

Article

유기오염물질의 복합독성이 요각류 사망률에 미치는 영향

강정훈^{1*} · 김응서²¹한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경남 거제시 장목면 장목리 391번지²한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Compound Effect of Persistent Organic Pollutants on the Mortality of Marine Copepods

Jung-Hoon Kang^{1*} and Woong-Seo Kim²¹South Sea Research Institute, KORDI
Geoje 656-830, Korea²Marine Resources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : This study investigated primarily the toxic effects of bis(tributyltin)oxide (TBT) and DDT (Dichlorodiphenyltrichloroethane) on the mortality of adult *Acartia omorii* and barnacle nauplii as well as the hatching rate of *A. omorii*. Subsequently, compound effects of TBT and DDT on the mortality of immature copepods were tested in order to assess whether or not synergistic influence existed in the mixture of sublethal concentration of two pollutants. Mortality of adult *A. omorii* increased as exposure concentration of DDT increased in the range of from 0.0001 to 1 ppm. Egg hatching rate of the copepod showed no distinctive difference in the range between 0.1 and 10 ppm, while barnacle nauplii showed abnormal motility of their appendages in the range of 0.0001 to 1 ppm. Mortality of adult *A. omorii* increased as TBT concentration increased within the range of 1 and 10 ppb, whereas egg hatching rate of the copepod showed no linear response to the same exposure range. Moreover, copepod nauplii were almost motionless even though copepod eggs hatched under the exposure condition of TBT (0~10 ppb) and DDT (0~10 ppm), respectively, suggesting that the nauplii are hard to develop into adult stage. On the basis of the sublethal concentration less than the 24-h LC₅₀, 0.001 ppm (DDT) and 2 ppb (TBT) were selected to confirm the compound effects of two pollutants on the mortality of immature copepods. Mortality of immature copepods under the condition of mixture of the two pollutants was higher than that in the single exposure condition. This result seems to indicate that synergistic effects of sublethal toxicants can make a more hazardous effect on the survival of immature copepods even though the concentration of single toxicant is not lethal to copepods in the marine environment.

Key words : DDT, TBT, Mortality rate, Hatching rate, Synergistic effect, Copepods, *Acartia omorii*

1. 서 론

환경성 내분비장애물질은 잘 분해되지 않고 생물체내에

농축되는 특성으로 가장 많은 관심을 받고 있는 오염물질이다(Jang *et al.* 2004; Shim *et al.* 2000). 트리부틸주석(tributyltin)은 선박표면의 부착생물 제어에 효과적이거나, 해양환경농도가 1 ng · l⁻¹ 미만의 저 농도에서도 굴의 패각기형 및 성전환(imposex)을 일으켜 비표적 생물들(non-

*Corresponding author. E-mail : jhkang@kordi.re.kr

target organisms)의 피해 잠재성이 높은 물질이다(Hugget *et al.* 1992; Sidharthan *et al.* 2002). 플랑크톤의 경우, 미세조류인 *Nannochloropsis oculata*의 성장이 0.0625 nM의 농도에서 억제되었고(Sidharthan *et al.* 2002), 규조류인 *Skeletonema costatum*의 성장은 $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 하에서 둔화되는 것으로 기록되어 있다(Beaumont and Newman, 1986). 동물플랑크톤 관련연구로는 중형 폐쇄생태계를 0~0.56 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 의 범위에서 6개의 상이한 농도조건하에 28일 동안 배양하였을 때, 동물플랑크톤(*Temora longicornis*)의 섭식을 감소가 관찰되었고(Jak *et al.* 1998), 0.8~1.2 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 농도 하에서 일반독성을 확인한 결과 96시간동안 노출된 성체 요각류 *Acartia tonsa*는 대부분이 사망하였다(U'Ren 1983).

유기염소계 농약인 DDT(Dichlorodiphenyltrichloroethane) 역시 내분비장애물질로서 발해만과 중국 측 연안, 황해 및 한국 측 연안 그리고 북극에 이르는 넓은 분포 패턴을 다양한 농도 범위로 나타냈다(Ma *et al.* 2001; Alexeeva *et al.* 2001; Oh *et al.* 2005). DDT는 식물플랑크톤에 흡착되어 동물플랑크톤(*Calanus finmarchicus*와 *C. hyperboreus*)의 섭식작용을 통해 체내에 농축되거나 직접 해수로부터 섭취하여 농축되는 것으로 알려져 있다(Harding *et al.* 1981; Fisk *et al.* 2001). 그리고 성체 요각류의 독성실험 결과가 제한적으로 보고된 예가 있다(Rajendran and Venugopalan 1988; Kim *et al.* 1997). 이에 비해, 국내에서는 DDT에 대한 동물플랑크톤의 일반독성 연구가 미흡하며, 트리부틸주석에 대한 연구 또한 제한적으로 수행되었을 뿐이다(Jang *et al.* 2004).

트리부틸주석과 DDT의 사용이 금지된 이후 많은 곳에서 생물 회복이 진행되고 있음이 보고되었다(Svavarsson 2000; Rees *et al.* 2001). 그러나 해양 퇴적환경에 잔류해 있던 트리부틸주석이나 DDT가 다양한 기작에 의해 용출되어 연안역이나 대형항구 등에 지속적으로 높은 농도가 보고된 바가 있다(Michel and Averty 1999; Binelli *et al.* 2004). 퇴적물에서 유기오염물질이 지속적으로 용출되는 해양 수괴환경에 내성이 약한 요각류 미성숙체(immature copepods)와 유생(nauplii) 혹은 알이 존재할 경우 성체에 비해 민감하게 반응할 것으로 예상된다. 해양환경 내에는 이 같은 내분비 장애물질이 혼합되어 다양한 농도로 존재하며, 상호작용으로 인한 상승효과 가능성이 다분히 잠재되어 있다. 이 가능성은 연안역에서 홍수, 준설 또는 저층교란으로 인한 퇴적물 재 부유외에, 오염된 항구 내에서 스크류에 의해 재부유된 오염물질에 의한 농도 증가 등에 기인할 수 있다(Jones *et al.* 2005; Hamer and Karius 2005).

요각류 알이 부화하여 유생단계를 거쳐 성체가 되기까지 필요한 환경조건은 충분한 먹이, 정상적인 먹이 섭식행동 그리고 수온이다(Mauchline *et al.* 1998). 그러나 해양

환경내의 여러 종류의 오염물질들의 상호작용이 존재할 경우 요각류가 성체로 발달하는 과정을 예측하기 어려워진다. 따라서 오염물질의 일반독성외에 요각류의 성장 및 발달과정에 미치는 각 물질의 상호작용으로 인한 상승 혹은 상쇄효과에 대한 연구가 필요하다. 현재까지 오염물질의 복합독성 연구는 주로 어류와 관련된 연구였고, 어류의 먹이생물로서 잠재성이 큰 요각류에 대한 연구는 알려진 바가 없다(오 2001). 따라서 본 연구에서는 지속성 유기오염물질 중 DDT와 트리부틸주석(TBT)을 대상으로 요각류 사망률에 미치는 상호작용의 영향을 확인하고자 하였다. 이를 위해, 요각류의 성체와 알의 사망률 및 부화율에 미치는 일반독성이 확인되었고, 이를 토대로 선택된 두 물질의 농도간의 상호작용이 요각류 성체의 사망률에 미치는 정도를 확인하고자 하였다. 상호작용 확인을 위한 각 물질의 농도는 성체 요각류의 50% 보다 낮은 사망률을 나타내는 농도를 선택하였다.

2. 재료 및 방법

독성실험 준비과정 및 분석

유기염소계 농약(DDT)

거제도 장목만에서 봄철과 가을철에 우점하는 동물플랑크톤인 요각류 *Acartia omorii*와 따개비의 유생을 대상으로 유기염소계 농약(DDT: Dichlorodiphenyltrichloroethane; 1,1,1-Trichloro-2,2-bis (*p*-chlorophenyl) ethane; Sigma Chemical Co.)에 대한 사망률을 구하였다. *A. omorii*의 알과 성체를 대상으로 부화율(hatching rate) 실험은 2000년 3월에, 성체의 사망률(mortality) 실험은 2000년 5월과 9월에 수행하였다. 그리고 따개비 유생의 사망률 실험은 9월에 수행하였다(Table 1).

부화율실험을 위해, 장목만에서 표준네트(망목크기: 200 μm , 망구직경: 45 cm)를 이용하여 매우 조심스럽게 동물플랑크톤을 채집한 뒤 여과해수에 담은 뒤 하루 동안 순치(acclimation)시켰다. 다음날 건강하게 살아남은 성체 *A. omorii*중 암컷과 수컷을 충분히 골라낸 뒤, 멸균 여과해수가 담긴 비이커 안의 100 μm 망목의 원통 속에 옮겨 두었다. 이는 포란된 알을 성체 요각류가 섭식하는 것을 막기 위함이며, 실험에 충분한 알을 얻기 위해 현장수온으로 조정된 배양기(incubator)안에 24시간 동안 두었다. 해부현미경 하에서 페트리디쉬(petridish) 한개 당 건강한 상태의 알 20개를 옮겨 넣은 후, 15°C, 12L:12D의 조건하에서 48시간 동안 DDT의 농도별 [0 ppm(대조구), 0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm]로 노출시켰다. 각 농도별로 두 개씩의 페트리디쉬를 준비하여 노출 최종부피가 40 ml이 되게 하였다(Table 1).

5월에 수행된 성체 요각류의 사망률 실험은 다음의 과

Table 1. Experimental condition about toxicity test of DDT to hatching rate and mortality of *Acartia omorii* and barnacle nauplii.

Parameters	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Test type	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal
Test chemical	DDT	DDT	DDT	DDT
Duration (hrs)	48	24	24	24
Endpoint	Hatching rate	Mortality	Mortality	Mortality
Test concentrations (ppm)	0, 0.1, 1, 10	0, 0.01, 0.1, 1, 10	0, 0.001, 0.01, 0.1, 1	0, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1
Temperature (°C)	15	20	20	22.6
Medium	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater
Photoperiod	12L:12D	12L:12D	12L:12D	12L:12D
Test chamber size	Petridish (90 mm × 15mm)	Beaker (250 ml)	Beaker (250 ml)	Six-well cell culture cluster
Test solution volume (ml)	40	100	100	15
Age of test animals	Egg	Adult <i>Acartia omorii</i>	Adult <i>Acartia omorii</i>	Barnacle nauplii
Number of animals per chamber of each concentration	20	10	10	6
Number of replicates per concentration	Duplicates	Triplicates	Triplicates	Triplicates
Experimental periods	21-25 March 2000	29 May-2 June 2000	20-25 September 2000	20-25 September 2000

정을 따랐다. 표준네트(망목크기: 200 μm , 망구직경: 45 cm)를 이용하여 동물플랑크톤을 채집한 후, 여과해수가 담긴 유리병에 옮겼다. 실험실에서 해부현미경 하에서 *A. omorii* 성체를 분리하여 0.2 μm 여과지로 거른 멸균 여과해수가 담긴 비이커에 옮겼다. 24시간 동안 순치시킨 뒤, 건강하게 살아남은 성체들을 분리하여, 노출농도 구배[0 ppm(대조구), 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm] 조건이 조성된 비이커에 10개체씩 옮겨 넣었다. 최종 노출 부피는 100 ml로 맞추었고, 실험에 사용된 개체수는 총 250 개체였다. 이후 20°C, 12L:12D로 맞추어진 배양기에서 24시간동안 노출하였고, 이후 생사여부를 해부현미경하에서 확인하였다. 생사여부 기준은 해부침으로 건드려도 움직이지 않는 것을 죽은 것으로 간주하였다(Table 1).

9월에 수행된 성체 요각류의 사망률 실험 조건은 5월 실험방법과 동일하게 수행되었고, 독성 노출범위[0 ppm(대조구), 0.001 ppm, 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm]는 5월에 비해 낮게 조정되었다(Table 1). 9월은 따개비류의 번식이 활발한 기간으로 우점하는 특성 때문에 따개비 유생의 독성노출실험이 수행되었다. 망목크기가 200 μm 인 표준네트로 따개비류의 유생을 채집한 후 멸균여과해수가 담긴 유리병에 옮겼다. DDT 노출농도는 0 ppm(대조구), 0.0001 ppm, 0.001 ppm, 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm의 6단계로 하였고, 각 농도 당 세 번 반복(triplicates) 실험을 하였

다. 노출실험용기로 6구 cell culture cluster를 사용하였으며, 각 농도 well에 유생 6개체씩 투입하였다(Table 1). 이 과정에서 발생할 수 있는 노출농도 희석효과를 배제하기 위해 미리 각 농도의 용액에서 여러 번 옮긴 후 최종적으로 실험용기에 옮겼다(Centeno *et al.* 1993). 전처리기간 끝난 뒤 22.6°C, 12L:12D의 조건으로 맞춰진 배양기안에서 24시간 동안 노출시켰다. 노출과정 중 배양액의 증발을 막기 위해 뚜껑을 닫은 후 파라필름으로 밀봉하였다. 24시간 경과 후, 생사여부를 해부현미경하에서 구분하였고, 해부침으로 건드려도 부속지(appendage)가 움직이지 않는 것은 죽은 것으로 간주하였다.

트리부틸주석(TBT)

트리부틸주석(bis(tributyltin)oxide, $\text{C}_{24}\text{H}_{54}\text{OSn}_2$, Fluka Co.)에 대한 요각류의 사망률과 부화율의 변화를 확인하기 위한 실험이 2001년 2월에 수행되었다. 노출농도는 Huggett *et al.*(1992)에서 제시된 요각류의 LC_{50} (1,000 ppt)를 근간으로 수행되었던 1999년 4월 결과에 근거하여 설정하였다(Table 2).

2월 5일-10일 동안에 수행된 1차 실험의 농도범위는 *A. omorii* 성체를 대상으로 0 ppt(대조구), 0 ppt + 1 ml/ (에틸알코올), 0.1 ppt, 1 ppt, 10 ppt, 100 ppt로 설정하였다. 2차 농도범위는 0 ppt(대조구), 100 ppt, 1,000 ppt,

Table 2. Experimental condition about toxicity test of TBT to hatching rate and mortality of adult *Acartia omorii*.

Parameters	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4	Condition 5	Condition 6	Condition 7
Test type	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal
Test chemical	TBT	TBT	TBT	TBT	TBT	TBT	TBT
Duration (hrs)	2	24	24	24	24	24	48
Endpoint	Mortality	Mortality	Mortality	Mortality	Mortality	Mortality	Hatching rate
Test concentrations	0, 100, 1000, 10000 ppt	0, 0+1 m/ (alcohol), 0.1, 1, 10, 100 ppt	0, 100, 1000, 10000 ppt	0, 0+1 m/(alcohol), 1000 ppt, 0+10 m/ (alcohol), 10000 ppt	0, 0+1 m/ (alcohol), 0.1, 1, 10, 100 ppb	0, 1, 3, 5, 8, 10 ppb	0, 1, 3, 5, 8, 10 ppb
Temperature (°C)	Ambient	5.3	5.3	5.3	6	6	15
Medium	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater
Photoperiod	Dark	12L:12D	12L:12D	12L:12D	12L:12D	12L:12D	12L:12D
Test chamber size	Nalgene bottle (2 l)	Beaker (250 ml)	Beaker (250 ml)	Beaker (250 ml)	Beaker (250 ml)	Beaker (250 ml)	Six-well cell culture cluster
Test solution volume (ml)	2000	100	100	100	100	100	15
Age of test animals	Copepods	Adult <i>Acartia omorii</i>	Adult <i>Acartia omorii</i>	Adult <i>Acartia omorii</i>	Adult <i>Acartia omorii</i>	Adult <i>Acartia omorii</i>	Eggs of <i>Acartia omorii</i>
Number of animals per chamber of each concentration	Community	10	10	10	10	10	10
Number of replicates per concentration	One	Triplicates	Triplicates	Triplicates	Triplicates	Triplicates	Triplicates
Experimental periods	14 April 1999	5-10 February 2001	5-10 February 2001	5-10 February 2001	20 February 2001	21-22 February 2001	23 February 2001

10,000 ppt, 3차 농도범위는 0 ppt(대조구), 대조구 + 1 m/(에틸알코올), 대조구 + 10 m/(에틸알코올), 1,000 ppt, 10,000 ppt로 하여 용제로 쓰인 알코올의 영향을 동시에 고려하였다(Table 2).

2월 19일-24일에 수행된 실험은 U'Ren(1983)의 실험농도범위를 참조하여 1차 실험은 0 ppb(대조구), 대조구 + 1 m/(에틸알코올), 0.1 ppb, 1 ppb, 10 ppb, 100 ppb로, 2차 실험은 0 ppb(대조구), 1 ppb, 3 ppb, 5 ppb, 8 ppb, 10 ppb로 하였다. *A. omorii* 성체의 사망률 실험을 위한 사전준비 조건은 DDT 실험방법에 소개된 것과 동일하였다. *A. omorii* 성체의 부화율 실험시 노출농도 조건은 0 ppb(대조구), 1 ppb, 3 ppb, 5 ppb, 8 ppb, 10 ppb로 하였다. 부화율 실험을 위한 사전 준비조건은 DDT 실험방법과 동일하였다(Table 2).

복합독성의 영향

지속성 유기오염물질인 TBT와 DDT의 상승효과를 확인키 위해, 각 물질의 반수치사농도(LC₅₀) 미만의 값이 선

택되어야 한다. 따라서 각 물질에 대한 요각류 성체의 반수치사 농도를 토대로 TBT는 2 ppb, DDT는 0.001 ppm을 선택하였다(Table 3). 선택된 두 물질의 농도를 섞은 뒤 *A. omorii* 성체에게 상승효과(synergistic effect)를 일으킬 가능성을 확인하고자 하였다. 노출농도 조건은 대조구, TBT(2 ppb), DDT(0.001 ppm), TBT+DDT로 구성하였다. 전처리가 끝난 뒤 20°C, 12L:12D의 조건으로 맞춰진 배양기 안에서 24시간 동안 노출시켰다(Table 3).

통계처리

각 유기오염물질에 대한 요각류의 반수치사농도(LC₅₀)는 US EPA에서 제공된 통계처리 프로그램(EPA probit analysis program used for calculating LC/EC values, version 1.5)을 이용하여 구하였다. 반수치사농도는 각 유기오염물질의 최종농도구배에서 나타난 성체 요각류의 사망률 결과를 대상으로 구하였다. DDT는 0, 0.001, 0.01, 0.1, 1 ppm 범위를, TBT는 0, 1, 3, 5, 8, 10 ppb 범위가 최종 선택되었다.

Table 3. Experimental condition about synergistic toxicity test of TBT and DDT to mortality of immature *Acartia omorii*.

Parameters	Condition 1	Condition 2	Condition 3
Test type	Static non-renewal	Static non-renewal	Static non-renewal
Test chemical	TBT+DDT	TBT+DDT	TBT+DDT
Duration (hrs)	24	24	24
Endpoint	Mortality	Mortality	Mortality
Test concentrations	Control, DDT(0.001 ppm), TBT(3 ppb), DDT+TBT	Control, DDT(0.001 ppm), TBT(1 ppb), DDT+TBT	Control, DDT(0.001 ppm), TBT(2 ppb), DDT+TBT
Temperature (°C)	20	20	20
Medium	Filtered seawater	Filtered seawater	Filtered seawater
Photoperiod	12L:12D	12L:12D	12L:12D
Test chamber size	Beaker (250 ml)	Beaker(250 ml)	Beaker(250 ml)
Test solution volume (ml)	100	100	100
Age of test animals	Immature <i>Acartia omorii</i>	Immature <i>Acartia omorii</i>	Immature <i>Acartia omorii</i>
Number of animals per chamber of each concentration	10	10	10
Number of replicates per concentration	Triplicates	Triplicates	Triplicates
Experimental periods	14 June 2001	15 June 2001	16-17 June 2001

3. 결 과

유기염소계 농약(DDT) 독성

부화율

첫 번째 실험(3월 21일-23일)에서의 부화율은 대조구보다 실험구에서 높게 나타났고, 동일 처리구내에서의 변이가 크게 나타났다(Fig. 1A). 평균값 측면에서 0.1 ppm에서의 부화율이 대조구에 비해 낮았고, 1과 10 ppm에서 더 높게 나타났다. 두 번째 실험(3월 22일-24일)에서도 0.1과 1 ppm에서의 부화율이 대조구보다 높았고(Fig. 1B), 첫 번째 실험과 달리 10 ppm에서 대조구보다 낮게 나타났다. 결과적으로 이 실험 농도 범위가 요각류란의 부화율에 유의한 저해효과를 끼친다고 보기 어려웠다. 그러나 두 실험 결과에서 대조구의 부화율이 50%에도 못 미쳤던 점을 보아 자연상태에서의 부화율도 낮은 시기였던 것으로 여겨진다.

사망률

(1) 성체 요각류

Rajendran and Venugopalan(1988)의 결과에 근거하여 DDT 노출 농도 구배를 0 ppm (control), 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm로 결정하여, 요각류 사망률 실험을 하였다. 실험횟수는 5월 29일부터 6월 2일까지 총 두 세트의 실험을 하였고, 각각 세 반복하였다(Fig. 2). 24시간 노출 후 두 실험에서 나타난 대조구의 사망률은 10% 내외였고, 실험구에서는 전반적으로 농도가 증가함에 따라 사망률이 증가하였다.

첫 번째 실험에서 24시간 경과 후, 0.01 ppm 농도에서 60%의 사망률을 나타냈고(Fig. 2A), 1 ppm과 10 ppm에서 모두 사망률 100%였다. 두 번째 실험에서는 10 ppm에서만 사망률이 100%로 나타났으며, 1 ppm에서는 85%를 나타냈다(Fig. 2B). 1 ppm에서의 사망률의 차이는 있었으나, DDT의 농도 증가에 따른 사망률 증가경향은 첫 번째

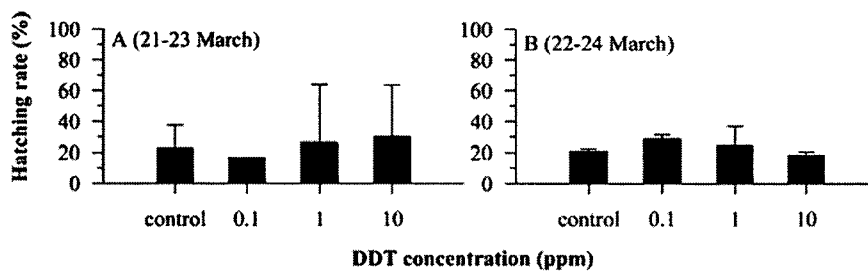


Fig. 1. Hatching rate (%) of copepod eggs when they were exposed to DDT solution at the concentrations of 0, 0.1, 1, 10 ppm for 48 hrs in March 2000.

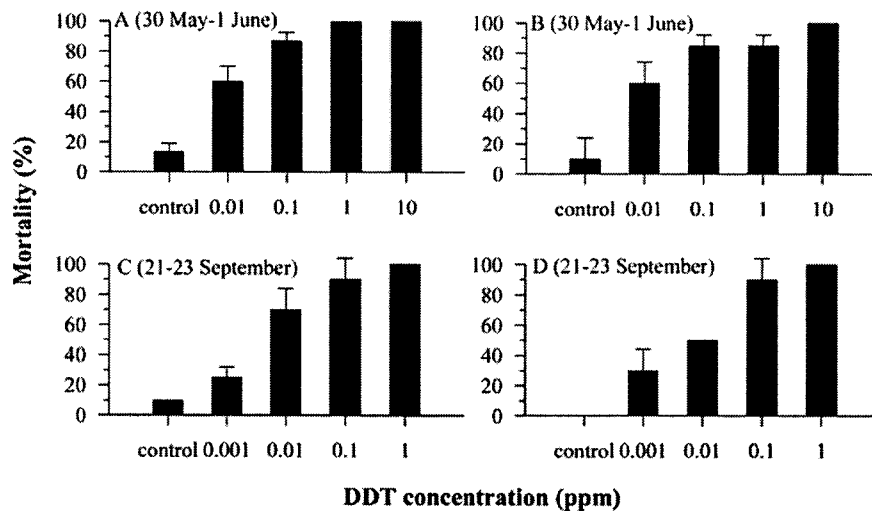


Fig. 2. Mortality of *Acartia omorii* adults when they were exposed to DDT solution for 24 hrs at the concentrations of 0, 0.01, 0.1, 1, 10 ppm in May-June and 0, 0.001, 0.01, 0.1, 1 ppm in September 2000.

실험과 같았다. 또한 두 실험에서 나타난 LC_{50} 은 대략 0.01 ppm 근처라는 것도 유사하였다. 따라서 정확한 LC_{50} 을 얻기 위해, 0.001 ppm 농도를 삽입하고, 10 ppm 농도를 제거한 후 추가 실험을 하였다.

이에 추가된 실험은 9월 20일-25일 간에 수행되었고, DDT 노출 농도구배를 Rajendran and Venugopalan(1988)의 결과와 5월 실험결과에 준하여 0 ppm(대조구), 0.001 ppm, 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm으로 설정하였다. 두 세트의 실험이 수행되었고 각 세트 당 세 번씩 반복하였다. 24시간 경과 후 대조구의 자연 사망률은 10% 이내였고, 실험구에서는 농도 증가에 따른 사망률 증가를 나타냈다.

첫 번째 실험에서 노출 24시간 후에 0.01 ppm 농도에 투입된 10개체 중에 70% 정도가 죽어있었고(Fig. 2C), 0.1 ppm 농도에서는 90% 정도를, 1 ppm 농도에서는 100%의 사망률을 나타냈다. 새로이 추가된 농도 0.001 ppm에서 나타난 사망률은 0.01 ppm 농도의 절반정도를 나타냈으며, 이 경향은 두 번째 실험에서도 유사하게 나타났다.

두 번째 실험에서는 노출 24시간 후에 0.01 ppm 농도에서 투입된 10개체 중 50%가 사망하였고(Fig. 2D), 0.1 ppm에서는 90% 정도가, 1 ppm에서는 모두 사망률이 100%였다. 이 결과는 지난 5월의 실험결과와 유사한 양상이며, 결과적으로 DDT의 농도가 증가함에 따라 나타나는 사망률의 전반적 경향은 두 실험결과에서 모두 같았다. 총 9회 반복된 성체 요각류 *Acartia omorii*의 결과를 통해 투입된 개체의 절반정도가 사망하는 DDT 농도는 0.01 ppm으로 판단된다.

(2) 따개비 유생

9월 20일-25일의 기간동안 따개비 유생의 DDT에 대한 사망률 확인을 위해 농도구배를 0 ppm(대조구), 0.0001 ppm, 0.001 ppm, 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm로 두었고, 24시간동안 노출시켰다. 상기 농도 조건에서 24시간 노출 후 50%의 사망률을 나타낸 실험구는 없었고, 해부침으로 건드렸을 때 약간씩 부속지(appendage)의 움직임이 있었

Table 4. Mortality of barnacle nauplii when they were exposed to DDT solution at the concentrations of 0(control), 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1 ppm for 24 hrs in September 2000.

Concentration (ppm)	Replicate 1			Replicate 2			Replicate 3		
	Live	Dead	Mortality (%)	Live	Dead	Mortality (%)	Live	Dead	Mortality (%)
Control	6	0	0	6	0	0	6	0	0
0.0001	6	0	0	6	0	0	6	0	0
0.001	6	0	0	6	0	0	5	1	16.7
0.01	5	1	16.7	5	1	16.7	4	2	33.3
0.1	4	2	33.3	5	1	16.7	6	0	0
1	4	2	33.3	5	1	16.7	4	2	33.3

다(Table 4). 해부현미경하에서 따개비류의 유생(nauplii)은 반복적인 부속지의 움직임이 관찰되었다. 따라서 1초 동안 반복하여 나타나는 부속지의 움직임을 해부현미경하에서 계수기로 측정하여 A.M.(appendage motility)/sec로 표현하였다. 노출 24시간의 결과에서 대조구에서는 노출 24시간동안 동일하게 5~6 A.M./sec를 나타냈으며, 0.0001 ppm에서는 2~3 A.M./sec로 줄어들었고, 운동성도 대조구에 비해 훨씬 감소하였다. 0.001 ppm에서는 건드려야만 appendage motility를 보였고, 간헐적인 이동성만을 보였다. 0.01 ppm에서는 제자리에서만 appendage motility를 보였고, 0.1 ppm과 1 ppm의 경우도 같은 양상을 보였다. 본 실험의 노출농도 범위에서는 따개비 유생의 사망률이 50%에는 이르지 않았으나, 고유 운동성을 상실하는 경향은 뚜렷하였다.

TBT가 성체 요각류의 사망률 및 부화율에 미치는 영향

Huggett *et al.*(1992)가 제시한 요각류의 LC₅₀ 1,000 ppt를 따라 요각류 군집을 대상으로 급성독성 실험을 수행하였다. 1999년 4월에 수행된 본 연구에서 노출된 TBT 농도구배는 0 ppt(대조구), 100 ppt, 1,000 ppt, 10,000 ppt였고, 실험구에서의 사망률은 각각 66%, 63% 그리고 72%를 나타냈다(Fig. 3A).

2001년 2월 5일-10일간의 실험 시, 위 결과를 근거로 최대 노출농도를 100 ppt로 정하여, 농도구배를 0 ppt(대조구), 0 ppt + 알코올(1 ml), 0.1 ppt, 1 ppt, 10 ppt, 100 ppt로 두었다. 실험 결과 최대 사망률이 10%를 넘지 않았으며, 100 ppt 농도에 24시간 노출된 성체 *Acartia omorii*의 운동성이 대조구에 비해 다소 약화되었다. TBT를 용해시키는데 사용된 에틸 알코올 1 ml를 첨가한 대조구 + 알코올에서의 결과가 대조구와 크게 다르지 않았다(Fig. 3B).

따라서 최대 노출농도를 상승시켜 농도구배를 0 ppt(대조구), 100 ppt, 1,000 ppt, 10,000 ppt까지 높였다. 이때 stock의 농도는 100 ppb였고, 세 번 반복실험 한 결과, 사망률이 10,000 ppt에서 100%를 나타낸 반면, 1,000 ppt와 100 ppt의 사망률의 차이가 크지 않았다(Fig. 3C). 다만 1000 ppt에 24시간 노출되었던 성체 *A. omorii*의 운동성이 100 ppt 보다 약화되었을 뿐이었다. 그리고 100 ppt에 노출된 성체들은 간헐적으로 스스로 움직였지만, 1,000 ppt에서는 건드려야만 움직임을 나타냈다. 여기서 10,000 ppt를 만드는데 사용된 에틸알코올이 10 ml이 들어갔는데, 여기에서 나타난 *A. omorii*의 사망률이 TBT와 에틸알코올 중 어떤 요인에 의해 더 영향을 받았는지 독성반응을 확인해야 할 필요가 있었다. 세 번째 실험에서 0 ppt(대조구), 0 ppt + 1 ml(에틸알코올), 0 ppt + 10 ml(에틸알코올), 1,000 ppt, 10,000 ppt의 조건에서 실험한 결과 알코

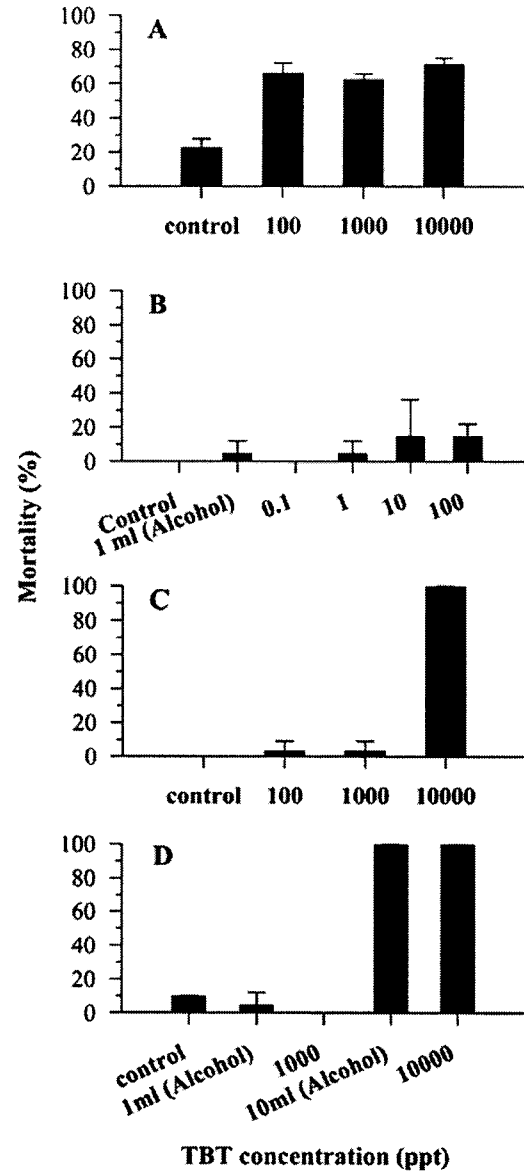


Fig. 3. Mortality of adult *Acartia omorii* after 2 hrs (A) and 24 hrs (B, C, D) exposure in each TBT concentration.

올 10 ml 조건에서 사망률이 100%였다 (Fig. 3D). 1,000 ppt에 노출된 성체 *A. omorii*의 운동성은 대조구에 비해 매우 약했으며, 앞선 실험결과와 유사한 결과였다.

2월 19일-24일 동안의 실험에서는 농도구배를 0 ppb(대조구), 0 ppb+1 ml(에틸알코올), 0.1 ppb, 1 ppb, 10 ppb, 100 ppb로 설정하였다. 노출실험결과 0 ppb(대조구), 0.1 ppb와 1 ppb까지의 사망률은 뚜렷한 경향을 보이지 않은 반면, 10 ppb와 100 ppb에서는 100%의 사망률을 나타냈다(Fig. 4A).

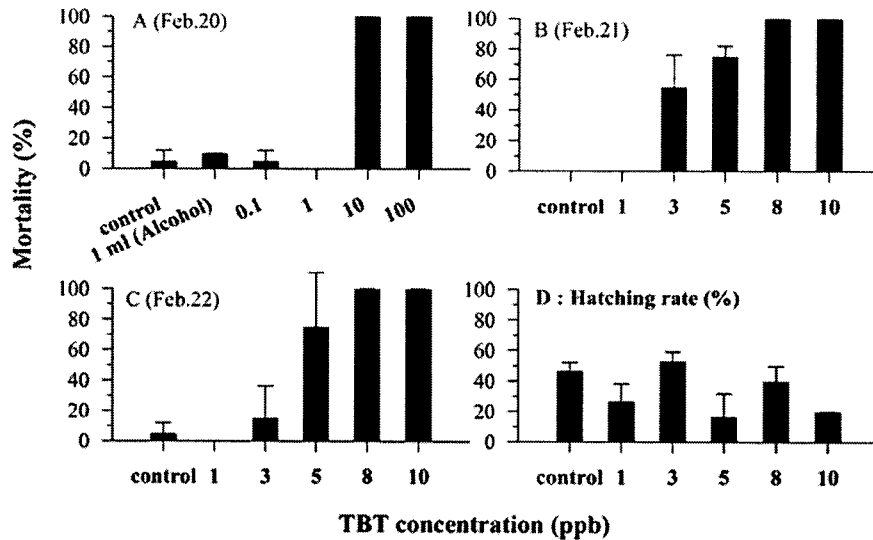


Fig. 4. Mortality of adults and egg hatching rate of *Acartia omorii* in each TBT concentration.

따라서 농도구배를 0 ppb(대조구), 1 ppb, 3 ppb, 5 ppb, 8 ppb, 10 ppb으로 재조정하였다. 노출 실험 결과 8 ppb와 10 ppb에서의 사망률이 100%였고, 5 ppb에서는 모두 70% 보다 높게 나타났다. 3 ppb에서 사망률은 2월 21일에 55%를, 2월 22일에는 15%였다(Fig. 4B, 4C). 결과적으로 본 실험에서 *A. omorii*의 LC₅₀는 대략 3 ppb로 판단되며, 이를 유기염소계 농약인 DDT(0.001 ppm)와의 상승효과(synergistic effect) 여부를 확인하기 위한 농도로 결정하였다. 따라서 상승효과를 위한 처리는 대조구(no treatment), DDT(0.001 ppm), TBT(3 ppb), DDT+TBT로 하였다.

TBT 독성이 요각류 부화율에 미치는 영향을 파악하기

위한 노출시간을 48시간으로 하였다(Fig. 4D). 그 결과 3 ppb에서의 결과를 제외한 나머지 농도 1 ppb, 5 ppb, 8 ppb 그리고 10 ppb에서의 부화율이 높은 변이를 보이며 대조구 보다 낮게 나타났다. 전반적으로 TBT 농도증가에 따른 부화율의 감소경향이 나타났다(Fig. 4D).

복합독성(compound effect)

DDT와 TBT의 복합독성을 확인하기 위한 실험은 6월 13일-18일에 시행되었으며 이 시기에 출현한 *A. omorii*는 모두 미성숙체였다. 앞서 복합독성영향을 확인하기 위해 결정된 농도는 DDT의 경우 0.001 ppm과 TBT 3 ppb, 그

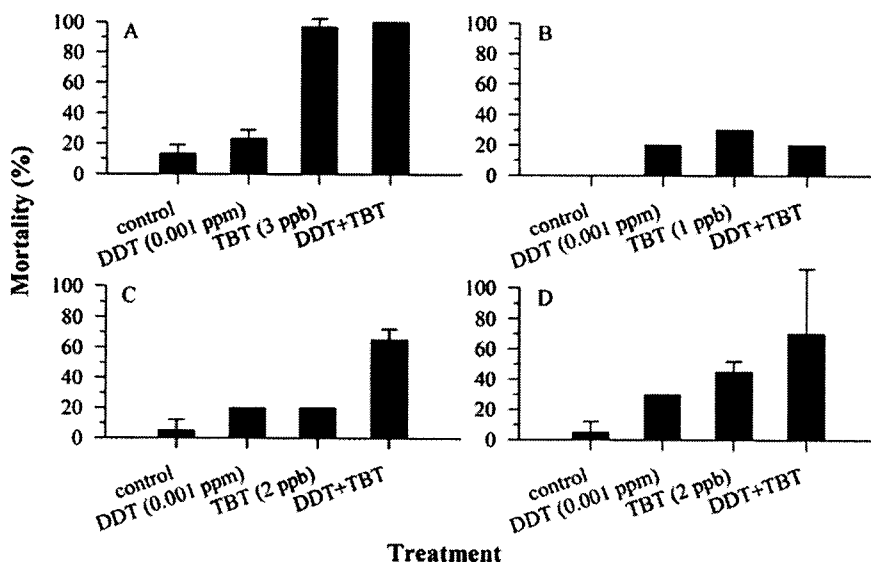


Fig. 5. Synergistic effect of both TBT and DDT on the mortality of immature *Acartia omorii*.

리고 두 물질의 혼합조건이었다. 그러나 TBT 3 ppb에서 24시간 노출후의 사망률이 모두 90% 이상이었고(Fig. 5A), TBT 1 ppb에서는 30%에 그쳐, 대상 TBT 농도를 2 ppb로 수정하였다 (Fig. 5B). 두 차례 실험한 결과 첫 번째의 경우 DDT 0.001 ppm의 농도와 TBT 2 ppb 농도 각각에서 20% 이하의 사망률을 기록하였다. 그러나 두 번째 실험에서는 DDT 0.001 ppm에서 50% 이하의 사망률과 TBT는 2 ppb 농도에서 50% 이하로 나타났다(Figs. 5C, 5D). 두 가지 혼합물질에 노출된 결과에서는 모두 60% 이상의 사망률을 나타내 복합독성의 상승효과가 있는 것으로 나타났다(Figs. 5C, 5D).

4. 토 의

급성 및 만성 독성시험은 수생생물에 대한 인간기원물질의 독성 및 환경영향농도를 평가하는 표준방법으로, 개체수준에서 나타나는 직접적인 영향 파악을 그 목적으로 한다. 자연환경에 노출되었거나, 노출될 것으로 예견되는 독성물질의 농도 범위를 사전에 설정하여 종별 반응양상을 확인하게 되면, 향후 접촉가능성이 높은 생물들의 반응양상을 사전 예측할 수 있다. 그러나 이러한 예측을 어렵게 하는 요인으로 저농도의 오염물질이 생물과 접촉할 경우 생리적 과정에 미세한 영향을 끼쳐 결과적으로 중간관계의 변화로 인한 개체군 혹은 나아가 군집구조 변화들을 수 있다(Preston and Snell 2001). 이외에 본 연구결과에서 확인된 것으로 하나 이상의 오염물질 혼합이 생물체의 치사율을 높이는 상승작용을 들 수 있다. 성체 요각류(*Acartia omorii*)를 이용한 일반독성 실험에서 사망률이 30% 미만이었던 DDT와 TBT의 농도가 혼합된 경우 사망률이 70% 이상으로 상승되었음이 관찰되었다.

DDT와 TBT에 대해 현재까지 알려진 생물의 독성반응은 육상에서 해양까지, 단세포에서 다세포의 생물에 이르기까지 매우 광범위하게 보고되어 있다. 어류의 주먹이원(십각류, 유형류, 요각류 등) 중에 요각류에 속하는 *Calanus finmarchicus*는 DDT가 흡착된 식물플랑크톤을 초식하여 체내에 축적시키는 종으로 알려져 있다(Harding et al. 1981). 한편 십각류인 *Lucifer* sp.와 요각류인 *Acartia* sp.와 *Eucalanus* sp.는 화살벌레인 *Sagitta* sp.보다 DDT에 민감하게 반응하여 낮은 LC_{50} (0.012-0.028 ppm)를 나타냈다. 이에 비해 화살벌레는 0.037 ppm(LC_{50})으로 나타나 십각류와 요각류에 비해 내성이 강한 것으로 나타났다. 이태리 북부의 호수에서는 과실에 의해 강을 통한 DDT의 유입이 홍합류의 생식 교란을 야기하였으며(Binelli et al. 2004), 한편 육상에서는 DDT에 노출된 설치류가 웅성 호르몬 분비 이상을 나타냈음이 보고되었다(Lee et al. 2003). 이러한 DDT는 사용이 금지되었음에도 불구하고 수 십 년

간 지속적으로 거의 모든 생물계에서 발견된다. 이 유기독성물질이 해양환경에 도달하는 경로는 인간기원물질의 직접적인 방류 혹은 강물 내지는 홍수에 의한다. 연안역에 도달한 DDT는 증산, 산화, 가수분해, 미생물 활동 및 식물체로의 이동과정을 거쳐 분해된다(김 등 2002). 그러나 연안해역으로 이동되어 분해되지 않은 DDT는 해수와 해양 저니토 중에 잔류하게 되며, 해양 동식물에 농축되는 특성으로 인해 다양한 경로를 통한 이동가능성이 매우 높다고 할 수 있겠다.

TBT의 경우, 식물플랑크톤의 크기분급(초미세, 미소, 미세플랑크톤)에 따른 일차생산력이 상이하게 나타났다. 미세플랑크톤(microplankton)은 0.01, 0.6, 10 nM 농도 구배에서 증가된 내성을 나타냈고, 초미세플랑크톤은 일차생산력이 증가하였으나, 미소플랑크톤(nanoplankton)의 일차생산력은 감소하였다(Petersen and Gustavson 1998). TBT는 극소량으로도 해양 요각류인 *Acartia tonsa*에 미치는 영향이 중금속인 구리에 비해 10배 독성이 높게 나타났다. *A. tonsa*에 대한 TBT의 96h LC_{50} 는 1 ppb였고, 저서성 요각류인 *Nitocra spinipes*의 96h LC_{50} 는 2 ppb로 나타나 저서성 요각류의 내성이 더 높은 것으로 나타났다(U'Ren 1983). 곤쟁이류의 경우 0, 0.56, 1.15, 3.07, 6.12 ppb의 구배하에서 6주간 노출되었을 때, 1.15 ppb 이상의 농도구에서 대조구에 비해 사망률이 40% 이상을 나타냈다(Jee et al. 2002). 어류인 넙치의 경우 3.2 ppb 이상의 농도에서 성장 및 산소 소비율이 감소되었다(강 등 2002).

위 내용에 따르면 해양생물은 유기오염물질인 DDT와 TBT에 노출되는 농도와 기간에 비례하여 사망률이 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 유형은 본 연구결과에서도 나타났는데, 성체 요각류(*A. omorii*)의 급성독성반응 실험에서도 농도증가에 따른 사망률 증가가 나타났다. 이 사망률을 토대로 계산된 각 유기오염물질에 대한 성체 요각류(*A. omorii*)의 반수치사농도(LC_{50})는 DDT의 경우, 다른 생물군 및 엽하구에 서식하는 요각류에 비하여 매우 낮게 나타나 민감도가 높은 것으로 나타났다(Table 5). 한편 TBT의 경우에는 노출시간이 다르지만, 성체 요각류(*A. omorii*)의 반수치사농도가 엽하구에 서식하는 요각류에 비해 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 그리고 단각류인 *Gammarus* sp.의 반수치사 농도와 비슷한 수준을 나타냈고, 십각류인 *Palaemonetes* sp.와는 큰 차이를 나타냈다(Table 5). 이와 같이 알고 있는 농도에 대한 생물의 반응 결과는 향후 예측을 가능케 한다. 그러나 때로는 생물체내의 조건과 환경이 미치는 영향의 복잡한 상호관계가 예측을 어렵게 하기도 한다.

해양 부유성 요각류의 사망률은 포식(predation)과 수온, 먹이용도, 발달시간의 지연정도와 관련이 있으며, 정상 환경이라면 사망률은 가입물에 의해 균형을 이룬다(Hirst

Table 5. Median lethal concentration (LC₅₀) values of DDT and tributyltin to various aquatic organisms.

	Life stage	LC ₅₀ (test duration)	Medium	Sources
DDT (ppm)				
Crustacea, Copepoda				
<i>Acartia omorii</i>	Adult	0.006 (24 hrs)	Filtered seawater	Present study
<i>Acartia</i> sp.	Adult	0.028 (24 hrs)	Filtered estuarine water	Rajendran and Venugopalan (1988)
<i>Eucalamus</i> sp.	Adult	0.012 (24 hrs)	Filtered estuarine water	Rajendran and Venugopalan (1988)
Crustacea, Decapoda				
<i>Lucifer</i> sp.	Adult	0.026 (24 hrs)	Filtered estuarine water	Rajendran and Venugopalan (1988)
Chaetognatha				
<i>Sagitta</i> sp.	Mature	0.037 (24 hrs)	Filtered estuarine water	Rajendran and Venugopalan (1988)
TBT (ppb)				
Crustacea, Copepoda				
<i>Acartia omorii</i>	Adult	4.1 (24 hrs)	Filtered seawater	Present study
<i>A. tonsa</i>	Adult	1.0 (96 hrs)	Brackish water	U'ren (1983)
<i>A. tonsa</i>	NR	1.1 (48 hrs)	Brackish water	Bushong <i>et al.</i> (1998)
<i>Eurytemora affinis</i>	NR	2.5 (48 hrs)	Brackish water	Bushong <i>et al.</i> (1998)
Crustacea, Amphipoda				
<i>Gammarus</i> sp.	Adult	5.3 (96 hrs)	Brackish water	Bushong <i>et al.</i> (1998)
Crustacea, Decapoda				
<i>Palaemonetes</i> sp.	NR	>31 (96 hrs)	Brackish water	Bushong <i>et al.</i> (1998)

Remarks: NR means not reported.

and Kierboe 2002). 생물이 중 수준에서 독성물질에 반응하는 양태는 관련 종의 발달단계, 건강상태, 성별 및 행동 패턴에 의해 좌우된다(Landis and Yu 1995). 생물이 고농도의 오염물질에 노출된 경우 생존, 성장 및 생식과정에 명백한 영향을 나타내며, 반면 저농도 하에서는 생물의 체내 생리적 과정에 미미한 영향을 끼친다(Preston and Snell 2001). 이때는 오염물질이 중 수준에 직접적으로 영향을 주는 측면보다 중간관계에 교란을 가져온다. 독성이 동물플랑크톤의 물리적 수용기(mechanoreception)와 화학적 수용기(chemoreception)의 기능을 저하시켜 먹이 섭식 성공률의 감소를 가져와 발달 및 성장을 저해한다(Gomez *et al.* 1997). 유생단계에서의 성장 및 발달은 먹이보다 수온에 연관성이 높은 것으로 알려져 있고, 미성숙체의 성장은 먹이환경이 더 중요하다(Hopcroft and Roff 1998). 부유성 요각류의 유생과 달리 저서생물인 따개비 유생의 운동성은 최종 정착지의 탐색이라는 측면에서 중요하게 고려될 수 있다. 본 연구에서 따개비 유생의 경우, DDT 노출농도범위에서 운동능력이 대조구에 비해 크게 상실되는 것으로 나타났다. 또한 요각류 란의 부화율이 TBT 농도에 따른 뚜렷한 경향은 없었지만, 노출농도 증가에 따라 대략적으로 감소하였으며 이는 성체가 될 수 있는 가능성이 그만큼 감소함을 의미한다. 이와 같이 독성 물질이 요각류의 생존에 미치는 영향보다 중 수준의 발달 및 성장

과정을 저해하여 비롯되는 기능 상실은 생태적 지위(ecological niche)의 변화에 의한 먹이망 구조 및 기능의 변화로 이어질 수 있다. 이러한 측면에서 단일 오염물질의 아치사 농도가 종의 생리적 안정성 및 행동을 저해하여 간접적으로 종 간 관계에 영향을 줄 수 있다(Preston and Snell 2001). 반면 두 가지 이상의 아치사 수준의 독성물질이 혼합될 경우 상승효과에 기인한 중 수준의 사망률 증가와 같은 직접적인 영향을 끼치는 것으로 나타났다(Fig. 5).

DDT와 TBT의 사용이 금지된 지 오랜 시간이 경과되었으나, 쉽게 분해되지 않는 특성으로 인해 연안과 대형 항구 내 퇴적물에 기인한 수층에서의 높은 농도가 보고된 바가 있다(Binelli *et al.* 2004; Jones *et al.* 2005; Hamer and Karius 2005). 퇴적물에 흡착되어 있던 물질이 저층 퇴적물 교란과 함께 재 부유되는 경우, 홍수에 의한 유입 그리고 선박 밸러스트 수에 의한 항만 해수의 국내·외로의 수송은 오염물질의 혼합작용의 가능성을 높일 수 있다. 본 연구결과에서 관찰된 오염물질의 혼합에 의한 상승작용은 해양환경에 존재하는 저농도의 여러 오염물질들이 동물플랑크톤의 행동장애를 넘어 치사수준으로 이끌 수 있음을 시사한다. 따라서 항구나 연안역에서 요각류를 중심으로 개체군 동태 파악을 위한 자연 사망률을 고려할 때 오염물질의 상승효과 가능성을 고려하여 다루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 강주찬, 황윤기, 지정훈. 2002. TBT의 노출에 따른 넙치, *Paralichthys olicaceus*의 생존, 성장 및 산소소비의 변화. *Kor. J. Environ. Toxicol.*, 17, 219-224.
- 김정호, 오윤근, 김정배. 2002. 제주도 연안 해양환경 중에서 유기인계 농약의 잔류. *J. Environ. Toxicol.*, 17, 341-346.
- 오재룡. 2001. 내분비계 장애물질이 유용수산자원에 미치는 영향에 관한 연구. 해양수산부, BSPG 325-00-1409-4. 331 p.
- Alexeeva, L.B., W.M.J. Strachan, V.V. Shlychkova, A.A. Nazarova, A.M. Nikanorov, L.G. Korotova, and V.I. Koreneva. 2001. Organochlorine pesticide and trace metal monitoring of Russian rivers flowing to the Arctic Ocean: 1990-1996. *Mar. Pollut. Bull.*, 43, 71-85.
- Beaumont, A.R. and B.P. Newman. 1986. Low levels of tributyltin reduce growth of microalgae. *Mar. Pollut. Bull.*, 19, 294-296.
- Binelli, A., R. Bacchetta, P. Mantecca, F. Ricciardi, A. Provini, and G. Vailati. 2004. DDT in zebra mussels from Lake Maggiore (N. Italy): level of contamination and endocrine disruptions. *Aquat. Toxicol.*, 69, 175-188.
- Bushong, S.J., L.W. Hall Jr., W.S., Hall, W.E. Johnson, and R.L. Herman. 1998. Acute toxicity of tributyltin to selected Chesapeake Bay fish and invertebrates. *Water Res.*, 22, 1027-1032.
- Centeno, M.D., L. Brendonck, and G. Persoone. 1993. Cyst-based Toxicity Tests. III. Development and Standardization of an Acute Toxicity Test with the Freshwater Anostracan Crustacean *Strptocephalus proboscideus*. p. 37-55. In: *Progress in Standardization of Aquatic Toxicity Tests*. ed. by A.M.V.M. Soares and P. Callow. Lewis Publishers, Florida.
- Fisk, A.T., G.A. Stern, K.A. Hobson, W.J. Strachan, M.D. Loewen, and R.J. Norstrom. 2001. Persistent organic pollutants (POPs) in a small, herbivorous, Arctic marine zooplankton (*Calanus hyperboreus*): Trends from April to July and the influence of lipids and trophic transfer. *Mar. Pollut. Bull.*, 43, 93-101.
- Gomez, A., G. Cecchine, and T.W. Snell. 1997. Effect of pentachlorophenol on predator-prey interaction of two rotifers. *Aquat. Toxicol.*, 37, 271-282.
- Hamer, K. and V. Karius. 2005. Tributyltin release from harbour sediments-modelling the influence of sedimentation, bio-irrigation and diffusion using data from Bremerhaven. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 980-992.
- Harding, G.C., W.P. Vass, and K.F. Drinkwater. 1981. Importance of feeding, direct uptake from seawater, and transfer from generation to generation in the accumulation of an organochlorine (p,p'-DDT) by the marine planktonic copepod *Calanus finmarchicus*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38, 101-119.
- Hirst, A.G. and T. Kjørboe. 2002. Mortality of marine planktonic copepods : global rates and patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 230, 195-209.
- Hopcroft, R.R. and J.C. Roff. 1998. Zooplankton growth rates: the influence of size in nauplii of tropical marine copepods. *Mar. Biol.*, 132, 87-96.
- Huggett, R.J., M.A. Unger, P.F. Seligman, and A.O. Valkirs. 1992. The marine biocide tributyltin. *Environ. Sci. Technol.*, 26, 232-237.
- Jak, R.G., M. Ceulemans, M.C.T. Scholten, and N.M. van Straalen. 1998. Effects of tributyltin on a coastal North Sea plankton community in enclosures. *Environ. Toxicol. Chem.*, 17, 1840-1847.
- Jang, P.G., K. Shin, M.C. Jang, D.W. Park, and M. Chang. 2004. Toxicity of persistent organic pollutants, PAHs and TBT, in zooplankton and influence on their viability. *Kor. J. Environ. Biol.*, 22, 1-10.
- Jee, J.H., S.G. Kim, U.K. Hwang, and J.C. Kang. 2002. The toxic effects of mysid, *Neomysis avatschensis* exposed to organotin. *J. Environ. Toxicol.*, 17, 357-362.
- Jones, M.A., J. Stauber, S. Apte, S. Simpson, V. Vicente-Beckett, R. Johnson, and L. Duivenvoorden. 2005. A risk assessment approach to contaminants in Port Curtis, Queensland, Australia. *Mar. Pollut. Bull.*, 51, 448-458.
- Kim, W.-S., M. Chang, S.H. Lee, and J.S. Lee. 1997. Effect of dispersants on zooplankton mortality in Korea. p. 269-275. In: *Recent Advances in Marine Science and Technology*, 96. ed. by N. Saxena. PACON INTERNATIONAL 1997, Hawaii.
- Landis, W.G. and M.H. Yu. 1995. Introduction to Environmental Toxicology: Impacts of Chemicals upon Ecological Systems. CRC Press. 328 p.
- Lee, K.J., S.U. Wui, J. Heo, S.H. Kim, J.Y. Jeong, and J.B. Lee. 2003. DDT reduced testosterone and aromatase activity via ER receptor in Leydig cell. *J. Environ. Toxicol.*, 18, 95-100.
- Ma, M., Z. Feng, C. Guan, Y. Ma, H. Xu, and H. Li. 2001. DDT, PAH and PCB in sediments from the intertidal zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, 42, 132-136.
- Mauchline, J., J.H.S. Blaxter, A.J. Southward, and P.A. Tyler. 1998. Advances in Marine Biology : The biology of calanoid copepods. Academic Press. 710 p.
- Michel, P. and B. Averty. 1999. Contamination of French coastal waters by organotin compounds: 1997 update. *Mar. Pollut. Bull.*, 38, 268-275.

- Oh, J.R., H.K. Choi, S.H. Hong, U.H. Yim, W.J. Shim, and N. Kannan. 2005. A preliminary report of persistent organochlorine pollutants in the Yellow Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 208-236.
- Petersen, S. and K. Gustavson. 1998. Toxic effects of tri-butyltin(TBT) on autotrophic pico-, nano-, and microplankton assessed by a size fractionated pollution-induced community tolerance (SF-PICT) concept. *Aquat. Toxicol.*, 40, 253-264.
- Preston, B.L. and T.W. Snell. 2001. Direct and indirect effects of sublethal toxicant exposure on population dynamics of freshwater rotifers: a modeling approach. *Aquat. Toxicol.*, 52, 87-99.
- Rajendran, N. and V.K. Venugopalan. 1988. Toxicity of organochlorine pesticides to zooplankton of Vellar Estuary. *Indian J. Mar. Sci.*, 17, 168-169.
- Rees, H.L., R. Waldock, P. Matthiessen, and M.A. Pendle. 2001. Improvements in the epifauna of the Crouch Estuary (United Kingdom) following a decline in TBT concentrations. *Mar. Pollut. Bull.*, 42, 137-144.
- Shim, W.J., S.H. Kahng, S.H. Hong, N.S. Kim, S.K. Kim, and J.H. Shim. 2000. Imposex in the rock shell, *Thais clavigera*, as evidence of organotin contamination in the marine environment of Korea. *Mar. Environ. Res.*, 49, 435-451.
- Sidharthan, M., S.Y. Kim, H.W. Lee, K.S. Park, and H.W. Shin. 2002. TBT toxicity on the marine microalga *Nannochloropsis oculata*. *Mar. Pollut. Bull.*, 45, 177-180.
- Svavarsson, J. 2000. Imposex in the Dogwhelk (*Nucella lapillus*) due to TBT contamination: improvement at high latitudes. *Mar. Pollut. Bull.*, 40, 893-897.
- U'Ren, S.C. 1983. Acute toxicity of Bis(tributyltin)oxide to a marine copepod. *Mar. Pollut. Bull.*, 14, 303-306.

Received Feb. 2, 2006

Accepted Mar. 8, 2006