

가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발

김 재환¹⁾, 박 부민²⁾, 양 수석³⁾, 이 대성⁴⁾

Development of High Efficiency Gas Turbine/Fuel Cell Hybrid Power Generation System

Jae Hwan Kim, Poo Min Park, Soo Seok Yang, Dae Sung Lee

Key words : Gas turbine(가스터빈), Fuel cell(연료전지), Hybrid power generation(혼합형 발전), High efficiency(고효율), External Reforming(외부개질), Simulated system(모사시스템)

Abstract : This paper describes an on-going national R&D program for the development of a gas turbine/fuel cell hybrid power generation system and related R&D activities. The final goal of this program is to develop a 200kW-class gas turbine/fuel cell hybrid power generation system and achieve high efficiency over 60% (AC/LHV). In the first phase of the development, a sub-scaled 60kW-class hybrid system based on the 50kW-class microturbine and the 5kW SOFC will be developed for the purpose of concept proof of the hybrid system. Core components such as the microturbine and the SOFC system are being developed and parallel preparation for system integration is being carried out. Before the core components are assembled in the final system, operating characteristics of a hybrid system are investigated from a simulated system where a turbocharger (microturbine simulator) and a modified fuel cell burner test facility (fuel cell simulator) are employed. The 60kW demonstration unit will be built up and operated to provide the valuable information for the preparation of the final full scale 200kW hybrid system.

1. 서 론

지난 한 세기 동안 전력소비가 급증하고 화석 연료의 고갈이 심화됨에 따라 고효율 원동기 개발과 경제적 전력생산에 대한 노력은 지속적으로 전개되어 왔다. 최근 이러한 노력들은 지구 온난화, 기후협약 등 환경문제의 영향으로 새로운 국면을 맞고 있으며, 기존 시스템과는 다른 새로운 개념의 발전 시스템 개발도 이러한 노력의 일환으로 진행되고 있다.

최근 들어 연료전지와 가스터빈의 통합이 열과 전기를 효율적이고 친환경적으로 생산할 수 있는 방법으로 대두되고 있는데 이는 이미 성숙된 가스터빈 관련기술과 현재 발전하고 있는 연료전지 설계/제작 기술에 기인한다. 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시스템은 고체산화물 연료전지(SOFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC) 등과 같은 고온형 연료전지의 공기 공급부로 쓰이는 송풍기를 가스터빈으로 대체하여 좀 더 높은 효율로 전

기를 생산하려는 개념 하에 고안되었다. 이와 같은 통합은 연료전지가 가압된 상태에서 운전되기 때문에 연료전지 자체의 발전효율이 상승할 뿐만 아니라 압축기 구동에 쓰고 남은 터빈 동력으로 발전기를 구동하여 여분의 전력을 얻을 수 있어 결과적으로 시스템 전체의 발전효율 상승을 가져온다.

현재 전 세계적으로 하드웨어가 개발되어 시험운전을 마친 가스터빈/연료전지 혼합형 발전시

- 1) 항공사업기획그룹, 한국항공우주연구원
E-mail : kjaehwan@kari.re.kr
Tel : (042)860-2914 Fax : (042)860-2626
- 2) 항공추진그룹, 한국항공우주연구원
E-mail : ppm@kari.re.kr
Tel : (042)860-2335 Fax : (042)860-2626
- 3) 항공추진그룹, 한국항공우주연구원
E-mail : ssyang@kari.re.kr
Tel : (042)860-2333 Fax : (042)860-2626
- 4) 항공사업단, 한국항공우주연구원
E-mail : dslee@kari.re.kr
Tel : (042)860-2300 Fax : (042)860-2006

시스템은 미국 Siemens-Westinghouse 사의 가압형 시스템⁽¹⁾과 미국 Fuel Cell Energy 사의 상압형 시스템⁽²⁾이 있다. 이 밖에 유럽이나 일본에서도 혼합형 발전시스템에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있으며⁽³⁾, 하드웨어 개발완료가 임박해 있다.

이 같은 세계적 연구개발 움직임과 새로운 발전 시스템에 대한 요구에 부응하여, 국내에서도 2002년 산업자원부 후원으로 '가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발'이라는 차세대 신기술개발과제가 시작되었다. 국내에서 마이크로터빈과 연료전지는 각각 독립된 연구개발 주제로 다루어졌고 혼합형 발전 시스템에 대한 연구는 시스템 성능해석 정도에 머물러 있었으나, 본 과제의 시작을 통해 본격적인 혼합형 발전시스템의 연구개발이 시작되었다. 본 논문에서는 현재 진행되고 있는 '가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발' 과제를 소개하고 관련기술 및 개발의 문제점 등에 관해 논의한다.

2. 개발과제 개요

본 과제는 출력 200kW급, 발전효율 60%이상의 마이크로터빈/고체산화물 연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발을 목적으로 한다. 과제의 총괄은 한국항공우주연구원이며, 시스템 통합, 마이크로터빈 개발, 연료전지 시스템 개발은 각각 한국항공우주연구원, 한국기계연구원, 한국에너지기술연구원이 맡고 있다. 이 밖에도 3개의 정부출연기관과 8개의 국내대학이 관련 기반기술에 관한 연구를 수행하고 있다.

과제는 3단계에 걸쳐 진행되며, 각 단계 당 3년의 연구개발 기간이 부여된다. 현재까지 마이크로터빈은 수차례의 국책과제 및 기업의 자체개발을 통해 어느 정도 기술축적이 되어 있으나, 고체산화물 연료전지의 경우는 아직 수백 W 수준의 스택 및 시스템을 개발할 수 있는 수준이다. 따라서 과제의 최종목표 달성을 위해 마이크로터빈은 수차례 개발경험이 있는 50kW급 수준을 유지하고 고체산화물 연료전지의 발전용량을 단계별로 증가시키는 전략을 채택하였다.

1단계 목표는 50kW급 가스터빈과 5kW 연료전지로 혼합형 시스템 통합을 통해 개발절차를 확립하고 실제 하이브리드 운전을 구현 및 증명하는 것이다. 일반적으로 최적화된 혼합형 시스템의 경우 연료전지의 출력이 가스터빈 출력의 작게는 2-3배, 많게는 8-9배가 되기 때문에 본 과제의 1단계 개발 시스템이 최적화된 시스템은 아니다. 그러나 현재의 출력비로 하이브리드 운전을 구현 및 증명하기에 충분하며 1단계에서 얻은 많은 관련기술 및 정보는 그대로 200kW급 시스템에

적용되기 때문에 이와 같은 1단계 목표설정은 매우 타당하다 할 수 있다.

3. 시스템 Layout 선정 및 개념설계

1단계 개발대상 시스템의 Layout은 국외에서 개발된 시스템들의 종합적 분석과 국내 기술수준을 토대로 Fig. 1과 같이 결정하였다. 기본적인 형태는 Siemens-Westinghouse 사의 가압형 시스템(PH220)과 흡사하나 마이크로터빈과 연료전지가 각각 독립적으로 운전될 수 있고 연료의 개질이 스택의부에서 일어난다. 한편, PH220 시스템과 같이 최적화된 시스템은 정격운전에서 마이크로터빈으로부터의 압축공기가 전부 공기극으로 공급되고 연소기(Combustor)가 꺼져있는 반면, 본 시스템은 앞서 언급한 출력비의 불균형으로 마이크로터빈에서 압축된 공기의 일부만이 연료전지로 공급되며 대부분의 공기가 연소기로 by-pass 되어 연소기가 항상 운전하게 된다.

연료전지 단독운전의 경우 공기는 보조 압축기에서 압축되어 가열기(HT1)에서 가열된 후 공기극(Cathode)으로 공급된다. 연료는 시동 시에는 독립적 연료 공급 시스템(N₂, H₂ 등)으로부터, 정격운전 시에는 LNG 개질 시스템으로부터 연료극(Anode)으로 공급된다. 공기와 연료의 전기화학반응에 의해 전기가 발생하며, 반응 후 공기 및 미반응 연료는 연료전지 연소기(FC Burner)에서 연소된 후 대기로 배출된다. 이때 연료전지 스택의 가압 운전은 압력조절 밸브(V7 in Fig. 1)로 가능하다. Siemens-Westinghouse 사 SOFC 스택의 Combustion zone과 같은 역할을 수행하는 연료전지 연소기는 개발대상 시스템의 고유한 구성부이며, 미반응 연료극 가스를 연소시켜 스택으로 유입되는 공기를 예열한다. 마이크로터빈은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연료전지와 연결된 유체가 운전변환 밸브들(V3, V6, FA1)로 차단되어 있기 때문에 연료전지 운전 중에도 단독운전이 가능하

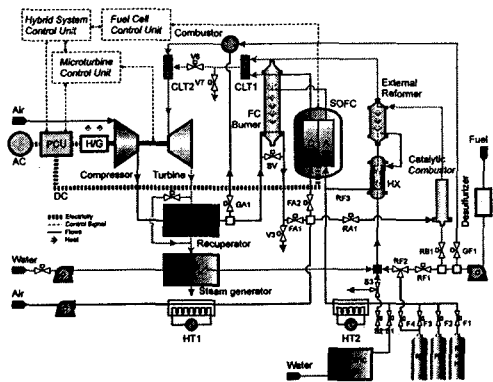


Fig. 1 Schematic of 60kW GT/FC Hybrid System

다. 마이크로터빈과 연료전지는 각각의 제어기에 의해 독립적으로 운전되다가 시스템 상위 제어기의 운전변환 과정(turn-over)을 통해 하이브리드 운전모드로 변환되며, 변환 후에는 연료전지의 공기공급은 마이크로터빈의 압축기 담당하며, 연료전지 연소기에서의 배출가스는 대기가 아닌 터빈으로 유입된다.

한편, LNG 개질시스템은 개질 반응기, 촉매연소기, 열교환기로 구성되며 스택 외부에 장착된다. 개질 반응에 필요한 열은 연료전지 시스템으로 공급된 일부의 공기와 연료를 이용한 촉매 연소를 통해 얻고 설정된 스택유입 온도(600℃)를 맞추기 위해 열교환기를 사용한다. 스택으로의 황 성분 유입을 막기 위한 탈황기(Desulfurizer)는 흡착제를 이용하는 방식을 채택하였다

시스템 구성 및 목표성능 달성을 위해 필요한 각 구성부의 요구 성능 및 특성은 정상상태 및 천이상태 성능해석을 통해 도출하였으며, 이 같은 개념설계에 필요한 성능해석 프로그램은 화학 공정해석에 많이 쓰이는 HYSYS를 이용하여 개발하였다.

4. 마이크로터빈

개발대상 마이크로터빈(Fig. 2)은 원심 압축기, 원심 터빈, 고속 발전기가 한 축으로 연결된 단축(single shaft) 가스터빈 이며, 기본적 공력 설계는 한국기계연구원의 기존 모델⁽⁴⁾과 유사하다. 따라서 본 개발단계에서는 기존 모델에서 고려되지 않은 고속 발전기 장착과 공기 베어링 개발에 초점을 맞춰 연구개발을 진행하고 있다. 고속 발전기는 미국의 CALNETIX 사 제품을 도입하였으나, 축 설계 및 동특성 시험은 한국기계연구원이 독자적으로 수행하였다.

마이크로터빈뿐만 아닌 혼합형 발전시스템의 유지보수 편의성을 위해 과제기획 초기부터 공기 베어링의 장착이 요구되었다. 이에 따라 개발대상 마이크로터빈에는 1개의 스러스트 베어링과 2개의 저널 베어링 장착되었다. 3개의 베어링 사

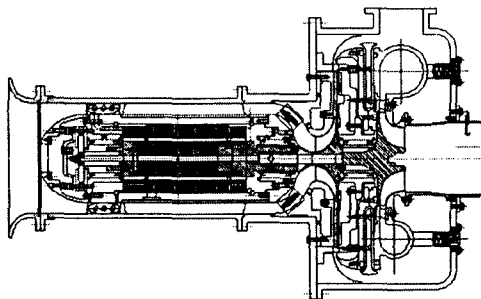


Fig. 2 50kW class microturbine

Table 1 Microturbine specifications

Parameters	Values
Turbine inlet temperature, °C	850
Pressure ratio	3.5
Inlet airflow rate, kg/s	0.7
Rotational speed, rpm	65,000
Efficiency* (AC/LHV), %	13

* : without recuperator

용은 고속회전에서의 안정성을 보장하지만 한 개의 저널 베어링이 고온에 노출되어 내구성 확보에 어려움이 있다. 따라서 현재 연구개발은 고온에서의 베어링 내구성확보에 중점을 두어 진행되고 있다. 마이크로터빈의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

5. 연료전지 발전시스템

연료전지 시스템은 SOFC 스택, 가압운전 시스템, 연료개질 시스템 등으로 구성되며, 개발초기에 단독운전용으로 설계되었다가 혼합형 발전시스템에서의 하이브리드 운전을 위해 일부 하드웨어 및 제어시스템이 향후 변경된다.

앞서 언급한 바와 같이 국내기술로 kW급 SOFC 스택의 공급이 어렵기 때문에 국외로부터 스택을 도입하였으나 가압 운전시스템 제작과 이과 관련된 BOP는 국내 기술로 수행되었다. SOFC 단위전지와 5kW 스택은 독일의 Juelich 연구소로부터 도입하였으며, 그 형상 및 메탄 상압운전 시 사양을 Fig. 3과 Table 2에 각각 나타내었다. Table 2 시 알 수 있듯이 Juelich 측의 가압운전 및 개질

Table 2 5kW SOFC stack specifications

Parameters	Values
Stack power for methane operation, kW	5
Maximum operating temperature, °C	800
Operating pressure, atm	1
Number of cells in stack	40
Mean operating voltage per cell, V	0.75
Rated operating current density, A/cm ²	0.462
Fuel	methane

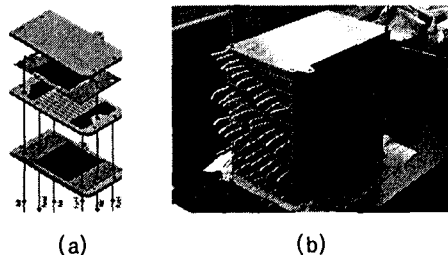


Fig. 3 Juelich SOFC (a) a unit cell (b) 5 kW stack

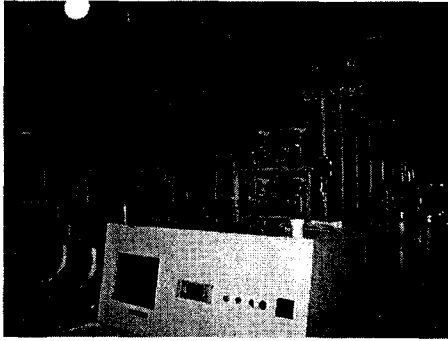


Fig. 4 5kW SOFC operating system

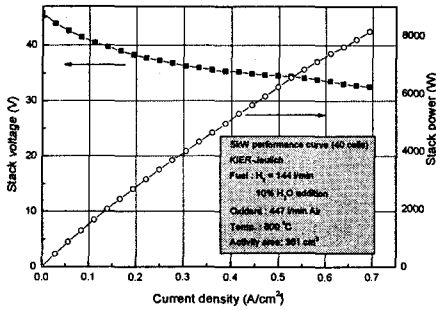


Fig. 5 5kW stack performance (H_2 operation)

가스 운전 자료는 없으며, 본 개발과제를 통해 이 같은 특성이 파악된다.

앞서 언급한 바와 같이 연료전지 시스템은 고유한 연료 개질시스템을 갖고 있다. 개질 반응기는 Shell & Tube 형의 열교환기 형태이며, Tube 안쪽에 니켈 촉매가 코팅되어 있어 LNG가 통과하면서 개질된다. 이때 필요한 열은 촉매 연소기의 연소가스가 Shell 측을 통과하면서 공급해 준다. 이때 개질 가스는 약 800°C의 고온이며 연료전지의 연료극에 적절한 온도(=600°C)로의 공급을 위해 개질기로 유입되는 저온 LNG와 열교환 한다.

5kW 발전 시스템은 상압에서의 수소운전과 개질가스 운전을 통해 성능을 확인한 상태이나, 단독 가압운전 중 압력조절 실패로 인한 가스누설로 스택이 손상되어 운전이 중단되었다. 2차로 도입되는 스택은 가압운전에 적합한 밀봉재의 도입하여 설계하였으며, 문제가 된 압력조절 방법을 수정하여 가압운전을 수행할 예정이다. 가압운전이 성공하면 최종 시스템에 연계하여 하이브리드 운전을 수행하게 된다. 5kW 가압운전 시스템과 이를 이용한 상압 수소운전에 성능곡선을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

6. 혼합형 발전 시스템 통합



(a) (b) (c)

Fig. 6 Tests of ancillary components (a) combustor (b) heat exchanger (c) fuel cell burner

시스템 통합은 마이크로터빈 및 연료전지 시스템 개발과 병행하여 1) 보조 구성부 개발 및 시험평가 2) 모사 시스템 운전을 통한 구성부 연계 운전 및 제어로직 확립 3) 최종 시스템 통합 및 시험평가의 단계로 진행된다.

개발된 가스터빈 구동연소기, 연료전지 연소기, 열교환기 등의 보조 구성부는 독립적 시험설비를 구축하여 전체 시스템이 요구하는 성능을 평가(Fig. 6)하였다. 국외 혼합형 발전시스템 개발과정의 경험에 의하면 가스터빈 구동연소기는 넓은 운전영역에서의 연소 안정성이 요구된다. 항공우주연구원 개발한 가스터빈 구동연소기는 캔 형의 LNG 연소기이며, 성능시험 결과 넓은 운전영역에서 연소 안정성을 보였으며, 정격운전에서도 성능요구 조건에 만족 하였다 (연소효율 99.6%, 압력손실 5%, pattern factor 12.6%). 연료전지 연소기는 연료극 미반응 가스와 공기를 공급하여 연소특성을 살펴본 결과 정격운전 조건에서 자발화 특성을 보여 별도의 점화는 필요 없는 것을 확인 하였으며, 연료전지로 유입되는 공기와의 열교환 성능도 설계요구조건에 부합하였다. 터빈의 배기열을 회수하는 열교환기는 plate-fin 형으로 설계되었으며 시험결과 열교환 효율 83%, 압력손실 3.6%로 설계요구조건에 부합하였다. 개발결과 열교환기의 코어 및 헤더의 설계는 비교적 수월하였으나, plate-fin 형 열교환기 제작을 위한 국내의 sus brazing 기술은 아직 미흡하였으며, 향후 지속적인 기술향상이 요구된다. 보다 향상된 기술이 확보될 경우 고효율의 콤팩트한 열교환기를 제작 할 수 있을 뿐만 아니라 보다 긴 수명을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

개발 및 시험평가를 마친 보조 구성부들은 터보차저, 수정된 연료전지 연소기 시험장치와 통합되어 모사시스템을 구성한다. Fig. 7 과 Fig. 8 에 모사 시스템의 Layout 과 실제 설비를 보였다. 터보차저는 마이크로터빈의 열유체역학적 운전특성을 모사할 수 있으며, 수정된 연료전지 연소기 시험장치는 연료전지의 열유체역학적 운전특성 뿐만 아닌 전기화학 반응 후 배기가스 성분을 모사할 수 있어 연료전지 연소기를 최종 시스템과 같은 조건에서 운전할 수 있다. 이 모사 시스템은 최종 시스템이 부분적으로 조립된 (Partially

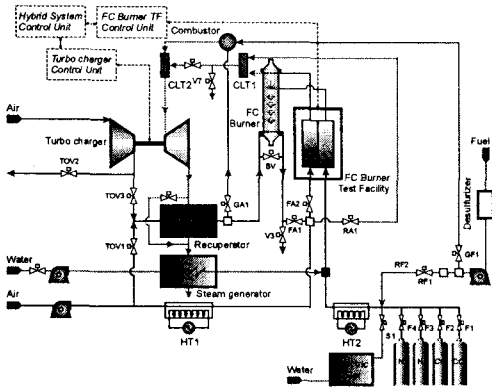


Fig. 7 Layout of simulated GT/FC hybrid system

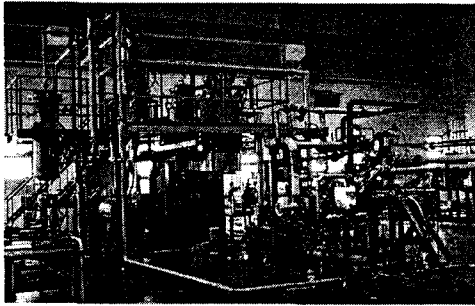


Fig. 8 Simulated GT/FC hybrid system

integrated) 시스템임과 동시에 통합 전 각 구성부의 연계운전 특성을 파악하고, 상위 제어기의 운전 제어로직을 확립하기 위한 시험설비이기도 하다. 마이크로터빈과는 달리 터보차저는 전력을 이용한 구동이 불가능하기 때문에 Fig. 7에서 보는 바와 같이 압축공기를 이용하여 터빈을 구동시킨 후 연소기를 점화 시키는 타력구동을 한다. 정해진 회전수에서 운전변환 밸브(TOV1→closed, TOV2→closed, TOV3→opened) 동작에 의해 터보차저의 압축기로 흡입되는 공기로 터빈을 구동하는 자력운전이 가능하게 된다. 모사시험 결과 각 구성부의 성능은 연계운전 시에도 변함이 없었으며, 현재는 하이브리드 운전으로의 전환 시험을 진행 중에 있다. 연료증감에 따른 시스템의 주요 운전변수들의 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

최종적으로 마이크로터빈과 연료전지 시스템의 개발이 완료되면, 현재 제작중인 전력변환장치(PCU) 및 상위제어기(Hybrid system control unit)와 함께 현재의 모사시스템에 통합되어 최종 60kW급 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템이 완성된다.

7. 결 론

본 논문에서는 현재 산업자원부 지원 하에 진

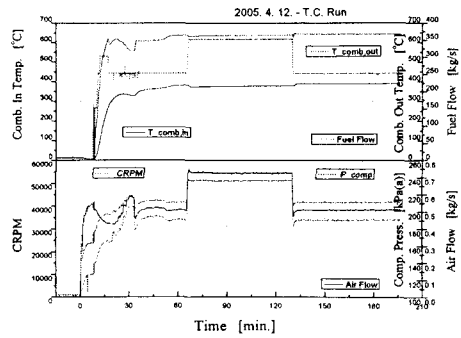


Fig 9 Variation of main operating variables with fuel flow rate change

행 중인 ‘가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전 시스템 개발’ 과제에 대해 간략하게 소개 하였다. 과제 최종목표인 200kW급 고효율(>60%) 혼합형 발전시스템을 개발하기 위한 1단계 연구개발 목표는 60kW급 기술 시현기(Demonstration unit) 개발이며 이를 통해 시스템 개발절차를 확립하고 실제 하이브리드 운전을 구현 및 증명하는 것이다. 시스템 통합관련 기술개발은 마이크로터빈과 연료전지 시스템 개발과 병행하여 진행되고 있으며, 최종 시스템 통합 전 모사 시스템 운전을 통해 하이브리드 운전의 특성을 파악하고 운전 제어로직을 확립하였다. 1단계의 마이크로터빈, 연료전지 시스템 개발 및 시스템 통합을 통해 축적된 설계 및 제작 관련기술은 향후 최적화된 최종 시스템 개발에 효과적으로 적용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술개발사업으로 수행되는 “가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발” 과제의 연구 결과물이며, 연구를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사의 드립니다.

References

- [1] Ghezal-Ayagh, H., Sub-megawatt DFC/T test results and future plan, 3rd annual DOE/U.N. Hybrid Conference and Workshop, 2003.
- [2] Veyo, S. E., Tubular SOFC hybrid power systems, 3rd annual DOE/U.N. Hybrid Conference and Workshop, 2003.
- [3] 吉田行男, 久留長生, 武信弘一, 2004, “高效率發電裝置固体酸化物燃料電池(SOFC),” 三菱重工技報, Vol. 41, No.1, pp.30-31.
- [4] 김수용, 박무용, 최범석, 안국영, 최상규, 2003, “50kW 마이크로 가스터빈 개발,” 유체기계연구개발발표회 논문집, 314-319.