



고체산화물 연료전지 발전시스템 기술개발 동향

이영덕, 강상규, 이상민, 안국영 | 한국기계연구원

[요약문]

고체산화물 연료전지는 세라믹 소재의 이온전도성 막과 전극에서의 전기화학반응을 이용하여 전력을 생산하는 장치로서 발전효율이 높고, 배출물 특성이 우수하여 미래형 청정발전기술로 각광받는 기술이다. 더불어 소음이 적게 발생하므로 주로 도심지 건물에 설치되는 분산형 발전시스템으로서 장점을 가지고 있다. 본 동향분석에서는 고체산화물 연료전지 시스템의 개발동향을 살펴보고, 시스템 별 사이클 구성방법에 대한 기술적인 차이점을 비교·분석하였다.

1. 서론

전기에 대한 양적, 질적 수요증가와 함께 분산발전에 대한 관심이 증가하고 있으며, 마이크로 터빈, 가스엔진, 스팀터빈 엔진, 태양광, 풍력, 연료전지 등의 기술을 대상으로 다양한 연구개발이 진행되고 있다^[1]. 이 중에서도 연료전지 기술은 수소경제시대를 대비할 수 있는 고효율·청정 발전기술로 각광받고 있는데, 수kW급 이하 소형 시스템에서는 고분자형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)와 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)를 이용한 연구개발과 실증사업이 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다^[2,3].

소형 연료전지 시스템의 개발용량은 지역에 따라 차이가 있는데 유럽과 미국 등 서구에서는 3~5kW급, 우리나라와 일본, 호주 등에서는 1kW급 이하를 개발목표로 하고 있다. SOFC 시스템의 경우 PEMFC 시스템에 비하여 아직까지 기술의 성숙도는 낮지만, 높은 발전효율을 얻을 수 있고, 고온의 배열을 회수할 수 있으며, 다양한 연료를 적용할 수 있는 장점(Fuel Flexibility)으로 인해 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 1kW급 용량에서 두 가지 연료전지 시스템의 효율을 비교해 보면, PEMFC의 경우에는 약 35%, SOFC의 경우에는 약 45%의 발전효율이 예상되는데, 상용화를 위해서는 시스템 생산가격 저감과 함께 발전효율의 향상이 필요하다^[3].

SOFC 시스템의 효율을 향상하는 방법론으로 연료전지 스택의 전기화학적 성능을 향상하는 방법, 시스템 구동을 위한 BOP (Balance of Plant)의 소비전력을 저감하는 방법, 시스템 구성방법을 최적화하여 효율을 개선하는 방법 등이 제안되고 있다. SOFC 스택에서의 손실은 캐소드 전극에서의 분극손실과 집전체에서의 전기적인 손실이 많은 부분을 차지하므로 이에 대한 개선이 필요하며, BOP 중에서는 가장 많이 기생전력(parasitic loss)을 소비하는 공기 블로워의 효율개선과 인버터의 효율개선이 시스템 전체 효율에 미치는 영향이 크다. SOFC 시스템구성시 스택의 운전방식, 연료개질 열공급 방안, 개질기 스팀공급 방법, 열 교환망 구성방법 등을 조합하면 다양한 시스템 구성이 가능하다.

본 동향분석에서는 분산형 고체산화물 연료전지 발전시스템의 선진그룹이라 할 수 있는 미국/유럽/일본 등의 개발현황을 조사하고, 시스템 개발기관별로 채택하고 있는 사이클 구성방법의 차이를 비교분석하였다.



2. 고체산화물 연료전지 발전시스템

2.1 고체산화물 연료전지의 작동원리 및 종류

고체산화물 연료전지(SOFC, Solid oxide fuel cell)는 세라믹 소재의 전극과 이온전도성 막에서의 전기화학반응(electrochemical reaction)을 이용하여 연속적으로 전력을 생산하는 장치로 정의된다. SOFC는 다른 종류의 연료전지에 비하여 높은 온도에서 작동하는데, 이는 세라믹 전해질이 충분한 이온전도도를 띠는 온도에 의해 주로 결정된다. 전해질 소재의 이온 전도 특성이 우수할수록, 전해질의 제작두께가 얇을수록 낮은 온도에서 작동될 수 있다. 전해질 물질로 널리 이용되는 YSZ (yttria-stabilized zirconia)를 적용하는 경우 전해질의 두께는 대략 5~10 μm 정도인데, 이 경우 750~1000 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 작동되는 것이 일반적이다. SOFC는 제작형태에 따라 원통형(tubular type), 평판형(planar), 그리고 평판형(flatten tubular)으로 구분할 수 있다. 또한 셀 제작시 지지체로 사용하는 물질을 기준으로 애노드 지지체형(anode-supported type), 전해질 지지체형(electrolyte-supported), 캐소드 지지체형(cathode-supported type)으로 구분 가능하며, 인터커넥트로 사용하는 금속을 지지체로 사용하는 금속지지체형(metal-supported type) 연구도 활발하게 진행되고 있다.

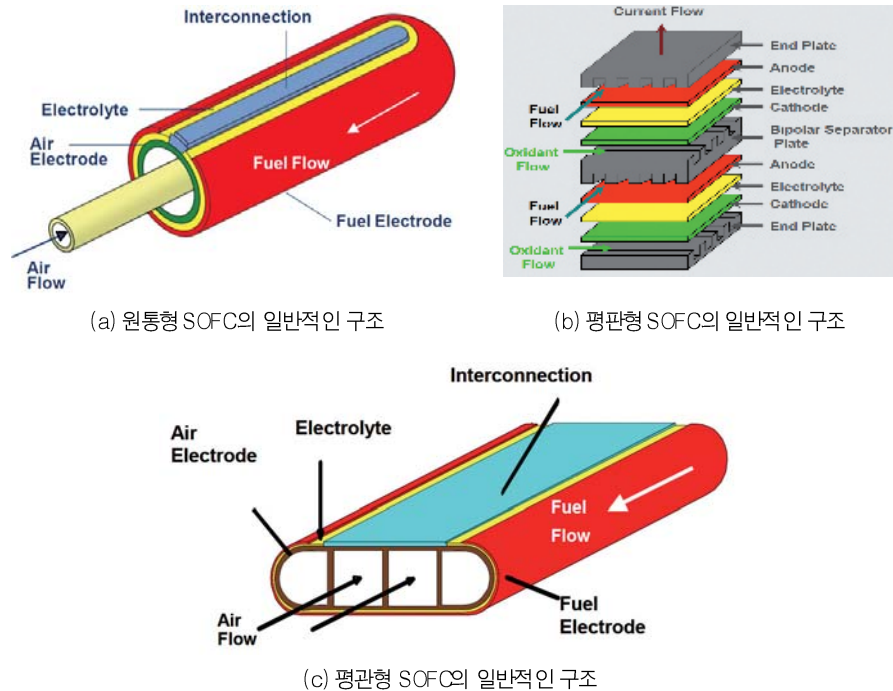


그림 1. SOFC 셀 형상에 따른 분류³⁾

2.2 고체산화물 연료전지의 장단점

앞서 언급한 바와 같이, 고체산화물 연료전지 시스템은 분산형으로 적용가능한 타 발전시스템에 비하여 발전효율이 높다(표 1 참고). 현재 기술수준을 감안하면 1kW급~MW급 정도까지의 시스템 구성이 가능하며 발전효율은 45~65% 정도로 가장 높은 수준이다.

또한 고온에서 작동하므로 탄화수소 계열의 연료를 직접 개질(direct reforming)할 수 있고, 일산화탄소도 연료로 사용되므로 다양한 종류의 연료를 적용할 수 있다. 촉매에 치명적인 황성분에 대한 내구성도 타 연료전지에 비하여

우수하다(표 2 참고).

표 1. 분산형 발전시스템의 용량 및 효율 비교

Type	Size	Efficiency
Micro-turbine	10~300kW	20~30%
PEMFC	<1kW~1MW	34~36%
SOFC	<1kW~1MW	45~65%

표 2. 연료전지 종류별 반응가스의 특징

Gas	PEMFC	MCFC	SOFC
H ₂	Fuel	Fuel	Fuel
CO	Poison	Fuel	Fuel
CH ₄	Diluent	Fuel	Fuel
S	Poison	<0.5ppm	<1ppm

2.3 연료전지 하이브리드 시스템 (Fuel cell hybrid system)

그림 2에 연료전지 단순 발전시스템과 하이브리드 시스템의 개념을 개략적으로 나타내었다. 연료전지에서 전력을 생산하기 위해서는 다른 동력기관과 마찬가지로 연료와 공기를 공급하게 되며, 연료전지 스택에서의 전기화학반응에 의해 전력을 생산한다. 일반적으로 연료전지에서는 공급된 연료를 100% 소비하지 않고 30% 정도의 미반응 연료를 배출하는데, 이를 애노드 오프가스(anode offgas)라 통칭한다. 또한 SOFC는 높은 온도에서 작동하므로 캐소드에서 배출되는 가스도 고온이며, 열역학 2법칙 측면에서 높은 활용도를 가지고 있다.(high quality = exergetically useful)

따라서 위 언급한 애노드 오프가스와 양질의 배출가스를 활용하여 연료전지 스택과 여타 동력발생장치를 적절하게 통합하면 추가적으로 전력을 생산하고 발전효율을 개선할 수 있다. SOFC의 경우 타 연료전지에 비하여 하이브리드 시스템 구성에 유리하여, 다양한 형태의 시스템이 제안된 바 있다.

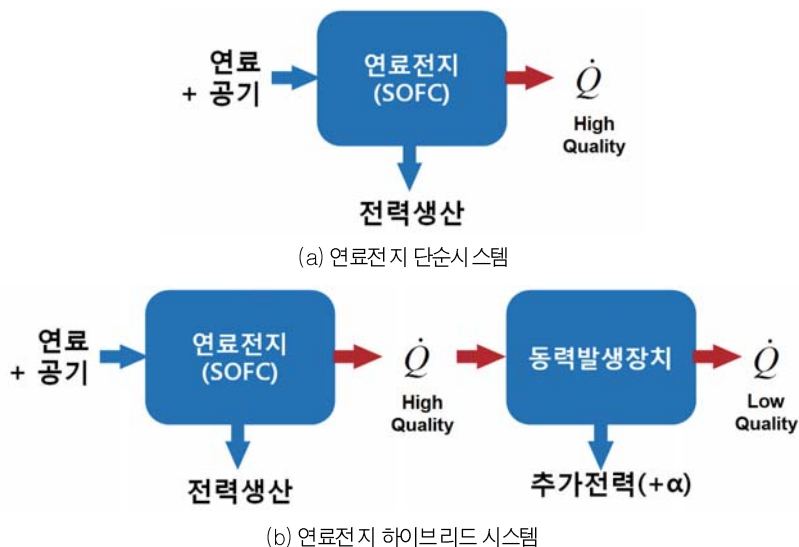


그림 2. 연료전지 단순시스템과 하이브리드 시스템 개략도



3. SOFC 시스템 개발동향 및 사이클 구성방법상의 특징

3.1 동향 분석 범위

본 분석에서는 국외에서 개발되고 있는 수 kW급에서 수백kW급 시스템을 분석대상으로 하였다. 1kW급 시스템으로는 일본의 Kyocera, 호주의 Ceramic Fuel Cell, 스위스 HEXIS, HTCeramics의 4개사의 시스템을 선정하였고, 10~20kW급 시스템으로는 일본의 Mitsubishi Materials, 핀란드의 Convion (구 Wartsila), 수백 kW급 시스템은 영국/미국의 Rolls Royce Fuel Cells (현재는 LG Fuel Cell Systems로 합병), 일본의 Mitsubishi Heavy Industry, 미국의 Bloom Energy사의 시스템을 분석대상으로 하였다.

3.2 수~수십 kW급 SOFC 시스템 개발동향

그림 3에 Kyocera사(일본)에서 개발한 SOFC 단위 셀과 700W급 열병합 시스템의 설치사진을 나타내었고, 그림 4에 사이클 구성도를 나타내었다^[4]. Kyocera사에서는 다양한 형태로 SOFC를 제작하여 왔는데, 현재는 평판형(flatten tubular type)으로 셀/스택을 제작하고 있다.(Circular planar → Rectangular planar → Segmented-in-series flatten tubular → Flatten tubular의 순서로 셀의 형태를 변경함) 스택의 작동온도는 700~750°C, 연료이용율은 70%. 시스템 발전효율은 45.0~46.5% (LHV 기준)로 보고되고 있다. 연료개질을 위해서 외부 개질기(S/C ratio는 2.5)를 채용하고 있으며, 애노드 오프가스는 개질기의 열원으로 활용된다.

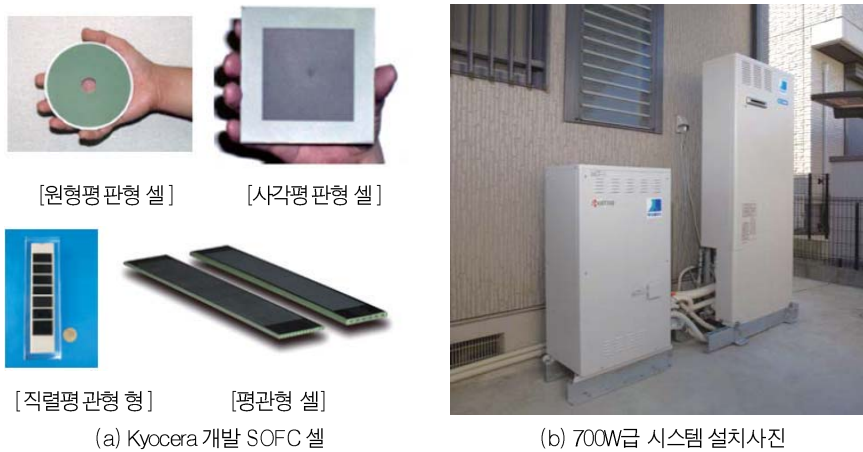


그림 3. Kyocera사 SOFC셀 및 열병합 시스템^[4]

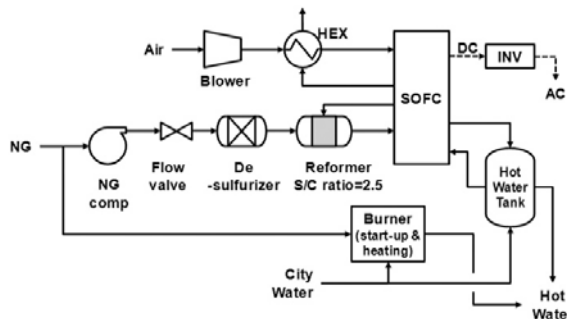


그림 4. 일본 Kyocera사 SOFC 시스템 구성도

그림 5에 Ceramic Fuel Cell Limited사(호주)에서 개발한 SOFC 스택모듈, 고온 BOP 및 2kW급 시스템의 사진을 나타내었고, 그림 6에 사이클 구성도를 나타내었다⁵⁾. ASC 타입의 평판형 셀을 4개 병렬로 연결하여 설계/제작되어 있다. 스택의 작동온도는 700-750℃, 연료이용율은 최대 85%, 시스템 발전효율은 61.3%(LHV기준)로 보고되고 있다. (부분부하 효율은 60.5%@1.5kW, 56.3%@1.0kW) 스택 전단에 Pre-reformer가 설치되어 있으나, 대부분의 연료는 스택 내부에서 개질된다(S/C ratio 20).



그림 5. CFCL社 SOFC 스택, 구성품 및 시스템⁵⁾

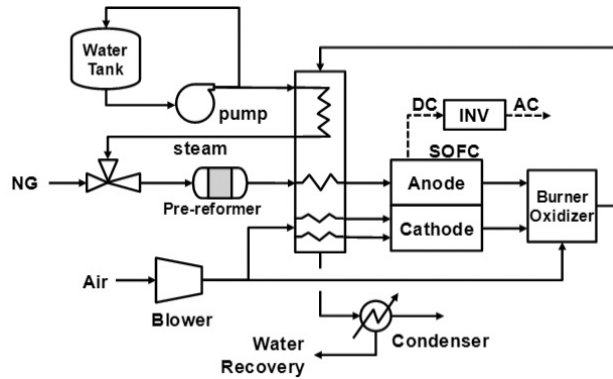
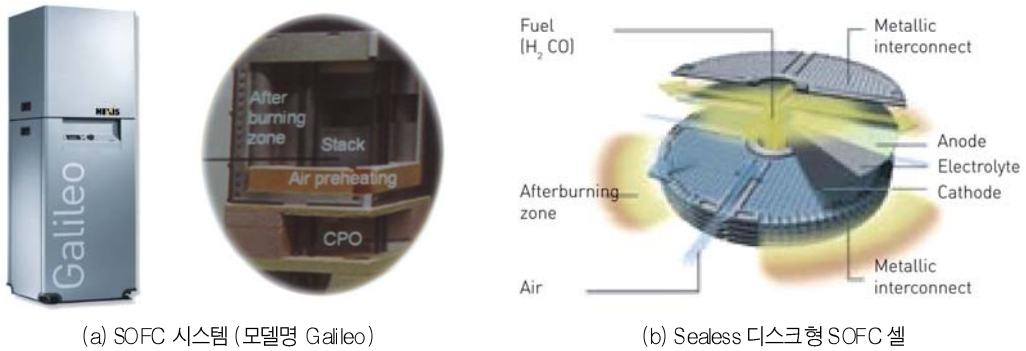


그림 6. 호주 CFCL社 SOFC 시스템 구성도

그림 7에 HEXIS사(스위스)에서 개발한 SOFC 시스템 (모델명 Gallireo)을 나타내었다⁶⁾. 시스템 용량은 1kW급, SOFC 스택은 sealess design의 ESC 타입 셀을 적용하고 있다. 스택의 작동온도는 800-950℃, 발전효율은 25-30% (LHV기준) 수준이다. 개질기로 CPOX를 적용하고 있기 때문에 전력효율은 타 시스템에 비하여 낮은 편이나, 외부에서의 물공급이 필요없어 시스템이 단순해지고, 유지/보수가 용이한 장점이 있다(그림 9 참조). 애노드 오프가스는 스택외부 고온부에서 자발화에 의해 연소시키는 방식을 채택하고 있다.



(a) SOFC 시스템 (모델명 Galileo)

(b) Sealess 디스크형 SOFC 셀

그림 7. HEXIS사 SOFC 시스템^[1]

그림 8에 HTCeramix(스위스)와 SOFC Power(이탈리아)에서 공동으로 개발하는 SOFC 모듈을 나타내었다^[7]. SOFC 스택은 타원형 형태의 평판형 구조이며, 스택의 작동온도는 800°C, 발전효율은 25-30% (LHV기준) 수준이다. HEXIS와 마찬가지로 CPOX 개질기를 적용하고 있으며, 개질기, 열교환기, 연소기 등의 고온부품을 HotBox™에 통합하였다.

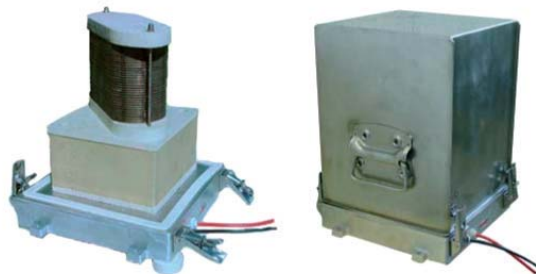


그림 8. HTCeramics/SOFC Power사의 SOFC HotBox™^[7]

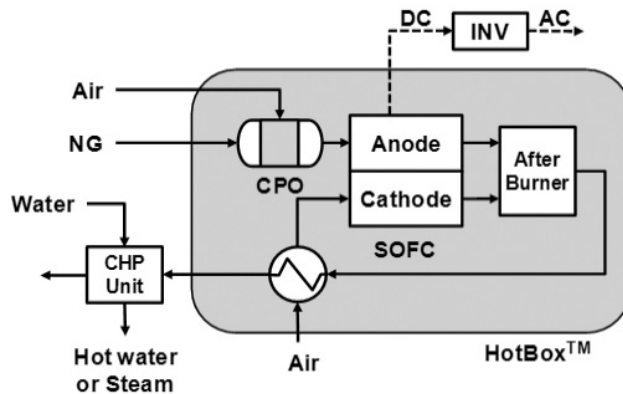
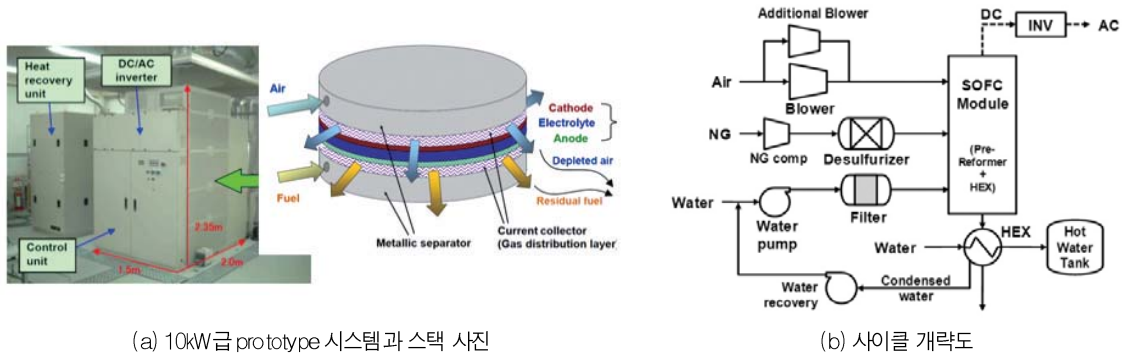


그림 9. CPOX 개질기 시스템의 사이클 구성도

그림 10에 Mitsubishi Materials와 Kansai Electric(일본)에서 개발한 10kW급 SOFC 시스템 프로토타입의 사진과 사이클 구성도를 나타내었다^[8]. ESC 타입의 원형-평판형 셀과 sealess design(HEXIS와 유사)을 채용하고 있으

며, 1kW급 소형 스택 16기를 모듈화하여 10kW급 스택을 구성하였다. 스택 작동온도는 780°C, 발전효율은 44.6% (LHV기준)이며, Pre-reform과 함께 스택내부개질을 이용하고 있다. 전해질로 LSGMC를 사용하고 있으며, 시스템 온도제어를 위해 보조블로워를 설치하고 있다.

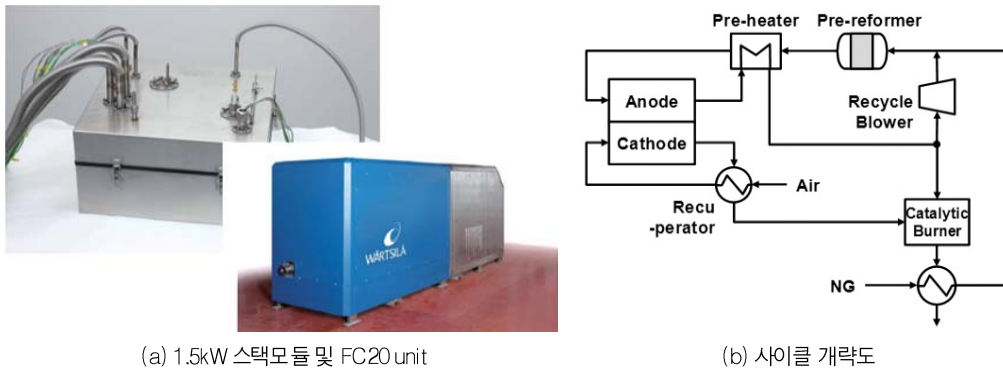


(a) 10kW급 prototype 시스템과 스택 사진

(b) 사이클 개략도

그림 10. Mitsubishi Materials 사의 SOFC 시스템⁸⁾

그림 11에 Convion사(구 Wartsila, 핀란드)와 TOFC(덴마크)에서 개발한 20kW급 프로토타입 시스템 및 스택 모듈의 사진과 사이클 구성도를 나타내었다^[4, 10]. 스택모듈은 TOFC에서 개발하고, 전체 시스템은 Wartsila에서 통합하였다. ASC 타입의 평판형 스택이며, 작동온도는 770°C, 연료이용율은 70-77%, 발전효율은 42% (LHV기준) 수준이다. 애노드 오프가스의 일부를 재순환함으로써(블로워 이용) 외부 물공급 없이 수증기 개질을 하고 있으며, S/C ratio는 1.5로 보고되었다. 중장기적으로 시스템 용량 50kW급, 53%의 효율을 목표로 하고 있다.



(a) 1.5kW 스택모듈 및 FC20 unit

(b) 사이클 개략도

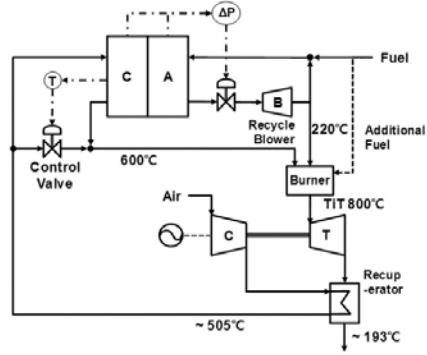
그림 11. Convion사(구 Wartsila)의 SOFC 시스템^{8, 10)}

3.3 수백 kW급 SOFC 시스템 개발동향

그림 12에 Mitsubishi 중공업(일본)의 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 사진과 사이클 구성도를 나타내었다^[11, 12]. 가압형(~3 bar) SOFC와 마이크로 가스터빈 연계하여 200kW급 시스템을 구성하고 4000시간 동안 운전결과가 보고되었다.(정격조건에서 SOFC의 출력은 176.3kW, 마이크로 터빈의 출력은 34.8kW, BOP 전력소비는 7.1kW 수준) 스택의 작동온도는 850-900°C이며, 발전효율은 52.1%(LHV 기준)을 달성하였다. 애노드 오프가스를 일부로 재순환하고 있으며, 마이크로 터빈의 터빈입구온도(TIT)가 800°C가 되도록 보조연료를 공급한다.



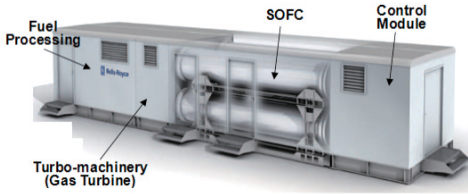
(a) 200kW급 SOFC/GT 시스템 사진



(b) 하이브리드 시스템 사이클 개략도

그림 12. Mitsubishi 중공업의 SOFC/GT 하이브리드 시스템^[11, 12]

그림 13에 Rolls-Royce Fuel Cell(미국/영국)의 SOFC 셀, 하이브리드 시스템용 마이크로 터빈과 시스템 전체 그림을 나타내었다^[13]. (현재는 우리나라 LG에서 지분의 51%를 인수하여 LG Fuel Cell Systems로 사명이 변경) 스택의 작동온도는 860°C, 작동압력은 3~7 bar, 목표효율은 53%(LHV 기준) 수준이다. 그림 14에 나타낸 바와 같이 이젝터나 블로워를 이용하여 캐소드 출가스를 재순환함으로써 공기예열용 고온열교환기를 없애는 독창적인 사이클을 고안하였다. 또한 이젝터로 애노드 오프가스의 일부를 재순환함으로써 개질기에 필요한 수증기를 공급하는 방식을 채용하였다. 지속적으로 연구가 진행되고는 있으나, 아직까지 시스템 수준의 운전결과는 보고하고 있지 못하다.



(a) 250kW급 SOFC/GT 시스템 그림

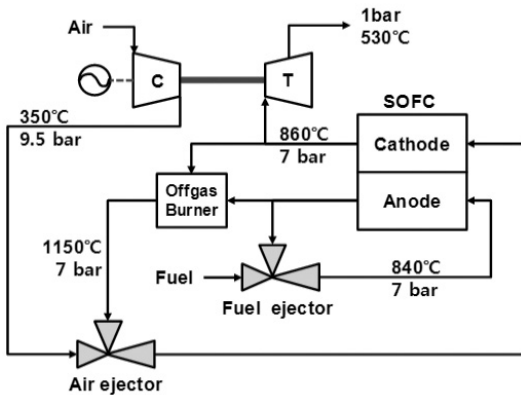


(b) 평판형 SOFC 셀

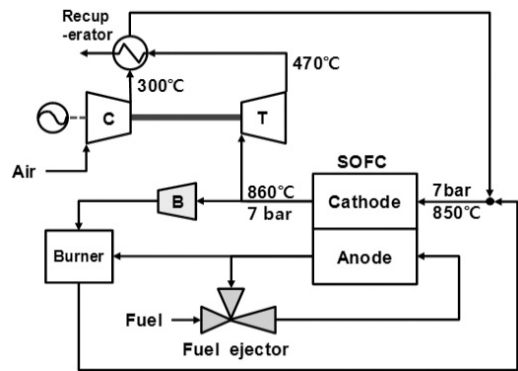


(c) 마이크로 터빈

그림 13. Rolls-Royce Fuel Cell(현, LG Fuel Cell)의 SOFC/GT 하이브리드 시스템^[13]



(a) 듀얼 이젝터 적용 방법



(b) 재순환 블로워와 recuperator 이용방법

그림 14. Rolls-Royce Fuel Cell의 사이클 구성도

그림 14에 BoomEnergy(미국)의 SOFC 시스템과 스택 사진을 나타내었다^[14]. ESC 타입의 평판형 스택을 이용하고 있으며, 1kW급 스택을 적층하여 25kW급 모듈을 구성하고, 이를 4개 통합하여 100kW급 시스템을 구성하는 방식을 취하고 있다. 전해질 주재료로 저온 전도성이 우수한 ScSZ (scandia stabilized zirconia)를 사용하고 있다. 스택의 작동온도는 1000℃, 발전효율은 50% 수준으로 보고되고 있다. 미국내 e-Bay, FedEx, Walmart 등에 45MW를 누적 보급하였다.

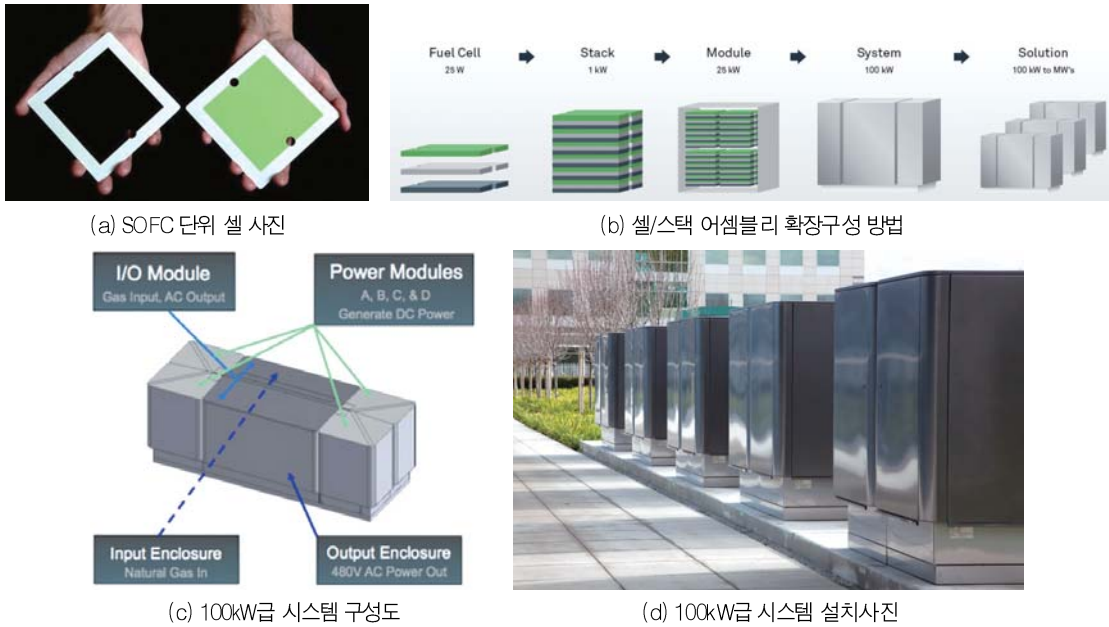


그림 15. Bloom Energy SOFC 시스템^[14]

3.4. SOFC 시스템 사이클 구성방법의 특징 요약

시스템 사이클 구성방법 조사결과, 대부분의 시스템에서 SOFC의 내부 개질 특성을 활용하여 소형의 전-개질기(pre-reformer)만을 장착하고 있으며, 외부개질기의 부하를 최대한 줄이고 있었다. 중대형 시스템의 경우에는 애노드 오프가스(anode offgas)를 재순환하여 연료 이용율을 극대화하고 있으며, 재순환을 위해 블로워나 이젝터를 적용하고 있었다. 다만, 소형 시스템에서는 애노드 오프가스 재순환을 적용하고 있지 않았다.

캐소드로 공급되는 공기를 예열하기 위하여 캐소드에서 배출되는 가스(cathode offgas)에 열교환기를 설치하여 열을 회수하거나, 연소기(after burner) 후단에 열교환기를 설치하여 열을 회수하고 있었다. 제조사에 따라 캐소드 오프가스 후단에 설치된 열교환기만을 이용하거나(Kyocera, Convion), 연소기 후단에 열교환기 설치하고 있었다(CFCL, HEXIS, HTCeramix). 대형 가압형 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 경우에는 터빈 출구에 열교환기(recuperator)를 설치하여 공기를 예열하거나(MHI), 캐소드 오프가스를 재순환하여 열을 회수하는 방식(RRFC)을 적용하고 있었다. 연료개질시 Pre-reformer를 거쳐 스택내부에서 개질하는 경우에는 Pre-reformer를 지난 후에 연료를 예열하여야 하는데, 애노드 오프가스의 열을 회수하거나(Wartsila), 연소기(after burner) 후단에서 열을 회수하고 있었다(CFCL).



4. 결 론

원자력 발전의 위험성, 신규 대형 발전소의 건설부지 확보의 어려움 등으로 인해 분산발전기술의 중요성이 증가하고 있고, 셰일가스의 개발로 인해 천연가스 가격이 안정화되면서 경제성면에서도 과거에 비해 유리해지고 있다. 또한 도심지의 미세먼지 문제가 심각해지면서 청정-분산형 발전기술의 수요는 급격하게 증가할 것으로 예상된다.

SOFC 발전시스템은 고효율, 청정 발전기술로 도심지 분산 발전시스템에 가장 적합한 기술이라 판단되나, 경제성이 확보되지 못하여 아직까지 상용화되지는 못하고 있다. SOFC 시스템의 효율 개선, 제작단가 저감, 내구성 개선 등 다양한 연구개발이 진행되고 있으므로 향후 충분히 경쟁력 있는 제품이 개발될 것으로 기대하며, 시스템 상용화를 위해서는 연료전지 재료에 대한 연구뿐만 아니라 시스템 최적화, BOP 개발 등의 공정 최적화 연구도 활발히 진행될 필요가 있다 하겠다.

❁ 참고 문헌

- [1] 오시덕, "분산발전으로서 열병합 발전기술의 현황 및 전망", 대한설비공학회 소형 열병합 발전 기술세미나, 2005
- [2] Laminié, J. and Dicks, A., 2003, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Subhash C. Singhal, Solid oxide fuel cell: status, challenges and opportunities. Finnish solid oxide fuel cell conference, June 29, 2006
- [4] Kayahara, Y., 2008, "Residential CHP Program by Osaka Gas Company and KYOCERA Corporation", Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [5] Föger, K., 2008, "SOFC Micro-CHP of Ceramic Fuel Cells Ltd. - Products for Today", Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [6] Nerlich, V., Schuler, A., 2008, "Galileo 1000 N from Hexis - Cogeneration with SOFC for Residential Application", Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [7] Olivier Bucheli, Thomas Zähringer, Massimo Bertoldi, Jan Van herle, Stefan Diethelm, Customer-Oriented Design, Manufacturing and Thermal Integration of SOFC Stacks at SOFCpower, Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [8] Takashi Miyazawa, Kei Hosoi, Satoru Yamasaki and Futoshi Nishiwaki, Disk-Type Seal-Less IT-SOFC CHP System Development, Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [9] <http://www.convion.fi>
- [10] Helge Holm-Larsen, Claus V. Andersen, Joachim Jacobsen, Søren Primdahl, Mette Juhl Jørgensen, Niels Christiansen, SOFC for m-CHP, APU and Distributed Generation - Application-Driven Development, Testing and Manufacture, Proceeding of European Fuel Cell Forum 2008
- [11] Omata, T., Kimura, T., Yamamoto, Y., Nishikawa, S., 2007, "Current Status of the Large-Scale Stationary Fuel Cell Demonstration Project in Japan", Proceeding of Fuel Cell Seminar 2007, pp. 59-62
- [12] Yoshinori Kobayashi, Development of Extremely High Efficiency Power Systems, Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycle System, Journal of Fuel Cell Science and Technology 2010, Vol. 10, No. 1, pp 56-62
- [13] LG Fuel cell Systems - Overview Presentation, Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee, April 23-24, 2013

[14] www.bloomenergy.com

[15] Sung Ho Park, Young Duk Lee, Kook Young Ahn, Performance analysis of an SOFC/HCCI engine hybrid system: System simulation and thermoeconomic comparison. Int J Hydrogen Energy 2014;39:1799-1810

[16] Xiongwen Zhang, S.H. Chan, Guojun Li, H.K. Ho, Jun Li, Zhenping Feng, A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. J Power Sources 2010;195:685-702



이 영 덕

· 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부
환경기계시스템연구실
· 관심분야 : 연료전지 하이브리드 시스템, 가스터빈
하이브리드 시스템, 에너지 시스템 경제
성 및 환경영향 분석
· E-mail : ydlee@kimm.re.kr



강 상 규

· 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부
환경기계시스템연구실
· 관심분야 : 연료전지 시스템 모델링/시뮬레이션,
개질시스템
· E-mail : kyu2613@kimm.re.kr



이 상 민

· 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부
환경기계시스템연구실
· 관심분야 : 연료전지 촉매연소기, 순산소 연소,
에너지 시스템 제어
· E-mail : viclee@kimm.re.kr



안 국 영

· 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부
환경기계시스템연구실
· 관심분야 : 연료전지 하이브리드 시스템, 가스터빈
연소기, 플랜트 엔지니어링
· E-mail : kyehnr@kimm.re.kr