

이 글에서는 나노전기유체역학에 대한 중요성과 주요 특성 및 응용할 수 있는 분야에 대해 소개하고자 한다.

인공적으로 제작된 나노구조물과 자연적으로 형성된 나노구조물

현대산업사회의 발전을 가져온 가장 큰 원동력은 증기기관의 발명과 더불어 전기의 이해와 전기기기의 발전이라 할 수 있다. James Clerk Maxwell (1831-1879)에 의해 1800년대 정립된 전자기학은 전자를 전기장 및 자기장을 이용하여 제어할 수 있는 이론을 제창하였고, 이를 기반으로 전기기기의 발전을 가속화할 수 있었다. 이후 William Bradford Shockley(1910-1989) 등에 의해 발명된 트랜지스터는 깨지기 쉬운 진공관을 대체하며 전자/전기기기 개발에 일대 혁명을 불러왔고, 오늘날 일상생활에 없어서는 안 될 다양한 제품의 핵심 부품으로 활용되고 있다. 반도체의 동작 원리를 간략하게 설명하면, 인공적으로 제작한 나노구조물에서 전자기장을 이용하여 전자를 제어하는 것이다. 하지만 자연적으로 형성된 나노구조물은 어떤 역할을 수행하고 있는지 살펴보기 위해서 간단한 예를 들어 본다. 생명체의 기본 구성 요소는 세포이며, 세포의 구조를 살펴보면 얇은 세포막에 둘러싸여 세포 내외부의 액체를 구분 짓고 있다. 세포막은 무수한 나노 구멍이 뚫려 있는 나노다공성 막이며, 액체는 이온을 포함하고 있는 전해질 용액이다. 또한 생체 신호는 전기에 의해 전달되기 때문에

흔히 알고 있는 나트륨 펌프 등은 나노막 주변 전해질 내 이온의 거동을 전기 신호에 의해 동작/유지되고 있다고 할 수 있다. 요약하자면 인공적으로 제작된 나노구조체는 전기장에 의해 전자를 제어하는 역할을 수행하며, 자연적으로 형성된 나노구조체는 마찬가지로 전기장을 이용해 이온을 제어하는 것이다. 제어하는 대상이 전자인지 이온인지는 명확한 차이가 있지만 더욱 큰 차이점은 이들이 움직이는 매질에 있다. 전자는 금속 등의 고체 매질에서 움직이지만 이온은 전해질과 같은 유체 매질에서 움직이게 된다. 따라서 자연적으로 형성된 나노구조물에서의 이온의 움직임을 연구하기 위해서는 반드시 유체역학적 지식을 수반하여야 하고, 이에 대한 연구 분야가 나노전기유체역학이 된다. 때문에 나노전기유체역학 분야는 Maxwell식으로 대표되는 전자기학적 이론과 Schrodinger식으로 대표되는 양자역학적 이론뿐만 아니라 Navier-Stokes식으로 표현되는 유체역학적 지식이 동시에 복합적으로 연관되어 있는 복잡다단한 연구 분야라 할 수 있다.

나노전기유체역학의 시작

나노전기유체역학은 세포막 근처의 이온 수송뿐만 아니라 역사적으로 해수담수화와 관련된 수처리 분

야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 2010년 UN에서 대한민국은 물부족 국가로 지정되며 수자원에 관한 연구가 가속화되었지만, 선진국에서는 이미 해수담수화에 관한 연구가 오랫동안 지속되어 왔다. 1969년 John F. Kennedy 대통령은 한 연설에서 물부족 문제를 해결하면 기술관련 노벨상과 노벨 평화상을 받을 수 있을 것이라 언급한 것은 이러한 높은 관심의 예이다. 가장 단순한 열식 담수화법과 더불어 에너지 효율이 높은 역삼투압 방식(RO : Reverse Osmosis)과 비교적 최근부터 연구 개발된 전기투석방식(ED : Electro-Dialysis)이 주로 연구 발전되어 왔는데, 전기투석법은 나노 구멍이 있는 얇은 막막에 직류 전기장을 인가하고 이온을 선택적으로 통과하게 하여 담수를 생산하는 방식으로 나노전기유체역학의 대표적인 연구 분야이다. 해수담수화 장치는 기본적으로 충분한 담수 생산량을 보장해야 하므로 대부분의 RO나 ED 장치는 센티미터에서 미터 이상의 시스템 크기를 갖고 하루 수십톤 이상의 담수를 생산하는 장치로 발전하게 된다. 이러한 스케일의 장치에 대한 연구는 막의 재료, 외부 압력 혹은 외부 전기장에 관련된 전력 소모량 등이 주요 관심사였고 나노막 근처에서 일어

나는 불안정성 등에 관한 나노전기유체역학은 상대적으로 주목받지 못하였다. 하지만 '90년대 초반에 시작된 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 연구와 2000년대 가속화된 NEMS(Nano-Electro-Mechanical System) 연구는 예전에는 관찰하지 못했던 나노막 주변 유동과 실제 이온 교환 기작을 마이크로미터 수준 이하 스케일에서 가시화할 수 있는 장치의 개발을 가능하게 하였다. 마치 구분구적법으로 적분하기 위해 미분된 구간을 설정하는 것처럼, 매크로 장치를 마이크로 장치로 미분하여 먼저 기존 성질을 관찰하며 연구할 수 있게 된 것이다. 이로 인해 나노막 근처의 나노전기유체역학이 핵심 역할을 수행하며 이온 수송의 새로운 기작들이 속속 발견되거나 증명되었다.

이온선택성 투과막과 이온농도 분극현상

해수담수화 분야에서 오랫동안 연구되어 온 시스템은 매크로 스케일의 나노막을 이용하여 전기력 혹은 압력을 이용하여 이온을 분리하는 것이다. 이 가운데 전기를 이용한 방식이 앞서 소개한 ED인데, 기본

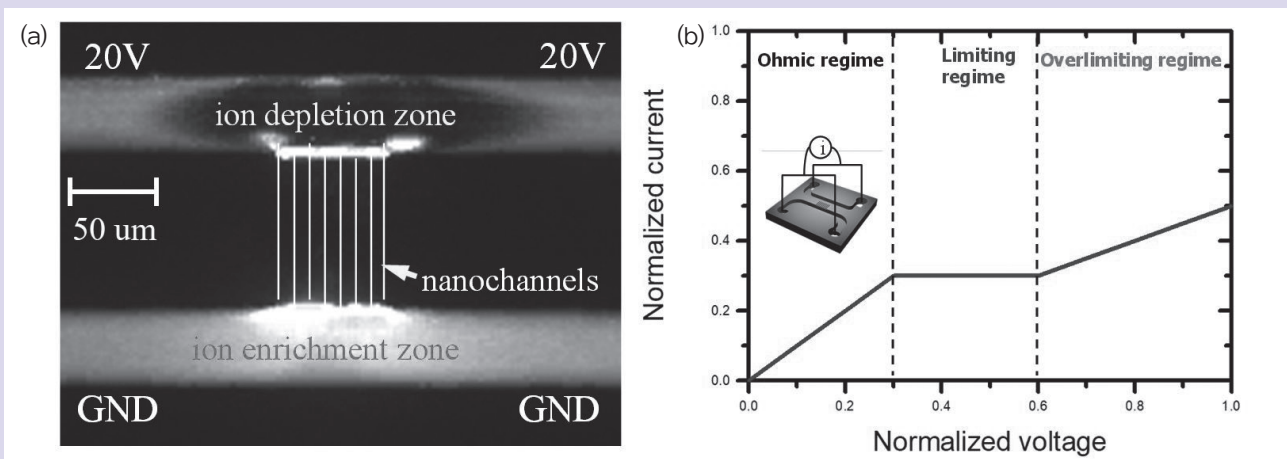


그림 1 (a) 나노채널이 두개의 마이크로 채널을 연결하고 있는 장치에서의 이온공핍층(ion depletion zone)과 이온충만층(ion enrichment zone)의 형성, (b) (a)에서의 장치에서 Ohmic current - limiting current - overlimiting current 영역의 출현으로 이어지는 독특한 이온 전류 흐름의 양상.

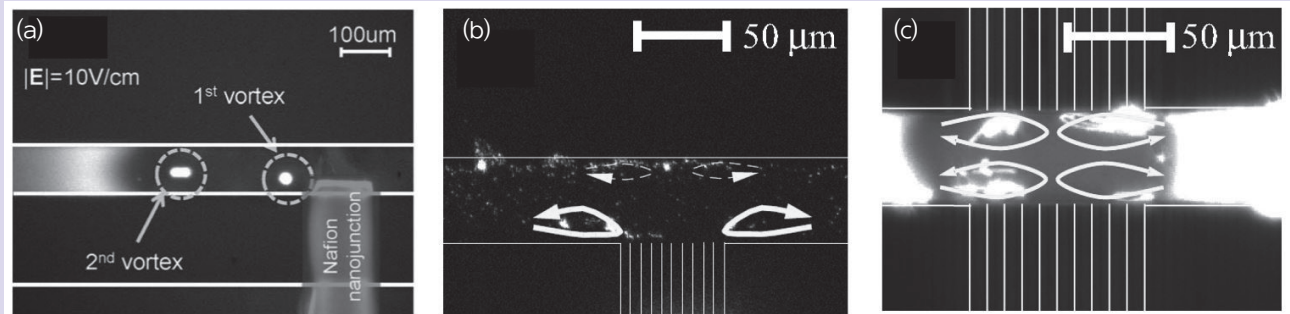


그림 2 (a) 나노막 주변에서의 다중 와류의 형성(Nanoscale, 2012, 7406), (b), (c) 단일 나노채널 주변과 양면 나노채널 주변에서의 와류의 형성의 가시화 실험 결과.(Phy. Rev. Letts., 2007, 044501)

원리는 전해질에 담지된 이온선택성 막을 가로지르게 전기장을 인가하여 주면 막과 동일한 극성의 이온은 나노막을 통과하지 못하고, 막과 반대 극성의 이온만이 나노막을 통과하게 되어 그림 1(a)에서 보듯이 나노막 양단에 전해질 농도가 급격히 낮아지는 영역(IDZ : Ion Depletion Zone)과 높아지는 영역(IEZ : Ion Enrichment Zone)으로 분극(polarization)이 일어나게 되어 이를 농도분극(CP : Concentration Polarization) 현상이라 명명하게 되었다(여기서 이온선택성은 전하를 띠고 있는 벽면이 나노스케일로 가까워지면, 양쪽 벽면으로부터 형성된 전기이중층이 서로 영향을 주게 되어 마치 양극의 환경 또는 음극의 환경이 나노포어 내부에 형성되는 것을 말한다). CP의 가장 두드러진 특성은 IDZ 및 IEZ의 발생과 더불어 막 근처 전해질에서 유동이 매우 불안정화되며, 그림 1(b)에서 보듯이 나노막을 통과하는 전류가 선형적 Ohmic 영역으로부터 시작하여, IDZ로 인해 고갈된 이온전류의 정체가 관찰되는 한계전류(limiting current) 영역을 거쳐, 기존의 diffusion-drift 식으로는 설명이 되지 않는 이온전류의 큰 상승인 과한계전류 영역(overlimiting current)이 관찰된다는 것이다. 전기유체역학의 바이블이라 일컬어지는 Introduction to physicochemical hydrodynamics 라는 책에서조차 과한계전류는 실험적 오류

(nonideal)라고 언급되어 있다. 하지만 과한계전류는 실험적으로 항상 관찰되는 현상으로 원인을 밝히기 위한 연구가 계속 되었다. 강한 전압으로 물분해된 전자가 추가 생성된다는 결과, 막혀 있는 나노막에 의한 back pressure 형성이 Taylor-Aris dispersion을 유발하여 이온 전류를 증가시킨다는 연구 등이 제안되었으나 가장 정설로 여겨진 가설은 유동의 강한 대류 현상에 의해 diffusion-drift 이외에 convection이 추가될 수 있다는 이론이었다. 이를 뒷받침하고자 NEMS 기반의 마이크로-나노채널 장치를 제작하여 나노막 주변의 유동을 가시화한 결과, 그림 2와 같이 강한 와류가 실험적으로 보여짐으로써 과한계전류의 기작이 점차 규명되기 시작하였다.

이때 마이크로-나노채널 장치에서의 전기유체역학은 매크로 나노막 주변의 전기유체역학과 다른 영역을 다루는 것으로 여겨져 CP가 아닌 ICP(Ion Concentration Polarization: 이온농도분극)로 명명되어 독특한 연구 영역을 구축하기 시작하였다. 이후의 지속적인 연구를 통해 마치 도체의 경우 전하가 내부에 유입되면 가장 바깥의 경계로 퍼지는 현상과 마찬가지로, 마이크로채널 내의 전류도 벽면 근처를 통해 가장 많이 흐른다는 표면 전도(surface conduction) 현상이 중요하게 작용됨이 밝혀졌으며, 이것이 CP와 ICP를 구분 짓는 척도로 될 수 있다.

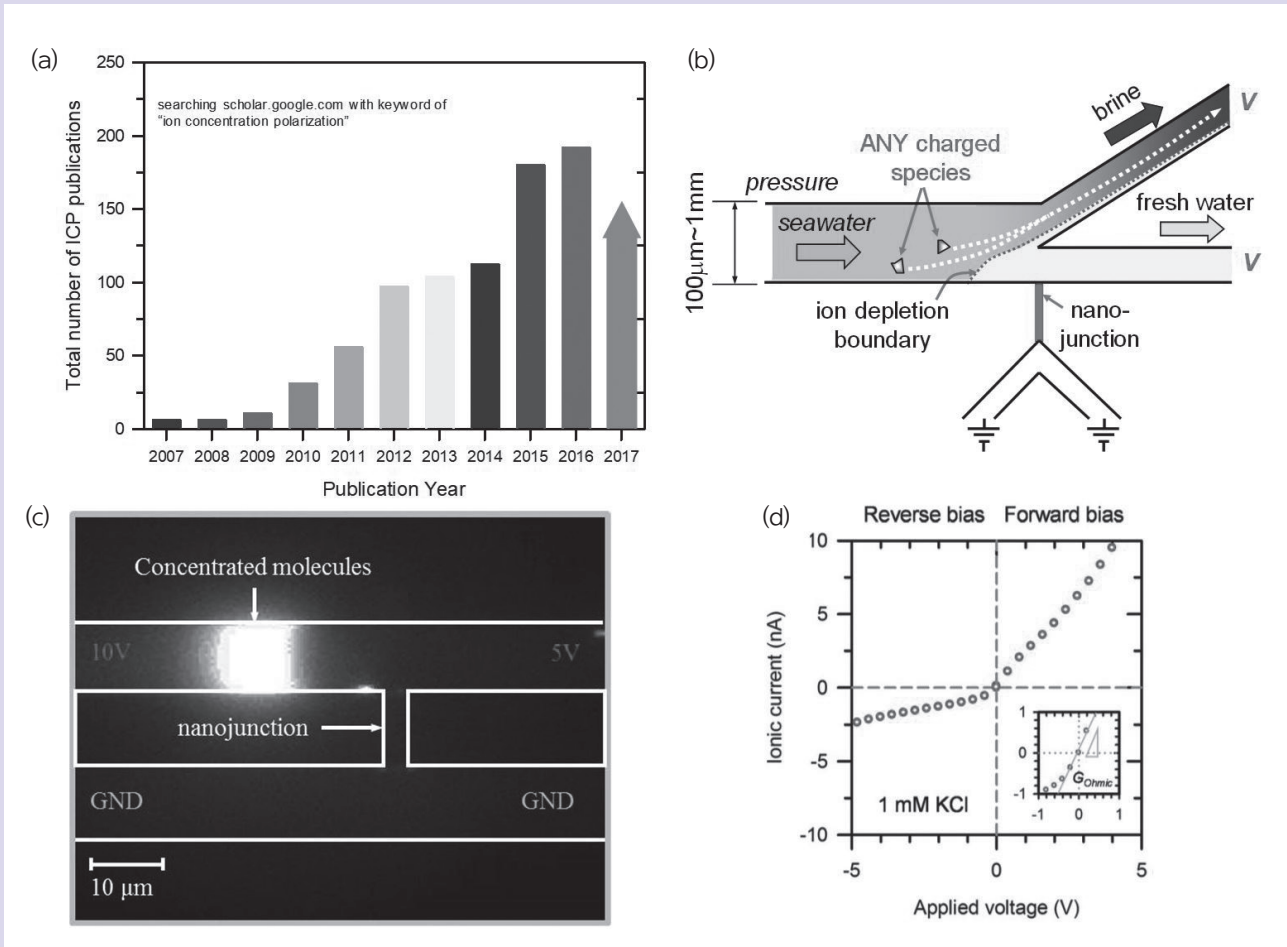


그림 3 (a) 2007년 이후 ICP에 관련된 논문의 증가 추세, (b) ICP를 이용한 해수담수화 모식도([Nature Nanotech., 2010, 297], (c) ICP를 이용한 물질 농축기의 농작 개념(Chem. Soc. Rev., 2010, 912), (d) ICP를 이용한 다이오드.(Nanoscale, 2017, 11871)

이온농도 분극현상의 공학적 응용

NEMS 기반의 장치로 ICP가 구현된 2007년 이후 ICP에 관한 연구가 그림 3(a)에서 보듯이 폭발적으로 증가하고 있으며 이는 유체역학적 기작 연구뿐만 아니라 이를 이용한 다양한 공학적 응용이 있기 때문에 전세계적으로 수많은 그룹이 ICP를 연구하기 시작하였다. 현재 대표적으로 ICP를 연구하는 그룹은 본 테마기획의 저자인 서울대 김성재 교수, 서강대 박정열 교수, 한양대 곽노균 교수, UNIST 김태성 교수, 광운대 이정훈 교수 등을 비롯하여 MIT Jongyoon Han 교

수, MIT Martin Bazant 교수, Stanford University Ali Mani 교수, University of Texas Austin Richard M. Crooks 교수, Notre Dame University Hsueh-Chia Chang 교수, National Cheng Kung University Ruey-Jen Yang 교수, Ben-Gurion University Boris Zaltzman 교수, Technion University Gilad Yossifon 교수 등이 있다.

IDZ 내부의 이온 농도가 매우 낮기 때문에 이 부분의 유체를 연속적으로 추출해냄으로써 해수의 담수화가 가능하고[그림 3(b)], 그림 3(c)에서 보듯이 IDZ 내부로 전하를 띤 입자들의 유입을 막게 되어 생체 시

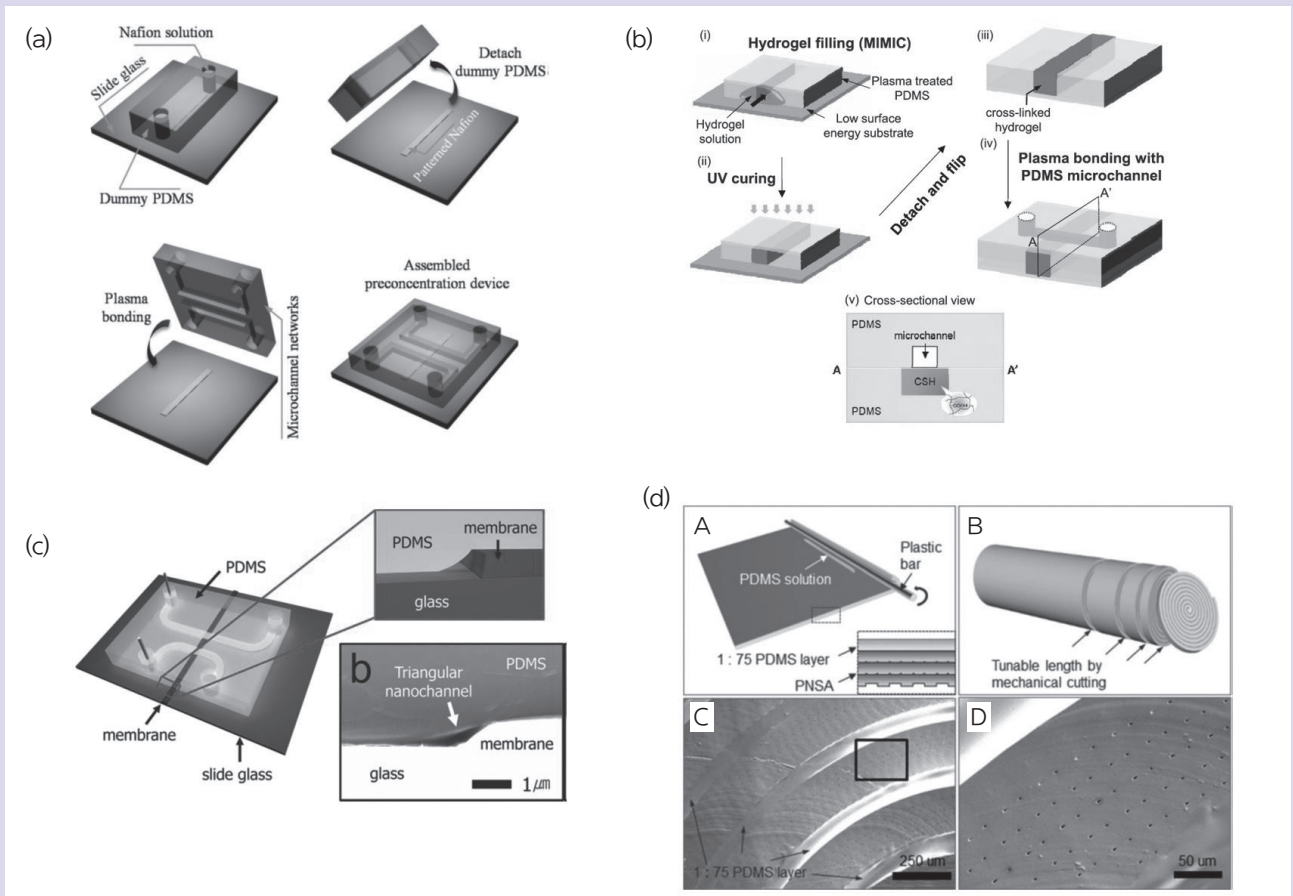


그림 4 (a) Nafion, (b) 수화젤을 이용한 나노막의 공정(Biochip J., 2016, 251, Biomicrofluidics, 2016, 014102), (c), (d) PDMS의 유연함을 이용한 나노채널 제작법(ACS Nano, 2013, 740, Nanoscale, 2014, 9681)

료 등의 물질을 IDZ의 경계면에 연속적으로 농축시킬 수 있는 대표적인 공학적 응용이 있다. 또한 ICP 현상 주변의 환경을 제어하여 다이오드, IFET(Ionic Field Effect Transistor) 등을 제작하기에 이르렀다 [그림 3(d)]. 그리고 최근에는 ICP를 유발하는 인자들을 전통적인 전기장을 이용하지 않고 나노구조물의 모세관 힘을 이용하거나, 나노구조물이 아닌 양극성 전극을 이용하는 새로운 발전이 진행되고 있다. 이와 더불어 기존의 청정실에서 제작되는 나노구조물은 공정 시간과 비용이 막대하여 나노유체역학 연구를 방해했기 때문에, 보다 손쉬운 나노구조물을 제작하는 공정법에 대한 연구도 끊임없이 지속되어 왔다. Nafion 또는 수화젤 같은 전도성 고분자 물질로 나노

채널을 대신하는 방식[그림 4(a)], PDMS의 유연함을 이용하는 방식[그림 4(b)] 등이 보고되었으며 이와 더불어 장치의 자체 재료를 PDMS가 아닌 종이를 이용하는 등의 새로운 발전이 이루어지고 있다.

이에 본 테마기획에서는 CP를 이용한 전기막 담수화법에서의 유체역학(한양대 곽노균 교수)에 대한 소개를 시작으로 ICP의 수치해석적 접근 방법(UNIST 김태성 교수), 종이 기반의 ICP 농축기(광운대 이정훈 교수), 나노구조물을 경제적으로 제작할 수 있는 방법인 자기조립법(서강대 박정열 교수)에 대해 세부적으로 소개함으로써 독자들로 하여금 나노전기유체역학 현상의 이해/공학적 응용/장치제작에 이르기까지 다양한 정보를 제공하고자 한다.