

불투수율이 하천수질에 미치는 영향 연구

최 지 용*

Effects of Imperviousness on River Water Quality

Ji-Yong Choi*

요약 : 유역의 도시화는 물순환, 하천형태, 수질 등에 영향을 끼치며 이는 도시하천의 홍수, 건천화, 수질악화 등으로 나타난다. 그러나 이와 같은 문제를 유역관리 차원에서 다룰 수 있는 정책수단이 부족한 것이 현실이다. 물 문제를 종합적으로 접근하기 위한 유역관리에 대한 필요성이 제기되기는 하지만 구체적인 관리수단에 대한 연구가 부족한 것이다. 따라서 효율적인 유역관리를 위해 하천의 물 순환과 수질에 영향을 미치는 인자를 밝혀내고 이를 관리수단으로 활용하는 것이 바람직하다. 이런 인자 중 불투수율은 유역의 수환경에 민감에 영향을 끼치는 지표일 뿐만 아니라 불투수면 저감, 투수율 제고 등과 같은 다양한 관리수단을 동원해 효율적으로 관리할 수 있어 유용한 유역관리지표가 될 수 있다. 본 연구에서는 불투수율이 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 기존의 문헌 조사와 더불어 경안천, 탄천, 중랑천, 안양천, 북한강 등 5개 유역에 대해 하천의 수질과 불투수율과의 관계를 고찰하였다. 고찰 결과 유역에서 불투수율이 증가할 수록 수질이 악화되는 것으로 나타났다. 이는 유역의 토지이용이 하천의 질을 결정하는 중요한 요소임을 제시하고 있으며 하천 수질관리에 있어 불투수율과 같은 유역관리지표의 도입이 필요함을 보여주고 있다.

주제어 : 유역관리, 토지이용, 불투수율, 수질, 도시화

ABSTRACT : Urbanization of watershed exerts bad influence on circulation of water, shapes of rivers, or water quality, etc. for which urban rivers suffer from flood, dry stream phenomenon, or deterioration of water quality. Nevertheless, policies to cope with these problems are rather insufficient. Although approaches are emerging recently in Korea to deal with these problems in the aspect of watershed management, practical methodological studies still run short. So it is desirable to clarify the factors affecting the water circulations or conditions of rivers in the watershed, and utilize them as management tools in the course of watershed management. Imperviousness could be the most useful index for watershed management not only because it is highly related to water environment quality, but also because management is possible through the introduction of various watershed management techniques such as reduction of impervious surface or increase of permeability ratio. This study examines the relation between the quality of rivers and imperviousness of watershed using both water quality analyses data and land use data along the 5 rivers, Kyungan-cheon, Tan-cheon, Joongrang-cheon, Anyang-cheon, and Bukhan-gang. The result of the analysis shows that the increase of impervious surface ratio has a negative effect on water quality. This shows that watershed management, or land use management along the

* 한국환경정책평가연구원 연구위원(Research Fellow, Korea Environment Institute)

watershed, is an important factor in the managing quality of a river. It also means that it is necessary to apply imperviousness in the watershed management projects as a technique to protect quality of rivers.

Key Words : watershed management, land use, imperviousness, water quality, urbanization

I. 서론

각종 토지개발행위에 따라 유역의 불투수면이 지속적으로 증가하고 있고, 이에 따른 다양한 형태의 수질악화, 홍수심화, 건천화 등 유역의 물 환경 문제가 발생하고 있다. 따라서, 토지이용형태 중 물의 순환에 영향을 미치는 인자를 유역관리지표로 활용하여 토지이용으로 야기되는 물 순환 교란을 유형화하여 규명하고, 유역환경과 토지이용계획과의 연계방안을 마련하여 이를 유역관리에 도입할 필요성이 증가하고 있다. 유역관리지표로는 도시적 토지이용비율, 인구밀도, 단위면적당 건축물 수, 유역의 불투수율 등 다양한 지표가 활용 가능하다.

이중에서도 불투수율은 유역의 건전성 파악과 미래의 하천 수질과 생태계 건전성을 예측하고 평가하는 중요한 지표임이 밝혀지고 있다. 또한, 개별사업의 활동을 유역규모에서 축적된 영향과 관련시킴으로서 건전한 물순환 구축과 효과적인 유역관리 계획을 수립하기 위한 중요한 기초지표로도 활용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 유역에서 불투수율이 하천의 환경에 미치는 영향에 대한 고찰과 우리나라의 5개 하천수질에 대한 불투수율의 영향을 분석하여 유역관리차원에서 불투수율의 적용의 중요성을 제시하고자 한다. 이를 위해

불투수율이 수질, 수량, 하천형태 및 생태에 미치는 문헌고찰과 더불어 불투수율에 의한 수질 영향을 객관적으로 평가하기 위해 경안천 외 4곳의 하천 유역의 토지이용현황과 수질 자료를 근거로 하여 불투수율 산정과 불투수율의 증가에 따른 수질변화를 분석하고 불투수율과 수질과의 연계성을 밝히고자 한다.

II. 불투수율의 수환경 영향에 대한 문헌 고찰

도시유역의 하천은 수질문제 뿐만 아니라 홍수, 건천화, 수생태계 질의 저하 등 다양한 형태의 수환경 문제를 경험하고 있다. 이의 원인중의 하나는 유역의 불투수율의 증가에 따른 물순환 장애로 인한 것이며, 특히, 하수처리장 설치 등을 통한 점 오염원 처리시설 강화에도 불구하고 수질개선이 나타나지 않는 것은 이와같은 유역의 물순환 장애로 건천화, 비점 오염원 배출력 증가, 하천의 자정능력 감소 등에 원인이 있다. 이와 같이 유역의 토지이용을 친 환경적으로 관리하지 못한 것이 주요 원인으로 나타남에 따라 각국에서는 유역의 토지이용지표, 특히 불 투수면 증가에 따른 수질영향을 파악하고 이에 대처하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 불투수율이 하천의 상태에 미치는 영향에 대한 연구는 일반적으로 수

문학적 영향, 지형학적 영향, 수질영향, 그리고 생물학적 영향으로 나누어 볼 수 있다. 다공성의 토지가 불투수면으로 전환될 때, 연중 강우의 많은 부분이 지표수 유출로 전환됨과 동시에 적은 양이 지하수로 들어간다. 증가된 지표수 양은 하도를 침식시키는 더 높은 침투유량을 가져오며, 서식지의 붕괴를 초래한다. 그 외에도 지표수 유출증가는 도시지역의 비점오염물을 운반하여 수질을 악화시킨다. 이와 같이 수질, 수량 측면에서 영향은 하천의 수생 생물의 풍부도, 다양성에 악영향을 끼쳐 하천생태계 전반에 부정적인 영향을 미친다. 불투수율 증가에 따른 수질, 수량, 하천생태에 미치는 영향은 각각 다음과 같다.

1. 수질

불투수면에는 대기로부터 침적되었거나, 차량으로부터 유출되거나, 또는 기타 오염원에서 발생한 오염물질이 축적된다. 강우시 축적된 오염물질은 신속히 불투수면으로부터 수세되어 수계로 유입된다. 모니터링 및 모델링 연구에서도 도시의 오염물질 부하량은 유역의 불투수율과 직접적인 관련성이 있다(Schueler, 1987; Schueler, 1994). 실제로 불투수율은 오염물질 부하량을 추정하기 위하여 이용되는 대부분의 시뮬레이션 및 경험모델에서 주요한 변수이다. 또 불투수면은 열을 흡수하거나 반사하여 하절기의 도시하천 수온이 상승하며, 온도상승의 정도는 유역의 불투수율에 직접적으로 관련되어 있는 것으로 조사되고 있다. 도

시하천은 비교대상인 산림지역의 하천에 비해 높은 평균수온을 나타내었으며, 온도상승의 정도는 유역의 불투수율과 직접적인 함수관계가 있었다(Galli, 1991).

2. 수량

불투수율이 증가하면 지표유출이 증가한다는 것은 많은 연구에 의해 뒷받침되고 있다. 실제 상황에서, 간단한 수문학적 계산에 의해서도 이와같은 사실을 확인 할 수 있다. 예를 들면 500㎡ 주차장(유출계수=0.95)에서 생성된 총유출량은 개발되지 않은 초지(유출계수=0.06)에서 생성된 유출량의 약 16배정도 된다. 초지가 주차장으로 대체된 후, 25mm의 강우시 우수유출수의 침투유량, 유속 및 도달시간 또한 크게 증가하게 된다(<표 1>참조). 불투수면 지역에서는 침투량이 감소하기 때문에, 지하수의 재충전은 이와 비례하여 감소할 것이고, 이와 같은 현상은 평상시 하천흐름의 감소로 이어지게 된다.

불투수면의 증가로 인하여 강우시 큰 홍수가 발생할 뿐만 아니라, 평상시에는 도시지역 하천의 수위는 낮아진다. 불투수면의 증가는 우수유출수가 땅으로 스며드는 것을 막는 정도가 커지는 효과를 가진다. 결과적으로, 우수가 지하수면으로 침투하기보다 지표면을 따라 하류로 방류되기 때문에, 지하수면은 물을 공급받지 못하게 된다. 수문학적, 지질학적 법칙에 의하면, 하천의 수위는 하천 아래의 지하수면의 수위에 의해 좌우되고, 지하수면의 물의 증가나 감소는 지표에 내리는 강수의 양에 의

〈표 1〉 500m² 면적의 주차장과 초지의 비교

유출 항목	주차장	초지	배수
곡선지수(CN)	98	58	-
유출계수	0.95	0.06	-
도달시간(분)	4.8	14.4	0.3배
2년빈도 24시간 강우에 대한 피크유출율(cms)	0.12	0.01	12배
25mm 강우당 유출량(cm)	97.8	6.1	16배

※ 주요 가정조건

주차장 : 3% 경사의 100% 불투수면, 길이 60m, 2년빈도 24시간 강우 = 70mm

초 지 : 3% 경사의 1% 불투수면, 길이 60m, 양호한 식생조건 가정

해 전적으로 좌우된다. 롱 아일랜드에서 수행한 조사(Simmons and Reynolds, 1982)에 따르면 하천에서 공급되는 물은 도시화되지 않은 지역은 유량의 84%가 지하수에 의한 기저유량으로 구성되나, 도시화된 지역의 경우는 불투수면으로 우수침투가 저하되어 갈수기 하천흐름의 기저유량으로 공급되는 지하수는 20% 수준이라는 것을 밝혔다. 따라서, 건기에는 하천 수량이 극심하게 줄어 건천화 된다.

3. 하천 형태 및 생태

일반적으로 하천은 유량이 증가하면 이를 수용하기 위하여 하천의 단면적을 증가시키는 방향으로 반응한다. 이와 같은 현상은 하천 폭을 넓히거나 하천의 바닥을 깎거나 또는 두 가지 현상을 병행하면서 이루어진다. 이처럼 하천의 하상이 불안정한 단계에서는 하천 독의 침식 및 서식지 교란이 발생하게 된다. 가장 중요한 문제는 어느 정도의 개발수준에서 이와 같은 일련의 현상이 시작되느냐는 것이다. 도시 하천의 안정성에 대한 한계값은 대략 10%의 불투수율 수준인 것으로 제시되었다

(Booth and Reinelt, 1993). 하상의 불안정성 및 침식으로 웅덩이 및 여울이 손실되고 하천 및 호소 변의 습윤지역이 감소되어 하천 내 서식지의 손실로 이어진다(Gibson et al., 1993; Shaver et al., 1995). 도시화가 하천수로의 구조와 안정성을 변형할 수 있다는 것은 널리 받아들여진 사실이다. 유역이 개발되어 불투수율이 증가하면 더 많은 피크유량과 더 잦은 빈도의 홍수방류로 인해 하류 수로가 확장된다. 수로 확장은 하천 내부의 서식지 구조의 질을 현저히 저하시키고, 유역에서 매해 발생하는 침식퇴적물의 양을 급격히 증가시킬 수 있다. 이 두 가지 요인이 도시 하천에서 종종 수중생물의 다양성을 급격히 줄어든게 하는 원인이다(EPA, 1997).

Ⅲ. 유역의 불투수율이 수질에 미치는 영향 고찰

앞에서는 유역의 수환경관리에 있어 불투수율이 중요한 지표임을 살펴보았다. 따라서 본 장에서는 우리나라에서의 불투수율 산정과 수질영향 고찰을 하여 유역관리 지표로서의 불투수율의 타당성을 검토하고자 한다.

1. 불투수율 산정

1) 산정방법의 고찰

유역관리지표로 활용하기 위해 불투수율 지표를 산정하는 방법에는 단순히 유역 내 총 불투수면 면적(Total Impervious Area (TIA))을 산정하는 방법과 불투수면 중에서도 수계에 연계된 불투수면인 유효 불투수면 면적(Effective Impervious Area (EIA))을 산정하는 방법 등이 있다. 이러한 불투수율 산정기법 중에 어느 것을 적용할 것인가는 유역의 여건과 자료수준에 따라 다르다.

총 불투수면 면적 산정방법은 단순히 유역 면적중 도로, 주차장, 지붕 등 유역 내 모든 불투수면이 차지하는 비율을 구하는 것으로 산정방법이 비교적 단순하고 일반적으로 적용되는 기법이다. 구체적인 측정방법은 직접적인 측정(실제로 지붕, 도로, 기타 포장된 표면을 포함하여 '지표면에서' 불투수면을 측정), 토지이용활용(토지이용현황에 근거하여 불투수면을 산정하며 이 방법은 현재 또는 미래의 토지이용 데이터와 여기서 추출된 토지이용/불투수면 계수를 이용), 도로 밀도이용법(도로 밀도로부터 불투수면을 산정(단위 면적당 도로의 길이)), 인구밀도 이용(인구 데이터로부터 불투수면을 산정) 등의 기법이 있다.

유효불투수면 산정법은 유역에서 단순히 총 불투수면 면적만을 지표로 활용할 경우 유역 관리에 있어서 불투수면에 의한 정확한 수환경 영향을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 정확한 수문분석을 위해서는 유역의 유효 불투수면 면적(EIA))을 평가해야 한다. EIA는 배

수체계와 직접적으로 연결된 부분으로, 유역 내에서 총 불투수면 면적(TIA))의 일부분이다. EIA에는 거리 표면, 거리와 연결된 포장된 도로, 도로에 인접한 인도, 우수관시스템으로 연결된 지붕, 그리고 주차장이 포함된다. EIA는 대개 전체 유역이나 소유역의 백분율로 나타난다. 일반적인 도시 유출 모델링이나 수문 분석에서, 유역내의 EIA는 TIA보다 작다. 그러나 고도로 도시화된 유역에서는 EIA의 수치가 TIA수치에 접근하거나 같은 수치를 보인다. 산정기법은 현장에서의 직접적인 측정(유역의 EIA를 실제 측정하기 위해 불투수면과 주요한 집수 체계사이의 연결을 평가하고 분류), 모델을 이용하여 추정(HEC-1 또는 SWMM과 같은 강우-유출 모델을 이용하여 추정), 유역 변수에 의한 실험식 개발(물리적 유역변수에 근거하여 EIA의 수치를 계산하기 위한 실험식 개발, 예를 들어 미국지질조사국(USGS)은 Portland, Salem, Oregon의 대도시 지역에 대하여 EIA를 추정하기 위해 실험식 $EIA = 3.6 + 0.43(TIA)$ 을 제시) 등이 있다.

2) 불투수율 산정

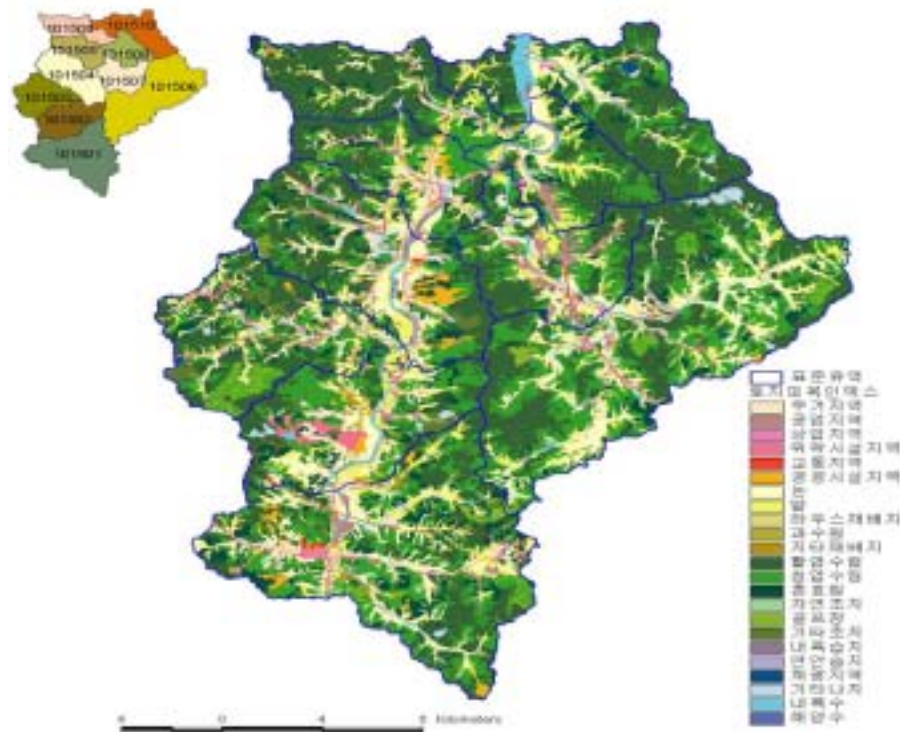
본 연구에서는 총불투수율을 산정하였고 산정 기법은 간접적인 방법으로 토지이용활용법을 적용하였다. 토지이용 활용법은 불투수율을 측정하는 가장 비용 효과적인 기법으로 직접적인 측정만큼 정확하지는 않지만 미래의 불투수율을 예측하는데 이용되는 주요한 방법이다. 기타 도로 및 인구밀도 이용법도 토지이용기법과 비슷하며, 도로 밀도와 인구밀도 활용법은 단독으로 사용하면 정확성이 떨어지므로,

대개는 다른 방법들과 결합하여 이용한다. 여러 가지 제약으로 인하여 불투수율 산정은 총 불투수율 산정을 일반적으로 이용한다. 본 연

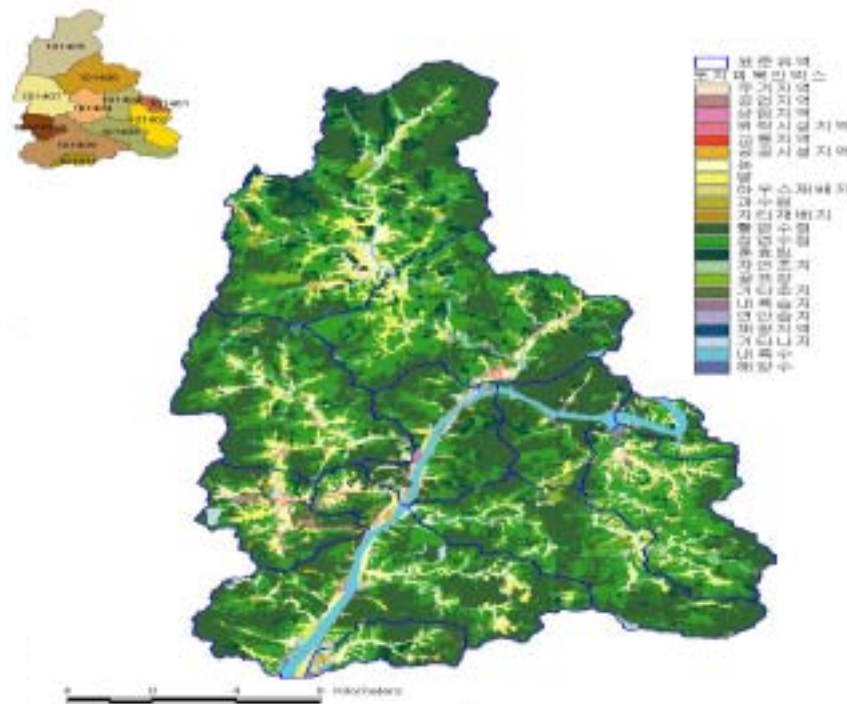
구에서도 인공위성 자료와 토지분류를 이용하여 불투수율을 산정하였다.



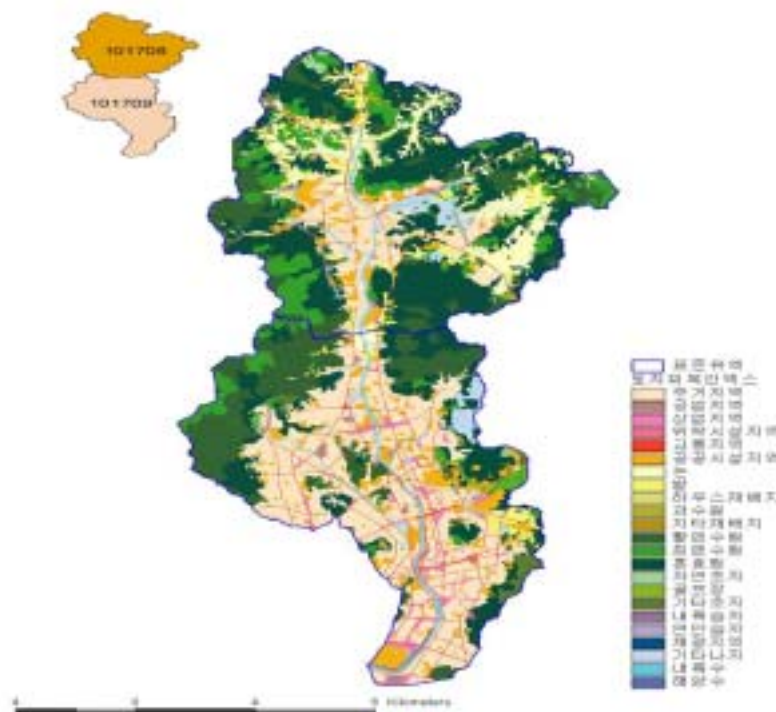
〈그림 1〉 연구대상 구역



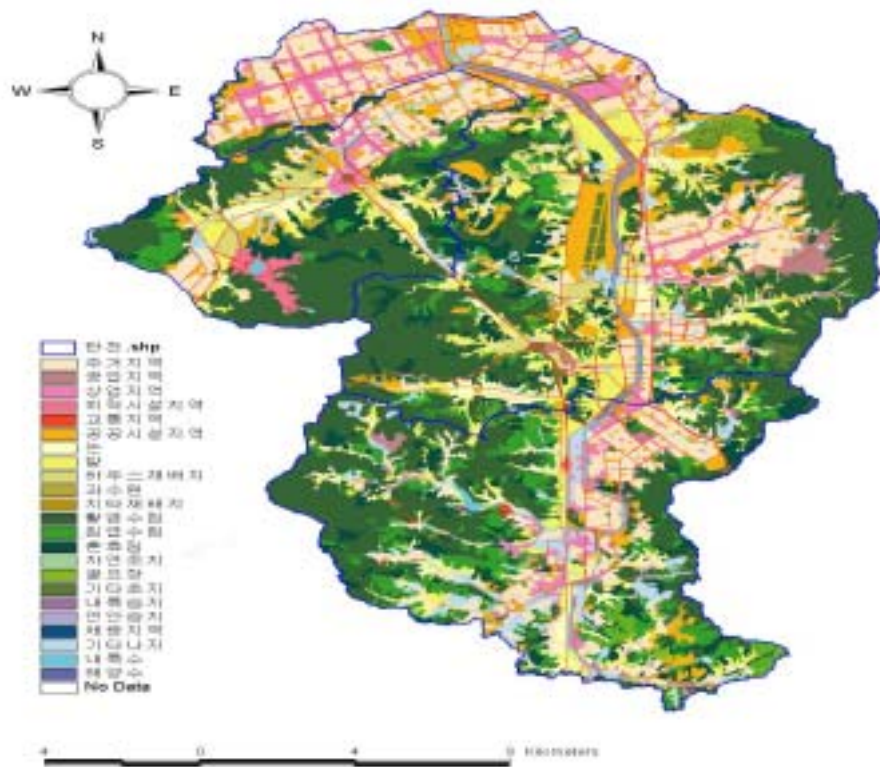
〈그림 2〉 경안천 구역 토지피복분류도



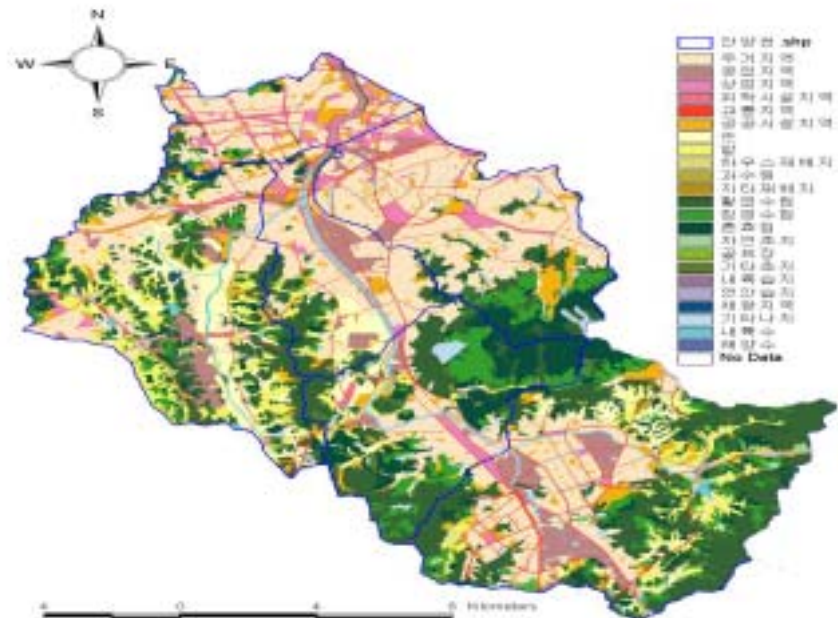
〈그림 3〉 북한강 본류 유역 토지피복분류도



〈그림 4〉 중랑천 유역 토지피복분류도



〈그림 5〉 탄천유역 토지피복분류도



〈그림 6〉 안양천 유역 토지피복분류도

분석대상지역은 비교적 도시화된 중랑천, 탄천, 안양천 유역, 팔당수계에 직접 영향을 끼치는 경안천 유역 그리고 비교적 자연상태를 유지하고 있는 북한강 본류 유역을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 유역의 토지 피복항목을 주거지역, 공업지역, 상업지역을 비롯한 21개의 피복항목으로 분류하여 이 중에서 주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설지역, 교통지역, 공공시설지역의 6개 지역을 불투수면 지역으로 고려하였다.

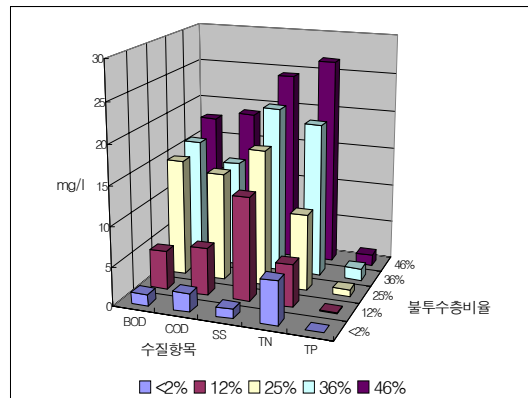
본 연구에서 필요한 자료 중 유역분류는 환경부 표준유역도에 근거하였으며, 토지피복분류는 2001년 현황 자료이다. 유역분류에 기초하여 해당 하천 수질조사지점을 선정하였으며, 해당하천에 관한 수질 정보는 환경부의 수질 측정망 자료로 2001년도 자료를 이용하였다.

〈표 2〉 수질조사지점에 대응한 유역구분과 불투수율

하천이름	지점 번호	수질조사지점	불투수율 (%)
탄 천	1	탄 천 2	24.69
	2	탄 천 5	33.79
	3	양 재 천	33.12
안양천	4	안 양 천 1	35.22
	5	안 양 천 2	31.54
	6	안 양 천 4	37.06
	7	도 립 천	43.28
	8	안 양 천 5	46.52
중랑천	9	중 랑 천 2	18.13
	10	중 랑 천 4	36.33
경안천	11	경 안 천 2	12.55
	12	경 안 천 3	14.02
	13	경 안 천 4	14.32
	14	곤 지 압	12.57
	15	경 안 천 5	12.50
	16	번 안 천	12.03
북한강본류	17	경 안 천 6	11.33
	18	조 중 천 2	1.98
	19	조 중 천 3	2.16
	20	대 성 리	2.36
	21	묵 현 천	3.08
	22	삼 봉 리	3.01
	23	팔 당 댐	3.02

2. 불투수율이 수질에 미치는 영향

하천의 질과 불투수율과의 관계는 〈그림 7〉에서 볼 수 있다. 대상지역은 상이한 불투수율을 지닌 5곳의 유역으로 비율은 각각 2%이하, 12%, 25%, 36%, 46%의 하천 유역이다. 수질 조사 항목은 BOD, COD, SS, TN, TP로 불투수율이 증가됨에 따라 각 수질 항목의 질이 대체로 악화되고 있는 것으로 나타났다.



〈그림 7〉 유역의 불투수율에 따른 수온 및 수질비교

〈표 3〉 수질항목별 불투수율 회귀분석 결과

	회귀식	상관 관계 (R ²)	F	CV
수온	$y = 14.31951 + 0.76832 \times \log(\text{ICP})$	0.83	48.88 ($p=0.0001$)	6.01
BOD	$y = 1.27701 + 0.34638 \times (\text{ICP})$	0.80	86.54 ($p=0.0001$)	34.47
COD	$y = 2.90089 + 0.35936 \times (\text{ICP})$	0.82	46.82 ($p=0.0001$)	27.48
SS	-	0.53	23.76 ($p=0.0001$)	50.50
T-N	$y = 2.95341 + 0.35008 \times (\text{ICP})$	0.74	28.35 ($p=0.0001$)	0.713
T-P	-	0.05	0.98 ($p=0.3324$)	356

이러한 하천의 수질과 불투수율과의 관계에서 회귀식도 도출하였으며, 이는 다음의 수온 및 수질 각 항목별로 제시하였다. 회귀식에서 y 는 각 수질항목을 나타내고, ICP는 불투수율을 나타내며 구체적인 값은 <표 3>과 같다.

1) 수온과의 관계

하천의 수온과 불투수율의 회귀분석결과 불투수율 계수는 0.76832으로 불투수율 증가는 하천의 수온에 정(+)의 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그리고 F 값과 R^2 값으로 볼때 불투수율은 하천 수온에 영향을 미침을 알 수 있다.

2) BOD와의 관계

BOD와 불투수율의 회귀분석결과 불투수율 계수는 0.34638으로 불투수율 증가는 BOD에 정(+)의 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 여기서 CV값이 34.47로 비교적 높게 나온 것은 독립변수인 불투수율이 하천의 BOD에 영향을 미치지만 불투수율 이외의 다른 독립변수가 회귀식에 들어오는 것이 설명력을 높일 수 있다는 것을 의미한다.

3) COD와의 관계

COD와 불투수율의 회귀분석의 결과 $F=46.82$ ($p=0.0001$)이고, $R^2=0.8240$, $CV=27.48430$ 였다. 불투수율의 계수는 0.35936으로 불투수율 증가는 COD에 정(+)의 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 여기서 CV값이 27.48430로 비교적 높게 나온 것은 BOD 경우와 마찬가지로 설명이 가능하다.

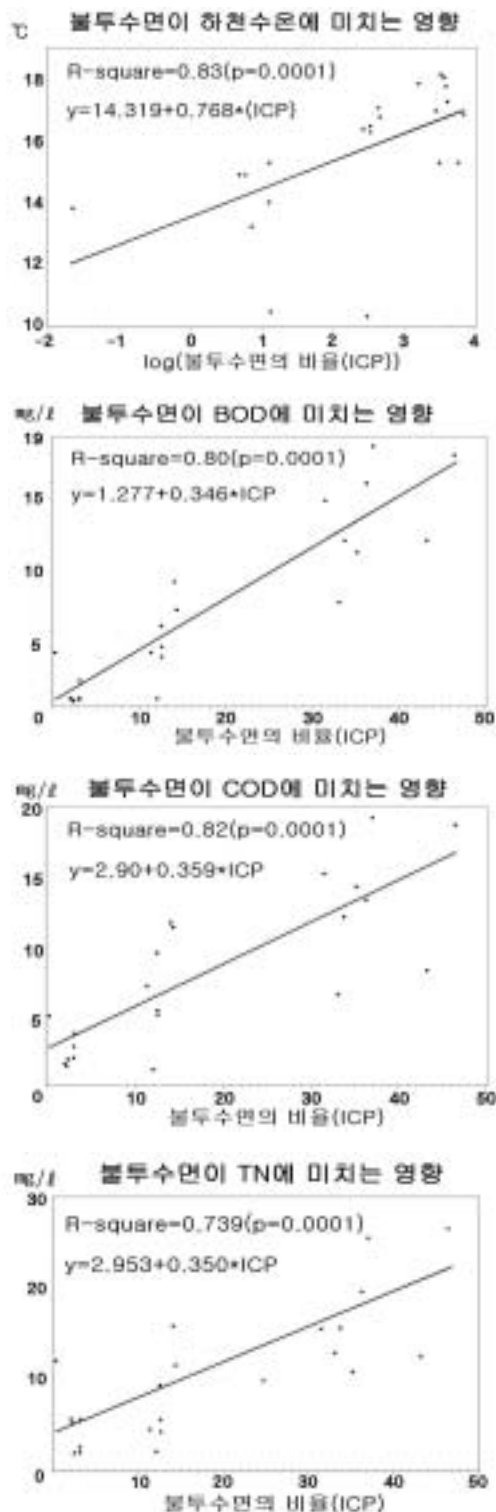
4) T-N과의 관계

T-N과 불투수율의 회귀분석 결과 $F=28.352$ ($p=0.0001$)이고, $R^2=0.7393$, $CV=0.7132$ 였다. 불투수율의 계수는 0.35008으로 불투수율증가는 T-N에 정(+)의 영향을 미친다. T-N과 불투수율의 모델은 $y=2.95341+0.35008 \times (ICP)$ 와 같다.

5) SS와 T-P와의 관계

SS와 불투수율의 회귀분석의 결과 F 값이나 CV 값으로 볼때 불투수율 증가와 SS의 증가는 거의 관계가 없다고 할 수 있다. T-P도 불투수율의 회귀분석의 결과 $F=0.98$ ($p=0.3324$)이고, $R^2=0.045$, $CV=356$ 으로 총인 증가와 불투수율 증가는 관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 토양내 인의 경우는 활성칼슘, 철, 알루미늄과 빠르게 반응하여 불용성 화합물을 형성하거나 토양입자 내 흡착되므로 지표 강우유출수에 의한 토양침식은 주요한 인 유출기능을 한다. 인의 유출은 불투수율 증가와는 관계없고, 토양의 손실과 관계가 있다.

회귀분석 결과, 수온, BOD, COD, TN은 불투수율이 증가함에 따라 증가하는 경향, 즉, 수온이 올라가거나 오염도가 심해지는 것으로 나타났으며, 이러한 관계를 나타낸 것이 <그림 8>이다. 이에 비해 SS와 TP의 경우는 토양의 유실에 영향을 받는 것으로 불투수율 증가와는 관련이 없는 것으로 나타났다.



〈그림 8〉 불투수율의 증가에 의한 수질항목별 변화

3. 불투수율의 유역관리 적용성 평가

유역의 토지이용은 전반적인 수환경과 관계가 있으며 효율적 수환경관리를 위해서는 유역내의 토지이용관리가 필요하다. 수환경 관리를 위해 활용 가능한 토지이용관련 지표로는 인구밀도, 주택밀도, 도로율, 불투수율 등이 연구되고 있다. 이중에서 불투수율은 개발 활동의 지표로서, 도시하천을 분류하고 단위유역을 관리하는데 유용한 지표로 사용된다. 최근에는 인구밀도, 도로율, 주택밀도, 도시적 토지이용을 등을 유역의 환경관리지표로 고려하는 연구도 일부 이루어지고 있으나 이들 지표는 가용한 관리수단이 없어 유역관리지표로의 적용성은 불투수율에 비해 떨어진다.

유역의 전반적인 수환경을 나타내는 지표로서 불투수율은 각각의 단위유역에서는 현재나 미래에 추정된 불투수율에 기초하여, 민감하천, 손상하천, 생태적 건전성 유지불능하천의 세 가지 범주 가운데 하나로 분류될 수 있다. 상대적으로 낮은 불투수율(10-15%)조차도 하천의 질에 불리하게 작용하고 생태계 변화를 초래할 수 있다고 한다. 많은 하천들이 일단 불투수율이 25%를 넘게 되면 수로의 안정성, 수질, 생물학적 다양성 측면에서 생태적으로 건전성을 유지하는 것이 불가능하게 된다(〈표 4〉 참조). 이는 하천의 질을 관리하기 위해서는 유역관리, 즉, 유역의 토지이용 관리가 중요한 요소임을 보여주며, 미래 하천의 질을 보호하는 기법으로써 이와 같은 불투수율 지표를 유역관리 계획에 활용할 필요성이 있음을 뜻한다.

〈표 4〉 불투수율에 근거한 하천 특징

하천의 다양성	민감하천	손상하천	생태적 건전성 유지불능 하천
불투수율	1-10%	11-25%	26% 이상
수로 안정성	안정함	불안정함	매우불안정함
수질	좋음-훌륭함	양호-좋음	양호-나쁨
생물학적 다양성	좋음-훌륭함	양호-좋음	나쁨

자료 : Schueler, 1994.

국내외 자료 검토와 분석 결과 불투수율에 따라 하천수온 및 BOD, COD, TN, 생태변화 등이 유의한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 하천의 수질은 유역의 토지이용 및 피복 현황에 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 따라서 유역의 토지이용 관리는 중요하며, 유역관리지표로서 불투수율 지표가 유용함을 알 수 있다. 일반적으로 각종 도시계획 및 토지이용계획에서는 주로 건축물만을 관리 및 규제해 왔고, 하수도 설치율만을 고려해 왔을 뿐, 수환경에 영향을 줄 수 있는 유역 내 인자들에 대한 고려는 이루어지지 않은 실정이다. 따라서, 수환경 관리를 위해 도시계획 및 토지이용계획에서 이용할 수 있는 수환경지표 마련은 필요하며 이러한 수환경 지표로서 불투수면 적용성은 크다.

- (1) 불투수율은 통합적인 유역관리 측면에서 유용한 주제이며 유역계획에서 통제 가능한 변수로 이용될 수 있다. 하천의 수온과 수질 상태는 유역의 불투수율을 비롯하여, 인구밀도, 주택밀도, 도로의 밀도, 합리식, 분리식의 하수관거 여부, 우수처리시설 운영 여부 등 많은 변수

에 의한 복합적인 결과물이다. 그럼에도 불구하고, 불투수율이 중요한 지표로 주목되는 이유는 토지이용과 수체와의 연계 관리라는 관점에서 보았을 때 인구나 주택보다 유역계획에서 집행이 용이한 주제라는 점이다.

- (2) 불투수율은 건축물의 지붕과 그 지붕들을 이어주는 각종 교통체계로 구성되어 있다. 대부분의 경우 교통체계에 의한 불투수면이 지붕(주택, 건물)으로 인한 불투수면보다 크고 수환경에 미치는 영향도 각종 노면에 축적된 오염물질에 의해 크다고 할 수 있다. 이와 같은 교통체계로 인해 생성된 불투수면은 지금까지는 유역의 물순환 차원에서 관리된 적이 없었으며 이는 유역의 불투수율을 활용해 일정규모 이상의 불투수율을 가진 유역은 불투수율의 정도에 따라 적절한 불투수율 저감기능을 도입토록 하는 등의 관리가 가능하다.
- (3) 회귀분석의 결과 불투수율에 따라 하천수온 및 BOD, COD, TN이 유의한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 하천의 수질 뿐만아니라 전반적인 유역의 생태수준을 나타내는 좋은 지표가 불투수율이다. 따라서 유역의 생태수준 관리를 위해서도 불투수율은 좋은 지표가 될 수 있다.
- (4) 유역의 하수처리시설, 우수처리시설, 도로청소 등으로 개발이전의 완전한 하천수질을 유지한다는 것은 불가능하며, 이러한 시설의 설치 및 운영과 토지이용

관리 특히, 불투수면의 관리가 동시에 이루어질 때 더 많은 수질 개선 효과를 이룰 수 있다. 따라서 유역의 수질관리에 있어서도 불투수율은 좋은 지표가 될 수 있다.

- (5) 불투수율은 도시하천의 구조관리에 있어서도 중요한 지표이다. 토지가 불투수면으로 전환될 때, 연중 강우의 많은 부분이 지표수로 유출되어 이들이 하천 형상을 변화시키는 주요 요인이다. 따라서 불투수율의 정도에 따라 하천의 물리적 구조관리에 있어서도 좋은 지표로서의 적용성이 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 효율적인 유역관리를 위해 불투수율과 같은 유역관리지표를 활용하는 방안을 고찰하였다. 이를 위해 유역의 수문, 수질, 수생태계의 변화에 대한 전반적인 문헌 고찰과 한강유역의 지천을 대상으로 실제 불투수율과 수질과의 관계를 분석하였다. 유역환경에 미치는 불투수율에 대한 문헌고찰과 한강 유역 지천에 대한 불투수율과 수질과의 연계성 검토 결과 불투수율은 하천 수질과 생태계 건전성을 예측하고 평가하는 중요한 지표로 판단된다. 또한 불투수율을 유역단위에서 검토함으로써 개별 토지이용의 활동을 유역규모에서 축적된 영향과 관련시킴으로서 효과적인 유역관리 계획을 수립하기 위한 중요한 기초 지표로도 활용이 가능하다. 일반적으로 각종 도시계획 및 토지이용계획에서는 주로 건축물

만을 관리 및 규제해 왔고, 하수도 설치율을 주요 환경관리지표로 고려해 왔을 뿐, 수환경에 영향을 줄 수 있는 유역 내 토지인자들에 의한 종합적인 고려는 이루어지지 않은 실정이다. 수환경 관리를 위해 도시계획 및 토지이용계획에서 이용할 수 있는 종합적인 수환경 관리지표 마련은 필요하며 이러한 수환경 관리지표로서 불투수율의 적용 타당성은 크다고 할 수 있다. 지금까지는 각종 토지이용행위 각각 필지별로 추진됨에 따라 이들이 모여 유역 전반에 미치는 영향에 대한 대처가 미흡하여, 결국에는 난개발로 이어져 유역 전체의 수환경 장애를 가져오는 원인으로 작용하고 있다. 따라서, 불투수율과 같이 유역의 수환경에 민감한 영향을 미치는 인자를 유역관리지표로 활용하여 도시적 토지이용이 집합되어 나타나는 유역의 수환경문제를 유형화하여 규명하고, 유역환경과 토지이용계획과의 연계방안을 마련하여 이를 유역관리에 도입해야 한다. 따라서 도시의 특성에 따라 적정 불투수율을 유지할 수 있도록 하고 일정 규모를 초과할 경우 적절한 투수시설이나 우수지 건설 등을 통해 물순환 장애를 제거할 수 있는 방안을 도입토록 하여야 한다.

참고문헌

- 환경부, 2003, 『중소유역 수질보전계획 수립기법 개발 최종보고서』.
- 환경부, 2003, 『팔당호 오염원 현황』.
- 한국환경정책·평가연구원, 2003, 『유역관리 효율화를 위한 불투수면 지표개발과 적용』.
- Booth, D. and L. Reinelt, 1993, "Consequences of Urbanization on Aquatic Systems: Measured

- Effects, Degradation Thresholds, and Corrective Strategies”, *Proceedings Watershed 93 A National Conference on Watershed Management*, March 21-24, Alexandria, Virginia, pp. 545~550.
- Booth, D.B., 2000, *Forest Cover, Impervious Surface Area, and the Mitigation of Urbanization Impacts in King County*, Washington, King County Water and Land Resources Division, Seattle, WA.
- U.S. EPA, 1997, *Urbanization and Streams: Studies of Hydrologic Impacts*, Office of Water, Washington, D.C. 841-R-97-009.
- Galli, J., 1991, *Thermal Impacts Associated With Urbanization and Stormwater Management Best Management Practices*, Metropolitan Washington Council of Governments, Maryland Department of Environment, Washington, D.C., p. 188.
- Gibson, G., M. Barbour, J. Stribling and J. Karr, 1993, *Biological Criteria: Technical Guidance for Streams and Small Rivers*, US EPA Assessment and Watershed Protection Division, Washington, D.C.
- Schueler, T., 1987, *Controlling Urban Runoff- A Practical Manual for Planning and Designing Urban Best Management Practices*, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, D.C.
- Schueler, T., 1994, “The Importance of Imperviousness”, *Watershed Protection Techniques* Vol. 1, No. 3: 100~111. Center for Watershed Protection.
- Shaver, E., J. Maxted, G. Curtis and D. Carter, 1995, *Watershed Protection Using an Integrated Approach*, In Stormwater NPDES Related Monitoring Needs, Engineering Foundation, American Society of Civil Engineers, Crested Butte, CO. August 7-12. 1994.
- Simmons, D. and R. Reynolds, 1982, *Effects of Urbanization on Baseflow of Selected South-Shore Streams, Long Island, NY*, Water Resources Bulletin. 18(5): 797~805.

원 고 접 수 일 : 2004년 6월 1일
최종원고채택일 : 2004년 6월 16일