

## 국내산 저서 단각류를 이용한 퇴적물 독성시험법 개발에 관한 연구

이정석 · 이승민<sup>1</sup> · 박경수<sup>2,\*</sup>

(주)네오엔비즈 환경안전연구소

<sup>1</sup>국립수산과학원 서해수산연구소

<sup>2,\*</sup>안양대학교 해양생명공학과

### Development of Sediment Toxicity Test Protocols using Korean Indigenous Marine Benthic Amphipods

JUNG SUK LEE, SEUNG MIN LEE<sup>1</sup> AND GYUNG SOO PARK<sup>2,\*</sup>

*NeoEnBiz Co., Deawoo Technopark A-1306, Dodangdong, Bucheon, Kyeonggido 420-806, Korea*

<sup>1</sup>*Environment Research Division, West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea*

<sup>2,\*</sup>*Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Incheon 417-833, Korea*

본 논문은 저서 단각류를 이용한 해양생태독성시험법 개발을 위하여 국내에 분포하는 후보종을 이용하여 수행된 일련의 생태독성시험결과를 제시하고, 이에 근거하여 퇴적물 독성시험을 위한 표준 시험종과 방법을 제시하였다. 퇴적물 독성평가를 위한 시험종으로는 저서단각류인 *Mandibulophoxus mai*, *Monocorophium acherusicum* 그리고 여러 국내산 단각류를 이용하였다. 시험법 개발 및 표준화를 위한 시험항목으로는 퇴적물 입도, 수온, 염분 및 암모니아에 대한 내성범위를 파악하기 위한 실험과 카드뮴과 같은 중금속이나 PAHs와 같은 유기오염물질에 대한 민감도를 파악하기 위한 실험이 포함되었다. 시험 결과 두 종 모두 여러 환경요인에 대한 적합한 내성과 민감도를 갖고 있어 퇴적물 시험종으로서 활용이 가능한 것으로 나타났다. 최종적으로 이들 저서 단각류의 현장 적용성 평가를 위해서 다양한 오염도를 갖는 현장 퇴적물에서 10일간 노출한 이후 사망독성을 평가하고, 오염정도와 생물반응의 관계성 등을 분석하였다. 두 종을 비교한 결과, 민감도의 측면에서는 *M. mai*가, 시험생물 공급, 배양, 유지 및 실험수행의 편의성에서는 *M. acherusicum*이 상대적으로 뛰어난 것으로 나타났다. 하지만, 두 종 모두 10일간의 퇴적물 사망독성시험의 시험종으로서 충분한 적합성을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다. 본 연구결과는 향후 단각류를 이용한 퇴적물 공정시험법의 작성에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

A series of experiments were conducted to find standard test organisms and to develop test protocols for sediment toxicity tests using indigenous amphipods inhabited in Korean coastal environments. The indigenous amphipods *Mandibulophoxus mai* and *Monocorophium acherusicum* were well associated with various sediment substrates from sand to mud. The tolerance limits to various physico-chemical factors affecting bioassay results such as temperature, salinity and total ammonium as well as the sensitivities to contaminants in water and sediments were investigated using *M. mai* and *M. acherusicum* in the present study. These amphipods were tolerable to the adequate ranges of salinity (10~30 psu), temperature (10~25 °C) and ammonia (<50 ppm). They have relevant sensitivities to the reference toxicants, dissolved cadmium as well as other metals and organic pollutants, when compared to the standard test species used in other countries. Field-sediment toxicity tests revealed that *M. mai* would be more sensitive to sediment-associated pollutants than *M. acherusicum*, while the sensitivity of *M. acherusicum* was comparable to those of other sediment test species in other countries. Overall results of this first attempt to develop an amphipod sediment toxicity test protocol in Korea indicated that *M. mai* and *M. acherusicum* should be applicable in the toxicity assessment of contaminated sediments, following the further evaluation encompassing various ecological and toxicological evaluation and the standardization of test method.

**Keywords:** Sediment Toxicity Test, Standard Method, Amphipods, Bioassay, Indigenous Species

\*Corresponding author: gspark@anyang.ac.kr

## 서론

해양환경에서 저서퇴적물은 해양생물을 위한 서식지를 제공해주고, 표층해수로 유입되는 많은 난분해성 화학물질의 중요한 저장고이기도 하다. 잠재적 독성을 가진 유해화학물질은 용존상이나 입자상의 형태로 해양환경으로 유입되어 최종적으로 퇴적물에 축적된다. 따라서 퇴적물 오염은 우리나라를 비롯한 산업화된 국가의 연안환경에서 이미 광범위하게 진행되어온 현상으로 인식되고 있다 (Burton, 1992).

유해화학물질로 오염된 퇴적물은 수많은 해양 생태계 구성원과 궁극적으로는 인간에 대한 심각한 위협이 될 수 있다. 퇴적물내 오염물질은 저서생물과 그들을 먹이로 살아가는 어류 등 수많은 해양생물들 그리고 이들을 소비하는 인간에까지 차례로 전달되어 장기간에 걸쳐 그 유해영향이 발현될 수 있다. 따라서 최근 선진국들의 연안환경 관리계획의 핵심은 과거 육상에서 해양으로의 유해물질 유입량 저감에서 현재에는 오랫동안 오염이 축적되어온 연안 퇴적물을 어떻게 평가, 관리, 정화·복원할 수 있는 지로 점차 옮겨가고 있는 실정이다(USEPA, 1998).

선진국에서는 표준 시험생물을 직접 환경 및 유해물질 시료에 노출하여 그 영향을 평가하는 생물검정법(bioassay)을 다양하게 개발하여 해양환경 생태계의 건강성 평가를 위한 수단으로 폭넓게 이용되고 있다. 생물검정법은 환경매체(environmental media)에 존재하는 유해물질의 농도-영향 관계(concentration-effect relationship) 규명, 환경기준 작성 및 환경매체에 혼재하는 유해물질(chemical mixture)에 의한 생물영향 평가 등의 목적으로 이용되고 있다.

국내에서도 과거 해양환경의 유해물질 생물영향 평가를 위해 생물검정법이 도입되어 활용된 사례가 있었다. 하지만 대부분의 경우 해수(seawater)를 대상으로 한 평가였고, 해양 퇴적물을 평가 대상으로 한 연구는 1990년대 후반에 들어서야 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 현재는 단각류(amphipods)를 비롯하여, 성게(sea urchin), 발광미생물, 갯지렁이 등을 이용한 퇴적물 생물검정법이 도입·개발되어 퇴적물 자체(whole sediment) 또는 퇴적물의 일부 구성요소(porewater and organic extract)를 대상으로 유해성을 평가하는 데

에 이용되고 있다(과학기술부, 2001).

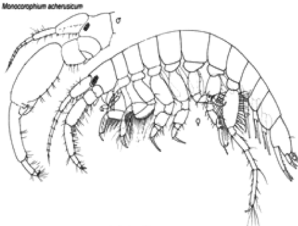
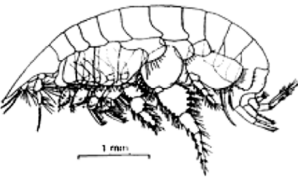
퇴적물 생물검정법 또는 독성시험(sediment toxicity test)의 활용 범위는 저서환경의 건강성 평가 및 퇴적물 생태독성 모니터링뿐만 아니라 퇴적물 환경기준의 작성, 정화·복원 계획의 수립, 준설물 평가, 해양 배출물의 평가, 사전·사후 환경영향평가 등 매우 광범위하다(USEPA, 1992; 1994; 1998). 특히 퇴적물 생물검정법의 결과는 경우에 따라서는 준설여부의 판단이나 준설물의 투기여부의 결정과 같은 사회경제적으로 영향이 큰 사업의 진행과정에 판단 기준으로 활용되는 경우가 많다. 하지만 생물 실험의 특성상 생물의 상태나 실험 조건에 따라서 시험 결과의 재현성이 영향을 받을 수 있기 때문에, 퇴적물 생물검정법을 이용하고 있는 선진국에서는 국가나 공인 기관에서 다양한 퇴적물 시험종에 대한 표준 시험방법과 프로토콜을 개발, 작성하여 민간 기업이나 대학, 연구소에서 이를 활용할 수 있도록 제시하고 있다(USEPA, 1994, 2000, 2001; ASTM, 1999).

하지만 국내에서는 아직까지 상기의 시험종을 이용한 퇴적물 독성시험방법에 대해서 공인된 표준화된 시험법이 작성되지 않아, 이들 시험법을 적극적으로 해양환경 평가에 활용하기에는 한계가 있는 실정이다. 따라서 본 연구팀은 세계적으로도 가장 널리 이용되는 퇴적물 시험생물인 저서 단각류(benthic amphipods)의 국내산 시험종에 대해서 시험종으로서의 적합성을 평가하였고, 국내산 시험종에 맞는 표준화된 시험조건을 파악하여 이에 근거한 시험법을 제시하기 위해 일련의 실험들을 수행하였다. 본 논문에서는 이러한 목적으로 수행되었던 여러 연구의 결과들을 요약하였고, 이에 근거하여 작성된 시험법의 특징과 내용에 대하여 간단하게 정리하여 제시하였다.

## 재료 및 방법

본 연구의 시험종인 저서 단각류 *Mandibulophoxus mai*는 시험 전에 충청남도 태안군 만리포와 천리포 모래사장에서 채집하였고, *Monocorophium acherusicum*은 (주)네오엔비즈 연구실에서 상시배양중인 시험개체를 이용하였다. 실험실에서 상시배양중인 *M. acherusicum*은 2003년 대부도 갯벌에서 채집한 이후 현재까지

**Table 1.** Description of candidate test species of Korean indigenous benthic amphipods

Species	Figure	Characteristic
<i>Monocorophium acherusicum</i> (A. Costa, 1851)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribution: costal areas of West and South Sea of Korea, and those of Australia, France, North America.</li> <li>- Habitat: intertidal mud flat, subtidal zone, and seaweed community, U-shaped tube builder composed of silk, mud and sand particles (NIMPIS, 2002).</li> <li>- Morphology: yellowish-brown in colour. morphological differences between males and females.</li> <li>- Ecology: Females brood embryos on their abdomen, which hatch out several crawling juveniles. Oviparous females found in summer but no seasonality in laboratory culture for breeding.</li> <li>- Phylogeny: Arthropoda - Crustacea - Malacostraca - Eumalacostraca - Peracarida - Amphipoda - Gammaridea - Corophiidae</li> </ul>
<i>Mandibulophoxus mai</i> (Jo, 1989)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribution: costal areas of West and South Sea of Korea and supposed to be Korean endemic species</li> <li>- Habitat: intertidal and subtidal sand, free burrowing infauna.</li> <li>- Morphology: white in color, pinkish during maturation. no distinct eye, no morphological difference between males and females.</li> <li>- Ecology: Females bearing ~20 eggs found from summer to early autumn in Taean, Korea.</li> <li>- Phylogeny : Arthropoda - Crustacea - Malacostraca - Eumalacostraca - Peracarida - Amphipoda - (Suborder) Gammaridea - (Family) Phoxocephalidae 일곱가시긴뿔옆새우 ( 환경부, 2006)</li> </ul>

**Table 2.** Summary of test conditions and test acceptability criteria for benthic amphipod survival test

Parameters	Test conditions
Test type	static non-renewal survival test
test duration	10 days
Temperature	20±1 °C
Salinity	30 psu
Photoperiods	Continuous
Light quality	“cool white” fluorescent lighting
Light intensity	500~1000 lux
Test chamber size	1-L glass beaker
Test sediment volume	175 mL (0.3-mm sieved sediment)
Dilution water	Filtered natural seawater
Seawater volume	800 mL
Initial density of test species	20 individuals
Number of replicates per concentration	4 or 5 (5 recommended)
Size of test organism	300-500 µm for <i>M. acherusicum</i> 1.0-2.0 µm for <i>M. mai</i>
Feeding regime	none
Aeration	none, unless DO falls below 80% in saturation value
Water quality measurement	measure water temperature, salinity, pH, DO and ammonia at 0, 5 and 10 th day of experiment
Endpoint	survival rates
Test acceptability criterion	90% or greater survival in controls

**Table 3.** Time schedule for 10 day - benthic amphipod survival test

Experiment days	Experimental contents
-10 days	1) collection or purchase of test organisms 2) acclimation of test organisms in glass beaker with sediment filtered with 300 µm mesh
-9 to -2 days	1) acclimation of test organisms under the test conditions 2) check the health conditions of test organisms
-1 day	1) distribute the test sediment in beaker 2) add overlying seawater with aeration
0 day	1) measure the water quality (temperature, salinity, pH, DO and ammonia) 2) distribute 20 individuals at each beaker 3) collect small amount of sediment in beaker to measure the total ammonia and sediment quality 4) remove the non-buried individuals after 3 hours and put new healthy individuals
1 to 9 days	1) exchange the overlying seawater after 5 days of experiment 2) check the behaviour of test organisms every day 3) re-bury the floating individuals by aeration 4) conduct reference toxicity test
10 days	1) Measure the overlying water quality 2) collect porewater to analyze total ammonium concentration 3) count the number of live organisms

계대배양을 실시하고 있다. 각 시험종의 분포, 생태 등 기존 문헌에서 파악된 정보에 대한 보다 자세한 설명은 Table 1에 제시하였고, 채집지역에 대한 정보는 Lee *et al.*(2005a)에 자세히 제시되어 있다.

실험에 이용한 해수는 인천 영흥도에 위치한 인천수산연구소에서 여과해수를 공급받아 이용하였다. 실험해수의 수질은 배양기간과 실험기간 전과정 동안에 항상 점검하였다. 퇴적물을 이용한 10 일간의 배양시험은 특별한 목적이 없는 한 모두 Table 2의 실험조건과 Table 3의 절차에 따라 실시하였다. 그리고 퇴적물 없이 해수만을 이용한 참조독성시험은 Table 4와 같은 조건에서 실시하였다.

기본 수질항목으로는 수온, 염분, pH, 용존산소 및 암모니아를

측정하였다. 온도, 염분 내성실험을 제외하면 중에 관계없이 모든 배양과 실험과정에서 수온은 20±1 °C, 염분은 30±1 psu, pH는 8.0±0.5, 용존산소는 >80%, 암모니아는 <1 mg·l<sup>-1</sup>를 유지하도록 하였다. 실험해수는 해수독성시험(water-only test)의 경우 폭기하지 않는 대신 매일 교환하였고, 퇴적물 독성시험의 경우 배양해수(overlying water)를 폭기하면서 5일에 한번 교환해 주었다.

배양 및 유해물질 첨가 실험(spiked sediment test)에는 모두 영종도와 강화도 갯벌의 오염되지 않은 지역에서 채취한 퇴적물을 300-mm 체로 걸러 굵은 입자를 제거한 다음에 기질(substrate)로서 이용하였다. 퇴적물의 인위적인 유해물질 첨가(sediment spiking)는 모두 기존의 연구 문헌과 프로토콜에 따라서 실시하였다(Lee *et al.*,

**Table 4.** Summary of test conditions and test acceptability criteria for water only test of benthic amphipod

Parameters	Test conditions
test type	static non-renewal survival test (water-only test)
test duration	4 days
reference toxic material	Cadmium ( adjust pH to neutral)
test concentrations	0 (Control), 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 5 mg·L <sup>-1</sup>
temperature	20±1 °C
salinity	30 psu
light quality	dark
test chamber	1-L glass beaker
dilution water	filtered natural seawater
seawater volume	1000 mL
aeration	none for daily renewal test, otherwise continuous aeration during test
number of individuals per test chamber	10 individuals
number of replicates per concentration	3
size of test organism	300~500 µm (sieve) for <i>M. acherusicum</i> 500~1000 µm (sieve) for <i>M. mai</i>
feeding regime	none
water quality measurement	measure water temperature, salinity, pH, DO and ammonia at 0 and 4 <sup>th</sup> day of experiment
endpoint	survival rates
test acceptability criteria	90% or greater survival in controls 96-h Cd LC <sub>50</sub> = 0.7~2.1 mg·l <sup>-1</sup> for <i>M. acherusicum</i> 96-h Cd LC <sub>50</sub> = 0.2~1.8 mg·l <sup>-1</sup> for <i>M. mai</i>

2000a, 2000b, 2001, 2004, 2005a; Lee and Lee 2005a; ASTM, 1994, 1999; USEPA, 1994).

본 논문에서 결과를 제시한 환경요인 내성 및 유해물질 민감도 파악 시험 및 현장 퇴적물 독성시험 방법에 대한 자세한 설명은 기존 문헌을 참조한다(Lee *et al.*, 2005a; 2005b; Lee and Lee, 2005b; 이 등, 2005; 국립환경과학원, 2006).

## 결 과

### 시험생물의 선정

#### 국내산 단각류의 분포 문헌 조사

본 연구에서는 단각류 퇴적물 독성시험에 적합한 시험종을 선정하기 위해서 여러 국내산 단각류에 대해 시험 적합도를 평가하는 일련의 조사 및 연구를 수행하였다. 그 과정에서 먼저 외국의 표준 시험종의 국내 서식여부를 파악하고자 하였다. 그러나 외국에서 이미 표준 시험종으로 이용되고 있는 *Leptocheirus plumulosus*, *Ampelisca abdita*, *Rhepoxynius abronius*, *Eohaustorius estuarius*, *Corophium volutator* 등의 저서단각류는 국내에 서식한다는 기록을 찾을 수 없었다(USEPA, 1994; Jo, 1989; Kator *et al.*, 2000; 김, 1986; 1991; 정, 2000). 다만 미국 서부의 일부지역에서 시험종으로 개발 중인 *Grandidierella japonica*는 국내 서식이 확인되었다(김, 1991).

국내산 단각류에 대한 문헌중에서 비교적 광역적인 분포에 대해 기재하고 있어 본 연구에서 조사한 문헌은 Jo(1989), 김(1991) 그리고 정(2000) 등이었다. 김(1991)은 78개 해안에서 채집된 단각류 약 80여 종을 기재하였다. 그리고 각 종의 분포 특징과 생태에 대한 개략적인 표를 제공하고 있다. 저자가 기재한 종(species)중에서 외국에서 표준화된 종과 유사종으로는 *Ampelisca brevicornis*, *A. misakensis*, *Corophium japonica*, *Grandidierella japonica*, *Eohaustorius longidactylus*, *E. setulosus* 등이 있었다. *Ampelisca* 종류는 대부분

를 포함한 경기도와 다른 서해안에서 채집되었다. *Corophium* 종류는 종에 따라 분포가 매우 다른 특징을 보였다.

*Corophiinae* 아과만을 분류하여 기재한 정(2000)은 기존에 *Corophium*으로 분류되던 종들을 *Sinocorophium*, *Monocorophium*, *Apocorophium* 등 세 종으로 나누어 분류하는 체계(Bousefield and Hoover, 1997)를 따라 *Corophiinae*에 속하는 총 8 종을 주로 서해안과 남해안 19개 지점에서 채집하여 기재하고 있다. 또한, *Corophium* 과 근연종인 *G. japonica*는 경기도와 전라남북도, 제주도에서 채집되었고, *Eohaustorius* 종류는 전라남북도와 경상남도, 충청남도에서 채집된 것으로 나타났다(김, 1991). 하지만 구체적인 채집위치나 서식밀도 등의 정보는 알 수 없었다. 전문가 자문과 본 연구진의 조사결과에 따르면 *G. japonica*는 최근 거제도, 영종도 등지에서 서식이 확인되고 있다.

서해안 사질조간대에서 출현한 저서 단각류 종을 기재한 Jo(1989)에 따르면 우리나라 연안의 모래 해안 서식 단각류는 모두 Dogielinotidae, Talitridae, Phoxocephalidae, Oedicerotidae, Haustoriidae 그리고 Urothoidea 등 6개 과(family) 중의 하나에 해당하였다. 가장 흔하게 채집된 종은 *Haustorioides koreanus*, *Trinorchestia longiramus*, *Mandibulophoxus mai*, *Monoculodes koreanus*와 *Urothoe* sp. 라고 보고하고 있다.

#### 국내산 단각류 생물검정법 문헌 조사

국내에서 최초로 저서 단각류를 이용한 퇴적물 독성시험법 개발에 관한 체계적인 문헌은 송(2001)으로서 서해안에서 채집한 *M. mai*의 시험생물 적합도 및 현장 적용성 등의 평가결과를 제시하고 있다. 저자에 따르면 *M. mai*는 니질과 사질 퇴적물을 모두 회피하지 않는 특성, 민감도, 취급 용이성 등에서 시험종으로서의 적합도를 어느 정도 만족하는 것으로 평가하고 있다(Table 1).

**시험법 개발을 위한 후보 시험종의 선정**

본 연구에서는 문헌조사와는 별도로 국내산 저서 단각류 시험종 개발을 위해서 충남의 8개 지점, 영종도 2개 지점, 대부도, 새만금, 강화도 각 1개 지점 등에서 단각류의 분포를 조사하고 채집을 실시하였다. 그 결과 충남에서는 *M. mai*, *M. koreanus*, *Haustorioides indivisus*, *H. koreanus*, *Urothoe* sp. 등의 생물이 대량 채집되었고, 영종도에서는 *G japonica*, 새만금에서는 *Sinocorophium* sp., 그리고 대부도에서는 *M. acherusicum*이 각각 채집되었다. 이들 채집된 생물들은 실험실로 옮겨져 퇴적물 시험생물로서의 적합성을 평가하기 위한 실험에 이용되었다(국립수산과학원, 2006). 따라서 이들 채집된 종을 이용하여 일련의 시험법 개발을 위한 실험을 실시하였다.

**시험생물의 적합성 평가(환경요인에 대한 내성)**

**퇴적물 입도별 선호도**

본 연구진은 퇴적물 시험생물로서의 적합성 평가는 일차적으로 퇴적물의 입도변화에 따른 선호도(퇴적물 내부로 파고 들어가는 특성)에 대한 평가로서, 10일간 니질, 사질 등 여러 입도 특성을 갖는 퇴적물에서 배양하면서 생존율과 함께 선호도를 조사하는 실험을 수행하였다(Lee et al., 2005a). 입도별 선호도 파악을 위하여 매일 1회 퇴적물을 벗어나 있는 개체의 비율을 조사하여 10일간의 평균 값(이하 평균 회피율)을 산출하였다. 시험결과 모든 입도에서 90% 이상의 생존율과 5% 이하의 평균 회피율을 보여 시험생물 후보종으로 파악된 종은 *M. mai*, *M. acherusicum* 등으로 나타났다(Table 5). 이들 시험생물 후보종에 대해서는 온도, 염분, 암모니아 등 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 환경 요인에 대한 평가를 실시하였다.

**온도 내성**

기존 연구에서 여러 수온 범위에서 10일간 퇴적물과 함께 배양한 결과 *M. mai*는 13~20 °C에서 생존율 100%, 22 °C에서 90%로 유의한 영향이 없었으나 25 °C에서는 80% 이하로 사망률이 다소 증가하였다(이 등, 2005). 단각류 *M. acherusicum*은 15~22 °C에서 유의한 생존율에 대한 영향이 없었고, 22~30 °C에서는 다소 생존율이 낮았으나 최고온에서도 80% 이상의 생존율을 보여 고온에 대

한 내성은 강한 것으로 나타났다. 하지만 5 °C의 저온에서는 생존율이 20%대로 감소하였다. 개체별 무게는 온도가 증가함에 따라 증가하여 25 °C에서 가장 크게 나타났지만 30 °C에서는 감소하여 고온에 의한 스트레스가 이 온도에서는 성장에 대한 영향으로 나타날 수 있음을 알 수 있었다.

단각류 시험종 *G japonica*의 경우 15 °C와 20 °C에서 개체 크기 및 먹이량에 따른 생존율 영향 실험을 실시하였는데, 먹이가 적고 개체크기가 큰 실험구에서 생존율이 70%로 낮아지는 현상이 관찰되었다. 이를 통해 *G japonica*는 먹이가 부족할 경우 동종포식(cannibalism)의 습성이 있는 것으로 추정되었고, 실제 육안관찰을 통해서 배양중인 생물들간의 동종포식이 종종 관찰됨을 알 수 있어, 퇴적물 시험종으로서 이용하기 위해서는 동종포식이 나타나지 않는 시험 조건에 대한 탐색이 필요함을 알 수 있었다.

**염분 내성**

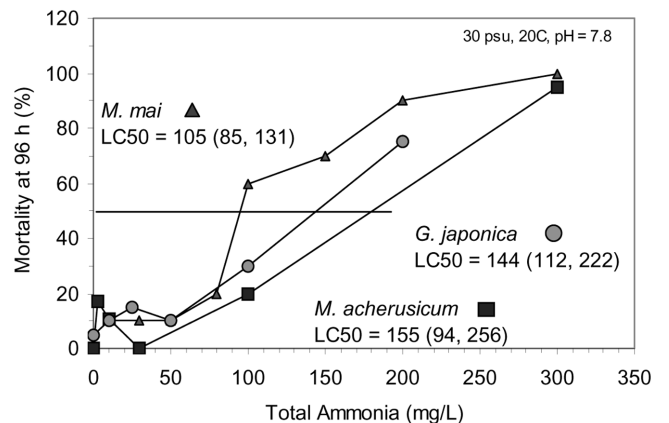
기존 연구에서 여러 염분의 해수에서 10일간 퇴적물과 함께 배양한 이후 생존율을 비교한 결과 *M. mai*는 15~35 psu, *M. acherusicum*은 15~40 psu 범위에서 유의한 생존율의 차이가 나타나지 않았다(Lee et al., 2005a). 하지만 10 psu에서는 두 종 모두 80% 이하로, 5 psu에서는 40% 내외로, 그리고 1 psu에서는 0%로 생존율이 감소하였다.

**암모니아 내성**

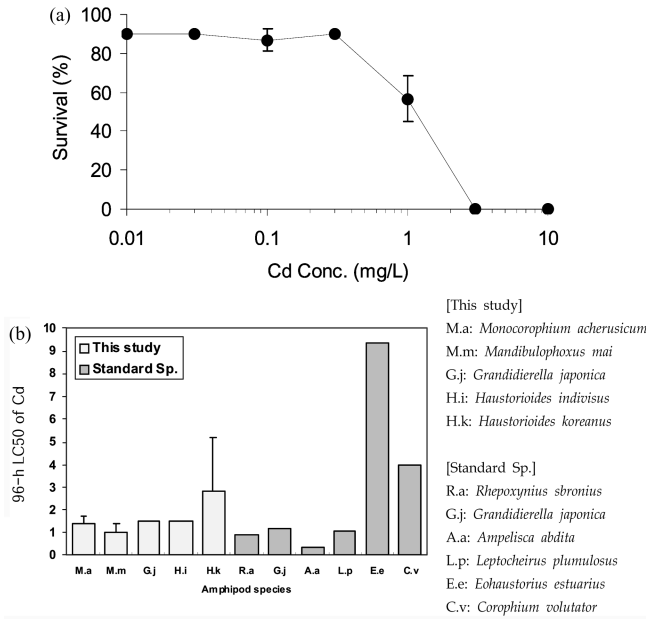
여러 암모니아 농도로 준비된 해수에서 *M. mai*, *M. acherusicum*, 그리고 *G japonica*를 4일간 퇴적물 없이 배양한 이후 각 농도별 생존율을 비교하여 농도-영향 관계를 규명하였다(Fig. 1). 시험결과 총 암모니아농도(total ammonium)가 50 mg·l<sup>-1</sup> 이하인 경우에는 세 종 모두 유의미한 사망이 관찰되지 않았지만 그 이상의 농도에서는 사망률이 농도와 비례하여 증가하는 특징을 보였다. 반수가 영향을 받을 수 있는 농도는 *M. mai*>*G japonica*>*M. acherusicum*의 순으로 증가하여 *M. acherusicum*이 암모니아 내성이 가장 큰 것으로 나타났다.

**Table 5.** Avoidance and survival rates of four benthic amphipod species, *Haustorioides koreanus* (Hk), *Mandibulophoxus mai* (Mm), *Haustorioides indivisus* (Hi) and *Monocorophium acherusicum* (Ma) exposed to various sediment types for 10 days.

Species	Sediment type (mud content)	Mean avoidance (%)	Mean survival (%)
Hk	Sand (0.1%)	0.0	95
Hk	Muddy sand (45.9%)	47.1	80
Hk	Mud (99.5%)	86.3	95
Mm	Sand (0.1%)	0.0	95
Mm	Muddy sand (45.9%)	5.2	90
Mm	Mud (99.5%)	6.3	88
Hi	Sand (0.1%)	6.3	95
Hi	Muddy sand (45.9%)	8.8	95
Hi	Mud (99.5%)	9.0	90
Ma	Sand (0.1%)	0.0	90
Ma	Muddy sand (45.9%)	0.0	93
Ma	Mud (99.5%)	0.0	93



**Fig. 1.** Comparison of mortalities of three benthic amphipod species, *Mandibulophoxus mai*, *Monocorophium acherusicum* and *Grandidierella japonica* exposed to various total ammonium concentrations in seawater.



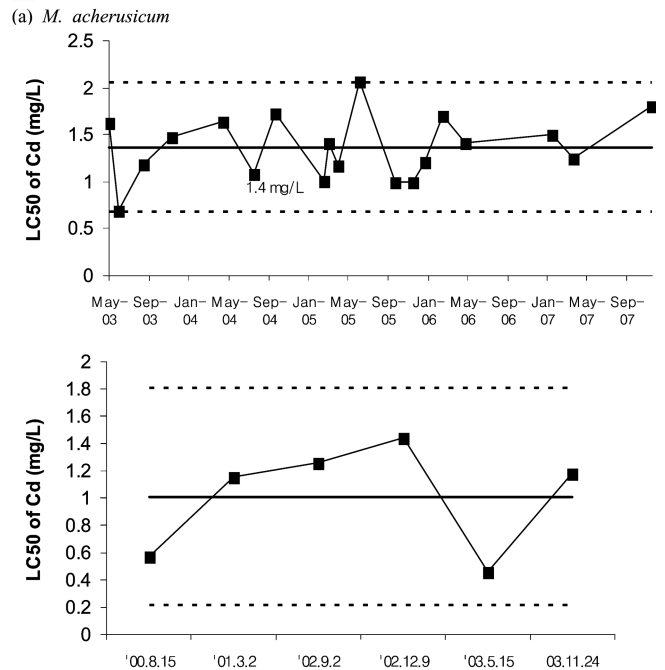
**Fig. 2.** (a) Survival rates of *Monocorophium acherusicum* exposed to various ranges of dissolved Cd concentrations in seawater. (b) Comparison of 96-h LC<sub>50</sub> of Cd (mg·l<sup>-1</sup>) among various benthic amphipods including indigenous species and standard test species in other countries.

**시험생물 적합성 평가(유해물질에 대한 민감도) 참조독성물질(용존 카드뮴)에 대한 영향**

단각류를 이용한 독성시험에서 양성 대조구(positive control)로 가장 많이 이용하는 유해물질은 카드뮴(Cd)이다. 본 연구에서도 국내산 단각류 *M. mai*, *M. acherusicum*, *G. japonica*, *H. indivisus*, *H. koreanus* 등 5종에 대해서 용존 Cd에 대한 4일간의 급성독성시험을 퇴적물 없이 실시하였고, 그 결과를 다른 해외 표준 시험종 결과와 비교하였다(Fig. 2). 시험결과 각 시험종의 Cd 농도별 생존율은 Fig. 2의 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 일정 농도까지는 생존율의 영향이 나타나지 않다가, 1~3 mg·l<sup>-1</sup>에서 생존율이 크게 감소하기 시작하여 10 mg·l<sup>-1</sup> 이상에서는 대부분의 개체가 사망하는 농도-영향 관계를 보였다. 이러한 관계를 통해 각 종별로 용존 Cd에 대한 96시간 반수사망농도(96 h-LC<sub>50</sub>)는 본 연구에서는 *M. mai*가 1.0 mg·l<sup>-1</sup>로 가장 낮았고, *H. koreanus*가 약 3 mg·l<sup>-1</sup>으로 가장 높았다. 해외 표준 시험종의 경우 *A. abdita*가 0.3 mg·l<sup>-1</sup>로 가장 민감한 종으로 나타났고, *E. estuarius*가 9 mg·l<sup>-1</sup>으로 가장 둔감한 종으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 이용한 국내산 단각류 종들의 민감도는 해외 표준 시험종의 민감도 범위내에 포함되는 것으로 국내산 종간의 민감도 변이는 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

**민감도의 시기별 변화**

독성시험생물로 이용되기 위해서는 가급적 시험 시기에 상관없이 일정한 생물 상태를 유지하는 것이 중요하다. 특히 유해물질에 대한 민감도가 시기별로 일정하게 유지되어야만 충분한 재현성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 *M. acherusicum*과 *M. mai* 두 종의 용존 Cd에 대한 민감도의 시기별 변이를 다년간 조사하여 왔다(Fig. 3). *M. acherusicum*의 용존 Cd에 대한 96h-LC<sub>50</sub>는 조사시기



**Fig. 3.** Temporal variation of 96-h LC<sub>50</sub> of dissolved Cd for (a) *Monocorophium acherusicum* and (b) *Mandibulophoxus mai* exposed to various concentrations of Cd in seawater. Horizontal solid line indicates the mean of LC<sub>50</sub> values and dashed lines indicate upper and lower limit of 95% confidence interval, respectively.

에 따라 0.7~2.1 mg·l<sup>-1</sup>의 범위에서 변화하여 평균 1.4 mg·l<sup>-1</sup>, 표준편차는 0.35 mg·l<sup>-1</sup>이었다. *M. mai*의 경우 시험시기별로 용존 Cd에 대한 LC<sub>50</sub>는 0.5~1.4 mg·l<sup>-1</sup> 범위에서 변화하였고 평균 1.0 mg·l<sup>-1</sup>, 표준편차는 0.4 mg·l<sup>-1</sup>로 나타났다.

일반적으로 유해물질 민감도의 시험생물 적합도 기준(acceptability criteria)은 기존 시험결과와 평균±표준편차의 2배(mean±2·SD)로 정하고, 개별 시험에서 항상 참조독성물질에 대한 민감도 시험을 실시하여 그 결과가 상기 범위내에 포함되지 않을 경우 시험생물의 민감도가 적합하지 않은 것으로 판단하여 재실험을 실시하도록 하고 있다(USEPA, 1994). 이러한 기준에 따르면 Cd 민감도 적합도 범위는 *M. acherusicum*의 경우 0.7~2.1 mg·l<sup>-1</sup>, *M. mai*의 경우에는 0.2~1.8 mg·l<sup>-1</sup>로 정할 수 있다.

**다양한 유해물질에 대한 민감도**

국내산 단각류 *M. acherusicum*의 용존 Cd, Cu, Hg, TBT 및 phenanthrene에 대한 급성독성 영향 및 지연독성(latent toxicity)에 대한 연구 결과 이 종은 다양한 종류의 유해물질에 대해서 일반적인 농도-영향 관계를 보여 반수치사농도의 산출이 가능하였다. 이 종은 TBT에 대해 가장 민감하였고(9.7 µg·l<sup>-1</sup>, 96 h-LC<sub>50</sub>), 수은(26 µg·l<sup>-1</sup>), phenanthrene(0.23 mg·l<sup>-1</sup>), 구리(0.25 mg·l<sup>-1</sup>), 카드뮴(0.7 mg·l<sup>-1</sup>) 순으로 증가하였다(Lee and Lee, 2005b). 하지만 96시간의 노출이 종료되고, 이후 오염되지 않은 해수로 옮겨 6일간 더 배양한 이후까지의 관찰결과 카드뮴, 수은 등은 지연독성이 크지 않았으나 phenanthrene 등은 상대적으로 크게 나타나 물질의 특성에 따라서는 급성 노출에 따른 조직 손상 등으로 인하여 노출 종료 이후에

도 지속적인 유해 영향이 발현될 수 있음을 보여주었다.

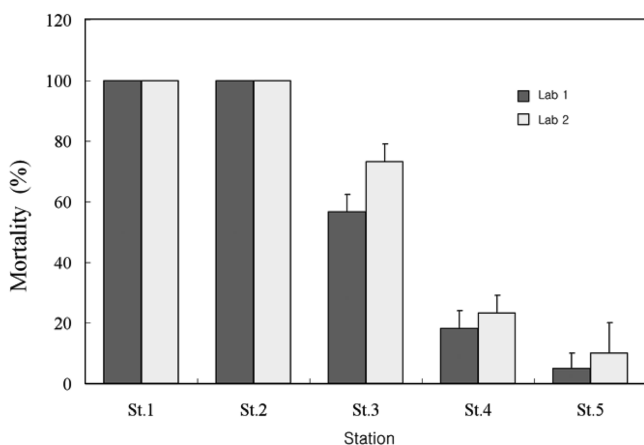
또한 *M. mai*의 경우에도 용존 Cu, Ni, Hg 등 여러 중금속에 대해 일반적인 농도-영향 관계를 보였고, *G. japonica*의 경우 Ag, Cd, Cu, Hg 등 중금속과 TBT, 그리고 Acenaphthene, Phenanthrene, Fluoranthene, Fluorene, Naphthalene, Pyrene 등의 방향성 탄화수소 (PAHs)에 대해서 전형적인 농도-시간-영향 관계를 보이는 것으로 나타났다(Lee et al., 2005b).

**시험생물 적합성 평가(현장 오염퇴적물 적용)**

단각류 *M. mai*는 울산만, 온산만, 마산만, 영일만, 시화호, 광양만 등 여러 지역에서 현장 퇴적물 급성 독성 시험에 활용된 바 있다(송, 2001; 과학기술부, 2001). 시험 결과 퇴적물의 중금속 농도 등 오염도와 육상 오염원과의 근접성이 단각류의 사망률과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 파악되었다.

단각류 *M. acherusicum*은 시화호, 온산만, 태안 등의 현장 퇴적물과 준설물, 해양배출물, 방오도로, 발라스트수, 슬래그 등의 다양한 시료에 대한 독성평가에 활용된 바 있다. 본 논문에서는 (주)네오엔비즈 연구팀과 서해수산연구소에서 *M. acherusicum*을 이용하여 각각 수행한 온산만 퇴적물 독성시험 결과를 제시하였다. 온산만 대정천 하류에서 채취한 5개 정점중에서 #1가 육지쪽, #5는 해양쪽에 가장 가까운 정점으로 오염원에 가까울수록 단각류의 생존율이 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 4). 또한 정점 #1, #2의 경우 원시료에서의 사망률과 50% 희석된 시료에서의 사망률이 모두 매우 높았는데, 10%로 희석된 시료에서는 사망률이 다소 감소하여 3% 희석된 시료에서는 40%내외의 사망률을 보여, 희석농도와 사망률간의 뚜렷한 상관성을 보여주었고, 이와 같은 경향은 두 기관의 시험 결과에서 공통적으로 나타났다(국립수산과학원, 2006).

이는 오염되지 않은 퇴적물로 희석됨에 따라 퇴적물의 오염농도는 비례하여 감소하고 이에따라 단각류의 사망률도 감소하는 농도-영향 관계가 현장 오염퇴적물에 대해서도 잘 나타남을 보여주는 결과이다. 또한 두 실험실에서 각기 독립적으로 수행한 독성시험의 결과가 전체적으로 매우 유사한 경향성을 보여, 잠재적으로 시험법의 활용성이 큰 것으로 판단할 수 있었다.



**Fig. 4.** Mortalities of *Monocorophium acherusicum* exposed to estuarine and marine sediments collected near Onsan Industrial Complex for a round robin test between two laboratories (West Sea Fisheries Research Institute and NeoEnBiz Co).

**시험방법의 선정**

저서 단각류를 이용한 공정시험방법은 USEPA(1994), ASTM (1999) 그리고 ISO (2005)에서 채택하고 있는 “저서단각류 10일 퇴적물 독성시험방법(benthic amphipod 10-d sediment toxicity test)”을 기반으로 작성되었다. 상기의 표준 시험방법은 모두 현장 또는 실험실에서 준비된 퇴적물을 1리터 비이커에 넣고 그 위에 약 1:4의 비율로 배양수(overlying water)를 부은 후 안정화시키고, 여기에 시험생물을 첨가한 다음 10일간 배양·노출시킨 이후에 생존·사망한 개체의 비율을 측정항목(end point)로 하는 기본적인 시험절차를 공유하고 있다.

단각류를 이용한 퇴적물 표준 시험방법의 특징으로는 첫째, 퇴적물내 유해물질과 시험생물간의 접촉을 극대화하기 위해 퇴적물과 배양수의 비율을 약 1:4 내외로 유지하고, 배양수를 정수식(static system)으로, 즉 원칙적으로 노출기간동안 배양수의 교환없이 시험을 수행하며, 노출기간 중 시험생물의 퇴적물 회피여부를 관찰하여 결과에 반영하도록 한다는 점, 둘째, 노출기간 중에는 용존 산소를 충분한 수준으로 유지하기 위해 연속적으로 폭기(aeration)를 실시한다는 점, 셋째, 퇴적물에 내재하는 암모니아 영향을 줄이기 위해 노출시작 전에 배양수를 넣고 폭기를 실시한 다음 배양수 교환을 1회 이상 실시하도록 한다는 점, 넷째, 시험에 일정 크기의 표준체로 걸러진 퇴적물을 이용하여 시험 종료후 시험생물의 회수를 용이하게 할 수 있도록 한다는 점, 다섯째, 노출 기간동안 생물에 영향을 미칠 수 있는 수질항목인 수온, 염분, pH, 용존산소농도 및 암모니아농도를 모니터링한다는 점, 마지막으로 매 시험마다 음성대조구(negative control)와 양성대조구(positive control)를 두어 시험생물의 건강성과 민감도를 점검하여 시험결과의 신뢰도를 높이고자 한다는 점 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 국제 표준 시험법을 기반으로 국내산 단각류 시험종을 이용하여 실시할 수 있도록 개량된 퇴적물 독성 공정시험방법과 절차를 요약하여 아래에 제시하였다(Table 2~4).

**가. 시험생물 준비:** 시험생물은 채집 또는 배양을 통해 공급할 수 있다. 종에 따라서는 채집을 통한 공급만이 가능할 수도 있고, 채집과 배양을 통한 공급이 모두 가능할 수도 있다. 채집을 통해 시험생물을 공급하는 경우 현장에서 채집된 개체들을 실험실로 옮겨 최소 일주일 이상 순치(acclimation)한 이후에 시험에 이용하는 것이 바람직하다. 순치과정 중에는 현장에서 시험생물과 함께 채취한 퇴적물을 기질로 하고, 미세조류(microalgae)나 곱게 간 어류사료를 먹이로 공급하여 시험생물의 건강을 최대한 유지할 수 있도록 한다. 실험실에서 배양하고 있는 개체를 이용하는 경우 이미 충분히 순치되어 있는 상태이므로 시험 직전에 배양 수조에서 건강한 개체들을 골라 시험에 이용한다.

시험생물의 공급 방법과 상관없이 시험에 이용할 개체들은 일정한 크기 및 건강성과 민감도를 갖고 있어야 한다. 시험에 이용할 개체들을 선별하기 위해서는 표준체를 이용한다. *M. acherusicum*의 경우 500- $\mu$ m 망은 통과하지만 300- $\mu$ m 망은 통과하지 못하는 개체들을, *M. mai*의 경우 1-mm 망은 통과하되 500- $\mu$ m 망은 통과하지 못하는 개체들을 선별하여 시험에 이용하도록 한다. 이처럼 종에 따라 다른 크기 그룹을 선별하는 것은 이와 같은 절차가 크기 자체가 아닌 각 종의 미성숙 단계(immature stage)의 개체를 선별하는 것을 목적으로 하기 때문이다. 성숙 단계의 개체들은 민감

도의 변이가 크고, 자연 사망률이 높으며, 시험기간 중 산란의 가능성이 있기 때문에 원칙적으로 시험생물로서 배제하도록 하고 있다.

**나. 시험 퇴적물의 준비:** 현장 퇴적물 또는 실험실에서 준비된 퇴적물은 모두 사전에 300- $\mu$ m 표준체를 이용하여 굵은 입자가 제거된 상태로 시험에 이용하여야 한다. 굵은 입자의 제거는 노출기간 이후 생존개체의 회수를 용이하게 할 뿐만 아니라, 시험목적상 굵은 입자, 자갈, 생물잔해 등은 제거될 필요가 있다.

현장 퇴적물 평가는 원칙적으로 채집된 퇴적물을 희석하지 않고 그대로 이용한다. 하지만 반수 영향 농도 산출 등 필요에 따라서는 오염되지 않은 퇴적물과 일정한 비율(e.g. 50, 25, 12.5% 등)로 희석하여 원래의 퇴적물(100%)과 함께 시험에 이용할 수 있다. 유해물질을 인위적으로 첨가한 퇴적물(spiked sediment)의 경우 첨가된 유해물질의 농도별로 실험구를 정하여 시험을 실시한다.

**다. 실험 비이커의 준비:** 적정량의 퇴적물을 먼저 비이커에 넣고 퇴적물이 교란되지 않도록 배양 해수를 천천히 붓는다. 퇴적물과 해수가 완전히 분리되어 안정화될 때까지 기다린 다음 배양수의 암모니아 농도를 측정하여, 일정 기준(1 mM) 이상인 경우 배양수 폭기 및 교환을 실시하여 암모니아 농도가 기준 이하가 되도록 한 이후에 시험생물 노출을 시작한다.

**라. 독성실험:** 각 실험구별 반복수는 최소 4 반복 이상으로 하되, 5 반복을 권고한다. 시험개체수는 각 반복구 별로 20개체를 투입하도록 한다. 시험 시작 직전과 중간, 그리고 종료 직후에 일반 수질 항목을 측정하여 기준 범위 만족 여부를 확인한다(Table 2). 시험기간 동안에는 매일 1회이상 시험 비이커를 관찰하여 이상 유무를 확인하고 퇴적물을 회피하는 개체가 있는 경우 회피개체수를 기록한다. 회피율은 일일평균 회피개체수를 투입한 개체수로 나눈 비율로서 산출한다.

**마. 실험의 종료:** 10일간의 시험기간이 종료하면 비이커의 배양수와 퇴적물을 잘 혼합하여 300- $\mu$ m 표준체에 천천히 부으면서 생존개체를 회수한다. 회수되지 못한 개체의 확인을 위해서 가급적 체를 통과한 퇴적물과 해수는 시험이 완전히 종료하기 전까지는 별도로 보관한다. 회수된 생존 개체수와 투입 개체수의 비율을 이용하여 생존율을 산출한다. 회수되지 못하였거나 죽은 상태로 회수된 개체는 모두 사망한 개체로 간주하여 사망률을 산출한다(Table 3).

**바. 음성대조구, 참조퇴적물 및 양성대조구:** 모든 시험에는 음성대조구와 양성대조구를 포함하도록 한다. 음성대조구로는 시험생물이 살기가 가장 적합한 특성을 가진 퇴적물(예를 들면, 시험생물 채집지역의 퇴적물)을 이용한다. 음성대조구의 투입 목적은 시험과정에서 시험생물의 건강 정도를 평가하기 위한 것으로 음성대조구에서의 생존율은 반드시 90% 이상이 되어야 한다.

참조퇴적물(reference sediment)은 시험대상 퇴적물들의 특성을 공유하면서 오염이 되지 않은 퇴적물로서 통상 현장 퇴적물의 경우 채집 지역에서 가장 오염원에서 가장 멀리 떨어진 점점의 퇴적물을 이용한다. 인위적 오염 퇴적물에 대한 참조퇴적물로는 유해물질을 첨가하지 않은 퇴적물을 이용한다. 참조퇴적물에서의 생존율은 다른 실험구의 생존율과 통계적으로 비교하여 유의성을 검정하는 기준이 되는 매우 중요한 결과이다.

양성대조구는 시험생물의 민감도의 적절성을 평가하기위한 것으로 통상 실험생물을 용존 카드뮴(dissolved Cd)에 4일간 노출하여 반수영향농도(LC<sub>50</sub>)를 산출하여 적합성 기준범위와 비교한다(Table 4).

**사. 자료분석:** 현장퇴적물의 경우 참조퇴적물의 생존율과 각 실험구의 생존율 간에 t 검정(Student's t-test)를 실시하여 유의성 검정을 실시한다. 인위적 오염퇴적물의 경우 참조퇴적물과 유해물질 농도별 실험구의 생존율 간에 Dunnett's test를 실시하여 최대무영향농도(No Observed Effect Concentration; NOEC) 및 최저영향농도(Lowest Observed Effect Concentration; LOEC)을 산출한다. 양성대조구 및 인위적 오염퇴적물의 농도별 반수치사농도(LC<sub>50</sub>)는 자료의 특성을 고려하여 Graphic method, Probit method, Spearman-Kärber method 또는 Trimmed spearman-Kärber method를 이용한다(USEPA, 1994).

## 고 찰

국내산 단각류 *M. mai*는 1999년 이후, *M. acherusicum*은 2003년 이후 퇴적물 시험종으로 선정되어 환경요인 내성범위 파악 및 유해물질 민감도 시험 등 적합성 평가를 실시하여 왔고, 이후 현장 퇴적물 및 고형시료 오염에 대한 반응성을 평가할 수 있는 여러 실험에 이용되어 왔다. 그 결과 두 종은 염분, 온도, 입도, 암모니아 등 환경요인에 대한 적절한 내성 범위를 갖고 있을 뿐만 아니라, 다른 해외 표준 시험종과 유사한 유해화학물질들에 대한 민감도를 갖고 있고, 민감도의 시기별 변이도 크지 않아 시험생물로서 기본적인 적합성을 보이는 것으로 평가할 수 있다.

이에 따라 기존 단각류 퇴적물 표준 시험법은 USEPA(1994)를 준용하되, 국내산 종의 특성을 반영한 시험조건을 Table 2~4와 같이 작성하여 현장 퇴적물 평가에 활용한 결과 현장 퇴적물의 복합 유해물질의 영향을 규명한다고 볼 수 있는 충분한 조사 결과가 축적되어 왔다. 물론 본 논문에서 제시한 단각류의 퇴적물 독성시험법은 10일간의 단기 노출 영향을 반영하므로 다른 만성 시험법에 비해 다소 민감도가 낮을 수 있지만, 본 시험법은 전 세계적으로 퇴적물의 독성 시험평가에서 가장 널리 이용될 뿐만 아니라, 가장 기본적인 시험법으로 인식되고 있다. 따라서 국내에서도 본 시험법의 퇴적물 유해물질 오염에 의한 생물영향 신속 스크리닝이라는 목적에 따라 보다 널리 활용될 필요가 있다.

이와 같은 결과들을 통해 상기 국내산 단각류 *M. mai*와 *M. acherusicum*은 향후 보다 다양한 현장 평가에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 상기의 두 시험종 이외에도 시험생물로서의 적절성이 충분히 평가된 다른 시험종도 보다 활발하게 개발되어 본 시험법의 활용도를 더욱 확대할 필요가 있다. 하지만 아직까지 *G. japonica*를 비롯하여 다른 국내산 종을 이용한 현장 오염퇴적물 평가가 일부 수행되어 왔으나, 이들 중에 대해서는 향후 최적의 시험법 개발 및 현장 적용성 평가를 위한 여러 연구가 수행되어 다양한 시험종을 확보할 필요가 있다. 또한 단각류를 이용한 만성 시험법이 국내에서도 표준화되어 기준작성, 정밀생태영향 및 위해성평가 등에 활용될 수 있도록 추가적인 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2008-ME-030)의 지원에 의해 운영되었습니다. 논문의 부족한 점을 개선할 수 있도록 고견을 주신 심사위원장님과 한국해양연구원의 최진우 박사님께 감사드립니다.



또한 연구와 실험을 함께한 (주)네오엔비즈의 이규태 박사와 김찬국, 문성대 연구원에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 과학기술부, 2001. 연안 저서환경 평가기술, 서울대학교.
- 국립수산과학원, 2006. 연안환경 평가관리 연구.
- 김창배, 1986, “한국해산 열새우류의 분류학적 연구”, 서울대학교 석사논문.
- 김창배, 1991, “한국해산 열새우류의 계통분류학적 연구”, 서울대학교 박사논문.
- 이규태, 이정석, 김동훈, 김찬국, 박진호, 강성길, 박경수, 2005. “국내산 저서 단각류 *Mandibulophoxus mai*와 *Monocorophium acherusicum*의 생존, 성장 및 민감도에 대한 온도의 영향, 한국해양환경공학회지, **8**: 9-16.
- 정종우, 2000. “A taxonomic study on the subfamily corophiinae (Crustacea: Amphipoda: Corophiidae) of Korea”, 서울대학교 석사논문.
- 송경준, 2001. “A study on the sediment bioassay using the Korean Amphipod *Mandibulophoxus mai* Jo”, 서울대학교 석사논문.
- 환경부, 2006, 한국고유생물종도감 (무척추동물 I).
- ASTM, 1994. “Collection, storage, characterization and manipulation of sediments for toxicological testing”. American Society for Testing and Materials, E1391-94.
- ASTM, 1999. “Conducting 10-day static sediment toxicity tests with marine and estuarine amphipods”. American Society for Testing and Materials, E1367-99.
- Bousfield, E.L., 1973. Shallow-water gammaridean Amphipoda of New England. Ithaca and London, Cornell University press.
- Bousefield, E.L. and P.M. Hoover, 1997. The Amphipod Superfamily Corophioidea on the Pacific Coast of North America. Part V. Family Corophiidae: Corophiinae, New Subfamily. Systematics and Distributional Ecology. *Amphipacifica*, **2**(3): 67-140.
- Burton, G.A. 1992. Sediment toxicity assessment. Lewis Publishers, INC., Chelsea. 457 p.
- ISO, 2005. Water quality - Determination of acute toxicity of marine or estuarine sediment to amphipods. International Organization for Standardization. ISO 16712:2005.
- Jo, Y.W., 1989. Shallow-water phoxocephalid Amphipod (Crustacea) of Korea. *Bijdragen tot de Dierkunde*, **59**(2): 97-125.
- Lee, B.G., S.B. Griscom, J.S. Lee, H.J. Choi, C.H. Koh, S.N. Luoma and N.S. Fisher, 2000a. Influence of dietary uptake and acid-volatile sulfide on the bioavailability of metals to sediment dwelling organisms. *Science*, **287**: 282-284.
- Lee, J.S., B.G. Lee, H.J. Choi, S.N. Luoma, C.H. Koh and C.L. Brown, 2000b. Influence of acid-volatile sulfide on the metal partitioning and bioavailability in contaminated sediments: metal partitioning. *Environ. Sci. Tech.*, **34**: 4511-4516.
- Lee, J.S., B.G. Lee, H. Yoo, S.N. Luoma and C.H. Koh, 2001. Influence of reactive sulfide (AVS) and supplementary food on Ag, Cd and Zn bioaccumulation in the marine polychaete, *Neanthes arenaceodentata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **216**: 129-140.
- Lee, J.S., B.G. Lee, S.N. Luoma and H. Yoo, 2004. Importance of equilibration time in the partitioning and toxicity of zinc in spiked sediment bioassays. *Environ. Toxicol. Chem.*, **23**: 65-71.
- Lee, J.S., K.T. Lee, D.H. Kim, C.K. Kim, J.H. Lee, K.H. Park and G.S. Park, 2005a. Application of indigenous benthic amphipods as sediment toxicity testing organisms. *Ocean Science Journal*, **40**: 17-24.
- Lee, J.S., K.T. Lee and G.S. Park, 2005b. Acute toxicity of heavy metals, tributyltin, ammonia and polycyclic aromatic hydrocarbons to benthic amphipod *Grandidierella japonica*. *Ocean Science Journal*, **40**: 61-66.
- Lee, J.S. and J.H. Lee, 2005a. Influence of acid volatile sulfides and simultaneously extracted metals on the bioavailability and toxicity of a mixture of sediment-associated Cd, Ni, and Zn to polychaetes *Neanthes arenaceodentata*. *Sci. Tot. Environ.*, **338**: 229-241.
- Lee, J.S. and K.T. Lee, 2005b. Delayed Mortality of Benthic Amphipods *Monocorophium acherusicum* Exposed to Various Pollutants in Seawater (Cd, Cu, Hg, TBT, Ammonia and Phenanthrene). *J. Environ. Toxicol.*, **20**: 133-141.
- NIMPIS 2002. *Monocorophium acherusicum* species summary. National Introduced Marine Pest Information System (Eds: Hewitt C.L., Martin R.B., Sliwa C., McEnulty F.R., Murphy N.E., Jones T. & Cooper S.).
- USEPA, 1992. “Evaluating Environmental Effects of Dredged Material Management Alternatives”, Office of Water, EPA-842-92-008.
- USEPA, 1994. “Methods for assessing the toxicity of sediment-associated contaminants with estuarine and marine amphipods”, Office of Research and Development, EPA 600/R-94/025.
- USEPA, 1998. “EPA’s Contaminated Sediment Management Strategy”, Office of Water, EPA-823-R-98-001.
- USEPA, 2000. “Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates (2nd ed.)”, Office of Research and Development, EPA 600/R-99/064.
- USEPA, 2001, “Method for assessing the chronic toxicity of marine and estuarine sediment-associated contaminants with the amphipod *Leptocheirus plumulosus*”, Office of Research and Development, EPA 600/R-01/020.

2008년 5월 8일 원고접수

2008년 5월 13일 수정본 채택

담당편집위원: 이창훈