

우리나라 저수지 수질에 미치는 수문지형 및 유역 토지피복의 영향

Effects of Hydrogeomorphology and Watershed Land Cover on Water Quality in Korean Reservoirs

조현석¹ · 조형진² · 조강현^{3*}

¹수생태공간정보연구소 연구원, ²수생태공간정보연구소 소장, ³인하대학교 생명과학과 교수

Hyunsuk Cho¹, Hyung-Jin Cho² and Kang-Hyun Cho^{3*}

¹Researcher, EConGEO, Incheon 22170, Korea

²Director, EConGEO, Incheon 22170, Korea

³Professor, Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

Received 20 March 2019, revised 3 June 2019, accepted 5 June 2019, published online 30 June 2019

ABSTRACT: In order to study the water quality status and its causal environmental factors, the water quality variables of chemical oxygen demand (COD), chlorophyll a (Chl a), Total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN), the hydrogeomorphologic variables of water level fluctuation, total water storage, dam elevation, watershed area, and shoreline development index, and the land cover variables of forest, agricultural area, and urbanized area in the watershed were investigated in total 73 reservoirs with various operational purposes, water level fluctuation and geographical distribution in South Korea. The water quality was more eutrophic in the reservoirs of the more urbanized and agricultural area in the watershed, the low altitude, the narrow water level fluctuation, the narrowed watershed area, and the more circular shape. In terms of the purposes of reservoir operation, the reservoirs for agricultural irrigation were more eutrophic than the reservoirs for flood control. The results of the variable selection and path analysis showed that COD determined by Chl a and TP was directly affected by water level fluctuation and the shoreline development of the reservoirs. TP was directly affected by the urbanized area of the watershed which was related to the elevation of the reservoir. TP was also influenced by the water level fluctuation and the shoreline development. In conclusion, the eutrophication of the reservoirs in Korea would be influenced by the land use of the watershed, hydrological and geographical characteristics of the reservoir, water level fluctuation by the anthropogenic management according to the reservoir operation purpose, and the location of the reservoirs.

KEYWORDS: Eutrophication, Path analysis, Reservoir operational purpose, Shoreline development index, Water level fluctuation

요 약: 우리나라 저수지의 수질 특성과 이에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위하여, 운영목적, 수위변동 및 지리적 분포가 다양한 73개 저수지를 선정하여 수질 요인으로 화학적산소요구량 (COD), 엽록소 a (Chl a), 총인 (TP), 총질소 (TN)를, 수문지형 요인으로 연수위변동폭, 총저수량, 댐의 고도, 유역 면적, 호안발달도 (shoreline development index)를, 토지피복 요인으로서 산림, 농경지 및 도시화지역의 면적비율을 조사하였다. 저수지 수질은 유역의 도시화지역과 농업지역의 면적 비율이 크고, 고도가 낮고 연수위변동폭과 유역면적이 좁으며 총저수량이 적고 원형에 가까운 형태의 저수지에서 더욱 부영양화가 심하였다. 저수지 운영목적에서는 농업용수용 저수지가 홍수조절용 저수지보다 수질이 좋지 않았다. 변수선택과 경로분석의 결과에서, TP에 의한 Chl a에 영향을 받는 COD는 수위변동폭과 호안발달도에 의하여 직접적으로 영향을 받았다. 또한 TP는 유역의 도시화면적에 의하여 직접적으로 영향을 받으며 토지이용은 저수지의 고도와 관련이 있었다. 한편 TP는 수위변동폭과 호안발달도에 영향을 받았다. 결론적으로 우리나라의 저수지 부영양화는 유역의 토지이용, 수문적 지형적 특성에 의하여 영향을 받으며, 특히 저수지 운영목적에 따른 인위적인 물관리에 의한 수위변동과 저수지의 위치에 의하여 수질 특징이 결정된다고 생각된다.

핵심어: 부영양화, 경로분석, 저수지 운영목적, 호안발달도, 수위변동

*Corresponding author: khcho@inha.ac.kr, ORCID 0000-0003-4546-3546

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

1. 서론

문순기후의 우리나라는 여름철에 강우가 집중되어 수자원을 확보하고 홍수재해를 방지하기 위하여 하천을 가로막아 댐을 건설하거나 용수공급의 목적으로 소규모 저수지를 조성하여 많은 저수지를 보유하고 있다. 수자원의 시공간적인 불균일 분포를 극복하기 위하여 건설한 저수지는 전국에 17,289개가 존재하며 이중 경상도(8,651개)와 전라도(5,445개)에 81%가 분포하고 있다(KRC 2019). 이들 저수지는 수자원의 이용 목적에 따라서 농업용수용, 수력발전용, 생활·공업용수용 및 홍수조절용 저수지로 구분되어 그 운영용도에 따라 저수지의 규모와 환경특성이 다양하다(Cho and Cho 2013). 일반적으로 저수지는 자연호에 비하여 시공간적 수질의 변화가 심하고 수리수문학적으로 변이가 크다(Thornton 1990, Lee et al. 2007). 또한 여름에 강우가 집중되는 문순기후에서는 집중 강우에 의하여 수리수문적 변화가 심하게 발생하고 오염물이 대량 유입되어 수질의 시간적 변동성이 매우 크다(Kim et al. 2012).

우리나라에서 다수를 차지하는 농업용수용 저수지는 관개수 공급을 위하여 농지 주변에 소규모로 건설되었기 때문에 하천 하류와 고도가 낮은 곳에 분포하며 수량과 수질 관리가 상대적으로 어려워 수질오염에 취약한 상태에 있다(Yoon et al. 2007). 반면, 홍수조절 및 생활, 공업용수 공급을 위해 건설된 저수지는 주로 수질이 양호한 하천의 상류에 위치하여 유역에 산지에 많을 뿐만 아니라 대규모로 건설되고 수량과 수질을 체계적으로 관리하기 때문에 수질이 양호하게 유지되고 있다.

우리나라의 저수지는 주로 계절적인 강우에 의존하여 집수하기 때문에 유역 토지이용에 영향을 받아 오염물질이 유입되고 이에 따라서 수질이 오염된다. 저수지의 주요한 오염원은 유역의 토지에서 강우시 유출되는 비점오염원이 49%로 가장 많고, 생활오염원이 27%, 축산오염원이 23%를 차지하며 비점오염원인 토지유래 오염원의 비율이 높다(KRCC 2017, Kim et al. 2018). 특히 비점오염원의 유입은 여름철 집중 강우에 영향을 받아 단기간에 유입되는데, 저수용량이 작은 소규모 저수지일수록 오염물질이 바닥에 많이 쌓여 식물플랑크톤이 과도하게 번식하면서 수질오염이 장기간 지속될 수 있다(Kim et al. 2018). 이처럼 저수지는 수리수문 특성, 지형적 특성, 유역의 토지이용과 함께 운영목적에 따라 수질이 다양할 수 있다.

저수지 수질에 영향을 미치는 다양한 환경요인에 대한 연구가 다수 이루어졌다(Thornton et al. 1996, Winton et al. 2019). 저수지의 수질과 유역 환경, 특히 토지이용과의 관계를 규명하기 위한 연구가 많았다(Cadenasso and Pickett 2000, Hwang et al. 2007, Yoon et al. 2007, Kim et al. 2008, Ye et al. 2009, López-Moreno et al. 2014). 또한 저수지의 수문, 지형 및 저수지의 형상이 수질에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되고 있다(Kim et al. 2008, Choi and Park 2011, Cho and Cho 2013). 그러나 저수지의 수질에 영향을 미치는 유역의 토지이용, 지형, 수문, 형상 등의 환경요인을 여러 저수지에서 동시에 종합적으로 검토한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 73개 저수지에서 운영목적 및 지역적 위치에 따른 수질 특성을 비교하고, 수질 요인과 관련된 수문지형 특성과 유역의 토지피복 특성의 상호관계를 파악하고자 하였으며, 이러한 환경요인이 저수지 수질에 기여하는 주요한 환경요인을 선별하고 이들 요인이 수질이 미치는 직접적, 간접적 영향을 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사지 개황

우리나라의 전국에서 저수지의 수질과 수문지형 및 토지피복 환경요인 사이의 관계를 규명하기 위하여, 수질 및 환경 자료의 수집 상황과 전국적 분포를 고려하여 조사대상 저수지를 선정하였다. 한국농촌공사, 한국수자원공사 및 한국수력원자력에서 관리하는 저수지와 댐 호 중에서 수질 및 수문 측정 자료가 모두 구비되어 있고 수면적이 0.5 km² 이상인 곳을 예비 조사후보지로 선정하였다. 이 중에서 저수지 주요 수문 환경요인인 연수위변동폭과 지역적 분포를 고려하여 총 73개의 저수지를 조사대상 저수지로 선정하였다(Fig. 1, Appendix 1). 저수지의 운영목적에 따라서 주요한 용도를 하나만을 선정하여 농업용수용(n=49), 홍수조절용(n=11), 생활·공업용수용(n=7), 수력발전용(n=6) 저수지로 구분하였다. 또한 조사 저수지의 행정 소재지에 따라서 구분하면 전북(n=12), 인천을 포함한 경기(n=11), 경북(n=11), 전남(n=11), 충남(n=9), 경남(n=8), 충북(n=6), 강원(n=5)이었다.

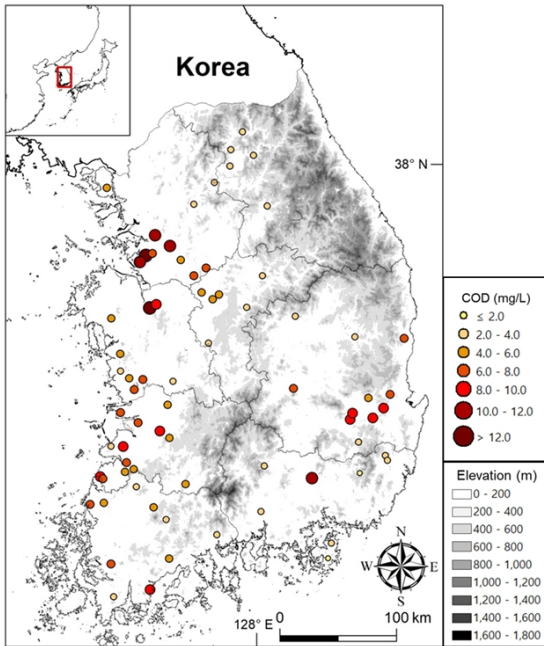


Fig. 1. Location of study reservoirs in South Korea. Circles indicate the study reservoir and its size indicate COD of the reservoir. The darkness of shadow indicates elevation above sea level.

2.2 환경 자료의 수집과 분석

조사대상 저수지의 환경자료는 수질, 수문-지형 및 저수지 유역의 토지피복으로 구분하고 총 12개 요인을 수집하였다. 수질 요인으로서 부영양화의 원인이 되는 영양소인 총인 (TP)과 총질소 (TN)를, 부영양화의 지표가 되는 엽록소a (Chl a)와 화학적산소요구량 (COD)을 선정하였다. 저수지 수질과 관련이 있을 것으로 생각되고 실제 자료 취득이 가능한 수문지형 요인으로서 연수위변동폭 (GF), 총저수량 (GS), 댐 (제방)의 고도 (GA), 유역 면적 (GW), 호안 발달도 (shoreline development index, GD)를, 부영양화 유발 오염물질의 부하량을 결정하는 유역의 토지피복 요인으로서 산림 (CF), 농경지 (CA) 및 도시화지역 (CU)의 면적비율을 선정하였다. 수질 요인과 연수위변동폭, 총저수량, 고도는 국가수자원관리종합정보시스템 (HRFCO 2019), 물환경정보시스템 (NIER 2019) 및 농촌용수종합정보시스템 (KRC 2019)에서 제공하는 2011년 1월 1일부터 2015년 12월 31일까지의 5년간 자료를 이용하였다. 저수지의 유역 면적은 물환경정보시스템에서 제공하는 표준유역 자료를 이용하여 지리정보시스템 소프트웨

어 (ArcGIS ver. 9.3.1 ESRI Inc.)를 이용하여 산출하였다. 호안발달도 (GD)는 카카오 지도 (<http://map.kakao.com>)에서 제공하는 1/256 또는 1/512 축적의 항공사진을 이용하여 둘레길이를 측정하여 Eq. 1에 의하여 산출하였다 (Hutchinson 1957).

$$GD = \frac{GL}{2\sqrt{\pi GE}} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기에서 GL은 저수지 둘레 길이 (km)와 GE는 저수지 수면적 (km²)이다. 호안 발달도가 1에 가까울수록 저수지의 모양이 원형에 가깝고, 이 값이 클수록 호안의 굴곡이 심하거나 저수지의 폭이 좁고 길이가 긴 하천 형태를 나타낸다. 저수지 유역의 토지피복 요인은 지리정보시스템 소프트웨어 (ArcGIS ver. 9.3.1 ESRI Inc.)를 이용하여 환경부에서 제공한 2013년 토지피복도에서 대분류 분류체계에서 수질과 관련이 있을 것으로 생각되는 산림, 농경지 및 도시화 지역의 면적 비율로 하였다.

2.3 자료 처리

본 연구에서 획득된 자료처리는 통계 계산과 그래프를 위한 무료 소프트웨어를 제공하는 R (R Core team 2019)을 이용하였다. 저수지의 운영목적과 지역적 위치에 따른 수질의 차이를 파악하기 위하여, 저수지 수질 환경 변수의 평균값을 R에서 ‘aov’와 ‘TukeyHSD’ 함수를 이용하여 분산분석과 Tukey의 정직유의차 (honest significant difference, HSD) 분석을 실시하였다. 환경요인에 따른 저수지 사이의 관계를 파악하기 위하여 R 환경에서 vegan 패키지 (Oksanen et al. 2019)의 ‘rda’ 함수를 이용하여 자료를 표준화한 후에 주요인 분석 (principal component analysis, PCA)을 실시하였다. 주요인분석은 서로 상관관계에 있는 많은 변수를 선형적으로 비상관 변수로 바꾸어 이들 변수 사이의 관계를 이해하기 쉽게 나타내는 서열법 (ordination)의 한 방법이다. 또한 저수지 수질과 이와 관련된 환경요인 사이의 관계를 파악하기 위하여 R환경에서 ‘cor.test’ 함수를 이용하여 Spearman 순위 상관 분석을 실시하였다.

저수지 수질과 관련이 있는 주요한 환경요인을 선별하기 위하여 변수선택법을 실시하였다. 변수선택법은 R환경에서 ‘step’ 함수를 이용하여 여러 변수 중에서

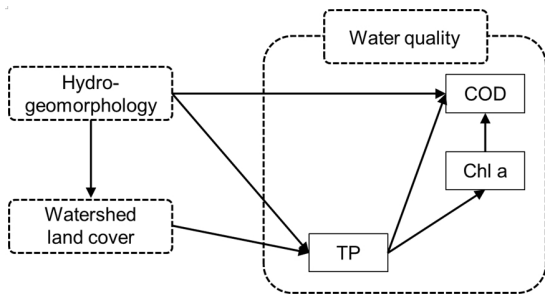


Fig. 2. Conceptual model for the path analysis of the effects of environmental factors on water quality in Korean reservoirs.

자동으로 예측변수를 선택하는 회귀모형의 적합방법인 단계별 회귀 (stepwise regression)를 실시하였는데, AIC (Akaike information criterion)이 가장 낮은 변수의 조합을 선택하였다. 저수지 수질에 영향을 미치는 환경요인의 직접, 간접적 영향을 파악하기 위하여 R 환경에서 lavaan 패키지 (Yves et al. 2018)의 ‘sem’ 함수를 이용하여 변수 조합 간에 직접적인 관계를 묘사하는 경로분석 (path analysis)을 실시하였다. 경로분석을 위한 개념 모형에서 수질 요인은 1차적으로 부영양화의 주요한 원인 물질은 TP로 2차적으로 부영양화를 나타내는 COD와 Chl a로 구분하였다 (Fig. 2). 또한 수질에 영향을 미치는 환경요인으로서 수문지형 요인으로서

고도, 연수위변동폭, 총저수량, 호안발달도를 유역 토지피복 요인으로 도시화지역 면적비율을 선정하였다.

3. 결과

3.1 저수지의 수질과 환경 특성

조사대상 73개 저수지에서 2011년부터 2015년까지의 평균 수질은 호소 생활환경기준 (ME 2019)에서 COD는 ‘약간 나쁨’ (5 mg/L - 8 mg/L), Chl a는 ‘보통’ (14 mg/m³ - 20 mg/m³), TN은 ‘나쁨’ (1.0 mg/L - 1.5 mg/L), TP는 ‘보통’ (0.03 mg/L - 0.05 mg/L) 등급이었다 (Table 1). 수질 항목의 변이는 Chl a (변이계수 1.01)이 가장 컸고, TN (변이계수 0.43)이 가장 적었다. 전국 저수지 유역의 토지피복은 산림이 66%으로 가장 넓었으나, 우리나라 전국의 토지피복과 비교하면 저수지 유역에서 산림의 비율이 낮고 농경지의 비율이 높았다 (SK 2019). 저수지의 수문지형 요인 중에서 저수용량이 1 - 2,900 × 10⁶ m³, 연수위변동수위폭이 0.8 m - 22.1 m로서 저수지에 따라서 변이가 매우 컸다. 저수지의 호안발달도는 1 - 14.4의 범위로서 원형에 가까운 것부터 하천형 저수지까지 다양한 형태를 가지고 있었다.

저수지의 수질을 운영목적에서 분류하면, 농업용수용 저수지가 다른 목적의 저수지보다 TN을 제외하고

Table 1. Water quality and the related environmental variables of the study reservoirs in South Korea (n = 73)

Variable	Abbreviation	Mean	SD	Range
Water quality				
Chemical oxygen demand (mg O ₂ /L)	COD	5.7	2.8	1.7-14.1
Chlorophyll a (mg/m ³)	Chl a	15.1	15.3	2.2-76.2
Total nitrogen (mg N/L)	TN	1.4	0.6	0.6-4.6
Total phosphorus (mg P/L)	TP	0.04	0.03	0.01-0.18
Land cover of watershed				
Forest areas (%)	CF	66.2	18.9	15.0-93.2
Agricultural areas (%)	CA	21.2	13.0	3.8-65.8
Urbanized areas (%)	CU	4.5	5.7	0.0-27.6
Hydrogeomorphology				
Water storage (x10 ⁶ m ³)	GS	161	509	1-2,900
Annual water level fluctuation (m)	GF	6.2	4.9	0.8-22.1
Altitude (m above sea level)	GA	67	53	2-227
Shoreline development index ¹ (-)	GD	2.7	2.2	1.0-14.4
Watershed area (km ²)	GW	340	880	3-5,291

¹Index value of 1 means the reservoir shape is the circle

Table 2. Comparisons of water quality according to their main operational purposes in South Korea. The different superscripts in the same column indicate the significant difference by Tukey's honestly significant different test

Main purpose	COD (mg O ₂ /L)	Chl a (mg/m ³)	TN (mg N/L)	TP (mg P/L)	n
Irrigation	6.9 ^b	19 ^b	1.4 ^a	0.06 ^b	49
Hydropower generation	3.4 ^a	8 ^{ab}	1.8 ^a	0.03 ^{ab}	6
Water supply	3.4 ^a	8 ^{ab}	1.0 ^a	0.02 ^a	7
Flood control	2.6 ^a	4 ^a	1.5 ^a	0.01 ^a	11

Table 3. Comparisons of water quality according to their regional locations in South Korea. The different superscripts in the same column indicate the significant difference by Tukey's honestly significant different test

Province	COD (mg O ₂ /L)	Chl a (mg/m ³)	TN (mg N/L)	TP (mg P/L)	n
Gyeonggi-do	7.7 ^b	33 ^b	2.0 ^b	0.08 ^b	11
Chungcheongnam-do	6.6 ^{ab}	23 ^{ab}	1.4 ^{ab}	0.06 ^{ab}	9
Chungcheongbuk-do	3.8 ^{ab}	6 ^a	1.6 ^{ab}	0.03 ^a	6
Jellanam-do	5.1 ^{ab}	11 ^a	1.1 ^a	0.04 ^{ab}	11
Jellabuk-do	6.6 ^{ab}	15 ^a	1.4 ^{ab}	0.04 ^{ab}	12
Gyeongsangnam-do	3.9 ^a	8 ^a	1.0 ^a	0.03 ^a	8
Gyeongsangbuk-do	6.3 ^{ab}	10 ^a	1.3 ^{ab}	0.04 ^a	11
Gangwon-do	2.4 ^a	4 ^a	1.9 ^{ab}	0.02 ^a	5

나머지 항목에서 수질이 좋지 않았다 (Table 2). 특히 COD는 농업용 저수지가 수질환경기준의 ‘약간 나쁨’ (5 mg/L - 8 mg/L) 등급으로서 ‘약간 좋음’ (3 mg/L - 4 mg/L) 또는 ‘좋음’ (2 mg/L - 3 mg/L) 등급의 수력발전용, 용수용 및 홍수조절용 저수지와 유의한 차이가 있었다. 저수지의 행정구역별 수질은 경기도 저수지가 다른 지역보다 불량하였다 (Table 3). 반면에 강원도의 수질이 비교적 좋았으나 TN은 높은 편이었다.

3.2 수질과 환경요인의 관계

저수지의 수질 요인 사이의 관계를 살펴보면, TP가 COD, Chl a와 유의한 양의 상관관계를 보였으나 TN은 다른 수질 요인과 유의한 상관관계가 없었다. 수질과 유역의 토지피복 요인과의 관계를 살펴보면, COD, Chl a 및 TP는 산림면적과 음의 상관관계가 농경지, 도시화지역과 양의 상관관계가 있었다. TN은 도시화지역과 양의 상관관계가 있었다. 수질과 수문지형 환경요인의 관계에서 저수용량, 연수위변동폭, 고도, 호안발달도 및 유역면적은 COD, Chl a 및 TP과 음의 상관관계가 있는 경우가 많았고 TN과는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

우리나라 저수지별 수질과 이와 관련된 환경요인에 대한 PCA 결과에서 저수지의 운영목적에 따라 주로 농업용수용 저수지 (약자 I)는 PC 1축의 오른쪽에 배열되었다 (Fig. 3). 이들 저수지는 환경 특성에 따라 고도 (GA)가 낮은 곳에 위치하고 연수위변동폭 (GF)이 좁으며 저수지 모양 (GD)이 원형에 가까웠고, 유역의 농경지 (CA)와 도시화지역 (CU)의 비율이 높아서 저수지의 수질이 부영양인 경향을 보였다. PC 1 축의 왼쪽에 배열된 저수지는 주로 홍수조절용 저수지 (약자 F)로서 고도가 높은 산림지역에 위치하고 연수위변동폭 (GF)이 큰 하천형 저수지이었다. 한편 PC 2 축의 양의 방향으로는 주로 저수지의 유역 면적 (GW)과 총저수량 (GS)이 큰 대형 저수지가 배열되었다.

3.3 수질에 영향을 미치는 환경요인

변수선택법에 의하여 선정된 저수지의 COD에 영향을 미치는 주요한 환경요인은 유역의 도시화지역과 농경지, 호안발달도, 연수위변동폭이었고, Chl a에는 도시화지역과 농경지, 호안발달도가 선택되었다 (Table 5). 주요한 영양소인 TP에는 도시화지역, 호안발달도, 연

Table 4. Spearman rank correlation among water quality and the related environmental variables of the reservoirs in South Korea (n = 73). Values above the diagonal indicate correlation coefficients and below the diagonal indicate their significant level. The bold numerals mean significant value and the red numerals mean negative correlation. The abbreviations are provided in Table 1

	COD	Chl a	TN	TP	CF	CA	CU	GS	GF	GA	GD	GW
COD		0.81	0.19	0.83	-0.60	0.54	0.44	-0.82	-0.63	-0.58	-0.67	-0.70
Chl a	***		0.03	0.71	-0.55	0.52	0.42	-0.71	-0.62	-0.71	-0.59	-0.60
TN	ns	ns		0.14	-0.13	0.08	0.31	0.14	-0.03	0.02	0.04	0.30
TP	***	***	ns		-0.62	0.51	0.53	-0.68	-0.62	-0.51	-0.61	-0.56
CF	***	***	ns	***		-0.90	-0.77	0.50	0.52	0.55	0.42	0.48
CA	***	***	ns	***	***		0.62	-0.52	-0.47	-0.56	-0.43	-0.46
CU	***	***	**	***	***	***		-0.25	-0.46	-0.44	-0.21	-0.17
GS	***	***	ns	***	***	***	*		0.60	0.53	0.82	0.88
GF	***	***	ns	***	***	***	***	***		0.63	0.50	0.47
GA	***	***	ns	***	***	***	***	***	***		0.43	0.49
GD	***	***	ns	***	**	***	ns	***	***	**		0.76
GW	***	***	*	***	***	***	ns	***	***	***	***	

ns, $p > 0.05$; *, $p \leq 0.05$; **, $p \leq 0.01$; ***, $p \leq 0.001$

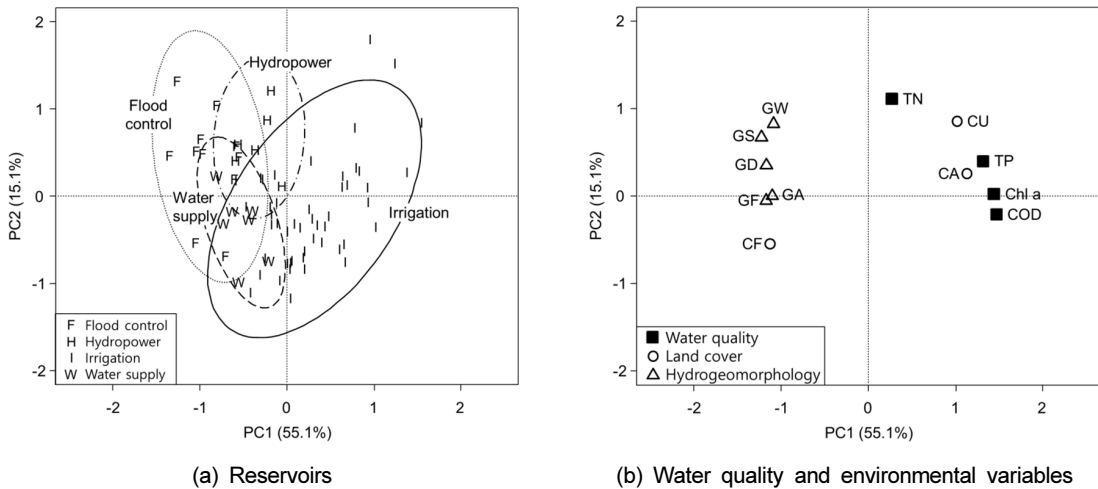


Fig. 3. Biplots of reservoirs and water quality with the related environmental variables by principal components analysis (PCA). (a) Arrangement of reservoirs based on the main operational purposes: solid line, irrigation; dashed and dotted line, hydropower generation; dashed line, water supply; dotted line, flood control. (b) Arrangement of water quality and the related environmental variables. Abbreviations are provided in Table 1. All ellipses illustrate 95% confidence ranges.

수위변동폭이, TN에는 도시화지역과 산림이 유의한 영향인자로 선정되었다. 특히 호안발달도와 연수위변동폭은 수질요인과 역상관 관계에 있었다.

저수지의 수질 중에서 부영양화를 나타내는 COD에 영향을 미치는 수질 및 환경변수의 직접적 또는 간접적 관계를 경로분석으로 묘사할 수 있었다 (Fig. 4). 저수지에서 부영양화를 유발하는 영양소인 TP에는 유역의 도시화지역 면적이 크게 영향을 미쳤다. TP는 Chl a와

COD에 양의 영향을 미쳤다. 부영양화 정도를 나타내는 COD에는 수문지형 요인 중에서 연수위변동폭과 호안발달도가 음의 영향을 미쳤다. 한편 수질에 영향을 미치는 환경요인 간의 관계를 살펴보면 고도가 높은 곳에서 도시화지역 비율이 낮고 연수위변동폭이 컸다. 또한 총저수량은 연수위변동폭과 호안발달도에 양의 영향을 미쳤다.

Table 5. Variables identified by stepwise regression analysis to predict water quality with the environmental variables in the study reservoirs

Independent variable	Dependent variable			
	COD	Chl a	TN	TP
Intercept	6.371***	11.540**	0.399 ^{ns}	0.055***
Urbanized area (CU)	0.013**	1.215***	0.086***	0.003***
Shoreline development (GD)	-0.529***	-1.158 ^{ns}		-0.005**
Agricultural areas (CA)	0.052**	0.231*		
Annual water level fluctuation (GF)	-0.184**			-0.002**
Water storage (GS)	0.001 ^{ns}			0.001 ^{ns}
Altitude (GA)		-0.054 ^{ns}		
Forest areas (CF)			0.009*	
Watershed area (GW)			0.001 ^{ns}	
F-value	21.94	19.98	15.01	25.36
R ²	0.5926	0.5132	0.3685	0.5751
p-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

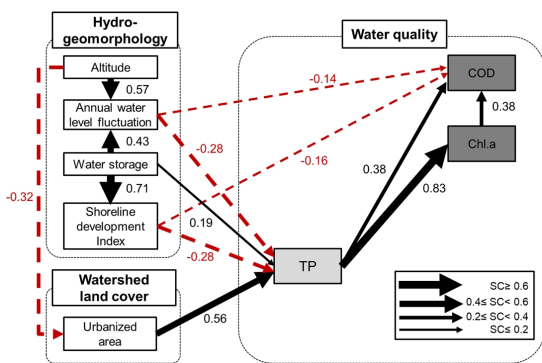


Fig. 4. Results of path analysis of effects of environmental factors on water quality. Numerals near arrow indicate significant standardized coefficients (SC) at $p < 0.05$. The thickness of arrow indicates the SC class (solid black line, positive SC; dashed red line, negative SC).

4. 논의 및 결론

본 연구는 전국에 분포한 다양한 환경을 가진 73개 저수지에서 수질과 이와 관련된 유역의 토지피복과 수문지형 환경 특성의 관계를 다양한 통계기법을 적용하여 규명하였다. 조사대상 저수지의 평균 COD는 5.7 mg O₂/L로서 환경부 호소 생활환경기준 등급 (ME 2019)에서 “약간 나쁨”의 하한치에 가까웠다. 1999년 - 2004년에 전국 48개 농업용 저수지에서 조사한 COD 평균은 7.8 mg O₂/L (Yoon et al. 2007)와 보다 최근에 다양한 용도의 저수지에서 조사한 본 연구의 결과가 이보다

낮았다. 조사대상 저수지에서 TN은 “나쁨” 등급, TP는 “보통” 등급이었고 TN:TP 비가 35로서 10이상으로 나타나 인이 부영양화의 제한요인으로 작용할 것으로 생각된다 (Lee et al. 2007, Cunha and Calijuri 2011). 따라서 본 연구에서 적용한 경로분석에서 TP가 Chl a에 영향을 미치는 요인으로 상정하였다.

저수지의 운영목적과 행정소재지에 따라서 수질을 비교하면, 농업용수용 경기도 소재 저수지의 수질이 홍수조절용 강원도 소재 저수지보다 더 부영양화되어 있었다. 농업용수용 저수지는 유역의 농경지와 도시화지역의 비율이 높아 영양염류인 총인의 유입량이 많기 때문인 것으로 생각된다. 특히, 경기도에 위치한 저수지의 경우 도시화지역의 면적비율이 다른 행정지역보다 2배 이상 높았다. 이러한 경향은 주로 연수위변동폭이 작고 저수지 모양이 원형에 가까운 특성을 보였는데, 주로 규모가 작은 농업용수용 저수지가 해발고도가 낮은 곳에 위치하고 부영양화된 수질 특성을 보인 것으로 확인되었다 (Cho and Cho 2013). 이와는 대조적으로 강원도에 고도가 높은 산지에 위치한 홍수조절용 저수지에서는 유역의 산림 면적 비율이 높아 오염물질의 유입량이 적어서 상대적으로 수질이 양호하였다 (Ahn et al. 2012). 일반적으로 저수지 수질은 저수지 유역의 산업활동, 농업활동, 가정하수 등의 다양한 발생원으로부터의 오염물질이 저수지로 유입되어 수환경에 영향을 주어 악화된다 (Cadenasso and Pickett 2000, Hwang et al. 2007, Gu et al. 2016).

유역의 토지피복뿐만 아니라 저수지의 수문지형 특성이 수질에 영향을 미친다. 특히 연수위변동폭, 저수용량, 호안발달도가 COD, Chl a 및 TP와 음의 상관성이 있었다. 일반적으로 하천 상류에 위치한 홍수조절용 및 용수 공급용 저수지에서 수위변동이 심하고 대규모의 하천형 저수지이다. 반면에 농업용저수지는 수심이 얇고 원형에 가까운 소규모 저수지가 많았다. 농업용 저수지에서도 COD가 댐 또는 보 높이인 수심과 음의 상관성이 있었다 (Choi and Park 2011). 변수선택법에 의하여 부영양화 정도를 나타내는 COD는 도시화지역과 농경지가 넓고 수위변동폭과 호안발달도가 적은 저수지에서 낮았다.

수질에 미치는 환경요인의 직접, 간접적 경로에서 저수지의 수문적 특성인 수위변동폭과 호안발달도가 COD에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 주로 호안발달도가 높은 하천형 저수지에서 연중 수위변화가 큰 경우에 수체의 교환율이 높기 때문일 것으로 생각된다 (Köiv et al. 2011). COD는 식물플랑크톤 성장의 주요한 제한요인인 TP에 의하여 간접적으로 영향을 받을 뿐만 아니라 직접적으로 영향을 받았다. 이는 저수지로 유입되는 유기인에 의한 직접적 유기물 부하때문인 것으로 생각된다. 한편 부영양화의 원인물질은 TP는 유역의 토지이용에 의하여 영향을 받는데 토지이용은 저수지의 고도와 관련이 있었다. 한편 TP는 COD와 마찬가지로 수위변동폭과 호안발달도에 영향을 받았다.

이상의 결과를 종합하면 우리나라의 저수지 부영양화는 유역의 토지이용, 수문적, 지형적 특성에 의하여 영향을 받으며, 특히 저수지 운영목적에 따른 인위적인 물관리에 의한 수위변동과 저수지의 위치에 의하여 수질적 특징이 결정된다고 생각된다. 따라서, 저수지 운영목적에 따라서 수문적 조건을 파악하고 부영양화 방지를 위한 수문조절을 고려하고 (Molina-Navarro et al. 2014), 저수지의 위치에 따라서 유역 토지이용 특성을 파악하고 오염물질의 유입을 관리하고 적극적으로는 유입수의 오염물질을 자연기반기술 (nature-based solution)로 처리하여 저감하는 방안이 필요할 것으로 판단된다 (Nesshöver et al. 2017).

References

- Ahn, Y.S., Lee, K.H. and Ahn, K.W. 2012. A study on hydrology and nutrient loading in forest catchment which effect aquatic environment in coastal area - a case study of Mt. Baekah, a deciduous forest in Hwasun county. *The Journal of Korean Island* 24: 129-138. (in Korean)
- Cadenasso, M.L. and Pickett, S.T.A. 2000. Linking forest edge structure to edge function: mediation of herbivore damage. *Journal of Ecology* 88: 31-44.
- Cho, H. and Cho, K.H. 2013. Analysis of environmental factors of geomorphology, hydrology, water quality and shoreline soil in reservoirs of Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 46: 343-359. (In Korean)
- Choi, E.H. and Park, Y.S. 2011. Correlations and regression analysis between reservoir water quality parameters. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage Journal* 18: 25-32. (in Korean)
- Cunha, D.G.F. and Calijuri, M.D.C. 2011. Limiting factors for phytoplankton growth in subtropical reservoirs: the effect of light and nutrient availability in different longitudinal compartments. *Lake and Reservoir Management* 27(2): 162-172.
- Gu, Q., Zhang, Y., Ma, L., Li, J., Wang, K., Zheng, K., Zhang, X. and Sheng, L. 2016. Assessment of reservoir water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Qiandao Lake, China. *Sustainability* 8: 243.
- HRFCO. 2019. Water Management Information System. Han River Flood Control Office, Seoul, South Korea. <http://www.wamis.go.kr/>. Accessed 14 March 2019. (in Korean)
- Hutchinson, G.E. 1957. *A Treatise on Limnology*, vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. Wiley, New York, USA.
- Hwang, S.J., Lee, S.W., Son, J.Y., Park, G.A. and Kim, S.J. 2007. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. *Landscape and Urban Planning* 82: 175-183.
- Kim, B.K., Park, J.S., Won, H.J. and Kim, Y.Y. 2018. Long-term performance of secondary dam installed for water purification of reservoir. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 19: 668-676. (in Korean)
- Kim, G.-H., Lee, J.H. and An, K.-G. 2012. Spatio-temporal fluctuations with influences of inflowing tributary streams on water quality in Daecheong Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* 45: 158-173. (in Korean)
- Kim, H.-S., Choi, E.-M., Park, J.-h., Hwang, H.-S., Kim, B., Kong, D.-S. and Hwang, S.-J. 2008. The relationships between empirical factors and water quality in agricultural reservoirs. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(3): 333-339.
- Köiv, T., Nöges, T. and Laas, A. 2011. Phosphorus retention

- as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative depth in 54 lakes and reservoirs. *Hydrobiologia* 660(1): 105-115.
- KRC. 2019. Rural Agricultural Water Resource Information System. Korea Rural Community Corporation, Naju, South Korea. <http://rawris.ekr.or.kr/>. Accessed 13 March 2019. (in Korean)
- KRCC. 2017. Statistical Yearbook of Land and Water Development for Agriculture. Korea Rural Community Corporation, Naju, South Korea. (in Korean)
- Lee, J.-Y., Lee, J.-H., Shin, K.-H., Hwang, S.-J. and An, K.-G. 2007. Trophic state and water quality characteristics of Korean agricultural reservoirs. *Korean Journal of Limnology* 40: 223-233. (in Korean)
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, Morán-TejedabJ, C., García-Ruiza, E.M and Tague, C. 2014. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment* 493: 1222-1231.
- ME. 2019. Framework Act on Environmental Policy, Ministry of Environment, Sejong, South Korea. <http://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9%ED%99%98%EA%B2%BD%EC%A0%95%EC%B1%85%EA%B8%B0%EB%B3%B8%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9>. Accessed 18 March 2019. (in Korean)
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A. and Jeppesen, E. 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *Journal of Hydrology* 509: 354-366.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K.N., Rusch, G.M., Waylen, K.A., Delbaere, B., ... and Krauze, K. 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment* 579: 1215-1227.
- NIER. 2019. Water Information System. National Institute of Environmental Research, Incheon, South Korea. <http://water.nier.go.kr/>. Accessed 14 March 2019. (in Korean)
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E. and Wagner, H. 2019. Package 'vegan', Community Ecology Package. <http://vegan.r-forge.r-project.org>. Accessed 10 March 2019.
- R Core Team. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>. Accessed 10 March 2019.
- SK. 2019. Statistical Information Service. Statistics Korea, Sejong, Republic of Korea. Accessed 15 March 2019.
- Thornton, J., Steel, A. and Rast, W. 1996. Chapter 8. Reservoirs. In, Chapman, D. (ed.), *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. UNESCO/WHO/UNEP.
- Thornton, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. In, Thornton, K.W., Kimmel, B.L. and Payne, F.E. (eds.), *Reservoir Limnology; Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, New, USA. pp. 1-4.
- Winton, R.S., Calamita, E. and Wehrli, B. 2019. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences* 16(8): 1657-1671.
- Ye, L., Cai, Q.H., Liu, R.Q. and Cao, M. 2009. The influence of topography and land use on water quality of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region. *Environmental Geology* 58(5): 937-942.
- Yoon, C.-G., Lee, S.-B., Jung, K.-W. and Han, J.-Y. 2007. Analysis of relationship between water quality parameters in agricultural irrigation reservoirs and land uses of associated watersheds. *Korean Journal of Limnology* 40: 31-39.
- Yves, R., Oberski, D., Byrnes, J., Vanbrabant, L., Savalei, V., Merkle, E., Hallquist, M., Rhemtulla, M., Katsikatsou, M., Barendse, M., Chow, M. and Jorgensen, T.D. 2018. Package 'lavaan'. <https://CRAN.R-project.org/package=lavaan>. Accessed 10 March 2019.

Appendix 1. Regional location and main operation purpose of the study reservoirs in South Korea

No.	Reservoir	Latitude	Longitude	Regional location	Operation purpose
1	Baegun	34° 59' 45.1" N	127° 35' 11.8" E	Jellanam-do	Irrigation
2	Baekgok	36° 52' 13.9" N	127° 24' 29.0" E	Chungcheongbuk-do	Irrigation
3	Beongae	35° 26' 29.1" N	128° 28' 44.2" E	Gyeongsangnam-do	Irrigation
4	Boksim	36° 11' 05.6" N	126° 51' 35.3" E	Chungchengnam-do	Irrigation
5	Boryeong	36° 14' 58.1" N	126° 38' 38.5" E	Chungchengnam-do	Flood control
6	Boseong	34° 48' 24.0" N	127° 08' 35.7" E	Jellanam-do	Hydropower
7	Buan	35° 39' 56.7" N	126° 34' 14.2" E	Jellabuk-do	Flood control
8	Bulgap	35° 13' 34.9" N	126° 30' 58.1" E	Jellanam-do	Irrigation
9	Cheongcheon	36° 22' 57.5" N	126° 38' 13.9" E	Chungchengnam-do	Irrigation
10	Cheongpyung	37° 43' 24.0" N	127° 30' 45.7" E	Gyeonggi-do	Hydropower
11	Chopyung	36° 49' 03.8" N	127° 30' 51.9" E	Chungcheongbuk-do	Irrigation
12	Chuncheon	37° 58' 42.0" N	127° 40' 12.8" E	Gangwon-do	Hydropower
13	Chungju	37° 00' 22.9" N	127° 59' 32.9" E	Chungcheongbuk-do	Flood control
14	Daechyeong	36° 28' 41.3" N	127° 28' 47.5" E	Chungcheongbuk-do	Flood control
15	Daegok	35° 37' 10.5" N	129° 10' 27.1" E	Gyeongsangnam-do	Water supply
16	Daehwa	35° 47' 32.9" N	127° 01' 53.4" E	Jellabuk-do	Irrigation
17	Daejeong	35° 24' 45.6" N	126° 30' 16.2" E	Jellabuk-do	Irrigation
18	Daeseong	36° 08' 09.6" N	128° 17' 50.8" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
19	Deogu	37° 09' 57.0" N	126° 55' 34.1" E	Gyeonggi-do	Irrigation
20	Dogo	36° 44' 33.1" N	126° 54' 47.3" E	Chungchengnam-do	Irrigation
21	Dongbang	37° 08' 54.7" N	126° 51' 43.8" E	Gyeonggi-do	Irrigation
22	Dongbok	35° 06' 27.7" N	127° 06' 28.1" E	Jellanam-do	Water supply
23	Dongbu	36° 07' 05.0" N	126° 47' 17.7" E	Chungchengnam-do	Irrigation
24	Geumpung	35° 23' 02.4" N	127° 17' 06.9" E	Jellanam-do	Irrigation
25	Gidong	36° 05' 29.8" N	129° 13' 09.1" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
26	Giljeong	37° 39' 44.8" N	126° 28' 00.2" E	Gyeonggi-do	Irrigation
27	Goesan	36° 45' 32.2" N	127° 50' 36.1" E	Chungcheongbuk-do	Hydropower
28	Gucheon	34° 49' 20.4" N	128° 38' 03.1" E	Gyeongsangnam-do	Water supply
29	Gui	35° 44' 21.5" N	127° 07' 32.1" E	Jellabuk-do	Irrigation
30	Gumgwang	36° 59' 53.1" N	127° 19' 44.8" E	Gyeonggi-do	Irrigation
31	Gwangju	35° 12' 02.6" N	126° 59' 12.5" E	Jellanam-do	Irrigation
32	Gyeongcheon	36° 41' 37.9" N	128° 18' 41.2" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
33	Hagok	35° 59' 06.2" N	129° 09' 29.2" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
34	Hakpa	34° 45' 19.5" N	126° 35' 56.9" E	Jellanam-do	Irrigation
35	Hapcheon	35° 32' 04.8" N	128° 01' 32.9" E	Gyeongsangnam-do	Flood control
36	Heungdeok	35° 32' 33.6" N	126° 43' 18.0" E	Jellabuk-do	Irrigation
37	Hoengsung	37° 32' 39.4" N	128° 01' 53.8" E	Gangwon-do	Flood control
38	Ibam	35° 29' 32.8" N	126° 47' 28.9" E	Jellabuk-do	Irrigation
39	Idong	37° 07' 05.2" N	127° 12' 03.6" E	Gyeonggi-do	Irrigation
40	Imha	36° 32' 16.1" N	128° 52' 58.9" E	Gyeongsangbuk-do	Flood control
41	Jangseong	35° 21' 22.4" N	126° 49' 13.3" E	Jellanam-do	Irrigation
42	Jijeong	34° 33' 44.5" N	126° 58' 16.2" E	Jellanam-do	Irrigation
43	Jinyang	35° 10' 49.7" N	127° 59' 58.6" E	Gyeongsangnam-do	Flood control
44	Masan	36° 46' 09.6" N	126° 58' 28.4" E	Chungchengnam-do	Irrigation
45	Milyang	35° 28' 55.8" N	128° 55' 50.8" E	Gyeongsangnam-do	Flood control
46	Muncheon	35° 53' 50.7" N	128° 50' 22.9" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
47	Myeogu	37° 05' 47.5" N	126° 48' 21.5" E	Gyeonggi-do	Irrigation
48	Myogok	36° 31' 30.1" N	129° 21' 23.8" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
49	Neung	35° 51' 06.2" N	126° 49' 26.1" E	Jellabuk-do	Irrigation
50	Odong	35° 12' 41.0" N	126° 23' 23.9" E	Jellanam-do	Irrigation
51	Okgu	35° 55' 44.5" N	126° 39' 12.1" E	Jellabuk-do	Irrigation
52	Oksan	36° 11' 44.2" N	126° 43' 42.4" E	Chungchengnam-do	Irrigation
53	Paldang	37° 33' 03.0" N	127° 19' 03.7" E	Gyeonggi-do	Hydropower
54	Paro	38° 07' 03.1" N	127° 46' 45.1" E	Gangwon-do	Flood control
55	Pungrak	35° 56' 43.8" N	128° 51' 43.0" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
56	Sasan	35° 40' 00.3" N	126° 41' 11.7" E	Jellabuk-do	Irrigation
57	Sayeon	35° 34' 53.0" N	129° 11' 38.7" E	Gyeongsangnam-do	Water supply
58	Seoknam	35° 25' 40.2" N	126° 28' 40.1" E	Jellabuk-do	Irrigation
59	Simgok	35° 54' 36.1" N	129° 03' 20.6" E	Gyeongsangbuk-do	Irrigation
60	Sinjal	37° 13' 29.1" N	127° 05' 41.5" E	Gyeonggi-do	Irrigation
61	Sinrim	35° 28' 10.9" N	126° 42' 35.1" E	Jellabuk-do	Irrigation
62	Sinsong	36° 39' 15.7" N	126° 32' 42.1" E	Chungchengnam-do	Irrigation
63	Soyang	37° 56' 14.9" N	127° 53' 28.7" E	Gangwon-do	Flood control
64	Tapjeong	36° 10' 44.7" N	127° 08' 56.7" E	Chungchengnam-do	Irrigation
65	Uiam	37° 51' 03.0" N	127° 39' 45.7" E	Gangwon-do	Hydropower
66	Unmun	35° 43' 25.0" N	128° 55' 03.9" E	Gyeongsangbuk-do	Water supply
67	Wanggoong	35° 59' 48.9" N	127° 06' 06.9" E	Jellabuk-do	Irrigation
68	Wangsong	37° 18' 23.8" N	126° 56' 51.1" E	Gyeonggi-do	Irrigation
69	Wonnam	36° 51' 22.6" N	127° 34' 25.5" E	Chungcheongbuk-do	Irrigation
70	Yangchon	34° 30' 06.3" N	126° 37' 57.1" E	Jellanam-do	Irrigation
71	Yeoncho	34° 56' 25.2" N	128° 39' 55.1" E	Gyeongsangnam-do	Water supply
72	Yeongcheon	36° 03' 53.4" N	129° 00' 48.8" E	Gyeongsangbuk-do	Water supply
73	Yongseol	37° 03' 34.4" N	127° 26' 44.6" E	Gyeonggi-do	Irrigation