

# 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템의 국내외 기술개발 동향

가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템은 고온형 연료전지 발전시스템의 산화제(공기) 공급부가 마이크로터빈으로 대체되어 고온고압의 공기가 연료전지로 공급되고 연료전지의 반응가스가 터빈을 구동하여 두 시스템이 동시에 서로 다른 방식으로 전력을 생산하는 시스템을 의미한다.

김 재 환

한국항공우주연구원 항공추진그룹(kjaehwan@kari.re.kr)

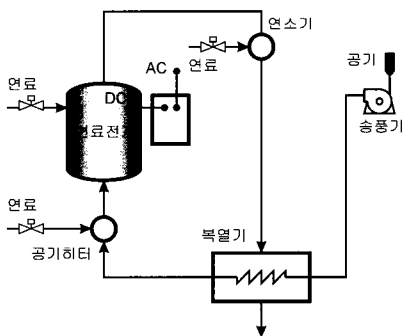
양 수 석

한국항공우주연구원(ssyang@kari.re.kr)

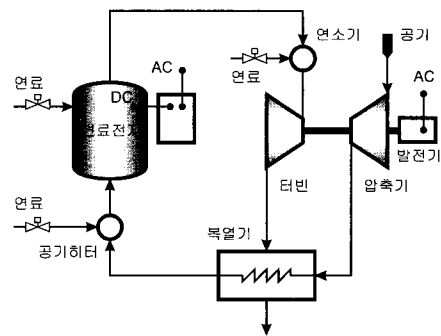
## 혼합형 발전시스템의 개념

가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템은 기존의 고온형 연료전지 발전시스템(그림 1)의 고 효율화를 목적으로 고안되었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 고온형 연료전지 발전시스템에는 연료전지 스택에서의 전기화학반응에 필요한 공기 또는 산소(산화제)의 공급을 위해 일반적으로 전기모터로 구동되는 송풍기가 사용된다. 또한, 연료전지의 스택은 공급되는 연료의 약 80~85%정도만이 반응하게끔 설계되기 때문에 반응하지 않은 연료의 연소를 위한 스택후방의 연소기, 연소된 고온가스와 스택으로 공급되는 공기의 열교환을 위한 복열기(recuperator) 등을 필요로 한다. 이러한 고온형 연료전지 발전시스템이 그림 2에서 보는 바와 같이 마이크로터빈과 혼합(하이브리드) 될

경우, ① 연료전지 스택으로 가압된 공기를 공급할 수 있어 스택자체의 발전효율이 높아지며, ② 연료전지 출구의 고온(600~1000) 반응가스는 압축기 구동용 터빈을 구동하는 데 사용되어 시동을 제외한 운전 중에 공기공급을 위한 전력사용이 없게 된다. 또한, ③ 압축기 구동 후 여분의 터빈동력으로 추가전력을 생산하여 결과적으로 전체 시스템의 발전효율 증대를 가져온다. 위의 관점과는 다르게 혼합형 발전시스템을 마이크로터빈의 고효율화 측면에서 보면, 전력생산이 가능한 연소기 장착 마이크로터빈이라고 생각할 수 있다. 혼합형 발전시스템은 두 개의 다른 시스템이 독립적 발전을 하는 것이 아니라, 서로가 작동유체를 공유하는 시스템이기 때문에, 상호간의 열유체역학적 매칭은 매우 중요하다. 두 시스템이 최고 발전효율을 갖게끔 열유체역학적으로 최적 매칭되었을 경우, 연



[그림 1] 고온형 연료전지 발전시스템



[그림 2] 가압형 혼합형 발전시스템

료전지의 출력은 전체출력의 약 80%, 마이크로터빈의 출력이 약 20%를 차지한다.

현 기술수준에서 연료전지 발전시스템의 단독운전으로 얻을 수 있는 발전효율은 약 45% 수준이며 연료전지 자체의 성능개선을 통한 그 이상의 발전효율 획득은 향후 많은 노력과 시간이 필요할 것으로 예상된다. 그러나, 위에서 기술한 바와 같이 상용화 단계에 있는 마이크로터빈과 혼합형 시스템을 구성할 경우 현 기술수준에서 약 60%에 가까운 발전효율을 얻을 수 있으며(그림 3), 미국의 경우 2010년에 70% 이상, 2015년에 80% 이상의 발전효율로 전력시장에 진입한다는 목표를 가지고 있다. 혼합형 발전시스템은 기존의 동력원들에 비해 배출물이 적어 수요처에 위치(on-site)하여 전력생산이 가능할 정도로 환경친화적이다. 또한 기존의 동력원들이 소형화에 따른 효율저하가 심한데 반하여 혼합형 발전시스템은 저출력용량에서도 고효율을 낼 수 있는 특징을 갖는다. 이 같은 특징들은 최근 급속히 성장하고 있는 분산발전방식에 꼭 필요한 요구조건들이며, 혼합형 발전시

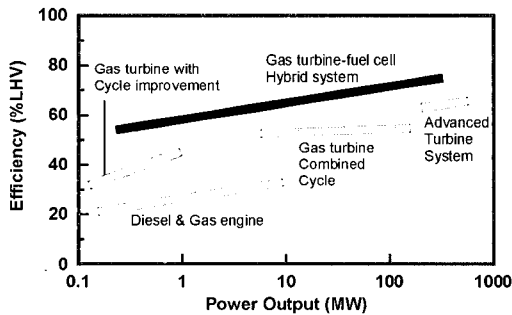
스템은 이러한 특징에 힘입어 향후 분산발전시장에서 경쟁력 있는 발전방식이 될 전망이다.

### 혼합형 발전시스템 관련 기술

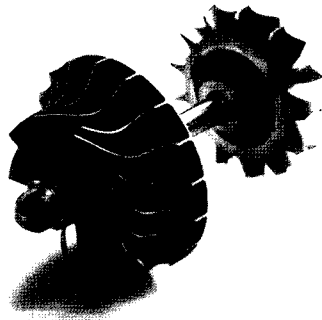
혼합형 발전시스템 개발에 필요한 요소기술은 크게 마이크로터빈, 고온형 연료전지 및 시스템 통합(system integration)관련 기술로 나눌 수 있다.

마이크로터빈과 관련된 핵심요소 기술로는 고효율 압축기/터빈, 저공해 연소기, 고효율 복열기, 고속발전기 및 에어 포일 베어링 등의 설계 및 제작기술을 들 수 있다. 고효율 압축기/터빈(그림 4) 개발을 위해서는 고효율 공력설계기술, 높은 터빈입구온도 확보를 위한 내열재 개발 및 코팅기술, 정밀주조법 등이 필요하며, 연소기의 경우는 저공해 연소기술 뿐만 아니라 희박 예혼합 연소에서 연소 안정성 확보가 무엇보다도 중요하다. 일반적인 열교환기는 비교적 용이하게 제작할 수 있는 데 반해, 고집적 고효율 복열기(그림 5)의 설계 및 제작 기술은 몇 개의 선진국 제조업체만이 가지고 있으며, 이를 위해서는 고집적 매트릭스 제조기술, 정밀 공정기술 등이 필요하다. 고속발전기의 설계 시에는 고속회전의 원심력으로 인해 발생하는 리테이너의 큰 스트레스 및 진동을 고려한 세밀한 설계가 이루어져야 하며, 비윤활 구동을 위한 에어 포일 베어링의 구현을 위해서는 고속회전으로 인해 점성유체에서 발생하는 발열과 고속발전기에서의 발열을 적절한 냉각 시스템을 구성하여 해소시켜 주는 기술을 필요로 한다.

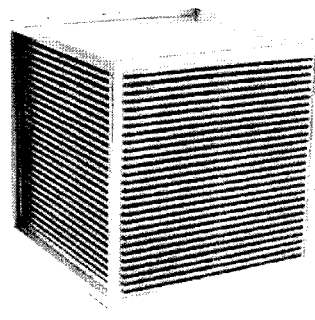
고온형 연료전지의 경우, 여러 가지 형상(평판형, 원



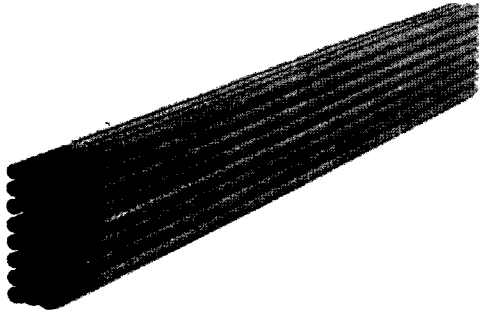
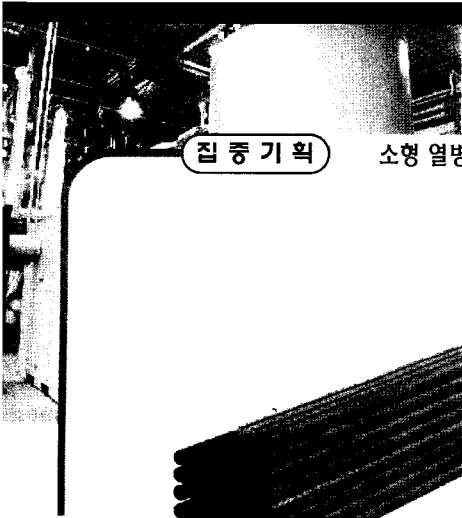
[그림 3] 혼합형 발전시스템과 타 동력원의 효율 비교



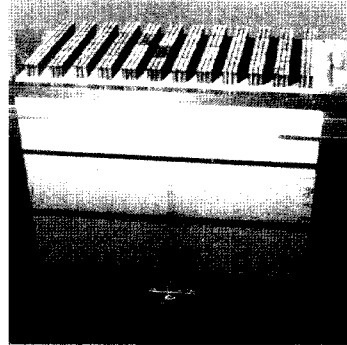
[그림 4] 마이크로터빈의 압축기/터빈



[그림 5] 고집적 고효율 복열기



[그림 6] 적층된 원통형 연료전지 다발



[그림 7] 원통형 연료전지 스택(100kW)

통형, 평판형 등)의 고성능 단전지 설계 및 제작기술은 어느 정도 확보되어 있으나 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 이들을 적층하는 스택제조 기술 및 스택 내부의 유로 설계는 매우 어려운 핵심기술로 알려져 있다. 하지만, 이러한 기술은 연료전지의 출력용량 증대를 위해 반드시 극복되어야 한다. 이 밖에도 고온에서의 작동으로 인하여 구성요소의 대부분이 세라믹 및 내열성 금속으로 이루어져 있어 재료간의 반응문제 및 신소재 개발, 전극특성 향상, 운전시험 평가 등이 주요 핵심기술들로 대두되고 있다. 또한, 현재 단전지 및 스택의 제조에는 많은 시간과 고가의 제조공정이 수반되기 때문에, 제작비용 절감 및 양산화를 위해 공정의 자동화 및 저가 제조공정 기술의 개발이 반드시 이루어져야 한다.

시스템 통합에 관련된 기술은 현재 세계적으로도 기초기술 검증 단계에 있으며, 앞으로 극복해야 할 기술적 문제들이 산재해 있다. 시제개발을 끝내고 상용화 단계에 있는 선진국에서도 특히 혼합형 발전시스템의 운전 신뢰성, 작동성, 시동성, 부하변동에 대한 시스템 안정성 확보 등을 기술개발의 난제로 지적하고 있다.

이러한 문제들의 해결을 위하여 시스템 개념설계 단계부터 정확한 설계 및 탈설계 성능해석, 천이운전 성능해석 등 시스템 운전에 관한 전반적인 해석을 수행하여 최적 열유체역학적 매칭에 필요한 각 구성부들의 정확한 사양 및 최적 운전제어로직을 도출한 후 시험을 통한 반복적인 검증이 수행되어야 한다. 또한, 두 시스템으로부터 생산된 전력의 변환 및 분배를 효율적이며 안정적으로 제어할 수 있는 최적 전력변환 장치의 설계기술이 시스템 통합과 관련된 핵심기술로 매우 중요하다.

### 국외 기술개발 동향

연료전지/마이크로터빈 혼합형 발전시스템의 연구개발은 현재 미국에서 가장 활발히 진행되고 있으며, 정부의 전폭적인 지원과 기업들의 적극적인 참여가 이루어지고 있다. 1998년에 미국의 에너지성(DOE) 주관 하에 혼합형 발전시스템의 개념설계 및 타당성 분석이 수행되었으며, 현재 이를 토대로 기획되어 진행 중인 관련 프로젝트는 표 1과 같다. 이 과제들과 관

<표 1> 검토방법에 따른 도입경제성 검토결과와의 비교

주관기관	연구내용
National Fuel Cell Research Center	System Integration Methodologies
Rolls-Royce	Small Turbogenerator Technology for DG
National Energy Technology Laboratory	Hybrid Performance Project
Siemens-Westinghouse	Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine
Fuel Cell Energy	Molten Carbonate Fuel Cell/Gas Turbine
Honeywell GE	SECA-based Fuel Cell Hybrid



련되어 현재 하드웨어가 개발된 시스템은 Siemens-Westinghouse사의 200kW급 SOFC/MGT System (그림 8)과 Fuel Cell Energy사의 300kW급 MCFC/MGT System(그림 9)이며, 현재 가장 상용화에 근접해 있다.

Siemens-Westinghouse사의 시스템은 자체 개발한 원통형 고체산화물 연료전지(SOFC)와 Ingersoll-Rand사의 마이크로터빈을 이용해 개발된 세계 최초의 가압형 혼합 발전시스템(PH220)이며, 출력 220kW, 발전효율 57%로 설계되었다. 이 시스템은 Univ. of California Irvine의 National Fuel Cell Research Center에서 약 3,000시간의 시운전을 통해 성능을 평가한 결과 평균출력 190kW, 발전효율 53%의 성능을 보였다. 위 시스템은 연료전지와 마이크로터빈 하이브리드화 기술의 가능성을 증명하였으나, 시스템의 최적화를 위해서는 두 시스템 간의 용량매칭, 마이크로터빈 설계 및 통합 기술 등이 보다 진보해야 한다는 결과를 얻었다. PH220의 개발로부터 얻은 경험으로부터 현재 300kW급 시스템이 새롭게 설계/제작되어 유럽에서의 운전평가가 계획되어 있다.

한편, Fuel Cell Energy사의 시스템은 혼합형 발전시스템의 또 다른 형태인 상압형(연료전지가 터빈의 후방에 위치하여 상압에서 운전됨)이며 자체 개발 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 Capstone사의 30kW 마이크로터빈을 이용해 설계/제작 되었다. 이 시스템은 Fuel Cell Energy사가 계획하고 있는 약 40MW급의 대형 혼합형 발전시스템의 달성여부 및 적합성 검증에 위해 개발되었으며, 약 6,700시간의 운전평가 결과 출력 280kW, 발전효율 52%의 성능을 보였다.

최근에는 운전결과를 바탕으로 Capstone사의 60kW 마이크로터빈을 새로 도입하여 혼합형 발전시스템을 재구성하고 있으며, 40MW시스템의 개념설계를 수행 중이다.

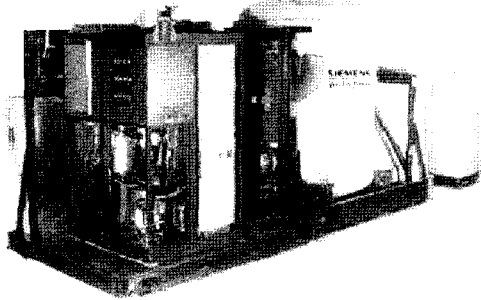
한편, 이외에도 미국에서는 Vision 21 사업의 일환으로 보다 큰 출력용량의 혼합형 발전시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있으며, 2010까지 kW당 약 \$400설치비용을 목표로 하고 있다.

일본에서는 연료전지 기술을 보유하고 있는 기업(미츠비시, 동경가스 등)을 중심으로 시스템 개발이 검토되고 있으며, 이미 대학과 정부출연연구소를 중심으로 한 기초기반연구는 1990년도 말에 시작된 상태이다. 유럽연합에서도 기업 중심의 컨소시엄이 미국과의 협력 하에 2000년도부터 4년 동안 약 300억의 개발비를 투입하여 1MW급 고체산화물 연료전지/가스터빈 혼합형 발전시스템을 개발하는 등 이 분야의 기술개발에 동참하고 있다.

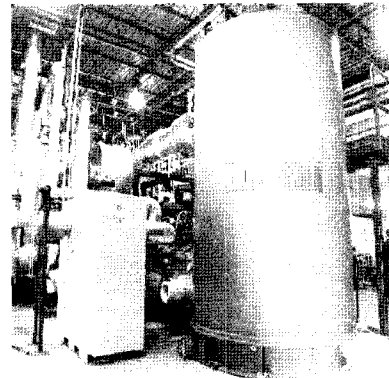
### 국내 기술개발 동향

국내에서의 혼합형 발전시스템에 관한 연구개발은 대학을 중심으로 한 개념설계와 성능해석 수준에 머물러 있었다. 한편, 핵심 구성부인 마이크로터빈과 연료전지는 각각 독자적인 개발과정을 밟아왔으며, 마이크로터빈 관련 요소기술들은 국내에서 수행된 개발 과제들을 통하여 어느 정도 확보되어 있으나, 고온형 연료전지의 경우 아직 선진국 수준의 출력용량을 제작할 수 있는 스택제조 및 시스템 설계기술이 확보되어 있지 않은 상태이다. 이 같은 상황에서, 2001년에

GAS TURBINE FUEL CELL



[그림 8] Siemens-Westinghouse사의 가압형 혼합 발전시스템

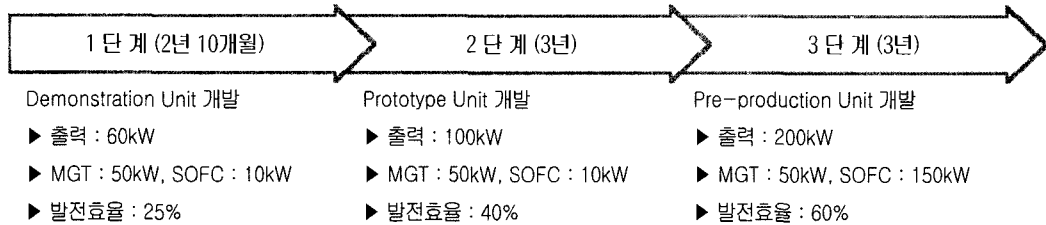


[그림 9] Fuel Cell Energy사의 상압형 혼합 발전시스템

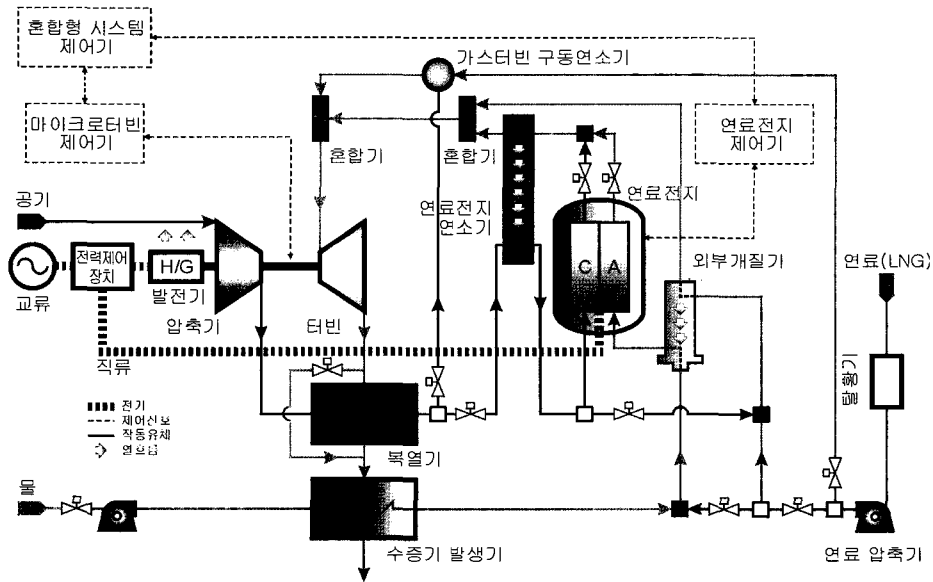
국내에서는 처음으로 혼합형 발전시스템 개발이 공론화 되고, 몇 차례의 기술기획위원회 등을 거쳐 2002년 산업자원부의 차세대신기술개발사업으로 선정되었고 9년 간의 기술개발 일정을 가지고 연구개발이 진행되고 있다.

기술기획을 통해 결정된 기술개발의 최종목표는 '발전효율 60%, 200kW급 가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발'이며 그림 10에서 보는 바와 같은 단계별 목표를 갖는다. 국내외 산업환경 및 국외 개발동향에 기초하여 발전시스템의 출력을 100~500kW급으로 결정하고 성능해석을 통해 약 60%의 발전효율을 가능목표치로 선정하였다. 그림 10의 각 단계별 연구개발 목표는 국내외 관련기반기술 현황에 기인한다. 혼합형 발전시스템에 사용되는 마이크로터

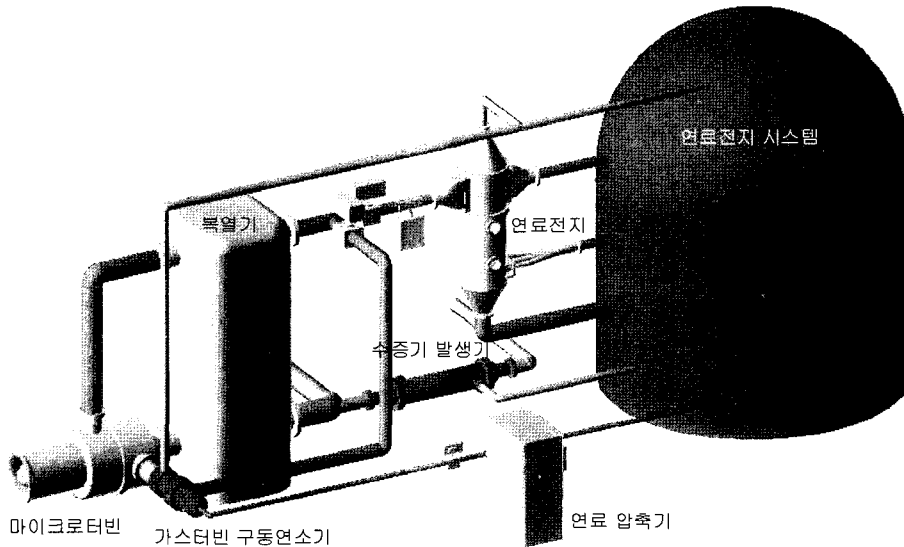
빈은 기술개발과제의 중복을 피하고 개발비용의 절감을 위해 이미 국내에서 개발된 50kW급 기 개발 시제품을 개량 개발하여 사용하기로 하고 단계별 고성능화에 초점을 맞추었다. 기존 국외의 시제품이나 성능해석을 통해 보면 50kW급의 마이크로터빈과 하이브리드화로 최적의 성능을 낼 수 있는 고체산화물 연료전지 출력은 대략 150~200kW정도가 된다. 하지만 현 시점에서 아직 국내의 단전지 스택기술 및 발전시스템 구축기술의 부족으로 고체산화물 연료전지의 출력용량을 최적용량에 맞추기 힘든 점을 감안하여 단계별로 출력용량을 증대하는 전략으로 연구개발을 추진하고 있다. 물론 이와 더불어 스택모듈의 고성능화도 함께 진행된다. 따라서, 1단계는 정부출연연구소 및 대학을 중심으로 한 기술검증 단계이며, 2단계는



[그림 10] 가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발 단계별 목표



[그림 11] 개발대상 60kW 혼합형 발전시스템 계통도



[그림 12] 개발대상 60kW 혼합형 발전시스템 체계 개념도

기업참여 및 기업으로의 기술이전단계, 마지막으로 3 단계는 상품화를 위한 기업주도의 기술성숙단계의 성격을 띠게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 핵심요소 기술은 크게 시스템 통합기술과 마이크로터빈 설계/제작기술 및 고체산화물 연료전지 및 스택개발기술의 3개로 나누어 볼 수 있다. 이에 따라 시스템 통합 및 기타 요소 구성부(열교환기, 연료전지 연소기, 가스터빈 구동연소기 등)의 개발은 SI에 관한 기술 및 경험을 많이 가지고 있는 한국항공우주연구원에서, 마이크로터빈 개발은 기존의 50kW급 엔진의 개발그룹인 한국기계연구원에서, 연료전지 개발은 고체산화물 연료전지 개발기술 보유그룹인 한국에너지기술연구원에서 수행하는 컨소시엄을 구성하여 연구개발을 진행하고 있다. 현재 1단계의 2차년도가 진행되고 있으며, 1단계 기술개발 비용으로 약 87억원이 투입되고 있다.

1차년도의 기술개발 결과 개발대상 시스템 체계 및 요소 구성부의 사양이 결정되고 이에 따른 구성부의 상세설계가 수정 보완되고 있는 상태이다. 그림 11과 그림 12는 1차년도 시스템 개념설계로 도출된 1단계 개발대상 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템의 계통도와 체계 개념도이다. 본 과제에 개발대상 혼합형 발전 시스템은 Siemens-Westinghouse사의 시스템

을 기본 모델로 하고 현 국내기술의 허용범위 내에서 시스템의 레이아웃을 결정하였다. 개발대상 시스템은 개량될 50kW급 기 개발 마이크로터빈과 국내기술로 1단계 개발 가능한 10kW의 고체산화물 연료전지로 구성된다. 1단계는 두 시스템 출력의 최적 매칭이 아닌 개념검증(proof-of-concept) 및 운전성(operability) 확보에 초점이 맞추어져 있기 때문에 시스템 효율은 낮게 설정되었다. 두 시스템의 출력이 최적 매칭 되었을 경우, 마이크로터빈과 연료전지(내부 개질형)의 출력비는 1:3.5 정도가 되고 연료 및 압축공기는 시동시를 제외하고 전부 연료전지 측으로 공급되나 개발대상 시스템은 그림 11에서 보는 바와 같이 10kW 출력에 필요한 연료 및 공기만이 연료전지로 공급되고, 나머지 연료 및 공기는 각각 분기되어 가스터빈 구동연소기에서 연소되게 된다. 정격 운전시 터빈입구에서 보다 큰 유효 압력비 확보를 위하여 연료전지로부터의 반응가스가 가스터빈 구동연소기를 거치지 않고 터빈입구에서 연소기 출구 배기가스와 합류하게끔 설계되었다.

2차년도에는 설계/제작된 구성부의 성능시험, 3차년도에는 시스템 조립 및 시운전이 계획되어 있어 1단계 기술개발 종료와 더불어 시스템 체계설계, 요소 구성부 설계 및 운전기술이 확보 될 전망이다. (●)