

신재생 에너지 원천기술 연구 센터 고체산화물 연료전지

글 _ 배중면 센터장
한국과학기술원 기계공학과

1. 원천기술연구센터 지정 배경 및 센터 개요

2009년, 지식 경제부에서는 신재생 에너지 분야 내 원천기술연구센터 설립을 골자로 한 '지식경제부공고 제 2009-135호' (2009년 4월 6일)를 공고하였다. 원천기술 연구센터는 태양광, 풍력, 연료전지 및 해양(조력) 분야로 구성되며, 고체산화물 연료전지 (Solid oxide fuel cell) 연구 센터는 연료전지 내 포함된 센터이다. 고체산화물 연료전지 연구 센터의 연구 책임자인 KAIST 배중면 교수는 수소 및 연료전지 분야에서 20년 이상 연구를 수행하였으며 참여 기관인 서울대, 한양대, 성균관대, 전남대, 전북대 교수님들 역시 오랜 기간 동안 고체산화물 연료전지 연구에 매진하고 있다. 특히, 대표적 융합학문인 고체산화물 연료전지를 연구하기 위하여 본 센터의 연구진은 재료공학, 기계공학, 화학공학 등 다양한 전공 분야로 구성되어 있다.



Fig 1. 센터 개요.

고체산화물 연료전지 연구 센터의 큰 강점은 연구 구성원들의 우수한 연구역량과 국내외 우수 연구기관 및 산업체와의 활발한 교류, 그리고 개발된 원천기술의 기술이전 가능성에 있다. 이를 바탕으로 고체산화물 연료전지를 다학제적 관점으로 연구하여 하나의 학문에서 찾아낼 수 없는 진보된 원천기술이 개발될 것으로 예상된다.

이러한 교류활동을 통해 글로벌 인재육성과 함께 기업이 원하는 맞춤형 인재양성이 가능하다. 그리고 해외 우수 기술의 국내 도입이 가능하며 국내 기술의 해외 홍보를 통한 투자유치 또한 가능하다.

2. 센터 현황 및 목표

본 센터는 기존의 화석연료를 기반으로 하는 사회에서 수소 사회로의 전환에서 꼭 필요한 고체산화물 고체산화물 연료 전지의 원천 기술 개발을 통한 에너지 자립의 기반을 구축함으로써 미래 성장동력 분야의 핵심 기반 기술 확립에 기여 하도록 할 것이다. 또한 고체산화물 연료전지의 특성상 갖는 재료/화공/기계공학 등의 다학제간 교류를 통한 창의적이고 글로벌 경쟁력을 갖는 전문 인력을 육성하고 배출함으로써 산업체에서 요구에 부응하고자 한다. 또한 대일 기술 의존도가 심한 원료 분야에 원천기술을 개발함으로써 대일 무역 적자 해소에 일조 하고자 하며 산학 협력 체제의 활성화로 기술 자문 및 원천핵심 기술을 산업체에 기술 이전을 수행함으로써 신재생 연료전



지 분야에서 세계적 중심지가 되고자 한다.

이를 위해서는 국외의 선진 연료전지 연구기관들과 국내의 연료전지 연구기관들간의 교류가 필수적이다. 이에 본 연구기관은 오래 전부터 고체산화물 연료전지와 관련된 유명 연구기관 및 산업체와 활발한 교류활동을 하고 있다. 대표적인 연구기관으로는 미국의 CFCC, CFC/USC, NFCRC, 독일의 Jülich, 일본의 AIST 및 스코틀랜드의 Univ. St. Andrew 등이 있으며, 공동 연구를 진행중인 산업체로는 사우디아라비아의 Aramco와 국내 포스코파워, 삼성SDI, 전력연구원이 있다.

고체산화물연료전지 센터는 6개 기관(KAIST, 서울대, 한양대, 성균관대, 전남대, 전북대), 7명의 교수, 28명의 학생으로 구성·운영 되고 있다. 특히, 주목할 점은 본 센터 참여 기관 내 교수님들의 전공 학과는 기계공학과, 재료공학과 및 화학공학과로 구성되어 있다. 연료전지 분야는 원천 재료에서부터 화학반응 및 시스템화를 위한 기계공학 분야까지 실로 많은 분야를 요구하는 복합 학문이라 할 수 있는데, 본 센터의 구성진은 이를 모두 아우를 수 있다.

본 센터의 중심적 역할을 할 수 있는 센터장은 KAIST 배중면 교수가 역임하고 있으며, 배중면 교수를 필두로 각 기관들에 의한 연구 결과들을 바탕으로 다양한 세미나를 개최하여 기술교류에 힘쓰고 있다. 세미나는 단순 학술 정보 교류의 장을 넘어서 고체산화물 연료전지 관련 업계 종사자들이 참석하여 시장 분석, R&D 동향 및 선진 기술들의 소개의 장으로 활용되고 있다. 특히 배중면 교수는 이미 여러 중소기업들뿐만 아니라, 대기업들에게 고체산화물 연료전지 소개 및 R&D 동향에 대한 여러 세미나를 개최 진행하고 있다.

3. 센터 연구진

본 센터의 연구진은 센터장은 KAIST 배중면 기계과 교수와 서울대 류한일 교수, 성균관대 이재찬 교수, 한양대 신동욱 교수, 이성철 교수, 전북대 이기태 교수, 전남대 송선수 교수로 총 6개 주요 대학과 7명의 교수진으로 이루어져 있으며 크게 SOFC 전극/전해질(재료) 개발 분야,

SOFC 제조/공정 개발 분야 그리고 SOFC 시스템/설계 분야로 분리하여 연구 개발을 진행 하고 있으며 그 세부 연구 내용은 아래와 같다.

센터장을 맡고 있는 KAIST 배중면 교수 연구팀에서는 SOFC 제조/공정 개발 분야 중 신개념의 고내구성 금속지지체 셀의 제조 공정과 대면적 Joing process 공정 기술 개발을 통해 금속 지지체 셀의 특성 파악과 SOFC 핵심이 되는 대면적화 스택 제조 기술 개발을 수행하고 있다.

이와 더불어 SOFC시스템 구현을 위해 스택과 연동운전이 가능한 고탄화수소 개질 시스템을 개발하여 탄소 침적 억제 운전 조건을 확립에 힘쓰고 있다. 또한 전산해석을 통한 시스템설계, 해석 및 시스템운전 조건 확립에 관한 연구를 수행 중이다.

서울대학교 류한일 교수 연구팀에서는 전극 소재의 이온/전자 이동계수를 확보하고 조성분리/상분해 기구 이론을 정립함으로써 SOFC 전극이 고온에서 장시간 구동될 때의 열화기구를 규명하는 연구를 수행 중이다.

전남대학교 송선주 교수 연구팀에서는 연료극의 특성 향상을 위해 후보 물질군의 전기전도도, 열팽창 계수, 기계적강도등의 특성을 평가하고 SOFC 구동 조건에서 최적의 연료극 개발에 관한 연구를 수행 중이며 또한 개질 가스 사용시 발생하는 연료극의 탄소 침적, 황 피독 그리고 Redox 반응에 의한 성능저하가 적은 연료극에 대한 연구중이다.

성균관대학교의 이재찬 교수 연구팀에서는 제일원리 계산 기법을 이용하여 전해질의 이온 전달 특성을 제안하고 전자전도 제어법을 제안하여 최적의 전해질 설계를 수행하고 있으며 동시에 전해질의 열화기구를 규명하는 연구를 수행하고 있다.

한양대학교의 신동욱 교수 연구팀에서는 ESSD 공정법을 이용하여 SOFC 셀의 성능 저감을 줄이기 위한 초박막 전해질 제조 공정을 확립하며 최적 증착 조건과 열처리 조건을 확립을 위한 연구를 수행 중이다.

전북대학교 이기태 교수 연구팀에서는 금속 소결법(SPS, HFIHS)를 이용하여 연료극/금속 지지체 신제조법을 제안하여 급속한 열처리 방법을 이용하여 입자성장

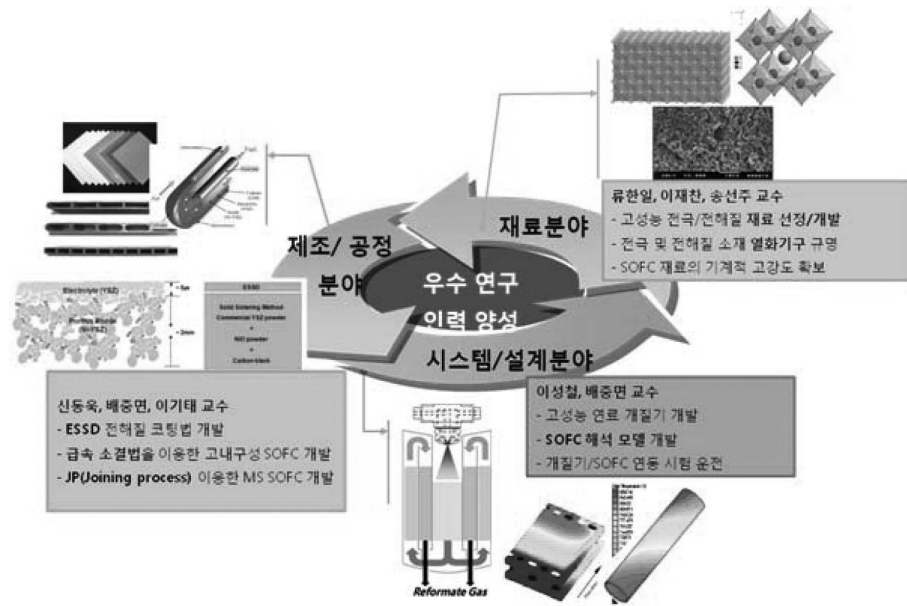


Fig. 2. 센터 연구진과 연구 내용.

을 억제 하는 미세구조 제어하는 연구를 수행 중이며 한양대학교 이성철 교수 연구팀에서는 전산해석을 통하여 SOFC 전기화학/열적 거동을 해석하여 최적 유로 설계 및 스택 모델링에 대한 3차원 모델을 연구중이며 개발된 3차원 모델을 실험을 통한 검증 연구를 수행하고 있다.

4. 센터 대표연구 사례

4.1. 금속지지체 SOFC 셀 대면적화 공정 기술 확보

상대적으로 세라믹 셀은 기계적 강도에 취약하고 또한 스택제작시 가스의 밀봉이 큰 문제로 대두 되어왔다.

Joining process가 적용된 금속지지체 셀의 경우 Tabel 1 에서 확인 할 수 있는 것과 같이 기계적 강도가 수십배 향상됨을 확인 할 수 있었다.

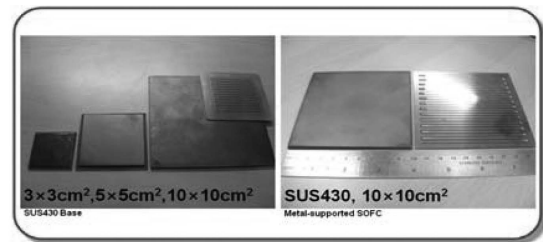


Fig. 3. 대면적 금속지지체 SOFC 셀.

Table 1. 금속지지체 셀과 세라믹지지체 셀의 기계적 강도 비교

	Displacement at yield (mm)	Strain at yield (mm/mm)	Load at yield (kN)	Stress at yield (MPa)	Modulus (MPa)
Ceramic supported cell	0.027	0.024	0.039	0.102	2.857
Metal supported cell	1.109	0.979	0.724	1.895	10.184

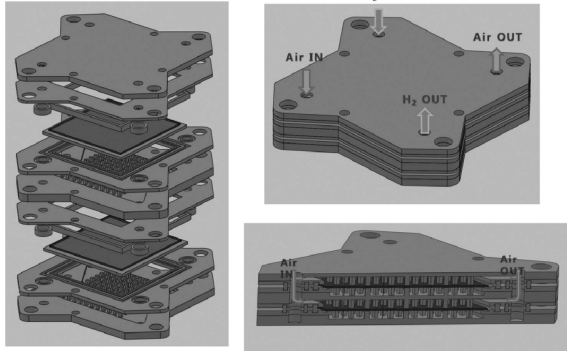


Fig. 4. 금속지지체 스택 디자인.



Fig. 5. 디젤 개질기 개발 과정.

본 연구팀에서는 저가의 금속지지체 대면적 joining process를 개발하였으며 또한 10×10 금속지지체 셀 제작 공정을 개발하였다. 이를 바탕으로 스택 제작을 위한 스택 디자인 하였으며(Fig. 3) 스택 제작을 Fig. 4와 같이 추진하고 있다.

4.2. 1kW급 디젤개질기 개발 및 운전

디젤과 같은 액체연료는 에너지 밀도가 높고 기존의 기반시설을 이용해 공급이 용이하기 때문에 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)의 연료로

써 각광받고 있다. 하지만 탄소침적이 빠르게 일어나고 기화가 쉽지 않아 공급에 어려움이 있다. 이와 함께 액체 연료 개질시 발생하는 에틸렌(Ethylene, C₂H₄)이 연료극과 반응해 탄소침적을 유발하고, 액체연료에 포함된 소량의 황성분이 연료극을 피독하여 SOFC 성능저감의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 센터에서는 3단계에 걸쳐 kW급 디젤 개질기를 개발하였다.

1세대 개질 시스템에서는 디젤 미립화를 위해 초음파 노즐을 적용하였다. 이를 통해 액체상인 디젤과 가스상인 산화제의 혼합을 높임으로써, 디젤 개질기의 성능을 향상시켰다. 2세대 개질 시스템에서는 디젤에 포함된 황성분을 제거하기 위해 디젤개질기와 탈황기 연동 시스템을 구축하였다. 3세대 개질 시스템에서는 통합 디젤 개질 반응을 구성해 개질가스 내 에틸렌과 황성분을 최소화하였고, 이를 통해 양질의 개질가스를 생산할 수 있었다. 통합개질기의 안정성을 평가하기 위해 장기 운전을 수행하였으며, 1500시간의 장기운전에 성공하였다.

4.3. 탄화수소 개질기 소형화

천연가스 및 디젤과 같은 탄화수소 개질기의 상용화를 위해서는 소형화가 중요하다. 개발단계에서는 가루 또는 작은 구 형태의 촉매를 사용하는 것이 일반적이나, 이러한 경우 개질기의 부피가 커지고 내부 압력이 증가하는 단점이 있다. 만약, 압력 증가로 인해 블로어 대신 컴프레서를 써야 할 경우, 전력소모량 10배, 시스템 크기 5배, 시스템 무게 5배 증가하게 된다. 이는 시스템 상용화에 치명적인 걸림돌이 될 수 있다. 내부 압력 감소를 위해 본 센터에서는 마이크로 채널 형태의 촉매를 개발하고 있다.

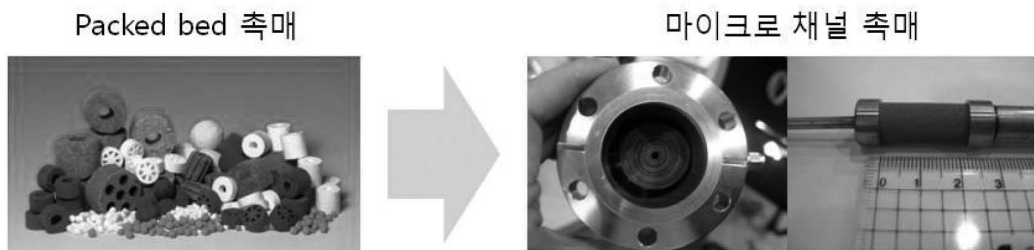


Fig. 6. 마이크로 채널 촉매 개발.

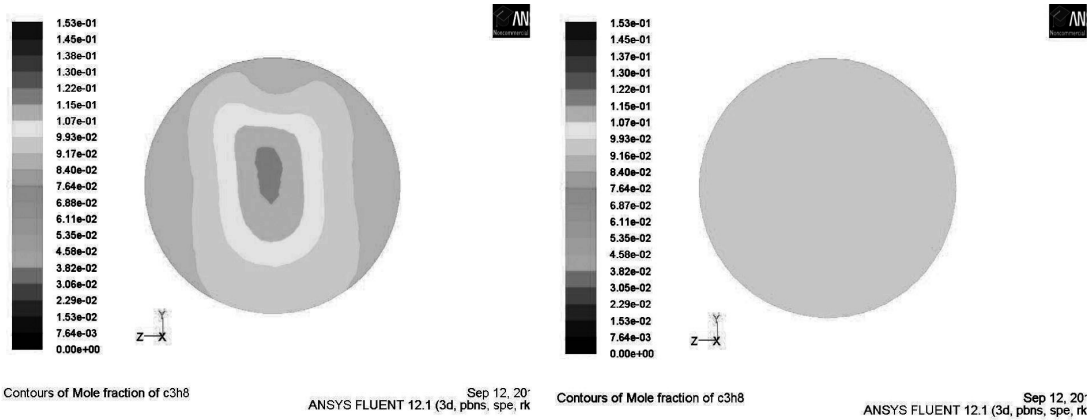


Fig. 7. 촉매층 입구에서의 연료 농도 분포

4.4. 탄화수소와 산화제의 혼합기술 개발

마이크로 반응기에서와 달리 kW급 탄화수소 개질기에서는 반응물을 균일하게 혼합하는 것이 중요하다. 반응물의 분포가 일정하지 않을 경우, 국부적으로 격한 산화반응이나 열분해가 일어나 개질기 성능 감소의 원인이

된다. 본 센터에서는 열유체 전산해석을 통해 이러한 문제에 접근하고 있다. 반응기 내 유동 및 반응물의 분포가 반응기의 형상과 운전조건에 따라 크게 달라지기 때문에 전산해석을 통해 최적의 조건을 도출하고자 한다.

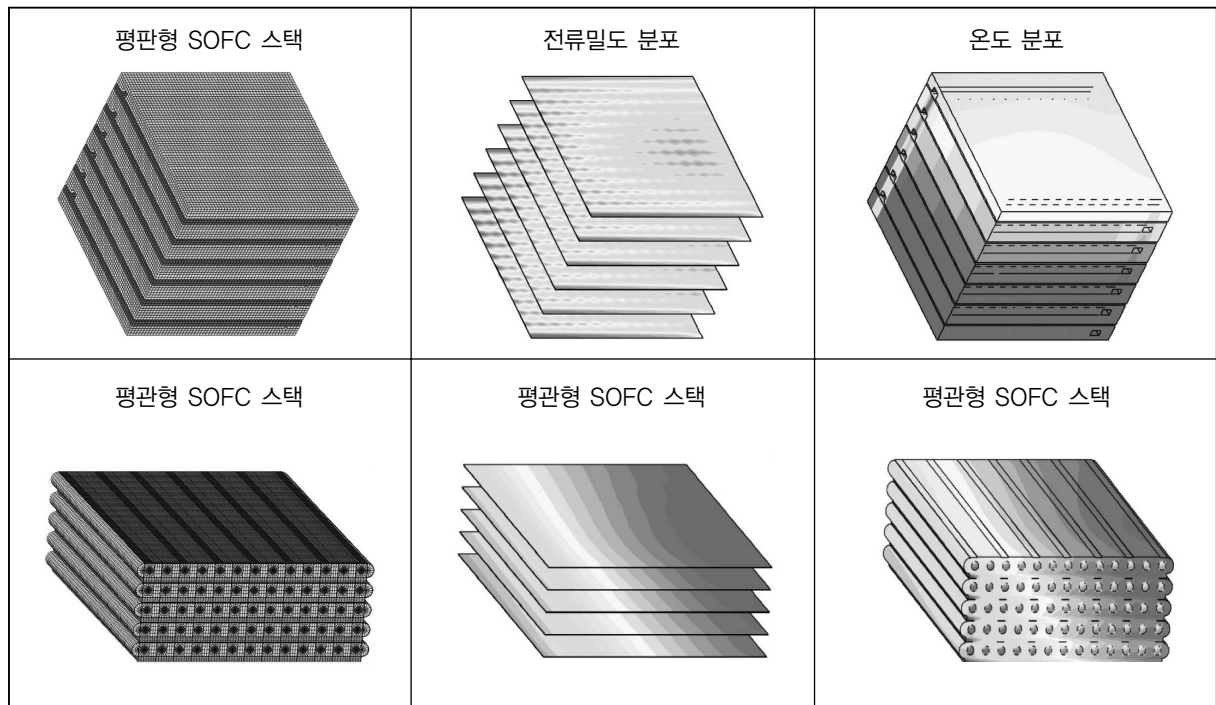
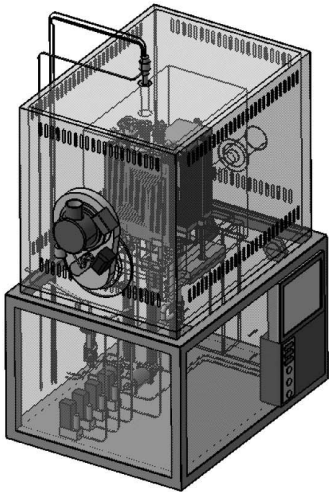


Fig. 8. 다물리적 고체산화물 연료전지 시뮬레이션.

정치형 SOFC 시스템



차량보조동력용 SOFC 시스템

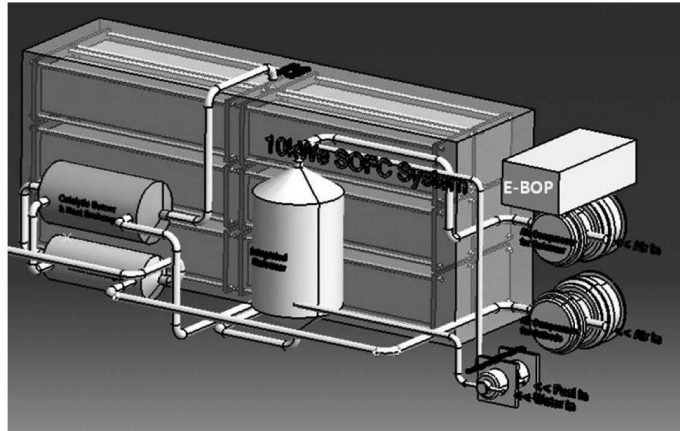


Fig. 9. SOFC 시스템 디자인.

4.5. 고체산화물연료전지 시뮬레이션 기술 개발

고체산화물연료전지는 전기화학반응과 열 및 물질 전달이 밀접한 관련을 맺으면서 동작하기 때문에 정확한 시뮬레이션을 위해서 다물리적 통합해석이 필요하다. 본 센터에서는 해석코드 개발과 실험을 병행하여 높은 신뢰성을 가지는 전산해석 모델을 개발하고 이를 이용하여 전류밀도 분포, 온도분포, 성능을 예측하였으며 다양한 종류의 단전지 및 스택을 설계하였다.

4.6. SOFC 시스템 디자인

SOFC 시스템을 구성하기 위해서 스택과 개질기를 비롯하여 펌프, 블로워, 열교환기, 연소기, 제어기 등 다양한 장치가 사용된다. 시스템의 상용화를 위해서는 제한된 공간 안에 장치들을 배치해야 할 뿐만 아니라 최적 온도유지, 압력손실 최소화, 상호간섭 방지 등의 기술이 필요하므로 전문적인 시스템 디자인 기술이 적용되어야 한다. 본 센터에서는 정치형 SOFC 시스템과 차량 보조동력용 SOFC 시스템을 위한 시스템을 설계하고 시운전을 준비하고 있다.

배중면



- 2소속 : 한국과학기술원 기계공학과
- E-mail : jmbae@kaist.ac.kr
- 연구분야 : Solid oxide fuel cell 시스템, 금속 지지체 SOFC, SOFC 전산 모사, 1kW 급 디젤 연료 개질 연구, 금속 분리판 내 Cr 피독 연구, 탄화수소와 산화제의 혼합기술 연구

이기택



- 소속: 전북대학교 신소재공학부
- E-mail: ktlee71@jbnu.ac.kr
- 연구분야 : 에너지소재, 고체산화물연료전지 (SOFC), 2차전지, 센서

●● 신동욱



- 소속 : 한양대학교 신소재공학부
- E-mail : dwshin@hanyang.ac.kr
- 연구분야 : solid oxide fuel cells, Li-ion thin film battery, nano glass, photonics materials,

●● 송선주



- 소속 : 전남대학교 신소재공학부
- E-mail : song@chonnam.ac.kr
- 연구분야 : Gas(Hydrogen, Oxygen) Separation Membranes, Proton Conductors (Phosphates, Oxides), Solid Oxide Fuel Cells, Conducting Glasses, Functional Electro-Ceramics, Interfacial Properties, Defect Chemistry and Transport Properties

●● 이성철



- 소속 : 한양대학교 화학공학과/수소연료전지공학과
- E-mail : scyi@hanyang.ac.kr
- 연구분야 : SOFC/PEMFC 모델링, 연료전지 전극 최적설계, 나노 복합 재료

●● 이재찬



- 소속 : 성균관대학교 신소재공학과
- E-mail : jcleec@skku.edu
- 연구분야 : 산화물 재료설계 및 물성분석, 투명 산화물 재료연구

●● 류한일



- 소속 : 서울대학교 공과대학 재료공학부
- E-mail : hiyoo@snu.ac.kr
- 연구분야 : 고체산화물연료전지 (Solid oxide fuel cells), 다적층세라믹캐패시터 (Multi-Layered ceramic capacitors), 열전재료 (Thermoelectric materials), 산소투과성 멤브레인 (Oxygen permeation membranes), 온사거 법칙 (Onsager reciprocity)