

<초청논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.5.299

## 고온형 연료전지 기반 통합형 발전시스템 - 연구개발 동향 고찰 -

김 동 섭<sup>†</sup>, 박 성 구<sup>\*</sup>

(2008년 12월 10일 접수, 2009년 3월 20일 수정, 2009년 3월 20일 심사완료)

### Integrated Power Generation Systems Based on High Temperature Fuel Cells - A Review of Research and Development Status -

Tong Seop Kim and Sung Ku Park

**Key Words :** SOFC(고체산화물 연료전지), MCFC(용융탄산염 연료전지), Hybrid System(하이브리드 시스템), CO<sub>2</sub> Separation(이산화탄소 분리), IGFC(가스화 연료전지), Alternative Fuel(대체연료)

#### Abstract

Fuel cells are expected to be promising future power sources in both aspects of thermal efficiency and environmental friendliness. Accordingly, worldwide research and development efforts have been enormously increasing recently in various applications such as power plants, transportation and portable power sources. Among others, high temperature fuel cells, such as solid oxide fuel cells and molten carbonate fuel cells, are suitable for electric power plants. Moreover, their high operating temperature is quite appropriate to construct further advanced integrated systems. This paper reviews recent literatures on research and development of integrated power generation systems based on high temperature fuel cells. Research and development efforts are summarized in the area of fuel cell/ gas turbine hybrid systems, application of carbon capture technology to fuel cell systems, integration of coal gasification with fuel cells, and the use of alternative fuels.

#### 1. 서 론

지속적인 화석연료의 고갈에 대한 우려감과 환경문제의 심각성이 보고되고 이에 대한 공감감이 커지면서 에너지 분야에 대한 연구개발의 중요성이 높아지고 있다. 특히 전력산업 분야에서도 새로운 시스템 개발에 대한 관심이 커지면서 환경친화적이며 효율이 높은 여러 가지 신개념 시스템들이 제안되고 있다. 특히, 연료전지는 이론적으로 기존의 열기관들에 비해 고효율이며 유해가스 배출이 적어 차세대

발전설비로 관심을 받고 있다. 연료전지에는 여러 종류가 있지만, 그 중에서 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell), 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell)와 같은 고온형 연료전지는 발전설비에 응용하기에 적합하다. 더욱이 고온형 연료전지는 고효율일 뿐만 아니라 작동온도가 높아서 다양한 목적의 고온 열원으로도 사용이 가능한데, 가스 터빈과 같은 기존 열기관과의 결합을 통해 이러한 열원으로써의 잠재력을 가장 잘 활용할 수 있다. 따라서 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템은 전세계적으로 관심과 연구개발의 대상이 되고 있다.<sup>(1~3)</sup> 이러한 노력의 결과로 실용화를 목적으로 실질적으로 작동하는 하이브리드 시스템이 실현된 바 있으며,<sup>(4,5)</sup> 연구용 시험설비가 구성된 예가 보고되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

<sup>†</sup> 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : kts@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7307 FAX : (032)868-1716

<sup>\*</sup> 인하대학교 대학원 기계공학부

기존의 상용화에 근접한 하이브리드 시스템들의 경우 연료전지의 출력이 대체로 수백 kW 로 제한되어 소규모 분산 발전 시스템으로 응용하기에 적합하였지만,<sup>(1)</sup> 기술의 발전으로 최근에는 효율이 70% 이상인 수 MW~수십 MW 급인 하이브리드 시스템에 대한 기초 설계 연구도 진행되고 있다.<sup>(8)</sup>

한편 화석연료 고갈에 대처하기 위해 연료전지에 다양한 연료를 사용하는 연구 또한 진행이 되고 있으며, 연료전지와 석탄가스화 공정을 결합한 IGFC(Integrated Gasification Fuel Cell) 시스템과 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)와 연료전지를 결합한 IGCC/Fuel Cell 시스템 등이 제안되고 있다. 또한 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출이 현저히 적어 친환경적으로 알려진 연료전지도 반응에 필요한 수소를 생산하기 위한 개질반응을 포함할 경우 이산화탄소 발생을 피할 수 없으므로 환경문제에 대처하기 위해 이산화탄소를 분리하기 위한 노력이 진행되고 있으며, 순산소 연소 기술과의 결합을 통해 이산화탄소를 분리하는 시스템도 제안된 바 있다.<sup>(3,9,10)</sup>

본 논문은 고온형 연료전지를 기반으로 한 통합형 발전시스템들에 대해서 최근 연구 개발 동향과 전망을 정리한다. 연료전지를 기반으로 한 다양한 시스템들의 개발과 관련된 기초 및 응용 연구분야를 다룬 최근의 문헌들을 조사하여 인용하였다. 고온형 연료전지의 기본적인 사항을 간단히 언급한 뒤 대표적인 응용 시스템인 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 연구 개발 동향을 분석한다. 이어서 최근 주요한 이슈로 부각되는 이산화탄소 제거와 연계된 기술 전망에 대해서 살피고, 석탄가스화 기술을 접목한 시스템에 대한 연구들에 대해서 정리한다.

## 2. 고온형 연료전지

### 2.1 개요

연료전지는 연료가 가진 화학에너지를 전기화학 반응을 통해 직접 전기에너지로 변환시키는 직접 에너지 변환장치로서 셀 반응을 통해 전기적 에너지를 생산하는데, 셀 반응이 발열반응이기 때문에 부수적으로 열도 발생시킨다. 특히 고온형 연료전지에서는 높은 온도에서 열이 발생하므로 이를 효과적으로(예를 들어 개질열로 공급) 사용하는 것이 가능하여 저온형 연료전지에 비하여 전체 발전 시스템의 효율을 더 높게 구현하는 것이 가능하다.

일정한 작동온도에서 손실이 없는 이론적인 반응을 가정하면, 연료전지의 이론적인 출력은

Gibbs free energy 를 사용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$W = -\Delta G = -n_f \Delta \bar{g}_f = n_f z F E \quad (1)$$

여기서  $F$ ,  $n_f$ ,  $z$  는 각각 패러데이 상수, 연료의 몰수 그리고 연료의 단위 몰 당 전자의 수를 나타낸다. 이론적인 셀 전압과 효율은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E = -\Delta \bar{g}_f / z F \quad (2)$$

$$\eta_{rev} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \Delta S}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H} \quad (3)$$

엔탈피와 엔트로피의 변화량은 작동온도에 따라 크게 변화하지 않으므로, 작동온도가 증가할수록 연료전지의 이론적인 효율은 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 카르노 사이클과 같은 이상적인 열기관과 반대 경향이다. 순수 수소를 사용하는 이상적인 연료전지의 셀 전압은 작동온도에 따라 1.23~0.92V (25~1000°C)이지만,<sup>(11)</sup> 연료전지의 실제 작동 셀 전압은 여러 가지 손실요인들에 의해 이론적인 셀 전압에 비해 낮게 나타나게 된다.

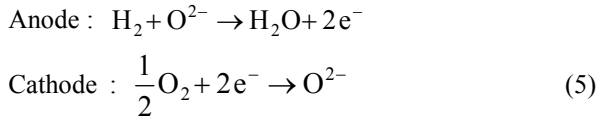
$$V_{cell} = E - \sum E_{loss} \quad (4)$$

연료전지 셀 전압을 감소시키는 3 가지 주요원인은 활성화(Activation) 손실, 저항(Ohmic) 손실, 농도(Concentration) 손실이다. 이러한 손실들은 여러 작동 파라미터, 예를 들어 온도, 압력, 전류밀도 등에 영향을 받는다. 활성화 손실이 고온에서 작으므로 SOFC 와 MCFC 등의 고온형 연료전지는 저온형 연료전지에 비해 상대적으로 작은 활성화 손실을 나타낸다.<sup>(11)</sup> 따라서 고온형 연료전지는 저온형 연료전지에 비해 이론적인 셀 전압은 낮지만 보고되는 실제 작동 셀 전압은 낮지 않다. 또한 물을 배출하는 저온형 연료전지와 달리 고온형에서는 증기를 배출하게 되므로 물관리를 피할 수 있으며 기존의 열기관들과의 결합이 용이한 장점이 있다. 또한 압력이 높을수록 셀 전압이 높는데(이론 전압 자체가 높음), 저온형에서는 공기의 가압에 필요한 동력이 소모되기 때문에 전체 발전 시스템 성능면에서 가압의 장점을 이용하기가 쉽지 않지만, 고온형에서는 가압된 연료전지 출구가스가 온도도 높기 때문에 추가적인 출력을 발생하도록 시스템을 구성할 수 있기 때문에(예를 들어 터빈 등을 이용함. 3 절의 하이브리드 시스템 참조)

가압의 효과를 충분히 이용할 수 있다.

## 2.2 고체산화물 연료전지(SOFC)

SOFC는 여러 가지 연료전지 중 가장 높은 온도(600~1000°C)에서 작동하게 되며, 각각의 전극에서의 반응은 아래와 같다.



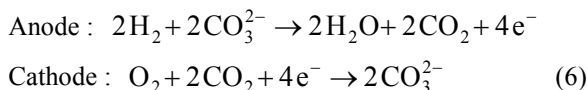
SOFC에서는 원 연료의 개질 시 발생하는 일산화탄소(CO)도 수소와 마찬가지로 전기화학반응에 참여를 하게 되며 이것은 SOFC가 가지는 많은 장점 중 하나이다.

셀 전압은 셀의 재질과 두께, 작동온도/압력 및 전류밀도에 의해 결정되며 현재 보고되는 SOFC의 작동전압은 0.7~0.9V이다. Siemens-Westinghouse사에서 초기에 개발한 100kW급 연료전지는 약 1000°C에서 작동하며 열효율은 약 46%인 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 또한 많은 연구진들이 800°C 부근에서 작동하는 SOFC에 대한 연구를 수행하고 있으며 특수한 목적을 위해 더 낮은 온도(500~600°C)에서 작동하는 연료전지에 대한 연구도 진행되고 있고,<sup>(12)</sup> 미국 에너지국(Department of Energy)의 SECA(Solid State Conversion Alliance) 프로그램을 통해 5~10kW급 소형 연료전지에 대한 연구도 진행 중에 있다.<sup>(1,9)</sup>

따라서 다양한 출력범위를 가지는 SOFC는 고정형 발전뿐만 아니라, 가정용 전원, 수송용 보조 전원 장치 등에도 응용되어 사용될 것으로 전망된다.

## 2.3 용융탄산염 연료전지(MCFC)

MCFC는 일반적으로 600~700°C에서 작동하며, 각각의 전극에서의 반응은 아래와 같다.

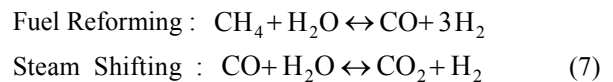


SOFC와 마찬가지로 MCFC 역시 일산화탄소를 연료로 사용할 수 있으며, 일반적으로 MCFC의 전압은 0.7~0.85V이고 0.9V를 상회하는 것도 가능할 것으로 예상되고 있다.<sup>(13)</sup> MCFC는 주로 고정형 발전 용도로 개발이 되고 있으며 여러 용도로 여러 국가에서 개발되고 있다. 가장 상용화에 성공한 예는 Fuel Cell Energy 사로서 250kW급 모듈개발을 시작으로 현재에는 MW급의 상용화에

성공하였으며, 효율은 40% 후반대로 알려져 있는데, 장래에는 가스터빈과의 결합을 통해 최고 70%에 이르는 효율을 기대하고 있다.<sup>(5)</sup>

## 2.4 부가 장치

여러 측면에서 봤을 때 수소를 연료전지의 연료로 사용하는 것이 가장 효과적이다. 그러나 수소 인프라가 아직 구축이 되지 않았기 때문에 연료전지 발전 시스템은 주로 천연가스 등 기존의 탄화수소 연료를 사용하게 되고 따라서 반드시 가스처리 시스템이 필요하게 된다. 그 중 가장 중요한 구성부는 개질기(Reformer)이며, 개질 방법은 수증기 개질(Steam Reforming), 부분산화(Partial Oxidation), 자열 개질(Autothermal Reforming)로 구분된다.<sup>(11)</sup> 발전용 고온형 연료전지의 경우 수증기 공급이 용이하여 주로 수증기 개질 방법을 사용하며, 이러한 수증기 개질은 아래와 같은 두 가지 반응으로 구성된다.



개질 반응에 필요한 수증기는 배열을 회수하여 외부로부터 공급하는 방법과 충분한 양의 수증기가 포함되어 있는 연료극 출가 가스를 재순환하여 공급하는 방법이 있다. 개질 반응은 흡열반응으로 반응에 필요한 열을 외부로부터 공급하는 방식과 발열반응인 셀 반응으로부터 직접 열을 공급하는 방식이 있으며, 전자를 외부개질(External Reforming), 후자를 내부개질(Internal Reforming)로 구분한다. 내부개질의 경우 수증기를 생산하기 위한 보조적인 장비를 설치하지 않아도 되기 때문에 시스템을 간결하게 구성할 수 있는 장점이 있고 열효율도 높다. 또한 셀 내부에 개질기가 위치하여 개질에 필요한 열을 직접 공급받기 때문에 작동온도가 높은 연료전지의 열관리 측면에서도 유리하다. 고온형 연료전지에서 내부개질이 가능하다는 점이 내부개질이 불가능한 PEMFC 등 저온형 연료전지에 비하여 전체 시스템 효율을 더 높일 수 있는 요인의 하나이다. 내부개질은 다시 직접개질(Direct Reforming)과 간접개질(Indirect Reforming)로 구분된다.<sup>(11)</sup> Fig. 1에 관형 셀과 내부 개질 방식을 사용하고 연료극 출가 가스를 재순환하는 실제 SOFC 시스템<sup>(4,14)</sup>을 모사한 SOFC 모듈을 예시하였다.

셀에 공급된 연료 중 일부는 연료전지 끝 단에서 과도한 농도손실(Concentration loss)을 방지하기 위하여 연료이용률(Fuel Utilization Factor)을 제한(보통 90%이하)하여 반응을 제한하게 된다. 이러한 미반응 연료는 연료전지 출구에 위치한 연소기

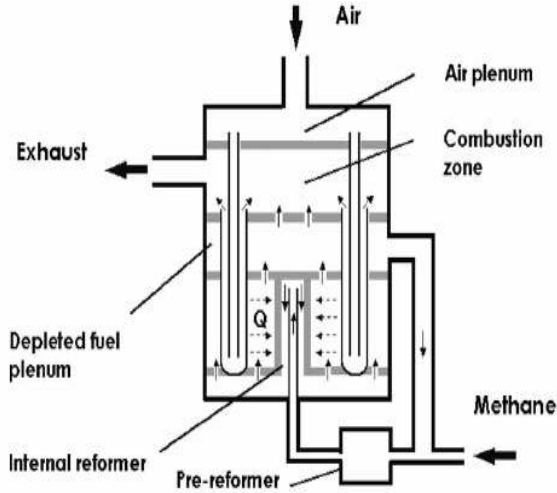


Fig. 1 Schematic of a SOFC module adopting internal reforming and anode gas recirculation<sup>(14)</sup>

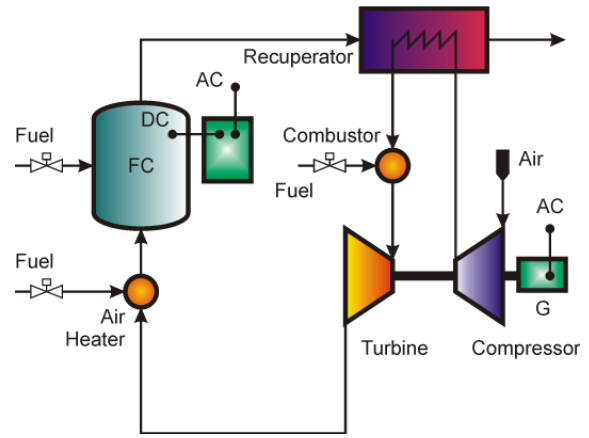
(Afterburner)로 유입되어 연소되고 연소가스는 연료전지 입구에 위치한 열회수기(Recuperator)에서 연료전지로 공급되는 공기를 예열하는 역할을 하는데, 연료전지 입구 공기의 온도를 예열함으로써 셀 내부에서 과도한 온도 구배로 인해 발생할 수 있는 열응력 문제를 미리 방지할 수 있다.

### 3. 하이브리드 시스템

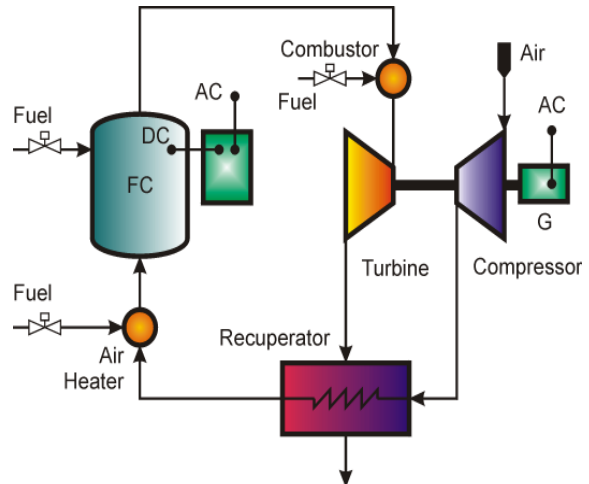
#### 3.1 원리

고온형 연료전지와 가스터빈을 결합할 경우 시너지 효과를 기대할 수 있으며, 하이브리드 시스템의 효율은 시스템 구성 방법과 설계 조건에 따라 다양하게 나타나지만 연료전지와 가스터빈이 단독으로 작동하는 시스템의 효율 보다는 높은 값을 나타낸다. 연료전지가 가스터빈에 비해 높은 효율과 출력을 나타내므로 하이브리드 시스템은 연료전지 시스템의 업그레이드 버전으로 간주될 수 있다. 더욱이 시스템 효율이 연료전지 단독 시스템에 비해 두드러지게 증가하지 않더라도 출력의 일부분을 상대적으로 가격이 저렴한 가스터빈과 공유함으로써 시스템 비용이 감소하는 효과도 있다.

고온의 연료전지와 가스터빈의 결합에 대한 이론적인 연구는 1990년대 초 중반부터 시작되었다. 많은 연구자들에 의해 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 열역학적 장점이 증명되었으며, 다양한 시스템 구성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 하이브리드 시스템은 크게 상압형과 가압형 두 가지로 구분된다.<sup>(16)</sup> 두 가지 하이브리드 시스



(a) Ambient pressure system



(b) Pressurized system

Fig. 2 Concepts of fuel cell/gas turbine hybrid systems

템의 차이는 연료전지의 작동 압력이 서로 다르다는 것이며, Fig. 2에 개념적인 차이를 보여 주기 위한 단순화된 개략도를 예시하였다. 상압형은 가스터빈을 통과한 가스(또는 공기)가 연료전지로 공급되는 구조이고, 가압형은 압축기 출구 공기가 먼저 연료전지로 공급되고 연료전지 출구 가스가 터빈으로 흘러 들어가는 구조이다. 이론적으로 가압형 시스템은 셀 전압이 더 높아 더 효율적이며 시스템 크기를 감소시킬 수 있는 장점이 있지만 높은 압력에서 안정적으로 작동할 수 있는 연료전지가 필요하게 된다.

#### 3.2 SOFC 하이브리드 시스템

가장 먼저 개발이 시도된 SOFC 하이브리드 시스템은 Siemens-Westinghouse 사의 220kW 급 가압형 시스템이다.<sup>(1,4,17)</sup> 이 시스템은 기술적 실현가능

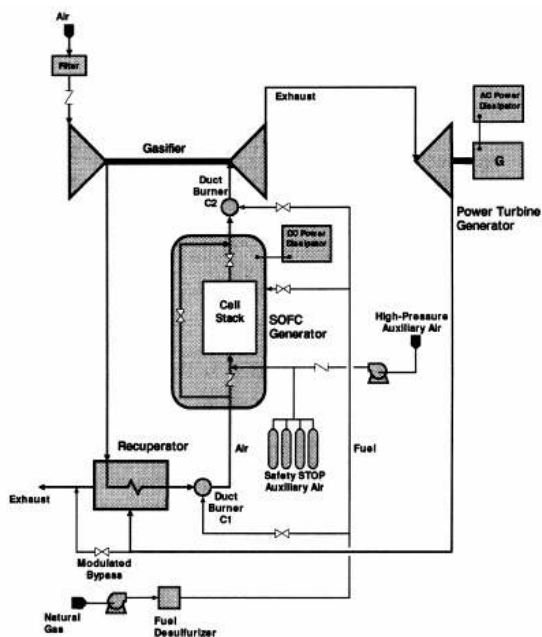


Fig. 3 Schematic diagram of a pressurized SOFC/GT hybrid system<sup>(15)</sup>

성에 대한 실증결과를 거쳤으며, 작동온도 995°C, 작동압력 2.9bar, 셀 전압 0.64V 로 작동하여 52%의 시스템 효율을 나타내었다. 가스터빈의 출력은 수십 KW 로서 마이크로 가스터빈(micro gas turbine)을 사용하였으며, 연료전지의 출력이 가스터빈의 출력보다 6 배 이상 큰 것으로 나타났다. 총출력을 300kW 급으로 증가시킨 시스템의 효율은 58% 정도로 기대하고 있으며(실증 결과는 아직 발표되지 않고 있음), 이러한 시스템들은 가압형 시스템으로서 설계 기본 원칙은 Fig. 2(b)과 같으며 내부 개질 방식과, 연료극 출구 가스 재순환 방식을 사용하였고 Fig. 3 에 개략도를 나타내었다.<sup>(15)</sup> Siemens-Westinghouse 외에도 Rolls-Royce 에서 1MW 급 SOFC 하이브리드 시스템을 개발 중이다.<sup>(18,19)</sup> 250kW 모듈을 연결한 1MW 급 연료전지와 가스터빈을 결합한 가압형 시스템이 대상이다. Roll-Royce 의 개발 방향은 Fig. 3 과 같은 시스템에 비하여 열교환기 대신 직접 연소로서 예열을 하는 등 다소 시스템 구성을 단순화하여 비용측면에 경쟁력을 갖고자 하는 것으로 파악된다.

SOFC 하이브리드 시스템에 대해서는 최근 수년간 다양한 연구 결과가 발표되었다. SOFC 하이브리드 시스템과 관련하여 연료전지 모듈 및 하이브리드 시스템의 파라메트릭 해석이 수행되었으며,<sup>(8,20-23)</sup> 가스터빈과 연료전지의 최적 결합에 대한 연구<sup>(24-26)</sup> 및 개질 방법의 영향,<sup>(27)</sup> 시스템 구성

과 설계변수 그리고 기술 수준이 시스템의 성능에 미치는 영향<sup>(28-33)</sup> 등에 대한 연구가 진행되었다. 또한 직렬 및 병렬로 연결된 다단의 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템이 제안되기도 하였다.<sup>(34,35)</sup> 하이브리드 시스템은 앞서 설명한 바와 같이 연료처리공정(주로 개질기)과 같은 복잡한 보조기기를 포함하게 되며, 연료전지와 가스터빈 간의 작동 변수를 일치시켜야 하는 등 많은 기술적 문제가 존재한다. 따라서 열역학적으로 최적화된 시스템이더라도 실제 구성요소간의 원활한 결합을 실현하기에 어려움이 있는 것이 사실이며 이러한 요인들로 인해 하이브리드 시스템의 실현 가능한 성능이 제한받게 된다. 초기의 하이브리드 시스템들이 이러한 시스템 결합에서 문제를 겪기도 하였다. 따라서 하이브리드 시스템의 설계에서는 연료전지, 가스터빈 그리고 보조기기들의 순조로운 결합을 고려하는 것이 매우 중요하다. 이러한 측면에서 하이브리드 시스템의 결합에 중요한 요소로 작용하는 작동 온도들(연료전지 온도, 터빈입구온도 등)을 실질적인 범위로 제한한 시스템에 대한 해석과,<sup>(36,37)</sup> 새로 개발하는 대신에 기존에 개발되어 있는 가스터빈을 사용하여 하이브리드 시스템을 구성할 때의 문제점에 대한 연구도 수행되었다.<sup>(38,39)</sup> 또한 가스터빈의 성능 개선에 의한 하이브리드 시스템의 설계성능 향상 가능성을 살핀 연구도 진행되었다.<sup>(40,41)</sup>

시스템의 설계와 관련한 다양한 연구와 더불어 SOFC 하이브리드 시스템의 작동특성에 대한 연구도 꾸준히 진행되어 왔다<sup>(14,42-48)</sup> 연료전지와 가스터빈은 작동방식 및 특성이 서로 다르기 때문에, 두 시스템을 결합한 하이브리드 시스템은 다양한 작동방식으로 운전이 가능하다. 따라서 이러한 연구들의 목적은 최적화된 운전방식을 찾아내는데 있으며, 또한 작동특성 해석은 하이브리드 시스템 작동 시 온도 제한과 같은 한계를 예측하는 방법으로도 활용이 가능하다.<sup>(49)</sup> 또한 연료전지와 가스터빈은 동적 응답 특성이 매우 다르기 때문에 전체 하이브리드 시스템의 성공적인 작동과 제어를 위해서 동적 특성의 구체적인 이해가 요구된다. 이에 따라서 SOFC 하이브리드 시스템의 동적 특성에 관한 연구는 최근 들어 활발히 진행되고 있다.<sup>(45-47,50-56)</sup>

### 3.3 MCFC 하이브리드 시스템

Fig. 4 에 내부개질 방식을 사용하는 Fuel Cell Energy 의 상압형 MCFC 하이브리드 시스템 개략

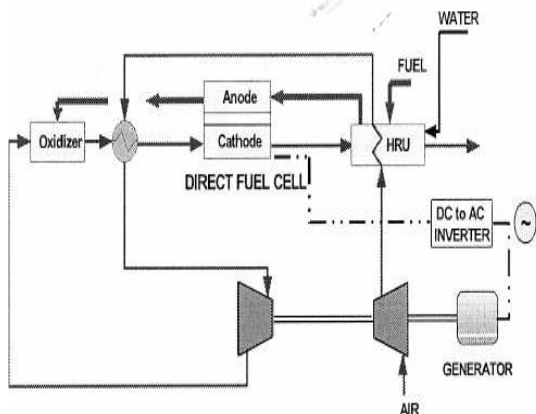


Fig. 4 Schematic diagram of an ambient pressure MCFC/GT hybrid system<sup>(5)</sup>

도를 나타내었다.<sup>(5)</sup> Fuel Cell Energy의 단위 모듈은 250kW 이고 MW 급 설비를 선보이고 있으며, 이를 바탕으로 상압형 하이브리드 시스템의 개발을 추진하고 있다. 이외에도 가압형 시스템의 대한 연구개발도 진행되고 있다.<sup>(57)</sup>

MCFC 하이브리드 시스템도 다양한 기초 연구가 진행되어왔다. 하이브리드 시스템을 개발하는 가장 간단한 방법은 제작되어 있는 연료전지와 가스터빈을 기반으로 주어진 설계 조건하에서 최적 결합을 통해 시스템을 구성하는 것이다. MCFC 하이브리드 시스템의 경우 최적 시스템 설계에 관한 연구와 더불어서 기존의 연료전지 또는 가스터빈을 사용하여 하이브리드 시스템을 구성하는 연구들도 발표되었다.<sup>(5,58-60)</sup> 또한 연료전지와 가스터빈을 결합한 기본적인 하이브리드 시스템 외에 스팀터빈과의 결합이나 증기분사를 고려하여 시스템 성능을 향상시키기 위한 연구도 진행된 바 있다.<sup>(61,62)</sup>

MCFC 하이브리드 시스템도 SOFC 하이브리드 시스템과 마찬가지로 연료전지와 가스터빈의 작동 특성 및 동적 응답특성이 다르기 때문에 최적화된 운전방식을 통한 하이브리드 시스템의 작동 및 제어에 대한 연구가 필요하게 되었고 이러한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.<sup>(50,63-67)</sup>

#### 4. 통합형 시스템

최근 연료전지 기술 개발이 급속히 이루어지면서 연료전지에 기반한 다양한 통합시스템들이 개념적으로 제안되고 일부는 개발이 착수되고 있다. 가장 좋은 예가 이미 3 절에서 살핀 하이브리드 시스템이다. 이외에도 최근에 대두되는 온실가스 저감과 연료 다양화 요구에도 연료전지가 잘 대응

할 수 있을 것으로 예상되면서 다양한 응용 시스템 개발이 제안되고 있다.<sup>(9,68)</sup> 본 절에서는 대표적이 예로서 이산화탄소 분리기술과의 접목과 석탄 및 대체연료의 사용에 대한 기술들을 정리한다. 이러한 시스템들은 아직 실증이나 상용화 단계에까지는 이르지 못하고 주로 가능성 연구나 시스템 구성이 제시되고 있는 상태이지만 앞으로 부각될 이러한 시스템들의 중요성을 고려하여 기술적 특성과 연구 개발 현황을 고찰하였다.

##### 4.1 이산화탄소 분리 기술 적용

연료전지는 기본적으로 수소와 산소의 반응으로 물(혹은 증기)를 배출하는 시스템이다. 하지만 수소 인프라가 충분히 구축되지 않은 상태에서는 연료전지는 반응에 필요한 수소를 생산하기 위한 개질기를 필수적으로 포함해야 한다. 이 경우 개질 반응에서 이산화탄소가 발생되며, 일산화탄소도 연료로 사용하는 고온형 연료전지의 특성상 셀 반응에서도, 또한 미 반응 연료의 연소과정에서도 이산화탄소는 발생하게 된다. 연료전지 혹은 하이브리드 시스템에서 이산화탄소를 분리하고자 하는 노력은 2000 년도 초반부터 활발하게 진행되어 왔다.

개질 가스와 후연소기 출구가스는 증기와 이산화탄소 외에 다른 종류의 가스들( $N_2$  etc)이 포함되어 있기 때문에 이산화탄소를 분리해 내기가 쉽지 않다. 따라서 혼합된 연료극과 공기극 출구가스를 후연소기로 공급하여 미 반응 연료를 연소시켰던 기존의 연료전지 시스템과 달리 각각의 전극에서 발생하는 가스를 따로 분리, 배출하려는 연구가 진행되었다.<sup>(69)</sup> 연료전지에서 출구가스를 분리하여 배출할 경우 연료극 출구 가스는 주로 수증기와 이산화탄소로 구성되어 있어 후처리를 통해 이산화탄소를 분리할 수 있다.<sup>(70,71)</sup> 하지만 여전히 남아있는 미 반응연료의 처리를 위해 다양한 후연소기를 적용하려는 연구도 진행되었다.<sup>(72)</sup> 또한 ITM(Ion Transport Membrane)<sup>(73)</sup>을 사용하여 공기극 출구 가스에서 분리한 순수산소를 후연소기에 공급하여 미반응 연료와의 순수산소 연소(oxy-fuel combustion)를 고려한 시스템이 제시된 바 있다.<sup>(10)</sup>

##### 4.2 석탄가스화 기술과의 접목

아직도 매장량이 풍부한 석탄을 가스화하여 연료로 사용하려는 연구가 발전시스템 분야에서 활발히 진행되고 있다. 석탄가스화는 주로 석탄가스화 복합 발전(IGCC)에서 사용되는 기술이며 석탄을 가스화하여 합성연료(Syngas)를 생성시키는 반응을 거친 합성연료는 주로 수소와 일산화탄소가

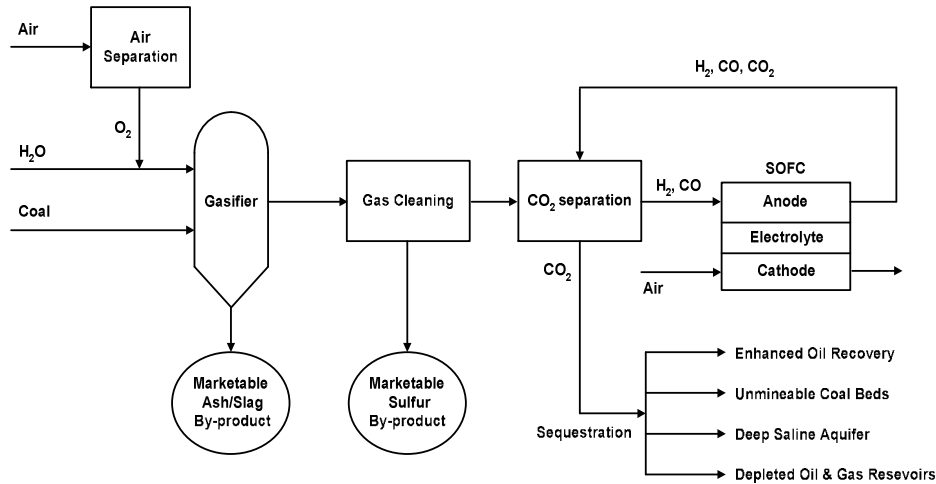


Fig. 5 Schematic diagram of an integrated gasification fuel cell.

주 성분으로서 주요 공정은 문헌에 잘 나타나 있다.<sup>(74,75)</sup> 석탄이 다른 화석연료에 비해 상대적으로 매장량이 풍부하기 때문에 현재 가능한 청정하게 사용하고자 하는 다양한 연구 및 개발이 진행 중인데, 가스화 기술은 특히 이산화탄소를 연소 전에 분리하는 기술(Pre-combustion CO<sub>2</sub> capture)을 적용할 수 있다는 큰 장점을 가지기 때문에 더욱 중요성이 인식되고 있다.

IGFC(Integrated Gasification Fuel Cell)는 석탄의 가스화 공정을 통해 얻어낸 합성 가스를 연료로 사용하는 연료전지를 뜻하며, 이러한 시스템의 개략도를 Fig. 5 에 나타내었다. IGFC 에서 사용하는 석탄가스화 공정은 IGCC 와 크게 다르지 않다. 석탄을 가스화하여 얻어낸 합성연료에서 이산화탄소를 분리하여 수소와 일산화탄소가 주성분인 연료를 얻어낸다. 석탄가스화 공정은 이미 실증이 완료되었을 뿐만 아니라 세계 여러 곳에서 운전이 되고 있기 때문에 연료전지와 결합을 위한 주변 기기의 개발과 일산화탄소 배출 등만이 문제점으로 작용하고 있으며, 가스터빈보다 상대적으로 효율이 높은 연료전지와 결합할 경우 IGCC 보다 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 미국은 정부의 주도로 IGFC 개발에 박차를 가하고 있으며, 90%이상의 이산화탄소를 분리하면서 약 50%(HHV) 효율의 500MW 급 IGFC 개발을 목표로 하고 있다.<sup>(9)</sup> IGFC 와 관련하여 합성연료가 연료전지 셀에 미치는 영향에 대한 연구와,<sup>(9,76,77)</sup> 합성연료를 사용하는 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 성능에 대한 해석적인 연구가 진행되고 있다.<sup>(78-80)</sup>

한편 IGCC 와 고온형 연료전지를 결합한 IGCC/Fuel Cell 하이브리드 시스템도 제안이 되고 있

다. 미국에서는 이러한 시스템을 국가 개발과제로 선정하여 진행되고 있으며,<sup>(3)</sup> 유럽과 중국 역시 이러한 시스템에 대하여 공동으로 연구를 진행하려 하고 있다.<sup>(73)</sup> 이 시스템은 IGFC 의 업그레이드 버전으로 볼 수 있으며, 개략도를 Fig. 6 에 나타내었다. 이 시스템은 기존의 가압형 SOFC 하이브리드 시스템에서 연료(주로 천연가스)를 수소와 일산화탄소로 변환시켜 연료전지로 공급하던 개질기 대신에 석탄을 합성가스로 변환시키는 가스화기가 사용되며, ITM(Ion Transport Membrane)을 사용하여 연료전지 공기극 출기가스에서 순수 산소를 분리하여 CO<sub>2</sub> 분리에 사용하게 된다. 또한 가스터빈 출기가스의 열 에너지를 회수하여 스팀을 생산하고 스팀터빈에서 팽창시켜 부가적인 출력은 얻어내는 복합발전(Combined Cycle)도 고려되었다. 시스템 구성을 제안하며 설계 성능 해석을 진행한 연구가 발표된 경우는 있지만<sup>(81,82)</sup> 아직 본격적으로 많은 연구가 진행되지는 않았다. 이러한 시스템이 실용화 되기 위해서는 ITM 및 H<sub>2</sub> separation membrane 과 같은 시스템 통합을 위한 구성부의 개발과 함께 합성연료를 사용하기 때문에 연료의 유량이 증가하며 발생하는 문제(IGCC 의 경우 압축기 서지문제)를 해결하기 위한 연구가 병행되어 진행되어야 할 것으로 예상된다.

#### 4.3 대체연료를 사용하는 연료전지 시스템

연료전지의 연료로 석탄을 사용하려는 노력 외에도 청정한 대체연료를 사용하려는 노력이 진행되고 있다. 주로 메탄올(Methanol)과 바이오매스(Biomass)를 통해 생산할 수 있는 에탄올(Ethanol)이 대체연료로 연구되고 있다. 메탄올은 기존의

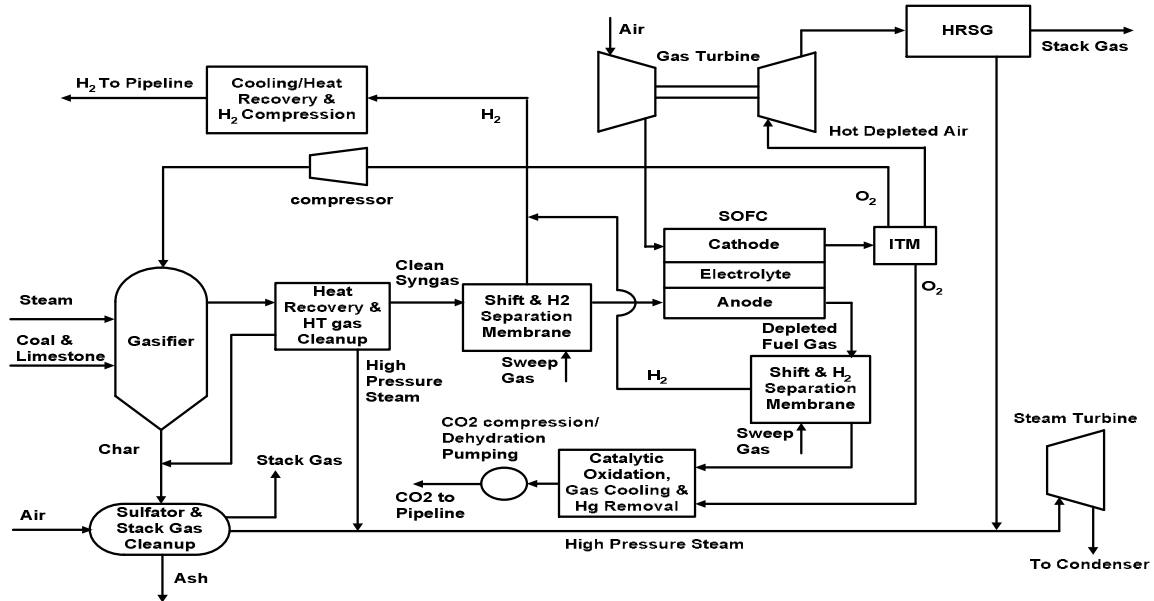


Fig. 6 Schematic diagram of an IGCC/SOFC hybrid system.

천연가스보다 낮은 온도에서 개질이 가능하기 때문에 시스템 내부에서 열회수량이 증가하며, 개질에 필요한 수증기의 양도 천연가스에 비해 적어 가스터빈의 출력이 증가하는 장점을 가진다. 바이오매스 중 사탕수수, 밀, 옥수수 등의 녹말 작물을 발효시켜 얻을 수 있는 바이오 에탄올(Bio-ethanol)의 경우 화석연료와 달리 환경오염 물질이 전혀 없고, 유해물질을 배출하지 않아 대체에너지로 주목을 받고 있다. 대체 연료를 사용한 연료전지 시스템에 대한 연구 결과는 2000년도 중반부터 발표되고 있으며, 타당성 분석 및 평가와 대체 연료가 연료전지에 미치는 영향, 시스템 설계 해석 등이 주를 이루고 있다.<sup>(83-89)</sup>

## 5. 결 어

본 리뷰 논문에서는 SOFC, MCFC 등 고온형 연료전지를 기반으로 한 통합형 발전시스템들에 대해서 최근 연구 개발 동향을 문헌 조사를 통하여 분석한 내용을 요약하였다. 가스터빈과 연계된 하이브리드 시스템과 이산화탄소 분리기술의 적용, 가스화를 통한 석탄을 이용하는 시스템과 대체연료의 사용 가능성 분야 등에서 최근 발표된 개발 및 연구 동향이 정리되었다.

SOFC는 수백 kW급 시스템의 개발이 완료되거나 개발 중이며, MCFC는 이미 MW급이 상용화가 가능한 수준이다. 현 단계에서는 연료전지 자체만으로는 대체로 40% 후반대 효율이 가능하며,

가스터빈과 효과적으로 하이브리드 시스템을 구성한 경우에는 50% 중반대 이상의 효율도 가능하다. 궁극적으로는 70%를 상회하는 수십 MW급 이상 시스템 개발을 목표로 하고 있는데, 대형화에 따른 여러 가지 기술적 문제점과 가스터빈과의 유연한 결합 기술들이 중요하다. 특히 내구성이 높으면서 좀 더 안정적으로 작동하는 상용 연료전지 기반 시스템의 개발을 위해 보다 상세하고 실제적인 연구가 진행 될 것으로 예상된다. 다양한 연구가 진행되어 최적의 효과를 내는 구성에 대한 틀은 이미 잡혀 있는 상태이지만 연료전지와 가스터빈의 최적 결합을 위한 세부적인 연구가 더욱 필요하고 연료전지와 가스터빈을 제외한 구성부들의 성능 역시 하이브리드 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 구성부 성능 극대화 방안 및 최적의 결합, 그리고 안정적이면서도 신뢰성 높은 운전에 대한 연구가 계속 되어야 할 것이다.

최근 전세계적으로 온실가스 규제가 강화되는 추세에서 모든 발전플랜트 분야에서 이산화탄소 분리, 저장기술의 적용이 고려되고 있기 때문에 연료전지를 기반으로 한 시스템들에서도 개발단계에서부터 이산화탄소 분리가 고려되어야 할 것으로 예상된다. 따라서 이 분야의 기초적인 연구 결과들이 발표되고 있는데, 대체로 연료전지 또는 하이브리드 시스템에서 공기극과 연료극 가스를 혼합하지 않고 분리를 유지한 상태에서 다양한 후처리 방법을 사용하여 이산화탄소를 다른 성분들



과 덜 섞이게 한 뒤 분리하는 개념들(예를 들어 수증기와 혼합물에서 응축과정을 통해서 이산화탄소 분리 배출)이 제안되고 있다.

매장량이 가장 풍부한 석탄을 청정하게 사용하려는 시도의 일환으로서 가스화 공정을 이용한 발전 방식들이 최근 각광을 받고 있다. 연료전지에 서도 IGFC 기술개발이 추진되고 있는데, 가스화 복합화력(IGCC) 보다 더 높은 효율이 기대된다. 더 나아가 IGCC/Fuel Cell 통합 시스템도 제안되고 있다. 이러한 시스템들에서도 이산화탄소 분리배출 장치를 포함하는 것을 기본으로 연구가 진행되고 있는 추세이다. 또한 최근 들어서 메탄올, 에탄올과 같은 대체연료를 고온형 연료전지에 사용하기 위한 연구들이 점차 늘고 있다.

아직 고온형 연료전지 자체가 용량면에서 대형 발전 시스템에 사용될 만큼 충분히 개발되지 않았기 때문에 더욱 발전적인, 그러면서도 대체로 중대형(수십 MW 이상 급)에 적합한 통합형 시스템들은 아직은 개념설계 단계이다. 그러나, 고온형 연료전지가 대용량화하면서 필연적으로 복합화력 발전(현재 효율 60%가 달성되었음)을 비롯한 기존의 고효율 발전시스템과 경쟁하여야 할 것이고, 결국 현재보다 더 높은 열효율이 필요하기 때문에 필연적으로 하이브리드화 등 효율을 더욱 향상시키는 시스템의 개발이 요구된다. 또한 하이브리드 시스템 등 연료전지 기반 시스템이 수소뿐 아니라 일반 화석연료, 특히 석탄 등을 사용할 경우에도 이산화탄소 배출을 극소화하면서 효율은 기존 시스템보다 높을 것으로 예상되기 때문에 이러한 통합시스템에 대한 연구가 지속될 것이고 궁극적으로 시스템 개발이 추진될 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. P. and Singhal, S. C., 2004, "U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program," *J. of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79~85.
- (2) Dennis, R., Burch, G., Williams, M., Hoffman, P., Gross, R. and Samuelsen, S., 2003, "Hybrid Power: A 2003 Perspective for the Decade," ASME paper GT2003-38950.
- (3) Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *J. of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (4) Veyo, S. E., Lundburg, W. L., Vora, S. D. and Litzinger, K. P., 2003, "Tubular SOFC Hybrid Power System Status," ASME paper GT2003-38943.
- (5) Ghezel-Ayagh, H., Daly, J. M. and Wang, Z., 2003, "Advanced in Direct Fuel Cell/Gas Turbine Power Plants," ASME paper GT2003-38941.
- (6) Panne, T., Widenhorn, A. and Aigner, M., 2008, "Steady State Analysis of a SOFC/GT Hybrid Power Plant Test Rig," ASME paper GT2008-50288.
- (7) Ferrari, M. L., Pascenti, M., Magistri, L. and Massardo, A. F., 2008, "Emulation of Hybrid System Start-Up and Shutdown Phases with a Micro Gas Turbine based Test Rig," ASME paper GT2008-50617.
- (8) Karvountzi, G. C., Ferrall, J. and Powers, J. D., 2007, "Effect of Fuel Cell Operating Parameters on the Performance of a Multi-MW Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid System," ASME paper GT2007-27553.
- (9) Doyon, J., Alinger, M., Powers, J. and Pierre, J. F., 2007, Office of Fossil Energy Fuel Cell Program Annual Report, pp. 9~20.
- (10) Park, S. K., Kim, T. S., Sohn, J. L. and Lee, Y. D., 2009, "Application of Oxy-Combustion Technology to a Hybrid SOFC system," ASME paper ICEPAG2009-1025.
- (11) Larminie, J., and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Ltd., New York.
- (12) Zhu, B., 2001, "Advantages of Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells for Tractionary Applications," *J. of Power Sources*, Vol. 93, pp. 82~86.
- (13) Mugikura, Y., 2004, *Molten Carbonate Fuel Cells and Systems - Stack Material and Stack Design*, In: Vielstich, W, Lamm, A. and Gasteiger, H. A. (eds), Fuel cell handbook, John Wiley & Sons, England, Vol. 4, pp. 907~941.
- (14) Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, J. H., Kim, T. S., Ro, S. T. and Suzuki, K., 2005, "Performance Analysis of a solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid Power System Based on a Quasi-Two Dimensional Model," *J. of Power Sources*, Vol. 142, pp. 30~42.
- (15) George, R. A., 2000, "Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstrations," *J. of Power Sources*, Vol. 86, pp. 134~139.
- (16) White, D. J., 1999, "Hybrid Gas Turbine and Fuel Cell Systems in Perspective Review," ASME paper 99-GT-419.
- (17) Veyo, S. E. and Vora, S. D., 2002, "Status of Pressurized SOFC/Gas Turbine Power System Development at Siemens Westinghouse," ASME paper GT-2002-30670.
- (18) Agnew, G. D., Townsend, J., Moritz, R. R., Bozzolo, M., Berenyi, S. and Duge, R., 2004, "Progress in the Development of a Low Cost 1MW SOFC Hybrid," ASME paper GT2004-53350.

- (19) Agnew, G. D., Bozzolo, M., Moritz, R. R. and Berenyi, S., 2005, "The Design and Integration of the Rolls-Royce Fuel Cell Systems 1MW SOFC," ASME paper GT2005-69122.
- (20) Companari, S., 2001, "Thermodynamic Model and Parametric Analysis of a Tubular SOFC Module," *J. of Power Sources*, Vol. 92, 26~34.
- (21) Kimijima, S. and Kasagi, N., 2002, "Performance Evaluation of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System," ASME paper GT-2002-30111.
- (22) Jung, Y. H., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2002, "Parametric Design Analysis of a Pressurized Hybrid System combining Gas Turbine and Solid Oxide Fuel Cell," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 26, No. 11, pp. 1605~1612.
- (23) Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., Kim, J. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2006, "Design Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems considering Temperature Constraints," *J. of Power Sources*, Vol. 160, pp. 462~473.
- (24) Bohn, D., Poppe, N. and Lapers, J., 2002, "Assessment of the Potential of Combined Micro Gas Turbine and High Temperature Fuel Cell Systems," ASME paper GT-2002-30112.
- (25) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, "Performance Characteristics Analysis of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid Systems," *Trans. of the SAREK*, Vol. 16, No. 7, pp. 615~622.
- (26) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2005, "Comparative Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems considering Different Cell Inlet Preheating Methods," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 722~729.
- (27) Liese, E. A. and Gemmen, R. S., 2003, "Performance Comparison of Internal reforming Against External Reforming in a SOFC, Gas Turbine Hybrid System," ASME paper GT2003-38566.
- (28) Companari, S., 2004, "Parametric Analysis of Small Scale Recuperated SOFC/Gas Turbine Cycles," ASME paper GT2004-53933.
- (29) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, "Analysis Performance Characteristics of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid Systems considering Limiting Design Factors," *Trans. of the SAREK*, Vol. 16, No. 11, pp. 1013~1020.
- (30) Park, S. K. and Kim, T. S., 2006, "Comparison between Pressurized Design and Ambient Pressure Design of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems," *J. of Power Sources*, Vol. 163, pp. 490~499.
- (31) Park, S. K., Yang, W. J., Lee, J. H. and Kim, T. S., 2007, "Comparative Thermodynamic Analysis on Design Performance Characteristics of Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power Systems," *J. Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 291~302.
- (32) Gorla, S. R., 2004, "Probabilistic Analysis of a Solid-Oxide Fuel-Cell Based Hybrid Gas-Turbine system," *Applied Energy*, Vol. 78, pp. 63~74.
- (33) Tarroja, B., Mueller, F., Maclay, J. and Brouwer, J., 2008, "Parametric Thermodynamic Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine System Design Space," ASME paper GT2008-51518.
- (34) Tsuji, T., Yanai, N., Fujii, K., Miyamoto, H., Watabe, M., Ishiguro, T., Ohtani, Y. and Uechi, H., 2003, "Multi-Stage Solid Oxide Fuel Cell: Gas Turbine Combined Cycle Hybrid Power Plant System," ASME paper GT2003-38391.
- (35) Selimovic, A. and Palsson, J., 2002, "Networked Solid Oxide Fuel Cell Stacks Combined with a Gas Turbine Cycle," *J. of Power Sources*, Vol. 106, pp. 76~82.
- (36) Kim, T. S., Yang, W. J., Lee, J. H., Park, S. K. and Kim, J. H., 2005, "Parametric Thermodynamic Analysis for Optimal Design of Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Combined Power System," In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Applied Thermodynamics. Turkey: Istanbul.
- (37) Yang, W. J., Kim, T. S., Kim, J. H. and Sohn, J. L., 2005, "Comparative Performance Assessment of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems considering Various Design Option," ASME paper GT2005-68533.
- (38) Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, T. S. and Ro, S. T., 2006, "Performance Characteristics of a MW-class SOFC/GT Hybrid System Based on a Commercially Available Gas Turbine," *J. of Power Sources*, Vol. 158, pp. 361~367.
- (39) Park, S. K., Oh, K. S., Kim, T. S. and Sohn, J. L., 2007, "Analysis of the Design of a Pressurized SOFC Hybrid System using a Fixed Gas Turbine Design," *J. of Power Sources*, Vol. 170, pp. 130~139.
- (40) Park, S. K., Kim, T. S. and Sohn, J. L., 2009, "Influence of Steam Injection through Exhaust Heat Recovery on the Design Performance of Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 550~558.
- (41) Yi, Y., Rao, A. D., Brouwer, J. and Samuelsen, G. S., 2004, "Analysis and Optimization of a Solid Oxide Fuel Cell and Intercooled Gas Turbine (SOFC-ICGT) Hybrid Cycle," *J. of Power Sources*, Vol. 132, pp. 77~85.
- (42) Costamagna, P., Magistri, L. and Massardo, A. F., 2001, "Design and Part-Load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and a Micro Gas Turbine," *J. of Power Sources*, Vol. 96, pp. 352~368.

- (43) Palsson, J. and Selimovic, A., 2001, "Design and Off-Design Predictions of a Combined SOFC and Gas Turbine System," ASME paper 2001-GT-0379.
- (44) Magistri, L., Bozzolo, M., Tarnowski, O., Agnew, G. and Massardo, A. F., 2003, "Design and Off-Design Analysis of a MW Hybrid System Based on Rolls-Royce Integrated Planer SOFC," ASME paper GT2003-38220.
- (45) Calise, F., Plaombo, A. and Vanoli, L., 2006, "Design and Partial Load Exergy Analysis of Hybrid SOFC-GT Power Plant," *J. of Power Sources*, Vol. 158, pp. 225~244.
- (46) Stiller, C., Thorud, B., Bolland, O., Kandepu, R. and Imsland, L., 2006, "Control Strategy for a Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System," *J. of Power Sources*, Vol. 158, pp. 303~315.
- (47) Wachter, A. and Joos, F., 2008, "Steady State Off-Design and Transient Behavior of a SOFC/GT Hybrid Power Plant with Additional Firing of the GT Combustor," ASME paper GT2008-50553.
- (48) Yang, J. S., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2008, "Performance Characteristics of Part-Load Operations of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System Using Air-Bypass Valves," *J. of Power Sources*, Vol. 175, pp. 296~302.
- (49) Kemm, M., Hildebrandt, A. and Assadi, M., 2004, "Operation and Performance Limitations for Solid Oxide Fuel Cells and Gas Turbines in a Hybrid System," ASME paper GT2004-30898.
- (50) Gemmen, R. S., Liese, E., Rivera, J. G., Jabbari, F. and Brouwer, J., 2000, "Development of Dynamic Modeling Tools for Solid Oxide and Molten Carbonate Hybrid Fuel Cell Gas Turbine Systems," ASME paper 2000-GT-554.
- (51) Magistri, L., Ferrari, M. L., Traverso, A., Costamagna, O. and Massardo, A. F., 2004, "Transient Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Hybrids Part C: Whole-Cycle Model," ASME paper GT2004-53845.
- (52) Bujalski, W., Paragreen, J., Reade, G., Pyke, S. and Kendall, K., 2006, "Cycling Studies of Solid Oxide Fuel Cell," *J. of Power Sources*, Vol. 157, pp. 745~749.
- (53) Zhang, X., Li, J., Li, G. and Feng, Z., 2006, "Dynamic Modeling of a Hybrid System of the Solid Oxide Fuel Cell and Recuperative Gas Turbine," *J. of Power Sources*, Vol. 163, pp. 523~531.
- (54) Traverso, A., Trasino, F., Magistri, L. and Massardo, A. F., 2007, "Time Characterisation of the Anodic Loop of a Pressurized Solid Oxide Fuel Cell System," ASME paper GT2007-27135.
- (55) Kroll, F., Nielsen, A. and Staudacher, S., 2008, "Transient Performance and Control System Design of Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrids," ASME paper GT2008-50232.
- (56) Ghigliazza, F., Traverso, A., Ferrari, M. L. and Wingate, J., 2008, "Multi-Purpose Model of SOFC Hybrid Systems," ASME paper GT2008-50562.
- (57) Tooi, M., 2005, "The Development and Prospects for Practical Use of Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)," First International Fuel Cell Expo. Japan : Tokyo.
- (58) Grillo, O., Magistri, L. and Massardo, A. F., 2003, "Hybrid Systems for Distributed Power Generation Based on Pressurisation and Heat Recovering of an Existing 100kW Molten Carbonate Fuel Cell," *J. of Power sources*, Vol. 115, pp. 252~267.
- (59) Desideri, U., Lunghi, P. and Ubertini, S., 2002, "Feasibility and Performance of an Ambient Pressure MCFC Combined with a Commercial Gas Turbine," ASME paper GT-2002-30650.
- (60) Lunghi, P., Bove, R. and Desideri, U., 2003, "Analysis and Optimization of Hybrid MCFC Gas Turbines Plants," *J. of Power Sources*, Vol. 118, pp. 108~117.
- (61) Campanari, S. and Macchi, E., 2001, "The Integration of Atmospheric Molten Carbonate Fuel Cells with Gas Turbine and Steam Cycles," ASME paper 2001-GT-0382.
- (62) Ubertini, S. and Lunghi, P., 2001, "Assessment of an Ambient Pressure MCFC : External Heated GT Hybrid Plants with Steam Injection and Post Combustion," *Fuel Cell*, Vol. 1, pp. 174~180.
- (63) Bedont, P., Grillo, O. and Massardo, A. F., 2002, "Off-Design Performance Analysis of a Hybrid System Based on an Existing MCFC Stack," ASME paper GT-2002-30115.
- (64) Roberts, R. A., Jabbari, F., Brouwer, J., Gemmen, R. S. and Liese, E. A., 2003, "Inter-Laboratory Dynamic Modeling of a Carbonate Fuel Cell for Hybrid Application," ASME paper GT2003-38774.
- (65) Jurado, F., 2002, "Study of Molten Carbonate Fuel Cell-Microturbine Hybrid Power Cycles," *J. of Power Sources*, Vol. 111, pp. 121~129.
- (66) Karvountzi, G. C. and Duby, P. F., 2007, "Part Load Strategies of a Multi-MW Molten Carbonate Fuel Cell Gas Turbine Hybrid System," ASME paper GT2007-27119.
- (67) Zhang, H., Wang, L., Weng, S. and Su, M., 2008, "Control Performance Study on the Molten Carbonate Fuel Cell Hybrid Systems," ASME paper GT2008-50747.
- (68) Hetland, L., Zheng, L. and Shisen, X., 2009, "How Polygeneration Schemes may Develop under an Advanced Clean Fossil Fuel Strategy under a Joint Sino-European Initiative," *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 219~229.
- (69) Haines, M. R., Heidug, W. K., Li, K. J. and Moore, J. B., 2002, "Progress with the Development of a CO<sub>2</sub> Capturing Solid Oxide Fuel Cell," *J. of Power Sources*, Vol. 106, pp. 377~380.

- (70) Moller, B. K., Arriagada, J., Assadi, M. and Potts, I., 2004, "Optimization of an SOFC/GT system with CO<sub>2</sub>-capture," *J. of Power Sources*, Vol. 131, pp. 320-326.
- (71) Campanari, S., 2002, "Carbon Dioxide Separation from High Temperature Fuel Cell Power Plants," *J. of Power Sources*, Vol. 112, pp. 273~289.
- (72) Maurstad, O., Bredesen, R., Bolland, O., Kvamsdal, H. M. and Schell, M., 2005, "SOFC and Gas Turbine Power System – Evaluation of Configurations for CO<sub>2</sub> Capture," *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol. I, pp. 273~281.
- (73) Dyer, P. N., Richards, R. E., Russek, S. L. and Taylor, D. M., 2000, "Ion Transport Membrane Technology for Oxygen Separation and Syngas Production," *Solid State Ionics*, Vol. 134, pp. 21~33.
- (74) Higman, C. and van der Burgt, M., 2003, *Gasification*, Elsevier, Massachusetts.
- (75) Rezaian, J. and Cheremisnoff, N. P., 2005, *Gasification Technologies*, Taylor & Francis Group, LLC, Florida.
- (76) Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M. D., Fowler, M. W., Douglas, P. L., Chewathanakup, S. and Mahaudom, H., 2006, "Experimental and Modeling Study of Solid Oxide Fuel Cell Operating with Syngas Fuel," *J. of Power sources*, Vol. 161, pp. 308~322.
- (77) Cayan, F. N., Zhi, M., Pakalapati, S. R., Celik, I., Wu, N. and Gemmen, R., 2008, "Effects of Coal Syngas Impurities on Anodes of Solid Oxide Fuel Cell," *J. of Power Sources*, Vol. 185, pp. 595~602.
- (78) Yoshiba, F. and Koda, E., 2008, "Efficiency Analysis of a Coal Gasification Molten Carbonate Fuel Cell with Gas Turbine Combined Cycle including CO<sub>2</sub> Recovery," ASME paper GT2008-50360.
- (79) Cocco, D., Serra, F. and Tola, V., 2008, "Fixed-Bed Coal Gasifiers Integrated with MCFC-GT Hybrid Systems for Distributed Power and Heat Generation," ASME paper GT2008-50777.
- (80) Yoshiba, F., Izaki, Y. and Watanabe, T., 2004, "System Calculation of Integrated Coal Gasification / Molten Carbonate Fuel Cell Combined Cycle Reflection of Electricity Generating Performances of Practical Cell," *J. of Power Sources*, Vol. 132, pp. 52~58.
- (81) Verma, A., Rao, A. D. and Samuelson, G. S., 2006, "Sensitivity Analysis of a Vision 21 Coal Based Zero Emission Power Plant," *J. of Power Sources*, Vol. 158, pp. 417~427.
- (82) Liqiang, D., Yongping, Y. and Ershu, X., 2007, "Study on SOFC-IGCC Hybrid Power System with High Efficiency," ASME paper GT2007-27463.
- (83) Morita, H., Yoshiba, F., Woudstra, N., Hemmes, K. and Spliethoff, H., 2004, "Feasibility Study of Wood Biomass Gasification/Molten Carbonate Fuel Cell Power System-Comparative Characterization of Fuel Cell and Gas Turbine Systems," *J. of Power Sources*, Vol. 138, pp. 31~40.
- (84) Panopoulos, K. D., Fryda, L. E., Karl, J., Poulou, S. and Kakaras, E., 2006, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cell Integrated with Novel Allothermal Biomass Gasification Part. I : Modeling and Feasibility Study," *J. of Power Sources*, Vol. 159, pp. 570~585.
- (85) Panopoulos, K. D., Fryda, L. E., Karl, J., Poulou, S. and Kakaras, E., 2006, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cell Integrated with Novel Allothermal Biomass Gasification Part. II : Exergy Analysis," *J. of Power Sources*, Vol. 159, pp. 586~594.
- (86) Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Pritzker, M. D., Fowler, M. W., Douglas, P. L. and Entchev, E., 2007, "Modeling of a Cathode-Supported Tubular Solid Oxide Fuel Cell Operating with Biomass-Derived Synthesis Gas," *J. of Power Sources*, Vol. 166, pp. 386~399.
- (87) Jamsak, W., Assabumrungrat, S., Douglas, P. L., Croiset, E., Laosiripojana, N., Suwanwarangkul, R. and Charojrochkul, S., 2007, "Thermodynamic Assessment of Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Bioethanol Purification Unit," *J. of Power Sources*, Vol. 174, pp. 191~198.
- (88) Santin, M., Traverso, A. and Massardo, A., 2008, "Solid Oxide Fuel Cell Hybrid Systems Fed by Liquid Fuels for Distributed Power Generation," ASME paper GT2008-50615.
- (89) Fiaschi, D., Manfrida, G. and Anselmi, S., 2008, "Performance Analysis and Comparison of Hybrid SOFC-GT Cycles Fuelled with Methanol," ASME paper GT2008-51367.

## 저 자 소 개



### 김 동 섭

1995년 서울대학교 기계공학부에서 박사학위를 취득하였고, 한국과학기술연구원, 아현공대, 서울대학교 터보동력기계 연구센터에서 연구원으로 활동하였으며, 2000년 9월에 인하대학교 기계공학부에 부임하여 2009년 4월 현재 부교수로 근무하고 있다. 주요 연구분야는 가스터빈, 복합화력, 마이크로터빈 등을 포함한 발전설비 시스템 및 구성부의 설계, 성능해석, 실험과 연료전지, 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템 및 진보적인 응용 시스템들의 설계와 성능해석 등이다.  
kts@inha.ac.kr