

CHAPTER 03



지키는
화학

몸을 지키는 합성섬유
단단하게, 똑똑하게 외형을 지키는 신소재
화재에 건디는 화학
사회의 안전과 안보를 지키는 화학

튼튼하면서 가벼운 겨울코트, 비에 잘 젖지 않는 등산복처럼 몸을 지키는 의류는 합성섬유 덕분에 가능했다. 세라믹 코팅, 형상기억소재, 자기치유물질처럼 단단하게 똑똑하게 외형을 지키는 신소재가 있고 화재로부터 지켜주는 내열·난연성 소재가 있다. 또 독성물질 누출, 원자력 사고 같은 재난에 대응해 사회 안전을 지키기 위해서도 화학물질이 필요하다. '지키는 화학'의 세계를 살펴보자.

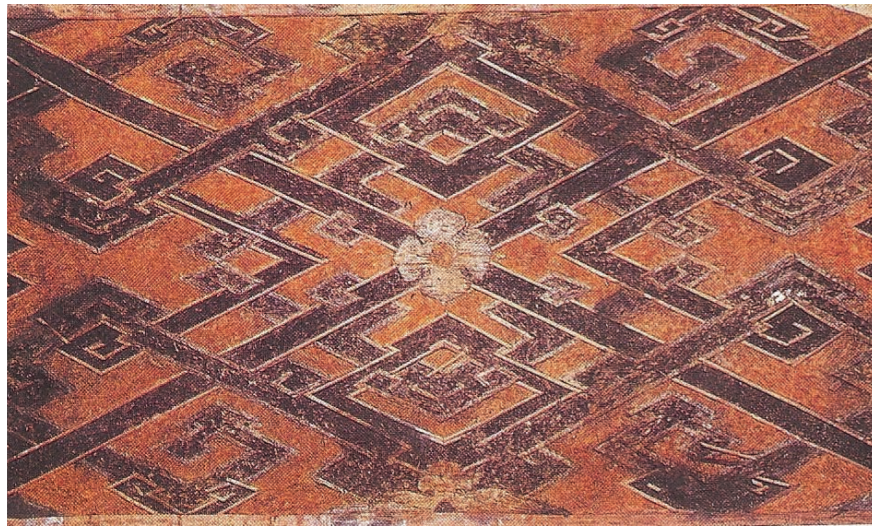
몸을 지키는 합성섬유

최초의 옷은 무엇으로 만들었을까. 고고학적으로는 1만 년 전의 신석기시대부터 마직물로 보이는 섬유를 이용해 옷을 만들어 입었을 것으로 추정된다. 인더스 강 유역에서는 5000년 전의 물건으로 추정되는 면직물이 발견됐다. 아주 오래전부터 인류는 추위와 바람을 피하기 위해 식물과 동물 가죽을 이용해 옷을 만들어 입었던 것이다.

문명의 발달과 섬유의 역사

섬유의 역사는 문명의 역사이기도 하다. 몸을 지키기 위한 기능적인 필요성뿐

중국 후난성에서 발견된 비단 옷감. 기원전 2세기경 서한 왕조 때 직조된 것으로 추정된다. © wikimedia.org



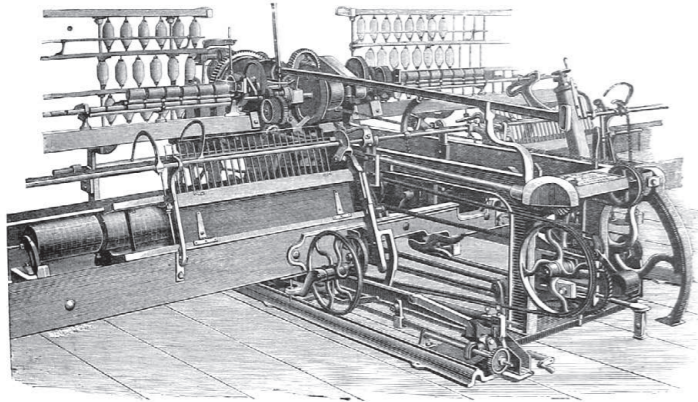
만 아니라 옷감이 주는 아름다움은 많은 사람들을 매료시켰다. 기원전 1700년 경부터 만들기 시작한 비단은 부드러운 감촉과 빛깔 때문에 중국을 비롯한 아시아뿐만 아니라 로마에서도 최고급 옷감으로 큰 인기를 끌었다. 또한 비단은 같은 무게로 따졌을 때 강철보다 질기기 때문에 갑옷의 안감으로 받쳐 입기도 했고 제1차 세계대전 이전까지 방탄복의 소재로 활용되기도 했다.

이처럼 값지고 중요한 옷감이기에 오랫동안 중국에서 비단의 제조법은 국가 기밀로 보호받았고, 귀중한 비단을 얻기 위해 많은 상인들이 먼 길을 떠났다. 중국에서부터 중앙아시아 사막과 초원을 거쳐 유럽까지 이르는 교역로인 실크로드(Silk Road)는 단순한 비단의 교역로가 아니라 동서양의 다양한 문화와 재화가 이동하고 서로 교류하는 연결로였다.

비단이 주로 귀족과 부유층의 사랑을 받았다면 값싸고 튼튼한 면직물은 널리 대중들의 사랑을 받았다. 그러나 면직물은 생산과정이 복잡하고 손이 많이 가기 때문에 산업혁명 전까지는 늘 공급이 수요보다 부족했다. 1769년 리처드 아크라이트가 발명한 수력 방적기와 1779년 사무엘 크럼프턴이 발명한 물 방적기를 이용해 생산과정이 기계화되면서 손으로 만들 때보다 가늘고 질긴 면직물을 대량으로 생산할 수 있게 됐다. 면직물의 대량생산은 산업혁명의 시발점이 됐다.

합성섬유의 시대가 열린다

산업혁명을 통해 생산이 기계화됐지만 면직물과 같은 천연섬유의 생산은 여전히 수요에 비해 많이 부족했다. 비단과 같이 여전히 수공업으로 생산되는 천연섬유는 20세기 초반까지도 값비싼 사치품이라 아무나 사용할 수 없었다. 자연적인 재료에서 섬유를 얻는 것이 쉽지 않다면 연금술처럼 다른 값싼 재료에서 비단 같은 비싼 섬유를 만들 수 있지 않을까. 1655년 영국의 과학자 로버트 후크가 처음으로 이 아이디어를 제시했을 때는 모두들 허무맹랑한 얘기가



1892년 영국 맨체스터에서 발행된 신문 <텍스타일 머큐리(Textile Mercury)>에 실린 물 방적기 그림.
© wikimedia.org

고 생각했다. 그러나 화학이 발달하면서 천연 섬유가 고분자물질로 구성돼 있다는 사실을 발견하며 점차 현실화됐다. 고분자물질은 수많은 원자가 결합해서 이루어진 분자의 혼합물을 의미하며 천연섬유는 식물에서 얻은 당류나 단백질이 다양한 패턴으로 긴 사슬처럼 연결된 고분자물질이다. 화학자들은 얻는 데 복잡한 과정을 거쳐야 하는 천연 고분자 대신 석유를 정제하는 과정에서 얻은 나프타(naphtha)와 같은 부산물에서 얻은 합성 고분자를 이용해 천연섬유와 같은 구조를 만들고자 노력했다.

합성섬유는 어떠한 원리로 만들어지는 것일까. 합성섬유는 원료인 석유나 석탄에서 추출한 탄소화합물을 인공적으로 합성해 길게 연결시켜 만든 섬유이다. 고분자물질은 일반적으로 작은 분자들이 계속 결합해 이어지면서 만들어진다. 이때 결합하는 단위가 되는 작은 분자를 단위체(또는 단량체)라고 부르며 이 단위체들을 화학반응으로 결합해 만들어낸 고분자물질을 중합체라고 한

다. 단위체들이 연결된 중합체는 제조방법에 따라서 우리가 흔히 쓰는 플라스틱으로 만들 수도 있으며 열을 가하거나 다른 화학물질로 녹여서 노즐을 통해 길게 뽑아내면 합성섬유로 사용할 수 있다.

천연섬유와 합성섬유, 어떻게 다른가?

인공적으로 원료를 추출할 수 있는 합성섬유는 천연섬유와 비교해서 여러 장점을 갖고 있다.

우선 합성섬유는 저렴하다. 아주 오래전부터 고급품인 비단과 양모와 같은 천연섬유는 비슷한 기능의 합성섬유와 비교할 때 생산비용이 비싸고 시간이 오래 걸린다. 비단 원사와 양모는 날씨와 기후에 따라 생산량이 달라지며 지역과 품종에 따라 품질이 각기 다르다. 예를 들어 양모 제품인 캐시미어는 중국, 티베트, 인도 지역에서만 생산된다. 특히 여름철에 양의 가슴 털을 빗질해 채취하기 때문에 양 한 마리당 생산량이 약 250g에 불과하며 생산량이 작은 만큼 캐시미어로 만든 옷은 가격이 매우 비싸다.

반면에 합성섬유는 공장 설비를 갖추기 위한 초기 비용은 많이 들지만 동일한 품질의 섬유제품을 기후나 지역과 관계없이 값싸게 대량 생산할 수 있어 좀 더 많은 사람들의 수요에 맞출 수 있다.

기능적인 부분에서도 합성섬유가 천연섬유보다 우수한 점이 많다. 종류에 따라 약간씩 성질이 다르지만 일반적으로 합성섬유로 만든 옷은 천연섬유에 비해 가볍고 질기며 마찰에 강해 잘 구겨지지 않고 오래 입을 수 있으며 세탁 및 관리도 더 편리하다. 화학적으로 안정한 물질로 구성됐기 때문에 천연섬유에 비해 잘 분해되지 않아 좀벌레나 곰팡이로부터 안전하다는 장점도 있다. 천연섬유는 본래의 특성 외에 다른 기능을 부가할 수 없지만 합성섬유는 생산원료와 공정에 따라서 고어텍스 원단과 같이 다양한 기능을 부가할 수도 있다. 나일론과 같은 합성섬유는 처음에는 주로 의류에 사용됐지만 강도와 내마모성이

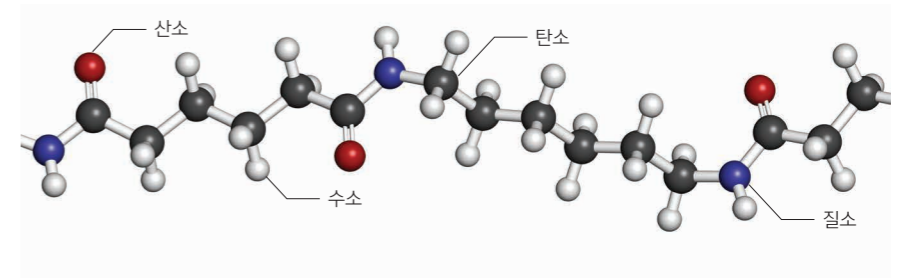
금속과 비교할 만큼 좋아 플라스틱의 재료와 같이 다양한 산업소재로 쓰이고 있다. 하지만 착용감, 감촉, 흡습성 면에서는 아직 합성섬유가 따라가지 못하고 있어 의류용으로 천연섬유도 여전히 사용되고 있다.

전 세계 섬유생산통계에 따르면 나일론, 폴리에스테르(폴리에스터) 같은 합성섬유의 생산이 꾸준히 증가해 1993년에는 천연섬유 생산을 넘어섰다. 오스트리아의 섬유기업 렌징(Lenzing)사가 발표한 보고서에 따르면 2011년 전 세계에서 생산된 약 8400만 톤의 섬유 중에서 5100만 톤이 합성섬유였다. 나일론이 개발된 지 불과 반세기 만에 천연섬유와 합성섬유의 위치가 역전된 것이다. 앞으로 화학기술이 발전해 합성섬유의 단점들이 점차 개선된다면 언젠가는 정말 천연섬유로 만든 옷을 보기 힘든 날이 올지도 모르겠다.

섬유 산업의 혁명 '나일론'의 등장

'나일론(nylon)'은 기적의 섬유로 불렸다. 세상에 처음 나일론을 공개했을 때 듀폰사는 '석탄과 물, 공기로 만들어진, 거미줄보다 기늘고 실크보다 아름다우며 강철보다 강한 섬유'라고 선전했다. 조금 과장되긴 했지만 나일론은 기존의 천연섬유처럼 가볍고 부드러워 구김이 잘 가지 않는 반면에 면직물이나 실크와는 비교할 수 없을 정도로 튼튼하고 잘 헤어지지 않는 '꿈의 섬유'였다. 사실 나일론은 실크를 타깃으로 삼아 실크의 분자 구조를 모사해 만든 것이다. 나일론은 우연한 발견을 계기로 탄생했다.

1935년 합성고무를 연구하던 듀폰사의 윌리스 캐러더스(Wallace Hume Carothers)와 연구원들은 놀이 삼아 연구 중이던 합성고무가 얼마나 늘어날 수 있는지 내기를 하곤 했다. 길게 잡아당긴 합성고무가 끊어지지 않고 마치 섬유질처럼 길게 늘어나는 것을 본 캐러더스는 합성고무가 아니라 합성섬유로 연구할 것을 주장했다. 우연한 발견을 계기로 합성섬유의 연구를 시작한 듀폰사는 1938년 세계 최초의 합성섬유인 나일론을 개발했다. 나일론은 석유에서



대표적인 나일론 중 하나인 '나일론 6,6'의 분자 구조. 각각 6개의 탄소가 포함된 두 종류의 단량체, 즉 헥사메틸렌다이아민과 아디프산이 중합체를 구성한다. © shutterstock.com

추출한 헥사메틸렌다이아민과 아디프산을 반응시켜 만든 폴리아미드(polyamide) 중합체에서 뽑아낸 합성섬유이다. 제조 방법에 따라서 나일론-6, 나일론-6,6, 나일론-6,10 등의 상품이 있으며 뒤에 붙는 숫자는 반복되는 단위체에 포함된 탄소 원자의 개수를 의미한다.

당시 여성들은 비단이나 면으로 만든 험렁한 스타킹을 신었다. 나일론으로 만든 스타킹은 비단과 비슷한 촉감과 광택을 가지면서도 더 탄력이 있어 쭈글쭈글해지지 않았다. 나일론 스타킹은 처음으로 발매되던 1940년 5월 15일 새벽부터 수많은 여성들이 가게 앞에 줄을 서 있다가 개장하자마자 구매해 하루 만에 400만 켤레가 매진됐다. 이 소식이 전 세계에 기사화되면서 이날은 역사적인 날로 기록됐다. 판매가 시작된 첫해에 총 6400만 켤레의 스타킹이 판매됐으며 1941년까지 나일론 스타킹은 양말 시장에서 30% 이상의 점유율을 기록했다. 듀폰사는 프랑스 파리 패션계를 통해 나일론 제품을 적극 선전했다. 1955년 패션쇼에서 샤넬, 크리스찬 디올, 니나리치 등 유명 패션기업들이 듀폰의 나일론 가운을 입은 모델들을 선보이면서 합성섬유로 만든 옷은 대중화



1954년 스웨덴 말뚝에서 한 여성이 나일론 스타킹을 검사하고 있다.
© wikimedia.org

되기 시작했다.

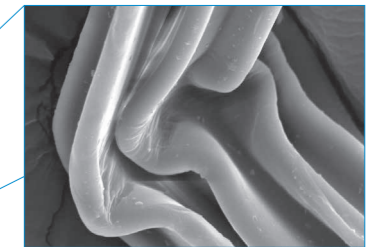
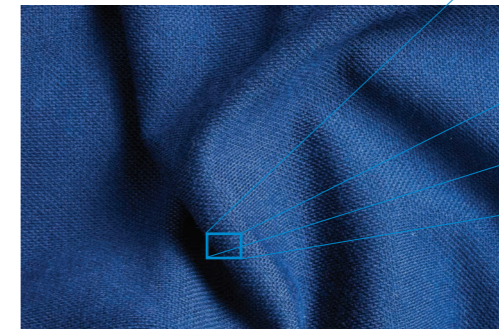
그러나 나일론은 흡습성이 낮아 정전기가 잘 일어나며 햇빛에 약해 변색이 잘 일어나는 단점이 있어 의류용으로 널리 쓰이기에는 무리가 있었다. 제2차 세계 대전이 발발하자 듀폰의 나일론은 의류가 아닌 군수품에 활용되기도 했다. 가벼우면서도 질기고 튼튼한 나일론은 낙하산과 타이어, 비행기 연료탱크와 같은 다양한 군수품에 사용되어 연합군의 승리를 이끌었다. 오늘날 나일론은 의류 소재보다는 다양한 나일론 제품을 기반으로 한 엔지니어링 플라스틱 재료에 더 많이 활용되고 있다.

가장 대중적인 합성섬유 '폴리에스테르' 섬유

나일론이 가장 유명한 합성섬유라면 폴리에스테르(polyester)는 가장 많이 사용하는 합성섬유이다. 1941년 영국의 화학자 존 윈필드(John R. Whinfield)와 제임스 딕슨(James T. Dickson)이 개발한 폴리에스테르는 석유화학제품인 에틸렌글리콜(ethylene glycol)과 테레프탈산(terephthalic acid)의 중합체로부터 얻은 합성섬유이다. 원료가 되는 중합체가 에스테르결합(-CO-O-)을 통해 긴 사슬 구조를 갖고 있어 폴리에스테르라고 부른다.

폴리에스테르 섬유는 염색이 어렵고 정전기가 발생하기 쉽다는 단점이 있지만 나일론 못지않게 튼튼하고 주름이 적으며 흡습성이 낮아 세탁 후에 쉽게 마르기 때문에 다양한 의류에 사용되고 있다. 또한 열가소성이 좋아 열처리를 한 폴리에스테르 의류는 세탁 후에도 다림질이 거의 필요 없을 정도로 형태를 잘 유지한다. 개발 당시에는 촉감이 비단과 비슷해 비단의 대체제로 주목받았다. 면이나 양모 같은 천연섬유와 비교할 때 폴리에스테르로 만든 옷은 훨씬 튼튼

폴리에스테르 직물은 주름이 잘 생기지 않고 세탁 후에 쉽게 마른다. © shutterstock.com



폴리에스테르 섬유 표면의 주사전자현미경(SEM) 사진. © wikimedia.org

하고 주름이 잘 생기지 않아 관리하기가 편리하다. 그러나 여러 단점 때문에 주로 천연섬유를 보완해 혼방 형태로 쓰이고 있다. 의류용과 산업용으로 쓰임새가 넓어 폴리에스테르 섬유는 전체 합성섬유 생산량의 65%를 차지할 정도로 널리 사용되고 있다. 주요 제품으로는 면-폴리에스테르 혼방제품인 테릴렌(Terylene), 테토론(Tetoron), 데이크론(Dacron) 등이 있다.

이렇듯 합성섬유는 특성상 물을 흡수하는 성질이 낮아 땀을 잘 흡수하지 못하거나 정전기를 유발하기도 하지만 다양한 기능과 장점이 있다. 이 덕분에 합성섬유를 이용하면 튼튼하면서도 가벼운 겨울코트, 비에도 잘 젖지 않는 여름옷, 잘 늘어나거나 헤어지지 않는 스타킹 같은 제품을 만들 수 있다. 그래서 나일론, 폴리에스테르 등 다양한 합성섬유가 개발·제작돼 왔다.

섬유의 '일석이조' 결합, 혼방

오늘날 대부분의 의류는 천연섬유 또는 합성섬유만으로 만들지 않는다. 우리가 많이 들어본 면 혼방, 모 혼방이라는 이름의 직물로 만들고 있다. 혼방이란 서로 다른 두 종류 이상의 섬유를 혼합하거나 성질이 다른 동일 섬유를 혼합해 실을 만드는 것을 말한다. 왜 하나의 섬유로 옷을 만들지 않고 번거롭게 혼방해 만드는 것일까.

생산 공정이 복잡해지지만 혼방을 하는 이유는 두 가지 섬유의 장점을 함께 취하고 서로의 단점을 보완하기 위해서이다. 예를 들어 천연섬유인 면직물로 만든 옷은 흡습성이 좋아 땀을 잘 흡수하기 때문에 항상 쾌적함을 유지할 수 있다. 하지만 강도가 약하고 잘 구겨지기 때문에 오래 입기 어렵다. 합성섬유인 폴리에스테르를 혼방해 옷을 만들면 면직물의 장점은 그대로 유지하면서 질기고 구김이 거의 없어 다림질이 편리한 폴리에스테르의 장점을 함께 갖게 된다. 두 가지 섬유의 장점을 통해 각자의 단점을 보완할 수 있기 때문에 많은 옷들이 혼방섬유를 이용하는 것이다.



우리가 입는 의류 대부분은 두 종류 이상의 섬유를 혼합해 만든다. 사진은 서울의 한 매장에 진열돼 있는 혼방셔츠.
© shutterstock.com

비단의 경우에는 비슷한 촉감의 합성섬유인 레이온 섬유와 혼방하는 경우가 많으며 양모의 경우 아크릴 섬유와 주로 혼방해 사용하고 있다. 기능적인 측면뿐만 아니라 경제적인 부분에서도 혼방섬유로 옷을 만드는 것이 이득이다. 예를 들어 양모와 같은 값비싼 천연섬유만으로 겨울옷을 만들면 가격이 비싸 소비자에게 큰 부담이 된다. 하지만 비슷한 촉감과 성질을 가진 아크릴 섬유와 혼방해 겨울옷을 만들면 저렴한 가격에 우수한 품질의 겨울옷을 입을 수 있다. 겨울 코트의 경우 양모-아크릴 혼방제품을 양모만으로 만든 제품과 비교하면 촉감 면에서 조금 차이가 있지만 보온성은 크게 차이가 없고 가격은 혼방 제품이 훨씬 저렴하다.

과거에는 천연섬유와 천연섬유를 조합해 혼방했으나 최근에는 합성섬유와 천연섬유를 주로 혼방하고 합성섬유끼리도 혼방해 사용하고 있다. 합성섬유는 생산과정에서 굵기, 길이, 모양을 자유롭게 변화시킬 수 있어 면이나 양모 같은 천연섬유와 혼합해 사용하기 편리하다. 혼방섬유의 특성은 섬유 간의 조합 비율에 따라 결정된다. 일반적으로 폴리에스테르와 면은 각각 65%, 35%의 비율로 혼방한다. 만일 폴리에스테르의 비율이 높아지면 튼튼하고 질긴 섬유를 얻을 수 있지만 착용감이 떨어지고 표면이 더 매끄러워져서 염색이 잘되지 않는다. 반대로 면의 비율이 증가하면 몸에 닿는 감촉이 더 좋아지지만 구김이 잘 생겨 관리하기가 어려워진다. 또 다른 혼방제품인 아크릴 섬유와 양모는 보통 각각 55%, 45%로 혼합한다. 그런데 양모의 비율이 늘어날수록 가격이 비싸지고 세탁할 때 섬유가 수축하기 쉬워 관리하기 힘들어진다.

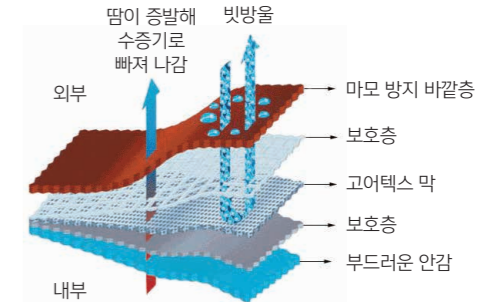
서로 색이 다른 물감이 도화지에서 만나 다채로운 색감을 내듯이 천연섬유와 합성섬유의 혼방을 통해 더 싸고 다양한 기능을 가진 옷을 만들 수 있으니 일석이조가 아닐 수 없다.

방수 소재의 대명사, 고어텍스

다들 '고어텍스(Gore-Tex)'라는 이름을 들어봤을 것이다. 흔히들 고어텍스를 등산복 브랜드 이름처럼 알고 있는데, 사실 고어텍스는 발명자인 윌버트 고어(Wilbert L. Gore) 박사의 이름에서 유래된 기능성 소재다. 고어텍스는 방수, 방풍 기능이 뛰어나면서 동시에 투습성이 뛰어난 분리막 소재이다. 주요 성분은 불소계 발수 코팅 소재인 테플론, 즉 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene)으로 다른 화학물질과 화학반응이 쉽게 일어나지 않아 화학적으로 매우 안정한 물질이다. 테플론 수지를 가열해 늘리면 눈에 보이지 않는 미세한 구멍이 있는 얇은 막이 생기는데, 이를 나일론 또는 폴리에스테르 옷감의 겉면에 접착해 만든 것이 바로 고어텍스이다. 고어텍스의 기능은 이 미세한 구멍에서 나온다. 고어텍스에 뚫려 있는 미세한 구멍은 지름이 200nm(나노미터, 1nm=10⁻⁹m)로 빗방울(지름 1mm)보다 작아 비가 옷에 스며들지 못하게 막는 반면, 수증기(지름 0.4nm)보다는 크기 때문에 몸에서 나온 땀은 증발해 수증기 형태로 열과 함께 바깥으로 방출된다.



아웃도어 제품에 많이 쓰이는 고어텍스 소재는 빗방울이 침투하지 못하게 하는 동시에 땀은 수증기 형태로 방출하도록 해준다. © shutterstock.com



고어텍스에 뚫려 있는 미세한 구멍은 빗방울보다 작고 수증기보다는 크다. © wikimedia.org

연꽃잎처럼
물방울이
스며들지 않는
섬유



연꽃잎 위에 빗방울이 스며들지 않고 구슬처럼 맺혀 있다. © shutterstock.com

비오는 날에는 연꽃잎 위에 빗방울들이 스며들지 않고 구슬처럼 흘러내리는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 나뭇잎 표면에 있는 미세한 털 때문에 발생한다. 나뭇잎의 미세한 털들이 물방울과 표면 사이의 접촉면적을 줄여 물방울과 표면 사이의 서로 당기는 힘을 감소시킴으로써 물방울들이 구슬처럼 구르게 되는 것이다. 또한 물방울과 접촉하는 표면의 에너지가 극히 낮은 경우도 계면 사이의 힘이 약화돼 동그란 구형의 물방울이 형성되고 쉽게 구르게 된다.

자연의 원리를 알게 되면 이를 다양한 분야에서 활용할 수 있다. 합성 섬유 표면이 매우 낮은 표면에너지를 가져 소수성을 보이거나 표면에 미세한 털과 같은 돌기를 만들 수 있다면 연꽃잎처럼 물이 잘 스며들지 않는 옷

을 만들 수 있을 것이다. 이처럼 원단 표면을 가공해 물을 튕겨 굴러 떨어지도록 하는 것을 발수가공(water repellent)이라고 한다. 비나 눈에 젖기 쉬운 스키복이나 우의, 텐트 같은 아웃도어 제품용 기능성 소재에는 이런 발수가공이 반드시 필요하다. 발수가공에는 섬유 단계에서 미세한 돌기를 만들어 발수기능을 갖도록 하는 방법도 있지만 기존 원단에 발수제를 코팅하는 방법도 있다. 아웃도어 의류나 텐트는 주로 발수제를 이용하는데, 발수제에 사용되는 원료는 1990년대까지 대부분 일본과 독일에서의 수입에 의존하고 있었다.

한국화학연구원은 2년간의 연구를 통해서 새로운 '불소계 발수제'를 개발하는 데 성공했다. 새로운 발수제는 물에 나노 크기의 소수성 불소수지 입자가 분산돼 있는 형태를 갖기 때문에 기존 섬유제품에 단순히 뿌려주는 것만으로도 표면을 소수성으로 바꾸며 연꽃잎처럼 미세한 돌기막이 생성돼 비가 잘 스며들지 않는다. 새로운 발수제는 텐트와 우산 같은 다양한 아웃도어 제품에 이용할 수 있어 개발 첫해에만 90억 원의 매출을 올릴 정도로 성공리에 판매되고 있다. 새로운 발수제는 불소를 사용하기 때문에 기존 발수제와 달리 물뿐만 아니라 기름과 같은 오염물질이 잘 스며들지 못한다. 따라서 기름과 같은 오염물질이 많이 발생하는 산업현장의 위생복, 안전복에 널리 사용되고 있다.

또한 본 '불소계 발수제'는 불이 붙기 쉬운 톨루엔, 신나와 같은 유기용제를 사용하지 않고 물을 용제로 사용하기 때문에 화재위험이 없을 뿐만 아니라 유해한 휘발물질이 발생하지 않아 인체에 무해하다. 사용과정뿐만 아니라 생산과정에서도 수질오염의 주범인 유기용제를 사용하지 않기 때문에 환경 친화적이다. 이처럼 화학소재는 자연을 모방한 특수기능으로 우리의 편리와 안전을 한층 업그레이드하고 있다.

단단하게, 똑똑하게 외형을 지키는 신소재

‘주꾸미가 찾아준 900년 전 보물.’ 2007년 5월 18일 충남 태안에서 통발로 주꾸미를 잡던 어부 김용철 씨는 깜짝 놀랐다. 통발 속 주꾸미 한 마리가 비색(翡色)이 감도는 접시를 단단히 감고 있었던 것이다. 김 씨가 경찰에 즉각 신고하면서 900년간 잠들어 있던 태안 보물선의 발굴은 이렇게 시작됐다. 개성으로 향하다 침몰한 것으로 추정되는 배에서는 2만여 점의 최상급 고려청자가 발견됐다. 보물선은 오랫동안 바닷속에서 형체를 알기 힘들 정도로 부패됐지만 발굴된 청자들은 수백 년 동안 바닷속에 잠들어 있었다고는 믿을 수 없을 정도로 선명한 비색을 자랑했다. 어떻게 고려청자는 아름다움을 지킬 수 있었을까.

도자기의 아름다움을 지키는 유약

그 비결은 고려청자에 사용된 유약에 있다. 유약이란 도자기의 표면에 얇게 씌워서 광택과 색채 또는 무늬를 내는 유리질의 분말을 칭하며, 장식과 규석, 석회석을 혼합해 만든다. 초벌구이한 도기에 유약을 바르고 가마에서 고온에 굽는 소성과정을 거치면 유약의 성분과 공기 중의 산소가 만나 산화과정을 거치면서 얇은 유리막이 생성된다. 이렇게 만든 그릇은 표면에 굳은 유약 때문에 좀 더 단단해지고 물이 잘 스며들지 않아 바닷속에서도 수백 년을 견딜 수 있다. 유약은 도자기를 좀 더 튼튼하게 만들 뿐만 아니라 아름다운 빛깔을 더해준다. 도자기를 굽는 불에는 산화염과 환원염이 있다. 산화염은 가마 속의 산소가 충분해 완전히 깨끗하게 연소되는 불이며 붉은색을 띤다. 이 방법은 도자기에 바른 물감(안료)의 색상이 뚜렷하게 나와 주로 현대 도자기, 다양한 색의 예술작품들을 굽는 데 이용된다. 반면 가마 내부의 산소 공급을 차단하면 연료가 불



‘국보 97호’인 청자 음각 연꽃 넝쿨무늬 매병.
© 국립중앙박물관

완전 연소해 푸른색의 환원염이 발생한다. 이때 불완전 연소로 발생한 일산화탄소가 유약의 산화제이철 성분과 결합하면서 산화제이철로 환원되어 고려청자의 푸른빛을 만들어 낸다. 청자와 백자 같은 전통자기들은 주로 환원염 상태에서 구워내며 유약 때문에 색상이 미려하고 강도가 매우 뛰어나다.

오늘날 우리가 사용하는 대부분의 그릇들은 유약을 발라 만들고 있다. 그러나 처음부터 유약을 사용해서 그릇을 만들던 것은 아니다. 처음으로 우리 조상들이 사용한 그릇은 유약을 바르지 않은 흙을 500℃ 이상의 고온에 구워 만든 토기이다. 신석기시대(빛살무늬토기)부터 고려시대까지만 하더라도 주로 토기를 사용했다. 그러나 낮은 온도에서 초벌구이를 한 토기는 점토 사이에 보이지 않는 미세한 구멍이 많아 음식물의 물기가 잘 스며들고 쉽게 잘 깨져 오래 사용



유약을 바르지 않았던 신석기시대 토기는 점토 사이에 미세한 구멍이 많아 쉽게 깨졌다. © shutterstock.com

하기 힘들었다. 강도가 낮아 오래 사용하기 힘든 토기의 단점을 극복하기 위해 800℃ 이상에서 재벌구이를 해 만든 그릇이 옹기이다. 토기보다 고온에서 구워낸 옹기는 토기보다 표면에 미세한 구멍이 작아 튼튼하지만 역시 물기가 잘 스며들어 오래 사용하기 어려웠다.

유약은 우연히 발견됐다. 최초의 도자기 유약은 기원전 3000년경 이집트에서 천연 탄산소다와 모래를 섞어서 유리구슬을 만들다 발견했다고 한다. 우리나라에서는 신라시대에 토기를 굽는 과정에서 토기에 불이 직접 닿아 부서지는 것을 막기 위해 재로 덮어 보호하면서 자연스럽게 발견됐다. 완성된 토기에 덮인 재를 털어내니 재가 유리코팅으로 변해 바깥에 달라붙어 물이 스며드는 것을 막아줄 뿐만 아니라 아름다운 빛깔을 만들어주는 것을 우연히 발견하게 되면서 유약은 도자기를 만드는 데 없어서는 안 될 재료가 됐다.

열로부터 지켜주는 세라믹

오랫동안 유약은 물과 충격으로부터 도자기를 지켜주는 보호막이었다. 그런데 기술이 발달하면서 유약으로부터 보호받던 도자기가 이제는 세라믹이라는 새로운 이름으로 다른 물질들을 보호하고 있다.

세라믹(ceramics)이란 고대 그리스어의 ‘케라모스(keramos)’, 즉 ‘흙으로 만들어진 또는 불에 태워서 만든 물건’이란 말에서 나왔다. 사람이 인위적으로 열을 가해 만들어진 비금속무기물질인 세라믹은 구석기시대 토기부터 사용해온 가장 역사가 오래된 재료이다. 대표적인 세라믹 제품으로 유리와 도자기가 있다. 오늘날의 세라믹은 점토와 모래 같은 천연 무기 재료를 그대로 사용하는 것이 아니라 천연 재료에서 필요한 성분을 순수하게 정제한 뒤 초미세 분말로 만들어 원하는 형태를 잡은 뒤에 가마에서 구워서 제작한다. 1970년대부터 만들기 시작한 새로운 세라믹은 현재 입자 크기가 나노미터(10억분의 1m) 단위로까지 줄어든 파인 세라믹(fine ceramics)에 이를 정도로 정밀해지고 있다. 세라믹은 입자 크기가 작을수록 강도가 더욱 높아져서 인공뼈, 엔진, 기어 등에 사용할 뿐 아니라 여러 가지 기능을 갖는 각종 센서에도 이용하고 있다.

우주왕복선의 외부 표면에는 세라믹 코팅이 돼 있어 강력한 마찰열을 버틸 수 있다. © shutterstock.com



주방기기 안전하게 사용하려면

주방식기로 이용하는 도자기에 바른 유약이 문제가 된 적이 있다. 과거에는 광명단과 같이 산화납(Pb_3O_4) 성분이 포함된 유약을 사용해 붉은색이 나고 표면이 매끈한 그릇을 만들었다. 하지만 납 위험성 때문에 요즘 국내에서 만드는 도자기는 납을 포함하지 않는 무연유약만 사용하도록 법으로 정하고 있다.

다양한 식기에 들어가는 화학약품도 안전성 논란이 있다. 특히 가볍고 튼튼해 주방용기로 널리 쓰이는 플라스틱은 환경호르몬 문제가 따라다닌다. 플라스틱의 일종인 폴리카보네이트(PC), 폴리아릴설폰(PASF), 에폭시 수지로 만든 용기를 고열로 가열하거나 음식과 접촉할 경우 비스페놀A가 용해돼 나올 수 있다. 비스페놀A는 발암, 내분비계 교란을 통한 성기능 장애 등을 일으킬 수 있는 화학물질이다.

하지만 대부분의 플라스틱 주방용기는 환경호르몬으로부터 안전하다고 봐도 괜찮다. 국내에서 생산·유통되는 주방용품의 95%가 폴리프로필렌(PP) 재질이며, 우유병이나 생수병에 쓰이는 폴리에틸렌(PE)이나 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)에서는 비스페놀A가 나오지 않는다. 실제 폴리카보네이트(PC) 재질 용기에서 검출되는 비스페놀A 수치는 정부 조사결과 안전기준치보다 낮은 미미한 수준이며, 소변으로 금방 배출돼 안전하다. 그러나 식약청은 성인에 비해 환경호르몬에 민감한 유아를 보호하기 위해 2012년부터 비스페놀A가 나오는 유아용 젖병의 제조·수입·판매를 금지하고 있다.

플라스틱 주방기기는 안전하게 사용하기 위해서는 용도에 맞게 써야 한다. 특히 플라스틱 용기를 전자레인지에서 돌릴 때에는 사용가능 여부를 반드시 확인해야 한다. 폴리염화비닐(PVC) 소재와 컵라면 용기 등에 쓰이는 폴리스티렌(PS), 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)는 열에 약하기 때문에 전

자레인지에 넣지 않는 것이 좋다. 반면 폴리프로필렌(PP), 폴리에틸렌(PE) 소재 용기는 전자레인지에서 사용할 수 있지만 되도록 식품을 데우는 용도로만 쓰고 조리용으로 장시간 사용하지 않는 것이 바람직하다. 따라서 전자레인지에는 도자기나 유리로 만든 주방용기나 전자레인지용 플라스틱 용기를 사용해야 한다.

환경호르몬의 문제는 주방에서 많이 쓰는 프라이팬에도 있다. 대부분의 프라이팬에는 음식이 조리 중에 늘어붙지 않게 코팅이 돼 있는데, 코팅에 사용되는 '과불화옥탄산(PFOA)'에서 환경호르몬이 유출될 수 있기 때문이다. 탄소와 불소의 결합물인 과불화옥탄산은 물과 기름에 저항하는 특성 때문에 프라이팬 코팅은 물론이고 의류의 방수처리에도 널리 쓰이고 있다. 대표적인 프라이팬 코팅제인 '테플론'에도 과불화옥탄산이 포함돼 있다. 과불화옥탄산은 호르몬 교란물질로서 당뇨와 뇌혈관 질환 등을 유발할 수 있어 주의가 필요하다. 특히 빈 프라이팬을 오래 가열하거나 코팅이 벗겨진 프라이팬을 사용할 경우 유출 가능성이 높아지니 주의해야 한다. 일반적으로 코팅 프라이팬의 수명은 1년에서 1년 반에 불과하다. 따라서 조리도구를 안전하게 사용하기 위해서는 프라이팬의 수명을 감안해 사용해야 하며, 코팅 프라이팬 외에 무쇠나 스테인리스 재질의 프라이팬의 사용도 고려해 볼 필요가 있다.



굽기 전에 잘 말린 도자기 그릇들. © shutterstock.com

세라믹의 강점은 도자기에서 알 수 있듯 열에 무척 강하다는 것이다. 금속이나 플라스틱과 달리 세라믹은 미세한 분자들이 강하게 결합돼 있어 1000℃가 넘는 온도에도 녹거나 분해되지 않는다. 우주왕복선의 외부 표면이 무려 3만 3000개의 초경량 특수 세라믹 타일로 덮여 있는 것도 이처럼 열에 강한 성질 덕분이다. 용광로에서 쇳물을 뽑아내려면 열에 강한 세라믹 내화(耐火)벽돌이 필수적이다. 이 때문에 제철용 세라믹 내화 벽돌은 산업혁명의 핵심품목으로 1800년대만 해도 유럽 각국에서 정부가 직접 생산을 관리할 정도로 중요한 품목이었다.

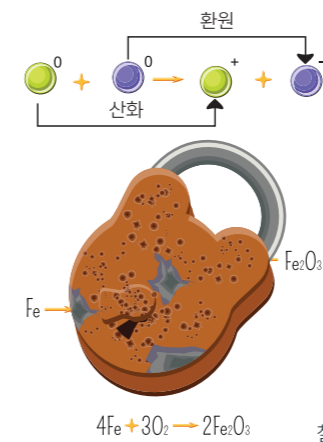
단일 소재뿐만 아니라 세라믹 코팅기술은 다양한 분야의 공업제품에 이용되고 있다. 특히 고온고압에서 작동하는 발전용 가스터빈이나 항공기 제트엔진에서 세라믹은 반드시 필요한 소재이다. 발전소에서 좀 더 효율적으로 전력을 생산하기 위해서는 가스터빈의 작동온도가 높아야 한다. 그러나 금속제 터빈부품은 강도가 높고 마찰에 강하나 고열에 약해 형태가 달라질 수 있어, 세라믹을 활용한 차열코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)을 통해 열로부터 보호하고 있다. 항공기 제트엔진 역시 연소가스의 고열로부터 금속부품이 변형되는 것을 막기 위해 세라믹 코팅을 하고 있다. 이처럼 유약으로부터 보호받던 도자기는 이제는 우주항공 산업에서 발전 산업까지 다양한 분야에서 고열로부터 재료들을 지키는 역할을 하고 있다.

산화로부터 금속을 지키는 다양한 방법들

수분에 취약하고 강도가 약한 토기의 단점을 보완하기 위해 유약을 발라 도자기를 만든 것처럼, 외부의 수분을 차단하는 일은 철과 같은 금속에게도 중요한 문제다. 철은 자동차부터 생활용품, 그리고 건축물에 이르기까지 우리 생활에서 쓰이지 않는 곳이 없는 중요한 재료이다. 만약 철이 없다면 에펠탑 같은 고층 건축물은 당연히 지을 수 없을 것이고 아직도 우리는 초가집과 나무

집에서 살고 있을 것이다. 하지만 이런 철에는 치명적인 약점이 존재한다. 바로 산화환원반응이다. 철(Fe)이 물(H₂O)과 산소(O₂)와 접촉하면 전자를 잃어버리고 산화해 우리가 흔히 녹이라고 부르는 붉은색의 산화철(Fe₂O₃·3H₂O)이 돼 버린다. 건축물에 사용된 철이 녹슬게 되면 강도가 크게 약해져서 무너질 수 있다.

따라서 철로 만든 건물과 제품들은 녹스는 것을 막기 위해 다양한 방법을 사용하고 있다. 가장 일반적인 방법은 겉에 페인트와 같은 도료를 바르는 것이다. 마치 유약이 도자기를 수분과 충격으로부터 보호하는 것처럼 페인트나 기름을 발라 수분과 공기로부터 철을 보호할 수 있다. 하지만 페인트나 기름은 유약과 달리 시간이 지나면 벗겨지기 쉬워서 주기적으로 다시 발라줘야 한다는 단점이 있다. 그래서 좀 더 튼튼한 다른 금속을 철 표면에 도금하는 방법이 있다. 철보다 반응성이 큰 아연이나 반응성이 적은 주석을 입혀서 수분과 산소를 차단하는 것이다. 아연을 도금한 금속을 합석이라 부르며 표면에 흠이 생기더라도 아연이 먼저 산화되어 철을 보호해주기 때문에 주로 지붕과 같은 건축용 자



철이 산화되는 원리. © shutterstock.com



페인트가 벗겨지면 공기 중에 노출된 철은 녹이 쓴다.
© shutterstock.com

재나 차량용 강판으로 사용한다. 주석을 곁에 도금한 금속을 양철이라고 부르는데 독성이 없어 통조림의 포장용기로 사용하고 있다.

물과 접촉해 산화되는 것은 철뿐만 아니라 알루미늄에게도 큰 문제이다. 많은 사람들이 알루미늄은 녹슬지 않는다고 생각하는데 이는 잘못된 상식이다. 순수한 알루미늄은 철보다 반응성이 좋아서 녹이 더 잘 생겨 위험하다. 그럼에도 왜 알루미늄은 녹슬지 않는 것처럼 보일까? 답은 알루미늄의 반응성이 워낙 좋기 때문이다. 알루미늄은 반응성이 매우 높아 공기 중의 산소와 수분과 급속히 반응해 순식간에 표면이 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 변한다. 철의 표면에 생기는 산화철(녹)과 달리 산화알루미늄의 얇은 막은 마치 유약이나 페인트처럼 알루미늄을 물과 공기로부터 차단하여 더 이상 산화되지 않게 보호한다. 우리가 알루미늄이 녹슬지 않는다고 생각하는 건 바로 이 산화알루미늄 피막 때문이다. 하지만 자연적으로 생기는 산화알루미늄 피막은 두께가 얇아 잘 벗겨지기 때

문에 좀 더 튼튼한 보호막을 만들 필요가 있다. 전기화학적 방식을 통해서 좀 더 두껍고 튼튼한 산화알루미늄 보호막을 알루미늄에 씌우는 방법을 아노다이징(anodizing, 양극산화)이라 부른다. 아노다이징(양극산화)은 양극(anode)과 산화(oxidizing)의 합성어로서 금속제품을 황산 같은 전해액에 넣고 전기를 흘리게 되면 금속제품이 전류가 흐르는 양극 역할을 하며 산화되기 때문에 이렇게 부르고 있다. 아노다이징을 통해 생성된 피막은 자연적으로 만들어진 것과 비교하면 매우 단단하고 잘 부식되지 않는다. 또한 피막의 표면에 매우 미세한 구멍이 나 있어서 순수 알루미늄과 달리 다양한 색상으로 염색하기 쉽다. 우리가 사용하는 스마트폰과 가전제품의 다양한 색깔은 바로 아노다이징 과정을 통해서 만들어진 것이다.

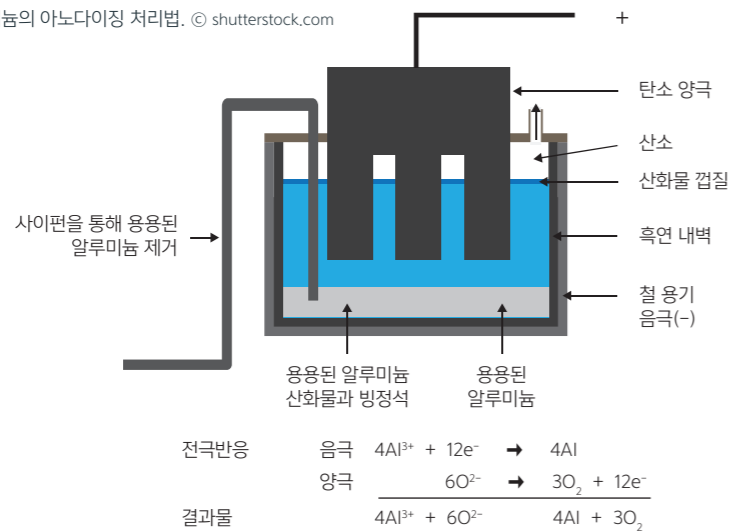
원형을 복구하는 형상기억소재와 자가치유소재

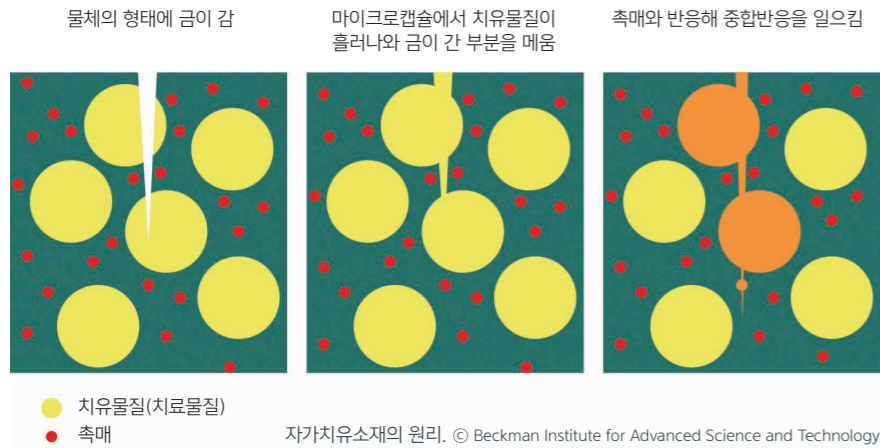
유약과 아노다이징을 통해 만든 보호막은 수분과 충격으로부터 소재를 지키지만 완벽한 방법은 아니다. 망치로 치는 식으로 강한 충격을 가하게 되면 강철 같은 튼튼한 소재도 결국 깨지기 때문이다. 그런데 형상기억합금이라는 특수한 소재로 형태를 만들게 되면 어떠한 외부충격에도 제품의 형태를 보호할 수 있다.

형상기억합금이란 다른 모습으로 변형됐을 때 열을 가하면 다시 변형 전의 모습으로 되돌아오는 성질을 가진 합금을 말한다. 우리가 아는 일반적인 금속은 한번 충격을 가해 형태가 변하면 원래대로 돌아오지 않는다.

형상기억합금을 처음으로 사용한 것은 1969년 아폴로 11호의 통신 안테나였는데, 발사할 때는 접혀 있다가 달 표면에서 적당한 온도가 되면 저절로 펴지게 만들었다. 일상생활에서는 브래지어와 같은 여성용 속옷에 가장 흔하게 사용되며 세탁과정에서 찌그러진 형태가 체온에서 다시 원래대로 돌아오게 된다. 그 외에도 기계부품이나 측정기기, 치열 교정용 보정기 같은 의료용으로 사용

알루미늄의 아노다이징 처리법. © shutterstock.com





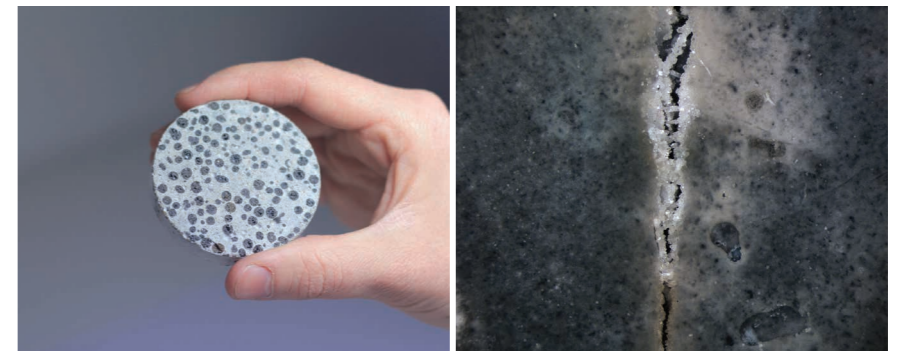
하기 위한 연구가 진행됐으며 전투기의 파이프 이음쇠와 온실 창 의 개폐장치 등에도 형상기억합금이 사용되고 있다.

아무리 유약으로 보호하더라도 한번 깨진 도자기는 다시 원래대로 돌아오지 않는다. 그래서 도자기나 휴대전화 액정유리 같이 깨지기 쉬운 물건들은 늘 조심해서 다룰 수밖에 없다. 휴대전화의 경우 한번 금이라도 가면 수리비로 큰돈을 지불해야 해서 두꺼운 케이스나 강화유리 같은 소재로 보호하는 사람들이 많지만 파손으로부터 완전히 자유로울 수는 없다. 충격으로부터 완전히 보호할 수 없다면 형상기억합금처럼 금이 가도 자동으로 원상회복되는 유리나 플라스틱을 만들면 되지 않을까?

놀랍게도 SF영화에서나 볼 법한 스스로 상처를 치유하는 소재에 대해서 이미 국내외에서 연구가 진행되고 있다. '외부 환경에 의해 손상을 입은 고분자가 스스로 결함을 감지해 자신의 구조를 복구함은 물론이고 원래의 기능을 회복할 수 있는 지능형 재료'를 자가치유소재(self-healing material)라고 부르고 있다. 자가치유소재는 스스로 복원기능을 가지므로 미세한 손상에 대처하기 용

이하며 재료에 따라서는 복구된 부분의 성능이 원래 물질과 차이가 없어 다양한 응용분야에 활용할 수 있다.

자가치유소재가 생물체처럼 스스로 상처를 치유하는 비결은 고분자물질에 있다. 손상부위를 복원할 수 있는 접착제와 같은 고분자물질을 첨가해 충격이 발생했을 때 스스로 복원하는 것이다. 예를 들어 플라스틱 소재에 액체치료물질이 담긴 미세한 캡슐을 주입해, 충격으로 플라스틱에 금이 가면 캡슐이 터지면서 액체치료물질이 방출된다. 캡슐에서 나온 액체치료물질이 플라스틱과 접촉하면서 마치 접착제처럼 변해서 충격으로 생긴 틈 사이에 스며들어 단단하게 메우는 것이다. 고분자물질 캡슐을 이용한 자가치유소재는 이미 상용화된 반도체 회로기판 등 다양한 용도에 이용되고 있다. 캡슐을 이용한 자가치유소재는 제작이 비교적 쉽고 플라스틱부터 유리까지 다양한 소재에 응용할 수 있기 때문에 가장 널리 연구되는 방법이다. 이 외에도 중공섬유(hollow fiber) 또는 관다발(vascular network)을 사용한 시스템 연구, 특정한 빛(자외선)을 받으면 형질이 바뀌는 고분자물질을 이용한 자가치유소재 연구도 진행 중이다.



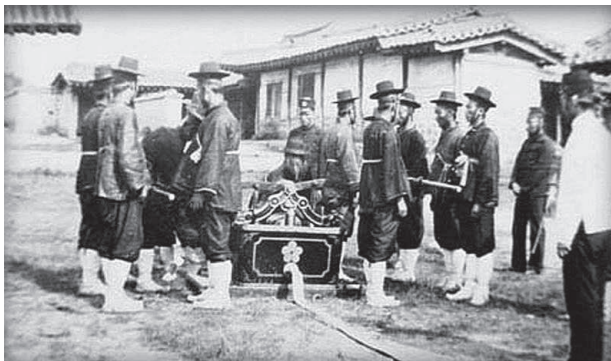
자가치유소재는 미래의 건축자재로 각광받고 있다.
© University College London

자가치유콘크리트가 깨진 부분을 스스로 메우고 있다.
© Delft University of Technology

‘서울의 상징, 해태.’ 상상의 동물인 해태는 선한 사람과 악한 사람을 구별한다고 해서 공정한 재판을 상징하는 동물이다. 조선시대에는 관리를 감찰하고 법을 집행하는 사헌부의 상징으로 관복에 사용했으며, 오늘날에도 국회의사당과 대검찰청 앞에 해태상이 세워져 있다. 그런데 또 다른 의미로 해태는 화재나 재앙을 물리치는 신수(神獸)로 여겨져 경복궁 앞에 한 쌍의 해태상이 궁궐 앞을 지키고 있다.

방화복을 입은 소방관

풍수지리설에 따를 때 서울은 나라의 수도로서 더없이 좋은 곳이지만 단 하나 화재에 약하다는 단점이 있다고 한다. 특히나 관악산이 유달리 불의 기운이 강해서 그 기운을 경복궁 뒤의 북악산이 제대로 막아주기 어렵다는 것이



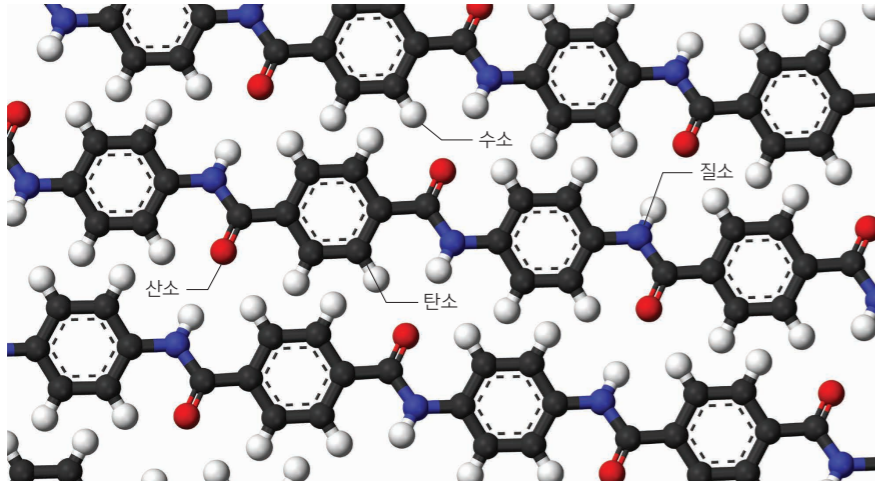
궁중소방대에서
완용펌프(수동 소방기구)를
조작하는 훈련을 하고 있다.
© wikimedia.org

다. 그래서 불의 기운을 억누르기 위해 경복궁 앞에 두 개의 해태 석상을 세웠다고 한다.

풍수가 과학적인 설명은 아니지만, 목조건축물이 주를 이루던 중세 동아시아권의 도시에서 화재는 종종 일어나는 재해였다. 자연히 화재를 예방하고 진압하는 방법도 발전했는데, 이미 세종대왕 시대에 오늘날 소방서와 같은 우리나라 최초의 소방기관인 금화도감(禁火都監)이 설치됐다. 50여 명의 군인들로 구성된 소방대인 금화도감 소속의 멸화군(滅火軍)들은 도끼와 쇠갈고리, 밧줄 등을 갖추고 물에 적신 천을 매단 장대와 노비들이 퍼온 물을 이용해 화재현장에서 불을 꺾다. 멸화군들이 가진 장비에서도 알 수 있듯이 사실 이들의 주요 임무는 화재 진압보다는 화재가 더 크게 번지는 것을 막는 것이다. 뜨거운 열기와 불꽃으로부터 신체를 보호할 방법이 없었던 멸화군들은 불을 끄기보다 도끼와 쇠갈고리를 통해 불이 붙은 건물을 무너뜨리고 주변을 정리하여 불길의 번지는 것을 막았다.

언제부터 소방관들이 불길 속으로 들어가 화재를 진압하고 인명을 구조할 수 있게 됐을까. 영국 빅토리아 시대(1837~1901년) 런던의 소방관들은 마치 바닷속 잠수부와 같은 복장으로 화재 현장을 누볐다. 불에 타지 않게 두꺼운 가죽으로 만든 코트와 머리를 보호하는 헬멧 그리고 외부로 연결된 파이프를 통해서 공기를 공급받는 방화복은 연기로부터 몸을 지키는 데는 적합했지만 화재 현장의 열기로부터 보호하기는 부족함이 많았다. 더구나 두꺼운 가죽코트는 화재현장에서 물을 뒤집어쓰다 보면 물을 먹어 무거워져 소방관들을 금방 지치게 만들었다. 가죽에서 고무코팅 소재로 소방관들의 코트가 바뀌면서 좀 더 가벼운 방화복을 입을 수 있게 됐지만, 불길로부터 직접 소방관들을 지킬 수 있게 된 것은 1950년대가 지나야 가능했다.

아라미드(aramid) 섬유는 불에 잘 타지 않는 난연성 섬유로 소방관들을 불꽃과 열로부터 지키기에 가장 적합한 소재이다. 1960년대 미국 듀폰사가 처음으



아라미드 섬유 일종인 케블라의 구조. © wikimedia.org

로 노멕스(Nomex)라는 이름으로 개발한 아라미드 섬유는 500℃가 넘어도 쉽게 탄화될 뿐 타지 않기 때문에 불꽃에 직접 닿는 방화복 외피로 사용하기에 알맞다. 또한 같은 합성섬유인 나일론보다 2.5배나 강도가 높으며 폴리에스테르보다는 탄성이 6배가 좋아 화재현장의 추락물과 같은 외부충격에 대해서도 신체를 보호할 수 있다는 장점을 가진다.

하지만 이런 아라미드 섬유가 세상에 빛을 보기까지는 꽤 오랜 시간이 걸렸다. 바로 열에 잘 녹지 않는 내열성 때문이다. 합성섬유는 원료물질을 열에 녹여서 가느다란 섬유로 뽑아내는 용융방사 과정을 통해 만들어진다. 그런데 아라미드 섬유를 구성하고 있는 고분자들은 열에 잘 녹지 않아 원료로부터 섬유를 뽑아내는 데 어려움을 겪었다. 오랜 실험 끝에 듀폰사가 우연히 다른 화학물질과 혼합해 원료 물질을 녹일 수 있는 방법을 발견하면서 생산이 가능해졌다. 열로부터 소방관을 지킬 수 있는 특성 때문에 세상에 나오는 것이 늦춰진 셈이다.

일상생활에서 화재로부터 지켜주는 내열·난연성 소재

2014년 5월 28일 오후 서울 지하철 3호선 도곡역으로 진입하던 전동차 안에서 화재가 일어났다. 방화범인 70대 남성은 미리 준비한 11L가량의 시너를 전동차 의자에 뿌리고 불을 붙이고 달아났다. 불이 일어난 과정이나 상황이 192명의 사망자를 낸 2003년 대구 지하철 화재와 흡사했지만 다행히 아무런 인명 피해도 나지 않았다. 11년 전 대구지하철 참사 이후 열차 내부를 난연성 소재로 전면 교체했기 때문이다.

대구 지하철 화재사고 때에 전동차의 실내와 천장은 불에 탈 때 유독성 가스를 내뿜는 섬유강화플라스틱(FRP)과 염화비닐 소재로 돼 있었다. 객차 내부에 붙어 있는 광고용 종이나 플라스틱, 아크릴판처럼 불에 타기 쉬운 소재도 문제였다. 화재에 대한 인식이 부족했기 때문에 아무도 위험성을 알지 못했지만, 전동차 안에 가득 찬 가연성 소재들은 불을 삼시간에 퍼지게 하고 유독가스를 배

대구 지하철 화재사고 이후 열차 내부 소재를 난연성 소재로 교체해 사용하고 있다. © shutterstock.com



출해 수많은 사상자를 발생시켰다. 사고 이후 전국적으로 낡은 전동차를 교체하거나 불이 쉽게 옮겨 붙지 않게 내부를 개조하는 시설투자가 강화됐다. 객실 의자는 스테인리스와 코팅 처리된 난연 섬유로 바뀌었으며, 열차 바닥은 염화 비닐에서 합성고무로, 단열재는 폴리에틸렌에서 잘 타지 않는 유리섬유로 바뀌었다. 대구지하철 사고 이후 전동차 내장재를 난연 소재로 바꾸면서 2014년 도곡역 사건에서는 방화가 큰불로 이어지지 않았던 것이다.

지하철 방화사건과 같은 화재위험으로부터 안전을 지켜주는 화학소재들은 내열성, 난연성을 가진다. 불에 강하다는 점에서 내열성 소재와 난연성 소재는 비슷해 보이지만 그 원리가 다르다. 이들 소재의 원리를 비교하기 위해 먼저 물체의 연소과정에 대해서 알아보자. 섬유와 목재, 플라스틱을 포함한 모든 소

내열성 소재로 만든 방화복은 화재현장의 고열에서도 소방관들이 활동할 수 있게 해준다. © shutterstock.com



재들은 가열과 열분해, 연소 및 전파 과정을 통해서 연소된다. 예를 들어 나무에 열을 가하면 나무 섬유질 속의 수증기가 먼저 증발하고 섬유질이 열분해되면서 일산화탄소처럼 불이 붙기 쉬운 가연성 기체가 발생한다. 목재에 붙은 불이 가연성 기체를 연료 삼아 공기 중의 산소와 결합해 타면서 화재가 점점 확산된다. 이런 가열, 열분해, 연소 및 전파 과정 중에 하나라도 차단하면 불은 금방 꺼지게 된다.

내열성 소재는 초고온에도 물체의 성질이 안정적이어서 열분해가 잘되지 않는다. 따라서 열분해 과정을 통해 가연성 기체가 발생하지 않아 거의 연소되지 않는 특성을 가진다. 대표적인 소재에는 소방관들의 방화복에 사용하는 아라미드 섬유와 탄소섬유 등이 있다. 아라미드 섬유는 400℃ 이상의 고열에도 열분해가 되지 않아 방화복, 우주복처럼 다양한 환경에서 인체를 보호하는 보호복의 재료로 사용되고 있다. 하지만 이들 소재가 아주 불에 타지 않는 것은 아니다. 일정 온도 이상으로 올라가면 내열성 소재 역시 열분해 되어 불에 타게 되지만, 그 온도가 너무 높기 때문에 사실상 일반적인 환경에서는 타지 않는다고 봐도 될 것이다.

반면 난연성 소재는 가연성 소재와 불연성 소재의 중간 성질을 가진 소재로 불이 불더라도 금방 꺼지는 자소성(自消性)을 가진 물질이다. 난연성 소재는 불꽃에 접촉하고 있을 때는 열분해가 이루어져 타지만 불꽃에서 떨어지면 더 이상 타지 않고 스스로 꺼진다. 이와 같이 난연성 소재는 우리가 흔히 생각하는 것처럼 타지 않는 소재가 아니라 붙은 불이 스스로 꺼져서 주변으로 화재를 더 크게 번지지 않게 하는 소재이며 방염소재라고도 부른다. 실제로 난연성 섬유로 만든 커튼이나 쿠션에 불을 갖다 대면 검게 그을리면서 타지만 발화원인 불에서 떨어지면 자연스럽게 불이 꺼지는 것을 볼 수 있다. 또한 불에 탈 때 유독가스가 발생하지 않아 화재사고 시에 인명피해를 줄이는 데 큰 도움이 된다. 난연성 소재는 불에 타기 쉬운 소재에 난연 물질을 넣어 쉽게 만들 수 있다. 먼

직물은 원래 불에 잘 타지만 섬유제조 과정에서 인(P)이나 질소(N)계 난연성 고분자물질을 첨가해 난연성 섬유를 만들고 있다. 섬유 속의 난연성 고분자물질은 열과 불꽃에 닿으면 산소와 반응해 안정된 물질인 탄화물로 변화한다. 검게 탄화된 섬유질은 열분해 과정에서 가연성 기체가 잘 발생하지 않아서 불이 자연적으로 꺼지게 된다. 대표적인 난연성 섬유인 ‘프로반(Proban)’은 면직물과 인이나 질소계 고분자를 합성해 만들며, 면직물보다 난연성이 뛰어날 뿐만 아니라 기존의 면 특유의 촉감과 흡습성은 그대로 갖고 있어 병원 시트, 베개 커버, 커튼 등 다양한 방염제품에 사용된다.

난연성 목재와 플라스틱 등도 비슷한 원리를 이용해서 만든다. 소재에 난연성 물질인 염화암모늄, 인산암모늄 등을 혼합하거나 코팅하는 것이다. 예를 들어 목재에 난연성 물질을 발라두면 화재발생 시에 열과 반응해 불꽃을 차단하는 얇은 피막이 목재 위에 형성된다. 또한 난연성 물질이 열분해 되면서 열을 흡수하거나 암모니아나 할로젠화수소 같이 불에 잘 타지 않는 기체를 발생시켜 자연스럽게 불이 꺼지게 된다.

내화재라고 불에 안 타는 것은 아니다

난연성 소재를 사용하게 되면 화재로부터 완전히 안전하게 지낼 수 있을까? 정답은 ‘그렇지 않다’이다. 난연성 소재는 불에 잘 타지 않지만 아주 타지 않는 것은 아니다. 난연성 소재라도 오랫동안 불꽃과 고열에 노출되면 타기 때문에 아주 안심하면 위험하다. 법적으로 불에 잘 타지 않는 소재를 내화재로 규정하고 있으며 성능에 따라 난연, 준(準)불연, 불연으로 구분하고 있다. 대형화재로 인해서 화재안전에 대한 관심이 늘어나고 있지만 정작 소재 관련 용어에 대해서는 잘 모르는 사람이 많다. 내화재라는 단어에 난연이든 불연이든 화재에 강하다는 의미가 포함돼 있지만 그 수준이 다르다. 불연재는 불에 타지 않는 재료로서 20분간 750℃로 가열할 때 자체 열 발생이



대표적인 준불연재인 석고보드는 불에 강하고 유독가스를 적게 배출하기 때문에 건축자재로 많이 사용한다.
© shutterstock.com

적으며(50℃ 미만), 10분간 305℃로 가열한 뒤 잔류 불꽃이 없는(30초 미만) 재료를 의미한다. 주로 대리석이나 석재, 콘크리트, 유리섬유와 같은 건축자재들이 불연재에 속한다. 준불연재는 불에 잘 타지 않는 재료로서 10분간 305℃로 가열한 뒤 잔류 불꽃이 없는데(30초 미만), 그 재료의 연소가스 속에 방치된 쥐가 9분 이상 활동할 수 있다. 충분히 불에 강하고 유독가스를 적게 내뿜는 준불연재에는 석고보드 등이 있다. 일상생활에서 가장 흔하게 볼 수 있는 난연재는 가연성 재료인 목재 등에 비해 타기 어려운 재료로서 6분 동안 235℃로 가열한 뒤 잔류 불꽃이 없으며(30초 미만), 그 재료의 연소가스 속에 방치된 쥐가 9분 이상 활동할 수 있다. 우리가 아는 대부분의 내장재들은 난연재에 속한다. 불연재보다는 연소되기 쉬우나 다양한 특수처리를 통해서 연소를 어렵게



특수 처리를 해 불에 타는 것을 어느 정도 방지하는 방염제품도 오랫동안 불꽃과 고열에 노출되면 불에 탈 수 있다.
© shutterstock.com

만들어 화재 시 유독가스 발생을 줄인 제품이다. 난연재보다 낮은 수준의 화재안전 기준으로 방염제품이 있다. 커튼이나 이불처럼 일반적으로 불에 잘 타기 쉬운 제품에 특수 처리를 해 불에 타는 것을 어느 정도 방지하는 제품이다.

불을 끄는 화학

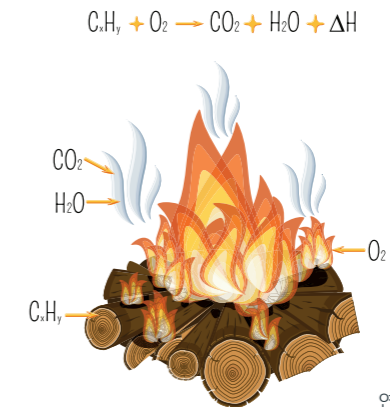
화재로부터 안전을 지키는 가장 좋은 방법은 화재예방이다. 화재를 예방하기 위해서 안전교육과 감시활동을 계속하고는 있지만 현실적으로 100% 화재를 예방할 수는 없는 노릇이다. 하지만 화재가 일어났을 때 초기 진압만 잘해도 큰 사고를 막을 수 있다. 이러한 초기 진압에 가장 중요한 역할을 하는 것이 바로 소화기이다. 소화기에는 화학 반응이 숨어 있다.

불은 연소의 3요소인 연료와 산소 그리고 충분한 온도라는 세 가지 조건 중 어느 하나만 없어도 꺼진다. 우리가 사용하는 소화기는 산소를 연료와 불꽃으로부터 차단해 불을 끄는 도구이다. 소화기를 이용해 불을 끌 때 조심해야 할 점은 화재의 종류에 따라서 사용하는 소화기가 다르다는 점이다. 적합하지 않은 소화기를 사용하게 되면 불을 끄는커녕 번지게 만들 위험이 있다. 오늘날 일

반적으로 사용하는 소화기에는 거품 소화기와 분말 소화기, 할론 소화기, 이산화탄소 소화기 등이 있다.

거품소화기는 소화기 속 용액이 섞이면서 만들어진 거품을 이용해 산소를 차단하는 소화기이다. 소화기를 거꾸로 흔들면 안에 있는 탄산수소나트륨 용액과 황산알루미늄 용액이 접촉하면서 이산화탄소와 수산화알루미늄이 만들어지는데, 이때 분비된 거품이 외부 산소의 유입을 차단한다. 거품소화기는 목재와 의류 등에 불이 붙은 일반적인 화재뿐만 아니라 휘발유 등의 유류나 화학약품에 의한 화재에 사용하기에 적합하지만, 거품으로 인한 감전위험 때문에 전기화재에는 사용하지 말아야 한다. 또한 소화기 속의 약제를 관리하기 힘들어 널리 사용하는 편은 아니다.

분말소화기는 관리가 편리하고 다양한 화재에 대응할 수 있어 가장 많이 사용하며, 질소나 이산화탄소 같이 불에 잘 타지 않는 기체의 고압가스를 이용해 소화약품인 탄산수소나트륨이나 인산암모늄 분말을 분사해 불을 끈다. 분사된 소화약품은 불꽃에 닿아 분해되면서 이산화탄소나 여러 가지 기체로 변해 공



연소가 일어나는 원리. © shutterstock.com

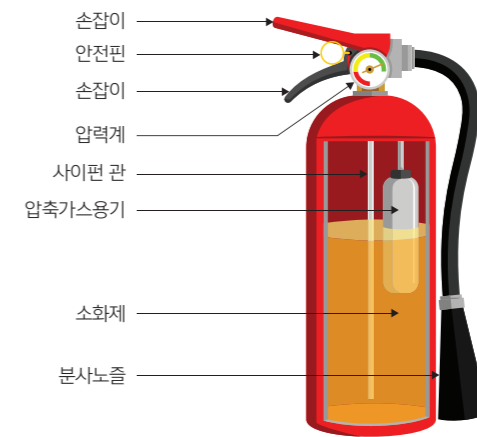
기를 차단하기 때문에 일반적인 화재뿐만 아니라 유류, 전기, 화학약품 등으로 인한 화재처럼 거의 대부분의 화재현장에서 사용할 수 있다. 다만 화재를 진압한 다음에 분말가루가 많이 남기 때문에 뒤처리가 힘들다는 단점이 있다. 분말 약제의 특성상 장기간 보관할 때에는 약제가 굳을 수 있기 때문에 정기적으로 관리해야 한다. 관리 방법은 어렵지 않다. 한 달에 한 번씩 소화기를 거꾸로 들었다가 뵈다 하는 식으로 흔들어 주면 되며, 소화기의 압력 게이지를 주기적으로 확인해 적정 수준(초록색)에 머물러 있는지 점검해야 한다.

할론가스를 소화약품으로 사용하는 할론 소화기는 일반화재 및 유류, 전기, 화학 약품 등에 의한 다양한 화재 현장에서 사용할 수 있는 소화기이다. 소화력이 강력한 반면에 사용 후 가루가 남지 않아 가정에서부터 공장, 자동차 등 고가장비의 안전을 지키기 위해 주로 사용하고 있다. 그러나 원료인 할론가스가 오존층을 파괴하는 온실가스의 하나로 지목받고 있어서 곧 생산이 중단될 예정이다.

이산화탄소 소화기는 이산화탄소를 압축·액화해 소화약제로 사용한다. 분사된 액화 이산화탄소는 드라이아이스 기체로 변하면서 화재가 난 곳을 이산화탄소 가스로 덮어 공기(산소)의 공급을 차단한다. 분말소화기와 달리 액체 소화제를 이용하기 때문에 장기보관이 편리하며, 사용 후에도 가루가 남지 않고 소화 대상물의 손상이 적기 때문에 주로 박물관이나 미술관에 많이 비치된다. 그러나 이산화탄소와 일산화탄소로 인한 질식 위험이 있기 때문에 지하 및 일반 가정에는 비치와 사용이 금지돼 있으며, 사용 중에도 항상 조심해야 한다. 화재별로 맞는 소화기는 어떻게 구별할 수 있을까. 소화기 겉면에는 분말 소화기, 이산화탄소 소화기 등 제품명이 쓰여 있기 때문에 그에 따라 사용하면 좋겠지만 급박한 화재상황에는 소화 약제별 용도가 기억이 나지 않을 수도 있다. 그럴 때는 소화기 겉 라벨에 쓰여 있는 알파벳과 색상을 보자. 소화기의 라벨에는 화재분류에 따른 소화기 용도를 알파벳과 색깔로 구분하고 있다. 먼저 'A'

는 보통화재용이며 분류색상은 흰색을 띤다. 보통화재는 나무, 솜, 종이 등 일반적인 가연성 물질에 의한 화재로 물로 소화가 가능한 화재를 말한다. 다음 'B'는 석유나 타르, 페인트 등으로 인한 유류화재 용도이며 분류색상은 황색이다. 마지막으로 'C'는 전기화재용으로 분류색상은 청색이다. 예를 들어 분말소화기의 라벨에는 알파벳 'A', 'B', 'C'가 함께 적혀 있다. 이는 분말소화기를 일반화재를 포함해서 유류화재, 전기화재와 같은 대부분의 화재에 사용할 수 있다는 의미이다. 세 가지 알파벳의 화재분류만 기억한다면 소화기 종류를 모르더라도 상황에 맞는 소화기를 사용할 수 있을 것이다.

따라서 평소에 주변에 소화기가 어디에 비치돼 있는지 늘 확인해두고 사용법을 잘 익혀 두는 것도 중요하다. 화재가 나면 우선 소화기를 화재가 난 곳으로 운반해야 한다. 침착하게 손잡이 부분의 안전핀을 빼고 바람을 등지고 서서 호스를 불 쪽으로 향하게 하여 소화기의 위아래 손잡이를 힘껏 움켜쥐고 빗자루로 쓸 듯이 뿌려주는 것이 효과적이다. 다양한 소화기를 목적에 맞게 올바른 방법으로 사용한다면 화재 위험으로부터 우리 스스로를 지킬 수 있을 것이다.



소화기의 구조. © shutterstock.com

사회의 안전과 안보를 지키는 화학

‘20세기 최대 산업재해, 보팔 대참사!’

1984년 12월 3일 평화로운 새벽 3시 인도 보팔(Bhopal) 지역이 한순간에 아비규환이 됐다. 다국적 화학약품 제조회사인 유니언 카바이드의 현지 화학 공장에서 일어난 사고 때문이다. 농약의 원료로 사용하는 아이소사이안화메틸(MIC)이라는 유독물질이 공장 화재로 인해서 누출된 것이다. 사고가 발생한 지 2시간 만에 유독가스 36톤이 누출됐으며 인근지역에서만 3828명이 죽고 3만여 명이 상해를 입었다. 히로시마 원폭 피해와 비교될 만큼 사상자가 발생한



1984년 보팔에서 유독가스 누출로 사망하거나 장애를 입은 사람들의 아픔을 담은 조각. © wikimedia.org

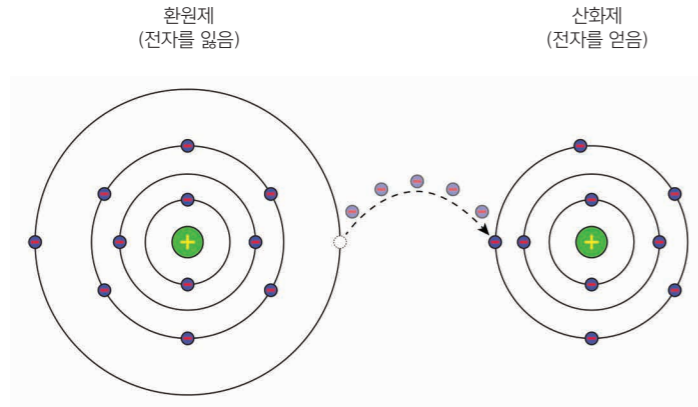
이 참사는 사고가 난 지 30여 년이 넘는 지금까지도 누출된 화학물질로 인한 후유증이 계속되고 있다. 하지만 화학물질 사고와 같은 다양한 위험을 극복하기 위해서는 화학물질의 도움이 필요하다.

화학물질 사고도 화학으로 해결한다

전자제품부터 의약품까지 화학물질은 다양한 곳에서 인류에게 생활의 편리함을 제공하고 삶의 질을 향상시켜 왔다. 그러나 그만큼 화학물질로 인한 위험도 가까이에 늘 존재하고 있다. 경북 구미에서 불산 누출사고로 사망자를 포함한 10여 명의 인명피해가 발생해 인근 지역이 특별재난구역으로 선포됐던 것처럼 인도 보팔사고 같은 일이 우리 주변에서 일어나지 말라는 법은 없다.

독성 화학물질이 누출됐을 때 장기적인 관점에서 직접적인 인명피해만큼이나 위험한 것은 토양과 하천, 지하수가 오염되는 것이다. 누출된 독성물질은 토양과 물을 오염시켜 오랫동안 생태계와 우리 건강에 치명적인 간접 피해를 입히게 된다. 보팔사고의 경우 화학물질이 수년에 걸쳐 인근 논밭과 지하수를 오염시켜 암 발병률이 증가됐고, 지금까지도 유산 및 기형아 출산이 일어나고 있다. 이런 간접 피해의 위험성 때문에 환경부의 화학물질사고대응 매뉴얼에서는 사고 발생 시 빠른 대피와 함께 오염 확산 방지를 강조하고 있다. 독성 화학물질의 누출을 막기 위해서는 오염물질 차단이 가장 중요하다. 매뉴얼에서는 더 이상 누출되는 것을 막기 위해 개인보호 장비를 갖춘 뒤 누출되는 곳의 밸브를 잠그고 하수구 등으로 연결되는 통로를 흙으로 차단할 것을 규정하고 있다. 그런데 이미 누출로 오염된 토양과 하천은 어떻게 해야 할까.

이이제이(以夷制夷)라고 했듯이 화학물질로 오염된 토양과 하천을 복구하기 위해서는 또 다른 화학물질인 방제약품을 사용한다. 화학물질 누출 초기에 독성 화학물질의 성질에 맞는 방제약품을 이용한다면 오염 피해를 크게 줄일 수 있다. 반응성을 기준으로 방제약품에는 중화제, 산화환원제 그리고 흡착제가



또 다른 중화제인 산화환원제의 원리. 산화는 전자를 잃는 반응이며 환원은 전자를 얻는 반응이다. 환원제는 다른 물질을 환원시키면서 자신은 산화되는 반면, 산화제는 다른 물질을 산화시키면서 자신은 환원된다.
© shutterstock.com

있다. 가장 일반적으로 사용하는 방제약품인 중화제는 누출된 화학물질이 물과 반응하거나 토양에 노출됐을 때 유독한 산성 또는 염기성 물질을 만드는 경우 사용한다. 즉 누출된 화학물질이 만드는 물질의 성질과 반대되는 화학물질을 투입함으로써 중성화시키는 것이다. 예를 들어 황산이나 질산 같은 산성 물질이 누출되면 염기성 물질인 가성소다나 소석회 같은 물질을 투입한다. 반대로 비료의 재료인 암모니아와 같은 염기성 물질이 누출되면 아세트산이나 묽은 염산을 중화제로 사용하는 것이다.

중화제는 화학물질 사고현장의 수습과정뿐만 아니라 폐광산의 환경복원과정에서도 널리 사용되는 화학물질이다. 강원도 일대에 있는 폐광산 지역에서는 광산폐기물과 침출수로 인한 환경오염이 큰 문제이다. 방치되고 노출된 광물과 지하수 등이 반응해 만들어진 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)

는 강산성을 띠며 지하수나 하천을 따라 흐르면서 인근 토양을 오염시켜 농사가 불가능한 것은 물론 사람이 살기 어려운 곳으로 만든다. 산성광산배수를 정화하기 위해서 반대 성질인 염기성 중화제를 투입하고 있다. 주로 소석회나 굴, 조개류의 껍질가루를 이용하고 있는데 가격이 저렴하고 효과가 우수해 관련 연구가 활발하게 이뤄지고 있다.

또 다른 중화제인 산화환원제는 산화환원반응을 이용해 독성물질 자체를 다른 무독성 물질로 변화시켜 제거한다. 산화환원반응은 전자를 얻거나 잃는 화학반응이다. 즉 산화는 전자를 잃는 반응, 환원은 전자를 얻는 반응을 말한다. 중화제로 사용되는 산화제는 다른 물질을 산화시키면서 자신은 환원되는 물질이며, 반대로 환원제는 다른 물질을 환원시키면서 자기 자신은 산화되는 물질이다. 예를 들어 청산가리로 잘 알려진 독극물질인 시안화물의 2차 생성물인 시안화나트륨(NaCN)을 제거하기 위해서는 산화제인 차아염소산나트륨(NaOCl)을 투입한다. 독성물질인 시안화나트륨과 산화제인 차아염소산나트륨이 접촉하면 산화환원반응이 일어나 두 물질은 질소와 이산화탄소, 수산화나트륨(NaOH) 그리고 염화나트륨(NaCl)으로 변화해 독성이 사라지게 된다.

바다를 지키는 화학물질

간혹 바다에서도 예기치 않은 사고가 일어난다. 2007년 태안 앞바다에서는 유조선과 크레인선의 충돌로 약 8만 배럴이나 되는 원유가 누출됐다. 이 때문에 태안군과 서산시의 양식장, 어장 등 8000여ha가 원유에 오염돼 어패류가 폐 죽음을 당했다. 질은 기름띠와 타르덩어리가 만리포, 천리포, 모항, 안흥항과 가로림만, 안면도까지 유입됐으며 당장 세계적인 철새도래지로 손꼽히는 천수만까지 위협받는 상황이 초래됐다.

이렇게 한번 생태계가 파괴되면 원상회복하는 데 수십 년이 걸린다. 그런데 태안 원유 유출사고의 경우 수십만 명의 자원봉사자들이 발 벗고 나선 덕분에 생



2007년 태안 앞바다에서 원유 유출 사고가 일어나 기름으로 뒤덮인 태안군 학암포 해안. © 녹색연합

각보다 빠르게 충격을 극복할 수 있었다.

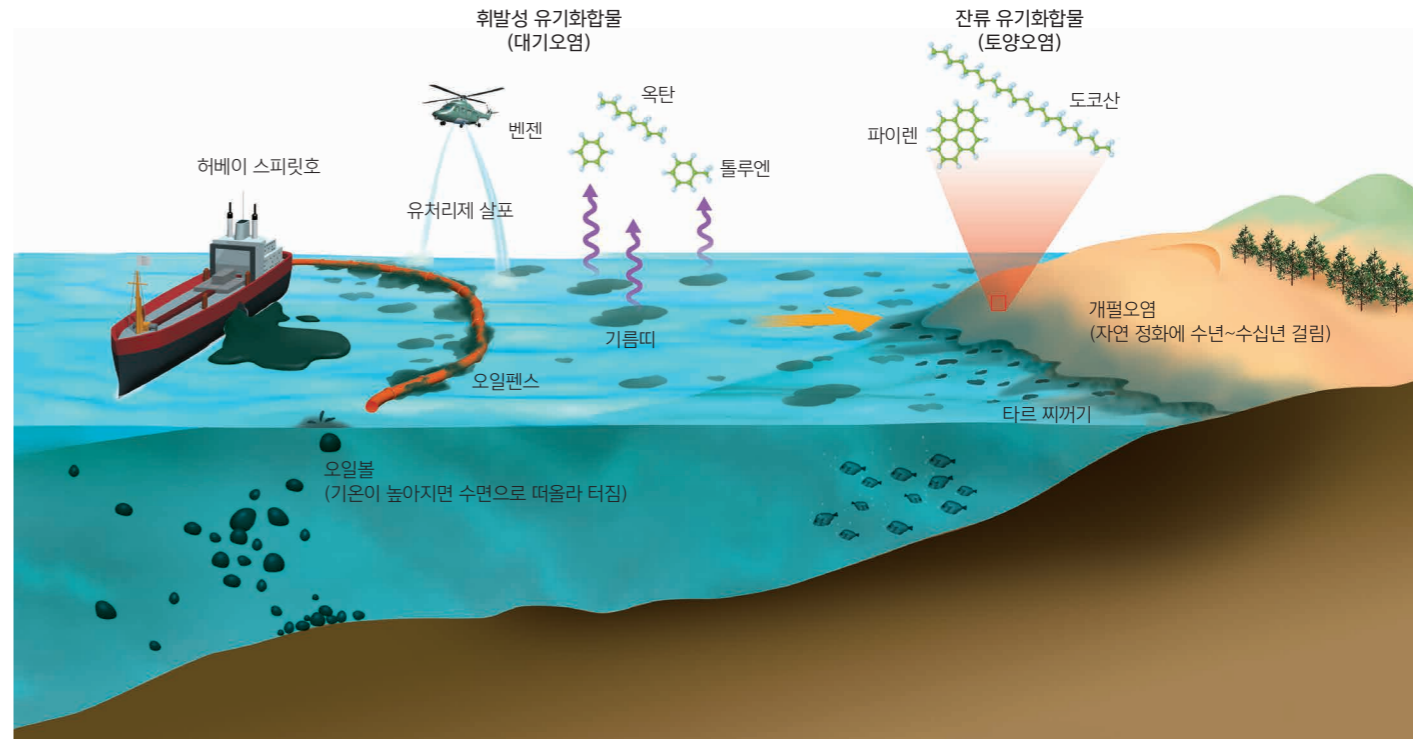
자원봉사자들의 손이 닿지 않는 태안 앞바다에는 유처리제와 응고제 같은 화학약품들이 한몫했다. 유화제라고 부르기도 하는 유처리제(oil dispersant)는 가정에서 사용하는 세제처럼 계면활성제를 이용해 해수와 누출된 기름의 유막 간의 표면장력을 감소시켜 미세한 방울로 분산시킨다. 즉 유처리제는 기름덩어리를 잘게 부수어 미세한 기름방울로 만들어준다. 잘게 분산된 기름은 표면적이 넓어지기 때문에 더 빨리 미생물을 통해 분해된다. 연구결과에 따르면 유처리제를 사용하면 그렇지 않았을 때보다 미생물의 생분해 속도가 적어도 수십 배, 조건에 따라서는 수백 배까지 빨라진다고 한다. 유처리제를 이용한 기름제거방법은 유독성 문제가 있지만 기름 처리방법이 간단하고 파도의 영향을 적게 받기 때문에 널리 사용되고 있다.

최근에는 유처리제에 포함된 유독성분 때문에 응고제를 이용한 방법을 많이 연구하고 있다. 유처리제가 기름을 미세하게 분해시켜 생분해를 촉진한다면, 응고제는 반대로 액체 상태의 기름을 서로 뭉치게 만들어 고체 상태로 만든다. 응고된 기름은 물에 뜨기 때문에 쉽게 바닷속에서 퍼 올릴 수 있어 오염물질을 제거하기가 좀 더 편리해진다. 특히 응고제는 유처리제보다 독성이 적고 바다

에 녹지 않아 친환경적이다.

예전처럼 회복하려면 적어도 20년은 걸릴 것이라는 전문가들의 암울한 예측과 달리 10년도 안 되어 태안해안은 예전처럼 해양생태계의 보고로 돌아왔다. 최악의 해상오염으로부터 태안을 지킨 것은 자원봉사자들의 손길과 여러 화학물질 덕분이었다. 사고 당시 독성문제 때문에 유처리제의 투입에 대해서 논란이 많았지만 적절한 화학물질의 사용이 없었다면 태안 해양생태계의 회복은 훨씬 더 먼 미래의 일이 됐을지도 모른다.

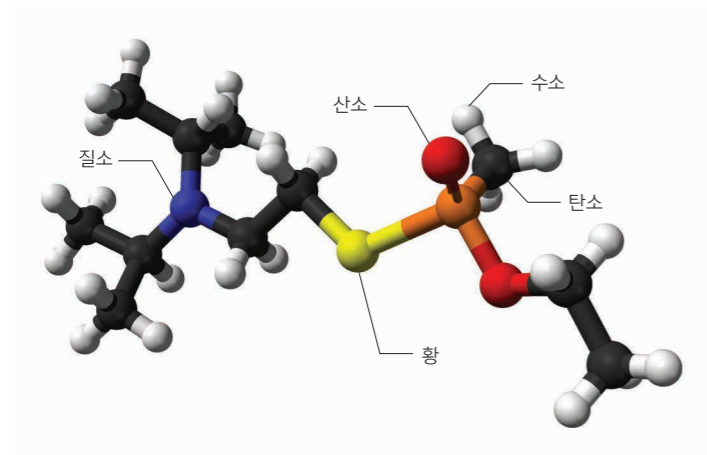
태안 원유 유출 사고의 영향과 대처. 유출된 기름은 뭉쳐서 바다에 가라앉기도 하는데, 유처리제를 살포하면 기름덩어리를 잘게 부수어 분해 속도가 빨라진다.



살충제에서 무기로 바뀐 화학물질

사고로 누출된 화학물질과 달리 처음부터 사람을 해하기 위해 존재하는 화학물질이 있다. 바로 화학무기이다. 화학무기는 유독성 물질을 이용해 사람을 살상하는 무기이다. 시위진압용의 최루탄이나 베트남전에서 밀림을 제거하기 위한 고엽제도 화학무기에 포함된다. 처음으로 화학무기가 사용된 것은 제1차 세계대전 당시 벨기에 이프르 전선에서였다. 당시 독일군이 프랑스군과 영국군의 참호에 염소가스로 공격했던 것이다. 최초의 화학전 이후 무수한 사람들이 화학무기로 희생됐고 오늘날에는 1993년 조인된 화학무기금지협약(CWC)에 의해 개발 및 생산, 비축이 금지되고 있다.

그런데 지난 2월 13일 피살된 김정남에게 사용된 화학물질이 화학무기로 사용되는 신경작용제인 'VX'로 알려지면서 큰 논란이 됐다. VX는 현재까지 알려진 독가스 가운데 가장 유독한 신경작용제로 몇분 만에 목숨을 빼앗을 수 있는 맹독성 물질이다. VX는 실온에서 호박색의 유성 액체로 존재하고 특별한 맛이



신경작용제 VX의 구조. © wikimedia.org

나 냄새가 없지만 호흡기, 눈, 피부 등을 통해 인체에 흡수되면 사린가스보다 100배 이상의 독성을 발휘한다. 하지만 원래 VX는 무기가 아닌 살충제로 개발됐다. 1952년 영국의 화학자 라나지트 고시(Ranajit Ghosh)가 살충제 목적으로 VX를 개발했지만 오래지 않아 인체에 치명적이라는 사실이 확인돼 상업적 용도의 사용과 판매가 금지됐다. 그러나 미국과 러시아를 비롯한 여러 나라들이 화학무기로서의 가능성에 주목하고 냉전시절 화학전 무기로 VX를 이용했던 것이다. 오늘날 VX는 1991년 유엔안전보장이사회 결의 687호를 통해 대량살상무기(WMD)로 분류돼 있으며, 화학무기금지협약을 통해 생산과 비축을 금지하고 있다. 화학무기금지협약 회원국인 미국과 러시아는 생산된 화학무기를 이미 전량 폐기한 상태이다.

화학무기는 테러에 사용되기도 한다. 가장 대표적인 사례가 1995년 일본에서 발생한 옴진리교 사린가스 테러사건이다. 신흥종교집단이었던 옴진리교가 출근시간에 맞춰 도쿄 지하철에 화학무기인 사린가스를 살포해 6천여 명이 중경상을 입고 13명이 숨지는 참극이 발생했다. 많은 사람들이 이 사건에 경악했던 이유는 희생자가 많았을 뿐만 아니라 신흥종교집단이 테러에 이용할 정도로 화학무기 생산이 크게 어렵지 않았기 때문이다. 북한과 휴전선을 맞대고 있는 우리로서는 전쟁 위험은 물론이고 일상생활에서 테러집단에 의한 화학무기 위험도 걱정해야 할지 모른다. 화학물질을 인류를 위해 올바르게 사용하기 위해서는 화학물질을 무기로 사용하는 것을 금지하는 국제적 협약과 국내법을 반드시 준수해야 한다. 또한 만약의 사고를 대비해 스스로 보호할 수 있는 방법을 미리 준비할 필요도 있다.

화생방 및 화학사고 상황에 대처하는 방법

만약 주변에서 화학사고가 발생한다면 제일 먼저 입과 코를 가리고 빨리 최대한 멀리 대피해야 한다. 화학물질이 흡수되는 경로는 입, 코 같은 호흡기와 피

부이다. 따라서 피부가 직접 노출되지 않도록 우의나 비닐을 착용하고 수건이나 마스크, 방독면 등을 이용해 코와 입을 감싸고 대피해야 한다. 우의나 비닐로 보호한다고 해도 옷에는 소량의 독성물질이 묻어 있을 수 있다. 따라서 안전한 장소로 대피한 뒤에는 반드시 비눗물로 샤워를 하고 새 옷으로 갈아입어야 한다.

화학사고가 발생했을 때 어디로 대피하는 것이 가장 안전할까? 사고가 발생한 곳에서 최대한 멀리 떨어진 곳으로 대피하는 것이 정답이지만 긴급 상황에서 항상 그럴 수는 없다. 이때에는 되도록 높은 곳으로 대피해야 한다. 화학사고로 발생한 독성가스는 대부분 공기보다 무겁기 때문에 높은 곳으로 대피하는 것이 안전하다. 화재 발생 시에는 연기가 공기보다 가볍기 때문에 자세를 낮게 하고 대피할 것을 권하고 있지만 화학사고 시에는 자세와 관계없이 되도록 빨리 이동해야 한다. 또한 바람은 독성물질을 운반하는 역할을 하므로 반드시 바람을 거슬러 이동해야 한다. 만약 실내로 대피한 경우에는 창문 등을 닫고 외부공기와 통하는 설비(에어컨, 환풍기 등)의 작동은 중단해야 한다. 하지만 실내공간은 환기가 잘되지 않아 한번 유입된 독성물질이 배출되지 않으니 되도록 실외로 대피하는 것이 바람직하다. 만약 자동차를 타고 사고현장을 지나게 된다면 창문을 닫고 에어컨 등을 반드시 꺼서 외부 공기가 차량 내부로 들어오는 것을 막아야 한다.

대피하는 과정에서 화학물질에 노출됐다면 최대한 빨리 병원에 가서 전문 의료진의 도움을 받아야 하지만, 병원까지 가는 동안에 응급조치를 먼저 취한다면 피해를 최소화할 수 있다. 화학물질에 눈이 노출됐으면 10~15분가량 생리 식염수나 흐르는 물에 씻어내야 한다. 단 알칼리성 물질에 노출된 경우는 30~60분가량 세척해야 한다. 화학물질이 피부에 닿았을 때는 오염된 옷을 벗기고 화학물질에 노출된 부위를 비누와 물로 완전히 씻어내야 한다. 만약 입으로 삼켰을 때는 토해내야 하지만 억지로 토해내는 것은 좋지 않으며 구토물이 기도로



화학사고가 나면 바람을 거슬러 이동해야 한다. 바람을 타고 독성 물질이 퍼지기 때문이다. 사진은 화학물질을 실은 열차의 충돌사고에서 승객을 구조하는 장면. © shutterstock.com

들어가지 않도록 조심해야 한다.

또 하나 중요한 것은 사건이 일어난 초기에 신속하게 대응하는 것이다. 화생방 사고나 화학 사고로 인한 피해는 초기 대응이 빠를수록 크게 줄어든다. 먼저 사고발생을 소방서나 경찰서, 관할 지자체에 빨리 신고하고 주변 사람들에게 알려 함께 대피할 수 있도록 해야 한다. 빠른 행동도 중요하지만 임의로 사고에 대응하면 자칫 유독물질이 더 확산될 수 있기 때문에 전문가의 도움을 받아 행동하는 것이 바람직하다. 안전한 장소로 신속히 대피하고 방송 등을 통해 정보를 파악하고 행동하는 것이 우리 몸을 유독물질로부터 지킬 수 있는 최선의 방법이다.

원자력 안전을 지키는 화학물질

독성물질 누출, 화학무기 살포, 원자력 사고와 같은 재난에 대응해 사회 안전

을 지키기 위해서는 화학물질이 반드시 필요하다. 원자력 발전은 경제적이면 서도 온실가스를 발생시키지 않아 친환경적이지만 인체에 치명적인 방사성 물질을 이용하기 때문에 이중삼중의 안전장치를 갖추고 있다. 하지만 지진과 같은 재난에서는 발전소의 안전장치만으로는 충분하지 않을 수도 있다는 것을 후쿠시마 원자력발전소 사고 사례를 통해 이미 잘 알고 있다. 국내에서도 원자력발전소를 운영하고 있지만, 중국이 서해 쪽에서 원자력발전소를 대규모로 운영하고 있기 때문에 중국 원전 사고의 영향이 편서풍을 타고 직접 전해지는 우리나라로서는 마냥 안심할 수가 없는 실정이다. 그러면 만의 하나 발생할 수도 있는 원자력 사고에 어떻게 대응할 수 있을까.

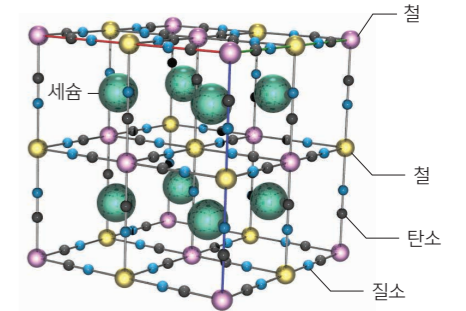
원자력 사고가 날 때 가장 큰 문제는 방사성 물질로 인한 오염이다. 방대한 오염지역을 정화하기 위해서는 제염(除染) 작업이 필요하다. 제염작업은 오염물질에 있는 방사성 물질을 제거하거나 최소화시켜 정화작업을 쉽게 만드는 과정을 말한다. 만약 제염작업이 이뤄지지 않으면 방사능 수치가 높아 기계나 사람을 통한 정화작업 자체가 불가능해진다. 오염수준이 낮은 지역에서는 오염된 토양의 표면을 긁어내고 폐기물을 수거해 제거하지만, 오염수준이 높은 원자로 인근지역에서는 화학적 제염이 반드시 필요하다.

화학적 제염의 원리는 비누로 우리 몸의 때를 벗겨내는 것과 유사하다. 아세톤과 중탄산나트륨 같은 화학제염제를 이용해 오염물질의 표면에 붙은 방사성 물질을 녹여내 제거하는 것이다. 많이 쓰이는 제염방법에는 유기계 환원제와 킬레이트제(알칼리성 철)를 화학제염제로 이용해 원자로나 장비 표면의 산화철 피막을 녹여내는 방법(CAN-DECON 법)이 있다. 이렇게 방사성 물질로 오염된 산화철 피막을 제거하면 오염지역의 방사선 농도를 줄일 수 있다.

제염 외에도 방제약품을 통해 직접적으로 방사성 물질을 흡착하는 방법이 있다. 원래 염색용 시료인 프러시안 블루(Prussian Blue, PB)는 방사성 세슘의 흡착소재로 후쿠시마 지역을 복원하기 위해 가장 많이 이용한 화학물질이다.



염색용 시료인 프러시안 블루는 방사성 세슘의 흡착소재로 많이 쓰인다.
© wikimedia.org



프러시안 블루가 방사성 세슘을 흡착한 모습.
© Mark Foreman's blog

프러시안 블루는 알칼리 양이온에 대한 선택적 흡착이 가능한 소재로서 입자 구조 때문에 방사성 세슘을 제거하는 데 효과적이다. 프러시안 블루 입자의 격자구조는 그 크기가 세슘의 양이온과 딱 맞아 다른 화학물질에 비해 흡착력이 높다. 또한 격자구조 내부에 들어 있는 물 분자가 세슘이온을 녹여 주므로 좀 더 효과적으로 흡착시킬 수 있다.

방사성 물질로부터 내 몸 지키기

일본 후쿠시마 원자력발전소 사고로 방사성 물질이 누출되면서 국내 병원들도 덩달아 바빴다. “거기 가면 요오드(아이오딘) 처방을 받을 수 있나요?”라고 문의하는 전화가 하루에도 수십 통씩 이어졌기 때문이다. 그런데 왜 사람들은 요오드를 찾은 것일까.

요오드가 방사능으로 인한 갑상선암을 예방하는 데 효과가 있기 때문이다. 요오드화칼륨을 섭취하면 요오드 성분이 갑상선으로 미리 들어가 방사성 요오드가 들어오는 것을 막아준다. 원자력 사고 시 방출되는 방사성 물질인 요오

드-131은 호흡을 통해 갑상선에 흡수돼 방사선인 ‘베타선’을 방출한다. 이 때문에 주변 세포 구조가 변화되고 당장은 증세가 나타나지 않더라도 수년 뒤 갑상선암으로 발전할 수 있다. 일례로 1986년 체르노빌 원전 사고 당시 인근 지역에 살거나 방사능으로 오염된 식품을 섭취한 사람들에게 갑상선암 발병이 증가한 적이 있었다.

방사성 요오드를 직접 흡입하기 24시간 전에 요오드화칼륨을 섭취하면 갑상선의 요오드의 양이 포화상태에 이르러 방사성 요오드가 갑상선에 흡수되는 것을 막을 수 있다. 만약 이미 흡입한 뒤라도 최소 15분 안에 요오드화칼륨을 투여하면 90% 이상, 6시간 내 투여하면 50% 정도의 방어효율을 기대할 수 있다. 이 때 갑상선에 흡수되지 못한 방사성 요오드는 소변 등을 통해 몸 밖으로 배출된다. 하지만 특별한 방사능 오염이 없는데도 예방 차원에서 요오드를 복용하는 것은 오히려 건강을 해칠 수 있다. 요오드 과다 복용 시 알레르기와 두드러기,

홍합, 구운 감자, 새우, 김, 미역 등에 요오드가 풍부하다. © shutterstock.com



방사성 요오드가 갑상선에 흡수되는 것을 막는 요오드화칼륨 정. © shutterstock.com

갑상선 기능항진증 또는 기능저하증 같은 부작용이 발생할 수 있기 때문이다. 갑상선 기능항진증은 혈액 속에 갑상선 호르몬이 과도하게 생기는 병으로 신진대사가 과도하게 활발해져 갑상선이 커지고 눈이 튀어나오며 심장이 빨리 뛰는 등의 증상이 나타난다. 반대로 저하증은

혈액 속에 갑상선 호르몬이 부족해 생기는 병이다. 몸속의 물질대사가 잘 이뤄지지 않아 몸이 나른하고 기력이 없어지는 등의 증상이 나타난다.

일반적으로 성인의 경우 하루 요오드 섭취 권장량은 0.15mg이며 최대 3mg까지로 복용을 제한하고 있다. 하지만 피폭 시에는 신체를 보호하기 위해 요오드 섭취량을 늘린다. 즉 요오드화칼륨(KI)을 기준으로 성인은 하루 130mg씩, 3세 이상에서 18세 이하의 어린이 및 청소년은 하루 65mg씩 최대 10일간 복용할 것을 권하고 있다. 사실 요오드는 약으로만 섭취할 수 있는 특별한 물질이 아니다. 미역, 다시마와 같은 해조류에도 요오드 성분이 풍부하다. 그러나 해조류 등을 먹는 것만으로는 방사능 요오드에 대응할 만큼 충분한 양을 섭취할 수 없기에 약을 통해 복용할 것을 권한다. 현재 과학기술정보통신부는 방사선 피폭 사고에 대비해 한국원자력의학원 부설 국가방사선비상진료센터, 서울대병원 등 21개의 방사선 비상진료 지정 의료기관과 방사선보건연구원에서 13만 명분의 요오드화칼륨 정을 보관하도록 규정하고 있다. 국내에서 일정 수준 이상의 방사선이 검출되면 과학기술정보통신부에서 방사선 비상진료기관을 통해 무상으로 공급하니 만약의 사태에 대비해 미리 주변의 방사선 비상진료기관을 확인해 두는 것도 좋을 듯하다.