

ORIGINAL ARTICLE

## 조류를 이용한 대체 과불화화합물(PFBA, PFBS)의 생태독성평가

박효진 · 신귀암\*

아주대학교 환경안전공학과

### Ecological Toxicity of Substitute Perfluorinated Compound (PFBA, PFBS) on Green Algae (*Raphidocellis subcapitata*)

HyoJin Park, Gwy-Am Shin\*

Department of Environmental Engineering and Safety, Ajou University, Suwon 16499, Korea

#### Abstract

Recently, environmental regulations on perfluorinated compounds (PFCs) have been implemented worldwide due to their serious ecological and human health hazards. In response to these regulations, industries have started using various alternative PFCs that are supposed to be less toxic and less bioaccumulative than conventional PFOA and PFOS. However, systematic studies on the effects of these alternative PFCs on ecosystems and human health are still very limited. In this study, we measured the ecotoxicity of representative alternative PFCs, namely, PFBA and PFBS, on algae using the internationally recognized OECD TG 201 method. The test organism was *Raphidocellis subcapitata*, the most widely used algal species in OECD TG 201 method and the endpoint of toxicity tests was growth rate. Based on our experimental results, the 50% effect concentration (EC<sub>50</sub>) values of PFBA and PFBS for the growth rate of *R. subcapitata* were calculated using the probit analysis method recommended by the U.S. Environmental Protection Agency, and were found to be 1,058 mg/L and 1,048 mg/L, respectively. These EC<sub>50</sub> values are relatively much lower than those of PFOA or PFOS. Generally, it is recognized that the ecotoxicity of PFCs decreases as the carbon chain length decreases, and the results of this study also demonstrate that the ecotoxicity of PFBA and PFBS, which have four carbons, is relatively lower in algae compared to PFOA and PFOS, which have eight carbons.

**Key words** : Ecological toxicity, Substitute perfluoroalkyl substance, *Raphidocelis subcapitata*

#### 1. 서론

과불화화합물은 최근 환경분야에서 가장 논란이 되고 있는 신종 환경오염물질 중 하나이다. 1950년대 이후에 과불화화합물은 물과 기름 등에 의한 오염을 방지하는 표면처리제로서 여러 가지 물품에 널리 이용되어 왔다(Prevedouros et al., 2006). 이러한 과불화화합물은 상대적으로 분해되기 힘든 물질로 자연계에서 생

물축적을 통하여 생태계와 동식물에게서 높은 농도로 검출되고 있으며(Giesy and Kannan, 2001; Giesy and Kannan, 2002; Kannan et al, 2002), 여러 가지 독성실험에 의하여 생태계의 다양한 동식물과 사람에게 유해성을 가지는 것으로 알려져 있다(OECD, 2002; Hinderlier et al., 2006; Cui et al., 2009).

과불화화합물의 생태/인체유해성이 널리 알려지면서 미국 등 여러 나라에서 과불화화합물에 대한 환경규

Received 14 October, 2025; Revised 14 December, 2025;

Accepted 17 December, 2025

\*Corresponding author : Gwy-Am Shin, Department of Environmental Engineering and Safety, Ajou University, Suwon 16499, Korea  
Phone : +82-31-219-2403  
E-mail : gwyam@ajou.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

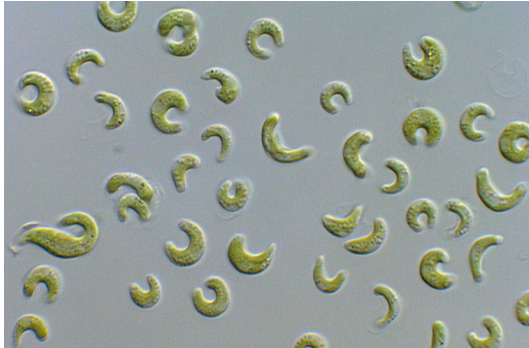


Fig. 1. Test organism (*Raphidocellis subcapitata*).

제가 이루어지기 시작하였으며 우리나라에서도 현재 Perfluorooctanoic acid (PFOA), Perfluorooctane sulfonate (PFOS), Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS) 3가지 물질에 대한 먹는물 감시기준을 설정하고 있다(Kim et al., 2025). 이러한 기존의 과불화화합물에 잇따른 환경규제에 대응하여 산업계에서는 PFOA와 PFOS보다 독성과 생체축적이 덜한 것으로 알려져 있는 다양한 대체 과불화화합물을 사용하고 있는 실정이다(Buhrke et al., 2013; Dai et al., 2013). 환경규제들과 그에 따른 대체 과불화화합물 사용증가로 인하여 Perfluorobutanoic acid (PFBA)와 Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS) 등의 대표적인 대체 과불화화합물은 국내외 주요하천에서 높은 빈도로 그리고 때로는 기존의 PFOA나 PFOS보다 훨씬 높은 농도로 검출되고 있다(Pan et al., 2018; Chen et al., 2024; Hung et al., 2025). 실제로 최근 유럽연합과 캐나다 등지에서는 기존의 PFOA, PFOS, PFHxS 뿐만 아니라 PFBA와 PFBS등을 포함한 20-25개의 과불화화합물을 총량으로 규제하고자 하는 움직임도 일어나고 있다(European Parliament and Council, 2020; Health Canada, 2024). 하지만 이러한 대체 과불화화합물이 생태계와 사람의 건강에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 체계적인 연구가 거의 없는 실정이다.

유해한 화학물질의 수생생물에 대한 생태독성은 주로 조류, 물벼룩, 그리고 어류에 대해 평가하고 있다. 그 중에서도 특히 조류는 수생태계의 1차 생산자로서 수생태계의 건강성을 평가하는 중요한 지표이다. 조류에 대한 과불화화합물의 독성은 주로 기존의 과불화화합물

인 PFOA와 PFOS에 대해 연구되었다(OECD, 2002). 그런데 PFOA와 PFOS의 조류에 대한 생태독성 연구는 여러 종류의 조류(*Raphidocellis subcapitata*, *Anabaena flosaquae*, *Navicular pelliculosa*, *Chlorella vulgaris*, *Geitlernema amphibium* 등)에서 연구되었고 또한 서로 다른 종말점(광합성 효율, 생장률 저해, 특정효소 반응 등)을 측정하는 것이어서 이들 사이에 직접적인 비교가 힘든 실정이다. 한 예로, 가장 일반적으로 쓰이는 종말점인 조류의 생장률에 대해서 PFOA의 EC<sub>50</sub>값은 248 mg/L (*G. amphibium*)에서 977 mg/L (*C. vulgaris*)로 조류에 따라 네 배 이상의 차이를 보였으며(Latata et al., 2009). 또한 PFOS의 EC<sub>50</sub>값도 117 mg/L (*R. subcapitata*)에서 284 mg/L (*N. pelliculosa*)로 조류에 따라 두 배 이상의 차이를 보였다(OECD, 2002).

앞에서 언급한 바와 같이 조류에 대한 대체 과불화화합물의 생태독성에 대해서는 아직까지 체계적인 연구가 거의 없는 실정이다. 이 연구에서는 대표적인 대체 과불화화합물인 PFBA와 PFBS의 조류에 대한 생태독성을 국제적으로 공인된 방법인 OECD TG 201 방법(OECD, 2006)으로 동일한 조류와 동일한 조건(종말점)에서 측정하여 이들 대체 과불화화합물의 생태독성을 직접적으로 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시험생물

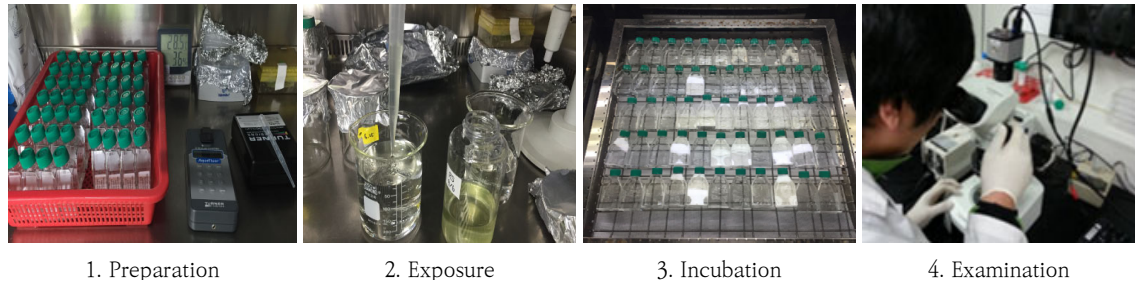
시험생물로는 OECD TG 201 방법에서 가장 많이 쓰이는 조류인 *R. subcapitata* (Fig. 1)을 사용하였다. 시험용 *R. subcapitata* 는 OECD TG 201 배지(OECD, 2006)에서 수온 23±1°C, pH 7.6±0.1, 24시간 명조조건(6000±1000 lux)으로 배양하였으며, 배양하는 동안 생성된 조류의 침전을 막기 위해 진탕배양기는 100 rpm의 속도로 교반하였다.

### 2.2. 시험물질

시험물질로는 대표적인 대체 과불화화합물인 탄소수 4인 PFBA와 PFBS를 사용하였으며 이들 물질의 화학식과 CAS 번호는 Table 1과 같다.

**Table 1.** Test compounds (Perfluoroalkyl substances tested)

Abbreviation	Full name	Formula
PFBA	Perfluorobutanoic acid	C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> COOH
PFBS	Perfluorobutane sulfonic acid	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> SO <sub>3</sub> H

**Fig. 2.** Test procedure.

### 2.3. 독성실험

조류에 대한 급성독성 실험은 OECD TG 201 방법 (OECD, 2006)에 따라 Fig. 2와 같이 진행하였다. 시험 물질의 실험농도를 결정하기 위하여 먼저 세 가지 농도 100, 1,000, 10,000 mg/L에서 농도범위 결정시험을 시행하였다. 농도범위 결정시험에서 PFBA는 1,000와 10,000 mg/L에서 비교군대비 각각 30%, 100% 성장을 저해, PFBS는 1,000와 10,000 mg/L에서 비교군 대비 각각 77%, 100%의 성장을 저해를 보였다. 이러한 농도범위 결정시험을 기반으로 OECD TG 201 방법 (OECD, 2006)의 제안을 따라, 조류의 성장저해가 5~75% 일어날 것으로 예상되는 구간에서 2배수의 간격으로 5개의 농도를 설정하여 최종 실험농도를 결정하였다. 즉, PFBA의 경우에는 0, 312.5, 625, 1250, 2500, 5000 mg/L를, PFBS의 경우는 0, 125, 250, 500, 1000, 2000 mg/L의 농도를 최종 실험농도(초기 농도)로 결정하였다. 실제 실험을 수행하기 위해서 먼저 *R. subcapitata*를 초기 농도  $\sim 10^4$  cells/mL로 이틀 동안 배양하였다(1. Preparation). 이렇게 함으로써 모든 대조군과 처리군에서 성장률이 1.5-1.7/day인 *R. subcapitata*가 실험기간(총 72시간)동안 최소한 16배이상 증가하는 지수성장 단계에 있게 하였다. 다음으로 이틀동안 배양한 *R. subcapitata*를 대조군과 처리군으로 사용할 용기에 나누고 위에서 결정한 실험농도에 각각 노출시켰다(2. Exposure). 그리고 각각의

실험농도에 노출된 *R. subcapitata*를 6개의 대조군과 각각의 실험농도에 대해 3개의 처리군으로 나누어 개별 배양용기에 옮겨 담아 위에서 언급한 배양조건(수온, pH, 조도, 교반속도 등)에서 총 72시간 동안 배양하였다(3. Incubation). 수온과 pH는 실험의 시작과 끝에 측정하였으며, 72시간 후에도 거의 변하지 않았다. 시험기간 동안 시험용액의 교환을 하지 않는 지수식 시험방법으로 진행하였고 72시간 후에 현미경을 이용하여 세포수를 계수하여(4. Examination) 성장저해를 구하였다. 최종적으로 대조군 대비 식물플랑크톤의 성장을 50% 저해시키는 반수영향농도(EC<sub>50</sub>)은 미국환경청에서 제시하는 probit 분석법을 사용하여 계산하였다(USEPA, 2003).

### 3. 결과 및 고찰

조류 *R. subcapitata*에 대한 과불화화합물 PFBA와 PFBS의 생태독성실험 결과는 Fig. 3과 같다. 먼저 PFBA의 경우에는 가장 낮은 농도인 312.5 mg/L에 노출되었을 때 성장률이 4% 정도 감소하였으며, 625 mg/L, 1250 mg/L에 노출되었을 때는 각각 28%, 56%의 성장률이 감소되는 것으로 나타났다. 가장 높은 농도인 2500 mg/L에 노출되었을 때는 전혀 성장이 일어나지 않았다. 이에 비하여 PFBS의 경우에는 가장 낮은 농도인 250 mg/L에 노출되었을 때에는 성장을 저해가

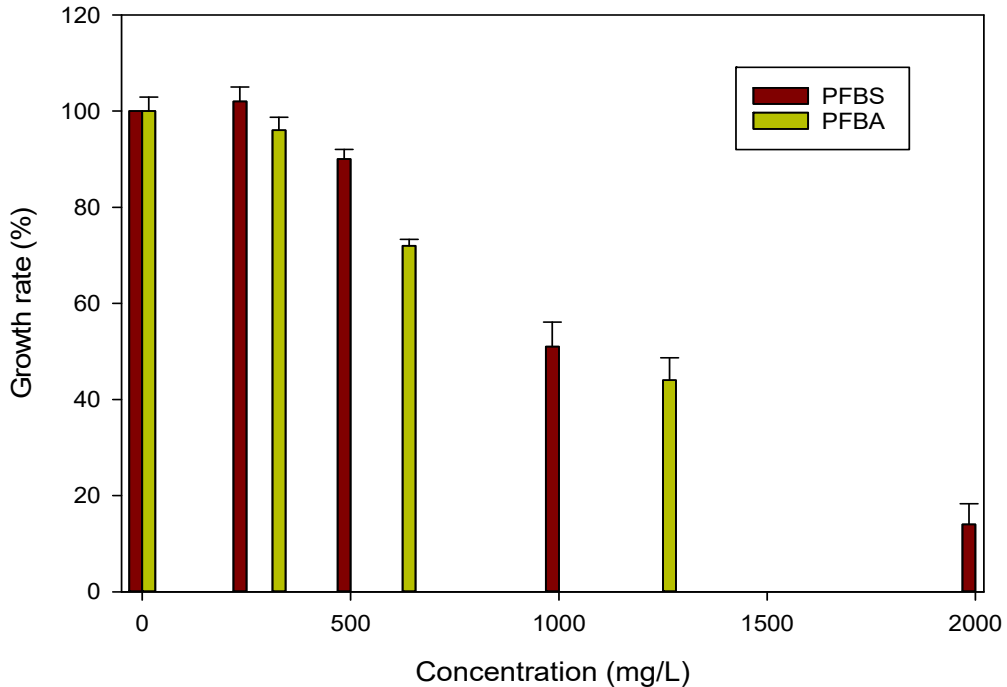


Fig. 3. Results of toxicity test on *Raphidocellis subcapitata*.

나타나지 않았으나 500 mg/L, 1000 mg/L에 노출되었을 때는 성장률이 각각 10%, 49% 감소되는 것으로 나타났다. 가장 높은 농도인 2000 mg/L에 노출되었을 때는 성장률이 86% 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과를 바탕으로 미국환경청에서 제시하는 probit 분석법을 사용하여 계산한 조류 *R. subcapitata*의 성장률 저해에 대한 PFBA와 PFBS의 반수영향농도( $EC_{50}$ ) 값은 각각 1,058 mg/L과 1,048 mg/L로 계산되었다.

서론에서 언급한 바와 같이 대체 과불화화합물의 생태독성에 대한 체계적인 연구는 아직까지 거의 없는 실정이다. 이 연구에서는 대표적인 대체 과불화화합물인 PFBA와 PFBS(탄소수 4)의 조류에 대한 생태독성을 국제적으로 공인된 방법인 OECD TC 201 방법으로 (그 방법중에서도 가장 많이 사용되는 조류(*R. subcapitata*)와 가장 일반적인 종말점인 성장률 저해를 기준으로) 실험하였다. 이전의 한 연구에서 조류 *R. subcapitata*에 대한 PFBA의  $EC_{50}$ 값이 268 mg/L으로 보고되었다(Ding et al., 2012). 이전 연구에서 보고된 이  $EC_{50}$ 값(268 mg/L)은 이 연구에서 계산된 값(1,058 mg/L)보다 4배 정도 작은데, 이 차이는 이전 연

구와 이 연구의 종말점의 차이(이전 연구(광합성 효율) vs 이 연구(성장률 저해))인 것으로 생각된다. 일반적으로 조류의 생태독성실험에서 광합성 효율은 성장률 저해에 비해 유해물질의 독성에 더 민감한(낮은  $EC_{50}$ 값) 것으로 알려져 있다. 한편, 최근의 한 연구에서 PFBS의 조류 *Scenedesmus obliquus*의 성장률 저해에 대한  $EC_{50}$ 값이 1800 mg/L로 보고되었다(Xue et al., 2022). 최근 연구에서 보고된 이  $EC_{50}$ 값(1,800 mg/L)은 이 연구에서 계산된 값(1,048 mg/L)보다 다소 높은데, 그 차이는 서로 다른 조류(*S. obliquus*와 *R. subcapitata*)가 과불화화합물에 대해 서로 다른 민감도를 보이기 때문인 것으로 생각된다. 실제로 조류 *R. subcapitata*는 조류 *S. obliquus*에 비하여 대표적인 과불화화합물인 PFOS에 조금 더 민감한 조류인 것으로 알려져 있다(Boudreau et al., 2003). 이전 연구(Boudreau et al., 2003; Xue et al., 2012)에 의하면 과불화화합물 PFOS에 대한 조류의 민감도는 *R. subcapitata* > *C. vulgaris* > *S. obliquus*의 순서로 알려져 있다.

또한 앞의 서론에서 언급한 바와 같이, 현재 다양한 대체 과불화화합물이 사용되고 있는 이유는 이들이 기존의 PFOA나 PFOS보다 독성이나 생물축적이 덜할 것으로 생각되기 때문이다(Brendel et al., 2018). 실제로 PFOS의 조류 *R. subcapitata*의 성장률 저해에 대한 EC<sub>50</sub>값은 117 mg/L(OECD, 2002)로 이 연구에서 계산된 동일한 조류의 성장률저해에 대한 PFBS의 EC<sub>50</sub>값(1,048 mg/L)보다 상대적으로 아주 낮은 값이다. 비록 PFOA의 조류 *R. subcapitata*의 성장률 저해에 대한 EC<sub>50</sub>값은 보고된 바가 없으나 다른 조류들의 성장률 저해에 대해 보고된 EC<sub>50</sub>값들은 248 mg/L (*Geitlerinema amphibium*), 368 mg/L (*Skeletonema marinoi*), 977 mg/L (*C. vulgaris*) (Latata et al., 2009)로서 이 연구에서 계산된 PFBS의 EC<sub>50</sub>값(1,058 mg/L)에 비해 상대적으로 낮은 값들이다(이전 연구(Latata et al., 2009)에 의하면 과불화화합물 PFOA에 대한 조류의 민감도는 *G. amphibium* > *Skeletonema marinoi* > *C. vulgaris*의 순서이다). 일반적으로 과불화화합물의 생태독성은 탄소수가 적어짐에 따라 감소한다고 알려져 있는데(Buhrke et al., 2013; Dai et al., 2013), 이 연구의 결과도 탄소수가 4인 대체 과불화화합물인 PFBA와 PFBS의 조류에 대한 생태독성이 탄소수가 8인 PFOA와 PFOS에 비해 상대적으로 낮다는 것을 보여주고 있다.

또한 이 연구에서 한 가지 중요한 사항은 이 연구에서 사용한 조류 *R. subcapitata*의 성장률 저해에 대한 두 과불화화합물 PFBA와 PFBS의 EC<sub>50</sub>값(1,048 mg/L vs 1,058 mg/L)이 서로 비슷하다는 것이다. 과불화화합물은 크게 PFOA로 대표되는 카복실기를 가진 군과 PFOS로 대표되는 술폰산기를 가진 군으로 분류되는데, 이 연구에서 사용한 두 개의 과불화화합물 중 PFBA는 카복실기를 가지는 과불화화합물이고 PFBS는 술폰산기를 가지는 과불화화합물이다. 그런데 물벼룩과 어류를 이용한 이전 연구에 의하면(Kim et al., 2010; Hagenaaars et al., 2011; Ulhaq et al., 2013) 같은 탄소수를 가지는 과불화화합물에서는 술폰산기를 가지는 군이 카복실기를 가지는 군보다 더 강한 독성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그리고 그 이유는 술폰산기를 가지는 군이 카복실기를 가지는 군보다 더 소수성(hydrophobic)이 강해서 물에 덜 용해되고 또한 생물체내에 더 높은 축적을 일어나기 때문인 것으로 추측되고 있다(Martin et al., 2003; Kannan et al., 2013).

하지만 다른 한편으로 기존의 과불화화합물(예, PFOA, PFOS등)에 비해 탄소수가 적은 대체 과불화화합물(예, PFBA, PFBS 등)은 기존의 과불화화합물에 비해 물에 더 잘 녹으며 생물체내에서의 반감기도 짧아 상대적으로 생물체내의 축적이 크지 않은 것으로 알려져 있다(Brendel et al., 2018). 또한 최근의 한 연구(Kusk et al., 2018)에 의하면 과불화화합물의 조류에 대한 생태독성은 상대적으로 비슷하다고 보고되고 있다. 결론적으로 최근의 연구와 이 연구의 결과는 과불화화합물의 조류에 대한 생태독성의 연구가 좀 더 많은 종류의 조류와 서로 다른 종말점에 대해 체계적으로 이루어져야 하는 필요성을 제기한다고 할 것이다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 대표적인 대체 과불화화합물인 PFBA와 PFBS의 조류에 대한 생태독성을 OECD TC 201 방법으로 측정하였다. 이 연구의 결과를 바탕으로 계산한 조류 *R. subcapitata*의 성장률 저해에 대한 PFBA와 PFBS의 반수영향농도(EC<sub>50</sub>)값은 각각 1,058 mg/L과 1,048 mg/L로 계산되었다. 이러한 EC<sub>50</sub>값들은 PFOA나 PFOS의 EC<sub>50</sub>값들에 비해 상대적으로 아주 낮은 값들이다. 일반적으로 과불화화합물의 생태독성은 탄소수가 적어짐에 따라 감소한다고 알려져 있는데, 이 연구의 결과도 탄소수가 4인 대체 과불화화합물인 PFBA와 PFBS의 조류에 대한 생태독성이 탄소수가 8인 PFOA와 PFOS에 비해 상대적으로 낮다는 것을 보여주고 있다. 비록 이 연구에서 대체 과불화화합물이 기존의 과불화화합물에 비해 조류에 대해 낮은 생태독성을 보였지만, 이들의 사용량이 증가하면 자연계에서 그 농도가 크게 증가할 것으로 예상된다. 그러므로 이들 대체 과불화화합물에 대한 장기적인 노출이 조류뿐만 아니라 생태계 전반에 걸친 영향에 대해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### REFERENCES

- Boudreau, T. M., Sibley, P. K., Mabury, S. A., Muir, D. G. C., Solomon, K. R., 2003, 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., 43, 307-313.

- Brendel, S., Fetter, E., Staude, C., Vierke, L., Biegel-Engler, A., 2018, Short-chain perfluoroalkyl acids: Environmental concerns and a regulatory strategy under REACH, *Environ. Sci. Eur.*, 30, 9-20.
- Buhrke, T., Kibelius, A., Lampen, A., 2013, *In vitro* toxicological characterization of perfluorinated carboxylic acid with different carbon chain lengths, *Toxicol. Lett.*, 218, 97-104.
- Chen, Y., Wang, R., Shih, Y., Chin, H., Lin, A. Y., 2024, Emerging perfluorobutane sulfonamido derivatives as a new trend of surfactants used in the semiconductor industry, *Environ. Sci. Technol.*, 58, 1648-1658.
- Cui, L., Zhou, Q. F., Liao, C. Y., Fu, J. J., Jiang, G. B., 2009, Studies on the toxicological effects PFOA and PFOS on rats using histological observation and chemical analysis, *Archi. Environ. Contam. Toxicol.*, 56, 338-349.
- Dai, Z., Xia, X., Guo, J., Jiang, X., 2013, Bioaccumulation and uptake routes of perfluoroalkyl acids in *Daphnia magna*, *Chemosphere*, 90, 1589-1596.
- Ding, G., Wouterse, M., Baerselman, R., Peijnenburg, W., 2012, Toxicity of polyfluorinated and perfluorinated compounds to Lettuce (*Lactuca sativa*) and green alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 62, 49-55.
- European Parliament and Council, 2020, Official Journal of the European Union, in: EU, Brussels, 1-62.
- Giesy, J. P., Kannan, K., 2001, Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1339-13422.
- Giesy, J. P., Kannan, K., 2002, Perfluorochemical surfactants in the environment, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 146-152.
- Hagenaars, A., Vergauwen, L., De Coen, W., Knapen, D., 2011, Structure-activity relationship assessment of four perfluorinated chemicals using prolonged zebrafish early life stage test, *Chemosphere*, 82, 764-772.
- Health Canada, 2024, Guidelines for Canadian drinking water quality, in: Health Canada, Ottawa, 44.
- Hinderliter, P. M., DeLorme, M. P., Kennedy, G. L., 2006, Perfluorooctanoic acid: Relationship between repeated inhalation exposures and plasma PFOA concentration in the rat, *Toxicol.*, 222, 80-85.
- Hung, M. D., Nga, N. T., Jung, H. Y., Shin, Y., Lee, B. C., Cho, H. S., 2025, Perfluoroalkyl substances (PFASs) in the major rivers of Korea: Distribution in the environment and bioaccumulation in crucian carp fish, *Sci. Total Environ.*, 979, 179483.
- Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J., Oehme, G., Focardi, S., Giesy, J. P., 2002, Perfluorooctanesulfonate and related fluorinated hydrocarbons in marine mammals, fishes, and birds from Coasts of the Baltic and the Mediterranean Seas, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3210-3216.
- Kannan, K., Tao, L., Sinclair, E., Pastva, S. D., Jud, D. J., Giesy, J. P., 2005, Perfluorinated compounds in aquatic organisms at various trophic levels in a Great Lakes food chain, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 48, 559-566.
- Kim, G. T., Cho, J. G., Yoon, J. H., Lee, C. W., Choi, G. H., Kim, H. M., Ryu, G. S., 2010, Toxicity evaluation of perfluorinated compounds using *Daphnia magna*, *Environ. Health Toxicol.*, 25, 153-159.
- Kim, K., Son, S., An, S., Choe, S., Jung, S., 2025, Toward strengthened regulation of PFAS in South Korea: Health risks, global Standards, and policy recommendations, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 47, 410-431.
- Kusk, K. O., Christensen, A. M., Nyholm, N., 2018, Algal growth inhibition test results of 425 organic chemical substances, *Chemosphere*, 204, 405-412.
- Latata, A., Nedzi, M., Stepnowski, P., 2009, Acute toxicity assessment of perfluorinated carboxylic acids toward Baltic microalgae, *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 28, 167-171.
- Martin, J. W., Mabury, S. A., Solomon, K. R., Muir, D. C., 2003, Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Environ. Toxicol. Chem.*, 22, 196-204.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 2002, Co-operation on Existing Chemicals, Hazard assessment of perfluorocotane sulfate (PFOS) and its salts, No. ENV/JM/RD(2002)17/FINAL, Paris, France.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006, OECD Guideline for testing chemicals, Test No. 201: Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test, OECD Publishing, Paris, France.
- Pan, Y., Zhang, H., Cui, Q., Sheng, N., Yeung, L. W. Y., Sun, Y., Guo, Y., Dai, J., 2018, Worldwide distribution of novel perfluoroether carboxylic and sulfonic acids in surface water, *Environ. Sci. Technol.*, 52, 7621-7629.
- Prevedouros, K., Cousins, I. T., Buck, R. C., Korzeniowski, S. H., 2006, Source, fate and transport of perfluorocoboxylates, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 32-44.

Xue, X., Gao, N., Xu, F., 2012, Toxicity of perfluooctane sulfonate (PFOS) and perfluorobutane sulfonate (PFBS) to *Scenedesmus obliquus*: Photosynthetic characteristics, oxidative damage, and transcriptome analysis, Environ. Pollut., 315, 120397.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2002, Revised draft hazard assessment of perfluorooctanoic

acid and its salts, [https://static.ewg.org/reports/2003/pfcs/EPA\\_hazard\\_full.pdf](https://static.ewg.org/reports/2003/pfcs/EPA_hazard_full.pdf). 2002.

Ulhaq, M., Carsson, G., Orn, S., Norgren, L., 2013, Comparison of developmental toxicology of seven perfluoroalkyl acids to zebrafish embryos, Environ. Toxicol. Pharmacol., 36, 423-426.

---

• Graduate student. HyoJin Park  
Department of Environmental Engineering and Safety,  
Ajou University  
p6286@ajou.ac.kr

---

• Professor. Gwy-Am Shin  
Department of Environmental Engineering and Safety,  
Ajou University  
gwyam@ajou.ac.kr