

*Daphnia magna*를 이용한 과불화화합물의 독성평가

김경태, 조재구, 윤준현, 이철우, 최경희, 김현미, 류지성*

국립환경과학원 위해성평가과

Toxicity Evaluation of Perfluorinated Compounds Using *Daphnia magna*

Kyung-Tae Kim, Jae-Gu Cho, Junheon Yoon, Chulwoo Lee, Kyunghee Choi,
Hyun-Mi Kim and Jisung Ryu*

Risk Assessment Divison, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and Perfluorooctanoic acid (PFOA) are the principal chemicals known as perfluoroalkyl acids (PFAs). Despite the widespread use of these compounds, relatively little is known about their fate and effects. The purpose of this study was to determine the toxic effects of PFOS and PFOA on *Daphnia magna*. In the acute toxicity test, *D. magna* were exposed for 48 hours at concentrations of 0, 30, 45, 67.5, 101.25 and 151.88 mg/L PFOS, and 0, 100, 160, 225, 337.5 and 506.25 mg/L PFOA, respectively. In the case of chronic toxicity test, *D. magna* were exposed through water for 21 days at concentrations of 0, 0.375, 0.75, 1.5, 3 and 6 mg/L PFOS, and 0, 1.25, 2.5, 5, 10 and 20 mg/L PFOA, respectively. Acute toxicity was assessed on the basis of immobility, while chronic toxicity was assessed on the basis of fecundity. The acute toxicity test on PFOS and PFOA showed that the values of EC₅₀ were 50.90 mg/L and 253.47 mg/L, respectively. In the chronic test, fecundity was reduced significantly at 1.5 mg/L of PFOS and 10 mg/L of PFOA, respectively. These results indicated that PFOS is more toxic to zooplankton than PFOA, and both chemicals have some hazard demonstrates risk for acute or chronic toxicity to freshwater organism.

Key words : Perfluorooctane sulfonic acid, Perfluorooctanoic acid, *Daphnia magna*, Immobility, Fecundity

서 론

과불화화합물(Perfluorinated chemicals)은 생활용품 중 화학물질, 의약품과 더불어 현재 환경 분야에

접수일: 2010년 3월 3일, 채택일: 2010년 6월 1일

*To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-32-560-7127, Fax: +82-32-560-7979

E-mail: jsgood4u@korea.kr

서 가장 논란이 되고 있는 환경오염물질 중 하나로 꼽힌다. 과불화화합물은 소수성을 지닌 탄소 8개로 구성된 사슬이 불소 분자와 함께 친수성을 지닌 머리에 붙어있는 형태를 취하고 있으며, 화학적으로 안정하여 표면제, 윤활유, 광택제, 음식포장용기, 종이, 섬유코팅제, 금속도금 등 상업적으로 다양하게 사용되고 있다(Sanderson *et al.*, 2003, 2004; Shin *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010). 그러나 많은 제품에서

첨가제로 사용되는 특성 때문에 사용량과 환경으로 배출되는 양을 집계하는 것이 매우 어렵다. 과불화화합물 중 대표적인 물질인 PFOS(perfluorooctane sulfonic acid)와 PFOA(perfluorooctanoic acid)는 일회용품, 코팅용기, 테플론 용기, 방수제 등 생활용품의 사용과정과 소방제의 살포 등의 경로를 통해서 환경으로 유입된다. 비록 환경 중에서 이 물질들의 잔류농도는 ng/L(ppb) 혹은 그 이하로 나타나지만 장기적으로 노출되면 수생태계에 미치는 영향을 무시할 수 없다(Shin *et al.*, 2009). 특히 PFOS와 PFOA가 환경 중 또는 생물체 내에서 오랜 기간 잔류 또는 축적됨에 따라 내분비계장애를 유발할 수 있다는 우려도 제기되고 있다(Peden-Adams *et al.*, 2007). PFOS 및 PFOA는 고농도로 장기간 노출 시 설치류 및 어류에 간독성을 유발할 수 있는 것으로 보고되었으며(Kennedy *et al.*, 2004; Hagenars *et al.*, 2008), 암을 유발할 우려가 있으나 인체에서의 발암성 증거는 아직까지 밝혀져 있지 않은 상태다(Apelberg *et al.*, 2007).

PFOS 및 PFOA에 대한 독성시험은 다양한 생물종을 이용해서 이루어지고 있지만, PFOS와 PFOA의 환경에 대한 영향을 평가하기 위해서는 설치류 이외에도 수계, 저질 또는 토양에 서식하는 생물, 즉 어류, 무척추동물류, 지렁이, 조류 등의 다양한 생물종에 대한 유해성 자료가 더욱더 필요하다(Hoff *et al.*, 2003; Colombo *et al.*, 2008).

이에 따라, 본 연구에서는 PFOS와 PFOA가 수생태계에 미치는 영향을 평가하기 위한 하나의 수단으로 OECD 공시시험종인 *D. magna*를 사용하여 독성시험을 수행하였다. *D. magna*는 짧은 생활사를 가지고 있으며, 번식력이 좋고, 담수 먹이연쇄에서 중요한 위치를 차지하고 있는 동물성 플랑크톤 집단을 대표한다. 또한 크기가 작아 취급하기 편리하고 실내사육도 용이할 뿐만 아니라, 다른 무척추동물에 비해 화학물질에 대한 독성 민감도가 높기 때문에 생태독성 시험에 적합하여 많이 이용된다(Mark and Solbe, 1998; Kim *et al.*, 2004).

본 연구에서는 과불화화합물인 PFOS와 PFOA가 *D. magna*에 미치는 급성 및 만성 독성을 평가하였다. 급성독성의 영향으로는 48시간 동안 노출한 후 유영저해를 관찰하였고, 만성독성이 경우는 21일간 노출에 따른 생식능력에 대한 영향을 관찰하였다.

재료 및 방법

1. 시험생물

시험생물로는 담수산 물벼룩인 *D. magna*를 사용하였다. 시험용 *D. magna*의 사육은 국립환경과학원 환경독성연구동에서 수온 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 조도 850 Lux, 광주기 16/8 h(명/암) 조건으로 OECD 시험방법 202에서 제시한 M4배지를 이용하여 배양하였으며, 먹이로는 녹조류인 *Chlorella vulgaris*를 1×10^6 cells/mL 공급하였다. 급성독성과 만성독성 시험에 사용된 *D. magna*는 3회 이상 어린개체를 생산한 산란용 어미로부터 얻은 개체 가운데 생후 24시간 미만의 어린 개체만을 선별하여 이용하였다.

2. 시험물질의 조제

시험물질로는 perfluorooctane sulfonic acid (PFOS, Wako co. Japan)와 perfluorooctanoic acid (PFOA, Sigma-Aldrich co. USA)를 사용하였다. 시험물질 농축액은 시험물질을 배양액에 용해시켜 준비하였으며, 재차 배양액으로 희석하여 시험용액을 조제하였다. 본 연구의 시험물질의 농도는 과불화화합물의 수용해도(PFOS: 680 mg/L, PFOA: 3.4 g/L)내에서 설정하였으며(3M, 2003; US EPA, 2003), 화학적으로 안정하여 단기간에 수중에서의 농도 변화가 거의 없을 것으로 예측되어 설정농도를 기반으로 하여 수행하였다(Huang *et al.*, 2010). 또한 농도 설정 시험을 급·만성 각각 두 번 실시하여 본 시험에서의 농도범위를 설정하였다.

3. 급성독성 시험

각 농도별로 준비된 시험용액을 플라스틱용기(PP재질)에 50 mL씩 첨가한 후, 각 용기마다 *D. magna* 5마리씩 노출하였으며, 각 농도별로 4개의 반복구를 두어 시험 농도당 20마리의 *D. magna*를 노출하였다. 시험물질의 농도는 PFOS의 경우 0, 30, 45, 67.5, 101.25, 151.88 mg/L, PFOA의 경우 0, 100, 160, 225, 337.5, 506.25 mg/L로 설정하였다. 시험조건(수온, 조도, 광주기)은 배양조건과 동일하게 실시하였으며, 지수식으로 시험하였다. 시험기간 동안 시험용액의 교환과 폭기는 하지 않았으며, 먹이는

공급하지 않았다. 총 노출시간은 48시간이었으며, 24시간과 48시간 후에 노출중인 개체를 관찰하여 유영저해 여부를 개체별로 관찰하였다. 유영저해의 판단은 용기를 살짝 흔든 후, 약 15초 후에 관찰하여 일부기관(촉각, 후복부 등)은 움직이나 유영하지 못할 경우 유영저해로 판단하였다(US EPA, 2002; OECD, 2004). 반수영향농도(EC₅₀)의 산출은 US EPA에서 제공하는 probit 통계법을 사용하였다.

4. 만성독성 시험

각 농도별로 준비된 시험용액을 플라스틱용기에 50 mL씩 첨가한 후, 각 용기마다 *D. magna*를 1마리씩 노출하였으며, 각 농도별로 10개의 반복구를 두어 시험 농도 당 10마리의 *D. magna*를 노출하였다. 시험물질의 농도는 급성독성 시험 결과를 기반으로 EC₁₀의 농도를 최고 농도로 설정하여 실험을 수행하였다. PFOS의 경우 0, 0.375, 0.75, 1.5, 3, 6 mg/L, PFOA의 경우 0, 1.25, 2.5, 5, 10, 20 mg/L로 공비를 2로 설정하여 결정하였다. 시험조건(수온, 조도, 광주기)은 배양조건과 동일하게 실시하였다. 반지수식으로 시험하였으며, 2일에 한번 시험용액을 전량 교환하였으며, 먹이는 매일 *Chlorella vulgaris*를 1 × 10⁵ cells/mL의 밀도로 공급하였다(Koivisto, 1995; Kim *et al.*, 2006). 총 노출기간은 21일이었고, 24시간 마다 노출 중인 각각의 어미개체로부터 태어난 신생개체수를 계수하였으며, 시험 중 사망한 어미개체도 계수하였다. 어미개체로부터 태어난 신생개체는 계수 후 시험용기로부터 즉시 제거 하였다. 21일 동안 노출 후 Dunnett 통계법을 이용하여 무영향관찰농도(NOEC)와 최소영향관찰농도(LOEC)값을 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 급성독성

급성독성시험에서는 유영저해를 종말점으로 하여 급성적 영향정도를 조사하였다. PFOS에 급성 노출된 *D. magna*는 24시간 후 45 mg/L 이하의 농도에서는 유영저해가 관찰되지 않았으나, 67.5 mg/L부터 유영저해가 나타나기 시작하였다. 본시험의 최고농도인 151.875 mg/L에서는 24시간 후 모든 개체가

움직임이 전혀 없어 유영저해 또는 사망한 것으로 관찰되었다. 48시간 후 유영저해를 측정된 결과, 최저 농도인 30 mg/L는 유영저해가 관찰되지 않았으나, 45 mg/L 이상의 농도에서 유영저해율이 30% 수준으로 관찰되기 시작했으며, 67.5 mg/L에서 유영저해율이 90%, 101.25 mg/L이상에서 100%의 유영저해를 나타내 전형적인 용량-반응 양상을 나타내었다(Fig. 1).

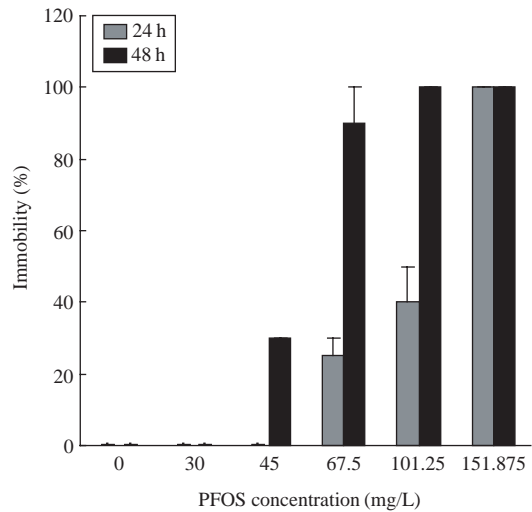


Fig. 1. Acute toxicity of PFOS to *D. magna*.

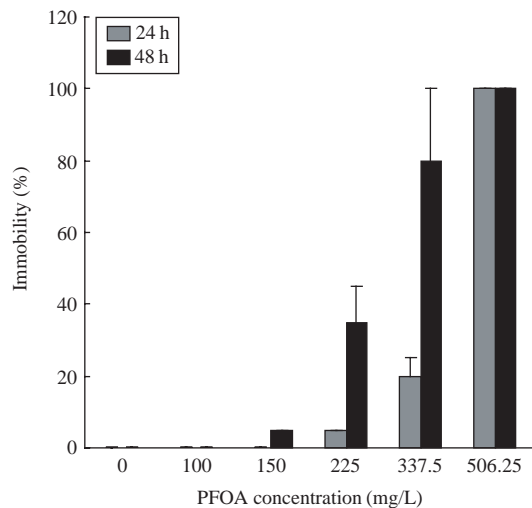


Fig. 2. Acute toxicity of PFOA to *D. magna*.

PFOA에 급성 노출된 *D. magna*는 24시간 후 150 mg/L까지는 유영저해가 관찰되지 않았으나, 225.0 mg/L부터 유영저해가 나타나기 시작하였다. 본시험의 최고농도인 506.25 mg/L에서는 24시간 후 모든 개체가 움직임이 전혀 없어 유영저해 또는 사망한 것으로 관찰되었다. 48시간 후 유영저해를 측정된 결과, 최저 농도인 100 mg/L에서는 유영저해가 관찰되지 않았으나, 150 mg/L 이상의 농도에서 유영저해가 관찰되기 시작했으며, 225 mg/L에서 유영저해율이 35%, 337.5 mg/L에서는 80%, 506.25 mg/L에서 100%의 유영저해를 나타내 PFOA의 경우 역시 전형적인 용량-반응 양상을 나타내었다(Fig. 2).

영향수준은 반수영향농도(EC₅₀), 무영향관찰농도(NOEC) 및 최소영향관찰농도(LOEC)값으로 산출하였으며 그 결과 값은 Table 1과 같다(Table 1). Probit 통계법으로 산출한 48시간 EC₅₀은 PFOS와 PFOA 각각 50.90 mg/L와 253.47 mg/L로 산출되었다. 급성 독성 48시간 독성영향에 대한 NOEC는 PFOS와

PFOA 각각 30 mg/L와 100 mg/L이며, LOEC는 45 mg/L와 150 mg/L로 각각 나타났다. 따라서 두 물질을 비교했을 때 PFOS가 PFOA 보다 급성독성이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 본 연구결과는 *D. magna*를 이용한 기존 연구에서도 유사하게 보고되었다. 하지만 PFOS에 대한 담수어종의 96시간 LC₅₀ 결과를 보면 Fathead minnow 9.5 mg/L, Bluegill sunfish 6.9 mg/L, Rainbow trout 7.8 mg/L로 *D. magna* 보다 PFOS에 더 민감하게 반응하였다(UK, 2004). 또한 *D. magna*와 같은 담수산 물벼룩인 *Moina macrocopa*를 이용한 연구에서 48시간 급성 독성에서 치사영향을 종말점으로 하였을 때 PFOS와 PFOA의 48-LC₅₀가 각각 27.7 mg/L와 73.9 mg/L로 나타났고(Lee *et al.*, 2007), 또 다른 연구에 따르면 17.95, 199.51 mg/L로 각각 보고 되었다(Ji *et al.*, 2009). 따라서 이 결과와 비교하였을 때 *D. magna*는 *M. macrocopa* 보다는 PFOS와 PFOA에 대한 민감도가 낮은 것으로 판단된다.

Table 1. Results of acute toxicity test with *D. magna* exposed to PFOS and PFOA

Chemicals	Exposure duration (hour)	EC ₅₀ (mg/L) (95% Confidence interval)	NOEC (mg/L)	LOEC (mg/L)
PFOS	24	94.32 (83.32 ~ 107.28)*	45	67.5
	48	50.90 (45.86 ~ 56.49)*	30	45
PFOA	24	336.23 (330.44 ~ 406.26)*	150	225
	48	253.47 (224.43 ~ 286.40)*	100	150

*values represent 24 h and 48 h-EC₅₀ with 95% confidence intervals in parentheses

Table 2. Results of 21 days chronic toxicity test with *D. magna* exposed to PFOS and PFOA

Chemicals	Nominal concentration (mg/L)	Adult survival (%)	Days to First Brood	Total number of Young per Adult	Number of Young per Brood	Growth (mm)
PFOS	Control	100	7.70 ± 0.67 ^a	70.30 ± 4.00	14.06 ± 1.65	3.33 ± 0.04
	0.375	100	7.90 ± 0.88	69.10 ± 2.28	13.82 ± 1.67	3.32 ± 0.04
	0.75	100	8.20 ± 0.42	67.90 ± 2.77	13.58 ± 1.23	3.29 ± 0.04
	1.5	90	8.44 ± 0.53*	66.56 ± 1.13*	13.31 ± 1.31*	3.23 ± 0.10*
	3	80	9.63 ± 0.74*	49.25 ± 2.38*	9.85 ± 1.21*	3.13 ± 0.08*
	6	80	10.63 ± 0.74*	34.13 ± 2.59*	6.83 ± 1.15*	3.00 ± 0.09*
PFOA	Control	100	7.50 ± 0.53	66.00 ± 2.31	13.20 ± 1.14	3.23 ± 0.09
	1.25	100	7.70 ± 0.67	65.90 ± 1.37	13.18 ± 1.60	3.22 ± 0.06
	2.5	100	8.50 ± 0.53*	64.40 ± 2.37	12.88 ± 1.49	3.22 ± 0.05
	5	100	8.90 ± 0.74*	63.50 ± 3.06	12.70 ± 1.33*	3.21 ± 0.09
	10	100	9.40 ± 0.84*	61.10 ± 1.85*	12.22 ± 1.04*	3.19 ± 0.11
	20	90	9.89 ± 0.60*	50.33 ± 2.35*	10.07 ± 1.63*	3.16 ± 0.13

^amean ± standard deviation, *significant (p < 0.05) difference from the control daphnids

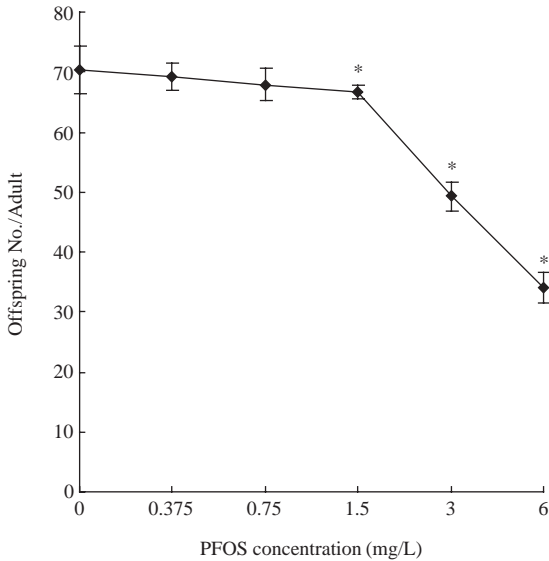


Fig. 3. Fecundity of *D. magna* exposed to PFOS for 21 days. mean \pm standard deviation, *significant ($p < 0.05$) difference from the control daphnids.

2. 만성독성

만성독성시험에서의 종말점은 어미개체에서 생산된 신생개체수를 기준으로 한 생식능 장애를 나타내는 영향농도를 종말점으로 하였다. 만성독성 시험 기간 동안 고농도의 PFOS와 PFOA 노출군에서 어미개체 가운데 일부가 사망하였다. PFOS의 경우 1.5 mg/L부터 10% 이상의 사망률이 관찰되었으며, PFOA의 경우 최고 농도인 20 mg/L에서 10%의 사망률이 관찰되었다 (Table 2).

PFOS에 노출된 어미개체로부터 생산된 신생 개체수는 0.75 mg/L 이하의 농도에서는 대조군과 유의한 차이를 보이지 않았으나, 1.5 mg/L 이상의 농도에서는 대조군에 비해 상대적으로 신생개체수가 감소하였다. 특히 본 시험의 최고 농도인 6 mg/L에서는 대조군의 절반 수준 이하로 신생개체수가 급격하게 감소하였다 (Fig. 3). 첫 부화일은 1.5 mg/L부터 농도가 높을수록 점차 늦어지는 경향을 보였다. 또한 0.75 mg/L부터 어미개체의 성장정도가 대조군에 비해 낮은 것을 알 수 있었다.

한편, PFOA에 노출된 어미개체로부터 생산된 신생 개체수는 5 mg/L 농도 이하에서는 대조군과 유의한 차이가 없었으나, 10 mg/L 이상의 농도에서는 대

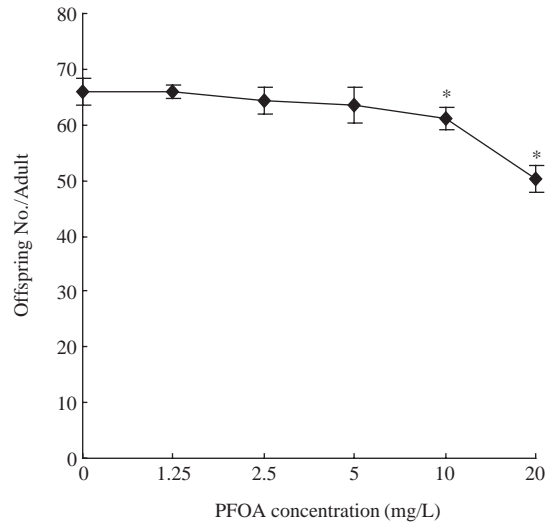


Fig. 4. Fecundity of *D. magna* exposed to PFOA for 21 days. mean \pm standard deviation, *significant ($p < 0.05$) difference from the control daphnids.

Table 3. Results of chronic toxicity test with *D. magna* exposed to PFOS and PFOA

Toxicity (End-point)	Toxicity values	PFOS (mg/L)	PFOA (mg/L)
Chronic toxicity (Fecundity)	21d-NOEC	0.75	5
	21d-LOEC	1.5	10

조군과 유의한 차이로 감소하였다 (Fig. 4). 또한 첫 부화일은 2.5 mg/L 농도부터 대조군에 비교하여 상대적으로 농도가 높을수록 시기가 늦어지는 것을 알 수 있었다.

21일 동안의 PFOS의 경우 NOEC는 0.75 mg/L이며, LOEC는 1.5 mg/L로 산출되었다. 또한 PFOA는 NOEC 5 mg/L, LOEC 10 mg/L로 각각 산출되었다 (Table 3). 따라서 상기 두 물질의 독성을 비교했을 때 앞서 언급한 급성독성시험과 같이 PFOS가 PFOA보다 독성이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 이용한 물벼룩과 다른 담수어류인 Fathead minnow의 PFOS에 대한 42일간 생존에 대한 NOEC는 0.3 mg/L로 보고되었다 (UK, 2004). 또한 *M. macrocopa*를 이용한 연구결과에 따르면 어미개체에서 10일간 생산된 신생 개체수를 측정하는 시험에서, PFOS의 경우 9.3 mg/L, PFOA에서는

24.1 mg/L 이상의 농도에서 유의적인 생식능 감소가 나타났고 NOEC는 PFOS와 PFOA에서 각각 4.6 mg/L과 12.0 mg/L로 산출되었다고 보고되었다(Lee et al., 2007). 이러한 결과와 비교해 보면 만성독성은 급성독성 결과와 다르게 *D. magna*가 *M. macrocopa*에 비해 PFOS와 PFOA의 만성독성에 대한 민감도가 높은 것으로 나타났다.

2007년 우리나라 잔류실태 조사 결과 4대강 하천 수 PFOS 농도는 1.2~10.3 ng/L이며, PFOA 농도는 1.5~14.1 ng/L로 조사되었다(국립환경과학원, 2008). 이러한 환경 중 농도와 이번 연구결과를 비교해 보면 본 연구에서 과불화화합물의 전반적인 생태독성은 높지 않은 것으로 판단되며, 환경 중 수계 위해도 역시 높지 않은 것으로 사료된다.

결 론

과불화화합물 중 생태계 및 인체 대한 위해성이 우려되는 PFOS와 PFOA의 급·만성 독성을 담수 산 물벼룩류인 *D. magna*를 이용하여 평가하였다. 48 시간 급성독성에서는 유영저해를 종말점으로 하여 PFOS와 PFOA에 의한 48h-EC₅₀이 각각 50.90 mg/L와 253.47 mg/L로 산출되었다. 비록 두 물질 모두 급성독성은 높지 않았으나, 다른 선행연구와 마찬가지로 PFOS의 급성독성이 PFOA에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 또한 21일 간 노출한 만성독성 시험에서는 생존율과 더불어 생식능에 대한 아치사 영향을 관찰하였다. 그 결과, PFOS의 경우 1.5 mg/L, PFOA에서는 10 mg/L 이상의 농도에서 유의적인 생식능 감소가 나타났으며, NOEC는 PFOS와 PFOA에서 각각 0.75 mg/L과 5 mg/L로 산출되었다. 현재 우리나라 하천에서 검출되는 PFOS, PFOA 농도와 비교하면 이번 시험에서 얻어진 만성 NOEC, LOEC 값은 매우 높으므로 당장 환경 중 생태위해성은 높지 않다고 할 수 있다. 그러나 과불화화합물에 대한 생태독성연구는 현재까지 매우 제한적이었으며, 환경 중 노출평가 역시 많은 자료가 있지 않다는 사실을 고려하면, 전체적인 전국 평균의 위해도 보다는 향후 배출량이 높은 특정지역에서 위해성 평가가 필요해질 개연성이 있다. 또한 환경보건법에서 생태위해성평가를 포함하고 있는 만큼 이번 연구는 앞으로 우리나라에서 수행될 생태위해성

평가에서 먹이사슬 단계의 중요 독성자료로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원. '과불화화합물의 환경위해성평가(II)' 연구사업 보고서. 2008.
- 3M Company. Environmental and Health Assessment of perfluorooctane sulfonate and its salts, 2003.
- Apelberg BJ, Goldman LR, Calafat AM, Herbstman JB, Kuklennyik Z, Heidler J, Needham LL, Halden RU and Witter FR. Determinants of fetal exposure to polyfluoroalkyl compounds in Baltimore, Maryland, Environ Sci Technol 2007; 41(11): 3891-3897.
- Colombo I, Wolf WD, Thompson RS, Farrar DG, Hoke RA and L'haridon J. Acute and chronic aquatic toxicity of ammonium perfluorooctanoate (APFO) to freshwater organisms, Ecotoxicol Environ Saf 2008; 71(3): 749-756.
- Hagenaars A, Knapen D, Meyer IJ, van der Ven K, Hoff P and De Coen W. Toxicity evaluation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in the liver of common carp (*Cyprinus carpio*), Aquat Toxicol 2008; 88(3): 155-163.
- 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*), Aquat Toxicol 2003; 62(4): 349-359.
- Huang H, Huang C, Wang L, Ye X, Bai C, Simonich MT, Tanguay RL and Dong Q. Toxicity, uptake kinetics and behavior assessment in zebrafish embryos following exposure to perfluorooctanesulphonic acid (PFOS), Aquat Toxicol 2010; 98(2): 139-147.
- Ji KH, Kim YH, Oh SR, Ahn BW, Jo HY and Choi KH. Toxicity of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid on freshwater macroinvertebrates (*Daphnia magna* and *Moina macrocopa*) and fish (*Oryzias latipes*), Environ Toxicol Chem 2008; 27(10): 2159-2168.
- Kennedy GL Jr, Butenhoff JL, Olsen GW, O'Connor JC, Seacat AM, Perkins RG, Biegel LB, Murphy SR and Farrar DG. The toxicology of perfluorooctanoate, Crit Rev Toxicol 2004; 34(4): 351-384.
- Kim BS, Park YK, Shin JS, Kim JH and Ahn YJ. Effect of algae on chronic assessment endpoints observed with Korean freshwater cladocerans, Korean J Pestic Sci 2004; 8(2): 117-128.
- Kim BS, Park YK, Park KH, Kim JK, Shin JS, Kim JH, Yoon SM and Ahn YJ. Selection of optimal culture media for developing standard ecological toxicity test methods using

- korean freshwater cladocera, Korean J Pestic Sci 2006; 10(3): 189-195.
- Koivisto S. Is *Daphnia magna* an ecologically representative zooplankton species in toxicity tests?, Environ Pollut 1995; 90(2): 263-267.
- Lee CW, Kim HM and Choi KH. Toxicity assessment of PFOA and PFOS using freshwater flea *Moina macrocopia*. J. Environ Toxicol 2007; 22(3): 271-277.
- Mark U and Solbe J. Analysis of the ecetoc aquatic toxicity (EAT) database V-The relevance of *Daphnia magna* as a representative test species, Chemosphere 1998; 36(1): 155-166.
- OECD. *Daphnia* sp., Acute immobilisation test, OECD guideline for testing of chemicals, 2004; No. 202.
- 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.
- Sanderson H, Boudreau TM, Mabury SA and Solomon KR. Impact of perfluorooctanoic acid on the structure of the zooplankton community in indoor microcosms, Aquat Toxicol 2003; 62(3): 227-234.
- Sanderson H, Boudreau TM, Mabury SA and Solomon KR. Effects of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid on the zooplanktonic community, Ecotoxicol Environ Saf 2004; 58(1): 68-76.
- Shin MY, Im JK, Kho YL, Choi KS and Zoh KD. Quantitative determination of PFOA and PFOS in the effluent of sewage treatment plants and in Han river, J Env Hlth Sci 2009; 35(4): 334-342.
- UK. Environmental risk evaluation report: Perfluorooctane-sulphonate (PFOS), Environment Agency 2004.
- US EPA. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms, US EPA 2002; 5th edition.
- US EPA. Preliminary risk assessment of the developmental toxicity associated with exposure to perfluorooctanoic acid and its salts, 2003.