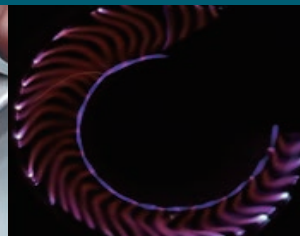
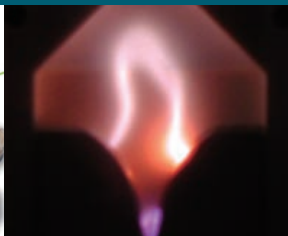
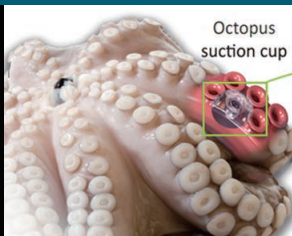
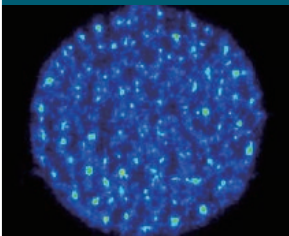


융합연구리뷰

Convergence Research Review

플리즈마 기술을 활용한
미세먼지 저감기술
—
웨어러블 소자를 위한
생체모사기반 점착계면 기술



C o n v e r g e n c e R e s e a r c h R e v i e w

Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2017 September vol.3 no.9

- 01 편집자 주
- 04 플리즈마 기술을 활용한 미세먼지 저감기술
- 38 웨러러블 소자를 위한 생체모사기반 점착계면 기술



발행일 2017년 09월 06일

발행인 하성도

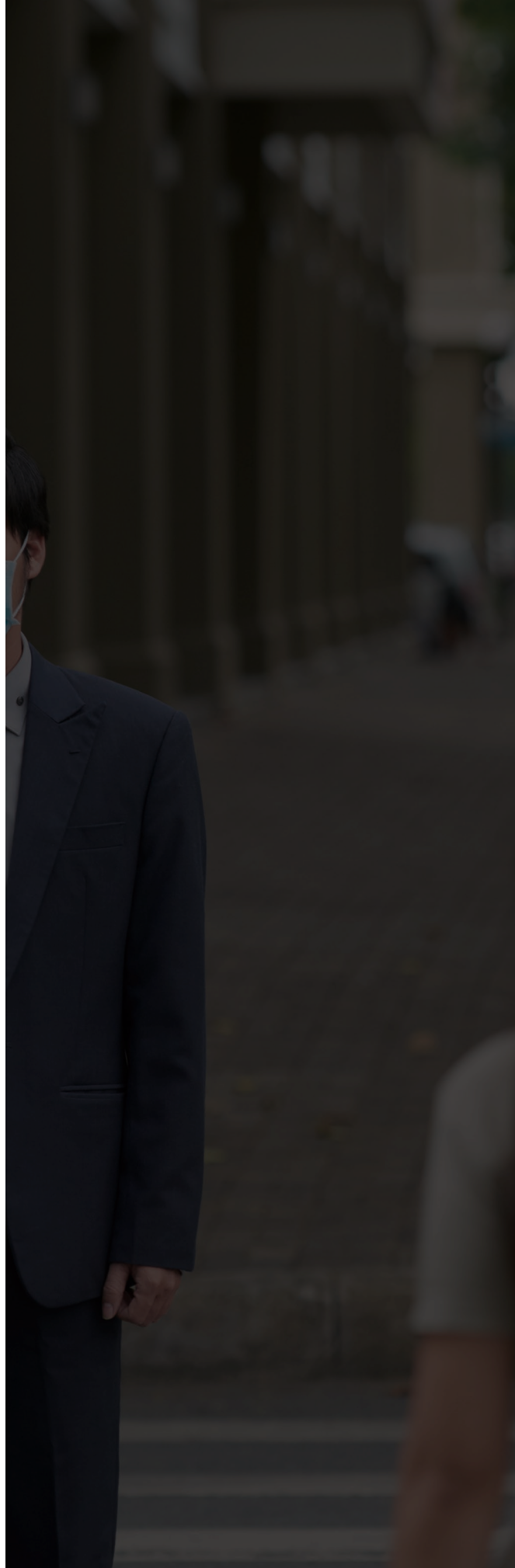
편집인 안주명 김보림

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹주식회사 Tel. 1800-3673



[편집자주]

| 플라즈마 기술을 활용한 미세먼지 저감기술

일기예보에서 미세먼지 농도가 중요한 부분을 차지하고, 외출 시 실시간 미세먼지 농도를 확인 후 마스크를 쓰고 나가는 일은 더 이상 우리사회에서 낯선 풍경이 아니다. 2016년 OECD에서 조사한 국가별 대기오염 수치에서 우리나라는 38개국 중 38위로 최하위를 기록하였다. 미세먼지는 2013년 국제보건기구(WHO) 산하 국제암연구소가 1등급 발암물질로 규정한 물질로, 우리나라의 경우 2012년부터 꾸준히 농도가 증가하고 있다. 불과 5년 전만해도 일반인에게 생소하게 느껴졌던 이러한 미세먼지의 위험성은 이제 많은 국민들이 인지하고 건강에 대한 걱정으로 이어지고 있다. 미세먼지는 공장에서 배출되는 매연, 산업현장에서 발생하는 비산먼지, 자동차 매연 등 인위적인 요인으로 만들어진다고 알려져 있다. 국제적으로 미세먼지로 인한 사망자가 늘어나고, 세계적으로 경제 피해 규모도 점점 증가함에 따라 미세먼지를 감소할 수 있는 기술 개발이 중요한 대안으로 떠오르고 있다. 우리나라는 새 정부 들어 미세먼지 저감 대책의 일환으로 노후화된 석탄화력발전소의 가동 중단을 결정하며, 미세먼지를 줄이는 핵심 기술로 플라즈마 버너 기술이 주목을 받고 있다. 플라즈마 버너 기술은 자동차의 매연저감장치에 적용하여 디젤차에서 배출되는 매연을 최대 95%까지 저감할 수 있는 기술로, 자동차 뿐만 아니라 발전소에서 나오는 질소산화물을 줄이는 데도 적용이 가능하다. 이 기술은 안전성이 높고 많은 에너지를 들이지 않고도 질소산화물을 줄일 수 있는 현존하는 세계 최고 기술 수준으로 평가받고 있다. 이에, 본 호 1부에서는 한국기계연구원의 송영훈 박사 연구팀을 통해 미세먼지 저감을 위한 플라즈마 버너 기술에 대해 살펴보고자 한다. 플라즈마 버너 기술이 대기 오염을 잡을 수 있는 솔루션이 되어 미세먼지의 위험성으로부터 조금은 해방될 수 있길 기대해본다.

| 웨어러블 소자를 위한 생체모사기반 점착 계면 기술

우리 주변에서 동물이나 식물이 지닌 장점을 과학과 접목하여 인간에게 필요한 새로운 것들을 만들어낸 사례들을 종종 볼 수 있다. 대표적으로 물총새의 부리와 머리를 본떠 고속운행에 따른 소음을 해결한 일본 고속열차 신칸센, 파리의 눈을 카메라 렌즈에 응용시켜 개발한 디지털카메라, 연잎 표면이 물방울에 젖지 않는 현상을 전자소자와 접목하여 만든 젖지 않는 메모리 소자 등이 있다. 위와 같이 생물체가 지닌 뛰어난 구조나 기능으로부터 원리를 도출하여 이를 새로운 공학기술로 만들어내는 기술을 생체모방기술 또는 생체모사기술이라고 한다. 과거에는 도꼬마리 가시를 모방한 벨크로, 민들레 씨를 모방한 낙하산, 단풍나무 열매를 모방한 비행기 프로펠러 등 외형적인 모방에 머물렀다면, 최근에는 정밀한 세포의 기능을 모방한 인공 효소 기술들이 등장하고 있다. 그 중 우리 생활에서 자주 접할 수 있고 활용범위가 넓은 분야로는 생체모사기반 점착 기술을 꼽을 수 있다. 최근 의류, 피부, 인체 장치 등에 부착하여 사용자의 정보를 수집하고 진단 및 치료에 활용하는 웨어러블 디바이스들이 주목을 받으며, 더불어 생체친화적 점착 소재 기술의 중요성이 부각되고 있기 때문이다. 기존의 화학물로 만든 점착 소재들은 젖은 표면에서 점착력이 사라지거나 끈적이는 오염물을 남기는 등의 문제로 적용에 한계가 있어 다양한 점착 기술의 개발이 요구되고 있다. 이에 본 호 2부에서는 성균관대학교 방창현 교수를 통해 생체모사기반 점착 계면 기술 동향에 대해 살펴보고자 한다. 이러한 기술은 환경 및 피부표면에서 끈적이는 화학 점착제 없이 반복적으로 탈부착이 가능한 소재 개발로 다양한 산업에 획기적으로 활용 가능한 원천기술이 될 것으로 예상된다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2017 September vol.3 no.9

<http://crpc.kist.re.kr>

01

플라즈마 기술을 활용한 미세먼지 저감기술

한국기계연구원 환경시스템 연구본부 플라즈마 연구실
송영훈 박사, 이재욱 박사, 김관태 박사, 이대훈 박사, 조성권 박사
(송영훈 yhsong@kimm.re.kr)



01 서론

1.1 플라즈마 기술

정부로부터 연구비를 지원받기 위해 연구자들이 작성하는 과제 제안서에 요즘 “플랫폼” 또는 “원천 기술”이라는 용어가 자주 등장하고 있음을 관련자라면 누구나 잘 알고 있다. 이는 공공성을 지향하는 정부 연구과제의 특성에 맞추기 위해 각 연구자들은 자신들이 제안하는 연구의 결과물이 미래에 다수의 사람들에게 폭넓게 활용될 가능성이 있다는 것을 주장하고 싶어 하기 때문으로 이해된다. 그리고 이러한 미래의 가능성을 얼마나 설득력 있게 제안서에 제시하느냐에 따라 과제의 선정에 영향을 미치기도 한다. 그러나 여기서 문제점은 미래를 정확하게 예측하기가 어렵다는데 있다. 한번 쯤 시간을 내어 10년 전 또는 20년 전 당시에는 미래였던 오늘날의 모습이 과연 얼마나 과거의 예측대로 이루어졌나를 따져본다면, 미래를 예측하는 일이 얼마나 어려운 일인지를 깨달을 수 있을 것이다. 그러나 이처럼 미래 예측이 어렵다고 “미래를 위한 기술개발을 시도하는 것이 부질없는가?” 라는 물음 또한 적절하지 않아 보인다. 이는 지난 수 세기 동안의 과학기술을 살펴보면 처음에는 그다지 주목받지 못했던 과학적 발견이 나중에 수많은 기술 분야에 영향을 준 것은 물론 우리의 삶 자체도 크게 바꾸어 놓은 사례가 다수 있기 때문이다. 플라즈마 기술은 그와 같은 사례 가운데에도 대표적인 사례로 거론될 수 있을 만큼 기술의 영향력과 파급효과에 있어 주목할 만한 기술이다.^{1), 2)}

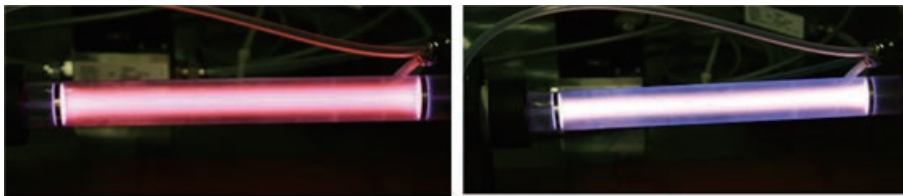


그림 1. 진공 유리관에 서로 다른 종류의 가스를 넣어 발생시킨 플라즈마로부터 방출되는 빛의 사진. (좌측) 네온 가스, (우측) 헬륨가스 (기계연구원 사진)

플라즈마 기술이 오늘날 우리의 삶을 얼마나 바꾸어 놓았는지를 알기 위해서는 처음 플라즈마를 발견했던 상황, 플라즈마의 특성, 그리고 이를 활용한 구체적인 기술을 살펴볼 필요가 있다. 오늘날 플라즈마라고 불리는 이온화된 기체(ionized gases)를 본격적으로 연구하기 시작한 시기는 19세기 중후반이다. 당시 몇 명의 과학자들은 유리로 제작된 진공관에 직류 전압을 인가시켜 발생시킨 빛을 바라보며 “빛을 방출하며 움직이는 기체”가 지금까지 알려진 기체와는 몇 가지 다른 특성이 있음을 발견했다. 그 후 수십 년이 지난 1920 년대에 이르러서도 여전히 “기체를 넘어선 기체”라는 다소 애매하게 언급되던 물질을 “플라즈마”라고 새롭게 이름을 붙여준 사람은 미국의 화학자 랭뮤어였다. 플라즈마는 기체분자가 외부로부터 강한 에너지를 받아 전자를 잃게 되면서 발생하는데, 이에 따라 플라즈마는 전자, 전자를 잃거나 얻은 이온화된 기체(ionized gases) 분자, 그리고 아직 이온화되지 않은 기체분자로 구성되어 있다. 플라즈마를 화학반응에 이용하는 입장에서 바라보았을 때 플라즈마가 갖고 있는 중요한 특성은 크게 두 가지이다. 첫 번째는 플라즈마를 구성하고 있는 전자 및 이온의 에너지는 일반적인 기체분자에 비해 상당히 크다는 점이고, 두 번째는 전자 및 이온 들은 전기적인 극성을 갖고 있어 외부의 전자기장에 의해 플라즈마가 독특한 유동(flow)을 보인다는 점이다.

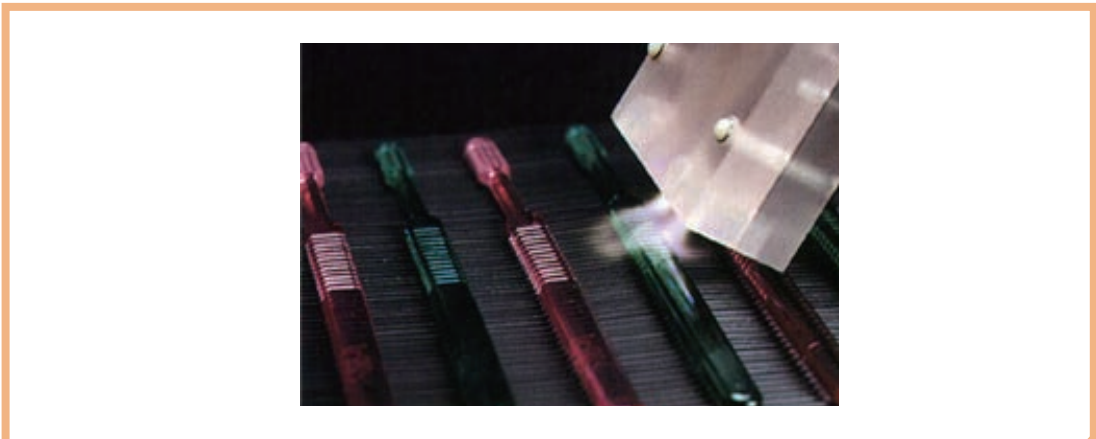


그림 2. 대기압 플라즈마 제트를 이용한 플라스틱 표면처리³⁾

상온 중에 있는 산소분자 하나가 갖는 에너지는 0.04 eV 즉, 300 K 내외에 불과하지만, 대기압 조건에서 펄스 코로나 또는 DBD (Dielectric Barrier Discharge, 유전체 장벽방전)를 통해 발생시킨 플라즈마 내의 전자가 갖는 에너지는 평균적으로 5 eV에 이른다. 5 eV를 온도로 환산하면 약 40,000 K에 해당하는 높은 온도이다. 물론 DBD를 통해 발생시킨 플라즈마의 전자 수밀도(number density)는 $10^{19}/m^3$ 수준으로 매

우 낮기 때문에(1 기압, 273 K에서 분자의 수밀도는 $2.7 \times 10^{25}/\text{m}^3$), DBD 플라즈마가 발생한 공간의 전체 기체분자의 평균온도는 상온에서 크게 벗어나지 않을 정도로 낮다. 이처럼 기체온도가 낮으면서도 개별적인 전자가 갖는 에너지가 큰 플라즈마 즉, 저온 플라즈마(non-thermal plasma)는 전자가 주변의 기체분자와 충돌하면서 화학반응이 시작되는 플라즈마 화학(plasma chemistry)을 일으킬 수 있다. 플라즈마 화학은 온도가 아니라 전자들에게 운동 에너지를 공급하는 전기장(Electrical Field)의 크기에 좌우되며, 이는 화학 반응 속도가 온도의 함수인 열화학(thermal chemistry)과 차별화되는 가장 큰 특징이다. 낮은 온도조건에서도 화학반응을 일으킬 수 있는 저온 플라즈마의 특성을 이용한 화학반응 사례는 <그림 2>에서 볼 수 있다. 즉, 그림과 같이 저온 플라즈마 제트를 이용하여 플라스틱 표면에 화학반응을 일으킬 경우, 플라스틱 표면에 잘 달라붙지 않는 잉크를 강하게 붙게 할 수 있다. 여기서 저온 플라즈마를 통해 일어난 표면 화학반응은 상온과 같이 낮은 온도조건에서 일어나므로 플라스틱 표면의 영구적인 변형을 피할 수 있다.

플라즈마의 또 다른 특성은 화학반응을 일으킬 수 있는 전자 및 이온들이 전기적 극성을 갖고 있다는 데 있다. 전자 및 이온은 외부로부터 가해진 전기장에 의해 공간적으로 특정한 방향으로 운동을 하게 되며, 이러한 플라즈마 특성을 이용할 경우 화학반응을 공간적으로 특정한 방향으로만 진행시킬 수 있다. 이에 대한 개념을 설명하기 위해 <그림 3>에 전기적으로 중성인 화학물질을 이용한 식각반응과 양이온을 활용한 식각반응의 개념을 비교하였다. 본 그림에서 전기장은 상하 방향으로 인가된 경우이며, 이에 따라 양이온은 위에서 아래 방향으로만 이동하면서 식각ⁱ⁾반응을 일으키게 된다. 이에 반해 전기적으로 중성인 화학물질을 이용한 식각반응은 특정한 방향성이 없기 때문에 그림에서 볼 수 있듯이 원하는 방향의 공간까지 식각반응이 진행된다. 플라즈마를 활용하여 한쪽 방향으로만 선택적으로 식각반응을 일으킬 경우 <그림 3>의 우측에서 보듯이 매우 정교한 세라믹 구조물의 제작이 가능해진다. 이러한 공간적으로 선택성을 갖는 새로운 화학반응의 발견은 오늘날 고도로 집적된 반도체 제조 기술이 가능하게 된 결정적인 계기가 되었다.

i) 식각(etching): 화학약품의 부식작용을 응용한 소형(微型)이나 표면기공 방법으로, 사용하는 소재에서 필요한 부위만 방식(防蝕) 처리를 한 후 부식시켜서 불필요한 부분을 제거하여 원하는 모양을 얻는다.

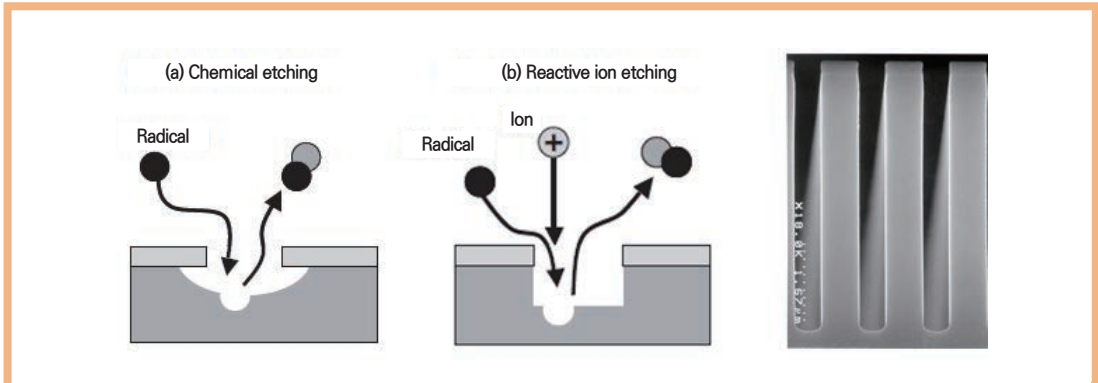


그림 3. chemical etching과 reactive ion etching을 비교한 개념도 및 reactive ion etching을 활용하여 제작된 세라믹 구조물, trench depth: 5.6 μm ^{4) 5)}

플라즈마를 활용한 식각 및 화학증착기술을 도입하면서 비약적으로 발전해온 반도체 기술이 오늘날 우리에게 준 영향력은 실로 막대하다. 반도체 기술이 바탕이 되어 컴퓨터, 인터넷, 스마트폰과 같은 IT (Informational Technology) 기술이 발전해 왔고, IT 기술은 해당 분야의 기술 뿐만 아니라 기계, 화학, 재료, 건축 등 거의 모든 기술 분야의 발전에도 결정적인 역할을 하고 있다. 최근 회자되고 있는 4차 산업혁명도 플라즈마를 활용하여 제조된 반도체 기술이 없었다면, 그 개념조차도 세상에 나타나지 않았을 것이 분명하다. 지난 30년간 IT 기술이 바꾸어 놓은 과학기술, 산업, 경제 그리고 변화된 인간의 삶을 돌이켜본다면, 오늘날 우리 삶의 토대가 되는 문명의 한 축에는 분명히 플라즈마 기술이 자리 잡고 있다고 해도 과언이 아니다.

플라즈마 기술이 광(light) 분야에서 활용되어 우리에게 미친 영향력도 IT 기술 사례에 비해 작지 않다. 우선 플라즈마를 이용한 조명(lighting, illumination) 기술은 우리에게 비교적 친숙한 기술이다. 최근에는 LCD TV 대비 경쟁력을 잃었지만 한때 플라즈마를 광원으로 하는 PDP (Plasma Display Panel) TV도 대량으로 보급된 시기가 있었다. 또한 플라즈마를 활용한 조명기술로는 네온사인과 자동차 헤드라이트가 있다. 한편, 기초과학 분야의 연구자들에게 있어서 플라즈마를 이용하여 물질의 성분을 분석하는 기술은 조명 기술보다 월등히 중요한 기술이다. 플라즈마는 빛을 방출하는 물질이며, 그 빛의 파장은 플라즈마 상태가 되기 이전의 물질의 종류에 따라 다르다<그림1 참조>. 따라서 어떤 물질을 플라즈마 상태로 만들어 방출되는 빛의 색깔 즉, 파장을 분석하게 되면 우리는 그 물질의 성분이 무엇인지를 알 수 있다. 이는 마치 지문분석을 통해 전 세계 모든 사람을 정확하게 식별할 수 있는 경우와 유사하다. 몇 해 전 NASA에서 화성을 탐사하였

을 때에도 <그림 4>와 같이 레이저를 조사하여 미지의 암석을 플라즈마 상태로 만들고 여기서 방출되는 빛을 분석하여 암석의 성분을 알아내었다. 오늘날 세상에 존재하는 수많은 무기물 및 유기물의 분석을 위해서는 앞서 소개된 플라즈마 분광(plasma spectroscopy) 기술보다 더욱 정교한 레이저 분광기술이 활용되고 있는데, 이들 분광기술의 바탕에는 플라즈마 발생기술이 활용되고 있다. 오늘날의 화학, 생물학, 재료, 의학, 약학 등의 분야가 분광학을 토대로 발전해왔음을 생각해본다면, 플라즈마 기술이 광 분야에 활용되면서 우리에게 준 영향력은 앞서 소개된 IT 기술에 활용된 경우에 비해 결코 작지 않다.

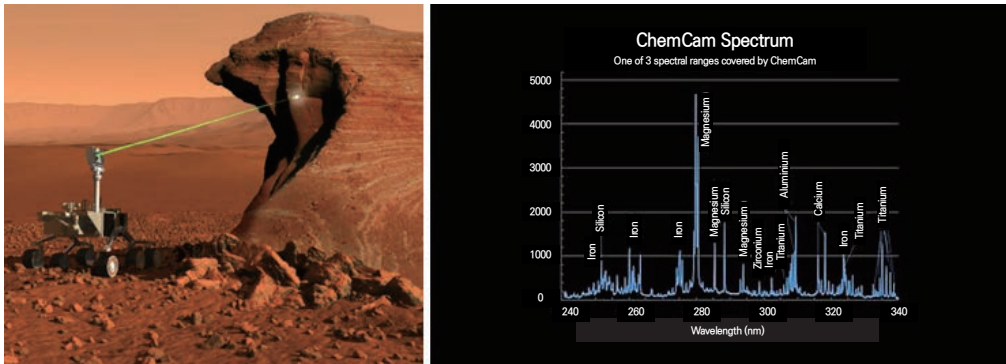


그림 4. 화성탐사에서 사용된 LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 기술 및 암석을 분석한 스펙트럼 (출처: NASA Langley Research Center)

지금까지 소개된 바와 같이 플라즈마 기술은 반도체 제조기술 또는 분광학에 적용된 것을 계기로 지난 세기에 걸쳐 다양한 분야의 학문과 기술 분야에게 그 유래를 찾아보기 어려울 만큼 커다란 영향력을 미치면서 성장해왔다. 한편, 과거 반도체 제조 및 분광학에 집중되었던 플라즈마 관련 연구는 지난 20여 년간 환경, 에너지, 의료, 바이오 등의 분야로 확대되고 있다. 미국 및 독일의 정부 지원을 받아 작성된 정책 보고서에서는 현재 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있는 새로운 플라즈마 기술들의 잠재력을 매우 높게 평가하였고, 이들 새로운 플라즈마 기술을 동력으로 삼아 정체기를 맞은 이들 국가의 산업 및 경제를 다시 한 번 성장시킬 것으로 보고서에 제안하였다.¹⁾²⁾ 본 글에서는 이처럼 새롭게 등장한 여러 종류의 플라즈마 기술 가운데, 최근 상용화 단계에 진입한 “플라즈마를 활용한 대기오염물질 저감기술”을 소개하고자 한다.

02 본론

2.1 미세먼지 및 미세먼지 저감기술

미세먼지란 공기 중에 떠다니는 먼지 가운데 크기가 10 μm 이하인 PM_{10} 과 2.5 μm 이하인 $\text{PM}_{2.5}$ 를 지칭하는 용어이다(PM, Particulate Matter, 입자상 오염물질). 과거에는 50 μm 이하의 크기로 공기 중에 부유하는 입자를 통칭하여 입자상 오염물질이라고 부르며 이를 규제해왔으나, 먼지의 크기가 작을수록 인체에 대한 위해도가 높다는 사실이 규명된 이후에는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 구분하면서 규제하고 있다. PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 이 발생하는 원인 및 이에 따른 미세먼지의 구성 성분은 서로 다르다. 상대적으로 인체 위해도가 낮은 PM_{10} 은 자연으로부터 발생된 경우가 많은 반면, 인체 위해도가 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 은 <그림 5>에서 보듯이 대부분 산업 활동 및 수송에서 사용하는 연소기에서 발생한다. 연소기에서 발생된 미세먼지의 주된 성분으로는 불완전한 연소로 인해 발생된 입자상의 탄소(C, Carbon) 및 탄화수소(Hydrocarbon) 즉, 매연이라고 일반적으로 인식되고 있으나, 실제 분석결과에 의하면 <그림 5>와 같이 미세먼지의 주된 성분은 연소기에서 기체상으로 배출된 SO_2 (아황산가스)와 NO_x (질소산화물)가 대기 중에서 다른 화학물질과 반응하여 입자상으로 전환된 황산염 및 질산염과 같은 2차 생성물이다. 따라서 미세먼지의 저감기술에서는 연소기에서 배출되는 입자들의 저감도 중요하지만, 최근에는 기체상으로 배출되는 SO_x 및 NO_x 의 저감이 더욱 중요한 기술로 인식되고 있다.

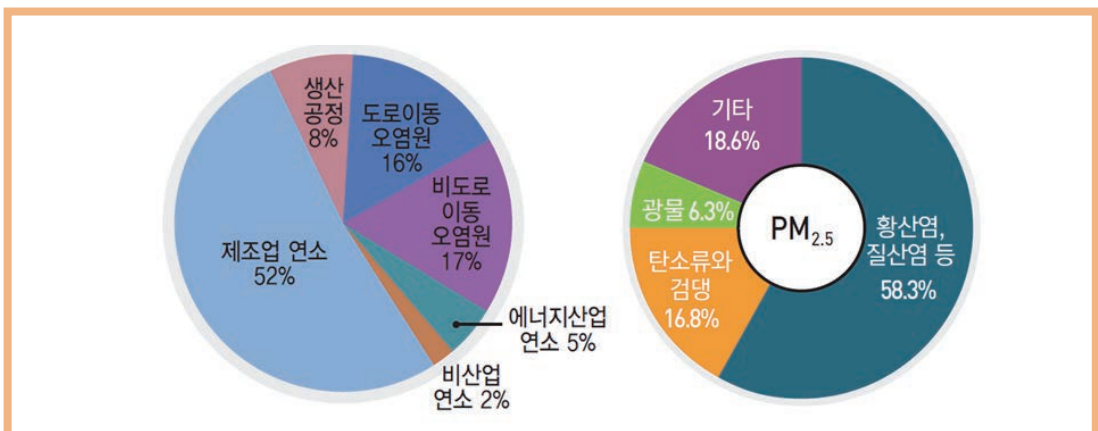


그림 5. $\text{PM}_{2.5}$ 배출원 (좌측) 및 $\text{PM}_{2.5}$ 를 구성하고 있는 성분 (우측), (출처: 환경부 자료 2016.4)

〈그림 6〉은 연소기에서 대기 중으로 배출된 NO_x 및 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbons, UHC)가 다른 화학물질과 어떻게 반응하여 입자상 2차 생성물을 만드느지를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 질산염이 발생하는 반응에는 NO_x 이외에도 태양광 및 VOCs(Volatile Organic Compounds, 휘발성유기화합물)가 필요하며, 2차 생성물이 만들어지는 반응과정에서 오존이 생성되는 것을 보여주고 있다. 실제 오존 경보가 내리는 때는 ① 강한 햇볕이 내리쬐는 여름철이고, ② NO_x 및 VOCs를 배출하는 자동차 운행과 산업 활동이 아침부터 시작되어 어느 정도 이들 화학물질의 농도가 높아진 오후 2~3시경임을 우리는 경험적으로 알고 있다. 한편, 미세먼지 농도가 높아져 우리에게 심각한 피해를 주는 경우는 그림에서 제시된 광 스모그 반응만으로는 설명할 수 없으며, 광 스모그 반응 이외에도 큰 영향을 미치는 변수로 기상조건을 들 수 있다. 예를 들어 만 명 이상의 사망자를 낸 것으로 보고된 1952년 겨울의 런던 스모그(Great Smog of London)는 석탄을 난방연료로 사용하면서 배출된 아황산가스가 며칠간 계속된 안개에 흡수되면서 생성된 황산미스트에 의한 것으로 알려져 있다. 또한 우리나라의 심각한 겨울 및 봄철 미세먼지 발생은 해외로부터 국내로 유입되는 계절풍이나 기온의 역전층과 같은 기상조건이 크게 좌우하고 있다.

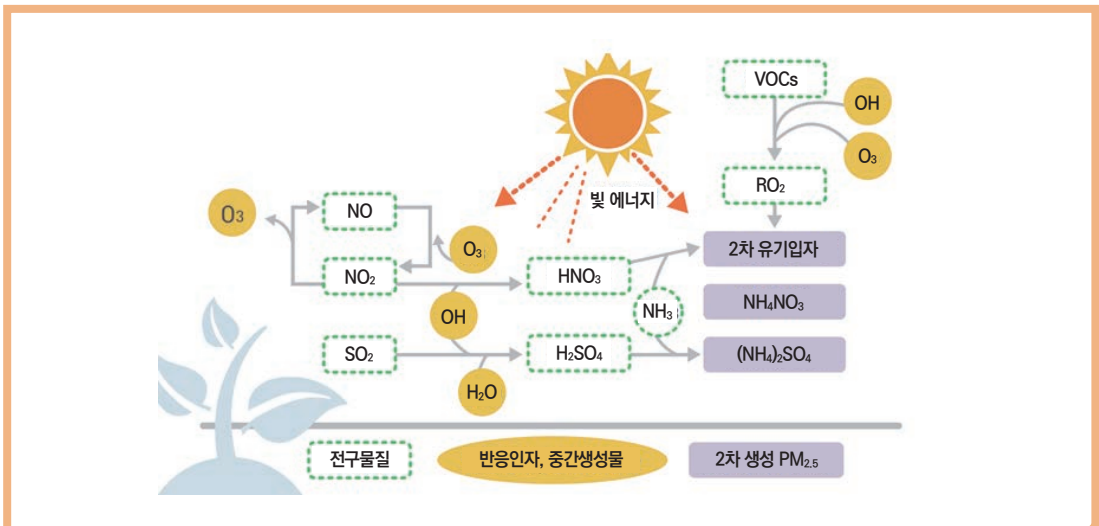


그림 6. 미세먼지의 일종인 광 스모그(Photo smog)가 발생하는 과정 (출처: 환경부 자료 2016.4)

이상에서 살펴본 바와 같이 미세먼지는 연소과정을 통해 발생하는 경우가 대부분이다. 이에 따라 미세먼지 발생을 줄이는 기술의 종류를 구분하는 방법도 연소과정을 중심으로 ① 연소 전처리 기술 (예: 연료에서

황 성분을 미리 제거하는 기술), ② 연소제어 기술, ③ 연소 후처리 기술로 구분될 수 있다. 여기서 연소를 제어하는 기술은 SO₂ 또는 NO_x가 연소과정 중에 발생되므로 이들 오염물질의 생성을 억제하기 위해 화염 온도 및 연소 반응경로를 제어하는 기술을 말한다. 산업용 보일러에서는 국부적으로 화염온도가 높아져서 NO_x 생성이 활발하게 일어나지 않도록 ① 화염의 길이를 증가시키는 기술, ② 다단으로 연소과정을 나누는 기술, ③ 배기가스를 재순환시켜 산화속도를 늦추는 기술, ④ 연료와 물을 함께 분사시키는 기술, ⑤ 환원제를 연소기에 투입하는 기술 등 다양한 연소제어 기술이 활용되고 있다. 이들 연소제어 기술은 비용이 비교적 저렴한 반면 NO_x 저감율은 50~60% 수준인 경우가 대부분이다. 한편, 산업설비에서 대표적으로 활용되고 있는 연소 후처리 기술로는 PM을 포집하는 전기 집진기, SO₂ 흡수를 위한 습식 스크러버, NO_x를 N₂로 환원시키는 SCR (Selective Catalytic Reduction, 선택적 촉매환원법) 설비를 들 수 있다. 이들 연소 후처리 기술들은 설치 및 운전비용이 고가이나 95~99% 수준의 높은 오염물질 처리율을 얻을 수 있기 때문에 오늘날 대부분의 산업설비에는 이들 연소 후처리 설비가 장착되어 있다.

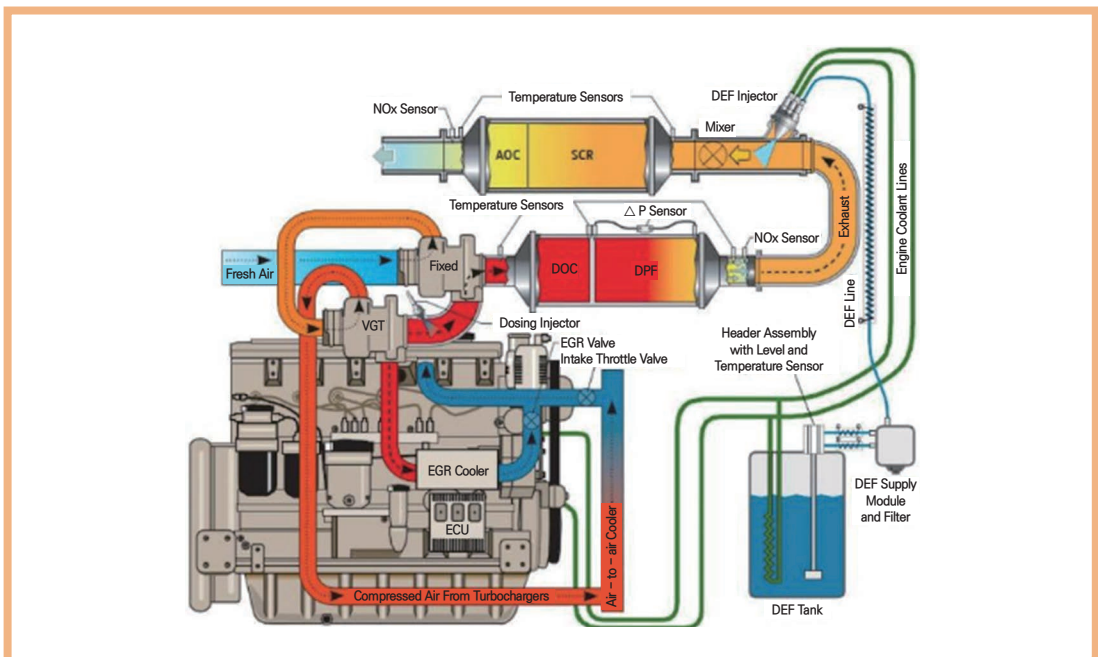
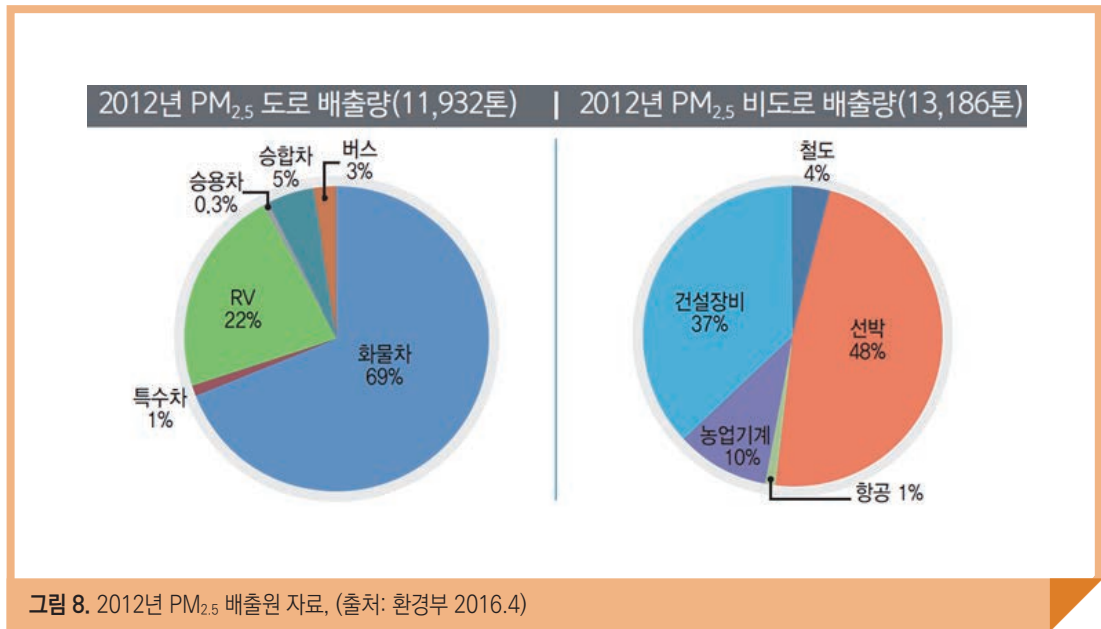


그림 7. 디젤차에 장착된 DOC, DPF, SCR, AOC 등으로 구성된 배기가스 정화 장치. (출처: John Deere사 홍보자료)

자동차에서 배출되는 미세먼지를 줄이는 기술은 엔진의 종류 즉, 가솔린 엔진 또는 디젤 엔진이냐에 따라 배출가스를 줄이는 기술이 확연하게 다르다. 또한 각각의 엔진에서도 ① 연소 전처리 기술로서 연료에 관한 연구 (예 : 수소첨가 메탄연료, 바이오 연료 등), ② 청정 엔진 연구, ③ 연소 후처리 연구로서의 배기정화 연구가 수행되고 있다. 플라즈마 기술은 기술의 특성상 이들 모든 연구 분야와 연관성이 있으나, 본 글에서는 플라즈마 기술과 연관성이 가장 큰 배기정화기술의 동향을 위주로 소개하기로 한다. 가솔린차의 배기관에 장착된 3원 촉매 (3 way catalysts) 장치는 배기가스 내의 NOx, 미연탄화수소 그리고 CO를 동시에 저감할 수 있다. 가솔린차에 3원 촉매장치가 장착되기 시작한 시기는 1970년대 중반이며, 이후 3원 촉매장치는 높은 배기가스 처리 성능과 비교적 저렴한 가격으로 인해 오늘날까지도 기술적으로 큰 변화 없이 활용되고 있다. 이에 반해 디젤차는 ① 배기가스 내의 산소농도가 5~15%로 높고 (산소농도가 높기 때문에 NOx 환원반응이 3원 촉매로 불가능), ② 배기가스 온도는 가솔린 엔진 대비 낮아 여러 종류의 촉매장치와 배기온도를 제어하는 기술이 필요하다. <그림 7>은 최근의 엄격한 디젤차 배기규제를 만족시키기 위해 디젤차 배기관에 장착된 촉매장치들 즉, DOC (Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particulate Filter), SCR, AOC (Ammonia Oxidation Catalyst) 장치를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 디젤차의 배기정화 시스템은 가솔린차와는 비교할 수 없을 정도로 복잡하며, 이에 따라 디젤차 배기정화 시스템의 가격은 가솔린차의 3원 촉매 장치에 비해 최소 10배 이상일 것으로 추정된다.

2000년대 들어 유럽에서는 디젤차의 배기기준을 거의 5년마다 강화시켜왔으며, 규제가 강화될 때마다 자동차 제작사들은 배기정화용 촉매장치를 하나씩 추가해가며 대응해왔다. 그 결과 <그림 7>에서 보듯이 최근에 출시된 디젤차의 배기관에는 화학 플랜트를 연상시킬 정도로 여러 개의 촉매장치가 장착되어 있다. 실제로 디젤차에 장착된 urea를 환원제로 하는 SCR은 당초 화학 플랜트에서 배출되는 NOx를 저감하기 위해 개발된 것으로, 미국을 중심으로 많은 연구자들은 2000년대 중반까지도 대형 화학 플랜트에서 사용되던 urea SCR 기술이 자동차에 장착될 것이라고는 예상하지 못했다. 이처럼 자동차 제작사들이 지난 20년간에 걸쳐 디젤차 배기정화를 위해 노력해왔음에도 불구하고, 최근 디젤차에 대한 사회적 인식은 매우 나쁘다. 폭스바겐이 일으킨 배기정화 장치 조작 사건으로 인해 미국을 중심으로 독일 디젤차에 대한 불신은 깊으며, 일부 유럽 국가에서는 향후 디젤차 생산 및 운행을 전면적으로 금지하는 강경한 조치를 발표하고 있다.

그러면 과연 이러한 강경한 조치들이 얼마나 미세먼지를 감소시키는데 효과적일 수 있는지를 판단하기 위해 보다 상세한 자료를 살펴볼 필요가 있다. 앞서 제시된 <그림 5>에서 보듯이 우리나라 PM_{2.5} 배출원 가운데 가장 큰 배출원은 제조업에서 사용되는 연소설비이고, 그 다음이 도로와 비도로 오염원이다. 그리고 <그림 8>에서 보듯 도로 및 비도로 오염원의 주된 배출원은 선박, 화물차, 건설기계와 같은 중대형 디젤 엔진임을 알 수 있다. 따라서 폭스바겐이 배기가스 정화장치 조작사건을 일으켰던 소형 디젤 승용차를 대상으로 규제를 강화하는 것보다는 중대형 디젤 엔진을 탑재한 선박, 화물차, 건설기계를 대상으로 보다 엄격한 규제를 시행하는 것이 미세먼지를 줄이는데 효과적임을 알 수 있다. 그리고 이와 병행하여 제조업의 연소기기에 대한 관리도 강화하는 것이 미세먼지 저감을 위한 실효성 있는 대책이 될 수 있다. 이상에서 보듯이 미세먼지를 저감하기 위해서는 모든 디젤차에 대한 전면적 금지를 선언하기에 앞서 미세먼지를 배출하는 다양한 배출원에 대해 살펴보고 비용대비 효과적인 미세먼지 저감 대책을 세우는 방안이 필요하다.



디젤차 이슈에서 또 하나 살펴볼 내용은 과연 디젤차는 가까운 장래에 사라질 수 있는가이다. 디젤차에 대한 부정적인 사회적 인식에도 불구하고, 에너지 수급전망자료에 의하면 디젤차는 상당기간 운행될 것으로 전망된다. <그림 9>는 향후 수송기계에서 사용되는 에너지원에 대한 전망 자료로, 그림에서 볼 수 있듯이 디

① 플라스마 기술을 활용한 미세먼지 저감 기술

② 웨어러블 소자를 위한 생체모사 기반 접착개편 기술

젤 연료는 2040년에도 여전히 수송기계의 주요 연료로 남아 있을 뿐만 아니라 현재보다 소비량은 더 증가될 전망이다에 있다. 이처럼 디젤 연료의 소비가 줄어들지 않는 이유는 기본적으로 OECD 국가 이외의 국가 즉, 중국, 인도와 같은 국가를 중심으로 경제성장이 지속되기 때문으로 분석되고 있지만, 또 한편으로는 디젤 엔진의 특성에도 기인하고 있다. 즉, 트럭, 선박, 건설기계에 장착되어 있는 높은 출력의 디젤 엔진을 대체할 만한 동력장치가 아직까지 마땅하지 않은 것이 현실이다. 디젤차나 선박을 대체할 전기차 또는 LNG 선박 엔진이 최근 많이 거론 되고 있으나, 이들 기술의 보급에는 상당한 시간이 소요될 것으로 보인다. 한편, 일부 전문가들은 조만간 자동차의 이슈는 미세먼지에서 온실가스인 CO₂로 옮겨갈 것으로 예상하고 있으며, 이 경우 가솔린차가 디젤차보다 먼저 사라질 수 있다는 전망도 하고 있다. 따라서 미래에 디젤차가 어떻게 될 것인가에 대한 전망은 쉽게 내릴 수 있는 사안이 아니다.

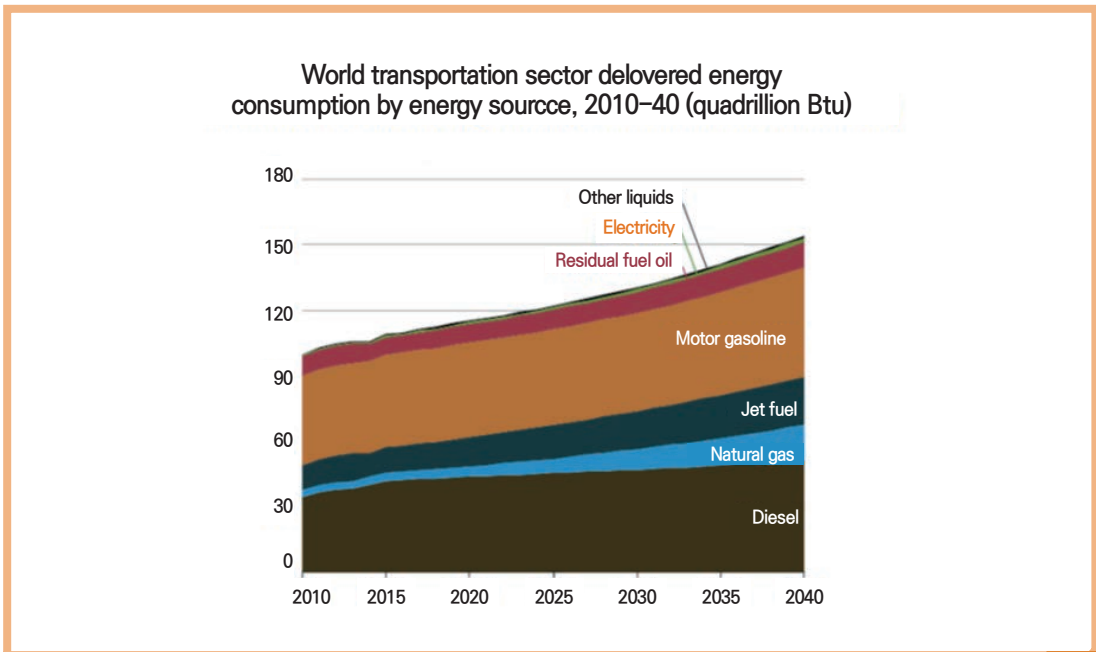


그림 9. 전 세계 수송 분야 연료별 사용전망. (출처: Int'l Energy Outlook 2016, US Energy Information Administration)

이상과 같이 본 장에서는 미세먼지의 발생원인 및 미세먼지 처리기술의 종류를 소개하였다. 이처럼 플라즈마를 활용한 미세먼지 저감기술을 소개하기에 앞서 기존의 미세먼지 저감기술을 소개한 이유는 플라즈마 기술은 어느 한 종류의 저감기술이 아니라 거의 모든 미세먼지 저감기술과 연계된 기술이기 때문에 전반적

인 대기오염 방지기술들에 대한 소개가 필요하였다. 실제로 1990년대부터 본격적인 연구개발이 시작된 “유해가스 처리를 위한 플라즈마 기술”은 전기집진기, 탈황설비, 저 NO_x 버너, SCR 등 여러 종류의 대기오염 저감기술에 적용되어 기존 기술을 개선하거나 아니면 전면적으로 대체하는 기술로서 연구되어왔다. 이후의 장에서는 기계연구원에서 개발된 “플라즈마를 활용한 유해가스 처리기술”을 중심으로 미세먼지 및 지구온난화가스를 저감하는 플라즈마 기술을 소개하기로 한다.

2.2 플라즈마를 활용한 유해가스 처리기술

2.2.1 저온 플라즈마를 활용한 SO_x 및 NO_x 동시 처리기술

1990년대 초 이태리 마게라 석탄 발전소에 세워진 탈황탈질 파일럿 설비는 전 세계적으로 큰 관심을 받았다. 본 파일럿 설비는 전기 집진기를 개조한 것으로, 전기 집진기 일부 전극에 집진기에서 사용하는 DC 고전압 전원 대신 1,000 nsec 미만의 짧은 펄스폭을 갖는 DC 고전압 양극 펄스 전원을 연결하여 운전되었다. <그림 11>에서 보듯 전극에 DC 고전압을 인가할 경우와는 다르게 펄스 고전압을 인가할 경우 전극 공간을 가득 채우는 스트리머 코로나가 발생하게 된다. 스트리머 코로나는 일종의 저온 플라즈마(non-thermal plasma)로, 온도가 낮은 배기가스 조건에서도 빠른 화학반응을 일으키는 특성을 갖고 있다. 실제로 스트리머 코로나를 활용할 경우 100 ℃ 이하의 낮은 온도조건에서도 배기가스 내의 NO 및 SO₂를 산화시킬 수 있으며, 반응속도가 빠르기 때문에 산화반응에 필요한 반응기 체적은 집진기의 1/5에 불과할 정도로 작았다. 이와 같은 1차 반응공정을 통해 발생된 NO₂, HNO₃, SO₃ 등은 2차 반응공정에서 암모니아 수용액과 반응시켜 암모늄염으로 전환 및 포집할 수 있었다. 본 기술의 가장 큰 장점은 이미 발전소에 설치되어 있는 전기 집진기의 일부를 개조하는 것만으로 SO₂ 및 NO_x를 동시에 처리할 수 있다는 데 있다. 즉, 본 기술이 발전소에 적용될 경우 추가로 습식 탈황설비나 SCR 설비를 설치할 필요가 없게 되며, 이로 인한 설치 공간 및 설비비용 절감은 상당한 것으로 평가되었다.

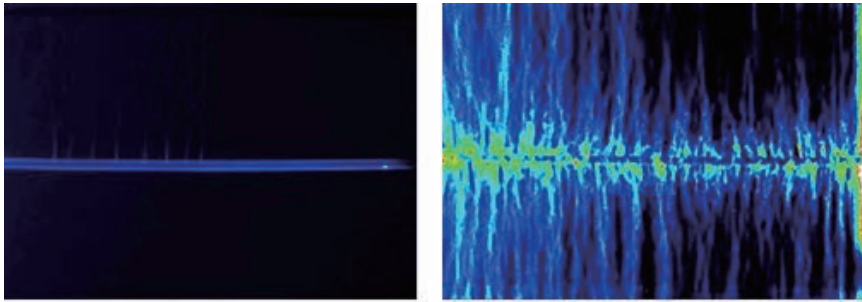


그림 11. DC 고전압 인가 시 발생된 글로우 방전 (좌측) 및 DC 고전압 펄스 인가 시 발생된 펄스 코로나 (우측), 사진: Intensified CCD를 통해 기계연구원에서 촬영

펄스 코로나를 활용한 탈황탈질 기술은 1990년대 당시 습식 탈황설비와 SCR 설비 기술을 보유하지 못했던 한국, 대만 및 중국을 중심으로 기술개발이 활발하게 시작되었다. 그러나 기술개발이 시작된 지 얼마 지나지 않아 미국, 유럽 및 일본에서 개발된 습식 탈황설비 및 SCR 설비가 한국, 대만 및 중국에 당초 예상보다 저렴한 가격으로 빠르게 보급되었다. 이는 펄스 코로나를 활용한 탈황탈질 기술을 개발하려는 동기 (motivation)를 크게 약화시키는 원인이 되었다. 한편, 기계연구원에서도 1996년도에 세계적 규모의 파일럿 플랜트를 건설하여 초기 시운전까지 성공하였으나<그림 12참조>, 상업적 운전에 필요한 장기운전은 수행하지 못한 채 1999년도에 기술개발 프로그램이 중단되었다. 당시 기계연구원의 파일럿 테스트에 의하면 펄스 코로나를 활용한 탈황탈질 기술개발에서 기술적으로 해결해야 할 가장 중요한 문제는 높은 운전비용이었다. 본 기술은 NO 농도에 비례해서 운전전력이 증가하는데, 300 ppm의 NOx가 배출되는 발전소에서는 발전량의 2~3% 내외에 이르는 운전전력이 소요되는 것으로 추정되었다. 이에 따라 본 기술은 NOx 배출농도가 낮은 경우는 쉽게 적용이 가능하나, 그렇지 않은 경우 운전비용을 줄이기 위한 별도의 반응공정이 필요한 것으로 평가되었다.⁶⁾

펄스 코로나를 활용한 탈황탈질 기술개발이 각 나라에서 중단된 지 15년이 지난 요즘 본 기술을 다시 개발하려는 국가가 늘고 있다. 그 이유는 발전소의 설비조건의 변화 및 환경규제의 강화로 설명될 수 있다. 예를 들어 우리나라의 경우 석탄 발전소에는 이미 습식 탈황 및 SCR 설비가 가동되고 있으며, 이에 따라 현재는 어느 나라 못지않게 낮은 농도의 NOx와 SOx를 배출하고 있다. 그럼에도 불구하고 수도권 근처에 소재

하고 있는 석탄발전소를 중심으로 현재보다 더욱 강한 배출규제가 향후 시행될 예정이며, 이 경우 현재 발전소에서 배출되고 있는 수십 ppm 수준의 NO_x 및 SO_x를 추가로 10 ppm 이하로 낮추는 기술이 필요하다. 따라서 고농도의 NO_x 저감에는 불리하지만 저농도의 NO_x 저감에는 장점이 있는 것으로 밝혀진 저온 플라즈마를 이용한 탈황탈질 기술의 발전소 적용이 심각하게 고려되고 있다. 실제로 중국에서는 조만간 발전소에 본 기술을 적용할 예정에 있으며, 기계연구원에서도 본 기술을 다시 개발할 예정에 있다. 본 사례에서 알 수 있듯이 하나의 기술개발 결과는 현재의 기준만이 아니라 미래의 기준에서도 함께 평가될 필요가 있다.



그림 12. 펄스 코로나를 활용한 탈황탈질 파일럿 플랜트, (출처: 기계연구원 제공)

2.2.2 유전체 장벽방전 플라즈마를 활용한 자동차 NO_x 저감기술

DBD(Dielectric Barrier Discharge, 유전체 장벽방전)는 펄스 코로나와 함께 대기압 조건에서 발생될 수 있는 대표적인 저온 플라즈마이다. DBD는 유전체에 충전된 전기 에너지가 공기 중에 방전되면서 발생되며, 공기 중에 방전된 기체는 유전체의 장벽으로 인해 전류밀도가 높은 아크(arc) 방전으로 전환되지 않고 미세 방전(micro discharge)의 형태를 가지면서 유전체 표면에 비교적 고르게 발생하게 된다. <그림 13>은 ICCD camera로 유전체 장벽에서 발생된 미세 방전을 찍은 사진으로, 전극 간의 간격이 커질수록 방전

의 크기는 커지다 나중에는 아크방전으로 전환된다. DBD는 펄스 코로나에 비해 전자들의 평균적인 에너지는 다소 작으나, 그럼에도 불구하고 오랜 기간 오존 발생장치에 효과적으로 활용되어온 플라즈마 발생기술인 만큼 산화반응을 일으키기에 크게 불리한 플라즈마 발생기술은 아니다.⁷⁾ 또한 DBD를 발생하기 위해 사용되는 전원장치인 고전압 교류 전원장치는 펄스 코로나 전원장치에 비해 기술적 난이도가 높지 않아 상용화에 유리하다. 이에 따라 국내외 많은 연구실에서는 자동차 배기정화기술 및 중소 규모의 VOCs 처리기술에 이용되는 저온 플라즈마 발생기술로서 DBD를 채택하고 있다.⁸⁾

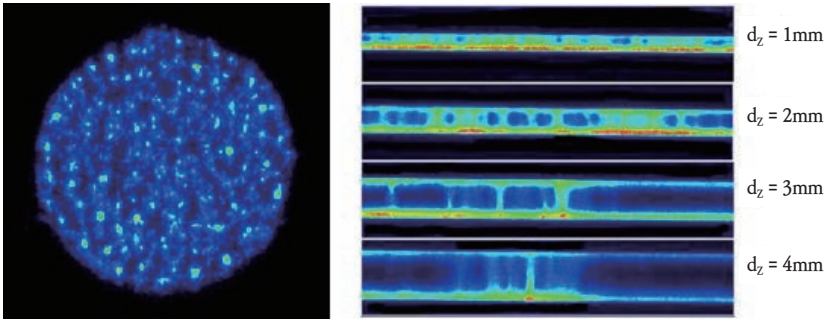


그림 13. 유전체 장벽방전으로 발생된 미세방전, (좌측) 투명 유전체인 ITO를 사용하여 미세방전의 종축을 촬영, (우측) 평판 알루미늄 판에서 발생된 미세방전의 횡축을 촬영. (출처: Intensified CCD를 통해 기계연구원에서 촬영)

1990년대 중반부터 2000년대 중반까지 거의 10년간 미국, 독일, 프랑스, 일본, 한국의 자동차 회사를 비롯하여 수많은 정부 연구소 및 대학에서 저온 플라즈마를 활용한 디젤 자동차 배기정화 연구가 활발히 수행되었다. 이처럼 본 기술의 연구가 전 세계적으로 동시에 수행된 이유는 당시 디젤차에서 NO_x를 저감할 수 있는 적절한 배기정화 기술이 나타나지 않았기 때문이었다. 디젤 배기 NO_x 저감기술은 ① LNT(Lean NO_x Trap), ② 탄화수소(HC, Hydrocarbon)를 환원제로 하는 HC SCR, ③ urea를 환원제로 하는 urea SCR, ④ 저온 플라즈마를 활용한 SCR 기술을 들 수 있으나, 이들 기술들 모두 장점과 동시에 단점을 갖고 있었다. 즉, HC SCR 기술은 디젤연료를 환원제로 사용하기 때문에 장치가 간단하다는 장점이 있으나, NO_x 처리율이 낮다는 문제점을 갖고 있다. 이와는 반대로 urea SCR은 광범위한 배기가스 온도조건에서 높은 탈질율을 나타내고 있지만, ① 자동차에 urea라는 환원제를 저장 및 공급하는 장치를 탑재해야하고, ② urea를 자동차에 공급하는 충전 인프라를 새로 구축해야하는 문제가 있다. LNT의 경우도 ① 배기온도가 높은 경우 탈질율

이 낮으며 (350 ℃ 이상), ② 다량의 연료를 환원제로 사용하기에 연비손실이 높고, ③ 연료희박 및 과농 조건으로 엔진을 제어하는 과정이 복잡하다는 등의 문제가 있다. 한편, 저온 플라즈마를 활용한 SCR 기술은 앞서 언급된 3종류의 기술에 비해 뒤늦게 연구가 시작된 기술로, 본 기술은 HC SCR 및 urea SCR의 기술의 단점을 보완하기 위한 목적으로 연구가 시작되었다.



그림 14. 선박엔진 배기관에 장착된 평판형 DBD 반응기 및 SCR 촉매, (출처: 한국기계연구원)

기계연구원에서는 2000년도부터 자동차 및 선박의 배기가스 처리공정에 활용하기 위한 목적으로 DBD 반응기 및 전원장치를 연구하기 시작하였다. 본 연구의 주된 목적은 수송용 기계의 배기가스를 처리하는데 있어 ① 압력손실이 적고, ② 열 충격, 진동 및 미세방전 등에 강한 내구성을 갖는 DBD 반응기를 개발하고, 또한 ③ 당시 소형화되지 않아 수송용 기계에 장착할 수 없었던 고전압 교류 전원장치를 소형화하는데 있었다. 본 기술개발은 <그림 14>와 같이 300 마력의 선박엔진에서 수행되었으며, 실험에서 사용된 urea SCR 촉매는 당시 국내에서 처음 개발된 S사의 촉매였다. <그림 14>는 수송기계에 장착되는 DBD 반응기의 여러 특성을 매우 잘 나타내고 있다. 우선 SCR 촉매 반응기에 비해 DBD 반응기는 크기가 놀라울 정도로 작다. 보다 구체적으로는 SCR 촉매 반응기의 공간속도는 5,000~10,000 hr⁻¹ 이었으나, DBD 반응기의 공간속도

는 1,000,000 hr⁻¹ 이상이였다. 현재 가솔린 자동차 3원 촉매의 공간속도가 100,000 hr⁻¹ 내외인 것을 감안 해보면 DBD 반응기의 크기는 수송기계에 장착하는데 어려움이 없을 정도로 작아질 수 있음을 본 실험을 통해 실증할 수 있었다. 또한 <그림 14>의 좌측 그림에서 볼 수 있듯이 선박엔진에서 배출되는 매연은 반응기 입구에는 부착되고 있으나, 반응기 출구에서는 매연이 사라진 것으로 나타났다. 이는 DBD 반응기에서 매 연이 산화되는 것을 입증하는 것으로 매우 흥미로운 결과였다. 즉, 당시는 전기가 통하는 특성을 가진 매연 이 DBD 반응기 작동에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 자료가 세계적으로도 거의 없었던 시기였는데, 기계연 구원의 실험은 배기가스 내의 매연이 DBD 반응기 작동에 영향을 주지 않음을 명확하게 규명하였다. 본 실험 결과에 의하면 일반적인 urea SCR 기술을 활용할 경우 200 °C 이하의 온도 조건에서는 탈질능력이 급격 히 떨어지나, 저온 플라즈마기술이 적용된 urea SCR 공정에서는 150 °C 조건에서도 75% 이상의 탈질율을 얻을 수 있었다. 또한 엔진 실험결과에 의하면 매연입자의 50%가 DBD 반응기에서 산화되는 것이 발견되어 본 기술의 잠재력이 높음을 알 수 있었다. 한편, 저온 조건에서의 높은 탈질율과 매연의 동시처리 가능성은 긍정적이었으나, 엔진출력의 5% 내외 정도로 높은 소요 전력은 본 기술의 약점으로 평가되었다. 이에 따라 본 기술은 상시운전이 아니라 냉간 시동 또는 저부하 운전과 같이 배기온도가 낮은 조건에서 제한적으로 적용해야만 하는 기술로 평가되었다.

이상과 같이 기계연구원에서 2000년도부터 수년간에 걸쳐 DBD 반응기를 선박엔진에 장착하여 관련 기술 을 개발하였는데, 당시 엔진에 장착할 정도의 내구성을 갖춘 DBD 반응기 기술을 보유한 기관은 미국의 델파 이(Delphi), 독일의 지멘스 등 전 세계적으로도 몇 개 이내에 불과했다. 기계연구원에서 개발한 DBD 반응기 는 국내 완성차 업체인 H사, 프랑스의 완성차 업체인 P사, 프랑스의 오를레앙 대학, Supelec 등에서 엔진 배 기관에 장착하여 활용한 사례가 있다. 특히, <그림 15>에서 보듯 국내 완성차 업체인 H사에서는 DBD 반응기 의 내구성을 검증하기 위해 50,000 km 도로주행시험을 수행하였으며, 본 반응기는 이러한 가혹한 내구시험 을 통과할 정도로 내구성을 갖추고 있었다. 한편, 2000년대 중반부터 여러 연구자들의 예상을 깨고 성능 및 가격 경쟁력을 갖춘 urea SCR이 자동차에 장착될 수 있다는 자료를 유럽의 자동차 회사들이 발표하기 시작 했으며, 이를 계기로 기계연구원을 포함한 여러 연구기관에서 진행되던 DBD를 이용한 NO_x 저감 기술개발 프로그램은 중단되었다. 현재 기계연구원에서는 DBD 반응기를 활용한 VOCs 저감, 의료 또는 재료 분야 연 구는 계속되고 있으나, 다음 절에 소개될 회전 아크 플라즈마를 이용한 자동차 배기정화 기술의 성능 및 가격 경쟁력이 높기 때문에 DBD 기술을 자동차에 적용하는 연구는 더 이상 수행하지 않고 있다.



그림 15. 50,000 km 도로주행에 사용된 DBD 반응기 및 전원장치, (사진: 기계연구원 제공)

2.2.3 회전 아크 플라즈마를 활용한 유해가스처리 기술

2.2.3.1 회전 글라이딩 아크 플라즈마

대기압 조건에서 아크 방전으로 발생된 플라즈마는 지금까지 소개된 펄스 코로나 및 DBD로 발생된 플라즈마와는 다르게 이온과 기체분자의 온도가 수 천 K에 이를 정도로 높은 반면 전자 온도는 1 eV 내외로 높지 않은 특성을 갖고 있다. 현재 산업에서 아크 플라즈마의 주된 용도는 재료의 용융, 절단, 코팅과 같이 열을 활용하는 데 있다. 한편, 아크 플라즈마를 상용 플랜트 규모의 화학공정에 활용한 사례를 살펴보면, ① 대기 중의 질소를 고정화시켜 암모니아를 제조하는 공정(20세기 초반까지 가동), ② 메탄을 고온에서 열분해한 다음 급속히 냉각시켜 아세틸렌을 제조하는 공정(20세기 중반까지 가동), ③ 메탄을 열분해하여 카본과 수소를 얻는 공정을 들 수 있는데 (현재도 가동 중이나 일부 지역에만 국한), 이들 공정의 대부분은 지난 20세기를 거쳐 오면서 촉매공정에 경쟁력을 잃고 가동이 중단되었거나 전기를 저렴하게 사용할 수 있는 특수한 지역에서만 가동되고 있다. 이에 따라 연구자들에게 있어 아크 플라즈마를 이용한 화학반응공정은 상당 기간 큰 주목을 받지 못했다. 그러나 1990년대 이후 연료전지 자동차에 수소를 공급하기 위해 초소형 연료



개질기를 탑재하려는 연구가 전 세계적으로 활발히 수행되었고, 여기서 일부 연구자들이 아크 플라즈마를 사용하면서 고온 플라즈마 발생기술을 활용한 화학반응 공정이 다시 관심을 받게 되었다. 한편, 고온 플라즈마 발생기술로서 아크 플라즈마와는 다른 특성을 갖는 글라이딩 아크 플라즈마 기술이 과거 구소련 국가들을 중심으로 연구되었는데, 본 플라즈마 발생기술은 연료개질을 비롯한 일부 화학반응에 장점이 있는 것으로 나타났다.

글라이딩 아크 플라즈마 반응기는 <그림 16>에서 볼 수 있듯이 상부로 갈수록 전극 간의 간격이 넓어지는 전극을 갖는 구조를 갖고 있다. 반응기에 고전압 전력을 공급하게 되면 전극 간의 거리가 가장 짧은 하부에서 방전이 시작되며, 발생된 아크는 하부에서 공급된 가스의 유동 및 고온 아크의 부력에 의해 상부로 미끄러지면서 올라가게 된다. 여기서 아크가 상부로 이동되면서 그림에서 보듯 아크의 길이 및 굵기가 증가하게 된다. 처음 아크가 발생되었을 때 길이가 짧은 아크는 일반적으로 알려진 아크 플라즈마와 특성이 유사하나, 반응기 상부에서 볼 수 있는 길이가 긴 아크 플라즈마는 부피가 팽창한 만큼 이온과 기체의 온도는 크게 낮아진다. 일부 연구자는 이처럼 팽창된 아크 플라즈마에 대해 저온 플라즈마의 특성이 나타나는 것으로 주장하고 있으나, 글라이딩 아크 플라즈마의 전자와 이온의 온도 차는 앞서 소개된 저온 플라즈마만큼 크지는 않다. 따라서 글라이딩 아크 플라즈마는 아크 플라즈마와 저온 플라즈마의 중간적인 특성을 갖는 것으로 보고 있다. 한편, 실용적인 측면에서 볼 때 2차원 형상을 한 글라이딩 아크 플라즈마 반응기를 화학 반응기로서 활용하기에는 여러 가지 제약사항이 있으므로, 이를 3차원 반응기로 개선시킨 것이 회전 아크(rotating arc) 플라즈마 반응기이다. <그림 17>은 2000년대 초 기계연구원에서 개발된 회전 아크를 보여주고 있는데, 회전 아크는 글라이딩 아크를 회전시킨 것이므로 보다 정확히는 글라이딩 회전 아크라고 불러야 할 것이다. 회전 아크는 반응기 내부에서 선회유동(swirl flow)을 일으켜 아크를 회전시키고 있으며, 유동에 의한 아크의 회전 속도는 초당 수백회에 이르고 있다.

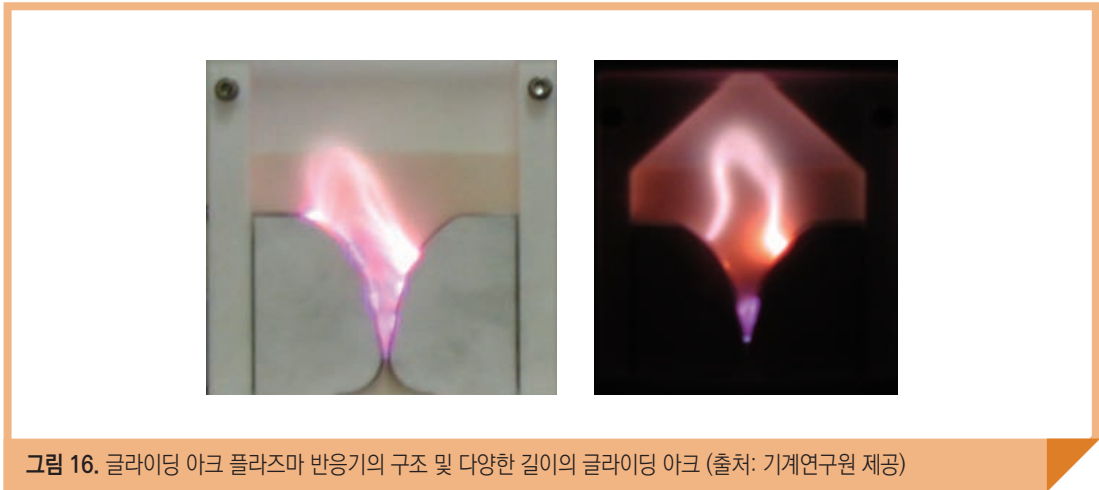


그림 16. 글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 구조 및 다양한 길이의 글라이딩 아크 (출처: 기계연구원 제공)



그림 17. 회전 아크 반응기 및 회전 아크, 우측: 1/800 sec shutter speed (사진: 기계연구원 제공)

아크 플라즈마가 갖고 있는 대부분의 열에너지는 금속 전극으로 빠져나가는 것으로 알려져 있다. 즉, 아크를 일종의 원통 구조물로 생각해보면 아크 표면은 매우 높은 온도를 갖고 있지만 주변의 기체에 열을 전달하기에는 표면적이 지나치게 작기 때문에 대부분의 열에너지는 원통의 종축 끝에 있는 전극을 통해 빠져나갈 수밖에 없다. 이에 따라 길이가 짧은 일반적인 아크 플라즈마는 아크 주변의 기체를 가열하여 화학반응을 가속시키는데 활용되기보다는 아크의 종축에 놓인 재료를 용융시키거나 절단하는 용도로 활용되고 있다. 따라서 아크 주변에 있는 기체에 열에너지를 많이 전달하여 화학반응을 가속시키기 위해서는 아크 표면적을 증

가시킬 수밖에 없다. 기계연구원에서는 글라이딩 아크와는 다른 방법으로 아크 표면적을 증가시키고 여기서의 화학반응을 살펴보는 기초적인 실험을 수행한 바 있는데, 실험사진은 <그림 18>에 제시되었다. 본 실험에서는 아크의 점화(ignition)를 전극 간의 거리가 짧은 조건에서 일으킨 다음, 모터를 이용해서 전극 간의 거리를 증가시켜가면서 아크를 관찰하였다. 그림에서 보듯 아크의 길이를 증가시키면 아크의 직경도 상당히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 아크의 길이가 길어질수록 화학반응도 보다 효과적으로 진행되었다.

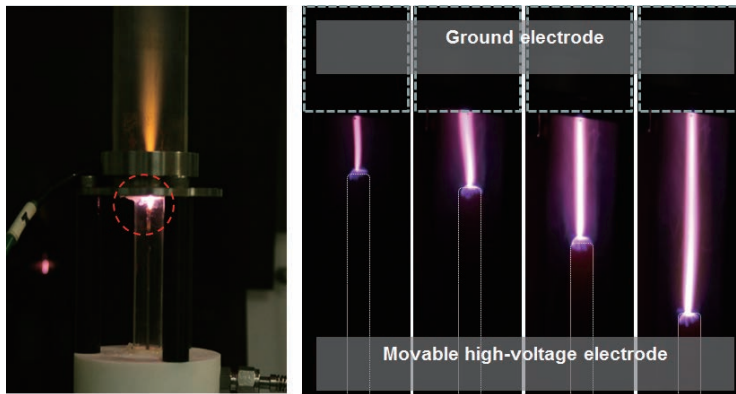


그림 18. 전극 간의 거리를 증가시켜 아크의 길이를 증가시키는 실험 (사진: 기계연구원 제공)

고온 플라즈마가 갖고 있는 에너지를 반응시키려는 기체에 효과적으로 전달할 수 있는 회전 아크 플라즈마 반응기가 개발되면서 지금까지 실용화에 어려움이 있었던 일부 화학반응 공정이 보다 쉽게 실용화될 수 있는 길이 열리게 되었다. <표 1>에는 기계연구원에서 회전 아크를 활용하고 있는 반응공정을 제시했으며, 기존 공정과 대비되는 장점도 함께 제시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 회전 아크 플라즈마를 효과적으로 활용할 수 있는 대표적인 기술로 반응기 크기가 초소형이어야만 하는 차량 탑재용(on-board) 연료 개질기 기술을 들 수 있다. 연료 개질을 대규모 화학 플랜트에서 수행할 경우는 촉매공정에 장점이 있으나, 개질하려는 연료의 유량이 적어 에너지 효율을 크게 따지지 않는 차량에서 수행할 경우는 고온 플라즈마 공정의 장점이 상당히 있다. 예를 들어 자동차를 포함한 수송기계에 적용할 차량 탑재용 연료 개질기는 부피가 작고 짧은 작동개시(start-up) 시간을 필요로 하는데, 기존의 촉매 반응기 기술로는 이러한 요구조건을 충족시키기가 어렵다. 이밖에도 표에서 제시되었듯이 플라즈마를 활용한 화학반응공정의 주된 장점은 설비가 소형화될 수

있고, 반응시간이 짧다는 데 있다. 이후의 절에서는 이러한 장점을 살린 회전 아크 플라즈마 기술의 개발 및 상용화 동향을 살펴보기로 한다.

표 1. 회전 아크 플라즈마가 활용되는 화학반응공정

반응공정 이름	기존 기술의 문제점	회전 아크 플라즈마의 장점
탄화수소 부분산화, 수증기 개질, CO ₂ 건식개질 공정	<ul style="list-style-type: none"> • 촉매공정의 경우 탄소가 촉매 표면에 부착 (coking 문제) • 차량 탑재용으로 활용이 어려움 (느린 부하 추종성) 	<ul style="list-style-type: none"> • coking 문제가 없음 • on-board application에 적합
PFCs (과불화탄소) 처리공정	<ul style="list-style-type: none"> • 고온의 열에너지 필요 • NOx 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 소형 반응기에서 고효율 처리 가능
C1 → C2 전환공정	<ul style="list-style-type: none"> • 설비의 소형화가 어려움 • syngas 발생 공정 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 설비의 소형화 유리 • 직접 전환공정
연소반응	<ul style="list-style-type: none"> • 가연한계가 좁음 	<ul style="list-style-type: none"> • 적은 에너지 투입으로 넓은 가연한계를 확보

2.2.4 회전 아크를 이용한 디젤차 배기정화 기술

디젤차로부터 배출되는 PM 및 NO_x 저감을 위해 <그림 19>와 같이 디젤 촉매장치인 DOC, DPF 및 SCR 장치를 장착하는 차량이 확대되고 있다. 디젤차에 이들 촉매장치를 장착하는데 있어 가장 큰 문제는 냉간시동(cold start), 저속 운행, 그리고 아이들링 조건일 때는 배기가스 온도가 촉매의 활성화 온도에 미치지 못해 촉매가 작동되지 못한다는 문제이다. 이를 해결하기 위해 현재는 배기가스 온도가 낮을 경우 엔진에 추가로 연료를 공급하여 배기가스 온도를 올려주는 기술 즉, 소위 포스트 인젝션(post injection) 기술을 사용하고 있으나, 최근 들어 장착되기 시작한 SCR의 작동을 위해서는 과거와는 비교할 수 없을 정도로 빈번하게 배기온도를 올려줄 필요가 발생하기 때문에 연비손실 문제가 심각하게 제기되고 있다. 특히 향후에는 본격적으로 CO₂ 규제가 강화될 것으로 예고되어 있어 열손실이 큰 포스트 인젝션 기술은 더욱 입지가 좁아질 수밖에 없다. 이에 따라 보다 적극적인 배기정화장치의 열관리 대책으로서 <그림 19>에서 제시된 바와 같이 디젤 촉매장치 전단에 열을 발생할 수 있는 장치 즉, 디젤버너, 전기히터 또는 마이크로웨이브 가열장치 등을 장착하는 방안이 제시되고 있다.

① 플라즈마 기술을 활용한 미세먼저 저감 기술

② 웨어러블 소자를 위한 생체 모사 기반 접착개편 기술

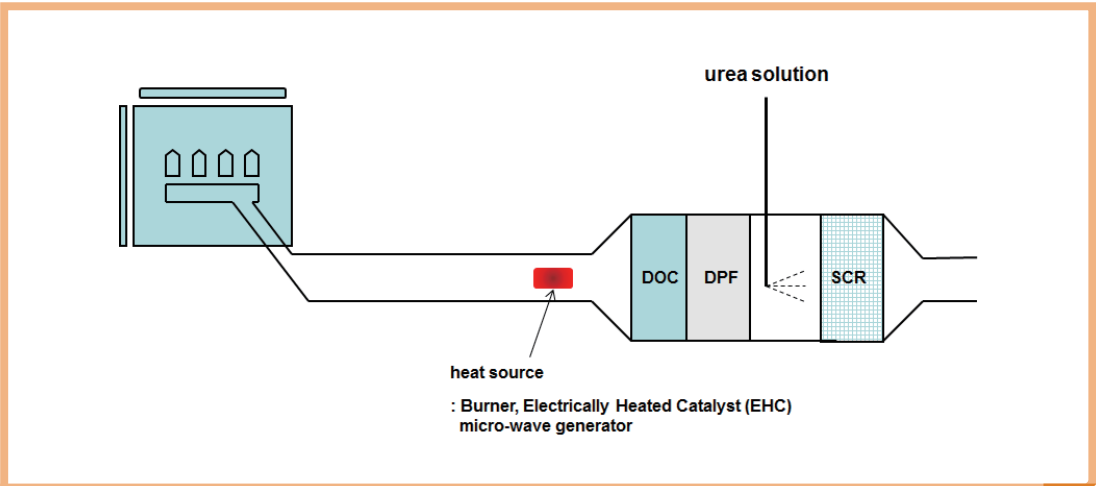
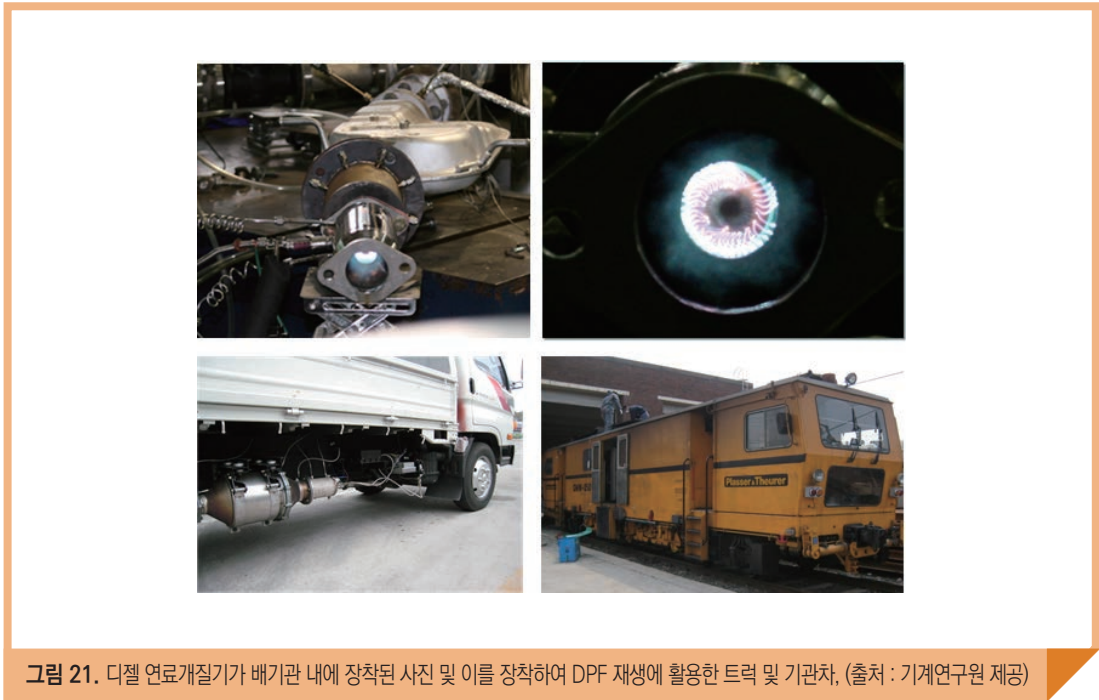


그림 19. 디젤 배기정화 장치 및 열관리를 위한 열원장치 개념도

디젤 배기정화장치의 열관리를 위한 열원으로서 가장 많이 검토되어온 기술은 전기히터가 장착된 촉매를 장착하는 기술이다. 그러나 미국의 GM사에서 MDD (Medium Duty Diesel) 차량에 본 기술을 적용한 결과에 의하면 본 기술은 4~6 kW 이상의 전기 에너지를 소모하는 것으로 평가되었다. 현재 1 kW 수준에 불과한 차량용 배터리의 용량을 고려해볼 때, 본 기술을 당장 적용하기에는 어려움이 따를 것으로 보인다. 또한 마이크로웨이브 발생장치로 촉매를 가열하는 방식은 직접 촉매를 가열하므로 촉매가 빠르게 촉매 활성화 온도에 도달하는 장점이 있지만, 본 기술 역시 전기 에너지를 얻는 방법에 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 열원으로서 전기 에너지를 사용하는 기술개발이 검토되는 이유는 전기 에너지에 대해 제약이 적은 디젤 하이브리드 자동차가 CO₂ 규제를 만족시키기 위해 멀지 않아 보편화될 가능성이 있기 때문이다. 한편, 디젤 버너는 미세먼지의 주된 배출원으로 지목되고 있는 중대형 트럭, 건설기계, 선박 등에 우선적으로 적용이 검토되고 있으며, 최근 미국의 ArvinMeritor, Cummings, Tenneco, 일본의 Hino 트럭, Mitsubishi 중공업 등이 디젤버너의 개발을 발표하고 있다. 기계연구원에서 개발되어 트럭, 기관차 선박 등에 적용된 “플라즈마 버너”는 디젤연료를 사용하기 때문에 흔히 연소기의 일종으로 알려져 있으나, 실제 본 기술의 학술적인 분류는 연소기술과는 다른 연료 개질기술로 분류된다. 플라즈마 기술을 적용한 연료 개질기는 현재 디젤 버너가 갖고 있는 여러 문제점들을 근본적으로 해결할 수 있다.

수송용 디젤 엔진의 배기관에 디젤 버너를 장착할 때 발생하는 가장 큰 문제는 ① 배기관 내에 산소농도가 15%로 높지 않고, ② 배기관의 산소농도 및 유속이 수시로 변하기 때문에 안정적인 화염을 얻기가 어렵다는 데 있다. 예를 들어 급가속 조건이 되어 배기 유량이 갑자기 커지면 버너의 화염이 꺼지게 되고 (일부 부하조건에서 배기가스 유속은 태풍의 기준 속도보다 빠른 30~40 m/s 에 달하고 있음), 이때 후단부에 있는 촉매에 연료가 액상으로 날아가게 되면 반응이 일어나지 못하고 배기관 밖으로 많은 양의 백연(white smoke)이 나가게 된다. 이러한 치명적인 사고를 방지하기 위해 앞서 소개된 해외 업체에서는 별도의 공기 펌프를 사용하여 상당히 많은 양의 공기를 버너에 공급함은 물론 공기와 연료의 비를 수시로 연소 당량비(stoichiometric combustion ratio)에 맞추기 위해 정교하게 제어하고 있다. 한편, 기계연구원에서는 일반적인 디젤 버너 대신 플라즈마 연료 개질기를 디젤 배기관에 적용하고 있는데, 본 기술의 가장 큰 장점은 외부로부터의 공기 공급이 적은 조건에서도 안정적인 화염을 유지할 수 있다는 점이다. <그림 20>에서는 회전 아크 플라즈마 반응기에 연료 및 공기를 공급하고, 여기서 공기와 연료비를 조절하면서 연료과농(fuel rich), 연료희박(fuel lean) 및 연소 당량비 조건에서의 화염을 살펴보는 기계연구원의 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯 플라즈마가 없는 경우 공기와 연료의 비율을 연소 당량비 조건에 가깝게 하지 않으면 화염이 유지될 수 없으나, 플라즈마가 있는 경우 연료희박 조건은 물론 연료과농 조건에서도 화염이 유지될 수 있다. 추가적인 실험에 의하면 플라즈마 반응기에서는 연소 당량비 조건에서의 공기량 대비 1/4에 불과할 정도로 적은 공기량 즉, 부분산화 조건에서도 화염이 유지될 수 있었다. 부분산화를 통해 생성되는 H₂ 및 CO는 ① 디젤 배기가스 내에 있는 산소와 2차적으로 반응하거나¹⁰⁾, ② 후단에 장착된 DOC에 이르러 산화반응(oxidation reaction)을 일으키고, ①과 ②의 과정을 통해 발생된 산화 반응열은 DPF와 SCR로 전달된다. 이와같이 연료 개질을 통해 촉매장치의 온도를 올려주는 방식은 기존의 디젤 버너와 비교해 보면 ① 외부로부터 공급되는 공기량을 줄일 수 있고, ② 이에 따라 가열시켜야 하는 배기가스 유량이 줄어들어 연료비의 절감 및 가스온도의 빠른 상승이 기대되며, ③ 배기정화 시스템에서의 열손실이 줄어드는 장점이 있다. 이상과 같은 기술적인 장점은 본 기술들이 기업에게 이전되는 과정을 거치면서 기업들에 의해 보다 철저하게 검증되었는데, 선박의 경우 해외에서 개발된 디젤 버너 대신 플라즈마 버너를 사용할 경우 ① 공기 공급량을 1/4 수준으로 줄이고, ② 연료 사용량을 20% 가량 줄일 수 있었다. 또한 설비가 소형화되고 제어가 단순해지면서 설치비용의 대폭적인 감소가 가능했다.



최근 회전 아크 플라즈마를 활용한 연료 개질기는 디젤차 적용에만 국한되지 않고 urea SCR을 사용하는 선박 또는 발전소와 같은 대형 설비에도 해당 기술이 적용되기 시작하였다. 국제해사기구(IMO, Int'l Maritime Organization)에서는 2016년도부터 신규로 건조되는 일정규모 이상의 모든 선박에 urea SCR 설비를 장착하도록 규정하고 있다. 선박의 경우 SCR은 HP(High Pressure) SCR과 LP(Low Pressure) SCR

로 구분되는데 엔진과 터보차저(turbo charger) 중간에 설치되는 HP SCR은 운전온도가 높아 SCR의 운전을 위한 열관리(thermal management) 기술이 필요하지 않으나, 터보차저 이후에 장착되는 SCR에는 <그림 23>과 같이 urea의 증발과 SCR 촉매의 재생을 위해 디젤 버너가 필요하다. 기계연구원에서 개발된 자동차 배기정화를 위한 플라즈마 연료개질기는 선박 엔진과 같은 대형 엔진에도 적용이 가능한 것으로 수차례의 실증연구를 통해 입증되면서, 우리나라 선박 엔진 제조사에게 활용될 수 있게 되었다. 현재 선박용 플라즈마 연료 개질기는 세계 최대의 조선사인 H 중공업에 조선기자재를 공급하는 T사 그리고 선박엔진 전문업체인 S 엔진에 기술이 이전되어 1~2년 이후 건조될 선박에 장착될 예정이다. 한편, 선박과 같은 대형 설비에 플라즈마 연료 개질기가 작동될 수 있음이 실증되면서, 2016년도부터는 발전소의 urea SCR 설비에도 해당 기술이 활용될 수 있도록 연구가 진행되고 있다.

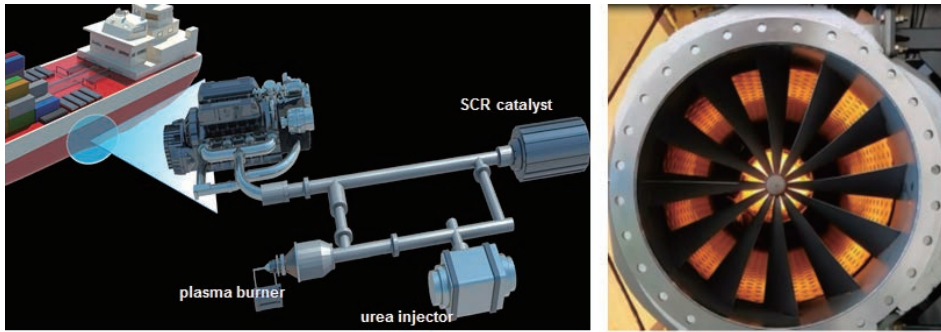


그림 23. 선박에 장착되는 urea SCR 및 플라즈마 버너(버너 직경: 1.2m) (출처: 기계연구원 제공)

2.2.4.1 회전 아크 플라즈마를 활용한 기타 응용기술

화염을 제어하여 NO_x를 줄이는 기술은 투입된 비용에 비해 NO_x 저감 효과가 가장 큰 기술이다. 기계연구원에서도 연소 후처리 기술이 아닌 연소제어 기술을 통해 NO_x를 저감할 수 있는 기술을 개발한 바 있다. 본 기술은 소형 산업용 버너에만 적용되었기 때문에 보다 더 큰 버너에서 기술을 검증할 일이 남아있으나, 본 기술의 잠재력은 일부 연구자들에게 매우 높게 평가받고 있는 기술이다. 기계연구원에서 개발된 저NO_x 버너의 작동원리는 <그림 24>에 보는 바와 같이 ① 산업용 버너를 일부 개조하여 플라즈마 연료 개질기를

장착하고, ② 연료 개질기에서 발생된 수소를 이용하여 원래의 화염보다 부피가 큰 화염을 만들어 NOx 발생을 억제하는 방법을 사용하고 있다. 그림에서 보듯이 플라즈마를 작동시켜 수소를 기존 버너의 화염에 보낼 경우 연소반응이 공간적으로 분산되면서 고온영역에서 집중적으로 나타나는 NOx 발생이 억제되었다. 0.5 ton 수증기 발생용 LNG 버너를 개조하여 플라즈마를 활용한 저NOx 버너의 성능을 실험한 결과, 일반 산업용 버너에서 배출되었던 35 ppm의 NOx 농도가 9 ppm으로 낮아질 수 있었다. 본 실험의 의미는 10 ppm 이하의 NOx 농도를 배출하는 저NOx 버너를 ① 배기가스 재순환이나, ② SCR 설비를 사용하지 않고서 달성하였다는데 있고, 불완전 연소로 인한 CO 농도 상승은 관찰되지 않았다.

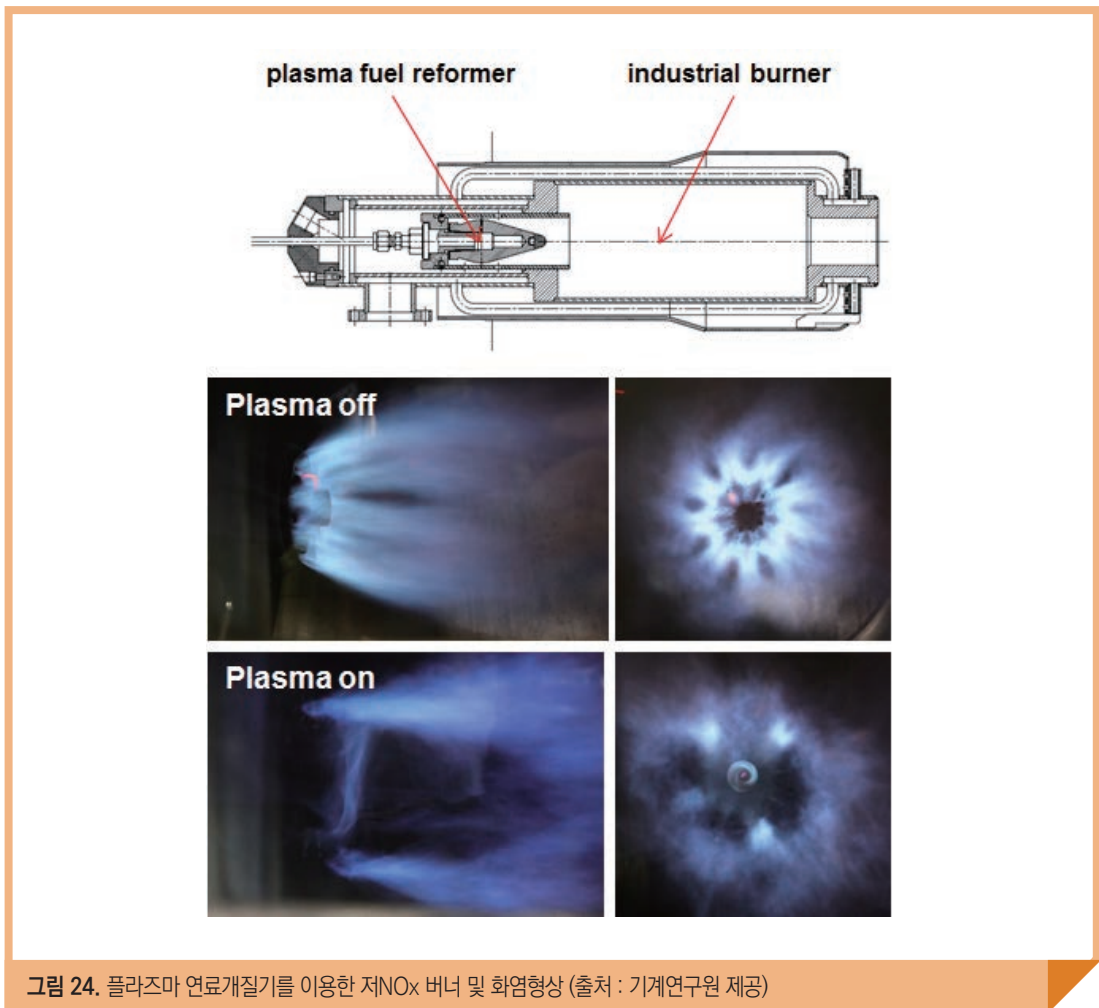


그림 24. 플라즈마 연료개질기를 이용한 저NOx 버너 및 화염형상 (출처 : 기계연구원 제공)



〈표 1〉에서 제시되었듯이 회전 아크 반응기를 사용할 경우 난분해성 가스를 어렵지 않게 처리할 수 있다. 예를 들어 해외에서는 지구온난화가스인 냉매를 처리하는 경우 아크 플라즈마를 사용하는 경우가 일반적이다. 한편, 우리나라의 경우는 반도체/디스플레이 산업에서 배출되는 지구온난화가스인 PFCs 가스 중에서도 특히 CF₄ 가스의 처리를 위한 시장이 활성화되어 있으나, 관련 업계에서는 지속적으로 강화되는 환경규제로 인해 기술적인 어려움을 겪고 있다. 즉, PFCs 처리를 위해 지금까지 주로 사용해왔던 소각법은 NO_x 및 CO 배출을 피하기 어렵기 때문에 배출규제가 부담이 되고 있다. 이에 따라 일부 공장에서는 연소기를 대신해서 아크 플라즈마 기술을 사용하고 있으나, 이 경우 에너지를 많이 사용하고 전극의 수명에 문제가 있다. 기계연구원에서는 몇 해 전 에너지를 적게 사용하는 회전 아크 플라즈마 설비기술을 관련 기업에게 이전하여 반도체 공정에 공급한 바 있으며, 최근에는 기존 기술 대비 1/5 수준의 전기 에너지로 95% 이상의 CF₄를 처리하는 기술을 개발하여 관련 기업들에게 기술을 이전한 바 있다.

연소기 배기정화 시스템의 열관리 기술로서 자동차, 선박 및 발전소 등에 기술이 적용되고 있으며, 이밖에도 저NO_x 버너, 반도체 공정가스 처리 등 다양한 분야에서 활용될 수 있었다. 본 기술이 다양한 분야에서 기존 기술들과 치열하게 경쟁해서 산업현장에서 채택될 수 있었던 가장 중요한 이유는 기술의 독창성에 있다. 앞서 소개되었듯이 디젤 배기정화 시스템의 열관리를 위해 전 세계의 거의 모든 기업 또는 연구기관에서는 열을 직접 발생하는 전기히터 또는 연소기를 채택하고 있다. 이에 반해 기계연구원 플라즈마 연구팀에서는 이들 기존 방법 대신 연료 개질기를 선택했고, 이후 10여 년간 흔들림 없이 본 기술을 발전시켜왔다. 현재 배기정화 시스템의 열관리를 위한 플라즈마 연료 개질기는 미국, 일본, 유럽, 중국 등에 지적재산권이 등록되어 있으며, 지금까지는 국내기업에만 기술이 이전되어 왔으나 해외기업과도 기술이전 협상이 곧 시작될 예정이다. 또한 10여 년간 본 기술에 집중한 탓에 〈그림 22〉에서 제시되었듯이 전원장치를 비롯한 반응기 기술의 완성도 및 가격 경쟁력이 향상되었던 사실도 본 기술이 여러 산업현장에 활용될 수 있었던 이유가 되었다.

03 결론

플라즈마를 과학자들이 본격적으로 연구하기 시작한 19세기 중반 이후 플라즈마 기술이 오늘날 우리에게 미친 영향력은 실로 막대하다. 즉, 플라즈마 기술은 오늘날의 IT 산업의 기반이 되는 반도체를 제조하는 데 핵심이 되는 기술이며, 새로운 재료와 의약품을 분석하는 데에도 바탕이 되는 기술을 제공하였다. 아마도 100년 전 진공 유리관에서 빛을 내며 움직이는 기체를 바라보며 이를 “기체를 초월한 기체”라고 불렀던 초기의 플라즈마 연구자들은 그들이 발견한 새로운 물체가 이토록 많은 분야와 연계되어 인류에게 도움을 줄 것이라고는 상상하지 못했을 것이다. 현재 플라즈마를 활용한 기술은 반도체/디스플레이 제조, 광학, 환경, 의료, 우주공간에서의 추진 등 수많은 첨단기술 분야에 걸쳐 있으며, 새롭게 등장하고 있는 신재생에너지 기술에도 활용이 시도되고 있다.

기계연구원 플라즈마 연구팀은 지난 20여 년간 플라즈마를 활용한 유해가스 처리 분야의 연구를 수행해왔으며, 이를 통해 개발된 기술은 최근 다수의 기업에게 이전되어 자동차, 선박, 발전소, 반도체 산업 등 여러 산업분야에서 활용되기 시작했다. 본 기술이 상용화 단계에 접어들기까지 많은 어려움이 있었는데, 이들 어려움을 극복해나가는 데에 중요했던 사항 중의 하나는 산업계의 역할이었다. 예를 들어 본 연구가 시작되었던 90년대 중반에는 플라즈마 전원장치를 제공해줄 국내 기업이 없었다. 이에 따라 연구개발 초기에는 해외에서 전원장치를 수입해오거나, 대학 또는 정부 연구소에 의뢰한 프로젝트를 통해 제작된 전원장치를 사용해야만 했다. 이렇게 하나씩 제작된 전원장치는 작동은 잘 했으나 가격, 크기, 내구성 등과 같이 산업현장에서 요구하는 사항들을 만족시키는 제품이 아니었다. 이후 연구팀에서 집중한 일은 국내 전원장치 기업을 육성하는 것이었고, 국내기업에서 구입한 전원장치가 산업현장에서 큰 이슈 없이 작동되기까지는 10여년 이상의 시간이 소요되었다. 현재 플라즈마 전원장치에 소요되는 주요 부품과 소재는 대부분 국내에서 조달할 수 있을 정도로 국내의 관련 산업은 성장했으며, 이처럼 플라즈마 관련 산업이 성장하는 데에는 기계연구원 뿐만 아니라 플라즈마 연구를 수행하고 있는 핵융합연구소, 원자력연구소, 전기연구소와 같은 정부 연구소의 역할이 컸다. 이상의 예에서 보듯이 어떤 새로운 기술이 상용화되기 위해서는 연구실에서 얻어진 연구결과 또는 특허만으로는 충분하지 않으며, 해당 기술을 제품화할 수 있는 관련 산업의 역량과 참여가 반드시 필요하다.



본 글이 실리는 책자는 “융합연구”를 주제로 하고 있는 것으로 알고 있는데, 기계연구원 플라즈마 연구팀은 기계공학(연소공학), 플라즈마, 환경공학 등 다양한 전공을 배경으로 하는 연구원으로 구성되어 있다. 따라서 플라즈마 연구팀은 어떤 연구를 수행하는데 있어 융합적인 접근을 시도하기에 용이했다. 최근 필자는 자동차 회사 관계자로부터 자율주행자동차가 단순히 핸들에 손을 놓고 다니기 위한 것이 아니라 연비 향상과 배기가스 감축에 핵심적으로 활용될 기술이라는 이야기를 듣고 많이 놀랐던 적이 있다. 즉, 자율주행을 하는 자동차는 주변을 인식하고 예측 주행을 하기 때문에 급가속이나 급정거와 같이 엔진에 무리를 주는 주행을 피할 수 있으며, 이로 인해 획기적인 수준의 연비 향상과 배기가스 감축이 기대될 수 있다고 한다. 이상의 예에서 보듯이 어떤 문제를 해결하는 방법은 지금까지 관련 문제를 전문적으로 담당해온 분야만이 아니라 예측하지 못한 낯선 분야에서도 찾을 수 있으며, 심지어 상당수의 파급력이 큰 혁신적인 성과는 예측하지 못한 분야에서 나왔음을 지난 과학기술의 역사는 말해주고 있다.

저자 **송영훈**

Young-Hoon Song

학력 펜실베니아주립대 기계공학 박사
KAIST 기계공학 석사
한양대학교 기계공학 학사

경력 現) 한국기계연구원 책임연구원

저자 **이재옥**

Jae-Ok Lee

학력 충남대학교 기계공학 석/박사
한밭대학교 기계공학 학사

경력 現) 한국기계연구원 책임기술원

저자 **김관태**

Kwan-Tae Kim

학력 충남대학교 기계공학 석/박사
한밭대학교 기계공학 학사

경력 現) 한국기계연구원 책임연구원

저자 **이대훈**

Dae-Hoon Lee

학력 KAIST 기계공학/항공우주공학 박사
KAIST 항공우주공학 학/석사

경력 現) 한국기계연구원 책임연구원
現) UST 부교수

저자 **조성권**

Sung-kwon Jo

학력 KAIST 항공우주공학 석/박사
전남대학교 기계시스템공학 학사

경력 現) 한국기계연구원 선임연구원

① 플라스마 기술을 활용한 미세면저점감기술

② 웨어러블 소자를 위한 생체모사 기반 접착개편 기술



참고문헌

1. "Plasma Technology", Federal Ministry of Education & Research, November 2001
2. "Plasma Science: Advancing Knowledge in the National Interest", Plasma 2010 Committee, Plasma Science Committee, National Research Council, ISBN: 0-309-10944-2, 2007
3. C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince, "Atmospheric pressure plasmas: A review", Spectrochimica Acta Part B 61, pp. 2 - 30, 2006
4. H. Abe, M. Yoneda, and N.Ujiwara, "Developments of Plasma Etching Technology for Fabricating Semiconductor Devices", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 3, pp. 1435 - 1455, 2008
5. Banqiu Wu, aAjay Kumar, and Sharma Pamarthy, "High aspect ratio silicon etch: A review", J. Applied Physics 108, p. 051101, 2010
6. Y.H. Song, W.H. Shin, S.J. Kim, M.S. Park, G.H. Jang, "A pilot test of pulsed corona process for combustion flue gas treatment" J. Adv. Oxid. Technol. Vol 4, No. 3, pp. 265 - 270, 1999
7. Y.H. Kim, W.S. Kang, J.M. Park, S.H. Hong, Y.H. Song, S.J. Kim, "Experimental and numerical analysis of streamers in pulsed corona and dielectric barrier discharges", IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 32, No. 1, pp. 18-24, Feb. 2004
8. Y.H. Song, S.K. Kim, K.I. Choi, T. Yamamoto, "Effects of Adsorption and Temperature on a Nonthermal Plasma Process for Removing VOCs", J. Electrostatics, 55, pp. 189-201, 2002
9. N. Hwang, J. Lee, D. H. Lee, Y.-H. Song, "Interactive phenomena of a rotating arc and a Premixed CH₄ flame", Plasma Chem Plasma Process, 32, pp. 187 - 200, 2012
10. S. H. Pyun, D. H. Lee, K.-T. Kim, Y.-H. Song, "Application of Plasma Fuel Reformer to an On-Board Diesel Burner", Plasma Chem Plasma Process, 36, pp. 329 - 340, 2016

02

웨어러블 소자를 위한 생체모사기반 점착계면 기술

성균관대학교 화학공학/고분자공학부

방창현 교수

(chpang@skku.edu)



01 서론

1.1 웨어러블 소자 및 소재 기술 개요

최근 유연 소자의 발전으로 의류, 피부, 인체 장기에 부착하여 사용자의 정보를 수집하고 진단 및 치료에 활용 가능한 다양한 개념의 웨어러블 신체부착 및 생체이식 디바이스 기술이 주목을 받고 있다. 이러한 웨어러블 디바이스는 하드웨어의 소형화 및 경량화, 유연한 소재의 개발과 인간의 의료 및 감성 공학에 있어 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 이러한 웨어러블 디바이스의 기술 분류는 크게 형태에 따라 휴대기기 및 액세서리와 같은 액세서리형, 의류형태의 의복형, 그리고 피부 및 인체 장기에 부착하는 형태의 신체부착/생체이식형(skin-attachable/implantable)으로 분류할 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 특히 신체부착/생체이식형 소자의 경우, 모바일 기기의 발달과 확산에 따라 의료 분야에 응용되어 모바일 헬스케어라는 새로운 산업시장이 형성되면서 환자의 상태를 실시간으로 원격 진단이 가능한 수준에 이르렀다(그림 1). 즉, 환자의 건강 및 질병과 관련된 신체 정보를 착용 가능한 간단한 소자로부터 수집하여 원격으로 관찰 진단하고, 이를 토대로 치료 및 경과를 관찰하는 U-헬스케어(ubiquitous healthcare)¹⁾에 대한 관심이 높아지고 있다.²⁾ Business Insider에 의하면 이러한 웨어러블 기기의 수는 2018년에는 1억 7700만여 대까지 증가할 것이며, 시장가치 규모는 120억 달러 규모에 달할 것으로 예측하고 있다.³⁾ 하지만, 기술적 한계로 인하여 현재 대부분의 웨어러블 디바이스 제품은 스마트 시계와 같은 손목시계 형태나 손목 밴드를 중심으로 전자제품 형태의 액세서리 형태가 주를 이루고 있다. 전문가들은 웨어러블 디바이스는 급성장 단계로 구체적인 예측이 어려우나, 지속적으로 다양한 진화를 거쳐 발전될 것으로 분석하고 있다. 그중에는 신체 부착 및 생체삽입 소자로부터 다양한 생체신호들을 수집하여 즉각적인 치료에 활용 가능한 형태를 예로 들 수 있다(그림 2).

i) 각종 정보 기술(IT)을 활용하여 언제 어디서나 건강 관리를 받을 수 있는 원격 의료 서비스



이러한 배경으로부터 신체부착/생체이식형(skin-attachable/implantable)소자는 웨어러블 기술발전 시나리오 로드맵의 최말단에 위치하고 있으며, 다양한 기술들(소자의 소형화 기술, 센서 기술, 무선통신기술, 점착인터페이스 기술)의 융합된 형태로 볼 수 있다. 이러한 신체 부착형 웨어러블 헬스케어 제품의 경우 주로 피부에 부착할 수 있는 형태 또는 콘택트렌즈 형태로 제작되고 있으나, 아직까지는 구글, 삼성, 소니와 같은 대기업 중심으로 제품화 및 개발 단계에 있다. 또한, 신체 이식형 소자의 경우는 몇 가지 제품화된 예가 있으나, 생체친화적이고 소형 경량화를 위해 해외 주요 대학을 중심으로 연구 단계에 있다. 신체부착/생체 이식형 소자들을 개발하는데 있어서 인체의 움직임을 극복하고 안정적인 생체 신호를 검출할 수 있는 신축성 소재 기술과 장시간 부착에도 인체에 불편함이 없는 반복적 생체친화성 점착 소재 기술이 중요한 이슈들로 부각되고 있다.

1 플라즈마 기술을 활용한 미세면저점착기술

2 웨어러블 소자를 위한 생체모사기반 점착계면 기술

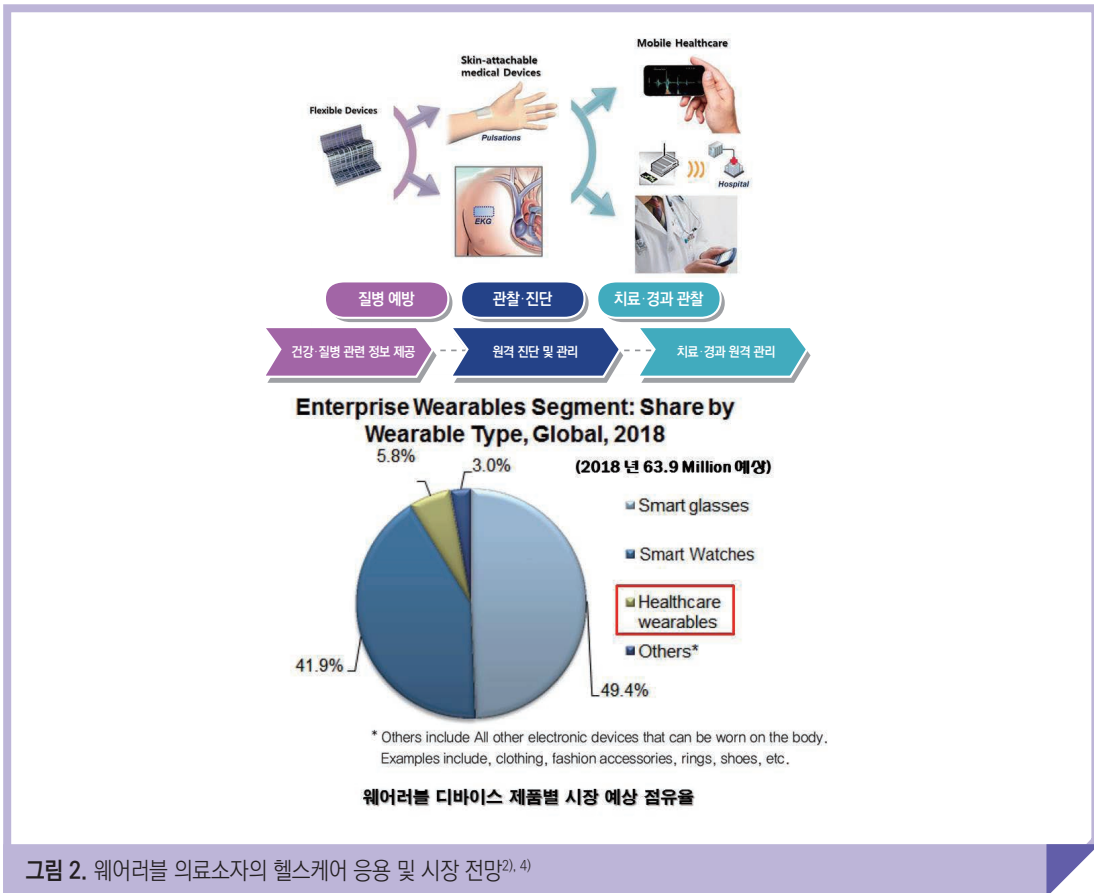


그림 2. 웨어러블 의료소자의 헬스케어 응용 및 시장 전망^{2), 4)}

이러한 맥락에서 삼차원 미세구조를 이용한 생체모사공학(Biomimetics)ⁱⁱ⁾을 기반으로 하는 점착 계면 기술들은 미세구조들의 부압 및 체결 등과 같은 물리적 상호작용에 의해 인체와 긴밀한 점착을 유도하여 기존의 끈적이는 화학점착제를 대체가 가능하다는 점에서 최근 주목을 받고 있다. 이러한 생체모사 점착 계면 기술은 단기적으로는 스마트워치의 인체와 접합부, 그리고 현재 병원에서 사용되고 있는 피부 및 장기 표면의 생체 신호(ECGⁱⁱⁱ⁾, EEG^{iv)} 등) 측정 장비에 응용될 수 있다. 향후 미용 및 의료용 패치 기술과 접목한 진단 및

ii) 생물체가 갖고 있는 다양한 기능을 인위적으로 모방하여 이용하는 기술

iii) 심장의 전기적 활동을 증폭하여 기록한 그림을 심전도(electrocardiogram: ECG)라 하는데, 이 분석법은 심장 상태를 측정하거나 손상 범위 진단시 이용됨

iv) 사람 또는 동물의 대뇌에 일어나는 전위변동, 또는 그것에 의하여 일어나는 뇌전류(brain current)를 두피 상에서 유도하여 기록한 전기기록도

치료에 대한 높은 가능성이 있는 것으로 판단 되고 있다. 나아가 신체부착/생체이식형 소자들은 약물조절 및 줄기세포와 결합되어 진화된 개념의 정밀진단 및 국부치료가 가능한 형태로 개발될 것으로 기대된다. 본 융합연구리뷰에서는 최근 개발된 신체부착/생체이식형 소자들에 대한 부착 소재 기술에 대해 분석하고, 최근 주목을 받고 있는 생체모사기반 점착 계면 기술들을 융합한 향후 발전 방향 및 적용 가능성에 대해 논의 할 계획이다.

02 본론

2.1 신체부착 소자의 부착소재 개발 현황

향후 신체부착/생체이식 소자는 보다 간소해지고 사용자의 편의성을 향상시키는 방향으로 발전할 것으로 예측된다. 이러한 배경에는 소자들이 생체와 일체화되어 사용자 맞춤형 헬스케어, 사용자 육체적 및 정신적 능력 향상 기능 등 다양한 서비스를 제공할 것으로 기대하고 있다. 다음은 신체부착형 소자와 생체이식형 소자의 주요 특징들과 각각의 부착기술의 개발 방향을 설명한 표이다.

표 1. 신체부착형 소자와 생체이식형 소자의 주요 특징 및 부착기술 개발 방향

기술구분	정의 및 특징	부착기술 개발 방향
신체부착형	<ul style="list-style-type: none"> • 패치/밴드형의 신체 부착 가능한 시스템 • 유연한 고분자 회로보드 구현 및 피부 부착 또는 일체화 	<ul style="list-style-type: none"> • 신축성/유연성 • 인체 무해성 및 피부자극 최소화 • 양산 기술
생체이식	<ul style="list-style-type: none"> • 생체 장기 표면 및 내부에 소자 이식 • 생체친화적 소재 및장기 표면 부착 또는 일체화 	<ul style="list-style-type: none"> • 신축성/유연성 • 인체 무해성 또는 생분해성 • 양산 기술

2.1.1 신체부착용 소자의 부착기술

현재 신체부착용 소자는 넓게 노출된 인체의 표면에 부착하여 진단 및 치료에 필요한 정보를 실시간으로 얻는 형태로 볼 수 있다. 이러한 맥락에서 스마트워치와 같은 기존의 액세서리형 소자들도 인체 표면에 자극을 주지 않고, 안정적으로 인체의 신호를 검출하는 기술이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 현재 혈당 측정을 위한 스마트 의료용 패치(MC10사의 Biostamp 그리고 Toumaz group의 SensiumVitals), 눈물의 바이오인자를 모니터링 하는 스마트 콘택트 렌즈(Google lens) 등이 제품화 되었다<그림 3>.⁵⁾ 이러한 신체부착용 소자들에 사용되는 소재들은 주로 아크릴 점착제, 실리콘, 또는 폴리우레탄 등이 있으며, 부착대상 표면에 따라 소자의 신축성 및 산소투과율^{v)}이 중요한 인자들로 고려되고 있다.



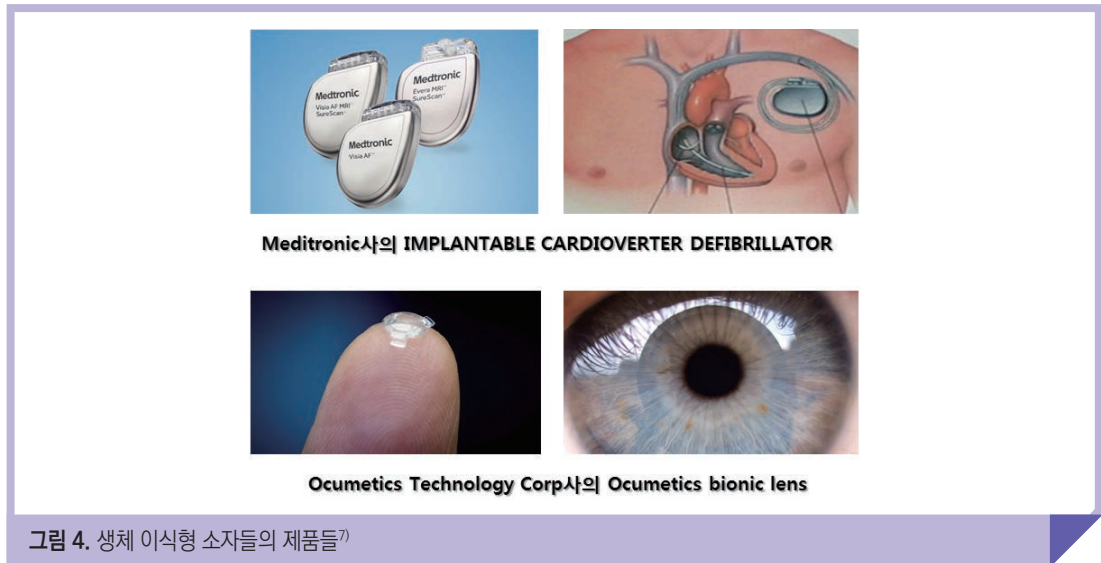
그림 3. 신체부착용 소자들의 제품들⁵⁾

나아가 대학 및 연구소에서는 생체와의 일체화를 높이기 위해 스마트 문신 등의 개념으로 발전되고 있다.⁶⁾ 또한 최근 대학 및 연구소에서는 소자의 장시간 부착 시 산소투과율 및 피부자극을 최소화하기 위하여 아크릴계의 화학점착제를 사용하지 않고, 케코도마뱀 또는 곤충의 발바닥 표면을 모사한 미세구조들을 이용한 점착 기술이 소개되고 있으며 다음 장에서 구체적으로 논의하고자 한다.

v) 콘택트 렌즈에 사용되는 지표로 확산에 의하여 다공질 세라믹스를 통과하는 산소의 양을 나타냄

2.1.2 생체이식형 소자의 부착기술

생체이식형 소자는 크게 인체의 장기에 부착/삽입하여 진단 및 치료에 활용하거나, 생분해성^{vi)} 물질로 만들어진 캡슐 형태로 신체 내부에 복용하는 형태 등이 있는 것으로 알려져 있다.³⁾ 이 중에서 생체 장기에 이식하는 진단/치료 소자들의 경우, 습한 인체장기들과의 계면 접촉기술이 중요한 이슈가 되고 있다. 하지만 기술적 요구사항이 높아 생체 이식형 소자 중 본격적으로 상용화된 제품은 많지 않고 Meditronic사의 Implantable Cardioverter Defibrillator 같은 압전형 심박조율기를 이식형 생체소자 중에서 현재 가장 상용화된 제품으로 소개할 수 있다<그림 4>.



구체적으로 이 제품은 심박동급속증^{vii)}환자에게 이식되어 환자의 심박수가 빨라지거나 느려지면 압전 소자를 통해 이를 감지할 수 있고 특정 전기 신호를 환자의 심장으로 전달함으로써 심박수를 조절한다. 이로부터 의사는 기기로부터 무선으로 환자의 상태를 실시간으로 체크하는 것이 가능하나, 환자의 다양한 일상 생활의 자유도를 높이기 위해 소자의 소재 및 계면의 기술들에 대한 개선이 필요할 것으로 보인다. 또한 다른

vi) 세균 혹은 다른 생물의 효소계에 의해서 분해될 수 있는 성질

vii) 발작적으로 심장의 고동이 빨라지는 상태

제품으로는 Ocumetics technology corps에서 개발 중인 Ocumeticsbiolens가 있다. 해당 제품은 생체친화적 고분자를 재료로 제작한 생체렌즈로, 개발사에 의하면 생체 친화적 고분자를 사용해 기존 렌즈삽입술에 사용되던 렌즈의 부작용인 외상성 백내장⁹⁾을 줄일 수 있다고 보고하였다. 전문가들은 이러한 제품들에 생체적합소자 소재 및 인체의 계면 기술을 개선하여 다양한 부작용을 최소화 할 수 있는 것으로 기대하고 있다.

이러한 생체 이식형 소자들은 환자의 빠른 진단 및 근본적인 치료를 위해 다양한 형태로 연구 중에 있으나, 아직까지 소형화 및 경량화를 위해 현재 주로 해외 대학과 연구소에서 제품화를 위해 개발단계에 있다. 구체적으로 미국 애리조나 대학의 에너지 하베스팅이 가능한 심박조율기⁸⁾, 일리노이대학의 뇌파측정 소자⁹⁾, 그리고 스웨덴의 린취핑대학에서 연구한 척추 이식이 가능한 약물조절 소자¹⁰⁾ 등이 있다(그림 5). 이러한 생체이식형 소자들의 경우, 다양한 소재가 개발되면서 이식형 웨어러블이 가능하게 되었고, 그 특성상 신체에 밀착되거나 체내에 이식되기 때문에 안전문제가 대두되고 있어 신축성, 장기와 소자간의 계면 기술의 중요성이 커지고 있는 실정이다.

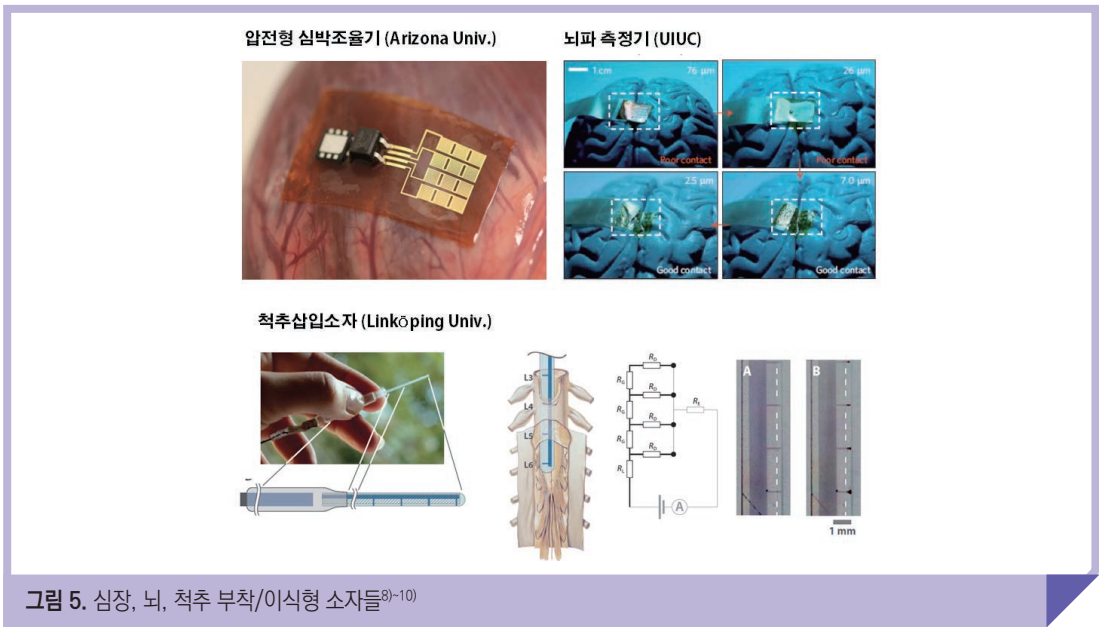


그림 5. 심장, 뇌, 척추 부착/이식형 소자들⁸⁾⁻¹⁰⁾

viii) 날카로운 상처에 의해 직접, 또는 둔한 상처에 의해 간접으로 수정체낭이 찢어졌을 때 수정체의 혼탁이 시작되는 것

2.2 웨어러블소자를 위한 생체모사기반 점착 계면 기술

앞에서 살펴본 것과 같이 신체부착 의료소자들은 혈당량, 안압, 심장병 진단과 같이 장시간 인체표면에 부착하여 진단을 위한 정보를 실시간 모니터링 할 수 있는 기술로 발전하고 있다. 이러한 부착형 진단 소자의 핵심 기술 중 하나인 점착 계면 기술은 생체신호를 효과적으로 수집 및 진단할 수 있고, 불편함 없이 장시간 부착할 수 있는 디바이스 점착 및 계면에 대한 연구로 초점이 맞춰져 있다. 최근에는 진화된 개념으로써 수집한 인체의 정보로부터 소자표면에서 직접적이며 국부적인 약물치료제를 투입하는 연구가 보고되고 있다.²⁾

2.2.1 생체모사기반 3차원 구조를 이용한 부착기술

인체 표면에 부착 가능한 생체모사기반 진단 및 치료용 패치들은 다음과 같이 크게 두 가지 형태로 구분된다. 첫째는 피부에 부착하여 심전도, 뇌파, 혈류량 및 혈류 속도 등의 생체신호들을 측정하는데 쓰이는 의료기기의 점착제를 개선한 건식 패치이다. 다음으로는 아직 대학과 연구소의 개발단계에 있는 박막형 센서 소자의 표면에 미세 점도들을 제작하여 인체의 미세한 생체신호들(다양한 맥파, 체온, PH, 혈당량 등)을 증폭하거나, 국부적인 치료가 가능한 약물주입형 삼차원 미세구조들을 이용한 계면 기술이다. 본 장에서는 신체 부착 소자에 적용되었거나 향후 신체부착 및 이식소자들에 적용될 수 있는 최근의 생체모사기반 점착 계면 기술들을 소개하고자 한다.

2.2.1.1 곤충 및 게코도마뱀 모사 점착소재 기술

첫째로, 딱정벌레 발바닥 버섯모양의 점도 구조물과 유사한 건식 점착 스킨 패치는 버섯모양의 구조적 특징을 심전도 측정 전극 표면에 구현하여 물리적 상호작용에 의해 피부 점착력을 유도한 기술이다.¹¹⁾ 이러한 생체모사기반 진단용 피부패치는 기존의 끈끈한 점착제를 사용한 진단 시스템과 비교하여 사용자의 불편함 없이, 안정적으로 결합하여 심전도를 측정 후 정보를 모바일 기기에 전송하는 방식을 제시하였다. 이러한 피부 부착에 유리한 버섯 모양의 스킨 패치는 실리콘계열의 생체친화적인 소재^{ix)}로 만들기 때문에 기존의 아크릴산염 기반의 점착제보다 표면 오염, 산화, 그리고 다른 환경적 요인들에 영향을 덜 받는다.¹²⁾ 또한 점도들 사이의 공간 덕분에 통풍이 잘 되어, 피부에 자극을 주지 않으면서 습진 등 부작용 없이 긴 시간 동안 사용할 수 있다. 나아가 구조물 밑부분의 기계적 강도를 높이고 접촉 부분의 소재를 개선한 연구도 진행되었다.

ix) 생체에 있어 무해하며 적용되기 쉬운 성질을 가진 의료용 재료를 의미함

다음으로 게코도마뱀의 발바닥 구조를 모방한 탄소나노튜브^{x)}를 삽입한 전도성 점착패드를 제작, 별도의 금속 전극 없이 심전도와 근육의 움직임 등의 생체정보들을 측정할 수 있는 기술이 개발되었다.¹³⁾ 이러한 점착 패치는 평면이 아닌 굴곡진 인간 피부 위에서도 높은(~1.3N/cm²) 수직 점착력을 보였으며, 30회 이상의 반복 테스트에 대해서도 점착력의 하락없이 일정한 성능을 유지하였다. 본 제품은 피부의 형태에 맞춰 변형되면서도 점착력을 유지하는 성질과 표면의 마이크로 구조로 인한 방수성 덕에 부착된 상태로 인체 신호를 탐지하는 웨어러블 디바이스에 응용 가능성이 높을 것으로 예상된다<그림 6>.

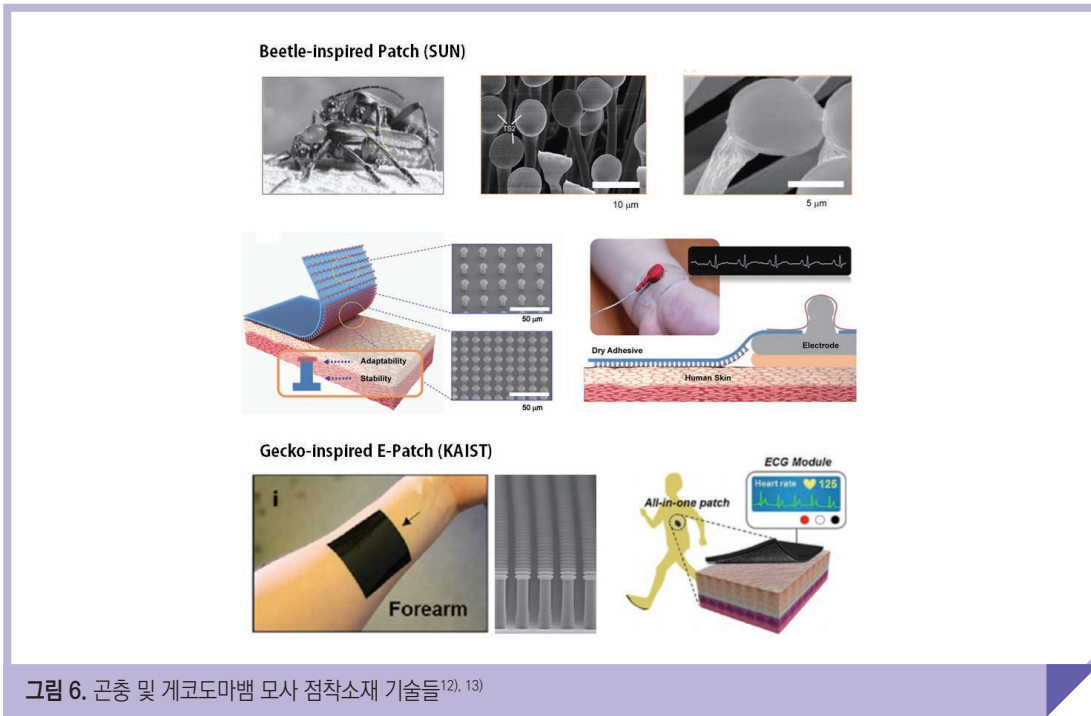


그림 6. 곤충 및 게코도마뱀 모사 점착소재 기술들^{12), 13)}

나아가 진화된 개념의 신체부착형 진단시스템의 피부와 접촉하는 계면에 마이크로 점모 구조를 도입하는 연구도 진행되었다.¹⁴⁾ 구체적으로 소자표면의 미세점모는 소자와 피부와의 안정적인 점착을 유도하고, 인체 표면에서 감지할 수 있는 동맥 및 정맥의 미세하고 다양한 맥박들을 검출하는데 있어 증폭 효과를 기대할 수 있다. 해부학적 특성상 정맥파의 경우 동맥파에 비해 상대적으로 측정이 어려운 것으로 알려져 왔으나, 본 점

x) 탄소 6개로 이루어진 육각형들이 서로 연결되어 관 모양을 이루고 있는 신소재

모구조를 이용한 피부의 접촉면을 증가시켜 측정이 가능함을 제시하였다. 이러한 마이크로헤어 센서는 일회용 밴드 형태의 비교적 제조가 간단하고, 피부와 접촉하는 계면에 생체모사형 마이크로 구조를 도입하여 피부 접촉 시 불편함이 없는 재료와 설계의 구조를 가지고 있다. 신체부착형 초고감도 압력 센서를 개발하여 호흡, 노동맥^{xi)} 및 경정맥파^{xii)}를 실시간 모니터링 함으로써 좌심방 좌심실과 우심방 우심실로 구성된 심장의 입체적인 병리학적 진단 정보를 제시할 수 있다. 구체적으로 맥파형의 시간차 및 파형 고도의 비율은 기존에 의학에서도 중요한 임상정보로 취급되고 있다. 즉, 손목에 위치한 노동맥 및 목과 어깨의 경계 지점 경정맥의 독특한 파형을 해석하여, 심혈관 질환을 진단할 수 있는 진단정보를 수집할 수 있다. 하지만 아직까지는 습한 피부 표면이나 물속에서의 높은 점착력 유지에는 한계가 있어, 추가적인 연구가 필요한 상황이다<그림 7>.

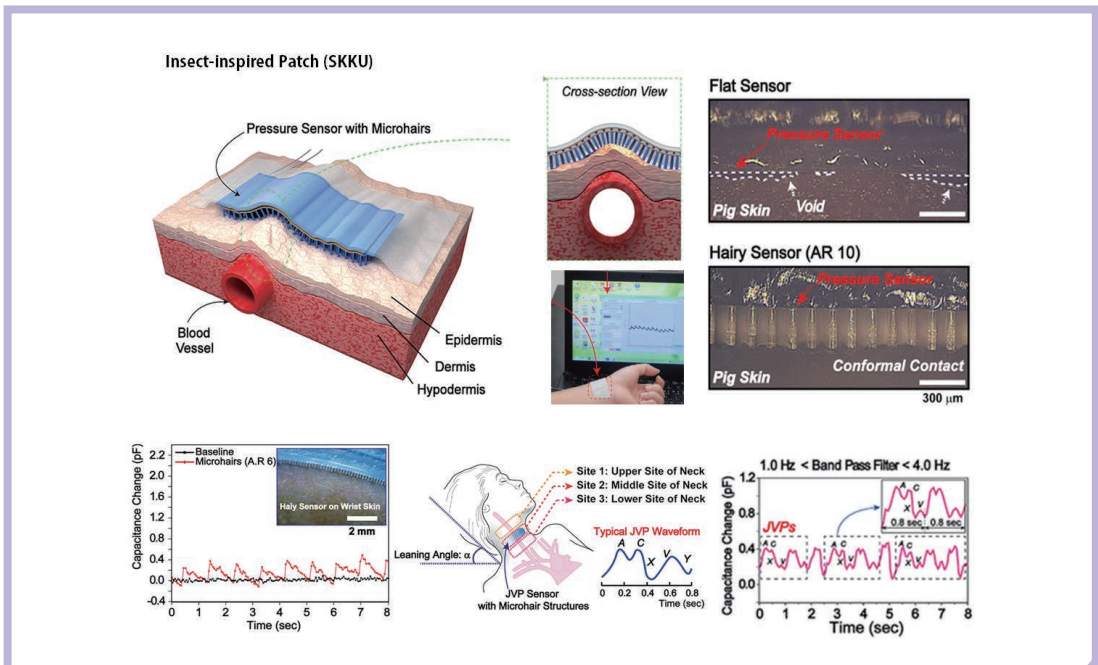


그림 7. 곤충 모사 섬모를 이용한 신체부착 소자¹⁴⁾

xi) 위팔동맥에서 갈라져 팔 아래쪽의 바깥쪽 부위에 혈액을 공급하는 혈관으로, 독특한 파형은 심혈관 질환의 임상정보와 관련이 있는 것으로 알려져 있음
 xii) 뇌로부터 목 부위에 합류해 심장으로 되돌아가는 혈관으로 내경정맥파는 우심방, 우심실, 판막에 대한 심혈관 질환과 관련이 있는 것으로 알려져 있음

2.2.1.2 양서류 모사 점착소재 기술

나이가 최근에는 화학점착제 없이 습한 피부 표면 및 피부의 통기성을 확보하여 수분과 유분, 땀으로 인한 피부 자극을 최소화하는 개념의 신체부착 소자가 개발되었다. 이는 인체에 긴밀한 점착을 위하여 양서류(개구리)의 미세 채널을 모사하여 화합물 기반 점착제 없이 미세구조를 이용하여 탈부착이 가능한 얇고 유연한 신체부착 센서 디바이스다.¹⁵⁾ 개구리와 같은 양서류의 발바닥은 미세 채널로 덮여 있는데, 이러한 구조를 센서와 인체 계면에 적용하여 피부 표면의 유체(수분, 땀 등)의 증발을 유도하고, 측정 대상과 센서가 긴밀하게 점착을 유지할 수 있게 하였다. 또한 손목과 같이 굴곡이 있는 표면에 부착하였을 때, 유연 디바이스에 작용하는 스트레스를 분산하여 센서가 뜯겨거나 탈리되는 현상을 예방하였다. 이러한 생체모사 기반 유연 박막 센서는 기존의 박막형 센서들과 비교해 공정의 간소화, 향상된 유연성, 높은 신호 민감도, 낮은 피부자극 등 다양한 장점을 가지고 있다<그림 8>.

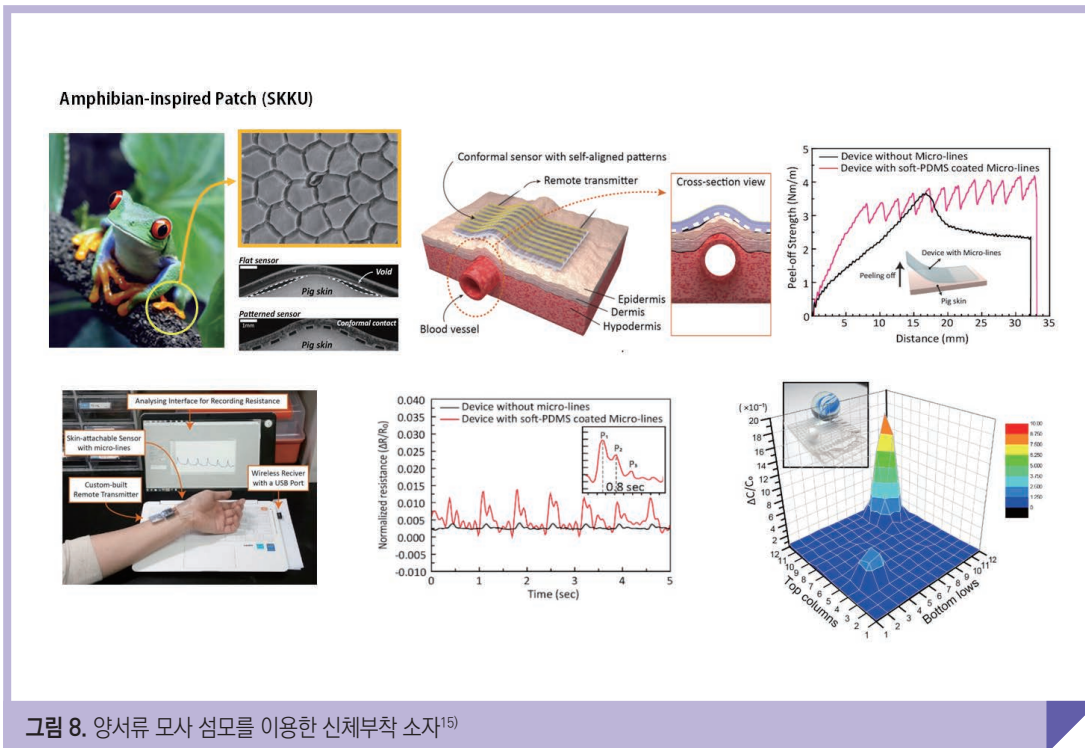


그림 8. 양서류 모사 섬모를 이용한 신체부착 소자¹⁵⁾

2.2.1.3 문어발판 모사 점착소재 기술

기준에 웨어러블 디바이스 및 피부의 점착 소재로 주로 사용되는 화합물 기반 점착제들은 물속의 젖은 표면과 땀에 의한 습한 피부에서 점착력이 급격하게 저하되는 문제점들이 있다. 또한 기존의 점착 소재들은 습한 인체 표면 환경에서 반복적인 탈부착이 불가능하다는 한계점이 존재한다. 이러한 맥락에서 최근 젖은 피부 표면 환경에서도 높은 점착력을 유지하면서 표면의 오염을 최소화하는 새로운 개념의 문어발판 모사 점착 소재가 개발되었다.¹⁶⁾ 이러한 연구는 기존에 알려지지 않은 문어의 흡착판 내부 미세 구형 돌기의 점착 메커니즘을 분석/규명하여, 이를 모사한 미세 삼차원 계층 구조 디자인 및 대면적 제조공정 기술을 제시하였다. 이를 이용하여 습한 표면 환경 및 굴곡진 피부에 안정적이고 높은 점착력을 가지며, 오염물을 남기지 않는 점착 소재로서 신체부착 의료소자의 점착 계면기술로 높은 잠재력을 가질 것으로 기대된다<그림 9>.



그림 9. 문어발판 모사 점착소재 기술¹⁶⁾

이러한 문어모사 패치는 점착표면에 오염물을 남기지 않는 소재이며, 건조한 표면, 물방울이 맺힌 습한 유리표면, 물속의 유리표면, 그리고 실리콘 오일 속의 유리표면의 높은 수직 점착력^{xiii)}을 나타내었다. 또한, 기존 화합물 기반의 끈적이는 점착제와 달리 점착 표면에 오염물이나 손상이 발생하지 않는 것을 확인하였다<그림 10>.

xiii) 두 개의 고체면이 점착제가 되는 제3물질을 사이에 두고 서로 접합된 상태를 분리하기 위해 필요한 단위 면적당 힘

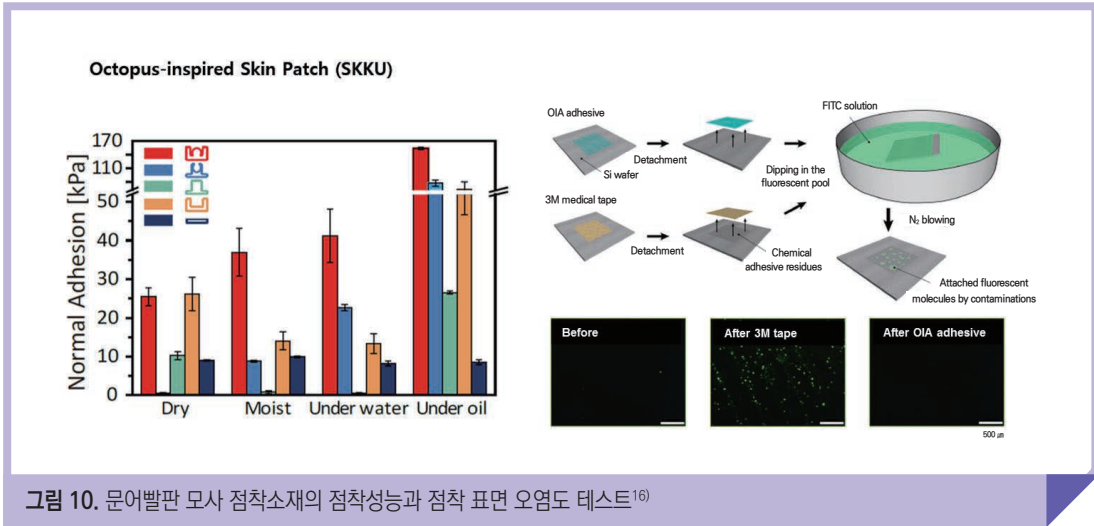


그림 10. 문어발판 모사 점착소재의 점착성능과 점착 표면 오염도 테스트¹⁶⁾

또한 문어의 빨판 내부에 존재하는 독특한 돌기를 관찰하여 미세 돌기와 빨판 내부표면에서 유체의 응집력을 통해 빨판의 부압(negative pressure)^{xiv)}이 증가됨을 최초로 증명하였다. 구체적으로 탄성고분자(elastomer)^{xv)}의 미세 구형 돌기를 가지는 음각의 문어모사 빨판 컵은 점착을 위한 외부의 힘에 의해 점착 표면의 수분을 밀어내고, 남은 수분은 구형 돌기와 돌기 주변 표면 사이의 공간으로 모세관 효과^{xvi)}에 의해 포집된다. 그리고 점착을 위한 외부의 힘을 제거하면 포집된 수분은 응집력^{xvii)}에 의해 유지되며, 동시에 문어발판 모사 컵과 부착 표면 사이의 공간은 높은 부압이 유도된다. 이러한 결과는 실제로 미세 입체구조의 내부에서 물 분자들이 거동하는 형태를 공초점 현미경(Confocal Microscopy)^{xviii)}을 이용하여 관찰 및 증명하였고, 수학적 모델을 통해 검증하였다. 또한, 문어 패치 소자는 부착 및 탈착 후 오염물을 남기지 않아 향후 신체부착/생체이식형 소자에 응용 가능성이 높을 것으로 기대된다(그림 11).

xiv) 물체 내부가 외부와 단절되어 있을 때, 물체 내부의 기압을 감소시켜 외부기압과 압력의 차이, 흡인력이라고도 함

xv) 외력(外力)을 가해서 잡아당기면 몇 배나 늘어나고, 외력을 제거하면 원래의 길이로 돌아가는 성질을 가지는 고분자 화합물

xvi) 액체가 가는 관을 따라 상승하는 현상

xvii) 액체 또는 고체에서 그 물질을 구성하고 있는 원자·분자 또는 이온 간에 작용하고 있는 인력

xviii) 일반적인 현미경과는 달리 대물 렌즈 뒤쪽에 비늘 구멍을 두어 시료의 한 점에서 출발한 빛만이 통과하게 하여 명암비와 분해능을 높은 현미경

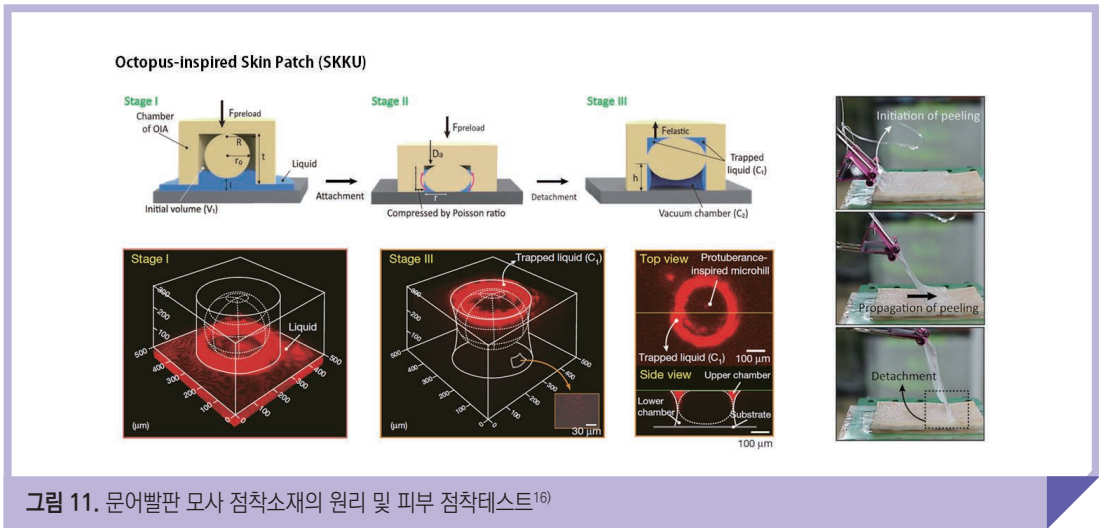


그림 11. 문어발판 모사 점착소재의 원리 및 피부 점착테스트¹⁶⁾

문어모사 패치는 유리나 웨이퍼와 같은 전자소자에 사용되는 소재 뿐만 아니라, 건조하거나 습한 다양한 여러 환경의 피부 표면들에 대해 점착표면에 오염물을 남기지 않고, 10,000회 이상의 반복적인 탈부착에도 점착력이 유지되었다. 또한, 문어패치는 피부 상처에 안정적인 점착을 통하여 창상 치료 패치로의 응용 가능성을 확인하였으며, 피부부착 의료용 생체신호 모니터링 소자의 부착소재 및 약물을 로딩 가능한 창상치료 패치로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.2.1.4 마이크로 니들을 이용한 인터페이스 기술

곤충 및 게코 발바닥을 모사한 기존 점착제와 다르게 최근 선인장이나 모기의 침을 모사한 마이크로 니들을 활용한 의료소재 및 소자 기술이 활발히 연구되고 있다. 이러한 생체모사 기반 마이크로 니들은 인체의 표피층 및 진피층에 삽입하는 개념으로 기존의 약물 효능과 효과를 최적의 형태로 전달하고 환자의 부작용을 최소화하며 안정성을 높이는 경피형^{xix)} 약물전달시스템 형태로 발전하고 있다.¹⁷⁾ 기존 경피형 약물전달 패치의 경우, 피부세포 사이의 통로로만 약물이 통과하기 때문에 피부접촉에 약물이 각질층을 통과할 수 있는 가능성이 적어 효과가 높지 않았다. 그러나 마이크로 니들 패치의 경우, 진피층까지 마이크로 니들이 들

xix) 피부를 통하여 자극이나 물질이 전달 될 때 쓰이는 용어

어가면서 피부 내부로 약물을 직접 전달하기 때문에 흡수율이 높다. 또한 주사방식에 비해 고통이 없고 약물의 전달 목적에 따라 다양한 물질을 전달할 수 있으며, 각막 또는 세포핵 등 국부적인 약물전달도 가능하다고 보고하고 있다.^{18), 19)}

이러한 마이크로 니들 기술은 현재 미용용으로는 제품화되어 있으나, 의료 소재 및 기기로서의 개발은 현재 대학과 연구소에서 활발히 연구 중이다. 또한 단순한 형태의 점착소재에서 나아가 센서의 진단기술과 결합한 형태로 개발된 바 있다.²⁰⁾ 구체적으로 살펴보면, 마이크로 니들 패치는 피부의 진피층까지 마이크로 니들을 이용하여 침투한 뒤 점착을 유지해야 하는데, 기존의 마이크로 니들 패치의 경우 매우 낮은 피부 점착력을 보이며, 주위 근육이 움직일 경우, 피부와 긴밀한 접촉을 하지 못해 약물 전달 효율이 떨어져 추가적인 의료 점착 테이프를 사용해야 하는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 미국 하버드 연구진들은 마이크로 니들 표면의 수분에 의해 팽창되는 고분자를 이용하여 피부와의 체결을 통해 점착력을 높이는 연구를 진행하였다.²¹⁾ 또한 MIT 연구진들은 환자의 통증을 유발하는 기존 방식의 문제점을 해결하기 위해 마이크로 니들에 호흡기 계통의 바이러스 백신을 코팅하여 원숭이를 대상으로 백신 접종 실험을 진행하였다.²²⁾ 기존엔 쥐 같은 작은 동물을 대상으로 진행하였으나, 최초로 영장동물을 대상으로 백신 접종을 성공하였다. 이는 생체친화고분자인 PLA(Polylactic acid)를 기반으로 백신을 포함한 용액을 마이크로 니들에 코팅하는 방식으로 제작되었으며, 약물 뿐만 아니라 백신 치료까지 범위를 넓힐 수 있는 가능성을 제시하였다. 마지막으로 서울대 연구팀은 그래핀 기반 바이오센서와 결합하여 여러 생체신호를 측정하고 진단하여 치료까지 하는 형태의 디바이스를 개발하였다.²⁰⁾ 피부의 외부 자극에 의한 스트레인 변화 뿐만 아니라 땀을 통해 pH를, 피부의 온도를 통해 포도당의 농도를 모니터링 한다. 이를 바탕으로 기준치보다 높은 농도의 포도당이 측정되면, 히터를 이용하여 고분자 표면을 용해시켜 마이크로 니들에 있는 약물을 피부속으로 방출하여 치료하는 방식의 디바이스를 구현하였다(그림 12).

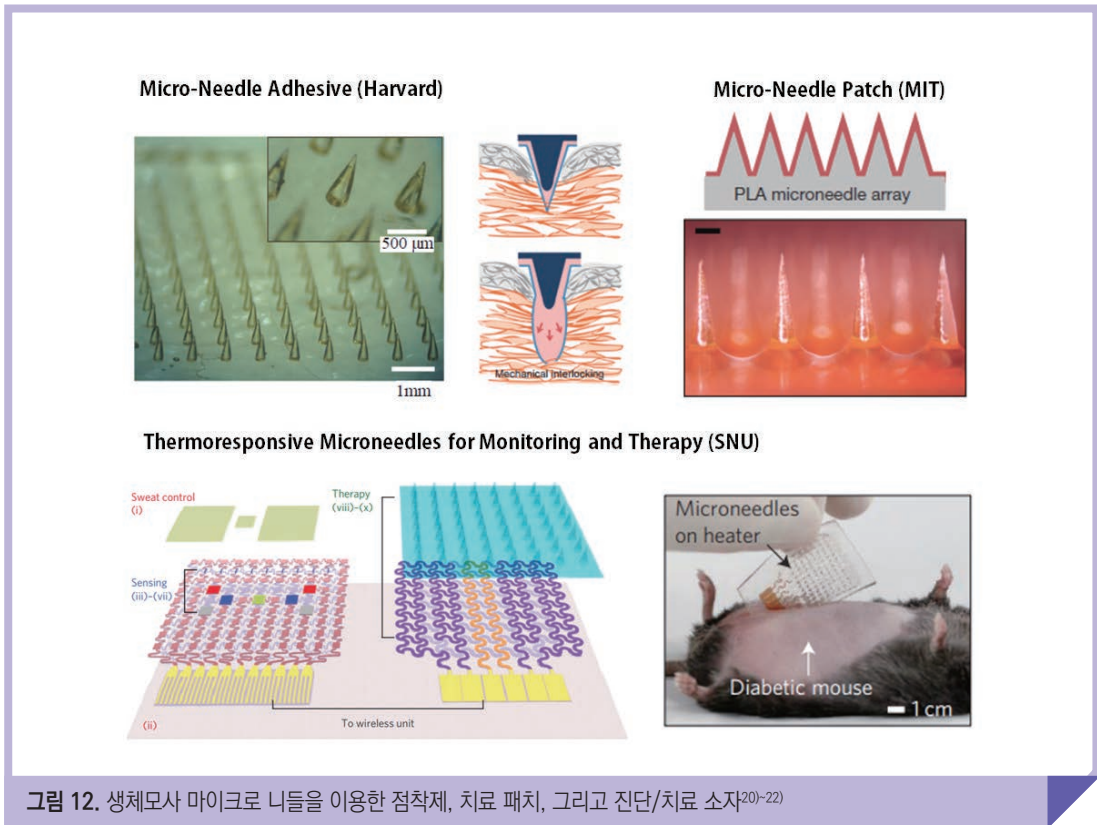


그림 12. 생체모사 마이크로 니들을 이용한 점착제, 치료 패치, 그리고 진단/치료 소자⁽²⁰⁻²²⁾

2.3 세포 치료와 결합된 점착계면 기술

지금까지 웨어러블 소자에 응용 가능한 생체모사 기반 점착 계면 기술의 최근 동향들에 대하여 살펴보았다. 웨어러블 소자의 향후 동향은 앞서 언급하였듯이 정보통신 및 모바일 기술의 발전과 함께 생체 내부에 삽입 또는 이식하여 환자의 건강 및 질병과 관련된 신체 정보를 모니터링 할 뿐만 아니라, 나아가 세포/조직의 직접적인 치료 기능이 융합된 형태로도 발전되고 있다. 이러한 세포치료가 결합된 생체이식형 소자의 구현을 위해서는 무선 전송 및 충전, 전력 생산, 신축성 프린팅 기술, 생체 친화/분해형 소재, 생체 내부 계면 및 부착 기술 등 다양한 핵심 요소기술이 요구되고 있다. 그러나 아직까지 생체 내부에 삽입하여 원하는 장기나 조직에 효율적으로 접촉하거나, 이식/부착하는 계면 기술이 미흡하여 중요한 이슈로 자리 잡고 있다. 또한 생체 이식형 소자는 이식 후 소자가 체내에 그대로 남아 환자에게 문제가 되는 면역 반응을 일으킬 수 있기 때문에, 인체에 무해하고, 생체 내부에서 분해될 수 있는 생체친화성 및 생분해성 소재의 개발에 대한

연구가 주된 이슈였다. 생체소재들은 생체 내/외부에서 생착률^{xx)} 및 세포 반응을 조절하여 재생과 치유를 돕는 연구들이 다양하게 보고되고 있으며, 현대 의료산업의 고도화에 따라 꾸준히 발전하고 있다.²³⁾ 그리고 현재는 생체 내부에서 이식/부착하는 계면 기술과 세포의 치료를 동시에 가능하게 하는 생체 이식형 소재의 개발에 주목하고 있다.

이러한 세포 치료와 결합된 헬스케어 소자는 아직까지 점착 계면 기술의 부재로 상용화 및 제품화 되는 수준에는 미치지 못하고 있으나, 국내외 여러 대학과 연구소에서 활발히 연구 중이다<그림 13>. 구체적으로 살펴보면, 홍합의 점착 메커니즘을 이용해 생체 점착에 활용 가능한 홍합단백질 기반의 하이드로젤^{xxi)}이 개발되었다.²⁴⁾ 이는 홍합의 점착 단백질과 인체 조직에서 추출한 자연치유 성분을 결합하여, 상처 치료 기능과 흉터 방지 기능을 함께 갖춘 점착제이다. 이 점착제는 홍합점착 단백질과 철 이온 간 가교 반응^{xxii)}을 이용해서 자가 복원력을 갖추고 있어 다양한 메디컬 분야에도 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 생체친화적인 재료로써 세포치료 소자를 생체 내부에 부착시켜주는 생체 점착소재로 응용될 수 있다. 다음으로, 미세 3D-프린팅^{xxiii)} 기법으로 심근경색^{xxiv)} 등 허혈성 심장질환자의 심장기능 회복에 유용한 ‘혈관화 심근패치’가 개발되었다.²⁵⁾ 이 심근 패치는 심장에서 유래한 세포들을 3D-프린팅 기법으로 이종 배열하고 내부에 혈관내피성장인자^{xxv)}를 집어 넣어 세포간 상호작용을 극대화시킨 세포 융합 플랫폼이다. 본 패치는 괴사된 심근조직의 혈관 생성을 돕고 이식 후 단시간 내 주변 혈관 구조와 연결되어 전달하는 줄기세포의 생존률과 분화도를 향상시키는 효과가 있다. 다만 이러한 3D-프린팅 기술을 이용한 스캐폴드 및 계면은 심장유래 줄기세포의 증식, 분화, 기능향상을 촉진시키는 환경을 조성하지만, 생체 내부 조직의 부착 및 점착 기술은 부재하여 환자의 심장에 부담을 가할 수 있는 봉합술을 사용하는 한계점이 존재한다. 마지막으로, 미국 펜실베이니아 연구팀에서는 기계적 안정성이 우수하면서도 점착성이 좋아 마이크로 수준의 세포에 점착이 가능한 계면 구조체를 가진 패치를 제시한 바 있다²⁶⁾. 이러한 기술은 수 마이크로미터 수준의 거칠기를 갖는 세포들의 표면에 기계적 안정성과 빈틈없는 점착 성능의 특징을 갖는다. 향후 사람의 피부나 생체 조직에도 긴밀한 점착을 유

xx) 조직이 다른 조직에 제대로 붙어서 사는 비율

xxi) 분산매가 물이거나 물이 기본 성분으로 들어 있는 젤리 모양의 물질

xxii) 수지(樹脂)의 분자가 서로 다리를 놓는 것처럼 결합하는 것으로, 우레탄이나 소부 도료(燒付塗料)가 경화될 때 일어나는 반응

xxiii) 컴퓨터의 3D모델링 소프트웨어로 완성한 입체 모형을 여러 층으로 나눠 한 층씩 쌓아 올려 3차원 모형을 완성하는 것.

xxiv) 심장혈관이 혈전, 연축 등의 원인에 의해 갑자기 막혀서 심장 근육이 손상되는 질환

xxv) 혈관내피세포의 증식을 야기하며 태생기의 혈관계, 조혈계의 발달이나, 종양조직의 혈관신생에도 중요한 역할을 함

지하여 의료용 점착 기술에 응용될 수 있으며, 약물전달이나 세포치료 기술이 융합된 의료용 점착 계면기술로 활용 가능성을 보여주었다.

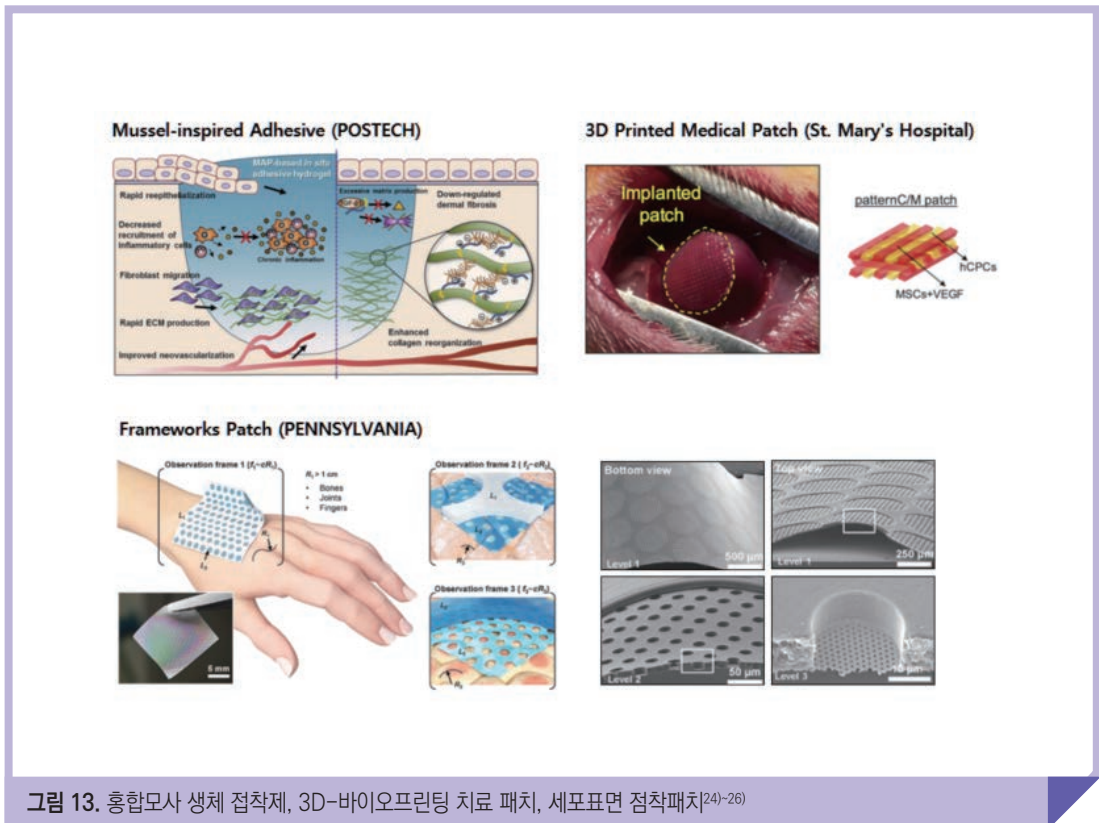


그림 13. 홍합모사 생체 점착제, 3D-바이오프린팅 치료 패치, 세포표면 점착패치^{[24]-26)}

03 결론

2010년대 소형 경량화된 스마트폰과 태블릿PC 등 스마트 기기의 발전은 사용자의 정보를 수집하고 진단 및 치료에 활용 가능한 다양한 개념의 웨어러블 디바이스 기술 구현을 가능하게 했다. 최근에는 웨어러블 디바이스의 발전동향에 따라 단순히 휴대기기와 같은 액세서리형에서 벗어나, 피부 및 인체 내부의 장기에 직접적으로 부착하는 형태의 신체부착/생체이식형의 진화된 개념의 웨어러블 디바이스들이 개발되고 있다. 이러한 맥락에서 생체모사 기반 미세구조 및 소재 기술들은 소자와 피부/장기 표면 사이 계면의 개선을 통해 치료 및 진단 기술의 획기적인 돌파구를 제시할 것으로 예상된다.

그러나 현재까지는 제품화 신체부착/생체이식형 소자의 계면 기술들은 주로 화합물 기반 점착제 및 봉합의 방법을 사용하였으며, 효율적인 진단과 국부적인 치료를 위한 소자와 인체 표면간의 계면 기술들이 부족한 실정이다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 계면 및 점착기술들은 아직까지 국내외 대학과 연구소의 개발 단계에 머무르고 있다. 이러한 측면에서 생체모사기반 점착 계면 기술은 단기적으로 기존의 의료용 패치 및 테이프와 장기 봉합을 위한 점착 기술로 활용될 수 있으며, 장기적으로 웨어러블 신체부착/생체이식형 소자의 고성능 진단 및 향후 세포조직공학과 결합된 고효율 치료를 위한 계면기술로도 잠재력이 높을 것으로 기대된다.

저자 방창현

Changhyun Pang

학력 서울대학교 기계공학 박사
성균관대학교 화학공학 학사

경력 現) 성균관대학교 화학공학/고분자공학부 조교수
前) 스탠포드대학교 박사 후 연구원
前) 서울대학교 박사 후 연구원

참고문헌

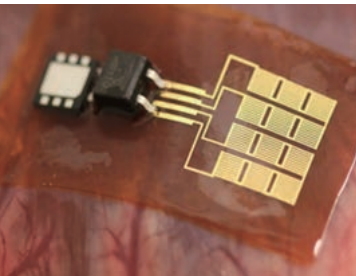
1. 심수민. 2014 웨어러블 산업백서. KT경제경영연구소, (2014)
2. 김다완, 정수연 & 방창현. 생체 모사기반 웨어러블 진단 패치 개발. 고분자 과학과 기술 25, 422-426 (2014)
3. 웨어러블 디바이스 기술 및 시장 동향, S&T Market Report 26 (2015)
4. Wearable Techonlogy.Frost&Sullivan 9AA5-00-01 (2014)
5. 고현협, 박종화, 이영오. 웨어러블 헬스케어용 화학공정소재 기술동향KEIT PD 이슈리포트 17-4 (2017)
6. Kim, D.-H. et al. Epidermal electronics. science 333, 838-843 (2011).
7. Fitzpatrick, D. Implantable electronic medical devices. (Elsevier, 2014).
8. Dagdeviren, C. et al. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 1927-1932 (2014).
9. Kim, D.-H. et al. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin, conformal bio-integrated electronics. Nature materials 9, 511 (2010).
10. Jonsson, A. et al. Therapy using implanted organic bioelectronics. Science advances 1, e1500039 (2015).
11. Pang, C. et al. Nano meets beetles from wing to tiptoe: versatile tools for smart and reversible adhesions. Nano Today 7, 496-513 (2012).
12. Bae, W. G. et al. Enhanced skin adhesive patch with Modulus-Tunable composite micropillars. Advanced healthcare materials 2, 109-113 (2013).
13. Kim, T., Park, J., Sohn, J., Cho, D. & Jeon, S. Bioinspired, highly stretchable, and conductive dry adhesives based on 1D-2D hybrid carbon nanocomposites for all-in-one ECG electrodes. ACS nano 10, 4770-4778 (2016).

참고문헌

14. Pang, C. et al. Highly Skin-Conformal Microhairy Sensor for Pulse Signal Amplification. *Advanced materials* 27, 634-640 (2015).
15. Park, Y. et al. Microtopography-Guided Conductive Patterns of Liquid-Driven Graphene Nanoplatelet Networks for Stretchable and Skin-Conformal Sensor Array. *Advanced Materials* 29 (2017).
16. Baik, S., Park, Y., Lee, T.-J., Bhang, S. H. & Pang, C. A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi. *Nature* 546, 396-400 (2017).
17. 백승기 & 박정환. 경피 약물 전달을 위한 마이크로니들의 제조. *전기전자재료* 26 (2013).
18. RL Bronaugh, HI Maibach. *Percutaneous Absorption: Drugs-Cosmetics-Mechanisms-Methodology*, 4th edition. New York: Marcel Dekker (2005)
19. Prausnitz, M. R., Mikszta, J. A., Cormier, M. & Andrianov, A. K. in *Vaccines for Pandemic Influenza* 369-393 (Springer, 2009).
20. Lee, H. et al. A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for diabetes monitoring and therapy. *Nature nanotechnology* 11, 566-572 (2016).
21. Yang, S. Y. et al. A bio-inspired swellable microneedle adhesive for mechanical interlocking with tissue. *Nature communications* 4, 1702 (2013).
22. DeMuth, P. C. et al. Vaccine delivery with microneedle skin patches in nonhuman primates. *Nature biotechnology* 31, 1082-1085 (2013).
23. 신영민 & 신홍수. 생분해성 고분자를 이용한 조직공학용 재료의 개발 현황. *Polymer Science and Technology* 18, 458-464 (2007).
24. Jeon, E. Y., Choi, B.-H., Jung, D., Hwang, B. H. & Cha, H. J. Natural healing-inspired collagen-targeting surgical protein glue for accelerated scarless skin regeneration. *Biomaterials* 134, 154-165 (2017).

참고문헌

25. Jang, J. et al. 3D printed complex tissue construct using stem cell-laden decellularized extracellular matrix bioinks for cardiac repair. *Biomaterials* 112, 264-274 (2017).
26. Kim, J. et al. Nonlinear Frameworks for Reversible and Pluripotent Wetting on Topographic Surfaces. *Advanced Materials* 29 (2017).



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 (TEL) 02-958-4984