

## PFOS (perfluorooctane sulfonate) 노출에 따른 조간대 칠게 (*Macrophthalmus japonicus*)의 생태독성학적 관정점 제시

김원석 · 박기연 · 차밀라니 · 곽인실\*

전남대학교 해양기술학부

### Ecotoxicological End-points on Intertidal Mud Crab, *Macrophthalmus japonicus*, following PFOS (Perfluorooctane Sulfonate) Exposure

Won-Seok Kim, Kiyun Park, Chamilani Nikapitiya and Ihn-Sil Kwak\*

Department of Fisheries and Ocean Science, Chonnam National University,  
Yeosu 550-749, Korea

**Abstract** - PFOS (perfluorooctane sulfonate) is one of the perfluorinated organic compound, which persist as a residual compound in the coastal environments. Intertidal mud crab *Macrophthalmus japonicus* mainly inhabits in coastal and bay ecosystems in Indo-Pacific region including Korea and reflects to environmental changes. In the present study, *M. japonicus* were exposed to different concentrations of PFOS and various ecotoxicological end-points such as survival rate, elimination of appendages, changes of the crust and internal organ color changes were investigated. Interestingly, the PFOS exposure showed concentration-dependent decrease of survival rate. High PFOS exposure ( $30 \mu\text{g L}^{-1}$ ) showed a low survival rate of 24% at 168 hours. Further, in comparison with the controls, the rate of elimination of appendages was also considerably increased in a time dependent manner upon PFOS exposure. Notably, with progression of time, an increased exposure to PFOS, test species showed whitening effect in a concentration-dependent manner, whereas the crab crust color was unchanged in the control. In addition, change in internal organs color and their visibility (clarity) observed in PFOS exposed crabs compared to control. Taken together, we suggest, eco-toxicology end-points of *M. japonicus* exposed to PFOS gave important biological information which could be useful to identify toxic contamination in the marine benthic environments.

**Key words** : *Macrophthalmus japonicus*, perfluorooctane sulfonate, tidal ecosystem monitoring, ecotoxicology, end-point

## 서 론

과불화화합물(perfluorinated compounds, PFCs)은 계면 활성제, 윤활유, 접착제, 난연제 그리고 의학에서 널리 사용되어지고 있는 잔류성 유기오염물질의 한 종류이다

\* Corresponding author: Ihn-Sil Kwak, Tel. 061-659-7148,  
Fax. 61-659-7149, E-mail. iskwak@chonnam.ac.kr

(Renzi *et al.* 2013). 과불화화합물은 환경 중에서 쉽게 분해되지 않으며 생체 내에서는 오랫동안 잔류하기 때문에 위해성이 우려되는 물질로서 알려져 있다(Inoue *et al.* 2004). PFOS (perfluorooctane sulfonate)는 복합과불화화합물이 분해되는 과정에서 나타나는 물질의 일종으로서 환경과 생물 체내에 널리 분포하는 물질이다(Giesy and Kannan 2001). 또한, PFOS는 표층수에서 저농도로 발견되었으며(Kannan *et al.* 2005), 생물 체내에서 높은 축적률을 가지는 특징을 보였고, 여러 환경매체 및 인간의 혈중에서 상대적으로 고농도로 확인되고 있다(Martin *et al.* 2002; Stock *et al.* 2004). 2002년 OECD에서 PFOS의 유해성에 대해 조사를 수행한 결과 PFOS는 환경 중으로 노출되면 환경에 잔류하여 생물에 위해성이 나타날 수 있다고 보고되었으며(OECD 2002), 2009년 5월 스위스 제네바에서 열린 제4차 스톡홀름협약 당사국총회에서 PFOS는 규제대상물질로서 제한되었다.

PFOS는 환경잔류성으로 국내외의 먼지(Strynar and Lindstrom 2008), 토양(Higgins *et al.* 2005), 다양한 해양 환경(Yamashita *et al.* 2005; Nakata *et al.* 2006; Bossi *et al.* 2008)에서 확인되며, 우리나라 인근에 접해 있는 중국과 일본에서도 흔해한다(Zareitalabad *et al.* 2013). 국내 환경부자료에 따르면, 물에서는  $0.67 \sim 415.67 \text{ ng L}^{-1}$ 가, 퇴적물에서는  $2000.2 \text{ ng}^{-1}$ 이 나타나며 일부 산업지역에서는 다소 높은 값이 관찰되었는데 이는, 미국, 일본과는 비슷한 수치로 다소 높은 값이 보고되었다(Korea Ministry of Environment, 2007). 최근 서해연안에서 PFCs 중 PFOS의 농도가 물에서는  $0.35 \sim 47 \text{ ng L}^{-1}$ 가, 퇴적물에서는  $0.2 \sim 5.8 \text{ ng}^{-1}$ 이 나타남으로써 비교적 적은 수치가 보고되었다(Naile *et al.* 2013). PFOS는 환경 중에 잔류함이 확인되어, 직·간접적으로 인간에게까지 영향을 미칠 수 있으므로, PFOS에 대한 생태독성반응 연구의 필요성이 대두되고 있다.

칠게(*Macrophthalmus japonicus*)는 절지동물문 십각목 달랑게과에 속하며, 우리나라 포항 이북을 제외한 전 조간대 지역에서 관찰되는 종이다(Hong *et al.* 2006). 칠게는 조간대 환경에서 유기물 섭식을 통한 생태계 오염을 방지하며, 조간대 갯벌에 은신처를 만드는 행동습성으로 조간대 갯벌의 산소공급과 탄소순환에 큰 영향을 미친다(Otani *et al.* 2010). 또한, *M. japonicus*는 저서성 무척추동물로서 서식환경이 제한적이어서 조간대 환경을 가장 잘 반영할 수 있는 지표생물로서 독성노출실험이 용이하여 해양 환경모니터링에 중요하게 이용될 수 있다(Ortiz-Zarragoitia and Cajaraville 2006). 따라서, 조간대에 서식하는 *M. japonicus*는 PFOS와 같은 환경잔류 화합물

독성을 연구하기에 매우 유용한 지표생물이라고 할 수 있다.

PFOS는 혈액 중의 단백질과 결합하며(Giesy and Kannan 2001), 노출된 설치류에서는 간독성이 보고되었다(Nakayama *et al.* 2005). 송사리(*Oryzias latipes*)에서 PFOS는 성장감소와 같은 초기 성장단계와 기형발생에 영향을 준다(Fang *et al.* 2013). 또한 여러 동물 실험에서 PFOS는 간과 면역기능에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Liu *et al.* 2007; Qazi *et al.* 2009). 민꽃게(*Charybdis japonica*)는 카드뮴에 노출 되었을 때, 신진대사 기능에 차이를 보였으며(Wang *et al.* 2013), Bisphenol A와 4-Nonylphenol 노출을 통한 각 조직별 HSP70 유전자 발현에 따른 차이를 확인한 연구가 보고되었다(Park and Kwak 2013). 연구대상 종인 *M. japonicus*에 대한 연구는 미미하여 카드뮴노출에 따른 체내 축적량과 칼슘의 상관성에 대한 연구(Korea Ocean Research and Development Institute, 1992)가 보고되었으며 지금까지 PFOS와 같은 과불화화합물에 대한 생태독성연구는 국내에서 시도되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 해양저서 생물인 국내산 *M. japonicus*를 대상으로 PFOS노출에 따른 생태독성 반응을 살펴보고자 한다. PFOS노출에 따른 *M. japonicus*의 생태독성학적 반응을 파악하여, 생존율, 외부 부속지 탈락, 갑각의 색, 내장 조직 등을 관찰·분석하였다. *M. japonicus*의 물질노출에 따른 생물학적반응성을 전체적으로 살펴보고 판정점을 제시하는 것은 해양생태계 모니터링을 위해 중요한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험생물

실험생물 종으로 이용한 칠게(*Macrophthalmus japonicus*, 갑각강, 십각목, 달랑게과)는  $2 \pm 0.3 \text{ cm}$  크기로 전라남도 여수시 여자만에서 수집하였다. 수집한 *M. japonicus*는 부속지의 탈락이 없는 건강한 개로 노출전 대조군과 PFOS 노출군 유리수조에 각각 20마리의 칠게를 넣어두었으며, 오차범위를 줄이기 위하여 3반복구를 두고 시행하였다. 실험개체를 추출하는 과정과 환경변화에 따른 개체의 적응을 고려하여 실험수조로 옮긴 후 24시간 순치한 후 노출실험을 진행하였다. 순치조건은 실온  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ , 염도  $33 \pm 1\%$ , 광주기 17L:7D, 원활한 산소공급을 위하여 산소공급기를 설치하였으며 먹이는 Tetramin (Tetra-Werke, Melle, Germany)을 24시간 간격으로 0.95

±0.5 g을 공급하였다.

## 2. 노출시약 및 실험조건

노출물질인 PFOS (perfluorooctane sulfonate, Sigma-Aldrich St. Louis, MO, USA)는 수 용해도가 낮으므로, 아세톤(acetone, CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>, Kanto Chemical Co., Inc.)에 녹여 1000 mg L<sup>-1</sup> stock solution을 조제하여 사용하였다. 노출조건은 유리수조(315 mm × 450 mm)를 이용하여 7일간 수행하였으며, 노출농도는 0, 1, 10, 30 µg L<sup>-1</sup>로 설정하였다. 순치 24시간 이후 PFOS를 노출하였으며, 노출 환경은 순치조건과 마찬가지로 실온 22 ± 1°C, 염도 33 ± 1‰, 광주기 17L:7D로 설정하였으며, 산소공급기를 통하여 산소를 공급하였다.

## 3. 생물학적 판정점 측정

### 1) 생존율

PFOS에 대한 *M. japonicus*의 생존율을 조사하기 위해 노출 후 7일 동안 매일 같은 시간에 사망한 개체를 확인하였으며, 노출 후 24시간 간격으로 부속지의 움직임이 없고 눈자루의 미동이 없을 경우 치사한 것으로 판단하여 치사 개체를 기록하였다. 노출 7일이 지난 후, 전체 노출 개체 수에 생존한 개체 수를 백분율로 환산하여 생존율을 나타내었다 ( $Y(\%) = (B/A) \times 100$ , Y=생존율, A=전체개체 수, B=전체개체 수-치사개체 수).

### 2) 부속지 탈락 및 갑각과 내장색 변화

*M. japonicus*의 부속지 탈락, 갑각과 내장 색의 변화를 관찰하였다. PFOS 노출에 따른 외·내형적 독성 영향을 분석하기 위해 생존율과 마찬가지로 7일 동안 24시간 간격으로 관찰 측정하였다. 부속지 탈락은 노출 전 대조군과 노출군의 부속지 갯수를 확인 후, *M. japonicus*로부터 완전히 탈락되어 수조에 떨어져 있는 부속지 수를 기록하여 탈락빈도를 환산하였다. 갑각색의 변화는 노출 기간 동안 갑각의 백화현상이 나타나는 개체를 관찰하였다. PFOS 노출에 따른 내부 장기의 변화를 파악하기 위하여 7일 노출 후, 개를 해부하여 내장색의 변화를 관찰하였다. 내장색의 변화는 핀셋을 이용하여 갑각을 제거 후, Olympus C-7070 Digital camera로 촬영하여, Image J program으로 내장색의 명도를 측정하였다.

## 4. 통계적 자료분석

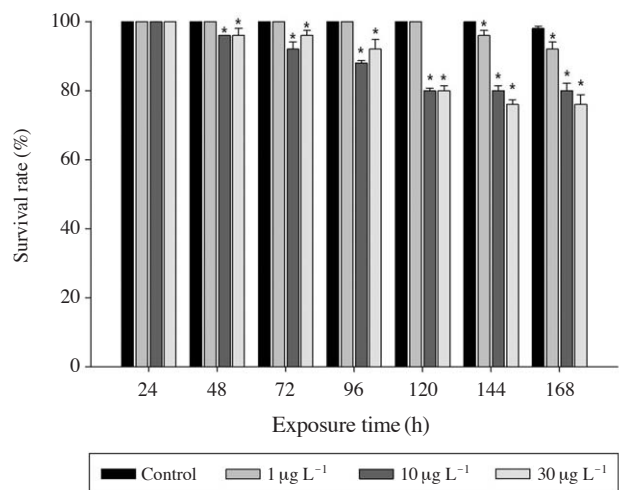
PFOS 노출에 대한 칠게의 생물 판정점 결과에 대해 분산분석(ANOVA, 유의수준  $\alpha=0.05$ )을 실시하고, 모든

데이터는 평균±분산 값으로 표시하였다. 또한, 각 실험구와 대조구 사이의 유의적 차이를 비교하기 위해 SPSS 12.0KO (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 Tukey's test로 분석하였다.  $P < 0.05$ 를 통계적으로 유의수준으로 검정하였다.

## 결 과

### 1. 생존율

생존율은 독성 노출실험에서 기본적인 생물 반응을 반영하는데 PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 48시간부터 생존율의 차이가 관찰되었다(Fig. 1). 노출하지 않은 대조군 개체의 생존율은 144시간(D6)까지 변화가 없으며, 마지막 날인 168시간(D7)에서 98%으로 감소하였다(Fig. 1). 상대적으로 저농도인 1 µg L<sup>-1</sup> PFOS 노출 시, 생존율은 120시간(D5)까지는 100%이나, 144시간(D6)부터 96%로 감소 후, 168시간(D7)에서 92%로 감소하였다. PFOS 10 µg L<sup>-1</sup>에 노출한 *M. japonicus* 생존율은 48시간(D2)에 96%, 96시간(D4) 88%, 144시간(D6) 80%로 노출시간 의존적으로 감소되었다. 상대적 고농도인 30 µg L<sup>-1</sup> PFOS 노출시 48시간(D2)에 96%, 96시간(D4)에 92%, 144시간(D6)에 76%로 노출시간 의존적으로 생존율이 감소되었다. 노출 7일째인 168시간의 *M. japonicus*의 생존율을 비교해 보면 대조군이 98%인 데

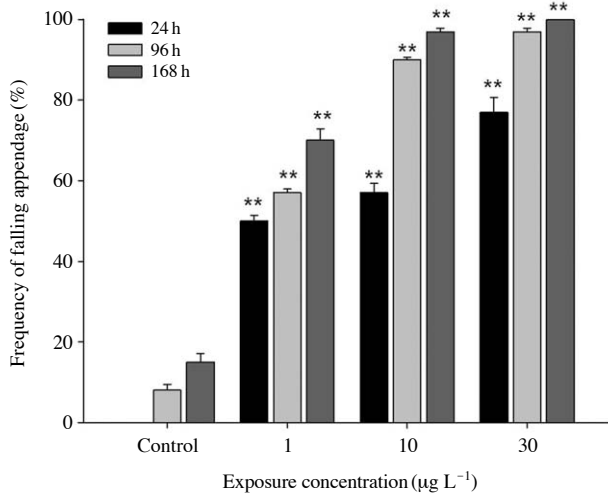


**Fig. 1.** Survival rate (%) of *M. japonicus* crab after PFOS exposure. The experiment was conducted in triplicate and the data are expressed as the mean ± SD. An asterisks indicates a statistically significant difference,  $p < 0.05$  compared with the control group.

비해  $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 가 92%,  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 가 80%이며, 고농도인  $30 \mu\text{g L}^{-1}$ 가 76%로 PFOS 노출농도에 의존적으로 생존율의 감소함을 확인하였다.

## 2. 부속지 탈락 빈도

PFOS에 노출된 *M. japonicus*의 노출 실험 중 탈락된 부속지의 개수를 확인하였다(Fig. 2). 대조군에서는 24시간(D1)에는 부속지 탈락이 0%, 96시간(D4)에 8%, 168시간(D7)에 15%로 나타났다. 노출 시험군  $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서는 PFOS 노출 후 24시간(D1)에서 50%, 96시간(D4)에 57%,



**Fig. 2.** Frequency of falling appendage on *M. japonicus* crab after PFOS exposure. The experiment was conducted in triplicate and the data are expressed as the mean  $\pm$  SD. A double asterisks indicates a statistically significant difference,  $p < 0.01$  compared with the control group.

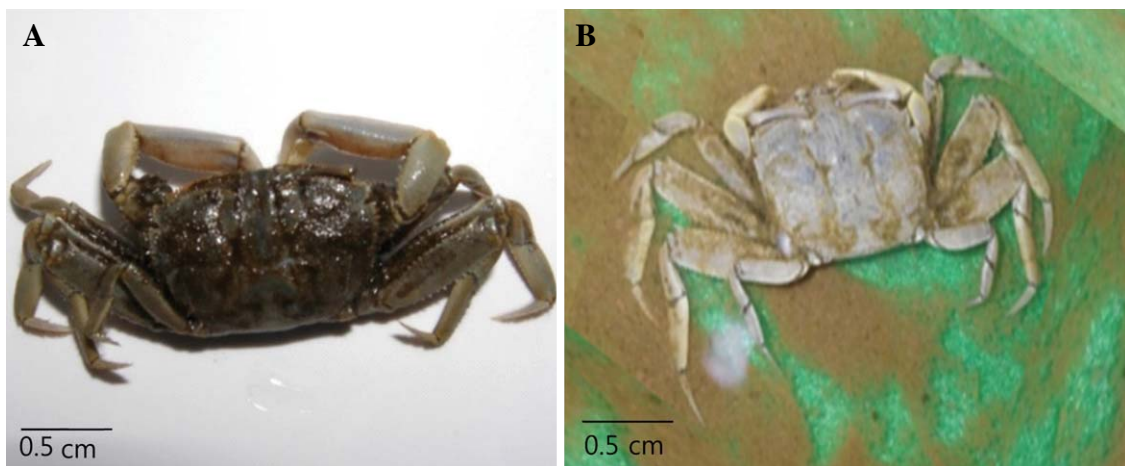
168시간(D7)에는 70%로 부속지 탈락빈도가 증가하였다.  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS 노출에서 부속지 탈락빈도는 24시간(D1)에 57%, 96시간(D4)에 90%, 168시간(D7)에 97%로 농도증가에 따라 증가되었다.  $30 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS 노출에서는 24시간(D1)에 77%, 96시간(D4)에 97%, 168시간(D7)에 100%로 나타나 전체적으로 PFOS 노출농도와 노출시간의존적으로 칠게의 부속지 탈락빈도가 늘어났다.

## 3. 갑각 색의 변화

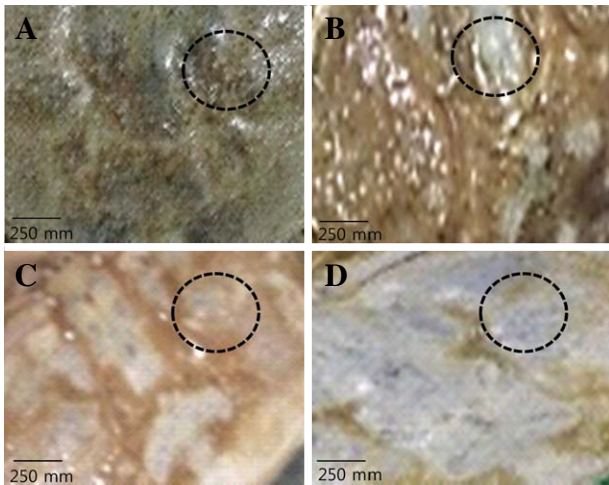
PFOS 노출에 따른 *M. japonicus* 갑각의 색 변화를 관찰한 결과, 노출 후 시간이 경과함에 따라 갑각이 하얀색으로 변해가는 백화현상(Whitening event)이 나타났다(Fig. 3). PFOS 노출 7일 후, 농도에 따른 *M. japonicus*의 갑각색을 조사하였다(Fig. 4). 대조군의 갑각색은 색이 선명하며 진한 회색빛을 보였다(Fig. 4A). 반면에, 저농도인  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 전체적으로 옅은 회색빛을 나타내며, 부분적으로 하얗게 변해가는 백화현상을 보였다(Fig. 4B).  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 백화현상이 나타나는 면적이 증가하였다(Fig. 4C).  $30 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*의 갑각은 대부분이 백화현상으로 인해 하얗게 변화하였으며, 극히 일부만이 옅은 회색을 유지하였다(Fig. 4D).

## 4. 내부 장기의 색 변화

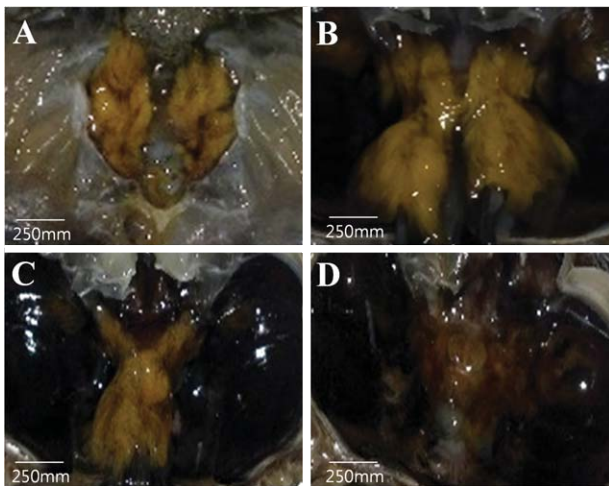
PFOS에 노출된 *M. japonicus* 내부장기의 색 변화를 관찰하였다(Fig. 5). 대조군 *M. japonicus*는 전체적으로 선명한 노란색으로 조직의 경계가 명확하였다(Fig. 5A). 저농도인  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 대조



**Fig. 3.** External change of *M. japonicus* crab exposure to control (A) and  $30 \mu\text{g L}^{-1}$  PFOS exposure (B) for 7d.

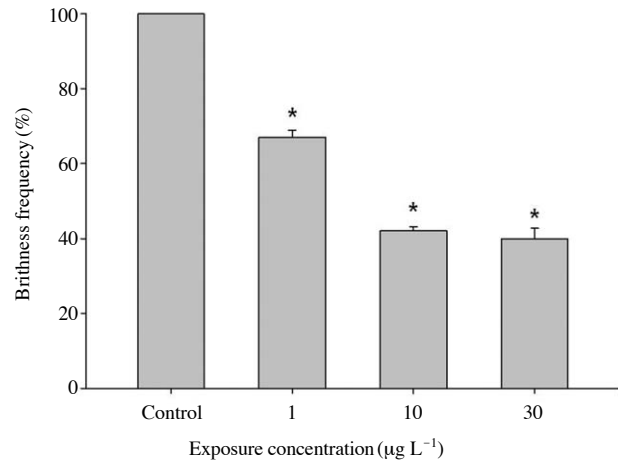


**Fig. 4.** Change of carapace color on *M. japonicus* crab after PFOS exposure for 7d (A=control, B=1  $\mu\text{g L}^{-1}$ , C=10  $\mu\text{g L}^{-1}$ , D=30  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Dotted circle indicated expanded whitening event of carapace.



**Fig. 5.** Changed color of internal organs on *M. japonicus* crab after PFOS exposure for 7d (A=control, B=1  $\mu\text{g L}^{-1}$ , C=10  $\mu\text{g L}^{-1}$ , D=30  $\mu\text{g L}^{-1}$ ).

군과 비슷한 밝은 노란색을 나타내지만 조직간의 경계가 불명확해짐을 관찰하였다(Fig. 5B). 10  $\mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 대조군에 비해 내장의 노란색 선명도가 많이 낮아지고, 조직 간 경계도 불명확하게 나타났다(Fig. 5C). 고농도인 30  $\mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 *M. japonicus*는 색과 선명도에서 큰 차이를 나타내어 내부장기의 색은 검은 색에 가깝게 변하였고, 색의 선명도도 대조군에 비해 크게 떨어지며 조직 간의 경계도 불명확해졌다. 내부장기의 색에 대한 결과를 Image J 프로그램



**Fig. 6.** Image processing analysis of internal organ color on *M. japonicus* crab for 7d after PFOS exposure. The experiment was conducted in triplicate and the data are expressed as the mean  $\pm$  SD. An asterisks indicates a statistically significant difference,  $p < 0.05$  compared with the control group.

을 이용하여 수치화하여 분석한 결과, 대조군은 내부장기 색의 명도가 100%일 때, 1  $\mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에 노출된 게의 내부장기 색 명도는 67%, 10  $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서는 42%, 고농도인 30  $\mu\text{g L}^{-1}$  PFOS에서는 40%를 나타내었다(Fig. 6).

## 고 찰

PFOS는 과불화화합물이 분해되는 과정에서 나타나는 잔류성 물질로, 생물에게 잠재적 유해물질로 알려져 있다(Inoue *et al.* 2007). PFOS는 인간과 쥐와 같은 포유류에서는 연구가 활발하게 되었으나(Martin *et al.* 2002; Stock *et al.* 2004; Nakayama *et al.* 2005), 해양 생물을 대상으로 한 연구는 드물다. 갑각류는 주요한 식량자원으로 경제적 가치와 형태적 다양성으로 많은 연구가 되고 있다(Martin and Davis 2001; Liu and Cui 2010; Mao *et al.* 2012). 특히, *M. japonicus*는 갯벌 생태계에서 산소와 탄소 순환에 중요한 영향을 끼치며, 유기물을 섭취하여 갯벌 생태계 유지를 도와주는 종이기도 하다. *M. japonicus*는 국내에서의 분포는 전북 새만금(Choi and Jung 1995)가 있으며, 고군산 군도의 갯벌(Rho and Kim 2004), 인천 장봉도 갯벌에서(Seo and Hong 2006) 우점종으로 보고되었다. 또한, *M. japonicus*와 *M. banzai*의 형태적 연관성을 유전학적 관점에서 연구하였으며(Horii *et al.* 2001), *M. japonicus*의 혈림프를 이용하여 렉틴 분리를 통한 당 결합 특성 연구가 보고되어 있다(Kim *et al.* 2006). 환경 유

해물질인 카드뮴 노출에 따른 *M. japonicus*의 영향에 관하여 보고되기도 하였다(Korea Ocean Research and Development Institute 1992).

본 연구에서는 PFOS에 노출된 *M. japonicus*를 대상으로 생존율, 부속지 탈락, 갑각의 색 변화 및 내부 장기의 색 변화 관찰을 통하여 PFOS 독성의 영향과 지표종으로서의 잠재적 가치를 알아보고자 하였다. PFOS 노출에 따른 *M. japonicus*의 생존율은 노출시간 의존적으로 감소하는 패턴을 보였다(Fig. 1). 이 결과는 *Oryzias melastigma*에서의 PFOS 노출에 대한 생존율의 감소와 유사하였다(Fang *et al.* 2013). 또한, PFOS 노출에 대한 부속지 탈락은 관찰은 24 h, 96 h와 168 h(7D)노출시간의 증가에 따라 부속지 탈락 빈도가 증가되는 것으로 나타났다(Fig. 2). 생존율의 감소패턴과 유사하게 *M. japonicus*의 부속지 탈락도 PFOS 노출농도와 노출시간에 따라 빈도가 증가하였다. *M. japonicus*의 갑각의 색은 PFOS 농도 증가에 따라 백화현상이 두드러지게 관찰되었으며(Fig. 3). 내부 장기의 색 선명도와 조직 간 경계가 PFOS 노출농도가 증가함에 따라 감소함이 확인되었다(Fig. 4). PFOS 노출독성에 대한 부속지 탈락 빈도의 증가, 갑각과 내장의 색변화는 노출 농도에 따라 대조군에 비해 유의적 차이점을 나타내었다. 이러한 결과는, PFOS 독성에 따라 칠게의 생물적 반응성이 영향을 받는것이 확인되었다. 이는 zebrafish를 대상으로 PFOS 노출 실험 결과에서 나타난 형태적 기형과 같은 독성 영향에 따른 생물 반응과 유사한 결과라고 할 수 있다(Cho *et al.* 2010). 따라서, 유해물질 노출에 따른 형태나 색의 변화는 환경모니터링을 위한 중요한 생물 판정점이 되기 때문에(Qu *et al.* 2009), PFOS 노출에 따른 *M. japonicus*의 외부 갑각 색과 내부 장기 조직의 색 변화를 생태독성의 유용한 판정점으로 제시하고자 한다. PFOS 노출시간과 노출농도에 비례하여 나타나는 생물적 반응(갑각의 색, 내부 장기의 색 변화)은 해양 생태환경의 모니터링 및 유해물질 관리에 있어 주요한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

PFOS의 환경 잔류성으로 다양한 생물에서 독성영향에 대한 연구가 이루어지고 있다(Zhao *et al.* 2012). 해양 갑각류 중 저서성은 수중생활 뿐만 아니라 육상생활을 하는 습성을 나타내, 해양 생태계 환경의 변화를 반영할 수 있다. 따라서 저서성 갑각류는, 환경 잔류성 화합물의 독성영향을 조사하기에 적합한 지표생물이 될 수 있다. 갑각류 곤쟁이목에 속하는 *Siriella armata*를 대상으로 PFOS와 PFOA 노출실험을 통해 과불화화합물의 생태학적 위험성이 조사되었었으며(Mhadhbi *et al.* 2012), 환경

중 PFOS의 생체 축적량 및 분포를 알아보기 위하여 조간대 게를 대상으로 체내 축적량이 조사되기도 하였다(Naile *et al.* 2013). *M. japonicus*에서 PFOS 독성에 대한 연구는 보고된 바 없으나, *M. japonicus* 체내에 카드뮴이 축적됨이 보고되었으며(Korea Ocean Research and Development Institute. 1992), BPA와 NP 노출시 *C. japonicus*의 조직별 HSP70 유전자 발현의 차이성 연구가 보고되어졌다(Park and Kwak 2013). PFOS 노출이 설치류에서는 간독성을 유발하며(Nakayama *et al.* 2005), zebrafish의 초기 난 발생과정에서는 부화율에 영향을 주어 생존율, 성장율, 간독성 및 유전발현의 차이가 나타남을 보고하였다(Fang *et al.* 2013). 본 연구에서는 국내 서식하는 조간대 *M. japonicus*를 대상으로 생태독성 반응의 판정점으로 외형적, 내부적인 관점에서 다양하게 조사하였다. PFOS 노출농도와 시간에 따라 생존율의 감소, 부속지 탈락빈도의 증가, 갑각의 백화현상 증가와 내부 장기 색의 변화가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 *M. japonicus*의 유해물질 노출에 따른 생물학적 반응 연구 뿐 아니라 해양환경의 유해화합물관리와 생태계 모니터링을 위한 주요한 위해성 진단과 평가방법으로 활용할 수 있을 것이다.

## 적 요

PFOS (Perfluorooctane sulfonate) 노출에 따른 *Macrophthalmus japonicus*의 생태독성학적 판정점을 탐색하고자 생존율, 부속지 탈락 수, 갑각 및 내장 색의 변화를 관찰하였다. 그 결과, PFOS 노출에 따른 생존율의 감소는 농도 의존적 패턴을 보여 상대적 고농도인 PFOS 30  $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 168시간 노출시 24%의 가장 낮은 생존율을 나타내었다. 부속지 탈락은 대조군에 비해 PFOS 노출군에서 탈락빈도가 증가하였다. 또한 대조군에서는 갑각색의 변화가 관찰되지 않았으나, PFOS 노출군에서는 백화현상이 농도의존적 패턴으로 관찰되었다. 내부 장기의 색 선명도도 PFOS 노출군에서 대조군에 비해 변화가 나타났다. 이러한 결과는 해양 저서환경의 모니터링을 위한 생물적 주요한 정보를 제공해 줄 것이다.

## 사 사

이 논문은 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013-R1A2A2A-01004914).

## REFERENCES

- Bossi R, J Strand, O Sortkjær and MM Larsen. 2008. Perfluoroalkyl compounds in Danish wastewater treatment plants and aquatic environments. *Environ. Int.* 34:443-450.
- Cho JG, KT Kim, TK Ryu, Y Park, J Yoon, CW Lee, HM Kim, K Choi and KE Jung. 2010. Toxicity of PFCs in embryos of the *Oryzias latipes* using flow through exposure system. *Environ. Health Toxicol.* 25:145-151. (in Korean)
- Choi YB and SH Jung. 1995. Survey of the waders on the west coast of Korea with special reference to waders on Kwanghwal mudflat in Kimje, Chollabukdo. *Kor. J. Ornithol.* 2: 57-73. (in Korean)
- Fang C, Q Huang, Y Ting, Y Chen, L Liu, M Kang, Y Lin, H Shen and S Dong. 2013. Embryonic exposure to PFOS induces immunosuppression in the fish larvae of marine medaka. *Ecotox. Environ. Safe.* 92:104-111.
- Giesy JP and K Kannan. 2001. Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. *Environ. Sci. Technol.* 35: 1339-1342.
- Higgins CP, JA Field, CS Criddle and RG Luthy. 2005. Quantitative determination of perfluorochemicals in sediments and domestic sludge. *Environ. Sci. Technol.* 39:3946-3956.
- Hong SY, KY Park, CW Park, CH Han, HL Suh, SG Yun, CB Song, SG Jo, HS Lim, YS Kang, DJ Kim, CW Ma, MH Son, HK Cha, KB Kim, SD Choi, KY Park, CW Oh, DN Kim, HS Shon, JN Kim, JH Choi, MH Kim and IY Choi. 2006. Marine Invertebrates in Korean coasts. Academy Publishing Company Inc. 1-48.
- Horii T, J Kitaura, K Wada and M Nishida. 2001. Genetic relationship among Japanese sentinel crabs. *Comp. Biochem. Physiol. B.* 130:75-82.
- Inoue K, F Okada, R Ito, S Kato, S Sasaki, S Nakajima, A Uno, Y Saijo, F Sata, Y Yoshimura, R Kishi and H Nakazawa. 2004. 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.* 112:1204-1207.
- Kannan K, L Tao, E Sinclair, SD Pastva, DJ Jude and JP Giesy. 2005. Perfluorinated compounds in aquatic organisms at various trophic levels in a Great Lakes food chain. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 48:559-566.
- Kim HN, WH Chung, CH Bae, KW Hwang and H Kim. 2006. Isolation and carbohydrate binding specificity of a lectin from the hemolymph of coastal crab *Macrophthalmus japonicus*. *J. Pharm. Soc. Korea* 50:166-171.
- Korea Ministry of Environment. 2007. 8th Endocrine disruptor research. Environmental health research department.
- Korea Ocean Research and Development Institute. 1992. On the cadmium bioaccumulation of the crab *Macrophthalmus japonicus* De Haan - low level calcium and salinity effects in muscle. (in Korean)
- Liu C, K Yu, X Shi, J Wang, PKS Lam, RSS Wu and B Zhon. 2007. Induction of oxidative stress and apoptosis by PFOS and PFOA in primary cultured hepatocytes of freshwater tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquat. Toxicol.* 82:135-143.
- Liu Y and Z Cui. 2010. Complete mitochondrial genome of the Asian paddle crab *Charybdis japonica* (Crustacea: Decapoda: Portunidae): Gene rearrangement of the marine brachyurans and phylogenetic considerations of the marine brachyurans and phylogenetic considerations of the decapods. *Mol. Biol. Rep.* 37:2559-2569.
- Mao H, FQ Tan, DH Wang, JQ Zhu, H Zhou and WX Yang. 2012. Expression and function analysis of metallothionein in the testis of stone crab *Charybdis japonica* exposed to cadmium. *Aquat. Toxicol.* 15:11-21.
- Martin JW and GE Davis. 2001. An updated classification of the recent crustacean. Natural History Museum of Los Angeles County, Los Angeles. pp. 124.
- Martin JW, DCG Muir, CA Moody, DA Ellis, WC Kwan, KR Solomon and SA Mabury. 2002. Collection of airborne-fluorinated organics and analysis by gas chromatography/Chemical ionization mass spectrometry. *Anal. Chem.* 74: 584-590.
- Mhadhbi L, D Rial, S Perez and R Beiras. 2012. Ecological risk assessment of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in marine environment using *Isochrysis galbana*, *Paracentrotus lividus*, *Siriella armata* and *Psetta maxima*. *J. Environ. Monit.* 14:1375.
- Naile JE, JS Khim, S Hong, J Park, Bo Kwon, JS Ryu, JH Hwang, PD John and JP Giesy. 2013. Distributions and bioconcentration characteristics of perfluorinated compounds in environmental samples collected from the west coast of Korea. *Chemosphere* 90:387-394.
- Nakata H, K Kannan, T Nasu, HS Cho, E Sinclair and A Take-mura. 2006. Perfluorinated contaminants in sediments and aquatic organisms collected from shallow water and tidal flat areas of the Ariake sea, Japan: environmental fate of perfluorooctane sulfonate in aquatic ecosystems. *Environ. Sci. Technol.* 40:4916-4921.
- Nakayama S, K Harada, K Inoue, K Sasaki, B Seery, N Saito and A Koizumi. 2005. Distribution of perfluorooctane acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Japan and their toxicities. *Environ. Sci.* 12:293-313.
- OECD. 2002. Hazard assessment of perfluorooctane sulfonate

- (PFOS) and its salts. ENV/JM/RD/7/ FINAL. pp. 362.
- Ortiz-Zarragoitia M and MP Cajaraville. 2006. Biomarkers of exposure and reproduction-related effects in mussel exposed to endocrine disruptors. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 50:361-369.
- Otani S, Y Kozuki, R Yamanaka, H Sasaoka, T Ishiyama, Y Okitsu, H Kakai and Y Fujiki. 2010. The role of crabs (*Macrophthalmus japonicus*) burrows on organic carbon cycle in estuarine tidal flat. Estuar. Coast. Shelf Sci. 86: 434-440.
- Park K and IS Kwak. 2013. Expression of stress response HSP70 gene in Asian paddle crabs, *Charybdis japonica*, exposure to endocrine disrupting chemicals, bisphenol A (BPA) and 4-nonylphenol (NP). Ocean Sci. J. 48:207-214.
- Qu L, X Dong and F Guo. 2009. Automatic K-Means for Color Enteromorpha Image Segmentation. The 3rd International Conference on Intelligent Information Technology Application.
- Renzi M, C Guerranti, A Giovani, G Perra and SE Focardi. 2013. Perfluorinated compounds: levels, trophic web enrichments and human dietary intakes in transitional water ecosystems. Mar. Pollut. Bull. 76:146-157.
- Rho HS and W Kim. 2004. Marine Decapods of Gogunsan Island. Korean J. Environ. Biol. 22: 456-463. (in Korean)
- Seo IS and JS Hong. 2006. Species composition and seasonal variation of nektonic assemblages at the jangbong upper tidal flat, Incheon, Korea. Korea. J. Korea Soc. Oceanogr. 11: 97-107. (in Korean)
- Stock NL, FK Lau, DA Ellis, JW Martin, DCG Muir and SA Madury. 2004. Polyfluorinated telomere alcohols and sulfonamides in the North American troposphere. Environ. Sci. Technol. 38:991-996.
- Strynar MJ and AB Lindstrom. 2008. Perfluorinated compounds in house dust from Ohio and North Carolina, USA. Environ. Sci. Technol. 42:3751-3756.
- Wang J, P Zhang, Q Shen, Q Wang, D Liu, J Li and L Wang. 2013. The effects of cadmium exposure on the oxidative state and cell death in the gill of freshwater crab *Sinopotamon henanense*. PloS One. 6:1-8.
- Yamashita N, K Kannan, S Taniyasu, Y Horii, G Petrick and T Gamo. 2005. A global survey of perfluorinated acids in oceans. Mar. Pollut. Bull. 51:658-668.
- Zareitalabad P, J Siemens, M Hamer and W Amelung. 2013. Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in surface waters, sediments, soils and wastewater - A review concentration and distribution coefficients. Chemosphere 91:725-73.
- Zhao YG, CKC Wong and MH Wong. 2012. Environment concentration, human exposure and body loadings of perfluorooctane sulfonate (PFOS), focusing on Asian countries. Chemosphere 89:355-368.

Received: 14 October 2014

Revised: 18 November 2014

Revision accepted: 1 December 2014