

토지이용과 인접저수지 수질의 관계에 대한 형태복잡도의 개선효과

이상우 · 황순진

건국대학교 환경과학과

I. 서론

경관생태학에서 가장자리(edges)는 인접하는 두 계(systems)간의 에너지의 흐름을 조절하는 중요한 인자로 알려져 있다(Forman, 1995). 이러한 가장자리의 흐름에 대한 에너지 및 물질의 조절효과는 가장자리의 투과성(permeability)와 흐름의 속성(nature of the flow)에 의해 결정된다(Cadenasso and Pickett, 2000; Wiens, 1992; Forman, 1995). 특히 조각규모에서 patch scale에서 조각이 가지는 투과성은 여러 요인 중 조각형태의 복잡성에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(McGarrigal and Marks, 1995). 이러한 관점에서 본 연구는 유역내 토지이용과 댐 혹은 저수지 수질과의 관계에 있어서 저수지의 형태복잡도가 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 기존의 많은 연구에서 유역내 토지이용과 수질은 직접적인 관계를 가지는 것으로 알려져 있다. 특히 도시적 토지이용 혹은 농경지와 같은 인간이 주가 되는 토지이용은 수환경에 BOD, COD, total-N, total-P와 같은 많은 유기물 및 부영양물질의 증가에 직접적인 원인으로 알려져 왔다(Liu *et al.*, 2000; Omernik, 1981; Tong and Chen, 2002). 유역에서 유출되는 토지이용의 잔류물질들은 수리수문학적 흐름에 의해 저수지에 유입된다고 가정하면, 이러한 흐름은 저수지 형태의 복잡도에 영향을 받을 것으로 보여진다. 복잡도의 간섭효과를 측정하기 위하여 본 연구는 사회과학 및 심리학 분야에서 많이 사용되는 완화모형(moderation model, Baron and Kenny, 1986)을 사용하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 수질, 형태복잡도, 토지이용의 측정

우리나라 전국에는 10,000개의 인공 댐 및 저수지가 분포하고 있으며, 이들 중 수면적인 0.1ha 이상 되는 153개를 임의로 선택하여 수질과 저수지의 형태복잡도를 측정하였다. 연구대상 수질은 BOD, COD, total-N과 total-P를 포함하였으며, 형태복잡도는 프랙탈지수를 사용하였다. 수질자료는 농림부, 환경부에서 2002년 4~6월에 측정한 값을 평균하여 사용하였다. 프랙탈 지수는 환경부의 토지피복도 GIS 벡터화일을 그리드(GRID)형태로 변환하여 FRAGSTATS에서 측정하였다. 강수의 수리수문 혹은 생화학적 간섭을 최소화 하기 위하여 본 연구에서는 유역 전체에 대한 토지이용을 측정하지 않고, 댐 및 저수지의 경계부에서 1km 버퍼(buffer)를 생성하여 버퍼내의 토지이용 비율을 측정하였다. 본 연구는 특히 인간의 토지이용에 의한 수질 변화, 그리고 형태 복잡도에 의한 간섭효과를 측정하기 위하여 도시지역에 초점을 두고 분석하였다.

2. 완화모형 설정(Moderation Model)

완화모형은 도시적 토지이용은 BOD, COD, total-N 그리고 total-P를 증가시키고, 댐 및 저수지의 형태복잡도는 수질 측정치들을 감소시킨다는 가설에 기초하여 수립되었다. 아래의 모형에서, 만약 형태복잡도를 단순($X_s=0$) 혹은 복잡($X_s=1$)으로 이분화 시킨다면, 모형은 공식 2와 3으로 변환될 수 있다. 결국 간섭효과는 공식 2와 3의 두 완화모형에서 도시토지이용변수의 평균화된 수들(d_1 과 d'_1)의 변화를 측정하여 검증된다. 만약 완벽한 간섭효과가 존재한다면 공식 (1)의 d_1 값은, 공식 (2)에서 그 크기가 통계적으로 유의하게 축소될 것이며, 완전한 간섭효과가 있을 경우 이 값은 0이 된다.

$$1) y_w = \mu + d_1 X_u + d_2 X_s + d_3 X_u X_s + \mathcal{M},$$

단, y_w = 수질 측정값, X_u = 도시적 토지 이용 비율, X_s = 형태복잡도, $X_u X_s$ = 도시적 토지이용 비율과 형태복잡도의 곱, \mathcal{O} = 상수, d_1, d_2, d_3 = 지수, m = 오차항.

$$2) Y_{ss} = \mathcal{O}_1 + d_1 X_u + m, X_s = 0.$$

$$3) Y_{cs} = (\mathcal{O} + d_2) + (d_1 + d_3) X'_u + m', X_s = 1 = \mathcal{O}'_1 + d'_1 X'_u + m.$$

단, $\mathcal{O}'_1 = (\mathcal{O} + d_2), d'_1 = (d_1 + d_3).$

III. 결과 및 고찰

1. 토지이용, 형태복잡도, 수질에 대한 상관분석

완화모형을 검증하기 전에 변수들간의 관계를 파악하기 위하여, 토지이용, 형태복잡도 그리고 수질들간의 상관관계를 분석하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 보여지는 바와 같이 비퍼지역내 토지이용과 수질에 직접적인 관계를 가지는 것으로 나타났다. 특히 도시토지이용은 저수지의 BOD, COD, T-N 그리고 T-P의 농도에 통계적으로 매우 유의한 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 유사하게 경작지역 또한 모든 수질측정치와 유의한 양의 관계를 갖는다. 이에 반하여 숲 지역은 모든 수질 특성들과 부의 관계를 가지 것으로 나타났다. 즉, 수질은 토지이용과의 관계에서 보면, 도시화 지역 혹은 경작지역이 많은 지역에서는 열악하고 숲이 많은 경우 양호한 것으로 판단된다. 이러한 결과들은 대부분의 기존 연구 결과들과도 부합한다(Liu *et al.*, 2000;

Omernik, 1981; Tong and Chen, 2002). 저수지의 복잡도 또한 모든 수질 특성과 부의 관계를 가지는 것으로 분석되었다. 흥미로운 것은 이러한 복잡도와 도시화 지역, 농경지역과의 관계가 부의 관계를 갖는다는 점이다. 이는 도시적 토지이용 혹은 농경지와 같은 인간의 간섭이 주가 되는 토지이용은 저수지의 형태를 단순화 할 수 있다는 것을 시사하는 것으로 해석된다.

2. 완화모형의 측정

토지이용과 수질과의 관계에 있어서 저수지 형태복잡도의 간섭효과를 측정하기 위하여 측정된 프랙탈을 평균값 (1.12)을 기준으로 단순형과 복잡형으로 나누었다. 결국 완화효과는 단순형에서 토지이용의 영향력이 복잡형에서 회귀분석을 하였을 때 그 평균화 지수 값이 어느 정도 감소되었는지에 의해 판단된다. 본 연구에서는 여러 토지이용 중 도시토지이용에 국한하여 분석하였으며 그 결과는 표 2에 요약되어 있다. 표 2에서 BOD의 일반모형은 BOD 값이 도시지역에 의해 증가하며 저수지의 복잡도에 의해 감소됨을 보여준다. 일반화 모형의 BOD 변화의 약 43%를 설명하는 것으로 나타났다.

단순형 모형에서 도시토지이용은 저수지 BOD 측정치를 높이는 것으로 나타났으며, 모형의 설명력은 약 50%이다. 복잡형 모형에서도 도시토지이용은 BOD 값을 증가시킨다. 하지만 단순형과 복잡형 두 모형의 평균화 지수를 비교해 보면 매우 흥미로운 결과를 얻을 수 있다. 즉 도시토지이용의 영향력은 단순형에서 0.71

표 1. 토지이용, 복잡도, 수질과의 상관분석 결과

	프랙탈	BOD	COD	T-N	T-P	도시	나대지	습지	초지	숲
BOD	-0.22**	-								
COD	-0.29**	0.74**	-							
T-N	-0.05**	0.46**	0.53**	-						
T-P	-0.18**	0.57**	0.69**	0.51**	-					
도시화	-0.16**	0.64**	0.49**	0.33**	0.47**	-				
나대지	-0.11**	0.36**	0.57**	0.53**	0.41**	0.48**	-			
습지	0.03**	0.02**	-0.01**	0.04**	0.01**	0.22**	0.24**	-		
초지	-0.10**	0.19**	0.27**	0.33**	0.21**	0.29**	0.45**	0.27**	-	
숲	0.24**	-0.51**	-0.72**	-0.46**	-0.52**	-0.58**	-0.68**	-0.16**	-0.47**	-
경작지	-0.22**	0.32**	0.63**	0.35**	0.41**	0.22**	0.51**	0.02**	0.26**	0.91**

* $p < 0.01$, ** $p < 0.01$, $n = 153$.

표 2. 도시화지역과 복잡도를 이용한 수질에 대한 일반 모형과 완화모형

	일반모형 (standard model)		완화모형 (moderation models)			
			단순형		복잡형	
	<i>b</i>	β	<i>b</i>	β	<i>b</i>	β
종속변수	BOD					
Urban	0.22*	0.62	0.25**	0.71	0.07**	0.25
FRAC ^d	-5.53*	-0.12	-	-	-4.34*	-
<i>F</i>	56.50**		87.61**		-	
<i>R</i> ²	0.43		0.50		0.06	
종속변수	COD					
Urban	0.16**	0.45	0.16**	0.51	0.21***	0.42
FRAC ^d	-10.54**	-0.22	-	-	-	-
<i>F</i>	30.53**		30.83**		14.23**	
<i>R</i> ²	0.28		0.26		0.18	
종속변수	Total-N					
Urban	0.05**	0.33	0.05**	0.34	0.05***	0.29
FRAC ^d	0.05**	0.003	-	-	-	-
<i>F</i>	9.59**		11.32**		6.1**	
<i>R</i> ²	0.11**		0.11		0.08	
종속변수	Total-P					
Urban	0.003**	0.45	0.003**	0.53	0.004***	0.41
FRAC ^d	-0.90**	-0.10	-	-	-	-
<i>F</i>	22.99**		33.29**		13.17**	
<i>R</i> ²	0.23**		0.28*		0.17	

p*<0.05, *p*<0.01

이지만, 복잡형에서는 0.25로 그 영향력이 급격히 감소했음을 알 수 있다. 더욱이 도시지역을 이용한 복잡형 회귀모형은 그 설명력이 6% 급격히 감소했다. 이러한 결과는 저수지의 복잡도에 따라 도시지역의 수질에 대한 영향력이 감소하는 것을 명확히 보여준다. COD에 대한 일반형, 완화모형들도 BOD 모형과 유사한 결과를 보여준다. COD에 대한 일반모형에서 도시지역은 COD를 증가시키며, 저수지의 복잡도는 COD를 감소시킨다. 단순모형에서도 도시지역은 COD를 증가시키나 그 크기는 복잡형에서 감소하는 것으로 나타났다. Total-N과 Total-P에 대한 일반 모형에 의하면 도시지역은 N과 P를 모두 증가시키는 것으로 나타났으나, 형태복잡도는 BOD나 COD 모형과는 다르게 통계적으로 유의하지 못한 것으로 나타났다. 하지만 단순형 모형과 복잡형 모형을 비교해 볼 때, 복잡도에 따라 도시지역에 의한 N에 대한 영향력은 비교적 작은 차이지만 감소하는 것으로 나타났다. P에 대한 완화모형도 유사한 결과를 보여주었다. 즉 도시지역은 단순형일 때 그 평준화 지수 값이 0.53인데 반하여 복잡형일 때에는 0.41로 감소한다.

따라서 BOD, COD Total-N, Total-P에 대한 일반모형, 완화모형을 분석해 볼 때 도시지역은 모든 유형의 수질에 부정적인 영향을 미치며, 저수지의 형태적 복잡도는 유기물을 감소시키나, N과 P 같은 부 영양물질은 감소시키지 못하는 것으로 보인다. 이러한 결과는 유기물과 부영양물질의 이동 특성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 유기물들은 대부분 입자상태로 지표수에 의해 이동하여 저수지의 가장자리 특성에 의해 영향을 받지만, 영양물질들은 지표수뿐만 아니라 지하수에 용존 상태로 이동하기 때문에 저수지의 가장자리에 대한 영향일 적은 것으로 판단된다. 하지만 저수지 형태복잡도에 따른 간접효과는 모든 수질 특성에 공통적으로 나타났다. 즉 형태복잡도가 직접적으로 수질을 개선하는 효과는 유기물에 대하여 제한적으로 나타나지만, 도시지역의 부정적 효과를 완화하는 간접효과는 유효한 것으로 판단된다.

IV. 결론

인간의 토지이용은 인접하는 수계의 수질에 직접적

인 영향을 미친다. 본 연구 결과에 의하면 이러한 영향은 저수지 형태적 복잡도에 따라 어느 정도 완화될 수 있는 것으로 보여진다. 하지만 일반적으로 유역내 토지이용은 도로의 건설, 수로변경, 제방건설 등 저수지의 형태를 단순화하는 경향이 있다. 이러한 행위들은 결국 오염물질을 직접적으로 생산하는 것뿐만 아니라, 저수지의 형태를 단순화하여 복잡도에 의한 완화효과까지 없애는 결과를 초래할 것으로 예상된다. 유역내 토지이용의 계획 및 관리는 이러한 관점에서 접근할 때 좀더 효과적일 수 있다. 특히 호안 근접지역에 대한 계획 및 관리는 저수지의 수질에 직, 간접적으로 영향을 주므로 저수지의 형태까지를 고려한 복합적인 고려가 요구된다.

인용문헌

1. Baron, R. M, Kenny, D. A.(1986) The moderator mediator variable distinction in social psychology research: Conceptual, strategic, and statistical consideration, *Journal of Personality and Social Psychology* 51(6), 1173-1182.
2. Cadenasso, M. L., Pickett, S. T. A.(2000) Linking forest edge structure to edge function: mediation of herbivore damage, *J. Ecology*, 88, 31-44.
3. Forman, R. T. T.(1995) *Land mosaics: The ecology of landscape and regions*, Cambridge University Press, New York.
4. Liu, A. J., Tong, S. T. Y., Goodrich, J. A.(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, *Environ. Eng. Pol.* 2, 65-76.
5. McGarigal, K., Marks, B. J.(1995) FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, General Technical Report PNW GTR 351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.
6. Omernik, J. M., Abernathy, A. R., Male, L. M.(1981) Stream nutrient levels and proximity of agricultural and forest land to streams, Some relationships, *J. Soil Water Conserv.* 36, 227-231.
7. Tong S. T. Y., Chen ,W.(2002) Modeling the relationship between land use and surface water quality, *J. Environ. Manage.* 66(4), 377-393.
8. Wiens, J. A., 1992. Ecological flows across landscape boundaries: a conceptual overview, *landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*(eds A.J. Hansen & F. di Castri), pp. 217 235, Springer Verlag, New York, NY.