〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.10.907 ISSN 1226-4881

하부 사이클 추가에 의한 MCFC 시스템의 성능향상

지승원* · 박성구* · 김동섭*†
* 인하대학교 기계공학과

Enhancement of MCFC System Performance by Adding Bottoming Cycles

Seung Won Ji*, Sung Ku Park* and Tong Seop Kim*†
** Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received April 26, 2010 ; Revised August 11, 2010 ; Accepted August 15, 2010)

Key Words: Molten Carbonate Fuel Cell(용융탄산염 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Organic Rankine Cycle(유기매체 랜킨 사이클), Oxy Fuel Combustion Cycle(순산소 연소 사이클)

초록: 고온형 연료전지인 MCFC 발전시스템에 가스터빈, 유기매체 랜킨 사이클, 순산소 연소 사이클 등 다양한 하부 사이클을 추가한 통합시스템들의 성능을 비교 해석하였다. MCFC 시스템의 성능과 운전조건을 바탕으로 하여 각 추가 시스템의 주요 설계 변수 변화에 따른 통합시스템의 성능 변화를 해석하였고 이로부터 각 시스템의 최적 성능을 도출하였다. 각 시스템을 비교하여 MCFC와 최적의 결합을 나타내는 시스템을 분석하였는데, MCFC/OXY 시스템이 MCFC 단독 시스템에 비하여 가장 큰 출력 증가를 나타내었으며, MCFC/GT 시스템의 효율 증가가 가장 큰 것으로 나타났다.

Abstract: Integration of various bottoming cycles such as the gas turbine (GT) cycle, organic Rankine cycle, and oxy-fuel combustion cycle with an molten carbonate fuel cell (MCFC) power-generation system was analyzed, and the performance of the power-generation system in the three cases were compared. Parametric analysis of the three different integrated systems was carried out under conditions corresponding to the practical use and operation of MCFC, and the optimal design condition for each system was derived. The MCFC/oxy-combustion system exhibited the greatest power upgrade from the MCFC-only system, while the MCFC/GT system showed the greatest efficiency enhancement.

- 기호설명 -

F : **패러데이 상수** [96,486 C/mol]
h : **비엔탈피** [kJ/kg]
$\overline{h}$: **몰 비엔탈피** [kJ/kmol]
LHV : **저위발열량** [kJ/kg·K]
MCFC : **용융탄산염 연료전지**
$\dot{m}$: **질량유량** [kg/s]
$\dot{n}$: **몰유량** [kmol/s]
ORC : **유기매체 랜킨 사이클**
OXY : **순산소 연소 사이클**
$\dot{Q}$: **열** [MW]
SCR : **연료 수증기 비**
TIT : **터빈입구온도** [°C]
U_f : **연료이용률**
V : **전압** [V]
$\dot{W}$: **출력** [MW]
η : **효율** [%]

하첨자
AC : **교류**
aux : **보조기기**
bot : **하부 사이클**
comp : **압축기**
conv : **직교류 변환**
DC : **직류**
FC : **연료전지**
GT : **가스터빈**
i : **성분**
int : **통합시스템**

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

P : 생성물
R : 반응물
turb : 터빈

1. 서 론

연료전지는 고효율이면서 친환경적인 장점으로 인하여 발전, 수송 등 여러 분야에서 주목을 받고 있고 실용화를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.[1] 특히 고온형 연료전지인 MCFC, SOFC가 발전설비(power plant)용으로 유망하다.[2] 고온형 연료전지는 다른 열기관들과 결합에 의하여 시너지 효과를 기대할 수 있는데, 특별히 가스터빈과의 결합에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 다양한 하이브리드형 SOFC에 대한 연구, 개발이 진행되었다.[3~8] MCFC는 600~700℃의 작동온도를 지니고 있으며 SOFC와 마찬가지로 하이브리드 시스템 구성에 대한 관심이 높다.[9~12] 역시 가스터빈과의 결합이 우선적으로 고려된다.

한편 MCFC 발전시스템에서 배출되는 배가스의 온도는 대략 350°C 내외로서 중/저온인데, 이 열을 회수하여 랜킨 사이클로서 추가적인 출력을 생산하는 것이 가능하다. 물을 사용한 랜킨 사이클 즉 증기터빈 사이클을 구성할 수도 있지만, 중/저온 열원에서는 물보다는 유기물 (organic fluid)을 사용하는 유기매체 랜킨 사이클(Organic Rakine Cycle)을 이용하는 것이 유리한 점이 많다고 알려져 있다. ORC는 비교적 높지 않은 온도의 배가스나 태양열, 지열 등 중/저온의 열원을 이용하는 경우에 많이 사용되는 방식이다. 한편 물을 사용하는 경우에는 열회수 증기발생기 후단에 추가적인 연료와 산소를 공급하여 작동유체의 온도를 증가시켜서 출력을 증강하는 방법이 가능한데, 일종의 순산소 연소(Oxy-fuel combustion)개념을 도입한 것이다. 순산소 연소를 이용한 발전방식은 CO_2를 후처리하여 지구온난화 문제에 대처하기 위해 제시된 방법으로 현재 많은 연구가 이루어지고 있으며,[13~16] 배열회수형 순산소 연소기술을 적용하기 위한 시도들도 이루어지고 있다.[17,18] 이외에도 태양열을 이용하여 물을 수증기로 상변화시킨 후 순산소 연소를 통해 터빈을 구동하는 발전시스템에 대한 연구도 있었다.[19]

이렇듯 다양한 중/저온 에너지 회수형 발전 시스템들이 가능하므로 여러 가지 형태의 응용된 MCFC 시스템이 구현 가능한데, 이번 연구는 가스터빈과의 결합을 비롯하여 배가스의 에너지를 ORC 및 순산소연소 사이클로 회수하도록 구성한 시스템 등 세 가지 경우에 대해서 성능을 비교 분석하고자 한다.

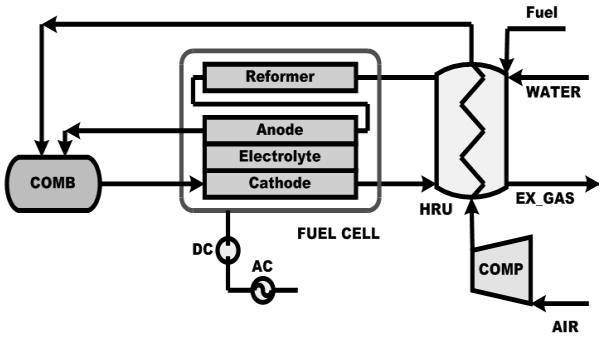

Fig. 1 Configuration of the MCFC

2. 시스템의 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

2.1.1 MCFC 시스템

MCFC 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었는데 공기를 공급해주는 블로워와 연료전지 그리고 열회수기(HRU)로 구성된다. 사용된 레이아웃은 현재 상용화되어 있는 MCFC 시스템[9]의 형태를 벤치마크하여 구성한 것이다.

연료전지는 연료를 수소로 변환시키는 개질기(reformer)와 수소와 산소가 반응을 하여 전기를 생성하는 셀 그리고 후연소기로 구성된다. 공기는 블로워를 통하여 공급되고 HRU에서 연료전지 공기극 출구가스와 열교환을 통하여 가열된 뒤 연소기에 공급된다. 연료는 공기와 마찬가지로 HRU에서 가열된 후 개질기로 공급된다. 개질반응에 필요한 수증기는 외부에서 공급하는 것으로 가정하였으며, 외부로부터 공급된 물은 HRU에서 수증기로 상변화 되어 개질기로 공급된다. 또한 개질반응에 필요한 열은 연료전지에서 직접 공급하는 내부개질(internal reforming)방식을 사용하였다. 수소가 포함된 개질 가스는 연료전지의 연료극으로 공급되어 반응하고, 연료극 출구 가스와 열회수기에서 가열된 공기는 후연소기로 공급된다. 후연소기 출구 가스는 공기극으로 공급되어 반응하고 열회수기에서 열이 회수된 후 배출된다.

2.1.2 MCFC/GT 하이브리드 시스템

MCFC와 가스터빈을 결합한 상압형 하이브리드

Table 1 Comparison of properties between water and R123

Working fluid	Critical point		Molecular weight	Boiling point @1bar
	Temperature	Pressure		
Water	647.3K	220.9bar	18.02 kg/kmol	373K
R123	457.15K	36.06bar	152.91 kg/kmol	300.9K

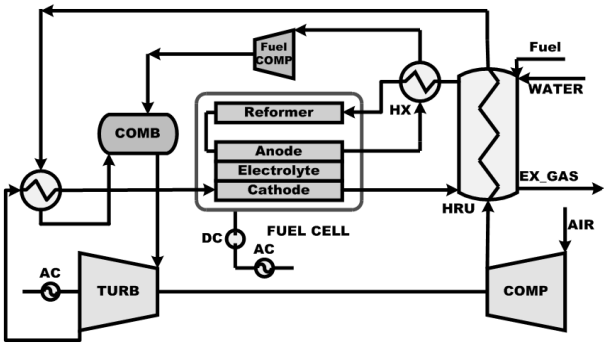

Fig. 2 Configuration of the MCFC/GT system

시스템의 구성은 선행연구[12]를 참고하였으며, 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 선행연구에서 간접적으로 터빈입구를 가열하는 방식보다(MCFC 제작사가 제안한 것) 직접 연소로서 터빈입구 가스를 가열하는 방식이 성능이 다소 더 우수함을 보였으므로 이에 준하는 사이클을 채택하였다. 가스터빈의 압축기에 의해 가압된 공기는 연료전지 공기극의 출구가스, 가스터빈의 출구가스와 순차적으로 열교환을 한 후 연소기에 공급된다. 연료전지 연료극 출구 가스는 HRU를 통해 가열된 연료, 증기혼합물과 열교환을 한 후 가스터빈의 압력비에 맞게 가압되어 후연소기에 공급된다. 가열된 공기와 가압된 연료극 출구 가스는 후연소기에서 연소반응을 한 후 터빈을 구동하여 출력을 생산하고 터빈의 출구가스는 HRU 출구 공기와 열교환후 공기극으로 공급된다. 이 전체 시스템은 연료전지와 가스터빈이 유기적으로 에너지 및 물질 교환을 통해 이루어진 시스템으로서 가스터빈을 하부 사이클이라고 표현하는 것이 반드시 적절하지는 않지만 가스터빈이 연료전지에서 남은 연료로 구동되어 발생 출력이 연료전지보다 작으므로 하부 사이클 범주에 포함시켜서 다른 하부 사이클들과 비교하는 것이 의의가 있다.

2.1.3 MCFC/ORC

ORC는 유기매체를 작동유체로 사용하는 랜킨 사이클로서 주로 중/저온 열원(지열, 태양열, 폐열

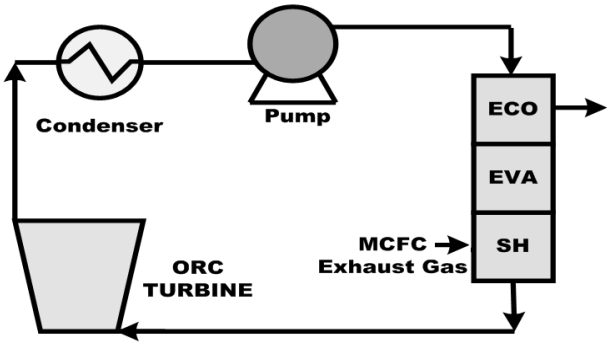

Fig. 3 Configuration of the ORC

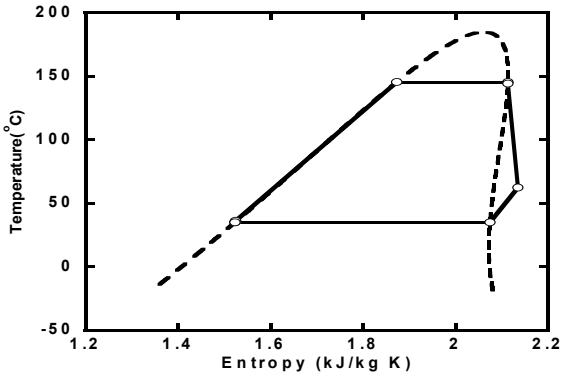

Fig. 4 An example of the T-s diagram of the ORC

등)을 회수하여 동력을 생산하는 역할을 한다. ORC는 터빈출구의 작동유체의 밀도가 물에 비하여 높다는 점이 설비의 소형화에 기여하고, 비등점이 낮기 때문에 온도가 낮은 열원을 사용하는 작은 용량의 발전 설비에 적합하다는 장점을 가진다. 여러 가지 작동유체를 고려하여 성능을 분석한 연구들이 있었다.[20~24] 특히, 소형 재생 사이클 가스터빈의 중온 배가스의 에너지를 회수한 하부 사이클에 ORC 적용을 고려한 예[24]가 있었다. 본 연구에서는 배기가스 온도 조건이 이 연구[24]의 조건과 유사하므로 동일한 매체인 R123을 작동유체로 사용하였다. R245fa가 새로운 물질로서 더 환경 친화적(오존층 파괴 지수가 낮음)인 물질로서 제안되기도 하지만,[21] 물성치가 R245fa와 유사하고 본 연구에서 사용한 상용프로그램에서 물성치가 제공되는 R123을 채택하였다. Table 1에 물과 R123의 물성치를 비교하였다.

ORC시스템의 구성은 Fig. 3에 나타내었다. (MCFC의 배기가스 이후만 나타내었음) 액체상태의 작동유체는 펌프를 통해 가압되고 열회수기를 거쳐 포화증기 혹은 과열상태가 된 후 터빈에서 팽창하여 동력을 생산한다. 터빈 출구의 작동유

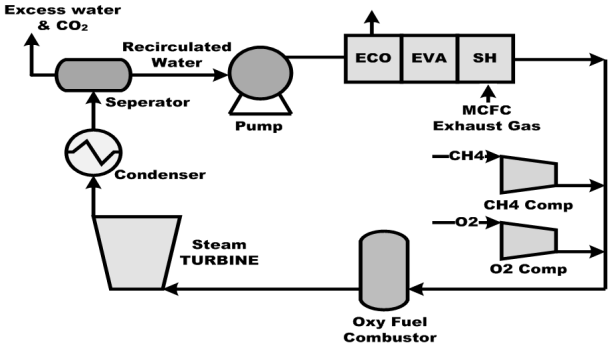

Fig. 5 Configuration of the Oxy-fuel cycle

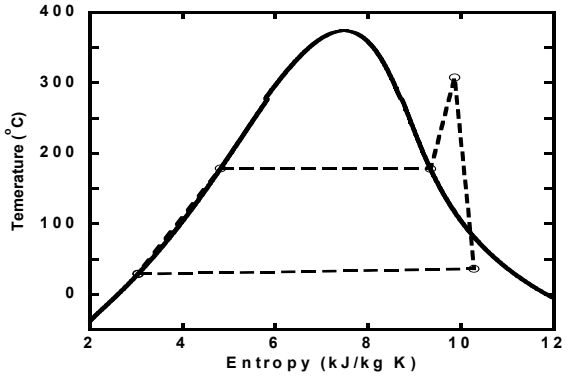

Fig. 6 An example of the T-s diagram of the oxy-fuel combustion cycle

체는 응축기에서 액체 상태로 상변화 된 후 다시 펌프에 공급되는 순환시스템으로 모델링 하였다. Fig. 4에는 ORC의 온도-엔트로피 선도를 예시하였다.

2.1.2 MCFC/OXY

순산소 연소는 공기 중의 산소만 분리하여 산화제로 사용하는 연소방식이다. 순산소 연소 시스템은 연소기 출구가스가 주로 물과 이산화탄소로 구성되기 때문에 응축과정을 통해 수분을 제거함으로써 고농도의 이산화탄소의 포집이 용이하다. 본 연구에서는 배열회수형 순산소 연소 사이클 방식[17]을 적용하였다. MCFC/OXY 시스템에서 MCFC 이후의 순산소 연소 사이클만 부각하여 Fig. 5에 나타내었다. 펌프를 통하여 가압된 물은 HRSG에서 수증기로 변환되고, 생산된 수증기, 연료 그리고 순수한 산소는 순산소 연소기에서 연소된다. 연소기 출구가스는 터빈을 구동한 후 응축기에서 응축되며 응축된 물은 다시 펌프로 공급되어 재순환되고 응축되지 않은 물과 CO_2의 혼합가스는 추출되어 배출된다. 순산소 연소기가 없으면 이 하부 사이클은 물을 이용한 일반적인 랜킨 사이클과 동일하지만 이 경우에는 터빈 입구온도가 낮아 생성되는 출력에 제한이 있다. 순산소 연소기를 도입하면 터빈입구온도를 가능한 높여서 출력을 증대시킬 수 있다. 사이클 특성은 문헌[17]을 통해 살필 수 있다. Fig. 6에 순산소 연소 사이클의 온도-엔트로피 선도를 나타내었다. 순산소 연소반응은 이론공연비로 100% 연소한다고 가정하였고, 이에 따라 연소가스는 이산화탄소와 수증기만으로 구성된다. 응축기에서 이산화탄소 성분이 상대적으로 높은 기체가 추출되어 정제과정을 거쳐 고농도 이산화탄소를 추출하는데 이 과정에 대한 구체적인 계산은 생략하였다. 이 부분이 포함될 경우 소모되는 동력으로 인하여 시스템 순 성능이 다소 감소할 것이다.

2.2 해석

2.2.1 MCFC

연료는 천연가스를 고려하였는데 100% 메탄(CH_4)으로 가정하였다. 다음과 같이 수증기 개질을 통해 연료전지에 필요한 수소를 생성하도록 하였으며 평형반응으로 가정하였다.

Steam Reforming : $CH_4 + H_2O \leftrightarrow 3H_2 + CO$ (1)
Water-Gas Shift : $CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$ (2)
Total reaction : $CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$ (3)

연료개질을 위하여 공급되는 수증기의 양은 다음과 같은 식으로 정의 되는 Steam Carbon ratio(SCR)에 따라 정의 된다.

$$SCR = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (4)$$

연료전지의 공기극에서는 산소와 이산화탄소가 반응하여 탄산이온이 생성된다. 탄산이온은 전해질을 통해 연료극으로 공급되며 연료극에서 수소와 반응한다. 이 때 수증기와 전자가 생산되는데, 전자는 외부 부하를 통과하여 전기를 생산한 후 공기극으로 공급되고, 수증기는 배출된다.

Anode : $2H_2 + 2CO_3^{2} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$ (5)
Cathode : $O_2 + 2CO_2 + 4e- \rightarrow 2CO_3^{2-}$ (6)
Overall : $H_2 + ½\ O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$ (7)

연료전지에서의 에너지 보존식은 아래와 같으며, $\dot{Q}$는 흡열반응인 개질기로 전달되는 열량이다.

$$\sum_{R} \dot{n}_i \overline{h}_i + \dot{Q} = \sum_{P} \dot{n}_i \overline{h}_i + \dot{W}_{FC,DC} \quad (8)$$

연료극에서 반응하는 연료의 비율은 아래에 정의된 연료이용률(U_f)로서 정하였다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2,reacted} + \dot{n}_{CO,reacted}}{\dot{n}_{H_2,supplied} + \dot{n}_{CO,supplied}} \quad (9)$$

셀 전압은 연료전지에서 중요한 설계변수중 하나로써 연료전지의 작동온도, 압력 등 여러 가지 작동조건에 의해서 변하게 된다. MCFC의 경우 일반적으로 약 0.7~0.85V의 셀전압을 가지는 것으로 알려져 있으며 미래에는 0.9V이상을 기대하고 있다.[25] 본 연구에서는 0.78V를 사용하였다. 셀 전압을 사용한 연료전지의 직류출력은 다음과 같이 계산되며, 교류출력은 변환효율, 블로워 및 펌프 등의 보조 기기의 출력을 고려하여 계산하였다.

$$\dot{W}_{FC,DC} = 2(\dot{n}_{H_2,reacted} + \dot{n}_{CO,reacted}) \cdot F \cdot V \quad (10)$$

$$\dot{W}_{FC,AC} = \dot{W}_{FC,DC} \cdot \eta_{conv} - \dot{W}_{AUX} \quad (11)$$

또한 연료전지의 효율은 공급되는 연료의 저위발열량을 기준으로 아래와 같이 계산된다.

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{CH_4}} \quad (12)$$

MCFC 시스템의 주요 설계 조건 및 성능은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2의 MCFC/GT 하이브리드 시스템 해석에서 가스터빈의 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{fuel,comp} \quad (13)$$

마지막 항은 MCFC 연료극 출구 가스를 터빈 측으로 공급하기 위해 가압하는데 소요되는 동력이다. MCFC/GT 통합 시스템의 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{W}_{int} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT} \quad (14)$$

ORC와 순산소 연소 사이클에서는 펌프를 통해 가압된 작동유체가 MCFC의 출구가스와 열교환을 하여 기체상태로 상변화 된 후 터빈을 구동하게 되므로 하부 사이클의 순 출력은 터빈출력에서 보조 동력 소모를 빼주어 아래와 같이 정의하여 계산하였다.

$$\dot{W}_{bot} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{aux} \quad (15)$$

하부 사이클들과 MCFC를 결합한 통합 시스템의 총 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{W}_{in} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{bot} \quad (16)$$

통합 시스템들의 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{int} = \frac{\dot{W}_{int}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{CH_4}} \quad (17)$$

순산소 사이클의 경우에는 순산소 연소를 위한 추가적인 연료공급도 분모에 포함한다. 하부 사이클 해석에 사용된 계산 조건은 Table 3에 정리하였다. 모델링 및 해석은 상용프로그램인 Aspen HYSYS를 사용하였다.[26]

3. 결과 및 토의

Table 2에 나타난 바와 같이 단독으로 작동하는 MCFC 시스템의 출력은 2.4MW, 효율은 46.8%인데 이는 상용 시스템[9]의 성능 수치와 유사하다.

Table 2 Design parameters and performance of MCFC

Fuel	methane (CH_4)
Fuel LHV	50,030 kJ/kg
Fuel Cell Operating Temperature	650°C
Operating pressure	near ambient
Cell Voltage	0.78V
SCR	2.5
Utilization factor	0.78
DC to AC conversion eff.	98%
Isentropic eff. of blower	80%
Isentropic eff. of pump	60%
Power Output	2.4MW
Thermal efficiency	46.8%

Table 3 Design parameter of the bottoming cycle

ORC	Turbine isentropic efficiency	85%
	Pump isentropic efficiency	80%
	Temperature of the condenser	35°C
	Pressure of the condenser	126.9 kPa
	Pinch temp. in HRU	10°C
Oxy	Turbine isentropic efficiency	85%
	Pump isentropic efficiency	80%
	Compressor isentropic efficiency	80%
	Condenser pressure	6kPa
	Pinch temp. in HRU	10°C
GT	Turbine isentropic efficiency	85%
	Compressor isentropic efficiency	80%

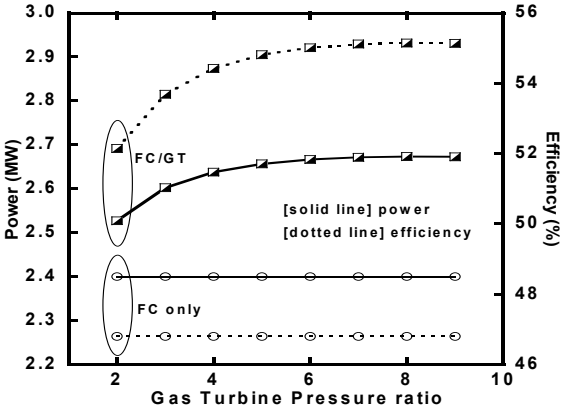

Fig. 7 Variations in system power and efficiency of the MCFC/GT system with GT pressure ratio

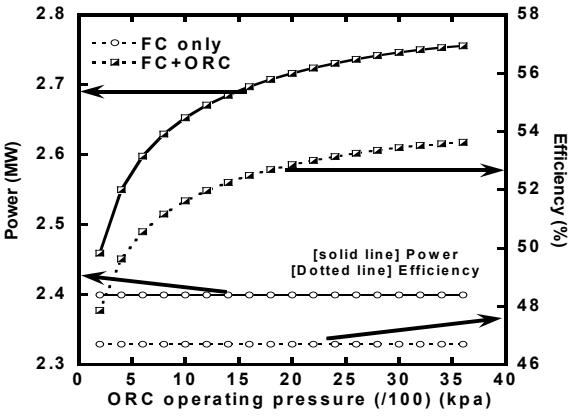

Fig. 8 Variations in system power and efficiency of the MCFC/ORC system with turbine inlet pressure (turbine inlet is saturated vapor).

먼저, MCFC와 가스터빈을 결합한 시스템의 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 주된 가스터빈 설계변수인 압력비 변화에 따른 해석을 하였다. 압력비가 증가함에 따라 가스터빈의 출력이 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 알려진 가스터빈의 출력 경향과 유사하다. 추가적인 연료의 공급이 없이 가스터빈의 출력이 증가하게 되므로 MCFC/GT 시스템의 출력 및 효율도 증가하는 경향을 나타낸다. 압력비가 2~9까지 변화할 때 시스템의 출력과 효율은 연료전지가 단독으로 작동하는 시스템과 비교하여 최대 11.3%, 17.8% 증가한다.

다음으로 MCFC/ORC 시스템의 해석 결과를 보인다. 선행 연구에서 300°C 내외의 배열을 이용하는 경우에 터빈입구 상태를 포화 증기로 유지하여도 충분히 성능을 높일 수 있다고 보고되므로[12] 본 연구에서도 ORC 터빈 입구온도를 작동

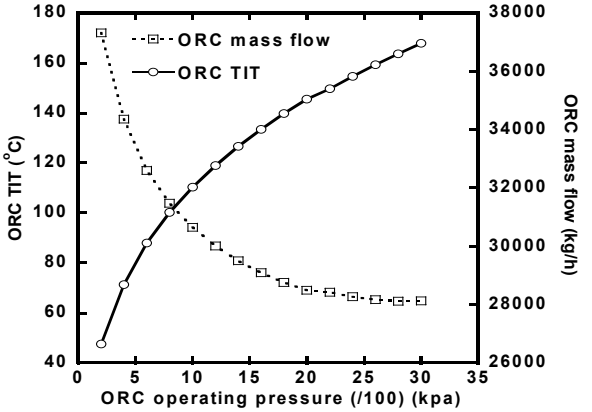

Fig. 9 Variations of the ORC TIT and working fluid mass flow with turbine inlet pressure (turbine inlet is saturated vapor)

유체의 포화증기온도로 가정한 해석을 먼저 수행하였으며, 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 시스템에서 연료전지로 공급되는 연료 및 공기의 양은 MCFC가 단독으로 작동하는 시스템과 동일하다. ORC의 압력비가 증가하여 포화증기온도가 증가하게 되면 HRU에서의 핀치 온도차를 유지하기 위해 Fig. 9와 같이 ORC 작동유체의 유량이 감소하게 된다. 하지만 ORC 작동유체의 유량이 감소하더라도 ORC 시스템의 터빈입구온도(TIT)와 작동압력이 증가로 인해 ORC 시스템의 출력은 증가하는 경향을 나타내고 따라서 전체 시스템의 출력과 효율도 증가하는 경향을 나타낸다. ORC 시스템의 압력비(터빈 입출구 압력의 비)가 약 1.5~29까지 변화할 때 MCFC/ORC 시스템의 출력은 최고 15.0%, 효율은 최고 14.6%까지 증가하였다. Fig. 10에는 터빈 입구 조건에 따른 성능 차이를 보고자 ORC 시스템이 일정한 터빈입구압력을 가질 때 TIT 변화에 따른 MCFC/ORC 시스템의 성능변화를 나타내었다. 터빈입구압력 1000, 2000, 3000kPa에서 포화증기온도는 각각 111.2, 146.6, 170.3°C이다. 터빈입구압력이 1000kPa와 2000kPa인 경우에는 작동유체의 온도가 포화증기온도일 때 MCFC/ORC시스템의 출력 및 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 랜킨사이클에서 증기터빈의 입구 온도 압력이 증가할 경우 효율이 증가하는 경향을 나타내지만 이번 연구에 고려된 MCFC/ORC 시스템에서 MCFC의 배열이 일정하기 때문에 ORC 사이클에서 터빈 입구온도가 증가하게 되면 앞서 Fig. 9에서 설명했던 것처럼 작동유체의 유량이 감소하게 된다.

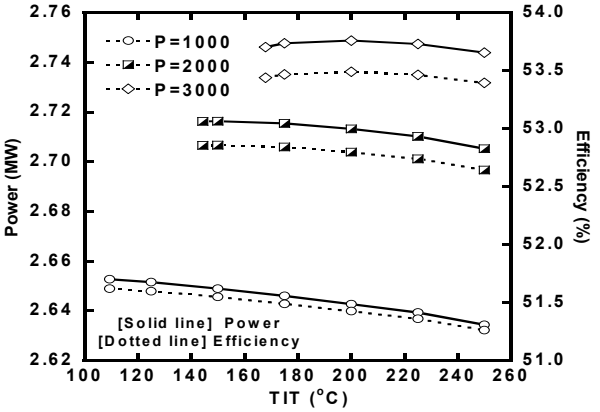

Fig. 10 Variations in system power and efficiency of the MCFC/ORC system with turbine inlet pressure and temperature

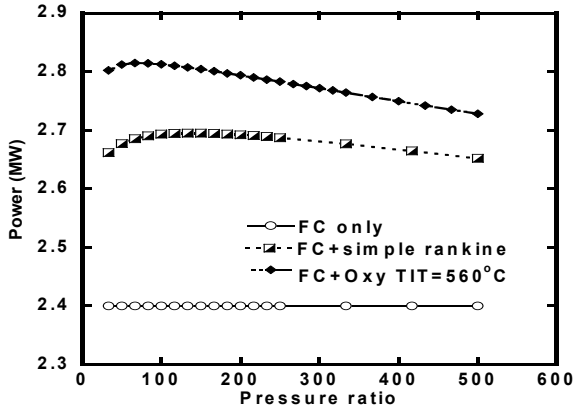

Fig. 11 Variations in system power of the MC FC/OXY system with turbine inlet pressure

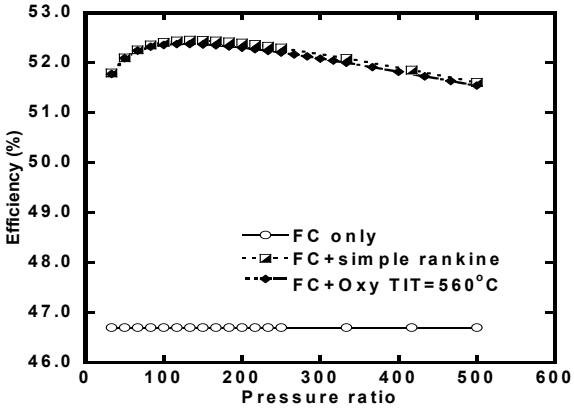

Fig. 12 Variations in system efficiency of the MCFC/OXY system with turbine inlet pressure

터빈입구압력이 1000, 2000kPa인 경우 터빈 입구 온도의 증가 영향에 비해 작동유체 감소의 영향이 크기 때문에 터빈입구온도가 포화증기온도 일 때 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 하지만 3000kPa경우에는 포화증기온도인 170.3℃일 때보다 출력과 효율이 높은 구간이 있었으며, TIT가 약 200℃인 경우에 최고점을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 터빈입구압력 조건에서 터빈입구온도를 변화시킨 경우에 비해 동일한 터빈 입구온도 조건에서 작동압력을 변화시킨 경우의 시스템 성능의 변화가 크게 나타났다.

MCFC/OXY 시스템의 해석 결과를 Fig 11~13에 나타내었다. Fig.11와 12에는 추가적인 연료와 산소의 공급이 없는 경우, 즉 물을 연료전지 시스템의 출구가스와의 열교환으로만 가열하여 생산된 증기를 작동유체로 사용하는 랜킨 사이클의 성능과 순산소 연소기에 추가적인 연료와 산소를 공급하여 터빈입구온도를 560°C로 설정한 순산소 사이클의 성능을 비교하여 나타내었다. 주 설계 변수는 터빈의 압력비이다. 추가적인 연료를 공급하지 않은 경우 약 터빈입구 압력 800kPa(압력비 133)에서 최대 출력이 나타났다. MCFC의 배열이 일정한 조건이므로 압력비가 상승하게 되면 물의 증발온도가 증가하게 되고 따라서 ORC의 경우와 마찬가지로 생성되는 수증기의 양이 감소하게 된다. 이러한 압력비 증가로 인한 터빈 출력의 증가와 유량 감소로 인한 출력의 감소의 영향이 서로 영향을 주며 출력의 최고점이 발생하게 된다. 또한 추가적인 연료의 공급이 없으므로 효율에도 동일한 경향을 나타내게 된다. 하지만 이 경우 증기터빈의 입구 온도가 255°C~400°C로 일반적인 증기터빈의 입구온도의 비해 낮다. 따라서 순산소 연소를 통해 증기터빈의 입구온도를 560°C로 고정한 경우에 대한 해석도 수행하였다. 순산소 연소를 적용하여 터빈입구온도를 560°C로 설정한 경우에도 추가 연료를 넣지 않았을 때와 출력과 효율의 경향은 비슷하다. 압력비가 133인 경우에 터빈입구온도를 560°C로 설정한 경우에는 추가연료를 넣지 않았을 때보다 4%정도의 추가적인 출력을 얻을 수 있었다. 하지만 추가적인 연료의 공급을 통한 영향이 증기터빈 입구온도 상승으로 인한 출력 증가의 효과와 거의 상쇄되어 효율은 추가적인 연료의 공급이 없는 경우와 거의 같게 나타난다. Fig. 13에는 순산소 연소 사이클의 터빈입구 압력이 일정할 때 터빈입구 온도 변화에 따른 출력 및 효율의 변화를 나타내었다. 터빈입구온도가 증가 할수록 출력은 증가하지만 그만큼 연료가 더 공급되어야 하므로 효

Table 4 Performance comparison of various systems based on MCFC

	MCFC	MCFC/ORC	MCFC/OXY	MCFC/GT
Design condition	-	ORC operating pressure : 3600 kPa	OXY operating pressure / temperature : 800kPa / 560°C	GT pressure ratio : 9
System power [MW]	2.40	2.76	2.81	2.67
System efficieny [%]	46.80	53.62	52.37	55.15

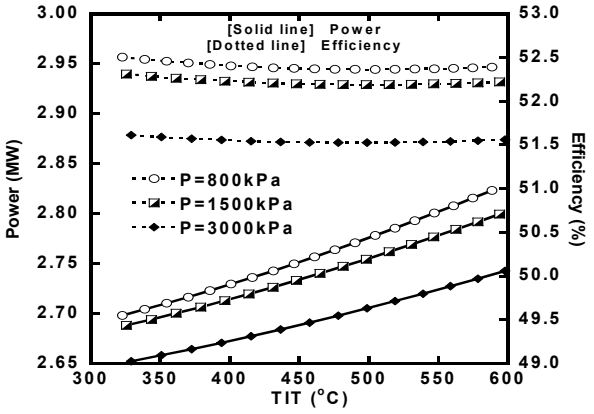

Fig. 13 Variations in system power and efficiency of the MCFC/OXY system with turbine inlet pressure and temperature.

율은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 연소가스의 주 성분이 H_2O 이기 때문에(이산화탄소보다 H_2O가 월등히 더 많음) 실제로 증기터빈과 유사하므로 터빈 입구온도는 기존 증기터빈의 예를 보아서 600°C 이하가 적절하다고 판단된다.

이상 설명한 3가지 각 통합 시스템의 최적 성능을 MCFC 단독 시스템 성능과 비교하여 Table 4에 나타내었다. MCFC/OXY 시스템이 연료전지 단독 시스템과 비교하여 가장 큰 출력의 상승을 나타내었다. 단, 이 시스템에서는 연소에 필요한 순수한 산소를 공기로부터 분리하기 위해 동력 소모가 필요한데 대체로 동력 소모는 약 200kWh/ton-O_2로 보고되고 있다.[27] 최고의 출력을 나타내는 MCFC/OXY 시스템에 사용된 산소의 양은 약 63.5kg/h이다. 따라서 순수산소의 분리를 위해 필요한 동력은 0.0127MW로 예상된다. 이러한 출력을 고려하더라도 여전히 MCFC/OXY 시스템의 출력증가가 가장 크다고 예상할 수 있다. 하지만 하부 사이클에 연료가 공급되기 때문에 다른 시스템들에 비해 효율의 증가는 크지 않다. MCFC의 배열을 이용한 두 시스템에 비해 MCFC/GT 시스템이 좀 더 큰 효율의 증가를 나타내었다. MCFC/ORC 시스템과 동일하게 추가적인 연료가 공급되지는 않지만 배열회수 등의 공정에서 에너지 손실이 존재하는 MCFC/ORC시스템에 비해 연소 혹은 연료전지 반응열을 직접 사용하면서 상대적으로 더 효과적인 에너지 사용이 가능하기 때문으로 이해된다.

4. 결 론

본 논문에서는 MCFC와 여러 가지 추가적인 사이클들을 결합한 시스템의 성능을 비교 분석하여 MCFC와 최적의 결합을 나타내는 시스템을 도출하였다. MCFC의 배열을 이용한 하부 사이클로써 ORC와 순산소 연소 사이클을 적용하였으며 상압형 MCFC/GT 시스템 및 MCFC 단독 시스템과 성능을 비교하였다.

(1) MCFC/GT 시스템에서는 압력비가 증가함에 따라 출력과 효율이 증가하는 가스터빈의 성능 특성과 유사한 결과를 나타내었다.

(2) 하부 사이클로 ORC를 사용한 경우에는 ORC작동압력이 높을수록 통합 시스템의 출력 및 효율은 증가하였으나 그 증가폭은 점차 줄어들었다.

(3) 하부 사이클이 순산소 연소 사이클인 경우 작동압력이 800kPa일 때 통합 시스템의 효율이 가장 높았으며, 압력비에 따라서는 작동압력인 800kPa, 즉 하부 사이클의 압력비가 133인 경우까지는 통합 시스템의 출력과 효율이 증가하였지만 그 이상으로 증가할 때는 감소하였다.

(4) MCFC 단독 시스템과 비교하여 가장 큰 출력의 증가를 나타낸 시스템은 MCFC/OXY 시스템이다. 순수 산소를 분리하기 위해 필요한 동력을 고려하더라도 순 출력 증가는 가장 클 것으로 기대된다. MCFC/GT 시스템의 경우가 MCFC 단독 시스템에 비해 효율 상승은 가장 크다. 또한 MCFC/GT 시스템의 경우 시스템 출구온도가 MCFC 단독 시스템의 출구 온도와 큰 차이가 없어 추가적으로 ORC 또는 순산소 연소 사이클과의 결합이 가능하며, 이 경우 출력 향상 정도는

더욱 클 것으로 예상된다.

참고문헌

(1) Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.

(2) 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.

(3) 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. Power Sources*, Vol. 96, pp. 352~368.

(4) 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. Power Sources*, Vol. 132, pp. 77~85.

(5) Yang, J. S., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2007, "Performance Characteristics of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System with Vatious Part-load control Modes," *J. Power Sources*, Vol. 166, pp. 155~164.

(6) 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. Power Sources*, Vol. 160, pp. 462~473.

(7) 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. Power Sources*, Vol. 163, pp. 490~499.

(8) Park, S. K., Oh, K. Y. and Kim, T. S., 2007, "Analysis of the Design of a Pressurized SOFC Hybrid System using a Fixed Gas Turbine Design," *Journal of Power Sources*, Vol. 170, pp. 130~139.

(9) Ghezel-Ayagh, H., Walzak, J., Patel, D., Daly, J., Maru, H., Sanderson, R. and Livingood, W., 2005, "State of Direct Fuel Cell/Turbine Systems Development," *Journal of Power Sources*, Vol. 152, pp. 219~225.

(10) Bischoff, M., Huppmann, G., 2002, "Operating Experience with a 250kWel Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) Power Plant," *J. of Power Sources*, Vol. 105, pp. 216~221.

(11) 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.

(12) Oh, K. S. and Kim, T. S., 2006, "Performance Analysis on Various System Layouts for the Combination of an Ambient Pressure Molten Carbonate Fuel Cell and a Gas Turbine," *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 455~463.

(13) Jericha. H., Sanz. W., Göttlich. E. and Neumayer. F., 2008, "Design Details of a 600MW Graz Cycle Thermal Power Plant for CO_2 Capture," ASME paper, GT2008-50515.

(14) Pronske. K., Trowsdale. L., Macadam. S. and 'Vic' Viteri. F., 2006, "An Overview of Turbine and Combustor Development for Coal-Based Oxy-Synbgas Systems," ASME paper, GT2006-90816.

(15) Sanz, W., Jericha, H., Bauer, B. and Göttlich, E., 2007, "Qualitative and Quantitative Comparison of Two Promising Oxy-fuel Power Cucles for CO_2 Capture," ASME paper, GT2007-27375.

(16) Park, B. C., Sohn, J. L., Kim, T. S., Ahn, K. Y., Kang, S. H. and Lee, Y. D., 2010, "Parametric Analysis of the Performance of Water Recirculated Oxy-fuel Power Generation Systems," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 1. pp. 35~43.

(17) Tak, S. H., Park, S. K., Kim, T. S., Sohn, J. L. and Lee, Y. D., 2009, "Performance Analysis of an Oxy-fuel Combustion Power Generation system Based on Waste Heat Recovery: Influence of CO_2 Capture," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 33, No. 2. pp. 968~976.

(18) Pak, B. S., Lee, Y. D. and Ahn, K. Y., 2009, "Characteristics and Economics Evaluation of a H_2O Turbine Reheat Cycle Power Generation System based on Oxy-Combustion Method for Utilizing Exhaust Gas of Large Scale MCFC," *Proc. of the KSME 2009 Fall Annual Meeting*,

Nov. 4~6, 2009.

(19) Gou, C., Ruixian, C. and Hong, H., 2007 "A Novel Hybrid Oxy-fuel Power Cycle Utilizing Solar Thermal Energy," *Energy*, Vol.32, pp. 1707~1714.

(20) Yamamoto, T., Furuhata, T., Arai, N. and Moric, K., 2001, "Design and Testing of the Organic Rankine Cycle," *Energy*, Vol. 26, pp. 239~251.

(21) Zyhowski, G. J., 2003, "Opportunities for HFC-245FA Organic Rakine Cycle Appended to Distributed Power Generation Systems," ICR0508, International Congress of Refrigeration 2003.

(22) Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M. and Fischer, J., 2007, "Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles," *Energy*, Vol. 32, pp. 1210~1221.

(23) Bruno, J. C., Lopez-Villada, J., Letelier, E., Romera, S. and Coronas, A., 2008, "Modelling and Optimisation of Solar Organic Rankine Cycle Engines for Reverse Osmosis Desalination," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 2212~2226.

(24) Lee, J. H. and Kim T. S., 2006, "Analysis of Design and Part Load Performance of Micro Gas Turbine/Organic Rankine Cycle Combined Systems," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, pp. 1502~1513.

(25) Vielstich, W., Lamm, A. and Gasteiger, H. A., 2004, Handbook of Fuel Cells, vol. 4, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 907‑941.

(26) Aspen Technology, HYSYS, ver. 2006.5.

(27) Darde, A., Prabhakar, R., Tranier, J. P. and Perrin, N., 2009, "Air Separation and Flue Gas Compression and Purification Units for Oxy-coal Combustion Systems," *Energy Procedia*, Vol. 1, pp. 527~534.