

ORIGINAL ARTICLE

남강 수질측정망 자료를 이용한 비모수적 장기 수질 추세 분석

정강영 · 김묘정¹⁾ · 송광덕 · 서권옥 · 홍성조 · 조소현 · 이영재 · 김경현*

국립환경과학원 영산강물환경연구소, ¹⁾경북대학교 건설환경에너지공학부

A Nonparametric Long-Term Trend Analysis Using Water Quality Monitoring Data in Nam-River

Kang-Young Jung, Myojeong Kim¹⁾, Kwang Duck Song, Kwon Ok Seo, Seong Jo Hong, Sohyun Cho, Yeong Jae Lee, Kyunghyun Kim*

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gwangju 61011, Korea

¹⁾School of Architecture, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract

In this study, seasonal Mann - Kendall test method was applied to 12 stations of the water quality measurement network of Nam-River based on data of BOD, COD, TN and TP for 11 years from January 2005 to December 2015. The changes of water quality at each station were examined through linear trends and the tendency of water quality change during the study period was analyzed by applying the locally weighted scatter plot smoother (LOWESS) method. In addition, spatial trends of the whole Nam-River were examined by items. The flow-adjusted seasonal Kendall test was performed to remove the flow at the water quality measurement station. As a result, BOD, COD concentration showed "no trend" and TN and TP concentration showed "down trend" in regional Kendall test throughout the study period. BOD and TP concentration in "no trend", COD, and TN concentration showed an "up trend" tendency in Nam-River dam. LOWESS analysis showed no significant water quality change in most of the analysis items and stations, but water quality fluctuation characteristics were shown at some stations such as NR1 (Kyungho-River 1), NR2 (Kyungho-River 2), NR3 (Nam-River), NR6 (Nam-River 2A). In addition, the flow-adjusted seasonal Kendall results showed that the BOD concentration was "up trend" due to the flow at the NR3 (Nam-River) station. The COD concentration was "up trend" due to the flow at NR1 (Kyungho-River 1) and NR2 (Kyungho-River 2) located upstream of the Nam-River. The effect of influent flow on water quality varies according to each site and analysis item. Therefore, for the effective water quality management in the Nam-River, it is necessary to take measures to improve the water quality at the point where the water quality is continuously "up trend" during the study period.

Key words : Regional/seasonal Mann-Kendall, LOWESS, Nam-River, Nonparametric statistical

1. 서론

우리나라는 90년대에 들어 4대강 물 관리 종합대책을

수립하여 적극적인 수질개선 대책이 추진되어 왔으며, 환경부에서는 전국의 하천, 호소 등 공공수역에 대하여 일 반수질측정망 운영지점을 1,348개(1993년)에서 1,828개

Received 18 July, 2018; Revised 12 September, 2018;

Accepted 3 October, 2018

*Corresponding author: Kyung hyun Kim, National Institute of Environmental Research, Yeongsan River Environment Research Center, Gwangju 61011, Korea
Phone : +82-62-970-3901
E-mail : matthias@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

(2016년)로 확대 관리하고 있고, 조사항목은 하천수 39개, 호소수 36개로서 매년 방대한 량의 수질데이터가 생산되고 있다(Yu et al., 2010; Jung et al., 2016; MOE 2016). 또한 수질오염총량제도를 기초로 한 총량측정망을 2004년 낙동강 수계를 시작으로 금강, 영산강, 한강 등 단계적으로 확대 시행하는 등 국가 물환경측정망을 확대 운영함으로써 전국에 대한 수질 현황 파악은 물론 정책방향 설정을 위한 기초자료로 활용하고 있다(MOE 2016; Kim et al., 2017). 국가에서 하천 호수 등 공공수역에 대해 수질측정망을 운영하는 가장 큰 목적은 수질 및 수생태계의 실태를 파악하는 것이다. 이러한 측정망 운영에 따라 생산된 방대한 관측 자료를 이용하여 신뢰성 있는 장기 추세를 분석하는 것은 수질관리 및 정책을 위한 중요한 정보를 얻을 수 있으며, 특히 하천이나 호소에서 영양염류와 생산성의 관계 같은 생태학적 과정을 과학적으로 이해하는데 중요하다(Bekele and McFarland 2004; Kwak et al., 2013). 관측 수질에 대한 추세 분석을 하기 위해서는 대상 수계 또는 하천의 수질이 갖는 통계적 특성을 파악하고 이에 적합한 방법을 선정하는 것이 필요하다(Kim and Park, 2004). 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 강우량과 온도변화와 같은 자연적인 요인이 인위적인 요인보다도 더 큰 수질 변화의 요인이 될 수 있다(Yu et al., 2010). 그리고 자연수체에서 관측되는 수질 자료는 계절변이가 심하고 결측치와 이상치가 존재한다. 잘 알려진 바와 같이, 수질 데이터는 일반적으로 정규분포 형태를 가지기보다 비정규분포 형태를 가지는 경우가 많으며 이 경우 관측치의 정규분포에 대한 가정 없이 분석이 가능한 비모수적 통계기법을 적용하면 해석의 오차를 줄일 수 있다(Montgomery and Reckhow, 1984; Sokal and Rohlf, 1995). 장기 수질변화에 대한 연구에 이러한 비정규성, 이상치 및 결측치 존재 등을 고려한 비모수적 추세분석방법인 Mann-Kendall, seasonal Kendall test가 많이 활용되어지고 있다(Xu et al., 2003; Kim and Park, 2004; Lee and Park, 2008; Karpouzou et al., 2010; Song et al., 2012). 한편 수질변동 요인에는 유량, 수온, 조류(algae), 생태환경의 변화 등 그 원인이 매우 다양하며 이 중 유량의 변화가 수질에 크게 영향을 미치므로 수질오염 관리 시 중요한 영향 요인으로 작용될 수 있다(Smith et al., 1982). 최근 수질오염총량관리제 등 많은 수질 관리 투자 사업이 시행되고 있음을 감

안할 때 수질개선노력에 의한 보다 신뢰성 있는 개선효과 분석을 위해서는 이러한 유량 등 외생변수(exogenous variable)에 의한 수질 변동을 파악하는 것 또한 중요하다(Hirsch et al., 1982; Smith et al., 1982; Yu et al., 2010; Kim et al., 2017). 그러나 생산되는 방대한 자료를 이용한 추세분석 연구는 지금까지 국내 연구자들에 의해 많이 수행되어 왔지만, 외부환경 요인을 고려한 변동 추세 분석 연구는 매우 드문 실정이며, 검정기법과 평활기법(smoothing technique)을 중심으로 한 연구가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 수계에 위치한 남강을 대상으로 계절 및 공간추세(seasonal/ regional Kendall test)분석은 물론 곡선추세(LOWESS)을 통해 대시간동안의 구체적인 변화 특성을 분석하였다. 또한 여러 외생 변수 중 유량의 영향을 배제한 계절추세분석(flow-adjusted seasonal Kendall test)을 실행함과 동시에 XYZ triplet 시·공간 장기경향 그래프를 통하여 수질 변화 특성을 구체적으로 파악하여 현 수질 상태에 대한 명확한 판단 근거를 마련함은 물론 제도효과 분석 및 개선방향 마련과 향후 수질관리 및 정책 수립에 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 유역

남강은 낙동강의 제1지류로 전체 유역의 면적은 3,467.52 km², 유로연장은 189.83 km, 유역평균폭 18.27 km, 형상계수는 0.10, 평균고도는 EL. 319.96 m, 평균경사는 31.86%이다. 또한 남강은 동경 127° 29' ~ 128° 28', 북위 35° 00' ~ 35° 46' 사이의 낙동강유역 남서쪽에 위치한 유역으로 서쪽으로는 백두대간의 지리산 자락(소백산맥)이 섬진강 유역과 경계를 이루며 남서쪽으로는 섬진강 하류 중권역, 북쪽으로는 황강 유역과 남쪽으로는 남남정맥을 분수령으로 하여 낙동강 남해 대권역과 경계를 이루고 있다. 남강은 경상남도 함양군 덕유산에서 발원하여 남류하면서 남강의 지류인 지방1급 하천인 함양위천이 합류되는 지점부터 국가하천 구간의 시점이 되며, 계속 남류한 후 임천, 양천 등이 유입하고, 남강의 좌안으로 유입되는 덕천강으로 합류시킨 후 남강댐으로 유입된다(Jung et al., 2013). 진주시의 남강댐(진양호)을 거친 뒤부터 남강으로 불리고, 남강댐 하류부

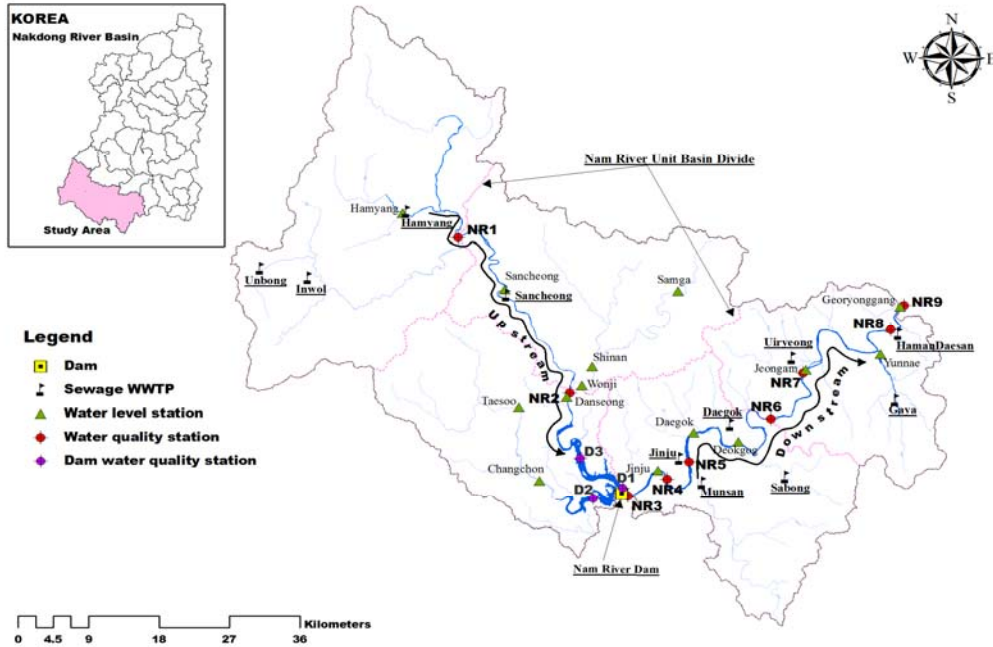


Fig. 1. Nam-River study sites.

구간은 진주시를 가로지르며, 남강수중보와 교량 등의 인공구조물과 만곡흐름을 특징으로 하는 하천으로서 하상경사가 매우 완만하고 유속이 비교적 느리므로 체류시간이 길고 하천수질이 환경기초시설의 방류농도와 남강댐 방류량에 큰 영향을 받는다(GNDI, 2010). 유역을 구성하고 있는 행정구역은 경상남도 함안군, 함양군, 산청군, 진주시, 합천군, 의령군, 하동군, 사천시, 고성군 및 전라남도 구례군, 전라북도 남원시 등 3도 3시 8군으로 이루어져 있다. 남강댐을 기점으로 남강은 동류하면서 나불천, 영천강, 반성천, 의령천이 그리고 국가하천인 함안천이 유입하여 낙동강 본류와 합류한다. 또한 남강 권역은 남강A, 남강B, 남강C, 남강D와 남강E 등 5개의 단위유역으로 구성되어 있다(Cho 2016). 기준관측소인 남강댐 유역의 47년(1966~2012년)간의 유출량 분석결과를 요약하면 풍수량 36.5 m³/s, 평수량 17.2 m³/s, 저수량 9.7 m³/s, 갈수량 2.9 m³/s 정도이고, 티센가중평균법을 이용한 유역평균 연강수량은 1,491.8 mm 정도이다(Kim et al., 2014). 본 연구대상유역에 위치해 있는 수위·수질 관측소 및 환경기초시설현황을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 연구방법

남강의 수질일반측정망과 수질총량측정망 공통 지점인 경호강1(남강A), 경호강2(남강B), 남강4-1(남강E), 수질총량측정망 지점인 남강(남강C), 남강2A(남강D), 그리고 수질일반측정망 지점인 남강1, 남강2, 남강3, 남강4, 진양호(남강댐1, 남강댐2, 남강댐3)의 총 12개 지점을 연구대상 지점으로 선정하였다. 연구기간은 2005년 1월부터 2015년 12월까지 약 11년을 선정하였고 분석항목은 5개로 생물학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), 유량에 대한 월평균 자료를 이용하였다. 수질 및 유량자료는 물환경정보시스템(WEIS, 2016)에서 수집하였다. 통계분석은 12개 지점에 대하여 계절추세분석(seasonal Mann-Kendall test), 곡선추세 LOWESS분석 및 지역추세분석(regional Kendall test), 외생변수의 영향을 제거한(adjusted seasonal Kendall test)를 USGS의 추세 검정 프로그램과 R을 이용하여 실행하였다.

본 연구는 유의수준(α) 0.05(신뢰도 95%)에서 유의미한 경향성을 파악하였으며, 첫 번째로 seasonal Mann

-Kendall test/regional Kendall test를 실행하여 해당 12개 지점에 대한 증감경향을 분석하였고, 항목별로 남강 전체에 대한 증감경향을 파악하였다. 다음 각 지점에 대한 연구기간 동안의 세부적인 수질변동 특성을 파악하기 위해 LOWESS 분석을 실행하였다. 그 다음 외생변수인 유량의 영향을 제거한 flow-adjusted seasonal Kendall test를 실행하여 유량의 존재 유무에 따른 수질 변화를 비교 분석하였다. 마지막으로 통계적 수치로 알아본 남강의 장기적인 시·공간적 수질변화를 XYZ triplet 그래프를 통해 시각화 하였다.

2.2.1. 계절추세분석 (seasonal Mann-Kendall tests)

seasonal Mann-Kendall test는 관심기간 동안 수질의 증감 경향을 단조 증감으로 나타내어 결과 해석에 용이한 장점이 있다. 이 방법은 각 계절에 대해 켄달 검정을 독립적으로 시행한 후, 그 결과들의 가중합을 구하여 하나의 경향 분석 결과를 도출해냄으로써 계절성을 배제하는 방법이다. 켄달 추정치 S는 관측 값들 간의 차이의 합으로 계산되어진다. Kendall의 S통계량의 합을 산출하여 검정하며 식은 아래(1)와 같다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

또한 $\text{Var}(S)$ 는 S의 분산으로 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\text{Var}(S) = \sum \text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=j}^q t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right] / 18 \quad (2)$$

여기서, n는 관찰값의 총 개수이고, q는 자료에서 같은 수로 묶여져 있는 전체 개수이며, t_j 는 같은 수의 개수이다. 표준 정규화에 의해 다음 식 (3)에 제시한 Mann-Kendall 통계치(Z)를 산정하고 이를 유의 수준의 표준 통계치(j)와 비교하여 경향을 파악한다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

수식을 통하여 Z-value를 계산한 다음 p-value를 구하여 유의성을 검증함으로써 경향성을 판단하게된다. 이때 $p \leq \alpha$ 이면 귀무가설을 기각하고 경향성이 있다는 대립가설을 수용한다(Choi et al., 2008).

2.2.2. 공간추세분석 (regional Kendall tests)

regional Kendall test는 앞의 세 가지 분석법과는 달리 12개 지점 전반에 대한 공간적 수질변동을 파악하기 위하여 사용하는 방법이다.

공간추세분석(regional Kendall)은 seasonal Mann-Kendall test와 유사하며 계절에 대한 정보 대신 지점에 대한 정보를 이용한다. 각 지점에 대한 S통계량은 식(4)에 나타내었다.

$$S_{loc} = P - M \quad (4)$$

$P = Y_j > Y_i$ 에 대한 양의 총 개수, $M = Y_j < Y_i$ 에 대한 음의 총 개수, 이때 regional Kendall test는 식 (5)와 같다(Helsel and Frans, 2006).

$$S_{RK} = \sum [S_{loc}] \quad (5)$$

$S_{RK} = \text{Regional Kendall}$

이 방법은 p-value ≤ 0.05 일 때 귀무가설을 기각하고 경향성이 있다는 대립가설을 수용하여 추세변화를 판단하며 증감에 대한 정보는 S 및 Z 값 통계량을 이용하였다. 또한 이에 수반되는 켄달 기울기 통계량(Kendall slope estimator)으로 경향성의 정도를 파악하였다(USGS, 2005; Kim et al., 2017).

2.2.3. 곡선추세분석(LOWESS)

LOWESS 분석은 곡선형 추세분석 방법으로써 직선형 추세분석의 단조 증감을 보완하여 관심기간 동안 추세 변동을 파악하기 위해 사용되고 있다. 이 방법은 Cleveland(1979)에 의해 제안 되었고, Cleveland and Devlin(1988)에 의해 발전되었는데, 데이터에 있는 각 점들에서 낮은 차원의 다항함수들이 각 점들에 가까이 위치한 데이터의 부분 집합들의 반응 값들을 적합시키고 추정한다. 비모수적 평활(smoothing)방법은 연구기간 중 추세 변동이 존재할 경우 회귀선의 형태를 직선으로 한정시키지 않고 자료의 적절한 경향을 반영 할 수

있는 방법으로 사용함으로써 단조 증감만을 나타내는 선형추세에 대한 단점을 보완할 수 있다. LOWESS는 전 구간이 아닌 x 에 대한 일정한 수직 구간(span 또는 window)을 정해 거리 및 영향력을 조절한 후 각 값에 대해 이동 직선(moving line)을 구하고 이로부터 y 의 평활 점(smoother)을 얻은 후 이 평활점들을 직선으로 연결한 것이다(Kim, 2014). 이동선(x_i, y_i)을 계산하는 방법 $x = x_i$ 를 중심으로 일정간격에 걸친 수직띠를 만든다. $x = x_i$ 를 중심으로 $n \times f$ 에 가장 가까운 정수만큼의 데이터를 포함하도록 수직띠의 폭을 결정한다. 여기서 f 는 $0 < f < 1$ 인 평활상수로서 흔히 $1/3 < f < 2/3$ 가 추천된다. f 의 값이 커질수록 한 평활점을 계산하기 위하여 많은 데이터의 점들이 사용되므로 평활곡선이 매끄럽게 되는데 기본값은 $2/3$ 이다.

2.2.4. 유량의 영향을 배제한 계절추세분석 (flow-adjusted seasonal Kendall test)

adjusted seasonal Kendall test는 seasonal Mann-Kendall test에서 외생변수의 영향을 제거함으로써 배경 변이성(background variables), 즉 잡음(noise)을 최소화하여 가설검정 시 오류의 가능성을 줄여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 분석 방법이다(Helsel and Hirsch, 2002). seasonal Mann-Kendall test와 LOWESS가 결합된 분석방법으로 종속변수에 자연적 외부영향 요인인 강수량, 기온, 유량 등에 해당하는 외생 변수를 고려하여 LOWESS 비모수 회귀에 의한 예측치를 산출하게 되고 이때 생산된 예측치와 실측치 간의 차이인 잔차(R_i)를 이용하여 flow-adjusted seasonal Kendall test를 실행한다(Helsel and Hirsch, 2002; Kim et al., 2017).

$$R_i = y_i - \hat{y}_{i(LOWESS)} \quad (6)$$

$$R_i = \text{adjusted residual}$$

3. 결과 및 토의

3.1. 수질장기경향분석

남강에서 장기수질농도의 변화를 살펴보기 위하여 유량을 제외한 BOD, COD, TN, TP 항목에 대하여 2005년부터-2015년까지 11년간의 월별 자료(132개)를 수집

정리하여 각 지점별로 Fig. 2.에 도식하여 비교하였다.

첫 번째로 Fig. 3.에서 2005년에서 2015년의 BOD의 장기흐름을 살펴보면 2004년부터 관리 대상항목으로 BOD를 선정하여 시행한 1단계 기간(2004~2010년)에서 2단계 기간(2011년~2015년)이 종료된 최근까지 전체적으로 볼 때 BOD의 농도는 서서히 감소하는 수질경향을 나타내고 있다. 두 번째로 TP의 장기흐름을 살펴보면 1단계 수질오염총량기간인 2004년~2010년까지는 TP농도가 상승했다 낮아졌다 했지만 2010년을 기점으로 관리 대상항목으로 TP를 선정하여 시행한 2단계 기간인 2011년부터 2015년 종료 시점까지 TP농도는 지속적으로 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 세 번째로 COD는 최근까지 상승했다 낮아졌다 했지만 별다른 농도 변화 경향을 보이지 않는 것으로 나타났으며, 네 번째 TN은 2011년을 기점으로 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3.2. 남강수질 현황

남강 연구대상 12개 지점의 최근 2015년도 연평균수질현황을 남강 수질측정망 지점(NR1~NR9) 자료와 남강댐(진양호) 수질측정망 지점(D1.2.3) 자료를 구분하여 Table 1에 제시하였다. 이는 2015년도 자료에 대해 산술 평균한 값을 수질환경기준에 따라 평가한 자료이다.

전반적으로 상류지점보다는 하류지점의 수질농도가 다소 높음을 알 수 있고, 그 농도 범위가 BOD는 1.3~2.3 mg/L, COD는 3.7~5.5 mg/L, TN은 1.184~2.102 mg/L, TP는 0.025~0.057 mg/L로 나타났다. 먼저 수질 오염총량관리 항목인 BOD에 대해서 살펴보면 각 단위유역별로 설정된 목표수질이 남강A(경호강1)는 1.5 mg/L, 남강B(경호강2)는 1.6 mg/L, 남강C(남강)는 1.2 mg/L, 남강D(남강2A)는 2.5 mg/L, 남강E(남강4-1)는 3.1 mg/L로 모두 기준을 초과하지 않고 목표수질기준 이하로 유지·관리되고 있으며, 전체적으로 수질환경기준 II(Below average) 이상등급의 아주 양호한 수질을 보이는 것으로 조사되었다. 다음 2단계 수질오염총량관리 항목으로 추가된 TP에 대해서 살펴보면 각 단위유역별로 설정된 목표수질이 남강A(경호강1)는 0.052 mg/L, 남강B(경호강2)는 0.043 mg/L, 남강C(남강)는 0.031 mg/L, 남강D(남강2A)는 0.070 mg/L, 남강E(남강4-1)는 0.075 mg/L로 TP 역시 모두 기준을 초과하지

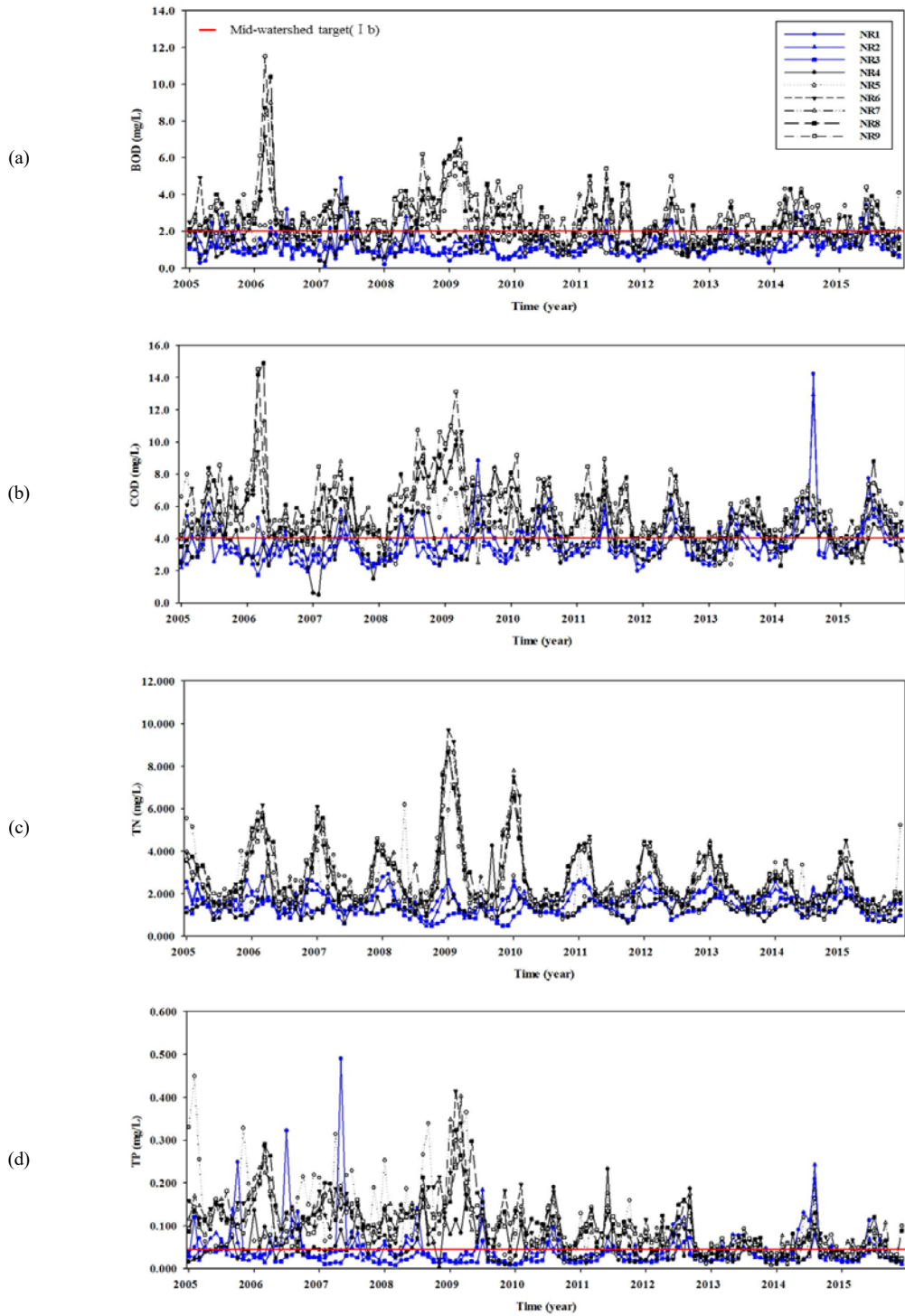


Fig. 2. Long-term variations of BOD, COD and TN, TP from 2005 to 2015.

Table 1. Result of monitoring sites and dam sites class in the Nam-River

Station	Site name	BOD ¹⁾	Class	COD ¹⁾	Class	TN ²⁾	Class	TP ¹⁾	Class
NR1	KyungHo-River 1	1.3	I b ³⁾	4.1	III	1.754	VI	0.043	II
NR2	KyungHo-River 2	1.5	I b	4.5	III	1.419	V	0.030	I b
NR3	Nam-River	1.7	I b	4.6	III	1.184	V	0.025	I b
NR4	Nam-River 1	1.6	I b	3.7	I b	1.200	V	0.027	I b
NR5	Nam-River 2	2.3	II	4.3	III	1.901	VI	0.041	II
NR6	Nam-River 2A	2.1	II	5.2	IV	2.102	VI	0.043	II
NR7	Nam-River 3	2.1	II	4.1	III	2.076	VI	0.055	II
NR8	Nam-River 4	2.1	II	4.7	III	1.948	VI	0.057	II
NR9	Nam-River 4-1	2.3	II	5.5	IV	2.019	VI	0.049	II
D1,2,3	Nam-River Dam	1.2	I b ¹⁾	2.9	I b ²⁾	1.633	VI ²⁾	0.022	II ²⁾

1) River (Stream) environmental standard for water quality

2) Lake environmental standard for water quality

3) In Score : Excellent (I a), Good (I b), Below average (II), Fair (III), Poor (IV), Very Poor (V)

※ Note 1 : NR1 ~NR9(Nam river site), D1.2.3(Nam river Dam site)

※ Note 2 : River (Stream) Mid-watershed target (I b) : BOD 2 Below, COD 4 Below, TP 0.04 Below
Lake Mid-watershed target (I a) : COD 2 Below, TN 0.2 Below, TP 0.01 Below

않고 목표수질기준 이하로 유지·관리되고 있는 것으로 분석되었다. 하지만 남강 중권역(남강댐, 남강)의 수질목표(I b)를 기준으로 볼 때 BOD와 TP는 남강댐을 기준으로 상류는 연평균 수질이 목표를 만족하는 것으로 나타났고, 하류는 약간 상회하는 것으로 나타났으며, COD 항목은 연평균 수질이 목표를 상회하는 것으로 분석되었다. Table 2는 2004년~2013년까지 최근 10년간 남강 유역의 하수종말처리장 방류수 농도를 조사한 것으로 대부분의 처리장 방류수 농도가 목표수질 달성을 위해 지속적으로 개선되었음을 알 수 있다. 하수처리장의 분포 및 방류량을 볼 때 상류보다는 하류가 이에 대한 영향을 많이 받을 것으로 보인다. 한편 COD의 경우는 NR4지점을 제외하고 수질환경기준 III(Fair) 등급의 수질상태를 보이는 것으로 조사되었으며, 특히 NR6지점과 GR9지점의 연평균농도가 높게 나타나 수질환경기준 IV(Poor) 등급인 것으로 나타났다.

TN은 대부분의 지점들이 모두 호소수질환경기준 V(Very Poor)등급에 해당하는 것으로 조사되었다. 남강댐(진양호)에서 유기물 오염지표인 BOD와 COD농도는 수질환경기준 I b(Good)등급 이상의 아주 양호한 수질을 보이는 것으로 조사되었고, 영양염류 지표인 TP는 II(Below average)등급, TN은 IV(Poor) 등급인 것으로

나타났다.

3.3. Seasonal Mann-Kendall/ regional Kendall test

수질 항목별 regional/seasonal Mann-Kendall 결과를 Table 3,4,5,6과 Fig. 3에 나타내었다. BOD에 대한 regional Kendall 결과 S 통계량은 -37, p-value는 0.3418로 귀무가설(H0=no trend)을 수용하여 전체적으로 남강의 BOD농도는 “no trend” 상태를 나타내었다. seasonal Mann-Kendall 결과 남강댐(진양호) 직 하류 남강(NR3) 지점은 S 통계량이 38이고 p-value는 유의수준(α) 0.05(신뢰도 95%) 이하로 BOD 농도는 유의한 “증가” 경향을 나타내었다.

반면, 하류 구간에 위치한 남강2A(NR6) 지점의 S 통계량 -38, p-value는 유의수준(α) 0.05 (신뢰도 95%)이하로 유의한 “감소” 경향을 나타내었다. 나머지 7개 지점에서는 증감경향을 나타내지 않았다. COD 농도는 regional Kendall 결과 S 통계량 -13, p-value 0.7540으로 이 역시 BOD농도와 마찬가지로 전체적으로 “no trend” 상태를 나타내었다. seasonal Mann-Kendall 결과 상류 구간에 위치한 경호강1(NR1), 경호강2(NR2), 남강(NR3)의 3개 지점에서 S 통계량 45, 40, 65, p-value 0.015, 0.0301, 0.0004로 유의한 “증가” 경향을 나타내었다. 반면, 하류 구간에 위치한 남강3(NR7),

Table 2. Sewage treatment plant BOD, COD and TN, TP concentration variation

Year	Upstream												Downstream												(Unit : mg/L)									
	Unbong			Inwol			Hamyang			Sancheong			Munsan			Jinju			Sabong			Daegok				Uiryeong			Gaya			HamanDaesan		
	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP	BOD	COD	TP		BOD	COD	TP	BOD	COD	TP			
2004				5.4	9.0	2.2	5.7				4.4	7.6	9.7	9.6	2.9	9.5				2.8	9.5	4.9	19.7				2.7	9.2						
2005				5.1	8.9	2.1	5.7				2.5	9.2	2.6	9.2	2.7	9.2				6.9	15.8	2.4	9.1				2.4	9.0						
2006	2.0	5.6	2.1	5.6	3.7	8.3	2.0	5.6			2.3	8.9	7.2	12.3	2.4	9.0				2.3	8.9	2.2	8.7				2.2	8.7						
2007	2.0	5.6	3.0	6.4	5.1	8.0	1.9	5.6			3.2	8.3	2.1	8.7	2.2	8.8				2.0	8.6	2.0	8.4				2.0	8.4						
2008	1.9	5.6	3.1	3.8	3.8	6.3	1.8	5.6			1.9	8.3	2.0	8.4	2.0	8.5				2.5	10.7	1.8	8.2				1.4	5.7						
2009	1.8	5.6	2.2	4.9	2.1	6.4	1.8	5.7			1.7	7.9	1.8	8.1	1.8	8.1				4.7	14.2	1.6	7.7				1.6	7.7						
2010	1.8	5.7	1.8	5.7	1.8	7.4	1.7	5.6			1.6	7.7	1.6	7.7	1.6	7.7				7.8	4.9	1.4	7.4				1.4	7.4						
2011	1.7	5.6	1.7	5.6	1.8	6.7	1.6	5.6			1.4	7.4	1.5	7.5	1.5	7.4				7.5	1.4	1.3	7.1				0.9	4.5						
2012	1.5	5.7	1.1	4.3	1.1	6.9	1.5	5.7			1.3	7.2	1.7	8.3	1.3	7.2				7.3	1.3	1.2	7.1				1.3	7.1						
2013	1.1	4.4	1.5	5.8	1.0	5.9	1.6	6.0			1.2	7.6	1.3	7.5	1.2	7.2				7.5	2.1	1.1	7.4				1.2	7.4						
Overflow (m ³ /day)	957		786		5,980		2,675			4,534		129,578		1,364		955		4,094		5,913		432												

Year	Upstream												Downstream												(Unit : mg/L)									
	Unbong			Inwol			Hamyang			Sancheong			Munsan			Jinju			Sabong			Daegok				Uiryeong			Gaya			HamanDaesan		
	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	COD	TP	TN	TP	BOD	COD	TP	TN	TP	BOD	COD	TP		TN	TP	BOD	COD	TP	TN	TP		
2004				13.311	0.899	8.502	0.557			11.367	0.916	18.211	1.057	11.186	0.887				11.076	0.835	23.702	1.166	10.831	0.828				10.831	0.828					
2005				13.916	0.952	8.413	0.549			10.736	0.764	10.821	0.774	10.837	0.827				11.629	1.130	10.730	0.713	10.535	0.708				10.535	0.708					
2006	8.300	0.533	8.290	16.383	0.818	8.393	0.522			10.274	0.661	17.036	1.244	10.573	0.699				10.219	0.647	10.148	0.632	10.000	0.620				10.000	0.620					
2007	7.236	0.510	4.734	14.537	0.700	7.333	0.482			12.013	1.402	9.735	0.558	10.045	0.608				9.611	0.537	9.519	0.520	9.392	0.509				9.392	0.509					
2008	7.145	0.472	5.749	1.112	9.013	0.534	7.212	0.442		9.027	0.456	9.057	0.454	9.351	0.485				13.245	1.314	8.933	0.428	9.118	1.583				9.118	1.583					
2009	7.085	0.425	5.888	1.349	10.409	0.938	7.147	0.377		8.624	0.374	8.706	0.380	8.806	0.395				8.706	0.380	8.280	0.281	8.429	0.331				8.429	0.331					
2010	6.928	0.341	6.928	0.340	9.212	0.925	6.969	0.288		8.255	0.270	8.331	0.278	8.373	0.303				7.882	0.134	7.718	0.114	7.998	0.204				7.998	0.204					
2011	6.848	0.223	6.832	0.239	9.808	0.800	6.971	0.140		7.849	0.149	7.871	0.165	7.906	0.171				7.856	0.158	7.856	0.158	7.856	0.158				7.856	0.158					
2012	6.697	0.102	5.046	0.097	10.301	0.138	7.141	0.108		8.147	0.094	7.917	0.107	7.919	0.101				7.990	0.102	7.990	0.102	7.854	0.111				7.854	0.111					
2013	5.169	0.064	6.562	0.097	10.451	0.139	6.759	0.102		8.138	0.080	8.234	0.091	8.141	0.090				13.810	0.067	7.442	0.075	8.078	0.096				8.078	0.096					

Table 3. Seasonal Mann-Kendall/regional Kendall tests results with BOD

Monitoring site	Seasonal Mann-Kendall trend						Trend	
	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)			
NR1	27.0	1.442	0.1492	0.245	0.02500	no trend	●	
NR2	35.0	1.896	0.0580	0.318	0.02500	no trend	●	
NR3	38.0	2.071	0.0384	0.345	0.02750	upward	▲	
NR4	14.0	0.718	0.4729	0.127	0.02750	no trend	●	
NR5	-33.0	-1.764	0.0777	-0.300	-0.07500	no trend	●	
NR6	-53.0	-2.876	0.0040	-0.482	-0.10000	downword	▼	
NR7	-23.0	-1.217	0.2238	-0.209	-0.08167	no trend	●	
NR8	-27.0	-1.438	0.1505	-0.245	-0.06250	no trend	●	
NR9	-28.0	-1.497	0.1344	-0.255	-0.06167	no trend	●	
Regional Kendall Test								
N	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend		
9	-37.0	-0.951	0.3418	-0.075	0.00000	no trend	●	

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

Table 4. Seasonal Mann-Kendall/regional Kendall tests results with COD

Monitoring site	Seasonal Mann-Kendall trend						Trend	
	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)			
NR1	45.0	2.433	0.0150	0.409	0.06188	upward	▲	
NR2	40.0	2.169	0.0301	0.364	0.07000	upward	▲	
NR3	65.0	3.554	0.0004	0.591	0.11120	upward	▲	
NR4	-4.0	-0.166	0.8680	-0.036	0.00357	no trend	●	
NR5	-25.0	-1.327	0.1844	-0.227	-0.05000	no trend	●	
NR6	-15.0	-0.774	0.4388	-0.136	-0.04687	no trend	●	
NR7	-45.0	-2.433	0.0150	-0.409	-0.15380	downword	▼	
NR8	-45.0	-2.426	0.0153	-0.409	-0.1688	downword	▼	
NR9	-18.0	-0.942	0.3464	-0.164	-0.05000	no trend	●	
Regional Kendall Test								
N	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend		
9	-13.0	-0.313	0.7540	-0.026	0.00000	no trend	●	

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

Table 5. Seasonal Mann-Kendall/regional Kendall tests results with TN

Monitoring site	Seasonal Mann-Kendall trend						Trend	
	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)			
NR1	19.0	0.992	0.3210	0.173	0.01385	no trend	●	
NR2	14.0	0.716	0.4742	0.127	0.01523	no trend	●	
NR3	10.0	0.495	0.6203	0.091	0.005665	no trend	●	
NR4	-14.0	-0.716	0.4742	-0.127	0.006722	no trend	●	
NR5	-48.0	-2.587	0.0097	-0.436	-0.07721	downword	▼	
NR6	-54.0	-2.918	0.0035	-0.491	-0.07225	downword	▼	
NR7	-52.0	-2.807	0.0050	-0.473	-0.09211	downword	▼	
NR8	-48.0	-2.587	0.0097	-0.436	-0.07465	downword	▼	
NR9	-24.0	-1.266	0.2055	-0.218	-0.04399	no trend	●	
Regional Kendall Test								
N	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend		
9	-133.0	-3.425	0.0006	-0.269	-0.03850	downword	▼	

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

Table 6. Seasonal Mann-Kendall/regional Kendall tests results with TP

Monitoring site	Seasonal Mann-Kendall trend						Trend	
	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)			
NR1	-2.0	-0.055	0.9561	-0.018	-0.00015	no trend	●	
NR2	-12.0	-0.607	0.5436	-0.109	-0.00034	no trend	●	
NR3	-8.0	-0.388	0.6982	-0.073	-0.00026	no trend	●	
NR4	-49.0	-2.646	0.0081	-0.445	-0.00313	downword	▼	
NR5	-59.0	-3.198	0.0014	-0.536	-0.01029	downword	▼	
NR6	-75.0	-4.080	0.0000	-0.682	-0.01029	downword	▼	
NR7	-80.0	-4.349	0.0000	-0.727	-0.01080	downword	▼	
NR8	-67.0	-3.639	0.0003	-0.609	-0.01019	downword	▼	
NR9	-75.0	-4.080	0.0000	-0.682	-0.00753	downword	▼	
Regional Kendall Test								
N	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend		
9	-222.0	-5.745	0.0000	-0.448	-0.00600	downword	▼	

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

Table 7. Regional Kendall Tests results in Nam-River dam

Regional Kendall Test							
Item	N	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend
BOD	3	-35.0	-1.578	0.1146	-0.212	-0.0125	no trend ●
COD	3	100.0	4.500	0.0000	0.606	0.0666	upward ▲
TN	3	87.0	3.865	0.0001	0.527	0.03167	upward ▲
TP	3	3.0	0.090	0.9279	0.018	0.0000	no trend ●

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

남강4(NR8)지점의 S 통계량은 -45, p-value는 유의수준(α) 0.05 (신뢰도 95%)이하로 유의한 “감소” 경향을 나타내었다. 나머지 4개 지점에서는 증감경향을 나타내지 않았다. COD 농도의 경우 “증가” 경향을 나타내고 있는 지점이 다른 분석 항목에 비해 다수 해당되었으며 특히 상류 구간에서 “증가” 경향이 뚜렷하였다. TN 농도는 regional Kendall 분석 결과 S통계량 -133, p-value 0.0006로 유의한 “감소” 경향을 나타내었다. seasonal

Mann-Kendall 결과 남강2(NR5), 남강2A(NR6), 남강3(NR7), 남강4(NR8)지점의 S통계량이 -48, -54, -52, -48, p-value 0.0097, 0.0035, 0.0050, 0.0097로 유의한 “감소” 경향을 나타내었으며, 이 들 지점을 제외한 나머지 지점에서는 증감 경향은 나타내지 않았다. TP 농도의 경우 regional Kendall 분석 결과 S통계량 -222, p-value 0.0000로 귀무가설(H_0 =no trend)을 기각하여 남강 전체적으로 통계적으로 매우 유의한 “개선” 경향을

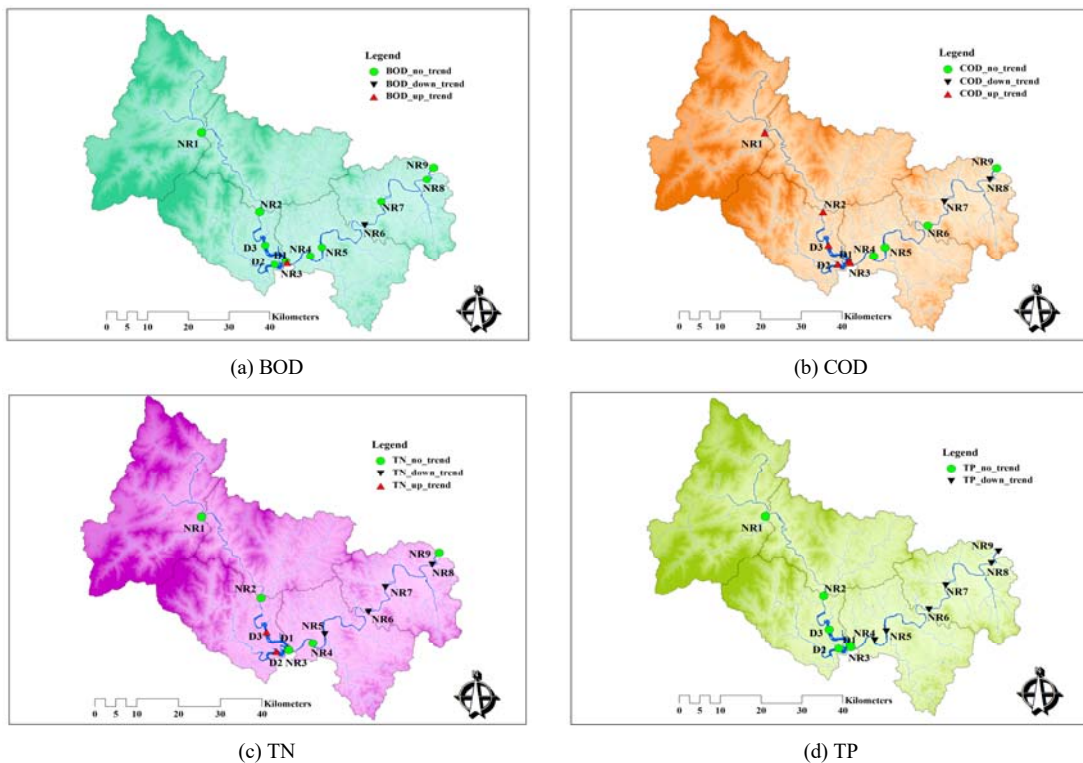


Fig. 3. Results of seasonal Mann-Kendall trend form 2005 to 2015.

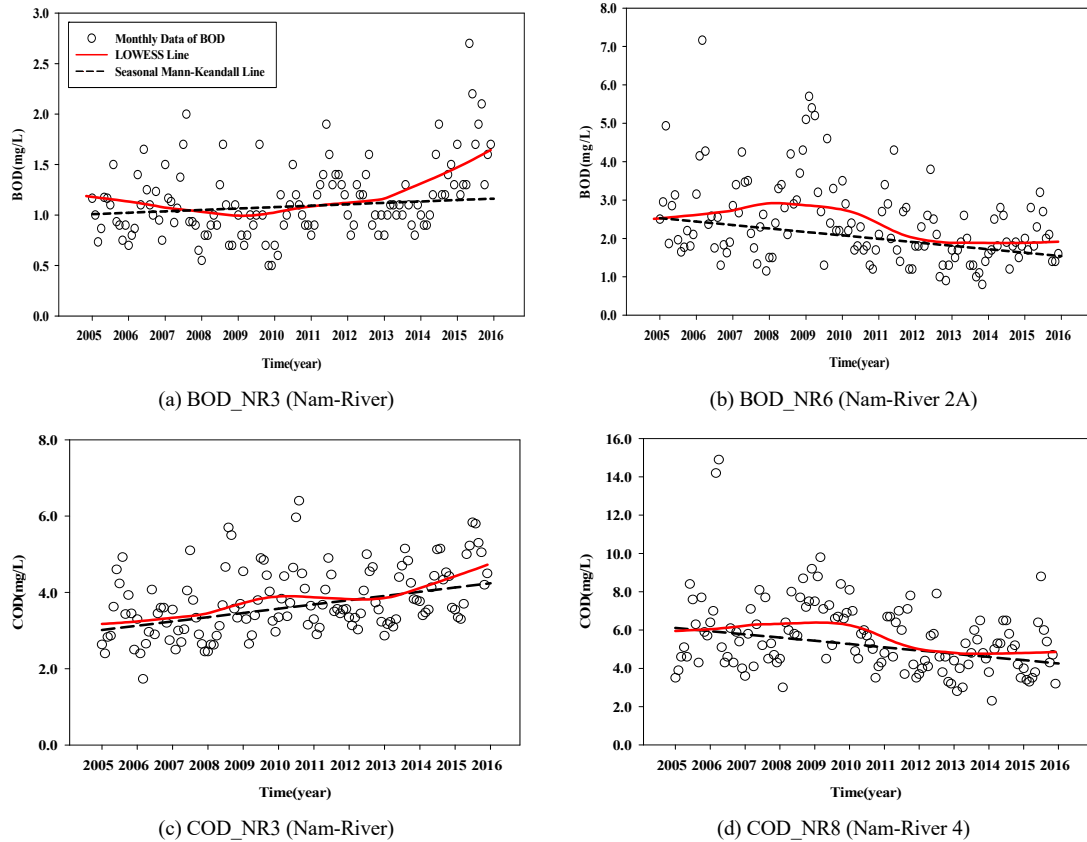


Fig. 4. Results of trend analysis of BOD, COD concentration in Nam-River main stream (example).

나타내었다. seasonal Mann-Kendall 분석 결과 “증가” 경향을 나타낸 지점은 없었으며, 중하류 구간인 남강 1(NR4)~남강4-1(NR9)의 6개 지점에서 S통계량은 -49~-75, p-value는 0.0081~ 0.0000 유의수준(α) 0.05 이하로 유의한 수질 “개선” 경향을 나타내었다. 이는 2011년 7월 기준 부산·경남지역에 총 50개소의 하수 및 폐수처리시설에서 총인처리시설을 설치 또는 운영되면서 TP 농도는 다른 수질 항목에 비해 “개선”된 경향을 나타내는 지점이 다수로 판단된다(NDG, 2012; Kim et al., 2017).

남강댐(진양호)에서 regional Kendall 분석 결과 전반적으로 BOD농도는 “no trend” 상태를 나타내었다. COD 농도는 regional Kendall 결과 S 통계량 100, p-value 0.0000으로 유의한 “증가” 경향을 나타내었다. TN 농도 이 역시 S 통계량은 87, p-value는 유의수준(α)

0.05 (신뢰도 95%)이하로 유의한 “증가” 경향을 나타내었다. TP농도는 귀무가설(H_0 =no trend)을 수용하여 전체적으로 “no trend” 상태를 나타내었다. seasonal Mann-Kendall Test에 따른 수질변화 경향 분석결과를 남강수계의 유역도와 함께 Fig. 3.에 지점별로 표시하여 나타내었다.

3.4. LOWESS analysis

각 지점별로 관심기간동안의 세부적인 수질변동특성을 파악하기 위하여 LOWESS분석을 실행하였다. 분석 결과 대상기간동안 수질의 증감변동이 파악되고, 뚜렷한 증감의 변동이 대표되는 지점을 항목별로 BOD, COD는 Fig. 5에 TN, TP는 Fig. 6에 나타냈으며, 예시로 나타낸 지점들에 대하여 구체적인 변화 특성을 분석하였다. NR3 (Nam-River) 지점의 BOD농도는 seasonal Mann-Kendall

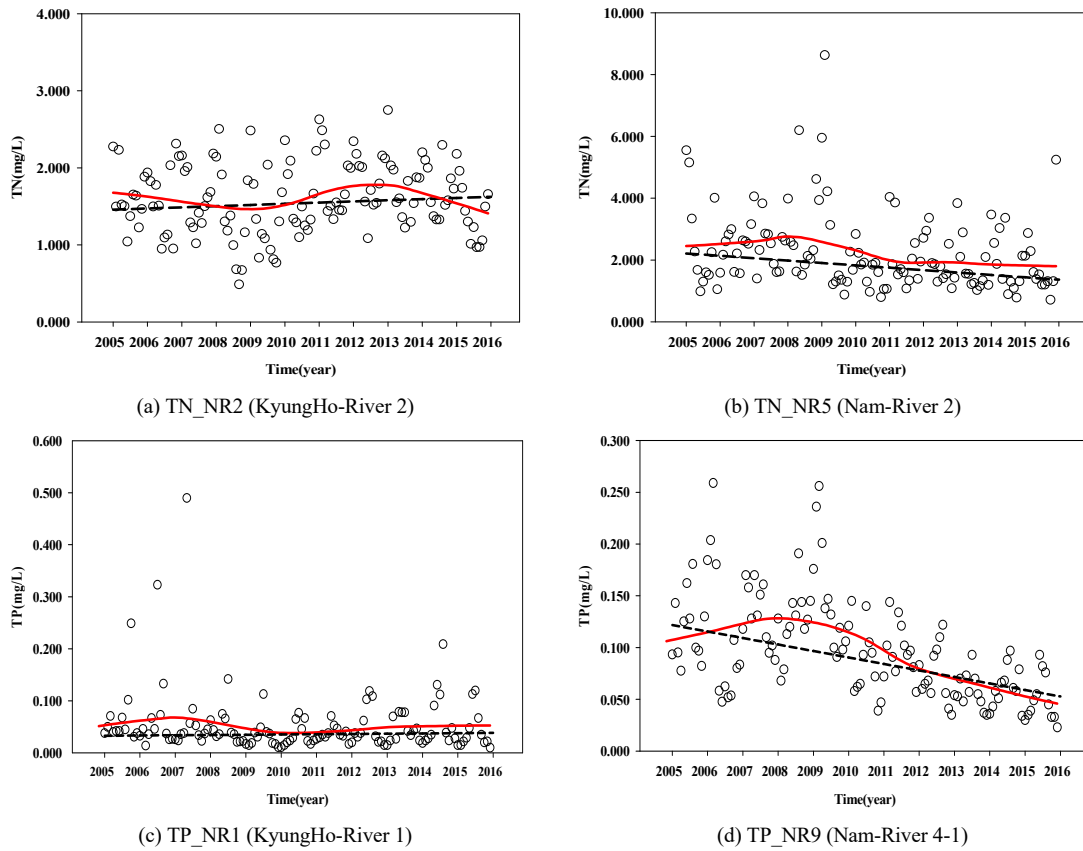


Fig. 5. Results of trend analysis of TN, TP concentration in Nam-River main stream (example).

test 결과 “증가” 경향을 나타내었고, LOWESS분석 결과에서는 2013년도를 기점으로 “증가” 하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. NR6(Nam -River 2A)지점은 seasonal Mann-Kendall test 결과 유의한 “감소” 상태였으나, LOWESS분석 결과 2010는 부터 감소하여 2012년부터 큰 변동 없이 일정하게 유지되는 경향을 보이고 있다.

나머지 지점에서의 LOWESS분석 결과 BOD농도는 지속적으로 감소하다 최근 2013년 후반부터 일정하게 유지되는 추세변화를 나타내었다. NR3(Nam-River) 지점의 COD농도는 seasonal Mann-Kendall 결과 “증가” 상태였으며, LOWESS 결과 2009년부터 2013년 까지 일정하게 유지되다 최근 다시 “증가”하는 상태를 나타내고 있다. NR8(Nam-River 4) 지점의 COD농도는 seasonal Mann-Kendall 결과 “감소” 상태를 나타내었으며,

LOWESS 분석 결과에서도 2010년 이후부터 꾸준히 “감소” 후 최근까지 “개선”되는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

NR2(KyungHo-River 2)지점의 TN농도는 seasonal Mann-Kendall 결과 “no trend” 상태를 나타냈으나 LOWESS 결과 2010년 “증가” 후 2013년부터 “감소” 하는 경향을 나타내고 있다. NR5(Nam-River 2)지점의 TN농도는 LOWESS 분석 결과 2008년 이후 지속적으로 “개선”되는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. NR1 (KyungHo-River 1)지점은 남강 최상류지점으로 이 지점의 TP농도는 seasonal Mann-Kendall 결과 “no trend” 상태를 나타냈으며, LOWESS 결과 역시2005~2015년까지 별다른 경향 없이 완만히 유지되는 상태를 나타내었다. NR9(Nam-River 4-1)지점은 남강 최 하류 말단에 위치해 오염부하가 심한 곳이다. 이 지점의 TP

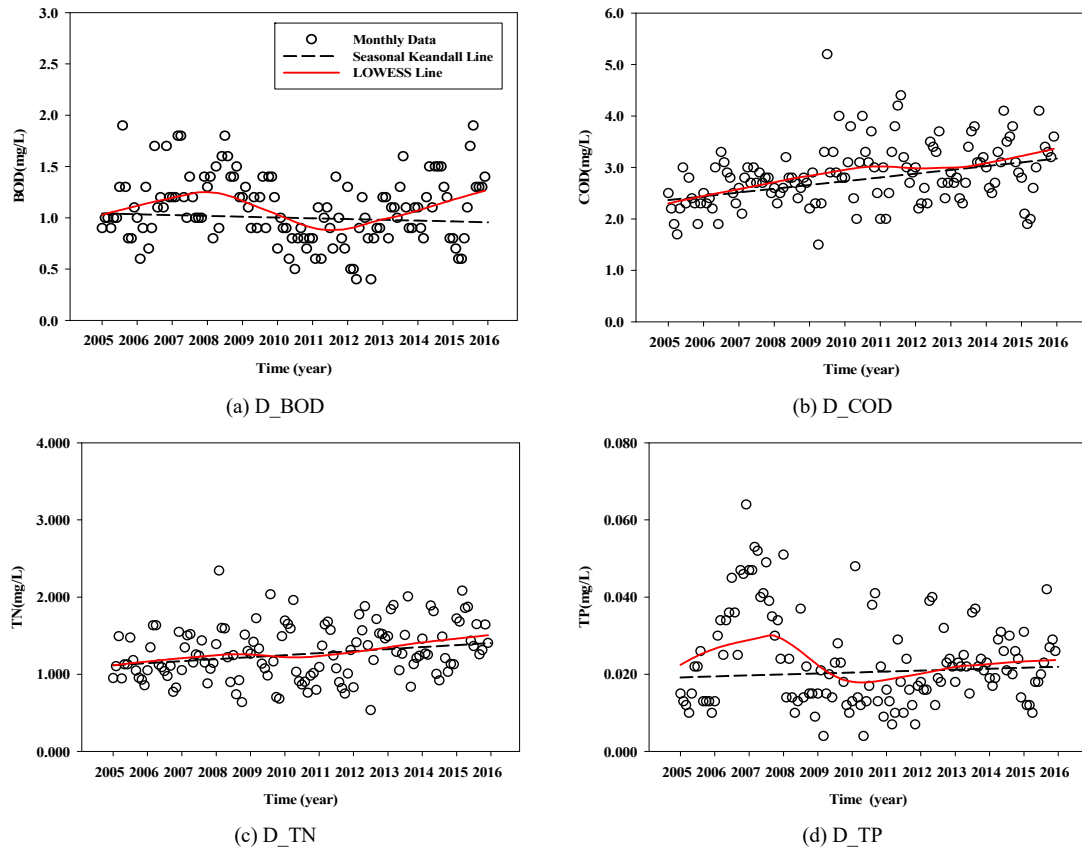


Fig. 6. Results of trend analysis of water quality concentration in Nam-River dam (example).

농도는 seasonal Mann-Kendall 결과 “감소” 상태를 나타냈으며, 2009년까지 꾸준히 증가하다 이후 감소 추세를 보이다 최근 급격히 “감소”, “개선” 경향을 나타내고 있다. 나머지 지점에서의 LOWESS 분석 결과에서도 TP 농도는 최근 급격한 “감소” 추세변화를 나타내었다.

남강댐(진양호)에서 BOD 농도는 seasonal Mann-Kendall 분석 결과 “no trend” 상태를 나타내었으나, LOWESS 분석 결과 2005~2008년 “증가” 후 2009년 “개선” 경향을 나타낸 뒤 2012년 다시 최근까지 지속적으로 상승하고 있는 상태를 나타내고 있다. COD 농도는 LOWESS 분석결과 지속적으로 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 그 원인을 분석해 볼 때 seasonal Mann-Kendall 분석 결과 “증가” 경향을 나타낸 상류지점들의 영향으로 추정된다. TN 농도는 seasonal Mann-Kendall test 결과는 “증가” 경향을 나타냈고, LOWESS

분석결과를 볼 때 2008년부터 꾸준히 증가하는 상태를 나타내고 있다. TP 농도는 seasonal Mann-Kendall test 결과에서 “no trend” 으로 나타났지만, LOWESS 분석 결과에서 남강댐 전체지점에서 LOWESS 분석 결과 2005~2008년 “증가” 후 2009년 “감소” 경향을 나타낸 뒤 2010년 다시 증가 후 2013년부터 농도가 일정하게 유지되고 있는 것으로 분석되었다.

3.5. Comparison of seasonal Mann-Kendall and flow adjusted seasonal Kendall tests

Adjusted seasonal Kendall test는 Seasonal Mann-Kendall test에서 외생변수의 영향을 제거함으로써 배경 변이성(background variables), 즉 잡음(noises)을 최소화하여 가설검증 시 오류의 가능성을 줄여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하는 분석 방법이다(Helsel와

Hirsch, 2002; Kim et al., 2017). 수질오염에서는 외생 변수로 유량의 변화가 크게 영향을 미치므로 유량의 영향을 고려한 즉 수질에 영향을 미칠 수 있는 자연적인 영향요인 중 유량(flow) 영향을 제거한 수질 추세를 분석하여 유량이 있을 때와 없을 때에 따른 수질변화를 비교 분석하였다. 유량 유무에 대한 비교 분석을 하기 위해서는 수질과 유량자료를 동시에 관측한 자료가 필요한데, 남강 9개 지점 중 수질과 유량을 동시에 관측해오고 있는 지점은 수질오염총량 단위유역인 NR1(남강A), NR2(남강B), NR3(남강C)지점과 NR6(남강D)지점 그리고 NR9(남강E)지점이다. 따라서 이 5지점에 대해 유량의 영향이 배제된 상태에서 수질 변화를 살펴보기 위해 flow adjusted seasonal Kendall test를 실행하였고 seasonal Mann-Kendall test 분석 결과와 항목별로 비교하여 서로 상이한 경우를 Table 5에 나타내었다. 분석 결과 BOD농도는 NR3(남강C)지점에서 S통계량이 38이고 p-value는 유의수준(α) 0.0384로 유의한 “증가” 경향을 나타내었지만, 유량의 영향을 제거한 결과 S통계량이 30이고 p-value는 0.1104로 경향성이 없다는 귀무가설(H_0)을 수용하여 증감의 경향이 아닌 “유지” 상태를 나타내어 유량에 의한 수질농도 증가가 있음을 알 수 있다. TP농도의 경우는 유량의 영향을 제거한 결과가 seasonal Mann-Kendall test 분석 결과와 서로 상이한 결과를 나타내지 않았다. TN농도는 NR6(남강D)지점에서 S통계량이 -54이고 p-value는 0.0035 유의수준 0.05 이하로 “감소”의 경향이 나타났으나, 하지만 유량의 영향을 제거한 결과 S통계량이 -4, p-value는 0.8688로 경향성이 없다는 귀무가설(H_0)을 수용하여 증감의 경향이 아닌 “유지” 상태를 나타내어 유량에 의한 수질농도 감소가 있음을 알 수 있다. 또한 NR9(남강E)지점에서 S통계량이 -24이고 p-value는 0.2055 유의수준 0.05 이상으로 증감의 경향이 나타나지 않았으나, 켄달 기울기 통계량이 -0.04399 mg/L/yr로 “감소” 하는 경향으로 나타났다. 하지만 유량의 영향을 제거한 결과 S통계량이 6, p-value는 0.7831로 유량을 제거하지 않았을 때와 마찬가지로 경향성은 없지만 slope가 0.00320 mg/L/yr로 다소 증가하고 있는 경향으로 나타나 유량에 의한 수질개선 효과를 나타내었다. COD농도는 NR2(남강B)지점에서 S통계량이 40이고 p-value는 유의수준(α) 0.0301로 유의한 “증가” 경향을 나타내었지만, 유량의

영향을 제거한 결과 S통계량이 24이고 p-value는 0.2055로 BOD농도의 NR3(남강C)지점 경우와 마찬가지로 증감의 경향이 아닌 “유지” 상태를 나타내어 이 지점에서는 유량에 의한 수질농도 “증가”가 있음을 알 수 있다. 반면 NR6, NR9 지점의 경우 유량의 영향을 제거하기 전(-), 후(+) 그리고 Slope가 전(-), 후(+)로 나타나 유량에 의한 수질농도 “감소”가 있음을 알 수 있다. 그리고 flow adjusted seasonal Kendall test를 실행한 결과와 seasonal Mann-Kendall test 실행결과의 slope 변화율을 항목별로 도시하여 Fig. 7에 나타내어 비교 분석하였다. 먼저 seasonal Mann-Kendall 검정결과 2005년~2015년 기간 동안 남강 본류 전체 9개 지점 중 통계적으로 유의한 BOD농도 변화가 일어난 곳은 2개 지점이지만 slope가 하루구간에서 전반적으로 (-) 감소하고 있는 추이를 보이고 있다. COD농도 변화가 일어난 곳은 5개 지점이며 상류지점에서 농도 증가폭이 크게 나타났다. TN농도의 경우 slope가 남강 상류에서 하류로 점점 (-) 감소하고 있는 추이를 보이고 있으며, 남강 본류 중간지점에서 농도 감소폭이 뚜렷하게 보이고 있다. TP농도 변화율은 slope가 본류 전반에 걸쳐 (-) 감소하고 있는 추이를 보이고 있으며, 특히 하류 말단 지점에서 농도 변화가 가장 크게 일어났으며 가장 큰 감소폭을 보였다.

다음으로 slope 변화율을 서로 비교한 결과에서 BOD, COD, TP항목은 상류에서 유량에 의한 수질의 “증가” 현상이, 하류에서는 유량에 의한 수질의 “감소” 현상이 나타났으며, 특히 COD항목에서 이러한 경우가 뚜렷하게 관찰되었다. 반면, TN항목은 상기 경우와 마찬가지로 하류에서는 유량에 의한 수질의 “감소” 현상이 나타났지만, 상류에서는 유량을 제거 했을 시 수질이 “증가” 즉 유량에 의한 수질 “감소”현상을 보였다. 이러한 결과는 상류에서 유량이 BOD, COD, TP항목의 농도증가에 영향을 줄 수 있음을 의미하고, 하류에서는 유량이 이들 수질인자들을 조절하는 가장 중요한 요인임을 제시한다. 따라서 유량의 영향을 제거한 flow adjusted seasonal Kendall test를 실행한 결과 강우나 외부로부터 유입된 유량이 수질에 미치는 영향이 각 지점 및 항목에 따라 다르게 나타나고 있어 효과적인 수질관리를 위해 이에 대한 원인 분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Table 5. Comparison of seasonal/adjusted seasonal Kendall trend tests

WQI*	Monitoring site	Seasonal Kendall test					Flow adjusted seasonal Kendall test						
		Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend	Statistic S	Z-value	p-value	Kendall's tau	Slope (mg/L/yr)	Trend
BOD	NR3	38.0	2.071	0.0384	0.345	0.02750	▲	30.0	1.596	0.1104	0.273	0.02640	●
	NR1	45.0	2.433	0.0150	0.409	0.06188	▲	24.0	1.266	0.2055	0.218	0.02357	●
	NR2	40.0	2.169	0.0301	0.364	0.07000	▲	24.0	1.266	0.2055	0.218	0.03826	●
COD	NR6	-15.0	-0.774	0.4388	-0.136	-0.04687	●	10.0	0.495	0.6203	0.091	0.01932	●
	NR9	-28.0	-1.497	0.1344	-0.255	-0.06167	●	8.0	0.385	0.7000	0.073	0.00615	●
TN	NR6	-54.0	-2.918	0.0035	-0.491	-0.07225	▼	-4.0	-0.165	0.8688	-0.036	-0.00511	●
	NR9	-24.0	-1.266	0.2055	-0.218	-0.04399	●	6.0	0.275	0.7831	0.055	0.00320	●

* WQI: Water quality item

Note : p-value < 0.05 statistically significant trends

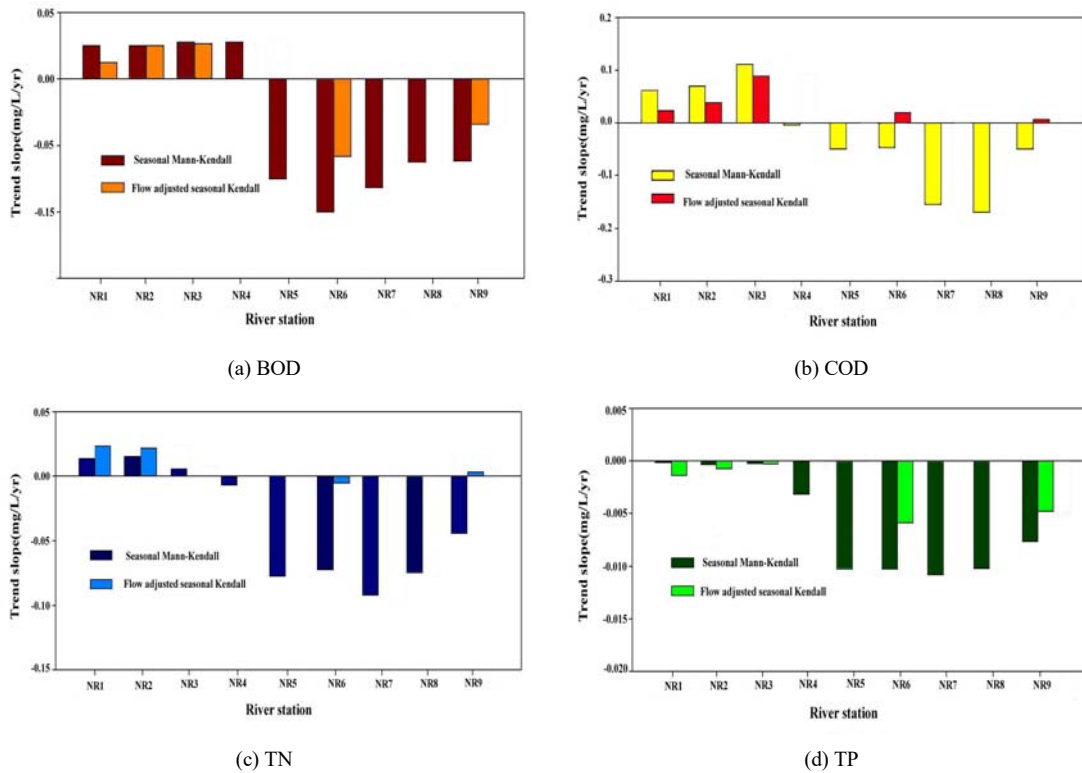


Fig. 7. Comparison of trend slopes at each main station in the Nam-River.

3.6. XYZ triplet contour map을 활용한 사공간 추세분석

남강에서 시·공간적인 농도 분포특성을 파악하기 위해 지점별 추세분석 결과를 상류지점부터 하류지점까지 나열하여 Fig. 8에 제시하였다. 분석 결과 BOD농도는 수질오염총량 1,2단계 시행을 거치면서 서서히 개선되어 감소하는 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 따라서 BOD 농도는 남강에서 대부분의 지점이 일정한 수질을 유지하거나 감소하는 추이를 나타내고 있고, 이 같은 추이는 남강 본류에서 BOD농도는 감소하거나 일정한 농도로 유지 및 관리되고 있다는 것을 의미하는 결과로 해석할 수 있다. 다만 유일하게 “증가” 추세를 나타낸 NR3(남강C)지점은 남강댐(진양호) LOWESS 분석에서 최근 남강댐에서의 BOD농도가 2013년 이후 증가 추이를 보이는 것의 영향으로 추정된다.

COD농도는 2005년에서 수질오염총량 2단계 시행 전까지 큰 변화가 없으나 그 이후부터 하류구간에서 완

만한 감소추이를 보이는 것으로 분석되었다. 반면 상류 구간에서 COD농도가 temporal-spatial contour map 분석에서 최근 붉게 나타났고, seasonal Mann-Kendall test 분석 결과 뿐만아니라 LOWESS 분석에서도 NR1(남강A), NR2(남강B), NR3(남강C)지점과 남강댐(진양호)에서도 “증가” 추세를 나타냈다. 따라서 이에 대한 원인 분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다. TN농도는 2005년 이후부터 2010년까지 큰 농도의 변화가 없었으나, 2011년부터 남강 중류구간에서 하류로 감소하는 경향이 뚜렷하게 관찰되고 있다. TP농도는 수질오염총량 2단계 시행 시점인 2010년부터 감소하는 추세 변화가 뚜렷하게 관찰되었으며, 그 이유는 목표수질이 설정된 단위유역의 해당 지자체에서 목표수질을 만족하기 위해 대규모의 환경기초시설의 설치와 점오염원에 대한 지속적인 배출부하량 삭감 등의 노력과 투자의 결과가 본류에서의 수질개선 효과로 나타났기 때문이라고 사료된다.

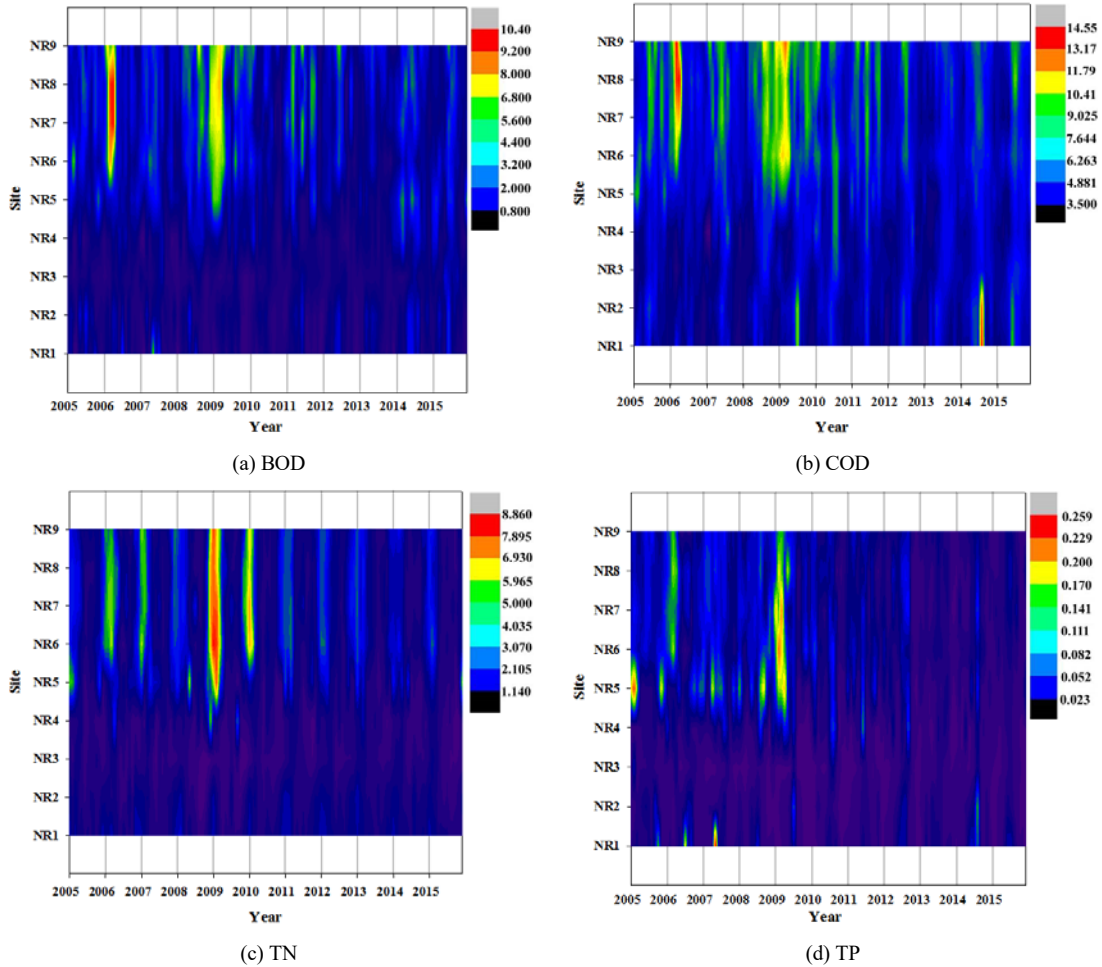


Fig. 8. XYZ triplet temporal-spatial contour map of water quality in the main stream of the Nam-River.

4. 결론

본 연구에서는 남강의 수질일반측정망과 수질총량측정망 12개 지점을 대상으로 2005년 1월부터 2015년 12월까지 11년간의 BOD, COD, TN, TP 항목 자료를 바탕으로 seasonal Mann-Kendall 검정법을 통해 지점별 수질변화를 직선추세를 통하여 살펴보고, LOWESS 분석법을 적용하여 연구기간 중 수질의 증감 변화의 경향성을 분석하였다. 또한 남강 전체지점의 공간적 추세를 항목별로 살펴보고, 아울러 수질과 유량을 함께 관측한 수질총량측정망 지점에 대해 유량을 제거한 후 (adjusted seasonal Kendall test)와 그렇지 않은 경우를

비교하였다. 이와 같은 연구방법을 통해 남강 수질 측정망 지점의 장기수질농도 변화 경향성을 정량·정성적으로 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

연구기간동안 남강 측정망 지점 전반에 걸친 regional Kendall test 결과 BOD, COD농도는 “no trend”, TN, TP 농도는 “개선” 경향을 나타내었으며, 남강댐(진양호)에서 regional Kendall test 결과 BOD, TP농도는 “no trend”, COD, TN농도는 “증가” 경향을 나타내었다. 각 지점별 seasonal Mann-Kendall 결과 BOD 농도는 “개선” 1지점, “유지” 7지점, “증가” 1지점으로 나타났고 COD 농도는 “개선” 2지점, “유지” 4지점, “증가” 3지점으로 나타났으며 TN 농도는 “증가”된 경향을 나타내는

지점은 없었고 “유지” 5지점, 4지점이 “감소” 경향을 나타내었다. TP 농도 역시 “증가” 경향을 나타내는 지점은 없었고 “개선” 6지점으로 다른 항목에 비해 가장 많았으며, “유지” 3지점 그리고 특이적으로 다른 항목과 다르게 전체적으로 slope가 (-) 감소하고 있는 추이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 수질관리제도 시행 및 저감시설 확충에 따른 오염원 관리를 통해 수질을 개선시키는 역할을 한 것으로 판단되며, 목표수질을 만족하는 지점에 대해서는 적어도 수질이 악화되지 않는 범위 내에서 관리가 이루어져야 한다고 사료된다. LOWESS 분석 결과 대부분의 분석 항목과 지점에서 뚜렷한 수질변동을 나타내지 않았으나 NR1(경호강1), NR2(경호강2), NR3(남강), NR6(남강2A)지점 등 일부 지점에서 수질 변동 특성을 나타내었다. 특히 NR3(남강)지점의 BOD농도는 2013년을 기점으로 “증가” 경향을 나타내었으며, NR1, NR2, NR3 지점과 남강댐 COD 농도는 연구기간동안 지속적으로 “증가” 경향을 보이는 것으로 나타났지만 댐 하류구간에서는 “개선” 되는 서로 상반된 결과를 보였다. TN과 TP 농도는 댐 하류 대부분의 지점에서 2011년 이후 “개선”된 경향이 뚜렷하였다. LOWESS 분석을 통해 시간에 따른 수질 변동을 명확히 파악 할 수 있었으며 그 외 지점에서는 뚜렷한 변동 없이 seasonall Mann-Kendall test와 유사한 결과를 나타내었다. 또한 유량을 제거한 flow-adjusted seasonal Kendall 결과, BOD 농도는 NR3(남강)지점에서 유량에 의한 영향으로 “증가”하고 있는 것으로 나타나 이는 남강댐에서의 영향을 의미하는 결과로 볼 수 있다. COD 농도는 남강 상류에 위치한 NR1(경호강1), NR2(경호강2) 지점에서는 유량에 의한 영향으로 “증가”하고 있는 것으로 나타났지만, 반면 하류에 위치한 지점들에서는 유량에 의한 수질 “개선”이 이루어지는 등 긍정적 효과를 나타내었으며, TN 농도 역시 같은 결과를 보였다. 이처럼 자연적인 요인인 유량을 배제한 수질변동추세분석(flow-adjusted seasonal Kendall)에서 상류구간은 유량에 의해 수질농도가 “증가”하고, 반대로 하류구간은 “감소”한다는 것은 이번 연구에서 매우 흥미로운 결과이며, 수질관리 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 그리고 향후 연구에서는 이에 대한 종합적인 분석이 보완되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 그간 수질 경향 분석에 이용되어 왔던 직선 및 곡선에 대한 추세결과 외에 대상 하천 전반

에 걸친 수질 경향과 XYZ triplet 시·공간 장기경향 그래프를 함께 이용한 추세 분석을 실행함으로써 과거 타 연구 방법을 한 단계 진보시킬 수 있었다. 이러한 방법은 다른 수계에 대해서도 수질정책 시행에 따른 수질개선 효과를 평가하는데 있어서 유용하게 활용될 수 있을 것이며, 이를 통해 향후 수질관리방안 등을 모색하고 결정할 때 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 제원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-03-03-002).

REFERENCES

- Bekele, A., McFarland., 2004, Regression-based flow adjustment procedures for trend analysis of water quality data, Transactions of the ASABE., 47(4), 1093-1104.
- Cleveland, W. S., 1979, Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots, Journal of American Statistician Association, 74, 829-836.
- Cleveland, W. S., Devlin, S. J., 1988, Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting, Journal of the American Statistician Association, 83, 596-610.
- Choi, J. H., Ha, J. H., Park, S. S., 2008, Estimation of the effect of water quality management policy in Paldang lake, Korean. Soc. Environ. Eng., 30(12), 1225-1230.
- Cho, K. S., 2016, The contribution of the contaminant sources in the dam of the Nam river downstream and the evaluation of the water quality in the Nakdong river mainstream, Master's Thesis, Pukyong National University, 1-5.
- GyeongNam Development Institute (GNDI), 2010, A plan of quality improvement in Nam river mid-watershed, Gyeongnam Development Institute, 1-55.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., Smith, R. A., 1982, Techniques of trend analysis for monthly water quality data, Water Resources Research, 18(1), 107-121.
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M., 2002, Statistical methods in water resources techniques of water-resources investigations book 4, chapter A3, U.S. Geological Survey, 226-230, 329-335.

- Helsel, D. R., Frans, L. M., 2006, Regional kendall test for trend, *Environmental Science & Technology*, 40(13), 4066-4073.
- Jung, K. Y., Kim, G. H., Lee, J. W., Lee, I. J., Yoon, J. S., Lee, K. L., Im, T. H., 2013, Selection of priority management target tributary for effective watershed management in Nam river mid-watershed, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 29(4), 514-522.
- Jung, K. Y., Lee, I. J., Lee, K. L., Cheon, Se. Uk., Hong, J. Y., Ahn, J. M., 2016, Long-term trend analysis and exploratory data analysis of Geumho river based on seasonal Mann-Kendall test, *J. Environ. Sci.*, 25(2), 217-229.
- Kim, J. H., Park, S. S., 2004, Long-term trend analysis of water qualities in Nakdong river based on non-parametric statistical methods, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28(4), 574-581.
- Karpouzou, D. K., Kavalieratou, S., Babajimopoulos, C., 2010, Trend analysis of precipitation data in pieria region(Greece), *European Water*, 30, 31-40.
- Kwak, S. J., Bal, DevBhatrai., Lee, C. K., Heo, W. M., 2013, Long-term trends of summer season of water quality in lake Doam, *KJEE.*, 46(1), 128-134.
- Kim, G. H., Jung, K. Y., Yoon, J. S., Cheon, S. U., 2014, Evaluation and comparison of four streamflow record extension techniques for Namgang dam basin, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 30(1), 60-67.
- Kim, M. A., Lee, S. Y., Mun, H. S., Cho, H. S., Lee, J. K., Kim, K. H., 2017, A nonparametric trend test using TMDL data in the Nakdong river, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(1), 40-50.
- Lee, H. W., Park, S. S., 2008, Long-term trend analysis of water qualities in Nakdong river based on non-parametric statistical methods, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 24(4), 480-487.
- Montomery, R. H., Reckhow, K. H., 1984, Techniques for detecting trends in lake water quality, *Water Resources Bulletin*, 20(1), 45-52.
- Ministry of Environment (MOE), 2016, Watere quality monitoring program, 11-1480000-001223-10, Ministry of Environment, 3-4.
- Nakdong River Basin Environmental Office (NDG), 2012, Technical support casebook of total phosphorus treatment plant, 11-1480354-000058-01, Nakdong River Basin Environmental Office, 23-26.
- Smith, R. A., Hirsch, R. M., Slack, J. R., 1982, A Study of trends in total phosphorous measurements at stations in the NASQAN network, Technical Report Water Supply Paper 2190, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 1-8.
- Sokal, R. R., Rohlf, F. J., 1995, *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*, W.H., Freeman & Co., New York, NY.
- Song, E. S., Jeon, S. M., Park, D. J., Shin, Y. S., 2012, Long-term trend analysis of chlorophyll a and water quality in the Yeongsan river, *Korean J. Limnology*, 45(3), 302-313.
- Water Information System (WEIS), 2016, <http://water.nier.go.kr/>.
- U.S. Geo;ogical Survey (USGS), 2005, <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5275/>.
- Xu, Z. X., Xu, Z. X., Takeuahi, K., Ishidaira, H., 2003, Monotonic trend and step changes in Japaneseprecipitation, *Journal of Hydrology*, 279, 144-150.
- Yu, J. J., Shin, S. H., Yoon, Y. S., Song, J. K., 2010, Long-term water quality trend analysis with NTrend 1.0 program in Nakdong river, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 26(6), 895-902.