하천 특성과 수질 지수를 활용한 낙동강 유역의 중점관리 지류·지천의 유형화 Classification of Nakdong River Tributaries under Priority Management based on their Characteristics and Water Quality Index

김예진[†] · 갈병석^{*} · 박재범^{*} · 김상훈^{**} · 임태효^{**}

Yejin Kim[†] · Byungseok Gal^{*} · Jaebum Park^{*} · Sanghoon Kim^{**} · Taehyo Im^{**}

부산가톨릭대학교 환경공학과 · ^{*}(주)다운솔루션

^{**}국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan

^{*}Daon Solutions · ^{**}Nakdong River Environment Research Center

(Received September 30, 2017; Revised November 28, 2017; Accepted January 20, 2018)

Abstract : The most important concern in the management of rivers will be the quantity and quality of water, but the tributaries should not be ignored due to their pollution loadings to the main river. Exploring the characteristics of the tributaries existing in the watershed can be used as a basis for establishing management policies for each tributary. In this study, the characteristic factors of 38 tributaries of Nakdong River, under priority management, were derived and represented as 15 factors. The factors explained the informations of each tributary such as watershed characteristics, pollution sources, and pollutant loads. For the water quality, it was expressed as water quality index suggested by Ministry of Environment. To derive the types of the tributaries according to the characteristics, Principal Component Analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis were used in consecutive order. As a result of the typification, 38 tributaries under priority management could be classified into 6 types and 4 streams not included to the types. The derived types were interpreted as reflecting the size of the stream, the size of the pollutant source, and the quality of the stream.

Key Words : Characteristics of Tributaries, Classification, Nakdong River, Tributaries, Water Quality Index

요약 : 하천의 관리에 있어 가장 관심사가 되는 것은 본류의 수량과 수질일 것이나, 본류의 수질을 고려할 때 무시할 수 없는 오염원으로서 작용하는 것이 지류·지천일 것이다. 유역에 존재하는 지류·지천의 특성을 탐구하는 것은 각 지류·지천의 관리 정책을 수립하기 위한 기초 작업으로 매우 중요하다. 본 연구에서는 낙동강 유역에 존재하는 38개의 중점관리지천에 관하여 하천의 특성인자를 도출하고 수질에 대한 정보를 수질 지수를 활용하여 압축한 후 하천의 유형화에 사용하였다. 하천의 특성인자는 유역특성과 오염원, 오염부하량에 관하여 15개 인자가 추출되었고, 수질을 대표하기 위하여 환경부가 사용하고 있는 실시간수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)의 계산 방법이 사용되었다. 각 하천에 대해 수집된 변수로부터 유형을 도출하기 위해서는 주성분분석과 계층적 군집분석이 사용되었다. 유형화 결과, 38개의 중점관리지천은 6개의 유형과 어느 유형에도 소속되지 않는 4개의 하천으로 분류될 수 있었다. 도출된 하천 유형은 하천의 규모와 오염 배출원의 크기, 하천의 수질을 반영한 것으로 해석되었다.

주제어 : 낙동강, 수질지수, 유형화, 지류·지천, 하천 특성

1. 서론

하천 수질을 체계적으로 관리하기 위한 노력은 오염원 관리에서부터 시작되며, 본류로 향하는 지류·지천 또한 본류의 입장에서는 유력한 오염원으로서 철저한 관리가 필요하다. 이러한 지류·지천 관리의 중요성은 여러 연구자들에 의해 지적된 바 있어, 지류·지천의 수질을 주기적으로 모니터링하고 수질의 특성을 분석한 사례들과¹⁻⁴⁾ 다수의 지류·지천들 중 관리 우선순위를 선정하기 위해 수질 모니터링 결과를 분석한 사례,⁵⁾ 그리고 보다 체계적인 하천 관리를 위한 하천 등급화의 방안을 연구한 사례⁶⁾에서 이를 뒷받침한다.

이들 연구가 모두 지류·지천의 특성과 수질을 보다 잘 이해하기 위한 수질 모니터링과 하천 특성에 관한 기초조사

작업에서 출발한다는 사실에서도 알 수 있듯이, 지류·지천의 관리를 위한 수질의 지속적인 측정과 하천의 특징에 대한 조사는 매우 중요하다. 환경부는 “3단계 수질오염총량제” 기본계획을 통해 일부 지류 총량제를 계획, 실시하고 있다. 강화된 수질오염총량을 준수하기 위해서는 유역에 존재하는 오염원에 대한 면밀한 조사를 통한 이해와 바람직한 지류·지천의 수질 관리로 본류에 기여하는 오염물질의 총량에 대한 보다 엄격한 제어와 각 하천들 사이의 직관적인 수질 비교가 필요하다. 이에 Na 등은 낙동강 유역의 지류·지천에 대해 누적된 수질 측정 자료를 분석하여 각 측정지점별 측정항목별 수질자료의 변동계수를 도출하여 평균값의 대표성에 대한 의문을 제기한 바 있다.⁵⁾ 또한 BOD, T-P, TOC 등의 수질 데이터를 낙동강 중권역별 목표수질과 비교하여

[†] Corresponding author E-mail: yjkim@cup.ac.kr Tel: 051-510-0621 Fax: 051-510-0628

초과횟수를 구하고, 오염부하량에 대한 %순위를 산정하여 상위 35개 지천을 중점관리지점으로 선정한 바 있다. 추후 중점관리지점은 39개 지점으로 확정되어 현재 낙동강수계 환경기초조사사업을 통하여 월 1회 수질분석이 수행되고 있어, 보다 세밀한 수질 모니터링이 수행되고 있다.

낙동강 분류 및 다수의 지류·지천에 대한 오염배출부하량 산정과 비점오염원의 존재에 관한 연구는 수질 모니터링과 동시에 산발적으로 수행되어 각 지류·지천의 수질의 근거로 이용되거나 하천 관리정책의 근거로 제시되어 왔다. Lee 등⁷⁾은 낙동강 수계의 권역별로 토지계 원단위를 활용하여 비점오염원 배출부하량을 산정하여 가장 많은 비점오염부하량을 배출하는 중권역은 금호강중권역임을 밝혔다. Kang 등⁸⁾은 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 서낙동강 주요 5개 지류에서 측정된 유량과 수질을 바탕으로 모델을 보정하고 수문 운영에 대한 수질을 모의하였다. 하천의 오염 부하량 분석 외에도 하천의 유역 특성이나 수리학적 특성을 연구한 사례도 다수 존재한다.⁹⁻¹¹⁾ 이러한 연구 사례에서도 관찰할 수 있듯이, 대상 하천의 특성은 다양한 측면에서 조사·분석되어, 각 하천의 유역이 가진 특성과 오염 배출특성 등은 하천의 수질 정보와 함께 바람직한 정책 수립을 위한 근거로 사용되어야 한다.

본 연구에서는 관리 대상 하천의 주요 특성을 파악하고 하천의 특성에 알맞은 합리적인 관리 정책 수립을 위하여 지류·지천의 유형화를 시도하였다. 현재 낙동강 유역에서 중점관리지류·지천으로 관리되고 있는 38개 지류·지천을 대상으로 각 하천의 유역 특성, 오염원 특성 및 오염부하량 인자들을 추출하여 다변량 통계분석을 수행함으로써 중점관리지류·지천을 주요한 몇 가지 유형으로 나누고자 하였다. 추출된 하천 특성인자는 하천연장, 유역면적, 도달시간, 총인구, BOD 및 T-P의 배출부하량 등 하천의 유역 특성과 오염원에 대한 정보를 포함하였다. 또한 각 하천의 수질을 대표하는 하나의 변수를 생성하여 활용하기 위해 환경부에서 활용하고 있는 실시간수질지수(RTWQI)를 활용하였다. 본 연구를 통해 추출된 유형은 각 지류·지천의 유역 특성과 오염원의 특성, 오염배출부하량 및 수질의 특성을 6개로 분류해 낼 수 있었다. 이러한 연구 결과는 새로이 자동측정망을 설치하고자 할 때의 기초 자료로 활용하는 등, 대상 지류·지천을 보다 효율적으로 관리하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지류·지천

낙동강권역에는 1,187개(낙동강수계 779개)의 국가 및 지방하천과 7,000여개의 소하천이 위치한다. 체계적인 유역관리를 위해 통합 모니터링 계획이 수립되었고 수질 및 유량

Fig. 1. Distribution of monitoring stations in tributaries of Nakdong river.

등의 기초자료 관리체계를 마련해 오고 있다. 이를 위해 낙동강 수계지류들에 대한 수질 및 유량 통합 모니터링 조사가 2011년부터 실시되었다. 낙동강 수계 22개 중권역에 속한 191개 지류·지천을 대상으로 지류 모니터링 대상지점을 선정하여, 안동댐 중권역 등 26개(본류 22개, 기타 4개) 중권역의 195개 지점을 대상으로 모니터링을 수행하고 있다. 이들 195개 지점은 일반관리대상지점 156개 지점과 중점관리대상지점 39개 지점으로 나누어져(Fig. 1, Table 1), 일반관리대상지점의 경우 년 2회(148개 지점) 혹은 년 4회(8개 지점), 중점관리대상지점은 월 1회의 수질 및 유량 모니터링을 실시하고 있다. 본 연구의 대상이 되는 하천은 중점관리대상지점 39개 지점이 위치한 38개 지류·지천으로서, 유역 특성과 오염원 특성, 배출부하량 특성 등의 정보를 수집하고 각 하천의 수질을 대표하기 위한 수질지수를 산정하였다. 수질지수 산정에는 Table 1에 나타난 각 지류지천별 측정시작일자부터 2016년 12월 31일까지 누적된 모든 수질측정자료를 활용하였다. 수질 분석 항목은 수온, DO, pH, 전기전도도, BOD, COD, T-N, T-P, SS, TOC, chl-a, 유량의 12개 항목으로, 본 연구에서는 수질 지수 산정을 위해 수온, pH, DO, EC, TOC, T-N, T-P를 사용하였다.

Table 1. Target tributaries and monitoring record

Medium sized management area	Tributary	Measurement start date	Number of measurements	Medium sized management area	Tributary	Measurement start date	Number of measurements
Gancheon	Ah	11/03/24	29	Nam river	Seokyo	11/03/25	45
Nakdong · Waegwan	Gumi	11/04/15	45		Euiryung	13/02/28	30
	Kyungho	11/03/18	45		Nam6	11/03/25	45
	Dongjung	11/03/18	45		Baekya	11/03/25	36
Geumho river	Bukan	11/03/17	38		Daesan	11/03/25	29
	Omok	11/06/02	37		Daesa	11/03/25	45
	Nam	11/06/02	52	Nakdong · Miryang	Gwangok	11/03/25	45
	Palgeo	11/03/18	53		Gyesung	15/06/18	18
	Dalseo	11/03/18	46		Chilwon	15/06/18	18
Nakdong · Goryeong	Chennae	11/03/18	38		Youngsan	11/04/15	53
	Kisegok	11/03/18	60		Oho	11/03/25	53
	Bonri	11/03/18	53		Yongdeok	11/03/25	45
	Yongha	11/03/18	60		Toirae	11/04/01	45
	Yongho	11/03/25	53		Hwapo	11/04/01	60
Nakdong · Changyeong	Topyeong	11/03/25	45		Chodong	11/04/01	60
	Changyeong	11/04/01	45		Sangnam	11/04/01	53
	Jeonhwa	11/03/25	38	Nakdong river estuary bank	Migeon	11/04/01	53
Nam river	Gajoa	11/04/08	53		Hogye	11/04/11	38
	Hyunji	11/04/01	53	Geojeodo	Sanyang	11/04/13	38

2.2. 하천 특성 분석

본 연구의 대상이 되는 중점관리대상지점이 위치하는 38개 하천에 관하여, 하천의 유역 특성, 오염원 특성 및 발생 부하량 특성에 관한 정보를 수집하였다(Table 2). 하천의 유역 특성으로는 유역면적, 최고/최저 표고, 하천연장, 하천경사, 도달시간 등을 조사하였다. 하천의 오염원 특성으로는 총인구, 인구밀도, 단위면적당 한우 및 젓소의 마리 수, 하수방류량, 대지면적, 대지비율 등을 산정하였는데, 이는 전국오염원조사자료(2015년)를 활용하였으며, 총인구 및 축산 현황, 오염원 현황 및 오염부하량 자료는 “수질오염총량관리기술지침(2014, 국립환경과학원)”에 따라 생활계, 축산계, 산업계, 토지계로 구분하여 정리하였다.^{11,12)}

2.3. 수질지수 도출

현재 환경부의 실시간 수질정보시스템(<http://www.koreawqi.go.kr>)에서는 대상 수계의 각 측정소마다 측정되는 수질에 대하여 실시간 수질지수(Real Time Water Quality Index,

RTWQI)를 산정하여 공시하고 있다. 이는 캐나다의 CCME (Canadian Council of Ministries of the Environment)¹³⁾의 WQI (Water Quality Index)를 모델로 하여 개발되었으며, 국내의 하천 사정에 맞추어 기준 범위가 조정된 것이다. 환경부의 실시간 수질지수는 아래의 식 (1)로 도출된다.

$$RTWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{3}} \quad (1)$$

여기서, F1은 기준치를 위반하는 수질항목의 개수를 전체 측정되고 있는 수질자료 개수로 나누어 산정한 비율이며, F2는 각 수질항목별로 측정주기 동안 기준치를 위반한 항목들의 총 횟수를 총 측정횟수로 나누어 산정한 비율, 그리고 F3은 각 수질지표별로 기준치를 위반한 정도를 비율화한 인자의 합으로 계산한 값이다. 수질이 가장 좋을 때 100의 값을, 수질이 좋지 않을수록 적은 값을 가지도록 설계되어 있다. 계산된 수질지수의 범위에 따라 부여되는 수질의 정성

Table 2. Characteristic variables for each tributaries

Categories	Characteristic variables
Characteristics of watershed	Drainage area [km ²] (x2), Inclination (x3), Max. altitude [m] (x4), Min. altitude [m] (x5), Extention [km] (x6), Travel time (Tc_min) (x7)
Pollutant	Total population [person] (x8), percentage of sewered population [%] (x9), Ox and cow [head] (x10), Effluent discharge [m ³ /d] (x11), Ratio of building site [%] (x12)
Pollutant load	Discharged BOD load [kg/d] (x13), Discharged T-P load [kg/d] (x14), BOD non-point source rate [%] (x15), T-P non-point source rate [%] (x16)

Table 3. Characteristics variables for each tributaries

Category	RTWQI domain	Definition
Excellent	80~100	It is always clean with little contaminants and always suitable for water-related activity
Good	60~79	It is suitable for water-related activity because it maintains relatively good water quality
Fair	40~59	It is generally good water quality and sometimes pollutants may affect water-related activity
Marginal	20~39	It requires attention to be used for water-related activities due to frequent inflow of pollutants
Poor	0~19	It is not suitable for water-related activities due to severe water pollution

적 정의가 위의 Table 3에 제시되어 있다. Gitau 등¹⁴⁾에 의하면, 기준치 위배 여부에 기초한 이러한 형태의 수질지수는 전 세계적으로 사용되고 있는 수질지수 이용사례 중 16% 정도의 빈도를 차지한다. Herley 등¹⁵⁾은 상수원수의 수질을 정보화하기 위하여 CCME의 WQI를 사용하여 수질의 모니터링과 그 결과의 공유, 그리고 지역사회의 이해를 이끌어낼 수 있었다고 보고하였다. 또한 Feng 등¹⁶⁾은 계산된 지수 값이 가지는 정성적 범위의 경계값을 함수화하여 보다 합리적인 수질지수를 제공할 수 있음을 보였다.

Gitau 등¹⁴⁾에 의하면, 수질 지수는 계산값 자체가 의미를 가진다기 보다는 그 효용성, 즉 다양한 지점의 수질을 비교하거나, 수질관리정책의 효과를 비교하기에 유용하다고 하였다. Abtahi 등¹⁷⁾은 24개 취수 지점의 먹는 물 수질을 비교하기 위하여 CCME의 WQI를 목적에 맞게 수정하여 사용하였다. Bora와 Goswami¹⁸⁾는 하나의 강에 존재하는 7개의 지점에 대해 수질지수를 계산하여 비교한 바 있으며, Akkoyunlu와 Akiner¹⁹⁾은 터키 내에 존재하는 다양한 하천의 수질을 대상으로 CCME를 포함한 3가지 수질 지수를 계산하여 비교하였다. 비교 대상이었던 8개 하천 수질을 “Poor”와 “Very Poor”의 범위로 평가하는 OWQI (Oregon Water Quality Index)와 “Good”과 “Mediun”으로 평가하는 미국의 NSF-WQI에 비해 CCME 제안한 수질지수는 “Fair”, “Marginal”, “Poor”로 평가하여 보다 다양한 수질 정보를 제시할 수 있음을 보여주었다. 또한 8개 하천에 대해 계산된 수질 지수 값 또한 세 가지 방법이 동일한 패턴을 가지고 움직여 이러한 수질 지수들이 각각 계산 방법은 다르나 수질의 변동 양상은 표현할 수 있음을 보여주었다.

수질 지수의 의미는 다양한 수질 항목으로 구성되어 있는 측정치들로는 불가능한 직관적인 평가와 비교가 가능하게 한다는 데 있다. 다시 말해, 시계열의 수질 자료에 대해서는 시간에 따른 수질의 개선/악화 여부를 판단하기 쉽게 하고, 일련의 하천 정비 사업이나 관리 정책의 효과를 파악할 수 있도록 하며, 다양한 대상 지점의 하천의 수질을 비교하거나 수질을 대표하는 값으로서 추가적인 작업을 가능하게 한다. 본 연구에서 수질지수는 다수의 중점관리하천의 수질을

대표하는 하나의 변수로서 하천의 여러 가지 특징들과 함께 유형화에 사용되었다.

2.4. 지류·지천 유형화 방법

본 연구는 각 지류·지천의 수질을 대표하는 수질지수(이하 WQI 혹은 x1) 값과 더불어 Table 2에 제시된 바와 같은 수많은 변수를 대상으로 각 지류·지천이 가지는 특성을 일련의 유형으로 그룹화하는 것에 그 목적이 있으므로, 다변량 변수들이 가지는 총 분산 중 주요 분산만을 추출하여 자료를 축약하기 위한 목적으로 주성분분석을 사용하였고, 유사도에 기반하여 비슷한 특성을 가진 지류·지천을 그룹화하기 위해 비교사(unsupervised) 군집화 방법인 비계층적 군집분석을 실시하였다. 이들 중 주성분분석은 요인분석과 그 원리가 같으며, 다양한 변수가 복잡하게 상관하고 있는 경우에도 그들의 상관관계를 설명하기 위한 공통적인 성분을 생각하여 그것을 요인(factor)라고 칭하여 총 분산이 몇 개의 분산(하나의 요인에 의해 설명되는 자료의 변동)으로 이루어져 있는지를 알 수 있도록 한다. 또한, 이에 따라 원자료의 공분산행렬을 최대로 설명하는 몇 개의 일차결합인 주성분(Principal Component, PC)을 사용하여 뒤이은 분석의 자료로 활용하기도 한다. 본 연구에서는 Table 2에 제시된 16개의 변수를 대상으로 주성분분석을 실시하고, 그 결과로 추출된 네 개의 주성분을 대상으로 제곱유클리디안 거리에 기초한 계층적 군집분석을 실시함으로써 지류·지천의 유형화를 시도하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상 지류·지천의 수질지수

각 지류·지천의 수질을 대표하는 WQI를 계산한 결과, 중점관리지점 39개 지점들의 수질은 모두 “Fair”(대체로 양호한 수질이나 때때로 오염물질이 유입되어 친수활동에 영향을 미칠 수 있음, 40~59) 이하의 범위에 존재하였다. 가장 WQI 값이 낮았던 하천은 달서천 31.8, 용하천 35.1, 구미천 38.6, 현지천 36.0, 퇴래천 36.3, 기세곡천 39.1, 화포천 39.3, 호계천 39.3의 순으로 존재하였다. 대부분의 지류·지천의 WQI의 값이 “Fair” 이하의 값을 가지는 이유는 본 연구의 선행 과정으로서 중점관리지점의 선정 근거에 해당 하천의 수질이 사용되었기 때문이다.⁵⁾ Fig. 2에 표시되어 제시된 구미천, 달서천, 기세곡천, 용하천, 현지천, 퇴래천, 화포천, 호계천은 WQI의 범위상 “Marginal”에 해당하는 하천으로서, 타 하천에 비해 수질이 나쁘다고 할 수 있다.

3.2. 유형화를 위한 분산해석

중점관리대상 지류·지천 38개 하천의 유형화를 위하여 추출된 15개 특성 변수들과 WQI의 총 16개 변수들 중 어떤

Fig. 2. Water quality index distribution of the target tributaries.

Table 4. Results of Spearman's rank correlation analysis for target variables

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16
x1								-.385	-.335		-.422	-.464				
x2			-.358	.529	.423	.868	.786	.523		.801	.465		.889	.920		
x3				.339		-.531	-.687						-.370	-.359		
x4					.425	.519	.369	.321		.357			.440	.442		
x5						.378	.369	.353					.385	.357		
x6							.967	.405		.679	.466		.744	.751		
x7								.406		.572	.469		.690	.679		
x8									.501		.675	.378	.736	.598		
x9												.352			.445	.370
x10													.732	.825	-.374	-.353
x11													.665	.579		-.396
x12																-.122
x13														.965		-.338
x14																-.423
x15																.848
x16																

한 변수들이 함께 분산을 형성하는지 알아보기 위해 주성분분석을 실시하였다(SPSS v.18.0). 본 연구에서와 같이 요인분석을 겸하는 목적의 주성분분석을 실시하기 전에 Kaiser-Meyer-Olkin의 표본적합성 측도를 계산하여 측정변수들 저변에 공통적인 잠재요인이 존재하는지를 알아보고, Bartlett의 구형성 검정을 통해 상관계수 행렬에 관한 검정을 수행하여 요인분석을 실시하기에 적합한지를 확인하여야 한다. Kaiser²⁰⁾에 따르면 KMO 측도의 값이 0.60 이상인 경우 공통적인 잠재요인이 보통(mediocre) 수준 이상으로 존재한다고 하였다. 본 연구에서 사용된 16개의 변수에 대한 KMO 측도의 값은 0.638, Bartlett의 구형성 검정으로는 유의확률 0.000으로 도출되어 요인분석 및 주성분분석을 수행하기에 적절한 것으로 판단되었다.

주성분분석을 수행하기 전, 16개 변수들 사이의 이변량 상관관계를 비모수적 방법인 Spearman의 순위상관계수를 통해 알아본 결과(Table 4), BOD 배출부하량(x13)과 T-P 배출부하량(x14)은 유역 면적(Drainage area, x2), 하천연장

(Extention, x5) 및 총 사육두수(Ox and cow, x10), 총 인구(Total population, x8)와의 상관계수가 유의하게 매우 높음(0.7 이상)을 알 수 있었다. 그러나 단순 상관도 분석만으로

Table 5. The variables included in each principal component

PCs	Variables	Ratio of variance (%)
1	WQI (x1), Extention (x6), Travel time (x7), Total population (x8), Ox and cow (x10), Discharged BOD load (x13), Discharged T-P load (x14)	29.5
2	Drainage area (x2), Inclination (x3), Max. altitude (x4), Min. altitude (x5)	18.7
3	Percentage of sewered population (x9), Effluent discharge (x11), Ratio of building site (x12)	16.7
4	Ratio of BOD loading from non-point source (x15), Ratio of T-P loading from non-point source (x16)	13.6
Total		78.4

는 이변량 계수 사이의 변동 경향을 확인할 수 있을 뿐이므로, 각 변수들 사이에 숨어있는 인자를 파악하고 어떠한 변수들이 모여 공통적인 분산을 형성하는지를 파악하기 위해 주성분분석을 실시하였다.

주성분 분석을 통한 분산해석 결과, 16개의 변수가 형성하고 있던 총 분산은 고유값이 1보다 큰 성분 4개가 78.4%의 분산을 차지하고 있음을 알 수 있었다. 이에 따라 주성분행렬로부터 각 주성분의 영향 변수를 분석한 결과가 Table 5에 제시되어 있다.

주성분 분석의 결과로부터, 제일 큰 분산을 형성하는 주성분(PC1, 29.5%)은 수질지수 및 수질과 연관된 변수들에 의해 구성되어 있어, 수질지수와 오염원자료, 배출부하량 변수들과의 관계가 존재함을 의미한다고 볼 수 있다. 다시 말해, 총 인구(x8) 및 총 한우/젖소마리수(x10), BOD 및 T-P의 배출부하량(x13, x14)은 직접적인 오염물질의 양을 의미하는 것으로서, 모두 수질지수와 밀접한 연관성을 가지고 있음을 보여준다. PC 1에 포함된 변수들 중 하천연장(x6)과 도달시간(x7)이 포함되어 있는 것은 상관도 분석 결과에서도 나타났듯이 BOD 배출부하량(x13) 및 T-P 배출부하량(x14)와의 강한 상호관계에 기인한다고 설명할 수 있다. 본 연구에서 수행한 주성분 분석(요인분석)은 상관행렬에 기초하였으므로 상관계수의 결과에 기대어 주성분분석 결과를 설명할 수 있는 경우가 생길 수 있다. 그러나 근본적으로 주성분분석(요인분석)은 상관행렬에 기초하여 통계적 모형을 구축하고, 그와 같은 구조를 생성시키는 몇 개의 요인을 추출하여 대상 변수들 간에 존재하는 구조적 관계를 알아보는 데 그 목적이 있어²¹⁾ 항상 상관도 분석 결과와 일치하지는 않는다.

두 번째 주성분(PC2, 18.7%)은 주로 하천 규모와 유량을 의미하는 인자들에 의해 구성되어 있어, 하천으로 배출된 오염물질이 하천 수질에 미치는 영향을 좌우할 수 있는 인자이다. PC3과 PC4는 간접적으로 수질에 영향을 미칠 수 있는 인자들로 간주될 수 있다. 이들 변수들 중 BOD 배출부하량, T-P 배출부하량, 하천연장 그리고 도달시간과 높은 상관계수를 보인 하천면적이 들어가 있다는 점은 상관계수

로는 설명되지 않지만 하천경사(x3), 최고표고(x4) 및 최저표고(x5)와 밀접한 상호관계가 존재하기 때문이라고 설명할 수 있다. 이와 같이 주성분분석을 통해 추출된 4개의 주성분은 전체 자료의 분산 중 주요한 78.4%의 분산을 포함하고 있어 자료의 해석을 방해하는 21.6%의 분산을 제외한 결과라고 할 수 있다. 따라서, 4개의 주성분을 대상으로 계층적 군집화를 시도하여 지류·지천의 유형화를 수행하였다.

Fig. 3. Dendrogram for classifying the target tributaries.

Table 6. Descriptions of deduced groups

Types [WQI ranking, mean]	Tributaries (low WQI order)	Characteristics
A group [4, 45.4]	Toirae (36.3), Kiseogok (39.1), Hogle (39.3), Chilwon (43.5), Sanyang (44.3), Kajoa (45.1), Jeonhwa (46.8), Bonri (48.3), Oho (49.7), Cheonnae (51.2), Baekya (56.3)	Smallest sized tributaries having many population and small pollutant loading
B group [1, 50.7]	Topyeong (46.7), Gyesung (49.4), Euiyung (53.0), Seokkyo (53.6)	Large sized tributaries having small population and Lowest pollutant loading
C group [3, 45.7]	Hyunji (36.0), Youngsan (42.1), Sangnam (42.2), Chodong (43.9), Yongdeok (45.3), Gwangok (46.0), Yongho (46.3), Dongjung (47.3), Daesa (50.3), Daesan2 (50.5), Migeon2 (53.0)	Small sized tributaries having low level of sewer service and fair pollutant loading
D group [2, 49.0]	Ah (48.3), Bukan (49.7)	Large sized tributaries having smallest population and fair water quality against high pollutant loading
E group [6, 41.4]	Hwapo (39.3), Changyeong (40.9), Kyungho (43.9)	Mid-sized tributaries having high pollutant loading
F group [5, 41.6]	Gumi (38.6), Palgeo (43.2), Nam (43.2)	Large sized, high population density and pollutant loading
Others	Dalseo (31.8), Yongha (35.1), Omok (47.8), Nam 6 (49.2)	Not classified

3.3. 유형화 결과

앞서 도출된 4개의 주성분 값을 바탕으로 제곱유클리디안 거리에 기초한 계층적 군집분석을 수행한 결과, Fig. 3과 같은 덴드로그램을 통해 6개의 유형이 도출되었다. 계층적 군집분석은 임의로 정해진 군집의 개수에 맞추어 군집화를 수행하는 비계층적 군집분석과 달리 유사도에 근거하여 비슷한 개체들을 묶어 가며 군집화를 수행하며, 이상치로 간주될 수 있는 값들을 군집화하지 않고 구분해내어 주

는 특징을 가지므로 본 연구의 목적에 부합한다.

유형화를 수행한 결과, Table 6에 제시된 바와 같은 6개의 유형으로 분류가 가능하였다. 그러나 오목천, 달서천, 용하천, 남강 6 지점은 특정 유형에 소속되어 분류되지 않았다. 달서천은 단위면적당 인구수가 타 하천에 비해 월등히 컸으며($110,302.1 \text{ person/km}^2$, 타 하천의 경우 $22,651 \pm 1,020.4 \text{ person/km}^2$), 그에 따라 폐수방류량 또한 1순위($35,540.2 \text{ m}^3/\text{d}$)에 해당하였다. 용하천은 폐수방류량이 2순위($11,948.4 \text{ m}^3/\text{d}$,

Table 7. Detailed descriptions of variables for each group

Types		WQI	Drainage area	Inclination	Max. altitude	Min. altitude	Extention	Travel time	Total pop.	Sewered population	Ox and cow
		-	km ²		El,m	El,m	km	(Tc)_min	person	%	head
A	$\bar{x}$	45.4	12,565	0.019	108,727	26,636	5,438	26,754	8673,182	31,306	326,727
	s	5.89	9,341	0.007	30,748	9,362	3,344	17,875	12673,096	35,859	573,541
B	$\bar{x}$	50.7	54,780	0.005	136,250	27,500	22,150	149,844	4981,000	50,045	2103,500
	s	3.25	31,288	0.001	29,262	15,000	3,557	41,464	3160,515	15,532	1651,082
C	$\bar{x}$	45.7	21,900	0.005	64,000	23,273	8,266	53,464	4203,636	54,952	1822,818
	s	4.72	9,885	0.002	24,199	6,278	2,925	23,934	4146,701	30,783	1838,962
D	$\bar{x}$	49.0	95,005	0.003	158,500	81,500	22,175	149,864	7534,500	5,385	4809,500
	s	0.971	1,534	0.002	30,406	2,121	0,318	39,481	170,413	0,870	1209,860
E	$\bar{x}$	41.4	62,597	0.008	198,667	55,000	17,700	109,314	23728,000	71,090	3184,333
	s	2.32	18,780	0.005	72,459	18,028	1,572	39,763	22880,418	12,710	848,871
F	$\bar{x}$	41.7	75,700	0.004	109,333	45,667	16,483	115,703	172205,333	90,200	2294,000
	s	2.67	40,155	0.002	34,948	9,815	3,575	23,809	70031,736	9,510	3177,381
Omok		47.8	156,780	0.003	150,000	40,000	32,650	259,132	88201,000	58,630	18267,000
Dalseo		31.8	8,940	0.002	35,000	20,000	8,600	68,255	98627,000	95,520	0,000
Yongha		35.1	12,720	0.034	290,000	23,000	7,970	37,953	12470,000	99,110	162,000
Nam6		49.2	688,280	0.029	550,000	140,000	14,220	67,716	11018,000	47,950	5253,000

Types		Discharge	ratio of building site	Discharged BOD loading	Discharged T-P loading	Ratio of BOD loading from non-point source	Ratio of T-P loading from non-point source
		m ³ /d	%	kg/d	kg/d	%	%
A	$\bar{x}$	197,715	3.236	214,695	11,427	0.700	0.641
	s	240,219	2.829	171,195	8,637	0.147	0.167
B	$\bar{x}$	359,108	0.809	760,300	42,203	0.641	0.638
	s	281,005	1.062	463,963	26,128	0.180	0.104
C	$\bar{x}$	67,297	2.714	411,387	23,515	0.709	0.681
	s	116,707	2.845	266,085	17,356	0.080	0.087
D	$\bar{x}$	447,015	0.589	1403,610	95,875	0.645	0.600
	s	567,531	0.050	458,644	16,440	0.025	0.044
E	$\bar{x}$	817,420	2.289	974,847	57,473	0.714	0.610
	s	908,177	0.294	244,045	19,056	0.097	0.034
F	$\bar{x}$	830,423	5.911	1499,237	57,533	0.736	0.684
	s	846,231	1.148	534,709	25,115	0.037	0.026
Omok		3188,140	1.480	3959,330	228,620	0.641	0.579
Dalseo		35540,170	60.403	781,150	24,170	0.640	0.520
Yongha		11948,380	14.387	435,660	13,930	0.805	0.697
Nam6		57,050	0.199	2088,880	128,100	0.848	0.826

타 하천의 폐수방류량 평균 $373.2 \pm 654.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 였으며, 남강 2 지점은 유역면적이 최대(688.28 km^2), 오목천은 그 다음 순위의 유역면적(156.78 km^2)을 보유하고 있었다. 타 하천의 유역면적의 평균이 $34.02 \pm 30.85 \text{ km}^2$ 라는 점을 고려하여 볼 때, 남강 6 지점과 오목천은 타 하천과 뚜렷이 구분되는 특징을 가지고 있다고 할 수 있다. 각 유형의 상세한 특성자료는 Table 7에 제시하였다.

본 연구의 유형화 결과에 의하면, 현재 중점관리 중인 지류·지천을 대상으로 신규 수질측정망을 설치하고자 한다면, WQI가 31.8로서 가장 낮고 단위면적당 인구밀도 및 폐수방류량도 높은 달서천부터 설치하여야 할 것이다. 그 다음으로 WQI가 낮으며(35.1) 동시에 폐수방류량이 두 번째로 큰 용하천이 대상이 될 것이다. 그 외, 수질 지수와 배출부하량이 큰 유형에 속하는 하천을 우선시하되 각 유형별로 고루 설치하는 것을 전제로 한다면 우선순위는 구미천 → 화포천 → 퇴래천 → 현지천 및 기세곡천이 될 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 낙동강 유역에 존재하는 중점관리 대상인 38개 지류·지천의 특성 자료를 수집하고, 각 지천의 수질의 특성을 대변하기 위하여 환경부의 실시간 수질지수(RTWQI)에 기초한 지수를 산출하여 수집된 자료와 함께 대상 지류·지천들의 유형을 분류하고자 하였다. 환경부의 다양한 수질 항목으로 이루어져 있는 수질 측정치를 나열하는 것으로는 해당 하천의 수질을 대표하여 특징짓기 힘든 점을 고려하여 본 연구에서는 각 지천의 수질을 대표하기 위한 하나의 변수를 생성하기 위해 환경부의 실시간수질지수(RTWQI)의 방법을 사용하였다. 다양한 수질지수의 산정 방법이 존재하고, 이론적인 문제들이 제기될 수 있으나 본 연구에서는 수질지수에 초점을 두기보다는 하천을 유형화하기 위한 기초자료를 생성하기 위한 목적으로 활용하였다.

이에, 각 지류·지천의 특성을 대변하는 변수들과 수질지수 값이 하나의 자료 세트를 이루어 유형화에 사용되었다. 유형화 결과와 관계없이 수질 지수가 낮은 순으로 신규 수질 측정망 설치 우선순위를 도출한다면 달서천(31.8) → 용하천(35.1) → 현지천(36.0), 퇴래천(36.3) → 구미천(38.6) → 기세곡천(39.1), 화포천 및 호계천(39.3)의 순서일 것이다. 그러나 유형화로서 도출된 하천 특성을 반영한다면, 즉 수질 지수와 배출부하량이 큰 유형에 속하는 하천을 우선시하되 각 유형별로 고루 설치하는 것을 고려한다면 우선순위는 달서천 → 용하천 → 구미천 → 화포천 → 퇴래천 → 현지천 및 기세곡천으로서, 최종 결정자의 합리적인 결정을 위한 다양한 자료를 제공한다는 측면에서 의미가 있다고 할 수 있다.

연구 대상이 되는 하천의 규모가 크면 클수록 측정 자료의 양은 많아지게 되어 일련의 목적을 위한 정보를 이끌어내는 작업은 어려워진다. 본 연구에서는 낙동강 유역의 중

점관리하천으로 분류되어 월 1회 수질 모니터링이 이루어지고 있는 38개 지류·지천에 대한 16개의 특징변수를 활용하여 유형화함으로써, 다양한 수치적 자료들에 내재되어 있는 정보를 추출하였다. 비록 본 연구에서 사용된 지류·지천의 특성치들이 낙동강 유역에 국한되어 있고, 따라서 추출된 유형의 특징은 대상이 되는 하천의 특성들 내에서 상대적으로 의미를 가지는 것이 한계일 것이나, 관심의 대상이 되는 하천들을 이해하거나 신규 수질측정망 설치지점을 결정하는 등의 정책의 근거를 제공하고자 하는 목적으로는 유용하다고 할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 논문은 낙동강수계 2017년도 환경기초조사사업 “낙동강수계 지류·지천 수질 및 유량 모니터링”에 의해 지원받았음.

KSEE

References

1. Na, S., Kwon, H., Shin, S. M., Son, Y. G., Shin D. and Im, T. H., “A Study on Seasonal Pollutant Distribution Characteristics of Contaminated Tributaries in Nakdong River Basin,” *J. Wetlands Res.*, **18**(3), 301~312(2016).
2. Lee, H. J., Park, H. H., Lee, J. H., Park, A. R. and Cheon, S. U., “Coliform pollution status of Nakdong river and tributaries,” *J. Korean Soc. Water Environ.*, **32**(3), 271~280 (2016).
3. Park, S., Moon, E., Choi, J., Cho, B., Kim, H., Jeong, W., Yi, S. and Kim, Y., “Analysis of distribution characteristics of flowrate and water quality in tributary at Chungcheongnam-do,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(10), 739~747 (2011).
4. Kim, S. H., “Research about the water pollution in the branch stream which affect water quality of Taehwa upriver : In the case of Eonyang and Samdong stream,” Master Thesis, Ulsan University (2010).
5. Im, T. H., Na, S., Shin, S. and Son, Y., “Water Quality Analysis in Nakdong River Tributaries for the Determination of Priority Management Area,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(10), 558~565(2016).
6. Na, S., Lim, T. H., Lee, J. Y., Kwon, L. H. and Cheon, S. U., “Flow rate-water quality characteristics of tributaries and a grouping method for tributary management in Nakdong river,” *J. Wetlands Res.*, **17**(4), 380~390(2015).
7. Lee, J., Kwon H. and Choi, H., “Evaluation of Pollution Level Attributed to Nonpoint Sources in Nakdonggang Basin, Korea,” *J. Environ. Impact Assess.*, **23**(5), 393~405(2014).
8. Kang, D. H., Kim, J. M., Kim, T. W. and Kim, Y. D., “Prediction of Continuous Discharge and Water Quality Change

- for Gate Operation in Seonakdong River Experimental Catchment Using SWAT,” *J. Wetlands Res.*, **14**(1), 21~33(2012).
9. Park, M. J., Park, G. A. and Kim, S. J., “A Study on Hydraulic Analysis using GIS-based RMA-2 and HEC-1,” *J. Korean Assoc. Geographic Informat. Studies*, **10**(1), 124~135 (2007).
 10. Park, Y., Choi, D., Kim, J. and Kim, S., “The Effect Analysis of Climate and Watershed Characteristics on Precipitation Partitioning in Nakdong River Basin,” *J. Korean Soc. Harzard Mitig.*, **13**(6), 423~428(2013).
 11. Report on the pollution sources of Korea(2015).
 12. Guidelines for Implementation of TDML(2014).
 13. CCME, “Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report. In: Canadian Environmental Quality Guidelines(1999),” Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnileg (2001).
 14. Gitau, M. W., Chen, J. and Ma, Z., “Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management,” *Water Resour. Manage.*, **30**(8), 2591~2610(2016).
 15. Hurley, T., Sadiq, R. and Mazumder, A., “Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality,” *Water Res.*, **46**, 3544~3552(2012).
 16. Feng, Y., Danying, Q., Bao, Q., Lin, M., Xigang, X., You, Z. and Xiaogang, Y., “Improvement of CCME WQI using grey relational method,” *J. Hydrol.*, **543**, 316~323(2016).
 17. Abtahi, M., Golchinpour, N., Yaghmaeian, K., Rafiee, M., Jahangiri-rad, M., Keyani, A. and Saeedi, R., “A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran,” *Ecol. Indicators*, **53**, 283~291(2015).
 18. Bora, M. and Goswami, D. C., “Water quality assessment in terms of water quality index (WQI): case study of the Kolong River, Assam, India,” *Appl. Water Sci.*, **7**(6), 3125~3135(2017).
 19. Akkoyunlu, A. and Akiner, M. E., “Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey’s Sapanca Lake Basin,” *Ecol. Indicators*, **18**, 501~511(2012).
 20. Kaiser, H. E., “An index of factorial simplicity,” *Psychometrika*, **39**(1), 31~36(1974).
 21. Kang, H., Han, S. T. and Kim, K., “Multivariate data analysis using SAS by examples,” Freedom Academy(2005).