

공간성, 호소유형 및 형태복잡도 지수를 이용한 토지이용과 호소수질의 관계 연구

이상우 · 황순진

건국대학교 환경과학과

Investigation on the Relationship between Land Use and Water Quality with Spatial Dimension, Reservoir Type and Shape Complexity

Lee, Sang-Woo · Hwang, Soon-Jin

Dept. of Environmental Science, Konkuk University

ABSTRACT

Land use types within a watershed closely are related with the water quality characteristics of receiving water bodies. Despite of a numerous studies suggesting a strong relationship between water quality and land use, there have been increasing concerns about the geographical variation and a lack of spatial integration in that relationship, which are essential to implementing these findings into land use planning and management. In the meantime, edges mediate the material flux between adjacent systems. This mediating effect of edges is strongly related to the complexity of their shapes. Land use activities within a watershed have a direct impact on the water quality of adjacent aquatic systems, and hydrological processes carry residuals from watershed into adjacent aquatic ecosystems through the edges. Therefore, the geometry of reservoirs theoretically affects the relationship between land uses in the watershed and the quality of receiving bodies of water. In this light, this study integrates the geo-spatial dimensions of land uses in the watershed using GIS and landscape indices in order to explore the relationship between land uses and water quality. Water quality characteristics, land uses and geometry of 133 randomly sampled reservoirs were correlated, based on buffer zones and types of reservoirs. The findings showed that land uses, particularly urban land uses, significantly affect water quality characteristics including BOD, COD, TN and TP, and geometry of reservoirs reduces the concentration of pollutant and nutrients in reservoirs. One of results indicates that the relationship between land use and water quality and effects of spatial dimension may vary with types of reservoirs and

pollutants. These results suggest that lakeshore areas are important, particularly for TN reduction and call for a caution to land use activities nearby shoreline areas for sustaining better water quality.

Key Words: Geometry of Reservoir, Landscape Indices, Watershed Management, GIS

I. 서론

강수의 표면 유출은 유역 내 토지이용을 비롯한 다양한 인간활동의 잔유물(residuals)을 호소로 이동시켜 호소 내의 생화학적 측면에 영향을 미친다. 따라서 호소 생태계의 건강성 유지를 위하여 유역 내 인간활동에 대한 이해와 관리가 필수적이다. 유역 내 인간활동 잔유물은 많은 경우 비점오염원 형태로 발생하여 표면유출을 통하여 호소에 유입된다. 최지홍 등(1999)에 의하면, 이러한 비점오염원은 간헐성, 배출지점의 확산, 오염원 및 부하의 다양성 때문에 점오염원보다 관리가 어려우며, 점오염원에 비하여 비점오염의 수질에 대한 영향은 강수시 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand: COD)의 경우 2.5배에 이른다. 비점오염의 관리에 대한 중요성을 인식하여 최근 범정부적으로 비점오염 관리를 위한 다각적인 방법을 모색하고 있으나, 유역 내에서 발생하는 인간활동과 주변 호소의 수질과의 관계에 대한 이해는 아직 크게 부족한 형편이다. 비점오염과 관련하여 많은 국내의 연구들이 토지이용과 인접 호소의 수질과의 관계를 규명하는 데에 초점을 두어 왔으나 이러한 결과들을 조경계획, 토지이용계획 및 토지관리에 직접 응용하기엔 많은 무리가 있는 실정이다. Baker(2003)가 지적한 바와 같이, 기존 연구들이 공간적 특성에 대한 고려 부족 때문이다. 일반적으로 호소의 수질은 유역 내 토지이용의 특성(Omernik *et al.*, 1981; Liu *et al.*, 2000; Tong and Chen, 2002), 호소의 규모 혹은 형태적인 특성(EPA, 1974), 강우강도 및 강수량(Cole, 1979) 등과 깊은 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이처럼 모든 조경계획이나 토지이용계획은 필연적으로 인접 호소나 하천의 수질에 직·간접적인 영향을 미치는 데에 반하여 이러한 관계에 대한 이해는 아직 크게 미흡하다.

한편 경관생태학 측면에서 유역과 호소는 두 개의

다른 생태계, 그리고 두 생태계 사이에 존재하는 가장 자리의 조합으로 이해할 수 있다. 가장자리(edges)는 전이생태계(transit ecosystem)로서 인접하는 두 계(systems)간의 에너지의 흐름을 조절하는 중요한 인자로 알려져 있다(Forman, 1995). 이러한 가장자리의 에너지 및 물질의 흐름 조절효과는 가장자리의 투과성과 흐름의 속성에 의해 결정된다(Wiens, 1992; Forman, 1995; Cadenasso and Pickett, 2000). 특히 조각규모(patch scale)에서 조각이 가지는 물질 혹은 에너지의 투과성은 여러 요인 중 조각형태의 복잡성에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(McGarigal and Marks, 1995). 유역에서 유출되는 토지이용의 잔류물질들은 수리·수문학적 흐름에 의해 호소에 유입된다고 가정하면, 이러한 흐름은 저수지 형태의 복잡도(shape complexity)에 영향을 받을 것이다.

이러한 관점에서 본 연구는 공간성을 고려한 토지이용과 인접 호소의 수질과의 관계를 파악하고, 호소의 분류상 그 공간적 효과가 호소의 분류상 차이를 보이는지를 규명하고 호소의 형태적 복잡성과 수질의 관계를 파악하는 데에 그 목적을 두고 있다. 조경 및 녹지계획, 그리고 모든 토지이용계획은 직간접적으로 인접 호소의 수질에, 그리고 궁극적으로 호소생태계 뿐만 아니라 거시적 측면에서 물의 순환에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 공간성, 호소유형 및 경관생태지수를 이용하여 유역 내 토지이용-수질관계를 파악하여 수질 보전을 위한 조경 및 녹지계획, 그리고 토지이용계획에 응용할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 호소 및 수질

우리나라 전국에는 18,000개의 호소가 분포하고 있

으며(김호섭과 황순진, 2004), 이들 중 133개를 무작위로 선택하였다. 다목적 댐은 일반 호소에 비해 규모 및 관리형태의 상이성 때문에 연구대상에서 제외하였으며, 호소의 형태를 측정하기 위한 최소 화상단위가 30m인 것을 감안하여 호소 수면적이 0.1ha 미만인 호소들은 연구 대상에서 제외하였다. 133개의 연구대상 호소 중 환경부 관리대상은 41개소 그리고 농림부 관리대상은 96개소로 4대강 유역 전국에 걸쳐 분포되어 있다(그림 1 참조). 연구대상 호소의 축조 연령별로 살펴보면 57% 이상이 40년 이상 되었으며, 10년 미만으로 최근에 축조된 호소는 3% 미만이다. 호소들의 평균 유역 면적은 약 66ha이고 평균 수면적은 1.5ha이다. 그리고 평균 수심은 7.5m로 나타났으며, 제방 높이와 길이는 각각 23m와 324m이다. 연구대상 수질요인은 생물학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand: BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand: COD), 총질소(Total Nitrogen: TN)와 총인(Total Phosphorous: TP)을 포함하였으며, 자료는 농림부와 환경부에서 2002년 4~6월에 측정된 값을 평균하여 사용하였다.

2. 토지이용 분석 및 호소의 형태복잡도

호소의 형태 복잡도 측정을 위하여 환경부의 토지피복도 GIS 벡터화일을 그리드(grid)형태로 변환하여 공간통계 프로그램의 일종인 Fragstats에서 측정하였다. Fragstats에서 조각의 형태 복잡도는 여러 다른 지수들을 사용하여 측정할 수 있는데, 본 연구에서는 면적대비 경계부 길이(perimeter-area ratio: PARA)와 프랙탈(FRAC)을 사용하여 측정하였다. PARA와 FRAC는 각각 식 1, 2의 방법으로 계산되며, PARA는 0보다 큰 실수값을, FRAC는 1과 2 사이의 값을 가진다(McGarigal and Marks, 1995). 프랙탈을 포함한 형태복잡도는 하천길이 해석(전민우와 조용수, 2004), 농촌경관에 대한 선호도 분석(서주환 등, 2002), 도시공원의 보전과 관리방안(김명수와 안동만, 1996), 농산촌 경관의 이질성과 다양성의 변화 분석(홍선기 등, 2000), 육수학적 해석(이도원 등, 2000), 그리고 도로 경관의 선호도 분석(서주환 등, 1999) 등 다양하게 응용되어 왔다.

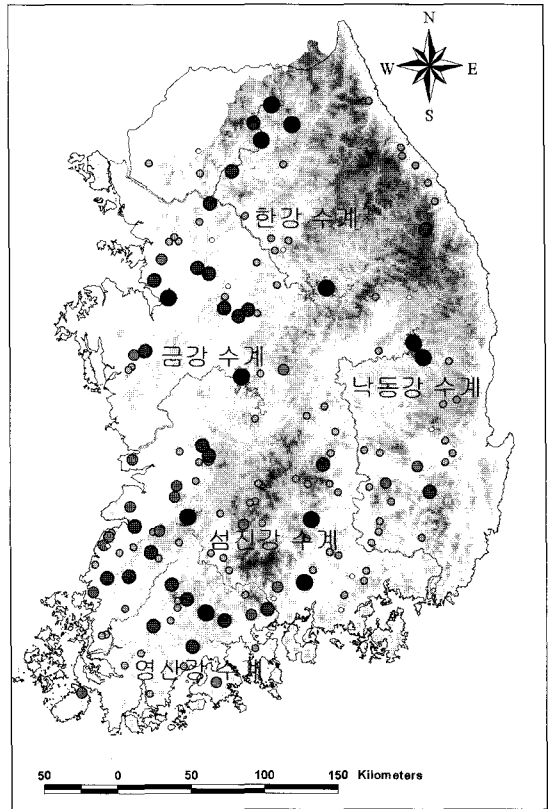
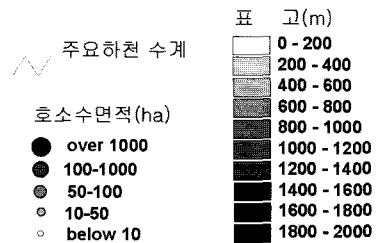


그림 1. 연구대상 호소들의 위치 및 상대적 크기
범례:



$$PARA = L/A \quad (\text{식 1})$$

$$FRAC = (2 \times \ln(0.25 \times L)) / \ln A \quad (\text{식 2})$$

여기서, L = 호소 둘레길이

A = 호소 수면적

유역 내 토지이용은 환경부의 토지피복도에 기초하여, 유역 전체를 측정하지 않고 호소의 가장자리로부터 1km 버퍼(buffer zones)를 생성하여 이를 다시 250m씩 나누어 각 구역별 토지이용 비율을 산정하였다(구역 1: 0~250m, 구역 2: 251~500m, 구역 3: 501~750m,

구역 4: 751~1,000m). 유역 전체보다는 호소 주변의 1km 버퍼 내 토지이용만을 이용한 것은 호소로부터 이격될수록 토지이용 자체의 영향보다는 표면 유출시 토지 표면의 수리수문학적 혹은 생화학적 영향을 받을 가능성이 커지기 때문이다(Marsh, 2005). 환경부 토지피복 분류는 8개 토지이용으로 대분류되어 있으나, 본 연구에서는 도시화지역, 삼림, 그리고 농업용지만을 사용하고, 수계, 나대지, 습지, 초지, 미분류 항목은 본 연구의 분석에 사용하지 않았다.

3. 호소의 유형 분류 및 분석

연구대상 호소는 OECD(Anon, 1982)가 제시한 연중 최대 엽록소(Chl. a) $25\mu\text{gL}^{-1}$ (부영양화 단계기준)와 평균수심(mean depth)을 이용한 김호섭과 황순진(2004)의 방법으로 분류하였다. 사전 조사에 의하면 본 연구 대상 호소들의 평균 수심은 7.5m로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 호소들을 각각 유형 I(엽록소 $<25\mu\text{gL}^{-1}$, 평균수심 $<7.5\text{m}$), 유형 II(엽록소 $>25\mu\text{gL}^{-1}$, 평균수심 $<7.5\text{m}$), 유형 III(엽록소 $>25\mu\text{gL}^{-1}$, 평균수심 $>7.5\text{m}$) 그리고 유형 IV(엽록소 $<25\mu\text{gL}^{-1}$, 평균수심 $>7.5\text{m}$)로 분류하였다. 사전분류 결과 유형 III에 해당하는 호소는 발견되지 않았으며, 유형 I은 73개소, 유형 II는 24개소, 유형 IV는 39개소인 것으로 나타났다(그림 2 참조). 분류상 각 유형별 특징은 유형 I은 부영양화되지는 않았

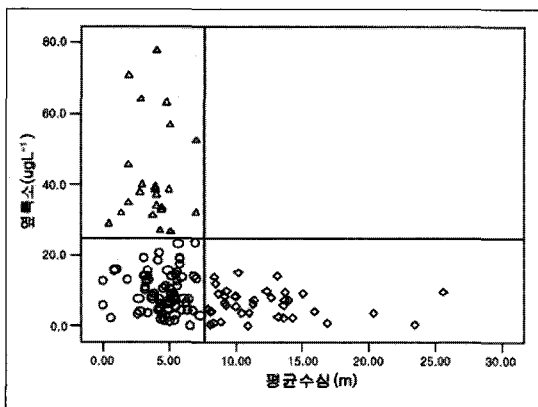


그림 2. 엽록소와 평균수심을 이용한 연구대상 호소의 분류*
 범례: ○: 유형 I, △: 유형 II, ◇: 유형 IV
 *: 유형 I은 73개소, 유형 II는 24개소, 유형 IV는 39개로 분류되었으며, 연구대상 호소 중에는 유형 III은 없는 것으로 나타난.

으나 수심은 얇은 호소, 유형 II는 부영양화가 발생하고 수심이 얇은 호소, 그리고 유형 IV는 부영양화가 발생하지 않고 수심이 깊은 호소이다.

토지이용-수질과의 관계 분석을 위하여 피어슨(Pearson) 상관분석 기법을 사용하였으며, 1km 버퍼 내 전체 토지이용과 각 구역별 토지이용을 각각 수질 측정치와 상관분석을 실시하였다. Fragstats를 통하여 측정된 호소의 형태복잡도 또한 측정된 수질과 상관분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구 대상 호소의 수질과 토지이용 현황

표 1은 1km 버퍼와 구역별 각 토지이용 비율을 요약하여 보여 준다. 버퍼 전체적으로 삼림이 67.8%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 다음이 농경지로 약 24.5%를 보여준다. 각 구역별 토지이용 현황을 살펴보면, 구역 1에서는 삼림이 약 61%로 가장 높으나 전체 평균에 비하여 농경지 및 도시화 지역의 비율이 약간 높았다. 역으로 구역 2에서는 삼림이 약간 높은 69.75%로 나타났으며, 농경지 및 도시화 지역은 전체 버퍼 평균에 비하여 약간 낮은 것으로 나타났다. 구역 3에서는 유사하게 삼림지역이 전체적인 평균보다 약간 높게 나타났고, 농경지와 도시화지역은 약간 낮은 비율을 보였다. 특이하게 구역 4에서 도시화 지역의 비율이 3.9%로 다른 구역들에 비하여 가장 높게 나타났으며, 삼림의 비율 또한 높은 것으로 파악되었다.

농경지 또한 구역 4에서 가장 낮은 비율을 보여 주었

표 1. 구역별 토지이용 비율

구역 구분	도시화 지역(%)	삼림 (%)	농경지 (%)	기타 (%)
1km 버퍼 전체	3.7	67.8	24.5	3.8
구역 1(0~ 250m)	3.9	60.9	30.6	4.5
구역 2(251~ 500m)	3.5	69.7	23.1	3.5
구역 3(501~ 750m)	3.6	70.3	22.3	3.6
구역 4(751~1,000m)	3.9	70.3	21.8	3.8

표 2. 수질 및 호소의 형태복잡도 지수들의 기초 통계치

측정 항목	최소	최대	평균	표준편차
BOD(μgL^{-1})	0.50	24.40	2.95	2.74
CCD(μgL^{-1})	1.70	17.70	5.43	2.77
TN(μgL^{-1})	0.22	9.65	1.86	1.30
TP(μgL^{-1})	0.00	0.36	0.05	0.05
면적 대비 경계부 길이	25.22	588.97	160.30	73.13
프랙탈 차원	1.03	1.28	1.12	0.05

n=133

다. 전체적으로 도시화 지역의 비율은 호소에 가까운 구역 1과 호소에서 가장 원거리인 구역 4에서 가장 높은 비율을 보였으며, 삼림은 호소에서 이격거리에 비하여 비율이 증가하고, 역으로 농경지는 호소에 가까워질수록 그 비율이 높아지는 패턴을 보여 주었다. 연구대상 호소의 평균 수질과 형태 복잡도를 요약한 표 2에 의하면 평균적으로는 양호한 편이나 일부 호소에서는 부영양화 및 오염물질 농도가 심각한 수준인 것으로 나타났다. 면적 대비 경계부의 길이의 평균은 약 160, 그리고 프랙탈의 평균은 각 1.12로 나타났다.

2. 각 구역별 토지이용과 수질의 상관관계

각 구역별 토지이용 비율을 구하고 호소의 수질을 대표하여 BOD, COD, TN 그리고 TP와 상관관계를 분석하였으며, 상관분석 결과 호소로부터 1km 내의 모든 토지 이용비율과 모든 수질 지표들과 통계적으로 유의한 관계를 갖는 것으로 분석되었다(표 3 참조). 구체적으로 살펴보면, 1km 반경 이내의 도시화 지역은 BOD($r=0.69$), COD($r=0.54$), TN($r=0.35$) 그리고 TP($r=0.69$)와 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 이 지역에서의 도시화 면적의 증가는 모든 수질들을 악화시키는 것으로 나타났으며, 특히 호소 내 BOD와 TP의 밀도와 높은 상관관계를 보였다. 농경지 비율도 이와 유사한데, 특히 COD($r=0.62$)와의 상관관계가 다른 수질 지표들과의 관계보다 높은 것으로 나타났다. 이에 반하여, 삼림지역은 모든 수질 지표들과 부의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. 즉 삼림지역은 BOD($r=$

표 3. 구역별 토지이용 비율과 수질과의 피어슨(Pearson) 상관관계 분석결과

구역 구분	토지이용 비율	BOD	COD	TN	TP
1km 버퍼 전체	도시화지역	0.69**	0.54**	0.35**	0.50**
	삼림지역	-0.52**	-0.74**	-0.47**	-0.53**
	농경지	0.31**	0.62**	0.35**	0.40**
구역 1	도시화지역	0.66**	0.56**	0.39**	0.46**
	삼림지역	-0.46**	-0.66**	-0.46**	-0.45**
	농경지	0.29**	0.55**	0.33**	0.36**
구역 2	도시화지역	0.66**	0.54**	0.35**	0.50**
	삼림지역	-0.51**	-0.72**	-0.47**	-0.52**
	농경지	0.31**	0.60**	0.35**	0.39**
구역 3	도시화지역	0.68**	0.51**	0.31**	0.49**
	삼림지역	-0.51**	-0.73**	-0.44**	-0.53**
	농경지	0.29**	0.61**	0.33**	0.39**
구역 4	도시화지역	0.67**	0.51**	0.33**	0.49**
	삼림지역	-0.52**	-0.74**	-0.45**	-0.54**
	농경지	0.31**	0.63**	0.35**	0.40**

n=133, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

-0.52), COD($r=-0.74$), TN($r=-0.47$) 그리고 TP($r=-0.53$)와 부의 상관관계를 갖는 것으로 나타나, 삼림지역이 증가할수록 수질이 개선될 확률이 높은 것으로 파악되었다. 특히 이러한 삼림의 효과는 호소 내 COD의 농도와 매우 높은 관계를 갖는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과 나타난 도시화 지역과 농경지 면적과 수질 지표들과의 양의 상관관계 그리고 삼림지역과 수질지표들과의 부의 상관관계는 기 연구들이 보고하였던 토지이용-수질과의 관계에 대한 분석 결과들과도 일치한다(Omerik *et al.*, 1981; 이진희 등, 1998; Liu *et al.*, 2000; Tong and Chen, 2002; 정광욱 등, 2006).

이러한 일반적인 토지이용-수질과의 관계에 있어서 공간성의 효과를 검증하기 위하여 각 구역별로 토지이용비율-수질과의 관계를 분석하였다(표 3 참조). 구역별 토지이용과 수질과의 상관관계를 분석한 결과, 도시화지역과 BOD와는 호소에서 거리가 멀어짐에 따라 상관관계의 강도는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

도시화 지역-COD와의 관계에서 거리가 멀어짐에 따라 그 상관관계수가 $r=0.56$ (구역 1)에서 $r=0.54$ (구역 2), $r=0.51$ (구역 3), $r=0.51$ (구역 4)로 점점 작아지는 것으로 분석되었으나, 그 감소비율은 매우 완만하였다. 도시화지역-TN의 상관관계는 구역 1에서 0.39로 가장 크고 구역 2와 3에서 각각 0.35와 0.31로 약해졌다. 도시화지역-TP의 상관관계 계수는 구역 2에서 0.50으로 가장 크고 구역 1에서 0.46으로 오히려 구역 1에서의 상관관계가 작은 것으로 나타났다.

표 3에서 보다 흥미로운 것은 구역별 삼림과 수질 지표들 간의 상관관계이다. 즉 삼림지역-BOD의 상관관계는 호소에 가까운 구역 1에서 -0.46 으로 가장 작고 이격된 구역 2, 3 및 4에서 각각 -0.51 , -0.51 그리고 -0.52 로 구역 1보다 큰 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 삼림지역-COD의 관계에서 보다 명확하게 나타났다. 즉, 삼림지역-COD의 상관관계수는 구역 1에서 -0.66 , 구역 2에서 -0.72 , 구역 3에서 -0.73 그리고 구역 4에서 -0.74 로 호소로부터 거리가 이격될수록 호소에서 COD와의 부의 상관관계가 더욱 증가하였다. 삼림지역-TP에서도 유사한 현상이 발견되는데, 구역 1에서의 상관관계수는 -0.45 인 반면 구역 2, 3, 4에서는 각각 -0.52 , -0.53 , -0.54 로 증가하였다. 그러나 삼림지역-TN에서는 이러한 현상이 발견되지 않았다.

농경지 면적 비율은 전반적으로 모든 수질의 지표들과 양의 관계, 즉 농경지가 증가할수록 호소에서 BOD, COD, TN, TP의 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 표 3의 구역별 상관분석에 의하면, 농경지-수질 지표들 간의 상관관계는 호소로부터의 거리로 구별되는 구역에서 일정한 패턴을 갖기보다는 불규칙적인 것으로 보인다. 즉, 농경지-BOD 혹은 농경지-TN에서는 구역 1과 구역 3에서 그리고 구역 2와 4에서 유사한 상관관계수 값을 보여 주었다. 다만 농경지-COD와 농경지-TP에서는 구역 1과 2에서보다는 구역 3과 4에서 보다 높은 상관관계수 값을 보여 삼림지역-수질 지표들 간에서 발견되었던 현상과 유사한 결과를 보였다. 예를 들면, 농경지-COD는 구역 1에서 0.55의 상관관계수를 보였고, 구역 2, 3, 4에서 각각 0.60, 0.61, 0.63의 상관관계수를 갖는 것으로 나타났다. 전반적으로 본 연구에서 검증하고자 하였던 토지이용-수질과의 관계에서 토지의 호소에 대한

인접효과는 도시화 면적에서 일부 확인할 수 있었으나 모든 토지이용과 수질 지표에서 발견되지는 않았다. 역으로, 일부 토지이용과 수질 지표들 간에 호소에서 거리 효과가 역으로 나타나거나 거리에 반응하지 않은 것으로 나타났다. 이는 토지이용-수질 관계에 있어서 거리 효과가 측정하는 수질 지표에 따라 상이할 수 있음을 의미한다. 또한 이러한 결과는 토지이용-수질과의 관계가 거리에 반응하는 단순한 선형적 관계이기보다는 보다 복잡한 또 다른 매개 시스템이 있음을 암시한다. 즉, Marsh(2005)가 지적한대로, 상부의 토지이용은 강수시 지표면을 따라 발생하는 강수의 유출과정에서 하부의 토지이용에 따라 수리수문학적 혹은 물리·화학적 변화를 경험할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

3. 호소 형태복잡도와 수질 상관관계

호소의 형태적 복잡도와 수질과의 관계를 파악하기 위하여 공간 통계 프로그램의 일종인 Fragstats을 이용하여 각 호소의 면적대비 둘레길이와 프랙탈 차원을 구하여 수질 지표들과 상관관계를 분석하였다(표 4 참조). 분석결과에 의하면 모든 호소의 형태복잡도 지수들은 모든 수질지표들과 부의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. 즉 호소의 형태가 복잡할수록 호소 내 BOD, COD, TN 그리고 TP의 농도는 낮아질 것으로 예상된다. 이들 관계를 자세히 살펴보면, 면적 대비 둘레 길이는 COD($r=-0.19$), TN($r=-0.2$), TP($r=-0.17$)와 통계적으로 유의한 부의 관계를 보였다. BOD와는 부의 관계를 갖는 것으로 나타났지만, 통계적으로 $p<0.05$ 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 프랙탈 지수는 BOD($r=-0.17$) 그리고 COD($r=-0.17$)와 통계적으로 유의한 부의 관계를 갖는 것으로 나타났

표 4. 호소의 형태복잡도와 수질과의 피어슨(Pearson) 상관관계 분석결과

형태복잡도 지수	BOD	COD	TN	TP
면적 대비 둘레길이	-0.12	-0.19*	-0.20*	-0.17*
프랙탈 차원	-0.17*	-0.17*	-0.09	-0.11

n=133, *: $p<0.05$, **: $p<0.01$

나, TN과 TP와는 통계적으로 유의한 관계를 보여주지 못했다.

4. 호소 유형별 토지이용과 수질과의 상관관계

토지이용과 수질과의 관계를 구역별 및 호소 유형별 상관관계를 분석한 결과 전반적으로 평균 수심이 얇고 부영양화가 되지 않은 호소(유형 I)에서 토지이용에 대한 수질이 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이와는 반대로 평균수심이 깊고 부영양화되지 않은 호소(유형 IV)에서는 토지이용에 대하여 수질이 덜 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다(표 5 참조). 유형 II, 즉 부영양화되고 평균 수심이 얇은 호소에서는 유형 I과 유형 IV의 중간 정도의 민감도를 보여 주었다. 상관관계 계수들의 유의성만을 기준으로 보면, 토지이용과 수질의 관계는 유형 I>유형 II>유형 IV 순으로 분석되었다. 호소의 형태복잡도는 대부분의 호소 유형과 구역에서 수질과 부의 관계를 보이거나 통계적으로 유의성이 인

정되는 관계는 유형 IV에서 TN과 호소 면적 대비 둘레 길이 뿐인 것으로 나타났다. 대체적으로 호소의 크기와 호소의 평균 깊이가 비례한다는 것을 감안하면, 호소의 형태복잡도에 의한 수질의 개선 효과는 호소가 어느 정도 규모를 갖는 경우에만 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

구역별 및 유형별 토지이용과 수질과의 관계를 구체적으로 살펴보면, 유형 I의 호소에서 도시화 지역은 모든 구역에서 수질 지표들과 통계적으로 유의한 양의 관계를 보여준다. 즉 도시화 비율이 높을수록 수질이 악화될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 분석 결과에 의하면 이러한 도시화-수질과의 관계에 있어서 거리효과가 비교적 명백히 보인다. 예를 들어 도시화 비율-BOD는 구역 1에서 상관관계수가 0.55이나 구역 2와 구역 3에서는 0.48과 0.45로 각각 축소되어 호소로부터 이격될수록 도시화-수질의 관계가 약해졌다. 이러한 경향은 COD, TN 그리고 TP와의 관계에서도 동일하게 관찰되었다. 삼림과 수질의 관계는 일부 거리효과가 관

표 5. 호소 유형별/구역별 피어슨(Pearson) 상관관계 분석결과

구분		호소 유형 I				호소 유형 II				호소 유형 IV			
구역	토지이용	BOD	COD	TN	TP	BOD	COD	TN	TP	BOD	COD	TN	TP
구역 1	도시	0.55**	0.46**	0.29**	0.47**	0.05	0.33	0.37	-0.01	-0.15	0.01	-0.10	0.17
	삼림	-0.32**	-0.59**	-0.23*	-0.47**	-0.44*	-0.63**	-0.60**	-0.29	-0.04	0.04	-0.38*	0.09
	농경지	0.21	0.56**	0.14	0.38**	0.47*	0.54**	0.45*	0.38	-0.08	-0.08	0.29	-0.11
구역 2	도시	0.48**	0.42**	0.24*	0.37**	-0.01	0.44*	0.30	0.22	0.05	0.22	0.27	0.18
	삼림	-0.37**	-0.67**	-0.21	-0.51**	-0.27	-0.57**	-0.57**	-0.32	-0.07	-0.21	-0.54**	-0.10
	농경지	0.26*	0.64**	0.11	0.44**	0.25	0.38	0.44*	0.27	0.01	0.17	0.45**	0.06
구역 3	도시	0.45**	0.38**	0.14	0.24*	0.01	0.44**	0.35	0.33	-0.09	0.14	0.13	0.08
	삼림	-0.34**	-0.68**	-0.20	-0.52**	-0.32	-0.60**	-0.47**	-0.35	-0.16	-0.38**	-0.52**	-0.16
	농경지	0.23*	0.64**	0.14	0.49**	0.33	0.47*	0.34	0.26	0.16	0.38**	0.49**	0.16
구역 4	도시	0.51**	0.40**	0.15	0.25*	0.01	0.40*	0.40*	0.36	-0.10	0.07	0.06	0.03
	삼림	-0.37**	-0.68**	-0.19	-0.57**	-0.37	-0.61**	-0.47*	-0.31	-0.23	-0.37*	-0.55**	-0.14
	농경지	0.22	0.62**	0.11	0.51**	0.42*	0.53**	0.38	0.22	0.26	0.40**	0.54**	0.16
면적 대비 둘레길이		-0.10	-0.26	-0.20	-0.15	-0.06	-0.22	-0.17	-0.27	-0.10	0.06	-0.37**	-0.08
프랙탈 차원		-0.01	0.01	-0.09	0.01	0.03	0.17	0.01	0.16	0.17	-0.15	0.19	-0.13

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

찰되기도 하나 대부분 거리효과의 역현상이 발견되었다. 즉, 삼림-수질의 관계는 호소에서 이격될수록 더욱 강화되는데, 이러한 현상은 특히 TP와의 관계에서 비교적 강하게 관찰되었다. 농경지-수질관계 또한 삼림-수질과의 관계와 유사한 양상을 보여 주었다. 즉, 일부를 제외하면 대부분 삼림-수질의 관계는 호소로부터의 거리의 역으로 상관관계가 강해지는 것이 관찰되며, 특히 TP와의 관계에서 이러한 경향이 강한 것으로 판단된다. 구체적으로 살펴보면, 농경지-TP의 상관관계수는 구역 1에서 0.38, 구역 2에서 0.44 그리고 구역 3과 4에서 각각 0.49와 0.51로 증가하였다.

IV. 결론

구역에서의 모든 조정행위, 토지이용 행위는 필연적으로 인접 호소 또는 하천에 영향을 미친다. 본 연구의 목적은 토지이용과 수질과의 관계에 있어서 공간성과 호소 유형 그리고 호소의 형태적 복잡도의 효과를 검증하고 이를 바탕으로 조정계획 혹은 토지이용 계획시 수질에 대한 토지이용의 영향을 최소로 하는 계획방안을 모색하는 데에 두고 있다. 환경부와 농림부에서 모니터링 하고 있는 18,000여개의 호소 중 133개를 무작위로 선택하여 호소로부터의 거리에 기초하여 4개의 구역으로 구분하고, 부영양화 정도와 평균 수심을 기초로 한 호소유형을 구분하고, 호소의 형태적 복잡도를 고려하여 상관관계를 분석하였다. 분석 결과 구역에서 조정계획이나 토지이용 계획시 고려할 만한 몇몇 의미있는 점이 발견되었다.

토지이용-수질과의 관계에 있어서 공간성의 효과, 즉 토지이용의 호소에 대한 근접성은 수질지표의 특성 혹은 호소의 유형에 따라 달리 나타난다. 즉, 공간성은 토지이용 유형, 수질 지표, 그리고 호소유형에 따라 복잡하게 변하는데, 어느 관계는 호소에서 이격될수록 그 관계의 크기가 작아지는 반면, 어떤 관계는 이격될수록 그 크기가 커지는 것도 관찰된다. 이러한 결과는 강수의 표면 유출시 토지이용(오염원)과 호소 사이에 매우 복잡한 수리·수문학적 그리고 생화학적 과정에 의한 것으로 판단된다. 즉, 동일한 토지이용 형태가 있을 때 그 토지이용과 호소 사이의 다른 토지이용 유형, 지

표면 조건, 수리수문학적 조건 등에 의해 호소에 대한 영향은 달라질 수 있을 것이다. 특히 흥미로운 것은 삼림-수질의 관계이다. 대부분의 관계에서 삼림은 호소에서 이격될수록 수질과의 관계가 커지는 것이 관찰되었는데, 이는 현재 환경부에서 추진하고 있는 수변 구역의 지정 및 수변림의 조성 정책에 대하여 일부 반하는 결과이다. 수변림은 많은 연구에서 일정부분 오염을 감소시키는 효과가 분명 있는 것으로 판단되지만, 본 연구 결과에 의하면 그 효과는 호소쪽보다는 토지이용 쪽에 붙여 조성할 때 그 효과가 클 것으로 기대된다.

모든 수질 지표에 동일하게 효과적이지 않지만, 호소의 형태 복잡도 또한 일정부분 수질을 개선하는 효과가 있는 것으로 판단된다. 대체적으로 인간에 의한 녹지계획 혹은 토지이용은 경관의 형태를 단순화, 직선화하는 경향이 있는데, 호안지역의 계획시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 즉 호안지역의 계획시 자연상태의 호안의 복잡도를 최대한 유지하는 것이 계획이나 개발에 의한 수질에 대한 영향을 저감할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있으며, 특히 이러한 효과는 질소(TN)에 대하여 클 것으로 기대된다.

호소 유형별 토지이용-수질과의 관계를 분석한 결과, 유형 I, 즉 평균수심이 얇고 부영양화가 아직 이루어지지 않은 호소에서 토지이용과 수질과의 관계가 다른 호소 유형들에 비해 보다 큰 것으로 나타났다. 대체적으로 열은 호소들인 경우 축조된지 오래 되었거나 호소가 작은 경우인데, 이러한 호소를 포함한 구역의 개발이나 계획시 토지이용에 대한 수질 악화가 예상된다고 볼 수 있다. 따라서 호소의 규모가 작거나 호소의 축조연령이 오래된 경우 토지는 극히 제한적으로 이용되거나(이명우, 1995) 또는 충분한 녹지 그리고 자연형 호소 형태를 유지하는 것으로 개발되는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구는 토지이용, 호소의 형태 복잡도 그리고 토지이용의 공간적 분포 등을 종합적으로 고려하여 호소 유형별로 이러한 변수들이 수질과 어떠한 관계를 갖는지 규명하였으나, 회귀분석을 통한 인과모형을 도출하지 못하였다. 따라서 토지이용, 호소의 형태 복잡도 등이 수질과 관계는 제한적으로만 해석되었다. 본 연구에서 사용된 변수들의 수질에 대한 인과관계를 규명하기 위해서는 회귀모형과 같은 통계기법이 추후 연구에서

도입되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 고려하지 못하였지만, 토지이용의 패턴이 수질에 어떠한 영향을 주는지도 향후 연구에서 검증할 필요가 있을 것이다. 조경계획, 녹지계획 혹은 도시계획 등 모든 디자인 혹은 계획행위는 필연적으로 유역 내 토지이용의 규모, 위치, 형태와 같은 토지이용의 공간적 패턴에 영향을 준다. 이러한 관점에서 디자인 혹은 계획 행위들이 수질에 어떠한 영향을 주는지 이해하는 것은 디자인이나 계획의 당위성을 제공하여 줄 것으로 판단된다.

인용문헌

- 김명수, 안동만(1996) 도시공원의 경관생태학적 분석-패취의 형태지수와 분산도 분석을 중심으로-. 한국조경학회지 23(4): 12-19.
- 김호섭, 황순진(2004) 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석-영륙소 a와 수심을 중심으로-. 한국육수학회지 37(2): 213-226.
- 서주환, 최현상, 김상범, 이철민(1999) 형태지수를 이용한 도로경관의 선호성 분석에 관한 연구-설악산 국립공원을 대상으로-. 한국조경학회지 27(4): 87-93.
- 서주환, 조영배, 이준근(2002) 형태지수를 이용한 농촌경관의 선호성 분석에 관한 연구-농촌 문화마을을 대상으로-. 한국산림휴양학회지 6(2): 7-14.
- 이도원, 장현정, 강신규(2000) 생태학적·육수학적 현상들에 대한 프랙탈의 적용. 한국육수학회지 33(2): 69-79.
- 이명우(1995) 토지이용으로 인한 수질영향. 한국조경학회지 22(4): 198-202.
- 이진희, 이행렬, 이재근, 이동근, 김훈희(1998) 하천에 있어서 자연성 보전, 정비, 창출에 관한 연구(I)-농촌지역에서의 토지이용과 하천수질과의 상관성-. 한국복원녹화기술학회 1(1): 84-94.
- 전민우, 조용수(2004) 보청천 유역의 하천길이에 대한 프랙탈 특성. 건설기술연구소 논문집 23(1): 281-291.
- 정광욱, 윤춘경, 장재호, 김형철(2006) 유역의 토지이용과 오염원 현황이 수질특성에 미치는 영향 분석. 한국육수학회지 39(1): 41-51.
- 최지홍, 신은성, 이동훈(1999) 서울 도시지역의 비점오염원 유출특성에 관한 연구. 한국물환경학회지 15(3): 315-323.
- 홍선기, 임영득, 中越信和, 장남기(2000) 한국 농산촌 경관의 구조와 이질성 및 다양성의 최근 변화: 경관의 보전과 복원과 관계. 한국생태학회지 23(5): 359-368.
- Anon(1982) Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- Baker, A.(2003) Land use and water quality. Hydrological Process 17: 2499-2501.
- Cadenasso, M. L. and S. T. A. Pickett(2000) Linking forest edge structure to edge function: mediation of herbivore damage. Journal of Ecology 88: 31-44.
- Cole, G. A.(1979) Textbook of Limnology (2nd ed.). St. Louis: The C. V. Mosby Company.
- EPA(1974) Lake Restoration, Minneapolis: US Environmental Protection Agency.
- Forman, R. T. T.(1995) Land Mosaics: the Ecology of Landscape and Regions. New York: Cambridge University Press.
- Liu, A. J., S. T. Y. Tong, and J. A. Goodrich(2000) Land use as a mitigation strategy for the water quality impacts of global warming: a scenario analysis on two watersheds in the Ohio River Basin, Environmental Engineering and Policy 2: 65-76.
- Marsh, W. M.(2005) Landscape Planning (4th ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- McGarigal, K. and B. J. Marks(1995) FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. General Technical Report PNW-GTR-351. Portland, OR: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Omernik, J. M., A. R. Abernathy, and L. M. Male(1981) Stream nutrient levels and proximity of agricultural and forest land to streams: some relationships. Journal of Soil Water Conservation 36: 227-231.
- Tong, S. T. Y. and W. Chen(2002) Modeling the relationship between land use and surface water quality. Journal of Environmental Management 66(4): 377-393.
- Wiens, J. A.(1992) Ecological flows across landscape boundaries: a conceptual overview. In A. J. Hansen and F. di Castri, eds., Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows. New York: Springer-Verlag. pp. 217-235.

원 고 점 수: 2007년 1월 23일
 최종수정본 접수: 2007년 2월 7일
 4인의명 심사필