

가스터빈 / 연료전지 혼합발전용 고체산화물 연료전지 개발

송락현, 임탁형, 정 현, 백동현, 신동열
한국에너지기술연구원
{rhsong, ddak, jungh, dhpeck, drshin}@kier.re.kr

1. 서론

세계적으로 전력발전설비는 고 효율화와 함께 규모의 거대화를 통한 집중 관리방식이 선호되었으며, 이를 목적으로 동력장치의 기술 개발이 이루어져 왔다. 이러한 대규모 설비를 중심으로 구성된 중앙관리 시스템은 효율적 시스템 관리라는 측면에서는 큰 장점을 가지고 있으나, 근래에 들어서는 몇 가지 결정적인 문제점들로 인하여 더 이상의 규모 확대에 대한 당위성에 의문이 던져지고 있다. 대표적인 문제점으로는 대규모 설비는 건설기간 등을 고려할 때 폭발적으로 증가하는 전력 수요를 정확히 예측하여 대처하기 힘들고, 장거리 송전 등으로 인한 부가적 손실이 크며, 순간적 부하 증가 등에 대처하기 힘들다는 것 등이다. 이러한 문제점을 보여주는 예로는 최근 미국 캘리포니아 주에서 일어난 바 있는 대규모 정전 사태이다. 이 사태에는 물론 여러 가지 다른 사회 경제학적 문제가 내포되어 있긴 하지만, 근본적으로 대규모 발전 및 송전 설비에 의존한 시스템이 지니고 있는 위와 같은 한계들이 실제로 큰 문제를 야기할 수 있음을 단적으로 보여주는 예라고 하겠다.

이에 따라 앞에 언급된 문제점을 극복하고자 전력 공급 구조도 중앙 집중 발전형으로부터 분산 발전형으로 변화되고 있다. 이러한 차세대 동력원의 요구 조건으로는 기존의 동력원에 비하여 열효율이 높아 경제성이 우수하여야 하며, 현재 인류가 당면하고 있는 최대 현안인 환경문제에 적합한 환경 친화적이어야 한다는 것이다. 공해 배출물이 적어야 한다는 것은 이미 대규모 발전설비를 비롯한 모든 산업 현장에서 지켜져야 할 필수 사항이지만, 특별히 전력의 수요처에 가깝거나 바로 수요처에 위

치하여야 하는 소형 시스템에서는 그 요구조건이 더욱 강화될 것은 자명하다.

이러한 측면에서 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)는 여타 발전 시스템에 비하여 여러 가지 장점(고효율, 고성능, 고급폐열, 연료의 다양성)을 구비하고 있으나, 실용화에는 상당히 후미에 있는 느낌을 지니고 있다. 이는 구성소재가 모두 세라믹을 근거로 하기 때문이며, 소재의 제조공정 및 부품양산, 기술의 확립 등이 필수적으로 이루어져야 한다.

연료전지의 기본원리는 탄화수소계열의 연료에 포함된 수소와 공기 중의 산소를 전기 화학적 반응을 통해 직접 전기를 생산하는 것으로, 1960년대 미국의 우주선 전력공급용 연료전지 발전기 개발이 기술개발의 동기가 되었으며, 미국, 일본 등의 선진국에서는 1970년대 초기부터 실용화를 위한 연구개발을 본격적으로 시작하였다.

선진국의 경우 현재까지 고체산화물 연료전지 발전시스템은 주로 분산전원용, 대형발전소용으로 기술이 개발되어 왔으나 최근에는 가정용 소형 열병합 발전시스템, 자동차용 및 이동전원용으로도 많은 연구개발이 진행되고 있다.

특히 3세대 연료전지인 고체산화물 연료전지는 ① 종래의 다른 연료전지에 비해 복잡한 외부 개질 시스템이 필요 없으며, ② 백금 등의 귀금속 전극촉매를 사용하지 않고 ③ 액상전해질에 의한 부식문제가 발생하지 않는 등 저온형 연료전지에서 발생하는 여러 가지 운전상의 문제점을 최소화시킬 수 있다는 장점과 동시에 발전시스템으로 3단계 복합발전(고체산화물 연료전지 발전 - 가스터빈 발전 - 증기터빈 발전)이 가능하다. 전기발전온도는 500°C 이상에서 이루어지며, 적절한 단열을 통해 운전온도 유지가 가능할 뿐 아니라 다양한 연료를 사용할 수 있으며 운

전온도 범위가 넓다. 더욱이 가스터빈과 복합발전시 거의 70%에 가까운 전기발생효율을 가지고 있기 때문에 미국, 일본 등 선진국에서 기술개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 다양한 장점을 갖고 있는 반면에 대부분의 구성요소들이 세라믹과 고온 금속소재로 구성되어 있고, 고온에서 운전되는 전기 화학적인 신 발전 기술이기 때문에 전극, 전해질, 연결재 등의 구성요소 및 전지의 설계요소와 관련하여 여러 가지 기술적인 문제점을 갖고 있다. 또한 선진국에서 실증중인 발전시스템의 경우 전극, 전해질, 연결재의 제조가 EVD, 플라즈마분사법 등 고가의 건식공정으로 이루어져 있어 실용화시 경제성 확보에 어려움을 겪을 것으로 판단되며, 실용화를 앞당기기 위해서는 저가의 제조공정 기술이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

이러한 고체산화물 연료전지의 전극과 전해질로 구성된 구성소재 제조공정기술과 단위전지 및 스택 제조는 극한 환경조건에서도 내구성과 장기 안정성을 결정하는 핵심기술로서 가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발에 없어서는 안 되는 중요한 역할을 한다. 이와 관련된 국내의 기술은 선진국과 상당한 격차를 나타내고 있으며, 특히 고체산화물 연료전지는 기반기술 연구 수준에 머물고 있는 상태이다. 더욱이 한국의 연료전지의 요소기술, 연료전지의 설계 및 제작 기술, 발전시스템을 일본과 비교해 볼 때 약 10년 정도의 차이가 나는 것으로 판단되며, 선진국과의 기술격차를 빠른 시간 내에 줄이기 위해서는 이들 핵심기술의 개발이 시급히 이루어져야 한다.

이러한 관점에서 본 고에서는 연료전자-가스터빈 혼합 발전 시스템의 핵심기술인 가압형 고체산화물 연료전지의 발전시스템 기술내용을 중심으로 가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템의 원리 및 특징, 연료전지/가스터빈 하이브리드 발전시스템의 국내외 기술개발 현황, 한국에너지기술연구원에서 수행하고 있는 프로젝트의 연구내용과 향후 계획 및 전망 등을 기술하였다.

2. 가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템의 원리 및 특징

분산발전 시스템에서 가장 중요한 것은 효율이 높아 경제성이 우수해야 한다는 것이다. 현재 가장 열효율이

높은 발전방식은 또 다른 형태의 복합 시스템인 가스터빈/증기터빈 혼합형 발전시스템으로 60%에 가까운 열효율이 가능하다. 그러나 가스터빈/증기터빈 혼합형 발전은 고효율 발전의 측면에서 분산 발전에 적합하나 소형화할 수 없는 단점이 있고 설사 소형화가 가능하다고 하더라도 이에 따른 효율저하가 반드시 수반된다. 한편, 열효율 측면에서 연료전지는 다른 분산 발전용 동력원에 비해 이론적으로는 매우 높은 효율을 가질 수 있으나, 실제로는 스택설계 기술의 한계로 인해 현재로는 50%를 넘기 힘든 형편이다. 따라서 현실적인 대안은 연료전지를 실증된 기술력을 지닌 마이크로 가스터빈과 효과적으로 (synergically) 결합시켜 단순 연료전지 발전 시스템의 한계효율을 넘는 고효율 발전시스템을 구성함으로써 분산 발전에 적합한 소형화와 고 효율화를 동시에 이루는 것이다. 미국에서는 연료전지 계열 발전방식의 기술개발 단계를 계획하고 이미 Vision 21 프로젝트(에너지성(DOE)주관)의 일환으로 대형 가스터빈 발전 방식과 함께 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템이 중소 규모의 발전 설비 적용을 목표로 장기적으로 착수되고 있다.

가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템은 두 기기의 장점을 극대화시켜 고효율화를 이룬다. 즉, 가스터빈은 중대형에서 효율이 어느 정도 높은 수준에 이르렀지만 소형에서는 아직도 효율이 상대적으로 낮으며, 배출물 특성은 여타 열기관에 비하여는 우수하나 연소 제어가 용이한 대형 가스터빈에 비하여 상대적으로 좋지 않다. 한편 연료전지의 최대 약점은 제작비용이 높다는 것인데 이는 가스터빈과 용량을 나눈으로서 어느 정도 해결이 가능하다. 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템의 예상 효율을 다른 열기관의 효율과 비교할 경우, 1MW 미만의 규모에서도 기존의 대형 발전용 시스템에 맞먹는 효율을 보이며, 대형의 경우 그 효율은 여타 다른 기관들에 비하여 월등히 높을 것으로 예상된다.

3. 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템 및 고체산화물 연료전지의 국내외 개발현황

가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템 (국외):

미국은 최근 캘리포니아 전력난 사태를 계기로 대통령

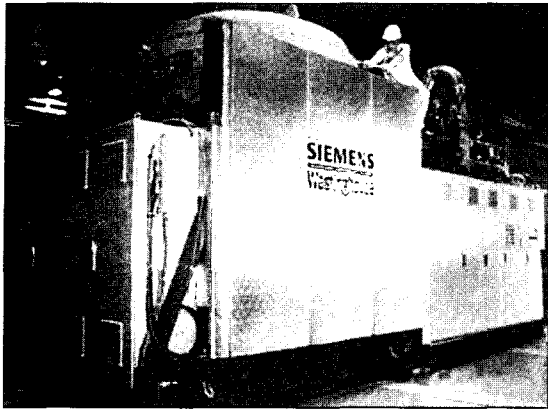


Fig. 1. 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템 (Siemens-Westinghouse, 220 kW).

이 직접 전력수급 산업의 개편작업을 진두지휘하고 있다. 미국의 전력수급 산업 개편의 기본은 화석연료를 사용한 발전설비 시설 및 지식기반 산업사회에 부합하는 분산형 시스템의 확충에 있으며 이러한 기초가 지속될 수록 고효율 화석연료 발전설비에 대한 관심이 점차적으로 증대될 전망이다. 또한, 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템은 화석연료를 사용하는 발전설비 중 최고 효율을 낼 수 있는 설비로서 발전 시스템의 고효율화에 크게 기여할 수 있는 제품으로 평가된다. 미국은 1990년대 말부터 에너지성(DOE) 산하 국립에너지기술연구소(NETL : National Energy Technology Laboratory)를 중심으로 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템 개발사업을 추진해오고 있다. 이 사업의 첫 결실로 2000년도 중반 Edison Technology Solutions(ETS)사에 의해서 Siemens-Westinghouse사의 SOFC형 연료전지와 Ingersoll Rand사의 마이크로 가스터빈으로 구성된 전체 효율 56%를 낼 수 있는 220 kW급 제품 시제 개발을 완료하였다(Fig. 1). 이 시제기는 2002년 3월 현재 California-Irvine 대학에서 성공적으로 인수시험을 마친 후 1000시간의 내구성 테스트에 들어갔다. 그 후 이 사업은 장기적으로 2015년까지 단계별 기술 개발을 지속해나갈 계획이며, 장기적인 최종 목표인 효율 80%이상의 제품 개발이 실현될 경우, 지금까지의 기존 열동력 시스템 성능 한계를 넘어서는 혁신적인 변혁이 이루어질 것으로 예상된다. 위의 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템 개발과제 이외에도 2002년 현재 DOE 주도로 진행되는 중장기 하이

Table 1. 미국 DOE 주관 하이브리드 시스템 연구개발 과제

TITLE	Institute & Company
SOFC Hybrid System for Distributed Power Generation	Honeywell, Inc.
Pressurized Solid Fuel Cell/Gas Turbine Power System	Siemens-Westinghouse Power Corp. Rolls-Royce Allison
A High Efficiency PSOFC/ATS-Gas Turbine Power System	Siemens-Westinghouse Power Corp. Caterpillar Inc.
Fuel Cell/Micro-Turbine Combined Cycle	McDermott Technology, Inc. Ingersoll-Rand (NREC, previously)
High Efficiency Fossil Power Plants(HEFPP) Conceptualization Program	FuelCell Energy Allison Engine Company

브리드 시스템 연구개발 과제들만 총 5개 (Table 1)이며 다수의 관련요소 기반기술이 진행되고 있다. 미국 DOE 주도로 그동안 추진되어오던 각종 에너지 개발사업을 종합하여 기획된 새로운 차원의 에너지 개발사업인 Vision 21사업에 포함되어 추진될 계획이다. Vision 21의 궁극적 목표는 "21세기형 무공해 발전설비의 구축"으로 설정되어 있으며, 이를 뒷받침하기 위한 요소기술로는 가스터빈, 연료전지 그리고 가스터빈/연료전지 혼합시스템 개발사업의 주요 목표 및 일정에 당초 DOE 산하 NETL이 계획하였던 내용이 수정 없이 반영되어 있다.

일본에서의 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템은 고효율 분산 발전 시스템 차원에서 그 활용이 검토되고 있다. 특히, 나라 전체가 크고 작은 섬들로 이루어져 있어 중앙에서의 전기공급을 위해 확보해야할 인프라를 고려하면 독립된 발전시스템을 갖는 것이 효율적일 수 있다는 발상에서 이 부분의 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 경우에는 넓은 국토 때문에 전기적으로 고립되어 있는 지역(예를 들면 사막한 가운데의 가스 스테이션이나 레스토랑)이 많으므로 애초에 인프라의 구축보다는 독립된 발전을 구축하는 정책을 써왔고 효율의 측면에서는 그리 크게 문제 삼지 않았다. 하지만 일본의 경우에는 미국만큼 큰 국토가 아니기 때문에 중앙 집중식 전기공급 시스템과의 가격경쟁에 있어서 분산발전 시스템의 고효율화 문제는 크게 대두된다. 이러한 측면에서 다른 분산 발전시스템에 비해 효율이 월등히 높은 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템은 매우 적합하다고 할 수 있다.

일본 내의 가스터빈/연료전지의 혼합형 발전 시스템 연구는 교토대학을 중심으로 5개 대학과 일본의 기계기술연구원이 참여한 '초소형 가스터빈, 고도 분산 에너지 시스템'의 프로젝트가 시작되면서 본격화되었다. 기업과는 독자적으로 시스템 개발 전반에 걸친 연구를 수행하여 앞으로 다가올 실질적인 상용화에 일도를 하자는 취지에서 시작되었다. 현재 구체적인 시스템 구성, 시스템의 최적화 및 가 구성부의 운전과 관련된 세부연구 등을 약 9개 연구그룹으로 나뉘어 연구를 진행 중이다.

고체산화물 연료전지 분야 (국외):

미국은 에너지성(DOE)과 전력연구소(EPRI)를 중심으로 연구개발 프로그램이 진행되고 있다. DOE의 경우 원통형 고체산화물 연료전지를 집중적으로 지원하고 있으며, 2002년까지 2억 달러를 투자하여 가스터빈/고체산화물 연료전지 복합발전시스템인 가압형 220 kW, 1 MW, 2 MW 발전시스템을 개발하는 프로그램을 1997년부터 진행하고 있다. 또한 상용화를 위해 100 MW 생산설비를 확충하고 고체산화물 연료전지 발전의 경제성 확보를 위해 발전 시스템의 가격을 kW(ac)당 1300달러로 감소시키는 것을 목표로 하고 있다. 원통형의 경우 일본의 세라믹 제조업체와 협력하여 원통관의 제조 및 전극 제조공정을 개선시키는 연구를 진행하고 있다. 미국의 경우 VISION 21 프로그램에 혼합발전용 연료전지 개발을 포함시켜 실용화에 박차를 가하고 있다. EPRI는 주로 소형 고체산화물 연료전지 개발을 지원하고 있으며, Ceramtec, Ztek 및 기업들의 컨소시엄으로 만든 고체산화물 연료전지 전문회사인 SOFC₂사 등 기업체와 연구소등에 연구비를 지원하고 있으며, 수 kW의 스택을 개발하였다. 가스연구소(GRI)도 고체산화물 연료전지의 연구개발에 투자하고 있으며 기업체, 연구소 등에 스택 개발과 실용화를 위한 기반기술 연구 등을 추진하고 있다. 그밖에 DOD, NASA, NIST 등에서도 각자의 목적에 따라서 일정액의 연구개발비를 투자하여 고체산화물 연료전지 기술 개발을 추진하고 있는 상황이다.

일본의 고체산화물 연료전지 연구는 NEDO의 지원하에 New Sunshine 프로그램으로 진행되고 있다. 지금까지 주로 평판형 고체산화물 연료전지를 많이 연구 개

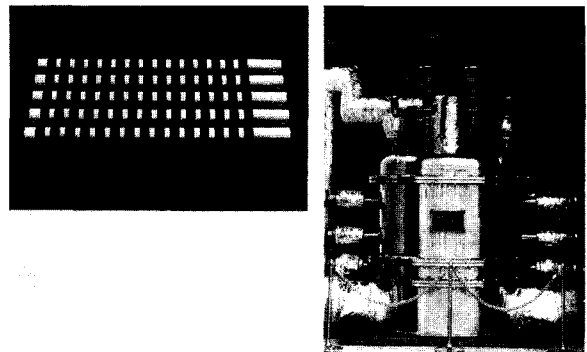


Fig. 2. 일본 미쯔비시 중공업의 20 kW급 SOFC 스택 시스템.

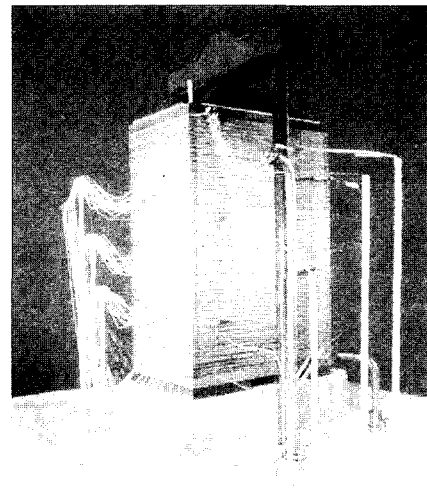


Fig. 3. 독일 울리히 연구소의 10 kW급 SOFC스택.

발하여 왔으나, 기술적인 문제점과 개발 속도 등을 감안하여 원통형 구조도 함께 개발하고 있는 상황이다. 일본은 미국 기술의 도입과 자체기술의 개발을 병행으로 추진하고 있다. 미국의 기술도입은 주로 25 kW급 원통형 발전시스템의 도입과 실증시험, 원통관 및 구성 소재개발과 제조공정 개선 연구를 추진하였다. 자체기술 개발로는 다전지식 원통형 연료전지를 개발하고 있으며, 현재 Mitsubishi 중공업 (Fig. 2)이 10 kW를 성공적으로 개발하였고 현재 전원개발과 함께 석탄가스용 100 kW급 개발을 추진하고 있다. 연구는 국립연구소, 전력회사, 가스회사, 세라믹 회사 등 많은 기업들이 추진하고 있는 상황이다.

유럽은 독일을 중심으로 영국, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴 등에서 연구개발이 진행되고 있다. 독일 울리히 연구소 (Fig. 3)는 현재 20 kW급 평판형 고체산화물 연료전

지스택을 제작하여 운전하였으며, 2010년 초까지 100 kW 급 및 MW급 시스템 개발을 진행하고 있다. 또한 유럽연합의 프로그램으로 고체산화물 연료전지 연구개발이 진행되고 있으며, 영국의 롤스로이스는 2007년까지 MW급 고체산화물 연료전지를 개발할 예정으로 기술 개발을 진행하고 있다. 최근에 호주에서는 정부, 가스회사, 에너지회사, 등을 중심으로 고체산화물 연료전지 전문회사인 CFCL을 설립하였으며, 이 회사는 3~5 kW, 25 kW의 스택을 개발하였다고 보고하였고, 100 kW급 개발, 용량증가 및 실용화 기술 개발 연구를 추진하고 있다.

가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템 (국내):

우리나라에서는 마이크로 가스터빈과 연료전지는 분산발전용 전원으로서 뿐만 아닌 각자 다른 용도를 목적으로 기술개발이 이루어져 왔다. 마이크로 가스터빈은 자동차에 탑재되는 터보 차저나 항공기의 보조동력 용으로도 기술개발이 이루어졌으며, 연료전지는 전원을 필요로 하는 중소형 발전 시스템과 최근에는 자동차 탑재용 전원으로서 그 기술개발의 폭을 넓히고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 다가올 지식기반 산업사회가 분산화 된 고효율 발전 시스템을 요구하는 바, 최근 15년 간 세계적으로 이 독립된 두 발전 시스템의 하이브리드화의 필요성에 눈뜨기 시작했고 활발한 기술개발 노력들이 있어왔으나, 불행히도 아직 국내에서는 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템 개발에 필요한 system Integration, 제어시스템 설계기술 등과 같은 기술개발 사례가 없을 뿐만 아니라 가스터빈 및 연료전지의 기술개발조차 쌍방의 기술교류가 거의 없는 그룹(가스터빈:기계항공분야, 연료전지:화학재료분야)에서 독립적으로 이루어져 서로 간의 기술수준 파악도 어려운 상태이다. 사실상 최근 2년전부터 산업자원부 차세대 신기술 개발사업으로 예기연, 항우연, 기계연을 중심으로 기술개발을 추진하고 있는 본 사업이 국내 연료전지/가스터빈 혼합발전 시스템의 첫 시도라 하겠다.

고체산화물 연료전지(SOFC) 분야 (국내):

우리나라에서의 고체 산화물 연료전지 기술은 1994년에 대체에너지 기술 개발 프로그램으로 진행되어왔으나,

1997년 쌍용중앙연구소가 개발을 중단한 후 국내 고체산화물 연료전지 기술 개발은 2002년 산업자원부의 본격적인 기술개발이 재개되기 전까지는 어려운 국면에 직면해 있었다. 현재는 각 연구소, 대학, 기업 등에서 기초 기술 개발, 요소 기술 개발, 단전지 기술, 스택 및 시스템 기술 개발 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 선진국에 비해서는 열악한 상황이다. 연구 개발은 원통형과 평판형 기술 개발 연구가 진행되고 있고 개발된 요소기술의 크기는 100 cm² 이상이다. 스택 제조기술은 쌍용중앙연구소 및 한국에너지기술연구원에서 100 W급을 개발하였으며, 단전지 제조기술 및 전극 기술 등은 확보되어 있는 상황이다. 또한 국내에서 개발된 단전지의 성능은 0.88 V, 300 mA/cm²로 선진국과 비교해서 손색이 없을 정도로 높은 값이다. 현재 진행 중인 세부적인 연구는 한국에너지기술연구원 APU용 kW급 개발(산자부) 및 5 kW급 가압 시스템 개발에 대한 연구(산자부), 전력연구원에서 kW급 소형 발전 시스템 개발(산자부), KIST에서 평판형 스택 연구 및 핵심원천기술 개발(과기부/산자부), 대학에서의 기초 연구 등이 있다. 산업체에서는 효성중공업 kW급 고체산화물 연료전지 시스템 연구, 현대자동차 자동차용 스택 기술 개발, 포항산업과학기술연구원의 kW급 스택 연구가 추진되고 있는 상황이다. 관련 기술로는 세라믹 소재 기술, 내열성 금속 기술, 스택 설계 및 제조 기술, 연료전처리 기술, 전력 변환 및 발전 시스템 기술이 있으며, 이미 잘 알려진 바와 같이 일부를 제외하고 국내 소재 기술은 매우 영세하고 열악한 상태이다.

4. 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템 개발 과제의 개요 및 구성

가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템은 세계적으로 실증된 기술이 거의 전무하여, 시스템 구축을 위한 하이브리드 기술 또한 확실히 정립되지 않은 단계이다. 관련 선진국에서는 특히 하이브리드 사이클에서의 신뢰성, 작동성, 시동성, 부하변화에 대한 시스템 적응성, 시스템 불안정성 등을 개발 난제로 지적하고 있다. 따라서 본 시스템 관련기술 개발과정에서도 이러한 하이브리드 시스

템 기술에서 많은 난관이 예상되며 많은 투자가 필요할 것으로 판단된다.

우선 가장 먼저 수행되어야 하는 “혼합 발전 시스템 통합 기술 개발”에서는 시스템의 사양 결정, 설계점 및 탈설계점 성능해석, 시동 및 천이 성능해석 등 시스템의 전반적인 해석을 수행하여 각 부품들의 사양을 확정하고, 연료전지와 가스터빈이 연계된 전체 시스템을 구성하고 최종적인 시스템 시험을 통하여 시스템 개발의 성공 여부를 판단한다. 혼합형 발전 시스템의 핵심부품인 가스터빈과 연료전지 외의 복열장치, 덕트버너 등의 개발 등도 수행된다. 하이브리드 시스템 구축에 필요한 연료 및 공기의 공급계통에 대한 제어조직 개발도 담당하는데, 그 이유는 하이브리드 시스템만을 고려하여 설계할 수 없고, 실제 운전 시에도 양쪽 서브시스템의 동작점을 함께 고려하여 운전되어야 하기 때문이다. 또한 하이브리드 시스템에서는 연료전지와 가스터빈에서 동시에 전력이 생성되기 때문에 발생하는 전력을 통합적으로 제어하는 기술의 연구도 필수적으로 수행되어야 한다.

“혼합 발전용 마이크로 가스터빈 개발”에서는 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템에 사용되는 가스터빈이 기존의 독립적인 가스터빈과는 형태가 다르기 때문에 체계 개발과제와 연계된 새로운 형태의 가스터빈을 개발한다. 다만 마이크로 가스터빈의 경우 최근 수년간 국내에서 이미 과제화되어 개발기술이 어느 정도 축적되어 있기 때문에 이를 십분 활용하여 개량 개발을 하는 쪽으로 방향을 설정한다. 핵심부품인 압축기와 터빈의 설계/제작, 축계통 설계/제작, 그리고 발전, 유향 등의 보기류의 구성을 주요 연구 내용으로 한다.

“혼합 발전용 고체산화물 연료전지 기술개발”에서는 하이브리드 시스템의 개발과 연계하여 구성될 고체산화물 연료전지를 개발해야 하는 것으로서, 현재 주로 상압형으로 개발되고 있는 고체산화물 연료전지 스택을 가압 운전하여 효율을 극대화시키며, 가압 운전을 통해 발생할 수 있는 구성 소재의 문제점 파악, 가압 스택 운전시스템의 최적화, 가압 임계조건의 선정뿐만 아니라 마이크로가스터빈과의 하이브리드화 기술 등을 주요 연구 내용으로 하고 있다.

이상의 3가지 연구개발 분야는 시스템의 구현, 시스템

Table 2. 가스터빈/연료전지 혼합발전시스템 개발의 세부 대상과제 및 담당연구기관

분 야	세부 연구추진 대상과제	담당연구기관
연료전지	가스터빈/연료전지 혼합 발전용 고체산화물 연료전지 기술개발	한국에너지기술연구원 (KIER)
가스터빈	가스터빈/연료전지 혼합 발전용 마이크로 가스터빈 개발	한국기계연구원 (KIMM)
하이브리드 시스템	가스터빈/연료전지 혼합 발전시스템 통합 기술개발	한국항공우주연구원 (KARI)

차원의 문제점 해결 및 최종적인 운전을 통한 성능 입증 을 주목표로 하기 때문에 요소 부품에 대한 기술 개발보다는 기존에 구축된 국내 및 국외 기술을 최대한 활용하여 시스템의 개발에 필요한 계통들을 설계/제작하는 것을 주요 연구 내용으로 하고 있다.

연구개발 분야는 시스템 병합기술과 시스템을 이루는 시스템의 개발과는 별개로 국내 기술을 선진국 수준으로 향상시키기 위한 노력도 병행되어야 하는데 “혼합형 발전 시스템 개발에 필요한 기반요소 기술개발”을 통하여 연료전지 스택의 설계기술, 혼합형 시스템의 운전모사 기술 그리고 고성능 열 교환기 설계기술 등을 개발한다. 해당과제는 시스템의 핵심 구성품 즉, 연료전지와 마이크로 가스터빈의 개발과 동시에 이들을 하이브리드화하는 통합기술도 이루어져야 하므로 우선순위와 관계없이 동시에 수행 되어야 한다.

5. “가스터빈/연료전지 혼합 발전용 고체산화물연료전지 개발” 과제의 연구목표 및 내용

연구과제의 목표 (연구기간: 2002-2011)	
총개발 목표	혼합발전 시스템용 150 kW급 고체산화물 연료전지 발전 시스템 개발
1단계 목표	혼합 발전 시스템용 5 kW급 고체산화물 연료전지 발전 시스템 개발 ▶ 효율 : 30% ▶ 사용연료 : LNG, 운전압력 : 3기압 ▶ 전력손실율 : <10 %, 수명 : 1,000 시간
2단계 목표	혼합 발전 시스템용 50 kW급 고체산화물 연료전지 발전 시스템 개발 ▶ 효율 : 35% ▶ 사용연료 : LNG, 운전압력 : 3기압 ▶ 전력손실율 : <5%, 수명 : 2,000 시간
3단계 목표	혼합 발전 시스템용 150 kW급 고체산화물 연료전지 발전 시스템 개발 ▶ 효율 : 40% ▶ 사용연료 : LNG, 운전압력 : 3기압 ▶ 운전시간 : <1%, 10,000 시간

(1) 1단계 목표 (연구기간: 2002 - 2005)

사용연료	LNG
스택 발전효율(DC/LHV)	37%
전력손실율	1,000시간당 10% 이하
연료전지 운전온도	800°C 이상
연료전지 운전압력	3기압
최대전력용량	5 kW (가압형)

1 단계 주요연구내용

- 가압형 5 kW급(올리히 스택 도입) 발전 시스템 설계 및 시스템 구성
- 모듈 가압 용기 설계 제작 및 모듈 가압 기술 개발
- 가압형 0.5 kW급 SOFC 스택 제작 기술 확보(고성능 및 내구성 확보)
- SOFC 스택의 LNG 특성 평가
- Prereformer 연계형 가압형 5 kW급 발전 시스템 운전 특성 평가 및 시스템 개선
- 발전시스템 종합 제어 기술 개발 및 혼합 발전 시스템 연계
- 가압형 5 kW급 Prereformer 및 연료전처리 시스템 설계 제작 기술 개발
- 연료전자-prereformer 연계 시스템 특성 평가
- 연료전처리 시스템(유량제어, 예열기, 구성품 연계 시스템) 설계 제작

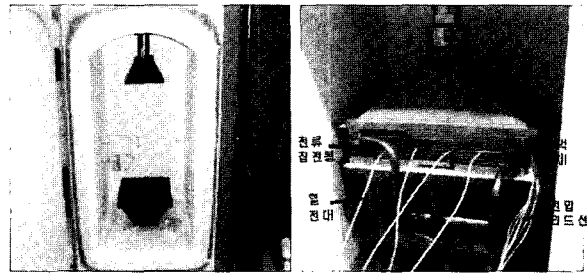


Fig. 7. 500 W급 SOFC 발전시스템 및 스택 주요 구성장치.

6. “가스터빈/연료전지 혼합 발전용 고체산화물연료전지 개발” 과제의 연구결과

KIER 에서는 가압형 5 kW급 SOFC 발전시스템 개발을 위한 선행연구로서 500 W급 SOFC 발전설비 (Fig. 7) 를 설계했는데, 이러한 발전설비는 SOFC 스택의 최초 가열, 환원, leak test, 수소 및 개질가스 주입운전, 공급가스 계통 제어시스템의 통합 제어설비 구성을 통한 SOFC 스택 본체와 연료개질기를 중심으로 제어가 이루어지도록 했으며, 향후 이들 스택 발전 시 셀 온도, 압력, 기체유량, DAQ를 통해 얻은 성능 (전류 및 셀 당 전압) 등을 측정하도록 설계 제작됐다. 또한, SOFC 스택의 성능, 부하 조건, 셀 당 온도, 압력, 시스템 이상 유무, 효율 등이 효과적으로 모니터링 될 수 있다. 가압 5 kW급 시스템에 소요된 스택은 독일 올리히 연구소로부터 도입된 셀 면

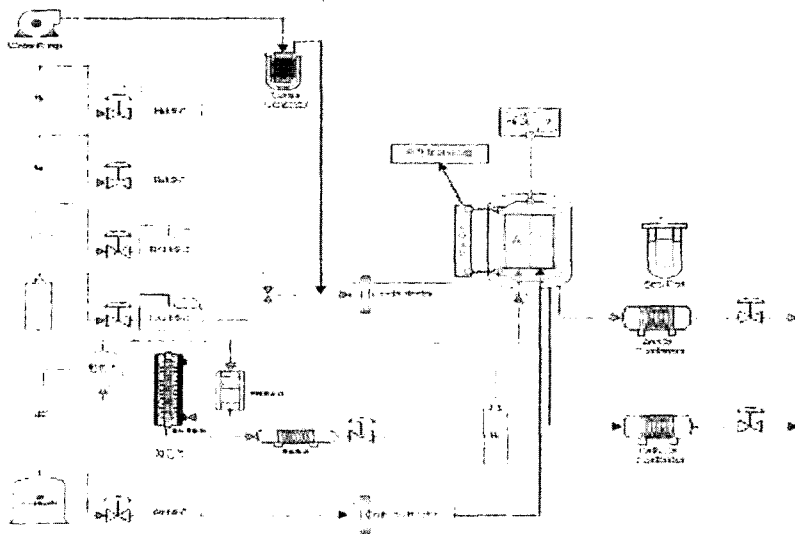


Fig. 8. 가압 5kW급 SOFC 발전시스템 개략도

적 400 cm²(20×20 cm²)인 연료극 지지체 평판형 스택이다.

500 W급 SOFC 스택에 대해 H₂를 이용해 운전한 결과 약 700 W의 전력을 얻을 수 있었으며, 약 20일 (480 시간) 동안 성공적으로 연속운전을 실시했다. 이 스택은 5 kW급 스택에 사용되는 셀 및 금속 연결재 크기와 동일하며, 단지 셀 수만 5 셀에서 5 kW급 40 셀로 증가한 것으로서 500 W급 스택의 성공적인 운전결과에 비추어, 가압 5 kW급 발전 설비가 제작 완료될 경우 즉시 운전이 실시될 예정이다.

또한, 이러한 선행연구를 바탕으로 해서 가압형 5 kW SOFC 발전시스템 (Fig. 8)설계 및 제작이 수행됐는데, 이러한 발전시스템은 가압 챔버, stack 가열용 furnace, stack에 일정한 압력을 주는 mechanical loading system, 공기 및 연료 예열기, 연료 및 공기배출구의 냉각기, 연료극 챔버 및 공기극 챔버 간의 압력 차이를 안전하게 유지시켜주는 seal pot (water head), 개회로 전압을 고정해주는 steam 주입기, SOFC 스택의 전기 부하, 셀 당 전압분포, 연료 이용률, 프로그램 제어시스템부로 구성된다. 운전절차의 경우 상압운전은 최초 가열, 환원, 수분 주입, 리크 테스트, 수소 조업, 개질가스 조업, 열 사이클링 실험으로 구성되며, 가압운전일 경우 가압준비, 가압챔버 setup, 가압운전 및 차압조절 (챔버-연료극 & 챔버-공기극 차압이 200 mm H₂O 이내), 가압 전기부하 운전의 운전절차를 갖는다. 또한, 가압형 5kW급 SOFC 스택의 가압 챔버에 대한 FEM 구조해석을 수행한 결과 10 mm 두께를 갖는 챔버가 제작되어야 하며, 전산유체 해석(CFD)을 적용한 정상운전 및 초기상태 가열을 고려한 온도분포 (Fig. 9)를 확인할 결과 비교적 균일하며 안정적인 온도 분포가 이뤄짐을 확인할 수 있었다. 가압 챔버 내에는 스택의 가열과 냉각이 되도록 공급되는 가스의 온도와 압력 제어 이외에 스택 내 전체압력이 목표압력 3.3 기압 및 작동온도 800°C에서 제어되도록 설계 제작됐으며, 차기년도부터 가압 챔버를 이용한 가압형 5 kW SOFC 발전 시스템의 성능시험을 수행할 예정이다.

개질기의 경우 소형 SOFC prereformer 용도로 부분 산화반응에 사용되는 팔라듐(Pd)-코팅 금속모노리스 촉매를 국산화 개발하였고, precursor의 변형, 조촉매의 조

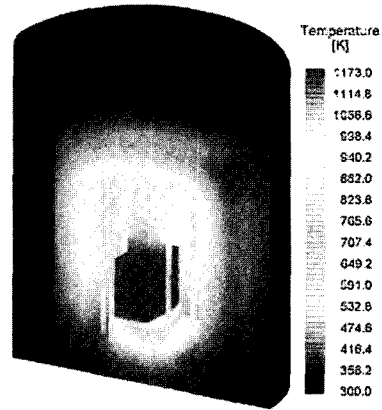


Fig. 9. 스택 온도가 900°C일 경우 온도분포



Fig. 10. 5 kW급 가압형 prereforming system.

성 변화 등에 의해 최적의 조성을 찾았다. 개선된 촉매는 450,000h⁻¹의 높은 공간속도에서 고활성을 유지하였다. 또한 Pd의 양도 5%에서 3%로 감소하여도 활성을 유지하여 촉매의 가격을 낮출 수 있었다. 반응기 크기는 0.2리터/kW(열교환기 포함)로 개발 목표인 0.25리터/kW를 달성하였다.

중대형 SOFC prereformer용 수증기개질반응에 적용하기 위해 상용 수증기개질촉매(Ni계)를 금속지지체에 안정적으로 washcoating하는 방법과 Ru를 소량 도핑하여 환원절차를 생략할 수 있는 국산 촉매를 개발하였다. GHSV 5,000 h⁻¹에서 95% 이상의 메탄전환율(반응온도 800°C)을 얻었고, 이 경우 촉매요구량은 200cc/kW이다. 개발촉매의 지속성 실험을 수행하여 촉매의 안정성을 확인하였고, 반응기의 소형화를 가능하게 하는 multi-tube형 열교환 반응기를 제작하였다. 이 반응기에 열전달 능



력이 향상된 Ni/Ru-금속모노리스 촉매를 충전하여 발전하면 개발 목표인 1 l/kW 크기의 달성이 가능할 것이다.

5kW급 SOFC와 연계되어 발전되는 prereforming system (Fig. 10) 설계가 완료되었고, 반응기, 촉매연소기 및 열교환기의 제작이 완료되었다. 가스터빈과 연결되기 전에 SOFC 단독발전을 위한 stand-alone 형태의 prereforming system을 따로 설계하여 현재 제작이 진행 중이다.

7. “가스터빈/연료전지 혼합발전 시스템 개발” 과제의 향후 계획 및 전망

본 연구개발과제는 향후 10년간의 연구기간을 거쳐 가스터빈/연료전지 혼합 발전 시스템을 구축하고자 한다. 이러한 기술개발은 현재까지 국내에서 전혀 시도된 적이 없고, 세계적으로도 기술 구현 단계에 있으며, 기술 협력이나 이전도 용이하지 않은 상황에 있다.

한편 본 시스템이 목표로 하는 시장은 향후 10년간 폭발적인 성장을 거듭할 것으로 예상되며, 이미 선진국에서는 이 시장을 선점하기 위해 막대한 연구 개발비를 투자하고 있는 상황이다. 따라서 본 시스템의 국내 개발이 늦어질 경우 이러한 막대한 경제적 이익을 놓치는 결과를 초래하게 된다. 본 연구의 추진 전략을 수립함에 있어서는 이러한 상황을 정확하게 인식하고, 현실적으로 접근할 필요가 있다.

본 연구는 기술의 특성상 연구 개발 단계에서는 오랜 연구 기간과 대규모 투자가 이루어져야 하지만, 개발·보급된 후에는 에너지 산업에 미치는 영향이 막대한 사업이다. 따라서 정부 주도의 개발 계획 아래 산·학·연이 공동으로 참여하여 개발하는 것이 바람직하다. 정부는 총괄적인 개발 계획을 수립하고, 예산 확보 및 보급 정책에 관한 방안을 수립하여야 한다. 학계는 다기능 세부 기술을 소화·개발하며, 전문 기술 인력을 양성하는 역할을 담당하여야 한다. 연구소는 연구과제와 직접적으로 관련된 핵심 기술을 개발하여야 한다. 산업체는 제품 생산 및 상용화의 기반을 구축하여야 한다.

가스터빈/연료전지 혼합형 복합 발전 시스템 구축에 있어서 가장 큰 기술적 난제는 연료전지 개발이 될 것이다. 연료전지는 아직 국내 개발이 진행 중이며, 본 연구의 1 단계가 완료되어야 시제가 개발될 것이다. 1 단계에서는

연료전지 스택기술 개발을 진행함에 더불어 하이브리드 시스템 통합기술 연구를 진행하여야 한다. 즉, 1 단계에서의 연구 개발 내용은 크게 연료전지 기술개발, 가스터빈 사이클 변경 및 고 효율화, 하이브리드 기술개발의 세 가지로 나눌 수 있다. 이후 2, 3 단계 연구에서는 1 단계에서 개발된 가스터빈/연료전지 발전 시스템을 바탕으로 해서 연구개발을 지속시키며, 점진적인 대형화 및 고 효율화를 진행하여야 할 것이다. 따라서 이러한 가스터빈/연료전지 혼합 발전시스템 개발은 미래 한국의 주요산업으로서 충분히 성장해 나갈 수 있으리라고 판단된다.

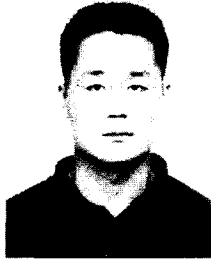
참고문헌

1. U.S. Department of Energy, www.fe.doe.gov
2. S. E. Veyo “Tubular SOFC hybrids : Present and Prospect”, Second DOE/UN International Conference and Workshop on Hybrid Power Systems, 341 (2002).
3. Future of the Cogeneration Market in EUROPE
4. J. Palsson et al., “Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems for Efficient Power and Heat Generation” The 3rd International Fuel Cell Conference, 391 (1999).
5. S. C. Singhal and K. Kendall, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, Fundamentals, Design and Applications, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (2003).
6. J. H. Kim et al., “Development of High Efficiency Gas Turbine/Fuel Cell Hybrid Power Generation System” International Workshop on Fuel Cell and Fuel Cell Hybrid systems, 46 (2004).
7. “가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발에 관한 산업분석” 산업자원부 (2002).



송락현

- 1984년 부산대학교 금속재료 공학과(학사)
- 1986년 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- 1989년 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- 1994년 일본물질공학공업기술연구소
- 1995년 객원연구원
- 1990년 한국에너지기술연구원 책임
- 현재 연구원



임 탁 형

- 1997년 한국과학기술원 화학공학과(학사)
- 1999년 한국과학기술원 생명화학공학과(석사)
- 2004년 한국과학기술원 생명화학공학과(박사)
- 2004년 한국에너지기술연구원 선임연구원 ~ 현재



정 현

- 1983년 서울대학교 화학공학과(학사)
- 1985년 서울대학교 화학공학과(석사)
- 1991년 워싱턴주립대학교 화학공학과(박사)
- 1991년 피츠버그대학교 연구원
- 1994년 한국에너지기술연구원 전환공정 연구센터장 ~ 현재



백 동 현

- 1985년 부산대학교 무기재료공학과(학사)
- 1988년 인하대학교 무기재료공학과(석사)
- 1996년 독일 RWTH Aachen 공대 에너지재료전공(박사)
- 1992년 독일 Research Centre Jülich(FZJ) 객원연구원
- 1996년 한국에너지기술연구원 선임연구원 ~ 현재



신 동 열

- 1972년 고려대학교 전기공학과(학사)
- 1976년 고려대학교 전기공학과(석사)
- 1985년 고려대학교 전기공학과(박사)
- 1977년 한국에너지기술연구원 책임연구원 ~ 현재
- 1997년 한국에너지기술연구원 대체에너지 연구부장
- 1999년 한국에너지기술연구원 수소연료 전지연구부장
- 2003년 한국에너지기술연구원 수소연료 전지연구부장
- 1980년 미국 Argonne National Lab. 객원연구원
- 1981년 미국 Microelectronics Center of North Caroline, MTS
- 1988년
- 1989년