

## 토지이용과 지형이 수질에 미치는 영향의 공간적 변동성에 관한 연구 - 금강 권역을 중심으로

박세린 · 최관모 · 이상우\*

건국대학교 산림조경학과

**Spatial Variation in Land Use and Topographic Effects on Water Quality at the Geum River Watershed.** Se-Rin Park (0000-0001-5119-638X), Kwan-Mo Choi (0000-0002-9204-1082) and Sang-Woo Lee\* (0000-0002-3275-7564) (Department of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University, Gwangjin-Gu, Seoul 05029, Republic of Korea)

**Abstract** In this study, we investigated the spatial variation in land use and topographic effects on water quality at the Geum river watershed in South Korea, using the ordinary least squares (OLS) and geographically weighted regression (GWR) models. Understanding the complex interactions between land use, slope, elevation, and water quality is essential for water pollution control and watershed management. We monitored four water quality indicators – total phosphorus, total nitrogen, biochemical oxygen demand, and dissolved oxygen levels – across three land use types (urban, agricultural, and forested) and two topographic features (elevation and mean slope). Results from GWR modeling revealed that land use and topography did not affect water quality consistently through space, but instead exhibited substantial spatial non-stationarity. The GWR model performed better than the OLS model as it produced a higher adjusted  $R^2$  value. Spatial variation in interactions among variables could be visualized by mapping  $R^2$  values from the GWR model at fine spatial resolution. Using the GWR model, we were able to identify local pollution sources, determine habitat status, and recommend appropriate land-use planning policies for watershed management.

**Key words:** GWR, LULC, OLS, topography, water quality

### 서 론

도시화, 산업화로 인한 유역환경의 변화와 가뭄, 홍수 등 극한 기상 현상의 강도와 빈도 증가에 따른 수리·수문학적 인자의 변화로 인하여 정부와 지자체의 하천 및 유역에 대한 관리와 복원 노력에도 하천의 수질은 개선되지 않거나 악화되고 있는 것으로 보고되고 있다(NIER, 2016). 하천 수질

에 영향을 미치는 요소는 크게 강우 강도, 강수량, 지질, 토양, 지형과 같은 자연적인 요인, 그리고 토지이용 유형, 이용 강도, 인간 활동과 같은 인위적인 요인으로 구분할 수 있다(Khatri and Tyagi, 2015). 인위적 요인은 자연적인 요인에 비하여 상대적으로 오염원 종류, 영향 강도 및 이동 경로가 복잡하고 다양하여 하천 수질에 대한 영향을 예측하기 어려운 특징을 가진다(Khatri and Tyagi, 2015). 그러나 하천 수질에 대한 인위적 요인의 영향은 일부 제어가 가능하다는 관점에서 하천 수질 보전 및 개선을 위한 지속적인 연구와 관심이 필요하다. 특히, 도시 지역의 확대는 불투수층 면적의 증가, 이로 인한 유역의 강우 유출특성과 비점오염물질 거동에 큰

Manuscript received 30 May 2019, revised 14 June 2019,  
revision accepted 15 June 2019  
\* Corresponding author: Tel: +82-2-450-4120, Fax: +82-2-3437-0202,  
E-mail: sw17311@konkuk.ac.kr

변화를 야기시키며, 농경지는 퇴적물, 영양염, 화학물질을 포함한 오염물질을 발생시켜 하천의 이화학적 특성 및 수생태계 건강성에 부정적 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Pratt and Chang, 2012; Gyawalia *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2016). 이와는 반대로 산림지역이나 수변 식생은 오염물질 발생량을 감소시키고, 유역과 수변 지역에서 유출수의 체류 시간을 증가시켜 오염물질의 하천 유입을 저감하는 등 하천 수질 및 수생태계에 긍정적 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Tong and Chen, 2002; Lee *et al.*, 2009).

토지이용과 수질과의 관계를 분석한 기존 국내·외 연구에서는 일반 통계 분석(Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2011), 회귀나무(Regression Tree) (Clapcott *et al.* 2012; Clément *et al.*, 2017), 수질 모델링(Abbaspour *et al.*, 2007; Paliwal *et al.*, 2007), MDS (Multi Dimensional Scale) (Chang, 2008; Shen *et al.*, 2015) 등 다양한 분석방법이 사용되어 왔다. 특히, 통계적 방법론 중에서 상관분석(e.g., Wang, 2001; Tong and Chen, 2002; Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2011), 일반최소자승법(OLS, Ordinary Least Squares)에 기초한 단순선형회귀(linear model) 분석(e.g., Ahearn *et al.*, 2005; Xiao and Ji, 2007), 다중선형회귀(multiple linear regression) 분석(e.g., Yang, 2012; Gyawalia *et al.*, 2013; Singh and Mishra, 2014) 등이 주로 사용되었다. 통계적 관점에서, OLS에 기반한 접근방법은 변수들 간의 관계가 공간적으로 모두 균일(stationarity)하다고 가정한다. 그러나 토지이용의 수질에 대한 영향은 유역의 크기, 토지이용의 패턴, 지형 등 유역의 특성 등에 따라 공간에 따라 다르게(non-stationarity) 나타날 수 있다(Tu and Xia, 2008; Tu, 2011). 유역 토지이용과 수질과의 관계를 다루었던 대부분의 기존 연구들은 변수들 간 관계의 공간적 균일성(spatial stationarity)을 검증하지 않고 수행되어 잔차(residuals)가 독립적이라는 통계적 가정을 위반하고 있으며 현실을 지역적으로 과대 혹은 과소 평가하고 있다고 볼 수 있다(Brunsdon *et al.*, 1998). 이러한 OLS에 기반한 통계적 방법의 한계를 보완하기 위하여 최근 회귀분석 방법 중 하나인 공간지리 가중회귀모형(GWR, Geographically Weighted Regression)이 제안되었으며, 도시공학, 지리학, 공간 경제학 등 공간문제를 다루는 다양한 분야에서 활용되고 있다(e.g., Kim, 2011; Kim and Lee, 2011; Kim and Um, 2013). OLS 방법과는 다르게, GWR에서 변수들의 관계는 공간적으로 변할 수 있다고 가정한다. GWR은 전체 연구 대상지에 대하여 단일 회귀계수를 추정하지 않고 단위 공간별로 추정하여 현실을 좀 더 정확하게 묘사할 수 있으며, 회귀계수 매핑(mapping)과 같은 시각화 과정을 통하여 공간적으로 변화하는 종속변수들의 상대적 영향력 크기를 효율적으로 파악할 수 있다(Brunsdon *et al.*,

1998; Fotheringham *et al.*, 2002). 기존 연구에 의하면 GWR이 OLS에 기반한 일반 회귀모형보다 통계적으로 토지이용과 토양오염, 수질, 생물학적 지표 등과의 관계에 대한 설명력이( $R^2$ ) 높은 것으로 나타났다(e.g., Lee, 2013; An *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017).

하천의 수질은 유역의 다양한 특성들에 의해 영향을 받으며, 유역의 공간적 특성에 따라 지역적으로 그 양상이 크게 다르게 나타날 수 있다. 이러한 관점에서, 국외의 경우 GWR을 이용한 수질과 토지이용 간 관계를 분석한 연구가 매우 활발하게 수행되고 있으나 국내에서는 수질과 토지이용 간 관계의 공간적 이질성보다는 전역적(global)인 관계에 초점을 둔 연구가 많아 GWR을 이용한 연구는 제한적으로 수행되었다(Lee, 2013). 본 연구는 1) 금강 수계에서 수질에 대한 유역 토지이용과 지형의 영향을 분석하고자 OLS 모형과 GWR 모형을 추정하였으며, 2) 추정된 두 모형의 설명력( $R^2$ )과 모형의 적합도(AICc, Moran's  $I$ ) 비교를 통하여 OLS 기반 모형에 비하여 GWR 모형이 유용한 모형임을 제시하기 위하여 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구 대상지

우리나라 주요 4대강 중 하나이며, 한강과 낙동강 다음으로 큰 규모인 금강 대권역을 연구 대상지로 선정하였다. 금강 수계 총 유역 면적은 17,925 km<sup>2</sup>이고 유로 연장은 584.82 km이다(Fig. 1). 금강 본류는 전라북도 장수군에서 발원하여 충청남도와 충청북도를 거쳐 서해로 흘러들어 간다. 충청남북도도와 세종시가 금강 유역의 약 70%로 대부분을 차지하고 있다. 금강은 산림 면적이 유역 면적의 약 50% 이상을 차지하고 있으며, 다음으로 농경지가 점유하고 있다(35%). 금강 유역은 표고 20 m 이하의 평야가 발달하여 우리나라 전체 평균에 비해 농경지의 비율이 높은 편이다. 금강 대권역은 17개의 국가하천과 860여 개의 지방하천으로 구성되어 있으며, 유역의 연평균 기온은 주요 기상관측소를 기준으로 10.2~13°C이고 표준편차는 0.75°C이며 1월 평균 기온은 -5.2~-0.8°C이고, 8월 평균 기온은 23.8~25.6°C이다. 연평균 강수량은 약 1,300 mm이고 여름철 강수량이 연 강수량의 약 55% 이상을 차지하며, 갈수기인 12월부터 4월까지 강수량은 약 224 mm이다(KMA).

### 2. 변수 선정 및 분석

#### 1) 수질 변수 선정

환경부에서는 전국 하천을 대상으로 2007년부터 수생태

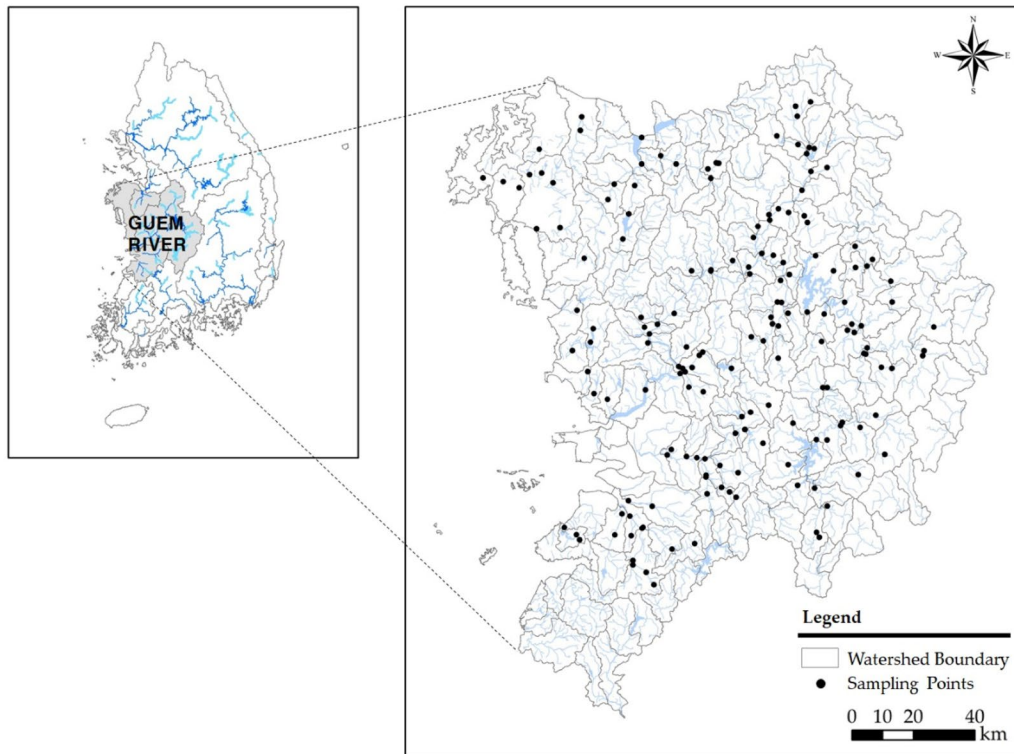


Fig. 1. Study area.

계 건강성 조사 및 평가를 시행하고 있으며, 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류 등 수생태계 건강성뿐만 아니라 하천의 구조, 수리 환경, 수질, 식생 등의 특성에 대해 모니터링해 오고 있다. 본 연구의 대상지인 금강 대권역의 경우 2007년 40개의 측정망으로 시작하여 2012년부터 2015년에는 170개까지 측정망을 확대하였다. 2016년부터는 물환경측정망 내 생물측정망 운영을 도입·운영하여 전국 하천의 생물측정망이 총 3,039개로 확대되었으며, 금강 대권역에는 3년 주기의 일반 측정망 576개와 상시 측정망 41개가 운영되고 있다. 각 측정망에 대한 조사는 홍수 전·후인 봄과 가을 연 2회 실시하고 있으며, 수온, pH, BOD, DO, 전기전도도(EC), Chl-*a* 등을 포함한 다양한 수질 항목이 측정되고 있다.

기존 국내·외 토지이용과 관련된 연구에서는 다양한 수질 항목이 분석에 이용되었다. 본 연구에서는 기존 연구에서 사용된 수질 항목 중 BOD (Biochemical Oxygen Demand: 생화학적 산소요구량), DO (Dissolved Oxygen: 용존 산소량), TN (Total Nitrogen: 총 질소), TP (Total Phosphorus: 총 인)의 4가지 항목을 선정하여 분석하였다. 유기물 농도를 기준으로 하는 BOD와 DO, 영양염류 농도를 기준으로 하는 TN, TP는 하천의 오염 정도를 측정하는 대표적인 지표라고 할

수 있으며, 「환경정책기본법」에 따른 하천과 호소의 수질환경기준으로 이용되고 있다. 측정값은 2014년 금강 대권역의 수생태계 건강성 조사 및 평가 결과의 수질 조사 자료를 이용하였다. 금강 대권역의 총 170개의 측정망 지점 중 금강 수계(만경·동진강, 삼교천, 기타 수계 제외) 중 본류를 제외한 지류 80개 지점을 대상으로 분석을 수행하였다.

## 2) 지형 및 토지이용 변수 선정

하천 수질에 영향을 미치는 자연적 요인과 인위적 요인을 고려하기 위해 본 연구에서는 지형적 특징으로써 표고와 경사(e.g., Richards *et al.*, 1996; Sliva and Williams, 2001)를 자연적 요인 변수로 선정하였고, 유역 토지이용 중 도시, 농경지, 산림의 비율(e.g., Bu *et al.*, 2014)을 인위적 요인 변수로 선정하였다. 표고와 경사는 수치표고모형(DEM, Digital Elevation Model)을 이용하여 ArcMap 10.6.1 프로그램을 통해 추출하였다. 환경부에서는 물환경 관리를 위해 하천 유역의 특성을 고려하여 대권역, 중권역, 소구역으로 구분하고 있으며, 금강 대권역은 21개의 중권역과 137개의 소권역이 포함되어 있다. 본 연구의 공간적 단위는 소권역 단위로 하였으며, 유역의 토지이용 비율은 ArcMap을 이용하여 각 측정망별 소권역 경계를 기준으로 환경부가 가장 최근 발간한

전국 토지피복지도 자료를 활용하여 계산하였다. 유역의 토지이용은 도시지역(주거지역, 공업지역, 상업지역 등), 농업지역(논, 밭 등), 산림지역(활엽수림, 침엽수림 등)의 세 항목을 변수로 선정하였다.

### 3) OLS와 GWR 모형 설정 및 비교

선정된 수질 항목과 독립변수들(지형 및 토지이용 변수)의 관계는 일반최소자승법(OLS)과 공간지리 가중회귀모형(GWR)을 이용하여 SPSS 25 통계 프로그램과 ESRI의 ArcMap 10.6.1 프로그램을 통해 추정하였다. 먼저 SPSS에서 다중 공선성이 있는 변수를 제외하고 모형의 설명력이 가장 높은 독립변수의 조합으로 최적의 모형을 도출하여 선택된 독립변수를 OLS와 GWR에 각각 적용하였다. GWR 모형은 지리적인 근접성을 기준으로 변수들 간 관계를 추정하는데, 이웃(neighborhood)을 정의할 때 fixed spatial kernel 법은 고정된 크기의 반경(bandwidth)을 고려하고 adaptive spatial kernel 법은 다른 크기의 반경을 고려하는 방법이다. 본 연구에서는 각 수질 항목에 대한 GWR 모형의 회귀계수 추정을 위해 adaptive spatial kernel을 이용하였고, 반경(bandwidth) 설정 방법은 AICc를 적용하였다. 추정된 OLS 모형과 GWR 모형의 비교를 위한 기준은 기존 연구에서 많이 사용된  $R^2$ , AICc(Akaike Information Criterion), Moran's  $I$ 를 선정하였다(Fotheringham *et al.*, 2002). 회귀모형 비교에 흔히 사용되는  $R^2$  값은 클수록 설명력이 높은 것으로 볼 수 있으며, AICc 값은 작은 값일수록 더 나은 모형으로 값의 차이가 4보다 클 때 개선된 것으로 판단한다(Fotheringham *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005). 특히, GWR은 지역별  $R^2$  값을 도출하여 공간에 따라 추정된 모형의 설명력이 균일하지 않음을 보여준다. 또한 추정된 모형 잔차(residual)의 Moran's  $I$  값은 0에 가까울수록 모형의 공간적 자기상관성(spatial auto-correlation)이 적어 개선된 모형으로 해석할 수 있다(Tu and Xia, 2008).

## 결과 및 고찰

### 1. 기초 통계량 및 공간적 분포 특성

본 연구에서 사용한 수질 측정 항목, 유역의 토지이용 비율 및 지형 변수들의 기초 통계량은 Table 1과 같다. 수질 측정 항목의 평균은 BOD, DO, TP 값이 각각 2.61, 9.77, 0.06 mg L<sup>-1</sup>으로 「환경정책기본법」 시행령에 제시된 기준에 따르면 BOD는 “약간 좋음”, DO는 “매우 좋음”, TP는 “매우 나쁨” 수준으로 나타났다. 유기물을 기준으로 하는 BOD, DO를 기준으로 판단하였을 때 수질은 양호한 편이나 영양염류를 측정하는 TP를 기준으로 판단하였을 때 수질은 불량하다고 볼 수 있다. 토지이용 비율의 평균은 산림지역이 55.05%로 가장 높았으며, 농업지역이 29.16%, 도시지역이 8.72%로 나타났다. 특히 농업지역과 산림지역의 비율의 표준편차 값이 높게 나타났으며 이는 유역별로 차이가 크다는 것을 의미한다. 금강 권역의 평균 경사는 10.23%이며, 평균 고도는 197.65 m로 우리나라 평균 고도인 482 m에 비해 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 각 변수들의 공간적 분포를 보여주고 있다. 산림지역의 비율은 금강 권역의 남동쪽에 위치하고 있는 전라북도 무주군, 장수군 지역에서 높게 나타났으며, 고도와 경사도도 각각 400~700 m, 14~21%로 높게 나타났다. 도시지역의 비율은 세종시, 대전시, 전주시, 청주시, 군산시, 천안시에서 높은 것으로 나타났으며, 농업지역의 비율은 금강 권역의 북쪽에 위치하고 있는 서산시, 당진시, 예산군과 남서쪽에 위치하고 있는 김제시, 익산시, 부여군, 논산시, 정읍시, 고창군 등에서 높은 것으로 나타났다.

### 2. OLS와 GWR 모형 추정 결과 및 비교

BOD에 대한 OLS 모형과 GWR 모형을 추정한 결과, OLS 모형은 하천의 BOD를 42% 설명하고 있으며, 모형의 F 값은 58.27으로  $p < 0.01$  수준에서 유의한 것으로 나타났다(Table

**Table 1.** Descriptive statistics of variables.

Type	Variables	Mean	SD	Minimum	Maximum
Water Quality Indicators	BOD (mg L <sup>-1</sup> )	2.61	1.67	0.30	7.70
	DO (mg L <sup>-1</sup> )	9.77	1.41	6.30	12.64
	TN (mg L <sup>-1</sup> )	2.20	1.11	0.48	6.15
	TP (mg L <sup>-1</sup> )	0.06	0.09	0.004	0.76
Land Use	Urban area (%)	8.72	9.01	0.65	52.48
	Agricultural area (%)	29.16	15.6	4.95	64.79
	Forested area (%)	55.05	19.2	18.31	86.19
Topographic Features	Slope (%)	10.23	4.37	2.92	18.60
	Elevation (m)	197.65	152.10	26.86	708.91

$n = 80$

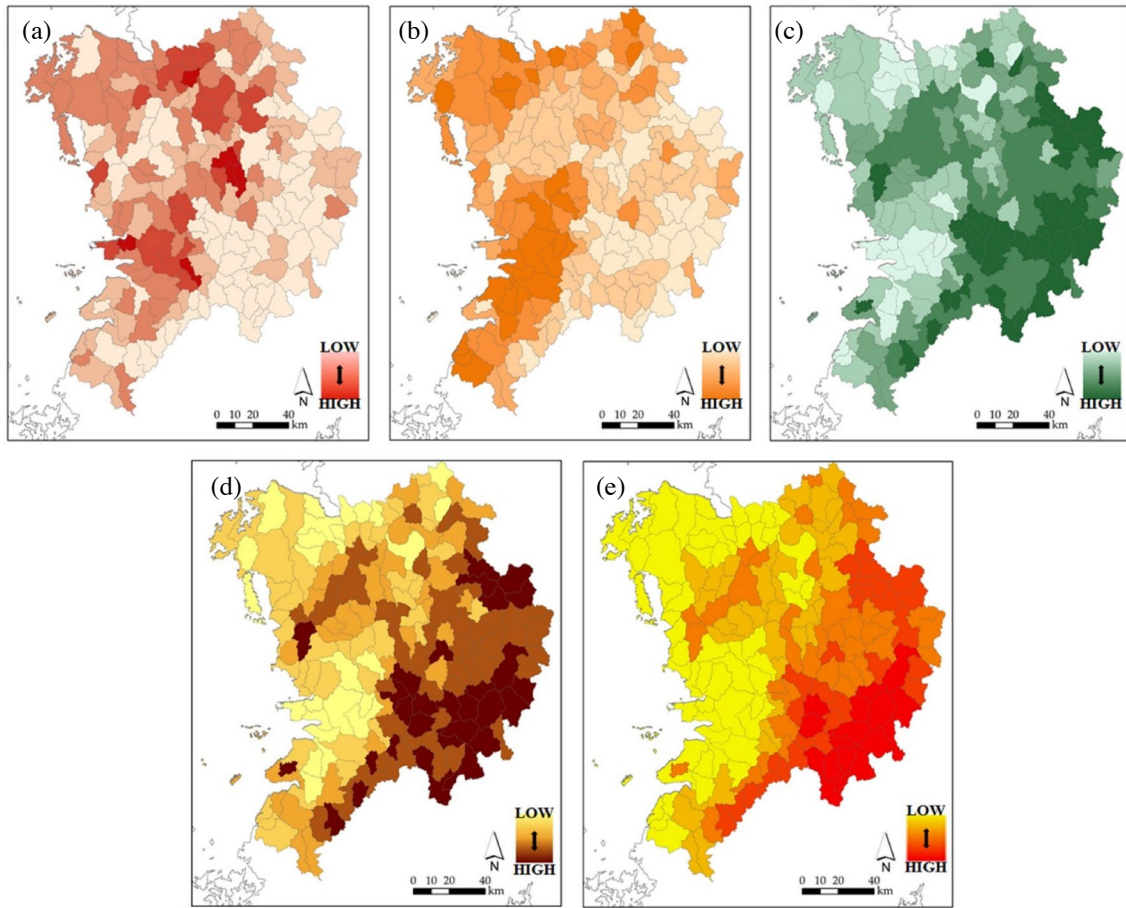


Fig. 2. Spatial distributions of land use and topographic variables. (a) urban areas, (b) agricultural areas, (c) forested areas, (d) slope, (e) elevation.

Table 2. Estimated OLS and GWR models of BOD and comparison.

Variables	OLS model (BOD)			GWR model (BOD)		
	Coefficient	Standardized Coefficient	t-value	Coefficient		
				Min	Max	Median
Intercept	5.17	—	14.17*	2.23	6.03	4.57
% Urban area	—	—	—	—	—	—
% Agricultural area	—	—	—	—	—	—
% Forested area	—	—	—	—	—	—
Slope	-0.25	-0.65	-7.63*	-0.31	-0.05	-0.21
Elevation	—	—	—	—	—	—
F-value		58.27*				
Adjusted R <sup>2</sup>		0.42			0.52	
AICc		270.52			267.43	
Moran's I <sup>1)</sup>		0.140			0.013	

n = 80, \*p < 0.01

<sup>1)</sup>Spatial auto-correlation index of residuals

2). 회귀모형에 의하면 경사가 완만할수록 BOD 값이 높은 것으로 나타나 수질에 부정적 영향을 미치는 것으로 볼

수 있다. OLS와 GWR 모형의 적합도를 비교하기 위해 R<sup>2</sup>, AICc (Akaike's Information Criterion), Moran's I 값을 비교

**Table 3.** Estimated OLS and GWR models of DO and comparison.

Variables	OLS model (DO)			GWR model (DO)		
	Coefficient	Standardized Coefficient	t-value	Coefficient		
				Min	Max	Median
Intercept	12.82	—	15.66*	10.20	13.44	12.13
% Urban area	—	—	—	—	—	—
% Agricultural area	-0.07	-0.79	-5.47*	-0.10	-0.01	-0.06
% Forested area	—	—	—	—	—	—
Slope	-0.09	-0.29	-2.03*	-0.15	0.04	-0.06
Elevation	—	—	—	—	—	—
F-value		20.96*			—	
Adjusted R <sup>2</sup>		0.33			0.56	
AICc		255.45			234.43	
Moran's I <sup>1)</sup>		0.171			-0.055	

$n = 80$ , \* $p < 0.01$

<sup>1)</sup>Spatial auto-correlation index of residuals

**Table 4.** Estimated OLS and GWR models of TN and comparison.

Variables	OLS model (TN)			GWR model (TN)		
	Coefficient	Standardized Coefficient	t-value	Coefficient		
				Min	Max	Median
Intercept	3.45	—	9.87*	1.75	4.98	3.19
% Urban area	—	—	—	—	—	—
% Agricultural area	—	—	—	—	—	—
% Forested area	-0.02	-0.39	-3.80*	-0.05	0.005	-0.02
Slope	—	—	—	—	—	—
Elevation	—	—	—	—	—	—
F-value		14.44*			—	
Adjusted R <sup>2</sup>		0.14			0.33	
AICc		236.17			230.18	
Moran's I <sup>1)</sup>		0.055			-0.011	

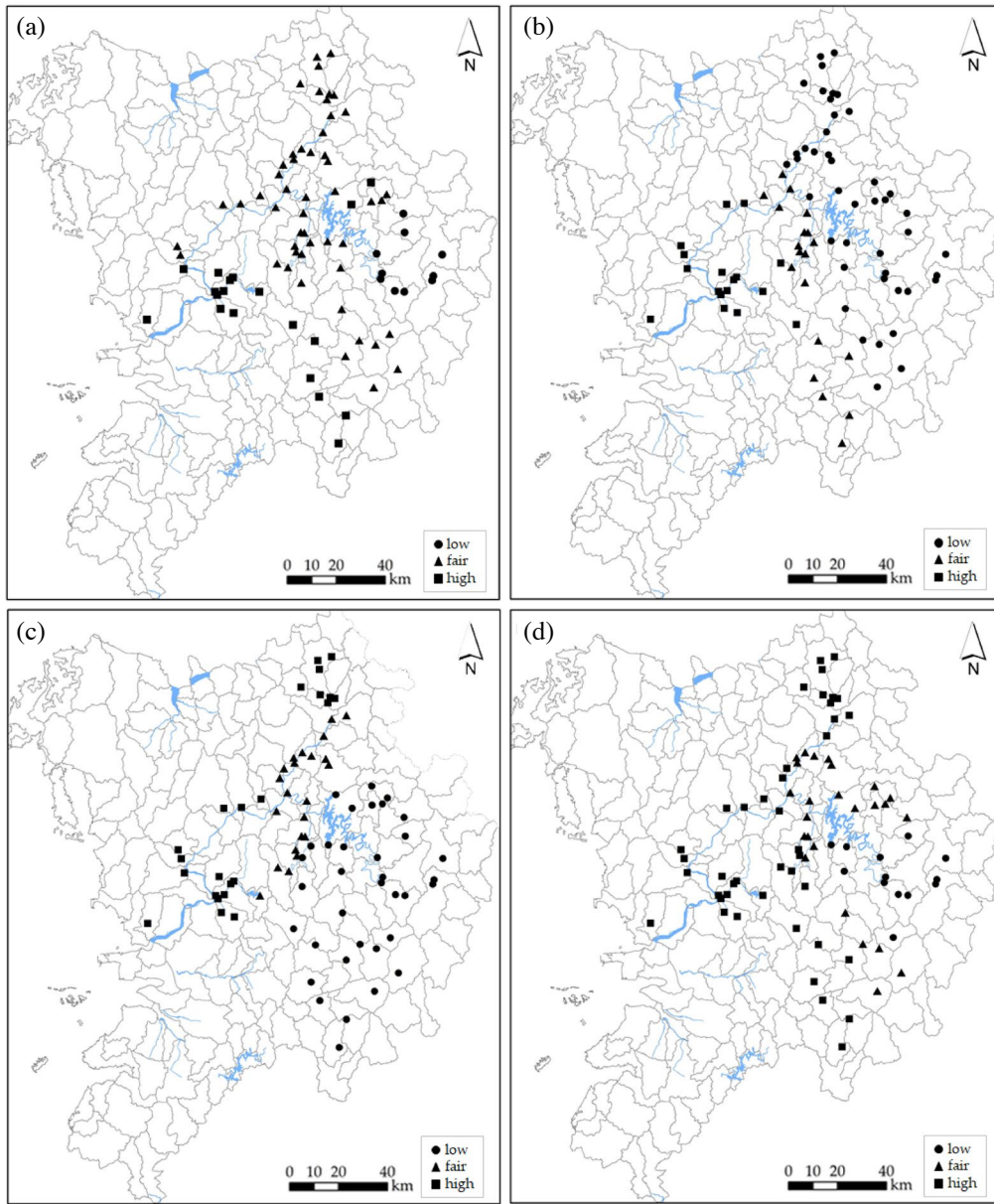
$n = 80$ , \* $p < 0.01$

<sup>1)</sup>Spatial auto-correlation index of residuals

하였다. BOD에 대한 GWR 모형은 R<sup>2</sup> 값이 0.52, OLS 모형은 0.42로 GWR의 값이 높아 설명력이 높은 것으로 나타났다. Moran's I 통계량의 경우, OLS 모형은 0.140, GWR 모형은 0.013으로 GWR 모형에서 공간적 자기상관성이 0에 가까운 값을 보여 모형의 공간적 종속성이 적은 것으로 나타났다. 그러나 모형의 적합도와 간단 명료성을 고려하는 지수인 AICc 값은 OLS 모형에서 270.52, GWR 모형에서 267.43로 다소 낮아졌으나 차이(3.09)가 미미하여 하천 BOD에 대한 GWR 모형의 적합도가 개선되었다고 단정하기는 어려워 보인다.

DO의 OLS 모형과 GWR 모형의 추정 및 비교 결과는 Table 3과 같다. 표에서 OLS 모형은 전체적으로 유의한 것으로 나타났으며 ( $F = 20.96$ ,  $p < 0.01$ ), 모형의 설명력은 33%

정도로 나타났다. 농업지역의 비율과 경사도가 높을수록 하천의 DO 농도는 낮아지는 것으로 나타났다. GWR 모형의 농업지역 변수의 회귀계수는 -0.10에서 -0.01, 경사도의 회귀계수는 -0.15에서 0.04까지 지역에 따라 다양하게 나타났다 (Table 3), 이러한 결과를 통해 유역의 특성과 하천의 DO와의 관계는 공간적으로 달라진다는 것을 알 수 있다. DO의 OLS와 GWR 모형의 비교 결과, 모형의 R<sup>2</sup> 값은 GWR 모형에서 0.56으로 확연하게 높아지며 이는 GWR 모형이 OLS 모형에 비하여 하천의 DO와 농업지역 및 경사도와 관계를 더 잘 설명한다는 것을 의미한다. AICc 값의 경우에도 GWR 모형(234.43)이 OLS 모형(255.45)보다 낮아 GWR 모형의 적합도가 높은 것으로 나타났다. Moran's I 값은 OLS 모형에서는 0.171로 공간적 자기상관도가 높은 것



**Fig. 3.** The spatial distribution of GWR local  $R^2$ . (a) BOD-slope, (b) DO-agricultural areas and slope, (c) TN-forested areas, (d) TP-agricultural areas.

으로 나타났으며, GWR 모형에서는  $-0.055$ 로 0에 가까운 값을 보여 공간적 종속성이 낮은 것으로 나타났다.

Table 4는 TN에 대한 OLS 모형과 GWR 모형의 추정결과이다. OLS 모형은 하천의 총 질소 농도를 14% 설명하고 있으며, 모형의 F 값은 14.44로  $p < 0.01$  수준에서 유의한 것으로 나타났다. OLS 모형에서 유역 내 산림지역은 하천의 총 질소 농도를 낮추는, 즉 하천 수질에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다( $b = -0.02, \beta = -0.39, p < 0.01$ ). GWR 모형의 회귀계수는 0.005부터  $-0.05$ 까지 지역에 따라 다양

한 분포를 나타내며(Table 4), 지역별  $R^2$  값(Fig. 3c)이 다르게 나타나 유역의 특성과 하천의 TN과의 관계는 공간적으로 균일하지 않으며, 지역에 따라 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. OLS 모형과 GWR 모형을 비교하였을 때,  $R^2$  값이 GWR 모형( $R^2 = 0.33$ )이 OLS 모형( $R^2 = 0.14$ )에 비하여 높게 나타나 하천 TN에 대한 GWR 모형의 설명력이 우수하다는 것을 보여준다. 또한 GWR 모형에서의 AICc값(236.17)은 OLS 모형(230.18)에 비해 낮게 나타나 모형의 적합도가 높은 것으로 나타났다. Moran's  $I$  값은 OLS와 GWR 모형 모

**Table 5.** Estimated OLS and GWR models of TP and comparison.

Variables	OLS model (TP)			GWR model (TP)		
	Coefficient	Standardized Coefficient	t-value	Coefficient		
				Min	Max	Median
Intercept	-0.023	-	-1.25*	-0.04	-0.003	0.027
% Urban area	-	-	-	-	-	-
% Agricultural area	0.003	0.53	5.63*	0.001	0.004	0.002
% Forested area	-	-	-	-	-	-
Slope	-	-	-	-	-	-
Elevation	-	-	-	-	-	-
F-value		31.70*				
Adjusted R <sup>2</sup>		0.27			0.35	
AICc		-177.599			-179.256	
Moran's I <sup>1)</sup>		-0.004			-0.099	

$n=80$ , \* $p<0.01$

<sup>1)</sup>Spatial auto-correlation index of residuals

두 0에 가까운 값을 나타내어 공간적 자기상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다.

토지이용 및 지형과 총 인 농도와와의 관계를 분석하기 위하여 OLS 모형과 GWR 모형을 도출하였으며, 그 결과는 Table 5에 요약되어 있다. OLS 모형은 R<sup>2</sup>가 0.27로, 전체적으로 유의한 것으로 나타났다(F=31.70,  $p<0.01$ ). 농업지역의 비율이 높을수록 총 인 농도가 높아져 수질에 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 영양염류의 유입원은 농경지(Woli *et al.*, 2004)이므로 유역 내 농업지역의 비율은 하천의 총 인 농도에 영향을 주게 된다. GWR 모형의 회귀계수 값은 다양한 분포를 나타냈다(Table 5). 모형의 R<sup>2</sup> 값은 GWR 모형에서 0.35로 높게 나타났으며, GWR 모형이 OLS 모형에 비해 설명력이 높다는 것을 알 수 있다. AICc 값의 경우에도 GWR 모형(-179.256)이 OLS 모형(177.599)보다 낮게 나타나 GWR 모형의 적합도가 높은 것으로 나타났다. Moran's I 값은 OLS가 GWR보다 0에 가까운 값을 보여주므로 공간적 자기상관성이 해소되었다고 보기는 어려우나 두 모형 모두 공간적 자기상관성이 낮으며 그 차이가 미미한 것으로 나타났다.

### 3. 토지이용 및 지형이 수질에 미치는 영향

토지이용 중 농업지역의 비율은 DO 농도를 낮추고, 총 인 농도를 증가시켜 수질에 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 농업지역은 논, 밭, 시설 재배지, 과수원, 축산 시설 등을 포함하고 있다. 논과 밭 등의 농경지는 유역 내 비료와 살충제 사용의 증가로 하천 내 인과 질소 같은 영양염과 유기물의 농도에 영향을 주게 된다(Woli *et al.*, 2004). 또한 유역 내 산림지역의 비율은 총 질소 농도와 통계적으로 유의한

관계가 있는 것을 확인하였다. 유역 내 산림지역의 비율이 높을수록 총 질소 농도 값이 감소하여 수질에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 산림이 수질에 긍정적인 영향을 준다는 선행 연구 결과를 뒷받침한다(Calder *et al.*, 2004; Singh and Mishra, 2014). 산림 비율이 높은 지역은 상대적으로 도시 및 농업지역의 비율이 낮아 비점오염원 유입이 적으며, 하천 수변식생은 강우 유출수를 저류하여 침전 등에 의하여 하천으로 유입되는 비점오염물질과 부유물을 줄이는 기능을 한다. 따라서 인간 활동으로 산림이 파편화되어 면적이 줄어들수록 하천 내 침전물, 영양물질, 화학물질, 부유물 등이 증가하는 것으로 보고되어 왔다.

본 연구에서 지형 변수 중 고도는 수질 지표와 유의한 관계가 없는 것으로 나타났으며, 경사의 경우에는 BOD, DO와 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 유역 내 경사와 BOD, DO와의 관계는 경사가 높을수록 BOD와 DO 값이 낮은 것으로 나타났다. Richards *et al.*(1996)의 연구에서 경사가 높은 지역은 유속이 빠르므로 하천으로 유입되는 물질의 속도를 증가시키고, 침식률이 높아 하천 내 수질을 악화시킬 수 있다고 하였다. 이러한 결과는 경사가 높을수록 하천 내 DO가 감소한다는 본 연구의 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 Chang(2008)의 연구에서는 경사가 가파른 지역일수록 개발되지 않고 산림으로 남아있는 경우가 많으며 경사가 완만한 지역일수록 개발로 인한 토지 피복의 변경으로 오염물질이 발생하여 하천의 수질을 악화시킬 수 있다고 하였다. 이는 경사가 낮을수록 하천 내 BOD가 증가한다는 본 연구의 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 이와 같이 지형 변수는 수질 항목에 따라 관계가 상이하게 나타났으나, 토지이용 변수와 수질 간의 관계는 일치하는 결과를 보여 주었다. 따라서 경사와 같은 지형적 요인은 토지이용에 비해 상대적으로



로 예측력이 낮은 변수라고 해석할 수 있으나(Chang, 2008), 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서 OLS와 GWR 모형의 비교를 통해 유역의 토지이용과 지형이 수질에 미치는 영향이 공간적으로 균일하지 않다는 것을 알 수 있었다. Table 2부터 Table 5를 통해 추정된 GWR 모형의 계수가 공간에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 3을 통해 모형의 설명력을 의미하는  $R^2$ 가 공간에 따라 어떻게 달라지는지 지역별 변동성을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 각각 추정된 GWR 모형의  $R^2$  값의 공간적 분포를 보여준다. 이는 지역에 따라 토지이용과 지형 변수가 수질에 미치는 영향에 대한 설명력이 다르다는 것을 의미한다. Fig. 3a는 경사가 BOD에 미치는 영향에 대한 설명력이 높은 지역과 낮은 지역을 보여 주고 있으며, 논산시, 부여군, 진안군, 장수군에서 상대적으로 설명력이 높은 것으로 나타났다. DO의 경우 공주시, 논산시, 부여군에서 설명력이 높고(Fig. 3b), 총 질소의 경우 DO와 유사한 공간적 분포를 보이며 공주시, 논산시, 부여군, 진천군, 음성군에서 설명력이 높은 것으로 나타났다(Fig. 3c). 총 인의 경우 도시와 농경지의 비율이 상대적으로 낮고, 산림지역의 비율이 높은 청주시, 영동군, 옥천군, 보은군을 제외하고 전반적으로 설명력이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 3d). 종합해 보면 공주시, 논산시, 부여군에서 GWR 모형의 설명력이 높은 것으로 나타났다.

## 결 론

본 연구에서는 금강 대권역을 대상으로 유역 내 토지이용과 지형이 수질 측정 항목인 BOD, DO, TN, TP에 미치는 영향을 검증하고자 OLS와 GWR 모형을 추정하고 분석하였다. GWR 모형은 기존 상관분석이나 일반 회귀분석과 비교하였을 때 공간적 이질성을 가정하고 종속변수와 독립변수 간의 지역적 차이를 검증할 수 있다는 장점이 있다. OLS 모형을 이용하여 변수의 영향력과 설명력을 파악하고, GWR 모형을 이용하여 공간적으로 다른 관계를 분석한 후 두 모형을 비교하였다. GWR 모형을 적용하였을 때 지형과 토지이용이 수질에 미치는 영향은 지역적으로 큰 변동이 확인되었다.

OLS와 GWR 모형의 비교를 위해  $R^2$ , AICc, Moran's  $I$  값을 이용하였으며, 전반적으로 GWR 모형이 OLS 모형에 비해 토지이용과 지형이 수질에 미치는 영향을 잘 설명하는 것으로 분석되었다. 이는 유역 내 토지이용 및 지형 요소와 수질과의 관계가 지역적으로 변동성이 있다는 것을 의미한다. OLS 결과는 수질에 미치는 토지이용 및 지형의 영향력을 연구지역에서 동일하게 추정하였으나, GWR 분석을 통해 각 변수가 수질에 미치는 영향력을 지역적으로 나타내어 차

이를 분석할 수 있었다. 대부분 모형에서  $R^2$  값이 OLS에 비해 GWR에서 대폭 향상된 결과를 나타냈으며, GWR 모형에서 AICc값이 4 이상으로 낮아져 모형의 적합도 또한 향상된 것으로 나타났다. Moran's  $I$  값의 경우, 총 인을 제외한 모든 GWR 모형에서 OLS 모형에 비해 공간적 자기상관성이 낮아진 것으로 나타났다.

연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 다중공선성의 문제로 일부 변수가 제외되었으며, 다양한 변수를 모형에 포함하여 분석하지 않았다. 하천의 수질에 영향을 미치는 유역의 특성은 본 연구에 포함된 변수를 포함하여 수리·수문, 토지이용의 패턴, 주요 오염원의 위치 등 다양한 요인들이 관여되어 있으므로 향후 좀 더 다양한 변수에 대한 고려가 필요하다. 다양한 변수 자료가 확보될 경우 모형의 타당성은 증가할 것이다. 둘째, 본 연구에서 수질 측정 항목은 2014년 자료만을 대상으로 하였으며, 다년간의 자료를 고려하지 않았다. 향후 다년간의 수질 측정 자료를 활용하여 시간과 공간의 이질성을 동시에 고려할 수 있는 GTWR(Geographical and Temporal Weighted Regression) 모형을 적용하여 연구를 확장시킬 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 OLS 모형에서는 회귀계수 상 유의미한 값을 볼 수 있는 유의수준이 제시되나, GWR 모형에서는 유의 수준이 제시되지 않는다는 한계점이 있다. 따라서 OLS는 변수의 전반적인 영향력을 파악하기 위해, GWR은 변수들 간 관계의 공간적 변동성을 파악하기 위해 두 방법을 동시에 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

토지이용과 하천의 관계를 보다 정확히 이해하는 것은 수질 개선 및 유역 관리 정책 수립에 매우 중요하다. 본 연구의 결과는 효율적인 하천의 수질 및 유역 관리, 하천정비 및 복원사업, 비점오염 관리, 오염총량제 등 하천 관련 사업 및 정책의 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 더 나아가 향후 유역 관리, 토지이용 계획 등의 수립 시 유역의 특성을 고려하여 지역적으로 다른 접근 방법을 적용한 정책이 필요하다는 점을 시사한다. 전국 또는 시·도 단위에서의 규모에서는 공통된 목표를 설정하고 관리하되, 지자체 단위의 규모에서는 지역별 특성을 고려한 하천 및 유역 관리 정책을 마련하는 것이 필요할 것이다.

## 적 요

본 연구는 금강 권역을 대상으로 일반최소자승법(OLS)과 공간지리 가중회귀모형(GWR)을 적용하여 유역 내 토지이용과 지형적 특성이 BOD, DO, TN, TP을 포함한 수질에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 일반적으로 OLS는 변수 간

의 관계가 균일하다는 가정에 기초하고 있으며, 지역적인 변화를 고려하지 않는다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 변수 간의 관계가 지역적으로 다르게 나타나는 것을 검증하기 위해 GWR을 이용하여 분석하였다. 종속변수인 총 4개의 수질 측정 항목(BOD, DO, TN, TP)과 독립변수인 토지이용 비율(도시, 농업 및 산림지역) 및 지형(고도, 평균 경사)에 대하여 OLS와 GWR 모형을 각각 추정하고, 비교하였다. GWR 모형의  $R^2$ 와 회귀계수 값의 기초 통계량을 분석한 결과, 공간적으로 큰 변동성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 토지이용과 지형이 수질에 미치는 영향이 지역에 따라 균일하지 않은(non-stationarity) 것을 보여준다. 또한 OLS와 GWR 모형의  $R^2$ , AICc, Moran's  $I$  지수를 비교하였을 때, 대부분 GWR 모형이 OLS 모형에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 향후 수질 및 유역 관리를 위한 토지이용 계획 수립 등의 정책적 근거로 활용될 수 있다.

**저자기도** 개념 설정: S.R. Park, S.W. Lee, 자료 수집 및 분석: S.R. Park, K.M. Choi, 원고 초안작성: S.R. Park, 원고 교정: S.R. Park, S.W. Lee, 원고 편집: K.M. Choi.

**이해관계** 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

**연구비** 이 논문은 2018년도 건국대학교 우수연구인력 양성 사업 지원에 의한 논문임.

## REFERENCES

- Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* **333**: 413-430.
- Ahearn, D.S., R.W. Sheibley, R.A. Dahlgren, M. Anderson, J. Johnson and K.W. Tate. 2005. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology* **313**: 234-247.
- An, K.J., S.W. Lee, S.J. Hwang, S.R. Park and S.A. Hwang. 2016. Exploring the non-stationary effects of forests and developed land within watersheds on biological indicators of streams using geographically-weighted regression. *Water* **8**: 120.
- Brunsdon, C., A.S. Fotheringham and M.E. Charlton. 1998. Geographically Weighted Regression - Modelling spatial non-stationarity. *Journal of the Royal Statistical Society* **47**: 431-443.
- Bu, H., W. Meng, Y. Zhang and J. Wan. 2014. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. *Ecological Indicators* **41**: 187-197.
- Calder, I.R., J. Amezaga, B. Aylward, J. Bosch, L. Fuller, K. Gallop, A. Gosain, R. Hope, G. Jewitt, M. Miranda, I. Porras and V. Wilson. 2004. Forests and water - closing the gap between public and science perceptions. *Water Science and Technology* **49**: 39-53.
- Chang, H. 2008. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. *Water Research* **42**: 3285-3304.
- Clapcott, J.E., K.J. Collier, R.G. Death, E.O. Goodwin, J.S. Harding, D. Kelly and R.G. Young. 2012. Quantifying relationships between land use gradients and structural and functional indicators of stream ecological integrity. *Freshwater Biology* **57**: 74-90.
- Clément, F., J. Ruiz, M.A. Rodríguez, D. Blais and S. Campeau. 2017. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments. *Ecological Indicators* **72**: 627-639.
- Fotheringham, A.S., C. Brunsdon and M.E. Charlton. 2002. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships, Wiley.
- Gyawali, S., K. Techato, C. Yuangyai and C. Musikavong. 2013. Assessment of relationship between land uses of riparian zone and water quality of river for sustainable development of river basin, A case study of U-Tapao river basin. Thailand. *Environmental Sciences* **17**: 291-297.
- Hwang, S.A., S.J. Hwang, S.R. Park and S.W. Lee. 2016. Examining the relationships between watershed urban land use and stream water quality using linear and generalized additive models. *Water* **8**: 155.
- Khatri, N. and S. Tyagi. 2015. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science* **8**: 23-39.
- Kim, H.J. and S.W. Lee. 2011. Determinants of 5 major crimes in Seoul metropolitan area: Application of Mixed GWR model. *Seoul Studies* **12**: 137-155.
- Kim, J.W. and J.S. Um. 2013. Exploring NDVI gradient varying across landform and solar intensity using GWR: a case study of Mt. Geumgang in North Korea. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System* **21**: 73-81.
- Kim, K.Y. 2011. Identification of centers using GWR and spatial clustering methods: A case study on Daegu metropolitan city. *Journal of the Korean Urban Geographical Society* **14**: 73-86.
- KMA (Korea Meteorological Administration). [http://www.weather.go.kr/weather/climate/average\\_south.jsp](http://www.weather.go.kr/weather/climate/average_south.jsp).
- Lee, S.W., S.J. Hwang, S.B. Lee, H.S. Hwang and H.C. Sung. 2009. Landscape-ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning* **92**: 80-89.
- Lee, S.W. 2013. Testing non-stationary relationship between the proportion of green areas in watersheds and water quality using geographically weighted regression model. *Journal of*

- the Korean Institute of Landscape Architecture* **41**: 43-51.
- Li, C., F. Li, Z. Wu and J. Cheng. 2017. Exploring spatially varying and scale-dependent relationships between soil contamination and landscape patterns using geographically weighted regression. *Applied Geography* **82**: 101-114.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2017. National Water Quality Assessment (2016). Available from <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/023/5642050.pdf>.
- Paliwal, R., P. Sharma and A. Kansal. 2007. Water quality modeling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS. *Journal of Environmental Management* **83**: 131-144.
- Park, S.R., H.J. Lee, S.W. Lee, S.J. Hwang, M.S. Byeon, G.J. Joo, K.S. Jeong, D.S. Kong and M.C. Kim. 2011. Relationships between land use and multi-dimensional characteristics of streams and rivers at two different scales. *International Journal of Limnology* **47**: 107-116.
- Pratt, B. and H. Chang. 2012. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of Hazardous Materials* **209-210**: 48-58.
- Richards, K., M. Sharp, N. Arnold, A. Gurnell, M. Clark, M. Tranter and W. Lawson. 1996. An integrated approach to modelling hydrology and water quality in glacierized catchments. *Hydrological Processes* **10**: 479-508.
- Shen, Z., X. Hou, W. Li, G. Aini, L. Chen and Y. Gong. 2015. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanized watershed in China. *Ecological Indicators* **48**: 417-427.
- Singh, S. and A. Mishra. 2014. Spatiotemporal analysis of the effects of forest covers on stream water quality in Western Ghats of peninsular India. *Journal of Hydrology* **519**: 214-224.
- Sliva, L. and D.D. Willams. 2001. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water Research* **35**: 3462-3472.
- Tong, S.T.Y. and W. Chen. 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management* **66**: 377-393.
- Tu, J. and Z.G. Xia. 2008. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression. *Science of the Total Environment* **407**: 358-378.
- Tu, J. 2011. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. *Applied Geography* **31**: 376-392.
- Wang, Q., J. Ni and J. Tenhunen. 2005. Application of a geographically weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* **14**: 379-393.
- Wang, X. 2001. Integrating water quality management and land use planning in a watershed context. *Journal of Environmental Management* **61**: 25-36.
- Woli, K.R., T. Nagumo, K. Kuramochi and R. Hatano. 2004. Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas. *Science of Total Environment* **329**: 61-74.
- Xiao, J. and W. Ji. 2007. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques. *Journal of Environmental Management* **88**: 529-551.
- Yang, X.J. 2012. An assessment of landscape characteristics affecting estuarine nitrogen loading in an urban watershed. *Journal of Environmental Management* **94**: 50-60.