

산학연 연구실 소개 (2)

KAIST 기능성 박막 연구실

(KAIST Functional Thin Films Laboratory)

주소: (우: 34141) 대전시 유성구 대학로 291 한국과학기술원 응용공학동 생명화학공학과 6114호

전화: 042-350-3976

E-mail: sgim@kaist.ac.kr, 홈페이지: <http://ftfl.kaist.ac.kr>



연구책임자 | 임성갑 교수
KAIST 생명화학공학과

1. 연구실 소개

본 연구실에서는 '개시제를 이용한 화학 기상 증착법(initiated chemical vapor deposition, 이하 iCVD)'을 이용하여 새로운 기능성 고분자들을 박막 형태로 합성하고, 이를 여러 응용 분야에 활용하고 있다. iCVD는 진공 상태의 반응기 내부에 단량체(monomer)와 개시제(initiator)를 기체 상태로 주입하여 용매가 없는 상태에서 고분자를 중합하는 신공정이다. 이 공정을 통하여 고분자를 중합하게 되면, 원하는 표면에 수 나노 수준의 박막 형태로 고분자를 코팅할 수 있을 뿐 아니라 높은 순도의 고분자를 얻을 수 있게 된다. 뿐만 아니라 60여 종 이상의 다양한 기능기를 갖는 고분자 박막을 복잡한 표면 구조를 갖는 기판 위에 손상 없이 도포할 수 있기 때문에, 온도감응성(thermoresponsibility), 생체적합성(biocompatibility), 초발수성, 항균성 등 다양한 기능의 표면 특성을 부여하는 것이 가능하다. 본 연구실에서는 이러한 장점을 갖는 iCVD 기반 고분자 박막을 이용하여 의료, 전자, 나노과학 등 다양한 분야에서 필요로 하는 표면 개질에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

이와 같은 iCVD 기반 기능성 고분자 박막의 응용 기술 개발을 통해 최근 3년간 *Nature Materials*, *Advanced Materials*, *Advanced Functional Materials*, *ACS Nano*, *Biomaterials*, *Chemistry of Materials* 등 여러 high-impact journal에 연구 결과를 발표하였다.

2. 주요 연구분야

2.1 Sub-100nm 고성능 나노 접착제 개발 및 고성능 미세유체소자(Microfluidic Device)로의 응용

미세유체소자는 수 마이크로 크기의 작은 채널에서 일어나는 유체의 유동현상을 활용하여 다양한 MEMS 기반 응용이 이루어지고 있다. 따라서 유체의 흐름이 이루어지는 마이크로 크기의 채널의 형태를 그대로 유지하기 위해서는 채널의 크기보다도 훨씬 얇으면서도 마이크로 채널을 기판 위에 강력하게 고정할 수 있는 접착제가 필요하다. 그러나 대부분의 기존 액상 형태의 접착제나 테이프 형태의 감압접착제는 수십 마이크로 이상의 두께로 이루어져 있기 때문에, 미세유체소자 제작에 적용이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구실에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 에폭사이드(epoxide) 작용기를 가진 고분자 박막을 마이크로 또는 나노 구조가 있는 표면에 iCVD 공정을 이용해 도포하고, 이를 활용하여 총 두께가 100 nm 이하의 나노 접착제를 개발하였다(*Lab Chip*, **13**, 1266 (2013)). 이렇게 개발된 나노 접착제는 얇은 두께를 가짐에도 불구하고 2.5 MPa 이상의 초강력 접합강도를 가질 뿐 아니라, 다양한 유기 용매와 열에 대해서도 접착 성능이 그대로 유지되었다. 또한 나노접착제는 유리나 웨이

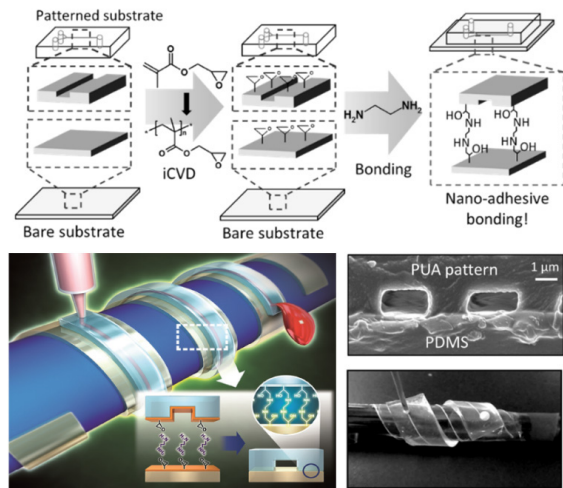


그림 1. iCVD를 이용한 나노접착제 개발 모식도 (위), 나노접착제를 사용해 개발한 새로운 형태의 미세유체소자의 실제 모습 (아래).

퍼 뿐 아니라 얇은 플라스틱 기판이나 메탈 필름과 같은 다양한 유연성 기판 위에도 제한 없이 적용이 가능하기 때문에, 이를 활용하여 구부러지거나 접을 수 있는 새로운 형태의 미세유체소자 개발뿐만 아니라 다양한 산업재료의 확대 적용 역시 기대된다.

이와 같은 나노 접착제를 미세유체소자 제작에 적용하면, 층류(laminar flow) 구동에만 의존하면 미세유체소자 내에서 난류(turbulent flow) 구동이 가능하여짐을 보였다(Lab Chip, 15, 1727 (2015)). 난류는 물질의 전달을 층류보다 원활하게 하여 유체간의 혼합을 매우 빠르게 할 수 있기 때문에, 이를 통하여 우수한 유체간 혼합, 고출력 화학반응기 제조 등 기존의 미세유체 소자가 지니고 있던 단점을 극복할 수 있는 새로운 플랫폼 기술의 역할을 할 것으로 기대된다.

2.2 iCVD 공정을 이용한 다양한 기능성 섬유 및 분리막 개발

일반적으로 종이나 직물, 멤브레인과 같이 물리적, 화학적으로 손상받기 쉬운 기판 위에 고분자 박막을 균일하게 도포하는 것은 대단히 어렵다고 알려져 있다. iCVD 공정은 기체 상태의 반응물들을 이용하여 기판의 표면에서 고분자를 직접적으로 합성하는 공정이기 때문에, 기판의 종류에 무관하게 다양한 작용기를 갖는 고분자를 수 나노미터 수준의 초박막의 형태로 코팅하는 것이 가능하다. 본 연구진은 이러한 장점을 활용하여 내구성이 강하면서도 높은 발수 특성을 가지는 섬유를 개발하였다. 이 초발수성 섬유는 내열성, 내오염성이 매우 우수하며, 80회 이상의 세탁 이후에도 초발수성을 잃지 않는다는 장점을 가진다(Polym. Chem., 4, 1664 (2013)). 특히 이러한 초발수 특성을 섬유의 한쪽 면에만 선택적으로 부여하는 것이 가능하며, 발수-친수 성능을 동시에 가지는 “야누스(Janus) 섬유”의 개발 역시 보고한 바 있다(ACS Appl. Mater. Interfaces, 6, 4005 (2014)). 이는 향후

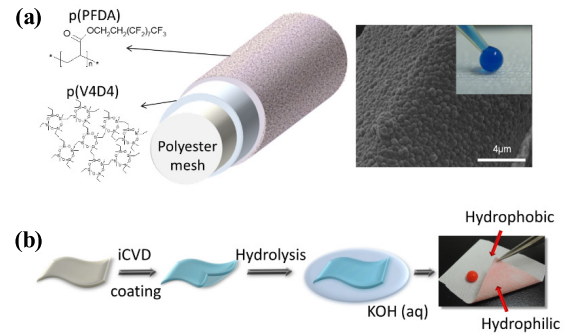


그림 2. (a) iCVD를 이용하여 제작한 내구성이 우수한 초발수 섬유의 도식도와 사진, (b) 초발수 섬유의 한쪽 면을 개질하여 제작한 야누스 섬유의 도식도와 사진.

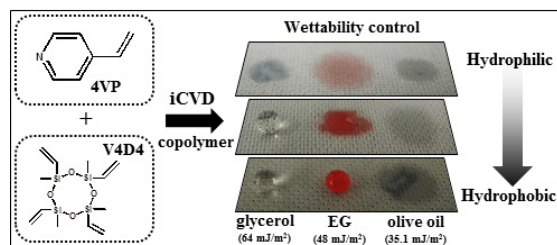


그림 3. iCVD를 이용하여 제작한 액체 분리막.

아웃도어 의류 산업이나 의료 산업에서 활용도가 높을 것으로 보인다.

또한 본 연구팀에서는 iCVD 공정을 분리막 개발에도 활용하고 있다. iCVD 공정을 이용하면 두 가지 이상의 작용기를 가지는 다양한 조성의 공중합체(copolymer)를 혼합 과정에서 상분리에 대한 우려 없이, 멤브레인과 같은 다공성 기판에 균일하게 도포할 수 있는데, 이를 통하여 다공성 멤브레인 기판의 표면에너지를 정밀하게 조절할 수 있음을 보고한 바 있으며, 이를 이용하여 다양한 표면장력을 갖는 용매들 간의 선택적 분리에 적용함으로써, 고성능의 액체 분리막을 개발하였다(Chem. Mater., 27, 3441 (2015)).

2.3 iCVD 고분자 박막을 이용한 전자소자용 재료 개발

최근 웨어러블(wearable), 플렉시블(flexible) 전자기기 및 디스플레이의 수요가 높아지면서 고분자를 포함한 다양한 유기재료를 이용하여 고성능의 유기전자소자(organic devices)를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며 성공적인 제품화를 위해서는 우수한 성능의 재료 물질 개발이 필수적이다. 본 연구진은 iCVD 공정의 대표적 장점인 대면적 공정으로의 확장 가능성과 초고순도의 고분자 물질 개발이 가능하다는 점을 활용하여 고성능의 유기전자소자의 구현을 가능하게 하는 신소재 개발 연구를 진행 중이다.

일반적으로 유기전자소자는 대기 중의 산소 및 수분에 노출될 시 급격한 성능 저하가 일어난다는 문제점을 가진 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구실에서는 유연성이 높은

iCVD 유기막과 산소 및 수분 투과도가 낮은 원자층 증착 공정(atomic layer deposition, ALD) 무기막을 활용하여 높은 유연성을 가지는 유무기 복합 다층막을 제작하고, 이를 고성능 봉지 재료로 응용하는 연구를 진행하고 있다. 이렇게 개발된 유무기 복합 다층막은 38 °C, 상대습도 90%의 가속 조건에서 10^{-4} g/m²/day 이하의 우수한 수분투과율을 가질 뿐 아니라 얇은 플라스틱 기판 위에도 적용될 수 있을 정도로 우수한 유연성을 보인다(*J. Appl. Polym. Sci.* **131**, 40974 (2014)).

또한 본 연구실에서는 전자기기에서 가장 넓은 면적을 차지하면서도, 전자기기 내부 회로를 구성하는 핵심 단위 소자인 트랜지스터(transistor)의 성능을 극대화하는 데 중추적인 역할을 하는 고성능의 고분자 절연막(insulator)을 개발하는 원천 기술 또한 확보하고 있다. 본 연구실에서 확보하고 있는 iCVD 고분자 절연막은 10 nm 이하의 얇은 두께로도 우수한 절연 특성을 보일 뿐 아니라, 고분자 특유의 유연성을 가지고 있다. 이를 활용하여 고이동도 그래핀(graphene) 트랜지스터, 저전압(2 V 이하) 구동 트랜지스터, 대면적 프랜지스터 회로 등을 구현하는 데 성공하였고, 이와 같은 연구 성과는 최근 *Nature Materials*에 보고된 바가 있다(*Nat.*

Mater. **14**, 628 (2015)). 따라서 iCVD 기반 고분자 전자 재료 물질들은 향후 다양한 유연성, 저전력 미래형 전자기기 제작에 있어 핵심적인 요소소재로 활용될 것으로 기대되며, 이 분야의 기술경쟁력의 우위를 확보하는 데에도 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

2.4 조직공학(Tissue Enineering)용 바이오 재료 개발

조직공학은 질병이나 사고로 인해 손상된 인체의 생체조직이나 장기를 대체하거나 재생할 수 있게끔 하는 기술로, 의료 및 생물 관련 연구 분야에서 매우 중요하게 각광을 받고 있는 분야이다. 이러한 조직공학 연구를 위해서는 생체조직의 세포의 기질(extracellular matrix, ECM)의 다양한 역할을 모방하여 세포의 부착, 증식 및 분화에 참여하는 중요한 역할을 하는 고분자 지지체의 개발이 필수적이다. 하지만 기존에 이용되던 고분자 지지체는 선택폭이 좁고 물리적 성

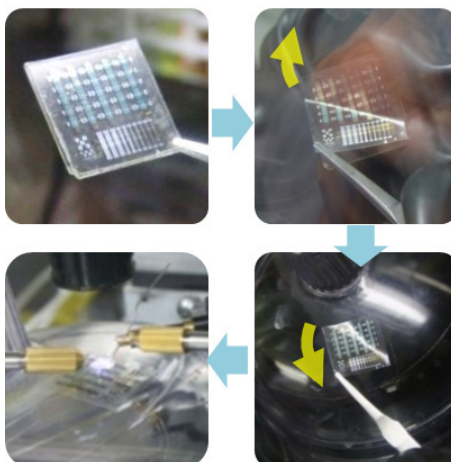
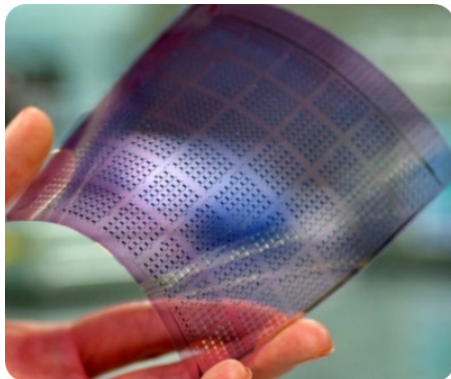


그림 4. iCVD 고분자 절연막을 이용하여 제작한 다양한 형태의 플렉시블 전자소자.

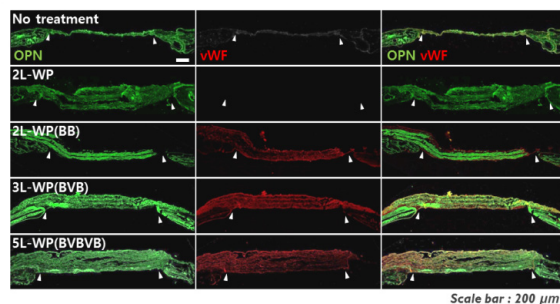
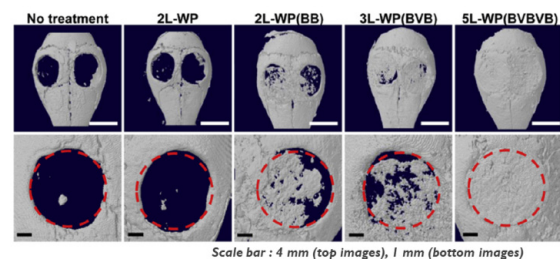


그림 5. iCVD 고분자가 코팅된 세포 지지체를 활용한 쥐 두개골의 골형성.

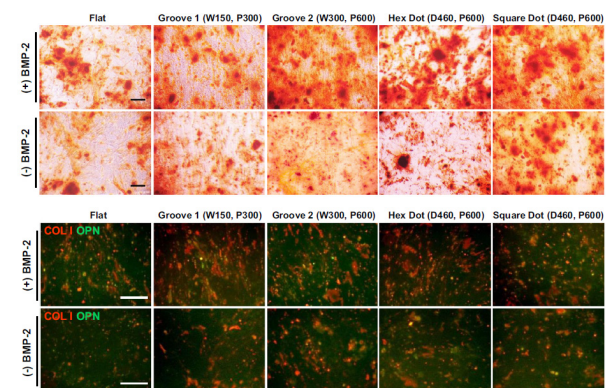


그림 6. 패턴 구조와 표면 화학적 특성에 따른 골세포 분화.

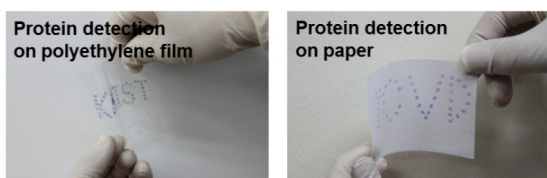
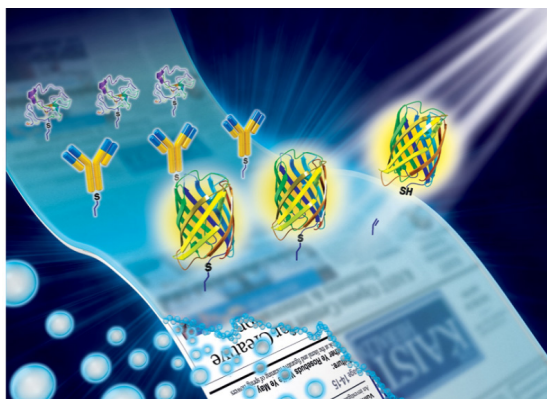


그림 7. 본 연구실에서 제작한 바이오센서의 모식도 (위) 및 실제 센서 사진 (아래).

질이 약하여 생체 적합성과 장기간 사용 가능성 측면에서 한계점을 지니고 있다. 이에 본 연구실에서는 iCVD 공정을 이용하여 셀룰로오스를 재료로 한 친환경 지지체에 초소수성 기능성 고분자를 코팅하여 세포 배양/조작 공정과 생체 내로 이식이 가능한 종이를 기반으로 하는 지지체를 개발하였다(*Biomaterials*, **35**, 9811 (2014)). 또한 다양한 나노패턴 위에 iCVD 기능성 고분자를 코팅한 후 특정 단백질을 고정하여, 세포 배양 기관의 단백질에 의한 화학적 특성과 나노패턴에 의한 물리적 특성이 줄기세포의 분화 거동에 미치는 영향에 대한 연구도 진행하고 있다(*Biomaterials*, **34**, 7236 (2013)).

2.5 기능성 고분자를 활용한 바이오 센서 개발

최근 질병 예방에 대한 관심이 높아지면서, 보다 쉽고 빠르게 질병을 진단할 수 있도록 돕는 바이오센서에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 기존의 바이오센서는 바이러스를 검출하는 항체를 안정적으로 고정시키기 위한 기판으로서 금이나 유리 등을 사용하고 있기 때문에 생산 단가가 높고, 휴대가 어렵다는 단점이 있다. 본 연구실에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 종이나 비닐 등 물리적으로 약한 기판 위에 iCVD 기능성 고분자를 코팅하고, 이 위에 항체를 고정화시켜 바이오센서로 활용할 수 있게끔 새로운 형태의 바이오센서를 제작하였다(*Polym. Chem.* **5**, 4459 (2014)). 이는



〈기능성 박막 연구실 구성원〉

향후 구제역과 같은 급속한 전파력을 갖는 바이러스성 질병을 현장에서 신속하게 진단할 수 있게끔 하는 중요한 요소기술이 될 수 있을 것이다.

3. 기능성 박막 연구실 구성원 소개

현재 본 연구실에는 지도교수인 임성갑 교수와 더불어 연구교수 1명, 박사과정 10명, 석사과정 6명, 학부 과정 2명 등의 연구자들이 위에 기술된 다양한 background의 흥미로운 연구주제들에 대한 연구를 수행 중이다.

4. 연구실 대표 연구실적

1. H. Moon, H. Seong, W. C. Shin, W. T. Park, M. Kim, S. Lee, J. H. Bong, Y. Y. Noh, B. J. Cho, S. Yoo, and S. G. Im, "Synthesis of ultrathin polymer insulating layers by initiated chemical vapour deposition for low-power soft electronics", *Nat. Mater.* **14**, 628 (2015).
2. J. B. You, K. Kang, T. T. Tran, H. Park, W. R. Hwang, J. M. Kim, and S. G. Im, "PDMS-based turbulent microfluidic mixer", *Lab Chip*, **15**, 1727 (2015).
3. H. Seong, J. Baek, K. Pak and S. G. Im, "A Surface Tailoring Method of Ultrathin Polymer Gate Dielectrics for Organic Transistors: Improved Device Performance and the Thermal Stability Thereof", *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 4462 (2015).
4. M. J. Kwak, M. S. Oh, Y. Yoo, J. B. You, J. Kim, S. J. Yu, and S. G. Im, "Series of Liquid Separation System Made of Homogeneous Copolymer Films with Controlled Surface Wettability", *Chem. Mater.*, **27**, 3441 (2015).
5. J. B. You, Y. Yoo, M. S. Oh, and S. G. Im, "Simple and Reliable Method to Incorporate the Janus Property onto Arbitrary Porous Substrates", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 4005, (2014).