

박 정 열 서강대학교 기계공학과 교수

| e-mail : sortpark@sogang.ac.kr

이 글에서는 공간적으로 형상 제어된 나노구조물의 자기조립화(self-assembly)를 이용하여 고용량의 이온흐름이 가능한 나노전기수력학 기술에 대한 소개와 더불어, 이를 활용한 이온 다이오드, 고효율 마이크로 믹서, 이온농도차 발전 응용 및 향후 생체 내 이온검출 센서, 인체 삽입형 디바이스, 뇌-기계 인터페이스 연구에 대한 전망을 소개하고자 한다.

전자공학 및 나노공정기술의 눈부신 발전에 힘입어 전자의 흐름을 제어할 있는 고체전자(solid state electronics) 소자의 성능은 증가하고 크기는 작아지는 무어의 법칙(Moore's law)이 적용되어 왔다. 그에 비해, 유체 내 이온흐름을 제어할 수 있는 나노유체소자는 그 속도와 집적도면에서 고체전자소자에 비해서는 떨어지지만, 생체환경과 같은 유체 내에서의 적용이 가능하고, 이온을 직접적으로 검출 및 제어하여 생체 시스템을 모사할 수 있다는 점에서, 많은 연구자들이 이에 대한 연구에 관심을 가져왔다. 최근에는 이러한 나노유체소자의 성능(고용량의 이온흐름 제어, 정류성능)의 증가 및 이에 대한 응용분야 확장에 노력하고 있다. 미소유체 내 나노구조물의 자기조립화에 기반한 3차원 나노채널 네트워크는 기존 2차원 나노채널보다 훨씬 큰 이온흐름 제어를 통해 고감도의 이온센서 및 에너지 응용이 가능할 뿐만 아니라, 다양한 재질 및 표면전하를 선택할 수 있어 실제 세포막의 이온펌프를 모사와 같은 생체 분자 제어기술의 연구에 적용 가능하다. 또한 고가의 공정장비 없이 미소유체의 물리적 원리를 활용하여 간단한 공정으로 구현되어 기존대비 공정시간을 획기적으로 단축시킬 수 있고, 가격경쟁력에 유리한 동시에 대량생산에 적합하다.

### 미소유체 내 나노구조물 자기조립화 형상 제어

지금까지 나노전기수력학 연구에 주로 활용되어 온 제작기술은 나노 리소그래피나 트랙 에칭(track etching)과 같은 값비싼 공정장비 및 복잡한 공정을 통해 전기 이중층(electrical double layer)과 비슷한 크기를 갖는 나노채널을 구현해왔다. 이로 인해, 2차원의 나노채널을 통해 이온이 이동할 수밖에 없으므로 통과할 수 있는 이온흐름이 수십 나노 암페어(nA)에 불과하여 고감도의 이온센서 및 이온 농도차 기반 또는 연료전지 기반 초소형 에너지 발생장치로의 활용에 한계가 있어왔다. 이러한 한계점을 극복할 수 있는 방법이 나노구조물의 자기조립화를 이용한 나노채널 네트워크 제작 기술이다. 이는 간단히 말해, 마이크로 채널 내에 나노입자 또는 나노와이어를 원하는 형상으로 자기조립화하여 나노구조물 사이의 공간을 3차원 나노채널 네트워크로 활용하는 방법이다. 이는 복잡한 공정이나 값비싼 공정장비를 활용하지 않고도 나노채널과 같은 이온 선택성이 쉽게 구현 가능할 뿐만 아니라, 나노구조물의 크기 제어, 재질의 종류, 자기조립화된 나노구조물의 표면 형상제어, 표면의 기능화 등을 통해 기존보다 훨씬 유연한 이온흐



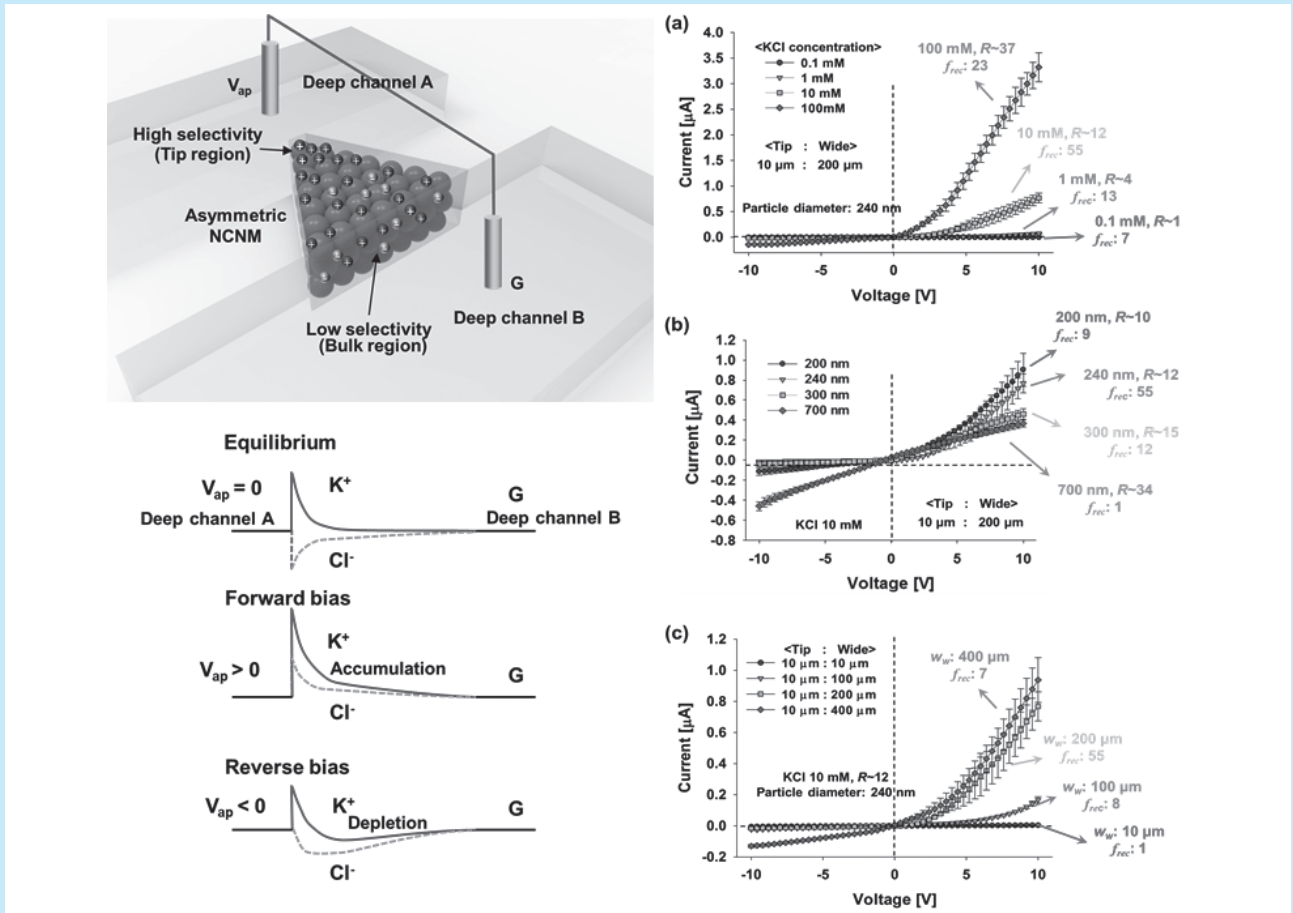


그림 2 비대칭 나노채널 네트워크를 이용한 고용량 이온다이오드[출처: E. Choi et al., Nano Letters 16, 2189 (2016)]

### 3차원 나노채널 네트워크의 응용

나노채널 네트워크는 원리적으로 기존에 나노채널이 응용되었던 분야에 모두 적용이 가능하다. 그중에서도 이 글에서는 3차원 나노채널 네트워크로 인한 장점이 부각되는 이온 다이오드, 고효율 마이크로 믹서, 이온농도차 발전에 대해 소개한다.

기존에는 같은 부호의 표면전하를 갖는, 전기 이중층과 비슷한 크기를 갖는 나노채널의 폭을 비대칭적으로 설계하여, 폭에 따른 이온선택성의 차이를 이용해 이온 다이오드를 구현하는 방식이 이론적, 실험적으로 연구되어져 왔다. 반면에 나노채널 네트워크의 경우는 자기조립화 형상제어, 다시 말해, 마이크로 크

기의 자기조립화된 나노채널 네트워크를 비대칭적으로 설계하게 되면 고용량의 이온정류(ionic rectification)가 가능한 이온 다이오드의 개발이 가능하다. 비대칭 나노채널 네트워크는 양 끝단에서의 상대적 단면적 크기 차이에 의해 이온 선택성 정도 및 전기적 저항 차이가 발생하게 된다. 이 양 끝단에 직류 전압을 걸어서 이온을 흐르게 하면, 직류전압의 방향에 따라 이온들이 나노채널 네트워크 안에서 누적되거나 희석되어 이온이 한 방향으로만 흐를 수 있게 된다. 특히, 나노채널의 형상에 따라 기존보다 최소 수십에서 수백 배 증가된 이온 흐름을 발생시킬 수 있으며, 이온농도뿐만 아니라 자기 조립화 되는 나노 구조물의 표면전하 및 크기, 마이크로 채널의 형상제어

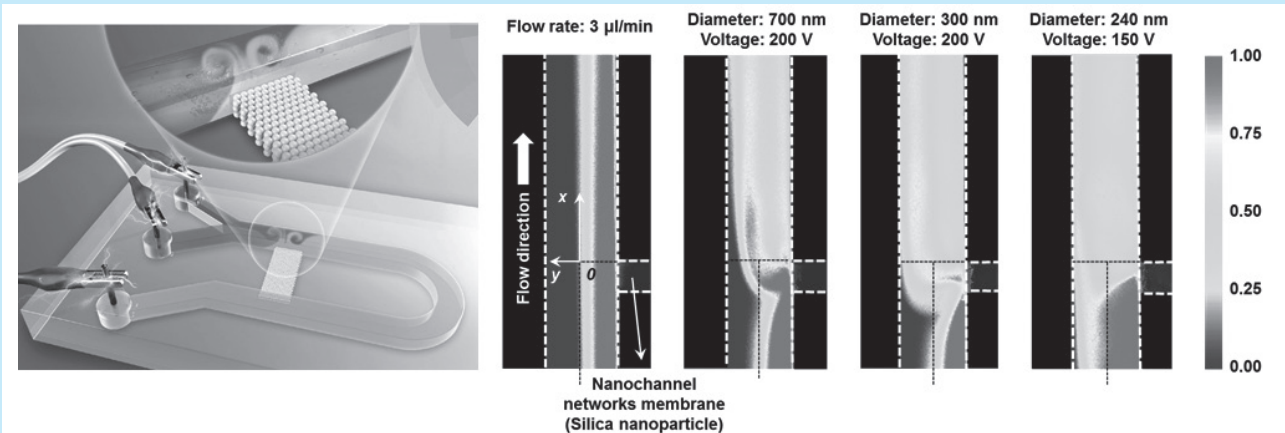


그림 3 (왼쪽) 3차원 마이크로 와동을 이용한 고효율 마이크로 믹서 개념도, (오른쪽) 나노입자의 크기 및 입력전압에 따른 두 가지 유체의 혼합성능 비교 실험결과[출처: E. Choi et al., Lab on a Chip, 15, 1794 (2015)]

(그림 2 참조)를 통해 손쉽게 이온 흐름을 제어할 수 있다. 그리고 형광 현미경으로 쉽게 관측할 수 있는 형광분자를 통해서 이온의 흐름을 관찰할 수 있는 부수적인 효과를 얻을 수 있다. 이러한 나노채널 네트워크의 특징을 활용하게 되면 고도화된 이온 트랜지스터의 개발, 이온 다이오드와 결합된 이온 논리회로 및 복잡한 이온소자의 개발이 가능해진다.

나노채널 네트워크의 양단에 일정 이상의 직류전압을 인가하게 되면 이온 교환막 사이로 이온의 선택적인 이동이 매우 활발해짐과 더불어, 나노채널 네트워크와 마이크로채널의 경계면에서 전기동역학적 불안정성이 발생하면서, 상대적인 점성이 큰 (낮은 레이놀즈수를 갖는) 미소유체에서는 일어나기 어려운 난류유동의 특징적인 와동(vortex)이 나타나, 기존보다 효율적인 혼합을 달성할 수 있다. 2차원 나노채널에 비해 훨씬 넓은 경계면으로 인해, 획기적으로 증가된 마이크로 와동을 발생시킬 수 있으며, 나노구조물의 물리적 성질(크기 및 표면전하)을 조절하여 나노채널 네트워크의 이온선택성 및 이온 전도도를 증가시킴으로써, 0.001초 이내에  $8\mu\text{m}$  이내 공간에서 혼합이 99% 이상 이루어지는 마이크로 믹서 개발이 가능하다.

앞에서 언급한 바와 같이 모세관력을 이용하여 나노구조물을 원하는 위치에 손쉽게 자기조립화할 수

있기 때문에, 양/음의 표면전하를 갖는 나노구조물을 원하는 간격으로 교차적인 직렬연결 구현이 가능하다 (그림 4 참조). 이를 활용하면 마치 전기뱀장어가 특정한 전기발생용 세포(electrocyte)의 세포막 사이로  $\text{Na}^+$ 와  $\text{K}^+$  이온을 각각 비대칭적인 농도분포를 갖도록 에너지를 사용해 막 단백질 사이의 이온펌프를 통해 유지하고 있다가, 이를 일시에 풀어 버리면서 이온농도차에 의한 역전기투석 기반 전기를 발생하는 것처럼(전기뱀장어는 600V 정도를 발생시킬 수 있는 것으로 알려져 있다), 양이온과 음이온 교환막 사이의 높은 농도의 유체가 낮은 농도의 유체로 이온교환막을 통해 선택적으로 확산되면서 고전압의 역전기투석기반 전기발생장치를 만들 수 있다. 흥미로운 점은 양이온과 음이온 교환막 사이의 거리가 무조건 가까워야 확산에 의한 효과가 극대화되어 에너지 발생이 효율적일 것으로 생각되지만, 실제로는 일정 거리 이하가 되면 이온교환막 내부에 이온희석 구간이 발생하게 되어 그 성능이 급격히 저하되기 때문에, 두 이온교환막 사이가 약  $80\sim 100\mu\text{m}$  정도에서 최적의 성능을 나타냄을 실험 및 다중물리 기반 수치해석을 통해 증명할 수 있다. 이 거리는 전기뱀장어 세포의 크기와 거의 동일한 크기로서 전기뱀장어가 최적의 성능을 낼 수 있도록 진화되었음을 간접적으로 알 수 있다.



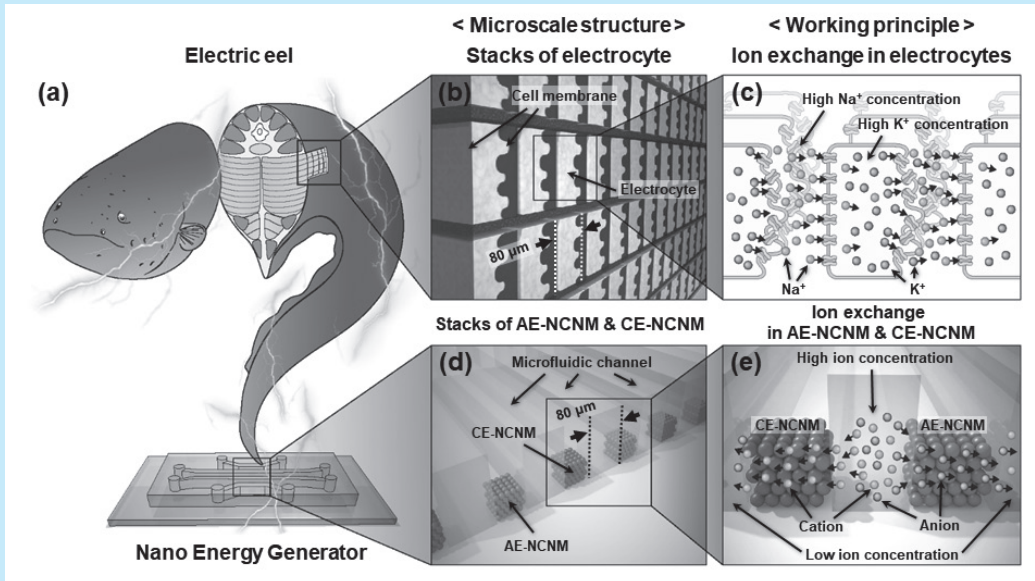


그림 4 (a) 양이온, 음이온 교환막의 직렬적 연결을 통한 고전압용 역전기투석 기반 나노유체 전기발생장치의 개념도 (b-c) 전기뱀장어의 전기발생용 세포(electrocyte)의 다층 직병렬연결 구조도 및 농도차에 따른 이온 이동에 의한 전기 발생 원리 (d-e) 역전기 투석 기반 나노유체 장치 내 양/음이온 교환막의 교차적 직렬연결 구조도 및 농도차에 따른 이온 이동에 의한 전기 발생 원리(출처: C. Wang et al., under review)

### 3차원 나노채널 네트워크의 미래 전망 및 맺음말

전자에 비해 이온의 이동성(mobility)은 훨씬 느리기 때문에 일반적인 상황에서는 이온흐름을 제어하기 보다는 전자흐름을 제어하는 것이 훨씬 효율적이며 공정상에서도 유리하다. 이온이 전자 대비 가장 잘 활용될 수 있는 분야는 고체전자소자가 직접 노출될 수 없는 생체환경이기 때문에, 미래에는 이러한 생체 내의 이온펌프의 기능을 보다 적극적으로 모사하고, 생체 시스템에 적극 활용하는 연구가 집중적으로 진행될 것이다. 특히, 정보 전달 입장에서 고체전자소자가 전자의 흐름을 통해 정보를 주고받는 것처럼, 생체 시스템에서는  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}$  와 같은 다양한 이온의 선택적 이동 및 신경전달물질(neurotransmitters)을 통해, 단순한 이진법 정보가 아닌 여러 가지 정보를 동시다발적으로 주고 받을 수 있으므로, 이를 모사

하는 각종 센서를 비롯한 나노유체소자 개발은 계속될 것이다. 이러한 특정 이온의 선택적 이동기반 센서는 금속기반의 전기적 센서에 비해 전기적 노이즈에 자유롭고, 금속 주위의 산화환원 반응에 의한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있으며, 금속전극을 제거하거나 최소화함으로써, 생

체적합한 시스템 제작에 용이하다. 따라서 미래에 인체 내 삽입 가능한 생체적합형 일회용 바이오센서, 뇌기계 인터페이스 및 웨어러블 디바이스에 적극 활용될 전망이다. 향후 이러한 생체모사 나노유체소자의 성능을 극대화하는 데 있어서, 3차원 나노채널 네트워크는 고용량의 이온흐름을 통해 그 성능을 극대화할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 나노구조물의 선택 및 표면 기능화를 통해 양/음이온의 선택성 이동뿐만 아니라 특정 이온만을 선택적으로 이동시킬 수 있다. 더 나아가 온도, 빛, 전기 또는 화학적 신호에 의한 나노구조물의 표면전하 제어에 의해 이온 이동의 on-off 스위칭 제어도 구현가능하다. 앞으로도 3차원 나노채널 네트워크에 대해, 유체역학기반의 기계공학자뿐만 아니라 물리, 화학 재료 및 생물학 연구자와의 적극적이고 지속적인 융합 연구가 필요한 시점이다.