

Research Paper

진위천수계의 오염총량관리에 따른 수질 및 수생태계 개선 효과 분석

임지혁 · 공동수
경기대학교 생명과학과

Analysis of Water Quality and Aquatic Ecosystem Improvement Effect According to TMDL in Jinwi River Watershed

Jihyeok Im · Dongsoo Kong
Department of Life Science, Kyonggi University

요약: 국내 물관리정책은 농도 중심의 물관리에서 부하량 관리 중심의 오염총량관리로 전환되면서 수질 및 수생태계에 변화를 가져왔다. 하지만 오염원의 변화와 유량 변동 등으로 총량제 시행 이후 수질 및 수생태계 건강성이 개선되었는지 판단하기 어려워 로그선형모델과 생물지표(저서성 대형무척추동물)를 활용하여 효과를 분석하였다. 그 결과 진위천수계의 BOD와 T-P농도는 각각 30%, 35% 저감되어 수질개선 효과를 보였으나, 저서생물지수(BMI) 결과 D등급에서 E등급으로 악화되었다. 진위천수계의 수생태계 건강성을 개선하기 위해서 생태하천을 가꾸는 노력이 필요하다.

주요어: 오염총량관리, 진위천수계, 수질개선, 저서동물지수

Abstract : As the domestic water management policy shifted from concentration-oriented water management to load management-centered Total Maximum Daily Load (TMDL), water quality and aquatic ecosystems brought changed. However, it was difficult to determine whether the water quality and the health of the aquatic ecosystem improved after the implementation of the TMDL due to changes in pollutant sources and discharge fluctuations ect, so the effect was analyzed using a log-linear model and biological indicators (Benthic Macroinvertebrates). As a result, BOD and T-P concentrations in the Jinwi River Watershed were reduced by 30% and 35%, showed the effect of improving water quality, however the benthic macroinvertebrates index (BMI) downgraded from grade D to grade E. Therefore, efforts to cultivate ecological rivers are necessary to upgrade the health of the aquatic ecosystem in the river watershed.

Keywords : TMDL, Jinwi River Watershed, water quality improvement, Benthic Macroinvertebrates Index

I. 서론

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 사계절이 뚜렷한 몬순 기후의 영향으로 강수량의 계절별, 지역별 편차가 크고, 산악지형도 많아 짧은 유로 연장, 급한 경사 등으로 유량변동계수가 크며 유출량 대부분이 홍수기에 편중되어 있어 물 관리가 매우 어려운 실정이다(MJ 2021). 진위천수계는 유역 내 공공주택지구나 산업단지 등 개발행위가 많이 이루어지고, 유량이 비교적 적으며 유속이 느려 수질이 급격하게 악화되었기 때문에 총량제가 한강수계법에 따라 임의제에서 의무제로 전환될 때 진위천수계도 해당 지자체(8개 시)가 협의를 통하여 총량제를 시행하였다(GP 2011; Oh et al. 2011; Han et al. 2014). 오염총량관리제도(이하 “총량제”라 한다)는 수계구간별 목표수질을 설정하고 달성·유지하기 위하여 오염원을 부하량으로 관리하는 제도이다(ME 2020). 오염물질을 감소시키면 감소시킨 범위 내에서 개발할 수 있도록 지자체에 혜택을 부여하고, 할당부하량을 초과하면 해당 지자체는 개발사업 추진에 제한받게 된다. 이러한 사유로 총량제 시행을 통한 수질개선 효과는 매우 크다고 시사되지만 최근 기후변화 등으로 여름이 길어지고 겨울이 짧아지는 계절의 변화와 함께 향후 홍수기 강수량도 증가할 것으로 전망하고 있어(NIMS 2020), 오염원의 변화 및 유량 변동 등으로 인하여 총량제 시행 이후 수질 및 수생태계 건강성이 많이 개선되었는지 판단하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 로그선형모델을 이용하여 시계열적 변화를 분석하고 지표생물(저서성 대형무척추동물)을 통하여 수질개선 효과 및 수생태계 건강성을 파악하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 조사 지점 및 자료 수집

수질의 조사지점은 진위천수계 목표수질 지점인 궁안교(a)로 선정하였으며 지표생물의 조사지점은 황구치천 합류부인 세월교(b)로 선정하였다(Figure 1). 유량과 수질, 지표생물 자료는 2012년부터 2019년까



Figure 1. Location map of the study site.

지의 물환경정보시스템의 총량측정망과 생물측정망 자료를 활용하였으며 오염원과 부하량자료는 이행평가 자료를 활용하였다.

2. 시계열적 변화 분석

Cohn et al.(1992)이 제안한 다변수 로그선형모델을 이용하여 수질개선 효과를 분석하였다. 이 모델은 유량과 시간의 함수로서 유량변동을 고려한 수질의 시계열적 변화를 해석할 수 있다(식 1).

$$\ln[C] = \beta_0 + \beta_1 \ln\left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right] + \beta_2 \left\{ \ln\left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right] \right\}^2 + \beta_3 [T - \bar{T}] + \beta_4 [T - \bar{T}]^2 + \beta_5 \sin[2\pi T] + \beta_6 \cos[2\pi T] + \varepsilon \quad (1)$$

총 7개의 매개변수가 사용되는데, 1개의 상수와 2개의 유량에 대한 계수, 2개의 시간에 대한 계수, 마지막으로 2개는 계절의 영향을 고려한 사인파함수(the first-order Fourier)에 대한 계수이다. 여기서, Q 는 유량(m^3/s), T 는 시간(year), ε 는 독립적으로 평균은 0, 분산이 σ_ε^2 인 정규분포를 따른다고 가정하였다. β 는 모델의 계수이고, \bar{Q} 와 \bar{T} 는 중심변수이다. 중심변수(centering variable)는 수치작업을 단순화하고 모델 수렴에 영향을 미치지 않게 한다.

3. 수생태계 변화 분석

저서성 대형무척추동물(Benthic Macroinvertebrates)은 하천 생태계에서 서식하는 많은 생물 중에서 가장 다양하고 풍부한 군집구성을 이루고 있으며 (Rosengerg & Resh 1993), 수명이 길고 채집이 쉬워 수생태계 평가를 할 수 있는 좋은 지표생물이다 (Piggott et al. 2015; Graeber et al. 2017). 따라서 저서성 대형무척추동물을 가지고 Shannon & Weaver(1949)의 다양성지수(H')와 Kong and Son et al.(2018)의 저서동물지수(BMI), 총종수를 활용하여 지표생물의 다양성과 민감성, 풍부성을 파악하였다(단, 출현종은 표기하지 않았다).

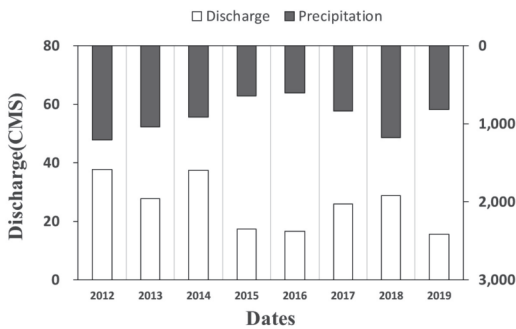
III. 결과 및 고찰

1. 수질개선

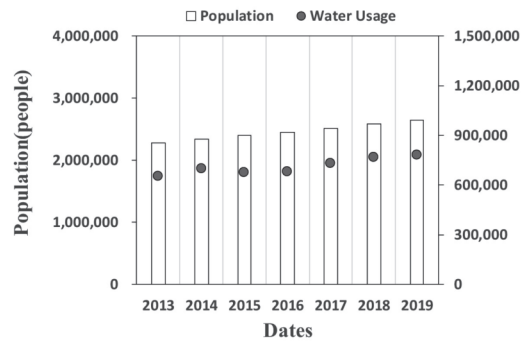
다변수 로그선형모델 계수는 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)가 최소가 될 때까지 시행착오법으로 변환시켜 산출하였고(Table 1), 수질 항목은 총량제 대상물질인 BOD를 적용하였다. 진위천수계는 대상물질이 BOD뿐이지만 T-N과 T-P도 함께 분석하였다(Figure 3). 2014년부터 2016년과 2019년에는 한발로 인하여 강수량과 유량이 적었고, 매년 증가하는 오염원(생활계 및 산업계 등)들로 인하여 발생량이 증가하였으나 배출부하량은 감소하였

Table 1. Coefficient values of the multivariate log-liner model

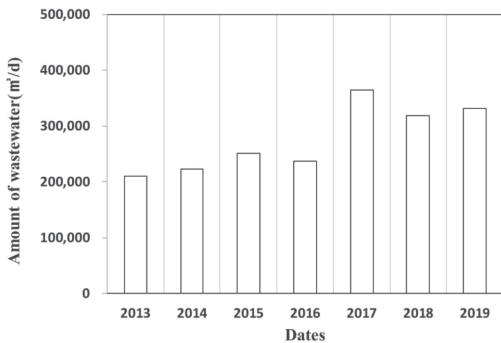
Parameters	RMSE	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	ϵ
BOD	1.9971	1.4187	-0.0212	0.0381	-0.0560	0.0032	0.2359	-0.1502	0.3152
T-P	0.1522	-0.2032	-0.1036	0.1134	-0.0666	-0.0169	0.0317	-0.1116	-0.7219



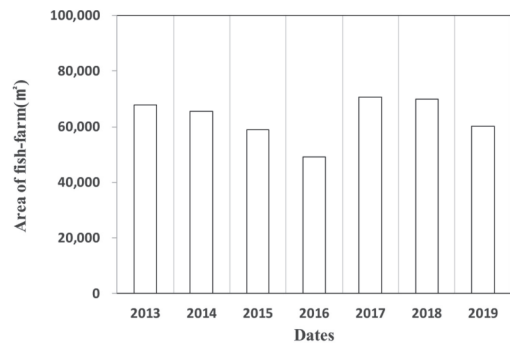
(a) Discharge and Precipitation



(b) Pollution Source from Human Living



(c) Pollution Source from Industrial wastewater



(d) Pollution Source from fish-farm

Figure 2. Comparison of annual discharge and precipitation, pollution sources, emission load.

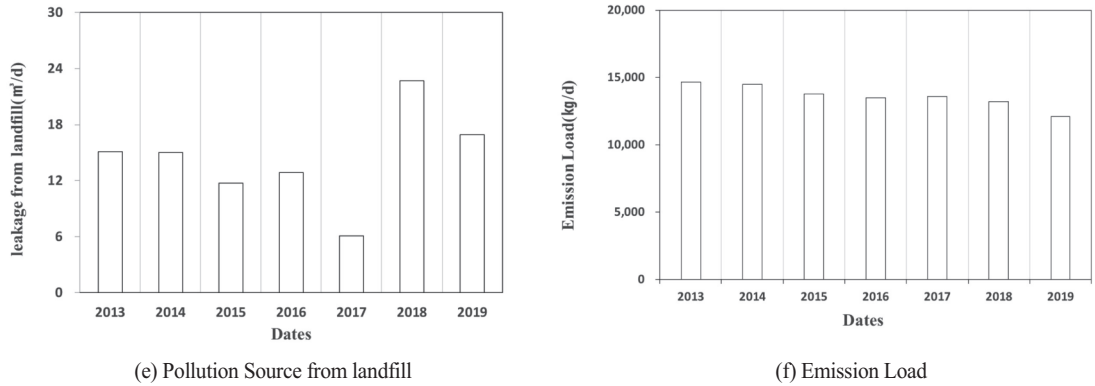


Figure 2. Continued

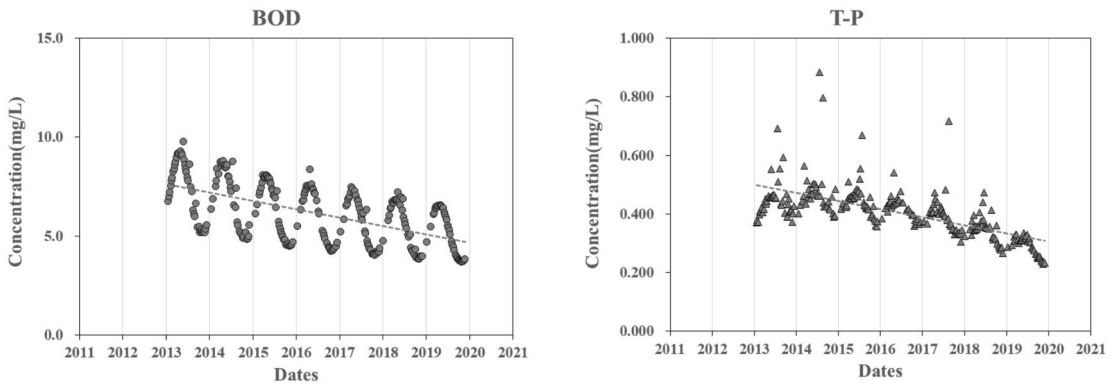


Figure 3. Effect of water quality improvement after TMDL

다(Figure 2). 모델 적용 결과 2019년 기준으로 BOD와 T-P 농도는 총량제 시행 초기(2013년)보다 각각 30%, 35% 수질이 개선되었는데(Figure 3), 이는 총량제가 수질개선에 이바지한다는 것을 의미하며, 공공하수처리시설 방류수 수질개선(10mg/L→5mg/L)의 효과라 하겠다(Han et al. 2014). 다만, T-N의 경우 총량제 시행 전후 증감의 변화가 없이 매년 동일한 범위(3.742mg/L~10.964mg/L)를 보이고 있어 T-N의 수질개선 효과를 높이기 위해서는 T-N도 관리가 필요할 것으로 보여진다(T-N의 결과는 표시하지 않았다).

2. 수생태계 건강성

수생태계 건강성을 평가한 결과 총량제 시행 초기에 비하여 총중수와 더는 크게 변화를 보이지 않았으나 BMI는 D등급(나쁨)에서 E등급(매우나쁨)으로 수

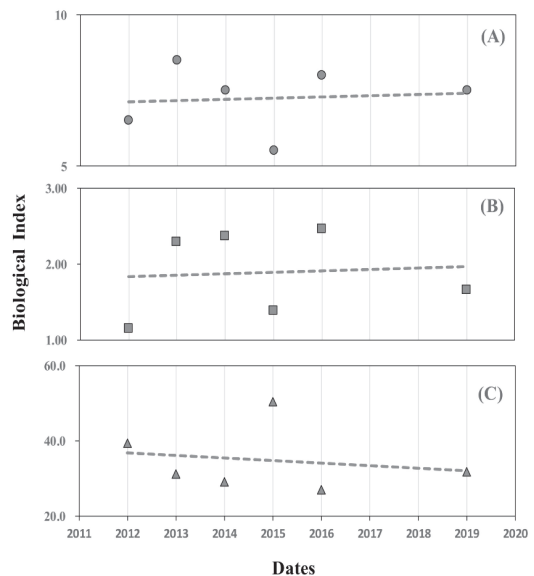


Figure 4. Effect of Aquatic ecosystem after TMDL. (A) Number of Species, (B) Diversity Index, (C) BMI

생태계 건강성이 나빠졌다(Figure 4).

2012년부터 2019년까지 대부분 깔따구류(Chironomidae sp.)가 우점종으로 나타났지만, 일시적으로 등검은실잠자리(*Paracercion calamorum*)가 아우점하면서 오락지수가 낮아져 BMI 등급이 상향된 것으로 판단되며 이로 인해 추이가 낮아진 것으로 사료된다. 다만 연 2회 조사한 결과를 평균 내다 보니 이상치로 인해 등급이 상향될 수 있으나 2012년부터 2019년까지 동 지점은 연 1회 E등급을 유지하였다.

IV. 결론

진위천수계의 2012년부터 2019년까지 총량제로 인한 수질과 수생태계 건강성 개선 효과를 분석한 결과, 총량제 시행 후 수질은 개선되지만 수생태계 건강성은 변화가 없었다. 이와 같은 경향은 총량제의 삭감계획 이행에 따른 것으로 사료되며 그중에서 공공하수처리시설의 방류수 수질개선에 의한 것으로 판단된다. 다만, 수질 지점과 수생태계 지점이 서로 상이하여 수질 해석과 연관 지어 다른 해석을 할 수 있으나 생물지표 지점에서의 연차별 변화추이만으로도 수생태계 건강성을 평가할 수 있었다. 또한 수생태계의 건강성 회복을 위해서는 총량제와 더불어 지자체에서 생태하천을 가꾸는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

References

Cohn TA, DL Caulder, EJ Gilroy, LD Zynjuk, RM Summers. 1992. The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An Empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. *Water Resources Research* 28(9): 2353-2363.

Graeber D, Tinna MJ, Jes JR, Tenna R, Peter W, Annette B. 2017. Multiple stress response of lowland stream benthic macroinvertebrates

is dependent on habitat type. *Science of the Total Environment* 599(600): 1517-1523.

Gyeonggi Province (GP). 2011. Monitoring of Flow and Water Quality in the Jinwi Watershed. [Korean Literature]

Han M, Ahn KH, Ryu J, Son J, Park BK, Kim YS. 2014. Evaluation of the Development and Reduction Scheme under Implementation Plan of Total Maximum Daily Loads in the Jinwi Watershed. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 36(6): 451-459. [Korean Literature]

Kong D, Son SH, Hwang SJ, Won DH, Kim MC, Park JH, Jeon TS, Lee JE, Kim JH, Kim JS, Park J, Kwak IS, Jun YC, Park YS, Ham SA, Lee JK, Lee SW, Park CH, Moon JS, Kim JY, Park HK, Park SJ, Kwon Y, Kim P, Kim AR. 2018. Development of Benthic Macroinvertebrates Index (BMI) for Biological Assessment on Stream Environment. *Journal of Korean Society on Water Environment* 34(2): 183-201. [Korean Literature]

Ministries Joint (MJ). 2021. The 1st National Water Management Master Plan (2021-2030). [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). 2020. The Basic Policy of Total Water Pollutant Load Management. [Korean Literature]

National Institute of Meteorological Science (NIMS). 2020. Korean Peninsula Climate Change Prospect Report 2020. [Korean Literature]

Oh MW, Lee OM, Song HB, Park SJ, Song MY, Kong D. 2011. Comparative Analysis on the Application of Biotic Indices for Environmental Assessment of a Polluted Stream (Jinwi Stream). *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(6): 760-768. [Korean Literature]

Piggott JJ, Townsend CR, Matthaei CD. 2015. Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics, *Global Change Biology* 21(5): 1887-1906.

Rosenberg DM, Resh VH. 1993. *Freshwater*

biomonitoring and benthic macroinvertebrates, Chapman & Hall.

Shannon CE, Weaver W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana