

# 융합연구리뷰

## Convergence Research Review



미래를 위한 지속가능 분산형 담수화 시스템을 만들다  
전기화학기술

—

세포의 본질을 탐색 가능하게 하다  
멀티스케일 패터닝 기술

## 목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2016 October vol.2 no.10

---

### 03 편집자주

미래를 위한 지속가능 분산형 담수화 시스템을 만들다 **전기화학기술**

**04** (리뷰) 지속가능한 분산형 담수화시스템을 위한 전기화학적 방법

**45** 국가 R&D 현황분석-스핀트로닉스

세포의 본질을 탐색 가능하게 하다 **멀티스케일 패터닝 기술**

**49** (리뷰) 멀티스케일 패턴을 이용한 세포의 거동 및 기능 제어 기술

**81** 국가 R&D 현황분석-극한환경 기술

---



**발행일** 2016년 10월 4일

**발행인** 하성도

**발행처** 한국과학기술연구원 융합연구정책센터  
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5  
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

**편집** (주)디자인플럼 tel. 051-202-9201



| 편집자주 |

## 미래를 위한 지속가능 분산형 담수화 시스템을 만든다 전기화학기술

전기화학의 시작은 18세기 루이지 갈바니가 동물전기를 발견하고 볼타가 전지를 발명하면서 시작되었다고 할 수 있다. 19세기 마이클 페러데이의 전기 분해 법칙이 발견되고 열역학의 발전으로 전기-화학-기계의 융합 연구가 이루어지게 됨으로써 전기화학기술은 급속한 발전을 이룬다. 20세기 말, 배터리 제조 등에 주로 활용되던 전기화학기술은 새로운 융합의 물결과 함께 물 부족 문제 해결이라는 사회적 문제를 해결하기 위한 방안으로 제시되기 시작하였으며, 이는 기존의 플랜트 형태의 대용량 담수화 시스템과는 다른 지속가능 분산형 시스템이라는 또 다른 해법을 제시하고 있다.

이에 이번 호의 1부에서는 지난 융합연구리뷰 vol.1 no.6에서 다루었던 대용량 플랜트를 통한 해수담수화 기술의 단점을 극복할 수 있는 새로운 방안으로 제시되고 있는 전기화학기술을 응용한 새로운 담수화 시스템의 개념 및 연구 동향, 향후 연구 방향을 소개함으로써, 향후 분야간의 융합 연구를 통한 더욱더 활발한 사회문제 해결이 이루어지기를 기대해 본다.

## 세포의 본질을 탐색 가능하게 하다 멀티스케일 패터닝 기술

인간은 자연에 대한 이해를 위해 다양한 활동을 수행하고 있으며, 그 중에서도 우리 스스로에 대한 탐구를 위해 많은 관심과 노력을 쏟고 있다. 20세기 인간은 우리 스스로에 대한 탐구를 끊임없이 시도한 결과 모든 동물을 구성하는 기본 단위인 세포를 체외에서 배양할 수 있게 되었으며, 이를 바탕으로 우리 스스로에 대한 탐구를 더욱더 깊이 하게 되었다. 하지만 세포의 체외 배양은 체내의 상황과는 같지 않았고, 이로 인해 세포의 본질을 탐구하고 이해하는 데에는 역부족이었다. 하지만 20세기 후반 반도체 제작 기술을 응용한 미세 패터닝 기술이 세포 배양 기술과 융합되면서 기존에는 불가능하였던 새로운 방식의 세포의 본질 탐구가 가능해지게 되었다.

이에 이번 호의 2부에서는 본질 탐구를 위해 전혀 다른 분야의 융합이 이루어져 새로운 학문의 분야를 만들어 나가고 있는 멀티스케일 패터닝 기술과 이를 기반으로 한 세포 연구의 역사와 내용, 최신 연구 동향, 향후 연구 방향 등에 대해 알아봄으로써, 융합연구가 어떻게 새로운 학문 분야를 개척해 나가고, 이를 바탕으로 다시 기존 학문 분야에 영향을 끼치는지를 확인하여 향후 많은 분야에서 다양하고 새로운 융합연구분야가 탄생하기를 기대해 본다.



# Electrochemical Methods for De-centralized Sustainable Desalination

지속가능한 분산형 담수화시스템을 위한 전기화학적 방법

◉ 한국과학기술연구원 뇌과학연구소 바이오마이크로시스템연구단 선임연구원 **곽노균** (rhokyun@kist.re.kr)

## 초록

지난 50년간 세계적인 물 부족현상과 함께 사람들은 점점 더 큰 담수화플랜트를 짓는데 집중해왔다. 현재 가장 많이 사용중인 두 가지 담수화법-염수(salt water)를 가열해 발생한 증기를 응결시키는 증발식(thermal desalination)과 염과 물분자의 크기 차이를 이용하여 기계적인 필터링을 하는 역삼투법(RO: reverse osmosis)- 또한 대용량 담수화에 적합하게 발전해왔다. 하지만 최근 물-에너지 연계성(water-energy nexus) 및 지속가능성(sustainability)에 관한 논의가 시작되며 대용량 담수화플랜트의 값비싼 초기 투자/유지 비용, 과다한 에너지 소비, 환경오염 문제 등이 지적되기 시작하였다. 이에 대응하여 신재생에너지로 구동이 가능한 소용량, 분산형 담수화플랫폼에 대한 필요성이 제기되고 있다. 이러한 상황에서 전기로 구동이 가능하며 소용량화가 용이한 전기화학적 담수화방법은 분산형 담수화플랜트에서 최적의 성능을 보일 수 있는 기술로 주목받고 있다. 본 리뷰에서는 세 가지 대표적인 전기화학적 담수화방법(전기투석공정(ED: electrodialysis), 전기탈이온공정(EDI: electrodeionization), 축전식탈이온공정(CDI: Capacitive Deionization))의 개발배경과 기본원리, 최근 연구등을 살펴보고, 이를 이용하여 국내외에서 진행되고있는 분산형 담수화플랜트에 대한 기술동향을 소개하고자 한다.

# 01

## 서론

### 1.1. 물 부족 및 물 스트레스

물은 살아가는데 있어 가장 중요한 요소중 하나이다. 잘 알려져있다시피, 지구상 대부분의 물은 바다에 존재하는 염분을 포함한 염수(salt water)이며, 약 3%만이 염분이 없는 담수(fresh water), 그리고 이 중에 단 0.77% (약 11,000,000 km<sup>3</sup>)만이 지하수(ground water) 및 표층수(surface water)와 같이 가용가능한 형태로 존재한다. 화석연료와 마찬가지로 지하수 및 표층수는 긴 시간에 거쳐 축적된 것으로 우리가 가용가능한 형태로 존재할 뿐, “재생가능(renewable)” 한 것으로 생각되어서는 안된다. 이 중 재생가능한 담수의 양은 전지구적인 물 순환(global water cycle)에 의하여 자연적으로 순환하고있는 양으로 고려해야 하며, 이는 연간 약 110,300 km<sup>3</sup>정도이다.

전체 지구상에 존재하는 물에 비하여 재생가능한 물의 비율은 극히 작지만, 절대적인 양이 부족하여 물 부족현상을 일으키는 것은 아니다. 그림1에서 나타나있듯이 가용가능한 담수는 전세계에 골고루 퍼져있는것이 아니라 지리적(공간적)으로, 그리고 계절(시간적)에 따라 다르게 분포되어 있다. 따라서 이 담수분포와 인구분포가 일치하는 곳의 물만 실제로 사람이 접근 및 사용이 가능하며, 이러한 극단적인 담수분포에 의하여 물 부족 현상도 지역적으로 나타나는 것이다. 일 예로, 중동지역의 경우 재생가능한 물이 물리적으로 부족한 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실을 World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)에서 출간한 2006년 보고서에서는 다음과 같이 표현하고 있다: “The world is not running out of water, but it is not always available when and where people need it”<sup>1a</sup>.

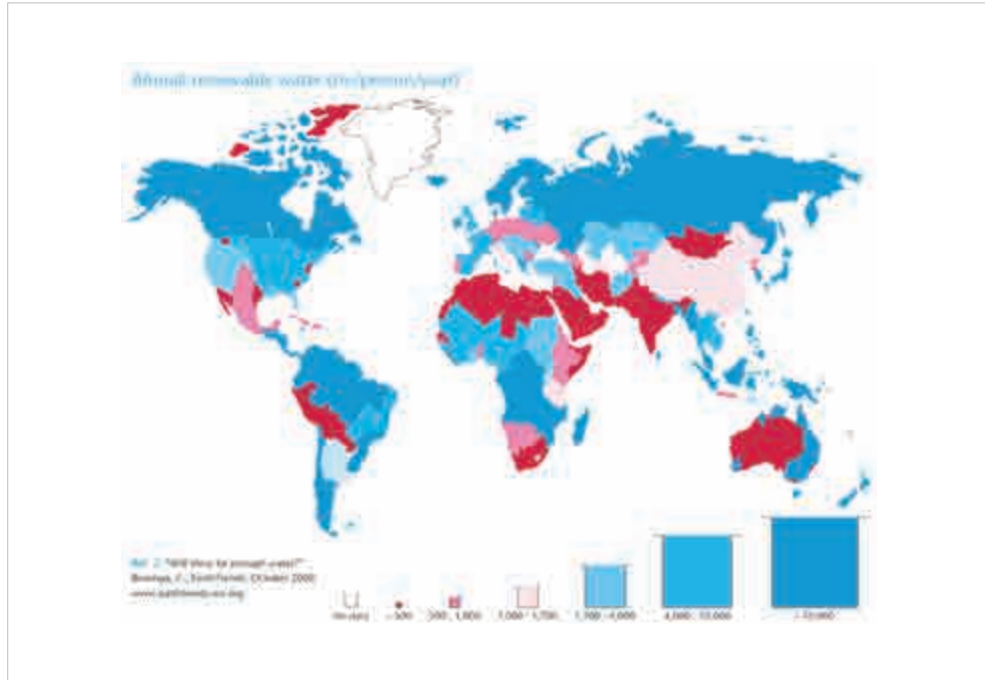


그림 1. 재생가능한 물의 세계적 분포도<sup>3)</sup>

고르지 않은 담수의 분포가 물 부족(water scarcity)의 원인이라면, 물 스트레스(water stress)는 보다 다양한 이유로 인하여 발생한다. 먼저, 가장 명확한 이유는 바로 지역적 인구분포이다. 물 스트레스는 사람이 쓰고자하는 물의 양보다 그 지역에 존재하는 양이 적을 때로 정의하는데, 쓰고자 하는 물은 가정에서 사용하는 생활용수 뿐만이 아니라 산업용수, 농업용수를 모두 포함한다<sup>1a, 2</sup>. 즉, 아무리 가용가능한 담수가 많이 존재한다 하더라도, 그것을 사용하고자 하는 사람, 공장, 혹은 농장이 많을 경우 물은 부족하게 될 것이다. 물의 지속가능성을 논할때, 인구증가 및 도시화(그리고 이로 인한 인구집중)에 의해 물 부족현상이 가속되었다고 하는 근거가 여기에 있으며, 그 대표적인 지역이 바로 대한민국이다. 한국의 경우, 그림 1에서 확인할 수 있듯이 높은 강수량(연평균 1,274mm로 세계평균의 약 1.6 배)으로 인하여 풍부한 수자원을 가지고 있지만, 높은 인구밀도로 인하여 1인당 강수량은 세계평균치의 1/6에 불과하다<sup>3</sup>. 이에 따라, 물리적으로 물이 부족한 중동만큼이나 물 스트



레스가 높은 국가로 분류되어 있다(그림2)<sup>2a</sup>. 인구밀도 외에도 물 스트레스는 그 지역의 기후(예: 강수량의 계절에 따른 집중), 경제 및 도시발전 정도(예: 수도시설 부족 혹은 기술 부족), 정책, 문화등에 따라서도 나타난다.

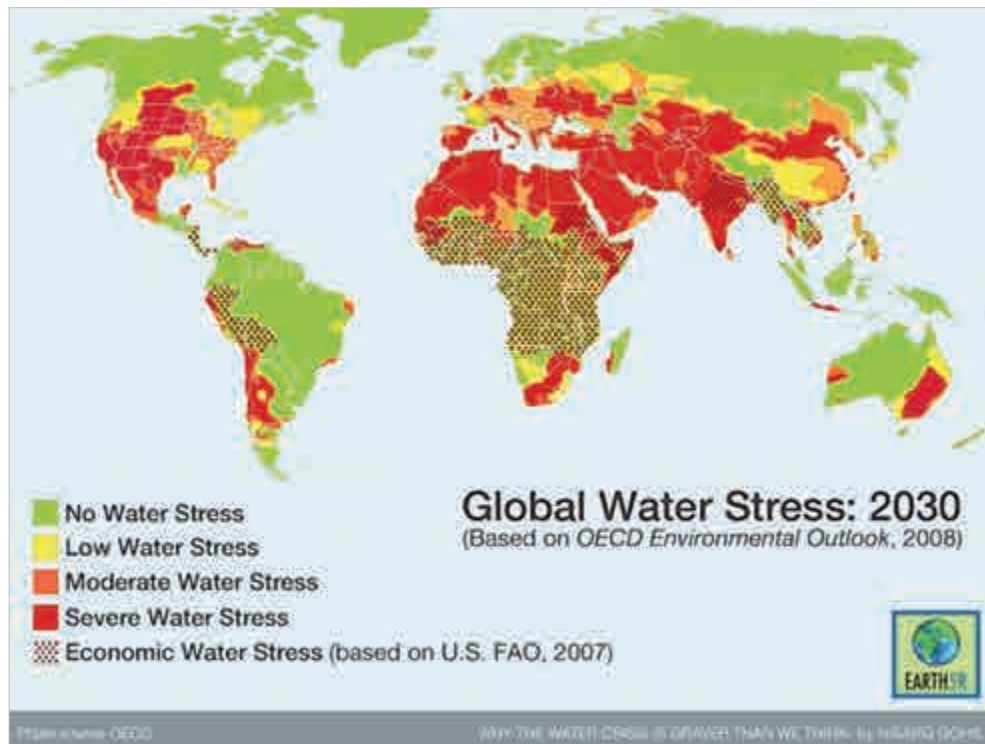


그림 2. 물 스트레스 분포도<sup>2a</sup>

UN 및 OECD의 보고서에 따르면, 2011년에서 2050년 사이에 세계적으로 인구는 33%가 늘어날 것이며, 필요한 식량은 60%가 늘어나고, 도시에 거주하는 인구집중도는 두 배가 될 것으로 예측하고 있다<sup>2</sup>. 이에 따라 2050년에는 현재 세계인구의 40%에 달하는 23억명이 극심한 물 스트레스를 경험하게 될 것으로 예측하고 있다.



## 1.2. 담수화 및 집중형 대용량 담수화 시스템

현재 그리고 미래의 물 부족문제를 해결하기 위하여 물 사용 효율을 증대시키거나 물 자원 보호, 재사용에 대한 기술 및 정책등 다양한 시도들이 이루어지고있다. 특히 가용가능한 수 자원으로 분류되지 않던, 풍부한 해수(seawater) 및 염분을 포함한 지하수(brackish water)등을 포집하여 가용가능한 물로 “생산”하는 기술은 절대적인 가용수자원의 양을 늘릴 수 있다는 점에서 주목받고 있다<sup>4b</sup>.

World Health Organization(WHO)에 따르면, 사람이 사용가능한 물의 염분농도를 500ppm이하로 특정하고 있다. 염분을 포함한 지하수의 경우 최대 10,000ppm, 해수의 경우 35,000-40,000ppm의 염분농도를 가지는데, 담수화(desalination)란 이러한 brackish/seawater내의 염분을 제거하여 500ppm이하의 담수로 만드는 프로세스를 통칭한다(그림 3)<sup>4</sup>. 지역적인 성격의 물 부족현상과 맞물려 지난 50년간 담수화플랜트는 보다 큰, 많은 담수를 생산해낼 수 있는 시스템을 지향하였다<sup>5</sup>. 역삼투법(RO)을 이용한 담수화플랜트의 경우, 2005년엔 이스라엘 Ashkelon에 지어진 세계 최대 담수플랜트의 용량이 약 330,000 m<sup>3</sup>/day이었던 반면, 2013년 이스라엘 Sorek의 624,000 m<sup>3</sup>/day, 2014년 사우디아라비아 Ras Alkhair의 1,000,000 m<sup>3</sup>/day로 계속해서 증가하는 추세에 있다(그림4)<sup>6</sup>. 이론적으로는 담수화에 필요한 에너지비용(energy cost)과 건설에 필요한 자본비용(capital cost)이 서로 trade-off관계에 있는것으로 알려져있지만<sup>1b</sup>, 현재 중동에서 가장 널리 사용되고있는 multi-stage flash(MSF), multiple-effect distillation(MED)와 같은 증발법이나 역삼투법(RO)의 경우, 플랜트의 크기가 커질 경우 공간활용도 증대로 전체비용을 약 4-6% 줄일 수 있다는 조사 또한 이러한 담수화플랜트의 거대화(megascale) 및 집중화(centralization)를 가속하는 근거가 되고 있다<sup>7</sup>.



그림 3. 담수화 모식도<sup>4</sup>



그림 4. 세계최대 담수화 플랜트  
Ras Alkhair, Saudi Arabia<sup>8</sup>

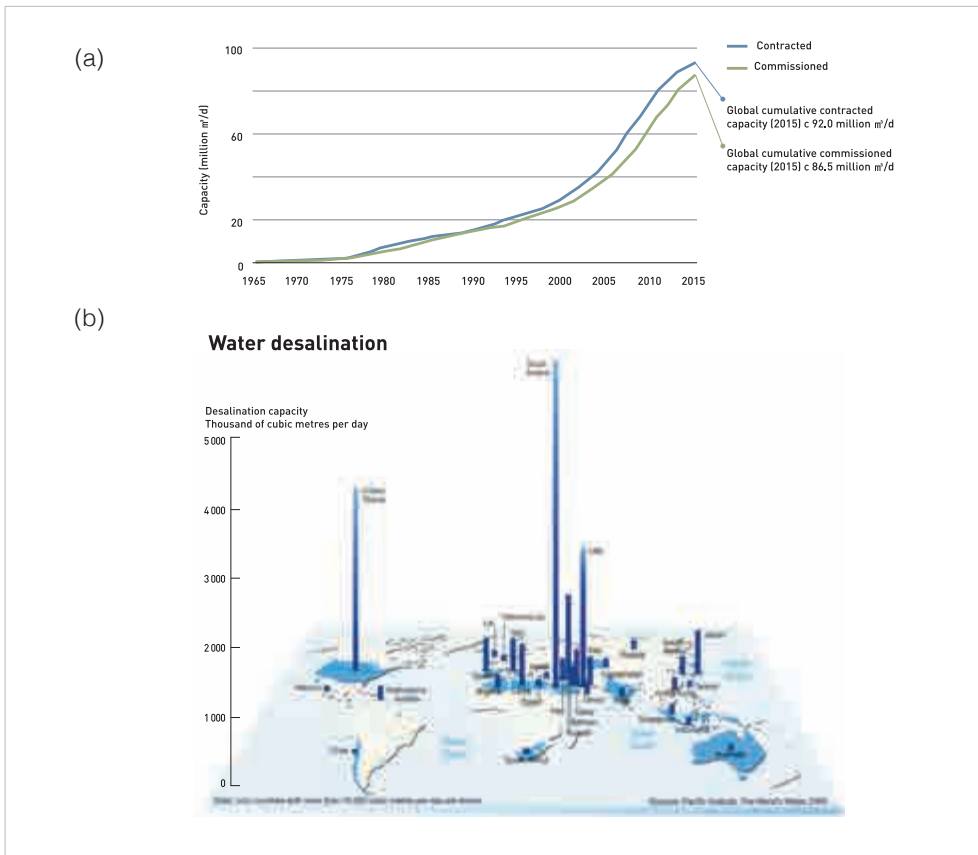


그림 5. a) 세계 담수화 총량변화 (1965-2015)<sup>5</sup>. b) 담수화플랜트 용량 분포<sup>9</sup>

### 1.3. 집중형 대용량 담수화 시스템의 문제점

담수화에 대한 수요가 본격적으로 시작된 1960년대 이후, 현재까지 집중형 대용량시스템이 세계적인 담수화플랜트의 용량을 끌어올려왔다(그림 5a)<sup>9</sup>. 이러한 양적 성장은 중동의 국가들과 미국(서부지역)을 중심으로 이루어졌는데, 이는 단지 이 지역들이 절대적으로 물이 부족한 곳이기 때문만은 아니다(그림 5b). 현존하는 증발법이나 역삼투법을 사용하는 대용량 담수화플랜트를 건설하고 운영하기 위해서는 매우 많은 자본과 화석연료가 필요하며, 이러한 자본과 연료는 물 스트레스를 받고있는 지역 중 석유가 풍부한 몇몇 나라만이 제공가능하다. 사실 1996년 Postel et al. 이 Science에 발표한 논문에 따르면, 수자원을 확보하는데 있어서 담수화보다는 새로운 댐이나 저수지를 더 짓는 것을 가장 현실적인 방법으로 제시하고 있다<sup>10</sup>. 그 이유는 담수화의 경우 높은 에너지/자본비용 때문에 석유보유국가에서만 사용할 수 있을 뿐, 전세계적으로 물 부족현상을 극복하는데는 한계가 있다는 것이다. 그리고 이는 현재 담수화의 현주소를 정확히 반영하고 있다.

높은 비용에 따른 담수화기술의 지역적 독점은 그 비용 및 기술을 감당하지 못하는 개발도상국들의 문제로, 선진화 혹은 적정기술(appropriate technology)의 개발을 통하여 해결 가능할지 모른다. 하지만 최근, 물-에너지 연계연구(water-energy nexus) 및 지속가능성(sustainability)에 대한 깊은 논의가 이루어짐과 동시에 몇몇 사례들을 통하여 현재의 집중형 대용량 담수시스템에 대한 재고찰이 이루어지고 있다<sup>11</sup>. 주요 쟁점은 재생불가능한(non-renewable) 화석에너지소모, 환경오염, 그리고 기후변화에 대한 대응문제이다. 2015년 12월부터 가동이 시작된 Carlsbad의 미국 최대 담수화플랜트에 대한 LA Times의 기사(Desalination plants aren't a good solution for California drought<sup>12</sup>)는 이러한 회의적인 시각을 잘 반영하고 있다.

첫째, 증발법이나 역삼투법을 사용하는 현재 담수화플랜트는 담수생산을 위해 상당한 양의 화석연료를 필요로 한다. 2000년도 기준으로 전세계 담수화 총용량은 약 2,200만 $m^3/day$ 인데, 이 생산량을 유지하기 위해서는 연간 약 2억 300만톤의 석유가 필요한 것으로 파악된다<sup>13</sup>. 기존에 담수를 확보하는 것 만을 고려하였을때는 이에 들어가는 에너지비용을 크게 신경쓰지 않았지만, 물과 에너지 수요를 연계시키며 물을 위해 이만한 양의 대체불가능한 화석연료를 쓰는 것이 효율적인지에 대한 많은 논쟁이 일어나고 있다. 또한 이러한 화석연료의 사용으로 인한 온실가스방출은 환경오염문제 뿐만아니라 탄소배출권(carbon credit)을 확보하기 위한 비용이 부가적으로 들어가게 된다. 실제로, Carlsbad의 담수화플랜트의 경우, Poseidon Water로부터 샌디에이고 시 수도청(San Diego County Water Authority)이 사용권을 구입하였는데, 그 비용이 약 \$2100-2300/acre-foot(1 acre-foot은 약 1,233 $m^3$ )에 이르며, 이는 샌디에이고시가 현재 Metropolitan Water District와 거래하는 비용(\$923/acre-foot)의 두 배가 넘는 가격이다<sup>12</sup>.

둘째, 화석연료사용에 의한 환경오염에 더하여, 두 가지 환경문제가 제기되고 있다. 담수화플랜트는 담수화를 하기위한 해수를 흡입하고, 이를 담수와 염분이 농축된 고염수(brine water)로 분리하여 담수는 저장을 고염수는 다시 바다로 방출한다. 이러한 일련의 담수과정중, 바다에서 해수를 흡입할 때, 많은 해양생물(특히 아직 미성숙한 작은 생물들)이 휩쓸려 죽게된다. 또한 방출된 고염수는 방류지역의 염분농도를 상승시켜 생태계를 교란시킬 수 있다<sup>14</sup>. 높은 농도의 염분 뿐만이 아니라 담수화프로세스 과정에서 들어간 다양한 화학물질(보통 pH조절 및 막 표면에 형성되는 스케일을 방지하기위하여 들어감) 또한 문제를 일으킬 가능성이 있다고 예측하고 있다. 실제로 2016년 3월, 이스라엘은 Rishon Letzion에 위치한 자국에서 가장 큰 담수화플랜트를 정지시켰는데, 담수화플랜트의 유출수가 이스라엘에서 가장 중요한 자연보호지역에 방류되고있으며, 이것이 환경오염 및 지속적인 수자원 확보에 도리어 악영향을 미친다는 판단에서 결정이 된 것이었다<sup>15</sup>. 이밖에도, 현재 담수화플랜트 주변의 바다에서 고염분의 유출수에 의한 환경변화를 장기적으로 모니터링하는 연구가 곳곳에서 시작되었으며, 생태계의 다양성, 용존산소량, 염분, pH등 다양한 측면에서의 관찰이 진행되고 있다.

셋째, 그림1-2에서 재생가능한 수자원이 풍부함에도 불구하고 물 스트레스가 높은 지역(예: 미국 서부와 한국)의 경우, 그 원인이 강수량의 집중과 가뭄이라는 시기적인 이유에 있는 경우가 많다. 특히 미국 서부-캘리포니아지역의 경우 지난 20년간 만성적인 가뭄과 물 부족에 시달리고 있으며, 최근 규모가 큰 담수화관련 프로젝트를 활발히 진행하는 곳이기도 하다<sup>16</sup>. 하지만 UC Berkeley의 명예교수인 Henry J. Vaux Jr.는 이러한 대용량 담수화플랜트에 대한 투자는 가뭄이 끝나고 다시 시작되는 주기성 때문에 위험한 투자라고 지적한다<sup>12</sup>. 실제로 산타바바라는 1980-1990년대 극심한 가뭄을 겪으며 약 3,400만 달러를 투자하여 대규모 담수화플랜트를 지었다. 하지만 플랜트가 완공된 1992년 이후, 강수량이 대폭 회복되면서 가뭄이 자연적으로 극복되었고, 많은 비용이 들어간 이 담수화플랜트는 정지 및 부분적인 해체가 진행되었다(그림 6). 그리고 현재, 이 가뭄은 다시 시작되었으며, 산타바바라는 다시 대규모 담수화플랜트에 대한 프로젝트를 시작하였다.

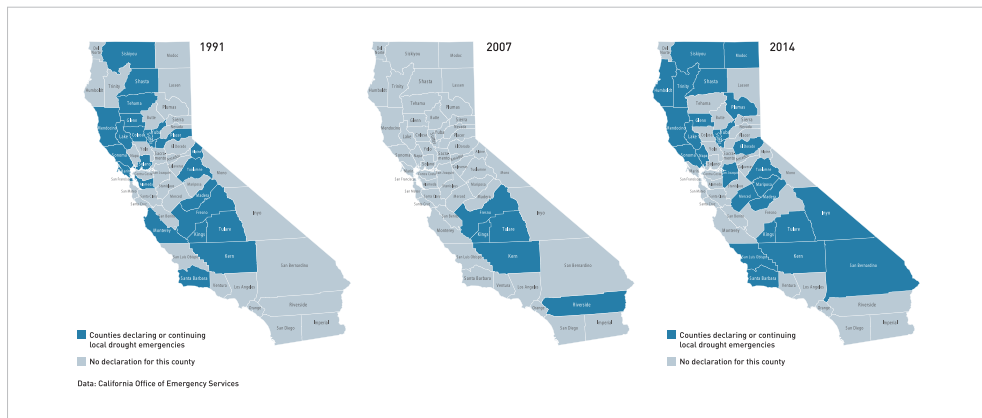


그림 6. 미국 캘리포니아의 가뭄경보 (1991, 2007, 2014년)<sup>16</sup>

## 1.4. 지속가능한 분산형 소용량 담수화의 필요성

집중형 대용량 담수화 시스템은 높은 에너지/설비비용으로 인하여 화석에너지 고갈, 환경오염, 기후변화에 대응하기가 어렵다. 또한 경제적인 문제로 물 스트레스를 받고 있는 인도, 아프리카지역에 적용할 수 없다. 따라서 에너지/설비 비용이 적게 들고, 쉽게 사용가능하며, 환경오염의 문제를 야기하지 않는 분산형 소용량 담수화시스템의 개발이 필요하다<sup>17</sup>. 이러한 분산형 시스템에서 가장 중요한 필요조건은 확장성(scalability)이다. 시스템의 효율에 무관하게 크기를 손에 들고 다닐 수 있을 정도로 작게도, 플랜트규모로 크게도 만들 수 있는 규모적 확장성이 보장이 되는 담수기술이어야만, 지역적/계절에 따른 상황에 맞춘 다양한 담수시스템의 제작이 가능할 것이며 에너지/설비비용을 최소화 할 수 있을 것이다. 또한 지속가능성을 위하여, 화석연료에 비하여 에너지 밀도(energy density)가 극히 떨어지는 재생가능에너지를 이용할 수 있는 기술이 필요하다.

정리하면, 분산형 소용량 담수화시스템은 저렴한 에너지/설비비용, 재생가능한 에너지로 구동이 가능하며, 확장성이 좋은 담수화기술이 필요하다. 이러한 상황에서 전기화학적(electrochemical) 담수화기술은 높은 확장성과 저렴한 설비비용으로 소용량 시스템을 구축하는데 적합한 차세대 담수화시스템으로 각광받고 있다<sup>18</sup>. 본 리뷰에서는 세 가지 대표적인 전기화학적 담수화방법(전기투석공정(ED: electrodialysis), 전기탈이온공정(EDI: electrodeionization), 축전식탈이온공정(CDI: Capacitive Deionization))의 개발배경과 기본원리를 살펴보고, 이 방식의 문제점 및 이를 극복하기 위한 최신연구동향을 살펴보고자 한다. 특히, 지속가능한 분산형 시스템을 위한 에너지비용절감 및 재생가능한 에너지원과의 연계에 대하여 다루고, 국내외에서 진행되고있는 전기화학식 분산형 담수화플랜트에 대한 동향을 소개하고자 한다.

# 02

## 전기화학적 담수화

### 2.1. 전기화학적 담수화란

MSF, MED와 같은 증발법이 상변화를 이용한 방법, 역삼투법(RO)이 선택적투과막을 이용한 short-range interaction을 사용한 방법이라면, 전기화학적 담수화는 기본적으로 long-range electrostatic interaction을 사용하는 방법이다(그림7)<sup>19</sup>. 염분(saline)은 전기적인 전하(electric charge)를 띤 이온(ion)으로 중성의 물 분자사이에 존재하며, 이는 우리고 전기장에 의하여 이 이온들에 힘을 가할 수 있도록 해준다. 따라서 전기장은 이온들을 원하는 위치로 이동시켜 특정지역내에서 이온들을 고갈시키거나 모아줄 수 있다. 이러한 전기적 이동현상에 대한 연구분야를 전기동역학(electrokinetic)이라 한다<sup>20</sup>. 기본적으로 전기영동(electrophoresis)에 의하여 음이온들은 양극으로, 양이온은 음극으로 이동하려하며, 양/음극과 같은 대전된 고체표면은 반대의 전하를 띤 이온을 끌어당기고, 동일한 전하를 띤 이온은 밀어내어 전기이중층(electric double layer)를 형성한다. 이 이중층의 두께는 염분 혹은 이온의 농도가 높을 수록 얇아지는데, 탈염수(deionized water)에서는 약 1 $\mu$ m, 해수에서는 약 1nm를 가진다. 이러한 원리를 바탕으로 대전이 가능한 전극이나 전하를 띤 이온이 고정되어있는 막(이온교환막(ion exchange membrane))을 이용하여 물속의 이온들을 선택적으로 흡착하거나 이동시켜 제거하는 담수화프로세스가 가능하다.

이러한 전기화학적 담수화방법은 고온, 고압이 필요한 증발식이나 역삼투법과 달리 전기와 이온선택성의 가진 전극 혹은 멤브레인만으로 담수화가 가능하기 때문에 설비비용이 낮으며, 효율과 상관없이 그 크기를 자유롭게 조절할 수 있다. 이러한 저렴한 설비비용과 높은 확장성이라는 확실한 강점을 가지고 있지만, 고염분의 해수를 처리하는 에너지비용이 역삼



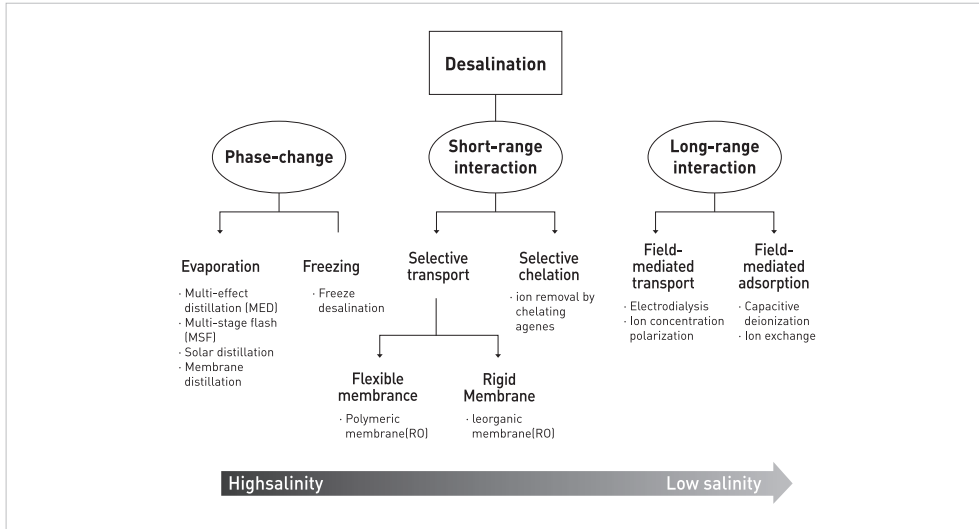


그림 7. 담수화기술의 기본원리<sup>19)</sup>

투법보다 높아, 염분이 상대적으로 낮은 기수(brackish water, 해수와 담수가 섞이는 지점의 물로 해수보다 염분이 낮은 물)를 처리하는 담수화플랜트에만 간간히 사용되거나, 이온을 선택적으로 이동시킬 수 있는 기능을 응용하여 식량가공(food processing), 생산(acid/base production)등 담수화가 아닌 다른 시스템에 주로 적용되고 있었다(그림8)<sup>18)</sup>. 하지만 담수화플랜트의 분산화, 소용량화, 지속가능성에 대한 필요성이 대두되며, 전기화학적 담수화방식에 대한 연구 및 상용화에 대한 시도가 다시 활발해지고 있다.

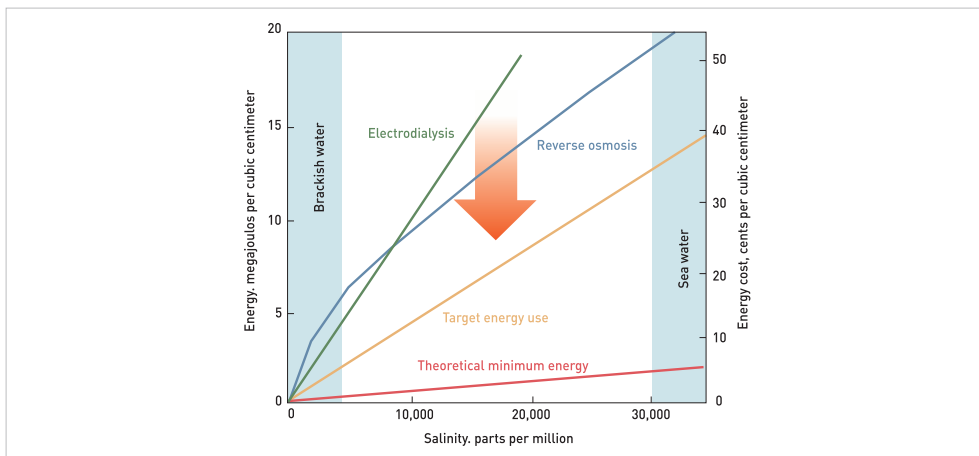


그림 8. 전기화학적 담수화방법중 하나인 전기투석공정과 역삼투법 에너지비용 비교<sup>21)</sup>

## 2.2. 전기투석 공정 (ED: Electrodialysis)

### 2.2.1. 전기투석 원리 및 개발역사

전기투석 공정은 이온교환막을 사용하는 막분리공정중 하나이다. 이온교환막은 막 내부에 아주작은 기공과 그 기공에 강한전하를 띤 고정이온(fixed ion)이 존재한다. 작은 크기의 기공과 강한전하에 의해서, 전하의 극과 동일한 co-ion은 교환막을 통과할 수 없게되고, 단지 고정이온전하의 극과 반대되는 counter-ion만이 교환막을 통과할 수 있다. 통과가 가능한 이온에 따라서 양이온이 선택적으로 통과가능한 양이온교환막(CEM: cation exchange membrane)과 음이온교환막(AEM: anion exchange membrane)으로 분류된다. 전기투석조(ED stack)는 양단의 전극 사이에 이 두 가지 타입의 이온교환막이 교차로 배열이 된 형태를 가지며, 교환막 사이에 유로를 형성하기 위하여 스페이서(spacer)를 배열한다(그림9a). 전기장하에서 물 속의 양이온과 음이온들은 각각 음극과 양극방향으로 이동하게되는데, 교차로 배열된 양/음이온 교환막에 의하여 한 유로에 있는 이온들은 그 옆의 유로로 모두 이동시킴으로서 공급된 염수를 담수와 염분이 농축된 고염수(brine 혹은 concentrated water)로 분리한다. 하나의 담수유로와 고염수유로를 묶어 전기투석공정의 단위셀로 설정할 수 있으며, 이 셀을 얼마나 많이 적층시키냐에 따라 담수화시스템의 용량을 조절 할 수 있다. 일반적으로 단위셀 100-200개를 적층시켜 양단의 전극사이에 넣어 구동한다(그림9b-c).

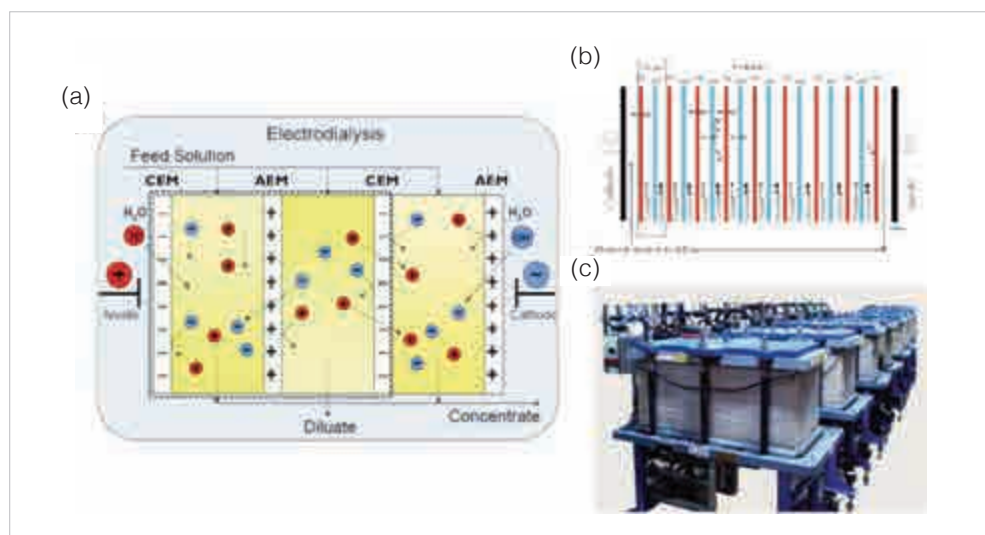


그림 9. a)전기투석 방법 모식도<sup>22</sup>. 양이온교환막(CEM)과 음이온교환막(AEM)이 양단의 전극 사이에 교차되어 배치되어있다. b-c)전기투석모듈 구조 및 장치<sup>23</sup>.

전기투석 공정의 개발역사는 이온교환막에 대한 이해와 함께 이루어져 왔다. 양이온 또는 음이온을 선택적으로 투과시킬 수 있는 반투과성 막을 이용한 분리공정은 1903년 Morse and Pierce에 의해 처음 시도되었으며, 이온선택성에 대한 수학적 이해는 1911년 제안된 Donnan exclusion potential 모델을 바탕으로 발전해왔다. 이후 이온교환막을 이용한 전기투석공정에 대한 다양한 실험이 이루어졌지만, 그림9와 같은 현대적인 전기투석 형태를 가지고 실질적으로 활용이 되기 시작한 것은 1940년대 Rohm and Haas Co.에서 고분자를 이용한 안정적인 이온교환막을 개발한 이후이다. 1954년 Ionics (General Electric(GE)에 2005년 인수됨)가 사우디아라비아 Aramco의 의뢰로 전기투석방식을 이용한 첫 담수화 플랜트를 세운 후, 미국 및 유럽에서 기수 및 해수담수화에 주로 이용되어오고 있다<sup>18b, 24</sup>. 본래 비슷한 시기에 개발된 역삼투법과 함께 증발식 담수화플랜트를 대체할 수 있는 기술로 주목을 받았었으나, 2000년대 역삼투법에 사용되는 필터멤브레인에 대한 기술적 진보가 빠르게 이루어지면서, 주된 시장이라 할 수 있는 해수담수화분야에서 기술적으로 도태되었다. 전기투석 공정 또한 담수화비용을 높이는 주된 원인으로 지적되었던 막의 오염을 효과적으로 줄일 수 있는, 전기장의 방향을 주기적으로 바꿔주는 Electrodialysis Reversal(EDR)공정이 Ionics에 의해 개발되었다. 하지만 해수담수분야에서 역삼투법에 비해 여전히 높은 에너지비용을 보였고, 현재는 역삼투법에 비해 비용적인 측면에서 우위를 보이는 기수의 담수에 주로 적용되어 오고 있다.

이에 따라, 현재 전기투석 방식에 관한 연구는 크게 두 가지 목적을 가지고 진행되고 있다. 첫째, 담수화에 필요한 에너지비용을 낮춰 역삼투법이나 증발법과 가격경쟁력을 확보하는 것과, 둘째, 담수화가 아닌 다른 상업적 프로세스의 적용이다. 본 리뷰에서는 전기투석장비의 요소별로 분류하여 연구동향을 살펴보고자 한다.

### 2.2.2. 연구동향: 이온교환막(IEM: ion exchange membrane)

앞서 언급하였듯이, 기본적으로 이온교환막은 막 내부의 고정이온에 따라 양이온과 음이온 교환막으로 분류한다. 양이온 교환막은 음전하를 띤 고정이온을 가지고 있는데,  $-\text{SO}_3^-$ ,  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{PO}_3^-$ ,  $-\text{PO}_3\text{H}^-$ ,  $-\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$  등이 사용된다(그림 10). 반대로 양이온은 양전하를 띤 고정이온을 가지고 있으며,  $-\text{NH}_3^+$ ,  $-\text{NRH}_2^+$ ,  $-\text{NR}_2\text{H}^+$ ,  $-\text{NR}_3^+$ ,  $-\text{PR}_3^+$ ,  $-\text{SR}_2^+$  등이 대표적이다<sup>25</sup>. 이에 추가적으로 위와 같은 고정이온들이 교환막의 매트릭스(matrix) 혹은 화학적구조와 어떻게 연결되어있는지에 따라 균질(homogeneous) 교환막과 비균질(heterogeneous) 교환막으로 다시 분류를 할 수 있다. 균질 교환막은 화학적으로 고정이온이 교환막과 결합되어있으며, 비균질교환막은 물리적으로 결합되어 있다. 1980년대 이후에 Ionics, Du Pont, Asahi Chemical, Tokuyama등에서 저렴하고 안정적인 성능을 가진 다양한 이온교환막이 개발되면서 제조공정이 경제성을 가지게 되었다.

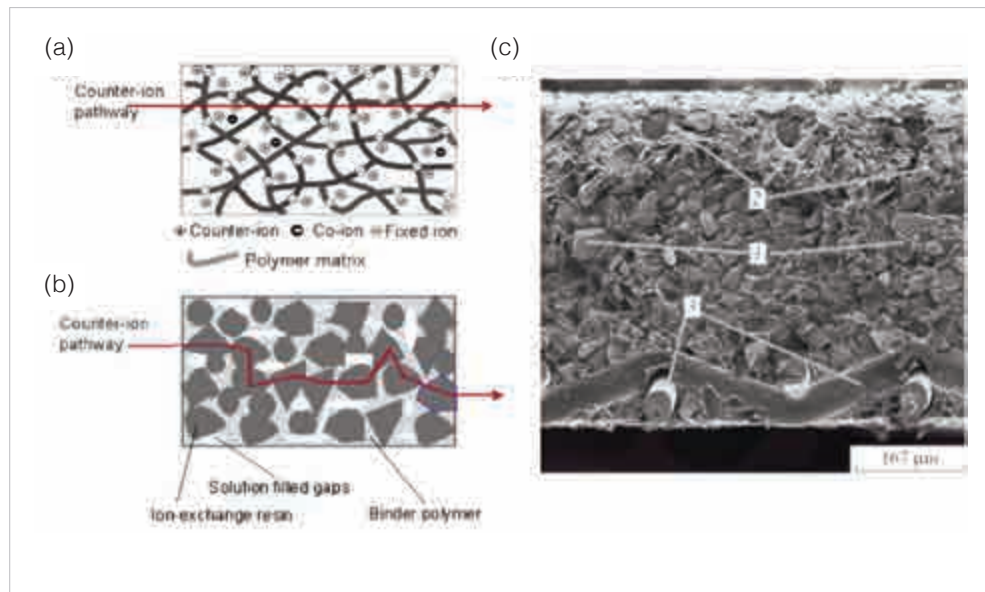


그림 10. a)균질한 양이온교환막 모식도와 b)비균질한 이온교환막의 모식도18b, c)비균질 음이온교환막 MA-40의 이미지. 음이온 교환레진(1), 폴리에틸렌(2) 및 강화목적으로 들어간 네트워크(3)로 이루어져 있다<sup>26</sup>.

종래부터 이온교환막과 관련된 기술개발은 전기투석공정이 가격경쟁력을 가질 수 있도록 전기저항이 낮고, 이온선택성이 높으며, 수명이 긴 이온교환막을 제조하는 것이 주된 목표였다. 초기에 이러한 조건을 만족시키는 이온교환막의 재료를 개발하고 막 제조공정을 개발하는것에 주력했다면, 근래에는 혼합물질(hybrid component), 나노입자(nanoparticle)를 추가하는 방식으로 이온교환막의 재료를 개선하는 연구가 많이 진행되고 있는데, 이러한 하이브리드 이온교환막은 막의 기계적 성질과 이온전도도를 개선할 수 있다. 일 예로, Kurnakov Institute와 Russian Academy of Science는 실리콘, 지르코늄 등 다양한 산화나노파티클들을 이온교환막에 추가하여 이온전도도와 선택성을 동시에 높일 수 있는 조합을 찾고 있다<sup>26</sup>.

최근에는 담수화용 이온교환막보다는 다른 상업적 프로세스를 위한 특수한 기능, 성질 혹은 이온 선택성을 가지는 이온교환막에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, 물 분해(water splitting)을 일으키는 목적으로 양이온교환막과 음이온교환막을 결합한 양극성(bipolar)교환막의 개발은 수소/산소기체 포집 혹은 산/염기 생산에 목적을 두고 있다<sup>18b</sup>. 또한 1가 혹은 2가 이온이나 리튬, 질산염(Nitrate)과 같은 특정 이온에 대한 선택성이 높은 특수한 이온교환막의 개발 또한 이루어지고 있다. 이는 도금폐수와 같은 공정폐수에서 가치있는 금속이온을 회수하거나, 독성을 가지는 이온을 제거하는 폐수처리등에 적용이 되고 있다.

### 2.2.3. 연구동향: 이온농도분극현상과 이온전달향상연구

이온교환막에 대한 비약적인 발전으로 인하여, 현재 전기투석 공정에 적용되는 교환막은 이온선택성이 96-99%에 이르며 전기저항으로인한 전압강하는 전체 전기투석시스템의 5%미만으로 알려져 있다. 따라서 이온교환막의 개선은 담수화플랜트의 유지비용을 낮추는데 일조할 수 있겠지만, 전기투석 공정의 원천적인 에너지 비용을 낮추는데는 큰 역할을 하지 못할 것이라는 시각이 존재한다. 이에 비하여 공정 자체에서 일어나는 이온전달현상에 대한 수학적 이해와 분석, 최적화는 많이 이루어져 있지 않다<sup>27</sup>.

전기투석 공정내에서 일어나는 이온전달에 대한 이론적인 모델은 1968년 MIT의 A.A. Sonin과 R. Probst에 의해 처음 정리가 되었는데, 이는 전통적인 대류확산식(convective diffusion equation)에 이온교환막에서 일어나는 이온농도분극현상(ion concentration polarization)을 적용한 결과이다<sup>28</sup>. 여기서 이온농도분극이란 교환막에서 일어나는 선택적인 양이온 혹은 음이온 이동에 의하여 막의 한 쪽의 이온농도는 감소(이온공핍층: ion depletion zone)하고 다른 한 쪽의 농도는 증가(이온농축층: ion enrichment zone)하는 현상을 말한다(그림 11)<sup>20, 29</sup>. 미시적으로 볼 경우, 양/음이온교환막에서 발생한 이온공핍층이 모여 담수를 만들어내고, 이온농축층이 모여 고염수를 만들어 내는 것이라 할 수 있다(그림 12a). 이때 막 근처의 이온농도프로파일은 전기영동에 의한 이온전달과 확산에 의한 이온전달이 균형을 이루어 선형적으로 나타나며, 전압을 높게 가할 수록 농도구배가 커지게 된다. 이때, 농도구배 혹은 그에 따른 이온전달량(즉, 전류)은 무한하게 커지지 못하고, 교환막과 용액이 만나는 곳의 농도가 0이 되었을 때 그 최대값을 가지게 된다. 이러한 현상을 확산한계(diffusion-limit)에 의한 한계전류(Ilim: limiting current)값이라 한다(그림 12b)<sup>20</sup>. 결과적으로 이 한계전류가 나타나는 전압에서 가장 많은 염분이온들을 제거할 수 있어, 대부분의 전기투석 담수시스템의 경우 이 값을 공정구동시 최적화 포인트로 설정하고 있다.

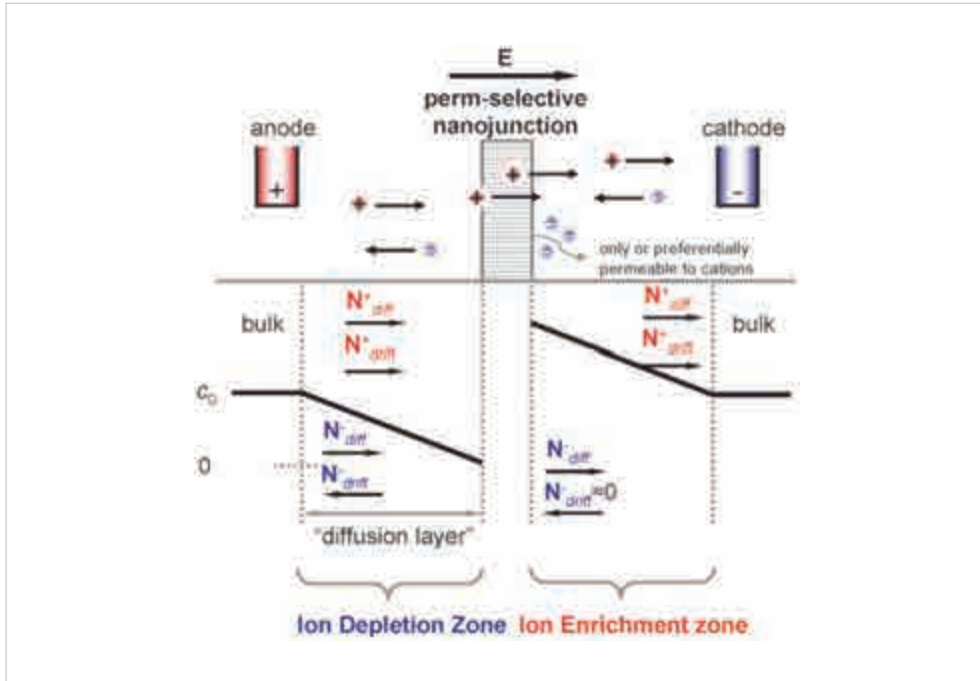


그림 11. 양이온교환막에서의 이온농도분극현상<sup>29</sup>

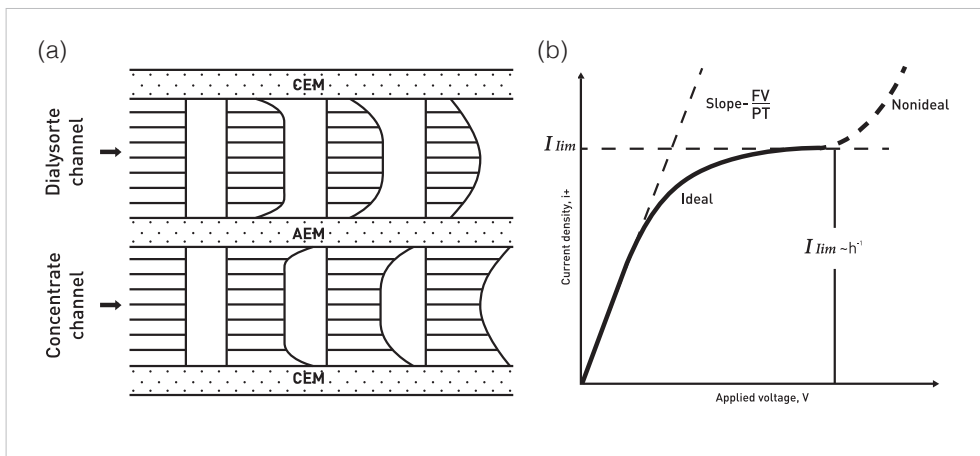


그림 12. a)전기투석 시스템 내 이온농도프로파일과 b)이에 따른 전압-전류 그래프<sup>20</sup>.



이러한 이론을 바탕으로, 현재 가장 많이 시도되고 있는 것은 다양한 방법을 통하여 선형적인 이온농도분극층, 특히 이온공핍층을 흐트러트리는 연구이다. 이온공핍층은 낮은 이온농도로 인하여 높은 전기적 저항값을 가지고, 이로 인하여 담수화프로세스에 필요한 전력값을 높이는 데 큰 역할을 하고 있다. 특히 한계전류값에서 구동할 경우, 교환막에 가까워질수록 이온농도는 거의 0에 수렴하게 되는데, 이는 무한대의 전기저항값을 말한다. 따라서 이 공핍층을 다양한 방식으로 교반시켜 농도구배를 약화시킬 수 있다면 담수화에 필요한 에너지비용을 낮출 수 있다. 이를 위하여 1970년대 부터 다른 막분리공정에서도 적용되고 있는 “turbulent promoter” 개념을 이용, 막과 막을 분리하기위해 들어가는 스페이서 구조 뒤쪽에서 와류가 발생하여 이온공핍층을 흐트러트릴 것이라 예측하고 다양한 스페이서구조에 대한 실험적 증거가 이루어졌다(그림 13)<sup>30</sup>. 이에 더하여 최근에는 보다 발전된 가시화 및 수치해석을 통하여 특정 스페이서구조를 사용하였을때 유동프로파일을 예측하는 것이 가능해졌다<sup>31</sup>. 하지만 이러한 스페이서가 항상 긍정적인 효과를 불어오는 것만은 아니다. 지금까지 사용되왔던 비전도성 폴리머 스페이서는 막과 막 사이에 공간을 차지하고, 이것은 유동저항과 전기적저항의 증가를 일으킨다. 따라서 최근에는 이온전도성을 가진 재료를 이용하여 스페이서를 제작하거나 이온교환막 자체를 구조를 가지게 제작하여 난류 촉진제(turbulent promoter)의 역할을 부여하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

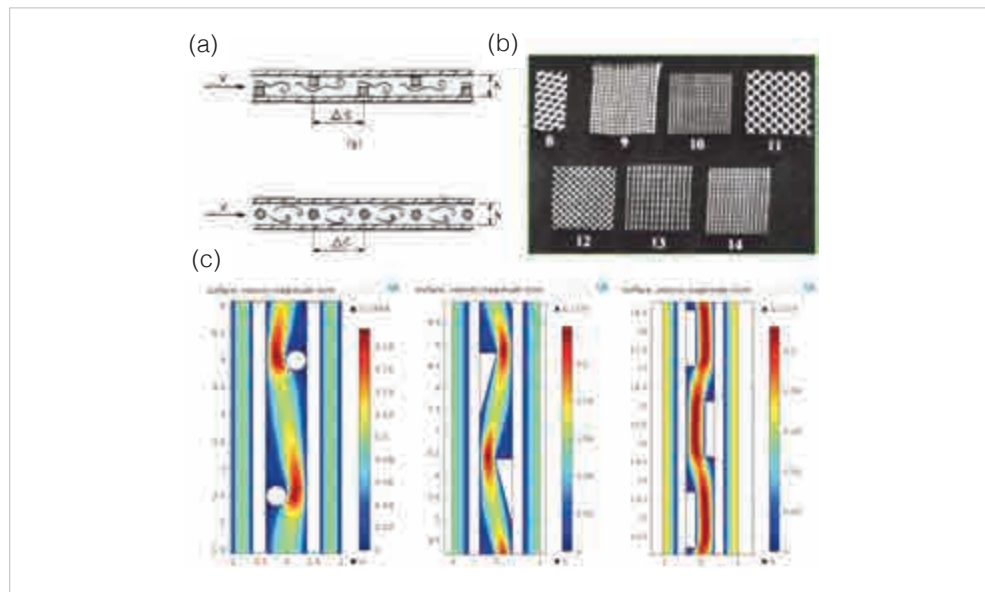


그림 13. a)전기투석시스템 내 turbulent promoter 모식도<sup>30b</sup> 및 b) 다양한 스페이서구조<sup>30a</sup>. c) 실린더 형태의 스페이서구조(왼쪽) 및 삼각형/직사각형 형태의 profiled 교환막에서의 유동 해석<sup>31</sup>

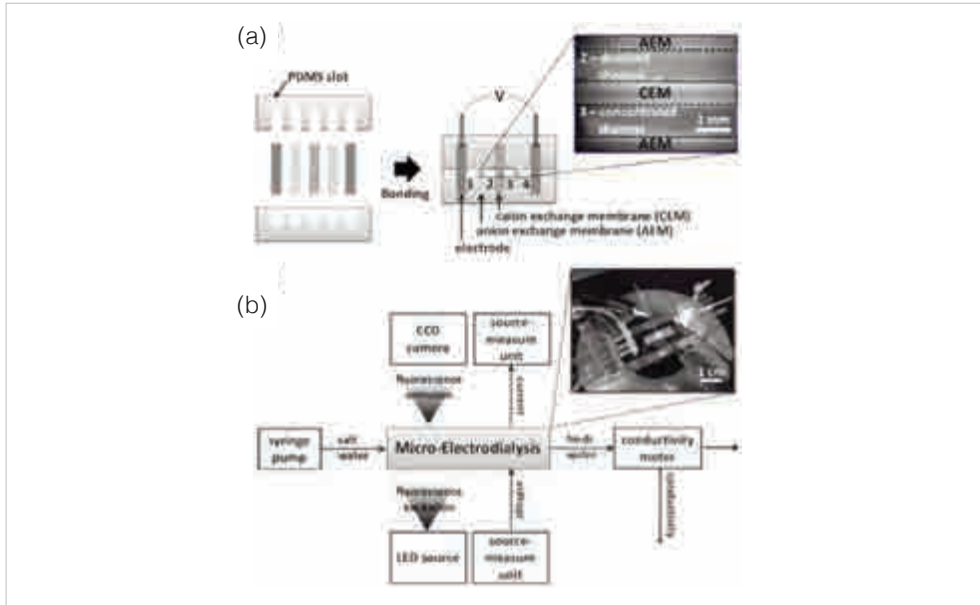


그림 14. 소형화된 전기투석 담수화시스템. a)시스템 구조 모식도 및 b)모니터링 방법 모식도<sup>27)</sup>.

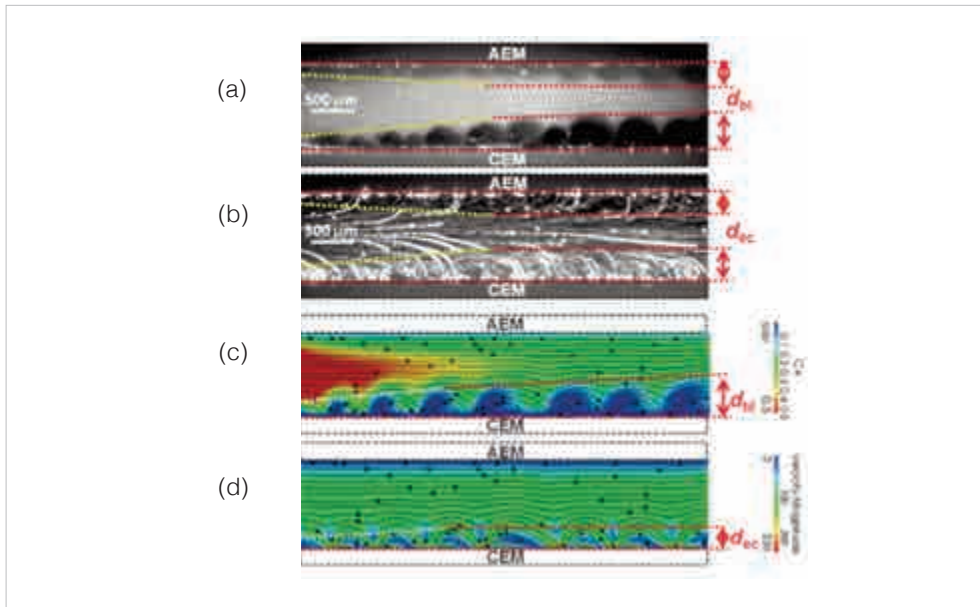


그림 15. 전기투석 담수화시스템에서 관찰된 전기적외류현상.

a)전하를 띤 형광색소를 이용하여 가시화된 이온공핍층(어두운 부분)과 b)전하를 띠지 않은 형광파티클을 이용하여 가시화된 전기적외류. 동일한 구조를 가진 수치해석모델에서 가시화된 c)이온 공핍층 및 d)전기적외류<sup>28)</sup>.

2000년대 후반부터는 기계적 구조가 아닌, 높은 전기장 하에서 발생하는 전기적와류현상 (electroconvection)을 이용한 연구가 진행되고 있다. 기존의 이온농도분극현상에 관한 모델에 따르면, 한계전류점에 다다른 후에는 아무리 전압을 높여도 전류값은 포화되어 일정하게 유지가 되어 한다. 하지만 실제로는 전류가 다시 올라가기 시작하는 비선형구간이 존재하며, 이를 과한계전류(overlimiting current)라 한다(그림12b). 처음 과한계전류가 발견된 1950-1970년대에는 이러한 과한계전류가 물분해에 의해 발생된다고 예측하였지만, 1979년 Rubinstein and Shitlman, 2000년 Rubinstein and Zaltzman에 의해 물분해와 같은 화학적반응이 아닌, 높은 전압하에서 유동불안정성이 발생되고, 이에 의하여 이온교환막 위에서 와류가 발생된다는 것과, 이 와류가 이온전달을 대류(convective)에 의해 향상, 과한계전류가 나타날 수 있다는 것을 증명하였다<sup>33</sup>. 이러한 기초연구를 바탕으로 2013년에는 실제 전기투석시스템의 단위셀을 소형화하여 담수화공정 중에 전기적와류현상을 가시화하는데 성공하였으며, 이 와류로 인하여 과한계전류가 발생하고 담수화능력이 향상됨을 증명하였다(그림 14-15)<sup>27, 32</sup>. RWTH Aachen University의 Matthias Wessling교수팀, Kuban State University의 V.V. Nikonenko교수팀, CNRS-University Montpellier의 G. Pourcelly교수팀등은 이온교환막의 친수/소수성, 교환막위의 화학적, 기계적 구조를 조절하여 이 전기적와류현상을 보다 낮은 전압에서 발생시키는 연구를 수학적 모델링과 함께 진행하고 있다<sup>33b, 34</sup>. 또한 Massachusetts Institute of Technology(MIT)의 Jongyoon Han교수팀과 Hanoi University of Science and Technology의 Van Sang Pham교수팀은 한국과학기술연구원 광노균 박사팀과 협력하여 전기적와류의 2D 및 3D 와류패턴연구 및 와류를 사용한 실제 전기투석시스템에서 기수, 해수, 그리고 해수보다도 염분이 높은 초고농도폐수를 담수화할 수 있는 시스템을 구현하고 이것이 다른 담수화방식에 비해 경쟁력이 있는지 증명해가고 있다<sup>35</sup>.

## 2.2.4. 향후전망

전기투석 공정은 다양한 전기화학적 담수화중 가장 실용적인 방식이라 평가받고 있으며, 담수화플랜트가 실제로 구동되고 있는 유일한 공정이다. 하지만 아직까지 전기투석 공정에 대한 연구는 미시적인 접근없이 대부분 “black-box” 방식으로 접근하여 입력값(전류 혹은 전압, 유량, 염분 농도 등)과 출력값(전압 혹은 전류, 담수의 염분 농도 등)을 모니터링하여 최적화가 이루어지고 있다. 미시적인 접근이 아직까지 드물었던 것은 전기투석 시스템 내에서 발생하는 이온농도분극현상, 전기적와류현상등에 의한 이온전달이 다양한 물리적힘(multi-physics)에 의해 일어나는 복잡한 현상이기 때문이기도 하다. 하지만 최근에 새로운 가시화시스템과 발전된 수치해석기법을 사용하여 다양한 미시적 접근이 이루어지고 있으며, 이는 기술적 성숙이 이루어졌다고 믿고있던 전기투석 공정을 한번 더 성숙시킬 수 있는 기회가 될 수 있을 것으로 보인다.

## 2.3. 전기탈이온 공정 (EDI: Electrodeionization)

### 2.3.1. 전기탈이온 원리 및 개발역사

전기탈이온 공정(EDI) 혹은 continuous electrodeionization(CEDI)이라고 불리는 이 기술 또한, 기존의 전기투석 공정의 이온농도분극현상을 극복하기 위하여 1955년 Argonne nationa Laboratory의 Walter et al.에 의해 처음 제시되었다<sup>36</sup>. 앞서 서술하였듯, 이온공핍층은 전기저항의 급격한 증가를 가져오고, 그 결과 전기투석 방식으로는 염분이온의 농도를 100%에 가깝게 제거하기 위해서는 높은 전력소모가 필요하다. 전기탈이온 공정은 이러한 문제를 극복하고 염분의 농도가 매우 낮은 초순수물(ultrapure water)를 효과적으로 생산하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 공핍층이 발생하는 채널의 이온교환막 사이를 이온교환수지(ion exchange resin)로 채워, 이 교환수지들이 막 사이에서 일종의 이온전도체 역할을 해주도록 시스템이 구성되어있다(그림16a). 여기서 이온교환수지는 이온교환공정(IX: ion exchange)에 사용되는 물질로, 수지표면의 고정이온과 전해질 속의 이동이온(mobile ion)을 서로 교환하고, 흡수된 이온을 수지 내에서 확산시킬 수 있는 물질이다(그림16b-c). 이러한 전해질 내의 염분이온을 이동시킬 수 있는 이온교환수지들로 인하여, 이온교환막 사이에 존재하는 모든 염분이온, 혹은 전기장 하에서 잘 움직이지 않던 무거운 금속이온이나 전하가 낮은 실리카(silica) 등을 효과적으로 제거할 수 있다. 그 결과 전기투석 방식에 비하여 최대이온제거율을 약 50%에서 90%이상 증가시킬 수 있다.

전기탈이온 공정은 전기투석 공정의 약점 뿐만이 아니라 이온교환공정의 단점 또한 해결하였다. 기존의 이온교환공정은 하나의 유로에 교환수지를 채워 놓은 형태이다. 따라서 연속 공정(continuous-flow operation)이 불가능하여 일정시간 가동 후 수지를 재생(regeneration) - 즉 수지에 흡수된 이온들을 빼내고 본래의 (이온교환능력이 있는) 고정이온으로 되돌리는 공정- 하는 단계가 필요하였다(그림16b). 이 과정에서 사용되는 화학약품과 최종적으로 발생하는 재생폐액 처리를 위해서는 상당한 비용이 소요되었는데, 전기탈이온 공정은 이온교환막을 통해 수지에 흡수된 이온을 연속적으로 빼낼 수 있어 재생공정자체가 필요하지 않다. 따라서 전기탈이온 공정은 전기투석 공정과 이온교환공정의 장점만을 효과적으로 결합시킨 하이브리드 시스템으로 평가받고 있다.

실제로 1955년 Walter et al.에 의해 처음 소개가 되었을 때는 높은 운전비용과 기술이 필요하여 관심을 끌지 못하였으나, 1980년대 환경오염문제에 대한 논의와 함께 이온교환공정의 재생폐액처리비용이 급격히 증가함에 따라, 이온교환공정의 유일한 대체공정으로서 주목 받기 시작하였다<sup>18a</sup>. 1987년 Millipore Corp.사에 의해 최초의 상업적인 전기탈이온공정이 개발이 되었고, 그 이후 U.S. Filter, Electropure, Ionics 등의 회사에서 경쟁적으로 관련 공정을 개발해오고 있다.

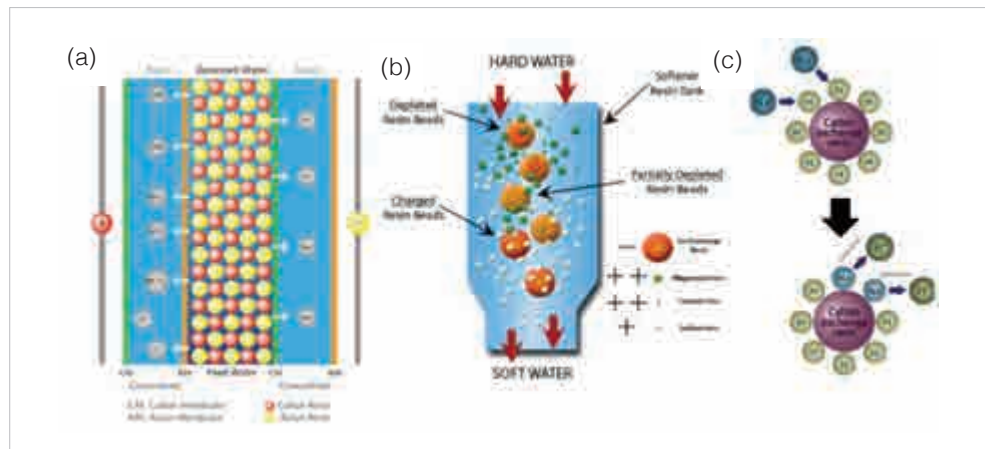


그림 16. a)전기탈이온공정 모식도(QUA group) 및 b)이온교환공정 모식도 (AXEON Water Technology). c)두 공정에서 사용하는 이온교환수지 중 양이온교환수지 모식도 (ASCOM Co.).

### 2.3.2. 연구동향: 이온교환레진(IER: ion exchange resin)

약 100년의 역사를 가지고 있는 이온교환공정은 이미 공정현장에서 상당한 노하우가 쌓여있으며 이온교환수지또한 화학적, 기계적 물성이 우수한 다양한 수지들이 개발되어있다(표1)<sup>18a</sup>. 이온교환막과 마찬가지로 이온교환수지 또한 기본적인 이온교환용량 성능은 이미 상당부분 포화되었다고 여겨지고 있으며, 이러한 기본성능향상 보다는 특정성능을 위한 수지들의 개발이 이루어지고 있다. 일 예로, 제올라이트(zeolite)나 포졸라나(Pozzolana)를 이용한 수지는 양극에서 발생하는 염소(이는 부식이나 이온교환막을 손상시킬 수 있음)을 제거하는데 효과를 보았으며, hydrated zirconium dioxide xerogel을 이용한 수지는 Ni<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>를 효과적으로 제거할 수 있다<sup>18a</sup>.

전기탈이온 공정에서는 전통적으로 약 수백 마이크로미터에서 수 밀리미터크기의 구형의 이온교환수지를 사용해오고 있다. 구형 수지는 성능은 매우 좋지만, 초기에 수지를 막 사이에 채우는 것이 어려우며, 수지의 교환, 수리가 쉽지 않다. 또한 구동중에 중력에 의하여 이온교환수지가 한쪽으로 쏠리게 되어, 유속이 감소하고 탈염이 가능한 유효면적이 줄어드는 등의 문제점이 발생한다. 이러한 공정상의 문제점을 해결하고자 전기투석 공정에 사용하는 스페이서와 같은 형태로 이온교환수지를 제작하는 연구가 진행되고 있다. 이를 이온교환섬유(ion exchange textile)라 한다<sup>37</sup>. Messalem et al.은 기존의 전기투석 스페이서에 이온교환이 가능한 작용기(functional group)을 지닌 고분자를 코팅하여 이온교환섬유를 제작하였으며<sup>38</sup>, 광주과학기술원의 문승현 교수팀은 폴리우레탄에 이온교환수지를 고정화하는 방식으로 이온교환폴리우레탄을 제작한 바 있다<sup>39</sup>.



표 1. 다양한 이온교환수지<sup>80)</sup>.

Supplier	Name	Ion
Bayer Leverkusen-Wolfen	Lewatit MPC 64	CrO <sub>4</sub>
Bayer Leverkusen-Wolfen	Wolfatit S2 30	CrO <sub>4</sub>
Central Drug House	Ceralite IR 120	Ca <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>
Central Drug House	Ceralite IRA 400	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Chemical Plant of Nankai University, China	D072	Ni <sup>2+</sup>
Chemical Plant of Nankai University, China	D296	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex 50 WX 2%	Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex 50 WX 4%	Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex A550 UPW	Cl <sup>-</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex C650 UPW	Na <sup>+</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex HCR-5 8%	Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex Mac-3	K <sup>+</sup>
Dow Chemical Co. <sup>TM</sup>	Dowex MSC-1	Ni <sup>2+</sup>
Hangzhou Resin Co.	D001	Cu <sup>2+</sup>
Hangzhou Resin Co.	D201	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Institut Francais du Textile et de l'Habillement	AET cellulose	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Institut Francais du Textile et de l'Habillement	Bipolar IET	Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup>
Institut Francais du Textile et de l'Habillement	CET cellulose	Cd <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , HCrO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>
Merck, Germany	4765	Na <sup>+</sup>
Merck, Germany	4766	Cl <sup>-</sup>
Mitsubishi	Diaion SA10A	Amino acids
Mitsubishi	Diaion SK1A	Amino acids
Mitsubishi	Diaion SKN 1	Co <sup>2+</sup>
Purolite Int. Ltd.	Purolite 201	Cl <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Purolite Int. Ltd.	Purolite C100E	Ca <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , Ni <sup>2+</sup>
Purolite Int. Ltd.	Purolite C 150 PTE	Cu <sup>2+</sup>
Purolite Int. Ltd.	Purolite A 520E	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Purolite Int. Ltd.	PFC100E	Organic acids
Purolite Int. Ltd.	PFA444	Organic acids
Purolite Int. Ltd.	Purolite A400	Citric acid, Cl <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IR-120	Ca <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IRA-67	HCrO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IRA-400	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IRA 402Cl	Cl <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IRN 77	Co <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , Ni <sup>2+</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Amberlite IRN 78	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Rohm and Haas Co. <sup>TM</sup>	Duolite C20	Pb <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>
Synthesized in Lab	Zirconium hidrophosphate	Ni <sup>2+</sup>
The chemical plant of Nankai University, China	D072	Cu <sup>2+</sup>
The chemical plant of Nankai University, China	D296	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Tianjin Hecheng S&T Develop. Co. Ltd.	001*7	Ca <sup>2+</sup>
Tianjin Hecheng S&T Develop. Co. Ltd.	201*7	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Zhenguang Co.	D354	HCrO <sub>4</sub>



### 2.3.3. 연구동향: 프로세스 및 모듈 개발

전기탈이온 공정은 초순수생산이라는 명확한 시장으로 인해, 실용적인 측면에서의 연구가 회사중심으로 많이 이루어져왔으며, 이에따라 다양한 프로세스 및 모듈이 개발되어 왔다. 전기투석 공정과 다르게 이온교환수지의 배열, 이온교환수지와 이온교환막의 배열에 따라 다양한 조합이 가능한것 또한 주목할만한 점이다.

먼저, 이온교환수지의 배열을 살펴보면, 기본적인 전기탈이온 공정은 그림16a에서 본 것과 같이 양이온/음이온교환수지가 섞여있는 혼합이온교환수지(mixed bed)를 사용한다. 이때 양이온과 음이온 교환수지의 비는 보통 이온교환용량이 균형을 맞추도록 한다. 하지만 처리하고자 하는 용액 내에 금속이온이 함유되어있는 경우, 이러한 혼합이온교환수지보다는 다층식이온교환수지층(layered bed)을 가지는 것이 더 효과적이라는 것이 이온교환공정을 통해 알려져왔다. 이에 따라 전기탈이온 공정 또한 다층식이온교환수지층을 가진 구조가 U.S. Filter사에 의하여 개발이 되었다(그림17a)<sup>40</sup>. 이에 더하여, 이온교환수지층 내에 전기전도도를 의도적으로 감소(inert dopant) 혹은 향상(electroactive dopant)시키기 위한 dopant과 티클을 첨가하는 시스템 또한 소개되었다(그림17b)<sup>41</sup>. Eignberger교수팀은 이를 좀 더 발전시켜 다층식이온교환수지층을 사용하는 대신, 양극성(bipolar) 이온교환막을 양이온/음이온 교환막 사이에 배치시키고, 둘로 나뉘어진 채널을 각각 양이온/음이온 교환수지를 채움으로써 도금폐수로 부터 중금속을 회수할 수 있는 시스템 또한 소개하였다(그림17c)<sup>42</sup>.

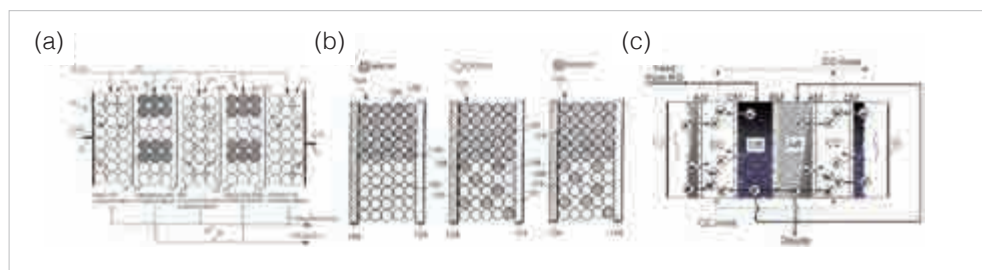


그림 17. a)다층식이온교환수지층을 포함한 전기탈이온공정<sup>40</sup>과 b)Dopant를 첨가한 공정<sup>41</sup>. c)양극성 이온교환막을 사용한 전기탈이온공정<sup>42</sup>.

전기탈이온 모듈의 경우, 기본적으로 전기투석 방식과 동일한 이온교환막을 평행하게 적층시키는 플레이트구조를 사용하고 있다(그림18a). 이러한 구조는 전기투석방식에서 증명되었듯 시스템의 확장성이 좋고 대용량시스템 제작이 용이하다. 하지만 물의 누출문제가 발생할 수 있고 막 사이의 이온교환수지를 교환하는데 많은 어려움이 있다. 최근에는 이러한 문제점을 극복한 실린더형태의 구조가 OMEXECELL, Ionpure 등에 의하여 개발이 되었다(그림18b). 이러한 구조는 원통상부를 통해서 수지의 교환이 용이하며 완전히 닫힌 구조이기 때문에 물의 누출문제를 방지할 수 있다.

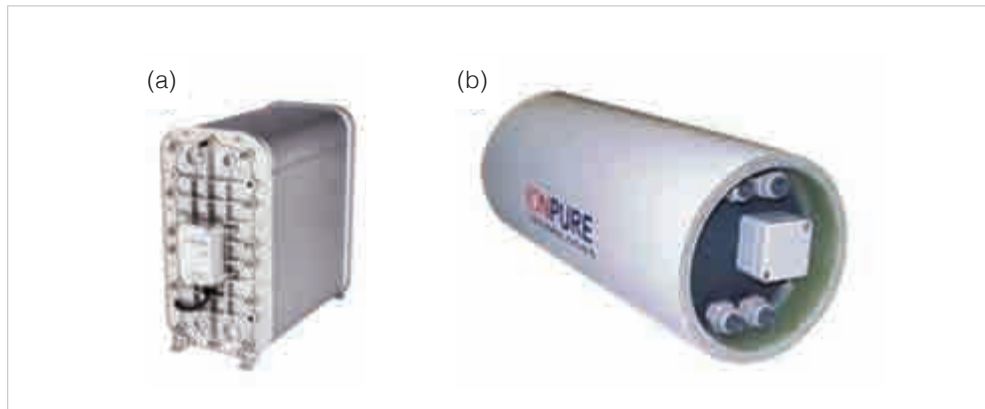


그림 18. Ionpure사의 a)플레이트형 전기탈이온시스템과 b)실린더형 시스템.

#### 2.2.4. 향후전망

현재까지 전기탈이온 공정은 담수화를 위해서 사용되기 보단 초순수물의 생산이나 연수화기(water softening)로써 많이 사용되고 있다. 하지만 2008년 Siemens사가 전기탈이온 공정이 염분이 낮은 물을 담수화하는데 큰 장점이 있는 것을 이용, 전기투석과 전기탈이온 공정을 결합한 해수담수화시스템을 개발하고 역삼투법과 비교하여 가격경쟁력이 있음을 증명하며 다시 담수화시장에서 주목받고 있다<sup>43</sup>. 추후에도 전기탈이온공정만을 사용한 독립적인 플랫폼 보다는 역삼투법, 전기투석법과 같은 다른 시스템과의 다양한 결합을 통한 해수담수화의 비용절감에 대한 개발이 집중적으로 이루어질 것을 보인다.

## 2.4. 축전식 탈이온 공정 (CDI: Capacitive Deionization)

### 2.4.1. 축전식 탈이온 원리 및 개발역사

전기투석과 전기탈이온 공정의 경우 그 원리 및 구조를 공유하고 있으나, 축전식 탈이온 시스템은 앞의 두 공정과는 다른 형태를 띠고 있다. 축전식 탈이온 시스템의 구조는 한 쌍의 다공성 전극으로만 이루어져 있으며, 이 둘 사이에 유로를 만들어주기 위한 스페이서가 들어간다(그림19)<sup>44</sup>. 다공성 전극으로는 카본(carbon)이 주로 사용된다. 전극사이의 유로로 전해질 용액이 흐를때, 약 1-1.4V의 낮은 전압으로 한 쌍의 전극을 각각 양/음으로 대전시키면 용액내의 양이온은 음극에, 음이온은 양극에 정전기적으로 흡착(electrosorption)이 되게 된다. 이러한 원리는 전기이중층(EDL: electric double layer)을 이용하여 양/음이온을 저장하는 EDL 캐패시터와 동일하다. 이와 같이 용액내의 염분이온을 다공성전극에 붙잡아 둬으로써 담수화가 진행된다. 하지만 전극이 흡착시킬 수 있는 이온의 양은 한정되어 있기 때문에, 흡착했던 이온을 방출하는 재생프로세스가 주기적으로 필요하다(그림19).

전기투석이나 전기탈이온공정과 비교하여 보면, 전극을 이용하다보니 셀 단위의 그리고 이를 적층하는 구조가 불가능하여 구조적 확장성이 떨어진다. 또한 두 공정은 연속공정(continuous-flow operation)인데 비하여, 축전식 탈이온 공정은 이온교환공정과 비슷하게 주기적인 재생과정이 필요하다. 이러한 단점으로 인하여 1960년 Blair and Murphy에 의해 기술이 발표된 후 2000년대까지 큰 주목을 받지 못하였다. 하지만 이 이후, 배터리에 들어가는 슈퍼캐패시터(Supercapacitor)용 전극이 급격한 기술발전을 이루고, 이러한 고성능 전극을 이용한 축전식탈이온 공정이 다른 전기화학적 담수화공정에 비해 낮은 에너지 비용을 보이는 것으로 발표되며 최근 많은 연구가 진행되고 있다<sup>45</sup>. 에너지 비용이 낮은 것은 이 공정이 구동되는 전압이 낮은 것과 관련이 높는데, 낮은 전압하에 염분이온을 천천히 제거하는 대신 에너지 효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.

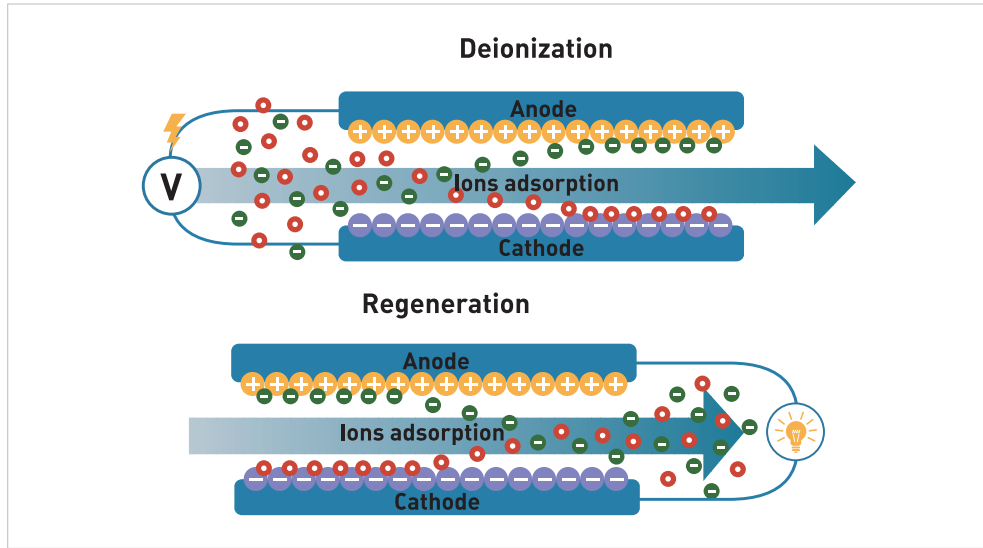


그림 19. 축전식 탈이온공정 모식도<sup>44</sup>.

## 2.4.2. 연구동향: 축전용 전극

축전식 탈이온 공정은 배터리, 슈퍼캐패시터와 같은 다른 전기화학시스템들과 많은 부분을 공유하고 있다. 이 공정의 기본적인 담수성능은 다공성전극이 얼마나 많은 양의 이온을 효과적으로 빠르게 흡수할 수 있는냐에 따라 결정된다. 최근 광범위하게 이루어지고 있는 슈퍼캐패시터에 대한 연구는 축전식탈이온 공정에 들어가는 전극을 발전시키는데에도 그대로 적용이 가능하다. 이에 따라, 그림20에서 확인할 수 있듯이 다공성전극의 최대이온 흡착용량(salt adsorption capacity)가 지난 10년간 두 배이상 증가한 것을 볼 수 있다<sup>18c</sup>. 전기투석이나 전기탈이온 공정과 다르게 축전식탈이온 공정은 아직 플랜트 스케일에서 상

용화가 이루어지 않았는데, 최근에는 상용화를 염두하여 다공성전극에 대한 기계적/화학적 안정성과 수명을 늘리는 연구가 진행되고 있다. 그 예로, Cohen et al.은 반복적인 흡착-재생 프로세스로 인하여 양극에서 화학적인 산화가 일어나는 것을 확인하였다<sup>45</sup>. 이를 개선하기 위하여 용액내의 용존산소량을 낮추거나, Electrodialysis Reversal(EDR)공정처럼 전극을 주기적으로 바꿔주는 방법을 통하여 공정시간을 600시간 이상으로 올릴 수 있음을 보여주었다<sup>46</sup>.

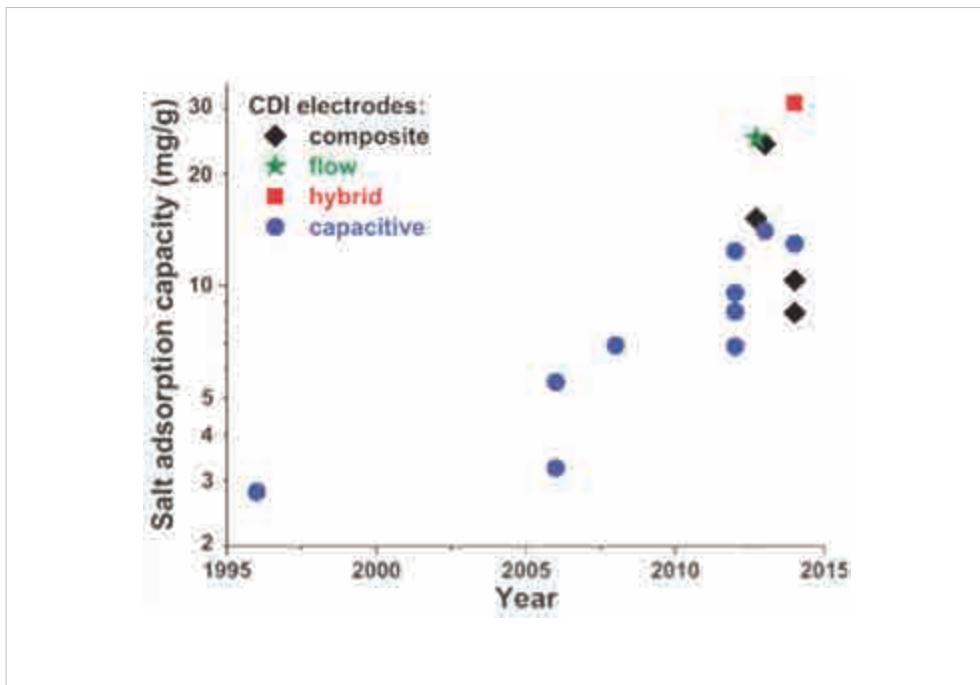


그림 20. 축전식 탈이온공정에서 사용되는 다공성전극의 최대이온흡수용량변화<sup>48)</sup>

### 2.4.3. 연구동향: 프로세스 디자인

축전식 탈이온공정은 다공성전극 사이를 용액이 흘러가는 기본적인 구조 외에(그림21a), 유체가 전극을 통과하여 지나가는 구조 또한 1970년에 Johnson et al.에 의하여 개발이 되었었다(그림21b). 하지만 거의 주목을 받지 못하다가, 2000년 후반에 와서야 이 구조의 장점이 밝혀지기 시작하였다. 가장 큰 장점은 전극사이의 유로를 최소화함으로써 전체적인 시스템의 전기저항을 낮출 수 있고, 용액이 다공성전극을 직접 통과하면서 전기적인 흡착을 빠르게 일으킬 수 있다는 것이다<sup>18c</sup>. 이러한 flow-through 구조를 사용하기 위해서는 멀티 스케일의 다공성전극이 필요한데, 이는 전극내에 유체가 흘러가기 위한 공간 또한 필요하기 때문이다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 축전식탈이온 공정의 구조는 각 전극위에 양이온과 음이온교환막을 올려놓은 membrane CDI(MCDI)시스템이다(그림21c). 이 구조는 다공성전극내의 전극과 동일한 극의 전하를 가진 이온(co-ion)이 빠져나가는 것을 막기 위함이다. 전기장 하에서 co-ion은 다공성전극을 빠져나가고 counter-ion은 전극내로 흡착이 이루어지는데, 이때 co-ion이 전극을 빠져나가는데 전력이 소모가 된다. MCDI는 전력 혹은 전류의 흐름을 counter-ion이 전극내에 흡착되는데 집중될 수 있도록 해주어 흡착효율(charge efficiency) -주어진 이온전달량(즉, 전류)에서 흡착되는 이온의 양- 의 개선을 유도할 수 있다.

2013년에는 한국에너지기술연구원 김동국 박사팀에서 축전식 탈이온공정을 연속공정화 할 수 있는 시스템을 개발하였다(그림21g-i)<sup>47</sup>. 기존의 고정된 다공성전극 대신, 다공성 카본파티클들이 유체를 따라 흘러가며 이온을 흡착하는 방식이다. 이는 재생된 다공성 카본파티클을 계속 공급해 줌으로서 계속해서 담수화프로세스를 진행할 수 있다. 이온이 흡착된 카본파티클을 재생하는 공정은 담수공정과 분리하여 따로 진행되게 된다. 이밖에도 서울대학교 윤제용 교수팀을 비롯한 연구팀은 실제 배터리에 적용되는 전극을 축전식 탈이온 공정에 사용하여 에너지비용을 낮추고 이온흡착능력을 향상시키는 연구를 진행하고 있다(그림21d-f)<sup>48</sup>.

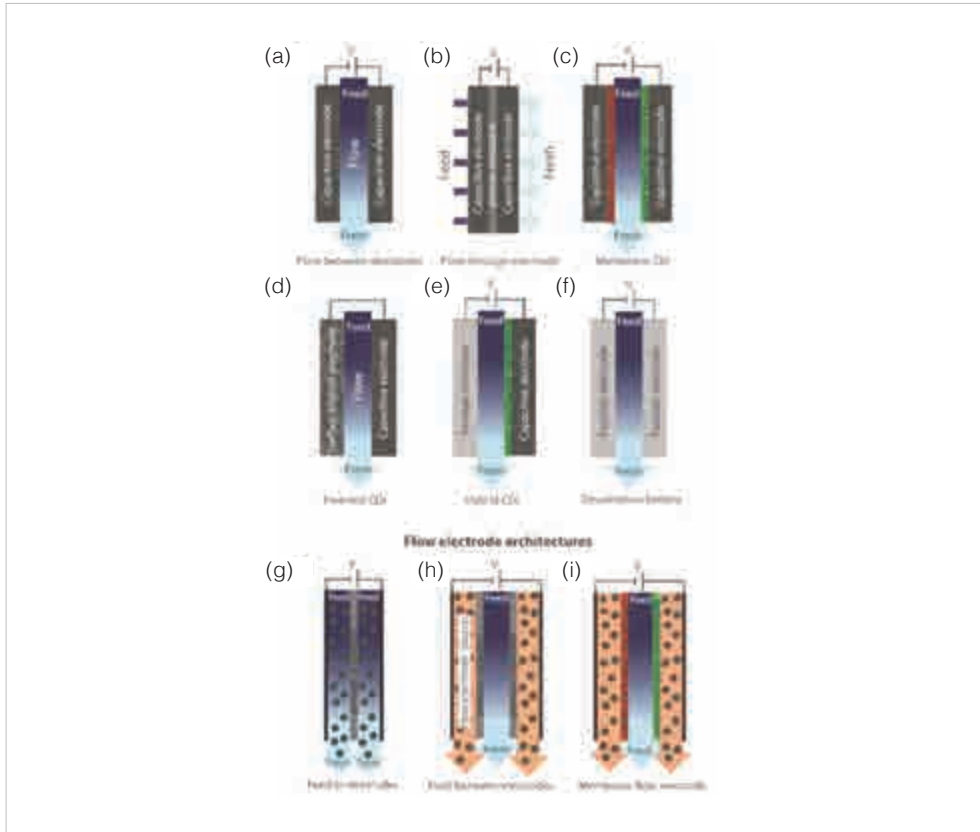


그림 21. 다양한 구조의 축전식 탈이온공정<sup>18)</sup>

## 2.2.4. 향후전망

축전식 탈이온 공정은 지난 10년간 슈퍼캐패시터의 발전과 함께 학계에서 많은 연구가 진행이 되었다. 다양한 프로세스, 구조는 물론 본 리뷰에서 다루지 않았지만 이온이 전기적으로 흡착이 되는 미시적인 메커니즘에 대한 이론과 실험 또한 광범위하게 이루어져 왔다. 다른 전기화학적 담수화와 다르게 축전식탈이온 공정은 아직 산업계에서는 사용되지 않고 있으며, 앞으로의 연구는 실제로 상용화를 하기위한 연구가 병행될 것으로 보인다. 아직까지 비교적 가격이 비싼 다공성전극의 가격경쟁력 확보, 구조적 확장성의 확보, 다공성 전극의 유지비용 및 교체주기등 실제 구동시 추가적인 비용이 발생할 수 있는 부분을 어떻게 극복해가냐에 따라 축전식 탈이온공정의 상용화 성공여부가 갈릴 것으로 보인다. 한편, 이렇게 전기투석이나 전기탈이온 방식에 비해 기술적인 성숙도 떨어지는 것은, 그만큼 축전식 탈이온공정이 개선될 여지가 많다는 것이며, 특히 기술적인 교차점이 있는 신재생에너지(배터리, 슈퍼캐패시터)를 이용한 분산화 담수시스템을 개발하는데 중요한 역할을 할 것으로 보인다.



# 03

## 전기화학적 담수화 연구의 융합적인 성격

전기화학적 담수화공정에 대한 연구는 전통적으로 막(membrane), 전기화학(electro-chemistry), 분리공정(separation process)을 다루는 화학공학분야와 환경공학분야에서 주로 다루어졌다. 하지만 근래에 들어서 나노/마이크로공학을 이용한 막 및 수지의 재료/구조개발, 전기장 하에서 유체의 흐름, 수 가지 담수화공정 및 비전통에너지원의 결합에 따른 열역학적 경제성평가, 프로세스디자인등 다양한 시각에서 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 기계공학, 전기공학, 재료공학 분야에서도 활발히 전기화학적 담수화공정이 다루어지고 있다.

전기화학적 담수화공정의 융합적인 성격 만큼, 그 응용분야 또한 담수화에 국한되지 않는다. 증발법이나 역삼투법의 경우 모든 염분을 담수로부터 분리하는 방식이지만, 전기화학적 방법은 원하는 염분이온을 원하는 양만 제거하는 것이 가능하다. 즉, 이온에 대한 조종가능성(controllability)가 매우 높다. 이에 따라 단순히 염분이온을 제거하는 것이 아닌, 양성자/수산화물 이온(proton/hydroxide ion) 제거/농축을 통한 산/염기 생산과 pH조절, 식품생산공정에서 광물질 제거(demineralization), 특수한 폐수처리(예: 비료에 의하여 오염된 표층수에서 질산염 제거, 방사능폐수에서 radioactive ion 제거등 다양한 목적을 위하여 사용되고 있다(표2-3)<sup>18b</sup>. 이러한 전기화학적 담수화시스템 고유의 능력은 다양한 종류의 물을 처리할 수 있게 해주며(실제로 해수 및 염수는 지역에 따라서 염분 구성이 다르다), 이 시스템이 독립형(stand alone) 담수화플랫폼 뿐만이아니라 다른 공정과의 상호보완적인 결합이 가능하게 해준다. 실제로 역삼투법 담수화플랫폼에는 전기투석 혹은 전기탈이온공정이 결합되어 있는 시스템이 다수 존재한다. 이는 역삼투법에 사용되는 필터멤브레인에 부착(fouling) 혹은 침전을 일으킬 수 있는 이온을 미리 제거하거나, 보론(boron)과 같이 물분자와 크기가 비슷하여 역삼투법으로는 제거가 잘 되지 않는 이온을 처리하기 위하여 사

용된다. 이러한 전기화학적 공정의 높은 유연성은 담수화플랜트의 규모, 위치, 담수화하고자 하는 물의 특성에 따라 공정을 최적화하고 비용을 절감할 수 있도록 해줄 것이다.

표 2. 전기투석공정의 산업적 이용<sup>80)</sup>

Industrial applications	Stack and process design	Status of application	Limitations	Key problems
Brackish water desalination	Sheet and tortuous path, reverse polarity	Commercial	Process costs	Costs
Boiler feed and process water	Sheet and tortuous path, reverse polarity	Commercial	Product water quality and costs	Costs
Waste treatment	Sheet or tortuous path, unidirectional	Commercial	Membrane properties	Membrane fouling
Demineralization of food products	Sheet flow or tortuous path, unidirectional	Commercial pilot plants	Membrane selectivity	Membrane fouling
Table salt production	Sheet flow unidirectional	Commercial	Process costs	Membrane fouling

표 3. 양극성이온교환막이 적용된 전기투석공정의 산업적 이용<sup>80)</sup>

Application	State of process development	Potential advantages	Problems related to application
Production of acids and bases from salts	Pilot plant operation	Low energy consumption	Contamination of products
Recovering of acids from fermentation	Commercial plants	Integrated process, lower costs	Unsatisfactory membrane stability
pH-control in chemical processes	Laboratory studies	Less chemical costs and salt deposits	Application experience, process costs
Removal of SO <sub>2</sub> from flue gas	Pilot plant tests	Decreased salt production	Long term membrane stability
Regeneration of ion-exchange resins	Pilot plant tests	Less ion-exchanger regeneration costs	High investment costs

# 04

## 전기화학적 담수화의 동향 및 미래

앞에서 확인할 수 있듯이 대표적인 세 가지 전기화학적 담수화공정에 대한 원천특허는 대부분 미국이 보유하고 있다. 이에 따라 관련 담수화공정에 대한 연구개발 또한 미국의 회사들 (General Electric, SnowPure, Dow Chemical 등)에 의해 주도되고 있으며, 뛰어난 막 및 수처리관련기술을 가진 독일, 프랑스, 네덜란드 등 유럽의 주요국가의 회사들 (Veolia, PCA GmbH, CERAM HYD등) 또한 전기화학적 담수화공정을 상용화하여 서비스하고 있다. 이를 이용한 분산형 소용량 담수화에 대한 연구 및 상용화 또한 마찬가지이다. 세계 1, 2위의 담수화플랜트회사인 Veolia와 General Electric(GE)의 경우 이미 상용화된 전기투석 공정과 전기탈이온 공정을 확보하고 있으며, 이를 소형화하여 담수 및 수처리가 필요한 무작위적인 시간, 공간에 서비스를 할 수 있는 “mobile water service”를 시행하고 있다 (그림22).



그림 22. GE(왼쪽) 및 Veolia(오른쪽)에서 시행중인 Mobile Water Service.

최근에는 한국 또한 주요 물 스트레스 국가중 하나로 담수화를 포함한 물 관련 기술에 관한 필요성을 자각하고 있다. 이러한 관심에 대한 일환으로 2015년에는 세계물포럼이 대구/경북에서 개최된 바 있으며, 한국기계연구원과 한국에너지기술연구원에서는 태양열을 사용한 소용량 해수담수화 시스템의 개발 및 상용화를 진행중이다<sup>17b</sup>. 하지만 세계적인 담수화플랜트 회사인 두산이나 최근 담수화 사업에 뛰어든 LG화학 모두 기존의 역삼투법에 의존하고 있으며, 분산형 담수시스템에 관한 연구 및 투자 또한 대부분 분산형 소용량 시스템에 효율적이지 못한 증발법이나 역삼투법을 기반으로 이루어지고 있다.

2014-2015년, United States Agency for International Development(USAID)는 지속가능한 소용량 염수(기수)담수기술에 위한 The Desal Prize라는 대회를 개최하였다<sup>49</sup>. 개발도상국에서 사용하는 것을 목표로, 제시된 담수기술은 재생가능한 에너지원으로 가동되어야 하며 사람이 음용가능한 수준의 물과 농업에 사용가능한 수준의 농업용수를 동시에 생산가능하여야 한다. 이 대회를 통하여 세 팀이 선출되어 파일럿 시스템을 구축할 수 있도록 지원이 되었는데, 1-2위 모두 전기화학적 담수화공정 중 하나인 전기투석 공정을 기반으로 하고 있다(3위는 역삼투법 기반). 이러한 결과는 전기화학적 담수화공정이 지속가능한 분산형, 소형화 담수시스템에 얼마나 효과적일 수 있는지 보여준다. 한국 또한 학계수준의 연구나 상용화기술이 이미 존재하는 기존의 증발법/역삼투법에서 벗어나 전기화학적 담수화 공정을 이용한 지속가능한 분산형 담수시스템에 대한 적극적인 연구개발이 필요하다 하겠다.



## 곽노균 (Rhokyun Kwak)

- 학 력**
- MIT 기계공학 박사
  - 서울대학교 기계항공공학부 석사
  - 서울대학교 기계항공공학부 학사

- 경 력**
- 現) 한국과학기술연구원 바이오마이크로시스템연구단 선임연구원

## 참고문헌

---

1. (a) Water Facts and Trends: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): WBCSD, c/o Earthprint Limited, 2006; (b) Miller, J. E. Review of Water Resources and Desalination Technologies: Sandia national Laboratories: 2003.
2. (a) OECD Environmental Outlook to 2050: OECD Publishing., 2012; (b) WATER AND JOBS Facts and Figures; The United Nations: 2016.
3. 강경민, [한국은 물 부족 국가] 전국 지자체 수돗물값 줄줄이 오른다. 환경닷컴 2015.04.07, 2015.
4. Is Desalination a Solution to California's Drought?; Pelican Water, 2015.
5. IDA Desalination Yearbook 2015-2016; International Desalination Association (IDA): Media Analytics Ltd., 2016.
6. Sorek Desalination Plant: The World's Largest and Most Advanced SWRO Desalination Plant. IDE Technologies.
7. Frenkel, V. S. In Bay Water SWRO Desalination: Challenges and Solutions, Advanced Membrane Technologies for Treating Brackish Groundwater, Seawater and Reclaimed Water, Stanford University, Stanford University, 2008.
8. <http://www.betterworldsolutions.eu/the-largest-desalination-plants-in-the-world/>.
9. The World's Water: 2008-2009; Pacific Institute: 2008.
10. Postel, S. L.; Daily, G. C.; Ehrlich, P. R., Human appropriation of renewable fresh water. Science 1996, 271 (5250), 785-788.
11. Schnoor, J. L., Water-Energy Nexus. Environ Sci Technol 2011, 45 (12), 5065-5065.
12. Hiltzik, M., Desalination plants aren't a good solution for California drought. Los Angeles Times 2015.04.24, 2015.
13. Kalogirou, S. A., Seawater desalination using renewable energy sources. Prog Energ Combust 2005, 31 (3), 242-281.
14. (a) Lattemann, S.; Hopner, T., Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. Desalination 2008, 220 (1-3), 1-15; (b) Miller, S.; Shemer, H.; Semiat, R., Energy and environmental issues in desalination. Desalination 2015, 366, 2-8.
15. Rinat, Z., Health Ministry Shuts Down Israel's Largest Desalination Plant Due to Pollution. HAARETZ 2016.
16. California's Most Significant Droughts: Comparing Historical and Recent Conditions; California Department of Water Resources: State of California, 2015.
17. (a) Peter-Varbanets, M.; Zurbrugg, C.; Swartz, C.; Pronk, W., Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. Water Res 2009, 43 (2), 245-265; (b) 박창대 태양열 등 신재생 에너지를 이용한 소용량 해수담수화 기술 동향: 2013.
18. (a) Alvarado, L.; Chen, A. C., Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications. Electrochim Acta 2014, 132, 583-597; (b) Strathmann, H., Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. Desalination 2010, 264 (3), 268-288; (c) Suss, M. E.; Porada, S.; Sun, X.; Biesheuvel, P. M.; Yoon, J.; Presser, V., Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we

## 참고문헌

---

- expect from it? *Energ Environ Sci* 2015, 8 (8), 2296–2319.
19. Humplik, T.; Lee, J.; O'Hern, S. C.; Fellman, B. A.; Baig, M. A.; Hassan, S. F.; Atieh, M. A.; Rahman, F.; Laoui, T.; Karnik, R.; Wang, E. N., Nanostructured materials for water desalination. *Nanotechnology* 2011, 22 (29).
20. Probststein, R. F., *Physicochemical Hydrodynamics: An Introduction*. 2nd ed.; Wiley-Interscience: New York, 2003.
21. Chou, C. K., *Helping Water Managers Ensure Clean and Reliable Supplies*. Lawrence Livermore National Laboratory, 2004.
22. Fumatech GmbH (<http://www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane-processes/Electrodialysis/>).
23. GE Power Water & Process Technologies (<http://www.gewater.com>).
24. Strathmann, H., *Ion-exchange membrane separation processes*. Elsevier: 2004; Vol. 9.
25. Xu, T. W., Ion exchange membranes: State of their development and perspective. *J Membrane Sci* 2005, 263 (1–2), 1–29.
26. A. B. Yaroslavtsev, V. V. N., Ion-exchange membrane materials: Properties, modification, and practical application. *Nanotechnologies in Russia* 2009, 4, 137–159.
27. Kwak, R.; Guan, G. F.; Peng, W. K.; Han, J. Y., Microscale electro dialysis: Concentration profiling and vortex visualization. *Desalination* 2013, 308, 138–146.
28. Sonin, A. A.; Probststein, R. F., A hydrodynamic theory of desalination by electro dialysis. *Desalination* 1968, 5 (3), 293–329.
29. Schoch, R. B.; Han, J. Y.; Renaud, P., Transport phenomena in nanofluidics. *Rev Mod Phys* 2008, 80 (3), 839–883.
30. (a) Belfort, G.; Guter, G. A., Experimental Study of Electro dialysis Hydrodynamics. *Desalination* 1972, 10 (3), 221–&; (b) Sonin, A. A.; Isaacson, M. S., Optimization of Flow Design in Forced Flow Electrochemical Systems, with Special Application to Electro dialysis. *Ind Eng Chem Proc Dd* 1974, 13 (3), 241–248.
31. Tadimetri, J. G. D.; Kurian, V.; Chandra, A.; Chattopadhyay, S., Corrugated membrane surfaces for effective ion transport in electro dialysis. *J Membrane Sci* 2016, 499, 418–428.
32. Kwak, R.; Pham, V. S.; Lim, K. M.; Han, J. Y., Shear Flow of an Electrically Charged Fluid by Ion Concentration Polarization: Scaling Laws for Electroconvective Vortices. *Phys Rev Lett* 2013, 110 (11).
33. (a) Rubinstein, I.; Zaltzman, B., Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane. *Phys Rev E* 2000, 62 (2), 2238–2251; (b) Urtenov, M. K.; Uzdenova, A. M.; Kovalenko, A. V.; Nikonenko, V. V.; Pismenskaya, N. D.; Vasil'eva, V. I.; Sistas, P.; Pourcelly, G., Basic mathematical model of overlimiting transfer enhanced by electroconvection in flow-through electro dialysis membrane cells. *J Membrane Sci* 2013, 447, 190–202.
34. Nikonenko, V. V.; Kovalenko, A. V.; Urtenov, M. K.; Pismenskaya, N. D.; Han, J.; Sistas, P.; Pourcelly, G., Desalination at overlimiting currents: State-of-the-art and perspectives. *Desalination* 2014.
-



## 참고문헌

---

35. (a) Kwak, R.; Pham, V. S.; Kim, B.; Chen, L.; Han, J., Enhanced Salt Removal by Unipolar Ion Conduction in Ion Concentration Polarization Desalination. *Sci Rep-Uk* 2016, 6; (b) Kim, B.; Kwak, R.; Kwon, H. J.; Pham, V. S.; Kim, M.; Al-Anzi, B.; Lim, G.; Han, J., Purification of High Salinity Brine by Multi-Stage Ion Concentration Polarization Desalination. *Sci Rep-Uk* 2016, 6.
  36. W. R. Walters, D. W. W., L. J. Marek, Concentration of Radioactive Aqueous Wastes. Electromigration Through Ion-Exchange Membranes. *Industrial & Engineering Chemistry* 1955, 47, 61-67.
  37. (a) Laktionov, E.; Dejean, E.; Sandeaux, J.; Sandeaux, R.; Gavach, C.; Pourcelly, G., Production of high resistivity water by electrodialysis. Influence of ion-exchange textiles as conducting spacers. *Separ Sci Technol* 1999, 34 (1), 69-84; (b) Dejean, E.; Laktionov, E.; Sandeaux, J.; Sandeaux, R.; Pourcelly, G.; Gavach, C., Electrodeionization with ion-exchange textile for the production of high resistivity water: Influence of the nature of the textile. *Desalination* 1997, 114 (2), 165-173.
  38. (a) Korngold, E.; Aronov, L.; Kedem, O., Novel ion-exchange spacer for improving electrodialysis - I. Reacted spacer. *J Membrane Sci* 1998, 138 (2), 165-170; (b) Messalem, R.; Mirsky, Y.; Daltrophe, N.; Saveliev, G.; Kedem, O., Novel ion-exchange spacer for improving electrodialysis - II. Coated spacer. *J Membrane Sci* 1998, 138 (2), 171-180.
  39. Yeon, K. H.; Lee, J. W.; Lee, J. S.; Moon, S. H., Preparation and characterization of cation-exchange media based on flexible polyurethane foams. *J Appl Polym Sci* 2002, 86 (7), 1773-1781.
  40. Felice Dimascio, G. C. G. Electrodeionization apparatus and method. 1996.
  41. Felice DiMascio, A. J., Gary C. Ganzi, Frederick Wilkins Electrodeionization apparatus and method. 1999.
  42. Grabowski, A.; Zhang, G. Q.; Strathmann, H.; Eigenberger, G., Production of high-purity water by continuous electrodeionization with bipolar membranes: Influence of concentrate and protection compartment. *Sep Purif Technol* 2008, 60 (1), 86-95.
  43. Siemens ED-CEDI desalination demo achieves 1.8 kWh/m<sup>3</sup>. *Desalination & Water Reuse* 2011.
  44. Garcia-Quismondo, E.; Gomez, R.; Vaquero, F.; Cudero, A. L.; Palma, J.; Anderson, M., New testing procedures of a capacitive deionization reactor. *Phys Chem Chem Phys* 2013, 15 (20), 7648-7656.
  45. Cohen, I.; Avraham, E.; Bouhadana, Y.; Soffer, A.; Aurbach, D., The effect of the flow-regime, reversal of polarization, and oxygen on the long term stability in capacitive de-ionization processes. *Electrochim Acta* 2015, 153, 106-114.
  46. Gao, X.; Omosebi, A.; Landon, J.; Liu, K. L., Surface charge enhanced carbon electrodes for stable and efficient capacitive deionization using inverted adsorption-desorption behavior. *Energ Environ Sci* 2015, 8 (3), 897-909.
  47. Jeon, S. I.; Park, H. R.; Yeo, J. G.; Yang, S.; Cho, C. H.; Han, M. H.; Kim, D. K., Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes. *Energ Environ Sci* 2013, 6 (5), 1471-1475.
  48. Lee, J.; Kim, S.; Kim, C.; Yoon, J., Hybrid capacitive deionization to enhance the desalination performance of capacitive techniques. *Energ Environ Sci* 2014, 7 (11), 3683-3689.
  49. SECURING WATER FOR FOOD: A GRAND CHALLENGE FOR DEVELOPMENT ANNOUNCES WINNERS OF THE DESAL PRIZE. USAID: 2015.
-



## 국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 전기화학기술을 활용한 담수화와 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

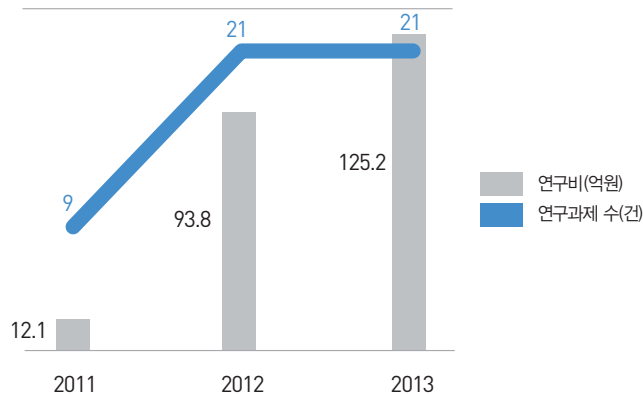
### | 과제 선별 기준 |

연구 요약문 내 ((전기) and (담수)) 로 검색

분석 결과 최근 3년간 총 51건의 과제에 231억원의 연구비가 투자됨

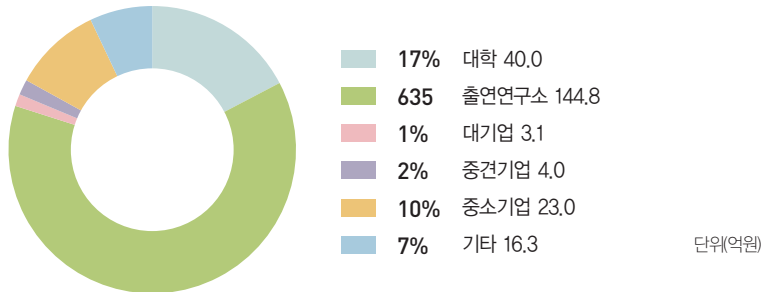
- 2012년 큰 폭으로 증가한 후 연구 규모가 꾸준히 커지고 있는 것으로 나타남

### 연도별 연구비와 연구과제 건수



**연구수행주체** 전기화학기술을 응용한 담수화 기술 개발 연구는 출연연구소를 중심으로 이루어지고 있음

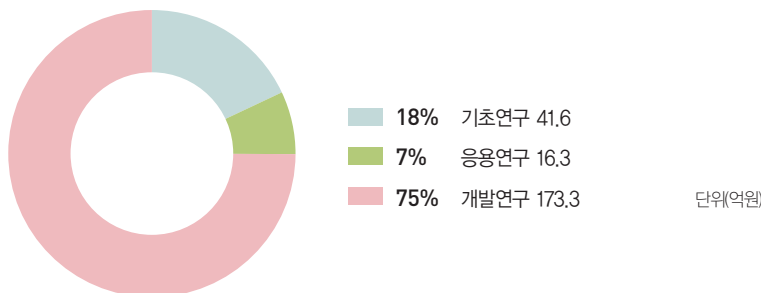
- 과제 건수는 대학이 29건으로 출연연구소(11건)보다 많으나, 출연연구소의 대형 연구과제를 중심으로 전기화학 기술을 응용한 담수화 기술 개발이 많이 이루어져 출연연구소의 비율이 높게 나타남
- 고무적이게도 대학과 연구소 뿐만이 아닌 기업(중소기업 6건, 대기업 2건, 중견기업 1건) 에서도 국가 R&D 사업을 통해 전기화학기술을 응용한 담수화 기술 개발 연구가 이루어지고 있음
  - 이는 전기화학기술을 응용한 우리나라 기업의 시장 진출 노력이 이루어지고 있음을 시사함



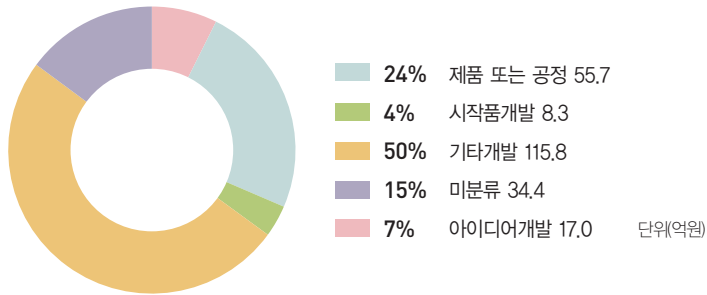
**연구수준** 국가 R&D 사업에서는 쉽게 찾기 어려운 개발연구를 중심의 연구가 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남

- 전기화학기술의 경우 이미 19세기 그 기초가 닦였을 정도로 굉장히 오래된 융합 학문이고, 여기에 마이크로 기술과의 융합 또한 20세 말 상당한 기초연구가 진행되었기 때문에 대다수의 연구가 개발연구의 성격으로 분류된 것으로 사료됨
  - 하지만 그럼에도 불구하고 전기화학기술을 활용한 담수화 기술의 개선과 담수화 과정에서의 물리적 현상을 이해하고 이를 응용하고자 하는 연구가 대학을 중심으로 꾸준히 계속(기초 22건, 응용 8건) 되고 있는 것으로 나타남
- 연구개발성격 측면에서는 기타 개발과 제품 또는 공정 개발에 많은 투자가 이루어지고 있는 것으로 나타남
  - 전기화학기술을 응용한 담수화 기술의 경우 총체적인 시스템을 개발하는 내용이기 때문에 기타 개발로 분류된 과제가 많은 것으로 사료됨
- 기술수명주기적 측면에서도 도입기와 성장기로 보는 연구가 각각 44%(103억원), 37%(85억원)으로 비슷한 수준으로 나타났으며, 이를 보았을 때 향후 더욱더 성장 가능성이 있을 것으로 판단됨

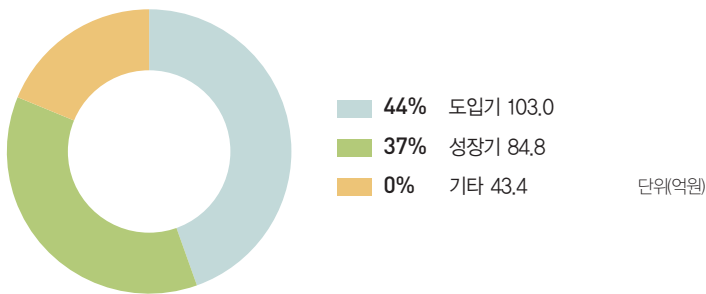
#### 연구개발단계



### 연구개발성격

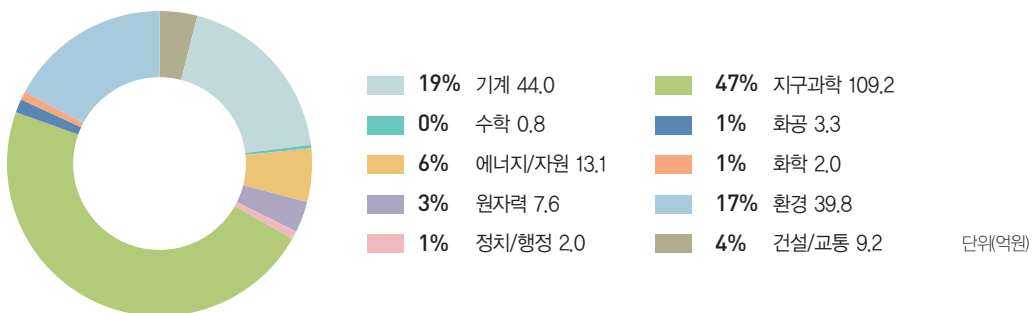


### 기술수명주기

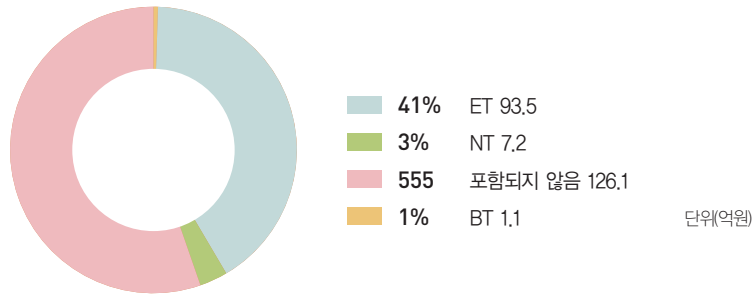


**연구분야** 국가과학기술표준분류 상에서는 지구과학을 중심으로, 미래유망 신기술분류(6T) 상으로는 ET를 중심으로, 국가기술지도분류(NTRM) 상에서는 환경/에너지 프론티어 진흥을 중심으로 많은 연구가 수행됨

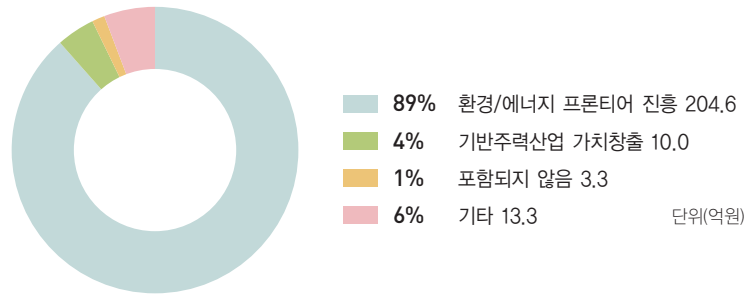
### 연구분야 [국가과학기술표준분류]



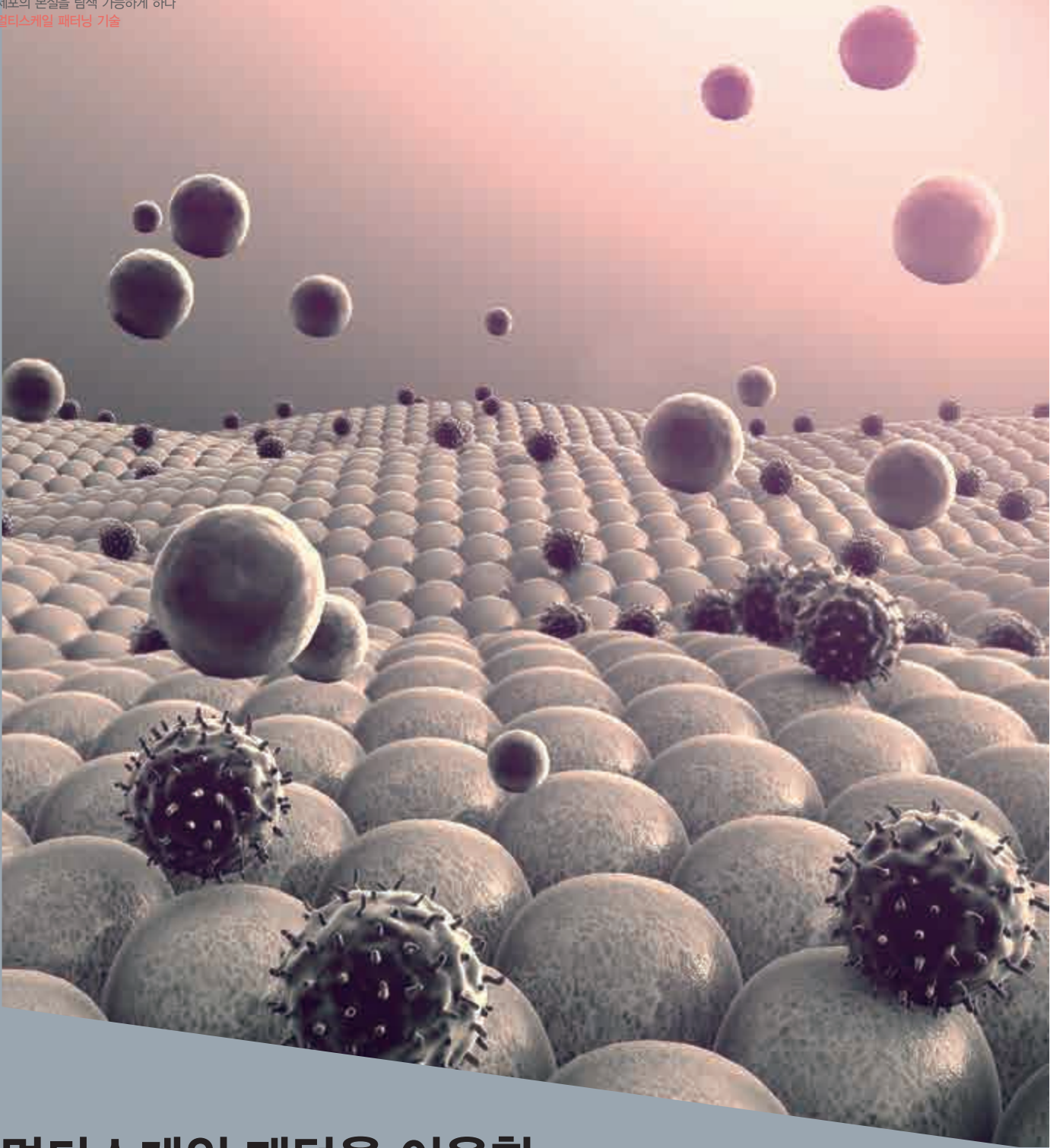
### 연구분야 [6T]



### 연구분야 [NTRM]



- 해수와 관련된 연구가 많이 이루어지다 보니 지구과학 분야로 분류된 연구가 많았으며, 그 뒤를 환경과 기계 분야의 연구가 많이 이루어짐
  - 정치/행정 분야의 연구 또한 이루어진 것으로 나타났는데 이는 전기화학기술을 응용한 담수화 기술의 사회적 활용 가능성을 타진하는 연구로 나타남
- 6T 기준에서는 ET로 분류한 연구가 41%로 높은 비율을 보이기는 하였으나, 대다수의 연구(55%)가 6T 분야에 포함되지 않는 것으로 나타남
- NTRM 분석 결과는 환경/에너지 프론티어 진흥 중심의 연구로 나타남
  - 이는 대다수의 연구가 환경을 중심으로 생각하기 보다는 에너지를 중심으로 연구 방향이 맞추어져 있기 때문인 것으로 사료됨



## 멀티스케일 패턴을 이용한 세포의 거동 및 기능 제어 기술

✉ 한국과학기술연구원 바이오마이크로시스템연구단 선임연구원 김홍남 (hongnam.kim@kist.re.kr)

---

## 초록

반도체 및 나노 기술의 발달에 따라 연구자들은 형태 및 크기가 정밀하게 제어된 나노, 마이크로 혹은 계층적 구조(이하 멀티스케일)의 미세구조물을 넓은 면적으로 제작할 수 있게 되었다. 상기 멀티스케일 구조물 제작 기술은 전자, 기계, 화학공학의 진보를 가져왔을 뿐만 아니라 바이오공학 부문에도 적용되어 세포의 거동제어, 기능 조절 등에 이용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 본 기고에서는 나노에서 마이크로 크기를 가지는 표면 패턴을 이용해 세포의 이동 및 특성을 제어하는 연구를 소개하고, 앞으로 연구가 더 필요한 이슈들에 대해 논의하고자 한다.

## 1. 서론

한 분야의 기술 발전이 다른 분야의 기술 발전을 촉진시키기도 하는데, 이러한 경우를 바이오 공학에서도 확인할 수 있다. 기존 전자 공학에서 반도체 소자를 제작하기 위해 사용되던 포토리소그래피(photolithography), 건식 식각(dry etching), 증착(deposition) 등의 기술은 마이크로기전시스템(MEMS) 기술의 발전을 가져왔고, 또한 마이크로 혹은 나노 구조물을 실리콘 웨이퍼 위에 제작하는 기술을 많은 연구자들이 누릴 수 있게 되었다. 또한 제작된 멀티스케일(마이크로 및 나노) 패턴을 원판(original master)로 사용하여 고분자에 복제할 수 있는 기술들이 개발되었는데, 나노임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography), 자외선 및 열을 이용한 몰딩방법(replica molding) 등을 이용하여 10 나노미터 수준의 미세구조물도 고분자 형태로 제작할 수 있었다. 그 외에도 나노구조물의 자기조립(self-assembly), 나노섬유(nanofiber)의 제작 등 다양한 기술이 개발되었다. 세포의 종류 및 배양 환경에 따라 다르지만 세포의 크기는 대략 5-100  $\mu\text{m}$  의 범위에 속하며, 세포가 주위 환경을 인식하는 리셉터의

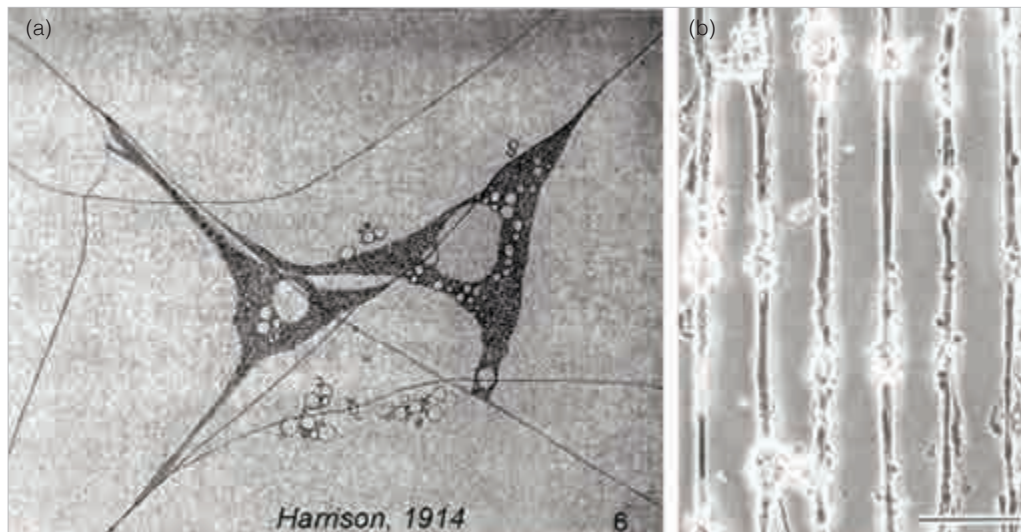
사이즈는 클러스터된 정도에 따라 수십 nm에서 수백 nm에 이르므로 이와 상응하는 크기의 미세구조물은 세포를 자극하는 용도로 사용될 수가 있다.

체외에서 연구를 수행하기 위해 배양하는 대부분의 인체 유래 세포는 표면에 부착하여야만 생존할 수 있는 부착의존성 세포(anchorage-dependent cell)이다. 이러한 부착의존성 세포들은 Integrin이라는 리셉터(receptor)를 이용해 표면에 부착하는데, 이 Integrin은 vinculin, paxillin, talin 등의 단백질과 함께 국소접착(focal adhesion)이라고 불리는 클러스터를 형성한다. 이 국소접착은 사람으로 비유하자면 손에 해당되는데, 사람이 눈을 감은 상태에서도 손으로 더듬어 물체의 형상을 느끼고 물건을 잡을 수 있듯이 세포도 바닥면과의 접착면 상태에 따라 바닥 상태를 느끼게 되며, 이에 반응하여 국소접착의 방향과 형태를 변화시킨다. 세포가 초기에 바닥면을 접착하였을 때는 작은 크기의 국소접착이 형성되고, 시간이 지남에 따라 이 국소접착의 면적이 커지게 되는데, 이때 바닥 패턴의 크기와 방향성에 따라 국소접착이 비등방적으로 길어진 막대 형태로 성장하게 된다. 국소접착은 사람으로 비유하면 근육에 해당하는 filamentous actin(f-actin)을 통해 세포핵과 연결된다. 이러한 과정을 통해서 국소접착에서 느낄 수 있는 구조 및 물질의 경도, 방향성 등의 정보가 세포 시그널링 분자들에 의해 핵으로 전달되어 단백질 합성을 변화시키고, 궁극적으로 세포의 거동 및 기능이 변화하게 된다<sup>2</sup>. 즉 멀티스케일 (나노 및 마이크로) 패턴을 이용하여 세포의 거동을 제어한다는 것은 세포의 국소접착이 형성되는 것을 제어한다는 것을 말하게 된다. 그 동안 다양한 연구 결과를 통해 바닥면의 멀티스케일 패턴이 세포의 이동방향, 속도, 세포 분화, 기능 등에 영향을 준다는 것이 밝혀졌으나, 세포 종류, 표면 코팅 단백질 및 재료의 물성 등에 따라 세포 기능 발현이 확연히 달라 연구자들이 메커니즘을 밝히기 위해 관한 연구를 활발히 수행하고 있는 상황이다.



## 2. 기술 연구의 역사

인간이 처음으로 동물과 사람의 체외에서 세포를 배양하게 된 것은 1907년의 R. Harrison의 실험으로부터 시작되었다<sup>3</sup>. Harrison은 체외로 꺼낸 개구리 배아의 척추 신경세포가 소금물 속에서 생존할 수 있음을 보였을 뿐만 아니라 신경돌기(neurite)를 뻗는 등 세포의 기능도 유지할 수 있다는 것을 보였다. 본격적이고 대중적으로 체외 환경에서 세포 실험을 진행하게 된 것은 폴리스티렌(polystyrene) 기반의 페트리 접시(PetriDish)가 개발된 이후부터이다<sup>4</sup>. 페트리 접시라는 세포배양접시 덕분에 전세계 연구자들은 항상 통일성 있는 실험환경을 이용할 수 있게 되면서 체외 세포배양 연구가 널리 확산될 수 있었다. 하지만 평면 기반의 페트리 접시라는 환경은 동물 및 사람의 체내환경과는 구조적으로 매우 상이하다는 한계가 있었는데, 인체 내 장기 및 조직은 섬유상의 세포외기질(extracellular matrix, ECM)의 계층적 구조로 이루어져 있기 때문이다.



**그림 1.** (a) 최초로 구조물 위에서 세포를 배양한 예시. R. Harrison(1914)은 거미줄 위에서 개구리의 배아척추신경세포를 배양하여 거미줄의 구조를 따라 세포의 형상이 변형됨을 발견하였다. (b) 최초로 공학적 기술을 이용해 제작된 구조물 위에 세포를 배양한 예시. Kleinfeld(1988) 등은 포토리소그래피 방식을 이용하여 제작된 패턴 위에서 뉴런이 방향성 있게 성장하는 것을 보였다.

가장 처음으로 평면이 아닌 구조물 상에서 세포를 배양한 실험을 한 연구자도 최초로 체외세포 배양을 선보인 R. Harrison이다<sup>5,6</sup>. Harrison은 거미줄 위에서 개구리의 배아 척추신경세포를 배양 하였는데, 개구리의 배아세포는 거미줄 방향을 따라 뻗어가는 형상을 보였다. 상기 Harrison의 연구가 다소 불규칙한 구조를 보이는 구조물에서 세포를 배양한 실험이라면, 형태와 크기가 정밀하게 제어된 구조물을 이용해 세포의 거동을 제어하는 연구는 1988년에 제시되었다. D. Kleinfeld 는 반도체공정에 사용되는 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하여 수십 마이크로미터 크기의 라인패턴을 제작하였다<sup>7</sup>. 패턴 위에만 선택적으로 아민(Amine)을 코팅하는 기술을 이용하여 패턴을 따라 신경돌기(neurite)를 성장시키는 방법을 선보였으며, 이러한 사례를 통해 패턴을 이용한 세포의 방향성 있는 성장, 거동 제어가 새로운 연구 주제로 부상 하였다.

본격적으로 패턴을 이용한 세포의 성장, 거동 및 기능 제어에 관한 연구가 이루어진 것은 좀 더 대중화 된 고분자 기반 패턴 제작 기술이 개발된 연후이다. 앞서 D. Kleinfeld의 연구는 방법적으로는 반도체 공정 중 포토리소그래피 방법을 사용하였고, 재료적으로는 투명한 석영(quartz) 기판을 사용하였다. 하지만 이러한 패터닝 방식은 제작에 고가의 비용이 소요되므로, 반복적인 실험에 사용되기에는 제약이 있었다. 패턴을 이용한 세포 실험이 대중화 된 것은 1998년에 하버드대학교의 George Whitesides 교수가 소프트 리소그래피(soft lithography)라는 기술을 개발하여 고분자 기반의 패턴을 제작하면서부터 시작되었다<sup>8</sup>.

초기 연구들은 높이가 있는 멀티스케일 구조물 보다는 마이크로컨택 프린팅(microcontact printing,  $\mu$ CP) 방식으로 제작된 마이크로 크기의 아일랜드 패턴을 이용해 세포-패턴간 상호작용을 이해하고자 하였다. 이러한 연구는 근본적으로 소프트 리소그래피 방법에 사용되는 재료인 polydimethyl siloxane(PDMS)의 물성 때문에 시작되었는데, 실리콘 고무의 일종인 PDMS는 탄성계수(elastic modulus)가 1-2 MPa 범위에 해당하여 화학적 조작용을 하지 않는 이상 나노크기의 구조물은 표면 형상이 신뢰성 있게 유지되지 않는다는 한계가 있었다<sup>9</sup>. 이러한 이유로 PDMS 기반의 패터닝에서는 마이크로 크기의 형태만 제작할 수 있었으나, 반대로 PDMS의 유연한 특성 덕분에 PDMS로 제작된 패턴은 다른 표면에 균일한 접촉을 형성할 수 있었다. 결론적으로 PDMS의 물성 덕분에 마이크로 크기로 형성된 패턴은 다른 표면에 균일하게 부착되므로, 이러한 특징을 이용해 특정 물질을 다른 기판에 전사하는 스탬프로 사용할 수가 있

---

었다<sup>10</sup>. 마이크로컨택 프린팅은 PDMS로 제작된 스탬프에 특정 물질을 코팅하여 마치 도장을 찍듯이 전자(transfer)하는 기술을 이야기 하며, 아일랜드의 형상에 따라 세포의 부착, 생존, 이동방향성 등이 조절됨을 실험적으로 확인할 수 있었다<sup>11</sup>. 이러한 실험적 결과들은 실제로 공학적 기술을 이용해 제작된 인공 형상이 세포에게 영향을 줄 수 있다는 근거를 제시하였고, 이는 후속 연구들에 영향을 주었다. 본격적인 나노크기의 구조물의 형성 및 응용은 나노크기의 형태를 유지할 수 있도록 충분히 단단한 물질들을 패턴 제작에 사용하게 되면서부터 시작되는데, polystyrene(PS) 및 polymethyl methacrylate(PMMA) 등의 열가소성(thermoplastic) 고분자 혹은 polyurethane(PU) 계열의 재료는 보통 수백 MPa 에서 수 GPa 에 해당하는 탄성계수를 가지고 있으므로 수 nm 크기의 구조물도 신뢰성 있게 제작할 수가 있었다<sup>12</sup>.

패턴을 이용한 세포거동 제어 연구는 MIT 의 Robert Langer와 하버드대학교의 Joseph Vacanti 교수가 제안한 ‘Tissue Engineering’ (조직공학)의 개념에 의해 촉진되었다<sup>13</sup>. 1993년 두 교수는 공동으로 Science지에 ‘Tissue Engineering’ 이라는 제목의 글을 기고하는데, 이 글에서는 공학적 기반의 기술을 이용하여 손상된 조직 및 장기를 재생시키는 기술에 관하여 언급하고 있다. 손상된 장기를 재생시키기 위해 환자에서 추출한 세포를 세포성장인자(growth factor) 등이 포함된 스캐폴드(scaffold)에서 배양하여 환자에게 다시 이식한다는 개념으로, 공학적인 기술을 이용하여 생체조직을 재생시킨다는 측면에서 생명과학/의학과 공학의 융합을 의미하게 된다. 상기한 마이크로 및 나노 패턴을 이용한 실험에 대한 데이터가 축적될수록 패턴은 거시적으로는 세포의 부착정도, 생존률, 이동속도, 이동방향, 분화능력 등에 영향을 미치지 않지만, 일차적으로는 세포가 바닥에 부착하는 국소접착의 형태, 숫자 및 배향 등에 직접적으로 영향을 미친다는 것을 알게 되었다. 연구자들은 필연적으로 국소접착의 방식을 변화시킨다면 다양한 세포 거동 및 기능을 조절할 수 있다는 사실을 파악하였고, 다양한 나노 및 마이크로 패턴을 제작하고자 하였다. 예를 들어 연구자에 따라 국소접착의 크기가 세포가 미치는 영향을 알아보기 위해서는 나노패턴의 크기를 더 작게 제작하고자 하였고, 국소접착의 클러스터링(clustering)이 미치는 영향을 알아보기 위해서는 나노패턴 간 간격 및 정렬도를 조절하기도 하였다. 그 외에도 표면 성질을 변화시키거나 전기전도도를 조절하는 등 다양한 시도를 통해 물리적인 요소 혹은 다른 요소와의 조합이 세포의 거동을 어떻게 변화시킬 수 있는지에 관한 지식을 축적해 나가고 있다.

### 3. 패턴 제작 방법

패턴의 제작 기술은 나노기술의 발전과 함께 진행되었는데, 크게는 top-down 방식과 bottom-up 방식으로 나눌 수 있다. Top-down 방식은 몰드, 마스크 등의 이미 정해진 템플릿(template)을 이용하여 복제해내는 방식을 말하며, bottom-up 방식은 나노입자 및 나노섬유 등 작은 빌딩블럭(building block)을 조립하여 큰 구조를 만들어내는 방식이다. 일반적으로 top-down 방식은 몰드 제작에 비용이 많이 드는 반면 동일한 형상을 반복적으로 신뢰성 있게 제작할 수 있는 장점이 있고, bottom-up 방식은 제작이 단순하지만 동일한 조립체 형상을 균일하게 반복적으로 얻기 어려운 단점이 있다.

대표적인 top-down 방식으로는 소프트 리소그래피 기술을 들 수가 있다<sup>8</sup>. 소프트 리소그래피는 고분자나 실리콘 고무 등 기계적으로 유연한(soft) 물질을 이용하여 패턴을 제작하는 기술을 말하는데, 유연한 물질로 몰드(mold)를 제작하고, 이 몰드를 이용하여 패턴을 찍어내거나 전사(transfer)하는 방식을 일컫는다. 초기에는 PDMS(polydimethyl siloxane)이라는 실리콘 고무 계열의 물질을 주로 사용하였으나 이후 관련 연구가 많이 진행되면서 자외선에 의해 경화되는 폴리우레탄(polyurethane) 계열의 물질을 몰드 재질로 이용한 사례도 많이 보고되고 있다<sup>14</sup>. 몰드를 이용하게 되면 반복적으로 동일한 형태의 패턴을 복제할 수 있으므로 신뢰성 있는 반복실험이 가능해진다. 나노임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography)는 몰드를 사용한다는 측면에서는 소프트 리소그래피와 유사하지만, 몰드를 이용해 높은 온도에서 유동성을 부여한 열가소성(thermoplastic) 고분자에 형상을 각인(imprint)하여야 하기 때문에 고온에서도 높은 경도를 가지는 몰드 재료를 사용하여야 한다<sup>15</sup>.

---

Bottom-up 방식의 경우 대체로 템플릿이 존재하지 않으며, 패턴을 직접적으로 그리거나 단위 빌딩블록을 자가조립(self-assembly)하는 방식으로 패턴을 제작한다. 레이저, e-beam, dip pen lithography 등을 이용하여 직접 패턴을 새기거나 그리는 방식은 신뢰성 있게 패턴을 제작할 수 있는 방식이다. 이러한 직접 제작(direct writing)기반의 패터닝 방식은 일일이 템플릿을 제작할 필요가 없으므로 다양한 형태, 크기의 패턴을 최적화하기에 용이하지만 넓은 면적의 패턴 제작에 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. 전기방사법(electrospinning)은 용매에 녹은 고분자가 전기장을 통과해 방사되는 과정에서 용매가 증발되며 나노섬유형태로 추출되는 기술을 말하며, 섬유를 모으는 콜렉터(collector)의 디자인에 따라 섬유의 정렬도를 제어할 수 있다. 인체 조직을 구성하는 세포외기질(extracellular matrix)의 형태와 유사하게 섬유상 조직을 구현할 수 있다는 측면과 저렴하게 대량생산이 가능하다는 점이 장점이다. 나노입자의 자가조립을 이용한 방법은 용매에 분산된 입자들이 용매의 증발 시에 밀집되는 현상을 이용해 규칙적인 배열의 패턴을 제작하는 방식이다. 그 외에도 크랙(crack)이나 주름(wrinkle) 등을 이용하여 규칙성 있는 패턴을 제작하는 방식이 있다.

## 4. 멀티스케일 패턴의 특징을 이용한 연구 결과

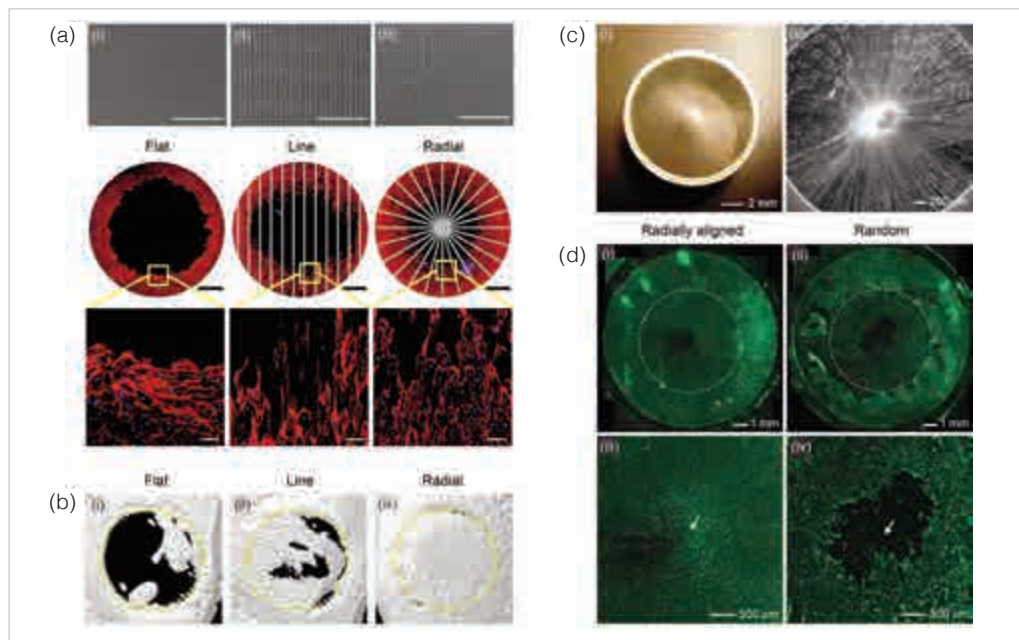
### 4.1 세포의 이동 방향 제어

세포는 바닥 패턴의 방향성에 맞추어 스스로의 방향성을 변화시키게 되는데, 가장 대표적으로는 바닥에 그루브(groove) 패턴이 있을 경우 그루브 방향으로 정렬되는 현상을 들 수 있다. 이러한 현상을 접촉유도(contact guidance) 라고 하며<sup>16</sup>, 세포의 배향, 신장, 이동방향 등을 결정하는 중요한 요소이다. 접촉유도에 의해 정렬된 세포는 패턴이 제시하는 방향을 따라 이동하게 된다. 이와 같은 현상은 체내에서도 암세포가 주변 조직을 침윤하는 과정이나 암전이 과정에서 흔히 관찰되고 있으며, 뇌 조직의 발달에서도 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 이러한 방향성에 의한 세포 거동제어를 체외 상처재생모델에서 물리적 방향성이 상처재생 속도에 미치는 영향을 연구하는데 이용할 수 있다. 예를 들어 사람 및 동물의 피부는 방향에 따라 다른 탄성계수(elastic modulus)를 가지고 있는데, 이를 피부결(tension line) 이라고 하며 피부 속 콜라겐(collagen) 섬유가 방향성 있게 정렬되어 있기 때문에 나타난다. 실제 제왕절개 수술 등의 피부절개 수술에서 볼 수 있듯, 피부결과 절개방향이 평행하면 그 방향성이 수직일 때보다 재생속도도 더 빠르고 흉터도 더 작게 되는데, 콜라겐 섬유의 방향성을 모사한 나노패턴 위에서 이러한 효과를 실험적으로 확인할 수 있다<sup>17</sup>. 나노패턴을 이용한 세포의 이동방향 제어는 상기한 인체 내에서 관찰되는 물리적인 미세환경을 체외(in vitro) 환경에서 모사하고자 하는 노력의 일환이다. 체내 조직의 물리적 형상을 모사하여 제작된 플랫폼 상에서 다양한 세포의 거동을 관찰하면서 체내 방향성 있는 세포 거동의 기초 원리를 파악하고, 이를 응용하여 물리적인 요소를 이용한 조직재생 및 질병 억제에 관한 연구를 수행할 수 있다.

기본적으로 균일한 간격을 가지는 그루브 형태에서는 접촉유도에 의해 세포가 라인의 양쪽 방향으로 이동할 수 있다. 이러한 양방향성을 띠는 그루브 형태의 패턴에 단일 방향성을 주는 방



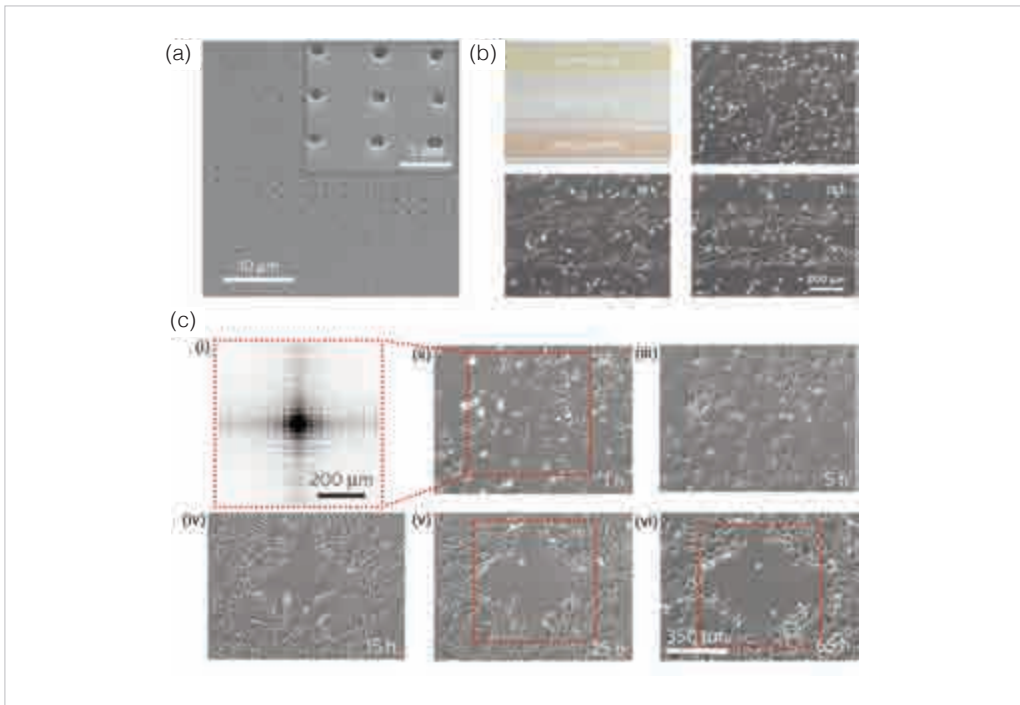
식으로 사용될 수 있는 방식은 그루브의 간격에 영향을 주는 방식이다. Georgia Tech.의 Younan Xia 그룹에서는 전기방사 방법을 이용하여 방사형으로 뻗어있는(radially aligned) 섬유망을 제작하였고, 세포가 더 좁은 패턴 섬유 간격으로 모인다는 점을 이용하여 세포를 가운데로 집중시킬 수 있었다<sup>18</sup>. 서울대학교 김병수, 전누리 교수 그룹에서는 방사형으로 뻗어있는 마이크로 그루브패턴을 임플란트로 사용하여 쥐의 두개골을 더 빠르게 재생시킬 수 있음을 보였다. 패턴이 없는 경우와 평행한 마이크로 그루브의 경우에 비해 방사형으로 뻗어 있는 임플란트의 경우 뼈세포들의 이동방향이 가운데로 집중되며 평행한 그루브에 비해 3배 가량 빠른 두개골 재생을 이룰 수 있었다<sup>19</sup>.



**그림 2.** (a-b) 선형 및 방사형 마이크로그루브 패턴을 이용하여 상처재생이 가능함을 보임. (A) Osteoblast 를 이용한 체외 실험 결과, (b) 쥐 두개골 재생의 결과. (c-d) 전기방사법을 이용하여 제작된 방사형 섬유 위에서 배양된 세포를 이용한 상처재생 연구. (c) 제작된 방사형으로 제작된 섬유, (d) 방사형으로 배열된 섬유와 랜덤으로 배열된 섬유에서 세포의 상처재생 속도 차이.



세포의 거동 제어는 패턴의 간격 제어를 통해서도 가능하다. U.C. Berkeley 의 Grigoropoulos 와 Healy 그룹은 레이저 식각(laser ablation) 방식을 통해 나노크레이터(nanocrator) 어레이를 제작하였다<sup>20</sup>. 나노크레이터의 지름은 동일하게 유지한 상태에서 간격만을 변화시켰을 때 세포들은 패턴의 간격이 멀어지는 방향으로 이동하였으며, 이를 이용하여 세포를 특정 지역에 모으거나 세포가 접근하지 못하게 할 수 있었다. 이와 반대로 서울대 故 서갑양 교수와 Johns Hopkins 대학 Levchenko 교수 연구팀은 사각형 격자의 간격을 조절하여 세포를 사각형 격자의 크기가 작은 방향으로 집중시킬 수 있었다<sup>21</sup>. 상기한 세포의 집중, 배척 기술은 체내에 삽입하는 임플란트 등을 제작할 때 조직세포의 생착을 촉진하는 기술로 적용될 수 있을 것이다.



**그림 3.** 레이저 식각을 이용해 제작된 패턴을 이용한 세포 배척 패턴(cell-repelling pattern)의 제작. (A) 레이저 식각을 이용해 제작된 패턴. (B) 여러 패턴 간격에 대하여 세포의 부착 선호도 분석 결과, 세포는 초기에 균일하게 부착하더라도 시간이 지날수록 패턴이 없는 곳으로 이동하였다. (C) 2차원(x 및 y 방향)으로 간격 그래디언트를 가지는 패턴에서의 세포의 부착성.

---

## 4.2. 줄기세포의 분화 촉진 및 억제

줄기세포는 다양한 세포로 분화할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 기존 연구들에 따르면 패턴의 사이즈, 간격, 정렬도 등에 따라 분화된 세포의 종류(lineage) 및 분화되는 효율이 다르다고 알려져 있다. 일반적으로 인체의 조직 내에는 줄기세포가 존재하며, 인체 조직이 외부적 충격 및 생화학적 공격에 의해 손상되었을 때 줄기세포가 조직세포로 분화하여 조직을 재생시킨다고 믿고 있다. 기존 연구들에서는 조직 내에서 생화학적 농도 그래디언트가 존재한다는 사실에 착안하여 주로 화학물질 혹은 세포성장인자 등을 사용하여 줄기세포를 분화시키는 연구를 수행하고 있었다. 하지만 패턴 제작기술이 발전하면서 인체 조직내의 물리적 요소도 체외에서 모사할 수 있게 되었고, 이를 이용하여 세포 주변에서 형성된 물리적 인자가 어떻게 줄기세포의 최종 분화형태에 영향을 주는지 분석할 수 있게 되었다.

1997년 하버드대학교의 Donald Ingber 교수 그룹은 패턴의 면적을 조절하여 세포의 생존/사멸을 제어할 수 있다는 논문을 Science지에 발표한다<sup>22</sup>. 이 연구에서는 세포가 정사각형의 패턴에만 부착할 수 있도록 표면에 접촉 전사(contact printing) 방식으로 세포가 부착할 수 있는 아일랜드를 제작하였는데, 정사각형의 면적이 작아질수록 세포 사멸이 급격히 증가한다는 결과를 보고 하였다. 이 연구를 주도적으로 수행하였던 Christopher Chen은 Johns Hopkins 대학의 교수로 부임한 뒤 2004년에 패턴의 면적이 인간성체줄기세포(human mesenchymal stem cell)의 분화에도 직접적으로 영향을 준다는 결과를 발표하였다. 이 논문에서 사각형의 면적이  $1024\mu\text{m}^2$ 로 작은 경우 성체줄기세포는 지방세포(adipocyte)로 분화하지만, 면적이  $10,000\mu\text{m}^2$ 로 큰 경우 성체줄기세포는 뼈세포(osteoblast)로 분화하였다<sup>23</sup>. 이 연구에서 세포가 펼쳐지는 면적이 RhoA 시그널링에 영향을 주어 줄기세포의 분화에 영향을 준다는 결과도 증거로 제시하였으며, 상기 결과는 이후 세포가 부착한 형상과 세포의 기능에 대한 연구들에 영감을 주었다.

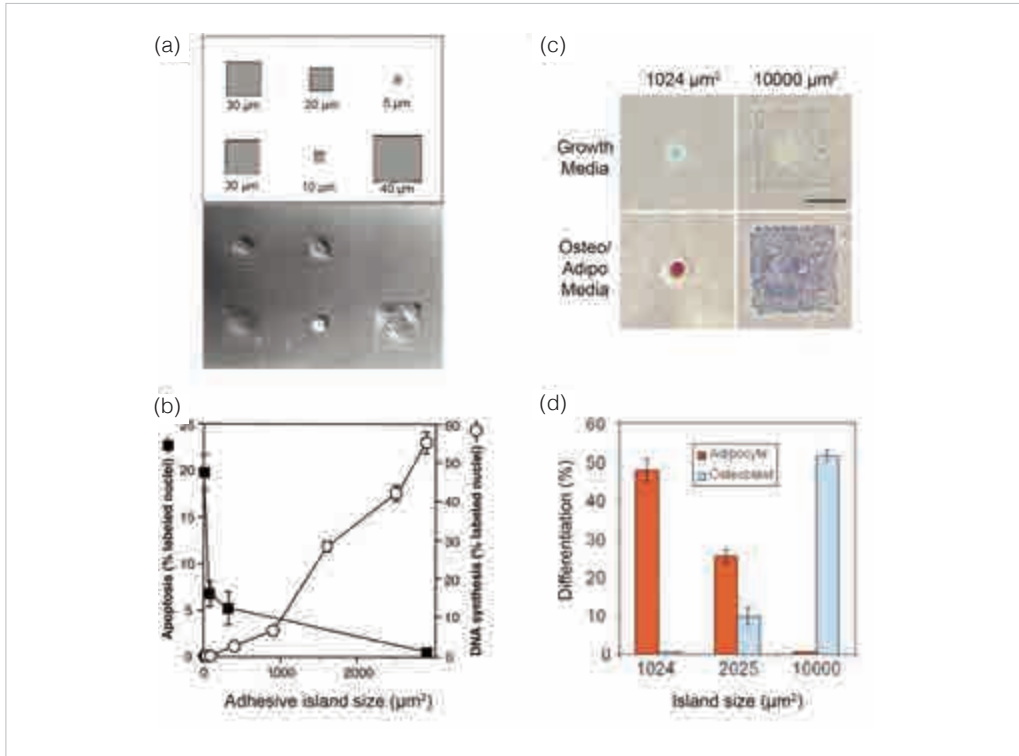


그림 4. 바닥 부착면의 크기를 이용한 세포 사멸 및 줄기세포 분화 결과. (a-b) 세포를 정해진 크기의 사각형 패턴에만 부착하여 배양하였을 때 사각형의 크기가 작아질수록 세포 사멸 정도가 급격히 증가함. (c-d) 세포를 두 가지 세포부착 면적의 패턴에 부착배양 하였을 때 성체줄기세포는 작은 패턴에서는 지방세포로, 큰 패턴에서는 뼈세포로 분화함.

영국 스코틀랜드 Glasgow 대학의 Matthew Dalby는 나노핏(nanopit) 배열의 무질서도가 성체줄기세포의 뼈분화에 영향을 준다는 결과를 2007년에 Nature Materials에 발표하였다<sup>24</sup>. Dalby 는 지름 120nm, 깊이 100nm의 나노핏 어레이(array)를 전자빔리소그래피(e-beam lithography) 및 핫 엠보싱(hot embossing) 방식으로 제작하였는데, 이때 어레이의 정렬도를 완전히 육각형 배열인 경우, 완전히 정사각형으로 배열된 경우, 50nm 어긋난 사각형 경우,

랜덤인 경우로 구분하였다. 성체줄기세포는 50nm 어긋난 사각형 배열에서 가장 높은 뼈세포 마커인 OCN과 OPN 발현을 보였다. 또한 패턴이 없는 기판에 뼈세포 분화를 촉진하는 약물 dexamethasone(DEX)을 첨가한 경우와 나노패턴에 DEX가 없는 경우를 비교 하였을 때 나노패턴 만으로도 약물과 비슷한 수준의 효과를 낼 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 줄기세포의 분화유도에서 물리적 요소의 효과를 잘 보여주는 예시라고 할 수 있다.

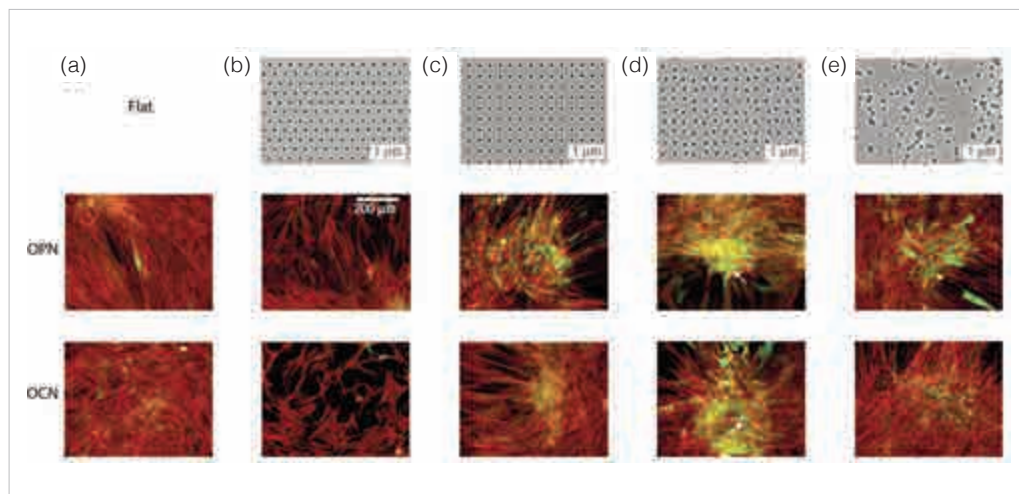


그림 5. 나노핏(nanopit) 배열의 흐트러짐이 줄기세포의 분화에 미치는 영향. 성체줄기세포는 정사각형 배열에서 50 nm 씩 어긋난 (D) 의 경우에 가장 높은 뼈세포 분화 마커를 보임.

기존의 연구들에서 보면 나노패턴의 존재는 줄기세포의 분화를 촉진하는 경향이 큰 것으로 보인다. Chen 등은 2012년 ACS Nano 저널에서 유리기판을 RIE(reactive ion etching) 방식으로 식각하여 1, 70, 150 nm 수준의 표면 거칠기를 제작하고, 표면 거칠기가 줄기세포의 분화능(stemness)의 보존(maintenance)에 미치는 영향을 분석하였다<sup>25</sup>. 줄기세포의 자가재생(self renewal) 특성의 마커인 Oct3/4 의 발현 정도를 분석 하였을 때, 줄기세포는 표면 거칠

기가 없는(1nm 수준) 기판에서 줄기세포로서의 분화능력을 유지하지만, 표면 거칠기가 큰 70, 150nm 표면에서는 줄기세포로서의 특징인 분화능을 잃어버리는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 줄기세포 실험을 하기 위한 준비단계에서 줄기세포를 어떻게 배양하여야 하는지에 대해 중요한 가이드 라인을 제시하고 있는데, 이 실험의 3가지 패턴의 경우에는 줄기세포의 단일 국소접착의 면적이 작고 세포당 국소접착의 개수가 많을수록 줄기세포가 분화능을 잃어버리는 것으로 나타났다.

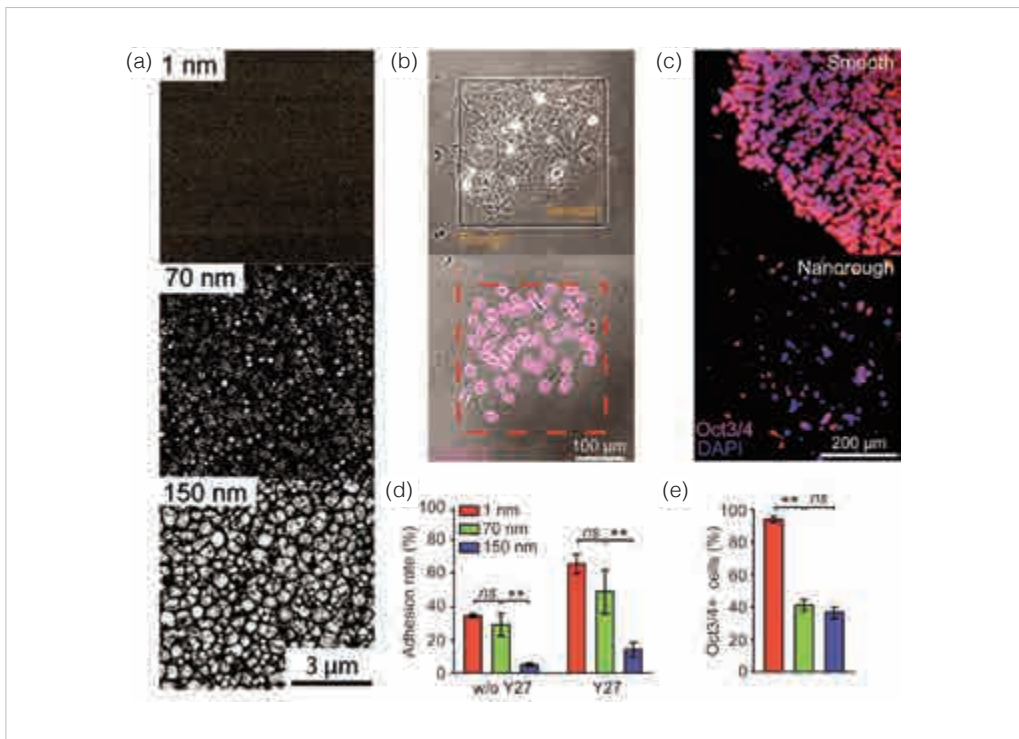


그림 6. 표면 거칠기를 이용한 줄기세포의 분화능력 보존 및 손실에 관한 연구. (a) Reactive Ion Etching 방식을 이용해 준비된 3가지의 거칠기 표면. (b-c) 줄기세포는 거칠기가 없는 매끈한 표면으로 이동함. (d-e) 매끈한 표면에서 배양된 세포는 분화능의 마커인 Oct3/4를 발현하는데 비해, 거친 표면에서는 거의 발현하지 않음.

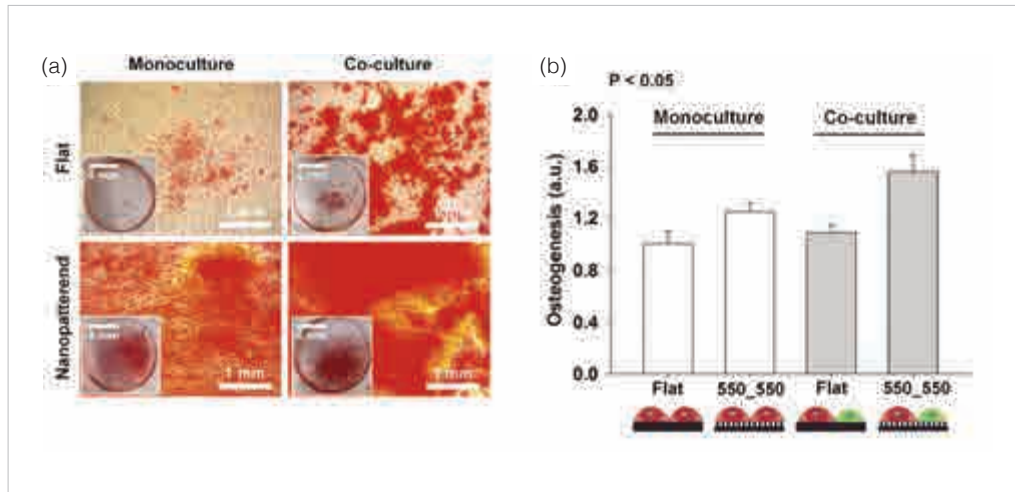


그림 7. 나노패턴과 줄기세포-혈관세포 공배양의 두 가지 요소가 줄기세포의 분화에 독립적 혹은 상승적으로 미치는 영향. 나노패턴의 존재와 공배양은 독립적으로도 줄기세포의 뼈 분화를 촉진하지만, 두 가지 요소가 동시에 존재할 경우 줄기세포 뼈 분화는 더더욱 좋아짐.

줄기세포의 분화는 바다면과의 상호작용(cell-substrate interaction) 뿐만 아니라 세포-세포 간 상호작용(cell-cell interaction)에 의해서도 상승적으로(synergistically) 영향을 받는다. 서울대 故 서갑양 교수와 정종훈 교수 그룹은 줄기세포의 분화는 나노패턴 뿐만 아니라 줄기세포 주변의 이종세포에 의해서도 촉진될 수 있음을 보였다. 나노패턴의 유무와 혈관세포의 공배양 유무의 경우를 조합하여 네종류의 조합에 대하여 줄기세포의 뼈세포 분화능력에 대해 분석하였을 때, 인간성체 줄기세포는 나노패턴의 존재에 의해서도 분화율이 증가하고 혈관세포의 공배양에 의해서도 분화율이 증가하지만, 두 가지 요인이 동시에 존재할 때는 분화율이 더 많이 상승함을 보였다. 실제 인간의 뼈조직에는 hydroxiapatite nanocrystal과 콜라겐이 융합된 세포외기질 뿐만 아니라 혈관조직 또한 같이 존재한다는 점을 생각할 때, 상기의 연구 결과를 통하여 미세환경의 물리적 구조뿐만 아니라 주위 이종세포와의 상호작용 또한 중요한 요소임을 실험적으로 확인할 수 있다.



### 4.3. 견인력의 측정

세포는 주변에 외력을 가하면서 접착, 이동을 하게 되는데, 이러한 과정에서 접착면 혹은 세포 외기질에 세포가 가하는 힘을 견인력(traction force)이라 한다. 이러한 견인력을 가시화 하는 방법은 1980년 Harris 등에 의해 Science 에 의해 처음 제시되었는데, 얇은 실리콘 고무막 위에 세포를 배양하였을 때 세포가 가하는 외력에 의하여 고무막에 주름이 생기는 현상을 보고 하였다<sup>27</sup>. 세포가 가하는 견인력의 정량적 크기를 측정하기 위해서는 추적자(tracer)의 상대적 위치변화를 모니터링 하고 이를 힘의 크기로 변환해야 하는데, 1994년 Lee 등은 실리콘 고무막에 부착된 라텍스 비드(latex bead)의 위치를 모니터링 하여 이동하는 케라티노사이트(keracyte)의 최대 견인력은 약  $2 \times 10^{-8}$  N 이라는 것을 밝혔다<sup>28</sup>. 이와 같이 유연한 기관에 포함된 추적자의 상대적 위치변화 견인력을 측정하는 기술을 Traction Force Microscopy 라고 부르는데, 마이크로필라 어레이(micropillar array)를 사용하면 유연한 기관과 추적자가 하나로 통합된 플랫폼을 제작할 수 있다.

지름에 비해 길이가 긴 형태의 구조물은 외력에 의해 휘어질 때 휘어지는 양은 가해진 외력과 상관관계를 가지는데, 이러한 재료역학적인 특성은 마이크로 크기의 세계에서도 여전히 유효하다. 수  $\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 마이크로필라(micropillar)를 탄성 재료인 PDMS로 제작하고, 필라의 윗면에만 선택적으로 세포가 부착할 수 있는 파이브로넥틴(fibronectin) 등의 단백질로 코팅을 하게 되면 세포는 선택적으로 마이크로필라의 윗면에만 접착을 형성하게 된다. 세포가 견인력을 생성하게 되면 세포와 접착된 마이크로필라는 휘어지게 되며, 휘어지지 않았을 때의 위치와 상대적 비교를 통해 세포가 가하는 견인력을 계산할 수 있다. 더불어 탄성재료로 제작된 마이크로필라는 외력이 제거되면 원래의 수직 형태로 신속히 복귀되기 때문에 매우 좁은 지역에 가해진 힘의 변화를 실시간으로 관찰할 수 있다.

상기의 특성을 잘 보인 예시는 Vedula 등의 연구에서 확인할 수 있는데, 세포가 집단이동현



상(collective migration)을 보일 때 물리적으로 한정된 공간이 세포의 거동에 어떤 영향을 미치는지를 Traction Force Microscopy 기술을 이용해 가시화 하였다<sup>29</sup>. Madin-Darby canine kidney(MDCK) 세포와 같은 상피세포(epithelial) 계열의 세포는 세포 사이에 강한 결합을 형성하기 때문에 이동 시에 마치 하나의 막(sheet)처럼 거동하게 되는데, 이를 집단이동현상이라고 한다. 너비가 다른 마이크로채널들 내부로 MDCK 세포가 집단이동할 때 채널의 폭에 따라 이동속도에 차이가 나는데, 예를 들어 폭 400 $\mu\text{m}$  채널에서는 최전선에서 이동하는 세포의 속도가 약 22.4 $\mu\text{m}/\text{h}$  인데 반하여 폭 20 $\mu\text{m}$ 인 채널에서는 세포의 이동속도가 약 39 $\mu\text{m}/\text{h}$ 로 훨씬 빠른 것을 알 수 있다. 세포막의 속도장(velocity field)을 마이크로필라 기반의 Traction Force Microscopy로 가시화 하였을 때, 폭 400 $\mu\text{m}$ 의 넓은 채널에서는 세포이동의 지역적 와류가 발생하고 채널 길이방향으로 당기는 힘만 생성되는데 반하여 폭 20 $\mu\text{m}$ 의 좁은 채널에서는 세포막의 최전선에서는 견인력이 발생하는 반면에 최전선 뒤 100 $\mu\text{m}$  가량의 영역에서는 이완되는 힘을 보임을 알 수 있었다. 이러한 좁은 채널에서의 이동모드 변화가 좁은 채널에서의 빠른 이동속도에 일부 기여했다고 저자들은 분석하였다.

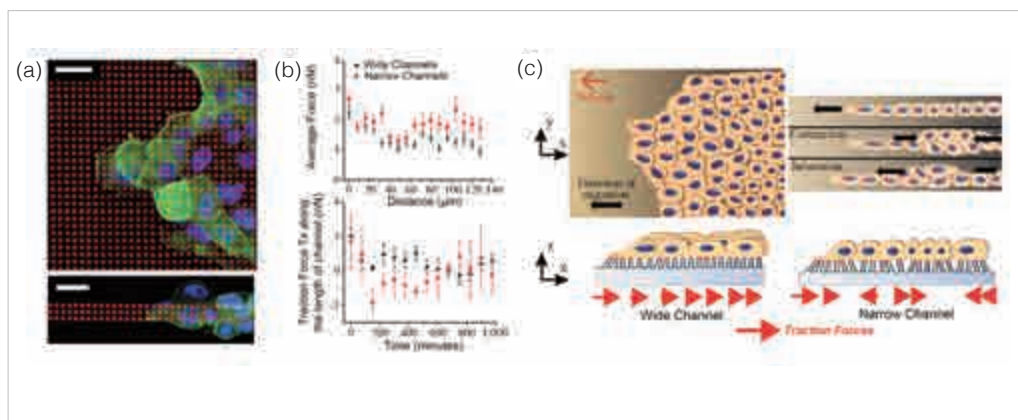
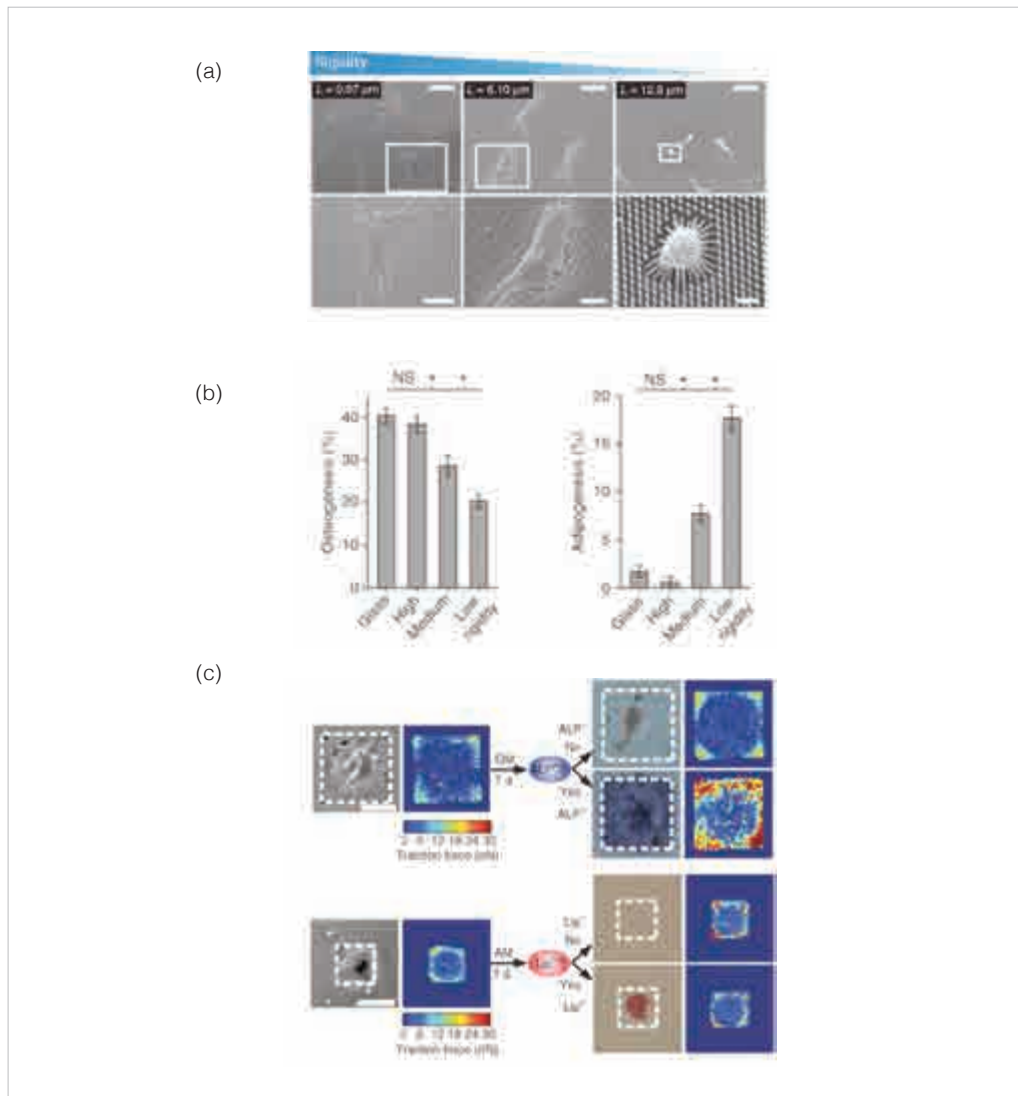


그림 8. 마이크로필라를 이용한 Traction Force Microscopy 기술 및 이를 이용한 세포의 견인력 분석. 집단적 세포 이동시 넓은 채널에서는 세포집단이 뒤쪽 방향으로만 견인력을 발생하는데 비해 좁은 채널에서는 지역적으로 견인력이 사라지는 부분이 있음을 밝힘.

마이크로필라의 또 다른 장점으로서는 마이크로필라의 높이를 변화시키면 스프링상수(spring constant), 즉 기관의 경도(rigidity)를 변화시킬 수 있다는 점이다. 마이크로필라의 지름은 동일하게 유지한 상태에서 필라의 길이를 변화시키면, 세포가 접촉하는 면적은 동일하게 유지하면서 바닥면의 경도를 변화시킬 수 있다. 이러한 점에 착안하여 미국 펜실베이니아 대학 Chen 그룹은 마이크로필라의 스프링상수(즉, 경도)가 성체줄기세포의 분화에 미치는 영향을 세포의 견인력과 연관 지어 설명할 수 있었다<sup>30</sup>. PDMS 로 만든 마이크로필라의 지름은 1.83  $\mu\text{m}$ 로 유지하되 높이를 0.97  $\mu\text{m}$ 에서 14.7  $\mu\text{m}$  범위에서 변화시킴으로써 스프링상수를 1.31 nN/ $\mu\text{m}$  (높이 14.7  $\mu\text{m}$ )에서 1,556 nN/ $\mu\text{m}$ (높이 0.97  $\mu\text{m}$ )까지 변화시킬 수 있었다. 높은 스프링상수를 가지는 짧은 마이크로필라 위에서는 줄기세포가 뼈세포로 분화 하였으며, 낮은 스프링상수를 가지는 가지는 긴 마이크로필라 위에서는 지방세포로 분화하였다. 세포가 마이크로필라를 당기는 견인력을 Traction Force Microscopy 방식으로 측정해 보았을 때, 뼈세포로 분화하는 줄기세포는 높은 견인력을 보였으며, 지방세포로 분화하는 줄기세포는 낮은 견인력을 보임을 알 수 있었다. 상기 결과는 동일한 Chen 그룹에서 2004년 보고한 논문인 세포가 접촉하는 아일랜드의 크기가 줄기세포의 분화에 미치는 영향을 분석한 결과와 일맥상통 하는데, 상대적으로 연성인 기관에서 둥글게 말린 형상에 가까울수록 지방세포로 분화하고 단단한 기관에서 펼쳐진 세포로 배양된 줄기세포는 뼈세포로 분화하며, 이는 견인력에 관련된 RhoA 시그널링에 관계된다고 요약할 수 있다. 이와 같은 결과는 마이크로필라 기반의 플랫폼이 세포를 자극하는 기능과 견인력을 측정하는 기능을 동시에 제공할 수 있기 때문에 가능하였다.



**그림 9.** 마이크로필라의 높이를 조절하여 세포가 부착하는 환경의 경도(rigidity)를 조절하고 이를 줄기세포의 분화 조절에 활용한 예시. (a) 지름은  $2 \mu\text{m}$ 로 동일하면서 높이를 다양하게 변화시킨 마이크로필라 위에 배양된 세포의 SEM 이미지. (b) 필라의 높이가 낮아 단단한 경우 줄기세포는 뼈세포로 분화되며, 반대의 경우 지방세포로 분화됨. (c) Traction Force Microscopy 를 이용해 분석한 결과 뼈세포 분화는 높은 견인력(traction force)과 관계가 있고, 지방세포 분화는 낮은 견인력과 관계가 있음.

#### 4.4. 세포 기능의 기전 연구

인체에서 발생하는 질병은 생화학적(biochemical) 물질의 비정상적 유입, 시공간적 분포 등에 크게 영향을 받지만 물리적(physical) 요소의 항상성 상실에 의해서도 발생한다. 대표적인 경우가 섬유상으로 존재하는 세포외기질의 손상이 세포에 미치는 영향을 들 수 있는데, 정상 상태의 장기 및 조직에서 세포외기질은 미세환경(microenvironment)로서 세포 기능 발현에 필수적인 리셉터, 적절한 물리적 경도(stiffness), 물리적 방향성 등을 제시한다. 정상적인 상황에서는 세포는 주위환경과의 상호작용 하에 항상성을 유지하지만, 외부적/내부적 요인으로 인하여 세포외기질이 손상되었을 때 세포단위에서 변화가 발생하고, 이 변화는 조직 전체에 영향을 줄 수 있다. 나노패턴을 이용하면 이러한 물리적 요소의 변화를 모사한 체외 플랫폼을 제작할 수 있으며, 상기 플랫폼에서 세포의 거동은 어떠하며 특정 신호전달 단계가 억제된다면 거동이 어떻게 달라지는지의 분석을 통해 근본적인 기전에 대한 이해를 넓힐 수가 있다.

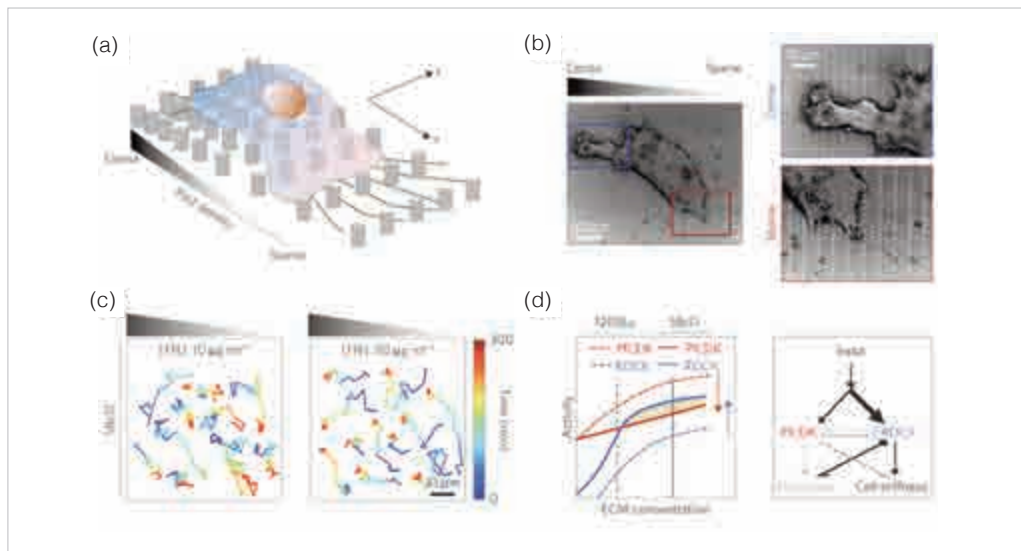


그림 10. 나노필라의 간격이 점차적으로 변화하는 그래디언트(gradient) 패턴을 이용한 세포 이동 및 바닥 침윤 메커니즘 분석. (a) 1방향으로 나노필라 간격에 그래디언트가 있는 패턴의 개념도. (b) 그래디언트 패턴 위에서 세포와 나노필라간 상호작용의 SEM 이미지. (c) Fibronectin (FN) 의 코팅 농도가 변함에 따라 세포의 이동방향성이 전환됨. (d) PI3K 와 ROCK 시그널링의 상대적 크기 차이가 이러한 세포의 이동방향 전환 및 세포 경도에 미치는 영향을 나타낸 그림.

---

예일대학교의 Andre Levchenko 그룹에서는 나노포스트의 간격이 점차적으로 변하는 그래디언트(gradient) 패턴을 이용하여 흑색종(melanoma)이 어떻게 악성종양의 성질을 가지게 되어 피부속으로 침윤하는지에 관련된 메커니즘을 연구하였다<sup>31</sup>. 멜라노마는 피부암 세포의 한 종류로 초기에 양성(benign) 일 때는 피부 표면에서 방사형으로 퍼지면서 성장하다가 어느 단계에 이르러 악성(malignant)의 성질을 띠게 되면서 피부의 깊이 방향으로 침윤하는 특성을 가진다<sup>32</sup>. 기존 연구들에 따르면 흑색종 세포가 조직으로 침윤하는 특성을 가지게 될 때 유전적 변화가 동반되는데, 예를 들어 기능성 PTEN 의 발현을 잃어버리는 과정에서 PI3K-Akt 시그널링이 과발현(over activation) 되는 특성을 보인다고 한다<sup>32</sup>. Levchenko 그룹에서 2016년 Nature Materials 에 보고한 연구 결과에 따르면 멜라노마 세포는 기존의 학설대로라면 패턴이 성긴(sparse) 곳에서 밀집된(dense) 곳으로 이동하여야 하지만, 특정 ECM 농도에서는 이동의 방향성이 기존과 반대로 밀집된 곳에서 성긴 곳으로 이동함을 보였고, 이러한 방향성의 특징은 세포 멤브레인의 경도(stiffness)와 상관관계가 있음을 보였다. ROCK 과 PI3K 시그널링을 선택적으로 억제하는 약물을 이용한 실험의 결과, 과발현된 PI3K 는 세포 멤브레인의 경도를 낮추어 패턴 사이로 잘 파고들게 만든다는 것을 실험적으로 증명하였고, 이러한 결과를 바탕으로 피부에서 멜라노마 세포가 기질금속단백질분해효소(matrix metallo-protease, MMP)를 분비하여 ECM 섬유를 손상시킬 경우 패턴의 간격이 증가하는 것 같은 효과를 갖게 되어 침윤하는 특성을 가지게 될 수 있다는 학설을 제안하였다. 이처럼 간격의 그래디언트가 있는 나노패턴은 세포 거동의 방향성을 뚜렷이 파악할 수 있는 플랫폼으로 사용될 수 있으며, 깊이 있는 연구를 통해 기존 생물학에서 밝히지 못했던 메커니즘을 연구하는데 사용될 수도 있음을 알 수 있다.

## 4.5. 기능성을 가진 패턴을 이용한 세포 연구

멀티스케일 패턴을 이용한 세포 거동제어는 주로 주어진 형상이 세포에 미치는 효과를 연구하는데 사용되었으나 최근에는 재료 자체에 기능성을 부여하여 외부에서 가해지는 추가적인 자극이 포괄적으로 세포에 미치는 영향을 연구도 진행되고 있다. 인체 내에서 뇌, 근육, 심장은 세포의 방향성 및 전기적 신호전달이 중요한 역할을 하는 장기이다<sup>3</sup>. 뇌의 경우 신경세포는 백질(white matter)에서 회백질(gray matter) 방향으로 뻗은 형상을 가지고 있으며, 정렬된 신경세포를 통해 전기신호를 전달한다. 근육 및 심장의 경우 전기신호에 의해 세포가 수축하게 되는데, 세포가 한쪽 방향으로 정렬되어 있기 때문에 방향성 있는 힘을 생성할 수가 있다. 따라서 이러한 물리적 방향성 및 전기신호가 동시에 존재하는 장기를 나노표면 상에서 배양하기 위해서는 표면의 전기적 특성도 필수적으로 고려해야 한다.

대표적으로 전도성을 가지는 물질을 이용하여 멀티스케일 패턴을 제작하거나, 이미 제작된 구조물 위에 전도성 물질을 증착하여 표면에 전기적 전도성을 부여할 수 있다. 미국 워싱턴 대학의 김덕호 교수 그룹과 KAIST의 임성갑 교수 그룹은 공동으로 polyurethane acrylate (PUA)로 제작된 나노그루브 패턴 위에 Ti와 Au를 증착하여 나노그루브 형상을 가지면서 전기전도성도 가지는 기판을 제작하였다<sup>33</sup>. 전기전도도는 나노그루브 패턴이 있는 경우와 없는 경우 모두 Au코팅의 경우가 Ti 코팅 보다 높았는데, 근육세포인 C2C12 세포를 배양하여 근섬유다발(myotube)로 분화에 나노그루브 패턴과 전기전도성이 미치는 영향을 비교하였다. 전기전도성은 근육세포의 퓨전(fusion)과 Myf5, MyoD, 및 MyoG 등 분화에 관련된 마커의 발현에 영향을 미쳐 전기전도도가 높을수록 발현양이 높아지는 경향을 보였고, 나노패턴의 존재는 근섬유다발의 길이에 영향을 미쳐 더 긴 근섬유다발을 형성하는데 영향을 주었다. 패턴이 없는 경우에서도 전기전도성이 증가함에 따라 근섬유분화에 뚜렷하게 증가하는 것을 볼 때, 실제 인체 근섬유에서 전기적 자극에 의해 근육이 수축하는 메커니즘을 체외 환경에서도 구현하는 것이 중요하다는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

이외에도 외부에서 가하는 외력에 의해 형상이 변화되는 멀티스케일 패턴을 제작할 수도 있다. 실제 인체 내 다양한 조직은 정적이지 않으며, 오히려 다양한 활동에 의해 형상이 변형되는 특징을 가진다. 그러므로 경우에 따라서는 외부적인 힘에 의해 동적으로 변화하는 환경을 구현하



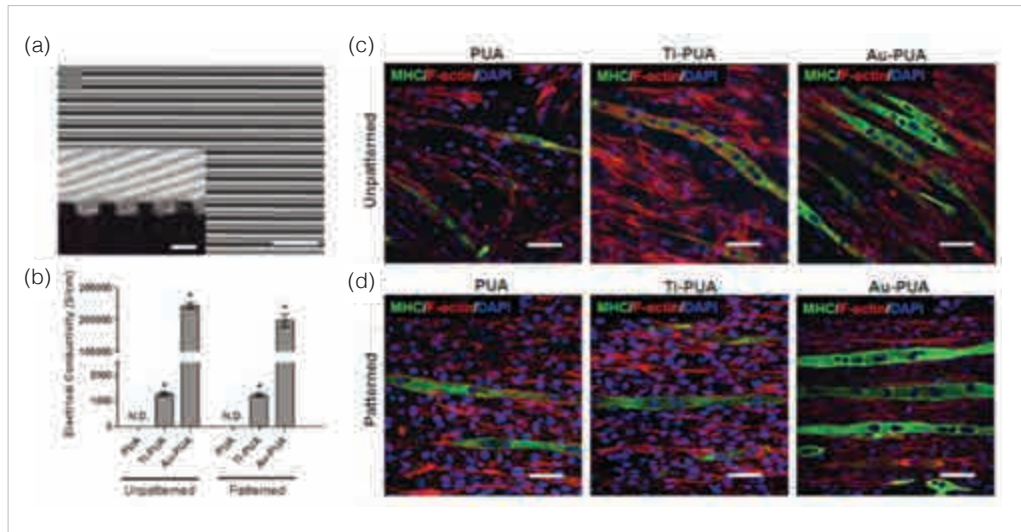


그림 11. 금속이 코팅된 나노패턴이 근섬유세포의 근섬유다발 분화에 미치는 영향 분석. (a) Au가 코팅된 나노패턴의 SEM 이미지. (b) Ti와 Au가 코팅된 polyurethane acrylate(PUA)표면의 전기전도도. (c-d) 표면 나노그루브 패턴과 전기전도도 요소들에 의해 분화된 근섬유다발(녹색)의 형광염색 이미지.

고, 이러한 동적 환경이 세포에게 미치는 영향을 연구하는 것 또한 필수적이다. 동적으로 변화하는 환경을 외부에서 인가하는 힘에 의해 변화되는 마이크로 구조물을 제작함으로써 구현할 수 있다. 홍콩과기대 Wen 그룹은 자성을 띠는 마이크로필라를 제작하고 외부 자기장의 변화에 의해 마이크로필라가 휘어지면서 발생하는 힘이 세포의 증식에 미치는 효과를 확인하였다<sup>34</sup>. 마이크로필라는 자성을 띠는 카르보닐 철분가루(carbonyl iron powder)를 PDMS에 30% 비율로 섞어서 제작하였으며, 자성입자는 마이크로필라에만 존재할 수 있도록 하여 관찰이 용이하게 하였다. 외부에서 자기력을 가했을 때 마이크로필라는 휘어지게 되는데, 두 개의 마이크로필라를 붙잡고 있는 NIH-3T3 세포가 마이크로필라의 휘어짐에 따라 뒤틀림을 받도록 하였다. 회전하는 자기장을 가하였을 때 주기가 1 Hz 일 경우에는 자기장이 없을 때에 비해 세포 증식 속도가 2.4배 증가하였고, 이후 주기가 증가함에 따라 세포 증식은 감소하여 4이상에서는 자기장이 없는 경우에 비해 세포 사망률이 높아졌다. 이 연구에서는 마이크로필라의 집단적 움직임에 의해 발생하는 효과에 관하여 연구하였지만, 세포 크기에 상응하는 개별적 제어가 가능한 구조를 제작한다면 기계적 힘이 세포의 기능에 미치는 효과에 대해 더욱 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.



## 4.6. 3차원 구조화

나노패턴은 근본적으로 2차원 평면에 형성된 구조체의 배열이므로 세포에게 가해지는 자극 및 성장 환경 모두 2차원에 한정되어 있다. 그러나 인체 내 조직은 두께를 가지는 3차원 형상이며, 장기에 따라서는 다층의 조직들이 각각 상이한 세포로 구성되어 있는 경우도 있다. 다층의 조직이라 할지라도 각 층 내부에서는 세포들이 일정한 방향성을 가지고 있는 경우가 많은데, 예를 들어 심장은 섬유층(Fibrous layer), 심낭벽측판(parietal pericardium), 장측판(visceral pericardium), 심근(myocardium), 내막(endocardium) 등의 다층 구조로 이루어져 있으며, 각 층 내부에서 세포외기질과 세포가 정렬된 형태를 발견할 수 있다. 또한 피부의 경우에도 표피층(epidermis), 진피층(dermis), 하피(hypodermis) 층으로 이루어져 있는데, 그중 진피층(dermis)에서는 콜라겐 섬유와 섬유아세포들이 방향성 있게 정렬되어 있어 피부 결의 특성을 보여주고 있다. 이를 모사하기 위해서는 2차원의 세포층을 방향성 있게 제작하고 이를 적층하여 각 층별로 방향성을 가지는 3차원 구조를 제작할 수 있는데, 상기 기술을 이용하면 기존 하이드로젤을 이용한 3차원 배양에서는 구현할 수 없었던 방향성 있는 다층구조를 제작할 수 있다.

상기 적층을 통한 3차원 조직 구현의 기본이 되는 기술은 Cell sheet engineering이라 불리는 방법이다. 일본 Tokyo Women's Medical University의 Teruo Okano 그룹은 Cell sheet 을 적층하여 3차원 조직을 만들 수 있는 기술에 관하여 1990년도 초반부터 연구하고 있었다<sup>35</sup>. 상기 기술은 열에 의하여 친수성/소수성이 조절되는 poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm)라는 하이드로젤 위에 세포를 배양 후에 온도를 20°C로 내리면 면(sheet) 형태로 세포면(cell sheet) 이 박리되는 현상을 이용하여 세포면을 이송(transfer)하는 기술을 말한다<sup>36</sup>. 미국 University of Washington의 Kim 그룹은 PUA와 gelatin methacryloyl (GelMA)로 만든 나노패턴 위에 PNIPAAm을 코팅하고 세포를 배양하였다<sup>37</sup>. 그런 이후 온도

를 22°C 로 낮추어 세포층을 떼어내어 여러 층 쌓는 기술을 선보였다. 각각의 세포층은 나노 그루브 위에서 배양하였으므로 정렬된 방향성을 가지고 있었고, 적층하는 층마다 방향성을 조절하여 적층 할 수 있었으며, 3일동안 방향성이 흐트러지지 않고 배양할 수 있었다. 상기 기술에서는 한 종류의 세포만을 사용하였으나, 다중 세포를 이용하여 세포층을 적층할 수 있다면 실제 인체조직과 유사한 이종세포 다층 조직을 구현할 수 있을 것이라 생각한다.

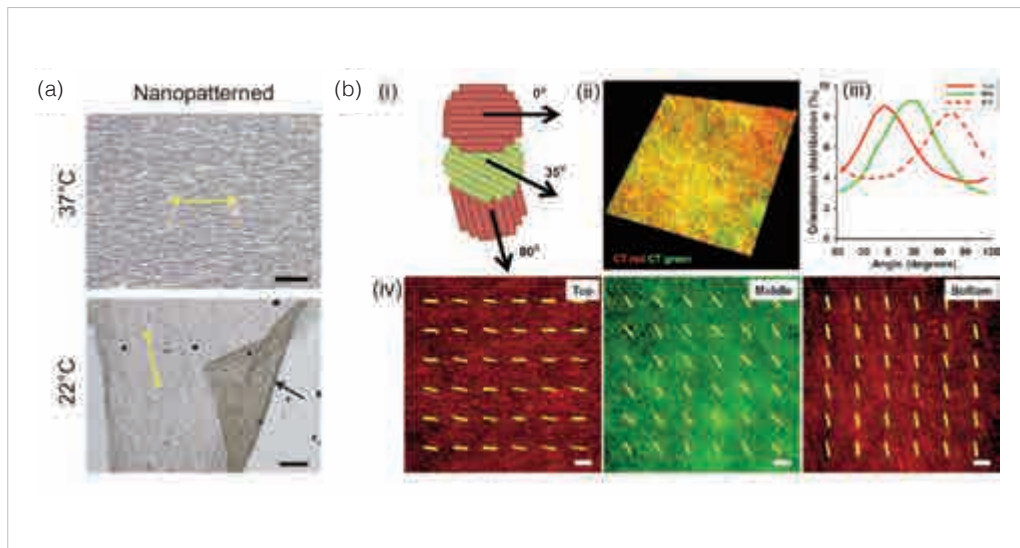


그림 12. 세포층(cell sheet) 전사 기술을 이용한 3차원 조직의 형성 기술. (a) poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm) 로 코팅된 나노그루브 위에 배양된 세포는 그루브의 방향으로 정렬되고, 온도를 22°C 로 낮추었을 때 세포층 형태로 박리됨. (b) 세포층을 전사하여 쌓게 되면 의도된 방향성을 가지는 다층의 3차원 세포조직을 제작할 수 있음.

## 5. 향후 연구주제

나노패턴을 이용하여 세포의 거동, 기능, 분화 등의 특성을 조절하기 위한 연구는 다양한 국가별, 학제별로 활발히 진행되고 있는 상황이지만, 아직도 연구해야 할 부분이 다양하게 남아 있으며, 이러한 이슈들은 비단 하나의 학문 영역에 그치지 않고 다학제적 고민이 필요한 부분이 많다.

가장 대표적으로 재료적인 한계를 극복할 필요가 있다. 그간 나노패턴을 형성하기 위하여 사용된 재료들은 세포에 적합하게 개발된 재료들이라기 보다는 기존 반도체 산업이나 광학적 부품을 개발하기 위해 사용되던 재료를 의공학이라는 영역으로 도입한 경우에 해당된다. 기존 연구들에 따르면 체외 실험의 경우 세포들에게 미치는 독성 등의 영향은 적다고 보고되고 있으나 물성자체의 특성이 세포의 기능성에 특화되지 않았으므로 생체재료로서의 특성에 대한 고려가 필요하다. 특히 인체 내 삽입을 염두에 두고 있는 경우라면 장기적 생체적합성은 더욱 더 중요한 이슈가 될 수 있다.

또한 재료의 물성 또한 중요한 고려 요소이다. 2006년 미국 펜실베이니아 대학 Discher 교수 연구팀에서 Cell지에 보고한 논문에서 줄기세포가 폴리아크릴아마이드(polyacrylamide, PA) 바닥면의 단단한 정도에 반응하여 조직의 경도(elastic modulus)에 상응하는 신경세포, 근육세포, 뼈세포로 분화한다는 기념비적인 결과를 보고하였다<sup>38</sup>. 이후 세포배양 환경의 경도는 중요한 고려요소가 되었다. 이후 세포배양 기판의 경도 외에도 공극(porosity)에서 유래된 세포가 부착되는 리셉터의 테더링(tethering) 등도 중요한 요소일 수 있다는 결과가 제시되었으나 논란의 여지가 있는 상황이다<sup>39,40</sup>. 앞서 설명한 바와 같이 마이크로 및 나노패턴은 형상에 따라 경도 등을 조절할 수 있고, 자기장 혹은 빛 등의 자극에 의하여 물성을 일시적으로

---

변화시킬 수 있는 기술도 보고된 바 있으므로 물리적/기계적 요소들이 세포의 기능에 미치는 영향을 연구하는데 중요한 플랫폼을 제공할 수 있다. 예를 들어 미국 미시건대학 Fu 그룹에서는 세포가 순간적인 자극에 의해 Cytoskeletal tension이 발생하였다가 다시 정상상태로 회복되는 과정을 마이크로필라에 배양한 세포를 분석하고, 관련된 메커니즘을 밝혀 2016년 Nature Materials에 보고 하였다<sup>41</sup>.

또한 마이크로 및 나노패턴을 이용한 세포기능 제어 기술에 새로운 기술을 접목할 필요성이 있다. 예를 들어 최근 들어 광유전학(optogenetics) 기술의 경우 세포에 삽입된 빛에 반응하는 이온채널을 이용하여 세포의 기능을 조절하는 기술이다<sup>42</sup>. 초기에는 생쥐의 뇌에 빛을 쬐이는 방식으로 행동을 제어하는 연구에 많은 관심을 가졌으나, 최근에는 체외에서도 세포기능을 조절하는 연구가 진행되고 있다.<sup>43</sup> 또한 줄기세포 관련 기술 중 직분화(direct reprogramming) 이나 유도분화 줄기세포(induced pluripotent stem cell, iPS) 등의 기술도 멀티스케일 패턴과 융합이 가능한 분야로, 상승적 효과를 통해 분화의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다<sup>44</sup>. 세포가 다양한 요소들(예를 들어, 세포-세포간 상호작용, 생화학 분자, 전기적 자극, 기계적 자극 등)이 동시에 가해질 때 상승적으로 기능이 좋아진다는 결과들을 볼 때, 새로운 기술의 접목은 세포기능 향상 및 새로운 메커니즘의 발견에 도움을 줄 것이다.

## 6. 결론

마이크로 및 나노패턴을 이용한 세포의 거동, 기능, 분화 제어에 관한 연구는 오랜 역사를 지닌 반면, 본격적인 연구는 1990년대 후반 바이오멤스(bioMEMS) 기술의 발전으로부터 가속화 되었다. 멀티스케일 패턴은 기존 플라스틱 접시기반에서 이루어졌던 생명과학에 한정되었던 연구 내용을 공학의 분야로 확장시킬 수 있었으며, 이러한 공학과 생명과학의 융합을 통해 그 동안 PetriDish 및 유리기판에 세포를 배양했던 실험에서는 관찰할 수 없었던 많은 결과들을 얻을 수 있었다. 나노/마이크로 패턴은 기본적으로는 공학적인 기술을 이용하여 제작된 인위적인 산물이지만 정밀한 형상의 제작을 통해 인체 내 세포외기질, 마이크로트랙 등의 형상을 체외에서 구현할 수 있었다. 많은 연구에서 보고된 바에 따르면 멀티스케일 패턴에서 배양된 세포는 그 형상, 거동, 기능 등이 페트리 접시나 유리기판에서 배양된 세포의 경우와 확연히 다르며, 오히려 더 인체 내 세포의 형상, 거동, 기능과 유사함을 보여주었다. 기존 패턴이 없는 2차원 환경에서 체외 배양된 세포들이 경우에 따라 체내와 상이하거나 신뢰성이 떨어지는 연구 결과를 보여왔음을 생각한다면, 인체 내 미세환경과 유사한 패턴 환경에서 배양되는 세포는 기초 기전연구 및 약물유효성 검증 등에서 더 신뢰성 있는 결과를 제시할 수 있을 것이라 생각한다. 또한 멀티스케일 패턴을 이용해 원하는 리니지로 줄기세포를 효율적으로 분화시킨다던가 손상된 조직을 재생시키는 기술로서 멀티스케일 형상을 포함하는 체내 삼입형 스캐폴드를 제작한다면 줄기세포를 이용한 조직 재생 효율을 더 높일 수 있을 것으로 생각된다. 마지막으로 향후 연구를 통해 나노패턴별, 세포별 조합에 따라 세포의 이동, 기능, 분화 등에 어떻게 영향을 미치는지 결과를 수집하고 데이터베이스화 하게 된다면 줄기세포치료, 조직 재생 등 다양한 의공학 기술의 응용할 수 있을 뿐만 아니라 정교하게 디자인 된 멀티스케일 패턴을 이용하여 그 동안 밝히지 못했던 세포 거동의 메커니즘을 밝히는 데 기여할 수 있을 것이다.



김홍남 (hongnam.kim@kist.re.kr)

- 학 력**
- 서울대학교 기계항공공학부 박사
  - 서울대학교 기계항공공학부 석사
  - 서울대학교 기계항공공학부 학사

- 경 력**
- 現) 한국과학기술연구원 바이오마이크로시스템연구단 선임연구원
  - 前) 한국과학기술연구원 박사후 연구원
  - 前) Johns Hopkins University 방문연구원

## 참고문헌

---

1. Prager-Khoutorsky, M. et al. Fibroblast polarization is a matrix-rigidity-dependent process controlled by focal adhesion mechanosensing. *Nat Cell Biol* 13, 1457–U1178, (2011).
2. Albiges-Rizo, C., Destaing, O., Fourcade, B., Planus, E. & Block, M. R. Actin machinery and mechanosensitivity in invadopodia, podosomes and focal adhesions. *J Cell Sci* 122, 3037–3049, (2009).
3. Kim, H. N. et al. Nanotopography-guided tissue engineering and regenerative medicine. *Adv Drug Deliver Rev* 65, 536–558, (2013).
4. Kim, J., Kim, H. N., Lang, Y. & Pandit, A. Biologically Inspired Micro- and Nanoengineering Systems for Functional and Complex Tissues. *Tissue Eng Pt A* 20, 2127–2130, (2014).
5. Moore, S. W. & Sheetz, M. P. Biophysics of Substrate Interaction: Influence on Neural Motility, Differentiation, and Repair. *Dev Neurobiol* 71, 1090–1101, (2011).
6. R.G., H. The reaction of embryonic cells to solid structures. *J Exp Zool* 17, 521–544, (1914).
7. Kleinfeld, D., Kahler, K. H. & Hockberger, P. E. Controlled Outgrowth of Dissociated Neurons on Patterned Substrates. *J Neurosci* 8, 4098–4120, (1988).
8. Xia, Y. N. & Whitesides, G. M. Soft lithography. *Annu Rev Mater Sci* 28, 153–184, (1998).
9. Odom, T. W., Love, J. C., Wolfe, D. B., Paul, K. E. & Whitesides, G. M. Improved pattern transfer in soft lithography using composite stamps. *Langmuir* 18, 5314–5320, (2002).
10. Perl, A., Reinhoudt, D. N. & Huskens, J. Microcontact Printing: Limitations and Achievements. *Adv Mater* 21, 2257–2268, (2009).
11. Ruiz, S. A. & Chen, C. S. Microcontact printing: A tool to pattern. *Soft Matter* 3, 168–177, (2007).
12. Choi, S. J., Kim, H. N., Bae, W. G. & Suh, K. Y. Modulus- and surface energy-tunable ultraviolet-curable polyurethane acrylate: properties and applications. *J Mater Chem* 21, 14325–14335, (2011).
13. Langer, R. & Vacanti, J. P. Tissue Engineering. *Science* 260, 920–926, (1993).
14. Suh, K. Y., Park, M. C. & Kim, P. Capillary Force Lithography: A Versatile Tool for Structured Biomaterials Interface Towards Cell and Tissue Engineering. *Adv Funct Mater* 19, 2699–2712, (2009).
15. Guo, L. J. Nanoimprint lithography: Methods and material requirements. *Adv Mater* 19, 495–513, (2007).
16. Teixeira, A. I., Abrams, G. A., Bertics, P. J., Murphy, C. J. & Nealey, P. F. Epithelial contact guidance on well-defined micro- and nanostructured substrates. *J Cell Sci* 116, 1881–1892, (2003).
17. Kim, H. N., Hong, Y., Kim, M. S., Kim, S. M. & Suh, K. Y. Effect of orientation and density of nanotopography in dermal wound healing. *Biomaterials* 33, 8782–8792, (2012).

## 참고문헌

---

18. Xie, J. W. et al. Radially Aligned, Electrospun Nanofibers as Dural Substitutes for Wound Closure and Tissue Regeneration Applications. *Acs Nano* 4, 5027–5036, (2010).
  19. Yoon, J. K. et al. Enhanced Bone Repair by Guided Osteoblast Recruitment Using Topographically Defined Implant. *Tissue Eng Pt A* 22, 654–664, (2016).
  20. Jeon, H. et al. Directing cell migration and organization via nanocrater-patterned cell-repellent interfaces. *Nat Mater* 14, 918–923, (2015).
  21. Kim, D. H. et al. Guided Cell Migration on Microtextured Substrates with Variable Local Density and Anisotropy. *Adv Funct Mater* 19, 1579–1586, (2009).
  22. Chen, C. S., Mrksich, M., Huang, S., Whitesides, G. M. & Ingber, D. E. Geometric control of cell life and death. *Science* 276, 1425–1428, (1997).
  23. McBeath, R., Pirone, D. M., Nelson, C. M., Bhadriraju, K. & Chen, C. S. Cell shape, cytoskeletal tension, and RhoA regulate stem cell lineage commitment. *Dev Cell* 6, 483–495, (2004).
  24. Dalby, M. J. et al. The control of human mesenchymal cell differentiation using nanoscale symmetry and disorder. *Nat Mater* 6, 997–1003, (2007).
  25. Chen, W. Q. et al. Nanotopography Influences Adhesion, Spreading, and Self-Renewal of Human Embryonic Stem Cells. *Acs Nano* 6, 4094–4103, (2012).
  26. Kim, J. et al. Synergistic effects of nanotopography and co-culture with endothelial cells on osteogenesis of mesenchymal stem cells. *Biomaterials* 34, 7257–7268, (2013).
  27. Harris, A. K., Wild, P. & Stopak, D. Silicone rubber substrata: a new wrinkle in the study of cell locomotion. *Science* 208, 177–179, (1980).
  28. Lee, J., Leonard, M., Oliver, T., Ishihara, A. & Jacobson, K. Traction Forces Generated by Locomoting Keratocytes. *J Cell Biol* 127, 1957–1964, (1994).
  29. Vedula, S. R. K. et al. Emerging modes of collective cell migration induced by geometrical constraints. *P Natl Acad Sci USA* 109, 12974–12979, (2012).
  30. Fu, J. P. et al. Mechanical regulation of cell function with geometrically modulated elastomeric substrates. *Nat Methods* 7, 733–736, (2010).
  31. Park, J. et al. Directed migration of cancer cells guided by the graded texture of the underlying matrix. *Nat Mater* 15, 792–801, (2016).
  32. Miller, A. J. & Mihm, M. C. Mechanisms of disease – Melanoma. *New Engl J Med* 355, 51–65, (2006).
  33. Yang, H. S. et al. Electroconductive Nanopatterned Substrates for Enhanced Myogenic Differentiation and Maturation. *Adv Healthc Mater* 5, 137–145, (2016).
-



## 참고문헌

---

34. Gao, Y. B. et al. Three Dimensional and Homogenous Single Cell Cyclic Stretch within a Magnetic Micropillar Array (mMPA) for a Cell Proliferation Study. *Acs Biomater Sci Eng* 2, 65–72, (2016).
35. Okano, T., Yamada, N., Okuhara, M., Sakai, H. & Sakurai, Y. Mechanism of Cell Detachment from Temperature-Modulated, Hydrophilic-Hydrophobic Polymer Surfaces. *Biomaterials* 16, 297–303, (1995).
36. Elloumi-Hannachi, I., Yamato, M. & Okano, T. Cell sheet engineering: a unique nanotechnology for scaffold-free tissue reconstruction with clinical applications in regenerative medicine. *J Intern Med* 267, 54–70, (2010).
37. Jiao, A. et al. Thermoresponsive nanofabricated substratum for the engineering of three-dimensional tissues with layer-by-layer architectural control. *Acs Nano* 8, 4430–4439, (2014).
38. Engler, A. J., Sen, S., Sweeney, H. L. & Discher, D. E. Matrix elasticity directs stem cell lineage specification. *Cell* 126, 677–689, (2006).
39. Trappmann, B. et al. Extracellular-matrix tethering regulates stem-cell fate. *Nat Mater* 11, 642–649, (2012).
40. Wen, J. H. et al. Interplay of matrix stiffness and protein tethering in stem cell differentiation. *Nat Mater* 13, 979–987, (2014).
41. Weng, S., Shao, Y., Chen, W. & Fu, J. Mechanosensitive subcellular rheostasis drives emergent single-cell mechanical homeostasis. *Nat Mater* 15, 961–967, (2016).
42. Fenno, L., Yizhar, O. & Deisseroth, K. The development and application of optogenetics. *Annu Rev Neurosci* 34, 389–412, (2011).
43. Tischer, D. & Weiner, O. D. Illuminating cell signalling with optogenetic tools. *Nat Rev Mol Cell Biol* 15, 551–558, (2014).
44. Yoo, J. et al. Nanogrooved substrate promotes direct lineage reprogramming of fibroblasts to functional induced dopaminergic neurons. *Biomaterials* 45, 36–45, (2015).

## 국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 멀티스케일 패터닝 기술을 이용한 세포연구와 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

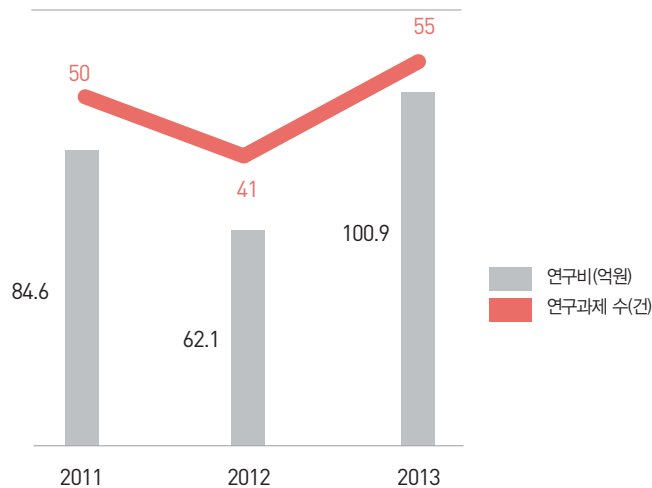
### | 과제 선별 기준 |

연구요약문 내 ((세포) and (패터닝)) or ((세포) and (미세구조)) or (세포패턴) or (세포 패턴) 으로 검색

분석 결과 최근 3년간 총 146건의 과제에 248억원의 연구비가 투자됨

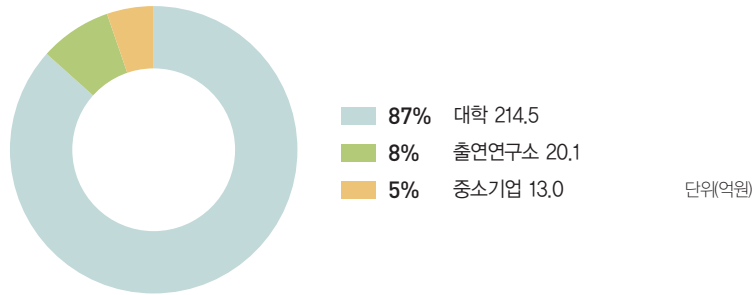
- 멀티스케일 패터닝 기술에 기반한 세포 연구에 대한 투자는 큰 변화 없이 일정한 수준으로 지원이 이루어지고 있는 것으로 나타남

연도별 연구비와 연구과제 건수



연구수행주체 대학을 중심으로 거의 모든 연구(141건)가 이루어지고 있는 것으로 나타남

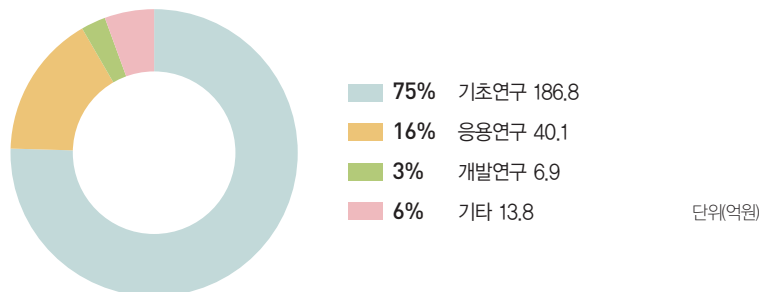
- 기초분야 성격의 연구임에도 불구하고 중소기업에서도 연구개발이 이루어지고 있는 것으로 나타났는데, 이는 제품 표면의 패터닝을 통한 세포의 부착능력 증대에 대한 연구로 향후 임플란트를 비롯한 다양한 인체 삽입용 의료기기에 활용될 수 있는 연구에서도 활발한 연구가 이루어질 것으로 예상됨



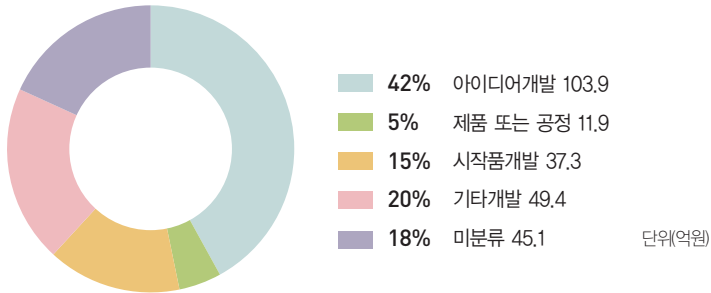
**연구수준** 기초연구 중심의 아이디어 개발, 도입기 연구가 대다수로 나타남

- 개발단계별로는 기초연구가 114건 187억원으로 가장 높게 나타났으나, 멀티스케일 패턴에 따른 세포의 반응 분석 결과를 응용(25건, 40억원) · 개발(6건, 7억원)하는 연구도 일부 이루어지고 있는 것으로 나타남
- 연구개발성격 측면에서는 다양한 패턴에 따른 세포의 반응을 살펴보고자 하는 아이디어 개발(66건, 104억원)과 이를 구현해보고자 하는 시제품개발(25건, 37억원) 중심으로 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
- 기술수명주기적 측면에서는 도입기로 보는 연구가 86건 122억원으로 49%를 차지하고 있으며, 기초연구의 수준이기 때문에 기술수명으로 판단하기 어렵다 보는 연구가 기타(37건, 80억원)로 그 뒤를 이음

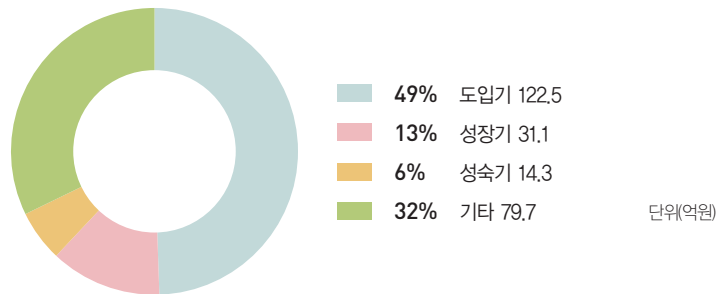
**연구개발단계**



### 연구개발성격

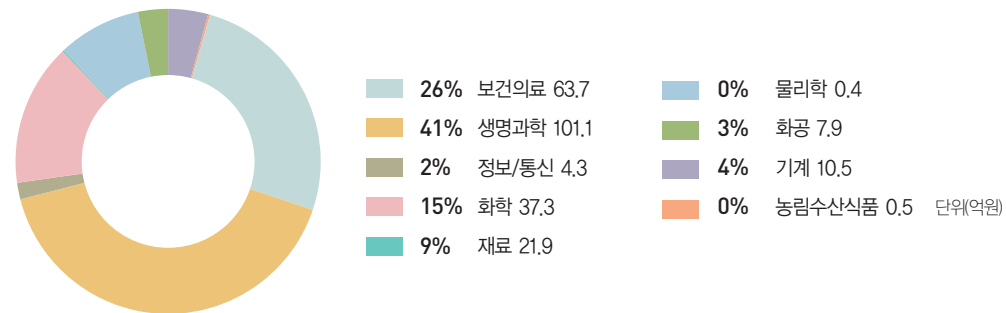


### 기술수명주기

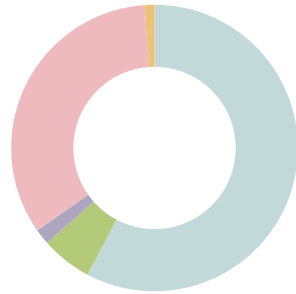


**연구분야** 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 생명과학, 보건의료 중심의 BT 기술과 건강한 생명사회 지향 중심으로 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남

### 연구분야[국가과학기술표준분류]



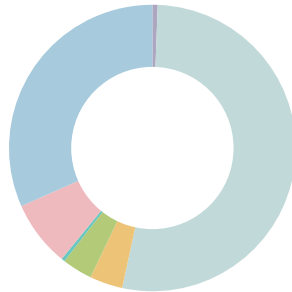
연구분야 [6T]



58%	BT	143.0
6%	ET	14.2
2%	IT	4.3
33%	NT	83.3
1%	포함되지 않음	2.7

단위(억원)

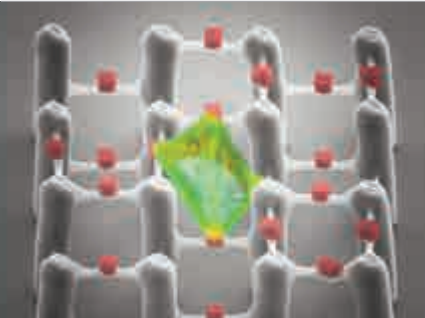
연구분야 [NTRM]



53%	건강한 생명사회 지향	130.7
4%	환경/에너지 프론티어 진흥	9.2
3%	기반주력산업 가치창출	8.5
0%	국가안전 및 위상 제고	0.9
7%	포함되지 않음	18.4
32%	기타	78.4
1%	정보/지식/지능화 사회 구현	1.5

단위(억원)

- 생명과학(101억원, 57건), 보건의료(64억원, 42건) 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타났으나,
  - 그 외에도 화학, 정보/통신, 물리, 재료, 화공, 기계 등 다양한 분야에서도 해당 연구를 위한 많은 연구들이 이루어지고 있는 것으로 나타나 연구의 융합적인 성격을 간접적으로 확인할 수 있었음
- 6T 기준에서는 BT 중심(105건, 143억원)의 연구가 이루어지고 있으나, 멀티스케일 패터닝 자체에 초점을 맞춘 NT(33건, 83억원) 분야의 연구도 활발하게 이루어지고 있는 것으로 나타남
- NTRM 분석 결과에서는 건강한 생명사회 지향 목적의 연구가 79건 131억원으로 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났으나
  - 기초 연구 성격이 많은 분야이기 때문에 기타로 분류되는 연구가 47건, 78억원으로 그 뒤를 이음



**융합연구정책센터**  
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 t. 02-958-4984