

고체산화물 연료전지 기술의 현황과 전망

배 중 면 | 한국과학기술원 기계공학과, 교수 | e-mail : jmbae@kaist.ac.kr

이 글에서는 고체산화물 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)의 주요 구성요소인 셀, 스택 및 시스템에 대한 세계적인 기술 수준 및 기술 개발 주요 이슈에 관하여 논의한다. 더불어 국내의 기술 수준에 대한 고찰을 통해 향후 국내 SOFC 관련 기술개발 전략을 수립하고자 한다.

현재 어느 때보다도 환경에 대한 관심이 집중되어 있고, 불안정한 에너지 수급에 대한 경제적인 문제가 부각되고 있다. 이에 맞추어 정부는 광복절 경축사로 '저탄소 녹색성장'이라는 비전을 제시하였으며, 2008년 9월 11일 '그린 에너지 산업 발전 전략'을 발표하였다.⁽¹⁾ 이는 그린 에너지 분야 최초의 통합적 기술 개발 및 산업화 전략이며, 구체적으로 2030년까지 그린 에너지 산업 9대 분야로 세계 시장 점유율 13%를 달성하겠다는 구체적인 목표까지 제시하였다. 특히 그린 에너지 산업의 개념을 3가지(신·재생, 연료청정, 효율성)로 나누고 주요기술에 구체적이고 정확한 목표를 부여하고 있다. 이 중 신 재생에너지의 부분에 태양광, 풍력, 수소연료전지, 석탄가스화 복합발전(IGCC)이 포함되어 있다. 이와 동일한 연장성에서 국외에서도 유사한 정책을 발표하였다. 미국의 버락 오바마 대

령, 영국의 고든 브라운 총리 및 프랑스의 니콜라 사르코지 대통령 등은 환경정책의 중요성을 강조하고 있다.

그린 에너지 산업 발전전략과 연결하여 그림 1에서 정리된 현재 국내의 주요 발전원별 설비용량을 살펴보면 화력발전과 원자력발전이 국내의 발전의 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다.⁽²⁾ 반면 수력 및 그 이외의 발전은 보조 발전원으로서의 역할을 하고 있다. 특히 화력발전의 경우도 도시 및 수요자가 요구하는 전력원과 근접한 위치에 입지할 수 있는 장점을 가질 수 있으나 전력을 발생하기 위해서 사용되는 연료의 사용으로 인해서 공해 및 다이옥신과 같은 인체에 유해한 물질이 배출되고 있다. 또한 원자력의 경우 발전 설비의 입지에 있어서 제한적이며 인체 및 환경에 치명적인 방사능물질에 의한 환경오염이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 오염문제를 줄일 수 있으며 또한 친환경

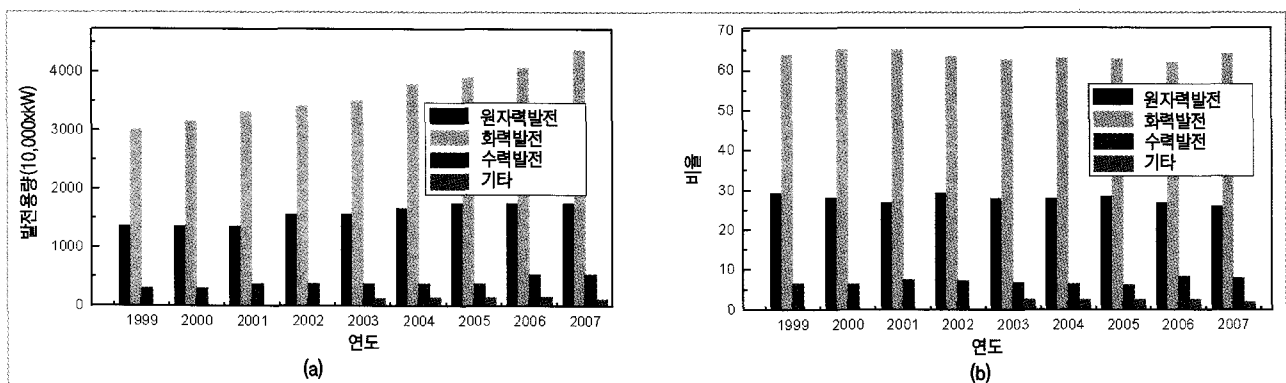


그림 1 국내 발전원별 설비용량(a) 및 발전 비율(b)⁽²⁾

경적인 전력발생장치인 연료 전지가 발전원으로서 많은 관심을 보이고 있다.

연료전지는 전기화학에너지를 전력원으로 직접 변환시키는 에너지변환장치로서 표 1과 같이 다양한 연료전지가 존재하고 있다.⁽³⁾ 특히 고온에서 작동되는 고체산화물연료 전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)는 다음과 같은 특징을 보이고 있다.

- 고효율 발전 및 열병합 발전 특성: 고온의 운전 특성은 자체적인 발전 효율을 높이며 고온, 고압의 배기 가스를 이용하는 가스터빈을 연계할 수 있다.
- 다양한 연료사용의 장점: 귀금속 촉매에 비교하여 상대적으로 저렴한 촉매를 사용하여 연료극 측에서의 직접내부 개질 반응이 가능하며 다양한 액상 및 기상의 연료를 사용할 수 있다.
- 친환경적인 발전: 전기화학 반응에 의해 발전이 되므로 친환경적이며 소음도 거의 없는 저공해 발전방식이다.
- 분산전원: 장소의 제약 없이 빠른 시간 내에 소형화/복합화된 SOFC 발전소를 건설하여 사용할 수 있다.

특히 SOFC의 경우에는 연료전지 기술 중에서도 특징적인 강점을 가지고 있으며 이에 특화된 방향으로의 개발이 진행 중이다.

경제적인 관점에서 장점을 보이는 SOFC의 경우, 높은 효율의 SOFC 발전은 연료의 절약을 통하여 금전적 이득을 가져올 수 있을 뿐만 아니라 궁극적으로는 연료의 절약으로 인한 탄소 배출의 감소로 이어져서 경제성과 함께 환경에도 강점을 보일 수 있다. 최근 탄소 배출권의 거래가 활발한 시점에서 이러한 SOFC의 특징은 경제적 이득으로 이어 질 수 있을 것이다. 이는 기술적인 성숙만 이루어질 수 있다면 기존의 에너지 기관과 비교 우위에 있을 수 있음을 암시한다.

표 1 다양한 연료전지 종류⁽⁴⁾

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
전해질	고분자 수소가 은 전도막	포타슘 수산화 물 매트릭스	용융인산염	용융탄산염	페로브스카이트계 산화물(세라믹)
전극	탄소	전이금속	탄소	니켈과 니켈산화물	페로브스카이트와 페로브스카이트/ 금속서멧
촉매	백금	백금	백금	전극물질	전극물질
작동온도	40~80℃	65~220℃	205℃	650℃	600~1000℃
이동전하	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	H ⁻

기술적 관점에서의 SOFC도 현재의 에너지 수급 방법에 적응이 쉽다는 강점이 있다. 연료의 범용성을 가지는 SOFC는 쓰이는 연료의 불순물에 대한 내성이 있으며 다양한 연료를 통하여 전력을 생산해 낼 수 있다. 따라서 현재의 에너지 수급 체계를 크게 변화시키지 않더라도 기술을 적용할 수 있다. 이러한 장점은 기술이 실 생활에 적용될 수 있는 여지를 넓혀 준다. 또한 시스템에 대한 신뢰도 및 안정성이 상대적으로 높아서 범용 발전 시설에 진입하기에 용이하다고 볼 수 있다. 기술적인 관점에서의 SOFC에 대해서 부연하자면 SOFC 시스템의 경우 크게 SOFC 스택 위주의 스택개발 및 단전지 개발과 SOFC 시스템을 구성하는 보조기기(Balance of Plant, 이하 BOP)로 구분할 수 있다. 현재 스택 및 단전지 개발의 경우 정부지원 하에서 관련기업이 포괄적으로 참여하여 개발을 추진 중이다. 스택 기술은 연료전지 기술 가운데 핵심기술(core-technology)이다. SOFC 스택은 SOFC를 구성하고 있는 단위부품들의 기계적인 총합체일 뿐만 아니라, 물리적 및 화학적으로 전기화학특성을 보이는 집적된 SOFC기술의 총아라고 할 수 있다. 현재 고체 산화물 연료전지의 국내 기술수준은 선진국에 비해 매우 낙후된 상태이다. 최근에 주목할 연구결과는 독일의 올리히 연구소에서 개발된 2개의 SOFC셀로 구성된 F-design의 SOFC 스택의 경우 장기성능 감소율이 1,000시간당 약 0.6%의 감소율을 보이고 있다. 또한 4개의 SOFC셀로 구성된 F-design SOFC 스

택의 경우 1,000시간당 약 0.2에서 0.4%의 성능 감소율을 보이고 있다.⁽⁴⁾ 일본의 경우 SOFC 단전지의 경우 1,000시간당 1.2%의 성능 감소율을 보여주고 있으며 이를 기준으로 20개의 SOFC 단전지로 구성된 스택의 장기성능 감소율의 경우 1,000시간당 약 1.5에서 1.6%의 장기성능 감소율을 보여주고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 우수한 장기성능 감소율의 경우 SOFC 스택의 장기성능 감소율 또는 열화율이라고 하며 발전용 SOFC는 계면의 화학적 불안정성이, 수송용 SOFC 시스템에서는 열기계적 불안정성이 중요한 이슈로 되어 있다. 또한 퇴화는 셀 구성품의 상호 간섭에서 발생할 수 있으며 이는 전해질의 전기전도도의 감소나 Ni 입자의 성김(roughness)과 카본 석출 같은 형태로 나타난다. 음극-전해질, 음극-집전체 계면의 호환성이 중요하다. Sr 성분이 이들 사이에서 검출되어 그들의 계면저항을 증가시키거나 금속 접촉제의 Cr에 의한 음극의 피독과 글라스-세라믹 차단제와 페라이트 접촉제와의 간섭에서 오는 열화 기구(mechanism)를 이해를 바탕으로 하고 있다. 마지막으로 여러 가지의 사이클 즉, 열, 산화환원, 부하의 사이클도 SOFC의 안전 요소이다. 따라서 이들 현상을 저감하는 재료와 공정의 개발이 필요하다. 극히 최근에는 장기 운전 후의 스택/시스템 레벨의 불순물에 의한 영향이 보고되었다. 이러한 장기성능에 문제를 발생시키는 부분에 대한 연구는 선진국에서는 어느 정도 만족할 만한 연구를 바탕으로 우수한 장기성능에 대한 연구를 진행 중이다. 이를 국내의 결과와 비교할 경우 한국전력에서 개발된 SOFC의 스택의 경우 1,000시간당 약 5~6%의 성능 감소율을 보이고 있으며 이는 현재까지 국외의 결과를 비교할 경우 셀 제조뿐만 아니라, SOFC 스택의 제작 및 운영에 있어서 기술적인 격차가 큰 것을 의미하고 있다. SOFC 스택의 구현을 위해서는 전류집진기술, 밀봉기술, 가압시스템 기술, 매니폴드 설계 기술 등 여러 분야의 기술이 필수적이다. 또한 스택의 규모가 커짐에 따라 시뮬레이션을 통한 설계 기술과 스택의 정상운전에 필수적인 운전온도 제어기술, 스택설계 개선, 구조 단순화, 효율 개선, 운전 간소화 등의 기술 개발이 이루어져야 한다. 또한 trial & error 방법으로 SOFC 스택을 제작하고 있는 현실에서 스택의 설계는

아직 초보단계를 벗어나지 못하고 있다. 이를 보완하고 개선하기 위해서는 컴퓨터를 통한 스택 설계 프로그램이 개발되어야 한다. 마지막으로 소재 원천기술의 최종적인 시제품은 스택이 되어야 하며 구성소재 및 부품의 개발도 독립적인 소재와 부품 설계와 함께 스택 구성을 최종적인 설계변수도 고려하여야 하며 재현성과 신뢰성을 확보해야 한다.

BOP의 경우 연료전지를 위한 수소의 생산 및 공급의 기반구조가 미약하고 재생에너지가 아닌 기존 화석연료의 개질에 의한 수소생산이 지배적인 현 시점에서는 기존의 화석연료를 수소로 전환하는 개질시스템이 연료전지 구동을 위해서 반드시 필요하다. 개질시스템의 핵심부분인 개질기는 연료를 화학반응을 통해 수소가 주성분인 합성가스(syn-gas)로 만들어주는 장치를 의미한다. 현재 자동차 등은 수소 스테이션에서 수소를 대량 생산한 후 이를 자동차에 공급하여 저장하는 방식이 유력할 것으로 보이고 있다. SOFC 시스템은 높은 효율과 폐열의 활용을 위해서는 개질기를 발전시스템에 포함시켜야 한다. 특히 연료의 공급라인의 건설이 어려운 격오지의 분산형 전원은 에너지 저장 밀도가 높은 액체연료 즉 디젤, 등유, LPG 등을 에너지원으로 사용하는 것이 적절하고, 따라서 이들 연료의 개질기 개발이 절실하다.

현재의 세계 정세는 지구 온난화를 통하여 환경에 대한 관심이 역사적으로 고조 되어 있는 시점이라고 할 수 있다. 교토 의정서와 발리 로드맵 등으로 선진 기술국가들은 탄소 배출의 규제에 매우 민감하게 움직이고 있다. 따라서 국내에서도 탄소 배출을 규제 하려는 움직임이 일고 있다. 이러한 규제는 시장에서의 친환경 기술의 가치를 높여주고 있으며 제반 기술들에는 범국가적인 투자가 이루어지고 있는 실정이다. 특히 SOFC 분야의 경우 향후 수 년 동안 가장 폭발적인 성장률로 성장할 것으로 예측되고 있다. 이는 환경적인 측면 또한 시장에서의 성장을 촉진하는 순기능을 하는 것으로 짐작 해 볼 수 있다. 이러한 시장이 만들어진다는 예측은 향후 성장할 차세대 산업에 우리나라도 주력해야 할 필요가 있음을 시사하는 것이다.

나노스케일 유동 측정

최근 몇 년간, 많은 연구역량이 미소유체에 집중하게 되면서, 점차적으로 그 크기가 마이크로(micro)에서 이제는 나노(nano)크기에 접근해가고 있다. 특히 바이오칩의 경우에 단일분자의 분석 및 센싱이 가능한 나노소자 칩의 중요성이 부각되고 있다. 이에 따라 나노스케일에서의 유체/열/물질 전달 현상에 대한 이해가 중요하게 제기되고 있다. 또한 앞에서 언급한 바 있는 벽면에서의 미끌어짐(slip) 현상을 정밀하게 관찰하기 위해서는 나노스케일까지의 측정이 필요하다. 그러나 마이크로 PIV의 경우에는 관측면의 수직 방향으로의 정밀도가 대물렌즈의 초점깊이(focal depth)에 의하여 약 $0.5\mu\text{m}$ 정도로 제한되기 때문에 벽면 근처를 관찰하고자 할 때 $0.5\mu\text{m}$ 이내의 영역은 관찰할 수 없다. 이에 따라 evanescent wave 조명을 이용하여 마이크로 PIV의 한계를 극복하고자 하는 연구가 수행되고 있다(Zettner & Yoda, 2003). 이를 나노 PIV(nano PIV)로 명명하기도 하였다. 한편 유사하게 TIRV(total internal reflection velocimetry)가 보고되기도 하였다.(Huang 등, 2006)

맺음말

마이크로/나노 스케일 시스템 설계 및 제작기술의 확보가 미래국가경쟁력의 원천이라는 인식하에 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 막대한 연구비를 투입하여 연구/개발에 박차를 가하고 있다. 마이크로 시스템의 핵심기술은 마이크로유체역학, 마이크로전기전자공학, 마이크로광학, 마이크로기계공학 등이 있으며, 특히 잉크젯 헤드, 랩온어

칩, 생체 내 진단기 등의 유체와 관련된 마이크로 시스템에서는 이들 유체를 제어하는 기술이 핵심이다. 따라서 마이크로 유체제어 기술과 관련하여 마이크로 입자유속계의 기본 원리 및 연구동향 및 최근의 방향에 대하여 개관하였다.

참고문헌

- (1) 이상준, 마이크로채널 내부 유동해석을 위한 마이크로 PIV 측정기술, 기계저널, 2003년 2월호, 32-37.
- (2) D. Byun, J. Kim, H. S. Ko, and H. C. Park, Direct Measurement of Slip Flows in Superhydrophobic Microchannels with Transverse Grooves, Physics of Fluids, 20, 11, 113601, 2008.
- (3) J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, and R. J. Adrian. A particle image velocimetry system for microfluidics, Experiments in Fluids, 25, 316-319, 1998.
- (4) C. M. Zettner and M. Yoda. Particle velocity field measurements in a near-wall flow using evanescent wave illumination, Experiments in Fluids, 34, 115-121, 2003.
- (5) P. Huang, J. S. Guasto and K. S. Breuer. Direct measurement of slip velocities using three-dimensional total internal reflection velocimetry, Journal of Fluid Mechanics, 566, 447-464, 2006.

기계용어해설

수분유출방지관(水分流出防止管; Antipriming Pipe)

물방울과 증기의 밀도차를 이용해 증기만 밸브로 송출함으로써, 수분유출을 막는 보일러에 장치된 관.

일관(유동)작업(一貫(流動)作業; Assembly Line)

컨베이어, 에스컬레이터, 나사 슈트 등 자동 반송장치를 이용, 순서대로 제품을 완성시키는 대량생산을 위한 작업방식. = flow process