

## Sogang Energy-Water Nexus Laboratory

김대중

서강대학교 기계공학과 교수

### 1. 서 론

전세계적으로 화석 연료의 고갈로 인한 이용 가능한 에너지의 부족 현상과 기후 변화 및 수자원의 오염으로 인한 이용 가능한 물의 부족 현상으로 인하여, 대체 에너지원에 대한 연구와 해수를 담수로 변환하는 연구가 주목을 받고 있다. 본 연구실은 에너지와 수처리 기술과 관련된 기계공학적인 연구를 주제로 하고 있으며, 효율적이고 지속 가능한 에너지 및 수처리 시스템을 개발하는 것이 주된 목표이다. 이를 위해서 기존 담수화 플랜트의 엑서지(exergy) 해석을 통한 경제성 분석, 기존 멤브레인 기반 담수화 장치의 문제점을 해결할 수 있는 신개념 나노채널 담수화 장치, 탄소나노튜브에서의 이온의 이동 등의 분자동역학(molecular dynamics) 시뮬레이션, 최근 배터리의 대체 기술로서 제안되고 있는 휴대용 연료전지(micro fuel cell) 및 가스터빈(MEMS gas turbine), 해수/담수 농도차를 이용한 발전 (pressure retarded osmosis, reverse electro dialysis), 이온풍(ion flow)을 이용한 소형 전자장비 및 조명장치의 냉각 등을 연구하고 있다. 이러한 연구들을 수행하기

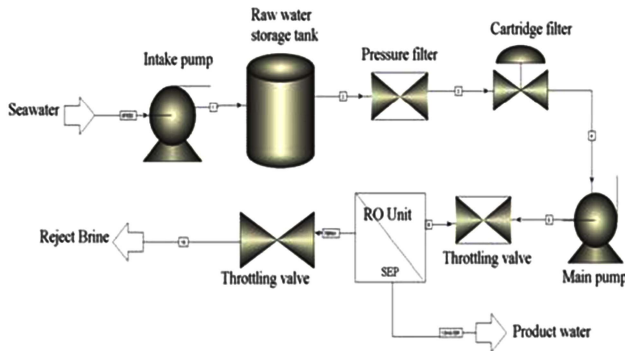
위하여 국방 MEMS 특화센터, 국방과학연구소(ADD), 미국 미시간 대학 등 국내/외 유수한 연구그룹과 지속적으로 협력하고 있다.

### 2. 수처리 기술 연구

#### 2.1 수처리 기술의 에너지 비용 해석

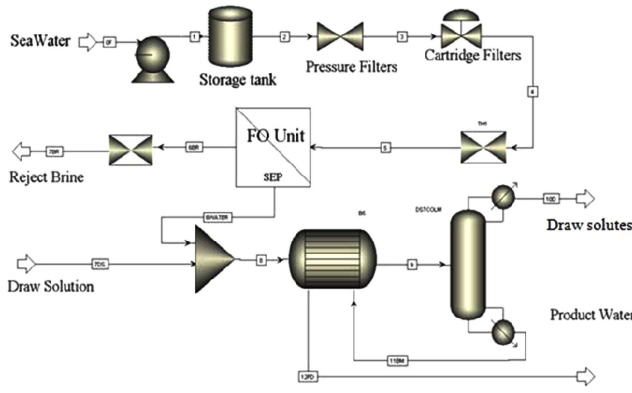
전 세계적인 인구 증가와 산업화로 인해 물 부족에 대한 우려가 높아지고 있다. 그러나 물 부족 문제를 해결하기 위한 강물이나 지하수의 개발은 한계가 있다. 그러므로 지구상 물의 98%를 차지하고 있는 해수의 담수화 기술은 수자원을 안정적으로 확보할 수 있는 방안으로 여겨지고 있다.

해수담수화 기술에는 주로 증발법과 역삼투압법이 사용되고 있으며 막여과를 이용한 대표적인 해수담수화 기술인 역삼투 방식은 고농도 용액에 삼투압 이상의 인위적인 압력을 가하여 멤브레인을 통해 고농도 용액의 물 분자를 역으로 저농도 용액으로 이동시킴으로써 물을 얻는 방법이다. 역삼투 과정은 고압으로 가압하는데 필요한 에너지 소비와 고압의 농축수를 통해



Component	Exergy flow [kW]		$\eta_c$ [%]
	Inlet	Outlet	
Intake pump	10	8.4	84
Storage tank	8.4	7.0	83
Pressure filter	7.0	6.5	93
Cartridge filter	6.5	6.0	92
Main pump	209.9	159.3	76
Throttling valve 1	159.3	96.5	61
RO unit	Brine	-500.5	50
	Permeate	614.9	
Throttling valve 2	614.9	595.7	97

<역삼투를 이용한 담수화 플랜트의 개념도 및 엑서지 해석 결과>



Component	Exergy flow [kW]		$n_c$ [%]
	Inlet	Outlet	
Intake pump	10	8.4	84
Storage tank	8.4	7.1	83
Pressure filter	7.1	6.5	92
Cartridge filter	6.5	6.0	92
Throttling valve 1	6.0	5.7	95
FO Unit	Brine	691.5	99
	Permeate	-9658.7	
Throttling valve 2	691.5	689.2	99
Heat exchanger	-7811	-7818	99
Single column	Distillate	1848	76
	Product	-1164	

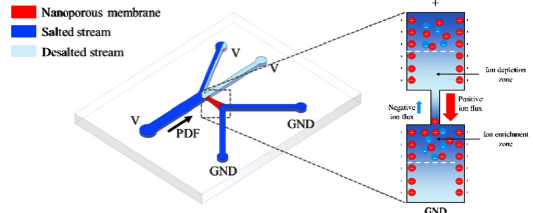
<정삼투를 이용한 담수화 플랜트의 개념도 및 엑서지 해석 결과>

배출되는 에너지 소모량이 크기 때문에 에너지 사용량을 줄이거나 회수하는 등의 다양한 노력들이 수행되고 있다. 최근 적은 에너지를 사용하는 새로운 해수담수화 공정으로 정삼투 공정을 이용한 해수담수화 공정이 주목을 받고 있다. 고농도 용액과 저농도 용액 농도차에 의한 물분자의 이동을 이용한 정삼투 방식은 역삼투 방식과는 달리 고압가압 공정을 필요로 하지 않는다는 장점이 있다.

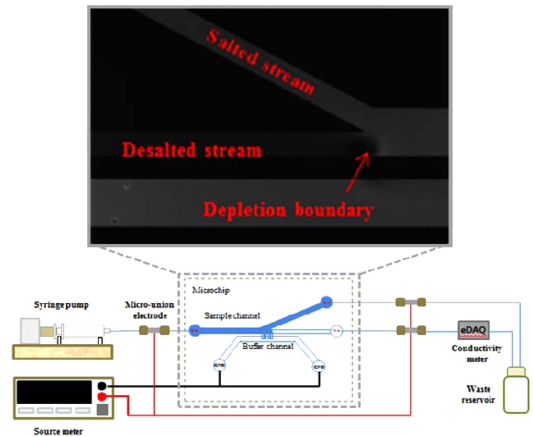
본 연구실에서는 삼투압을 이용한 담수화 기술인 정삼투 방식과 역삼투 방식을 이용한 해수담수화 플랜트에 대한 공정모사 및 이를 이용한 에너지와 엑서지 해석을 수행하고 있으며, 이를 통한 담수화 플랜트에서의 경제성을 평가하고 있다.

2.2 신개념 나노채널 담수화 연구

현재 널리 사용되고 있는 해수 담수화 기술에는 증발법(distillation), 역삼투법(reverse osmosis), 전기투석법(electrodialysis) 등이 있으며 2000년대에 들어서는 정삼투법(forward osmosis) 등 새로운 기술이 각광받고 있다. 이러한 해수담수화 장치는 공장 규모 장치와 제반 시설의 건설을 필요로 하고 있어, 현재 물부족을 겪고 있는 빈곤국가와 재난을 겪고 있는 지역에서는 활용하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구실에서는 최근 급속도로 향상된 마이크로/나노채널 제작 기술을 이용하여 마이크로 시스템 내에서 나노 채널을 형성하여 마이크로/나노 계면을 이루고, 나노채널을 통한 전기장 인가 시 마이크로/나노

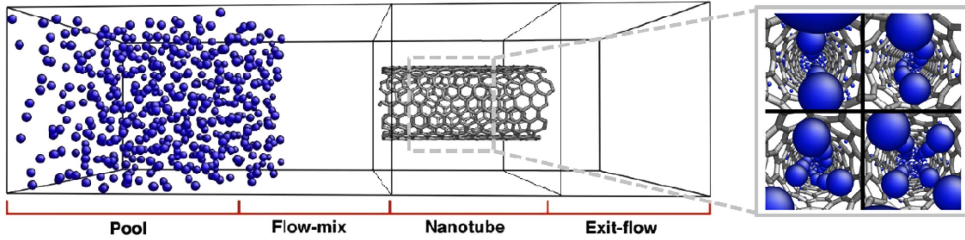


<채널 경계에서의 이온배제 현상의 개념도>



<담수화 장치의 실제 구동 모습 및 실험 구성도>

채널의 계면(interface)에서 이온 배제 영역(ion depletion region)에 기반을 둔 해수담수화 장치를 연구하고 있다. 위 현상을 이용한 해수담수화 기술의 최적화 연구는



<탄소나노튜브 내에서의 분자동역학 시뮬레이션을 위한 구성도>

아직 초창기 단계이며 이러한 연구는 각종 이온의 전달현상과 유체 유동현상, 전기장 현상이 모두 관여하는 다중 물리적으로 접근할 수 있고, 나노 펌 기술과 화학적인 나노 기술 등을 통하여 나노 채널 내부 구조와 내부 재료성질을 제어하고 이를 통하여 기존의 맵브레인 기반 기술을 대체할 수 있는 고기능성 나노 채널 제작과 실험을 진행할 수 있다. 이를 통해 최종적으로 저에너지 소비 및 고효율의 친환경 담수화 공정을 구현하는 것을 목표로 하고 있다.

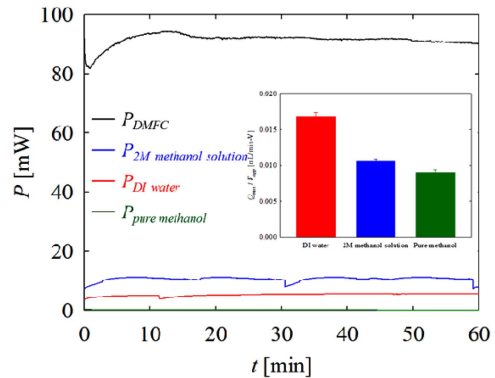
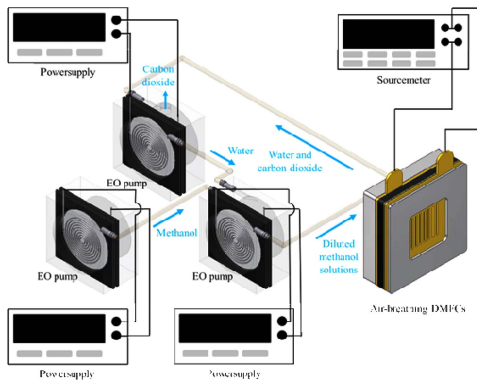
**2.3 분자동역학을 이용한 해석**

나노스케일의 세공(pore)에서 유체의 조절은 여과 및 삼투 기술을 이용하는 다양한 응용분야에서 중요하게 여겨지고 있다. 기존 매크로 스케일의 연속체 모델은 나노스케일과 같이 매우 작은 크기에의 적용이 어렵고, 이로 인해 분자 레벨에서의 해석이 요구된다. 본 실험실에서는 나노스케일의 세공에서 이온과 물의 이동에 대한 연구를 분자동역학적 해석을 통하여 수행하고 있다.

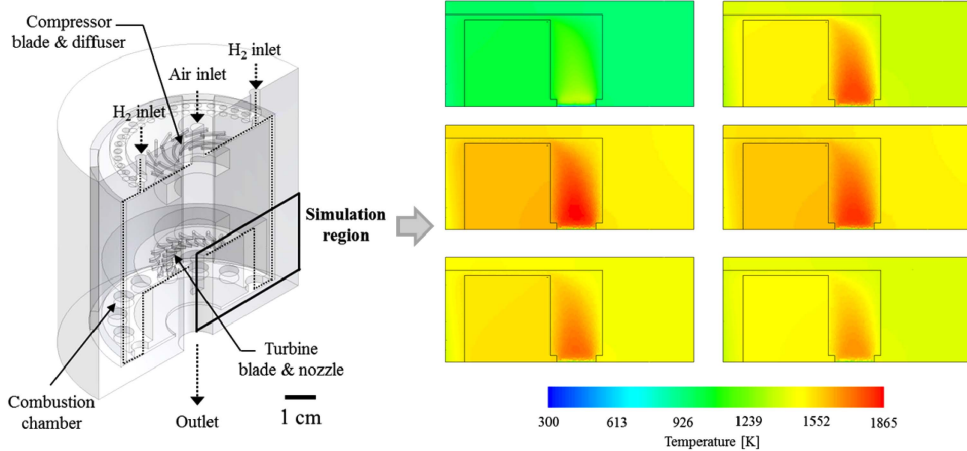
**3. 에너지 기술 연구**

**3.1 휴대용 연료전지 연구**

연료전지(fuel cell)는 작게는 휴대용 전력 공급 장치, 크게는 소형 발전 시스템으로 다양하게 연구되고 있다. 최근 휴대폰, 노트북 등과 같은 휴대용 전자장비들은 다기능화로 인하여 에너지 부족 현상을 겪고 있고, 이를 해결할 방안으로 휴대용 연료전지가 제안되고 있다. 본 연구실에서는 휴대용 연료전지의 성능에 큰 영향을 주는 연료 및 공기공급 장치에 대한 연구를 수행하고 있다. 휴대용 연료전지의 경우 소형화를 위하여 외부 기기를 사용하지 않는 수동적인 연료 및 공기 공급 방법이 주로 이뤄지고 있다. 그러나 수동적인 방법은 유량의 정밀한 조절 및 대상 유체의 원활한 공기 등의 어려움으로 인하여 성능이 저하되는 문제를 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 작은 크기와 적은 소비전력으로 작동할 수 있는 연료 및 공기 공급장치가 요구된다. 본 연구실에서는 직접 메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC)에 적용 가능한 능동형 연료 공급 장치로써 전기침투 현상에 기반을 둔 연료공급 펌프를



<직접메탄올연료전지를 위한 연료순환 시스템 및 연료전지의 출력 및 소비전력 결과>



<초소형 가스터빈의 구성도 및 당량비 변화에 따른 해석 결과>

연구하고 있고, 고분자 전해질막 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)의 공기 공급을 위하여 전자기적인 액츄에이션(electromagnetic actuation)을 이용한 왕복식 공기공급 장치를 연구하고 있다.

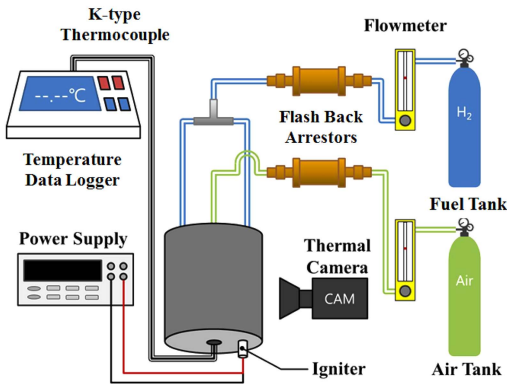
**3.2 초소형 가스터빈 연구**

본 연구실에서는 작은 크기에서 높은 출력 밀도를 얻을 수 있는 초소형 가스터빈(MEMS gas-turbine)에 대한 연구를 포함공대, 경북대와 연합하여 수행하고 있다. 효율적인 초소형 가스터빈의 개발을 위해서는 압축기와 터빈 사이의 단열, 높은 회전 수를 가지는 로터, 연소기 내에서의 안정적인 연소, 효율 개선 등이 요구 된다. 특히, 연소기 내에서의 안정적인 연소

및 압축기와 터빈 사이의 단열 등은 초소형 가스터빈의 안정적인 작동을 위해 매우 중요하다. 이를 위하여 본 연구실에서는 상용화 유체해석프로그램을 이용한 연소기 내부에서의 연료와 공기의 혼합과 연소, 열전달에 대한 연구와 실제 연소기 출구와 연소기 표면에서의 온도 측정을 통한 실험적 연구를 수행하고 있으며, 결과를 활용하여 최적 조건의 초소형 연소기를 개발 중에 있다.

**2.3 해수/담수 농도차를 이용한 발전 연구**

최근 해수와 담수의 농도차 발전(salinity gradient power)이 친환경, 지속 가능성, 전세계적으로 2.6 TW 정도의 높은 잠재적 에너지로 인하여 주목을 받고 있다. 본 연구실에서는 기존 높은 비용을 요구하는 이온교환막(ion exchange membrane)을 대체할 목적으로 전기이중층의 오버랩에 의하여 이온의 선택적 투과성을 가지는 나노 세공을 가지는 멤브레인을 이용한 연구를 수행하고 있다. 기존 이온교환막을 이용한 연구는 20 W 출력의 발전 설비의 제작이 네덜란드의 REDSTACK사에서 수행 중에 있지만, 나노채널을 이용한 방법은 아직 연구 초기 단계에 있다. 또한, 나노채널을 이용한 방법은 이온교환막을 이용한 방법보다 훨씬 높은 출력 밀도를 얻는 것으로 보고되고 있다. 본 연구는 현재 이온의 확산율 등에 의한 실제 성능 변화에 대한 파라메트릭 연구를 수행중에 있으며, 향후 연구실 규모에서 연구 가능한 발전 설비로의 연구가 진행될 것이다.

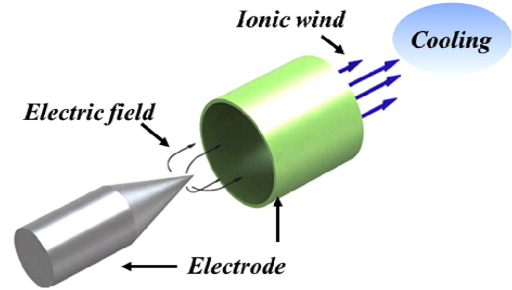


<마이크로 연소기의 실험 구성도>

### 3.4 LED 조명장치 냉각 연구

LED를 이용한 영상 조명은 기존 텅스텐(tungsten)이나 HMI 조명의 한계를 극복하고 여러 이점을 제공할 수 있기에 관심과 적용 의지가 높아지고 있다. 기존 영상 조명 장치에 비해 발열이 훨씬 적고 색 온도 및 밝기를 자유롭게 조정할 수 있으며 에너지 소모가 월등히 낮다는 편의성의 장점이 있다. 현재 국내 기존 방송용 조명 장치 제작을 위하여 LED를 사용한 연구는 초기 적용 단계이며 방송용 조명이라는 특수한 경우는 LED 조명의 무소음 냉각 방식이 주요한 이슈로 떠오르고 있다. 기존의 조명 발열을 감소시키기 위한 냉각 방식으로는 팬(fan)을 이용한 형태, 냉매를 이용한 형태 등이 사용되었으나 방송용 조명이라는 목적에서는 무소음 냉각 방식이 요구된다.

이러한 무소음 냉각 방식을 위하여 이온풍을 사용한 냉각 시스템의 연구가 본 연구실에서 진행되고 있다. 이온풍은 Hauksbee에 의하여 대전된 튜브에서 약한 바람이 생성되는 것이 발견된 이후 많은 연구가 진행되었다. 방전극과 접지극 사이에 전기장이 인가되면 방전극 근처의 기체에 글로우 방전(glow discharge)이 일어나게 되고 이러한 현상을 대기압 조건에서 코로나(corona)라고 한다. 특히 코로나는 방전극과 접지극 사이의 인가된 전압에 의해 기체분자의 움직임을 유발하게 되는데 이를 이온풍이라고 한다. 따라서 이온풍은



<이온풍의 발생원리>

일종의 전기력을 이용한 무소음 풍량 발생기로써 발생된 풍량을 이용하여 LED 조명의 발열을 줄이는 연구를 진행하고 있다.

## 4. 맺음말

서강대학교 Energy-Water Nexus연구실은 신개념 에너지 및 수처리 장치의 연구뿐 아니라 기존 담수화 플랜트의 경제성 분석, 분자동역학 시뮬레이션을 이용한 이온의 이동 등에 대한 근본적인 원리 규명, 소형전자장비의 냉각 시스템 등을 연구하고 있으며 이를 상용화 시스템으로 적용하고자 노력하고 있다.