

# 세가시육질꼬리옆새우(단각류)의 생물교란이 시화호 퇴적물 내 황화합물과 산소 농도의 수직적 분포에 미치는 영향

Effects of Bioturbation of the Amphipod *Monocorophium uenoi*  
on the Vertical Distribution of Sulphides and Oxygen within  
Sulphides-Rich Sediments of Lake Sihwa

구 본 주\*<sup>+</sup> / 권 개 경\*\* / 신 상 호\*\*\* / 제 종 길\*\*\*\*

Bon Joo Koo\*<sup>+</sup> / Kae Kyeong Kwon\*\* / Sang-Ho Shin\*\*\* / Jong-Geel Je\*\*\*\*

## :: Abstract ::

The survival rate and tube number of *Monocorophium uenoi*, one of the dominant species in Lake Sihwa, was investigated under laboratory condition with salinity gradients (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40‰). Another laboratory experiments were conducted to investigate the survival rate of *Monocorophium uenoi* in sulphide-rich sediment with oxic overlying water, and the effect of amphipod bioturbation on sulphide and oxygen profiles. The survival rate and tube-forming number of the amphipod were high in salinity range of 20 to 30‰. The amphipod survival rate was also high in sulphidic sediment when the water column was oxic. The amphipod bioturbation affected the oxygen and sulphide content in the sediment; oxygen conditions in the upper sediment layers were improved, and simultaneously the concentrations of sulphide were reduced. And their depth was clearly dependent on amphipod density. In Lake Sihwa, previously anoxic bottoms with sulphidic sediment during summer turn oxic with pycnocline disappearance during autumn. Amphipods seem to have the capability to quickly invade such areas, and their tubing of the sediment may play an important role in preparing the sediment for further recolonisation of other macrobenthos.

**Keywords:** *Monocorophium uenoi*, bioturbation, sulphide, oxygen, Lake Sihwa

+ To whom corresponds should be addressed. bjoo@kordi.re.kr

\* 한국해양연구원 해양생태·환경연구사업단 선임연구원

\*\* 한국해양연구원 해양바이오신소재연구사업단 선임연구원

\*\*\* 한국해양연구원 해양생태·환경연구사업단 연구원

\*\*\*\* 열린우리당 국회의원

## :: 요 지 ::

시화호의 우점종 중의 하나인 세가시육질꼬리옆새우의 염분구배 (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40‰)에 따른 생존율 및 튜브형성 개수 실험을 하였다. 그리고 수층 내 산소농도가 충분할 경우 황화합물 농도가 높은 퇴적물 속에서 대상 종의 생존율과 이들의 생물교란 활동이 퇴적물 내 산소농도와 황화합물의 수직구배에 미치는 영향을 실험하였다. 대상 종은 20~30‰ 염분 조건에서 생존율이 높았으며 튜브형성 개수 또한 많았다. 수층 내 산소 농도가 충분할 경우, 대상 종은 황화합물 퇴적물에서 높은 생존율을 나타내었다. *M. uenoi*의 생물교란 활동은 퇴적물 내로 산소를 확산시킴으로써 황화합물을 제거하였다. 산소 확산과 황화합물이 제거되는 깊이는 대상 종의 서식밀도가 높을수록 증가하였다. 시화호 퇴적물에는 황화합물의 농도가 높게 나타나며, 특히 여름철에는 밀도성층의 강화로 저층수에 빈산소층이 형성되어 저서동물이 서식하지 못하는 무생물대가 형성된다. 가을 무렵에는 성층의 약화로 저층수에도 산소가 충분히 공급되며 *M. uenoi*가 높은 밀도로 출현한다. *M. uenoi*의 생물교란 활동은 저서동물 군집이 재형성될 수 있는 서식지를 조성하는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다.

**핵심용어:** 세가시육질꼬리옆새우, 생물교란, 황화합물, 산소, 시화호

## 1. 서론

해양환경에서 수층의 산소부족 현상은 퇴적물 내 황화합물의 축적을 야기하며, 퇴적물 내 황화합물의 존재는 이곳에 서식하는 저서동물의 생존에 치명적이다(Diaz and Rosenberg, 1995; Laine et al., 1997). 황화합물은 수층에 산소가 충분히 있더라도 유기물 부하량이 많을 경우에는 퇴적물 내에 축적될 수도 있다(Giordani et al., 1996). 저서동물은 황화합물의 독성을 피하기 위해 행동학적, 생리학적, 그리고 생화학적인 기작을 전개하기도 한다(Modig and Ólafsson, 2001). 이러한 기작 중 굴이나 튜브를 만드는 등의 생물에 의한 퇴적물 교란활동은 퇴적물 내로 산소를 공급하고(Wetzel et al., 1995), 이는 퇴적물 내 생지화학적인 층서구조에 영향을 준다(Aller and Aller, 1992; Ziebis et al., 1996; Tuominen et al., 1999). 일반적으로, 연안 퇴적물 내 산소공급은 표층으로부터 수 mm로 제한되어 있다(Jørgensen, 2000; Furukawa et al., 2004). 그러나 생물에 의한 퇴적물 교란활동은 황화합물 함량이 높은 퇴적물 내로 산소를 패치 형태로 공급하며, 산소에 의해 쉽게 산화되는 황화합물은 생물활동에 의해 퇴적물에서 제거될 수

있다.

시화호의 경우 매년 여름철에는 넓은 해역에 걸쳐 밀도성층이 강하게 발달하며, 이로 인해 저층수에는 빈산소층 혹은 무산소층이 형성된다(Han and Park, 1999; 박 등, 2003; 해양수산부, 2003, 2004, 2005). 특히, 수심이 깊은 중앙해역에는 겨울철을 제외한 전 시기에 빈산소층이 강하게 형성된다. 수층 내 산소부족 현상으로 시화호 저층 퇴적물에는 황화합물이 높은 농도로 축적되어 있으며, 수심이 가장 깊은 곳의 퇴적물 내 황화합물 농도는 약  $500 \mu\text{mol/l}$ 에 이른다(해양수산부, 2003). 이러한 빈산소층의 형성으로 여름철 시화호 대부분 해역의 저층 퇴적물에는 저서동물이 출현하지 않는 무생물대(azoic zone)가 형성된다(홍 등, 1997; 구, 2005).

밀도성층이 약화되는 매년 가을에는 저층수로 산소가 유입되기 시작하고 시화호 표층퇴적물에는 연한 갈색을 띠는 산화층이 발견되며 저서동물이 다시 군집을 형성한다(구, 2005). 이 퇴적물 속에는 *Monocorophium uenoi* (세가시육질꼬리옆새우)가 높은 밀도로 출현하며, 표층에는 이들의 서식관이 형성되어 있다. 이들의 생물학적 교란(bioturbation)에 의해 산소가 퇴적물 속으로 유입되고, 그 결과로 산화가 일어나 황화

합물이 제거되고 이곳에 다른 저서동물이 가입할 수 있게 되어 새로운 군집이 형성되는 것으로 추정되었다. 여름철 저층 퇴적물 내 무생물대 형성과 가을철 저서동물의 군집 재형성 현상은 1998년 배수갑문을 통해 해수교환이 본격적으로 실시된 이후 시화호에서 매년 반복되고 있다. 발틱해의 경우에도 이와 유사한 사례가 소개된 바 있다. 발틱해의 경우 수괴 혼합의 부족으로 염분 약층 (60~80m) 이하 깊이에는 오랜기간 동안 빈산소층이 형성되며, 약층이 사라지는 시기에는 저층수의 산소 농도가 회복되면서 옆새우류인 *Monoporeia affinis* 가 가장 먼저 가입하여 생물교란 (bioturbation)을 통해 퇴적물 내 황화합물을 제거한다(Modig and Ólafsson, 2001; Ólafsson and Limen, 2002). 이는 이후 저서동물 군집이 형성될 수 있는 서식지 조성에 중요한 역할을 한다(Modig and Ólafsson, 2001).

이 논문의 목적은 *M. uenoi*의 생물교란이 시화호 퇴적물 내 황화합물과 산소 농도의 수직구배에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 아울러 대상 종의 염분에 대한 적응 범위 및 황화합물에 대한 내성정도 파악 등 생태적인 면도 함께 파악하고자 한다. 이는 시화호 대형저서동물 군집 형성과정에 대상 종이 기여하는 기능을 이해함으로써 보다 효율적으로 시화호 저서생태계를 관리하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 현장채집

대상 종인 *Monocorophium uenoi* (육질꼬리 옆새우류)와 실험에 이용된 퇴적물은 시화호에서 2003년 10월에 채집하였다. 황화합물의 농도가 높아 검은색을 띠는 퇴적물 (SRS: sulphide-rich sediment)은 Fig. 1의 정점 A에서 반빈 채니기를 이용하여 채집하였다. 채집한 SRS에는 저서동물이 전혀 출현하지 않았다. 이 지역은 시화호에서 수심이 가장 깊은 곳 (16m)으로 저층수에는 겨울철을 제외한 시기에 빈산소층이 형성

되는 곳이다. 황화합물의 농도가 감지되지 않는 갈색의 퇴적물 (SFS: sulphide-free sediment)은 시화호 배수갑문에서 약 30m 떨어진 정점 B에서 채집하였다. 이 정점에서는 반빈채니기를 이용하여 실험에 이용할 대상 종도 퇴적물과는 별도로 채집하였다. 이 지역은 외해수와의 해수교환으로 저층수의 산소농도가 항상 높게 유지되는 지역이다. 실험실로 옮긴 퇴적물은 곧바로 4℃의 항온실에 보관하였으며, SFS는 항온실 보관 전에 300 $\mu$ m 체로 걸러 대형저서동물을 제거하였다. 모든 실험에는 시화호에서 채집된 3mm 크기 이상의 *M. uenoi*를 이용하였다.

### 2.2. 생존율

750ml (15\*10\*5cm) 크기의 플라스틱통에 SF 퇴적물을 5mm 두께로 간 후 염분을 달리한 여과된 해수를 채우고 대상 종의 염분에 대한 내성 실험을 수행하였다. 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%의 염분 범위에 3.5~7.6mm의 크기의 대상 종을 각각 30개체씩 투입하였으며, 15℃의 항온실에서 84시간 동안 대상 종의 생존율을 측정하였다. 그리고 84시간 후 대상 종이 만든 튜브(tube)의 길이와 수를 측정하였다. 각 실험조에는 기포기 (aerator)를 달아 충분히 산소를 공급하였으며, 동일 조건에서 두 번 반복실험을 하였다.

### 2.3. 황화합물(sulphides)과 산소(oxygen) 농도의 수직분포

내경이 8.5cm (표면적: 57cm<sup>2</sup>)이며 높이가 12cm인 원통형 통 32개를 준비하였다. 24개에는 SRS를 그리고 8개에는 SFS를 5cm 깊이로 각각 담은 후 여과된 26%의 해수를 채웠다. 각 통에는 대상 종을 투입하였으며, 통의 윗부분은 실험도중 대상 종이 빠져 나올 수 없도록 200 $\mu$ m 크기의 망목을 씌웠다(Fig. 2). 24개의 SRS에는 시화호 내의 대상 종 평균서식밀도를 고려하여 30개체 (고밀도: 약 6,000개체/m<sup>2</sup>)와 5개체 (저밀도: 200개체/m<sup>2</sup>)를 각각 8개의 통에 투입

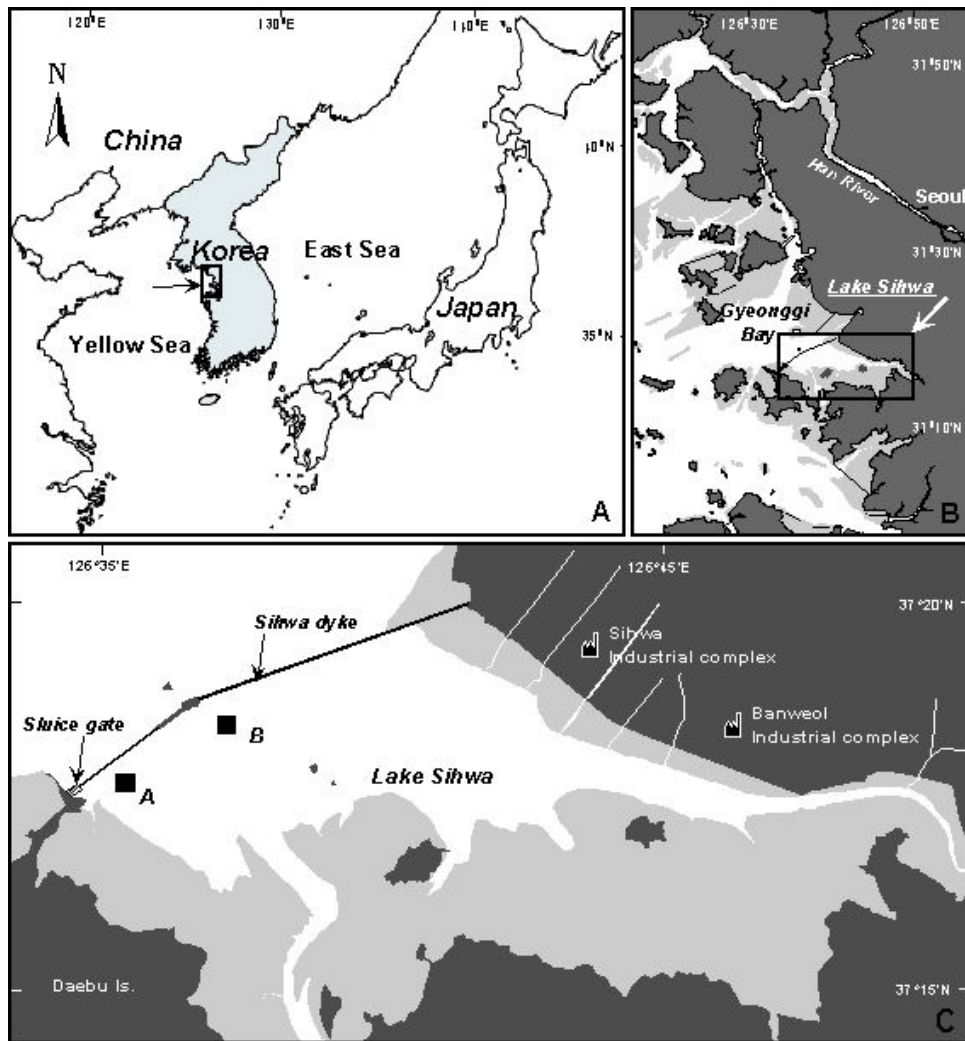


Fig. 1. Location and layout of the study site (A & B). Sampling sites of A for sulphide-rich sediment (SRS) and B for sulphide-free sediment (SFS) and *Monocorophum uenoi* in Lake Sihwa (C).

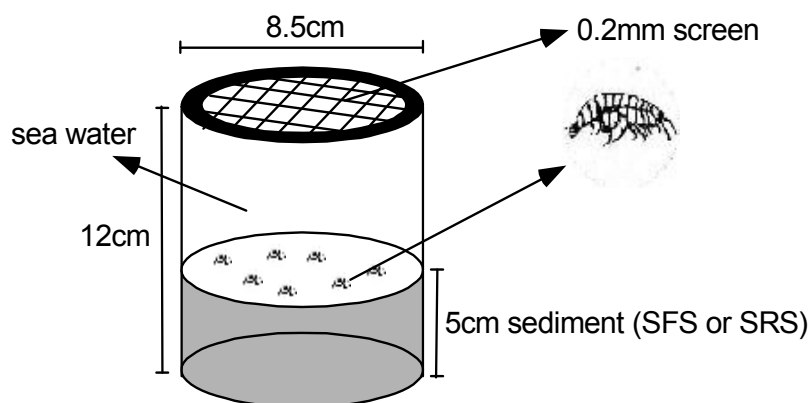


Fig. 2. Schematic representation of the experimental jar for oxygen and sulphide profiles.

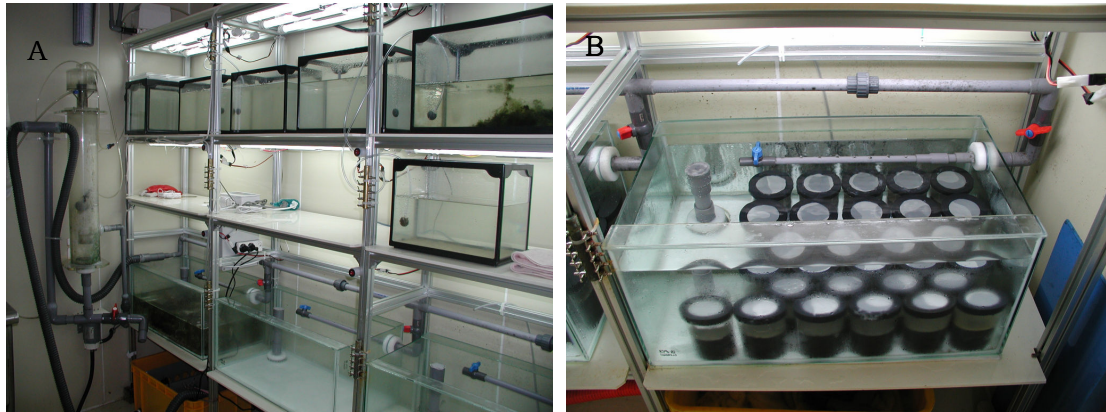


Fig. 3. Experimental unit with water flow system (A) and aquarium tank with experimental jars (B).

하였으며, 나머지 8개에는 대상 종을 투입하지 않았다. 그리고 SFS 8개에도 30개체의 대상 종을 투입하였다. 이렇게 준비된 32개의 실험구는 26%의 해수가 순환되는 수조에 넣고 15°C 조건에서 4일간 배양을 하였다(Fig. 3). SRS의 실험구는 대상 종의 밀도를 달리한 각 treatment (고밀도-30개체, 저밀도-5개체, 0개체) 별로 매일 2개씩을 취하여 퇴적물내 황화합물과 산소 농도를 미세전극 (microelectrode, Unisense)을 이용하여 측정하였다. 측정 후 실험구는 생존을 파악을 위해 곧바로 해수순환 수조에 다시 투입하였다. 실험 종료 후 (4일 경과 후) SRS 16개 실험구 (고밀도 8개와 저밀도 8개)와 SFS 8개 실험구에서 생존한 대상 종의 개체수를 계수하였다.

실험 전 24개의 SRS 실험구 내 황화합물의 평균 농도는 1cm 깊이에서  $443 \pm 82 \mu\text{mol}/\ell$ 였으며, SFS 실험구에서는 동일 깊이에서 농도가 감지되지 않았다. 해수순환식 수조에는 냉각기와 온열기를 설치하여 설정된 온도가 자동으로 유지되도록 하였다. 순환되는 해수는 시스템 내에서 여과되었으며, 해수의 순환속도는 25 ml/sec 를 일정하게 유지하였다.

#### 2.4. 황화합물과 산소농도 측정

퇴적물내 황화합물과 산소 농도는 H<sub>2</sub>S 미세전극 (H<sub>2</sub>S50, Unisense)과 O<sub>2</sub> 미세전극 (OX50, Unisense)을 이용하여 측정하였다. 보정

(calibration)과 측정 방법은 Visscher et al. (1991)을 따랐다. 황화합물의 세가지 형태인 S<sup>2-</sup>, HS<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>S의 농도분포는 pH에 의존적이다. 따라서 황화합물의 농도를 알기 위해 pH 도 함께 측정하였다(pH50, Unisense). 퇴적물 내 각각의 농도 측정시에는 미세전극을 micro-manipulator (MM33, Unisense)에 고정된 후 1mm 간격으로 20mm 깊이까지 삽입하면서 picoammeter (PA2000, Unisense)를 이용하여 전류를 측정하였다. 이로부터 황화합물과 산소의 농도를 계산하였다([www.unisense.com](http://www.unisense.com)의 manual 참조).

### 3. 결과

#### 3.1 Monocorophium uenoi의 생존율

##### 3.1.1 염분구배에 따른 생존율 및 튜브 형성

각기 다른 염분농도를 가진 수조에 대상 종을 넣고 염분에 대한 내성 정도를 파악하였다. 84시간 후 20~30%의 염분 범위에서 대상 종은 90% 이상의 생존율을 보였으며, 특히 30%에서는 모든 개체가 생존하였다(Fig. 4). 반면 1%의 염분에서는 실험 시작 약 3시간 후부터 사망하는 개체가 나타나기 시작하여 6시간 후에는 모든 개체가 사망하였다. 5%의 염분에서는 시간에 따라 사망하는 개체의 수가 크게 증가하였으며, 84시간 후에는 약 38%의 생존율을 보였다. 15와 35%

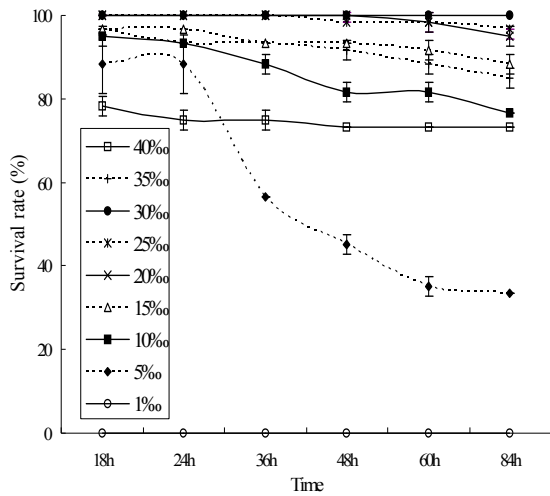


Fig. 4. The survival rate of *Monocorophium uenoi* under laboratory condition with salinity gradients.

에서는 18시간 후 약 95%의 생존율을 보였으나 점차 감소하여 84시간 후에는 공히 약 85%의 생존율을 보였다. 10‰에서는 18시간 후에는 15%의 경우와 유사한 생존율을 보였으나 감소 폭이 증가하여 84시간 후에는 약 73%의 생존율을 보였다. 40‰에서는 18시간 후 약 75%의 생존율을 보였으며, 84시간 후에도 유사한 생존율을 유지하였다.

실험에 이용된 대상 종의 크기는 3.53~7.56mm였으며, 실험 종료 후 이들이 만든 튜브 길이는 약 4~10mm의 분포를 보였다. 튜브의 형태는 일자(一字)형이었으며 분지되는 경우는 없었다. 튜브는 퇴적물 내에서 수직으로 선 경우와 비스듬히 혹은 수평으로 형성되어 있었다. 염분내성 실험 후 염분 구배별 생존한 개체의 수와 만들어진 튜브의 수를 계수하였다. 20~30‰의 경우 생존 개체수가 28개체 이상이었으며, 튜브 수는 생존 개체당 2개 이상이었다. 15와 35‰ 그리고 10과 40‰의 염분에서 생존 개체수는 공히 20~25개체로 유사하였으나, 생존 개체수당 튜브 수는 35, 40‰에서 각각 2.0, 1.8개로 15, 10‰의 1.5, 1.4에 비해 많았다(Fig. 5).

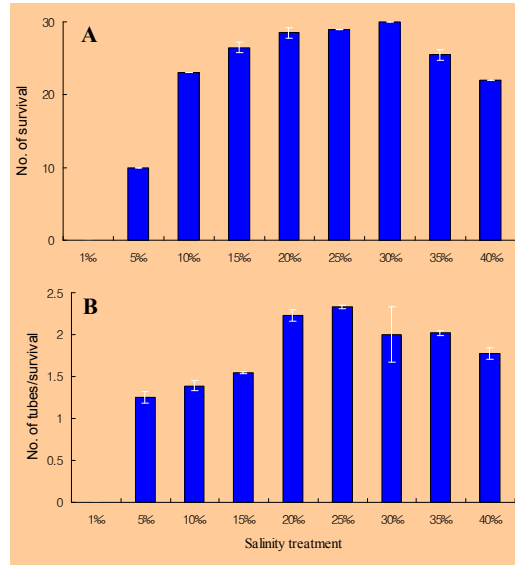


Fig. 5. The number of survivals (A) and tubes per survival (B) after the experiment with respect to salinity gradients.

### 3.1.2 SRS와 SFS에서의 생존율

30개체와 5개체를 SRS에 각각 투입한 경우와 SFS에 30개체를 투입한 경우의 대상 종의 4일 후 생존율을 비교하였다. 각 조건에서 대상 종은 75~88% 범위의 생존율을 보였다. 평균 생존율은 SFS에서 가장 높았으며, 30개체를 넣은 SRS에서 가장 낮았다. 그러나 각 조건에서의 생존율은 유의한 차이를 보이지 않았다(ANOVA,  $P > 0.05$ , Fig. 6). 또한 SRS에 투입한 대상 종의 밀도 역시 생존율에 영향을 미치지 못하였다 ( $P > 0.05$ ).

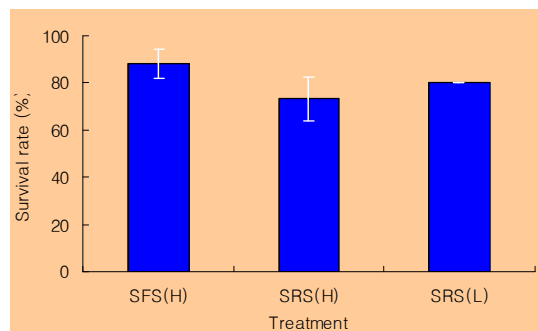


Fig. 6. Average survival rate in treatments of amphipods in SRS and SFS for 84 hours.

### 3.2 황화합물(sulphides)과 산소(oxygen)농도의 수직분포

*M. uenoi*를 투입하기 전 SRS 내 황화합물의 농도는 깊이가 깊어질수록 증가하였다. 표층에서는 농도가 감지되지 않았으며 1mm 깊이에서 63  $\mu\text{mol}/\ell$ 의 농도를 보였다. 9mm 깊이 (426  $\mu\text{mol}/\ell$ ) 까지는 농도 증가 폭이 컸으며 이후 깊이부터는 상대적으로 증가 폭이 작았다. 최대 농도는 20mm 깊이에서 539  $\mu\text{mol}/\ell$ 이었다(Fig. 7).

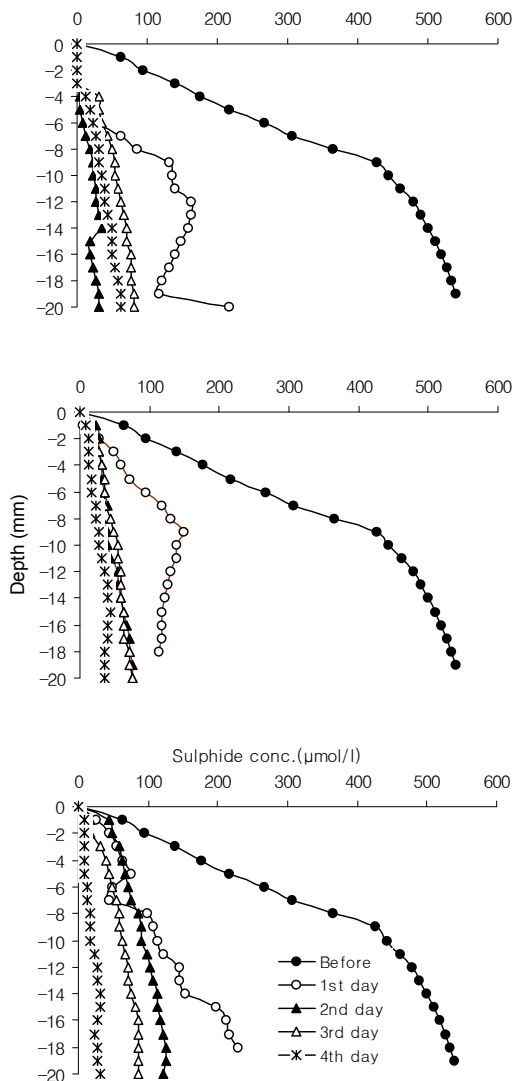


Fig. 7. Sulphide profiles performed each day for 5 days in SRS with gradients of amphipod density.

30개체를 투입한 고밀도의 경우 (A)에는 24 시간 후에 표층으로부터 3mm 깊이까지는 황화합물이 감지되지 않았으며, 이후에도 이 깊이에서는 황화합물의 농도가 0  $\mu\text{mol}/\ell$ 였다(Fig. 7). 그러나 5개체를 투입한 경우 (B)와 대상 종을 투입하지 않은 경우 (C)에는 표층을 제외한 깊이에서 황화합물이 계속 감지되었다. A의 경우에는 3mm 이하 깊이에서 둘째날까지는 황화합물의 농도가 감소하였으나 셋째날에는 다시 농도가 증가하는 경향을 보였다. B와 C의 경우에는 이와는 달리 시간이 갈수록 황화합물의 농도가 점차 감소하는 경향을 보였다. A와 B의 경우에는 둘째날 깊이 10mm 정도에서 농도가 역전되는 현상이 있었다. 대상 종을 높은 밀도로 넣은 경우에는 이들에 의한 생물교란 결과로 표층에서 3mm 깊이에서 황화합물이 산화되었으나, 대상 종을 넣지 않은 경우와 적은 개체를 투입한 경우에는 황화합물이 완전히 산화되지 않고 남아 있었다.

실험 시작 전 퇴적물 내 산소농도의 분포는 표층에서 24% 이었으며, 1mm 이하의 깊이에서는 약 0% 정도였다(Fig. 8). A의 경우에는 표층에서 산소농도가 계속 증가하여 4일 후에는 약 83% 정도가 되었으며 수직적으로도 3mm 깊이까지 산소가 확산되었다. 이에 반해 B의 경우에는 산소 확산 정도가 A의 경우에 비해 적었으며, C의 경우에는 상층의 해수에 산소농도가 높음에도 불구하고 퇴적물 속으로 전혀 확산되지 못하였다(Fig. 8).

### 4. 고찰

비록 짧은 기간 동안의 실험이었으나, *Mono-corophium uenoi*는 20~30% 염분범위의 조건에서 생존율이 높았으며 튜브 형성 개수도 많았다. 10, 15%의 염분 조건에서는 35, 40% 조건과 비교해 유사한 생존율을 보였으나 튜브 형성 수가 적어 저염인 환경에서 상대적으로 적응성이 떨어지는 것으로 여겨졌다. 5%의 염분 조건 하

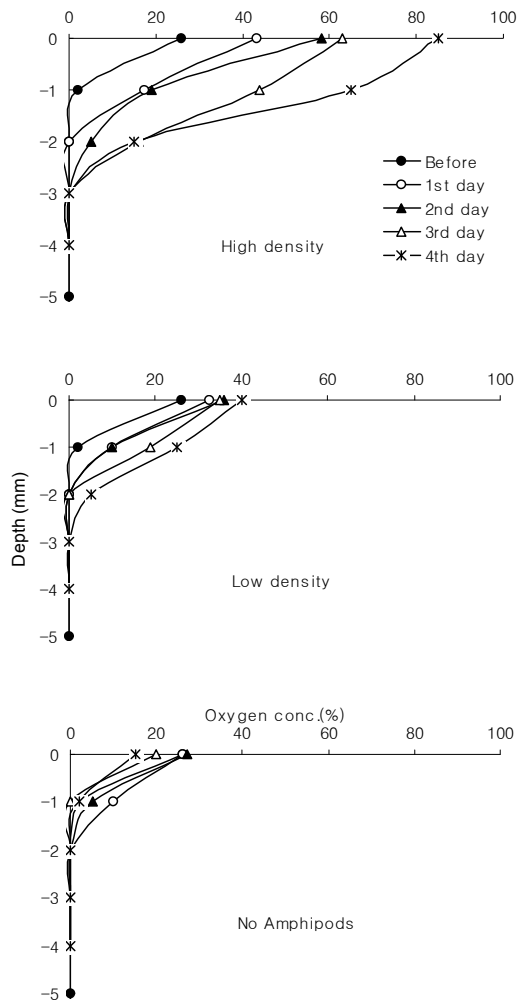


Fig. 8. Oxygen profiles performed each day for 5 days in SRS with gradients of amphipod density.

에서도 대부분의 개체가 실험구 투입 직후 튜브를 만들었으며, 84시간 후에도 생존한 개체가 있었다. 그러나 생존한 개체는 저염 환경에 적응을 하지 못하는 듯 정상적인 행동을 하지 못하였다. 실제로 대상 종이 저염의 환경에 노출된 적이 시화호에서 있었다. 2003년 여름철의 집중 강우로 시화호 저층수의 평균 염분이 15% 정도로 감소하였으며, 저염 형성 이후부터 2005년 봄까지 대상 종이 시화호 대부분 해역에서 자취를 감추었다(해양수산부, 2005). 낮아진 염분이 *M.*

*uenoi* 를 사라지게 한 직접적인 이유인지는 알 수 없으나, 본 실험에서 나온 결과로부터 대상 종이 서식하기에 적절한 염분범위는 20~30‰임을 유추할 수 있었다.

*M. ueno*는 퇴적물 내 높은 황화합물 조건하에서도 높은 생존율을 보여 황화합물에 대한 저항성이 강한 것으로 판단되었다. 84시간 후 SRS 조건하에서 대상 종의 생존율은 SFS에서의 생존율과 유의한 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 황화합물은 저서동물의 생존에 치명적으로 작용하며 황화합물에 노출되는 경우에는 급격한 종다양도지수의 감소를 초래하기도 한다(Andersin et. al., 1978; Laine et al., 1997). 황화합물에 노출되었을 시 이를 극복하기 위한 저서동물의 적응기작은 종별로 상이하다(Hagerman, 1998). 일부 단각류의 경우, 퇴적물 내 황화합물이 있을 시 재빠르게 굴 (burrow)을 생성함으로써 황화합물과의 접촉시간을 단축시키는 방법을 전개하기도 한다(e.g. *Monoporeia affinis*, Modig and Ólafsson, 2001). 굴을 생성하는 과정 중에 수층으로부터 퇴적물 속으로의 산소 확산에 의해 굴 주변 퇴적물의 황화합물이 제거되는 것이다. 본 실험에서도 *M. ueno*는 SRS 에서 재빨리 튜브를 만드는 것을 확인할 수 있었다. 튜브를 생성하는 과정 중의 교란으로 퇴적물 내로 산소가 유입되고 황화합물이 제거될 수 있는 것으로 판단되었다. 대상 종은 저층수에 빈산소층이 형성되는 여름철에는 시화호 대부분의 해역에서 사라지며 가을에 수괴 내 산소농도의 호전과 함께 황화합물 퇴적물 속에 많은 튜브를 형성하며 개체수를 유지한다(해양수산부 2003). 황화합물에의 노출을 견디는 기작에 대해선 밝혀진 바 없으나, 대상 종은 수층의 산소농도가 높게 유지되는 환경에서는 퇴적물 내 황화합물의 노출에도 견딜 수 있는 것으로 판단되었다. 이는 발틱해에서 보여지는 *Monoporeia affinis*의 생태학적인 특징과도 유사한 것 이었다(e.g. Modig and Ólafsson, 2001; Ólafsson and Limen, 2002).

굴 (burrow)을 만드는 등의 저서동물의 생물



학적 활동은 퇴적물 속으로 산소가 접촉될 수 있는 표면적을 증가시켜 환원상태의 퇴적물에 산소가 공급되는 기회를 제공한다. 이러한 산소 유입은 퇴적물 내에서 일어나는 일련의 생지화학적 과정에 큰 영향을 준다(Rhoads, 1974; Ziebis et al., 1996). 이러한 저서동물의 활동에 의해 산소가 퇴적물로 확산될 수 있는 면적은 서식지 환경과 종에 따라 400% 까지 증가될 수 있다 (e.g. Ziebis et al., 1996; Koo et al., 2005; Kristensen and Kostka, 2005). *M. uenoi*에 의한 생물교란은 상층 퇴적물로 산소를 확산시킴으로써 동시에 황화합물을 산화시키는 역할을 하였다. 황화합물의 제거 정도는 대상 종의 밀도와 관련이 있었으며, 많은 개체를 투입한 경우 (30 개체)에는 3mm 깊이까지 황화합물이 제거되었다. 그러나 3일 이후에는 3mm 깊이 이하에서 황화합물의 농도가 다시 증가하는 패턴을 보였다. Modig와 Ólafsson (2001)은 *M. affinis*를 대상으로 한 유사한 실험에서 그 이유를 대사물질의 축적과 황산염의 퇴적물 속 침투 때문인 것으로 추정하였다. 대상 종의 대사물질이 시간이 감에 따라 퇴적물 속에 축적되어 유기물 농도가 증가하며, 퇴적물의 교란으로 해수층의 황산염이 퇴적물 속으로 유입되어 황산염 환원과정에 의해 축적된 유기물이 분해되면서 황화합물의 농도가 증가될 수 있는 것이다. 국내에서도 해양환경에서 황산염 환원의 역할과 중요성에 대한 연구가 있었다(현 등, 2003). 5개체를 투입한 경우에는 황화합물 농도 감소 폭이 대상 종을 투입하지 않은 경우와 유사한 정도였다. 따라서 황화합물의 제거 정도는 생물교란 활동의 강도와 관련이 있는 것으로 판단되었다. 생물활동에 의한 퇴적물 속으로 산소농도 확산 정도는 대상 종의 밀도 효과를 보다 뚜렷하게 나타내었다. 30개체를 투입한 경우에는 3mm 깊이까지 산소가 확산되었으며, 시간 경과와 함께 그 정도가 증가하였다. 그러나 5개체를 투입한 경우에는 산소 확산 깊이가 얕았으며 퇴적물 표층에서 보이는 산소 확산도 상대적으로 적었다. 대상 종을 투입하지 않은 경

우에는 실험 기간 중 퇴적물 내 산소 농도 변화가 거의 없었다. *M. uenoi*의 생물학적 교란 활동은 수층의 산소를 퇴적물 속으로 확산시킴으로써 퇴적물 내 황화합물을 제거하였다. 특히, 대상 종의 밀도가 높은 경우에 퇴적물 내 산소와 황화합물의 농도 분포에 더 큰 영향을 주었다.

결론적으로, *M. uenoi*는 20~30%의 염분 환경에서 생존율이 높았으며 튜브 형성 개수도 많았다. 시화호와 같이 단혀진 해양환경에서 빈번하게 발생할 수 있는 저염분 환경은 대상 종의 개체군 유지에 악영향을 미칠 수도 있었다. 수층 내 산소 농도가 충분할 경우에는 *M. uenoi*는 황화합물 퇴적물에서도 높은 생존율을 나타내었다. *M. uenoi*에 의한 생물교란은 퇴적물 내로 산소를 확산시킴으로써 황화합물을 제거하였다. 산소 확산과 황화합물 제거 정도는 서식밀도가 높을수록 증가하였다. 시화호 퇴적물에는 황화합물의 농도가 높게 나타나며, 특히 여름철에는 밀도성층의 강화로 저층수에 빈산소층이 형성되어 저서동물이 서식하지 못하는 무생물대가 형성된다. 가을 무렵에는 성층의 약화로 저층수에도 산소가 충분히 공급되며 *M. uenoi*가 높은 밀도로 출현한다. *M. uenoi*의 생물교란 활동은 저서동물 군집이 재형성될 수 있는 서식지를 조성하는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “시화호 해양환경 개선사업 (BSPM 32900-1749-4)”의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사하여 주시고 좋은 의견을 주신 목포대학교 임현식 교수님과 한양대학교 한정호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

구분주 (2005). 방조제 공사 이후 시화호 내 염분 및 용존산소농도변화에 따른 대형저서동물의 장기변동, 시화호 환경생태 워크샵 논문집,

- 안산환경기술개발센터, pp. 31-40
- 박준건 (2003). 김은수, 조성록, 김경태, 박용철, 시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구, *Ocean and Polar research*, 25권, 4호, pp. 459-468
- 해양수산부 (2003). 시화호 해양환경 개선 사업, BSPM 226-00-1607-4, p. 498
- 해양수산부 (2004). 시화호 해양환경 개선 사업, BSPN 283-00-1674-4, p. 753
- 해양수산부 (2005). 시화호 해양환경 개선 사업, BSPM 329-00-1749-4, p. 686
- 현정호, 이홍금, 권개경 (2003). 해양환경의 황산염 조절요인 및 유기물 분해에 있어 황산염 환원의 중요성, 한국해양학회지 「바다」, 8권, 2호, pp. 210-224
- 홍재상, 정래홍, 서인수, 윤건택, 최병미, 유재원 (1997). 시화방조제의 건설은 저서동물군집의 사-공간적인 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가? 한국수산학회지, 30권, 5호, pp. 882-895
- Aller, R.C. and Aller, J.Y. (1992) Meiofauna and solute transport in marine muds, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 37, pp. 1018-1033
- Andersin (1978). A-B. Lassig, J., Parkkonen, L., and Sandler, H., The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and the Gulf of Finland, *Kiel Meeresforsch.*, Vol. 4, pp. 23-52
- Diaz, R.L. and Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, Vol. 33, pp. 245-303
- Furukawa, Y., Smith, A.C., Kostaka, J.E. (2004). Watkins, J., and Alexander, C.R., Quantification of macrobenthic effects on diagenesis using a multicomponent inverse model in salt marsh sediments, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 49, pp. 2058-2072
- Giordani, G., Bartoli, M., Cattadori, M., and Viaroli, M. (1996). Sulphide release from anoxic sediments in relation to iron availability and organic matter recalcitrance and its effects on inorganic phosphorus recycling, *Hydrobiol.*, Vol. 329, pp. 211-222
- Hagerman, L. (1998). Physiological flexibility; a necessity for life in anoxic and sulphidic habitats. *Hydrobiologia*, Vol. 375/376, pp. 241-254
- Han, M.W. and Park, Y.C. (1999). The development of anoxia in the artificial lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation. *Mar. Pol. Bull.*, Vol. 38, No. 12, pp. 1194-1199
- Jørgensen, B.B. (2000). "Bacterial and marine biogeochemistry." *Marine geochemistry*, Edited by Schulz, H.D. and Zabel, M., Springer, Berlin, pp. 173-207
- Koo, B.J., Kwon, K.K., and Hyun J.H. (2005). The sediment-water interface increment due to the complex burrows of macrofauna in a tidal flat, *Ocean Science Journal*, Vol. 40, No. 4, pp. 221-227
- Kristensen, E., and Kostka, J.E. (2005). "Macrofaunal burrows and irrigation in marine sediment: microbiological and biogeochemical interactions." *Interaction between Macro- and Microorganisms in Marine Sediments*, Edited by Kristensen, E., Kostka, J.E. and Haese, E., American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 390
- Laine, A.O., Sandler, H., Anderson, A-B. and Stigzelius, J. (1997). Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrographical regime, *J. Sea Research*, Vol. 38, pp. 135-159

- Modig, H. and Ólafsson, E. (2001). Survival and bioturbation of the amphipod *Monoporeia affinis* in sulphide-rich sediment, *Mar. Biol.*, Vol. 138, pp. 87–92
- Ólafsson, E. and Limen, H. (2002). Recovery of soft-bottoms after anoxic events: Laboratory experiments with the amphipod *Monoporeia affinis* from the Baltic Sea, *Ophelia*, Vol. 56, No. 2, pp. 121–134
- Rhoads, D.C. (1974). Organism sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, Vol. 12, pp. 263–300
- Tuominen, L., Makela, K., Lehtonen, K.K., Haahti, H. and Kuparinen, S. (1999). Nutrient fluxes, porewater profiles and denitrification in sediment influenced by algal sedimentation and bioturbation by *Monoporeia affinis*, *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, Vol. 49, pp. 83–97
- Visscher, P.T., Beukema, J. and Van Gemerden, H. (1991). In situ characterisation of sediments: measurements of oxygen and sulphide profiles with a novel combined needle electrode, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36, pp. 1476–1480
- Wetzel, M.A., Jensen, P. and Giere, O. (1995). Oxygen/sulfide regime and nematode fauna associated with *Arenicola marina* burrows: new insights in the thionios case, *Mar. Biol.*, Vol. 124, pp. 301–312
- Ziebis, W., Forster, S., Huettel, M. and Jørgensen, B.B. (1996). Complex burrows of the mud shrimp *Callinassa truncata* and their geochemical impact in the sea bed, *Nature*, Vol. 382, pp. 619–622