

〈Note〉

## 메틸에틸케톤과 메탄올이 김어리톡토기의 사망 및 번식에 미치는 영향

위 준 · 이윤식 · 손진오 · 김용은 · 모형호<sup>1</sup> · 조기종\*

고려대학교 환경생태공학과, <sup>1</sup>고려대학교 생명자원연구소

### Effects of Methyl Ethyl Ketone and Methanol on the Survival and Reproduction of *Paronychiurus kimi* (Collembola: Onychiuridae)

June Wee, Yun-Sik Lee, Jino Son, Yongeun Kim, Hyung-ho Mo<sup>1</sup> and Kijong Cho\*

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

<sup>1</sup>Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

**Abstract** - Acute and chronic toxicities of methyl ethyl ketone and methanol were investigated on *Paronychiurus kimi* (Collembola), for evaluating the potential effects of accidental exposures of these chemical substances on the terrestrial environments. This study was undertaken to establish a toxicity database for these chemical substances, which was required for the preparation of the response compensation and liability act for agricultural production and environmental damage. The 7-d acute toxicity and 28-d chronic toxicity were conducted using the OECD artificial soil spiked with varying, serially diluted concentrations of methyl ethyl ketone and methanol. Mortality was recorded after 7-d and 28-d of exposures, and the number of juveniles were determined after 28-d of exposure in the chronic toxicity test. In both assessments, methanol was more toxic than methyl ethyl ketone in terms of mortality (LC<sub>50</sub>) and reproduction (EC<sub>50</sub>). The 7-d LC<sub>50</sub> of methyl ethyl ketone and methanol were 762 and 2378 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt., respectively, and the 28-d LC<sub>50</sub>s were 6063 and 1857 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt., respectively. The 28-d EC<sub>50</sub> of methyl ethyl ketone and methanol were 265 and 602 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt., respectively. Comparison of results obtained in this study with literature data revealed that *P. kimi* was more sensitive to methanol than other soil invertebrates. However, given the high volatility of the chemicals tested in this study, further studies are necessary to improve the current test guideline, or to develop new test guidelines for an accurate assessment of chemicals that require toxicity databases for chemical accidents.

**Key words** : substances requiring preparation for accidents, acute toxicity test, chronic toxicity test, chemical accidents

\* Corresponding author: Kijong Cho, Tel. 02-3290-3064,  
Fax. 02-3290-6509, E-mail. kjcho@korea.ac.kr

## 서 론

매년 국내에서는 400여 종의 신규화학물질이 도입되며, 화학물질의 사용 및 유통량이 증가함에 따라 이들 화학물질의 운반 및 유통 과정에서 사고 발생률이 증가하고 있는 추세이다(Suh *et al.* 2015). 화학물질에 의한 사고 발생 시, 사고발생지에 물질적, 환경적 피해를 일으킬 뿐만 아니라, 화학물질의 확산을 통해 사고 발생 지역 주변의 환경과 주민에게도 피해를 줄 수 있다. 최근 2012년 구미에서 발생한 불화수소가스 누출사고의 경우 피해지역 복구와 지역주민 지원을 위하여 364억원을 지원하였으며, 지역주민의 건강검진은 12,243건에 이르렀다는 보고가 있었다(Suh *et al.* 2015). 이처럼 화학사고에 의한 피해는 광범위하게 나타날 뿐만 아니라 장기적인 영향도 가지고 있어, 사고발생 시 피해예측과 이에 대한 적절한 대응책 마련이 필요한 실정이나 구체적 방안이 마련되어 있지 않은 실정이다(Korea Environment Institute 2013).

국내에서는 「화학물질관리법」 제39조에 따라 화학사고 발생의 우려가 높거나 화학사고가 발생하면 피해가 클 것으로 우려되는 물질들을 “사고대비물질”로 지정하여 관리하고 있으며, 화학사고 발생 시, 「화학물질관리법」 제44, 45조에 따라 즉시 조사단을 구성하여 화학물질의 유출에 따른 인적, 물적 피해와 환경에 대한 영향을 평가하고 있다. 하지만 화학사고 후 시료 분석결과와 피해 개체 수 등을 기반으로 환경피해를 산정하는 미국 및 EU의 산정법(EPA 2002)과 달리 국내에서는 피해를 육안감별(식물의 황화현상 및 괴사 등)에 근거하고 있으며, 환경매체의 피해는 간과하고 있다. 특히 토양에 대한 유해화학물질의 영향과 관련된 법 조항은 부족한 실정이며, 이마저도 각각 유해화학 물질이 토양에 미치는 영향이나 취약성에 대해서는 대책 마련이 부족한 상황이다(Yoo *et al.* 2016). 또한 화학사고 시 보상 기준과 의사결정에 매우 중요한 기초 자료들은 매우 부족하여 피해를 규명하기 어려운 현실이다(He *et al.* 2011).

본 연구의 목적은 사고대비물질에 대한 생태독성평가를 통해서 화학사고가 생태계에 미치는 영향을 정량화하여, 향후, 화학사고 발생 시 피해보상 기준과 의사결정에 과학적 근거를 제공하는 데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 사고대비물질 중 국내외적으로 토양에 대한 영향 평가가 이루어지지 않은 메틸에틸케톤과 메탄올을 대상으로 이들 물질이 토양에 미치는 영향을 평가하기 위해 국내 토착 절지동물인 김어리톡토기(*Paronychiurus kimi*)를 이용한 생태독성평가를 수행하였다. 메틸에틸케톤과 메탄올은 사고대비물질에 속하는 물질들로 2016년 환경부에서 발표한 ‘2014년 화

학물질 배출량 조사’에서 각각 전체 배출량의 6.3과 5.0%를 차지하며, 배출량 상위 10개 화학물질에 속하였다(National institute of chemical safety 2017). 많은 배출량과 더불어 2014~2016 3년간 사고 발생건수는 각각 9, 5건으로 2014년 이전에 비해 발생빈도가 증가하는 추세를 보이고 있다(National institute of chemical safety 2017). 하지만 메틸에틸케톤과 메탄올에 대한 연구는 국내외적으로 인체위해성에 초점을 맞추어 수행되어 왔으며, 토양 생태계에 대한 영향을 평가하는 연구는 매우 부족하여 본 연구를 수행하였다.

톡토기는 토양에 서식하는 절지동물 가운데 가장 풍부한 생물로(Engel *et al.* 2004), ISO와 OECD 등의 국제기관에서 제정한 표준지침에 토양질 평가를 위한 표준 종으로써 지난 40년간 오염 물질이 토양에 미치는 영향을 평가하는 데 이용되어 왔다(Fountain *et al.* 2005). 또한 본 실험에서 이용한 김어리톡토기는 OECD 표준지침에서 표준종인 *Folsomia candida*와 *F. fimetaria*의 대체 종으로 기재되어 있다(OECD 2009). 김어리톡토기는 한국의 논 토양에 풍부하게 분포하면서 분해자로서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라(Son *et al.* 2007), OECD 표준지침의 대체 종으로서 다양한 오염물질에 대한 평가가(Kang *et al.* 2001; Son *et al.* 2007, 2009) 이루어져 왔기 때문에 본 연구에 사용되었다.

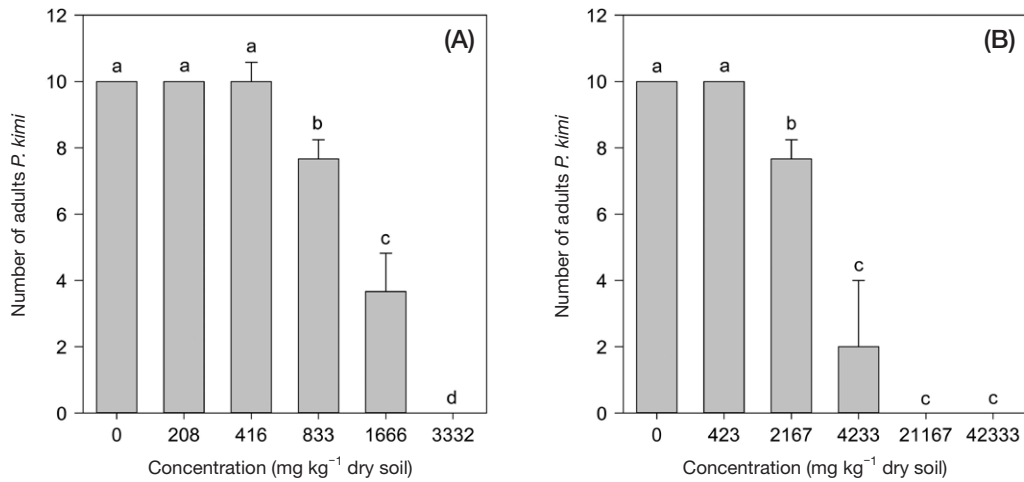
## 재료 및 방법

### 1. 실험생물

실험에 사용된 김어리톡토기는 1996년 경기도 이천의 논에서 채집된 후(Choi *et al.* 2002), 20±1°C 항온기 암조건에서 사육되어 왔다. 석고, 차콜과 물을 4:1:4(부피)로 섞어 만든 현탁액을 페트리디쉬(95 mm 지름, 15 mm 높이)에 1 cm 깊이로 넣고 건조시킨 배지를 김어리톡토기의 사육에 사용하였다. 사육 시 배지를 증류수를 이용하여 습윤 시키고, 먹이로 Brewers' yeast를 매주 제공하였다(Snyder *et al.* 1969). 매주 동일한 시점에 성충이 낳은 알을 따로 선별하여, 위에 기술한 방법대로 사육 후, 부화 후 28~30일이 지난 동일한 연령의 성충을 실험에 이용하였다(Son *et al.* 2007).

### 2. 시험물질

메틸에틸케톤( $C_2H_5COCH_3$ , >99% purity, ACS reagent)은 Sigma Aldrich (St. Louise, MO, USA)에서 메탄올( $CH_3OH$ , >99% purity, HPLC grade)은 J. T. Baker (Phillipsburg, NJ, USA)에서 구입하여 사용하였다. 급성독성평가에서는 토



**Fig. 1.** Mean numbers (per container) of survivors of *Paronychiurus kimi* adults 7-d after exposure to methyl ethyl ketone (A), and methanol (B) in artificial soil. Ten adults were initially inoculated in each container. Different letters in each graphic panel represent significant differences between treatments (Tukey's *post hoc* tests,  $p=0.05$ ).

양 내 메틸에틸케톤과 메탄올의 농도가 각각 208, 416, 833, 1666, 3332 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt.과 423, 2166, 4233, 21166, 42333 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt.이 되도록 시험물질과 3차 증류수와 혼합하여 수용액 상태의 저장용액(Stock solution)을 제조하여 준비하였다. 만성독성평가에서는 토양 내 메틸에틸케톤과 메탄올의 농도가 각각 46.875, 93.75, 187.5, 375, 750, 1500 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt.과 156.25, 312.5, 625, 1250, 2500, 5000 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt.이 되도록 시험물질과 3차 증류수와 혼합하여 수용액 상태의 저장용액(Stock solution)을 제조하여 준비하였다.

### 3. 김어리톡토기(*Paronychiurus kimi*)를 이용한 생태독성평가

본 실험에서는 대상 시험물질이 성충의 사망에 미치는 7일 급성독성평가와 OECD 표준지침 232(OECD 2009)를 기반으로 성충의 산란수에 미치는 28일 만성독성평가를 진행하였다. 시험에 사용된 인공 토양은 건조 중량 기준으로 가늘게 분쇄된 5% Sphagnum peat, 20% 카울린 및 75% 모래로 조성된 토양을 이용하였고, 토양 산도는 탄산칼슘을 이용하여 6.0±0.5로 조절하였다. 토양 수분함량은 토양보수력(Water Holding Capacity)의 50%로 조절하기 위해 앞서 상이한 농도로 제조된 메틸에틸케톤과 메탄올 수용액과 3차증류수를 토양에 넣고 균일하게 교반하여 준비하였다. 처리군은 각 농도에서 교반된 토양 30g(습윤 중량기준)을 폴리스틸렌 용기에 넣어 준비하였고, 대조군은 3차 증류수를 이용하여 준비하였다. 각 농도당 5반복으로 수행하였다. 급·만

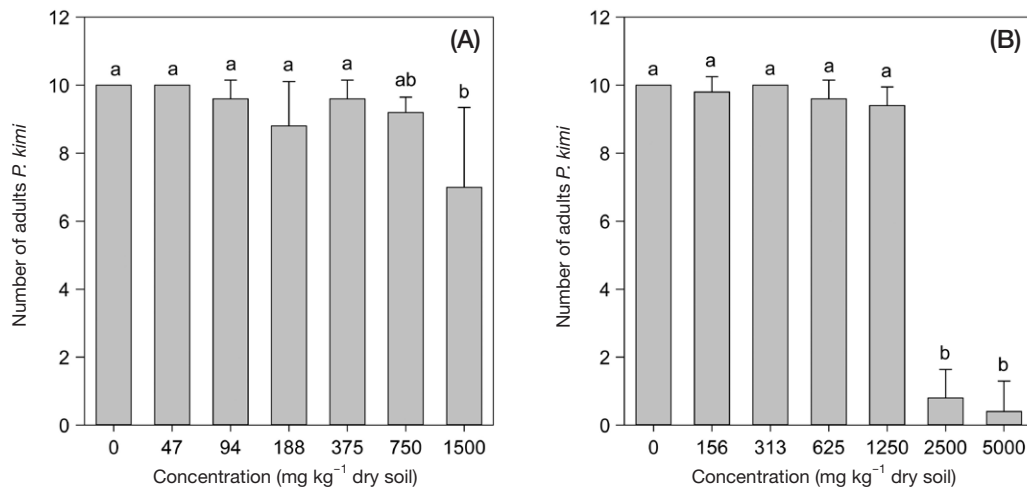
**Table 1.** LC<sub>50</sub> estimates (mg kg<sup>-1</sup>) with 95% confidence limits for the effects on survival of adults *P. kimi* 7- and 28-d after exposure to different concentration of methyl ethyl ketone and methanol in artificial soil

Substance	7-d LC <sub>50</sub>	28-d LC <sub>50</sub>
Methyl ethyl ketone	1014 (805~1266)	6063 (2324~83034)
Methanol	2378 (1803~2931)	1857 (1184~2475)

성독성평가시 노출기간 동안, 시험 용기는 20±1°C 항온기, 암조건에서 유지되었고, 토양 수분의 함량은 3차 증류수로 중량 손실을 보충하여 매주 조정 하였다. 급성독성평가에서는 실험기간 동안 추가적으로 먹이를 제공하지 않았고, 만성독성평가에서는 먹이로 적당량의 Brewers' yeast를 격주 제공하였다. 급성독성평가에서는 실험종료 시 토양에 적당량의 물을 부어 부유된 성충의 수를 계수하였고, 만성독성평가에서는 실험종료 시 부유된 성충과 유충의 수를 계수하였다.

### 4. 통계 분석

모든 통계분석은 통계프로그램 SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하였다. 통계 분석에 앞서 만성독성실험의 산란수 자료는 각 처리농도에서 반복수간의 이상치(outlier)를 MAD(median absolute deviation) 방법을 이용하여 제거 후 분석하였다(Leys *et al.*, 2013). 급·만성독성실험 수행 후 대조군과 처리군의 사망률을 비교하기 위해, 일원배치분산분석을 수행하였고, 사후검정으로 Tukey 검정법을 이용하여 유의수준 5%에서 분석하였다. 만



**Fig. 2.** Mean numbers (per container) of survivors of *Paronychiurus kimi* adults 28-d after exposure to methyl ethyl ketone (A) and methanol (B) in artificial soil. Ten adults were initially inoculated in each container. Different letters in each graphic panel represent significant differences between treatments (Tukey tests,  $p = 0.05$ ).

성독성실험 수행 결과에 대해 반수치사농도(LC<sub>50</sub>, median lethal concentration)와 95% 신뢰구간은 Probit 모델을 이용하여 분석하였으며, 산란수에 대한 반수영향농도(EC<sub>50</sub>, effective concentration 50%)와 95% 신뢰구간은 Haanstra *et al.* (1985)가 제안한 로지스틱모형을 이용하여 적합하였다. 산란수에 대한 무영향관찰농도(NOEC, no observed effect concentration)와 최소영향관찰농도(LOEC, lowest observed effect concentration)는 일원배치분산분석을 수행 후, 사후검정으로 Dunnett검정법을 이용하여 산출하였다.

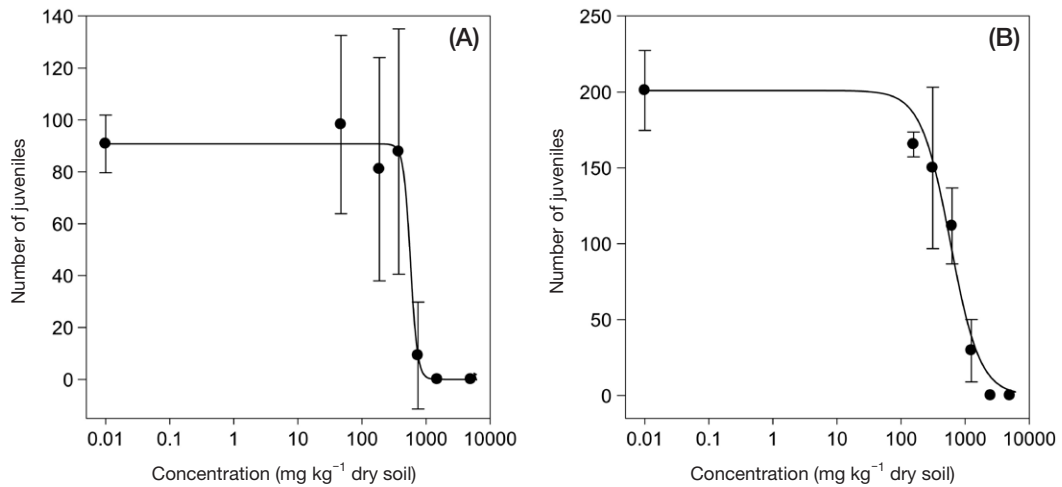
## 결과 및 고찰

### 1. 메틸에틸케톤과 메탄올이 김어리톡토기 사망 및 산란에 미치는 영향

메틸에틸케톤에 대한 급성독성평가 결과 LC<sub>50</sub> 값은 762 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. (Table 1)이었으며, 833 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. 이상의 농도에서 사망률이 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Fig. 1). 메틸에틸케톤에 대한 만성독성평가 결과 LC<sub>50</sub> 값은 6063 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. (Table 1), EC<sub>50</sub> 값은 570 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt., NOEC와 LOEC 값은 각각 375와 750 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt.였다. 메탄올에 대한 급성독성평가 결과 LC<sub>50</sub> 값은 2378 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. (Table 1)으로 메틸에틸케톤에 비해 낮은 독성을 보였으며, 2166 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. 이상의 농도에서 사망률이 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Fig. 1). 메탄올에 대한 만성독성평가

결과 LC<sub>50</sub> 값은 1857 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. (Table 1)이었으며, 2500 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. 이상의 농도에서 대조군과 유의한 차이를 보였다(Fig. 2). 28일 후 성충이 낳은 유충의 수는 농도에 따라 Sigmoid 형태의 농도의존적 감소추세를 보였으며(Fig. 3), EC<sub>50</sub> 값은 589 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt., NOEC와 LOEC 값은 각각 156.25와 312.5 mg kg<sup>-1</sup> soil dry wt. (Table 2)으로 메틸에틸케톤과 유사한 결과를 보였다.

메틸에틸케톤의 경우 토양에서 절지동물에 대한 독성평가 결과는 없었지만, Mayer *et al.* (2001)은 1시간 동안 100 mL L<sup>-1</sup>에서 꿀벌 *Apis mellifera*가 기피 행동을 보이지 않았다고 보고했으며, Reynolds. (1977)는 상추 *Lactuca sativa*의 발아에 대한 72시간 EC<sub>50</sub> 값을 12.5 mM로 보고하였다. 메탄올의 경우, 종래에 보고된 토양 메탄올에 대한 결과와 본 연구결과를 비교했을 때, Stantec consulting Ltd. (2006)이 붉은줄지렁이(*Eisenia andrei*)와 장님마디톡토기(*Folsomia candida*)에 대해 보고한 LC<sub>50</sub> 값과 EC<sub>50</sub> 값들은 각각 17199.10 mg kg<sup>-1</sup>와 26646.05 mg kg<sup>-1</sup>, > 10000 mg kg<sup>-1</sup>와 EC<sub>50</sub> of 5683.53 mg kg<sup>-1</sup>로 본 실험결과와 최소 5배 이상의 차이를 보였다. 이러한 결과는 *P. kimi*가 종래의 다른 토양 절지동물에 비해 메탄올과 메틸에틸케톤에 대해 높은 민감도를 갖는 것으로 판단된다. 본 실험의 결과는 Frampton *et al.* (2006)과 Daam *et al.* (2011)이 다양한 농약에 대한 급·만성독성평가에서 톱토기가 지렁이보다 민감하다고 보고한 결과와, 중금속에 대하여 *F. candida*에 비해 *P. kimi*가 민감하다고 보고한 Son *et al.* (2007)의 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 국내 토착 절지동물이면서 다양한 화학물질에 민감한 *P. kimi*는 사고대비물질들이 토양에 미치는 영향을



**Fig. 3.** Numbers of offspring produced by adult *P. kimi* 28-d after exposure to methyl ethyl ketone (A) and methanol (B) in artificial soil. The relationship between juvenile production and concentration of methyl ethyl ketone or methanol was fitted using the logistic model presented by Haanstra *et al.* (1985).

**Table 2.** 28-d EC<sub>50</sub> estimates (mg kg<sup>-1</sup>) with 95% confidence limits, NOEC (no observed effective concentration) and LOEC (lowest observed effective concentration) (mg/kg) for the effects on reproduction of adult *P. kimi* exposure to different concentration of methyl ethyl ketone and methanol in artificial soil

Substance	28-d EC <sub>50</sub>	NOEC	LOEC
Methyl ethyl ketone	570 (284~857)	375	750
Methanol	589 (483~697)	156.25	312.50

파악하는 데 적합한 것으로 사료된다.

본 연구에서 적용된 OECD 표준지침에서는 휘발성이 큰 (Henry's constant > 1 or Vapor pressure > 0.0133 Pa at 25°C) 물질에 대해 평가 및 적용의 제한을 권고하였으나 (OECD 2009), 아직까지 정확한 표준지침은 마련되어 있지 않은 실정이다. 그러나 현재까지 이들 사고대비물질에 대한 생태독성정보의 부재와 더불어 대부분의 사고대비물질들이 큰 휘발성을 가지고 있는 점을 감안할 때, 이러한 사고대비물질에 대한 정확한 평가를 위해서는 종래의 표준지침을 개선하거나 새로운 평가지침 마련을 통해 지속적인 생태독성정보구축을 위한 더 많은 연구가 필요하다.

### 적 요

화학사고 발생 시 환경에 노출된 화학물질이 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 우리나라에서 서식하는 김어리톡토기 (*Paronychiurus kimi*)를 이용하여 OECD guidelines 232 Collembola reproduction test in soil에 따라 사고대비물

질 2종, 메틸에틸케톤과 메탄올에 대한 급성, 만성 생태독성평가를 진행하였다. 메틸에틸케톤과 메탄올을 농도별로 OECD 인공토양과 섞은 후, 성충 *P. kimi* 10마리를 접종하여 7일 후의 성충 사망률과, 28일 후의 성충 사망률 및 번식률을 확인하였다. 메틸에틸케톤과 메탄올에 대한 급성독성평가 결과, LC<sub>50</sub> 값은 각각 2378과 762 mg kg<sup>-1</sup> soil이었으며, 만성독성평가 결과, LC<sub>50</sub> 값은 각각 1857과 6063 mg kg<sup>-1</sup> soil이었다. 만성독성평가 시 *P. kimi*의 산란 수에 대한 EC<sub>50</sub> 값은 메틸에틸케톤에서 570 mg kg<sup>-1</sup> soil, 메탄올이 589 mg kg<sup>-1</sup> soil로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 본 연구의 결과 *P. kimi*가 종래의 다른 토양 절지동물에 비해 메탄올에 대해 높은 민감도를 갖는 것으로 판단되었다. 현재까지 이들 사고대비물질에 대한 생태독성정보의 부재와 더불어 대부분의 사고대비물질들이 큰 휘발성을 가지고 있는 점을 감안할 때, 이러한 사고대비물질에 대한 정확한 평가를 위해서는 종래의 표준지침을 개선하거나 새로운 평가지침 마련을 통해 지속적인 생태독성정보구축을 위한 더 많은 연구가 필요하다.

### 사 사

본 연구는 환경부의 "화학사고 대응 환경기술개발사업" (2016001970003)에서 지원받았습니다.

### REFERENCES

Choi WI, MI Ryoo and JG Kim. 2002. Biology of *Paronychi-*



- urus kimi* (Collembola: Onychiuridae) under the influence of temperature, humidity and nutrition. *Pedobiologia* 46: 548-557.
- Daam MA, S Leitão, MJ Cerejeira and JP Sousa. 2011. Comparing the sensitivity of soil invertebrates to pesticides with that of *Eisenia fetida*. *Chemosphere* 85:1040-1047.
- Engel MS and DA Grimaldi. 2004. New light shed on the oldest insect. *Nature* 427:627-630.
- Fountain MT and SP Hopkin. 2005. *Folsomia candida* (Collembola): a "standard" soil arthropod. *Annu. Rev. Entomol.* 50:201-222.
- Frampton GK, S Jänsch, JJ Scott-Fordsmand, J Römbke and PJ Van den Brink. 2006. Effects of pesticides on soil invertebrates in laboratory studies: a review and analysis using species sensitivity distributions. *Environ. Toxicol. Chem.* 25: 2480-2489.
- Haanstra L, P Doelman and JH Voshaar. 1985. The use of sigmoidal dose response curves in soil ecotoxicological research. *Plant Soil.* 84:293-297.
- He G, L Zhang, Y Lu, AP Mol. 2011. Managing major chemical accidents in China: Towards effective risk information. *J. Hazard. Mater.* 187:171-181.
- Kang S, WI Choi and MI Ryoo. 2001. Demography of *Paronychiurus kimi* (Lee) (Collembola: Onychiuridae) under the influence of glufosinate-ammonium on plaster charcoal substrate and in artificial soil. *Appl. Soil Ecol.* 18:39-45.
- Korea Environment Institute. 2013. A study on the Improvement of Environmental Impact Assessment of Industrial Complexes Based on Risk Assessment of Chemical Leakage Accidents. Korea Environment Institute.
- Leys C, C Ley, O Klein, P Bernard and L Licata. 2013. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J. Exp. Soc. Psychol.* 49:764-766.
- Mayer DF, ID Lunden, G Kovacs and ER Miliczky. 2001. Field evaluation of non-pesticide chemicals as honey bee repellents. *COLLOQUES-INRA.* 98:159-168.
- National institute of chemical safety. Pollutant release and transfer registers information system. <http://icis.me.go.kr>. Accessed May 25, 2017.
- National institute of chemical safety. Chemical Safety Clearing-house. <http://csc.me.go.kr>. Accessed May 25, 2017.
- OECD. OECD Guideline for the testing of chemicals. 232 Collembolan Reproduction Test in Soil.
- Reynolds T. 1977. Comparative effects of aliphatic compounds on inhibition of lettuce fruit germination. *Ann. Bot.* 41:637-648.
- Snider RJ, JH Shaddy and JW Butcher. 1969. Culture techniques for rearing soil arthropods. *Mich. Entomol.* 1:357-362.
- Son J, MI Ryoo, J Jung and K Cho. 2007. Effects of cadmium, mercury and lead on the survival and instantaneous rate of increase of *Paronychiurus kimi* (Lee) (Collembola). *Appl. Soil Ecol.* 35:404-411.
- Son J, KI Shin and K Cho. 2009. Response surface model for predicting chronic toxicity of cadmium to *Paronychiurus kimi* (Collembola), with a special emphasis on the importance of soil characteristics in the reproduction test. *Chemosphere* 77:889-894.
- Stantec Consulting Ltd. 2006. Ecotoxicity Assessment of Amines, Glycols, and Methanol to Soil Organisms. Report prepared for Petroleum Technology Alliance Canada. <http://www.ptac.org>.
- Suh YW and JG Park. 2015. Establishing a Post Impact Assessment System for Chemical Accidents. Korea Environment Institute.
- US Environmental Protection Agency. 2002. Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980 "Superfund".
- Yoo KJ, JH Yang and SI Hwang. 2016. A Study on the Introduction of Pre-management System to Prevent Soil Contamination by Chemical Accident. *J. Soil Groundw. Environ.* 21:20-29.

Received: 31 May 2017

Revision accepted: 5 June 2017