

합성가스를 연료로 사용하는 고체산화물연료전지-가스터빈 하이브리드 시스템의 탈설계점 성능 특성[§]

최정일* · 손정락*† · 송성진* · 김동섭**

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 인하대학교 기계공학과

Off-design Performance Characteristics of SOFC-GT Hybrid System Operating with Syngas Fuel

Jungil Choi*, Jeong Lak Sohn*†, Seung Jin Song* and Tong Seop Kim**

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

** School of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received September 1, 2009 ; Revised December 18, 2009; Accepted December 30, 2009)

Key Words : Syngas(합성가스), SOFC(고체산화물연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid(하이브리드), Off-Design Performance(탈설계점성능)

초록: 가스화기를 장착한 고체산화물연료전지와 가스터빈의 하이브리드 시스템의 사전 연구로서 합성가스에서 수소와 일산화탄소의 구성이 하이브리드 시스템의 성능특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 다른 구성요소와 다른 발열량을 가진 연료의 특성이 가스터빈의 탈설계점 운전을 유발하여 결과적으로 전체 하이브리드 시스템의 다른 성능 특성을 야기할 것으로 예상된다. 합성가스의 구성요소가 고체산화물연료전지의 성능에 영향을 준다는 것과 일산화탄소를 사용하는 하이브리드 시스템의 성능이 수소를 사용하는 것보다 나쁘다는 것이 발견되었다. 부분부하 성능에서는 수소를 사용하는 경우 부분부하 운전시에 성능 저하가 일산화탄소의 경우보다 더 현저하였다.

Abstract: As a preliminary study on a SOFC-GT hybrid system integrated a with coal-gasification system, the influence of the concentrations of H₂ and CO in syngas on the performance characteristics of the hybrid system is investigated. It is expected that the differences in the heating values of fuels with different compositions trigger the off-design operation of the gas turbine and result in different performance characteristics of the overall hybrid system. Syngas compositions are found to affect the SOFC performance. Performance of hybrid system with carbon monoxide is poorer than the case with hydrogen. In the case of part-load performance with syngas, performance degradation at part-load operating conditions with hydrogen is more dominant than the case with carbon monoxide.

- 기호설명 -

- A_c : 반응면적(m²)
- F : 페르데이 상수
- J : 전류밀도 (A/m²)
- \dot{n} : 연료 공급 몰유량(mol/s)
- U_f : 연료 이용률
- V_{oc} : 개회로 전압 (V)
- ΔV_{act} : 활성화 손실 (V)
- ΔV_{ohm} : 저항 손실 (V)
- \dot{z} : 연료 소모 몰유량 (mol/s)

1. 서 론

석탄은 매장량이 풍부하고 전세계적으로 골고루 분포되어 있어서 주요 에너지원으로 사용되고 있다. 하지만 석탄을 연료로 사용할 때 발생하는 유해 가스와 온실가스로 인해 사용의 규제를 받고 있다. 이런 문제 가운데, 가스화기를 이용한 가스화 복합발전 시스템은 석탄에서 발생하는 유해 물질을 슬래그 형태로 처리하고 온실가스인 이산화탄소를 탄소회수저장 기술을 이용함으로써 환경 오염을 줄이면서 고효율의 가스터빈을 구동하여 전력을 생산할 수 있는 시스템으로 주목을 받고 있다. 하지만 기존 천연가스를 사용하는 복합화력발전 시스템에 가스화기를 결합함으로써 인해 효율이 40% 내외로 떨어지게

§ 이 논문은 2009년도 에너지 및 동력공학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임)

† Corresponding Author, jlsohn@snu.ac.kr

된다.⁽⁴⁾ 이 문제를 해결하기 위해서 현재 개발된 발전 시스템 중에서 가장 높은 효율을 낼 수 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)와 가스터빈(GT)을 결합한 하이브리드 시스템에 가스화기를 이용하는 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽²⁾ 이를 통해 석탄을 연료로 이용하면서도 환경 친화적인 고효율의 발전시스템을 개발할 수 있다. 그런데 SOFC/GT 하이브리드 시스템은 가스화기에서 생성되는 합성가스를 연료로 사용하는 시스템으로 설계된 것이 아니다. 그래서 합성가스를 하이브리드 시스템에 연료로 공급할 경우 연료의 화학적 성분이 바뀌고 연료의 발열량이 바뀌기 때문에 탈설계점에서 시스템이 작동할 것이 예상된다.

본 연구는 기존 SOFC/GT 에 가스화기에서 생성된 합성가스가 연료로 공급될 경우 발생하는 탈설계점에 성능 특성을 연구하였다. 먼저 합성가스의 농도가 하이브리드 시스템에 미치는 영향을 조사하였고 부분 부하가 될 때 성능 특성도 연구하였다. 본 연구는 지멘스웨스팅하우스사에서 개발한 CH₄ 을 연료로 하는 220 kW 급 시스템의 설계 값을 이용하여 Aspenplus™ 프로세스 시뮬레이션 프로그램을 통해 SOFC/GT 하이브리드 시스템을 모델링 하였다.⁽⁶⁾ 시스템의 주요 변수들은 Table 1 에 기술하였다. CH₄ 대신, 합성가스를 연료로 사용할 경우 시스템 전체적으로 작동 환경이 바뀌게 되는데 이 중에서 터빈입구온도(TIT)는 재료의 한계와 효율의 문제 때문에 고정을 시켜야 한다. 그래서 TIT 를 840 °C 라고 제한 조건을 두고 모든 해석을 실시하였다.

Table 1 Parameters of the SOFC/GT hybrid system

| Parameter | Value |
|---|-----------|
| Hybrid system | |
| Ambient conditions (° C, atm) | 15.0, 1.0 |
| System power (kW) | 220 |
| System efficiency (%) | 59.3 |
| SOFC | |
| SOFC power (kW) | 175.0 |
| Cell temperature (° C) | 889.0 |
| Steam-carbon ratio | 2.5 |
| Fuel utilization factor | 0.85 |
| Average current density (A/m ²) | 3200.0 |
| Fuel inlet temperature (° C) | 15.0 |
| D.C. to A.C. conversion efficiency (%) | 95.0 |
| GT | |
| GT power (kW) | 47.0 |
| Pressure ratio | 2.9 |
| Turbine inlet temperature (° C) | 840.0 |
| Compressor isentropic efficiency (%) | 78.0 |
| Turbine isentropic efficiency (%) | 82.0 |
| Recuperator effectiveness (%) | 89.0 |
| Mechanical efficiency (%) | 96.0 |
| Generator efficiency (%) | 95.0 |

2. SOFC/GT 시스템 모델

2.1 하이브리드 시스템

SOFC/GT 하이브리드 시스템은 연료전지를 주요 발전 요소로 사용하고 효율을 높이기 위해 가스터빈을 하부 사이클로 사용한다. Fig. 1 은 이 시스템의 개략도이다. 압축기를 통과한 공기는 가스터빈 출구 가스 및 연료전지 연소기 가스와 열교환을 통해 예열된 뒤에 연료전지 공기극으로 들어간다. 그리고 연료도 압축되어 외부개질기에 공급된다. 개질에 필요한 열과 수증기는 연료극 후단에서 나오는 가스를 재순환시킴으로서 공급한다. 연료전지 스택 안에서 내부개질이 일어남과 동시에 H₂ 와 CO 의 전기화학 반응이 일어나고 이 과정을 통해서 전기가 생산된다. 연료전지 스택에서 반응을 마친 가스는 연료전지 내에 있는 연소기에 공급하여 남아있는 연료를 모두 연소시킨다. 이는 하부 사이클에 있는 가스터빈 입구에 들어가는 가스의 온도를 높여서 효율을 높이기 위함이다. 이처럼 연료전지 배기 가스는 터빈을 작동시킴으로써 추가적인 전기를 생산하고 대기로 배출된다.

2.1.1 SOFC 모델

SOFC 는 산소 이온을 전달할 수 있는 세라믹으로 된 고체 산화물을 절연체로 사용한다. 800 °C~1100 °C 에서 작동하기 때문에 고온의 배기가스를 하부 사이클에 이용할 수 있다.⁽⁴⁾ SOFC 에서는 H₂ 와 CO 를 연료로 이용하여 전기화학 반응을 통해서 전기를 생산한다. 이를 위해서 탄화수소계열의 연료는 개질이 필요하다. 이번 연구에서 비교 기준으로 사용한 시스템은 CH₄ 을 연료로 사용한다. CH₄ 의 개질에는 수증기 개질을 나타내는 식 (1)과 수성 가스 변환 과정을 나타내는 식 (2)가 있다.

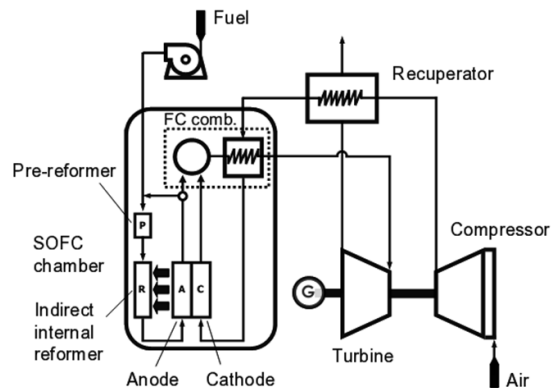
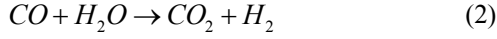
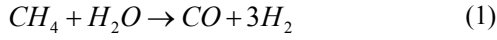
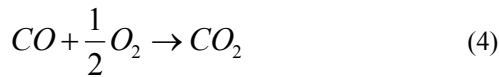
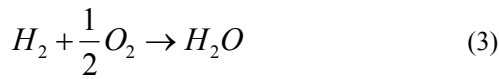


Fig. 1 Schematic of SOFC/GT hybrid system



수증기 개질 반응은 1 mol 의 CH_4 과 수증기가 반응하여 3 mol 의 H_2 와 1 mol 의 CO 를 생성하는 강한 흡열과정이다. 수성 가스 변환 반응은 1 mol 의 CO 와 수증기가 반응하여 1 mol 의 H_2 와 CO 를 생성하는 약한 발열반응이다. 그래서 CH_4 의 전체적인 개질 반응은 외부에서 열과 수증기 공급이 필요한 흡열 반응이다. 이를 위해 외부개질기에 필요한 열과 수증기는 연료극 배기 가스를 재순환하여 공급하고 내부개질에서는 스택내의 전기화학 반응을 통해 발생하는 열과 수증기를 이용한다.

연료전지 스택의 연료극에서는 H_2 와 CO 가 공기극에서 절연체를 통과하여 온 O^{2-} 와 전기화학 반응을 일으켜 전기를 생산한다. [식 (3) & (4)]



연료전지에서 생산하는 전력은 식 (5)를 통해서 계산한다.

$$\dot{W}_{\text{SOFC}} = V_C \times j \times A_c \quad (5)$$

여기서 필요한 셀 전압은 개회로 전압 (V_{oc}) 에 전압손실을 뺀 값이다. SOFC 연료전지에서는 H_2 와 CO 가 동시에 반응하는데 이들의 V_{oc} 는 스택 내에서 발생하는 수성가스화 반응이 화학적 평형 상태에 있다고 가정하였기 때문에 동일하다고 가정하였다.^(5,6) 전압손실에는 활성화 손실, 저항 손실, 농도 손실이 있는데 900 °C 의 작동온도에서 3200 A/m² 의 전류밀도를 고려하는 이번 연구에서는 확산 과정이 아주 빨라서 농도 손실을 무시할 수 있다고 가정하였다⁽⁶⁾ [식 (6)] 그리고 활성화 손실을 구하는 식은 Achenbach 의 손실 모델을 이용하였고 저항 손실은 Song 이 제한한 모델을 이용하였다. 셀 전압 손실 모델은 Singal 이 제안한 실험 결과와 비교하여 실험 값을 잘 모사함을 검증하였다.

$$V_C = V_{OC} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} \quad (6)$$

SOFC 에 생산되는 전력을 계산하는데 필요한 전류밀도는 식 (7)에 의해서 소모되는 H_2 와 CO 의 몰 유량에 비례하고 반응면적에 반비례한다. 그리고 소모되는 H_2 와 CO 의 몰 유량은 공급되는 CH_4 , H_2 그리고 CO 의 몰 유량의 합과 연료 중 스택 내에서 소모되는 비율인 연료이용률의 곱으로 계산된다.

$$j = \frac{2F(\dot{z}_{\text{H}_2} + \dot{z}_{\text{CO}})_{\text{consumed}}}{A_c} = \frac{2F \times U_f \times (4\dot{n}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{CO}} + \dot{n}_{\text{H}_2})_{\text{supplied}}}{A_c} \quad (7)$$

2.1.2 가스터빈 모델

본 연구에서 가스터빈의 동력은 50 kW 급으로서 마이크로 가스터빈이 사용되었다. 경제성과 제작 가능성을 고려하여 원심 압축기와 레이디얼 터빈을 사용하였다. 부분 부하에서의 압축비와 효율은 Zhang & Cai 가 제시한 일반적인 성능곡선을 이용하여 계산하였다.

2.1.3 시스템 성능

전체 시스템의 성능은 식 (8)을 통해 계산하였다.

$$\eta_{\text{Hybrid}} = \frac{\dot{W}_{\text{SOFC}} + \dot{W}_{\text{GT}}}{\dot{m}_f \times \text{LHV}_f} \quad (8)$$

2.2 합성가스의 조성

석탄 가스화기에서 생성되는 주요 가스는 H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , H_2O 이며 분율은 가스화기의 종류에 따라 다르다. 이 성분을 그대로 하이브리드 시스템에 적용할 경우 합성가스 개별의 영향을 파악하기 어렵다. 이를 위해 이 중에서 발열량이 있어서 연료로 사용할 수 있는 H_2 와 CO 를 이용하여 인공적인 합성가스를 조성하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 하이브리드 시스템은 CH_4 을 연료로 하는 시스템이다. 그리고 이 시스템에 H_2 와 CO 가 각각 어떤 영향을 미치는지 조사하고자 한다. 이를 위해 CH_4 100% 인 경우를 비교 기준으로 하고 H_2 와 CO 를 질량기준으로 10% 에서 50% 까지 섞으면서 전체 시스템의 성능을 관찰하였다. (Table 2)

Table 2 Syngas compositions for analysis

| - Different H ₂ compositions | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| H ₂ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| CH ₄ | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 |
| LHV (kJ/kg) | 50010 | 57045 | 64040 | 71035 | 78030 | 85025 |
| - Different CO compositions | | | | | | |
| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| CO | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| CH ₄ | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 |
| LHV (kJ/kg) | 50010 | 46055 | 42060 | 38065 | 34070 | 30075 |

3. 탈설계점 성능 특성

3.1 합성가스의 성분의 영향

3.1.1 하이브리드 시스템에 미치는 영향

먼저 합성가스의 성분이 시스템에 미치는 영향을 조사하였다. 합성가스를 연료로 공급할 경우, 시스템에 전체적인 성능변화가 예측된다. 그러나 TIT 가 840 °C 라는 것은 제한 조건으로 고정하였다. Fig. 2 에서 H₂가 공급될 때 합성가스의 농도가 증가할수록 CH₄ 이 연료인 경우에 비해 동력이 커졌다가 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 그러나 CO 가 혼합된 경우 농도가 증가할수록 동력은 줄어든다. 이런 현상은 효율을 나타내는 Fig. 3 에서도 동일하게 나타난다. 이런 경향이 나타나는 것은 SOFC 에서 H₂ 와 CO 의 작동의 차이 때문이다. Fig. 4 의 그래프가 하이브리드 시스템의 동력 그래프와 동일한 추이를 나타냄을 확인할 수 있다. 즉, 하이브리드 시스템에 합성가스를 공급할 경우 동력의 약 75%를 담당하는 SOFC 의 성능에 따라서 전체 시스템의 성능이 결정됨을 확인할 수 있다. 그리고 또한 합성 가스의 농도는 가스터빈의 작동 성능에는 영향을 미치지 않음도 보여준다. 이를 토대로 SOFC/GT 하이브리드 시스템에서 H₂ 는 CH₄ 과 유사한 성능을 나타낸다는 것을 확인하였고 CO 는 SOFC 에서 성능이 저하되어 하이브리드 시스템에서 낮은 성능을 나타냄을 확인하였다.

3.1.2 SOFC 에 미치는 영향

SOFC 에서 동력은 전류밀도, 셀전압 그리고 반응면적의 곱을 통해서 얻게 된다. 본 연구에서는 동일한 시스템을 대상으로 하였기 때문에 반응면적은 상수가 된다. 합성가스를 혼합할 경우 전류밀도가

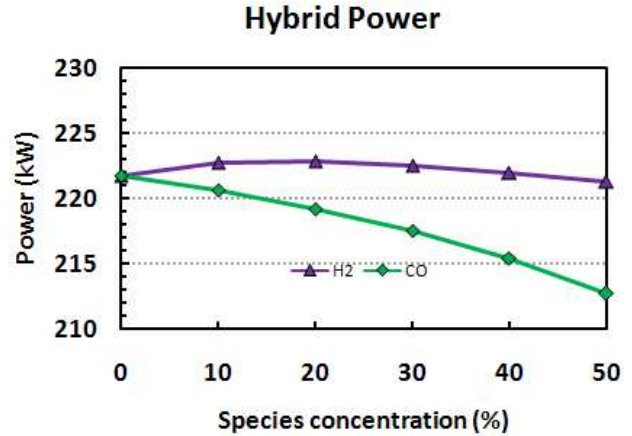


Fig. 2 Hybrid system power change with variable H₂ and CO concentrations

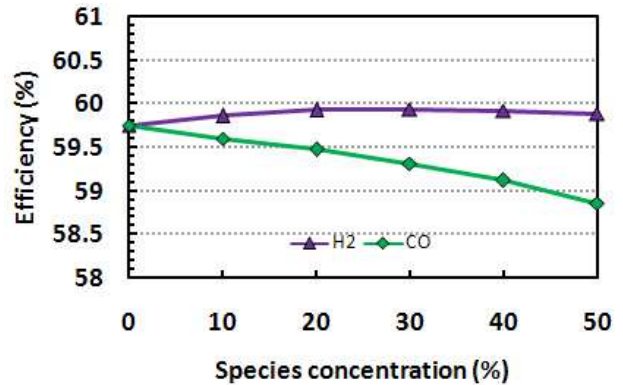


Fig. 3 Hybrid system efficiency change with variable H₂ and CO concentrations

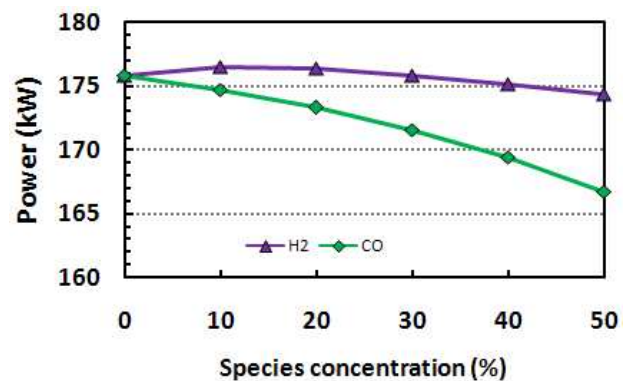


Fig. 4 SOFC power change with variable H₂ and CO concentrations

감소하게 되는데 이는 TIT 구속조건을 만족시키기 위한 연료의 양이 줄어들음을 말해준다. 먼저, H₂를 혼합한 경우 연료의 발열량이 증가함과 동시에 연료 중 CH₄의 양이 감소하여 열공급이 필요한 개질 반응이 줄어들어 연료전지의 온도가 상승하기 때문에 TIT 조건을 만족하기 위한 연료의 양이 줄어들어 전

류밀도가 감소한다. 그리고 CO 를 혼합한 경우 연료의 발열량은 감소하지만 강한 흡열 반응인 식 (1)의 수증기 개질 반응이 줄어들고 약한 발열 반응인 식 (2)의 수성 가스 변환 반응이 늘어나기 때문에 연료 전지 온도가 상승하여 결과적으로 적은 양의 연료로도 TIT 조건을 만족할 수 있게 된다. H₂의 경우 CO에 비해 발열량이 더 크기 때문에 결과적으로 연료 전지 온도가 더 상승하게 되고 더 적은 전류밀도를 가지게 된다. 셀전압의 경우 연료전지의 특성에 의해 높은 셀온도와 적은 전류밀도를 가질 때 높은 값을 가지게 된다.⁽⁴⁾ 이에 따라 CH₄에 비해 높은 셀온도와 적은 전류밀도를 가진 합성가스의 경우, 높은 셀전압을 가지게 된다. H₂를 혼합했을 때는 CO를 혼합했을 때 보다 더 높은 온도와 더 적은 전류밀도를 가지기 때문에 더 큰 전압을 가지게 된다. 결국, H₂의 경우 적어진 전류밀도의 부분을 상승한 전압 값으로 상쇄하여 CH₄을 공급하는 경우와 비슷한 성능을 나타낸다. 하지만 CO를 혼합한 경우, 셀전압이 전류밀도의 감소폭만큼 상승하지 못해서 더 적은 동력을 내게 되어 SOFC의 성능이 떨어지게 된다.

3.2 부분부하 성능 특성

3.2.1 하이브리드 시스템에 미치는 영향

부분부하 성능해석에는 H₂와 CO가 각각 질량 기준으로 50% 혼합되었을 때의 하이브리드 시스템의 성능 특성을 조사하였다. SOFC/GT 하이브리드 시스템에서 부분 부하 성능은 부하가 줄어들수록 증가하다가 감소하는 경향을 가진다.⁽⁹⁾ 이런 경향은 합성가스를 혼합했을 때에도 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할 수 있는 것처럼 동일하게 나타난다. 이는 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 것처럼 SOFC의 효율은 부분 부하로 갈수록 선형적으로 증가하는데 비해 가스터빈 효율은 부분 부하로 갈수록 감소하고 감소하는 정도가 증가하기 때문이다. Fig. 8에서 가스터빈의 효율은 전체 공급한 연료의 발열량에 따른 가스터빈의 출력을 나눈 값이다. 그런데 Fig. 5에서 H₂를 혼합했을 경우, 100% 부하일 때는 3.1에서 설명한 것과 같이 농도에 관계없이 동일한 성능을 나타내지만 부분부하에서 작동하게 되면 농도가 커질수록 성능 저하가 나타나고 부하가 작아질수록 계속해서 성능저하 폭이 커진다는 것을 확인하였다. 이는 Fig. 7에서처럼 H₂가 혼합될 경우 부분부하에서 작동하게 되면 SOFC 성능이 다른 경우에 비해 저하되기 때문이다. 3.1절에서 H₂가 혼합되는 경우 연료량이 감소해도 동일한 성능을 유지하는 이유가 높은 셀온도라는 것을

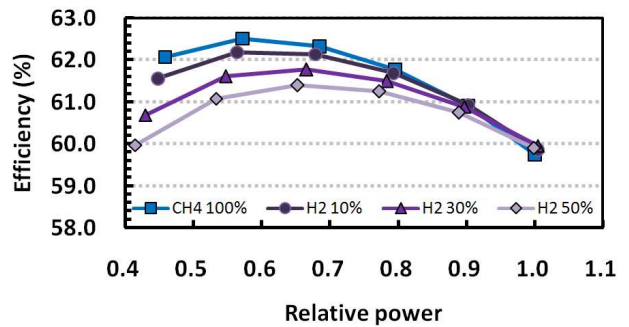


Fig. 5 Part-load efficiency change of the hybrid system with variable H₂ concentrations

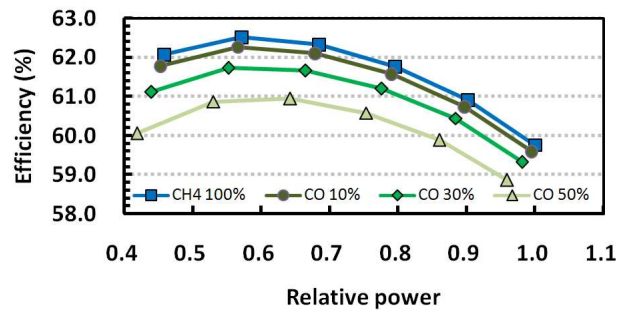


Fig. 6 Part-load efficiency change of the hybrid system with variable CO concentrations

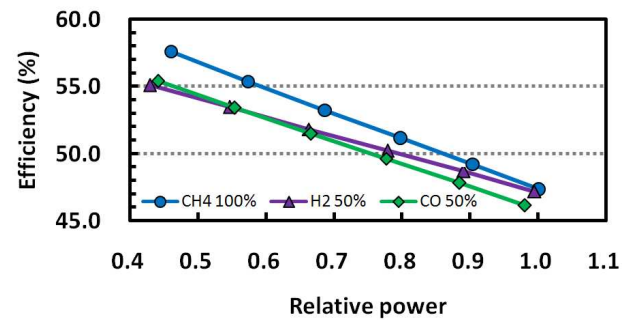


Fig. 7 Part-load efficiency change of the SOFC with 50% of H₂ and CO concentrations

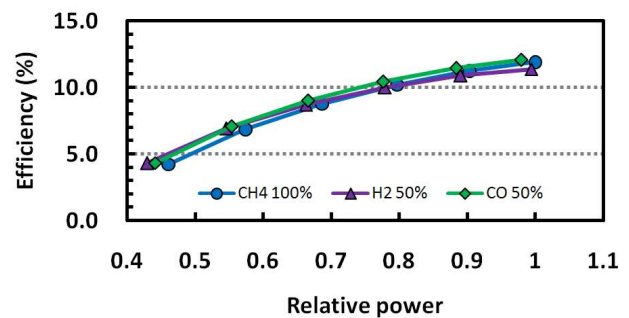


Fig. 8 Part-load efficiency change of the gas turbine with 50% of H₂ and CO concentrations

확인했었다. 그런데 부분부하로 갈수록 연료량이 부하에 비례하여 감소하고 셀온도도 감소하게 된다. 이로 인해 높은 온도에 기인한 전압 상승이 줄어들어 셀전압을 설계부하 수준으로 유지하지 못해 시스템 효율이 감소하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 CH_4 을 연료로 하는 SOFC/GT 하이브리드 시스템에 가스화기에서 나오는 합성가스인 H_2 와 CO 가 연료로 공급될 때의 탈설계점 성능특성에 대해서 연구하였다. 이를 위해서 하이브리드 시스템을 모델링하고 혼합가스를 질량기준으로 10~50% 농도로 공급하면서 시스템에 미치는 영향을 조사하였고 부분부하에서도 혼합가스가 시스템 성능에 미치는 영향도 조사하였다.

먼저 H_2 가 혼합될 경우 CH_4 을 공급했을 때와 유사한 성능을 보였다. 그러나 CO 를 혼합한 경우, SOFC 의 성능저하로 인해 하이브리드 시스템에서 CH_4 을 공급하는 경우보다 성능이 낮아지는 것을 확인하였다.

그리고 합성가스를 사용했을 때 부분 부하에서의 성능은 CH_4 을 연료로 했을 때와 동일한 추이를 보이는 것을 확인하였다. 하지만 H_2 를 혼합하는 경우, 부분부하로 갈수록 100% 부하에서 나타났던 고온의 셀 온도로 인한 효과가 감소하여 성능 저하가 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다.

이 연구 결과는 향후 가스화기를 이용한 SOFC/GT 하이브리드 시스템에서 가스화기의 종류와 작동 조건을 결정할 때 도움을 주는 정보로 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) NETL, 2007, "Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity Summary Sheets," *Fossil Energy Power Plant Desk Reference*, p. 15
- (2) Verma, A., Rao, A. D. and Samuelsen, G. S., 2006, "Sensitivity Analysis of a Vision 21 Coal Based Zero Emission Power Plant" *Journal of Power Sources*, Vol. 158, No. 1, pp. 417~427.
- (3) Veyo, S. E., Shockling, L. A., Dederer, J. T., Gillett, J. E. and Lundberg, W. L., 2002, "Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems: Status," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, No. 4, pp. 845~849.
- (4) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, "Fuel cell Systems Explained," *John Wiley & Sons, Ltd*, New York, NY.
- (5) Achenbach, E., 1994, "Three-Dimensional and Time-Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 49, No. 1-3, pp. 333~348.
- (6) Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, J. H., Kim, T. S., Ro, S. T. and Suzuki, K., 2005, "Performance Analysis of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid Power System Based on a Quasi-Two Dimensional Model," *Journal of Power Sources*, Vol. 142, No. 1, pp. 30~42.
- (7) Singhal, S. C., 2000, "Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology," *Solid State Ionics*, Vol. 135, No. 1-4, pp. 305~313.
- (8) Zhang, N. and Cai, R., 2002, "Analytical Solutions and Typical Characteristics of Part-Load Performances of Single Shaft Gas Turbine and Its Cogeneration," *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 9-12, pp. 1323~1337.
- (9) 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," *Journal of Power Sources*, Vol. 175, No. 1, pp. 296~302.

(1) NETL, 2007, "Bituminous Coal and Natural Gas to