<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.1.031 ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

터빈 간접가열식 상압형 MCFC/가스터빈 복합시스템의 성능예측과 경제성 평가§

최주환* · 김동섭*† · 곽부호**
* 인하대학교 기계공학부, ** 포스코에너지 기술전략실 연료전지연구소

Performance Prediction and Economic Assessment of Atmospheric Pressure MCFC/Gas Turbine Hybrid System with Indirect Turbine Firing

Joo Hwan Choi*, Tong Seop Kim*† and Bu Ho Kwak**
* Division of Mechanical Engineering, Inha Univ.,
** POSCO energy, Fuel Cell R&BDE Center.

(Received May 23, 2013 ; Revised November 6, 2013 ; Accepted November 13, 2013)

Key Words: Molten Carbonate Fuel Cell(용융 탄산염 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(복합 시스템), Heat Exchanger(열교환기), Performance(성능), Economic Assessment(경제성 평가)

초록 : 연료전지와 가스터빈의 하이브리드 시스템의 성능은 시스템 구성방법에 따라 영향을 많이 받는다. 본 연구에서는 용융탄산염연료전지(MCFC)와 가스터빈을 터빈간접가열방식으로 모사하여 성능을 예측하였다. 하이브리드 시스템의 설계파라미터의 변화에 따른 성능의 경향을 나타내었다. 그리고 MCFC 단독 운전시의 설계조건에 미치는 영향을 최소화하는 가장 합리적이고 실현가능한 하이브리드 시스템의 설계 조건을 구현하였다. 경제성 평가를 통해 MCFC단독 시스템 대비 하이브리드 시스템의 경제적 이점을 평가하였다.

Abstract: The performance of fuel cell/gas turbine hybrid systems is highly affected by system configuration. In this study, the performance of a hybrid system combining a molten carbonate fuel cell (MCFC) and an indirectly fired gas turbine was predicted. Firstly, general performance trends of the hybrid system depending on major design parameters were examined. Then, the most feasible design options with the least impact on the MCFC stack design conditions were drawn. The economic advantage of the hybrid system over the basic MCFC only system was evaluated.

- 기호설명 -

C_t : 연간 작동비용
CCS : 이산화탄소 저장 포집장치
CF_0 : 초기 투자비용
CIT : 공기극 입구온도
DIR : 직접 내부개질
ε : 열교환기 유용도
F : 패러데이 상수
GM : 총 이익
HRU : 열회수 장치
HTR : 고온 열교환기
IIR : 간접 내부개질
LHV : 저위 발열량
LTR : 저온 열교환기
MCFC : 용융 탄산염 연료전지
NPV : 순 현재가치
PR : 압력비
R : 연간 총수익
SCR : Steam Carbon Ratio
SOFC : 고체 산화물 연료전지
T : 온도
TIT : 터빈 입구온도
V : 셀 전압

§ 이 논문은 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 31., 영흥에너지파크) 발표논문임.
† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

$\dot{W}$: 출력
η : 효율

하첨자
AC : 교류
AUX : 주변기기
c : 압축기
conv : 직교류 변환
DC : 직류
el : 전기판매
FC : 연료전지
fuel : 연료
gen : 제너레이터
GT : 가스터빈
m : 기계 및 베어링
sys : 시스템
t : 시간
T : 터빈

1. 서 론

최근 전 지구적으로 화석에너지의 고갈로 인한 꾸준한 원유 가격의 상승과 환경 문제 등이 부각되면서 보다 깨끗하고 효율적인 발전 시스템의 개발이 진행되고 있다. 수소에너지, 태양열, 풍력, 조력과 같은 재생 가능한 에너지 원을 제외하고, 화석 연료 중에서 천연가스가 환경오염에 가장 영향이 작은 에너지 원으로 여겨지고 있다[1]. 따라서 전세계적으로 천연가스의 수요와 공급이 점점 증가하고 있는 추세인데 그에 따라 온실가스(CO_2)배출을 줄이는 것이 중요하게 여겨지고 있다. 우리나라에서도 신재생 에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard)의 도입으로 2012년 1월부터 500MW 이상 발전 사업자들은 매년 일정 발전량을 신재생 에너지로 공급해야 한다.[2] 그리고 전 세계적인 기후변화 협약 및 교토의정서에 따른 온실가스 감축 의무가 발효됨에 따라서 효율은 높고 이산화탄소 배출량은 적은 발전 시스템에 대한 요구가 생기고 있다.

이러한 여러가지 문제에 대응하기 위하여 연료전지가 부각되고 있다. 더불어 연료전지와의 복합적인 시스템을 구성하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 시스템 연구가 활발히 진행되고 있는데 그 중에서 고온형 연료전지인 MCFC, SOFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 연구개발 중에 있으며 실제로 미국의 FCE사에서 250kW급의 MCFC 가스터빈 하이브리드 시스템이 테스트 과정을 마쳤고 중대형 시스템으로의 확장을 연구하고 있다.[3~7]

선행 연구에서는 시스템 구성 방법에 따른 설계 성능 분석하였으며,[8] 가스터빈의 압력비와 연료 유량을 변화시킬 때의 시스템의 성능의 변화를 분석하였다.[9] 최근에는 MCFC와 가스터빈, 스팀터빈 복합시스템도 연구되고 있고,[10] 배기 가스중 이산화탄소 양을 줄이기 위해 CCS를 결합한 시스템도 연구 중에 있다.[11,12] 또한 시스템으로 들어가는 연료량을 제어하여 전체 출력을 제어하는 시스템[13] 등 여러 가지 설계 변수에 따른 성능 변화를 예측하는 연구가 이루어지고 있다. 이 외에도 기존의 상용화된 MCFC에 가스터빈을 결합하여 탈설계 상태에서의 성능을 분석하고[14], 하이브리드 시스템의 출력 크기에 따른 성능을 비교한 연구 결과[15]가 발표되고 있다.

본 연구에서는 하이브리드 시스템이 최적의 성능을 나타내는 압력비를 도출하고, 하이브리드 시스템의 설계 변수에 따른 성능을 분석하여 MCFC단독 시스템과 비교 후 성능개선 효과를 예측하였다. 연료전지는 입출구 온도 변화에 민감하게 반응하므로 시스템의 하이브리드 화로 인해 발생할 수 있는 MCFC의 온도 변화가 MCFC에 미치는 영향을 최소화하도록 열교환기의 성능을 변화시켜 시스템이 안정적으로 작동할 수 있는 시스템 설계 변수를 도출하고자 하였다. 성능 개선 효과와 더불어 경제성 평가를 통해 MCFC 단독 시스템에 비하여 하이브리드 시스템의 경제성이 어느 정도 향상되는지 분석하였다.

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

MCFC 단독 시스템과 MCFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템을 각각 Fig. 1,2에 나타내었다. MCFC 연료전지 하이브리드 시스템은 상용화된 MCFC와 가스터빈을 개조하여 결합한 것이다. MCFC 단독 시스템의 레이아웃은 선행 연구를 벤치마킹하여 사용하였다.[7] MCFC 가스터빈 하이브리드 시스템은 터빈 입구의 공기를 가열하는 방법에 따라 터빈간접가열 방법과 터빈직접가열 방법으로 나뉘는데,[9] 본 연구에서는 터빈

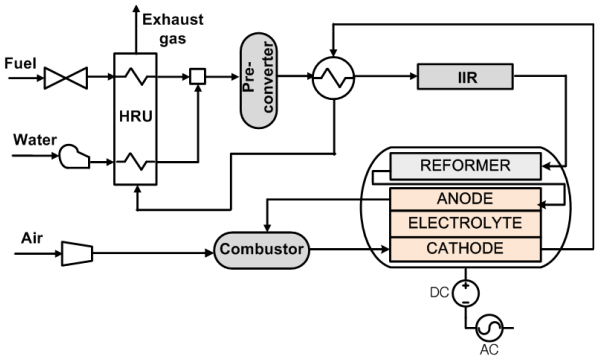

Fig. 1 Configuration of the MCFC system

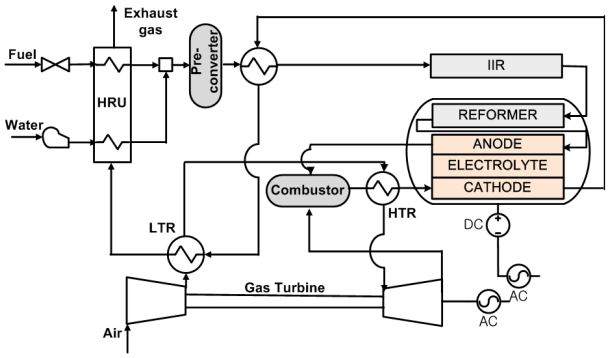

Fig. 2 Configuration of the MCFC/gas turbine hybrid system

간접가열 방법을 통한 연구를 수행하였다. 이는 현재 상용화하기 위해 개발 중에 있는 시스템과 유사한 형태이다.[16] 본 연구에 사용된 레이아웃은 터빈 간접 가열 방법 중 선행 연구에서 최적의 성능을 구현하는 형태를 선정하여 모델링하였다.[9]

시스템의 구성은 크게 연료와 물을 분사해주는 주입구, 연료전지 모듈, 열회수기, 가스터빈으로 구성된다. MCFC는 연료(천연가스)에 포함되어 있는 메탄(CH_4) 외의 탄화수소(C_nH_{2n+2})들을 분해해주는 전개질기(Pre-convertor)와 연료를 수소로 변환시키는 개질기(Reformer)와 수소, 산소, 이산화탄소의 반응을 통해 전기를 생성하는 셀, 그리고 후연소기로 구성된다. 공기는 가스터빈을 통과하여 후연소기로 공급된다. 연료는 HRU에서 가열되고, 개질반응에 필요한 수증기는 외부에서 물을 공급하는 것으로 가정하였다. 외부로부터 공급된 물은 HRU에서 수증기로 상변화 되어 연료와 함께 전개질기를 지나 개질기로 공급된다. 개질반응은 간접내부개질(IIR)과 직접내부개질(DIR) 방식을 사용하였으며 개질반응에서 필요한 열은 MCFC에서 발생한 열을 직접 전달하는 방식을 사용하였다. 수소가 포함된 개질 가스는 연료전지의 연료극으로 공급되어 공기극에서 공급된 산소와 반응하여 연료전지의 출력을 얻을 수 있다.

Table 1 Design parameters

Parameter	Data
Fuel Cell	
Fuel Cell temperature	600°C
Steam to carbon ratio	2
Cell voltage	0.82V
Current density	94.8mA/cm^2
DC to AC conversion efficiency	94%
Fuel utilization	0.69
Pressure drop in heat exchanger	1.5%
Pressure drop in combustor	2%
Gas Turbine	
Compressor Efficiency(%)	83
Turbine Efficiency(%)	88
Generator Efficiency(%)	96

가스터빈은 크게 압축기, 연소기, 터빈으로 구성되는데, 외부로부터 공급된 공기는 압축기를 지나 압축되어 연소기 출구에서 나오는 고온의 가스와 열을 교환하여 터빈을 구동시킬 수 있을 만큼 충분한 온도로 가열된다. 여기서 가열된 고온 고압의 공기로 터빈을 구동시켜 출력을 얻는다. 터빈의 출구가스와 연료전지의 연료극의 출구가스는 연소기로 공급된다. 연소기에서 연소된 고온의 가스는 가스터빈의 압축기 출구의 공기와 열교환 후 연료전지의 공기극으로 공급된다. 공기극 출구로 나오는 가스는 열 회수기를 지나 외부로 배출된다.

2.2 시스템 모델링

시스템으로 공급되는 공기는 ISO 조건인 15°C, 101.325kPa, 상대습도 60% 이며, 연료는 CH_4 91.3%의 천연가스로서 발열량은 49,300kJ/kg이다. MCFC의 모델링은 선행연구[3,4]를 참고하였고, MCFC 및 가스터빈의 설계파라미터는 Table 1에 나타내었다. MCFC의 설계변수는 상용화된 MCFC의 설계변수[17]를 이용하였고 가스터빈의 설계변수는 소형 가스터빈의 값들[18]을 사용하였다. MCFC는 중소형 분산발전형으로 연구 및 보

급 중에 있는 3MW급으로 모델링하였으며, 연료전지의 운전온도는 600°C로 가정하였다.

셀 전압은 연료전지에서 중요한 설계변수중 하나로써 연료전지의 작동온도, 압력 등 여러 가지 작동조건에 의해서 변하게 된다. 동작전압을 바탕으로 하여 연료전지의 출력을 아래의 식을 통해 계산하였고, 이때 직-교류 변환 효율을 고려하였으며 펌프에 의한 소모동력 또한 포함하였다.

$$\dot{W}_{\mathrm{FC,DC}} = 2(\dot{n}_{\mathrm{H_2}} + \dot{n}_{\mathrm{CO}})_{\mathrm{reacted}} \cdot F \cdot V$$
$$\dot{W}_{\mathrm{FC,AC}} = \dot{W}_{FC,DC} \cdot \eta_{conv} - \dot{W}_{AUX} \quad (1)$$

위와 같은 식을 통해 MCFC의 출력을 계산하고, 가스터빈의 출력은 터빈에서 생산되는 출력에서 압축기 소모동력을 뺀 출력이며 다음과 같이 정의한다. 아래 식에서는 압축기에서의 기계적 효율과 터빈의 발전 효율도 각각 고려하였고 하이브리드 시스템의 총 일은 MCFC에서 발생한 출력과 가스터빈 시스템에서 발생한 출력의 합으로 나타낸다.

$$\dot{W}_{\mathrm{GT}} = (\dot{W}_{\mathrm{T}} - \dot{W}_{\mathrm{C}} / \eta_{\mathrm{m}}) \times \eta_{\mathrm{gen}}$$
$$\dot{W}_{\mathrm{net}} = \dot{W}_{\mathrm{FC,AC}} + \dot{W}_{\mathrm{GT}} \quad (2)$$

그리고 하이브리드 시스템의 전체 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{\mathrm{sys}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{\mathrm{Fuel}}} \quad (3)$$

이 시스템에서는 가스터빈의 압력비와 열교환기의 유용도(effectiveness)를 변수로 하여 성능 변화를 관찰하였다. 압력비는 가스터빈의 압축기 입출구의 압력비를 나타내며, 유용도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{T_{\mathrm{Cold.out}} - T_{\mathrm{Cold.in}}}{T_{\mathrm{Hot.in}} - T_{\mathrm{Cold.in}}} \quad (4)$$

3. 해석결과

3.1 성능분석

먼저 가스터빈의 압력비를 변수로 해석하였으며 Fig. 3~6에 그 결과를 나타내었다. 압력비에 따른 시스템의 성능을 고찰하기 위해 저온열교환기(LTR)의 유용도를 임의로 고정시킨 상태에서, 압력비와 고온열교환기(HTR)의 유용도 변화가 연료전지의 공기극 입구온도(CIT), 가스터빈에서 중요한 설계인자인 터빈입구온도(TIT), 하이브리드 시스템의 순 출력 및 효율 등 4가지 인자에 미치는 영향을 고찰하였다.

압력비의 상승에 따라서 CIT와 TIT가 전체적으로 낮아진다. 반면 HTR의 유용도와 압력비에 따른 TIT와 CIT의 변화는 서로 반대의 경향을 보인다. TIT는 저압 조건에서는 HTR의 유용도에 따라 차이가 크고, 고압으로 갈수록 차이가 줄어든다. CIT는 저압조건에서는 큰 차이가 없고 고압조건에서 민감한 변화를 보인다. 이처럼 가스터빈의 압력비에 따른 CIT와 TIT의 민감도 경향은 서로 다르게 나타난다.

압력비에 따른 출력과 효율은 각각 Fig. 5~6과 같이 나타난다. HTR의 유용도가 커질수록 TIT가 높아지고 이는 가스터빈의 출력을 증가시키므로 전체 시스템의 출력과 효율은 좋아진다. TIT는 낮은 압력비에서 더 높지만 하이브리드 시스템의 효율은 압력비 4~5에서 최적이다. 이러한 성능변화는 선행연구에서 마이크로가스터빈의 성능곡선과 유사한 분포[18]를 보인다. 하이브리드 시스템을 설계할 때 MCFC의 출력은 일정하므로 가스터빈의 출력이 최대가 되는 설계점이 최적 설계점이라 할 수 있다. 따라서 가스터빈의 성능이 최대가 되도록 HTR, LTR의 유용도를 조합하여 하이브리드 시스템이 최적의 성능을 발현할 수 있도록 하였다.

3.2 설계점 선정

Fig. 3~6에서 가스터빈의 압력비와 HTR의 유용도를 변수로 하여 MCFC와 가스터빈의 하이브리드 시스템의 성능을 해석하였다. 앞서 살핀 바와 같이 가스터빈의 압력비와 열교환기의 성능에 따라서 CIT가 변한다. 즉, 원래 MCFC 단독 시스템에서의 CIT에서 벗어나게 된다. 그러나, 이러한 CIT의 변화는 MCFC의 안정적 작동 측면에서 바람직하지 않을 수 있다. 그러므로 본 절에서는 CIT가 애초 MCFC 단독 시스템에서의 값과 동일하게 유지되도록 하이브리드 시스템의 설계점을 정하는 경우를 고려하여 그 때의 성능을 고찰하

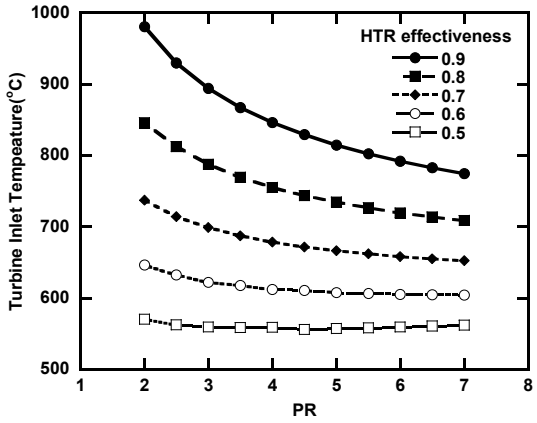

Fig. 3 Variation in turbine inlet temperature with pressure ratio and HTR effectiveness (LTR effectiveness = 0.3)

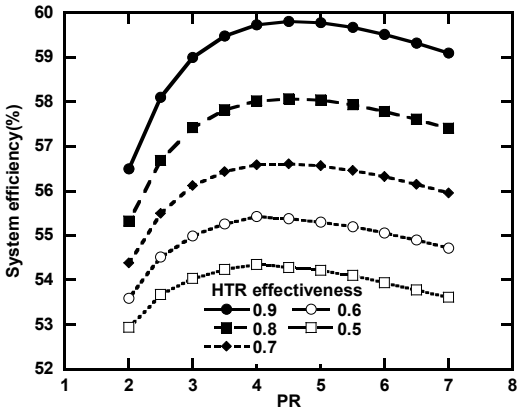

Fig. 5 Variation in hybrid system efficiency with pressure ratio and HTR effectiveness fixed LTR effectiveness (LTR effectiveness = 0.3)

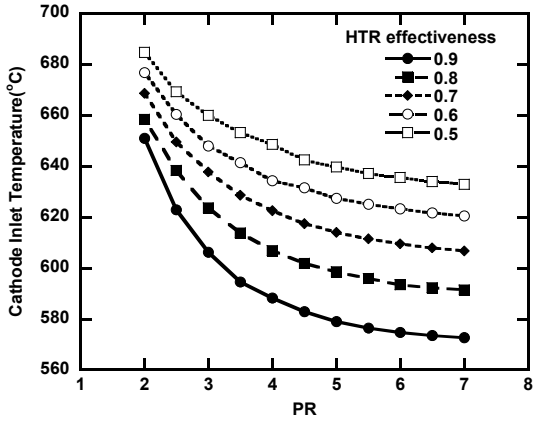

Fig. 4 Variation in cathode inlet temperature with pressure ratio and HTR effectiveness fixed LTR effectiveness (LTR effectiveness = 0.3)

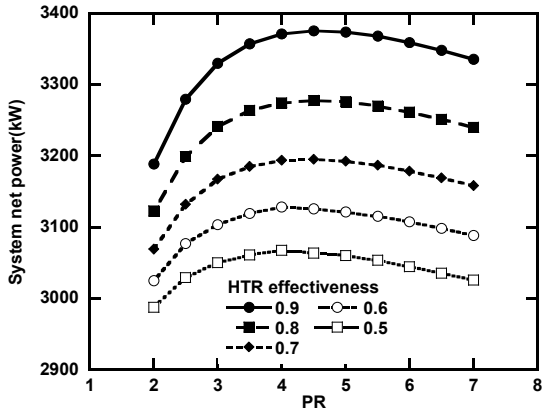

Fig. 6 Variation in hybrid system power with pressure ratio and HTR effectiveness fixed LTR effectiveness (LTR effectiveness = 0.3)

였다. 압력비를 Fig. 5에서 대체로 가장 높은 효율을 보이는 4.5로 고정한 상태에서 HTR, LTR의 유용도를 변화시키면서 성능과 CIT 변화를 관찰하였으며, CIT 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 HTR의 유용도가 커질수록 CIT는 낮아지고, LTR의 유용도가 커질수록 CIT는 높아짐을 확인할 수 있다. 이러한 경향에서 시스템이 안정적으로 운전하는 작동점을 HTR, LTR의 조합으로 찾을 수 있다.

본 연구에서 검토된 LTR의 유용도는 0.33~0.5인데 선행연구[8,9]에서 사용한 값(0.78~0.86)과는 차이가 있다. 연료전지의 안정적인 작동을 위해서 연료전지의 입출구를 연료전지의 작동온도인 600°C를 유지해야 하는 제한 조건이 있다. 선행연구의 LTR유용도를 사용하게 되면 Fig. 7에서와 같이 CIT가 항상 600°C보다 크므로 안정적인 시스템 작동이 어렵다(선행연구에서는 셀 작동온도가 650°C로서 본 연구에서 보다 높았기 때문에 더 높은 LTR 유용도 사용이 가능하였음). LTR과 HTR의 유용도가 커지면 시스템 외부로 버려지는 열을 더 많이 회수하므로 열역학적으로는 바람직하지만, MCFC의 온도를 상승시키는 결과를 가져온다.

유용도에 따라 CIT는 큰 변화폭을 갖는데 이 중에서 CIT가 600°C를 만족하는 점들을 하이브리드 시스템의 설계점으로 생각할 수 있다. Table 2에서 몇 개의 설계점을 제시하였다. 세 가지 조합을 예로 들었으며 이들은 Fig. 7에 박스로 표시한 점들이다. CIT를 만족하면서 HTR와 LTR의 유용도가 높은 조합에서 높은 출력과 효율을 얻을 수 있다. 가장 성능이 높은 Case 3의 경우 MCFC 단독 시스템과 비교하였을 때 하이브리드

시스템은 출력은 최대 600kW 이상 상승하고 효율은 11%p 이상 상승함을 확인하였다.

4. 경제성 평가

4.1 경제성 평가 방법

Table 2에서 가장 높은 출력과 효율을 가진 Case 3을 토대로 하이브리드 시스템의 경제성을 발전사업자의 관점에서 평가하여 기존 MCFC 단독 시스템의 성능 대비 경제성이 얼마나 효과적인지 평가하였다.

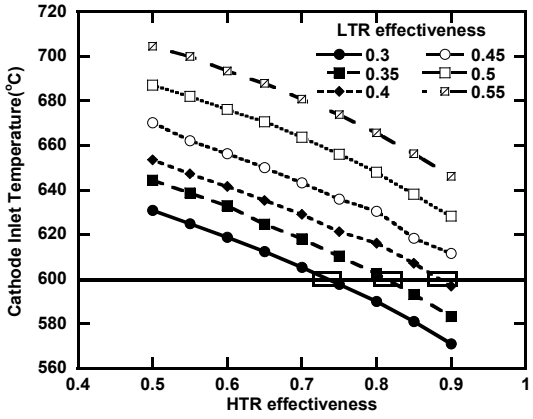

Fig. 7 Variation in cathode inlet temperature with heat exchanger effectiveness

다양한 경제성 평가 방법 중 본 연구에서는 순현재가치법(NPV)을 이용하여 평가하였다.[19] NPV 기법은 시간적 가치를 고려하여 유효한 기간동안 유입 유출되는 현금을 현재 가치로 환산한 현재 순이익에 해당하는 개념으로 긴 시간동안 운영하는 발전 사업자의 경제성 평가 방법으로 타당하다. 본 연구에서 사용한 NPV기법의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.[20]

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=0}^{n} \frac{GM_t}{(1+I)^n}$$
$$GM_t = R_{el} - C_t \quad (5)$$

NPV는 초기투자비용(CF_0)에서 화폐의 시간 가치를 반영한 할인율을 고려하여 총이익(gross margin)의 총 합으로 나타내었다. GM_t는 t년도의 총이익으로 전기 판매 수익에서 연료비 및 O&M 비용을 포함한 연간 비용을 제외한 것이다. NPV가 클수록 투자가 바람직하며 NPV=0이 되는 n을 회수기간(Payback period)이라 한다. 회수기간이란 투입된 투자금을 현금 유입을 통해 회수하는데 걸리는 기간을 말하며 회수기간이 짧을수록 투자가 바람직하다고 평가할 수 있다.[21] 경제성을 평가하기 위해 항목별로 세분화하여 Table. 3에 나타내었다.

연간 전기판매수익(R_{el}) 계산 시 전기 단가는

Table 3 Calculation factors of the economic assessment

Factor	MCFC	Hybrid
Fuel cell Power output(A)(kW)	2,800	2,878
Gas turbine Power output(B)(kW)	-	533
Electric cost(C)(won/kWh)	(22,23)	(22,23)
Annual maximum operating time(D)(h)	8,640	8,640
Availability(E)	0.9	0.9
Fuel mass flow(F)(kg/s)	0.1143	0.1143
LHV(G)(kJ/kg)	49,300	49,300
Fuel cost(H)(won/MJ)	(24)	(24)
Fuel cell Installation cost(I)($/kW)	3,500	3,500
Gas turbine installation cost(J)($/kW)	-	1,100
Revenue for annual electric sales (R_{el})	(A+B)×C×D×E	
Annual operation cost(C_1)	F×D×G×H	
O&M cost(C_2)	(A×I)×0.3÷5	
total annual cost(C_t)	C_1+C_2	
Initial investment cost(CF_0)	A×I+B×J×1.5	

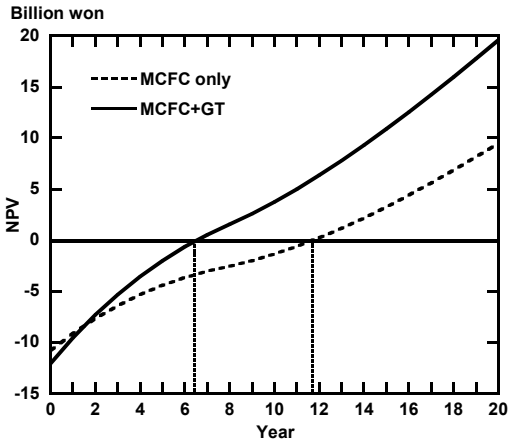

Fig. 8 Result of economic assessment

RPS에 따른 전기보조금에 의한 단가[22]와 계통한계가격 상승에 따른 전기 단가[23] 중 높은 가격을 참조하였다. 연간 작동 비용(C_t)은 연료비(C_1)와 O&M 비용(C_2)의 두 항목으로 나뉜다. 연료의 LHV와 가스단가는 한국가스공사의 가격표[24]를 참조하였고, MCFC 설치비용은 문헌을 참고하였다.[25] MCFC의 O&M 비용은 설치비용의 30%로 가정하였고,[25] 5년 단위로 O&M 이 이루어진다고 가정하였다.

하이브리드 시스템의 초기 투자 비용(CF_0)은 MCFC 설치비와 가스터빈의 가격의 합이며 기반 부대시설 비용은 포함하지 않았다. 가스터빈의 가격은 출력이 비슷한 소형 마이크로 가스터빈의 단가($/kW)[26]를 참조하여 계산하였다. LTR, HTR은 가스터빈의 부속품으로 생각하였으며 유사하게 열교환기를 사용하는 마이크로 가스터빈에서 열교환기의 가격 비중이 30% 내외임과 추가적인 비용을 감안하여 가스터빈과 HTR, LTR을 합한 시스템의 단가를 기존 가스터빈 단가의 1.5배로 두었다. Table 3에 경제성 평가에 사용한 인자들을 요약하여 나타내었다.

4.2 경제성 평가 결과

MCFC 단독 시스템과 하이브리드 시스템의 경제성 평가 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 하이브리드 시스템은 가스터빈 단가와 개조비용을 포함한 가격이므로 MCFC 단독 시스템보다 많은 초기투자비용이 수반된다. 하지만 NPV=0이 되는 회수기간은 하이브리드 시스템이 약 6.3년으로 MCFC 단독시스템과 비교하였을 때 약 47%단축되어 경제성에 크게 기여하는 것으로 분석되었다. 그 이유는 하이브리드 시스템의 투자비용 대비 출력이 더 많이 생산되고, 출력은 매년 더 많은 수익으로 누적되어 하이브리드 시스템의 경제성에 크게 기여하는 것으로 분석되었다.

Table 2 Several design options to satisfy the original cathode inlet temperature

	MCFC Only	Hybrid system		
		Case 1	Case 2	Case 3
CIT(°C)	600	599.7	600.2	600.2
PR	4.5	4.5	4.5	4.5
LTR effectiveness	-	0.3	0.35	0.4
HTR effectiveness	-	0.74	0.82	0.89
TIT(°C)	-	715	786.9	861
MCFC Power(kW)	2800	2878.0	2878.0	2878.1
GT Power(kW)	-	370.5	450.5	533.1
System Power(kW)	2800	3248.5	3328.5	3411.2
System efficiency(%)	48.7	57.6	59.0	60.4
GT/FC Power Ratio	-	0.127	0.155	0.185

5. 결 론

본 연구에서는 MCFC와 가스터빈을 결합한 간접가열방식의 하이브리드 시스템의 설계 변수(압력비, 열교환기의 성능)에 따른 시스템 전체의 성능 변화를 살피고 시스템의 하이브리드화로 인해 MCFC에 미칠 수 있는 영향을 최소화하도록 설계하는 방법에 대해서 고찰하였으며 경제성을 분석하였다.

시스템의 압력비가 증가하면 CIT와 TIT는 감소하는 추세이지만 두 개의 열교환기의 유용도에 관계없이 출력과 효율은 압력비가 4~5일때 최적 성능을 나타낸다. 각각의 압력에서 HTR의 유용도가 커질수록 시스템 전체의 출력과 효율은 증가한다.

HTR, LTR의 유용도를 적절하게 조합하여 공기극 입구온도를 MCFC 단독 운전시와 같아지게 되는 HTR, LTR의 조합을 제시하였다. 성능 향상 정도가 가장 큰 설계점에서 MCFC 단독 시스템과 비교하였을 때 시스템 출력은 22%, 효율은 11.7%p 개선되었다.

하이브리드 시스템이 MCFC 단독 시스템에 비하여 초기 투자비용이 증가하는 효과보다는 출력 및 효율 향상에 의한 효과가 상대적으로 커서

투자 회수기간과 장기적 수익이 대폭 증가하는 것으로 예측되었다.

참고문헌

(1) Chacartegui, R., Blanco, M. J., Munoz de Escalona, J. M., Sanchez, D. and Sanchez, T., 2012, “Performance assessment of Molten Carbonate Fuel Cell-Humid Air Turbine hybrid systems Original Research Article,” *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 8 October 2012

(2) Influence of Introducing Renewable Portfolio Standard (RPS) on the National Electricity Supply Master Plan, 2011, Korea Power Exchange (in Korean).

(3) Ji, S. W., Park, S. K. and Kim, T. S., 2010, “Enhancement of MCFC System Performance by Adding Bottoming Cycles,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, pp. 907~916

(4) 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,” *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 490~499.

(5) 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," *Journal of Power Sources*, Vol. 132, pp. 77~85.

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

(7) Ghezel-Ayagh. H., 2008, “Direct Fuel Cell/ Turbine Power Plant: Final Technical Report for Period May 1, 2000 through September 30.”

(8) Oh, K. S. and Kim, T. S., 2004, "Effect of System Configuration on Design Performance of Atmospheric Pressure Mcfc/Gas Turbine Hybrid Systems," *Journal of the Society Air-Conditioning Refregerating Engineess of Korea*, Vol. 16, No. 11, pp. 1021~1027.

(9) 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.

(10) Massardo, A. F. and Bosio, B., 2002, "Assessment of Molten Carbonate Fuel Cell Models and Integration with Gas and Steam Cycles," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, pp. 103~109.

(11)Spallina, V., Romano, M. C., Campanari, S. and Lozza, G., 2011, "Application of MCFC in Coal Gasification Plants for High Efficiency CO2 capture," ASME GT2011-46274.

(12) Manzolini, G., Campanari, S., Chiesa, P., Giammotti, A., Bedont, P. and Parodi, F., 2012, "CO2 Separation from Combined Cycles Using Molten Carbonate Fuel Cells," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 9, pp. 011018-1-8.

(13)Zhang, H., Weng, S., Su, M. and Zhang, W., 2010, "Control Performance Study on the Molten Carbonate Fuel Cell Hybrid Systems," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, pp.061006-1-8.

(14) Bedont, P., Grillo, O. and Massardo, A. F., 2003, "Off-Design Performance Analysis of a Hybrid System Based on an Existing Molten Fuel Cell Stack," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, pp. 986-993.

(15) Campanari, S., Iora, P., Silva, P. and Macchi, E., 2007, "Thermodynamic Analysis of Integrated Molten Carbon Fuel Cell-Gas Turbine Cycles for Sub-MW and Multi-MW Scale Power Generation," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, pp. 308~316.

(16) 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.

(17) Ghezel-Ayagh, H., Daly, J. M. and Wang. Z. H, 2003, "Advances in Direct Fuel Cell/ Gas Turbine Power Plant," ASME paper GT 2003-38941.

(18) Shin, H. D., Kang, D. W., Kim, T. S., Choi,

M. K. and Park, P. J., 2012, "Design Parameter Sensitivity Analysis of a 200kW Class Micro Gas Turbine System," *Journal of Fluid Machinary*, Vol. 15, No. 6, pp. 39~45.

(19) Ko, K. H. et al., 2004, Engineering Economy, Mun Un Dang (in Korean).

(20) Campanari, S., Chiesa, P. and Silva, P., 2007, "Performance Assessment of Cogeneration Systems Industrial District Applications," ASME paper, GT2007-27659.

(21) Thuesen, G. J. and Fabrycky, W. J., 2003, Engineering Economy, Prentice hall, 9th ed., pp. 179~183.

(22) Price Guidelines of Electric Power by Renewable Energy, Notification No. 2010-176, Ministry of Knowledge Economy (in Korean)

(23) www.kpx.or.kr

(24) www.kogas.or.kr

(25) Remick, R. and Wheeler, D., 2010, "Molten Carbonate and Phosphoric Acid Stationary Fuel Cells: Overview and Gap Analysis," Technical Report, NREL/TP-560-49072.

(26) Gas Turbine World 2012, GTW Handbook Vol.29.