

경안천 유역 수질 및 이행평가 자료를 통한 임의적 오염총량관리제도 시행의 성과 분석

이범연^a · 이창희^{b,*}

명지대학교 환경에너지공학과

Effects of the Voluntary Scheme of Total Maximum Daily Load based on Water Quality and Annual Evaluation data in the Gyeongan Watershed, South Korea

Lee, Bum-Yeon^a · Lee, Chang-Hee^{b,*}

Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University

(Received 29 April 2021, Revised 12 July 2021, Accepted 13 July 2021)

Abstract

This study presents the achievements and limitations of the voluntary-based Total Maximum Daily Load (TMDL) through statistical analysis of water quality monitoring data and performance assessments of TMDL plans implemented in the Gyeongan watershed. The results clearly showed that responsible local governments complied the allocated TMDL and the designated water quality goals were successfully achieved in the required period. This was possible because the Ministry of Environment provided innovative incentives, such as, relaxations of the existing tight land-use regulations and full-scale financial aids for constructing and operating public treatment facilities to draw local government voluntary participation. However, a couple of problems which decreased the effectiveness and efficiency of the voluntary TMDL were identified. The different TMDL implementation schedules between upstream (Yongin) and downstream (Gwangju) governments caused delay in water quality improvement and exaggerated TMDL allocation to the local development which made excessive investment in the treatment facilities. Although it is not directly related to the voluntary scheme, technical methods for establishing and assessing the water quality goals should be improved so that the effects of flow conditions on water quality are properly assessed. We expect that results of this case study contribute to developing a more effective voluntary-based scheme for the implementation of the so-called ‘tributary TMDL’ in the future.

Key words : Gyeongan stream, Total maximum daily load, Voluntary approach, Water quality assessment, Watershed management

^a 연구원(Researcher), armdry83@nate.com, <https://orcid.org/0000-0002-1623-223>

^{b,*} Corresponding author, 교수(Professor), changhee@mju.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-8066-6838>

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, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

1.1 Background

도시화 및 산업화로 인해 오염원이 급증하면서 부하량의 양적 증가, 오염원의 밀집 및 비점오염물질의 증대가 발생하게 되어 기존의 점오염원 위주의 배출수 규제만으로는 오염을 통제할 수 없어 수계의 환경기준을 달성하고 수질개선을 시키기 위한 새로운 개념으로 오염총량관리제(이하 총량관리; Total Maximum Daily Load, TMDL)가 도입되었다(NIER, 2006). 총량관리란 수역의 일정지점에 목표수질을 설정하고 이를 달성하기 위해 상류의 영향 유역에서 배출할 수 있는 해당 오염물질의 총 부하량을 계산하고 이를 개별오염원별로 할당하여 관리하는 유역관리에 기반한 수질관리제도의 하나이다(NIER, 2006; U. S. EPA., 2008).

총량관리를 포함한 유역관리를 효과적으로 실시하기 위해서는 이해당사자 협력체계 구축, 유역 특성 및 문제 파악, 문제해결을 위한 목표설정, 계획 마련, 계획의 이행 및 이행 모니터링, 이행사항에 대한 평가 및 개선대책 마련 등 전 과정에 걸쳐 목표달성 때까지 지속적인 계획의 보완을 실시하는 적응관리가 필요하다(Allan et al., 2008; Bell et al., 2007; Harrison, 2007; Walters, 2007). 따라서 총량관리는 유역 현황 및 문제 파악, 목표수질 설정, 오염원 조사, 부하량 산정, 오염원별 할당 및 삭감방안 마련 등을 포함한 계획의 수립, 시행, 이행 모니터링 및 평가의 과정을 목표수질이 달성될 때까지 반복적으로 수행하며(NIER, 2006; U. S. EPA., 1991; U. S. EPA., 2008), 이 과정에서 노출되는 문제를 지속적으로 보완이 요구된다(Freedman et al., 2004; Reckhow, 2003; U. S. EPA., 2002). 특히 이행평가는 총량관리의 과정 중 발생하는 문제의 원인을 파악하고 해결하기 위해 선택된 대책들의 적절성과 수질개선에 대한 효과성을 판단하는 단계로서 목표수질 달성을 위해 보다 효과적이고 효율적인 다음 단계 또는 타지역의 총량관리 계획의 수립 및 시행의 근거가 된다는 점에서 매우 중요하다(Benham et al., 2008; Cabrera-Stagno, 2007; Hashim, 1998).

우리나라의 총량관리 이행평가는 연도별로 시행하는 단기 이행평가와 각 단계(5년) 이상의 장기간 이행결과를 평가하는 장기 이행평가로 구분된다(NIER, 2016). 단기 이행평가는 시행계획에 포함된 연차별 개발계획 및 삭감계획의 이행여부, 배출시설에 대한 모니터링 등을 통한 연차별 할당부하량 달성여부 평가가 주로 이루어지며, 장기 이행평가의 경우 장기간의 수질 변동 등의 자료를 통해 목표수질 달성여부 평가와 목표 달성 또는 미달성 원인 분석을 통해 차기 오염총량관리 계획 시 제도적 및 기술적 개선방안을 도출하기 위해 실시된다.

최근 환경부는 현재 시행중인 의무적 총량관리가 다양한 수질 오염물질 중 생물화학적산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD)과 총인(Total Phosphorus, TP)만을 다루는 대상물질의 한계와 목표수질이 본류에 설정되어 있어 지류

수질의 개선이 미흡하다는 한계를 극복하기 위해 지류 수질 악화의 원인이 되는 다양한 오염물질을 총량관리 대상에 포함할 수 있는 지류총량제의 도입을 추진하고 있다(NIER, 2020). 지류총량제는 현행 의무적 총량관리의 한계를 극복하는데 장점이 있는 반면 해당시군의 자발적 참여를 전제로 하는 임의적 제도라는 점에서 시행효과를 담보할 수 없다는 근본적인 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구는 국내에서 임의적 총량관리가 시행되었던 대표적인 사례인 경안천 유역의 연도별 단기 이행평가 자료를 활용하여 임의적 총량관리의 성과 및 한계점을 분석함으로써 향후 효과적인 지류총량제 시행을 담보하기 위한 시사점을 도출하고자 한다.

1.2 TMDL in Gyeongan watershed

임의적 오염총량관리는 원하는 지방자치단체로 하여금 목표수질 달성을 담보하는 경우 토지이용규제를 완화하여 지역개발 등을 자체적으로 관리하도록 허용하는 총량관리 체제이다. 즉, 기초자치단체가 대상물질, 목표수질 설정, 시행계획 등을 중앙정부인 환경부와 협의를 통해 결정하고 승인을 받은 후 시행하는 체제를 가진다. 기초자치단체는 시행 이후 총량관리 대장작성 및 매년 이행평가 보고서를 환경부에 제출하여 이행사항에 대한 평가를 받으나 자발적 시행체제라는 점에서 시행이 계획대로 이뤄지지 않는 경우 법적으로 정해진 직접적인 제재수단은 없다.

경안천 유역 임의적 총량관리의 주요 내용, 즉, 대상물질, 목표수질, 목표수질 설정지점, 유량 조건, 허용총량, 할당 부하량, 부하량 삭감대책, 및 승인시기 등은 Table 1과 같다. 경안천 유역의 하류에 위치한 광주시는 2004년 총량관리를 시작하여 의무적 시행체제로 전환된 2013년 이전까지 2단계(1단계 2004~2007년, 2단계 2008~2012년)에 걸쳐 시행되었으며, 상류의 용인시는 2007년부터(공식적 승인은 2008년) 2012년까지 1단계(2007~2012년)가 시행되었다. 따라서 전체 경안천 유역에 걸친 총량관리는 실제적으로 2007년부터 시행되었다.

경안천 유역의 목표수질은 대상물질인 BOD에 대해 광주시 1차 5.5mg/L(GA-A 5.5mg/L 유입 조건), 2차 3.8mg/L이며, 용인시의 경우 4.1mg/L가 2012년까지 설정되었다. 이때 목표수질의 설정은 팔당호 수질개선을 위해 최근 몇 년간 수질변화 추이, 물환경관리기본계획 상 2015년 목표기준(BOD 3.5mg/L), 대상지역의 수질오염 특성, 장래 오염부하 전망, 수질오염물질 삭감 가능성 등을 고려하여 현재수질보다 악화되지 않는 범위 내에서 10년 평균 저수량 조건으로 설정되었다.

목표수질에 대한 평가는 오염총량관리 단위유역의 수질측정방법에 근거하여 8일 간격으로 연간 30회 이상 과거 3년간 측정된 결과를 토대로 다음과 같이 평균수질을 산정하여 평가하고 있다.

Table 1. Summary of TMDL plan in Gyeongan watershed

Categories	Gwangju	Yongin	Remarks
Target pollutant	BOD	BOD	
Target water quality	Phase 1 : 5.5mg/L Phase 2 : 3.8mg/L	4.1mg/L	
Water quality target setting point	GA-B	GA-A	
Flow condition	3.595 m3/s	1.530 m3/s	10yr average low flow
Total Maximum daily load	Phase 1 : 3,146.3 kg/d Phase 2 : 5,309.9 kg/d	5,626 kg/d	Phase 1 : Upper area of Seoha Weir Phase 2 : Gyeongan A and B watershed
Allocation load	Phase 1 : 3,012.1 kg/d Phase 2 : 4,778.9 kg/d	5,063.4 kg/d	MOS : Phase 1 5%, Phase 2 10%
Load reduction plans	Phase 1 : Construction and expansion of sewer treatment plant (Gyeongan, Gonjiam, Opo, Docheok), Maintenance of sewer system(1st phase), Improvement of effluent water quality (Gyeongan, Gonjiam, Opo, Docheok), Installation of nonpoint source reduction facilities Phase 2 : Construction of sewer treatment plant (Gwangju2, Gonjiam2, Opo2), Improvement of effluent water quality (Gyeongan, Gonjiam, Opo, Docheok, Gwangju, Maesan), Maintenance of sewer system(2nd phase), Direct purification facility, Installation of nonpoint source reduction facilities	Construction and expansion of sewer treatment plant (Yongin, Seongmit, Mohyeon, Dongbu, Jeongsu, Donglim) Maintenance of sewer system, Improvement of effluent water quality (Yongin)	
Period(approval date)	Phase 1 : 2004 ~ 2007(2004.7) Phase 2 : 2008 ~ 2012(2008.12)	2007 ~ 2012 (2008. 4)	

$$\text{Average Water Quality} = e^{\left(\text{Conversion average water quality} + \frac{\text{Conversion variance}}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\text{Conversion average water quality} = \frac{\ln(\text{measurement water quality}) + \ln(\text{measurement water quality}) + \dots}{\text{Number of measurements}} \quad (2)$$

$$\text{Conversion variance} = \frac{\ln(\text{measurement water quality}) - \text{conversion average water quality}}{\text{Number of measurements} - 1} \quad (3)$$

이는 목표수질 설정이 저수량 조건에 대해 설정된 것에 반해 평가는 연중 수질을 반영하여 평가하고 있어 비점오염원에 대한 영향이 일시적으로 나타나 대부분 저갈수기에 악화된 수질을 나타내는 하천에 대해서는 평가수질이 실제 저수량 시기의 수질보다 낮은 농도로 평가될 가능성이 있다.

2. Materials and Methods

2.1 Study site

연구대상지역인 경안천 유역은 국내에서 가장 먼저 총량관리가 도입되어 의무적 총량관리로 전환되기 이전인 2012년까지 임의적 총량제가 실시되었던 경기도 광주시 및 용인시를 포함한다. 경안천은 우리나라의 중북부 지역(127°8'4" ~ 29°6'56" E, 37°9'43" ~ 29°24'24" N)에 위치하고 있으며, 유역면적 567.04km²인 중소규모의 하천으로 하천연장이 47.70km로 비교적 짧기 때문에 광주시 구간의 하류 수질이 용인시 구간의 상류 수질에 크게 좌우된다(Fig. 1). 경안천은

서울 및 수도권 2,500만명의 상수원인 팔당호로 직접 유입되기 때문에 해당유역에는 수질관리 목적으로 상수원 보호구역, 상수원 수질보전 특별대책지역 및 수변구역 등을 포함한 다양한 토지이용 규제가 지정되어 있다. 따라서 폐수배출시설, 특정수질유해물질 및 유해화학물질 배출시설, 분뇨배출시설, 공동 주택의 입지를 지역에 따라 금지하거나 일정규모 미만에 대해서만 허가를 내주는 등의 중점관리가 이루어지고 있다(Table 2). 이러한 토지이용 규제와 더불어 총량관리 도입이전까지는 수질악화의 원인인 오염원의 증가를 억제하기 위해 공공하수처리시설의 신증설 및 하수처리구역의 확대를 가능한 제안하는 정책을 유지해 왔다. 그러나 급증하는 개발압력 때문에 하수처리구역 이외 지역에서 규제 미만의 소규모 오염원이 난립하여 하천의 수질은 악화되고 강력한 토지이용규제에 대한 지역 주민의 민원이 가중되는 등의 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정부는 해당 지역이 원하는 경우 경안천이 목표하는 수질을 만족시키는 조건에서 토지이용 규제를 완화할 수 있는 임의적 총량관리를 도입하였다.

Table 2. Regulations in the special water quality control zone (2004.5)

Category	Zone I	Zone II
Wastewater discharge facilities	- factory which discharges designated water pollutants is not allowed - new factory which discharges more than 200m ³ /day wastewater can not be located	- factory which discharges designated water pollutants is not allowed - factory which discharge more than 200m ³ /day wastewater can be located in STP service area or in the outside of STP service area only when wastewater can be treated less than 30 ppm (BOD ₅)
Sewage discharge facilities	- building which has total area larger than 800m ² can not be located in the outside of STP service area - hotel or restaurant which has total area larger than 400m ² can not be located in the outside of STP service area	- building which has total area larger than 800m ² is allowed in the outside of STP service area only when wastewater can be treated less than 20ppm (BOD ₅) - hotel or restaurant which has total area larger than 400m ² can not be located in the outside of STP service area
Cattle shed	- cattle shed which has total area larger than 450m ² (cow) or 500m ² (pig) is not allowed	- cattle shed which has total area larger than 450m ² (cow) or 500m ² (pig) can be located only when wastewater can be treated less than 50ppm (BOD ₅)

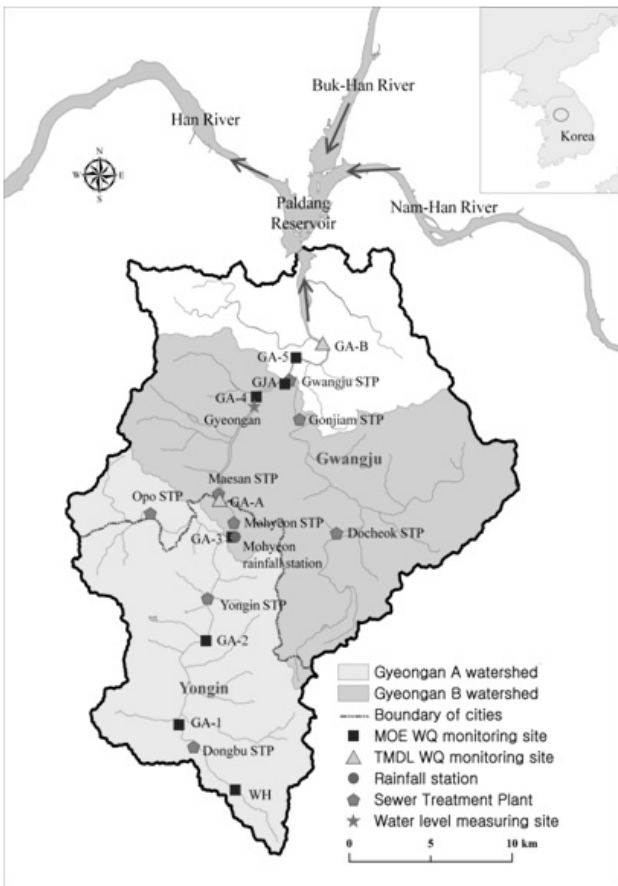


Fig. 1. Study site.

2.2 Methods

본 연구는 수질평가 및 시행계획 상의 계획 평가를 통해 오염총량관리의 긍정적 효과 및 한계점 분석하였다. 목표수질 달성 평가를 위해 목표수질 설정 지점 및 경안천 상류에서 하류 측정지점별 수질변화 분석을 통해 목표수질 달성 여부 및 초과율을 분석하였다. 또한 오염총량관리 보고서에 계획하였던 오염원 및 부하량, 삭감방안의 수행실적 평가를 통해 인위적 수질개선 효과를 분석하였다.

2.2.1 Water quality analysis

수질분석은 환경부 오염총량관리 유량 및 수질 측정망(이하 총량측정망)의 GA-A 및 GA-B 지점의 자료를 활용하였다(Fig. 1). 총량 측정망 자료는 8일 간격으로 측정된 자료로서 연도별 변화 파악이 가능한 2005년부터 2012년까지의 자료를 사용하였다. 수질 분석은 시계열 변화를 파악하기 위해 비모수 통계방법인 Mann-Kendall trend test를 실시하였으며 상하류간 관계를 파악하기 위해 비모수적 상관분석(Spearman correlation)을 실시하였다(Helsel and Hirsch, 2002; Kim, 2008). 분석항목은 광주시 및 용인시 임의제 총량관리 대상물질인 BOD와 더불어 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total Nitrogen, TN), 총인(Total Phosphorus, TP)을 포함하였다. 이때 월평균 유량과 대상지역 중앙 지점에 위치하고 있는 모현 측정소의 강우량 자료를 이용하여 강우량에 따른 수질 변화도 함께 분석하였다. 총량관리 시행시기를 고려하여 우선 도입된 광주시의 1단계 기간인 2004년부터 2007년까지를 1단계로 하였으며, 용인 및 광주시(2단계) 모두 도입된 기간인 2008~2012년을 2단계로 구분하여 실시하였다. 상류의 용인시의 총량관리는 2007년 시작되어 구분된 단계 보다 1년 앞서지만 승인일자가 2008년이므로 구분시점을 2008년으로 하였다.

또한 경안천 유역의 환경부 수질측정망 자료를 활용하여 상류에서 하류로의 수질변화를 1단계 시작연도(2004년), 2단계 시작연도(2008년), 최종연도(2012년)에 대해 분석하였으며, 이때 경안천에 직접 유입되는 주요 공공하수처리시설(500m³/d 이상) 방류수질 변화도 함께 고려하여 평가 하였다.

2.2.2 Evaluation of TMDL target water quality

목표수질 평가는 목표수질 설정 항목인 BOD를 대상으로 오염총량관리 목표수질 평가 방법(수식 1~3)에 따라 GA-A 및 GA-B 지점에 대해 당해 연도 및 과거 3년을 평균하여 단계별, 지역별 목표수질(Table 1)과 비교하였다. 또한 유량조건에 따른 목표수질 달성도를 평가하기 위해 전체 유량조건에 대한 TMDL 산정 및 평가를 위해 많이 사용되고 있거나 고려되고 있는 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)를

작성하여 평가하였다(Johnson et al., 2009; Teague et al., 2011). 유량조건의 구분은 유량지속기간(Flow duration interval)에 따라 주로 활용되고 있는 High flows(0~10%), Moist conditions(10~40%), Mid-range conditions(40~60%), Dry conditions(60~90%), Low flows(90~100%)의 5개 구간으로 구분하여 실시하였다(Babbar-Sebens and Karthikeyan, 2009; U. S. EPA., 2007). 유량자료는 GA-A와 GA-B지점에 일 간격 유량이 측정되지 않아 인근에 위치한 경안수위표의 자료(수위-유량 관계식을 통해 산정)를 GA-A와 GA-B 지점의 상류 유역 면적 비로 산정하였다. LDC 작성을 위한 유량 자료는 과거 10년(2003~2012) 동안의 자료를 활용하였다.

2.2.3 Evaluation of TMDL plan

인위적인 요소에 대한 달성도 평가를 위해 용인시의 광주시의 오염총량관리 시행계획 보고서 및 이행평가 보고서를 바탕으로 2006년 이후 주요 오염원(인구, 소, 돼지, 산업폐수 배출량, 대지비율) 및 총 배출부하량 변화를 파악하였으며, 최종연도인 2012년 계획 대비 현황을 분석하였다. 또한 이행평가 보고서를 통해 연도별 삭감방안 적용 현황 및 삭감방안 시행을 위한 투자 내역을 분석하여 인위적인 요소에 의한 효과를 분석하였다.

3. Results and Discussions

3.1 Water quality changes in Gyeongan stream

총량측정망의 월평균 수질변화를 살펴보면 BOD, COD, TN 및 TP 모두에서 감소추세를 나타내고 있어 오염총량관리제도 시행에 따라 대상물질뿐만 아니라 기타 오염물질 항목의 개선도 함께 이뤄진 것으로 판단된다(Fig. 2). 시기별로는 BOD와 COD는 4~6월에 가장 악화된 경향을 보였으나,

TN 및 TP는 유량이 적은 겨울철(12월~2월)에 악화된 농도 값을 보였다. 상대적으로 유량이 풍부한 여름철에는 모든 오염물질 항목이 비교적 낮은 농도를 보였는데 이는 유량 증가로 인한 희석효과로 판단된다. 반면 유량이 상대적으로 적은 시기에는 오염물질에 따라 농도 증가가 시기적으로 다르게 나타나는데 이는 유량뿐만 아니라 다른 요인이 복합적으로 작용함을 반영한다. 유기물 지표항목인 BOD 및 COD가 봄철에 가장 높은 농도를 보이는 이유는 적은 하천 유량으로 인해 점오염원의 영향이 상대적으로 크고 퇴비 등 눈에 축적된 유기물을 포함하는 관개용수의 하천 유출 등의 영향으로 판단된다(Cha et al., 2012; Shim et al., 2005). TN 및 TP 등의 영양염류는 공공하수처리시설 방류수 농도의 영향이 큰 것으로 판단된다. 특히 TP의 경우 2010년 이후 수질농도가 크게 감소하고 2012년부터는 일정한 농도를 보이는데 이는 2012년부터 4mg/L에서 0.2mg/L로 강화된 방류수 수질기준을 맞추기 위해 2010년부터 방류수 수질이 크게 개선되었기 때문이다(Fig. 3).

GA-A와 GA-B 지점의 수질에 대한 정규분포 검정 결과(Shapiro-Wilk 검정법) 모든 수질항목에서 p-value가 0.001미만 값으로 정규분포(p-value가 0.05 이상)를 보이지 않아 비모수 방법의 하나인 Mann-Kendall trend test를 적용하여 수질변화 추세를 분석하였다. 분석 결과 지점별로는 GA-A의 경우 1단계의 TN, 2단계의 모든 항목에서 p-value가 0.05 미만으로 통계적 유의한 감소추세를 보였다. GA-B의 경우 BOD와 TP에서 1단계와 2단계에 걸쳐 유의한 감소추세를 보였으며, COD의 경우 2단계, TN의 경우 전체 기간에서 일정한 경향성을 가지고 있는 것으로 조사되었다. 다른 항목의 경우에도 통계적 유의성은 없으나 Kendall's tau 및 Sen's slope이 대부분 음의 값을 보이고 있어 일부 수질 개선이 이뤄진 것으로 판단된다.

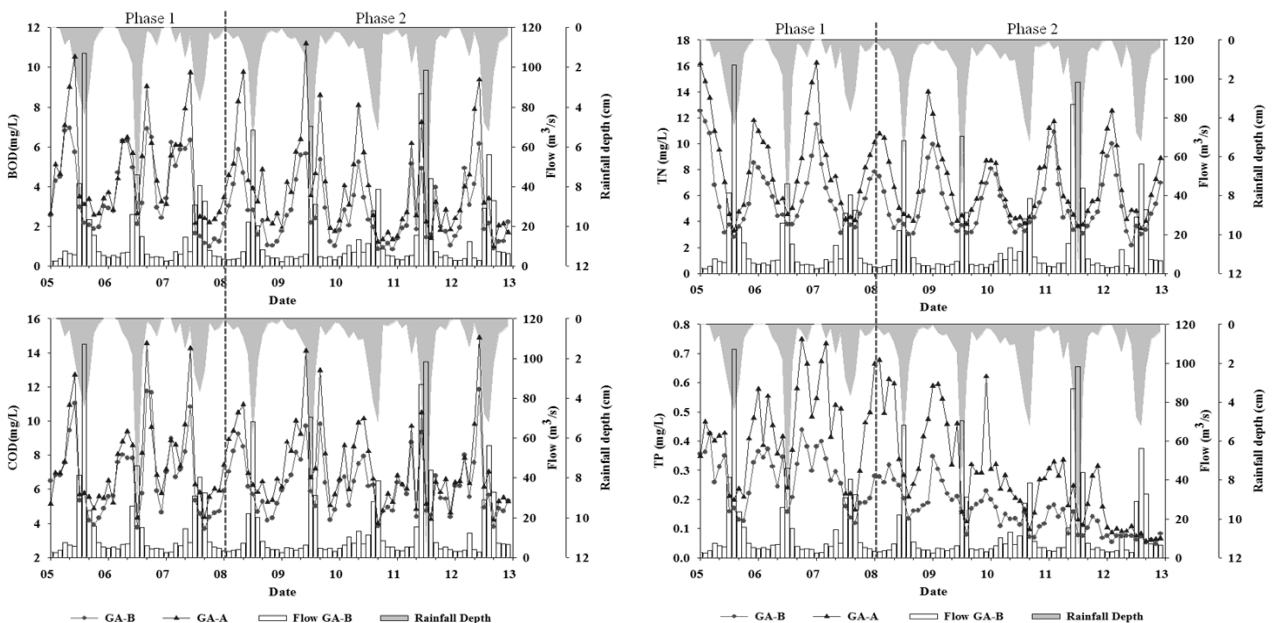


Fig. 2. Temporal water quality changes.

Table 3. Mann-Kendall trend test

Categories		GA-A			GA-B		
		Whole Period	Phase 1	Phase 2	Whole Period	Phase 1	Phase 2
BOD	Kendall's tau	-0.180	-0.102	-0.165	-0.199	-0.169	-0.099
	S	-13,479	-1,074	-4,808	-14,860	-1,778	-2,871
	p-value	< 0.0001	0.069	0.000	< 0.0001	0.003	0.023
	Sen's slope	-0.005	-0.008	-0.007	-0.004	-0.012	-0.002
COD	Kendall's tau	-0.077	-0.014	-0.156	-0.066	-0.079	-0.093
	S	-5,810	-143	-4,552	-4,954	-826	-2,698
	p-value	0.023	0.810	0.000	0.053	0.163	0.033
	Sen's slope	-0.003	-0.001	-0.008	-0.002	-0.006	-0.003
T-N	Kendall's tau	-0.190	-0.134	-0.132	-0.138	-0.083	-0.064
	S	-14,333	-1,418	-3,891	-10,407	-876	-1,867
	p-value	< 0.0001	0.017	0.002	< 0.0001	0.139	0.141
	Sen's slope	-0.007	-0.017	-0.007	-0.003	-0.007	-0.002
T-P	Kendall's tau	-0.425	0.043	-0.558	-0.547	-0.152	-0.581
	S	-32,025	454	-16,394	-41,232	-1,607	-17,053
	p-value	< 0.0001	0.443	< 0.0001	< 0.0001	0.007	< 0.0001
	Sen's slope	-0.00103	0.00030	-0.00180	-0.00071	-0.00060	-0.00080

※ Bold : Significance level at p-value <0.05

상류의 GA-A와 하류의 GA-B의 수질 변화를 비교해보면 월별 수질 변화 패턴은 비슷하게 나타났으나, GA-A가 GA-B 보다 악화된 수질을 보였다(Fig. 2). GA-A와 GA-B의 전체 자료에 대한 Spearman's rho 상관분석 결과에서도 유의도 0.01 미만으로 통계적으로 유의한 상관관계를 보였으며 모든 항목에서의 상관계수도 0.8 이상의 높은 상관성을 보였다 (Table 4). 이는 GA-B가 GA-A에 영향을 받고 있는 것으로 상류에 위치한 용인시의 수질에 따라 경안천 하류 목표수질 설정지점의 수질이 크게 영향을 받고 있음을 반영한다.

임의적 총량관리 시행 이후 경안천 상류로부터 하류까지의 수질변화를 살펴보면 연도에 상관없이 모든 항목에서 용인시 구간인 GA2 또는 GA3 지점까지 수질이 악화되고 있으며 광주시 구간인 GA4부터는 비교적 일정 수질농도 유지 또는 감소되고 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). 지점별 변화를 보면 하류 광주시의 유기물질(BOD, COD)농도는 총량관리

가 시작된 2004년에는 상류의 용인공공하수처리시설 (48,000m³/d) 방류수 유입에 의해 급격히 증가된 것으로 보이나 방류수 수질이 개선된 2008년 이후에는 공공하수처리 시설 방류수 유입에 따라 농도 증가가 크게 미치지 않는 것으로 나타났다. TP농도도 용인공공하수처리시설 방류수에 영향을 크게 받았으나 2010년 이후 방류수 수질개선과 더불어 뚜렷하게 감소하였다. 반면 TN농도는 용인공공하수처리 시설 방류수 농도가 상류의 농도보다 높아 방류수에 따라 급격히 악화되는 경향이 지속적으로 나타났다. 상류(용인시) 지역은 유기물질의 경우 용인시 총량관리가 시작된 2008년에 가장 악화된 수질을 보였으나 상류의 동부공공하수처리 시설 운영 이후 수질이 개선되었으며, 영양염류의 경우 2004년 이후 지속적으로 개선추세를 보였다. 그러나 용인시 구간 상류에서 하류까지의 수질변화는 총량관리 시행에 상관없이 GA2 지점까지 조사된 모든 항목에서 증가하는 추세를 보였

Table 4. Spearman's Rho

GA-A \ GA-B		BOD	COD	TN	TP
BOD	rho	.857**	.762**	-.112*	.427**
	p	.000	.000	.027	.000
COD	rho	.781**	.868**	-.048	.415**
	p	.000	.000	.343	.000
TN	rho	.148**	.189**	.890**	.494**
	p	.003	.000	.000	.000
TP	rho	.420**	.397**	.395**	.832**
	p	.000	.000	.000	.000

** : Correlation is significant at the 0.01 level.
rho : correlation coefficient

* : Correlation is significant at the 0.05 level
p : significance level

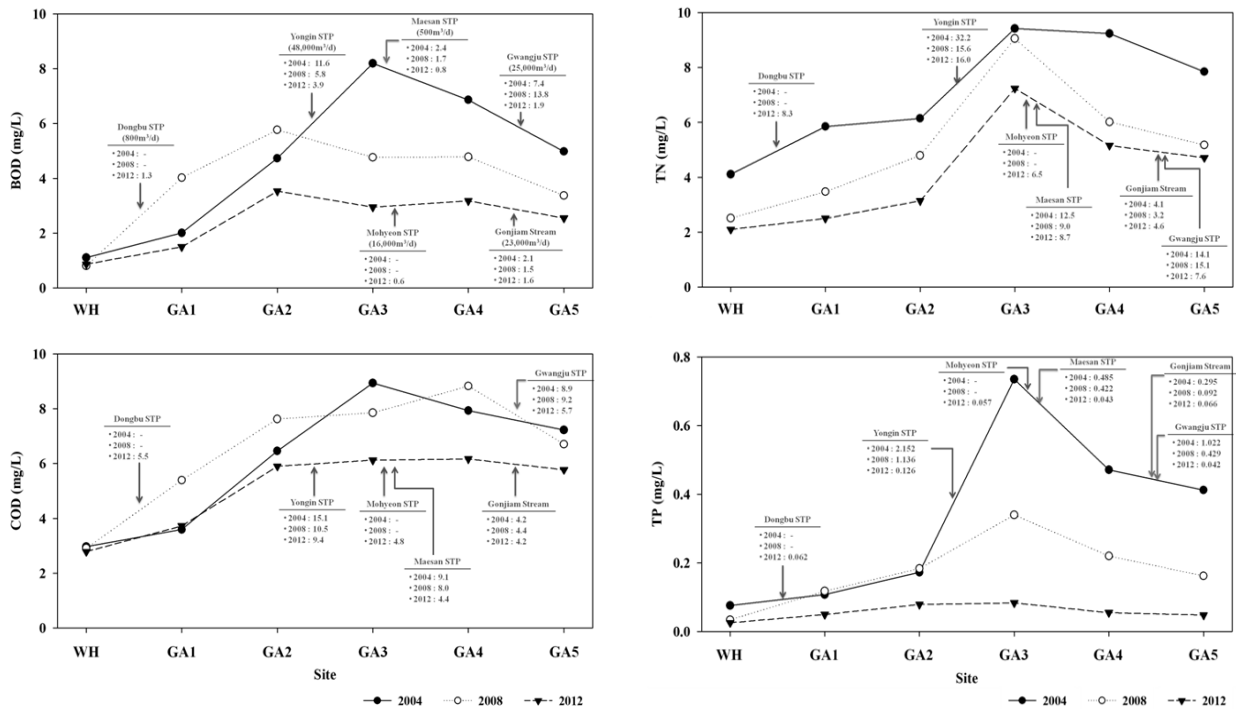


Fig. 3. Spatial water quality changes.

다. 이는 용인시 도심구간(GA1~GA2)에 위치한 지류하천(금학천 등) 유입 및 관로불명수(오집, 누수 등) 및 도시비점오염원 등의 영향으로 판단된다(Paule et al., 2015).

연도별 경안천 상하류의 수질 변화로 볼 때 하류에 위치한 광주시 구간의 수질은 총량관리 초기에는 상류 용인공공하수처리시설 방류수질 강화에 따라 뚜렷하게 개선되었으나 2단계 이후에는 그 효과가 크게 감소하였다. 또한 2008년 BOD와 같이 광주시 지역의 일부 공공하수처리시설 방류수 수질이 악화된 연도에도 상하류 수질 변동 경향에는 큰 변화가 없는 것으로 볼 때 하류지역으로 갈수록 지류하천 유입 등으로 인한 유량 증가로 공공하수처리시설 방류수 영향이 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 Evaluation of TMDL target water quality

총량측정망 수질 자료 중에 연도별 분석이 가능한 2005년부터 과거 3년 이동평균 및 연평균을 산출평균과 오염총량관리 목표수질 평가 방법에 따라 산정한 결과는 Table 5와 같다. GA-A의 연평균 수질은 총량관리 시행 초·중반인 2010년까지는 목표수질을 초과하였으나, 최종연도인 2012년에는 3년 이동평균 기준 3.5mg/L로 목표수질을 14.7% 초과 달성한 것으로 나타났다. GA-B의 경우 총량측정망의 측정이 시작된 2005년 이후 1단계(5.5mg/L) 및 2단계(3.8mg/L) 목표수질을 모두 달성하고 있는 것으로 나타났으며 최종연도(2012년)의 3년 이동평균 농도는 2.5mg/L로 목표수질을 34.4% 초과 달성하였다. 또한 목표수질 설정의 근거가 되었

Table 5. BOD evaluation of water quality at target point

(mg/L)	GA-A					GA-B				
	1yr Avg.		3yr moving Avg.		Target water quality	1yr Avg.		3yr moving Avg.		Target water quality
	Avg.	T. Avg.	Avg.	T. Avg.		Avg.	T. Avg.	Avg.	T. Avg.	
2005	4.891	4.855	N.D.	N.D.	5.5*	3.771	3.776	N.D.	N.D.	5.5
2006	5.070	5.120	N.D.	N.D.	5.5*	4.348	4.398	N.D.	N.D.	5.5
2007	4.398	4.397	4.780	4.782	4.1	3.388	3.416	3.835	3.881	5.5
2008	4.586	4.585	4.682	4.695	4.1	2.763	2.764	3.494	3.529	3.8
2009	5.020	5.132	4.664	4.677	4.1	3.284	3.334	3.143	3.153	3.8
2010	3.485	3.475	4.379	4.401	4.1	2.291	2.274	2.786	2.788	3.8
2011	3.187	3.150	3.918	3.900	4.1	2.550	2.539	2.718	2.714	3.8
2012	3.782	3.842	3.493	3.497	4.1	2.632	2.653	2.494	2.493	3.8

T. Avg. : Average of estimated by TMDL method

N.D. : No data

*: Boundary water quality condition in phase 1 Gwangju city TMDL plan

Table 6. Unachieved target water quality (BOD) from load duration curve

Categories		Low flows	Dry conditions	Mid-Range conditions	Moist conditions	High flows
GA-A	Phase 1	50.6%	57.1%	42.9%	28.6%	6.3%
	Phase 2	33.6%	35.1%	26.7%	33.3%	9.5%
	Whole Period	40.3%	43.1%	31.8%	31.8%	8.1%
GA-B	Phase 1	48.1%	36.4%	83.3%	23.1%	7.7%
	Phase 2	27.9%	15.2%	28.6%	19.4%	0.0%
	Whole Period	35.2%	23.6%	45.0%	21.0%	3.0%

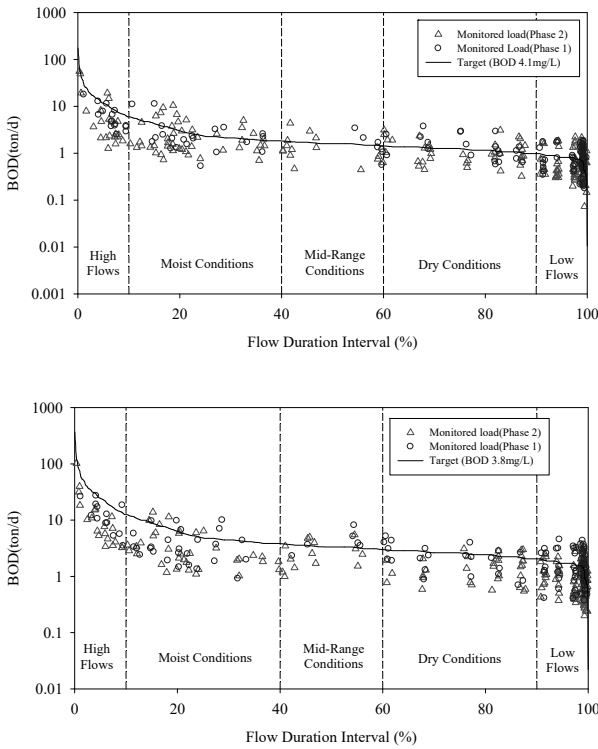


Fig. 4. Load duration curve in GA-A (up) and GA-B (down).

던 물환경관리계획의 2015년 달성 목표(BOD 3.5mg/L)도 달성한 것으로 분석되었다.

목표수질 설정 지점인 GA-A와 GA-B에 대한 LDC를 작성한 결과는 Fig. 4와 같다. LDC를 이용하여 2단계 목표수질(GA-A 4.1mg/L, GA-B 3.8mg/L) 달성도를 분석한 결과 전체 유량조건에 대해 GA-A 64.3%, GA-B 71.0%의 달성도를 보여 하류에 위치한 GA-B가 달성도가 높은 것으로 나타났다. 시기별로는 GA-A(1단계: 56.8%, 2단계: 68.7%) 및 GA-B(1단계: 60.3%, 2단계: 77.4%) 모두에서 1단계에 비해 2단계에서 달성도가 높아지는 것으로 분석되어 총량관리 시행에 따른 수질개선 효과를 보여주고 있다. 유량조건 구분에 따른 목표수질 달성도를 평균한 결과 GA-A의 경우 Low flows 40.3%, Dry conditions 43.1%, Mid-range conditions 31.8%, Moist conditions 31.8%, High flows 8.1%의 초과반도를 보였으며, GA-B의 경우 Low flows 35.2%, Dry conditions 23.6%, Mid-range conditions 45.0%, Moist conditions 21.0%, High flows 3.0%로 조사되었다. 즉, 경안

천의 경우 유량이 비교적 적은 시기인 Mid-range condition 이하가 유량이 상대적으로 풍부한 Moist condition 이상에 비해 GA-A 및 GA-B 모두에서 달성도가 낮은 것을 보여준다. 이는 점오염원 및 강우량이 적은 강우사상에도 오염물질이 유출되는 도시지역의 비점오염원의 영향으로 인해 평수량 이하의 유량 조건에서 목표수질 달성도가 낮은 것으로 판단된다(U. S. EPA., 2007). 다만, Mid-range condition 이하에서 목표수질 달성도를 살펴보면 1단계에 비해 2단계에서 크게 증가하고 있어 저수기 기준유량 조건에서 총량관리 시행에 따른 수질개선 효과가 나타난 것으로 판단된다.

3.3 Evaluation of TMDL plan

수질에 영향을 미치는 인위적인 요인인 오염원 및 부하량 변화를 살펴보면 용인시는 인구, 대지비율, 광주시는 인구, 산업계 폐수배출량 및 대지비율이 증가하였다(Table 7). 주요 오염원의 증가에도 불구하고 용인시 및 광주시 모두 인구, 소 및 돼지 사육두수, 대지비율이 시행계획에서 전망한 2012년 오염원 전망치에는 미치지 못했다. 또한 용인시 및 광주시 모두 2012년 배출부하량이 2006년에 비해 감소하였으며, 시행계획의 전망치보다 적었다. 이는 총량관리 계획에 반영된 주택단지 개발 등의 지역개발이 지연되었기 때문에 실제 2단계 총량관리에 반영되었지만 추진된 지역개발사업은 용인시(개발할당량 1,310kg/일, 준공실적 92.7kg/일) 및 광주시(제2차 개발할당량 648.4kg/일, 준공실적 101.8kg/일) 각각 개발할당부하량의 7.1% 및 15.7%에 지나지 않았다.

반면 부하량 감소를 위한 삭감시설에 대한 투자는 전반적으로 계획대로 추진되었다. 용인시는 하수처리시설 확충, 하수처리시설 방류수질 기준 강화, 하수관거 정비사업 등 비교적 관리가 용이하고 효과가 확실한 공공부문 점오염원 관리에 집중적인 투자를 하였다. 광주시도 1단계 삭감방안의 경우 이와 크게 다르지 않았으나 2단계에서는 점오염원의 지속적 삭감과 더불어 하천 직접정화시설 및 비점저감시설 등의 명목적인 추가적인 삭감방안을 도입하였다(Table 8). 이러한 삭감방안의 적용으로 인해 용인시는 65.0%였던 하수도 보급률을 2012년에 88.8%로 약 24% 증가시켰고, 광주시는 2006년 80.4%에서 2012년 90.6%로 약 10%의 증가시켰다.

이러한 부하량 삭감대책에 대한 투자는 수질개선으로 나타났다(Fig. 5). 광주시 1단계 계획에 의해 공공하수처리시설 신설 및 증설, 고도처리 등으로 투자액이 증가한 2007년 이후 하류 GA-B의 수질이 비교적 감소하는 경향을 보였다. 또

Table 7. Pollutant source and discharge load change in each city on Gyeongan A and B watershed

Categories		2006	2008	2010	2012	Prediction (2012)
Yongin	Population (Capita)	160,105	163,505	164,555	166,842	278,265
	Cattle & Pig(head)	89,985	75,920	72,726	70,222	89,985
	Wastewater discharge(m ³ /d)	4,842	5,443	4,632	4,717	4,329
	Developed ground ratio (%)	10.2	10.9	11.2	11.6	15.9
	Discharge load(kg/d)	8,425.10	6,185.40	4,604.90	3,994.30	5,063.40
Gwangju	Population (Capita)	210,227	219,874	235,590	261,350	346,624
	Cattle & Pig(head)	9,616	10,720	10,567	7,224	9,616
	Wastewater discharge(m ³ /d)	4,138	4,555	6,160	6,358	5,113
	Developed ground ratio (%)	10.3	11.2	12.3	13.1	15.8
	Discharge load(kg/d)	5,637.30	5,288.20	5,558.90	4,015.20	4,647.60

Table 8. Implementation status of load reduction measures

Year	Yongin	Gwangju
2006	-	Maintenance of sewer system (1st phase)
2007	-	Construction and expansion of sewer treatment plant (Chugok, Gyeongan, Gonjjam, Docheok, Opo), Improvement of effluent water quality (Gyeongan, Gonjjam, Docheok)
2008	-	Improvement of effluent water quality (Opo)
2009	Construction of sewer treatment plant (Seongmit)	Improvement of effluent water quality (Maesan, Gwangju), Installation of nonpoint source reduction facilities
2010	Construction of sewer treatment plant (Mohyeon, Dongbu)	Direct stream purification facility
2011	Maintenance of sewer system	Maintenance of sewer system (2nd phase)
2012	-	-

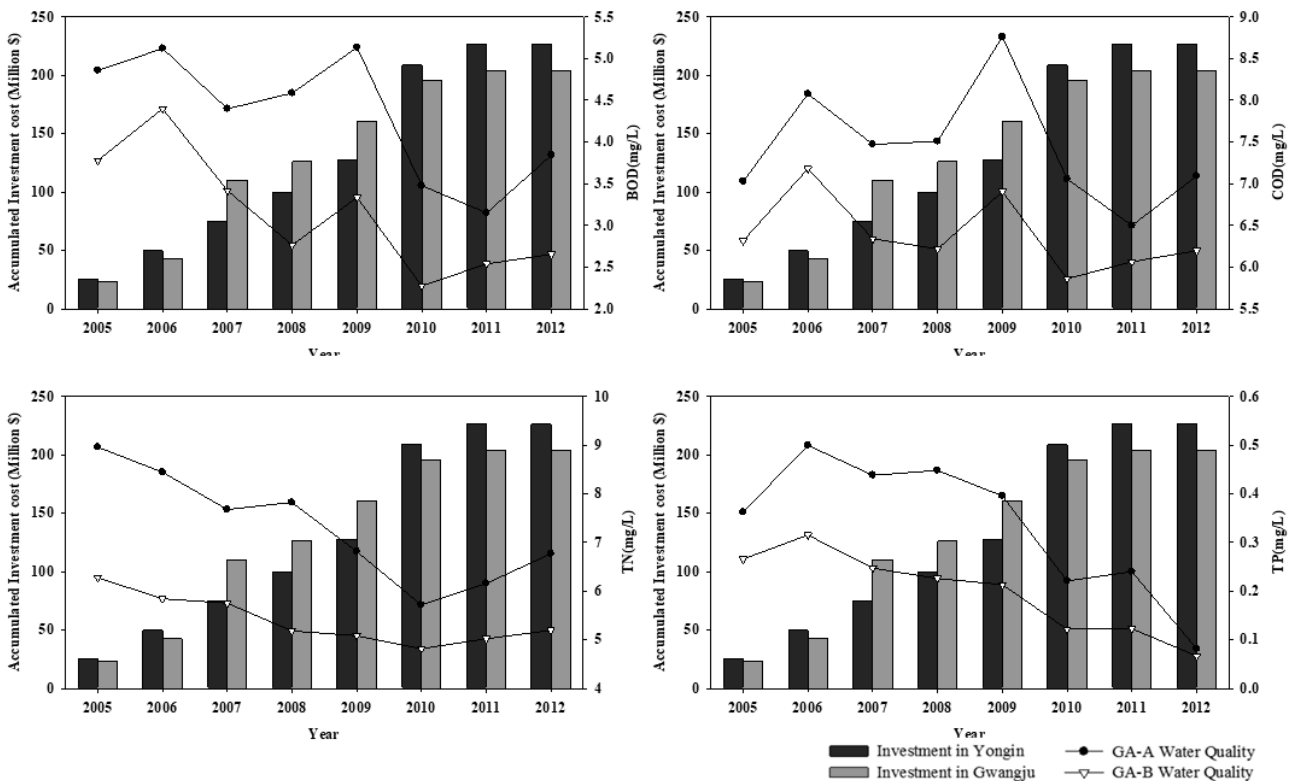


Fig. 5. Water quality changes due to investment of load reduction measures.

한 용인시의 공공하수처리시설 완공 등으로 투자액이 급증한 2010년 수질개선 또한 급격하게 일어난 것으로 보아 총량관리 도입에 따라 기존의 오염원 증가 정책에서 탈피하여 지역개발에 따른 부하량을 예측하여 선제적으로 공공하수처리시설을 확충하는 정책의 변화가 성공적이었음을 반영한다.

결국 총량관리 시행에 따른 경안천 목표수질의 초과달성은 오염원 증가에 앞서 처리시설을 확충하는 선 처리 후 개발의 원칙이 철저히 적용된 반면 총량관리계획에 반영된 지역개발의 추진이 지연됨에 따른 복합적인 원인에 기인한다고 볼 수 있다.

3.4 Implications

경안천 유역에 적용된 임의적 총량관리는 일정기간 동안 목표하는 수준까지의 수질개선과 더불어 기존에 적용되었던 토지이용규제를 벗어나 지역개발도 이루었기 때문에 성공적이라 할 수 있다. 이의 배경에는 무엇보다도 강력한 인센티브의 제공이었다는 점을 부인할 수 없다. 대부분의 지역이 특별대책지역에 속해 있어 환경정책기본법 제22조제2항(2003년 기준)에 근거한 행위제한(Table 2)으로 규모 이상의 오수배출시설 등의 입지 불가로 인해 대규모 개발사업이 추진되지 못하였으나 총량관리 시행 지역에 대한 일부 행위제한의 적용배제(한강수계상수원수질개선및주민지원등에관한법률 제9조(2003년 기준))에 근거하여 광주시와 용인시는 총량관리 시행과 더불어 대규모 지역개발이 가능해 졌다. 더욱 한강수계상수원수질개선및주민지원등에관한법률 제10조에 근거하여 총량관리 수립 및 시행하는 지역에 대한 총량관리 비용 등을 우선 지원 받을 수 있어 이 지역개발을 위한 공공처리시설 확충(오염부하량 삭감)에 필요한 비용의 대부분을 국고와 수계기금(용인 94%, 광주 89%)에서 우선 지원했기 때문에 총량관리의 자발적 시행이 가능했다. 반면 강력한 토지이용 규제가 없거나 처리시설 설치를 위한 수계기금의 사용이 어려운 기초자치단체가 자발적으로 총량관리를 시행한다는 것은 현실적으로 기대하기 어렵다. 이런 관점에서 현재 도입이 추진되는 지류총량제는 시행을 의무화하거나 임의적 시행체계를 채택한다면 확실한 인센티브의 제공이 필요하다. 그렇지 않으면 그 실효성을 확보하기는 어려울 것으로 판단된다.

수질개선 측면에서 본 총량관리 도입의 성공적인 요인은 선 처리 후 개발 원칙의 실현에 있다고 판단된다. 이는 개발 수요를 미리 예측하여 하수도보급률 증가, 공공하수처리시설 신증설, 하수관로정비 및 방류수 수질기준 강화 등이 시행된 시기에 수질이 개선된 사실로부터 분명히 볼 수 있다. 또한 오염총량관리 시행에 따른 일부 대규모 개발이 가능해져서 소규모 난개발이 줄어들었고 동시에 환경영향평가제도를 통한 예방적 관리가 가능하게 된 것도 수질개선의 요인으로 볼 수 있다. 즉, 환경영향평가 대상이 되는 대규모 개발계획 또는 사업은 수질오염총량제와 타 관련 계획 간의 연계업무처리지침(2006년 제정, 2008년 폐지)에 근거하여 환경부(또는 한강유역환경청)와의 환경영향평가 협의 과정을 통해 총량관리 계획에서 할당받은 부하량 이내에서만 부하량이 배출되도록 강제함으로써 실질적 사전관리가 강화될 수 있었다.

반면 총량관리 시행을 통한 지역개발을 추진하기 위해 다소 무리한 개발계획이 수립되어 총량관리계획의 오염원 증가가 과다하게 반영되는 문제가 있었다. 이러한 오염원의 과다 산정은 선 처리 후 개발 원칙에 따르면 목표수질 또는 할당부하량을 만족시키기 위해 선제적으로 과도한 처리시설에 대한 투자를 초래할 수 있다는 점에서 총량관리 계획수립 시 유의해야 할 부분으로 판단된다.

경안천과 같이 유역면적이 크지 않고 하천의 유하거리가 짧은 하천에서는 상류 수질이 하류 수질에 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이와 같은 특성을 보이는 하천의 경우 총량관리는 상류 또는 하류 별도의 기초자치단체별로 시행하는 것 보다는 전체유역에 통합적으로 시행하는 것이 보다 효과적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다(Darghouth, 2008; Haire et al., 2009; Moon, 2007). 특히 이러한 문제는 대권역 또는 중권역 물환경관리계획 단계에서의 유역단위 현황분석을 통해 상하류간의 영향이 큰 지역의 경우 지자체별이 아닌 전체 유역별로 실시될 수 있도록 관련 기관의 협의회를 구성하여 협의 및 도입 또는 전체 유역의 계획 수립을 실시하여 각 지자체별로 할당을 실시하는 의무적 총량관리의 시행이 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

비단 이는 임의적 총량관리의 문제는 아니지만 기술적인 면에서는 목표수질 설정 방법과 평가 방법 간의 괴리를 줄일 필요가 있다. 임의적 총량관리의 경우 목표수질이 저수기 유량조건에서 설정되었다. 저수기 조건의 목표수질 평가를 위해서는 일단위의 수질 및 유량 측정이 필요하나 현실적인 한계로 8일 간격으로 측정된 자료를 평균하여 평가하고 있어 수질이 양호하여 초과율이 낮은 유량이 많은 시기가 포함되어 평가 수질농도가 과소평가될 가능성이 있다. 따라서 목표수질 설정방법과 평가방법의 차이로 인해 정확한 목표수질 평가가 이루어지지 않을 가능성이 있으므로 목표수질 설정 시 사용된 저수량 조건의 자료를 구분하여 평가하는 방법 또는 유량 조건에 따라 수질의 평가가 가능한 LDC 적용 등의 방법이 필요할 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구는 경안천 유역에 시행된 임의적 총량관리의 평가를 통해 수질개선에 대한 성과 및 한계를 분석하였다. 전반적으로 총량관리의 시행에 따라 오염원 및 부하량 관리가 체계적으로 이루어져 수질개선의 경향이 뚜렷하게 나타났고 목표수질을 초과달성하는 등 긍정적인 효과를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 이는 해당지역에 적용되는 토지이용규제의 완화와 처리시설 설치와 운영에 대한 재정적 지원을 포함한 획기적인 인센티브 때문에 임의적 시행체계 임에도 불구하고 해당 기초자치단체가 제도를 자발적으로 시행하였고 이를 통해 선 처리 후 개발이라는 원칙이 실현될 수 있었기 때문이다. 그럼에도 불구하고 제도적인 면에서는 비현실적으로 과도한 지역개발의 추진을 위한 과도한 처리시설의 확충과 동일 유역 상하류 기초자치단체의 총량관리 시행시기 불일치로 인한 통합성 미흡 등의 문제 해결이 필요한 것으로

나타났다. 임의적 총량관리의 문제만은 아니지만 과학적인 수질 개선의 평가를 위해서는 목표수질의 설정방법과 평가 방법간의 괴리를 줄일 필요가 있는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 현행 의무적 총량관리의 단점을 보완하기 위해 도입예정인 임의적 지류총량관리의 실효성 있는 시행체제의 개발에 참고할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

이 연구는 명지대학교 교원에게 부여되는 연구년 사업의 지원을 받았습니다.

References

- Allan, C., Curtis, A., Stankey, G., and Shindler, B. (2008). Adaptive management and watersheds: A social science perspective, *Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 166-174.
- Babbar-Sebens, M. and Karthikeyan, R. (2009). Consideration of sample size for estimating contaminant load reductions using load duration curves, *Journal of Hydrology*, 372(1), 118-123.
- Bell, J. M., Doran, S., Finch, R., and Dupuis, T. (2007). Adaptive management: Developing staged TMDL implementation in rapidly urbanizing watersheds, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2007(5), 766-792.
- Benham, B., Zeckoski, R., and Yagow, G. (2008). Lessons from TMDL implementation case studies, *Water Practice*, 2(1), 1-13.
- Cabrera-Stagno, V. (2007). Developing effective TMDLs: An evaluation of the TMDL process, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2007(5), 443-453.
- Cha, S. M., Lee, S. W., Kim, L. H., Min, K. S., Lee, S. Y., and Kim, J. H. (2012). Investigation of stormwater runoff strength in an agricultural area, Korea, *Desalination and Water Treatment*, 38, 389-394.
- Darghouth, S., Ward, C., Gambarelli, G., Styger, E., and Roux, J. (2008). Watershed management approaches, policies, and operations: Lessons for scaling up, *Water Sector Board discussion Paper Series Paper No. 11*, The World Bank, Washington, D. C.
- Freeman, P. L., Nemura, A. D., and Dilks, D. W. (2004). Viewing total maximum daily loads as a process, not a singular value: Adaptive watershed management, *Journal of Environmental Engineering*, 130, 695-702.
- Haire, M., Vega, R., Koenig, J., and Rafi, T. (2009). Handbook for developing watershed TMDLs, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2009(6), 520-548.
- Harrison, K. W. (2007). Two-stage decision-making under uncertainty and stochasticity: Bayesian programming, *Advances in Water Resources*, 30(3), 641-664.
- Hashim, W. A. (1998). *Planning as process: A community guide to watershed planning*, Washington state department of ecology, Washington.
- Helsel, D. R. and Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources techniques of water resources investigations, Book 4, chapter A3*, U. S. Geological survey, Reston, VA.
- Johnson, S. L., Whiteaker, T., and Maidment, D. R. (2009). A tool for automated load duration curve creation, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(3), 654-663.
- Kim, H. C. (2008). *Education, psychology, social research methodology series, Research Methods[18] Nonparametric statistical analysis*, Kyoyookbook. [Korean Literature]
- Moon, H. J. (2007). Watershed management and implementation of total pollution load management system (TPLMS) for water in Korea, *Proceedings of the International Forum on Water Environmental Governance in Asia*, Technologies and Institutional Systems for Water Environmental Governance. National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). *Advanced total pollution load management system for development and preservation*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2016). *Total pollution load management system stage (Intermediate) evaluation manual (Draft)*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2020). *Total pollution load management system diagnosis and future vision*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Paule, M. C. A., Ventura, J. R. S., Memon, S., Lee, B. Y., Jahng, D., Kang, M. J., and Lee, C. H. (2015). Fecal contamination in Yongin watershed: Association to land use and land cover and stormwater quality, *Desalination and Water Treatment*, 53(11), 3026-3038.
- Reckhow, K. H. (2003). On the need for uncertainty assessment in TMDL modeling and implementation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(4), 245-246.
- Shim, S., Kim, B., Hosoi, Y., and Masuda, T. (2005). Outflow of dissolved organic matter from agricultural fields in an irrigation period, *Journal of Korea Society of Water Environment*, 21(2), 141-146. [Korean Literature]
- Teague, A., Bedient, P. B., and Guven, B. (2011). Targeted application of seasonal load duration curves using multivariate analysis in two watersheds flowing into lake Houston, *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 620-634.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (1991). *Guidance for water quality-based decisions: The TMDL process*, EPA 440/4-91-001, Washington, DC.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2002). *The twenty needs report: How research can improve the TMDL program*, EPA 841-B-02-002, Washington, DC.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2007). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs*, Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, EPA 841-B-07-006, Washington, D.C.

United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.).
(2008). *Handbook for developing watershed TMDLs (Draft)*,
Washington, DC.

Walter, C. J. (2007). Is adaptive management helping to solve
fisheries problems?, *AMBIO*, 36(4), 304-307.