

## 국내 분리막 소식

### ■ 세계 최초 미생물 이용, 분리막 오염 예방 기술 개발 폐수처리 공정(MBR)에 분자생물학 접목, 분리막 오염 예방

한국환경산업기술원(원장 김용주)은 국가환경기술개발 사업의 일환으로 연구를 진행한 서울대학교 이정학 교수팀이 세계 최초로 폐수처리 공정에 분자생물학을 접목하여 고질적인 분리막오염(membrane fouling) 문제를 획기적으로 예방하는 기술을 개발했다고 밝혔다. 이번 연구 성과는 세계적 학술지 네이처(Nature) 7월 24일자 기술동향(Technology Feature)란에 소개됐다. 폐수 처리공정인 '분리막 생물-반응기(MBR-Membrane Bio Reactor)'는 폐수의 고도처리와 처리수를 재이용하는 장점이 있어 세계적으로 널리 쓰이고 있다. 세계적인 물부족 문제와 맞물려 MBR 공정은 연평균 20%씩 성장을 거듭하여 2018년 세계시장 규모는 3조 4,000억 원(34억 달러) 규모에 이를 것으로 예상된다. 그러나 MBR 공정은 폐수 중의 미생물이 분리막 표면에 미생물층(생물막)을 형성하여 분리막의 세공이 막히는 고질적인 약점이 있다. 현재는 오염된 분리막을 물리적으로 세척하거나 염소(chlorine) 같은 화학약품을 이용해 오염을 제거하며 여기에 소요되는 에너지 비용이 MBR 운전비용의 약 60%를 차지할 정도다. 이정학 교수팀은 세계 최초로 폐수처리공학에 분자생물학을 접목하여 하폐수 처리용 MBR에서 분리막의 오염을 예방할 수 있는 획기적 기술을 개발했다. 먼저, MBR 폐수 속 미생물이 서로 신호물질을 교환함으로써 여과분리막 표면에 군집(미생물층)을 형성하는 것이 분리막 오염의 주된 원인을 확인했다. 미생물의 신호교환을 차단하기 위해 정족수 감지 억제(Quorum Quenching) 방법을 적용해 분리막의 오염 문제를 원천적으로 해결할 수 있었다. 폐수 속 미생물의 신호교환물질을 차단할 수 있는 미생물 발굴은 배재대학교 이정기 교수팀(바이오·의생명공학과)과 협력 연구를 통해 이루어졌다. 이정학 교수팀은 현재 가동 중인 하수처리장에서 실증 시험한 결과, 기존의 MBR 공정에 비하여 에너지 비용을 절반 수준으로 줄일 수 있었다. 이정학 교수팀은 환경부와 미래창조과학부의 지원으로 10년 넘게 꾸준히 연

구를 이어오면서 세계적으로 이 분야 연구를 이끄는 리더 그룹으로 주목받고 있다. 교수팀은 이번 연구 성과가 세계 시장에 미칠 영향을 고려해 우리나라뿐만 아니라 미국, 일본, 유럽, 중국 등에 각각 특허를 출원했다. 한국환경산업기술원 이종현 미래환경사업실장은 "이 기술은 국내에서 개발한 세계 최초의 원천기술로서 폐수처리분야의 세계시장을 선도하고, 또한 산학연 환경인들의 창의적인 연구개발에 자신감을 불어 넣어 줄 수 있는 훌륭한 모범사례"가 될 것이라고 말했다. [기술사신문 2014. 08. 03]

### ■ 리튬이차전지 성능 3배 높이는 분리막 기술 개발

리튬이차전지 성능을 세 배 이상 향상시키고 안전성을 개선하는 기술이 개발됐다. 소형전지뿐만 아니라 전기차, 스마트그리드용 중대형 전지에 응용될 것으로 보인다.

이상영 울산과학기술대(UNIST) 에너지 및 화학공학부 교수팀은 오팔 보석 구조를 역이용한 리튬이차전지용 분리막을 개발했다고 24일 밝혔다. 나노미터(mm) 단위의 기공이 균일하게 분포된 구조로 리튬이온의 전달력과 내열성을 크게 향상시켰다. 리튬이차전지 분리막은 양극·음극이 닿지 못하게 격리하는 동시에 전해액으로 두 극 사이를 오가며 충전·방전을 가능케 한다. 폴리에틸렌·폴리프로필렌을 주로 쓰지만 기공도가 낮고 구조가 균일하지 못해 전기차 배터리 등 차세대 전지에서 요구되는 고출력, 고속충전 특성을 확보하지 못했다. 고온에서는 분리막이 수축돼 양극·음극이 뒤섞이면서 배터리가 폭발할 위험도 있었다. 연구진이 개발한 분리막은 150℃ 고온에서도 열 수축 현상이 전혀 발생하지 않았다. 리튬이차전지에 적용한 결과 기존 전지에 비해 세 배 이상 출력이 높았고 충전 속도는 갑절 이상 빨랐다. 수명도 세 배 이상 연장되는 등 뛰어난 성능을 보였다. 전해액 흡수력도 향상돼 극성전해액 등 다양한 전해액을 사용할 수 있게 됐다. 기존 분리막은 물에 잘 젖지 않는 특성 때문에 극성이 높은 전해액을 사용할 수 없었다. 연구진이 사용한 오팔 구조는 균일한 크기의 나노입자들이 규칙적·반복

적으로 배열된 구조로 천연 오팔 원석이나 나비 날개 등에서 나타난다. 여기서 나노입자를 제거해 균일한 다공 구조를 만든 것이 역 오팔 구조다. 연구진은 이 모양대로 분리막을 만들어 기존 분리막 한계를 극복했다. 박재문 미래창조과학부 연구개발정책실장은 “전기자동차, 스마트그리드용 중대형 전지 성능과 안전성을 향상시킬 수 있는 신개념 분리막의 기술적 토대를 마련한 데 의의가 있다”고 밝혔다. 대면적 분리막 제조·검증 기술 확보가 상용화를 위한 과제로 제시됐다. 연구는 미래부 ‘기후변화 대응 기술개발사업’ 지원을 받아 수행됐고 미국화학회(ACS)에서 발행하는 화학·재료과학분야 국제학술지 ‘나노레터스’ 온라인판에 소개됐다. [전자신문 2014. 07. 24]

**■ 오팔 보석 구조 모방 분리막을 이용한 리튬전지 출력 3배 향상  
전기차용 전지 성능 한차원 향상시킬 신개념 분리막 개발**

국내 연구팀이 오팔(Opal) 보석 구조에 착안, 기존 리튬이차전지보다 성능과 안전성을 대폭 개선할 수 있는 분리막 소재 원천 기술 개발에 성공했다. 이번 기술 개발로 전기차나 스마트그리드용 중대형 전지의 성능과 안전성을 한차원 향상시킬 수 있을 것으로 관계자들 사이에서 기대감이 모아지고 있다. 미래창조과학부에 따르면 울산과학기술대학교 이상영 교수팀은 LG화학 배터리연구소 김종훈 박사팀과 함께 미래창조과학부 ‘기후변화대응기술개발사업’ 등으로부터 지원받아 규칙적인 입자 배열을 특징으로 하는 오팔(Opal) 보석 구조와 정반대 형태의 역 오팔(inverse opal) 구조를 갖는 신개념 분리막 개발에 성공했다. 신개념 분리막은 나노미터 크기의 기공(pore)들이 균일하게 분포된 다공성 구조의 특징으로 인해 리튬이온 전달 특성 및 내열성을 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 현재 모바일 전원 등으로 널리 쓰이는 리튬이차전지는 시트(sheet) 형태의 양극, 음극 및 전해액 이외에, 미세 기공을 가진 필름인 분리막(separator membranes)으로 구성되는데, 이 분리막은 두 전극이 서로 닿지 못하도록 격리시키는 동시에 분리막 내부 다공 구조에 채워진 전해액을 통해 리튬이온이 양극-음극 사이를 이동해 충전과 방전을 가능케 하는 중요한 역할을 한다. 지금까지 분리막 소재로 폴리에틸렌 혹은 폴리프로필렌 등이 많이 쓰였으나, 낮은 기공도와 불균일한 기공 구조로 인해 전기자동차용 전지와 같은 차세대 전지에서 요구되

는 고출력, 고속 충전 등의 특성을 확보하기에는 어려움이 있었다. 또한 전지 온도 상승시 분리막 열 수축에 의해 양극과 음극이 맞닿게 돼 폭발이나 발화 우려도 존재했다. 연구팀은 기존 분리막 소재의 한계를 극복하기 위해 100나노미터 크기의 실리카 나노입자를 가교반응이 가능한 아크릴 고분자와 혼합하고, 이를 폴리에스테르 다공성 지지체에 채워 넣은 후 자외선에 15초 노출시킴으로써 가교 고분자를 제조했다고 밝혔다. 여기서 실리카 나노입자만을 선택적으로 제거하는 간단한 공정으로 역 오팔 나노 구조 분리막을 개발할 수 있었다는 설명이다. 개발된 역 오팔 분리막은 150℃ 고온에서도 전혀 열수축이 발생하지 않아 전지 폭발 및 발화 위험성을 크게 감소시켰을 뿐 아니라, 리튬이차전지에 적용한 결과 기존 전지에 비해 3배 이상의 출력 특성, 2배 이상의 충전 속도 및 3배 이상의 수명 연장 등 높은 성능을 보였다고 연구팀은 전했다. 게다가 우수한 친수성으로 인해 기존 전지에서는 적용되기 어려웠던 극성 전해액 사용도 가능하다. 미래부 박재문 연구개발정책실장은 “이번 연구성과를 토대로 향후 상용화를 위한 대면적 분리막 제조 및 검증 등의 과제가 남아있지만, 기존 소형 전지뿐 아니라 전기자동차 및 스마트그리드용 중대형 전지의 성능과 안전성을 한 차원 향상시킬 수 있는 신개념 분리막의 기술적 토대를 마련한 데에 큰 의의가 있다”고 밝혔다. 이번 연구 성과는 화학·재료과학분야 세계적 권위지인 ‘나노 레터스(Nano Letters)’ 온라인 논문에 게재(논문명: Inverse Opal-Inspired, Nanoscaffold Battery Separators: A New Membrane Opportunity for High-Performance Energy Storage Systems)됐다. [환경미디어 2014. 07. 28]

**■ 감염에 강한 비흡수성 멤브레인  
노출 개선으로 연조직 부족 케이스 성공률 높여**

오스템임플란트(대표 최규욱·이하 오스템)가 출시한 미국 Osteogenics사의 ‘Cytop-last PTFE 멤브레인’이 비흡수성 멤브레인의 장점을 앞세워 꾸준한 사랑을 받고 있다. 멤브레인 시장은 크게 흡수성 멤브레인과 비흡수성 멤브레인 시장으로 나눌 수 있는데, 흡수성 멤브레인은 편리한 시술이 장점이라면, 비흡수성 멤브레인은 장기간 형태를 유지해야 하는 케이스에 주로 이용된다. 비흡수성 멤브레인 ‘Cytoplast PTFE’의 가장 큰 특징은 비흡수성 임에도 감염에 강하다는 점이다. 기존 Gore-Tex 재질의

비흡수성 멤브레인이 노출됐을 경우, 감염에 취약했던 것에 반해 'Cytoplast PTFE'는 0.2 $\mu$ m hore size로 2~5 $\mu$ m 크기의 박테리아가 침입 자체를 할 수 없다. 덕분에 멤브레인이 외부로 노출되더라도 박테리아 침투에 의한 감염의 위험이 낮아 안전하게 사용할 수 있다. 또 티타늄이 보강된 'Cytoplast PTFE'의 경우, 불림형성이나 공간을 필요로 하는 골증대 시술에 쉽게 적용 가능하다. 오스텀 관계자는 "기존 비흡수성 멤브레인 PTFE 소재의 가장 큰 단점이었던 멤브레인 노출을 개선시켜 일반적인 GBR 뿐만 아니라 연조직이 부족한 케이스에서도 성공적으로 이용할 수 있다는 점 덕분에 꾸준히 호응을 얻고 있다"고 설명했다. [치과신문 2014. 11. 10]

### ■ 신개념 산소분리막 기술로 친환경 화력 발전 눈앞에 세륨 산화물 복합체 세라믹 산소분리막 기술 개발 성공

현재 석탄 화력발전은 전 세계 전력 생산의 60% 이상을 차지하고 있다. 이처럼 석탄 화력발전은 정비된 인프라, 저렴한 발전 비용으로 대량의 전력을 생산하고 있으나, 온실가스 배출에 따른 환경문제로 인해 그 비중을 높이는 데 한계가 있다. 대안으로 석탄가스화 복합발전(IGCC)과 순산소연소(Oxyfuel) 등 산소를 이용한 고효율·친환경 화력발전이 주목받는 가운데, 산소분리 설비·제조비용을 절감할 수 있는 기술이 국내 연구진에 의해 개발됐다. 한국에너지기술연구원(이기우 원장)은 세륨 산화물( $CeO_2$ ) 복합체를 이용해 안정적·경제적으로 산소를 분리하는 신개념 세라믹 산소분리막을 개발했다. 이번에 개발된 세륨 산화물 복합체 산소분리막은 안정적으로 산소이온을 전달하는 물질인 세륨 산화물( $CeO_2$ )과 전자를 전달하는 물질인 페로브스카이트(Perovskite)를 혼합해 기존보다 저렴한 소재를 사용해도 높은 산소 투과특성을 낼 수 있도록 고안됐다. 이를 통해 산소분리 설비비용을 최대 48%, 산소 제조비용을 최대 68%까지 줄일 수 있으며, 화학적 안정성도 기존 세라믹 산소분리막 대비 10배 이상 향상됐다. 기존의 산소 분리 방법은 끓는점의 차이에 의해 공기에서 산소를 분리하는 심냉분리법에 기초했다. 그러나 분리 시 대규모 공장이 필요하고, 공기를 압축하는 과정에서 많은 전기를 소모해 최종 발전 효율을 9% 저하시키는 단점이 있었다. 이를 극복하기 위

해 세라믹 산소분리막 기술이 개발됐지만 높은 산소 제조가격, 취약한 화학적 안정성이 문제로 지적돼왔다. 반면, 세륨 산화물 복합체 분리막은 제조가격과 안정성의 문제를 극복해 기존의 발전 플랜트, 제철산업 효율 상승에 기여할 수 있다. 높은 비용절감 효과를 통해 친환경 발전 기술의 실용화를 앞당길 수 있게 된 것이다. 또, 미국 등 기술 선진국의 투과 성능( $3ml/cm^2 \cdot min$ )을 뛰어넘은 세계 최고 수준( $3.6ml/cm^2 \cdot min$ )을 기록해 향후 분리막 시장 점유율에서도 우위를 차지할 것으로 기대된다. 연구책임자인 유지행 박사는 "세륨 산화물 복합체 산소분리막 기술은 현존하는 세계 최고 수준의 기술로써, 기존의 산소분리 설비·제조비용을 2/3수준으로 줄여 친환경 발전을 가능케 할 새로운 기술"이라며 "발전, 철강, 화학 공정, 생명 공학 분야와의 융합을 통해 고부가가치 산업을 창출하고, 창조경제를 실현하는데 기여하겠다"고 밝혔다. 한편, 이 기술은 2014년 2월, 영국 왕립화학회가 발간하는 재료분야 학술지 'Journal of Materials Chemistry A' 표지논문 및 'Chemistry of Materials'에 게재돼 학계의 인정을 받았으며, 연구진은 현재 실용화를 위한 모듈화 및 주변 장치 개발을 진행 중이라고 전했다. [기술사신문 2014. 11. 13]

### ■ 초소형 나노맨홀을 이용한 고성능 분리막 소재 개발 고도로 정렬된 3차원 나노구조체로 빠르고 정확하게 액체 여과하는 분리막 제작, 정수필터나 연료전지 등에 응용기대

국내 연구진이 하수관으로 빗물을 걸러 흘려보내는 맨홀의 형태와 기능을 모방한 고성능 분리막\*을 개발했다. 나노맨홀\* 구조체로 물질을 정확히 분리하는 한편 마이크로 채널\*을 통해서 물질을 빠르게 이송시킬 수 있는 소재를 개발함으로써 고성능의 정수필터나 연료전지용 분리막 등에 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 성균관대 화학공학부 및 나노과학기술원 유필진 교수와 연세대 화공생명공학과 류두열 교수 및 성균관대 김영훈 박사가 주도한 이번 연구는 교육부와 한국연구재단이 추진하는 일반연구지원사업 등의 지원으로 수행되었고, 연구결과는 재료분야 국제학술지 어드밴스드 머티리얼스지(Advanced Materials) 10월 28일 온라인판에 게재되었다. (논문명 : Multiscale Porous Interconnected Nanocolander Network

with Tunable Transport Properties) 분리막의 성능을 높이기 위해서는 보다 많은 물질을 정확하게 분리할 수 있도록 분리효율과 처리용량을 높이는 것이 관건이다. 기존 분리막 소재는 기공을 작게 만들어 선별도를 높이면 액체 이동시 저항이 커져 처리용량이 줄어드는 것이 단점이었다. 연구팀은 마이크로 기공을 갖는 대면적의 구조물 틀에 미세한 나노기공을 갖는 블록공중합체\*를 주입하여 나노맨홀이 촘촘히 연결된 형태의 독특한 분리막 소재를 개발했다. 또한 작은 나노기공으로 선별도를 높이는 동시에, 구조체 내부에 액체가 빠르게 이송될 수 있는 일종의 고속도로 역할을 수행하는 마이크로 채널을 포함시켜 처리용량이 저하되는 것을 방지하였다. 만들어진 분리막은 기존 블록공중합체 기공구조만으로 형성된 2차원 평면 형태의 분리막에 비해 두꺼워 졌지만, 도리어 투습용량은 서너 배 이상 향상되면서 기계적 안정성도 동시에 확보되었다는 설명이다. 유 교수는 “본 연구에서 제시된 분리막 설계의 새로운 접근방식은 이온의 이동제어가 중요한 리튬이차전지나 연료전지의 분리막에 적용될 경우에도

우수한 성능을 보일 것으로 기대한다”고 밝혔다. [기술사신문 2014. 10. 29]

- \* 분리막 : 물이나 액체의 여과와 정제에 사용되는 소재로 막에 있는 기공크기에 따라 걸러낼 수 있는 물질의 크기와 종류가 결정된다.
- \* 나노맨홀 : 수 백 나노미터(머리카락의 약 7000분의 1) 직경의 맨홀 형태 나노구조물
- \* 마이크로 채널 : 마이크로 미터 크기(머리카락 두께의 약 50분의 1)의 폭을 지닌 통로로, 구조체 내에서 물이나 액체가 빠르게 지나갈 수 있는 빈 공간
- \* 블록공중합체 : 서로 상이한 특성이 있는 두 종류의 고분자를 강제적인 화학결합으로 결합시켜 규칙적인 형태의 나노구조를 형성할 수 있도록 설계한 고분자