

Working Paper
2011-WP-13

하수처리장 에너지 · 자원화를 위한 잠재력 평가 및 활용기술 동향

유명진

2011

Working Paper

2011-WP-13

하수처리장 에너지·자원화를 위한 잠재력 평가 및 활용기술 동향

2011

■ 연구진 ■

연구책임 유명진 • 서울시립대 환경공학부 명예교수

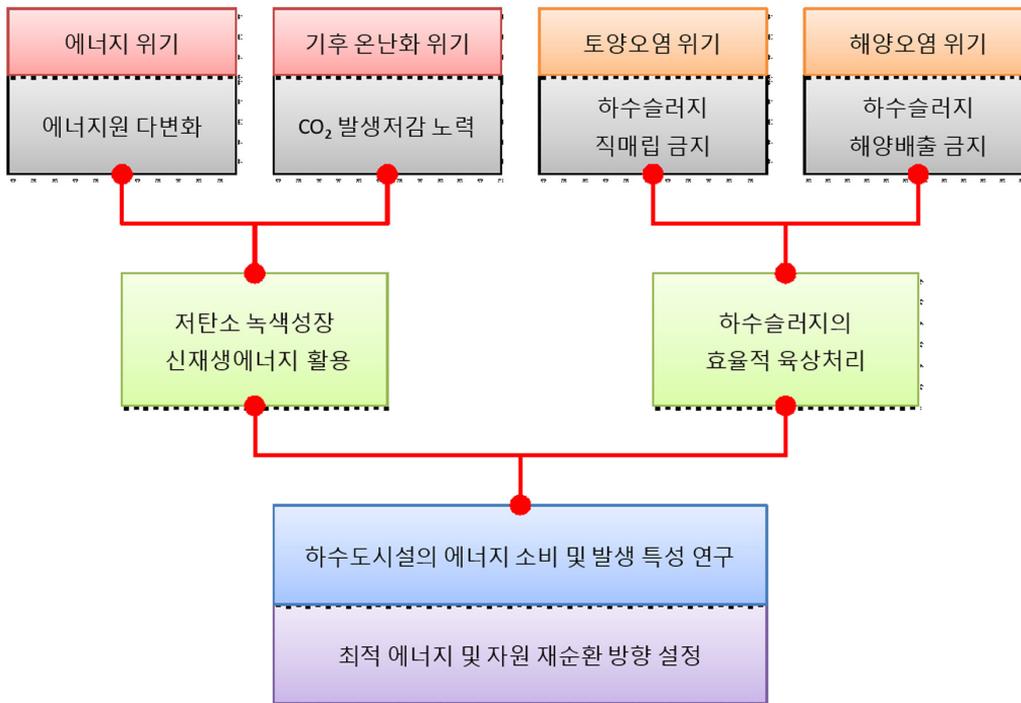
연구원 정신호 • 서울시립대 환경공학박사

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약

오늘날과 같이 인류가 화석에너지에 지나치게 의존하게 되면 인류의 복지에 중대한 위기를 초래한다. 에너지 위기, 기후 온난화의 위기 및 토양오염과 해양오염의 위기라는 상황 속에서 정부의 저탄소 녹색성장의 기조 아래 신재생에너지를 적극적으로 활용하고, 하수처리과정에서 발생하는 슬러지 폐기물을 효율적으로 육상에서 처리하는 최선의 방법을 찾아야 한다.

이 연구의 목적은 하수도 및 하수처리시설의 에너지 소비 및 발생 특성을 조사하여 하수도시설에서의 발생 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 방향을 제시하고, 동시에 발생하는 슬러지 폐기물을 해양배출이나 직매립을 하지 않고 가장 효율적으로 처분할 수 있는 방법을 제시하는 데에 있다.



〈그림 1〉 연구의 필요성 및 연구 목적 개념도

□ 하수처리시설에서 발생하는 에너지원 및 자원들의 특징

하수처리시설에서 발생하는 에너지원 및 자원들의 특징은 다음의 표에 정리한 바와 같이 슬러지처리계통에서 발생하는 에너지원(슬러지의 연료화, 바이오가스 활용), 수처리계통에서 발생하는 에너지원(하수열 이용, 소수력 발전), 공간을 활용한 에너지원(태양광 발전, 풍력발전) 및 기타 자원화(처리수 재이용, 인회수, 고화처리, 부숙화 등)가 있다.

〈표 1〉 하수처리시설에서 발생하는 에너지원 및 자원들

구분	활용법	개요	특징
슬러지처리계통에서 발생하는 에너지원	슬러지의 연료화	슬러지의 건조 혹은 탄화처리를 통해 함수율을 낮추고 잔존하는 발열량을 화력발전소에서 연소시켜 에너지를 얻는 방법	최종산물의 감량효과가 가장 큼 발열량문제로 화력발전소에서 사용할 수 있도록 해야 함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
	바이오가스 활용	슬러지의 혐기성 소화를 통해 소화가스를 생산하고, 이 가스를 이용해 열이나 전기를 생산하거나 연료로 판매하는 방법	활용방안이 매우 다양함 타 유기성폐기물의 연계처리 가능함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
수처리계통에서 발생하는 에너지원	하수열 이용	처리된 하수의 열을 이용하여 냉난방시설의 열교환에 활용하는 방법	처리수와 외기의 온도차가 클 때 효과가 큼
	소수력 발전	처리된 하수의 위치에너지를 이용하여 전력을 이용하는 방법	방류수면과의 낙차가 존재할 때만 사용 가능함
공간을 활용한 에너지원	태양광 발전	하수처리장 시설 지붕 등의 공간에 집광판을 설치하여 전력을 생산하는 방법	일조량이 큰 경우 사용 이익이 있음
	풍력 발전	풍향이 좋은 하수처리장의 빈 부지내에 풍력발전기를 설치하여 전력을 생산하는 방법	풍량과 풍향이 안정된 경우 사용 이익이 있음
기타 자원화 (에너지원은 아님)	처리수 재이용	먹는 물 수질기준을 요구하지 않는 수요처에 처리수를 활용하는 방법	처리수질의 안전성이 우선적으로 보장되어야 함
	인회수	수처리과정 및 슬러지처리과정을 거치면서 농축된 인을 결정화과정을 거쳐 회수하여 비료 등으로 활용하는 방법	슬러지처리계통 운전과 직접 관련 공정 중 중금속 농도에 민감함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
	고화처리	슬러지를 고형화하여 매립지 복토재로 활용하는 방법	재활용 생산품의 소비처 확보가 주요 관건임
	부숙화, 퇴비화	슬러지를 퇴비로 활용할 수 있도록 처리하는 방법	재활용 생산품의 소비처 확보가 주요 관건임

□ 서울시 하수처리시설에서의 에너지 및 자원 발생 특성

○ 인회수 가능량

- 서울시 하수처리시설에서 소화조탈리액 및 탈수여액의 반송위치에 인회수시설을 설치함으로써 회수할 수 있는 부존 인자원량의 연간 총량은 서울시 4개 하수처리 시설 합계 1,899톤/년, 70% 회수율을 가정할 때에는 1,329톤/년으로 추정되었다.

○ 하수처리수의 부존에너지량

- 하수처리후 방류하는 처리수가 가지고 있는 부존에너지량은 서울시 4개 하수처리 시설 합계 914,759TOE/년으로 추정되었다. 이 부존에너지 중에서 겨울철(1월, 2월, 3월, 10월, 11월, 12월)에 5℃ 차이만큼만 에너지를 회수한다고 할 때에는 366,318 TOE/년이 된다. 하수처리수는 다른 에너지 생산방법들보다 월등하게 큰 부존에너지량을 나타내고 있다.

○ 바이오가스의 부존에너지량

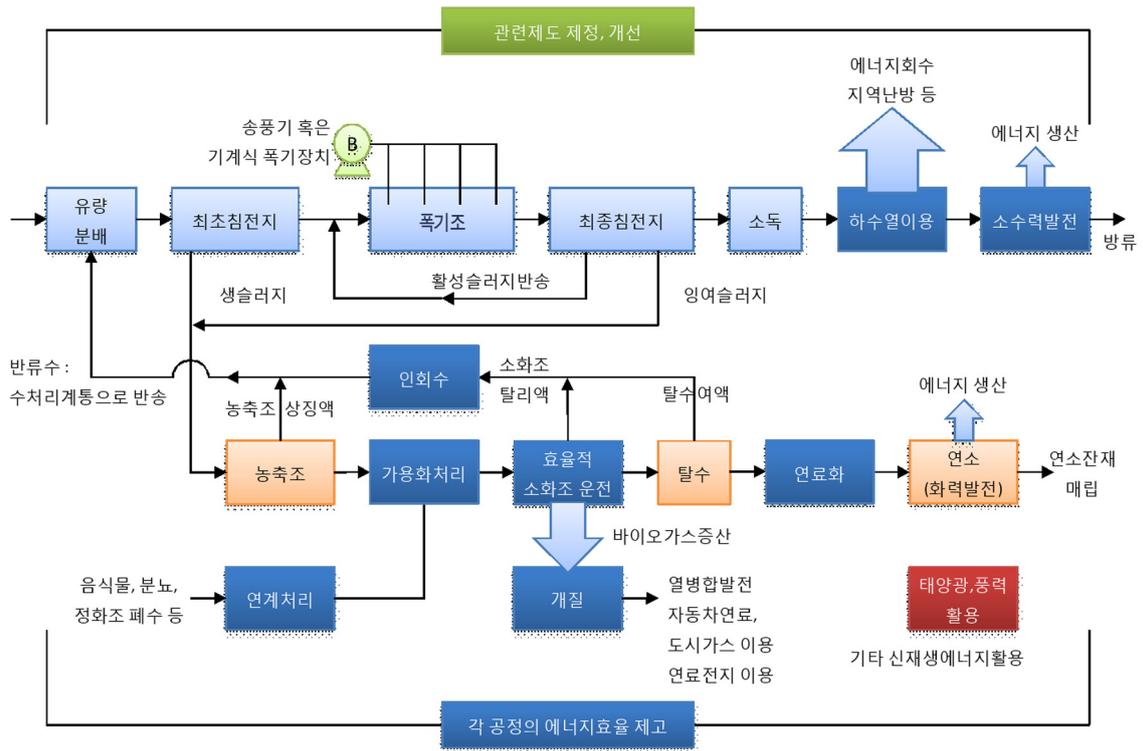
- 바이오가스를 증산하기 위해서는 슬러지의 가용화 및 유기성폐기물의 연계처리가 확대될 필요가 있다. 2011년 현재 발생하는 바이오가스의 부존에너지량은 서울시 4개 하수처리시설 합계 39,793TOE/년으로 계산되었다. 바이오가스의 개질을 통해서 고부가가치의 바이오메탄을 생산하면 도시가스 및 자동차 연료로 공급하고 연료전지의 원료로 이용할 수 있으므로 적극적으로 개질기술을 개발·보급할 필요가 있다.

○ 슬러지연료의 부존에너지량

- 2011년 처분된 슬러지량 중에서 해양배출, 재활용, 건조, 소각처리량을 건조하여 연료화한다고 할 때 탈수슬러지 연료의 부존에너지량은 서울시 4개 하수처리시설 합계 16,400TOE/년으로 추정되었다. 발열량이 낮은 연료는 유상판매를 할 수 없어 경제적 이익을 얻을 수는 없지만, 다른 재활용방법들에 비해 확실하게 줄고, 무해하며 소량의 에너지도 얻는 최선의 방법이라고 생각된다.

□ 서울시 하수도시설의 에너지 및 자원 재순환 방향

서울시 하수도시설의 에너지 및 자원 재순환을 통해 에너지 자립화로 나아가기 위한 핵심적인 요소들은 다음과 같이 정리될 수 있다.



〈그림 2〉 하수처리시설의 에너지 및 자원 재순환 방향 개념도

- 각 공정의 에너지 효율 개선
 - 에너지소비대책으로 각 공정의 에너지 효율을 개선한다. 특히 폭기조에서의 송풍기는 하수처리시설의 대표적인 에너지 소비원이므로 산소전달효율이 높은 산기장치를 사용하고, 부하에 따라서 효율적으로 운전할 수 있는 송풍기를 사용하도록 한다. 각종 모터와 펌프 등 에너지 사용기기의 효율을 높인다.
- 소화조 운전 성능 개선
 - 소화조의 운전 성능을 개선하기 위해서 가장 기본적인 효율개선(가온방법, 교반방법, 운전온도, pH 등 운영방식의 최적화)을 실시하고, 경제적이고 효율적인 슬러지가용화 처리법을 적용하여 바이오가스 증산 및 소화슬러지 감량화를 달성한다. 또한 유기성 폐기물(분뇨, 정화조오니, 음식물류 폐기물, 음폐수 등)을 연계처리하여 하수슬러지와 병합소화시킴으로써, 바이오가스 증산을 달성한다.

- 생산된 바이오가스의 최대 활용
 - 바이오가스를 소화조 가온이나 소규모 발전을 위한 연료로만 사용하는 것이 아니라, 규모의 효과를 위해서 열병합발전을 통한 지역난방에까지 이용범위를 넓히고, 바이오메탄으로 개질처리함으로써 자동차연료, 도시가스로 공급할 수 있도록 하고, 연료전지 원료로 활용할 수 있도록 한다.
- 소화슬러지의 연료화, 자원화 처리
 - 소화된 슬러지는 가장 단순한 방법으로 건조해 연료화처리를 하고 화력발전소에서 보조연료로 활용하면서 연소시켜서 최대 감량을 달성한 후 매립한다. 슬러지의 재활용은 실질적으로 소비가 가능한 방법에 한해 실시한다.
- 하수열의 적극적 이용
 - 규모의 효과를 얻을 수 있도록 대규모 하수열 회수시설을 설치하여, 처리장 내의 각종 열에너지로 이용할 뿐만 아니라, 지역난방에까지 확대하여 활용한다.
- 소화 탈리액, 탈수여액의 반송 시 인회수
 - 인회수시설을 설치하여 소화 탈리액과 탈수여액에서 인을 최대한 회수함으로써 방류수 수질기준을 달성하는데 일조하고, 회수된 인을 비료 등으로 활용한다.
- 기타 신재생에너지 활용
 - 일조조건이 좋은 지역에 태양광, 풍황이 좋은 지역에 풍력 등의 재생에너지를 최대한 활용하여 에너지 자립률을 높인다.
- 관련제도 제정 및 개선
 - 신재생에너지를 활용할 수 있는 기술발전뿐만 아니라 법적인 제한조치 해제, 신재생에너지 활용 촉진을 위한 지원정책 등을 수립하여 시행한다.

목 차

I. 연구의 개요	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 내용 및 방법	7
II. 하수도시설의 에너지 소비 및 발생 특성	9
1. 하수도시설 개요	9
2. 하수도시설의 에너지 소비 특성	16
3. 하수도시설의 에너지 및 자원 발생 특성	31
III. 슬러지 처리와 신재생에너지 활용 기술	61
1. 하수슬러지 처리	61
2. 바이오가스 생산현황	86
3. 슬러지의 에너지 최적 처리방안	99
4. 바이오가스 활용	121
IV. 서울시 하수도 에너지 및 자원 재순환 사례	135
1. 서울시 하수도 구역 및 처리장의 사례	135
2. 서울시 하수처리시설의 신재생에너지 이용사례	149
3. 서울시 하수도 에너지 재순환 방향 제안	152
V. 결 론	157
참고문헌	161

I

연구의 개요

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

오늘날과 같이 인류가 화석에너지에 지나치게 의존하게 되면 인류의 복지에 중대한 위기를 초래한다. 화석연료의 생산과 소비는 본질적으로 대기오염과 수질오염을 초래하게 되고, 방대한 경제적 투자를 요구한다. 화석연료와 핵연료에 대한 안정적 장기공급을 확보하기 위한 국가 간의 노력은 자주 국제적 긴장과 분쟁을 야기하기도 한다. 이와 함께 온실가스의 대기방출은 인류에게 돌이킬 수 없는 재앙을 초래할 것이라는 과학자들의 경고가 설득력을 높이고 있다.

화석연료의 고갈이 경고된 것은 이미 오래전 일이다. 가채매장량을 연간생산량으로 나눈 가채연수(reserve/production ratio: RP ratio)로 따지면 석유가 42년, 천연가스가 60년, 석탄이 133년에 이른다. 석탄을 제외하면 2세대를 버티지 못하는 양이다.

〈표 1-1〉 화석연료의 가채 매장량

구 분	석 유	석 탄	천연가스
가채 매장 확인량	12,379억bbl	8,475억톤	177조m ³
연간 생산량	298억bbl	64억톤	3조m ³
가 채 연 수	42년	133년	60년

자료 : BP Statistical Review of World Energy, 2008.6

1, 2차 오일쇼크를 겪으면서, 이 위기의식은 더욱 커졌다. 그 당시에는 석유의존도를 탈피할 목적으로 각종 재생에너지에 대한 관심이 높아졌고 바이오매스의 에너지화를 위

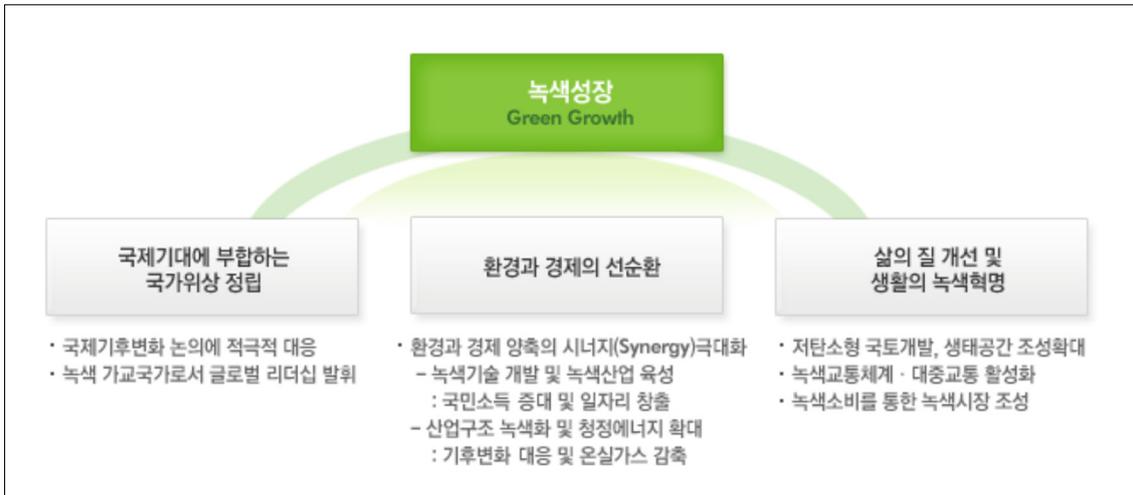
해 노력했었다. 2001년 9.11사태를 계기로 상승을 시작하던 유가는 2006년에는 1배럴당 70달러대까지 상승한 후, 2008년 7월에는 150달러에 육박하기에 이르렀다. 다시 70달러 대로 떨어졌지만 이렇게 불안정한 유가는 전 세계국가들의 안정적인 경제정책 실현을 어렵게 만들고 있다. 석유의존도 탈피의 목적과 더불어 신재생에너지 개발에 관심을 가지는 중요한 이유 중의 하나는 지구온난화의 주범이 이산화탄소로 지목되면서 이산화탄소를 발생시키지 않는 에너지의 개발의 필요성이 커진 탓이다. 메탄이나 프레온가스 등이 분자당 온실효과가 훨씬 크지만 인간의 활동으로 인해 인위적으로 발생하는 기체 중에서는 이산화탄소가 배출량이 제일 많기 때문에 가장 큰 온난화 효과를 갖고 있다. 중요한 것은 이산화탄소의 상당량은 인간의 활동으로 발생하고 있기 때문에 인위적인 제어가 가능하다는 점이다. 이러한 대기오염을 유발시키는 주범이 산업사회에서 오늘에 이르기까지의 에너지원으로 인류문명에 이바지해온 바 있는 화석연료 즉, 석유, 석탄 등이다).

인류 문명의 발전과 더불어 에너지소비는 지속적으로 급증하고 있고 최근까지도 기존 화석연료인 석유와 석탄의 대안으로 여겨졌던 원자력도 한계점을 보이고 있다. 2011년 3월에 있었던 해저지진으로 일본 후쿠시마 원자력 발전소에서 방사성 누출사고가 발생한 것을 계기로 유럽의 각국은 노후화된 원자력발전소를 폐기하고 정상적으로 가동 중인 원자력발전소도 점차적으로 폐쇄하기로 하였다. 우리나라는 2012년 3월 고리원자력발전소에서 전력 공급이 중단되는 사고가 발생했었다. 원자력발전소는 상당한 양의 전력을 안정적으로 생산할 수 있지만 아무리 정상적으로 잘 운전해도 매우 위험한 방사성폐기물이 발생하고, 일본에서처럼 예기치 못한 사고가 발생하면 그 위험이 매우 크다는 문제가 있다.

이러한 시점에 정부는 저탄소 녹색성장을 새로운 국가 비전으로 제시하였다.

- “저탄소 녹색성장”이란 온실가스를 적정수준 이하로 줄이며, 이를 위해 에너지와 자원을 절약하고 효율적으로 사용하여 기후변화와 환경훼손을 줄이고 청정에너지와 녹색기술의 연구개발을 통하여 새로운 성장동력을 확보하는 등 경제와 환경이 조화를 이루는 성장을 말한다.
- 우리나라는 현재 지구온난화 등으로 인한 환경위기와 화석연료에 대한 수입의존도가 높아 자원위기를 동시에 직면하고 있다. 이에 따라 우리나라는 미래 국가경쟁력의 핵심으로 대두되고 있는 환경과 경제성장을 동시에 추진해야만 한다.
- 그러므로 우리는 경제성장과 환경보호를 동시에 추진하는 새로운 패러다임인 녹색성장에 보다 관심을 기울여야 하고, 이에 따라 정부가 추진하는 “저탄소 녹색성장”의 필요성이 더욱 강조된다.

1) IPCC, 기후변화 2007: 종합 보고서, Intergovernmental Panel on Climate Change



〈그림 1-1〉 녹색성장의 개념

화석연료에 대한 의존도를 낮추고 청정에너지의 사용 및 보급을 확대하며 녹색기술 연구개발, 탄소흡수원 확충 등을 통하여 온실가스를 적정수준 이하로 줄이면서, 동시에 에너지와 자원을 절약하고 효율적으로 사용하여 기후변화와 환경훼손을 줄이고 청정에너지와 녹색기술의 연구개발을 통하여 새로운 성장동력을 확보하며 새로운 일자리를 창출해 나가는 등 경제와 환경이 조화를 이루는 성장을 이루겠다는 것이다²⁾.

이의 일환으로 관계부처가 협력하여 2009년에는 「폐자원 및 바이오매스 에너지대책」을 수립하였고, 폐자원 에너지화 및 수도권매립지 「환경에너지종합타운」은 환경부가 중심이 되어 추진하게 되었으며, 바이오매스 에너지화는 환경부, 지식경제부, 농림수산식품부 등 관계부처가 역할을 나누어 추진하게 되었다³⁾. 2010년에 환경부의 생활하수과는 “하수처리시설 에너지 독립선언!”이라는 표어 아래 하수처리시설의 에너지 자립화 기본계획을 수립하여 발표하였다⁴⁾. 여기에서 환경부는 하수처리시설이 에너지를 대량 소비하는 시설이지만 공공하수처리시설의 에너지자립률은 0.8%에 불과하다고 지적하였다⁵⁾.

2) 저탄소 녹색성장 기본법, 제2조, 2011.4.14

3) 저탄소에너지 생산·보급을 위한 「폐자원 및 바이오매스 에너지 대책」 실행계획, 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청, 2009.7

4) 에너지 자립화 기본계획, 환경부 생활하수과, 2010.1

5) 하수처리시설에서의 연간 전력사용량 대비 신재생에너지 생산을 통한 전력발생량과 에너지 절감량 합계의 비율

지금까지 하수도 사업은 시설확충과 처리효율을 높이기 위한 신기술도입에 집중하였으나 에너지 효율성에 대한 고려가 미흡하다는 것을 인정하였다. 하수처리시설은 하수처리과정(소화가스·소수력 발전·하수열) 및 입지특성(풍력·태양광 발전)상 풍부한 에너지 잠재력을 보유하고 있으므로 하수처리시설의 기능을 확대하여 저탄소·녹색성장 및 기후변화에 대비한 에너지 자립화 및 온실가스 감축에 일조한다는 것이다. 하수처리시설의 에너지 잠재력으로 하수슬러지의 소화가스 이용, 하수처리수의 소수력발전과 하수열 이용, 태양광 이용과 풍력 이용에 대한 다섯 가지 항목에 집중하여 잠재력을 추정하고 시설설치·이용계획을 추진하기로 하였다.

〈표 1-2〉 하수처리시설의 에너지자립화를 위한 신재생에너지 분야

이용자원	신·재생 에너지	이용 방법	잠재력 추정
하수 슬러지	소화가스	하수슬러지의 혐기성 소화 바이오매스 병합처리 도입	소화가스 발생량 2,000Nm ³ /일 이상인 하수처리장 38개소에서 연간 299GWh(≈23,089 TOE) 발전 가능
하수 처리수	소수력 발전	하수처리수 방류 낙차, 방류관거 유속 등을 이용하여 발전	방류수 낙차 2m 이상, 발전설비 용량 10kW 이상인 15개 시설에서 연간 11GWh(≈2,321 TOE) 발전 가능
	하수열 이용	히트 펌프를 활용하여 여름에 냉열원, 겨울에 온열원으로 이용 가능	전국 하수처리수 평균유량을 바탕으로 이용 온도차 5℃로 가정하여 산출한 냉난방 열이용 가능량은 약 230,000TOE/년
시설, 공간활용	태양광 발전	하수처리시설의 침전지, 생물반응조, 관리동 지붕 등에 태양광 발전 도입	하수처리시설 면적의 15%를 설치면적 기준으로 344개소에 도입 시 연간 410GWh(≈86,510TOE) 발전 가능
	풍력발전	풍황 조건이 좋은 처리시설 여유 부지에 풍력 발전 도입	연평균 풍속 5m/s 이상인 46개소에서 연간 97GWh(≈20,467TOE) 발전 가능

자료 : 에너지 자립화 기본계획, 환경부 생활하수와, 2010.1
 환산기준⁶⁾ : 발전기준, 에너지법시행령 1TOE = 107kcal ≈ 4.739MWh
 에너지관리공단 1TOE = 4~4.3MWh로 사용하기도 함.

6) 에너지환산기준, 에너지법시행규칙 별표, 시행 2011.12.30.
 과학기술용어사전, IEA/OECD는 1TOE = 11.63MWh = 0.01163GWh로 정의하기도 하나 이 보고서에서는 에너지법시행규칙에 따라 환산함.

범정부차원의 저탄소 녹색성장의 기조는 서울시에서도 동일하게 추진되었다. 2007년 4월에 “서울시 친환경 에너지 선언”에서 서울시의 에너지 이용률을 2000년 기준으로 2010년까지 12%, 2020년까지 15% 줄이겠다고 선언하면서, 태양광 등 신재생에너지 적극 보급, 하수열 등 미활용 에너지 활용을 통해 0.6% 수준인 서울의 신재생에너지 이용률을 2010년까지 2%, 2020년까지 10%로 확대하고, 특히 공공부문은 2020년까지 신재생에너지 20% 이용을 목표로 정했다⁷⁾.

이러한 목표를 추진하기에 가장 적합한 공공시설은 하수처리시설이다. 그 이유는 크게 두 가지이다. 첫째는 지금까지 미활용되고 버려진 에너지가 풍부하기 때문이다. 하수처리시설은 에너지를 다량으로 소비하기만 하는 시설로 여겨져 왔으나, 근래에는 미활용되었던 잠재 에너지원들로부터 에너지를 회수하여 사용할 수 있는 기술들이 개발되고 보급되어 에너지 소비처에서 에너지 생산처로 변화할 수 있는 가능성이 충분히 존재한다. 이것은 하수처리시설의 규모가 대규모라는 사실에 기인한다. 서울시의 하수처리시설은 중랑, 난지, 탄천, 서남물재생센터에서 총 581만³/일의 시설용량을 가지고 2010년 현재 462만³/일의 하수를 처리하고 있다. 전국 500³/일 이상의 시설용량을 가지고 있는 공공하수처리시설 452개 가운데 이들 시설은 규모면에서 1,2,3,4위를 차지하고 있다. 여기서 발생하는 하수처리수와 하수슬러지, 바이오가스에 잠재되어 있는 에너지도 막대한 것으로 추정되고 있다.

둘째는 이제는 기존의 방법대로 하수슬러지를 처분할 수 없으므로 의무적으로 에너지를 최대한 활용하는 방법을 사용해야 하기 때문이다. 탈수된 슬러지케이크는 과거에는 주로 매립되었으나, 환경부가 온실가스 발생억제 및 재활용촉진을 위해 유기성오니의 직매립을 금지시켰고, 해양수산부는 96런던협약 의정서 발효와 함께 폐기물의 해양배출기준을 대폭 강화하여 2012년부터 해양배출을 금지시켰다⁸⁾. 2013년부터는 음식물류 폐기물과 음폐수도 해양배출로 처분할 수 없게 된다⁹⁾. 이에 따라 모든 하수슬러지와 음식물류 폐기물, 음폐수 등을 육상에서 최대한 처리해야 하는 것이다. 유기성 폐기물의

7) ‘서울 친환경 에너지 선언’ 발표, 뉴스와이어, 2007.4.2

<http://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=238578&ected=>

8) 친환경적 투기해역관리를 위한 범정부적 육상폐기물 해양투기관리 종합대책, 해양수산부, 2006.3

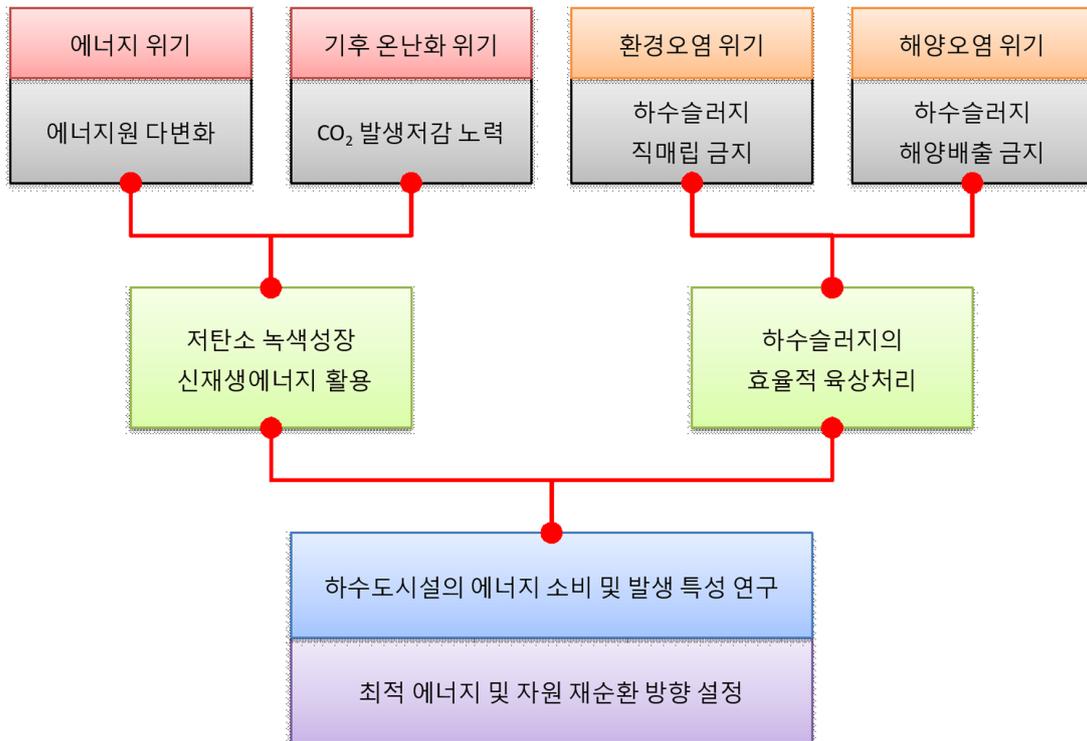
9) 음폐수의 해양배출 금지 결정, 국정현안정책조정회의, 2007.9

혐기성 소화는 소화효율을 높임으로써 바이오가스 생산 등으로 에너지를 최대한 회수하면서 동시에 슬러지의 감량화를 이루는 좋은 방법이다. 따라서 하수슬러지의 효율적 처리는 어느 한 편만 강조하는 것이 아니라 에너지를 최대한 회수하면서 처분해야 할 양을 감량시키는 두 가지 목적을 동시에 달성하는 것이다.

2) 연구의 목적

에너지 위기, 기후 온난화의 위기 및 토양오염과 해양오염의 위기라는 상황 속에서 저탄소 녹색성장의 기조 아래 신재생에너지를 적극적으로 활용하고, 하수처리과정에서 발생하는 슬러지 폐기물을 효율적으로 육상에서 처리하는 최선의 방법을 찾아야 한다.

이 보고서의 목적은 하수도시설의 에너지 소비 및 발생 특성을 조사하여 하수도시설에서 발생하는 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 방향을 제시하고, 동시에 발생하는 슬러지 폐기물을 해양배출이나 직매립을 하지 않고 가장 효율적으로 처분할 수 있는 방법을 제시하는 데에 있다.



〈그림 1-2〉 이 연구의 필요성 및 목적 개념도

2. 연구의 내용 및 방법

1) 연구의 주요 내용

이 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 하수도시설의 에너지 소비 및 발생 특성 조사
- 하수도시설의 에너지 최적 이용 방안 조사
- 국내외 바이오가스 생산시설 조사
- 슬러지의 최적 처리방안 조사
- 하수도시설에서 신재생에너지 활용도 조사
- 바이오가스의 활용 가능성 제고 방안 제시
- 서울시 하수도시설 여건 분석
- 서울시의 하수도 에너지 재순환 방향을 도출

2) 연구의 방법

연구의 주요 내용을 포함하면서 연구 목적을 달성하기 위해서 각종 정책, 연구문헌, 용역보고서, 통계자료 등을 조사하고 분석을 수행하였다. 조사된 자료를 통해 서울시의 하수도시설에서 사용 가능한 신재생에너지의 부존량을 추정하여 비교하고, 어떤 에너지원을 중점적으로 활용해야 하는지를 제시하였다. 또한 과거의 시행착오를 참고로 하여 최선의 슬러지처리 방안도 함께 제시하였다.

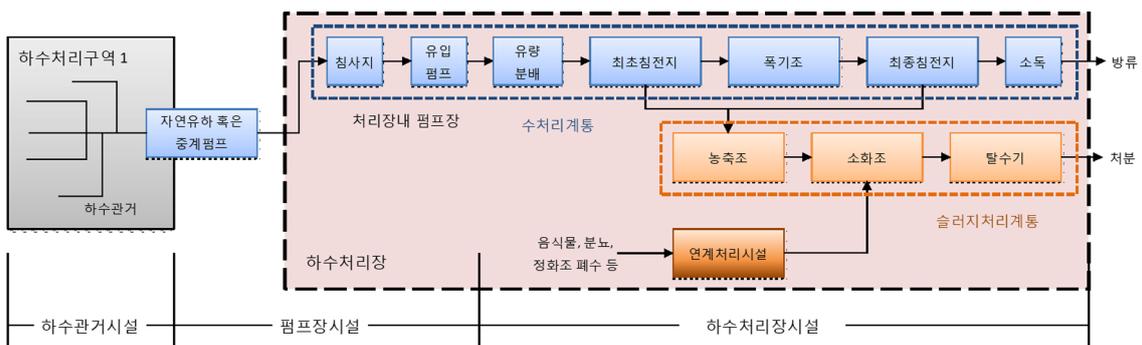


하수도시설의 에너지 소비 및 발생 특성

1. 하수도시설 개요

1) 하수도시설 구성

공공하수도시설은 발생한 하수를 하수처리장까지 보내기 위한 하수관거시설, 자연유하로 하수를 보내기 어려운 지역에서 필요한 펌프장 시설, 그렇게 모아서 받은 하수를 물리적, 화학적, 생물학적 방법으로 처리하여 오염물질을 제거하는 하수처리시설(혹은 하수처리장시설)로 크게 구분될 수 있다. 하수처리시설은 또한 수처리계통과 슬러지처리계통으로 나뉘어 각기 기능을 가지고 운영되며, 하수처리장의 여건에 따라서 연계처리(음식물쓰레기, 분뇨, 정화조폐수 등) 시설이 연결되어 운영되기도 한다.



〈그림 2-1〉 하수도시설 구성도

2) 하수도시설의 부분별 기능

(1) 하수관거시설

하수도의 관거시설은 관거, 맨홀, 우수토실, 토구, 물받이(오수, 우수 및 집수받이) 및 연결관 등을 포함한 시설의 총칭이며, 주택, 상업 및 공업지역 등에서 배출되는 오수나 우수를 모아서 처리장 또는 방류수역까지 유하시키는 역할을 한다.

하수관거 정비가 잘되어 분류식 하수관거를 가지고 있는 지역에서는 오수만이 하수 처리장으로 보내진다. 우천 시에 오수를 수역으로 방류하는 일이 없기 때문에 하천의 수질오염방지에 유리하다. 하수처리구역 내에서 발생한 수세분뇨는 하수관거에 투입되어 하수처리장으로 함께 보내는 것을 원칙으로 하고 있다.

하수처리장에는 기본적으로 오수만을 유입시켜야 하지만, 오수와 우수가 분리되지 않는 합류식 하수관거를 가지고 있는 지역에서는 오수 및 우수가 혼합된 채로 하수처리장으로 보내지기도 한다. 합류식은 우천 시에 수량이 급격히 늘어나 하수처리장에서 모두 받아들이지 못하고, 일정량 이상은 모두 월류시키게 되므로 오수가 우수와 함께 수역으로 방류되는 단점이 있다. 또한, 합류식 하수관거에 분뇨가 하수관에 투입되면 우천 시에 분뇨까지 월류하여 수역으로 배출될 우려가 있기 때문에, 합류식 하수관거지역에서는 건물마다 정화조를 설치하여 분뇨를 수거하도록 되어 있다. 정화조에서 수거된 정화분뇨는 해당 처리구역의 하수처리장에서 연계해 합병처리하고 있다.

(2) 펌프장시설

하수는 가능하면 자연유하로 하수처리장까지 이송되는 것이 가장 바람직하다. 그러나 지형조건에 따라, 관거의 매설깊이가 너무 깊어져 비경제적이 되거나, 특정 지역의 오수를 압력관을 통해 이송시켜야 하는 경우가 발생할 수 있다. 또는 하수처리장의 지반고와 방류수역 수면의 높이문제로 오수를 양수해야 할 경우도 있다. 이때에는 펌프장 시설을 설치하여야 한다.

펌프장 시설에는 강우 시 저지대의 우수배제를 위해 설치하는 우수(빗물)펌프장, 오수를 자연유하로 하수처리장까지 보내기 어려운 경우에 설치하는 중계펌프장, 처리장의 유입단에서 처리수를 자연유하로 수역에 방류하기 위해 수면고를 높이지 위한 처리장

내 펌프장¹⁰⁾으로 구분해 볼 수 있다. 펌프장은 하수도시설 중에서 에너지를 많이 소비하는 시설 중 하나이다.

(3) 하수처리장시설

하수도의 처리장시설 혹은 하수처리시설¹¹⁾은 하수관거와 펌프를 통해 이송받은 하수를 물리적, 화학적, 생물학적 방법을 이용하여 처리함으로써, 방류수 수질기준에 적합하도록 하수 중의 오염물질을 제거 혹은 저감시켜 수역에 배출하기 위한 단위조작 및 단위 공정들의 집합 시설이다.

활성슬러지 공법을 적용한 일반적인 하수처리장 시설은 <그림 2-2>에 나타난 바와 같다. 이 그림에서 최초침전지까지를 1차처리라고 부르며, 활성슬러지 공법을 적용하여 폭기조와 최종침전지까지 운영하는 경우를 2차처리라고 부른다. 질소와 인 등의 영양염류까지 제거하기 위한 공정을 가지고 있는 경우에는 고도처리라고 부른다. 생물학적 처리 방법으로 활성슬러지 공법 이외에도 생물막 공법을 이용할 수도 있다.

생물학적처리를 이용하는 대부분의 하수처리시설의 오염물질 제거 원리는 미생물로 하여금 하수 중의 오염물질(유기물질)을 섭취하여 성장하도록 만들고, 그 미생물을 수중에서 분리함으로써 오염물질을 제거하여 처리수를 얻는 것이다. 따라서 원리상 수중에서 오염물질을 제거할수록 미생물이 많이 발생한다. 이것을 오니 혹은 슬러지라고 부른다. 대규모 하수처리시설은 처리장 내에 슬러지처리시설을 갖추고 있고, 분뇨, 정화조폐수, 음식물폐수 등을 연계하여 처리할 수 있는 시설도 함께 갖추고 있다. 소규모 하수처리시설은 운영의 효율성을 위하여 발생슬러지를 다른 하수처리시설로 보내 함께 처리하도록 하는 방법을 사용한다.

① 수처리 계통의 시설

하수처리시설 중 수처리계통 시설의 공정별 기능을 설명하면 다음과 같다.

10) 처리장 내 펌프장 혹은 유입펌프장은 하수도시설 기준상 펌프장시설로 분류되지만, 처리장 부지에 설치되므로 처리장시설로 간주되기도 한다.

11) 근래에는 물재생센터라고 부르기도 한다.



〈그림 2-2〉 하수처리시설의 수처리 공정

○ 침사지

하수처리구역 내 각종 하수배출원으로부터 흘러나온 하수는 하수관거시설을 통하여 저지대인 하수처리장으로 흘러오고, 하수처리장에 도달한 하수는 가장 먼저 침사지에서 일정시간 저류하게 된다. 침사지는 명칭이 의미하는 그대로 모래를 가라앉히는 공정인데 하수 속에 포함된 모래나 흙을 비롯해서 기타 물보다 무거운 입자 성분의 물질들은 스스로 침전되고 물에 뜨는 물질이라도 비닐이나 유기체 조각, 나무나 형질 등 부피가 큰 물질은 스크린(조목, 세목스크린)을 통해 걸러진다. 이렇게 모래나 기타 물질들을 하수처리 초기단계에서 제거하지 않으면 기계류가 마모되고 배수관로가 막히거나 다음 처리공정들에서 처리효율이 떨어지게 되기 때문이다. 침전된 모래 등의 물질은 침사인양기를 통해 바닥에서 제거된다. 모래와 비닐 등 이물질이 제거된 하수는 유입펌프장으로 유입된다.

○ 유입펌프

침사지를 거친 하수는 본격적인 처리를 거치기 위해서 최초침전지로 보내진다. 이때 각 공정에 높이 차이를 두어 하수처리장의 남은 공정들에서 하수가 자연스럽게 이동할 수 있도록 하기 위해서 최초침전지는 침사지보다 높게 설치되는 것이 보통이다. 낮은 위치에 있는 침사지로부터 높은 위치의 최초침전지로 하수를 이송하기 위해서 펌프가 설치된다. 즉, 유입펌프장은 하수를 침사지로부터 최초침전지로 보내기 위한 펌프시설이다. 양수된 하수는 최종 방류될 때까지 추가 동력없이 자연유하로 흐르도록 설계된다.

○ 최초침전지(1차침전지)

최초침전지 또는 1차침전지로 불리는 거대한 탱크는 침사지에서 모래 등이 제거된 하수를 받아서 다시 몇 시간씩 체류시킨다. 그러면서 하수 중의 비교적 미세한 물질들까지 침전시킨다. 또한 표면에 떠다니는 부유물 등은 기계적 설비를 사용하여 제거된다. 최초

침전지에 가라앉은 침전물(생슬러지)은 슬러지 처리공정으로 보내진다. 여러 개의 최초 침전지를 운영하면서 유량을 적절히 분배, 조절하기 위해서 최초침전조 앞단에 유량분배조를 둔다. 최초침전지에서는 하수가 2~3 시간 정도 체류하면서 하수 중에 포함된 전체 유기물질(BOD)의 약 30%, 무기성 부유물질은 35% 정도 제거되는 것이 보통이다. 일부 하수처리시설은 전처리된 분뇨를 이곳에 유입시켜 수처리공정과 연계처리하기도 한다.

○ 폭기조

최초침전지를 통과한 하수는 흔히 2차처리 공정으로 일컬어지는 폭기조로 유입된다. 송풍기를 연결한 산기장치 혹은 기계식 폭기장치를 통해 많은 양의 공기를 공급해, 하수 중의 산소 농도를 적절히 유지시킨다. 호기성 미생물은 산소를 이용해 하수 속의 유기물을 활발히 분해, 섭취하고 자기 몸체를 불리게 된다(산화 및 동화작용). 미생물들은 덩어리(플록, floc)를 이루어 미세한 유기물질들을 흡착하기도 한다. 폭기조에서 성장한 미생물들의 덩어리는 유기물질을 활발히 섭취하여 제거하는 능력이 있어 활성슬러지라고 불린다. 활성슬러지 공법은 4~8 시간의 단시간 동안에 미생물의 대량증식이 가능하고, 유기물은 BOD 기준으로 약 90~95%가 제거될 정도로 처리효율이 높으며, 운영이 비교적 쉽기 때문에, 하수처리 공법 중에서 가장 많이 이용되고 있다.

○ 최종침전지

폭기조에서 정상적으로 성장한 활성슬러지 플록은 침전성이 좋아 최종침전지에서 쉽게 침전된다. 오염물질이 제거되어 깨끗해진 상등수(혹은 상징액)는 필요에 따라 소독하여 최종적으로 수역에 방류한다. 침전에 의해 분리된 고형물 중 일부(침전된 슬러지의 대략 20~30%)는 폭기조의 미생물 농도 유지를 위해 폭기조 유입부로 반송시킨다. 반송되지 않은 여분의 슬러지(잉여슬러지)는 슬러지처리공정으로 보내 처리한다. 슬러지는 미생물 덩어리이지만 그 겉면에는 미처 분해되지 못한 유·무기성 물질들도 같이 부착되어 있다.

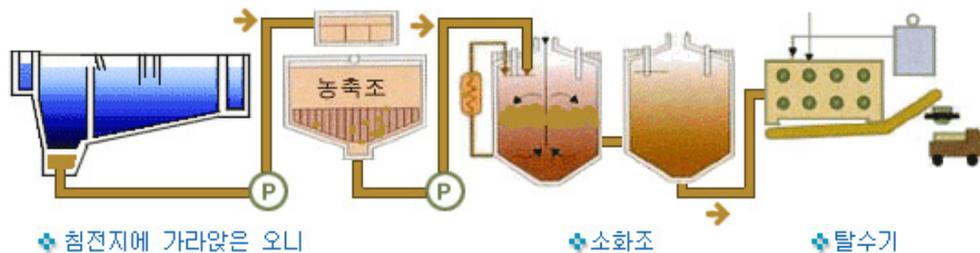
○ 고도처리설비

위에서 설명한 활성슬러지 공정은 유기물제거가 주된 목표이지만, 근래에는 질소와

인을 추가로 제거하려는 목적으로 수처리공정을 일부 추가, 변경시켜서 무산소-산소공정(Anoxic-Oxic ; A/O), 혐기-무산소-산소공정(Anaerobic-Anoxic-Oxic ; A₂O) 등의 고도처리 공정을 운영하기도 한다. 공공수역으로 방류되는 방류수 수질기준이 점차 강화됨에 따라서 환경기준의 준수, 폐쇄수역 등의 부영양화 방지, 처리수의 재이용 등을 목적으로 고도처리공정의 필요성이 높아지고 있다.

② 슬러지처리 계통의 시설

슬러지 혹은 오니 처리 공정은 수처리계통에서 필수적으로 발생하는 잉여슬러지를 안정화, 감량화, 자원화를 목적으로 처리하는 공정이다. 잉여슬러지는 미생물덩어리와 물이 섞인 걸쭉한 죽 같은 액체이면서 그 양이 크고, 유기물 농도가 매우 높기 때문에, 처리장 내에서 소화과정을 통해 안정화시키고, 함수율을 낮추어 부피를 줄이고, 수송할 수 있도록 고형화시킨다. 소규모 하수처리장에서는 몇개의 처리장이 연계하여 처리하거나, 가까운 중대규모 하수처리장의 슬러지처리시설로 운반하여 처리하는 것이 더 경제적이다.



〈그림 2-3〉 하수처리시설의 슬러지처리 공정

○ 농축조

최초침전지에서 분리된 생슬러지와 최종침전지에서 발생한 잉여슬러지를 혼합 유입시키고, 농축시킨 후 소화조로 이송시킨다. 이는 슬러지의 양을 줄이고 농도를 높여 소화조 처리기능을 향상시키기 위한 것이다. 농축은 중력식 농축 혹은 가압부상식이 주로 사용된다.

농축조의 상장액은 유기물질 농도가 높기 때문에 수처리계통으로 반송시켜 처리한다.

○ 소화조

농축조에서 농도가 높아지고 감량된 농축슬러지는 혐기성 소화를 통하여 슬러지의 유기물을 저감시킴으로써 슬러지의 감량화, 안정화를 이룬다. 폭기조에서는 호기성 미생물이 주된 역할을 하여 유기물질을 제거하지만, 소화조에서는 대개 혐기성방식으로 운영되어, 완전히 공기가 차단된 상태에서 미생물이 무산소 호흡으로 유기물을 분해한다. 소화조는 대개 완전히 밀폐된 원통 구조를 가지며, 1단계, 혹은 2단계로 소화를 시키기도 한다. 소화조에서 미생물이 유기물을 분해하는 반응은 매우 느려 우리나라 대부분 하수처리장에서는 그 기간을 30일 정도로 잡고 있다. 소화조는 폭기조보다 운전이 어려운 특징이 있다.

소화조는 대개 교반을 위한 장치와 혐기성 소화가 원활히 이루어지도록 따뜻하게 가온시키는 장치가 설치된다. 혐기성 소화를 적절히 잘 운영할 경우 메탄발효에 의한 소화가스(일종의 바이오가스)가 발생하는데 이 가스는 가연성이 있어 적절한 처리를 거쳐 개질시키면 유가의 에너지 자원으로 활용될 수 있다. 이 때문에 최근에 소화효율을 높이기 위해서 슬러지를 전처리하거나, 음식물폐수와 연계처리하는 방법들이 시도되고 있다. 소화된 슬러지는 탈수기로 보내지고, 소화조에서 나오는 상징액은 수처리계통으로 반송된다.

○ 탈수기

탈수기는 소화슬러지를 최종처분하기 전에 부피를 감소시키고 취급이 용이하도록 고형화시키는 장치이다. 소화된 슬러지의 함수율은 96~98% 정도인데, 탈수를 적절히 시키면 탈수방법에 따라서 55~80% 정도로 낮출 수 있다. 이렇게 되면 슬러지는 케이크의 상태로 되면서 부피는 1/5~1/10까지 줄어든다. 탈수에 의해 고액을 분리하는 성능을 높이기 위해서 탈수전 슬러지개량을 하기도 한다. 슬러지개량을 위해 물 세정 및 응집제와 같은 약품을 투입한다.

탈수는 필터프레스, 스크류프레스, 벨트프레스, 원심탈수 등의 방법이 사용된다. 탈수기에서 분리된 탈리액은 수처리계통으로 반송된다.

2. 하수도시설의 에너지 소비 특성

1) 하수도시설의 주요 기기 및 에너지 소비 특성

하수도시설의 에너지 소비 특성을 검토하기 위해서 기기별로 검토를 해보면, 하수도 시설에서 운전 중인 기기류는 기계분야, 전기분야, 계측/제어분야 및 기타분야로 구별할 수 있다.

- 기계분야 : 공정별로 그 특성과 기능이 상이한 펌프, 송풍기, 협잡물의 제거를 위한 조목, 세목 스크린, 제진기, 컨베이어, 그리고 슬러지 수집기, 소화가스 보일러, 탈수기 등
- 전기분야 : 수전/변전/배전설비, 각종 전동기, 비상발전기 등
- 계측/제어분야 : 감시제어설비와 계측기기 등으로 MLS(자료 송수신장치), POS, PES(운전자, 관리자 컴퓨터), 중앙관리동에서 설비의 모든 운전상태를 통제, 감시하고 종합적으로 관리하는 MGP(중앙감시 모자이크 그래픽 패널) 등
- 기타분야 : 관리동에서 사용되는 컴퓨터 등 사무용 기기, 조명기기와 냉난방 및 공기조절기기 등

분야별 기기들 중에서 에너지를 가장 많이 소비하는 분야는 기계분야이다. 특별히 에너지 소모가 많은 기기는 펌프와 송풍기, 소화가스 보일러를 꼽을 수 있다. 소화가스 보일러는 에너지를 많이 소비하기는 하지만 주로 발생하는 소화가스를 소각하여 열원으로 사용하기 때문에 외부의 전력이 많이 소비되지 않고 제어, 계측장비에만 소비된다. 따라서 주요 전력사용은 펌프류와 송풍기류의 기계들에서 발생한다.

하수도시설을 관거시설, 펌프장시설, 처리장시설로 나누어 보면, 관거시설에서는 특별히 에너지를 소비하는 시설이 존재하지 않는다. 관거시설 내에 유량이나 수질을 모니터링하는 장비가 설치되어 있다면 에너지를 소비하기는 하겠지만 다른 시설에서의 에너지소비와 비교한다면 거의 무시할만한 수준이다. 즉, 하수도시설에서 주로 에너지를 소비하는 시설은 펌프장시설과 처리장시설이다.

2) 펌프장 시설의 에너지 소비 특성

펌프장 시설로는 빗물펌프장, 중계펌프장, 처리장내 펌프장 등이 있다. 펌프장에서의 주요 기계설비들을 간략히 설명하면 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 펌프장 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
수문	침사지의 선택운전, 불시의 정전 및 펌프장 보수 시의 유입량을 일시 차단하거나, 합류식의 경우 호우 시 펌프장설비의 침수방지를 위해 유량조절을 하기 위한 목적	-수동식, 전동식, 전동형 자동강하식
스크린 설비	하수 중의 협잡물을 제거하여 펌프, 배관 등의 손상과 막힘을 방지하고 동시에 다음 공정의 처리시설을 보호하여 하수처리를 용이 -조목스크린: 수동제거식, 기계제거식 -세목스크린: 연속 체인식 자동스크린, 간헐식(One Rake) 자동스크린, 협잡물종합 처리기 -미세목스크린: 스텝스크린, 전동마이크로 바-스크린	-자동스크린: 간헐운전 -운반기기는 스크린과 연동 하여 수위계 및 프로그램 timer에 의해 운전
침사 제거 설비	주펌프, 슬러지펌프 등의 마모 및 막힘방지, 관로의 모래퇴적으로 인한 유입하수의 유입곤란, 반응조에 모래가 침적되는 것을 방지하기 위하여 유입하수 중의 모래를 제거 -종류: 그레브식, 주행버킷 컨베이어식, 버킷체인 컨베이어식, 스크류 컨베이어식, 포기식, 선회류 및 선와류식, 협잡물종합처리기, 진공차 등	
펌프 설비	유입하수를 처리시설로 이송하는 설비이며 중계펌프와 처리장 내의 유입펌프 및 처리수 이송펌프로 분류 -펌프는 수위에 의한 ON-OFF운전(주로 조정조가 있는 경우)을 기본으로 하고, 수위상승에 따라 속도제어 및 대수제어를 검토 -조정조 이송펌프의 정유량제어는 일부 속도제어를 포함하여 대수제어 또는 분배계량조 설치를 검토	-제어방식: 수위제어, 유량제어 -유량제어: 펌프의 대수제어, 펌프의 회전수제어(VS 방식, 인버터방식), 토출밸브의 개도제어 등
유량 조정조 설비	유입하수의 유량과 수질의 변동을 흡수해서 처리시설의 처리효율을 높이고 처리수질의 향상을 도모하는 것을 목적으로 필요에 따라 설치하는 시설 -용량: 계획 일일 최대 오수량을 넘는 유량을 일시적으로 저류하도록 정함	-유입하수의 조정방법: In-line 방식(비경제적), Off-line 방식(경제적)

자료 : 환경관리공단, 하수종말처리장 기계설비공사 설계지침, 환경부, 2001

빗물펌프장은 강우 시에 지반이 낮은 배수구역에서 자연유하에 의해 우수를 배제할 수 없는 경우, 모인 우수를 침수되지 않도록 신속히 양수해서 배제시켜야 하므로, 계절적인 요인이 에너지 소비 패턴에 가장 큰 영향을 미친다. 설계 및 시공은 분류식의 경우 계획우수량, 합류식의 경우 계획하수량과 강우 시 계획오수량을 참고하여 시행하도록 되어 있다. 실제로는 매일 24시간 운전하는 것이 아니라 강우에 따라서 매일, 매시간,

매분 운전을 달리해야 하므로 에너지 소비는 일기에 따라 변하는 특성이 있다. 침수방지는 지역주민의 피해 방지를 위해서 우선순위를 가지므로 항상 여유율을 가지고 운전되어야 한다¹²⁾.

중계펌프장은 장거리로 하수를 자연유하로 흘려보낼 경우, 관거의 매설 깊이가 깊어져 비경제적으로 되는 경우 유입구역의 하수를 다음의 펌프장 혹은 처리장으로 이송시키기 위해서 설치하는 펌프장이다. 중계펌프장은 특정지역을 제외하고 주로 오수를 대상으로 한다¹³⁾. 오수발생원이 되는 지역의 지형적 특성과 오수발생특성에 의해 설계, 시공되는 중계펌프장은 전체 하수도시설 중에서 차지하는 에너지소비량의 비중이 상대적으로 작다.

처리장 내의 펌프장은 유입하수를 자연유하로 처리해서 항상 하천이나 해역으로 방류시키는데 문제가 없도록 설치한 펌프장이다. 거의 모든 하수처리장은 처리구역 내 가장 저지대쪽에 설치된다. 이 하수가 처리된 후 수역으로 방류할 때, 우천 시 등에 방류측의 수면고가 높아져도 무리 없이 배출될 수 있도록 설계할 필요가 있다. 이 펌프장은 빗물펌프장이나 중계펌프장과 달리 우천 시, 청천 시 운전의 차이가 적다. 하수처리장은 항상 일정한 농도와 유량이 유입해야 최고의 처리효율을 나타낼 수 있고, 도시계획과 정비에 따라서 합류식 관거가 점차 줄어들고 있으므로 우천 시, 청천 시의 차이는 더욱 줄어들 것이다. 처리장 내 펌프장은 일기의 영향보다 하수 처리계획에 따라서 운전하므로 에너지소비패턴을 계획하고 예측하여 운전할 수 있는 특성이 있다.

처리장 내 펌프장은 하수도시설기준의 구분상 펌프장시설로 분류되어 있지만, 하수처리장 부지 내에서 하수처리시설의 일부로 관리 운영되기 때문에 처리장시설과 함께 검토되는 것이 효율적이다.

12) 2009년 기준 전국의 빗물펌프장 배수능력은 분당 $388,309\text{m}^3$ ($23,298,561\text{m}^3/\text{hr}$)이다.

13) 2009년 기준으로 전국 중계펌프장의 배수능력은 우수펌프 $652,245\text{m}^3/\text{hr}$, 우수펌프 $46,940\text{m}^3/\text{hr}$ 로 오수를 주대상으로 하고 있다.

3) 처리장 시설의 에너지 소비 특성

(1) 연간 운영, 유지관리 비용

하수처리장은 관거시설이나 펌프장 시설에 비하여 시설이 복잡하고, 인건비, 약품비, 에너지 비용 등을 포함한 운영 유지비용이 상대적으로 크다. 2009년 기준으로 시설의 건설과 개보수 등 공사에 소요된 연간 비용은 하수관거시설이 약 2조 1천억원(33.2%)이고 처리장시설은 약 1조 9천억원(30.5%)인 반면, 운영 및 유지관리에 소요된 연간 비용은 하수관거시설이 약 1천 2백억원(1.9%), 처리장시설은 약 8천 4백억원(13.3%)에 이른다. 운영 및 유지관리 비용의 일부만 에너지 비용인 것을 감안하더라도, 하수관거에서의 실질적인 에너지소비량은 상대적으로 매우 작기 때문에, 에너지관리적인 측면에서 주된 관심은 처리장시설에 집중될 수 밖에 없다.

하수처리장은 항상 정해진 양을 정해진 방법대로 처리하므로 계절별 에너지 소비패턴에 큰 변동이 없다.

〈표 2-2〉 하수도시설 구분별 사업비용 비교

(단위 백만원)

용도별 구분	전국		서울		
	(백만원)	(백분율)	(백만원)	(백분율)	
총계	6,328,388	100%	977,366	100%	
하수관거 시설	소계	2,340,047	37.0%	525,417	53.8%
	시설비	1,429,511	22.6%	12,069	1.2%
	개보수비	672,548	10.6%	448,906	45.9%
	운영 유지비	121,992	1.9%	51,276	5.2%
	기타	115,996	1.8%	13,166	1.3%
유수지 및 펌프장시설	소계	117,495	1.9%	70,949	7.3%
	시설비	67,407	1.1%	39,707	4.1%
	개보수비	26,195	0.4%	18,889	1.9%
	운영 유지비	21,757	0.3%	11,823	1.2%
	기타	2,136	0.0%	530	0.1%
처리장 시설	소계	2,960,823	46.8%	338,995	34.7%
	시설비	1,748,660	27.6%	173,494	17.8%
	개보수비	181,420	2.9%	21,965	2.2%
	운영 유지비	843,107	13.3%	139,203	14.2%
	기타	187,636	3.0%	4,333	0.4%
기타	910,024	14.4%	42,005	4.3%	

자료 : 2009년 하수도통계, 환경부, 2010

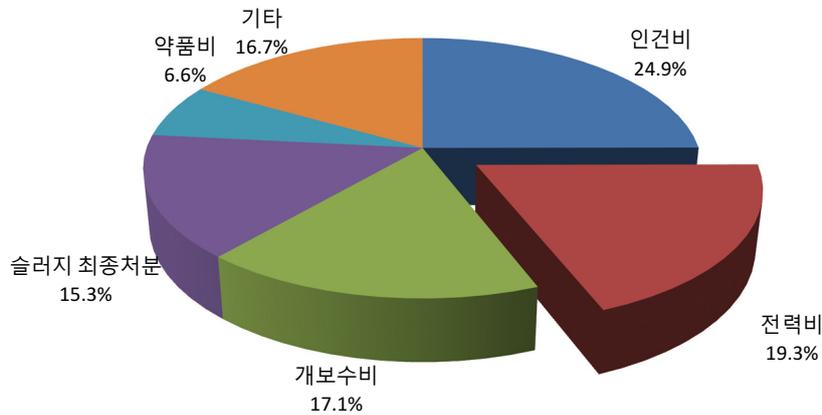
(2) 하수처리장 운영, 유지관리비용 분석

2011년 환경부 생활하수과의 보고에 의하면 2009년, 2010년의 운영, 유지관리비용은 다음의 표와 같다. 대략 25% 내외인 인건비를 고정비용으로 간주하고 제외하면 20% 내외인 전력비가 운영비 중에서 가장 큰 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다.

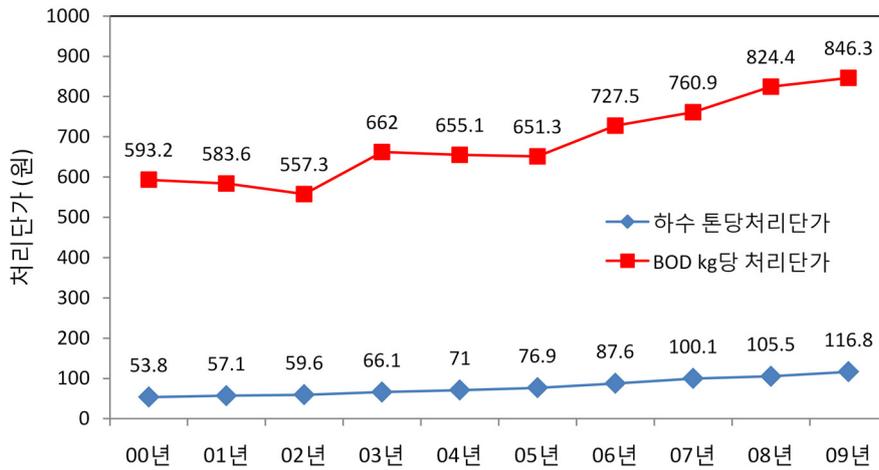
〈표 2-3〉 2년간 하수처리비용 항목당 분석

구 분		계	인건비	전력비	개보수비	슬러지 최종처분	약품비	기타
'10	연간 운영비 (구성비 %)	871,107 (100)	217,322 (24.9)	167,695 (19.3)	149,249 (17.1)	133,429 (15.3)	57,844 (6.6)	145,571 (16.7)
	톤당 처리비(원/톤)	121.4	30.3	23.4	20.8	18.6	8.1	20.3
	BOD 1kg당 처리비(원)	892.8	222.7	171.9	153.0	136.8	59.3	149.2
'09	연간 운영비(백만원) (구성비 %)	782,225 (100)	203,771 (26.1)	156,139 (20.0)	129,947 (16.6)	123,319 (15.8)	47,256 (6.0)	121,793 (15.6)
	톤당 처리비(원/톤)	116.8	30.4	23.3	19.4	18.4	7.1	18.2
	BOD 1kg당 처리비(원)	846.3	220.5	168.9	140.6	133.4	51.1	131.8

자료 : 2010년도 공공하수처리시설 운영실태 분석결과, 환경부, 2011

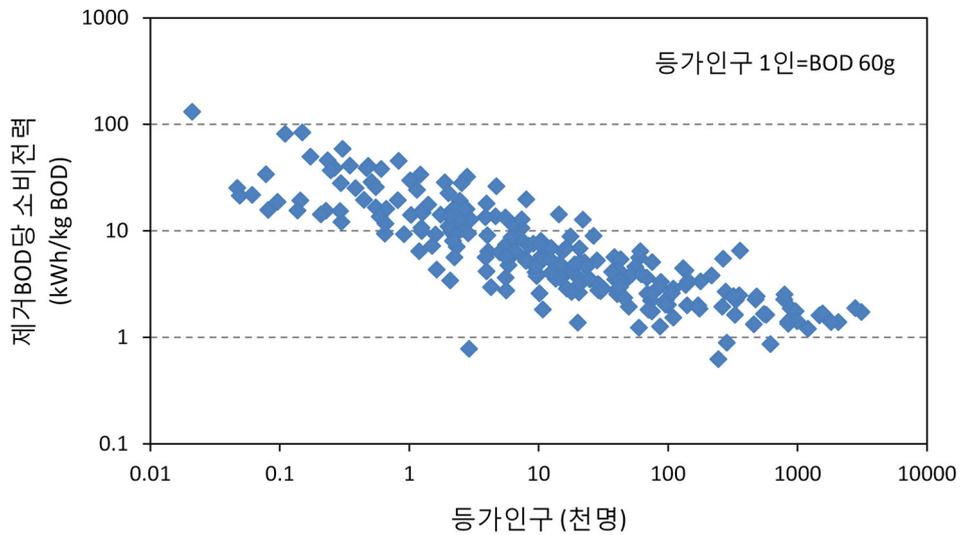


〈그림 2-4〉 하수처리비용 항목별 분포



〈그림 2-5〉 연도별 하수처리단가 증가 추이

제거한 BOD kg당 처리단가를 보면 2000년에 593원에서 2009년에 846원으로 꾸준히 증가하고 있으며, 제거한 BOD kg당 소비전력을 처리장별로 나타낸 그래프를 보면 대규모 처리장일수록, 처리한 BOD양이 많을수록, 에너지소비량이 훨씬 적은 특성을 보이고 있다.

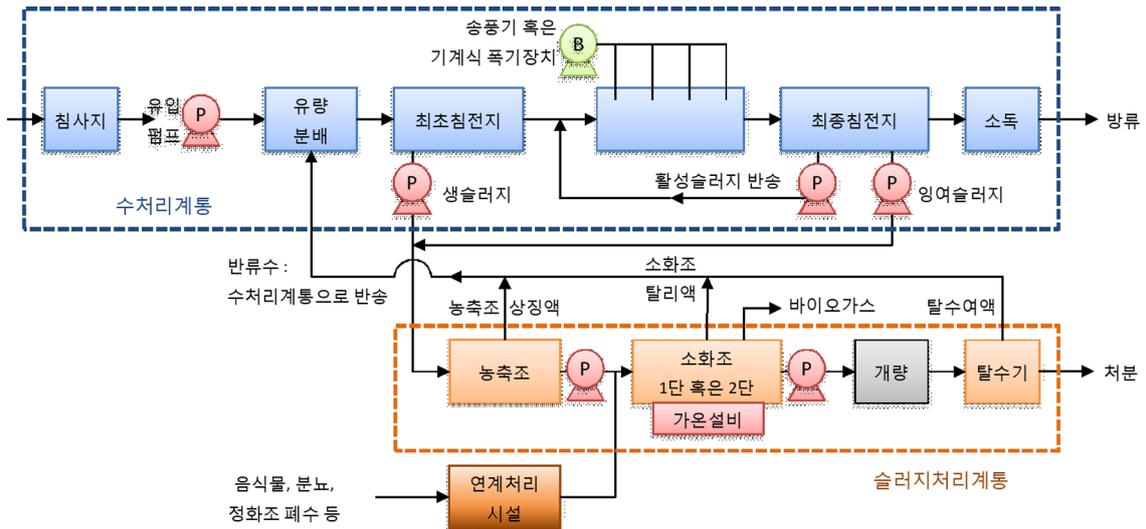


〈그림 2-6〉 각 하수처리장의 등가인구에 따른 제거 BOD당 소비전력(2005년)

(3) 하수처리장 기계별 전력 소비 분석

① 하수처리장의 처리흐름 및 기계설비의 구성

활성슬러지공법을 채용한 대표적인 하수처리장의 처리흐름을 에너지를 소비하는 주요 기계류 장치와 함께 나타내어 설명하면 다음의 그림과 같다.



〈그림 2-7〉 일반적인 하수처리장의 처리흐름과 주요 에너지 소비 시설

처리장 내 펌프장(유입펌프장)에서는 유입되는 하수 전량을 양수하여 유량분배조로 보내고, 최초침전지에서 침전된 생슬러지는 슬러지펌프를 통해 슬러지 농축조로 보내진다. 폭기조(폭기조)에서는 송풍기(혹은 기계식 폭기장치)를 통해 산소를 공급받은 미생물이 유기물을 섭취하면서 오염물질을 제거하고 최종침전지에서 침전된 활성슬러지는 일부가 폭기조 전단으로 반송되어 폭기조 활성슬러지 농도를 유지시키고, 나머지 잉여슬러지는 슬러지펌프를 통해 농축조로 보내진다. 농축된 슬러지는 함수율을 높여 슬러지펌프를 통해 보내지고, 농축조 상징액은 수처리계통으로 반송된다. 소화조는 대개 혐기성으로 운전되며, 교반장치와 가온설비를 가지고 있다. 가온설비는 대개 소화 시 발생한 소화가스(바이오가스)를 에너지원으로 이용하여 운전된다. 연계처리시설(음식물폐수 혹은 분뇨, 정화조 폐수 등)이 있는 경우에는 수처리계통에서 발생한 슬러지와 함께 소화조에서 처리되기도 한다. 소화된 슬러지는 탈수성능 개선을 위해 개량과정으로 보내

지고, 소화조에서 탈리된 소화탈리액은 농축조 상징액과 마찬가지로 수처리계통으로 보내진다. 개량된 슬러지는 탈수기로 보내져 최종적으로 탈수된 슬러지케이크를 생산하게 되고 탈수여액은 역시 수처리계통으로 보내진다.

탈수케이크는 퇴비화, 건설재료, 소각연료 등으로 자원화되거나 매립, 해양투기 등으로 최종처분되어 왔다. 그러나 매립과 해양투기는 전술한 바와 같이 법적으로 금지되었고, 퇴비화와 건설재료로의 자원화 시도가 난항을 겪고 있는 형편이다. 근래에는 소화효율을 높여 소화가스를 활용하고자 음식물폐수 병합처리, 소화전 슬러지의 전처리 등이 시도되고 있다.

하수처리장의 각종 기계설비의 기능을 간략히 설명하면 다음과 같다.

〈표 2-4〉 수처리 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
일차 침전지 설비	<ul style="list-style-type: none"> 침전 가능한 부유고형물의 침전을 제거하기 위한 고액 분리시설로 생물학적 처리공정의 부하감소, 후속처리시설의 시설용량의 감소 및 운전비용의 안정적 절감 등이 목적 -슬러지수집기: 침전된 슬러지를 한곳에 긁어 모음(연속운전, 일정한 스크래핑 속도 유지) -스컴스키머: 수면상에 부상하는 스크 제거 -슬러지인발설비: 슬러지 수집기에 의하여 모아진 슬러지 배출 (생슬러지 펌프에 의한 강제인발 방식) 	-인발슬러지펌프의 제어방식은 VS 방식, 대수제어방식, VWF방식 등을 검토하고, 생슬러지 펌프는 Timer로 정격운전
반응조 설비	<ul style="list-style-type: none"> 활성슬러지 미생물이 유기물질을 산화하고 새로운 세포의 동화작용에 필요한 산소의 공급과 반응조 내 혼합액의 교반을 목적으로 하는 설비 -산기장치: 산기식, 기계식 및 펌프순환식 -산기식 (미세기포식, 조대기포식): 압축공기를 폭기조의 바닥에 설치한 산기장치에 의한 미세기포를 분출하고, 기포의 상승작용에 따라서 발생하는 상향류에 의해서 하수와 활성슬러지를 혼합, 교반해 공기 중의 산소 공급 -기계식(중축회전식, 횡축회전식, 수중교반식): 하수에 선회류를 일으켜서 대기 중에 물보라, 수막을 형성시키거나 물결을 일으켜서 공기와 접촉시켜 공기중의 산소를 하수에 용입시키는 형식으로, 수중축류펌프의 회전차 하부에 압축공기를 분출하여 미세기포화하는 형식 -펌프순환식: 펌프와 송풍기의 조합에 의해, 펌프의 토출수에 공기를 혼입하여 하수에 산소를 공급 -산기장치의 인양 설비 -소포설비: 폭기조 등의 공기공급 또는 교반 등에 의해서 거품이 생기므로 소포장치 등으로 소포하고, 거품의 비산을 방지하기 위한 설비 	-반응조 바닥부의 슬러지 퇴적을 방지하기 위하여 0.1 m/ sec 이상의 지바닥의 유속을 확보

〈표 계속〉 수처리 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
이차 침전지 설비	<p>침전 가능한 부유 고형물의 침전을 제거하기 위한 고액 분리시설로 생물학적 처리 공정의 부하감소, 후속처리시설의 시설용량의 감소 및 운전비용의 안정적 절감 등이 목적</p> <p>-슬러지수집기: 슬러지의 긁어모으는 속도는 최종처리단계이므로 일차침전지에 비해서 침전슬러지가 가볍기 때문에 슬러지의 부상을 극소화할 필요가 있고, 수류나 슬러지수집기에 의한 물의 혼란에 의해서 부상이 쉬우므로 침전지의 형상이나 슬러지수집기의 기중에 따라서 방류, 수질에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 장방형 침전지가 일차침전지에 비해서 느리게 하는 것이 바람직함</p> <p>-스킵스키머: 일차침전지에 비해서 침전의 부유물이 발생하지 않으므로 처리공법 등의 현장조건에 따라서 설치를 고려</p>	<p>-슬러지인발: 타이머에 의한 간헐 운전이 가능하고, 16시간으로 잉여슬러지의 전량이 인발될 수 있도록 설계, 원칙적으로 펌프에 의한 방식</p> <p>-반송슬러지펌프: 최소구경이 80mm로 막힘이 잘 일어나지 않는 구조</p> <p>· 잉여슬러지 인발설비: 생슬러지 펌프와 같은 형식</p>
송풍기설비	<p>반응조 등에 공기를 압송하는 설비로 공기여과기, 송풍기, 전동기, 송풍관, 밸브류 등으로 구성</p> <p>-송풍기의 토출압력: 5,000~7,000mmAq</p> <p>-풍량: 5~550m³/min</p> <p>-용량: 반응조(주조), 예비반응조, 수로, 포기침사지, 에어리프트펌프 등의 필요공기량으로 결정</p> <p>-반응조 송풍기: 직결단단 터보송풍기, 단단 터보송풍기(기어증속형, 자기부상형), 로터리(루츠식)송풍기 등</p> <p>-공기여과기, 송풍기, 전동기 등의 설치위치는 옥내로 하고, 가능한 한 반응조에 가까운 장소</p>	<p>-터보송풍기의 풍량제어: 흡입 버터플라이밸브, 흡입베인, 가변토출디퓨저에 의한 방법</p> <p>-로터리(루츠식)송풍기의 풍량조정: 대수제어, 방풍밸브와 회전수(주파수변환)제어와의 조합을 원칙</p>

자료 : 환경관리공단, 하수종말처리장 기계설비공사 설계지침, 환경부, 2001

〈표 2-5〉 슬러지 처리 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
슬러지 농축설비	<p>-종류: 중력농축조, 기계농축설비(원심농축기, 부상식 농축기, 벨트농축기)</p> <p>-중력식 농축: 심한 악취, 장기간 체류로 인한 혐기화로 고도처리 공정에서 제거된 인(P)성분이 방출되므로 최근에는 사용되지 않음</p> <p>-원심농축기: 처리규모가 큰 곳에서 연속적인 농축을 하고자 할 때 아주 유용한 방법으로 시설규모가 작고, 냄새발생 문제를 최소화함. 2000~3000g, 농축슬러지의 함수율 95~96%, 고형물회수율 90~95%</p> <p>-부상식농축기: 활성슬러지나 살수여상슬러지와 같이 비교적 가벼운 슬러지의 농축에 많이 이용됨. 가압부상법(전량가압법, 부분가압법, 순환수가압법), 감압부상법(진공부상법)이 있으며 농축슬러지의 함수율은 96~97%, 고형물회수율은 90~98%</p> <p>-벨트농축기: 유입되는 슬러지를 3~7m/min 속도로 회전하는 GBT의 벨트위로 유입 분배하여, 슬러지의 표면을 넓혀 자연압(중력)으로 하수처리에서 물리적, 화학적, 생물학적으로 발생되는 슬러지를 연속적으로 농축시키는 설비로 농축슬러지의 함수율 96~97%</p> <p>농축인발 슬러지펌프: 최소구경은 100mm</p>	

(표 계속) 슬러지 처리 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
슬러지 소화조 설비	-소화방식: 1단 소화 또는 2단 소화 -투입 슬러지농도가 높은 경우: 고액분리를 목적으로 하는 2차 소화조는 설치하지 않는 것이 좋음 -투입슬러지의 유기분이 50~80% 정도의 중온소화(30~35℃)의 경우 소화일수 20일 정도에서의 소화율은 50% 정도로 됨 -교반방식: 가스교반방식 (가스압축기) 또는 기계교반방식 (소화조 내에 교반기를 부착) -탈황설비: 건식 또는 습식 -가온설비: 증기주입식 (표준형, 직접식) 또는 외부 가온방식 (열교환기 이용, 간접식), 보일러 설비 (10kg/cm ² 이하) -잉여가스연소장치: 노(爐)내형 또는 노(爐)외형 -소화슬러지인발설비: 수위차, 모노펌프(일축나사식 슬러지펌프) 또는 원심나선형 스크류 슬러지펌프, 최소구경은 원칙적으로 100mm -소화가스의 저위발열량: 5,100~5,500kcal/N·m ³	
슬러지 탈수설비	-슬러지의 조정공정: 후속 탈수공정의 효율을 향상시키기 위한 수단으로 약품조정(주로), 열처리, 슬러지세정 등 -벨트프레스탈수기: 상하 2매 이상의 여과포와 이들에 장력을 걸어 주는 로울러 및 압력을 가하는 로울러에 의해 공급된 슬러지를 여과, 압착에 의해 연속적으로 탈수 -원심탈수기: 보울이라 불리는 고속회전하는 외통내부에 슬러지를 공급하여 원심효과에 의해서 슬러지의 고액을 침강분리 -가압탈수기: 여과판에 여과포를 걸고, 이것을 필요용량에 맞는 매수로 나란하게 한 여과실을 갖고, 슬러지를 여과실 내에 압입하여 가압탈수 -다중 원판외통형 스크류프레스: 본체는 일정하게 회전하는 스크류와 그 회전에 따라 미세하게 상하운동을 하는 여과부로 구성되어 있고, 스크류는 여과부를 관통하므로 그 끝이 항상 유동링을 밀어 올리고 있어 링의 유동에 의해 여과부의 공극을 청소하여 막힘이 발생하지 않는 구조의 탈수기 -유동판 농축탈수장치: 본체는 저속으로 회전하는 스크류와 고정판, 유동판으로 구성되어 있으며, 농축부는 유동판과 고정판이 번갈아 가면서 적층을 형성하고, 고정판 사이에서 일정 간격의 틈새를 유지하는 유동판은 2개의 편심축에 의해 미세한 운동을 하여 농축·탈수하는 장치 · 슬러지 저류설비: 슬러지 탈수기가 통상주간에 운전하므로 슬러지일시 저류 및 슬러지 균등화를 도모하기 위한 설비(공기교반송풍량: 0.5~1.0m ³ /hr·m ³ 조) · 슬러지공급펌프, 약품공급펌프, 수압펌프, 여과포 세정펌프, 공기조용 송풍기 등	-소규모처리장에서는 발생슬러지량이 적어 탈수기 가동률이 낮으며 초기 투자비가 높고, 주변의 악취발생 방지, 설비의 중복투자 방지, 유지관리의 간소화 등을 고려하여 진공차 등을 이용한 광역처리장과 연계처리를 검토
탈수케이프 반출 저류설비	탈수기로부터 배출된 탈수케이프를 반출하여 일시 저류하기 위한 설비로 벨트컨베이어, 스크류 컨베이어, 뉴메틱 컨베이어 등을 이용하고 저류호퍼의 개폐방식은 전동유압, 공압 컷게이트 식이 있음	

자료 : 환경관리공단, 하수종말처리장 기계설비공사 설계지침, 환경부, 2001

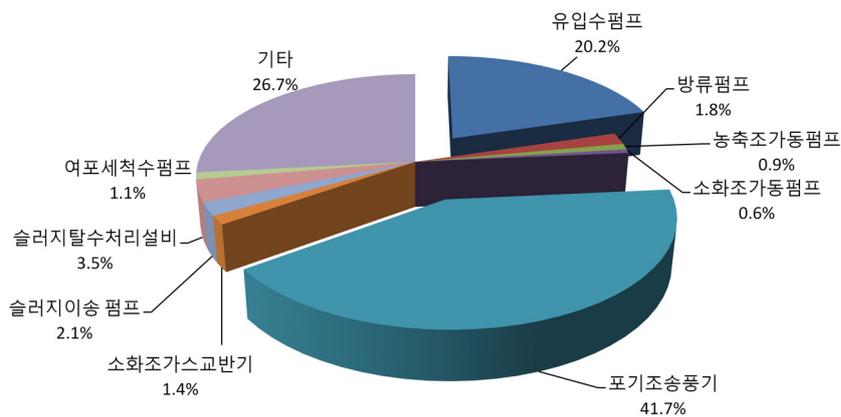
〈표 2-6〉 기타 기계설비의 구성과 기능

설비명	기능	비고
용수설비	처리수를 기계냉각수, 축봉수, 세척수 및 소포수 등에 사용하기 위한 설비이고, 장래 필요 시 재이용수의 확보를 위한 -용수의 종류: 상수, 지하수, 공업용수, 사여과수, 2차처리수(스트레이너여과) 등 -펌프, 전동기, 송풍기 등의 실링수 및 냉각수: 사여과수 사용을 표준으로 하지만, 상수를 이용하는 경우는 순환이용을 원칙 -탈수기의 여포세정, 소각용 세정탑 용수 등: 공업용수 또는 사여과수를 표준으로 함 -소포수, 침사지(침사세정수), 기타 세정수 등: 스트레이너 여과수 정도로 함 -탈취용수(보급수, 회석수), 약품용해수 등: 사여과수 이상의 용수가 바람직함	
소독설비	처리수 중에 생존할 우려가 있는 병원성 세균을 사멸시켜 처리수의 위생적인 안전성을 높임 -염소소독, 오존소독, 자외선소독 등	
탈취설비	부지주변의 자연환경 및 주거환경과의 조화를 도모하며, 청결감이 있는 분위기가 있도록, 시설처리장-펌프장에서 발생하는 악취를 제거 -약액세정방식, 미생물탈취방식, 활성탄흡착방식	탈취팬은 보수관리, 위험분산을 고려해서 2대(병렬운전) 설치
기타설비	-바닥배수펌프(최소구경은 50mm 이상) -상징수 배출장치(기계식, 밸브식, 공기식 및 펌프식)	

자료 : 환경관리공단, 하수종말처리장 기계설비공사 설계지침, 환경부, 2001

② 하수처리장 기계설비의 에너지 소비특성

2006년 대한상하수도학회에서 발간한 공공하수도시설 에너지 절감대책 보고서에 의하면, 하수처리장의 주요 기계설비별 전력소비율은 다음의 표에 나타낸 것과 같다. 그림 및 표에서 볼 수 있는 바와 같이 가장 큰 에너지소비원은 폭기조 송풍기이며(전국 평균 41.6%), 그다음이 유입수 펌프로(전국 평균 20.2%) 조사되었다. 하수처리장의 기계설비들은 계절별 에너지 소비패턴이 크게 다르지 않은 특성이 있다.



〈그림 2-8〉 전국 하수처리장의 주요 기계설비별 전력 소비율

〈표 2-7〉 지역별 하수처리장의 주요 기계설비 전력 소비율

(단위 : %)

처리장 소재지 (시,도)	응답 처리장 수	유입수 펌프	방류 펌프	농축조 가동 펌프	소화조 가동 펌프	폭기조 송풍기	소화조 가스 교반기	슬러지 이송 펌프	슬러지 탈수처리 설비	여포 세척수 펌프	기타
강원도	6	28.5	0.0	0.0	0.3	47.1	3.2	0.8	2.2	0.7	17.2
경기도	65	14.6	5.1	1.4	0.1	28.1	0.4	1.5	1.9	0.6	46.3
경남도	29	19.4	0.0	1.5	0.6	43.0	1.0	2.7	6.9	1.8	23.2
경북도	30	23.1	0.0	1.3	2.6	35.9	1.9	1.2	3.4	1.8	28.6
광주시	2	46.8	0.0	0.4	0.8	39.8	2.1	5.0	1.8	0.5	2.8
대구시	6	15.8	0.4	0.3	0.3	52.0	2.2	4.7	0.6	1.1	22.6
대전시	1	39.0	0.0	0.1	0.2	49.8	0.2	0.2	0.3	0.1	10.2
부산시	7	25.0	6.2	2.2	1.7	37.9	0.4	2.6	2.9	2.4	18.7
서울시	4	21.8	0.0	0.6	1.1	52.9	2.5	0.6	6.4	1.4	12.8
울산시	4	21.5	0.6	0.5	0.0	48.1	0.0	3.8	1.4	0.9	23.1
인천시	6	35.6	0.0	0.7	0.0	26.7	0.0	0.5	2.5	0.9	33.1
전남도	18	20.0	2.0	1.2	1.8	29.9	1.0	2.7	5.8	2.0	33.5
전북도	16	15.7	0.1	0.2	0.0	36.8	0.2	2.5	5.2	0.2	39.2
제주도	3	30.2	0.0	0.0	0.0	50.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.3
충남도	8	24.8	2.1	0.5	0.0	36.1	4.0	1.4	0.8	8.0	22.2
충북도	25	12.9	0.3	2.5	0.2	35.6	1.9	15.1	2.4	1.3	27.9
계/평균	230	20.2	1.8	0.9	0.6	41.6	1.4	2.1	3.5	1.1	26.6

자료 : 공공하수도시설 에너지 절감대책 보고서, 대한상하수도학회, 2006

4) 에너지 소비 절감 대책

에너지대책은 크게 수요대책과 공급대책으로 구분하여 볼 수 있다. 갈수록 증가하는 에너지 수요에 대처하기 위하여 보다 경제적이고, 환경적으로 안전하며, 안정적인 양을 공급할 수 있는 방안들이 모색되고 있다. 근래에는 화석연료 고갈 위기와 기존 에너지 생산방법의 환경과괴적 경향으로 인해 태양광, 풍력, 지열, 조력 등의 신재생에너지의 개발 및 보급에 노력을 하고 있다. 그러나 공급대책만으로 문제를 해결할 수 없기 때문에 공급대책과 더불어 에너지 사용을 절감하고, 효율적인 운전을 위해 낭비적인 요인을 없애며, 고효율의 설비를 도입하는 등의 에너지 수요대책을 함께 시행해야 한다.

하수처리시설에서 에너지 수요대책은 각 공정의 운전을 최적화하여 효율성을 높이는 방법을 강구하는 방향으로 진행된다. 이는 다음과 같은 세부 사항들을 달성함으로써 종합적인 수요대책을 시행할 수 있다.

- 하수처리 공정의 최적 설계
- 주요 에너지 소비 기기에 대한 효율성 제고
- 통합제어를 통한 운전기법의 개선
- 통합관리시스템을 통한 에너지소비량의 관리
- 에너지관리 협의체의 운영을 통한 하수처리장 관리기법의 개선
- 관리동 등의 행정용 에너지절약

① 하수처리 공정의 최적 설계

2005년에 조사된 자료에 따르면 하수처리 공법별로 제거 BOD당 소비전력이 아래의 표와 같이 큰 차이를 보이고 있다. 2차처리(표준활성슬러지법) 공법과 이 A₂O공법, 산화구 공법의 제거 BOD당 소비전력은 각각 1.88, 1.84, 1.82kWh/kgBOD인 반면, SBR공법은 7.79kWh/kgBOD인 것으로 조사되었다. 이런 단순한 전력사용량으로 공정 전체 효율의 고저를 단정하기에는 무리가 있으나, 처리목표 수질을 달성하면서 슬러지발생량이 적고, 동시에 에너지 소비가 적은 공법을 설계하여 적용하는 것이 바람직할 것이다.

〈표 2-8〉 하수처리 공법별 제거 BOD당 소비전력

	2차 처리	고도처리				계 (평균)
		A ₂ O	SBR	산화구	기타	
처리장 수	84	15	30	9	92	230
제거BOD당 소비전력 (kWh/kg BOD)	1.88	1.84	7.79	1.82	2.32	2.07

자료 : 공공하수도시설 에너지 절감대책 보고서, 대한상하수도학회, 2006

② 주요 에너지 소비 기기에 대한 효율성 제고

2006년에 대한상하수도학회가 실시한 설문조사(148처리장 답변)에 의하면, 에너지가 과다하게 소모되거나, 내구연한에 가깝거나 지나는 등 시설 노후화에 기인하여 기계적 성능에 영향을 미치는 경우, 과용량 설비에 기인한 저부하 운전의 경우, 저용량 설비로 인한 과부하 운전이 심한 경우, 부하변동이 심하여 효율이 떨어지는 경우, 간헐운전에 기인한 효율저하의 경우에 대하여 의견을 제시하였다. 이 중에서 대표적인 기기를 간략

히 요약하면 다음과 같다.

○ 폭기조 송풍기 : 거의 모든 처리장에서 송풍기가 최대의 전력소비원인데, 송풍기의 제어를 효율적으로 조절하기 어려워 과다하게 전력이 소모되는 경향이 있으므로 필요에 따라 속도제어를 할 수 있는 인버터방식의 송풍기로 개선하는 것이 좋을 것으로 의견을 제안하였다. 또한 저효율 산기장치로 인해 송풍량이 과다해지는 경향 때문에 산소전달 효율이 높은 산기장치를 사용할 것을 제안하였다.

○ 유입 펌프 : 대수제어방식으로는 유량변동에 유연히 대처하지 못하고, 유량균등조가 미설치되어 전반적 처리효율에 영향을 주고 기동방식의 문제, 시설 노후의 문제로 효율이 낮은 것을 지적하였다. 특히 유입 펌프는 하수와 직접적으로 접하여 가동하므로 본체부식 및 베어링 씰의 마모가 심하고, 장시간 사용 시 베어링, 임펠러 등의 마모가 심한 것으로 보고하였다. 마모를 줄이기 위해 하수관거의 지속적인 준설과 침사지성능 개선도 필요함을 제안하였고, 노후시설을 고효율이면서 속도를 제어할 수 있는 인버터방식의 펌프로 교체할 것을 제안하였다.

○ 탈수기 : 오염부하량 증가, 음식물처리장, 분뇨처리장, 침출수처리장과 연계처리로 당초보다 슬러지부하량이 증가하여 설계보다 과부하로 운전되는 경우가 다수 보고되었다. 이 때문에 가동시간이 증가하고, 관리가 어려워 예상보다 빨리 노후화되어 성능이 저하하는 경향이 있어 시설 증대가 필요함을 제안하였다.

이와 같이 설계당시에 예상하지 못했던 여러 상황들로 인해 비효율적으로 운전되고 있는 여러 다양한 기기들에 대해 보고하였다. 이러한 시설들은 기기별로 개보수, 교체, 추가 등의 방법을 강구하여 높은 효율로 운전하면서, 저에너지 소비를 이루어야 할 것이다. 이러한 기기별 효율성 제고 대책은 각 처리장 및 공정별, 기기별로 상황이 다르므로 각 처리장의 운영자들이 가장 효율적인 방법을 찾아 적용하도록 노력하여야 할 것이다. 참고로 2003년 하수처리시설 기술진단 사례집에 제시된 기계설비분야 에너지절감 방안 검토사항을 아래 표에 정리하였다.

〈표 2-9〉 환경관리공단 하수종말처리시설 에너지 절감 방안

번호	공정 및 설비	에너지 절감을 위한 고려사항
1	공통 사항	<ul style="list-style-type: none"> -비효율적인 운전설비 검토(가동시간) -노후화에 따른 효율저하설비 -Pump, 송풍기류 Discharge Valve Close 상태운전으로 인한 손실 -Pump, 송풍기류 등 Belt 느슨함 및 노후화로 인한 손실 -감속모터 사용(기계감속기 사용설비): 교반기 등 감속기가 들어가는 모터설비는 무부하 시 감속용 모터로 개선하여 전력비 절감 -저농도 탈취를 위해 생물반응조로 유입처리 -공동구 전등 자동점멸 시스템 구축
2	유입 및 중계 펌프장	<ul style="list-style-type: none"> -유입펌프 자동운전: 빈번한 기동정지 검토(양정 Setting), 수동운전에 대한 인력 Loss 점검, 유입량 후단공정으로 일정하게 공급방안 검토(단속운전에서 연속운전) -중계 및 유입 Pump류 노후화로 교체 및 신설 시 Type을 수중모터펌프로 개선: 유지관리 및 운전비용 절감(고압인 경우 빈번한 단속운전 시 재검토) -중계펌프장 TM/TC 검토로 비상주에 의한 인력손실 절감 -SCREW 펌프 적정 Level에 의한 운전효율 향상방안 검토
3	침사지	<ul style="list-style-type: none"> -미세스크린 설치로 후단부하 감소(중, 소형처리장) -침사수로 적정 유속 유지에 따른 설비운전 방안 검토
4	최초 침전지	<ul style="list-style-type: none"> -슬러지수집기의 재질변경(Non Metal)으로 운전 및 유지보수비용 절감 -슬러지수집기 간헐운전 절전도모: 수처리에 지장이 없는 범위 내 -생오니 인발펌프 자동운전 방안 검토: 초침 슬러지 계면에 의한 자동인발 기능
5	폭기조	<ul style="list-style-type: none"> -Roots Type Blower 노후화 교체 시 단단터보송풍기로 교체(중, 대형처리장) -노후 산기관 교체 -폭기조 효율적 운영관리를 위한 송풍기 자동화: DO값에 의한 송풍기 자동운전
6	최종 침전지	<ul style="list-style-type: none"> -반송펌프 반송량 조절을 위한 회전수 제어 방법 검토: 인버터, Pully 조정 → 적정반송량 이송
7	용수공급 설비	<ul style="list-style-type: none"> -용수공급장치의 타입을 가압식 용수공급 장치로 검토: 압력식의 경우 단속운전으로 손실(Loss) 발생 -사여과지 형식을 중력식으로 (대형처리장의 경우) -처리수(중수도) 활용방안 검토: 인근 공단 지역, 조경수, 화장실 등 -여포세척수 Filtering후 재사용: 여포여액 재활용방안 강구, 세척수 재활용
8	농축조	<ul style="list-style-type: none"> -농축슬러지 펌프 자동운전(균등슬러지 인발을 위해) -GBT 적용으로 농축효율 및 운전비용 절감 -소포수 용수 활용방안 검토(중간처리수)
9	소화조	<ul style="list-style-type: none"> -잉여가스 재활용 방안 검토(발전기 등) -가스 Blower 단속운전 방안 검토 -소화조 상부 브리더 밸브 누설 여부 검토 -열교환기, 보일러 자동운전 방안 검토 (소화조 적정온도 유지)
10	탈수기	<ul style="list-style-type: none"> -여과포 세척수 압력 적정유지 -여과포 세척수량 확인 -세척수 펌프 Auto Strainer 압력감소 여부 확인 -Air Compressor 기동방법 검토: 직입기동 방식을 Soft Start 방식으로 -공기라인 누설 여부 확인

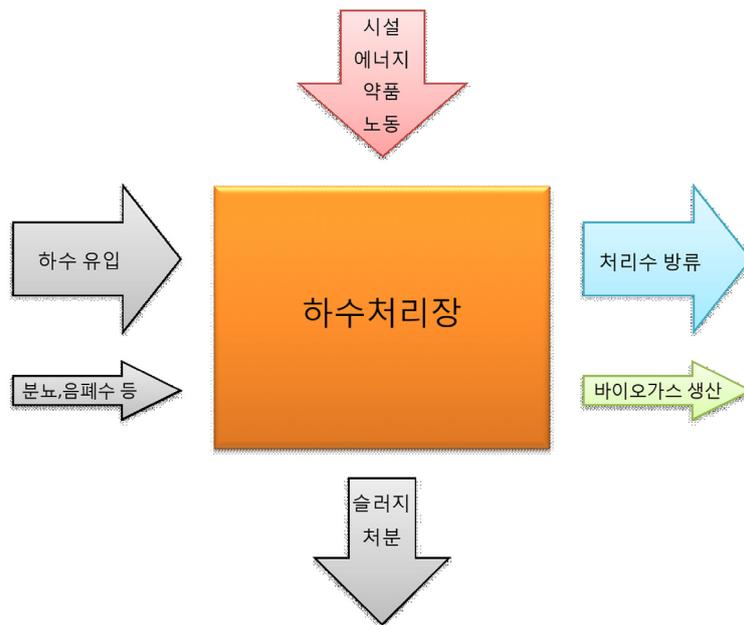
자료 : 환경관리공단, 2003년 하수처리시설 기술진단 사례집, 2004. 11.

3. 하수도시설의 에너지 및 자원 발생 특성

1) 하수도시설에서의 에너지 및 자원 발생 개념

하수도시설은 오랫동안 에너지를 소비하면서 오염물질을 처리하는 시설로만 인식되었고 에너지를 생산할 수 있는 시설이라는 생각을 하게 된 것은 비교적 근래의 일이다. 하수도시설 중에서 에너지 및 자원의 생산이 가능한 시설은 관거시설, 펌프장시설보다 처리장시설에 국한된다.

하수처리시설에서의 물질 및 에너지 수지를 간략히 표현하면 다음과 같다.



〈그림 2-9〉 하수처리장에서의 물질 및 에너지 수지

주원료인 하수가 유입되면, 시설, 에너지, 약품, 노동 등을 투입하여, 오염된 하수를 처리하여 깨끗해진 처리수를 얻는다. 이때 처리수는 방류수 수질기준이라는 법적 제한 요건을 충족해야 한다. 유입수 중의 오염물질은 슬러지라고 하는 부산물로 이동하여 발생하게 된다. 처리수가 깨끗해지는 만큼 슬러지의 양이 많아지는 것이다. 경우에 따라, 분뇨나 음식물폐수 등이 하수처리와 연계되어 처리되며, 슬러지처리 시에 소화가스(혹은 바이오가스)가 유가(有價)의 부산물로 생산된다. 슬러지처리과정을 거친 잔류 슬

러지는 또 다른 과정을 통해 최종처분되기 위해 하수처리장 외로 반출된다. 과거에는 이 슬러지를 저비용으로, 매립 혹은 해양배출로 최종처분하여 왔었다. 그러나 규제 강화로 인해 2003년부터는 육상에서 직매립이 금지되고¹⁴⁾ 2012년부터는 해양배출이 불가능해졌다¹⁵⁾. BOD뿐만 아니라 질소, 인까지 제거하기 위해 방류수 수질기준이 더욱 강화될수록 슬러지 발생량은 증가한다.

이러한 강제 요인과 더불어 에너지 비용의 증가는 하수처리장에서 유출되는 모든 물질들에 남아 있는 에너지를 회수하여 사용할 수 있는 기술개발에 압력요인으로 작용하고 있다. 에너지 발생원으로서뿐만 아니라 경제적 가치가 있는 자원으로서의 활용도 적극적으로 추진되고 있다.

소극적으로는 처리수의 시설 내 재이용과 적극적으로는 처리수의 수역방류 시 방류구와 방류수면과의 낙차를 이용한 소수력발전, 하수 자체가 가진 하수열을 이용하는 방법, 소화 시 발생한 바이오가스를 활용하는 방법, 소화 후 탈수된 슬러지의 탄화, 퇴비화, 고화, 연료화 등의 방법을 통한 재활용 등이다.

하수처리장에서 에너지 소비를 절감하는 대책과 동시에 추진되어야 할 에너지 공급 대책은 에너지의 양과 질을 안정적으로 공급하는 것이 목적은 아니다. 과거에 전기보급률을 제고하는 대책이나, 상하수도 보급률을 제고하는 식의 대책이 아니다. 과거에 사용하지 않고 버려지던 에너지원에서 어떻게 에너지를 회수해서 다시 사용하도록 할 것인가에 관한 에너지 공급원 변화의 대책이다. 이 절에서는 하수처리시설에서 지금까지 잘 활용되지 않았거나 활용되었더라도 실적이 미미하였던 에너지 발생원에 대해서 하수슬러지처리공정에서 발생하는 에너지원, 하수 수처리공정에서 발생하는 에너지원, 하수처리장의 공간을 활용하는 에너지원 및 기타 자원 이용으로 나누어 그 특성을 검토하고자 한다.

14) 2003년 7월부터 시설용량 1만톤/일 이상인 하수처리장의 하수슬러지 직매립 금지, 폐기물관리법

15) 런던협약('96 의정서)에 의해 해양오염방지법(해양환경관리법) 개정, 2012년부터 사실상 하수슬러지의 해양배출 금지

2) 하수슬러지 처리계통에서 발생하는 에너지원

(1) 하수슬러지의 연료화

① 하수슬러지 연료화 추진 과정

하수슬러지는 2006년에 하수슬러지 기본계획이 수립된 이후 2008년까지 재활용에 포커스를 맞추어 각종 정책이 시행되었다. 2012년부터 하수슬러지의 해양배출이 금지되기 때문에, 2011년까지 발생하는 하수슬러지 전량을 육상에서 처리하고자 하는 목표를 세우고 처리대상 하수슬러지의 2011년 추정발생량에 대해 약 69%를 재활용으로 처리하고자 하는 방안을 계획하였다. 소화가스를 활용하는 방안은 언급되기는 했으나 슬러지 소화에 의해 감량화, 안정화되면서 발생하는 것이기 때문에 슬러지 발생량과 연관된 처리물량으로 계획되지는 않았다. 즉 2008년 계획 수립 당시까지 연료화에 큰 관심을 두지 않았던 것이다.

〈표 2-10〉 환경부의 하수슬러지 처리 계획

		2006년 계획		2007년 계획		2008년 계획	
2011년 발생추정 총량		10,133	100%	9,554	100%	10,259	100%
해양배출		-	0.0%	-	0.0%	-	0.0%
매립	소계	274	2.7%	844	8.8%	149	1.5%
	직매립			62	0.6%	89	0.9%
	가스화			782	8.2%	60	0.6%
소각	소계	3,084	30.4%	3,252	34.0%	2,974	29.0%
	생활연계			157	1.6%	685	6.7%
	전용			3,095	32.4%	2,289	22.3%
재활용	소계	6,775	66.9%	5,458	57.1%	7,136	69.6%
	복토재			3,678	38.5%	3,808	37.1%
	탄화			271	2.8%	1,301	12.7%
	시멘트원료			599	6.3%	912	8.9%
	녹생토			489	5.1%	373	3.6%
	퇴비화			385	4.0%	368	3.6%
	연료화			16	0.2%	308	3.0%
	지렁이분변토			20	0.2%	66	0.6%

자료 : 하수슬러지관리 기본계획, 2006, 환경부
 하수슬러지관리 종합대책, 2007, 환경부
 하수슬러지관리 종합대책(수정), 2008, 환경부

그러나 2009년에 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청이 공동으로 수립한 “저탄소에너지 생산·보급을 위한 『폐자원 및 바이오매스 에너지 대책』 실행계획”에 의하면 환경부는 지금까지 재활용에 집중했던 추진 방향을 에너지화로 전환하기로 결정하였다. 2007년 기준으로 해양배출, 매립 및 소각되는 하수슬러지 6,220톤/일 전량을 석탄화력발전소 혼소 등 연료화 방식으로 전환함으로써 에너지화하는 방안을 마련하여 추진하기로 한 것이다. 환경부는 2012년부터의 해양배출 규제에 대비하여, 해양배출되는 하수슬러지의 육상처리대책(고화, 소각, 건조, 탄화, 퇴비화 및 부숙화 등)을 수립하여 추진 중이나, 작금의 에너지난 및 기후변화에의 적극 대응을 위하여는 에너지화로의 생산적 전환을 적극 모색할 필요가 있다고 역설하였다. 에너지화로의 전환 공정 중의 하나인 건조시설 설치·운영비가 다른 처리방법보다 상대적으로 저렴하여 경제적이라고 지적하면서, 이미 예산을 확보하여 설치 중인 시설에 대하여도 사업진도 등을 고려해, 가능한 경우 연료화시설로 전환토록 하는 방안, 현재 하수슬러지를 건조 후 소각 처리하는 시설에 대하여도 연료화시설로 전환토록 하는 방안을 검토하고, 2010년부터의 신규 및 대체시설은 연료화 방식을 우선적으로 추진하겠다고 하였다. 또한 관련제도를 제·개정하여 하수처리오니를 화력발전소 연료로 사용할 수 있도록 허용하고 하수슬러지 소화가스 등 바이오가스의 자동차연료 및 도시가스로 공급하는 것을 허용하겠다고 발표하였다.

이와 같은 전격적인 대책의 전환은 2008년까지 추진해오던 하수슬러지 69% 재활용이 현실적으로 거의 불가능하다는 것을 인식했기 때문이다. 슬러지 재활용 사업은 2006년의 기본계획이나 2007년과 2008년 종합계획에서 환경부도 지적하고 있듯이 곳곳에서 지역주민들의 반발을 사고 있고, 애써 생산된 재활용제품들도 소비가 극히 부진해 사업이 지지부진한 실정이었다. 게다가 수백억원의 국비와 지방비가 투입된 수도권매립지관리공사의 하수슬러지 고화처리시설¹⁶⁾이 2008년 말에 준공되고도 6개월이 지나도록 정상가동되지 않았으며, 계획처리량의 10%밖에 처리해내지 못했다. 고화처리시설이 정상적으로 가동되었다면, 계획대로 2단계, 3단계로 추가 증설을 함으로써 당초에 목표했던

16) 고화처리시설은 수도권매립지에 반입되는 폐수슬러지나 하수슬러지를 고화제·시멘트 등과 섞은 후 양생·건조시켜 매립지 복토제를 생산하는 장치이다.

하수슬러지 발생량의 37%(복토재로 재활용)를 처리하게 되었을 것이었다¹⁷⁾.

이에 따라 환경부는 재활용에 중점을 두었던 정책을 과감히 포기하고, 정부의 저탄소·녹색성장 기조에 부응하여 하수슬러지의 연료화를 적극적으로 추진하게 되었다¹⁸⁾. 버려지는 물건들로부터 사용할 수 있는 재활용품이 생산되는데, 이때 중요한 점은 재활용품이 실제로 소비자에 의해 선택되어 사용되어야 한다는 것이다. 재활용품이 생산되었으나 사용되지 않는다면 비용을 들여서 다른 형태의 폐기물을 생산하는 꼴밖에 되지 않는다. 재활용품의 품질이 나쁘지 않아도, 제도적으로 사용을 불허한다거나 심리적인 이유에서 사용되지 않는다면 어쩔 도리가 없는 한계점이 존재한다. 이 때문에 정부는 관련제도를 제·개정하여 하수처리슬러지를 화력발전소 연료로 사용할 수 있도록 허용하고 하수슬러지 소화가스 등 바이오가스를 자동차연료 및 도시가스로 공급하는 것을 허용하겠다고 발표하였다.

② 하수슬러지의 연료화

여러 처리방법 중의 하나인 소각은 불에 태워 없애는 것(소량의 소각잔재만 부산물로 생성됨)이므로 재활용과 달리 제품이 생산되지 않는 특성이 있다. 연료화도 재활용의 관점에서 보면 재활용 연료를 생산하는 것이지만, 연료로 사용되면 태워서 없앤다는 점에서 소각과 비슷하다. 그 둘의 차이점은 소각은 태우기 위해서 외부의 연료를 사용해야 하지만, 연료화는 그 자체의 발열량으로 스스로 타고 외부의 연료를 요구하지 않는다는 점이다. 정부에서 강조하고 있는 것은 가장 저렴한 방법으로 하수슬러지를 연료화해서 에너지를 얻겠다는 것이다. 2009년에 발표한 정부의 “폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획” 중의 하수슬러지 에너지화 확대 계획¹⁹⁾에서 다음과 같은 이유를 설명하면서 연료화의 이점을 강조하였다.

17) 슬러지자원화 시설의 1단계 고화처리시설이 준공초기부터 운영상의 문제점들을 드러내자, 당초 2단계도 고화처리시설로 계획하였던 것을 연료화시설로 변경하였다. 2012년 현재, 1단계 고화처리시설의 설계상, 운영상의 문제가 보완되어 정상운영되고 있다고 하지만, 최초 설계 당시와는 다른 운영비 증가로 기대했던 효과를 보이지 못하고 있다.

18) 재활용은 엄밀히 말하면 연료로 재활용하는 것을 포함하지만, 여기서는 연료로 재활용하는 것을 제외한 다른 방법의 재활용을 뜻한다.

19) 저탄소에너지 생산·보급을 위한 「폐자원 및 바이오매스 에너지 대책」 실행계획, 환경부 등, 2009

폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획 p.109

□ 에너지화로의 전환 공정 중의 하나인 건조시설 설치·운영비가 다른 처리방법보다 상대적으로 저렴하여 경제적

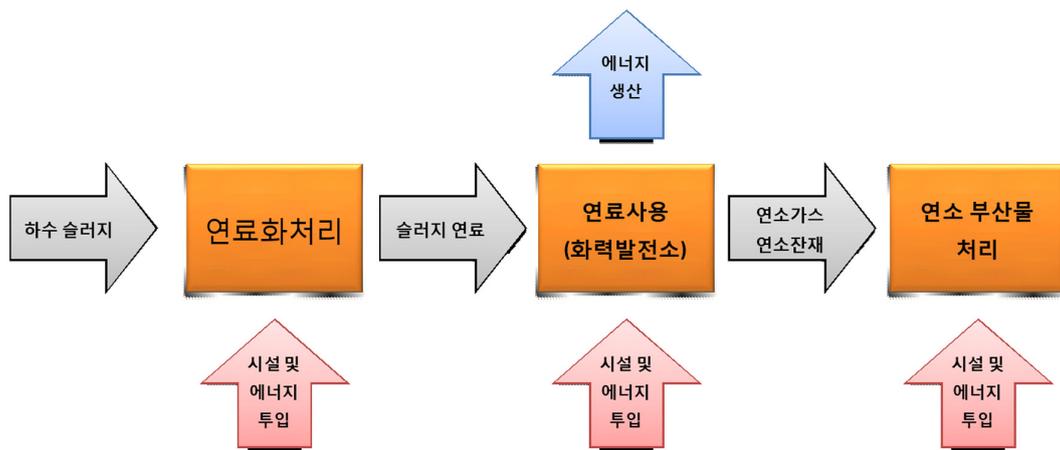
○ 현재 가동 중인 시설에 대한 운영·관리 실태조사('08.12) 결과

구분	건조	부숙화	고화	소각		탄화	분변토
				전용	혼합		
설치비	52	209	137	98,2	158	174	380
처리단가	28,782	57,407	67,000	68,694	71,721	76,728	88,000

※ 소각은 시설이 대용량으로 설치비가 적으나 운영 시에 많은 비용이 소요되며, 탄화는 다른 처리방법에 비하여 처리단가가 높음

※ 현재 설계 중이거나 공사 중인 시설에 대한 분석결과도 건조시설 설치비가 가장 낮게 나타남

슬러지를 연료화할 때 고려할 점은 연료로 사용해서 얻는 에너지의 가치가 연료화처리에 투입되는 비용과 연소 부산물 처리의 비용보다 커야 한다는 것이다. 별도의 발전용 연소시설을 설치하지 않고 기존의 화력발전소에서 연료로 사용된다면 연료사용 시 발전을 위한 투입비용은 무시할 수 있을 것이다. 만일 생산되는 에너지는 작고 연소부산물 처리의 비용이 크다면, 화력발전소가 하수처리장으로부터 슬러지연료를 구매하는 것이 아니라 하수처리장이 비용을 들여서 화력발전소에서 소각시켜 달라고 요청해야 할 것이다. 이렇게 되면 연료화의 개념보다는 소각의 개념에 가깝게 된다.



〈그림 2-10〉 하수슬러지 연료화의 물질 및 에너지 수지 개념도

따라서 위에 예를 든 것처럼 건조시설 설치 운영비만을 고려하는 것이 아니라 총괄적인 과정에서 비용편익분석이 실시되어야 한다. 또한 생산된 연료의 품질이 나빠서 발열량이 너무 낮거나, 취급이 불편하거나, 연료사용 시 기존의 연료보다 유해가스가 많이 배출되거나 하면 연료로 사용되지 못할 우려가 존재하므로 연료의 품질을 높이는 방안을 연구해야 한다.

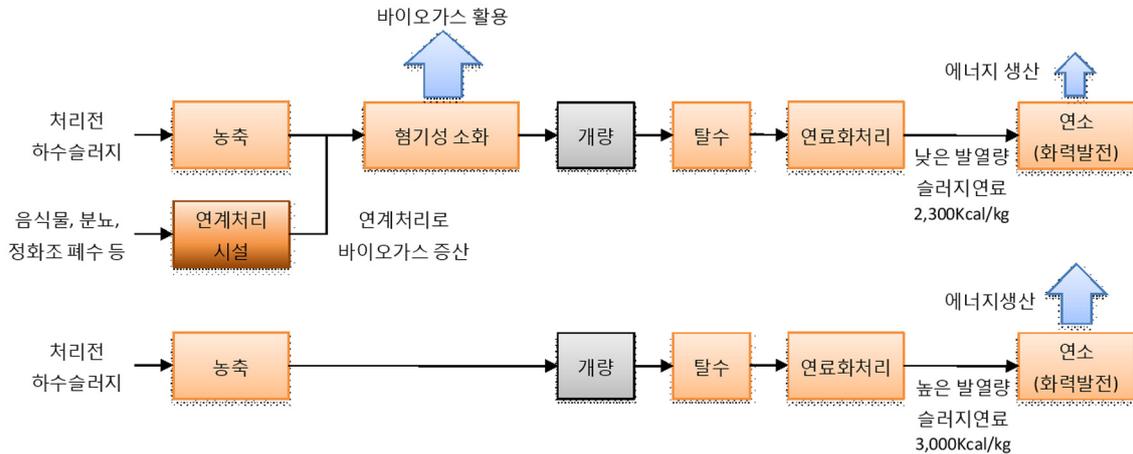
연료의 품질에서 가장 중요한 것은 발열량이다. 소화하지 않고 탈수한 슬러지의 발열량(저위발열량 기준)은 대략 3,000kcal/kg이고 소화시켜 탈수한 슬러지의 발열량은 대략 2,000~2,300kcal/kg이다. 이 때문에 2009년 정부계획에서는 가급적 슬러지를 소화시키지 않고 연료화하여 발열량을 높이는 것이 바람직하다는 의견을 내 놓았다.

폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획 p.110

- 연료화를 전제로 하는 하수처리장은 소화조 설치 또는 소화조 효율 개선사업 대상에서 제외
 - 소화조 신규설치 및 효율 개선사업 등은 화력발전소 혼소 이외의 방법으로 육상 처리가 가능한 지역 등에 대하여 제한적으로 추진
 - ※ 소화조를 거친 슬러지는 유기물 분해(약 50%)로 인해 발열량이 낮아져 연료화 추진 곤란
- 하수슬러지 에너지화 촉진을 위한 제도적 기반 조성
 - 하수슬러지의 화력발전소 연료로의 사용, 바이오가스의 자동차연료 및 도시가스로의 사용이 가능토록 관계법령 개정 추진
- ☞ 하수슬러지 연료 3,000kcal/kg, 무연탄 4,600kcal/kg

그러나 슬러지를 소화시키지 않으면 도시가스에 근접하는 발열량을 가지고 있는 훌륭한 에너지원인 바이오가스를 생산할 수 없다. 슬러지의 혐기성소화는 바이오가스 생산뿐만 아니라 감량화에 크게 기여하고 있고, 근래에는 유기성폐기물(분뇨, 음폐수 등)과의 병합처리를 위해서도 활용이 용이한 장점이 있다. 따라서 슬러지 연료화 추진을 위해서 단순 비교에 의한 슬러지 연료화의 장점만 부각시키는 것이 아니라, 슬러지의

혐기성소화를 안 할 때 잃게 될 손실도 반드시 고려해야 한다. 현재의 기술력과 시장성, 환경영향 등을 모두 포괄하고, 관련되어 있는 여러 공정들에 대해서 종합적인 분석이 수행된 후, 신중한 정책 추진이 필요할 것이다.



〈그림 2-11〉 하수슬러지의 연료화 처리 과정 비교

앞선 에너지 대책 실행계획에서는 간과되었던 요인을 환경부도 인식하여 2011년 “하수슬러지 처리시설 설치 운영 지침서”에서는 ‘최종부산물에 대한 처리비용을 운영비에 포함하여 검토할 것’과 ‘운영비가 낮더라도 부산물 처리비용이 높은 경우 경제성을 재검토할 것’을 가이드라인으로 제시한 것은 중요한 발전이다.

(2) 바이오가스

① 바이오가스의 개념

바이오가스(Bio Gas)는 유기물이 혐기성상태(Anaerobic State)에서 미생물에 의해 분해되어 발생하는 가스의 총칭이다. 동식물의 시체, 가축 분뇨, 음식물 쓰레기, 유기성 슬러지 등은 메탄발효를 통해 가연성 가스로 분해될 수 있다. 이 과정에서 얻어지는 가연성 가스를 바이오가스라고 부른다. 바이오가스는 버려지는 물질을 이용하여 유가(有價)의 연료를 얻을 수 있다는 점에서 경제성이 있으며, 화석연료의 사용을 일부분 대체할 수 있다는 점에서 온실가스 배출을 저감시킬 수 있다는 장점이 있어 이의 활용을 위해 많은 노력을 하고 있다.

이 가스의 조성비는 유기물의 종류, 혐기소화조건에 따라 약간의 차이가 있으나, 대체로 주요성분인 메탄(Methane, CH₄, 약 50~60%), 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂, 약 30~40%), 암모니아(Ammonia, NH₃)가 함유되어 있고, 미량으로 황화수소, 질소, 수소, 산소, 일산화탄소, 실록산(Siloxane) 등이 함유되어 있다. 이 성분들 중에서 메탄, 수소, 일산화탄소는 가연성분이어서 연료로 사용하여 에너지를 얻을 수 있다. 바이오가스의 저위발열량은 5,000~5,500kcal/Nm³ 정도이다²⁰⁾. 이 가스를 난방용, 발전용 혹은 가정 주방연료로도 사용할 수 있다. 바이오가스는 정제, 개질과정을 통해 천연가스처럼 압축되어 자동차연료로 사용될 수 있으며 열병합발전이나 연료전지의 원료로도 사용될 수 있다.

바이오가스 생산에 관심이 높은 분야는 주로 매립가스(Ladfill gas, LFG) 활용, 가축분뇨 처리, 음식물쓰레기 처리, 하수슬러지 처리 등이다. 이것은 원료물질에 의해 분류한 것인데, 이 원료들은 대체로 과거에는 이용가치가 낮은 저급의 에너지원으로 취급되었다. 근래에는 이 물질들을 환경적으로 안전하게 처리하기 어려운 문제를 인식하게 되었고, 저급의 에너지원으로부터 경제적으로 에너지를 생산하는 기술들이 많이 발전하게 되었다.

② 하수처리장에서의 바이오가스 생산

과거에 하수처리의 슬러지처리 계통에서의 혐기성 소화는 하수 중의 오염물질이 제거되면서 발생하는 슬러지의 양을 줄여서(감량화) 수송비용을 절감하고, 최종처분(매립 혹은 해양투기) 단계에서 악영향을 줄이기 위해 안정화시키는 것이 가장 큰 목적이었다. 소화과정 중에서 부산물로 발생하는 가스는 소화조 가온을 위해 보일러 가동 연료로 사용하고 남은 양은 소각시켜 버렸다. 소화가스를 이용하여 발전을 하는 것은 부식성 가스의 제거 문제, 운전의 안전성 문제 등 때문에 오히려 비경제적이었다. 그러나 갈수록 에너지 가격이 상승하고 있고, 화석연료의 고갈 위기가 심각하게 인식되고 있으며, 대체 에너지원 개발의 요구가 높아지면서, 소화가스를 처리하는 기술들과 소화가스 발생량을 증가시키는 기술들도 많이 개발되었다. 이에 따라 소화가스는 소화과정 중 어쩔 수 없이

20) 메탄의 저위발열량은 약 8,500kcal/Nm³

발생하는 또 다른 부산물이 아니라, 소화과정의 주 생산물로 인식이 되고 있다. 주 생산물의 생산을 증가시키기 위해서는 소화효율을 높이는 방법이 강구되어야 하고, 소화조 효율을 높이면 슬러지의 감량화와 안정화가 자연적으로 이루어지는 특징이 있다. 슬러지처리의 주요 목적인 감량화, 안정화, 자원화가 동시에 달성되는 것이다. 바이오가스라고 불리는 것은 버려지는 폐기물에서 가치있는 에너지를 생산하여 환경을 살리는 훌륭한 재생에너지라는 의미가 강조되어 있는 것이다²¹⁾.

다음의 표에서 보는 바와 같이 2007년까지 하수처리장의 에너지자립률은 0.8%에 불과하였는데 그 중에서 0.72%가 소화가스 발전으로 에너지자립에 절대적으로 큰 비중을 차지하고 있다.

〈표 2-11〉 2007년 전국 하수처리시설의 전력생산량 및 자립률

소계	전력생산량(MWh/년)				자립률(%)
	소화가스발전 (6개소)	소수력발전 (5개소)	풍력발전 (1개소)	태양광발전 (7개소)	
14,998	13,065 (0.72%)	809 (0.04%)	3 (0.00%)	1,120 (0.06%)	0.8

하수슬러지관리 종합대책(수정), 환경부, 2008

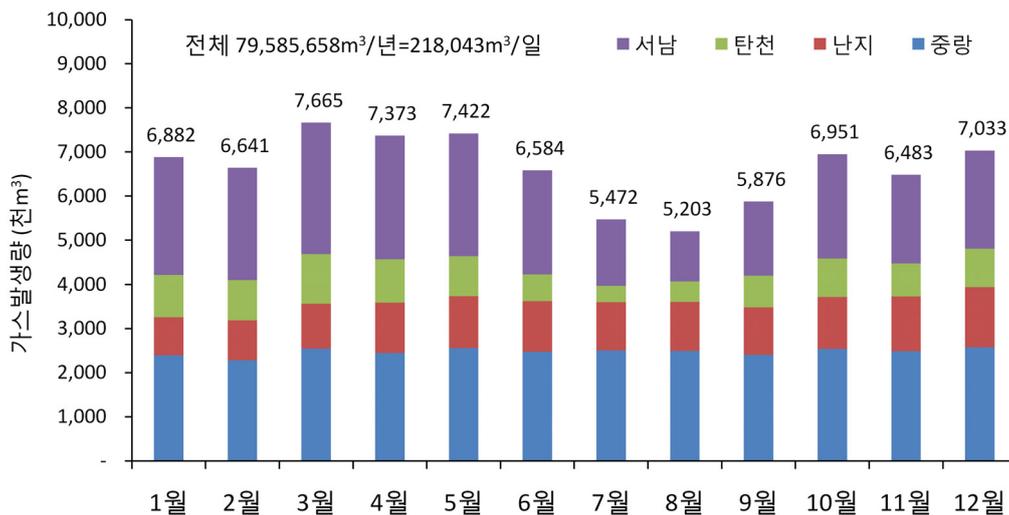
2008년에 환경부가 발표한 “하수슬러지관리 종합대책(수정)”에 의하면, 소화조 용량 4,500m³ 이상의 33개 공공하수처리시설을 대상으로 소화조 효율개선 사업 및 가스이용 사업을 시행하기로 하였다. 이들 처리시설의 바이오가스 발생량은 325,100m³/일에 이르고 이를 발전용 연료 등으로 사용하면 연간 232억원의 연료대체효과 및 36억원 상당의 온실가스 배출권이 발생한다고 보고하였다.

21) 과거에는 소화과정에서 발생하는 가스라고 해서 ‘소화가스’ 혹은 부산물로 생성되는 가스라고 해서 ‘부생가스’로 불리웠으나, 근래에는 물질순환과정 중에 있는 생물체를 원료로 하여 생산되는 가스라는 의미를 가지고 있으면서 환경친화적인 느낌을 주는 ‘바이오가스’라는 명칭으로 많이 불리고 있다.

〈표 2-12〉 소화조 효율개선사업 대상 공공하수처리시설의 바이오가스 발생량(2007)

시·도별	처리장명	가스발생량(m ³ /일)
계	33개소	325,100
서울(4)	중랑, 탄천, 난지, 서남	165,490
부산(3)	수영, 강변, 남부	32,810
대구(4)	달서천, 신천, 서부, 북부	25,880
인천(2)	가좌, 송기	6,520
광주(2)	광주 제1, 2	18,650
대전(1)	대전	8,395
울산(1)	용연	8,415
경기도(7)	수원, 성남 등	33,154
강원도(2)	춘천, 원주	6,020
전북도(1)	군산	6,932
전남도(1)	목포	667
경북도(3)	포항, 김천, 구미	5,759
경남도(2)	마산, 진주	6,408

2011년 서울시 4개 하수처리장(중랑, 난지, 탄천, 서남물재생센터)의 소화조에서 발생한 바이오가스의 양은 연간 79,585,658m³으로 일평균으로는 21만8천m³/일에 이른다. 2007년도에 16만5천m³/일이었던 것에 비교하면 약 30% 증가했음을 알 수 있다.



〈그림 2-12〉 2011년 서울시 4개 하수처리장에서 바이오가스 발생량

앞 절 하수슬러지의 연료화에서 언급한 바와 같이 2009년에 발표한 정부의 “폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획” 중의 하수슬러지 에너지화 확대 계획에서는 연료화를 지나치게 강조한 나머지 슬러지의 혐기성소화를 중요시하지 않는 방안이 제시되었다. 하지만 다행히 2010년도 “에너지자립화 기본계획”에서는 하수슬러지 소화효율 개선을 통해 바이오가스를 활용하는 방안의 여러 장점들이 강조되면서 추진계획들이 수립되었고²²⁾, 2011년 “하수슬러지 처리시설 설치운영지침”에서는 ‘슬러지 처리시설 용량은 하수처리시설 에너지자립화와 연계하여 감량화 방안을 우선적으로 검토하여 감량화 후 발생하는 하수슬러지량으로 시설용량을 결정’해야 한다는 가이드라인이 제시되었다²³⁾. 하수슬러지로부터 바이오가스를 이용하는 방법의 장점을 요약해보면 다음과 같다.

- 하수슬러지는 생활에서 발생하여 양적, 질적으로 안정적이다(원료 측면에서). 이미 하수관거를 통해 하수가 처리장으로 이송되고 있고, 슬러지처리시설이 하수처리장 내에 공존하기 때문에 수집을 위한 별도 에너지가 필요 없는 집약형 유기성 자원이다.

- 하수처리장은 바이오매스(유기성폐기물: 하수슬러지, 분뇨, 음폐수 등)를 에너지로 전환할 수 있는 소화조 등의 처리 공정 도입이 용이하다. 유입하수의 낮은 농도문제, C/N비의 불균형 문제 등으로 하수슬러지만으로는 효율적이지 않을 수 있으나, 기존의 시설을 활용하여 유기성폐기물을 이용해 슬러지 농도를 높이면서 C/N비를 맞출 수 있고, 바이오가스 증산을 시도할 수 있다.

- 기존 하수처리 공정과의 연계를 통해 바이오매스의 처리에 따라 발생하는 폐수의 처리도 용이하므로 주변지역 바이오매스의 효율적인 통합처리가 가능하다.

- 개질(고질화)처리를 하면 열병합발전, 도시가스, 연료전지등에 활용할 수 있어 부가가치와 활용도를 높이기 용이하다.

- 가스 발생량 2,000Nm³/일 이상인 하수처리장 38개소에서 연간 299GWh 발전이 가능한 것으로 추정된다.

22) 에너지 자립화 기본계획, 환경부, 2010

23) 하수슬러지 처리시설 설치·운영 지침, 환경부, 2011

환경부는 실행계획으로 소화가스 이용 에너지 회수 확대 계획을 수립하였는데, 소화조 설치 시설에 대해서는 소화가스 발생량 2,000Nm³/일 이상인 26개소에서 2010년부터 2015년까지 소화가스 이용 사업을 추진함으로써 연간 157GWh의 전력을 생산하겠다고 계획하였으며, 소화조 가온, 열병합 발전, 냉난방 연료, 정제 판매(차량용, 도시가스연료) 등 적용시설별 공급 여건 및 용도를 고려하여 추진하겠다고 밝혔다. 또한 소화조 미설치 시설에 대해서는 하수처리용량 10만톤/일 이상이면서 소화조 미설치 시설에 소화조 신규 설치를 추진하겠다고 밝혔다.

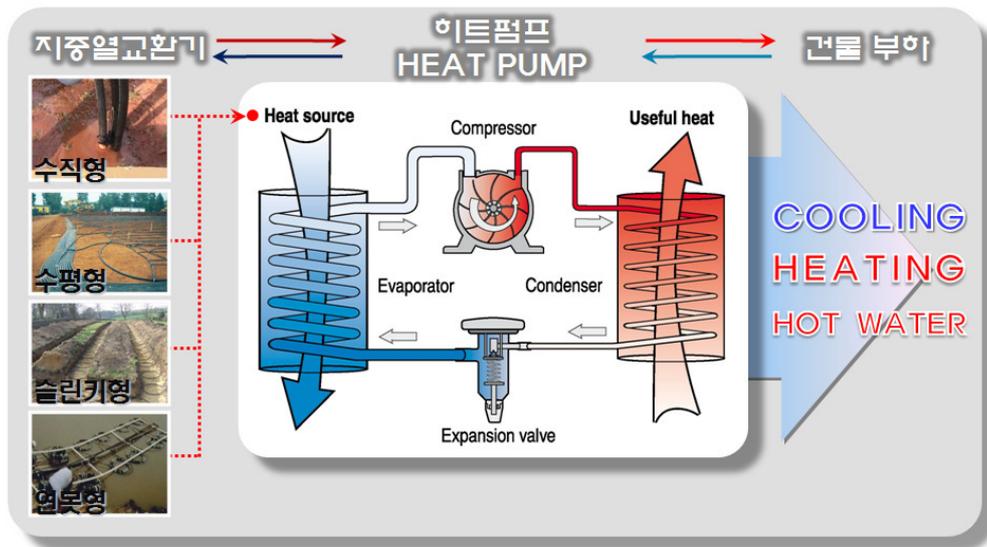
이와 더불어 환경부는 소화가스 발생량 증가 대책을 추진하여 소화효율 개선사업을 지속적으로 추진하고, 소화가스 발생량 증가를 위한 음식물 및 분뇨 등 고함수 바이오매스의 연계 처리를 추진하겠다고 말했다. 뿐만 아니라 소화조 최적 운전 매뉴얼 마련, 운영·관리 기술지원 및 교육 실시, 전 공정 혐기성 하수처리기술, 슬러지 전처리 기술 등 소화가스 발생량을 증가를 위한 기술을 개발하여 적용하겠다고 발표했다.

3) 하수처리장의 수처리계통에서 발생하는 에너지원

(1) 처리수의 잠재열 이용 - 하수열 이용 방법

하수열을 열펌프(heat pump, 히트펌프)를 이용하여 냉난방에 이용하겠다고 하는 아이디어는 원래 지열에너지 활용의 한 분야로 연중 수온이 비슷한 지하수를 열원(heat source) 및 열배출원(heat sink)으로 사용하는 지하수열원 열펌프(groundwater-source heat pump) 기술에서 유래된 것이다. 지하수는 연중 수온이 거의 일정하고 깨끗하기 때문에 이용하기에 매우 좋은 장점이 있다. 물펌프가 낮은 위치에 있는 물을 높은 위치로 올리는 것과 마찬가지로 열펌프는 낮은 온도에서 열을 흡수하여 높은 온도 쪽으로 열을 배출시킨다. 열기관이 고열의 에너지원에서 동력을 생산하고 저온의 폐열을 생산하는 반면, 열펌프는 저열의 에너지원에 동력을 주어 고열을 생산한다. 에어컨은 더운 실내의 공기에서 열을 흡수하여 시원하게 만들고 더 더운 실외로 열을 배출시킨다. 열펌프 난방기는 추운 외기에서 열을 흡수하여 실내에 공급한다. 공기방식 열펌프는 열지 않는 정도의 기후에서는 사용할 수 있으나 너무 추운지역에서는 효율이 급격하게 낮아지는 단점이 있다. 외부의 실외기가 얼어버리기 때문이다. 그래서 열지 않는 비교적 따뜻한 지하수

혹은 하수의 열을 사용하면 훨씬 효율을 높일 수 있는 것이다. 하수는 그 열을 활용하든 안하든 처리해야 하며 처리 후에는 방류해야 한다. 그 하수를 이용한다고 할 때 시설투자비는 소비되겠지만, 일단 운영이 되기 시작하면 에너지원의 구입비용이 들지 않는다는 것이 일반적인 에너지원(전력 및 화석 연료)과의 차이점이다. 하수열의 이용은 다음 그림에 나타낸 지중열교환을 지하수 대신 처리된 하수로 이용하겠다는 것이다.



자료 : 신재생에너지백서, 에너지관리공단, 2010

〈그림 2-13〉 히트펌프의 원리

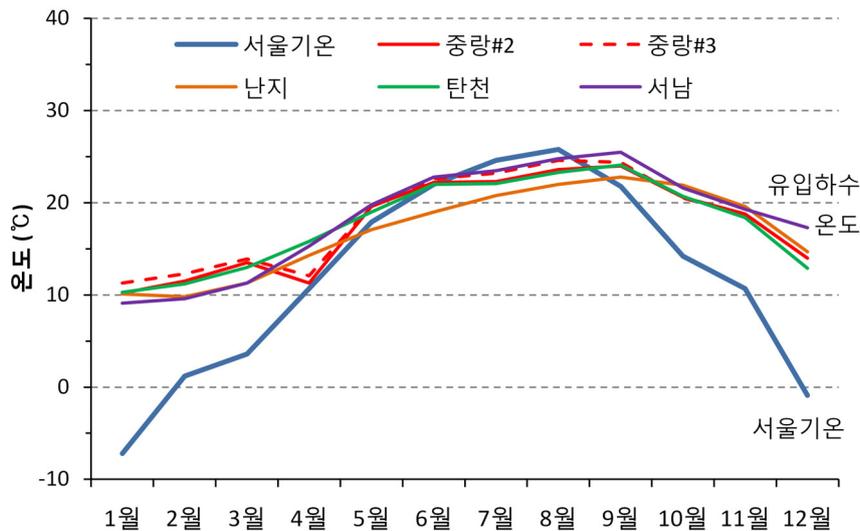
환경부는 하수열 이용 계획으로 2010년부터 단기적으로 열펌프 설치 확대를 통해 하수열을 관리동 냉난방 시스템 및 소화조 가온용으로 이용하는 방안을 추진하겠다고 계획하였고, 중·장기적으로 열수요지가 근접한 처리시설을 중심으로 하수 및 하수처리수를 지역 냉난방 시스템의 열원으로 공급을 확대하는 것을 검토하기도 하였다. 이와 함께 하수열 확대를 위한 제도, 기술개발 및 하수열 대가 산출기준 등을 마련하기로 하였다.²⁴⁾

하수의 열을 이용할 때의 장점은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

24) 에너지 자립화 기본계획, 환경부, 2010

○ 열교환 효율이 우수하고 열원으로 안정적 :

하수는 지하에 매설된 관거 내를 흐르고 있으므로 외기온의 영향을 받는 것도 적으며, 그림에 나타난 바와 같이 대개 동절기 10℃에서 하절기 25℃ 정도이고 일교차도 2℃ 정도로 연간을 통하여 수온이 안정되어 있다. 또한 겨울철엔 외기온보다 8~18℃ 정도 따뜻하고, 여름철 외기온보다 1~4℃ 정도 시원하다. 하수를 열원으로 한 열펌프는 공기열원 열펌프보다 냉매와의 온도차가 크게 되므로 열교환 효율이 좋다고 알려져 있다.²⁵⁾



〈그림 2-14〉 서울의 하수처리시설 유입하수의 온도와 기온(2011)

○ 막대한 부존열량 :

25) 환경부의 “에너지 자립화 기본계획(2010)”에 의하면 ‘하수는 계절에 영향을 받지 않고 안정된 양·온도를 유지하므로 히트펌프를 활용하여 여름에 냉열원, 겨울에 온열원으로 이용 가능하고 하수관망이 도시 내에 펼쳐져 있어 에너지 주수요지인 도시 내 추가 열원으로 활용 잠재력이 광범위하다’고 설명하였으나 계절에 영향을 받지 않는 것이 아니라 적게 받는 것이며, 도시내에 펼쳐져 있는 하수관거의 하수를 직접 이용할 수 있다기보다 처리된 하수를 히트펌프의 냉열원 및 온열원으로 사용할 수 있다고 보아야 한다. 처리되지 않은 하수는 각종 오염물질과 혐잡물 등으로 인해 냉난방시설에 직접 사용하기는 부적절하다. 따라서 도시 내에 하수관거가 펼쳐져 있어 활용 잠재력이 있는 것이 아니라, 하수처리장이 도시 내에 위치하기 때문에 하수처리장 내의 수요량을 초과하여 생산된 에너지를 처리장 외부로 공급할 경우에도 거리가 멀지 않다는 의미이다.

전국에서 하수처리수로 배출되는 수량은 2009년 연간 68억 m^3 , 2010년 연간 70억 m^3 에 이르고 있으며²⁶⁾, 전국 하수처리수 총량을 온도차 5 $^{\circ}C$ 로 가정한 부존에너지량은 350만 TOE에 이른다²⁷⁾²⁸⁾.

○ 열원이 열수요지에 근접하여 존재 :

하수처리장은 대개 도심부에 위치하고 있으므로, 열원과 열수요처가 근접하고 있어 열수송을 위한 배관비용이 적게 소요되어 경제성면에서 유리하다.

○ 물 절약 효과 :

하수를 열원으로 이용할 경우는 원칙적으로 냉각탑이 불필요한데, 이는 냉각탑을 사용하면, 물을 증발시킬 때 기화잠열에 의해 냉각수를 차갑게 하기 때문에 증발 손실분을 수도물로 보급할 필요가 있으나, 하수열을 이용할 때는 냉각탑이 필요없어 물을 절약할 수 있다.

○ 열섬(heat island)화 현상 배제 :

공기열원의 경우 냉난방에 따른 배열은 공기열원기 설치장소 근방의 대기로 국부적으로 배출되지만, 하수열 이용의 경우에는 지하에 매설된 관거를 통하여 확산되기 때문에 열섬화 현상을 피할 수 있다.

(2) 처리수의 위치에너지 활용 - 소수력발전

① 소수력발전의 개념

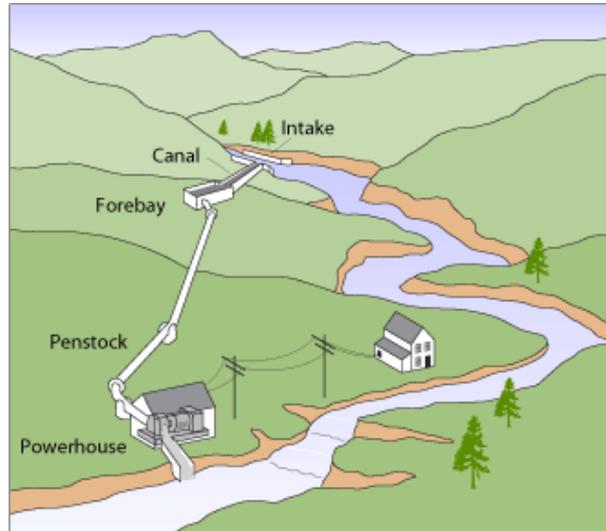
소수력발전(small hydropower generation)은 대개 설비 용량이 15MW(혹은 20MW) 미만의 소규모 수력 발전을 의미한다. 소수력발전은 일반적인 대규모 수력발전과 원리면에서는 차이가 없으나, 대규모 수력발전이 환경에 부정적 영향을 미치는 반면, 소수력발전은 국지적인 지역 조건과 조화를 이룰 수 있도록 규모가 작고 기술적으로 단순하게

26) (2009) 하수도통계 2010 및 (2010) 하수도통계 2011, 환경부

27) TOE(Ton of Oil Equivalent, 석유환산톤) : 다른 종류의 에너지원들을 원유1톤의 발열량을 기준으로 표준화한 값으로 1toe=10Gcal=107kcal \approx 4.739MWh(발전기준, 에너지법시행기준)이다. 원유의 발열량이 산지마다 조금씩 다르고 기관마다 약간 다른 정의를 한다. IEA/OECD는 1TOE=41.868GJ(기가 줄)=11.63MWh로 정의한다.

28) 실제 이용량은 설비의 규모와 효율에 따라 달라진다. 에너지 자립화 기본계획, 환경부, 2010.1에서는 하수열의 이용 가능한 열량을 23만TOE라고 보고하였다.

발전을 하는 차이점이 있다. 소수력은 낙차력이 좋으나 수량이 많지 않은 곳과 수량은 많으나 낙차가 적은 곳에서 활용된다.



〈그림 2-15〉 낙차가 크고 수량이 적은 소수력 발전의 예

외국에서는 소수력을 설비용량에 의해 세분하여 다음과 같이 구분하기도 한다.

- Micro hydropower : 100kW 미만
- Mini hydropower : 100 ~ 1,000kW
- small hydropower : 1,000 ~ 10,000kW

우리나라에서는 대체로 설비용량이 3,000kW 이하의 수력발전소를 소수력이라고 지칭하고 있다. 소수력발전은 공해가 없는 청정 에너지이며 다른 재생 가능한 에너지원에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 개발 가치가 큰 부존 자원으로 평가되어 구미 선진국을 중심으로 기술 개발과 개발 지원 사업이 경쟁적으로 활발하게 진행되고 있다. 소수력 자원의 적극적인 개발은 에너지원의 개발 차원뿐 아니라 경제·사회적으로, 전력 수요 급증 시의 부하 평준화 효과 및 석유 수입 대체, 민간 주도의 반영구적 공익 사업으로서 환경 친화적인 에너지원의 개발을 통한 지역 개발의 촉진과 이로 인한 경제적 파급 효과의 극대화, 관련 기술의 수출 산업화 등의 부수적인 효과를 거둘 수 있다고 평가되고 있다.

우리나라 소수력자원의 조사를 통하여 도출된 결과에 의하면 대부분의 소수력발전

입지가 자연낙차(自然落差)가 크지 않다는 것을 알 수 있으며, 자연낙차가 큰 소수력발전입지는 매우 제한되어 있기 때문에 낙차가 작은 저낙차 소수력발전소의 건설에 노력을 기울일 필요가 있다.

소수력발전의 장점과 단점은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

○ 소수력 발전의 장점 :

- 대수력 발전에 비해 친환경적이다.
- 투자비에 비해서 연 유지비가 아주 적다.
- 비교적 설계 및 시공기간이 짧다.
- 주위의 인력이나 자재를 이용하기가 쉽다.
- 민간 주도의 반영구적 공익 사업으로 시행하기에 유리하다.

○ 소수력 발전의 단점 :

- 초기 투자비용이 많다.
- 저낙차이면서도 고낙차 소수력 발전기에 비하여 효율이 뒤지지 않는 저낙차용 수차의 개발이 시급하다.

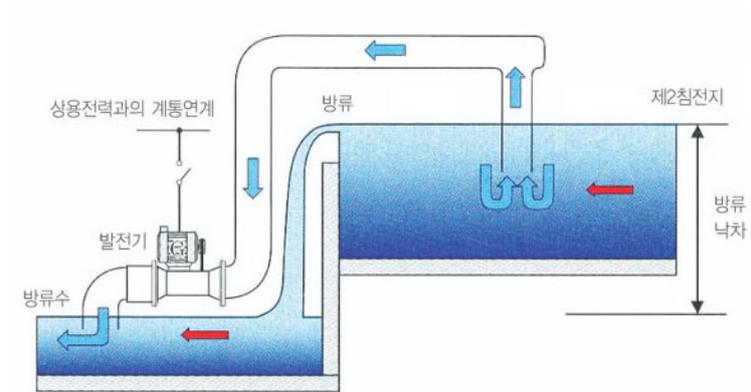
② 하수처리장에서의 소수력발전

하수처리장에서 처리수는 기본적으로 방류수역의 수위보다 높은 위치에서 방류하도록 되어 있다. 하수처리장의 건설 시에 수리계산은 방류수역의 수위를 결정하는 것으로부터 시작해서 각 처리공정의 수위를 역으로 계산해 나가는 방식을 사용한다. 계획방류수위는 대체로 해당 하천의 계획고수위 혹은 해당 해역의 최고조수위를 100년 확률 강우강도를 고려하여 정하게 된다. 지나치게 높은 계획고수위일 때에도 자연유하로 방류할 수 있도록 건설하려면 하수처리장의 지반고를 상당히 높여야 하고 이를 위해서 항상 유입펌프를 고양정으로 운전해야 할 필요성이 생긴다. 이렇게 되면 오히려 비경제적이기 때문에, 경제성을 고려하여 대부분의 시간에는 자연유하로 방류할 수 있는 높이를 정한다. 그리고 방류수역의 수위가 너무 높아지는 특별한 경우에는 침수되지 않도록 방류펌프를 가동해서 처리수를 방류시키는 방법이 더 경제적이다.

이렇게 방류되는 처리수는 방류수역의 수위가 너무 높아지는 특별한 경우를 제외하

면, 대부분의 시간에 충분한 낙차를 가지고 방류되므로 유효한 위치에너지를 가지고 있는 것이다. 이 위치에너지를 이용하여 소규모로 발전을 하려는 것이 하수처리시설에서의 소수력발전이다.

일본 도쿄도 가사이물재생센터는 하루 처리능력이 40만 m^3 로 활성슬러지법을 이용한 하수처리 시설인데, 이 처리장의 방류구는 수면으로부터 수 미터 높이에 설치되어, 낙차를 이용한 수력발전을 하는데 사용하고 있다. 발전기의 출력은 27kW로, 연간발전량은 일반가정의 20세대 분 정도라고 보고되었다²⁹⁾.



〈그림 2-16〉 하수처리장의 처리수 방류 시 소수력발전 개념도

환경부가 발표한 “에너지 자립화 기본계획”에서는³⁰⁾ 소수력의 잠재력으로 방류수 낙차가 2m 이상이고 발전설비 용량 10kW 이상인 15개 시설에서 연간 11GWh 발전이 가능하다고 언급하였다. 환경부는 추진계획으로 2010년부터 2015년까지 방류수 낙차 2m 이상, 발전설비 용량 10kW 이상인 7개소에 소수력발전을 도입하여 연간 6GWh의 전력을 생산하겠다고 계획하였다.

29) [선진 환경시설 견학기] ‘2011 도쿄 하수도전시회’ 및 도쿄도 하수처리장 견학을 다녀와서, 워터저널, 2011.8.31.

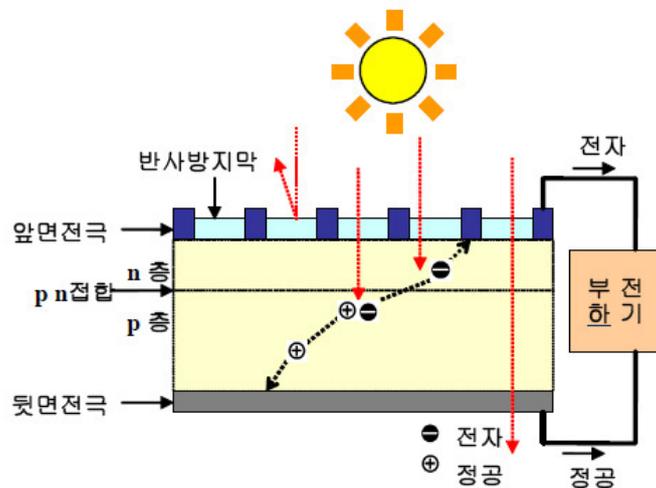
30) 에너지 자립화 기본계획, 환경부, 2010.1

4) 하수처리장 공간을 활용한 에너지원

2010년 환경부는 “에너지 자립화 기본계획”에서 하수처리시설의 에너지 잠재력의 하나로 하수처리장 공간을 활용한 태양광 이용, 풍력 이용방법을 제시하였다. 엄밀히 말하면 태양광이나 풍력 에너지를 이용하는 방법은 하수처리시설의 특성으로 볼 수는 없으나, 하수처리시설에서 이용할 수 있는 방법 중의 하나로 이해할 수 있다.

(1) 태양광 이용

태양에너지는 청정하고 재생 가능한 에너지원으로 태양의 빛에너지를 이용하여 인간의 실생활에 활용하는 태양광에너지기술과 태양의 열에너지를 이용하여 활용하는 태양열기술로 크게 분류된다. 태양광에너지기술은 태양이 가지고 있는 광전자에너지를 전기 에너지로 변환하는 발전기술로 태양광발전기술이라고 하며 일반적으로 태양광기술로 일컬어지고 있다. 태양광발전기술은 p-n접합의 반도체 특성을 갖는 발전소자인 태양전지를 가지고 설명할 수 있다.



자료 : 신재생에너지백서, 에너지관리공단, 2010

〈그림 2-17〉 태양전지의 기본 구조 및 작동 원리

태양전지는 p형과 n형 반도체를 접합시키고(‘p-n 접합’) 앞뒤 표면에 금속전극을 붙여 제작한다. 빛이 반도체에서 흡수되면 전자와 정공 쌍이 생성되고 전자와 정공은 p-n 접

합부에 존재하는 전기장의 영향으로 서로 반대 방향으로 흘러간다. 따라서 도선으로 연결된 외부 회로에 전기가 발생하게 된다.

또한, 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 가급적 많은 빛이 반도체 내부에서 흡수되도록 하고, 빛에 의해 생성된 전자와 정공 쌍이 소멸되지 않고 외부 회로까지 전달되도록 하며, p-n 접합부에 큰 전기장이 생기도록 소재 및 공정을 설계해야 한다. 태양광발전 기술은 태양전지 셀(어레이), 태양전지에서 발전한 직류를 교류로 변환하는 전력변환장치인 PCS(Power Conditioning System), 전력저장기능의 축전장치, 시스템 제어 및 모니터링과 부하로 구성된 발전시스템기술이다. 또한, 태양광기술은 원료(폴리실리콘)기술, 기관(잉곳/웨이퍼)기술, 태양전지 셀 공정기술, 모듈공정기술, PCS기술, 시스템기술 등으로 기술의 가치사슬(Value Chain)을 형성하고 있어 원천소재기술에서 구성재료, 제조장비, 공정기술 등의 융합복합기술로 산업의 파급효과가 기대되는 21세기 저탄소 녹색 성장을 주도할 신성장동력의 녹색산업기술이다.

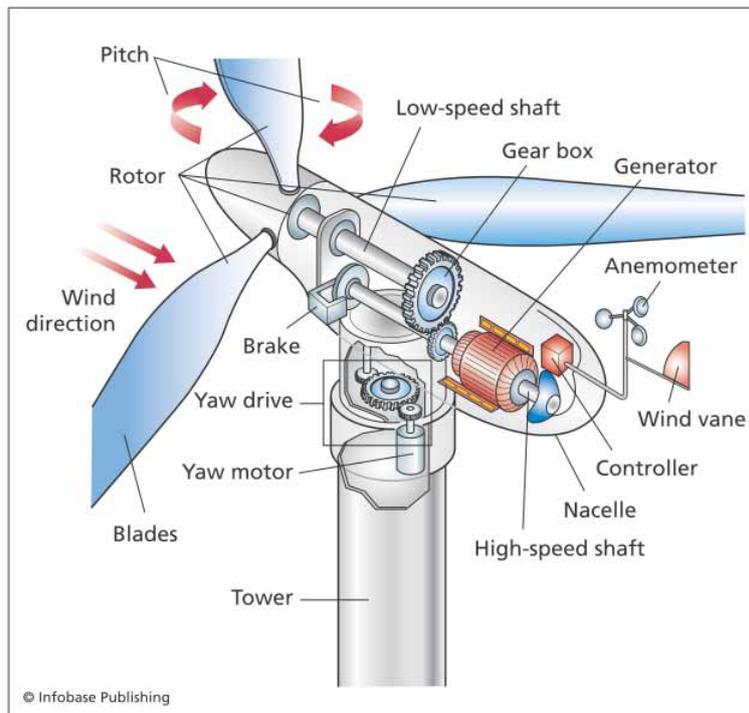
환경부의 “에너지 자립화 기본계획”에 의하면 하수처리시설의 침전지, 생물반응조, 관리동 지붕 등에 태양광 발전을 도입하여, 하수처리시설 면적의 15%를, 설치면적 기준으로 344개소에 태양광 발전을 하게 되면 연간 410GWh의 전력을 생산할 수 있다. 환경부는 실시계획으로 2010년부터 2030년까지 344개 하수처리시설의 침전지, 생물반응조, 관리동 지붕 등에 태양광 발전을 도입하여 연간 390GWh의 전력을 생산하겠다고 계획하였다.



(그림 2-18) 소화조의 지붕에 태양광집열판을 설치한 사례(Alvarado water treatment plant, 샌디에고)

(2) 풍력 이용

풍력발전은 바람이 가지는 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 전력을 생산하는 시스템이다. 인류는 바람을 에너지원으로 다양하게 활용하였다. 고대부터 양수와 제분의 용도로 사용되었던 풍차는 바람의 힘을 단지 기계적 에너지로 변환하는 장치이다. 전기의 발견과 발전기의 발명으로 인하여 바람을 이용하여 전력을 생산하는 풍력발전기가 등장하게 되었다. 풍력은 신재생에너지의 대표적인 에너지원으로 재생 가능한 에너지 자원을 거의 무한정 이용할 수 있고 이산화탄소나 방사선폐기물과 같은 환경오염물질을 배출하지 않는 무공해 천연 에너지이다. 신재생에너지원 가운데 경쟁력이 가장 높은 에너지원이며, 기존의 천연가스나 석탄에 의한 발전단가에 근접하고 있는 수준이다.



자료 : 신재생에너지백서, 에너지관리공단, 2010

<그림 2-19> 풍력발전기의 구조(수평축 풍력발전 시스템)

풍력발전 시스템은 크게 풍력발전기 구조물 시스템과 풍력발전기를 제어하는 제어시스템으로 나뉘어진다. 풍력발전기 구조는 <그림 2-19>와 같이 바람이 가지는 에너지를 회전력으로 변환시키는 블레이드(blade), 블레이드를 연결하는 허브(hub), 회전력을 증속

기에 전달하는 주축(main shaft), 저회전 고토크의 회전을 고회전 저토크의 회전으로 변환하는 증속기(gearbox), 회전력을 전력으로 바꾸는 발전기(generator), 풍력발전기를 지지하는 타워(tower), 블레이드의 피치각을 조절하는 피치 시스템(pitch system), 나셀을 바람이 부는 방향으로 일치시키는 요 시스템(yaw system), 그리고 풍력발전기를 제어하는 제어/모니터링 시스템으로 이루어져 있다. 풍력발전시스템은 바람이 불어오는 방향에 대하여 로터의 회전축 방향이 평행하게 설치되는 수평축 풍력발전기와 바람이 불어오는 방향과 수직하게 설치되는 수직축 풍력발전기로 대별될 수 있다.

환경부의 “에너지 자립화 기본계획”에 의하면 도입 타당성 및 발전 가능량은 개별처리장의 풍황(풍속, 크기, 분포)에 좌우되나 풍황 조건이 좋은 처리시설 여유 부지에서 풍력 발전을 한다고 가정하고, 연평균 풍속 5m/s 이상인 46개소에서 풍력 발전을 하게 되면 연간 97GWh의 전력을 생산할 수 있다. 환경부는 시범사업을 통해 풍력 발전기의 규모별 경제성, 소음 및 풍황 조건 등을 고려한 적용 모델 도출 후 세부적으로 추진하겠다는 계획을 세웠고, 2010년부터 2020년까지 강가 및 해안가에 위치한 연평균 풍속 5m/s 이상인 43개소에 풍력 발전기 도입으로 연간 97GWh의 전력을 생산하겠다고 계획하였다.

5) 기타 자원화

여기에서 언급하는 기타 자원화는 엄밀히 말해서 에너지자원은 아니다. 그러나 자원으로 이용하면 이미 소요되고 있던 비용을 절감하거나, 새로운 수입원을 창출할 수 있다는 의미에서 유용한 자원으로 간주된다.

(1) 처리수 재이용

하수처리장의 처리수는 하천에 방류되면서 기본적으로 하천의 유지용수로서의 역할을 한다. 그러나 유지용수로서의 역할뿐만 아니라 다양한 수자원으로 간주하여 재이용을 할 수 있다. 처리된 하수를 그대로 방류하기보다 먹는 물과 같은 수질이 필요하지 않는 용도로 또는 쾌적한 물환경을 창출하기 위한 수원으로 이용할 수 있는 것이다. 예를 들어 공업용수, 농업용수, 공원이나 골프장 등의 조경용수, 건물 화장실의 세정용수,

청소용수, 세차용수 등으로 이용할 수 있다. 처리수의 온도는 겨울철에 외기온도보다 10℃가량 높기 때문에 용설용수로도 활용할 수 있다. 먹는 물 수준의 수질이 필요하지 않은 곳까지 먹는 물을 이용하게 되면 그만큼 상수도 비용이 소요되지만, 처리수를 재이용할 경우에는 해당 상수도 비용을 절감할 수 있다.

〈표 2-13〉 2010년 하수처리시설의 처리수 재이용 현황

시·도별	연평균 유입하수량 (천톤/년)	하수처리수 재이용현황 (천톤/년)	처리수 재이용률(%)
전국(2010)	6,845,663	743,479	10.9
서울특별시	1,657,240	47,266	2.9
부산광역시	539,576	60,972	11.3
대구광역시	424,387	116,060	27.3
인천광역시	250,876	55,024	21.9
광주광역시	228,377	14,646	6.4
대전광역시	205,040	2,898	1.4
울산광역시	173,097	10,477	6.1
경기도	1,612,825	191,745	11.9
강원도	185,647	19,046	10.3
충청북도	162,687	17,428	10.7
충청남도	176,429	51,865	29.4
전라북도	281,114	9,414	3.3
전라남도	155,638	28,192	18.1
경상북도	393,215	59,686	15.2
경상남도	349,081	54,667	15.7
제주특별자치도	50,436	4,093	8.1

자료 : 2010년 하수도통계, 환경부, 2011³¹⁾

처리수의 재이용을 위해 우선적으로 중요한 것은 처리수의 수질이 이용목적에 맞게 안전해야 한다는 것이다. 직접 음용하지 않는다 하더라도, 화장실 세정, 청소용, 세차용 등으로 사용 중에 포말 비산에 의한 악영향이 있을 수 있으므로 병원균이나 유해세균

31) 환경부가 발표한 2010년 하수도통계에서 시·도별 처리수 재이용현황은 취합자의 실수로 지역별 이용량을 잘못 기록하였음. 본 데이터는 이 오류를 수정한 값임.

등으로부터의 안전성이 보장되어야 한다. 또한 이용의 편리성을 위해 처리수를 적절한 양과 수압으로 배관을 통해 처리장 내의 각 수요처에 급수한다고 할 때 배관에 미생물이나 스케일이 쉽게 형성되지 않도록 해야 할 것이다.

각 광역시와 도별로 하수처리수의 재이용현황을 정리한 표에서 보면 충청남도는 약 30%를 재이용하고 있다고 보고된 반면, 대전은 1.4%밖에 재이용하지 않았다고 보고되었다. 서울도 2.9%밖에 재이용하지 않았다. 이런 것을 볼 때 하수처리수의 재이용을 적극적으로 강조할 필요가 있다고 생각된다.

(2) 인회수

하수처리는 기본적으로 유기물질(BOD 기준)을 제거하는 것을 1차적인 목표로 한다. 그리고 하수의 고도처리는 질소와 인까지 제거하는 것을 목표로 한다. 유기물질 중의 탄소는 미생물의 동화작용으로 수중에서 슬러지로 이동되어 제거되며, 일부는 미생물의 성장과 활동에 에너지로 사용되면서 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)로 분해되어 제거된다. 고도처리 중의 질소제거 기작은 유기물질 중의 질소를 질산화시키는 과정 중에서 탈질산화라는 과정을 거쳐 기체질소(N₂)로 방출시킴으로써 수중에서 제거시키는 것이다. 생물학적 인제거 기작은 인섭취 미생물로 하여금 혐기, 호기과정을 거치면서 인을 과량으로 섭취시키고 그 미생물을 수중에서 슬러지로 분리시켜 제거하는 것이다. 앞선 탄소, 질소와는 달리 인은 기체상태로 수계에서 분리시키는 방법이 없다. 따라서 수처리계통에서 인을 과량섭취하면서 인의 제거율을 높이지만, 슬러지처리계통에서 혐기성 소화를 하게 되면 미생물은 과량으로 섭취했던 인을 다시 방출한다. 슬러지처리계통의 혐기성 소화 탈리액, 소화슬러지의 탈수여액은 수처리계통으로 반송시켜 처리하게 되는데 여기에 고농도의 인이 다시 함유되어 수처리 공정의 인부하를 가중시키게 된다. 방류수에서 비롯된 인 부하가 하수 원수보다도 높아지기도 한다. 하수처리장으로 유입된 인의 운명은 처리수로 방류되든지, 슬러지에 함유되어 처분되든지 둘 중의 하나일 뿐이다. 처리수 방류 시에 수질기준을 만족시켜야 하므로 처리수 쪽으로는 기준치 이상의 인을 보낼 수 없다. 생물학적 인제거의 원리상 혐기성소화를 시키면서 슬러지가 인을 방출하지 않고 인을 고농도로 함유한 채로 최종처분되도록 할 방법도 없다. 인을 방출하지 않도록 혐기성 소화를 시키지 않고 응집제 처리법을 이용하면 감량화, 바이오가스 생산 등을 포기해

야 한다. 따라서 인제거에는 반드시 생물학적 과정 이외에 별도의 처리방법이 병행되어야 한다.

공공하수처리장은 2012년부터 다음과 같은 방류수 수질기준을 적용받게 되었다. 가장 염려스러운 항목은 총인으로, 강화된 기준을 달성하기 쉽지 않을 것으로 여겨지고 있다. 2010년 시설규모 500m³/일 이상인 공공하수처리시설에서의 유입수질 및 방류수질을 보면 평균적으로 76%의 인이 제거되었다고 보고되었다. 이 인은 어떻게 최종처분되었을까? 처분되는 탈수슬러지에서 총인농도가 측정되지 않으므로 정확히 알 수는 없지만 다른 배출경로가 없으므로 슬러지로 배출되고 있다고 볼 수밖에 없다.

〈표 2-14〉 2012년 1월 1일부터 적용되는 방류수 수질기준

구분		생물화학적 산소요구량 (BOD)(mg/L)	화학적 산소요구량 (COD)(mg/L)	부유물질 (SS) (mg/L)	총질소 (T-N) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	총대장균 군수 (개/ml)	생태독성 (TU)
1일 하수처리 용량 500m ³ 이상	I 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.2 이하	1,000 이하	1 이하
	II 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.3 이하	3,000 이하	
	III 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	0.5 이하		
	IV 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 500m ³ 미만 50m ³ 이상		10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 50m ³ 미만		10 이하	40 이하	10 이하	40 이하	4 이하		

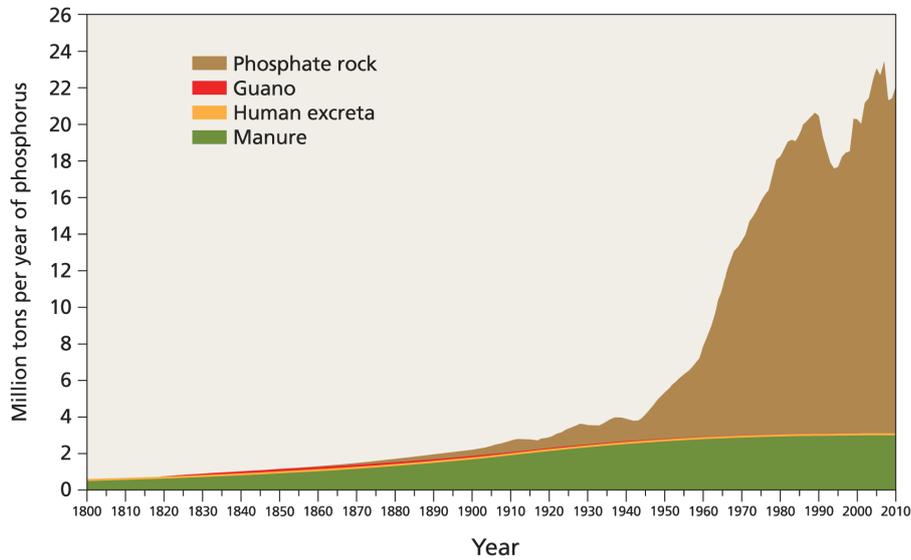
자료 : 하수도법 시행규칙 [별표1]

〈표 2-15〉 2010년 시설규모 500m³/일 이상인 공공하수처리시설에서의 유입수질 및 방류수질

연도	구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P
2010	유입수질(mg/L)	141.2	82.7	139.5	33.8	3.8
	방류수질(mg/L)	5.2	10.7	3.6	12.2	0.9
	제거율(%)	96.3	87.1	97.4	63.9	76.3
2009	유입수질(mg/L)	143.5	82.6	140.9	34.4	3.8
	방류수질(mg/L)	5.4	10.7	3.9	12.7	1
	제거율(%)	96.2	87	97.2	63.1	73.7

자료 : 2010년 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과, 환경부, 2011

인은 하수처리분야에서 제거해야 할 오염물질이다. 그러나 농업분야에서 인은 비료의 필수성분이다. 비료를 위한 인은 지금까지 전량 인광석을 채굴하여 사용하였다. 인소비의 90%는 모두 식량생산(곡물)을 위한 것이다³²⁾.



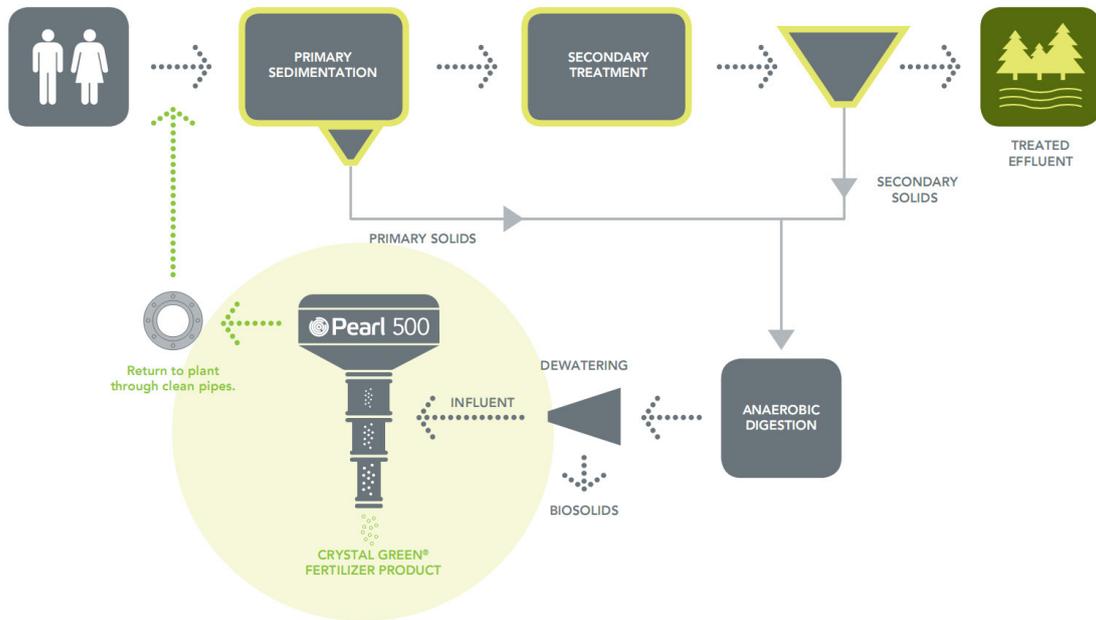
〈그림 2-20〉 전 세계 인소비 증가 현황(Cordell)

인의 소비는 1950년대에 인광석이 농업 비료로 사용되기 시작하면서 급격하게 증가하였다. 이른바 녹색혁명(Green Revolution)³³⁾이 일어나면서 많은 나라에서 식량증산이 이루어지고, 인구가 급증하였다. 현재상태가 지속되면 인광석이 100년 이내에 고갈될 것이라는 보고가 있다. 이에 따라 선진국에서는 고농도 인폐수가 발생하는 산업들을 위주로 인회수기술들이 개발되어 활용되고 있고, 하수처리장에서도 인을 회수하는 기술이 실규모 플랜트에서 적용되고 있다. 네덜란드의 Crystalactor, 일본의 Phosnix, 캐나다의 Pearl Process 등이 그 예이다. 이들은 최적 운전상태에서 대략 70~90%의 인회수율을 보이고 있다. 또한 회수된 인은 다른 제조공정의 원료로 사용되거나 직접 비료로 사용할 수 있는 고가의 생산품으로 실제 판매되고 있다. 판매이익으로 인회수 설비의 설치와

32) Cordell, D., et al., The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 2009

33) 개발도상국의 식량생산력의 급속한 증대나 이를 위한 농업상의 여러 개혁을 일컫는다.

운영비가 수년내에 회수되었음을 보고하고 있다.



〈그림 2-21〉 인회수 시스템의 예(Pearl Process, Ostar)

만일 2010년 500m³/일 이상인 공공하수처리시설에서 평균적으로 제거되었다고 하는 76%의 인의 양을 연간 일평균 하수처리량을 고려하여 계산하면 55,970kg/일인데, 이 중에서 50%만 인을 회수한다고 가정하더라도 27,985kg/일의 양이 된다. 인회수처리시설의 설치와 운영의 비용편익분석을 실시하여 인자원의 잠재성을 개발할 필요성이 있다고 판단된다.

위에서 언급했던 방법들 이외에도 다른 자원화 방법으로는 고화처리를 통해 매립지 복토재로 활용하는 방법, 부숙화 혹은 퇴비화 처리를 통해 퇴비로 활용하는 방법 등이 있다. 그러나 이들 방법은 슬러지를 재활용하여 생산된 생산물들의 수요처가 부족한 한계가 있다.

6) 하수처리장에서의 발생 에너지 및 자원의 특성

하수처리장에서 발생하면서 장래에 이용하기에 잠재력이 큰 주요 신재생에너지 분야

는 다음과 같다. 장에서 소개한 바와 같이 첫째로, 하수슬러지 처리과정에서 발생하는 하수슬러지 연료화분야, 바이오가스분야가 있고, 둘째로, 수처리계통에서 발생하는 처리의 열을 이용하는 하수열이용 분야, 처리수의 위치에너지를 이용하는 소수력발전 분야가 있으며, 셋째로 하수처리장의 공간을 활용하는 태양광이용 분야, 풍력이용 분야, 그리고 마지막으로 에너지원은 아니지만 자원으로 활용함으로써 비용을 절감하거나 수익을 창출하는 처리수 재이용 분야와 인회수 분야가 있다. 이외에도 슬러지의 재활용 방법으로 고화, 부숙화, 퇴비화 등도 있다.

〈표 2-16〉 하수처리시설에서 발생하는 에너지원 및 자원들 정리

구분	활용법	개요	특징
슬러지처리 계통에서 발생하는 에너지원	슬러지의 연료화	슬러지의 건조 혹은 탄화처리를 통해 함수율을 낮추고 잔존하는 발열량을 화력발전소에서 연소시켜 에너지를 얻는 방법	최종산물의 감량효과가 가장 큼 발열량문제로 화력발전소에서 사용할 수 있도록 해야 함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
	바이오가스 활용	슬러지의 혐기성 소화를 통해 소화가스를 생산하고, 이 가스를 이용해 열이나 전기를 생산하거나 연료로 판매하는 방법	활용방안이 매우 다양함 타 유기성폐기물의 연계처리 가능함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
수처리계통에서 발생하는 에너지원	하수열 이용	처리된 하수의 열을 이용하여 냉난방시설의 열교환에 활용하는 방법	처리수와 외기의 온도차가 클 때 효과가 큼
	소수력 발전	처리된 하수의 위치에너지를 이용하여 전력을 이용하는 방법	방류수면과의 낙차가 존재할 때만 사용 가능함
공간을 활용한 에너지원	태양광 발전	하수처리장 시설 지붕 등의 공간에 집광판을 설치하여 전력을 생산하는 방법	일조량이 큰 경우 사용 이익이 있음
	풍력 발전	풍향이 좋은 하수처리장의 빈 부지내에 풍력발전기를 설치하여 전력을 생산하는 방법	풍량과 풍향이 안정된 경우 사용 이익이 있음
기타 자원화 (에너지원은 아님)	처리수 재이용	먹는 물 수질기준을 요구하지 않는 수요처에 처리수를 활용하는 방법	처리수질의 안전성이 우선적으로 보장되어야 함
	인회수	수처리과정 및 슬러지처리과정을 거치면서 농축된 인을 결정화과정을 거쳐 회수하여 비료 등으로 활용하는 방법	슬러지처리계통 운전과 직접 관련 공정 중 중금속 농도에 민감함 법적 기준에 영향을 크게 받고 있음
	고화처리	슬러지를 고형화하여 매립지 복토재로 활용하는 방법	재활용 생산품의 소비처 확보가 주요 관건임
	부숙화, 퇴비화	슬러지를 퇴비로 활용할 수 있도록 처리하는 방법	재활용 생산품의 소비처 확보가 주요 관건임

위의 활용방법들 중에서 하수열이용 분야와 소수력발전 분야 및 태양광이용 분야, 풍력이용 분야는 하수처리장 고유의 수처리공정 및 슬러지처리공정의 운전과 직접적인 관련이 없는 특징을 가지고 있다. 수처리공정 및 슬러지처리공정의 운전이 잘되든 잘되지 않든 상관없이 단위 기술이 잘 설치, 운영되면 기대한 성과를 얻을 수 있다는 것이다. 그리고 이러한 신재생에너지를 활용하지 않는다고 해도 법적 제재조치를 받지 않는다.

그러나 하수슬러지의 연료화, 바이오가스의 활용 및 인회수 방법은 수처리계통의 처리효율, 공정메커니즘과 슬러지처리계통의 소화효율 등과 밀접한 관련이 있다. 수처리공정의 적용 공법, 하수원수의 성상, 그리고 방류수 수질기준에 의한 목표처리수질에도 영향을 받는다. 또한 슬러지처리공정 중의 농축효율, 소화효율에도 큰 영향을 받으며, 하수슬러지의 최종처분은 직매립금지(폐기물 관리법) 및 해양배출금지(해양환경관리법) 규제에 직접적인 영향을 받는다. 생산된 제품을 실제로 이용하기 위해서는 하수슬러지와 관련한 여러 규정들(예를 들면 하수슬러지의 화력발전소 연료로의 사용, 바이오가스의 자동차연료 및 도시가스로의 사용 등)에도 직접적인 영향을 받는다.

위와 같은 이유로 인해 하수처리시설에서의 에너지 및 자원 재활용의 주된 관심은 슬러지처리 계통의 운전과 관련한 효율개선 및 생산물(슬러지 연료, 바이오가스 등)의 다양한 활용 방안에 집중될 수밖에 없다. 이에 따라 다음 장에서는 신재생에너지 활용기술 중에서 하수슬러지의 슬러지처리 공정의 핵심 부분인 혐기성소화에 대해 중점적으로 다루기로 한다.



슬러지 처리와 신재생에너지 활용 기술

1. 하수슬러지 처리

1) 하수슬러지 처리의 목적

과거 수십년간 하수도정비의 진전으로 생활환경의 개선과 공공수역 수질개선에 진전이 있었다. 그러나 하수처리량이 증대하고, 수질기준 강화에 따른 고도처리 도입으로 하수처리과정에서 발생하는 슬러지량이 크게 증가하고 있다. 또한 쉽고 경제적인 처분방법이었던 매립과 해양배출도 불가능하게 되었다. 최종적으로 하수슬러지를 경제적으로 영구히 안정적으로 처리하기 위해서는 반드시 감량화가 최대에 이루어져야 한다.

일반적으로 슬러지의 성상은 수분을 가장 많이 가지고 있고, 소량의 무기물질과 유기물질로 이루어져 있다. 이 유기물질은 어느 정도의 에너지를 가지고 있는데, 이 에너지를 회수하여 사용하는 것이 경제적으로 기술적으로 용이하지 않았었다. 슬러지는 그대로 배출되면 환경상에서 악영향을 일으키는 오염물질의 역할을 한다. 이 때문에 과거에는 슬러지의 최종산물에서 에너지의 함량을 최소화시키고, 안정화시키는 것이 주요 목적 중의 하나였다. 그러나 근래에는 에너지 비용의 상승, 화석에너지의 고갈 문제, 화석에너지 사용으로 인한 전 지구적 환경문제 등으로 인해서, 조금이라도 남아 있는 에너지를 회수하여 활용하는 재생에너지 활용 방안으로 슬러지의 에너지화(연료화)가 부각되고 있는 것이다. 에너지화는 안정화와 상충되는 면이 있는데, 에너지화는 원료인 슬러지에 사용 가능한 에너지가 많을수록 유리하지만, 안정화는 원료 슬러지에 에너지가 적을수록 유리하다. 처리의 용이성을 우선시한다면 안정화가 훨씬 용이한 반면, 에너지화는 공정이 더 복잡하고 어렵다. 그러나 에너지화에 의한 경제적 효과와 재생에너지

활용으로 인한 환경적 부하 경감을 고려하면 에너지화를 우선적인 목적으로 설정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 하수슬러지 원료에서 에너지를 최대한으로 회수하면 그 잔류물에서는 자동으로 에너지 준위가 최소한으로 떨어지는 것이므로 잔류물의 안정화는 더 쉽게 이루어질 수 있을 것이다.

하수슬러지의 처리목적 중의 또 다른 하나는 자원화이다. 자원화는 슬러지를 자원으로 재활용함으로써 복토재(고화처리), 탄화물, 시멘트원료, 녹생토, 퇴비, 연료, 지렁이 분변토 등으로 만들어 사용하자는 것이다. 과거 에너지화의 개념이 부각되기 전에는 연료로 재활용하는 것도 자원화의 일종으로 간주되었다. 그러나 이 글에서는 재활용 중에서 연료로서의 재활용은 에너지화의 범주로 분류하여 제외하고, 에너지화로 분류되지 않는 다른 용도로의 재활용을 자원화로 간주한다. 2008년까지는 환경부도 하수슬러지 처리의 중심을 거의 자원으로 재활용하는 것에 집중하고 있었다. 그러나 재활용 목표가 60~70%에 이르는 지나친 목표설정과 재활용 공정의 운영상의 문제, 재활용 생산물의 품질문제, 재활용 생산물의 소비처 제한 문제 등이 대두되면서, 재활용은 그 동력을 많이 상실하게 되었다.

다음의 표에 기존의 슬러지 처리목적과 함께 현재 상황에서 새롭게 제안되는 슬러지 처리의 목적을 나타내었다.

〈표 3-1〉 하수슬러지 처리의 목적

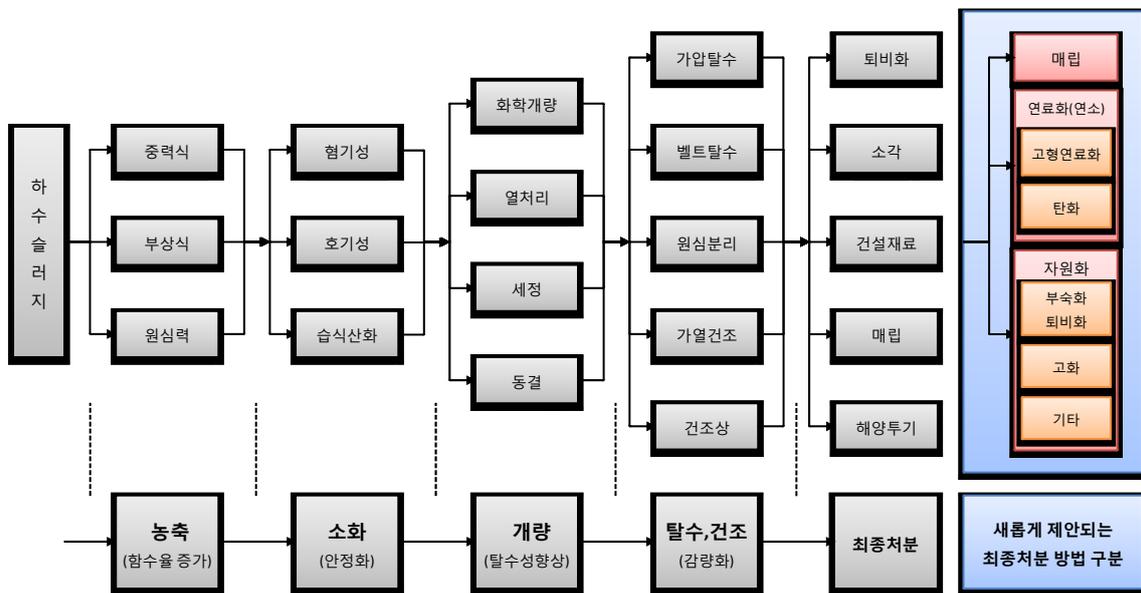
과거의 슬러지 처리 목적		새롭게 제안되는 슬러지 처리 목적		
과거	개념	현재	개념	시행방안들
감량화	중간 처리과정 및 최종처분의 양을 최소화	감량화	중간 처리과정 및 최종처분의 양을 최소화	소화, 건조, 탈수, 소각 등
안정화	최종산물의 에너지감소로 환경악영향을 최소화	에너지화 후 안정화	슬러지 내 잔류 에너지를 최대한 회수한 후 잔류물에 대해 안정화	소화를 통한 바이오가스 증산 슬러지의 연료화
자원화 (재활용)	슬러지를 원료로 하여 재활용품을 생산	자원화	에너지화를 제외한 슬러지의 자원화	제한적 고화(복토재) 제한적 부숙화(토양개량) 공정 중 인회수 등

2) 하수슬러지 처리의 여러가지 방안들

여러 슬러지 처리 방법들은 처리과정에서의 방법 단계별로 구별해 볼 수 있고, 최종처분 방법별로 구별하여 살펴볼 수 있다.

(1) 슬러지 처리과정 단계별 구분

하수처리과정에서의 슬러지 처리방법은 다음의 그림과 같이 농축, 소화, 개량, 탈수 및 건조, 최종처분 혹은 자원화의 단계로 나뉜다.



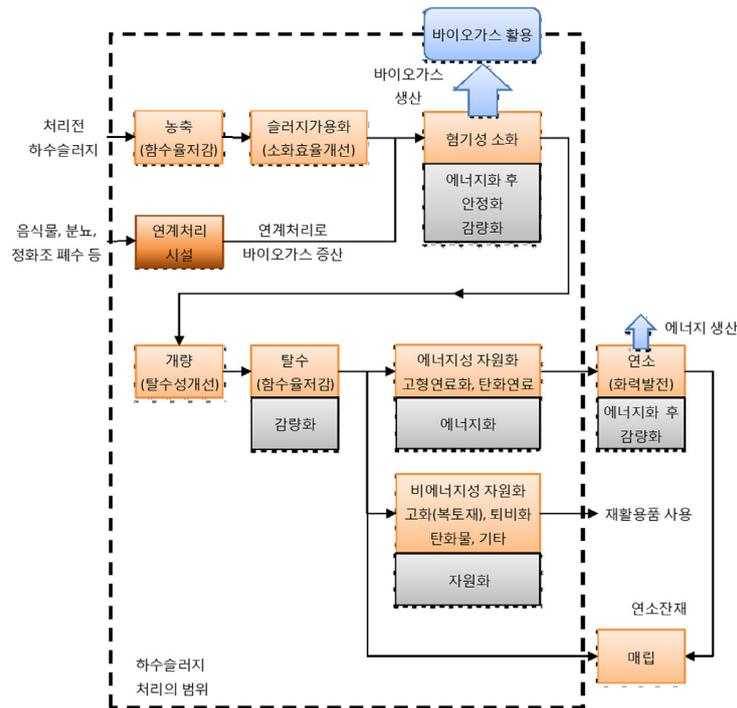
〈그림 3-1〉 슬러지처리 계통도

농축은 이어지는 소화과정의 운전 효율을 높이기 위해 함수율을 증가시키는 것이다. 농축의 방법은 중력식이나 부상식, 원심력 방식 등을 선택할 수 있다. 소화는 슬러지를 혐기성 또는 호기성, 습식산화 방법으로 분해시켜 안정화시키는 것인데, 국내에 설치된 소화조는 대부분 혐기성 소화 방법을 적용하고 있고 바이오가스의 활용 측면에서도 혐기성 소화가 권장된다. 앞의 절에서 설명한 바와 같이 슬러지의 소화는 안정화의 목적과 더불어 소화가스(바이오가스) 활용에 의한 에너지화의 목적이 크게 강조된다.

이후 슬러지의 탈수성 향상을 위해서 개량과정을 거치게 되고, 탈수 혹은 건조과정을 거쳐 함수율을 더 낮춤으로써 감량화시킨다. 마지막 최종처분과정은 하수도시설기준³⁴⁾

에서는 위의 그림과 같이 퇴비화, 소각, 건설재료, 매립 및 해양투기로 분류하였으나, 더 이상 해양투기는 불가능하고, 매립은 소규모 처리장의 경우나 매립가스를 활용하는 경우, 연소잔재의 매립 등으로 제한되었다. 소각은 최종 산물의 부피를 가장 작게 줄일 수 있는 방법(소각잔재)이지만 에너지를 투입해서 소각시킨다는 개념이 크기 때문에, 스스로 연소될 수 있는 정도로 발열량을 높이고 화력발전소의 연료로 사용함으로써 연소 시에 에너지를 회수할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 따라서 소각의 개념을 연료화의 개념으로 대체할 수 있을 것이다. 자원화에 해당하는 방법들은 현재 부숙화, 퇴비화, 고화 등으로 제한되고 있지만 장래에 더 좋은 자원화 기술들이 개발되면 하나의 방안으로 추가될 수 있을 것이다. 따라서 최종처분은 위 그림의 오른쪽과 같이 바꾸어 정리하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 위의 각 단계는 반드시 거쳐야 하는 것이 아니라 처리의 효율과 운영방법에 따라 가감될 수 있다.

대표적인 슬러지 처리과정 단계들을 슬러지 처리 목적과 관련하여 나타내면 다음과 같이 정리될 수 있다.

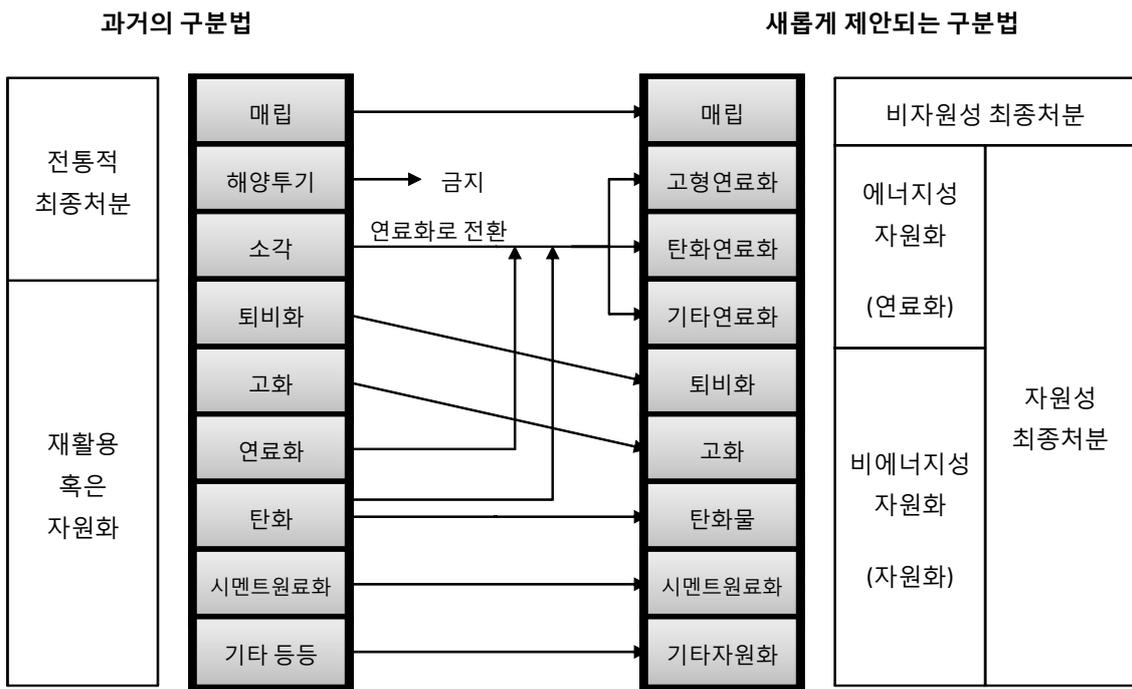


〈그림 3-2〉 슬러지처리공정의 단계별 목적

34) 환경부제정 하수도시설기준, 한국상하수도협회, 2005

(2) 최종처분 방법별 구분

슬러지처리방법을 알아보는 다른 방법은 최종적으로 매립시킬 것인가, 연료로 쓸 것인가 혹은 다른 용도의 자원으로 재활용하여 쓸 것인가와 같이 최종처분의 방법별로 구분해서 살펴보는 것이다. 하수처리에서 최종처분은 대개 매립, 소각 혹은 해양배출을 의미해왔다. 그러나 폐기물관리법에서는 재활용 혹은 자원화라고 불리워졌던 방법들(퇴비화, 고화, 시멘트원료화, 녹생토화, 지렁이 분변토화, 연료화, 탄화 등)도 일단 특정 재활용의 목적을 위해서 처리되어 생산되면 하수처리라고 하는 경계를 벗어난다고 보아야 한다. 따라서 재활용 혹은 자원화도 하수처리의 입장에서 최종처분 방법 중의 하나로 보는 것이 타당하다. 이러한 관점에서 최종처분 방법을 구분하면 비자원성 최종처분(매립)과 자원성 최종처분으로 나눌 수 있고 자원성 최종처분은 다시 에너지성 자원화(연료화), 비에너지성 자원화(자원화)로 구분할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 다음과 같다.



〈그림 3-3〉 하수슬러지 최종처분의 구분

이 방법들 중 신재생에너지 활용기술 범주에 포함시킬 수 있는 것은 에너지를 얻을 수 있도록 처리하는 에너지성 자원화(이후에는 줄여서 연료화라고 칭함) 기술이다. 다른 처리 방법은 비에너지성 자원화 기술(이후에는 줄여서 그냥 자원화라고 칭함)이라고 할 수 있다. 아래에는 연료화 기술 중 고형연료화, 탄화, 자원화 기술 중 퇴비화 및 고화처리에 대해서 간단히 살펴보기로 한다.

① 고형연료화

하수슬러지는 건조중량 1kg당 2,000kcal/kg~4,000kcal/kg의 발열량을 가지고 있으나, 탈수슬러지 상태에서도 70~80% 정도의 수분을 함유하고 있기 때문에 조연제를 혼합하지 않으면 연소시킴이 어렵다. 조연제를 사용하면 비용증가뿐만 아니라 CO₂ 배출을 증가시키는 단점이 있다. 이 때문에 수분의 제거가 필수적인데, 수분을 완전히 제거하면 유기응집제를 사용한 슬러지는 건조중량 1kg당 3,000kcal/kg~4,000kcal/kg의 발열량을 갖게 되고, 조연제 없이 소각이 가능하게 된다.

〈표 3-2〉 슬러지 연료화 처리방안 장단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> •처리주기 단기간 •연료제품으로 활용 가능하여 수익성 확보 시 경제성 우수 •비교적 환경영향 적음 •건설비, 운영비 저렴 •소요면적 작음 	<ul style="list-style-type: none"> •연료제품 특성이 안정적이지 못해 활성화에 어려움 •처리부산물 재이용 불가 시 추가 처분비 소요 •유기성 슬러지에만 처리가 국한됨 •국내 설치사례 적음 •국내외 기술 수준 낮음

슬러지의 연소열을 이용하기 위해서는 자연연소가 가능한 열량 이상의 발열량을 가져야만 한다. 따라서 슬러지의 함수율을 효율적으로 낮추는 방안이 무엇보다 중요하다. 슬러지를 소각하는 경우, 연소가 안전하게 계속되게 하려면 1,200kcal/kg 이상의 열량이 필요하다. 슬러지의 유기물 함량이 60%일 때 800℃ 이상의 발열량을 갖기 위해서는 슬러지의 함수율은 60% 이하이어야 하는데, 현재 사용하고 있는 탈수법으로는 70~80% 이하로는 함수율을 낮추기 어렵기 때문에 슬러지의 연료화를 위해서는 추가 탈수법(건조 등)이 도입되어야 한다. 탈수성 향상을 위해 탈수조제로 가연물을 첨가해 탈수하여 건조하는 방법도 사용된다.

연료화를 위해서는 슬러지 자체가 가지고 있는 가연성분(유기물)이 많이 함유되어 있을수록 발열량이 높아지므로 슬러지의 소화를 시키지 않는 것이 좋겠다는 견해도 있었으나, 소화과정에서 발생하는 소화가스를 잘 활용하도록 하고, 발열량이 낮아진 소화 슬러지를 잘 탈수 건조시키는 방안을 개발하는 것이 바람직할 것이다. 연료화 방법은 건조한 슬러지를 직접 고형연료로 이용하는 방법과 첨가제 혹은 미분탄 등을 첨가한 슬러지를 연료로 사용하는 방법 및 건조한 슬러지를 열분해하여 그 생성물을 연료로 이용하는 방법으로 구분할 수가 있다.

○ 하수슬러지와 석탄 혼합 기술 :

이 기술은 슬러지에 석탄분말을 첨가-건조-성형하여 고열량 고품위 고형연료를 제조하는 기술로 슬러지 연료화 과정에서 탈수슬러지의 물성에 따라 첨가제의 양 및 구성 성분비를 조절하여 줌으로써 자소성을 향상시키고, 주된 사용처인 시멘트회사, 화력발전소 및 농가 보일러 등의 용도에 맞게 분말형태와 펠렛 형태의 연료를 생산할 수 있다. 슬러지의 고형연료화는 넓은 의미에서 건조기술의 한 분류로 볼 수 있으며, 원료의 혼합과 건조가 핵심공정이다. 슬러지 건조 시 점성구간에 과부하와 높은 에너지의 소모로 인한 건조 시 문제점을 석탄분말 혼합에 의한 슬러지 물성변화로 해결하였다. 또한 석탄분말의 혼합으로 연료화 제품의 열량향상과 연소특성을 개선하는 기술이다.

○ 하수슬러지와 폐플라스틱 혼합성형 기술 :

이 기술은 서로 다른 두 가지의 폐기물인 하수슬러지와 폐플라스틱을 활용하여 성형 연료를 만들고, 다시 이를 이용하여 슬러지 건조 및 플라스틱 용융, 성형연료 제조 시 필요한 에너지를 생산하는 자원재활용 시스템이다. 또한 하수슬러지를 환경친화적이고 경제적으로 처리하기 위하여 하수슬러지에 폐플라스틱(8,000~9,000kcal/kg)을 혼합 성형시켜 사용 용도에 따라 과립, 펠릿, 브리켓 형태의 연료(발열량 5,000~6,000 kcal/kg)를 생산한다. 폐플라스틱 대용으로 농촌에서 발생하는 폐비닐을 사용할 수 있고, 재생고체연료 PE 또는 PP를 슬러지와 혼합성형하고, 연소실의 온도를 1,000℃ 이상 유지함으로써 냄새물질까지 소각할 수 있다. 배출되는 연소가스는 건조기에 투입하여 하수슬러지를 건조시키고 발생한 수증기는 열교환기를 통하여 재생세척수로 이용하며 폐건조가스는 다시 연소로에 투입하여 소각시킨다.

〈표 3-3〉 하수슬러지 고품연료의 성상

구분	단위	석탄	석탄 혼합 연료	폐플라스틱, 폐비닐	폐플라스틱 성형 연료
성상	-	괴탄, 분탄	펠릿, 과립	-	과립, 펠릿, 브리켓
수분	%	< 15	< 15		
발열량	kcal/kg	3,000~7,000	5,000~6,500	8,000~9,000	5,000~6,000

자료 : 대전시에 설치된 2톤/hr 용량의 슬러지 공형 연료화 파일럿 플랜트 시설 제품 분석 결과

고형연료 제품도 판매 혹은 소비되지 못하면 결국 처분해야 할 짐이 된다. 이를 위해 별도의 연소 및 에너지회수시설 등을 설치하기는 매우 어려운 일이다. 소각장 신규건설은 수년간 주민들의 반대에 부딪혀 사업진행이 어려웠기 때문이다. 소비처를 확보하기 위해서는 기존의 화력발전소에서 연료로 사용할 수 있도록 하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 발열량이 다른 연료를 사용함으로써 발전소 운전에 문제가 생기지 않도록 충분한 검토가 필요하다. 환경부는 화력발전소 등에 연료로 공급하는 경우의 가격조건을 다음의 표와 같이 제시하면서 시설 및 지역여건을 감안하여 수요처와 협의하도록 하였다.

〈표 3-4〉 하수슬러지를 화력발전소 등에 연료로 공급하는 경우의 가격조건

저위발열량(kcal/kg)	구입가격(원/톤)	비 고
4,000 이상	40,000	1. 슬러지 건조(탄화)과정에서 인위적으로 에너지를 회수·사용함으로써 저위발열량이 2,500kcal/kg 미만이 된 경우에는 구입가격을 0원(도착도 무상)으로 할 수 있음 2. 저위발열량 2,500kcal/kg 미만은 발전소별 설비 특성을 감안하여 사용여부를 협의해 결정함
3,700 이상~4,000 미만	35,000	
3,400 이상~3,700 미만	30,000	
3,100 이상~3,400 미만	25,000	
2,900 이상~3,100 미만	20,000	
2,700 이상~2,900 미만	15,000	
2,000 이상~2,700 미만	10,000	

자료 : 하수슬러지 처리시설 설치·운영지침, 환경부, 2011

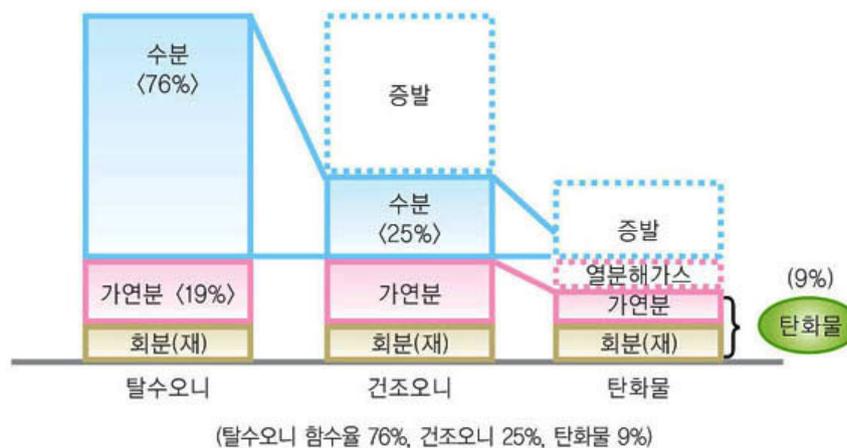
② 탄화

슬러지 등 유기성폐기물을 무산소 상태에서 가열하면 노(爐) 내에서 수분 및 가스가 발생하고 열분해가 시작되며, 잔존물에 탄소를 주체로 하는 무기물이 남는 것을 탄화라고 한다. 유기성 물질은 환원상태에서 간접 가열하면 불안정해지면서 거대한 분자로부

더 작은 가스상의 분자들로 분리되며, 이때 엔트로피가 증가하면서 파괴되고 온도에 따라 유기성 물질들 건조, 건류가스 형성, 탄화의 순서로 탄화가 진행된다. 200℃까지의 온도영역에서는 수분의 분리에 의한 건조 공정이 진행되고, 200~400℃의 온도영역에서는 유기성 폐기물의 주 구성체인 유기물의 세포막이 파괴되면서 세포질 및 수분으로 분리되며 추출된 수분은 증발되고 세포질은 주성분인 셀룰로스, 단백질, 지방 같은 고분자 유기물질 등으로 다시 분리되어 기체상 물질, 액상 유기물, 고상 탄화물 등으로 분리된다. 400~1,200℃의 온도영역에서는 건류 시 발생한 생성물들이 계속 분리되면서 H₂, CO, CO₂, CH₄ 등의 합성가스가 생성된다. 이상과 같은 각 온도대에서의 주된 화학반응을 다음의 표에 나타내었다.

〈표 3-5〉 탄화로에서의 온도변화에 따른 화학반응

온도 (℃)	화 학 반 응
100 ~ 200	열적건조, 수분분리(물리적)
250	탈산, 탈황, 결합수분 및 CO ₂ 분리, H ₂ S-화합물 분리
340	지방함유 물질 분리, 메탄 및 다른 지방물질들의 분리
380	C-함유 건류물질
400	C-O 및 C-N 결합물질의 분리
400 ~ 800	탄화물 형성
> 600	Olefin, (Ethylene-) Ethylen → Butylen



〈그림 3-4〉 슬러지 탄화의 개념도

〈표 3-6〉 탄화물의 사용처

특 성	활 용 분 야
다공 흡착성	환경오염물질 흡착 및 수질 정화제(오수정화 및 방류수SS 제거제)
미생물 활성	퇴비 발효 촉진제
토양 활성	절개지 녹화 자재
대체 연료	비닐하우스 난방용 보조 연료, 화력발전소의 석탄 혼소 연료
흡수, 흡유성	탈수 보조제 및 폐유 흡착제(해양오염 제거제)
환 원 성	고로 환원제, 가탄제, 보온재(제철공정)

탄화기술은 열원과 슬러지의 열접촉 방식에 따라 직접가열식과 간접가열식이 있으며, 탄화로 구조에 따라 스크류식과 로터리킬른식, 회전로상식 등으로 분류한다. 탄화시설에서 생산되는 탄화물은 흡착성 등의 특성이 있어 여러 용도로 유용하게 이용할 수 있다. 그러나 슬러지 탄화시설의 건설, 운영에 소요되는 비용이 크고, 동일한 사용 목적을 위해 질이 좋은 활성탄이 판매되고 있기 때문에 경쟁력이 높지 않은 단점이 있다. 다른 용도로 충분히 소비되지 않을 경우에는 최종적으로 화력발전소의 석탄 혼소 연료로 사용될 수 있다. 일례로, 일본의 도쿄도 동부 슬러지 플랜트의 슬러지 탄화설비 사업은 하수슬러지로부터 탄화물을 생산하여 화력발전소의 대체 연료로 이용하는 일본 최초의 설비인데, 하수슬러지의 자원화 및 석탄 대체(1%)로 인한 온실 가스의 삭감에 기여를 하고 있다고 보고되고 있다.

탄화 공정을 건조 등에 비해 건설, 운전 등이 훨씬 복잡하고 소요 비용이 크기 때문에, 탄화물의 활용이 원활치 않다면 굳이 탄화보다 단순 건조 후 고품연료로 사용하는 것이 바람직하다는 의견도 있다. “폐자원 및 바이오매스 에너지대책 실행계획”에 의하면 2008년에 가동 중인 시설의 운영비를 다음과 같이 보고하면서, 소각은 시설이 대용량으로 설치비가 적으나 운영 시에 많은 비용이 소요되며, 탄화는 다른 처리방법에 비하여 처리단가가 높고, 현재 설계 중이거나 공사 중인 시설에 대한 분석결과도 건조시설 설치비가 가장 낮게 나타났다고 지적하였다³⁵⁾.

35) 저탄소에너지 생산·보급을 위한 폐자원 및 바이오매스 에너지대책 실행계획, 환경부 등, 2009

〈표 3-7〉 가동 중인 하수슬러지 처리시설의 설치비 및 처리단가 비교

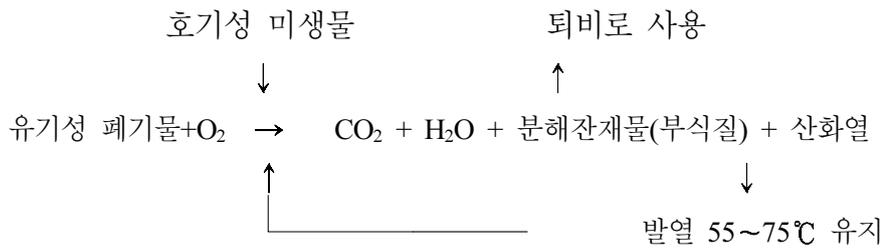
구분	건조	부숙화	고화	소각		탄화	분변토
				전용	혼합		
설치비	52	209	137	98.2	158	174	380
처리단가	28,782	57,407	67,000	68,694	71,721	76,728	88,000

③ 퇴비화

퇴비화는 호기성 조건하에서 생물학적으로 유기물을 안정화시키는 유기성 폐기물 자원화 방법 중의 하나로 도시폐기물 중의 음식물쓰레기, 농·축산폐기물 또는 하수처리장 슬러지와 같은 유기물을 부식으로 변환시키는 생화학적 공정이다. 부산물인 퇴비는 토양의 성상을 개량함으로써 식물의 재배를 돕는 토양개량제 효과를 기본으로 하지만, 퇴비화된 생성물은 질적으로 안정화되어 있기 때문에 녹농지 이외에 녹생토(건설공사 녹화용)와 매립보조재로 사용 가능하다. 퇴비는 100% 안정화된 유기물은 아니나 토양 주입 시 작물 등에 하등의 영향을 미치지 않을 정도로 퇴비 내의 유기물질은 매우 느린 속도로 계속 분해된다. 유기물 분해에 의한 안정화의 효과는 다음과 같다.

- 슬러지가 감량화, 악취 제거, 시비 후 작물의 생육 장애 방지
- 병원균, 기생충란, 바이러스 사멸 또는 불활성화에 따른 안전성(safety) 확보
- 퇴비화 중의 건조화에 따른 최종 부산물의 취급성, 저장성 개선

퇴비화는 공기의 공급여부에 따라 호기성과 혐기성으로 구분하나 혐기성은 처리효율이 낮고 처리시간이 오래 필요하므로, 일반적으로 퇴비화라 하면 호기성 처리를 의미한다. 즉 퇴비화는 슬러지 등의 유기성 폐기물을 산소가 존재하는 상태에서 호기성 미생물을 통해 분해하여 퇴비로 바꾸는 공정으로, 이의 분해원리를 도식화해보면 다음과 같다.



〈그림 3-5〉 퇴비화에 의한 유기물 분해의 모식도

미생물에 의하여 유기물이 분해되는 과정에서 산화열이 발생하므로 외부에서 온도를 가하지 않아도 온도가 60~70℃로 상승하게 된다. 또한 이때 분해와 동시에 유기성 폐기물 속에 들어있는 수분은 발효열에 의해 증발하여 건조 및 감량화가 동시에 이루어진다.

퇴비화는 미생물에 의하여 분해되기 때문에 미생물들이 성장할 수 있는 조건인 산소, 수분, 온도, 영양분의 균형설정이 중요한 운전조건으로 작용한다. 이들 운전조건은 상호 연관성을 가지고 연동하기 때문에 그 상황에 알맞은 조건의 설정 및 조건 유지를 위한 제어기술 확립이 중요하다. 퇴비화에 영향을 주는 몇몇 주요 인자들에 대하여 간략히 살펴보면 다음과 같다.

○ 함수율 :

함수율이 전체 퇴비질량의 30% 이하일 때는 미생물의 활동이 저해되며 20% 이하일 때는 활동이 불가능해지게 된다. 분해속도는 전체질량의 50~60%일 때 가장 빠르게 된다. 수분이 너무 많으면 퇴비물질의 내부공간이 물로 충만되어 공기의 양이 감소하고 산소공급이 원활하지 못하므로 혐기성 상태가 되어 퇴비화 속도가 늦어질 뿐만 아니라, 악취 발생의 문제가 생긴다.

○ C/N 비 :

일반적으로 퇴비화에서 가장 이상적인 탄소와 질소의 무게비율은 50 이하로 25~30:1 이다. 만약에 비율이 25~30 이하일 경우에는 질소성분의 유실이 커지며, 암모니아 등의 악취가 심하게 발생한다. 또한 25~30 이상에서는 미생물의 성장에 필요한 질소원이 적어 미생물의 성장에 장애를 줌으로써 퇴비화의 반응속도가 느리게 진행된다.

○ pH :

미생물의 활성도가 활발한 pH범위는 중성 정도이므로 퇴비화에서도 이 범위의 pH 유지가 필요하다. 그러나 퇴비화장치 투입 전이나 초기 조건에서는 혐기성 상태가 조성되기 쉬워 pH가 이보다 낮은 경우가 많다. 따라서 pH 상승을 위하여 약품을 투입하거나 공기공급을 원활히 하여 줄 필요가 있다.

○ 미생물의 접종 :

슬러지 내에 미생물이 부족하거나 초기 반응 중 온도상승이 늦은 경우에는 외부에서 미생물을 추가로 접종을 하여 줄 필요가 있다. 추가로 접종을 해주는 미생물은 슬러지 퇴비화 반응에 단시간 내에 적응이 가능해야 하므로 종균제 선택에 신중을 기한다.

○ 공기 공급량 :

공기량이 적으면 반응은 혐기성으로 진행되며 공기량이 많으면 미생물자체 산화열의 축적을 저해하여 온도가 상승되지 않는다. 퇴비화에서 적절한 공기량은 0.5 L/min·kg으로 나타나고 있으나, 배출가스 내의 산소농도범위가 5~10%범위를 유지하도록 투입공기량을 조절하여 줄 수도 있다.

○ 통기개량제 :

퇴비의 효과적인 생산과 적절한 공기의 유통을 위하여 폐기물 상호 간의 공극을 크게 해 줄 필요가 있다. 따라서 톱밥, Wood chip, 짚단, 분쇄한 종이 및 이미 생산된 퇴비 등의 통기개량제를 퇴비화 대상폐기물과 섞어 수분함량을 조절하고 동시에 공기의 유통을 원활하게 할 수 있다. 또한 통기개량제는 퇴비 생산에 필요한 탄소원과 질소원을 공급하여 적절한 C/N비로 조절할 수 있는 효과가 있다. 통기개량제는 쉽게 구할 수 있는 물질이어야 하며, 적절한 분해도를 갖는 탄소화합물을 다량 함유하여야 하고, 수분 흡수능도 좋아야 한다.

슬러지로 생산된 퇴비는 비료관리법 규정에 만족하도록 항상 정기적인 검사를 해야 한다. 탈수슬러지에 유해물질이 미량이라도 들어 있으면 퇴비 속에서 유해물질이 잔류할 수 있기 때문에 다음과 같은 기준을 반드시 만족시켜야 한다³⁶⁾³⁷⁾.

36) 유기성오니등을 토지개량제 및 매립시설 복토용도로의 재활용방법에 관한 규정, 환경부고시 제2007-105호, 2007.7.6

37) 비료공정규격, 농촌진흥청고시 제2007-3호, 2007.4.20

〈표 3-8〉 부속토(퇴비) 원료기준

구 분		등 급	
		가 등급	나 등급
유 해 물 질 함 량	비소(As)	50 이하	“가” 등급의 기준을 초과하는 경우
	카드뮴(Cd)	5 이하	
	크롬(Cr)	300 이하	
	구리(Cu)	500 이하	
	납(Pb)	150 이하	
	수은(Hg)	2 이하	

단위 : mg / kg 건조중량

〈표 3-9〉 부속토 제품 기준

구 분		등 급	
		가 등급	나 등급
유 해 물 질 함 량	비소(As)	50 이하	“가” 등급의 기준을 초과하는 경우
	카드뮴(Cd)	5 이하	
	크롬(Cr)	300 이하	
	구리(Cu)	500 이하	
	납(Pb)	150 이하	
	수은(Hg)	2 이하	
유기물함량		25% 이상	
유기물대 질소비		50 이하	
염분(NaCl)		1% 이하	
부 속 도		실험수행 시 실온보다 20℃ 이상 재발열이 없을 것.	

단위 : mg / kg 건조중량

〈표 3-10〉 퇴비의 원료로 사용 가능한 물질과 사용 불가능한 물질

구분	원 료 범 위	비 고
사전 분석검토 후 사용 가능한 원료	읍면단위 농어촌지역 생활하수오니	<ul style="list-style-type: none"> 퇴비의 원료로 사용하고자 하는 자가 제시한 폐수처리공정에 첨가되는 물질의 종류 특성과 오니 중의 이화학적 성분, 재료의 토양오염 및 분해성의 자료를 농업과학기술원장이 검토한 후 지정 고시 합성 및 특수약품품을 제조하는 과정에서 발생하는 폐수처리오니는 제외(02.12.31 개정)
사용 불가능한 원료	도시 및 공단지역 폐수처리오니	

④ 고화처리

고화란 고화제를 이용하여 폐기물 내의 유독물질을 차단해 피막보호를 하는 것으로, 폐기물 내 유해성 오염물질의 용존성, 유독성 및 독성을 최소화하는 화학적 형태로 전환시켜 유해성을 감소시키는 효과가 있다. 안정화 및 고화는 처리공정상 동시에 이루어지기 때문에 대개의 경우 고화라고 표현한다. 슬러지의 고화처리는 유해슬러지에 함유된 중금속 등이 환경 중의 매체(물)를 통하여 지하수나 토양 등을 오염시키지 않도록 무해화 또는 용출이 어려운 형태로 변화시킴으로써 환경오염, 운반이나 처분과정중 비산, 그리고 침출수의 누출을 방지하는 것이다. 함수율과 유기물 함량이 높은 탈수슬러지를 흡수성·수경성을 갖는 고화제와 혼합 양생하여 탈수케이크의 물리적·화학적 결점을 개량하게 되면 다음과 같은 효과를 나타낸다.

- 유해병원 사멸 및 부패방지 : 고화제 중 석회성분에 의해 발열반응이 진행되고 pH가 상승하게 되면 미생물의 활동이 억제되어 유기물의 부패도 중지된다.

- 중금속 용출 억제 : 고화 처리된 하수슬러지는 유리된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 의해 알칼리성을 나타내기 때문에 이 상태에서 중금속류는 불용성 수산화물 안정화 등의 작용에 의해 용출이 억제되며, 일부는 수화반응 과정에서 $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ 나 $\text{CaPb}_3\text{Si}_3\text{O}_{11}$ 등의 난용성 물질에 의해 고착되어 결정구조 내로 중금속이 치환 또는 고용된다.

- 냄새의 억제 : 석회주입으로 인하여 pH가 상승하게 되면 미생물의 활동이 줄어들어 슬러지 내의 유기물 분해도 중지되고 이로 인한 냄새도 줄어들게 된다.

- 재슬러지화 방지 : 고화제 중 생석회가 슬러지 내 수분과 반응하여 소석회로 변화하면 물에 대한 용해도는 0.3%로 낮아지므로 고화된 슬러지 전체가 소수성을 띠며 다시 슬러지화하지 않는다.

- CO_2 가스의 흡착 : 고화제의 종류에 따라 다소 간의 차이는 있으나 비표면적은 고화처리 후 2~4배 정도 증가하였으며, 이에 비례하여 CO_2 가스 흡착량도 고화처리 후 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 고화처리 하수슬러지를 위생매립지의 복토재로 활용 시 지구온난화의 주요 원인을 제공하는 CO_2 가스를 흡착하는 부수적인 효과를 얻을 수 있다.

수도권매립지에 설치되었던 슬러지자원화 1단계시설은 슬러지를 고화 처리하여 복토

재 등으로 재활용하는 시설로 준공 당시 기술적 어려움을 극복하고 시운전 및 시설보완(2009~2011)을 통해 현재 정상적으로 운영되고 있다. 다만 1단계시설을 최초 설계하였을 당시의 조건과 현실적인 운영조건이 맞지 않아 운영비가 당초계획보다 크게 증가하였다. 또한 슬러지자원화 2단계시설은 당초에 1단계와 동일한 고화처리시설로 계획하였으나 1단계에서 발생했던 문제들로 인해서 연료화시설로 변경하였다. 이 시설은 건조방식으로 슬러지를 처리하여 화력발전소의 보조연료로 생산하고 있다.

3) 혐기성 소화의 이론

슬러지의 소화는 하수처리시설의 슬러지처리계통 공정들 중의 핵심 공정이며, 슬러지의 최종처분 방법 중의 하나가 아니라 슬러지 처리과정 단계 중의 하나이다. 혐기성 소화가 강조되는 것은 최종처분 단계에 이르기 전 처리과정의 중간단계에서 소화가스를 발생시킴으로써 에너지회수를 할 수 있고, 슬러지의 감량화에 크게 기여하며, 이후 처리 과정에도 큰 영향을 미치기 때문이다. 슬러지 소화의 공법으로는 호기성/혐기성/습식산화 등 여러 방법들이 존재하지만, 에너지회수적인 측면과 다른 유기성 폐기물(분뇨, 음식물폐수 등)과의 연계처리적인 측면을 고려할 때 혐기성 소화가 가장 많이 선택되고 있다. 따라서 이 절에서는 혐기성 소화의 기본적인 내용을 설명한다.

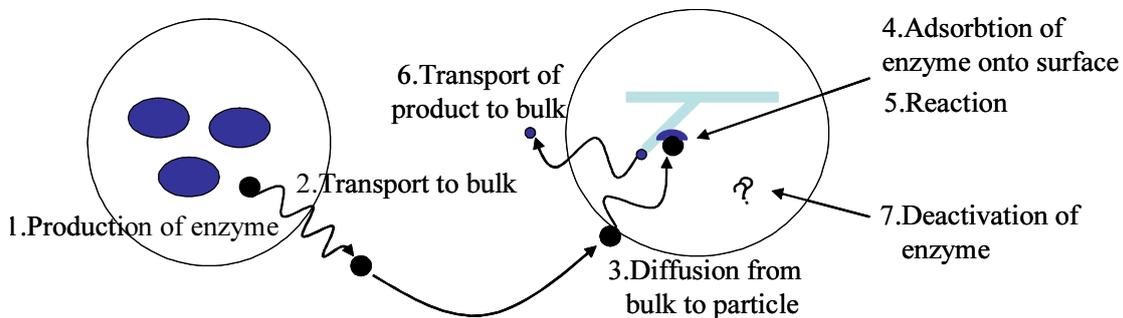
(1) 혐기성 소화의 원리

혐기성 소화는 용존 산소가 존재하지 않는 혐기성 상태에서 몇 그룹의 혐기성 미생물을 이용하여 폐수나 슬러지의 유기물질을 단계적으로 분해하여 최종 생성물로 메탄(CH_4)과 이산화탄소(CO_2)를 발생시키는 처리 방법이다. 혐기성 미생물에 의해 유기물이 최종적으로 메탄으로 전환되는 반응은 대략 3단계를 거친다고 알려져 있다. 첫 번째 단계는 산 발효균에 의하여 생성된 체외효소(extracellular enzymes)에 의하여 혐기성 미생물이 직접 이용할 수 없는 고분자 유기물질을 저분자 유기물로 가수분해하여 고리가 긴 유기산 및 알코올, 수소, 이산화탄소 등을 생성하는 가수분해단계이다. 두 번째 단계는 가수분해 단계에서의 생성물들을 산 생성균들이 분해하여 아세트산, 수소, 이산화탄소 등을 생성하는 산 생성 단계이다. 문헌에 따라서는 산 생성 단계를 좀 더 세분화하여 산 생성 단계와 아세트산 생성 단계로 나누기도 한다. 마지막 단계인 메탄 생성 단계에

서는 아세트산 이용 메탄 생성균이 아세트산을 분해하여 메탄 및 이산화탄소를 생성하거나 이산화탄소 환원성 메탄 생성균이 이산화탄소와 수소(H₂)를 메탄으로 전환시키게 된다.

① 가수분해반응

가수분해 반응은 <그림 3-6>에 나타난 것처럼, 여러 종류의 미생물들이 분비하는 체외효소³⁸⁾에 의해 고분자 물질이 당, 지방산, 아미노산, 글리세롤과 같은 가용성 저분자 물질로 분해되는 과정으로, 이 과정에 의해서 고분자 물질이 미생물의 세포막을 통해 체내로 흡수되어 대사와 성장 에너지원으로 이용된다. 이 가수분해 반응은 pH나 온도뿐만 아니라 고형물의 형태, 크기 및 잔류농도에 영향을 받고, 가수분해 반응의 산물인 유기산에 의해서도 저해를 받는 등의 복잡한 반응이다. 특히 슬러지나 음식물쓰레기와 같은 고형물이 다량 함유된 기질의 가수분해는 혐기성 소화반응의 전체 반응속도를 제한하는 율속단계(rate-limiting step)로 알려져 있다.



<그림 3-6> 효소에 의한 입자상 가용성 유기물의 가수분해 과정

따라서 다양한 전처리를 통해 이 가수분해 반응 효율을 높임으로써 전체 혐기성 소화 반응의 효율 또한 개선할 수 있다. 이러한 전처리를 거치면 슬러지나 음식물쓰레기 내에서 고형물 형태로 존재하는 지방, 탄수화물, 그리고 단백질 성분을 각각 작은 단위의 분

38) 셀로비아제(cellobiase), 아말라아제(amylase) 프로테아제(protease) 등

해 가능한 지방족아미노산(aliphatic acid), 다당류(polysaccharides), 그리고 아미노산(amino acids)으로 가수분해할 수 있다고 알려져 있다(Ying-Chih Chiu *et al.*, 1997).

② 산 생성 반응

산 생성 반응은 산 생성균(acetogenic bacteria)이 가수분해 반응의 산물을 탄소원과 에너지원으로 이용하여 휘발산 등의 산 생성물을 생성하는 과정으로, 이 과정에서의 환원 생성물은 산 생성균의 종류와 환경 특성에 따라 달라지지만 주된 생성물은 아세트산이라 할 수 있다. 어떤 종류의 미생물들은 아세트산 외에 수소(H₂)를 발생시키므로 수소생성균이라 부르는데 이들의 활동은 반응조 내 수소분압과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 시스템 내의 수소분압이 높을 때에는 아세트산(acetic acid)보다 프로피온산(propionic acid), 뷰틸산(butyric acid), 에탄올 등의 환원물질이 생성된다. 이러한 유기산과 에탄올 등은 산 생성균에 의해 아세트산으로 분해된다.

탄수화물은 가수분해에 의해 생성된 포도당이나 기타 단당류가 세포에 흡수되어 에너지공급을 위한 해당경로를 거쳐 피루브산(pyruvic acid)까지 중간분해된 후, 혐기성 상태에서 다시 여러 지방산, 알데히드, 알코올, CO₂, H₂ 등 다양한 물질로 전환된다. 이때의 생성물질분포상태는 pH, 온도, 수소분압 등 환경조건에 따라 달라진다. 탄수화물의 가수분해는 가장 빠르고 쉽게 이루어지는 것으로 알려져 있으며, 발효과정에 의해 최종적으로 휘발성 지방산 (volatile fatty acids, VFA)로 분해된다.

탄수화물의 혐기성 대사에서 유기산이 과량으로 생성되면, 반응조의 완충능력이 파괴되어 pH가 저하되어 그 반응이 휴지되는 어려움을 겪을 수도 있는데, 충격부하가 있을 때에 이와 비슷한 현상이 흔히 일어날 수 있다.

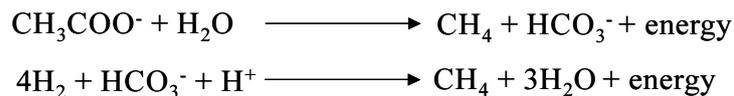
단백질은 가수분해된 α-amino acids가 미생물의 세포벽을 통과하여 세포 내에서 분해되어 최종적으로 아세트산이 생성된다. 아미노산의 분해는 아미노산 단독으로 수소화반응을 거치거나 다른 아미노산과 쌍을 이루어 탈아미노기 반응을 거쳐 진행된다. 수소이용세균의 존재하에 진행되는 수소화 반응에 의한 아미노산의 산 발효는 전체 아미노산의 산 발효 중에서 약 10%를 차지하고 나머지는 Stickland 반응이라 알려진 산화적 혹은 환원적 탈아미노기 반응에 의해 분해된다.

지질이 가수분해되어 생성된 글리세롤은 알코올의 분해경로를 따라서 더 분해되며,

긴 탄소사슬을 가진 고급 지방산은 Knoop의 β산화이론에 의하여 보다 저급의 지방산을 거쳐 아세트산과 수소로 분해된다. 그러나 조건에 따라서, 프로피온산과 뷰틸산으로 분해될 때도 있다. 하지만 수소분압이 높을 경우에는 열역학적으로 β산화가 일어나기 어려운 것으로 알려져 있으므로, 수소이용세균에 의해 수소분압이 낮게 유지되는 조건하에서만 β산화가 일어난다.

③ 메탄 생성 반응

메탄 생성은 절대혐기균인 메탄생성균들에 의해 이루어지는데 이들은 형태상으로 *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*의 4속으로 분류되고 있다. 이러한 세균들이 직접 이용할 수 있는 기질은 아세트산, 수소, 이산화탄소, 포름산(HCOOH), 메탄올 등이며, 이 외의 지방산과 알코올 등은 비메탄세균과 메탄세균의 상호작용에 메탄과 이산화탄소로 전환된다. 아세트 생성세균이 그러한 비메탄세균에 포함된다. 탄수화물, 지질, 단백질을 혐기성으로 발효시킬 때 가장 많이 생성되는 중간 물질은 아세트산인데, 최종발효산물인 메탄의 약 70%가 아세트산으로부터 전환된다고 알려져 있으며 나머지 30%가 H₂로부터 발생한다. 이들 반응의 간략한 반응식을 아래에 나타내었는데, 전자를 담당하는 미생물을 아세트산분해 메탄 생성균(acetoclastic methanogens)이라 하고, 후자를 담당하는 미생물을 수소이용 메탄 생성균(H₂-utilizing methanogens or CO₂ reducing methanogens)이라 부른다.



특히 둘째 경로를 통한 메탄 생성반응은 혐기성반응 전체를 좌우할 만큼 중요한데, 이 경로의 반응이 시스템 내의 H₂를 제거하고, 그 분압을 낮게 유지함으로써 아세트산 생성을 가능케 하는 역할을 하기 때문이다. 만약, 시스템 내의 수소분압이 허용수준, 예컨대 10⁻⁴기압을 초과하면, 아세트산 생성은 중단되고 프로피온산, 뷰틸산 등의 기타 휘발산이 생성된다. 기질을 최종적으로 메탄으로 전환시키는 주경로가 아세트산 생성임을 감안할 때, 그러한 수소분압의 상승은 바람직하지 않다. 메탄생성세균은 절대혐기성세

균으로 약하고 증식속도가 낮으므로, 온도, pH 등의 조건을 적합하게 안정시키는 것이 중요하다. 수소분압은 시스템 내의 전반적인 발효반응속도에 대하여 중요한 영향을 주지만, 그 허용한도가 너무 낮으므로 감시하기가 어렵다. 대신에 수소분압이 너무 높아질 경우 시스템 내에는 프로피온산 등의 비아세트산이 축적됨으로써 pH가 저하되는 현상을 관찰할 수 있다.

(2) 혐기성 반응의 영향인자들

① 유기물

혐기성소화에서는 지극히 다종류의 유기물이 분해되어 메탄과 이산화탄소를 발생시킨다. 일반적으로 유기물 중에 포함되는 셀룰로스 등의 탄수화물의 비율이 많아지면, 가스 중에서 이산화탄소의 농도가 높아지게 된다. 또, 분해속도는 탄수화물이 가장 빠르고 일반적으로 소화 가스 중 이산화탄소 함유비의 증가는 유기물부하와 온도 및 소화일수의 균형이 허물어져 소화가 불완전하게 된 것을 가리키며, 더욱 악화되면 거품이 일어나는 현상이 생긴다.

소화조예의 유기물 부하는 재래법 단상 방식의 유기성 폐액 메탄발효법에서는 중온, 고온의 발효에서는 2~3kgVS/m³/d가 최적이며, 2상 소화에서는 6kgVS/m³/d가 최적으로 알려져 있다.

② 영양소

Bacteria는 성장 및 활동에서 여러 영양소(C, N, O, H, P, S 등)가 필요한데, 가장 중요한 것은 질소와 인이다. 가장 활발한 혐기성반응이 일어나는 범위는 C/N 비율이 12~16 사이로 알려져 있으나 충분한 여유를 두고 20~30 사이로 유지하는 것이 좋다. 유기물에 비해 질소가 적으면 발생가스 중에서 탄산가스가 많이 된다(CO₂ 50% 이상). 반면 질소가 많으면 메탄가스 생성량이 많아지나, 암모니아의 축적에 따른 pH의 저하로 시스템에 문제를 일으킬 수 있다.

③ 온도

혐기성 분해 과정에서 효소가 조절하는 미생물 반응은 온도의 영향을 크게 받는다.

때문에 25℃보다 낮은 온도에서는 기질의 분해율이 급격하게 감소하는 반면, 온도가 25℃ 이상으로 올라가게 되면 분해율이 점차 증가하게 된다. 그러나 온도가 42℃를 초과하는 경우에는 중온성 미생물의 성장 한계점에 도달하면서 분해율이 감소하게 된다. 이후 55℃ 부근 영역에서 분해율이 다시 증가하게 되는데, 이 영역에서 기질의 분해는 고온성 미생물의 활동에 의한 것이다. 고온성 미생물을 이용한 고온 소화(약 55℃)는 중온 소화(약 35℃)에 비해 반응조 내에서 고형물 체류시간(solid retention time)이 짧고 효율이 좋으며 병원균을 쉽게 죽일 수 있는 장점이 있으나 중온 소화에 비해 온도나 유기물 부하 등의 변동에 대한 안정도, 복원력이 떨어지기 때문에 숙련된 운전노하우가 필요하다. 현재 혐기성소화조의 대부분이 중온소화인 것은 고온발효에 비교하여 가운을 위한 필요열량이 낮게 소요될 뿐만 아니라 고온 소화에 비해 조작성이 좋기 때문이다.

④ pH

혐기성 소화에서 유기물 전환의 중요한 두 단계인 산 발효와 메탄 발효에서의 적정 pH는 서로 달라, 산 발효에서는 pH 5.5~6 사이에서 유기산의 발생량이 최대이고, 메탄 발효단계에서는 pH 7.5~8 사이에서 최대 메탄가스 발생량을 나타낸다. 이와 같은 이유에서 상분리가 없이 단상으로 소화를 할 경우에는 가능한 중성에서 약알카리 영역을 빠른 시간에 유지시켜 주는 것이 필요하고 2상 소화에서는 각 발효단계의 pH영역을 유지시켜 주는 것이 중요하다. 한편 산 생성균과 메탄 생성균의 활동에 저해를 받는 pH의 하한치는 각각 4.5 부근과 6.5 부근으로 알려져 있다.

pH가 변함에 따라 산 발효에서 발생하는 휘발성 지방산(volatile fatty acids, VFAs)의 비율도 변화하는데, pH 5.0~7.0 영역에서는 VFA 중 아세트산과 뷰틸산이 주로 발생하고, pH 8에서는 뷰틸산이 감소하고 아세트산과 프로피온산이 주요 산물이 되는 것으로 보고되고 있다.

⑤ 암모니아

혐기성 반응조 내의 암모니아는 대개 단백질 분해과정에서 탈아미노기반응에 의하여 생성된다. 암모늄이온(NH_4^+)보다는 암모니아분자(NH_3)가 훨씬 더 독성이 있는 것으로 알려져 있는데, 이들 두 물질은 pH에 따라서 아래와 같이 평형을 이룬다.



암모니아 분자가 저해를 일으킬 수 있는 농도는 $K_{ic,50}$ 이 100~400NH₃-N/L일 때로 보고되고 있다. $K_{ic,50}$ 은 activity가 50%로 감소하였을 때의 값을 의미한다. 반면에 암모늄 이온의 경우 저해를 일으킬 수 있는 농도는 1,500mg/L 정도이다.

⑥ 황화물(sulfide)

혐기성 반응조에서 황화물은 일반적으로 황산염의 생물학적 환원반응에 의해 발생한다. 황화물이 100mg/L 이상의 농도에서는 혐기성 미생물에 저해를 일으키는 것으로 알려져 있고, 특히 200mg/L 이상의 고농도에서는 완전히 억제시키는 것으로 보고되고 있다. 황산염 역시 50~100mg/L에서 저해를 줄 수 있는 것으로 나타났다. 황화물은 미생물에 독성을 끼칠 수 있는 가용성 중금속과 결합하여 불용성의 염을 형성함으로써 중금속의 독성을 없앨 수 있다. 따라서 중금속이 고농도가 있어도 그것에 상응하는 황화물이 존재하면 저해작용을 나타내지 않을 수도 있다.

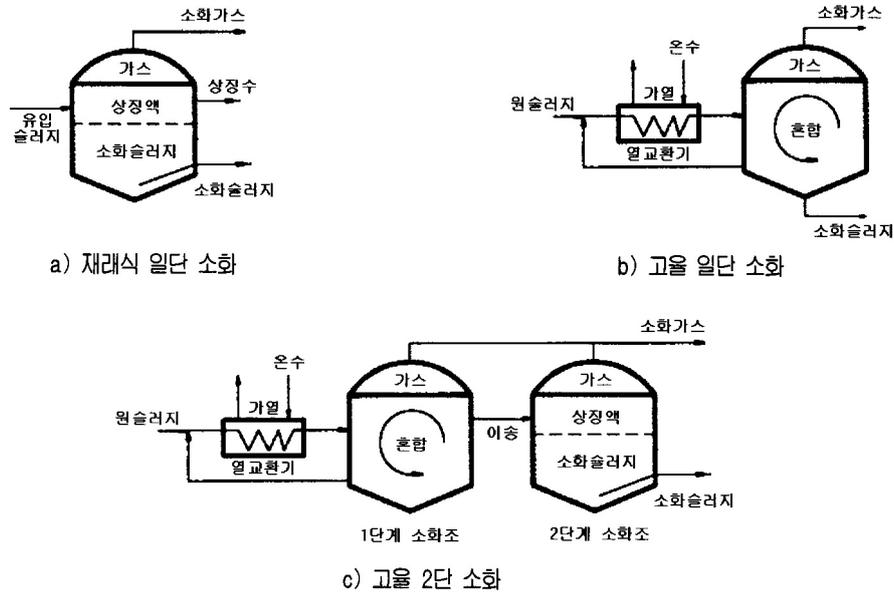
(3) 혐기성소화조의 설계 및 운영

혐기성 소화조를 설계할 때에는 소화조에 유입되는 슬러지의 양과 특성, 고형물 체류 시간 및 온도, 소화조의 운전방법 및 소화조 내에서의 슬러지 농축, 상징수의 형성 및 슬러지 저장을 위하여 요구되는 부피 등을 고려해야 한다. 특히 유입슬러지의 성상은 소화조 운전이 가장 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 처리대상 슬러지의 유기물 농도와 구성, 슬러지의 함수율, 무기 영양분의 농도, 온도의 변화, 독성물질의 함량, 알칼리도 등을 잘 측정하고 계획해야 한다. 또한 설계 시에 이러한 요인들이 어느 정도 변화더라도 운영조건을 유연하게 변화시켜 원활한 소화가 이루어질 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

○ 1단 소화와 2단 소화 :

슬러지 소화조를 1개를 두어 소화할 수도 있지만 더 좋은 소화효율을 얻기 위해서는 앞단에서는 소화조의 슬러지가 완전히 혼합될 수 있도록 교반기를 설치하고, 후단에서는 고액분리가 이루어지도록 2단계로 설치하는 것이 바람직하다. 슬러지를 혼합시키는 이유는 유입되는 슬러지를 소화조 내에 균등히 분배하여 미생물에 연속적으로 양분을

공급하고, 소화조의 온도를 모든 부분에서 같게 하여 층이 형성되는 것을 막으며, 완충제인 알칼리도를 소화조 내에 균등하게 분배함으로써 pH를 조절하고 미생물 성장을 방해하는 물질의 농도를 최소화하며 스크럼 형성을 줄이거나 방지하기 위한 것이다.



〈그림 3-7〉 슬러지 혐기성 소화공정의 종류

슬러지의 혼합은 소화가스에 의한 재순환, 기계식 방법에 의한 혼합 혹은 펌프에 의한 슬러지의 재순환 방법을 이용할 수 있다. 많은 보고에 의하면 소화가스에 의한 재순환은 혼합효과가 크지 않은 것으로 알려져 있기 때문에 되도록 다른 혼합방법을 사용하는 것이 바람직하다.

○ 슬러지의 농축 :

농축은 슬러지를 소화시키기 전에 함수율을 낮추는 과정인데 이는 소화시킬 슬러지의 양을 감소시킴으로써 소화조의 크기를 줄이고, 가열에 필요한 에너지를 감소시키며, 미생물의 양분이 되는 유기물의 농도를 높인다. 또한 식중미생물의 유출을 줄일 수 있고, 혼합효과를 높일 수 있으며, 소화과정을 더 잘 조절할 수 있게 된다.

○ 슬러지의 가용화를 위한 전처리 :

소화과정에서 가수분해 단계는 미생물의 에너지원과 영양분을 제공하기 위한 초기단계이고, 가수분해가 느리게 진행되기 때문에 전체 반응의 율속단계로 작용한다. 이러한

느린 분해반응을 빠르게 진행하도록 돕기 위해서 잉여슬러지의 세포를 파괴함으로써 소화효율을 높이는 가용화기술들이 많이 발전하게 되었다. 대표적인 가용화 방법으로는 기계적처리, 오존처리, 초음파처리, 전자선처리, 산·알칼리처리 등의 방법이 있다.

○ 소화조 가온 :

소화공정에서 온도는 소화효율, 미생물활성에 영향을 미치는 중요한 운전인자이다. 운전 온도에 따라 저온소화(10~25℃), 중온소화(35~40℃) 및 고온소화(55~60℃)로 구분할 수 있는데, 우리나라 대부분의 하수처리장은 중온소화를 이용하고 있다. 소화조를 가온시키는 방법에는 가열된 증기에 의한 직접가온방법과 열교환기에 의한 간접가온방법이 있다. 직접가온방법은 설치 및 운영비가 낮지만 가온효과가 떨어지고 수증기에 의해서 슬러지가 희석되며, 완전혼합이 잘 이루어지지 않으므로 부분 과열이 발생하는 등의 문제가 있다. 따라서 설치 및 운영이 상대적으로 어렵더라도 가온효과가 확실한 간접가온 방식이 더 바람직하다. 2005년 환경부가 실시한 소화조 효율개선 사업에서 과천, 용인, 제천 하수처리장은 직접가온방식을 간접가온방식으로 변경한 후 소화효율이 향상되었다고 보고하였다.

○ 소화조의 준설 :

혐기성 소화조는 장기간 운영하게 되면 소화조 하부에 생슬러지 및 잉여슬러지 플록 내에 함유되어 있던 무거운 입자들이 가라앉으면서 점차 단단한 층을 형성하게 된다. 이렇게 되면 소화조의 유효용적이 감소하여 체류시간이 줄어들고, 슬러지의 혼합이 방해되어 소화효율이 떨어지게 된다. 따라서 적절한 기간마다 계획을 세워 소화조를 준설할 필요가 있는데, 준설 시 가동이 중단되는 소화조로 유입되는 슬러지는 정상 가동 소화조로 이송시켜 처리할 수 있도록 관로를 배치할 필요가 있다. 준설 시 발생하는 퇴적물, 협잡물의 처리도 충분히 고려하여야 한다.

○ 소화효율 :

소화가 얼마나 잘 되었는지에 대한 소화효율은 다음의 식에 나타난 것과 같이 소화조 투입 전후의 유기물질과 무기물질의 비율로 계산된다. 유기물질이 많이 분해될수록 소화가스의 발생량이 증가하고 소화슬러지의 발생량은 감소하게 된다. 또한 슬러지 내의 유기물질의 비율은 감소하면서 무기물질의 비율은 증가한다.

$$D(\text{소화효율}) = \left(1 - \frac{FS_1}{VS_1} \cdot \frac{VS_2}{FS_2}\right) \times 100$$

FS_1 : 투입슬러지의 무기성분(%)

VS_1 : 투입슬러지의 유기성분(%)

FS_2 : 소화슬러지의 무기성분(%)

VS_2 : 소화슬러지의 유기성분(%)

○ 소화가스 포집 및 이용 :

발생하는 소화가스를 포집하고 저장하기 위해서는 소화가스의 발생량과 가스압변동을 항상 감시하여야 하고, 소화조 지붕의 가스돔 및 가스포집관에는 안전장치를 설치해야 한다. 탈황장치를 비롯한 유해물질 제거장치와 안전한 가스저장조가 필요하다. 발생한 소화가스는 소화조 가온을 위한 보일러 연료, 슬러지의 건조 및 소각을 위한 연료, 발전을 위한 동력원으로 사용될 수 있다. 연소 시 부식을 방지하기 위해서는 황화물 성분을 제거해야 한다. 과거에는 소화가스를 소화조 가온을 위한 연료로 사용하고 남은 성분을 모두 소각시켜서 폐기시켰다. 잉여 발생량이 너무 작은 경우에는 어쩔 수 없으나 가능하면 최대한 활용하는 방안을 마련하여야 한다. 작은 하수처리량에 따라 슬러지처리량이 작은 것, 유입하수의 유기물 농도가 낮은 것, 소화조의 설계와 운전이 비효율적인 것 등이 소화가스의 발생량이 적은 원인이 된다. 하수처리량이 작거나 유입하수의 유기물 농도가 낮은 것은 어찌할 도리가 없으나 소화조의 설계와 운전이 잘못되어 소화가 제대로 이루어지지 않는 것에 대해서는 충분히 개선의 여지가 있다. 이에 따라 소화조의 효율 개선을 위한 각종 노력이 강조되고 있는 것이다. 유기물질의 농도가 너무 낮은 문제는 유기성 폐기물의 연계처리로 개선될 수 있으며, 혼합방식의 문제, 가온방식의 문제 등은 반드시 개선되어야 한다.

소화가스는 그 활용방법에 따라 적절한 전처리 방법을 거쳐야 한다. 열량을 증가시키고 안정성을 높이기 위한 전처리, 수분, 할로겐화합물, 황화수소, 암모니아, 실록산을 제거시키기 위한 전처리 등이 요구된다. 소화가스는 소화조 가온을 위한 보일러의 연료로 가장 많이 사용되고 있으며, 근래에는 열병합발전, 연료전지, 도시가스나 자동차연료로 이용할 수 있도록 시도되고 있다.

2. 바이오가스 생산현황

1) 국내 바이오가스 생산 및 보급현황

바이오가스 생산시설은 원료물질 발생원에 따라 하수슬러지를 이용하는 시설, 매립지 가스를 이용하는 시설, 가축분뇨를 이용하는 시설, 음식물 쓰레기 혹은 음식물 폐수를 이용하는 시설, 유기성 폐기물 혹은 폐수를 이용한 시설, 에너지 작물을 이용한 시설 등으로 나누어 볼 수 있다.

바이오가스가 최근 급속히 보급되고 있는 이유는 이 자원을 이용하지 않을 경우 폐기물로 주변 수계나 토양을 오염시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 이들 폐기물성 바이오매스 자원(유기성 폐기물 : 축산 폐수, 음식 쓰레기, 폐지, 하수슬러지 등)은 재활용되거나 에너지로 재순환되지 않으면 폐기물로 환경 문제를 일으키게 된다. 이들 유기성 폐기물들은 어차피 비용을 들여 처리해야 할 폐기물인데 이 처리과정을 개선하거나 처음부터 에너지 회수와 폐기물처리를 동시에 달성할 수 있도록 설계하여 설치·운영한다면 일거양득의 효과를 거둘 수 있게 되는 것이다. 또한 바이오매스 에너지를 이용하면 화석 연료와는 달리 대기 중의 이산화탄소를 증가시키지 않고 순환되기 때문에 탄소배출권을 획득할 수 있는 좋은 방법이 된다. 이러한 장점 때문에 바이오매스 에너지 중의 하나인 바이오가스 생산시설이 빠르게 보급되고 있다. 바이오가스 생산시설은 하루 10톤 이하를 처리하는 소규모 시설로부터 하루에 수천톤 이상의 하수슬러지를 처리하는 대규모 시설까지 다양하며, 운영주체도 공공기관뿐만 아니라 민간업체가 운영하는 시설도 많이 존재한다.

공공하수처리시설에서 발생하는 하수슬러지는 쉽게 분해되는 유기성물질의 농도가 상대적으로 작고, 탄소 대 질소의 비율(C/N비)이 적정 값보다 낮아 다른 유기성 폐기물과의 병합 혹은 연계처리가 많이 이루어지고 있다. 유기성 폐기물들을 별도의 시설에서 처리하는 것보다 하수처리시설의 슬러지처리시설과 연계하여 처리하는 방법의 장점은 하수슬러지에 쉽게 분해되는 유기성물질을 보충하고, 탄소 대 질소의 비율(C/N비)을 맞추어 줌으로써 바이오가스를 효과적으로 증산할 수 있기 때문이다. 또한 각각의 유기성 폐기물 처리시설에서는 부산물로 발생하는 폐수와 소화슬러지를 외부로 보내거나 자체적으로 다시 처리해야 하는 불편이 있지만, 하수처리장에서 폐수는 수처리계통으로 반

송시켜 처리하고, 소화슬러지는 하수의 소화슬러지와 함께 처리하므로 상대적으로 적은 비용으로 쉽게 처리할 수 있다.

아래에는 국내의 바이오가스 생산시설들의 예를 간략히 나타내었다.

〈표 3-11〉 음식물쓰레기를 이용한 바이오가스 생산시설 예

소재지	시설명	시설 형태	운전 상태	시설용량 (톤/일)	소화 방식	설치 연월	생산방식
경기 광주시	광주시퇴비화시설	공공처리	운전 중	20	습식	2001. 8.	열
경기 의왕시	의왕시퇴비화시설	공공처리	운전 중	30	습식	1997. 2.	열
경기 파주시	파주시퇴비화시설	공공처리	운전 중	30	습식	2001. 1.	열
경기 김포시	(주)삼영이엔시	민간시설	운전 중	50	습식	2002. 9.	열
강원 고성군	항목리 환경자원사업소	공공처리	운전 중	10	습식	2003. 11	열
충남 태안군	음식쓰레기자원화시설	공공처리	운전 중	10	습식	2003. 7.	열
경북 영덕군	영농조합법인	민간시설	운전 중	10	습식	2095. 12	열
부산 강서구	생곡음식물자원화시설	공공시설	운전 중	200	건식	2005. 1.	발전차액
인천 연수구	송도자원환경센터	공공처리	운전 중	200	습식	2005. 9.	열

자료 : 바이오가스 현황과 과제, 한국에너지기술연구원, 2010

〈표 3-12〉 음식물쓰레기/분뇨와 하수병합 처리를 이용한 바이오가스 생산시설 예

소재지	시설 형태	운전 상태	시설용량 (톤/일)	소화 방식	설치 연도
부산 강서구	공공처리	운전 중	200	습식	2005
부산 동래구	공공처리	운전 중	120	습식	2000
광주 광산구	공공처리	운전 중	160	습식	2007
울산 남구	공공시설	운전 중	520	습식	2002
대구 북구	공공처리	운전 중	200	습식	2002
강원 속초시	공공처리	운전 중	20	습식	2005
경남 사천시	공공시설	운전 중	20	습식	2004
경남 밀양시	공공시설	운전 중	20	습식	2003
수도권매립지	공공시설	운전 중	1,350	습식	2006

자료 : 바이오가스 현황과 과제, 한국에너지기술연구원, 2010

〈표 3-13〉 가축분뇨를 이용한 바이오가스 생산시설 예

시설명	소재지	원료	시설용량 (m ³ /일)	공정	설비업체	설치 연도
공공처리시설	경기파주	가축분뇨,음식물	80	2단,USAB	(주)한라산업개발	2005
여양농장	충남청양	가축분뇨	20	1단,CSTR	(주)유니슨	2006
모전양돈단지	경기이천	가축분뇨	20	2단,USAB	(주)대우건설	2007
국제축산	경기안성	가축분뇨,음식물	5	1단,PFR	(주)금호건설	2008
우포월드	경남창녕	가축분뇨,음식물	100	1단,CSTR	(주)이지바이오	2008
하수처리장	충남아산	가축분뇨,슬러지	100	2단,USAB	(주)대우건설	2008
-	전남순천	가축분뇨	20	1단,CSTR	정림산업	2008
진영축산	전북부안	가축분뇨	50	1단,CSTR	한진해운	2009
국립축산과학원	경기수원	가축분뇨,도축폐기물	10	1단,CSTR	국립축산과학원	2009
광일농장	경기안성	가축분뇨,농부산물	20	1단,CSTR	(주)DHM	2009

자료 : 녹색 축산신기술, 농촌진흥청, 국립축산과학원, 2010

〈표 3-14〉 매립가스 이용 바이오가스 활용시설 예

소재지	사용형태	운전 상태	시설용량 (kW)	설치 연도
수도권매립지(에코에너지)	발전	운전 중	50,000	2007
수도권매립지(상원EnC)		운전 중	9,880	2003
부산 생곡(서희건설)		운전 중	6,000	2001
전남 목포		운전 중	1,065	2008
광주 운정동(서희건설)		운전 중	3,180	2003
대전 금고동		운전 중	3,460	2003
청주 학천리(서희건설)		운전 중	1,000	2004
군산 내초동(㈜청우이앤씨)		운전 중	1,000	2002
순천 왕지(미래에너지개발)		운전 중	1,850	2005
여수 한흥동(한려에너지개발)		운전 중	923	2005
포항 호동(서희건설)		운전 중	2,000	2002
제주 회천(서희건설)		운전 중	1,000	2003
서울 난지도		가스공급	운전 중	920
대구 방천리(대구에너지환경)	운전 중		7,800	2006
울산 성암동(SK㈜)	운전 중		2,520	2002
원주 흥업동	운전 중		-	2001

자료 : 바이오가스 현황과 과제, 한국에너지기술연구원, 2010

〈표 3-15〉 국내 회사별 바이오가스 활용기술 예

기술 구분	기술 업체명	기술명	적용실적 및 기술의 특징
자체 개발 기술	대우 건설	DABS	-이상중온혐기소화 -인천송도(음식물 200톤/일) -경기이천(20톤/일), 충남아산(100톤/일), 전북무주(50톤/일) -시스템이 안정적이고 가스순도가 높으며, 국내기술 선도기업
	한라 산업 개발	MSWAS	-국내(에너지기술연구원)에서 개발된 기술 -경기안양(5톤/일), 경기의왕(15톤/일), 경기파주(80톤/일), 강원속초(20톤/일), 경남밀양(20톤/일)
	지엘 이앤이		-수평형 소화조를 이용한 습식소화 -경기광주, 경기 김포
	코오롱 건설	IEBS	-충남천안(10톤/일) Pilot설비
	DH-M		-양돈농가형 설비(컨테이너 타입) -충남홍성(10톤/일) -혼소형 열병합발전설비
	에코 데이	ER-1	-경북울진(20톤/일), 충남홍성(30톤/일) -PFR형 습식소화
	효성 예바라		-기존 하수처리장의 소화조에 음식물쓰레기를 전처리 후 처리하는 기술 -음식물침출수, 하수슬러지 -서울강서, 부산수영, 대구신천
	정봉		-하수처리장 연계 음폐수 처리용USAB -광주송대(200톤/일)
	삼을		-USAB형 습식소화 -경남창녕(10톤/일)
	유니슨		-CSTR습식소화 바이오가스 열병합발전설비 -충남청양(20톤/일)
기술 도입	서희 건설	DRANCO	-벨기에로부터 기술을 도입한 건식소화방식 -음식물쓰레기만 처리 -부산 생곡, 서울동대문
	정림 산업		-독일LIPP사 기술제휴 -전남순천 돈분처리시설(10톤/일)
	태영 건설	BIMA (BGP)	-일본 나가소라치 음식물처리시설 기술도입 -중온 습식소화방식, 실적 없음
	미랜	BioACE	-덴마크 MEC Energy ApS로부터 기술도입
	전테크	EGSB USAB	-네덜란드 Biothane으로부터 기술도입 -대전(140톤/일), 구미효성(100톤/일)
	동문IRS	BKE	-독일 IRS로부터 기술도입 -강원동해, 대전유성, 음식물쓰레기 처리

2) 국내 하수처리장의 바이오가스 생산현황

(1) 시설 운영 현황(전국, 2006년)

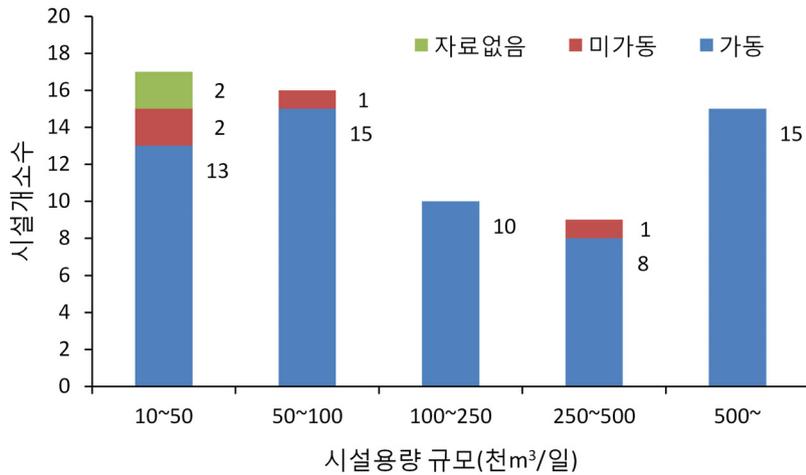
2005년 환경관리공단은 소화조가 설치되어 있는 전국의 68개 하수처리장의 소화조를 대상으로 정밀진단을 실시하여 그 결과를 보고하였고³⁹⁾, 2006년에는 환경부가 주관한 “공공하수도시설 에너지 절감대책 수립에 관한 연구”에서는 67개 소화조 설치 하수처리장 중에서 실제로 소화조를 운영 중인 63개소에 대해 정리하여 보고하였다⁴⁰⁾. 이 절에서는 위의 보고서의 결과들을 바탕으로 하수처리장 소화시설에 대한 다양한 자료를 참조하여 정리하였다. 하수처리장의 바이오가스 생산시설은 하수처리공정에서 발생한 슬러지를 처리하기 위한 공정을 가지고 있어 슬러지를 혐기성 소화로 처리하면서 소화가스(바이오가스)를 발생시키는 시설들을 지칭한다.

2006년 현재 전국 294개 하수처리장 중 소화조 설치 처리장은 67개소로, 이 중 4개소는 소화조를 가동하지 않고 있고, 1개소는 실온에서 소화 중이다. 하수처리장의 처리용량에 따라 소화조 운영 현황을 보면, 10,000~50,000m³/일 규모에 17개소(13개소 가동 중, 2개소 미가동, 2개소 자료미비), 50,000~100,000m³/일 규모에 16개소(15개소 가동 중), 100,000~250,000m³/일 규모에 10개소(모두 가동 중), 250,000~500,000m³/일 규모에 9개소(8개소 가동 중), 그리고 500,000m³/일 이상 규모에 15개소(15개소 가동 중)가 설치되어 있다.

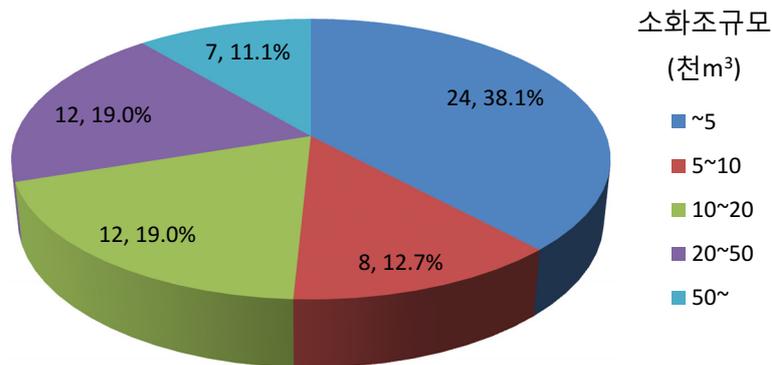
가동 중인 소화조를 규모별로 살펴보면 소화조 용량 5,000m³ 이하가 24개소(38.1%), 5,000~10,000m³가 8개소(12.7%), 10,000~20,000m³가 12개소(19.0%), 20,000~50,000m³가 12개소(19.0%), 그리고 50,000m³ 이상이 7개소(11.1%)였다.

39) 소화조 운영실태 정밀진단 결과 보고, 환경부 상하수도국 생활하수과, 2005

40) 공공하수도시설 에너지 절감대책 수립에 관한 연구, 대한상하수도학회, 2006



〈그림 3-8〉 하수처리장 규모에 따른 소화조 운영 현황



〈그림 3-9〉 소화조 규모별 개소수

소화조 운영에서 몇 가지 운영 방식에 따라 하수처리장 개소수를 분류하면 다음과 같이 간략히 정리할 수 있다.

- 가온 방식 : 직접가온(증기주입식) 37개소(63.8%), 간접가온(열교환방식) 21개소(36.2%)
- 교반 방법 : 가스교반방식 45개소(77.6%), 기계교반 8개소(13.8%), 가스 및 기계교반 병행 5개소(8.6%)
- 농축방법 : 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합하여 농축하는 시설 43개소(74.1%), 분리 농축하는 시설 12개소(20.7%)

- 소화조 온도 : 중온소화 적정범위인 33~37℃로 운전 37개소(63.8%), 33℃ 미만으로 운전 18개소(31%), 37℃ 이상으로 운전 3개소(5.2%). 소화조 내 상부와 하부의 온도차가 2℃ 이내로 운전하는 시설 41개소(70.7%)⁴¹⁾

〈표 3-16〉 전국 하수처리장 소화시설의 조건별 운영현황(2005)

운영조건 구분		개소수	백분율
소화조 가온 방법	직접가온	37	63.8%
	간접가온	21	36.2%
소화조 교반 방법	가스교반	45	77.6%
	기계교반	8	13.8%
	가스, 기계병행	5	8.6%
생슬러지/잉여슬러지 농축방법	혼합농축	43	74.1%
	분리농축	12	20.7%
소화조 운영 온도	적정범위 33~37℃	37	63.8%
	33℃ 미만	18	31.0%
	37℃ 이상	3	5.2%
	상·하부 온도차 2℃ 이내	41	70.7%
합계(소화조 운영 하수처리장 수)		58	100%

(2) 소화효율에 영향을 미치는 인자

위의 보고서에서 보고한 각 시설의 진단결과로부터 도출된 소화효율에 영향을 미치는 인자들을 정리하면 다음과 같다.

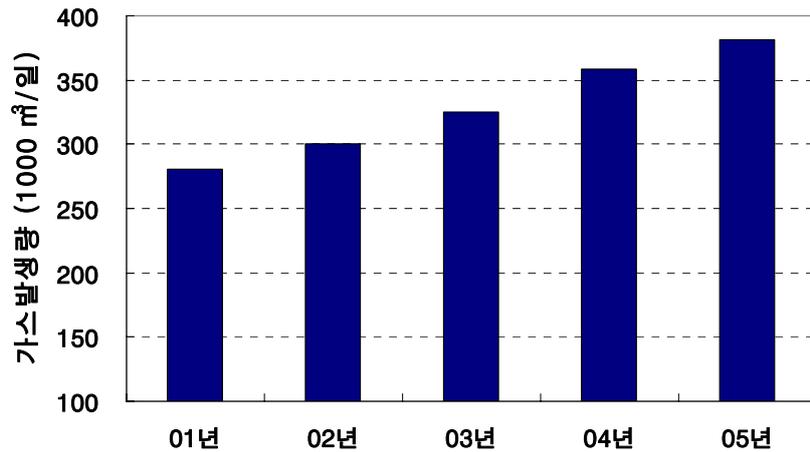
- 소화조 구성 : 1단 소화보다 2단 소화의 효율이 약 5% 높으며, 계란형 소화조가 소화효율이 가장 좋다.
- 소화조 가온방식 : 직접가온(증기주입식)보다 간접가온(열교환방식) 방식의 소화효율이 높다.

41) 소화조 상·하부의 온도차가 2℃ 이상인 경우 조내 슬러지의 혼합이 원활치 않음.

- 소화조 온도 : 소화조 적정온도범위인 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ 를 유지하는 처리장의 평균소화효율이 좋다. 상·하부 온도차가 2°C 이내인 경우의 소화효율이 높게 나타난다.
- 소화조 체류일수 : 소화온도 35°C 에서 약 25일 정도가 적합하다. 소화온도가 낮을 경우는 소화일수를 길게 하고, 높을 경우는 줄여서 운전할 수 있다.
- 소화조 pH : 적정범위인 7.0~7.5로 유지하면 소화효율이 가장 높다. 혐기성 소화에서 유기산을 분해하는 역할을 하는 메탄균은 pH에 민감하여, 7.0 이하로 저하되면 소화방해가 일어나고 가스발생도 억제된다.
- 유기산(VA) 농도 : 소화상태를 판단할 수 있는 좋은 지표로, $2,000\text{mg/L}$ 이상에서는 pH가 저하하고, 메탄발효가 억제되므로 통상 $300 \sim 2,000\text{mg/L}$ 의 범위를 유지하는 것이 적절하다. 유기산과 알칼리도의 비율(VA/Alk)은 소화조 투입슬러지 양, 농도 등을 조절하여 VA/Alk 비를 0.3 이하로 유지하는 것이 좋다.
- 탄소질소비 : 하수슬러지의 C/N비는 12~16일 때 가스발생량이 가장 많으나 순수한 잉여오니는 이미 생물학적 분해가 이루어졌기 때문에 C/N비가 4~6 정도로 낮아 잉여오니만으로는 혐기성 처리 효율이 낮다.
- 슬러지 농축방법 : 생슬러지와 잉여슬러지를 분리 농축하는 처리장의 소화효율이 혼합하여 처리하는 처리장보다 높게 나타난다.
- 하수처리 공법 : 고도처리시설을 운영 중인 처리장의 소화효율이 미설치된 처리장보다 높다.
- 하수유입수질 : 하수 원수의 BOD가 높을수록 소화효율이 높았으며, 특히 100mg/L 이하인 처리장의 평균소화효율은 매우 낮은 것으로 나타난다.

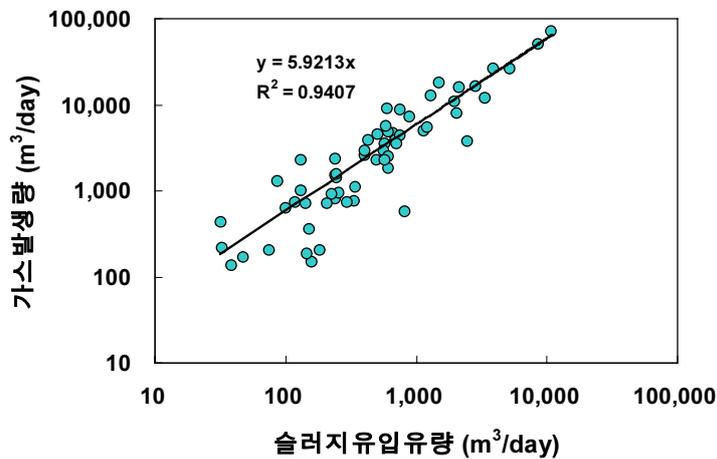
(3) 가스발생현황

2005년 현재 총 소화 가스발생량은 $382,000\text{m}^3/\text{일}$ 이며, 2001년부터 2005년까지 꾸준히 증가하고 있다. 하수처리량에 따른 실제 가스발생량 대 설계 가스발생량의 비는 평균 69%, 슬러지 유량가중 평균값은 82%로 대부분의 처리장에서 설계 가스발생량에 미치지 못하고 있다.

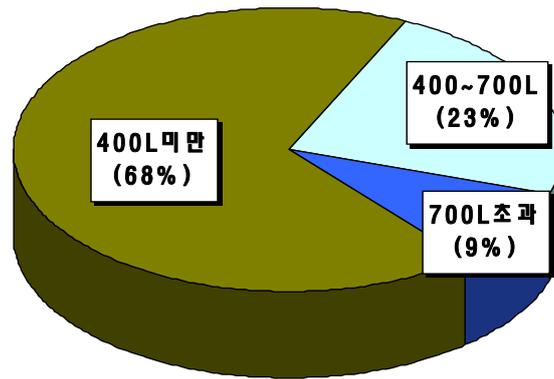


〈그림 3-10〉 연도별 총 소화가스 발생량 변화 추이

하수처리장 60개소의 평균 가스발생량은 $5.84\text{m}^3/\text{톤}$ 슬러지로 나타났다. 농축 슬러지의 휘발성 고형물(VS) 1kg당 가스발생량은 적정범위 ($400\sim 700\text{L}/\text{VS kg}$) 또는 그 이상은 19개소(32%)에 불과하며 나머지(68%) 처리장에서는 가스발생량이 400L 이하였다. 소화조에서의 소화효율은 2004년 현재 평균 35%이며, 하수처리장 규모와 별다른 상관관계를 나타내지 않았다.



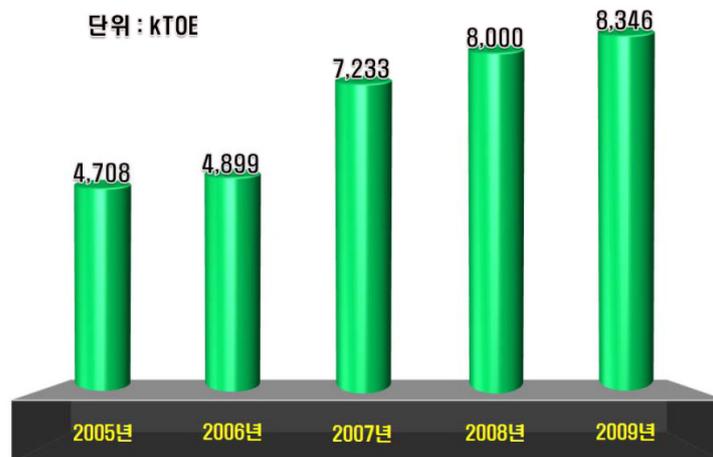
〈그림 3-11〉 슬러지 유입유량에 따른 가스발생량



〈그림 3-12〉 단위 휘발성 고형물당 가스발생량

3) 외국 바이오가스 생산 및 보급현황

한국석유관리원 녹색기술연구소의 보고⁴²⁾⁴³⁾에 의하면 국외의 바이오가스 에너지화에 의한 보급은 유럽을 중심으로 기술개발 및 사업화가 진행되고 있으며, 유럽 국가의 바이오가스 발생량 현황을 보면, 2009년에는 약 8,346kTOE의 바이오가스가 발생하였다. 연도별 바이오가스 발생 현황을 보면, 2007년 바이오가스 발생량이 2006년 대비 47%가 늘어 꾸준히 증가하는 추세에 있다.



〈그림 3-13〉 유럽국가의 바이오가스 발생량

42) 김재곤, 세계 바이오가스의 보급동향 분석, 한국석유관리원 녹색기술연구소

43) 김재곤, 국내외 천연가스 대체 바이오에너지의 기술개발 연구현황 분석, 한국석유관리원 녹색기술연구소

바이오가스 생산 기술은 1970년대 석유위기를 계기로 개발이 시작되어 구동독 시절 상당 수준의 기술을 확보하였으나, 이후 유가안정에 따라 개발 필요성이 감소하였으며, 1997년 원료(음식물)와 포장지를 분리하는 기술이 개발된 것을 시발로 하여 2000년대 들어 덴마크를 중심으로 실용화 방안이 적극 추진되고 있다. 바이오가스 생산 기술 수준은 관련 장비 생산업체별 및 국가별(독일, 덴마크 등)로 대체로 비슷한 수준이나, 어떤 원료를 사용하는지 여부에 따라 바이오가스 생산비용이 크게 달라지게 된다. 이러한 바이오가스는 생산과 공급측면에서 볼 때 바이오디젤, 바이오에탄올 등의 다른 바이오연료보다 여러 측면에서 장점을 가지고 있는데, 특히 자국의 폐기자원을 활용하여 생성할 수 있다는 장점(이때는 원료가격이 없거나, 매우 낮다)과 기존의 천연가스 자동차 및 도시가스 배관망을 사용할 수 있다는 점에서 공급체계의 이점을 가지고 있다. 유럽연합은 바이오연료의 전주기 분석(LCA; life cycle assessment)에 의한 온실가스 배출량을 산정하여 온실가스 감축 기여가 큰 바이오연료 사용을 권고하고 있다. EU는 아래의 표와 같이 바이오연료의 생산경로에 따른 온실가스 배출 저감률을 정하고 있는데, 바이오가스의 온실가스 배출 저감률은 80~86%으로 바이오에탄올(32~71%), 바이오디젤(36~45%)에 비해 우수한 것으로 제시하고 있다.

〈표 3-17〉 EU의 바이오연료의 온실가스 배출 저감률

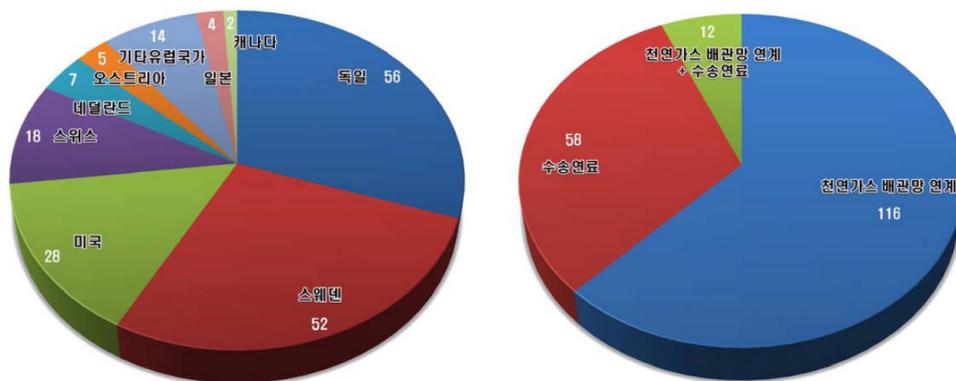
바이오연료 생산경로	온실가스 배출 저감률
밀 바이오에탄올	32%
사탕수수 바이오에탄올	71%
유채유 바이오디젤	45%
대두유 바이오디젤	40%
팜유 바이오디젤	36%
유기성폐기물 바이오가스	80%
습식소화 바이오가스	84%
건식소화 바이오가스	86%

유럽에서는 주로 열병합발전(CHP; combined heat and power)을 통해 바이오가스를 에너지화하고 있으며, 2009년 기준으로 총 25,167GWh의 전기를 생산하였다. 2000년 이

후 신재생에너지 보급비율 목표 달성을 위하여 바이오가스를 고질화(혹은 개질화)하여 수송연료 또는 천연가스 배관망에 연계하여 사용하는 기술의 개발 및 사업화가 진행되고 있다. 2010년까지 총 186개소의 바이오가스 고질화플랜트가 설치되어 운영되고 있다.

국가별 바이오가스 고질화 플랜트 설치 현황을 보면 독일(56개)과 스웨덴(52개)이 가장 많은 고질화 플랜트를 설치하여 운영 중이며, 특히 스웨덴은 바이오가스를 고질화하는 기술의 핵심기술인 이산화탄소/메탄 분리기술을 보유하고 있는 업체가 다수이며, 스웨덴 이외의 국가로 사업영역을 넓히고 있다. 전 세계적으로 바이오가스 고질화 플랜트 설치현황을 보면 2000년 이후부터 본격적으로 플랜트가 설치되기 시작하였으며, 2006년부터 그 수가 급속도로 증가하고 있다.

바이오가스 고질화 기술은 크게 이산화탄소/메탄 분리기술로 분류를 할 수 있는데 흡착법(47개)과 물 흡수법(69개)을 많이 적용하여 고질화 플랜트가 설치되었으며, 막 분리법은 2006년부터 본격적으로 적용되기 시작하였다. 바이오가스 고질화 플랜트를 통해 생산된 바이오메탄은 압축/액화를 통해 수송연료로 사용되거나 천연가스 배관망과 연계를 통해 천연가스와 혼합하여 사용되고 있다. 바이오가스 고질화플랜트 현황을 보면 총 186개소 중 116개소가 천연가스 배관망과 연계하여 바이오메탄을 공급하고 있고, 58개소는 수송연료로 사용하고 있다. 그리고 12개소는 천연가스 배관망 연계와 수송연료로 병행하여 사용하고 있다.



〈그림 3-14〉 국가별 바이오가스 고질화 플랜트 설치현황 및 바이오가스 활용현황

〈표 3-18〉 외국의 바이오가스 고질화 기술 보유 회사

회사명	이산화탄소/메탄분리기술	최종산물	국가명
Prometheus Energy	심냉법	액화바이오메탄	미국
Acron Technology	심냉법	액화바이오메탄	미국
Malmberg	물흡수법(Water Scrubbing)	바이오메탄	스웨덴
Flotech	물흡수법(Water Scrubbing)	바이오메탄	스웨덴
Purac	화학적흡수법(Amine)	바이오메탄	스웨덴
DMT	물흡수법(Water Scrubbing)	바이오메탄	네덜란드
Air Liquid	멤브레인법	바이오메탄	프랑스
Xebec	흡착법(PSA)	바이오메탄	캐나다

독일의 바이오에너지 종류별 이용실적을 보면 바이오가스는 전체 바이오에너지의 약 8.5%를 차지하고 있다. 독일에서 바이오가스는 전력과 난방열을 연계하여 생산하는 열병합발전에 주로 활용되고 있다. 바이오가스를 이용한 전력 생산을 장려하는데 그치지 않고 바이오가스 생성 시 발생하는 열의 효율적인 이용을 권장하기 위하여 전력 생산 없이 바이오가스만을 생산하는 시설에는 정부 보조금을 지급하지 아니하고 열 이용의 효율성이 증대된 시설에는 전력에 대한 보조금을 증액 지급하는 정책을 실시하고 있다. 해조류를 이용한 바이오매스 생산 프로젝트, 바이오매스를 이용한 바이오석탄 획득 방법 연구 등도 추진되고 있다.

〈표 3-19〉 독일의 바이오에너지 종류별 이용실적(2007)

종류별	전력	난방	수송연료	합계	백분율
고체바이오	11.7	76.2	-	87.9	57.7%
액체바이오	2.6	4.5	44.4	51.5	33.8%
Biogas	9.5	3.5	-	13.0	8.5%
합계	23.8	84.2	44.4	152.4	100%

자료 : 독일의 그린에너지 정책 및 산업, 외교통상부, 2009
단위 : TWh(10억 kWh)

독일에는 현재 총 3,700여 개의 바이오가스 생산 시설이 운영되고 있는데, 대부분 소규모 시설이고 투자 규모 100억 원 이상인 곳은 50여 개에 그치고 있으나 독일 정부가 가장 적극적으로 육성·지원하고 있는 분야로 향후 성장 가능성이 높다. 바이오가스 분야

에는 200여 개의 기업이 활동하고 있으며, 대부분의 기업이 중소기업 수준의 규모이다. 외교통상부는 “독일의 그린에너지 정책 및 산업”에서 바이오가스 분야 사업 영역별 기업 수를 다음과 같이 보고하였다.

- 바이오가스 시설 관련 부품 제조 : 60개
- 가스 분류(Biogasaufbereitungsanlagen) : 32개
- 원료 반죽기기(Ruhrwerke) 관련 : 23개
- 바이오가스 시설 안전점검 등 : 3개
- 설비 상담, 기술지도 및 금융 등 서비스 : 74개

3. 슬러지의 에너지 최적 처리방안

1) 슬러지의 최적처리 개념

앞에서 설명했던 바와 같이 슬러지의 혐기성소화는 슬러지의 감량화, 에너지화 후 안정화 및 자원화의 목적을 달성하기 위한 슬러지처리공정의 핵심 과정이다. 슬러지를 최적으로 처리하는 것은 다음과 같은 몇 가지 중요한 요소들을 요구한다.

- A. 각 공정의 에너지 효율 개선
- B. 기본적인 소화조 운전 성능 개선
- C. 효율적인 슬러지 가용화 처리
- D. 바이오가스 증산을 위한 유기성 폐기물 연계처리
- E. 생산된 바이오가스의 효율적 활용
- F. 소화슬러지의 연료화, 자원화 처리
- G. 소화 탈리액, 탈수여액의 반송 시 인회수
- H. 각종 관련제도 제정, 개선으로 최적 처리 촉진

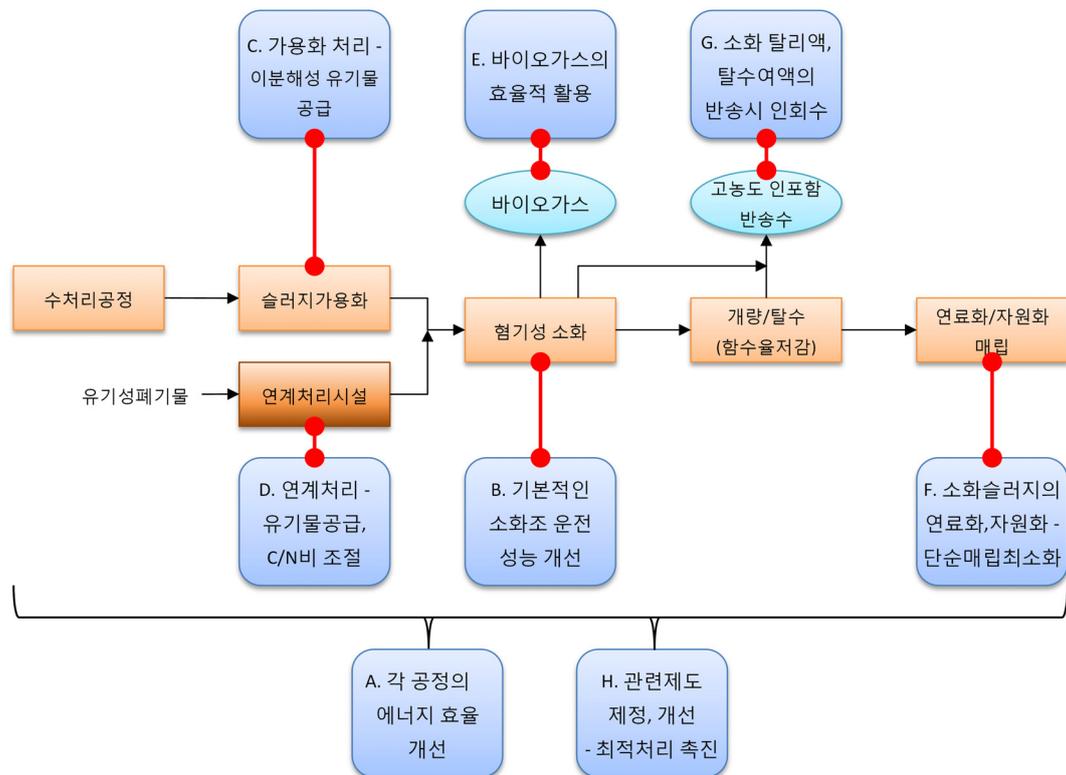
○ 각 공정의 에너지 효율 개선 :

각 공정의 소비 에너지 효율을 개선하는 것은 최적처리를 위한 에너지 절감에 가장

기초적인 단계이다. 전술한 ‘에너지 소비 절감 대책’에서 언급한 것처럼 각 공정의 최적 설계, 주요 에너지 소비 기기에 대한 효율성 제고, 통합제어를 통한 운전기법의 개선 등의 방법을 통해 에너지 효율을 개선하도록 한다.

○ 기본적인 소화조 운전 성능 개선 :

소화조의 운영은 슬러지 처리의 핵심적인 공정이므로, 소화효율 개선을 위해 가장 먼저 여기서 언급하는 최소한의 개선은 반드시 이루어야 한다. ‘혐기성소화조의 설계’와 ‘소화효율에 영향을 미치는 인자’를 참고하여 가능하면 소화조구성을 2단으로 하여 혐기성소화와 고액분리가 별도의 조에서 진행되도록 하고, 에너지 효율이 높은 간접가온 방식으로 소화조를 가온하며, 소화조의 온도는 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ 를 유지하면서 상·하부의 온도차를 적고 충분한 혼합이 이루어지도록 적절한 교반을 실시한다. 조 내 pH를 7.0~7.5로 유지하고, 유입기질에 이분해성 유기물질 농도를 높이면서 C/N비를 적절히 조절할 수 있는 방법을 강구한다. 소화조 운전 성능 개선을 위해서는 예상치 못한 상황에서도 효과적으로 대처할 수 있도록 소화조 운전을 위한 전문인력의 양성도 필요할 것이다.



〈그림 3-15〉 하수슬러지 최적처리의 개념도

○ 효율적인 슬러지 가용화 처리 :

혐기성소화의 기질로 하수슬러지만을 이용하게 되면 쉽게 분해할 수 있는 유기질이 부족하여 반응이 충분히 일어나지 않게 되는데, 슬러지의 세포벽을 파괴하여 이분해성 유기질을 공급하도록 하여 소화효율을 높인다. 이 방법은 혐기성소화의 감량효과 및 바이오가스 증산에 매우 효율적인 것으로 알려져 있으나, 가용화 자체를 위한 비용이 지나치게 증가하지 않도록 하는 것이 필요하다.

○ 바이오가스 증산을 위한 유기성 폐기물 연계처리 :

소화조에 유입되는 유기물농도를 높이는 방법으로 유기성 폐기물의 연계처리를 시도할 수 있다. 이를 통해 바이오가스를 증산할 수 있다. 다만 하수슬러지만 소화시킬때보다 소화슬러지의 양이 늘어날 수 있고, 소화조 탈리액에서 유기물농도와 질소, 인의 농도가 증가하여 수처리계통에 부하가 커질 수 있다. 그러나 유기성 폐기물들을 별도로 처리하기 위해서 소화조를 비롯한 슬러지처리시설과 폐수처리시설을 별도로 운영하는 것과 비교하면, 기존에 운영하고 있던 하수처리시설을 활용하여 바이오가스를 증산하고, 유기성 폐기물을 동시에 처리하는 것이 훨씬 경제적이고, 기술적으로 효율적이다. 단, 기존의 하수처리시설에 과부하를 주지 않도록 적절한 양을 연계처리하는 것이 중요하다.

○ 생산된 바이오가스의 효율적 활용 :

혐기성소화조에서 발생한 바이오가스는 과거에는 보일러 연료로만 사용하면서 보일러에서 생산된 증기를 소화조에 주입시킴으로써 혼합효과와 가온효과를 주는 데 많이 활용되었고, 그 나머지는 소각시켜 폐기되었다. 하지만 이제는 바이오가스의 전처리와 고질화(개질화) 기술이 많이 발달하여, 고급의 에너지원으로서 열병합발전, 자동차 혹은 도시가스 연료로 공급, 연료전지 이용 등을 추진하고 있다. 기술개발과 함께 바이오가스 공급과 사용에 관한 제도적인 보완이 뒷받침될 필요가 있다.

○ 소화슬러지의 연료화, 자원화 처리 :

소화된 슬러지는 가장 단순하면서 에너지가 적게 소비되는 방법으로 연료화시키는 것이 가장 바람직할 것으로 생각된다. 퇴비화, 고화 등의 자원화는 그 소비처를 확보할 수 있을 때에만 추진하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 재활용품으로 만들어 놓고도 소비되지 않으면 재활용품이 다시 처리해야 할 폐기물이 되기 때문이다. 연료로서의 품질이

그리 높지는 않더라도 스스로 연소할 수 있는 발열량 기준 이상만 되도록 만들면, 기존에 운영되는 화력발전소에서 기존의 연료와 함께 혼소시키는 것이 가장 합리적일 것이다. 소각처리를 위한 소각장을 새로 건설하는 것이 매우 어려운 것도 기존 화력발전소에서 혼소시키고자 하는 이유 중의 하나이다. 슬러지 연료가 소량 투입되는 것은 기존 화력발전소의 연소가스 배출이나 연소잔재 발생 증가에 큰 영향을 미치지 않는다. 단, 기존 연료보다 낮은 발열량으로 발전소 운전이 문제가 되지 않도록 혼소에 대한 기준을 마련하는 것이 중요하다. 소화슬러지의 연료화, 자원화를 통해서 단순 매립을 최소화하도록 한다.

○ 소화 탈리액, 탈수여액의 반송 시 인회수 :

하수처리 방류수의 수질기준이 강화되었기 때문에 인을 제거하기 위해 응집 등의 방법을 이용하면 수질기준은 달성할 수 있으나 새로이 처리해야 할 슬러지가 발생한다. 이러한 방법보다는 비교적 운전이 복잡하고 초기설치비가 소요되지만, 세계적으로 인자원이 고갈되고 있는 상황속에서, 고농도의 인이 함유되어 있는 소화 탈리액과 탈수여액은 인을 자원으로 회수하기에 아주 적합하다. 인은 비료로서의 가치가 입증되어 외국에서는 상용화 기술로 활용되고 있다.

○ 각종 관련제도 제정, 개선으로 최적 처리 촉진 :

연료화 및 자원화과정을 통해서 생산되는 재활용제품들의 소비를 촉진하기 위해서는 재활용품의 품질향상이 필수적이지만, 재활용품 소비를 막는 법적 제한이 있는 경우 충분한 검토 후 법적조치를 개선하여 재활용품 소비를 촉진할 수 있도록 해야 한다. 바이오가스의 도시가스 공급 기준, 슬러지연료의 화력발전소 혼소 기준, 열병합발전의 전력구매 기준 등이 마련되고, 하수처리수준을 벗어난 다른 기관과의 협력이 원활히 이루어질 수 있도록 각종 장려정책이 마련되어야 할 것이다.

다음 절에는 슬러지를 최적으로 처리하기 위한 요소들 중에서 슬러지 전처리로서의 가용화처리, 유기성 폐기물 연계처리에 대해서 살펴보기로 한다.

2) 슬러지 전처리 - 가용화

우리나라의 많은 하수처리장에는 혐기성소화조가 설치되어 있으나, 이들 혐기성소화조의 소화효율이 낮은 관계로 메탄가스의 유효이용정도도 낮은 뿐만 아니라 감량화 효과 및 에너지 회수가 충분히 이루어지지 않고 있다. 따라서 잠재적인 재생에너지원인 슬러지로부터 바이오가스 형태의 에너지를 효율적으로 회수하기 위해서는 소화조 효율을 개선시킬 수 있는 여러 가지 방안이 필요하다. 그 유력한 방법들 중의 하나는 소화조 투입 전단계에서 슬러지를 대상으로 전처리를 행하여 소화효율을 높이는 방법이다. 이러한 슬러지 전처리 기술은 슬러지 내 미생물의 견고한 세포벽을 파괴하여 미생물의 생분해성을 높이는 것을 목적으로 하고 있다. 이들을 크게 분류하면 아래 표에 나타나 있는 바와 같이 불밀처리, 초음파처리 등의 기계적 방법, 알칼리나 오존 등을 사용하는 화학적 방법, 높은 온도와 그에 수반하는 고온을 이용하는 열적 방법, 효소나 미생물제제를 사용하는 생물학적 방법 등으로 구분할 수 있으며, 이들 중 두 가지 이상을 결합하여 전처리 효과를 극대화할 수도 있다.

〈표 3-20〉 슬러지 전처리 가용화 기술의 분류

처리 기술	처리 방법
생물화학적 처리방법	고온 호기성 소화를 이용한 방법 소화균을 이용하는 방법
화학적 처리방법	오존을 이용한 처리방법 전기분해를 이용한 처리방법 알칼리 약품처리법 펜톤 처리법
물리적 처리방법	캐비테이션 파쇄법(초음파, 수리동력학) 초임계수를 이용한 방법 볼밀(Ball mill) 파쇄법
복합 처리방법	알칼리 처리 + 기계적 파쇄 감압파쇄 + 가열 + 초음파

(1) 고온 호기성 소화를 이용한 가용화

이 기술은 고온 호기성 세균에서 나오는 내열성 효소를 이용하여 오니를 가용화시키고, 가용화된 오니를 생물반응조에 반응시켜 가용화된 오니가 최종적으로 CO₂ 등으로

산화·분해되어 오니 발생을 저감화시키는 기술이다. 이러한 가용화는 분비되는 효소의 종류 및 온도 등에 따라 그 정도는 달라지는 것으로 보고되고 있다.

슬러지의 가용화 속도를 높이기 위해 가동초기에는 고온 호기성 세균 반응조 내에 자연계에서 분리된 *Bacillus Stearothermophilus*를 식중하나, 이 기술의 근본원리는 슬러지 가용화조의 운전조건에서 자연발생적으로 증식하는 고온 호기성 세균이 가지는 슬러지 가용화 능력을 이용하는 것이다. 이러한 원리상 슬러지 발생이 최대한 억제되기 위해서는 잉여슬러지가 슬러지 가용화조에서 전부 가용화되고 생물반응조에는 전부 무기화되어야 하지만, 실제 순수 고온 호기성 세균을 이용한 경우 투입슬러지의 약 50~60%가 가용화되나, 혼합배양의 경우 40~50% 정도 감량화되어 슬러지는 잔존하게 된다. 따라서 슬러지 감량화를 향상시키기 위해서는 동일한 프로세스가 반복되어야 한다. 이때 가용화 작용은 고온 호기성 세균이 분비하는 효소의 분해작용과 열에 의한 물리화학적 열변성의 양 작용이 동시에 진행되어 가용화 및 생분해도가 증가한다. 이와 같이 가용화된 슬러지는 생물반응조에서 일부는 재합성되지만 대부분은 이산화탄소와 물로 분해되어 슬러지가 감량화되고 결과적으로는 잉여오니가 감소한다.

고온 호기성 가용화조의 온도는 63℃를 표준으로 설정하되 60~70℃의 범위에서 제어하며, 수리학적 체류시간(HRT)은 1.5일 정도를 표준으로 하되, 1~3일 정도의 범위로 설정한다. 가용화조에서 슬러지의 가용화 및 산화분해를 위해 필요한 산소의 양은 저감화 슬러지 1kg당 0.34kgO₂ 정도이다.

(2) 오존 산화

슬러지가 오존과 접촉 시, 오존의 산화력은 슬러지를 구성하고 있는 세균의 세포벽을 구성하는 점성물질을 해체하고 세포벽을 구성하고 있는 다당성분을 분해하거나 저분자화하여 결과적으로는 세포벽을 파괴하게 된다. 이러한 세포벽의 파괴에 따라 세포 내 원형질(단당류 및 유기산 등)이 용출되며 이물질은 일부 오존산화력에 의해 분해되어 이분해성 유기물질(Readily Biodegradable COD, RBCOD)로 변환된다. 이분해성으로 전환된 유기물질이 생물반응조로 반송되면 기존의 활성슬러지에 의해 산화 분해되어 무기화되며 일부는 생체를 합성하는데 사용된다.

오존에 의한 슬러지 가용화는 오존에 의한 직접반응과 OH라디칼에 의한 간접 반응에

의해 일어난다. 일반적으로 OH라디칼이 오존보다 산화력이 높고, 분해대상 범위도 더 넓기 때문에 최근에는 OH라디칼을 생성 및 이용할 수 있는 공법이 많이 개발되고 있다. 오존 처리는 pH에 의해 처리효율이 크게 달라지며 OH라디칼은 방해물질(scavenger)에 의해 저해를 받는 경우도 있는 것으로 알려져 있다. 또, 제2의 부산물이 생성될 수 있으며 과도한 오존처리는 경제성에서 불리하다. 문헌에 의하면 오존주입률 0.05gO³/gSS까지는 슬러지의 가용화가 오존주입량과 거의 비례하여 증가하는 것으로 보고되고 있다.

〈표 3-21〉 오존을 이용한 하수슬러지 감량화 기술의 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> • 기존의 처리시설에 설치 가능 • 슬러지의 감량화와 동시에 BOD 감소 • 난분해성 물질의 처리 가능 • 살균이 동시에 진행 	<ul style="list-style-type: none"> • 설치비가 비쌈 <ul style="list-style-type: none"> - 오존 발생장치 - 오존에 의한 배관 부식 방지를 위한 내식성 재질 사용 - 배 오존 파괴 설비가 필요 • 운전비용이 비쌈 • 고도의 운전기술이 필요 • 배오존에 의한 2차대기오염의 가능성

오존 처리에서는 생물반응조의 슬러지를 반응슬러지로부터 오존과 접촉 반응시킨 뒤 생물반응조로 반송하도록 구성되어 있고, 부설설비로 배오존 처리장치가 필요하다. 활성슬러지는 슬러지 가용화조(오존접촉조)에서 오존의 강력한 산화작용에 의해 생분해성이 높아지며, 이러한 슬러지는 생물반응조 내에서 일부는 활성슬러지로 재합성되거나 나머지는 이산화탄소와 물로 분해되어 최종적으로는 슬러지 발생량이 감소한다. 오존에 의하여 발생한 RBCOD 성분은 슬러지의 질소제거를 위한 유기 탄소원으로 활용이 가능하나, 이러한 가용화단계에서 질소 및 인 성분도 일정비율로 용출되므로 발생한 RBCOD 중 일부만 고도처리의 유기탄소원으로 활용이 가능하다. 오존을 이용하여 슬러지를 처리한 후 소화조로 이송할 경우에는 소화효율이 향상된다. 이러한 몇 가지 예가 아래 표에 제시되어 있다.

〈표 3-22〉 오존 처리에 따른 슬러지 가용화율 및 기타 처리효율 비교

잉여슬러지 TS (%)	오존투입량	가용화율 (%)	공정 종류	효율변화 (% of control)
0.2	50 mg O ₃ /g VSS	-	CSTR-AS (SRT 10 day)	잉여슬러지 70% 감소
0.4	0.5 g O ₃ /g DS	25	CSTR-BNR (SRT 16.5 day)	총 질소 10% 감소
0.7	0.6 g O ₃ /g SS	45.3	Batch	부피 55% 감소
0.95	0.2 g O ₃ /g COD	29	Batch	메탄 180% 증가
1.2	0.2 g O ₃ /g SS	-	Batch	메탄 200% 증가
1.8-1.6	0.05 g O ₃ /g TS	37	CSTR-AD (14day)	메탄 180% 증가

자료 : 환경부

일본 군마현(縣)에 소재한 시마 하수처리장은 오존을 이용한 슬러지 감량화 기술을 적용하고 있는데, 오존 처리를 한 경우 발생하는 슬러지의 양은 대조군에 비하여 1/3.4로 감량되는 것으로 보고되었다.

(3) 알칼리 처리

알칼리에 의한 슬러지의 가용화는 슬러지 내 미생물 세포벽의 화학적 분해에 의해 이루어진다. 적용되는 알칼리의 종류에 따라서도 효율에 차이가 있는데 부분적으로 용해되는 2가의 알칼리보다 1가의 알칼리가 높은 효율을 나타내며 그 중에서도 NaOH는 가장 높은 효율을 보이는 것으로 보고되고 있다. 알칼리 처리에 의한 슬러지 가용화의 효율은 알칼리제 주입 농도, 접촉시간, 슬러지 고형물 농도 등 여러 가지 요인에 의해 좌우된다. 일반적으로 일정 범위까지는 알칼리제 주입농도와 접촉시간이 커질수록 가용화 효율이 증가하였다가 그 이후로는 거의 일정한 값을 유지하므로, 최적 알칼리 주입 농도와 접촉시간을 결정하는 것이 중요하다. 슬러지 가용화 효율을 높이기 위하여 알칼리 처리에 열 처리를 결합하는 경우에는 처리 온도가 낮아 경제성은 높아지지만 악취 및 타 난분해성 물질 생성 등의 단점이 있다. 다음 표는 알칼리 처리와 열 처리를 결합하였을 때 슬러지 가용화율 및 소화효율 증가 사례를 몇 가지 제시한 것이다.

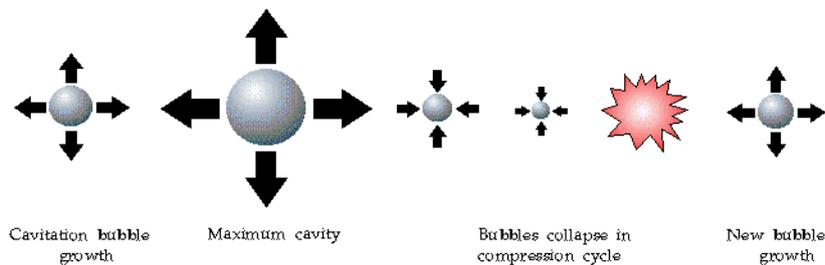
〈표 3-23〉 알칼리 및 열 결합 처리에 의한 슬러지 가용화율 및 소화효율 변화

잉여슬러지 TS (%)	전처리 조건			반응기 종류	가용화율 (%)	소화효율 증가 (% of control)
	Temp.	NaOH투입량	Time			
0.79	60℃	0.01 N	48 hrs	Batch	35	메탄 140% 증가
0.85	135℃	0.3 g NaOH/ gVSS	30 min	Batch	45	메탄 220% 증가
3.06	140℃	4.6 g/L	30 min	Batch	80	생분해도 350% 증가
3.8	121℃	7.0 g/L	30 min	Batch	84.5	메탄 138% 증가
4.08	175℃	pH 12	30 min	CSTR	68	메탄 157% 증가
4.30	175℃	300 meq/L	60 min	Batch	55	메탄 78% 증가

자료 : 환경부

(4) 초음파 캐비테이션을 이용한 슬러지 가용화

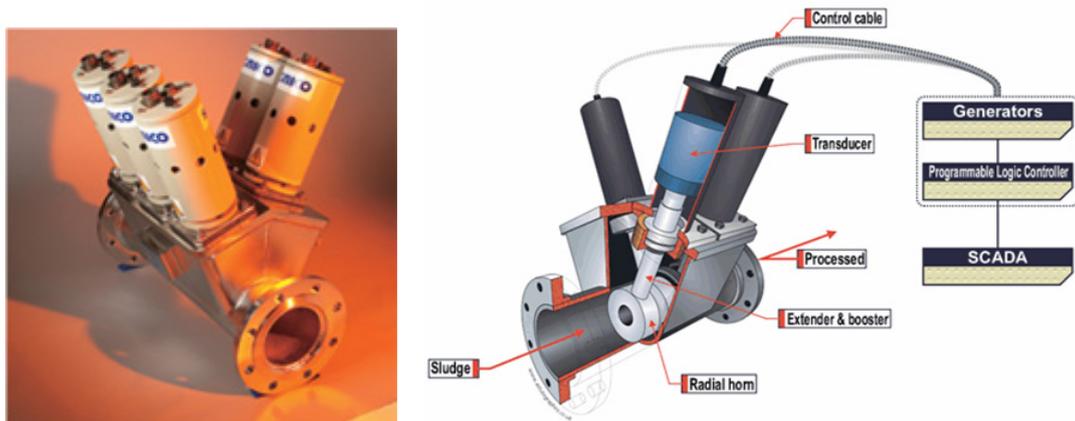
유체 내에 높은 음향강도를 지닌 초음파를 조사하면 격렬한 가압, 감압이 반복되다가 국지적인 압력강하로 인하여 캐비테이션(cavitation)이 발생한다. 캐비테이션의 발생은 캐비테이션 기포(cavitation bubble)의 발생을 수반하는데, 캐비테이션 기포는 점차 성장하다가 일정 압력 이상의 조건하에서 압축되어 내파된다. 이러한 캐비테이션 기포의 내파는 국소적으로 매우 강한 충격력과 단열압축에 의한 온도상승을 야기하며 이에 따른 충격파, 전단력 및 고온 조건에 의해 슬러지 내 미생물 세포가 파괴됨으로써 슬러지의 가용화가 일어난다. 이러한 캐비테이션 기포 파괴 시 수반되는 국소적인 고온, 고압은 초임계 상태를 출현시키기도 하고 라디칼(Radical) 반응을 촉진시키기도 하여 특수한 화학반응을 일으킬 가능성도 있다.



〈그림 3-16〉 캐비테이션 기포의 성장과 파괴 과정

초음파 처리에서의 슬러지 가용화율은 70~85%까지 가능한 것으로 알려져 있는데, 슬러지 가용화 효율을 제고하기 위하여 알칼리 처리나 열 처리 등과 함께 이용될 수도 있다. 예를 들어 잉여슬러지에 pH 11 전후가 되도록 알칼리를 첨가하고 초음파를 투사하는 경우에는 약 50%의 효율향상이 보고되고 있다. 이러한 초음파 처리에서의 슬러지 가용화 효율은 초음파 자체의 주파수나 강도 외에도 조사 시간, 온도 등 여러 가지 인자의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

영국 브리스톨 Avonmouth 하수처리장은 2001년 7월부터 1년간 full scale로 소화조 유입 전 농축 잉여슬러지를 대상으로 초음파 처리를 하였다. 초음파 처리에 사용한 장치는 영국 Sonico사의 Sonix 장비로 현재 유럽이나 동남아 등지 15개소 이상에 적용되고 있다. 초음파 처리의 효과로는 소화조에서의 휘발성 고형물 가용화가 30~50% 증가하였으며, 소화가스 발생량도 약 50% 늘어났음이 보고되었다.



〈그림 3-17〉 영국 Sonico사의 Sonix 초음파 발생 장치

독일의 Bamberg 하수처리장은 Sonolyzer 초음파 슬러지 처리장치(EIMCO water technologies사)를 사용하여 full-scale로 운영하고 있다. Bamberg 하수 처리장의 용량은 12.15MGD로 하루에 발생하는 잉여슬러지의 양은 약 250m³이다. 슬러지 소화를 위해 운영하고 있는 소화조는 난형 소화조로 체류시간 18일을 가지고 있으며 평균 36.6%의 휘발성 고형물 감량률을 보이고 있다. 초음파 조사 강도 3.2kWh/m³의 처리를 거친 슬러지는 소화조에서 휘발성 고형물 가용화 효율이 48% 정도 증가한 결과를 보였으며, 소화

가스 발생량은 30% 늘어났다.

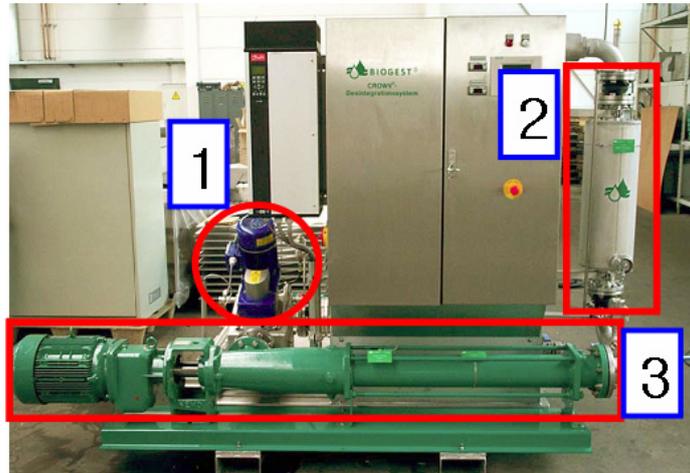


〈그림 3-18〉 독일 EIMCO water technologies사의 Sonolyzer

(5) 수리동력학적 캐비테이션을 이용한 슬러지 가용화

단면적이 급격하게 감소하는 벤츨리관의 목 부분을 유체가 통과할 경우, 유체의 속도는 급격히 증가하며 그에 따라 유체의 압력은 거의 진공에 가깝게 감소하게 된다. 물의 증기압보다 낮은 압력 조건하에서는 유체 속 용존 상태의 기체가 유체로부터 이탈하여 캐비테이션 기포라 불리는 공기방울을 생성시킨다. 이들 캐비테이션 기포는 단면적이 다시 확대되어 압력이 회복되는 영역을 지나며 격렬하게 파괴되는데, 이 과정에서 발생하는 충격파와 열에 의해 슬러지의 가용화가 이루어진다.

수리동력학적 캐비테이션을 이용한 슬러지 처리 기술의 상용화 장비는 독일의 Biogest사에서 개발한 Crown disintegration 시스템이 유일하다. 이 시스템은 <그림 3-19>와 같이 homogenizer, progressive cavity pump(PCP) 및 disintegrator로 구성되어 있는데, 슬러지는 PCP에서 12bar로 가압 후 homogenizer를 거쳐 disintegration에서 처리되며 슬러지 고형물 농도 3~8%에 적용이 가능하다. 2002년 10월 독일 Tanusstein 하수처리장에 최초로 full-scale 장치를 설치한 이래로 지금까지 독일 내에서만 약 10개소에 설치되어 있다. 슬러지 처리효과로는 소화가스 수율 30% 증가, 탈수성 5% 향상 및 슬러지 발생량 20% 이상 감소 등을 들 수 있다.



(1; homogenizer, 2; disintegrator, 3; PCP)

〈그림 3-19〉 독일 Biogest사의 Crown disintegration 시스템



〈그림 3-20〉 독일 Weisbaden 하수처리장에 설치된 수리동력학적 cavitation 발생장치

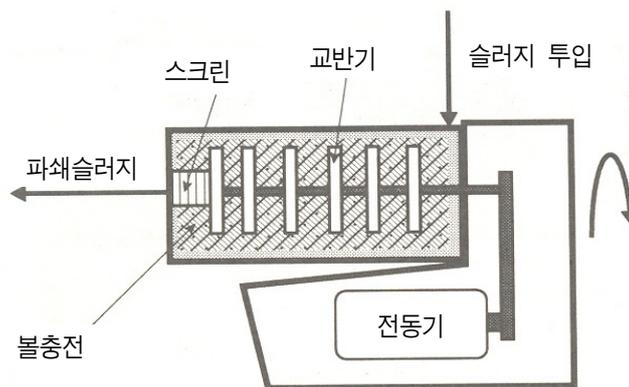
캐비테이션을 발생시키는 방법들인 초음파와 수리동력학적 방법의 장단점을 다음의 표에 비교하였다.

〈표 3-24〉 캐비테이션 생성방법에 따른 장단점 비교

캐비테이션 발생방법	장점	단점
초음파	<ul style="list-style-type: none"> · 생분해도 개선율: 20-90% · 슬러지 처리 효율이 높음 · 고형물 함량 및 점도의 영향을 비교적 적게 받음 · 현장경험이 비교적 많음 	<ul style="list-style-type: none"> · 에너지 투입량이 높음 · 시설유지비가 비교적 높음 · 열로 인한 에너지 손실이 큼
수리 동력학적	<ul style="list-style-type: none"> · 비용이 저렴 · 에너지 효율이 높음 · Cavitation 발생장치가 간단 · 시설유지비가 적음 · Scale-up이 비교적 쉬움 	<ul style="list-style-type: none"> · 캐비테이션 기포 파괴에 따른 충격파의 에너지가 낮음 · 고압의 펌프가 필요함 · 고형물 함량이나 점도가 높을 경우 캐비테이션 발생이 힘들 · 현장경험이 많지 않음

(6) 볼밀(Ball mill) 파쇄법

볼밀파쇄를 이용한 슬러지 가용화 기술은 교반기로 고속회전하는 볼이 충전된 분쇄실로 슬러지를 유입시켜 교반되는 금속볼 사이에서 발생하는 전단마찰력과 열에 의해 슬러지를 파쇄시키는 방법이다. 이때 입경 0.5mm 정도의 유리볼이나 금속볼을 파쇄매체로서 파쇄실 체적의 60~80% 정도 충전시키며, 슬러지의 충분한 파쇄에 필요한 파쇄실 내 체류시간은 수초에서 수분 정도이다. 볼밀파쇄에 의한 가용화율은 볼의 특성, 충전율, 파쇄시간, 교반속도(교반기의 선단속도) 등에 따라 좌우되며, 고형물 농도 기준으로 5% 정도로 유지하는 것이 바람직하다.



〈그림 3-21〉 볼밀 파쇄기의 구조

불밀 파쇄는 부산물이나 부가적인 반응 등이 발생하지 않아 후처리에 미치는 영향이 적으나, 운전 및 유지비용이 높은 편이고 탈수성 향상에는 큰 성과가 없다. 다음의 표는 하수처리장 잉여슬러지를 0.25~0.5mm의 유리볼을 사용하여 불밀 파쇄시간 10분으로 하였을 때 가용화율 변화의 한 예를 제시한 것이다.

〈표 3-25〉 불밀 파쇄에 의한 하수처리장 잉여슬러지의 가용화율

구분	전체 (mg/L)		상등액 (mg/L)		가용화율 (%)
	파쇄전	파쇄후	파쇄전	파쇄후	
BOD	14,000	11,000	620	6,500	59.1
CODcr	26,000	22,000	610	7,400	33.6
TOC	2,800	2,400	47	1,100	45.8
T-N	1,300	1,400	160	730	52.1
T-P	350	450	29	110	24.4

자료 : 환경관리공단(2004)

(7) 열처리

슬러지에 고온을 적용하여 미생물의 세포벽을 파괴하거나 용해함으로써 슬러지를 가용화시키는 방법인 열처리를 거친 슬러지는 혐기성 소화조의 미생물들이 접근할 수 있는 표면적이 크게 늘어남으로써 소화효율이 높아진다. 열처리에 의한 슬러지 가용화 효율은 온도, 처리시간, 슬러지의 고형물 농도 등 몇 가지 요인들에 영향을 받으나 가장 중요한 요인은 온도이다. 열처리에 적용되는 온도는 60~200°C 사이가 대부분인데, 상용화된 공정들은 적정온도로 150°C 내외를 채택하고 있다. Stuckey와 McCarty (1987)는 175°C가 폐활성 슬러지의 분해성을 증진시킬 수 있는 최적 온도라고 보고하였다. 또 Haug 등(1983)은 170~175°C에서 30~60분의 처리시간이 최적 전처리 조건으로 보고하였으며, 그 이상의 온도, 특히 200°C 이상에서는 분해되기 어려운 갈색의 복합 화합물을 형성하는 Maillard reactions에 의해 혐기성 소화가 이루어지기가 어려운 것으로 알려져 있다. 일반적으로 적절한 열처리를 거친 슬러지는 혐기성 소화에서 메탄 가스 발생량의 증가 등 소화효율이 증가한다. 또한 열처리는 슬러지의 살균효과와 탈수 케이크의 발열

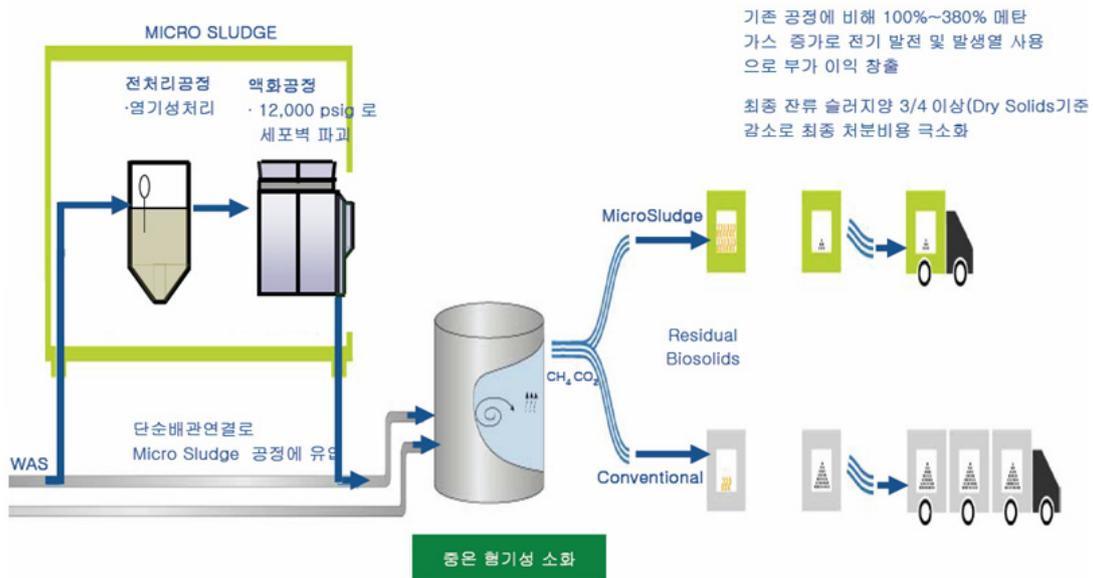
량 증가 등의 효과도 있으나 고온 처리로 인해 경제성의 문제가 있다. 상용화된 열처리 공정 중에서 대표적인 것은 노르웨이의 Cambi사의 Cambi 공정이다. Cambi 공정에서의 슬러지 감량화율은 65~70%, 소화가스 증가량은 30~50%로 보고되고 있다.



〈그림 3-22〉 아일랜드 더블린 하수처리장 전경과 설치된 Cambi 열처리 공정

(8) 마이크로슬러지(microsludge)

마이크로슬러지 기술은 캐나다의 Paradigm사가 개발한 기술로, 알칼리로 슬러지를 전처리하여 미생물 세포막을 약화시킨 후에 12,000psig의 압력을 가하는 호모지나이저(homogenizer)를 이용하여 미생물 및 무기성 슬러지를 액화시키는 화학적 처리방법과 물리적 처리방법이 결합된 복합 처리방법이다. 혐기성 소화조의 전단에 설치할 경우, VS 감량화율은 75%, 소화가스 증가량은 100~380% 정도를 얻을 수 있다고 한다. 현재 캐나다 Vancouver의 Chilliwack 하수처리장과 미국 LA의 Joint Water Pollution Control Plant에 설치되어 있다.



〈그림 3-23〉 마이크로슬러지 공정

(9) 슬러지 전처리 방법의 비교

현재 현장에서 적용되고 있는 슬러지 전처리 방법을 크게 물리적, 화학적, 생물학적 및 열적 처리 방법으로 구별하여 이들의 가용화 정도나 비용 측면 등을 비교하면 다음과 같다.

〈표 3-26〉 슬러지 전처리 방법의 비교

전처리 방법	기계적 처리	화학적 처리	생물학적 처리	열처리
슬러지 가용화 정도	++	+	+	+
슬러지 분해속도	+	°	°	°
병원균 살균효과	+	+	°	++
탈수효과	°	°	°	+
처리여액의 악취	-	-	-	--
초기투자비	중간	낮음	낮음	높음
운전 및 유지비용	중간 - 높음	중간	낮음	높음 또는 낮음

(++ : 우수, + : 양호, ° : 보통, - : 미흡, -- : 불량)

〈표 3-27〉 다양한 슬러지 가용화 기술들의 소화 관련 항목들의 비교

가용화 기술 종류	적용기술	국내외 적용실적	소화조 활용여부	소화효율 증가	
기계적	Sonix	초음파 이용 세포벽 파괴	유럽/동남아 (15개소)	시설변경 없이 사용가능	VS : 30~50% Gas : 50~90%
	Ultra-waves	초음파 이용 세포벽 파괴	유럽/일본 (16개소)	시설변경 없이 사용가능	VS : 20~30% Gas : 20~50%
	Micro-sludge	알칼리 + 호모지나이저	캐나다 (1개소)	시설변경 없이 사용가능	VS : 75% Gas : 200~380%
열적	Thermal Hydrolysis	고온고압 이용 가수분해	유럽 (8개소)	탈수기 증설 소화조	VS : 65~70% Gas : 30~50%
화학적	GPV	심층고온고압 유기물 산화	유럽/미국 (4개소)	농축조 후단 시설불용	VS : 90% Gas : 0
생물학적	ATAD	고온호기성 자체산화열 세포벽 파괴	미국 (1개소)	일부 소화조를 호기조로 개조 필요	VS : 55~60% Gas : 0
물리적	소화슬러지 감소 및 가스 증량기술	비중차 이용 소화조미생물 고농도 유지	국내기술 실적 없음	시설변경 없이 사용가능	VS : 60% Gas : 20%

자료 : 서울특별시 (2005)

3) 유기성폐기물의 하수 병합처리

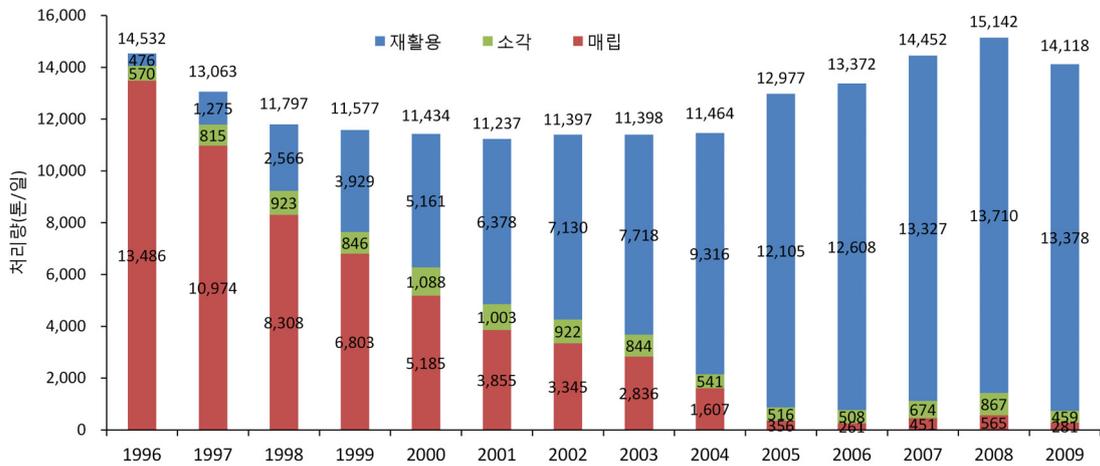
유기성 폐기물은 생물에서 유래한 동식물성의 폐기물로 유기물의 함량이 40% 이상인 폐기물로 정의할 수 있는데⁴⁴⁾, 그 종류 및 발생원이 다양하며, 발생원에 따라 관리하는 주체가 달라 명칭에도 차이가 있다. 현재 환경부의 통계상에서 분류되고 있는 유기성 폐기물들인 음식물류 폐기물, 하·폐수슬러지, 분뇨슬러지, 축산분뇨, 식품 잔사, 동·식물성 잔재물 등은 생활 및 사업장 일반폐기물로 자원으로 활용되고 있거나, 활용의 가능성이 높은 물질로 분류할 수 있다. 여기서 하수와의 병합처리에 주된 관심을 갖는 것은 음식물류 폐기물이다⁴⁵⁾.

44) 유기성폐기물 종합관리기술 구축, 국립환경연구원, 2005

45) 분뇨는 이미 하수도법과 하수도시설기준에서 하수와 병합하여 처리하는 것을 원칙으로 하고 있다.

(1) 음식물쓰레기와 음폐수 처리의 문제

음식물쓰레기는 쓰레기종량제 실시, 음식물쓰레기 분리배출지역 확대, 감량의무사업장의 확대, 음식문화개선 등 여러 가지 요인의 복합적 작용으로 종량제 실시 이후 2001년까지 지속적으로 발생량이 감소하였다. 그러나 2005년 1월 음식물류 폐기물의 직매립 금지제도 시행으로 음식물류 폐기물 발생량이 급증하였으며, 향후 소득수준의 향상에 따른 음식소비 증가 및 군지역의 음식물 분리수거 확산으로 계속 증가세를 보일 것으로 예상된다. 아래의 표와 그림을 보면 1996년부터 2005년까지 매립의 비율은 크게 감소하고 있고 재활용의 비율은 크게 증가하고 있다. 발생량은 2005년부터 다시 증가하고 있는 추세이다.



〈그림 3-24〉 음식물류 폐기물 발생량 및 처리현황

〈표 3-28〉 연도별 음식물류 폐기물 발생량 및 처리량 현황

연도	발생량 (톤/일)	발생량 원단위 (kg/인·일)	매립 (톤/일)	매립 (%)	소각 (톤/일)	소각 (%)	재활용 (톤/일)	재활용 (%)
1996	14,532	0.33	13,486	92.8%	570	3.9%	476	3.3%
1997	13,063	0.29	10,974	93.0%	815	6.9%	1,275	10.8%
1998	11,797	0.25	8,308	72.7%	923	8.1%	2,566	22.4%
1999	11,577	0.25	6,803	59.7%	846	7.4%	3,929	34.5%
2000	11,434	0.24	5,185	40.0%	1,088	8.4%	5,161	39.8%
2001	11,237	0.23	3,855	28.8%	1,003	7.5%	6,378	47.7%
2002	11,397	0.24	3,345	23.1%	922	6.4%	7,130	49.3%

〈표 계속〉 연도별 음식물류 폐기물 발생량 및 처리량 현황

연도	발생량 (톤/일)	발생량 원단위 (kg/인·일)	매립 (톤/일)	매립 (%)	소각 (톤/일)	소각 (%)	재활용 (톤/일)	재활용 (%)
2003	11,398	0.24	2,836	18.7%	844	5.6%	7,718	51.0%
2004	11,464	0.24	1,607	11.4%	541	3.8%	9,316	66.0%
2005	12,977	0.27	356	2.7%	516	4.0%	12,105	93.3%
2006	13,372	0.28	261	2.0%	508	3.8%	12,608	94.3%
2007	14,452	0.29	451	3.1%	674	4.7%	13,327	92.2%
2008	15,142	0.3	565	3.7%	867	5.7%	13,710	90.5%
2009	14,118	0.28	281	2.0%	459	3.3%	13,378	94.8%

자료 : 음식물류 폐기물 및 발생폐수의 에너지화를 위한 방법별 최적모델 및 설치·운영 지침서 개발 연구, 환경부, 2008

음식물류 폐기물 배출 시스템 개선 방안, 경기개발연구원, 2011

〈표 3-29〉 연도별 음폐수 발생량 및 처리량 추이

(단위 : 톤/일)

구분	발생량(총처리량)	육상처리량	해양배출량	해양배출률
2004	4,008	2,019	1,989	49.6%
2005	6,293	2,731	3,562	56.7%
2006	8,225	2,805	5,420	65.9%
2007	9,077	4,197	4,880	53.8%

자료 : 음식물류폐기물 처리시설 현황(2007.12.31 기준), 환경부

현행 음식물쓰레기의 재활용 방법은 퇴비화 및 사료화가 90% 이상을 차지하고 있는데, 이들 음식물쓰레기 사료화 또는 퇴비화에는 많은 어려움이 따른다. 음식물쓰레기는 계절별, 배출원별로 성상이 불균일하고 이물질 혼입률도 다르므로 적당한 사료로 자원화하기가 힘들다. 즉 음식물쓰레기의 계절별 성상의 불균일은 영양소 함유량이 일정치 않은 것을 의미하고 사료화시설에서는 그에 따른 부재료를 혼합하여야 하므로 자원화비용의 상승을 유발하고 배출자의 경제적 부담을 유발한다. 또 외부의 환경적 요인과 수거체계의 원인으로 음식물쓰레기가 부패하거나 병원균에 오염될 우려도 있다. 장래 수요부분을 정확히 산정하여 자원화 추진목표를 제시하기 어려운 문제도 있다.

음식물쓰레기를 퇴비화 하는 경우에도 여러 가지 어려움이 따른다. 퇴비화를 위한 적

정 수분함량은 55~65%이지만 음식물쓰레기의 수분함량은 약 80~90%이기 때문에 퇴비화를 위해서는 수분조절제를 사용하여야 한다. 그러나 현재 수분조절제로 가장 많이 사용되고 있는 톱밥은 가격이 너무 비싸므로 퇴비제조에서 경영비에 큰 부담을 주고 있는 실정이다. 퇴비화 과정 중에서 음식물쓰레기의 이분해성 유기물이 분해되며 생성되는 부산물로 인한 다량의 악취 제거를 위한 탈취시설이 필요하다는 점도 경영에 부담이다. 또한 음식물쓰레기의 높은 염분함량 때문에 토양 중에 염분이 집적되어 토양의 입단 구조를 분산시켜 토양의 통기성이나 투수성 등 토양의 물리성이 악화되고, 과잉으로 집적된 염분이 작물에 유용한 성분의 식물체 흡수를 방해하여 양분의 불균형 및 결핍을 발생시킬 우려가 있다.

이상과 같은 여러 문제점 외에도 퇴비화와 사료화의 최종 생산품들이 제품으로서의 가치가 낮다는 점은 이들 재활용 방법들의 효용성을 크게 떨어뜨리고 있다. 따라서 기존의 재활용의 대다수를 차지하고 있는 퇴비화나 사료화 외에도 혐기성소화를 통한 에너지화나 탄화 등의 다각적인 처리방법의 점진적인 점유율 확대를 추진해야 할 필요성이 대두되고 있다.

또한 음식물류 폐기물의 재활용은 대부분 퇴비화 및 사료화에 의존하고 있는데, 재활용 과정에서 음폐수가 지속적으로 발생하고 있다. 이는 퇴비화 및 사료화를 위해 반드시 필요한 염분 제거에 사용하는 세척수와 음식물류 폐기물 자체가 함유하고 있는 수분이 처리과정 중에서 음폐수로 발생하기 때문이다. 2007년 현재 공공시설에서 발생하는 음폐수는 25%가량 해양배출하고 있으며 민간시설의 경우에는 86.2%를 해양배출하고 있다. 그러나 런던협약('93년 가입) 및 '96의정서의 국제규제기준 적용에 따라 해양배출기준이 강화되었고, 이에 따라 해양수산부도 “육상폐기물 해양투기 관리 종합대책('06.3)”에 따라 해양투기량을 2005년 대비 2011년까지 50% 이하로 감축할 계획이고, 환경부는 2012년 말까지 음폐수 발생 전량을 육상처리하여 2013년부터 해양투기를 금지할 방침이다.⁴⁶⁾ 환경관리공단이 제안한 음식물쓰레기 에너지화 처리방법은 모두 혐기성소화를 이용하고 있는데 여기서도 소화후 폐액과 소화슬러지가 발생하여 별도의 처리가 필요하다⁴⁷⁾.

46) 음폐수의 해양배출 금지 결정, 국정현안정책조정회의, 2007.9

〈표 3-30〉 음폐수 발생 및 처리현황(2007.6)

구분	발생량	육상처리					해양 배출	해양배출 비율
		계	하수 처리장	침출수 처리장	처리업체 위탁처리	기 타		
계	8,818	3,748	2,975	455	47	272	5,070	57.5%
공공	4,138	3,101	2,572	274	-	255	1,037	25%
민간	4,680	648	403	181	47	17	4,033	86.2%

자료 : 환경부(2007), 단위 : 톤/일

〈표 3-31〉 음폐수의 연도별 해양배출 감축 계획

구분	2007	2008	2009	2010	2011	2012년말
발생량(톤/일)	8,764	9,044	9,336	9,573	9,869	9,971
육상처리(톤/일)	3,808	5,068	5,625	6,742	7,779	9,971
해양배출(톤/일)	4,956	3,976	3,712	2,832	2,090	0

자료 : 환경부(2007)

(2) 음식물쓰레기 및 음폐수의 하수 병합처리의 장점

음식물쓰레기와 하수의 병합처리는 크게 세 가지 공정으로 이루어진다. 첫 번째 단계인 전처리 공정(선별·파쇄)에서는 수거된 음식물쓰레기를 잘게 파쇄하여 유기물과 가연성 물질, 금속류 등의 재활용품과 단순 매립 물질을 분리하고, 두 번째 단계에서는 혐기성 소화 공정으로 이송되어 하수슬러지와 병합하여 처리되면서 처리과정에서 바이오가스를 생산한다. 마지막 단계인 후처리 공정에서는 혐기성 소화 완료 후 발생한 소화 잔사를 처리한다. 지금까지 혐기성 소화 후 발생하는 대부분의 슬러지는 매립이나 소각되어 왔지만, 근래에는 정부의 에너지화 및 자원화 정책에 따라서 퇴비화 혹은 연료화처리가 추진되고 있다.

47) 음식물류 폐기물 및 발생폐수의 에너지화를 위한 방법별 최적모델 및 설치·운영 지침서 개발 연구, 환경부, 2008

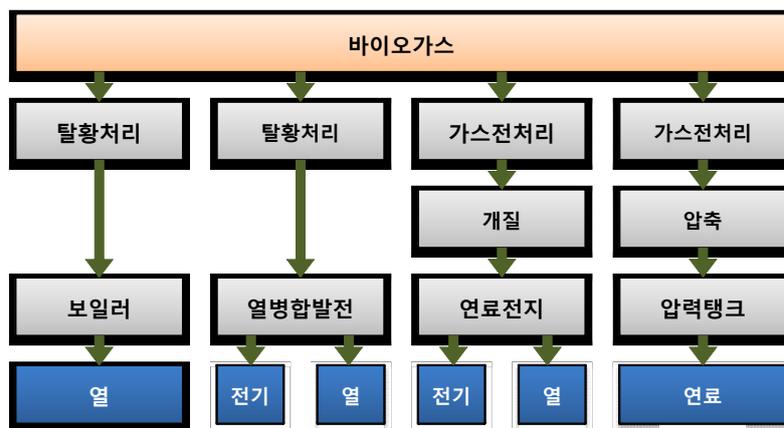
〈표 3-32〉 하수슬러지와 음식물쓰레기의 통합소화 효과

소화조 운전변수	폐기물 특성		통합소화 효과
	음식물	하수슬러지	
pH 및 알칼리도	낮음	높음	소화조 적정 pH 유지 및 부족 알칼리도 보충 유기물과 영양염의 균형, 소화균의 활성도 증가 암모니아 저해 감소 생분해성 유기물 증가로 바이오가스 회수율 증대
영양염류	높음	낮음	
C/N 비	높음	낮음	
암모니아 농도	높음	낮음	
고형물농도	높음	낮음	
생분해도	높음	낮음	

4. 바이오가스 활용

1) 바이오가스 활용 방법 분류

혐기성 소화로 발생한 바이오가스는 그 활용방법에 따라 적절한 전처리 방법을 거쳐야 한다. 열량을 증가시키고 안정성을 높이기 위한 전처리, 수분, 할로겐화합물, 황화수소, 암모니아, 실록산을 제거시키기 위한 전처리 등이 요구된다. 바이오가스의 활용분야는 열을 이용하는 방법, 전기를 생산하여 이용하는 방법, 열과 전기를 동시에 생산하여 이용하는 방법 등으로 나누어 볼 수 있다. 현재까지 소화가스는 소화조 가운을 위한 보일러의 연료로 가장 많이 사용되며, 근래에는 단순한 발전을 넘어선 열병합발전, 개질을 통한 연료전지, 도시가스나 자동차 및 선박의 연료로도 이용할 수 있도록 시도되고 있다.



〈그림 3-26〉 바이오가스의 활용 기술

(1) 소화조 가온을 위한 보일러 연료

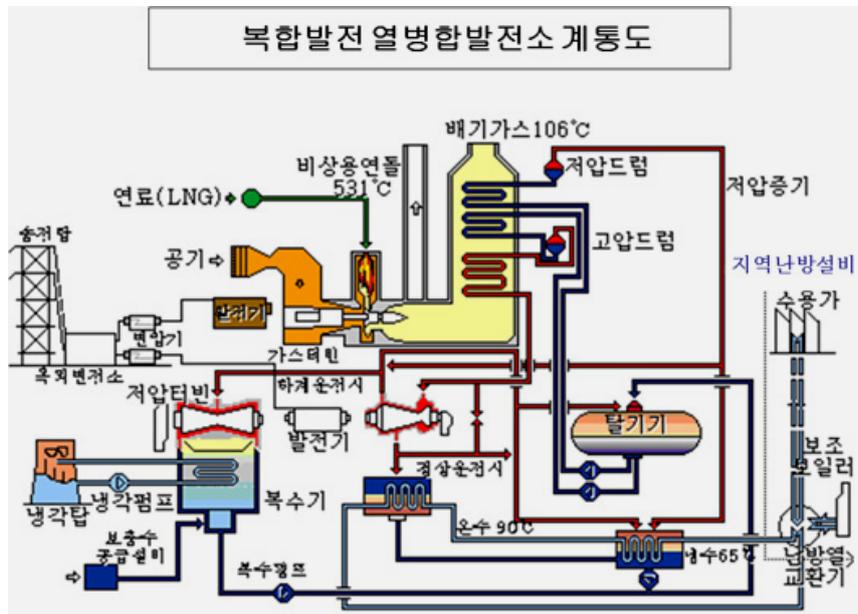
2005년의 조사⁴⁸⁾에 의하면 혐기성 소화시설을 가지고 있는 우리나라 대부분의 하수 처리장은 발생하는 바이오가스를 소화조 가온을 위한 보일러 연료로 사용하고(발생 가스량의 83%), 나머지는 사용처를 찾지 못해 소각시켰다(12%). 53%의 처리장은 가스발생량이 소화조 가온에 필요한 양에 미치지 못해 추가연료를 사용하였다. 그러나 이 원인은 소화조가온을 효율이 낮은 직접가온법(보일러에서 가열된 증기를 소화조 내로 주입하는 방법)을 이용한 시설이 64%나 되었기 때문이다. 또한 전반적으로 소화조의 운영이 효율적으로 이루어지지 않았기 때문에 바이오가스의 생산량이 크지 않았던 것도 한 원인이다. 반면 생산된 바이오가스의 12%가 잉여가스로 소각되었다고 보고되었다. 어떤 처리장은 바이오가스가 모자라서 추가연료를 사용하고, 어떤 처리장은 남는 바이오가스를 활용하지 못해 소각시켜 버리는 비효율적 운전이 시행되었던 것이다. 2005년 이후 적극적으로 추진되었던 소화조효율 개선사업과 2008년 이후 강하게 추진되는 에너지화 정책들에 힘입어, 농축방식, 가온방식, 교반방식 등을 비롯한 운영조건들이 많이 개선되어 바이오가스는 증산되고 있고, 소화조 가온 연료로 사용한 후 남는 바이오가스의 활용에 대한 연구도 급속도로 진행되고 있다.

(2) 열병합발전(Combined Heat and Power Generation)

현대 사회의 핵심적인 에너지원 역할을 담당하고 있는 전력의 생산은 발전소를 통해 이루어진다. 기존의 발전은 전기를 생산하는 것에만 초점이 맞추어져 있으나 열병합발전은 하나의 에너지원으로부터 열과 전력을 동시에 발생시켜 용도별로 적절히 공급하여 에너지 이용 효율의 극대화를 추구하는 발전시스템이다. 일반 상용화력발전소와 같은 종래의 발전시스템은 통상 전기를 생산하면서 발생하는 열을 일부 활용하더라도 대부분은 강이나 바다로 버려진다. 이들 시스템은 투입에너지의 1/3만 전력으로 생산하는 반면(총효율 30~35%), 열병합발전방식은 이러한 손실열을 회수 이용하여 냉·난방열로 이용함으로써 에너지이용효율(총효율 70~80%)을 최대한으로 높인 것이다. 일반적으로 고온부는 전기생산, 저온부는 공장의 공정(Process)용 증기 또는 온수로 만들어 주거 및 사무

48) 소화조 운영실태 정밀진단 결과 보고, 환경부(환경관리공단 시행), 2005

용시설에 난방용으로 공급하게 된다.



〈그림 3-27〉 지역난방기술주식회사의 복합 열병합발전 시스템 계통도

이 발전시스템은 화석연료를 이용하는 방법의 하나로 개발되어 현재에도 활발하게 이용되고 있다. 여기에 재생에너지인 바이오가스를 원료로 이용하여 사용하는 방법이 활발하게 추진되고 있는 것이다. 이를 위해 바이오가스의 품질을 높이고(고질화, 개질화) 기존의 화석연료에 맞추어져 있던 각종 기준들(예를 들어 발열량 기준 등)과 운전방식들을 개선하고자 하는 노력들도 진행되고 있다.

(3) 연료전지

① 연료전지 개요

연료전지는 수소와 산소가 가진 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 전기화학적 장치로 수소와 산소를 양극과 음극에 공급하여 연속적으로 전기를 생산하는 새로운 발전 기술이다. 연료전지는 건전지나 축전지의 이웃 간이라 할 수 있으며, 전지보다 발전장치라고 말하는 것이 더 적합하다. 연료전지 발전 시스템은 천연가스로부터 개질화과정을 거쳐 나온 수소와 공기 중의 산소를 전기로 화학반응을 시켜, 물의 전기분

해와 반대되는 반응으로 하여 전기를 만든다. 연료전지는 발전효율이 높고, 환경친화적이며 이산화탄소와 물만 생성된다. 또한 폐열도 이용할 수 있기 때문에 오늘날 중대한 이슈로 대두되고 있는 에너지 문제, 환경문제의 해결에 공헌할 수 있는 이상적인 발전 장치로 평가되고 있다.

연료 전지의 일반적인 특성은 연료가 전기화학적으로 반응하여 전기를 생산하는 과정에서 발생하는 열을 회수하는 것까지 포함하여 총효율을 80% 이상으로 높이는 고효율 발전이 가능하다. 기존의 화력 발전에 비해 효율이 높으므로 발전용 연료의 절감과 열병합 발전이 가능하다. 또한 NO_x와 CO₂의 배출량이 석탄 화력 발전의 1/38과 1/3 정도이며, 소음도 매우 적어 공해 배출 요인이 거의 없다. 이와 더불어 모듈화에 의한 건설 기간의 단축, 설비 용량의 증감이 가능하고 입지선정이 용이하다. 따라서 도심 지역 또는 건물 내 설치가 가능하여 경제적으로 에너지를 공급할 수 있으며, 천연 가스, 도시 가스, 나프타, 메탄올, 폐기물 가스 등 다양한 연료를 사용할 수 있으므로 기존의 화력 발전을 대체하고, 분산 전원용 발전소, 열병합 발전소, 무공해 자동차 전원 등에 적용될 수 있다.

연료전지 발전 시스템은 수소를 함유한 일반 연료(LPG, LNG, 메탄, 석탄가스 메탄올 등)로부터 연료전지가 요구하는 수소를 많이 포함하는 가스로 변환하는 연료 개질 장치, 연료 개질 장치에서 들어오는 수소와 공기 중의 산소로 직류 전기와 물 및 부산물인 열을 발생시키는 연료 전지 본체, 그리고 연료 전지에서 나오는 직류를 교류로 변환시키는 전력 변환 장치로 구성된다. 이와 같은 기본적인 장치 외에도 플랜트의 효율을 높이기 위해서는 연료 전지 반응에서 생기는 반응열과 연료 개질 과정에서 나오는 폐열 등을 이용하는 장치가 부수적으로 필요하다.

② 연료전지별 특징

이러한 연료 전지는 작동 온도와 주연료의 형태에 따라 알칼리형(AFC; Alkaline Fuel Cell), 인산염형(PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융 탄산염형(MCFC; Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물형(SOFC; Solid Oxide Fuel Cell), 고분자 전해질형(PEMFC; Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), 직접메탄올형(DMFC; Direct Methanol Fuel Cell) 등으로 구분된다.

〈표 3-33〉 연료전지의 종류별 특징

종류/특징	고온형 연료전지		저온형 연료전지			
	용융탄산염 연료전지 (MCFC)	고체산화물 연료전지 (SOFC)	인산염 연료전지 (PAFC)	알칼리 연료전지 (AFC)	고분자전해질막 연료전지 (PEMFC)	직접메탄올 연료전지 (DMFC)
작동온도	550~770℃	600~1000℃	150~250℃	50~120℃	50~100℃	50~100℃
주 촉매	Perovskites	니켈	백금	니켈	백금	백금
전해질의 상태	Li/K alkali carbonates mixture	YSZ GDC	H ₃ PO ₄	KOH	이온교환막	이온교환막
전해질 지지체	immobilized liquid	Solid	immobilized liquid	-	Solid	Solid
전하전달 이온	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	H ⁺
가능한 연료	H ₂ , Co (천연, 석탄가스)	H ₂ , Co (천연, 석탄가스)	H ₂ , Co (메탄올, 석탄가스)	H ₂	H ₂ (메탄올, 석탄가스)	메탄올
외부연료 개질기의 필요성	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
효율 (%LHV)	50~60	50~60	40~45	-	< 40	-
주용도	대규모발전, 중소사업소 설비	대규모발전, 중소사업소 설비, 이동체용전원	중소사업소 설비, biogas plant	우주발사체 전원	수송용 전원, 가정용 전원, 휴대용 전원	휴대용 전원
특징	발전효율 높음, 내부개질 가능, 열병합대응 가능	발전효율 높음, 내부개질 가능, 복합발전 가능	CO 내구성 큼, 열병합대응 가능	-	저온작동 고출력밀도	저온작동 고출력밀도
과제	재료부식, 용융염취산	고온열화, 열파괴	재료부식, 인산유출	전해질에서 누수현상 방지	고온운전 불가능, 재료비/가공비 높음(고가의 촉매 및 전해질), 낮은 효율 (30~50%)	고온운전 불가능, 재료비/가공비 높음, 메탄올 크로스 오버 문제

자료: 신재생에너지백서, 에너지관리공단, 2010

○인산염 연료전지(PAFC) :

인산염 연료전지 기술은 20년 이상 개발되고 개선되었고, 전기 생산에 비교적 순수한 수소(70% 이상)를 요구한다. 인산염형 연료전지 내의 전극은 탄소 지지체의 표면에 백금이나 백금 혼합물의 촉매가 필요하다. 인산염형 연료전지의 운전 온도는 약 200℃이다. 이것은 인산 전해질의 안정도를 위하여 허용하는 최대값이다. 이 기술로 현재까지 순수한 발전 효율은 40~50% 정도이다. 이 수준보다 높은 효율을 갖기 위해서는 전지와 스택 구성품의 지속적인 개발과 종합시스템 제어기술이 필요하다. 연료전지 반응 시 반응열을 냉각시켜야 하며 이때 생성되는 반응열을 이용하면 효율을 70% 이상 높일 수 있다.

○알칼리 연료전지(AFC) :

알칼리 연료전지는 전해질로서 수산화칼륨과 같은 알칼리를 사용한다. 연료로 순수 수소를 쓰며, 산화제로 순수 산소를 쓴다. 운전 온도는 대기압에서 60~120℃이다. anode의 촉매는 니켈망에 은을 입힌 것 위에 백금-납을 사용하고, cathode는 니켈망에 금을 입힌 것 위에 금-백금을 사용한다. 알칼리 연료전지 고효율화의 기본적인 목적은 자동차 산업의 전원 공급용이다. 알칼리 연료전지는 알칼리가 이산화탄소에 민감하기 때문에 인산형 연료전지의 개발보다 늦게 개발되었다.

○고분자전해질 연료전지(PEMFC) :

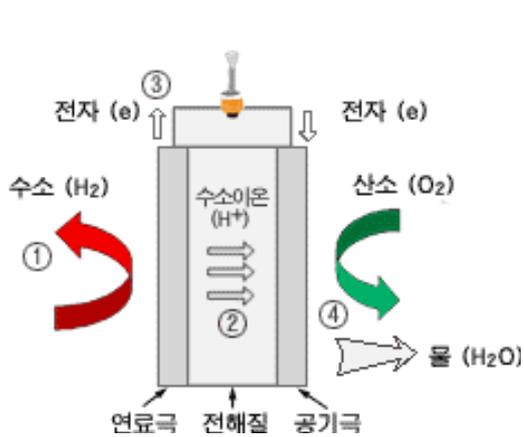
고분자전해질 연료전지는 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(일종의 멤브레인)이다. 인산형 및 알칼리형 연료전지 시스템과 비슷하게 촉매로 백금을 사용한다. 개발 목표는 최소 1.5g/kW의 백금 촉매를 쓰는 것이다. 이 백금 촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하므로 일산화탄소의 농도는 1,000ppm 이하로 유지하여야만 한다. 고분자전해질형 연료전지 시스템의 소형화는 자동차 응용에 가장 중요한 역할을 한다. 인산형 연료전지보다 약 10년 늦게 개발되었지만, 인산형에 비해 저온에서 동작되며, 출력 밀도가 크므로 소형화가 가능하고, 기술이 인산형과 유사하여 응용 기술의 적용이 쉽다. 이 때문에 현재는 고분자전해질 연료전지의 상업화 가능성이 높다고 할 수 있다. 더욱이 현재 몇 개의 시범용 고분자전해질 연료전지의 전원에 의한 자동차는 실험 결과 우수성이 입증되어 더 많은 연구 계획을 진행 중이다.

○ 용융탄산염 연료전지(MCFC) :

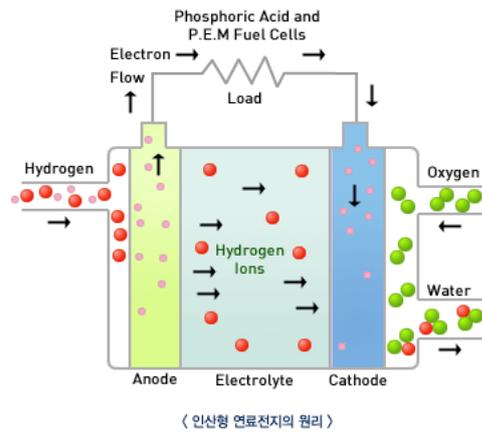
용융탄산염 연료전지의 전해질은 낮은 용융점을 가지는 탄화리튬과 탄화포타슘의 혼합물이다. 전극은 다공성 니켈로 만든다. 전극의 부식성때문에 내구성이 단점으로 지적되고 있다. 운전온도가 높아 정상운전되는 동안 용융탄산염 전해질의 결핍과 증발로 인하여 양이 줄어들기 때문에 운전의 안정성 및 유효 수명이 짧은 단점도 있다. 용융탄산염형 기술의 장점은 일산화탄소, 이산화탄소 및 수소에 대한 내성이 있는 점이다. 이로 인해 일산화탄소와 이산화탄소를 분리하는 공정이 필요한 다른 기술들보다 초기 투자비가 낮고 시스템 설계가 매우 단순해진다. 또한 용융탄산염 연료전지의 운전 온도는 약 650℃이고, 전지 스택의 열로 전지 내부에서 탄화수소 기체의 개질이 이루어지기 때문에 개질의 비용을 줄일 수 있다.

○ 고체산화물 연료전지(SOFC) :

고체산화물 연료전지의 특징은 탄화수소를 직접 전기로 변화시킬 수 있다는 것이다. 전해질은 안정화된 산화이트륨으로 가스가 스며들지 않은 산 이온이 효율적으로 접촉하고 있는 얇은 산화지르코늄 층이다. Cathode는 안정된 산화이트륨으로 된 지르코늄으로 만들어졌고, anode는 니켈-지르코늄 세라믹 합금으로 만들어졌다. 현존하는 연료전지 중 가장 높은 온도(700 ~ 1000℃)에서 작동한다. 이 온도에서는 수소와 일산화탄소의 전기 화학적 산화 반응이 일어나고 촉매없이 연료가 개질된다. 특히 모든 구성요소가 고체로 이루어져 있기 때문에 다른 연료전지에 비해 구조가 간단하고, 전해질의 손실 및 보충과 부식의 문제가 없는 장점이 있지만, 높은 운전 온도에서 금속 재료의 충분한 열적-기계적 강도를 요구하기 때문에 가스 누출 방지가 가장 중요한 애로 사항이다. 고체산화물 연료전지는 상업적으로 자동차 응용에 연구되고 있다.

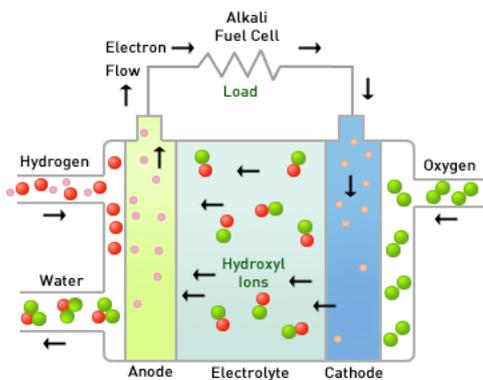


(a) 연료전지의 개념도



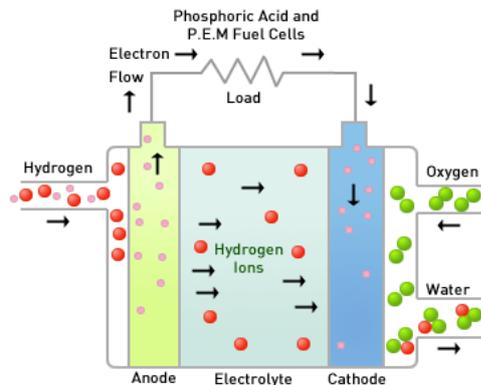
< 인산형 연료전지의 원리 >

(b) 인산염 연료전지의 원리



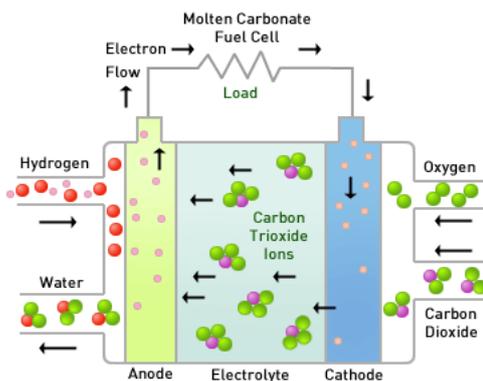
< 알칼리형 연료전지의 원리 >

(c) 알칼리 연료전지의 원리



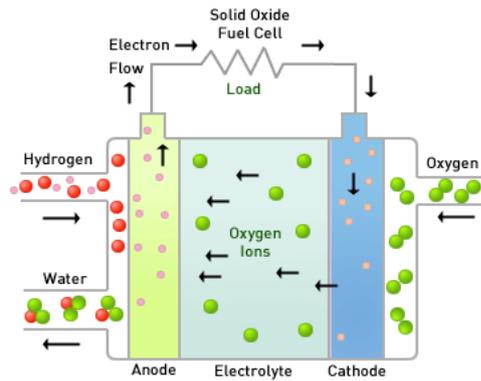
< 고분자전해질형 연료전지의 원리 >

(d) 고분자전해질 연료전지의 원리



< 용융탄산염 연료전지의 원리 >

(e) 용융탄산염 연료전지의 원리



< 고체산화물 연료전지의 원리 >

(f) 고체산화물 연료전지의 원리

< 그림 3-28 > 연료전지의 개념과 연료전지 종류별 원리

③ 연료전지 기술 현황

연료전지 기술을 선도하고 있는 미국은 1962년 제미니 계획에 의하여 우주 및 군용의 알칼리 연료전지 연구를 처음 시작하였다. 그후 1969년 28개 가스회사가 중심이 되어, 주거용 및 상업용 인산염형 연료전지 기술 개발을 위한 9년 계획인 TARGET(Team to Advanced Research for Gas Energy Transformation) 프로그램을 수립하고, UTC(United Technology Corp. 현재 IFC : International Fuel Cell)사에 개발을 위탁함으로써 시작되었다. 최근에는 FCG-1 계획에 의해 IFC, WH(Westinghouse)사에서 전기 사업용 MW급 연료전지 기술 개발사업을 수행하고 있고, 25~400kW급의 현지 설치형을 개발하여 200kW급은 이미 상용화되었으며, 제조 단가를 현재의 약 3000달러/kW에서 1500~1000달러/kW 이하로 낮추고 수명을 40,000시간 이상 지속시킬 수 있는 발전 시스템을 개발하기 위해 노력하고 있다.

일본은 1981년부터 6년 동안 에너지 절약 기술 개발 계획(Moonlight Project)의 일환으로 연료전지의 신뢰성 향상과 고효율화 기술의 개발을 추진하였고, 인산염형의 경우 1000kW급 발전 설비의 독자 개발과 실증 실험, 200kW급 현지 설치형의 상용화를 목표로 하여 연구 개발을 추진하였다. 최근에는 New Sunshine 계획에 의해 1996년까지 가압형 5MW, 상압형 1MW급 발전 설비의 실증 실험을 목표로, 9개의 전력회사와 4개의 가스회사 및 전력중앙연구소로 구성된 연구 조합을 구성하고, NEDO 주관하에 대규모 실용화 연구를 수행하고 있다. 현재의 기술 수준은 화력 대체와 분산 전원용으로 이미 1MW급 실증 플랜트의 운전 시험을 완료하였으며, 도쿄전력은 11MW급 인산염형 연료전지 발전소를 1991년 완공하여 운전시험을 계속하고 있다.

유럽의 연료전지 기술 개발은 미국과 일본의 기술 독점에 대한 방어적 개념에서 추진되고 있으며, 연료 개질기, 전력 변환 및 System Engineering 관련 기술을 기업이 보유하고 있다. 네덜란드는 '86년부터 PEO주도로 미국의 IGT에서 핵심기술을 도입하여 ECN에서 MCFC를 개발하고 있다. 이탈리아는 '86년부터 ENEA 주도로 VOLTA 계획을 추진하여 PAFC, MCFC, SOFC를 개발하고 있다. 기타 국가는 기초 연구, 주변 기술(개질, 전력 변환)의 개발을 추진하고 있으며 Siemens, ABB, Haldor Topsoe A/S 등이 관련 기술을 보유하고 있다. 캐나다는 자동차용 고분자전해질형 연료 전지 개발을 주도하고 있으며, Ballard Power System Inc.에서 연료전지 버스와 승용차를 개발하고 있다.

국내의 연료전지 기술 개발은 1985년부터 한국에너지기술연구소와 한전기술연구원 공동으로 5.9kW급 인산염형 연료전지 본체를 수입하여 발전 시스템을 구성하여 성능 실험을 실시한 것이 효시이다. 이를 계기로 국내에서도 연료전지 개발의 중요성을 인식하게 되었으며, 최근에는 연구 개발사업이 활성화되어 인산염형, 용융 탄산염형, 고체전해질형 및 고분자전해질 연료전지도 개발하고 있다. 현재 국내의 기술 수준은 전반적으로 기초 연구 단계이나, 연료전지 본체를 포함한 연료개질, 전력 변환 장치 등의 소규모 시제품 개발을 목표로 하여 추진 중이며 최근 10kW급 인산염형 발전시스템과 5kW급 고체고분자 발전시스템이 한국에너지기술연구소에 의해 개발되었으므로 이러한 발전 추세로 보아 단기간 내 현재의 선진 기술 수준에 근접할 수 있을 것으로 전망된다.

한국기업평가사의 보고서는 연료전지 상용화를 위해 해결되어야 할 몇 가지 과제를 다음과 같이 지적하였다⁴⁹⁾. 우선 연료전지 단가가 화석연료 대비 수 배에 달하고 있어 가격경쟁력이 미흡한데 이는 고효율에 반드시 수반되는 고가의 촉매 및 전해질 때문이다. 또한 주 연료인 수소를 추출하는데 필요한 LNG 단가가 여타 에너지원보다 높은 것도 원인이다. 따라서 연료전지 단가를 낮추는 것이 시급하다. 다음으로 석유플랜트, 제철소 등에서 대량의 수소를 저장하여 연료전지에 공급하는 인프라 구축이 필요하다. 마지막으로 기존 연료전지의 한계를 극복하거나 새로운 시장을 창출할 수 있는 연료전지 기술이 개발되어야 한다.

여기서 바이오가스를 경제적으로 고질화하여 LNG를 대체할 수 있다면 연료전지의 가격경쟁력을 제고하는 데에 일조할 수 있을 것이라 생각된다.

(4) 바이오가스의 활용을 위한 전처리 : 개질(혹은 고질화)

생산된 바이오가스를 어떤 목적으로 사용하느냐에 따라서 전처리과정이 달라져야 한다. 바이오가스의 전처리는 바이오가스에 함유된 불순물인 황화수소, 실록산 및 기타 불순물을 제거하는 기술과 이산화탄소를 제거하는 기술(업그레이딩)이다⁵⁰⁾. 바이오가스에

49) 연료전지 시장 동향 및 전망, 한국기업평가, 2011

50) 문헌에 따라서 정제기술, 개질기술, 고질화기술, 업드레이딩기술 등이 혼용되고 있다. 바이오가스의 정제기술을 전처리기술(탈황, 실록산제거, 제습)과 개질기술(이산화탄소 제거)로 구분하기도 한다.

포함돼 있는 H₂S, 실록산 등을 제거하지 않은 경우에는 기기의 부식이나 플러깅(plugging: 막힘현상)을 유발해 기기 수명을 단축시키고 동시에 고장의 원인이 된다. 소화조 가운을 위한 보일러의 연료 혹은 열병합발전의 연료로 이용할 경우 보일러 및 발전기의 성능과 수명을 최대한 보장하기 위해서 바이오가스에 포함하는 수분은 필수적으로 제거되어야 하고 동시에 황화수소는 1,000ppm 이하로 낮춰야 한다. 유해불순물 제거차원의 정제기술이 적용되는 것이다. 더 나아가 바이오가스를 연료전지용으로 사용하거나 도시가스 혹은 자동차 연료로 사용하기 위해서는 천연가스(LNG)에 근접하는 수준으로 품질을 높여야 한다. 이것을 보통 개질 혹은 고질화처리라고 부른다. 혐기성소화의 운전 방식과 주원료 등에 따라서 차이가 있지만 대개 30% 내외의 이산화탄소를 함유하게 되는데, 이산화탄소는 유해물질로 분류되지는 않지만 함량이 높으면 반비례적으로 메탄의 함량이 적어진다. 이 때문에 바이오가스생산 당시 60% 내외였던 메탄의 함량을 97% 이상으로 높이는 것이 개질의 주요 목표가 된다. 최근 유럽을 중심으로 바이오가스의 단순 이용보다 고급화를 위해 메탄함량을 높이고 불순가스를 제거한 깨끗한 바이오메탄이라는 연료로 이용하려는 경향이 확대되고 있다. 바이오메탄은 메탄농도가 97% 이상, 산소·질소 농도가 3% 이하 그리고 H₂S, 실록산 등이 제한 수준 이내로 포함된 가스로 현재 가정에서 이용하는 가스레인지, 보일러 등에 그대로 사용할 수 있다.

〈표 3-34〉 바이오가스와 개질처리된 바이오메탄의 비교

구분	바이오가스	바이오메탄
조성	CH ₄ (50~60%), CO ₂ (30~40%) 기타 가스(5%)	CH ₄ (97%), CO ₂ +O ₂ +N ₂
열량(kcal/Nm ³)	<5,000	Max 9,500
적용처	발전, 보일러	발전, 보일러, 연료전지, 산업체연료, 자동차, 철도차량, 선박연료, 가스배관망 연동
원거리 공급여부	불가능	가능(기체, 액체, 고체)
CO ₂ 분리	없음	분리함
투자비규모	낮음	높음
판매가격(수익성)	낮음	높음(비고: 제조원가 중간)
부가가치	낮음	높음

또 천연가스자동차, 천연가스철도, 천연가스선박, 연료전지, 마이크로가스터빈, 가스 엔진발전 등 기존 천연가스가 사용되는 곳에 바이오메탄을 사용할 수 있다. 개질을 통해 활용도가 훨씬 높아지는 것이다. 특히 유럽, 미국 등의 선진국은 기존 천연가스배관망에 바이오가스를 혼합해 공급하기도 하며, 최근 일본의 가스회사도 이러한 경향에 맞춰 바이오가스 구매요령을 자율적으로 정해 각 지역 내 바이오가스·바이오메탄 제조자로부터 가스를 구매해 자기 권역 내의 배관을 통해 소비자에게 공급하고 있다. 바이오가스를 폭넓게 사용할 수 있도록 하는 기술이 바로 바이오가스 정제기술로 국내에서는 한국에너지기술연구원에서 파일럿으로 개발했으나 상업화는 아직 달성되지 못했고 대부분의 정제기술은 외국으로부터 도입되고 있다.

H₂S는 주로 가성소다 흡수탑이나 산화철흡착탑 등으로 제거하고 실록산은 황성탄에 의해 주로 제거한다. 실록산이 생기는 원인은 우리가 사용하는 샴푸, 주방세제 등 생활용품에 실리콘화합물이 포함되어 있기 때문이며 이의 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 대표적인 불순물인 CO₂와 H₂S 제거를 위해 이용되고 있는 기술은 다음의 표에 나타낸 바와 같다.

〈표 3-35〉 대표적인 이산화탄소 제거기술 및 탈황기술

Carbon dioxide(CO ₂)	Hydrogen sulfide(H ₂ S)
Water scrubbing	Biological desulphurisation
Polyethylene glycol scrubbing	Biological filters
Pressure swing adsorption (PSA) Membrane	Iron chloride to digester slurry
- High pressure gas separation	Iron oxide wood chips
- Gas-liquid absorption membranes	Water scrubbing
	Impregnated activated carbon
	Sodium hydroxide scrubbing

자료 : 선진국의 바이오가스 생산 및 활용기술 현황, 허남호, 2009

바이오가스를 바이오메탄으로 정제하는 기술은 국외에서는 상업화된 기술과 상업화를 진행하는 기술 등 다양한 기술이 통용되고 있지만, 국내에서는 아직 개발되지 않은 상태이다. 상업화된 기술은 흡수법, 흡착법, 멤브레인법이 있으며 상업화가 진행 중인 기술은 심냉법, 초저온법 등이 있다. 전처리와 정제기술로 제조된 바이오메탄은 선진외국에서 부가가치가 높아 온실가스 저감이 필요한 분야와 안정적인 수요처인 자동차, 철

도 등의 수송용 분야 및 기존 천연가스 배관망과 연계해 바이오메탄과 천연가스를 혼합해 공급하는 용도로 사용하고 있다. 이를 위해 선진국은 연구개발을 통해 바이오메탄에 대한 국가 품질기준을 규정·운영하고 있으며 각 바이오메탄 제조자는 이 품질기준에 맞춰 가스를 제조하고 지역 천연가스사업자는 바이오메탄을 사용한 것만큼 정부와 지방자치단체로부터 신재생에너지를 사용한 것으로 인정받고 있다.

IV

서울시 하수도 에너지 및 자원 재순환 사례

1. 서울시 하수도 구역 및 처리장의 사례

1) 서울시 하수처리시설의 처리구역과 시설현황

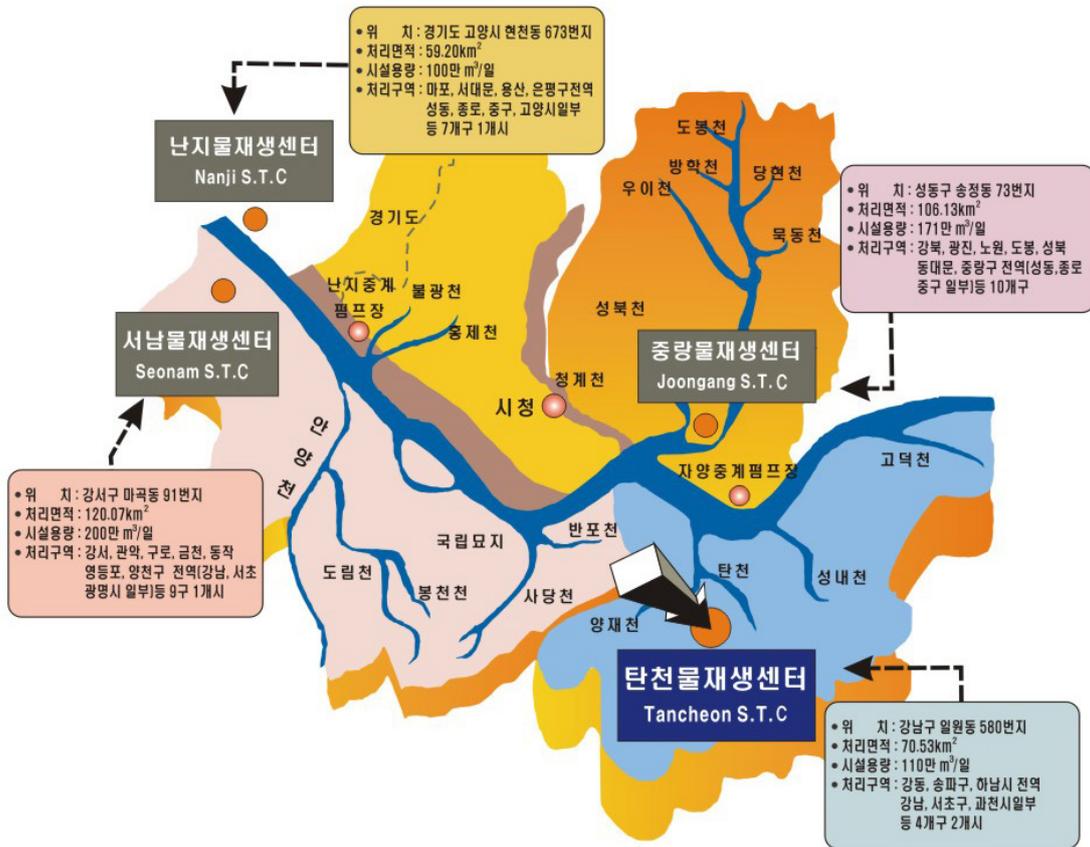
(1) 수처리공정

서울시에서 총시설용량 5,810,000m³/일의 4개 하수처리시설(중랑, 탄천, 서남, 난지)이 서울시 전역의 거주지역, 상업지역에서 발생하는 하수를 전량 처리하고 있다. 전국 인구의 1/4이 거주하는 대도시인만큼 서울의 하수처리용량도 전국 하수처리시설용량의 23%에 달하고 있다. 하지만 고도처리에서는 중랑하수처리장(중랑물재생센터)에서 일부만 고도처리공법으로 운영되고 있어 전국 고도처리시설용량의 2.8%밖에 되지 않는 것으로 볼 때, 고도처리면에서 타 지역보다 미흡한 것을 볼 수 있다.

〈표 4-1〉 서울시 하수처리시설의 시설용량

시설명	소재지	시설용량 합계 (천m ³ /일)	물리적 처리 (천m ³ /일)	생물학적 처리 (천m ³ /일)	고도처리 (천m ³ /일)	처리구역
중랑	성동구 송정동 73	1,710	0	1,250	460	강북, 광진, 노원, 도봉, 동대문, 성북, 중랑 전역 및 성동, 종로, 중구, 의정부 일부
탄천	강남구	1,100	0	1,100	0	강동, 송파, 하남시 전역 및 강남, 서초, 과천시 일부
서남	강서구 마곡동 91	2,000	0	2,000	0	강서, 관악, 구로, 금천, 동작, 영등포, 양천구 전역 및 강남, 서초, 광명시 일부
난지	경기도 고양시 현천동 673-2	1,000	0	1,000	0	마포, 서대문, 용산, 은평 전역 및 성동, 종로, 중구, 고양시 일부
서울시 합계		5,810	0	5,350	460	
전국 합계		25,118	0.05	8,453	16,665	
서울시와 전국의 비율		23.1%	0.0%	63.3%	2.8%	

중량하수처리장은 한 계열(2처리장)만 A2O 공법의 고도처리를 도입하여 운영하고 있고, 나머지 2계열(3처리장, 4처리장)은 표준활성슬러지법으로 처리하고 있다. 탄천하수처리장, 서남하수처리장, 난지하수처리장은 모두 2계열씩 운영하고 있는데 모두가 표준활성슬러지법으로 운전되고 있다.



〈그림 4-1〉 서울시 하수처리구역

(2) 슬러지처리 공정

중량하수처리장은 두 계열의 슬러지처리공정을 운영하고 있는데 하나는 분뇨와 정화조오니를 처리하고, 다른 하나는 세 계열의 수처리공정에서 발생한 하수슬러지를 처리하고 있다. 난지하수처리장과 서남하수처리장은 두 계열의 슬러지처리공정을 운영하고 있는데, 하나는 1계열 수처리공정의 하수슬러지에 분뇨, 정화조오니를 연계하여 병합처리하고 있고, 다른 하나는 2계열 수처리공정의 하수슬러지만을 처리하고 있다. 탄천하수

처리장은 하나의 슬러지처리공정을 가지고 있어 두 계열의 수처리공정에서 발생한 하수 슬러지를 한데 모아서 처리하고 있다. 탄천하수처리장에서는 분뇨, 정화조오니의 병합 처리가 이루어지지 않고 있다.

〈표 4-2〉 서울시 하수처리장의 소화조 및 분뇨처리시설

처리장	소화조규격	소화조 총용적 (m ³)	분뇨처리 시설용량 (m ³ /일)	분뇨 및 정화조오니 처리구역
중랑	D23,0m×H8,92m : 10조, D29,0m×H15,0m : 14조	175,000	4,000	분뇨 : 13개 구 (중구, 성동, 광진, 동대문, 중랑, 성북, 강북, 도봉, 노원, 서초, 송파, 강동, 강남) 정화조 : 11개 구 (중구, 성동, 광진, 동대문, 중랑, 성북, 강북, 도봉, 노원, 송파, 강동)
탄천	D27,0m×H15,0m : 10조	85,800		없음
서남	D26,0m×H12,5m : 16조, D28,0m×H15,0m : 8조	180,000	2,000	정화조 : 9개 구 (강동, 송파, 관악, 동작, 구로, 금천, 영등포, 강서, 양천)
난지	D26,0m×H12,5m : 8조, D26,0m×H13,5m : 3조	74,500	4,500	분뇨 : 6개 구 (종로, 용산, 은평, 서대문, 마포, 영등포) 정화조 : 8개 구 (종로, 중구, 용산, 서대문, 마포, 강남, 서초구 전 지역, 영등포구 일부지역)
서울시 합계		515,300	10,500	

2) 서울시 하수처리장의 운영과 에너지 및 자원 재순환

(1) 수처리공정 운영

서울시 4개 하수처리시설의 2011년 연간 일평균 하수처리량은 중랑하수처리장 1,297,573m³/일, 탄천 777,109m³/일, 서남 1,686,617m³/일, 난지 644,035m³/일로 총 4,405,334m³/일이다. 이는 전국 하수처리량 19,435,854m³/일(2010년)의 약 23%에 해당하는 양이다.

○ 자원재순환 : 인회수

서울시의 전 지역은 2012년 1월 1일부터 환경부고시에 의하여 1일 하수처리용량 500m³ 이상인 III지역으로 분류된다⁵¹⁾. 2011년 4개 하수처리장의 평균 오염물질 제거율은 BOD 95.1%, COD 84.4%, SS 96.6%, T-N 50.1%, T-P 66.3%였다. 그러나 2011년의

평균 방류수질을 볼 때, 다른 모든 항목은 기준치 이내이지만 T-P는 2012년부터 적용되는 0.5mg/L를 훨씬 상회하고 있다. 인이 생물학적으로 제거될 때에는 혐기성소화공정에서 다시 고농도로 방출되기 때문에 수처리계통의 인부하를 다시 증가시키고, 장기간 순환되면서 운영될 때 방류수의 수질을 궁극적으로 달성하기 어렵다. 화학적 침전으로 인을 제거하면 방류수 수질기준을 달성하기는 어렵지 않으나, 재활용이 어려운 상태의 슬러지가 다량으로 발생하게 되는 단점이 있다. 이 때문에 인이 방출되는 지점에 정석탈인(crystalization)과 같은 효율적인 인회수 기술을 도입할 필요성이 있다.

〈표 4-3〉 서울시 하수처리장의 수처리공정 운영현황 - 처리량(2011)

처리장	일평균 (천m ³ /일)	연간총량 (천m ³ /년)	타시도하수 (천m ³ /일)	침출수 (천m ³ /일)
종량	1,298	473,614	309	6
탄천	777	283,645	19,634	32
서남	1,687	615,615	49,905	17
난지	644	235,073	5,323	677
서울시 합계	4,405	1,607,947	74,924	731
전국 합계(2010)	19,436	7,094,087		
서울시와 전국의 비율	22.7%			

〈표 4-4〉 서울시 하수처리장의 수처리공정 운영현황 - 수질 및 제거율(2011)

처리장	구분	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	대장균군 (개/mL)
종량	유입수	145.4	69.9	88.7	32,402	3,571	116,304
	방류수	7.9	10.7	5.3	16,056	1,122	596
	제거율	94.6%	84.7%	94.0%	50.4%	68.6%	99.5%
탄천	유입수	133.9	65.9	117.2	32,885	3.2	110,337
	방류수	4.8	9.9	2	12,179	0.836	696
	제거율	96.4%	85.0%	98.3%	63.0%	73.9%	99.4%
서남	유입수	126.6	59	115.9	26,573	3,252	138,146
	방류수	7.5	10.4	4	16,021	1,426	528
	제거율	94.1%	82.4%	96.5%	39.7%	56.2%	99.6%
난지	유입수	137.6	68.9	115.9	31,646	2,88	115,327
	방류수	6.2	9.9	2.7	16,689	0.959	303
	제거율	95.5%	85.6%	97.7%	47.3%	66.7%	99.7%

51) 방류수수질기준 적용을 위한 지역 구분, 환경부고시 제2010-44호, 2010.4.19 제정

〈표 4-5〉 2012년 1월 1일부터 적용되는 방류수 수질기준

구분		생물화학적 산소요구량 (BOD)(mg/L)	화학적 산소요구량 (COD)(mg/L)	부유물질 (SS) (mg/L)	총질소 (T-N) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	총대장균 군수 (개/ml)	생태독성 (TU)
1일 하수처리 용량 500m ³ 이상	I 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.2 이하	1,000이하	1 이하
	II 지역	5 이하	20 이하	10 이하	20 이하	0.3 이하	3,000이하	
	III 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	0.5 이하		
	IV 지역	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 500m ³ 미만 50m ³ 이상		10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하		
1일 하수처리용량 50m ³ 미만		10 이하	40 이하	10 이하	40 이하	4 이하		

자료 : 하수도법 시행규칙(별표 1)

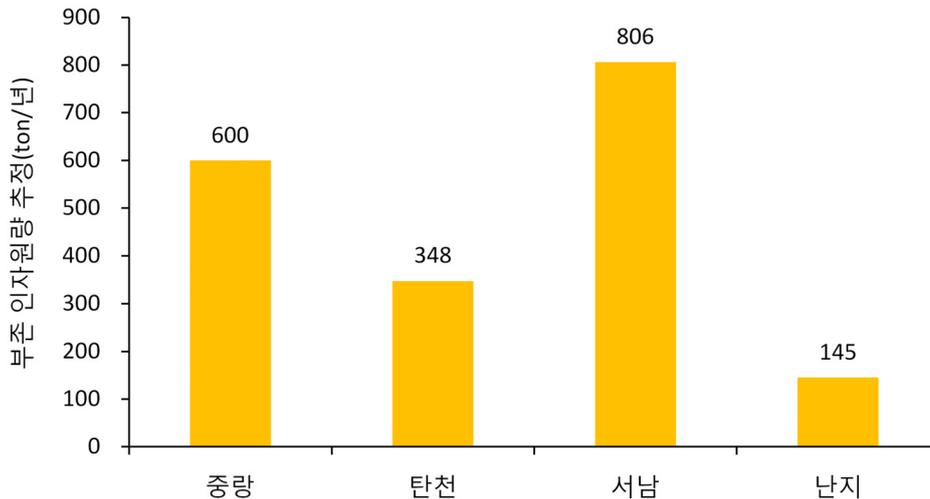
총인대책을 수립하기 위해서는 수처리공정 뿐만 아니라 슬러지처리공정을 포함한 각 공정 단계에서 물질수지를 수립하여야 한다. 그러나 지금까지 하수처리시설의 슬러지처리 공정 각 단계에서는 주로 고형물의 양과 수분의 양이 주관심사였기 때문에 인의 농도를 의무적으로 측정하지 않았다. 통계자료로 준비된 것이 없기 때문에 물질수지 수립을 위해서는 별도로 각 공정 단계에서의 인농도를 실측해야 한다. 따라서 이 보고서에서는 몇 가지 가정을 세워 이론적으로 어느 정도 될 것이라고 추정치만을 제시하였다. 여기서는 대략적인 인회수 가능성을 알아보기 위해서 다음과 같이 가정하고 계산해 보도록 한다.

표준활성슬러지법의 잉여슬러지에 포함된 인의 양은 0.02~0.03gP/gMLSS인 반면, 생물학적 인처리공정에서의 인을 과량섭취한 잉여슬러지의 인 함유량은 0.025~0.05gP/gMLSS인 것으로 알려져 있다. 혐기성소화공정에서 인을 다시 방출하므로 슬러지 내의 인함유량이 더 낮아질 수 있지만 VS의 3%까지 인을 함유한 채로 소화슬러지가 탈수되어 최종처분된다고 가정하면 각 하수처리 공정에서 회수할 수 있는 인의 양은 다음의 표에 나타낸 것과 같다. 즉, 잠재적 자원으로 부존 인자원량은 서울시의 하수처리장에서 연간 1,899톤이 된다. 외국의 인회수 기술은 70~80%를 실제로 회수하여 상품가치가 있는 비료로 판매하고 있다고 보고되어 있다. 부존 인자원량의 70%를 회수한다고 가정하면 연간 1,329톤/년의 인자원을 회수할 수 있는 것이다.

〈표 4-6〉 서울시 하수처리장의 부존 인자원량 추정

처리장	연간처리량 (천m ³ /년)	유입수 (mg/L)	방류수 (mg/L)	현재 제거율 (%)	목표 제거량 (kg T-P)	슬러지 발생량 (ton/년)	슬러지내 인함유량 (ton/년)	부존 인자원량 (ton/년)
중랑	473,614	3,571	1,122	68.6%	1,454,469	189,970	855	600
탄천	283,645	3.2	0,836	73.9%	765,840	92,958	418	348
서남	615,615	3,252	1,426	56.2%	1,694,173	197,303	888	806
난지	235,073	2.88	0,959	66.7%	559,474	92,041	414	145
서울시합계	1,607,947							1,899

가정 : 방류수 목표 인농도 0.5mg/L, 탈수슬러지 함수율 75%, 탈수슬러지 VS 60%, 슬러지 VS 중 인함량 3%(가정치와 실제 값이 달라지면 회수 가능한 인의 양은 달라질 수 있음)



〈그림 4-2〉 서울시 하수처리장의 부존 인자원량 추정

○ 하수열 이용

하수열 이용법은 수처리공정의 마지막에서 방류되는 하수가 가지고 있는 열을 이용하여 냉난방의 열교환에 사용하는 방법이다. 에너지 부존량을 추정하기 위해서 2006년 대한상하수도학회의 보고서⁵²⁾에서는 전국에서 배출되는 하수처리수의 양을 연간 32억

52) 공공하수도시설 에너지 절감 대책 수립에 관한 보고서, 대한상하수도학회, 2006

m³로 추정하고, 이 전량을 이용 온도차를 5℃로 가정하여 산출한 열에너지 부존량을 약 16,000 Tcal/년이라고 하였다. 인천발전연구원의 보고서⁵³⁾에서는 인천광역시의 연간하수발생량을 연간 254,791.19천m³로 추정하고, 이용 온도차를 5℃로 가정하여 부존 에너지량을 1,273.96Gcal/년으로 계산하였다⁵⁴⁾.

이 보고서에서는 이용온도차를 5℃로 가정하는 것이 아니라 월별 평균기온과 평균유입수온과의 차이를 적용하여 서울시 4개 하수처리장의 하수열이 가지고 있는 부존 에너지량을 추정해 보고자 한다. 유입되는 생하수를 이용하기보다 처리수를 이용하는 것이 보편적이기 때문에 보다 정확하게 추정하기 위해서는 처리수의 온도를 가지고 계산해야 하지만, 겨울철에도 처리과정을 지나면서 폭기조에서 송풍되면서 열을 받게 되고, 혐기성소화조에서 가온되는 등의 이유로 온도가 유지된다고 가정한다⁵⁵⁾. 또한 여름철에는 유입하수의 온도가 기온보다 다소 낮지만 처리과정에서 열을 받게 되어 유입될 때 보다 처리수의 온도가 올라가기 때문에 기온과의 온도차이가 거의 없을 것으로 생각된다. 따라서 여름철에 냉방을 위한 냉열원으로는 사용하지 않고, 하수의 온도가 기온보다 높은 경우에만 히트펌프에 의해 열을 회수하여 난방 혹은 온수로 이용한다고 가정하고 계산하도록 한다.

$$Q = C \sum_{i=1}^{12} (V_i \cdot \Delta T_i)$$

Q : 부존열량(kcal/년)

C : 물의 열용량(1,000kcal/℃/m³)

V_i : 매월의 하수처리량(m³)

ΔT_i : 매월의 하수유입수온과 기온과의 온도차(℃)

53) 인천광역시 공공하수처리시설 하수열 활용방안, 인천발전연구원, 2010

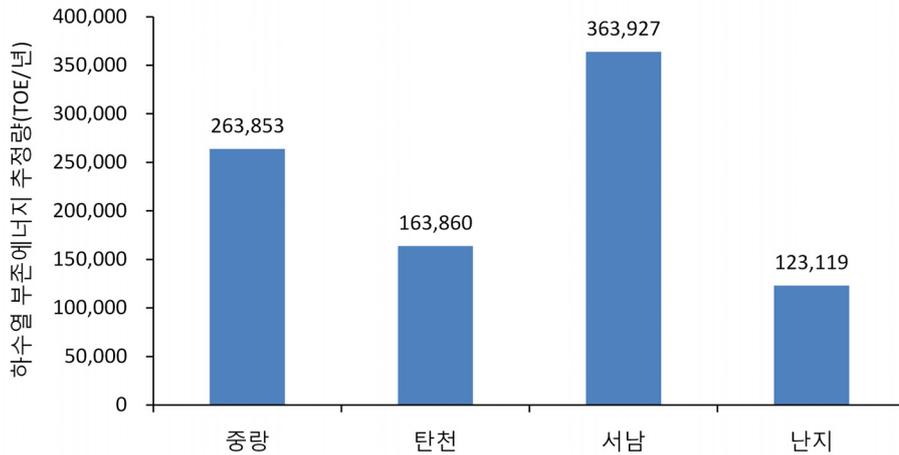
54) 이 보고서에서는 물의 열용량을 1kcal/m³/℃로 계산하였는데, 이것은 오류이다. 물의 열용량은 1000kcal/m³/℃이므로 위의 인천광역시의 하수열 부존 에너지량은 1,273.96Tcal/년이 된다.

55) 실제로 겨울철에도 10~12℃로 방류되고 있다고 보고되고 있다.

〈표 4-7〉 하수온도와 기온과의 월별차를 고려한 하수열 부존 에너지량 추정(2011)

처리장	유량가중평균 온도차 (°C)	연간 하수처리량 (m ³ /년)	부존에너지량 (Tcal/년)	부존에너지량 (TOE/년)
중랑	5.57	473,614,152	2,639	263,853
탄천	5.78	283,644,599	1,639	163,860
서남	5.91	615,615,348	3,639	363,927
난지	5.24	235,072,906	1,231	123,119
서울시 합계	5.69	1,607,947,005	9,148	914,759

가정 : 하수의 온도가 기온보다 높은 경우에만 열펌프에 의해 열을 회수하여 난방 혹은 온수로 이용
 Tcal = 1012cal = 109kcal = 100TOE



〈그림 4-3〉 서울시 하수처리장의 하수열 부존에너지 추정

월별 평균 하수온도와 월평균 기온의 온도차이를 해당 월의 처리유량과 곱하여 계산한 값은 월별 온도차이를 월별 유량을 가중치로 하여 가중평균을 구하여 계산한 값과 동일하다. 월별 평균 하수온도와 매월의 온도차를 이용하여 계산한 결과는 온도차를 일괄적으로 5°C로 적용하고 연간 처리량으로 계산할 때보다 다소 큰 값이 나타났지만, 심각한 차이는 없었다. 추정결과에 의하면 서울시 하수처리시설에서 발생하는 하수열 부존에너지량은 약 91만TOE/년으로 추정된다.

(2) 슬러지처리계통 운영

서울의 4개 하수처리시설(중랑, 난지, 서남, 탄천)은 다음의 표에 나타난 것과 같이 총 소화조용량 515,300m³의 규모로 하수슬러지 및 유기성 폐기물의 슬러지를 연계하여 소화처리하고 있다. 중랑하수처리장은 고도처리장과 3,4처리장을 각각의 슬러지처리 계통으로 분류하여 운전하고 있고, 난지하수처리장은 1처리장과 2처리장을 각각의 슬러지처리 계통으로 분류하여 운전하고 있다. 탄천하수처리장은 1처리장과 2처리장을 합하여 하나의 슬러지처리 계통으로 운전하고 있으며, 서남하수처리장은 1처리장과 2처리장을 각각의 슬러지처리 계통으로 분류하여 운전하고 있다.

○ 탈수슬러지의 연료화

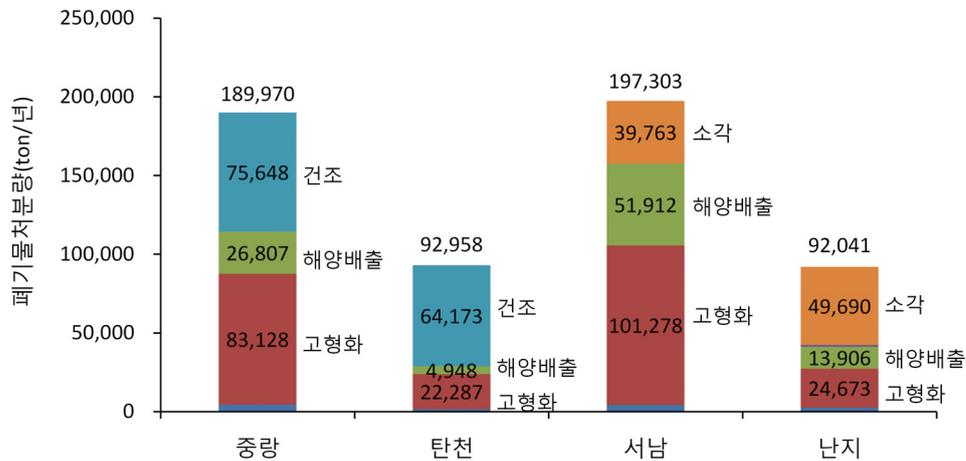
하수처리공정에서 발생하는 슬러지와 분뇨, 정화조오니 및 협잡물등의 폐기물 처리현황을 보면 서울시 평균적으로 고형화처리가 40.4%로 가장 많이 이루어지고 있고, 건조가 24.4%로 그다음을 처리하고 있다. 그러나 2012년부터 금지되는 해양배출에 의한 처리가 17.1%나 되고 있어 다른 육상처리로의 변환이 시급하다.

앞선 장에서 전술한 바와 같이 2009년에 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청이 공동으로 수립한 “저탄소에너지 생산·보급을 위한 「폐자원 및 바이오매스 에너지 대책」 실행계획”에서 환경부는 지금까지 재활용에 집중했던 추진방향을 에너지화로 전환하기로 결정하였다. 즉 환경부는 해양배출, 매립 및 소각되는 하수슬러지 전량을 석탄화력발전소 혼소 등 연료화 방식으로 전환함으로써 에너지화하는 방안을 마련하여 추진하기 시작하였다. 이미 예산을 확보하여 설치중인 시설에 대해서도 사업진도 등을 고려해 가능한 경우 연료화시설로 전환토록 하는 방안, 현재 하수슬러지를 건조 후 소각 처리하는 시설에 대해서도 연료화시설로 전환토록 하는 방안을 검토하고, 2010년부터의 신규 및 대체시설은 연료화 방식을 우선적으로 추진하겠다고 밝혔다. 이러한 정부차원의 저탄소 녹색성장의 기조에 부응하도록 서울시의 하수처리장에서도 폐기물의 처분방식을 연료화쪽으로 추진하는 것이 좋을 것이다. 전환 대상량은 이미 처리되고 있는 고형화처리량을 제외하고 해양배출하던 양과 건조처리량, 소각량을 최대한 연료화로 전환할 수 있을 것이다. 정상적으로 소각장에서 소각되고 있는 처리량은 소각시설자체에서 보조연료를 가능한 사용하지 않고 소각하면서,

발생하는 열을 회수할 수 있어야 한다. 건조처리도 화력발전소 등에서 사용하기에 부담이 되지 않는 고품질(발열량과 취급성 등)의 연료로 생산할 것을 목표로 하여 건조시켜야 할 것이다. 소각시설에서 기술적인 문제 때문에 어쩔 수 없이 보조연료를 사용해야 한다면 외부의 추가연료를 사용할 것이 아니라 바이오가스를 증산하도록 노력하고 잉여 바이오가스를 활용하여 소각시키는 방안을 추진해야 할 것으로 생각된다.

〈표 4-8〉 서울시 하수처리시설에서의 폐기물(슬러지, 협잡물 등) 처분 현황(2011)

처리장	구분	계	직매립	고형화	해양배출	재활용	건조	소각
중랑	톤/년	189,970	4,387	83,128	26,807	0	75,648	0
	(%)	100%	2.3%	43.8%	14.1%	0.0%	39.8%	0.0%
탄천	톤/년	92,958	1,550	22,287	4,948	0	64,173	0
	(%)	100%	1.7%	24.0%	5.3%	0.0%	69.0%	0.0%
서남	톤/년	197,303	4,350	101,278	51,912	0	0	39,763
	(%)	100%	2.2%	51.3%	26.3%	0.0%	0.0%	20.2%
난지	톤/년	92,041	2,628	24,673	13,906	1,143	0	49,690
	(%)	100%	2.9%	26.8%	15.1%	1.2%	0.0%	54.0%
서울시 합계	톤/년	572,273	12,915	231,365	97,574	1,143	139,822	89,454
	(%)	100%	2.3%	40.4%	17.1%	0.2%	24.4%	15.6%



〈그림 4-4〉 서울시 하수처리장의 폐기물 처리현황(2011)

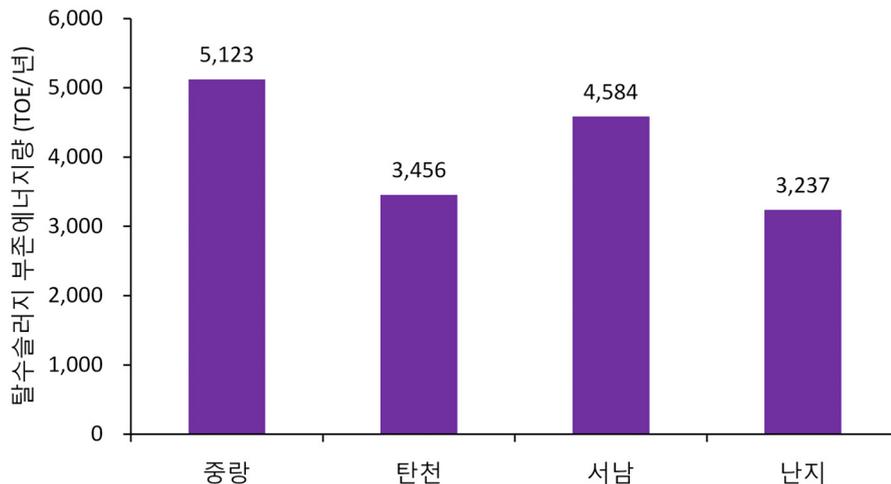
직매립량과 고화처리량을 제외하고 해양배출량, 재활용량, 건조처리량, 소각처리량 전량을 보조적인 첨가물 없이 건조에 의한 연료화로 전환할 수 있다고 가정하면, 이때

발생하는 열량을 다음과 같이 계산할 수 있다. 발생하는 탈수슬러지의 함수율은 대략 75%이므로 건조슬러지의 양은 대략 발생슬러지량의 1/4이 된다. 건조된 탈수슬러지의 저위발열량을 2,000kcal/kg(건조기준)으로 잡고 계산하면 다음의 표와 같다. 탈수슬러지를 건조처리하여 연료화하는 데에 소요되는 에너지량을 제외하고 생산할 수 있는 에너지량을 추정할 때, 서울시 하수처리시설에서 발생하는 탈수슬러지 연료의 연간 부존에너지량은 약 164Tcal(=16,400TOE)로 추정된다. 물론 운영상 발생 가능한 여러 문제들과 건조하는데 필요한 에너지를 감안하지 않은 것이므로 별도의 연구가 필요하겠으나 개발 가능한 부존 에너지량을 확인하는 데에는 충분하다고 생각된다.

〈표 4-9〉 연료화 가능 탈수슬러지의 부존에너지 추정(2011)

처리장	함수 슬러지량 (톤/년)	건조 슬러지량 (톤/년)	발생열량 (Mcal/년)	발생열량 (TOE/년)
중랑	102,455	25,614	51,227,465	5,123
탄천	69,122	17,280	34,560,925	3,456
서남	91,676	22,919	45,837,850	4,584
난지	64,740	16,185	32,369,975	3,237
서울시 합계	327,992	81,998	163,996,215	16,400

가정 : 해양배출량, 재활용량, 건조처리량, 소각처리량 전량을 보조적인 첨가물 없이 건조에 의한 연료화로 전환, 건조된 탈수슬러지 연료의 저위발열량 = 2,000kcal/kg(건조기준)



〈그림 4-5〉 서울시 하수처리장 탈수슬러지의 부존에너지량 추정(2011)

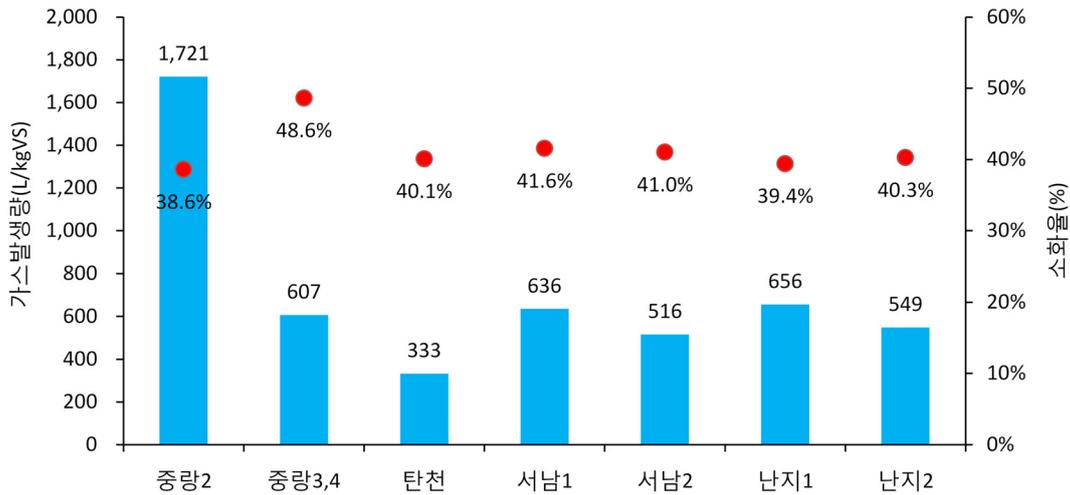
○ 바이오가스 발생량과 부존에너지량

서울시 4개 하수처리시설의 2011년 소화조 운영 시 발생하는 바이오가스 발생량과 소화율을 검토한 결과를 다음의 표에 나타내었다. VS kg당 가스발생량은 탄천하수처리장을 제외한 모든 하수처리장에서 500L 이상으로 적정 발생량이라고 알려진 400~700L를 초과하고 있다. 특히 중랑하수처리장의 2처리장계열은 분뇨와 정화조오니만을 투입하여 처리하고 있는데, 소화율은 38.6%임에도 불구하고 VS kg당 가스발생량은 1,721L로 매우 큰 것으로 조사되었다. 고도처리장과 3, 4처리장에서 발생하는 하수슬러지를 모아 소화시키는 3,4처리장 계열 소화조에서는 소화율이 48.6%로 다른 하수처리장들보다 가장 높은 효율을 보이고 있고 VS kg당 가스발생량은 607L로 양호한 결과를 보이고 있다. 서남하수처리장과 난지하수처리장에서도 분뇨와 정화조오니를 하수슬러지와 연계하여 병합소화처리를 하는 1계열과 하수슬러지만 소화시키는 2계열을 비교하여 보면 소화율은 거의 차이가 없지만 VS kg당 가스발생량은 1계열에서 크게 나타나고 있다. 하수슬러지만을 소화처리하고 있는 탄천하수처리장은 소화율이 낮지 않지만 VS kg당 가스발생량은 333L로 가장 낮은 수치를 보이고 있다.

이와 같은 결과로 판단해 보면 하수슬러지의 혐기성소화에서 유기성폐기물을 연계하여 병합소화처리를 하는 것이 에너지의 회수 측면에서 확실히 유리하다는 것을 알 수 있다. 유기성폐기물들을 별도로 처리하여도 바이오가스를 생산할 수 있지만, 공공하수처리와 연계하여 처리하는 것은 바이오가스 증산의 측면에서도 이점이 있고, 시설규모의 효과측면에서도 이점이 있으며, 유기성폐기물 별도처리 시에 발생하는 폐수와 슬러지를 하수처리와 연계할 수 있다는 점에서도 이점이 있다. 분뇨를 연계처리할 수 있는 여건이 아닌 경우에는 음식물류 폐기물을 전처리하여 하수슬러지와 병합소화시키는 방법으로 바이오가스 증산 및 종합적 운영비용 저감을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 4-10〉 서울시 하수처리장 소화조의 운영효율(2011)

처리장	구분	VS당 가스발생량 (L/kgVS)	소화율	비고
중랑	2처리장계열	1,721	38.6%	분뇨와 정화조오니만을 투입하고 있음
	3,4처리장계열	607	48.6%	고도처리슬러지, 3,4공장의 하수슬러지만을 투입하고 있음
탄천	1,2계열	333	40.1%	하수슬러지만을 소화처리하고 있음
서남	1계열	636	41.6%	분뇨와 정화조오니를 하수슬러지와 연계하여 소화조에서 병합처리하고 있음
	2계열	516	41.0%	하수슬러지만을 소화처리하고 있음
난지	1계열	656	39.4%	분뇨와 정화조오니를 하수슬러지와 연계하여 소화조에서 병합처리하고 있음
	2계열	549	40.3%	하수슬러지만을 소화처리하고 있음

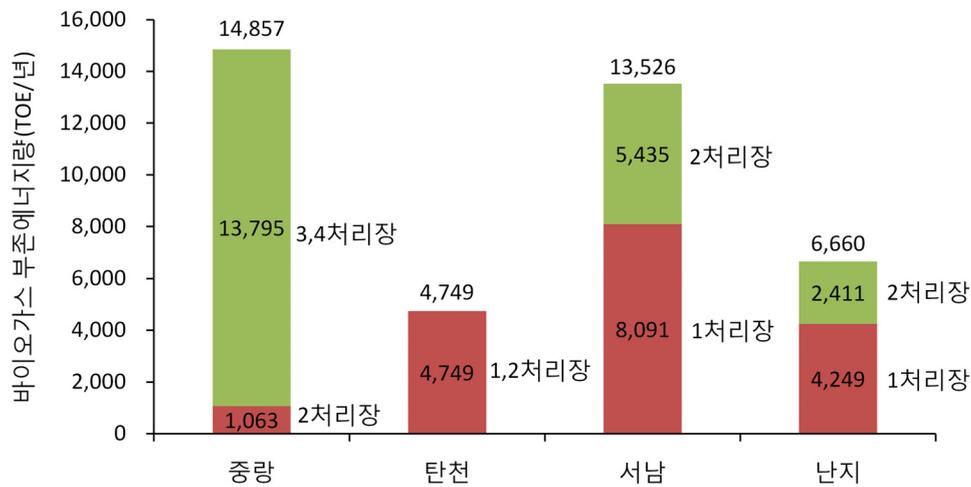


〈그림 4-6〉 서울시 하수처리장의 VS당 가스발생량과 소화율(2011)

각 하수처리장 슬러지처리 계열별 바이오가스 발생량 합은 연간 7천9백만 m^3 를 넘고 있으며, 일평균 약 21만8천 m^3 가 발생하고 있다. 바이오가스의 발열량을 5,000kcal/ Nm^3 라고 간주하고 연간 발생량을 환산하면 약 40만Gcal(4만TOE)에 이른다.

〈표 4-11〉 서울시 하수처리장의 바이오가스 부존에너지량(2011)

구분		연간총계 (천m ³ /년)	일평균 (천m ³ /일)	부존에너지량 (Mcal/년)	부존에너지량 (TOE/년)
중랑	계	29,715	81.4	148,573,940	14,857
	2처리장계열	2,125	5.8	10,625,325	1,063
	3,4처리장계열	27,590	75.6	137,948,615	13,795
탄천	계	9,499	26.0	47,493,415	4,749
	1,2처리장계열	9,499	26.0	47,493,415	4,749
서남	계	27,052	74.1	135,260,435	13,526
	1처리장계열	16,182	44.3	80,911,845	8,091
	2처리장계열	10,870	29.8	54,348,590	5,435
난지	계	13,320	36.5	66,600,500	6,660
	1처리장계열	8,498	23.3	42,490,890	4,249
	2처리장계열	4,822	13.2	24,109,610	2,411
서울시 합계		79,585	218	397,928,290	39,793



〈그림 4-7〉 서울시 하수처리장의 바이오가스 부존에너지량(2011)

2. 서울시 하수처리시설의 신재생에너지 이용사례

서울시 신재생에너지 사업은 「서울시 신재생에너지 활용 가이드라인」과 「서울 친환경 에너지 선언 (2007.4.2.)」을 통하여 신재생에너지 이용률을 2010년까지 2%, 2020년까지 20%로 확대하는 정책 목표를 정하여 시책사업으로 추진 중이다. 이를 분야별로 살펴보면 다음과 같다.

1) 태양광 이용

여러가지 다른 신재생에너지들 중에서 하수처리장에 가장 적극적으로 도입되고 있는 분야는 태양광이다. 이는 상대적으로 설치와 운영이 쉽다는 이유에 기인한다.

〈표 4-12〉 서울시 하수처리장의 태양광 이용 사업 사례

사업	공사기간	내용	기대효과 등
중랑물재생센터 태양광발전시설 설치사업	2008년 3월 ~ 12월	태양광발전 200kW, 인버터 100kW×2대	· 연간 25만kWh의 전력을 생산하여 제2처리장 용수공급동에 활용, 약 16백만원의 전력요금 절감
중랑물재생센터 지하공동구 태양광 자연채광 조명개선사업	2010년 7월 ~ 10월	지하공동구 일부구간 (약 1,440m)	· 태양광에 의한 쾌적한 근무환경 개선 및 연간 약 1천만원의 비용절감
난지물재생센터 태양광발전시설 설치사업	2010년 6월 ~ 11월	태양광발전 100kW	· 생산전력 약 13만kWh/년을 관리동 전기설비에 공급하여 연간 약 9백만원의 전력비 절감
중랑물재생센터 태양광발전시설 설치사업	2008년 8월 ~ 2011년 12월	태양광발전 200kW, 인버터 100kW×2대	· 연간 생산전력 25만kwh을 중랑천 용수공급시설에 활용 약 16백만원의 전력비 절감
중랑물재생센터 지하공동구 태양광 자연채광	2011년 7월 ~ 2012년 1월	지하공동구(폭기조) 1,500m 자연채광	· 신재생에너지 보급확대 및 태양광에 의한 지하살균 등 환경개선
서남물재생센터 지하공동구 태양광 자연채광	2011년 7월 ~ 10월	지하공동구(폭기조) 660m 자연채광	· 신재생에너지 보급확대 및 태양광에 의한 지하살균 등 환경개선
서남물재생센터 태양광 발전시설 설치사업(민자사업)	2010년 9월 ~ 2011년 8월	태양광발전 1,300kW	· 서울시 : 부지제공, 부지점용료 징수(96백만원/년), · 사업자 : 건설비 투자, 15년간 시설운영 전력판매 · 기대효과 : 생산전력 132만kWh/년, 전력판매액 8억원/년

초기에는 소규모로 태양광을 이용하여 근무환경을 개선하거나, 관리동 내의 소비전력을 일부 보충하는 형태가 많았다. 그러나 최근에는 서남물재생센터의 사례에서 볼 수 있는 것과 같이 적극적으로 태양광발전시설을 설치하여 생산전력을 외부에 판매하는 것까지 계획하고 있다.

2) 바이오가스

바이오가스는 과거에 소화조의 가운을 위한 보일러연료로만 사용되다가 점차 활용의 범위를 넓히고 있다. 초기에는 단순히 시설 내 슬러지 건조, 소각시설의 연료, 전력생산에 사용되었는데 이후에는 바이오가스를 정제하여 바이오메탄으로 개질시킨 다음에 활용하는 방법이 도입되고, 열병합발전을 통해 지역난방에도 활용하는 방법도 추진 중이다. 이러한 발전의 주요 요인 중 하나는 바이오가스를 정제하여 불순물을 없애고 메탄함량을 높이는 기술이 발전하고 이용 가능하게 된 것에 기인한다.

〈표 4-13〉 서울시 하수처리장의 바이오가스 이용 사업 사례

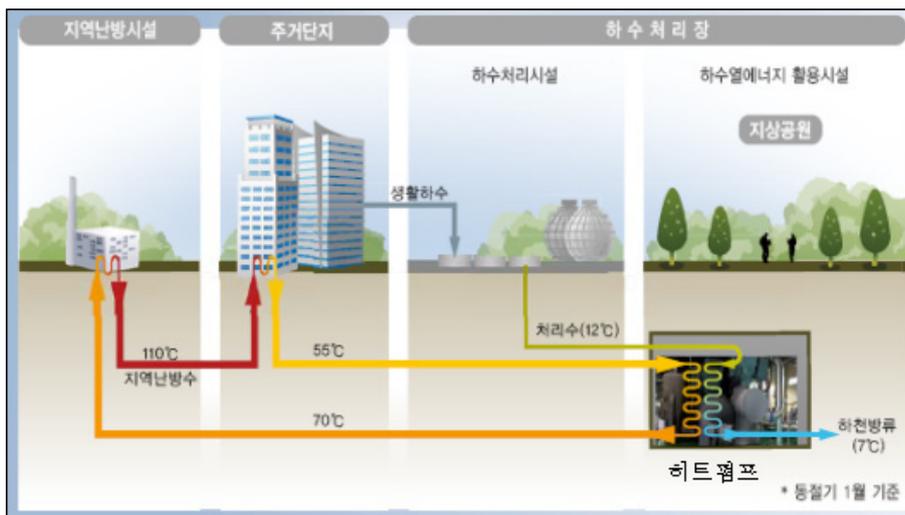
사업	공사기간	내용	기대효과 등
소화가스 연료화사업	2007년 8월 ~ 12월	슬러지건조·소각시설 연료공급장치 교체 (중랑, 난지, 서남)	· 연간 6백만Nm ³ 의 소화가스를 연료로 활용 약 22억원의 에너지비용[도시가스 및 경유] 절감
소화가스 연료발전기 설치사업	2008년 1월 ~ 12월	탄천 1,000kW×2대, 서남 800kW×2대	· 연간 1,394만kwh의 전력을 생산하여 약 9.5억원의 전력요금 절감(탄천 873만kWh, 서남 521만kWh)
서남물재생센터 소화가스 차량연료화 사업	2009년 ~ 2024년 (운영개시일로부터 15년)	소화가스를 활용 2,940Nm ³ /일의 차량연료 생산	· 서울시 : 시설부지와 소화가스를 제공하고 사업자의 투자비회수 후 시설물 인수 · 사업자 : 차량연료 판매, 투자비 회수 후 시설물 인계 · 신재생에너지 생산제고 및 화석연료 사용 저감(연간 77만4000Nm ³ 의 CNG 물량 대체) 도모
난지물재생센터 바이오가스를 이용한 지역난방	2011 ~ 2012년	소화가스를 이용해 한국지역난방공사에서 열병합 발전, 지역난방 공급	· 서울시 : 하루 최대 4만m ³ 의 바이오가스를 난방공사에 공급 · 난방공사 : 바이오가스를 연료로 사용해 하루평균 78MWh의 전기와 90GCal의 열을 생산, 난지와 고양시 약 7,900가구에 에너지 공급 · 연간 석유환산 9400톤의 화석연료 수입대체 효과와 더불어 이산화탄소 1만6000톤의 온실가스 저감

3) 하수열 이용

하수열을 이용한 열에너지 회수는 서남·난지물재생센터에서 보는 것과 같이 초기에 관리동 냉난방에 활용하는 수준에서 탄천물재생센터의 예와 같이 지역난방을 하는 수준으로까지 발전하고 있다. 하수 처리과정을 거쳐도 동절기에 약 12℃를 유지하므로 열펌프를 통해 회수한 열을 지역난방에 활용하고 냉각된 처리수는 7℃ 정도로 하천에 방류하도록 설계되어 있다. 서울시는 서남·난지·중랑 물재생센터 등 나머지 세 곳도 차례로 사업자를 선정해 열펌프를 설치해 하수열을 재활용할 방침이다.

〈표 4-14〉 서울시 하수처리장의 하수열 이용 사업 사례

사업	공사기간	내용	기대효과 등
서남물재생센터 방류수 열원회수 관리동 냉난방사업	2008년 5월 ~ 8월	열회수설비 80RT (관리동 냉난방 2,242㎡)	· 연간 약 15,000Nm ³ 상당 도시가스 절감 (약 10백만원)
난지물재생센터 방류수 열원회수 관리동 냉난방사업	2010년 6월 ~ 10월	열회수설비 80RT (관리동 1,908㎡ 냉난방)	· 연간 등유 약 29㎏를 절감하여 36백만원의 연료비 절감
탄천물재생센터 하수열 에너지 이용 사업	2012년 ~ 2013년	열펌프 설치, 하수열 회수로 2만가구 지역난방	· 포스코 연간 20만Gcal의 열 생산 · 한국지역난방공사 예비 열원을 확보해 시설 투자비와 액화천연가스(LNG) 비용을 절감 · 이산화탄소 발생량 3만2000톤 저감



〈그림 4-8〉 하수열을 이용한 지역난방 개념도

3. 서울시 하수도 에너지 재순환 방향 제안

1) 에너지 부존량 비교

서울시의 4개 하수처리시설은 전국의 23%에 해당하는 하수처리량을 처리할 정도로 대규모이다. 이런 규모의 효과 때문에 이용 가능한 신재생에너지의 양도 막대하다. 앞서 언급했던 신재생에너지 중에서 태양열이나 풍력은 하수처리시설의 특징이라고 볼 수 없기 때문에 검토에서 제외하고 하수처리시설과 직접 연관이 있는 바이오가스 이용, 탈수슬러지의 연료화, 하수열 이용의 방법에 대해 추정된 부존에너지량을 비교하면 다음의 표와 같다. 하수열의 경우 앞에서는 처리수의 수온이 기온보다 높을 때만 고려하여 열을 회수하여 사용한다고 가정하였는데, 여기서는 난방이 필요한 계절(1월, 2월, 3월, 10월, 11월, 12월)에 온도차 중에 5℃만 에너지로 회수한다고 가정하였다. 바이오가스는 2011년 실제 발생량을 바이오가스의 평균적인 저위발열량(5,000kcal/m³)을 적용하고, 탈수슬러지 연료는 2011년 처분된 슬러지량 중에서 해양배출, 재활용, 건조, 소각처리량을 건조하여 연료화한다고 가정하여 2,000kcal/kg(건조기준)을 적용하였다.

〈표 4-15〉 하수열, 바이오가스, 탈수슬러지 연료의 부존에너지량(추정) 비교

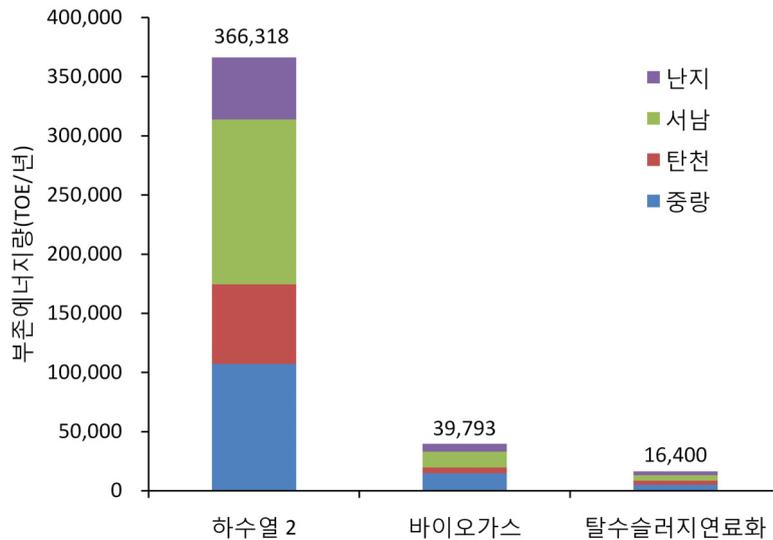
	중량 (TOE/년)	탄천 (TOE/년)	서남 (TOE/년)	난지 (TOE/년)	서울시 합계 (TOE/년)
하수열 1(추정)	263,853	163,860	363,927	123,119	914,759
하수열 2(추정)	107,113	67,291	139,485	52,429	366,318
바이오가스(실제)	14,857	4,749	13,526	6,660	39,793
탈수슬러지 연료화(추정)	5,123	3,456	4,584	3,237	16,400

하수열 1 : 처리수의 수온이 기온보다 높은 경우의 하수열 부존에너지량

하수열 2 : 난방이 필요하면서 처리수온이 기온보다 5℃ 이상 높은 계절(1,2,3월, 10,11,12월)에만 5℃ 온도 차이만큼의 열에너지를 회수한다고 가정

바이오가스 : 4개 하수처리장의 2011년 바이오가스 생산량 기준, 5,000kcal/m³ 적용

탈수슬러지 연료화 : 4개 하수처리장의 2011년 폐기된 슬러지 중 해양배출, 재활용, 건조, 소각처리량을 건조연료 화하였다고 가정하고 2,000kcal/kg(건조기준) 적용



〈그림 4-9〉 하수열, 바이오가스, 탈수슬러지 연료의 부존에너지량(추정) 비교

탈수슬러지 연료는 부존에너지량도 다른 방법에 비해 작고, 사실상 저위발열량 2,000kcal/kg인 경우 연료로 판매하기보다 무상으로 공급하게 된다⁵⁶⁾. 하수처리시설 내에 슬러지연료를 연소시키면서 발전을 할 수 있는 시설을 건설하기보다 기존의 화력발전소에서 연료로 연소시키는 것이 여러 가지로 효과적이기 때문에 화력발전소의 연료 조건에 맞아야 한다는 요구사항이 생긴다. 이 때문에 낮은 발열량의 탈수슬러지 연료는 판매하기보다 무상으로 공급하면서 소량의 비율을 기존 화력발전소 연료에 섞어 혼소하도록 요청해야 하는 것이다. 이 경우 창출되는 이익은 없지만, 재활용품이 소비되지 않으면 새로운 폐기물이 발생하는 다른 재활용방법들의 맹점에 비하면 폐기물 발생량이 확실하게 줄고, 무해하며 소량의 에너지도 얻는 최선의 선택으로 생각할 수 있다.

서울시 하수처리장 소화조 운영효율을 볼 때, 하수슬러지의 혐기성소화에서 유기성폐기물을 연계하여 병합소화처리를 하는 것이 바이오가스의 증산 측면에서 확실히 유리하다. 또한 바이오가스는 정제하여 바이오메탄으로 개질하였을 때 훨씬 높은 부가가치를 가져 천연가스와 동일하게 자동차 연료나 도시가스으로도 공급할 수 있고, 연료전지로의 활용도 또한 높아지기 때문에 직접적인 경제적 가치가 발생한다. 관건은 얼마나 경제

56) 화력발전소등 연료로 공급하는 경우의 가격조건, 하수슬러지처리시설 설치·운영 지침, 환경부, 2011

적으로 순도 높은 바이오메탄을 생산할 수 있는가에 달려있다. 바이오가스의 부존에너지량은 추정치가 아니라 실제 생산량에 근거한 계산이며, 지금도 여러 가지로 활용되고 있다. 하지만 바이오가스를 부가가치가 높지 않은 소화조가온 연료로 이용하는 하수처리장이 많으므로 부가가치를 높이고 에너지회수 효율을 높이기 위해서 개질과정이 필수적으로 요청된다.

위에 부존에너지량 비교결과를 보면, 하수열을 이용하는 방법이 부존에너지량 중에서 일부만 이용한다고 가정하더라도 다른 에너지원에 비해 매우 큰 양이 됨을 알 수 있다. 슬러지를 가용화처리하고 유기성폐기물의 연계처리로 바이오가스를 200% 증산한다고 하더라도 하수열이 가지고 있는 부존에너지에 비교되지 않는다. 열펌프 기술은 이미 많이 개발되어 일반 소비자들도 냉난방기에서 열펌프를 사용하고 있다. 따라서 하수열의 적극적인 이용방법의 개발, 특히 막대한 하수처리량이 가지고 있는 에너지를 충분히 활용하기 위하여 대규모 시설을 통해 에너지를 회수하는 방법에 집중적인 노력을 기울일 필요가 있다고 생각된다. 소규모 에너지 회수 시설로 관리동 냉난방에만 이용하는 수준에서 벗어나 지역난방으로까지 활용하는 적극적인 활용이 필요하다고 보인다. 특별히 서울시는 기존의 하수처리장이 이미 규모의 효과를 가지기에 충분히 큰 시설이므로 지방의 소규모 시설보다 훨씬 유리한 위치에 있다. 최근에 서울시에서 추진하고 있는 하수열 이용 지역난방 사업은 매우 바람직한 방향이라고 생각된다⁵⁷⁾⁵⁸⁾.

2) 최적의 하수도 에너지 및 자원 재순환 방향 제안

지금까지 조사하고 연구한 내용을 종합하여 하수도시설의 에너지 및 자원 재순환 방향을 제안하면 다음과 같은 핵심요소들로 요약될 수 있다.

A. 각 공정의 에너지 효율 개선

57) 서울시, 하수열로 지역난방 공급한다, 투데이에너지, 2012.2.21,

<http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=70157>

58) 버려진 하수, 지역난방에 이용한다, 서울경제, 2012.2.23,

<http://economy.hankooki.com/lpage/society/201202/e20120221161057117980.htm>

- 에너지소비대책으로 각 공정의 에너지 효율을 개선한다. 특히 폭기조에서의 송풍기는 하수처리시설의 대표적인 에너지 소비원이므로 산소전달효율이 높은 산기장치를 사용하고, 부하에 따라서 효율적으로 운전할 수 있는 송풍기를 사용하도록 한다. 각종 모터와 펌프, 기계류 등 에너지 사용기기의 효율을 높인다.

B. 소화조 운전 성능 개선

- 소화조의 운전 성능을 개선하기 위해서 가장 기본적인 효율개선(가온방법, 교반방법, 운전온도, pH 등 운영방식의 최적화)방법을 시행한다.
- 가장 경제적이고 효율적인 슬러지 가용화 처리법을 적용하여 바이오가스 증산과 소화슬러지 감량화를 달성한다.
- 유기성 폐기물(분뇨, 정화조오니, 음식물류 폐기물, 음폐수 등)을 연계처리하여 하수슬러지와 병합소화시킴으로써, 바이오가스 증산을 달성한다.

C. 생산된 바이오가스의 최대 활용

- 단순히 소화조 가온이나 소규모 발전을 위한 연료로만 사용하는 것이 아니라, 규모의 효과를 위해서 열병합발전을 통한 지역난방에까지 이용범위를 넓힌다.
- 바이오가스를 바이오메탄으로 개질처리함으로써 부가가치를 높이고, 자동차연료, 도시가스로의 공급, 연료전지로의 활용도를 높이도록 한다.

D. 소화슬러지의 연료화, 자원화 처리

- 소화된 슬러지는 가장 단순한 방법으로 건조해 연료화처리를 하고 화력발전소에서 보조연료로 활용하면서 연소시켜서 최대 감량을 달성한다.
- 실질적으로 소비가 가능한 방법에 한해 재활용하여 자원으로 활용함으로써 단순 매립을 최소화한다.

E. 하수열의 적극적 이용

- 하수처리장에서 발생하는 처리수의 열을 열펌프시설을 통해 회수하여 관리동 냉

난방 에너지로 활용하는 수준에서 확장하여 지역난방에까지 활용한다.

F. 소화 탈리액, 탈수여액의 반송 시 인회수

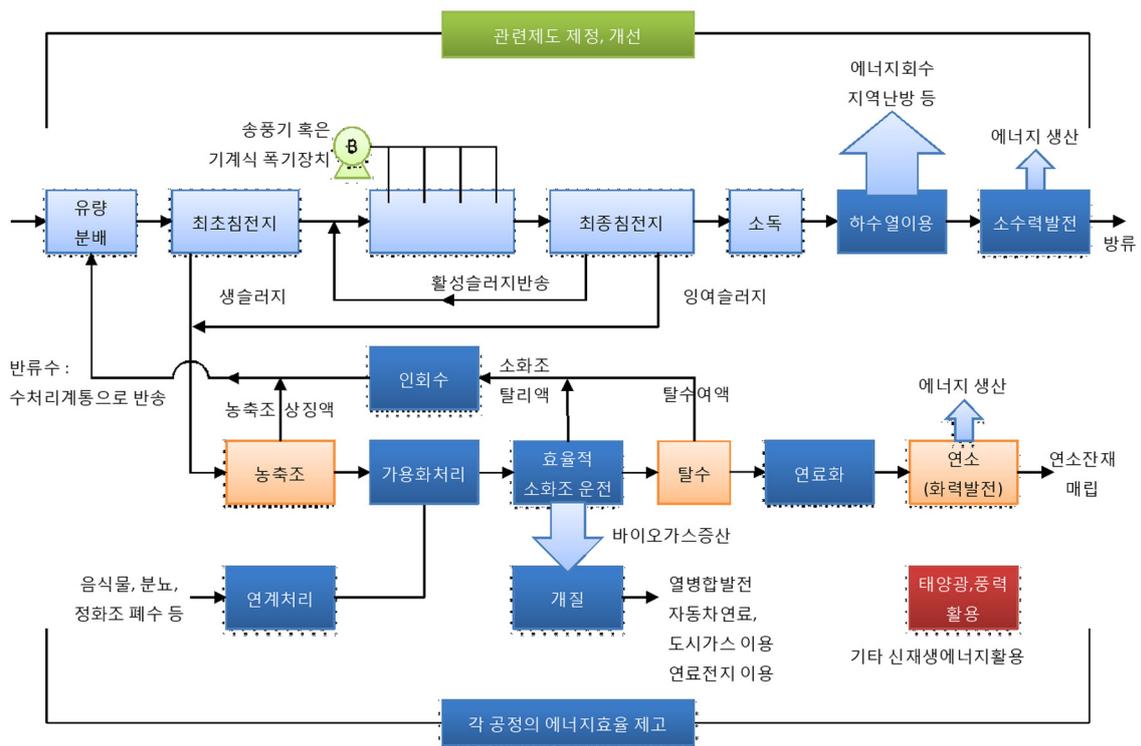
- 인회수시설을 설치하여 소화 탈리액과 탈수여액에서 인을 최대한 회수함으로써 방류수 수질기준을 달성하는데 일조하고, 회수된 인을 비료 등으로 활용한다.

G. 기타 신재생에너지 활용

- 태양열과 풍력 등의 재생에너지를 최대한 활용하여 에너지 자립률을 높인다.

H. 관련제도 제정 및 개선

- 신재생에너지를 활용할 수 있는 기술발전뿐만 아니라 법적인 제한조치 해제, 신재생에너지 활용 촉진을 위한 지원정책 등을 시행한다.



(그림 4-10) 하수처리시설의 에너지 및 자원 재순환 방향 개념도



결론

지금까지 각종 문헌과 자료를 조사하여 일반적인 하수도시설에서의 에너지 발생 및 소비특성을 정리하였고, 서울시 하수도시설에서 이용 가능한 신재생에너지에 대해 특화하여 정리하였다. 또한 에너지와 자원을 최적으로 활용하여 하수처리시설의 운영과 슬러지 발생을 최소화할 수 있는 방안들에 대해 알아보았다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 하수처리시설에서 발생하는 에너지원 및 자원

하수처리시설에는 지금까지 제대로 활용하지 못했던 훌륭한 에너지원 및 자원이 존재한다. 슬러지처리계통에서 발생하는 에너지원(슬러지의 연료화, 바이오가스 활용), 수처리계통에서 발생하는 에너지원(하수열 이용, 소수력 발전), 공간을 활용한 에너지원(태양광 발전, 풍력발전) 및 기타 자원화(처리수 재이용, 인회수, 고화처리, 부숙화 등)를 보다 적극적으로 활용해야 할 필요가 있다.

- 서울시 하수처리시설에서의 에너지 및 자원 발생 특성

- 서울시 하수처리시설에서 유입되는 인의 총량과 유출되는 인(처리수 및 슬러지)의 총량을 고려하여 소화조탈리액 및 탈수여액의 반송위치에 인회수시설을 설치함으로써 회수할 수 있는 부존 인자원량은 중랑, 탄천, 서남, 난지물재생센터에서 각각 600톤/년, 348톤/년, 806톤/년, 145톤/년이며 합계 1,899톤/년으로 추정되었다. 회수율을 70%로 가정하면 서울시 합계 1,329톤/년이 된다.

- 하수처리후 방류하는 처리수가 가지고 있는 부존에너지량은 중랑, 탄천, 서남, 난

지물재생센터에서 각각 263,853TOE/년, 163,860TOE/년, 363,927TOE/년, 123,119TOE/년이며 합계 914,759TOE/년으로 추정되었다. 이 부존에너지 중에서 겨울철(1월, 2월, 3월, 10월, 11월, 12월)에 5℃ 차이만큼만 에너지를 회수한다고 할 때에는 각각 107,113TOE/년, 67,291TOE/년, 139,485TOE/년, 52,429TOE/년이며 합계 366,318TOE/년이 된다. 하수처리수는 다른 에너지 생산방법들보다 월등하게 큰 부존에너지량을 나타내고 있다.

- 바이오가스를 증산하기 위해서는 슬러지의 가용화 및 유기성폐기물의 연계처리가 확대될 필요가 있다. 2011년 현재 발생하는 바이오가스의 부존에너지량은 중랑, 탄천, 서남, 난지물재생센터에서 각각 14,857TOE/년, 4,749TOE/년, 13,526TOE/년, 6,660TOE/년이며 서울시 합계는 39,793TOE/년으로 계산되었다. 이는 2011년 현재의 발생량이므로 슬러지의 가용화 및 유기성폐기물의 연계처리 확대로 바이오가스가 증산된다면 더 많은 에너지를 회수할 수 있을 것이다. 또한 바이오가스의 개질을 통해서 고부가가치의 바이오메탄을 생산하면 도시가스 및 자동차 연료로 공급하고 연료전지의 원료로 이용할 수 있으므로 적극적으로 개질기술을 개발·보급할 필요가 있다.

- 2011년 처분된 슬러지량 중에서 해양배출, 재활용, 건조, 소각처리량을 건조하여 연료화한다고 할 때 탈수슬러지 연료의 부존에너지량은 중랑, 탄천, 서남, 난지물재생센터에서 각각 5,123TOE/년, 3,456TOE/년, 4,584TOE/년, 3,237TOE/년이며 서울시 합계는 16,400TOE/년으로 추정되었다. 발열량이 낮은 연료는 유상판매를 할 수 없어 경제적 이익을 얻을 수는 없지만, 재활용품이 소비되지 않으면 새로운 폐기물이 발생하는 다른 재활용방법들의 맹점에 비하면 폐기물 발생량이 확실하게 줄고, 무해하며 소량의 에너지도 얻는 최선의 방법이라고 생각된다.

서울시 하수처리시설의 에너지 및 자원 재순환을 통해 에너지 자립화로 나아가기 위한 핵심적인 요소들은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 각 공정의 에너지 효율 개선
 - 에너지소비대책으로 각 공정의 에너지 효율을 개선한다. 특히 폭기조에서의 송풍기는 하수처리시설의 대표적인 에너지 소비원이므로 산소전달효율이 높은 산기장치를

사용하고, 부하에 따라서 효율적으로 운전할 수 있는 송풍기를 사용하도록 한다. 각종 모터와 펌프, 기계류 등 에너지 사용기기의 효율을 높인다.

- 소화조 운전 성능 개선

- 소화조의 운전 성능을 개선하기 위해서 가장 기본적인 효율개선(가온방법, 교반방법, 운전온도, pH 등 운영방식의 최적화)을 시행하고, 경제적이고 효율적인 슬러지 가용화 처리를 적용하여 바이오가스 증산화 및 소화슬러지 감량화를 달성한다. 또한 유기성 폐기물(분뇨, 정화조오니, 음식물류 폐기물, 음폐수 등)을 연계처리하여 하수슬러지와 병합소화시킴으로써, 바이오가스 증산을 달성한다.

- 생산된 바이오가스의 최대 활용

- 바이오가스를 소화조 가온이나 소규모 발전을 위한 연료로만 사용하는 것이 아니라, 규모의 효과를 위해서 열병합발전을 통한 지역난방에까지 이용범위를 넓히고, 바이오메탄으로 개질처리함으로써 부가가치를 높여 자동차연료, 도시가스로 공급할 수 있도록 하고, 연료전지 원료로 활용할 수 있도록 한다.

- 소화슬러지의 연료화, 자원화 처리

- 소화된 슬러지는 우선적으로 가장 단순한 방법으로 건조해 연료화처리를 하고 화력발전소에서 보조연료로 활용하면서 연소시켜서 최대 감량을 달성한다. 소화슬러지의 자원화 재활용(퇴비화, 고화, 탄화 등)은 실질적으로 소비가 가능한 방법에 한해 시행한다.

- 하수열의 적극적 이용

- 규모의 효과를 얻을 수 있도록 대규모 하수열 회수시설을 설치하여, 처리장 내의 각종 열에너지(소화조가온, 관리동 냉난방)로 이용할 뿐만 아니라, 지역난방에까지 확대하여 활용한다.

- 소화 탈리액, 탈수여액의 반송 시 인회수

- 인회수시설을 설치하여 소화 탈리액과 탈수여액에서 인을 최대한 회수함으로써 방류수 수질기준을 달성하는데 일조하고, 회수된 인을 비료 등으로 활용한다.

- 기타 신재생에너지 활용
 - 일조조건이 좋은 지역에 태양광, 풍황이 좋은 지역에 풍력 등의 재생에너지를 최대한 활용하여 에너지 자립률을 높인다.

- 관련제도 제정 및 개선
 - 신재생에너지를 활용할 수 있는 기술발전뿐만 아니라 법적인 제한조치 해제, 신재생에너지 활용 촉진을 위한 지원정책 등을 수립하여 시행한다.

참고문헌

- 강재원 외, 「유기성폐기물 종합관리기술 구축 (I) 유기성폐기물 처리실태 및 특성조사」, 국립환경연구원, 2004.6
- 공공하수도시설의 방류수수질기준, 하수도법 시행규칙 별표 1, 환경부령 제428호, 2011. 2.17
- 김성우·성은혜, 「인천광역시 공공하수처리시설 하수열 활용방안」, 인천발전연구원, 2010.7
- 김응호 외, 「공공하수도시설 에너지 절감대책 수립에 관한 연구」, 대한상하수도학회, 2006
- 김재곤, 「국내외 천연가스 대체 바이오에너지의 기술개발 연구현황 분석」, 한국석유관리원 녹색기술연구소
- 김재곤, 「세계 바이오가스의 보급동향 분석」, 한국석유관리원 녹색기술연구소
- 녹색성장위원회, <http://www.greengrowth.go.kr/>
- 뉴스와이어, “서울 친환경 에너지 선언 발표”, 뉴스와이어, 2007.4. <http://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=238578&ected=>
- 대한상하수도학회, 「공공하수도시설 에너지 절감 대책 수립에 관한 보고서」, 2006
- 박철휘 외, 서울시에서 발생하는 음식폐기물침출수의 바이오가스화에 대한 최적화 연구, 서울지역환경기술개발센터, 2010
- 방류수수질기준 적용을 위한 지역 구분, 환경부고시 제2010-44호, 2010.4.19
- 비료공정규격, 농촌진흥청고시 제2007-3호, 2007.4.20
- 서울경제, “버려진 하수, 지역난방에 이용한다”, 서울경제, 2012.2.23, <http://economy.hankooki.com/lpage/society/201202/e20120221161057117980.htm>
- 서울시, 2011년 서울시 물재생센터 통계

석유환산톤 및 이산화탄소배출량 자동계산(에너지관리법 기준), <http://co2.kemco.or.kr/directory/toe.asp>

소화조 운영실태 정밀진단 결과 보고, 환경부 상하수도국 생활하수과, 2005

심수용, 선진 환경시설 견학기 '2011 동경 하수도전시회' 및 동경도 하수처리장 견학을 다녀와서, 워터저널, 2011.8.31.

에너지 자립화 기본계획, 환경부 생활하수과, 2010.1

에너지환산기준, 에너지법시행규칙 별표, 지식경제부령 제233호, 2011.12.30

위키피디아, http://en.wikipedia.org/wiki/Tonne_of_oil_equivalent

유기성오니등을 토지개량제 및 매립시설 복토용도로의 재활용방법에 관한 규정, 환경부 고시 제2007-105호, 2007.7.6

유준위, 「김경훈, 연료전지 시장 동향 및 전망」, 한국기업평가, 2011

음폐수의 해양배출 금지 결정, 국정현안정책조정회의, 2007.9

이동훈 외, 「유기성폐기물 종합관리기술 구축 (II) 유기성폐기물 처리방법별 환경성 및 경제성 평가」, 국립환경연구원, 2005.8

이정임, 「음식물류폐기물 배출시스템 개선방안」, 경기개발연구원, 2011.11

이종원 외, 「음식물류 폐기물 및 발생폐수의 에너지화를 위한 방법별 최적모델 및 설치·운영 지침서 개발 연구」, 환경부, 2008.11

저탄소 녹색성장 기본법 제2조, 법률 제10599호, 2011.4.14

저탄소 녹색성장의 개념, <http://oneclick.law.go.kr/CSP/CnpClsMain.laf?csmSeq=543&ccfNo=1&ccciNo=1&cnpClsNo=1>

저탄소에너지 생산·보급을 위한 「폐자원 및 바이오매스 에너지 대책」 실행계획, 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청, 2009.7

친환경적 투기해역관리를 위한 범정부적 육상폐기물 해양투기관리 종합대책, 해양수산부, 2006.3

투데이에너지, “서울시, 하수열로 지역난방 공급한다”, 투데이에너지, 2012.2.21, <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=70157>

폐기물관리법, 법률 제10615호, 2011.4.28

하수도법, 법률 제10599호, 2011.4.14

하수슬러지 감량화 방안 연구 중간보고서, 대한상하수도협회, 2011.8

하수슬러지 국·내외 처리실태 및 방법 정책검토, 대전광역시의회 입법정책실

하수슬러지 처리시설 설치·운영 지침, 환경부, 2011

해양환경관리법(구 해양오염방지법), 법률 제10803호, 2011.6.15

화력발전소등 연료로 공급하는 경우의 가격조건, 하수슬러지처리시설 설치·운영 지침, 환경부, 2011

환경관리공단, 하수종말처리장 기계설비공사 설계지침, 환경부, 2001

환경부, 2010, 2009년 하수도통계

환경부, 2011, 2010년 하수도통계

환경부제정 하수도시설기준, 한국상하수도협회, 2005

BP Statistical Review of World Energy, 2008.6

Cordell, D., et al., The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 2009

IPCC, 기후변화 2007: 종합보고서, 기상청 번역

Working Paper
2012-WP-13

**하수처리장 에너지·자원화를 위한 잠재력
평가 및 활용기술 동향**

발행인 이창현

발행일 2012년 5월 7일

발행처 서울시정개발연구원

137-071 서울시 서초구 남부순환로 340길 57

전화 (02)2149-1234 팩스 (02)2149-1025

본 출판물의 판권은 서울시정개발연구원에 속합니다.