

Original article

수변림으로 인한 유역 토지이용이 하천 수질에 미치는 관계 완화효과 연구

권현일 · 이종원 · 이상우*

건국대학교 산림조경학과

Mitigation Effect of Watershed Land Use due to Riparian Vegetation on Stream Water Quality. Hyeonil Kwon (0000-0002-6897-3648), Jong-Won Lee (0000-0002-7984-7233) and Sang Woo Lee* (0000-0002-3275-7564) (Department of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea)

Abstract Urban areas in watersheds increase the impervious surface, and agricultural areas deteriorate the water quality of rivers due to the use of fertilizers. As such, anthropogenic land use affects the type, intensity and quantity of land use and is closely related to the amount of substances and nutrients discharged to nearby streams. Riparian vegetation reduce the concentration of pollutants entering the watershed and mitigate the negative impacts of land use on rivers. This study analyzes the data through correlation analysis and regression analysis through point data measured twice a year in spring and autumn in 21 selected damaged tributary rivers within the Han River area, and then uses a structural equation model to determine the area land use. In the negative impact on water quality, the mitigation effect of riparian vegetation was estimated. As a result of the correlation analysis, the correlation between the agricultural area and water quality was stronger than that of the urban area, and the area ratio of riparian vegetation showed a negative correlation with water quality. As a result of the regression analysis, it was found that agricultural areas had a negative effect on water quality in all models, but the results were not statistically significant in the case of urban areas. As a result of the model estimated through the structural equation, BOD, COD, TN, and TP showed a mitigation effect due to the accumulation effect of river water quality through riparian vegetation in agricultural areas, but the effect of riparian vegetation through riparian vegetation was found in urban areas. There was no These results were interpreted as having a fairly low distribution rate in urban areas, and in the case of the study area, there was no impact due to riparian forests due to the form of scattered and distributed settlements rather than high-density urbanized areas. The results of this study were judged to be unreasonable to generalize by analyzing the rivers where most of the agricultural areas are distributed, and a follow-up to establish a structural equation model by expanding the watershed variables in urban areas and encompassing the variables of various factors affecting water quality research is required.

Key words: riparian vegetation, land use, structural equation model, water quality, stream, watershed

서론

Manuscript received 2 December 2022, revised 9 December 2022,
revision accepted 12 December 2022

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-4120,
E-mail: swl7311@konkuk.ac.kr

하천 수질에 영향을 미치는 요소는 자연적 요인과 인위
적 요인으로 구분된다. 그중 인위적 요인은 오염원의 특성

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

과 종류에 따라 하천으로 유입되는 경로가 복잡하기 때문에 하천 수질의 영향을 예측하기 어렵다(Khatri and Tyagi, 2015). 인위적 요인의 토지이용 유형 중 도시지역 확대는 불투수면 면적의 증가를 초래하고 비점오염원의 농도 증가와 물순환의 문제로 하천 수질과 수생태계 건강성을 저하시키며(Nagy *et al.*, 2012; An *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2016), 농업지역은 영농활동으로 인해 유출수와 영양염류가 증가하는 것으로 보고되었다(Wang and Yin, 1997; Paul and Meyer, 2001; Tsegaye *et al.*, 2006). 이처럼 인위적 토지이용은 토지이용의 유형, 강도 및 양에 영향을 미치며 인근 하천으로 배출되는 물질 및 영양소의 양과 밀접한 관련이 있어 유역에서의 인위적 토지이용의 비율은 하천 수질의 핵심지표가 될 수 있다(Villeneuve *et al.*, 2018; Jabbar and Grote, 2019; Musonge *et al.*, 2019).

수변림은 육상생태계와 수생태계 사이의 경계면으로 영양분과 퇴적물 이동에 중요한 역할을 하며(Kuglerova *et al.*, 2014; Ou *et al.*, 2016) 오염물질 농도를 감소시키고 유역에서 유입되는 유출수의 체류 시간을 증가시켜 하천 오염물질 유입을 저감하는 등 하천 수질 및 수생태계에 밀접한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Tong and Chen, 2002; Park *et al.*, 2019). 특히 하천과 인접하고 있는 수변림의 폭이 넓

을수록 부정적 영향의 저감효과가 높은 것으로 알려져 있다(Abu-Zerig, 2001; Borin *et al.*, 2005).

유역의 토지이용과 하천 수질과의 관계를 분석한 연구들은 상관 분석, 단순회귀 분석 또는 다중회귀 분석 등 OLS (ordinary least square)에 기반하였다(Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2011; Clapcott *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2015). 이러한 분석 방법은 다수의 독립변수, 종속변수가 존재할 경우 구조적 관계의 분석에 한계를 가지며 이러한 문제를 보완하기 위해 구조적 인과관계를 분석할 수 있는 구조방정식 모형(structural equation model)은 경로 분석, 회귀 분석, 요인 분석이 합성되어 발전된 통계 방법이며 변수 간의 공분산 구조에 관한 여러 개별 모형이 가지는 특성들을 하나의 모형으로 통합하는 것이 가능하고 변수 간의 직접효과, 간접효과를 추정할 수 있어 여러 분야에서 사용되고 있다(Kim, 2001; Chu, 2006). 본 연구에서는 구조방정식 모형을 이용하여 변수들의 데이터를 구조적 분석을 통해 유역 토지이용이 수질에 미치는 부정적인 영향에서 수변림으로 인한 수질의 완화효과를 추정하였다. 본 연구의 결과는 수변림을 통해 완화되는 수질 측정지표를 파악하여 유역의 토지이용, 하천의 수질 및 수변구역 관리에 세부적으로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

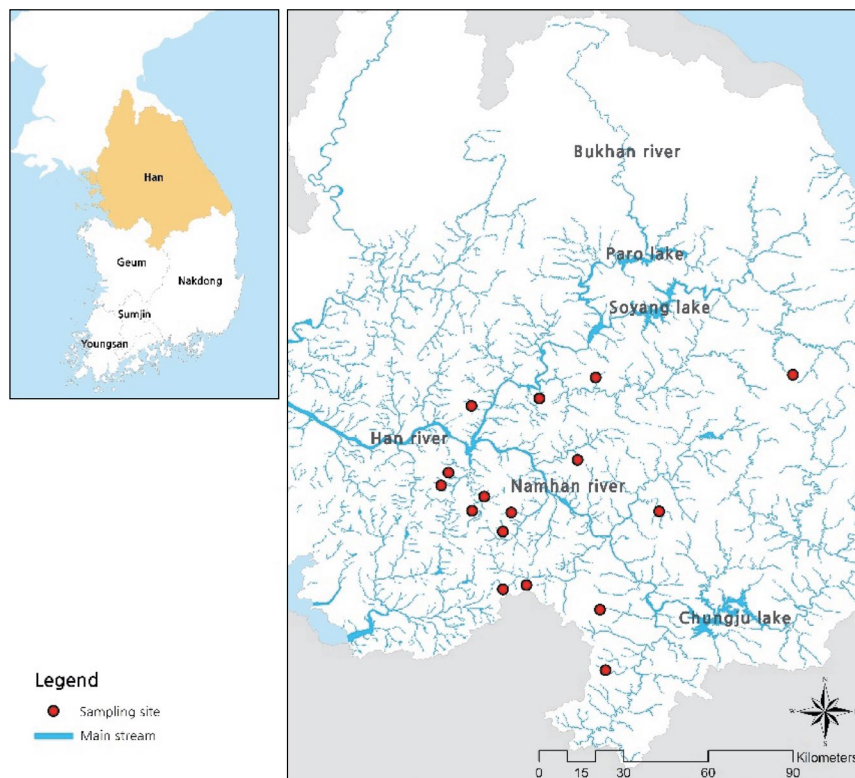


Fig. 1. Study areas and sampling sites.

연구 방법

1. 연구 대상 구역

본 연구는 한강 대권역 내 환경기초조사사업을 통해 조사된 21개 훼손 지류 하천에 대하여 연구 대상 지점으로 선정하여 분석하였다(Fig. 1). 한강은 강원도 태백시 검룡소에서 발원한 남한강이 흘러 강원도 금강군 옥발봉(북한)에서 발원한 북한강과 경기도 용인시 문수봉에서 발원한 경안천이 팔당호에서 만나 서울특별시의 중심을 관통하여 하구에 도달하며 한강 수계 총 유역 면적은 26,219 km², 유로연장은 469.7 km이다. 서울, 수도권의 생활용수, 공업용수 및 농업용수를 공급하고 있으며 한강 유역은 상대적으로 산업 및 인구의 밀집도가 높아 사회적 경제적 변화에 영향이 높게 나타나는 유역이다(Wang *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2017; Jung *et al.*, 2018). 특히, 국내에서 「한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률」이 제정되어 ‘한강수변구역 관리 기본계획’ 사업을 실시하고 있어 연구 결과의 활용성이 있을 것이라 판단된다(Kim, 2000).

2. 데이터 및 분석 방법

1) 수질 자료

본 연구에서는 수질오염공정시험법에 준하는 수질측정 항목 중 BOD, COD, TN, TP를 선정하였다. 한강 수계관리 위원회에서 한강 유역을 대상으로 실시하고 있는 환경기초 조사사업 연구에서 2018년부터 2022년까지 훼손된 하천을 선정하여 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류 등 수생태계 건강성과 수리, 환경, 수질 등의 특성에 대해 조사하고 있으며 훼손 하천의 수생태계 건강성 조사는 봄과 가을로 연 2회를 실시하고 있다. 본 연구에서는 2018년부터 2021년까지 21곳 훼손 지류 하천 내 146개 조사지점 중 데이터의 결측치 및 오류값을 제외한 116개 지점을 대상으로 측정된 수질 데이터를 이용하였다.

2) 유역 토지이용 및 수변림 데이터

수변림은 일반적으로 45 m의 완충녹지가 보편적이지만(Spackman and Hughes, 1994) 하천 보전의 목적과 중요도에 따라 폭의 기준이 매우 다양하다. 큰 도심하천일 경우 100 m의 완충녹지가 생물다양성과 조류를 보전하기 위해 필요하다고 보고되었다(Spackman and Hughes, 1994). 따라서 본 연구에서는 100 m의 완충구역을 설정하였으며 ArcMap 10.6.1 (ESRI, 2018)에서 연구 대상 지점별 소유역과 수변지역 경계를 환경부의 LULC (Land Use/Land Cover) 파일과 중첩하여 훼손 하천 유역의 농업지역, 도시지

역 비율 및 수변림 비율(RVR, Riparian Vegetation Ratio)을 최종적으로 추출하였다.

3) 통계 분석

자료의 통계 분석을 위해 IBM SPSS Statistics (Ver. 25) 프로그램을 이용하여 피어슨 상관관계 분석, 다중선형회귀 분석을 통해 결과를 도출하였으며 SPSS Amos 25 프로그램을 이용하여 피어슨 상관관계 분석 및 회귀 분석 결과에 기초하여 구조방정식 모형을 설정하였다. 상관 분석은 2개 이상의 변수에 존재하는 상관관계의 정도를 측정하는 분석 방법으로 피어슨 상관계수를 이용하여 상관계수 및 유의수준을 제시하였다. 피어슨 상관계수는 두 변수 간의 선형성이 얼마나 강한지 측정하기 위해 사용된다. 상관관계에 대한 적절성은 ± 1.0 에 근접할수록 유의미한 선형관계를 나타내며, 양수일 경우 비례관계, 음수일 경우 반비례관계를 분석한다(Kim *et al.*, 2016; Zhi *et al.*, 2017). 본 연구에서는 수질, 농업지역, 도시지역의 비율, 수변림의 비율을 측정변수로 설정하였으며 각 변수들의 상관관계를 분석하였다.

다중선형회귀(Multiple Linear Regression)는 하나의 예측대상에 대해 하나 이상의 예측인자들 사이의 선형적 관계를 이용하여 예측대상을 추정하는 통계적 기법이다(Wilks, 2006). 본 연구에서는 다중선형회귀를 기반으로 종속변수에 대한 예측변수의 영향력에 관한 해석을 재정의함으로써 이론 개발에 바탕과 근거로 도움이 될 수 있는 상호작용 변수를 추가하였다(Jackman *et al.*, 2011).

구조방정식 모형은 확인적 요인 분석(confirmatory), 경로 분석(path analysis), 다중회귀 분석 등이 결합된 형태이다. 변수들 간의 인과관계 및 상관관계를 동시에 추정할 수 있으며 특히 데이터 분석 결과를 시각화하여 결과물의 해석이 용이하다(Kim, 2009; Kim and Lee, 2018). 일반적으로 구조방정식 모델에서는 관측변수와 잠재변수를 구분하여 분석하는데, 본 연구에서는 유역의 도시지역, 농업지역 비율과 수질의 구조적 모형을 설정한 뒤 RVR을 추가한 모형을 통해 하천 수질의 완화효과를 도출하였다.

연구 결과 및 고찰

1. 기초 통계량

조사지점 BOD 평균은 2.05 mg L⁻¹으로 「환경정책기본법」 시행령에 제시된 하천 수질환경 기준 2등급(보통 등급)인 것으로 나타났다(Table 1). TP의 평균은 0.07로 하천 수질환경 기준 2등급으로 나타났으며 COD의 평균은 4.00으로 하천 수질환경 기준 Ib로 나타나 TP와 COD는 전반적인

Table 1. Descriptive statistics of the variables.

	Variables	Min.	Max.	Mean	Std. D.
Water quality (mg L ⁻¹)	BOD	0.60	7.80	2.05	1.12
	TN	0.97	10.28	3.25	1.34
	TP	0.01	0.34	0.07	0.06
	COD	1.30	17.30	4.00	2.22
Riparian vegetation (%)	RVR 100 m	0.00	85.00	37.00	0.21
Land use (%)	Urban	0.00	10.00	4.00	0.03
	Agriculture	3.0	82.00	26.00	0.17

n = 116

Table 2. Pearson correlation among variables in the study.

	BOD	COD	TN	TP	Urban	Agriculture
RV 100 m (%)	-0.426**	-0.435**	-0.456**	-0.386**	-0.230*	-0.570**
BOD (mg L ⁻¹)		0.948**	0.556**	0.701**	0.418**	0.574**
COD (mg L ⁻¹)			0.606**	0.648**	0.398**	0.517**
TN (mg L ⁻¹)				0.583**	0.303**	0.348**
TP (mg L ⁻¹)					0.319**	0.491**
Urban area (%)						0.473**

n = 116, *p < 0.05, ** p < 0.01

로 각각 ‘좋음’, ‘약간 좋음’으로 나타났다. TN의 경우 평균 값은 3.25로 「환경정책기본법」 시행령에 제시된 호소수 수질환경 기준 6등급으로 나타나 ‘매우 불량’한 것으로 나타났다. 수질 항목 중 지점들 간 변화는 COD (Std.=2.22)가 가장 높고 TP가 (Std.=0.06) 가장 낮은 것으로 조사되었다. 100 m 완충지대 수변림의 비율(RVR 100) 평균은 37%로 나타났다, 최소값이 0% 그리고 최대값이 85%로 나타나 지점들 간 수변림의 분포가 상당히 다른 것으로 조사되었다. 도시지역과 농업지역의 평균 비율은 각각 4%와 26%로 조사되어 연구 대상지 유역은 전반적으로 도시지역보다는 농경지의 비율이 상당히 큰 것으로 조사되었다. 전체적으로 지점들 간 도시지역 비율의 변화는 상대적으로 작고 (Std.=0.03) 수변림 비율(RVR 100)은 상대적으로 큰 것으로 나타났다 (Std.=0.21).

2. 상관관계 분석

상관 분석 결과, 하천 수질과 유역에서의 도시지역 비율 및 농업지역의 비율은 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보여주는 것으로 나타났다 (Table 2). 이를 구체적으로 살펴 보면, 유역에서의 농업지역 비율은 BOD (r=0.574), COD

(r=0.517), TN (r=0.348) 그리고 TP (r=0.491)와 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. 유역에서의 도시지역 비율 역시 BOD (r=0.418), COD (r=0.398), TN (r=0.303) 그리고 TP (r=0.319)와 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났는데 이는 유역에서 농업지역이나 도시지역 토지이용이 높을수록 수질이 악화되는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구의 상관관계 분석 결과는 농업지역이 도시지역보다 수질에 대하여 상대적으로 강한 상관관계를 보였는데, 선행 연구에서도 유사한 경향이 보고되었다 (Han *et al.*, 2010; Jung *et al.* 2012). 이와는 반대로 수변림 면적비율은 BOD (r=-0.426), COD (r=-0.435), TN (r=-0.456) 그리고 TP (r=-0.386)와 음의 상관관계를 보여 수변구역에서 식생 비율이 높아지면 하천 수질이 개선되는 것으로 나타나 수변림의 하천 수질에 대한 긍정적인 효과를 보고한 많은 선행 연구 결과와 일치하였다 (Tong and Chen, 2002; Choi *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2019).

3. 회귀 분석

본 연구에서 하천 수질이 토지이용에 영향을 미치는지 알아보기 위해 다중선형회귀 분석 항목으로 하천 수질을 중

Table 3. Estimated BOD, COD, TN, TP regression model.

Dependent variable	Independent variable	B	S.E	β	t	p
BOD	(Constant)	1.297	0.200		6.488	0.001
	Urban	7.532	8.489	0.175	0.887	0.377
	Urban_RVR100	0.195	16.523	0.002	0.012	0.991
	Agriculture	3.796	1.122	0.5651	3.382	0.001
	Agriculture_RVR100	-7.080	2.868	-0.290	-2.469	0.015
F = 21.498 ($p < 0.001$), adj.R ² = 0.416						
COD	(Constant)	2.985	0.394		7.580	0.000
	Urban	3.159	16.733	0.037	0.189	0.851
	Urban_RVR100	26.291	32.567	0.157	0.807	0.421
	Agriculture	8.607	2.212	0.641	3.891	0.000
	Agriculture_RVR100	-22.548	5.652	-0.465	-3.989	0.000
F = 22.314 ($p < 0.001$), adj.R ² = 0.426						
TN	(Constant)	3.045	0.266		11.428	0.000
	Urban	4.389	11.321	0.085	0.388	0.699
	Urban_RVR100	8.449	22.035	0.084	0.383	0.702
	Agriculture	3.504	1.497	0.431	2.341	0.021
	Agriculture_RVR100	-13.225	3.824	-0.451	-3.458	0.001
F = 12.266 ($p < 0.001$), adj.R ² = 0.282						
TP	(Constant)	0.038	0.012		3.077	0.003
	Urban	-0.334	0.522	-0.141	-0.641	0.523
	Urban_RVR100	1.240	1.015	0.267	1.221	0.225
	Agriculture	0.257	0.069	0.688	3.723	0.000
	Agriculture_RVR100	-0.452	0.176	-0.336	-2.563	0.012
F = 12.017 ($p < 0.001$), adj.R ² = 0.277						

속변수로 설정하였다. 독립변수로 도시지역, 농업지역을 설정하였으며 수변림과 도시지역, 농업지역의 상호작용 변수를 추가하였다. 분석 결과 BOD의 회귀모형은 통계적으로 유의하게 나타났으며 ($F = 21.498$, $p < .001$), 회귀모형의 설명력은 약 41.6%로 나타났다. 회귀계수 유의성 검정 결과, Urban ($p = 0.377$), Urban_RVR ($p = 0.991$)은 유의하지 않는 값으로 나타났으며 Agriculture ($p = 0.001$), Agriculture_RVR ($p = 0.015$)은 유의한 값으로 나타났다(Table 3). COD의 회귀모형은 통계적으로 유의하게 나타났으며 ($F = 22.314$, $p < 0.001$), 회귀모형의 설명력은 약 42.6%로 나타났다. 회귀계수 유의성 검정 결과, 도시지역 ($p = 0.851$), 도시 100 ($p = 0.421$)은 유의하지 않고, 농업지역 ($p = 0.000$), 농업 100 ($p = 0.000$)은 유의한 것으로 나타났다. TN의 회귀모형은 통계적으로 유의하게 나타났으며 ($F = 12.266$, $p < 0.001$), 모형의 설명력은 약 28.0%로 다소 낮게 나타났다. 회귀계수 유의

Table 4. Structural equation model results for BOD, COD, TN, and TP.

Path	B	S.E	C.R	p
Urban → BOD	0.20	3.21	2.53	0.01
Agriculture → BOD	0.51	0.50	6.49	0.00
Urban → COD	0.21	6.667	2.523	0.01
Agriculture → COD	0.44	1.050	5.430	0.00
Urban → TN	0.18	4.44	2.07	0.04
Agriculture → TN	0.27	0.70	3.06	0.00
Urban → TP	0.12	0.19	1.39	0.16
Agriculture → TP	0.45	0.03	5.43	0.00

성 검정 결과, 도시지역 ($p = 0.699$), 도시 100 ($p = 0.702$)은 유의하지 않고 농업지역 ($p = 0.021$), 농업 100 ($p = 0.001$)은 유의한 것으로 나타났다(Table 5). 유사하게 TP의 회귀모형

은 통계적으로 유의하게 나타났으며($F=12.017, p<.001$), 회귀모형의 설명력은 약 27.7%로 나타났다. 회귀계수 유의성 검정 결과, 도시지역($p=0.523$), 도시 100($p=0.225$)은 유의하지 않고 농업지역($p=0.000$), 농업 100($p=0.012$)은 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

전반적으로 추정된 BOD와 COD의 회귀모형 설명력이 높게 조사되었고, TN과 TP의 모형 설명력이 낮게 나타났다. 또한 모든 추정된 모형에서 Urban 그리고 Urban과 수변림의 상호작용 변수는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다($p>0.05$). 기존 도시지역의 수질에 대한 부정적 효과를 보고한 선행 연구와(Paul and Meyer, 2001; Tong and Chen, 2002; Bolstad and Swank, 2007) 다소 다른 결과는 연구 대상 지역의 도시지역은 농업지역에 비하여 상대적으로 상당히 낮은 비율을 차지하고 있으며(평균 4%, Table 1), 또한 도시지역이 고밀도의 시가지 지역이 아닌 산재된 형태의 농촌 취락지역이기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 그러나 모

든 모형에서 농업지역은 수질에 부정적 영향을 주는 것으로 조사되어 선행 연구 결과와(Nagy *et al.*, 2012; Sun, R *et al.*, 2013) 일치하는 것으로 나타났다. 농업지역과 수변림의 상호작용 효과는 모든 모형에서 통계적으로 유의한 것으로 조사되었다.

4. 유역 도시지역 비율, 농업지역 비율, 100 m 수변림 비율과 수질의 구조적 관계

유역의 도시지역, 농업지역 비율과 수질의 구조모형을 추정한 결과(단순모형), 모든 구조모형에서(SEM, Structural Equation Model) 도시지역과 농업지역의 비율이 증가할수록 BOD, COD, TN, TP의 농도는 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 특히 모든 구조모형에서 농업지역의 영향이 도시지역에 비하여 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 도시지역의 경우 COD 모형에서 가장 큰 영향을 주며($\beta=0.21$), TP 모형에서 가장 작은 것으로 분석되었다($\beta=0.12$). 농업지역의 부정적 영향은 BOD 구조모형에서 가장 크고($\beta=0.51$) TN 구조모형에서 가장 작은 것으로 분석되었다($\beta=0.27$). 이러한 결과는 회귀모형 추정 결과에서 설명한 바와 같이 조사 대상 지역이 주로 농경지에 입지한 농촌형 하천으로 도시화 지역 비율이 낮기 때문인 것으로 보인다.

단순모형에서 추정된 결과를 토대로 100 m 완충지대 수변림 비율을 추가하여 도시지역, 농업지역 비율이 수질 농도에 대한 영향을 모두 갖는 것으로 개별적으로 설정하였다. 모형을 추정한 결과 Fig. 2에 비해 모든 구조모형에서 농업지역에 대한 영향은 100 m 완충지대 수변림이 수질에 간접적인 영향은 없는 것으로 나타났으나 직접적인 영향으로 인한 완

Table 5. Result of Model for BOD concentration with ratio of 100m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed.

Path	B	S.E	C.R	p
Urban → 100m buffer_RVR	0.05	0.61	0.66	0.51
Agriculture → 100m buffer_RVR	-0.59	0.10	-7.76	0.00
100 m buffer_RVR → BOD	-0.17	0.49	-1.76	0.08
100 m buffer_RVR → COD	-0.23	1.00	-2.36	0.02
100 m buffer_RVR → TN	-0.41	0.63	-4.00	0.00
100 m buffer_RVR → TP	-0.17	0.30	-1.70	0.09

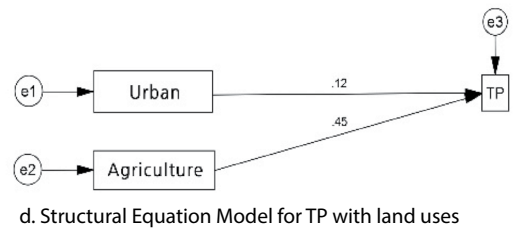
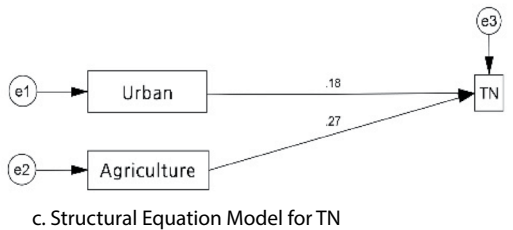
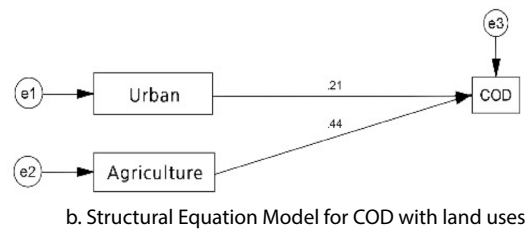
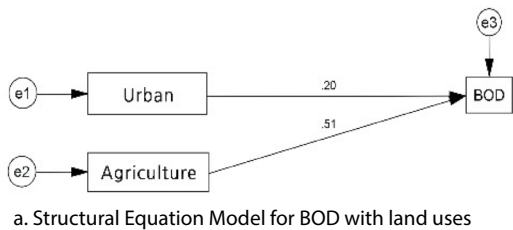
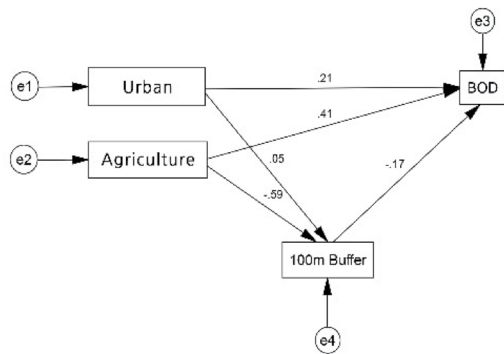
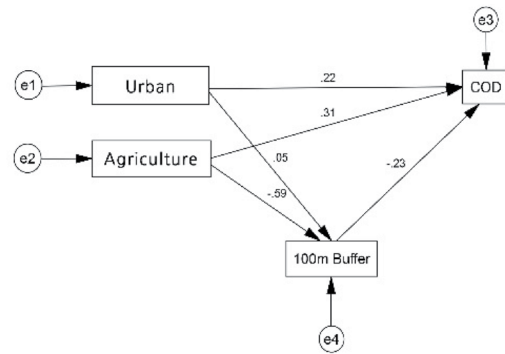


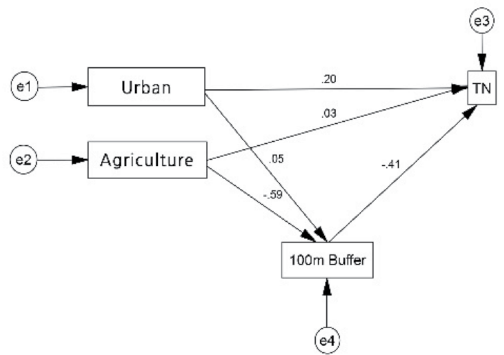
Fig. 2. Structural Equation Models for BOD (a), COD (b), TN (c), and TP (d). The values in the model are standardized coefficients and e represents error terms.



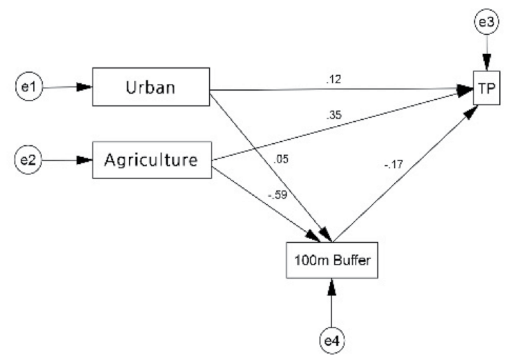
a: Model for BOD concentration with ratio of 100 m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed



b: Model for COD concentration with ratio of 100 m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed



c: Model for TN concentration with ratio of 100 m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed



d: Model for TP concentration with ratio of 100 m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed

Fig. 3. Model for BOD (a), COD (b), TN (c), and TP (d) concentration with ratio of 100 m buffer riparian vegetation, Urban area and Agriculture area in watershed. The values in the model are standardized coefficients and e represents error terms.

화효과가 나타났다(Table 5, Fig. 3). 수변림은 TN이 가장 높은 완화효과가 나타났으며($B = -0.41$), BOD가 가장 낮은 완화효과가 나타났으며($B = -0.17$). 반면 도시지역의 경우 수변림에 대한 영향이 없는 것으로 나타났는데 이러한 결과는 이전 연구에서 도시지역의 20% 이상인 유역의 경우가 아닌 이상 수질 농도가 급격히 증가하지 않는 것으로 보고된 바와 같이(Tromboni and Dodds, 2017) 본 연구의 대상지는 주로 농촌형 하천으로 도시지역 비율이 낮으며(평균 4%, Table 1) 도시지역과 하천 수질에 대한 상관관계 결과가 상대적으로 약한 상관관계의 결과를 나타내고 있다(Table 2). 또한 구조방정식 결과에서 도시지역과 BOD (S.E=3.17), COD (S.E=6.52), TN (S.E=4.18)의 표준오차가 높게 나온 것으로 나타나 조사지역에서 도시지역이 해당하는 표본이 적은 것으로 해석되었으며 결과적으로 연구 대상지의 도시지역은 하천 수질에 영향을 미치지 못하는 것으로 해석되었다.

결론

많은 선행 연구에서 토지이용과 유역 내 수질 사이의 관계에 대한 연구를 진행해 왔으며 대부분 수질은 도시지역 및 농업지역 같은 개발지역의 면적 및 비율과 다양한 요인들의 영향을 받는 것으로 보고되었다. 많은 연구에 따르면 도시 및 농경지의 사용은 토양 표면이 바뀌고 불투수지역을 증가시키며 오염을 발생시키는 주요 원인이라고 보고하였다(Lenat and Crawford, 1994; Tong and Chen, 2002; White and Greer, 2006). 본 연구에서는 한강 수계 내 21곳 훼손 지류 하천의 116개 조사지점을 대상으로 상관관계 분석을 통해 변수 간의 관계성을 파악하였으며 상호작용변수를 추가한 다중선형회귀 분석을 통해 유의성을 파악하였다. 마지막으로 구조방정식을 통해 유역의 도시지역, 농업지역이 수질에 미치는 영향을 수변림으로 인한 완화효과를 분석하였다. 최종 모형에서 농업지역은 하천 수질 농도에 영향을 미

치며, 수변림의 간접적인 효과는 없는 것으로 나타났으나 직접적인 효과로 인해 수질에 미치는 부정적 영향을 완화시키는 것으로 나타났다. 반면 도시지역의 경우 하천 수질농도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 이는 연구 대상 지역이 밀집된 도시지역이 아닌 산재된 농촌 취락지역 형태로 수질에 영향을 크게 미치지 못하는 것으로 나타났으며 표준 오차 값이 높게 나와 도시지역에 해당하는 표본이 많지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 한강 수계만을 대상으로 진행하였으며 대부분 농업지역이 분포하는 하천을 대상으로 변수들을 사용하여 분석하였기 때문에 일반화하는 것은 무리가 있다고 판단되었다. 유역의 연구 대상지의 확대와 도시하천 유역 변수 확대, 수질에 영향을 미치는 다양한 요인들의 항목, 하천 건강성평가 생물지수까지 포괄하여 구조방정식 모형을 설정하는 후속 연구가 요구된다.

저자정보 권현일(건국대학교 산림조경학과 석사과정), 이종원(건국대학교 산림조경학과 박사수료), 이상우(건국대학교 산림조경학과 교수)

저자기여도 개념설정: S.W. Lee, J.W. Lee, 자료 수집 및 분석: S.W. Lee, H.I. Kwon, 원고 초안작성: H.I. Kwon, 원고 교정: S.W. Lee, J.W. Lee, H.I. Kwon, 최종 원고 검토: S.W. Lee. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술 출판에 있어 어떠한 이해충돌의 여지가 없습니다.

연구비 이 논문은 환경기초조사사업 재원으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

사사 이 논문은 2021학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Abu-Zreig, M. 2001. Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: simulation study using VFSMOD. *Hydrological Processes* **15**(8): 1477-1488.
- 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**(4): 120.
- Atasoy, M., R.B. Palmquist and D.J. Phaneuf. 2006. Estimating the effects of urban residential development on water quality using microdata. *Journal of Environmental Management* **79**(4): 399-408.
- Bolstad, P.V. and W.T. Swank. 1997. Cumulative impacts of landuse on water quality in a southern appalachian watershed 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **33**(3): 519-533.
- Borin, M., M. Vianello, F. Morari and G. Zanin. 2005. Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **105**(1-2): 101-114.
- Choi, Y.H., J.C. Ryu, H.S. Hwang, D.H. Kum, Y.S. Park, Y.H. Jung, J.D. Choi and K.J. Lim. 2015. Analysis of Pollutant load Reduction Efficiency with Riparian Buffer System Using the SWAT-REMM. *Korean Society on Water Environment* **31**(2): 166-180.
- Chu, S.-H. 2006. Analyzing Impacts of Telecommunications on Travel Using Structural Equation Modeling. *Journal of Korean Society of Transportation* **24**(3): 157-165.
- 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**(1): 74-90.
- ESRI. 2018. ArcGIS 10.6.1. ESRI (Environmental Systems Research Institute), Redlands.
- Fernandes, M.R., F.C. Aguiar and M.T. Ferreira. 2011. Assessing riparian vegetation structure and the influence of land use using landscape metrics and geostatistical tools. *Landscape and Urban Planning* **99**(2): 166-177.
- 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**(4): 155.
- Han, J.H., Y.J. Bae and K.G. An. 2010. Spatial and temporal variability of water quality in Geum-River watershed and their influences by landuse pattern. *Korean Journal of Ecology and Environment* **43**(3): 385-399.
- Jabbar, F.K. and K. Grote. 2019. Statistical assessment of non-point source pollution in agricultural watersheds in the Lower Grand River watershed, MO, USA. *Environmental Science and Pollution Research* **26**(2): 1487-1506.
- Jackman, M.G.A., W.L. Leite and D.J. Cochrane. 2011. Estimating latent variable interactions with the unconstrained approach: A comparison of methods to form product indicators for large, unequal numbers of items. *Structural Equation Modeling* **18**(2): 274-288.
- Jung, S., J. Eum, C. Jang, Y. Choi and B. Kim. 2012. Characteristics of nonpoint source pollution and relationship between land use and nutrient concentrations in the Han River watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* **28**(2): 255-268.
- Jung, T.Y., D.H. Yun, M.J. Shim, S.M. Lee and Y.Y. Yoon. 2018. Long-Term Variations of Water Quality and Material Flux in the Han River Korea. *KSWST Journal of Water Treat-*

- ment **26**(5): 55-64.
- 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**(1): 23-39.
- Kim, K.S. 2001. AMOS Structural Equation Model analysis. SPSS Academy, Seoul. 2001. pp 315-430.
- Kim, J.H. 2009. An analysis of the changes in the cause-and-effect relationships between socio-economic indicators and the road network of Seoul using structural equation model. *Journal of the Korean Geographical Society* **44**(6): 797-812.
- Kim, J.S., S.J. Lee, Y.S. Oh, G.J. Cho, B.S. Sim, M.S. Kim, S.P. Moon and C.H. Kim. 2016. Development of ESS Control Algorithm for Smoothing the Output of Renewable Energy using Pearson's Correlation Coefficient. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* **30**(9): 33-39.
- Kim, S.Y., S.W. Lee, J.W. Lee and K.J. An. 2018. Exploring the relationship between prior knowledge on rain gardens and supports for adopting rain gardens using a structural equation model. *Sustainability* **10**(5): 1500.
- Kim, S.H. 2000. Monitoring and Recommendations for Policies of Riparian Buffer Zone. *GRI REVIEW* **2**(3): 25-42.
- Kuglerová, L., A. Agran, R. Jansson and H. Laudon. 2014. Towards optimizing riparian buffer zones: Ecological and biogeochemical implications for forest management. *Forest Ecology and Management* **334**: 74-84.
- 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**(2): 80-89.
- 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): 185-199.
- Musonge, P.S., P. Boets, K. Lock, N.M.D. Ambarita, M.A.E. Forio, D. Verschuren and P.L. Goethals. 2019. Baseline assessment of benthic macroinvertebrate community structure and ecological water quality in Rwenzori rivers (Albertine rift valley, Uganda) using biotic-index tools. *Limnologica* **75**: 1-10.
- Nagy, C.R., B.G. Lockaby, L. Kalin and C. Anderson. 2012. Effects of urbanization on stream hydrology and water quality: the Florida Gulf Coast. *Hydrological Processes* **26**(13): 2019-2030.
- Ou, Y., X. Wang, L. Wang and A.N. Rousseau. 2016. Landscape influences on water quality in riparian buffer zone of drinking water source area, Northern China. *Environmental Earth Sciences* **75**(2): 1-13.
- Park, H., H.J. Kim, Y. Chae, and Y. Kim. 2017. Assessment of Water Use Vulnerability Considering Climate and Socio-economic Changes in Han River Watershed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* **37**(6): 965-972.
- 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**(S1): S107-S116.
- Park, S.R., K.M. Choi and S.W. Lee. 2019. Spatial variation in land use and topographic effects on water quality at the Geum River watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**(2): 94-104.
- Paul, M.J. and J.L. Meyer. 2001. Streams in the urban landscape. *Annual review of Ecology and Systematics* **32**(1): 333-365.
- Popov, V.H., P.S. Cornish and H. Sun. 2006. Vegetated biofilters: the relative importance of infiltration and adsorption in reducing loads of water-soluble herbicides in agricultural runoff. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **114**(2-4): 351-359.
- Pusey, B.J. and A.H. Arthington. 2003. Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: A review. *Marine and Freshwater Research* **54**(1): 1-16.
- Scott, M.L., P.L. Nagler, E.P. Glenn, C. Valdes-Casillas, J.A. Erker, E.W. Reynolds and C.L. Jones. 2009. Assessing the extent and diversity of riparian ecosystems in Sonora, Mexico. *Biodiversity and Conservation* **18**(2): 247-269.
- 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 urbanised watershed in China. *Ecological Indicators* **48**: 417-427.
- Son, J.G., J.K. Choi, J.W. Koo, J.D. Song, J.Y. Cho, and Y.J. Kim. 2006. Correlativity analysis between water quality items in the Downcheon basin for agricultural watershed management. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **48**(4): 77-86.
- Spackman, S.C. and J.W. Hughes. 1995. Assessment of minimum stream corridor width for biological conservation: species richness and distribution along mid-order streams in Vermont, USA. *Biological Conservation* **71**(3): 325-332.
- Sun, R., L. Chen, W. Chen and Y. Ji. 2013. Effect of land-use patterns on total nitrogen concentration in the upstream regions of the Haihe River Basin, China. *Environmental Management* **51**(1): 45-58.
- Tong, S.T. and W. Chen. 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management* **66**(4): 377-393.
- Tromboni, F. and W.K. Dodds. 2017. Relationships between land use and stream nutrient concentrations in a highly urbanized tropical region of Brazil: thresholds and riparian zones. *Environmental Management* **60**(1): 30-40.
- Tsegaye, T., D. Sheppard, K.R. Islam, W. Tadesse, A. Atalay and L. Marzen. 2006. Development of chemical index as a measure of in-stream water quality in response to land-use and land cover changes. *Water, Air, and Soil Pollution* **174**(1): 161-179.

- Villeneuve, B., J. Piffady, L. Valette, Y. Souchon and P. Usseglio-Polatera. 2018. Direct and indirect effects of multiple stressors on stream invertebrates across watershed, reach and site scales: A structural equation modelling better informing on hydromorphological impacts. *Science of The Total Environment* **612**: 660-671.
- Wang, X. and Z.Y. Yin. 1997. Using GIS to assess the relationship between land use and water quality at a watershed level. *Environment International* **23**(1): 103-114.
- Wang, X. 2001. Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. *Journal of Environmental Management* **61**(1): 25-36.
- Wang, S.K., E.H. Na and S.S. Park. 2005. Object-oriented Design for Water Quality Monitoring Networks in the Han River System. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **27**(5): 453-460.
- White, M.D. and K.A. Greer. 2006. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California. *Landscape and Urban Planning* **74**(2): 125-138.
- Wilks, D.S. 2011. Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academic press.
- Zhi, X., S. Yuexin, M. Jin, Z. Lujie and D. Zijian. 2017. Research on the Pearson correlation coefficient evaluation method of analog signal in the process of unit peak load regulation. In 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI) (pp. 522-527). IEEE. <https://www.me.go.kr/>