

물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 석유화학폐수의 생태독성 원인물질 연구

백병천[†] · 김태령* · 박수호 · 김성욱

전남대학교 환경시스템공학과

*전남대학교 연안환경문제연구소

A Study on Ecotoxicity Substance in Petrochemical Complex Wastewater using *Daphnia magna*

Byeong-Cheon Paik[†] · Tae-Ryung Kim* · Soo-Ho Park · Sung-Ug Kim

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

*Institute of Coastal Environmental Research, Chonnam National University

Abstract

Chemical substances cause ecotoxicity in petrochemical complex wastewater using *Daphnia magna* was investigated in this study. TU(toxicity unit) values of influent of petrochemical complex wastewater treatment plant were 1.14 to 1.74 (average 1.45) and TU of discharge wastewaters from twenties petrochemical factories was 0.00 to 11.31 (average 1.51). In properties analysis for influent of petrochemical complex wastewater plant, most of the heavy metals and hazardous substances concentration were lower than 24hr-EC₅₀ values, but Cl⁻ and Cu concentrations were higher and them ecotoxicity affecting is expected. Toxicity values by most heavy metals in discharge wastewaters from twenties petrochemical factories were between minimum EC₅₀ and maximum EC₅₀. However, toxicity values by chemical substances such as Na, Cl⁻ were more than maximum EC₅₀. The correlation coefficients (r) between TU and heavy metals such as Cr, As, Cu were high more 0.8, respectively, and those between TU and Na, Cl⁻ were also high than 0.9, respectively.

Keywords : *Daphnia magna*, Ecotoxicity, Substance, Petrochemical complex wastewater

1. 서론

우리나라의 남해안에 위치한 광양만권은 1960-1970년대 이후 개발과 성장에 중점을 둔 국가경제 성장정책과 더불어 해역이용 증가요구에 의해 대규모 간척·매립사업과 같은 연안지역의 개발이 행하여져 왔으며, 북쪽

에는 광양제철소 및 광양연관단지가 조성되어 있으며, 서쪽에는 울촌 공업단지가 조성중이고, 남쪽에는 중화학 공업기지인 여수 국가산업단지가 건설되어 우리나라의 대표적인 중·화학공업지역으로 발전해 왔다¹⁾. 그러나, 광양만권은 지금까지 개발과 성장에 중점을 둔 국가경제 성장정책으로 인하여 환경보전

[†]Corresponding author E-mail: bpaik@jnu.ac.kr

보다는 경제성장과 국토개발이 우선적으로 추진되어 왔다. 그 결과 산업단지의 제품생산 활동에 의한 배기가스의 배출과 주변 주민의 건강에 악영향, 건설공사 시 발생하는 폐수 및 공장폐수 등의 오염물질 유입으로 인한 적조현상발생과 퇴적층 오염도 축적을 야기시키고 있다²⁾. 특히, 광양만의 연안은 해류의 움직임이 거의 없어 유입된 오염물질은 장시간 연안에 머물러 있으면서 수중 및 퇴적층을 오염시키고 있다^{3,4)}.

최근 환경부의 환경관리전략은 용량기반 수용체 중심의 통합관리로 이루어지고 있으며, 수질관리에도 2006년부터 “물환경관리 기본계획(‘06-‘09)”을 수립하여, 생태적으로 건강하고 유해오염물질로부터 안전한 물환경 조성을 목표로 하여, 오염원 중심에서 수용체 중심으로, 통합적인 수질관리 방향으로 추진되고 있다. 물환경관리 기본계획에는 화학물질에 의한 만성적 영향이 예상되는 지역에 물벼룩·조류 등에 의한 생물측정(Bio-monitoring)과 확인(Bioassay) 과정을 통한 수생태계 영향평가 안이 제시되어 있으며, 수질환경보전법이 “수질 및 수생태계 보전에 관한 법률”로 개정되어, 1·2종 사업장은 2011년 1월 1일부터, 3·4·5종 사업장은 2012년 1월 1일부터 생물을 이용한 생태독성 평가를 적용하게 된다⁵⁻⁷⁾.

여수 국가 산업단지에는 석유화학산업과 여러 산업시설 등의 업체가 입주해 있는 대규모 공단이 조성되어 있으며, 2010년 현재 여수 국가 석유화학단지 내 46개 업체가 약

65,020 m³/day의 폐수를 전처리 후 폐수종말처리시설로 유입시켜 활성슬러지법으로 재처리하여 방류하고 있으며, 2011년 생태독성관리제도 시행으로 새로운 환경기준인 생태독성 값에 대한 대응이 매우 필요하며, 관련제도의 조폐개정으로 생태독성관리의 점검주기가 월 1회 이상, 조류의 시험생물추가 등 더욱 강화될 전망이다^{7,8)}.

따라서 본 연구에서는 석유화학공장으로부터 배출되는 폐수에 대하여 물벼룩 생태독성 시험을 통하여 생태독성을 일으키는 원인 물질을 조사하여 석유화학공장폐수의 생태독성관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 및 분석방법

2.1. 대상시료

본 연구에서는 석유화학산업단지에서 발생하여 석유화학폐수종말처리장으로 유입하는 유입수를 총 5회에 걸쳐 시료를 채취하였으며, 시료는 냉장상태로 운반하고 분석 때 까지 냉장보관(4℃ 이하)하여 분석하였다. 분석항목은 생태독성에 영향을 주는 중금속 등 유해물질에 대하여 수행하였으며, 분석항목 및 분석방법은 Table 1에 나타내었다. 물벼룩 생태독성 시험용 시료로 사용된 시료량은 5 L 씩 채수하여 생태독성 시험을 실시하였다.

2.2. 물벼룩 생태독성 시험

2.2.1. 물벼룩 배양조건

Table 1. Analysis items and methods

항목	측정기기	분석방법
Sulfate, Na	IC	Ion Chromatography
유해물질	-	수질오염공정시험기준
중금속	ICP-MS	DDTC - MIBK 법
Cl ⁻	Titration	질산은 적정법

Table 2. Culture condition of *Daphnia magna*

항목	조건	
물벼룩 종	<i>Daphnia magna straus</i>	
배양온도(℃)	20±2	
명:암 비(hr)	16 : 8	
조도(Lux)	500-1,000	
주먹이	녹조류(Chlorella) - (4.5~5)×10 ⁸ cells/mL	
보조먹이	YCT (yeast, chlorophyll, retramine)	
배양액	시약	첨가량(mg/L)
	염화칼륨(KCl)	8
	황산마그네슘(MgSO ₄)	120
	황산칼슘 이수화물(CaSO ₄ · 2H ₂ O)	120
	탄산수소나트륨(NaHCO ₃)	192

독성시험에 사용한 물벼룩의 배양조건은 Table 2와 같다. 독성시험에 사용한 물벼룩의 종은 *Daphnia magna straus*로 국립환경과학원에서 분양받아 배양하였다. 배양 시 온도는 20±2℃ 이고, 타이머를 설치하여 명:암비를 16:8(hr)로 맞추었으며, 조도는 500-1,000 Lux 사이로 조절해 주었다. 물벼룩의 주먹이인 녹조류는 *Chlorella vulgaris*를 배양하여 $(4.5-5.0) \times 10^8$ cells/mL로 농축한 후 배양액 1 L당 1 mL/day 공급하였으며⁹⁾, 보조먹이인 YCT(yeast, chlorophyll, retramine)의 경우 US EPA 방법에 따라 제조하여 주먹이와 마찬가지로 배양액 1 L당 1 mL/day 공급하였다. YCT의 경우 50 mL씩 나누어 냉동보관 하였고, 사용 시 해동하여 냉장보관하며 일주일 이내에 사용하였다. 농축한 주먹이의 경우는 냉장보관(4℃)하여 10일 이내로 사용하였다. 물벼룩 배양액의 경우 수질오염공정시험기준에 따라 KCl, MgSO₄, CaSO₄ · 2H₂O, NaHCO₃를 2차 초순수에 녹여 하루 이상 폭기하여 사용하였다¹⁰⁾.

2.2.2. 표준독성시험

독성시험에 사용되는 시험생물은 독성물질에 대한 민감도가 일정하게 유지되어야 하며,

잘 통제된 환경에서 정해진 시험 절차를 따라야 한다. 따라서 시료의 유해오염물질에 대한 시험생물의 상대적인 민감도가 일정하게 유지되는 지를 확인하기 위하여 표준독성시험을 수행하였으며 본 연구에서는 중크롬산칼륨(K₂Cr₂O₇)과 염화나트륨(NaCl)을 표준독성물질로 사용하여, 생물종별 급성독성시험과 동일한 방법으로 수행하였다. 독성시험 시 중크롬산칼륨의 농도범위를 0.0-4.0 mg/L로 하였으며, 염화나트륨의 농도범위는 0.0-10,000.0 mg/L로 하여 각 농도별로 5개씩 4반복으로 수행하였다. 반수영향농도(EC₅₀) 산출 방법은 수질오염공정시험기준을 따랐다¹⁰⁾.

2.2.3. 급성독성시험

수질오염공정시험기준에 따라 물벼룩을 이용한 24시간 급성독성시험을 수행하기 위하여, 냉장 보관된 시료는 20±2℃로 온도를 맞춘 후 시험에 사용하였고, 2차 초순수를 이용하여 희석하였다. 독성시험에 투입할 물벼룩은 시험 시작 하루 전에 따로 분리하여, 2주 이상 된 물벼룩의 성체에서 태어난 24시간 미만의 어린 개체를 이용하였다. 시험시작 2시간 전 먹이를 공급하고 시험기간 동안은 먹이를 공급하지 않았으며, 시험 시 배지의

교환도 없는 정지식 급성독성평가 방법을 이용하였다. 각 대상 폐수를 농도별로 20개씩 50 mL 유리비커를 준비하고, 대조구는 사육수만을 넣은 50 mL 유리비커를 준비하였다. 각각의 비커에 물벼룩을 20개체씩 넣어 24시간 후의 유영 저해수를 기록하였다. 이때의 유영저해라 함은 시험용기를 천천히 움직여도 물벼룩이 15초간 헤엄치지 못하는 경우를 말하며 촉각만 움직일 경우에는 유영저해를 받은 것으로 간주하였다. 시험 환경조건은 사육환경조건과 동일하게 유지시켜 주었으며, 시험 전후에 각 시험액과 대조구의 pH 및 DO를 측정하였다. EC_{50} 을 산출하기 위해 생존개체수와 백분율을 이용해 probit 또는 Trimmed Spearman-Kärber 통계처리법을 이용하였다¹⁰⁻¹⁴⁾.

2.2.4. 생물독성값

통계처리법을 이용하여 EC_{50} 값을 산출하였고, 다음과 같은 식 (1)에 의하여 독성단위 (toxic unit, TU)를 산출하였다. 반수영향농도 (EC_{50})을 구할 수 없는 경우에는 100 % 시료에서 0-10 %에 영향에 대해서는 TU를 0으로 하고, 10-49 %에 영향에 대해서는 $0.02 \times (\text{영향 받은 퍼센트})$ 로 TU를 계산하였다^{10,15)}.

$$TU = \frac{100}{EC_{50}} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 물벼룩 독성시험

3.1.1. 대조구 시험결과 신뢰성

Table 3. Reliability of the control test for *Daphnia magna*

Number of test	Number of animals	Number of surviving animals	Survival ratio of animals
90	1,800	1,800	100%

Table 3에 나타난 바와 같이 물벼룩 급성 독성시험은 80회 정도로, 표준독성물질 실험이나 재현성확인 시험 등을 합하면 90회 정도의 시험 횟수에 달한다. 시험횟수만큼 대조구 시험이 실시되기 때문에 대조구 시험 횟수도 90회에 달하는데 전체 대조구 시험에서 사망한 물벼룩은 하나도 없었다. 한 번의 대조구 실험에 20마리의 물벼룩이 투입되므로 800마리(20마리×90회=1,800마리) 대조구 시험에서 사망한 물벼룩이 한 마리도 없다는 것과 같다. 따라서 물벼룩이 사망하는 경우 시료에 유해화학물질이 존재하거나 물벼룩 생존에 영향을 주는 요인이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 시험의 신뢰성 확보를 위해서는 대조구에서 사망하는 개체수가 적어야 하며 국제적으로 인정되는 대조구 생존율은 90%이상이다. 본 연구에서 수행된 대조구 시험결과로 미루어 보아 매우 신뢰성 있는 시험결과가 산출된 것으로 사료된다.

3.1.2. 표준독성물질 민감도 평가

중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)을 이용하여 물벼룩에 대한 급성독성시험방법에 따라 24시간 유영저해율을 관찰하여, Fig. 1에 나타내었다. 중크롬산칼륨의 24시간 EC_{50} 은 평균 1.10 mg/L, 표준편차는 0.05 mg/L를 보였으며, 이 값은 EPA ecotoxicity database에서 제시하는 0.9-2.0 mg/L의 범위에 있는 것으로 나타났다. 또한, 표준편차를 고려할 때 정밀도 및 재현성도 우수한 것으로 사료되며, 시험법에 따라 시험을 수행한다면 결과의 재현성에 문제가 없을 것으로 판단되었다.

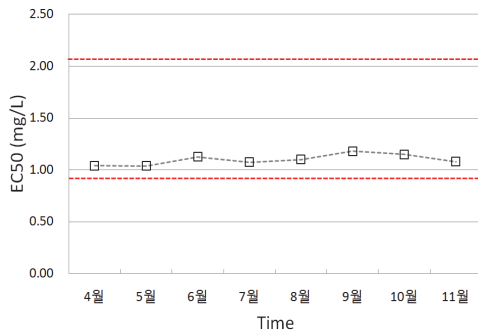


Fig. 1. Sensitivity evaluation of *Daphnia magna* of standard substance $K_2Cr_2O_7$.

3.2. 석유화학폐수의 급성독성평가

석유화학공단 폐수종말처리장으로 유입되는 폐수의 독성에 대한 특성을 파악하기 위해 5개월 동안 12회에 걸쳐 물벼룩을 이용하여 급성독성시험을 수행하였다. Fig. 2는 물벼룩을 이용하여 측정된 생태독성값(TU)을

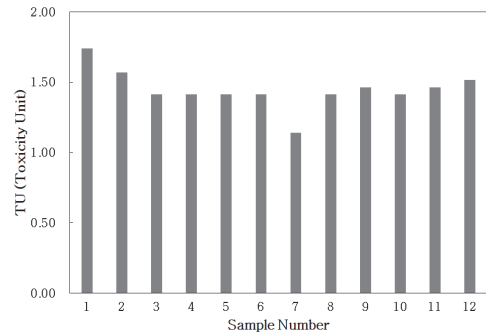


Fig. 2. TU of petrochemical wastewater using *Daphnia magna*.

보여준다. 생태독성 시험 결과 TU 값은 1.14-1.74 (평균 1.45)로 항상 1 이상을 초과하는 것으로 나타났다.

3.3. 종말폐수처리장 유입폐수의 성상분석

석유화학공단 폐수종말처리장으로 유입되

Table 4. Properties of petrochemical wastewater

Items		Cr	Dis. Fe	Zn	Cu	Cd	Hg	As	Pb
Influent (mg/L)	Max.	0.012	1.395	0.733	0.110	ND	0.001	ND	0.082
	Min.	0.007	0.499	0.165	0.025	ND	0.001	ND	0.082
	Ave.	0.009	1.116	0.298	0.078	ND	0.001	ND	0.082
24-hr EC ₅₀	Max.	0.700	32.340	4.340	0.105	-	0.012	19.000	5.890
	Min.	0.120	6.150	0.139	0.005	-	0.007	0.020	4.190

Items		Cr ⁶⁺	Ni	Ba	Dis. Mn	F	Phenol	CN	Benzene
Influent (mg/L)	Max.	ND	0.055	0.471	0.335	0.634	0.185	0.027	0.029
	Min.	ND	0.011	0.046	0.111	0.199	0.158	0.021	0.029
	Ave.	ND	0.029	0.138	0.187	0.377	0.176	0.024	0.029
24-hr EC ₅₀	Max.	-	13.200	67.140	40.000	-	26.300	-	21.900
	Min.	-	8.200	43.200	10.000	-	4.200	-	14.810

Items		Se	Dichloroethane	n-Hexene	Dichloromethane	ABS	Cl ⁻
Influent (mg/L)	Max.	0.040	0.151	1.400	0.070	0.507	5,929.0
	Min.	0.001	0.151	1.200	0.025	0.443	1,967.0
	Ave.	0.017	0.151	1.300	0.051	0.478	4,188.2
24-hr EC ₅₀	Max.	0.870	0.368	0.066	0.2050	-	3,641.0
	Min.	0.530	0.285	0.030	0.1871	-	2,730.8

는 폐수의 성상을 파악하기 위해 5개월 동안 5회에 걸쳐 중금속 및 이온 물질 등을 분석하였다. Table 4에 이들 성분의 최고값, 최저값, 평균값 및 U.S. EPA ECOTOX Database의 24hr-EC₅₀을 나타내었다. 대부분의 중금속 및 유해물질의 경우 24hr-EC₅₀ 값보다 낮게 나타나 생태독성에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다. 그러나 Cl⁻ 및 Cu의 경우는 24hr-EC₅₀값보다 높게 나타나 생태독성에 영향을 주는 것으로 판단되었다.

Warnic and Bell¹²⁾에 따르면 Cu가 0.027 mg/L에서 100% 유영저해를 보였다고 하는 연구결과와 본 연구에서 Cu가 평균 0.071 mg/L에서 독성이 발현된다는 점을 고려할 때, 대상 폐수의 Cu는 독성발현농도보다 높게 분석되어, Cu에 의한 독성이 있는 것으로 판단된다. 또한, Cl⁻의 경우도, 독성이 평균 3,436 mg/L에서 발현되는 시험결과를 고려하면, 대상 폐수의 생태독성은 Cl⁻ 및 Cu의 영향이 큰 것으로 판단된다.

3.4. 개별공장 유출폐수의 성상분석

석유화학공단 폐수종말처리장으로 유입되는 폐수의 독성에 대한 특성을 파악하기 위해 먼저, 주요 20개 석유화학공장에서부터 배출되는 폐수에 대하여 반달말을 이용한 독성 시험을 수행한 후, 이 중 독성이 나타나는 폐수에 대하여 중금속 및 이온물질의 분석을 수행하였다. 물벼룩을 이용하여 측정된 개별 공장 유출폐수에 대한 TU 값은 0.00-11.31(평균 1.51)로 매우 다양하게 나타났다.

중금속의 분석항목은 Cr, As, Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Ni, Fe, Se 이었다. 이 항목중 독성을 유발할 가능성이 있는 물질을 기존 문헌의 EC₅₀(반수영향농도)와 비교하였다. Pb와 Mn은 최소 EC₅₀이하로 나타났으며, 나머지 물질은 최소 EC₅₀과 최대 EC₅₀ 사이로 나타났다.

이온물질의 분석항목은 Ca, K, Mg, Na, F, Br, Cl⁻, SO₄²⁻ 이었다. 이 항목 중 독성을 유

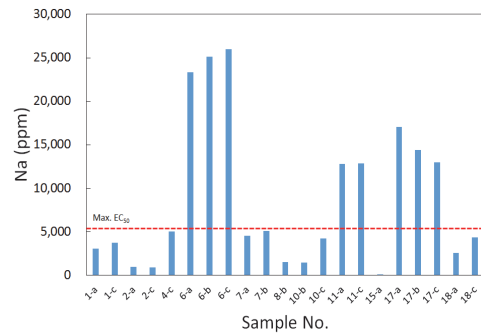


Fig. 3. Na concentration of discharge waste-waters from 20 petrochemical factories.

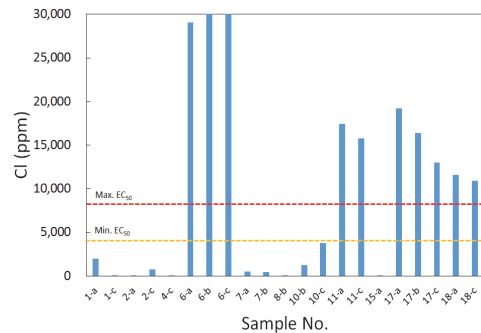


Fig. 4. Cl⁻ concentration of discharge waste-waters from 20 petrochemical factories.

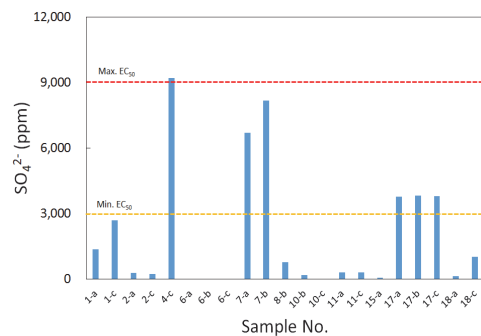


Fig. 5. SO₄²⁻ concentration of discharge waste-waters from 20 petrochemical factories.

발할 가능성이 있는 물질을 기존 문헌의 EC₅₀(반수영향농도)와 비교하였다. K, Mg는 최소 EC₅₀이하로 나타났으며, Ca는 2개 시료를 제외하고 최소 EC₅₀이하로 나타났다. 그러나 Fig.3,4,5에 나타난 바와 같이 Na, Cl⁻, SO₄²⁻

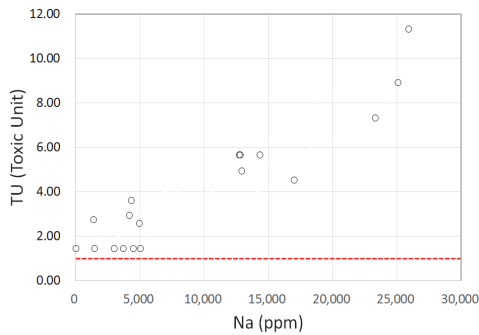


Fig. 7. Correlation between TU and Na.

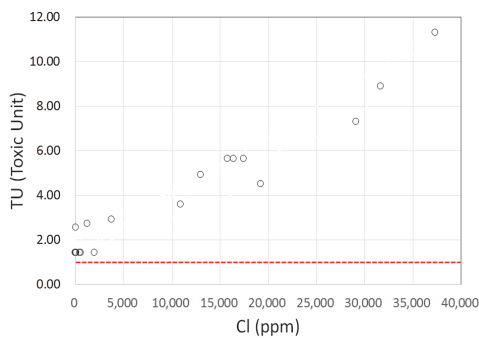


Fig. 8. Correlation between TU and Cl⁻.

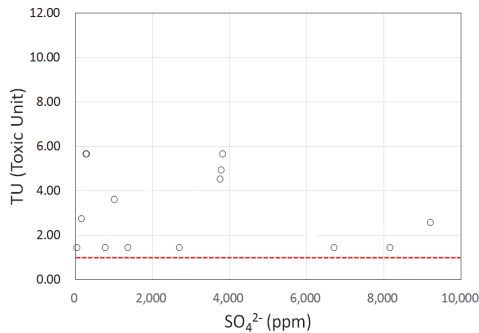


Fig. 9. Correlation between TU and SO₄²⁻.

는 최소 EC₅₀과 최대 EC₅₀ 사이 또는 최대 EC₅₀ 이상으로 나타났다.

3.5. TU 값과 독성원인물질의 상관성 분석

폐수종말처리장으로 유입되는 주요 20개 폐수에 대한 독성과 주요 독성유발물질에 대하여 상관성을 분석하였다. 폐수 내에 독성을

유발하는 물질의 종류가 다양하나, 이중 가장 큰 영향을 주는 것으로 추정되는 Na, Cl⁻, SO₄²⁻에 대하여 분석을 수행하였다. Fig. 6에서 보여주듯이 물벼룩의 이용한 TU 값과 원인물질의 상관성 분석 Na의 농도가 증가할수록 생태독성은 증가하는 것으로 나타났으며, 특히, 5,000 mg/L 이상일 경우 농도에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. Na의 농도가 5,000 mg/L 이하에서도 생태독성이 1 이상인 것으로 나타난 것은 시료의 특성상 독성을 유발하는 다른 물질을 함유하여 나타난 것으로 사료되었다. Fig. 7, 8에서 보여주듯이 Cl⁻도 Na와 비슷한 경향을 나타내었으며, SO₄²⁻는 10,000 mg/L까지는 농도와 생태독성의 상관관계는 없는 것으로 나타났다.

3.6. TU 값과 독성원인물질의 항목간 상관성 분석

물벼룩 독성값(TU)과 독성원인물질 간의 관련성을 평가하기 위하여 독성원인물질에 대하여 항목간 상관관계를 분석하였다. 중금속의 경우 11개 항목에 대한 상관관계 분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 분석결과, TU와 Cr, As, Cu가 r값이 0.8이상으로서 높은 양의 상관관계를 보였다. 이온물질의 경우 7개 항목에 대한 상관관계 분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 분석결과, TU와 Na, Cl⁻가 r값이 0.9이상으로서 높은 양의 상관관계를 보였다.

4. 결 론

석유화학공단으로부터 배출되는 폐수에 대한 물벼룩 생태독성 시험을 통하여 생태독성을 일으키는 원인 물질을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 석유화학공단 폐수종말처리장으로 유입되는 폐수에 대하여 물벼룩을 이용하여 측정된 TU는 1.14-1.74(평균 1.45)로 나

Table 5. Correlation matrix between TU and heavy metals

	Cr	As	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Ni	Fe	Se	TU
Cr	1.000										
As	.896	1.000									
Cd	-.306	-.286	1.000								
Pb	.255	.004	-.201	1.000							
Cu	.804	.857	-.268	-.041	1.000						
Zn	-.273	-.353	-.057	.276	-.281	1.000					
Mn	.039	.020	-.180	-.207	.159	-.027	1.000				
Ni	.442	.590	-.293	-.063	.168	-.203	-.030	1.000			
Fe	.028	.217	-.123	-.150	-.233	-.131	-.170	.893	1.000		
Se	.295	.071	-.148	-.070	.009	-.118	-.128	.203	.150	1.000	
TU	.837	.858	-.374	.093	.934	-.175	.076	.202	-.217	.042	1.000

Table 6. Correlation matrix between TU and ion substances

	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄ ²⁻	TU
Ca	1.000						
K	-.170	1.000					
Mg	-.124	-.292	1.000				
Na	-.210	.900	-.286	1.000			
Cl	.031	.847	-.390	.952	1.000		
SO ₄ ²⁻	-.158	-.033	.417	-.115	-.318	1.000	
TU	-.212	.819	-.336	.940	.921	-.200	1.000

타났으며, 20개 석유화학공장에서부터 배출되는 폐수에 물벼룩을 이용하여 측정된 TU는 0.00-11.31(평균 1.51)의 범위를 보였다.

- 2) 석유화학공단 폐수종말처리장으로 유입되는 폐수에 존재하는 대부분의 중금속 및 유해물질의 농도는 24hr-EC₅₀ 값보다 낮게 나타나 생태독성에 대한 영향이 적은 것으로 나타났으나, Cl⁻ 및 Cu의 경우는 24hr-EC₅₀값보다 높게 나타나 생태독성에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- 3) 20개 석유화학공장에서부터 배출되는 폐수 내에 존재하는 중금속 중 Pb와 Mn의 농도는 최소 EC₅₀이하로 나타났

으며, 나머지 물질은 최소 EC₅₀과 최대 EC₅₀ 사이로 나타났다. 또한 이온물질의 경우에는 K, Mg 농도는 최소 EC₅₀ 이하로 나타났으며, Na, Cl, SO₄²⁻는 최소 EC₅₀과 최대 EC₅₀ 사이 또는 최대 EC₅₀ 이상으로 나타났다.

- 4) TU와 독성원인물질 간의 상관관계에서는 중금속의 경우 TU와 Cr, As, Cu가 상관계수(r)값이 0.8이상으로서 높게 나타났다으며, 이온물질의 경우 TU와 Na, Cl⁻가 r값이 0.9이상으로서 높은 상관관계를 보였다.

사 사

본 연구과제는 환경부지정 전남녹색환경지원센터의 연구비지원에 의해 수행된 연구과제입니다.

References

1. 국립수산과학원 남해수산연구소(2007), 광양만 및 가막만에서의 유기오염 기작 탐색, 국립수산과학원.
2. 여수대학교 수산과학연구소(1997), 여천공단 환경오염대책을 위한 정밀조사 사업, 여수대학교 수산과학연구소.
3. 윤이용, 박재규(2005), 해양오염, 신광문화사.
4. 전남지역환경기술개발센터(2008), 광양만권 해양환경조사, 전남지역환경기술개발센터.
5. 환경부(2002), 수질유해물질의 통합독성관리제도 도입방안 연구.
6. 환경부(2008), 국립환경과학원, 환경관리공단, 산업폐수에 대한 생태독성 배출관리 제도.
7. 환경부(2011), 환경관리공단, 3-5종 폐수배출시설 생태독성관리 업무편람.
8. 문재수(2012), 반달말 생물감시장치를 이용한 독성 연구, 경북대학교 산업대학원 석사학위 논문.
9. 환경바이오(2009), WEMS 조류생물 경보장치.
10. 국립환경과학원(2010), 산업폐수 방류수평가를 위한 물벼룩을 이용한 급성독성 시험에 관한 실험서.
11. EPA(2002), Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving water to freshwater and marine organisms (5th edition).
12. Wanic, S. L., and Bell, H. L.(1969), "The acute toxicity of some heavy metals to different species of aquatic insects," Journal of the Water Pollution Control Federation, 41, 280-284.
13. EPA(2000), Method guidance and recommendations for Whole Effluent Toxicity (WET) testing (40 CFR Part 136).
14. Sigmund F, Zakrzewski(2006), Environmental toxicology, OXFORD.
15. EPA(1991), Technical support document for water quality-based toxic control.