J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 55, No. 5 (2022), pp. 371-381
doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.5.371
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Assessment of water quality index suitability of domestic watersheds

Lee, Sangung[a] · Jo, Bugeon[b] · Kim, Young Do[c]*

[a]Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[b]Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[c]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

Paper number: 22-017
Received: 11 March 2022; Revised: 22 April 2022; Accepted: 26 April 2022

Abstract

Since tributaries have greater water quality variability than main streams, a comprehensive evaluation method that considers the effects of various parameters rather than one water quality parameter has been introduced for effective water quality management of tributaries, but the characteristic of the watershed is not considered. In this study, the urbanization rate, livestock excreta generation, and industrial wastewater discharge in the Hantan River middle-watershed classify urban and non-urban watersheds, and evaluate the suitability of water quality indexes by watershed characteristics by analyzing water quality characteristics and calculating CCME WQI, RTWQI, and NSFWQI. Factor analysis was used to understand the effect of water quality parameters used to calculate the water quality index on the water quality index results. As a result of the factor analysis, the relationship between CCME WQI, TC, and FC was derived, and the relationship between RTWQI and DO, SS in urban watersheds and NSFWQI and FC in non-urban watersheds was revealed. As a result of evaluating suitability through comparison with BOD and T-P grades, it was interpreted that the suitability of the water quality index was low in urban watersheds and that comprehensive water quality evaluation using RTWQI was possible in non-urban watersheds.

Keywords: Hantan river, Water quality index, Factor analysis, Suitability assessment

국내유역의 수질지수 적합성 평가

이상웅[a] · 조부건[b] · 김영도[c]*

[a]명지대학교 토목환경공학과 석사과정, [b]명지대학교 토목환경공학과 박사과정, [c]명지대학교 토목환경공학과 교수

요 지

지류 하천은 본류에 비해 수질 변동성이 심하므로, 지류하천에 대한 효과적인 수질관리를 위해서 단일 수질 항목에 의한 평가보다 다항목의 영향을 고려한 종합적인 평가 방법이 도입되고 있으나 유역 특성이 고려되지 못하는 한계가 발생한다. 본 연구에서는 한탄강 중권역을 도시화율 및 가축분뇨 발생량, 산업폐수 배출량으로 도시 유역과 비도시 유역을 분류하고 수질 특성 분석 및 CCME WQI, RTWQI, NSFWQI 산정을 통해 유역 특성별 수질지수의 적합성을 평가하고자 한다. 수질지수 산정시 사용되는 수질항목이 수질지수 결과에 미치는 영향을 파악하고자 요인분석을 활용하였다. 요인분석 결과, CCME WQI와 TC, FC의 관계가 도출되었으며, 도시 유역에서 RTWQI와 DO, SS, 비도시 유역에서 NSFWQI와 FC의 관계가 나타났다. 하천생활환경기준 항목인 BOD, T-P 등급과 수질지수 비교를 통해 적합성을 평가하였을 때 도시 유역에서는 수질지수의 적합성이 낮은 것으로 나타났으며, 비도시 유역에서 RTWQI를 활용한 종합적인 수질 평가가 가능한 것으로 해석되었다.

핵심용어: 한탄강, 수질지수, 요인분석, 적합성 평가

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-330-6407
E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Y. D. Kim)

© 2022 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

최근 이상기후변화와 지속적인 개발로 형성된 도시화로 인공계 물순환이 확대되어 도시지역 및 비도시지역에서 물순환 왜곡이 발생되고 있다. 불투수면적 증가, 녹지 감소에 따른 토지 이용 변화로 강우시 토양으로 침투되는 기저유출, 표면 증발량은 감소하고 표면 유출 증가로 건물 및 도로에서 발생되는 오염원이 하천으로 직접 유입되어 하천 수질을 위협하고 있다. 국내에서는 수질을 관리하기 위해 BOD, T-P 항목을 대상으로 관리 방안과 대책을 수립하지만, 본류에 비해 지류·지천은 유량이 적어 생활하수의 직접적 유입, 강우시 비점오염물질의 유입, 고농도 축산폐수 등의 영향으로 수질 변동성이 크기 때문에 효과적인 수질관리를 위해서 다양한 항목을 고려한 종합적인 수질 평가 방법이 도입되고 있는 추세이다(Son *et al*., 2017).

국내외에서는 수질지수(Water Quality Index, WQI)를 활용하여 하천의 복잡한 수질 정보를 점수 및 등급으로 산정하는 종합적인 평가가 수행되고 있다(Lee *et al*., 2020). 수질지수는 하천 수질을 구성하는 주요 항목의 차원을 축소하여 산술 평균 또는 기하평균으로 산정되어진다. 이러한 수질지수 산정은 특정 지역의 시·공간 변화에 대한 하천수질의 경향성 및 수계간의 직관적인 비교가 가능하다(Shweta *et al*., 2013). 대상항목, 관리기준, 대상지점 등 연구목적에 따라 국내의 실시간수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI), 캐나다의 CCME WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index), 미국의 NSFWQI (National Sanitation Foundation Water Quality Index), OWQI (Oregon Water Quality Index) 등 여러 국가에서 개발된 수질지수를 활용한 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 수질지수를 활용하여 시·공간 변화에 따른 수질 변동을 평가하였으며, 하천생활환경기준과 비교를 통해 수질지수의 적합성을 검토하였다. Park *et al*. (2019b)은 서낙동강 상·하류의 월별 CCME WQI를 산정하여 공간변화에 따른 수질 변동을 비교 분석 하였으며, Park *et al*. (2018)은 낙동강 주요 지류지천에서 산정한 RTWQI를 Mann-Kendall Test, Sen Slope Test를 통해 우선 관리 지류지천을 파악하였다. Kal *et al*. (2017)은 낙동강 중점관리지점을 대상으로 산정한 RTWQI와 BOD, T-P의 생활환경기준을 비교하여 효율적인 하천관리 방법의 적용성을 검토하였으며, Sin *et al*. (2018)은 금호강 유역에서 주요지류의 BOD와 K-CWQI (Korea-Comprehensive Water Quality Index) 결과의 일치도를 비교하여 적합성을 평가하였다.

국외에서는 수질지수를 비교하여 하천 수질을 평가하기에 적합한 수질지수를 검토하였다. Kalagbor *et al*. (2019)은 Kaani River, Kpean River를 대상으로 NSFWQI와 WAWQI (Weight Arithmetic Water Quality Index)를 산정하고 WHO (World Health Organization) 기준과 비교하여 수질지수의 적합성을 평가하였으며, Zeinalzadeh and Rezaei (2027)은 주성분 분석과 상관분석으로 오염원 및 요인별 하천 수질 관리의 시·공간변화를 평가하기에 적합한 수질 항목을 선정하였다. Darvishi *et al*. (2016)은 Talar River의 하천 구간별 건기 및 우기의 NSFWQI, OWQI를 산정하여 수질의 시·공간변화를 평가하였으며, 산정된 수질지수 결과와 오염물질의 유입을 기준으로 하천 특성을 평가하기에 적합한 수질지수를 선정하였다. Zotou *et al*. (2019)는 Vosvozis River의 7가지 WQI와 수질 항목의 상관성을 분석하여 WQI별 성능을 평가하였으며, Noori (2020)은 인구밀도가 높은 Al-Shula City 하천을 대상으로 CCME WQI와 Weighted Arithmetic WQI를 산정하고 일부 수질 항목에 의한 WQI의 점수 변화를 비교하여 특정 오염원을 평가하기에 적합한 수질지수를 선정하였다. 이러한 국내외 연구사례에서는 수질지수를 활용하여 시·공간 변화에 따른 수질 변동 평가와 수질지수간의 비교를 통해 하천 수질의 종합적인 평가에 대한 적합성을 검토하지만 유역별 오염원 특성 및 현황이 반영되는 수질지수를 검토하는 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 유역 특성에 적합한 수질지수를 평가하고자 한탄강 유역을 도시화율 및 도시지역 인구비율, 가축분뇨 발생량, 산업폐수 배출량, 불투수면적률 기준으로 도시 유역 및 비도시 유역으로 분류하여 수질 특성을 분석하고 CCME WQI, RTWQI, NSFWQI 세 가지 수질지수를 산정하였다. 수질지수와 수질 항목간의 관계를 파악하고자 요인분석을 활용하여 수질지수 산정 항목이 점수 산정에 반영되는 정도를 분석하고 하천생활환경기준 항목인 BOD, T-P의 등급과 비교를 통해 유역 특성별 수질지수의 적합성을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상

본 연구에서는 과거부터 수질오염 문제가 대두되고 있는 신천이 위치한 한탄강 중권역의 신천 유역, 포천천 유역, 영평천 유역, 화강 유역을 대상으로 소권역 상류의 도시화율 및 도시지역 인구비율, 가축분뇨 발생량, 산업폐수 배출량, 불투수면적률을 고려하여 도시 유역 및 비도시 유역으로 분류하였다.

국가공간정보포털에서 제공되는 행정구역별 토지정보와 전국오염원조사에서 제공되는 2019년 생활계, 축산계, 산업계 조사자료, 소권역별 불투수면적률 등 유역 현황 자료를 수집하였다. 행정구역별 오염원 현황 및 토지관리계획에서 도시지역으로 구분한 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역과 비도시 유역으로 구분한 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역의 행정구역별 용도지역을 GIS를 활용하여 유역 단위로 재산정하였다. 유역 인구수 대비 시가지 인구수로 도시지역 인구 비율을 계산하였으며, 유역 면적 대비 도시지역 면적으로 도시화율을 산정하였다. 상류유역의 도시화 및 도시지역 인구, 불투수면적률의 비중이 높고 오염원 발생 및 배출량이 높은 1, 2순위 유역을 도시 유역으로 분류하고 3, 4순위는 비도시 유역으로 정의하였다. 신천 상류 유역은 도시화율(31.6%, 1순위), 도시지역 인구 비율(47.1%, 1순위), 가축분뇨 발생량(38,091.8 m^3/day, 1순위), 산업폐수 배출량(5,202.4 m^3/day, 1순위), 불투수면적률(14.5%, 2순위)이 높게 나타나 도시 유역으로 분류하였으며, 영평천 상류 유역은 도시화율(8.5%, 4순위), 도시지역 인구 비율(25.7%, 3순위), 산업폐수 배출량(369.5 m^3/day, 4순위), 불투수면적률(2.8%, 3순위)이 낮게 나타나 비도시 유역으로 분류하였다. 포천천 상류 유역 및 화강 유역은 도시화율, 도시지역 인구 비율, 가축분뇨 발생량은 유사하게 나타나지만, 포천천 상류유역의 산업폐수 배출량(4,191.8 m^3/day, 2순위) 및 불투수면적률(17.0%, 1순위)이 화강 유역의 산업폐수 배출량(611.0 m^3/day, 3순위) 및 불투수면적률(2.28%, 4순위) 보다 높게 나타나 포천천 상류 유역은 도시 유역, 화강 유역은 비도시 유역으로 분류하였다(Table 1). 선정한 유역 말단에 위치한 수질측정망인 신천유역의 신천3(SC), 포천천 유역의 포천천(PC), 화강 유역의 김화남대천(KH) 지점을 연구 대상 지점으로 선정하였으며, 영평천 유역 하류에 위치한 영평천2 지점은 포천천 유입의 영향으로 수질 항목별 농도가 높게 측정될 것으로 판단되어 상류에 위치한 영평천1(YP) 지점을 연구 대상 지점으로 선정하였다. 수질측정망 위치 및 토지이용 현황을 Fig. 1에 도식화하였다.

Table 1. Characteristics of the study watershed

Station		Ratio of urbanization (%)	Ratio of urban population (%)	Livestock excretions generation (kg/day)	industrial Wastewater emission (m^3/day)	Ratio of impervious surface (%)
Urban watershed	SC	31.6	47.1	38,091.8	5,202.4	14.5
	PC	9.8	26.9	8,155.6	4,191.8	17.0
Non-urban watershed	YP	2.7	25.7	-	396.5	2.8
	KH	8.5	21.5	8,041.3	611.0	2.28

SC: Sincheon, PC: Pocheoncheon, YP: Yeongpyeongcheon, KH: Gimhwa Namdaecheon

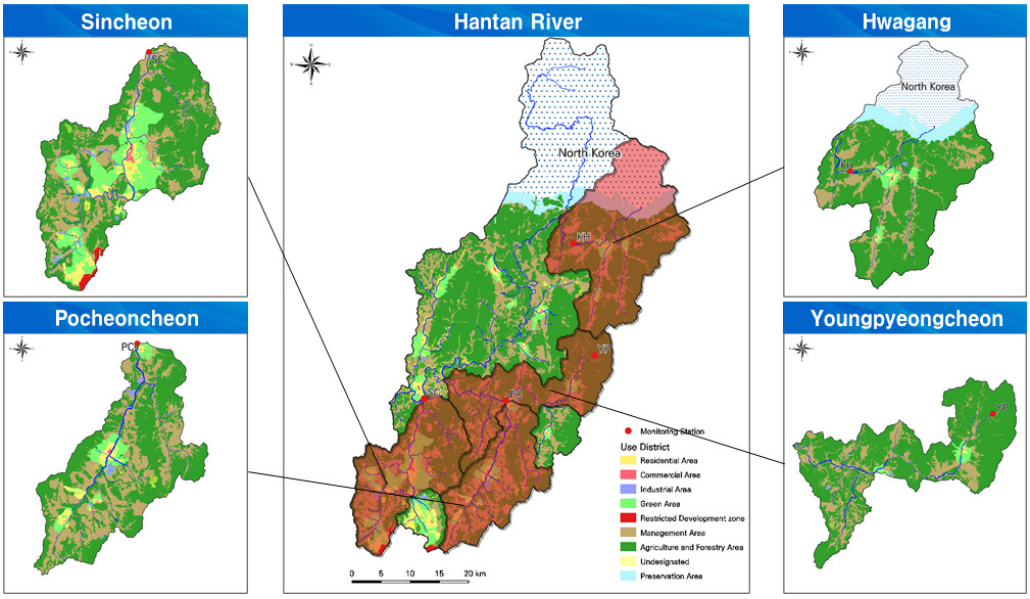


Fig. 1. Location of Hantan River water quality monitoring network and land use status

2.2 수질지수 산정

2.2.1 CCME WQI

CCME WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index)는 수질 정보 전달 및 관리를 위해 캐나다에서 개발한 수질지수로 다양한 국가 수자원 기관에서 활용되고 있다. pH, DO (Dissolved oxygen), BOD (Biochemical oxygen demand), COD (Chemical oxygen demand), SS (Suspended solid), T-P (Total phosphorus), TOC (Total organic carbon), 총 대장균군(Total coliforms, TC), 분원성 대장균군 (Fecal coliforms, FC) 9개 수질 항목으로 수질기준 대비 F_1 (Slope, 범위), F_2(Frequency, 빈도), F_3(Amplitude, 규모) 3개의 인자를 통해 산정한 CCME WQI는 정의된 Excellent (100-95), Good (94-80), Fair (79-60), Marginal (59-45), Poor (44-0) 5개 등급으로 평가한다. F_1은 수질 항목별 측정기간 동안 수질기준 범위를 초과한 항목들의 총 횟수를 전체 측정 횟수로 나누어 산정한 분율이다(Eq. (1)).

$$F_1 = \left(\frac{N\ of\ failed variables}{N\ of\ Variables}\right) \times 100 \tag{1}$$

F_2는 수질 측정 총 횟수 대비 수질기준을 초과한 항목의 측정횟수를 산정한 분율이다(Eq. (2)).

$$F_2 = \left(\frac{N\ of\ failed\ tests}{N\ of\ tests}\right) \times 100 \tag{2}$$

F_3는 수질 항목별 수질기준 범위를 초과한 정도를 분율화한 합으로 계산하는 방법으로 단계를 구분하여 산정한 분율을 Eq. (3) 부터 Eq. (6)에 정리하였다. 수질기준에 부적합한 농도가 수질기준을 초과하는 경우 Eq. (3)에 대입하고, 수질기준 미만인 경우 Eq. (4)에 대입한다.

$$excursion = \left(\frac{Failed\ test\ value}{Objective}\right) - 1 \tag{3}$$

$$excursion = \left(\frac{Objective}{Failed\ test\ value}\right) - 1 \tag{4}$$

Eq. (3) 또는 Eq. (4)에서 산정한 excursion의 합을 전체 측정 데이터 개수로 나누어 산출된 *nse* (Normalized sum of excursions)를 대입하여 F_3 분율을 산정한다.

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} excursion_i}{N\ of\ tests} \tag{5}$$

$$F_3 = \frac{nse}{0.01nse + 0.01} \tag{6}$$

산정된 인자들의 분율을 이용해 CCME WQI를 계산한다.

$$CCME\ WQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{1.732}} \tag{7}$$

2.2.2 실시간수질지수(RTWQI)

하천의 수질 상태를 실시간으로 제공하고자 환경부에서는 CCME WQI를 기반으로 국내 실정을 고려하여 개발된 실시간수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)는 자동측정망에서 시간별 측정되는 최근 12시간의 WT (Water temperature), pH, EC (Electrical conductivity), DO (Dissolved oxygen), TOC (Total organic carbon), T-N (Total nitrogen), T-P (Total phosphorus), Turbidity로 하천의 종합적인 수질을 평가하고 있다. RTWQI는 12시간 동안 측정된 수질 항목을 F_1, F_2, F_3 3개의 인자로 계산한다. F_1은 수질자료 개수 대비 수질기준을 초과하는 수질 항목의 개수, F_2는 측정주기 동안 총 측정횟수 대비 수질 항목별로 수질기준을 초과한 항목들의 총 횟수, F_3는 수질 항목별 수질기준 초과 정도로 산정된다. 산정방법은 Eq. (8) 부터 Eq. (14)에 정리하였다. RTWQI 산정 결과를 점수로 나타내어 정의된 우수(100-80), 양호(79-60), 보통(59-40), 주의(39-20), 불량(19-0) 5개 등급으로 평가한다. 수질 항목별 기준은 Table 2에 정리하였다. 본 연구에서 대상 지점의 수질측정망은 월 단위로 측정되어 12시간의 주기를 월 주기로 계산하고 미측정 되는 Turbidity를 제외하여 RTWQI를 산정하였다. 미측정 항목의 제외로 수질 기준을 초과하는

Table 2. Standard range for water quality paramter in RTWQI

Parameter	Water Quality Index Range
Water Temperature	(Average monthly water temperature for 10 years) -10℃ ≤ WT ≤ (Average monthly water temperature for 10 years) +10℃
pH	6.5 ≤ pH ≤ 9.0
Dissolved Oxygen	0.8 × DO (Saturation concentration at current temperature) ≤ DO ≤ 1.3 × DO (Saturation concentration at current temperature)
Electric Charge	200 ㎲/cm or less
Total Organic Carbon	3.0 mg/L or less
Total Nitrogen	3.0 mg/L or less
Total phosphorus	0.1 mg/L or less
Turbidity	10 NTU or less

항목당 산출되는 F_1 점수의 감소 범위가 증가하는 영향이 나타난다.

$$F_1 = \left(\frac{N\ of\ failed variables}{N\ of\ Variables}\right) \times 100 \tag{8}$$

$$F_2 = \left(\frac{N\ of\ failed\ tests}{N\ of\ tests}\right) \times 100 \tag{9}$$

$$excursion = \left(\frac{Failed\ test\ value}{Objective}\right) - 1 \tag{10}$$

$$excursion = \left(\frac{Objective}{Failed\ test\ value}\right) - 1 \tag{11}$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} excursion_i}{N\ of\ tests} \tag{12}$$

$$F_3 = \frac{nse}{0.01nse + 0.01} \tag{13}$$

$$RTWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{3}} \tag{14}$$

2.2.3 NSFWQI

미국보건재단(National Sanitation Foundation)에서 개발하였으며, 델파이기법(Delpi)으로 수질 항목에 가중치를 부여하여 수질지수를 계산하는 방법이다. 항목별 가중치 적용은 수질 항목의 선택과 하천 수질의 주요 영향 인자에 대한 연구자의 주관성을 감소하는 것이 가능하다. NSFWQI 산정 항목은 WT (Water temperature), pH, Turbidity, 분원성 대장균군 (Fecal coliforms, FC), DO (%, sat), BOD (Biochemical oxygen demand), PO_4^{3-} (Total phosphate), NO_3^- (Nitrates), 총 고형물 (Total solids, TS)로 항목별 정의된 가중치는 Table 3에 정리하였다. NSFWQI 결과를 정의된 Excellent (100-91), Good (90-71), Medium (70-51), Bad (50-26), Very bad (25-0) 5개 등급으로 평가한다. NSFWQI는 수질 항목별 등급 기준에 대한 값에 가중치를 곱한값으로 산정된다(Eq. (15)).

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^{n} Q_i W_i \tag{15}$$

n은 수질 항목의 개수, Q_i는 수질 항목별 등급기준에 대한 값, W_i는 수질 항목별 가중치를 의미한다. 가중치 합은 1이 기준이지만, 미측정 항목으로 인해 가중치 합은 1 미만으로 산출되어 상대 가중치로 재산정하였으며, 상대 가중치 산정식에서 W_i는 상대 가중치, w_i는 정의된 항목별 가중치, n은 수질 항목의 개수를 의미한다(Eq. (16)).

Table 3. Weight for parameter in NSFWQI

Parameter	Weight (W_i)	Relative weight (w_i)
Water Temperature Change	0.10	0.118
pH	0.11	0.129
Turbidity	0.08	-
Fecal Coliform	0.16	0.188
Dissolved Oxygen (% sat)	0.17	0.200
Biochemical Oxygen Demand	0.11	0.129
Total Phosphate	0.10	0.118
Nitrates	0.10	0.118
Total Solids	0.07	-

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{16}$$

본 연구에서는 대상 지점의 수질측정망에서 미측정 되는 Turbidity 및 총 고형물을 제외한 월 단위의 측정 자료를 활용하여 NSFWQI를 산정하였다. 미측정 항목의 제외로 재산정한 가중치는 항목별 수질지수 산정 값의 기여도가 높아져 항목별 수질 오염도에 따라 점수 변동이 나타날 것으로 판단된다.

2.3 요인 분석

CCME WQI, RTWQI, NSFWQI와 수질 항목간의 관계를 파악하기 위해 요인분석을 활용하여 수질지수별 산정 항목이 점수 산정에 반영되는 정도를 프로그래밍 언어인 Python을 활용하여 분석하였다. 요인분석은 다항목의 복잡한 데이터의 변수간의 관계를 분석하여 차원을 축소하고 공통 인자를 추출하여 변수 집합에서 영향력 있는 요인을 탐색하는 기법이다. 요인분석을 수행하기 전에 데이터의 적절성을 평가하기 위해 Bartlett test와 KMO test (Kaiser Meyer Olkin)을 수행하였다. Bartlett test는 변수의 분산을 검정하여 유의성을 평가하는 방법으로 p-value가 0에 가까운 값일수록 유의한 것으로 간주된다. KMO test (Kaiser Meyer Olkin)은 변수 간의 분산 비율을 추정하여 자료의 적절성을 평가하는 방법으로 0.5 이상일 경우 적절한 것으로 간주된다. 변수들과 요인간의 상관계수인 요인적재값을 제곱하여 더한 값이 1 이상인 고유값으로 요인 수를 결정하였다. 변수의 상관요인 해석을 쉽게 하고자 Varimax,

Quartimax, Promax, EQUIMAX와 같은 회전방법 중 본 연구에서는 공통인자에 대한 분산의 극대화로 변수를 축소하는 Varimax로 요인을 회전하였다(Park *et al.*, 2019a).

3. 연구결과

3.1 대상 유역의 수질 분석

연구 대상 지점의 수질 특성을 분석하기 위해 물환경정보시스템에서 제공하는 2015년 부터 2019년까지 월 간격으로 측정된 연구 대상 지점의 수질 자료를 수집하여 하천생활환경기준 항목의 계절별 농도 범위를 하천생활환경기준으로 “Ia(매우좋음)”, “Ib(좋음)”, “II(약간좋음)”, “III(보통)”, “IV(약간나쁨)”, “V(나쁨)”, “VI(매우나쁨)” 등급으로 평가하고 농도 분포를 그래프로 시각화하였다(Fig. 2). 계절별 높은 농도가 나타나는 수질 항목을 농도 범위와 하천생활환경기준 등급으로 분석하였다. 연구 대상 지점들의 pH는 6.7~8.1 범위로 “Ia” 등급, DO는 7.5~17.4 mg/L로 “Ia” 등급으로 나타났다. SS는 SC 지점에서 15.2~30.8 mg/L 농도로 “III”~“IV” 등급으로 나타났으나 PC 지점(5.8~11.4 mg/L) 및 YP 지점(0.4~1.0 mg/L), KH 지점(1.7~5.0 mg/L)에서 “Ia”~“III” 등급으로 나타났다. 도시 유역으로 분류한 SC지점의 BOD (8.0~10.4 mg/L)는 “VI”~“VI” 등급, COD (14.9~17.6 mg/L)는 “VI” 등급, TOC (8.7~11.8 mg/L)는 “VI” 등급으로 나타났으며, PC 지점의 BOD (3.6~5.9 mg/L)는 “III”~“IV” 등급, COD (8.1~13.5 mg/L)는 “IV”~“VI” 등급, TOC (5.7~10.1 mg/L)는 “IV”~“VI” 등급으로 봄에 유기물 지표의 오염도가 높은 것으로 나타났다. SC 지점의 TC (850~28,500 CFU/100 ml), FC (550~3,500 CFU/100 ml)는 수질기준을 초과하였으며, PC 지점의 TC (1,200~6,200 CFU/100 ml), FC (285~2,700 CFU/100 ml)는 “III” 등급 부터 수질기준 초과 범위로 봄, 가을에 미생물 지표의 오염도가 높게 나타났다. T-P는 여름에 SC

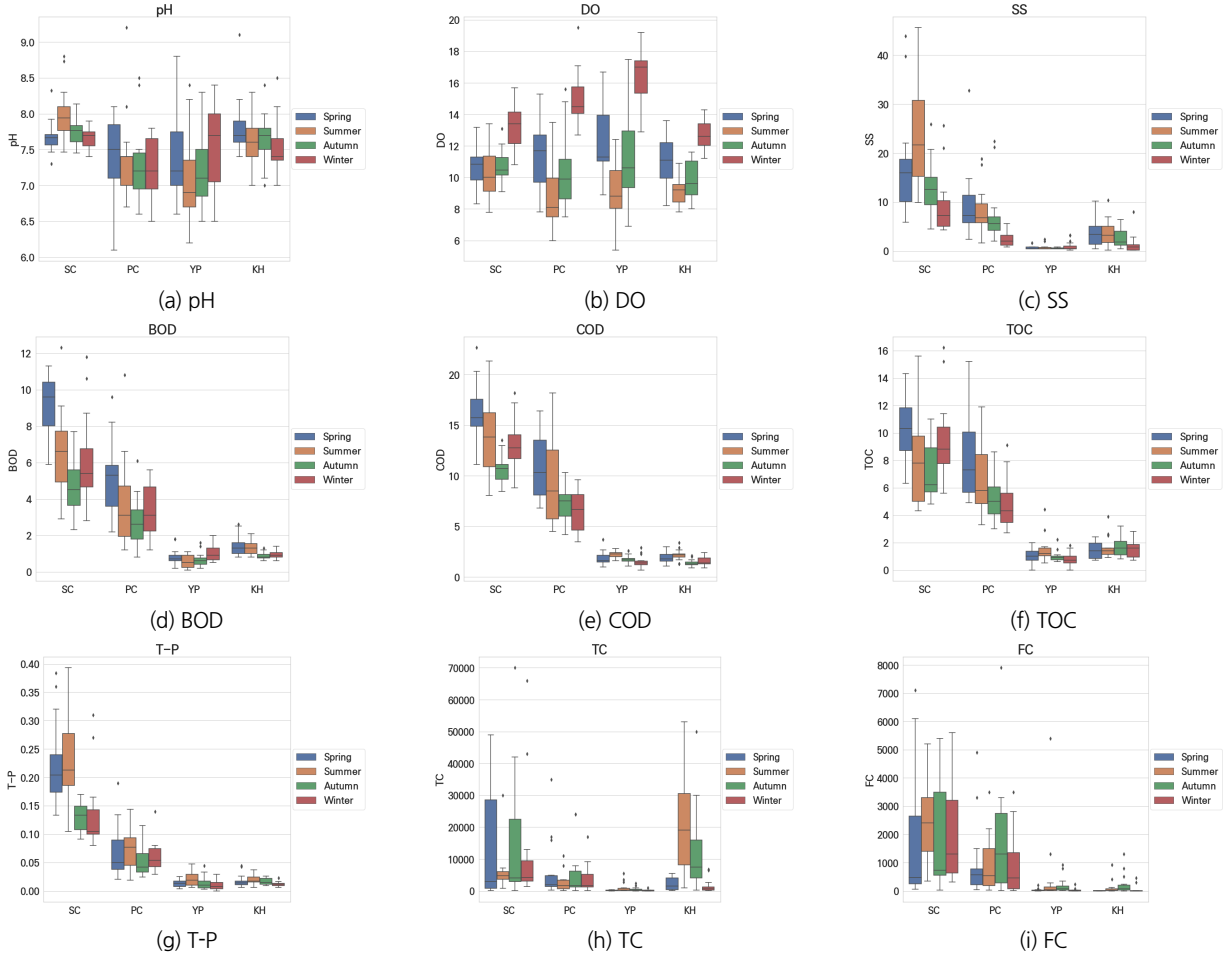


Fig. 2. Seasonal water quality analysis results of staions

지점에서 0.186~0.277 mg/L (“III”~“IV” 등급)로 오염도가 높으나 PC 지점은 0.045~0.094 mg/L (“II” 등급)로 낮은 오염도가 나타났다. 비도시 유역으로 분류한 YP 지점에서 BOD (0.6~0.9 mg/L)는 봄에 “Ia” 등급, FC (20~170 CFU/100 ml)는 가을에 “Ib”~“II” 등급으로 나타났다. 여름에는 COD (2.0~2.4 mg/L)는 “Ib” 등급, TOC (1.1~1.6 mg/L)는 “Ia” 등급, T-P (0.010~0.029 mg/L)는 “Ia”~“Ib” 등급, TC (48~730 CFU/100 ml)는 “Ia”~“II” 등급으로 수질 오염의 영향이 적은 것으로 나타났다. KH 지점의 BOD (1.0~1.6 mg/L)는 봄에 “Ia”~“Ib” 등급, TOC (1.1~2.1 mg/L) 및 FC (23~200 CFU/100 ml)는 가을에 “Ia”~“Ib” 등급, “Ib”~“II” 등급으로 나타났다. 여름에는 COD (2.0~2.3 mg/L)가 “Ia”~“Ib” 등급, T-P (0.016~0.025 mg/L) “Ia”~“Ib” 등급으로 나타났으며, TC (8,225~30,500 CFU/100 ml)는 수질기준을 초과하였다. 대상 지점별 수질을 비교하였을 때 도시 유역으로 분류한 SC 지점 및 PC 지점의 수질 오염도가 비도시 유역 보다 높은 것으로 나타났으나 비도시 유역으로 분류한 KH 지점에서 FC가 높은 농도가 나타났다. 분뇨에서 발생되는 미생물 지표인 TC와 FC는 가축분뇨 발생량이 많은 KH 지점 유역 상류에서 처리되지 않은 가축분뇨가 하천으로 유입되어 TC 농도가 높게 나타나는 것으로 판단된다(Lee *et al*., 2016).

3.2 수질지수 산정 및 평가

대상지점별 CCME WQI, RTWQI, NSFWQI를 산정하고 지점별 산출된 점수를 비교하였다. CCME WQI는 한탄강 중권역의 BOD (2.0 mg/L), T-P (0.04 mg/L) 목표수질을 고려하여 하천생활환경기준 “Ib” 등급을 수질기준으로 산정하였으며, RTWQI는 정의된 기준, NSFWQI는 재산정한 상대 가중치를 적용하여 산정하였다(Fig. 3). 수질지수별 정의된 등급을 동일한 표현으로 평가하기 위해 CCME WQI의 Excellent (100-95), Good (94-80), Fair (79-60), Marginal (59-45), Poor (44-0) 구분한 등급 및 우수(100-80), 양호(79-60), 보통(59-40), 주의(39-20), 불량(19-0) 등급으로 구분되는 RTWQI, Excellent (100-91), Good (90-71), Medium (70-51), Bad (50-26), Very bad (25-0) 등급으로 구분되는 NSFWQI의 등급체계를 Excellent, Good, Fair, Bad, Very bad로 명명하여 수질을 평가하였다. 도시 유역으로 분류한 SC 지점과 PC 지점의 CCME WQI 산정결과 23.4점, 33.2점으로 “Very bad” 등급으로 나타났으며, RTWQI 산정결과는 62.5점, 64.6점으로 “Good” 등급, NSFWQI 산정결과 69.5점, 73.3점으로 “Fair” 등급 및 “Good” 등급으로 평가되었다. 비도시 유역으로 분류한 YP 지점 및 KH 지점의 CCME WQI 산정결과 72.9점, 63.2점으로 “Fair” 등급으로 나타났으며, RTWQI 산정결과는 80.8점, 76.1점으로 “Excellent” 등급 및 “Good” 등급, NSFWQI 산정결과 84.3점, 90.4점으로 “Good” 등급 및 “Excellent” 등급으로 나타났다. WQI 산정 방법 및 사용되는 수질 항목의 차이로 지점별 산정된 점수차가 나타났다. 수질 오염도가 높은 SC 지점 및 PC 지점의 CCME WQI는 낮은 점수로 산정되었으며, 수질 오염도가 낮은 YP 지점의 CCME WQI의 점수는 높게 산정되었다. 전반적인 수질 농도가 낮게 측정되는 KH 지점은 TC의 높은 농도로 YP 지점보다 낮은 점수가 산정된 것으로 판단된다. RTWQI는 CCME WQI 보다 높게 정의된 수질기준으로 등급을 평가하여 CCME WQI 보다 높은 등급이 나타나는 것으로 판단된다. 정의된 수질 항목별 가중치를 미측정 항목에 의해 상대 가중치로 재산정한 NSFWQI는 상대 가중치가 높은 DO 및 FC의 영향이 점수 산정에 크게 나타나 CCME WQI 및 RTWQI 보다 상대적으로 높은 점수 및 등급이 산출된 것으로 판단된다.

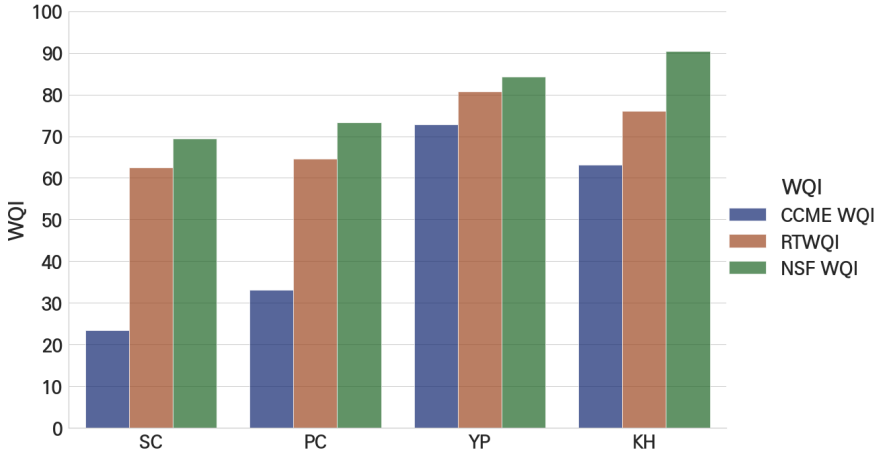


Fig. 3. Result of calculating CCME WQI, RTWQI, and NSFWQI of stations

3.3 수질지수와 하천생활환경기준 항목 요인분석

수질지수 산정에 사용되는 수질 항목이 점수 산정에 반영되는 정도를 파악하고자 월별로 산정한 CCME WQI 및 RTWQI, NSFWQI의 결과와 하천생활환경기준 항목별 월 평균 자료의 관계성을 파악하고자 요인분석을 수행하였을 때 Bartlett test 결과 전체 지점에서 p-value가 0.05 이하로 유의한 것으로 나타났다. KMO test 결과는 YP 지점에서 CCME WQI (0.53), RTWQI (0.51), NSFWQI (0.54)로 자료가 적절한 것으로 나타났으나 SC 지점, PC 지점, KH 지점에서 0.5 이하로 나타나 자료가 부적절한 것으로 나타나 CCME WQI, RTWQI, NSFWQI 및 하천생활환경기준 항목의 월별 시계열 자료로 요인분석을 수행하였다(Fig. 4). CCME WQI 및 RTWQI의

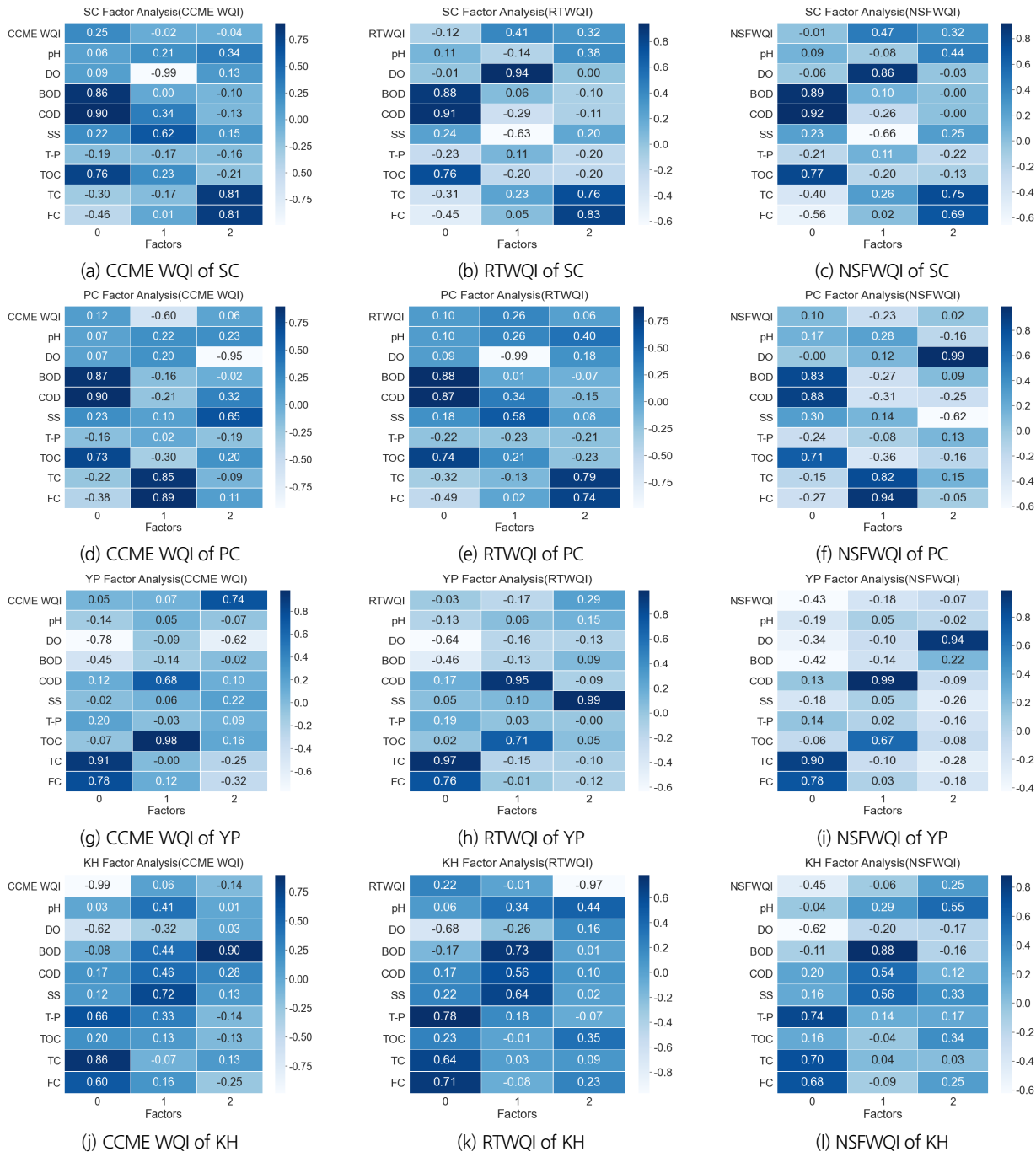


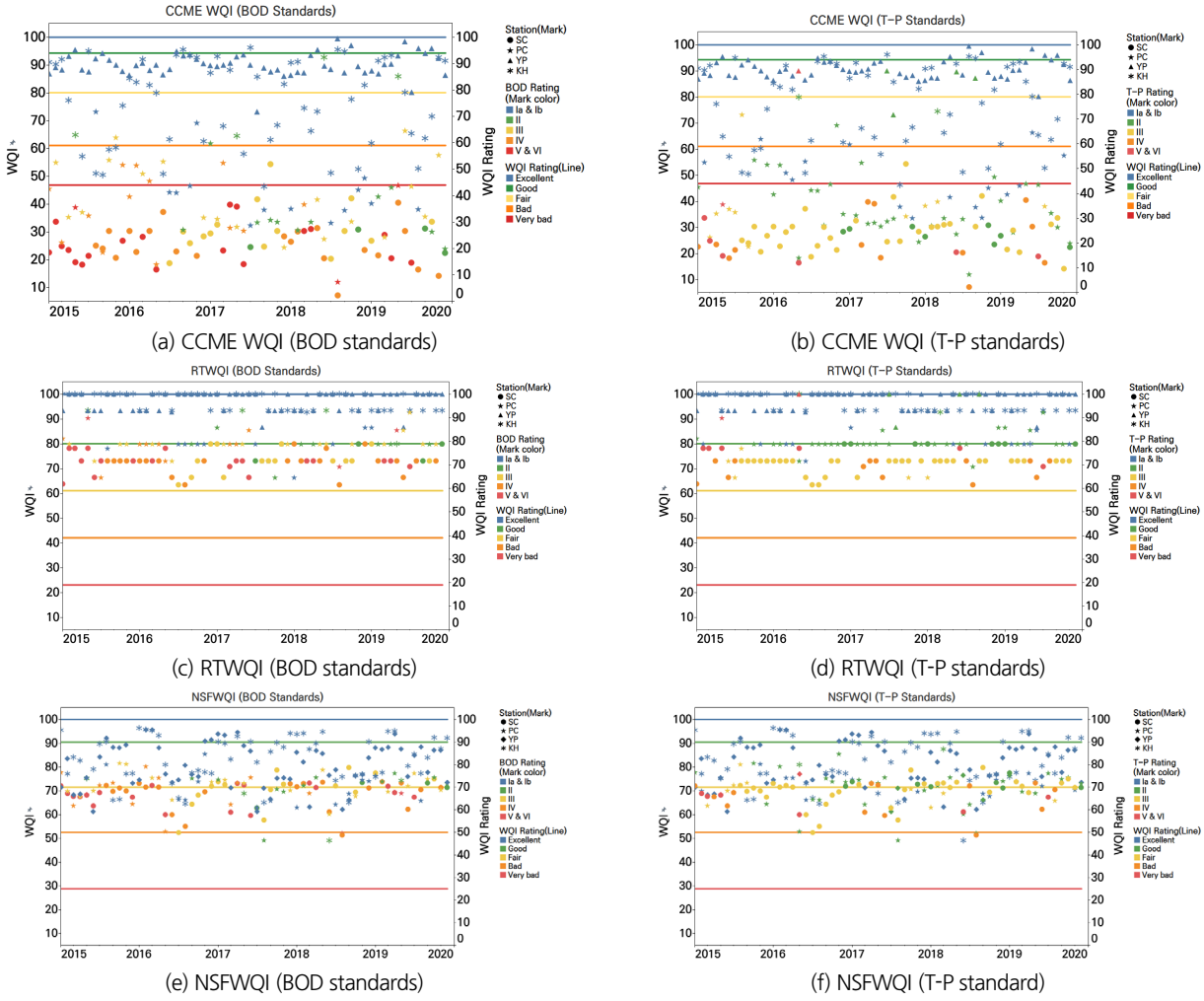
Fig. 4. Factor analysis results of water quality index and water quality

F_2는 항목별 총 측정횟수 대비 수질기준을 초과한 총 횟수를 계산한 요인으로 월별 시계열로 수질지수를 산정시 F_1과 동일한 값이 산출된다. 지점별 요인분석을 수행하기 전에 데이터의 적정성을 평가하기 위해 Bartlett test와 KMO test (Kaiser meyer Olkin)을 수행하였다. Bartlett test 결과 SC 지점 및 PC 지점, YP 지점, KH 지점에서 p-value가 0.05 이하로 유의한 것으로 나타났다. KMO test 결과는 SC 지점의 CCME WQI (0.62), RTWQI (0.66), NSFWQI (0.65) 및 PC 지점의 CCME WQI (0.67), RTWQI (0.61), NSFWQI (0.63), YP 지점의 CCME WQI (0.51), RTWQI (0.58), NSFWQI (0.57), KH 지점의 CCME WQI (0.68), RTWQI (0.63), NSFWQI (0.66)로 자료가 적절한 것으로 나타났다. 변수들과 요인 간의 상관계수인 요인적재값을 제곱하여 더한 값이 1 이상인 고유값이 높은 순서로 Factor 0 부터 Factor 2번 까지 3개의 요인 수를 나타내었다. 고유값은 요인을 설명하는 분산의 양을 나타내는 것으로 고유값이 클수록 설명력이 높은 것을 의미한다. 변수의 요인적재값은 -1 부터 +1의 값으로 ± 0.4 이상일 경우 유의한 요인으로 설명되며, 항목별 요인적재값이 높은 항목을 공통요인으로 분석하였다. 연구 대상 지점별 수질지수와 하천생활환경기준 항목의 관계를 분석하였을 때 SC 지점의 RTWQI 및 NSFWQI는 Factor 1에서 DO, SS와 관계가 나타났다. PC 지점의 CCME WQI는 Factor 1에서 TC, FC와 관계가 나타났다. YP 지점의 CCME WQI는 Factor 2에서 DO와 관계가 나타났으며, NSFWQI의 Factor 0에서 BOD, TC, FC와 관계가 나타났다. KH 지점의 CCME WQI는 Factor 0에서 DO, T-P, TC, FC와 관계가 나타났으며, RTWQI는 Factor 2에서 pH, NSFWQI는 Factor 0에서 DO, T-P, TC, FC와 관계가 나타났다. CCME WQI 산정에 사용되는 하천생활환경기준 항목인 DO, pH, BOD, COD, TOC, SS, T-P, TC, FC는 PC 지점(TC, FC), YP 지점(DO), KH 지점(DO, T-P, TC, FC)에서 관계가 나타나 미생물 지표인 TC 및 FC의 농도 변화를 반영하는 것으로 판단된다. RTWQI 산정에 사용되는 하천생활환경기준 항목인 pH, DO, TOC, T-P는 SC 지점(DO, SS) 및 PC 지점(DO, SS), KH 지점(pH)에서 관계가 나타나 도시 유역에서 RTWQI는 DO와 SS의 수질 변동을 반영하는 것으로 판단된다. NSFWQI 산정에 사용되는 하천생활환경기준 항목인 DO, pH, BOD, FC는 SC 지점(DO), YP 지점(DO, BOD, FC), KH 지점(DO, FC)에서 관계가 나타나 비도시 유역에서는 FC 농도 변화가 반영되는 것으로 판단된다.

3.4 유역 특성별 수질지수 적합성 평가

수질지수의 적합성을 평가하고자 수질 관리 항목인 BOD 및 T-P를 하천생활환경기준의 항목별 등급으로 산정하고 수질지수별 정의된 등급 범위로 비교하였다(Fig. 5). 하천생활환경기준 등급인 “Ia”, “II”는 Excellent, “II”는 Good, “III”는 Fair, “IV”는 Bad, “V”, “VI”는 Very Bad로 산정하여 수질지수별 정의된 등급 범위와 비교를 통해 일치도가 80% 이상으로 산출될 때 적합한 것으로 평가하였다. CCME WQI는 SC 지점에서 BOD (19회/60회, 31.7%), T-P (8회/60회, 13.3%), PC 지점에서 BOD (9회/60회, 15.0%), T-P (29회/60회, 48.3%), YP 지점에서 BOD (7회/60회, 11.7%), T-P (55회/60회, 91.7%), KH 지점에서 BOD (5회/60회, 8.3%), T-P (57회/60회, 95.0%)의 일치도는 비도시 유역의 T-P 등급과 적합성이 높은 것으로 나타났다. RTWQI는 SC 지점에서 BOD (4회/60회, 6.7%), T-P (8회/60회, 13.3%), PC 지점에서 BOD (12회/60회, 20.0%), T-P (29회/60회, 48.3%), YP 지점에서 BOD (60회/60회, 100.0%), T-P (55회/60회, 91.7%), KH 지점에서 BOD (57회/60회, 95.0%), T-P (57회/60회, 95.0%)의 일치도를 평가하였을 때 비도시 유역에서 적합성이 높게 나타났다. NSFWQI는 SC 지점에서 BOD (9회/60회, 15.0%), T-P (22회/60회, 36.7%), PC 지점에서 BOD (17회/60회, 28.3%), T-P (27회/60회, 45.0%), YP 지점에서 BOD (8회/60회, 13.3%), T-P (9회/60회, 15.0%), KH 지점에서 BOD (16회/60회, 26.7%), T-P (16회/60회, 26.7%)의 일치도는 유역 특성에 관계 없이 적합성이 낮은 것으로 나타났다.

하천생활환경기준 항목인 BOD, T-P와 수질지수별 비교를 통해 적합성을 평가하였을 때 비도시 유역으로 분류한 YP 지점 및 KH 지점에서 CCME WQI는 T-P 단일 항목의 등급과 일치도가 높게 나타났으나, RTWQI는 BOD, T-P 두 항목의 등급과 높은 일치도가 나타나 비도시 유역에서 RTWQI를 활용한 수질 평가가 더 적합한 것으로 판단된다. 도시 유역에서 TC, FC, 비도시 유역에서는 DO, T-P, TC, FC와 관계성이 나타나는 CCME WQI는 도시 유역에서 높은 농도로 측정되는 유기물 지표인 BOD, COD, TOC의 영향을 반영하지 못해 점수가 과다산정 되었으며, 비교적 수질오염도가 낮은 YP 지점 및 KH 지점에서 T-P의 적합성이 높게 나타나는 것으로 판단된다. NSFWQI 산정에 활용되는 DO, FC는 항목별 적용되는 상대 가중치가 높게 산정되어 오염도가 높은 도시 유역에서는 BOD, T-P 등급보다 낮은 등급이 나타나고 비도시 유역에서는 높은 등급으로 산정되어 적합성이 낮은 것으로 판단된다. 도시 유역 특성을 반영할 수 있는 수질 항목의 재선택과 항목별 가중치 재산정을 통해 수질지수를 개선한다면 유역 특성을 고려한 종합적인 수질 평가가 수행될 것으로 사료된다.



(a) CCME WQI (BOD standards)

(b) CCME WQI (T-P standards)

(c) RTWQI (BOD standards)

(d) RTWQI (T-P standards)

(e) NSFWQI (BOD standards)

(f) NSFWQI (T-P standard)

Fig. 5. Comparative analysis results of WQI and river living environment standard (BOD, T-P)

4. 결 론

본 연구는 한탄강 중권역을 도시화율 및 도시지역 인구비율, 가축분뇨 발생량, 산업폐수 배출량, 불투수면적률에 따른 도시 유역 특성과 비도시 유역 특성으로 구분하고 수질측정망 자료를 활용하여 산정한 수질지수와 하천생활환경기준을 비교하여 유역 특성을 반영하는 수질지수를 검토하였다.

수질 특성을 파악하기 위해 수질측정망에서 2015년 부터 2019년 까지 측정된 자료를 활용하여 SC, PC, YP, KH 지점의 수질을 분석하였다. 대상 지점의 pH, DO, SS는 하천생활환경기준 “Ia” 등급으로 나타났으며. 유기물 지표인 BOD, COD, TOC와 영양염류 지표인 T-P, 미생물 지표인 TC, FC는 도시 유역으로 분류한 SC 지점과 PC 지점에서 높은 오염도가 나타났다.

수질지수의 적합성을 파악하고자 대상 지점의 CCME WQI, RTWQI, NSFWQI를 산정하였다. SC의 CCME WQI (23.4점), RTWQI (62.5점), NSFWQI (69.5점)은 비교적 낮은 점수가 산정되었으며, YP의 CCME WQI (72.9점), RTWQI (80.8점), NSFWQI (84.3점)은 비교적 높은 점수가 산정되었다. 월별 시계열 자료로 산정한 수질지수와 하천생활환경기준 항목으로 요인분석을 수행하였을 때 CCME WQI와 TC, FC의 관계가 도출되었으며, 도시유역에서 RTWQI와 DO 및 SS, 비도시 유역에서 NSFWQI와 FC의 관계가 나타났다. 국내 유역 수질 평가의 적합성을 평가하고자 하천생활환경기준 항목인 BOD, T-P의 등급과 WQI 등급을 비교하였다. 비도시 유역으로 분류한 YP 지점과 KH 지점의 CCME WQI는 T-P와 일치도가 높게 나타났으나, RTWQI는 BOD, T-P의 일치도가 높게 나타나 RTWQI가 비도시 유역의 종합적인 수질 평가 도구로서 적합한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 한탄강 유역의 도시 유역 특성과 비도시 유

역 특성을 반영하는 수질지수를 검토하였다. 비도시 유역에서는 하천생활환경기준 항목인 BOD, T-P 등급과 RTWQI 산정 결과의 일치도가 높게 나타나 비도시 유역 특성을 반영할 수 있는 것으로 판단되나 도시 유역에서는 수질지수 산정 방법 및 사용되는 수질 항목의 차이로 적합성이 낮게 나타나 적용이 어려운 것으로 판단되었다. 이러한 도시 유역 특성은 높은 농도의 수질에 의해 과다산정되는 수질지수를 정의된 등급 체계로 평가하기 어려운 것으로 사료된다. 향후 수질 항목 및 가중치 재산정을 통해 도시 유역 특성을 고려한 수질지수를 개발하여 도심 하천의 종합적인 수질 평가를 하고자 한다. 이러한 도시 유역 특성을 고려한 수질지수는 도심지의 지류·지천을 종합적으로 평가하는 방법으로 수질 예측 및 효율적인 수질 관리가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 경기녹색환경지원센터의 연구비지원(21-05-01-30-33-1)에 의하여 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Darvishi, G., Kootenaei, F.G., Ramezani, M., Lotfi, E., and Asgharnia, H. (2016). “Comparative investigation of river water quality by OWQI, NSFWQI and Wilcox indexes (case study: The Talar River-Iran).” *Archives of Environmental Protection*, Vol. 42, No. 1, pp. 41-48.

Kal, B.S., Park, J.B., Kim S.H., and Im, T.H. (2017). “Assessment of tributary water quality using integrated Water Quality Index.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 311-317.

Kalagbor, I.A., Johnny V.I., and Ogbolokot I.E. (2019). “Application of national sanitation foundation and weighted arithmetic water quality indices for the assessment of Kaani and Kpean Rivers in Nigeria.” *American Journal of Water Resources*, Vol. 7, No. 1, pp. 11-15.

Lee, H.J., Park, H.K., Lee, J.H., Park, A.R., and Cheon, S.U. (2016). “Coliform pollution status of Nakdong River and tributaries.” *Journal of Korean Society on Water Environmen*, Vol. 32, No. 3, pp. 271-280.

Lee, J.H., Ha, H.J., Lee, M.H., Lee, M.Y., Kim., T.H., Cha, Y.K., and Koo, J.Y. (2020). “Assessment of water quality of major tributaries in Seoul using water quality index and cluster analysis.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 42, No. 10, pp. 452-462.

Noori, M.D. (2020). “Comparative analysis of weighted arithmetic and CCME water quality index estimation methods, accuracy and representation.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 737, No. 4, pp. 012174.

Park, J.B., Kal, B.S., and Kim, S.H. (2019a). “Application of multivariate statistical techniques to analyze the pollution characteristics of major tributaries of the Nakdong River.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 215-223.

Park, J.B., Kal, B.S., Kim, S.H., Lee, M.Y. (2018). “Long-term trend analysis of major tributaries of Nakdong River using water quality index.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 20, No. 3, pp. 201-209.

Park, K.D., Kang, D.H., So, Y.H., and Kim, I.K. (2019b). “Temporal-spatial variations of water quality level and water quality index on the living environmental standards in the west Nakdong River.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 28, No. 12, pp. 1071-1083.

Shweta, T., Bhavtosh, S., Prashant, S., and Rajendra, D. (2013). “Water quality assessment in terms of water quality index.” *American Journal of Water Resources*, Vol. 1, No. 3, 34-38.

Sin, S.H,, Im, T.H., Kim, S.H., Sin, D.S., and Kwon, H.G. (2018). “Consideration in applying Korean - Comprehensive Water Quality Index (K-CWQI) to assessement of water quality in the major tributaries of Gumho-River Basin.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 455-465.

Son, Y.G., Na, S.M., Im, T.H., and Kim, S.H. (2017). “Water quality analysis in Nakdong River tributaries using 2012-2016 monitoring data.” *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 6, pp. 680-688.

Zeinalzadeh, K., and Rezaei, E. (2017). “Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis.” *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 13, pp. 1-10.

Zotou, I., Tsihrintzis, V.A., and Gikas, G.D. (2019). “Performance of seven Water Quality Indices (WQIs) in a Mediterranean River.” *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 191, No. 8, pp.1-14.