

## 보령호 퇴적물중의 질소, 인 및 중금속의 용출특성

### Releasing Characteristics of Nitrogen, Phosphorus and Metals of the Sediments in Boryung Lake

유병로\*  
Ryu, Byong-Ro

#### ABSTRACT

In this study, the fractional composition and the releasing of nutrients and metals from sediments of Boryung reservoir were investigated. Based on present study, the forms of sediment phosphorus of the four sites in reservoir were classified as adsorbed phosphorus, non apatite inorganic phosphorus(NAI-P), apatite phosphorus and residual phosphorus. Residual phosphorus showed the highest fraction, NAI-P second, apatite phosphorus third and adsorbed phosphorus fourth. The sedimentation rate of T-P and T-N in aerobic condition were  $0.31 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$  and  $29 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ . The sedimentation rate of T-P and T-N in anaerobic condition were  $0.12 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$  and  $13.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ . The releasing rate of T-P and T-N in anaerobic condition were  $0.23 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$  and  $10.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ .

**Keywords :** Release, Nutrient, Sedimentation, Boryung lake

#### 요 지

본 연구는 보령댐 호저 퇴적물 중의 영양염류, 중금속의 존재형태와 용출특성에 대하여 조사하였다. 4개 지점의 퇴적물 중 인의 존재형태는 4종류로 분류하였는데 세립질 퇴적물의 표면에 흡착된 인, 철이나 알루미늄과 금속과 착물을 이룬 인(NAI-P), 칼슘을 포함한 인산염 광물에 포함된 인(apatite P)과 잔류적 인으로 구분하였다. 4개 지점에서 공히 가장 많은량으로 존재하는 인은 잔류인이고, 그 다음은 NAI-P, apatite 인, 흡착된 인의 순서로 나타났다. 총질소와 인의 침전량은 호식성 조건에서 각각  $0.31 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ ,  $29 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 이었으며 혐기성 조건에서 각각  $0.12 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 와  $13.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타났다. 또 총질소와 인의 용출은 호기성 조건에서는 일어나지 않았으며 혐기성 조건에서는 각각  $0.23 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 와  $10.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타나 보령호의 경우 현재는 용출량보다 침전량이 더 큰 것으로 나타났다.

**주요어 :** 용출, 영양염류, 침전, 보령호

\* 정희원 · 한밭대학교 토목환경도시공학부 부교수 · 공학박사

## 1. 서론

수계로 흘러간 오염물질 중의 많은 부분은 粘土粒子和 같은 미세한 퇴적물에 흡착·공침되거나 생물체에 의해 흡수되며 특히 인이나 중금속은 오염되지 않은 수계에 유입되면 거의 대부분이 퇴적된다. 이렇게 퇴적된 오염물질은 퇴적물 내에서 박테리아(Bacteria)의 활동에 의한 유기물의 분해와 관련하여 퇴적물내의 pH, ORP(Oxidation Reduction Potential)의 변화에 따라 다시 수층으로 이동할 수 있다. 특히 인과 중금속은 퇴적물 내의 물리·화학적 변화에 민감하게 반응하는 물질로서, 물질순환 과정에서 퇴적물 내에 주로 저장되는 물질들이며 오염물질의 존재형태가 용존상태로 쉽게 변할 수 있는 조성을 갖고 있다면 상부의 수층을 오염시킬 가능성은 더욱 커지게 된다. 본 연구에서는 보령호의 퇴적물을 대상으로 부영양화의 원인물질인 인의 존재형태 및 용출 특성실험, 중금속의 존재형태 및 용출실험 등을 통해 호수 퇴적물내의 오염물질이 수계에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

## 2. 퇴적시료의 특성

### 2.1 조사지점

시료채취시기는 1998년 실시한 것으로 1차(11월13일), 2차(2월12일), 3차(4월17일), 4차(6월30일)의 4회이다. 퇴적물 시료는 보령호 및 지천 유입부 퇴적물의 특성을 대표할 수 있는 4개 지점을 기본적인 조사 정점으로 선정하여 채취하였다. 시료 채취는 Ponar grab sampler를 이용하여 채취하였으며 퇴적물 시료채취지점을 Fig. 1.에 나타내었다.

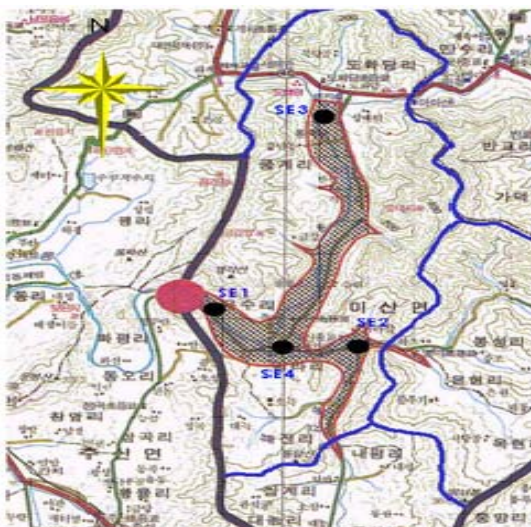


Fig.1. Sampling site

### 2.2 퇴적물의 입도

현장조사에서 채취한 시료를 분석한 결과, 표층 퇴적물은 주로 미사로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 보령호 퇴적물의 1차 조사시 채취된 각 정점의 입도분석 결과를 살펴보면 정점 1에서는 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 9.1%, 72.4% 및 18.5%로 미사의 함량이 높다. 평균입도 5.18 $\Phi$ , 조직은 clayer silt이며 분급도는 2.02 $\Phi$ 이다. 정점 2의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 10.6%, 73.6% 및 15.8%로 미사의 함량이 높고 모래의 함량이 다른 정점에 비해 매우 낮은 값을 나타내었다. 평균입도 8.02 $\Phi$ , 조직은 clayey silt, 분급도 1.65 $\Phi$ 이다. 정점 3의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 21.5%, 69.9%, 8.6%로 미사의 함량이 높다. 평균입도 5.48 $\Phi$ , 조직은 sandy silt, 분급도는 1.85 $\Phi$ 이다. 정점 4의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 10.7%, 75.8%, 13.5%로 미사의 함량이 높다. 평균입도 7.02 $\Phi$ , 조직은 clayer silt, 분급도는 1.86 $\Phi$ 이다.

1차 입도 분석 결과 낮은 분급도와 양성왜도는 보령호 퇴적물에서 공통적으로 나타나는 것으로, 보령호의 퇴적 환경에서는 분급작용이 활발하지 않고 세립질 퇴적물이 퇴적하기 좋은 환경이기 때문으로 사료된다. 3차 조사시 각 조사 정점의 입도분석 결과 정점 1의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 8.5%, 73.0%, 18.5%로 미사의 함량이 높다. 평균입도 5.89 $\Phi$ , 조직은 clayer silt, 분급도는 1.85 $\Phi$ 이다. 정점 2의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 13.8%, 70.5%, 15.7%로 미사의 함량이 높다. 평균입도 6.35 $\Phi$ , 조직은 clayer silt, 분급도 1.35 $\Phi$ 로 각각 나타났다. 정점 3의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 21.3%, 70.8%, 7.9%로 미사와 모래의 함량이 높다. 평균입도 6.02 $\Phi$ , 조직은 clayer silt, 분급도는 1.95 $\Phi$ 로 나타났다. 정점 4의 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 12.6%, 68.2%, 19.2%로 미사의 함량이 높고 모래의 함량이 다른 정점에 비해 비교적 낮게 나타났다. 평균입도 6.85 $\Phi$ , 조직은 clayer silt, 분급도는 1.65 $\Phi$ 로 나타났다. 보령호 퇴적물의 3차 조사시 입도분석 결과 낮은 분급도와 양성왜도는 조사 정점에서 공통적으로 나타나고 있는데, 이는 보령호 퇴적 환경의 분급작용이 활발하지 않고 세립질 퇴적물이 퇴적하기 좋은 환경임을 반영해주는 것이다.

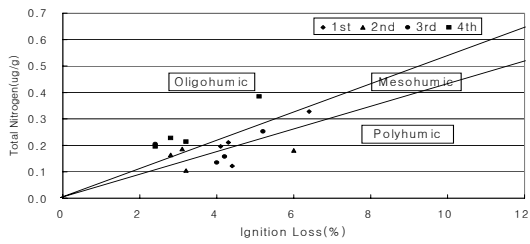


Fig. 2. Humic status of sediments

### 2.3 부식화도

보령호 퇴적물의 부식화도는 1차 조사시 정점 1에서 121.8로 Hakanson 등(1983)의 기준에 의하면 polyhumic 인 것으로 나타났으며, 정점 2에서 211.0, 정점 3에서 328.2, 정점 4에서 195.6으로 mesohumic으로 나타났다. 2차 조사시 정점 1에서 105.3, 정점 2에서 182.9, 정점 3에서 180.6, 정점 4에서 164.2로 1차, 4차에서는 polyhumic으로 2차, 3차에서는 oligohumic인 것으로 각각 나타났다. 3차 조사시 부식화도는 정점 1에서 135.3, 정점 2에서 205.3, 정점 3에서 253.2, 정점 4에서 185.3로 모든 영역에 분포되어 있는 것으로 나타났다. 4차 조사시 부식화도는 정점 1에서 196.4, 정점 2에서 228.2, 정점 3에서 385.3, 정점 4에서 213.6으로 나타나 모든 정점에서 oligohumic인 것으로 나타났다.

### 2.4 총질소(T-N) 함량

1차 조사시 총질소 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 121.8 µg/g, 211.0 µg/g, 328.2 µg/g, 195.6 µg/g로 평균 214.2 µg/g로 나타났다. 2차 조사시 총질소 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 105.3 µg/g, 185.9 µg/g, 180.6 µg/g, 164.2 µg/g로 평균 159.0 µg/g로 나타났다. 3차 조사시 총질소 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 135.3 µg/g, 205.3 µg/g, 253.2 µg/g, 185.3 µg/g로 평균 194.7 µg/g로 나타났다. 4차 조사시 총질소 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 196.4 µg/g, 228.2 µg/g, 385.3 µg/g, 213.6 µg/g로 평균 255.9 µg/g로 나타났다.

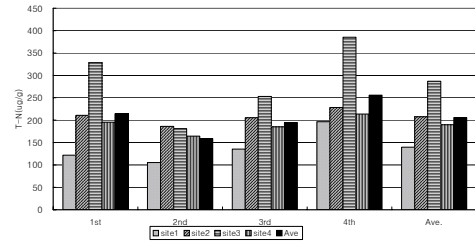


Fig. 3. Total nitrogen of sediment

### 2.5 총인(T-P) 함량

퇴적물 중의 인의 존재형태 실험은 Hieltjes와 Lijklema(1980)과 전상호(1989)의 실험방법에 따라 실시하였으며, 1차 조사시 총인 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 각각 28.9 µg/g, 46.3 µg/g, 54.9 µg/g, 46.5 µg/g으로 평균 44.2 µg/g로 나타났다. 2차 조사시 총인 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 각각 34.3 µg/g, 35.8 µg/g, 46.4 µg/g, 34.1 µg/g으로 평균 37.7 µg/g로 나타났다. 3차 조사시 총인 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 각각 36.4 µg/g, 52.5 µg/g, 50.6 µg/g, 31.5 µg/g으로 평균 42.8 µg/g이다. 4차 조사시 총인 함량은 정점 1, 2, 3, 4에서 각각 35.8 µg/g, 56.4 µg/g, 65.0 µg/g, 35.3 µg/g으로 평균 48.1 µg/g이다. 보령호 퇴적물내 총인의 평균 함량은 43.2 µg/g으로, 한수공(1997)의 자료와 비교하면 대청호 1,203 µg/g, 임하호 878 µg/g, 소양호 776 µg/g, 진양호 610 µg/g에 비해 무척 낮은 편이다.

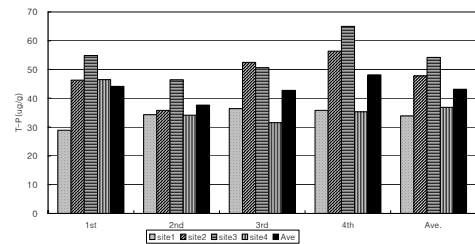


Fig. 4. Total phosphorus of sediment

### 2.6 중금속의 함량 조사

보령호 퇴적물에 함유된 중금속(구리, 망간, 아연, 카드뮴)의 농도와 용출 가능성은 수환경 변화에 민감한

부분인 adsorbed fraction과 reducible fraction의 함량비의 합으로 구성된다.

### 2.6.1 구리(Cu)

구리는 생물체에 필수성분이고 미량의 경우에는 인체에 독성이 없으며, 먹는물 수질기준은  $1\text{mg}/\ell$ 로 비교적 높다. 구리의 농도가  $5\text{mg}/\ell$  이상일 때에는 쓴맛을 낸다. 1차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 구리의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $15.3\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $20.3\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $20.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $18.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $18.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 2차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 구리의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $16.9\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $15.4\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $15.3\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $20.3\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $17.0\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 3차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 구리의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $13.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $13.9\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $16.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $25.3\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $17.3\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 4차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 구리의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $19.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $15.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $19.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $30.3\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $21.2\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다.

1차, 2차, 3차, 4차 조사시 보령호 퇴적물내 구리의 평균총량은  $18.5\mu\text{g}/\text{g}$ 으로, shale의 평균 구리 함량인  $45\mu\text{g}/\text{g}$ (Wedepohl, 1961)과 비교하면 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다.

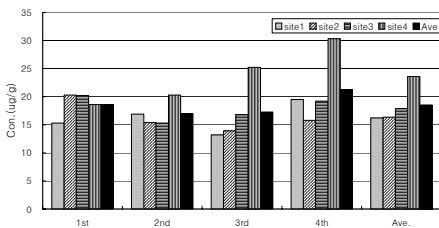


Fig. 5. Cu contents of sediment

### 2.6.2 망간(Mn)

망간은 거의 모든 토양속에 상당한 양이 불용성의 이산화망간(Manganese dioxide) 형태로 존재하며, 이산화탄소가 포함되어 있는 물에 아주 불용성이다. 산소가 없는 상태에서의 망간은 안정하지만, 산소가 용존되어 있는 자연수에서는  $\text{MnO}_2$  혹은  $\text{MnO}(\text{OH})_2$ 의 형태로 존재하며 파이프나 싱크대

내에 黑水를 유발시켜 물을 변색시킨다. 망간은 생물체에 필수 원소로써 수중에 일정량이 반드시 함유되어야 하며, 높은 농도에서는 독성을 띠나 자연수내에서 독성을 일으키는 농도는 거의 도달하지 않는다.

1차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 망간의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $53.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $32.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $52.9\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $32.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $43.0\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 2차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 망간의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $53.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $32.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $52.9\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $32.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $43.0\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 3차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 망간의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $62.3\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $36.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $68.0\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $42.1\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $52.3\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 4차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 망간의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $21.9\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $54.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $59.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $39.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $43.8\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. Shale의 평균 망간 함량인  $850\mu\text{g}/\text{g}$ (Wedepohl, 1961)과 비교하면, 1차, 2차, 3차, 4차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 망간의 평균총량은  $43.8\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다.

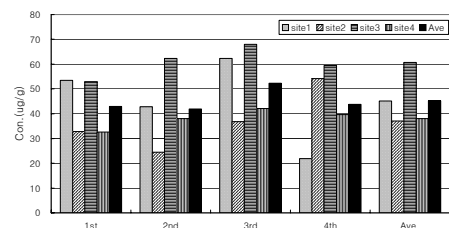


Fig. 6. Mn contents of sediment

### 2.6.3 아연(Zn)

아연은 생물체에 필수성분이고 미량의 경우에는 인체에 독성이 없어 먹는물 수질기준은  $1\text{mg}/\ell$ 로 비교적 높으며, 탁도를 유발하기도 한다. 1차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 아연의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $12.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $8.6\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $15.4\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $9.8\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $11.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 2차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 아연의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $10.5\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $9.8\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $18.6\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $8.6\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $11.9\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 3차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 아연의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $11.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $11.2\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $15.0\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $11.5\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 평균  $12.2\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 4차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 아연의 총농도는 정점

1, 2, 3, 4에서  $9.4\mu\text{g/g}$ ,  $12.5\mu\text{g/g}$ ,  $13.9\mu\text{g/g}$ ,  $12.8\mu\text{g/g}$ 으로 평균  $12.2\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 1차, 2차, 3차, 4차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 아연의 평균총량은  $12.0\mu\text{g/g}$ 로 shale의 평균 아연 함량인  $95\mu\text{g/g}$ (Wedepohl, 1961)보다 낮은 값을 보이고 있다.

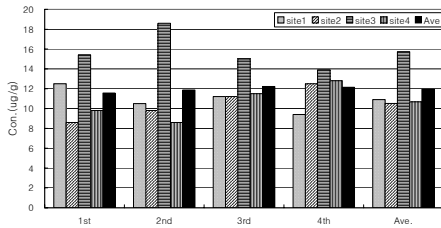


Fig. 7. Zn contents of sediment

#### 2.6.4 카드뮴(Cd)

카드뮴은 산업의 발달에 따라 많이 검출되는 원소로서, 주로 공장의 연돌로부터 대기로 방출되어진 후 빗물에 녹아 궁극적으로 토양과 물에 축적된다. 먹이연쇄를 따라서 이 카드뮴은 생물체 내에 농축되고 독성이 크므로 잠재적으로 유해한 금속으로 간주된다. 우리나라의 먹는물 수질기준에서는  $0.05\text{mg}/\ell$  이하로 규제하고 있다. 1차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 카드뮴의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $1.2\mu\text{g/g}$ ,  $1.2\mu\text{g/g}$ ,  $1.3\mu\text{g/g}$ ,  $1.1\mu\text{g/g}$ 으로 평균  $1.2\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 2차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 카드뮴의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $1.3\mu\text{g/g}$ ,  $1.0\mu\text{g/g}$ ,  $1.5\mu\text{g/g}$ ,  $0.8\mu\text{g/g}$ 으로 평균  $1.2\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 3차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 카드뮴의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $0.8\mu\text{g/g}$ ,  $1.3\mu\text{g/g}$ ,  $1.3\mu\text{g/g}$ ,  $0.9\mu\text{g/g}$ 으로 평균  $1.1\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 4차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 카드뮴의 총농도는 정점 1, 2, 3, 4에서  $1.0\mu\text{g/g}$ ,  $0.8\mu\text{g/g}$ ,  $1.6\mu\text{g/g}$ ,  $1.2\mu\text{g/g}$ 으로 평균  $1.2\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 1차, 2차, 3차, 4차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 카드뮴의 평균총량은  $1.1\mu\text{g/g}$ 으로 shale에 함유된 평균 카드뮴 총량인  $0.3\mu\text{g/g}$ 에 비해 높은 값을 보이고 있다.

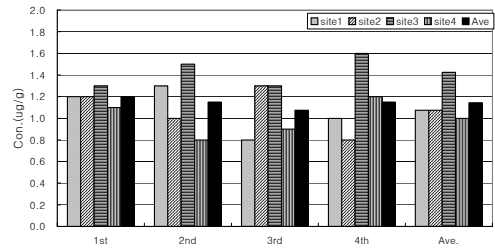


Fig. 8. Cd contents of sediment

Table 1. Content of metals in sediment

(unit:  $\mu\text{g/g}$ )

Site	other	Cu	Mn	Zn	Cd
site1	1st	15.3	53.5	12.5	1.2
	2nd	16.9	42.8	10.5	1.3
	3rd	13.2	62.3	11.2	0.8
	4th	19.5	21.9	9.4	1.0
Ave.	16.2	45.1	10.9	1.1	
site2	1st	20.3	32.8	8.6	1.2
	2nd	15.4	24.5	9.8	1.0
	3rd	13.9	36.8	11.2	1.3
	4th	15.8	54.2	12.5	0.8
Ave.	16.4	37.1	10.5	1.1	
site3	1st	20.2	52.9	15.4	1.3
	2nd	15.3	62.3	18.6	1.5
	3rd	16.8	68.0	15.0	1.3
	4th	19.2	59.5	13.9	1.6
Ave.	17.9	60.7	15.7	1.4	
site4	1st	18.6	32.6	9.8	1.1
	2nd	20.3	38.0	8.6	0.8
	3rd	25.3	42.1	11.5	0.9
	4th	30.3	39.6	12.8	1.2
Ave.	23.6	38.1	10.7	1.0	
Mean	1st	18.6	43.0	11.6	1.2
	2nd	17.0	41.9	11.9	1.2
	3rd	17.3	52.3	12.2	1.1
	4th	21.2	43.8	12.2	1.2
Total Ave.	18.5	45.3	12.0	1.1	

### 3. 질소, 인과 중금속의 용출 실험

#### 3.1 실험장치

보령호에서 채취한 퇴적물을 직경 14cm, 부피 9ℓ의 원통 아크릴 관에 평평하게 깔 후 보령호에서 채수한 물을 퇴적물 표면이 교란되지 않도록 넣는다. 용출량

조사시에는 산소를 공급해주는 호기성 환경하에서 퇴적물내 오염물질의 용출량 조사 및 질소를 공급해주는 혐기성 조건하에서 퇴적물내 오염물질의 용출량을 알아보았다. 분석대상이 된 오염물질은 총인, 용존무기인(DIP), 총질소, 중금속(Zn, Cu, Cd, Mn)으로, 한달동안 매일 용출시험조내의 수질을 측정하여 용출량을 추정하였다. 분석 방법은 총인, 용존 무기인(DIP), 총질소의 경우 환경오염공정시험법에 의거하여 분석하였고, 중금속은 ICP로 측정하였다. 퇴적물내 오염물질의 용출실험장치는 다음 Fig. 9에 나타내었다.

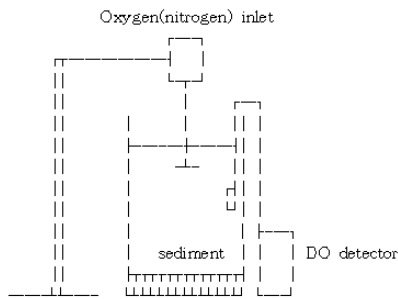


Fig. 9. Apparatus for Experiments of sediment release

### 3.2 실험조건

퇴적물에 의한 수층의 오염 가능성이 높은 물질에는 인, 질소 및 중금속 등이 있는데 이들의 거동에는 용존산소 농도가 큰 영향을 미치기 때문에, 이를 고려하여 용출실험조는 호기성 조건과 혐기성 조건으로 구분하여 실시하였다. 호기성 조건하에서의 용출량 조사는 3차 시료 채취시 정점 1에서 채취한 퇴적물을 대상으로하여 실험하였고, 혐기성 조건하에서의 용출량 조사는 4차 시료 채취시 정점 1에서 채취한 퇴적물을 대상으로 분석하였다.

호기성 조건하에서 용출실험조 내 물의 평균온도와 평균 용존산소 농도는 각각  $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ,  $7.0 \pm 0.5 \text{mg/l}$ 로 그때의 용존산소 포화도는 81.7%로 나타났으며, 물의 pH는 6.0~7.0으로 유지되었다. 혐기성 조건하에서 용출실험조내 물의 평균온도와 평균 용존산소 농도는 각각  $27.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ,  $0.1 \text{mg/l}$  이하로 조절하였다. 이때의 용존산소 포화도는 1.2%로 낮게 유지시켰고, 물의 pH는 7.0~8.0으로 유지되었다.

### 3.3 인의 존재형태 조사

실험결과인 Table 2.에서 1차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 평균 총인 함량은  $44.2 \mu\text{g/g}$ 이고, 존재형태별 평균 함량은 adsorbed P, NAI P, apatite P, residual P가 각각  $1.8 \mu\text{g/g}$ ,  $16.6 \mu\text{g/g}$ ,  $6.3 \mu\text{g/g}$ ,  $20.1 \mu\text{g/g}$ 으로 각각 총인 농도의 4.0%, 37.5%, 14.3%, 45.4%로 나타났다. 주된 존재형태가 residual P, NAI-P이고 그 다음으로 apatite P, adsorbed P의 순으로 나타났다.

보령호에서 residual P, NAI-P가 높게 나타난 것으로 보아 수중 용존인의 제거과정은 주로 생물체에 의한 고정과 철이나 알루미늄과의 결합에 의한 것으로 사료된다. 퇴적물에 함유된 NAI-P는 pH가 높아지거나 혐기성 상태가 되면 용출이 되는 부분으로, 보령호 퇴적물에 함유된 NAI-P는 37.5%로서, 한국수자원공사(1997) 등의 자료와 비교하면 진양호 28.5%, 임하호 31.6%, 대청호 29.3%에 비해 높게 나타나 인의 용출 가능성이 높은 것으로 사료된다.

2차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 평균 총인 함량은  $37.7 \mu\text{g/g}$ 이고, 존재형태별 평균 함량은 adsorbed P, NAI-P, apatite P, residual P가 각각  $1.4 \mu\text{g/g}$ ,  $14.9 \mu\text{g/g}$ ,  $4.7 \mu\text{g/g}$ ,  $16.7 \mu\text{g/g}$ 으로 나타나 각각 총인 농도의 3.8%, 39.6%, 12.4%, 44.3%로 나타났다. Residual P가 인의 주성분으로 나타났고 NAI-P가 그 다음으로 많은 것으로 나타났다.

3차 조사시 보령호 퇴적물에 함유된 평균 총인 함량은  $42.8 \mu\text{g/g}$ 이고, 존재형태별 평균 함량은 adsorbed P, NAI-P, apatite P, residual P가 각각  $1.5 \mu\text{g/g}$ ,  $16.5 \mu\text{g/g}$ ,  $6.1 \mu\text{g/g}$ ,  $18.6 \mu\text{g/g}$ 으로 나타나 각각 총인 농도의 3.6%, 38.6%, 14.4%, 43.4%로 나타났다. Residual P가 인의 주성분으로 나타났고 NAI-P가 그 다음으로 많은 것으로 나타났다.

4차 조사시, 보령호 퇴적물에 함유된 평균 총인 함량은  $48.1 \mu\text{g/g}$ 이고, 존재형태별 평균 함량은 adsorbed P, NAI-P, apatite P, residual P가 각각  $1.9 \mu\text{g/g}$ ,  $20.8 \mu\text{g/g}$ ,  $6.1 \mu\text{g/g}$ ,  $19.3 \mu\text{g/g}$ 으로 나타나 각각 총인 농도의 4.0%, 43.1%, 12.7%, 40.1%로 나타났다. NAI-P가 인의 주성분으로 나타났고 Residual P가 그 다음으로 많은 것으로 나타났다.

Table 2. Fractional composition of sediment phosphorus

(unit:µg/g)

Site	other	T-P	Ad-P	NAI-P	Ap-P	Re-P
site1	1st	28.9	1.2	12.1	3.8	11.8
	2nd	34.3	1.2	11.0	5.1	17.0
	3rd	36.4	1.4	16.4	5.1	13.5
	4th	35.8	1.4	14.7	5.0	14.7
ave.	33.9	1.3	13.5	4.7	14.3	
site2	1st	46.3	2.0	15.7	6.9	21.6
	2nd	35.8	1.6	15.4	5.1	13.8
	3rd	52.5	2.0	21.5	6.8	22.1
	4th	56.4	2.5	24.3	6.2	23.4
ave.	47.8	2.0	19.2	6.3	20.2	
site3	1st	54.9	1.8	23.1	7.7	22.4
	2nd	46.4	1.8	17.6	4.6	22.3
	3rd	50.6	1.7	16.2	7.6	25.3
	4th	65.0	2.7	28.6	9.1	24.7
ave.	54.2	2.0	21.4	7.3	23.6	
site4	1st	46.5	2.1	15.3	7.0	24.4
	2nd	34.1	1.1	15.6	3.8	13.6
	3rd	31.5	1.1	12.0	5.0	13.4
	4th	35.3	1.1	15.5	4.2	14.5
ave.	36.9	1.3	14.6	5.0	16.5	
Site	other	T-P	Ad-P	NAI-P	Ap-P	Re-P
mean	1st	44.2	1.8	16.6	6.3	20.1
	2nd	37.7	1.4	14.9	4.7	16.7
	3rd	42.8	1.5	16.5	6.1	18.6
	4th	48.1	1.9	20.8	6.1	19.3
total ave.	43.2	1.7	17.2	5.8	18.6	

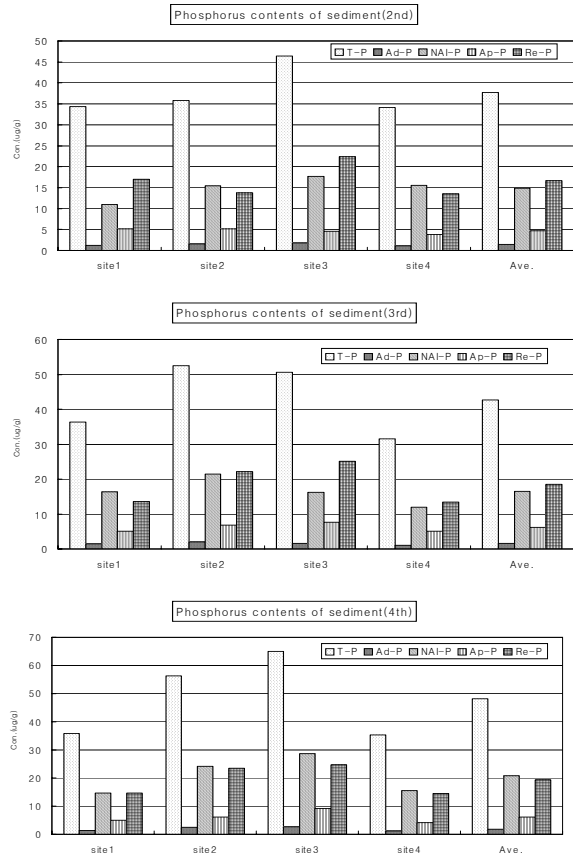
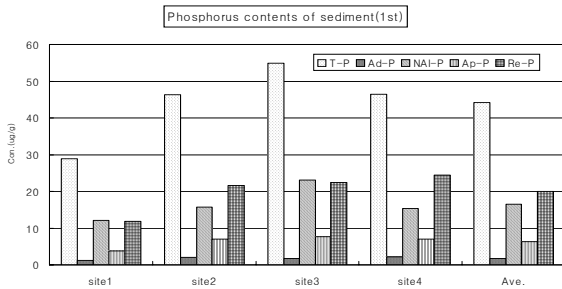


Fig. 10. Fractional composition of sediment phosphorus

### 3.4 인의 용출특성

Fig. 11.은 인의 수중 용출 및 침전특성을 나타낸 것으로 실험기간 중 호기성 조건(1st)하에서, 총인은 퇴적물내로 침전하는 경향을 보였는데, 이때 총인의 침전량은 0.31 mg/m<sup>2</sup>·day로 보령호의 저수면적을 고려시 총인의 침전량은 2.0kg/day가 된다. 용존 무기인은 실험기간 중 뚜렷한 변화를 보이지 않았다.

혐기성 조건(2nd)하에서, 총인은 실험 초기 8일간은 부유물질이 침전하면서 같이 침전하는 경향을 보였는데, 이때의 침전량은 0.12mg/m<sup>2</sup>·day로 보령호의 저수면적을 고려한 침전량은 0.75kg/day로 나타났다. 실험 8일 이후부터는 퇴적물에서 용출되는 것으로 나타났는데, 이때의 용출량은 0.23mg/m<sup>2</sup>·day로, 보령호의 저수면적을 고려할 경우 1.5kg/day가 된다. 용존 무기인은 용출되는 것으로 나타났는데, 이때의 총인과 달리 용출실험기간 중 계속 퇴적물용출량은 0.10mg/m<sup>2</sup>·day로 보령호 저수면적



으로 환산하면  $0.65\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 가 된다.

보령호의 얇은 수심으로 인해 용출현상이 지속되는 기간은 매우 짧을 것으로 사료되어, 퇴적물에서 용출되는 총인에 의한 수질의 변동은 크지 않을 것으로 사료된다.

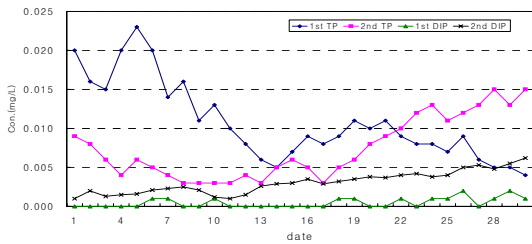


Fig. 11. Release of total phosphorus and dissolved inorganic phosphate

### 3.5 질소의 용출특성

실험기간 중 호기성 조건하에서 총질소는 감소하는 경향을 보였는데, 이때 총질소의 감소량을 퇴적물과의 반응으로만 가정하면  $29.0\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적  $6.44\text{km}^2$ 를 고려시  $187.0\text{kg}/\text{day}$ 의 총질소가 감소될 수 있다(충청남도, 1998).

Fig. 12.에서 총질소는 혐기성 조건하에서 실험 초기 9일간은 수층의 부유물질이 침전하는 동안 같이 퇴적물에 침전하는 경향을 보이고, 9일 후부터는 퇴적물로부터 용출되는 경향을 나타냈다. 실험 초기 총질소의 침전량은  $13.6\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려하면  $87.9\text{kg}/\text{day}$ 이고, 9일 이후에 총질소의 용출량은  $10.5\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적 고려시  $67.8\text{kg}/\text{day}$ 가 퇴적물로부터 용출 될 수 있다.

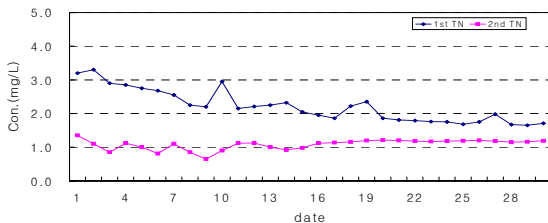


Fig. 12. Release of total nitrogen

### 3.6 중금속의 용출특성

중금속 용출실험 결과는 Fig. 13. ~Fig. 16.에 나타났다.

호기성 조건하에서, 망간은 Fig. 13.에서 볼 수 있듯이 실험 시작 후 9일 이내에 침전이 급격히 발생하였고, 아연은 실험기간 동안 천천히 퇴적물에 침전하는 것으로 나타났다. 그 외 카드뮴이나 구리는 실험기간 중 특징적인 현상은 보이지 않았다. 망간의 침전량을 알아보면,  $5.36\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적  $6.44\text{km}^2$ 를 고려하면  $33.89\text{kg}/\text{day}$ 이고, 아연의 경우  $0.94\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적 고려시  $6.02\text{kg}/\text{day}$ 가 된다. 이러한 결과는 산소가 충분히 공급되고 수층의 교란이 없는 실험조건과 비슷한 상태의 호소에서는 퇴적물내 중금속의 용출은 거의 없고 수층의 오염물질이 퇴적물에 주로 침전하는 것으로 사료된다. 혐기성 조건하에서, 망간은 호기성 조건하에서의 용출실험 결과와 달리 퇴적물로부터 용출 되었다. 망간의 용출량은  $0.94\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 전 호수면적을  $6.44\text{km}^2$ 를 고려하면  $6.02\text{kg}/\text{day}$ 가 된다. 아연은 실험 초기 18일간은 수층의 부유물질이 침전하는 동안 같이 퇴적물에 침전하는 경향을 보이고, 18일 후부터는 퇴적물로부터 용출되는 경향을 나타냈다. 실험 초기 아연의 침전량은  $0.82\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려하면  $5.37\text{kg}/\text{day}$ 이고, 18일 이후에 아연의 용출량은  $0.41\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적 고려시  $2.64\text{kg}/\text{day}$ 가 퇴적물로부터 용출될 수 있다. 그 외 구리, 카드뮴은 실험기간 동안 별다른 특징을 보이지 않았다.

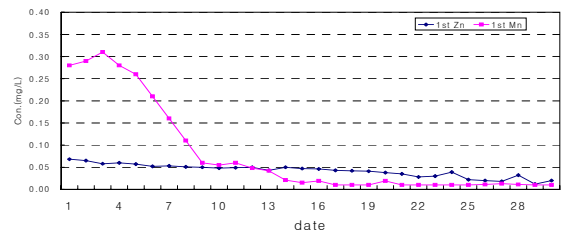


Fig. 13. Release of Zn and Mn in aerobic condition

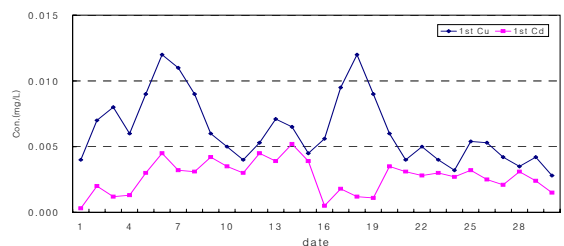


Fig. 14. Release of Cu and Cd in aerobic condition



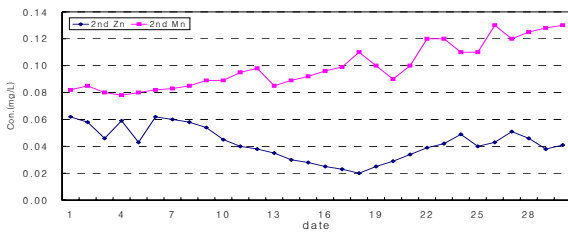


Fig. 15. Release of Zn and Mn in anaerobic condition

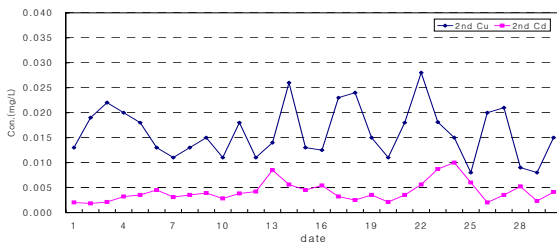


Fig. 16. Release of Cu and Cd in anaerobic condition

#### 4. 결론 및 고찰

보령호 호저 퇴적물 중의 질소, 인 및 중금속의 함량 및 존재형태별 분석을 실시하고 용출시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 총질소 함량은 1차 조사시 214.2 $\mu\text{g/g}$ , 2차 159.0 $\mu\text{g/g}$ , 3차 194.7 $\mu\text{g/g}$ , 4차 255.9 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다.
- (2) 총인 함량은 1차 44.2 $\mu\text{g/g}$ , 2차 37.7 $\mu\text{g/g}$ , 3차 42.8 $\mu\text{g/g}$ , 4차 48.1 $\mu\text{g/g}$ 로서 보령호 퇴적물내 총인의 평균 함량은 43.2 $\mu\text{g/g}$ 이며, 대청호 1,203 $\mu\text{g/g}$ , 임하호 878 $\mu\text{g/g}$ , 소양호 776 $\mu\text{g/g}$ , 진양호 610 $\mu\text{g/g}$ 에 비해 낮은 편으로 호수가 조성된지 오래되지 않아 인의 축적도는 낮은 것으로 판단된다.
- (3) 중금속중 Cu, Mn, Zn, Cd의 함량은 각각 18.5  $\mu\text{g/g}$ , 45.3 $\mu\text{g/g}$ , 12.0 $\mu\text{g/g}$ , 1.1 $\mu\text{g/g}$ 로 나타났다. 구리의 평균총량은 18.5 $\mu\text{g/g}$ 으로, shale의 평균 구리 함량인 45 $\mu\text{g/g}$ (Wedepohl, 1961)과 비교하면 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다. Shale의 평균 망간 함량인 850 $\mu\text{g/g}$ (Wedepohl, 1961)과 비교하면, 보령호의 망간의 평균총량은 43.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 아연의 총농도는 12.2 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타나 shale의 평균 아연 함량인 95 $\mu\text{g/g}$ (Wedepohl, 1961)보다 낮은 값을 보이고 있다. 카드뮴의 평균총량은 1.1 $\mu\text{g/g}$ 으로 shale에 함유된 평균 카드뮴 총량인 0.3 $\mu\text{g/g}$ 에 비해 높은 값을 보이고 있다.

(4) 퇴적물에 함유된 NAI-P는 37.5%로, 진양호 28.5%, 임하호 31.6%, 대청호 29.3%에 비해 높게 나타나 인의 용출 가능성이 높은 것으로 사료된다.

(5) 호기성 조건하에서, 총인은 퇴적물내로 침전하는 경향을 보였는데, 이때 총인의 침전량은 0.31 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려시 총인의 침전량은 2.0 $\text{kg/day}$ 로 산출되었고 용존 무기인은 실험기간 중 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 혐기성 조건하에서, 총인은 실험 초기 8일간은 부유물질이 침전하면서 같이 침전하는 경향을 보였는데, 이때의 침전량은 0.12 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려한 침전량은 0.75 $\text{kg/day}$ 로 나타났다. 실험 8일 이후부터는 퇴적물에서 용출되는 것으로 나타났는데, 이때의 용출량은 0.23 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로, 보령호의 저수면적을 고려할 경우 1.5 $\text{kg/day}$ 가 된다. 용존 무기인은 총인과 달리 용출실험기간 중 계속 퇴적물에서 용출되는 것으로 나타났는데, 이때의 용출량은 0.10 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호 저수면적으로 환산하면 0.65 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 가 되는 것으로 나타났다.

(6) 호기성 조건하에서 총질소는 감소하는 경향을 보였는데, 이때 총질소의 감소량 29.0 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호에서 187.0 $\text{kg/day}$ 의 총질소가 감소될 수 있다. 혐기성 조건하에서 총질소는 실험 초기 9일간은 퇴적물에 침전하는 경향을 보이고, 이후에는 용출되는 경향을 나타냈다. 실험 초기 총질소의 침전량은 13.6 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려하면 87.9 $\text{kg/day}$ 이고, 9일 이후에 총질소의 용출량은 10.5 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적 고려시 67.8 $\text{kg/day}$ 가 퇴적물로부터 용출될 수 있음을 알 수 있다.

(7) 호기성 조건하에서, 망간은 실험시작 후 9일 이내에 침전이 급격히 발생하였고, 아연은 실험기간 동안 천천히 퇴적물에 침전하는 것으로 나타났다. 그 외 카드뮴이나 구리는 실험기간 중 특징적인 현상은 보이지 않았다. 혐기성 조건하에서, 망간은 호기성 조건하에서의 용출실험 결과와 달리 퇴적물로부터 용출되었다. 망간의 용출량은 0.94 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 전 호수면적을 6.44 $\text{km}^2$ 를 고려하면 6.02 $\text{kg/day}$ 가 된다. 아연은 실험 초기 18일간은 수층의 부유물질이 침전하는 동안 같이 퇴적물에 침전하는 경향을 보이고, 18일 후부터는 퇴적물로부터 용출되는 경향을 나타냈다. 실험 초기 아연의 침전량은 0.82 $\text{mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 보령호의 저수면적을 고려

하면 5.37kg/day이고, 18일 이후에 아연의 용출량은 0.41 mg/m<sup>2</sup>·day로 보령호의 저수면적 고려시외 구리, 카드뮴은 실험 기간 동안 별다른 특징을 보이지 않았다.

이상을 종합하면 보령호 퇴적물은 부영양화의 지표항

목인 질소와 인의 용출이 크지 않고 상류에 탄광지역이 있으나 이에 의한 퇴적물중의 중금속 용출량은 크지 않은 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2001. 8. 17)

## 참 고 문 헌

1. 전상호(1989), "강원도 춘천지역의 소양호, 춘천호 및 의암호 퇴적물의 인 존재형태와 이동에 관한연구", 서울대학교 대학원 박사 학위논문, pp. 31-54.
2. 전상호(1985), "소양호 표층퇴적물에 함유된 인의 존재 형태에 대하여", 한국지구과학회지 제6권 2호, pp. 57-62
3. 충청남도(1998), "보령댐 상수원보호구역 지정 수질보전대책", pp. 235-256.
4. 한국수자원공사(1997), "댐저수지 유기퇴적물 분포 및 처리방안 연구", pp. 32-33.
5. 한국수자원공사(1997), "운문댐 상수원 보호구역지정 종합보고서", pp. 210-216.
6. Hakanson, L. and M. Jansson (1983), "Principles of lake sedimentology", Springer-Verlag, Berlin, p 316.
7. Hietjes, A.H.M. and L. Lijklema (1980), "Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments", J. of Environ. Qual., Vol.9, No.3, pp. 405-407.