

넙치의 초기 생활사에 미치는 해양 독성물질들의 급성독성 영향

탁건태 · 김종균*

부경대학교 식품생명공학부 생물공학 전공

The effect of acute toxicity of marine toxicants on early life of coastal olive flounder

Keon-Tae Tak and Joong Kyun Kim*

Major of Biotechnology, Division of Food Science and Biotechnology, Pukyong National University,
Pusan 608-737, Korea

Abstract

The effects of acute toxicities of marine toxicants on early life of coastal olive flounder were investigated. An increasing order of acute toxicity on embryo- and larva-stages of *Paralichthys olivaceus* was $CdCl_2 < HgCl_2 < Basta < Aroclor\ 1254$, and the toxicant effect was more severe on the larva-stage than the embryo-stage. The hatching percentage depended upon the concentrations of toxicants exposed at the embryo stage. The fry deformed from hatching at high toxicant concentrations died immediately, and the yolk-consumption rate of just hatched fry was slower at the higher-toxicant concentrations.

For Aroclor 1254, Basta, $HgCl_2$ and $CdCl_2$, the values of 72hr-LC₅₀ at embryo-stage were estimated to be 15.5 ng/L, 21 nL/L, 17 $\mu g/L$ and 29 $\mu g/L$, respectively, and those values at larva-stage were estimated 3.5 ng/L, 16.0 nL/L, 10.5 $\mu g/L$ and 15.0 $\mu g/L$, respectively.

Key words – acute toxicity, Aroclor 1254, Basta, mercury, cadmium, olive flounder

서 론

배타적 경제수역 설정에 따라 각국은 자국 연안의 수산 생물의 생산 증대를 위하여 바다목장화사업, 유용 어패류의 방류사업, 어초 설치, 환경 내성 어류의 개발, 외국으로부터의 종 혼란 어패류의 이식 제한, 새로운 먹이생물 개발 및 양식기술 개발과 같은 사업을 활발히 진행시키고는 있으나 [23,24], 어장 환경은 해양에 유입되는 각종 독성물질에 의

해 나날이 나빠지고 있다. 해양 독성물질들을 살펴보면, 전기 절연체로 사용되는 polychlorinated biphenyls (PCBs) [6,16], 제초제 및 살충제와 같은 농약[14,19], 카드뮴·구리·수은 등과 같은 중금속[2,4,8,20], 원유와 그 수용성 성분[21]과 방오도료 tributyltin[3,11] 등이며, 이러한 독성물질들은 생태계에 잔존하면서 먹이사슬을 통하여 생체내에 축적되어 생체내의 섬세한 호르몬계에 영향을 줌으로써 어패류 및 인간의 정상적인 생리 작용을 저해하거나 교란시키기도 한다. 세계생태보전기금(WWF), 미국 및 일본 등에서는 각각 67종, 73종 및 143종의 물질을 내분비 교란물질(endocrine disrupter)로 분류하고 있으며, 세계생태보전기

*To whom all correspondence should be addressed

Tel · (051) 620-6186, Fax : (051) 620-6186

E-mail · junekim@pknu.ac.kr

금에서 지정된 67종 중 51종이 국내에서 제조 또는 유통되고 있고, 이 중 42종은 농약과 산업용 화학물질 등으로 구분돼 사용이 금지되거나 취급 제한을 받고 있다[25].

PCB, 중금속, 제초제 등의 내분비계를 교란시키는 물질과 원유의 수용성 성분은 해양환경 중에서 끊임없이 유입되고, 침전, 흡착 및 분해되어 어느 일정 농도 이상으로 항상 존재하기 때문에, 이들이 수산생물에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 보고되고 있다. 전기 절연체 PCB는 해수의 $10^4 \sim 10^6$ 배 농도로 식물성 플랑크톤에 축적되어 세포 분열 저해에 영향을 미치며[6], 식물성 플랑크톤에서 동물성 플랑크톤 또는 어류로의 먹이사슬에 영향을 줌으로써 먹이사슬의 군집 조성을 파괴시켜 생태계의 균형까지도 변화시킬 수 있다고 조사되었다[10]. 또한 이 물질은 식물성 플랑크톤의 광합성을 직접 저해하는 것보다 흡착물질에 붙었다가 장기간에 걸쳐서 조금씩 떨어져 나가 저해하는 간접 효과가 더 큰 것으로 보고되었다[16]. Atrazine과 같은 제초제는 연안 해역의 식물성 플랑크톤의 광합성 Hill 반응을 저해하며[14], 아주 적은 양의 식물성 플랑크톤이 감소되더라도 그 양이 동물 플랑크톤의 성장 및 생식 유지에 필요로 하는 한계농도 이하로 떨어지면 동물성 플랑크톤은 멸종하는 것으로 보고되고 있다[19]. 중금속은 엽록체의 thylakoid 막을 손상시키는데[14] 유기금속화합물이 무기금속화합물보다 더 높은 독성효과를 나타내며[8] 해양 도중 미생물의 작용에 의하여 유기금속화합물로 변하기도 하는 것으로 보고되고 있고[13], 식물성 플랑크톤의 세포내 축적에 관한 연구도 보고되고 있다[2,4,7,18].

따라서, 우리 나라 연근해 어장을 보존하여 어획 생산량 감소를 피하기 위해서는 일정농도 이하에서 독성물질들이 유지될 수 있도록 그 총량을 규제할 필요성이 있다. 또한, 천연 어패류의 생존율은 굉장히 낮을 때 일반적으로 알려진 해양오염물질의 반수치사농도는 어패류의 성체를 대상으로 조사한 경우가 많으므로, 어패류의 초기 생활사에 있어서의 독성영향도 조사되어야 할 필요성이 있다. 본 논문에서는 우리나라 전 연안에 널리 분포하며 대표적 양식 해산 어인 넙치의 초기 생활사(수정란으로부터 부화 직후의 넙치 자어)에 있어서, 대표적 해양 독성물질로 알려진 Aroclor 1254, 제초제(바스타액) 및 중금속(염화수은과 염화카드뮴)의 급성독성 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

본 연구에 사용한 독성 실험물질로는 최근 그 정도가 심각한 Aroclor 1254, 제초제(바스타액) 및 중금속(염화수은과 염화카드뮴)이었다. Aroclor 1254, 염화수은과 염화카드뮴은 Aldrich Chemical 회사로부터 구입하였고 농약은 국내 시판 중인 것을 사용하였다. 독성 실험은 우리나라 연안에 널리 분포하는 넙치의 수정란과 부화 직후의 자어를 대상으로 실시하였고, 각 독성물질의 농도는 기존의 발표된 자료를 근거로 독성영향이 미칠 수 있는 농도범위에서 실험하였다[4,14,16,20]. 각 독성물질에 대한 시간별 반수치사농도는 Litchfield와 Wilcoxon의 방법으로 독성물질 농도나 처리 시간의 상용 log 값에 대한 치사 빈도의 probit 값의 접점을 구하여 분석하였다[12].

PCB

PCB는 Aroclor의 이름으로 100여 가지의 제품이 시판되고 있는데 그중 Aroclor 1248 및 1254가 가장 많이 생산되고 있어서 수계에도 가장 많이 분포한다. 본 실험에서는 Aroclor 1254를 사용하였고, volumetric flask를 사용하여 Aroclor 1254를 methanol에 희석시켜 0.1~100 ng/L 농도 범위로 만들어 실험 대상인 넙치의 수정란과 자어에 대한 Aroclor 1254의 급성독성 영향을 알아보았다.

제초제(바스타액)

국내에서 많이 사용하면서도 저독성으로 알려진 바스타액(glyphosate ammonium을 18% 포함)을 3차 증류수에 희석하여 1~500 nL/L의 범위의 농도로 만들어 실험에 사용하였다.

중금속

실험에 사용한 중금속은 EDTA를 첨가하지 않은 염화수은과 염화카드뮴을 3차 증류수에 녹여 stock solution을 만들어 사용했으며, 10~5,000 $\mu\text{g/L}$ 범위의 농도로 만들어 그 독성도를 조사하였다.

넙치

분류학적으로 가자미목(Pleuronectida)의 넙치과(Bothidae)에 속하는 넙치(*Paralichthys olivaceus*)를 실험 대상으로 하

었다. 넙치 수정란은 국립수산진흥원에서 2.5~3.8 kg 체중의 암컷 19마리와 1.4~2.8 kg 체중의 수컷 12마리의 친어를 관리하여 자연 산란한 것 중에서 산란 직후 수면 위로 부상한 개체를 수확하여 실험에 사용하였다. 수확한 넙치 수정란은 먼저 미세한 망으로 세란하고 1톤 수조에 안정화시킨 후 상실기에 실험 비커에 250 eggs/2L씩 옮겨 독성 처리를 하였다. 이때, 수정란의 수정율, 난경 및 발생단계를 만능투영기로 측정하였는데, 본 실험에 사용한 수정란의 수정율, 난경, 유구직경 및 부화자어의 전장은 각각 98.75%, 0.89 ± 0.02 mm, 0.16 ± 0.01 mm 및 2.36 ± 0.09 mm이었다.

독성영향 실험

실험은 2L 유리 비커에 1 μ m 필터로 여과한 후 자외선 살균한 해수를 넣어 120cm \times 220cm \times 20cm 아크릴 항온 수조에 수용하고 온도조절기와 히터로 $18 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 유지하였다. DO 및 pH는 각각 5 mg/L 및 6.5로 유지하였고, 실험 도중 매 24시간마다 물을 절반씩 air stone을 통해 환수하고 해수 보충시는 본래의 독성물질 농도가 유지되도록 하였고 사망한 개체는 즉시 제거하였다.

넙치 수정란의 특성을 보면 부화 직후까지는 수면 위에 떠 있는데 발생과정 중에 수정란이 흰색으로 변하여 바닥에 가라앉게 되면 이를 사망한 것으로 간주하였으며, 이 특성을 이용하여 96시간 동안 관찰하여 사망한 개체를 계수하여 반수치사농도(LC₅₀: median lethal concentration)를 구하였다.

넙치 자어는 부화 직후부터 독성물질을 비커에 처리하여 96시간 동안 관찰하여 사망한 개체를 계수하여 조사하였고, 먹이 생물은 공급하지 않았다. 사망한 개체는 즉시 제거하고 매일 24시간마다 새로운 해수로 교체해주고 해수 교체 시는 본래의 독성물질 농도가 유지되도록 하여 각 독성물질의 반수치사농도와 난황 흡수율을 구하였다.

결과 및 고찰

넙치 수정란에 미치는 급성 독성 영향

상실기의 넙치 수정란에 대한 Aroclor 1254의 독성영향은 부화가 완료된 24시간 이후에 50 및 100 ng/L의 농도에서 각각 42%와 52%가 치사하였으며, 처리후 72시간까지는 유의적인 폐사빈도가 나타나지 않다가 72시간 후부터

96시간 사이에 처리한 전체 농도군에서 급격히 죽었다. 이에 비해 대조군은 96시간 이후에도 1.5%만이 죽었다. 부화 후 이틀째가 되는 72시간 후에는 난황이 거의 흡수되어 넙치 종묘 생산에 있어서 최초로 먹이 생물을 공급하는 시기인데, Aroclor 1254의 경우에는 난황이 흡수된 이 시기부터 더 민감한 독성을 나타내는 것으로 보인다(Fig. 1A).

넙치 수정란은 바스타액 처리 후 24, 48, 72 및 96시간 후에 처리농도 175, 54, 21 및 9.5 ng/L 이상의 농도에서 각각 반수 이상이 죽었고, 각 시기별 난황 흡수에 따른 유의적 치사 빈도 차이는 나타나지 않았다(Fig. 1B).

넙치 수정란에 대한 염화수은의 독성영향을 살펴보면 24시간만에 350 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서 반수 이상이 죽었으며, 처리후 48시간 및 72시간 후에는 각각 24 및 17 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서 반수가 죽었다. 96시간 후에는 처리한 모든 농도군에서 모두 죽었으나, Aroclor 1254에서처럼 난황이 완전히 흡수된 후에는 독성이 유의적으로 나타나지 않고 난황이 흡수되어지는 단계인 24시간과 48시간 사이에 유의적인 빈도로 죽었다(Fig. 1C).

염화카드뮴의 넙치 수정란에 대한 독성영향은 염화수은에 비해 그 독성 민감도가 낮게 나타났다. 부화가 완료되는 24시간 후에 400 $\mu\text{g/L}$ 이상의 염화카드뮴 농도에서 반수 이상이 죽었으며, 처리 후 48시간 및 72시간 후에 각각 110 및 29 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서 반수가 치사하여, 각각 2,500 및 600 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서 모두 죽었고, 처리 후 96시간 후에는 처리한 모든 농도에서 모두 죽었다. Aroclor 1254나 염화수은에서 나타나는 난황 흡수 과정중의 독성물질 노출 시간별 치사빈도 차이가 염화카드뮴에서는 나타나지 않았다(Fig. 1D).

상실기의 넙치 수정란에 각 독성물질들을 처리하여 부화가 완료된 24시간 후에 그 부화율을 살펴보면, Aroclor 1254에 대해서는 처리 후 12시간 후부터 부화하기 시작하여 50 및 100 ng/L에서 각각 65%와 56%가 부화하였으나 부화 직후에 대부분 죽었고, 10 ng/L 이하의 Aroclor 1254 농도에서는 75% 이상이 부화하였다. 제초제 바스타액의 경우, 100 nL/L 이상의 농도에서는 수정란 중 50% 미만이 부화하였고, 50 nL/L 이내의 농도에서는 85% 이상이 부화하여 독성 영향을 적게 받았다. 염화수은이 넙치 수정란의 수정율에 미치는 영향은 2,000 $\mu\text{g/L}$ 에서 10% 미만이 부화하였으나, 1,000 $\mu\text{g/L}$ 에서는 70% 정도가 부화하였고, 염화

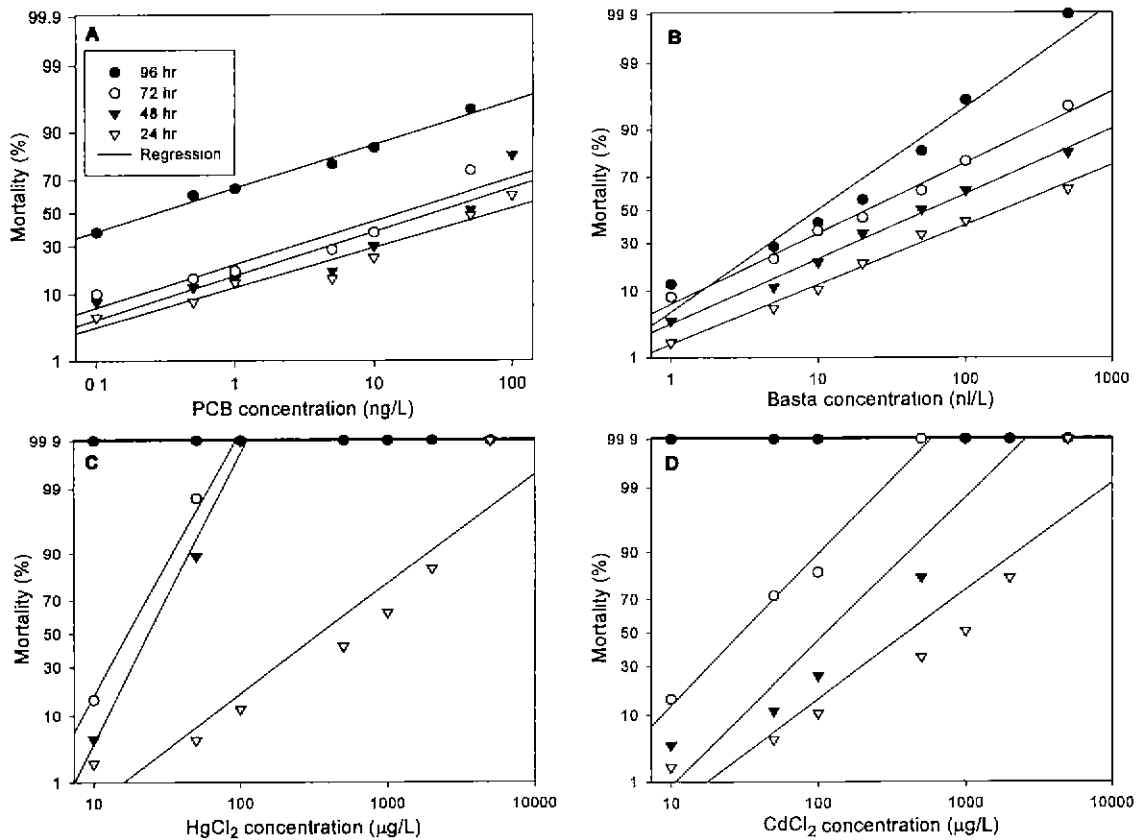


Fig. 1. Mortality percentages at the embryo stage of *P. olivaceus* exposed at various toxicant concentrations. A, Aroclor 1254; B, Basta; C, HgCl₂; D, CdCl₂.

카드뮴에 대해서는 5,000 µg/L에서 10% 미만이 부화하였으나 2,000 µg/L에서 70% 정도가 부화함으로써, 부화에 미치는 염화수은과 염화카드뮴의 70% 역치한계치(threshold limit value ; TLV) 농도는 각각 1,000 µg/L과 2,000 µg/L 정도인 것으로 추정되어진다. 우리나라 마산만에서의 해수와 침전물 중의 PCB 농도는 각각 10.3~26.2 ng/L와 10.2~244.4 ng/g로 침전물에 부착된 PCB의 농축지수(concentration factor)는 705~11,980로 보고되고 있으며[1,9], 이는 PCB의 소수성과 그 구조의 안정성으로 인해 침전물에 부착된 PCB가 서서히 용출되면서 장기간의 만성적 독성 영향을 나타내는 것으로 보인다. 8개월된 바다표범(*Phoca groenlandica*)의 암·수 각각 5개체씩에 농축된 Aroclor 1254의 농도는 근육, 신장, 간, 및 지방에서 각각 3.8과 8.2, 8.6과 21.5, 23과 73, 및 945와 890 ng/g로 지방에서 가장 많은 Aroclor 1254 검출되어 친지질 독성물질임이 보고되어 졌는데[22], 독성물질의 생체내 대사에 의한 회복기능보다

는 독성발현의 영향을 더 받을 것으로 보인다. 일반적으로 균에 대한 중금속의 threshold 농도는 5,000 µg/L 이하인 것으로 보고되고 있다[17].

부화직후의 넘치 자어에 미치는 급성 독성 영향

부화 직후의 넘치 자어에 대한 Aroclor 1254의 독성영향을 살펴보면 24시간의 치사빈도가 0.1~100 ng/L 처리농도 범위에서 5~62%이었다. 각 농도별 Aroclor 1254 처리 후 난황이 거의 흡수되는 48시간까지의 치사빈도는 급격한 변화가 없었으나 난황이 완전히 흡수된 48시간 이후부터는 전체 처리군에 걸쳐 유의적인 빈도로 죽었다(Fig. 2A).

부화 직후의 넘치 자어에 대한 제초제 바스타액의 독성 영향은 바스타액 처리 24, 48, 72 및 96시간 후에 90, 36, 16 및 8.6 nL/L 이상의 농도에서 반수 이상이 죽었고, 각 시기별 난황 흡수에 따른 치사 빈도 차이는 나타나지 않는 등 넘치 수정란에 미치는 독성 영향과 비슷한 경향을 나타

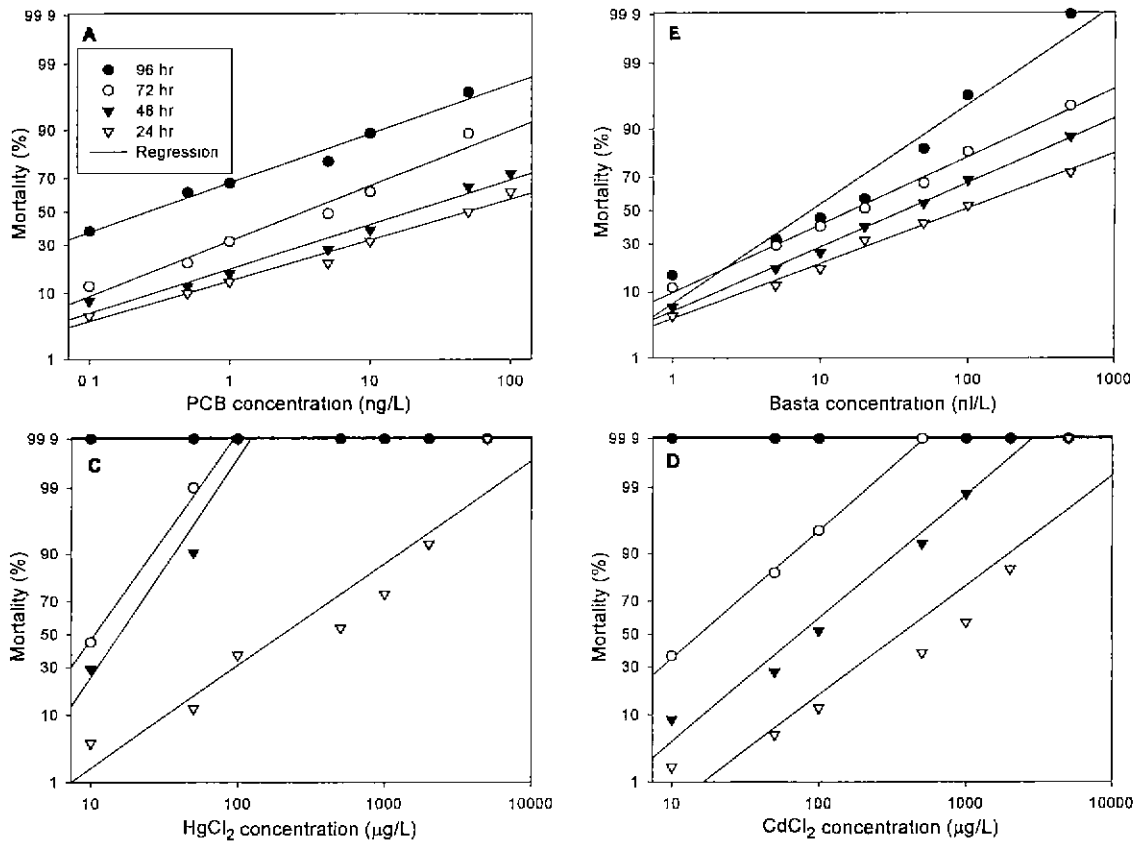


Fig. 2. Mortality percentages at the larva stage of *P. olivaceus* exposed at various toxicant concentrations. A; Aroclor 1254, B; Basta, C; HgCl₂, D; CdCl₂.

내었다(Fig. 2B).

염화수은에 대한 독성영향을 살펴보면 처리 후 24시간 만에 197 μg/L 이상의 농도에서 반수 이상이 죽었으며, 처리 후 48시간 및 72시간 후에는 각각 15.7 및 197 μg/L에서 반수가 치사하여, 100 및 120 μg/L 이상의 처리농도에서 모두 죽었다. 처리 후 96시간에는 처리한 모든 농도에서 모두 죽었으며, 난황이 흡수되어지는 24시간부터 48시간까지 급격히 죽었다(Fig. 2C).

부화직후 넙치 자어에 대한 염화카드뮴의 독성 영향을 살펴보면, 처리 후 24시간만에 355 μg/L 이상의 농도에서 반수 이상이 죽었다. 처리 후 48시간과 72시간에는 처리 농도 74와 15 μg/L에서 각각 반수가 치사하였고, 2,900 μg/L과 500 μg/L 이상의 농도에서 모두 죽었는데, 넙치 수정란에 대한 독성과 비교하면 그 정도가 덜 민감하게 나타난 것이며, 수정란의 처리 경우와 마찬가지로 부화와 난황 흡수 시기에 따른 유의한 치사 빈도는 나타나지 않았다(Fig. 2D).

위의 결과에도 나타나듯이, 환경 독성물질들에 대해 직접적인 영향을 받으며 사는 수산생물들은 중간 및 종내 계통간과 생육발달별로 독성 감수성이 차이가 있는데, 이는 독성물질의 친지질, 극성, 및 소수성 등의 물리적인 특징이 수산생물의 체성분 조성과 독성상태의 물질을 비독성이나 친수성으로 바꾸어 체외로 분비시키거나, 반대로 체내로 흡수·축적시키는 물질대사의 효소반응계에 서로 다르게 반응하기 때문이다[15].

반수치사농도(LC₅₀)

넙치의 초기 생활사에 있어서 실험에 사용된 해양독성 물질에 대한 반수치사농도(LC₅₀)를 구하여 Table 1에 나타내었다. Aroclor 1254, 제초제 바스타액, HgCl₂ 및 CdCl₂의 넙치 수정란에 대한 72hr-LC₅₀ 값은 각각 15.5 ng/L, 21 nL/L, 17 μg/L 및 29 μg/L이었고, 부화 직후의 넙치 자어에 대한 72hr-LC₅₀값은 3.5 ng/L, 16.0 nL/L, 10.5 μg/L 및

Table 1. The values of LC₅₀ estimated from the embryo- and larva-stages of *Paralichthys olivaceus* exposed at various marine toxicants

Exposure time (hr)	Aroclor 1254 (ng/L)		Basta (nL/L)		HgCl ₂ (μg/L)		CdCl ₂ (μg/L)	
	embryo	larva	embryo	larva	embryo	larva	embryo	larva
24	74	50	172	93	350	197	404	355
48	27	19.2	55	36	24	15.7	114	74
72	15.5	3.5	21	16	17	10.5	29	15
96	0.3	0.3	9.7	8.5				

15.0 μg/L이었다. 독성물질에 대한 독성 민감도는 Aroclor 1254 > 제초제 바스타액 > HgCl₂ > CdCl₂ 순이었다.

표의 결과에서 보듯이 본 실험의 모든 독성물질들은 수정란 단계부터 독성물질을 처리한 것보다 부화 직후의 자어에 처리한 것이 더 민감한 독성 영향을 나타내었다. 이는 수정란의 경우 배체를 둘러싸고 있는 장막(chorion)이 생물체내외 독성 외부 환경 사이를 막아 주는 장벽의 역할을 함으로써 자어에 비해 상대적으로 적은 독성물질이 흡수될 뿐만 아니라, 수정란 내의 난황과 유구(oil globule)에 독성물질이 축적되어 상대적으로 신경계와 기관에는 영향을 적게 미치게 되기 때문인 것으로 보인다[5]. 일반적으로 수은이 카드뮴보다 더 독성이 강한 것으로 알려져 있는데 [4,20], 넙치 수정란과 자어에 대해서도 이와 같은 결과가 나타났다.

Aroclor 1254, 제초제 바스타액 및 염화수은의 경우에는, 24시간의 수정란과 부화 자어의 반수치사농도의 비가 72시간 또는 96시간의 각 처리 단계의 반수치사농도의 비보다 높게 나타났다. 이는 수정란이 부화되어지는 과정 중에 관여하는 변수가 독성물질의 처리농도 및 처리 시간과 함께 의존적으로 독성 민감도에 영향을 미치는 것으로 보여지며, 염화카드뮴은 처리농도와 처리 시간에 더 크게 영향을 받는 것으로 보인다[20]. Aroclor 1254와 염화수은은 각각 난황이 흡수된 후와 난황이 흡수되어지는 단계에서 특히 폐사 빈도가 높았고, 염화카드뮴, 제초제(바스타액)는 발생 단계 차이에 따른 급격한 폐사 빈도 현상이 나타나지 않았는데 이는 이들 물질들이 각각 다른 독성 특성을 지니고 있기 때문으로 보여진다[15].

요 약

넙치의 초기생활사에 있어서의 해양 오염물질의 급성독

성을 알아보았는데, 수정란 및 부화 직후의 넙치 자어에 미치는 급성독성 영향은 Aroclor 1254 > 제초제 바스타액 > HgCl₂ > CdCl₂ 순이었으며, 수정란보다는 자어에 대한 영향이 더 크게 나타났다. 이때, 넙치 수정란에 독성물질을 처리하였을 때의 부화율은 처리 농도에 의존적인 경향을 나타내었으며, 높은 처리 농도에서 부화하여 기형으로 발생한 개체는 곧 죽었고, 난황 흡수율도 독성 물질의 처리 농도가 높을수록 낮은 경향을 보였다.

Aroclor 1254, 바스타액, HgCl₂ 및 CdCl₂의 72시간 반수치사농도는 넙치 수정란에 대하여 각각 15.5 ng/L, 21 nL/L, 17 μg/L 및 29 μg/L이었으며, 부화 직후의 자어에 대해서는 각각 3.5 ng/L, 16.0 nL/L, 10.5 μg/L 및 15.0 μg/L이었다.

일반적으로 알려진 해양오염물질의 반수치사농도는 어패류의 성체를 대상으로 조사한 경우가 많은데, 실제 해양 환경에 있어서는 수산생물의 초기 생활사에 미치는 해양 독성물질의 영향을 조사하여 해당 독성물질의 규제 농도를 정해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 부경대학교내 해양식량자원개발 관련 특성화 사업단의 연구비로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Choi, H. G. 1989. Polychlorinated biphenyls (PCBs) residue in the seawater and sediment in Masan Bay. *Bull. Natl. Fish. Res. Dev. Agency (KOREA)* **43**, 49-56.
2. Davies, A. G. 1978. Pollution studies with marine plankton. II. heavy metals. *In Advances in Marine Biology* **15**, 382-508.

3. Gibbs, P. E., G. W. Bryan and P. L. Pascoe. 1991. TBT-induced imposex in the dogwhelk, *Nucella lapillus*: Geographical uniformity of the response and effects. *Mar. Environ. Res.* **32**, 79-87.
4. Goudey, J. S. 1987. Modeling the inhibitory effects of metals on phytoplankton growth. *Aquat. Toxicol.* **10**, 265-278.
5. Hall, L. W. Jr., W. C. Graves, D. T. Burton, and B. S. Roberson. 1982. A comparison of chlorine toxicity to three life stages of striped bass (*Morone saxatilis*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **29**, 631-636.
6. Harding, L. W. and J. H. Phillips. 1978. Polychlorinated biphenyl (PCB) effects on marine phytoplankton and cell division. *Mar. Biol.* **49**, 93-101.
7. Huntsman, S. A. and S. A. Sunda. 1980. The role of trace metals in regulating phytoplankton growth with emphasis on Fe, Mn, and Cu, pp. 285-328, *In* Morris, I. (ed.), *The physiological ecology of phytoplankton*, Vol. **1**, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
8. Kayser, H. 1976. Waste-water assay with continuous algal cultures: The effect of mercuric acetate on the growth of some marine dinoflagellates. *Mar. Biol.* **36**, 61-72.
9. Khim, J. S., K. Kannan, D. L. Villeneuve, C. H. Koh and J. P. Giesy. 1999. Characterization and distribution of trace organic contaminants in sediment from Masan Bay, Korea. 1. Instrumental analysis. *Environ. Sci. Technol.* **33**(23), 4199-4205.
10. Lederman, T. C. and G. Y. Rhee. 1982. Bioconcentration of a hexachlorobiphenyl in Great Lakes planktonic algae. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **39**, 380-387.
11. Lee, R. F., V. O. Valkirs and P. F. Seligman. 1989. Importance of microalgae in the biodegradation of tributyltin in estuarine waters. *Environ. Sci. Technol.* **23**, 1515-1518.
12. Litchfield, J. T. and F. Wilcoxon. 1949. A simplified method of evaluating dose-effect experiments. *J. Pharm. exp. Ther.* **96**, 99-113.
13. Magos, L., A. A. Tuffery and T. W. Clarkson. 1964. Volatilization of mercury by bacteria. *Br. J. Ind. Med.* **21**, 294-298.
14. Moreland, D. E. 1980. Mechanisms of action of herbicides. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **31**, 597-638.
15. Murty, A. S. 1986. Effect of water pollution on Fishes, p. 83, *In* Murty, A. S. (ed.), *Toxicity of pesticides to fish*, Vol. **1**. CRC Press Inc., Florida.
16. Nau-Rither, G. M., C. F. Wurster and R. G. Rowland. 1982. Polychlorinated biphenyls (PCBs) desorbed from clay particulates inhibit photosynthesis by natural phytoplankton communities. *Environ. Pollut. Ser.* **28**, 177-182.
17. Noever, D., H. Matsos, A. Britten, D. Obenhuber and S. Armstrong. 1996. Microbial diffraction gratings as optical detectors for heavy metal pollutants. *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 828-832.
18. Rai, L. C., M. J. P. Gaur and H. D. Kumar. 1981. Phycology and heavy-metal pollution. *Biol. Res.* **56**, 99-151.
19. Schober, U. and W. Lampert. 1977. Effects of sublethal concentration of the herbicide Atrazine on growth and reproduction of *Daphnia pulex*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **17**, 269-277.
20. Wong, S. L., J. F. Wainwright and J. Pimenta. 1995. Quantification of total and metal toxicity in wastewater using algal bioassays. *Aquat. Toxicol.* **31**, 57-75.
21. Zachleder, V. and Z. Tukaj. 1993. Effects of fuel oil and dispersant on cell cycle and macromolecular synthesis in the chlorococcal alga *Scenedesmus armatus*. *Mar. Biol.* **117**, 347-353.
22. Zitko, V., G. Stenson and J. Hellou. 1998. Levels of organochlorine and polycyclic aromatic compounds in harp seal bearers (*Phoca groenlandica*). *Sci. Total Environ.* **221**(1), 11-29.
23. 김윤. 1990. 넙치 전암컷 생산을 위한 연구 I. 자성발생성 2배체 유도. *한국양식학회지* **6**, 42-52.
24. 이정희, 한석중, 김계우. 1991. 연안 정착성 어류 치어 방류 사업보고서. 수산진흥원 사업보고 **90**, 187-194.
25. 한겨레 신문. 1999. 21세기 특집- 전세계를 뒤덮는 환경 호르몬 공포. 사회면, 1999. 2. 1 일자.