



연료전지/마이크로터빈 하이브리드 발전시스템

글 ■ 김재환 / 한국항공우주연구원, 선임연구원
■ 양수석 / 한국항공우주연구원, 책임연구원
■ 이대성 / 한국항공우주연구원, 책임연구원

e-mail ■ kjaehwan@kari.re.kr

이 글에서는 차세대 분산발전시스템으로 급부상하고 있는 연료전지/마이크로터빈 하이브리드 발전시스템을 소개하고, 국내외 기술개발 동향, 관련기술 및 향후 개발계획 살펴본다.

높은 에너지변환 효율을 갖는 동력원의 개발 및 고효율 발전은 인류가 전기 에너지를 사용하면서부터 계속되어온 과제였으며, 앞으로도 효율적 전력생산에 대한 노력은 계속될 것이다. 기존의 발전용 동력원들은 화석연료를 사용하는 왕복동 엔진, 스팀터빈, 가스터빈 등의 열동력 기관이 주를 이루었으며, 지금까지 구성부의 성능향상 및 응용 사이클 개발 등을 통하여 꾸준한 효율증대가 이루어져 왔다. 하지만 이들 열기관들은 이들이 가진 고유의 저효율 에너지 변환과정(열에너지→기계에너지)으로 인하여 효율증대에 제한(카노효율)을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 한편, 열동력 사이클을 이용한 전력생산 방법과는 다르게 직접에너지 변환(direct energy conversion)을 통한 전력생산도 꾸준히 연구되어 오고 있는데, 이의 대표적인 예가 바로 연료전지(Fuel Cell)이다. 연료전지는 연료가 가진 화학적 포텐셜 에너지를 직접 전기에너

지로 변환함으로써 앞서 언급한 낮은 효율의 에너지변환 과정이 생략되기 때문에 매우 높은 발전효율을 갖는다. 이미 연료전지에 대한 이론 및 전력생산 가능성은 19세기 초에 증명되었고, 20세기 중반에 유인우주선 등에 탑재됨으로써 차세대 전력생산방식으로 주목받았으나, 소재와 제작공정 기술의 한계, 고가의 제작비용 및 대체에너지원 개발로 인해 한때 연구개발이 주춤하였다. 그러나 20세기 후반 들어 환경문제 및 고효율 발전에 대한 필요성이 심각히 대두되면서

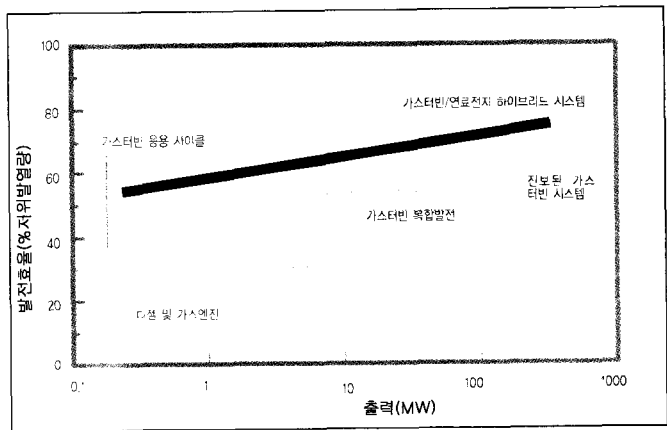


그림 1 하이브리드 시스템과 타동력원의 효율 비교



지난 20년 동안 선진국을 중심으로 다양한 연료전지 및 그 응용시스템 개발이 전략적으로 수행되었다. 한편, 최근에 가장 주목받고 있는 연료전지 응용시스템은 연료전지/마이크로터빈 하이브리드 발전시스템이며, 이는 고온형 연료전지(용융탄산염 또는 고체산화물 연료전지)와 고온열원을 필요로 하는 기존의 열동력 기관(마이크로터빈)의 상호보완적 결합을 통한 고효율 전력생산을 목표로 한다. 현 기술수준에서 연료전지 발전시스템의 단독운전으로 얻을 수 있는 발전효율은 약 45% 수준이며, 연료전지 자체의 성능개선을 통한 그 이상의 발전효율획득은 향후 많은 노력과 시간이 필요할 것으로 예상된다. 그러나 이미 기술검증 단계에 있는 마이크로터빈과 하이브리드 시스템을 구성할 경우 현 기술수준에서 약 60%에 가까운 발전효율을 얻을 수 있으며(그림 1), 미국의 경우 2010년에 70% 이상, 2015년에 80% 이상의 발전효율로 시장에 진입한다는 목표를 가지고 있다. 하이브리드 발전시스템은 기존의 동력원들에 비해 배출물이 적어 바로 수요처에 위치(on-site)하여 전력생산이 가능할 정도로 환경 친화적이다. 또한 기존의 동력원들이 소형화에 따른 효율저하가 심한데 반하여 하이브리드 발전시스템은 저

출력 용량에서도 고효율을 낼 수 있는 특징을 갖는다. 이 같은 특징들은 최근 급속히 성장하고 있는 분산발전방식에 꼭 필요한 요구조건들이며, 하이브리드 발전시스템은 이러한 특징에 힘입어 향후 분산발전시장에서 경쟁력 있는 발전방식이 될 전망이다.

시스템 개요 및 기술개발 동향

하이브리드 시스템은 기존의 고온형 연료전지 발전시스템(그림 2)의 고효율화를 목적으로 고안되었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 고온형 연료전지 발전시스템에는 연료전지 스택에서의 전기화학반응에 필요한 공기(산소)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 3에서 보는 바와 같이 마이크로터빈과 하이브리드화 될 경우, 1) 연료전지 스택으로 가압된 공기를 공급할 수 있어 스택자체의 발전효

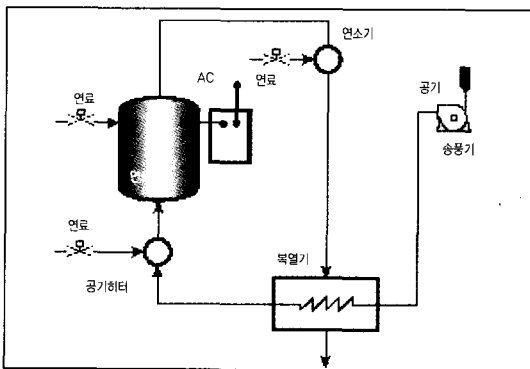


그림 2 고온형 연료전지 발전 시스템

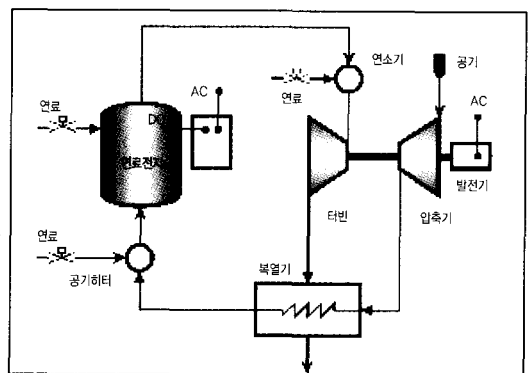


그림 3 가압형 하이브리드 발전 시스템



표 1 미국 DOE주관 하이브리드 발전시스템 관련 프로젝트

주관기관	연구내용
Ntional Fuel Cell Research Center	시스템 통합 방법
Rolls-Royce	분산발전용 소형 터보제너레이터
Rolls-Royce	시장평가 및 시장진입에 관한 연구
Siemens-Westinghouse	고체산화물 연료전지/가스터빈
Fuel Cell Energy	융융탄산염 연료전지/가스터빈
Honeywell GE	SECA에 기초한 연료전지 하이브리드

율이 높아지며, 2) 연료전지 출구의 고온(600~1000°C) 반응가스는 압축기 구동용 터빈을 구동하는 데 사용되어 시동을 제외한 운전 중에 공기공급을 위한 전력사용이 없게된다. 또한, 3) 압축기 구동 후 여분의 터빈동력으로 추가전력을 생산하여 결과적으로 전체 시스템의 발전효율 증대를 가져온다. 위의 관점과는 다르게 하이브리드 발전시스템을 마이크로터빈의 고효율화 측면

에서 보면, 전력생산이 가능한 연소기 장착 마이크로터빈이라고 생각할 수 있다. 하이브리드 발전시스템은 두 개의 다른 시스템이 독립적 발전을 하는 것이 아니라, 서로가 작동유체를 공유하는 시스템이기 때문에, 상호간의 열유체역학적 매칭은 매우 중요하다. 두 시스템이 최고 발전효율을 갖도록 열유체역학적으로 최적 매칭되었을 경우, 연료전지의 출력은 전체출력의 약 80%, 마이크로터빈의 출력이 약 20%를 차지한다. 연료전지/마이크로터빈 하이브리드 발전시스템의 연구개발은 현재 미국에서 가장 활발히 진행되고 있으며, 정부의 전폭적인 지원과 기업들의 적극적인 참여가 이루어지고 있다. 1998년에 미국의 에너지성(DOE) 주관 하에 하이브리드 발전시스템의 개념설계 및 타당성 분석이 수행되었으며, 현재 이를 토대로 기획되어 진행 중인 여섯 개의 관련 프로젝트는 표 1과 같다. 이 과제들과 관련되어 실제 하드웨어가 개발된 시스템은 Siemens-Westinghouse 사의 220kW급 SOFC/MGT System(그림 4)과 Fuel Cell Energy 사의 300kW급 MCFC/MGT System(그림 5)이며, 현재 가장 상용화에 근접해 있다. Siemens-Westinghouse 사의 시스템은 자체 개발한 원통형 고체산화물 연료전지(SOFC)와 Ingersoll-Rand 사의 마이크로터빈을 이용한 가압형 하이브리드 발전시스템이며, 출력 220kW, 발전효율 약 57%

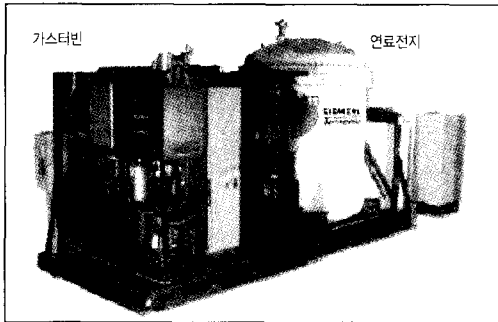


그림 4 Siemens-Westinghouse 사의 220kW 하이브리드 시스템

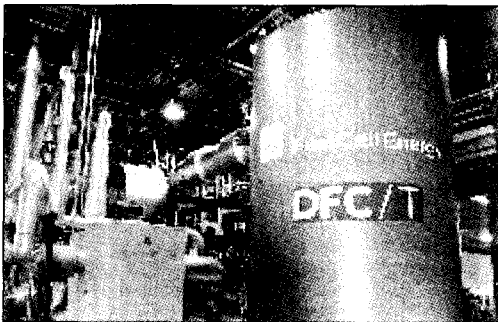


그림 5 Fuel Cell Energy 사의 300kW 하이브리드 시스템



의 성능을 보인다. 이미 Univ. of California Irvine에서의 시운전을 통해 성능이 검증되었으며, 현재 상용화를 앞둔 기술검증 단계에 있다. 한편, Fuel Cell Energy사의 시스템은 하이브리드 발전시스템의 또 다른 형태인 상압형(연료전지가 터빈의 후방에 위치)이며, 자체 개발 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 Capstone 사의 마이크로터빈을 이용해 설계/제작되었다. 이 시스템은 출력 300kW, 발전효율 55% 이상으로 설계되었으며, 현재 성능검증 단계에 있다. 현재 미국에서는 Vision 21 사업의 일환으로 보다 큰 출력용량의 하이브리드 발전시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있으며, 2010까지 kW 당 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 기초기반 연구는 1999년도에 시작된 상태이다. 유럽 연합에서도 기업 중심의 컨소시엄이 구성되어 2000년도부터 4년 동안 약 300억의 개발비를 투입하여 1MW급 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템을 개발하고 있다. 국내에서의 하이브리드 발전시스템에 관한 연구개발은 개념설계와 성능해석 수준에 머물러 있으며, 핵심 구성부인 마이크로

가스터빈과 연료전지는 각각 독자적인 개발 과정을 밟아왔다. 현재 마이크로터빈과 관련된 요소기술들은 국내에서 수행된 개발과제들을 통하여 어느 정도 확보되어 있으나, 고온형 연료전지의 경우 아직 선진국 수준의 출력용량을 제작할 수 있는 기술이 확보되어 있지 않은 상태이다.

하이브리드 발전시스템 관련 요소기술

하이브리드 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/제작기술을 들 수 있다. 고효율 압축기/터빈(그림 6) 개발을 위해서는 고효율 공력설계기술, 높은 터빈입구온도 확보를 위한 내열재 개발 및 코팅기술, 정밀주조법 등이 필요하며, 연소기의 경우는 저공해 연소기술뿐만 아니라 희박 예혼합 연소에서의 연소 안정성 확보가 무엇보다도 중요하다. 일반적인 열교환기는 비교적 용이하게 제작할 수 있는 데 반해, 컴팩트한 고효율 복열기(그림 7)의 설계/제작 기술은 몇 개의 선진국 제조업체만이

가지고 있으며, 이를 위해서는 고집적 매트릭스 제조기술, 정밀 공정기술 등이 필요하다. 고속 발전기의 설계시에는 고속회전의 원심력으로 인해 발생하는 리테이너의 큰 스트레스 및 진동을 고려한 세밀한 설계가 이루어져야 하며, 비윤활 구동을 위한 에어 포일 베어링의 구현을 위해서는 고속

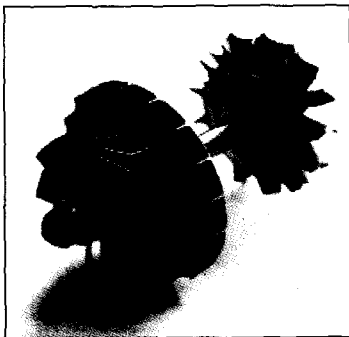


그림 6 마이크로터빈의 압축기/터빈

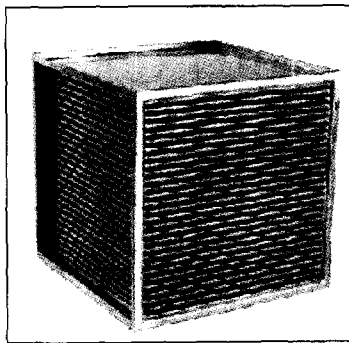


그림 7 고집적 고효율 복열기

