

## 부영양호 퇴적층으로부터 용존유기물의 용출특성

박 제 철

(금오공과대학교 토목환경공학부)

Characteristics of DOC Release from Sediment in Eutrophic Lake. Park, Je-Chul (Dept. of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 188 Shinpyung-dong, Kumi 730-701, Korea)

This study was conducted to estimate the internal dissolved organic carbon (DOC) loading from sediment in eutrophic shallow Lake Kasumigaura. Contents of water and organic carbon were about 80% and 6.3% with depth in the sediment, respectively. The highest DOC concentration in porewater (104 mg C/l) was observed in September suggesting that the porewater could play an important role as an internal loading of DOC. Results of DOC release experiments showed that the labile-DOC (L-DOC) release was not detected in the oxic condition, while refractory-DOC (R-DOC) release was detected. The L-DOC and R-DOC release rates in the anoxic condition ranged from 14.5~48.6, 14.4~27.3 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectively. The current study showed that L-DOC released in the oxic condition was rapidly utilized by aerobic bacteria, in contrast, L-DOC and R-DOC released in anoxic condition were slowly utilized by anaerobic bacteria. These results suggested that L-DOC and R-DOC were closely related to sediment release and most of the R-DOC released could be an important source of DOC in eutrophic lakes during summer. Therefore, R-DOC pool should be added as one of the important energy source for microbial-based aquatic food webs in eutrophic lakes.

**Key words :** shallow eutrophic lake, porewater, sediment, release, dissolved organic carbon (DOC), labile-DOC, refractory-DOC

### 서 론

상수원으로 이용되는 호소에서 유기물은 정수처리의 비용을 상승시키고, 정수처리 공정의 부산물로서 trihalomethanes (THMs)을 생성하여 상수원수의 질을 하락시키는 등 사회적 문제를 발생시키고 있다(한국건설기술연구원, 1995). 이러한 유기물오염을 적절히 관리하기 위해서는 유기물의 기원, 현존량 및 거동을 정확히 파악할 필요가 있고, 또한 이를 평가할 수 있는 유용한 측정방법의 개발도 요구되고 있는 실정에 있다.

호소로 유입되는 육상생태계 기원의 용존유기물(Dissolved Organic Matter: DOM)은 유역구성(삼림, 농업 및 도시지역 등)에 따라 특성이 결정되고, 이 DOM은 하천으로 유입되고 하천생태계를 통과하는 동안에 침전, 분해 및 섭식 등의 과정을 거쳐 호소로 유입된다. 따라서 육상기원의 DOM은 호소로 유입되는 과정에 생분해성은 거의 분해되므로 대부분 난분해성의 부식물질(humic substance)로 구성되어 있다고 할 수 있다(Fukushima *et al.*, 1996).

호소내부에서 생성되는 유기물은 식물플랑크톤의 광합성에 근원을 두고 있으며, 이렇게 만들어진 식물플랑

\* Corresponding author: Tel: 054) 467-4366, Fax: 054) 467-4475, E-mail: jcpark@kumoh.ac.kr

크톤의 입자성유기물 (Particulate Organic Matter: POM) 은 수중생태계의 먹이연쇄 과정에 따라 순환하게 된다. 식물플랑크톤 기원의 POM은 약 20~30%가 호흡으로 이용되고, 5~15%가 체외배출 (extracellular excretion) 및 자기분해 (autolysis)에 의해 수중의 DOM으로 배출된다 (Chrost and Faust, 1983; Watanabe, 1984; Jensen *et al.*, 1985; Hama and Handa, 1987; Baines and Pace, 1991). 또한 일부의 POM은 섭식활동에 의해 동물플랑크톤이 이용하고 (Lampert, 1978; Goma *et al.*, 1996; Park *et al.*, 1997; 박, 1998) 나머지는 침전되면서 미생물에 의한 분해 등의 과정을 거치면서 퇴적층에 쌓여 퇴적유기물이 된다. 이러한 외부 및 내부기원의 퇴적유기물은 환경변화에 의해 DOM 형태로 다시 수중으로 용출되게 된다 (Orem *et al.*, 1986; 박, 1996).

이와 같이 호소에서의 DOM은 하천을 통해 유입되는 외부기원과 식물플랑크톤 및 수초의 배출, 동물플랑크톤의 섭식활동에 의한 배출, 퇴적물로부터의 용출 등의 내부생성 기원으로 분류될 수 있다. 다양한 기작에 의해 생성되는 DOM은 수중유기물의 저장고 (pool)로서 뿐만 아니라 탄소순환에 있어서도 중요한 역할을 담당하고 있다. 이 중 퇴적물로부터의 용출기작에 관해서는 연구가 매우 미흡한 실정이며 대부분의 연구가 인과 질소 중심으로 이루어져 (Olsen, 1958; Pomeroy *et al.*, 1965; DeMontigny and Prairie, 1993) 호소에서의 용존유기물에 관한 정보는 매우 부족하다.

따라서, 본 연구에서는 축적된 퇴적유기물로부터 DOM의 잠재적인 용출량을 산정하기 위하여 공극수 (porewater)의 용존유기탄소 (Dissolved Organic Carbon: DOC)를 정량하였고, 또한 실험실내 호기와 혐기 조건하에서 용출실험을 실시하여 DOC의 용출특성을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 퇴적유기물 조사방법 및 용출실험

조사대상호인 가스미가우라호 (L. Kasumigaura, Japan)는 자연호로서 수표면적이 177 km<sup>2</sup>, 최대 수심이 7.2 m, 평균 수심이 4 m로서 수심이 얇고 체류시간이 비교적 긴 정체성 수역이다. 유역면적이 크기 때문에 인위적 또는 자연적으로 부영양화가 진행되기 쉬운 특성을 지니고 있으며, 최근 들어 여름철이면 남조류가 대량 발생하는 등 수질악화가 심각한 호소이다 (建設省關東地方建設局, 1995).

퇴적물의 공극수 조사는 1994년 3월부터 1995년 11월까지 월 1회 호소 중심부에서 코아샘플러 (core sampler)를 이용하여 소형아크릴 코아 (직경 4 cm, 길이 30 cm)를 퇴적물 표층에서 15 cm 깊이까지 유동이 없는 상태로 10~15개 채취했다. 채취한 코아는 현장에서 6층 (0~1, 1~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10 cm)으로 절편 (slice)분취한 후, 신속하게 실험실로 옮겨 원심분리하여 공극수를 추출하였다. 추출한 일부분의 공극수는 다시 GF/F 여과지로 여과하여 T-DOC (Total-DOC)를 측정하였다. 1995년 8월에는 DOC 분자량 분획 (size fraction)을 위해 추출한 공극수 여과액의 일부분을 ultrafilter (Toyo co.)의 UH-1 (MW; Molecular Weight, 1,000)과 UK-10 (MW, 10,000)을 이용하여 분획 (size fraction)한 후, 다음과 같이 MW < 1,000, 1,000 < MW < 10,000, MW > 10,000으로 분류하였으며 각 분자량 범위에서의 DOC를 정량하였다. 또한, 동시에 퇴적물의 함수율과 유기탄소 함유량을 측정하였다.

퇴적유기물의 용출실험은 20°C 조건에서 1995년 5월, 6월, 7월, 8월 및 11월에 총 5회, 30°C 조건에서 하계기간인 7~9월 사이에 총 3회를 조사하였다. 시료는 유리로 만든 코아 (직경 11 cm, 길이 50 cm)를 이용하여 호소 중심부에서 4개를 채취한 후 (퇴적물 두께 20 cm 정도), 거의 유동이 없는 상태로 실험실로 운반하여 Fig. 1과 같이 설치하였다. 용출실험 시작전에 코아의 상층수를 사이펀을 이용하여 퇴적물이 재부유하지 않도록 조심스럽게 뽑아낸 후 GF/F 여과지로 여과하여 다시 조심스럽게 채워 넣었다. 이와 같은 방법으로 퇴적층의 상층수에 포함된 POM을 제거하였으며, 2개의 코아를 각 1개의 실험구로 하였고, 호기·혐기조건을 만들어 온도조절이 가능한 항온실에서 20°C, 30°C 조건에서 용출실험을 실시하였다. 호기조건 실험구에는 용출실험 동안에도 계

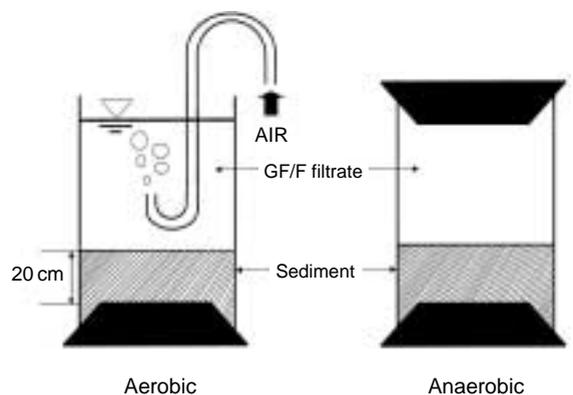
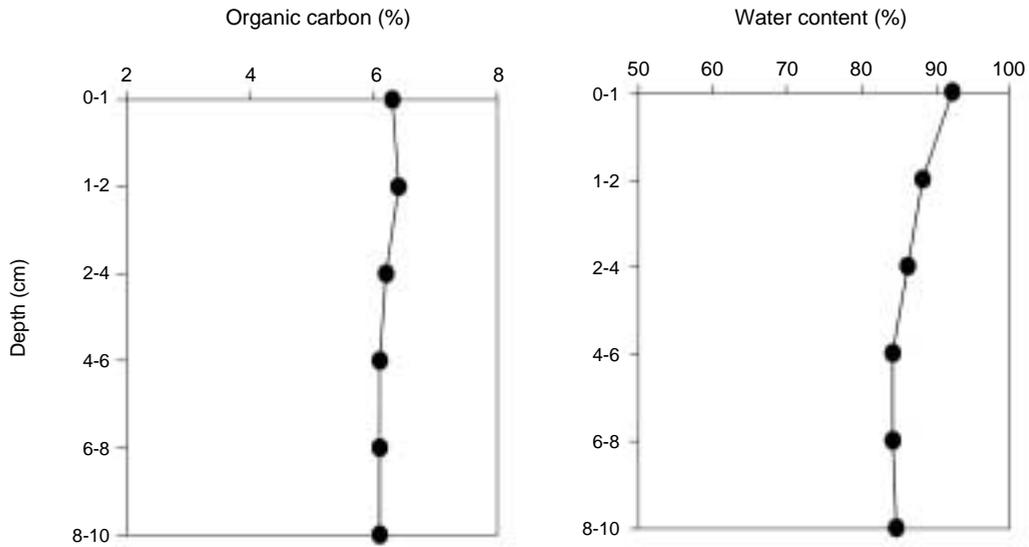


Fig. 1. Apparatus for DOC release from core-sediment.



**Fig. 2.** Vertical distributions of water content (%) and organic carbon (%) in sediment of central basin, collected in August, 1995.

속해서 공기펌프로 산소를 공급하였다. 또한, 혐기조건의 실험구는 여과액에  $N_2$  가스를 주입하여 무산소상태를 만든 후 조심스럽게 채웠으며, 실험종료까지도 무산소상태를 유지하는 것을 DO meter를 이용하여 확인하였다. 퇴적물의 산소소비속도 측정을 위한 예비실험 결과로부터 용출실험기간은 2일 정도가 적당할 것으로 판단되어 3일 후 퇴적물이 부유하지 않도록 상층수를 채수하여 DOC 측정 및 분해실험을 실시하였다. 이때 얻어진 초기와 최종 DOC 농도 변화로부터 수정된 Fick 식을 이용하여 용출속도를 계산하였다(朴, 1996).

## 2. DOC 분해실험 및 분석

미생물에 의한 DOC 분해실험은 GF/F 여과지로 여과된 여과액을 500 ml 유리용기 (450°C에서 열처리한 것)에 넣어 온도  $20 \pm 1^\circ C$ 의 항온 암실에서 100일간 실시하였다(Ogura, 1972; Servais, 1987; Park *et al.*, 1997). DOC 분해실험 결과 50일 사이에 분해된 유기물을 생분해성의 유기탄소(Labile-DOC), 50일 후 남아있는 유기물을 난분해성의 유기탄소(Refractory-DOC) 농도로 정량하였다.

DOC 분석은 시료에 염산(2N)을 첨가하여(pH 2 이하로 맞추) Air-Zero가스로 포기시켜  $CO_2$ 를 미리 제거한 후, 고온(680°C)의 백금촉매가 내장된 Shimazu TOC-5000 분석기로 측정하였다. 시료 1개에 대해 총 6회 측정하였으며(DOC  $\pm 0.05$  mg C/l), 측정값의 변동계수는

대부분 1% 이하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 퇴적유기물의 함수율 및 유기탄소 함유량

가스미가우라호 중심부의 표층수(0~1 m)를 대상으로 약 3년 동안(1992~1995년) 측정된 POC(입자성 유기탄소)와 DOC 농도는 각각 평균  $4.3 \pm 3.2$ ,  $3.4 \pm 0.4$  mg C/l이었으며, POC/DOC 비가 겨울철을 제외하고는 1 이상을 나타냈다. 이와 같이 수중에 존재하는 유기물 중 POC가 DOC보다 농도가 높고 계절변동 폭이 크다는 것은 침전 가능성이 높은 식물플랑크톤 등 부유성 유기물이 많다는 것이고, 이렇게 상부의 수층으로부터 호소 바닥에 침전된 POC 기원의 유기퇴적물은 용출, 분해 및 재침전 등 호소내 유기물순환에 기여도가 높을 것으로 판단된다.

퇴적층의 깊이별 함수율 및 유기탄소의 함유량은 Fig. 2에 나타내었다. 함수율의 수직분포는 표층에서 높고 퇴적층이 깊어질수록 감소하는 전형적인 경향을 보였으며, 유기탄소의 함유량은 약 6% 정도로 깊이에 따른 수직적 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 퇴적층 10 cm 깊이까지 함수율이 80% 이상을 나타내고 있다는 것은 산화환원전위의 변화에 따라 퇴적층(sediment)의 공극수로부터 상부 수체(overlying water)로 또는 그 반대로 물

질이동 가능성이 높다는 것을 시사한다고 볼 수 있다. 또한 퇴적물(고형물)의 유기탄소 함유율이 10 cm까지 거의 일정하다는 것은 퇴적오염물질을 제거하기 위해서는 준설깊이를 결정할 때 최소 10 cm 이상으로 결정되어야 한다고 판단되며, 본 연구대상의 호소에서 수질개선을 위해 보다 정확한 준설계획을 수립하기 위해서는 유기탄소 함유량이 감소하는 깊이까지 조사할 필요가 있을 것으로 평가되었다.

## 2. 공극수 DOC 농도의 계절변화

퇴적층에서 DOC의 변동은 수체와 접촉하고 있는 퇴적층의 경계면에서 일어나는 생물에 의한 분해·섭취, 농도구배에 따른 확산, 퇴적층 교란에 의한 용출 등에 의해 발생한다. 따라서 전술한 바와 같이 공극수의 DOC는 다시 수층으로 용출될 가능성이 높고, 호소내 유기물 순환중 내생산유기물로서 중요성이 높다고 할 수 있다 (Wetzel, 2000).

공극수 DOC 농도와 분자량 크기별 DOC 비율의 수직 분포 변화는 Fig. 3과 같다. DOC 농도는 퇴적층 10 cm 깊이보다 표층(0~4 cm)에서 약 2배 정도 높은 농도를 보였으며, 깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같이 표층부분이 함유율이 높고 공극수의 DOC 농도가 높다는 것은 환경변화에 따라 용출가능성이 높다고 볼 수 있다. 반면에 분자량 크기별 DOC 비율은 깊이에 따른 수직변화는 거의 없었으며, 고분자량(MW > 10,000)의 DOC가 평균 23%, 중분자량(1,000 < MW < 10,000)의 DOC가 평균 33%, 저분자량(MW < 1,000)의 DOC가 44%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 특히 분자량 크기별 DOC 비율중 MW < 10,000 이하의 작은 크기가 많다는 것은 상대적으로 용출 가능성도 높다는 것을 의미하는 것으로 수체에 존재하는 DOC중 MW < 10,000 크기가 약 80% 정도 차지하고 있는 것과 무관하지 않을 것으로 사료되었다(朴, 1996).

호소 중심부의 시료를 대상으로 측정된 퇴적층의 공극수 DOC 계절변화를 Fig. 4에 나타내었다. 1995년 6월 전까지는 계절변동 및 퇴적층의 깊이에 따른 수직변화도 거의 없이 평균 4.3 mg C/l 농도를 보였으나, 6월 이후부터 농도가 증가하기 시작하여 9월에는 표층(1~2 cm)에서 104 mg C/l 최대농도를 나타냈다. 최대농도를 나타낸 후 농도는 다시 감소하여 11월에는 20 mg C/l까지 감소했다. 1995년 6~11월 사이에 공극수 DOC 농도가 크게 증가한 원인에 대해서는 아직 밝혀진 사실이 없고, 현 시점에서는 퇴적층의 물리·화학적 변화가 이

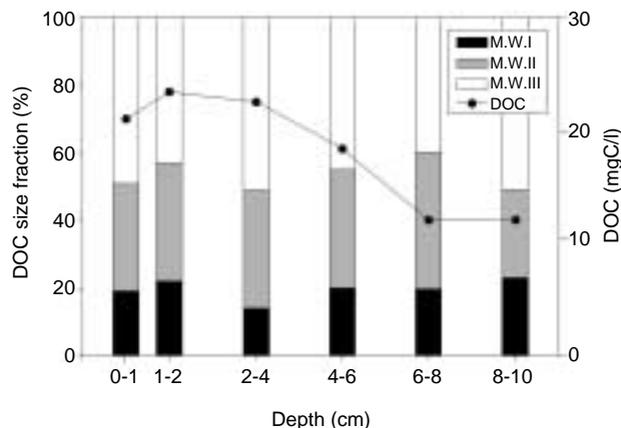


Fig. 3. Molecular weight distributions of porewater DOC in central basin, collected in August, 1995.

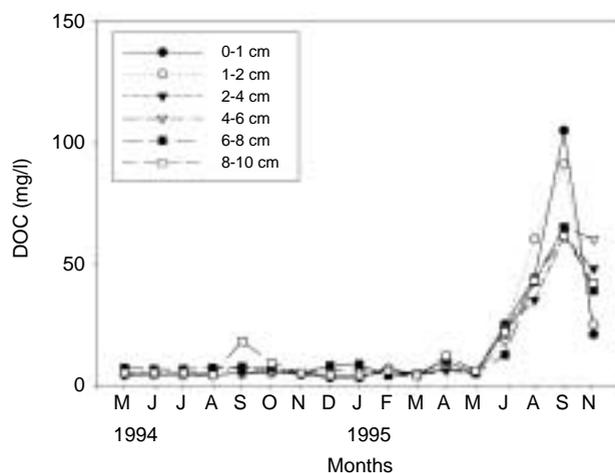


Fig. 4. Monthly variations of porewater DOC concentrations in central basin from May 1994 to November 1995.

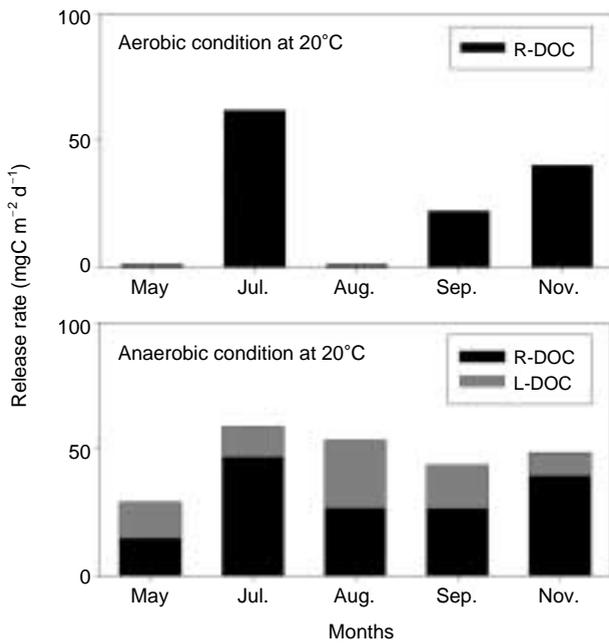
전보다는 크게 일어났을 가능성에 초점을 맞추어 추가 조사중에 있다.

## 3. DOC의 용출특성

가스미가우라호는 수심이 얇고 바람이 강하여 혼합이 잘 되는 호소로 잘 알려져 있으며, 여름철 심층에 형성되는 무산소층도 기간이 매우 짧거나 거의 형성되지 않는 호소이다. 용출실험은 수체와 퇴적층 사이에 발생하는 물리·화학·생물학적 현상들이 복잡하기 때문에 현장조건을 그대로 재현하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서도 DOC 용출실험을 혐기와 호기조건으로 산화환원

전위를 변화시키는 화학적 변화와 수온을 20°C, 30°C로 조절하는 물리적 변화 등 단순한 두 조건하에서 실시하였다.

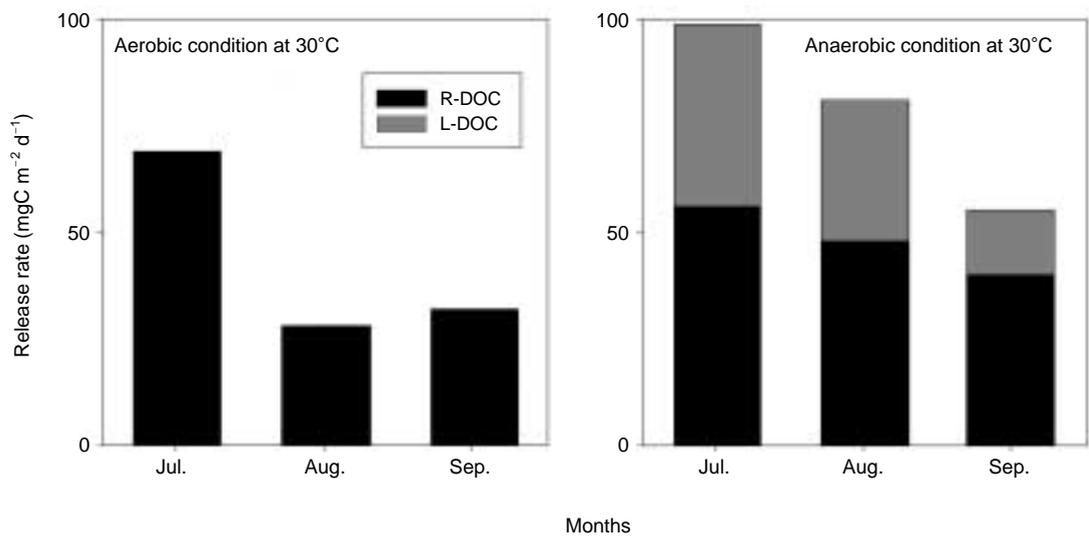
위 두 조건에서 L-DOC (생분해성 용존유기탄소)와 R-DOC (난분해성 용존유기탄소) 용출속도를 측정할 결



**Fig. 5.** Monthly variation of DOC release rates from sediment in central basin from May to November 1995 (incubated in the dark at 20°C).

과는 Figs. 5, 6과 같다. 먼저, 호기조건에서의 DOC의 용출특성을 보면 L-DOC의 용출은 거의 관측되지 않았으나 R-DOC 용출속도는 7~8월에 평균 40 mg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 결과는 퇴적층의 표층 부분에 DO가 유지되고 있을 때는 생분해성의 L-DOC가 용출되어도 미생물에 의해 빠르게 분해되기 때문에 수체의 DOC 농도 증가에는 기여하지 못할 것으로 평가되었다. 따라서 현장조건이 호기상태를 유지한다면 L-DOC와 R-DOC 모두 용출될 것으로 예상되지만 L-DOC가 빠르게 분해되어 본 실험결과와 같이 R-DOC만 용출되는 것으로 나타나 호기조건하에서 수체의 유기물 증가요인은 주로 R-DOC에 의해 나타날 가능성이 높을 것으로 관측되었다. 혐기조건하에서는 호기조건과는 달리 L-DOC와 R-DOC가 모두 용출되는 것으로 나타났으며, 5, 9 및 11월보다는 7, 8월 여름철에 용출속도가 큰 값을 보였다. 여름철 (7~8월)에 L-DOC와 R-DOC 용출속도는 각각 평균 19, 37 mg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>였고, 혐기조건에서도 L-DOC보다는 R-DOC 용출이 약 2배 정도 많은 것으로 나타났다. 특히 호기·혐기조건에 관계없이 R-DOC는 거의 용출속도가 일정한 반면에 L-DOC는 DO 농도에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이와 같이 DOC 용출속도가 호기와 혐기조건에 따라 다르게 나타나는 이유는 미생물의 활성도 차이에 의해 유기물 분해능력의 차이로 인하여 나타나는 것이라고 사료되었다.

DOC 용출속도는 온도변화보다는 DO 농도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 호기조건에서의 8월을 제외



**Fig. 6.** Monthly variation of DOC release rates from sediment in central basin from July to September 1995 (incubated in the dark at 30°C).

하고는 20°C, 30°C의 각 조건에서의 용출속도는 일정하게 나타났다. 본 연구대상의 호소는 수심이 얇아 조사기간중 심층의 수온이 20°C 이상 유지하고 있었기 때문에 20°C 이상의 조건으로 실험을 실시했지만 국내 대형 호소의 경우에는 연중 심층의 수온이 5~10°C를 유지하므로 수온조건을 다르게 하면 본 연구결과와 다른 결과가 도출될 가능성이 높을 것으로 예상되었다.

결과적으로 퇴적층의 공극수의 DOC 농도가 높다는 것은 (Fig. 4) 수체로 이동(용출) 가능성이 높다는 것을 용출 실험결과로 알 수 있었으며, 특히 심층에 산소가 고갈되면 난분해성의 유기물이 용출될 가능성이 높아 수체의 유기물 농도를 증가시키는 주요 원인이 된다는 연구결과는 다시 말해 내부생성 기작 중 퇴적물로부터의 용출에 의한 유기물오염은 수질관리를 위해 반드시 정량 평가되어야 할 당위성을 의미한다고 볼 수 있다. 여름철 심층에 무산소층이 형성되는 국내 대형 인공호에서도 이러한 현상이 관측되고 있는데 심층의 DOC가 표층에 비해 높은 농도를 보이고 있었으며, 심층 DOC의 90% 이상을 R-DOC가 차지하는 것으로 나타났다 (김 등, 1998).

호소·하천의 유기물 조성을 보면, 계절적으로 약간의 변화는 있으나 대부분의 수계에서 입자성보다는 용존성 유기물이 많이 존재하며 (김 등, 1988), 또한, 용존성 유기물의 구성은 생분해성보다는 난분해성의 유기물이 대부분을 차지하는 것이 일반적인 경향이다 (Thurman, 1985). 따라서 수중 유기물의 pool (저장고)이라고 할 수 있는 난분해성의 유기물은 부영양 호소·하천생태계에서 에너지원으로서 중요할 뿐만 아니라 탄소순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다고 할 수 있다. 이와 같이 난분해성 유기물의 중요성은 많이 알려져 있으나 이와 관련된 연구는 국내에서는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다. 따라서, 퇴적층에서 난분해성 유기물의 내부생성 기작에 관해서는 본 연구를 통해서 어느 정도 밝혀졌지만 퇴적물로부터의 용출에 영향을 주는 생물학적 요인을 포함한 기타 다른 기작에 관해서는 검토되지 않았기 때문에 호소에서 유기물오염을 저감시키기 위해서는 앞으로 진행될 연구에서 해결되어야 할 과제라고 사료된다.

## 적 요

수심이 얇고 부영양 호소인 L. Kasumigaura를 대상으로 퇴적층으로부터 유기물 용출특성을 조사하였다. 퇴적물의 함수율은 약 80% 이상을 차지하고 있었으며, 공

극수의 DOC 농도는 표층에서 높고 깊어질수록 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 조사기간중 공극수의 DOC 농도 (104 mg C/l)가 크게 증가하여 공극수로부터 수체로 용출 가능성이 높을 것으로 추정되었다. DOC 용출실험 결과, 호기조건에서는 Labile-DOC (L-DOC) 용출이 거의 관측되지 않았고 Refractory-DOC (R-DOC)만 관측되었으며, 혐기조건에서는 L-DOC와 R-DOC 모두 용출되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 퇴적층의 상부수층에 DO가 충분히 유지되면 L-DOC는 용출되어도 호기성 bacteria에 의해 쉽게 분해되기 때문에 R-DOC만 용출되는 것으로 조사되었으며, 혐기조건하에서는 혐기성 bacteria의 유기물 분해능력의 감소로 L-DOC와 R-DOC 모두 용출되는 것으로 나타났다. 결과적으로 내부생성기원의 유기물중 퇴적층으로부터 R-DOC 용출은 수체의 유기물 농도를 증가시키는 주요 원인으로 나타났다. 수중 유기물의 대부분을 차지하고 있는 R-DOC는 유기물순환에 중요한 역할을 담당하고 있다는 사실이 확인되었다.

## 사 사

원고심사를 통해 문제점의 지적과 중요한 코멘트를 해준 두 심사위원께 감사드립니다.

## 인 용 문 헌

- 김범철, 최광순, 김철구, 이유희, 김동섭, 박제철. 1998. 소양호의 DOC와 POC의 분포. 한국육수학회지 **31**: 17-24.
- 박제철. 1998. 용존유기물의 내부생성 메커니즘에 관한 실험적 연구. I. 동물플랑크톤의 영향. 한국육수학회지 **31**: 129-135.
- 한국건설기술연구원. 1995. 고도정수처리시스템개발.
- 建設省關東地方建設局, 1995. 霞ヶ浦 人と自然の共存を求めて. 水資源開發公園.
- 朴濟哲, 1996. 霞ヶ浦における溶存有機物の舉動と生成機構に関する研究. 東京水産大學 博士學位論文. 58pp.
- Baines, S.B. and M.L. Pace. 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its important to bacteria: patterns across marine and freshwater system. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 1078-1090.
- Chrost, R.H. and M.A. Faust. 1983. Organic carbon release by phytoplankton: its composition and utilization by bacterioplankton. *J. Plankton Res.* **5**: 477-493.
- DeMontigny, C. and Y.T. Prairie. 1993. The relative impor-

- tance of biological and chemical processes in the release of phosphorus from a highly organic sediment. *Hydrobiologia* **253**: 141–150.
- Fukushima, T., J.C. Park, A. Imai and K. Matsushige. 1996. Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; Dynamics, biodegradability and origin. *Aquat. Sci.* **58**: 139–157.
- Goma, R.H., M. Aizaki, T. Fukushima and A. Otsuki. 1996. Significance of zooplankton grazing activity as a source of dissolved organic nitrogen, urea and dissolved free amino acids in a eutrophic shallow lake: experiments using outdoor continuous flow pond systems. *Jpn. J. Limnol.* **57**: 1–13.
- Hama, T. and N. Handa. 1987. Pattern of organic matter production by natural phytoplankton population in a eutrophic lake. 2. Extracellular products. *Arch. Hydrobiol.* **109**: 227–243.
- Jensen, L.M., O.N.G. Jorgensen and M. Sondergaard. 1985. Specific activity. Significance in estimating release rates of extracellular dissolved organic carbon (EOC) by algae. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **22**: 2893–2897.
- Lampert, W. 1978. Release of dissolved organic carbon by grazing zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* **23**: 831–834.
- Ogura, N. 1972. Rate and extent of decomposition of dissolved organic matter in surface seawater. *Mar. Biol.* **13**: 89–93.
- Olsen, S. 1958. Phosphate adsorption and isotopic exchange in lake muds. Experiment with P32; Preliminary report. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **13**: 915–922.
- Orem, W.H., P.G. Hatcher, E.C. Spiker, N.M. Szeverenyi and G.E. Maciel. 1986. Dissolved organic matter in anoxic porewaters from Mangrove Lake, Bermuda. *Geochim. Acta* **50**: 609–618.
- Park, J.C., M. Aizaki, T. Fukushima and A. Otsuki. 1997. Production of labile and refractory dissolved organic carbon by zooplankton excretion: An experimental study using large outdoor continuous flow-through pond. *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* **54**: 434–443.
- Pomeroy, L.R., E.E. Smith and C.M. Grant. 1965. The exchange of phosphate between estuarine water and sediments. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 167–172.
- Servais, P., G. Billen and M.C. Hascoet. 1987. Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. *Water Res.* **21**: 445–450.
- Thurman, E.M. 1985. *Organic geochemistry of natural water*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 5–110.
- Watanabe, Y. 1984. Transformation and decomposition of photosynthetic products of lake phytoplankton. *Jpn. J. Limnol.* **45**: 116–125.
- Wetzel, R.G. 2000. *Limnology*. Saunders Coll. Publ. Philadelphia, pp. 731–783.

(Manuscript received 5 July 2003,  
Revision accepted 25 August 2003)