

불투수 지표면 비율 증가와 하천수질농도 상승의 연관성에 대한 사례 연구

- 안양천 · 경안천 · 복하천 유역을 중심으로 -

장 수 환* · 최 지 용** · 이 지 현***

A Case Study on Correlation of Water Quality and Impervious Cover Rates in Watersheds

- Focused on An-Yang Cheon, Kyung-An Cheon, Bok-Ha Cheon Watersheds -

Su Hwan Jang* · Ji Yong Choi** · Ji Hyun Lee***

요약 : 유역내 불투수 지표면 증가는 강우시 우수유출량과 침투유량을 증가시킬 뿐 아니라 수질악화에 영향을 주는 결정적인 인자이다. 그동안 특정유역에서의 우수유출량 증가와 초기유출수의 심각한 오염에 대하여 강우사례에 한정된 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 11곳의 대상유역에 대한 1992년에서 2002년까지의 패널데이터를 수집하여 유역내 인자의 양적 변화와 수질 농도 상승 사이의 연관성을 분석하였다. 분석방법으로는 수년간의 수질농도 데이터와 유역내 인자 데이터에 내재된 자기회귀문제와 공시적 상관문제를 처리하기 위하여 Parks Model을 이용하였다. 연구결과 도시화된 안양천 유역의 경우 유역내 하수처리율의 증가는 수질농도 하강과 유의한 관련성이 있는 반면 불투수 지표면 비율 증가는 이 유역의 수질농도 상승과 유의한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 이는 안양천 유역과 같은 도시유역의 수질농도 상승은 인구밀도, 하수처리율, 산림면적 등에 의해 영향을 받는다고보다는 유역의 불투수 지표면의 비율증가와 관련성이 있음을 시사한다고 할 수 있다. 이에 비해 복하천 유역과 같이 도시화가 비교적 덜 일어난 지역의 경우는 불투수 지표면의 증가보다는 인구증가에 상응하지 못하는 하수처리량이 수질농도를 상승시키는 영향을 주는 것으로 보인다. 경안천과 안양천유역의 경우 불투수 지표면 증가에 따른 수질농도 상승 영향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 도시유역의 수질관리에 있어서 불투수 지표면을 관리하는 것이 효과적인 수질관리방법이 될 수 있음을 시사한다.

주제어 : 도시화, 도시유역, 불투수지표면 비율, 하천 수질, 패널분석

ABSTRACT : Impervious cover rates is a crucial factor effecting water quality as well as runoff volume in stream in urbanized watershed, but few studies have testified a relationship between impervious cover rates and water quality empirically. In this study a relationship between impervious cover rates and water quality using panel data is showed. For the analysis, data of 11 watersheds from 1992 to 2002 are used. To consider autoregression of error terms, the Parks method is applied. The result of this study shows that water quality has deteriorated as impervious cover rates has increased in watershed although wastewater treatment rates has

* 이엔위즈(주) 책임연구원(Senior Research Engineer, Environmental & Whole Information System), 논문주작성자인.

** 한국환경정책·평가연구원 연구위원(Research Fellow, Korea Environment Institute)

*** 한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute)

increased considerably. Water concentration has increased with an increase of impervious cover rates rather than wastewater treatment condition, watershed area, forest area and population density. As the result of analysis, impervious cover rates is a crucial factors raising chemical concentration of water, e.g. BOD, COD, SS, TN, TP. These results are identical when impervious cover rates are calculated maximum or minimum. This means that the deterioration of water environment can be no longer prevented only with the old means of environmental management such as sewage treatment. Also, the need for developing and using new watershed management indicators that enable us to better manage land use is growing.

Key Words : urbanization, urbanized watershed, impervious cover rates, water quality, panel analysis

I. 서론

유역내 토지이용의 형태는 하천의 수량과 수질에 영향을 준다. 본 연구에서는 유역이 도시화됨에 따라 나타나는 불투수 지표면의 증가와 하천의 수질농도 상승과 관련이 있는가에 대해 분석하였다. 불투수 지표면과 수질과의 연관성 연구에서 중요한 쟁점은 다음과 같다.

첫째, 유역내 불투수 지표면의 비율이 어느 정도가 되면 수질에 해로운 영향을 가져오는지 하는 것이다. 만약 수질에 영향을 미치기 시작하는 유역내 불투수 지표면의 임계치(threshold)를 도출해낼 수 있다면, 수질관리를 위해 유역내에서 개별적으로 일어나는 개발활동을 통제할 수 있는 중요한 수단이 될 것이다.

둘째, 불투수 지표면의 비율에 따라 수질을 설명할 수 있는 정도가 달라진다는 것이다. 선행연구에 따르면 불투수 지표면에 따른 수환경 변화는 유역내 불투수 지표면의 비율이 10~25%인 상태에서 가장 잘 나타난다. 유역내 불투수 지표면의 비율이 비교적 낮은 5% 미만의

유역에서는 불투수 지표면의 비율이 증가함에 따라 수질변화를 보이지 않을 수도 있다. 예를 들어 집약적인 농업활동이 있었던 지역에서는 농지가 불투수 지표면으로 전환됨에 따라 오염물 유출에서 감소경향을 나타내기도 한다. 한편 불투수 지표면의 비율이 30% 이상을 초과하면 불투수 지표면의 비율증가에 따른 수질을 비롯한 수환경 변화경향은 파악하기 힘들다는 것이 일반적인 연구 결과이다.

셋째, 유역에 따라 하천수질에 영향을 미치는 인자는 상이하게 나타난다는 것이다. 도시화율이 낮은 지역은 대체로 불투수 지표면의 비율이 낮고, 하수처리율도 저조한 실정이다. 이러한 지역에서의 하수처리 시설 증가 없이 발생하는 인구 증가는 수질 오염에 주요원인이 될 수 있다. 반면 도시화가 이루어진 유역의 경우 하수처리량이 증가하여 하수처리 미비로 인한 수질 악화는 발생하지 않을 수 있으나, 오히려 불투수 지표면의 비율이 높아져, 강우시 불투수 지표면에 누적된 오염물 유출로 인한 수질 농도 상승이 일어날 것이다.

본 연구에서는 이러한 쟁점에 답하기에 앞서, 과연 불투수 지표면의 증가와 수질 농도 상승이 관련이 있는가에 대해 실증분석하고자 한다. 그동안 불투수 지표면과 관련하여 유출 양상의 변화에 대한 모델링 연구는 다수 있었으나 수질과의 연관성에 대한 연구는 드문 것이 현실이다. 더구나 단기간의 샘플링 연구가 아닌 10년 이상의 실증분석에 의한 연구는 이루어진 적이 거의 없었다. 본 연구에서는 11개 소유역을 대상으로 1992~2002년까지의 유역 내 불투수 지표면 면적의 증가와 수질농도 변화의 관계에 대하여 실증분석하였다.

II. 이론적 배경 및 주요선행연구

1. 하천 수질 변화와 불투수 지표면 증가의 연관성 연구동향

과거 20~30년동안 유역의 도시화와 비점오염물질 발생과의 연관성에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 미국의 경우 '70년대와 '80년대에 유역이 도시화됨에 따른 토지이용 변화에 따른 도시하천의 변화를 규명하려는 연구가 활발하였으며, '90년대부터는 토지이용변화 중 특히 불투수 지표면의 증가가 도시하천에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Chang et al.(1990)은 불투수 지표면 증가로 인한 강우시 유량 및 오염물질 유출증가 현상으로 볼 때, 불투수 지표면을 하천 변화에 영향을 끼치는 유역의 주요 변수 중 하나라고 말하고 있다.

Schueler(1994)는 불투수 지표면이 하천의 질에 미치는 영향을 강우시 유출량의 변화, 하도의 물리적 확장 및 제방의 불안정성 증가, 기저유량의 감소, 각종 오염물 유출 증가, 하천 수온 상승, 서식지의 파괴 등으로 구분하였다.

CWP(2003)는 불투수 지표면과 하천의 수질과의 관계는 몇 가지로 일반화하고 있다.

첫째, 우수유출수에 의해 방류수계로 운반되는 단위면적당 오염부하는 유역의 불투수 지표면의 비율에 직접 비례하여 증가한다. 이는 오염부하가 평균적인 오염 집적과 우수유출수량의 결과물이므로 당연하다. 유출수 양이 불투수 지표면의 비율에 직접적으로 비례하여 증가하기 때문에, 평균적인 오염 농도가 같은 한, 오염부하는 자동적으로 불투수 지표면 비율이 증가할 때 증가한다.

둘째, 도시 유출수에서 오염물 농도의 평균 값이 일반적으로 대부분의 다른 비 도시적 토지이용으로부터의 유출수에서 보다 더 높다는 것이다. 결과적으로 도시의 단위면적당 비점오염 부하는 이전의 토지이용이었던 산림, 목초지, 경작지, 공지 등에서의 비점오염 부하를 대부분 초과한다. 한 가지 예외는 농경지인데, 농경지에서는 단위면적당 많은 침전물과 영양물질이 유출된다. 이러한 유역의 경우, 집약적으로 이용되던 경작지에서 낮은 밀도의 거주개발지로 전환되면, 실제로 약간 감소된 침전물 또는 영양물 유출을 보인다. 그러나 좀더 집약적인 토지개발(불투수 지표면 30%이상)은 경작지의 부하와 동등하거나 초과할 것으로 예상된다.

셋째, 유역내 1~10% 불투수 지표면 비율은

우수유출수 오염부하 증가에 영향을 가장 적게 준다는 것이다. 많은 연구에 따르면 불투수 지표면 비율이 낮은 소규모 유역의 경우는 불투수 지표면의 영향보다는 유역내의 탄화염암(carbonate rock)의 양, 유역의 토질, 자연지형(physiographic), 소유역에서의 산림과 경작지 피복(cover)의 상대적 비율, 지질 등과 같은 유역의 기타 인자들이 오염부하에 더 많은 영향을 미친다.¹⁾

〈표 1〉 불투수면에 따른 초기 유출 농도

오염물질 (ppm, MPN)	5% imp	30% imp	50% imp	70% imp	90% imp
BOD(5일)	9	10	14	16	19
COD	26	52	65	66	69
총 유기 탄소	7	13	14	18	24
NO ₃ +NO ₂	0.15	0.71	0.52	0.55	0.67
TKN	0.52	0.91	1.10	1.24	1.40
암모니아	0.09	0.24	0.38	0.30	0.24
인산	0.04	0.22	0.20	0.20	0.20
총 고형물질	80	170	212	220	123
구리	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
철	0.36	0.68	0.48	0.54	0.58
납	0.004	0.045	0.03	0.04	0.06
아연	0.008	0.060	0.090	0.12	0.17
분변성대장균	9	39	28	28	31
분변성연쇄상구균	9	30	27	27	30

주 : imp는 불투수면을 말함.

자료 : Chang et al.(1990)

2. 불투수 지표면모델(ICM)과 임계치에 대한 연구

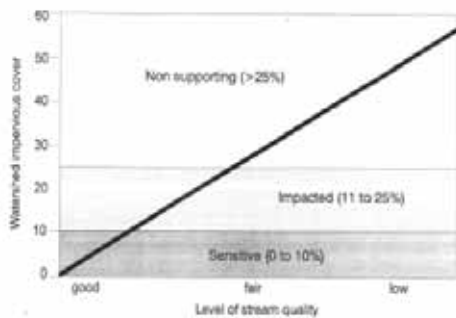
CWP(1998)에서는 불투수 지표면의 증가와 하천의 질 사이의 관계에 대한 축적된 연구 결과를 바탕으로 ICM(Impervious Cover Model)²⁾을 제시하였다. ICM은 개개의 개발행위에 하천에 영향을 주는 인자인 불투수 지표면의 임계치(threshold)³⁾를 제시해줌으로써 개별적인 개발행위나 토지이용을 유역차원에서 조정할 수 있다. ICM에서는 유역내 불투수 지표면의 비율에 따라 하천을 세가지 범주, 즉 민감하천(0~10%), 손상하천(11~25%), 생태적 건전성 유지불능 하천(26% 이상)으로 구분하고 있다. ICM에 의하면 대부분의 하천 질 지표들은 유역의 불투수면 비율이 10%를 초과할 때 악화되기 시작하며 25%를 넘으면 심각한 악화가 예상된다고 한다. 이는 유역의 토지이용이 하천 환경에 어떤 영향을 줄 것인가를 신속하게 예측할 수 있다는 점에서 유역계획을 위한 중요한 수단으로 활용될 수 있다. 특히, 불투수면 모델은 유역관리 계획 과정에서 초기에 토지 보존 문제와 토지이용계획의 중요성을 고려하도록 유역관리자를 촉구하는 지표가 되기도

1) 이는 유역관리자가 민감한 하천 범주의 유역에서는 산림이나 경작지와 같은 기타 유역 지표들에 대해 조사해야 한다는 것을 의미한다(Liu et al., 2000).

2) ICM은 실제 하천의 질보다 잠재적인 하천의 질을 예측한다. 그리고 일부 하천은 ICM의 하천 질 예측 내용과 일치하지 않을 수도 있다. 예를 들면, 모니터링 지표는 '민감한'으로 분류된 하천에서 불량한 수질을 나타내거나 '생태적 건전성 유지 불능' 하천인 곳에서 놀랍게도 높은 생물다양성 점수를 보일 수 있다. 한 예로 수변서식지의 상태가 양호하다면 해당 유역의 불투수 지표면의 비율이 높아도 생물다양성이 높을 수 있다. Horner and May(1999)의 Puget Sound Ecoregion에서의 연어에 대한 연구에서 볼 수 있다. 연구 결과 만약 훌륭한 수변 서식지가 보존되었다면, 불투수 지표면의 비율이 15%인 곳에서도 일반적으로 어류 다양성이 보존될 수 있으며, 불투수 지표면 비율이 30%인 곳에서도 수생곤충의 다양성이 양호하게 유지될 수 있다고 나타났다.

3) 여기서 임계치는 수질에 영향을 미치기 시작하는 유역내 불투수 지표면의 비율을 말한다. 불투수 지표면 비율 10%와 25%라는 "임계치(threshold)"는 정확한 '구분점'이 아니라 그 범위의 불투수 지표면 비율에서의 일반적인 변화를 반영한 값이다. 따라서, 실제로 유역의 몇 % 내에서 하천 질 지표에서의 실제 차이를 구분한다는 것은 불가능하다(예를 들면 9.9%와 10.1%).

한다. <표 2>은 CWP(1998)에서 제시하는 ICM의 하천분류에 따라 유역 개발 및 관리 기준을 나타낸 것이다.



<그림 1> Sensitive, Impacted, Non-Supporting 하천에서 불투수율과 하천 수질의 관계

<표 2> 유역 개발 및 관리기준

민감하천(0-10%의 불투수면)	
· 목표: 개발 이전의 생물학적 다양성 유지	
· 토지이용: 불투수면의 제한	
· 수단: 개발전 수문상태 유지, 침투 및 재충전 유지	
· 완충지: 가장 넓은 하천 완충지, 민감 지역 보호	
· 기타 방안: 토지 취득, 부지조성 제한	
손상하천(11-25%의 불투수면)	
· 목표: 하천 서식지 보호와 수질악화 방지	
· 토지사용: 유역의 불투수면 증가에 대한 강도높은 제한	
· 지침: 오염물질 제거/수로보호를 강조	
· 완충지: 일반적 3단계 완충지조성, 지역특성에 따라 폭 다양	
· 기타 방안: 지역연못 시스템, 지역 계획 기술	
생태적 건전성 유지불능 하천(불투수면이 26%이상)	
· 목표: 하류의 오염물질 부하량 최소화/범람 예방	
· 토지사용: 유역 개발 및 재개발 촉진 제한	
· 지침: 인/금속/독극물 제거 최대화, 연못과 습지에 규제 해제	
· 완충지: 여가를 위한 자연적 전용도로/범람 보호	
· 기타 방안: 오염 방지, 불법적 연결, "오염우려지역" 관리	

III. 분석방법

1. 연구의 범위 및 자료 구성

본 연구의 내용적 범위는 불투수 지표면을 포함한 유역 인자의 양적 변화와 수질농도 변화와의 관계를 알아보는 것이다. 이를 위해 유역내 인자들에 대한 자료를 유역별, 연도별 패널데이터를 구축하였다. 하천의 수질에 영향을 미치는 유역내 인자는 유역의 불투수 지표면 비율, 하수처리량, 임야면적, 유역크기, 인구밀도이다. 이 유역인자들의 양적 변화에 따른 수질농도 변화를 보기 위해 택한 결과변수는 BOD, COD, TN, TP, SS 농도이다. 수질농도 변화는 환경부의 1992~2002년까지의 월별 측정데이터를 이용하였다. 시간적 범위는 1992년에서 2002년까지이다. 공간적 범위는 불투수 지표면의 비율 변화에 따른 수질영향을 보기 위하여 도시화된 정도에 따라 북한천 유역, 경안천 유역, 안양천 유역으로 선정하였다. 본 연구대상유역의 불투수 지표면 비율은 북한천 유역 4.2~8.4%(3.1~6.1%), 경안천 유역 3.6~17%(2.7~12.1%), 안양천 유역 24~47.5%(17.3~34.9%)⁴⁾였다. 본 연구에서는 환경부의 표준유역구분에 기초하여 11개 소유역(watershed)⁵⁾으로 구분하였다. 유역단위데이터를 동, 면 단위의 자료를 이용하여 산정하는 데 있어서 유역경계에서 나누어지는 동이나 면의 경우에는 면적비율에 근거하여 인구수와 토지이용면적을 할당하였다. 또한 본 연구에서는 자료의 처

리 및 시계열 자료의 일관성 있는 구축을 위해 행정구역의 통합 및 분리 시점을 고려하여 유역에 해당되는 행정구역을 구성하였다.



〈그림 2〉 대상유역의 위치

〈표 3〉 수질영향 분석을 위한 유역 구분

유역 구분	면적(km ²)	해당지역
북하천1	136.8	용인, 이천, 여주, 광주 일부
북하천2	167.3	이천, 여주, 광주 일부
북하천3	33.7	여주군 일부
경안천1	202	용인, 광주 일부
경안천2	88.9	광주, 성남 일부
경안천3	162.7	광주, 여주, 이천 일부
경안천4	107.9	하남, 양평, 성남, 광주 일부
안양천1	121.4	광명, 과천, 군포, 성남, 수원, 시흥, 안양, 의왕시 일부
안양천2	50.4	부천, 시흥, 서울 포함
안양천3	47.5	과천, 안양, 서울 일부
안양천4	60.1	광명, 부천, 서울 일부

본 연구는 패널데이터를 이용한 유역 분석

을 위해 오차항의 자기회귀특성을 고려한 Parks 추정법과 선형회귀모형을 적용하였으며 통계패키지로는 SAS를 이용하였다.

2. 불투수 지표면의 비율 변화

이 논문에서 불투수 지표면 산정은 두가지 방법을 이용하였다. 먼저 1992~2002년까지의 『통계연보』에 나타난 지목별 분류에서 대지, 공장용지, 도로를 불투수 지표면으로 산정하였다. 종교용지, 공원, 운동장 등과 같은 지역도 불투수면과 투수면이 상존하고 있는 지역이나, 불투수 지표면의 산정에 있어서 (+)가 (-)가 되어 결국은 합이 보상된다는 가정하에 불투수 지표면의 산정에서 제외하였다. 그러나 대지, 공장용지를 불투수 지표면으로 산정하는 과정에서 불투수 지표면이 과대 추정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 지목분류를 이용한 값을 불투수 지표면의 최대산정값으로 하고, 용도지역에 근거한 건폐율과 도로면적을 합한 값을 불투수 지표면의 최소산정값으로 하였다. 〈표 4〉는 11개 하천 유역의 최대 및 최소 불투수 지표면의 비율을 나타낸 것이다. 각 하천유역의 수질영향 인자 분석에서는 각 유역에 대한 분석에 있어서 불투수 지표면 면적의 최소산정값과 최대산정값을 이용하여 두 가지로 분석하였다. 가장 높은 증가율을 보인 지역은 경안천 2 지역인 성남시 분당동·수내

4) () 안의 값을 건폐율과 도로를 고려하여 산정한 불투수 지표면의 비율이며, () 밖의 값은 24개 지목 중 대지, 도로, 공장용지를 이용하여 얻은 불투수 지표면의 비율이다. () 안의 값이 작게 나타난다.

5) "http://www.stormwatercenter.net/; Chapter 1 from The Rapid Watershed Planning Handbook" 에 따르면 소유역(watershed)의 크기는 26~260km²이다. 본 연구에서는 100km² 내외의 유역을 대상으로 하였다.

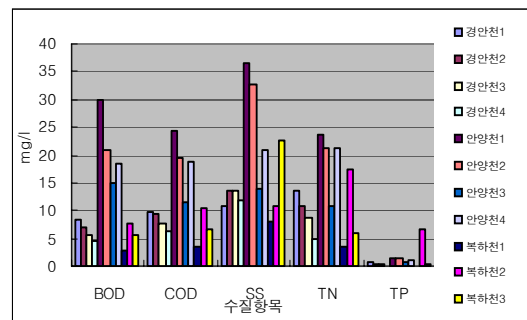
<표 4> 각 유역내 불투수 지표면 비율 변화

(단위 : %)

유역	1992			1994			1996			1998			2000			2002		
	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균	최대	최소	평균
북하천1	4.2	3.1	3.7	5.1	3.7	4.4	5.4	3.9	4.7	5.9	4.3	5.1	6.2	4.5	5.4	6.7	4.8	5.8
북하천2	5.1	3.6	4.4	6.0	4.3	5.2	6.4	4.7	5.6	7.1	5.2	6.2	7.7	5.6	6.7	8.4	6.1	7.3
북하천3	4.5	3.2	3.9	4.4	3.2	3.8	5.1	3.6	4.4	5.6	4.2	4.9	6.0	4.4	5.2	6.6	4.8	5.7
경안천1	5.4	4.0	4.7	5.7	4.2	4.8	6.5	4.6	5.6	7.0	5.1	6.1	7.6	5.5	6.6	8.7	6.3	7.5
경안천2	5.0	3.8	4.4	5.3	3.9	4.6	8.5	6.1	7.3	9.6	7.1	3	10.5	7.6	9.1	17	12.1	14.6
경안천3	3.6	2.7	3.2	3.8	2.9	3.4	4.0	3	3.5	4.9	3.5	4.2	5.0	3.6	4.3	5.7	4.1	4.9
경안천4	4.0	2.9	3.5	4.4()	3.2	3.8	4.6	3.3	3.9	4.8	3.4	4.1	5.3	3.9	4.6	6.2	4.4	5.3
안양천1	24.0	17.3	20.7	26.5	19	22.8	28.7	20.5	24.6	29.9	21.2	25.5	31.1	22.4	26.8	32.0	22.9	27.5
안양천2	33.1	23.6	28.4	35.0	25	30	36.1	25.6	30.9	35.3	25.3	30.3	35.5	25.4	30.5	36.4	26.1	31.3
안양천3	38.2	27	32.6	40.6	29.7	35.2	41.1	30.1	35.6	42.5	30.6	36.6	42.7	31.2	37	43.0	31.8	37.4
안양천4	44.0	33	38.5	45.6	32.6	39.1	46.2	33.2	39.7	46.9	34.3	40.6	47.2	34.9	41.1	47.5	34.9	41.2

동과 용인시 수지읍 등 지역으로 최대로 산정한 불투수 지표면비율은 1992년 5%에서 17%로 증가하여 300% 이상의 증가율을 보였다. 북하천 1, 3 지역인 광주읍, 이천읍 일부지역과 경안천 3, 4 지역인 광주시, 양평군 등 지역은 다른 유역에 비하여 불투수 지표면의 비율이 적은 지역으로 나타났다. 안양천유역은 4개의 유역이 모두 도시화된 유역으로 불투수 지표면의 비율이 2002년 현재 30%이상으로 나타났다. 특히 서울시, 안양시 등을 포함하는 안양천 3, 4 지역은 불투수 지표면 비율이 가장 높았다.

평균값을 나타낸 것으로 안양천1~안양천4 유역이 수질농도가 높은 것을 볼 수 있다. 불투수 지표면의 증가에 따른 수질변화는 <그림 3>에서 볼 수 있다.



<그림 3> 유역별 수질 평균값

3. 수질변화

본 연구에 변수로 들어간 수질조사항목은 BOD, COD, TN, TP, SS 이다. 1992~2002년 까지 환경부 수질측정망의 매월 1회 수질조사 결과를 이용하였다. <그림 3>은 유역별 수질

4. 모형설정

본 연구에서 이용한 수질에 영향을 미치는 영향을 분석하기 위해 채택한 방법은 패널분석이다. 이러한 분석 방법은 Schuler(1987)에

의한 Simple Model과 마찬가지로 일반화된 정보를 사용하기 때문에 지역의 특수한 상황에 대한 자료요구 수준이 낮은 편이고, 대체로 이 모델에서 제공하는 기본값은 다양한 지역에서의 경험에서 얻어진 관계식에서 산정된다는 점에서 같다. 또한 Simple Model과 마찬가지로 단기간 동안의 오염부하에 의한 수질오염을 모의하기에는 적당치 않으므로 짧은 시간 간격에서 관측되는 오염부하량의 변동을 반영할 수는 없다는 특징이 있다. 본 연구에서 이용된 패널분석에 의한 방법도 도시 개발활동으로 인한 수질 변화의 장기적인 분석에 적합하다. 패널분석은 패널데이터를 이용한 분석으로 패널데이터(Panal Data)는 개별주체나 지역(여기서는 유역)들 각각의 횡단면 자료를 일정한시간 간격으로 연결한 시계열 자료이며 추정모델을 간단히 표시하면 아래와 같다.

$$y_{it} = \sum_{k=1}^p X_{itk} \beta_k + u_{it} \quad i:1, \dots, N; t=1, \dots, T$$

여기서 y_{it} 는 종속변수로 구성된 벡터, X_{itk} 는 각 독립변수로 구성된 벡터, β_k 는 추정치 U_{it} 는 오차항을 의미한다. N은 횡단면의 수로써 개체수를 말하며(본 논문에서는 유역), T

는 각 횡단면의 시계열 수, p는 설명변수 또는 독립변수의 수를 의미한다.

본 연구에서 사용한 패널 분석은 일반회귀 분석에서의 문제점을 보완하는 방법으로 회귀 분석에서 변수로 선택하지 못한 누락변수(unobservable omitted variable)에 대한 처리를 해준다.⁶⁾

한편 오차항이 아래 식에서 보는 바와 같이 횡단면에서 공시성(contemporaneous correlation)의 상관관계를 지닌 1차 자기회귀형태(first-order autoregression)를 띄고 있다고 가정하는 경우 공분산 메트릭스는 2단계 절차에 의해 추정되며 이에 따라 GLS(Generalized least squares)에 의해 모델회귀계수가 추정될 수 있다.

$$u_{it} = \rho_i u_{i,t-1} + \varepsilon_{it}$$

여기서 ε_{it} 는 오차항이며 ρ 는 자기공분산 계수이다.

유역의 불투수 지표면의 비율, 인구밀도, 산림면적, 하수처리량 등은 유역내에 한번 존재하게 되면 그 이후의 오염물질에 계속하여 영향을 주는 특성이 있기 때문에 오차항의 형태에 대한 가정에서도 시계열에 따른 오차를 가정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 따라서

6) Baltagi(1996)은 패널데이터(panel data)의 장점을 6가지로 들고 있다.

첫째, 패널데이터는 개별적 특성(heterogeneity)을 통제할 수 있다. 이러한 특성을 통제하지 못하는 시계열분석이나 횡단면 분석은 왜곡된(biased) 결과를 얻을 위험이 있는데, 패널데이터는 시계열분석이나 횡단면 분석에서는 불가능한 지역(본 연구에서는 유역) 불변요인(invariant)이나 시간불변 요인을 통제할 수 있다. 둘째, 패널데이터는 시계열분석에서 발생하기 쉬운 다중공선성 문제를 해소시켜주며, 여기에 횡단면 차원을 추가함으로써 가변성(variability)을 확대하고 정보를 늘릴 수 있다. 셋째, 패널데이터는 조정과정의 동태성(dynamics of adjustment)을 연구할 수 있게 해준다. 상대적으로 안정적으로 보이는 횡단면분포에서 파악하기 힘든 다양한 변화를 파악할 수 있게 해준다. 넷째, 패널데이터는 순수한 횡단면이나 순수한 시계열 데이터에서 발견할 수 없는 효과를 더 잘 규명하거나 추정할 수 있다. 특정한 특성을 지닌 집단들이 추후에 어떠한 변화를 나타내는지를 알 수 있게 해준다. 다섯째, 패널데이터는 순수한 횡단면자료나 시계열자료보다 복잡한 행태적 모형을 구축하고 검증할 수 있게 해준다. 여섯째, 패널데이터는 미시적인 단위에서 수집되는 데이터에서 발생할 수 있는 편의(bias)가 제거될 수 있다.

본 연구에서는 수질에의 영향을 주는 유역의 인자에 대한 분석은 Parks 추정법을 사용하였다. Parks⁷⁾는 확률오차항이 u_{it} , $i = 1, 2, \dots, N$, $t = 1, 2, \dots, T$ 의 구조를 지닌 1차 자기회귀모형을 고려했다.

Parks 추정법에서는 이분산,⁸⁾ 공시적 상관성,⁹⁾ 자기회귀¹⁰⁾ 특성을 지닌 자료를 적절한 변형을 통해서 일치추정량, 점근적 추정량의 특성을 지닌 추정치를 구해준다. 본 연구에서 분석한 수질자료는 물이라는 매체 특성상 인접한, 또는 상류의 수질이 하류에 영향을 주기 때문에 공시적 상관성을 가정하는 것이 타당하다. 또한 이미 과거에 발생된 값이 누적되어 현재 값에 계속 영향을 주고 있으므로 이로 인해 발생하게 되는 자기회귀문제를 고려해야 한다.

본 연구에서는 통계프로그램으로 SAS를 이용하였다. 모형의 추정을 위해서는 선형회귀분석과 횡단면 시계열회귀분석(time-series cross-section regression, TSCSREG)을 사용하였다.

수질에 영향을 미치는 요인들을 수질 설명함수로 설정하였다. BOD, COD, TN, TP, SS 수질 데이터를 종속변수로 설정하고 이에 영향을 미치는 요소로서 유역의 총 면적, 유역내 산림면적, 불투수 지표면 비율, 하수처리량, 인구밀도를 투입하였다. 함수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Y = & \alpha_1 + \beta_1 \ln(\text{impervious cover rates}) \\ & + \beta_2 \ln(\text{watershed area}) \\ & + \beta_3 \ln(\text{population density}) \\ & + \beta_4 \ln(\text{volumn of wastewater treatment}) \\ & + \beta_5 \ln(\text{forest cover rates}) + U_i \end{aligned}$$

위 식에서는 종속변수에 로그를 취하였는데, 이는 자료의 분산을 줄여 안정되게 계수를 추정할 수 있도록 해준다.¹¹⁾

IV. 분석결과

1. 불투수 지표면의 변화에 따른 하천수질변화

불투수 지표면의 증가에 의한 수질영향을 OLS를 이용하여 분석한 결과는 <그림 4>과 같다. TP를 제외한 4개의 수질항목에 대해 불투수 지표면 비율은 수질농도 증가와 관련이 있는 것으로 나타났다.

그러나 <그림 4>의 선형회귀분석결과는 불투수 지표면 변수에 내재된 다른 도시화 속성을 구분하여 고려하는 데 미흡하기 때문에 본 연구에서는 불투수 지표면에 의한 수질영향을 추정하기 위해 패널분석을 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

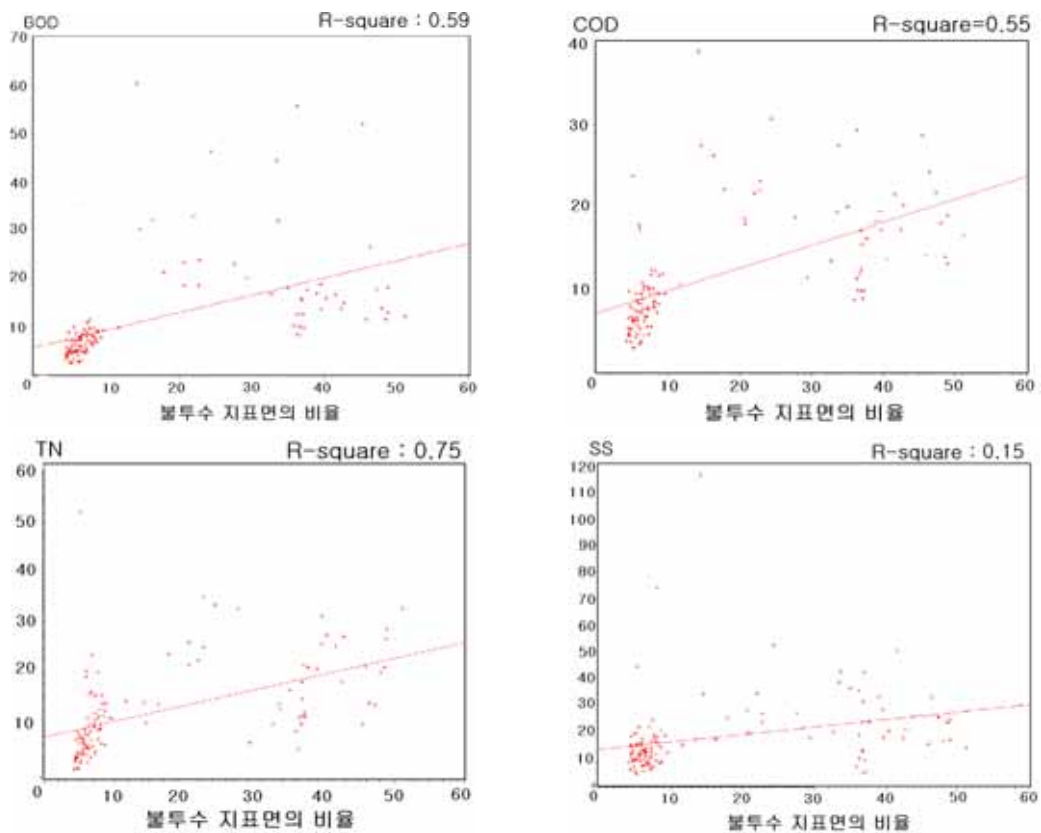
7) 1967년에 발표된 Parks 추정법에 관한 자료는 <http://v8doc.sas.com/sashtml/>에서 얻을 수 있음.

8) 횡단면상의 이분산으로 x 가 증가할수록 y 의 조건부 분산도 같이 증가한다는 가정

9) 공시적 상관성으로 같은 시계열에서 오차 i 와 j 가 공분산을 가진다는 가정

10) 자기회귀로 시계열자료에 대한 회귀분석에서 회귀모형의 설명변수에 종속변수의 과거값들이 포함되어 있다고 가정

11) 이는 Lin-Log 모형이라 하는데 X 의 퍼센트 1단위 증가에 대해 Y 의 절대적 변화를 보기 위한 것이다.



〈그림 4〉 불투수 지표면의 비율에 따른 수질농도의 변화

2. 모형의 추정

11개 유역 하천수질에 영향을 주는 유역내 인자에 대한 패널분석결과의 변수 추정치와 t 값은 〈표 5〉에서 볼 수 있다. 분석결과 임야면 적비율을 제외한 모든 인자들이 BOD에 유의한 영향을 준 것으로 나타났다.

하수처리량 증가는 하천수의 BOD 농도를 낮추는 영향을 갖는 것으로 나타났다. 또한 불투수 지표면 비율의 추정치는 10.98로 다른 인자들보다 하천수의 BOD 농도 증가에 대한 탄력성이 큰 것으로 나타났다. COD에 대하여는 본 연구에서 고려한 모든 유역내인자가 유의

한 추정치를 보였으며 COD의 농도를 낮추는 영향을 보인 하수처리량을 제외한 다른 인자들은 COD 농도 상승과 관련된 것으로 나타났다. 인자 중 COD 농도에 대한 탄력성은 불투수지표면 비율 > 유역의 면적 > 인구밀도 > 임야면적 순이었다.

TN에 영향을 미친 유역내인자는 인구밀도를 제외한 모든 인자들의 추정치가 유의하게 나왔다. 앞의 BOD, COD에서와 마찬가지로 불투수 지표면이 TN 농도 높이는 영향을 미친 것으로 나타났으며, TN의 농도를 높이는 영향을 준 임야면적과 유역면적보다 탄력성이 높게 나타났다. 하수처리량의 TN에 대한 추정치

는 -0.5로 탄력성은 낮지만 TN의 농도를 낮추는데 유의한 영향을 미친 것으로 나타났다. TP의 경우, 모든 유역내 인자가 유의한 추정치를 보였으며, 인구밀도와 하수처리량, 임야면적은 TP의 농도를 낮추는 영향을 준 것으로 나타났다. 보통 인의 발생원은 비료나 가축의 배설물로 축산업이나 농업을 하고 있는 지역에서 유출되고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구 결과, 불투수 지표면의 비율 증가에 의한 총인의 농도 증가가 나타났으며, 이는 Schueler(1987)의 불투수 지표면의 증가에 따른 인의 증가 연구와 마찬가지로 불투수 지표면 증가가 인 부하의 증가에 기여하고 있음을 나타내는 것이다. SS의 경우도 본 연구에서 고려한 영향요인이 모두 유의하게 나왔으며, 인구밀도와 하수처리량의 증가는 SS의 농도를 낮추는 영향을 준 것으로 나타났다. 반면 불투수 지표면의 비율, 임야면적과 유역의 면적은 SS의 농도를 높이는 영향을 준 것으로 나타났다. 건폐율을 이용하여 불투수 지표면을 최소로 산정하여 분석한 결과(〈표 5〉 참조)도 마찬가지로 불투수 지표면이 모든 수질항목의 농도 상승과 관련이 있음을 보여준다. 〈표 6〉은 유역별 분석결과이다. 분석결과 복하천유역은 불투수 지표면비율과 수질농도 상승의 연관성을 볼 수 없었으나, 인구밀도, 임야면적비율, 유역 면적과 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 경안천과 안양천유역의 경우 불투수 지표면의 증가와 수질농도 상승이 유의한 수준에서 연관성이 있는 것으로 나타났다.

〈표 5〉 전체 유역의 수질영향 인자 분석

수질 항목	독립변수	추정계수 (t 검정통계량) ¹⁾	추정계수 (t 검정통계량) ²⁾
BOD	Intercept	-18.760(-6.38)**	-23.546(-9.66)**
	불투수 지표면의 비율	10.981(12.63)**	8.891(10.52)**
	인구밀도	-1.470(-3.31)*	-0.337(-1.04)
	하수처리량	-0.221(-4.73)**	-0.247(-5.62)**
	임야의 면적 비율	0.277(1.00)	-0.022(-0.08)
	유역의 면적	3.618(10.78)**	4.708(14.64)**
	R ²	0.76	0.75
COD	Intercept	-16.626(-1218.4)**	-17.002(-9.43)**
	불투수 지표면의 비율	3.327(1715.83)**	2.205(5.65)**
	인구밀도	1.759(877.86)**	2.291(8.87)**
	하수처리량	-0.272(-1512.8)**	-0.222(-9.59)**
	임야의 면적 비율	0.6133(1529.8)**	0.386(2.93)*
	유역의 면적	2.131(3884.69)**	2.096(11.23)**
	R ²	0.99	0.84
TN	Intercept	-25.899(-6.39)**	-28.854(-7.59)**
	불투수 지표면의 비율	6.378(4.76)**	5.779(13.21)**
	인구밀도	0.187(0.25)	0.878(2.26)*
	하수처리량	-0.506(-9.81)**	-0.469(-11.02)**
	임야의 면적 비율	2.784(11.82)**	2.175(11.14)**
	유역의 면적	4.027(9.45)**	4.648(11.23)**
TP	Intercept	-1.219(-109.48)**	-1.352(-6.46)**
	불투수 지표면의 비율	0.619(398.12)**	0.526(12.39)**
	인구밀도	-0.068(-55.36)**	0.018(0.68)
	하수처리량	-0.026(-306.4)**	-0.033(-9.3)**
	임야의 면적 비율	-0.066(-92.71)**	-0.066(-3.78)*
	유역의 면적	0.311(612.24)**	0.315(10.29)**
SS	Intercept	-8.603(-2.80)*	-15.582(-1.9)
	불투수 지표면의 비율	14.621(34.26)**	3.853(3.44)*
	인구밀도	-4.340(-14.58)**	0.408(0.45)
	하수처리량	-0.786(-16.24)**	-0.561(-4.81)**
	임야의 면적 비율	6.578(19.04)**	7.063(7.29)**
	유역의 면적	2.418(19.11)**	1.107(1.94)
	R ²	0.95	0.59

주 : *는 5% 수준에서 유의성을 가짐, **는 1% 수준에서 유의성을 가짐

- 1) 지목을 이용하여 최대한으로 산정한 불투수 지표면 비율
- 2) 건폐율과 도로면적을 이용하여 최소한으로 산정한 불투수 지표면 비율

〈표 6〉 유역별 하천수질에 영향을 미치는 인자분석결과

		BOD	COD	TN	TP	SS
북 하 천	불투수지표면비율	x(x)	-*(*)	-*(*)	-*(*)	x(x)
	인구밀도	+**(+**)	x(x)	x(+*)	+**(+*)	x(x)
	하수처리량	x(x)	x(x)	x(x)	x(x)	x(x)
	임야면적비율	x(-*)	+*(+*)	+*(+*)	-*(+*)	x(x)
	유역면적	-*(x)	+*(+*)	+*(+*)	+**(-*)	x(x)
경 안 천	불투수지표면비율	+*(+*)	+**(+*)	+*(+*)	x(+*)	+*(-*)
	인구밀도	x(x)	x(x)	x(x)	+*(x)	x(+*)
	하수처리량	+**(-)	+**(-)	+*(+*)	+*(x)	-*(x)
	임야면적비율	x(+*)	+**(+*)	x(+*)	x(+*)	x(x)
	유역면적	x(x)	x(x)	x(-*)	+**(-)	x(x)
안 양 천	불투수지표면비율	+*(+*)	+*(+**)	+*(+*)	+*(+*)	+*(x)
	인구밀도	-*(*)	x(-*)	-*(*)	x(-*)	x(x)
	하수처리량	-**(-**)	-**(-**)	+*(+**)	x(x)	-**(-*)
	임야면적비율	-*(*)	-*(*)	+*(+*)	x(-*)	x(+*)
	유역면적	+*(+*)	+**(+**)	+*(+**)	+*(+*)	x(x)

주 : *는 5% 수준에서 유의성을 가짐, **는 1% 수준에서 유의성을 가짐

V. 결론

본 연구에서는 하천유역의 불투수 지표면의 증가가 수질 농도의 상승을 가져오는 인자임을 확인하였다. 본 연구에서 비교한 세 하천의 경우, 북하천 유역은 불투수 지표면 증가에 따른 수질농도 상승 경향을 보이지 않는 반면, 경안천 유역에서부터는 불투수 지표면의 증가에 따른 수질농도 상승 경향이 나타났다. 경안천 유역 정도의 불투수 지표면 비율수준에서는 불투수 지표면 증가에 의한 수질농도 상승 영향이 나타나는 것으로 보인다. 따라서 불투수면을 증가시키는 도시개발 관련 지방서 및 규정을 개선하는 등 제도적인 뒷받침이 필요하다.

하천의 수질관리에서 불투수 지표면을 수질 관리를 위한 지표로 사용하기 위해서는 수질

에 영향을 미치는 임계치에 대한 연구가 필요하다. 유역내에서 하천수질에 영향을 미치는 불투수 지표면의 비율 즉 임계치를 산정하기 위해서는 불투수 지표면의 비율, 분리상태, 집수유역의 크기 등에 따른 사례연구를 꾸준히 축적할 필요하다.

참고문헌

- 건설교통부 서울지방국토관리청, 2002, 『안양천 하천정비 기본계획(보완)』
- 경기도, 1999, 『경안천 수계 하천정비 기본계획』
- 경기도, 2003, 『북하천수계 하천정비 기본계획』
- 장수환, 2005, 『도시유역 수질영향인자로서의 불투수 지표면에 대한 고찰』, 서울대학교 도시계획박사학위논문.
- 한국환경정책·평가연구원, 2004, 『유역관리 효율화를 위한 불투수면 지표개발과 적용 II』
- Baltagi, Baldi H., 1996, *Econometric Analysis of Panel Data*, John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England.
- Bryant, J., 1995, "The Effects of Urbanization in Water Quality in Puget Sound Lowland Streams." Masters Thesis, University of Washington. Seattle, WA, p.128.
- Chang, G., J. Parrish and C. Souer, 1990, *The First Flush of Runoff and Its Effect on Control Structure Design*, Environment Resource Management Division, Department of Environment and Conservation Services, Austin, TX.
- CWP(Center for Watershed Protection), 1998, *Raid Watershed planning Handbook-A Comprehensive Guide for Managing Urban Watersheds*, Ellicott City, MD.
- CWP, 2003, *Impacts of Impervious Cover on Aquatic Systems*, Watershed Protection Research Monograph No.1
- Gujarati, G. N., 1988, *Basic Econometrics*. 2nd Edition, New York: MacGraw-Hill.
- Horner, R. R., D. B. Booth, A. A. Azous and C. W. May,

- 1996, "Watershed Determinants of Ecosystem Functioning," in Roesner, L. A. (ed.), *Effects of Watershed Development and Management on Aquatic Ecosystems*, Proceedings of the ASCE Conference, Snowbird, UT.
- Horner, R., C. May, E. Livingstone and J. Maxted, 1999, "Impervious Cover, Aquatic Community Health and Stormwater BMPs: Is There a Relationship?", *Processings of the Sixth Biennial Stormwater Research and Watershed Management Conference*, September, 14~17.
- Liu, Z., D. Weller, D. Correll and T. Jordan, 2000, "Effect of Land Cover and Geology on Stream Chemistry in Watershed of Chesapeake Bay", *Journal of American Water Resources Association* 36(6): 1349~1365.
- Schueler, T., 1987, *Controlling Urban Runoff-A Practical Manual for Planning and Designing Urban Best Management Practices*, Metropolitan Washington Council of Governments. Washington, DC, p.240.
- Schueler, T., 1994, "The Importance of Imperviousness", *Watershed Protection Techniques* Vol. 1, No. 3, Center for watershed Protection, 100~111.
- 원 고 접 수 일 : 2005년 6월 8일
1차심사완료일 : 2005년 7월 7일
최종원고채택일 : 2005년 7월 29일