

Research Article

Open Access

주암호 홍수조절용지내 침수 식물체의 영양염류 제거속도 및 용출속도

한종학,^{1†} 서동철,^{1†} 김상돈,² 강세원,¹ 임병진,² 박종환,² 김갑순,² 이준배,² 김현욱,³ 허종수,⁴ 조주식^{1*}

¹순천대학교 생물환경학과, ²영산강 물환경연구소, ³서울시립대학교 환경공학부, ⁴경상대학교 응용생명과학부

Removal and Release Velocities of Nutrients by Submerged Plants in Flood Control Reservoirs around Juam Lake

Jong-Hak Han,^{1†} Dong-Cheol Seo,^{1†} Sang-Don Kim,² Se-Won Kang,¹ Byung-Jin Lim,² Jong-Hwan Park,² Kap-Soon Kim,² Jun-Bae Lee,² Hyunook Kim,³ Jong-Soo Heo⁴ and Ju-Sik Cho^{1*} (¹Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, ²Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, ³Division of Environmental Engineering, University of Seoul, ⁴Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University)

Received: 3 June 2011 / Accepted: 17 June 2011

© The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: Eutrophication occurs occasionally in flood control reservoirs around Juam lake in summer and early autumn. Lakeside macrophyte which is one of internal pollutants effects on water quality when it is submerged during water surface is rising after rainy season.

METHODS AND RESULTS: To improve water the quality of water from water supply source and to establish the management plan of submerged plants in flood control reservoirs around Juam Lake, the removal and release velocities of nutrients by submerged plants in site 1 and 2 were investigated. Removal or release velocity constant (K) of COD by *Carex dimorpholepis* Steud in column was 0.07~0.18 day⁻¹ at 0~4 days after flooding, -0.23~-0.17 day⁻¹ at 5~19 days after flooding and -0.28~-0.03 day⁻¹ at 20~33 days after flooding. Removal or release velocity constant (K) of T-N by *Carex dimorpholepis* Steud was 0.02 day⁻¹ at 0~4(8) days after flooding, -0.13~-0.10 day⁻¹ at 5(9)~33 days after flooding in column. Removal or release velocity constant (K) of T-P by *Carex dimorpholepis* Steud was 0.05~0.06

day⁻¹ at 0~4 days after flooding, -0.14~-0.09 day⁻¹ at 5~33 days after flooding. Release velocity constant (K) of nutrients by *Miscanthus sacchariflorus* Benth was lower than that by *Carex dimorpholepis* Steud. In site 1, the amount of nutrients release by *Carex dimorpholepis* Steud was 6,719 kg/month/area for COD, 2,397 kg/month/area for T-N and 466 kg/month/area for T-P. The amounts of nutrients release by *Carex dimorpholepis* Steud were higher than those by *Miscanthus sacchariflorus* Benth in both sites.

CONCLUSION(s): The results of this study suggest that COD, T-N and T-P in water quality of Juam lake were strongly influenced by submerged plants in flood control reservoirs.

Key Words: Flood control reservoir, Nutrient, Release velocity, Removal velocity, Submerged Plant

서 론

국내의 대부분의 댐과 저수지는 영양염류의 유입으로 여름과 초가을 고수온기에 부영양화 현상이 빈번하게 일어나고 있으며, 이러한 현상은 질소와 인 등의 영양염류와 환경오염 등의 다양한 인자와 밀접한 상관이 있다(Cho *et al.*, 1996; Lee and Kang, 2000). 호수내의 영양염류 증가에 영향을 주는 대표적인 오염원으로는 상류로부터 유입되는 점오염원 및

*교신저자(Corresponding author):

Tel: +82-61-750-3297 Fax: +82-61-752-8011

E-mail: chojs@suncheon.ac.kr

[†]공동 제 1저자

비점오염원과 호수내부에서 생산되는 유기물로 인한 부하로 알려져 있으며, 이 중 호수내부에서 생성되는 주 오염원으로는 식물플랑크톤의 증가와 홍수조절용지내 식물체의 침수로 인한 영양염류의 용출이 있다. 홍수조절용지내에서 생장하는 식물들은 생장기 동안에는 수질과 토양(퇴적층)으로부터 영양성분을 흡수하여 생장하므로 수질정화와 더불어 토양 생태계 활성화에 다양한 이점이 있으나, 홍수기에는 저수율 상승으로 인해 식물체들이 상당기간 침수되어 분해되면서 수중의 영양염류를 증가시켜 조류의 번식과 이취미 유발 등의 요인으로 작용할 수 있고, 부영양화를 촉진시켜 안정적인 수자원 공급에 차질을 빚을 수 있다(Cho, 2010; Lee and Bae, 2002; Lee and Kim, 2005; Lee and Park, 2005).

우리나라에 건설된 다목적댐은 목적에 따라 저수량 관리를 효과적으로 하기 위하여 여름 홍수기 전에 수위를 최대한 낮추며, 여름 홍수기 이후에 높은 수위를 유지시켜 그 이듬해 홍수기 전까지의 수자원 이용에 효율성을 기하고 있다. 하지만 이로 인해 여름철 홍수기 전 3~4개월 동안 댐 주위 수변 지역에 다양한 잡초가 번성하게 되고 홍수기 이후 이들이 침수되어 수질오염 문제를 야기시킬 수 있다(Chung and Chung, 2003; Lee *et al.*, 2003).

본 연구의 조사지역인 주암댐은 전라남도 순천시, 보성군 및 화순군과 경계에 위치한 댐으로 홍수조절용지는 총면적 5,716천 m^2 중 절대보존구역이 6천 m^2 (0.1%)이고, 관리/완충구역이 201천 m^2 (3.5%)이며, 보전적 이용구역이 5,509천 m^2 (96.4%)으로 구성되어 있다(Cho, 2010; Lee *et al.*, 2007). 특히, 주암호내에는 수몰 이전에 경작지로 사용되었던 완만한 홍수조절용지가 상당히 넓은 면적으로 분포되어 있어, 봄철부터 강우 직전인 이른 여름철까지 초목류들이 토양과 수질로부터 영양염류를 흡수하면서 왕성하게 성장하고, 홍수 시기에 저수량 증가로 초목류들이 침수되어 서서히 분해되면서 다량의 유기물, 질소 및 인 등의 영양염류들을 용출시키고 있다. 따라서 홍수조절용지의 고유기능인 이취수 기능과 수질보전을 위한 완충지(Buffer zone) 기능을 고려한 최적 활용방안을 마련하기 위해 침수식물체가 수질에 미치는 영향을 파악하는 것이 절실히 필요한 실정이다(Cho, 2010; Choi, 2002; Ministry of Environment, 2009).

이에 본 연구에서는 주암호 홍수조절용지내에 서식하는 침수식물체들의 영양염류 용출이 주암호 수질에 미치는 영향을 조사하고자 침수상태의 수질, 토양 및 식물체를 자연상태 그대로 column으로 옮겨와 침수기간별 영양염류의 제거속도 및 용출속도를 조사하였고, 이들 결과를 토대로 각 홍수조절용지에서 침수식물체별 영양염류 용출량을 산출하였다.

재료 및 방법

조사 대상지역

주암호 홍수조절용지내 침수 식물체의 영양염류 제거속도 및 용출속도를 조사하기 위한 column시료의 채취지역은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주암호 홍수조절용지를 대표할 수 있

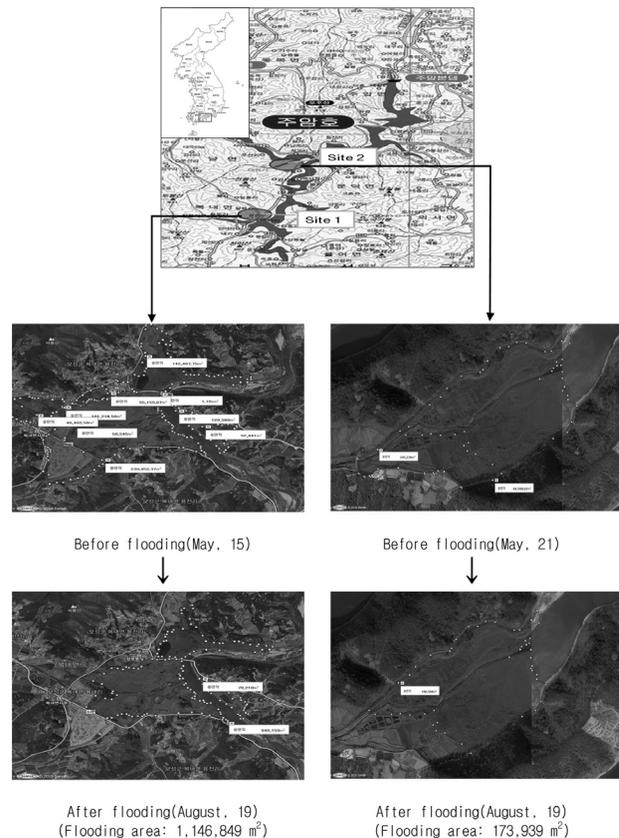


Fig. 1. Sampling sites of submerged plants, and flooding area in flood control reservoirs around Juam lake.

고, 접근이 용이한 2개 지점(Site 1 및 2)으로 선정하였다. Site 1 (34°53'53" N, 127°08'30" E)은 전남 보성군 북내면 북내리 일원의 홍수조절용지로 주암호 홍수조절용지 중 단일 지역으로서 가장 넓은 지역으로 유정천-북내천-일봉천이 본류인 보성강과 합류하는 매우 넓은 환경사 나대지로 전체 홍수조절용지 면적은 약 1,848,568 m^2 정도이었다. Site 1의 식생은 물억새, 이삭사초, 매자기, 개망초 및 털뽕새귀리 등 약 30여종 이상이 분포하고 있었으며, 주요 우점종은 물억새와 이삭사초였다.

Site 2 (34°58'05" N, 127°10'07" E)는 전남 보성군 문덕면 죽산리 일원의 홍수조절용지로 나대지의 환경사 지역으로 전체 홍수조절용지 면적은 약 245,238 m^2 정도이었다고, 주요 우점식생은 물억새 및 이삭사초이었다(Cho, 2010; Kang *et al.*, 2011).

공시수질

본 실험에 사용된 수질은 식물체 및 토양 시료채취 시 동일지역에서 직접 채취한 주암호 원수를 그대로 사용하였으며, 채취 즉시 저온상태(5°C)로 유지하여 실험실로 운반하였다. 공시 수질의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 COD는 평균 5.0 mg/L, T-N 함량은 평균 0.94 mg/L 및 T-P 함량은 평균 0.019 mg/L이었다.

Table 1. Chemical characteristics of raw water used in Juam lake

Sites	COD _{Cr} (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Site 1	5.0	0.95	0.018
Site 2	5.1	0.93	0.020

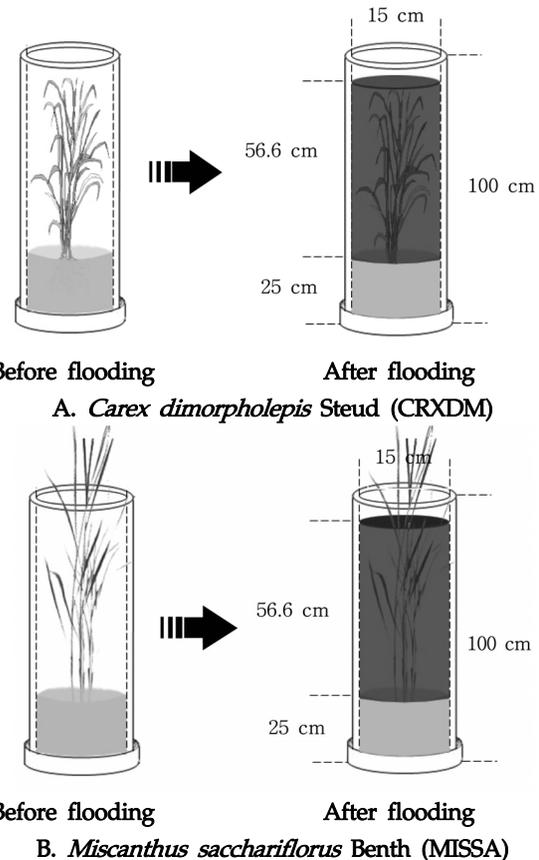
실험방법

침수식물체의 영양염류 제거속도 및 용출속도를 조사하기 위한 column은 토양과 식물체 채취가 용이하고, 침수 식물체의 제거속도 및 용출속도를 정확히 파악할 수 있게 특수 제작하였으며, 그 크기는 지름 15 cm 높이 100 cm로 총체적은 17,663 cm³ 되게 하였다. 침수식물체의 영양염류 제거속도 및 용출속도를 구하기 위한 시료는 제작된 원통형 column에 두 지역의 홍수조절용지에서 대표적인 우점종인 이삭사초 (*Carex dimorpholepis* Steud)와 물억새(*Miscanthus sacchariflorus* Benth)를 각각 토양표면으로부터 깊이 25 cm까지 자연상태 그대로 3반복으로 채취하여 column의 수질 및 토양 환경을 실제 현장 홍수조절용지와 동일하게 유지되도록 준비하였다(Herrman and White, 2008). 사용된 column에 홍수시 침수환경과 동일한 조건을 부여하기 위해 채취한 주암호 원수를 이용하여 각 column에 11 L씩 주입한 후 column 내의 영양염류 제거속도 및 용출속도를 모니터링하기 위해 침수된 후 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 19, 29 및 33 days에 column내 수질을 100 mL씩 채취하여 COD, T-N 및 T-P 함량을 각각 분석하여 영양염류 제거속도 및 용출속도를 조사하였다(Fig. 2).

영양염류 제거속도 및 용출속도를 구하기 위해 1차속도 방정식을 사용하였다(Seo, 2005). 일차반응속도($V = KC$)는 순간적인 시간 dt 에서 영양염류 농도 C 가 dc/dt 만큼 변할 때의 순간적인 반응속도는 $-dc/dt$ 로 나타낼 수 있다(반응물질의 농도는 시간이 지남에 따라 감소하므로 -로 표시함). Column 설치 시점의 수질내 농도를 영양염류 초기농도(C_0)로 하여 체류시간에 따른 각 영양염류의 농도(C)의 반응 비(C/C_0)를 이용하였으며, 영양염류의 제거속도 및 용출속도 방정식은 $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응식을 이용하였다(Seo, 2005). 일차 반응속도 방정식에서 기울기가 양의 값인 경우 영양염류가 제거되며, 기울기가 음의 값인 경우 영양염류가 용출된다. 홍수 조절용지에서 침수식물체별 영양염류 용출량 산출은 column 실험을 통해 용출된 COD, T-N 및 T-P 함량을 실제 각 사이트의 식생면적을 고려하여 산출하였다.

분석방법

수질 분석은 수질오염공정시험법(Choi *et al.*, 2004) 및 APHA의 standard method(APHA, 1995)에 준하여 다음과 같이 하였다. 수질 중 COD는 중크롬산칼륨법, T-N은 자외선 흡광도법(UV2550PC, Perkinelmer) 및 T-P는 아스코르빈산 환원법(UV2550PC, Perkinelmer)으로 각각 분석하였다.

**Fig. 2. Schematic diagram of column experiment used.****결과 및 고찰****홍수조절용지에서 침수 식물체별 COD의 제거속도 및 용출속도**

홍수조절용지에서 site 1과 2에서 COD의 제거속도 및 용출속도를 구하기 위한 일차반응속도 방정식은 Fig. 3에서 보는 바와 같다. Site 1에서 주요 우점 침수식물체의 COD 일차반응속도 방정식은 이삭사초의 경우 침수 0~4 day 구간에서 $\ln(C/C_0) = -0.184 \text{ time (day)} - 0.037$ ($R^2 = 0.970^{***}$, $P < 0.01$)이었고, 침수 5~19 day 구간에서 $\ln(C/C_0) = 0.169 \text{ time (day)} - 0.952$ ($R^2 = 0.921^*$, $P < 0.05$)이었으며, 침수 20~33 day 구간에서 $\ln(C/C_0) = 0.029 \text{ time (day)} + 1.565$ ($R^2 = 0.999^{***}$, $P < 0.01$)으로 모든 구간에서 고도의 유의성이 있는 직선회귀식을 보였다. Site 1에서 물억새의 COD 일차반응속도 방정식은 침수 0~6 day 구간에서 $\ln(C/C_0) = -0.137 \text{ time (day)} - 0.207$ ($R^2 = 0.720$)이었고, 침수 7~19 day 구간에서 $\ln(C/C_0) = 0.191 \text{ time (day)} - 2.068$ ($R^2 = 0.984^{***}$, $P < 0.01$)이었고, 침수 20~33 day에서 $\ln(C/C_0) = 0.045 \text{ time (day)} + 0.670$ ($R^2 = 0.999^{***}$, $P < 0.01$)로 침수초기를 제외하고는 고도의 유의성이 있는 직선회귀식을 보였다.

상기의 COD 일차반응속도 방정식을 이용하여 column에서 COD가 제거되거나 용출되는 속도를 산출한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. Site 1에서 이삭사초의 경우 COD 제거속도 상수(K , day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.18 day^{-1}

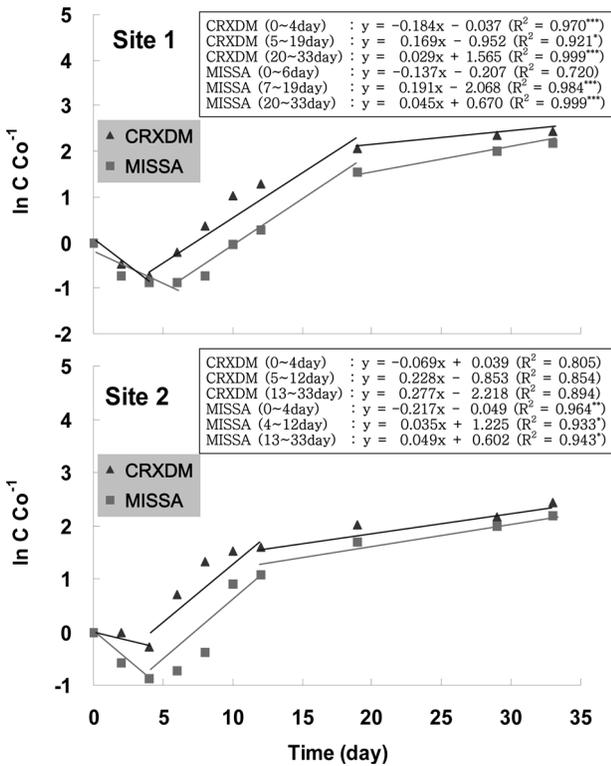


Fig. 3. Removal and release velocities of COD in the water in column experiments with flooding time(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

이였으며, COD 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~19 day 구간에서 -0.17 day^{-1} 이었고 20~33 day 구간에서 -0.03 day^{-1} 이었다. Site 1에서 물억새의 COD 제거/용출속도 상수 (K, day^{-1})는 침수 0~6 day, 7~19 day 및 20~33 day 구간에서 각각 0.14, -0.19 및 -0.05 day^{-1} 이었다. 이상의 결과를 미루어볼 때 침수초기에는 침수식물체가 생육하면서 COD를 분해 이용하여 수질을 정화하였으나, 침수식물체에 따라 다소 차이가 있었지만 침수 4~6일후부터 침수식물체가 미생물에 의해 서서히 분해되면서 COD가 수질내로 용출되는 경향이 있었다. Kang *et al.*(2011)의 보고에 의하면, 홍수조절용지에서 COD의 용출패턴을 조사한 결과 이삭사초가 물억새보다 약간 빨리 분해되어 용출된다고 보고된 바 있으나, 본 연구결과 이삭사초의 COD 용출시점은 물억새에 비해 약 2일정도 빨랐으나 용출속도면에서는 큰 차이 없이 유사하였다. 이와 같은 침수식물체의 용출시점 차이는 이삭사초의 경우 물억새에 비하여 식물조직이 연하고 대부분 잎으로 구성되어 초기 미생물에 의한 분해가 용이하기 때문으로 판단된다.

Site 2에서 이삭사초 및 물억새의 COD 일차반응속도 방정식(Fig. 3)을 이용하여 column에서 COD가 제거되거나 용출되는 속도를 산출한 결과(Fig. 4), 이삭사초의 경우 COD 제거/용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day, 5~19 day 및 20~33 day 구간에서 각각 0.07, -0.23 및 -0.28 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 COD 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~6 day, 7~19 day 및 20~33 day 구간에서 각각 0.22, -0.04 및

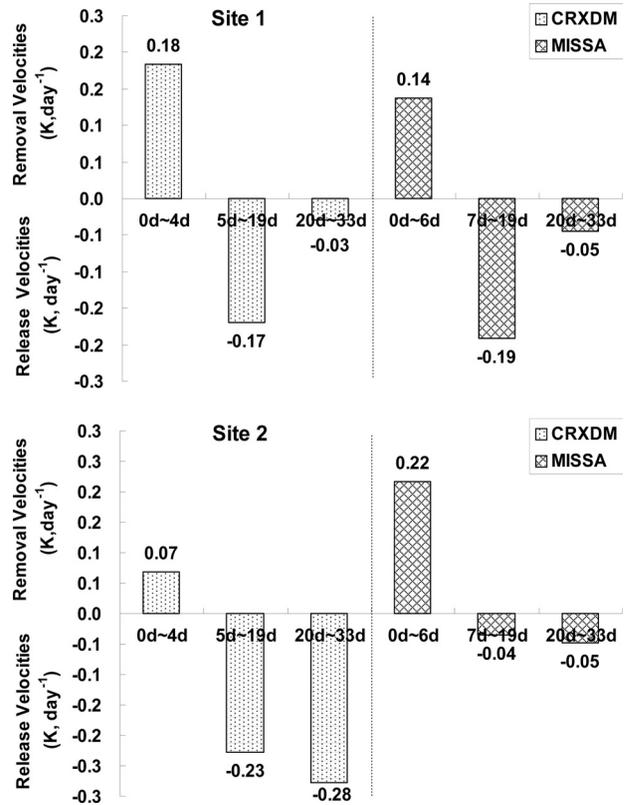


Fig. 4. Removal and release velocity constants(K) of COD in the water in column experiments with flooding time under different sites(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

-0.05 day^{-1} 이었다. Site 2에서는 site 1과는 달리 이삭사초의 용출속도가 물억새에 비해 월등히 빠른 경향이 있었다. site 1과 2에서 물억새의 COD 제거속도와 용출속도가 차이가 많은 것은 column 시료 채취시 column내의 식물체, 토양, 미생물 및 수질 등의 환경의 차이가 나기 때문으로 판단되며, 특히 물억새나 갈대 등의 수생식물은 통기조직이 발달하여 잎으로부터 쉽게 뿌리에 공기를 공급할 수 있는 특수한 통기구조를 가지고 있어 침수 초기에 다른 수생식물에 비해 수중에서 오랜기간동안 생육이 가능 한 것으로 알려져 있다(Seo, 2005).

또한 Cho *et al.*(1996) 및 Lee *et al.*(2003, 2007)은 주암호의 침수식물체에 의한 COD 용출패턴 및 용출속도를 조사한 연구에서 식물체 침수 직후부터 COD가 용출되어 COD 함량이 증가되었다고 보고하였는데, 이는 실제 홍수조절용지 환경과는 달리 채취된 침수식물체만 수중에 넣어 용출실험을 진행하였기 때문에 실제 현장에서의 영양염류 용출속도와는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 침수 초기에 COD가 이들의 결과와는 상반되게 감소하는 경향을 보였는데, 이는 침수 초기 일정기간 동안은 식물체와 미생물의 정상적인 생육과 활동이 가능하도록 특수 제작한 column을 이용하여 홍수조절용지내의 식물체, 토양 및 미생물 등의 환경을 그대로 유지할 수 있도록 채취하였기 때문으로 판단되며, 선행연구인 Kang *et al.*(2011)의 연구결과에서도 동일한 경향이였다.

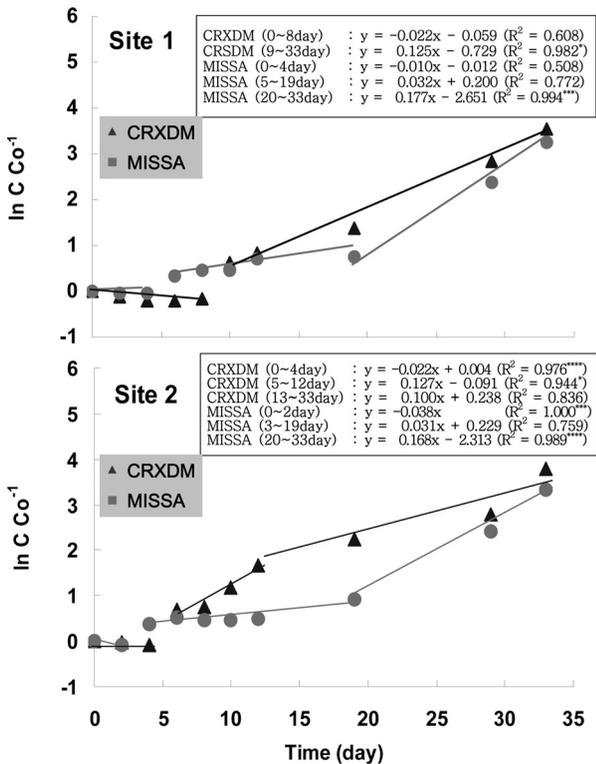


Fig. 5. Removal and release velocities of T-N in the water in column experiments with flooding time(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

홍수조절용지에서 침수 식물체별 T-N의 제거속도 및 용출속도

홍수조절용지에서 site 1과 2에서 T-N의 제거속도 및 용출속도를 구하기 위한 일차반응속도 방정식은 Fig. 5에서 보는 바와 같다. Site 1에서 침수된 이삭사초의 T-N 일차반응속도 방정식은 침수 0~8 day 및 9~33 day 구간에서 각각 $\ln(C/C_0) = -0.022 \text{ time (day)} - 0.059$ ($R^2 = 0.608$) 및 $\ln(C/C_0) = 0.125 \text{ time (day)} - 0.729$ ($R^2 = 0.982^*$, $P < 0.01$)로 모든 구간에서 고도의 유의성이 있는 직선회귀식을 보였다. Site 1에서 물억새의 T-N 일차반응속도 방정식은 침수 0~4, 5~19 및 20~33 day 구간에서 각각 $\ln(C/C_0) = -0.010 \text{ time (day)} - 0.012$ ($R^2 = 0.508$), $\ln(C/C_0) = 0.032 \text{ time (day)} + 0.200$ ($R^2 = 0.772$) 및 $\ln(C/C_0) = 0.177 \text{ time (day)} - 2.651$ ($R^2 = 0.994^{***}$, $P < 0.01$)이었다.

이상의 T-N 일차반응속도 방정식을 이용하여 column에서 T-N이 제거되거나 용출되는 속도를 산출한 결과(Fig. 6), site 1에서 이삭사초의 경우 T-N 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~8 day 구간에서 0.02 day^{-1} 이었으며, T-N 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 9~33 day 구간에서 -0.13 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 T-N 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.01 day^{-1} 이었으며, T-N 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~19 day 및 20~33 day 구간에서 각각 -0.03 및 -0.18 day^{-1} 이었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 이삭사초 column의 경우 침수 8일까지 T-N이 미미하게 제거되다가

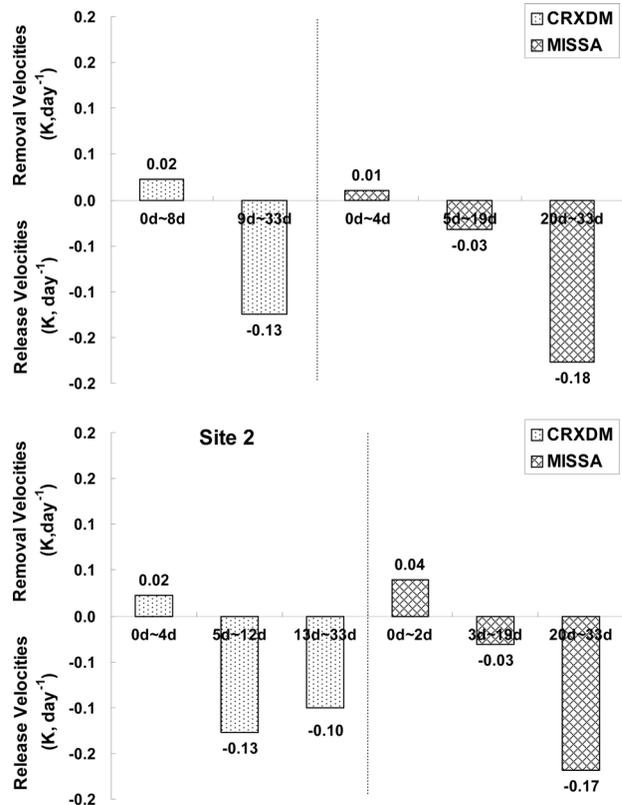


Fig. 6. Removal and release velocity constants(K) of T-N in the water in column experiments with flooding time under different sites(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

침수 9일경부터 침수 33일까지 일정한 속도로 T-N이 용출되는 경향이었고, 물억새 column의 경우 침수 4일까지 T-N이 미미하게 제거되다가 침수 5일부터 침수 19일까지 미미하게 용출되었으나 이삭사초에 비하면 거의 용출이 되지 않았다. 하지만 물억새 column에서 침수 20일부터 T-N의 용출속도가 급격히 증가하면서 수중내로 T-N이 용출되는 경향이였다. 상기결과에서 T-N 용출시점은 물억새가 이삭사초에 비해 약 10일 정도 길었는데, 이는 물억새는 침수되더라도 통기조직이 발달하여 잎으로부터 쉽게 뿌리에 산소를 공급할 수 있어 침수시 다른 수생식물에 비해 장기간 생육이 가능했기 때문으로 판단된다. 반면에 이삭사초의 경우 침수시 수중의 미생물에 의해 쉽게 분해가 되는 것은 물억새와 같은 통기조직이 없기 때문으로 판단된다.

Site 2에서 이삭사초 및 물억새의 T-N 일차반응속도 방정식(Fig. 5)을 이용하여 column에서 T-N이 제거되거나 용출되는 속도를 산출한 결과, T-N 제거/용출속도 상수(K, day^{-1})는 이삭사초의 경우 침수 0~4 day, 5~12 day 및 13~33 day 구간에서 각각 0.02 , -0.13 및 -0.10 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 침수 0~2 day, 3~19 day 및 20~33 day 구간에서 각각 0.04 , -0.03 및 -0.17 day^{-1} 으로 site 1과 유사한 경향이였다(Fig. 6).

Site 1 및 2에서 T-N의 제거속도는 침수식물체 종류에 따라 별 차이 없이 $0.01\sim 0.04 \text{ day}^{-1}$ 로 COD에 비해 다소 느린

제거속도를 보였고, T-N의 용출속도는 물억새가 이삭사초에 비해 약간 빨랐지만 용출시점은 이삭사초가 물억새에 비해 매우 빨랐다. 또한 T-N의 용출시점은 COD의 용출시점과 비교해볼 때 전반적으로 T-N의 용출시점이 COD의 용출시점에 비해 늦은 경향으로, 이는 식물조직의 분해시 우선 미생물이 식물체를 분해하면서 COD성 영양성분인 유기물을 일차적으로 용출시키고, 이후 용출된 유기물이 미생물에 의해 더욱 분해되면서 무기성분인 질소가 용출되기 때문으로 판단된다.

Kang *et al.*(2011)이 보고한 침수기간에 따른 물억새와 이삭사초의 수질내 T-N 용출량적인 측면에서 두 수생식물은 큰 차이 없이 비슷한 경향이었다고 보고하였는데, 본 실험결과 T-N의 용출속도는 수생식물 종류에 따라 약간의 차이가 있었으며, 용출시기 또한 침수식물체의 생육특성에 따라 많은 차이가 있었다.

주암호 저수구역내 침수식물체의 용출실험 결과에서 침수 30일 후 물억새에 의한 T-N 용출량이 2.28 mg/g이라고 Lee *et al.*(2007)이 보고한 바 있으나, T-N 용출속도를 제시하지 않아 본 연구결과와는 직접적인 비교는 어려우나 전체적인 T-N 용출속도 증가폭은 본 연구결과에 비하여 비교적 완만한 것으로 판단되었다. 이와 같은 차이는 Lee *et al.*(2007)의 연구는 실제 홍수조절지의 환경조건을 전혀 고려하지 않고 단지 식물체를 수중에 넣어서 T-N의 용출량만을 조사하여 용출속도가 일정하게 유지되었기 때문으로 판단된다. 하지만 본 실험에서는 실제 홍수조절지 환경조건과 동일하게 하여 용출초기와 용출된 이후 침수기간에 따라 용출속도가 달랐다.

홍수조절용지에서 침수 식물체별 T-P의 제거속도 및 용출 속도

홍수조절용지에서 site 1과 2에서 T-P의 제거속도 및 용출속도를 구하기 위한 일차반응속도 방정식은 Fig. 7에서 보는 바와 같다. Site 1에서 침수 0~4 day 구간에서 T-P 일차반응속도 방정식은 이삭사초와 물억새의 경우 각각 $\ln(C/C_0) = -0.046 \text{ time (day)} + 0.011$ ($R^2 = 0.956^{**}$, $P < 0.01$) 및 $\ln(C/C_0) = -0.063 \text{ time (day)} + 0.003$ ($R^2 = 0.999^{***}$, $P < 0.01$)이었다. 이후에 침수 5~33 day 구간에서 T-P 일차반응속도 방정식은 이삭사초의 경우 $\ln(C/C_0) = 0.144 \text{ time (day)} + 1.042$ ($R^2 = 0.951^{**}$, $P < 0.01$)이었고, 물억새의 경우 $\ln(C/C_0) = 0.150 \text{ time (day)} + 0.544$ ($R^2 = 0.994^{***}$, $P < 0.01$)이었다. 이상의 T-P 일차반응속도 방정식을 이용하여 column에서 T-P 제거속도와 용출속도를 산출한 결과(Fig. 8), site 1에서 이삭사초의 경우 T-P 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.05 day^{-1} 이었으며, T-P의 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~33 day 구간에서 -0.14 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 T-P 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.06 day^{-1} 이었으며, T-P의 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~33 day 구간에서 -0.15 day^{-1} 로 두 수생식물 모두에서 T-P 제거속도 및 용출속도는 거의 비슷하였다.

Site 2에서 침수 0~4 day 구간에서 T-P 일차반응속도 방정식은 이삭사초와 물억새의 경우 각각 $\ln(C/C_0) = -0.063$

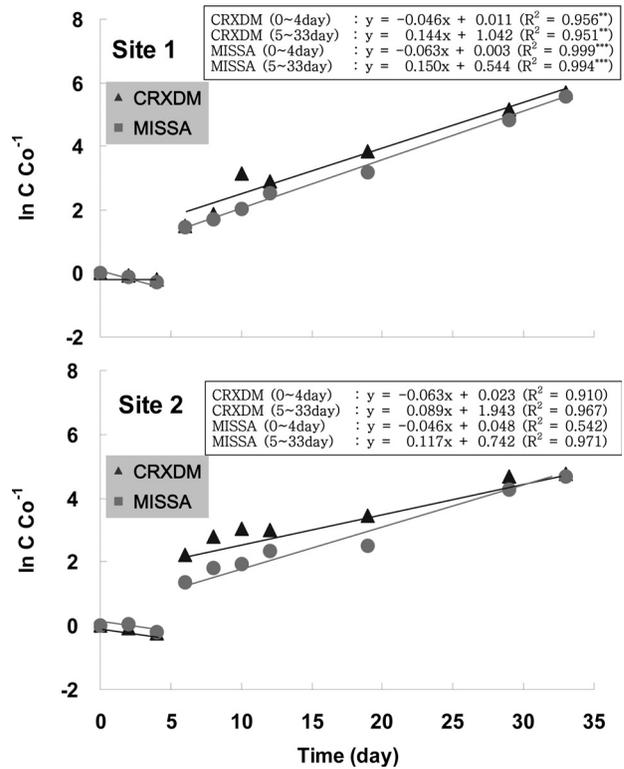


Fig. 7. Removal and release velocities of T-P in the water in column experiments with flooding time(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

time (day) + 0.023 ($R^2 = 0.910^*$, $P < 0.05$) 및 $\ln(C/C_0) = -0.046 \text{ time (day)} + 0.048$ ($R^2 = 0.542$)이었다. 이후 침수 5~33 day 구간에서 이삭사초와 물억새의 T-P 일차반응속도 방정식은 각각 $\ln(C/C_0) = 0.089 \text{ time (day)} + 1.943$ ($R^2 = 0.967^{**}$, $P < 0.01$) 및 $\ln(C/C_0) = 0.117 \text{ time (day)} + 0.742$ ($R^2 = 0.971^{**}$, $P < 0.01$)이었다(Fig. 7). 이상의 T-P 일차반응속도 방정식을 이용하여 column에서 T-P 제거속도와 용출속도를 산출한 결과(Fig. 8), site 2에서 이삭사초의 T-P 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.06 day^{-1} 이었으며, T-P의 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~33 day 구간에서 -0.09 day^{-1} 이었다. 또한, site 2의 물억새의 T-P 제거속도 상수(K, day^{-1})는 침수 0~4 day 구간에서 0.05 day^{-1} 이었으며, T-P의 용출속도 상수(K, day^{-1})는 침수 5~33 day 구간에서 -0.12 day^{-1} 이었다. 이상의 결과에서 site 2에서의 T-P 제거속도 및 용출속도는 site 1과 큰 차이 없이 유사한 경향이었다.

Site 1 및 2에서 T-P의 제거속도는 침수식물체 종류에 따라 별 차이 없이 $0.05 \sim 0.06 \text{ day}^{-1}$ 정도이었고, T-N의 용출속도는 물억새가 이삭사초에 비해 미미하게 빨랐지만 큰 차이는 없었다. 또한 수생식물 종류별 T-P의 용출특성을 COD와 T-N의 용출특성과 비교해볼 때, 전반적으로 T-P의 용출시점은 수생식물 종류별에 따라 큰 차이가 없었고, 용출속도도 큰 차이 없었다.

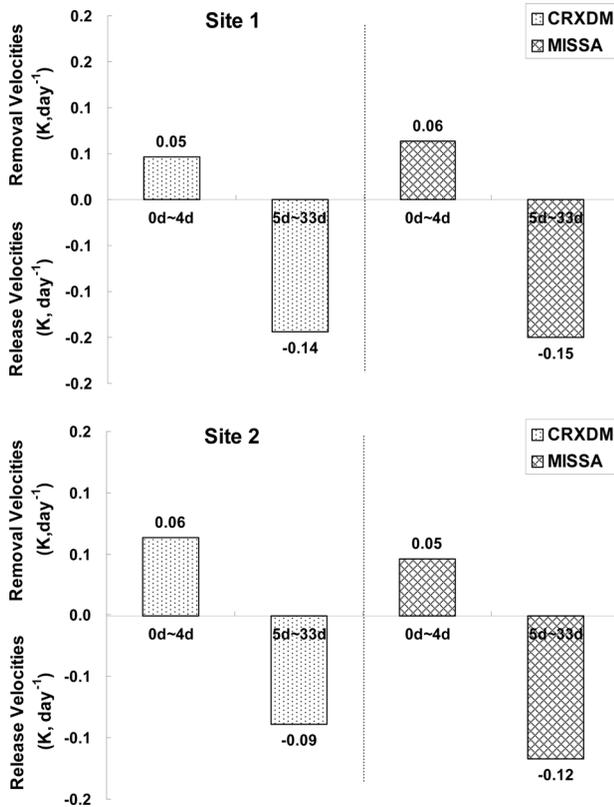


Fig. 8. Removal and release velocity constants(K) of T-P in the water in column experiments with flooding time under different sites(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

Cho *et al.*(1996)는 동북수원지에서 자생식물이 침수시 수질에 미치는 영향을 보고한 바 있으나, 동북수원지 원수에 침수식물체를 그물망에 넣은 후 인위적으로 침수시켜 용출량을 조사하여 본 연구결과와 용출특성이 다소 차이가 있었으며, Lee *et al.*(2003, 2007)에 의해 수행된 용출실험도 실제 환경조건을 고려하지 않아 본 연구결과와 직접적인 비교가 불가능하였다. 특히 본 column 실험은 홍수조절용지 환경을 그대로 옮겨서 실험을 수행하여 초기 분해속도는 약간 느린 반면에 식물체가 침수 후 일정기간이 지난 이후에는 토양이나 수질내 미생물에 의해 분해속도가 급격히 증가하는 경향을 보였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 T-P를 제외하고는 이삭사초와 같이 식물조직이 연하고 대부분 잎으로 구성되어 분해가 용이한 식물이 줄기가 딱딱하고 분해가 용이하지 않은 물억새에 비해 초기 영양염류의 용출시기는 빨랐으나 용출속도는 상대적으로 약간 느렸다. Kang *et al.*(2011)의 홍수조절용지 침수식물체의 용출특성 연구에 의하면, 침수식물체에 의한 용출량의 차이는 biomass량이나 식물체 구성성분 함량에 의존적이라고 하였다. 따라서 향후 홍수조절용지내에서 침수식물체에 의한 영양염류의 용출이 수질에 미치는 영향을 정밀하게 평가해야 할 필요가 있으며, 이를 위해 장기간 침수식물체별로 영양염류 용출량, 영양염류의 용출속도 및 용출시기 등 다양한 인자가 고려되어야 할 것이며, 최종적으로 이들 결과

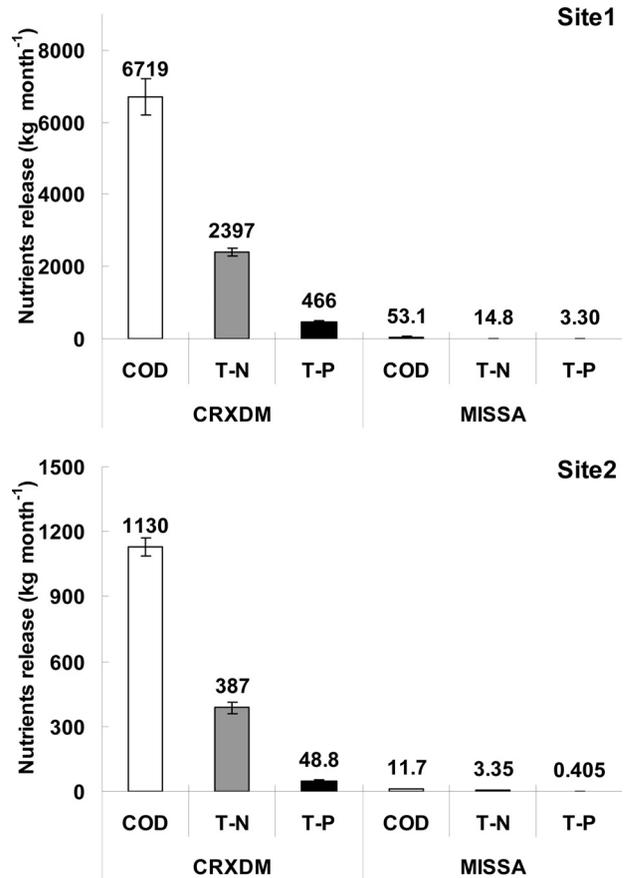


Fig. 9. The amount of nutrients release by submerged plants in column experiment for 1 month under different flooding control reservoirs around Juam lake(CRXDM: *Carex dimorpholepis* Steud; MISSA: *Miscanthus sacchariflorus* Benth).

를 토대로 홍수조절용지에서 침수식물체의 관리방안이나 활용방안이 마련될 수 있을 것이다.

홍수조절용지에서 침수식물체별 영양염류 용출량 산출

침수식물체가 홍수조절용지 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각 조사 site에서 침수식물체별 침수면적을 조사한 결과 site 1에서 이삭사초와 물억새의 침수 면적은 각각 851,242 m² 및 8,154 m²이었으며, site 2에서 이삭사초와 물억새의 침수 면적이 각각 142,716 m²와 1,794 m²이었다.

홍수조절용지별 영양염류 용출량을 산출한 조사한 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. Site 1에서 침수식물체에 의한 COD, T-N 및 T-P의 용출량은 이삭사초의 경우 각각 약 6,719, 2,397 및 466 kg/month/area이었고, 물억새의 경우 각각 53.1, 14.8 및 3.30 kg/month/area로 이삭사초의 영양염류 용출량이 물억새에 비해 식생면적이 넓어 매우 많았다. 그리고 Site 2의 COD, T-N 및 T-P의 용출량은 이삭사초의 경우 각각 약 1,130, 387 및 48.8 kg/month/area이었고, 물억새의 경우 각각 11.7, 3.35 및 0.405 kg/month/area로 site 1과 마찬가지로 이삭사초의 영양염류 용출량이 물억새보다 전반적으로 매우 많았다. 이와 같이 침수식물체

종류별로 영양염류 용출량의 차이가 큰 것은 침수식물체 종류별 용출농도보다 침수면적에 의한 영향이 크기 때문에 판단된다.

이상의 결과에서 이삭사초의 홍수조절용지별 영양염류의 용출량은 홍수조절용지내 식생분포 면적에 따라 차이가 컸으며, 물억새의 홍수조절용지별 영양염류의 용출량은 이삭사초에 비해 큰 차이 없이 유사한 경향이었다. 국내에서 저수구역내의 침수식물체 중 이삭사초에 의한 영양염류 용출특성은 보고된 바 없으나 물억새의 경우 Lee *et al.*(2007)이 용출실험에서 T-N 용출량이 7.80 mg g^{-1} , T-P 용출량이 1.55 mg g^{-1} 으로 보고된 바 있다. 하지만 본 연구결과는 실제 홍수조절지 환경과 동일한 column 실험을 통해 물억새에 의한 영양염류 용출량을 산출한 반면에 Lee *et al.*(2007)는 용출실험에서 넣어준 고사체 단위그람당 용출량을 산정하여 직접적인 비교는 어려웠다.

Lee *et al.*(2007)는 주암호 전체 저수구역내의 수변식물이 호우시 30일 정도 침수되었을 경우를 가정하여 수질오염 부하량을 산정한 결과에서 수변식물에 의해 발생하는 영양염의 자연적 용출량은 COD 성분 47,703 kg, T-N 성분 6,524 kg 및 T-P 성분 1,016 kg으로 보고한 바 있다. 하지만 이들 실험결과가 실제 홍수조절지 환경과는 달리 채취된 침수식물체만 수중에 넣어 용출실험을 하였기 때문에 용출량 산출 시 실제 용출량과 달리 과소 평가나 과대 평가될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한 Lee *et al.*(2007)는 T-N 용출량은 주암호 연간 배출부하량의 0.80% 정도이며, T-P의 경우는 연간 배출부하량의 1.34%로서 주암호에 미치는 영향은 미비한 것으로 보고하였으나, 홍수조절용지의 넓이, 침수시기, 침수기간 및 침수 우점 식물체 등이 매년 달라 정확한 영양염류 용출량을 예측하기 위해서는 이들 인자들을 모두 고려하여 산정해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 본 실험결과에서도 실제 영양염류 용출량보다는 침수 우점식물체 서식면적에 의해 영양염류 용출량의 차이가 심하였다. 또한 대부분의 홍수조절지의 경우 수질의 흐름이 거의 없고 정체되어 있는 경우도 많아 침수식물체의 영양염류 용출로 인해 부분적으로 T-N 및 T-P의 함량이 높아져 부영양화를 일으킬 수 있으므로 침수식물체에 의한 영양염류 용출이 수질에 미치는 영향을 정밀하게 평가해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 주암호 홍수조절용지내에 서식하는 침수식물체들의 영양염류 용출이 주암호 수질에 미치는 영향을 조사하고자 침수상태의 수질, 토양 및 식물체를 자연상태 그대로 column으로 옮겨와 침수기간별 영양염류의 제거속도 및 용출속도를 조사하였고, 이들 결과를 토대로 각 홍수조절용지에서 침수식물체별 영양염류 용출량을 산출하였다. COD 제거속도 상수(K, day^{-1})는 이삭사초의 경우 침수 0~4 day, 5~19 day 및 20~33 day 구간에서 0.07~0.18, -0.23~-0.17 및 -0.28~-0.03 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 침수 0~6 day, 7~19 day

및 20~33 day 구간에서 0.14~0.22, -0.19~-0.04 및 -0.05 day^{-1} 이었다. T-N 제거속도 상수(K, day^{-1})는 이삭사초의 경우 침수 0~4(8) day 및 5(9)~33 day 구간에서 0.02 및 -0.13~-0.10 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 침수 0~2(4) day, 3(5)~19 day 및 20~33 day 구간에서 0.01~0.04, -0.03 및 -0.18~-0.17 day^{-1} 이었다. T-P 제거속도 상수(K, day^{-1})는 이삭사초의 경우 침수 0~4 day 및 5~33 day 구간에서 0.05~0.06 및 -0.14~-0.09 day^{-1} 이었고, 물억새의 경우 침수 0~4 day 및 5~33 day 구간에서 0.05~0.06 및 -0.15~-0.12 day^{-1} 이었다. 이상의 결과에서 침수초기에는 침수식물체가 생육하면서 영양염류를 분해 이용하여 수질을 정화하였으나, 침수식물체에 따라 다소 차이가 있었지만 침수 4~10일후부터 침수식물체가 미생물에 의해 서서히 분해되면서 영양염류가 수질내로 용출되는 경향이었다. 홍수조절용지에서 침수식물체별 영양염류 용출량은 이삭사초가 물억새에 비해 약간 많았다. 특히 site 1에서 COD, T-N 및 T-P 용출량은 이삭사초의 경우 각각 6,719, 2,397 및 466 kg/month/area이었고, 물억새의 경우 각각 53.1, 14.8 및 3.30 kg/month/area이었다.

감사의 글

This research was supported by a fellowship from the Yeongsan & Sumjin River Watershed Management Fund of South Korea. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea Government (Ministry of Education, Science and Technology), [NRF-2010-0025548, NRF-2010-359-F00003]. This work was also supported by the R&D Program of MKE/KEIT[10037331, Development of Core Water Treatment Technologies based on Intelligent BT-NT-IT Fusion Platform.

참고문헌

- APHA, AWWA, WCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC, pp. 4-112.
- Cho, J.S. 2010. The effect of water quality by dead plant in Juam and Dongbok lakes and establishment plan for reducing environmental pollution. Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju, South Korea.
- Cho, Y.G., S.J. Bae, S.K. Baik, and J.J. Lee. 1996. Effects of submerged wild growing plants on water quality in the Dongbok reservoir. *J. Korean Soc. Wat. Qual.* 12, 277-284.
- Choi, C.D. 2002. Research report on agricultural laud

- use and water quality in the flood detention area of Imha multi-purpose dam. *Korean Soc. Agric. Eng.* 44, 20-23.
- Choi, K.C., O.U. Kwun, Y.D. Kim, Y.H. Kim, W.S. Lee, J.Y. Lee, S.J. Jun, and S.K. Jung. 2004. Annotation for standard methods of water quality. printed in Dong Hwa Technology Publishing Co.
- Chung, J.E. and S.O. Chung. 2003. Survey and analyses of farming condition and nonpoint source pollution in the flood control area of the multi-purpose dams, KCID. 10, 64-72.
- Herrman, K.S. and J.R. White. 2008. Denitrification in intact sediment cores from a constructed wetland: Examining the isotope pairing technique. *Appl. Geochem.* 23, 2105-2112.
- Kang, S.W., D.C. Seo, M.J. Han, J.H. Han, B.J. Lim, J.H. Park, K.P. Kim, Y.J. Lee, I.K. Choi,, Y.H. Lee, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2011. Characteristics of nutrients release by submerged plants in flood control reservoirs within Juam lake. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44, 271-277.
- Lee, Y.S. and B.S. Kang. 2000. Characteristics of pollutant load from a dam reservoir watershed - Case study on Seomjinkang dam reservoir. *Korea Water Resource Association* 33, 757-764.
- Lee, H.D. and C.H. Bae. 2002. Runoff characteristics and strategies for nonpoint source reduction. *J. Korean Soc. Wat. Qual.* 18, 569-576.
- Lee, Y.C., J.G. Park, and K.S. Lee. 2003. Release characteristics of submerged macrophytes. Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water Wastewater Meeting Conference Proceedings, BEXCO, Pusan, pp. 213-216.
- Lee, Y.S. and J.G. Park. 2005. Assessment of water quality impact of submerged lakeside macrophyte. EIAA. 14, 255-262.
- Lee. Y.S. and H.J. Kim. 2005. Estimation of pollutant load on submerged macrophyte. Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water Wastewater Meeting Conference Proceedings, Kumho National University Institute of Technology, pp. 625-628.
- Lee, Y.C., S.K. Lee, E.J. Oh, C.J. Ko, and I.Y. Song. 2007. The investigation for reducing nutrient that was created inside of lakes and marshes with gardening control inside the submergence sections in lake Juam. Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water Wastewater Meeting Conference Proceedings, KINTEX, Gyeonggido, pp. 397-403.
- Ministry of Environment. 2009. Environment a white book. pp. 376-377.
- Seo, D.C. 2005. Development of treatment process of biological nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant by natural purification system. Doctor Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.