

담수산 물벼룩인 *Moina macrocopa*를 이용한 과불화화합물 PFOA와 PFOS의 독성평가

이 철 우*, 김 현 미, 최 경 희

국립환경과학원 화학물질평가부 환경노출평가과

Toxicity Assessment of PFOA and PFOS Using Freshwater Flea *Hyalella azteca*

Chulwoo Lee*, Hyun-Mi Kim and Kyunghee Choi

Environmental Exposure Assessment Division, National Institute of Environmental Research,
Kyongseodong Seogu, Incheon 404-708, Korea

ABSTRACT

Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) are fully fluorinated organic compounds which are highly persistent in environment and accumulated in organism. These chemicals are released to the environment at their manufacture, during their use in industrial and consumer applications and from disposal after their use. The purpose of this study was to determine the effects of PFOA and PFOS on the freshwater flea (*Moina macrocopa*). Acute toxicity test and chronic toxicity test were performed for 2 days and 10 days, respectively. Acute toxicity was assessed on the basis of mortality, while chronic toxicity was assessed by fecundity as well as mortality. The acute toxicity studies on PFOA and PFOS showed that the values of LC₅₀ were 73.9 mg/L and 27.7 mg/L respectively. In the chronic toxicity test, fecundity was reduced significantly at 24.1 mg/L of PFOA and 9.3 mg/L of PFOS, respectively. Conclusively, the results of this work suggest that *Moina macrocopa* could be a suitable model organism for screening and assessing of environmental pollutants in water.

Key words : perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctane sulfonate (PFOS), *Moina macrocopa*

서 론

과불화화합물(Perfluorinated chemicals)은 현재 국내는 물론 국제적으로 새롭게 주목받고 있는 환경오염물질이다(Karrman *et al.*, 2006; Renner, 2006). 그러나 과불화화합물의 환경 중 오염실태와

인체 또는 생태계에 대한 유해성 여부는 아직까지 명확히 확인되지 않고 있다. 과불화화합물 가운데 대표적인 물질로는 PFOA (Perfluorooctanoic acid) 와 PFOS (Perfluorooctane sulfonate)가 알려져 있다 (Renner, 2003). PFOA는 테플론, 프라이팬 그리고 종이컵과 같은 1회용 음식용기의 코팅재료로 많이 쓰이고 있으며, 반도체 세척작업에도 사용되고 있다. PFOS 역시 다양한 용도로 쓰이고 있는데 직물, 카페트의 성분, 금속도금, 포장지 및 코팅 첨가제 등에 사용되고 있다(Mawn *et al.*, 2005; Begley *et*

* To whom correspondence should be addressed.
Tel: +82-32-560-7240, Fax: +82-32-560-7260
E-mail: leecwoo@hanmail.net

al., 2005). 과불화화합물의 특성은 쉽게 분해되지 않기 때문에 환경 중 또는 생체 내에서 오랜 기간 동안 잔류함으로써 유해성 (hazard)과 위험성 (risk)이 우려되는 물질이다 (Inoue et al., 2004). 환경부에 따르면 아직까지 국제적으로 불소계화합물에 대한 구체적인 규제가 이루어지고 있지는 않으나, 최근 들어 PFOS가 스톡홀름협약 후보물질로 선정된 바 있으며, 미국에서는 PFOS를 포함한 과불화화합물들을 제조·수입하는 경우 EPA에 통보하도록 하는 등 규제를 강화하고 있는 추세이다. 유럽연합의 경우는 PFOS의 사용을 제한하는 지침 안을 채택하고 있으며, 우리나라도 PFOS와 같은 과불화화합물의 규제 또는 사용에 대한 대응 방안 마련에 집중하고 있다 (EC, 2002).

PFOS와 PFOA는 일반적으로 급성독성은 높지 않다고 알려져 있으나, PFOS는 설치류를 이용한 실험에서 간독성을 유발할 수 있는 것으로 보고된 바 있다 (Nakayama et al., 2005). PFOA의 경우 동물실험을 통해 암을 유발할 우려는 있으나, 인체에서의 발암성 증거는 아직까지 밝혀져 있지 않은 상태이다 (Sasaki et al., 2003). 최근 들어 PFOA와 PFOS 또는 이들 화합물에 의한 인체 및 생태독성에 관한 연구 결과들이 계속해서 보고되고 있으나, 아직까지 과불화화합물류의 유해성 데이터는 충분하지 못한 상황이다 (Hoff et al., 2003a). 특히 PFOA와 PFOS가 환경 중 또는 생물체 내에서 장기간 잔류 또는 축적됨에 따라 내분비계장애를 유발할 수 있다는 우려도 제기되고 있으나 이에 대한 검증 연구가 필요하다 (Saito et al., 2003; Peden-Adams et al., 2007). 2002년도에 OECD에서 수행된 PFOS의 유해성평가 결과, PFOS가 환경 중에 배출되거나 잔류하면서 인체와 환경에 대해 우려가 있다고 제시된 바 있다 (OECD, 2002). 그러나, PFOS를 제외하고는 과불화화합물류의 독성시험은 현재까지 한정된 생물에서만 이루어지고 있는데 설치류 이외에도 수계, 저질 또는 토양에 서식하는 시험생물, 즉 어류, 무척추동물류, 지렁이 등에서의 다양한 유해성 자료가 요구되고 있다 (Hoff et al., 2003b).

본 연구에서 PFOA와 PFOS의 독성평가를 위해 사용된 시험종은 담수산 물벼룩류인 *Moina macrocopa*로서 OECD 공시종인 *Daphnia magna*와 같이 국제적으로 널리 사용되는 시험생물은 아니나, D.

*magna*에 비해 생활사가 짧아 시간·비용 경제적인 측면과 국내 환경 중에 서식하고, 실험실 내 사육이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 *M. macrocopa*는 카드뮴, 구리와 같은 중금속류, 유기용제, 농약류 등과 같은 유해화합물질에 의한 수생독성 평가에 사용이 점차 증가하는 추세이다 (Garcia et al., 2004). 본 연구에서는 국내 수계에 서식하는 *M. macrocopa* 물벼룩을 사용하여 PFOA와 PFOS의 급·만성 노출시험을 수행하였으며, 현재 OECD 화학물질 시험지침 (OECD Test guidelines for chemicals)의 생태독성 시험 가운데 하나인 물벼룩류 (*D. magna*) 독성시험항목에서 사용되고 있는 유영저해와 생식능을 중심으로 독성값을 산출하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시험종

시험생물로는 담수산 물벼룩인 *Moina macrocopa*를 사용하였다. 시험용 물벼룩의 사육은 (주)네오엔비즈 환경안전연구소에서 수온 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 조도 500 lux, 광주기 16 h/8 h (명/암) 조건으로 US EPA에서 제시한 MHW (Moderately Hard Water) 용액에서 배양하였으며, 먹이로는 녹조류인 *Pseudokirkneriella subcapitata* (= *Selenastrum carpicornutum*)와 보조먹이로 YCT (Yeast, Chlorophyll, Tetramin)를 공급하였다 (US EPA, 2002). 급성독성과 만성독성 시험에 사용된 물벼룩은 산란용 어미로부터 얻은 개체 가운데 생후 24시간 미만의 어린 개체만을 선별하여 시험에 이용하였다.

2. 시험물질의 조제

시험물질로는 과불화화합물 가운데 대표적인 물질인 PFOA (Perfluorooctanoic acid)와 PFOS (Perfluorooctane sulfonate)를 사용하였다. PFOA는 화합물인 Ammonium perfluorooctanoic acid (Aldrich corp., CAS No. 3825-26-1), PFOS의 경우는 Potassium perfluorooctane sulfonate (Fluka corp., CAS No. 2795-39-3)를 사용하였다. 시험물질 농축액 (Stock solution)은 시험물질을 증류수에 용해시켜 준비하였으며, 재차 배양액으로 희석하여 시험용액

을 조제하였다. 1차적으로 농도설정실험(range finding test)을 실시하여 본 시험에서의 농도범위를 설정하였다.

3. 급성독성 시험

급성독성 시험은 PFOA와 PFOS가 *Moina macrocopa*의 사망(mortality)을 유발하는 정도를 알아보고자 수행되었다. 각 농도별로 준비된 시험용액을 유리 vial에 20 mL씩 첨가한 후, 각 vial마다 10마리의 물벼룩을 투입하였으며, 농도별로 3개의 반복구를 두었다. 시험물질의 농도는 PFOA의 경우 15.1, 30.1, 60.2, 120.4, 240.9, 481.8 mg/L 그리고 PFOS의 경우 11.7, 23.3, 46.6, 93.2, 186.4, 372.9 mg/L로 설정하였다. 시험물질의 농도는 nominal concentration이며, 화합물에서 ammonium 및 potassium을 제외한 순수한 PFOA와 PFOS의 농도로 환산한 값으로 설정하였다. 시험조건(수온, 조도, 광주기)은 물벼룩 배양과 동일한 조건으로 실시하였으며, 지수식 시험으로서 시험용액의 교환과 폭기는 하지 않았고, 먹이 또한 공급하지 않았다. 총 노출시간은 48시간이었으며, 24시간과 48시간 후에 노출 중인 개체를 관찰하여 사망 유무를 개체별로 조사하였다. 물벼룩에서 사망과 유영저해(immobilization)의 구분은 명확하지 않으며, 따라서 유영장애가 관찰되는 물벼룩을 살짝 건드렸을 때 반응을 보이지 않으며 움직임도 전혀 없는 경우에 이를 사망으로 판단하였다. 반수치사농도(LC₅₀)의 산출은 probit 통계법을 사용하였으며, 무영향관찰농도(NOEC) 및 최소영향관찰농도(LOEC)는 Dunnett's test를 이용하여 산출하였다.

4. 만성독성 시험

만성독성 시험은 PFOA와 PFOS가 *M. macrocopa*의 생식능력에 미치는 영향을 평가하고자 실시되었다. 각 농도별로 준비된 시험용액을 유리 vial에 20 mL씩 첨가한 후, 각 vial마다 1마리의 물벼룩을 투입하였다. 시험물질의 농도는 1.5, 3.0, 6.0, 12.0, 24.1, 48.2 mg/L (PFOA) 및 0.6, 1.2, 2.3, 4.6, 9.3, 18.6 mg/L (PFOS)로서 2배수 간격으로 6단계로 설정하였다. 시험물질의 농도는 급성독성 시험에서와 마찬가지로 화합물에서 순수한 PFOA와 PFOS로 환산한 농도로 설정하였다. 각 농도별

로 1개체씩 10개의 반복구를 설정하였고, 시험은 배양 시와 동일한 조건에서 수행하였다. 배양 중 폭기는 하지 않았고, 시험용액은 매일 전량 교환하였으며, 먹이는 매 시험액 교환 시 *P. subcapitata*를 5×10^5 cells/mL의 밀도로 공급하였다. 총 노출기간은 10일이었고, 24시간 마다 노출 중인 각각의 개체로부터 새로이 태어난 새끼의 수(신생개체수)를 계수하였다. 시험물질에 최초 노출된 물벼룩을 모체로 명명하였으며, 노출기간 동안 각 모체로부터 생산된 새끼들은 계수 후 vial에서 즉시 제거하였다. EC₅₀, NOEC 및 LOEC는 급성독성 시험에서와 동일한 통계방법을 이용해 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 급성독성

PFOA에 급성 노출된 *M. macrocopa*는 24시간 후 60.2 mg/L 이내의 PFOA 농도에서는 사망률에 있어 대조군과 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 120.4 mg/L부터 독성영향(치사영향)이 나타나기 시작하였다. 본 시험에서의 최고 농도인 481.8 mg/L에서는 24시간 후 모든 개체가 움직임이 전혀 없었으며, 따라서 사망한 것으로 관찰되었다. 한편, 48시간 후 사망률을 측정된 결과, 최저 농도인 15.1 mg/L에서도 대조군과 비교해 통계적으로 유의한 차이가 나타나기 시작했다. 60.2와 120.4 mg/L

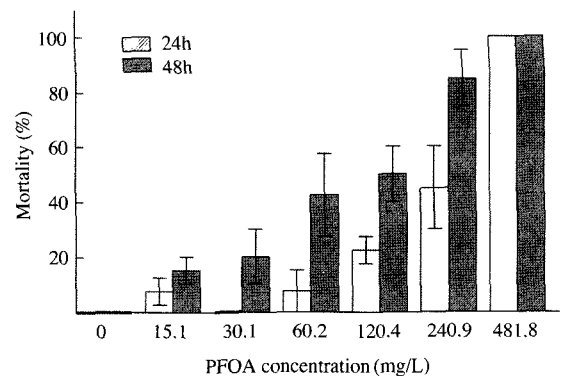


Fig. 1. Acute toxicity of PFOA (as Ammonium perfluorooctanoic acid) to *Moina macrocopa*. Acute toxicity was assessed on the basis of mortality ratio (means \pm standard deviation, 3 replicates per treatment).

에서는 사망률이 50% 전후로 나타났으며, 240.9 mg/L에서는 80% 이상의 개체가 사망에 이르는 용량-반응 양상을 나타내었다(Fig. 1).

PFOS에 노출된 *M. macrocopa*는 24시간 후 46.6 mg/L 농도까지 사망한 개체가 발견되지 않았으나, 93.2 mg/L부터 독성영향이 유의적으로 나타나기 시작하였다. 한편, 186.4 mg/L에서는 24시간 후 모든 개체가 유영능력이 상실되었으며, 결국 사망하였다. 노출 종료 시점인 48시간 후에는 최저 농도인 11.7 mg/L의 PFOS에서는 대조군과 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 23.3 mg/L부터 독성영향이 나타나기 시작하였다. 또한 93.2 mg/L 이상의 농도에서는 48시간 후 모든 물벼룩이 유영능력을 상실하고 사망하였다(Fig. 2).

2. 만성독성

만성독성 시험 기간에 고농도의 PFOA 처리군에서 *M. macrocopa* 모체 가운데 일부의 사망이 관찰되었다. 6.0 mg/L 이상의 PFOA 처리군에서 모체의 사망이 나타났으며, 농도가 증가할수록 노출 종료(10일 후) 까지 모체의 사망률은 증가하였다. 대조군과 1.5 mg/L 및 3.0 mg/L PFOA 처리군에서는 노출 시작 후 10일 동안 모든 개체(모체)가 생존하였으나, 6.0 mg/L에서는 9일 후에 사망 개체가 발견되기 시작하여 최종적으로 시험 종료 후 10개체 가운데 8개체가 생존하였다. 12.0 mg/L에서는 8일

후, 24.1 mg/L 이상에서는 3일 후부터 사망 개체가 관찰되었으며, 시험 종료 시 각각 7개체와 4개체가 생존하였다. 48.2 mg/L 처리군에서는 10일 후에 10개체 모두 사망하였다. 한편, PFOA에 노출된 *M. macrocopa* 모체로부터 생산된 신생 개체(offspring)수는 12.0 mg/L 농도 이하에서는 대조군과 유의한 차이가 없었으나, 24.1 mg/L 농도에서는 대조군(모체 당 평균 27.8 ± 8.3 신생 개체수)과 비교해 절반 수준 이하인 평균 9.9 ± 5.5 로서 신생개체수가 급격히 감소하였다(Fig. 3). 또한 48.2 mg/L의 PFOA 처리군에서는 신생 개체의 생산이 전혀 관찰되지 않았는데 주요 원인은 모체의 사망에 기인하였다.

PFOS 만성독성 시험의 경우도 PFOA와 마찬가지로 노출 농도 가운데 고농도에서 시험기간 동안 모체의 사망이 관찰되었다. 대조군에서는 10일간 사망한 개체가 없었으나(10개체 모두 생존), 0.6 ~ 4.6 mg/L에서는 8일 후부터 사망 개체가 발견되기 시작하였다. 그러나 본 농도 범위에서는 처리군 모두 사망한 모체 수가 2개체를 넘지 않았다. 그러나, 9.3 mg/L에서는 5일 후, 18.6 mg/L 이상에서는 3일째부터 사망이 관찰되었으며, 시험 종료 시 각각 6개체와 3개체가 생존하였다. PFOS 노출 농도에 따른 생식능 변화를 조사한 결과, 10일 동안 태어난 *M. macrocopa* 신생 개체수는 4.6 mg/L 농도 이하에서는 대조군(모체 당 평균 42.0 ± 17.1 신생 개체수)과 비교해 유의적인 차이는 나타나지 않았으

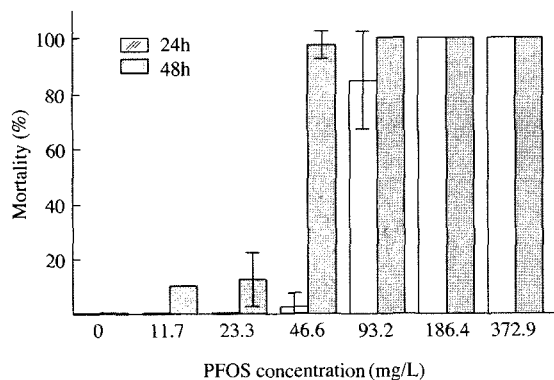


Fig. 2. Acute toxicity of PFOS (as Potassium perfluorooctane sulfonate) to *Moina macrocopa*. Acute toxicity was assessed on the basis of mortality ratio (means \pm standard deviation, 3 replicates per treatment).

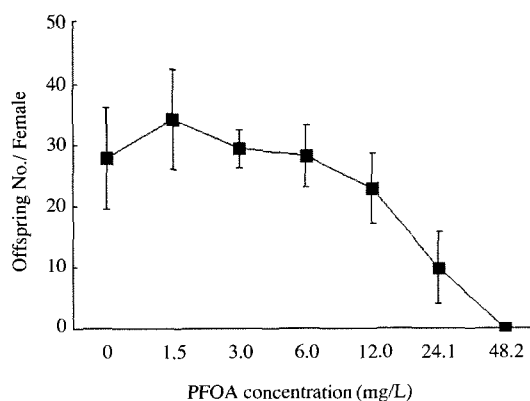


Fig. 3. Fecundity of *Moina macrocopa* exposed to PFOA for 10 days. Fecundity was calculated by counting the number of offspring per female (means \pm standard deviation, n=10).

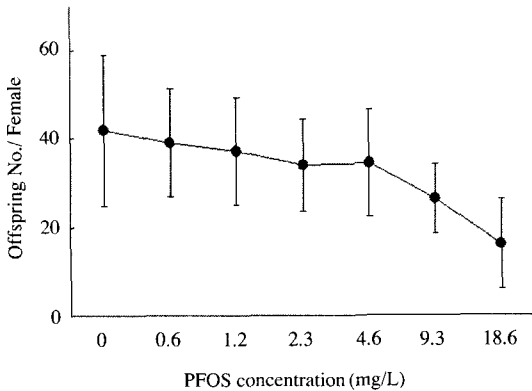


Fig. 4. Fecundity of *Moina macrocopa* exposed to PFOS for 10 days. Fecundity was calculated by counting the number of offspring per female (means \pm standard deviation, n=10).

나, 9.3 mg/L 농도에서는 모체 당 신생 개체수가 평균 26.4 ± 7.7 , 18.6 mg/L 농도에서는 16.1 ± 10.2 로 감소폭이 높게 관찰되었다(Fig. 4).

3. 독성영향 수준 산출

급성독성과 만성독성 시험에서의 영향을 평가하기 위해 각 종말점(end-points)별 영향 수준을 도출하였다. 영향 수준은 치사농도(LC), 무영향관찰농도(NOEC) 및 최소영향관찰농도(LOEC) 값으로 산출하였으며 Table 1에 나타난 바와 같다. 급성독성의 경우 반수치사농도(LC₅₀)는 *M. macrocopa* 물벼룩의 50%가 사망에 이른 농도를 나타내었다. 한편, 만성독성의 경우 독성영향은 두 가지로 구분하여 산출하였는데 하나는 치사영향이며, 다른 하나는 모체에서 생산된 신생 개체수(offspring)를 기준으로 한 생식능 장애를 영향농도로 산출하였다. 48시간 노출한 급성독성 시험에서는 독성영향(치사영향)에 대한 NOEC가 PFOA 및 PFOS 각각 15.1 mg/L와 11.2 mg/L이었으며, LOEC는 PFOA와 PFOS가 각각 15.1 mg/L 및 23.3 mg/L로 산출되었다. Probit 통계법으로 도출한 48시간 LC₅₀은 PFOA와 PFOS가 각각 73.9 mg/L와 27.7 mg/L로 나타났다. 따라서 상기 두 물질의 독성을 비교했을 때 PFOS가 PFOA 보다 급성독성이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 본 시험에서 산출된 독성값

Table 1. Toxicity values of PFOA and PFOS to *Moina macrocopa*

Toxicity (End-points)	Toxicity values	PFOA (mg/L)	PFOS (mg/L)
Acute toxicity (Mortality)	24 hr-LC ₅₀	226.4	73.4
	48 hr-LC ₅₀	73.9	27.7
Chronic toxicity (Fecundity)	10d-NOEC	12.0	4.6
	10d-LOEC	24.1	9.3
	10d-EC ₅₀	19.6	11.6

을 다른 물벼룩류인 *Daphnia magna* 종과 비교했을 때 독성값은 유사하거나 민감한 수준으로 나타났다. PFOS의 경우 *D. magna*는 유영저해에 대한 48h-EC₅₀이 27 mg/L로서 *M. macrocopa*에서와 거의 일치하는 독성값을 보였으며, PFOA에 의한 *D. magna*에서의 48h-EC₅₀은 480 mg/L로서 *M. macrocopa*가 *D. magna*에 비해 민감한 것으로 나타났다(Boudreau et al., 2003a, b). 한편, 과거 연구 보고에 따르면, 어류에서의 PFOA 또는 PFOS에 의한 독성은 어종에 따라 감수성 차이가 나타났으며, 따라서 이 물질들에 대한 물벼룩류와 어류간의 정확한 민감성 비교는 어려웠다(Martin et al., 2003).

한편, 10일간 노출한 만성독성에서 나타난 영향 수준을 도출한 결과, PFOA의 치사영향에 대한 NOEC는 12.0 mg/L이었으며, LC₅₀은 22.3 mg/L로 산출되었다. PFOS의 경우, NOEC는 4.6 mg/L, LC₅₀은 10.0 mg/L로 나타남에 따라 10일 간의 만성노출 역시 급성노출에서와 마찬가지로 PFOS의 독성이 PFOA 보다 다소 높은 경향을 나타내었다. 아치사 영향으로서 생식능 변화에 대한 NOEC와 LOEC를 산출한 결과, PFOA에 노출된 *M. macrocopa* 모체에서 태어난 신생 개체수는 12.0 mg/L 농도 이하에서는 대조군과 유의한 차이가 없었으며, 따라서 NOEC는 12.0 mg/L, LOEC는 24.1 mg/L로 나타났다. 그러나 24.1 mg/L의 PFOA 농도에서는 대조군과 비교해 50% 이하로 생식능이 급격히 감소함에 따라 보다 정확한 LOEC를 도출하기 위해서는 이 보다 낮은 농도에서의 추가 시험 필요성이 제기되었다. PFOS에 노출된 *M. macrocopa* 모체에서 태어난 신생 개체수는 4.6 mg/L 이하에서는 대조군과 유의한 차이가 없었으며, 따라서 NOEC는 4.6 mg/L, LOEC는 9.3 mg/L로 나타났다. 과거 *D. magna*에서 수행된 PFOS에 의한 21일 만성독

성 시험에서 산출된 생식능에 대한 NOEC인 12 mg/L와 비교했을 때 만성노출에서는 *M. macrocopa*가 민감한 것으로 나타났다 (Brook *et al.*, 2004). Probit 통계로 산출된 생식능에 대한 10d-EC₅₀은 PFOA와 PFOS에서 각각 19.6 mg/L와 11.6 mg/L로 산출되었는데 생식능에 대한 독성 역시 PFOS가 높게 나타났으나 앞서 언급한 급성독성에서의 EC₅₀과 비교했을 때 두 물질 간의 차이는 상대적으로 적게 나타났다. 한편, 만성독성 시험에서 산출된 독성값에 대해 안전계수 (safety factor) 100을 적용하여 예측무영향농도(PNEC)를 계산하였는데 그 결과, 아치사 영향인 생식능 장애에 대한 PNEC는 PFOA와 PFOS 각각 0.12 mg/L와 0.05 mg/L로 도출되었다.

본 시험에서 사용된 *M. macrocopa*는 현재 국제적으로 독성시험에 널리 사용되는 *D. magna* 물벼룩과 비교해 크기가 매우 작아 관찰 시 어려움이 따르는 단점이 있으나, 생활사가 *D. magna*에 비해 짧고, 사육이 어렵지 않으며, 번식력이 높아 수계 중 환경오염물질의 독성을 평가하는데 있어 유용한 생물종이라고 판단된다. 또한 *D. magna*와는 달리 *M. macrocopa*는 국내 환경 중에 서식하는 생물로서 실험실 내에서 이루어지는 독성시험 뿐만 아니라 여기서 생산되는 독성값을 활용해 국내 환경에 적합한 환경 위해성평가를 시도할 수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 *M. macrocopa*를 시험종으로 사용하는 생태독성 시험지침을 개발하고, 아울러 *M. macrocopa* 외에도 국내 수계에 널리 서식하는 물벼룩류를 독성시험종으로 개발하는 연구를 병행할 필요가 있다. 이러한 연구들이 성공적으로 이루어질 경우, 국내 수계 중에 배출되거나 잔류성이 높은 유해화학물질의 유해성 평가와 이를 토대로 한 환경 위해성평가를 수행하는데 있어 효과적인 생물모델을 확보할 수 있을 것으로 본다.

결 론

과불화화합물 (Perfluorinated chemicals) 가운데 생태계 및 인체 대한 위해성이 우려되는 PFOA (Perfluorooctanoic acid)와 PFOS (Perfluorooctane sulfonate)의 급·만성 독성을 담수산물벼룩류인 *Moina macrocopa*를 이용하여 평가하였다. 48시간

급성독성에서는 치사영향을 종말점 (end-points)으로 하여 PFOA와 PFOS에 의한 반수치사농도 (48-LC₅₀)가 각각 73.9 mg/L와 27.7 mg/L로 산출되었다. 비록 두 물질 모두 급성독성은 높지 않았으나, PFOS의 급성독성이 PFOA에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 한편, 10일 간 노출한 만성독성 시험에서는 사망률과 더불어 생식능에 대한 아치사 영향을 관찰하였다. 생식능 영향은 PFOA와 PFOS에 농도별로 노출한 *M. macrocopa*를 모체에서 10일 간 생산된 신생 개체수 (offspring)를 측정함으로써 평가하였다. 그 결과, PFOA의 경우 24.1 mg/L, PFOS에서는 9.3 mg/L 이상의 농도에서 유의적인 생식능 감소가 나타났으며, 따라서 무영향 관찰농도 (NOEC)는 PFOA와 PFOS에서 각각 12.0 mg/L과 4.6 mg/L로 산출되었다. 결론적으로 본 시험에서 사용된 *M. macrocopa*는 생활사가 짧고, 과불화화합물에 대한 감수성 또한 *Daphnia magna*에 비해 유사하거나 높은 것으로 나타나 환경오염물질의 독성을 평가하는데 있어 유용한 생물종이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 독성시험에 협조해 주신 (주) 네오엔비즈 환경안전연구소에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Begley TH, White K, Honigfort P, Twaroski ML, Neches R and Walker RA. Perfluorochemicals: potential sources of and migration from food packaging, Food Addit Contam 2005; 22(10): 1023-1031.
- Boudreau TM, Sibley PK, Mabury SA, Muir D and Solomon KR. Laboratory evaluation of the toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on *Selenastrum capricornutum*, *Chlorella vulgaris*, *Lemna gibba*, *Daphnia magna* and *Daphnia pulicaria*, Arch Environ Contam Toxicol 2003a; 44: 307-313.
- Boudreau TM, Wilson CJ, Cheong WJ, Sibley PK, Mabury SA Muir D and Solomon KR. Response of the zooplankton community and environmental fate of perfluorooctane sulfonic acid in aquatic microcosms, Environ Toxicol Chem 2003b; 22(11): 2739-2745

- Brook D, Footitt A and Nwaogu TA. Environmental risk evaluation report: PFOS. UK Environmental Agency 2004.
- EC. European Union Risk Assessment Report, Bis (penta-bromodiphenyl) ether. European Commission, Joint Research Centre, EUR 20402 EN: 2002.
- Garcia GG, Nandini S and Sarma SS. Effect of cadmium on the population dynamics of *Moina macrocopa* and *Macrothrix triserialis* (Cladocera), Bull Environ Contam Toxicol 2004; 72(4): 717-724.
- Hoff PT, Van de Vijver K, Van Dongen W, Esmans EL, Blust R and De Coen WM. Perfluorooctane sulfonic acid in bib (*Trisopterus luscus*) and plaice (*Pleuronectes platessa*) from the Western Scheldt and the Belgian North Sea: distribution and biochemical effects, Environ Toxicol Chem 2003a; 22(3): 608-614.
- Hoff PT, Van Dongen W, Esmans EL, Blust R and De Coen WM. Evaluation of the toxicological effects of perfluorooctane sulfonic acid in the common carp (*Cyprinus carpio*), Aquatic Toxicol 2003b; 62: 349-359.
- Inoue K, Okada F, Ito R, Kato S, Sasaki S, Nakajima S, Uno A, Saijo Y, Sata F, Yoshimura Y, Kishi R and Nakazawa H. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and related perfluorinated compounds in human maternal and cord blood samples: assessment of PFOS exposure in a susceptible population during pregnancy, Environ Health Perspect 2004; 112(11): 1204-1207.
- Karrman A, van Bavel B, Jarnberg U, Hardell L and Lindstrom G. Perfluorinated chemicals in relation to other persistent organic pollutants in human blood, Chemosphere 2006; 64(9): 1582-1591.
- Martin JW, Mabury SA, Solomon KR and Muir D. Dietary accumulation of perfluorinated acids in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), Environ Toxicol Chem 2003; 22(1): 189-195.
- Mawn MP, McKay RG, Ryan TW, Szostek B, Powley CR and Buck RC. Determination of extractable perfluorooctanoic acid (PFOA) in water, sweat simulant, saliva simulant, and methanol from textile and carpet samples by LC/MS/MS, Analyst 2005; 30(5): 670-678.
- Nakayama S, Harada K, Inoue K, Sasaki K, Seery B, Saito N and Koizumi A. Distributions of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Japan and their toxicities, Environ Sci 2005; 12(6): 293-313.
- OECD. Hazard Assessment of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and its Salts. ENV/JM/RD (2002)17/FINAL. Perfluoroalkylated Substances-Aquatic Environmental Assessment, RIKZ and University of Amsterdam. Report RIKZ/2002.043, 2002.
- Peden-Adams MM, EuDaly JG, Dabra S, EuDaly A, Heesemann L, Smythe J and Keil DE. Suppression of humoral immunity following exposure to the perfluorinated insecticide sulfluramid, J Toxicol Environ Health A 2007; 70(13): 1130-1141.
- Renner R. Perfluorinated chemicals in blood, Environ Sci Technol 2006; 40(7): 2128-2134.
- Renner R. Concerns over common perfluorinated surfactant, Environ Sci Technol 2003; 37(11): 201-202.
- Saito N, Sasaki K, Nakatome K, Harada K, Yoshinga T and Koizumi A. Perfluorooctane sulfonate concentrations in surface water in Japan, Arch Environ Contam Toxicol 2003; 45: 149-158.
- Sasaki K, Harada K, Saito N, Tsutsui T, Nakanishi S, Tsuzuki H and Koizumi A. Impact of airborne perfluorooctane sulfonate on the human body burden and the ecological system, Bull Environ Contam Toxicol 2003; 71: 408-413.
- US EPA. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms, 5th ed. EPA Office of water (4303T) 2002.