

자동차용 소재 기술: 차세대 자동차 스마트 코팅 소재 기술 동향

A Review of Next Generation Automotive Smart Coating Technologies

김진철 · 박영일 · 이상호 · 노승만 | Jin Chul Kim · Young Il Park · Sang-Ho Lee · Seung Man Noh

Center for Green Fine Chemicals, Korea Research Institute of Chemical Technology(KRICT)
45, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea
E-mail: jckim81@kRICT.re.kr

1. 서론

현재까지 자동차 코팅 소재는 특정 기재 표면을 외부환경으로부터 보호하고 심미적 외관을 향상시키는 목적으로 주로 이용되어 왔으나 최근에는 자기치유, 저온경화, 자기세정, 자극-응답, 자율주행 등과 같은 다양한 스마트 기능과 접합된 형태로 진화하고 있다. 글로벌 시장 조사 전문 기관인 나노마켓(Nanomarkets)에 따르면 글로벌 스마트 코팅 소재 시장은 2022년 약 107억 달러 규모로 성장할 것으로 보이며 이중에서 자동차용 스마트 코팅 소재는 약 13억 달러 규모로 전체 스마트 코팅 시장의 약 12%를 차지하는 거대한 시장을 형성할 것으로 예측된다.¹

현재 자동차용 코팅 소재 기술은 탄소 배출, 유해화학물질 저감 등의 글로벌 환경 규제 정책이나 자율주행자동차 등의 4차 산업 혁명 이슈에 대응하기 위한 신기술 개발이 매우 중요한 시점으로 글로벌 선진기업을 중심으로 많은 신기술이 개발되고 있는 상황이다. 본 고에서는 최근 PPG Industries, BASF, DOW-Dupont, Bayer 등 글로벌 선진기업에서 주목하고 있는 차세대 자동차용 스마트 코팅 소재 기술 동향을 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 차세대 자동차 스마트 코팅 소재 기술 개발의 필수 요소

자동차 코팅 소재는 전기·전자, 건축·토목, 생명공학 등의 다른 산업 분야에서 사용되는 코팅 소재 대비 현저히 높은 기계적·화학적 내구성과 다양한 사용 환경에서의 내후성을 확보하면서도 상품성을 위한 미려한 외관 또한 구현해야 하는 고난이도 기술 분야이다(그림 1).

Author



김진철

2005 경북대학교 고분자공학과 (학사)
2007 POSTECH 신소재공학과 (석사)
2012 POSTECH 화학과 (박사)
2013 Minnesota 대학교 (Post-Doc.)
2013-현재 한국화학연구원 선임연구원



이상호

2008 숭실대학교 섬유공학과 (학사)
2010 고려대학교 화학과 (석사)
2014 교토대학교 고분자공학 (박사)
2017 U.C. Santa Barbara (Post-Doc.)
2017-현재 한국화학연구원 선임연구원



박영일

2006 가톨릭대 화학과 (학사)
2008 가톨릭대 화학과 (석사)
2011 가톨릭대 화학과 (박사)
2013 Los Alamos 연구소 (Post-Doc.)
2013-현재 한국화학연구원 선임연구원



노승만

1995 고려대학교 재료공학과 (학사)
1997 고려대학교 화학과 (석사)
2012 고려대학교 화학생명공학과 (박사)
2006 KCC 중앙연구소 선임연구원
2014 PPG Industries 선행연구팀장
2013-현재 한국화학연구원 책임연구원

실제로 자동차 코팅 소재 기술 개발 역사를 되짚어 보면 1970년대에 글로벌 기술 개발 트렌드가 외관 향상에만 집중되어 있었던 것에 반해 2010년에 들어와서는 제품의 외관뿐만 아니라 기계적·화학적 내구성, 친환경성, 내스크래치성, 공정 효율성을 동시에 고려해야 하는 하이테크 기술로 변모한 것을 알 수 있다(그림 2).

따라서, 자동차 코팅 소재에 어떠한 스마트 기능을 접합하여 새로운 제품을 개발하기 위해서는 전술한 상품으로의 모든 필수 요소를 충족하면서도 목적인 스마트 기능 또한 발현시켜야 하기 때문에 종전의 코팅 기술보다도 더욱 기술 집약적인 개발이 이루어져야 한다.

2.2 자기치유 코팅 소재 기술

자기치유 코팅 기술은 자동차 외관 품질의 service life를 비약적으로 향상시킬 수 있는 중요한 스마트 코팅 기술이다. 특히, 자동차 클리어코트(clearcoat)에 적용할 수 있는 스크래치 자기치유 코팅 기술은 많은 글로벌 완성차 업체에서 가장 주목하고 있는 기술 중 하나이다. 최초로 자동차용 스크래치 자기치유 코팅 소재 기술을 상용화한 업체는 일본 Nissan 자동차이다(그림 3).² Nippon Paint와의 기술 협력을 통해 개발된 이 제품의 상품명은 Scratch Shield로 폴리우레탄 아



그림 1. 기계적·화학적 내구성과 다양한 사용 환경에서의 내후성을 동시에 확보해야 하는 자동차 코팅 소재 기술.

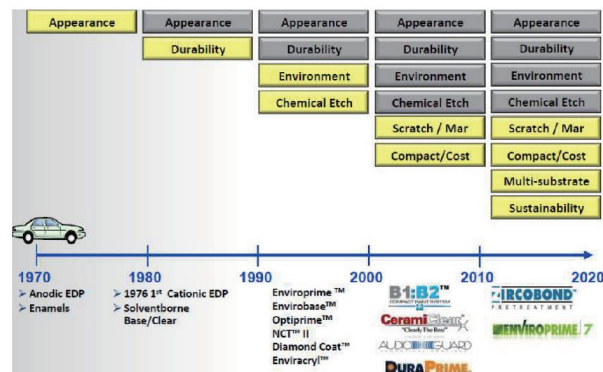


그림 2. 자동차 코팅 소재 기술 개발 트렌드 변화.

크릴레이트(polyurethane acrylate)를 기반으로 한 고탄성 가교형 고분자 수지이다(그림 4).

그러나 Scratch Shield는 탄성회복에 의존하기 때문에 기존 상용 클리어코트 수지와 대등한 기계적·화학적 내구성을 구현하기 힘들고 경도가 낮아 코팅 표면이 쉽게 연마되지 않기 때문에 보수 도장 시 현장 작업성이 현저히 저하되는 문제점이 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 학계와 산업계에서는 새로운 고성능 자기치유 메커니즘을 개발하는 연구가 활발히 진행 중이다.

자기치유 메커니즘은 외인성 자기치유 시스템(extrinsic self-healing system)과 내인성 자기치유 시스템(intrinsic self-healing system)으로 분류된다(그림 5). 외인성 자기치유 시스템은 액상의 자기치유 물질을 함유하는 마이크로 캡슐을 코팅 층에 분산시킨 형태로 물리적 충격으로 인해 코팅 층이 손상을 입었을 경우 마이크로 캡슐이 파괴되면서 자기 치유 물질이 방출된 후 경화됨으로써 손상을 치유하는 방식이다^{3,5}. 외인성 자기치유 시스템은 넓은 면적의 손상 부위를 자기 치유할 수 있다는 점에서 큰 이점을 가지고 있으나 마이크로캡슐의 제조 공정이 복잡하여 소재의 대량 생산이 용이하지 않고, 코팅 바인더와 마이크로캡슐 간 굴절률 차로 인한 광 난반사 현상(haze)으로 인해 투명한 코팅 층을 제조하기 어렵다. 또한 자기치유 현상이 마이크로캡슐의 붕괴에 의해 일어나기 때문에 일회성 자기치유만을 제공할 수 있고 물리적·화학적 내구성을 보유한 마이크로캡슐 제조가 용이하지 않아 내구성과 투명성을 동시에 요구하는 자동차용 코팅

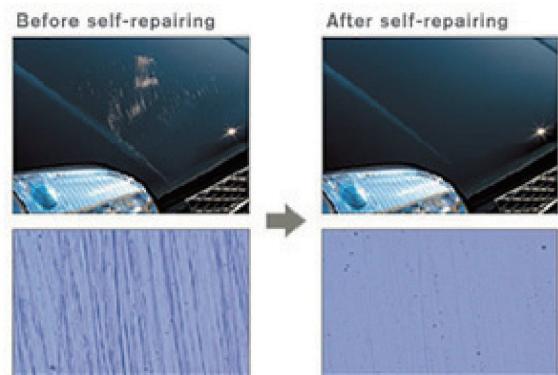


그림 3. Nissan 자동차에 적용된 스크래치 자기치유 클리어코트 기술.

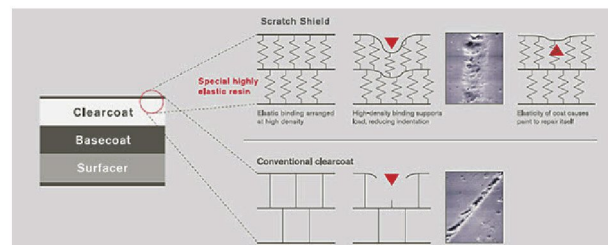


그림 4. Scratch Shield 제품의 스크래치 자기치유 원리.

분야 등에서는 그 사용이 매우 제한된다.

이에 반해, 내인성 자기치유 코팅 시스템은 코팅 소재에 i) 수소결합(hydrogen bonding) 및 전하-이동 복합체(charge transfer complex) 등의 물리적 상호 작용, ii) 가역적 촉매 반응(catalytic reaction), iii) 디엘스 알더-역디엘스 알더 반응(Diels Alder(DA)/retro-Diels Alder(r-DA) reaction) 및 힌더드 유레아 결합(hindered urea bond), 알콕시 아민(alkoxy amine), 보로닉 에스터(boronic ester), 다-설파이드 결합(di-sulfide bond) 등 다양한 동적가교시스템(dynamic crosslinking system)을 도입하여 자기치유 소재를 제조하는 기술로써 외인성 자기치유 시스템과는 달리 다회성 자기치유가 가능하다는 점과 투명한 코팅 층도 제조할 수 있다는 점에서 산업계의 큰 주목을 받고 있다(그림 6).^{7,8}

특히, 힌더드 유레아 기반 가역 고분자 네트워크 시스템은 이소시아네이트(isocyanate)와 2차 아민 간 반응을 이용하므로 기존 폴리우레탄 기반 코팅 시스템에 즉시 적용이 가능

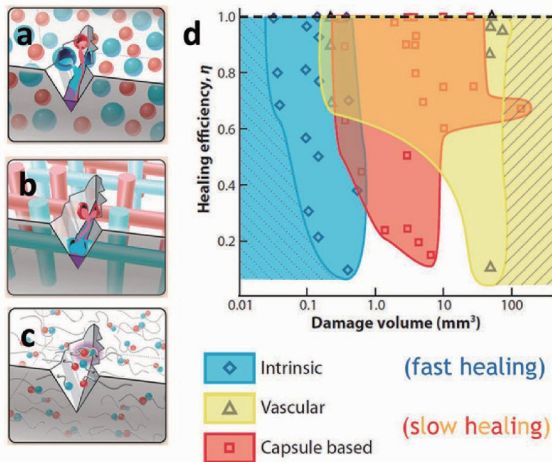


그림 5. 자기치유 코팅 시스템의 종류: (a) 캡슐형 및 (b) 광상형 외인성 자기치유 시스템, (c) 내인성 자기치유 시스템, (d) 각 시스템 별 자기치유 면적 및 효율 비교.⁶



그림 6. 내인성 자기치유 코팅 소재 기술.

하고 상온 자기치유 시스템이므로 높은 자기치유 성능과 기계적 물성을 동시에 확보할 수 있는 기술로 상용화 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다(그림 7).⁹

2.3 저온경화 코팅 소재

친환경 저온경화 코팅 소재 기술은 기존 고온 경화 공정 대비 낮은 온도(100℃ 이하)에서 화학적 가교 (crosslinking) 반응을 구현할 수 있는 시스템이다. 최근 자동차 코팅 시스템에서 본 기술이 크게 주목받고 있는 이유는 후술할 두 가지 측면 때문이다. 첫째는 전세계적인 경량화 자동차 개발 이슈이다(그림 8-10).¹⁰⁻¹¹ 경량화 자동차에는 플라스틱 부품이 많이 적용되고 있는데 플라스틱은 금속이나 세라믹과 비교하여 용융점 낮고 고온 안정성이 현저히 떨어지기 때문에 현재

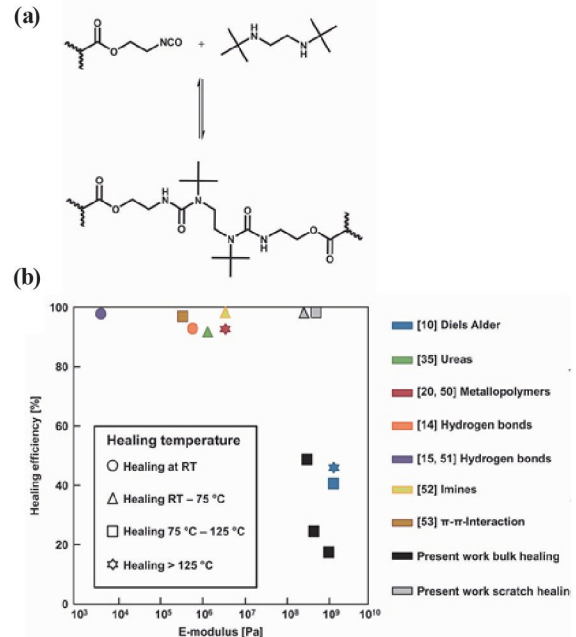


그림 7. 힌더드 유레아 기반 가역 고분자 네트워크: (a) 가역반응 메커니즘 (b) 저장 모듈러스-자기치유 성능 관계.

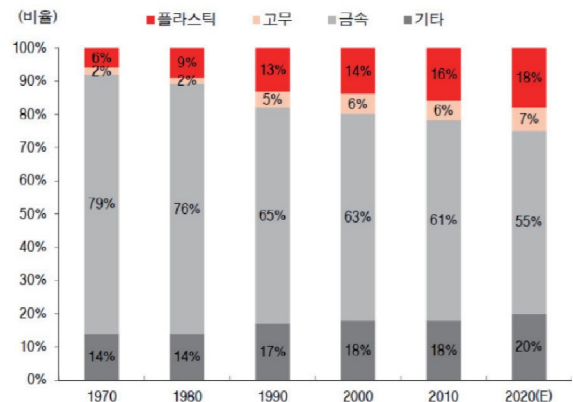


그림 8. 연도별 플라스틱 부품 자동차 적용 비율.

자동차 생산라인에서 사용되는 고온경화공정(~150℃)에서는 뒤틀림 등의 구조적 치수변형을 유발하기 쉽다. 둘째는 이산화탄소 배출권과 같은 국제 환경 규제에 대응하기 위한 에너지세이빙(energy saving) 공정 기술 개발 이슈이다.

현재 자동차 생산라인에서 사용되고 있는 열경화 오븐은 길이 100 m, 표면적 300~400 m²의 대형 시설이며 글로벌 수준의 완성차 양산력을 보유하기 위해서는 약 20여 개가 가동되어야 한다. 화석 연료를 사용하여 20여 개의 경화 오븐을 24시간 구동할 경우 이산화탄소 배출량은 약 6 톤으로 이를 저감하여 신기후체제에 대응하기 위해서는 저온 경화 공정 개발이 필수적이다.

저온 경화 코팅 시스템 개발의 핵심은 낮은 온도에서도 높은 가교 밀도를 구현하는 동시에 코팅액의 장기 보관 안정성을 확보할 수 있는 저온 경화 촉매 설계 기술이다. 최근 다양한 저온 경화 시스템들이 BASF, Cavestro, Asahi Kasei 등의 글로벌 화학 기업들에 의해 개발되고 있는데 상용화가 유망한 기술로는 열개시제(TRI, Thermal Radical Initiator) 기반, 블록 이소시아네이트(blocked isocyanate) 기반, 에폭시

(epoxy) 기반 코팅 시스템이 있다.¹²

2.4 자동차 코팅 공정 단축화 기술(Compact Process)

전술한 바와 같이 곧 다가올 전세계적 신기후체제 발효에 따라 자동차용 코팅 공정 기술 또한 새로운 국면으로 접어들고 있다(그림 11).

자동차용 코팅 공정은 크게 전처리, 전착공정, 중도 코팅, 상도베이스코트 코팅, 클리어코트 코팅 공정으로 나뉘는데 각각의 개별 공정은 매우 복잡한 세부 공정으로 이루어져 있다. 이러한 복잡한 단계를 통합하여 단축하는 공정(compact process)을 개발하는 것은 국내외 완성차 업체의 기술적 숙원 사업이다(그림 12).

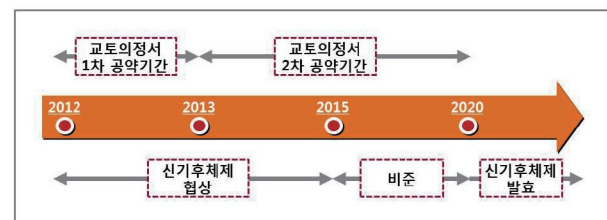


그림 11. 신기후체계 발효 로드맵.¹³⁾



그림 9. 플라스틱 경량화 자동차 BMW i3 모델.

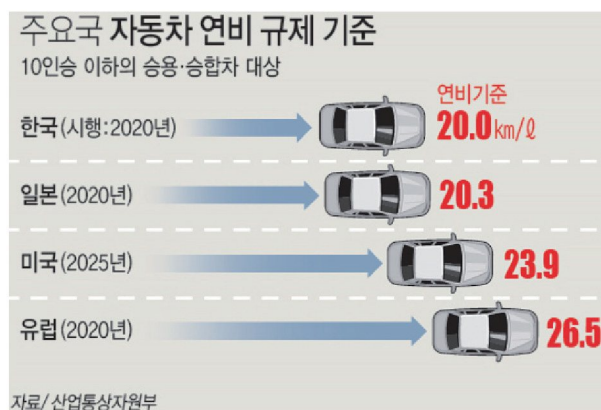


그림 10. 주요국 자동차 연비 규제 기준

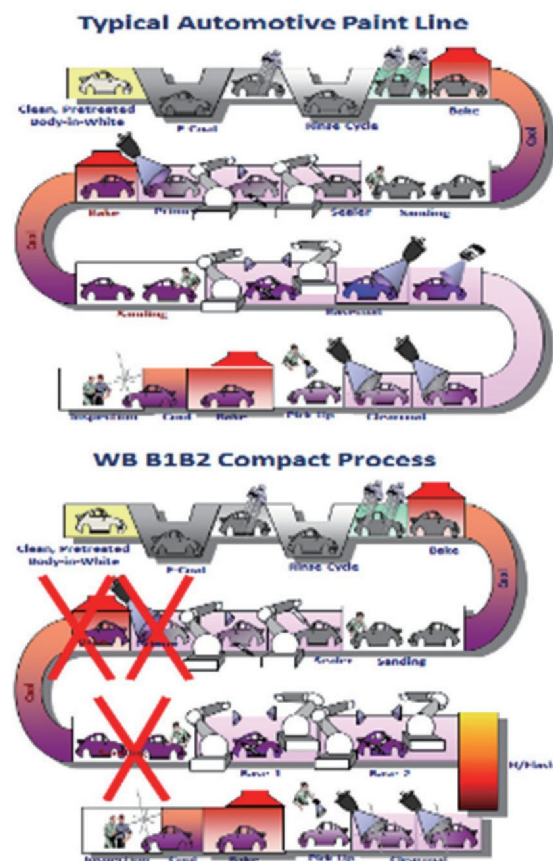


그림 12. 자동차 코팅 공정 단축화 기술의 예.

BMW의 영국 Oxford 공장과 미국 Spartanburg 공장은 자동차용 단축 코팅 공정의 성공적인 사례로 평가받는다. 본 기술의 핵심은 중도 및 상도 코팅 공정을 wet-on-wet으로 코팅하고 한 번에 경화하는 것으로 각 계면 간 층분리를 물리·화학적으로 정밀하게 제어하는 것이 중요하다.

자동차 코팅 공정 단축화 기술로써 자가계층화(self-stratification) 현상을 이용한 적층 시스템이 크게 각광받고 있다. 이 시스템에서는 서로 상용성이 없는 두 가지 이상의 수지를 공통 용매(혹은 공통 용매 혼합물)에 용해시켜 코팅액을 제조한 후 코팅 공정에서 용매 휘발, 열 또는 질량 이동 현상, 화학 반응 등을 이용하여 두 개 이상의 서로 다른 코팅을 층 분화에 의해 한 번에 형성한다(그림 13).¹⁴⁻¹⁷

2.5 자기세정 코팅 소재 기술

자기세정 코팅 기술은 코팅 표면에 오염 물질이 흡착되는 것을 방지하거나 스스로 세정할 수 있는 시스템으로 혹독한 외부 환경에 빈번히 노출되어 표면 오염이 많이 발생할 수 있는 자동차 외장 코팅에 적용하고자 하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 일본 Nissan 자동차는 최근 자사 자동차에 자기세정 코팅 기술을 적용하였는데 본 기술의 핵심은 초소수성(super hydrophobic) 또는 올레오포빅(oleophobic) 표면을 구현하는 것이다(그림 14).¹⁸

그러나 자기세정 코팅을 본격적으로 상용화하기 위해서는 해결해야 할 과제가 몇 가지 있는데 그 중 가장 중요한 이슈는 재도장 공정 적합성 개선이다. 전술한 바와 같이 자기세

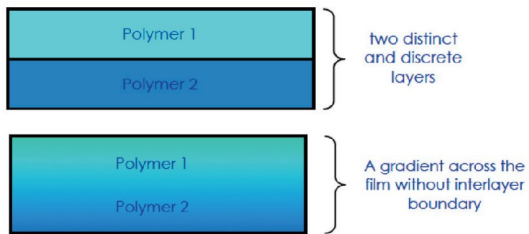


그림 13. 자가계층화 코팅과 범용 코팅의 차이: (a) 일반 코팅 공정, (b) 자가 계층화 코팅 소재에 의한 고분자 코팅 공정.

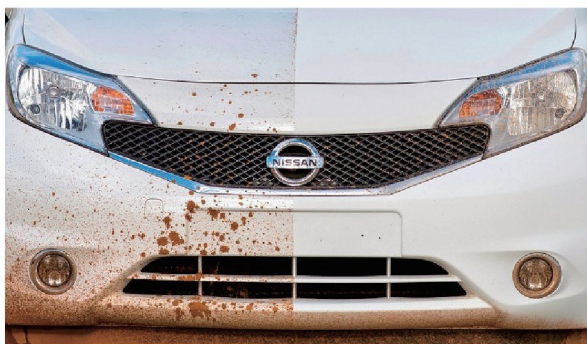


그림 14. Nissan 자동차의 자동차용 자기세정 코팅 기술 Nissan LEAF®.

정 코팅 소재는 낮은 표면 에너지를 통해 구현되는데 재도장 공정 시 보수용 도료(refinish paint)가 기존 코팅 층 위에 도장되지 않는 문제점이 있다.

2.6 자율주행 자동차 코팅 소재 기술

최근 4차 산업 혁명과 관련하여 자동차 산업에서 가장 큰 주목을 받고 있는 것은 자율주행 자동차의 상용화 기술이다. 자율주행 자동차를 구현하기 위해서는 거리 측정이나 3차원 입체 이미지 데이터를 감지하는 센서 시스템 탑재가 필수적인데 이러한 센서 시스템 중에서도 특히 그 필요성이 증대되고 있는 것은 라이다(light detection and ranging, LIDAR) 관련 기술이다. 라이다는 빛을 이용해 물체를 감지하고 거리를 측정하는 기술을 뜻하며 거리 측정 수단이 레이저이기 때문에 흔히 레이저 레이더 또는 3차원 스캐너(scanner)라고도 불린다. 전자기파를 주기적으로 방출하여 물체에 반사되는 신호를 읽어 물체와의 거리, 이동 방향, 높이 등을 확인하는 레이더(radio detection and ranging, RADAR)와 측정 원리는 비슷하지만 라이다의 경우 전자기파 대신 레이저를 사용한다는 점에서 레이더와는 다르다. 라이다는 파장이 짧은 레이저를 사용하므로 레이더보다 측정 정밀도와 공간 해상도가 높아 물체의 형태를 빠르고 입체적으로 파악할 수 있으



그림 15. 천정 중앙에 360도 회전식 LIDAR 센서를 장비한 Google의 자율주행자동차.¹⁹

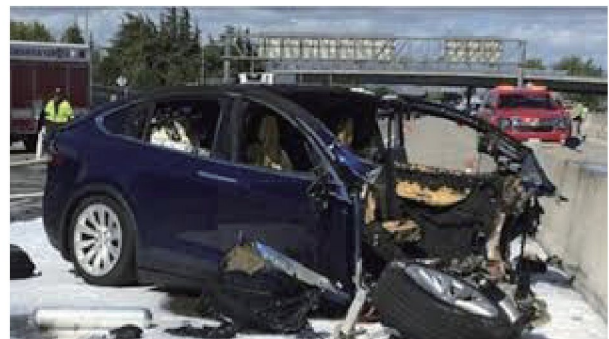


그림 16. 자율주행차 사고 사례(테슬라 모델 X, 센서 시스템 오작동으로 인한 사고로 추정됨).

며 물체 특성에 따라서는 레이더가 감지하지 못하는 물체도 확인할 수 있다. 자율주행자동차에 탑재되는 라이더 센서에 관한 연구 개발을 가장 활발히 진행하고 있는 기업은 Google, Tesla, Apple, Uber 등의 글로벌 기업들이다(그림 15).

자율주행차 상용화를 위해 해결해야 할 가장 큰 과제는 사고 회피 시스템의 신뢰도를 높이는 것으로 이는 라이더 센서 시스템 성능과 밀접한 관련이 있다(그림 16). 기존에는 센서 감지 디바이스 및 상황 인지 인공지능의 성능을 개선하여 사고 회피 시스템을 개선하는 연구가 많이 이루어졌으나 최근에는 자동차 코팅 소재에 입사되는 레이저의 반사 강도를 증폭시키는 연구가 PPG Industries를 중심으로 연구되고 있다. PPG Industries에서 주력하고 있는 라이더 감지 코팅 소재는 모든 파장의 빛을 흡수하는 다크 톤(dark tone)의 도료에서도 라이더 광원의 빛을 선택적으로 반사할 수 있는 기술로 가지(eggplant)의 표면 구조를 자연 모사하여 구현한 것이다. 가지는 표면이 검은 빛을 띄고 있지만 강한 햇빛 아래에서도 내부는 낮은 온도를 유지할 수 있는데 이는 흡수된 빛이 내부에서 반사되기 때문이다. PPG Industries는 과거 이를 응용한 코팅시스템을 항공기에 적용해 표면과 객실 온도를 $-14 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 까지 낮출 수 있는 기술을 상용화한 사례가 있다.²⁰

3. 결론

본 특집에서는 차세대 자동차 스마트 코팅 소재 기술에 관해 살펴보았다. 자동차 코팅 소재 기술은 대한민국 주력 산업인 수송기기 산업의 글로벌 경쟁력과 밀접하게 관련된 핵심 정밀화학 분야로 본 고에서 서술한 국내·외 주요 이슈에 대응할 수 있는 국산 원천 기술 개발이 시급한 상황이다.

참고문헌

1. Nanomarkets, *Smart Coatings Market 2015-2022* (2015).
2. <https://www.nissan-global.com>.
3. S.H. Cho, S.R. White, and P.V. Braun, *Adv. Mater.*, **21**, 645 (2009).
4. Y.K. Song, B. Kim, T.H. Lee, J.C. Kim, J.H. Nam, S.M. Noh, and Y.I. Park, *Macromol. Rapid Commun.*, **38**, 1600657 (2017).
5. Y.K. Song, B. Kim, T.H. Lee, S.Y. Kim, J.C. Kim, S.M. Noh, and Y.I. Park, *Sens. Actuators B Chem.*, **257**, 1001 (2017).
6. T.-P. Huynh, P. Sonar, and H. Haick, *Adv. Mater.*, **29**, 1604973 (2017).
7. Z. Wei, J. H. Yang, J. Zhou, F. Xu, M. Zrínyi, P. H. Dussault, and Y. Osada, and Y. M. Chen, *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 8114 (2014).
8. J. C. Kim, Y. I. Park, S. H. Lee, and S. M. Noh, *J. Adhes. Interf.*, **19**, 30 (2018).
9. S. Zechel, R. Geitner, M. Abend, M. Siegmann, M. Enke, N. Kuhl, M. Klein, J. Vitz, S. Gräfe, B. Dietzek, M. Schmitt, J. Popp, U. S. Schubert, and M. D. Hager, *NPG Asia Mater.*, **9**, e420, (2017).
10. ATKeamey, ACS Publications, Research Center, Hanwha Investment & Securities Co., Ltd.
11. <https://playtube.pk/watch?v=xvaQMTcckSg>.
12. K. I. Jung, B. Kim, D. G. Lee, T. -H. Lee, S. Y. Choi, J. C. Kim, S. M. Noh, Y. I. Park, and H. W. Jung, *Prog. Org. Coat.*, **125**, 160 (2018).
13. <http://www.etnews.com/20151109000207>.
14. H. Murase and W. Funke, *15th EATPEC Congress*, **2**, 387, (1980).
15. V. V. Verkholtantsev, *Prog. Org. Coat.*, **13**, 71 (1985).
16. V. V. Verkholtantsev, *Prog. Org. Coat.*, **26**, 31 (1995).
17. V. V. Verkholtantsev, *Pigment & Resin Technology*, **32**, 300 (2003).
18. <https://www.nissanusa.com>.
19. <https://waymo.com>.
20. <http://corporate.PPG Industries.com>.