

유역에서 토지이용과 오염원자료의 공간적 변화가 하천수질에 미치는 영향 분석

정광욱 · 이승재* · 이상우 · 한정윤

(건국대학교 환경과학과)

The Analysis of the Effect of Spatial Variability in Land Use and Pollutant Source on the Stream Water. Jung, Kwang-Wook, Seung-Jae Lee*, Sang-Woo Lee and Jung-yoon Han (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

For effective watershed management, we must understand the complex and dynamic relationships of land uses and water quality. Despite numerous studies investigated the relationships between water quality and land use, there are increasing concerns on the geographical variation and lack of spatial integrations in previous studies. We investigated the relationships between land use and water quality characteristics in the Hwa-Sung estuarine reservoir watershed in Korea, which has spatially integrated land uses. The spatial variations of these relationships were also examined using zonal analysis. Water quality parameter were correlated positively with residential and forest and negatively with paddy and upland especially during base flow in the near buffer zone. During storm flow, correlation between land use and water quality was less apparent. Population and livestock density was correlated well to water quality parameter than just number of population and livestock. Relationships across zones, distinguished by distances from streams, were inconsistent and erratic, suggesting that the relationships between remote land uses and water quality may be affected more significantly by sub-basin characteristics than by the land use itself. The watersheds studied are mainly non-urban and their land uses are similar to typical watershed of other estuarine reservoirs, therefore, the correlation developed in this study might be helpful to manage other watersheds of estuarine reservoir. This methodology could be applied to other areas where the watershed characteristics are not significantly different from the study area.

Key words : land use, land use planning, pollutant loading, water quality, watershed management, non point source

서 론

인구 증가, 산업발달 및 도시화의 결과로 유역에서 많은 양의 오염물질이 발생하여 수계로 유입되어 하천 및 호소의 수질문제를 일으키고 있다. 기존의 오염원 관리는 방류수 수질기준을 만족시키기 위한 점오염원 배출저감

에 중점을 두었으며 수질개선에 효과적이었다. 하지만 점오염원의 제어는 한계점에 다다랐고, 비점오염을 포함한 오염부하량의 양적 증가와 집중화로 인해 환경용량을 초과한 오염물질이 수계에 유입되어 호소나 하천의 부영양화가 심화되고 있다.

유역내의 효과적인 토지이용과 오염원관리는 건전한 하천생태를 유지하기 위해 반드시 필요하다. 특히 하구담

* Corresponding author: Tel: 02) 452-3931, Fax: 02) 452-3931, E-mail:dlsj@konkuk.ac.kr

수호와 같이 유역말단에 위치한 지형적인 특징으로 많은 양의 오염물질이 유입되는 호수는 토지이용과 오염원관리에 더 많은 노력이 필요하다. 우리나라 하구담수호 유역은 대부분 주거지역을 포함하는 전형적인 비도시 유역의 형태를 보이기 때문에 토지이용과 오염원의 분포 등 유역전반에 대한 이해가 필요하다. 유역말단 지역은 하수처리장 방류수, 정화조유출, 불명수의 유입, 축산, 그리고 농경지의 비점오염 등 오염물질의 유입으로 하천의 수질 문제를 발생시키고 있으며, 하구담수호로 유입되어 호수 수질에 악영향을 미친다(Donoso *et al.*, 1999).

본 연구의 대상지역인 화성유역은 수질이 양호한 상류부에서 비도시 시가지지역을 거치면서 급격하게 수질이 악화되는 특징을 갖고 있다. 이는 비도시 시가지지역의 정화조 유출이나 처리되지 않고 유입되는 불명수에 의해 하천수질이 오염된다고 판단할 수 있다(Jeon *et al.*, 2001). 이러한 수질의 악화는 유역 내의 토지이용과 깊은 관계가 있다는 연구가 보고되고 있다(Gburek and Folmar, 1999; Tong and Chen, 2002; Zalidis *et al.*, 2002). 유역내의 토지이용과 하천수질 간의 상관성 연구에서는 강우에 의한 표면 유출로 인해 오염물질을 하천으로 이동시키기 때문에 발생하는데, Lenat and Crawford (1994)와 Fisher *et al.* (2000)은 농경지역의 토지이용이 질소와 인 등의 영양물질의 농도에 영향을 준다고 보고하였으며, Tong and Chen (2002)은 주거지역과 상업지역, 그리고 농업지역의 토지이용이 질소와 인, 그리고 fecal coliform의 농도와 상관성이 있다고 발표하였다.

최근 우리나라는 오염총량제를 도입하여 전국에 걸쳐 인구, 축산, 산업, 토지, 양식, 매립장, 그리고 하수처리장 등 방대한 자료를 행정구역 단위별로 발생하는 배출부하량으로 산정하는데 이용하고 있으나, 계산과정이 복잡하고 많은 시간이 필요하기 때문에 신속한 유역 평가에는 아직 개선할 부분이 남아있는 상태이다. 이중에 비도시 유역은 오염물질의 배출구조가 비교적 단순하기 때문에 광범위하게 수집되고 있는 기본 오염원 자료를 이용하여 오염원에 대한 평가가 어느 정도 가능할 것으로 추정된다. 투수면적비율이 큰 비도시유역, 특히 시비가 이루어지는 농경지와 축산을 사육하는 축산지역이 많은 유역은 질소, 인, 그리고 유기물질 등이 토양에 축적되어 수계로 유입될 때 이들 사이에서는 일정한 상관성을 갖고 수계로 유입된다고 보고하고 있다(Hooda *et al.*, 2000).

유역에서 fecal coliform의 농도는 하천으로부터 도시 지역, 농업지역, 인구, 주택밀도, 그리고 정화조의 거리에 영향을 받기 때문에 거리에 비례한 오염부하가 감소량을 산정하여 계산하여 적용하였다(Kelsey *et al.*, 2004). 오염

원으로부터 발생하는 오염물질 총량을 발생부하량(generation load)이라 한다. 폐수처리장과 같은 환경기초시설을 통하여 삭감된 후 유역으로 배출되는 오염물질량을 배출부하량(discharge load)이라 하며, 배출부하량은 소형 지천을 통하여 하천수계까지 도달되는 과정에서 자정되어 다시 감소되는데 수계까지 도달된 부하량을 유달부하량(delivery ratio)으로 정의하여 현재 우리나라 오염총량관리제도에 이용하고 있다(국립환경과학원, 2002). 결국 하천으로 부더의 거리가 멀어질수록 희석, 침전, 그리고 탈착 등의 물리적 작용에 의하여 유역에서 발생하는 오염원의 양이 줄어들게 되어 주요 지천에 미치는 영향이 줄어들고, 하천에서의 거리가 가까운 곳에서 발생하는 배출부하량은 물리적 작용이 일어날 수 있는 거리가 제한되어 먼 곳에서 발생하는 오염부하량보다 많은 영향을 줄 것으로 추정할 수 있다.

본 연구에서는 화성유역의 3개 주요하천인 남양천, 자안천, 그리고 어은천을 하천거리별로 각각 4개의 buffer zone으로 구분하여, 하천에서부터 토지이용과 오염원의 거리에 따라 하천수질에 미치는 영향에 대해 상관분석하였다. 본 연구결과는 하천이나 호소를 관리하는 관리자와 설계자들이 토지이용과 기초오염원의 자료를 이용하여 신속하고 간단하게 유역을 평가하는 방법에 대해 소개하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지역

연구대상지역은 화성간척지구의 상류유역으로 동경 126° 45'~126° 55', 북위 37° 10'~37° 15'에 위치하고 있으며, 여러 개의 하천이 담수호로 유입되는 특징을 가지고 있다. 측정된 지점과 화성유역 전체의 토지이용도는 환경부에서 제공하는 1:25,000도를 이용하여 분석하였다(Fig. 1).

소유역의 구분은 USEPA에서 개발된 통합수질관리 프로그램인 BASINS에서 수치고도모델(Digital Elevation Map, DEM)과 하천도를 이용하여 3개의 주요하천인 남양천에 2개, 자안천에 3개, 그리고 어은천에 3개의 수질 측정지점을 중심으로 7개의 소유역으로 구분하였다(Fig. 1). DEM은 환경부에서 제공해 주는 자료를 사용하였고, BASINS에서의 DEM은 Automatic Delineation Utility를 이용한 소유역 분할에 이용하였다. 하천도는 수자원공사 하천정보시스템의 자료를 사용하였고, BASINS에서의 하천도는 Automatic Delineation Utility의 Burn in

option을 적용할 때 사용하였다. 토지이용도는 Landsat Thematic Mapper (TM; 30-m resolution)와 Indian Remote Sensing (IRS)-1C panchromatic images (5.8-m resolution)의 1999년 5월 21일과 2000년 2월 29일 자료를 이용하여 주거지역, 논, 밭, 산지, 그리고 기타(초지, 나지, 습지)로 분류하였다.

화성호는 남양천, 자안천, 그리고 어은천이 흘러들어 가는 주요 세 하천으로 남양천과 자안천은 저수지 북서쪽, 어은천은 남서쪽에 위치하고 있다. 남양천과 자안천의 면적은 각각 1,664 ha와 3,505 ha이며 서로 근접해있다. 어은천은 남양천, 자안천과의 거리가 떨어져있으며 면적은 1,798 ha이다. 남양천의 N2지역은 3.45%의 경사를 가지고 있으며 어은천의 E1지역은 경사가 완만한 농경지역이다.

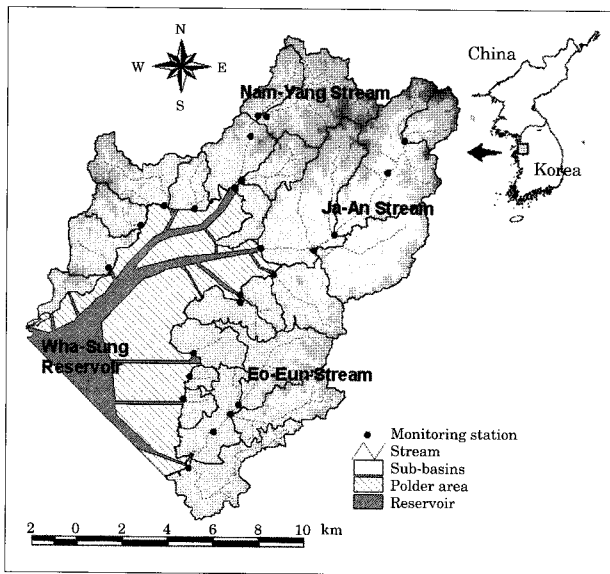


Fig. 1. Study area and monitoring stations.

2. 토지이용과 오염원현황

화성 지역의 토지이용 형태는 주거지가 9.3%, 논 37.0%, 밭 17.9%, 산림 29.1%인 전형적인 비도시 형태이다. 남양천의 N1과 N2의 산림면적은 각각 43.9%와 51.4%로 비율이 높은 반면 논 면적은 각각 25.8%와 14.8%로 낮은 비율을 나타내었으며, 자안천의 J2의 산림면적은 52.7%로 절반이 넘는 비율을 나타내었다(Table 1). 주거지역의 면적은 N1과 J2, J3의 비율이 낮게 나타났으며, N1지역은 인구수가 가장 많은 반면에 낮은 주거면적으로 높은 인구밀도를 보여주고 있다. 주거지역은 하천의 수질에 직접적인 영향을 미치는 주요 수질오염 인자이고 경사와 유역의 거리에 영향을 많이 받는다.

가축사육두수는 N2지역 가축의 사육두수(16,483마리)와 사육면적비율(13.42%)이 가장 많았고, J2지역의 사육면적비율(1.74%)은 ha당 사육하는 가축의 수가 가장 작았다. 이러한 가축사육시설은 지속적인 관리가 이루어지고 있지만 아직도 주요수질오염 인자로서 높은 농도의 오염물질을 배출하며, N2지역의 오염물질의 배출이 많음을 예측할 수 있다.

샘플은 평상시 N1, N2, J1, J2, J3, E1, 그리고 E2의 7개 지점에서 2003년 11월~2005년 12월동안 2주 간격으로 채취하였고, 강우시에는 N1, N2, J1, E1, 그리고 E2 5개 지점에서 폭우가 내리는 동안 1~4시간 간격으로 샘플을 채취하였다. 수질 분석항목은 온도, pH, EC, BOD₅, COD, turbidity, SS, TN, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, TP, PO₄-P, 그리고 the microbiological index (total coliforms, fecal coliforms, *E. coli*)이며 모두 Standard Methods (APHA, 1998)에 의해 분석되었다(Table 2).

3. 통계분석을 위한 buffer zone의 구축

GIS로 구축된 하천으로부터 거리에 따라 4개의 buffer

Table 1. Land uses classification in monitoring station for statistical analysis.

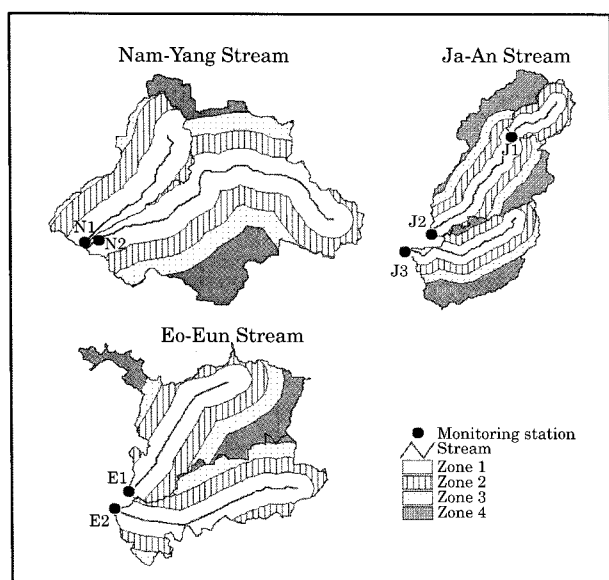
Sub-basins	Residential		Paddy		Upland		Forest		Other		Total area
	Area	%	Area	%	Area	%	Area	%	Area	%	
N1	40.7	9.3	112.7	25.8	90.1	20.7	191.5	43.9	1.3	0.3	436.2
N2	124.6	10.1	181.7	14.8	257	20.9	631.2	51.4	34.1	2.8	1,228.6
J1	7.4	1.7	175.6	41.0	17.6	4.1	225.6	52.7	1.9	0.4	428.1
J2	205.3	11.8	599.9	34.4	192.8	11.1	666.2	38.2	77.5	4.5	1,741.7
J3	85.9	6.4	535.3	40.1	253.8	19.0	344.4	25.8	116.7	8.7	1,336.1
E1	112.2	10.9	366.7	35.5	308.5	29.9	187.5	18.2	57.3	5.6	1,032.2
E2	146.1	19.1	281.2	36.7	112.5	14.7	226.3	29.5	0.1	0.0	766.1
Total	772.2	10.4	2,253.1	32.3	1,232.3	17.7	2,472.7	35.5	288.9	4.1	6,969.2

Area in ha.

Table 2. Population and livestock number per unit area (ha) in the sub-basins.

Sub-basins	Population		Dairy cattle		Beef cattle		Pig		Total livestock	
	PP	PP/A	DC	DC/A	BC	BC/A	Pig	Pig/A	TL	TL/A
N1	2,461	5.64	326	0.75	170	0.39	1,769	4.05	2,265	5.19
N2	7,039	5.73	2,293	1.87	1,155	0.94	13,035	10.61	16,483	13.42
J1	1,446	3.38	1,013	2.37	413	0.96	611	1.43	2,037	4.76
J2	3,975	2.28	1,161	0.67	473	0.27	5,159	2.96	6,793	3.90
J3	3,705	2.77	1,898	1.42	355	0.27	13,517	10.12	15,771	11.80
E1	2,652	2.57	1,701	1.65	458	0.44	2,445	2.37	4,604	4.46
E2	9,031	11.79	1,205	1.57	543	0.71	3,817	4.98	5,565	7.26

PP: Population; DC: Dairy cattle; BC: Beef cattle; A: area (ha)

**Fig. 2.** Buffer zoning of sub-basins in the study area.

zone을 구분하였으며, 3개의 buffer zone은 하천으로부터 각각 400 m의 간격이며, zone 4는 zone 3의 외부의 지역이다(Fig. 2).

수집된 자료는 통계용 프로그램인 SPSS (Ver. 12)를 이용하여 상관분석이 이루어졌다. 상관분석은 두 변수 사이의 관계의 정도를 측정하고 표현하려는 분석이다. 상관분석은 상관관계수(r)은 두 변수간의 상관관계의 강도를 나타내는 지표이며, -1에서 +1사이의 값을 갖는다. 음의 값의 경우는 둘 사이의 관계가 반대로 변하는 특성이 있음을 의미하며 양의 값은 비례하여 증가하는 경향을 나타낸다. r -값이 유의수준 1% 내에 있으면 높은 상관관계가 있다는 것을 의미하고, 유의수준 5% 내에 있으면 보통의 상관관계를 인정하며, 5%보다 클 경우는 상관관계가 성립되지 않는다고 판단하였다(Ott, 1988). 또한 토지이용 백분율과 가축사육 비율은 평상시와 홍수시기에 수질특

성과 관련이 있으며, *E. coli* 테이터는 10~150,000 MPN (most probable number) 100 mL⁻¹의 범위로 측정값의 차이가 매우 크기 때문에 log화하여 상관분석 하였다.

결과 및 고찰

1. 화성유역의 수질특성

일반적으로 강우시 하천수의 농도는 강우유출에 의해 많은 양의 비점원오염의 유입으로 하천수질이 악화된다. 하지만 화성유역의 N1, N2, 그리고 E3 지점은 평상시 밀집된 주거지역과 상업지역의 생활하수 유입으로 인해 수질이 악화된 지역으로 강우시 초기유출 후에는 오히려 하천수질이 개선되는 특징을 갖고 있다(Jung *et al.*, 2006). 하지만 다른 측정지점의 경우 평상시보다 강우시의 수질 농도가 높은 수준 이었다.

본 연구지역의 강우시 수질이 평상시 수질보다 COD 약 1.5배, SS 약 3배, TN 약 2배, Total coliform 약 6배, Fecal coliform 약 6배, 그리고 *E. coli* 약 5배 높은 것을 알 수 있으며, BOD₅, NO₃-N, 그리고 TP는 유사한 수준 이었고, NH₃-N과 PO₄-P은 그 값이 줄어든 것으로 나타났다. 이를 통해 강우시에 오염원의 농도가 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 오염원의 유입경로를 파악하고 관리방안을 찾는 일이 시급한 실정이다(Table 3).

2. Buffer zone별 토지이용과 수질 상관성 평가

Table 4에서는 zone별 토지이용과 수질측정지점의 수질자료간의 상관성을 Pearson 상관관계수로 표현하였고, 굵은 글씨는 1%의 유의수준에서, 기울임 글씨는 5%의 유의수준에서 상관성을 갖는다. 주거지역중 zone 1에서는 평수기에 NO₃-N과 SS를 제외한 모든 수질항목이 0.1%의 유의수준에서 상관성을 나타내었는데 이는 하천 주변

Table 3. Water quality characteristics of the study area.

	Water quality characteristics	Min.	Max.	Mean	Std.
Baseflow period	BOD ₅ (mgL ⁻¹)	0.2	116.8	15.3	22.7
	COD (mgL ⁻¹)	2.1	119.6	29.7	23.9
	SS (mgL ⁻¹)	0.5	102.0	25.1	19.9
	TN (mgL ⁻¹)	1.7	67.7	12.0	10.3
	NH ₄ -N (mgL ⁻¹)	0.1	23.9	3.7	4.5
	NO ₃ -N (mgL ⁻¹)	0.1	8.5	2.3	1.6
	TP (mgL ⁻¹)	0.1	5.3	1.2	1.3
	PO ₄ -P (mgL ⁻¹)	0.1	15.5	0.4	1.3
	Total coliform (MPN 100 mL ⁻¹)	3.5	160,000	22,191	33,602
	Fecal coliform (MPN 100 mL ⁻¹)	4.5	160,000	16,635	26,746
<i>E. coli</i> (MPN 100 mL ⁻¹)	4.8	144,000	5,561	14,614	
Stormflow period	BOD ₅ (mgL ⁻¹)	1.3	47.9	13.4	10.8
	COD (mgL ⁻¹)	4.3	160.0	43.9	27.1
	SS (mgL ⁻¹)	5	381.3	69.6	67.2
	TN (mgL ⁻¹)	1.4	98.0	21.4	12.5
	NH ₄ -N (mgL ⁻¹)	0.1	19.0	1.9	3.4
	NO ₃ -N (mgL ⁻¹)	0.4	10.5	3.0	2.1
	TP (mgL ⁻¹)	0.1	6.2	1.2	1.0
	PO ₄ -P (mgL ⁻¹)	0.1	0.7	0.1	0.1
	Total coliform (MPN 100 mL ⁻¹)	2,300	1,900,000	136,736	314,623
	Fecal coliform (MPN 100 mL ⁻¹)	1,150	1,600,000	92,775	218,547
<i>E. coli</i> (MPN 100 mL ⁻¹)	500	500,000	27,000	66,995	

의 주거지역이 하천수질에 좋지 않은 영향을 미친다는 것을 판단할 수 있다.

하천에서의 무기질소는 산화상태에 따라서 질산염(NO₃⁻), 아질산염(NO₂⁻), 암모늄염(NH₄⁺)과 질소분자(N₂) 형태로 존재한다. 질소의 형태별 변화는 오염원의 유입시기에 따라 변하기 때문에 질소형태를 통해 점오염이나 비점오염의 유입에 대한 평가를 가능하게 해준다. 일반적으로 NH₄는 자연계에서는 토양이나 수체의 질산화 유기물이나 무기물로부터 발생하지만 그 양은 작으며, 산업, 가정하수, 그리고 농지배수 등의 오염원 유입에 의해서 발생하고 자정작용에 의해 질산화 과정을 거치면 질산염이나 아질산염으로 변화한다. 따라서 zone 1에서 주거지역과 NO₃-N 상관성이 낮은 이유는 하천으로 직접 유입되는 질소의 형태가 NH₄-N이고 하천의 질산화 과정이 발생하기에는 오염원의 거리가 가깝기 때문인 것으로 판단된다.

Zone 2의 경우 평수기에는 TN만이 0.05%의 유의수준에서 음의 상관성을 나타냈는데, zone 1보다 상관성이 약화되었다. 이는 하천으로부터 거리가 멀어짐에 따라 하천 수질에 미치는 영향이 작아진다고 판단할 수 있다. Zone 3와 zone 4의 경우에는 음의 상관관계를 가지게 되는데 이는 하천으로부터 멀리 떨어진 곳의 주거지역이 하천수질에 긍정적인 영향을 미치고 있다기보다 하천으

로부터 멀어지면서 주거지가 줄어들고 산림이 대부분을 차지하고 있기 때문에 주거지역의 영향이 크게 나타나지 않는 것으로 해석된다. 그리고 강우기는 평수기보다 zone 1과 zone 2의 상관성이 높게 나타났는데, 이는 강우가 지속되면서 주거지의 오염물질이 씻겨내려 오면서 수질에 악영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 하지만 zone 1의 경우 평수시에 비해 상관계수가 낮게 평가되었는데, 이는 많은 양의 강우로 인해 하천수질이 희석되어 나타난 결과라고 판단된다. Zone 2는 평수시와는 다르게 양의 상관성을 나타내었으며 BOD₅($r=0.39, p=0.01$), TN($r=0.17, p=0.05$), NH₄-N($r=0.18, p=0.05$), NO₃-N($r=0.42, p=0.01$), 그리고 PO₄-P($r=0.37, p=0.01$)에서 높은 상관성을 나타내었다. 강우가 발생할 경우에는 유출에 의해 하천 수질이 영향을 받는데 상대적으로 먼 지역의 주거지역 오염물질에도 영향을 받는다고 평가할 수 있다. 따라서 토지이용의 관리를 통해 하천수질을 보호하기 위해서는 하천 주변으로 주거지역을 위치시키기 보다는 하천에서 거리를 두고 계획하는 것이 수질관리에 유리하다는 결론을 내릴 수 있다.

논은 많은 연구자들에 의해 오염물질을 배출하는 오염원으로 생각하고 있지만 평수기 zone 1의 SS를 제외한 모든 항목에서 음의 상관관계를 나타내었으며, *E. coli*($r=-0.20, p=0.05$)를 제외하고는 모두 1%의 유의수준에

Table 4. Correlation analysis between land use of buffer zone and water quality.

Water quality	Base flow				Storm flow			
	Resi.	Paddy	Upland	Forest	Resi.	Paddy	Upland	Forest
Zone 1 (0~400 m)								
BOD ₅	0.45	-0.38	-0.15	-0.11	0.48	-0.33	<i>0.26</i>	-0.31
COD	0.35	-0.23	-0.06	-0.23	0.13	0.01	0.10	-0.22
SS	0.11	0.09	0.10	-0.38	<i>-0.09</i>	<i>0.18</i>	<i>0.04</i>	-0.11
TN	0.53	-0.43	-0.31	-0.10	0.13	-0.06	<i>0.19</i>	-0.12
NH ₄ -N	0.60	-0.52	-0.27	-0.10	<i>0.20</i>	<i>-0.20</i>	0.05	-0.04
NO ₃ -N	0.09	-0.34	-0.21	0.51	0.29	-0.56	<i>-0.17</i>	0.34
TP	0.36	-0.32	-0.23	0.00	<i>0.17</i>	-0.12	-0.03	-0.09
PO ₄ -P	0.38	-0.38	-0.22	0.04	0.24	-0.42	-0.06	0.23
Total coliform	0.43	-0.38	-0.21	-0.07	0.13	-0.14	-0.06	-0.01
Fecal coliform	0.36	-0.29	<i>-0.20</i>	-0.10	0.10	-0.10	-0.08	-0.01
<i>E. coli</i>	0.23	<i>-0.20</i>	-0.12	-0.06	0.08	-0.09	-0.09	0.01
Zone 2 (400~800 m)								
BOD ₅	-0.11	0.10	0.04	-0.06	0.39	-0.04	0.33	-0.11
COD	-0.06	<i>0.17</i>	0.01	<i>-0.18</i>	0.04	0.15	0.01	<i>-0.19</i>
SS	-0.05	0.33	0.05	-0.41	-0.13	<i>0.19</i>	-0.12	<i>-0.17</i>
TN	<i>-0.19</i>	0.14	<i>-0.17</i>	-0.04	<i>0.17</i>	-0.02	<i>0.19</i>	-0.05
NH ₄ -N	-0.12	0.07	-0.04	0.00	<i>0.18</i>	-0.09	0.16	0.05
NO ₃ -N	0.10	-0.54	0.06	0.62	0.42	-0.61	0.35	0.55
TP	-0.15	0.07	-0.10	0.02	0.10	-0.01	0.02	-0.02
PO ₄ -P	0.00	-0.12	-0.03	<i>0.17</i>	0.37	-0.48	0.32	0.42
Total coliform	-0.09	0.06	-0.04	0.00	0.05	-0.04	0.02	0.03
Fecal coliform	-0.10	0.10	-0.09	-0.05	0.02	-0.01	-0.02	0.02
<i>E. coli</i>	0.04	-0.02	-0.02	0.03	0.01	-0.02	-0.03	0.03
Zone 3 (800~1,200 m)								
BOD ₅	-0.33	0.04	-0.12	0.09	0.11	0.08	0.29	-0.13
COD	<i>-0.19</i>	0.16	-0.04	-0.08	0.13	<i>0.18</i>	0.05	<i>-0.19</i>
SS	-0.08	0.38	-0.14	-0.32	0.09	<i>0.18</i>	-0.08	<i>-0.16</i>
TN	-0.31	0.06	0.00	0.04	0.05	0.05	0.13	-0.08
NH ₄ -N	-0.34	0.00	0.00	0.11	-0.05	-0.07	0.09	0.05
NO ₃ -N	-0.01	-0.56	0.33	0.49	-0.11	-0.55	0.37	0.46
TP	-0.27	-0.01	-0.08	0.11	0.16	0.02	<i>0.16</i>	-0.06
PO ₄ -P	-0.12	-0.14	<i>0.19</i>	0.15	-0.04	-0.40	0.34	0.32
Total coliform	-0.25	-0.01	-0.04	0.10	-0.07	-0.06	0.00	0.06
Fecal coliform	<i>-0.18</i>	0.03	-0.04	0.04	-0.04	-0.04	0.00	0.04
<i>E. coli</i>	-0.01	-0.04	0.06	0.04	-0.01	-0.04	0.01	0.04
Zone 4 (1,200~above)								
BOD ₅	-0.26	0.46	-0.02	-0.40	0.28	<i>0.25</i>	0.37	-0.29
COD	<i>-0.16</i>	0.40	0.08	-0.38	0.05	0.22	<i>0.20</i>	-0.23
SS	-0.03	0.49	0.21	-0.53	-0.04	<i>0.18</i>	0.10	<i>-0.17</i>
TN	-0.28	0.32	-0.15	-0.24	0.14	0.07	0.14	-0.09
NH ₄ -N	-0.27	0.36	-0.13	-0.29	0.08	0.00	0.05	-0.01
NO ₃ -N	0.06	-0.64	-0.31	0.68	0.23	-0.60	-0.30	0.55
TP	-0.21	<i>0.20</i>	-0.13	-0.12	0.10	0.06	0.10	-0.08
PO ₄ -P	-0.09	-0.01	<i>-0.19</i>	0.05	0.24	-0.44	<i>-0.18</i>	0.39
Total coliform	<i>-0.18</i>	0.28	-0.13	-0.22	-0.03	0.01	-0.02	0.00
Fecal coliform	-0.15	0.26	-0.11	<i>-0.21</i>	-0.03	0.02	-0.01	-0.01
<i>E. coli</i>	0.05	0.06	-0.10	-0.06	-0.02	0.00	-0.02	0.00

Bold values are statistically significant at $p < 0.01$, italics at $p < 0.05$

Table 5. Correlation analysis between major pollutant of each buffer zone and water quality.

Water quality	Base flow				Storm flow			
	PP/A	DC/A	BC/A	Pig/A	PP/A	DC/A	BC/A	Pig/A
Zone 1 (0~400 m)								
BOD ₅	0.42	0.50	0.64	0.53	0.32	0.38	0.47	0.38
COD	0.45	0.30	0.46	0.33	<i>0.19</i>	0.01	0.06	0.00
SS	<i>0.19</i>	<i>0.21</i>	<i>0.18</i>	0.11	0.03	-0.14	-0.15	-0.17
TN	0.59	0.23	0.51	0.33	0.02	<i>0.17</i>	0.13	0.13
NH ₄ -N	0.57	0.44	0.69	0.53	0.10	<i>0.20</i>	0.24	0.22
NO ₃ -N	-0.25	0.01	0.00	0.12	-0.05	0.33	0.38	0.45
TP	0.36	0.24	0.41	0.31	<i>0.19</i>	0.00	0.09	0.04
PO ₄ -P	0.26	0.15	0.31	0.25	-0.07	0.28	0.29	0.35
Total coliform	0.39	0.33	0.50	0.39	0.13	0.09	0.16	0.12
Fecal coliform	0.37	<i>0.19</i>	0.37	0.25	0.13	0.03	0.11	0.07
<i>E. coli</i>	0.16	0.09	<i>0.18</i>	0.14	0.11	0.00	0.07	0.04
Zone 2 (400~800 m)								
BOD ₅	0.43	0.49	0.63	0.52	0.35	0.38	0.50	0.38
COD	0.45	0.30	0.47	0.32	0.21	0.02	0.10	0.00
SS	0.24	0.22	0.25	0.11	0.04	-0.13	-0.12	-0.17
TN	0.58	0.23	0.52	0.31	0.06	<i>0.18</i>	<i>0.16</i>	0.14
NH ₄ -N	0.56	0.43	0.67	0.51	0.10	<i>0.20</i>	0.23	0.22
NO ₃ -N	-0.27	-0.02	-0.08	0.12	-0.10	0.31	0.29	0.45
TP	0.35	0.23	0.41	0.29	<i>0.18</i>	0.00	0.10	0.04
PO ₄ -P	0.25	0.14	0.28	0.24	-0.09	0.27	0.24	0.35
Total coliform	0.39	0.31	0.48	0.38	0.11	0.08	0.14	0.12
Fecal coliform	0.36	<i>0.18</i>	0.36	0.24	0.11	0.03	0.09	0.07
<i>E. coli</i>	0.15	0.08	0.15	0.14	0.09	0.00	0.06	0.04
Zone 3 (800~1,200 m)								
BOD ₅	0.42	<i>0.18</i>	0.34	0.15	0.39	<i>0.26</i>	0.40	0.30
COD	0.41	0.09	0.29	0.09	<i>0.16</i>	-0.02	0.11	-0.04
SS	0.12	0.01	0.10	-0.10	-0.03	-0.12	-0.07	-0.18
TN	0.59	0.08	0.42	0.04	0.07	<i>0.17</i>	0.15	0.11
NH ₄ -N	0.59	<i>0.18</i>	0.45	0.14	0.14	0.11	0.14	<i>0.17</i>
NO ₃ -N	-0.05	0.25	0.07	0.24	0.16	0.41	0.28	0.57
TP	0.36	0.08	0.28	0.05	0.21	0.04	<i>0.17</i>	0.08
PO ₄ -P	0.34	0.14	0.26	0.11	0.12	0.38	0.26	0.46
Total coliform	0.39	0.09	0.28	0.07	0.12	-0.02	0.04	0.07
Fecal coliform	0.35	0.00	0.21	-0.01	0.11	-0.04	0.03	0.04
<i>E. coli</i>	0.16	-0.03	0.05	-0.01	0.10	-0.04	0.03	0.03
Zone 4 (1,200~above)								
BOD ₅	0.34	-0.21	<i>0.21</i>	-0.24	0.32	0.11	0.34	0.12
COD	0.28	-0.15	<i>0.17</i>	-0.13	0.09	-0.08	0.04	-0.09
SS	-0.02	-0.26	-0.09	-0.22	-0.05	-0.14	-0.10	-0.16
TN	0.41	-0.11	0.31	-0.21	0.04	0.11	0.11	0.07
NH ₄ -N	0.46	-0.12	0.34	-0.21	0.11	0.07	0.12	0.09
NO ₃ -N	0.09	0.48	0.25	0.29	0.25	0.57	0.44	0.64
TP	0.25	-0.09	<i>0.18</i>	-0.16	<i>0.16</i>	0.05	0.15	0.07
PO ₄ -P	0.32	0.10	0.30	-0.03	<i>0.19</i>	0.49	0.38	0.52
Total coliform	0.30	-0.17	<i>0.18</i>	-0.23	0.07	-0.05	0.01	-0.01
Fecal coliform	0.24	-0.20	0.12	-0.23	0.07	-0.06	0.01	-0.02
<i>E. coli</i>	0.10	-0.13	0.01	-0.14	0.06	-0.03	0.02	0.00

PP: Population; DC: Dairy cattle; BC: Beef cattle; A: area (ha)

Bold values are statistically significant at $p < 0.01$, italics at $p < 0.05$

서 음의 상관성을 보였다. 본 연구결과에서는 하천 주변에 논이 위치하는 것이 하천수질에 긍정적인 영향을 미치고 있다고 판단할 수 있다. Yoon *et al.* (2003)에 의하면 물관리가 논에 배출부하량에 큰 영향을 주며 비료를 투입하는 일정시기에 배출을 억제하면 논에서 발생하는 오염부하량을 줄일 수 있다고 보고하였고, Jung *et al.* (2006)은 토지이용과 하천수질과의 상관분석결과 논은 하천수질에 좋은 영향을 미치는 것으로 평가하였다. 강우시에는 음의 상관관계수가 작아지는 형태를 나타냈지만, COD와 SS를 제외하고는 BOD_5 ($r=-0.33, p=0.01$), NH_4-N ($r=-0.20, p=0.05$), NO_3-N ($r=-0.56, p=0.01$), 그리고 PO_4-P ($r=-0.42, p=0.01$)로 모두 음의 상관성을 나타내었다. zone 2에서도 유사한 상관관계를 나타내었는데 zone 1과 비교하면 NO_3-N 과 PO_4-P 를 제외하고는 상관성이 약해졌으며, zone 3과 zone 4는 음과 양의 상관관계가 수질항목별로 다양하게 나타났다.

밭은 zone 1에서 음의 상관관계를 갖는 항목들이 많아 수질에 악영향을 미친다고 할 수 없었다. 밭은 강우에 직접 타격을 받기 때문에, 경운으로 토양 결집력이 약화된 토양이 쉽게 유실되어 하천으로 유입되어 하천수질에 악영향을 준다(Choi *et al.*, 1995). 하지만 화성유역은 경사도가 낮은 지역에 대부분의 밭이 위치하고 있으며, 하천 주변으로는 대부분 논이 발달하였기 때문에 밭에서 발생된 토양유실에 의한 하천오염이 NO_3-N 과 PO_4-P 를 제외한 모든 수질항목에서 그 영향이 작았던 것으로 판단된다.

Zone 1의 산림의 경우 모두 음의 상관관계로 ($p>0.01$) 하천 수질에 긍정적인 효과를 나타낸다고 평가할 수 있으며, 강우기에는 NO_3-N 과 PO_4-P 가 양의 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Jung *et al.* (2006)이 보고한바 있는 산림의 토지이용이 하천수질과의 관계에 대한 상관 분석 결과와 상반되는 결론으로서, 전 연구에서는 유역단위로 적용된 연구결과이기 때문에 유역과 하천수질 간의 상관성을 평가 할 경우 전체 유역의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 토지이용으로만 평가하기 보다는 하천으로부터 거리별로 평가하는 것이 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3. Buffer zone별 오염원과 수질 상관성 평가

평상시 zone 1에서 단위면적당 인구수와 수질측정지점의 수질자료를 상관관계 분석한 결과 NO_3-N 과 *E. coli*를 제외한 나머지 항목이 1%와 5% 유의수준에서 양의 상관성을 갖는 것으로 나타났고, zone 2에서도 NO_3-N 과 *E.*

*coli*를 제외한 나머지 항목이 모두 1% 유의수준에서 양의 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 하지만 zone 3과 zone 4로 갈수록 상관관계수의 크기가 줄어들거나 상관성을 가지지 않게 된다. 결국 단위 면적당 인구수와 수질 간의 상관관계는 하천으로부터의 거리에 반비례하는 경향을 나타내며 토지이용의 주거지역 결과와 유사한 결과이다. 강우기 zone 1에서 BOD_5 는 1%의 유의수준의 양의 상관관계, COD와 TP가 5%의 유의수준에서의 양의 상관관계를 가질 뿐 나머지는 상관성이 매우 낮게 나타났는데 이는 zone 2~4에서도 유사한 경향을 나타냈다.

강우시에는 오염물질이 하천으로 유입되고, 그와 함께 많은 유량이 함께 유입되는데 평상시 오염도가 높은 하천에서는 오히려 희석되는 효과를 나타내고, 오염도가 높지 않은 하천에서는 평상시의 농도보다 높아지는 경향을 나타낼 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 강우시에 수질과의 상관성이 낮아진 것으로 판단되지만, 하천주변의 주거지역이 많이 있는 경우 평상시에 오염이 심화된 하천이기 때문에 강우시 상관성이 약화되었다고 판단할 수 있다. 따라서 본 연구유역과 같이 생활하수에 의해서 많은 양의 오염물질이 배출되어 하천수질이 악화된 경우에는 강우에 의하여 하천수질이 악화되기 보다는 희석되어 하천수질이 개선되는 현상이 발생할 수 있다.

가축(젓소, 한우, 돼지)이 단위면적당 사육두수로 평가한 결과, 평수기에 zone 1에서 zone 4로 거리가 멀어질수록 상관성이 낮아지는 경향을 뚜렷하게 나타냈다. 젓소와 돼지의 경우에는 zone 4에서의 수질과 단위면적당 가축두수 간에 음의 상관관계수를 보였는데 이는 하천으로부터의 거리가 먼 지역에서의 사육이 하천수질에 긍정적인 영향을 미친다고 판단하기 보다는 하천으로부터 먼 거리의 사육지역은 하천수질에 영향을 덜 준다고 판단하는 것이 보다 합리적이다. 강우시에도 평수기와 유사한 경향을 나타내었지만, 강우시 강우에 의한 희석효과로 인해 평수기보다 상관성이 낮게 나타났다. 이러한 결과를 통해 단위 면적당 가축의 사육의 두수와 하천과 수질과의 상관관계는 하천으로부터의 거리가 멀어질수록 낮게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 전형적인 비도시 유역인 화성유역을 대상으로 하천의 단위면적당 토지이용과 주요 오염원이 수질에 미치는 영향을 400 m 간격의 buffer zone으로 나누어 분석을 실시하였다.

토지이용과 주요 오염원이 하천수질에 미치는 영향을 상관분석한 결과 주거지에서는 zone 1에서 높은 양의 상관성에서 점차 감소하여 zone 3와 zone 4에서는 음의 상관계수를 가지게 된다. 그러므로 하천에 가까운 곳에 위치한 주거지역에 대해서는 보다 철저한 물관리가 필요할 것으로 판단된다. 논과 밭은 zone 1에서 음의 상관계수를 나타내었는데 하천주변에 농경지가 위치할 경우 하천수질에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 산림은 음의 상관성이 부분적으로 높아지는 경향을 나타내는데, 이는 산림이 오염물질을 배출하는 주된 오염원은 아닌 것으로 판단된다.

특히, 논은 많은 연구자들로부터 오염원의 하나로 평가 받고 있지만, 본 연구에서는 하천수질에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 평가되었는데, 이는 수질이 좋은 지역에서는 오염원으로 작용할 수 있지만 하천수질관리를 위해서는 수변구역으로써 논을 이용하는 방안도 검토 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

주요 오염원이 하천수질에 미치는 영향을 분석한 결과, 단위면적당 인구의 경우 양의 상관계수가 하천에서 멀어질수록 감소하였으며, 하천으로 가까울수록 높은 상관성을 나타내어 생활하수의 유입이 하천수질 악화의 직접적인 원인으로 판단되었다. 인구가 밀집한 지역은 정화조의 정비, 하수처리장의 신설, 그리고 하수관거의 정비 등의 관리계획이 필요하다.

단위면적당 가축사육두수의 경우 수질항목과 양의 상관성을 보였는데, 하천으로부터의 거리가 멀어질수록 상관성이 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 결국 건강한 하천을 유지하기 위해서는 하천주변의 가축사육장의 관리도 중요하지만 가축 사육장의 위치를 고려하여 적용하는 방안도 검토 할 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

강우시의 결과는 대체적으로 평수기보다 낮은 상관성을 나타내었다. 이는 강우시 하천에 유입되는 오염원의 양이 적은 것이 아니라 많은 양의 오염원이 유입되에도 불구하고 동시에 많은 유량이 유입되는 과정에서 그 농도가 희석되어 낮게 나타난 것이다. 이러한 결과는 실제로 더 많은 양의 오염원이 강우시에 하천으로 유입된다는 점을 시사하며, 쾌적한 하천수변공간을 조성하기 위해서는 유역관리를 통한 점원과 비점오염원의 관리와 합리적인 토지이용을 통해 달성 할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발 사업의 “BASINS 및

WASP을 이용한 화성유역과 호소의 통합수질예측시스템 개발”의 지원에 의한 것임

참 고 문 헌

- 국립환경과학원. 2002. 수계오염총량관리기술지침.
- APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th edition.) American Public Health Association, Washington, D.C., USA.
- Choi, J.D., Y.H. Choi and K.S. Kim. 1995. Characteristics of runoff and groundwater quality from a pasture and field. *Korean Water Resour. Assoc.* **28**(3): 175-186.
- Donoso, G., J. Cancino and A. Magri. 1999. Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the central valley of Chile. *Water Sci. Technol.* **39**(3): 49-60.
- Fisher, D.S., J.L. Steiner, D.M. Endale, J.A. Stuedemann, H.H. Schomberg, A.J. Franzluebbbers and S.R. Wilkinson. 2000. The relationship of land use practices to surface water quality in the Upper Oconee Watershed of Georgia. *Forest Ecol. Manage.* **128**: 39-48.
- Gburek, W.J. and G.J. Folmar. 1999. Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: A baseflow survey. *J. Hydrol.* **214**: 1-18.
- Hooda, P.S., A.C. Edwards, H.A. Anderson and A. Miller. 2000. A review of water quality concerns in livestock farming areas. *Sci. Total Environ.* **250**: 143-167.
- Jeon, J.H., C.G. Yoon and J.H. Ham. 2001. Analysis of relationships among the pollutant concentrations in non-urban areas. *Korean J. Limnol.* **34**(3): 215-222. (in Korean)
- Jung, K.W., C.G. Yoon, J.H. Jang and H.C. Kim. 2006. Analysis of land use and pollutant source effect on water quality characteristics of the watershed. *Korean J. Limnol.* **39**(1): 41-51.
- Kelsey, H., D.E. Porter, G. Scott, M. Neet and D. White. 2004. Using geographic information systems and regression analysis to evaluate relationships between land use and fecal coliform bacterial pollution. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **298**: 197-209.
- Lenat, D.R. and J.K. Crawford. 1994. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont Streams. *Hydrobiologia* **294**(3): 185-200.
- Ott, L. 1988. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. Duxbury Press, Boston.
- Tong, S.T.Y. and W. Chen. 2002. Modeling the relationship between land and surface water quality. *J. Environ. Manage.* **66**(4): 377-393.

Yoon, C.G., J.H. Ham and J.H. Jean. 2003. Mass balance analysis in Korea paddy rice culture. *Paddy and Water Environment* 1(2): 99-106.

Zalidis, G., S. Stamatidis, W. Takavakoglou, K. Eskridge and N. Misopolinos. 2002. Impacts of agricultural prac-

tices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88(2): 137-146.

(Manuscript received 16 August 2006,
Revision accepted 10 December 2006)