

부유물질증가에 따른 저서성 해양생물의 독성평가에 관한 연구

윤성진 · 박경수*

안양대학교 해양생명공학과

(2011년 1월 3일 접수; 2011년 6월 13일 수정; 2011년 10월 7일 채택)

Ecotoxicological Effects of the Increased Suspended Solids on Marine Benthic Organisms

Sung Jin Yoon, Gyung Soo Park*

Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Incheon 417-833, Korea

(Manuscript received 3 January, 2011; revised 13 June, 2011; accepted 7 October, 2011)

Abstract

Environmental impacts of suspended solids (SS) released in coastal area by dredging, reclamation and construction can cause serious damages to coastal habitats and benthic organisms. Acute toxicity tests (4-7 days) were conducted to identify the relationship between SS concentration and mortality of three marine benthic species; benthic copepod (*Tigriopus japonicus*) adult, Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*) spat, and olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) fry. Benthic copepod was the most sensitive to SS followed by olive flounder fry and Pacific abalone spat, with an LC₅₀ (lethal concentration of 50% mortality) value of 61.0 mg/L and LOEC (lowest observed effective concentration) value of 31.3 mg/L for benthic copepod. LOEC and 7 day-LC₅₀ for Pacific abalone spat were 500.0 mg/L and 1887.7 mg/L, and those for olive flounder fry were 125.0 mg/L and 156.9 mg/L, respectively. The tolerance limits of the test species to SS revealed the various concentration ranges of SS, which reflects the physiology and ecology of the test species. These results are very valuable for the determination of SS concentration of effluents released into the coastal area by dredging, reclamation and construction etc. Also, sharp increase of SS can cause long-term damages to the benthic and sessile fauna by blanketing of benthic substratum. These experimental procedures for marine bioassay and acute toxicity results can be a useful guideline for practical management planning of SS discharge into coastal area.

Key Words : Suspended solids, Acute toxicity test, Olive flounder, Pacific abalone, Benthic copepod, LC₅₀, LOEC, NOEC, Marine bioassay.

1. 서론

생물을 이용한 위해성 평가는 기존의 단일항목에 국한되어 측정되었던 화학적 분석방법에서 벗어나 다

양한 물질이 공존할 때 발생하는 독성 상승 또는 길항 효과에 대하여 그 위해성을 통합적으로 평가할 수 있는 기능적 평가 방법의 일환으로 수행되고 있다 (Rand와 Petrocelli, 1985). 이에 미국 및 유럽국가를 비롯한 대부분의 국가에서는 각 나라의 실정에 적합한 다양한 시험종 및 독성시험방법을 개발하였으며, 이를 공정시험법으로 제정하여 유해물질의 평가에 이용하고 있다(ASTM, 1996; ISO, 1995; NIWA,

*Corresponding author : Gyung Soo Park, Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Incheon 417-833, Korea
Phone: +82-32-930-6032
Email: gspark@anyang.ac.kr

1998; USEPA, 2002). 일반적으로 생태독성시험방법은 생태계를 대표할 수 있는 기초생산자, 소비자 및 분해자 그룹별로 개발하며, 각각의 생물군에 1종씩 최소 2종을 포함하는 “Battery Test”를 권장하고 있다 (USEPA, 2002). 국내의 해양생태독성평가는 시험생물의 배양 및 사육, 시험방법 및 과정, 시험의 재현성 및 적합도 기준 등을 고려하여 총 9종의 해양생물에 대한 시험방법이 개발되어 있다(박 등, 2008a; 윤 등, 2006a; 이 등, 2008).

본 연구에 사용된 저서성 요각류 *Tigriopus japonicus*는 주로 조간대에 서식하고, 해양생태계에서 식물플랑크톤을 섭식하는 1차 소비자로서 어류의 먹이생물로 중요한 생태적 위치를 차지한다(Kwok과 Leung, 2005). 또한 *Tigriopus* 속 생물은 독성에 대한 민감도가 비교적 높고 반복실험 시 재현성이 높기 때문에 일부 국가에서는 이미 해양 미소 갑각류를 대상으로 한 해양생태독성평가용 시험생물로 이용되고 있다(Barka 등, 2001; Forget 등, 1998). 전복 *Haliotis discus hannai*는 상업적으로 매우 유용한 패류로서, 대부분 부유물질의 농도가 높지 않은 암반이나 해조류 군락지 등에 서식하며, 해조류를 주 먹이로 하는 1차 소비자의 역할을 담당한다. 전복은 부착 및 이동을 하는 습성 때문에 급작스럽게 고농도에 노출되지 않는 본래의 서식처에서는 부유물질에 대한 영향을 받지 않은 것으로 판단된다. 그러나 준설이나 매립과 같은 연안 개발로 인해 발생하는 수중의 부유물질 농도 증가는 부착기질의 감소 및 서식처의 파괴로 인한 전복의 생태-생리적 영향을 증가시키는 요인이 될 수 있으며, 장기적으로는 대량 폐사로 인한 막대한 어업 피해를 초래할 수 있다(이, 2008). 어류를 이용한 독성시험방법은 수정란의 부화율 및 자어 사망률을 측정값(endpoint)으로 독성 여부를 판단한다. 수서독성시험에서 최종 소비자로 이용하는 표준생물은 실험실 사육이 가능한 소형어류를 많이 이용한다(박 등, 2005; USEPA, 1994). 그러나 대부분의 해양어류는 실험실 사육 및 유지가 어렵기 때문에 해양생태독성시험에는 적합하지 않은 것으로 인식되어 왔다. 해양어류 중 넙치 *Paralichthys olivaceus*는 저서생활을 하는 우리나라의 대표적인 양식어종으로 알려져 있다. 또한 넙치는 생물공급이 원활하고 독성물질에 대한 민감도가

높기 때문에 많은 연구자들이 해양생태독성시험용 시험생물로 사용하고 있다(강 등, 2003; 김 등, 2004; 박 등, 2002; 박 등, 2008b; 탁과 김, 2001).

항만 및 연안개발사업에 포함되는 준설, 방파제 축조 및 매립 등 다양한 공사는 주변 해역의 해수유동 및 퇴적 환경의 장·단기적 변화를 유발하며, 궁극적으로는 다양한 방식으로 연안 생태환경에 큰 변화를 초래할 수 있다. 특히 연안개발로 인해 해양환경에 미치는 주요 오염원은 공사 중 발생하는 부유물질로써 단시간 동안 고농도로 발생한다. 이와 같은 부유물질의 해양확산은 탁도를 증가시킴으로써 식물플랑크톤이나 해조류 등의 1차 생산력을 저하시킬 뿐만 아니라 이를 섭식하는 1차 소비자의 생물량이 감소시킬 수 있다. 또한 수중의 급작스런 부유물질 증가는 부착생물의 폐사를 유발하거나 유영생물의 회피반응으로 인해 어업생산에 피해를 초래할 수 있다(이, 2008). 특히 이동능력이 적은 부유생물이나 저서생물 및 저서어류의 경우 부유물질의 해양 유입에 따른 잠재적인 생리-생태적 영향은 부어류(pelagic fish)와 같이 유영능력이 높은 종들 보다 훨씬 심각할 것으로 우려되고 있으나 이와 관련된 세부적인 연구가 희박한 상황이다.

이에 따라 본 연구는 해양의 저서생태계에서 생산자 및 1차 소비자의 역할을 담당하는 저서성 요각류 *T. japonicus*와 참전복 *H. discus hannai* 치패 및 2차 소비자로서 넙치 *P. olivaceus* 치어를 대상으로 하여 연안 개발로 인해 발생할 수 있는 급작스런 부유물질의 농도 증가에 따른 저서생태계의 분류군별 생태적 영향을 파악하기 위하여 해양생태독성평가를 수행하였으며, 이를 이용하여 부유물질의 해양 유입 농도를 제한하는 기초자료를 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 저서성 요각류 성체 부유물질 노출실험

저서성 요각류 *T. japonicus* 성체의 부유물질 노출 실험은 100.0 mL 용량의 원뿔형 폴리에틸병에 50.0 mL의 시료를 채운 후 윤 등(2006a)의 해양생태독성평가 방법을 참조하여 시험구별로 10개체의 생물을 넣고 수행하였다. 또한 본 연구에서 요각류, 참전복 및 어류를 대상으로 한 부유물질 노출실험은 Fig. 1과 동

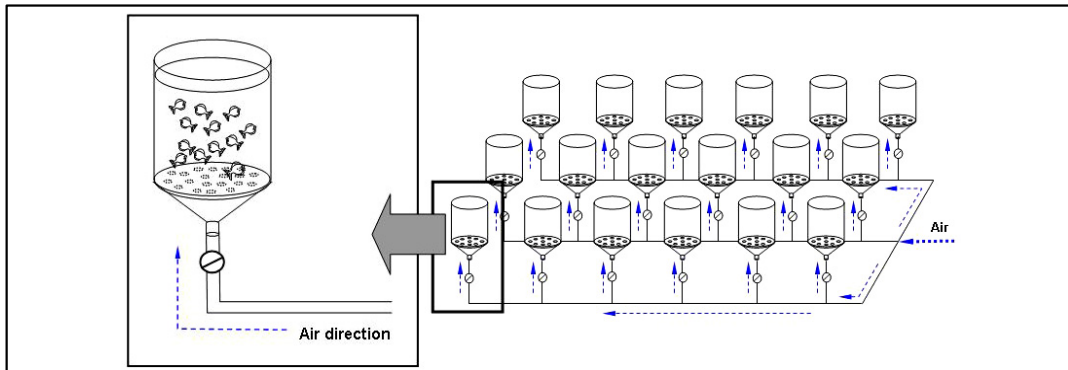


Fig. 1. Diagram of experimental unit on suspended solid toxicity test using benthic copepod, Pacific abalone and olive flounder.

일한 형태의 실험수조를 제작하여 실시하였다.

시험에 사용한 모든 해수는 오염되지 않은 지역에서 만조 시 채수하여 1.0 μm 카트리지 필터로 여과하여 멸균한 후 사용하였다. 시험용수의 염분은 30.0 psu 이상의 농도 (31.3 ± 0.4 psu)를 유지하였으며, 수온은 21.9 ± 0.1 °C, pH는 7.6 ± 0.1 로 유지하였다. 또한 시험용수의 용존산소는 7.5 mg/L 이상을 유지하였다 (Table 1). 시험에 사용된 부유물질은 인천광역시 강화군 길상면 선두리 전면 갯벌에서 펄을 채취하여 실험실로 옮긴 후 건조기(WIM-RL4, DAIHAN, Korea)에서 80 °C로 조절하여 항량이 될 때까지 건조하였으며, 이 후 분쇄한 후 100.0 μm sieve로 거르고 해수에 용해시켜 시험농도를 제조하였다. 시험물질의 농도는 예비실험을 통해 최고 농도를 500.0 mg/L로 결정한 후 순차적으로 1/2씩 농도를 낮추어 250.0, 125.0, 62.5, 31.3 mg/L로 5개 처리구를 조제하였으며, 대조구(0.0 mg/L)를 두어 처리구(treatment group)와 비교 분석하였다. 실험은 농도구별로 3개의 반복구를 두어 총 4일 동안 수행하였으며, 실험종료 후 각각의 처리구에서 시험물질의 농도는 $\pm 0.1\%$ 이내로 실험전 조제한 부유물질의 농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 생물의 먹이는 1일 1회 각 시험구마다 건조된 *Spirulina*를 해수에 용해시킨 후 그 상등액을 공급하였다.

저서성 요각류 성체를 이용한 부유물질 노출시험의 측정값은 각각의 농도별로 사망한 개체를 계수하여 누적된 폐사율을 96시간 사망률로 환산하였다. 시험물질은 1일 1회 교환하였으며, 생물의 생존 여부는

시험물질 교체 시 농도별 처리구에 담긴 시료를 125.0 μm mesh로 여과하였다. 여과된 생물은 해수가 담긴 페트리디쉬에 넣고 10초 이내에 움직임이 없는 개체는 사망한 개체로 판단하여 제거하였다. 생존한 나머지 개체는 스포이드를 사용하여 시험구로 옮겨 실험을 진행하였다.

2.2. 참전복 치패 부유물질 노출실험

본 실험에 사용된 시험생물은 참전복(*H. discus hannai*)이며, 연령은 부화 후 10~12달 지난 치패(각장 1.8~2.0 cm, 각고 0.3~0.4 cm, 각폭 1.2~1.5 cm)이다. 참전복 독성시험은 용존산소 유지 및 시험용기 내의 부유물질 농도가 일정하게 유지되도록 폭기한 상태에서 시험구별로 10개체의 생물을 넣고 실시하였다. 실험은 시험생물의 생존 여부를 판단하기 위하여 0.5 cm 망목크기의 섬유재질 사각망(5.0 cm \times 5.0 cm \times 5.0 cm)을 제작하여 용기의 중앙 및 중간 수심에 위치시킨 후 그 안에 시험생물을 투입하여 실시하였다. 시험용수의 염분은 32.2 ± 0.1 psu 범위로 조절하였으며, 수온은 15.6 ± 0.1 °C, pH는 7.5 ± 0.1 로 유지하였다. 또한 시험용수의 용존산소는 7.5 mg/L 보다 높은 농도를 유지하였다. 참전복 치패를 이용한 부유물질 노출 시험은 별도의 규정된 시험방법이 없기 때문에 어류를 이용한 독성평가방법(박 등, 2008b)을 참조하여 7일간 수행하였으며, 관련 실험변수는 Table 1에 수록하였다. 부유물질 노출시험에 사용된 시험물질의 농도는 예비실험을 통해 최고농도를 4,000 mg/L로 결정한

후 순차적으로 1/2씩 농도를 낮추어 2,000.0, 1,000.0, 500.0 그리고 250.0 mg/L로 조제하였으며, 대조구 (0.0 mg/L)를 두어 처리구와 비교하였다. 먹이는 시험 기간 동안 1일 1회 각 시험구마다 생물 습중량의 0.1%에 해당하는 양의 전복 치패용 사료를 공급하였다. 참전복 치패를 이용한 부유물질 노출시험의 측정값은 각각의 농도별로 사망한 개체를 계수한 후 누적 사망률 자료를 이용하여 7일 사망률(%)로 환산하였다.

2.3. 넙치 치어 부유물질 노출실험

넙치 치어는 수산종묘배양장에서 분양받은 부화 후 60일 가량 지난 개체를 이용하였으며, 노출실험은 각각의 시험구별로 10개체를 넣고 실시하였다. 실험실 내 광주기는 16시간(L) : 8시간(D)으로 조절하였으며, 생물의 먹이는 상업용으로 판매하는 넙치 치어용 사료를 공급하였다. 먹이 투여량은 체중의 2.0% 가량을 매일 아침 1회 공급하였다. 부유물질을 이용한 해양생태독성시험은 USEPA(1991; 2002)의 방류수 독성평가 및 박 등(2008b)이 개발한 해양생태독성평가 방법을 적용하였다. 부유물질 실험에 사용된 넙치 치어는 체장 3.1~3.3 cm, 체중 0.3~0.4 gWWt 범위의

소형 개체이며, 급성독성 시험조건은 Table 1과 같다. 넙치 치어를 대상으로 부유물질을 이용한 생태독성시험은 7일간 수행하였으며, 시험농도는 예비시험을 거친 후 대조구, 125.0, 250.0, 500.0, 1,000.0, 2,000.0 mg/L 구간으로 설정하였다. 실험은 각각의 농도별 처리구에 해당하는 부유물질의 농도를 계량한 후 생물을 투입하기 전에 완전히 용해시킨 후 토사가 부유할 수 있도록 시험용기 아래 방향에서 공기를 주입하였다. 측정값은 각각의 농도별로 사망한 개체를 매일 1회씩 계수하여 누적된 사망률로 환산하였다.

2.4. 통계처리

실험생물에 대한 부유물질 농도별 사망률 차이에 대한 유의성 검증과 독성통계는 USEPA (1993)에서 제시한 통계처리과정을 따라 Toxcal 5.0 (Tidepool Scientific Software, USA) 프로그램을 이용하여 Dunnett's test와 maximum likelihood probit analysis 과정을 거쳐 산출하였다. 본 연구에서는 부유물질이 생물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 통계 처리 후 생물의 반수치사농도(LC₅₀), 무영향농도(NOEC, no observed effective concentration) 및 최저영향농도(LOEC, lowest observed effective concentration) 값

Table 1. Toxicity test conditions for three test organisms exposed to various concentrations of suspended solids

Parameters/test species	<i>Tigriopus japonicus</i>	<i>Haliotis discus hannai</i>	<i>Paralichthys olivaceus</i>
Test type	Static renewal	Static renewal	Static renewal
Endpoint	Mortality (%)	Mortality (%)	Mortality (%)
Age of test organism	Adults	10-12 months	60 days
Initial individuals (n)	10	10	10
Test duration	4 days	7 days	7 day
Test temperature(°C)	21.9±0.1	15.6±0.1	18.0±1.0
Test salinity (psu)	31.3±0.4	32.2±0.1	30.0±0.5
Test pH	7.6±0.1	7.5±0.1	7.6±0.2
Test DO (mg/L)	>7.5	>7.5	> 7.0
Light intensity	Ambient intensity	Ambient intensity	Ambient intensity
Light period (L : D)	12h:12h	12h:12h	12h:12h
Test chamber (mL)	100.0	2,000.0	2,000.0
Test solution (mL)	50.0	1,500.0	1,500.0
Feeding regime	1/day	1/day	1/day
Dilution water	Filtered seawater (1µm)	Filtered seawater (1µm)	Filtered seawater (1µm)
Renewal period	1/day	1/day	1/2days
Number of replicates	3	3	3
Test concentrations (mg/L)	Control, 31.3, 62.5, 125.0, 250.0 and 500.0	Control, 250, 500, 1000.0, 2,000.0 and 4,000.0	Control, 125.0, 250.0, 500.0, 1,000.0 and 2,000.0
Test acceptability criteria	>90% survival at control		

으로 산출한 후, 부유물질에 대한 각각의 실험생물별 민감도를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부유물질 노출에 따른 저서성 요각류 성체의 사망률 변화

부유물질에 노출된 저서성 요각류 성체의 노출시간별 사망률 실험에서 대조구의 사망률은 일반적으로 독성시험에서 유효한 수준으로 평가하는 10% 이하로 실험의 신뢰성을 확보하였다. 대조구를 제외한 모든 처리구에서 실험생물 사망률은 실험시작 2일이 경과한 후부터 증가하였으며, 500.0 mg/L 농도에서는 시험생물의 30%가 사망하였다. 실험시작 3일 후부터 시험구별 사망 개체는 부유물질 농도에 따라 뚜렷하게 구분되었으며, 이를 누적사망률로 환산한 결과, 대조구, 31.3, 62.5, 125.0, 250.0 그리고 500.0 mg/L에서 각각 0.0, 23.3, 36.7, 60.0, 60.0 그리고 63.3%로 나타났다. 실험종료 시 실험생물의 누적사망률은 31.3, 62.5, 125.0, 250.0 그리고 500.0 mg/L 농도에서 각각 33.3, 53.3, 66.7, 76.7 그리고 93.3%로 250.0 mg/L 보다 높은 농도에서 70% 이상의 누적사망률 값이 산출되었다(Fig. 2). 96시간 동안 부유물질에 노출시킨 저서성 요각류의 사망률은 대조구보다 부유물질의 농도

가 높은 처리구에서 증가하는 경향을 보였으며, 실험 종료 후에는 부유물질의 농도와 실험생물의 사망률 사이에 뚜렷한 변화 패턴을 관찰할 수 있었다 ($p < 0.05$). 부유물질 농도에 따른 사망률을 이용하여 생물의 반수치사농도(LC₅₀)를 산출한 결과, 요각류 성체의 96시간 반수치사농도는 61.0 mg/L로 산출되었으며, 최저영향농도는 31.3 mg/L, 무영향농도는 31.3 mg/L 이하였다(Fig. 2).

연안지역에서 이루어지고 있는 다양한 개발공사로 인해 연안 수역의 부유물질 농도 증가는 해당 해역에 서식하는 생물뿐만 아니라 인근의 어장환경의 변화를 초래하는 주요 요인으로 인식되고 있다(고 등, 1998). 육상에서 유입되는 부유물질은 준설로 인한 퇴적물의 재부유로 인해 농도가 증가하게 되고 작은 입자의 부유물질들이 일정기간 수층에 머물게 되면, 광투과를 저해하여 일차생산이 저하되고 이를 섭식하는 1차 소비자가 감소한다. 또한 부유물질 농도 증가는 암반이나 해조류에 부착하여 생활하는 갑각류를 포함한 다양한 저서생물의 섭식 및 생존에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Lee, 1994; Shin 등, 2002). 본 연구에서 실험생물로 이용한 저서성 요각류 *T. japonicus*는 저서환경에 서식함에도 불구하고 부유물질에 대한 노출실험은 수행된 바 없으며, 이로 인해 생물의 생존에 영향을 주는 부유물질의 최소 내성한계 농도가 규

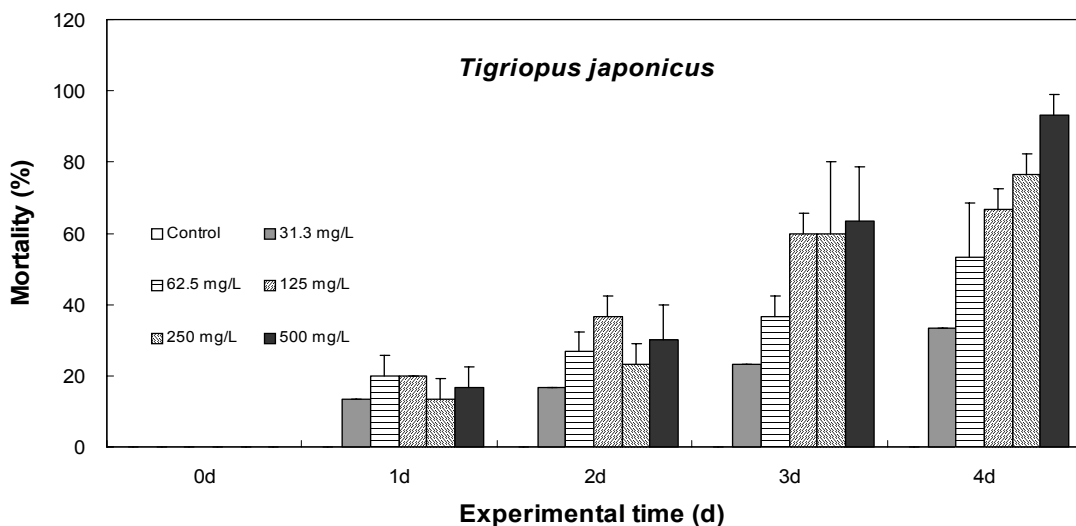


Fig. 2. Mortality of benthic copepod (*T. japonicus*) exposed to various concentrations of suspended solids with times.

명되지 않았으나 급작스런 부유물질의 증가에 따른 동물플랑크톤의 생존 및 개체수 증가 여부는 포식압에 의한 요인이 아닌 광투과 저해현상에 따른 일차 생산자의 현존량에 감소 및 부유물질 농도 증가에 따른 동물플랑크톤의 자연사망율에 기인될 것으로 판단된다.

3.2. 부유물질 노출에 따른 참전복 치패의 사망률 변화

참전복(*H. discus hannai*) 치패의 실험 기간별 사망률은 실험 초기부터 2일이 경과한 후 2,000.0 mg/L와 4,000.0 mg/L 농도에서 각각 20% 이하로 나타났으며, 대조구, 250.0, 500.0 및 1,000.0 mg/L에서는 사망 개체가 없었다. 그러나 실험시작 3일 후부터 사망률이 증가하기 시작하여 실험종료 시 누적사망률은 2,000.0 mg/L 처리구에서 56.7%로 산출되었으며, 4,000 mg/L 처리구에서는 노출 생물의 76.7%가 사망하였다. 한편 2,000.0 mg/L 이하의 처리구에서의 누적사망률은 250.0, 500.0 그리고 1,000.0 mg/L 농도에서 각각 13.3, 26.7 및 26.7%로 산출되어 실험개체의 70.0% 이상이 생존하였다. 한편 대조구의 누적사망률은 6.7%로서 10.0% 이하의 사망률을 보여 실험결과가 유효한 것으로 나타났다(Fig. 3). 부유물질 노출 결과를 이용하여 반수치사농도(LC₅₀)를 산출한 결과, 참전복 치패의 7일 반수치사농도는 1,887.7 mg/L로 저

서성 요각류보다 30배 이상이 높았으며, 최저영향농도는 500.0 mg/L, 무영향농도는 250.0 mg/L로 분석되어 부유물질 농도에 따른 민감도가 저서성 요각류에 비해 매우 낮았다. 조(2004)의 연구에 따르면 부유물질과 수온에 의한 이매패류의 폐사는 바지락의 경우 20℃에서 부유물질 100.0 mg/L에 15일간 노출되어도 폐사가 발생하지 않은 반면 25℃에서는 40.0 mg/L와 50.0 mg/L에서 70일 후 누적 폐사율이 100.0%, 30℃에서는 0.0~50.0 mg/L 농도에서 실험 8일까지 누적 폐사율이 100.0%로 보고되어 온도 상승에 따라 부유물질의 민감도가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 연안공사 주변에 설치된 가두리 양식장이나 생물의 서식처에서 여름철 장마기에 다량의 토사가 유입되고 고수온이 형성되면 양식생물이나 주변 서식생물들은 토사에 의한 영향이 배가될 수 있음을 의미하므로 고수온기에 토사 유입은 서식생물에 치명적이다. 이(2008)는 참전복 치패의 폐사 및 글리코겐 함량에 미치는 부유물질의 영향 연구에서 96시간 동안 0.0~2,000.0 mg/L의 농도구에서 전복 치패를 노출시키는 동안 전체 농도구에서 폐사는 일어나지 않았으나 부유토사 농도가 1,500.0 mg/L와 2,000.0 mg/L인 시험구에서는 글리코겐 함량이 대조구와 비교하여 유의하게 감소하는 것으로 보고하였다.

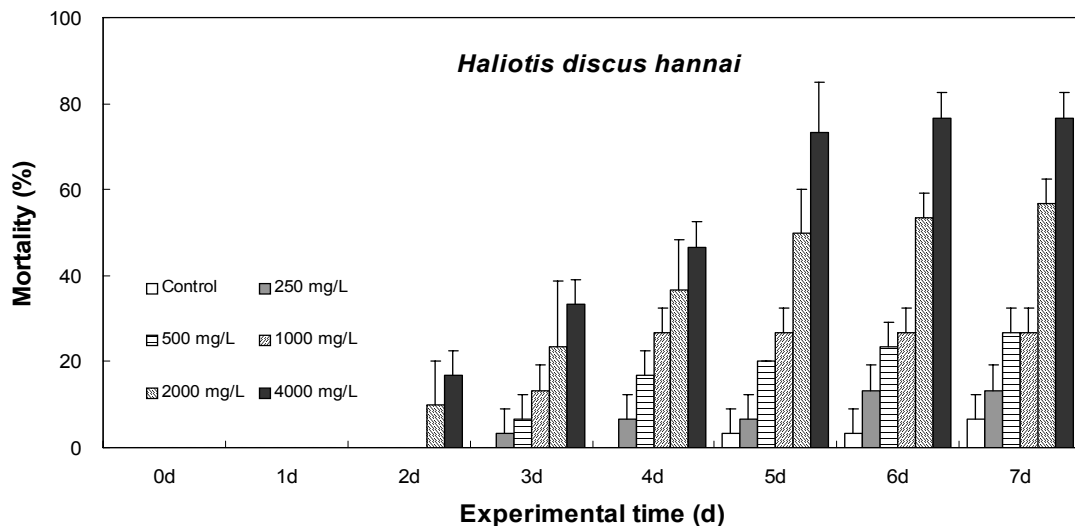


Fig. 3. Mortalities of Pacific abalone (*H. discus hannai*) exposed to various concentrations of suspended solids with times.

부유물질에 의한 이매패류의 생리적 저해현상을 살펴보면, 부유물질의 농도 증가는 여과율의 저하(Ward와 MacDonald, 1996), 산소소비율 감소(Grant와 Thorpe, 1991) 및 성장이 저해되는 것으로 보도되었다(Bricelj 등, 1984; MacDonald 등, 1998). 또한 본 연구와 유사한 크기의 실험종을 이용하여 부유물질에 대한 폐사 영향을 관찰한 이(2008)의 연구에 의하면, 전복은 부유토사 2,000.0 mg/L에서 96시간 동안 노출된 경우 폐사가 나타나지 않았으나 연체부의 글리코겐 함량이 있어서는 1,500.0 mg/L 이상의 농도구에서 유의하게 감소하였는데, 이와 같은 결과를 바탕으로 부유토사는 폐사의 직접적인 영향에 미치지 않으나 부유토사에 의한 건강상 장애를 일으킬 수 있을 것으로 판단하였다(Table 2). 이와 반면 본 연구에서는 7일 동안 부유물질에 노출된 전복은 고농도에서 실험시작 96시간 지난 후 생존 개체가 감소하여 7일 후에는 2,000.0 mg/L 이상의 농도에서 50% 이상의 개체가 사망하였다. 이와 같은 결과는 비록 본 연구에 사용된 실험생물의 크기가 이(2008)의 조건과 유사할지라도 부유토사에 노출에 따른 생물의 생리적 스트레스 유발 조건(96시간, 1,500.0 mg/L)과 생태적인 영향이 나타나기 시작하는 조건의 차이에 의한 결과로 해석되며, 추가적으로 실험수온 차이 및 실험시간 경과에 따른 개체의 건강상태 악화로 인한 생물의 사망률 증가 현상이 유발된 것으로 판단된다. 결론적으로 부유물질 2,000.0 mg/L의 고농도에서 참전복 치폐의 생존을

이 비교적 높은 결과는 이(2008)가 제시한 바와 같이 본 시험종이 부유물질에 대한 내성이 높다는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 비록 높은 내성에도 불구하고 고농도에서 발생하는 생리적 스트레스는 생물체내에 지속적으로 축적되어 생물 고유의 대사활동은 불가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 설정한 2,000.0 mg/L 이상의 부유물질 농도는 해양에서 수행되는 매립이나 준설 등의 연안 공사나 장마철 기간 동안 일시적인 강우량 증가로 인해 육상토사가 유입될 경우를 제외하고는 해양에서 거의 발생하지 않는 고농도 환경이다. 그러나 Chang과 Chin(1978)에 의하면, 백합(*Meretrix lusoria*), 가무락(*Cyclina sinensis*) 및 동죽(*Mactra veneriformis*)을 1,000.0 mg/L의 부유물질 농도에 24시간 노출시킨 후 정상태수에 옮겨 장기간 사육한 경우, 대부분의 실험생물이 폐사하였으며, 노출농도가 높고 노출시간이 길어질수록 폐사율이 높았다. 반면, 녹색담치(*Perna viridis*)는 비교적 부유물질에 강한 내성을 보여 1,200.0 mg/L의 농도에서 96시간 노출되어도 폐사하지 않았지만 부유물질의 농도가 증가함에 따라 아가미 조직 손상도가 증가하여 여과율이 감소하는 것으로 보고되었다(Shin 등, 2002). 또한 Cheung과 Shin(2005)은 250.0, 500.0, 750.0 및 1,000.0 mg/L의 농도에서 14일 동안 노출시킨 녹색담치의 아가미 조직은 부유물질의 농도가 증가함에 따라 손상 정도가 높았으며, 깨끗한 해수로 치환하여도 손상된 조직은

Table 2. Comparison of results of this study (*H. discus hannai*) and effects of suspended solids on other marine mollusca

Test species	Life stages	Exposure time	LOEC(mg/L)	References
Pacific abalone <i>Haliotis discus hannai</i>	Spat	96 hours	>2000	이(2008)
Common oriental clam <i>Meretrix lusoria</i>	Adult	45 days	>1000	Chang and Chin(1978)
Chinese Dosinia <i>Cyclina sinensis</i>	Adult	35 days	>1000	Chang and Chin(1978)
Surf clam <i>Mactra veneriformis</i>	Adult	35 days	>1000	Chang and Chin(1978)
Asian green mussel <i>Perna viridis</i>	Adult	96 days	>1,200	Shin <i>et al.</i> (2002)
Pacific abalone <i>Haliotis discus hannai</i>	Spat	7 days	>1887.7	Present study

회복되지 않았다. 이러한 결과는 부유물질 자체가 패류의 폐사를 유발하지 않지만 조직학적 손상을 일으켜 섭이율, 호흡 등에 영향을 미치게 되고 장기간 동안 노출되었을 경우에는 성장 저하를 일으킬 수 있음을 의미한다. 비록 여과섭이성 이매패류는 부유물질에 민감한 것으로 알려져 있지만 다른 아가미 호흡 생물들도 부유물질에 노출된 후 환경이 회복되더라도 아가미의 조직 손상 등 영향이 지속되어 결국 폐사에까지 이를 수 있을 것으로 생각된다.

3.3. 부유물질 노출에 따른 넙치 치어의 사망률 변화

다양한 부유물질 농도에 노출된 넙치(*P. olivaceus*) 치어의 사망률은 실험시간이 경과함에 따라 급증하였으며, 실험시작 3일부터 사망개체가 발생하였다. 넙치 치어의 사망률은 부유물질의 농도가 높은 처리구에서 뚜렷한 증가를 보였으며, 부유물질의 농도와 누적사망률 사이에 뚜렷한 농도-반응관계(dose-response relationship)를 보였다. 대조구의 사망률은 독성시험 결과의 신뢰성을 평가하는 주요 항목으로써 본 실험에서는 10.0% 이내로서 실험의 유효성을 확보하였다. 실험종료 후 125.0 mg/L 처리구 넙치 치어의 사망률은 대조구와 뚜렷한 차이를 보였으며, 125.0 mg/L 처리구의 사망률은 대조구보다 40.0%로 높게 나타났으며, 125.0~250.0 mg/L 농도 구간의 넙치 치어는

250.0 mg/L 보다 높은 처리구에서 50% 이상의 개체가 사망하였다. 부유물질 노출 시험 결과를 이용하여 7일째 넙치 치어의 반수치사 영향농도(7 days LC₅₀)를 산출한 결과, 참전복 치패의 반수치사농도보다 낮은 농도인 156.9 mg/L로 산출되었으며, 최저영향농도는 125.0 mg/L, 무영향농도는 125.0 mg/L 이하로 분석되었다(Fig. 4).

수중의 탁도 증가는 어류의 스트레스를 유발하여, 체내 활성산소가 다른 물질과 결합하려는 화학적 친화력이 강해져 세포나 기관의 막을 공격하여 세포의 기능을 손상시켜 생존에 영향을 미친다. 그러므로 장기간 높은 부유물질에 노출되면 아가미와 신장 조직이 비정상적인 형태로 변형되어 치명적인 손상을 초래한다(신 등, 2006; 2008). 또한 어류는 서식처 주변의 이화학적 환경이 변할 경우, 내성한계 이하의 환경에서는 체내 적응과정을 거치면서 변화된 환경에 순화되기 때문에 외부의 환경자극에 대한 생리, 생태적 영향은 거의 받지 않는 것으로 보고되었다(Kim 등, 2002; Kim 등, 2006; Yoon 등, 2003). 그러나 급작스런 수질악화로 인해 환경이 변화되면 이에 따른 자극으로 인해 생물들은 심한 스트레스를 받게 되어 일시적으로 본래의 서식처를 떠나 다른 곳으로 회피하는 행동을 하거나 일부 종들은 사망에 이르기도 한다(윤 등, 2006b; Popper 등, 2004). 이러한 현상은 생물의

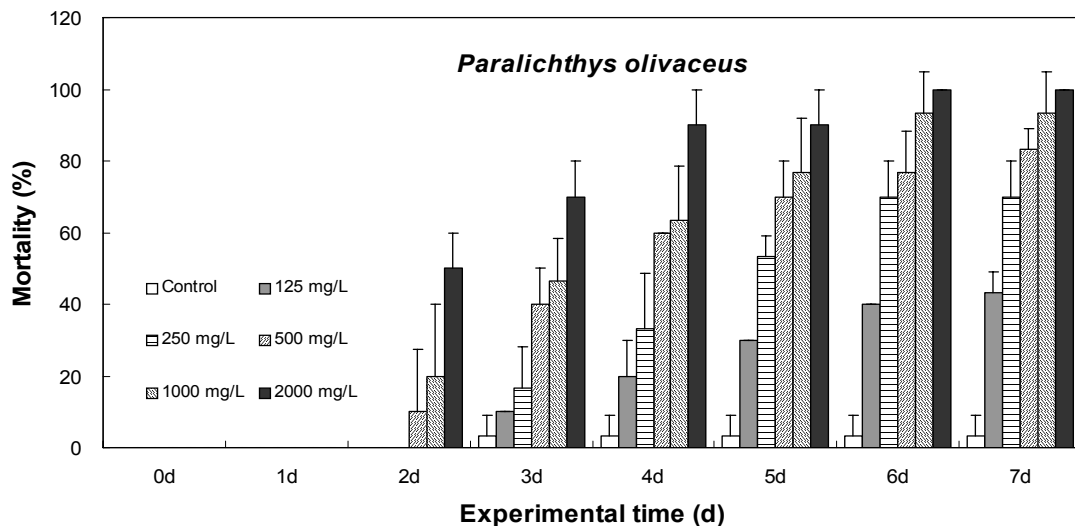


Fig. 4. Mortalities of olive flounder fry (*P. olivaceus*) exposed to various concentrations of suspended solids with times.

이동 능력에 따라 차이는 있으나 부유물질 증가가 어류의 생리-생태에 미치는 영향이 커질 것으로 판단된다.

본 연구에서 부유물질 농도에 따른 넙치 치어의 사망률은 실험 2일째부터 증가하였으며, 7일 후에는 부유물질 농도별 사망 개체수가 급증하였다. 본 실험 결과, 넙치 치어의 생존에 미치는 부유물질의 최저농도(LOEC)는 156.9 mg/L이다. 한국환경정책평가원(2003)의 연구에 의하면 부유물질에 대한 어류의 반응은 수중에 확산되는 농도에 따라 다소 차이는 있으나 주로 수중의 탁도 증가에 따른 회피행동을 보이는 것으로 관찰되었다. 방어(*Seriola quinqueradiata*)는 고령토(kaoline)의 농도가 10.0 mg/L 보다 높으면 회피반응을 보이며, 해저퇴적물의 경우에는 100.0 mg/L에서 영향을 받는 것으로 조사되었다. 감성돔(*Acanthopagrus schlegeli*)은 적토 350.0 mg/L에서 기피반응을 보였으며, 조피볼락의 경우 고령토 110.0 mg/L에서 기피반응이 관찰된 반면, 호저니(red clay) 1,000.0 mg/L에서는 별다른 반응이 관찰되지 않았다. 반면 청보리멸

(*Sillago japonica*)은 고령토와 호저니 농도 1,000.0 mg/L에 영향이 없는 것으로 조사되었으며, 학공치(*Hemiramphus sajori*)는 해저니 10.0 mg/L에도 회피반응을 보였다(Table 5). 따라서 부유성 어류는 고농도의 부유물질에 노출될 경우, 자신의 서식처를 떠나 다른 지역으로 회피하는 행동을 보일 것으로 판단된다. 일부 어류는 소음, 진동, 기타 서식환경에 영향을 주는 주변의 다양한 이화학적 환경요인이 생물의 내성한계를 벗어난 심각한 수준에 도달하기 전까지는 회피행동을 보이지 않은 것으로 보고되었다(윤 등, 2007; Popper 등, 2004; Wilson과 Dill, 2002). 이와 같은 결과는 비록 부유성 어류를 대상으로 실험한 자료이지만 본 연구결과와 비교해 볼 때 외부의 스트레스에 대한 회피반응은 생물종이나 노출물질의 종류에 따라 차이를 보이는 것으로 생각된다.

넙치는 부유성 어류에 비해 유영능력이 떨어지며, 서식환경을 고려할 때 비교적 부유물질에 대한 내성이 큰 것으로 해석된다. 또한 본 종은 기질에 파묻혀 있는 상황에서 장기간 머물 수 있기 생태적 특성 때문

Table 5. Comparison of SS toxicity test results of marine fishes (KEI, 2003)

Test species	Test materials	Size of test species	LOEC
Yellow tail <i>Seriola quinqueradiata</i>	Kaoline Marine sediment	109.0 g	>10.0 mg/L >100.0 mg/L
Black seabream <i>Acanthopagrus schlegeli</i>	Red clay	15.0 cm	>350.0 mg/L
Japanese jack mackerel <i>Trachurus japonicus</i>	Kaoline Red clay	12.5.0 g 12.5.0 g	>110.0 mg/L >180.0 mg/L
Rock bream <i>Oplegnathus fasciatus</i>	Marine sediment		>5.0 mg/L
Rock fish <i>Sebastes pachycephalus</i>	Kaoline Marine sediment	188.4 g 188.4 g	>110.0 mg/L >1,000.0 mg/L
Japanese sea perch <i>Sillago japonica</i>	Kaoline Marine sediment	19.7g 19.7g	>1,000.0 mg/L
Japanese halfbeak <i>Hemiramphus sajori</i>	Marine sediment	-	>10.0 mg/L
Oliver flounder <i>Paralichthys olivaceus</i>	Marine sediment	-	>156.9 mg/L

에 급작스런 고농도의 부유물질 노출에 의한 행동 및 대사활동의 큰 영향을 받지 않는 한 서식처를 회피하지 않을 것으로 판단되며, 이는 부유성 어류와의 생태적 특성을 비교해 볼 때 비교적 부유물질에 대한 내성이 높은 것으로 해석된다. 따라서 해수의 유동이 원활한 경우, 넙치는 일정한 수준의 부유물질에 노출되어도 회피반응 보다는 부유물질의 농도가 희석될 때까지 일정기간 서식처 바닥에 머무르는 행동을 보일 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 산출된 결과를 고려해 볼 때, 넙치와 같은 저서어류는 저층의 해수 흐름이 정체되어 활발한 희석작용이 부족한 경우 부유물질 농도가 125.0 mg/L에 도달할 때까지는 큰 영향을 받지 않으나 156.9 mg/L 이상의 농도에서 장기간 노출될 경우, 부유물질에 의한 아가미 막힘으로 인해 호흡 및 대사활동에 심각한 저해현상을 유발할 것으로 판단된다. 부유물질의 해양 유입에 따른 저서어류의 생리-생태적 영향을 최소화하기 위해서는 육상으로부터 토사유입과 해양 준설로 인한 해저 퇴적물의 재부유를 방지할 수 있는 대비책을 마련하고 그 영향을 최소화할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다. 한편 연안지역의 간척 및 매립사업에 사용되는 물질은 토사뿐만 아니라 산업활동 과정에 발생하는 부산물이 다량 포함되어 있다. 이러한 물질들은 비록 처리과정을 거친 후 사용될지라도 장기간 동안 방치될 경우 다양한 유해성 화학물질을 용출되어 생물독성을 유발할 수 있다. 따라서 향후 부유물질에 대한 생물영향평가는 부유물질에 포함된 물리·화학적 특성을 고려한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부유물질이 해양생물에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 저서성 요각류 *Tigriopus japonicus* 성체, 참전복 *Haliotis discus hannai* 치패 및 넙치 *Paralichthys olivaceus* 치어를 이용하여 4~7일 동안 급성독성실험(acute toxicity test)을 수행하였다. 실험결과, 저서성 요각류는 약 31.0 mg/L(LOEC=31.3 mg/L)부터 영향이 나타나기 시작하였으며, 4일-반수 치사농도(4 days LC₅₀)는 61.0 mg/L 였다. 참전복 치

패의 부유물질에 대한 최저영향농도(LOEC)는 500.0 mg/L, 7일-반수치사농도(7days LC₅₀)는 1887.7 mg/L로 저서성 요각류보다 16배 높은 농도에서 부유물질의 영향이 나타났다. 넙치 치어는 최저영향농도가 125.0 mg/L이고 7일-반수치사농도는 156.9 mg/L이었다. 본 연구에서 부유물질에 대한 시험생물의 생태독성 영향은 저서성 요각류 성체 > 넙치 치어 > 참전복 치패 순으로 높게 나타났으며, 시험생물 중 저서성 요각류 성체가 부유물질에 가장 민감한 반응을 보였다. 이와 같은 결과는 비록 많은 종을 대상으로 실험을 수행하지 않았으나 부유물질에 대한 생물의 내성한계는 생물종, 서식환경 및 생물의 생태-생리적 습성에 따라 차이가 나는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 수중의 급작스런 부유물질의 증가는 유영능력이 없거나 이동 범위가 좁은 생물의 경우 노출 후 3~4일이 경과하면 사망하는 개체가 증가하기 시작하며, 고농도에서는 7일 이내에 대부분의 생물이 사망하는 것으로 나타났다. 따라서 수중의 부유물질 노출로 인한 지속적인 농도 증가는 생물의 생존 및 건강상의 장애를 유발시킬 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서 산출된 실험 결과는 부유물질 발생 수역의 생물 영향을 진단하고 그 대책을 수립하는데 중요한 자료로 활용 가치가 높은 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 지원으로 해양환경기술개발사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 강주찬, 김재원, 김성길, 황운기, 2003, 구리의 노출에 따른 넙치, *Paralichthys olivaceus* 치어의 만성독성, 환경생물학회지, 21, 36-41.
- 김맹진, 정상철, 송춘복, 2004, 염분에 따른 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 성장과 생존, 한국어류학회지, 16, 100-106.
- 고철환, 박철, 유신재, 이태원, 장창익, 최중기, 홍재상, 허형택, 1998, 해양생물학, 서울대학교 출판부, 558-559.
- 박경수, 이승민, 한태준, 이정석, 2008a, 해양생태독성평가를 위한 표준시험방법 개발에 관한 연구, 한국해양학회지<바다>, 13(2), 106-111.

- 박경수, 강주찬, 윤성진, 이승민, 황운기, 2008b, 어류 자어의 사망률을 이용한 해양생태독성시험 방법에 관한 연구, 한국해양학회지<바다>, 13(2), 140-146.
- 박경수, 윤성진, 이승민, 김애향, 박승운, 강덕영, 2005, 해양생태독성평가를 위한 표준시험생물로서의 송사리(*Oryzias latipes*)에 관한 연구, 환경생물학회지, 23, 293-303.
- 박창범, 나오수, 이치환, 김병호, 이영돈, 허문수, 이정재, 정사철, 이기완, 노섭, 송춘복, 최광식, 이계혁, 여연규, 전유진, 2002, Formalin이 넙치(*Paralichthys olivaceus*) 난 발생 및 부화자어에 미치는 영향, 환경독성학회지, 17, 13-19.
- 신명자, 이정, 이종은, 서울원, 2006, 탁도 변화가 붕어 조직의 항산화효소 활성에 미치는 영향, 한국환경생물학회, 24(2), 119-125.
- 신명자, 김정숙, 황윤희, 이종은, 서울원, 2008, 탁도 변화가 참갈겨니(*Zacco koreanus*) 조직에 미치는 영향, 한국육수학회지, 41(1), 73-80.
- 윤성진, 박경수, 오정환, 박승운, 2006a, 저서성 해산 요각류 harpacticoid *Tigriopus japonicus* 유생을 이용한 해양생태독성평가, 한국해양환경공학회지, 9(3), 160-167.
- 윤성진, 염동혁, 김우근, 윤희길, 이성규, 2007, 초음파가 잉어 *Cyprinus carpio*의 성장 및 단기적 행동에 미치는 영향, 한국육수학회지, 40(2), 244-253.
- 윤종락, 이성욱, 안수용, 박지현, 배종우, 안명석, 2006b, 수중소음이 어류에 미치는 영향, 2006년도 한국수염진동공학회 추계학술대회논문집, 1-8.
- 이경선, 2008, 참전복, *Haliotis discus hannai*의 폐사 및 글리코겐 함량에 미치는 부유토사의 영향, 해양환경안전학회지, 14(3), 183-187.
- 이승민, 박경수, 윤성진, 강영실, 오정환, 2008, 윤충류 *Brachionus plicatilis* 및 저서 요각류 *Tigriopus japonicus*의 초기 생활사를 이용한 해양생태독성시험 방법에 관한 연구, 한국해양학회지<바다>, 13(2), 129-139.
- 조영민, 2004, SS농도변화에 따른 바지락(*Ruditapes philippinarum*; Bivalvia)의 여과 변동, 여수대학교 대학원 석사논문, 18-22.
- 탁건태, 김중균, 2001, 넙치 생존과 성장에 미치는 TBT 독성, 한국수산학회지, 34, 103-108.
- 한국환경정책평가원, 2003, 해수유동 및 부유사확산의 예측기법 개선에 관한 연구, Korea Environment Institute (KEI), 29-39.
- ASTM, 1996, Standard guide for acute toxicity test with rotifer *Brachionus*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Barka, S., Pavillon, J. F., Amiard, J. C., 2001, Influence of different essential and non-essential metals on MTLP levels in the copepod *Tigriopus brevicornis*, Comp. Biochem. Physiol., 128C, 497-193.
- Bricelj, V. M., Malouf, R. E., de Quillfeldt, C., 1984, Growth of juvenile *Mercenaria mercenaria* and the effect of resuspended bottom sediments, Mar. Biol., 84, 167-173.
- Chang, S. D., Chin, P., 1978, Effects of suspended silt and clay on the mortality of some species of bivalves, Bull. Korea. Fish. Soc., 11(4), 227-231.
- Cheung, S. G., Shin, P. K. S., 2005, Size effects of suspended particles on gill damage in green-lipped mussel *Perna viridis*, Mar. Pollut. Bull., 51, 801-810.
- Grant, J., Thorpe, B., 1991, Effects of suspended sediment on growth, respiration, and excretion of the soft-shell clam (*Mya arenaria*), Can. J. Fish. Aquat. Sci., 48, 1285-1292.
- Forget, J., Pavillon, J. F., Menasria, M. R., Becquené, G., 1998, Mortality and LC₅₀ for several stages of marine copepod *Tigriopus brevicornis* (Müller) exposed to the metals arsenic and cadmium and the pesticides atrazine, carbofuran, dichlorvos, and malathion, Ecotoxicology Environmental safety, 40, 239-244.
- ISO, 1995, Water quality - marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricorutum*. the International Organization for Standardization, ISO 10253, 7.
- Kim, W. S., Yoon, S. J., Moon, H. T., Lee, T. W., 2002, Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*, Mar. Ecol. Prog. Ser., 243, 209-216.
- Kim, W. S., Yoon, S. J., Kim, J. W., Lee, J. A., Lee, T. W., 2006, Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*, Mar. Biol., 149, 1209-1215.
- Kwok, K. W. H., Leung, K. M. Y., 2005, Toxicity of antifouling biocides to the intertidal harpacticoid copepod *Tigriopus japonicus* (Crustacea, Copepoda): Effects of temperature and salinity, Mar. Pollut.

- Bull., 51, 830-837.
- Lee, J. Y., 1994, Effects of silt and clay on the rates of respiration, filtration and nitrogen excretion in shellfish, *Macra ceneriformis*, Bull. Korea. Fish. Soc., 27(1), 59-68.
- McDonald, B. A., Bacon, G. S., Ward, J. E., 1998, Physiological response of infaunal (*Mya arenaria*) and epifaunal (*Placopecten magellanicus*) bivalves to variations in the concentration and quality of suspended particles II, Absorption efficiency and scope of growth, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 219, 127-141.
- NIWA, 1998, Marine algae (*Dunaliella tertiolecta*) chronic toxicity test protocol, National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand, 30.
- Popper, A. N., Plachta, D. T. T., Mann, D. A., Higgs, D., 2004, Response of clupeid fish to ultrasound: a review, ICES J. Mar. Sci., 61, 1057-1061.
- Rand, G. M., Petroceilli, S. R., 1985, Fundamentals of aquatic toxicology, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 666.
- Shin, P. K., Yau, S. F. N., Chow, S. H., Tai, K. K., Cheung, S. G., 2002, Responses of the green-lipped mussel *Perna viridis* (L.) to suspended solids, Mar. Pollut. Bull., 45, 157-162.
- USEPA, 1991, Guidelines for culturing the Japanese medaka, *Oryzias latipes*, EPA/600/3-91/064, United States Environmental Protection Agency.
- USEPA, 1993, Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms, EPA/600/4-90/022F, United States Environmental Protection Agency.
- USEPA, 1994, Short-term methods for estimating the chronic toxicity of Effluents and receiving waters to marine and estuarine organisms, EPA/600/4-91/003, United States Environmental Protection Agency, 436.
- USEPA, 2002, Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms, United States Environmental Protection Agency, 122.
- Ward, J. E., MacDonald, B. A., 1996, Pre-ingestive feeding behaviours of two sub-tropical bivalves (*Princtada imbricate* and *Arca zebra*): Responses to an acute increase in suspended sediment concentration, Bull. Mar. Sci., 59, 417-432.
- Wilson, B., Dill, L. M., 2002, Pacific herring respond to simulated odontocete echolocation sound. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 59, 542-553.
- Yoon, S. J., Kim, C. K., Myoung, J. G., Kim, W. S., 2003, Comparison of oxygen consumption patterns between wild and cultured black rockfish *Sebastes schlegeli*, Fish. Sci., 69, 43-49.