

기후변화에 따른 지류 하천의 시공간적 기온-수질 탄성도 영향 평가

박재범·갈병석[†]·김성민^{*}

(주)다온솔루션

*국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Spatio-temporal Evaluation of Air Temperature-Water Quality Elasticity in Tributary Streams According To Climate Change

Jaebeom Park·Byungseok Kal[†]·Seongmin Kim^{*}

Daon Solution co., Ltd.

^{*}Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received : 06 September 2021, Revised : 24 September 2021, Accepted : 24 September 2021)

요약

탄성도는 하나의 변수 변화에 따른 다른 변수의 변화되는 양상을 정량적인 수치로 해석하는 통계적 기법으로 상관성 분석 이상의 정보를 제공하여 기후변화 연구에 다양하게 활용하고 있다. 본 연구에서는 낙동강 주요 지류를 대상으로 기온과 수질 자료를 이용하여 탄성도를 산정하고 기온에 대한 수질의 민감도 분석을 수행하였다. 또한, T-Test 결과를 이용하여 탄성도에 대한 신뢰구간을 산정하고 탄성도의 유효성을 검토하였다. 탄성도의 강도는 여름 > 가을 > 봄 > 겨울 순으로 높은 강도를 나타내고 있으며 방향은 음과 양의 탄성도가 함께 있는 지역적 특성을 나타내고 있다. 월별 관측자료를 대상으로 계층적 군집 분석을 수행 후 5개 군집으로 분류하였으며 평행좌표 그래프를 이용하여 군집 별 특성을 시각적으로 분석하였다. 주요 지류의 경우 인구밀도가 상대적으로 높고 주변에 하수처리장, 소규모 축사, 농업 활동 등의 복잡한 영향 인자로 인해 기온 탄성도의 방향과 강도는 지역적 특성을 나타내고 있다. 특히, TP의 경우 기온변화에 따른 조류성장과 사멸로 발생하는 생태계의 영양물질 순환에 따라 큰 지역적 변동성을 나타내고 있다. 낙동강 주요 지류의 기온 탄성도는 약 이상이고 유의수준 5%에서 타당하므로 기온변화에 따른 수질 변동이 존재하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 지류, 수질 탄성도, 신뢰구간, 기후변화

Abstract

Elasticity is a statistical technique that interprets the changing pattern of another variable according to a change in one variable as a quantitative numerical value and provides more information than correlation analysis and is widely used in climate change research. In this study the elasticity was calculated and sensitivity analysis was performed using air temperature and water quality data of the major tributaries of the Nakdong River. In addition the confidence interval for the elasticity was calculated using the T-Test and the validity of the elasticity was examined. The strength of elasticity shows high strength in the order of summer>fall>spring>winter and the direction shows regional characteristics with both negative and positive elasticity. After performing hierarchical cluster analysis on monthly observation data they were classified into 5 clusters and the characteristics of each cluster were visually analyzed using a parallel coordinate graph. The direction and intensity of the air temperature elasticity show regional characteristics due to the relatively high population density and complex influencing factors such as sewage treatment plants, small-scale livestock houses and agricultural activities. In the case of TP it shows great regional variability according to the circulation of nutrients in the ecosystem caused by algae growth and death according to temperature changes. Since the air temperature elasticity of the major tributaries of the Nakdong River is over weak and is valid at the significance level of 5%, it was analyzed that there is a change in water quality according to the air temperature change.

Key words : Tributary, Water Quality Elasticity, Confidence Interval, Climate Change

[†]To whom correspondence should be addressed.

Daon Solution co., Ltd.
E-mail: kalbs9801@gmail.com

• Jaebeom Park Daon Solution co., Ltd. / Director (econeural@gmail.com)
• Byungseok Kal Daon Solution co., Ltd. / Director (kalbs9801@gmail.com)
• Seongmin Kim Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Researcher (frogsmin@korea.kr)

1. 서 론

홍수와 가뭄 등의 수자원 관련 기후변화 영향은 오랫동안 광범위하게 연구가 진행되어왔으나 하천 수질 관련 영향이 주목받기 시작한 것은 최근 일이다. 기후 변수 관련 인자 중 기온, 강우, 증발량, 극치 사상(홍수, 가뭄)은 수질에 영향을 미치는 중요한 요인이나 기후-수질 관련 영향과 기후요소에 대한 수질의 민감도에 관한 정보는 부족한 상태이다.

하천은 시간에 따라 변화하는 동적 시스템으로 변화하는 성질 중 수중의 건전성에 큰 영향을 미치는 요소가 수질이다. 도시화, 인구증가, 토지이용 변화 등의 인위적 변화와 기후패턴의 변화는 수질 변화에 큰 영향을 미치는 주요 요소이다. 특히, 기후변화에 따른 기온 증가로 수온이 변화하고 이 영향으로 수질과 수생생물의 서식환경이 변화하게 된다. 이런 이유로 기후변화로 인한 기온변화는 수문학자, 생태학자, 환경공학자 등의 하천 수질 관련 의사결정에 중요하게 고려해야 하는 문제로 대두되고 있다(Park et al., 2020).

일반적으로 수질의 기후 민감도는 장기간의 관측자료 또는 기후 시나리오를 수질 모델에 입력하여 해당 결과를 이용하여 평가한다. 대부분의 선형연구는 수질 모델을 기반으로 수행하였다. 국외에서는 최근 기후변화의 관심이 높아지면서 전지구 또는 지역 기후 모델 자료를 대상으로 SWAT 및 HSPF 등의 모델을 이용하여 기후변화에 따른 수자원 및 수질 영향 평가를 수행하고 있다(Zhang et al., 2011; Zhang et al., 2013; Yasin et al., 2014). 국내에서는 주로 SWAT 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 장기 수자원 및 수질을 평가하고 있다. Jang and Ahn(2012)은 SWAT 모델을 이용하여 미래 기후변화에 따른 낙동강 유역의 수문-수질 변화를 분석하였으며, 미래 기후변화로 인한 지표유출과 오염 부하 배출이 증가하여 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측하였다. Park et. al(2017)은 기후변화 시나리오가 용당댐 유역과 호 내의 유량과 수질 변화에 미치는 영향을 분석하는 방법론을 수립하기 위해 SWAT 모델과 CE-QUAL-W2 모델을 차례로 사용하였다. 기후변화에 의한 장래의 유량 및 수질 변화는 지역적, 시기적 특성을 고려하여 분석하는 것이 바람직하며, 갈수 및 홍수에 의한 시기별, 지역별 유량 및 수질 관리대책이 필요한 것으로 분석하였다. Kim et al.(2018)은 새만금 유역 내 만경강 상류 소유역을 대상으로 시나리오 재현성이 높은 10개 GCM 산출물을 SWAT 모형의 입력자료로 활용하여 모형의 적합성을 평가하고 기후변화에 따른 수문-수질 영향 평가를 수행하였다. Woo et al.(2020)은 극한 기후변화 시나리오와 유역 간 물 이동 변화를 고려하여 만경강 유역의 미래 수문 및 수질평가를 수행하였으며, 유출량 감소와 부하량 증가로 인한 수질 악화를 개선하기 위해서는 유역 간 물 이동이 일정 수준으로 지속되어야 할 것으로 판단하였다. 수질 모델을 이용한 연구는 수질 변수에 대한 기후요소의

영향을 이해하는 데 도움이 되지만 수중 생태계의 다양성으로 인해 단일 하천 또는 지역적 규모의 유역에 관한 연구로 제한되는 문제점이 있다. 이와 같은 이유로 다수 하천의 기후요소와 수질 변수 사이의 기본적인 해석을 위해서는 통계학적 기법이 더 선호된다.

통계적 기법은 기후요소와 수질 변수를 2개의 무작위 그룹으로 고려하여 의존관계를 분석한다. 선형 또는 비선형 회귀식을 이용하여 하천 수질과 기온 사이의 특성을 분석할 수 있다. 이런 통계기법은 대규모 하천의 기본적인 해석을 위한 빠르고 쉬운 방법을 제공하지만, 수질과 기후요소에 대한 대규모 자료가 필요하다. 탄성도(Elasticity)는 수문, 수질, 기상 변수를 대상으로 하나의 변수 변화에 따른 다른 변수의 변화되는 양상을 정량적인 수치로 해석하는 통계적 기법으로 기후변화 연구에 활용되고 있다. 수질 변수의 기온 관련 민감도는 탄성도로 표현할 수 있으며 물리적인 의미가 있다. 탄성도가 약 0의 값을 가지면 기후는 수질에 영향을 미치지 않으며 ± 1 의 값을 가지면 높은 민감도가 있다(Jiang et al., 2014). Shon et al.(2010, 2011)은 목표 수질 고시지점을 대상으로 기후변화에 따른 낙동강 유역의 기온 및 수질의 경향성 및 특성을 탄성도를 이용하여 분석하였다. Park et al.(2020)은 신뢰구간 추정과 가설검증이 가능한 비모수 기반의 탄성도 해석기법을 개발하여 낙동강 주요 지류를 대상으로 기온-수온 탄성도를 분석하였다. 낙동강 주요 지류의 수온 탄성도는 약 이상이고 유의수준 5%에서 타당하므로 기후변화에 따른 기온-수온 변동성이 큰 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 낙동강수계 중점관리 34개 지점을 대상으로 하천 수질 변수와 기후요소에 대한 민감도를 수질 변수에 대한 개별 탄성도를 기준으로 분석하였다. 수질의 기온 탄성도에 대한 유의수준에 따른 적합도와 신뢰구간을 산정하고 탄성도를 등급화하여 시공간적인 유의성과 크기를 분석하였다. 이를 통하여 탄성도를 이용한 지류의 수질 관리를 위한 방법론을 개발하였으며 낙동강수계 34개 중점관리 지점에 대한 기온변화에 따른 수질 탄성도의 지역적 차이를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 자료

본 연구에서는 낙동강물환경연구소에서 하천 모니터링을 수행하고 있는 34개 중점관리지점을 대상으로 수질의 기온 탄성도를 산정하고 시공간적 통계 분석을 수행하였다. 중점관리지점의 관측자료는 월(monthly) 기온, 수질 자료를 사용하였으며 관측개시일로부터 10년(2011~2020년) 자료를 대상으로 하였다. 중점관리지점의 기온 자료는 구미, 창원, 김해 등 8개 기상청 종관기상관측소의 관측일 자료를 이용하였으며 최근린 거리를 기준으로 선정하였다. 낙동강수계 중점관리지점의 현황은 Fig. 1과 같다.

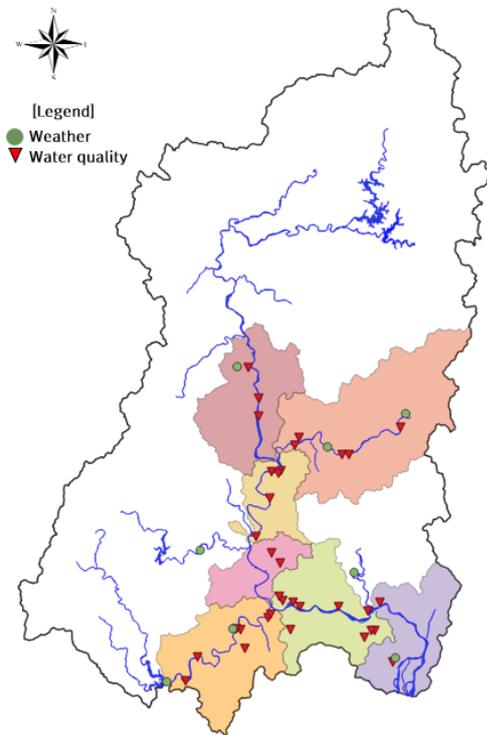


Fig. 1. The study area and location of monitoring sites in Nakdong river

2.2 분석 방법

탄성도(Elasticity)는 경제학에서 시작한 용어로 반응의 척도로 많은 분야에서 사용하고 있다. 자료의 단위에 무관하고 단순함으로 많은 통계적 분석에 이용하고 있다. 기후 변화 관련 연구에서는 수문, 수질, 기상 변수를 대상으로 하나의 변수 변화에 따른 다른 변수의 변화되는 양상을 정량적인 수치로 해석하는 통계적 기법으로 기후변화 연구에 활용되고 있다. 탄성도 산정을 위한 주요 어려움은 수문모형을 이용하거나 수학적 공식을 적용하는 데 있으며 이를 해결하기 위해 Sankarasubramanian et al(2001)은 기후 변수의 평균을 이용하는 Eqn. 2와 같은 해석기법을 도입하였으며 추가적인 연구를 통해 Eqn. 3과 같은 비모수적 통계치를 제안하였다.

수문학에서 널리 알려진 유량의 강우 탄성도($\epsilon_p(P, Q)$)는 강우(P) 변화률에 대한 유량(Q) 변화률로 Eqn. 1과 같이 정의한다.

$$\epsilon_p(P, Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} \tag{1}$$

여기서, $\epsilon_p(P, Q)$ 는 무작위 변수로 P 와 Q 에 의존한다. Eqn. 1은 다음과 같은 형태로 변경할 수 있다(Sankarasubramanian et al., 2001).

$$\epsilon_p(\mu_p, \mu_Q) = \frac{dQ}{dP} \Big|_{P=\mu_p} \frac{\mu_p}{\mu_Q} \tag{2}$$

$$\epsilon_p(P, Q) = median \left(\frac{Q_t - \overline{Q}}{P_t - \overline{P}} \frac{\overline{P}}{\overline{Q}} \right) \tag{3}$$

본 연구에서는 이와 같은 관계를 기준으로 수질 변수의 기온 탄성도를 Eqn. 4와 같이 정의하였다.

$$\epsilon_T = median \left(\frac{WQ_t - \overline{WQ}}{T_t - \overline{T}} \frac{\overline{T}}{\overline{WQ}} \right) \tag{4}$$

여기서, \overline{WQ} , \overline{T} 는 수질, 기온 관련 월 자료의 평균, WQ_t , T_t 는 시간 t 에서의 수질, 기온을 의미한다.

중간값(median)을 이용한 수질의 수온 탄성도의 이점은 극치 기후 사상에서 발생하는 이상치(outlier)의 영향을 최소화할 수 있다는 데 있다. 하지만, 중간값을 이용한 탄성도는 신뢰구간에 대한 추정이 불가능한 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Park et. al(2020)은 OLS(Ordinary Least Square)개념을 이용하여 탄성도를 산정하고 t 검정을 이용하여 유의성을 검증하고 추정할 수는 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 환경변수의 극치 분포가 수중 생태계에 큰 영향을 줄 수 있지만, 중간값을 이용하여 탄성도를 산정하고 기온과 수질의 일반적인 관계 파악에 집중하였다. 또한, 탄성도를 4등급으로 분류하여 신뢰도와 강도를 평가하였다. 탄성도의 신뢰도는 유의수준을 1%, 5%, 10%를 기준으로 1% 이하는 1등급, 1~5%는 2등급, 5~10%는 3등급, 10% 이상은 4등급으로 구분하여 등급화하였다(Park et.al, 2020). 탄성도의 강도는 Jiang et al.(2014)이 제안한 수질에 대한 기준을 준용하여 1, 0.5, 0.1 기준으로 1 이상 4등급(완전, Unit elastic), 0.5~1.0 3등급(강, Strong elastic), 0.1~0.5 2등급(약, Relatively elastic), 0.1이하 1등급(비탄성, Inelastic)으로 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공간적 변동성 평가

관측 지점에 대한 수질 변수의 기온 탄성도 산정결과는 Table 1과 같다. 기온 탄성도 결과는 BOD $-0.21(-0.84 \sim 0.44)$, TN $-0.38(-1.0 \sim 0.01)$, TP $0.17(-0.59 \sim 0.85)$ 로 분석되었다. Fig 2의 신뢰구간 분포에서 알 수 있는 것과 같이 수질의 기온 탄성도는 유의수준 5% 내에서 유의한 것으로 분석되었다.

기온 탄성도는 Fig. 3 및 Fig. 4과 같은 공간 패턴을 나타내고 있다. $\epsilon_T(T, BOD)$ 은 칠원천, 초당천, 계성천 등의 지점을 제외하고 음의 방향을 나타내며, 강도는 기세곡천을 제외한 33개 지점에서 3등급 이하의 탄성도를 나타내고 있다. $\epsilon_T(T, TN)$ 는 석교천1 지점을 제외하고 음의 방향을 나타내며, 강도는 현지천을 제외한 33개 지점에서 3등급 이하의 탄성도를 나타내고 있다. $\epsilon_T(T, TP)$ 는 본리천, 천내천, 대산천, 달서천 등의 지점을 제외하고 양의 방향을 나

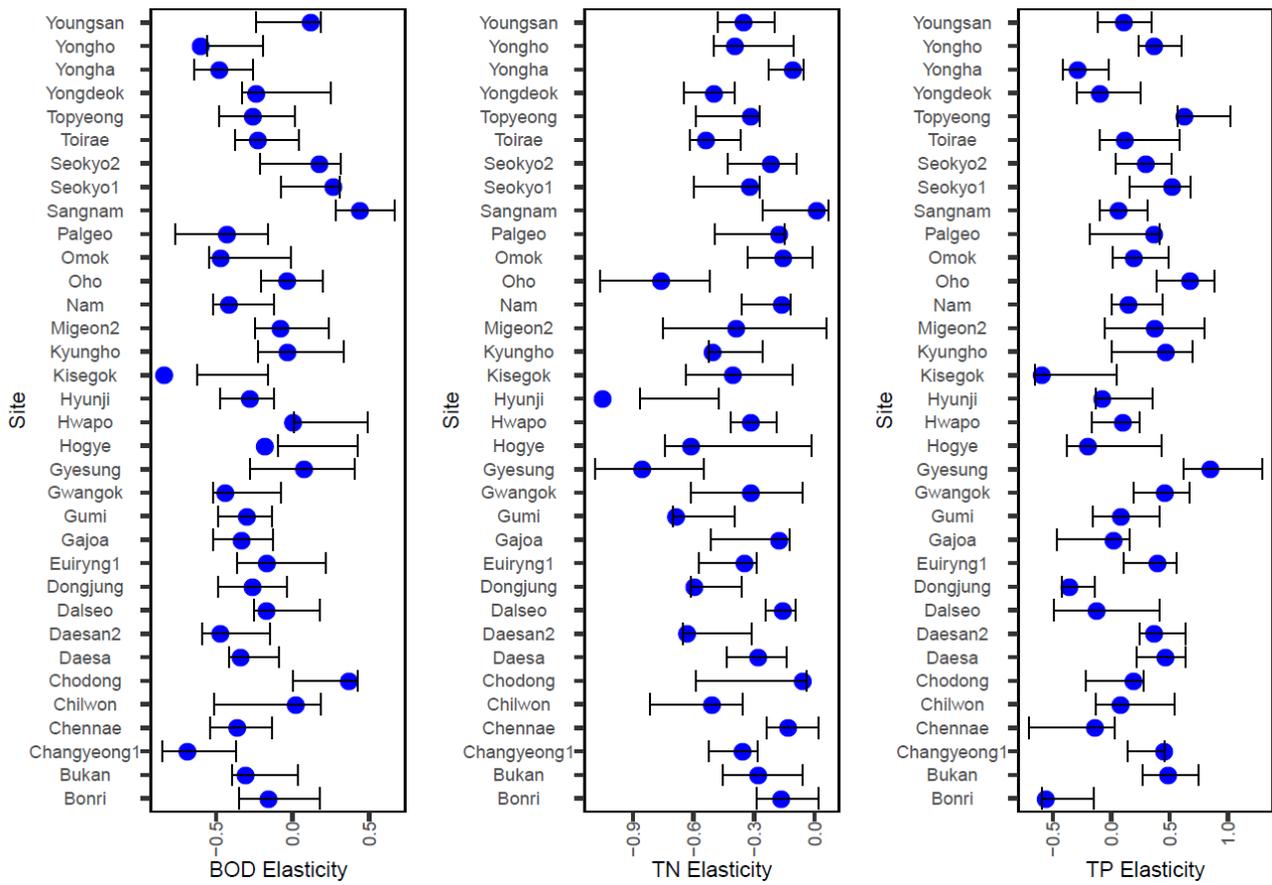


Fig. 2. 95% confidence interval analysis of monthly air temperature elasticity

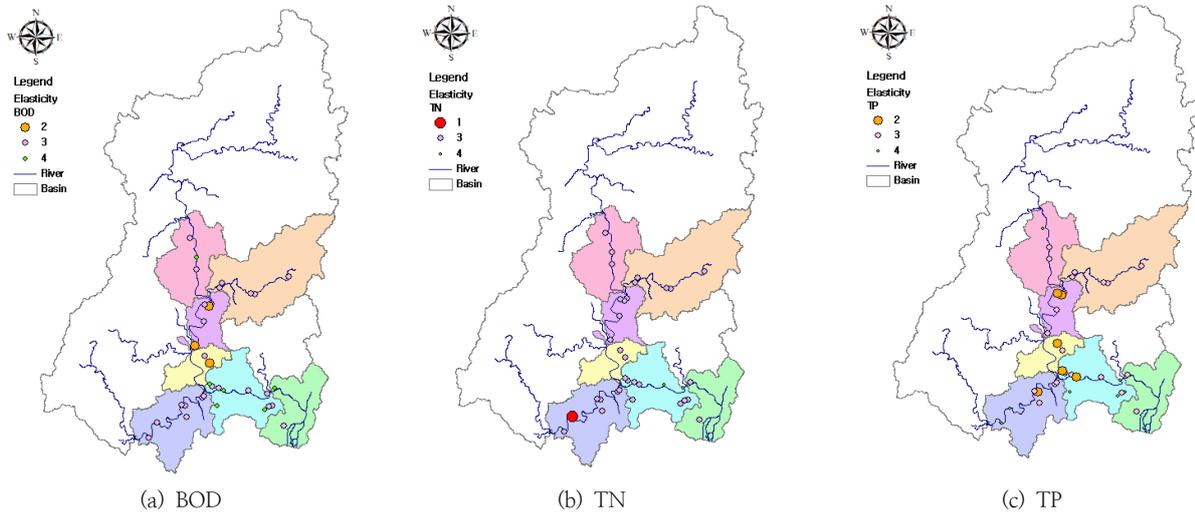


Fig. 3. Spatial pattern of air temperature elasticity for three main water quality parameters

타내며, 강도는 본리천, 계성천, 기세곡천, 오호천, 석교천1, 토평천의 6개 지점을 제외하고 3등급 이하의 탄성도를 나타내고 있다. 음의 탄성도를 나타는 BOD와 TN은 하천에서의 기온 상승에 따른 유기물의 분해, 질산화와 탈질화 등의 반응보다는 소규모 축사와 농업 활동 등의 외부 유입 부하량의 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 양의 탄성도

를 나타내는 TP는 기온이 증가함에 따라 하상에서의 인의 용출과 조류의 번식과 사멸에 따른 영향으로 탄성도가 증가하는 것으로 분석되었다.

주요 지류의 경우 인구밀도가 상대적으로 높고 주변에 수처리장, 소규모 축사, 농업 활동 등의 복잡한 영향 인자로 인해 기온 탄성도의 방향과 강도는 지역적 특성을 나타

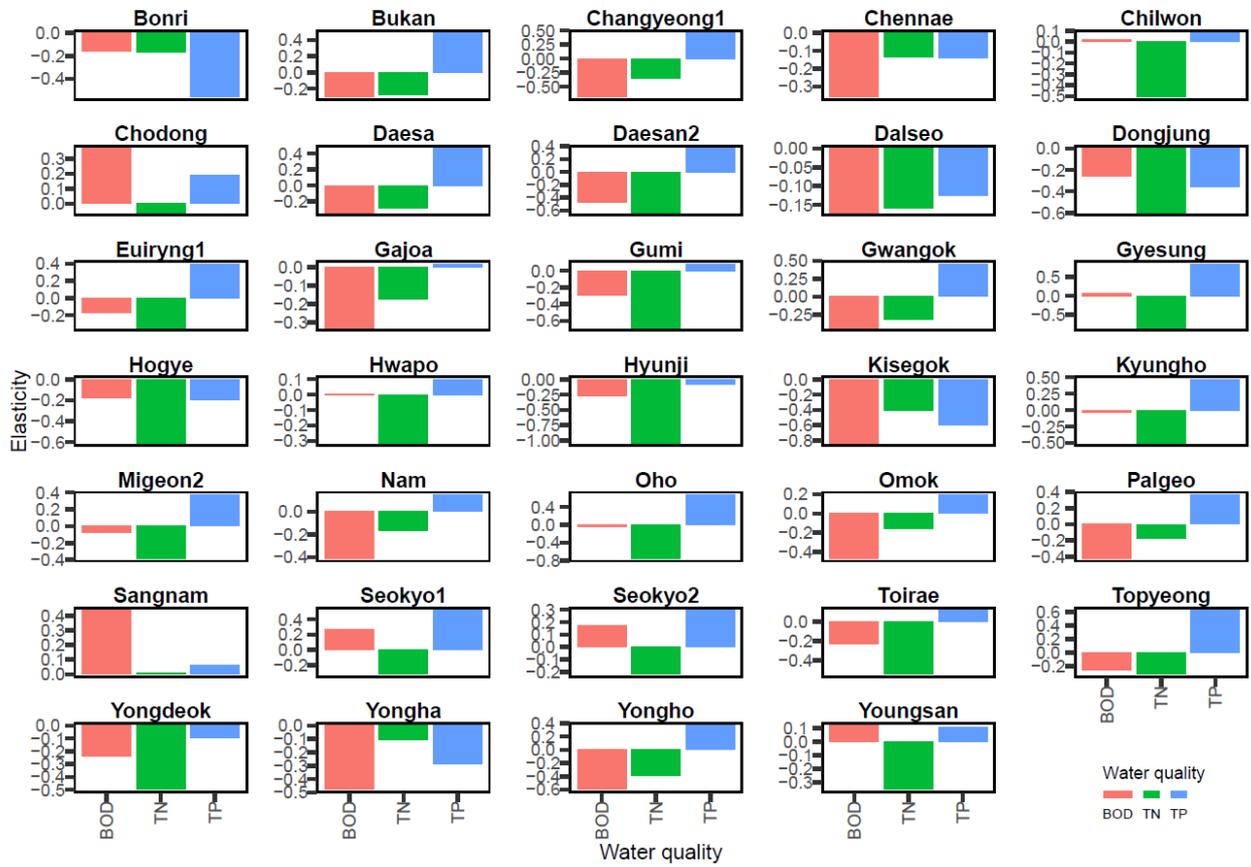


Fig. 4. Distribution of air temperature elasticity according to site

Table 1. Results of monthly air temperature elasticity analysis in each station

SITE	$\varepsilon_T(T, BOD)$				$\varepsilon_T(T, TN)$				$\varepsilon_T(T, TP)$			
	value		grade		value		grade		value		grade	
	elast	pval	elast*	pval**	elast	pval	elast*	pval**	elast	pval	elast*	pval**
Bonri	-0.16	0.524	3	4	-0.17	0.085	3	3	-0.56	0.001	2	1
Bukan	-0.31	0.095	3	3	-0.28	0.011	3	2	0.49	0.000	3	1
Changyeong1	-0.69	0.000	2	1	-0.36	0.000	3	1	0.45	0.000	3	1
Chennai	-0.36	0.001	3	1	-0.13	0.088	3	3	-0.14	0.070	3	3
Chilwon	0.02	0.358	4	4	-0.51	0.000	3	1	0.08	0.229	4	4
Chodong	0.37	0.044	3	2	-0.06	0.024	4	2	0.19	0.806	3	4
Daesa	-0.34	0.003	3	1	-0.28	0.000	3	1	0.46	0.000	3	1
Daesan2	-0.47	0.001	3	1	-0.63	0.000	3	1	0.37	0.000	3	1
Dalseo	-0.17	0.726	3	4	-0.16	0.000	3	1	-0.13	0.875	3	4
Dongjung	-0.26	0.024	3	2	-0.60	0.000	3	1	-0.36	0.000	3	1
Euiryng1	-0.17	0.630	3	4	-0.35	0.000	3	1	0.40	0.004	3	1
Gajoa	-0.33	0.001	3	1	-0.18	0.002	3	1	0.02	0.323	4	4
Gumi	-0.30	0.001	3	1	-0.69	0.000	3	1	0.08	0.383	4	4
Gwangok	-0.44	0.010	3	1	-0.32	0.017	3	2	0.46	0.001	3	1
Gyesung	0.07	0.712	4	4	-0.85	0.000	3	1	0.85	0.000	2	1
Hogye	-0.18	0.210	3	4	-0.61	0.042	3	2	-0.20	0.895	3	4
Hwapo	0.00	0.045	4	2	-0.32	0.000	3	1	0.10	0.717	4	4
Hyunji	-0.28	0.001	3	1	-1.05	0.000	1	1	-0.08	0.358	4	4
Kisegok	-0.84	0.001	2	1	-0.40	0.006	3	1	-0.59	0.089	2	3
Kyungho	-0.03	0.699	4	4	-0.51	0.000	3	1	0.47	0.049	3	2
Migeon2	-0.08	0.961	4	4	-0.39	0.091	3	3	0.37	0.087	3	3
Nam	-0.41	0.002	3	1	-0.16	0.000	3	1	0.15	0.049	3	2

Table 1. Results of monthly air temperature elasticity analysis in each station (continue)

SITE	$\varepsilon_T(T, BOD)$				$\varepsilon_T(T, TN)$				$\varepsilon_T(T, TP)$			
	value		grade		value		grade		value		grade	
	elast	pval	elast*	pval**	elast	pval	elast*	pval**	elast	pval	elast*	pval**
Oho	-0.03	0.961	4	4	-0.76	0.000	3	1	0.68	0.000	2	1
Omok	-0.47	0.041	3	2	-0.16	0.035	3	2	0.19	0.043	3	2
Palgeo	-0.43	0.003	3	1	-0.18	0.000	3	1	0.37	0.440	3	4
Sangnam	0.44	0.000	3	1	0.01	0.249	4	4	0.06	0.315	4	4
Seokyo1	0.27	0.231	3	4	-0.32	0.000	3	1	0.52	0.002	2	1
Seokyo2	0.17	0.706	3	4	-0.22	0.003	3	1	0.30	0.022	3	2
Toirae	-0.23	0.111	3	4	-0.54	0.000	3	1	0.12	0.156	3	4
Topyeong	-0.26	0.062	3	3	-0.32	0.000	3	1	0.63	0.000	2	1
Yongdeok	-0.24	0.785	3	4	-0.50	0.000	3	1	-0.10	0.882	4	4
Yongha	-0.48	0.000	3	1	-0.11	0.001	3	1	-0.29	0.028	3	2
Yongho	-0.60	0.000	2	1	-0.40	0.003	3	1	0.37	0.000	3	1
Youngsan	0.12	0.820	3	4	-0.35	0.000	3	1	0.11	0.316	3	4

* Elasticity : 4($e > 1$), 3($0.5 \leq e < 1$), 3($0.1 \leq e < 0.5$), 1($e \leq 0.1$), ** Significance : 1($p < 1\%$), 2($5\% \leq p < 1\%$), 3($5\% \leq p < 10\%$), 4($p \geq 10\%$),

내고 있다. 근린 관측소는 유사한 탄성도를 나타내고 있으며, 계성천, 기세곡천, 토평천 등이 높은 기온 탄성도를 나타내고 있다. 다른 수질에 비해 TP는 기온변화에 따른 조류성장과 사멸에 따른 생태계의 영양물질 순환에 따라 큰 지역적 변동성을 나타내고 있다.

3.2 계절별 변동성 평가

계절별 기온과 수질을 이용하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 기온 탄성도 및 유의수준을 Table 2 ~ Table 3과 같이 산정하였다. 봄의 탄성도 강도는 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 1단계 12개, 2단계 19개, 3단계 3개, $\varepsilon_T(T, TN)$ 1단계 5개, 2단계 18개, 3단계 9개, 4단계 2개, $\varepsilon_T(T, TP)$ 1단계 6개, 2단계 23개, 3단계 5개를 나타내고 있다. 대부분 지점의 수질 탄성도가 2단계(약) 이상의 탄성도를 나타내고 있으며 BOD 호계천, 기세곡천, 용하천, TN 호계천, 미전천, TP 본리천, 칠원천, 가좌천, 관곡천, 상남천 등의 지점이 높은 탄성도를 나타내고 있다. 탄성도의 방향은 BOD 음의 방향(67.6%), TN 음의 방향(79.4%), TP 복합방향(음 47.1%, 양 52.9%)을 나타내고 있다. 95% 신뢰구간에서 BOD 17.5%, TN 50.1%, TP 73.5%의 유의성을 나타내고 있다. BOD 기세곡천, 용호천, TN 동전천, 의령천, TP 기세곡천, 상남천 등의 지점이 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

여름의 탄성도 강도는 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 1단계 3개, 2단계 8개, 3단계 5개, 4단계 18개, $\varepsilon_T(T, TN)$ 2단계 5개, 3단계 11개, 4단계 18개, $\varepsilon_T(T, TP)$ 1단계 1개, 2단계 11개, 3단계 8개, 4단계 14개를 나타내고 있다. 50% 이상의 지점에서 수질 탄성도가 3단계(강) 이상의 탄성도를 나타내고 있으며 BOD 본리천, 창녕천, 초동천, TN 칠원천, 초동천, TP 칠원천, 달서천 등의 지점이 높은 탄성도를 나타내고 있다. 탄성도의 방향은 BOD 음의 방향(79.4%), TN 음의

방향(76.4%), TP 음의 방향(61.2%)을 나타내고 있다. 95% 신뢰구간에서 BOD 17.6%, TN 17.5%, TP 20.5%의 유의성을 나타내고 있다. BOD 대사천, 석교천, TN 초동천, 석교천, 용호천, TP 초동천 등의 지점이 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

가을의 탄성도 강도는 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 1단계 6개, 2단계 13개, 3단계 9개, 4단계 6개, $\varepsilon_T(T, TN)$ 1단계 8개, 2단계 13개, 3단계 8개, 4단계 5개, $\varepsilon_T(T, TP)$ 1단계 5개, 2단계 14개, 3단계 9개, 4단계 6개를 나타내고 있다. 대부분 지점의 수질 탄성도가 2단계(약) 이상의 탄성도를 나타내고 있으며 BOD 대상천, 가좌천, 관곡천, TN 현지천, 미전천, TP 북안천, 가좌천 등의 지점이 높은 탄성도를 나타내고 있다. 탄성도의 방향은 BOD 양의 방향(67.7%), TN 음의 방향(67.6%), TP 양의 방향(64.7%)을 나타내고 있다. 95% 신뢰구간에서 BOD 8.7%, TN 29.4%, TP 8.8%의 유의성을 나타내고 있다. BOD 관곡천, TN 달서천, 현지천, 오호천, TP 본리천, 북안천, 용하천 등의 지점이 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

겨울의 탄성도 강도는 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 1단계 11개, 2단계 21개, 3단계 2개, $\varepsilon_T(T, TN)$ 1단계 19개, 2단계 15개, $\varepsilon_T(T, TP)$ 1단계 8개, 2단계 21개, 3단계 5개를 나타내고 있다. 대부분 지점의 수질 탄성도가 2단계(약) 이하의 탄성도를 나타내고 있으며 BOD 계성천, 팔거천, TN 창녕천, 칠원천, TP 초동천, 계성천 등의 지점이 높은 탄성도를 나타내고 있다. 탄성도의 방향은 BOD 양의 방향(52.9%), TN 음의 방향(67.6%), TP 양의 방향(58.8%)을 나타내고 있다. 95% 신뢰구간에서 BOD 5.9%, TN 2.9%, TP 2.9%의 유의성을 나타내고 있다. BOD 상남천, 용호천, TN 퇴례천, TP 대산천 등의 지점이 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

Table 2. Results of seasonal air temperature elasticity analysis in each station

Site	Spring			Summer			Fall			Winter		
	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
Bonri	-0.13	-0.32	-0.69	-1.73	-0.79	-1.66	-0.06	-0.20	-0.80	-0.05	0.00	0.13
Bukan	0.00	-0.12	-0.34	-0.15	-0.64	1.04	-0.42	0.72	1.13	0.16	0.09	0.00
Changyeong1	-0.34	0.08	0.25	-2.89	-0.50	0.66	0.26	-0.43	0.61	-0.18	-0.29	0.26
Chennaе	0.00	-0.48	0.31	-0.07	-0.91	-0.32	-0.57	0.03	-0.39	0.00	0.00	0.02
Chilwon	0.25	-0.11	0.64	-0.28	-1.11	1.23	0.47	-0.69	0.14	0.13	-0.14	0.23
Chodong	0.09	-0.67	0.18	-1.99	-4.44	-0.86	0.83	0.06	0.11	-0.39	0.38	0.69
Daesa	0.09	-0.43	0.20	-1.89	-1.61	-0.23	-0.82	0.00	0.42	-0.10	-0.13	-0.03
Daesan2	-0.09	-0.78	0.20	-2.05	-1.18	-0.98	-1.15	0.03	0.72	-0.09	-0.07	0.12
Dalseo	0.01	-0.10	0.00	0.04	0.43	-3.61	-0.14	-0.21	-0.01	-0.12	0.00	-0.14
Dongjung	-0.24	-0.48	-0.42	-1.87	0.47	-0.53	0.35	-0.63	-0.30	-0.33	-0.13	-0.14
Euiryng1	0.31	-0.11	-0.03	-1.16	-0.90	-1.35	-0.60	-0.24	0.41	0.14	-0.01	0.12
Gajoa	-0.14	0.02	0.51	-0.61	-1.99	0.13	-1.27	0.14	-1.16	0.03	0.07	0.13
Gumi	-0.28	-0.67	0.02	-1.26	-1.00	0.47	0.23	-0.58	2.45	0.02	-0.09	-0.23
Gwangok	-0.19	0.26	0.57	-0.25	-2.27	-0.38	-1.01	-0.52	-0.46	-0.19	-0.30	-0.28
Gyesung	-0.09	-0.71	-0.05	0.67	-2.35	-1.69	-0.74	-0.46	0.20	0.52	0.37	0.67
Hogye	-0.62	-1.25	0.40	-0.30	-1.62	-1.47	-0.81	0.02	-0.66	0.21	0.05	0.17
Hwapo	-0.13	-0.41	0.31	-0.89	1.00	-2.58	-0.06	-0.29	-0.09	0.26	-0.07	0.43
Hyunji	-0.21	-0.76	-0.32	-1.06	1.88	0.82	-0.26	-1.99	0.22	-0.08	-0.06	0.01
Kisegok	-0.68	-0.38	-0.24	2.63	2.46	2.91	-0.77	-0.94	-1.11	0.03	-0.13	-0.17
Kyunggho	-0.36	-0.29	0.45	-1.16	0.38	0.59	0.35	-0.96	1.86	-0.11	-0.05	-0.16
Migeon2	-0.04	-1.07	-0.45	0.10	-1.42	-1.62	-0.65	1.35	0.06	-0.19	0.20	-0.62
Nam	-0.24	0.03	0.31	-0.78	1.11	-1.90	-0.99	-0.22	0.65	0.04	-0.02	0.10
Oho	-0.36	0.64	-0.12	0.34	-0.14	0.50	-0.08	-1.05	0.06	-0.16	0.42	0.17
Omok	-0.10	-0.90	0.06	-0.60	-2.00	-0.02	0.03	0.15	0.15	0.27	0.00	0.01
Palgeo	-0.46	0.18	0.25	-1.56	-1.07	-0.76	1.01	-0.04	0.89	-0.71	-0.30	-0.58
Sangnam	0.29	-0.44	-0.70	-1.62	-0.99	0.31	-0.21	0.09	0.56	0.37	-0.06	0.10
Seokyo1	0.46	-0.12	0.29	-1.61	-0.88	0.31	-0.16	0.10	0.81	0.18	-0.11	-0.30
Seokyo2	0.06	-0.35	0.32	-1.62	-1.80	-0.32	-0.28	0.51	0.45	0.30	-0.42	0.06
Toirae	-0.05	-0.32	-0.07	-2.94	-0.78	-3.19	0.03	-0.28	0.05	0.10	-0.14	0.30
Topyeong	0.00	-0.68	0.40	-1.34	-0.54	1.19	-1.34	-1.06	0.56	0.10	-0.07	0.13
Yongdeok	0.31	-0.34	-0.17	-1.41	0.43	-0.16	0.09	-0.46	-0.11	0.49	-0.08	-0.08
Yongha	-0.51	-0.06	-0.47	-0.15	-0.79	-1.85	-0.47	-0.09	-1.13	-0.06	-0.05	-0.16
Yonggho	-0.45	0.12	-0.16	0.01	-1.60	0.36	-0.48	-1.16	-0.42	-0.25	0.06	-0.06
Youngsan	-0.07	-0.52	-0.32	0.33	-0.73	-0.19	1.06	-0.29	0.27	-0.39	0.38	0.82

Table 3. Results of seasonal elasticity confidence level analysis in each station

Site	Spring			Summer			Fall			Winter		
	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
Bonri	4	2	2	2	4	4	4	4	2	4	4	4
Bukan	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	3
Changyeong1	3	2	3	4	4	4	4	3	3	4	3	4
Chennaе	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Chilwon	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4
Chodong	4	4	4	2	1	2	4	4	4	4	4	4
Daesa	4	4	4	1	4	4	3	4	4	4	3	4
Daesan2	4	2	4	1	4	4	2	4	4	4	4	1
Dalseo	4	2	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4
Dongjung	4	1	3	3	4	4	4	2	4	4	3	3
Euiryng1	4	1	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4
Gajoa	4	4	4	4	2	4	4	4	3	4	4	4
Gumi	4	2	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Gwangok	4	4	4	4	2	4	1	3	4	4	4	4
Gyesung	4	3	4	4	4	3	4	2	3	4	4	4
Hogye	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
Hwapo	4	1	4	4	4	3	4	2	4	4	4	4
Hyunji	4	4	4	2	4	4	4	1	4	4	4	4

Table 3. Results of seasonal elasticity confidence level analysis in each station (continue)

Site	Spring			Summer			Fall			Winter		
	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP	BOD	TN	TP
Kisegok	2	2	2	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Kyungho	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	3	4
Migeon2	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Nam	2	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4
Oho	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4
Omok	4	2	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
Palgeo	3	3	4	4	3	3	4	4	4	3	1	3
Sangnam	2	1	2	4	4	4	4	3	3	2	4	4
Seokyo1	4	2	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4
Seokyo2	4	2	4	3	1	3	4	4	4	4	4	4
Toirae	4	2	4	4	4	4	4	4	4	3	2	4
Topyeong	4	2	2	4	4	3	3	1	4	4	4	4
Yongdeok	4	1	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Yongha	4	4	2	4	4	4	4	4	2	4	3	4
Yongho	2	4	4	4	1	4	4	1	4	2	4	4
Youngsan	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3

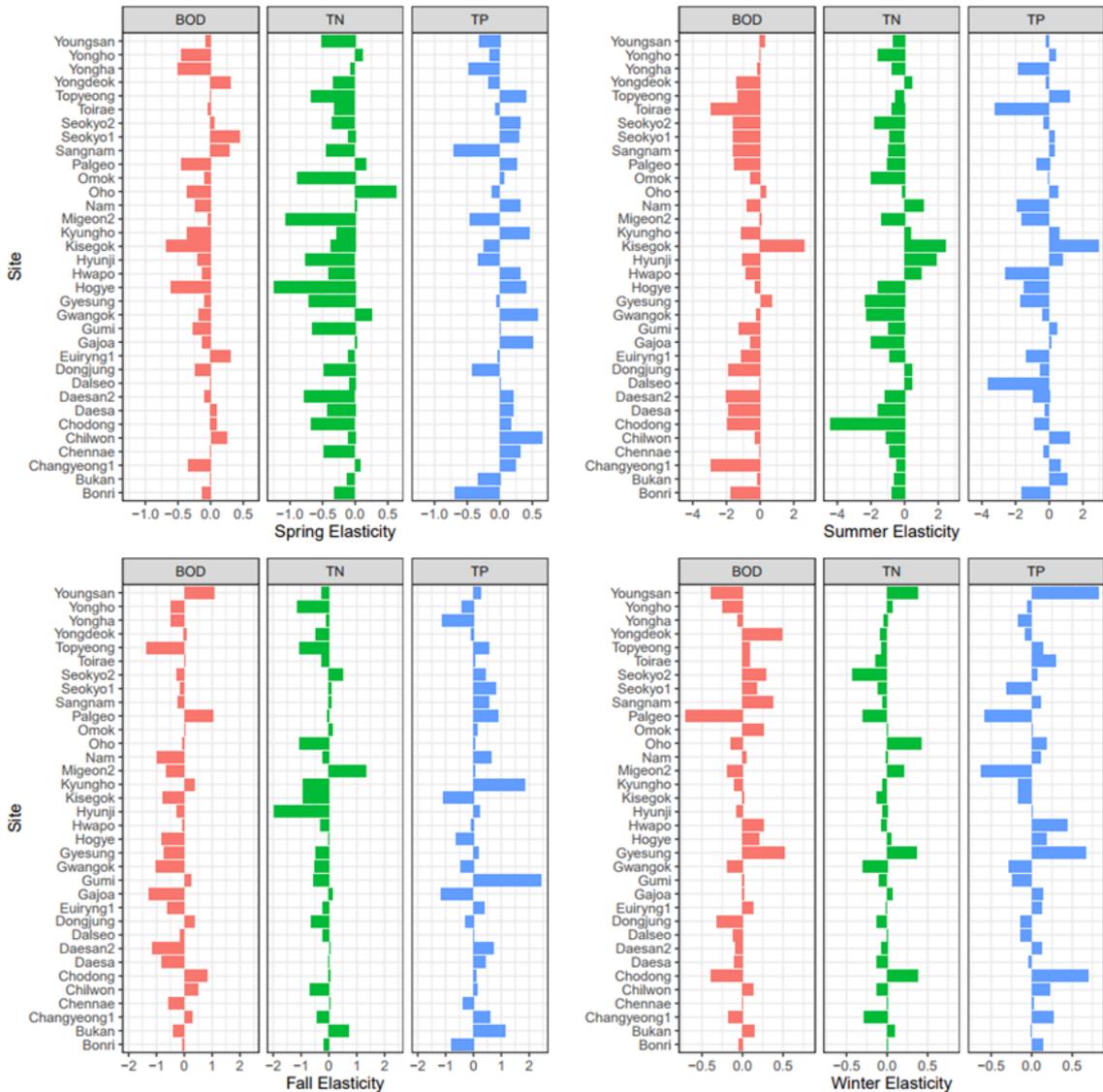


Fig. 5. Seasonal distribution of air temperature elasticity according to site and water quality

Fig. 5의 지점에 따른 계절별 탄성도 분포에서 알 수 있는 것과 같이 탄성도의 강도는 여름 > 가을 > 봄 > 겨울 순으로 높은 강도를 나타내고 있으며 방향은 음과 양의 탄성도가 함께 있는 지역적 특성을 나타내고 있다. 여름과 가을의 경우 상대적으로 변동성이 크고 봄과 겨울의 경우 일정한 기온의 전형적인 계절적 특성을 반영하고 있다. 계절별 자료의 경우 30개 이내의 작은 자료 개수로 인해 전체 자료를 대상으로 하는 지역별 분석에 비해 낮은 유의수준을 나타내고 있다. 유의수준 5% 이내의 신뢰도를 나타내는 봄의 TN, TP 탄성도를 제외하고 대부분의 탄성도가 유의수준 10%를 초과하는 것으로 분석되었다. 상대적으로 유량이 풍부하고 기온의 변동성 큰 봄~가을의 신뢰도는 높고, 하천이 건천화되어 있으며 기온의 변동성이 작은 겨울의

신뢰도는 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 계절별 자료의 경우 봄~가을은 수질 자료의 신뢰성을 미치는 이상치 자료가 적으며 관측 기간의 수질이 기온의 변화를 잘 반영하나 겨울은 이상치 자료가 많으며 수질의 변화를 기온을 포함한 복합적인 영향을 고려해야 하는 것으로 분석되었다.

3.3 탄성도 군집분석

지역별 탄성도의 유사성을 파악하기 위하여 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis)을 수행하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. 군집의 최적 개수는 군집 내 중심 측도와 개체 간 거리 제곱의 총합을 이용하여 최적 군집의 개수를 산정하는 팔꿈치 방법(Elbow method)과 수질 변수의 탄성도를 고려하여 Height 6을 기준으로 5개 군집으로

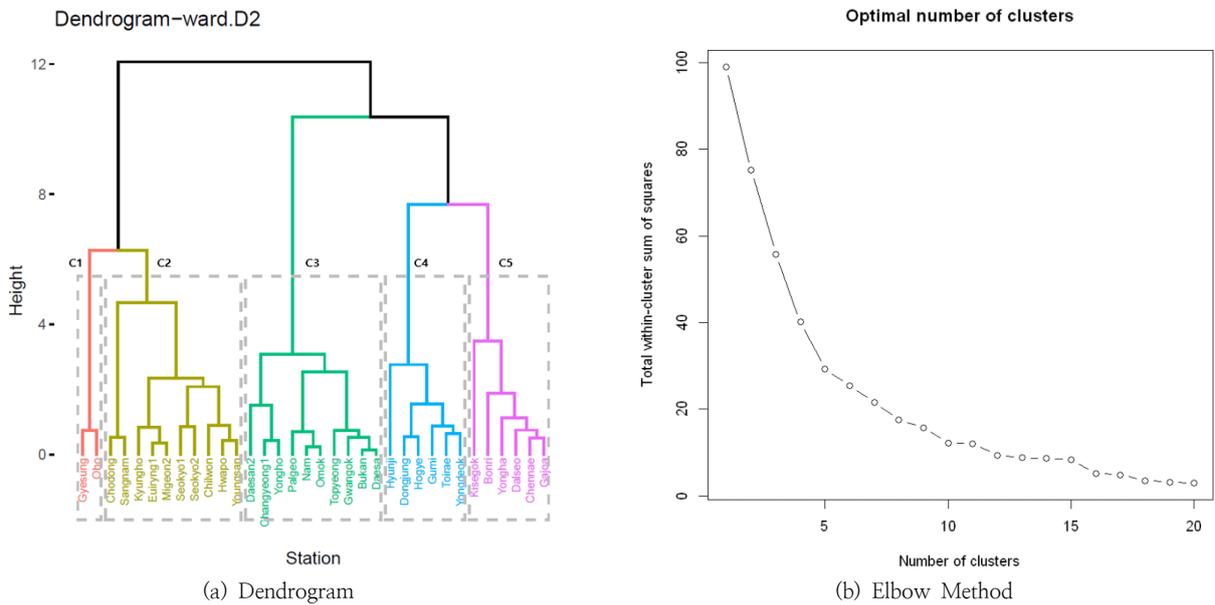


Fig. 6. Selection optimal number of clusters considering air temperature elasticity

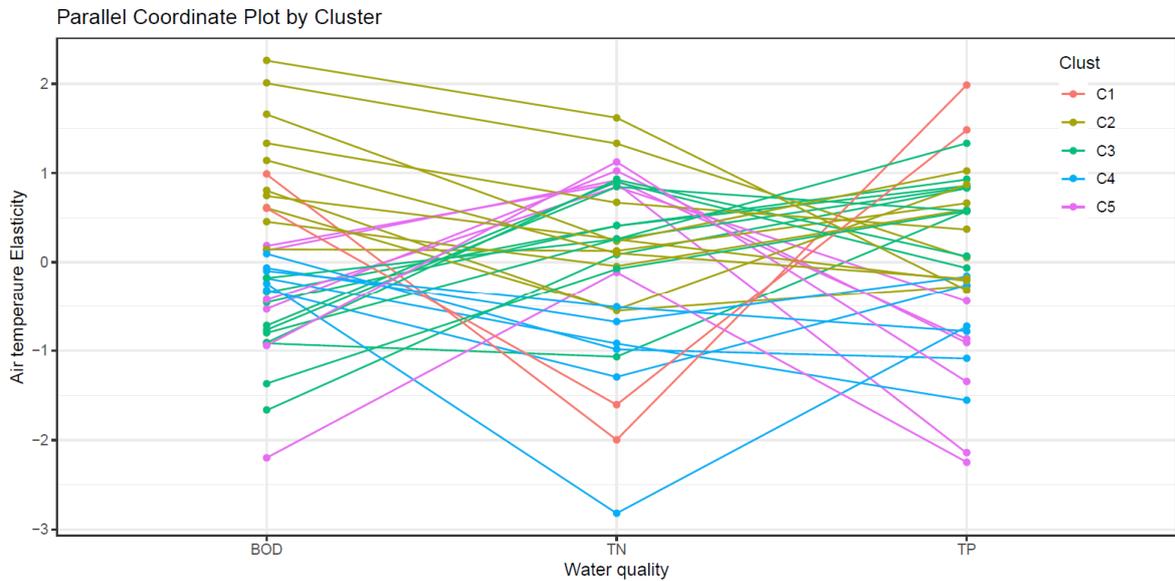


Fig. 7. Air temperature elasticity parallel coordinate plot by cluster

분류하였다.

Fig. 7과 같은 군집별 평행좌표 그래프를 이용하여 군집별 특성을 분석하였다. 군집 C1은 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 비탄성, $\varepsilon_T(T, TN)$ 음 강탄성, $\varepsilon_T(T, TP)$ 양 강탄성을 나타내는 군집으로 계성천, 오호천 등의 지점이 해당한다. 군집 C2는 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 양 약탄성, $\varepsilon_T(T, TN)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TP)$ 양 약탄성을 나타내는 군집으로 칠원천, 초동천, 의령천 등 10개 지점이 해당한다. 군집 C3은 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TN)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TP)$ 음 약탄성을 나타내는 군집으로 북안천, 창녕천, 대사천 등 10개 지점이 해당한다. 군집 C4은 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TN)$ 음 강탄성, $\varepsilon_T(T, TP)$ 비탄성을 나타내는 군집으로 동정천, 구미천, 호계천 등 6개 지점이 해당한다. 군집 C5은 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TN)$ 음 약탄성, $\varepsilon_T(T, TP)$ 음 약탄성을 나타내는 군집으로 본리천, 천내, 달서천 등 6개 지점이 해당한다.

최근 수질오염총량제, 오염 지류 개선사업 등으로 인해 BOD, TN의 수질은 전반적으로 개선되고 있으나, TP의 경우 대부분의 군집에서 양의 약탄성도 이상을 나타내고 있다. 특히, 군집 C1과 C3에 해당하는 계성천, 오호천, 북안천, 오목천, 팔거천 등의 유역은 소규모 축사와 농업 활동의 영향으로 발생하는 방류수의 추가로 수질에 영향을 미치는 지역으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기온과 수질 변수 사이의 관계를 분석하기 위해서 낙동강수계 34개 중점관리 지점에 대한 탄성도 기법을 적용하였다. 기온 탄성도는 기온과 수질 사이의 관계를 해석하는 우수한 기법으로 상관성 분석 이상의 정보를 제공하고 있다. 이를 기준으로 수질 변수에 대한 민감도 유형, 강도를 분석하였다. 또한, T-Test 결과를 이용하여 탄성도에 대한 신뢰구간을 산정하고 탄성도의 유효성을 검토하였다.

본연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 낙동강수계 지류 지천의 경우 대부분 지점에서 $\varepsilon_T(T, BOD)$ 와 $\varepsilon_T(T, TN)$ 은 음의 탄성도, $\varepsilon_T(T, TP)$ 는 양의 탄성도를 나타내고 있다. 또한, 유의성 분석결과는 유의수준 5% 내에서 유의한 것으로 분석되었다. 음의 탄성도를 나타내는 BOD와 TN은 하천에서의 기온 상승에 따른 유기물의 분해, 질산화와 탈질화 등의 반응보다는 소규모 축사와 농업 활동 등의 외부 유입 부하량의 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 양의 탄성도를 나타내는 TP는 기온이 증가함에 따라 하상에서의 인의 용출과 조류의 번식과 사멸에 따른 영향으로 탄성도가 증가하는 것으로 분석되었다.

(2) 주요 지류의 경우 인구밀도가 상대적으로 높고 주변에 하수처리장, 소규모 축사, 농업 활동 등의 복잡한 영향인자로 인해 기온 탄성도의 방향과 강도는 지역적 특성을

나타내고 있다. 근린 관측소는 유사한 탄성도를 나타내고 있다. 특히, TP의 경우 기온변화에 따른 조류성장과 사멸로 인한 생태계의 영양물질 순환에 따라 큰 지역적 변동성을 나타내고 있다.

(3) 계절별 탄성도의 강도는 여름 > 가을 > 봄 > 겨울 순으로 높은 강도를 나타내고 있으며 방향은 음과 양의 탄성도가 함께 있는 지역적 특성을 나타내고 있다. 계절별 자료의 경우 30개 이내의 작은 자료 개수로 인해 전체 자료를 대상으로 하는 지역별 분석에 비해 낮은 유의수준을 나타내고 있다.

(4) 기온 탄성도를 기준으로 계층적 군집 분석(Hierarchical cluster analysis)을 수행하여 5개 군집으로 분류하였으며 평행좌표 그래프를 이용하여 군집 별 특성을 시각적으로 분석하였다. $\varepsilon_T(T, BOD)$ 의 영향은 적으나 $\varepsilon_T(T, TN)$ 와 $\varepsilon_T(T, TP)$ 의 영향은 큰 것으로 분석되었다.

(5) 따라서 탄성도 강도와 유의성 검증을 고려하여 볼 때 오염도가 높은 중점관리 지류의 TP는 기온변화에 따른 변동이 클 것으로 판단되며 계절 변화를 고려한 수질 관리대책이 필요할 것으로 분석되었다. 특히, 합천창녕보 상류에 있는 계성천, 오호천의 경우 기온과 함께 복합적인 요인의 영향으로 높은 양의 탄성도를 나타내므로 해당 하천에 대한 정밀 모니터링을 통한 원인분석과 이에 따른 수질 개선에 대한 대책이 우선 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 낙동강수계관리위원회에서 시행한 “낙동강수계 지류-지천 장기 모니터링 및 목표수질 달성도 평가”의 결과입니다.

References

- Jang JH, Ahn JH(2012), Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic and Water Quality Components in Nakdong River Basin, J. Korea Water Resour. Assoc, 45(11), pp.1121-1130[Koan Literature] <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.11.1121>
- Jiang, J., Sharma, A., Sivakumar, B. & Wang, P(2014), A global assessment of climate-water quality relationships in large rivers: An elasticity perspective. Sci Total Environ 468-469, pp.877-891, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.002>
- Kim DH, Hwang SW, Jang TI, So HC(2018), Assessing Climate Change Impacts on Hydrology and Water Quality using SWAT Model in the Mankyung Watershed, J of the Korean Society of Agricultural Engineers, 60(6), pp.83-96[Koan Literature] <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.6.083>
- Park JB, Kal BS, Kim SM(2020), Analysis of Air-water

- Temperature Elasticity Taking into Account the Confidence Interval in Major Tributary of Nakdong River, *J of Wetlands Research*, 22(3), pp.178-186 [Koean Literature] <https://doi.org/10.17663/JWR.2020.22.3.178>
- Park JT, Jang YJ, SEO DI(2017), Water quality prediction of inflow of the Yongdam Dam basin and its reservoir using SWAT and CE-QUAL-W2 models in series to climate change scenarios, *J. Korea Water Resour. Assoc*, 50(10), pp.703-714[Koean Literature] <https://doi.org/110.3741/JKWRA.2017.50.10.703>
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R.M, Limbrunner, J.F. (2001), Climate elasticity of Streamflow in the United States, *Water Resource.Rs*, 37(6), pp.1771-1781 <http://dx.doi.org/10.1029/2000wr900330>
- Shon TS, Lim YG, Baek MK, Shin HS(2010), Analysis for Air Temperature Trend and Elasticity of Air-water Temperature according to Climate Changes in Nakdong River Basin, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 26(5), pp.822-833.[Korean Literature] <http://www.riss.kr/link?id=A82400369>
- Shon TS, LEE KY, Im TH, Shin HS(2011), Elasticity Analyses between Water Temperature and Water Quality considering Climate Change in Nak-dong River Basin, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(6), pp.830-840.[Korean Literature] <http://www.riss.kr/link?id=A82709673>
- Yasin, H. Q. and R. S. Clemente(2014), Application of SWAT model for hydrologic and water quality modeling in Thachin river basin, Thailand. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39(3): 1671-1684. <https://doi:10.1007/s13369-013-0770-3>
- Woo, SY, Lee JW, Kim YW, Kim SJ(2020), Assessment of future stream flow and water quality of Man-gyeong river watershed based on extreme climate change scenarios and inter-basin water transfer change using SWAT, *J. Korea Water Resour.Assoc*, 53(8). pp.605-616 [Koean Literature] <https://doi:10.3741/JKWRA.2020.53.8.605>
- Zhang, Y., J. Xia, J. Chen, and M. Zhang(2011), Water quantity and quality optimization modeling of dams operation based on SWAT in Wenyu river catchment, China. *Environmental Monitoring and Assessment* 173(1-4): 409-430. <https://doi:10.1007/s10661-010-1396-5>
- Zhang, Y., J. Xia, Q. Shao, and X. Zhai(2013), Water quantity and quality simulation by improved SWAT in highly regulated Huai river basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 27(1): 11-27. <https://doi:10.1007/s00477-011-0546-9>