

## 다양한 시험생물종을 이용한 산업폐수 생태독성 평가 및 원인물질 탐색

류태권, 조재구, 김경태, 양창용, 정기은\*, 윤준현, 최경희

국립환경과학원 환경건강위해성연구부 위해성평가과

## Ecotoxicity Test of Wastewater by a Battery of Bioassay and Toxicity Identification Evaluation

Tae-Kwon Ryu, Jae-Gu Cho, Kyung-Tae Kim, Chang-Yong Yang,  
Ki-Eun Joung\*, Junheon Yoon and Kyunghee Choi

Risk Assessment Division, Environmental Health Risk Research Department,  
National Institute of Environmental Research

### ABSTRACT

Toxicity identification and quantification are important factors to evaluate the effect of industrial effluent on the aquatic environment. In order to measure the potential and real toxicity of mixed chemicals in the effluents, the biological method (i.e., WET test) should be used as well as chemical analysis method. In this study, we conducted WET test for various kinds of industrial effluents using aquatic organisms such as water flea (*Daphnia magna*), algae (*Pseudokirchneriella subcapitata*), fish (*Oryzias latipes*, *Danio rerio*), and microorganism (*Vibrio fischeri*). In addition, we carried out chemical analysis and TIE (Toxicity Identification Evaluation) for effluents in order to identify the substances causing toxicity. Among the 30 kinds of wastewater, S13 showed the highest eco-toxicity and  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Cl}^-$  ion were suspected as major compounds causing toxicity for aquatic organisms. In order to confirm these suspected compounds, various confirmation procedures need to be carried out.

**Key words :** WET (Whole Effluent Toxicity), TIE (Toxicity Identification Evaluation), *Vibrio fischeri*, *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia magna*, *Oryzias latipes*, *Danio rerio*

### 서 론

현재 전 세계적으로 유통되고 있는 화학물질의 수

는 약 246,000여 종에 이르며 국내에서도 약 41,000여 종의 화학물질이 제조되어 사용되고 있다. 또한, 매년 전 세계적으로 약 2,000여 종의 새로운 화학물질이 개발되어 유통되고 있다(환경부, 2009). 따라서 수계로 배출되는 유해화학물질의 종류가 급속히 증가하고 있으며 모든 유해화학물질에 대하여 배출기준을 설정하여 관리하는 것은 현실적으로 불가능한 일이다(Grothe *et al.*, 1995; Power *et al.*,

접수일: 2010년 5월 24일, 채택일: 2010년 8월 30일

\*To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-32-560-7126, Fax: +82-32-560-7979

E-mail: aubrey1@korea.kr

2004). 뿐만 아니라, 현행 이·화학 수질기준을 충족시키는 산업폐수에서도 물벼룩 등 생물체에 대한 생태적 손상 사례가 다수 보고되고 있다(Burgess *et al.*, 1995; 나진성 등, 2004; Kim *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2008). 이러한 이유들로 인해 수계로 배출되는 유해물질의 독성을 통합적으로 관리할 필요성이 대두되었다(Thomas and William, 2000; Victor *et al.*, 2000).

산업폐수 통합독성평가(Whole Effluent Toxicity test, WET test)란 지표생물을 이용하여 폐수의 독성을 평가하는 생물학적 독성평가 방법으로 폐수 중에 존재하는 오염물질의 혼합독성과 화학분석이 되지 않는 미지의 오염물질에 의한 독성까지 통합적으로 평가할 수 있는 독성평가 기법이다(Ankley and Burkhard, 1992; Kosian *et al.*, 1998). 이는 기존의 개별 화학물질에 대한 분석에 의한 관리방식을 보완할 수 있는 새로운 오염관리기법으로 평가받고 있으며 미국을 비롯한 선진국에서는 이미 오래전부터 배출수에 대한 모니터링을 위한 수단으로써 활용하고 있다. 현재 방류수 통합독성평가에는 조류, 물벼룩, 어류, 발광박테리아 등의 시험생물종이 이용되고 있으며 최소 2종 이상의 종을 이용하여 평가하는 것이 일반적이다(Baun and Nyholm, 1996). 우리나라도 이러한 세계적인 추세에 따라 2011년부터 물벼룩에 대한 급성독성시험을 이용하여 산업폐수에 대한 통합독성을 평가하는 “생태독성 배출허용기준 제도”를 시행할 예정이다(환경부, 2009).

본 연구에서는 현행 “생태독성 배출허용기준 제도”에서 시험생물종으로 규정하고 있는 물벼룩뿐만 아니라 발광박테리아, 조류, 어류 3종을 추가하여 4종의 시험생물종을 대상으로 산업폐수 통합독성시험을 실시하였다. 아울러, 독성이 높은 폐수를 대상으로 생태독성 원인물질을 규명하고자 독성원인 물질탐색(Toxicity Identification Evaluation, TIE)을 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시료채취

2011년부터 시행될 생태독성 배출허용기준 제도의 적용을 받게 되는 시설 가운데 폐수 배출량 및

기존 생태독성시험 결과 등을 고려하여 30개 사업장을 선정하여 배출수를 채취하였다. 채수용기는 폴리에틸렌 재질의 무균 채수병을 이용하였으며, 채수기 및 채수용기는 시료로 3회 이상 세척 후 사용하였다. 시료는 산화방지를 위해 완전히 채웠으며 채취나 운반 과정에서 폭기 되지 않도록 주의하였다. 시료는 냉장 상태로 운반한 뒤 4°C에서 냉장보관 하였다. 생태독성시험은 시료채취 후 별도의 전처리과정을 거치지 않고, 36시간 이내에 실시하였다(환경부, 2008).

### 2. 시험생물 및 시험방법

#### 1) 조류 성장저해시험

조류 성장저해시험은 *Pseudokirchneriella subcapitata* (ATCC 22662)를 이용하였으며 250 mL 플라스크에 100 mL 넣고, 23±2°C, 24시간 4,000~8,000 Lux의 광조건, 100 rpm 조건으로 배양하였다. OECD test guideline 201 (Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test)에 따라 시험을 수행하였다(OECD, 1998).

#### 2) 물벼룩 급성독성시험

물벼룩 급성독성시험에 사용된 물벼룩(*Daphnia magna*)은 50 mL 비이커에서 20±1°C, 850 Lux, 용존산소 3 mg/L 이상, 광주기 16/8시간(명/암) 조건으로 배양하였으며, 먹이로는 녹조류인 *P. subcapitata*와 *Chlorella* sp.를 공급하였다(OECD, 1998). 3회 이상 어린 개체를 생산한 어미에서 얻은 개체 가운데 생후 24시간 이내의 어린 개체만을 선별하여 시험에 이용했으며 노출기간 동안 먹이와 공기는 공급하지 않았다. 물벼룩 급성독성시험은 수질오염공정시험기준 제49항 「물벼룩을 이용한 급성독성시험」에 따라 수행하였다(환경부, 2008).

#### 3) 어류 급성독성시험

어류 급성독성시험에 사용된 개랑 송사리(*Oryzias latipes*) 및 제브라피시(*Danio rerio*)는 1L에서 24±1°C, pH 7.5±0.2, 용존산소 7~8 mg/L 및 광주기 16시간/8시간(명/암) 조건으로 사육하였으며, 먹이로는 갯 부화한 알테미아를 공급하였다. 부화 후 4개월 이상 된 2±1 cm의 크기의 개체를 이틀간 절식시킨 후 시험을 실시하였다. 어류 급성독성시험은 OECD test guideline 203 (Fish, Acute Toxicity Test)

에 따라 시험을 수행하였다(OECD, 1998).

#### 4) 발광박테리아 발광을 저해시험

발광박테리아 발광을 저해시험에 사용한 시험종은 *Vibrio fischeri*이며, 동결 건조된 상태의 박테리아를 시험을 실시하기 직전, 활성화 용액에 녹인 뒤 사용하였다. 사용된 발광미생물 및 활성화 용액은 상용화되고 있는 NeoEnBiz사의 제품을 사용하였고, 염분농도를 20psu로 조정한 후 해양오염공정시험법에 따라 평가하였다(국토해양부, 2008). 발광을 저해는 초기발광량과 15분 후의 발광량 차이의 비율을 이용하여 계산되었다.

### 3. 독성값 산출

각각의 시험생물을 이용한 독성시험은 대조군 및 산업폐수 100%, 50%, 25%, 12.5%, 6.25%를 대상으로 실시하였다. 발광박테리아는 노출 후 15분에서의 발광 저해율, 조류는 노출 후 72시간 후의 평균 특이성장률, 물벼룩은 노출 후 24시간 및 48시간 후의 유영저해율, 어류는 노출 후 96시간 후의 치사율을 종말점으로 하였다. Probit 통계법을 사용하여 반수영향농도(EC<sub>50</sub>) (또는 반수치사농도(LC<sub>50</sub>)) 및 95% 신뢰한계를 구하고 아래의 식에 따라 Toxic Unit (TU)값을 산출하였다(정명규 등, 2000).

**Table 1.** Eco-toxicity test of wastewater using *Daphnia magna* and water quality characteristics

Site	<i>Daphnia magna</i> Acute toxicity (TU)		Criteria (TU)	Water quality characteristics						
	24 h	48 h		Temp. (°C)	pH	D.O. (mg/L)	Conductivity (mS/cm)	Salinity (psu)	Residual Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Ammonia (mg/L)
S1	1	1.1	2	28.9	7.7	6.2	5.2	2.7	0	18.9
S2	0	0	2	24.6	7.6	6.1	1.1	0.6	0	8.1
S3	0	0	2	27.1	7.2	3.8	3.2	1.6	0	2.6
S4	0	0.5	4*	25.7	7.8	6.1	1.9	1.0	0	0
S5	0	0	1	25.9	7.9	6.7	3.4	1.7	0	0.1
S6	1.9	1.9	4*	30.4	7.7	4.5	0.3	0.2	0	7.1
S7	0	0.2	2	32.8	7.1	6.4	3.2	1.6	0	1.2
S8	0.5	1.5	1	29.2	7.0	6.6	0.9	0.5	0	0.1
S9	0	0	1	33.6	6.6	9.2	4.7	2.4	0	2.7
S10	0	0	1	34.7	7.2	6.5	2.7	1.4	0	0.3
S11	>2	>2	4*	21.0	6.9	7.3	23.3	13.8	0	0.6
S12	>2	>2	8*	36.3	7.2	7.7	20.9	12.0	0	0.1
S13	>2	>2	8*	23.6	3.5	7.9	25.1	14.9	0	21.2
S14	0.7	0.7	2	30.1	7.6	7.8	4.6	2.7	0	12.2
S15	0.1	0.2	2	27.8	7.5	7.6	7.1	3.8	0	0
S16	0	0	2	28.9	7.4	7.3	2.5	1.3	0	0.3
S17	0	0	2	31.0	7.0	4.4	1.1	0.5	0	0
S18	0	0	2	34.2	7.1	0.5	4.7	2.5	0	1.3
S19	0	0	2	28.4	7.6	6.9	2.3	1.1	0	0.7
S20	0	0	2	27.5	7.2	6.1	0.7	0.3	0	0.1
S21	0	0	2	29.5	7.3	5.6	0.7	0.4	0	1.4
S22	1.26	1.39	2	28.3	8.2	4.9	0.4	0.2	0	0
S23	0	0	2	31.1	7.2	3.3	4.9	2.6	0	2.4
S24	0	0	2	31.8	7.1	0.5	3.3	1.7	0	0.1
S25	0	0	2	24.6	7.4	3.9	0.3	0.1	0	0
S26	0	0	1	29.5	7.0	1.8	0.6	0.3	0	0
S27	1.37	1.80	1	28.2	7.6	3.3	2.1	0.1	0.2	0.3
S28	0	0	1	28.1	7.8	4.0	1.1	0.6	0	10.0
S29	1.46	1.46	2	27.3	7.8	4.6	9.4	5.3	0	0
S30	0	0	1	27.1	6.1	2.0	2.6	1.3	0	13.9

\*The criteria will be applied below TU2 from 2016

$$TU = \frac{100}{[EC_{50}(\%)]} \text{ 또는 } TU = \frac{100}{[LC_{50}(\%)]}$$

수온, pH, 용존산소, 전기전도도, 염분농도, 잔류염소, 암모니아 7개 항목을 대상으로 측정하였으며 수온, pH, 용존산소 및 전기전도도 측정은 시료채취 현장에서 실시하였다.

#### 4. 생태독성 원인물질 탐색

US EPA에서 제시한 방법에 따라 phase I, II 생태독성 원인물질 탐색을 수행하였다(US EPA, 1993). Phase I 단계에서는 물벼룩 급성독성시험으로 원시료 테스트, 휘발성 물질 제거 테스트, 유기화합물 제거 테스트, 부유물 제거 테스트, 중금속 제거 테스트, 산화제 제거 테스트, 암모니아 독성 테스트를 실시하여 독성원인물질의 그룹을 확인하고자 하였다. Phase II 단계에서는 양이온, 음이온 수지를 이용하여 정밀화학 분석 및 기기분석을 통해 총 용존 고형물(Total Dissolved Solids) 등을 분석하였다. 또한 정밀 화학분석 및 기기 분석은 공정시험법을 참고하여 수행하였다(환경부, 2008).

### 결과 및 고찰

#### 1. 물벼룩 급성독성시험을 이용한 산업폐수 생태독성 스크리닝

30개 사업장의 배출수 시료에 대한 물벼룩 급성독성시험 결과 및 수질 측정 결과는 Table 1과 같다. 배출수에 대한 물벼룩 급성독성시험은 24시간 및 48시간 노출 후 유영 저해율을 종말점으로 하여 TU값을 산출하였다. pH는 S13 시료를 제외한 모든 시료에서 중성을 나타내었으며 수온은 21.0~36.3°C이었다. 냉장 보관된 시료는 실험실에서 20±1°C로 조절한 뒤 물벼룩 급성독성시험을 실시하였다. 염분농도는 인천지역에 위치하고 있는 3개 사업장 시료(S11, S12, S13)를 제외한 나머지 시료에서 3psu 이하로 측정되었다. 암모니아 농도는 0~21.2 mg/L로 시료의 종류에 따라 다양하게 측정되었다. 대부분 사업장의 배출수는 생태독성 배출허용기준을 만족하였으나 S8(폐수종말처리시설), S11(제1차 철강산업시설), S12, S13(기초무기화합물제조시설), S27(섬유염색 및 가공시설) 시료는 기준치

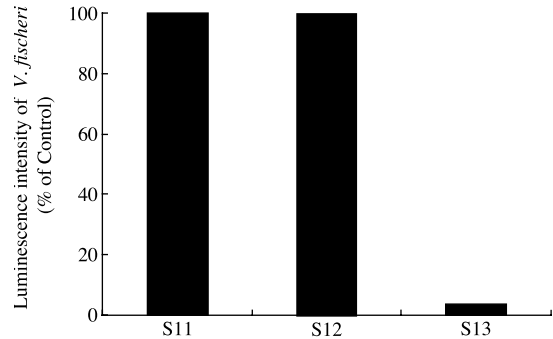


Fig. 1. Eco-toxicity test of S11, 12, and 13 using *Vibrio fischeri*.

를 초과하는 것으로 나타났다. 특히 염분농도가 10 psu 이상이었던 S11, S12, S13 시료에서는 원수 100%와 50% 농도에 노출된 물벼룩이 노출 후 10분 이내에 모든 개체가 치사하였다. 이 시료에서 나타난 물벼룩 독성이 염분농도에 의한 영향인지 여부를 확인하기 위해 발광박테리아를 이용한 독성시험을 추가로 실시한 결과, S11 및 S12 시료는 발광박테리아에서 영향이 없는 것으로 나타나, 이 시료에 의한 물벼룩 독성은 높은 염분농도에 의한 것으로 추정된다. 반면 S13 시료의 경우 발광박테리아에서 영향이 나타나는 것으로 보아 염분농도에 의한 영향 외에 다른 독성 유발 요인이 존재할 것으로 추정된다(Fig. 1). S13 시료의 수질 측정값을 보면 pH가 매우 낮게 나타났으므로 독성에 영향을 준 것으로 예상된다. 이와 같은 추정결과를 토대로 S8, S13 및 S27 사업장을 대상으로 Battery test를 이용하여 독성을 평가하였다.

#### 2. Battery test를 이용한 산업폐수 생태독성평가

수계로 배출되는 폐수의 독성을 통합적으로 평가하기 위해서는 한 가지 시험 생물종만을 사용하는 것보다는 먹이사슬을 고려하여 여러 생물종을 사용하는 것이 생태계에 미치는 전반적인 영향을 평가하는데 있어 바람직할 것이다(Carr *et al.*, 2003; Bielymyer *et al.*, 2004; Hernando *et al.*, 2005). 미국을 비롯한 선진국에서도 배출수 통합독성평가를 위해 적어도 세 개 이상의 생물종을 사용하고 있으며 급성독성뿐만 아니라 아만성 및 만성독성까지 평가하는 추세이다(Zha and Wang, 2006; Barata *et al.*,

**Table 2.** Eco-toxicity test of wastewater using a battery of test organisms (Unit: TU)

Test organism	Exposure time	S8	S13	S27
<i>P. subcapitata</i>	72 h	4.3	6.0	2.9
<i>D. magna</i>	24 h	0	6.8	0
	48 h	0	8.3	0
<i>D. rerio</i>	96 h	0	1.6	0
<i>V. fischeri</i>	15 min	0	1.4	2.1
D.O. (mg/L)		5.2	7.3	6.2
pH		7.7	8.0	7.0
Conductivity (mS/cm)		2.7	34.7	1.7
Salinity (psu)		1.4	21.2	0.9
Residual Cl <sup>-</sup> (mg/L)		0	0	0
Ammonia (mg/L)		0	38.6	0

2008).

본 연구에서도 이러한 국제적 추세에 따라 4가지 시험생물종(물벼룩, 어류, 조류 및 발광박테리아)을 이용하여 산업폐수에 대해 생태독성을 평가하였다(Table 2). 시험결과 조류에 대해서는 모든 시료에서 독성이 높게 나타났다. 그러나 물벼룩과 어류에 대해서는 S13 시료에서만 독성이 나타났다. 발광박테리아에 대해서는 S13과 S27 시료에서 TU 1 이상의 독성이 나타났으며, 시험에 이용한 시료의 수가 적은 한계점은 있지만, 배출수에 대한 시험 생물종별 민감도는 조류>물벼룩>어류의 순으로 나타났다. 발광박테리아의 경우는 담수종인 다른 시험생물종과 다소 다른 결과를 나타냈다(Onorati and Mecozzi, 2004; Lee *et al.*, 2007). 그러나 전 세계적으로 화학물질이나 염분농도가 높은 시료의 생물학적 독성을 평가하기 위해 많이 사용되고, 특히 염분농도가 존재하는 시료에서는 유용한 생물로 판단된다. 또한 이런 다른 결과의 원인은 염분농도와 색도에 의한 영향으로 판단된다. 염분농도가 높은 S13 시료의 경우 발광박테리아에 대한 독성이 타 시험 생물종에 비해 상대적으로 낮게 나타났으며 색도가 있는 S27 시료(섬유염색 및 가공시설 배출수)의 경우 어류 및 물벼룩에서는 독성이 나타나지 않은 반면 발광박테리아에서는 조류와 비슷한 수준의 독성을 나타내었다.

### 3. 생태독성원인물질탐색

원인물질 탐색은 모든 시험 생물종에서 독성을 나타낸 S13 시료를 대상으로 하였다. 1차적으로 독

**Table 3.** Toxicity Identification Evaluation (phase I) of S13

Test type	TU
Baseline whole effluent test	6.5
Filtration test	5.9
Sodium thiosulfate addition test	5.3
EDTA addition test	5.5
Post C, solid phase extraction (SPE) column test	7.0
Aeration test	5.7
Graduated pH test	
	pH 6
	pH 7
	pH 8

성원인물질군을 규명하기 위해 산화제, 중금속류, 유기화합물, 휘발성 물질, 암모니아, 부유물질을 대상으로 각각의 물질을 제거한 시료를 이용하여 물벼룩 급성독성시험을 실시한 뒤 원시료의 독성값과 비교해보았다(Table 3). 원시료의 TU값은 6.5이었으며 산화제, 중금속, 부유물질 제거 독성시험에서 TU값이 각각 5.3, 5.5, 5.9로 감소되었으나 큰 차이를 보이지는 않았다. 암모니아에 의한 독성유무를 알아보기 위해 pH별 독성변화를 살펴본 결과, pH 6의 산성 상태에서 TU값이 11.3으로 현저히 증가하였고 pH가 증가함에 따라 TU값이 감소되는 결과를 보였다. 이처럼 pH가 높아짐에 따라 독성이 감소하는 경우 황화수소나 중금속에 의한 영향을 의심할 수 있으나, 본 시료의 경우 중금속 제거 독성시험 결과가 원시료의 독성시험 결과와 크게 차이가 없는 것으로 보아 일반적인 중금속에 의한 영향이라고 판단하기는 어려우며, EDTA에 의해 제거되지 않는 종류의 중금속에 의한 영향이 존재할 것으로 추정할 수 있다.

기존의 연구 결과들을 보면, S13 시료와 같이 Phase I 독성원인물질 탐색에서 뚜렷한 독성원인물질 군이 파악되지 않는 경우 염이 독성원인물질 군인 경우가 많았다(환경부, 2009). 따라서 먼저 염에 의한 독성 가능성을 확인하기 위해 S13 시료에 대해 Phase II 독성원인물질 탐색 단계인 총 용존 고형물 분석을 수행하였다(Table 4). 아울러, S13 시료의 수질오염물질 화학분석 결과(Table 5)를 참조하여 독성원인물질을 규명하고자 하였다. K<sup>+</sup> 등 7종의 용존 고형물에 대한 분석 결과, 칼슘 이온 및 염소 이온이 각각 13,968 mg/L와 11,961 mg/L였다. Mount *et al.*의 연구 결과에서 염화칼슘에 대한 물벼룩 반수치사농도 값이 1,838~3,526 mg/L로 보고

**Table 4.** Total dissolved solids (TDS) of S13 wastewater

TDS	Concentrations (mg/L)
K <sup>+</sup>	10.2
Na <sup>+</sup>	1,582.0
Mg <sup>2+</sup>	29.9
Ca <sup>2+</sup>	13,968.0
F <sup>-</sup>	N.D.
Cl <sup>-</sup>	11,961.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	247.0

**Table 5.** Chemical analysis of S13 wastewater

Parameter	Unit	S13
BOD	mg/L	50.4
COD	mg/L	13.9
Suspended solid	mg/L	9.7
Total phosphorus	mg/L	0.098
Phenol	mg/L	0.015
Cyanide	mg/L	N.D.
Chromium	mg/L	N.D.
Soluble iron	mg/L	0.97
Zinc	mg/L	0.085
Copper	mg/L	0.206
Cadmium	mg/L	N.D.
Mercury	mg/L	N.D.
Arsenic	mg/L	N.D.
Lead	mg/L	N.D.
Hexavalent chromium	mg/L	0.04
Soluble manganese	mg/L	0.152
Selenium	mg/L	N.D.
Fluoride	mg/L	6.75
Total coliforms	CFU/mL	N.D.
Chromaticity		13.5
Anionic surfactant	mg/L	0.6
Normal-hexane extract	mg/L	2.1
Organic phosphorus	mg/L	N.D.
PCB	mg/L	N.D.
Trichloroethylene	μg/L	N.D.
Tetrachloroethylene	μg/L	N.D.
Benzene	μg/L	N.D.
Dichloromethane	μg/L	N.D.
Carbon tetrachloride	μg/L	N.D.
1,1-dichloroethylene	μg/L	N.D.
1,2-dichloroethane	μg/L	N.D.
Chloroform	μg/L	N.D.

\* N.D.: Not Detected

된 농도보다 훨씬 높은 농도로 존재하고 있었다 (Mount *et al.*, 1997). 이는 S13 사업장의 주된 생산제

품이 염화칼슘이라는 점을 고려할 때, 칼슘이나 염소이온을 제거하는 공정의 부재로 인해 폐수 중에 염소와 칼슘 이온이 높은 농도로 잔류하기 때문인 것으로 추측된다. 반면에 화학분석결과에서 유기화학물질은 대부분 검출되지 않아 독성의 원인은 아닌 것으로 판단된다.

위의 결과들을 고려할 때, S13 시료에서 나타난 생태독성의 주된 원인은 주로 염소 이온 및 칼슘 이온에 의한 것으로 추정된다. 그러나 독성원인 의심물질에 대해서는 독성물질 첨가법이나 상관관계 분석법 등의 방법으로 독성원인물질 확증 실험 (Phase III)을 추가적으로 수행함으로써 정확한 독성원인물질을 찾아내어 이들 물질에 의한 독성을 저감할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

## 결론

30개 사업장에서 배출되는 산업폐수에 대해 물벼룩을 이용하여 생태독성시험을 실시한 결과 대부분의 시료는 산업폐수 배출허용기준에 적합한 것으로 평가되었다. 2011년부터 국내에 도입될 예정인 “생태독성 배출허용기준 제도”에서는 물벼룩종인 *D. magna* 단일종만을 시험생물종으로 채택하고 있으나 국외의 사례와 마찬가지로 수생태계 보호 측면에서 먹이사슬 단계를 대표하는 발광박테리아 (분해자), 조류(생산자), 물벼룩류(1차 소비자) 및 어류(2차 소비자)로 시험생물종을 다양화하여 battery test를 수행하였다. 시험결과에서 나타났듯이 배출수는 스크리닝 test 시료와 battery test를 위한 시료에서 시료의 성상이 달라진다는 것을 알 수 있었다. S13의 경우 스크리닝 test 때는 pH가 3.5로 산성이었지만 battery test시에는 8.0으로 약알칼리성으로 나왔을 뿐만 아니라 염분농도에 있어서도 14.9와 21.2로 두 시료간의 차이가 난다는 사실을 확인할 수 있었다. 즉 배출수는 여러 주변여건과 생산량의 변화에 따라 배출되는 성상이 다르다는 사실을 중요시해야 할 것이다. 물벼룩의 경우, 자체 결과에 따르면 염분농도 10 psu 이상에서는 100% 치사율을 보인다는 것을 확인하였고, 암모니아의 경우에는 21.2와 38.6 ppm으로 나타났다. AGG의 보고(2010)에 따르면 물벼룩의 48시간 EC<sub>50</sub>값이 25.4 ppm으로 보고된 것과 비교하면 암모니아에 의한 독성이



있을 것이라 예상되었다. 하지만 TIE 시험 결과와 48시간의 결과를 종합해보면 암모니아에 의한 독성은 나타내지만 독성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 발광박테리아를 이용한 생태독성평가 방법은 색도가 있는 시료에 대해서는 적용에 제한점이 있지만 염분농도에 의한 영향 유무를 구별할 수 있는 장점을 보였다. Battery test에서, 가장 높은 독성값을 보인 S13 시료에 대해서는 생태독성원인물질탐색을 실시한 결과, 칼슘 및 염소 이온이 주요 독성원인물질로 예측되었다. 독성 유발 의심물질에 대해서는 TIE III단계 실험을 통한 확증 연구가 필요하며 이들의 독성을 저감하기 위한 방법이 모색되어야 할 것이다.

본 연구 결과에서도 알 수 있듯이 현행 수질오염 기준에 적합하게 처리되어 배출되는 방류수일지라도 방류수 내에 존재하는 각종 독성물질들의 상호 작용에 의해 수생생물에 미치는 독성의 정도가 달라질 수 있다. 따라서 개별 화학물질별 관리 방법과 독성에 근거한 개념인 생물학적 독성평가 방법을 병행함으로써 건강한 수생태계 보전에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 국립환경과학원 박사 후 연구과정 지원사업에 의해 이루어진 것임.

## 참 고 문 헌

국토해양부. 해양환경공정시험방법 2008.  
나진성, 김기태, 김상돈, 장남익, 김용석. *Daphnia magna*와 *Selenastrum capricornutum*을 사용한 하수처리장 방류수의 생물독성평가, 대한환경공학회지 2004; 26(12): 1326-1333.  
정명규, 나규환, 이장훈, 이종화, 김상규, 황갑수, 안혜원. 환경독성학, 동화기술 2006; 15-55.  
환경부. 수질오염공정시험기준 2008.  
환경부. 생태독성관리제도 업무편람 2009.  
환경부. 산업폐수 생태독성 원인물질 탐색 및 저감방안에 관한 연구(II) 2009.  
American Gas Group Material Safety Data Sheet, Ammonia, Anhydrous 2010; 1-5.  
Ankley GT and Burkhard LP. Identification of surfactants as

toxicants in primary effluent, Environ Toxicol Chem 1992; 11(9): 1235-1248.  
Barata C, Alañon P, Gutierrez-Alonso S, Riva MC, Fernández C and Tarazona JV. A *Daphnia magna* feeding bioassay as a cost effective and ecological relevant sublethal toxicity test for Environmental Risk Assessment of toxic effluents, Sci Total Environ 2008; 405(1-3): 78-86.  
Baun A and Nyholm N. Monitoring pesticides in surface water using bioassays on XAD-2 preconcentrated samples, Water Sci Technol 1996; 33(6): 339-347.  
Bielmyer GK, Klaine SJ, Tomasso JR and Arnold WR. Changes in water quality after addition of sea salts to fresh water: implications during toxicity testing, Chemosphere 2004; 57(11): 1707-1711.  
Burgess RM, Ho KT, Tagliabue MD, Kuhn A, Comeleo R, Comeleo P, Modica G and Morrison GE. Toxicity characterization of an industrial and a municipal effluent discharging to the marine environment, Mar Pollut Bull 1995; 30(8): 524-535.  
Carr RS and Nipper M. Porewater toxicity testing: Biological, chemical, and Ecological considerations, SETAC Press, Florida, USA, 2003; 11-94.  
de Vlaming V, Connor V, DiGiorgio C, Bailey HC, Linda A, Deanovic LA and Hinton DE. Application of whole effluent toxicity test procedures to ambient water quality assessment, Environ Toxicol Chem 2000; 19(1): 42-62.  
Grothe DR, Dickson KL and Reed-Judkins DK. Whole Effluent Toxicity Testing: An Evaluation of Methods and Prediction of Receiving System Impacts, SETAC Press, Florida, USA, 1995; 9-322.  
Hernando MD, Fernandez-Alba AR, Tauler R and Barcelo D. Toxicity assays applied to wastewater treatment, Talanta 2005; 65(2): 358-366.  
Kim YH, Lee MJ, Eo SM, Yoo NJ, Lee HK and Choi KH. Chronic toxicities of effluents from dye industry using *Daphnia magna*, Korean J Environ Biol 2005; 23(2): 146-151.  
Kim E, Jun YR, Jo HJ, Shin SB and Jung J. Toxicity identification in metal plating effluent: implications in establishing effluent discharge limits using bioassays in Korea, Mar Pollut Bull 2008; 57(6-12): 637-644.  
Kosian PA, Makynen EA, Monson PD, David R, Mount O, Spacie A, Mekenyan OG and Ankley GT. Application of toxicity-based fractionation techniques and structure-activity relationship models for the identification of phototoxic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment pore water. Environ Toxicol Chem 1998; 17(6): 1021-1033.  
La Point TW and Waller WT. Field assessment in conjunction with whole effluent toxicity testing, Environ Toxicol

- Chem 2000; 19(1): 14-24.
- Lee JS, Lee KT, Kim CK, Kim HJ, Lee CH and Lee JH. Toxicity of binary mixture of cyanide and 3,5-dichlorophenol to *Vibrio fischeri* determined by newly developed N-tox bioassay system, Korean J Environ Toxicol 2007; 22(1): 27-36.
- Mount DR, Gulley DD, Hockett JR, Garrison TD and Evans JM. Statistical models to predict the toxicity of major ions to *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia magna* and *Pimephales promelas* (fathead minnows), Environ Toxicol Chem 1997; 16(10): 2009-2019.
- OECD. Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, Test No. 202: Daphnia, Acute Toxicity Test, Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test, Test No. 212: Fish, Short-term Toxicity Test on Embryo and Sac-fry Stages, 1998.
- Onorati F and Mecozzi M. Effects of two diluents in the Microtox toxicity bioassay with marine sediments, Chemosphere 2004; 54(5): 679-687.
- Power EA and Boumphrey RS. International trends in bioassay use for effluent management, Ecotoxicology 2004; 13(5): 377-398.
- US EPA. Methods for Aquatic Toxicity Identification Evaluations, Phase I, II, III. EPA/600/R-92/079-81, 1993.
- Zha J and Wang Z. Acute and early life stage toxicity of industrial effluent on Japanese medaka (*Oryzias latipes*), Sci Total Environ 2006; 357(1-3): 112-119.