

## 과불화합물의 규제 및 산업적 용도에 대한 화학구조적 고찰

# Chemical Structural Approach to Understand Global Prohibition on Perfluorinated Compounds and their Uses

### \*Corresponding author

Eun Kyung Choe  
ekchoe@kitech.re.kr

최은경\*, 나진성, 조영달, 송기봉<sup>1</sup>, 이수영<sup>2</sup>, 석광설<sup>2</sup>

한국생산기술연구원 국제환경규제대응기술지원센터, <sup>1</sup>화학물질안전원, <sup>2</sup>국립환경과학원

**Eun Kyung Choe\*, Jinsung Ra, Young Dal Cho, Ki Bong Song<sup>1</sup>, Suyeong Lee<sup>2</sup> and Gwangseol Seok<sup>2</sup>**

Product Eco-testing and Risk Assessment Center, Korea Institute of Industrial Technology, Ansan, Korea

<sup>1</sup>National Institute of Chemical Safety, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Received\_July 07, 2016  
Revised\_August 11, 2016  
Accepted\_August 17, 2016

### Textile Coloration and Finishing

TCF 28-3/2016-9/134-155

©2016 The Korean Society of  
Dyers and Finishers

**Abstract** Perfluorinated chemicals are highly diverse and widely used. More than 160 substances are pre-registered under REACH and approximately 140 substances are in the existing chemicals list of Korea from this chemical group. Chemical structures of PFCs that are globally prohibited and still in uses are identified with OECD's classification of PFCs with an overall review on their uses in consumer products including textile products. Case examples for current domestic situation on use of PFCs as a major component of water-repelling agents in textile products as well as a brief summary of eight major PFC manufacturers' situation are presented from our survey study along the supply chains and the most recent report of EPA stewardship programme, respectively.

**Keywords** fluorotelomers, PFOA stewardship, perfluorinated chemicals, perfluoroalkyl, precursors, side-chain-fluorinated, water-repelling

## 1. 서 론

과불화(perfluoro/perfluorinated)란 분자 내 사슬(chain)의 탄소 원자가 모두 불소 원자로 변한 것으로<sup>1-5)</sup>, PFC(perfluorinated chemical, perfluorinated compound)는 사슬 내 모든 C-H가 C-F로 치환된 화합물을 말하며, 과불화알킬 부분(perfluoroalkyl moiety)이 과불화되지 않은 원자에 결합되었으나 결국은 PFC로 변환될 가능성이 있는 PFC 전구체(precursors)까지 포함하여 지칭하고 있다<sup>1)</sup>. 국내에서는 완전 불화된 탄소 사슬(fully fluorinated carbon chain), 즉 과불화된 알킬 사슬을 분자 구조 내에 갖는 물질을 과불화합물 혹은 과불화화합물(perfluorinated chemicals, PFCs)이라고 지칭하고 있다<sup>6,7)</sup>. 불

소 원자가 고분자의 주골격 사슬(polymer chain backbone)을 이루고 있는 탄소 원자에 결합되어 있는 불소 고분자(fluoropolymers), 예로 PTFE(polytetrafluoroethylene), PVDF(polyvinylidene fluoride) 등은 PFC 전구체(precursors)도 아니며, PFC에서 제외하고 있다<sup>2,3,5)</sup>. 또한, HFCs(hydrofluorocarbons), PFCs(perfluorocarbons) 등의 온실 가스도 역시 PFC(perfluorinated chemical)에서 제외된다<sup>2)</sup>. 과불화합물의 대표적인 예로는 perfluoroalkyl sulfonates(PFASs, 예로 PFOS) 및 perfluorocarboxylic acids(PFCAs, 예로 PFOA)를 들 수 있다<sup>1-5)</sup>.

따라서 과불화합물 규제 이전에 가장 흔하게 검출되었던 두 가지 과불화합물은 의류, 가구, 카펫의 오염방

지제 및 발수제로 판매된 다양한 3M Scotchgard 제품의 핵심 성분이었던 PFOS 관련 물질과 PTFE(예로 Teflon®)의 유화 중합 시 계면활성제로 사용되었던 PFOA(perfluorooctanoic acid)였다<sup>1,3-5</sup>.

과불화합물은 강력한 C-F 화학결합으로 인하여 잔류성(persistent)을 갖게 되며, 열적으로 안정하고, 방수, 방오, 발유 특성으로 인하여 1950년대부터 생산되어 광범위하게 유용하게 사용되어 왔다<sup>1,3-5,8-12</sup>. 3M은 PFOS 및 관련 물질(분해되어 PFOS로 되는 물질)의 중간체인 PFOSF(perfluorooctanesulfonyl fluoride)의 주요 글로벌 생산업체로, 유럽과 아시아의 소규모 생산업체와 함께, 1970년에서 2002년까지 약 96,000톤의 PFOSF를 생산하였고 2000년 생산의 절정을 이룰 때 3M에서 세계 생산량의 78%를 제조하였다<sup>3</sup>. 그러나 인간의 체내 및 환경 중에서 검출되고 있다는 연구 결과와 함께 잔류성, 생물농축성 및 독성을 갖는 것으로 평가된 PFOS 및 관련물질의 생산을 중단하기로 3M이 결정함에 따라, 2000년~2003년 급격히 생산량이 감소하였다<sup>3-5</sup>. 2003년 오히려 중국은 PFOS의 생산량을 더 늘리기 시작하였고, 2005년부터 중국 내수 및 해외 수요에 맞추기 위해 급속히 생산량이 늘어, 2003년~2008년의 축적 생산량이 250톤까지 증가하였으며, 이 중 50톤은 수출된 것으로 보고되고 있다<sup>3,4</sup>.

1970년에서 2002년 사이의 PFOS 및 관련물질의 용도는 carpets 48,000톤, 제지 및 포장재 24,000톤, 의류 12,500톤, 기능성 케미컬 6,000톤 및 소화용수성막포(aqueous fire fighting foams) 10,000톤이었다<sup>3</sup>. DuPont, Daikin, Clariant and Asahi Glass 등의 글로벌 제조업체에서는 이들 수요에 대해 불소텔로머(fluorotelomers)라는 동등한 특성을 갖는 다른 과불화합물을 대체물질로 공급해 오고 있고, 이중 짧은 탄소 사슬을 가진 대체물질은 유해성이 감소하기도 하나<sup>8</sup>, 건강 및 환경에 미치는 악 영향(adverse effects)을 잠재적으로 갖고 있는 텔로머들도 있다<sup>1,3,5</sup>. 이들 텔로머 기반의 물질과 PFCA가 수 십년간 다양한 용도로 사용해왔고, PFOS 생산 중단이라는 움직임과 함께 대체물질로서의 역할도 해왔으나 탄본소 총사설슬에서의 길는 이수에백 따종라의 다인양체한 및 과 환화불경에 합 물대과한 그 유 용해성 논란이 계속 중이다<sup>3-5,8</sup>. 도, 사용이 규제된 과불화합물 종류 및 현재 사용 중인 과

불화합물의 실태 및 향후 규제 방향에 대하여, 과불화합물의 화학구조적 분류 체계 및 관련 용어를 통하여 통합적으로 이해해 보고자하며, 이에 언급되는 과불화합물의 약자를 Table 1에 정리하였다.

## 2. 과불화합물 용어 및 분류 체계

### 2.1 OECD 분류 체계

OECD(Organization for Economic Cooperation and Development, 경제협력개발기구)의 환경보건 안전국에서는 30여개 회원국을 대상으로 과불화합물의 사용 실태를 효율적으로 실시하고자, 다양한 과불화합물을 PFOS 및 관련물질, PFOA 및 관련 물질, PFAS(perfluoroalkyl sulfonates) 및 관련 물질, PFCA(perfluorocarboxylic acids) 및 관련물질로 분류하는 체계를 갖추었다(Figure 1)<sup>2</sup>.

PFOS는 완전 불화된, 8개 탄소를 갖는 술포산(CAS No. 1763-23-1)으로 음이온 염 형태를 지칭하기도 한다.

PFOA는 완전 불화된, 8개 탄소를 가진 카르복실산(C8)(CAS No. 335-67-1)으로써, 음이온 염 형태를 지칭하기도 한다. PFOS 관련물질은 PFOS 염이거나 분해되어 PFOS로 될 수 있는 물질을 말하고, PFOA 관련물질은 PFOA 염이거나 분해되어 PFOA로 될 수 있는 물질을 말한다<sup>1</sup>.

PFCA는 PFAC(per-fluoroalkyl carboxylate)라고도 불리며 PFOA뿐만아니라 완전 불화된 탄소 사슬이 더 적거나 큰 동종 물질(homologues)을 포함하는 카르복실산을 지칭하며 PFAC 관련물질은 염 형태의 PFAC 혹은 분해되어 PFAC가 되는 물질이다<sup>1</sup>.

PFAS는 PFOS뿐만아니라 완전 불화된 탄소 사슬이 더 적거나 큰 PFOS 동종 물질을 모두 포함하는 술포산을 지칭한다. PFAS 관련 물질은 염 형태의 PFAS 혹은 분해되어 PFAS가 되는 물질이다<sup>1</sup>.

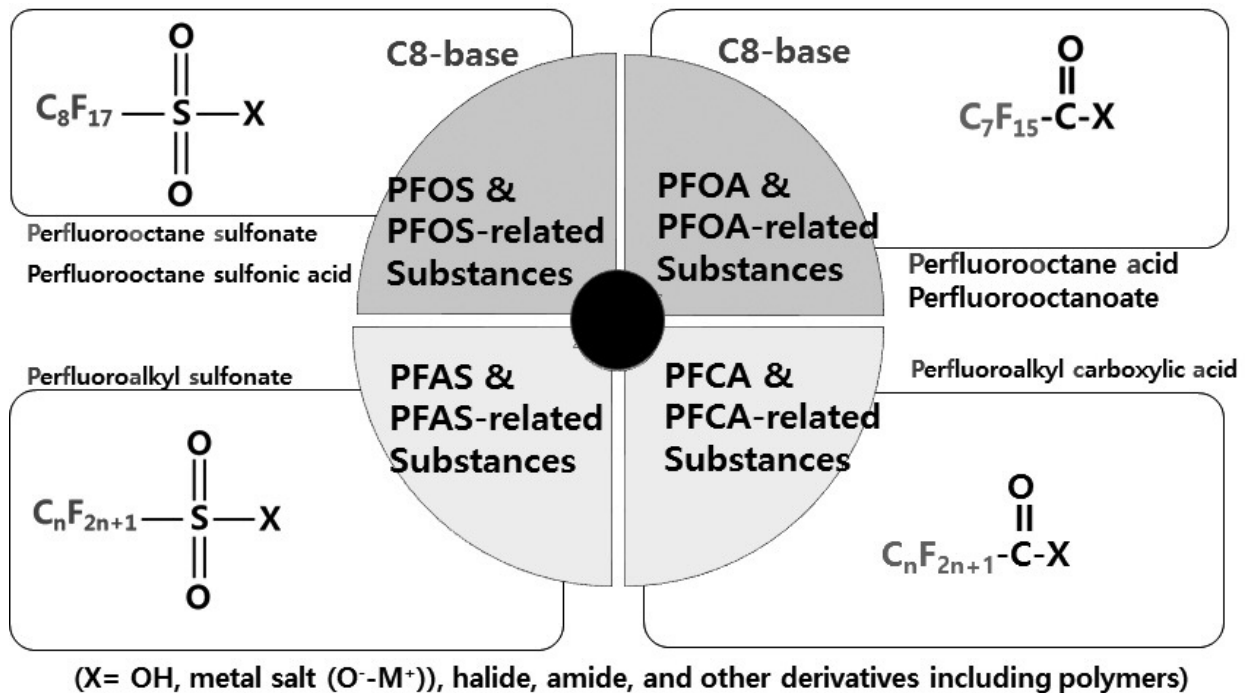
PFOS, PFOA, PFCA, PFAS의 각 관련물질은 carboxylates, amines, ethers, iodides, phosphonic/phos-phinic화합물, alcohols, esters, phosphates, sulfonates, siloxanes, thioethers, urethanes 및 acrylates 등의 화학구조를 가질 수 있다<sup>1</sup>.

OECD는 2004년, 2006년, 2009년, 2012년 PFOS를 포함한 PFAS와 PFOA를 포함한 PFCA에 대한 생

**Table 1.** Abbreviations and acronyms<sup>1-5,13)</sup>

Abbr. and Acronyms	Full name
PFCs	Perfluorinated chemicals, Perfluorinated compounds * in which all carbon-hydrogen bonds in a chain have been replaced by carbon-fluorine bonds <sup>1)</sup> . * also refers to PFC precursors, chemicals which contain a perfluoroalkyl moiety attached to other atoms that may not be perfluorinated, and have potential to transform to produce PFCs <sup>1)</sup> * Collective designation of perfluoroalkyl substances, polyfluoroalkyl substances and side-chain fluorinated polymers <sup>3)</sup>
PFOS	Perfluorooctane sulphonate <sup>2)</sup> , perfluorooctane sulfonic acid <sup>1)</sup>
PFAS-1	Perfluoroalkyl sulphonates, one example being PFOS perfluoroalkyl sulfonic acids
PFOA	Perfluorooctane acid, perfluorooctanoic acid
PFCA	Perfluorocarboxylic acids, one example being PFOA
PFAC	Perfluoroalkyl carboxylic acids <sup>3)</sup> Perfluoroalkyl carboxylate <sup>1)</sup> PFCA = PFAC
PFOS related substances	All substances which can break down to PFOS
PFOA related substances	All substances which can break down to PFOA
PFAS-2	perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances <sup>13)</sup> entire group of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances <sup>3)</sup>
PFBS	Perfluorobutane sulphonate, Perfluorobutane sulfonic acid (C4)
PFHxS	Perfluorohexane sulphonate, Perfluorohexane sulfonic acid (C6)
PFHpS	Perfluoroheptane sulfonic acid (C7)
PFDS	Perfluorodecane sulphonate, Perfluorodecane sulfonic acid (C10)
PFHxA	Perfluorohexane acid, Perfluorohexanoic acid (C6)
PFHpA	Perfluoroheptane acid, Perfluoroheptanoic acid (C7)
PFOA	Perfluorooctane acid, Perfluorooctanoic acid
APFO	Ammonium perfluorooctanoate (C8)
PFNA	Perfluorononane acid, Perfluorononanoic acid (C9)
APFN	Ammonium perfluorononanoate (C9)
PFDA	Perfluorodecane acid, Perfluorodecanoic acid (C10)
PFUnA, PFUdA, PFUnDA <sup>3)</sup>	Perfluoroundecane acid, Perfluoroundecanoic acid (C11) Henicosafuoroundecanoic acid
PFDoA, PFDoDA <sup>3)</sup>	Perfluorododecane acid, Perfluorododecanoic acid (C12) Tricosafuorododecanoic acid
PFTrA, PFTrDA <sup>3)</sup>	Perfluorotridecane acid, Perfluorotridecanoic acid (C13) Pentacosafuorotridecanoic acid
PFTA, PFTeDA <sup>3)</sup>	Perfluorotetradecane acid, Perfluorotetradecanoic acid (C14) Heptacosafuorotetradecanoic acid
PFPeA	Perfluoropentadecane acid, Perfluoropentadecanoic acid (C15)
PFHxDA	Perfluorohexadecanoic acid (C16)

Abbr. and Acronyms	Full name
PFOSF <sup>4</sup> , POSF <sup>3</sup>	perfluorooctane sulfonyl fluoride (C8)
PFOSA	Perfluorooctane sulphonamide (C8)
FTOH	Fluorotelomer alcohols, components in commercial products which can break down(degrade) into PFCA A general term which describes a class of alcohols of general structure F(CF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH where n is an integer <sup>1</sup>
FTCA	Fluorotelomer carboxylic acid
Fluorotelomer epoxide	a class of epoxides of the general structure F(CF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> CH <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> O
Fluorotelomer olefin	a class of alkenes of the general structure F(CF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> CH=CH <sub>2</sub>
6:2 FTAC	6:2 Fluorotelomer acrylate
6:2 FTMAC	6:2 Fluorotelomer methacrylate
6:2 FTO	6:2 Fluorotelomer olefin
6:2 FTS	6:2 Fluorotelomer sulfonate
6:2 FTSA	6:2 Fluorotelomer sulfonic acid
8:2 diPAP	8:2 Fluorotelomer phosphate diesters
8:2 FTAL	8:2 Fluorotelomer aldehyde
8:2 FTCA	8:2 Fluorotelomer carboxylic acid
8:2 FTI	8:2 Fluorotelomer iodide
8:2 FTOH	8:2 Fluorotelomer alcohol
8:2 FTUOH	8:2 Unsaturated fluorotelomer alcohol
8:2 monoPAP	8:2 Fluorotelomer phosphate monoester
EtFASAs	N-ethyl perfluoroalkane sulfonamides
EtFASEs	N-Ethyl perfluoroalkane sulfonamidoethanol
EtFBSE	N-Ethyl perfluorobutane sulfonamidoethanol
EtFBSE	N-Ethyl perfluorobutane sulfonamidoethanol
EtFOSA	N-Ethyl perfluorooctane sulfonamide
EtFOSAA	N-Ethyl perfluorooctane sulfonamidoacetic acid
EtFOSAC	N-Ethyl perfluorooctane sulfonamidoethyl acrylate
EtFOSE	N-Ethyl perfluorooctane sulfonamidoethanol
N-Me-FOSA	N-Methyl perfluorooctane sulfonamide
N-Me-FOSE	N-Methyl perfluorooctane sulfonamidoethanol
PFAA	Perfluoroalkyl acids
Polyfluoro/polyfluorinated	Describes a substance where many but not all hydrogen atoms attached to carbon atoms are replaced with fluorine atoms
Perfluoro/perfluorinated	Describes a substance where all hydrogen atoms attached to carbon atoms are replaced with fluorine atoms where C-H becomes C-F
Fluorinated (organic) polymer	a polymer which has a hydrocarbon backbone (polyurethane, etc.) which is appended a fluorinated alkyl chain such as -[CH <sub>2</sub> CH(C(O)OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> F)] <sub>n</sub> -
Fluoropolymer (FP)	a polymer which has fluorine attached to the majority of carbon atoms which comprise the polymer chain backbone such as PTFE
PTFE	Polytetrafluoroethylene
ETFE	Ethylenetetrafluoroethylene
PVDF	Polyvinylidene fluoride
ECF	Electrochemical fluorination



P1: Perfluoro alcohol compounds  
 P2: Perfluoro amine compounds  
 P3: Perfluoro carboxylic compounds  
 P4: Perfluoro ester compounds  
 P5: Perfluoro ether compounds  
 P6: Perfluoro iodide compounds  
 P7: Perfluoro phosphonic/phosphinic compounds  
 P8: Partial perfluoro & miscellaneous perfluoro compounds

F1: Fluoro alcohol compounds  
 F2: Fluoro ammonium compounds  
 F3: Fluoro amine compounds  
 F4: Fluoro carboxylic compounds  
 F5: Fluoro ester compounds  
 F6: Fluoro ether compounds  
 F7: Fluoro iodide compounds  
 F8: Fluoro phosphate compounds  
 F9: Fluoro sulfate compounds  
 F10: Fluoroalkyl silicate compounds  
 F11: Fluoro sulfonate/sulfonamide/sulfonyl compounds  
 F12: Fluoro siloxane/silicone/silane compounds  
 F13: Fluoro thiols compounds  
 F14: Fluoro thioether compounds  
 F15: Fluoro thioester compounds  
 F16: Fluoro urethane compounds  
 F17: Partial fluoro & miscellaneous fluoro compounds

**Figure 1.** OECD's classification of perfluorinated compounds that was used in the survey on the production, use and release of PFOS, PFOA, PFCA, their related substances and products/mixtures containing these substances<sup>2,4)</sup>.

산과 사용에 대한 조사를 2~3년 간격으로 실시하여 왔다<sup>1,2,4,5,9,10,12</sup>. 2007년 PFOS, PFAS, PFOA, PFCA, 각 관련 물질, 분해되어 PFCA로 되는 물질에 대한 리스트를 엑셀 형태로 발표하였고<sup>2</sup> 다양하고 복잡한 과불화합물에 대한 물질 리스트를 발표한 후에 훨씬 유용한 조사 결과를 얻을 수 있었다. 이들 조사 대상에는 전체 고분자의 일부분으로서 PFCA나 PFAS를 갖는 고분자도 포함되었고 PFCs라는 같은 약어로 불리는 불화탄소 온실가스와 고분자 주 골격이 과불화된 PTFE와 같은 불소 고분자는 포함되지 않는다<sup>4</sup>.

OECD는 PFOS 및 PFOA 외에 다음의 과불화합물을 중점적으로 모니터링해오고 있다<sup>4,9</sup>:

- PFOA를 포함한 탄소사슬 길이 C8 및 그 이상 PFCA
- PFOS 및 PFHxS(perfluorohexane sulfonic acid)를 포함한 탄소사슬 길이 C6 및 그 이상의 PFAS
- 이들 물질을 의도적으로 생성할 가능성이 있거나 제품 내 불순물로 존재하는 전구체 또한 OECD 조사 시 관심을 갖는 세 개 물질군을 설정<sup>3</sup>.
- 과불화된 탄소 사슬을 갖는 과불알킬 물질(per-fluoroalkyl substances)
- 탄소 사슬이 완전히 불소화되지는 않았지만 분자의 일부로써, 과불화된 부분(perfluorinated moiety)을 갖는 불소 텔로머 및 다불화 물질(polyfluoroalkyl substances)
- 과불화된 측쇄를 갖는 측쇄불화형 고분자(side-chain-fluorinated polymers)

## 2.2 과불화합물 이해를 위한 용어 정리

### 2.2.1 사슬 길이

과불알킬(perfluoroalkyl) 산이나 그 음이온은 자주 “긴 사슬(long-chain)” 혹은 “짧은 사슬(short-chain)”이라 언급되는데, 이를 확실히 하고자 OECD에서 과불알킬 carboxylates와 sulfonates에 대해 사슬 길이를 정의하였다. “긴 사슬”이란 8개 혹은 그 이상의 탄소로 이루어진 과불알킬 카르복실산(7개 이상의 과불화된 탄소를 갖음)과 6개 혹은 그 이상의 탄소로 이루어진 과불알킬 술폰산(즉, 6개 이상의 과불화된 탄소를 갖음)을 일컬으며, 이와 같이 PFCA와 PFSA에 대해 각각 정의가 다르다<sup>3,9,12</sup>. 그 이유는 사슬 길이 6

을 갖게 되는 PFSA(즉, PFHxS, C<sub>6</sub>F<sub>13</sub>SO<sub>3</sub>H)는 같은 사슬 길이를 갖는 PFCA(즉, PFHxA, C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>COOH)에 비해 훨씬 생물농축성이 크기 때문이다<sup>3</sup>. 이렇듯 긴 사슬(longchain) 과불화합물과 짧은 사슬(short-chain) 과불화합물과의 차이점은 독성(toxicity)과 생물농축성(bioaccumulation)에 근거를 두고 있다<sup>14</sup>. OECD 정의는 과불알킬 carboxylates와 sulfonates에 대한 것이지만, 과불화된 사슬이 7개(즉, C<sub>7</sub>F<sub>15</sub>-) 혹은 그 이상이면 어느 경우라도 “긴 사슬”로 여길 수 있게 된다<sup>1</sup>.

참고로, PFOS와 PFOA는 보통 C8 화합물로 불려왔는데, PFOA의 경우, 사슬 길이를 기능기(functional group)의 탄소는 제외하고 과불화된 탄소 사슬길이만으로 여겨 PFOA(C<sub>7</sub>F<sub>15</sub>-COOH)를 C7으로 불려야 한다는 의견도 있다<sup>1</sup>.

### 2.2.2 과불화 및 다불화

과불화(perfluoro/perfluorinated) 물질이란 aliphatic 물질에서 기능기(functional group)에 결합된 수소 원자를 제외하고, 모든 수소 원자가 불소 원자로 치환되어 C-H가 C-F로 되었음을 의미한다. 다불화(polyfluoro/polyfluorinated) 물질은 많은 수소가 불소로 치환되었지만 모두 다 치환되지는 않았음을 의미한다<sup>1</sup>. 전자는 aliphatic 사슬이 perfluoroalkyl moiety(C<sub>n</sub>F<sub>2n+1</sub>-)만으로 구성된 반면, 후자는 perfluoroalkyl moiety(C<sub>n</sub>F<sub>2n+1</sub>-)에 짧은 탄화수소(C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>-) 사슬이 연결된다. PFC를 과불화 및 다불화 화합물로 명명하기도 하고, 더 특징적으로는 과불알킬 및 다불알킬 물질(PFAS, Table 1의 두 번째 뜻의 PFAS)이라고 표현하기도 한다.

### 2.2.3 Electrochemical fluorination 및 Telomerization

과불화합물은 electrochemical fluorination(ECF) 혹은 telomerization의 두 가지 방법에 의해 주로 합성된다<sup>5</sup>. ECF는 octane sulfonyl fluoride 등과 같은 유기물질을 전기분해하여 수소 원자를 불소 원자로 치환하는 과정이며, free-radical 반응으로 진행되므로 과불화합물뿐만 아니라 선형 및 가지형 사슬의 과불 이성질체, 출발물질의 동종물질 등이 같이 생산된다. 전통적으로 PFOS(출발물질: POSF) 및 PFOA(출발물

질: perfluorooctanoyl fluoride)를 제조하는데 사용되어 왔다.

Telomerization은 perfluoroalkyl iodide(PFAI)와 tetrafluoroethylene(TFE)를 반응시켜 더 긴 과불화사슬을 갖는 perfluoroalkyl iodide를 합성하는 기술이며, PFAI를 “telogen”, TFE를 “taxogen”이라고 한다. 첫 단계 이후 ethylene이 삽입되는 두 번째 단계가 진행되는데, 첫 단계에서 생성된 perfluoroalkyl iodide 혼합물(텔로머 A)과 두 번째 단계에서 생성된 fluorotelomer iodides(텔로머 B)는 최종의 “fluorotelomer-based” surfactant와 polymer 제조를 위한 원부물질 중간체(raw material intermediates)가 된다. Telogen과 taxogen이 선형인지 가지형인지에 따라 생성물질도 완전히 선형 혹은 가지형이 되는 것이 telomerization 반응의 특징이다<sup>3,5)</sup>. 텔로머라고 하는 불화 물질은 telomerization이란 특수한 고분자 합성 과정에 의해 생산되며, 텔로머는 모든 C-H가 C-F로 되지 않고 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>- 기로 종료된다.

### 2.3 과불화합물 전구체

과불화합물 전구체(precursor)란 PFOA를 포함한 탄소 사슬 길이 C8과 그 이상의 PFCA 혹은 PFH<sub>x</sub>S and PFOS를 포함한 탄소 사슬 길이 C6 이상의 PFAS로 분해될 수 있는 잠재력을 가진 물질을 의미한다<sup>1)</sup>. 이와 같이 PFCA나 PFAS로 분해되는 물질인 전구체는 환경에 잔존하여(persistent) 건강과 환경에 악영향을 미치므로 모니터링 대상이 되고 있다<sup>2-5)</sup>.

예로, PFOSA(perfluorooctanesulfonamide)는 PFOS의 전구체이고<sup>4)</sup>, 텔로머 제조 공정에서 잔존하는 텔로머 알코올과 텔로머 요오드와 같은 모노머는 최종 산물에 남게 되어 PFOA로 변환될 수 있으므로 유력한 PFOA 전구체이다<sup>1)</sup>. 즉, 계면활성제 그리고 축쇄를 불화시킨 고분자의 제조 등에 널리 사용되는 8:2 fluorotelomer alcohol(8:2 FTOH)과 같은 다불화알킬(polyfluorinated alkyl) 물질은 불화되지 않은 탄소 사슬도 갖고 있으나, 환경에서 분해하여 과불화알킬(perfluorinated alkyl) 물질이 되는 대표적인 전구체 물질이다<sup>8)</sup>.

### 2.4 PFC 용어에 대한 다른 의견

PFC(perfluorinated chemical, perfluorinated

compounds)는 온실가스 중의 하나인 PFC(perfluorocarbons)와 혼동이 되므로 과불화합물을 지칭할 때 PFC라는 약어를 사용하지 말고 PFAS(per- and polyfluorinated alkyl substances)를 사용하자는 주장이 제기되었으나<sup>13)</sup>, PFAS 약어를 사용할 경우도 PFAS(perfluoroalkyl sulfonate)와 약어가 같아 혼동을 하지 말고 구별하여 사용해야 한다. 현재 과불화합물을 지칭할 때 PFC와 PFAS가 병행하여 같이 사용되고 있음을 참조해야 한다. 예로 OECD에서는 2013년 자료에 “과불화(perfluorinated) 및 다불화(polyfluorinated)된 물질 즉 PFC”란 표현을 사용하였고<sup>12,14)</sup> 2014년 독일의 BfR(federal institute for risk assessment) 심포지움에서 Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances를 PFAS란 약어로 사용하였다<sup>8)</sup>. OECD/UNEP GLOBAL PFC GROUP에서는 “과거에는 PFAS가 종종 PFC로 지칭되었다”라는 언급과 함께 PFC를 “long-chain perfluorinated compounds(LC PFASs), short-chain perfluorinated compounds(SC PFASs)”라고 표현하였고, 모든 약어(abbreviations and acronyms)에 대해 완전 일치시키는 것(harmonize)은 가능하지 않으며, 과불화합물을 주제로 논의할 때 PFAS란 약어와 함께 오래 전부터 인정되어 사용되어 온 PFC란 약어를 충분히 사용할 수 있다는 의견이다<sup>14)</sup>.

## 3. 과불화합물 생산량 및 국내·외 유통 과불화합물의 종류

2000년~2003년 미국 3M의 생산 중단으로 PFOS의 글로벌 생산량이 급격히 감소했다. 2009년 UNIDO 연구에 의하면, 중국이 2003년 대규모 PFOS 생산을 시작했고, 2005년부터 중국의 연간 생산량은 중국 내 용도 및 해외 수요 증가로 급속히 성장하여 2003년~2008년 PFOS 축적 생산량은 250톤(이 중 200톤은 중국 내수)이며 2006년 PFOS를 생산하는 중국 회사 수는 15개로 증가하였다. 이 시기에 PFOS 및 관련 물질 축적 생산량은 410톤으로 중국이 절반을 생산하였고, 일본 100톤, 독일이 25톤의 순서였다<sup>3)</sup>.

2006년 다양한 과불화합물의 종류에 대한 리스트를 발간하여 과불화합물의 구조 및 명칭에 대한 이해를 도운 결과, 이 후 OECD에서 OECD 국가를 대상으로 수

행한 과불화합물의 글로벌 유통 조사는 질적으로 크게 향상되었다<sup>2)</sup>.

2009년의 조사 결과는 다음과 같다<sup>4)</sup>:

- PFOS 및 PFOS 관련물질 :  
perfluorooctane sulfonate(PFOS), potassium perfluorooctane sulfonate, ammonium perfluorooctane sulfonate, perfluorooctane sulfonyl fluoride(PFOSF)의 4종
  - PFAS 및 PFAS 관련물질 :  
perfluorohexane sulfonate, potassium perfluorohexane sulfonate, perfluorohexane sulfonyl fluoride의 3종
  - PFOA 및 PFOA 관련물질
    - PFOA 및 PFOA의 염/esters : PFOA, PFOA branched, methyl perfluorooctanoate, PFOA potassium salt, PFOA ammonium salt, fatty acids/C7-13/perfluoro/ammonium salts의 6종
    - PFOA 관련물질 : Perfluorooctyl iodide의 1종
    - 분해되어 PFOA 물질로 되는 물질(C8:2 fluorotelomers) : C8:2 alcohol, C8:2 iodide, C8:2 methacrylate, C8:2 acrylate, C8:2 olefin의 5종
  - PFCA 및 PFCA 관련물질
    - C8보다 긴 탄소사슬의 PFCA :  
(Perfluorododecanoic acid(PFDoA), Perfluorononanoic acid(PFNA), Ammonium perfluorononanoate(APFN), Perfluorodecanoic acid(PFDA), perfluoroundecanoic acid(PFUnA)의 5종
    - PFCA 관련물질 :  
C10 iodide, C12 iodide, C14 iodide, C16 iodide의 4종
    - C8보다 긴 사슬의 플루오로텔로머 :  
C10:2 alcohol, C12:2 alcohol, C14:2 alcohol, C10:2 iodide, C12:2 iodide, C14:2 iodide, C16:2 iodide, C18:2 iodide, C10:2 methacrylate, C12:2 methacrylate, C14:2 methacrylate, C10:2 acrylate, C12:2 acrylate, C14:2 acrylate의 14종
- Ammonium perfluorooctanoate(APFO)와 Am-

monium perfluorononanoate(APFN)가 글로벌하게 제조되는 주요 PFCA이며, 불소 고분자(fluoropolymers)와 산업 용도 및 소비자 용도의 계면활성제로 널리 사용되어 왔고<sup>5,9-11)</sup> 환경에서 검출되는 PFCA의 주요 발생점은 크게 두 가지로 볼 수 있다<sup>5)</sup>:

- Fluorotelomers, PTFE 같은 불소고분자, 혹은 APFO 등을 제조하는 생산 플랜트
- Fluorotelomer alcohol과 같은 PFCA-전구체를 배출하는 제품

PFCA는 플루오르텔로머 기반 물질과 함께 미반응 물질로 잔존하여 그 자체로 배출될 수 있고, fluorotelomer-based substances가 분해되어 배출될 수 있다. 상용 플루오르텔로머 기반 물질의 과불화 탄소사슬 길이는 다음과 같이 매우 다양하다.

(n = 1~5, 2~6, 2~10, 2~11, 2~14, 2~16, 2~18, 3~5, 3~9, 4, 4~7, 4~8, 4~12, 4~14, 4~16, 4~18, 5~11, 6~10, 6~12, 6~14, 6~16, 6~18, 7~13, 8~14, 8~16, 9~15, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17)<sup>2)</sup>

실내 대기 연구로부터 먼지 입자와 연계된 PFCA 전구체가 존재하여 가공된 카펫이나 섬유로부터 발생했으리라 추측되었고, 분석 결과 플루오르텔로머 알코올(FTOH)과 소량의 PFCA 및 perfluoroalkyl sulfonate (PFAS)가 의류 및 섬유제품에서 배출될 수 있음이 밝혀졌고 10.7mg/m<sup>2</sup>의 FTOH가 검출되었다<sup>16,17)</sup>.

유럽 REACH제도를 통해 2010년과 2013년 2번에 걸쳐 등록된 물질 중 ECHA 홈페이지에서 “perfluoro” 검색어 서치에 의해 유럽에서 생산되거나 수입되는 과불화합물 종류 및 유통량 범위를 조사해 보았는데, “perfluoro” 검색어로 검색된 물질 중 직접적인 관련이 있는 물질의 예는 다음과 같다<sup>18)</sup>:

- Tetraethylammonium heptadecafluorooctanesulphonate
- Alcohols, C8-14,  $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro
- 2-Propenoic acid,  $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro-C8-14-alkyl esters
- Alkyl iodides, C8-14,  $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro
- Alkyl iodides, C6-18, perfluoro
- N, N, N, -triethylethan ammonium 1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluorobutane-1-sulfonate

PFOS(테트라에틸암모늄염)가 연간 1~10톤 범위로 등록되었고, 과불알코올 및 2종 과불요오드가 중간체로 등록되었으며, C-4 base PFAS가 1~10톤 범위, 과불 모노머(아크릴)는 유통량이 연간 100~1000톤 범위로 등록되어 있다(Table 2).

환경부 국립환경과학원의 화학물질정보시스템(National Chemicals Information System of Korea)으로부터 “perfluoro” 검색어로 검색된 국내 과불화합물 리스트는 총 145종이었고, 이 중 관련 없는 물질을 제외해보면 약 120여 종이다<sup>19)</sup>. 대표적인 예로는 텔로머 알코올, 인계 유도체, 아크릴 모노머, 텔로머 요오드, 실리콘계 폴리머, 아크릴계 폴리머 등이 있고

PFOS(칼륨염)도 있으며 이들 물질들은 덴마크 및 캐나다에 등재된 과불화합물 등과 유사한 과불 화합물 들이다. 검색된 과불화합물 중 퍼플루오로옥탄술포산칼륨(고유번호: 2010-1-612)과 퍼플루오로옥탄산 테트라메틸암모늄(고유번호: 97-1-327)이 유독물질로 지정되어 있다(Figure 2).

### 4. 과불화합물의 용도

#### 4.1 생활용품에서의 과불화합물 용도

과불화합물은 탁월한 발수성, 발유성 및 방오성으로 인해 매우 다양한 제품에 사용되어 왔다. PFOA의 주

**Table 2.** Tonnages, uses and registrants of examples from perfluorinated compounds registered in EU REACH<sup>18)</sup>

EC No.	CAS No.	Substance name	Chemical structures registered in REACH	Total tonnage band(ton/year)	Registrant	Uses
260-375-3	56773-42-3	Tetraethylammonium heptadecafluorooctanesulphonate		1-10	Confidential	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metal (chromium) plating</li> <li>• Manufacture of fabricated metal products</li> </ul>
269-927-8	68391-08-2	alcohols C8-14, $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro		Intermediate use only		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermediate consumed in a reaction under strictly controlled conditions</li> <li>- Intermediate</li> <li>- Manufacture of fine chemicals</li> </ul>
288-003-5	85631-54-5	2-propenoic acid, $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro-C8-14-alkyl esters	-	100-1,000	Archroma Germany GmbH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Use of the monomer to produce polymers</li> <li>- Intermediate</li> <li>- Manufacture of fine chemicals</li> </ul>
289-100-5	85995-91-1	Alkyl iodides, C8-14, $\gamma$ - $\omega$ -perfluoro	-	Intermediate use only		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strictly controlled intermediate consumed in chemical synthesis</li> <li>- Intermediate</li> <li>- Manufacture of chemicals and chemical products</li> </ul>
292-474-2	90622-71-2	Alkyl iodides, C6-18, perfluoro		Intermediate use only		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strictly controlled intermediate consumed in chemical synthesis</li> <li>- Intermediate</li> <li>- Manufacture of chemicals and chemical products</li> </ul>
700-536-1	25628-08-4	N,N,N-triethylethanammonium 1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluorobutane-1-sulfonate		1-10	Confidential	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metal (chromium) plating</li> <li>• Manufacture of fabricated metal products</li> </ul>

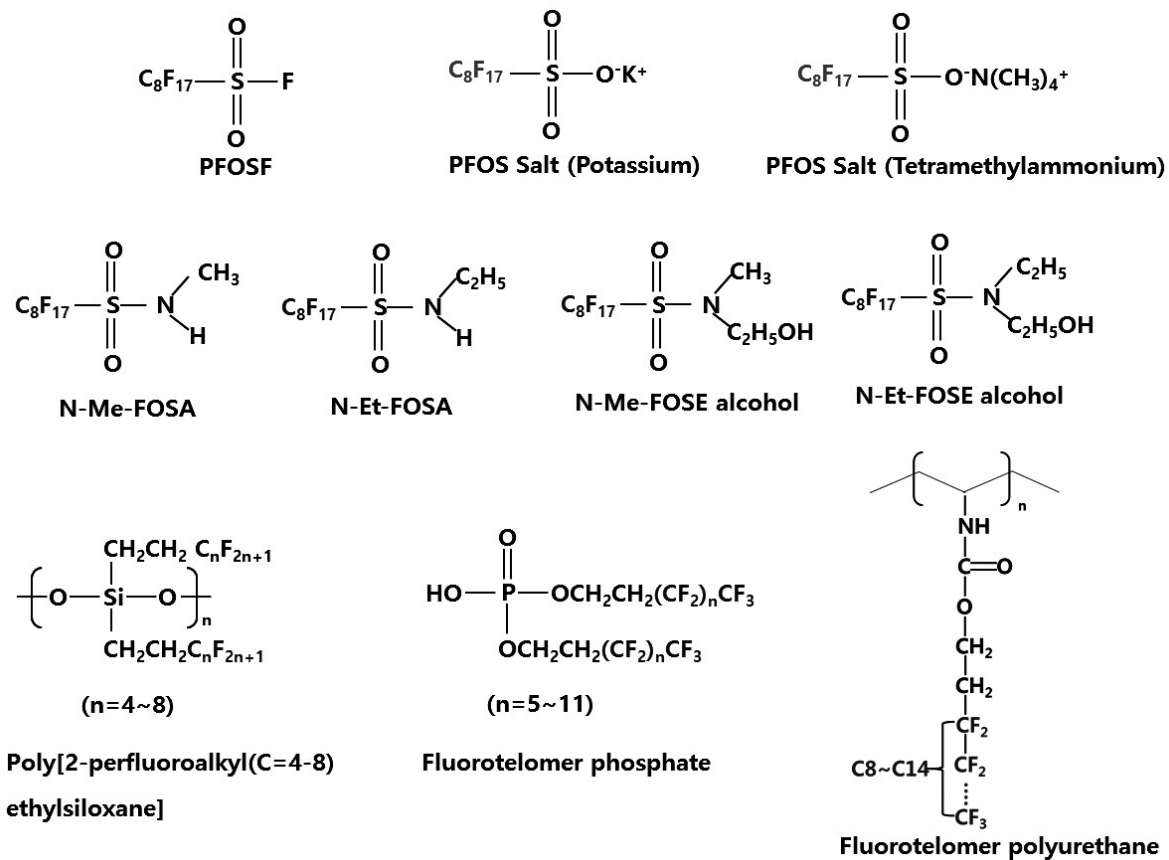


Figure 2. Examples of various perfluorinated compounds that have been used globally and domestically.

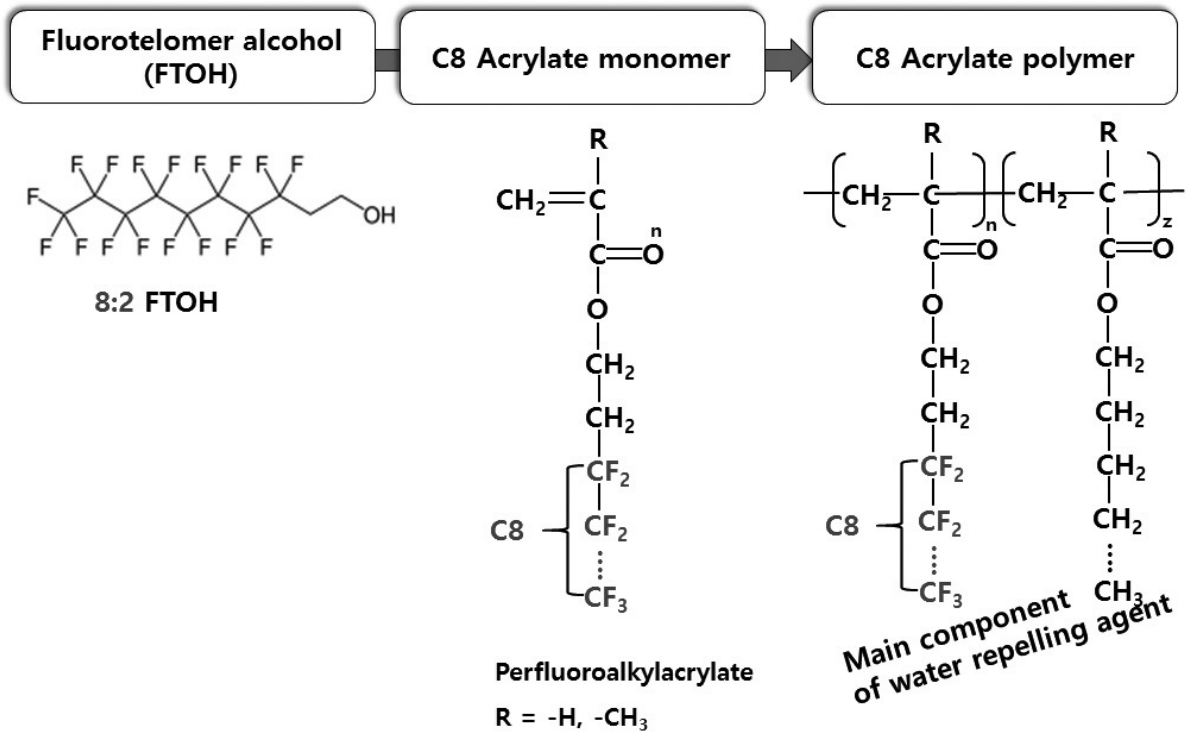
요 용도는 polytetrafluoroethylene(PTFE)와 같은 불소 고분자 생산 시 공정 케미컬로 사용되고, perfluorononanoic acid(PFNA)도 비슷한 기능으로 polyvinylidene fluoride(PVDF) 생산 시 보조제로 사용된다<sup>1-5,10,11</sup>. 불소 고분자 PVDF는 조리용기, 전자제품, 섬유, 와이어 및 케이블 코팅, 반도체 등에 사용되므로 공정 중에 사용되었던 PFOA 혹은 PFNA가 잔류할 가능성이 크다.

PFOS 및 PFOS 관련 물질은 지난 십여년간 퇴출되어 왔고, 비교적 분자량이 적은 고분자형의 여러 텔로머들이 PFOS의 용도를 대신하여 카펫, 섬유, 종이, 석조물 및 가죽에 발수성, 발유성 및 방오성을 부여하기 위한 표면 처리에 사용되며, 페인트, 코팅제, 세정제, 액체연료 화재용 소화약제, 혹은 반도체 박막에 사용되고 있다<sup>10-12,14</sup>.

이와 같이 계면활성제나 표면처리 약품으로 사용되는 플루오르텔로머는 어떤 배합물(예로 소화약제)에서는 주요 활성 성분으로 혹은 더 복잡한 배합물(예로 in impregnating products)에서는 매우 소량 성분으로

사용되기도 한다. 가장 많이 쓰여 온 용도는 섬유 분야이며, 습윤제(wetting agents), 소포제 및 가공제로서 스포츠웨어, 작업복, 카펫, 가구 등에 사용된다. 기름진 식품의 포장지에 기름 방지막으로 사용되고, 코팅, 광택, 왁스, 창문 청소용 및 그 외 용도의 세정 제품에 계면활성제로 사용되며, 소화약제에는 C8을 대체한 C6 과불사슬을 갖는 플루오르텔로머가 계면활성제로 사용된다<sup>10,11</sup>.

PFOS의 용도에 있어 개발도상국과 선진국의 주요한 차이점은 전자의 경우 생활용 및 산업용으로 다양하게 응용되고 있는 반면 후자는 해당 물질의 대체가 어려운 특별 용도에 대하여 유예기간을 두어 산업 용도로만 제한적으로 사용되고 있다는 것이다. 예로, 2008년 중국에서 과불화합물 용도 조사 결과, 섬유, 소화약제, 농약, 금속 도금, 반도체, 세정 제품 등에 사용되었고, 섬유가공에 사용된 PFOS는 100톤이었다<sup>3,10</sup>. 2009년 OECD 조사에 의하면, 연간 2.5톤의 PFOS 및 관련 물질이 도금 산업(크롬 도금 시 김서림 방지제, 양극산화



**Figure 3.** An example of chemical structure of the common C8 perfluorinated water repelling component.

및 산세척), 사진관련 산업(종이제품, 인쇄용 판, 필름 제품), 반도체 산업(감광제, 반사방지코팅, 감광막용 현상액), 항공산업(유압작동유), 소화약제에 한하여 제한적으로 사용되었다<sup>20)</sup>. 2005년 기준으로 유럽 내에 가장 많은 양의 PFOS 관련 물질은 화재 발생 시 사용하기 위한 소화약제 용도로 약 122톤이 저장되어 있었으나, Directive 2006/122/EC에 의거 2011년 6월 27일까지 모두 소진하도록 규정하였으므로, 현재 유럽 내에 소화약제로 사용되는 PFOS 물질은 없을 것으로 예상된다<sup>20)</sup>. 과불 계면활성제를 성분으로 함유하고 있는 소화약제는 포소화약제 중에 수성막포 소화약제 (aqueous film foaming agents) 및 불화단백포 소화약제이다. 차세대 핵심소방안전기술개발사업 최종 보고서(2010년)에 의하면, 포소화약제에 대한 국내시장은 약 만톤 정도이며, 소방서나 군, 또는 관공서를 제외하고는 수입제품을 사용하는 경우가 많고, 대부분 수성막포를 사용하며, 수성막포 소화약제에 과불 계면활성제가 5-10%로 함유되어 있다<sup>21)</sup>.

2012년 노르웨이 오염방지청, 덴마크 EPA 및 수의 식품청에서 자국의 소비자제품에서의 과불화합물 함유 실태를 파악하였는데, 가죽과 카펫에서 기준치(1

μg/m<sup>2</sup>)이상 검출되고, 각 종 액체용 제품에 8:2 및 10:2 FTOH가 약 5-10%가 함유되어 있었던 점이 특이 사항이었고 또한, 전 세계 플루오르텔로머 기반 물질의 50% 정도가 의류 가공에 사용되리라 파악하고 있고 덴마크에서는 2008년 약 400kg의 불소화합물질이 직물 함침에 사용되었으며, 분해되어 PFOA와 PFCA로 되는 물질 및 분해되어 PFOS와 PFSA로 되는 물질에도 관심을 갖고 실태 파악을 하였다<sup>3)</sup>.

#### 4.2 섬유제품용 발수제 용도로 사용되는 과불화합물 현황

국내 섬유제품용 발수제에는 8:2 텔로머 알코올, 혹은 이 물질이 아크릴에 결합한 아크릴 모노머 형태의 물질이 몇 개의 글로벌 과불화합물 제조회사로부터 수입되어, 5~6개의 국내 조제업체에서 고분자(발수제 주성분)로 합성되어 최종 발수제(고분자 에멀전 형태)로 판매되어 왔었다(Figure 3). 과불화합물 발수제의 원료물질은 텔로머 알코올, 텔로머 요오드 혹은 텔로머 아크릴 모노머 형태로 모두 수입되며, 주요 국외 공급처는 일본의 Nicca, Daikin, Asahi 및 독일의 Clariant(현재 사업 인수자 : 스위스 Archroma), 미국의 DuPont과 3M이며, 중국원료도 매우 소량 사용되고

있는 것으로 조사되었다. 2013년 기준 약 10% 정도만 C6 텔로머 아크릴 기반 발수제로 대체되어 있었으나, 2014년 기준 20% 정도, 미국 EPA의 Stewardship 프로그램이 종료된 2015년은 발수가공 시장의 40% 수준으로 대체되었고, C8 발수제의 생산은 더 이상 없이 2016년 내로 잔고 소진이 될 전망이다.

중국이 C8 발수제를 생산하는 체계를 갖추어 발수제 생산이 확장되고 있고 중국 내수용으로 C8을 사용하는 것으로 진척이 될 가능성이 높아서, C8을 제한하는 국제적인 규제 동향이 난항을 겪을 가능성도 높다는 산업계 의견이 있다. 국내 발수제 원료는 중국에서 적지않게 수입되고 있고, 발수가공된 완제품의 유통을 고려하면 이에 대한 관리 방안이 필요하리라 사료된다.

대부분 발수제 가공업체에서 C8 발수제를 사용하고 있더라도, PFOA가 섬유에서 검출될 경향은 낮으며, 의류 대기업의 Blue Sign 획득과 같은 친환경 인증과 연계가 되어, 중견 원단 생산업체는 발수 가공 시에 이와 같은 PFOA 미검출의 Blue Sign 인증을 받은 불소 발수제를 공급받아 사용하고 있는 추세이다. 따라서 Blue Sign 인증을 받은 아사히, 니카 발수제의 공급이 증가해 왔다. 과불화합물이 주성분으로 사용되는 발수제는 다음 섬유제품 가공에 주로 쓰인다:

- 폴리에스테르/나일론 원단의 아웃도어 의류
- 나일론 원단의 텐트
- 폴리에스테르 재료의 인조피혁
- 가죽제품
- 자동차용 및 사무공간용 카펫
- 액체 필터 및 에어필터용 폴리에스테르 부직포

## 5. 과불화합물의 글로벌 규제 현황

### 5.1 국제협약에서 규제하는 과불화합물

스톡홀름협약은 생물 농축성, 장거리 이동성, 독성의 특성을 지닌 POPs(Persistent Organic Pollutants, 잔류성 유기오염물질)로부터 인간의 건강과 환경을 보호하기 위해 2004년 5월에 발효된 국제 협약이며, 2009년 5월 4차 미팅에서 산업용 화학물질(industrial chemicals) 그룹에 과불화합물 중 PFOS와 이들의 염, PFOSF(n-perfluorooctanesulfonyl fluoride)를 Annex B 물질(생산/사용 제한물질)로 규정하여 관리하고 있고, 이의 영향으로 국내에서는

2010년부터 하·폐수종말처리장 등의 주요 배출원에 대한 노출실태조사가 추진되었다<sup>22-24</sup>.

바젤협약은 유해 폐기물의 국가 간 이동이나 교역을 규제하는 국제 환경협약으로 1983년 3월 스위스 바젤에서 UNEP 32개국이 서명하고 1992년 5월에 정식 발효되었다. 2013년 5월 개최된 11번째 미팅에서 PFOS와 이들의 염, PFOSF를 포함하는 폐기물의 환경적으로 건전한 관리를 위한 기술지침을 2013년 3월 까지 의견 수렴을 마치고 캐나다의 주도하에 의결하였다<sup>24</sup>.

로테르담협약은 특정 유해화학물질 및 농약의 국제 교역 시 사전통보승인(PIC, prior informed consent)에 관한 협약으로 1998년 9월 네덜란드 로테르담 외교회의에서 채택되고, 2004년 2월에 발효되었는데, 2013년 5월, 제6차 미팅에서 PIC 절차가 필요한 물질 목록인 부속서 III에 과불화합물 추가 여부가 논의되었으며, 논의된 과불화합물은 PFOS, PFOSA, PFOSF이다<sup>24</sup>.

### 5.2 REACH에서 규제하는 과불화합물

유럽 REACH(Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals, 신화학물질관리제도)에서는 화학물질별 인체독성 및 생태독성 실험 자료를 기반으로 유해성 평가(hazard assessment)를 수행하며 이로부터 화학물질 규제에 대한 근거를 제시하고 있다. 2006년 PFOS를 시작으로, 2012년 C8보다 긴 사슬(C11, C12, C13, C14)의 PFCA 과불화합물, 2013년 PFOA 및 PFOA 암모늄염을 SVHC(Substances of Very High Concern, 고위험성 물질)로 단계적으로 규제하였고, 규제 내용은 Table 3과 같다<sup>25</sup>.

REACH의 제한(Restriction) 규제는 물질별로 제한 조건이 있는데, PFOS는 혼합물로 사용될 경우 50 mg/kg(무게비로 0.005%), 부품 및 완제품에 사용될 경우 무게비로 0.1%, 코팅재료로 사용될 경우는 1 µg/m<sup>2</sup>이다. 단, 광 식각 공정을 위한 감광제 또는 반사방지코팅(반도체 산업), 필름, 종이, 인쇄판 등에 적용하는 사진코팅, 전기도금 습윤제, 비 장식성 경질크롬 도금용, 항공기 유압작동유에 사용하는 것은 예외 조항이 적용되는데, 안전한 대체물질이 이 용도로 개발될 때까지 예외가 적용된다. 단, 예외 적용되는 동안 가능한 최적 기술로 PFOS의 환경배출을 최소화해야 한

다. 소방품의 성분으로 사용하는 것은 이미 제조된 소방품의 소진을 위해 2011.6.27.까지 사용이 가능했었으나 예외 적용 기간이 만료되었다<sup>26)</sup>. 허가후보물질(Candidate List of SVHC for Authorisation)로 규제되는 PFOA, PFOA 암모늄염, C11~C14 PFCA는 완제품 내 0.1% w/w 이면서 연간 총 1톤 이상이면 신고(Notification)하게 되어 있고, 완제품 내 물질정보를 하위사용자나 소비자가 요청하면 45일 이내 이들 과불화합물이 함유되었는지 여부에 대해 무상으로 제공하여야 한다<sup>25)</sup>.

### 5.3 미국 EPA의 과불화합물 규제

2015년 1월 21일 미국 EPA(Environmental Protection Agency, 환경청)은 PFOA 및 PFOA 관련물질 혹은 완제품의 일부 제조자(수입자) 및 이들 물질을 더 가공하는 자는 어떤 제품에서 이들 물질을 신규 사용하기 90일 전에 신고하도록 하여 필요 시 제한 및 금

지할 수 있도록 하고 있다. 이러한 독성물질관리법(Toxic Substances Control Act)하의 중요 신규사용규칙(Significant New Use Rule; SNUR)으로 EPA는 2002년부터 긴사슬 PFAS(per- and polyfluoroalkyl substances)를 체계적으로 규제해 왔었다(2002년 3월 13개 PFAS 물질; 2002년 9월 75개 PFAS 물질; 2007년 9월 183개 PFAS 물질; 2013년 9월 카펫에 사용되는 PFOA 관련물질)<sup>27)</sup>.

2006년 시작된 EPA의 2010/2015 PFOA Stewardship Program은 PFAS를 제조하는 8개 주요 글로벌 회사(Arkema, Asahi, BASF/Ciba, Clariant, Daikin, 3M/Dyneon, DuPont, Solvay Solexis)들이 PFOA, PFOA로 분해될 수 있는 전구체, 탄소사슬이 PFOA보다 더 긴 PFCA의 환경 배출과 제품 내 함유량 감소에 대한 진도보고서를 매년 10월 31일까지 제출하여, 2000년을 전후한 각 회사별 연도를 기준으로 2010년 전에 95% 감소 그리고 2015년까지 환경 배

**Table 3.** Hazards of perfluorinated compounds and EU REACH's regulation on these chemicals<sup>25,26)</sup>

Substance name	Acronym	Chain length	CAS No.	Hazard*	Regulation	
					Candidate list for authorization	Restriction
Perfluorooctane sulfonates <b>C<sub>8</sub>F<sub>17</sub>SO<sub>2</sub>X</b> (X = OH, Metal salt (O-M <sup>+</sup> ), halide, amide, and other derivatives including polymers)	PFOS	C8	Various	CMR, PBT		● 2009.6. (Entry No. 53) *restricted in 2006 before REACH
Heptacosafuorotetradecanoic acid <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>12</sub>-COOH</b>	PFTeDA	C14	376-06-7	vPvB	● 2012.12.19	
Pentacosafuorotridecanoic acid <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>11</sub>-COOH</b>	PFTTrDA	C13	72629-94-8	vPvB	● 2012.12.19	
Tricosafuorododecanoic acid <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>10</sub>-COOH</b>	PFDoA	C12	307-55-1	vPvB	● 2012.12.19	
Henicosafuoroundecanoic acid <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>9</sub>-COOH</b>	PFUdA	C11	2058-94-8	vPvB	● 2012.12.19	
Perfluorooctanoic acid (Pentadecafluorooctanoic acid) <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-COOH</b>	PFOA	C8	335-67-1	CM(R), PBT	● 2013.6.20	
Ammonium pentadecafluorooctanoate <b>CF<sub>3</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>6</sub>-COO-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	APFO	C8	3825-26-1		● 2013.6.20	

\* CMR: Carcinogenic, Mutagenic or Toxic to reproduction

\* PBT : Persistent, Bioaccumulation and Toxic

\* vPvB : very Persistent and very Bio-accumulative

출 및 제품에서 완전 제거함을 목표로 하였다. 2010/2015 PFOA Stewardship 프로그램은 2007년~2015년 동안 10월 31일까지 연간 보고서를 제출하게 되어 있으며, 2006년 10월 제출한 baseline data를 기준으로 개선된 진척 사항을 산출하도록 되어 있다. 2014년 연간개선보고서(공개된 가장 최근 보고서)를 비교하기 쉽도록 더 간결한 형태로 Table 4에 재정리하였다<sup>28)</sup>.

PFOA, PFOA 염, PFOA보다 긴 사슬 동종체 및 전구체의 4 가지 분류 물질에 대해 미국과 미국 외 지역으로 구분하여, 제조 공정에서의 환경 배출과 제품 함유량에 대한 보고서를 제출하도록 하여 모니터링 해왔음을 알 수 있고, 제품은 플루오르폴리머 분산형, 그 외 플루오르폴리머(건조형), 텔로머의 세 가지 제품으로 나눈다. 보고서에 따르면 3M의 경우, 미국은 1999년, 미국의 지역은 2000년을 기점으로 하여, PFOA 환경 배출 각 1,700kg, 14,400kg에서 모두 PFOA 무배출을 달성하였고, 플루오르폴리머 제품 내 PFOA 함유량도 각 4,300ppm 및 1,600ppm에서 PFOA 무함유를 달성했다. DuPont의 경우, 플루오르폴리머 분산형 및 그 외 플루오르폴리머(건조형) 제품에 함유된 PFOA는 미국 지역에서 각 970ppm, 340ppm 기준에서 모두 2ppm으로 감소하였고(99% 이상 달성), 미국 외 지역에서는 PFOA 함유량 각 1,040ppm, 300ppm 기준에서 1ppm 및 무함유로 저감함을 보고하였다. 클라리언트(현재 아크로마가 사업 인수)는 미국 외 지역에서 텔로머를 주로 생산해 온 기업으로, 2005년(기준해) 텔로머 함유 PFOA의 양이 총 <5kg에서 총 <1kg으로 감소하였고, 텔로머 함유 전구체의 양은 총 <100kg에서 총 <7kg으로 감소하였다<sup>28)</sup>.

플루오르텔로머 알코올(FTOHs)이 다른 플루오르텔로머 및 측쇄불화폴리머(side-chain-fluorinated polymers)의 중간체로 사용되면서, 휘발성이 있어 제조 및 플루오르텔로머 기반 제품의 사용 시의 배출에 대한 심각성이 대두되고 있으나<sup>29-32)</sup>, EPA 보고서의 환경배출 자료에는 FTOHs 자료는 없다.

EPA에서는 플루오르텔로머 기반의 고분자(FTPs)가 PFOA 및 다른 과불화합물로 분해되는 것을 확인하는 방법을 개발하였고 이들 고분자가 더 작고 더 유해한 과불화합물이 되는 지 여부에 대해서 연구하여, 널리 통용되었던 개념 '잠재적으로 유해한 화합물로 분해

되어 환경에 배출되지는 않는다는'을 깨고 시간이 지남에 따라 분해되는 결과를 발표하였다<sup>33-35)</sup>.

#### 5.4 섬유제품과 관련된 과불화합물 규제 현황

섬유제품의 글로벌 민간규제인 Oeko-Tex Standard 100, Bluesign, GOTS(Global Organic Textile Standard) 및 그린피스에 동조하는 아디다스, 나이키, 푸마 등 세계적인 스포츠 웨어 메이커와 H&M, GAP 등의 대형 어퍼웨어 메이커가 ZDHC(Zero Discharge of Hazardous Chemicals, 2020년까지 유해물질 무방출 달성)를 주도함에 따라 PFOS/PFOA 뿐만 아니라 C8과 그 이상의 과불화합물을 갖는 과불화합물이 규제 대상이 되고 있다.

유럽 섬유연구소에서 제창한 Oeko-Tex Standard 100은 강제적이 아닌에도 불구하고 섬유제품에 함유된 유해물질의 사실적 규제로서, 글로벌 기업 주도로 전 세계 섬유제품에 영향을 미쳐왔다.

현재(2016년) 과불화합물에 대한 규제 내용은 Table 5와 같으며 다음과 같이 규제 항목 및 기준치를 개정하면서 가장 엄격한 기준치를 제시하고 있다<sup>36)</sup>.

- 2009년 PFOS, PFOA 처음 도입
- 2014년 개정을 통해 PFOA 규제치를 강화하고(유아용 0.05mg/kg, 일반 0.1mg/kg, 비의류용 0.5mg/kg) 및 C-11, 12, 13, 14의 4개 물질 추가
- 2015년 개정을 통해 PFOA 규제치를 <1.0 μg/m<sup>2</sup>로 강화함
- 2016년 개정을 통해 C-7, C-9, C-10의 3개 물질 추가하여 총 9개 과불화합물을 규제함

## 6. 대체물질 현황

과불화합물의 대체물질이라 할 때 과불화합물은 PFOA, PFOS 및 긴 사슬 PFCA가 주 대상이다.

PFCA로 분해될 잠재력을 가진 플루오르텔로머 알코올 및 다른 플루오르텔로머 전구체들은 1970년대부터 생산되어 PFOS와 동시에 시장에 유통되었다. PFOS를 퇴출하면서 3M에서는 짧은 사슬 perfluoroalkyl sulfonates(예로 perfluorobutane sulfonate (PFBS))나 플루오르텔로머를 대체물질로 선택하였다. C8 플루오르텔로머는 분해되어 PFOA가 되므로 더 짧은 사슬의 플루오르텔로머를 대체물질로 개발하였

**Table 4.** Summary of most recently reported reductions in emissions and product content of PFOA, precursors, and higher homologues from (a) U.S. operations and (b) non-US operation : (1) percent reduction in emissions and product content and (2) actual emissions and product content<sup>(2B)</sup>

(1) Percent reduction in emissions and product content

Company	Chemical category	% Reduction in emissions*	% Reduction in product content*		
			Fluoropolymer dispersions	Other fluoropolymers	Telomer based products
Arkema	PFOA & Higher homologues	(a) 91% (b) CBI	(a) 100% (b) Not applicable	(a) 96% (b) CBI	(a), (b) Not applicable
	Precursors	(a), (b) Not applicable			
Asahi	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) 100% (b) 99.8%	(a) 100% (b) 100%	(a) 100% (b) 99.9%	(a) Not applicable (b) Negligible
	Precursors	(a) Not applicable (b) 100%	(b) Not applicable	(b) Not applicable	(b) 100%
BASF (Ciba)	PFOA & Higher homologues	(a), (b) 100%			
	Precursors				
Clariant	PFOA & PFOA salts	(a) Not applicable (b) >80%	(b) None reported	(b) None reported	(b) 90%
	Direct precursors	(a) Not applicable (b) >85%	(b) None reported	(b) None reported	(b) 94%
Daikin	PFOA	(a) 100% (b) None reported	(a) 100%	(a) >100%	(a) 100%
	Precursors & Higher homologues	(a) 100% (a) Not applicable	(a) Not applicable	(a) Not applicable	(a) >99%
DuPont	PFOA & PFOA salts	(a) 99.8% (b) 99.8%	(a) 99% (b) 99.9%	(a) 99% (b) 100%	99% (regional data: CBI)
	Higher homologues	(a), (b) None reported			
Dyneon/3M	Precursors	(a), (b) CBI	(a), (b) None reported	(a), (b) None reported	98% (regional data: CBI)
	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) 100% (b) 100%	(a) 100% (b) 100%	(a) Not applicable (b) 100%	(a), (b) No Telomer production
Solvay Solexis, Inc.	Precursors	(a), (b) No precursor production			
	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) >99.999% (b) Not applicable	(a) >99.999%	(a) >99.999%	(a) Not applicable
	Precursors	(a), (b) Not applicable			

## (2) Actual emissions and product content

Company	Chemical category	Emissions		Product content		
		Releases to all media** (kg)	kg of release/kg of product produced	Dispersions (ppm wet-weight basis)	Other fluoropolymers (ppm dry-weight basis)	Telomers (ppm dry-weight basis, unless stated otherwise)
Arkema	PFOA & Higher homologues	(a) > 500 – 2,000	(a) > 0.0001 – 0.0005	(a) 0	(a) > 5 – 20	(a), (b)
		(b) > 500 – 2,000	(b) > 0.0003 – 0.0008	(b) Not applicable	(b) > 25 – 75	Not applicable
Asahi	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) 0	(a) Not applicable	(a) 0	(a) 0	(a) Not applicable
		(b) 20.1	(b) For FP Production: < 1 kg/100 kg	(b) 0	(b) 18	(b) Negligible
	Precursors	(a) Not applicable				
		(b) 0	(b) For Telomer Prod: < 1kg/100 kg	(b) Not applicable	(b) Not applicable	(b) Average 50% (range: 0–100%)
BASF (Ciba)	PFOA & Higher homologues	(a), (b)				
		Not applicable				
Clariant	PFOA & PFOA salts	(a) Not applicable				
		(b) 1.0	(b) None reported	(b) None reported	(b) None reported	(b) < 1 kg
	Direct Precursors	(a) Not applicable				
		(b) < 1.5	(b) None reported	(b) None reported	(b) None reported	(b) < 7 kg
Daikin	PFOA	(a) 0	(a) 0	(a) 0	(a) 0	(a) 0
		(b) None reported				
	Precursors & Higher homologues	(a) 0	(a) 0	(a) Not applicable	(a) Not applicable	(a) 0
		(b) None reported				
DuPont	PFOA & PFOA salts	(a) 90	(a), (b)			9 kg
		(b) 45	None reported	(a) 2	(a) 2	(regional data: CBI)
	Higher homologues	(a), (b)	(a), (b)	(b) 1	(b) 0	(a), (b)
	Precursors	None reported	None reported			None reported
		(a), (b) CBI	(a), (b)	(a), (b)	(a), (b)	< 8 kg
Dyneon/3M	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) 0	(a) 0	(a) 0	(a) 0	(a), (b)
						No telomer production
	Precursors	(a), (b) 0				
Solvay Solexis, Inc.	PFOA, PFOA salts & Higher homologues	(a) 0	(a) 0	(a) < 2	(a) < 1 ppb	(a), (b)
		(b) Not applicable	(b) Not applicable	(b) Not applicable	(b) Not applicable	Not applicable
	Precursors					

\*Cumulative percent reductions from each baseline year through end of 2012

\*\* from FP and telomer manufacturing

**Table 5.** Oeko-Tex Standard 100' prohibition of perfluorinated compounds in textile products in 2016<sup>36)</sup>

Product class Perfluorinated compounds			I	II	III	IV
			Baby	In direct contact with skin	With no direct contact with skin	Decoration material
Name	CAS No.	Acronym (Unit)				
Perfluorooctane sulfonates	various	PFOS ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Perfluoroheptanoic acids	various	PFHpA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Perfluorooctanoic acids	various	PFOA ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Perfluorononanoic acids	various	PFNA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Perfluorodecanoic acids	various	PFDA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Henicosafleuroundecanoic acid	2058-94-8	PFUdA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Tricosafleurorododecanoic acid	307-55-1	PFDoA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Pentacosafleurotridecanoic acid	72629-94-8	PFTTrDA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5
Heptacosafleurotetradecanoic acid	376-06-7	PFTeDA (mg/kg)	0.05	0.1	0.1	0.5

다. EPA에서는 2000년부터 대체물질에 대한 검토를 해오고 있으며, 2010/15 PFOA Stewardship Program에서도 대체물질의 개발을 계속적으로 장려해왔다. EPA의 New Chemicals Program(NCP)의 일환으로 대체물질 검토가 이루어지는데 특히, 과불화합물에 대해 과거부터 이슈였던 독성, 거동(fate) 및 생물농축성 이슈를 주요하게 검토하고 있으며, 150여개의 대체물질이 제안되어 EPA가 검토를 하였다<sup>37, 38)</sup>.

긴 사슬 과불화합물(LCPFCs)의 대체물질이나 최종 제품에 불순물로 존재하는 LCPFCs를 제거하는 신공정을 개발하는 것이 주요한 기술적 도전이며, 현재까지 개발된 많은 대체물질은  $\leq C6$ 의 더 짧은 사슬의 과불화합물로서, 필요한 기능성은 제공하나 LCPFCs가 갖고 있는 독성과 생물농축성 잠재력이 없는 것으로 여겨진다<sup>39)</sup>.

긴 사슬 ( $\geq C8$ )보다 덜 유해한 과불알킬 사슬 길이 ( $\leq C6$ )를 갖는 화합물이나 고분자가 기술적으로 긴 사슬 다불화합물(polyfluorinated chemicals)의 최고의 대체물질인 반면 fluoroalkyl polyether, fluorinated ethers, ketones 그리고 비불소 대체물질인 silicone polymers, siloxanes, propylated aromatics, sulfosuccinates 등과 다음의 물질이 3M, DuPont, BASF, Omnova Solutions Inc, Worlee-Chemie, Rutgers Kureha Solvents GmbH, Munzing Chemie 등의 회사에서 개발되고 있다(Table 6)

3, 39-41):

- Shorter-chain perfluoroalkyl sulfonates
- Shorter-chain perfluoroalkyl ketones and ethers
- Polyfluorodialkyl ether sulfonates
- Fluorotelomers and fluorophosphates
- Fluorinated co-polymers
- Fluorinated polyethers
- Siloxanes and silicone polymers
- Propylated aromatics
- Sulfosuccinates
- Stearamidomethyl pyridine chloride
- Polypropylene glycol ether, amines, and sulfates

불소 대체물질은 잔류성은 있는 반면 긴 사슬 화합물보다 생물농축성 및 독성은 적으며, 비불소 대체물질은 잔류성과 생물농축성이 크지는 않으나, siloxanes과 나노물질의 경우 더 독성이 있는 경우도 보고되고 있으며, 대부분의 연구가 과불화합물에 대해 수행되어, 대체물질의 독성에 대한 공공 자료는 미흡한 편이다<sup>40)</sup>.

탄소사슬 8개 과불화합물인 PFOA, PFOS 및 C8 이상의 과불화합물을 가진 불소 발수제는 유럽 REACH, 미국 EPA의 규제에 의해 2015년 이후 주요 8개 기업에서는 생산하지 않을 것이 확실시 되었고, 불소 발수제 메이커들은 이미 C6 기술에 의한 C6 과불화합물 생산체제를

**Table 6.** Main alternatives to long-chain polyfluorinated chemicals<sup>3, 38-40)</sup>

Alternative compounds	Used in / used for
Perfluorobutane sulfonate (PFBS) or based on different C4-perfluoro compounds	Paint and coatings industry, electronic coating; industrial and commercial cleaning; stain protectors for carpets, leather, furniture, automotive, hard surfaces and other apparels
C6 fluorotelomer sulfonamide compounds	Fire-fighting foam
C4-C6 Fluorotelomer alcohols and esters	Surfactant, coating, printing, textile and chemical industries
Fluorinated co-polymers	Impregnation of leather and indoor car upholstery
CF <sub>3</sub> or C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> fluoroalkyl polyethers	Surfactant and flow-, level-, and wetting additive for coating formulations, floor polish
Dodecafluoro-2-methylpentane-3-one	Fire-fighting foam
Perfluorobutyl methyl ethers	Industrial cleaning
Propylated naphthalenes or bi-phenyls	Water repelling agents for rust protection systems, marine paints, coatings, etc.
Fatty alcohol polyglycol ether sulfate	Levelling and wetting agents
Silicone polymers	Wetting agents in the paint and ink industry
	Levelling and wetting agents
Sulfosuccinate	Paint and coating industry: wetting and dispersing agents for water based applications e.g. wood primers

가동해와서, 현재 과도기적으로 C8과 C6 과불화합물의 발수제가 공존하고 있다.

국내 자동차용 도료에는 PFOS가 표면광택제로 첨가되어 자동차 도색에 사용되어 왔는데, 2000년 초반 3M 및 DuPont에서의 PFOS 공급이 중단된 이래, 실리콘계 광택제로 대체하여 사용하고 있음이 도료 생산 업체를 통하여 조사되었다. 스웨덴 ChemSec에서는 특히 섬유공정에 사용되는 과불화합물 및 다른 유해물질에 대한 대체물질을 사용한 약제들이 상품 브랜드 및 생산기업 위주로 서치가 되도록 웹을 운영하고 있다<sup>41)</sup>.

섬유용 발수제로 사용되는 과불화합물의 대체 현황은 단계적으로 free PFOA 함유를 줄인 C8-과불발수제, C6-과불발수제, C6 과불-비불소계 혼합 발수제, 비불소계 발수제 등이 개발되어 사용되고 있다. 과불사슬을 줄이면서 free PFOA의 양을 크게 줄이는 C6-기술에서 달성한 수준은 PFOA 0.5ppm 이하 혹은 PFOA free(5ppb 이하)이며, 비불소계 발수제는 “fat modified resin”, “60% renewably sourced raw materials”, “dendrimer”, “3D molecules”, “hydrocarbon polymer” 등의 특징을 가지고 있다<sup>42)</sup>. 또

한 2014년부터 Huntsman 및 Rudolf, 2015년에는 Chemours(DuPont 스핀오프회사) 등의 글로벌 케미컬 기업의 비불소 발수제도 국내 시장에 도입되었는데 배경에는 Marks & Spencer, Gaps 등을 비롯한 친환경 의류기업이 비불소 발수제 사용 의류 판매를 주도하고 있고 국내 염색가공업체에 이와 관련한 수주가 발생하고 있기 때문이다(Figure 4).

국내에서도 아크릴 고분자 기반의 비불소계 발수제가 2015년부터 판매되고 있고 PFOA-free 불소 고분자의 발수도 향상을 위해 나노 실리카 입자를 이용한 lotus effect 등이 연구되고 있다<sup>43-46)</sup>.

## 7. 결 론

PFCs(perfluorinated chemicals)는 과불화합물 및 다불화합물(per- and polyfluorinated chemicals)을 모두 포함하여 사용되고 있는 용어로, 더 구체적으로는 과불알킬 화합물 및 다불알킬 화합물(per- and polyfluoroalkyl substances(PFASs))을 말한



**Figure 4.** (a) Prohibition on the use of C8 perfluorinated compounds in textile industry, (b) global textile and clothing retailers leading the use of fluorine-free water repelling agents, and (c) global chemical companies that started to market them.

다. 이들 물질은 1950년대부터 세정제, 섬유, 가죽, 종이, 잉크, 소화약제, 절연체 등의 산업적 응용 및 소비자 제품에 광범위하게 사용되어 오면서, 2000년을 전후하여 잔류성, 생물농축성 및 독성이 주목받았고, 실제 환경, 생물체, 인간, 식품 등에서 세계 도처에서 검출되면서 긴 사슬 물질을 중심으로 규제 대상물질이 되었다.

과불화합물은 Arkema, Asahi, BASF/Ciba, Clariant, Daikin, 3M/Dyneon, DuPont, Solvay Solexis 등의 글로벌 기업과 중국, 일본 등에서 주로 생산하고 있는데, 중국의 몇 개 제조업체와 일본 니카는 C8 알킬 사슬을 기반으로 한 과불화합물을 계속 생산할 것으로 전망되고 있다. C8 및 C8 이상 긴 사슬의 과불알킬을 이용한 발수·발유·방오제는 C6 과불알킬 혹은 비불소 화합물 기반의 대체물질을 이용한 시장으로 전환되고 있는 한편, 형식 자원이 풍부한 중국에서는 C8 과불화합물을 중국 내수용으로 사용할 가능성이 크다고 동종업계에서 전망하고 있고, 널리 쓰이고 있는 PTFE, PVDF, ETFE 등의 불소 고분자 생산에 PFOA가 공정 케미컬로 사용되어 왔으므로 국내 수입되는 제품에 대한 PFOA 관리가 필요하다.

따라서 생활용품에 대한 국내 과불화합물 관리기준 또는 안전기준 도입이 필요한 시점이며, 이를 위해서는 신뢰할 수 있는 과불화합물의 유통량 조사, 생활용품에 함유되어 있는 과불화합물 및 과불화합물 전구체 종류 및 함유량 조사, 글로벌 규제의 업데이트 등이 필요하고 이미 정부 용역사업으로 일부 진행되었거나 진행 중이다. 유통량 조사는 1차에서 3차에 걸친 OECD 조사에서 알 수 있듯이 과불화합물에 대한 리스트 작업을 포

함한 조사 방법의 확립과 주요 PFC 제조회사의 파악 및 협력 요청이 선행되어야 유용한 조사 결과에 다가갈 수 있다. 생활용품 실태 조사는 기능을 위해 주요 성분으로 사용된 과불화합물의 종류 및 사슬길이를 파악하고 특히 휘발성 플루오로로머의 검출 및 고분자, 실리콘 화합물 등의 측쇄사슬이나 인산형으로 존재하여 검출되지 않는 과불알킬에 대한 실태 파악이 필요하리라 사료된다. 그리고 주요 성분이 아닌 계면활성제 등의 공정 케미컬로 사용되어 최종 제품에 불순물로 존재하는 미량 PFCA(대표적인 예로 PFOA)의 정량 검출을 통해 이에 대한 규제치 마련의 근거를 확보해야 한다. 안전기준 부재 시 PFOA 및 긴 사슬 PFCA는 자체로 혹은 그 전구체를 통해 “Poisons without Passports”<sup>5)</sup>의 개념으로 국내 소비자 생활로 스며들게 된다.

OECD에서 수행한 과불화합물의 글로벌 유통 조사는 2006년 다양한 과불화합물의 종류에 대한 리스트를 발간하여 과불화합물의 구조 및 명칭에 대한 이해를 도운 것이 이후의 조사 결과를 질적으로 향상시키는데 기여하였다. 국제기구 보고서, 국제 학술논문 및 심포지움, 관련 서적, OECD 및 EPA의 기술 자료들로부터 국내·외 유통되는 과불화합물의 종류, 과불화합물의 용도 및 글로벌 과불화합물 규제 뿐만 아니라 다양한 과불화합물에 대한 용어 및 약어를 정리하였고 과불화합물 분류체계 및 분류체계별 대표적 과불화합물의 화학구조를 제시하였다. 정리 요약된 과불화합물에 대한 정보는 국내 과불화합물 유통량 조사나 법적 규제 활동을 위해 이해관계자간의 기본적인 소통이 필요할 때 유익하리라 사료된다.

## 감사의 글

본 총설의 일부는 환경부 국립환경과학원 연구용역 사업의 결과입니다.

## References

1. Organisation for Economic Co-operation and Development(2016), OECD Portal on Perfluorinated Chemicals, Available at: [www.oecd.org/ehs/pfc/](http://www.oecd.org/ehs/pfc/), 2016.7.1.
2. ENV/JM/MONO(2006)15, Lists of PFOS, PFAS, PFOA, PFCA, Related Compounds and Chemicals that May Degrade to PFCA, OECD Environment, Health and Safety Publications, 2007.
3. Environmental Project No. 1475, Survey of PFOS, PFOA and other Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances, Danish Environmental Protection Agency, Denmark, 2013.
4. ENV/JM/MONO(2011)1, Survey on the Production, Use and Release of PFOS, PFOA, PFCA, their Related Substances and Products/Mixtures Containing these Substances, OECD Environment, Health and Safety Publications, 2011.
5. ENV/JM/MONO(2007)11, Report of an OECD Workshop on Perfluorocarboxylic Acids(PFCAs) and Precursors, OECD Environment, Health and Safety Publications, 2007.
6. W. W. Lee, W. H. Chang, H. Pyo, T. S. Kang, and J. Hong, Analytical Trend of Perfluorinated Compounds in Environmental and Biota Samples, *Analytical Science and Technology*, **23**(4), 331(2010).
7. B. C. Paik, T. R. Kim, and S. K. Kam, Distribution of Perfluorinated Compounds(PFCs) in Sumjin River and Southern Coastal Area of Korea, *J. of the Korean Society of Urban Environment*, **14**(2), 87(2014).
8. Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances(PFAS): Status Quo of Consumer Health Assessment on PFAS, BfR-Symposium, Federal Institute for Risk Assessment(BfR), BfR-Symposium, 6-7 March, Berlin, pp.31-37, 2014.
9. B. Diderich, OECD Activities on Perfluorinated Chemicals, EU Workshop on Perfluorooctanoic Acid and its Ammonium Salt: Production, Use and Risk, Brussels, 4 May, 2010.
10. Report Nr 7/06, Perfluorinated Substances and their Uses in Sweden, Swedish Chemicals Agency (KEMI), Sweden, 2006.
11. Project Report 09/47, Survey, Screening and Analyses of PFCs in Consumer Products, Swerea IVF AB, Sweden, 2009.
12. K. Madsen, OECD/UNEP Global PFC Group, POPs COP6, 29 April, 2013.
13. I. R. C. Buck, J. Franklin, U. Berger, J. M. Conder, I. T. Cousins, P. Voogt, A. A. Jensen, K. Kannan, S. A. Mabury, and S. J. Leeuwen, Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins, *Integrated Environmental Assessment and Management*, **7**, 513(2011).
14. OECD, OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis Paper on Per- and Polyfluorinated Chemicals(PFCs), Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD, 2013.
15. S. Satya, PFCs: Outcome of the 2009 OECD Survey, OECD Webinar on Perfluorinated Chemicals, March, 2011.
16. Greenpeace(2014), Chemistry for Any Weather: Per- and Polyfluorinated Chemicals in Textile Products and Ambient Air, Available at: [www.switchmed.eu/en/documents/greenpeace\\_chemistry-any-weather-pfc-textiles-1.pdf](http://www.switchmed.eu/en/documents/greenpeace_chemistry-any-weather-pfc-textiles-1.pdf), 2016.7.1.
17. M. Schlummer, L. Gruber, D. Fiedler, M. Kizlauskas, and J. Muller, Detection of Fluorotelomer Alcohols in Indoor Environments and their Relevance for Human Exposure, *Environ Int.*, **57-58**, 42(2013).
18. European Chemicals Agency, Information on Chemicals, Available at: [echa.europa.eu/information-on-chemicals](http://echa.europa.eu/information-on-chemicals), 2016.
19. National Chemicals Information System, Chemical Search, Available at: [ncis.nier.go.kr/ncis/CLU0402.do](http://ncis.nier.go.kr/ncis/CLU0402.do), 2016.7.1.
20. Directive 2006/122/EC, Restrictions on the Marketing and Use of Certain Dangerous Substances and Preparations(perfluorooctane sulfonates), the European Parliament and the Council of the European Union, 2006.

21. Final Report to National Emergency Management Agency, Research and Development of Eco-friendly, High-rise Special Extinguish Chemicals, Incheon National University, 2010.
22. Final Report to NIER, Study on Estimation of PFCs Emissions to Environment, POSTECH, 2011.
23. Ministry of Environment News(2009), Report from the 4th Stockholm Convention, Available at: [www.me.go.kr/home/web/board/list](http://www.me.go.kr/home/web/board/list). 2016.7.1.
24. Nier-SP2013-436, Survey and Analyses of PFOS, its Salts and PFOSF and National Institute of Environmental Research, 2013.
25. European Chemicals Agency, Candidate List of Substances of Very High Concern for Authorisation, Available at: [echa.europa.eu/chem\\_data/authorisation\\_process/candidate\\_list\\_obligations\\_en.asp](http://echa.europa.eu/chem_data/authorisation_process/candidate_list_obligations_en.asp), 2016.6.20.
26. Commission Regulation(EC) No 552/2009, Amending Regulation(EC) No 1907/2006 on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as Regards Annex XVII, the Commission of the European Communities, 2009.
27. US Environmental Protection Agency(2016), Per- and Polyfluoroalkyl Substances(PFASs) under TSCA, Available at: [www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/and-polyfluoroalkyl-substances-pfass-under-tsca](http://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/and-polyfluoroalkyl-substances-pfass-under-tsca), 2016.7.1.
28. US Environmental Protection Agency(2016), PFOA Stewardship Program Baseline Year Summary Report, Available at: [www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/pfoa-stewardship-program-baseline-year-summary-report](http://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/pfoa-stewardship-program-baseline-year-summary-report), 2016.7.1.
29. M. A. Kaiser, B. S. Larsen, C. P. Kao, and R. C. Buck, Vapor Pressures of Perfluorooctanoic, -Nonanoic, -Decanoic, -Undecanoic, and -Dodecanoic Acids, *J. of Chemical and Engineering Data*, **50**, 1841(2005).
30. S. Posner, T. P. Knepper, and F. T. Lange, "Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp.25-39, 2012.
31. I. E. Jogstena, M. Nadalb, B. V. Bavela, G. Lindstroma, and J. L. Domingob, Per- and Polyfluorinated Compounds(PFCs) in House Dust and Indoor Air in Catalonia, Spain: Implications for Human Exposure, *Environment International*, **39**(1), 172(2012).
32. S. Fiedlera, G. Pfistera, and K. W. Schrammab, Poly- and Perfluorinated Compounds in Household Consumer Products, *Toxicological and Environmental Chemistry*, **92**(10), 1801(2010).
33. US Environmental Protection Agency(2016), Research on Per- and Polyfluoroalkyl Substances(PFAS), Available at: [www2.epa.gov/chemical-research/perfluorinated-chemical-pfc-research](http://www2.epa.gov/chemical-research/perfluorinated-chemical-pfc-research), 2016.6.20.
34. J. Washington, J. Naile, T. Jenkins, and D. Lynch, Characterizing Fluorotelomer and Polyfluoroalkyl Substances in New and Aged Fluorotelomer-Based Polymers for Degradation Studies with GC/MS and LC/MS/MS, *Environmental Science and Technology*, **48**(10), 5762(2014).
35. M. J. A. Dinglasan, Y. Ye, E. A. Edwards, and S. A. Mabury, Fluorotelomer Alcohol Biodegradation Yields Poly- and Perfluorinated Acids, *Environmental Science and Technology*, **38**(10), 2857(2004).
36. Oeko-Tex® Standard 100, General and Special Conditions for the Authorization to Use the Oeko-Tex® Standard 100 Mark, ed. 03/2016, Oeko-Tex® Association, 2016.
37. US Environmental Protection Agency(2016), Alternative Chemicals, Available at: [www.epa.gov/oppt/pfoa/pubs/altnewchems.html](http://www.epa.gov/oppt/pfoa/pubs/altnewchems.html), 2016.7.1.
38. US Environmental Protection Agency(2016), Safer Choice, Available at: [www2.epa.gov/saferchoice](http://www2.epa.gov/saferchoice), 2016.7.1.
39. Organisation for Economic Co-operation and Development, Information on Short-Chain PFCs and Other Alternatives, Available at: [www.oecd.org/ehs/pfc/informationonshort-chainpfcsotheralternatives.htm](http://www.oecd.org/ehs/pfc/informationonshort-chainpfcsotheralternatives.htm), 2016.6.20.
40. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 06/2006, Uses of Perfluorinated Substances, Available at: [www.greenpeace.to/publications/uses-of-perfluorinated-chemicals.pdf](http://www.greenpeace.to/publications/uses-of-perfluorinated-chemicals.pdf), 2016.6.20.
41. S. Banda, Introduction to the Guidance on Perfluorooctane Sulfonate and its Derivatives, Available at: [www.oecd.org/env/ehs/risk-management/47643074.pdf](http://www.oecd.org/env/ehs/risk-management/47643074.pdf), 2016.6.20.

42. The International Chemical Secretariat(ChemSec) (2016), Alternative Chemicals-Guidance for Possible Substitution Substances and Scenarios, Available at: [textileguide.chemsec.org/act/alternative-chemicals-you-can-use](http://textileguide.chemsec.org/act/alternative-chemicals-you-can-use), 2016.6.20.
43. Marks and Spencer(2014), PFC Substitution Guidelines, Available at: [corporate.marksandspencer.com/documents/policy-documents/ecp-modules/module-11.pdf](http://corporate.marksandspencer.com/documents/policy-documents/ecp-modules/module-11.pdf), 2016.7.1.
44. S. M. Park, I. J. Kwon, R. Kim, J. H. Yeum, N. S. Yoon, and K. N. Lee, A Study on the Self-cleaning Surface Finishing Using PFOA Free Fluoric Polymer and Silica Nano-sol, *Textile Coloration and Finishing*, **21**(6), 1(2009).
45. H. K. Shin, M. W. Huh, and N. S. Yoon, Fabrication of Silica-Containing Breathable Waterproof Polyurethane Dispersion Film, *Textile Coloration and Finishing*, **27**(2), 126(2015).
46. T. Kim, M. Ryu, and Y. Jang, Synthesis of Super Hydrophobic Disazo Red Dyes using Alkylanilines as Diazo Components, *Textile Coloration and Finishing*, **27**(1), 27(2015).