

소형 농업 저수지인 금풍저수지에서 침수식물의 분포, 식생구조 및 생물량

김기환 · 진승남¹ · 조형진¹ · 조강현^{1,*}

(한강물환경연구소, ¹인하대학교 생명과학과)

Distribution, Vegetation Structure and Biomass of Submerged Macrophytes in a Small Agricultural Reservoir, Keumpoong Reservoir, Korea. Kim, Kihwan, Seung-Nam Jin¹, Hyungjin Cho¹ and Kang-Hyun Cho^{1,*} (Han-River Environment Research Center, Gyeonggi-Do 476-820, Korea; ¹Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

Distribution, abundance and biomass of submerged macrophytes were assessed using a double-headed rake and an echo-sounder in the Keumpoong Reservoir to investigate the temporal and spatial variations of submerged macrophytes in a small agricultural reservoir located upstream. Slope steepness and water depth in the littoral zone were important controlling factors on flora and vegetation structure of submerged macrophytes. Biodiversity of submerged macrophytes was increased at a gentle slope of the littoral zone. The results of DCA (detrended correspondence analysis) showed that the structure of submerged vegetation depended on the depth of water. Submerged macrophytes were distributed at the maximum water depth of 2.8 m in the Keumpoong Reservoir. The area occupied by the submerged macrophytes was estimated at only 6% of the total reservoir area because of the steep slope of the littoral zone and the large annual water-level fluctuation of 3.5 m. The increase of water level and inflow of turbid water in the rainy season might reduce the biomass of submerged macrophytes in the reservoir. It may be concluded that submerged vegetation in the Keumpoong Reservoir, a small agricultural reservoir located at the upstream, appears to be particularly susceptible to water level fluctuations and slope steepness of the littoral zone.

Key words : echo-sounder, double-headed rake, slope steepness, water depth, water-level fluctuation

서 론

용수 공급, 수력발전, 유량 조절, 유로 변경 및 위락의 목적으로 조성되는 저수지는 하천 계곡에 댐이나 제방을

쌓아 물을 가두어 놓는 인공적인 수생태계이다. 우리나라에서 농업 관개용 저수지는 1970년대부터 빠르게 증가하여 현재 총 17,659 개소에 달한다(RAWRIS, 2011). 저수지 생태계의 구조와 기능은 같은 크기의 호수와 유사하다고 생각하지만, 몇 가지 측면에서 큰 차이가 있다

* Corresponding author: Tel: 032) 860-7698, Fax: 032) 874-6737, E-mail: khcho@inha.ac.kr

(Thornton, 1990). 특히 V자 지형인 호수와 비교하면 저수지는 U자형이고 수위변동과 수리 특성의 변이가 더 크기 때문에 연안대를 포함하는 수변부 식생 발달이 제한된다 (Straskraba *et al.*, 1993).

침수식물은 식물체 전체가 물속에서 생육하는 관속식물이다 (Cronk and Fennessy, 2001). 대부분의 침수식물은 바닥에 뿌리를 내려 생육하지만 붕어마름과 같이 뿌리가 없이 부유하는 종도 있다 (Cronk and Fennessy, 2001). 침수식물은 수생태계에서 상위 먹이사슬에 먹이와 서식처를 제공하는 기초생산자로서 중요한 역할을 수행한다 (Carpenter and Lodge, 1986; Meerhoff *et al.*, 2003). 특히 침수식물은 광합성을 수행하는 경엽부가 물 속에 잠겨있어 수중생태계에서 물질생산과 영양소 순환에 직접적인 영향을 미친다 (조, 1992; Barko and James, 1998).

호수와 저수지에서 침수식물의 분포와 생장에 영향을 미치는 요인으로는 수심 (Dodson *et al.*, 2000), 빛 (Van den Berg *et al.*, 2003), 온도 (Rooney and Kalff, 2000), pH, 전기전도도, 산소, 영양소 이용도 및 퇴적물 유형 (Barko *et al.*, 1991) 등과 같은 환경요인과 유속, 파력, 수위변동 등과 같은 교란 요인 (Madsen *et al.*, 2001)이 중요하다. 또한 인간의 교란을 포함하여 경쟁, 초식 등과 같은 생물적 요인도 침수식물에 영향을 미친다 (Søndergaard *et al.*, 1996). 특히 저수지에서는 수위변동이 침수식물의 분포와 생장에 큰 영향을 미친다 (Thomaz *et al.*, 2006).

최근 국내에서는 호수의 건강성 평가법 개발을 위한 연구가 진행되고 있다 (CAER, 2011). 이 연구사업의 하나로 침수식물을 이용하여 건강성 평가법 (EPA, 1998)이 개발되고 있는데, 이러한 평가과정에서 가지는 어려움 중의 하나가 침수식물 채집법의 표준화이다. 침수식물은 물속에서 채집을 수행하여야 하기 때문에 효과적이고 정량적인 채집이 어렵다 (Capers, 2000; Rodusky *et al.*, 2005).

그러므로 본 연구에서는 인위적으로 조성되었고 농업용수 공급 목적으로 관리되고 있는 소형 저수지인 금풍저수지에서 양날갈퀴법을 적용하여 침수식물의 식물상, 식생구조 및 생물량의 시간적 공간적 변이를 파악하고 음파탐지법을 적용하여 저수지의 지형과 침수식물 분포를 조사하여 침수식물의 시간적 공간적 변이를 규명하는 데 연구의 목적이 있다.

조사지 개황

본 연구는 전라북도 남원시 주생면의 섬진강 수계 풍촌천에 위치한 금풍저수지에서 수행하였다 (Fig. 1). 금풍

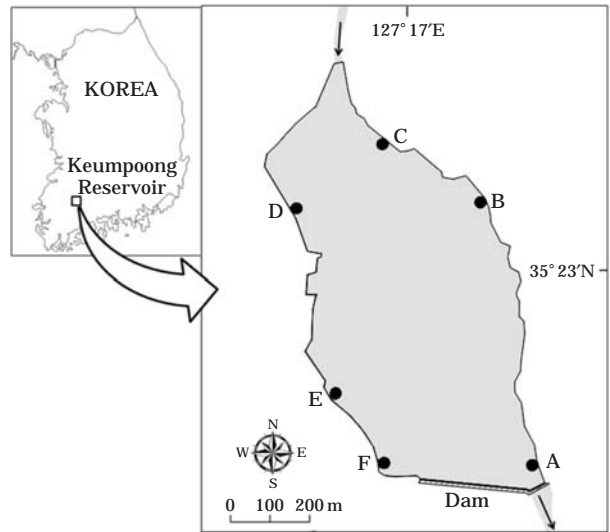


Fig. 1. Map showing the study site. The closed circles indicate the sampling sites of submerged macrophytes in the Keumpoong Reservoir.

저수지는 1971년에 준공된 농업용수 관개용 저수지로서 총저수량 $2.742 \times 10^6 \text{ m}^3$, 만수 면적 0.48 km^2 , 유로 연장 1.3 km 이다 (RAWRIS, 2011). 이 저수지의 유역 면적은 $1,090 \text{ ha}$ 이고 유역의 토지이용은 대부분 삼림과 농경지이다 (RAWRIS, 2011).

저수지의 남쪽에 댐이 위치하고 있고, 동쪽은 주로 소나무 숲과 연결되어 있으며, 서쪽은 도로와 연결되어 있으며 도로 건너편이 농경지였다. 또한 저수지의 북쪽은 마을이 위치하고 있었다. 저수지의 호안은 서쪽과 남쪽이 인공 제방인 석축과 콘크리트 제방으로 이루어져 있고, 동쪽과 북쪽은 암석과 흙 등의 자연제방이었다. 저수지 바닥은 동쪽이 주로 모래와 자갈로 이루어져 있고 서쪽이 주로 모래와 미사로 이루어져 있다. 금풍저수지는 현재 수상스키장으로 이용되고 있어서 수시로 모터보트가 운행되고 있었다.

금풍저수지에서 연안대 경사가 비교적 완만하고 수위변동역이 넓어서 침수식물이 많이 분포하는 곳을 조사지로서 6 군데를 선정하였다 (Fig. 1). 조사지 A는 연안대의 경사가 16° 이었고 저수지 바닥은 주로 모래로 이루어져 있었다. 산지와 인접한 조사지 B는 저수지 바닥이 모래와 자갈로 이루어져 있으며 연안대 경사가 34° 로서 매우 급하였다. 조사지 C는 저수지의 유입하천 부근으로 바닥은 모래와 미사이었으며 호안의 경사는 22° 로 급하여 침수식물이 좁게 분포하였다. 조사지 D는 연안대의 경사가 11° 로 완만하고 저수지 바닥은 주로 모래와 미사이었다. 조사지 E는 연안대의 경사가 6° 로 완만하여 수위변동역

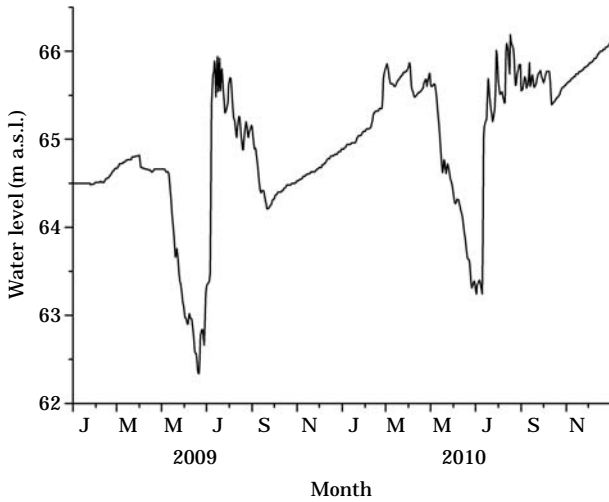


Fig. 2. Seasonal change of water level above sea level (a.s.l.) in the Keumpoong Reservoir (Data from RAWRIS (2011)).

이 넓었으며 침수식물이 넓게 분포하였다. 조사지 F는 연안대의 경사가 5° 로 가장 낮고, 수위변동역이 가장 넓었으며 이곳에 주로 바늘골이 분포하였으며 침수식물도 넓게 분포하였다.

금풍저수지의 만수위는 66.1 m인데 (RAWRIS, 2011), 연간 수위변동폭은 약 3.5 m이었다 (Fig. 2). 이 저수지의 수위는 일반적인 농업용 저수지와 마찬가지로 농업용 관개의 목적에 의하여 인공적으로 수위가 조절되었는데, 용수기인 4월말부터 수위가 급격히 하강하여 7월초 이후에 수위가 다시 상승하였다.

연구 방법

1. 군집구조 및 생물량 조사

2010년 6월 28일과 7월 22일에 금풍저수지의 6군데 조사지에서 양날갈퀴를 이용하여 침수식물을 채집하고 종별 양날갈퀴의 피복도와 생물량을 측정하였다. 침수식물 채집용 양날갈퀴 (double-headed rake)는 농업용 갈퀴 2개를 맞대어 용접하여 제작하였다 (Trebitz *et al.*, 1993; Weaver *et al.*, 1997). 양날 갈퀴의 머리 부분은 30×20 cm 이고, 길이 7 cm, 폭 1 cm의 빗살이 양쪽으로 각각 11개가 붙어있다. 여기에 3개의 연결 막대를 결합하면 총 330 cm의 막대가 부착된다.

각 조사지에서 저수지 중심선으로부터 육상 쪽으로 연안대에 트랜섹트를 설치하고, 이 트랜섹트를 따라서 1 m

간격으로 양날갈퀴를 사용하여 침수식물을 채집하였다. 각 채집지점에서 수심이 1 m보다 낮은 곳에서는 호수 바닥에 서거나 수심이 1 m 이상인 곳에서 닻으로 고정된 배에서 트랜섹트와 직각 방향으로 양날갈퀴를 70 cm 굽어서 정량적으로 침수식물을 채집하였다. 종 수도는 채집된 양날갈퀴의 머리 부분에 걸린 침수식물의 종별 피복도로 측정하였다. 피복도는 Kenow *et al.* (2007)의 방법을 변형하여 + (피복도 < 1%), 1 (1 ~ 5%), 2 (5 ~ 25%), 3 (25 ~ 50%), 4 (50 ~ 75%), 5 (75 ~ 100%)의 6단계 등급으로 평가하였다. 침수식물의 동정은 Choi (2000)와 Na (2010)을 참조하였다. 조사지의 수심은 침수식물을 양날갈퀴로 채집할 때 2 m 접자 또는 휴대용 음파 수심측정기 (Model PS-7, Hondex, 일본)를 이용하여 측정하였고, 경사계를 이용하여 연안대의 호안 경사를 측정하였다.

피복도 측정 후 양날갈퀴에 채집된 침수식물은 모두 수거하여 비닐봉지에 담아 실험실로 운반하였다. 실험실에서 침수식물 시료를 수돗물로 깨끗이 씻은 후에 종별로 분리하였다. 분리된 시료를 80°C 건조기에서 항량이 될 때까지 건조시킨 후 무게를 측정하여 건물량을 구하였다.

2. 호분도 및 식생도 작도

금풍저수지에서 이미지 소나 (StructureScan Model LSS-1, Lowrance, 미국)를 부착한 음파탐지기 (Model HDS8, Lowrance, 미국)를 이용하여 지형과 침수식물의 분포를 2010년 6월과 7월에 조사하였다. 배의 옆면에 낚싯대 거치용 철제 지지대를 설치하고 이곳에 음파탐지기의 센서를 수면의 수직 방향으로 설치하였다. 저수지에서 약 200 m 간격으로 동서로 2 km hr^{-1} 속도로 운항하면서 위치 좌표, 수심 및 침수식물 높이에 대한 정보를 수집하였다. 특히 수표면 노이즈를 줄이기 위하여 바람이 없는 수면이 안정된 날에 현장조사를 실시하였다. 음파탐지기의 송신 펄스는 800 kHz, 진동 속도는 15 pings s^{-1} 로 설정하였다. 음파탐지기에 기록된 위치 정보 (정확도 20 cm)를 UTM (Universal Transverse Mercator) 좌표 형태로 추출하고 해당 좌표에서의 만수위 기준의 수심으로 GIS 소프트웨어 (Arc GIS 9.3.2)를 이용하여 호분도를 작도하였다.

침수식물 분포도는 저수지의 호안을 따라 답사하면서 침수식물을 눈으로 확인하여 지형도에 표시한 후 GIS 소프트웨어 (Arc GIS 9.3.2)를 이용하여 호분도 위에 침수식물 분포지를 표시하였다. 또한 음파탐지기로 획득된 식생출현 및 높이 자료 이용하여 침수식물 분포도를 수정하였다. 한편 음파탐지기로 측량하는 동안에 중요 지점에서는

갈고리나 잠수를 이용하여 침수식물의 출현 여부와 식물 높이를 확인하였다. 음파탐지기로 획득한 영상과 현장에서 채집한 결과는 잘 일치하였다. 음파탐지기에 저장된 영상은 뷰어 프로그램 (SonarViewer, version 2.1.0, Lowrance, 미국)에서 수심과 식물의 높이를 측정하였다 (Fig. 3). 영상 이미지에서 육안으로 식물을 쉽게 구분할 수 있었고, 무작위로 커서를 이동하여 식물 높이를 측정하여 평균 높이를 구하였다.

3. 자료 처리

분석용 식생자료를 구축하기 위하여 2010년 6월에 조사한 식생자료를 분석에 이용하였으나 조사지 E는 6월 조사를 하지 않았기 때문에 7월 조사 자료를 이용하였다. 각 조사지에서 측정된 중별 피복도 등급을 평균 피복도 백분율로 환산한 후에 상대빈도와 상대피복도를 계산하고 합하여 중요도를 계산하였다.

금풍저수지에서 침수식물의 식생 구조를 해석하기 위하여 다변량 분석을 실시하였다. 통계 환경 R (Team, 2008)에서 Vegan 패키지 (함수 'decorana', Oksanen, 2011)을

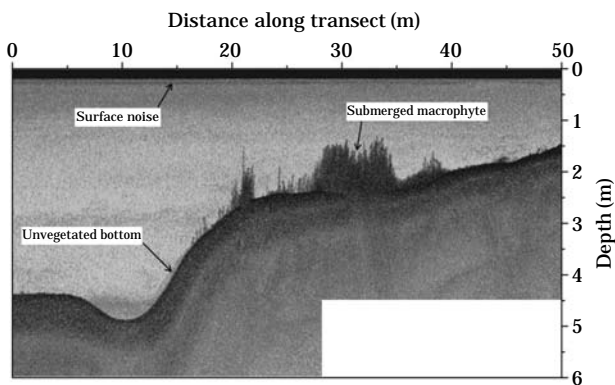


Fig. 3. Typical echo intensity signal within a vegetated area and on an unvegetated bottom.

이용하여 방형구별 식생 피복도 자료로 Decorana (DCA, Hill and Gauch, 1980)를 실시하였다. 수심과 연안대 경사 각도로 구성된 환경요인과 DCA 축과의 상관관계를 Vegan의 함수 'envfit'로 분석하였다 (Oksanen, 2011).

생물량 자료는 각 조사지의 방형구에서 측정된 침수식물 생물량을 50 cm의 수심 간격으로 정리하여 수심 별 평균 생물량을 계산하였다. 작도된 호분도로부터 50 cm 수심 간격 별 개방 수면적과 식생분포면적을 GIS 소프트웨어로 계산하였다. 수심 간격 별 침수식물 생물량과 식생 분포면적을 곱하고 합산하여 전체 저수지에서 침수식물 총생물량을 산출하였다.

결 과

1. 식물상

2010년에 금풍저수지에서 관찰된 침수식물은 4과 7종이었다 (Table 1). 이 중에서 검정말 (*Hydrilla verticillata*), 실나자스말 (*Najas gracillima*), 민나자스말 (*Najas marina*)은 7개 모든 조사지에서 출현하였으며 새우가래 (*Potamogeton maackianus*)는 조사지 C와 E에서만 발견되었다. 조사지별 출현종수는 연안대의 경사가 완만한 조사지 E와 F에서 6종 이상으로 많았고, 연안대 경사가 34°로 매우 급한 조사지 B에서는 출현빈도가 높은 3종의 침수식물만이 발견되었다.

2. 군집 구조

침수식물의 식생자료를 이용하여 DCA (detrended correspondence analysis)를 실시하여 식물종과 조사지를 2축의 그래프에 표시하였다 (Fig. 4). 제1과 2축의 고유값 (eigen value)은 각각 0.4772 및 0.3936이었으며, 두 축과 환경요인인 연안대 경사각도와 수심의 상관관계는 각각

Table 1. Flora of submerged macrophytes in the Keumpoong Reservoir. Open circle indicates the presence of species at the sampling site.

Scientific name	Korean name	Leaf form	Site					
			A	B	C	D	E	F
<i>Hydrilla verticillata</i>	검정말	Broad	○	○	○	○	○	○
<i>Najas gracillima</i>	실나자스말	Narrow	○	○	○	○	○	○
<i>Najas marina</i>	민나자스말	Broad	○	○	○	○	○	○
<i>Ceratophyllum demersum</i>	봉어마름	Narrow	○			○	○	○
<i>Potamogeton crispus</i>	말즘	Broad	○		○		○	○
<i>Potamogeton pusillus</i>	실말	Narrow				○	○	○
<i>Potamogeton maackianus</i>	새우가래	Broad			○			○
No. of species			5	3	5	5	7	6

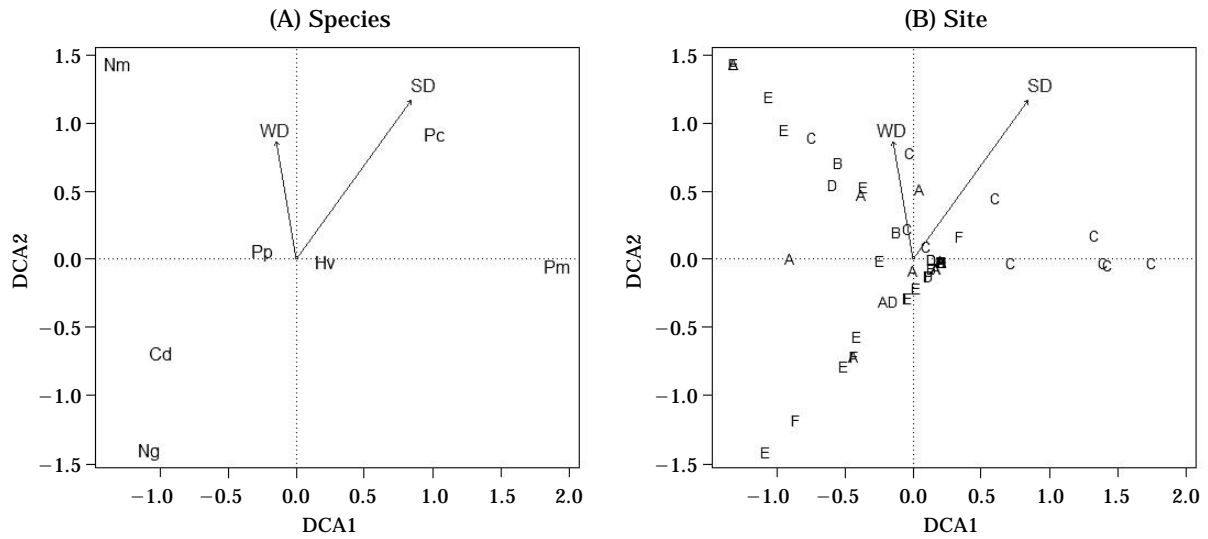


Fig. 4. Ordination biplot derived from the first two axes of detrended correspondence analysis (DCA) of the submerged vegetation in the Keumpoong Reservoir. (A) species ordination (Cd, *Ceratophyllum demersum*; Hv, *Hydrilla verticillata*; Ng, *Najas gracillima*; Nm, *N. marina*; Pc, *Potamogeton crispus*; Pm, *P. maackianus*; Pp, *P. pusillus*). (B) site ordination (alphabets indicate site names). The angles and lengths of the radiating arrows indicate the direction and strength of relationships of the variables with the ordination scores (SD, slope degree of the littoral zone; WD, water depth).

$p=0.003$ 및 $p=0.070$ (1,000번 치환에 기초)이었다. 대체로 수심(WD)이 깊고 연안대 경사(SD)가 급한 곳에 민나자스말(Nm)과 말즘(Pc)이 우점하고, 얕은 수심의 완만한 연안대에서는 붕어마름(Cd)과 실나자스말(Ng)이 우점하였다(Fig. 4A). 한편 조사지의 배열에서는 새우가래(Pm)가 많이 분포하는 조사지 C가 분리되어 나타났으며, 조사지간 차이보다는 조사지내의 수심에 따라서 조사지가 배열되었다(Fig. 4B).

3. 식생 분포

금풍저수지의 수심은 댐 부근의 중앙으로 갈수록 깊어져서 최대 수심이 만수위 기준으로 9.7 m에 달하였다(Fig. 5). 침수식물이 분포할 수 있을 것으로 생각되는 수심인 3 m보다 얕은 수역은 저수지의 서안과 북안을 따라서 좁은 띠로 분포하였다. 저수지의 수심 별 면적은 수심 3~7 m인 수역이 32.9 ha로서 전수역의 69%를 차지하였으며, 침수식물이 생육 가능한 수심인 3 m 이내의 얕은 수역은 8.1 ha로 전체 수역의 17%를 차지하였다(Fig. 6A). 저수지에서 침수식물은 호안을 따라서 띠 모양으로 분포하며 특히 연안대 경사가 급한 동안보다 경사가 완만한 서안에 넓게 분포하였다(Fig. 5). 침수식물은 수심 2.8 m까지 분포하였으며 분포면적은 3.0 ha로 전수역의 6%를 차지하였다(Fig. 6A). 침수식물의 분포면적은 수심 1~2 m에

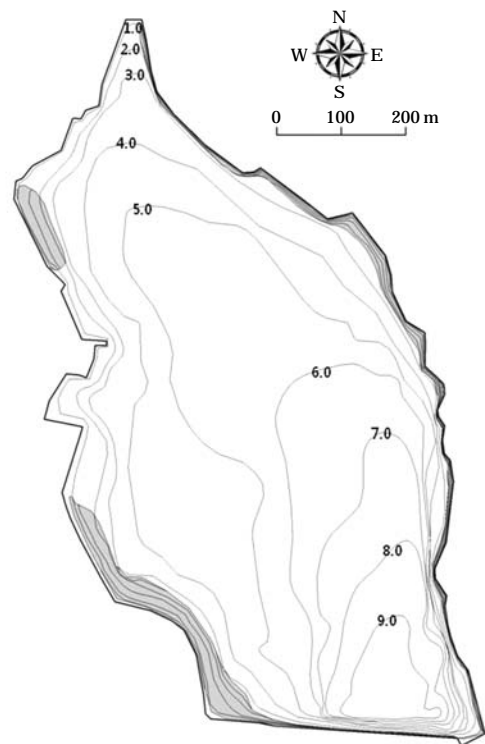


Fig. 5. Distribution map of submerged macrophytes and bathymetric chart in the Keumpoong Reservoir. The shaded area indicates the area occupied by submerged macrophytes. Numerals on the line indicate water depth at the full water level.

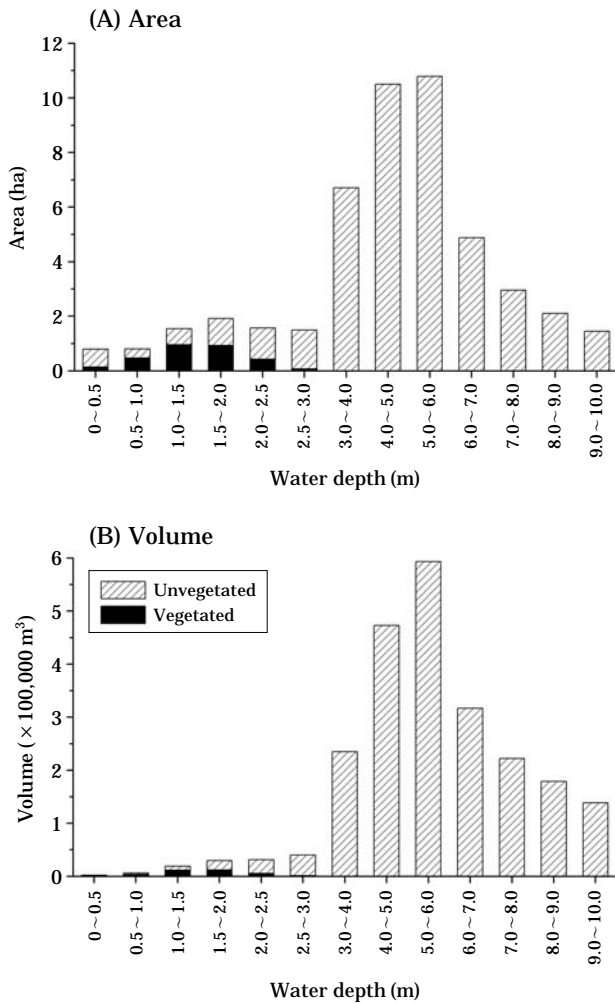


Fig. 6. Changes in area (A) and volume (B) occupied or unoccupied by the submerged macrophytes with the water depths in the Keumpoong Reservoir. The water depth is expressed at the full water level.

서 1.9 ha로서 침수식물 분포 총면적의 63%를 차지하였다. 침수식물이 차지하는 수체적은 34,480 m³로서 저수지 전체 수체적의 1.5%를 차지하였다(Fig. 6B). 수심 1~2 m의 수역에서 침수식물이 차지하는 체적은 23,650 m³로서 침수식물 점유 체적의 69%를 차지하였다(Fig. 6B).

4. 생물량

6월에 금풍저수지에서 침수식물은 만수위 기준 0.5~2.0 m에서 분포하며 수심 별 단위면적당 생물량을 살펴보면 1.0~1.5 m에서 45 g DM m⁻²으로 가장 많았다(Fig. 7). 6월보다 수위가 상승한 7월에 생물량은 0~3.0 m에서 나타났고 1.0~1.5 m에서 19 g DM m⁻²으로 가장 많았으나 6월에 비하여는 생물량이 감소하였다. 수심에 따른 중

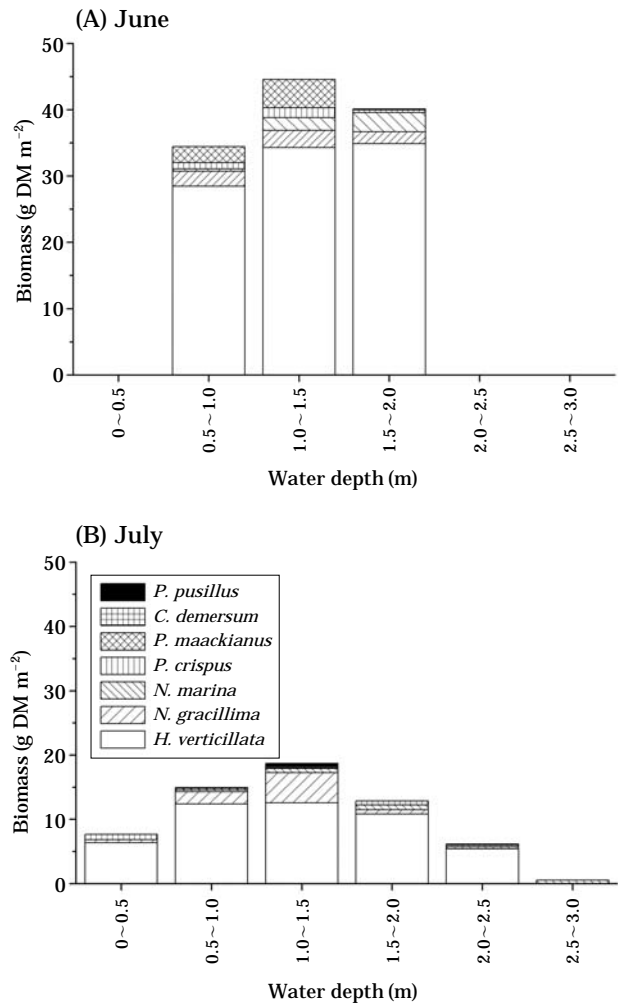


Fig. 7. Biomasses of submerged macrophytes with water depths in the Keumpoong Reservoir in June and July 2010. The water depth is expressed as a mean value in June and July.

별 생물량을 살펴보면, 전 수심에 걸쳐 검정말의 생물량이 총 침수식물 생물량의 78%에 달할 정도로 많았다. 검정말(*H. verticillata*)은 6월에는 수심 2 m까지 생물량이 증가하다가 그보다 깊은 수심에는 출현하지 않았고, 7월에는 1.5 m 수심까지 생물량이 증가한 후에 감소하였다. 실나자스말(*N. gracillima*)의 생물량은 1.5 m보다 얕은 수심에서 생물량이 많았고, 민나자스말(*N. marina*)은 1.5 m보다 수심이 깊은 곳에서 생물량이 많았다.

저수지 전수역에서 침수식물의 생물량은 1,003 kg DM 이었다(Table 2). 만수위를 기준으로 한 수심 1~2 m에서 생물량이 802 kg DM으로서 저수지 전체 생물량의 80%를 차지하였다.

Table 2. Maximum biomasses of submerged macrophytes per unit area (mean±SD) and in the whole reservoir with the water depths in the Keumpoong Reservoir.

Water depth † (m)	Biomass per a unit area (g DM m ⁻²)	Occupied area (ha)	Total biomass (kg DM)
0~0.5 †	7.7±4.4 (n=3)	0.14	11.0
0.5~1.0 §	34.4±26.7 (n=23)	0.47	162.6
1.0~1.5 §	44.6±28.6 (n=28)	0.96	426.9
1.5~2.0 §	40.1±26.8 (n=5)	0.94	375.3
2.0~2.5 †	6.1±4.7 (n=6)	0.44	26.6
2.5~3.0 †	0.5 (n=1)	0.08	0.4
Total biomass in the whole reservoir			1,002.8

† expressed as a mean value in June and July, † measured in July 2010 and § measured in June 2010.

고찰

본 연구의 대상생물인 침수식물은 물속에서 생육하기 때문에 채집이 매우 어려운데, 이들의 채집 방법은 크게 직접 채집법과 간접 채집법으로 나눌 수 있다(Madsen, 1999). 직접 채집법에는 물가걷기(wading) 조사법, 스노클링과 스쿠바(Cyr and Downing, 1988; Madsen, 1999) 등을 이용한 수중 조사법, 갈구리(grapnel)(Ali *et al.*, 2007), 갈퀴(rake)(Treibitz *et al.*, 1993; Weaver *et al.*, 1997; Murphy *et al.*, 2003; Rodusky *et al.*, 2005), 드레지(dredge)(Sutton, 1982; Sabol, 1984; Osborne, 1984) 등을 이용하는 방법이 있다. 간접 채집법은 항공과 인공위성 영상(Nelson *et al.*, 2006), 음파(Hamabata, 1997; Sabol *et al.*, 2002), 수중 카메라(Spears *et al.*, 2009) 등을 이용하는 방법이 있다. 이 연구에서는 손쉽게 흔히 사용되는 양날갈퀴 채집법(Deppe and Lathrop, 1992; Kenow *et al.* 2007)과 음파탐지법(Hamabata, 1997)을 채용하였다. 양날갈퀴로 채집한 침수식물의 종별 갈퀴 피복도는 침수식물의 상대적 생물량을 잘 반영하여(Kim, 2011), 침수식물의 수도를 평가하는 데 적합하였다. 또한 음파탐지기에 의하여 저수지 지형, 침수식물의 분포 및 식물체 높이는 확인할 수 있었으나, 식물종 또는 형태 특성을 구분할 수 없었다. 그러므로 양날갈퀴법에 의한 정량채집과 음파탐지법에 의한 분포 확인으로 침수식물을 효율적으로 조사할 수 있다고 판단되었다.

금풍저수지에서 연간 수위변동은 농업용 용수를 공급하는 5월부터 수위가 계속 하강하여 강우기인 7월 이후에 수위가 상승하는 전형적인 농업용수용 저수지의 수위변동 특성을 보였다(Fig. 2). 이 저수지에서 연간 수위변동폭은 약 3.5 m로서 비교적 컸다. 이러한 큰 수위변동에 의하여 금풍저수지에서는 경엽부의 일부가 물위로 솟구치거나 뜨는 정수식물과 부엽식물은 생존하기 어렵고 물속에서 생활하는 침수식물만이 생존이 가능한 것으로 판

단된다(Van Geest *et al.*, 2005).

금풍저수지에서는 총 7종의 침수식물이 발견되었는데 이중 실나자스말, 붕어마름, 실말과 같은 협엽종이 43%를 차지하였다(Table 1). 침수식물의 출현종수가 7종으로서 비교적 적은 것은 아마도 이곳의 연간 수위변동폭이 3.5 m로서 크기 때문인 것으로 생각된다. 침수식물의 다양성은 호수의 연간수위변동에 매우 민감하게 반응한다고 알려져 있다(Beklioglu *et al.*, 2006). 한편 저수지에서 협엽종의 구성비율은 팔당호와 청평호(HBC, 2009)보다 높았다. 일반적으로 협엽종은 부영양화가 진행됨에 따라서 점차 감소하는 것으로 알려져 있다(Davis and Brinson, 1980). 그러므로 금풍저수지에서는 아직 부영양화가 심하게 진행되지 않아서 협엽종이 많이 분포하는 것으로 생각된다. 또한 저수지 바닥도 미사나 점토가 드물고 주로 모래로 구성되어 있어서 수질오염이 크게 진행되지 않았음을 알 수 있었다.

다변량분석의 결과에 의하면 금풍저수지에서 침수식물 식생구조에 영향을 미치는 주요한 환경요인은 수심과 연안대 경사이었다(Fig. 4). 연안대 경사가 급할수록 수심이 급속히 증가하므로 결국 수심이 침수식물 식생구조에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이라고 생각된다(Wallsten and Forsgren, 1989; Havens, 2003; Lacoul and Freedman, 2006). 금풍저수지에서는 수심이 깊은 곳에서는 민나자스말과 말즘이 수심이 얇은 곳에서는 붕어마름과 실나자스말이 주로 분포하였다(Fig. 4A). 팔당호에서는 수심이 깊은 곳에서 붕어마름이 수심이 얇은 곳에 나사말이 우점하는 것과 차이가 나는 수심에 따른 침수식물 분포의 차이가 있었다(Cho and Kim, 1994). 이러한 분포의 차이는 팔당호의 연수위변동 폭은 약 0.5 m로서 비교적 안정된 반면에(WAMIS, 2011), 금풍저수지에서는 연수위변동 폭이 크기 때문일 수 있다. 그러나 이러한 분포 차이에 대한 원인을 밝히기 위해서는 면밀한 연구가 필요하다.

금풍저수지의 침수식물 분포 최대 수심은 2.8 m로서 빈

영양호인 미국의 조지아호의 12 m (Sheldon and Boylen, 1977), 일본의 비와호의 7 m (Hamabata, 1997)보다는 낮았고 부영양호에 가까운 팔당호의 2.5 m (Cho and Kim, 1994)와 유사하였다. 침수식물의 최대분포수심과 투명도를 나타내는 세키 수심 사이에 일반적으로 직선적 상관관계를 보이고, 수심에 따라서 빛 환경이 크게 달라지므로 수체의 탁도가 침수식물의 최대분포수심을 결정하는 주요인이 된다 (Davis and Brinson, 1980). 금풍저수지에서 2010년의 화학적산소요구량 (COD)은 $4.0 \sim 6.9 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, 부유물질량은 $1.9 \sim 19.7 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다 (WIS, 2011). 특히 홍수기에는 심한 탁수가 저수지로 유입되었다. 이곳에서 침수식물의 최대분포수심이 낮은 이유는 부영양화 진행과 유입 탁수에 의한 탁도 증가가 주원인인 것으로 생각된다. 또한 연수위변동폭이 큰 것과 수상스키용 보트 운행에 따른 파력 교란에 의하여 침수식물의 분포가 제한되는 것으로 생각된다.

금풍저수지에서 침수식물은 완만한 경사의 연안대를 따라서 분포하며 (Fig. 5), 저수지 총수면적의 6%, 총수체적의 1.5%를 차지하고 있었다 (Fig. 6). 침수식물이 차지하는 면적에 비하여 체적의 비율이 적은 이유는 이들이 주로 수심이 얇은 곳에 분포하고, 분포지에서도 수면까지 도달하지 못하기 때문이다. 우리나라 하천 상류에 조성된 대부분의 저수지에서는 수변부의 경사가 급하여 수생식물의 정착 가능 공간이 좁고 인위적인 수위변동에 의하여 유입된 수생식물의 정착을 어렵게 하고 있다. 전체 저수지에서 침수식물을 포함한 수생식물이 차지하는 분포면적과 체적이 적어서 이들이 저수지에 기여하는 생태적 기능도 제한될 것이다.

금풍저수지에서 침수식물의 최대 생물량은 수심 1.0~1.5 m에서 45 g DM m^{-2} 이었다 (Table 2). 팔당호에서 침수식물의 최대생물량은 수심 1.5~2.0 m에서 322 g DM m^{-2} 보다 적었다 (Cho and Kim, 1994). 금풍저수지에서 침수식물의 생물량은 수심 0.5~2.0 m에서 주로 분포하고 홍수에 의한 탁수가 유입되는 7월에 생물량이 급격하게 감소하였다 (Fig. 7, Table 2). 6월말 이후에 강수량이 증가하여 저수위 수위가 증가하고 탁도가 증가하면서 침수식물의 생장이 억제된다. 그러나 저수위시 노출된 수변부의 일부는 수위가 높아짐에 따라서 침수되고 이곳에 침수식물이 새로이 정착하였다.

2010년에 수체의 연평균농도는 총질소가 0.974 mg L^{-1} , 총인이 0.032 mg L^{-1} 이므로 (WIS, 2011), 수체에 보유된 질소는 2,225 kg, 인은 73 kg으로 추정된다. 침수식물의 영양소 농도를 질소가 13.3 mg g^{-1} , 인이 1.0 mg g^{-1} 이라고 한다면 (Güsewell and Koerselman, 2002), 저수지 전체에

서 침수식물의 질소 보유량이 13.3 kg, 인 보유량이 1.0 kg으로 추정된다. 결국 침수식물이 보유한 질소는 수체 보유량의 0.6%, 인은 1.4%로서 매우 적었다.

이상의 결과를 종합하면 하천 상류에 위치한 금풍저수지에서는 수변부의 경사가 급하여 연안대가 좁게 발달하고 연수위변동이 약 3 m로 커져 정수식물과 부엽식물이 정착하지 못하고 침수식물만이 분포하고 있었다. 침수식물도 홍수기에 탁수 유입과 수위상승으로 생장이 저해되었으며 수심에 따라서 식생구조가 변화하였다. 또한 좁은 연안대에 생장이 제한된 침수식물은 저수지 전체에서 생태적 기능이 매우 제한될 것으로 생각된다.

적 요

하천 상류에 위치한 농업용 소형 저수지인 금풍지에서 침수식물의 분포와 수도의 공간적 시간적 변이를 파악하기 위하여, 양날갈퀴법과 음파탐지법을 이용하여 침수식물의 분포, 풍부도 및 생물량을 측정하였다. 침수식물의 출현종수와 식생구조는 연안대의 지형 경사도와 수심에 영향을 받았다. 침수식물 식물상의 종풍부도는 완만한 연안대에서 높았다. DCA (detrended correspondence analysis)에 의한 식생분석 결과에 의하면 침수식물의 식생구조는 수심에 의하여 영향을 받았다. 금풍저수지에서 침수식물은 최대 수심 2.8 m까지 분포하였다. 침수식물 분포지는 수변부 경사가 급하고 연간 수위변동폭이 3.5 m에 달하여 총수면적의 6%에 불과하였다. 침수식물의 생물량은 수위변동과 홍수기 탁수 유입으로 인하여 제한되었다. 결론적으로 하천 상류에 조성된 농업용 저수지인 금풍지에서 침수식물의 식생구조는 수심과 연안대 경사에 의하여 영향을 받았고, 연안대 경사가 급하고 연수위변동이 커서 침수식물의 분포와 생물량이 제한되었다.

사 사

본 연구는 본 연구는 환경부 Eco-STAR project (수생태 복원사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 또한 음파 탐지법을 지도하여 주신 University of Shiga Prefecture의 E. Hamabata 교수님께 감사 드립니다.

인 용 문 헌

Ali, M.M., A.A. Mageed and M. Heikal. 2007. Importance of

- aquatic macrophyte for invertebrate diversity in large subtropical reservoir. *Limnologica* **37**: 155-169.
- Barko, J.W. and W.F. James. 1998. Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation, and resuspension, p. 197-217. *In*: The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes (Jeppesen, E., M. Søndergaard and K. Christoffersen, eds.). Springer, New York.
- Barko, J.W., D. Gunnison and S.R. Carpenter. 1991. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany* **41**: 41-65.
- Beklioglu, M., G. Altinayar and C.O. Tan. 2006. Water level control over submerged macrophyte development in five shallow lakes of Mediterranean Turkey. *Archiv für Hydrobiologie* **166**: 535-556.
- CAER. 2011. <http://www.ecowater.re.kr/>. Center for Aquatic Ecosystem Restoration, Chuncheon.
- Capers, R.S. 2000. A comparison of two sampling techniques in the study of submersed macrophyte richness and abundance. *Aquatic Botany* **68**: 87-92.
- Carpenter, S.R. and D.M. Lodge. 1986. Effects of submerged macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany* **26**: 341-370.
- Cho, K.-H. 1992. Matter Production and Cycles of Nitrogen and Phosphorus by Aquatic Macrophytes in Lake Paltangho. PhD Thesis, Seoul National University, Seoul.
- Cho, K.-H. and J.-H. Kim. 1994. Distribution of aquatic macrophytes in the littoral zone of Lake Paltangho. *Korean Journal of Ecology* **17**: 435-442.
- Choi, H.K. 2000. Hydrophytes. Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, Daejeon.
- Cronk, J.K. and M.S. Fennessy. 2001. Wetland Plants: Biology and Ecology. Lewis, New York.
- Cyr, H. and J.A. Downing. 1988. Empirical relationships of phytomacrofaunal abundance to plant biomass and macrophyte bed characteristics. *Canada Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**: 975-984.
- Davis, G.J. and M.M. Brinson. 1980. Responses of Submersed Vascular Plant Communities to Environmental Change. Report FWS/OBS-79/33 U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Services Program, Washington, DC.
- Deppe, E.R. and R.C. Lathrop. 1992. A comparison of two rake sampling techniques for sampling aquatic macrophytes. Wisconsin Department of Natural Resources Research and Management Findings 32, Madison.
- Dodson, S.I., S.E. Arnott and K.L. Cottingham. 2000. The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology* **81**: 2662-2679.
- EPA. 1998. Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria. Technical Guidance Document. EPA. 841-B-98-007, Washington DC.
- Güsewell, S. and W. Koerselman. 2002. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **5**: 37-61.
- Hamabata, E. 1997. Distribution, stand structure and yearly biomass fluctuation of *elodea nuttallii*, an alien species in Lake Biwa - studies of submerged macrophyte communities in Lake Biwa. *Japanese Journal of Limnology* **58**: 173-190.
- Havens, K.E. 2003. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake. *Hydrobiologia* **493**: 173-186.
- HBC. 2009. Survey on the Environment and Ecosystem of Lakes in the Han River System. The Han River Basin Commission, Hanam.
- Hill, M.O. and H.G. Gauch. 1980. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Plant Ecology* **42**: 47-58.
- Kenow, K.P., J.E. Lyon, R.K. Hines and A. Elfessi. 2007. Estimating biomass of submersed vegetation using a simple rake sampling technique. *Hydrobiologia* **575**: 447-454.
- Kim, K. 2011. Spatial Variations in Abundance and Biomass of Submerged Macrophytes in a Small Agricultural Reservoir. MS Thesis, Inha University, Incheon.
- Lacoul, P. and B. Freedman. 2006. Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. *Environmental Reviews* **14**: 89-136.
- Madsen, J.D. 1999. Point Intercept and Line Intercept Methods for Aquatic Plant Management. Technical Note APCR-P-M1-02. US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Madsen, J.D., P.A. Chambers, W.F. James, E.W. Koch and D.F. Westlake. 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia* **444**: 71-84.
- Meerhoff, M., N. Mazzeo, B. Moss and L. Rodriguez-Gallego. 2003. The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology* **37**: 377-391.
- Murphy, K.J., G. Dickinson, S.M. Thomaz, L.M. Bini, K. Dick, K. Greaves, M.P. Kennedy, S. Livingstone, H. McFerran, J.M. Milne, J. Oldroyd and R.A. Wingfield. 2003. Aquatic plant communities and predictors of diversity in a sub-tropical river floodplain: the upper Rio Parana, Brazil. *Aquatic Botany* **77**: 257-276.
- Na, H.R. 2010. Sexual System and Systematics of Hydril-

- loideae (Hydrocharitaceae). PhD Thesis, Ajou University, Suwon.
- Nelson, S.A.C., K.S. Cheruvilil and P.A. Soranno. 2006. Satellite remote sensing of freshwater macrophytes and the influence of water clarity. *Aquatic Botany* **85**: 289-298.
- Oksanen, J. 2011. Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: Vegan Tutorial. <http://cc.oulu.fi/~jarioksa/opetus/metodi/vegantutor.pdf/>.
- Osborne, J.A. 1984. The Osborne submerged aquatic plant sampler for obtaining biomass measurements, p. 58-68. *In: Ecological Assessment of Macrophyton: Collection, Use, and Meaning of Data* (Dennis, W.M. and B.G. Isom, eds.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- RAWRIS. 2011. <http://rawris.ekr.or.kr/>. Rural Agricultural Water Resource Information System, Uiwang.
- Rodusky, A.J., B. Sharfstein, T.L. East and R.P. Maki. 2005. A comparison of three methods to collect submerged aquatic vegetation in a shallow lake. *Environmental Monitoring and Assessment* **110**: 87-97.
- Rooney, N. and J. Kalf. 2000. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry. *Aquatic Botany* **68**: 321-335.
- Sabol, B.M. 1984. Development and use of Waterways Experiment Station's hydraulically operated submersed aquatic plant sampler, p. 46-57. *In: Ecological Assessment of Macrophyton: Collection, Use, and Meaning of Data* (Dennis, W.M. and B.G. Isom, eds.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Sabol, B.M., R.E. Melton, R. Chamberlain, P. Doering and K. Haurert. 2002. Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation. *Estuaries and Coasts* **25**: 133-141.
- Sheldon, R.B. and C.W. Boylen. 1977. Maximum depth inhabited by aquatic vascular plants. *American Midland Naturalist* **97**: 248-254.
- Søndergaard, M., L. Bruun, T. Lauridsen, E. Jeppesen and T.V. Madsen. 1996. The impact of waterfowl on submerged macrophytes: in situ experiments in a shallow eutrophic lake. *Aquatic Botany* **53**: 73-84.
- Spears, B.M., I.D.M. Gunn, L. Carvalho, I.J. Winfield, B. Dudley, K. Murphy and L. May. 2009. An evaluation of methods for sampling macrophyte maximum colonisation depth in Loch Leven, Scotland. *Aquatic Botany* **91**: 75-81.
- Straskraba, M., J.G. Tundisi and A. Duncan. 1993. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management, p. 213-288. *In: Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. (Straskraba, M., J.G. Tundisi and A. Duncan, eds.). Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.
- Sutton, D.L. 1982. A core sampler for collecting *hydrilla propagules*. *Journal of Aquatic Plant Management* **20**: 57-59.
- Team, R.D.C. 2008. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Thomaz, S.M., T.A. Pagioro, L.M. Bini and K.J. Murphy. 2006. Effect of reservoir drawdown on biomass of three species of aquatic macrophytes in a large sub-tropical reservoir (Itaipu, Brazil). *Hydrobiologia* **570**: 53-59.
- Thornton, K.W. 1990. Perspective on reservoir limnology, p. 1-14. *In: Reservoir Limnology* (Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Paync, eds.), John Wiley & Sons.
- Trebitz, A.S., S.A. Nichols, S.R. Carpenter and R.C. Lathrop. 1993. Patterns of vegetation change in Lake Wingra following a *myriophyllum spicatum* decline. *Aquatic Botany* **46**: 325-340.
- Van den Berg, M.S., W. Joosse and H. Coops. 2003. A statistical model predicting the occurrence and dynamics of submerged macrophytes in shallow lakes in the Netherlands. *Hydrobiologia* **506-509**: 611-623.
- Van Geest, G.J., H. Wolters, F.C.J.M. Roozen, H. Coops, R.M.M. Roijackers, A.D. Buijse and M. Scheffer. 2005. Water-level fluctuations affect macrophyte richness in floodplain lakes. *Hydrobiologia* **539**: 239-248.
- Wallsten, M. and P.O. Forsgren, 1989. The effects of increased water levels on aquatic macrophytes. *Journal of Aquatic Plant Management* **27**: 32-37.
- WAMIS. 2011. <http://www.wamis.go.kr/>. Water Management Information System, Seoul.
- Weaver, M.J., J.J. Magnuson and M.K. Clayton. 1997. Distribution of littoral fishes in structurally complex macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **54**: 2277-2289.
- WIS. 2011. <http://water.nier.go.kr/>. Water Information System, Seoul.

(Manuscript received 14 January 2012,
Revised 14 March 2012,
Revision accepted 15 March 2012)