

# 제한요소를 고려한 가스터빈-가압형 SOFC 하이브리드 시스템의 성능특성 해석

양 원 준, 김 동 섭<sup>†</sup>, 김 재 환<sup>\*\*</sup>

인하대학교 대학원, <sup>†</sup>인하대학교 기계공학과, <sup>\*\*</sup>한국항공우주연구원

## Analysis of Performance Characteristics of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid Systems Considering Limiting Design Factors

Won Jun Yang, Tong Seop Kim<sup>†</sup>, Jae Hwan Kim<sup>\*\*</sup>

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>\*\*</sup>Aeropropulsion Department, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

(Received July 13, 2004; revision received August 30, 2004)

**ABSTRACT:** The hybrid system of gas turbine and fuel cell is expected to produce electricity more efficiently than conventional methods, especially in small power applications such as distributed generation. The solid oxide fuel cell (SOFC) is currently the most promising fuel cell for the hybrid system. To realize the conceptual advantages resulting from the hybridization of gas turbine and fuel cell, optimized construction of the whole system must be the most important. In this study, parametric design analyses for pressurized GT/SOFC systems have been performed considering probable practical limiting design factors such as turbine inlet temperature, fuel cell operating temperature, temperature rise in the fuel cell and so on. Analyzed systems include various configurations depending on fuel reforming type and fuel supply method.

**Key words:** Gas turbine(가스터빈), SOFC(고체산화물 연료전지), Reforming(개질), Limiting factor(제한요소) Efficiency(효율), Specific power(비출력), Power ratio(출력비)

### 기 호 설 명

F : Faraday 상수 [96,486 Coulomb/mol]  
FC : 연료전지  
FCT : 연료전지 작동온도 [°C]  
FR : 터빈입구 연소기로의 연료공급비율  
GT : 가스터빈

HX : 열교환기  
LHV : 저위발열량 [kJ/kg]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]  
 $\dot{n}$  : 몰유량 [kmol/s]  
TIT : 터빈입구온도 [°C]  
V : 전압 [V]  
 $\dot{W}$  : 출력 [kW]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7307; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: kts@inha.ac.kr

### 그리스 문자

$\eta$  : 효율

## 하첨자

AC	: 교류
aux	: 보조장치
DC	: 직류
gen	: 발전기
inv	: 직교류변환기(인버터)
sh	: 가스터빈 축
sys	: 하이브리드 시스템

## 1. 서 론

연료전지는 화학반응을 통해 직접 전기에너지를 얻는 고효율 장치이며 유해가스 배출이 거의 없다. 따라서 현재 연료전지에 대한 전 세계적인 관심이 커지고 있다. 연료전지는 단독으로 운영할 때도 그 성능이 우수하지만, 최근에는 연료전지를 가스터빈과 결합하여 성능을 더 높이려는 연구가 이루어지기 시작했다. 특히 소규모 분산 발전에 대한 관심이 높아지면서 연료전지 중에서도 작동온도가 높은(600~1000°C) 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)와 마이크로 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템에 대한 개발욕구가 높아지고 있으며 이미 선진국에서는 국가적인 과제로서 개발중이다.<sup>(1,2)</sup> 국내에서도 최근 단기적 성능목표는 낮지만, 궁극적으로 소형이면서 고효율의 하이브리드 시스템을 개발하기 위한 과제가 진행중이다.<sup>(3,4)</sup>

하이브리드 시스템은 결합방법에 따라 다양한 구성이 가능하다. 그러나 다양한 결합방법이 있는 만큼 설계시 고려해야 할 제한요소들이 많고 이러한 제한요소들은 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 고효율의 연료전지를 만들고도 적절한 가스터빈을 결합하지 못한다면 하이브리드 시스템은 그 시너지 효과를 얻지 못할 수도 있다. 따라서 제한요소를 적절하게 고려하여 최적화된 하이브리드 시스템의 결합을 이루는 것이 가장 중요하다. 고온에서 작동하는 시스템이므로 연료전지와 가스터빈의 주요 설계변수인 셀 작동 온도, 셀 입출구 온도차, 터빈 입구 온도 등이 주요 제한요소가 될 수 있다.

본 연구는 이러한 제한요소를 고려한 가스터빈-가압형 SOFC 하이브리드 시스템의 설계 특성을

알아보고 성능을 해석하고자 한다. 또한 일반적으로 외부개질기보다 내부개질기를 사용한 경우에 성능이 우수하다고 알려져 있으나 선행연구<sup>(4)</sup> 결과, 외부개질기를 사용하면서도 내부개질기를 사용한 경우와 유사한 성능을 얻을 수 있는 것으로 예측되었다. 따라서 본 연구에서는 내부개질기뿐만 아니라 외부개질기를 사용한 시스템 역시 해석의 대상으로 하였다. 제한온도를 맞추기 위한 방법으로는 연료를 연료전지에 먼저 공급하고 연료전지에서 반응한 가스로 터빈을 구동하는 방법과 터빈입구 연소기로 추가의 연료를 보내 연료전지와 터빈에 각각 연료를 공급하는 방법 두 가지를 고려하였다.

## 2. 시스템 구성

본 연구의 대상은 가압상태로 운전되는 연료전지 출구에 터빈을 배치한 하이브리드 시스템으로서 개질방법에 따라 외부개질과 내부개질로 구분하고 터빈입구 연소기에 추가연료의 공급 유무로 구분하여 총 4가지 시스템들에 대하여 해석하였다. 연소기로의 추가적인 연료공급 여부로 시스템 형태를 구분하면 Fig. 1, 2와 같다.

### 2.1 연소기로의 추가 연료공급이 없는 시스템

Fig. 1의 시스템들은 선행연구<sup>(4)</sup>에서 제시된 여러 가지 시스템들 중 성능이 가장 우수한 외부개질형과 내부개질형 시스템이다.

#### 2.1.1 외부개질을 이용한 시스템

연료전지 밖에서 연료를 개질하여 셀 반응에 필요한 수소를 얻는 구성이다. 이 시스템에서 개질에 필요한 수증기는 셀에서 반응하고 나온 수증기를 재순환하여 공급한다. 또한 개질에 필요한 열은 셀에서 반응하고 나온 고온의 공기를 열교환하여 공급한다.

#### 2.1.2 내부개질을 이용한 시스템

연료전지 안에서 연료를 개질하여 수소를 얻는 구성이다. 개질에 필요한 수증기는 외부개질 구성과 마찬가지로 수증기 재순환 방법을 사용한다. 발열반응인 셀 반응에서 발생하는 열의 일부를 연료의 개질에 이용한다. 이 시스템은 상용화

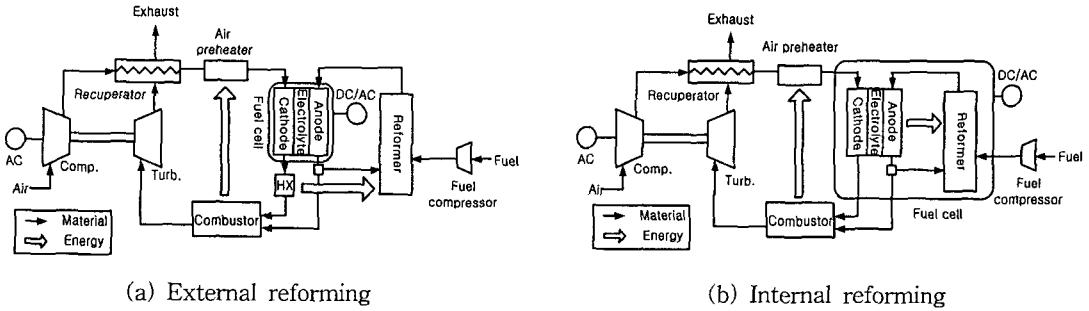


Fig. 1 GT/SOFC hybrid systems without additional fuel supply to the combustor.

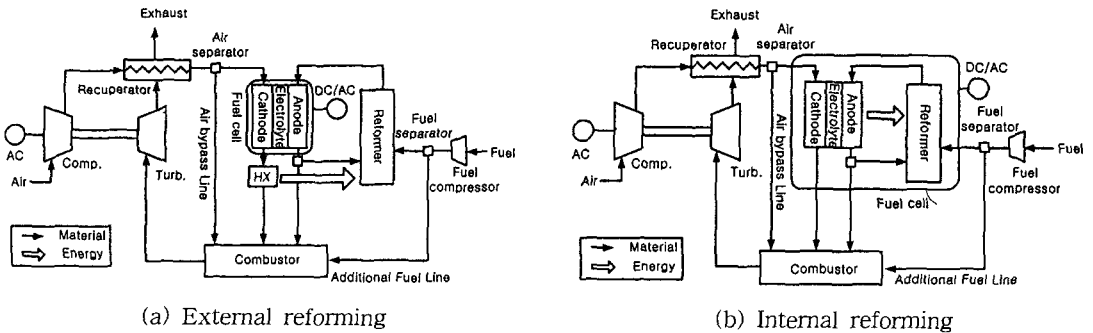


Fig. 2 GT/SOFC hybrid systems with additional fuel supply to the combustor.

에 가장 근접한 Siemens-Westinghouse사의 시스템<sup>(5,6)</sup>과 유사한 구성이다.

두 시스템 모두 압축기를 통해 가압된 공기와 연료가 연료전지에서 반응한 후 터빈으로 유입되는 가압형 하이브리드 시스템이다. 또한 수증기 개질법(steam reforming method)을 사용하며 이 방법은 흡열반응으로서 열 공급이 필요하다. 수증기 개질을 사용하는 외부개질방법과 내부개질방법의 특징을 비교하면 다음과 같다. 외부개질기를 사용하면 셀이 단열상태에서 작동하고, 내부개질기를 사용하면 셀에서 개질기로 열이 방출된다. 따라서 외부개질형 시스템에서는 셀 온도를 유지하기 위하여 필요한 연료량(연료/공기비)이 적고, 반대로 내부개질형을 사용하는 경우에는 셀에서 열 방출이 있으므로 상대적으로 많은 연료가 필요하게 되고 결과적으로 출력이 높아진다.

### 2.2 연소기로의 추가 연료공급이 있는 시스템

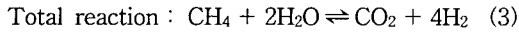
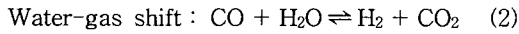
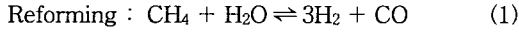
Fig. 2의 시스템들은 연료전지에서 나온 가스를 이용하여 터빈을 작동시킬 뿐 아니라 터빈입구 연소기에도 직접 연료를 공급한다. 하이브리드 시스

템을 구성하고 있는 연료전지와 가스터빈에 각각 직접 연료를 공급하여 설계 제한온도를 조금 더 쉽게 맞출 수 있는 구성이다. 이와 같은 구성과 유사한 방법으로 연료전지의 설계온도 조건만을 맞추어 가스터빈을 설계한 시스템도 있다.<sup>(7)</sup> 본 연구에서는 그러한 설계조건만 아니라 다양한 제한요소를 고려하여 해석하고자 한다. 개질방법은 Fig. 1의 경우와 동일하게 외부개질과 내부개질로 구성하지만 Fig. 1에서 사용한 연료전지 입구공기를 높이기 위한 예열기(연소기에서 열 공급)를 제거하고 대신 터빈입구온도를 높여서 간접적으로 연료전지 입구공기온도를 높이는 방법을 사용한다. 또한 터빈입구온도가 너무 높아지는 것을 방지하기 위하여 공기를 터빈입구 쪽으로 부가적으로 공급할 경우도 발생하며 이를 가능하게 하기 위한 연소기로의 직접 공기 공급라인도 표시되어 있다. 개질방법에 따른 차이는 2.1의 내용과 동일하다.

### 3. 해석방법

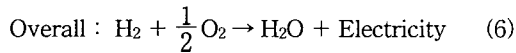
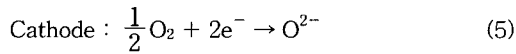
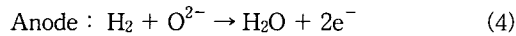
시스템 성능 해석은 화학반응을 포함한 열시스템 해석이 가능한 상용프로그램<sup>(8)</sup>을 사용하였다.

연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하며 개질기에서 연료의 1차, 2차 개질반응을 통해 수소를 얻는다. 단위 메탄 1몰이 완전 반응을 거친다고 가정하면 아래와 같이 4몰의 수소가 발생한다.



그러나 실제로 반응률은 반응조건에 의존하므로 반응온도와 압력의 함수로 이를 결정하는 평형반응(equilibrium reaction)을 고려하였다.

셀은 공기극과 연료극 두 곳에서 반응이 동시에 일어난다. 공기극에서는 공기 중의 산소만 이온화되어 전해질을 통해 연료극으로 이동하여 수소 및 개질기에서 개질되지 않고 남은 일산화탄소와 반응한다. 이때 발생한 전자가 공기극으로 이동하면서 전류를 발생시킨다. 수소를 기준으로 한 반응식은 다음과 같다.



개질반응에서 생성된 일산화탄소도 연료로 사용되어 수소처럼 1몰당 2몰의 전자가 이동된다.

셀반응으로 발생하는 전압의 값은 셀의 작동온도만의 함수로 가정하였다. 국내에서 1차 목표로 개발중인 하이브리드 시스템의 설계값인 작동온도 800℃에 셀전압 0.7V를 기준으로 하며,<sup>(4)</sup> 셀 작동온도가 높아질수록 셀전압이 증가하는 것<sup>(9)</sup>을 고려하여 작동온도 700~1000℃에서 셀전압이 0.63~0.81 V 사이에서 변화하게 하였다.

연료전지와 가스터빈의 출력력 및 하이브리드

시스템의 효율은 식(7)~(9)로 정의한다.

$$\dot{W}_{FC,AC} = 2(\dot{n}_{\text{H}_2} + \dot{n}_{\text{CO}}) \cdot F \cdot V \cdot \eta_{inv} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{GT,AC} = \dot{W}_{GT,sh} \cdot \eta_{gen} - \dot{W}_{aux} \quad (8)$$

$$\eta_{sys} = \frac{\dot{W}_{GT,AC} + \dot{W}_{FC,AC}}{(m \cdot LHV)_{\text{CH}_4}} \quad (9)$$

기타 구체적인 시스템 해석방법과 계산식들은 선행연구<sup>(4)</sup>와 동일하다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 제한요소

선행연구<sup>(4)</sup> 결과 가장 좋은 성능을 가지는 외부개질 시스템은 내부개질 시스템과 비슷한 성능을 갖는다. 그러나 이 시스템에서 몇 가지 가정이 현실적인 문제를 가진다. 첫째, 셀전압이 0.7V로 일정하다고 가정하였다. 그러나 셀전압은 셀의 작동온도와 압력의 함수이다. 따라서 온도변화가 큰 SOFC 시스템에서 셀전압을 일정하게 놓고 계산하는 것은 무리가 있다. 둘째, 성능이 가장 좋은 외부개질 시스템은 셀의 작동온도(1000℃ 이상)가 너무 높다. 마지막으로 셀의 입출구 온도차에 제한이 없었다. 셀에서의 안정적인 화학반응만을 고려하여 셀 입구온도를 700℃로 고정하였기 때문에 셀 작동온도가 높은 외부개질 시스템의 경우 셀 입출구 온도차가 커지고 이때 발생한 열응력이 셀 재질에 영향을 줄 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 영향을 주는 제한요소를 고려하여 해석하였다. 즉, 터빈 재질을 고려한 터빈입구온도, 신뢰성 있는 설계를 위한 연료전지 작동온도, 그리고 연료전지 내부에서 과도한 열응력발생 억제를 고려한 셀입출구 온도차(또는 셀 입구온도) 등을 주요 제한요소로 두었다. Table 1

Table 1 Various design cases without additional fuel supply to the combustor (Fig. 1)

Case	Cell voltage	TIT	FCT	Cell inlet air temp.	Additional fuel supply
0	fixed	fixed (850℃)	free	fixed (700℃)	no
1	variable	fixed (850℃)	free	fixed (700℃)	no
2	variable	free	fixed (800℃)	no preheating (air preheater)	no
3	variable	free	fixed (800℃)	fixed (FCT-100℃)	no
4	variable	fixed (850℃)	fixed (800℃)	free	no

Table 2 Various design cases with additional fuel supply to the combustor (Fig. 2)

Case	Cell voltage	TIT	FCT	Cell inlet air temp.	Additional fuel supply
5	variable	free	fixed (800°C)	fixed (FCT-100°C)	yes
6	variable	fixed (850°C)	free	fixed (FCT-100°C)	yes
7	variable	fixed (850°C)	fixed (800°C)	free	yes
8*	variable	fixed (850°C)	fixed (800°C)	fixed (FCT-100°C)	yes

\*Air preheater is additionally inserted between the recuperator and the fuel cell.

Table 3 Component parameters

Compressor pressure ratio	3.5
Recuperator effectiveness (%)	83
Turbine efficiency (%)	85
Compressor efficiency (%)	78
Generator efficiency (%)	93
Fuel utilization factor of the cell*	0.7
Steam carbon ratio**	3
Inverter efficiency (%)	93

\* (fuel reacted)/(fuel supplied) at the cell

\*\* (reforming steam supplied)/(fuel supplied)

에는 추가연료공급이 없고 공기극 입구 예열기 (air preheater)를 사용하는 Fig.1의 시스템에 대한 각 해석 방법(case)별로 적용한 제한요소들을 요약하였다. 터빈입구온도는 마이크로 가스터빈에 맞추어 850°C로 하고 셀의 작동온도와 입출구온도차는 국내의 기술수준을 고려하여 각각 800°C와 100°C로 하였다.<sup>(3)</sup> Case 0은 선행연구<sup>(4)</sup>에서 얻은 결과이다. Table 2에는 터빈입구 연소기에

추가로 연료를 공급하면서 공기에열기를 제거한 Fig. 2의 시스템들에 대한 해석방법 및 제한요소들을 나타냈다. 이상 언급한 case들이 모두 두 가지 제한요소들만을 고려한 것인데 비하여 Case 8에서는 세 가지 제한요소들(TIT, FCT, 셀입출구 온도차)을 모두 고려하였다. 이를 위하여 Fig. 2의 구성부들을 유지한 상태에서 Fig. 1에서 사용하였던 공기에열기도 함께 사용해야 한다. Table 3은 모든 경우에 대하여 일정하게 설정한 구성부 파라미터들이다.

Fig. 1과 Fig. 2 시스템의 해석결과를 각각 Table 4과 Table 5에 각각 나타내었다. 터빈입구 연소기에 추가 공급되는 연료량의 비(FR)는 다음과 같이 정의한다.

$$FR = \frac{\text{additional fuel supplied to combustor}}{\text{total fuel supplied}} \quad (10)$$

유사하게 터빈입구 연소기에 추가로 공급되는 공기량의 비(AR)는 다음과 같이 정의한다.

Table 4 Comparison of analysis results for systems without additional fuel supply to the combustor

Case	Reformer type	TIT (°C)	FCT (°C)	Cell inlet air temp. (°C)	FR	AR	System efficiency (%)	Power ratio (FC/GT)	Specific power (kJ/kg air)
0	Ext.	850	1031	700	0	0	62	6.44	550.9
	Int.	850	853	700	0	0	62.4	6.12	567.8
1	Ext.	850	1044	700	0	0	69.64	10.71	860.3
	Int.	850	846	700	0	0	64.04	6.80	622.7
2	Ext.	700.1	800	449.9	0	0	60.83	8.24	447.9
	Int.	943.2	800	617.3	0	0	63.76	5.48	662.3
3	Ext.*	-	-	-	-	-	-	-	-
	Int.	553	800	700	0	0	57	17.08	324.1
4	Ext.*	-	-	-	-	-	-	-	-
	Int.	850	800	637.1	0	0	62.71	6.23	576.1

\*System is impossible to design considering the limiting factors.

Table 5 Comparison of analysis results for systems with additional fuel supply to the combustor

Case	Reformer Type	TIT (°C)	FCT (°C)	Cell inlet air temp. (°C)	FR	AR	System efficiency (%)	Power ratio (FC/GT)	Specific Power (kJ/kg air)
5	Ext.	1061	800	700	0.635	0	40.65	0.94	239.2
	Int.	1063	800	700	0.291	0	53.58	2.48	437
6	Ext.	850	652.7	552.7	0.631	0	34.93	0.97	155.5
	Int.	850	651.7	551.7	0.324	0	45.91	2.18	256.9
7	Ext.	850	800	553.8	0.228	0	53.29	3.63	362.5
	Int.	850	800	553.5	0	0.351	62.78	6.131	571.6
8	Ext.	850	800	700	0.557	0	39.3	1.55	190.8
	Int.	850	800	700	0.191	0	54.88	3.82	386.9

$$AR = \frac{\text{additional air supplied to combustor}}{\text{total air supplied}} \quad (11)$$

## 4.2 연소기로의 추가 연료공급이 없는 시스템

### 4.2.1 Case 1 : FCT에 대해 셀전압 영향 고려

Case 1은 셀전압식을 이용하여 선행연구 결과인 case 0을 다시 계산했다. 셀전압식은 800°C에서 0.7 V이고, 온도가 높아질수록 상승하므로 셀 작동온도가 800°C 이상인 두 시스템 모두 셀전압이 커져서 셀전압을 일정하게 가정한 case 0에 비하여 시스템 성능을 높게 예측한다. 특히 작동온도가 1044°C인 외부개질 시스템은 셀전압이 0.829 V로 상승하여 연료전지의 출력이 크게 증가한다. 이에 따라 전체 효율은 7.5% 증가하고 비출력도 크게 증가한다.

### 4.2.2 Case 2 : FCT의 제한 고려

외부개질 시스템과 같이 높은 FCT를 가지는 시스템의 현실적인 설계를 위해 FCT를 800°C로 설정하였다. FCT를 낮추기 위해 재생기에서 1차 예열 후 셀 공기극에 예열기를 이용한 2차 예열을 하지 않았다. 외부개질 시스템은 낮은 FCT와 개질열에 이용되는 셀 출구 공기 열교환으로 TIT가 700.1°C로 낮아져 case 1보다 성능이 낮게 나온다. 내부개질 시스템에서는 FCT는 낮아지나 개질열을 셀 반응에서 얻고 공기극 입구 예열이 없으므로 TIT는 943.2°C로 높아진다. 연료전지의 성능은 낮아지고 가스터빈의 성능은 높아져 전체 효율은 case 1과 비슷하게 나왔다. 그러나 내·외부개질 시스템 모두 100°C 이상의 셀 입출구 온도차가 필요하다. 특히 외부개질 시스템

은 셀 입구온도가 500°C 이하로 낮아서 안정적인 셀 화학반응을 고려할 때 실제로 구현하기 힘들 것으로 판단된다.<sup>(10)</sup>

### 4.2.3 Case 3 : FCT, 셀 입출구 온도차의 제한 고려

고온의 FCT를 고려한 case 2에 셀 입출구 온도차로 발생하는 열용력을 고려하여 온도차를 100°C를 유지한 경우이다. 셀 입출구 온도차를 유지시키기 위해서 연소기에서 공기 예열기로 case 2보다 더 많은 열이 방출된다. 따라서 TIT는 낮아지고 터빈출력이 크게 감소하여 결과적으로 전체 효율과 비출력이 낮아진다. 특히 외부개질 시스템은 연료전지 출구가스를 개질열로도 이용하므로 TIT가 더 크게 감소하여 가스터빈의 순출력이 음수가 되어 설계 불가능한 결과를 얻었다.

### 4.2.4 Case 4 : FCT, TIT의 제한 고려

Case 3에서 낮아진 TIT를 높이기 위해서 FCT는 800°C로 유지시키고 셀 입구온도, 즉 공기에 열량을 조절하였다. 내부개질 시스템은 공기에 열을 하지 않으면 case 2와 같이 TIT는 943.2°C이다. 따라서 공기에 열을 하여 TIT를 850°C로 낮출 수가 있고 이 경우 성능은 case 2보다 낮다. 외부개질 시스템은 공기에 열을 하지 않은 case 2의 TIT가 700.1°C이므로 TIT 850°C의 시스템을 만드는 것은 불가능하다.

## 4.3 연소기로의 추가 연료공급이 있는 시스템

### 4.3.1 Case 5 : FCT, 셀 입출구 온도차의 제한 고려

Case 3과 동일한 제한조건을 부여하였다. FCT

를 800℃로 하고 터빈입구 연소기로 추가연료를 공급하여 TIT를 높이고 재생기를 통해 셀 입출구 온도차를 100℃로 맞추었다. 셀 입출구 온도가 case 3과 동일하기 때문에 case 3과 셀의 성능은 같고 필요한 셀 입구온도를 얻기 위하여 TIT를 높였기 때문에 가스터빈 출력이 증가하여 전체 출력은 증가한다. 그러나 상대적으로 효율이 낮은 가스터빈에 연료를 더 투입하여 출력을 증가시켰기 때문에 전체 효율은 case 3보다 낮다. 한편 TIT가 상당히 높기 때문에 가스터빈의 출력이 커져서 외부개질 시스템에서도 case 3과 달리 시스템 구성이 가능하다. 그러나 가스터빈 출력비중이 너무 커져서 전체 시스템 효율은 상당히 낮다.

#### 4.3.2 Case 6 : TIT, 셀 입출구 온도차의 제한 고려

Case 5에서 높은 TIT를 낮추어 850℃ 유지시키고 셀 입출구 온도차는 역시 100℃로 제한하였다. TIT가 고정되어 있어 셀 입구온도는 항상 일정하고 입출구 온도차도 100℃로 유지하여 내·외부개질 시스템 모두 연료전지만의 성능은 비슷하다. 그러나 셀 반응에서 개질열을 소모하는 내부개질 시스템인 경우 더 많은 연료가 셀에 공급되므로 외부개질 시스템에 비하여 연료전지 출력이 크고 시스템 효율도 높다.

#### 4.3.3 Case 7 : FCT, TIT의 제한 고려

Case 4와 같이 FCT와 TIT를 각각 800℃와 850℃으로 동시에 일정하게 유지시켰다. TIT가 850℃이므로 셀 입구온도는 약 550℃가 된다. FCT가 낮은 case 6보다 연료전지의 성능이 개선되어 전체 성능이 높다. 그러나 셀 입구온도가 셀반응에 필요한 온도보다 낮은 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한 내부개질 시스템은 개질열을 빼앗기지 않으므로 TIT가 850℃ 이상 높아질 가능성이 높다. 따라서 이 경우에는는 앞선 다른 case들과는 달리 터빈입구 연소기로의 추가적인 연료공급은 불필요하며, 오히려 일부의 공기를 터빈입구 연소기에 추가로 공급하여야 한다.

#### 4.3.4 Case 8 : FCT, 셀 입출구 온도차, TIT의 제한 고려

FCT, 셀 입출구 온도차, TIT를 모두 고려하기 위해서 셀 입구 공기예열과 터빈입구 연소기에 추가 연료공급방법을 모두 사용하였다. Case 3을 기반으로 터빈입구 연소기에 추가로 연료를 공급

하여 TIT를 원하는 수준(850℃)으로 올린 경우이다. 연료전지를 거치지 않고 직접 터빈입구 연소기로 추가의 연료를 공급하였기 때문에 case 3에 비해 가스터빈 출력 비중이 커지나 전체 효율은 낮아져 내부개질 시스템 경우 약 55% 효율을 갖는다. Case 3에서 TIT가 크게 낮아 설계가 불가능했던 외부개질 시스템도 낮은 효율을 갖지만 설계가 가능하다. 결과적으로 내·외부개질 시스템 모두 모든 설계 제한요소를 고려하고도 설계가 가능하였다.

## 5. 결 어

제한요소를 고려한 하이브리드 시스템의 성능 변화를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제한요소를 고려하면 내부개질형 시스템이 외부개질형 시스템보다 성능이 높다. 이는 작은 셀 입출구 온도차로도 설계가 가능한 내부개질 시스템이 제한요소에 영향을 덜 받기 때문이다.

(2) 터빈입구 연소기로 추가 연료공급이 없는 시스템에서 대체로 60% 내외의 효율을 보이며, 터빈입구 연소기에 추가의 연료공급을 한 경우보다 효율이 높게 나타났다. 이는 상대적으로 효율이 높은 연료전지의 출력이 가스터빈 출력보다 높을수록 시스템의 효율은 더 좋아지기 때문이다. 그러나 터빈입구 연소기로 추가 연료공급이 없는 시스템에서 외부개질 구성은 내부개질 구성보다 상대적으로 설계의 제약을 크게 받는다.

(3) 공기예열기를 사용하면서 동시에 터빈입구 연소기에 추가의 연료를 공급하는 방법을 사용하면 한 가지 방법만 사용할 경우에 맞추지 못했던 설계 제한요소들(TIT, FCT, 셀 입출구 온도차) 모두 만족하는 설계가 가능하였으며 내부개질형 시스템은 터빈 입구온도 850℃, 연료전지 작동온도 800℃, 셀 입출구 온도차 100℃의 제한조건에서 55%의 효율을 갖는다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술개발 사업의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. National Energy Technology Laboratory, U.S.

- Department of Energy, <http://www.netl.doe.gov>.
- Williams, M. C., Strakey, J. P. and Singhal, S. C., 2004, U.S. Distributed generation fuel cell program, *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79-85.
  - Korea Aerospace Research Institute, 2003, Development of high efficiency gas turbine/fuel cell hybrid power generation system, report to Ministry of Commerce, Industry and Energy.
  - Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, Performance characteristics analysis of gas turbine-Pressurized SOFC hybrid systems, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 615-622.
  - Veyo, S. E., Lundberg, W. L., Vora, S. D. and Litzinger, K. P., 2003, Tubular SOFC Hybrid Power System Status, ASME paper GT2003-38943.
  - Jeong, Y. H., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2002, Performance design analysis of a pressurized hybrid system combining gas turbine and solid oxide fuel cell, *Trans. of KSME B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1605-1612.
  - 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.
  - Aspen Technology, HYSYS, ver. 3.2.
  - Massardo, A. F. and Lubelli, F., 1998, Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycle (IRSOFC-GT), Part A: Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis, ASME paper 98-GT-577.
  - Singhal, S. C. and Kendall, K., 2003, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications, Elsevier Ltd., Chapter 13.