

황복 *Takifugu obscurus* 자치어를 이용한 침출수 단기독성 연구

박 훈 · 한경남 · 김형선¹

인하대학교 해양학과, ¹한국해양연구소 생물자원개발연구센터

Study on Short-term Toxicological Evaluation of Treated Landfill Leachate Using Early Stage of River Puffer Fish, *Takifugu obscurus*

HOON PARK, KYUNG-NAM HAN AND HYUNG SUN KIM¹

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

¹Marine Living Resources Research and Development Center, Korea Ocean Research and
Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

본 연구는 황복 *Takifugu obscurus*의 자치어를 이용하여 쓰레기 매립지 침출수의 독성도를 생물검정을 통해 평가하고, 침출수 해양방류가 수산생물에 미치는 영향 및 피해 등을 추론하는데 기본적인 자료로 제공하고자 수행되었다. 급성독성 단기실험은 인공수정에 의해 부화된 자치어(전장 5, 10, 15 mm)와 자연산 치어(전장 30, 45 mm)를 대상으로 실시되었다. 1996년 9월에 채수한 침출수의 부피비 0%~16%범위로 실험구를 설정한 후 실험을 실시하였고, 결과로 Spearman-karber Method를 이용한 반치사농도(LC₅₀)를 구하였다. 전장별 5단계의 24hr-LC₅₀은 침출수 농도 3.03~8.57%, 48hr-LC₅₀은 2.73~6.21%, 72hr-LC₅₀은 2.45~5.53%, 96hr-LC₅₀은 2.38~4.93%로 나타났다. 또한, 96hr-LC₁은 0.69~1.51%로 나타났다. 행동 관찰 결과, 호흡수에 있어서는 침출수 농도 0.5%와 1%사이에서 영향이 나타났다(P < 0.05). 전장 5 mm의 자어 단계가 가장 높은 LC₅₀을 보였으며, 전장 약 15 mm까지는 감소의 경향을 보이다 15 mm이상에서부터 성장에 따라 LC₅₀이 증가하였다. 시간의 변화에 따라 LC₅₀은 감소하였으며, 감소양상은 성장에 따라 다르게 나타났다. 이상의 결과로부터, 황복의 자치어에 있어서 침출수 농도 3%이상에서 24시간 내에, 2%이상에서는 96시간 내에 50%의 사망률을 보여 치사의 영향이 나타나고, 침출수 농도 0.5%와 1%사이에서 어체에 생리적인 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Toxic effect of landfill leachate on the larvae and juvenile stage of the river puffer fish, *Takifugu obscurus*, were investigated in order to assess severity of environmental impact of leachate effluent on the general population of estuarine fishes. A short-term toxic experiment was designed to test both laboratory hatched larvae and juveniles (5, 10 and 15 mm in length) and in-situ juveniles (30 and 45 mm in length) using the leachate concentrations between 0 and 16%. Lethal concentrations of 50% mortality (LC₅₀) were observed using Spearman-karber Method. 24hr-LC₅₀ appeared at the leachate concentrations ranging from 3.03 to 8.57%, 48hr-LC₅₀ at 2.73 to 6.21%, 72hr-LC₅₀ at 2.45 to 5.53%, and 96hr-LC₅₀ at 2.38 to 4.93%, respectively. Leachate concentrations between 0.69 and 1.51% induced 96hr-LC₁. Respiratory frequency was significantly affected even at low leachate concentrations between 0.5 and 1.0% (P < 0.05). These results suggest that the leachate effluents may cause a harmful impact on the physiology of river puffer fish, especially for younger cohorts.

서 론

인천 연안은 수도권 지역의 생활하수 및 많은 공장이나 항만 등으로부터 오·폐수의 유입 그리고 김포매립지 등으로부터 침출수 해양방류에 의해 해수질이 지속적으로 악화되고 있으며, 이로 인하여 인천 연안에 서식하는 해양생물상에 큰 변화를 가져오고 있다. 최근에는 수도권 쓰레기 매립지 침출수의 해양방류에 대한 평가가 문제시되고 있다(최 등, 1995).

침출수는 일반적으로 다량의 난분해성 유기물과 중금속 등 다양한 유해물질을 함유하고 있어 해양에 유출될 경우 주변환경 및 해양 생태계 그리고 인체에 이르기까지 많은 피해를 유발한다(O'Connor *et al.*, 1990). 또한 침출수에 함유된 유해물질의 종류와 농도는 매립지의 수질학적 특성들과 매립된 쓰레기의 종류, 기후, 매립 후 경과기간 등에 따라 다양하게 변화하고 강수량과 온도 등에 의한 계절적인 차이도 나타난다(Cameron and Koch, 1980; Wong, 1989; O'Connor *et al.*, 1990). 따라서 다

양한 유해물질의 상호작용 등을 파악할 수 없는 일반적인 이화학적 방법으로는 침출수의 유해성을 파악하는데 많은 시간과 노력 그리고 고비용이 요구되어, 이를 해결하기 위해 생물을 이용한 독성 평가법이 널리 사용된다(Cheung *et al.*, 1993; 박 등, 1996). 지금까지 독성평가에 사용되는 생물로는 박테리아, 조류, 동물플랑크톤, 무척추저서동물 그리고 어류 등이 있으며, 담수어류를 포함한 상기의 생물들은 취급이 간편하여 독성연구에 많이 사용되고 있다. 그러나 해산어류는 채집 상 어려움이 많아 연구가 되어 있지 않은 실정이며, 특히 발육단계별 어류에 미치는 연속적인 독성평가 연구는 전무하다. 한편, 어류는 성체 대신에 초기단계의 알이나 자치어를 이용할 경우 오염물질에 대해 더욱 더 민감하게 반응(Cooper and Liu, 1991)하므로 어류의 발생학적 또는 생리학적인 독성평가 기준 등에 많이 이용되고 있다(Blaxter, 1977).

수도권 매립지는 인천 연안의 해안 간척지에 위치하고 있으며 (Fig. 1), 1일 처리능력 3,500톤 규모의 침출수 처리장을 운영하고 있다. 현재 매립지에서는 처리장에서 침출원수(raw landfill leachate)를 정화하여 정화된 침출수(treated landfill leachate)를 하천으로 방류하며 침출수는 하천을 통해 오수들과 함께 섞여 연안 방조제안의 장도유수지를 이루고, 이렇게 모인 침출수는 해양으로 방류되고 있다.

매립지가 위치한 염하수로는 담수와 해수가 혼합되는 지역으로 기수역에서 생활하는 많은 수산생물의 성육장으로 이용되고

있고, 산란을 목적으로 하는 황복이나 뱀장어와 같은 왕복성 회유어의 이동장소이기도 하다. 그러나 최근 몇 년간 이 지역에 서식하는 어족자원의 감소가 두드러지게 나타나고 있으며, 특히 산란지 이동으로 이용하고 있는 어종의 양적 감소는 더욱 더 현저하여(최 등, 1996), 이에 대한 대책 마련이 시급하다.

본 연구는 최근 감소추세에 있는 황복, *Takifugu obscurus*의 초기단계를 이용하여 수도권 쓰레기 매립지에서 방류하는 침출수의 독성도를 평가하고 침출수의 해양 방류가 수산생물에 미치는 영향 등을 추론하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

실험어

침출수 독성도 평가를 위하여 인공수정에 의해 부화된 전장 20 mm이하(5, 10, 15 mm)의 자·치어와 전장 30 mm이상(30, 45 mm)의 자연산 치어를 사용하여 실험하였다.

자연산 치어는 96년 8월과 9월에 인천 연안의 장봉도 인근 해역에서 채집하여 실험실내에서 순응시킨 후 사용하였고, 부화된 자치어는 97년 5월 29일 임진강에서 채포한 황복 친어로부터 인공수정에 의해 얻어진 수정란을 부화조에서 300 ml/분의 폭기와 0.5~0.7회전/일의 환수조건하에서 난 관리 및 부화시켜 사용하였다. 부화된 자어는 원형 FRP수조(500 l)로 옮겨 부화후 10일까지는 지수상태로 매일 사육수의 20%씩 교환하였으며, 이후에는 성장에 따라 0.5~2회전/일의 범위로 환수하며 사육하였다. 사료는 부화후 25일까지는 *Nannochloropsis* sp.로 배양한 Rotifer, *Brachionus rotundiformis*와 영양강화한 *Artemia*, *Artemia salina* 유생의 생물이료만 제공하였고, 그 후부터는 영양강화한 *Artemia*와 시판하는 자치어용 넘치 배합사료를 혼합 급여하였다.

침출수 및 실험수

실험에 사용된 침출수는 정화된 침출수로 우기후인 96년 9월 5일에 침출수 처리장 방류구에서 채수하여 영하 70℃ 냉동고에 보관하였고, 필요시 4℃ 냉장상태에서 해동시켜 실험에 사용하였다. 실험용 해수는 카트리지 여과기(5 μm, 3개)와 활성탄 여과기, 자외선 살균기로 이루어진 여과 시스템을 통하여 여과 및 살균하여 사용하였고, 담수는 지하수를 여과하여 사용하였다.

실험 방법 및 분석

실험은 전장을 크기별로 약 5 mm(Exp. I), 10 mm(Exp. II), 15 mm(Exp. III), 30 mm(Exp. IV) 그리고 45 mm(Exp. V)로 구분하여 총 5개 크기별로 실시하였고(Table 1), 각 크기별 농도 구간은 예비실험 결과를 토대로 설정하였다.

Exp. I, Exp. II, Exp. III은 10 l 사각수조에 침출수 부피비율을 0%(control), 1%, 2%, 4%, 8%, 16%로 하였고, Exp. IV는 25 l 사각수조에 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 8%로, Exp. V는 25 l 사각수조에 0%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%로 설정하여 실험어를 실험별로 15~30개체씩 넣고 실시하였다. 각 실험은 지수상태에서 실시하였고, 사육수 변질을 막기 위하여 매일 수조내 실험수를 1/3씩 교환하였다.

수조내 수온 및 염분도는 T-S Bridge(Kent)를 이용하여 1일

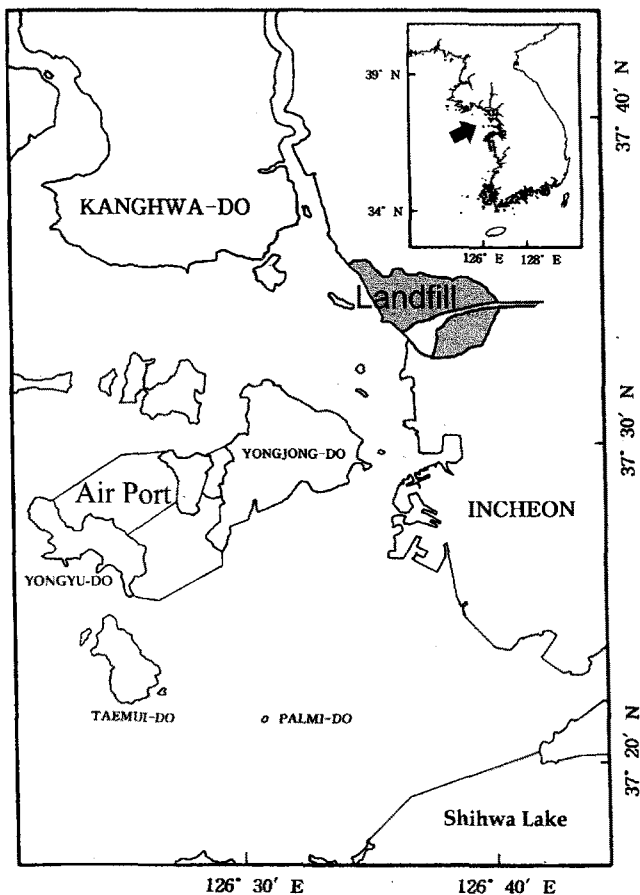


Fig. 1. A map showing the study area.

Table 1. Experimental conditions for the assessment on acute effects of the treated landfill leachate

Experiment Number	Individual Number	Experimental water				Initial size	
		T (°C)	DO (mg/l)	pH	S (psu)	Ave. T.L.(mm) ^{*1}	Ave. W.W.(mg) ^{*2}
						(Mean±S.D.)	
Exp. I	30	20.7-20.8	6.6-6.9	7.6-8.2	11.8-12.8	4.4±0.2	1.0
Exp. II	20	22.7-23.4	6.2-6.7		25.0-26.0	11.9±0.9	24.2± 6.5
Exp. III	20	23.0-23.5	6.5-6.6	8.28-8.36	25.0-26.5	15.8±0.8	88.4±15.7
Exp. IV	15	22.7-23.5	7.5-7.7	8.29-8.92	29.2-30.0	32.6±3.4	584±175
Exp. V	15	19.9-20.7	7.8-8.1		30.0-30.9	44.3±3.6	1,309±341

*1: Average total length (mm)

*2: Average wet weight (mg)

3회, 용존산소는 DO meter(YSD)를 이용하여 1일 1회, 수소이온 농도지수는 pH/ION meter(DMS, DP-880M)를 이용하여 2일 1회 측정하였다. 실험기간 동안에 수온은 20~23.5°C이었고, 용존산소는 6.2~8.1 mg/l, 수소이온농도는 7.6~8.9 범위였다.

반치사농도(LC₅₀)는 사망률 자료를 근거로 Spearman-Kärber Method를 이용하여 구하였다. 각 실험별 침출수 농도에 따른 호흡수의 변화는 관찰이 용이한 전장 30~45 mm의 Exp. IV와 Exp. V에서 측정하였고 ANOVA test로 유의성을 검정하였다. 또한 유영형태 및 유영능력 등의 행동변화를 관찰하였다.

결 과

사망률

Exp. I과 Exp. V를 제외한 Exp. II~IV(전장 10~30 mm범위)는 침출수 농도 2~4%범위내에서 96시간내에 50%이상의 사망률을 보였다(Table 2). Exp. II(전장 10 mm)는 4%의 농도에서 48시간이내에 70%의 사망률을 보였고, Exp. III~IV(전장 15~30 mm)에서는 전 개체가 사망을 하였다. 또한, 침출수 농도 8% 이상에서는 자어기인 Exp. I을 제외한 전 실험에서 12시간이내에 모든 개체가 사망을 하였다. 반면에 자어기(부화후 8일)인 Exp. I은 침출수 농도 8%이상에서 96시간내에 전 개체가 사망하였고, 24시간내에는 침출수 농도 16%에서 전 개체가 사망하여 다른 실험군보다 매우 낮은 사망률을 나타내었다. 조사결과, 각 실험에 있어서 사망률은 농도 증가와 시간경과에 따라 증가하는 경향을 보였고, 동일 실험내에서 실험어 사망시간은 전장과 체중과는 통계적 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

반치사농도

각 크기별 반치사농도(LC₅₀)를 Table 3에, 그 변화양상을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. LC₅₀의 변화양상은 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 보였고, 전장이 증가할수록 시간에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 또한, 약 72시간 이후에는 노출이 지속되어도 LC₅₀은 X축에 거의 평행하게 나타나는 현상을 보였다. 가장 작은 전장인 Exp. I의 경우, 24시간에는 8.57%의 LC₅₀을 보였으나 96시간에는 4.93%의 LC₅₀을 나타내 약 42%의 감소를 보였으며, 가장 큰 전장인 Exp. V에서는 24시간에는 5.37%의 LC₅₀을 보였고 96시간에는 4.72%의 LC₅₀을 나타내 약 12%의 감소만을 보였다.

크기별 LC₅₀에 있어서는 자어단계인 Exp. I에서 24hr-LC₅₀이 8.57%로 가장 높게 나타났으며, 48-96hr-LC₅₀도 다른 전장별 실험보다 높게 나타났다(Fig. 3). 전장 약 15 mm인 Exp. III까지는 성장에 따라 LC₅₀이 감소하는 경향을 보였으며, 전장 약 30 mm인 Exp. IV이후부터는 성장에 따라 LC₅₀이 다시 증가하는 경향을 보였다. 또한, 전장 약 10 mm인 Exp. II와 15 mm인 Exp. III간에 있어서 LC₅₀의 감소양상은 48시간까지 나타났으며 그후 72시간부터는 증가하는 양상을 보였다.

Probit method에 의해 계산되어진 72hr-LC₁은 1.21~1.70%, 96hr-LC₁은 0.69~0.99%의 범위로 나타났다(Table 3).

호흡수 및 행동 변화

침출수 노출시간에 따른 호흡수의 변화 양상을 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 침출수 농도가 높아질수록 급격한 호흡수의 감소를 보였으며, 4%이상의 높은 농도에서는 깊은 호흡과 짧은 호흡을 번갈아가며 단속적이며 불규칙한 호흡 형태를 보였다. 이러한 호흡수 변화를 ANOVA test한 결과, Exp. IV와 Exp. V에서 호흡수 변화가 대조구와 침출수 농도 0.5%에는 유의차가 없었으나, 농도 0.5%와 1%, 2%, 4%, 8%간에는 각각 유의차가 인정되었다(P < 0.05). 호흡수는 각 농도에 따라 유의적이었으나 경과시간 6시간이후에 대해서는 통계적 상관관계가 인정되지 않았다. 그러나, Exp. V에서 실험개시후 2시간에 측정된 농도 2%와 4%는 6시간후 급격한 감소 경향을 보였다. Exp. IV와 Exp. V간의 큰 차이는 없었으나, Exp. V에서 호흡수 변화가 비교적 안정적으로 나타나 같은 농도일 경우에는 작은 개체(Exp. IV)의 호흡수 변화가 다소 큰 양상을 보였다.

유영형태 및 유영능력 등의 행동변화에 있어서는 전장과 침출수 농도에 따라 변화가 나타나는 시간과 정도는 달랐으나 일반적인 행동변화 양상이 관찰되었다. 즉, 침출수를 투입하면 급작스런 스트레스 증가와 충격으로 인하여 일시적으로 유영속도가 빨라지나 점차적으로 유영성이 둔화되어 외부 자극에 대한 반응이 느려짐이 관찰되었다. 이후 평형감을 상실하여 오른쪽으로 기울어지고, 방향성없이 미약한 유영력을 보이거나 물의 흐름에 따라 부유하는 경향이 관찰되었고, 최종적으로 뒤집혀서 유영하며 표층으로 부상한후 사망하였다. 실험어는 일반적으로 0.5%이하의 농도에서 수조내 공간에 고른 분포를 보인 반면 농도가 증가되어 갈수록 시간의 경과에 따라 저층에 많이 분포하는 경향을 보였다.

Table 2. Mortality at different elapsed time exposed to the treated landfill leachate of each experiment

Experiment Number	Concentration (%V/V)	N	12h	24h	36h	48h	60h	72h	84h	96h
Exp. I	0	30								0%
	1	30							0%	3%
	2	30					0%	3%	3%	7%
	4	30			0%	3%	3%	7%	7%	10%
	8	30	0%	40%	80%	87%	93%	93%	100%	
	16	30	77%	100%						
Exp. II	0	20								0%
	1	20						0%	5%	10%
	2	20		0%	5%	5%	5%	5%	15%	35%
	4	20	5%	20%	55%	70%	80%	90%	100%	
	8	20	90%	100%						
	16	20	100%							
Exp. III	0	20								0%
	1	20								0%
	2	20	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
	4	20	50%	70%	100%					
	8	20	100%							
	16	20	100%							
Exp. IV	0	15						0%		
	1	15						0%		
	2	15						0%		
	3	15	0%	7%	27%	53%	87%	100%		
	4	15	7%	73%	87%	100%				
	8	15	100%							
Exp. V	0	15								0%
	1	15								0%
	2	15								0%
	4	15					0%	0%	0%	7%
	6	15	27%	73%	93%	100%				
	8	15	100%							

Table 3. LC₅₀ and LC₁ with 95% confidence limits at different elapsed time of larval river puffer exposed to the treated landfill leachate (Concentration Unit: % V/V)

Experiment Number	24hr-LC ₅₀ ^{*1}	48hr-LC ₅₀	72hr-LC ₅₀	96hr-LC ₅₀	72hr-LC ₁ ^{*2}	96hr-LC ₁
Exp. I	8.57(7.57-9.71) ^{*3}	6.21(5.59-6.89)	5.53(5.00-6.11)	4.93(4.42-5.49)	2.49(0.00-4.25)	1.51(0.00-3.73)
Exp. II	4.60(3.99-5.30)	3.25(2.74-3.85)	3.25(2.74-3.85)	3.00(2.37-3.79)	1.40(0.76-1.86)	0.69(0.33-1.03)
Exp. III	3.03(2.76-3.33)	2.73(2.55-2.92)	2.73(2.55-2.92)	2.38(2.04-2.78)	1.21(0.00-2.78)	0.99(0.53-1.30)
Exp. IV	3.86(3.42-4.35)	2.88(2.63-3.15)	2.45() ^{*4}			
Exp. V	5.37(4.96-5.82)	4.90() ^{*4}	4.90() ^{*4}	4.72(4.40-5.07)		

^{*1}LC₅₀: Lethal Concentration killing 50% of the exposed organisms calculated by the Spearman-Kärber method.

^{*2}LC₁: Lethal Concentration killing 1% of the exposed organisms calculated by the Probit method.

^{*3}(Lower-Upper): 95% Confidence limits.

^{*4}(): Limits do not exist.

고찰

황복(*Takifugu obscurus*)의 초기단계를 이용하여, 침출수의 독성도를 평가하고 생물에 미치는 영향을 파악함으로써 침출수의 해양양류가 수산생물에 미치는 영향 및 피해를 추론하고자 급성

독성 단기실험을 실시하였다. 실험 결과, 24hr-LC₅₀은 3.03~8.57%범위로 나타났으며, 48hr-LC₅₀은 2.73~6.21%, 72hr-LC₅₀은 2.45~5.53%, 그리고 96hr-LC₅₀은 2.20~4.93%로 나타났다. 이것은 박 등(1996)의 난지도 매립지 침출수에 대한 송사리 알의 96hr-LC₅₀이 1.07~2.50%으로 나타난 결과나 Wong(1989)의

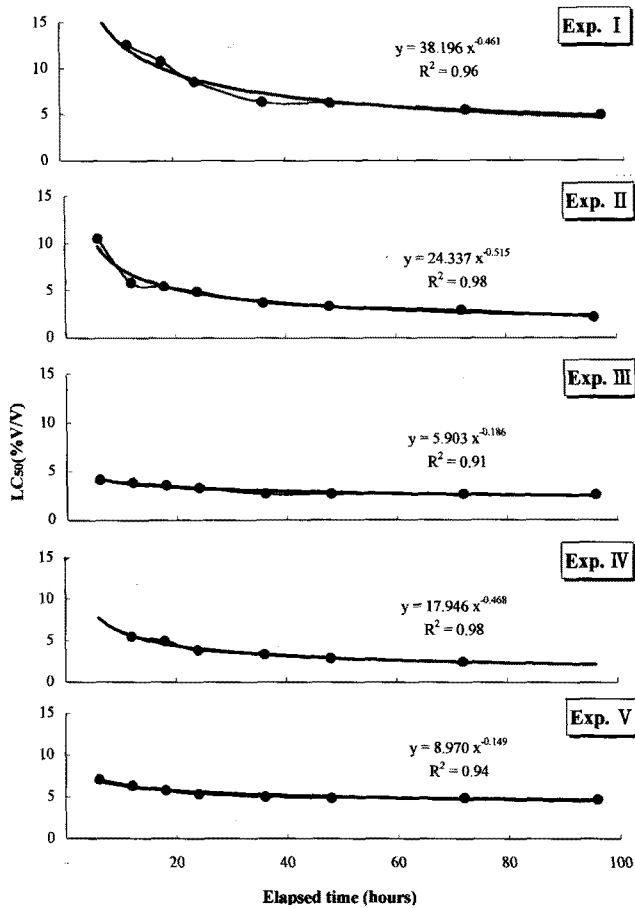


Fig. 2. LC₅₀ at different elapsed times of the larval river puffer exposed to the landfill leachate for each experiment.

Gin Drinker's bay landfill site(Hong Kong)의 침출수에 대한 틸라피아(25~30 mm)의 96hr-LC₅₀이 1.4~2.3%로 나타난 결과와는 다소 차이가 있었다. 이러한 결과의 원인으로 생각해 볼 수 있는 것은 침출수의 성분이 매립된 물질의 종류나 매립기간등의 차이에 기인하는 것으로 추측할 수 있고(Cameron and Koch, 1980; O'Connor *et al.*, 1990), 또한 해산어와 담수어의 생리적인 차이에 의한 것으로도 예측되어진다(한, 1996).

일반적으로 노출 경과시간에 따라 LC₅₀은 감소하는 것을 보였으며, 성장할수록 노출 경과시간에 대한 감소가 완만한 양상을 보였다. 이는 성장단계에 따라 침출수의 독성에 대한 저항과 순응정도 등이 증가하는 것에 의한 것으로 사료된다. 또한, 특이하게 자어단계인 Exp. I(전장 약 5 mm)에서 다른 크기별 실험에서보다 LC₅₀이 가장 높게 나타났으며, 전장 10~15 mm까지는 크기의 증가에 따라 감소하는 양상을 보이다 전장 30 mm이상에서부터 다시 증가하는 양상을 보였다. 이러한 양상은 넙치류(*Pleuronectes platessa* L.)의 갓 부화한 전기자어보다 부화후 14 일된 후기자어가 더 낮은 구리(Cu) 농도에서 높은 사망률을 보인 Blaxter(1977)의 실험결과와 유사한 경향을 보였다.

많은 학자들은 무척추동물에 있어서 유생 단계가 성체에 비해 오염물질에 대해 더 민감하다고 보고하였다(O'Connor *et al.*, 1990). 어류에 있어서는 배체보다 자치어가 좀 더 민감하며, 배

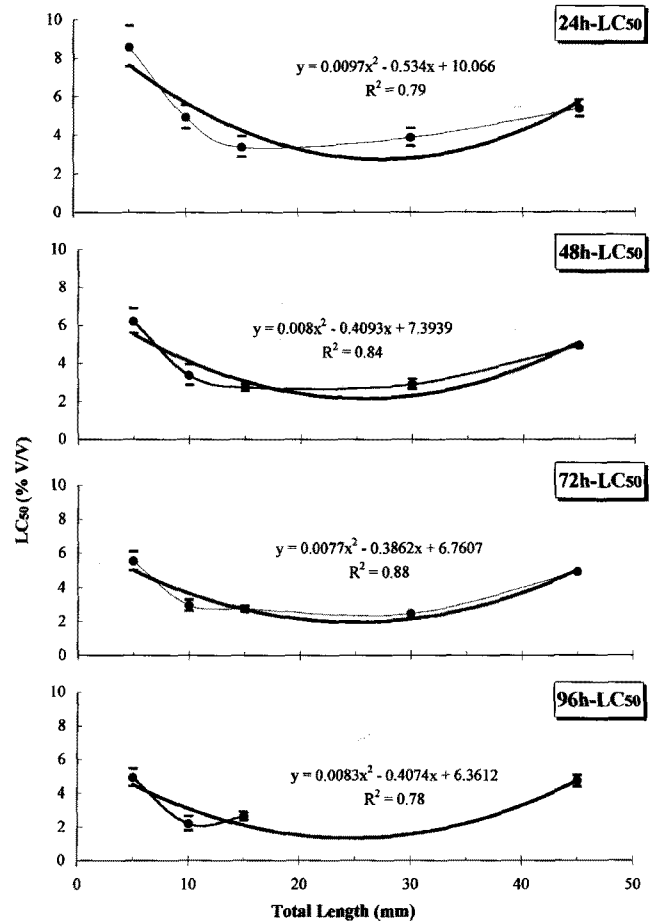


Fig. 3. Variation of LC₅₀ at different sizes (TL) of larval river puffer exposed to the land leachate for the different elapsed time (LC₅₀ values were calculated by Spearman-Kärber method).

체와 자치어보다 유어등이 덜 민감하다고 한 바 있다(Rosental and Alderdice, 1976; Weis and Weis, 1977; McKim, 1984). 또한 Weis and Weis(1977)는 일반적으로 담수어는 자치어가 배체보다 더 민감하고, 반대로 해수어는 배체가 자치어보다 더 민감하다고 하였으며, 담수에서 산란하는 해산종인 연어의 경우 이러한 점에서 해수어와 비슷한 경향을 보인다고 하였다.

본 실험 결과, 황복 자어기는 침출수에 대한 내성이 강하며, 성장과 더불어 내성이 약해지다가 일정단계(본 실험에서 약 15~30 mm이상)이후로 성장함에 따라 내성과 순응정도 등이 강해지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 황복이 담수에서 산란 후 자어기를 이 지역에서 보낸 뒤 해수로 이동하는 전장 10~15 mm 전후의 전기 치어기에 체내 제거관의 분화, 발달 및 내·외부형태의 변화가 단기간내에 일어나는 극히 불안정한 단계로서, 이 시기에 내성 감소는 외부환경에 대해 더욱 민감하게 반응하여 나타난 생리적인 변화로 생각되며, 전장 30 mm부터는 해수에 적응되어 어류의 일반적인 양상과 유사한 것으로 사료된다. Schrab *et al.*(1993)와 Blaxter(1977) 등은 어류마다 오염원에 반응하는 정도가 다르며 또한 물질의 종류나 어류의 발달 단계에 따라 반응의 차이를 보인다고 보고하여, 소화성 어류인 황복의 자·치어는 서식환경이 정해진 다른 해산어종과는 오염물질에 대한 반응

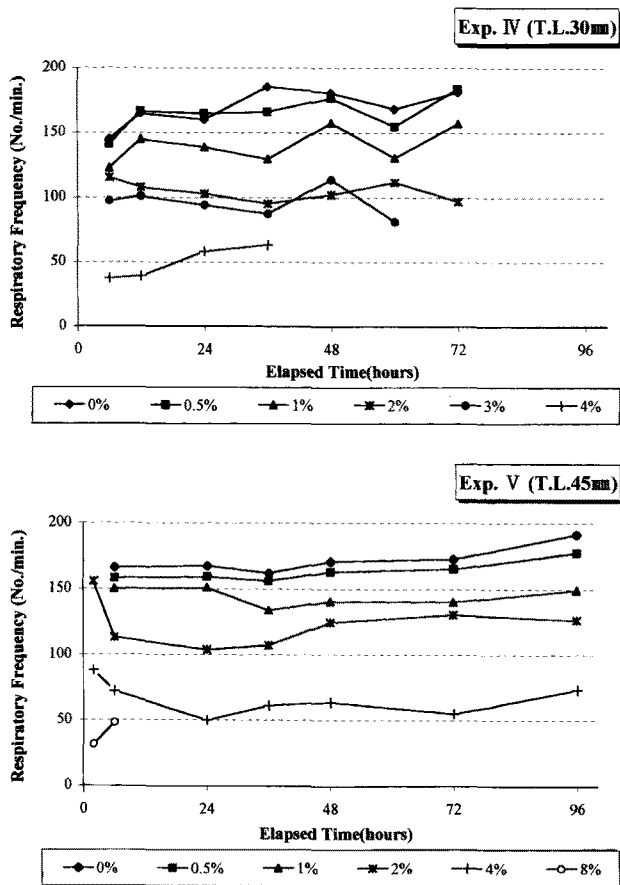


Fig. 4. Temporal changes in the respiratory frequency (the gill opening and closing) of the juvenile river puffer according to the elapsed time exposed to the treated landfill leachate.

과 적응력에 차이가 있을 것으로 생각된다.

행동 관찰에 따르면, 침출수 농도 증가에 따라 호흡수가 감소하였는데, 농도에 있어서 0.5%까지는 유의차가 없었으나 1% 이상에서 유의차가 있음을 알 수 있었다($P < 0.05$). 유영형태 및 유영능력도 약 1% 이상의 농도에서 차이를 보이기 시작하였다. 이러한 결과들은 Probit method에 의해 계산되어진 96hr- $LC_{0.1}$ 이 0.69~0.99%, 72hr- $LC_{0.1}$ 이 1.21~1.70%로 나타난 것에도 유사하였다. $LC_{0.1}$ 은 실험 생물의 1%가 사망하는 농도로, USEPA (United States Environmental Protection Agency)의 복합폐수 급성독성 기준(이 등, 1991)에 따르면 처리한 생물의 1% 이상이 영향을 받는 경우를 유해하다고 판정한다. 따라서 본 실험에서는 96시간 이내에 최소한 침출수 농도가 0.69% 이상이면 유해하다고 판정될 수 있다. 결과적으로 침출수 농도가 약 1% 전후이면 침출수의 영향이 나타나는 것으로 사료된다. 일반적으로 침출수를 투입하면 급작스런 스트레스 증가와 충격으로 인하여 일시적인 유영력·운동성의 증가를 볼 수 있었는데 이는 오염물질에 대한 도피 행위로 보여지며 시간이 경과된 후 오른쪽으로 기울어져 유영하는 것은 평형감 상실에 의한 것으로 사료된다.

해산어류 생활사에 있어서 생식조직 발달시기나, 초기 배체시기 또는 내부영양에서 외부영양으로 전환되어가는 자어시기 등은 환경변화나 오염에 대한 스트레스에 민감하게 반응한다

(Rosenthal and Alderdice, 1976). 따라서 가장 민감한 이러한 시기에 오염물질에 대한 독성도 평가 실험을 한다면 수산생물에 대해 더 많은 변화와 영향을 파악할 수 있을 것이라 사료된다.

결론

수도권 매립지에서 방류되는 침출수의 독성을 평가하고자 황복 자치어를 이용하여 급성독성 단기실험을 실시하였다.

전장 5~45 mm 자치어로 실험한 결과, 24hr- LC_{50} 은 침출수 부피비 농도 3.03~8.57%로 나타났으며, 48hr- LC_{50} 은 2.73~6.21%, 72hr- LC_{50} 은 2.45~5.53%, 96hr- LC_{50} 은 2.38~4.93%로 나타났고, 72hr- $LC_{0.1}$ 은 1.21~2.49%, 96hr- $LC_{0.1}$ 은 0.69~1.51%로 나타났다. 96시간내에 침출수 농도 최소 0.69% 이상에서 황복 자치어에 영향을 주었다. 또한 호흡수 측정 결과, 대조구(0%)와 농도 0.5%에서는 유의차가 없었으나, 농도 1% 이상의 실험구와는 유의차가 인정되었고($P < 0.05$), 먹이에 대한 반응과 유영상태 변화등에 있어서도 농도 1% 이상에서 차이를 보이기 시작하였다.

이러한 결과들을 종합하여 보면, 반치사농도(LC_{50})는 시간에 따라 다르나, 96시간내에 최소 2.38%(V/V) 이상으로 나타났으며, 농도 0.7% 이상에서는 호흡수 변화와 유영상태 변화 등의 영향이 나타났다. 따라서, 침출수 해양방류시에 단기적으로 잔류농도가 24시간 이내 약 3% 이상, 96시간 이내 약 2% 이상에서 치사의 급성독성 영향을 나타내며, 잔류농도가 96시간 이내 약 0.7% 이상이면 어류에 영향을 주는 것으로 판단된다.

많은 연구자들에 의해서, 일반적으로 생물의 독성물질에 대한 반응도는 박테리아 > 조류 > 동물플랑크톤 > 무척추 저서생물 > 어류의 순으로 나타나며 하등생물일수록 영향을 더 많이 받고, 발생단계에 있어서 배체와 자치어가 보다 민감하게 반응을 한다고 보고되었다(Rosenthal and Alderdice, 1976; Atwater et al., 1983; Plotkin and Ram, 1984; Schrab et al., 1993; Devare and Bahadir, 1994). 이에 따르면, 어류보다 하등생물들에게서 더 많은 피해가 발생함을 추론할 수 있으며, 이에 따른 기초 생태계의 변화는 더 큰 양상을 보일 것으로 사료된다.

방류해역에서 확산모델 결과에 의하면(최 등, 1996), 방류후 침출수 잔류농도가 황복 자치어 최대 허용농도보다는 적은 농도로 나타나지만, 해양방류가 반복적이고 지속적으로 이루어진다면 해양 생물권에 심각한 생리생태적 충격을 가하게 되어 영향권내 해역의 생태계에 대한 피해와 생산력 감소를 유발시킬 수 있다.

침출수가 채수된 김포 매립지는 현재 매립이 계속 진행되고 있는 곳이며, 유독성 물질의 양이 비교적 적다고 알려진(Wong, 1989; 박 등, 1996) 우기후에 침출수 채수가 이루어져, 본 실험에 사용된 침출수의 독성이 적을 것을 감안한다면 더 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서, 독성이 비교적 더 강할 것으로 알려진 불철에 방류가 이루어진다면 외해에서 강이나 하구역으로 산란이나 색이를 목적으로 회유하는 실뱀장어와 황복과 같은 왕복성 어류는 회유경로를 변경할 가능성이 높아지고, 기존 연안역에 서식하고 있는 어종 감소와 어획량 감소를 유발할 것으로 사료된다. 따라서, 근본적인 기준 설정을 위하여 다양한 생물 종과 다양한 성장 발달단계를 이용한 생물 검정 등 더 많은 연구가 선행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문을 세심하게 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 해양연구소 김종만 박사님과 부경대학교 진평 교수님께 감사드립니다. 또한 본 논문을 자세히 검토해 주신 한국해양 연구소 안인영 박사님과 현정호 박사님께 감사 드립니다.

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 인하대학교 서해연안환경연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- 박배경, 박석순, K.M. Erstfeld and K.R. Cooper, 1996. 송사리 알의 초기 발생과정을 이용한 매립지 침출수 독성도 평가. 한국 환경생물학회지, **14**: 55-61.
- 이성규, 심점순, 김용화, 노정구, 1991. 어류, *Daphnia* 및 Ames' Test를 이용한 산업폐수의 환경독성 및 유전독성 평가. 한국 수질보전학회지, **7**: 100-109.
- 최중기, 박용철, 홍재상, 한경남, 1996. 김포매립지 침출수 방류해역의 해양환경·해양생태계 조사 연구 보고서. 인하대 해양과학기술연구소, pp. 621-774.
- 최중기, 홍재상, 박용철, 1995. 김포매립지 침출수 방류해역의 해양환경·해양생태계 조사 연구 보고서. 인하대 해양과학기술연구소, 163 pp.
- 한경남, 1996. 자주복 유어의 필수지방산 요구 및 적정함량. 한국 양식학회지, **9**: 353-361.
- Atwater, J.W., S. Jasper, D.S. Mavinic and F.A. Koch, 1983. Experiments using *Daphnia* to measure landfill leachate toxicity. *Water Res.*, **17**: 1855-1861.
- Blaxter, J.H.S., 1977. The effect of copper on the eggs and larvae of plaice and herring. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, **57**: 849-858.
- Cameron, R.D. and F.A. Koch, 1980. Toxicity of landfill leachates. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **52**: 760-769.
- Cheung, K.C., L.M. Chu and M.H. Wong, 1993. Toxic effect of landfill leachate on microalgae. *Water Air Soil Poll.*, **69**: 337-349.
- Cooper, K.R., H. Liu, 1991. Evaluation of baltic herring and Icelandic cod liver oil for embryo toxicity, using the Japanese medaka (*Oryzias latipes*) embryo larval assay. *Environ. Tox. Chem.*, **10**: 707-714.
- Devare, M. and M. Bahadir, 1994. Biological monitoring of landfill leachate using plants and luminescent bacteria. *Chemosphere*, **28**: 261-271.
- McKim, J.M., 1984. Early life stage toxicity tests. In: Fundamentals of Aquatic Toxicology, edited by Rand, G.M. and S.R. Petrocelli, Hemisphere Publishing Corp., Washington, pp. 58-95.
- O'Connor, O.A., R. Dewan, P. Galuzzi and L.Y. Young, 1990. Landfill leachate: A study of its anaerobic mineralization and toxicity to methanogenesis. *Arch. Environ. Con. Tox.*, **19**: 143-147.
- Plotkin S. and N.M. Ram, 1984. Multiple bioassays to assess the toxicity of a sanitary landfill leachate. *Arch. Environ. Con. Tox.*, **13**: 197-206.
- Rosenthal, H. and D.F. Alderdice, 1976. Sublethal effects of environmental stressors, natural and pollutional, on marine fish eggs and larvae. *J. Fish. Res. Board Can.*, **33**: 2047-2065.
- Schrab, G.E., K.W. Brown and K.C. Donnelly, 1993. Acute and genetic toxicity of municipal landfill leachate. *Water Air Soil Poll.*, **69**: 99-112.
- Weis, J.S. and P. Weis, 1977. Effects of environmental pollutants on early fish development. *Aquat. Sci.*, **1**: 45-73.
- Wong, M.H., 1989. Toxicity test of landfill leachate using *Sarotherodon mossambicus* (Freshwater fish). *Ecotox. Environ. Safe.*, **17**: 149-156.

1999년 2월 8일 원고 접수

1999년 7월 12일 수정본 채택