

산학연 연구실 소개(2)

서강대학교 화공생명공학과 고분자 재료 연구실

(Polymer Materials Lab., Dept. of Chemical & Biomolecular Eng., Sogang University)

주소: 서울시 마포구 백범로 35 서강대학교 화공생명공학과 공학관 515호 (우 04107)

전화: 02-705-8483

E-mail: hwrhee@sogang.ac.kr, Homepage: <http://sgpml.sogang.ac.kr>

연구책임자 | 이희우 교수

서강대학교
화공생명공학과

1. 연구실 소개

본 연구실은 1993년에 설립이 되어, KIST에서의 5.5년간의 연구경력을 이어서 지난 26년간 기능성 고분자(전도성)의 물성 향상과 응용을 연구를 해왔고, 특히 고분자 나노복합재료를 이용하여 차세대 에너지 분야와 반도체 재료의 개발을 주도하고 있다. 특히 물질의 크기를 나노미터로 제어할 때 나타나는 불연속적인 특성의 변화를 이해하고 활용하는 것은 매우 중요하며, 이를 통해 혁신적인 신소재의 개발이 가능하다고 생각한다.

나노복합재료는 기존의 복합재료와는 달리 매우 특이한 특성(전기적, 광학적 특성)을 가지므로 이를 활용하여 고분자의 기능성과 기계적 물성을 동시에 향상시킴으로써 전자 기기 및 전기 자동차(electric vehicle)의 심장인 차세대 전 고체 배터리(all solid state battery)를 연구하고 있고, 또한 수소경제 시대의 총아인 수소 전기차(fuel cell vehicle)의 성능을 향상시키고 가격을 낮추는데 핵심적인 역할을 하는 고분자 나노복합전해질막을 개발하고 있다. 한편 미래 전자 기기의 두뇌에 해당하는 차세대 시스템 반도체의 다층 구리 배선을 절연하는 층간 절연재료를 개발하고 있다. 이들 세 분야에서는 세계적으로 가장 선두에 있으며 기업들과의 검증을 통해 모든 물질들이 상용화가 가능한 물성들을 갖추고 있다. 그리고 이러한 결과를 바탕으로 벤처기업인 Midas Materials를 창업하여 기술이전 및 상용화를 추진하고 있다. 또한 삼성디스플레이 연구센터의 센터장으로서 폴더블폰을 비롯한 차세대 디스플레이 산업에 요구되는 신소재의 개발과 인력 양성을 하고 있다.

2. 주요 연구 분야

2.1 수소 전기차 개발을 위한 고분자연료전지막 및 셀 성능 향상

현재의 에너지원인 석유는 매장량이 제한적이며 미래에는 석유화학의 원료로서 보존을 해야만 하고, 또한 미래 경제는 현재의 석유경제에서 수소를 기반으로 하는 수소경제 시대가 도래할 것으로 예측을 하고 있다. 따라서 미세먼지와 지구 온난화 등을 해결하기 위해서는 내연기관을 사용하는 자동차에서, 전기 자동차를 거쳐 2040년경이면 궁극적으로는 수소 전기차가 90% 이상이 사용될 것으로 전망하고 있다.

현재 수소 전기차를 개발하는데 있어서 가장 큰 걸림돌은 촉매와 고분자 전해질의 가격이 비싸다는 것이고, 특히 후자는 막-전극 접합체(membrane-electrode assembly) 가격의 35% 정도를 차지하고 있다. 따라서 수소 전기차의 상용화를 앞당기기 위해서는 고분자 전해질의 성능을 높이고 기계적 강도를 증가시켜 전해질막의 두께 또는 사용량을 줄이는 것이 매우 중요한 변수가 된다.

따라서 본 연구실에서는 고분자 전해질 내에 존재하는 나노채널을 활용하여 이들 문제를 해결하

고자 하였다. 먼저 나노입자를 기능화시켜 프로톤을 주는 물질과 받게 물질을 설계하여 이를 나노채널 내에 균일하게 분산을 시키고 Grotthuss mechanism 을 활용하여 전도성을 현저히 향상시켰다. 또한 나노복합막은 기계적 강도가 뛰어나 뿐만 아니라 동시에 유연성을 가지고 있으므로 계면에서의 저항을 현저히 줄일 수 있어 셀 성능이 비약적으로 증가하였다. 불소계 나노복합 전해질막(Nafion NC)은 DOE 목표치($1,000 \text{ MW/cm}^2$, 2020년) 보다도 훨씬 우수한 성능을 얻었으며, 탄화수소계막 나노복합막(sPEEK NC)의 경우에는 상용 불소계 전해질막보다도 우수한 전도도를 얻었고, 저렴한 나노복합막을 개발함으로써 수소전기차의 상용화의 가능성을 현저히 높였다. 더구나 본 연구실에서 고안한 방법은 어떤 고분자 전해질에도 적용할 수 있는 장점이 있고, 아주 적은 양을 사용하여도 효과가 아주 뛰어나다는 장점과 나노채널의 크기에 따라 최적량이 존재함을 확인하였다.

한편 포항가속기를 이용한 SAXS를 사용하여 나노채널의 크기를 분석하는 기술을 확립하였으며 또한 나노입자와 필름 제조법에 따라 나노채널의 크기를 다양하게 조절할 수 있으며, 특히 나노입자의 함량에 따라 채널의 크기가 증가하며 최대 약 50% 까지 증가하였고, 이는 MEA의 성능의 향상과 밀접한 관련이 있다.

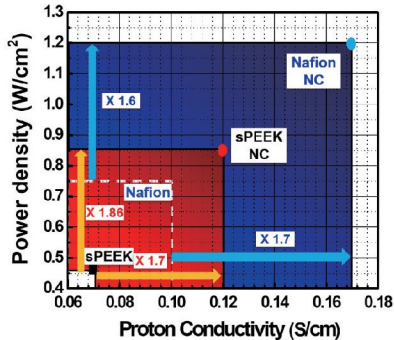


그림 1. 나노복합막의 전도도 및 셀 성능 증가.

2.2 차세대 전 고체 배터리의 개발을 위한 고체 고분자 전해질막의 개발

현재 전자 기기 및 전기 자동차의 전원으로 사용되는 리튬 이온 배터리(LiB)는 액체 전해질을 사용함으로 인해 충·방전에 따른 폭발을 원천적으로 방지할 수 없다. 이로 인해 노트북, 휴대폰, 테슬라의 자동차 폭발 사고 및 최근 화웨이 휴대폰의 폭발까지 다양한 폭발 사고가 끊어지지 않고 있으며 앞으로 배터리의 고밀도화가 되면 더 빈번한 폭발이 예상된다. 따라서 현재의 LiB 및 성능 증가에 따른 폭발을 방지하고 차세대 리튬-금속 배터리, 리튬-공기 배터리 등을 개발하기 위해서는 고체 전해질을 반드시 개발하여야만 한다.

그러나 세라믹 전해질을 포함한 전 고체 배터리는 아직도 개발이 되지 않고 있으며 한편 고분자 전해질은 지난 60년간의 지속적인 연구를 통해 3세대(동그라미 1,2,3)까지 개발이 되었지만 그림 4에서 보는 바와 같이 상온(dry state)에서의 전도도는 약 10^{-5} S/cm 대에 머물러 있고 저온에서의 전도도가 낮아 상업적으로 활용할 만한 고체 전해질이 개발이 되지 않고 있다. 이는 poly(ethylene oxide)를 비롯한 고분자(matrix)의 유전상수가 낮음으로 인해 리튬 이온의 해리가 어렵고 또한 고분자의 분절 운동에 의해 이온의 전달이 매우 느리기 때문이다. 한편 최근에는 음이온이 큰 리튬 염

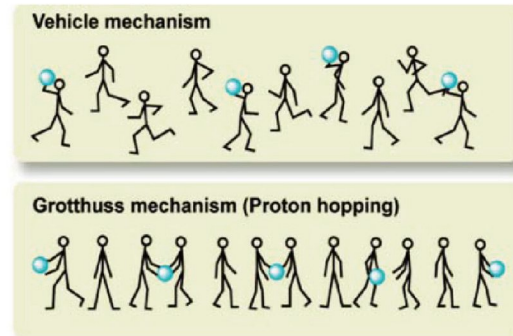


그림 2. 프로톤 전달 mechanism.

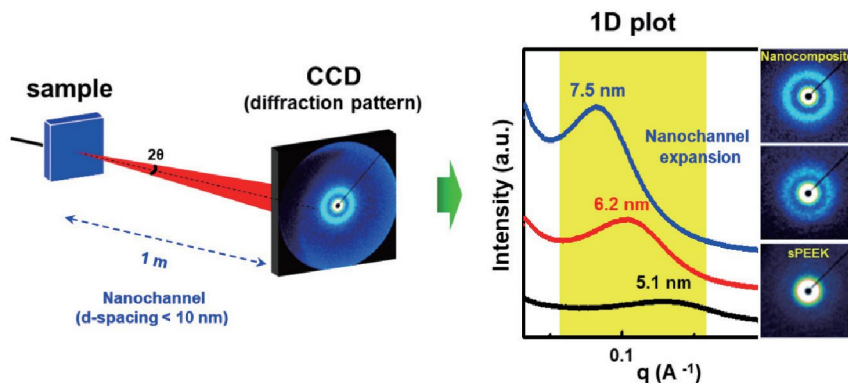


그림 3. SAXS with synchrotron radiation source and 1 D plot of nanocomposite membranes.

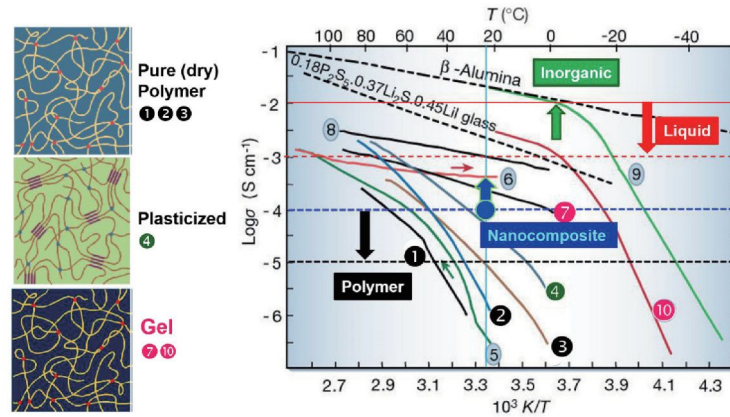


그림 4. 온도에 따른 모든 전해질의 전도도.

을 사용하여 전도도를 크게 향상시켰으나 아직 상온 이온전도도는 여전히 $\sim 10^{-4}$ S/cm 에 도달하지 못하고 있으며, 가소화 효과로 인해 필름의 물성이 급격히 저하하는 문제를 해결하지 못하고 있다.

본 연구실에서는 나노입자의 말단에 에틸렌 글리콜(EG) 모이어티를 부착하여 PEO matrix와의 상용성을 높여서 나노입자와의 상분리를 방지함으로써 많은 나노입자를 도입하였다. 이렇게 도입된 나노입자는 고분자 전해질막의 유리전이온도를 낮추고 segmental motion을 증가시켜 리튬이온의 이동도를 증가시켰다. 또한 EG의 길이를 조절함으로써 유리전이온도를 조절할 수 있었으며, 강도가 우수한 나노입자를 사용함으로써 음이온이 큰 LiTFSI(lithium trifluoromethanesulfonate) 등을 사용할 경우에도 전해질막의 강도가 급격히 감소(sticky)하는 것을 막을 뿐만 아니라 오히려 크게 향상시킬 수 있었다(그림 5). 따라서 다양한 기능성 나노 입자와 리튬 염을 활용하여 나노복합전해질을 개발하였으며 상온에서의 전도도를 $\sim 10^{-4}$ S/cm 이상으로 향상시켰고, 동시에 가장 취약한 기계적 물성을 현저히 증가시켜 강도가 아주 우수한 필름을 제조하였다. 현재는 차세대 전극을 이용한 전고체 배터리 및 플렉스 배터리 개발을 위해 배터리의 성능을 최적화하고 있다.

2.3 차세대 시스템 반도체 개발을 위한 중간절연재료

반도체 산업은 More than Moore's law에 따라 회로 선폴이 급격히 줄어들고 있으며 이로 인해 비약적인 발전을 해왔다. 그러나 비메모리(시스템) 반도체의 경우에는 선폴이 급격히 줄어들어도 불구하고 이에 상응하는 중간절연재료가 개발이 되지 않아 신호간섭, 신호지연 및 전력소모가 급격히 증가함으로 반도체의 칩의 성능을 충분히 구현하지 못하고 있다. 1993년 이래 반도체 로드맵(Interconnect Chapter)은 중간절연재료의 개발이 늦어짐으로 인해 지난 20년 이상 매년 로드맵 일정이 수정되어 왔다. 특히 Applied



그림 5. 나노복합 전해질막의 비약적인 강도의 향상.

Materials에서 차세대 중간 절연재료로서 개발하였던 Black Diamond III(BD III, $k = 2.3$)의 개발이 실패로 끝남에 따라 이제는 상업적으로 사용할 수 있는 재료는 더 이상 개발이 되지 않고 있으며, 전 세계적으로 현실적인 대안이 없는 상태이다. 이러한 문제는 유전상수를 낮추기 위하여 더 많은 기공의 함량이 증가함에 따라 기공이 뭉치고 커짐에 따른 기계적 강도(modulus)가 급격히 감소하기 때문이다. 그림 7에는 전 세계적으로 개발된 모든 중간 절연재료의 유전상수(k)와 기계적 강도(탄성률, E)를 비교하였다. 현재 반도체 산업에서 사용되는 화학기상 증착법(chemical vapor deposition)의 경우 유전상수를 낮춤에 따라 탄성률의 하락이 너무 커서 더 이상 새로운 재료의 개발은 불가능하다고 판단된다. 이에 반해 상압에서 용액을 사용하여 박막 증착을 하는 spin-on glass (SOG)는 저렴하고 공정성이 매우 우수한 장점이 있다. 이 공정을 이용하여 세계적인 반도체 재료회사들이 유전상수를 1.9까지 낮출 수는 있었으나 이 또한 기공의 크기와 뭉침 현상을 조절할 수가 없어서 탄성률이 4 GPa 에도 미치지 못함으로 인해 어느 것도 상업화된 것이 없는 실정이다.

본 연구실에서는 고강도의 (초)저유전 절연재료를 개발하기 위해 nanoporosity engineering 기법을 활용하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 박막을 증착한 후에 상온에서

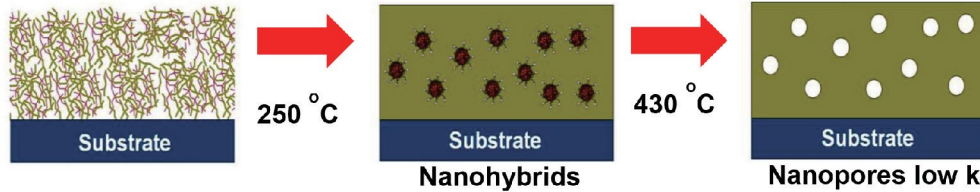


그림 6. 초저유전체 제조를 위한 nanoporosity engineering.

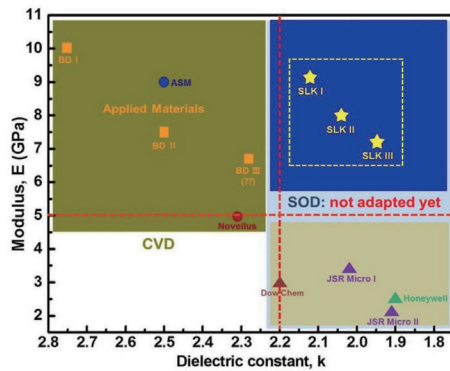


그림 7. 세계적으로 개발된 중간절연재료의 유전상수와 탄성을 관계(SLK: 서강대에서 개발된 초저유전체).

250 °C까지 가열하면 유기실리케이트의 졸-겔 반응이 일어나게 되고 이에 따라 유기실리케이트와 반응형 포로젠과의 상분리(nanohybrid)가 일어나게 된다 이 때 반응형 포로젠의 관능기의 갯수와 관능기의 화학적 구조를 조절함으로써 상분리가 되는 포로젠의 크기를 1 ~ 2 nm로 조절할 수 있었다. 이를 위해 강도가 높은 유기실리케이트 공중합체($k = 2.9$)를 설계하였고, 포로젠(pore generating materials)은 유기 실리케이트의 졸-겔 반응에 참여할 수 있는 반응형(methoxy 또는 ethoxy silyl group) 포로젠을 설계하였다.

이로부터 강도가 매우 우수한 초저유전체(modulus, $E = 8 \text{ GPa}$ @ dielectric constant, $k = 2.0$)를 개발하였으며, 기공의 함량에 따라 유전상수가 매우 선형적으로 감소하므로 차세대 반도체의 공정의 회로 선폭에 따라 유전율을 임의로 조절할 수 있는 장점이 있다. 또한 반응형 포로젠을 사용함으로써 기공의 크기를 전 영역에 걸쳐 1 ~ 2 nm 이하로 조절할 수 있었고, 유전상수가 2.0일 경우에도 CMP 공정에서는 요구하는 탄성률보다 2 GPa 이상의 마진이 있으므로, 전 세계적으로 상용화 요건($E > 5 \text{ GPa}$ @ $k = 2.3$)을 만족하는 유일한 물질이라고 생각한다. 또한 차세대 비메모리 반도체의 CPU 칩의 제조뿐만 아니라 차세대 AI 반도체에 탑재될 NPU(neural processing unit)에 적용할 수 있는 유일한 물질이라고 판단한다.

2.4 플렉서블 디스플레이 패널 보호용 내충격코팅 소재 개발

DMA와 nanoindenter를 사용하여 내충격성이 우수한

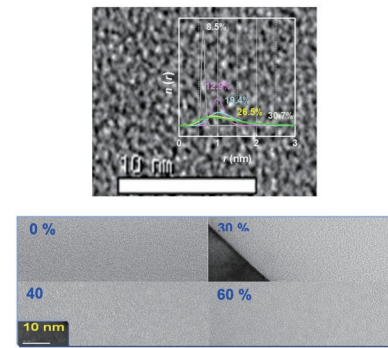


그림 8. 기공함량에 따른 기공크기 및 분포: (a) TEM, (b) SAXS.

소재들의 구조와 물성간의 상관관계 도출하고 이로부터 충격흡수에 대한 메커니즘 규명함으로써 고굴곡 내충격 코팅용 고분자 나노합재료를 설계 및 개발하고 있다. 또한 차세대 신소재는 자가 치유력이 요구되므로 상온에서도 회복력과 자가 치유력이 우수한 소재를 개발하고 있다.

3. 결론

본 연구실에서는 앞으로도 차세대 에너지 산업뿐만 아니라 전자, 디스플레이 및 반도체 산업 등에 핵심적인 재료를 지속적으로 개발하여 국내뿐만 아니라 세계 산업에 활용할 수 있기를 기대한다.

이러한 연구결과를 바탕으로 국내외 논문 223편(*Advanced Materials, Advanced Energy Materials, Nanoscale* 등)을 발표하였고, 국내외 특허 132건을 출원 및 등록하였으며, 3권의 책을 출판하는데 저자 또는 공저자로 참여하였다. 또한 차세대 디스플레이 산업의 경쟁력을 확보하기 위하여 삼성 디스플레이 연구센터를 서강대에 유치하여 지난 5년간의 제 1기를 성공적으로 마쳤다. 올 해 제 2기 협약식을 마치고 앞으로 5년간 차세대 폴더블 디스플레이와 이와 연계된 신규 핵심 재료 등 관련한 공동연구를 진행할 예정이며 또한 연구센터를 통해 전문 인력을 집중적으로 양성하게 될 것이다.

끝으로 이 지면을 빌려 지난 26년동안 어려운 환경과 눈치밥 가운데서도 지도교수를 믿고 열심히 해준 모든 제자들에게 감사의 마음을 표하는 바이다. 또한 같은 동료교수로서 또 공동연구자로서 함께 해 주셨던 모든 분들께 감사의 인사를 드립니다.