



수질오염총량제 시행 이후 낙동강수계 41개 지점의 BOD와 T-P의 목표수질과 초과율의 공간변화 분석

A Study on the Spatial Variation of Target Water Quality and Excess Rate at 41 Stations in Nakdong River Basin after the Total Maximum Daily Loads

조현경^a · 곽은태^b · 김상민^{c,†}

Cho, Hyun kyung · Kwak, Eun Tae · Kim, Sang Min

ABSTRACT

The objective of this study was to assess spatial variation of the target water quality criteria and excess rate in Nakdong river basin after the Total Maximum Daily Loads (TMDLs). For this, 41 total water quality monitoring stations were selected BOD and T-P data were collected from 2003 to 2019. The annual average water quality of BOD and T-P were calculated and compared with the target water quality for each stations by period. As a result of analyzing the BOD, Kumho A, Nakbon F, Namgang D, Miryang B, Wicheon B and Hoecheon A exceeded the target water quality criteria for two consecutive times. For T-P, Nakbon N, Naeseung B, Miryang A, Hwanggang A and Hoecheon A exceeded the target water quality criteria twice in a row. In the case of T-P, the target water quality excess rate was relatively low after the TMDLs implementation compared to before the TMDLs implementation. However, in the case of BOD, there was no difference in the target water quality excess rate before and after TMDLs. As a result, the overall annual average water quality shows a decreasing trend, but it is necessary to manage the water quality for the Nakdong river basin that exceed the target water quality.

Keywords: TMDL; Nakdong river; target water quality; excess rate

1. Introduction

우리나라는 도시화 산업화로 인해 개별 오염원에서 배출허용기준을 준수하더라도 생활 및 산업폐수 발생량의 양적 증가로 인해 하천의 수질환경기준을 초과하는 제도적 한계에 도달하였다. 이에 정부에서는 1998년 4대강 물관리 종합대책을 수립하면서 기존의 개별배출원 농도규제에서 벗어나 지역의 목표수질을 달성할 수 있는 배출부하량에 대한 관리방법인 수질오염총량제를 도입하였다 (Park, 2011). 1998년 팔당호 등 한강상수원 수질개선 특별종합대책에서 오염원의 총량증가에 대처하기 위해 수질오염총량관리제를 처음으로 도입하

였고, 법적인 시행근거로 1999년 한강수계 상수원 수질개선 및 주민 등에 관한 법률, 2002년 낙동강 수계 물관리 및 주민 지원 등에 관한 법률, 금강 수계 물 관리 및 주민 지원 등에 관한 법률을 명문화하였다 (Song, 2003).

수질오염총량제는 관리하고자 하는 하천의 목표수질을 정하고, 목표수질을 달성, 유지하기 위한 수질오염물질의 허용부하량 (허용총량)을 산정하여 해당 지역에서 배출되는 오염물질의 부하량을 허용총량이하로 규제 또는 관리하는 제도를 말한다 (NIER, 2009). 낙동강수계 또한 2004년부터 41개 수질오염총량관리 단위구역 내 수질, 구역조사를 통한 목표수질 평가를 수행하고 있으며, 2010년 10월 이후부터는 단위구역 내 시·군경계 지점에 대한 모니터링을 효율적으로 실시하여 소유역내 수질, 유량의 변화추세를 파악하고 수질오염총량관리제 기본·시행계획 수립 및 이행평가 등에 활용 하고 있다 (Yang et al., 2017). 현재 수질오염총량관리제는 2004년부터 2010년까지 제1단계가 종료되었고, 2011년부터 2015년까지 2단계가 종료되었으며 현재는 3단계가 진행중이다 (Kim et al., 2019).

국외의 경우 미국, 일본, 독일, 프랑스, 중국 등이 우리나라의 수질오염총량제와 유사한 제도를 운영하고 있다. 미국은 1972년부터 점오염원에 대한 기술적 달성 가능한 최소배출량

^a Ph.D. Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University

^b Undergraduate Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University

^c Professor, Department of Agricultural Engineering (Insti. of Agric. and Life Sci.), Gyeongsang National University

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax.: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: October 8, 2020

Revised: October 22, 2020

Accepted: October 27, 2020

을 지정, 허가하는 NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System) 제도를 시행하였으나, 수질이 개선되지 않고 환경단체의 소송에 따라 1992년부터 TMDL (Total Maximum Daily Loads)을 본격 시행하였으며, 수체의 환경용량과 비점오염원을 고려한 수계의 수질오염총량을 관리한다는 수질오염총량제의 원칙을 반영하고 있다. 독일은 직접 총량관리를 시행하고 있지는 않으나 수질오염총량관리의 원리에 의하여 폐수배출을 허가해주는 제도를 시행하고 있다 (Cho, 2008). 일본은 1979년 이후 수질오염방지법의 시행 등에 의해 총체적으로는 개선되는 경향을 보이고 있으나 달성되지는 않아, 달성이 곤란한 지역에 대하여 총리령에서 정한 수질오염항목에 대한 오염부하량의 총량감소에 관하여 기본방침을 정하였다 (ME, 2006).

국내의 수질오염총량제의 현황은 현재 1, 2단계가 완료되었으며, 그동안 할당부하량을 만족하기 위하여 다양한 계획들이 추진되었다 (Park, 2008). 할당부하량을 초과할 경우 지자체의 개발사업 추진에 제한을 받으며, 단위유역당 평가수질이 설정된 목표수질을 달성, 유지하였는지 확인하는 것도 중요한 평가요소 중 하나이다. 수질오염총량관리제가 국내에 도입된 후 목표수질 달성여부 평가를 위한 부하지속곡선 분석 (Hwang et al., 2011), 단위유역 목표수질 달성여부 평가방법들이 연구되어지고 있으나 (Park and Oh, 2012), 각 수계별 목표수질의 변화와 달성여부 등에 대한 공간적 분석은 부족하다. 또한 낙동강 유역의 목표수질 달성여부 평가와 수질현황에 대한 연구 또한 미흡한 실정이다 (Park et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 수질오염총량제 시행 후부터 현재까지 낙동강수계의 오염총량관리 운영결과를 조사 및 정리하여 낙동강수계의 공간적인 수질목표와 수질의 변화를 분석하였다. 수질총량오염제의 오염물질 대상인 BOD와 T-P에 대해 41개 지점의 평균수질을 산정하여 목표수질과 비교하였다. T-P의 경우 2단계부터 오염물질 대상으로 관리되고 있으나 측정된 수질자료를 이용하여 수질오염총량제가 시행되기 이전의 T-P 또한 평균수질을 산정하여 분석하였다.

II. Materials and Methods

1. 대상유역

본 연구의 대상유역은 낙동강 유역으로 낙동강은 해발 1,567 m의 강원도 태백산에서 발원하여 총 길이가 525 km인 강으로 안동호에 유입된 후 서쪽으로 흘러 반변천, 미천, 내천을 비롯한 지류와 합류하고, 남쪽으로 흐르면서 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강과 합류한 후 동쪽으로

흐르며 밀양강 및 양산천에 합류 후 낙동강 하굿둑을 통해 남해로 흘러 들어간다. 낙동강 유역은 22개 중권역, 195개 소권역으로 구분되고, 804개 하천을 포함하며, 유역면적 23,717 km²의 유역특성을 가지고 있다. 분류 한정으로는 한강보다도 긴 남한에서 가장 긴 강이며, 한강, 금강, 영산강과 함께 4대강으로 꼽힌다. 낙동강 유역내 환경기초시설은 하수처리장 97개, 분뇨처리장 34개, 축산폐수처리장 18개, 산업폐수 45개, 마을하수도 644개가 위치하고 있다 (Cho and Kim, 2018). 수질오염총량관리제에서 유역의 구분은 수질오염총량관리 기술지침 (2019.3.20. 개정)에 따라 배수구역은 강우가 지표수의 형태로 유출되어 합류되는 해당지역으로 하며, 수질오염총량관리 기본계획 및 시행계획 수립을 위한 기준이 되는 년도를 기준으로 조사한다. Fig. 1은 수질오염총량측정망의 위치를 보여주며, 낙동강수계 목표수질 설정지점 및 총량관리단위유역을 바탕으로 선정하였다.

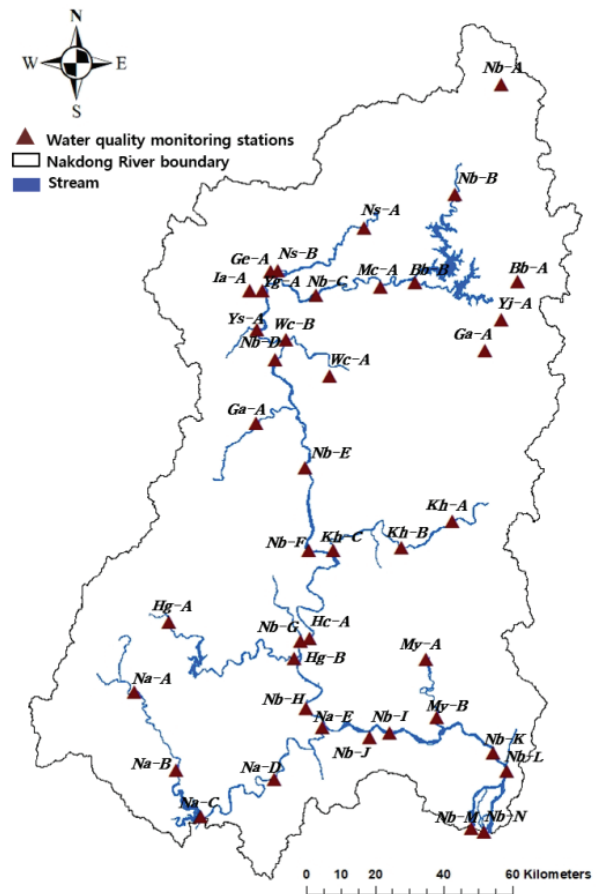


Fig. 1 Location of TMDL water quality monitoring stations in Nakdong river basin

2. 목표수질 설정

목표수질은 수질오염총량관리 목표설정을 위한 기준치로서 하천의 용도(상수원수, 농업용수 등), 오염원 밀도, 지역개발정도, 환경기초시설 투자정도, 수량 및 수질, 수중생태계의 건전성 등을 고려하여 설정된다. 10년 평균저수량을 기준으로 예측된 BOD의 농도가 1 mg/L 이하인 수계구간의 목표수질은 1 mg/L로 설정하고, 이외의 지역은 광역시·도 경계지점에 대한 금년도 수질측정결과와 환경부 수질측정망 인접지점의 과거 3년간 수질측정결과의 평균치를 초과하지 않는 수준으로 되어 있다 (ME, 2004).

다음의 Table 1은 낙동강 유역의 수질오염총량제 시행에 따른 단계별 목표수질을 각 지점별로 정리한 결과이며, Fig. 2는 낙동강 유역의 목표수질을 공간적 변화를 보여주고 있다.

3. 수질자료

낙동강 유역의 수질오염총량관리에 따른 수질분석을 위해 낙동강물환경연구소에서 낙동강 수계법 제9조~17조에 따라

관리하는 41개의 단위유역을 선정하였고, 환경부의 물환경정보시스템 (water.nier.go.kr)을 이용하여 2003년부터 2019년까지의 BOD와 T-P 자료를 수집하여 정리하였다.

4. 목표수질과 평균수질

평균수질은 목표수질이 정해진 다음 각 단위유역에서의 BOD와 T-P를 평가하기 위한 수질값으로 산정 시점으로부터 과거 3년간 측정된 것으로 하며 낙동강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 시행규칙 (2020)에 따라 계산되었다. 2003년부터 2019년까지의 수질자료를 이용하였으나 목표수질이 2005년부터 제시되어 있어, 2003년 2004년의 목표수질은 1차 목표수질 (2005년 목표수질)을 기준으로 비교, 분석하기 위해 이용되었다. 산정된 평균수질과 목표수질을 비교하여 평가하기 위한 기간 분류는 수질오염총량관리제도 실시이전 (2003년~2004년), 1단계 (2005년~2010년), 2단계 (2011년~2015년), 3단계 (2016년~2019년)로 구분하여 조사하였다.

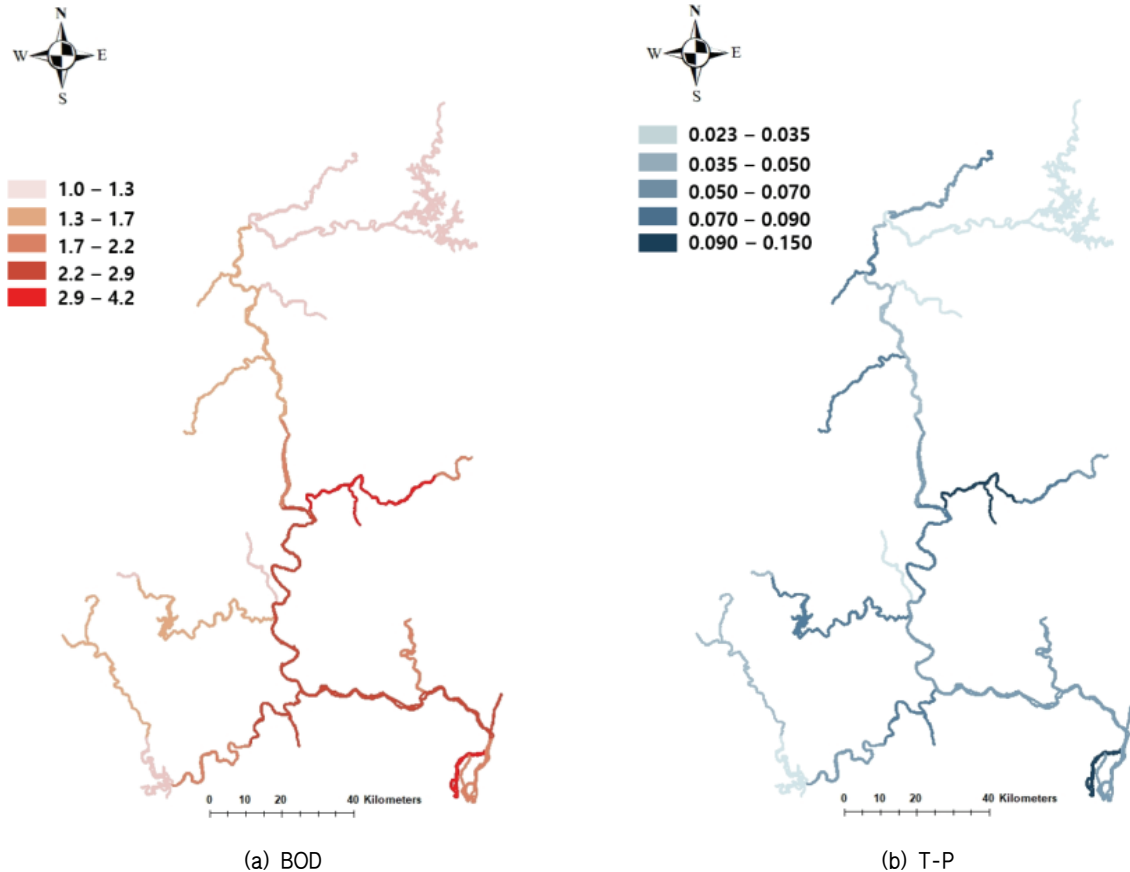


Fig. 2 Spatial variation of TMDL target water quality (BOD and T-P) in Nakdong river basin (2016~2020)

Table 1 TMDL target water quality (BOD and T-P) for 41 stations in Nakdong river basin

Station	Target BOD			Target T-P	
	'05~'10	'11~'15	'16~'20	'11~'15	'16~'20
Nakbon A	1.5	1.5	1.4	0.057	0.057
Nakbon B	1.4	1.4	1.3	0.022	0.023
Nakbon C	1.4	1.5	1.2	0.033	0.032
Nakbon D	1.5	1.5	1.4	0.045	0.043
Naeseung A	1.5	1.5	1.2	0.110	0.074
Naeseung B	1.5	1.5	1.2	0.053	0.063
Geumcheon A	1.5	1.5	1.4	0.067	0.059
Banbyeon A	1.5	1.4	1.3	0.025	0.024
Banbyeon B	1.5	1.4	1.4	0.034	0.027
Michun A	1.5	1.5	1.3	0.032	0.032
Ian A	2.0	2.0	1.5	0.047	0.034
Yeonggang A	1.5	1.5	1.4	0.050	0.045
Yongjeon A	1.5	1.4	1.3	0.046	0.045
Byeongseong A	2.0	2.0	1.7	0.130	0.086
Gamcheon A	1.5	1.8	1.5	0.110	0.087
Wicheon A	1.5	1.5	1.2	0.045	0.030
Wicheon B	1.5	1.5	1.4	0.045	0.045
Gilan A	1.5	1.5	1.3	0.023	0.022
Kumho A	1.9	1.9	1.8	0.104	0.069
Kumho B	2.4	3.8	3.3	0.236	0.093
Kumho C	4.0	4.0	3.5	0.254	0.149
Hwanggang A	1.5	1.5	1.2	0.060	0.047
Hwanggang B	1.5	1.5	1.5	0.100	0.075
Hoecheon A	1.1	1.0	1.0	0.034	0.037
Miryang A	1.4	1.4	1.4	0.031	0.031
Miryang B	2.0	2.5	1.8	0.074	0.062
Namgang A	1.5	1.5	1.5	0.052	0.052
Namgang B	1.6	1.6	1.6	0.043	0.043
Namgang C	1.7	1.2	1.2	0.034	0.031
Namgang D	2.0	2.5	2.1	0.112	0.070
Namgang E	2.5	3.1	2.5	0.109	0.075
Nakbon E	1.8	1.8	1.7	0.053	0.051
Nakbon F	2.0	2.0	1.9	0.060	0.058
Nakbon G	2.9	2.9	2.8	0.137	0.075
Nakbon H	2.7	2.7	2.6	0.094	0.061
Nakbon I	2.8	3.1	2.6	0.093	0.059
Nakbon J	2.9	2.9	2.7	0.078	0.059
Nakbon K	3.0	3.0	2.8	0.074	0.063
Nakbon L	3.1	3.1	2.9	0.074	0.065
Nakbon M	2.5	2.5	2.2	0.069	0.059
Nakbon N	4.3	3.9	4.2	0.115	0.113

III. Results and Discussion

1. BOD, T-P의 평균수질 분석

BOD, T-P의 낙동강수계 41개 지점의 실측 수질자료를 이용하여 2005~2019년까지의 평균수질을 산정하였다. 측정수질은 산정년도로부터 과거 3년간 측정된 것으로 하며, 측정된 수질자료로부터 연도별 평균수질이 2회 연속 목표수질을 초과하는 경우 수질오염총량관리 시행계획 수립대상이 된다.

BOD의 경우 지점별로 분석한 결과 Kumho A, Nakbon F, Namgang D, Miryang B, Wicheon B, Hoecheon A 등이 2회 연속 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 단계별로 분석한 결과 1단계는 9개 지점, 2단계는 5개 지점, 3단계는 11개 지점이 2회 연속 목표수질을 초과하였다. 연도별로는 2015년, 2009년이 가장 높았으며 2008년, 2016년이 다음으로 높은 값

을 보였다.

T-P의 경우 지점별로 분석한 결과 Nakbon N, Naeseung B, Miryang A, Hwanggang A, Hoecheon A 등이 2회 연속 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 단계별로 분석한 결과 2단계는 23개 지점, 3단계는 3개 지점이 2회 연속 목표수질을 초과하였다. 연도별로는 2005년도에 가장 높았으나 2009년을 기준으로 10년간 지속적으로 감소하는 추세를 보였다.

Table 2와 3은 2005~2019년 산정된 평균수질과 목표수질을 나타내며, 음영으로 표시한 수치는 목표수질을 초과한 것을 나타낸다. Fig. 3과 4는 BOD와 T-P 모두 2회 연속 목표수질을 초과하는 지점 (Kumho A, Nakbon H, Miryang B, Yeonggang A)의 그래프를 보여주고 있다.

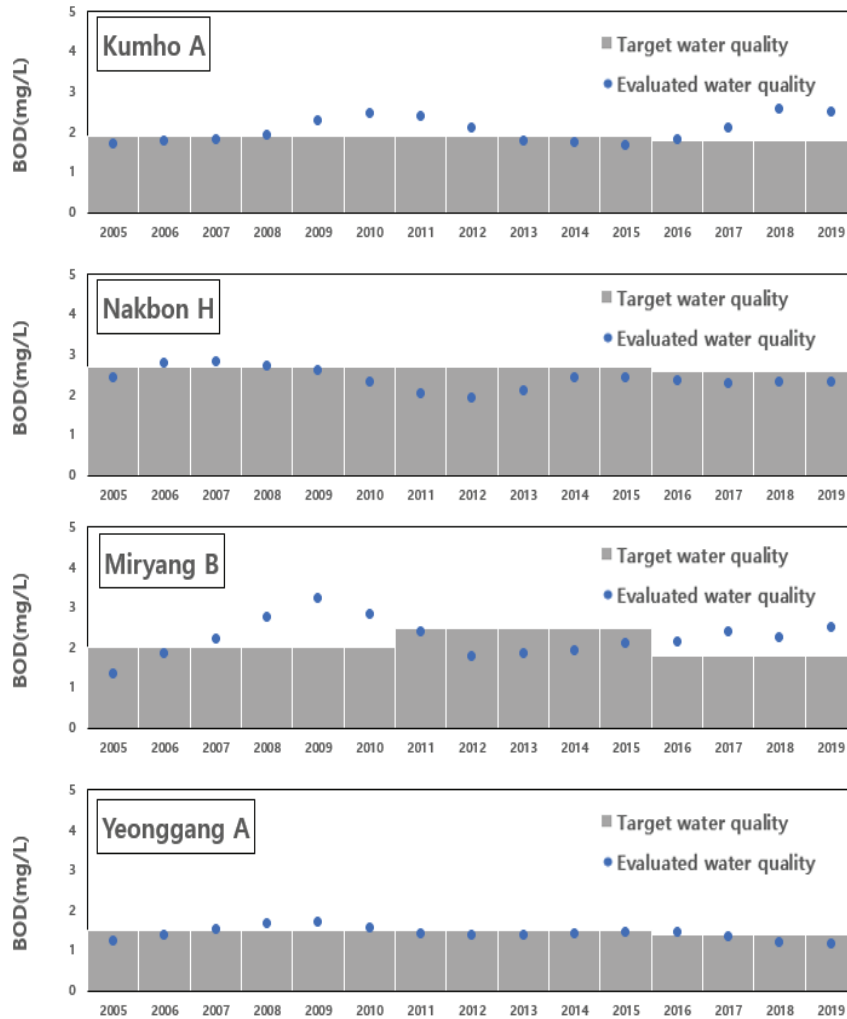


Fig. 3 BOD Evaluated and target water quality at 41 stations in Nakdong river basin points exceeding the target water quality twice in a row

2. 목표수질 초과율 분석

목표수질 초과율은 총 수질측정 횟수에 대한 목표수질기준 초과횟수의 비율로 산정하였으며, 수질오염총량관리제도 실시이전 (2003-2004년), 1단계 (2005-2010년), 2단계 (2011-2015년), 3단계 (2016-2019년)로 구분하여 조사하였으며, 2003년부터 2019년의 측정된 수질자료를 이용하여 목표수질을 넘는 비율을 산정하였다. BOD의 경우 실시이전 금호강 유역 인근 본류와 낙동강 하류 남강유역의 초과율이 비교적 높으며, 1단계에서는 남강유역의 초과율이 높은 것으로 나타난다. 2단계에서는 금호강 유역의 초과율이 높았으며, 3단계부터 현재까지는 낙동강 본류 Nakbon E~F의 초과율이 높은 값을 보였다. 초과율 분석 결과 낙동강 본류 Nakbon E~F와 남강유역이 수질오염총량제의 실행에도 여전히 초과율이

높은 것을 알 수 있다.

T-P의 경우 수질오염총량관리제도 실시이전 (2003-2004년)과 1단계 (2005-2010년) 기간에는 대상물질이 아니었으나, 이후 설정된 목표수질과 비교한 결과 낙동강 본류, 금호강유역, 낙동강 하류 Nakbon I~N, 밀양강 하류유역까지 초과율이 높은 것으로 나타났다. 2단계 (2011-2015년)부터 T-P는 관리대상으로 추가되었으며, 낙동강 본류 Nakbon E~F와 낙동강 하굿둑 부근 Nakbon K~N에서 높은 값을 보였으며, 3단계부터 현재까지는 Nakbon B와 Banbyeon B의 초과율이 비교적 높은 값을 보였다. T-P의 경우는 수질오염총량제 1과 2단계 시행에서 낙동강 본류 Nakbon E~F와 낙동강하굿둑 부근 Nakbon K~N에서 높은 값을 보였으나 3단계 시행 후 평균 14%로 초과율이 많이 낮아진 것을 알 수 있다.

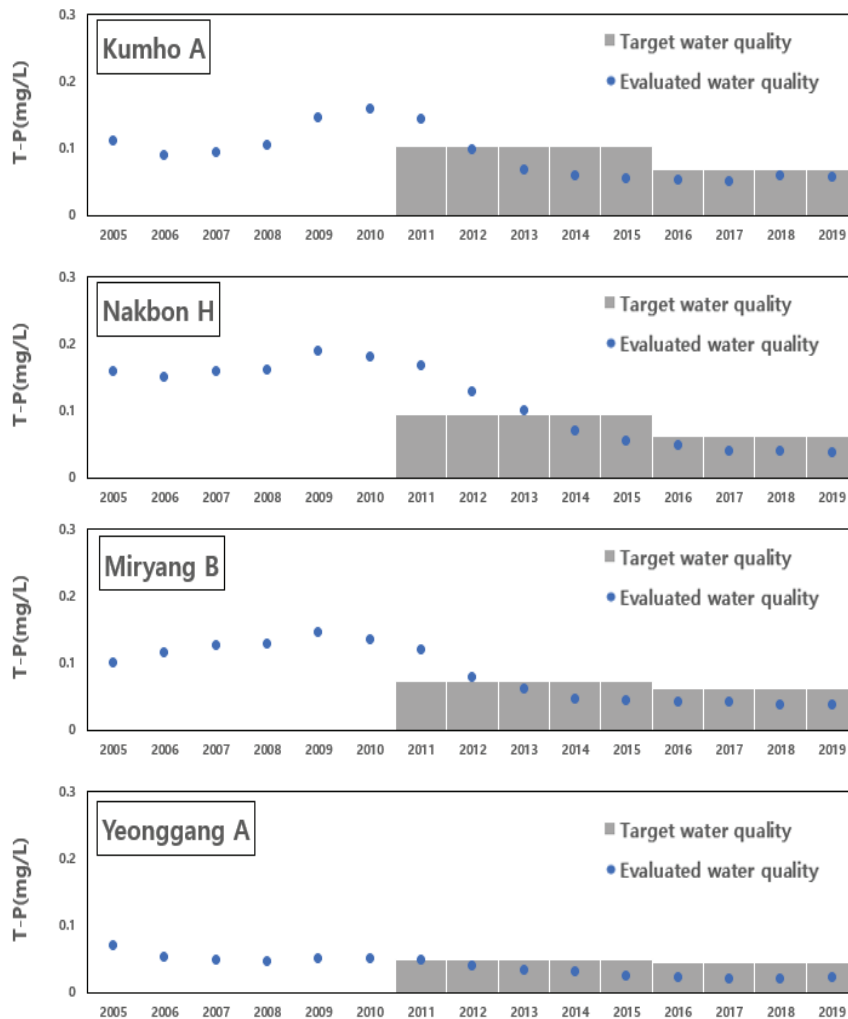


Fig. 4 T-P Evaluated and target water quality at 41 stations in Nakdong river basin points exceeding the target water quality twice in a row

Table 2 Evaluated and target water quality at 41 stations in Nakdong river basin (BOD)

Station	BOD (mg/L)																Target BOD (mg/L)		
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	'05~ '10	'11~ '15	'16~ '20	
Gamcheon A	1.2	1.2	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.8	1.8	1.5		
Geumcheon A	0.9	0.9	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.5	1.5	1.4	
Kumho A	1.7	1.8	1.8	1.9	2.3	2.5	2.4	2.1	1.8	1.7	1.7	1.8	2.1	2.6	2.5	1.9	1.9	1.8	
Kumho B	1.9	2.0	2.0	1.9	2.1	2.1	2.5	2.7	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.8	2.9	2.4	3.8	3.3	
Kumho C	3.4	3.5	3.7	3.7	3.8	3.5	3.4	3.2	3.5	3.6	4.0	3.9	4.0	3.5	3.3	4.0	4.0	3.5	
Gilan A	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	1.5	1.5	1.3	
Nakbon A	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.1	1.1	1.5	1.5	1.4	
Nakbon B	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.4	1.4	1.3	
Nakbon C	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	1.4	1.5	1.2	
Nakbon D	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	
Nakbon E	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8	1.7	1.6	1.5	1.7	2.1	2.2	2.2	2.0	1.9	2.0	1.8	1.8	1.7	
Nakbon F	1.6	1.9	2.1	2.2	2.2	2.1	1.9	1.9	2.1	2.4	2.3	2.2	2.0	2.2	2.2	2.0	2.0	1.9	
Nakbon G	2.6	2.8	2.9	2.9	3.1	2.8	2.4	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.4	2.4	2.5	2.9	2.9	2.8	
Nakbon H	2.5	2.8	2.8	2.7	2.6	2.3	2.1	1.9	2.1	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.7	2.7	2.6	
Nakbon I	2.6	3.1	3.3	3.3	3.2	2.9	2.4	2.1	2.1	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.8	3.1	2.6	
Nakbon J	2.6	3.1	3.3	3.3	3.2	2.9	2.4	2.1	2.1	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.9	2.9	2.7	
Nakbon K	2.3	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.2	2.1	2.0	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	2.8	
Nakbon L	2.4	2.8	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.5	2.3	2.1	2.0	2.1	2.0	3.1	3.1	2.9	
Nakbon M	2.3	2.6	2.4	2.5	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.0	2.0	2.5	2.5	2.2	
Nakbon N	4.2	4.2	3.8	3.6	3.4	3.4	3.3	3.6	3.9	4.1	4.0	3.8	3.7	3.4	3.5	4.3	3.9	4.2	
Namgang A	1.3	1.3	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.4	1.4	1.2	1.1	1.0	1.5	1.5	1.5	
Namgang B	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.5	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2	1.6	1.6	1.6	
Namgang C	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.5	1.5	1.3	1.2	1.7	1.2	1.2	
Namgang D	2.2	2.6	2.7	2.9	3.1	2.8	2.7	2.1	2.0	1.8	1.9	2.0	2.1	2.0	1.9	2.0	2.5	2.1	
Namgang E	2.4	3.1	3.4	3.7	3.9	3.4	3.1	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.3	2.4	2.5	3.1	2.5	
Naeseung A	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.5	1.5	1.2	
Naeseung B	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	1.5	1.5	1.2	
Michun A	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.5	1.5	1.3	
Miryang A	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.4	1.4	1.4	
Miryang B	1.4	1.9	2.2	2.8	3.2	2.9	2.4	1.8	1.9	1.9	2.1	2.1	2.4	2.3	2.5	2.0	2.5	1.8	
Banbyeon A	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.5	1.4	1.3	
Banbyeon B	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.3	1.1	1.0	1.5	1.4	1.4	
Byeongseong A	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.6	1.5	1.5	2.0	2.0	1.7	
Yeonggang A	1.2	1.4	1.5	1.7	1.7	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.2	1.2	1.5	1.5	1.4	
Yongjeon A	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.3	1.1	1.0	0.9	0.9	1.5	1.4	1.3	
Wicheon A	1.2	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.2	
Wicheon B	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	2.1	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	1.5	1.5	1.4	
Ian A	1.9	1.7	1.5	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.3	1.8	2.1	2.0	1.5	1.3	2.0	2.0	1.5	
Hwanggang A	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.5	1.5	1.3	1.3	1.5	1.5	1.2	
Hwanggang B	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.6	1.5	1.5	1.5	
Hoecheon A	1.0	1.2	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1	1.3	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.5	1.1	1.0	1.0	

* The shaded area means that the target water quality exceeded

Table 3 Evaluated and target water quality at 41 stations in Nakdong river basin (T-P)

Station	T-P (mg/L)																Target T-P	
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	'11~ '15	'16~ '20	
Gamcheon A	0.227	0.227	0.237	0.248	0.261	0.255	0.213	0.154	0.114	0.096	0.079	0.062	0.049	0.049	0.047	0.110	0.087	
Geumcheon A	0.064	0.046	0.045	0.050	0.055	0.055	0.051	0.048	0.054	0.059	0.054	0.044	0.035	0.035	0.040	0.067	0.059	
Kumho A	0.111	0.089	0.096	0.105	0.147	0.160	0.145	0.100	0.068	0.061	0.056	0.054	0.052	0.060	0.058	0.104	0.069	
Kumho B	0.096	0.072	0.075	0.076	0.084	0.086	0.114	0.122	0.116	0.094	0.080	0.074	0.058	0.056	0.062	0.236	0.093	
Kumho C	0.483	0.451	0.501	0.578	0.663	0.596	0.517	0.399	0.276	0.164	0.112	0.099	0.085	0.072	0.066	0.254	0.149	
Gilan A	0.044	0.027	0.023	0.026	0.016	0.016	0.014	0.015	0.015	0.018	0.018	0.018	0.014	0.014	0.015	0.023	0.022	
Nakbon A	0.076	0.056	0.061	0.065	0.076	0.076	0.071	0.054	0.047	0.046	0.047	0.039	0.030	0.021	0.023	0.057	0.057	
Nakbon B	0.044	0.023	0.022	0.025	0.020	0.020	0.020	0.022	0.025	0.025	0.022	0.018	0.017	0.017	0.018	0.022	0.023	
Nakbon C	0.096	0.048	0.040	0.035	0.034	0.037	0.044	0.046	0.040	0.030	0.024	0.021	0.018	0.020	0.022	0.033	0.032	
Nakbon D	0.083	0.054	0.048	0.046	0.044	0.049	0.059	0.059	0.051	0.040	0.035	0.030	0.027	0.028	0.029	0.045	0.043	
Nakbon E	0.113	0.090	0.087	0.091	0.109	0.121	0.130	0.108	0.086	0.061	0.050	0.043	0.035	0.035	0.035	0.053	0.051	
Nakbon F	0.120	0.083	0.082	0.085	0.104	0.116	0.121	0.104	0.083	0.064	0.052	0.044	0.034	0.034	0.034	0.060	0.058	
Nakbon G	0.197	0.177	0.187	0.208	0.252	0.244	0.221	0.165	0.121	0.080	0.062	0.058	0.048	0.047	0.046	0.137	0.075	
Nakbon H	0.159	0.151	0.160	0.161	0.190	0.182	0.168	0.128	0.101	0.072	0.056	0.049	0.041	0.040	0.039	0.094	0.061	
Nakbon I	0.152	0.142	0.143	0.144	0.164	0.154	0.136	0.108	0.087	0.068	0.054	0.048	0.041	0.039	0.037	0.093	0.059	
Nakbon J	0.152	0.142	0.143	0.144	0.164	0.154	0.136	0.108	0.087	0.068	0.054	0.048	0.041	0.039	0.038	0.078	0.059	
Nakbon K	0.124	0.119	0.125	0.131	0.141	0.132	0.119	0.098	0.083	0.069	0.054	0.047	0.038	0.037	0.036	0.074	0.063	
Nakbon L	0.123	0.117	0.127	0.131	0.147	0.136	0.128	0.105	0.093	0.072	0.057	0.048	0.039	0.037	0.036	0.074	0.065	
Nakbon M	0.128	0.116	0.112	0.109	0.119	0.117	0.118	0.106	0.090	0.062	0.052	0.045	0.040	0.038	0.038	0.069	0.059	
Nakbon N	0.522	0.187	0.171	0.165	0.185	0.179	0.167	0.147	0.136	0.126	0.115	0.095	0.083	0.074	0.078	0.115	0.113	
Namgang A	0.072	0.057	0.052	0.045	0.038	0.037	0.035	0.041	0.046	0.051	0.048	0.044	0.036	0.033	0.035	0.052	0.052	
Namgang B	0.066	0.046	0.043	0.035	0.033	0.033	0.032	0.034	0.037	0.041	0.037	0.035	0.029	0.027	0.028	0.043	0.043	
Namgang C	0.041	0.034	0.032	0.026	0.089	0.021	0.022	0.026	0.026	0.027	0.026	0.026	0.023	0.022	0.022	0.034	0.031	
Namgang D	0.123	0.129	0.130	0.130	0.148	0.137	0.123	0.085	0.071	0.057	0.050	0.045	0.038	0.034	0.034	0.112	0.070	
Namgang E	0.105	0.111	0.121	0.122	0.133	0.121	0.111	0.086	0.076	0.064	0.056	0.050	0.044	0.039	0.039	0.109	0.075	
Naeseung A	0.156	0.132	0.131	0.128	0.139	0.133	0.121	0.098	0.086	0.073	0.058	0.046	0.037	0.040	0.042	0.110	0.074	
Naeseung B	0.112	0.082	0.085	0.082	0.086	0.088	0.094	0.091	0.087	0.073	0.057	0.042	0.036	0.041	0.044	0.053	0.063	
Michun A	0.066	0.034	0.032	0.028	0.025	0.028	0.032	0.035	0.036	0.034	0.029	0.023	0.002	0.022	0.023	0.032	0.032	
Miryang A	0.051	0.034	0.034	0.031	0.030	0.033	0.037	0.037	0.036	0.039	0.037	0.039	0.035	0.035	0.032	0.031	0.031	
Miryang B	0.102	0.116	0.127	0.131	0.148	0.136	0.121	0.079	0.063	0.046	0.045	0.043	0.043	0.038	0.039	0.074	0.062	
Banbyeon A	0.052	0.029	0.027	0.024	0.018	0.016	0.017	0.018	0.020	0.021	0.020	0.018	0.016	0.015	0.016	0.025	0.024	
Banbyeon B	0.093	0.047	0.034	0.024	0.022	0.022	0.025	0.026	0.026	0.025	0.023	0.021	0.018	0.016	0.018	0.034	0.027	
Byeongseong A	0.289	0.257	0.239	0.219	0.208	0.187	0.169	0.135	0.111	0.088	0.074	0.062	0.052	0.052	0.059	0.130	0.086	
Yeonggang A	0.071	0.053	0.050	0.047	0.052	0.052	0.049	0.040	0.034	0.031	0.026	0.024	0.021	0.021	0.023	0.050	0.045	
Yongjeon A	0.051	0.039	0.046	0.046	0.039	0.031	0.027	0.026	0.031	0.031	0.027	0.019	0.015	0.014	0.015	0.046	0.045	
Wicheon A	0.062	0.031	0.030	0.031	0.026	0.027	0.027	0.029	0.029	0.028	0.026	0.024	0.019	0.019	0.018	0.045	0.030	
Wicheon B	0.065	0.042	0.044	0.045	0.048	0.047	0.053	0.052	0.050	0.044	0.040	0.037	0.033	0.033	0.033	0.045	0.045	
Ian A	0.065	0.040	0.038	0.031	0.031	0.029	0.026	0.029	0.031	0.039	0.040	0.041	0.037	0.033	0.035	0.047	0.034	
Hwanggang A	0.139	0.128	0.113	0.113	0.144	0.138	0.127	0.098	0.089	0.076	0.060	0.048	0.036	0.033	0.036	0.060	0.047	
Hwanggang B	0.062	0.050	0.048	0.034	0.030	0.031	0.035	0.043	0.043	0.043	0.036	0.033	0.026	0.023	0.023	0.100	0.075	
Hoecheon A	0.074	0.053	0.050	0.049	0.039	0.040	0.044	0.048	0.047	0.040	0.035	0.033	0.030	0.029	0.031	0.034	0.037	

* The shaded area means that the target water quality exceeded

산술평균으로 계산하였을 때 41개의 지점 BOD의 초과율은 20.4% (실시이전) > 28.4% (1단계, 2005~2010) > 31.5% (2단계, 2011~2015) > 30.8% (3단계, 2016~2019)로 나타났고 T-P의 초과율은 63.9% (실시이전) > 53.6% (1단계, 2005~2010) > 27.3% (2단계, 2011~2015) > 14.2% (3단계, 2016~

2019)로 지속적으로 감소하는 추세를 보였다. Table 4는 수질 오염총량관리지점의 2003년부터 2019년까지 측정된 수질자료를 이용하여 목표수질을 넘는 비율을 산정한 값이며, Fig. 5와 6은 낙동강 유역의 기간별 초과율을 공간적으로 보여주고 있다.

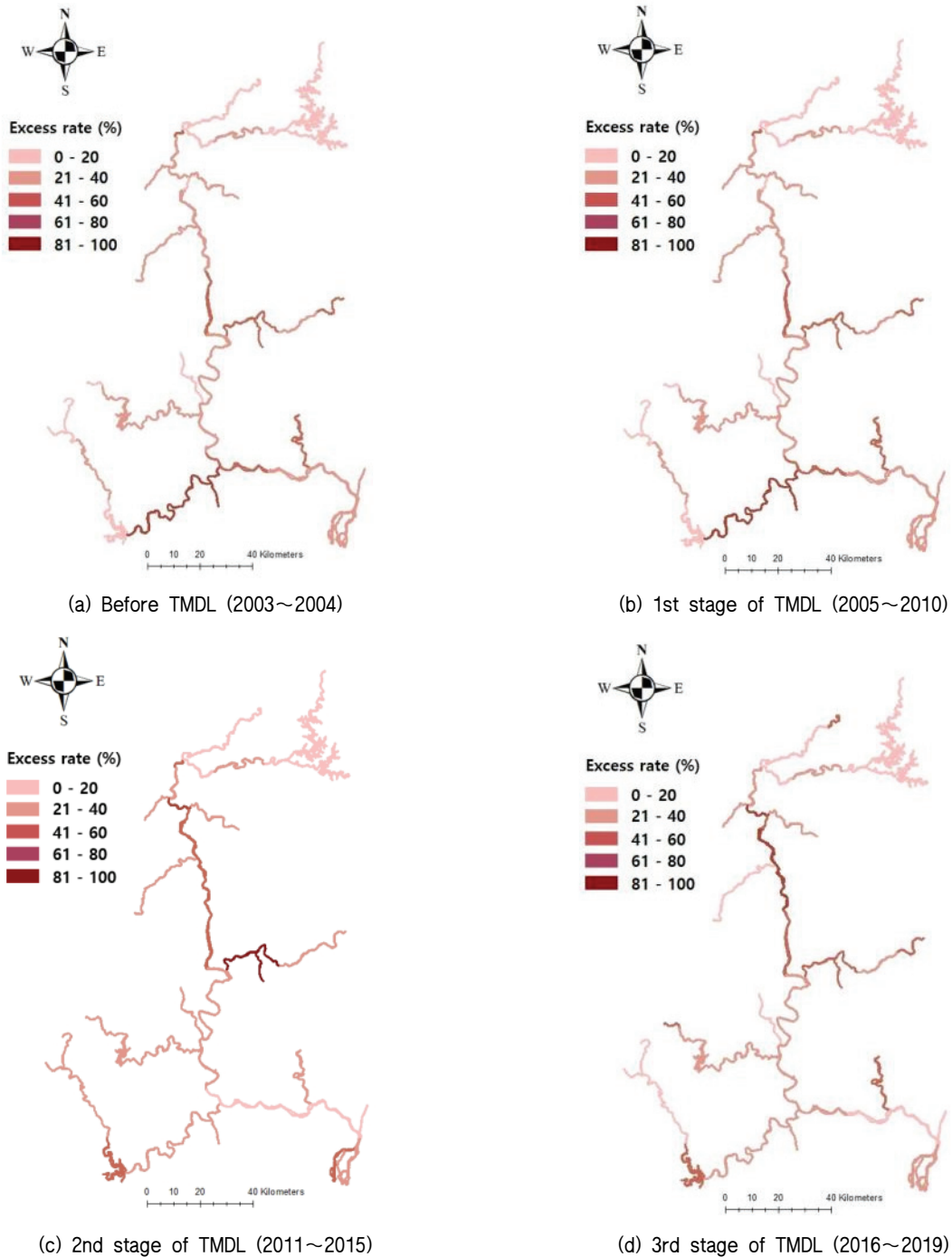


Fig. 5 Excess rate of target water quality for each stage of TMDLin Nakdong river basin (BOD)

Table 4 Excess rate of target water quality for each stage of TMDL in Nakdong river basin (BOD, T-P)

Station	BOD excess rate (%)				T-P excess rate (%)			
	'03~'04	'05~'10	'11~'15	'16~'19	'03~'04	'05~'10	'11~'15	'16~'19
Nakbon A	13.0	25.9	28.1	17.8	55.1	57.1	29.1	3.9
Nakbon B	2.7	11.1	19.2	19.3	48.6	29.8	28.0	22.2
Nakbon C	5.7	16.0	15.7	20.1	80.0	46.7	33.3	14.8
Nakbon D	4.2	17.9	50.8	57.8	68.1	40.2	32.5	13.5
Naeseung A	7.0	10.2	15.5	41.2	60.6	70.2	11.2	9.8
Naeseung B	1.4	11.1	15.4	9.9	84.9	84.5	51.7	6.8
Geumcheon A	15.5	27.1	32.3	24.2	33.8	19.1	23.7	15.7
Banbyeon A	12.5	20.0	18.7	18.4	56.9	25.3	22.7	18.4
Banbyeon B	4.3	12.4	36.7	15.6	75.7	21.1	18.3	3.1
Michun A	12.9	25.8	28.6	35.9	54.3	28.4	35.0	19.6
Ian A	28.2	15.1	17.0	31.4	42.3	14.7	23.5	31.4
Yeonggang A	25.4	44.9	43.6	34.6	53.5	39.1	13.2	8.5
Yongjeon A	2.7	15.6	33.2	13.1	34.2	22.2	8.0	2.0
Byeongseong A	38.0	27.6	27.9	32.7	83.1	71.1	18.1	11.8
Gamcheon A	11.1	21.4	21.7	19.6	94.4	96.4	26.8	8.5
Wicheon A	23.3	29.8	20.7	28.9	43.8	14.7	10.1	11.2
Wicheon B	26.4	33.8	72.9	78.4	54.2	36.4	36.9	16.3
Gilan A	1.4	5.8	8.6	7.8	54.8	19.1	18.7	19.6
Kumho A	28.2	49.6	35.5	49.0	43.7	55.8	11.2	25.5
Kumho B	25.4	29.9	31.3	26.8	5.6	1.8	5.1	12.4
Kumho C	26.8	47.8	92.5	41.1	90.1	96.4	28.8	5.7
Hwanggang A	14.3	12.4	39.9	54.9	42.9	20.9	15.8	14.4
Hwanggang B	35.1	22.7	33.7	32.0	62.2	48.9	22.6	5.2
Hoecheon A	24.3	17.0	28.4	20.3	68.9	45.1	52.9	15.7
Miryang A	6.8	15.6	31.8	19.0	48.6	45.5	52.0	38.6
Miryang B	12.2	50.7	28.9	56.2	60.8	80.9	19.6	9.8
Namgang A	28.4	16.1	26.4	13.7	50.0	25.0	26.9	20.9
Namgang B	32.4	26.2	29.1	17.6	45.9	28.0	26.1	18.3
Namgang C	14.9	6.3	56.1	52.7	41.9	21.4	16.3	17.3
Namgang D	47.3	65.3	24.7	33.3	31.1	53.3	10.1	4.6
Namgang E	33.8	60.8	25.4	23.4	28.4	55.2	10.8	4.2
Nakbon E	15.1	37.1	54.9	66.0	91.8	83.9	49.5	13.7
Nakbon F	20.0	47.3	53.3	60.1	82.9	83.0	45.7	12.4
Nakbon G	32.4	38.7	31.0	30.7	85.9	87.1	20.7	16.3
Nakbon H	29.7	38.7	27.1	30.1	95.9	94.2	32.5	19.0
Nakbon I	31.1	50.2	13.3	24.8	94.6	90.2	27.6	19.0
Nakbon J	28.4	36.6	18.7	19.0	94.6	92.0	33.0	20.3
Nakbon K	23.0	30.0	14.2	6.3	94.6	88.4	36.3	5.7
Nakbon L	21.6	36.0	19.4	10.6	95.9	90.1	42.3	14.6
Nakbon M	31.1	28.9	24.4	40.0	95.9	91.2	40.1	19.1
Nakbon N	39.2	28.9	43.9	29.6	87.8	84.9	53.0	11.8
Average	20.4	28.4	31.5	30.8	63.9	53.6	27.3	14.2

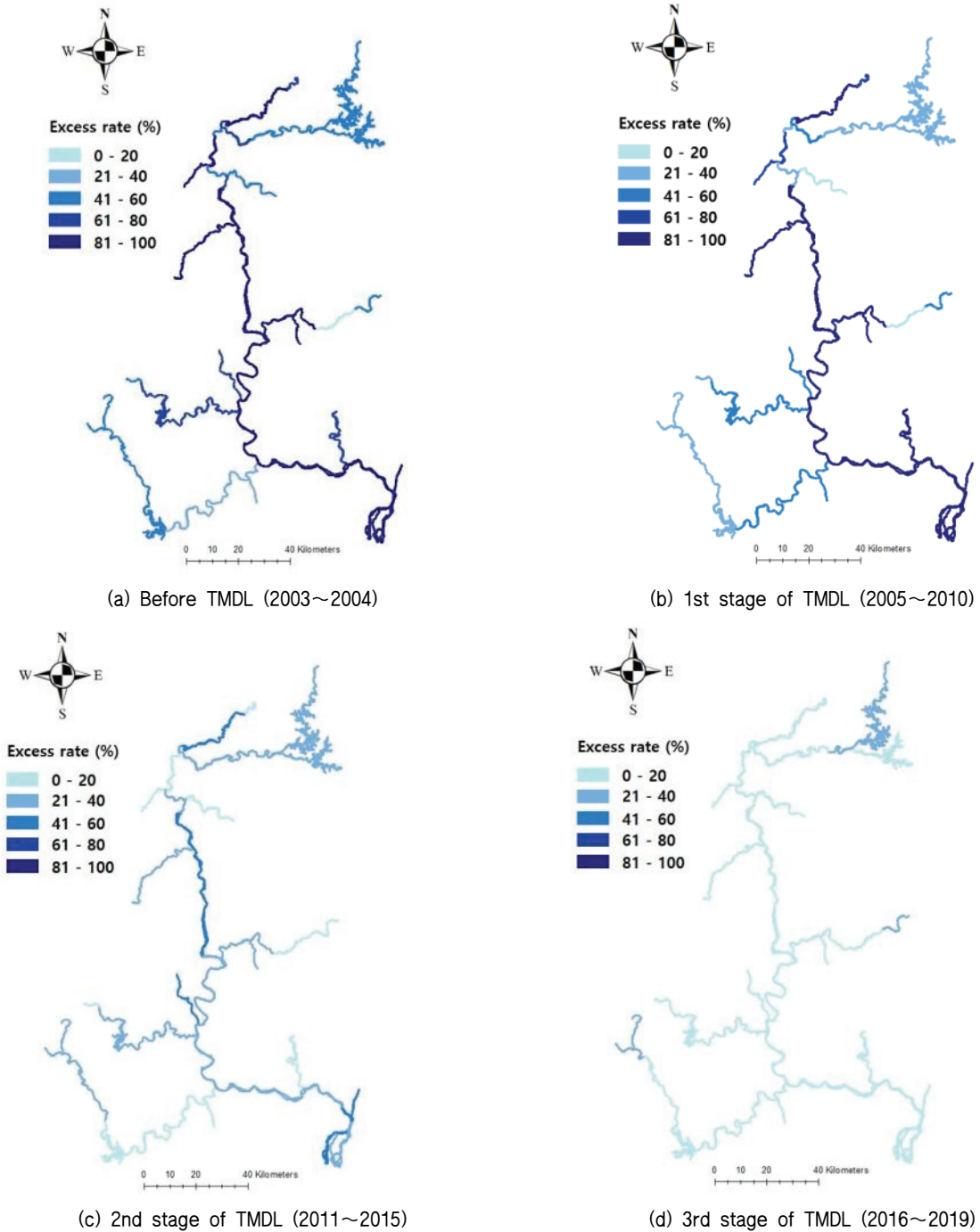


Fig. 6 Excess rate of target water quality for each stage of TMDL in Nakdong river basin (T-P)

IV. Conclusion

본 연구에서는 수질총량오염제 실시로 인한 전체적인 낙동강 수질현황을 분석하였으며, 측정 수질값을 이용하여 평균 수질을 산정하고 이를 목표수질과 비교, 분석하였다. 또한 목표수질 기준 초과횟수와 수질측정 횟수를 이용하여 목표수질

초과율을 산정하여 낙동강 유역의 공간적분석을 실시하였다. 이를 위해 BOD와 T-P에 대해 낙동강유역내에 위치한 41개 오염총량관리 대상지점의 평균수질과 목표수질을 비교, 분석하였다. T-P의 경우 2단계부터 오염물질 대상으로 포함되었으나 수질오염총량제가 시행되기 이전의 T-P 또한 수질을 조

사하여 평균수질을 산정하였다.

평균수질과 목표수질을 비교, 분석한 결과 BOD의 경우 Kumho A, Nakbon F, Namgang D, Miryang B, Wicheon B과 Hoecheon A 등이 2회 연속 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 단계별로 분석한 결과 1단계는 9개 지점, 2단계는 5개 지점, 3단계는 11개 지점이 2회 연속 목표수질을 초과하였다. T-P의 경우 지점별로 분석한 결과 Nakbon N, Naeseung B, Miryang A, Hwanggang A과 Hoecheon A 등이 2회 연속 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 단계별로 분석한 결과 2단계는 23개 지점, 3단계는 3개 지점이 2회 연속 목표수질을 초과하였다. 연도별로는 T-P는 2005년도에 가장 높았으나 2009년을 기준으로 10년간 지속적인 감소를 하는 경향을 보였다.

목표수질기준 초과횟수와 총 수질측정횟수를 이용하여 초과율을 산정하여 공간적으로 분석한 결과 BOD의 경우 수질오염총량제 실시이전에는 금호강 유역 인근 본류와 낙동강 하류 남강유역의 초과율이 비교적 높으며, 1단계 수질오염총량제를 실시기간에는 남강유역의 초과율이 높은 것으로 나타났다. 2단계에는 금호강 유역의 초과율이 높은 값을 가지며, 3단계부터 현재까지는 낙동강 본류 Nakbon E~F의 초과율이 높은 값을 보였다. BOD의 초과율 분석 결과 낙동강 본류 Nakbon E~F, 남강유역과 금호강유역이 수질오염총량제의 실행에도 여전히 초과율이 높은 것을 알 수 있다. 이는 남강유역과 금호강유역이 위치한 지역은 인구밀도가 높을 뿐만 아니라 환경기초시설이 밀집되어 있으며, 지천들이 낙동강 본류로 모이면서 초과율이 높은 것으로 판단된다.

T-P의 경우 수질오염총량제 실시이전 (2003-2004년), 1단계 수질오염총량제 실시기간 (2005-2010년)에는 T-P가 대상물질이 아니었으나 비교의 목적을 위해 공간적으로 분석한 결과, 낙동강 본류와 금호강유역, 낙동강 하류 Nakbon I~N, 밀양강 하류유역까지 초과율이 높은 것으로 나타났다. 2단계 수질오염총량제를 실시기간에는 T-P가 추가되었으며, 낙동강 본류 Nakbon E~F와 낙동강 하굿둑 부근 Nakbon K~N이 높은 값을 보였다. 3단계부터 현재까지는 Nakbon B와 Banbyeon B의 초과율이 비교적 높은 값을 가진다. T-P의 경우는 수질오염총량제 1과 2단계 시행에서 낙동강 본류 Nakbon E~F와 낙동강하굿둑 부근 Nakbon K~N에서 높은 값을 보였으나 3단계 시행 후 평균 14%로 초과율이 많이 낮아졌으며 수질오염총량제의 효과가 있음으로 판단된다. 산술평균으로 계산하였을 때 41개의 지점 BOD의 초과율은 20.4% (실시이전) > 28.4% (1단계) > 31.5% (2단계) > 30.8% (3단계)로 나타났으며, T-P의 초과율은 63.9% (실시이전) > 53.6% (1단계) > 27.3% (2단계) > 14.2% (3단계)로 지속적으로 감소하는 추

세를 보였다.

본 연구를 통해 분석한 결과 낙동강유역의 BOD와 T-P의 평균수질은 대체로 감소 추세를 나타내고 있으나, 낙동강 본류나 금호강유역, 낙동강 하류 등 목표수질을 초과하는 유역이 있으므로 수질관리 방안이 필요한 것으로 판단된다. 또한 목표수질 초과율을 분석한 결과 T-P의 경우 감소추세를 보이고 있으나, BOD의 경우 일부 상승하는 추세를 보이고 있어 목표수질 달성을 위한 오염원관리 및 수질관리 대책이 필요한 것으로 판단된다. 현재의 수질오염총량기준은 3년간의 장기간의 평균치로부터 목표수질이 산정되기 때문에 순간적인 수질악화로 인한 초과사례가 있을 것으로 예상되어 이에 대한 해결책이 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

1. Cho, Y. M., 2008. A study for applications of the total maximum daily load system in Han River. The Seoul Institute (in Korean).
2. Cho, H. K., and S. M. Kim, 2018. Water quality correlation analysis between sewage treated water and the adjacent downstream water in Nakdong River Basin. *Journal of Korea Water Resource Association* 34(2): 202-209. doi:10.14249/eia.2019.28.4.373 (in Korean).
3. Enforcement Rules of the Act on the Management of Nakdong River Water Resources and Support for Residents, 2020. <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=220113&efYd=20200717#0000> (Accessed Mar. 2020).
4. Hwang, H. S., B. K. Park, Y. S. Kim, K. J. Park, S. U. Cheon, and S. J. Lee, 2011. Research paper: Research on the applicability of the load duration curve to evaluate the achievement of target water quality in the unit watershed for a TMDL. *Journal of Korea Water Resource Association* 27(6): 885-895 (in Korean).
5. Kim, K. H., C. D. Cho, H. J. Yoon, T. H. Im, S. M. Kim, Y. S. Kim, and M. J. Seo, 2019. A study on the evaluation of water quality target at cities and counties watershed in the Nakdong River Basin. In Proc. *Journal of Korea Environmental Sciences Society Spring Conference on Academic Presentation* 2019: 188-189 (in Korean).
6. ME (Ministry of Environment), 2002. Nakdong River Water System Target Water Quality Set Point and Total Amount Management Unit Area, 2002-163 (in Korean).
7. ME (Ministry of Environment), 2004. Explanation of the Total Water Pollution Control System (in Korean).

8. ME (Ministry of Environment), 2006. Explanation of the Total Water Pollution Control System (in Korean).
9. National Institute of Environmental Science; Nakdong River Environment Research Center, 2009. Nakdong River Water Meter Target Water Quality Monitoring System Operation Result Report (in Korean).
10. Park, J. D., and S. Y. Oh, 2012. Methodology for the identification of impaired waters using LDC for the management of total maximum daily loads. *Journal of Korea Water Resource Association* 28(5): 693-703 (in Korean).
11. Park, J. H., 2008. Evaluation of the established reduction scheme in implementation plan of total maximum daily loads. *Journal of Korea Water Resource Association* 24(3): 297-306 (in Korean).
12. Park, J. H., D. H. Rhew, and D. I. Jung, 2011. Water quality status of the unit watersheds in the Yeongsang/Seomjin River Basin since the management of total maximum daily loads. *Journal of Korea Water Resource Association* 27(5): 719-729 (in Korean).
13. Park, S. H., 2011. A study on the result analysis and improvement of total water pollution loading system. Gwangju, Ind.: Chonnam National University (in Korean).
14. Song, D. S., 2003. Harmonisierung zwischen Wasser Qualitat Total Kontrollsystem (WQTK) und Planungsrecht in Korea. *Korean Society of Environmental Law* 24(2): 125-150 (in Korean).
15. Water Environment Information System (WEIS), http://water.nier.go.kr/waterData/totalSearch.do?menuIdx=3_1_6&siteTypeCd=A (Accessed Feb. 2020).
16. Yang, D. S., K. Y. Jung, J. M. An, I. J. Lee, and D. S. Shin, 2017. Water quality evaluation in the unit basin of the Nakdong River System after the introduction of the total water pollution system. *Journal of Korea Environmental Sciences Society* 26(1): 97-97 (in Korean).