

<Note>

동양하루살이 알을 이용한 산업폐수 생태독성평가

모형호 · 손진오¹ · 정진호¹ · 신기일² · 조기중^{1,*}

고려대학교 생명자원연구소, ¹고려대학교 환경생태공학부
²한국외국어대학교 통계학과

Ecotoxicological Test on Various Industrial Effluent Using Mayfly Egg, *Ephemera orientalis*

Hyoung-ho Mo, Jino Son¹, Jinho Jung¹, Key-Il Shin² and Kijong Cho^{1,*}

Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

¹*Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University,
Seoul 02841, Republic of Korea*

²*Department of Statistics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 17035, Republic of Korea*

Abstract - We developed a new ecotoxicological test method using native test species, eggs of *Ephemera orientalis*, and five kinds of industrial wastewater were tested to validate the test method. The water samples were collected in Jun 2006 from the following industries: pesticide, metal plating, PCB, leather1, and leather2. Wastewater and effluent were diluted by distilled water, respectively, to prepare various concentrations, 100, 50, 25, 12.5, 6.3, 3.1, and 0%. For the egg bioassay, 20 freshly laid eggs (<24 h old) were exposed to test solutions in a Petri dish (52 × 12 mm) at 20°C with photoperiod of 16 h light and 8 h dark for 14 days. The median egg hatching concentrations (EHC50) were estimated using Probit analysis. All EHC50s of wastewater were less than 3.1%, which meant very high ecotoxicity except for the wastewater of PCB industry having 6.1% of EHC50. Among the effluents, the least toxic effluent was from pesticide industry having 58% of EHC50, while the effluent of leather2 was the most toxic having 7.3% of EHC50.

Key words : ecotoxicity, egg hatching, wastewater

서 론

많은 국가에서 산업폐수의 수질기준은 개별 화학물질에 대한 농도규제로만 이루어져 있다. 하지만 산업이 발달함에 따라 산업폐수 속에 포함되어 있는 화학물질의 종류도 급격하게 증가하고 있기 때문에 이들 유해물질들을 개별적으로 모두 관리한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그리고 개별 화

학물질이 배출허용기준을 만족하더라도 이들은 다양한 환경 요인들과 함께 또는 오염물질 간의 상호작용을 통해 수생태계에 영향을 미칠 수 있다(Zhou *et al.* 2008). 이러한 이유로 선진국에서는 생물독성관리 개념을 도입하여 산업폐수를 관리하고 있으며, 여러 국가에서는 산업폐수에 대한 생물독성 평가법의 적용을 연구하고 있다.

우리나라도 2011년부터 공공 하·폐수처리시설과 1·2종 사업장을 대상으로 물벼룩을 이용한 방류수 생태독성 기준을 적용하였다(국립환경과학원 2014). 그러나 현재의 생태독성평가에 사용되는 공식 시험종은 우리나라 토착 생물이

* Corresponding author: Kijong Cho, Tel. 02-3290-3064,
Fax. 02-3290-3509, E-mail. kjcho@korea.ac.kr

아닌 유럽 원산의 큰물벼룩(*Daphnia magna*)이며, 서식지 차이에 따른 생태학적 적절성에 의문이 제기되고 있는 실정이다(De Gelas and De Messter 2005). 또한 외래종의 사용과 관리에 있어, 이들 시험종의 국내 생태계로의 유출에 대한 리스크가 존재하기 때문에 학계에서는 지속적으로 자생 시험종 도입의 필요성을 제기하고 있다(Kim *et al.* 2005).

이와 같은 고유생물종을 이용한 생태독성평가가 중요하다는 인식의 확산과 함께, 다양한 토착 생물들을 이용한 생태독성평가시험법 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구에는 단순히 국내에 서식하는 생물을 시험종으로써 이용하는 것 이외에도, 시험법의 표준화 및 국내 환경에 적합한 생태위해성평가 수단의 마련이라는 목적을 가지고 수행되어야만 한다(환경부 2009).

본 연구는 우리나라와 일본, 극동러시아 일대에 서식하는 동양하루살이(*Ephemera orientalis*)의 알을 이용하여 다양한 종류의 공장 폐수를 대상으로 생태독성평가를 수행하였다. 하루살이류는 전통적으로 강도래, 날도래 등과 함께 군집분석을 통해 이들 분류군의 풍부도를 통해 수생태계의 건강성 지표로서 주로 이용되어 왔다(Wui *et al.* 1991). 그러나 국내에서 하루살이를 개체 단위로 생태독성평가에 이용한 적은 거의 없으며, 미국에서는 일부 하루살이종의 유충을 이용한 생태독성평가만이 수행되었다(Beketov 2004).

동양하루살이는 비교적 깨끗한 하천 하류에 서식하며, 하천의 유기물을 먹으면서 봄과 가을철에 대발생하는 것으로 알려져 있다(Hwang *et al.* 2007). 특히 이들은 하천 생태계에서 유기물 섭식을 통한 물질 순환과 어류나 조류와 같은 다른 포식자들의 주요 먹이원으로서 수생태계 먹이사슬 관계에서 중요한 종이라 할 수 있다. Mo *et al.*(2016)은 동양하루살이알이 시험종으로써 갖는 여러가지 장점에 대해 보고한 바 있는데, 이는 다음과 같다. 동양하루살이 알컷은 한번에 약 2,000개의 알을 산란하여 시험에 충분한 숫자의 알을 제공하고, 각 알은 비교적 크기가 커서(직경 100 μm , 길이 200 μm) 육안으로도 확인이 가능하며, 알집이 아닌 개별 알로 산란함으로써 시험자가 다루기 용이하다는 장점이 있다. 또한 동양하루살이 알은 pH, 온도, 용존유기탄소, 경도 등 여러가지 환경 변이에 대해 폭넓은 저항성을 가지는 반면, 다양한 중금속과 농약류에 대해 높은 민감도를 가져 시험종으로써 매우 적절하다고 보고되었다.

본 연구의 목적은 다양한 자생 생태독성시험종과 시험법 개발의 필요성이 요구되는 상황에서, 우리나라에 서식하는 동양하루살이 알을 이용하여 공단지역에서 배출되는 다양한 종류의 폐수에 대해 생태독성평가를 수행함으로써, 향후, 토착종을 이용한 생태독성평가법의 제정에 과학적 근거를 제공하는 데 있다.

재료 및 방법

1. 산업폐수 시료 채취 및 화학적 분석

산업폐수는 2006년 6월에 농약, 도금, PCB, 피혁1, 피혁2의 총 5가지 제조업체로부터 원수 및 배출수를 각각 채취하였다. 채수한 시료는 얼음을 채운 아이스박스에 넣어 한시간 이내에 실험실로 운반하였고, 실험실에서는 4°C의 저온실에서 보관하였다. 각 시료에 대한 화학적 분석과 생태독성평가는 모두 채수 후 24시간 이내에 실시하였다.

채취한 시료를 대상으로 물리화학적 특성 및 유해화학물질에 대한 분석을 수행하였다. 물리화학적 특성 중, pH는 Orion 720A pH meter(Thermo Electron Inc., USA)로 측정하였으며, 화학적 산소요구량(COD)은 색도계(Thermo Orion AQ2040, USA)와 test kits(Humas, Korea)를 이용하여 크롬법으로 분석하였다(환경부 2006).

산업폐수 내 중금속 농도는 HNO_3 을 이용하여 습식분해를 수행한 후 유도결합플라즈마분광광도계(Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spectrophotometer, ICP-OES)를 사용하여 분석하였으며, 분석된 중금속 종류로는 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 철, 니켈, 납, 아연이었다.

2. 동양하루살이(*Ephemera orientalis*)를 이용한 산업폐수 생태독성평가

동양하루살이는 곤충강 하루살이목 하루살이과에 속하는 무척추동물로써, 한반도를 비롯한 일본, 시베리아, 극동 러시아 등지의 비교적 청정한 하천 하류에서 서식한다(Hwang 2009). 본 시험에 사용된 동양하루살이 알은 경기도 남양주시 진접읍의 왕숙천에서 채집한 성충을 실험실로 이동하여 산란된 알을 7가지 농도구간으로 희석한 공장폐수에 노출시켜 부화율을 확인하였다. 대조구는 3차 증류수를 사용하였으며, 55×12 mm 페트리디쉬에 시험용액을 넣은 후, 하루살이 알을 20개씩 투입하여 투입한 알의 수와, 부화한 개체의 수를 해부현미경을 통해 확인하였다. 각 폐수는 원수와 배출수 기준으로 100, 50, 25, 12.5, 6.3, 3.1, 0%의 7가지 농도가 되도록 증류수로 희석하여 시험용액을 준비했으며, 대조군은 증류수를 이용하였다. 각 농도당 반복 시험수는 4회였으며, 노출 기간 동안 물 교환과 먹이 공급이 없는 지수식(static) 조건으로 20°C, 광도 2,000 lux 이상의 16L:8D 광주기로 설정된 인큐베이터 내에서 14일간 노출을 진행하였다. 14일 경과 후 해부현미경을 통해 각 용기별 부화한 개체수를 기록하였다. 폐수 종류별로 반수부화농도인 EHC50 값을 Probit 분석의 한가지인 Trimmed Spearman-karber method

Table 1. pH and COD, and contents of metals in industrial wastewater collected in June 2006

	Pesticide		Metal plating		PCB		Leather1		Leather2	
	Raw	Effluent	Raw	Effluent	Raw	Effluent	Raw	Effluent	Raw	Effluent
pH	12.16	6.92	2.51	8.29	2.67	6.45	6.34	7.56	7.14	7.55
COD(mg L ⁻¹)	1215	310	80	23	67	19	1750	123	720	202
Metals(mg L ⁻¹)										
As	N.D.*	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cr	0.77	0.50	387.20	25.20	N.D.	N.D.	0.70	0.20	0.59	0.22
Cu	1.52	0.65	57.21	11.20	242.21	2.02	1.05	0.70	0.98	0.50
Fe	0.80	0.40	1.97	0.20	2.07	1.75	2.24	1.05	3.51	2.51
Ni	0.19	0.13	0.03	0.02	0.05	0.02	0.22	0.02	0.54	0.05
Pb	0.02	0.02	0.04	0.04	0.08	0.02	0.04	0.01	0.16	0.11
Zn	0.17	0.04	0.50	0.10	0.54	0.31	2.23	0.15	0.03	N.D.

*Not Detected

Table 2. Median egg hatching dilution concentration (EHC50) of *Ephemera orientalis* eggs on industrial wastewater (unit: %)

	Pesticide	Metal plating	PCB	Leather1	Leather2
Raw	<3.125	<3.125	6.14	<3.125	<3.125
Effluent	58.38	21.13	27.71	54.34	7.34

(Hamilton *et al.* 1977)를 이용하여 추정하였다.

결과 및 고찰

1. 산업폐수 화학적 분석

폐수 종류별로 pH는 차이가 매우 컸으며, 같은 종류의 폐수라 하더라도 원수와 배출수 간의 pH 차이도 매우 큰 것으로 나타났다. 그러나 배출수의 pH는 모두 6.5에서 8.3 사이에 드는 것으로 확인됐다. COD 역시 폐수 종류별로 차이가 컸으나, 배출수의 COD는 모두 310 mg L⁻¹ 이내로 저감되었다(Table 1).

중금속 농도 역시 폐수 종류별로 매우 다르게 측정되었으나, 카드뮴은 어느 폐수에서도 검출되지 않았다. 반면 크롬과 구리의 농도는 도금 업종에서 매우 높게 검출되었으며, PCB 업종에서는 구리의 농도가 매우 높게 검출되었다. 배출수 중에는 피혁2의 철 농도가 다른 종류의 배출수에 비해 비교적 높게 검출되었다.

2. 동양하루살이(*Ephemera orientalis*) 알을 이용한 생태독성평가

동양하루살이 알의 반수부화 희석농도를 통한 폐수의 생

태독성시험결과, 피혁2를 제외한 모든 종류의 시료에서 배출수의 독성은 원수에 비해 4배 이상 낮아지는 것을 확인하였다(Table 2). 피혁2 배출수의 반수부화 희석농도는 7.3%로써 생태독성이 다른 종류 배출수에 비해 3배 이상 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 통해 피혁2의 폐수는 생태독성을 경감시키기 위해서는 폐수 처리 과정의 개선이 필요할 것으로 사료된다. 원수와 배출수 간의 생태독성이 가장 크게 경감된 업종은 농약이었으며 18배 정도 경감된 것으로 확인되었다.

적 요

국내 토착종을 이용한 생태독성평가시험법 개발을 위해 동양하루살이 알을 이용하여 다양한 종류의 공장 폐수를 대상으로 생태독성평가를 수행하였다. 산업폐수는 2006년 6월에 농약, 도금, PCB, 피혁1, 피혁2의 총 5가지 제조업체로부터 원수 및 배출수를 각각 채취하였으며, 원수와 배출수는 각각 100, 50, 25, 12.5, 6.3, 3.1, 0%의 7가지 농도가 되도록 증류수로 희석하여 시험용액을 준비했다. 동양하루살이 알을 각 시험용액에 20개 씩 분주하여 20°C, 광도 2,000 lux 이상의 16L:8D 광주기로 설정된 인큐베이터 내에서 14일간 노출을 진행하였고 반복수는 4회였다. 폐수 종류별로 반수부화농도인 EHC50 값은 Probit 분석으로 추정하였다. 각 폐수별 원수의 EHC50은 PCB를 제외한 모든 종류의 폐수에서 3.1% 미만으로 생태독성이 매우 높게 나왔으며, 배출수의 EHC50은 피혁2가 7.3%로 독성이 가장 높은 반면 농약이 58%로 독성이 가장 낮게 나왔다.

사 사

본 연구는 한국연구재단의 신진연구자지원사업 (NRF-2014R1A1A1002960)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Beketov M. 2004. Different sensitivity of mayflies (Insecta, Ephemeroptera) to ammonia, nitrite and nitrate: linkage between experimental and observational data. *Hydrobiologia* 528:209-216.
- De Gelas K and L De Messter. 2005. Phylogeography of *Daphnia magna* in Europe. *Mol. Ecol.* 14:753-764.
- Hamilton MA, RC Russo and RV Thurston. 1977. Trimmed Spearman-Kärber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. *Environ. Sci. Technol.* 11:714-719.
- Hwang JM, YJ Bae and WP McCafferty. 2007. A checklist of the burrowing mayfly family Ephemeridae. pp. 159-172. In *International Advances in the Ecology, Zoogeography and Systematics of Mayflies and Stoneflies* (Hauer FR, JA Stanford and RL Newell eds.). University of California Press. Berkeley.
- Hwang JM, TJ Yoon, SJ Lee and YJ Bae. 2009. Life history and secondary production of *Ephemera orientalis* (Ephemeroptera: Ephemeridae) from the Han River in Seoul, Korea. *Aquat. Insects* 31:333-341.
- Kim BS, YK Park, KH Park, JS Shin and JH Kim. 2005. Optimal temperature conditions of Korean freshwater Cladocera for development of standard toxicity test methods. *Korean J. Pestic. Sci.* 9:221-230.
- Ministry of Environment. 2006. Standard methods for the examination of water and wastewater. Ministry of Environment.
- Ministry of Environment. 2009. Development and standardization of ecotoxicity tests using species indigenous to Korea (III). Ministry of Environment.
- Mo HH, Y Kim, YS Lee, YJ Bae, JS Khim and K Cho. 2016. Burrowing mayfly *Ephemera orientalis* (Ephemeroptera: Ephemeridae) as a new test species for pesticide toxicity. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23:18766-18776.
- National Institute of Environmental Research. 2014. Guideline of ecotoxicological test and operation. National Institute of Environmental Research.
- Van Wijngaarden RPA. 1993. Comparison of response of the mayfly *Cloeon dipterum* to chlorpyrifos in a single species toxicity test, laboratory microcosm, outdoor ponds and experimental ditches. *Sci. Total Environ.* 134:1037-1046.
- Wui IS, CH Ra, JB Lee and SK Baik. 1991. Studies on the bioindicator of aquatic insects to the environmental pollution. *Korean J. Environ. Biol.* 9:42-54.
- Zhou Q, J Zhang, J Fu, J Shi and G Jiang. 2008. Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Anal. Chim. Acta.* 606:135-150.

Received: 21 September 2016

Revised: 22 September 2016

Revision accepted: 22 September 2016