

우리나라 저수지에서 지형, 수문, 수질 및 호안 토양 환경요인의 분석

조 현 석 · 조 강 현*

(인하대학교 생명과학과)

Analysis of Environmental Factors of Geomorphology, Hydrology, Water Quality and Shoreline Soil in Reservoirs of Korea. Cho, HyunSuk and Kang-Hyun Cho* (Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

In order to understand shoreline environment characteristics of Korean reservoirs, the interrelationships between environmental factors of geomorphology, hydrology, water quality and shoreline soil were analyzed, and the reservoir types were classified according to their environmental characteristics in the 35 reservoirs selected by considering the purpose of dam operations and annual water-level fluctuations. Geomorphological and hydrological characteristics of reservoirs were correlated with the altitude and the size scale of reservoirs. The annual range of water level fluctuation showed a wide variation from 1 m to 27 m in the various reservoirs in Korea. The levels of eutrophication of most reservoirs were mesotrophic or eutrophic. From the result of the soil texture analysis, sand contents were high in reservoir shorelines. Range, frequency and duration of water-level fluctuation were distinctive from the primary function of reservoirs. Flood control reservoirs had a wide range with low frequency and waterpower generation reservoirs had a narrow range with high frequency in the water-level fluctuation. According to the result of CART (classification and regression tree) analysis, the water quality of reservoirs was classified by water depth, range of water-level fluctuation and altitude. The result of PCA (principal component analysis) showed that the type of reservoirs was classified by reservoir size, water-level fluctuation, water quality, soil texture and soil organic matter. In conclusion, reservoir size, the water-level fluctuation, water quality and soil characteristics might be major factors in the environment of reservoir shorelines in Korea.

Key words : drawdown zone, lake water quality index, reservoir size, water depth, water-level fluctuation

* Corresponding author: Tel: +82-32-860-7698, Fax: +82-32-874-6737, E-mail: khcho@inha.ac.kr

서 론

저수지(reservoir)는 제방이나 댐에 의하여 형성되어 특별한 목적으로 관리되는 수체와 용수를 공급하기 위하여 변경되고 관리되는 자연 수체를 통칭한다(Steel and Rast, 1996). 좁은 의미의 저수지는 물 이용을 위하여 하천이나 계곡에 댐을 축조하여 저수하는 인공 호소를 의미한다. 특히 우리나라에서 저수지는 일반적으로 농어촌 용수를 확보할 목적으로 하천, 하천구역 또는 연안구역 등에 물을 가두어 두거나 관리하기 위한 시설을 의미한다(KRC, 2010). 시간 및 공간적인 수자원 분포의 이질성을 완화하기 위한 저장 시설인 저수지는 식수 및 생활용수 공급, 농업용수 공급, 수력발전, 농업용 관개, 하천 및 홍수 조절, 상업 및 휴양 목적 수산, 휴양 및 심미적 이용, 운하용 등의 다양한 목적으로 이용되고 있다(Steel and Rast, 1996). 전지구적으로 해양으로 유입되는 총수량의 25%가 저수지에 일단 저장되는 것으로 추정되지만(Wheal, 1991), 저수지에 대한 수자원 및 생태적 중요성이 과소평가되고 있다(Steel and Rast, 1996).

우리나라는 몬순 기후로서 여름에 강우가 집중되고, 대부분의 토양이 화강암 또는 편마암으로서 보수력이 낮으며 지형학적으로 산지가 70%이고 경사가 급하여 강우의 유출이 빠르다. 이로 인하여 시간, 공간적으로 수자원 분포가 불균일하기 때문에 수자원 확보와 홍수 조절을 위하여 많은 저수지를 조성하였다. 현재 우리나라에는 농업용 저수지가 약 17,600개(KRC, 2010), 다목적댐 저수지가 17개, 용수댐 저수지가 14개(KWRC, 2012), 수력발전댐 저수지 10개, 양수발전댐 저수지 7개(KHNP, 2012) 등이 전국적으로 산재하여 있다. 이처럼 우리나라의 저수지는 소규모의 농업용 저수지로부터 대규모의 다목적 홍수조절용 댐 호까지 다양한 크기와 용도를 갖는다.

일반적으로 저수지는 수체의 체류시간과 하천의 영향도에 의하여 하천과 자연 호수의 중간적인 특성을 가진다(Kimmel and Groeger, 1984). 먼저 저수지의 지형적인 특성을 살펴보면, 하천에 댐을 막아서 형성된 저수지는 평균 수심에 비하여 최대수심이 자연호수에 비하여 깊고, 댐 조성 이전의 홍수터가 물에 잠기면서 수심이 얇은 수역이 넓게 전개된다(Steel and Rast, 1996). 그러나 우리나라의 경우 저수지 주변에 제방을 축조하여 농경지로 이용하는 경우가 흔하여 얇은 수역이 제한되기도 한다. 또한 유역 면적도 자연호수에 비하여 넓은 경향이 있고, 호안선은 자연호수에 비하여 구불구불하고 길다. 수리수문적 측면에서 저수지는 수체의 체류시간이 자연호수보다

짧은 경향이 있다. 또한 저수지의 수위 변동은 자연적인 수문 과정 뿐만 아니라 저수지의 이용 목적에 따라서 인위적으로 수량과 수위가 조절된다(Thornton *et al.*, 1990). 수질 측면에서는 자연 호수에 비하여 저수지는 영양염류가 타생적이고 수중 이온 조성의 변이가 심하고 투명도가 낮은 경향이 있다(Thornston *et al.*, 1990). 그러나 저수지의 이러한 환경 특성은 저수지의 형태와 운영에 의하여 크게 영향을 받기 때문에 일반화하기 어렵다.

저수지의 호안(湖岸, shoreline)은 수생생태계와 육상생태계가 접하는 다양하고 변화가 심한 경계부이다. 자연 호수에서는 일반적으로 호안의 수심에 따라서 다양한 생활형의 수생식물이 확장하는 습지가 발달하며 이 구역을 연안대(littoral zone)라고 한다(Keddy, 2010). 그러나 수위변동 폭이 큰 저수지에서는 수위가 하강하면서 이전에 침수된 지역이 공기 중으로 노출된다. 이런 과정에서 환경이 수생에서 육상으로 급격히 변하고, 이곳 생물에게 큰 영향을 미친다. 이처럼 최고 수위 아래에서 대기로 노출되는 호안 부분을 수위변동역(drawdown zone)이라고 한다(Abrahams, 2005). 저수지의 호안은 육상으로부터 수생까지의 폭넓은 환경이 나타나는 구역이며 시간, 공간적인 급격한 환경 변화에 적응한 특이한 생물군집이 나타난다(Hill *et al.*, 1998; Abrahams, 2005). 또한 저수지의 수위변동역에서 수위변동(water-level fluctuation)은 저수지 생태계의 구조 및 기능과 연관된 중요한 환경요인이다(Leira and Cantonati, 2008).

우리나라 저수지에서 수위변동역에 대한 관심은 주로 대규모 다목적 댐 호에서 나대지로 노출된 수변을 복원하기 위한 기술적 접근이 이루어지고 있고(Jeong, 2005), 이곳의 환경과 생물에 대한 생태학적 연구는 찾아보기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 우리나라에서 환경 특성이 다양한 35개 저수지를 선정하여 저수지의 지형, 수문, 수질 및 호안 토양 환경의 특성을 분석하여 환경요인들간의 관계를 규명하였고 환경 특성에 따라 저수지의 유형을 구분하고자 하였다.

조사지 개황

본 연구의 조사대상지는 한국농촌공사, 한국수자원공사 및 한국수력원자력에서 관리하는 댐 호를 포함하여 수위를 인위적으로 조절하는 저수지 중에서 선정하였다. 이들 저수지 중에서 수위와 수질 측정 자료가 모두 구비된 곳을 예비 대상으로 선정하였다. 이 예비 대상지 중에서 연수위변동폭과 이용 용도를 고려하여 35개 저수지를 조사

Table 1. Abbreviations, location and primary function related to the hydrological characteristics of the study reservoirs in Korea. Most reservoirs were constructed for several purposes, and main usage means the most important function which is related with water-level fluctuations.

Name	Abbrev.	Latitude	Longitude	Main usage*
Baekgok	Bg	36° 52' N	127° 24' E	Agricultural water supply
Beongae	Be	35° 26' N	128° 28' E	Agricultural water supply
Boryeong	Br	36° 14' N	126° 38' E	Residential and industrial water supply
Boseonggang	Bs	34° 48' N	127° 08' E	Waterpower generation
Buan	Ba	35° 39' N	126° 34' E	Residential and industrial water supply
Bulgap	Bp	35° 13' N	126° 30' E	Agricultural water supply
Cheongcheon	Cc	36° 22' N	126° 38' E	Agricultural water supply
Cheongpyeong	Cp	37° 43' N	127° 30' E	Waterpower generation
Chopyeong	Cy	36° 49' N	127° 30' E	Agricultural water supply
Chuncheon	Ch	37° 58' N	127° 40' E	Waterpower generation
Chungju	Cj	37° 00' N	127° 59' E	Flood control
Daechong	Dc	36° 28' N	127° 28' E	Flood control
Daegok	Dg	35° 37' N	129° 10' E	Residential and industrial water supply
Daejeong	Dj	35° 24' N	126° 30' E	Agricultural water supply
Dongbok	Db	35° 06' N	127° 06' E	Residential and industrial water supply
Dongbu	Du	36° 07' N	126° 47' E	Agricultural water supply
Geumpung	Gp	35° 23' N	127° 17' E	Agricultural water supply
Gucheon	Gc	34° 49' N	128° 38' E	Residential and industrial water supply
Hapcheon	Hc	35° 32' N	128° 01' E	Flood control
Heungdeok	Hd	35° 32' N	126° 43' E	Agricultural water supply
Imha	Ih	36° 32' N	128° 52' E	Flood control
Jijeong	Jj	34° 33' N	126° 58' E	Agricultural water supply
Jinyang	Jy	35° 10' N	127° 59' E	Flood control
Milyang	My	35° 28' N	128° 55' E	Flood control
Okgu	Og	35° 55' N	126° 39' E	Agricultural water supply
Paldang	Pd	37° 33' N	127° 19' E	Waterpower generation
Paro	Pr	38° 07' N	127° 46' E	Flood control
Sayeon	Sy	35° 34' N	129° 11' E	Residential and industrial water supply
Sinsong	Ss	36° 39' N	126° 32' E	Agricultural water supply
Soyang	Sa	37° 56' N	127° 53' E	Flood control
Uiam	Ua	37° 51' N	127° 39' E	Waterpower generation
Wonnam	Wn	36° 51' N	127° 34' E	Agricultural water supply
Woonmun	Wm	35° 43' N	128° 55' E	Residential and industrial water supply
Yeoncho	Yc	34° 56' N	128° 39' E	Residential and industrial water supply
Yeongcheon	Yh	36° 03' N	129° 00' E	Residential and industrial water supply

*Most reservoirs were constructed for several purposes, and main usage means the most important use purpose which is related with water-level fluctuations.

대상지로 선정하였다(Fig. 1, Table 1).

수위 측정 자료가 존재하는 국내 저수지의 연수위변동 폭은 1~28 m로서 변이 폭이 컸다(WIS, 2012; RAWRIS, 2012). 저수지의 연수위변동폭을 2 m 구간으로 분류하여 구간별로 고르게 저수지 수가 분포하도록 조사대상 저수지를 선정하였다. 저수지별 운영 목적은 홍수조절용, 발전용, 농업용수용, 생활 및 공업용수용 저수지로 구분하였다. 실제로 저수지는 여러 용도를 복합하여 조성된 것이 흔하였으나 여기에서는 수위 조절과 가장 밀접한 하나의 목적만으로 저수지를 분류하였다. 조사대상 저수지를 운영 목적별로 분류하면, 농업용수용 13개, 생활 및 공업 용

수용 9개, 홍수조절용 8개, 발전용 5개이었다(Table 1).

선정된 저수지에서 조사공간의 종적범위는 만수위일 때 저수지에 의하여 하천의 유속이 변화되는 곳까지로 하였다. 저수지에서 조사공간의 횡적범위인 호안은 만수위와 저수위 사이의 수위변동역과 수생식물이 분포하는 수심까지의 연안대를 포함하였다.

이 연구에서 저수지 호안 환경의 분석은 추후 환경과 식생의 관계를 파악하기 위하여 진행하였기 때문에 조사대상 저수지에서 지형과 토양의 조사를 위한 조사지점 선정은 호안 식생이 잘 발달된 지역과 해당 저수지에서 가장 흔한 유형의 호안이 나타나는 곳을 저수지당 3지점 이

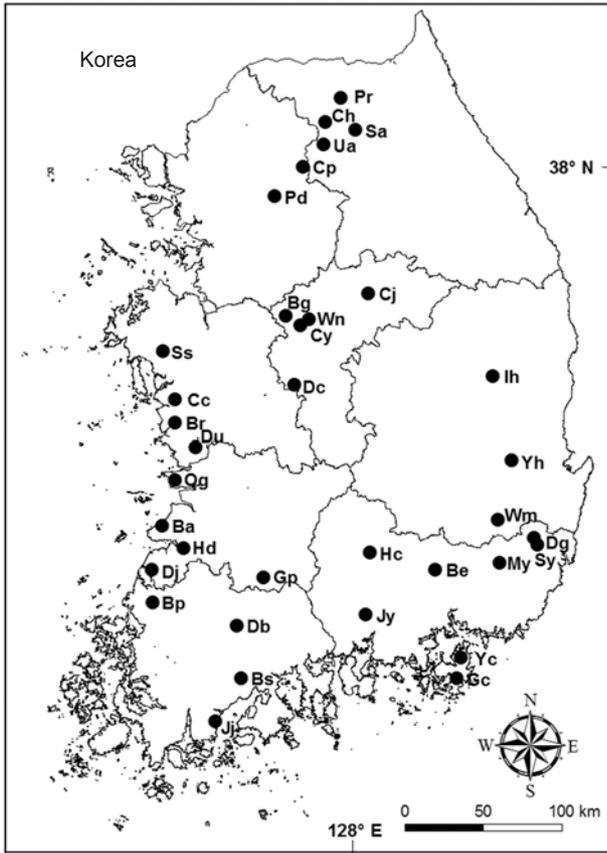


Fig. 1. Map showing the study reservoirs in Korea. Abbreviations are provided in Table 1.

상을 선정하였다. 지형과 토양의 조사는 2011년 4월부터 2012년 8월까지 실시하였다.

연구 방법

1. 지형 자료의 수집과 분석

조사대상 저수지의 지형에 대한 자료로서 고도, 유역 면적, 수면적, 평균 수심, 둘레 길이, 호안 발달도 및 호안 경사도를 수집하였다. 저수지의 고도(altitude, AL), 유역 면적(basin area, BA) 및 수면적(water surface area, WA)의 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WIS, 2012)과 농촌용수종합정보시스템(RAWRIS, 2012)에서 취득하였다. 저수지의 고도는 제방 혹은 댐의 정상 해발표고로 산출하였다. 저수지의 평균 수심(mean water depth, WD)은 총저수량을 수면적으로 나누어 산출하였다. 저수지의 둘레길이(circumference, CI)는 만수위일 때 저수지 수면의 둘레 길이를 다음 지도(<http://map.daum.net>)에서 제

공하는 1/256 또는 1/512 축적의 항공사진을 이용하여 측정하였다. 저수지의 호안 둘레의 비규칙성을 나타내는 호안발달도(shoreline development index, SH)는 다음 식에 의하여 산출하였다(Hutchinson, 1957).

$$SH = \frac{CI}{2\sqrt{\pi WA}}$$

호안발달도가 1이면 저수지가 원형이고, 이 값이 클수록 호안선의 굴곡이 심하거나 저수지의 길이가 길고 폭이 좁은 하천형 저수지 형태를 나타낸다.

호안 사면의 평균경사도(mean degree of shoreline slope, SL)는 현장에서 측정하였다. 조사대상 저수지의 조사지점에 만수위로부터 저수위 방향으로 트랜섹트(transect)를 설치하고 지형을 측량하였다. 트랜섹트에서 5 m 간격으로 수준기를 이용하여 표고차를 측정하였다. 경사면 전체의 평균 경사도는 트랜섹트의 총 길이와 표고차를 이용하여 삼각함수로 계산하여 산출하였다.

2. 수문 자료의 수집과 분석

조사대상 저수지의 수문에 대한 자료로서 총저수량, 연중양수위, 연수위변동폭, 연사분위수위변동폭, 중앙수위 연범람횟수, 중앙수위이하 연노출기간 및 수위변동역의 연평균노출기간을 산출하였다. 저수지의 총저수량(total water storage, WS)과 2009년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지의 3년간 일수위 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WIS, 2012)과 농촌용수종합정보시스템(RAWRIS, 2012)에서 취득하였다. 연중양수위(annual median water level, WL)는 연간 일평균수위의 중앙값이다. 연수위변동폭(annual water level fluctuation, WF)은 연간 최고수위와 최저수위의 차이이다. 연사분위수위변동폭(annual range of the first and third quartile of water levels, WQ)은 제1사분위 수위와 제3사분위 수위의 차로써 계산하였다(Riis and Hawes, 2002). 중앙수위 연범람횟수(annual flood number at the median water level, WN)는 중앙수위 아래에서 위로 수위가 상승하는 횟수를 계수하여 산출하였다(Riis and Hawes, 2002).

수위변동역에서 고도에 따른 노출기간을 산출하기 위하여 3년간의 고도와 노출기간의 관계를 Origin 프로그램(OriginLab Corp., 2009)을 이용하여 로지스틱 회귀(logistic regression) 분석을 실시하여 회귀식을 얻었다. 이 식으로부터 고도별 연평균 노출기간을 추정하였다. 중앙수위이하 연노출기간(annual exposure duration below median water level, WB) (days yr^{-1})은 연중양수위 아래의 수

역변동역이 노출되는 연평균기간이다 (Riis and Hawes, 2002). 한편 수위변동역 전역의 연평균노출기간 (mean exposure duration of the drawdown zone, WE) (days yr⁻¹)은 다음 식에 의하여 산출하였다.

$$WE = \frac{\sum E_i L_i}{\sum L_i}$$

여기에서 E_i 는 조사지점 트랜섹트의 지점 i 에서 연평균 노출기간 (days yr⁻¹)이고 L_i 는 지점 i 의 트랜섹트에서 점유 거리 (m)이다. 수위변동역의 연평균노출기간은 수위변동의 유형과 지형에 따라서 영향을 받는다. 이 기간은 저수위로 유지되는 기간이 길수록, 고수위 지형이 넓을수록 증가한다.

3. 수질 자료의 수집과 분석

각 저수지별 수질 환경은 물환경정보시스템 (WAMIS, 2012)과 농촌용수종합정보시스템 (RAWRIS, 2012)에서 제공하는 2009년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지의 3년간 자료를 이용하였다. 수집한 수질 측정항목은 총질소 (T-N, mg L⁻¹), 총인 (T-P, mg L⁻¹), 화학적산소요구량 (COD, mg L⁻¹), 클로로필 a (Chl- a , mg m⁻³) 및 부유물질 (SS)이었다. 특히 저수지의 부영양도를 판정하기 위하여 다음 식에 따라서 한국 호수수질 평가지표 (lake water quality index, LQI)를 이용하였다 (Kim, 2010).

$$\begin{aligned} LQI = & 0.5 (5.8 + 64.4 \log (\text{COD})) \\ & + 0.25 (12.2 + 38.6 \log (\text{Chl-}a)) \\ & + 0.25 (114.6 + 43.3 \log (\text{T-P})) \end{aligned}$$

4. 토양의 채집 및 분석

저수지 호안의 토양 특성을 파악하기 위하여, 조사지점에 설치한 트랜섹트에서 나타나는 주요 식물군집마다 토양을 채집하였다. 먼저 각 채토지에서 암석노출도는 지면위로 드러난 암석의 피도를 10% 단위로 기록하였다. 분석용 토양 시료는 각 채토지에서 열십자 모양으로 중앙부와 2 m 떨어진 끝부분의 총 5군데에서 깊이 10 cm까지의 표토를 채취하여 하나로 혼합하여 채집하였다. 채취한 토양은 실험실로 운반한 다음 2주간 음건 시킨 후 2 mm 체로 쳐서 토양 분석용 시료로 이용하였다.

토양 분석 항목은 토성, pH, 전기전도도 및 유기물함량이었다. 토양 유기물함량은 550°C에서 작열손실량으로 간주하였다 (Dean, 1974). 토양의 pH와 전기전도도는 음건 토양: 증류수=1:5 (무게:부피)로 혼합하고 30분간 진탕한

후 여과지 (Whatman No. 2)로 여과한 용액에서 측정하였다. 토성은 비중계법을 이용하여 모래, 미사 및 점토의 함량을 측정하였다 (Sheldrick and Wang, 1993).

저수지의 토양 환경요인별 대표치를 구하기 위하여, 각 조사지점의 채토지에서 측정된 토양 요인의 평균을 구하여 조사지점의 대표치를 구하고, 다시 조사지점의 평균값을 평균하여 저수지의 대표치로 계산하였다.

5. 자료 처리

저수지의 이용 용도에 따른 환경의 차이를 파악하기 위하여 이용용도별 저수지의 환경 변수의 평균값을 R 환경 (R Core Team, 2012)에서 'aov'와 'TukeyHSD' 함수를 이용하여 분산분석과 Tukey의 정직유의차 (honest significant difference, HSD) 분석을 실시하였다. 또한 저수지 호안의 환경요인간의 관계를 파악하기 위하여 R 환경 (R Core Team, 2012)에서 Hmisc 패키지 (Harrell, 2012)의 'rcorr' 함수를 이용하여 Pearson 상관 분석을 실시하였다. 또한 환경요인에 따른 저수지 사이의 관계를 파악하기 위하여 R 환경 (R Core Team, 2012)에서 vegan 패키지 (Oksanen *et al.*, 2012)의 'rda' 함수를 이용하여 자료를 표준화 (standardization)하여 주요인분석 (principal components analysis, PCA)을 실시하였다.

저수지 수질 (LQI)과 관련이 있는 환경요인을 선별하기 위하여 변수선택 (variable selection)과 분류회귀 나무 (classification and regression tree, CART) (Breiman *et al.*, 1984) 분석을 실시하였다. 변수선택법은 SAS 소프트웨어 (SAS Institute Inc. 2009)에서 단계별 회귀 (stepwise regression)을 이용하였으며 변수선택시 유의수준은 5%로 하였다. 또한 분류회귀 나무 분석은 R 환경 (R Core Team, 2012)에서 rpart 패키지 (Therneau *et al.*, 2012)의 'rpart' 함수를 이용하였다.

결 과

1. 환경 특성

조사대상 35개 저수지가 위치한 해발고도는 평균 80 m이었다 (Table 2). 해발고도가 가장 낮은 저수지는 전남 장흥에 위치한 지정제로서 2 m이었고 가장 높은 곳은 경남 밀양에 위치한 밀양호로서 194 m이었다. 저수지의 유역면적은 하류에 위치한 팔당호에서 가장 넓었고 소규모 농업용 저수지인 지정제가 가장 좁았다. 특히 유역면적의 변동계수 (CV)가 229%로서 저수지간 차이가 매우 컸다.

Table 2. Altitude (AL), basin area (BA), water surface area (WA), mean water depth (WD), circumference (CI), shoreline development index (SH) and mean degree of shoreline slope (SL) in the study reservoirs.

Reservoir	AL (m a.s.l.)	BA (km ²)	WA (km ²)	WD (m)	CI (km)	SH*	SL (°)
A) Main usage: Agricultural water supply							
Baegkok	96	85	2.3	9.4	13	2.5	13.7
Beongae	4	20	0.8	3.0	6	1.8	14.9
Bulgap	31	47	2.0	8.4	14	2.8	1.7
Cheongcheon	37	70	2.7	7.8	15	2.6	4.3
Chopyeong	59	133	2.6	5.4	22	3.9	14.4
Daejeong	23	11	0.5	4.4	3	1.3	3.8
Dongbu	13	28	2.4	5.0	11	2.0	12.8
Geumpung	63	11	0.5	5.7	4	1.5	5.7
Heungdeok	10	44	3.8	2.6	11	1.6	2.5
Jijeong	2	1	0.6	2.9	5	1.8	10.7
Okgu	6	3	3.2	4.0	8	1.2	3.7
Sinsong	34	7	0.5	6.9	4	1.6	3.1
Wonnam	113	37	1.1	7.7	16	5.6	12.6
B) Main usage: Residential and industrial water supply							
Boryeong	61	164	5.8	20.2	24	2.8	12.3
Buan	40	59	3.0	16.8	29	4.7	8.5
Daegok	113	58	2.4	15.1	23	4.2	13.7
Dongbok	166	189	6.6	15.1	33	3.6	3.4
Gucheon	90	13	0.5	20.0	8	3.0	19.1
Sayeon	54	67	1.9	15.9	26	5.3	18.0
Woonmun	144	301	7.8	20.6	55	4.1	6.8
Yeoncho	45	235	6.9	15.0	44	4.7	2.0
Yeongcheon	150	12	0.6	8.7	8	3.0	12.0
C) Main usage: Flood control							
Chungju	125	6,648	97.0	28.4	502	14.4	15.8
Daecheong	74	3,204	72.8	20.5	225	7.4	8.4
Hapcheon	156	925	25.0	31.6	93	5.2	8.3
Imha	148	1,361	26.4	22.5	128	7.0	5.3
Jinyang	41	2,285	28.2	11.0	79	4.2	6.8
Milyang	194	95	2.2	33.5	16	3.0	15.9
Paro	170	3,901	38.2	26.7	122	5.6	4.4
Soyang	170	2,703	70.0	41.4	139	4.7	8.3
D) Main usage: Waterpower generation							
Boseonggang	125	275	1.8	3.2	12	2.5	3.7
Cheongpyeong	50	9,921	17.6	10.5	96	6.5	4.2
Chuncheon	102	4,736	14.3	10.5	63	4.7	6.3
Paldang	25	23,800	36.5	6.7	112	5.2	3.4
Uiam	70	7,709	15.0	5.3	56	4.1	2.6
Mean	80	1,976	14.4	13.5	58	4.0	8.4
Median	63	95	3.0	10.5	23	3.9	6.8
SD	57	4,522	23.2	9.9	93	2.5	5.1
CV** (%)	71	229	161	73	160	61	61

* $SH=CI/2 \cdot \sqrt{\pi WA}$

**Coefficient of variation

저수지의 수면적과 평균 수심은 대규모 다목적 댐호인 소양호와 충주호에서 컸다. 팔당호는 수면적이 넓음에도 불구하고 수심이 얕았고, 반면에 구천호는 수면적이 매우 좁았으나 수심이 깊었다. 저수지의 둘레길이는 충주호에서 502 km로서 매우 길었다. 저수지의 형상을 나타내는

호안발달도(SH)는 소형 농업저수지인 옥구저수지와 대형저수지에서 1에 접근하여 모양이 원형이 가까웠으며 충주호가 14.4, 대청호와 임하호가 7 이상으로 커서 저수지 주변부의 굴곡이 심하였다. 식생 정착의 가능성을 좌우하는 호안의 평균 경사각도는 구천호와 사연호가 각각

Table 3. Total water storage (WS) and annual values of median water level (WL), range of water level fluctuation (WF), range of the first and third quartile of water levels (WQ), flood number at the median water level (WN), exposure duration below median water level (WB) and mean exposure duration of the drawdown zone (WE) in the study reservoirs.

Reservoir	WS ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	WL (m a.s.l.)	WF (m)	WQ (m)	WN (no. yr ⁻¹)	WB (days yr ⁻¹)	WE (days yr ⁻¹)
A) Main usage: Agricultural water supply							
Baegok	22	96	5.5	3.4	4.3	84	212
Beongae	2	5	1.6	0.3	9.0	159	24
Bulgap	17	29	6.5	3.2	1.7	175	159
Cheongcheon	21	37	5.7	2.8	2.7	130	92
Chopyeong	14	40	3.1	1.0	6.0	74	10
Daejeong	2	28	4.8	2.4	2.3	68	104
Dongbu	12	14	3.3	1.5	5.7	94	103
Geumpung	3	65	3.7	1.8	2.7	179	35
Heungdeok	10	12	3.9	0.7	3.0	159	76
Jijeong	2	4	2.7	1.3	12.7	115	120
Okgu	13	7	2.0	1.0	2.3	178	40
Sinsong	3	36	4.5	2.3	1.7	99	231
Wonnam	9	114	7.8	4.3	1.0	191	52
B) Main usage: Residential and industrial water supply							
Boryeong	117	65	13.4	6.7	1.0	183	148
Buan	50	37	7.5	3.7	1.3	178	218
Daegok	36	113	10.7	5.3	0.7	192	137
Dongbok	100	163	12.5	6.2	1.3	191	228
Gucheon	10	87	9.2	6.4	1.0	192	133
Sayeon	30	55	8.7	4.3	1.0	191	165
Woonmun	160	140	14.5	7.2	3.0	142	162
Yeoncho	103	45	5.6	2.8	1.3	192	247
Yeongcheon	5	147	9.5	4.8	1.3	191	85
C) Main usage: Flood control							
Chungju	2,750	129	20.7	10.4	1.3	191	140
Daecheong	1,490	70	11.8	5.9	1.7	192	296
Hapcheon	790	158	26.5	13.2	1.0	175	42
Imha	595	146	12.6	6.3	1.3	191	183
Jinyang	309	40	7.4	3.7	6.7	194	326
Milyang	74	194	20.1	10.1	1.3	192	213
Paro	1,018	168	19.2	9.6	1.7	175	152
Soyang	2,900	177	26.7	13.4	1.0	191	86
D) Main usage: Waterpower generation							
Boseonggang	6	126	3.1	1.5	18.7	188	42
Cheongpyeong	186	50	1.7	0.9	18.7	185	305
Chuncheon	150	102	2.0	1.0	9.3	187	123
Paldang	244	25	1.0	0.4	33.0	184	212
Uiam	80	71	1.6	0.9	17.7	180	57
Mean	324	80	8.6	4.3	5.2	165	142
Median	36	65	6.5	3.4	1.7	183	137
SD	704	57	7.0	3.6	7.1	38	84
CV* (%)	217	71	81	84	137	23	59

*Coefficient of variation

19.1° 과 18.0° 로서 급경사를 이루었으며, 불갑제가 1.7° 로서 가장 완만하였다.

저수용량(WS)은 저수지간 변이가 매우 컸는데(CV=217%), 다목적 댐호인 소양호가 $2,900 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로서 가장

컸다(Table 3). 2009년부터 2011년까지 3년간 평균 연수위변동폭(WF)은 1.0~26.7 m로서 저수지에 따라서 다양하였다. 연수위변동폭은 홍수조절용의 소양호, 합천호, 충주호, 밀양호에서 20 m 이상으로서 컸고, 발전용인 팔당호,

Table 4. Total nitrogen (T-N), total phosphorus (T-P), chemical oxygen demand (COD), chlorophyll *a* (Chl-*a*), suspended substance (SS) and lake water quality index (LQI) of water in the study reservoirs. Data from RAWRIS (2012) and Water Information system (2012).

Reservoir	T-N (mg L ⁻¹)	T-P (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Chl- <i>a</i> (mg m ⁻³)	SS (mg L ⁻¹)	LQI*
A) Main usage: Agricultural water supply						
Baegok	1.3	0.029	4.1	4.9	3.8	44
Beongae	1.0	0.083	10.8	14.4	7.5	67
Bulgap	1.1	0.026	5.6	9.8	4.8	51
Cheongcheon	1.2	0.032	4.7	10.5	5.4	50
Chopyeong	1.0	0.038	5.1	6.2	4.4	50
Daejeong	1.4	0.041	7.8	21.0	11.6	61
Dongbu	0.7	0.039	6.2	17.6	7.7	57
Geumpung	1.1	0.029	4.7	7.9	5.3	48
Heungdeok	1.8	0.078	6.3	12.5	30.3	59
Jijeong	1.0	0.043	8.1	21.0	7.6	62
Okgu	1.2	0.060	7.7	12.9	12.7	61
Sinsong	1.8	0.052	5.8	11.8	7.3	56
Wonnam	1.4	0.055	5.3	7.8	5.6	53
B) Main usage: Residential and industrial water supply						
Boryeong	1.6	0.013	2.5	5.7	2.5	34
Buan	1.0	0.011	3.8	4.9	1.5	39
Daegok	0.9	0.019	3.9	8.4	3.9	44
Dongbok	0.8	0.015	3.5	5.0	3.4	39
Gucheon	0.8	0.014	2.0	9.2	3.5	34
Sayeon	0.9	0.017	3.8	8.5	4.9	43
Woonmun	2.1	0.034	3.0	9.1	7.6	43
Yeoncho	0.8	0.030	3.8	10.8	7.7	47
Yeongcheon	1.2	0.020	4.7	8.2	2.2	47
C) Main usage: Flood control						
Chungju	2.0	0.021	2.2	3.4	3.7	33
Daecheong	1.5	0.017	3.0	6.2	2.2	39
Hapcheon	1.4	0.013	2.6	2.2	1.4	31
Imha	1.2	0.020	3.8	3.5	3.3	40
Jinyang	1.2	0.020	2.9	6.9	3.7	39
Milyang	1.0	0.010	1.7	2.7	1.5	25
Paro	1.5	0.013	2.2	2.2	4.4	29
Soyang	1.5	0.010	2.1	2.2	3.0	27
D) Main usage: Waterpower generation						
Boseonggang	1.3	0.042	4.8	7.2	8.9	50
Cheongpyeong	1.6	0.025	3.2	10.8	4.3	44
Chuncheon	1.8	0.028	2.4	4.6	6.8	36
Paldang	1.8	0.023	3.5	13.2	4.7	45
Uiam	1.5	0.017	2.4	6.9	2.8	36
Mean	1.3	0.030	4.3	8.6	5.8	45
Median	1.2	0.025	3.8	7.9	4.4	44
SD	0.4	0.018	2.0	4.8	5.0	11
CV** (%)	31	62	47	56	87	24

*LQI=0.5 (5.8+64.4 log (COD))+0.25 (12.2+38.6 log (Chl-*a*))+0.25 (114.6+43.3 log (T-P))

**Coefficient of variation

의암호, 청평호 및 자연 습지로서 농업용 저수지로 이용하는 번개늪이 2m 이하로서 작았다. 제1, 3사분위 수위의 연평균 수위변동폭(WQ)은 연수위변동폭과 유사한 경향이였다. 저수지 수위의 연중양값을 기준으로 하는 수위변

동 횡수인 연범람횡수(WF)는 팔당호를 비롯한 발전용 저수지에서 많았고 소양호를 비롯한 홍수조절용 다목적 대형댐호에서 연간 2회 이내로 매우 적었다. 저수지 수위의 연중양값 이하인 수위변동역의 연간 노출기간(WB)은

Table 5. Coverage of rock exposure (SR) and contents of sand (SA), silt (SI) and clay (SC), pH, electric conductivity (EC) and organic matter content (OM) of shoreline soil in the study reservoirs.

Reservoir	SR (%)	SA (%)	SI (%)	SC (%)	pH*	EC* (mS m ⁻¹)	OM (%)
A) Main usage: Agricultural water supply							
Baegok	6	82	13	5	5.0	1.8	3.3
Beongae	0	38	36	26	5.8	1.4	4.8
Bulgap	0	73	19	8	6.7	0.3	2.1
Cheongcheon	1	62	25	13	5.4	1.9	7.0
Chopyeong	17	49	36	15	5.3	1.9	5.9
Daejeong	0	53	34	13	6.0	1.5	4.3
Dongbu	14	81	15	4	5.7	1.4	3.2
Geumpung	0	74	18	8	5.7	1.8	3.3
Heungdeok	0	45	30	25	5.7	2.2	6.3
Jijeong	2	73	17	10	5.6	1.9	6.0
Okgu	0	80	9	11	5.9	1.8	3.2
Sinsong	4	49	38	13	5.4	2.2	7.6
Wonnam	10	61	32	7	5.5	1.7	7.4
B) Main usage: Residential and industrial water supply							
Boryeong	19	70	20	10	6.1	1.3	4.3
Buan	3	40	43	17	4.5	2.3	6.9
Daegok	46	75	15	10	6.7	0.7	7.0
Dongbok	1	57	29	14	5.8	1.9	7.6
Gucheon	45	49	33	18	4.7	2.6	11.3
Sayeon	21	56	35	9	6.0	1.8	6.0
Woonmun	2	69	19	12	5.7	1.5	3.9
Yeoncho	0	47	30	23	5.7	2.6	7.2
Yeongcheon	7	69	16	15	6.1	1.7	3.2
C) Main usage: Flood control							
Chungju	15	55	25	20	6.9	1.5	3.5
Daecheong	0	57	34	9	7.6	1.7	5.5
Hapcheon	32	46	37	17	5.4	2.5	8.9
Imha	2	70	13	17	6.0	3.0	2.6
Jinyang	0	40	42	18	5.4	2.1	8.0
Milyang	49	42	39	19	5.9	2.0	6.8
Paro	0	70	22	8	5.6	1.6	5.1
Soyang	1	65	22	13	6.2	2.2	4.4
D) Main usage: Waterpower generation							
Boseonggang	0	43	34	23	5.5	2.4	10.5
Cheongpyeong	0	74	22	4	6.1	1.4	5.4
Chuncheon	0	71	22	7	6.0	1.9	7.8
Paldang	0	62	26	12	6.4	2.7	5.0
Uiam	0	60	33	7	5.6	1.9	6.8
Mean	9	60	27	13	5.8	1.9	5.8
Median	1	61	26	13	5.7	1.9	5.9
SD	14	13	9	6	0.6	0.5	2.2
CV** (%)	166	22	35	45	10	26	38

*soil : water=1 : 5 (w/v)

**Coefficient of variation

대부분의 저수지에서 160일 이상으로 길었으나 대정저수지, 초평저수지, 백곡저수지 등의 일부 농업용저수지에서 90일 이하로 짧았다. 한편 저수지 수위변동역 전 경사면에서 연평균 노출기간(WE)은 진양호가 326일로서 가장 길었고 초평저수지가 10일로서 가장 짧았다.

저수지의 수질 환경요인 중에서 총질소(T-N)는 운문호와 충주호에서 2.0 mg L⁻¹ 이상으로 높았고 구천호, 동북호, 연초호에서 0.8 mg L⁻¹로서 낮았다(Table 4). 부유물질(SS)은 흥덕저수지에서 30.3 mg L⁻¹로 다른 저수지보다 크게 높았고 옥구저수지와 대정저수지에서 10 mg L⁻¹

Table 6. Comparisons of environmental factors of reservoirs according to their primary function. The abbreviations are provided in Tables 2, 3, 4, and 5. The different superscripts in the same line indicate the significant difference by Tukey's Honestly Significant Different test.

Environmental factor	Main usage			
	Agricultural water supply	Residential and industrial water supply	Waterpower generation	Flood control
AL (m a.s.l.)	40 ^c	92 ^{bc}	75 ^{bc}	135 ^{ab}
WA (km ²)	2 ^b	3 ^b	17 ^b	45 ^a
WD (m)	7 ^c	15 ^b	7 ^{bc}	27 ^a
CI (km)	13 ^b	23 ^b	68 ^{ab}	163 ^a
SH	2.3 ^b	3.9 ^{ab}	4.6 ^{ab}	6.4 ^a
SL (°)	7.5 ^{ab}	11.3 ^a	4.0 ^b	9.1 ^{ab}
WS (× 10 ⁶ m ³)	10 ^b	68 ^b	133 ^b	1,240 ^a
WF (m)	4.8 ^{bc}	9.4 ^b	1.9 ^c	18.1 ^a
WQ (m)	2.2 ^c	5.0 ^b	0.9 ^c	9.1 ^a
WN (no. yr ⁻¹)	4.2 ^b	1.3 ^b	19.5 ^a	2.0 ^b
WB (days yr ⁻¹)	131 ^b	184 ^a	185 ^a	188 ^a
WE (days yr ⁻¹)	97 ^a	169 ^a	148 ^a	180 ^a
LQI	55 ^a	42 ^b	42 ^{bc}	33 ^c
SR (%)	4 ^a	17 ^a	0 ^a	12 ^a
SA (%)	64 ^a	58 ^a	62 ^a	56 ^a
SI (%)	24 ^a	28 ^a	27 ^a	29 ^a
SC (%)	13 ^a	14 ^a	11 ^a	15 ^a
pH	5.7 ^a	5.7 ^a	5.9 ^a	6.1 ^a
EC (mS m ⁻¹)	1.7 ^a	1.9 ^a	2.0 ^a	2.1 ^a
OM (%)	4.7 ^a	6.8 ^a	7.1 ^a	5.6 ^a

이상으로 높았다. 총인(T-P), 화학적산소용구량(COD) 및 클로로필 *a*(Chl-*a*)으로 종합하여 평가하는 호수수질지수(LQI)는 수심이 얕은 늪지인 번개늪에서 67로서 가장 높았고, 대정저수지, 옥구저수지 및 지정제에서 60 이상으로 높았으며 밀양호, 소양호 및 파로호에서 30 미만으로 낮았다.

저수지 호안에서 암석 노출도(SR)는 평균 9%이었고 저수지에 따라서 변이가 컸다(CV=166%) (Table 5). 호안 토양의 토성에서 대체로 모래(SA) 함량이 미사(SI)와 점토(SC) 함량보다 많았다. 백곡저수지와 동부저수지에서는 모래 함량이 80% 이상이었으며 번개늪, 보성강호, 흥덕저수지 및 연초호에서 모래 함량이 적었다. 토양의 전해물질량을 나타내는 전기전도도(EC)는 팔당호에서 2.7 mS m⁻¹로서 가장 높았고 불갑제에서 0.3 mS m⁻¹으로 가장 낮았다. 토양의 유기물 함량(OM)은 평균 5.8%이었고 구천호에서 11.3%로 가장 많았다.

2. 저수지 용도에 따른 환경 비교

수위변동과 관련이 깊은 저수지 용도를 구분하여 환경요인을 다중비교한 결과는 Table 6과 같다. 저수지의 위치는 홍수조절용 다목적 댐 호가 다른 용도의 저수지보

다 고도(AL)가 높은 곳에 위치하였다. 또한 수면적(WA)과 저수용량(WS) 저수지의 규모는 홍수조절용 저수지가 다른 용도의 저수지보다 컸다. 수심(WD)은 홍수조절용이 가장 깊었고, 생활, 공업 용수용이 그 다음으로 깊었다.

저수지 수위 특성에서 연수위변동폭(WF)는 홍수조절용이 18.1 m으로 가장 컸고 생활, 공업용수용 9.4 m, 농업용 4.8 m 및 발전용 1.9 m의 순이었다. 저수지 용도에 따라서 수위변동폭 뿐만 아니라 변화 유형에도 차이가 있었다(Fig. 2). 대표적인 홍수조절용 저수지인 소양호에서는 홍수기 직후에 최대수위에 도달하고 다음 해 홍수까지 수위가 지속적으로 하강하는 유형이었다. 발전용 저수지인 팔당호에서는 수위변동폭은 작지만 수위변동이 잦았다. 생활, 공업용수용 저수지는 홍수조절용과 수위변동양상이 비슷하지만 수위가 홍수조절용보다 빨리 하강한 후에 홍수전까지 낮게 유지되었다. 농업용 저수지인 옥구저수지의 경우에는 경작이 시작되는 4월 이전까지 저수를 하였다가 4월 이후 물의 공급으로 수위가 낮아졌다.

저수지의 호수수질지수(LQI)는 농업용수용 저수지에서 가장 높았고 홍수조절용 저수지에서 가장 낮았다(Table 6). 호안의 토양 환경요인에서는 저수지 용도별 유의한 차이가 나타나지 않았다.

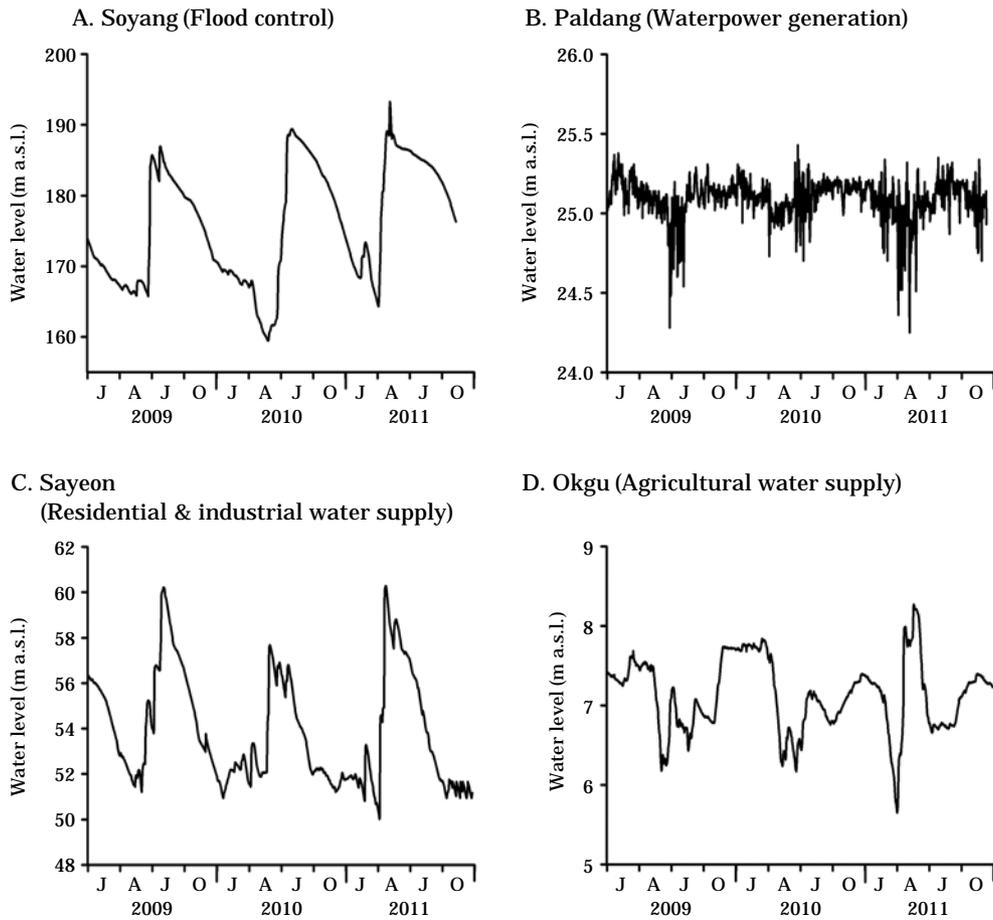


Fig. 2. Changes in water levels in the four reservoirs representing the primary function of the study reservoirs. The main function of the reservoir is in the parenthesis.

3. 환경요인간의 관계

조사 저수지에서 수집된 환경요인간의 상관관계를 살펴보면, 유역면적 (BA), 수면적 (WA), 저수용량 (WS) 등과 같은 저수지 규모에 관련된 환경요인 사이에 유의한 양의 상관성이 있었다 (Table 7). 저수지의 고도 (AL)는 수심 (WD) 및 호안발달도 (SH)와 유의한 양의 상관성이 있었다. 저수지의 수위변동폭 (WF)은 고도와 저수지 규모에 관련된 환경요인과 양의 상관성이 있었다. 그러나 수위변동폭과 중앙수위 연범람횟수 (WN) 사이에 음의 상관성이 있었다. 호안의 암석노출도를 제외한 토양환경은 다른 지형, 수문 및 수질 환경요인과 대체로 유의한 상관성이 없었다. 그러나 특이하게 토양의 pH는 수면적, 호안발달도 및 저수용량과 양의 상관성이 있었다.

저수지에서 수질과 다른 환경요인의 관계를 살펴보면 특히 부영양화 정도를 나타내는 호수수질지표 (LQI)는 수

심 (WD), 고도 (AL), 호안발달도 (SH) 및 연수위변동폭 (WF) 과 유의한 음의 상관성이 있었다 (Fig. 3). LQI에 영향을 미치는 주요 환경요인을 선별하기 위하여 변수선택 다중회귀를 실시한 결과 수심 (WD, m)과 호안발달도 (SH)가 선정되었으며, 이들 환경변수에 의한 호수수질지표 (LQI)의 회귀식은 다음과 같다.

$$LQI = 47.488 - 0.692 WD + 18.966 SH \quad (R^2 = 0.774^{***})$$

그러므로 수심과 호안발달도를 독립변수로 하는 LQI 추정 회귀식은 그 설명력이 77.4%로서 높았다. 수질에 영향을 미치는 주요한 환경변수에 의한 저수지 유형을 분류하기 위하여 분류회귀 나무 (CART) 분석에 의한 분지도에서 수심 (WD), 연수위변동폭 (WF) 및 고도 (AL)에 의하여 부영양화 정도에 따라서 저수지가 5개 집단으로 분류되었다 (Fig. 4). 수심이 9.021 m 미만이고 해발고도가 23.86 m 미만인 저수지는 모두 6개 지소이었고 평균 LQI

Table 7. Correlation coefficients between environmental factors in the shoreline of the study reservoirs. The lower diagonal indicates the significant levels (the shaded cell indicates negative significant correlation). The abbreviations are provided in Tables 2, 3, 4, and 5.

	AL	BA	WA	WD	SH	SL	WS	WF	WN	WB	WE	LQI	SR	SA	pH	EC	OM
AL		-0.07	0.31	0.72	0.38	0.17	0.41	0.76	-0.28	0.41	0.00	-0.73	0.34	0.01	0.08	0.14	0.12
BA	ns		0.44	0.00	0.40	-0.24	0.22	-0.12	0.78	0.23	0.25	-0.21	-0.20	0.09	0.30	0.19	-0.07
WA	ns	**		0.58	0.80	0.01	0.93	0.54	0.02	0.33	0.23	-0.50	-0.12	-0.02	0.55	0.09	-0.17
WD	***	ns	***		0.54	0.26	0.69	0.94	-0.42	0.46	0.18	-0.83	0.41	-0.1	0.18	0.16	0.03
SH	*	*	***	***		0.16	0.69	0.47	-0.01	0.42	0.29	-0.54	0.05	-0.04	0.43	0.05	-0.10
SL	ns	ns	ns	ns	ns		0.09	0.24	-0.27	-0.06	-0.09	-0.17	0.70	-0.07	-0.07	-0.14	0.05
WS	*	ns	***	***	***	ns		0.68	-0.17	0.27	0.06	-0.51	-0.05	0.00	0.45	0.06	-0.19
WF	***	ns	***	***	**	ns	***		-0.51	0.36	0.03	-0.72	0.40	-0.10	0.19	0.06	-0.01
WN	ns	***	ns	*	ns	ns	ns	**		ns	0.04	0.16	-0.30	0.02	0.03	0.19	0.13
WB	*	ns	ns	**	*	ns	ns	*	ns		0.19	-0.55	0.11	-0.09	0.32	0.11	0.15
WE	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns		-0.28	-0.05	-0.08	0.16	0.09	0.10
LQI	***	ns	**	***	***	ns	**	***	ns	***	ns		-0.38	0.07	-0.07	-0.20	-0.20
SR	**	ns	ns	*	ns	***	ns	*	ns	ns	ns	*		-0.15	-0.06	-0.06	0.33
SA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns		0.28	-0.43	-0.60
pH	ns	ns	***	ns	**	ns	**	ns		-0.43	-0.43						
EC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**		0.43
OM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	*	*	

ns: $p > 0.05$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

는 61.11로서 부영양화가 심하였다. 반면에 수심이 9.021 m 이상이고 연수위변동폭이 16.85 m 이상인 저수지에서 평균 LQI는 28.62이었다.

4. 환경요인에 의한 저수지간의 관계

35개 조사 저수지에서 지형, 수문, 수질 및 토양의 19 가지 환경요인 자료를 이용하여 주요인분석(PCA)을 실시한 결과, 제1축과 제2축이 전체 변이의 각각 33%와 19%를 설명하였다(Fig. 5). 제1축에서 가장 왼쪽에 주로 홍수조절용 저수지가, 중앙 왼쪽에 생활, 공업용수용 저수지가, 중앙 오른쪽에 발전용 저수지가, 가장 오른쪽에 농업용 저수지가 위치하였다. 1축에서 왼쪽으로 갈수록 고도(AL)가 높고 수위변동폭(WF)이 크고 평균 수심(WD)이 깊었으며 오른쪽으로 갈수록 호수수질지수(LQI)가 증가하였다. 한편 2축의 위로 갈수록 입자가 작고 유기물이 많은 호안 토양을 가진 저수지가 위치하였다. 그러므로 제1사분면에는 규모와 수위변동폭이 작고 고운 토양의 호안을 가진 부영양화된 주로 농업용수용 저수지가, 제2사분면에는 규모와 수위변동폭이 작고 거친 토양의 호안을 가진 부영양화된 농업용수용과 일부 발전용 저수지가 위치하였다. 제3사분면에는 규모와 수위변동폭이 크고 거친 토양의 호안을 가진 비교적 부영양화가 덜 진행된 홍수조절용 및 생활, 공업 용수용 저수지가 위치하였다. 또한 제4사분면에는 규모와 수위변동폭이 크고 고운 토

양의 호안을 가진 비교적 부영양화가 덜 진행된 홍수조절용 및 생활, 공업 용수용 저수지가 위치하였다.

고 찰

1. 지형 특성

우리나라의 저수지는 용수공급, 홍수조절, 수력 발전 등의 다양한 목적으로 전국적으로 곳곳에 다양한 환경에 약 18,000개가 조성되었다(Lee et al., 2005; KRC, 2010). 저수지는 조성된 곳의 환경, 용도에 따른 저수와 취수에 의한 수문 환경, 외부 유입 또는 내부 발생 오염물에 의한 수질 환경에 따라서 그 환경이 매우 다양하다. 조사대상 저수지의 해발고도는 범위가 2~194 m로서 넓고, 저수면적과 총저수용량의 변이계수도 각각 161%와 217%로서 저수지 크기가 매우 다양하다(Tables 2, 3). 저수지가 조성된 곳의 환경과 저수지의 크기가 다양하기 때문에 저수지의 지형적, 수문적 특성도 매우 다양하다. 예를 들면, 저수지의 평균수심은 저지대에 위치한 소규모 저수지에서 낮았고 고지대에 위치한 대규모 저수지에서 깊었다(Table 2). 우리나라 대부분의 저수지는 계곡이나 하천을 막아서 조성된 것으로 저수지의 형상이 하천형으로 좁고 길며 주변의 굴곡이 심한 편이다. 조사대상 저수지의 호안발달도는 저지대에 위치한 소규모 저수지에서 1~2

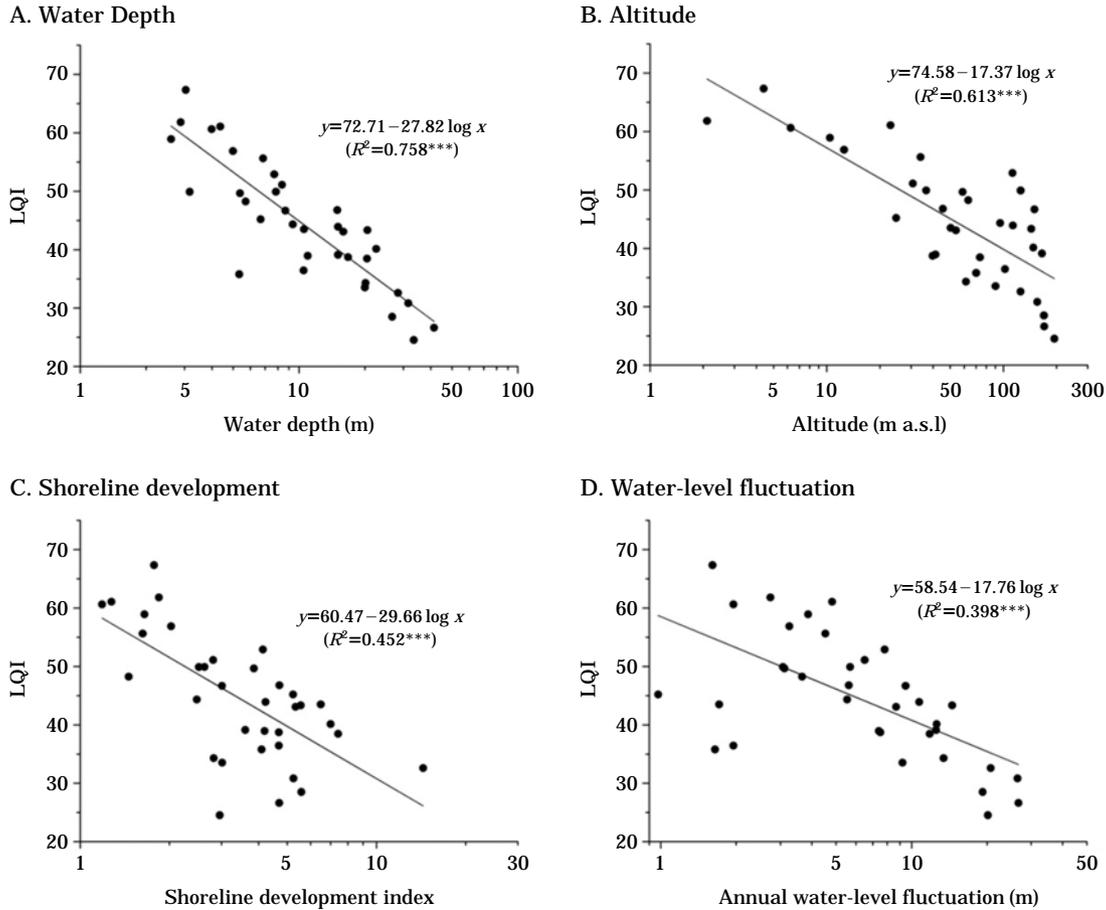


Fig. 3. Relationship between lake water quality index (LQI) and the other environmental factors, mean water depth (A), altitude (B), shoreline development (C) and annual range of water-level fluctuation (D) in the study reservoirs. $LQI = 0.5 (5.8 + 64.4 \log (COD)) + 0.25 (12.2 + 38.6 \log (Chl-a)) + 0.25 (114.6 + 43.3 \log (T-P))$.

의 범위로 원형 혹은 타원형에 가까웠고, 나머지 저수지는 평균 4 정도로서 호안의 길고 굴곡이 심한 하천형태의 모습을 보였다 (Table 2).

2. 수문 특성

저수지의 수위는 주로 유역의 강우에 의한 유입수량과 취수와 수문조작에 의한 유출수량에 의하여 결정된다. 특히 저수지의 수위 변동은 수생태계의 생태적 과정에 큰 영향을 미치며 (Naselli-Flores and Barone, 2005; Hofmann *et al.*, 2008), 특히 호안 식생의 정착과 성장에 영향을 미치는 주요한 환경요인이다 (Keddy and Reznicek, 1986; Hill *et al.*, 1998). 저수지에서 수위변동은 변동의 폭, 빈도 및 기간이 생태적으로 중요하다 (Leira and Cantonati, 2008). 본 연구에서는 우리나라 저수지의 수위변동을 변동 폭의 관점에서 연수위변동폭과 연사분위수위변동폭으

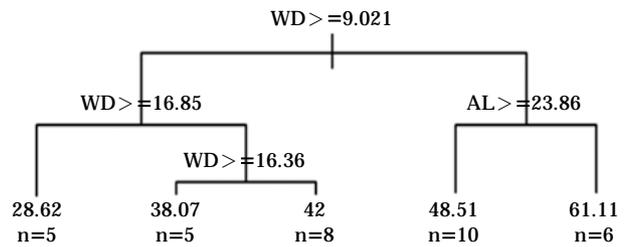


Fig. 4. Classification and regression tree analysis of lake water quality index (LQI). Numeral at the end of branch is the mean LQI of the classified group. WD, mean water depth (m); WF, annual range of water-level fluctuation (m); AL, altitude (m a.s.l.) and $LQI = 0.5 (5.8 + 64.4 \log (COD)) + 0.25 (12.2 + 38.6 \log (Chl-a)) + 0.25 (114.6 + 43.3 \log (T-P))$.

로, 변동 빈도의 관점에서 중앙수위 연범람횟수로, 변동 기간의 관점에서 중앙수위 이하 연노출기간, 수위변동역

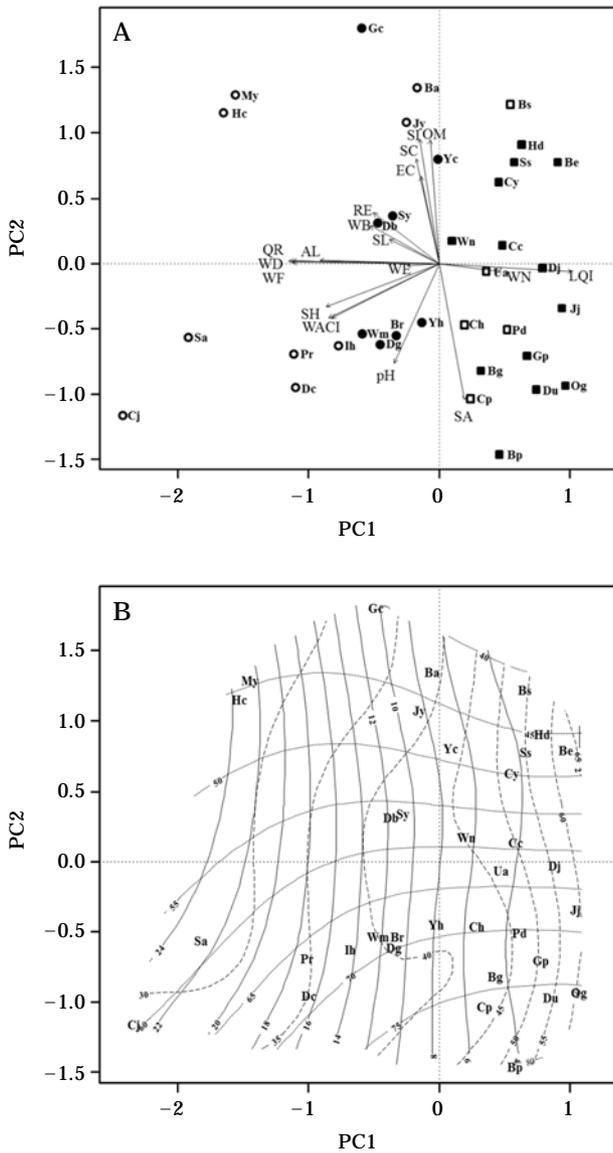


Fig. 5. Biplot of reservoirs and environmental factors by principal components (PC) analysis. Abbreviations are provided in Tables 1, 2, 3, 4 and 5. (■, reservoirs for agricultural water supply; □, for water-power generation; ●, for residential and industrial water supply; ○, for flood control; Contour line of solid line, annual water fluctuation (WF, m); dashed line, lake water quality index (LQI); dotted line, sand (SA, %).

의 연평균노출기간으로서 분석하였다(Riis and Hawes, 2002) (Table 3). 연수위변동폭과 연사분위수위변동폭은 팔당호의 각각 1.0 m와 0.4 m로부터 소양호의 각각 26.7 m와 13.4 m로서 저수지에 따라서 매우 변이가 컸다(Table 3). 이뿐만 아니라 수위변동 빈도와 수위변동에 따른 호안

의 공기 중 노출기간의 범위도 저수지에 따라서 크게 차이가 났다. 결국 저수지에 따라서 수문적 차이가 크고 이에 따라서 식생을 비롯한 호안 생태계의 생태적 구조와 기능에도 큰 차이가 나타날 것으로 생각된다(Casanova and Brock, 2000).

3. 수질 특성

본 연구에서 저수지의 수질은 화학적산소요구량, 총인 및 엽록소 *a*를 종합하여 김(Kim, 2010)이 개발한 한국 호수수질지표(LQI)를 이용하여 평가하였다. LQI가 30 이하이면 빈영양, 31~50이면 중영양, 51~70이면 부영양, 그리고 71 이상이면 과부영양 상태로 평가한다(Kim, 2010). 조사대상 저수지의 수질은 대부분 중영양 혹은 부영양이었으며, 밀양호, 소양호 및 파로호만이 빈영양이었다(Table 4). 이들 빈영양 저수지는 모두 해발고도 170 m 이상인 상류의 산악지대에 위치하고 있다. 따라서 이 저수지의 유역이 대부분 산지로서 점 및 비점 오염물 유입량이 적은 특성을 가지고 있다. 그러나 대부분의 다른 저수지에서는 부영양화에 따른 수질문제로 수자원 이용에 특별한 관리가 필요할 것으로 생각된다.

4. 호안 토양 특성

저수지 호안에서 토양 환경은 이곳에 생육하는 식생을 비롯한 다양한 생물의 분포와 수도에 큰 영향을 미친다(Keddy and Fraser, 2000). 특히 저수지 호안에서는 수위변동에 의하여 침식, 이송 및 퇴적 과정이 변화하여 호안 토양의 특성이 좌우된다(Leira and Cantonati, 2008). 우리나라 저수지는 대부분 산악지대에 위치하여 호안의 경사가 급하고 여름 집중호우에 의한 수위변동폭이 커서 수위변동역에서 암석의 노출도가 높고 모래의 함량이 많은 토성의 특성을 보인다(Table 5). 호안 경사면이 급경사이고 수위변동의 교란이 심한 저수지의 수위변동역에는 식생 정착이 어렵거나 종다양성이 낮을 것으로 판단되며, 토양 환경과 식생의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다(Backeus, 1993).

5. 저수지 용도별 환경 특성

저수지의 지형과 수문 환경은 저수지의 조성 및 이용 목적에 따라서 독특한 특성을 나타내었다(Table 6 및 Fig. 2). 홍수조절용 저수지는 고도가 높은 곳에 대규모로 조성되며 수위변동의 폭은 컸으나 빈도는 적었다. 발전용 저수지는 홍수조절용 저수지에 비하여 규모가 작고 수위

Table 8. Variables identified by stepwise regression analysis to predict a lake water quality index (LQI) among environmental factors in the study reservoirs.

Variable	Coefficient	Partial R ²	p
Intercept	47.488		< 0.001
Mean water depth (WD) (m)	-0.692	0.695	< 0.001
Shoreline development index (SH)	18.966	0.079	0.002

*LQI=47.488-0.692 WD+18.966 SH

**LQI=0.5 (5.8+64.4 log (COD))+0.25 (12.2+38.6 log (Chl-*a*))+0.25 (114.6+43.3 log (T-P))

변동의 폭이 적으나 빈도가 매우 높았다. 생활 및 공업 용수용 저수지는 수위변동 유형이 홍수조절용 저수지와 유사하지만 수위가 낮아지는 시기가 보다 빠른 시기에 나타났다. 농업용 저수지는 대체로 소규모이고 수위변동 폭이 크지 않고 일정한 수위로 유지되는 시기가 길었다. 특히 수위변동의 관점에서 살펴보면 저수지의 이용 목적에 따라서 수위변동에 의한 교란의 규모, 빈도 및 기간에서 독특한 수문학적 특성을 나타내었다. 이러한 수문적 특성 차이에 의하여 호안 생태계의 구조와 기능이 큰 영향을 받을 것으로 생각된다.

6. 환경요인과 수질의 관계

저수지는 자연 호수와 마찬가지로 부영양화 과정에 영향을 받는다. 일반적으로 저수지는 자연적인 부영양화와 더불어 지역의 인구 증가와 개발에 따라서 문화적 부영양화에 민감하다(Steel and Rast, 1996). 특히 저수지는 유역 하류에 건설되어 유입하천으로부터 많은 오염물질이 부하되어 수질이 악화되기 쉽다(Jeon *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2007). 또한 저수지는 자연호에 비하여 시공간적으로 수질의 역동성이 크고 큰 변이를 보인다(Lee *et al.*, 2007). 실제로 조사 대상 저수지에서 부영양화 상태를 나타내는 호수수질지수(LQI)는 저수지의 환경 특성에 따라서 빈영양으로부터 부영양 상태까지 다양하였다(Table 4). 저수지 수질과 관련된 다양한 환경 변수중에서 변수선택법에 의하면 수심과 호안발달도가, 분류회귀 나무(CART) 분석에 의하여 수심, 수위변동폭, 고도가 중요한 환경요인으로 선정되었다(Table 8 및 Fig. 4). 두가지 분석 모두에서 수심이 얕을수록 수질이 악화되었는데, 이는 수심이 얕을수록 체적이 비하여 표면적이 커져서 부영양화에 취약하기 때문이다(Yoon *et al.*, 2003; Kim and Kim, 2010). 호안발달도는 면적에 대한 둘레길이의 지표인데, 저지대의 소형 저수지에서 이 값이 작고 수질오염에도 민감한 것으로 생각된다. 또한 저수지의 고도가 높은 곳일수록 유역의 개발이 적어서 수질이 양호하였으며, 수위변동폭이 큰 저수지가 대부분 고도가 높은 곳에 위치하고 규모

가 커서 수질이 양호한 경향이 있었다. CART 분석에 의하면 저수지의 수질은 수심, 수위변동폭 및 고도에 의하여 5개의 그룹으로 분류되었고 LQI에 의한 부영양 단계 구분의 빈영양 단계에 1개 그룹이, 중영양 단계에 3개 그룹이, 부영양 단계에 1개 그룹이 속하여(Fig. 4), 이들 환경요인에 의한 저수지 수질 구분이 적합한 것으로 생각되었다.

7. 저수지의 유형구분

지형, 수문, 수질 및 호안 토양 환경에 의하여 조사대상 저수지의 유형을 분류할 수 있었다(Fig. 5). 고도, 저수면적, 수심, 호안발달도 등의 지형 환경과 수위변동폭 등의 수문 환경은 수질 환경과 깊은 상관이 있어서, 이들 3가지 환경요인의 총합에 의하여 저수지 유형이 구분되었다. 한편 저수지 호안의 환경은 토양 환경 중에서 토성, 유기물, 전기전도도에 의하여 분류되었다. 결국 우리나라 저수지에서 호안 환경은 저수지 규모와 수위변동이 크고 수질이 양호한 저수지 중에서 토양 환경이 양호하거나 불량한 2가지 유형과 저수지 규모와 수위변동이 작고 수질이 불량한 저수지 중에서 토양 환경이 양호하거나 불량한 2가지 유형으로서, 총 4가지 유형으로 구분할 수 있었다.

우리나라 저수지 생태계에서 지형, 수문, 수질 및 토양 환경을 종합적으로 고찰하면, 저수지의 저수용량, 수면적, 수심 등과 같은 규모와 위치 고도와 같은 지형 요인, 수위변동의 크기, 빈도와 같은 수문 요인, 부영양화에 관련된 수질 요인이 전체적으로 저수지 환경을 결정하는 주요 요인이었다. 또한 저수지 호안 환경에서는 토양의 토성과 화학적 특성이 중요한 환경요인이었다. 특히 수질은 저수지의 지형 및 수문 환경요인과 밀접하게 관련되어 있었다. 이러한 주요 환경요인에 따라서 우리나라 저수지의 유형을 구분할 수 있었으며, 이 유형에 따라서 호안 식생과 다른 생물 군집의 특성도 영향을 받을 것으로 생각된다. 특히 저수지의 호안에서 식생은 사면의 안정화, 비점오염물질의 감소, 생물서식처의 제공, 미적 경관미의 향상

등에 중요하다(Abrahams, 2006). 그러므로 저수지의 환경 특성에 따른 식생 구조 변화에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

적 요

우리나라 저수지에서 호안 환경의 특성을 파악하기 위하여, 수위변동폭과 이용 목적에 따라서 35개 저수지를 선정하여 지형, 수문, 수질 및 토양 환경요인을 조사하여 이들 사이의 관계를 분석하고 환경 특성에 따라 저수지의 유형을 구분하였다. 저수지의 지형적, 수문적 특성은 그 조성된 곳의 환경과 크기에 따라서 다양하였다. 저수지의 연수위변동폭은 1~27 m로서 변이가 컸다. 저수지의 수질은 대부분 중영양 혹은 부영양 상태이었다. 호안의 토양 환경은 모래 함량이 많았다. 저수지의 수위변동폭, 빈도 및 기간은 저수지의 이용 목적에 따라서 독특한 특성을 보였다. 홍수조절용 저수지는 수위변동 폭이 크고 빈도는 낮았으며 수력발전용 저수지는 수위변동 폭이 크고 빈도가 높았다. 회귀분류 나무(CART) 분석 결과에 의하면 저수지의 수질은 수심, 수위변동폭 및 고도에 의하여 구분되었다. 주요인분석(PCA)의 결과에 의하면 환경요인에 의하면 저수지의 유형은 저수지의 크기, 수위변동폭, 수질 및 토양의 토성과 유기물 함량에 의하여 구분되었다. 이상의 결과를 종합하면, 우리나라 저수지의 호안에서 저수지의 크기, 수위변동폭, 수질 및 호안 토양의 특성이 중요한 환경요인인 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단(Eco-STAR project)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 본 연구에서 현장 조사를 도와준 인하대학교 생태학연구실의 조형진 박사와 진승남에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Abrahams, C. 2005. The ecology and management of drawdown zones. *British Wildlife* **16**: 395-402.
- Abrahams, C. 2006. Sustainable shorelines: the management and re-vegetation of drawdown zones. *Journal of Practical Ecology and Conservation* **6**: 37-51.
- Backeus, I. 1993. Ecotone versus ecocline: vegetation zonation and dynamics around a small reservoir in Tanzania. *Journal of Biogeography* **20**: 209-218.
- Breiman, L., J. Friedman, C.J. Stone and R.A. Olshen. 1984. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont, CA, USA.
- Casanova, M.T. and M.A. Brock. 2000. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? *Plant Ecology* **147**: 237-250.
- Dean, W.E., Jr. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* **44**: 242-248.
- Harrell, F.E., Jr. 2012. Package 'Hmisc'. (<http://biostat.mc.vanderbilt.edu/Hmisc>).
- Hill, N.M., P.A. Keddy and I.C. Wisheu. 1998. A hydrological model for predicting the effects of dams on the shoreline vegetation of lakes and reservoirs. *Environmental Management* **22**: 723-736.
- Hofmann, H., A. Lorke and F. Peeters. 2008. Temporal scales of water-level fluctuations in lakes and their ecological implications. *Hydrobiologia* **613**: 85-96.
- Hutchinson, G.E. 1957. *A Treatise on Limnology*. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. Wiley, New York, USA.
- Jeon, J.H., C.G. Yoon, J.H. Ham, H.I. Kim and S.J. Hwang. 2002. Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoirs. *Korean Journal of Limnological Society* **35**: 28-35.
- Jeong, J.J. 2005. *An Experimental Study on the Restoration of the Flood Fluctuation Slopes of the Dam Reservoir*. MS Thesis, Dankook University, Cheonan, Korea.
- Keddy, P. and L.H. Fraser. 2000. Four general principles for the management and conservation of wetlands in large lakes: The role of water levels, nutrients, competitive hierarchies and centrifugal organization. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* **5**: 177-185.
- Keddy, P.A. 2010. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Keddy, P.A. and A.A. Reznicek. 1986. Great Lakes vegetation dynamics: the role of fluctuating water level and buried seeds. *Journal of Great Lakes Research* **12**: 25-36.
- KHNP. 2012. <http://www.khnp.co.kr/>. Korea Hydro and Nuclear Power Co., Seoul, Korea.
- Kim, B.C. 2010. *Evaluation of Ecological Integrity in Lake Ecosystem*. Eco-STAR Project, Chuncheon, Korea.
- Kim, H.J. and H.I. Kim. 2010. Water quality management of agricultural reservoirs considering effective water

- depth. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage Journal* **17**: 95-104.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: a perspective. *Lake and Reservoir Management* **1**: 277-281.
- KRC. 2010. <http://www.ekr.or.kr/>. Korea Rural Community Co., Uiwang, Korea.
- KWRC. 2012. <http://www.kwater.or.kr/>. Korea Water Resources Co., Daejeon, Korea.
- Lee, G.Y., H.D. Kim, G.G. Jeong, K.H. Kim and O.J. Kwon. 2005. Study on the Planning of Water Resource Security by Redevelopment of Agricultural Reservoirs. Rural Research Institute, Ansan, Korea.
- Lee, J.Y., J.H. Lee, K.H. Shin, S.J. Hwang and K.G. An. 2007. Trophic State and Water Quality Characteristics of Korean Agricultural Reservoirs. *Korean Journal of Limnological Society* **40**: 223-233.
- Leira, M. and M. Cantonati. 2008. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography. *Hydrobiologia* **613**: 171-184.
- Naselli-Flores, L. and R. Barone. 2005. Water-level fluctuations in Mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality. *Hydrobiologia* **548**: 85-99.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens and H. Wagner. 2012. Package 'vegan', Community Ecology Package. (<http://vegan.r-forge.r-project.org>).
- OriginLab Corp. 2009. Origin. Northampton, MA, USA.
- R Core Team. 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. (<http://www.R-project.org>).
- RAWRIS. 2012. <http://rawris.ekr.or.kr/>. Rural Agricultural Water Resource Information System, Uiwang, Korea.
- Riis, T. and I. Hawes. 2002. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes. *Aquatic Botany* **74**: 133-148.
- SAS Institute Inc. 2009. SAS/STAT. SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- Sheldrick, B.H. and C. Wang. 1993. Particle size distribution, p. 499-511. *In: Soil Sampling and Methods of Analysis*. (Carter, M.R. ed.). Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, London, UK.
- Steel, J.T.A. and W. Rast. 1996. Reservoirs. Chapter 8. *In: Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. (Chapman, D. ed.). UNESCO/WHO/UNEP.
- Therneau, T., B. Atkinson and B. Ripley. 2012. Package 'rpart'. (<http://cran.r-project.org>).
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.F. Payne. 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. Wiley, New York, USA.
- WAMIS. 2012. <http://www.wamis.go.kr/>. Water Management Information System, Seoul.
- Wheal, C. 1991. Freshwater Pollution. UNEP Environment Library, No. 6. Nairobi, Kenya.
- WIS. 2012. <http://water.nier.go.kr/>. Water Information System, Seoul, Korea.
- Yoon, K.S., K.S. Lee, H.J. Kim and H.I. Kim. 2003. Classification and water quality management of agricultural reservoirs. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* **45**: 66-77.

(Manuscript received 28 January 2013,
Revised 6 March 2013
Revision accepted 2 July 2013)