

## 산업폐수 방류수의 생태독성 평가

오경택 · 김지원 · 김우근 · 이순애 · 윤홍길 · 이성규<sup>†</sup>

한국화학연구원부설안전성평가연구소

## Ecotoxicity Assessment of Industrial Effluent in Korea

Kyung Taek Oh · Ji Won Kim · Woo Kun Kim · Soon Ae Lee · Hong Gil Yun · Sung Kyu Lee<sup>†</sup>

Ecotoxicology Research Team, Korea Institute of Toxicology  
(Received 1 August 2005, Accepted 12 September 2005)

### Abstract

Ecotoxicity assessments of 90 selected effluents of 22 industry types from 2002 to 2004 in Korea were evaluated by a toxic battery of bioassay test using fish *Oryzias latipes*, invertebrate *Daphnia magna*, algae *Selenastrum capricornutum* and bacteria *Vibrio fischeri* with the physicochemical measurement items and permit concentrations on the present Water Quality Conservation Act in Korea. Total toxic unit ( $\Sigma$ TU) of 8 industry types of 22 industry types by the toxic battery appeared in order of the value site as follows; Pigment Dye Manufacturing ( $\Sigma$ TU 217.1) > Textile and Dye ( $\Sigma$ TU 39.3) > Semiconductor Electronic Manufacturing (Small) ( $\Sigma$ TU 25.6) > Wastewater and Sewage Treatment Plants ( $\Sigma$ TU 25.4) > Coating ( $\Sigma$ TU 23.8) > Leather Skin Manufacturing ( $\Sigma$ TU 18.0) > Synthetic Resin Manufacturing ( $\Sigma$ TU 15.6) > Assemble Metal Manufacturing ( $\Sigma$ TU 10.7). Our results demonstrate that ecotoxicity assessment, by bioassay test, is effective and practical for industrial wastewater management for 90 selected effluents with the limitation of the physicochemical permit. Among 90 effluents, 9 samples failed physicochemical permit limitation and 81 passed it. In result of ecotoxicity assessment of 90 effluents by the toxic battery, 76 effluents exhibited ecotoxicity and the others did not. The physicochemical measurement items and permit concentrations on the present Water Quality Conservation Act in Korea were low related to the ecotoxicity value by the toxic battery and appeared limited for water quality management to water-ecosystem and environment-friendly management of water.

**keywords** : Bioassay, Ecotoxicity, Effluent, Toxic battery, Toxic unit (TU)

### 1. 서론

현재 국내에는 약 36,000여종의 화학물질이 유통되고 있으며, 연간 300여종의 화학물질이 신규등록되고 있는 실정이다(환경부, 2003a). 그리고 2002년도 화학물질 유통량은 247,454천톤이었다(환경부, 2004b). 이렇게 많은 화학물질이 제품 생산 혹은 세척 공정을 통하여 산업폐수 방류수에 포함되어 배출될 수도 있지만, 이러한 수질유해화학물질에 관해서는 특별하게 관리 및 규제할 수 있는 관련 법규가 없기 때문에 관리가 되고 있지 않는 실정이다. 또한, 현재의 수질환경보전법 제8조에 명시된 오염물질의 배출허용기준 항목(29가지)만으로는 날로 증가해가고 여러 가지 화학물질과 반응하여 발생하는 수질유해물질을 능동적으로 관리하기에는 적합하지 않다(Galassi et al., 2004; Hernando et al., 2005; Reemtsma et al., 2001). 그리고 이를 보완하기 위하여 개별항목별로 배출허용기준에 포함시키는 문제는 시간과 비용면에서 많은 문제점들을 가지고 있

기 때문에 북미 및 유럽에서는 효과적인 수질유해물질 관리방안으로 통합독성(Grothe et al., 1995; Power et al., 2004) 관리체도를 도입해서 이미 시행하고 있거나 시행하기 위해서 현장자료(Pilot Study) 수집 및 관련 법안 정비가 진행되고 있다(Farré et al., 2004; Reemtsma et al., 2001; Swedish EPA, 1997; Whitehouse et al., 2004). 따라서, 산업폐수 방류수에 포함되어 수환경생태계에 유입되는 위해성이 큰 수질유해화학물질들을 통합적으로 묶어 특별한 업종에 대하여 배출허용기준에 생태독성 항목을 설정해나갈 필요가 있다(환경부, 2003a, 2004a; Power et al., 2004).

통합독성(Whole Effluent Toxicity)관리는 산업폐수 방류수에 포함된 수질유해물질의 관리 방안의 하나로 수계의 생태계에서 생산자와 소비자 역할을 하는 조류, 발광박테리아, 무척추동물(물벼룩), 어류에 미치는 독성을 조사하는 것이다(Bielmyer et al., 2004; Carr et al., 2003; Hernando et al., 2005; Lipnick et al., 2000; Newman et al., 2003). 이는 수환경생태계에 서식하는 생물종을 사용하여 산업폐수 방류수의 독성을 평가함으로써 수질유해물질을 통합적으로 관리할 수 있다는 장점을 가지고 있으며(Grothe et al.,

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
sungklee@kitox.re.kr

1995) 수질유해물질에 대하여 통합적으로 관리하기 때문에 개별항목으로 관리하는 것보다 시간과 비용면에서 효과적이라 할 수 있다(Grothe et al., 1995).

이에 대하여 최근 국내에서 통합독성 관리제도 도입 필요성에 대한 연구가 증가되고 있는 실정이며(KEI, 1994; 환경부, 2003a; Lee et al., 1991), 환경부(2002, 2003a, 2003b, 2004a)의 연구에 의하면 산업폐수 관리체계 개선하는 방법으로 통합독성 관리제도를 단계적으로 도입되어야 한다고 보고하였다. 또한, 통합독성 관리제도 도입시 수계에 미치는 영향이 클 뿐만 아니라 연구능력이 확보되고 경제적 부담이 가능한 대형 배출시설 업체, 또는 대규모 공단에서 운영하고 있는 공공폐수처리시설에 우선 적용한 후 개별배출시설로 확대 적용하는 것이 바람직하다고 보고하였다(환경부, 2003a, 2004a). 이와 유사한 연구 결과를 보이는 Reemtsma 등(2001), Power 등(2004), 환경부(2002) 등에 의한 연구에 의하면, 스웨덴에서는 정상과 특성을 잘 모르는 대규모 배출시설의 복합 폐수 및 독성이 높은 농약 공장 폐수에 대해서 적용, 캐나다에서는 펄프폐수에 대하여 제한적으로 적용하고 있으며 일본에서는 펄프·제지제조업 폐수에 대해 자발적인 차원에서 독성시험을 적용하고 있는 것으로 보고하였다.

이에 따라, 본 연구에서는 국내의 22개 업종 90개 배출시설에 대하여 산업폐수 방류수의 배출허용기준과 생태독성 평가(환경부, 2002, 2003b, 2004a)와 아울러 업종별 독성 값을 비교하였다. 그리고 생태독성 값과 수질측정 항목의 배출허용기준 농도간의 상관관계도 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 업체선정 및 시료채취방법

본 연구에서는 전국에 분포되어 있는 22개 업종 90개 배출시설에 대하여 산업폐수 최종 방류수의 생태독성 및 수질분석을 평가하였다. 또한, 사전조사에서 방류수 독성이 다른 배출업체보다 높은 5개 업종 9개 배출업체의 원폐수에 대해서 생태독성 및 수질분석을 추가적으로 실시하였다. 선정된 90개 배출시설에 대한 시료 채취방법은 다음과 같이 실시하였다. 정밀검사 대상 배출업체는 원폐수와 최종 방류수, 그 외 배출업체는 폐수 방류장소에 따라 최종 방

류수를 일회성(Grab) 시료채취 방법으로 2회 시료를 채수하여 생태독성 평가와 수질분석에 사용하였다. 생태독성 시험용 시료로 사용된 시료량은 20 L, 수질분석용 시료량은 8 L씩 각각 채수하여, 저온에서 당일 배송을 원칙으로 생태독성 시험은 안전성평가연구소에서 수질분석은 해당유역 환경관리청에서 각각 실시하였다(환경부, 2002, 2003b, 2004a; Lee et al., 1991).

### 2.2. 생태독성 시험 및 수질분석

생태독성시험은 어류, 물벼룩, 조류 및 발광박테리아를 대상으로 시험(US EPA, 2001, 2002)을 실시하였다. 어류(*Oryzias latipes*): Fish, Acute Toxicity Test (No. 203, adopted: 2nd July 1992), 물벼룩(*Daphnia magna*): *Daphnia* sp., Acute Immobilization Test and Reproduction Test (No. 202, adopted: 4th April 1984), 조류(*Selenastrum capricornutum*): OECD Guidelines for Testing of Chemicals (No. 201, adopted: 7th June 1984)의 독성 시험방법을 Table 1로 정리하여 나타내었다. 그리고 발광박테리아(*Vibrio fischeri* NRRL B 11177)의 독성 시험방법은 다음과 같이 실시하였다(Farré et al., 2004; Hernando et al., 2005; Ren et al., 2005; Wang et al., 2002). 박테리아 독성 시험종은 액상건조(liquid-dried)된 *Vibrio fischeri* NRRL B 11177을 사용하였으며, LUMISTox LCK 480 (Dr Lange Co.)를 이용하여 발광량을 측정하였다. 시험방법은 DIN 38412 L 341, DIN/EN/ISO 11348-2에 따라 시험을 실시하였다. 측정결과는 Probit 분석법을 이용하여 발광량이 50% 감소되는 때의 해당 물질의 농도(EC<sub>50</sub>)를 구하였다. 그리고 생태독성시험 결과는 EC<sub>50</sub> 또는 LC<sub>50</sub> 값으로 표현할 경우, EC<sub>50</sub> 또는 LC<sub>50</sub> 값이 작을수록 독성도가 커지므로, 이런 문제를 보완하고자 TU(toxic unit) = 100/LC<sub>50</sub> 값 또는 100/EC<sub>50</sub> 값으로 독성단위(Toxic Unit)로 전환하여 나타냈다(정 등, 2000).

수질분석용 시료는 냉장상태로 유지시켜 해당 배출시설의 관할 유역환경청으로 운반하였다. 이렇게 운반된 시료는 수질환경보전법 제 8조 및 같은 법 시행규칙 제 8조, 별표 5 “오염물질의 배출허용기준”에서 정한 항목 중에서 배출시설의 오염물질 배출항목에 대하여 수질분석 및 배출허용기준 준수여부를 평가하였다.

**Table 1.** Ecotoxicity testing methods

Items	<i>Oryzias latipes</i>	<i>Daphnia magna</i>	<i>Selenastrum capricornutum</i>
Test type	Static	Static	Static
Test duration	96 hr	48 hr	72 hr
Temperature	23±1°C	20±2°C	23±2°C
Photoperiod	16 hr light, 8 hr dark	16 hr light, 8 hr dark	Continuous light
Dilution water	Membrane filtered (1 µm) tap water	M4 medium	OECD medium
Test conc.	Effluents: 5 and a control	Effluents: 5 and a control	Effluents: 5 and a control
No. organisms per conc.	7	10	1 × 10 <sup>4</sup> cells/mL
Endpoint	Mortality	Immobilization	Growth inhibition
Result	96 h-LC <sub>50</sub>	48 h-EC <sub>50</sub>	72 h-EC <sub>50</sub>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 업종별 생태독성평가 및 생태독성 시험종에서 독성 출현율

22개 업종별 생태독성 결과를 조사한 결과를 Table 2로 나타내었다. Table 2의 결과를 보면, 독성 값이 제일 높게 조사된 업종은 안료 및 염료 제조시설로서 생태독성 값이 조사한 업종의 평균 독성 값 21.0보다 10배 높은 217.1이었다. 또한, 4가지 독성 시험종 모두에서 비슷한 독성 값이 조사되어 해당 업종에 대한 방류수 관리가 필요한 것으로 판단된다. 두 번째로 독성 값이 높은 업종은 섬유 및 염색 제조시설로서 독성 값이 39.3이었다. 그 다음으로 독성 값이 높은 업종은 반도체 및 기타전자제품(小), 하·폐수종말처리장, 도금시설로서 독성 값이 각각 25.6, 25.4, 23.8이었다. 이상 5개 업종은 22개 업종의 평균 독성 값인 21.0보다 모두 높게 조사되었으며, 평균 독성 값보다 낮은 업종은 17개였다.

22개 업종에서 4가지 독성 시험종에 대하여 모두 독성 반응을 나타낸 업종은 8개 업종으로서 36%를 차지하였다. 3가지 독성 시험종(물벼룩, 조류, 박테리아)에 대하여 독성 반응을 나타낸 3개 업종과 박테리아 독성 시험종을 제외한 나머지 독성 시험종에서 독성 반응을 나타낸 1개 업종은 18%를 차지하였다. 그리고 박테리아 독성 시험종에서만 독성 반응이 나타난 업종은 4개 업종으로서 18%, 2가지 독성 시험종에서 독성 반응이 나타난 업종은 6개 업종으로서

27%를 차지하였다(Table 2).

90개 배출시설의 방류수 중에서 4가지 독성 시험종에 대하여 한 가지 이상 독성 반응이 나타난 배출시설은 76개 업체로 84%를 차지하였다(환경부, 2002, 2003b, 2004a). 반면, 수질환경보전법의 오염물질 배출허용기준을 위반한 업체는 9개 배출시설로 10%였다. 이러한 결과는 현재의 수질환경보전법의 오염물질 배출허용기준만으로 산업폐수 방류수를 효과적으로 관리할 수 없다는 것을 보여주는 결과이다. 따라서 오염물질 배출허용기준보다 물관리에 있어 더 현실적이고 효과적이며, 국제적 흐름에 보조를 맞출 수 있는 통합독성 평가를 도입 할 수 있는 방법을 모색해야 할 것으로 판단된다(Carr et al., 2003; Grothe et al., 1995; Power et al., 2004; Reemtsma et al., 2001; Swedish EPA, 1997; Whitehous et al., 2004).

독성 값이 높은 5개 업종으로는 안료 및 염료제조시설, 섬유 및 염색, 반도체 및 기타전자제품제조시설(소), 하·폐수종말처리장, 그리고 도금시설이었다. 이들 업종들 중에서 규모가 크고 일부 독성 시험종의 독성 값에 의하여 독성 battery(어류, 물벼룩, 조류 및 발광박테리아) 독성 값이 높은 하·폐수종말처리장을 제외한 4개 업종에서 독성 battery를 이용한 독성 반응이 조사되었다. 그러나 4개 업종은 일일폐수배출량이 작은 소규모 사업장으로 독성 값을 낮추기 위한 경제적 지원이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 국내의 통합독성 제도 도입시 우선적으로 적용 가능한 업종으로는 대규모 하·폐수처리시설이라고 판단된다. 이러

**Table 2.** Ecotoxicity value (TU: Toxic Unite) of types of industry

Types of industry (Effluent number)	<i>Oryzias latipes</i>	<i>Daphnia magna</i>	<i>Selenastrum capricornutum</i>	<i>Vibrio fischeri</i>	ΣTU	
Pesticide Chemicals Manufacturing (2)	1.0	1.8	1.0	1.4	5.2	
Leather Skin Manufacturing (2)	1.5	6.0	9.0	1.5	18.0	
Rolling and Drawing of Copper (3)	1.1	2.4	1.5	1.2	6.2	
Pulp and Paper (5)	1.1	1.1	2.1	1.1	5.4	
Textile and Dye (9)	29.6	4.6	3.3	1.8	39.3	
Wastewater and Sewage Treatment Plants (15)	1.0	1.1	1.4	1.4	4.9	
Industrial Chemicals Manufacturing (2)	1.0	2.8	2.8	1.5	8.1	
Wastewater and Sewage Treatment Plants (3)	1.0	1.0	21.5	1.9	25.4	
Pigments and Paints (1)	1.0	2.2	2.4	1.0	6.6	
Pigment Dye Manufacturing (2)	26.3	45.5	73.8	71.5	217.1	
Synthetic Resin Manufacturing (1)	1.6	3.4	9.6	1.0	15.6	
Assemble Metal Manufacturing (6)	2.5	1.5	4.8	1.9	10.7	
Nonferrous Metals (6)	1.0	1.1	2.0	1.9	6.0	
Semiconductor Electronic Manufacturing	Large (4)	1.0	1.3	1.0	3.8	7.1
	Small (6)	2.4	2.4	18.7	2.1	25.6
Coating (6)	2.4	3.3	16.2	1.9	23.8	
Petroleum Refining (4)	1.0	1.0	1.6	2.2	5.8	
Primary Ironmaking (4)	1.0	1.0	2.0	4.2	8.2	
Silk Cotton Industry (2)	1.0	1.0	1.0	2.1	5.1	
Textile Mills (2)	1.0	1.0	1.0	2.2	5.2	
Sewage Treatment Plants (2)	1.0	1.0	1.0	2.0	5.0	
Wastewater Treatment Plants (3)	1.0	1.0	1.0	4.3	7.3	
<b>Average TU value</b>	<b>3.7</b>	<b>4.0</b>	<b>8.1</b>	<b>5.2</b>	<b>21.0</b>	

한 결과는 Reemtsma 등(2001), Power 등(2004), 환경부(2002)에 의해서 보고된 것과 같다.

90개 배출시설의 방류수에 대한 생태독성 평가를 실시한 결과, 독성 시험종의 독성 출현율은 생태계에서의 영양 단계와 비슷한 결과를 보였다(Table 3). Table 3의 결과를 보면, 어류와 물벼룩 시험종에 대해서 독성 출현율이 각각 19%, 33%였다. 어류 독성 출현율보다 물벼룩 독성 출현율이 거의 두 배 가까이 높게 조사되었다. 하지만 물벼룩 독성 시험종과 조류 독성 시험종에서 독성 출현율은 각각 33%, 40%로 비슷한 독성 출현율을 나타내었다. 반면, 발광박테리아 독성 시험종의 독성 출현율은 어류 독성 출현율보다 4배, 조류 독성 시험종보다 거의 2배에 가까운 77%의 독성 출현율을 나타내었다. 이러한 연구결과는 독성 값의 신뢰도를 높이기 위하여 발광박테리아와 같은 감수성이 높은 독성 시험종을 대상으로 한 Farré 등(2004)의 연구에서 보여주었듯이, 독성시험을 할 수 있는 연구실간 공동시험(Ring Test)으로 독성 값의 신뢰도를 높일 수 있는 방법을 제시해주고 있다.

22개 업종의 독성 출현율과 90개 배출시설의 독성 출현율을 비교하였을 때, 독성 시험종의 출현율은 발광박테리아 > 조류 > 물벼룩 > 어류 순이었다(Table 3). 90개 배출시설의 생태독성 결과를 살펴보았을 때, 독성시험에 사용되는 생물체의 먹이사슬에서의 위치에 따라 독성 출현율이 다음을 확인할 수 있었다. 생태계에서 분해자 역할 및 생산자 역할을 하는 박테리아가 산업폐수 방류수에 대한 독성 출현율이 제일 높았다. 그 다음으로 생산자 역할을 하는 조류였으며, 생태계에서 소비자를 역할을 하는 물벼룩, 어류 순으로 나타났다(Grothe et al., 1995; Newman et al., 2003). 또한, 어류는 생태독성 감수성이 다른 3가지 생물종보다 둔하고 발광박테리아는 다른 3가지 생물종보다 너무 예민하다는 결론을 내릴 수 있다. 이러한 결과는 환경적인 외부 인자에 의하여 생태독성 값이 많은 영향을 받을 수 있음으로 국제적인 인증시스템(Good Laboratory Practice: GLP)에 적합한 연구 환경을 갖추어 놓은 상태에서 독성시험이 수행되어야 한다(Farré et al., 2004; Power et al., 2004; Reemtsma et al., 2001).

### 3.2. 생태독성 시험결과와 수질분석 값과의 상관관계

본 연구에서 90개 배출시설의 방류수에 대한 4가지 독성 시험 종중에서 독성 반응이 나타나지 않은 업체는 14개 업체로서 16%였으나, 오염물질의 배출허용기준에 부적합한 9개 업체로서는 10%였다(환경부, 2003b, 2004a). 배출허용기준에 부적합한 수질항목으로는 주로 BOD (Biochemical

Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), T-N, Pb, F, PCB, Hg, 색도였다(환경부, 2003b, 2004a). 환경부(2003b)의 연구에 의하면, 수질분석 항목인 BOD, COD, Fe, Zn 농도와 생태독성 값과의 상관관계가 매우 낮은 것을 보여주고 있다. 본 연구에서도 생태독성 값과 수질분석 농도와의 상관관계가 어느 정도 있는지를 확인하기 위하여 환경부(2004a) 생태독성 값과 수질분석 항목인 COD, Zn 농도 자료를 가지고 상관성을 조사하였다. 그 결과를 Fig. 1과 2로 나타내었다.

Fig. 1과 2에서 알 수 있듯이 COD와 Zn의 농도와 독성 시험종의 독성 값과의 상관성이 낮은 것을 확인할 수 있었다. COD는 산업폐수 방류수내에 함유된 유기물질의 오염 정도를 나타내는 의미는 있지만 같은 업종이라도 배출시설에 따라 각기 다양한 폐수특성을 지니기 때문에 생태독성 값과의 상관성이 낮은 결과가 나온 것으로 판단된다. 그리고 중금속인 Zn의 경우에는 업종에 따라 방류수에 포함된 농도 차이가 크며, 그 농도 또한 배출허용기준 농도보다 낮게 배출되는 업체가 많았기 때문에 COD보다 상관 값이 더 낮은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 환경부(2003b)와 같은 결과이다.

### 3.3. 원폐수와 방류수 조사 업체의 생태독성

환경부(2002, 2003b)의 연구에 의하여 보고되어진 업종중에서 독성 값이 높은 5개 업종 9개 배출시설을 선정하여 배출시설의 원폐수와 방류수에 대하여 생태독성 평가를 실시하였다. 이러한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4의 결과를 보면, (1)~(7), (9) 배출시설의 방류수는 오염물질 배출허용기준에 모두 적합하였다(환경부, 2004a). 하지만 생태독성 시험 결과에서는 생물 시험종에 대한 독성 반응이 나타났다. (1)과 (2) 배출업체는 산업용 화학물질 제조시설 업종으로 생태독성 조사결과, (1) 배출시설의 생태독성 결과를 보면 원폐수 시료에서는 4가지 시험종에서 독성 반응이 나타났지만, 방류수 시료에서 발광박테리아 시험종에서만 독성 값이 1.9 TU로 조사되었다. (1) 배출시설의 생물학적 폐수 처리과정에서 방류수의 어류, 물벼룩, 조류 시험종에 대한 독성 유발물질이 제거되어 독성 반응이 나타나지 않은 것으로 판단된다. (2) 배출시설의 생태독성 결과, 원폐수 시료에서 발광박테리아 시험종을 제외한 나머지 독성 시험종에서 독성 반응이 나타났으나, 방류수 시료에서는 어류와 발광박테리아 시험종에서 독성 반응이 나타나지 않았다. (2) 배출시설의 물리화학적 폐수 처리과정에서 물벼룩과 조류 시험종에 대한 독성 유발물질이 상당히 제거되어 독성 값이 현저히 저감되었음을 알 수 있

Table 3. Toxic appearance rate of test organism

Type of industry and effluents number		Fish	Invertebrate	Algae	Bacteria
22	Toxic appearance	9	15	16	20
	Toxic appearance rate (%)	41	68	73	91
90	Toxic appearance	17	30	36	69
	Toxic appearance rate (%)	19	33	40	77

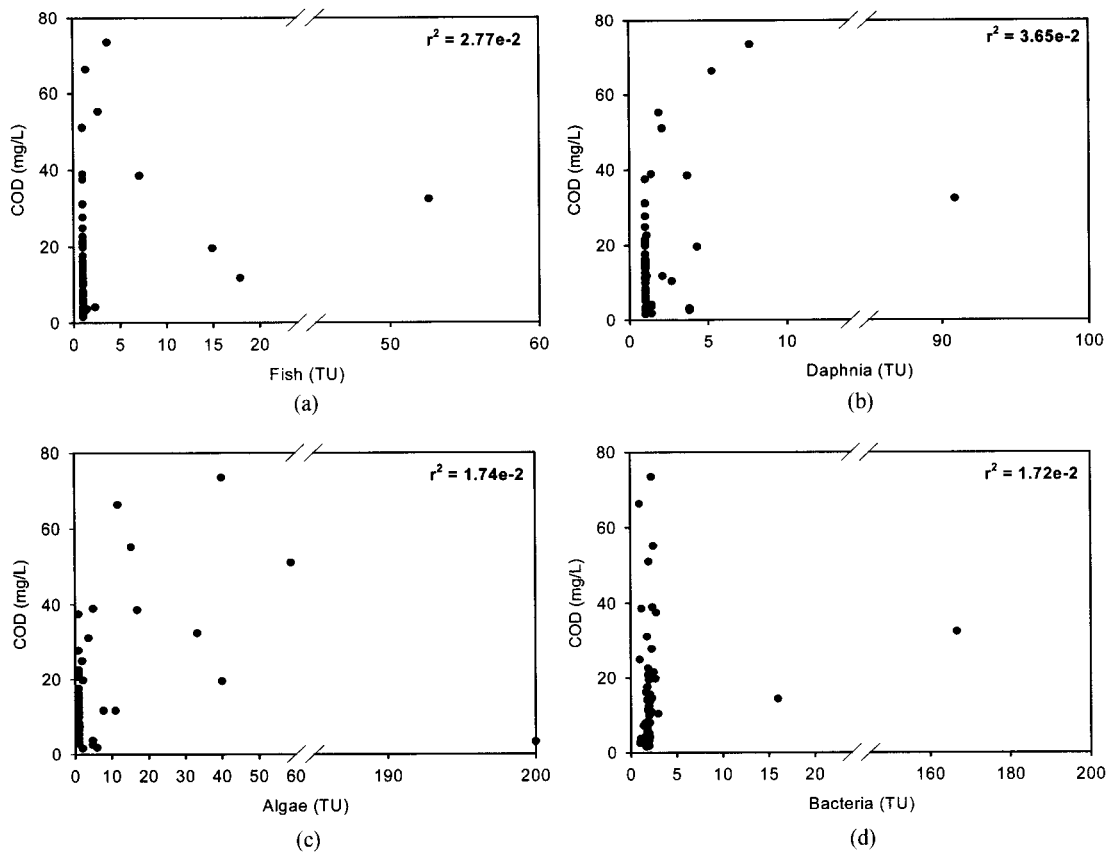


Fig. 1. A correlation between COD and toxic unite of test organism.

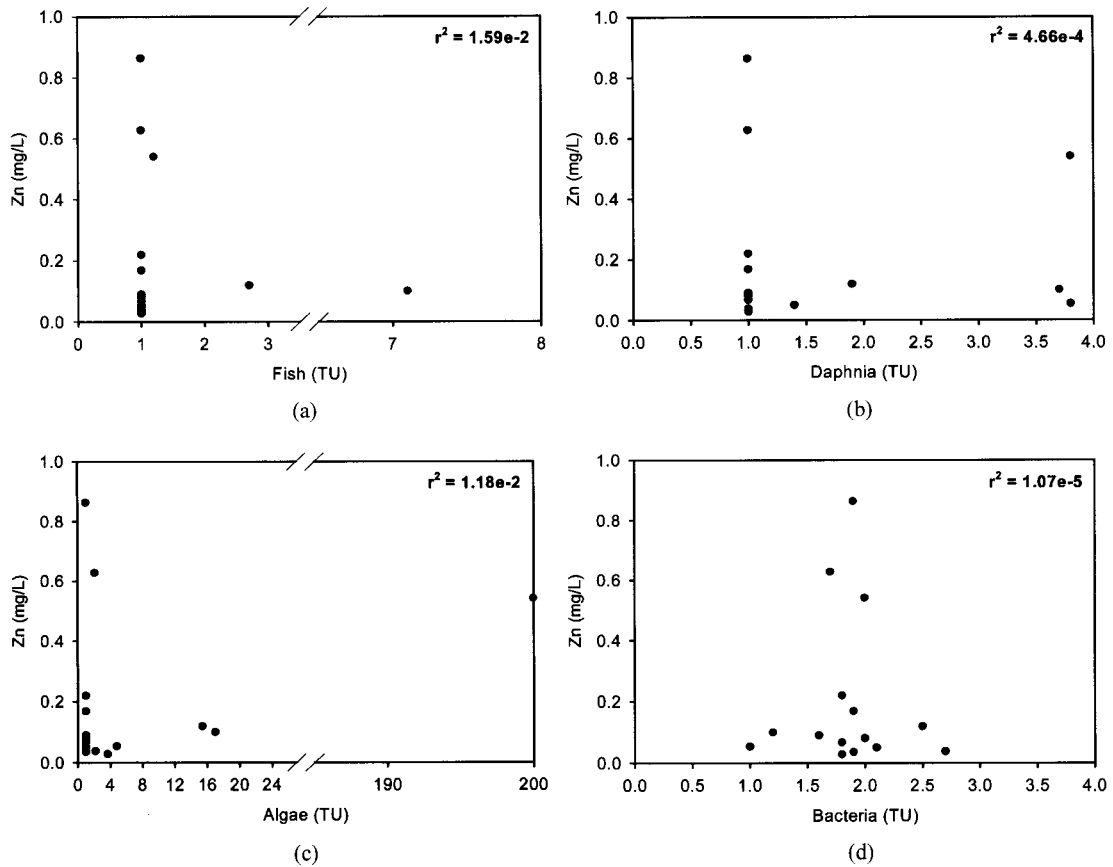


Fig. 2. A correlation between Zn and toxic unite of test organism.

**Table 4.** Ecotoxicity value (TU) for the types of industry of the fine research in 2004

Types of industry	Order	Fish	Invertebrate	Algae	Bacteria	
Industrial chemicals manufacturing	(1)	O.W. <sup>1)</sup>	4.0	5.2	5.8	59.3
		E <sup>2)</sup>	1.0	1.0	1.0	1.9
	(2)	O.W.	7.8	33.4	39.9	1.0
		E	1.0	4.6	4.5	1.0
Wastewater and sewage treatment plants	(3)	O.W.	1.0	1.0	17.6	3.7
		E	1.0	1.0	28.5	1.9
	(4)	O.W.	1.0	1.6	2.2	8.0
		E	1.0	1.0	34.0	1.9
	(5)	O.W.	1.0	1.0	2.1	3.2
E	1.0	1.0	2.0	2.0		
Pigments and paints	(6)	O.W.	1.3	2.1	25.0	3.2
		E	1.0	2.2	2.4	1.0
Pigment dye manufacturing	(7)	O.W.	155.5	229.0	8.6	162.5
		E	45.5	87.0	116.5	139.0
	(8)	O.W.	32.0	457.0	25.0	288.5
E		7.0	4.0	31.0	4.0	
Synthetic resin manufacturing	(9)	O.W.	1.7	22.0	7.0	4.8
		E	1.6	3.4	9.6	1.0

1) O.W.: Original Wastewater, 2) E: Effluent

었다. (2) 배출시설의 사용 원수는 바닷물을 이용하는데, 이로 인하여 원폐수 및 방류수 시료 채취시 염분 농도가 각각 38, 32 ppt였다(환경부, 2004a). 이렇게 높은 염분농도는 감수성이 높은 생물 시험종에 영향을 줄 수 있다. Bielmyer 등(2004)과 US EPA(2002)의 연구에 의하면, 시료의 염분 농도에 따라 유기물의 용해도와 독성 시험종의 영양환경에 매개변수로 작용하여 독성 값의 신뢰도에 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 산업용 화학물질 제조시설 업종의 원폐수와 방류수에 대한 생태독성 결과, 폐수처리과정에서 원폐수에 함유된 수질유해물질이 제거됨을 알 수 있었다.

(3)~(5) 배출시설은 하·폐수 종말처리장 시설로 폐수 처리를 모두 생물학적인 방법으로 처리하고 있다. (3) 배출시설의 생태독성 조사 결과, 원폐수와 방류수 시료에서 어류와 물벼룩의 독성은 나타나지 않았다. 하지만 조류 시험종의 독성 값이 원폐수 독성 값 17.6 TU보다 1.6배 높은 28.5 TU로 조사되었다. 이러한 원폐수 시료의 독성 값보다 방류수 시료 독성 값이 높은 역전현상은 (4), (7)~(9) 배출시설의 조류 시험종, (6) 배출시설의 물벼룩 시험종에서 나타났다. 이는 폐수 성상의 복합적인 특성과 다양한 수질유해물질간의 반응으로 인하여 독성 값이 증가하여 생긴 결과로 그 원인에 대하여 명확하게 설명하기는 어려운 것으로 판단(Wang et al., 2002)되며, 다른 이유로는 화학적폐수처리 공정과정에서 사용되는 물질과 수질유해물질이 서로 반응하여 생태독성을 증가시켰을 것으로 판단된다(정 등, 2000; Farré et al., 2004; Hernando et al., 2005).

(6) 배출시설의 원폐수와 방류수의 생태독성 시험결과, 물벼룩의 독성 값이 원폐수와 방류수에서 거의 비슷한 2.1, 2.2 TU를 나타내었고, 나머지 독성 battery의 독성 값은 모두 원폐수보다 방류수에서 낮게 조사되었다. (7)와 (8) 배출

시설은 안료 및 염료 업종으로서 (7) 배출시설의 조류 독성 값이 원폐수 독성 값 8.6 TU보다 방류수 독성 값이 13배 이상 증가한 116.5 TU로 조사되었다. 이러한 불명확한 수질유해물질을 제거하기 위해서는 방류수에서 독성원인물질(Toxicity Identification Evaluation, TIE)을 찾고 공정상의 조사를 통하여 방류수의 독성을 저감(Toxicity Reduction Evaluation, TRE)시키는 기술을 개발해야할 것으로 판단된다(환경부, 2004a; Power et al., 2004; Reemtsma et al., 2001). (8) 배출시설의 생태독성 결과는 (7) 배출시설과 매우 비슷한 양상으로 조사되었지만, (8) 배출시설의 수질측정 항목 중에서 BOD 농도는 오염물질 배출허용기준 120 ppm보다 36.4 ppm 초과한 156.4 ppm이었다(환경부, 2004a). (7)과 (8) 배출시설은 모두 생물학적인 처리방법으로 폐수를 처리하고 있었으며, 이들 업종은 다른 업종과 비교하여 COD 농도 값이 120.5, 38.5 ppm으로 높게 조사되었다. 높은 COD 농도 값이 생태독성 시험종의 독성 값에 직·간접적으로 영향을 주었을 것으로 판단되지만, 생태독성 값과 수질측정 항목(BOD, COD, Zn, Fe)의 농도 값간의 상관관계에 대해서는 매우 낮은 상관관계를 보여 주고 있는 것으로 보고되었다(환경부, 2002, 2003b; Lee et al., 1991). 이러한 결과들로부터 내릴 수 있는 결론은 현재의 오염물질 배출허용기준 항목만으로 안료 및 염료, 섬유 및 염색 폐수, 그리고 공공처리시설로부터 배출되는 복잡한 산업폐수를 효율적으로 관리하는 데는 부적절하며 한계성을 가지고 있다고 판단된다(Carr et al., 2003; Grother et al., 1995; Reemtsma et al., 2001). (9) 배출시설은 합성수지 업종으로서 수질측정 항목은 오염물질 배출허용기준에 적합하였으나, 방류수 시료에서 발광박테리아를 제외한 나머지 독성 시험종에서 독성 반응이 나타났다. 특히, 조류 시험종의 독성 값은 원폐수 독성 값 7.0 TU보다 2.6 TU 높은

9.6 TU로 나타났다.

지금까지 5개 업종 9개 배출시설에 대한 원폐수와 방류수 조사 결과, 4가지 독성 시험종을 사용한 독성 시험에서 각기 다양한 특성이 조사되었다. 하지만 독성을 유발시키는 수질유해물질이 무엇인지는 명확하게 밝히지 못하였다. 특히, 하·폐수 종말처리장과 같이 다양한 유입물질이 들어오는 곳에 대하여 독성 원인물질(Toxicity Identification Evaluation, TIE)을 추적하는 것은 장기간 연구와 많은 비용이 소요 될 것이다(Power et al., 2004; Reemtsma et al., 2001). 현재의 오염물질 배출허용기준만으로 산업폐수 방류수에 포함되어 있는 수질유해물질을 관리하는데 한계가 있음을 확인하였다. 또한, Table 4의 결과에서 보여주듯이 배출시설의 폐수 처리에 있어 29개 오염물질 항목에 대하여 잘 관리되고 있으나(환경부, 2004a), 29개 오염물질 항목에 포함되지 않은 수질유해물질에 대해서는 관리가 잘 되지 않고 있다. Power 등(2004)의 연구에 의하면, 통합독성 관리제도는 친환경적 방류수 관리이며, 현실적인 물관리라는 것으로 보고하였다.

따라서, 지금까지 결과로부터 현재의 수질보전법에 명시된 29개 항목의 오염물질 배출허용기준만으로 산업폐수의 방류수를 선진국 처리수준으로 맞추는 일은 현실적으로 어려울 것으로 판단된다. 그러므로, 국내의 수환경생태계를 보호하고 산업발전과 더불어 효율적으로 산업폐수 방류수를 관리하기 위하여 통합독성 개념의 관리제도 도입이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

국내 22개 업종 90개 배출시설에 대한 산업폐수 배출시설별 수질측정과 생태독성(어류: *Oryzias latipes*, 물벼룩: *Daphnia magna*, 조류: *Selenastrum capricornutum*, 발광박테리아: *Vibrio fischeri*)을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 22개 조사 업종 중에서 독성 battery(어류, 물벼룩, 조류, 발광박테리아)의 독성 값( $\Sigma$ TU: Toxic Unit)이 높은 8개 업종은 안료 및 염료( $\Sigma$ TU 217.1) > 섬유 및 염색( $\Sigma$ TU 39.3) > 반도체 및 기타전자제품(小)( $\Sigma$ TU 25.6) > 하·폐수종말처리장( $\Sigma$ TU 25.4) > 도금시설( $\Sigma$ TU 23.8) > 가죽 및 모피( $\Sigma$ TU 18.0) > 합성수지( $\Sigma$ TU 15.6) > 조립금속제품제조시설( $\Sigma$ TU 10.7) 순으로 조사되었다.
- 2) 산업폐수 방류수의 오염물질 배출허용기준을 위반한 배출시설은 90개 업체 중에서 9개 업체였으며, 81개 업체의 방류수는 현행 오염물질 배출허용기준을 잘 준수하였다. 그리고 독성 battery를 이용한 90개 배출시설의 독성평가시험에서는 76개 방류수에서 독성 반응이 나타났고 14개 방류수에서는 독성 반응이 나타나지 않았다.
- 3) 생태독성 시험결과와 수질분석 결과의 상관성을 보기 위하여 COD 및 Zn 농도와 독성 battery의 독성 값으로 상호 상관성을 조사한 결과, 상관성이 매우 낮았다.
- 4) 본 연구의 결과는 현재의 수질보전법에 명시된 29개 항

목의 오염물질 배출허용기준만으로 산업폐수 방류수를 선진국 처리수준으로 맞추는 일은 현실적으로 어려울 것으로 판단된다. 따라서 국내의 수환경생태계를 보호하고 산업발전과 더불어 효율적인 산업폐수 방류수 관리를 위하여 통합독성 개념의 관리제도 도입이 필요하다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 수질유해물질의 통합독성관리제도 도입방안 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드리는 바입니다.

#### 참고문헌

정명규, 나규환, 이장훈, 이종화, 감상규, 황갑수, 안혜원, 환경독성학, 동화기술, pp. 15-55 (2000).  
 한국환경정책·평가연구원(KEI), 폐·하수의 통합독성 배출 기준 설정에 관한 기초연구, pp. 8-71 (1994).  
 환경부, 산업폐수 관리체계개선 연구 (2003a).  
 환경부, 수질유해물질의 통합독성 관리제도 도입방안 연구 (2002).  
 환경부, 수질유해물질의 통합독성 관리제도 도입방안 연구 (II) (2003b).  
 환경부, 수질유해물질의 통합독성 관리제도 도입방안 연구 (III) (2004a).  
 환경부, 환경통계연감 2004, pp. 155-156 (2004b).  
 Bielmyer, G. K., Klaine, S. J., Tomasso, J. R. and Arnold, W. R., Changes in Water Quality after Addition of Sea Salts to Fresh Water: Implications during Toxicity Testing, *Chemosphere*, **57**, pp. 1707-1711 (2004).  
 Carr, R. S. and Nipper, M., *Porewater Toxicity Testing: Biological, Chemical, and Ecological considerations*, SETAC Press, Florida, U. S. A., pp. 11-94 (2003).  
 Farré, M., Arranz, F., Ribó, J. and Barceló, D., Interlaboratory Study of the Bioluminescence Inhibition Tests for Rapid Wastewater Toxicity Assessment, *Talanta*, **62**, pp. 549-558 (2004).  
 Galassi, S., Guzzella, L. and Croce, V., Screening Organic Micropollutants in Surface Waters by SPE Extraction and Ecotoxicological Testing, *Chemosphere*, **54**, pp. 1619-1624 (2004).  
 Grothe, D. R., Dickson, K. L. and Reed-Judkins, D. K., *Whole Effluent Toxicity Testing: An Evaluation of Methods and Prediction of Receiving System Impacts*, SETAC Press, Florida, U. S. A., pp. 9-322 (1995).  
 Hernando, M. D., Fernández-Alba, A. R., Tauler, R. and Barceló, D., Toxicity Assays Applied to Wastewater Treatment, *Talanta*, **65**, pp. 358-366 (2005).  
 Lee, S. K., Shim, J. S., Kim, Y. H. and Roh, J. K., Exotociological and Mutagenicity Evaluation of Industrial Effluents with Aquatic Organisms (*Oryzias latipes*, *Daphnia magna*, *Selenastrum capricornutum*) and Ames' Test with *Salmonella*, *J. KSWPRC.*, **7**(2), pp. 100-109 (1991).  
 Lipnick, R. L., Hermens, J. L. M., Jones, K. C., and Muir, D. C. G., *Persistent, Bioaccumulative, and Toxic Chemicals I*

- *Fate and Exposure*, ACS Symposium Series 772, Washington, D. C., pp. 1-26 (2000).
- Newman, M. C. and Unger, M. A., *Fundamentals of Ecotoxicology*, 2nd-Edition, Lewis Publishers, CRP Press LLC, pp. 111-277 (2003).
- Power, E. and Boumphrey, R. S., International Trends in Bioassay Use for Effluent Management, *Ecotoxicology*, **13**, pp. 377-398 (2004).
- Reemtsma, T. and Klinkow, N., *Strategy for the Investigation of Hazardous Substance in Industrial Effluents: IDA (Industrial Discharge Assessment)*, Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin, pp. 1-103 (2001).
- Ren, S. and Frymier, P. D., Toxicity of Metals and Organic Chemicals Evaluated with Bioluminescence Assays, *Chemosphere*, **58**, pp. 543-550 (2005).
- Swedish EPA, *Characterization of Discharges from the Chemical Industry: The STORK Project* (1997).
- US EPA, *Ecotoxicity Test Methods for Effluent and Receiving Water Assessment: Comprehensive Guidance* (2001).
- US EPA, *Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater and Marine Organisms*, EPA-821-R-02-012, Fifth Edition (2002).
- Wang, C., Yediler, A., Lienert, D., Wang, Z., and Kettrup, A., Toxicity Evaluation of Reactive Dyestuffs, Auxiliaries and Selected Effluents in Textile Finishing Industry to luminescent bacteria *Vibrio fischeri*, *Chemosphere*, **46**, pp. 339-344 (2002).
- Whitehouse, P., Johnson, I., Forrow, D. M., and Chubb, C., A Regulatory Framework for Controlling Effluent Discharges Using Toxicity Testing in the UK, *Exotoxicology*, **13**, pp. 399-411 (2004).