

생태하천 복원사업 전후 하천 생태지표 변화의 시계열 분석

이 한 섭*

Time Series Analysis of Changes in Ecological Indicators of Streams After Stream Restoration Projects

Lee, Hanseop

요약 : 국내에 하천법이 도입된 초기에는 하천의 수자원 제공 기능에만 초점을 맞춘 하천 정비사업이 주로 시행되었고 이는 전반적인 하천 환경의 악화와 하천 생태계의 쇠퇴를 초래하였다. 이에 대응하기 위해 2000년대 이후 하천의 생태적 기능을 복원하려는 생태하천 복원사업이 도입되어 점차 확대 시행된 후 현재에는 전국적으로 사업이 시행되고 있다. 그러나 현재는 이러한 생태하천 복원사업이 실제로 하천을 생태적으로 만드는지에 대해서 평가 사업에서 적절히 평가할 수 있는 항목이 마련되어있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내외의 선행 연구를 조사하여 하천의 생태적 평가에 도입할 수 있는 지표로는 어떤 것들이 있는지를 파악했고, 그중 다수의 연구에서 공통으로 제시하고 있는 항목을 선정해 실제 하천 복원 사례에 적용해보았다.

연구 대상지인 안양천, 왕숙천, 갑천, 무심천의 수질 지표에 대해 분석한 결과 BOD와 인 함량 등의 지표는 많은 조사 지점에서 뚜렷한 감소 추세에 있었으며, 조사 지점별로 하천 복원사업 전후의 수질 지표에 유의미한 개선을 나타내는 경우가 많았다. 반면 생물 지표를 분석했을 때에는 변동이 큰 조사 자료로 인해 명확한 추세가 확인되는 경우가 적었으며, 대체로 생물 다양성이 감소한다는 경향이 파악되었으나 이는 수질 지표가 개선된 것과는 다른 양상을 보였다.

주요어 : 생태하천, 하천 복원 평가, 생태 지표, Mann-Kendall test, t-test

Abstract : Because early stream maintenance projects in Korea were mainly focused on increasing water resources, they caused the deterioration of the stream environment and the decline of the riverine ecosystem. To solve the problem, stream restoration projects were introduced to restore the original

*서울대학교 지리학과 석사과정(Master's Student of Geography, Seoul National University, lhstop93@snu.ac.kr)

function of the streams since 2000s. However, there is no substantive standard to assess the ecological aspect of the restoration projects. Therefore, some of the indicators from the prior studies were applied to the assessment of the result of some restoration projects in this study.

Chemical indicators such as pH, DO, BOD, COD, N, P of Anyangcheon stream, Wangsookcheon stream, Moosimcheon stream, Gapcheon stream were analyzed. BOD and P were on the decline in most of the research spots after the restoration project and other indicators were improved in some of the spots. Meanwhile, there was no obvious trend in biological indicators which was different from the result of the chemical indicators.

Key words : Ecological Stream, Stream Restoration Assessment, Ecological Indicators, Mann-Kendall test, t-test

1. 서론

우리나라의 하천관리는 1970년대에 하천법이 제정된 이후로 주로 이·치수 기능에 중점을 둔 하천 정비에 초점이 맞춰져 왔으며, 이에 따라 자연 하천 본연의 환경적 기능이 상당 부분 손실되었다. 그러나 이러한 추세가 계속됨에 따라 하천의 수질 악화 및 하천 주변 생태계 파괴 등의 문제가 지속적으로 제기되었으며, 그러한 문제의 해결을 위해 하천 환경정비사업 등이 도입되었다. 이에 따라 이·치수 기능 중심의 하천 정비에서 수생태계 복원 위주의 사업이 시행되었고 이를 통해 하천 환경의 생태적 개선을 위한 생태하천 조성이 시작되었다(환경부, 2011). 이러한 생태하천 복원사업은 크게 생물서식처 복원 및 수질 개선을 목표로 하여 생물종과 생태계 중심의 하천사업 정착, 생태계의 종적·횡적 연결성 확보, 건강한 물순환 체계 구축, 기후변화 대비, 도심 건천·복개하천 복원 등을 중점적으로 추진하였다.

이러한 흐름에서 2000년대 이후 정부 주도의 하천 정비사업이나 지방자치단체 주도의 지방하천 생태복원 사업 등을 통해 생태하천 복원사업은 전국적으로 보편화되었고, 그에 따라 이를 평가할 필요성이 생기게 되었다. 그러나 생태하천 복원사업 평가는 그것이 생태적으로 복원된 하천에 대한 평가임에도 하천의 생태적 측면에서의 개선 사항보다는 사업으로 인한 경제적(임슬예 등, 2015), 인지도적 편익 조사(임현정 등, 2015) 또는 사업 계획 이행 여부 평가(김상우, 2015) 등을 우선시해왔다. 따라서 본 보고서에서는 생태하천 복원사업 평가에 있어 어떻게 생태적 측면을 고려할 것이며 그에 따라 어떤 지

표들을 바탕으로 평가해야 하는지 살펴보고, 그것을 실제 생태하천 복원사업이 시행된 하천을 대상으로 적용하여 복원사업 이후 하천이 실제로 더 생태적으로 변화되었는지를 파악해보고자 한다.

생태하천 복원사업과 관련하여 사업의 주된 목표 중 하천 주변의 생태계 복원과 관련된 연구를 진행한 국내 사례로 김재업 등(2015)이 생태하천 복원사업이 시행된 울산의 태화강과 대전의 대전천 일대를 위성영상 자료로 분석하여 사업 전후의 지표특성이 어떻게 달라졌는지를 관찰하였고, 강호선 등(2014)과 최일홍 등(2010)은 각각 울산시와 수원시의 하천에서 생태하천 복원사업 이후 식생 변화가 어떤 양상으로 일어났는지를 조사하였다. 또한 생태하천의 수질에 대한 연구로 박정규(2004)는 대전 주원천의 생태하천 조성을 위해 필요한 조사를 진행하면서 하천의 수질 및 생태 양상에 대한 내용을 바탕으로 생태하천 복원의 방향을 제시했으며, 최지용(2002)은 하천의 생태적 복원 및 수질 관리를 위해서는 수변 완충녹지의 기능이 중요하다고 주장하였으나, 두 연구 모두 생태하천 복원사업 전후의 하천의 수질을 비교 분석하지는 않았다. 이밖에 생태하천의 생태적 요소 이외의 다른 영향에 대해 분석한 연구로는 임슬예 등(2015)이 화성시 남양천과 공주시 유구천을 대상으로 조건부 가치 측정법을 적용해 하천 복원의 경제적 편익을 조사하였고, 임현정 등(2015)은 전주시 전주천의 생태하천 복원사업에 대해 설문을 통해 주민의 만족도와 중요 인지도 등을 조사하였다.

다음으로 생태하천 평가에 대해 연구한 국내 사례로 최미희(2006)는 지속가능한 하천복원사업을 위해 복원사업 평가에 있어 경제적, 환경적, 인문사

회적인 다양한 요소를 고려해야 한다고 주장하였으며, 최미경(2017)은 하천의 생태적 관리를 위해 제도적으로 분절된 하천관리 체계를 하나로 통합하고 수질, 수생태계, 인간 생활 등을 하천 환경이라는 큰 틀로 인식할 필요가 있다고 하였다. 또한 생태하천 복원사업의 평가 방안 개발에 있어 김석규 등(2015)은 생태하천 복원사업이 진행된 하천을 대상으로 하천의 구조적, 생태적 측면에 대한 전과정 평가를 실시하여 하천 정비에 따른 환경적 영향의 정량화를 시도하였고, 송주일 등(2008)은 국내외 문헌 연구를 통해 하천 평가를 하천 기능 및 특성 구분, 범주별 하천 특성의 훼손 정도 파악, 평가항목 구체화 및 항목별 평가의 3단계로 나누고 이를 실제 하천에 적용하였다. 이지영 등(2018)은 독일 성과감독 프로그램의 사례를 들어 유럽 물관리지침을 바탕으로 국내의 하천복원사업을 평가하는 방안을 제시했으며, 박은하 등(2015)은 전문가 설문 및 인터뷰를 통한 델파이 기법을 적용해 도시하천환경의 평가지표를 마련하려 했다.

생태하천 및 복원 평가 등에 관련한 해외 연구 사례로는 Paillex 등(2017)이 스위스 Thur 강 일대의 두 하천에 대한 복원사업에 있어 어떤 생태적 지표를 도입할지에 관해 연구하였으며, Van Den Brink 등(1996)은 네덜란드에 흐르는 Rhine 강과 Meuse 강을 사례로 생태하천 관리에 있어 생물다양성이 중요함을 지적하였다. 또한 Pander 등(2013)은 유럽 물관리지침과 미국의 수질 오염 방지법을 토대로 수질 개선, 생물 보호, 서식지 보호 등의 세 가지 측면에서 하천의 생태적 복원을 위한 지표를 제시하였고, Chang(2008)은 한강 유역의 수질 자료를 분석하여 그 분포에 공간적 자기상관성이 나타나는

지, 또 시계열적 변이는 어떠한지 살폈다.

본 연구에서는 국내 생태하천 복원사업 평가에 필요한 생태적 지표들을 찾기 위해 선행 연구 사례를 분석하여 생태적 평가 요소들을 선정하고, 이를 실제 생태하천 복원 사업지에 적용하여 생태하천 복원사업 이후 하천의 생태적 지표가 실제로 개선되었는지를 살펴보았다.

2. 연구 방법

생태하천 복원사업 평가를 위한 생태적 지표는 국내외의 선행 연구, 특히 하천의 생태적 평가를 위한 물관리지침 등을 참고한 해외의 연구 사례들을 참고하여 여러 사례에 공통으로 포함된 요소들을 선정하였다. 선정된 평가지표인 수질 지표와 생태적 지표를 분석하기 위한 자료는 환경부 물환경정보시스템의 물환경측정자료에서 취득하였다. 수질 자료는 각 항목별로 2009년부터 2018년까지 10년 동안의 월별 측정값을 수집하였으며, 수질 지표의 계절적 변동의 영향을 줄이고자 연평균값을 구하여 분석에 사용하였다. 분석 과정에서 전체 평균의 다섯 배가 넘는 측정치는 이상치로 판단하여 분석에서 배제했으며, 이를 해당 월의 전년도와 후년도 값의 평균을 구하여 보간하였다. 다음으로 생태적 지표를 평가하기 위한 생물 자료는 2009년부터 2016년까지 매년 상·하반기에 한 번씩 조사된 생물 분류군의 종 수 자료를 취득하여 분석하였다.

자료의 분석은 측정치의 연평균값을 시계열 그래프로 나타내어 변화의 추세를 파악한 다음, Mann-Kendall trend test를 통해 자료의 수치가 증가 또는 감소하는 추세가 있는지를 알아보았다.

Cohen(1988)에 따르면 Mann-Kendall trend test는 시계열 자료의 단조적인 증가 또는 감소 추세를 탐지하기 위한 통계 기법으로, 전반적인 추세를 파악하기 위해 자료에 계절적인 변동이 없어야 하고 자료의 최소 관측치가 8에서 10 이상이 되어야 한다는 조건이 있다. 본 연구에서 사용한 수질 자료는 10년간의 월 측정치를 바탕으로 연평균값을 구한 것으로, 계절적 변동의 영향이 통제되었고 자료의 개수도 지표별로 10개로 Mann-Kendall trend test 실행을 위한 조건을 만족하였다. 다음으로 수질 자료의 추세 파악 이외에 생태하천 복원사업 전후로 실제 수질 측정치에 유의미한 차이가 있는지를 파악하고자 취득한 자료의 첫 2년치와 마지막 2년치 월별 자료에 대해 t-test를 실시하여 두 시기의 평균값에 차이가 있는지를 분석하였다. 본 연구에서의 Mann-Kendall trend test와 t-test는 각각 유의 수준 5%에서 분석을 실행하였다.

자료 분석을 통한 생태하천 복원사업 평가를 적용할 연구 대상지로는 4대강 사업의 대상지로 이·치수 중심의 정비사업이 행해졌던 하천의 지류 중에서 최근 10년 이내에 생태하천 복원사업이 시행된 곳을 선정하였다. 이와 같은 조건을 만족하는 하천 중 한강의 지류인 안양천과 왕숙천, 금강의 지류인 갑천과 무심천을 최종 연구 대상지로 선정하였으며, 하천별로 시행된 복원 공사는 크게 하천 유로 정리 및 인공 구조물 제거, 하천변 식생 식재, 수질 정화시설 설치 등으로 나타났다. 대상 하천 중 안양천은 2013년부터 2017년까지 생태복원 사업이 시행되었으며, 분석 자료는 수질 측정 지점 중 안양천 3,4,5에서 측정된 자료를 사용하였다. 안양천 3,4,5는 하천의 중·하류에 위치하고 그중 안양천 4는 도

립천이 안양천에 합류하는 지점에, 안양천 5는 안양천이 한강 본류에 합류하는 지점에 위치하였다. 왕숙천은 2012년부터 2015년까지 생태복원 사업이 시행되었으며, 하천 수질 측정 지점 중 왕숙천 2,3,4의 자료를 분석에 사용하였다. 왕숙천 2,3,4는 하천의 중·하류에 위치하고 그중 왕숙천 2는 사릉천이 왕숙천에 합류하는 지점에, 왕숙천 4는 왕숙천이 한강 본류에 합류하는 지점에 위치하였다. 갑천은 2010년부터 2012년까지 생태복원 사업이 시행되었으며, 하천 수질 측정 지점 중 갑천 3,4,5에서의 측정 자료를 분석에 사용하였다. 갑천 3은 갑천의 중류 구간 중 탄동천이 갑천에 합류하는 곳에 위치해 있으며, 갑천 4,5는 하천의 하류에, 특히 갑천 5는 하천이 인근의 대청호로부터 이어지는 금강 지류에 합류하는 곳 근처에 위치하였다. 무심천은 2013년부터 2018년까지 생태복원 사업이 시행되었으며, 하천 수질 측정 지점 중 무심천 1,2,3의 측정 자료를 분석에 사용하였다. 무심천 1,2는 하천의 중류에 있으며 무심천 1은 영운천이 무심천에 합류하는 지점에 위치해 있고, 무심천 3은 하천의 하류에 위치해 있다.

3. 연구 결과

선행 연구를 종합한 결과 하천의 종합적 평가에 포함되는 생태적 지표 또는 하천의 생태적 복원에 대한 평가에 공통되는 요소는 크게 수질의 개선, 생물 다양성의 증가, 서식지 다양성의 증가로 분류할 수 있었다. 이때 각 요소에서 고려되는 개별 항목으로는 수질 지표에서는 pH, DO(용존 산소량), BOD(생화학적 산소 요구량), COD(화학적 산소 요

구량), TOC(총 유기 탄소량), 질소 함유량, 인 함유량 등이 있었고, 생물 다양성을 파악하는 생물군으로는 하천 주변 식생, 수서 식생, 어류, 저서성 무척추동물, 돌말류 등이 있었으며, 서식지 다양성을 정량화하는 항목으로는 수심, 하폭, 하천 곡률도, 하천변 자연 서식지 구성 등이 있었다. 이중 일관된 조사 자료를 얻을 수 없는 서식지 다양성 지표는 분석에서 제외하였고, 수질 지표 중에서는 pH, DO, BOD, COD, 질소 및 인 함유량을, 생물 지표 파악을 위한 생물군으로는 어류, 저서성 무척추동물, 부착돌말류를 선정하였다. 생물 지표 중 하천변 식생 및 수서 식생도 생물 다양성 파악에 필요한 생물군이지만 환경청 조사 자료가 조사 대상 기간 동안 정기적으로 진행되지 않아 분석에서 제외하였다.

위에서 선정된 지표의 자료를 연구 대상 하천별로 그 변화 추세를 그래프를 통해 나타내었고, 다음으로 Mann-Kendall trend test 분석 결과를 통해 그러한 추세가 정량적으로 유의미한 것인지를 파악하고자 Kendall's tau 지수와 유의확률¹⁾을 표로 나타내었다. 또한 하천 복원사업 시행 전과 후에 해당하는 연도의 수질 자료를 t-test를 통해 분석²⁾하고 그 결과를 표로 나타내었다.

먼저 연구 대상지 네 곳의 하천 중 안양천의 수질 변화 분석 결과는 <표 1>, <표 2>와 같다.

안양천 수질 지표의 변화를 나타낸 <그림 1>의 그래프를 살펴보면 인 이외에는 뚜렷한 감소 추세를 나타낸 지표는 없다. 실제로 Mann-Kendall trend test 결과 유의한 추세를 나타내는 것은 세

지점에서의 인 함량과 안양천 5에서의 BOD 및 COD뿐이다. 다음으로 2009/10년 수질 측정치와 2017/18년의 수질 측정치를 t-test로 비교 분석한 결과 세 지점에서 모두 대부분의 수질 지표가 유의미하게 개선된 것으로 나타났다.

두 번째로 왕숙천의 수질 변화 분석 결과는 <표 3>, <표 4>와 같다.

왕숙천 수질 지표의 변화를 나타낸 <그림 2>의 그래프를 살펴보면 pH와 BOD, 인 등에서 변화의 추세가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 실제로 Mann-Kendall trend test를 통해 분석한 결과 인은 세 지점에서 모두 감소하는 추세에 있었고, 그밖에 왕숙천 2와 3의 pH, 왕숙천 4의 BOD와 COD도 감소하는 추세를 보였다. 왕숙천 4에서는 DO 또한 감소하는 추세를 나타냈는데 이는 수중 용존 산소량이 줄어드는 추세임을 의미하므로 해당 지표가 악화되는 추세에 있다고 볼 수 있다. 다음으로 2009/10년과 2017/18년의 수질 자료를 t-test를 통해 비교 분석한 결과 pH와 인은 두 시기 사이에 유의미하게 개선된 것으로 나타났지만, 왕숙천 3에서의 BOD와 질소, 왕숙천 4에서의 DO 등은 악화된 것으로 나타났다.

다음으로 갑천의 수질 변화 분석 결과는 <표 5>, <표 6>과 같다.

갑천 수질 지표의 변화를 살펴보면 BOD, 질소 및 인의 값이 감소하는 추세를 확인할 수 있고 실제 Mann-Kendall trend test 결과에서도 해당 지표들이 개선되는 추세에 있는 것을 확인할 수 있다. 다음

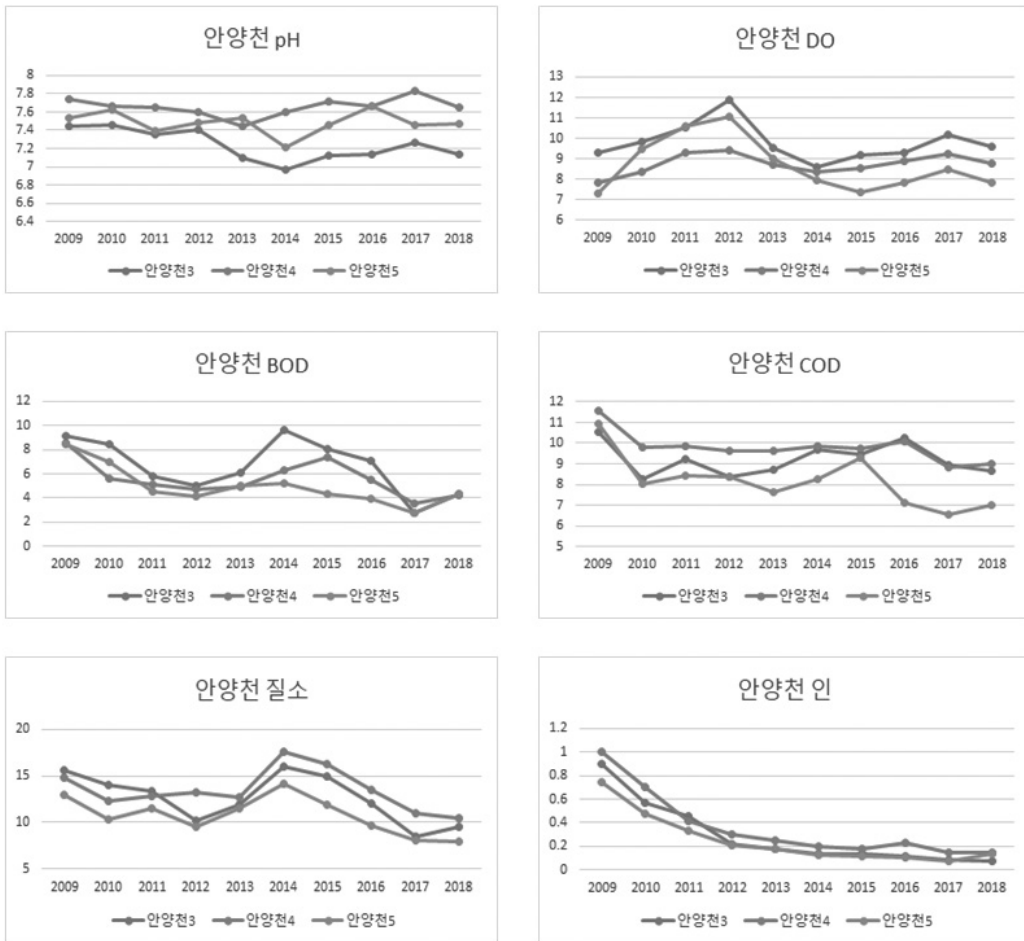
1) Mann-Kendall trend test를 통해 생태적 지표가 유의미하게 개선된 경우 *, 반대로 악화된 경우 #로 표에 표시
2) t-test를 결과 생태하천 복원사업을 기점으로 생태적 지표가 개선된 경우 *, 반대로 악화된 경우 #로 표에 표시

〈표 1〉 안양천 수질 지표 Mann-Kendall test 결과 Kendall's tau와 그에 대한 p-value

tau/p-value	pH	DO	BOD	COD	질소	인
안양천3	-0.36/0.178	-0.0222/1	-0.378/0.152	0.0222/1	-0.422/0.107	-0.99/0.0001*
안양천4	0/1	0.244/0.3711	-0.378/0.152	-0.36/0.178	-0.2/0.4743	-0.9/0.0005*
안양천5	-0.09/0.7876	-0.2/0.4743	-0.6/0.02*	-0.556/0.032*	-0.422/0.107	-0.833/0.001*

〈표 2〉 안양천 09/10년도와 17/18년도 수질 지표 t-test p-value

09/10-17/18	pH	DO	BOD	COD	질소	인
안양천3	0.00113*	0.22541	6.604E-06*	0.16661	3.61E-05*	3.94E-11*
안양천4	0.27347	0.04427*	0.00337*	0.00811*	0.01731*	2.27E-11*
안양천5	0.01412*	0.38415	0.00017*	5.839E-05	0.00179*	6.7E-14*



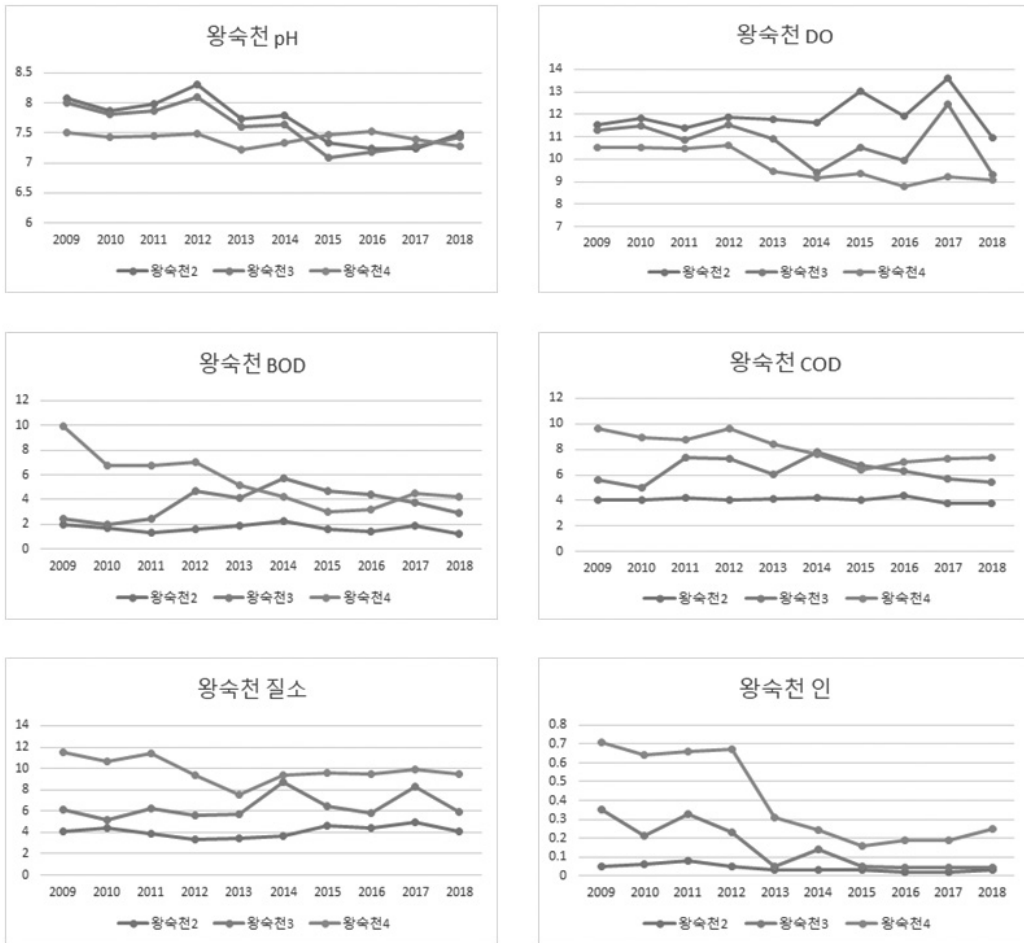
〈그림 1〉 안양천 수질 지표 변동(2009-2018)

〈표 3〉 왕숙천 수질 지표 Mann-Kendall test 결과 Kendall's tau와 그에 대한 p-value

tau/p-value	pH	DO	BOD	COD	질소	인
왕숙천2	-0.644/0.012*	0.244/0.3711	-0.289/0.283	-0.156/0.592	0.27/0.3232	-0.662/0.015*
왕숙천3	-0.511/0.049*	-0.333/0.211	0.244/0.3711	-0.111/0.721	0.289/0.2831	-0.815/0.002*
왕숙천4	-0.2/0.47427	-0.689/0.007#	-0.6/0.0201*	-0.6/0.0201*	-0.244/0.371	-0.584/0.025*

〈표 4〉 왕숙천 09/10년도와 17/18년도 수질 지표 t-test p-value

09/10-17/18	pH	DO	BOD	COD	질소	인
왕숙천2	5.97E-06*	0.25493	0.16645	0.17124	0.23908	0.00016*
왕숙천3	1.63E-06*	0.25884	0.02176#	0.26989	0.01816#	6.95E-11*
왕숙천4	0.03191*	0.00063#	2.16E-05*	0.00078*	0.09177	4.49E-15*



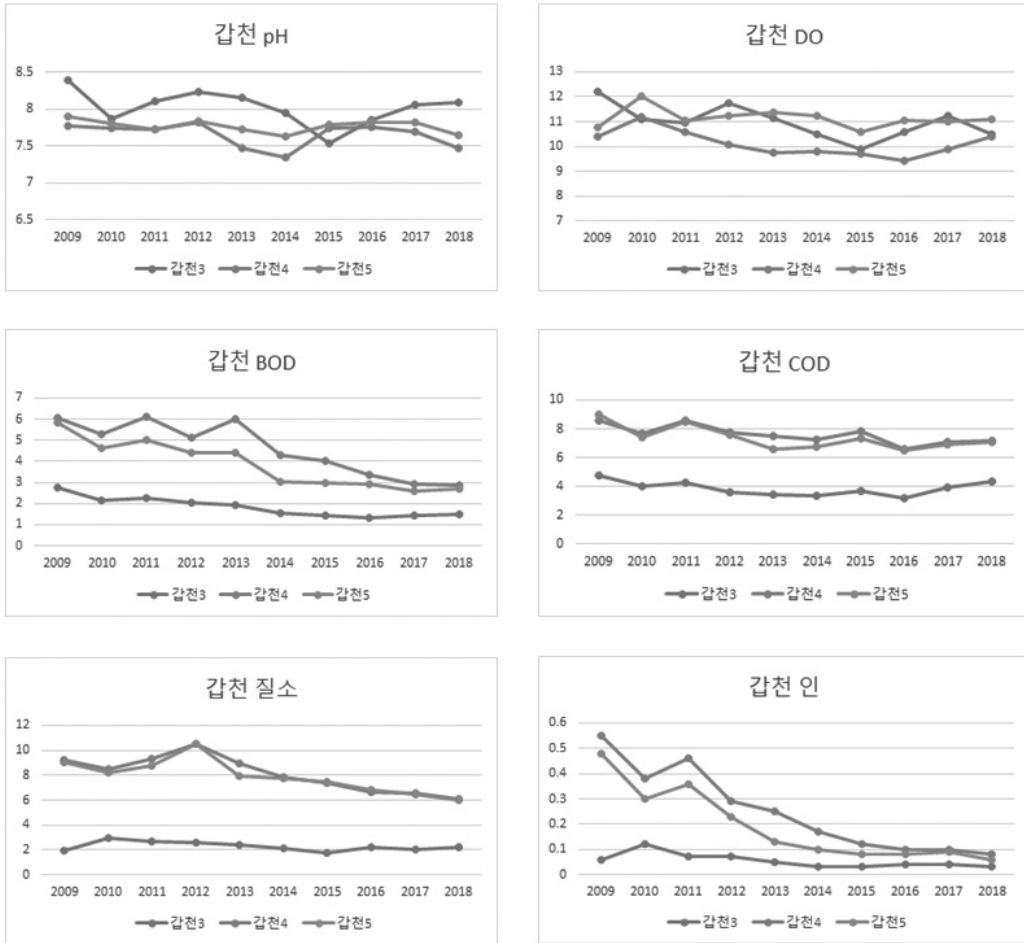
〈그림 2〉 왕숙천 수질 지표 변동(2009-2018)

〈표 5〉 갑천 수질 지표 Mann-Kendall test 결과 Kendall's tau와 그에 대한 p-value

tau/p-value	pH	DO	BOD	COD	질소	인
갑천3	-0.289/0.283	-0.405/0.127	-0.733/0.004*	-0.244/0.371	-0.333/0.211	-0.613/0.022*
갑천4	-0.36/0.178	-0.378/0.152	-0.822/0.001*	-0.6/0.0201*	-0.733/0.004*	-0.94/0.0002*
갑천5	-0.225/0.419	-0.18/0.5296	-0.867/0.001*	-0.467/0.074	-0.822/0.001*	-0.85/0.0009*

〈표 6〉 갑천 09/10년도와 17/18년도 수질 지표 t-test p-value

09/10-17/18	pH	DO	BOD	COD	질소	인
갑천3	0.37445	0.14137	3.353E-05*	0.21273	0.10611	1.69E-06*
갑천4	0.07029	0.12767	2.181E-07*	0.0279*	9.05E-06*	4.65E-15*
갑천5	0.1603	0.26525	8.133E-06*	0.02931*	0.00034*	4.01E-12*



〈그림 3〉 갑천 수질 지표 변동(2009-2018)

으로 2009/10년과 2017/18년의 자료를 t-test를 통해 비교 분석한 결과 모든 지점에서의 BOD 및 인 함량과 갑천 4.5에서의 COD 및 질소 함량이 유의미하게 낮아진 것으로 나타났다.

다음으로 무심천의 수질 변화 분석 결과는 <표 7>, <표 8>과 같다.

무심천 수질 지표의 변화를 살펴보면 무심천 1.2의 COD, 무심천 2의 BOD, 무심천 3의 질소 등만 감소하는 추세를 보이며 모든 지점에서 뚜렷한 감소 추세를 보이는 지표는 없었다. 또한 t-test를 통한 2009/10년과 2017/18년의 수질 자료 비교에서도 무심천 1.2의 BOD와 COD, 무심천 3의 질소 함량만 유의미하게 감소한 것으로 나타났고 나머지 지표들은 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다.

다음으로 <표 9>~<표 12>와 <그림 5>~<그림 8>은 생물 지표를 파악하기 위한 각 조사 대상 하천에서의 생물군별 생물종 수 변화를 나타낸 것이다.

생물종 수의 변화는 조사 회차별로 변동이 심해 대체로 유의미한 추세가 없는 것으로 분석되었는데, 그림에도 불구하고 왕숙천 4의 어류와 저서성 무척추동물, 갑천 3의 저서성 무척추동물과 갑천 4의 어류, 무심천 2,3의 저서성 무척추동물은 감소하는 추세를 보였다. 나머지 분류군에 대해서도 유의미한 수치는 아니더라도 대체로 생물종 수는 감소하는 추세를 나타냈으며, 유의미하게 종 수가 증가하는 생물군은 무심천 2의 부착돌말류 뿐이었다.

4. 토의

하천이 복원을 통해 생태적으로 변했을 경우 그 내부와 주변에서 더 다양하고 복잡한 생태계가 발

달 가능해지는데, 이를 파악할 수 있는 지표로 국내외의 선행 연구들은 수질 지표, 생물 다양성 지표, 서식지 다양성 지표를 선정해 제시하였다. 수질은 수서 생물 및 수변 생물이 공급받는 수자원의 질을 의미하므로 그 생물들의 생존에 중요한 요인으로 작용하고, 서식지 다양성 또한 보다 많은 생물 종들이 하천 주변에 서식하면서 생태계를 구성해갈 수 있는 원동력이 된다. 수질 개선과 하천 주변 서식지의 다양화는 생물 다양성의 증가를 불러오게 되고, 이를 통해 하천 생태계의 수용력이 더 높아지게 되므로 하천이 더 생태적으로 변했다고 볼 수 있다. 따라서 해당 지표들은 하천 복원사업 평가에서 생태적인 부분을 고려할 때 반드시 포함되어야 할 요소라고 할 수 있다.

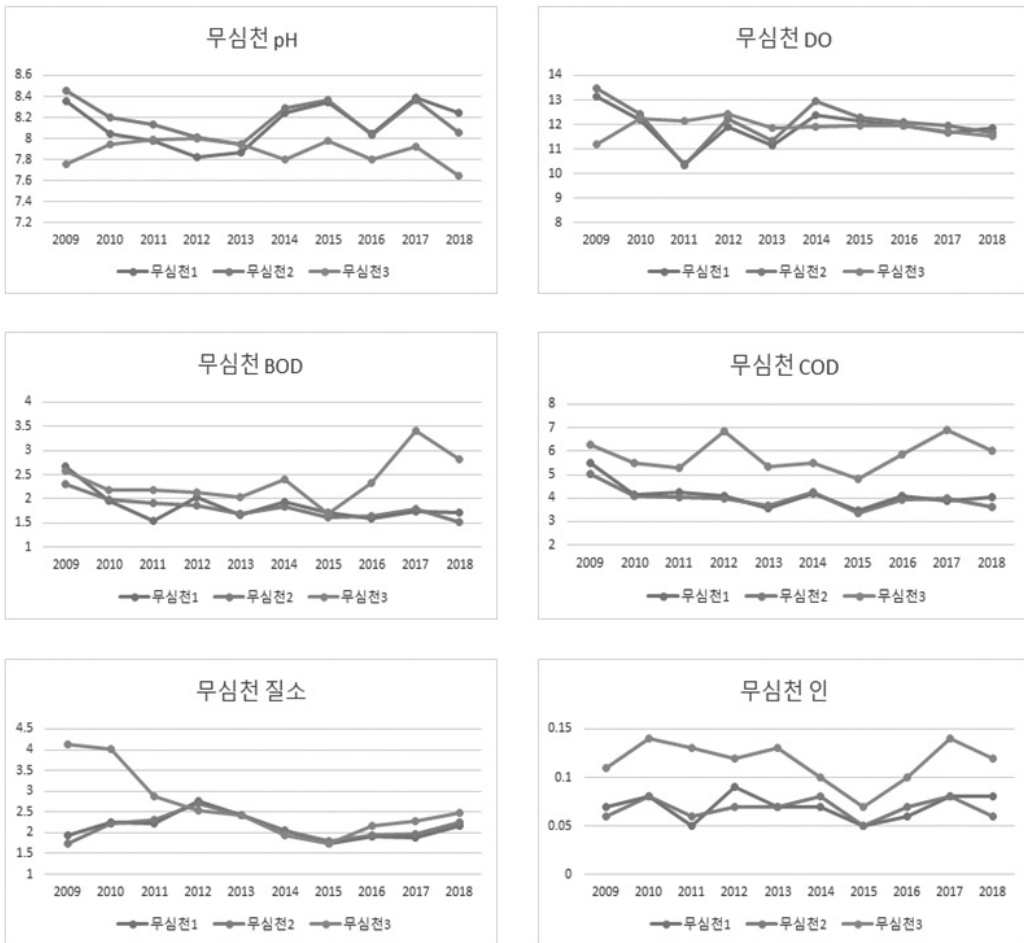
다음으로 앞서 선정한 생태 지표들 중 수질 지표와 생물 지표가 연구 대상 하천에서 생태하천 복원사업을 통해 실제로 개선되었는지를 시계열 분석을 통해 파악한 결과 대부분의 측정 지점에서 수질 지표가 개선되는 추세를 확인했으며, 복원 전후로 수질 측정치가 개선되는 방향으로 유의미하게 변한 것도 파악할 수 있었다. 대상 하천별로 결과를 살펴보면 안양천의 경우 측정 지점 세 곳에서 모두 인 함량은 감소하는 추세를 보였고, 특히 안양천 5 지점에서는 BOD와 COD 또한 감소하는 추세를 나타냈다. 생태하천 복원사업 전후의 수질 지표를 비교 분석한 결과 안양천 3에서는 네 가지 지표가 안양천 4.5에서는 각각 다섯 가지 지표가 유의미하게 개선되어 네 곳의 연구 대상지 중 가장 높은 개선 비율을 보였다. 이는 생태하천 복원사업뿐만 아니라 안양천 중류에 위치한 수질 정화시설에서 수질 정화 작업을 하는 데에 따른 영향도 있을 것으로 보인다. 왕

〈표 7〉 무심천 수질 지표 Mann-Kendall test 결과 Kendall's tau와 그에 대한 p-value

tau/p-value	pH	DO	BOD	COD	질소	인
무심천1	0.205/0.4707	-0.244/0.371	-0.351/0.243	-0.511/0.049*	-0.289/0.283	0.048/0.9262
무심천2	-0.09/0.7876	-0.278/0.348	-0.778/0.002*	-0.556/0.032*	-0.0222/1	0.05/0.9253
무심천3	-0.225/0.419	-0.244/0.371	0.135/0.6534	0.156/0.5915	-0.556/0.032*	-0.163/0.585

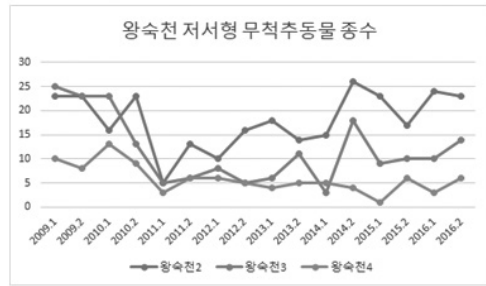
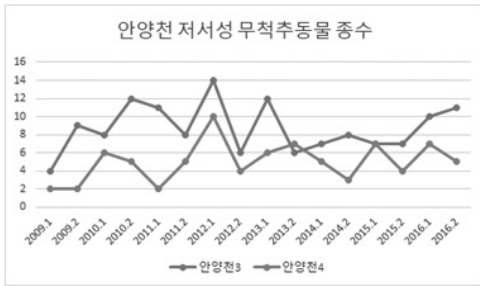
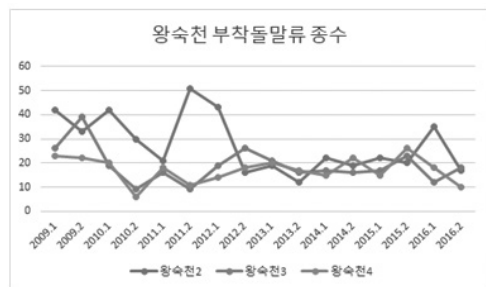
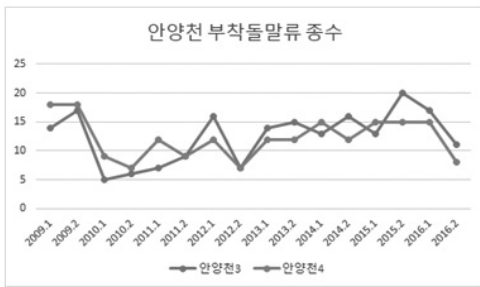
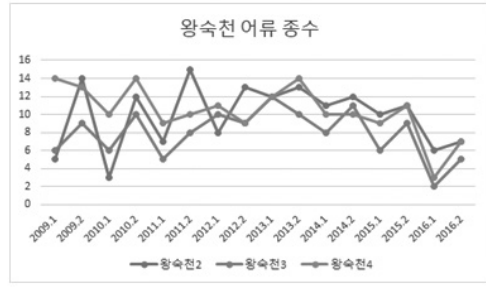
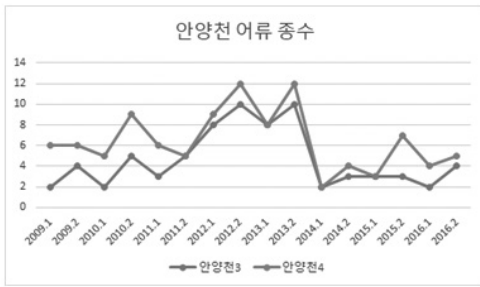
〈표 8〉 무심천 09/10년도와 17/18년도 수질 지표 t-test p-value

09/10-17/18	pH	DO	BOD	COD	질소	인
무심천1	0.45136	0.15351	0.00056*	0.034*	0.07168	0.22603
무심천2	0.24602	0.06857	0.0137*	0.00619*	0.21277	0.42938
무심천3	0.21025	0.45096	0.01114#	0.16014	2.1E-06*	0.33744



〈그림 4〉 무심천 수질 지표 변동(2009-2018)

생태하천 복원사업 전후 하천 생태지표 변화의 시계열 분석



〈그림 5〉 안양천 생물종 수 변동(2009-2016)

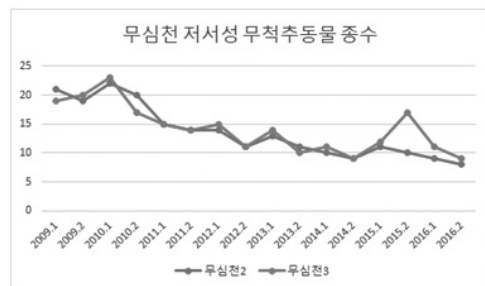
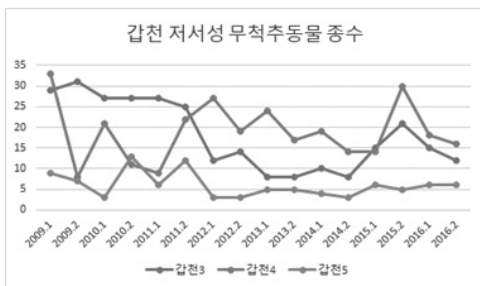
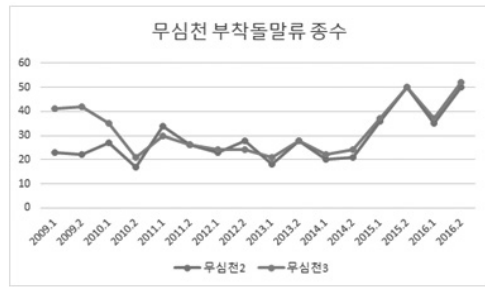
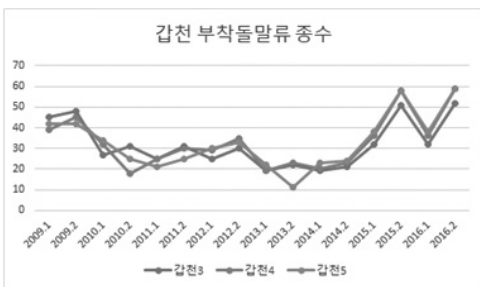
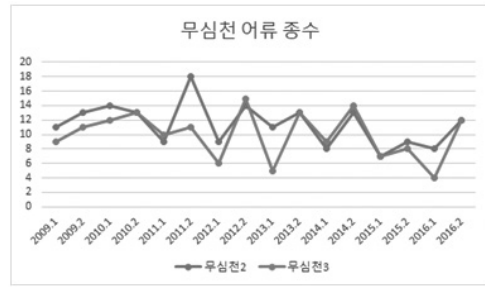
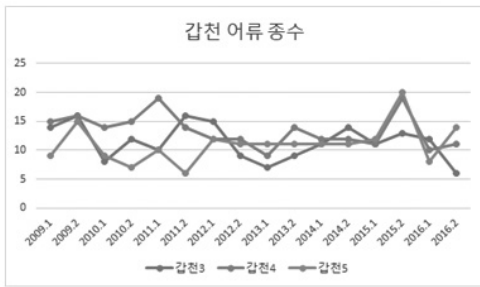
〈그림 6〉 왕숙천 생물종 수 변동(2009-2016)

〈표 9〉 안양천 생물종 수 Mann-Kendall test 결과

tau/p-value	어류	부착동물류	저서성 무척추동물
안양천3	0.0358/0.89	0.298/0.124	0.026/0.927
안양천4	-0.182/0.363	0.082/0.711	0.266/0.183

〈표 10〉 왕숙천 생물종 수 Mann-Kendall test 결과

tau/p-value	어류	부착동물류	저서성 무척추동물
왕숙천2	-0.103/0.618	-0.329/0.086	0.201/0.313
왕숙천3	-0.061/0.784	-0.146/0.468	-0.153/0.442
왕숙천4	-0.415/0.035	-0.12/0.5557	-0.463/0.017



〈그림 7〉 갑천 생물종 수 변화(2009-2016)

〈그림 8〉 무심천 생물종 수 변화(2009-2018)

〈표 11〉 갑천 생물종 수 Mann-Kendall test 결과

tau/p-value	어류	부착돌말류	저서성 무척추동물
갑천3	-0.196/0.319	0/1	-0.5/0.0096
갑천4	-0.474/0.015	0.134/0.499	-0.033/0.892
갑천5	0.316/0.108	0.093/0.652	0.093/0.652

〈표 12〉 무심천 생물종 수 Mann-Kendall test 결과

tau/p-value	어류	부착돌말류	저서성 무척추동물
무심천2	-0.316/0.109	0.38/0.047	-0.86/7.2E-6
무심천3	-0.136/0.498	0.094/0.651	-0.61/0.0015

속천의 경우 세 곳의 측정 지점에서 모두 인은 감소하는 추세를 보였고, 왕속천 2,3에서는 pH가, 왕속천 4에서는 BOD와 COD가 감소 추세에 있었다. 또한 세 지점에서 모두 pH와 인 함량은 복원사업 이후에 유의미하게 낮아졌으며 왕속천 4에서는 BOD와 COD도 이전에 비해 개선되었다. 왕속천 4가 다른 지점에 비해 더 많은 수질 지표가 개선된 것은 안양천의 경우와 마찬가지로 하류에 위치한 수질 정화시설의 영향이 있었을 것으로 판단되는데, 구리시 수질 정화시설은 왕속천 하류에 자리하여 왕속천 4지점은 그 영향을 받는 반면 왕속천 2, 3지점은 그보다 상류에 있어 영향을 받지 않는다. 갑천의 경우 세 지점에서 모두 BOD와 인 함량이 개선되는 추세에 있고 갑천 4에서는 COD와 질소 함량, 갑천 5에서는 질소 함량도 감소 추세에 있다. 하천 복원사업 전후 수질 지표 비교 분석 결과에서는 갑천 3에서 BOD와 인 함량, 갑천 4, 5에서 BOD, COD, 질소 함량, 인 함량이 유의미하게 개선되었는데 대전시의 수질 정화시설이 갑천 3 측정 지점보다 하류 쪽에 위치하여 해당 지점이 그 영향을 덜 받아 개선 지표가 적은 것으로 해석할 수 있었다. 마지막으로 무심천의 경우 지점별로 한두 가지의 수질 지표가 개선되는 추세에 있고 복원사업 전후 비교에 있어서도 개선이 확인되었으나, 네 곳의 연구 대상 하천 중 가장 저조한 개선 비율을 나타냈다. 이는 무심천의 생태복원 구간이 네 곳 중 가장 짧고 수질 측정 지점들이 수질 정화시설에서 거리가 멀기 때문으로 볼 수 있었다. 수질 지표별로 살펴보면 인 함량의 경우 무심천을 제외한 세 하천에서 모두 뚜렷한 감소 추세에 있었는데 이는 해당 하천들의 유역에서 농업 활동이 줄어들어 인을 포함한 비료의 사용이 줄

어든 것을 주된 원인으로 해석할 수 있었다. 무심천의 경우 그 상류 일대에 여전히 농업 경작지가 많이 남아있어 수질 측정 시 인 함량이 감소하지 않았을 것으로 판단할 수 있었다. 다음으로 BOD와 COD의 경우 대체로 수질 정화시설이 하천 근처에 위치한 경우 그보다 하류에 있는 측정 지점에서 감소하는 것으로 나타났는데, 이를 통해 수질 정화작업이 수중 산소 요구량을 효과적으로 감소시킨다고 판단할 수 있었다.

다음으로 생물군 중 수로 파악한 생물 지표의 경우 대부분의 측정 지점에서 변동이 심한 결과를 보여 유의미한 추세를 나타내는 분석 결과가 많지 않았다. 그러나 추세가 나타나는 경우 무심천 2 지점에서 부착돌말류가 증가 추세에 있는 것을 제외하고는 모두 감소 추세에 있는 것으로 분석되었다. 이것으로 판단했을 때 대상 하천들에서 생물 다양성 지표가 악화되고 있다고 판단할 수도 있겠으나, 조사 시점별로 조사된 생물 종 수가 크게 변동하는 경우가 많고 종 수가 변화하는 추세가 하천의 수질이 변화하는 추세와도 맞지 않는 경우가 많아 조사 자료의 신뢰성에 문제가 있을 가능성도 고려해볼 필요가 있다고 보았다.

본 연구는 하천 평가에 필요한 생태적 지표를 선정하여 이를 실제 네 곳의 생태하천 복원사업이 진행된 하천에 적용하였는데 분석 대상이 된 자료를 전적으로 환경부 조사 자료에 의존하는 데에서 발생하는 한계가 있었다. 수질 자료의 경우 TOC가 2012년부터 조사되기 시작하여 2009년부터의 자료를 수집한 본 연구에 포함시킬 수 없었고, 생물 자료의 경우 앞서 언급했듯 변동이 큰 조사 결과가 많았는데 이것이 실제로 출현 생물 종 수가 증감을 반복

했기 때문에 발생한 결과인지, 조사 과정에서의 한계로 발생한 차이인지를 확인할 수 없었다. 또한 생물 지표 분석에 있어 수서 식생 및 수변 식생의 다양성도 중요한 평가항목이지만 대부분의 지점에서 규칙적이고 일정한 시점에서의 결과가 존재하지 않아 분석에서 제외해야 하는 문제도 있었다. 이에 더해 수질 및 생물 지표 측정 지점에서의 수심, 하폭 등 물리적 지표 자료를 조사 및 자료 검색을 통해 획득하지 못한 것도 서식지 다양성에 대한 분석을 연구에서 제외하게 하는 한계점으로 작용했다. 추가적인 한계점으로는 하천별 유역과 측정 지점 간의 공간적 상관성에 대한 고려가 결여되었다는 것과 수질 및 생물 지표에 대한 설명 변수를 생태하천 복원 사업 하나만으로 한정해 분석한 것 등이 있다. 이렇듯 한계점과 보완점이 명확한 연구이나, 이 치수 중심의 하천 정비사업과 생태하천 복원사업이 차례로 시행된 하천을 대상으로 복원사업이 생태적인 개선 효과를 보였는지를 검증해보고자 그를 평가할 수 있는 지표들을 선정하여 10년에 걸친 시계열 분석을 실행해 보았다는 의의가 있다고 볼 수 있다. 그러나 연구 대상지 네 곳 모두 생태하천 복원사업이 끝나고 충분한 시간이 지나지 않았으므로 본 연구에서 분석한 결과가 정말로 유효한지 파악하기 위해서는 보다 더 긴 시간 동안의 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

5. 결론

선행 연구를 분석해 하천의 생태적 평가에 도입할 수 있는 평가지표로 pH, DO, BOD, COD, 질소 함량, 인 함량 등의 수질 지표, 어류, 저서성 무척추

동물, 돌말류, 하천 식생 등의 생물군을 포함한 생물적 지표, 수심, 하폭, 곡률도 등의 서식지 다양성 지표를 선정하였다. 이를 바탕으로 안양천, 왕숙천, 갑천, 무심천의 생태하천 복원지에 대해 수질 지표와 생물 지표의 시계열 변화를 분석한 결과 수질 지표는 여러 지점에서 개선된 결과를 보였으며, BOD나 인 함량 등은 대부분의 측정 지점에서 감소한 것을 확인하였다. 반면 생물 지표의 경우 조사 자료의 변동으로 인해 유의미한 추세가 나타나는 곳이 적었으며, 확인된 추세도 수질 지표의 변화 추세와는 다른 양상을 보였다. 해당 연구가 보다 큰 학문적 가치를 갖게 하기 위해서는 생태적 지표에 영향을 주는 다른 요인들에 대한 폭넓은 고려와 장기간에 걸친 모니터링이 필요할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 국내 문헌

- 강호선, 조홍제, 2014, “울산시 도심하천의 자연형 하천 조성에 따른 식생 변화”, 『한국수자원학회논문집』, 47(7), 657-670.
- 김상우, 2015, 『생태하천 사업 평가』, 국회예산정책처.
- 김석규, 고광용, 2015, “구조적·생태적 측면에서 생태하천 정비 평가”, 『한국환경기술학회지』, 16(1), 46-52.
- 김석규, 김철, 2007, “자연 친화적인 하천 정비사업의 평가방법에 관한 연구”, 『한국수자원학회논문집』, 40(7), 503-510.
- 김재엽, 장동호, 2015, “다중시기 위성영상을 이용한 생태하천복원지역의 지표특성 분석-태화강을 대상으로-”, 『한국지형학회지』, 22(1), 63-73.
- 김재엽, 장동호, 2015, “대전천 생태하천복원지역의 지표 특성 분석을 위한 원격탐사 자료의 활용”, 『한국지리학회지』, 4(2), 231-240.
- 박은하, 김진원, 오충현, 2015, “텔파이 기법을 활용한 도시 하천 환경 평가지표 선정”, 『한국환경복원기술학회지』, 18(6), 27-38.
- 박정규, 2004, “주원천 유역의 수질개선을 위한 생태하천 조성”, 『환경관리학회지』, 10(1), 63-70.
- 변찬우, 2010, 『우리 풍토에 맞는 생태하천』, 나무도시.
- 송주일, 이준호, 윤세의, 2008, “도시하천의 복원과 관리를 위한 하천평가기법 개발”, 『대한토목학회논문집』, 28(3), 283-296.
- 이정주, 황영석, 박성일, 엄정섭, 2018, “도심소하천 식생 조사에서 현장사진과 UAV 근적외선 영상의 비교 평가”, 『환경영향평가』, 27(5), 475-488.
- 이지영, 최재용, 2018, “독일 성과감독프로그램을 통한 하천생태복원 사후평가방안 연구-유럽물관리지침(WRRIL)에 관한 하천관리 사례를 중심으로”, 『한국환경복원기술학회지』, 21(6), 83-93.
- 임슬예, 유승훈, 2015, “생태하천 복원사업의 편익 분

석-남양천 및 유구천을 중심으로”, 『지역연구』, 31(4), 25-45.

- 임현정, 이명우, 정문선, “전주천 생태하천 복원사업 후 이용자 평가-환경특성 및 중요도, 만족도 분석을 중심으로”, 『환경영향평가』, 24(3), 217-232.
- 최미경, 2017, “생태적인 하천관리를 위한 법·제도적 개선방안 연구”, 『한국정책논집』, 17, 16-26.
- 최미희, 2006, “하천복원사업 평가기준의 과제”, 『환경영향평가』, 15(1), 13-22.
- 최일홍, 한봉호, 기경석, 2010, “경기도 수원천 생태하천 복원사업 이후 식생변화 연구”, 『한국생태환경학회지』, 24(6), 723-734.
- 최지용, 2002, “물환경 생태복원을 위한 수질관리-수변 완충녹지(buffer zone) 관리를 중심으로”, 『환경생물학회지』, 20, 20-29.
- 환경부, 2011, 『생태하천 복원 가이드북』, 환경부 생태하천 자료집.
- 환경부, 2017, 『생물측정망 조사 및 평가지침』, 국립환경과학원.
- 환경부, “물환경측정자료, 물환경정보시스템”, 2020.12.17., <http://water.nier.go.kr>

2. 국외 문헌

- Chang, H., 2008, Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea, *Water Research*, 42, 3285-3304.
- Cohen, J., 1988, Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd edition, *Academic press*.
- Darby, S., Sear, D., 2008, River restoration: Managing the uncertainty in restoring physical habitat, *Wiley*.
- Paillex, A., et al., 2017, Integrating and extending ecological river assessment: Concept and test with two restoration projects, *Ecological Indicators*, 72, 131-141.
- Pander, J., Geist, J., 2013, Ecological indicators for

stream restoration success, *Ecological Indicators*,
30, 106–118.

Van Den Brink, F.W.B, et al., 1996, Biodiversity in the
Lower Rhine and Meuse river–floodplains: Its
significance for ecological river management,
Netherland Journal of Aquatic Ecology, 30(2–3),
129–149.