

공간지리 가중회귀모형(GWR)을 이용한 유역 녹지비율과 하천수질의 비균질적 관계 검증†

이상우

건국대학교 녹지환경계획학과

Testing Non-Stationary Relationship between the Proportion of Green Areas in Watersheds and Water Quality using Geographically Weighted Regression Model

Lee, Sang-Woo

Dept. of Environmental Design, Konkuk University

ABSTRACT

This study aims to examine the presence of non-stationary relationship between water quality and land use in watersheds. In investigating the relationships between land use and water quality, most previous studies adopted OLS method which is assumed stationarity. However, this approach is difficult to capture the local variation of the relationships. We used 146 sampling data and land cover data of Korean Ministry of Environment to build conventional regressions and GWR models for BOD, TN and TP. Regression model and GWR models of BOD, TN, TP were compared with R^2 , AICc and Moran's I. The results of comparisons and descriptive statistics of GWR models strongly indicated the presence of Non-Stationarity between water quality and land use.

Key Words: Land Use, Water Quality, Forest Effects, Nakdonggang

국문초록

본 연구는 낙동강 대권역에서 공간지리 가중회귀모형을 이용하여 녹지지역과 BOD, TN, TP를 포함하는 수질과의 지역적 비균질적 관계를 검증하고자 수행되었다. 대부분 기존의 상관분석 혹은 회귀분석은 OLS (Ordinary Least Square) 기법에 기초한 균질적 관계의 분석에 초점을 두어 왔다. 이러한 녹지지역과 수질의 균질적 관계에 기초한 분석은 지역적으로 변화를 고려하지 않는 단점이 있다. 연구대상지는 낙동강 대권역내 146개 지점이며, 수질자료와 토지피복 자료는 환경부 자료를 활용하였다. BOD, TN, TP에 대하여 일반 회귀모형과 모델과 GWR 모델을 추정하여 비교하였다. 비교결과, BOD와 TN의 GWR 모델이 OLS 모델에 비하여 우수한 것으로 나타났다. GWR 모델의 R^2 와 녹지지역의 계수 값의 기초통계량을 분석한 결과, 지역적으로 큰 변동이 확인되었다. 이러한 결과는 유역 토지이용과 수질과의 관계가 공간적으로 비균질적이라는 것을 입증하여 주었다.

주제어: 유역토지이용, 하천수질, 녹지효과, 낙동강

†: 이 논문은 2012학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

Corresponding author: Sang-Woo Lee, Dept. of Environmental Design, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, Tel: +82-2-2450-4120, Fax: +82-2-2456-7183, E-mail: swl7311@konkuk.ac.kr

I. 서론

유역에서의 토지이용은 인접 하천의 수질과 생태적 특성에 막대한 영향을 주는 것으로 많은 연구들이 보고하고 있다. 유역 토지이용과 수질 혹은 수생태 건강성을 다루었던 많은 연구들은 공통적으로 유역면적 대비 도시화 면적, 불투수 면적(impermeable areas), 도로, 포장면적(paved areas), 건물 등을 포함하는 개발지역의 비율이 높으면 수질과 수생태 건강성은 악화되고, 초지, 산림과 같은 식생지역의 비율이 높으면 수질과 수생태 건강성은 유리하다는 점을 보고하고 있다(e.g., 최윤의 등, 2012; Meador *et al.*, 2005; Mehaffey, 2005; Tong and Chen, 2002; Tu and Xia, 2008; Wang *et al.*, 1997; Weaver and Garman, 1994; Park *et al.*, 2011). 특히 근래의 연구에 의하면 단순한 유역에서의 토지이용 비율뿐만 아니라, 토지이용 패턴 또한 하천 수질과 밀접한 관계를 가지는 것으로 보고하고 있다. Lee *et al.*(2009)는 우리나라 호소와 댐을 대상으로 한 연구에서 도시화 지역의 PD(Patch Density), LPI(Largest Patch Index), ED(Edge Density)와 같은 경관생태지수가 댐과 호소의 수질에 밀접하게 관련이 있음을 보고하고, 수질 측면에서 도시화 지역이 군집화되고(Aggregated), 단순한 형태(Compact)일 때 분산되고(Dispersed), 복잡한 형태(Complex)보다 유리하다고 주장하였다. 이러한 기존의 연구 결과들은 도시화 지역 혹은 도시인접지의 하천 수질과 수생태 건강성 유지 및 관리를 위해서는 유역에서의 토지이용의 양뿐만 아니라, 공간적 분포의 관리가 필수적이라는 점을 강조하고 있다.

그러나 유역 토지이용과 하천 수질 혹은 하천의 생태적 건강성을 다루었던 대부분의 연구들은 토지이용이 하천에 대한 균질적 영향(Stationarity)을 주는 것으로 가정하고 있다. 즉, 단순 상관분석 혹은 회귀분석과 같은 OLS(Ordinary Least Square) 기법을 이용하여 연구대상지 전 지역에서의 평균적인 유역 토지이용과 수질, 수생태 건강성과의 관계를 분석하였으며, 상관분석 혹은 회귀분석 결과는 대상지 전체에 동일한 것으로 가정하였다. 하지만 유역 토지이용과 하천 수질과 생태적 특성은 유역의 크기, 토지이용의 공간적 패턴, 오염원 위치, 지형 등 다양한 변수에 의해 달라질 수 있다(Tu, 2011). 즉, OLS 기법은 연구대상지 전체의(Global) 평균적인 관계(Stationary Relationships)를 파악하는데 유용하지만, 연구대상지 내 변동(Non-Stationary Relationships)은 파악하기 어렵다. 따라서 연구대상지가 충분히 작다면 연구결과가 직접적으로 유역 토지이용계획에 적용 가능하나, 한강수계와 같이 넓은 지역이 연구대상지라면 연구 결과는 지역에서 활용하기 곤란하다.

연구 전체 대상지 내부의 변동(Local Variation)을 통계적으로 분석하기 위하여 SAP(Spatial Adaptive Filtering, Foster and Gorr, 1986, Gorr and Olligschlaeger, 1994) 그리고 MLM(Multi-

Level Modeling, Goldstein 1987)과 같은 몇몇 통계적 기법들이 제시되었다. 한편, 내부의 변동을 공간통계적으로 분석하기 위하여 공간지리 가중회귀 모형(Geographically Weighted Regression: GWR, Brunson *et al.*, 1996, Fotheringham *et al.*, 2002)이 근래에 제안되었다. GWR은 다른 기법에 비하여 상대적으로 단순하고 지역적으로 회귀계수 값을 모두 계산해 준다는 장점 때문에 임학, 지리학, 도시경제, 원격탐사 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(e.g., Propastin, 2012; Lu *et al.*, 2011, Saphores and Li, 2012; Kamarianakis *et al.*, 2008; Szymanowskia and Kryza, 2011; Tu, 2011; Tu and Xia, 2008; Zhang *et al.*, 2011; Gao and Li, 2011).

본 연구는 공간지리 회귀모형(GWR)을 이용하여 비균질적인 토지이용, 특히 녹지의 하천수질에 대한 영향의 검증에 목적을 두고 있다. 많은 연구에서 녹지는 하천 수질에 긍정적인 영향을 주는 것으로 보고하고 있으나, 기존 연구들은 녹지의 영향은 대상지 내에서 균질하다고 가정하고 있다. 이러한 결과들은 소규모 지역에서의 활용성이 떨어지는 문제를 가지고 있다. 반면, 비균질적 공간지리 회귀모형 연구 결과는 직접적으로 유역 내에서의 토지이용 및 관리 정책이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

II. 연구방법 및 자료

1. 연구 대상 수계

연구대상지는 낙동강 수계로 선정하였다. 낙동강은 우리나라 주요 4대강 중 하나이며, 안동, 구미, 대구, 부산 등 대도시가 상류부터 하류까지 입지하고 있어 하천수질과 토지이용의 관계가 매우 밀접한 수계이다. 낙동강은 강원도 태백의 황이연 못으로 알려져 있으며, 총 연장은 525km이고, 총 유역 면적은 23,834km²이다(Figure 1 참조). 낙동강 수계 최근 30년(1981~2010) 평균 연강수량은 1,064mm이며, 우리나라 여타 지역과 같이 연강수량의 2/3 정도가 7~9월 여름에 집중되는 반면, 봄과 가을은 심각한 가뭄이 발생(기상청, 2013)하여 하천의 수위 변동 폭은 매우 큰 특징을 가지고 있다.

2. 하천 수질

환경부는 매년 전국 하천을 대상으로 수생태 건강성 조사 및 평가(National Aquatic Ecological Monitoring Program: NAEMP)를 시행하고 있다. NAEMP 사업은 우리나라 전국 하천의 수생태 건강성뿐만 아니라, 하천구조, 식생, 하천 수질 등과 같은 다양한 하천 특성을 조사평가하여, 조사항목 측면에서 매우 광범위하며, 공간적으로도 전국 하천을 대상으로 하고 있어 하천

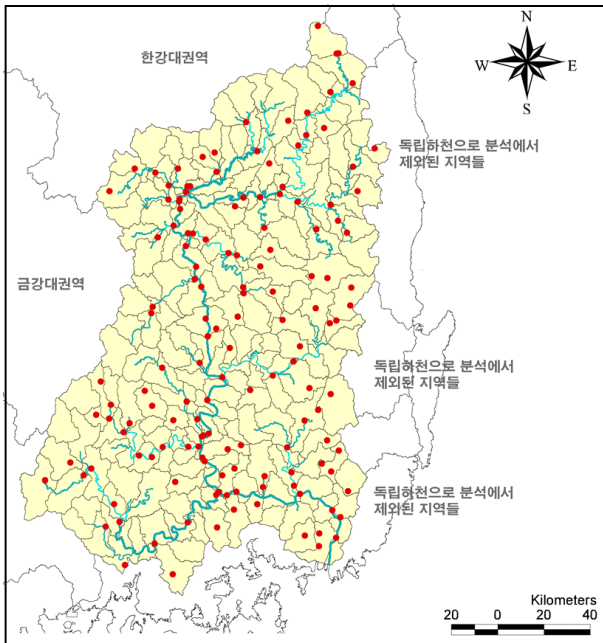


Figure 1. Descriptive statistics of variables

Legend: ● sampling location — major streams
 □ small watershed management areas

관련 연구에 매우 유용한 자료이다(Lee *et al.*, 2011). 본 연구에서 사용한 하천수질 자료는 환경부 NAEMP 자료 중 BOD (Biochemical Oxygen Demand: 생화학적 산소요구량), COD (Chemical Oxygen Demand: 화학적 산소요구량), TN (Total Nitrogen: 총 질소), TP (Total Phosphorus: 총 인), Chl. a 등을 포함한 다양한 수질 지표들을 포함하고 있으나, 본 연구에서는 관련 연구에서 가장 빈번하게 사용되는 BOD, TN, TP 지표만을 사용하였다. 조사결과는 공개된 2009년 자료를 사용하였으며, 연구대상지 내 조사지점 중 낙동강 수계에서 독립적인 하천들을 제외한 146개 지점의 자료를 이용하였다. NAEMP에 의하면 조사는 봄과 가을, 연 2회 실시하였으며, 본 연구는 봄과 가을의 평균값을 이용하였다.

3. 유역 토지이용 평가

환경부는 유역관리를 위하여 물환경관리 기본계획에서 전국을 환경부 장관이 관리계획을 수립해야 하는 4대강 중심의 4개 대권역, 유역 환경청장이 관리계획을 수립해야 하는 117개 중권역, 그리고 그 시장, 군수, 구청장이 관리계획을 수립해야 하는 840개 소권역으로 나누어 관리하고 있다(환경부, 2006). 이 중 낙동강 대권역에는 33개 중권역과 266개의 소권역을 포함하고 있으며, 본 연구의 공간적 단위는 유역관리 가장 기초가 되는 소권역 단위이다. NAEMP가 정확히 소권역별로 1개 지점을 조사평가하지 않지만, 대체적으로 소권역별 조사평가 지점

을 설치운영하고 있다. 본 연구에서는 낙동강 대권역내 266개 소권역 중 NAEMP 조사지점이 설치 운영되고 있으나, 낙동강 수계와 독립적인 하천의 소권역을 제외한 146개의 소권역을 연구대상지로 선정하여 분석하였다. 제외된 소권역은 주로 동해안의 태화강 수계, 외황강 수계, 회야강 수계, 그리고 신명청과 같은 동해안 소규모 수계를 포함하고 있는 소권역들, 또는 환경부의 NAEMP 조사에서 제외된 소권역들이다.

연구범위에 포함된 소권역에서의 토지이용 비율을 계산하기 위하여 본 연구에서는 2007년 환경부가 발간한 전국 토지피복도 GIS 자료를 활용하였다. 환경부의 토지피복도는 23개의 토지피복으로 전국 토지피복을 분류하였으나, 본 연구에서는 이를 6개로 재 분류하여 분석하였으며, 재 분류된 6개 토지피복은 (1) 산업화 지역, 주거지, 상업지, 도로 등을 포함한 개발지역, (2) 농경지(밭), (3) 농경지(논), (4) 녹지지역, (5) 초지지역, 그리고 (6) 습지이다. 연구대상 소권역 경계화일과 환경부 토지피복도 자료를 GIS에서 중첩하여 소권역별 전체 면적대비 녹지지역의 비율을 산정하여 분석에 이용하였다. 수질자료는 2009년 자료이나 토지피복 자료는 2007년 자료로 약 2년의 시간 차이가 있다. 환경부에서 2009년 전국 토지피복도 자료를 공개하지 않은 상태에서 2007년 토지피복 자료는 가장 최근의 자료로 판단하였으며, 소권역 유역차원에서 토지 피복의 변화는, 특히 낙동강 수계에서 녹지의 변화는 그리 크지 않은 것으로 가정하였다.

4. GWR 모델 추정 및 비교

유역 토지이용과 하천 수질과의 관계를 분석하는데 가장 빈번하게 이용되는 OLS(Ordinary Least Square)는 유역 토지이용과 하천수질의 모든 연구대상지에서의 균질적 관계(Stationarity)를 가정하고 있다. 즉, OLS는 연구대상지 전체에서 토지이용-수질의 평균적 관계(Global Model)를 분석하는데 유용한 방법으로, 각 소규모 공간에서의 관계(Local Model)을 제시하지는 못한다. 일반적인 단일 토지이용과 수질과의 OLS 모델은 다음 식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$y = b_0 + b_1x + \epsilon, \epsilon \sim iid N(0, \sigma^2) \quad (\text{식 1})$$

단, y 는 종속변수로 본 연구에서는 하천의 수질,

b_0 는 상수항,

b_1 은 변수 x 에 대한 계수,

x 은 독립변수로 소권역내 녹지비율,

ϵ 은 에러 항이다.

위 식 1에 기초하여 추정된 회귀식은 하나의 β_0 과 β_1 을 제시하여 주는데, 이는 모든 소권역에서 유역내 녹지의 비율이 수질에 대하여 동일한 영향을 준다는 것을 나타낸다. 상기 식 1에 기초하여 단순 GWR 모델식을 다시 기술하면 다음 식 2와 같이 표현된다.

$$y = b_0(u_i, v_j) + b_1(u_i, v_j)x + \epsilon, \quad \epsilon \sim iid N(0, \sigma^2) \quad (\text{식 2})$$

단, y 는 종속변수로 본 연구에서는 j 소권역 하천의 수질,
 (u_i, v_j) 는 소권역 j 의 위치(coordinate),
 $b_0(u_i, v_j)$ 은 지역적(local) 상수항,
 $b_1(u_i, v_j)$ 은 변수 x 에 대한 지역적(local) 계수,
 x 는 독립변수로 소권역내 녹지비율,
 ϵ 은 에러 항이다.

식 2에서 흥미로운 것은 상수항과 변수의 계수가 더 이상 단일 특정 값이 아닌 위치(u_i, v_j)에 따라 변한다는 사실이다. 따라서 식 2는 단일 식이 아닌 측정된 샘플 수와 동일한 다수의 식을 나타낸다는 것을 알 수 있다. GWR 모델은 특정 지점에서의 지리적 근접성에 기초하여 종속변수와 독립변수 간의 관계를 추정한다(Fotheringham *et al.*, 2002). 또한 GWR 모델 추정을 위해서 본 연구에서는 spatially adaptive kernel(세부적인 weighting 방법들은 Charlton *et al.*(2005) 가중방법을 사용하였다.

녹지지역과 하천 수질과의 관계를 보다 더 잘 설명하고 있는지를 평가하기 위해서는 OLS 모델과 GWR 모델의 비교가 필요하다. 본 연구에서는 세 가지 기준을 가지고 비교하였는데, 첫 번째 항목은 회귀모형 비교에 가장 흔히 사용되는 R^2 이고, 두 번째 항목은 AICc(Akaike Information Criterion, Fotheringham *et al.*, 2002) 값이다. 일반적으로 AICc 값이 낮으면 추정된 모델이 보다 현실을 잘 설명하는 것으로 해석할 수 있다(Wang *et al.*, 2005). 마지막 기준은 Morans' I 값이다. 측정된 모델 잔차의 Morans' I 값이 0에 가까울수록 모델의 공간적 종속성이 적은 것으로 해석할 수 있다(Tu and Xia, 2008). OLS 모델과 GWR 모델의 추정, 그리고 비교를 위한 통계값들은 ESRI의 ArcMap과 R 통계프로그램을 이용하여 구하였다.

III. 결과

1. 측정변수들의 기초 통계량

Table 1은 BOD, TN, TP, 그리고 녹지지역의 비율을 포함한 측정변수들의 기초통계량을 보여 주고 있다. 전반적으로 측정 지점들의 수질은 비교적 양호한 수준에 분포되어 있으나, 몇몇 지점에서 상당히 높은 수치를 보여주고 있어 수질측면에서 매우 불량한 것으로 나타났다. 측정변수들의 평균은 BOD, TN, TP가 각각 1.029, 2.268, 0.045으로 수질환경기준 및 호소수 수질환경기준상(환경정책기본법시행령) BOD의 경우 “좋음”, TN은 “매우 나쁨”, TP는 “보통” 수준을 보이고 있는 것으로 판단된다. 흥미로운 것은 BOD를 기준으로 한 수질은 좋은 상태이나 영양염류 기준으로 한 기준으로 볼 때 조사지역은 보통 내지는 매우 나쁜 수준으로, 이화학적 기준측면보다는 영양염류 측면에서 더 불량한 것으로 판단된다. 유역내 녹지지역의 평균적인 비율은 64.215이고, 최대는 95.54로, 특정 소권역에서는 녹지비율이 매우 높은 것으로 판단된다.

Figure 2는 각 측정변수들의 공간적 상대적 분포를 보여주고 있는데, 낙동강 대권역을 상하로 가로 지르는 낙동강 분류 구간을 중심으로 대체적으로 수질이 불량하고, 녹지비율도 낮은

Table 1. Descriptive statistics of variables

Variables	Min.	Max.	Mean	Std.D.
BOD	2	5.1	1.029	0.69
TN(총 질소)	0.739	4.95	2.268	0.86
TP(총 인)	0.003	0.448	0.045	0.05
% Green area(녹지비율)	26.674	95.54	64.215	14.98

$n=146$

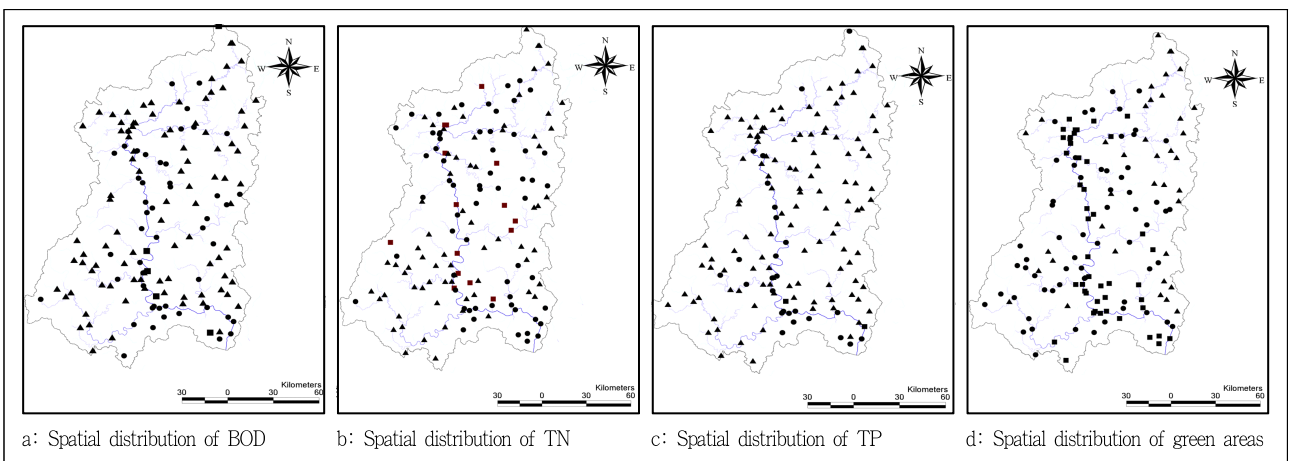


Figure 2. Spatial distributions of measured variables

In the Figure, Bad, Fair, Good of water quality (a, b, c) and Poor, Fair, Rich of green areas (d) are used relative terms.
 Legend: (a,b,c) ■ bad ● fair ▲ good (d) ■ poor ● fair ▲ rich

것을 알 수 있다. BOD와 TN은 비교적 유사한 공간적 분포를 보이며, TN의 경우 본류의 중앙부터 하류구간에서 특히 수질이 좋지 않은 것으로 보인다. 녹지 비율은 전반적으로 동측에서 높은 비율을 보이고, 중앙부나 서측에서는 상대적으로 낮은 녹지비율을 갖는 것으로 보인다.

2. OLS 모델과 GWR 모델 추정 및 비교

유역의 녹지비율과 하천수질과의 관계에 있어서 비균질성(Non-Stationarity) 검증을 위하여 BOD, TN, TP에 대한 3개의 OLS 모델과 GWR 모델을 추정하여 비교하였다. 위에서 기술한 바와 같이 모델의 적합도 비교는 R^2 , AICc 값, 그리고 잔차의 공간자기상도(Moran's I) 값을 이용하여 비교하였다. R^2 은 높을수록 추정된 모형의 설명력이 높으며, AICc 값과 공간자기상관도는 낮을수록 현실에 가깝게 추정되었거나, 잔차의 공간 종속성이 낮아 보다 나은 모형으로 판단할 수 있다.

Table 2는 BOD를 위한 OLS 모델과 GWR 모델의 추정결과를 보여주고 있다. 추정된 OLS 모델은 하천의 BOD를 약 14.6% 설명하고 있으며, 모델 전체적인 유효성은 ($F=25.86$)으로 $p < 0.01$ 수준에서 유효한 것으로 나타났다. 또한 OLS 모델에서 유역내 녹지지역이 인접 하천의 BOD를 낮추는, 즉 하천 수질에 긍정적인 역할을 하는 것을 보여주고 있다($b = -0.018$, $\beta = -0.39$, $p < 0.01$). OLS 모델과 GWR 모델의 비교에 있어서, GWR 모델 ($R^2 = 0.222$)이 OLS 모델($R^2 = 0.146$)에 비하여 높은 R^2 값을 보여 주고 있어, 하천 BOD에 대하여 GWR 모델의 설명력이 높은 것으로 나타났다. GWR 모델의 AICc 값과 공간자기상관성 값 모두 OLS 모델보다 낮은 값을 보여 주고 있어, 모델 적합성도 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 유역내

녹지지역의 비율과 하천 BOD와의 관계에 있어서 공간적으로 비균질(Non-Stationarity)하다는 점을 보여 주고 있다. 즉, 녹지지역과 BOD와의 관계는 공간적으로 크게 변화한다는 것을 알 수 있다.

TN을 위한 OLS 모델과 GWR 모델의 추정 및 비교 결과를 보여주고 있는 Table 3에서도 BOD 모델과 유사한 결과 관찰할 수 있다. 표에서 OLS 모델은 전체적으로 유효한 것으로 나타났으며($F=25.86$, $p < 0.01$), 모델의 설명력은 5.9% 정도로 비교적 낮은 설명력을 보여 주고 있다. 즉, 하천의 총 질소 농도는 유역의 녹지지역에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 일반적인 질소의 유입원이 경작지역임(Tong and Chen, 2002), 그리고 본 연구에서 경작지역을 설명변수로 포함하지 않은 것을 고려한다면 낮은 모델의 설명력은 설명이 가능하다. 비록 모델의 전체적인 설명력이 낮은 수준이지만, 유역에서의 녹지지역 비율은 주변 하천에서의 총 질소의 농도를 낮추는 효과가 있는 것으로 보인다($b = -0.015$, $\beta = -0.255$, $p < 0.01$). 즉, 유역에서 녹지지역의 비율이 높을수록 인접 하천에서 총 질소의 농도는 낮아질 가능성이 높은 것으로 해석이 가능하다. 모델의 R^2 값은 GWR 모델에서 0.119로 상당히 높아지는데, 이는 GWR 모델이 OLS 모델에 비하여 녹지지역과 하천 총 질소 농도와의 관계를 보다 잘 설명하고 있다는 것을 보여주고 있다. AICc 값 또한 GWR 모델이 OLS 모델보다 낮아 GWR 모델이 녹지지역과 하천에서 총 질소 농도와 관계를 보다 잘 설명하는 것으로 나타났으나, 공간 자기상관 값은 GWR 모델에서 다소 높게 나타났다. 하지만 공간자기상관도 값이 일반적인 상관계수와 같이 -1 과 1 사이의 값을 가지며, 0 에 가까울수록 상관성이 없는 것으로 해석하는 점을 고려할 때, 두 모형 모두 0 에 가까운 값을 보여주고 있어, 그 차이는 극히 미미한 것으로 판단된다.

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

Variables	OLS model (BOD)			GWR model (BOD) ¹⁾
	b ²⁾	β ³⁾	t-value	
Intercept	2.187	-	9.358**	-
% Green area	-0.018	-0.390	-5.085**	-
F-value	25.860**			-
Adjusted R ²	0.146			0.222
AICc	288.019			276.450
Moran's I ⁴⁾	0.118			-0.044

Compared to OLS model, GWR model with higher R^2 , lower AICc value and lower spatial autocorrelation explains better the relationship between green areas and BOD.

¹⁾ Coefficients of intercept and %green areas in GWR model vary observation by observation.

²⁾ Regression coefficient of green areas.

³⁾ Standardized regression coefficient of green areas.

⁴⁾ Spatial autocorrelation index of residuals.

$n=146$, ** $p < 0.01$

Table 3. Estimated OLS and GWR models of TN and comparison

Variables	OLS model (TN)			GWR model (TN) ¹⁾
	b ²⁾	β ³⁾	t-value	
Intercept	3.220	-	10.452**	-
% Green area	-0.015	-0.255	-3.169**	-
F-value	10.045			-
Adjusted R ²	0.059			0.119
AICc	368.682			362.969
Moran's I ²⁾	-0.063			-0.081

Compared to OLS model, GWR model with higher R^2 and lower AICc value explains better the relationship between green areas and TN concentration.

¹⁾ Coefficients of intercept and % green areas in GWR model vary observation by observation.

²⁾ Regression coefficient of green areas.

³⁾ Standardized regression coefficient of green areas.

⁴⁾ Spatial autocorrelation index of residuals.

$n=146$, ** $p < 0.01$

따라서 녹지역과 총 질소 농도와의 관계를 설명함에 있어서 GWR 모델이 OLS 모델에 비하여 상대적으로 우수한 것으로 판단되며, 이러한 결과는 녹지역과 총 질소의 농도와의 관계는 공간적으로 변하는 비균질성을 갖는 것으로 해석된다.

녹지역과 TP(총 인)의 관계를 분석하기 위하여 추정된 OLS 모델과 GWR 모델은 Table 4에 요약되어 있다. 추정된 OLS 모델은 전체적으로 유효한 모형인 것으로 나타났으나($F=25.86$, $p<0.01$), 그 설명력은 상당히 낮은 수준인 것으로 보인다($R^2 = 0.093$). 이러한 이유는 총 질소와 같이 영양염류의 공급원이 본 연구에 포함되지 않은 경작지이기(Tong and Chen, 2002) 때문으로 판단된다. 하지만 녹지역의 TN(총 인) 농도에 대한 긍정적인 효과는 유효한 것으로 판단된다($b = -0.001$, $\beta = -0.315$, $p<0.01$). R^2 는 GWR 모델에서 크게 개선되는 것으로 나타나($R^2=0.149$), GWR 모델이 OLS 모델에 비하여 녹지역과 하천에서의 총 인 농도와의 관계를 보다 잘 설명하는 것으로 보인다. 하지만 GWR 모델의 상대적으로 높은 AICc 값과 공간자기상관도에 비추어 볼 때 GWR 모델이 OLS 모델에 비

Table 4. Estimated OLS and GWR models of TP and comparison

Variables	OLS model (TP)			GWR model (TP) ¹⁾
	b ²⁾	β ³⁾	t-value	
Intercept	0.127	-	6.075**	-
% Green area	-0.001	-0.315	-3.978**	-
F-value	15.827**			
Adjusted R ²	0.093			0.149
AICc	-417.826			-425.190
Moran's I ⁴⁾	0.071442			-0.0883

Compared to OLS model, higher R² GWR model shows suggests GWR model explains better the relationship between green areas and TP concentration. However, higher values of AICc values and spatial autocorrelation of GWR model indicate better performance of GWR model over OLS model is not conclusive.

¹⁾ Coefficients of intercept and % green areas in GWR model vary observation by observation.

²⁾ Regression coefficient of green areas.

³⁾ Standardized regression coefficient of green areas.

⁴⁾ Spatial autocorrelation index of residuals.

$n=146$, ** $p<0.01$

해 녹지와 총 인 농도와의 관계를 보다 잘 설명하는 모델이라는 것을 단정하기는 어려워 보인다.

3. 수질에 대한 녹지역 영향력의 비균질성(Non-Stationarity)

OLS 모델과 GWR 모델의 비교를 통하여 녹지역의 수질에 대한 영향이 공간적으로 비균질적(Non-Stational)이라는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 영향력의 공간적 비균질성은 오염원의 위치, 토지이용 패턴, 수리수문적 특성, 하천 유형, 강우 특성 등 다양한 변수에 기인한 것으로 추정된다(Tu, 2011). 이러한 다양한 원인에 의하여 녹지역의 수질에 대한 영향력은 공간에 따라 다르고, 또한 추정된 모델의 계수와 설명력도 다를 수 있다.

Table 5와 Figure 3은 식 2에 기초하여 추정된 BOD, TN, TP GWR 모델의 R² 값과 녹지역 변수의 회귀계수 기초 통계 값과 공간적 분포를 보여주고 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 추정된 GWR 모델의 R² 값과 녹지역의 계수 값이 지역적으로 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 R² 값과 녹지역의 계수 값의 지역적 변동은 녹지역의 수질에 대한 영향력이 균질하지 않고, 유역특성에 따라 비균질하다는 것을 직접적으로 보여주고 있다. 특히 그 변동 폭은 BOD 모델이 가장 크며, TP 모델은 그 변동 폭이 상대적으로 작으로 보인다. BOD 모델의 최대 R² 값은 0.284이고, TP 모델의 최대 R² 값은 0.137으로 지역적 모델의 설명력 또한 BOD 모델이 상대적으로 우수한 것으로 보인다. 녹지역의 영향력(R²)은 TN 모델에서 최대 -0.042로 나타나, 상대적으로 가장 큰 영향력을 보여주었고, TN 모델에서 가장 작은 영향력을 보였다. Figure 3에서, 공간적으로 녹지의 BOD에 대한 영향력은 구미, 대구, 부산 등 도시화율이 높은 하류지역에서 그 영향력이 상대적으로 높고, 도시화율이 상대적으로 낮은 상주, 문경, 안동지역을 포함하는 중, 상류 지역에서 낮아지는 것을 볼 수 있다. 총 질소(TN)의 경우 도시화율이 상대적으로 높거나 혹은 낮은 경우에는 녹지의 영향력이 보통 수준으로 변하며, 도시화율이 중간 정도일 때 가장 높은 것으로

Table 5. Local R² and coefficients of green areas in estimated GWR models, and their descriptive statistics

Water quality	GWR model	Min. ¹⁾	Max.	Mean	Std.D.
BOD	Local R ²	0.042	0.284	0.183	0.093
	Coefficient of Green Areas	-0.006	-0.034	-0.021	0.726
TN	Local R ²	0.000	0.212	0.081	0.064
	Coefficient of Green Areas	0.003	-0.042	-0.017	0.013
TP	Local R ²	0.053	0.137	0.102	0.021
	Coefficient of Green Areas	-0.0005	-0.001	-0.001	0.0005

¹⁾ Absolute values

$n=146$

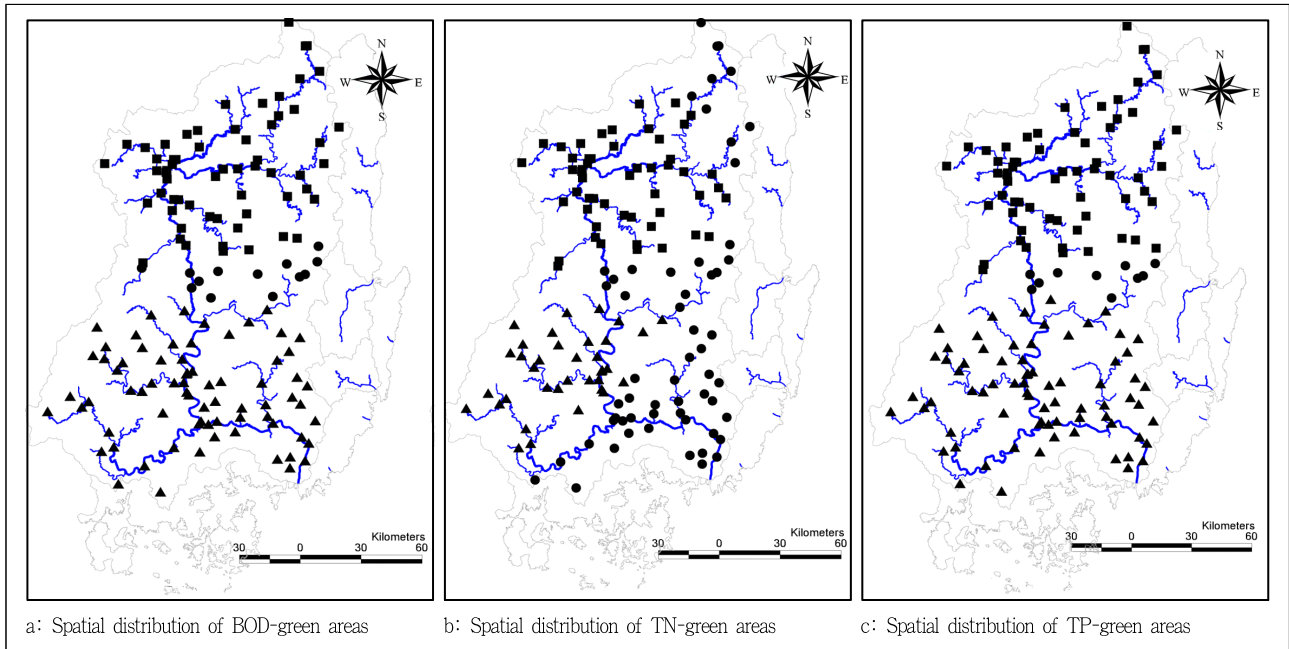


Figure 3. Non-stational relationships between green areas and water quality parameters

Spatially, influence of green areas is higher in downstream areas where watersheds are relatively highly urbanized, and it is lower in middle and upstream areas where watersheds are relatively less urbanized.

Legend: ■ low ● fair ▲ high

보인다. 총 인(TN)의 경우도 BOD와 매우 유사한 공간적 분포를 보인다. 즉, 도시화율이 높은 하류에서는 녹지의 영향력이 높고, 도시화율이 낮은 중상류에서는 녹지의 영향력이 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다. 하지만 이러한 공간적 해석은 소권역 단위에서 GWR 모형에서 녹지의 회귀계수 값과 소권역 도시화율과의 관계를 추가적으로 분석해야 좀 더 명확한 결론에 도달할 수 있을 것으로 보인다. 또한 Figure 3에서 나타난 공간적 패턴은 녹지와 수질과의 관계가 측정된 오염지표뿐만 아니라, 공간적으로 달라지는 것을 보여 주고 있다. 아마도 이러한 현상은 오염물질과 녹지와의 관계 및 오염물질의 유입 경로 및 패턴 등에 의해 변화하는 것으로 해석되나, 본 연구결과로는 확정적인 결론을 내리기 어려우며, 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

IV. 결론

하천 수질과 유역의 토지이용과의 관계에 대한 연구에서 가장 흔하게 사용되는 분석방법인 Pearson 상관분석과 일반 회귀분석은 OLS에 기초하고 있는데, 이는 전체 연구대상지의 평균적인 관계를 분석하기에 용이하나, 지역적으로 변화하는 관계를 무시하는 단점이 있다. 본 연구는 이러한 지역적으로 변화하는 종속변수와 독립변수간의 관계를 분석하기 위해 유용한 GWR(공간지리 가중회귀모형, Geographically Weighted Regression)을 이용하여 녹지지역과 하천수질 관계의 비균질성(Non-Stationarity)을 검증하고자 OLS 모델과 GWR 모델을 추정하고 비교 평가하였다. 모델 추정을 위하여 2009년 전국하천 수생태 건강성 조사 및 평가(NAEMP) 결과 중 낙동강 대권역의 BOD, TN, TP 자료를 분석에 이용하였다. 유역의 녹지비율은 2007년 환경부의 토지피복도에 기초하여 낙동강 대권역내 소권역 단위에서 전체 유역면적 대비 녹지비율을 OLS 모델과 GWR 모델을 추정하였다.

추정된 OLS 모델과 GWR 모델을 R^2 , AICc 값, 그리고 추정된 모델 잔차의 공간자기상관성 등 세가지 기준을 가지고 비교하였다. TP(총 인) 항목을 제외하고, BOD와 TN 항목에서 GWR 모델이 OLS 모델에 비해 상대적으로 녹지비율과 수질과의 관계를 보다 더 잘 설명하는 것으로 나타났다. 또한 추정된 GWR 모델의 R^2 와 녹지지역의 계수의 기초 통계량을 분석한 결과, 하천의 BOD와 TN 농도에 대한 R^2 와 녹지지역의 계수는 지역적으로 크게 변하는 것으로 나타났다. OLS 모델에 대해 GWR 모델의 상대적 우수성, 그리고 추정된 GWR 모델에서 R^2 와 녹지지역 계수의 지역적 변동성은 모두 녹지지역과 하천 수질과의 관계에서 지역적 비균질성(Non-Stationarity)이 존재함을 증명해준다.

녹지지역과 수질과의 관계에 있어서 지역적 비균질성의 존재는 수질을 보전하기 위한 토지이용계획 및 관리를 좀 더 복잡하게 만든다. 지역적으로 녹지지역과 수질의 관계가 균질하다면 모든 연구대상지역에 동일한 토지이용 관리계획이 적용

된다. 지역적으로 비균질성이 존재한다면 모든 연구대상지역에 동일한 토지이용 관리계획이 적용

될 수 있지만, 이러한 지역적 비 균질성의 존재는 지역적으로 다른 접근방법과 다른 정책이 적용되어야 한다는 것을 강조하고 있다. 따라서 수질 보전을 위한 유역 토지이용계획 및 관리에 좀 더 정교하고, 지역 유역 고유 특성을 반영한 접근이 필요하다. 근래의 연구에 의하면 녹지의 수질에 대한 긍정적인 영향은 도심지역에 가까울수록 좀 더 큰 것으로 보고하고 있어 (Tu, 2011), 도시화 지역에서 녹지의 확보에 좀 더 많은 지자체의 정책적 관심과 지원이 특히 더 필요하다. 하지만 정부 차원에서 수질을 고려한 유역관리에는 이러한 공간적 비균질성은 오히려 정책의 수립과 집행에 덜 효과적일 수 있다. 따라서 국가 차원의 유역관리는 균질성을 기초로, 지자체 차원에서의 유역관리는 비균질성을 기초로 하는 혼용식 방법이 적당할 수 있다.

녹지지역과 수질과의 관계에 있어서 지역적-공간적 비균질성의 원인은 유역특성, 수리수문, 토지이용 패턴, 주요 오염원의 위치 등 다양한 변수들이 관여되어 있다. 낙동강 수계에서 이러한 녹지지역과 수질과의 비균질적 관계에 대한 원인 추정 은 본 연구 범위 밖으로 연구에 포함되지 않았다. 하지만 지역적 비균질성에 대한 원인을 규명할 수 있다면, 녹지지역과 수질과의 관계를 좀 더 일반화 시킬 수 있고, 또한 수질 보전을 위한 토지이용 계획 및 관리를 좀 더 용이하게 할 수 있을 것이다. 추정된 GWR 모델의 녹지지역의 계수 혹은 지역적 R^2 와 다양한 공간특성 변수들 간의 관계를 분석하는 것도 비균질성 원인을 규명하는 한 방법이 될 수 있을 것이다.

본 연구의 한계는 설명변수를 하나밖에 사용하지 않은 점이다. 이러한 이유로 추정된 OLS 모형과 GWR 모형이 낮은 R^2 값을 가지게 되었으며, 이는 본 연구의 가장 큰 한계 점이다. 설명력을 높이기 위해 GWR 모형에 추가적으로 다른 토지피복 비율 변수의 추가는 상당히 많은 소권역수가 필요하다. 하지만 본 연구에서는 소권역 개수가 고정되어 있어 설명변수를 추가할 수 없었다. 추후 연구에서 좀 더 많은 샘플 수를 확보할 수 있다면 다른 토지피복 비율들의 수질에 대한 공간적 변화를 분석하는 데에 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 연구 결과에서 나타난 바와 같이 모든 수질항목에 녹지의 비균질성이 동일하게 발견되기 보다는 수질항목에 따라 선택적으로 나타나는 것으로 보아, 좀 더 다양한 수질항목을 고려한 연구 또한 흥미로운 주제일 것으로 판단된다. 수질-녹지와의 관계가 본 연구에서 통계적으로 의미 있는 비균질성을 보였지만, 타 지역에서도 이와 동일한 결과를 보일지는 알 수 없으며, 낮은 설명력을 고려할 때 일부 지역에서는 비균질성이 실질적인 차이가 있는지 판단하고 어렵다. 또한 본 연구에서 사용한 토지피복자료와 수질자료는 시기적 차이가 있으므로 환경부에서 2009년 전국 토지피복도를 공개하면 반복연구를 통하여 연구결과를 확인할 필요성도 있다.

인용문헌

1. Brunsdon, C., A. S. Fotheringham and M. E. Charlton(1996) Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis* 28(4): 281-298.
2. Charlton, M., S. Fotheringham and C. Brunsdon(2005) Geographically Weighted Regression, ESRC National Center for Research Methods (NCRM/006).
3. Choi, Youn-Hee, Yae-Jun Chun and Jin-Hyoung Jon(2012) A study on the physical changes of streams due to urbanization, *Proceedings 2012 Korean Association of Landscape Architects Spring Conferences*, pp. 211-215.
4. Foster, S. A. and W. L. Gorr(1986) An adaptive filter for estimating spatially varying parameters: Application to modeling police hours spent in response to calls for service. *Management Science* 32: 878-889.
5. Fotheringham, A. S., C. Brunsdon and M. E. Charlton(2002) Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships, Wiley.
6. Gao, J. and S. Li(2011) Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression. *Applied Geography* 31: 292-302.
7. Goldstein, H.(1987) *Multilevel Models in Educational and Social Research*. New York: Oxford University Press.
8. Gorr, W. L. and A. M. Olligschlaeger(1994) Weighted spatial adaptive filtering: Monte Carlo studies and application to illicit drug market modeling. *Geographical Analysis* 26: 67-87.
9. Kamarianakis, Y., H. Feidas, G. Kokolatos, N. Chrysoulakis and V. Karatzias(2008) Evaluating remotely sensed rainfall estimates using nonlinear mixed models and geographically weighted regression. *Environmental Modelling & Software* 23: 1438-1447.
10. Korean ministry of Environments, Master plan for Water Environments -Master Plan for Water Quality Management ('06-'15).
11. Lee, S. W., S. J. Hwang, J. K. Lee, D. I. Jung, Y. J. Park and J. T. Kim(2011) Overview and application of the National Aquatic Ecological Monitoring Program(NAEMP) in Korea. *International Journal of Limnology* 47: S3-S14.
12. 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 Urban Planning* 92: 80-89.
13. Lu, B., M. Charlton and A. S. Fortheringham(2011) Geographically weighted regression using a non-euclidean distance metric with a study on London house price data. *Procedia Environmental Sciences* 7: 92-97.
14. Meador, M. R., J. F. Coles and H. Zappia(2005) Fish assemblage responses to urban intensity gradients in contrasting metropolitan areas: Birmingham, Alabama, and Boston, Massachusetts. In: Brown, L. R., R. H. Gray, R. M. Hughes, M. R. Meador(Eds.), *Effects of Urbanization on Stream Ecosystems*. American Fisheries Society, Bethesda, pp. 409-422.
15. Mehaffey, M. H.(2005) Linking land cover and water quality in New York City's water supply watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment* 107: 29-44.
16. 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. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 47: 107-116.

17. Propastin, P.(2012) Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18: 82-90.
18. Saphores, J.-D. and W. Li(2012) Estimating the value of urban green areas: A hedonic pricing analysis of the single family housing market in Los Angeles, CA, *Landscape and Urban Planning* 104: 373-387.
19. Szymanowski, M. and M. Kryza(2011) Application of geographically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wroclaw (SW Poland), *Procedia Environmental Sciences* 3: 87-92.
20. Tong, S. and W. Chen(2002) Modeling the relationship between land use and surface water quality, *Environmental Management* 66: 377-393.
21. Tu, J. and Z. Xia(2008) Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: model design and evaluation, *Science of the Total Environment* 407: 358-378.
22. 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.
23. Wang, L., J. Lyons, P. Kanehl and R. Gatti(1997) Influences of watershed land use on habitat quality and biotic integrity in Wisconsin streams, *Fisheries* 22: 6-12.
24. Weaver, A. L. and G. Garman(1994) Urbanization of a watershed and historical changes in a stream fish, *Transactions of the American Fisheries Society* 123: 162-172.
25. Zhang, H., J. Zhang, S. Lu, S. Cheng and J. Zhang(2011) Modeling hotel room price with geographically weighted regression, *International Journal of Hospitality Management* 30: 1036-1043.
26. http://www.kma.go.kr/weather/climate/average__30years.jsp

원 고 접 수 일: 2013년 8월 20일
 심 사 일: 2013년 10월 28일(1차)
 2013년 11월 19일(2차)
 계 재 학 정 일: 2013년 11월 21일
 3 인 의 명 심 사 필