

환경호르몬 문제 해결을 위한 재료공학 연구 동향

곽승엽 · 최정수 · 김성호

1. 서론

우리 인류에게는 기존 재료의 약점을 보완하고 급변하는 시대가 요구하는 정밀 제어된 물성을 보유하는 신소재의 개발을 통한 풍요로움의 추구 뿐만 아니라, 지구생태계에 미치는 위해를 최소화하여 동시대를 살아가는 인류와 생태계 구성원과 후세에게 환경적인 삶의 질을 보장해 주어야 할 의무가 있다. 그런 의미에서 1990년대 후반 등장하여 근래에는 매일같이 신문이나 잡지에서 주요하게 다뤄지고 있는 환경호르몬 문제에 대해 체계적인 현상 파악과 함께 근본적인 대책을 수립하기 위한 재료공학의 역할을 정확히 짚고 넘어가는 것이 중요하다.

환경호르몬 (environmental hormones)이란 말은 '환경'에 노출된 화학물질이 생체 내로 유입돼 마치 호르몬처럼 작용한다는 의미에서 일반인의 이해를 돕기 위해 만들어진 용어로, 학술적으로 널리 사용되는 용어는 내분비계 교란물질 (endocrine disruptors)이며 생체의 생리기능을 관장하는 내분비계의 비정

상적인 작용을 유발하는 원인물질이다. 전세계적으로 내분비계 교란물질과 관련된 이슈가 환경운동가, 환경정책입안자, 정치가, 환경보건학자 사이에 본격적인 관심을 끌게 된 결정적인 계기는 1996년 콜본 (Colborn), 더마노스키 (Dumanoski), 마이어스 (Myers) 등이 함께 저술한 [도둑맞은 미래 (Our Stolen Future)]가 출판되면서이다 (그림 1).¹ 이 책에서 저자들은 환경성 내분비계 교란물질이 야생동물과 인류의 생식, 면역, 그리고 정신 기능의 장애와 교란을 유발하는 주범일 수 있음을 체계적으로



최정수

1994~ 서울대학교 섬유고분자공학과
1998 (학사)
1998~ 서울대학교 재료공학부 (석사)
2000
2000~ 서울대학교 재료공학부 박사과정
현재



곽승엽

1983~ 서울대학교 섬유공학과 (학사)
1987
1987~ 미국 University of Akron
1989 (석사)
1989~ 미국 University of Akron
1992 (박사)
1993~ 한국과학기술연구원(KIST)
1996 (선임연구원)
1996~ 서울대학교 재료공학부
현재 조, 부교수



김성호

1995~ 서울대학교 응용화학부 (학사)
1999
1999~ 서울대학교 재료공학부 (석사)
2001
2001~ 서울대학교 재료공학부 박사과정
현재

Research Trends in Materials Science and Engineering to Solve the Problem of Endocrine Disruptors

서울대학교 재료공학부 (Seung-Yeop Kwak, Jeongsoo Choi, and Sung-Ho Kim, School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, Korea)
e-mail: sykwak@snu.ac.kr



그림 1. 1996년 출판되어 환경 호르몬의 위험을 경고한 “Our Stolen Future”.

지적하였다. 본 총설에서는 근래 각종 합성물질과 관련하여 크게 이슈화 되고 있는 환경호르몬 (내분비계 교란물질)의 작용과 인체를 비롯한 생태계에 미치는 위해 사례에 대해 알아보고, 재료공학을 이용한 환경호르몬 문제해결을 위한 연구 현황에 대해, 특히 재료와 밀접한 관계가 있는 환경호르몬인 다이옥신 및 프탈레이트 가소제 문제 해결에 대한 연구를 살펴본다.

2. 현재 대두되고 있는 환경호르몬 문제

2.1 환경호르몬의 작용 (표 1)

호르몬이란 생물의 성장, 생식, 그리고 행동을 비롯한 다양한 생리 작용에 영향을 미치는 것으로, 사람의 경우 **그림 2**에서 보듯이 뇌, 갑상선, 부갑상선, 흉선, 부신, 췌장, 생식소 등의 내분비선에서 분비되며 호르몬 종류는 알려진 것만 백여종에 달한다. 분비된 호르몬은 혈액을 타고 목표 지점에 도착, 세포 표면에 존재하는 수용체에 자극을 가하여 작용하며, 호르몬의 과잉 또는 부족은 질병을 유발하게 된다.

그림 3은 환경호르몬의 정상호르몬에 대한 방해 작용을 나타내는 모식도이다. 호르몬과 수용체의 관계는 열쇠와 자물쇠의 결합 관계와 유사하다. 호르몬의 특정 부위가 수용체에 성공적으로 결합하면, 이 신호가 세포 내 유전자에 도달해 유전자의 특정 부위를 활성화시켜 작용이 일어난다.² 환경호르몬의

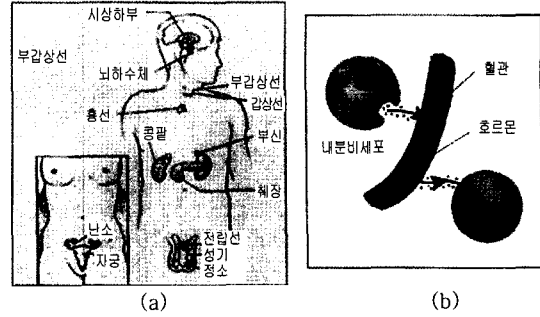
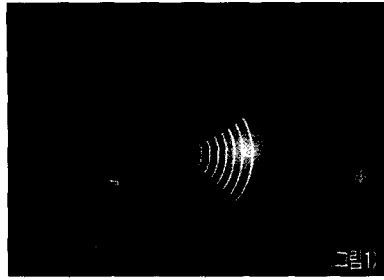


그림 2. 인체내에서의 호르몬의 작용. (a) 인체의 호르몬 분비기관, (b) 호르몬의 작용 메카니즘.

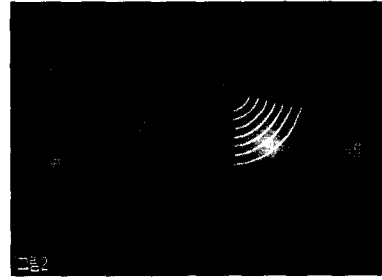
‘방해공작’은 수많은 경로를 통해 이루어지는데, 각 물질이 구체적으로 어떤 메카니즘을 통해 영향을 미치는지는 확실히 밝혀지지 않았다. 여기서는 현재 까지 알려진 몇 가지 가설을 살펴보게 된다.³⁻⁵

유사한 분자구조상의 특성으로 인해 세포 수용체가 환경호르몬을 정상호르몬과 구분하지 못하고 결합할 수 있다 (모방설, **그림 3** (b)). 이런 환경호르몬의 양이 증가하면 세포 유전자는 평소보다 과도하게 활동을 벌인다. 예를 들어 제노에스트로겐이라는 합성물질은 여성호르몬 에스트라디올과 거의 비슷하게 작용한다. 흔히 여성호르몬의 양이 지나치게 많아지면 유방암이나 자궁암에 걸릴 확률이 높아진다고 알려졌다. 환경호르몬이 많아질수록 암에 걸릴 가능성이 커진다는 의미다. 이에 비해 수용체와 결합하긴 하되 세포에 영향을 미치지 않고 단지 천연호르몬의 결합을 방해하는 경우가 있다 (봉쇄설, **그림 3** (c)). 예를 들어 남성호르몬 테스토스테론이 붙을 자리에 DDE (제초제 DDT의 부산물질)가 결합하면 남성은 성징이 감소해 여성화된다. 이 때문에 미국 플로리다주 아포프카호수에 서식하는 악어 수컷의 경우 음경이 위축돼 번식률이 줄어들었다. 또한 수용체에 결합한 환경호르몬이 똑같은 수용체를 세포 표면에 더 많이 만드는 경우도 있다 (이상자극설, **그림 3** (d)). 이렇게 되면 세포로서는 무리하게 정상보다 훨씬 많은 자극을 받는 셈이고, 또한 환경호르몬이 수용체와 결합하지 않은 채 약 영향을 미치는 상황이 존재한다. 예를 들어 다이옥신이나 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyl, PCB)은 이런 과정을 거쳐 남성호르몬과 갑상선 호르몬, 그리고 인슐린의 혈중 농도를 떨어뜨린다고 알려졌다.

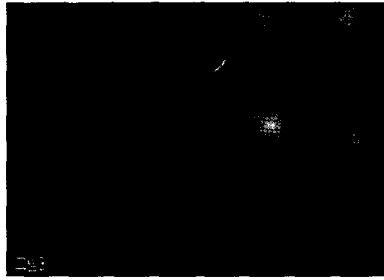
2.2 환경호르몬의 종류 및 위해 사례



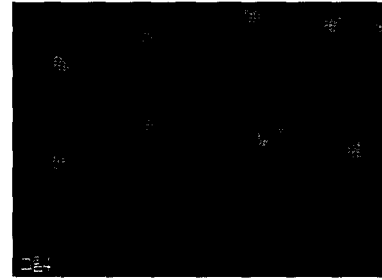
(a) 정상적인 호르몬의 작용 모식도



(b) 환경호르몬에 의한 호르몬 모방



(a) 환경호르몬에 의한 호르몬 봉쇄작용



(b) 환경호르몬에 의한 이상자극 작용

그림 3. 환경호르몬 작용의 메카니즘.

표 1. 호르몬의 작용단계에 따른 내분비계 장애물질의 작용

호르몬 작용단계	내분비계장애물질의 작용 예
1. 호르몬 합성단계 2. 내분비선으로부터의 호르몬 방출단계 3. 표적장기의 세포로 혈액을 통해 수송	스티렌 다이머·트리머 · 뇌하수체에 작용하여 호르몬 합성저해
4. 호르몬수용체의 인식, 결합 및 활성화	모방설 (유사작용 : mimics) · PCB, 노닐페놀, 비스페놀 A, 프탈레이트 에스테르 등 (에스트로젠 유사체로 작용) 봉쇄설(봉쇄작용 : blocking) · DDE, vinclozlin (장애물질이 수용체와 결합하여 안드로젠 호르몬의 작용 저해)
5. DNA의 조절부위에 결합하여 유전적 발현 또는 세포분열을 조절하는 신호 발생	이상자극설 (촉발작용 : trigger) · 다이옥신류, 유기주석화합물 (TBT, TPT)

현재까지 알려진 환경호르몬의 종류는 표 2와 같다. 1990년대 들어 본격적으로 환경 호르몬의 위해성을 지적하기 시작한 세계야생생물기금(WWF)은 자연에 노출된 환경호르몬의 종류를 67종으로 선정했으며, 일본의 경우 독자적으로 환경호르몬을 1백43종으로 선정했다.

분류 기관별로 약간씩 다르긴 하지만 환경호르몬은 크게 농약류와 합성화학물류의 두 종류로 구분할 수 있다. 농약류의 대표적인 사례는 DDT이다. DDT는 1940년대 초 살충제로 사용되어 농업 생산을 크게 증가시키고, 모기를 박멸해 학질이나 황열병으로

부터 수백만명의 생명을 구했지만, 여기저기서 피해가 속출하자 1970년대에 사용이 금지된 물질이다. 같은 시기에 알드린, 일드린, 클로르단과 같은 농약 역시 비슷한 이유로 사용이 금지됐다. 한편 합성화학물류는 농약류를 제외하고 각종 산업계에서 파생하는 유해화학물질을 일컫는다. 예를 들어 다이옥신은 제조제를 만들 때 부산물로 발생하거나, 소각장에서 피복전선이나 페인트처럼 유기염소계 화합물을 태울 때 생성되는 대표적인 환경호르몬이다. PCB는 전기나 열의 전달을 막는 절연유의 원료인데, 변압기나 콘덴서를 비롯해 거의 전 공업분야에 이용

된다. 주로 산업폐수에서 많이 검출되며, 한국에서도 오래 전부터 낙동강을 오염시키는 주범으로 인식되는 물질이다. 이외에도 계면활성제로 사용되는 페놀류나 선박의 도료로 사용되는 트리부틸주석 (TBT) 등 다양한 종류가 있다. 이러한 환경호르몬은 현재까지 **그림 4**에서 표시한 바와 같이 각종 야생동물 및 인체에 여러 종류의 질환을 유발하는 것으로 보고되어 있다.^{6,7}

3. 재료공학을 이용한 환경호르몬 문제해결 연구현황

여기서는 앞서 언급한 환경호르몬의 지구 생태 파괴 피해를 줄이기 위한 재료과학의 연구에 대해 알아본다. 환경호르몬의 무차별적인 피해로부터 모든 대책의 강구가 시급한 것은 사실이나 그 독성의 정도 및 발생량, 그리고 인체 위해성의 척도 등을 고려하여 여기서는 사용량 또는 발생량이 많은 다

이옥신의 발생을 저감하거나 근절시키기 위한 연구 개발과 환경호르몬으로 분류된 프탈레이트 가소제로부터의 피해를 근절시키기 위한 연구개발에 대해 살펴보고자 한다 (**그림 5**).

3.1 다이옥신 발생 예방 및 저감기술

다이옥신 (dioxin)이란 용어는 이 물질이 가지는 화학 구조에 기인한 명칭이지만 근래 들어 일반인의 귀에 익은 보통명사처럼 인식되고 있다. '다이'라는 말이 '죽다'는 뜻의 영어 '다이' (die)처럼 들릴 만큼 인간에게 위협적인 존재로, '인간이 만들어낸 최악의 독성물질'이라는 오명을 갖고 있으며, 극소량으로도 생식기능과 면역기능을 파괴하고 암을 유발하며 성격장애를 일으킨다고 알려진 치명적인 물질이다.

다이옥신은 **그림 6**에서 보듯이 2개의 벤젠고리가 산소원자에 의해 연결된 구조로 이루어져 있고, 8개의 염소원자가 들어갈 수 있고, 염소원자의 치환위치에 따른 2백여개의 폴리염화디벤조다이옥신 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, PCDD)와 폴리염화

표 2. 환경호르몬의 종류

세계야생생물기금 (WWF) 분류(67종)	일본 후생성의 분류 (142종)	내분비계 장애물질 용출이 우려되는 생활용품
<ul style="list-style-type: none"> · 다이옥신류 등 유기염소 물질 6종 · DDT 등 농약류 44종 · 펜타-노닐 페놀 · 비스페놀 A · DOP 등 프탈레이트 8종 · 스티렌 다이머, 트리머 · 벤조피렌 · 수은, 납 등 중금속 3종 	<ul style="list-style-type: none"> · 프탈레이트류 등 가소제 9종 · 플라스틱에 존재하는 물질 17종 · 다이옥신 등 환경오염물질 21종 · 농약류 75종 · 수은 등 중금속 3종 · DES 등 합성에스트로젠 8종 · 식품 및 식품첨가물 3종 · 에스트로젠 유사호르몬 6종 	<ul style="list-style-type: none"> · 플라스틱 용기, 음료캔, 병마개, 수도관의 코팅제, 아말감 : 비스페놀A · 합성세제 : 알킬페놀 · 컵라면 용기 : 스티렌 다이머, 트리머 · 폐건전지 : 수은

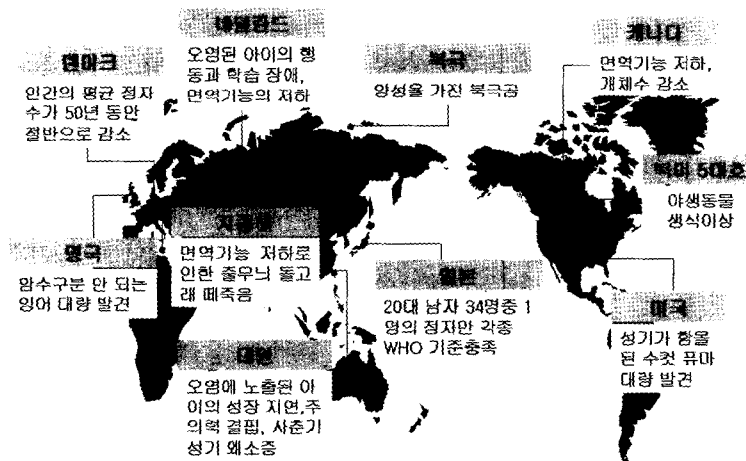


그림 4. 세계 각국에서 보고된 환경호르몬의 피해 상황.

벤조퓨란 (polychlorinated dibenzofuran, PCDF) 을 통칭한다. 이성질체간에 독성의 차이가 있어 일반적으로 다이옥신이라고 하면, 2,3,7,8-테트라클로로디벤조-파라-디옥신 (2,3,7,8-TCDD)의 독성을 1로 하였을 때의 상대 독성의 값으로 환산한 독성 등가량 (toxic equivalent, TEQ)으로 나타낸다. 다이옥신은 화학적으로 매우 안정하며, 냄새와 색깔이

없고, 또 물에는 잘 녹지 않고 기름에 녹는 지용성 물질이다.

다이옥신은 산업문명이 낳은 맹독성 물질로, 염소가 함유된 유기화합물을 다루는 수많은 산업 공정에서 발생하게 된다. 예를 들어 화학물질을 합성하는 공장에서는 물론이고, 목재를 보존하거나 종이제품을 표백하는 과정, 석탄이나 석유를 정제하는 과정, 각종 금속을 제련하는 과정, 탄소 전극을 생산하는 과정 등 다양한 발생원이 존재한다. 최근에는 쓰레기(특히 산업폐기물)를 태울 때 다이옥신이 많이 배출되는 것으로 알려졌다 (그림 7). 다이옥신의 생성 메카니즘에 대해서는 여러가지 가설이 제안되어 있으나, 벤젠 고리를 가진 벤젠, 페놀 및 그들의 염소화합물이 중요한 전구체이며 이들 전구물질과 염소, 산소가 존재하면 다이옥신류가 생성된다고 여겨지고 있다. 그림 7은 샤우브 등이 제안한 다이옥

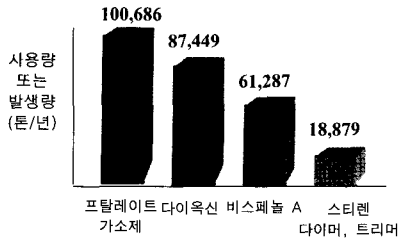


그림 5. 대표적인 환경호르몬 물질 및 발생량.

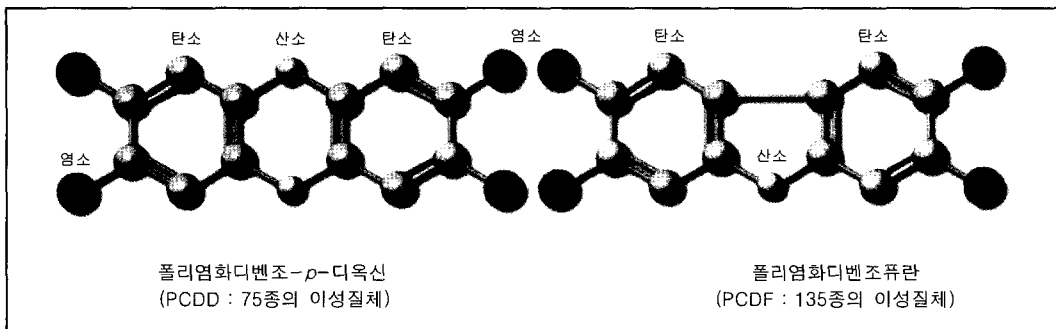


그림 6. 다이옥신류 화합물의 종류별 구조.

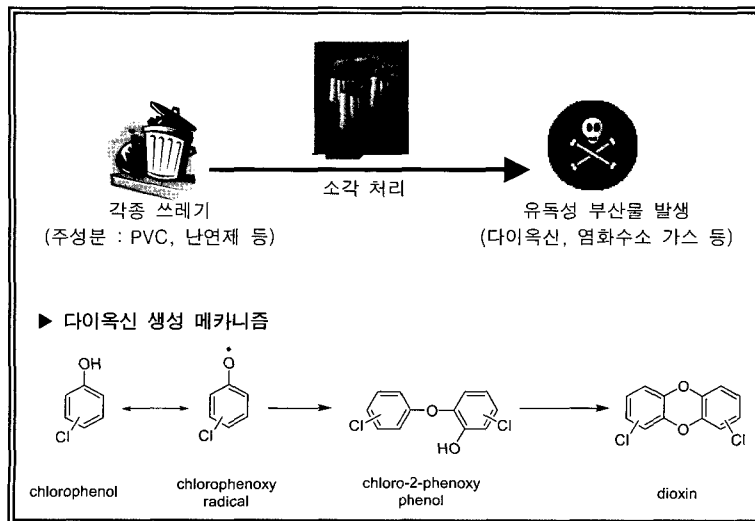


그림 7. 다이옥신의 생성 모식도.

신 생성모델이다.⁸⁻¹⁰ 그래서 국내외적으로 소각장이 다이옥신을 발생시키는 주범으로 인식되고 있다. 한 예로 올해 3월 말 일본의 한 쓰레기 소각장에서 일했던 노동자들이 장암과 심한 피부병에 시달리고 있다는 사실이 밝혀졌다.

다이옥신은 **표 3**에서 보듯이 PVC 및 난연제 등이 다량 포함된 도시쓰레기 및 병원쓰레기의 소각시 발생하는 것으로 알려지고 있다. 이러한 발생 경로에 주목하여 다음과 같은 방안을 통해 다이옥신 생성을 저감 또는 근절시킬 수 있게 된다.

① 다이옥신 생성의 원료가 되는 물질을 대체하거나 변형 처리하는 방안

② 소각처리의 효율성 향상을 통한 방안

③ 발생 유독성 물질을 무독성 물질로 정화시킬 수 있는 정화장치 개발 방안

다이옥신의 발생을 억제하기 위해 많은 분야에서 연구가 수행되고 있다. 이를 위해 1,000 °C 이상의 고온에서의 24시간 연속 운전이 가능한 다이옥신이 안 생기는 소각로 개발과 필터를 통한 굴뚝에서의 다이옥신 제거 또는 미생물을 이용한 다이옥신 분해 특성을 이용한 바이오리메디에이션 등의 다이옥신 분해 연구 등의 많은 연구가 수행되고 있다. 여기서의 논점은 재료과학적 측면에서의 다이옥신 생성 저감 및 근절이기 때문에 앞서 언급한 것 중 첫번째 방안에 대해 논하기로 한다. 일단 염소를 다량 함유하고 있어 소각처리시 다이옥신 생성의 주원인물질로 주목되는 폴리염화비닐 (PVC) 및 할로겐성 난연제를 대체하고자 하는 대체재료 개발 연구와 소각처리를 근본적으로 배제한 새로운 쓰레기 처리법이 적용가능한 소재개발을 위해 PVC에 광분해성을 도입하고자 하는 연구 개발에 관한 것을 살펴본다.

3.1.1 PVC 대체재료의 개발

현재까지 단일의 대체 고분자가 기존 PVC의 모든 특성을 구현하는 것은 알려지지 않았지만 각종 용도에서 요구하는 특성을 잘 구현하여 그 용도에서

표 3. 다이옥신 생성 경로별 원인물질과 비율

폐기물 종류	원인성분	비율(%)
도시 쓰레기	PVC, 표백종이, 화학제품	61.2
병원 쓰레기	PVC	36.0
독극물 쓰레기	화공약품, 농약	2.8
구리 제련	PVC 피복, 염화용매	-
철강 제련	PVC 피복, 염화용매	-

만큼은 기존 PVC 재료를 대체하여 이용되고 있거나, 그러한 목적으로 많은 연구개발이 이루어지고 있다.

일례로 PVC의 값이 싸고 내후성이 큰 재료로서 주목 받는 것은 대부분 폴리올레핀 계열의 열가소성 탄성체이다. 폴리올레핀은 탄소 (C)와 수소 (H)로 되어 있는 지방족 탄화수소의 폴리머이다. 이 때문에 이론상 완전 연소 아래에서는 이산화탄소 (CO₂)와 물 (H₂O)만 발생할 뿐이고 불완전 연소 조건 하에서도 다이옥신류를 비롯하여 질소산화물이나 유황산화물 등의 유독가스를 발생하지 않게 된다. 이것은 제품의 사용주기 후에 폐기물 처리에 있어 소각처리에든 환경 및 생태 부하가 없다는 것을 의미하기 때문에 PVC가 갖는 기존의 환경 및 생태 부하 문제를 해결할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 환경적인 요소 이외에 재료의 용도가 요구하는 여러 물성을 구현하기 위해서는 서로 다른 특징을 갖는 두 고분자를 혼합 (블렌드)하는 방법이 종종 사용된다. 일례로 재료에 강한 성질을 줄 수 있는 부분과 부드러운 성질을 줄 수 있는 서로 다른 종류의 고분자를 블렌드하여 사용하는 방법이 개발되어 상용화가 시도되었으며, 나아가 이러한 블렌드가 끈적거림 및 내파손성 부문에서 기존 PVC가 갖는 특성에 미달하는 성질을 보이자 고분자량의 폴리부틸렌-스티렌 공중합체 고무를 수첨가 방법에 의해 새로이 개량한 다이나론 SBR (Dynaron SBR)과 앞서 언급한 폴리프로필렌과 블렌드하여 사용하는 기술도 개발되고 있다. 이러한 개발품은 내후성 및 내파손성 등의 물성에 있어 기존의 PVC와 유사한 물성을 지니게 되어, 이러한 소재특성을 요구하는 많은 용도의 PVC 제품에서 PVC를 대신하여 사용되게 될 것이다.

또 다른 예로는 고내열성, 투명성, 박리성, 내약품성 등의 기존 PVC의 특성을 잘 구현하여 다음의 용도에서의 대체사용이 시도되고 있는 폴리메틸펜텐 (TPX)을 들 수 있다. TPX는 아래 화학식에서 보듯이 4-메틸펜텐-1 단량체를 중합하여 얻어지는 고분자이며 미쯔이화학에서 공급하고 있다 (**그림 8**).

① 산업재 : 합성 피혁용 이형지, 프린트 기판용

이형 필름, 농약병, 특수 합성지, 자동차 부품

② 식품포장재 : 전자레인지용 식기, 베이킹 카튼

③ 의료 및 실험기기 : 조영제용 시린지, 혈액분석셀, 혈액백, 애니멀케이지

이렇게 얻은 폴리메틸펜텐은 일본생활협동조합 연합회의 식품용 랩 필름의 원료로서 채용되어 그 환

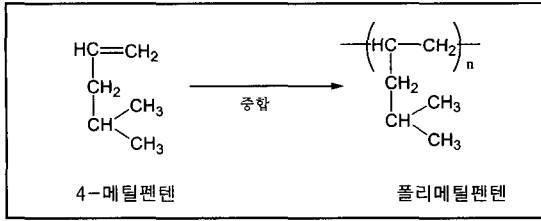


그림 8. 폴리메틸펜텐을 얻는 반응식.

경 및 생태 안정성을 인정받은 상태이며, 현재까지 기존 PVC 사용 식품용 랩 필름을 대체하기 위해 개발된 제품 중 가장 뛰어난 성능을 갖고 있으나, 점착성 및 가스투과성 등의 보완될 점 등이 남아 있어 추가적인 연구개발이 진행되고 있다.

이러한 TPX 사용 식품용 랩 필름은 그 외에 녹는점이 235~245 °C에 이르러 폴리프로필렌 및 폴리에틸렌 등 기존에 개발되었던 폴리올레핀계의 랩 필름과는 달리 전자레인지용의 고온 사용이 가능하다는 특징도 갖고 있다.

그 외에도 각종 화재나 건축물 리노베이션 시 대량 폐기물 소각처리에 의해 다이옥신 발생의 주범 역할을 하던 건축 내장재, 특히 벽지 부분의 대체품 개발도 수행되고 있다. 폐기후의 처리가 쉬운 PE 소재의 부직포 벽지가 타이백이라는 상품명으로 개발되고 있다. 또한 PVC의 수축성을 대체할 수 있는 PS 라벨용 수축필름도 일본의 겐즈화학에서 개발되어 있다. 이렇듯 소각처리 과정에서 PVC의 고분자 사슬 내 염소가 다이옥신 생성 메카니즘에 있어서 염소 공여체 역할을 한다는 사실에 주목하여 PVC 소재 자체를 전혀 다른 고분자로 대체하려는 연구개발이 많은 부분 진척되어 일부 품목에서는 대체가 일어나고 있다. 하지만, PVC의 경제성, 내후성, 내수성, 내약품성, 난연성, 전기절연성 등의 뛰어난 성질과 필름형, 파이프형, 플레이트형 등의 우수한 성형성을 PVC의 대체 고분자 역시 최종 용도에 서 지녀야 한다는 과제를 안고 있다.

3.1.2 비할로겐성 난연제의 개발

전기, 전자기기에서 화재 안정성의 목적으로 종래 일반적으로 사용되어 왔던 할로겐계 난연제는 폐기물 소각 시 다이옥신 등의 유해 물질을 발생시킬 가능성이 높아 큰 사회적 문제가 되고 있다. 이러한 환경문제를 해결하기 위한 재료과학의 노력을 살펴보면 크게 비할로겐계 난연제의 개발과 난연제의 사용 없이도 자기 소화기능을 갖는 특수 전기, 전자기기용 소재의 개발을 들 수 있다.

우선 비할로겐계 난연제로 개발된 대표적인 물질로는 실리콘화합물 계통을 들 수 있는데 근래에 개발된 신규 실리콘화합물 난연제의 경우 폴리카보네이트에 적용하여 전자기기의 케이스에 적용한 결과 훌륭한 난연효과를 나타냈으며, 도금성, 경도, 착색성, 내약품성 등의 특성도 우수한 것으로 알려져 좋은 대체 난연제로 평가받고 있다. 그 외에도 인산에스테르 등 비교적 독성이 적은 난연제로의 대체도 연구되었으나 그 독성 부분의 확실한 안정성이 보장되지 않아 인체에 무해한 실리콘계 난연제나 다음에 설명할 자기 소화기능을 갖는 재료 및 재료 설계에 의한 난연화가 바람직한 것으로 평가되고 있다.

자기 소화기능을 갖는 소재로 개발된 예는 에폭시 수지 조성물을 들 수 있다. 에폭시 수지 내에 존재하는 가교구조가 특수한 에폭시 수지 조성물의 제조를 가능케 하는데 이렇게 개발된 자기 소화기능의 수지 재료는 종래의 에폭시 수지 조성물보다 극히 높은 난연성을 갖기 때문에 전기, 전자기기용 기판으로 이용되고 있다.

지금까지 언급한 할로겐계 난연제를 대체한 비할로겐계 난연제 사용 재료, 또한 난연제의 사용 없이 자기 소화기능을 이용하여 제조한 재료들의 공통적인 특성을 다음에 열거하였다.

- ① 할로겐 원소나 안티몬 등의 중금속을 함유하지 않으므로 아무리 연소해도 다이옥신 등의 유해 물질을 발생하지 않는다.
- ② 할로겐 원소나 안티몬 등의 중금속을 포함하지 않음에도 불구하고 업계 안전규격에 합당한 정도의 내연소 성능을 갖는다.
- ③ 할로겐 원소를 포함하지 않으므로 장기 내열 열화 특성이 뛰어나다.

종래 난연제를 사용하여 제조된 재료와 비교할 때 동등한 정도의 성형성, 가공성, 착색성, 도금성, 경도, 내약품성 등의 여러 소재특성을 갖는다.

이외에도 난연제의 사용 없이 기존의 특성을 나타내기 위해 PC/ABS 수지, PC/PS 수지 등이 개발되어 사용되고 있다.

3.1.3 광분해성 PVC의 개발

앞서 언급한 PVC를 대체할 고분자의 개발을 살펴보면, 현재까지 각 용도에서의 PVC 대체가 10~20%에 불과한 경우가 많으며 전체 PVC 용도에 초점을 맞추었을 때, 아직까지 개발 대체품이 기존의 PVC 제품의 물성을 구현하지 못하는 경우도 많다. 그래서 전혀 다른 고분자를 이용한 PVC 소재 자

체의 획기적인 대체보다는 PVC의 소재 자체의 특성을 유지할 수 있으며 문제가 되는 소각처리과정 대신 다른 방안을 이용한 폐기물 처리를 착안하여 PVC에 광분해성을 도입하는 새로운 접근방법이 고안되고 있다.^{11,12}

그림 9에서 살펴보면, 기존 PVC 제품에서 제품 성형 전 단계에서 광분해성 촉매활성을 갖고 있는 전이금속 산화물의 나노입자를 PVC 기질 내에 고르게 분산시키게 되면, 최종 PVC 제품의 제품수명을 다하고 나서 폐기물 처리에 있어 광분해를 이용할 수 있게 된다. 광분해 메카니즘은 다음과 같다. 특정 전이금속 산화물의 경우 태양광 또는 UV 영역의 파장의 빛을 조사하였을 때, 산소의 존재 하에서 산소 라디칼, 퍼옥사이드 라디칼 등을 생성하고 이러한 활성 라디칼 들이 유기물의 사슬을 끊어 궁극적으로는 이산화탄소와 산소, 무기산으로 분해시키게 되는 것이다.

광분해성 PVC 소재의 개발을 위해서는 촉매 입자를 나노 크기로 만들어 표면적을 극대화시키고, 기질 내 고르게 분산시키는 것, 그리고 특정파장의 빛을 집중적으로 조사하는 것 등이 핵심 기술이 된다. 현재까지 이러한 광분해의 요건을 충족시키는 실용화된 기술이 개발된 것은 아니지만 실험적으로 가능성을 충분히 검토한 상황이며, 이러한 광분해 기술이 실용화된 후에는 폐기물 소각장 대신 UV 조사를 건립하여 PVC 폐기물의 집중적인 처리가 가능해져 전체 폐기물 중에 함유된 PVC의 분리처리만 가능해진다면 PVC에 의한 다이옥신의 생성은 근본적으로 차단할 수 있는 획기적인 기술이라 하겠다.

3.2 프탈레이트류 가소제 용출 차단 및 무환경호르몬 가소제 제조기술

가소제란 재료에 연성을 부여하기 위해 첨가되는 물질로 양에 있어 대부분을 차지하는 PVC와 같은 열가소성 탄성체에 사용되며, 대부분이 프탈

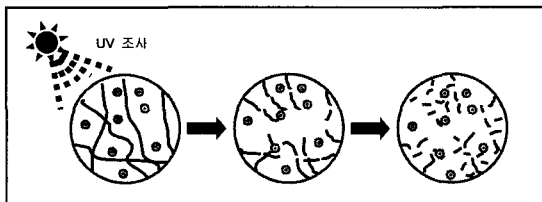


그림 9. 전이금속 광촉매 나노입자가 분산되어 있는 광분해성 PVC의 UV를 이용한 광분해.

레이트류의 에스테르 화합물이다 (**그림 10**). 그러나 여기서 중요한 것은 가소제가 단순히 재료에 첨가되는 첨가제라고 하기엔 엄청나게 많은 양인 전체 중량 대비 30~50% 가량이 첨가된다는 사실과, 이러한 가소제가 사용 중에 용출되어 나온다는 것, 그리고 용출된 가소제가 맹독성을 갖는 환경호르몬이라는 사실이다. 전체 가소제의 90% 이상이 PVC에 사용되고 있으며, 사용 가소제의 90% 이상이 프탈레이트류 가소제라는 점, 그리고 나머지에 해당하는 아디페이트류 가소제도 구조 및 그 독성에 있어 프탈레이트류 가소제와 크게 다른 점이 없다는 것에 근거하여 여기서는 PVC용 가소제로 많이 쓰이는 프탈레이트류 가소제에 초점을 맞추어 이 문제에 대응하는 재료과학의 연구동향에 대해서 살펴보고자 한다.

프탈레이트류 가소제의 위험성은 앞서 언급한 바와 같은 세가지 문제점 이외에도 가소제를 다량 사용한 연질 PVC의 용도와 관련하여 이해할 수 있다. 연질 PVC는 뛰어난 소재특성과 더불어 우수한 경제성을 갖기 때문에 식품 포장재 및 저장용기, 유아용 완구류, 혈액백, 의약품의 개봉방지용 밀폐제 등의 용도에 널리 사용되어 왔는데, 이는 인체와 직접적인 접촉이 불가피한 용도인 것이다. 예를 들어 유아용 치아발육기의 경우 계속된 경구접촉으로 인해 함유 가소제가 인체로 전이된다는 사실과, 혈액백 및 주사기와 같은 의료용 기기에서의 가소제 용출 등이 끊임없이 문제로 제기되었다는 사실에서 그 문제의 심각성을 짐작할 수 있게 된다. 이러한 환경호르몬 가소제 문제는 다른 환경오염 물질에서의 문제와는 달리 직접적이고 즉각적인 인체 전이로 인해 각종 질병의 유발 가능성이 보고되고 있는 상황이다.^{13,14} 이러한 문제는 소재 자체의 제조와 사용에 관련한 문제로 재료 설계 단계에서의 근본적인 문제 해결이 필수적이며, 현재까지의 접근방법은 다음의 두 가지 방안으로 압축할 수 있으며 각기 많은 부분에서 성공적인 결과를 거두고 있다.

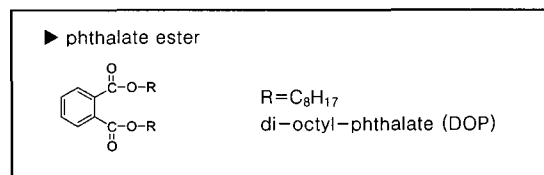


그림 10. 대표적인 프탈레이트류 화합물인 DOP의 구조식.

3.2.1 가소제의 사용없이 연질 PVC의 소재특성과 연질특성을 구현한 대체 고분자의 개발

세계적으로 유명한 장난감 제조사인 유럽의 한 회사에서는 식용유와 녹말로부터 만들어지는 새로운 고분자 물질에 대한 개발을 진행하고 있다. 이러한 고분자 물질이 기존 연질 PVC가 갖는 소재특성 및 연질특성을 갖는다는 것을 확인하여, 만족할만한 생물성 고분자가 개발되면 PVC 및 첨가제 프탈레이트 화합물을 대신하여 현재 생산중인 많은 종류의 장난감을 만드는 재료로 이용할 수 있을 것이다. 본능적으로 모든 것을 입으로 가져가는 유아들이 장난감을 빨거나 씹을 경우 입을 통하여 프탈레이트 화합물이 체내로 유입될 수 있다는 문제로 인하여 세계 곳곳에서 문제가 되고 있고, 이의 사용을 억제하고 반대하는 법안이나 사회 운동들이 야기되고 있다. 이러한 현실에 착안한 생태안정성 및 환경무해성 고분자 재료에 대한 연구개발은 대규모회사에서 종종 찾아볼 수 있다.

앞에서 언급한 폴리메틸펜텐과 같은 폴리올레핀의 개발도 한 예라 할 수 있다. 이러한 폴리메틸펜텐은 기존에 개발되어 사용되고 있던 선형 저밀도 폴리에틸렌과 같이 식품포장용 랩에 적용되어 랩에 함유된 가소제의 식품으로의 전이를 근본적으로 차단할 수 있는 고분자 재료이다. 이렇듯 연질 PVC의 특정한 물리, 화학적 성질을 구현하여 특정 용도에서의 대체가 가능해지고는 있지만 모든 연질 PVC의 특성을 구현하는 데는 한계가 있기 때문에 다음과 같이 PVC에 무독성, 그리고 무용출성의 가소제를 사용하는 방안에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

3.2.2 무독성, 무용출성 가소제의 개발

앞에서 언급한 바와 같이 프탈레이트류 가소제가 이렇듯 문제가 되는 것은 그 자체가 저분자 물질이기 때문에 확산현상에 의한 PVC 제품 밖으로의 용출이 불가피하다는 것이고, 용출된 가소제가 독성을 갖는 환경호르몬이라는 사실이다. 이에 착안하여 전혀 용출이 되지 않으며, 그 자체도 무독성인 대체 가소제를 개발하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되었다.

우선 프탈레이트 가소제의 용출성이 저분자 물질의 확산에 의한 점에 착안하여 PVC와 상용성이 있으며 연질 특성의 부여가 가능한 고분자 물질을 제조하여 PVC용 가소제로 사용한 예를 들 수 있다. 이러한 고분자 물질은 고분자가 갖는 제한된 분자

운동성의 한계로 인해 기존 프탈레이트 가소제 만큼의 연질 특성의 부여에는 실패했으나, 중경질 및 연질의 일부 용도에의 적용은 충분히 가능하다는 결과를 갖고 일부 품목에 적용하기 위한 실용화가 진행되고 있다.

나아가 보다 나은 연질 특성을 부여할 수 있는 대체 가소제의 개발을 위하여 기존에 개발이 시도된 고분자 가소제가 충분한 연질 특성의 부여에 실패한 것이 제한된 분자운동성의 한계로 말미암은 것이었다는 점에 착안하여, 대체 가소제의 3차원적 구조를 정밀 제어하여 충분한 분자운동성을 부여하고, 이로 인해 PVC와의 혼합시 기존 저분자 가소제 만큼의 연질 특성 부여가 가능할 것이라는 점에 착안한 연구개발도 활발히 진행 중이다.

4. 결론

지금까지 환경호르몬 문제의 해결을 위해서 환경운동 및 사회적 규제 등에 의한 사회적 운동으로 비기술적인 측면에서 쓰레기 저감 및 재활용 등의 소극적인 방향으로 모색되어 왔다. 최근에 들어 앞서 언급한 대체재료 개발 및 저감기술 등에 대한 연구가 시작되고 있으나, 전세계적인 측면에서도 아직까지는 매우 부족한 실정이다. 그리하여 각각의 피해에 대한 정확한 발생 메카니즘 조차 분명히 규명되어 있지 않은 상태이다. 근본적인 문제해결을 위해서 다양한 학문 분야에서의 많은 연구가 수행되어야 하며, 이에 대한 첫걸음은 재료로부터 시작되어야 한다. 하나뿐인 지구를 살리고 있는 우리의 도둑맞은 미래를 되찾아야 하는 막중한 사명의 열쇠를 찾는 역할은 재료공학을 연구하는 재료공학도의 몫인 셈이다.

참고문헌

1. T. Colborn, J. P. Myers, and D. Dumanoski, "Our Stolen Future", Little Brown and Company, London, 1996.
2. R. K. Naz, "Endocrine Disruptors: Effects on Male and Female Reproductive Systems", CRC Press, 1999.
3. E. Carlsen, A. Giwercman, N. Keiding, and N. E. Shakkebaek, *Br. Med. J.*, **305**, 609 (1992).

4. T. Colborn and C. Clement, "Chemically Induced Alterations in Sexual and Functional Development: the Wildlife/Human Connection", Princeton Scientific Publishing, NJ, 1992.
5. R. J. Kavlock, *Chemosphere*, **39**, 1227 (1999).
6. A. Schecter, "Dioxins and Health", New York, 1994.
7. G. Lyons, "Phthalates in the Environment", World Wildlife, UK, 1995.
8. G. Choudhary, L. H. Keith, and C. Rappe Eds., "Chlorinated Dioxins and Dibenzofurans in the Total Environment", Butterworth, Boston, 1983.
9. Y. Okamoto and M. Tomonari, *J. Phys. Chem. A*, **103**, 7689 (1999).
10. G. Choudhary, L. H. Keith, and C. Rappe, "Chlorinated Dioxins and Dibenzofurans in the Total Environment", Butterworth, Boston, 1983.
11. S. Horikoshi, N. Serpone, Y. Hisamatsu, and H. Hidaka, *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 4010 (1998).
12. S. Cho and W. Choi, *J. Photoch. Photobio. A*, **143**, 221 (2001).
13. C. A. Harris, *Environ. Health. Perspect.*, **105**, 802 (1997).
14. R. Gray, "Interconnections between Human and Ecosystem Health", Chapman & Hall, UK, 1996.