

가압형 고체산화물 연료전지 / 가스터빈 하이브리드 시스템 설계에서 터빈입구 바이패스의 효과

박성구* · 손정락** · 김동섭***

Effect of Gas Bypass at Turbine Inlet on Design of a Pressurized Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid System

S. K. Park*, J. L. Sohn**, T. S. Kim***

Key Words : SOFC(고체산화물연료전지), Gas turbine(가스터빈), Pressurized hybrid system(가압형 하이브리드 시스템), Design(설계), Compressor surge(압축기 서지), bypass(바이패스).

ABSTRACT

Hybrid power generation systems combining a solid oxide fuel cell and a gas turbine is promising due to their high efficiency. In the pressurized hybrid system, the operating condition of the gas turbine may play a critical role in designing the hybrid system. In particular, prevention of surge of the compressor can be a critical issue. The existence of fuel cell between the compressor and the turbine may cause an additional pressure loss and thus compressor operating points tend to approach the surge if the original turbine inlet temperature is pursued. In this study, bypassing some of the turbine inlet gas directly to the turbine exit side is simulated. Its effects on suppressing the surge problem and change in performance characteristics are discussed.

1. 서론

화석연료의 고갈과 환경 문제의 심각성이 보고되면서 지공해, 고효율의 발전시스템의 도입이 갈수록 중요해지고 있다. 이러한 환경변화에 부합하는 대체 발전 시스템 중에서 연료전지가 급속히 부각되기 시작하였고, 또한 연료전지와 가스터빈을 결합하여 시너지 효과를 낼 수 있는 하이브리드 시스템에 대한 연구와 시스템 개발이 선진국을 중심으로 국가과제로써 활발

하게 이루어지고 있다.⁽¹⁾

연료전지의 작동온도가 높은 고온형 연료전지, 특히 고체산화물연료전지(SOFC)의 상용화에 대한 연구 개발이 중점적으로 이루어지고 있는데, 그 중에서 연료전지가 가압상태로 운전되도록 가스터빈과 결합하는 가압형 하이브리드 시스템에 대한 개발이 중점적으로 이루어지고 있다.^(2,3) 하이브리드 시스템에서는 가스터빈이 여분의 동력을 발생시키는 역할이외도 다른 중요한 역할을 담당한다. 즉, 별도의 공기 공급장치(블로워) 없이 가스터빈이 연료전지에 산화제(공기)를 공급하게 된다. 특별히 가압형 시스템의 경우 압축기 출구 공기가 연료전지로 바로 공급되기 때문에 가스터빈과 연료전지가 매우 유기적으로 결합(압력을 공유)되고, 따라

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 인하대학교 기계공학과

E-mail : kts@inha.ac.kr

서 두 구성부 사이의 상호작용이 시스템 운전성과 성능에 지대한 영향을 미친다.

최근 SOFC 하이브리드 시스템과 관련한 많은 기초 연구 결과들이 발표되고 있는데 대부분의 설계관련 연구들은 SOFC와 가스터빈을 비롯한 하이브리드 시스템의 구성요소들이 원하는 설계조건과 설계성능을 만족하도록 새로 설계한다는 가정 하에 이루어진 것이다. 연료전지의 경우 셀의 적층에 의해 스택(stack)의 크기를 조절하여 다른 용량으로 설계하는 것이 비교적 용이하지만 가스터빈의 경우 개발초기 단계에서 새로운 용량의 엔진을 설계하여 개발하는 것은 비용측면이나 개발일정 등의 측면에서 봤을 때 비현실적이다. 결국 하이브리드 시스템을 구성하는 가스터빈은 기존에 개발되어 있는 상용 가스터빈을 사용하는 것이 현실적일 것으로 생각된다. 단, 이렇게 기계작된 가스터빈을 사용하고 이를 기반으로 연료전지를 설계하여 하이브리드 시스템을 구성할 경우 몇 가지 문제점이 있을 것으로 예상된다. 하이브리드 시스템의 설계 작동점은 가스터빈이 단독으로 작동하는 시스템의 작동점과 다른 작동점을 가지게 되고, 주로 압축기 서지점에 근접하는 경우가 많다.⁽⁴⁾ 이렇게 설계 작동점이 압축기 서지점에 근접하여 시스템이 설계되면 운전시 출력감소나 정지(shotdown)시에 정상적인 작동에 문제를 야기할 수 있다.⁽⁵⁾ 시스템의 안정적인 운전을 위해서는 일정한 서지 마진을 확보해야 하므로 압축기 작동점 역시 시스템 설계시 유의하여야 한다. 즉 시스템의 구성방식 및 연료전지의 설계 조건에 따라서 압축기의 작동점은 변화할 것이고 이로 인해 압축기 서지마진이 변화하기 때문에 압축기 작동점 역시 시스템을 설계할 때 주요한 설계 변수로 작용할 것이다. 특히 압축기 출구 공기를 바로 연료전지로 공급하는 가압형 시스템에 있어서는(원래 가스터빈 설계시에는 고려되지 않았던) 연료전지의 존재로 인하여 가스터빈의 작동점 변화가 예상된다. 이러한 문제점에 착안한 선행 연구에서는 연료전지 작동온도가 증가할수록 하이브리드 시스템의 성능은 좋아지지만 압축기 작동점은 서지점에 근접하게 되며, 그 결과 원래의 가스터빈 설계점 근처에서 운전되기 힘들거나 운전되더라도 성능이 현격히 낮아지는 문제를 야기할 것으로 예상되었다.⁽⁶⁾

따라서 본 연구에서는 이미 설계되어 있는 가스터빈을 사용하여 하이브리드 시스템을 구성하고 연료전지 작동온도가 높아 압축기의 작동점이 서지점에 근접하는 문제를 해결하기 위해 터빈입구공기의 일부를 터

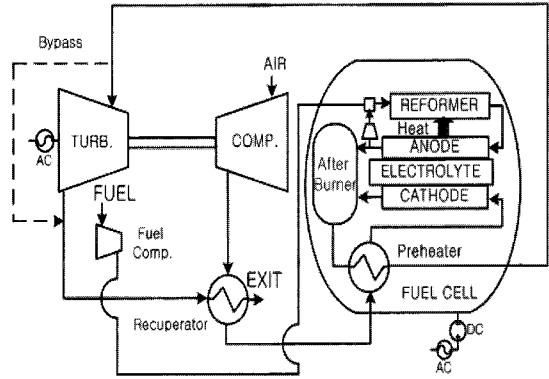


Fig. 1 Hybrid system configuration

빈으로 보내지 않고 터빈 출구로 바이패스하여 압축기 작동점의 변화를 가져오는 것을 해석적으로 모사해보고 그 효과를 분석하고자 한다.

2. 시스템 구성 및 해석 방법

2.1. 시스템 구성

Fig. 1에 본 연구에서 고려한 하이브리드 시스템의 구성도를 나타내었다. 공기와 연료가 가압된 상태로 연료전지로 유입되는 가압형 시스템이며 연료전지 반응에 필요한 수소를 공급해주기 위한 개질방응으로는 수증기 개질방법을 사용하였다. 내부개질을 고려하여 개질에 필요한 열은 셀 내부에서 직접 공급하는 방법을 사용하였고, 개질에 필요한 수증기는 연료극 재순환을 통해 공급하여 주게 된다. 시스템에 공급된 공기는 압축기를 통해 압축된 후 터빈출구가스의 열을 회수하고 먼저 연료전지로 공급된다. 연료전지 설계조건인 셀 입출구 온도차이를 만족시켜주기 위해 연료전지 출구가스를 통해 다시 한번 예열되고 셀에 유입되어 반응한 후 연료전지 후연소기로 공급되어 연료극의 미반응 연료와 연소하여 터빈으로 유입된다. 실선으로 표시된 것들은 기존 연구에서 사용한 것과 동일한 시스템 구성이다. 가스터빈은 기존의 제작된 것을 사용한다고 가정하여 해석에서 가스터빈 부분은 운전해석(탈설계 해석)을 수행하며, 연료전지를 포함한 나머지 요소들은 모두 각 조건에서 설계(각각 독립적임)된다고 가정한다. 가스터빈은 단단 원심압축기와 터빈을 사용하는 120 kW급을 가정하였다. 주요 설계파라미터들은

Table 1 Design parameters of the gas turbine

Ambient condition	150C, 1atm
Air mass flow rate	1 kg/s
Compressor pressure ratio	4.59
Compressor efficiency	0.75
Turbine inlet temperature	948oC
Turbine efficiency	0.85
Recuperator effectiveness	0.83
Shaft speed	65,000 rpm
Mechanical efficiency	0.96
Generator efficiency	0.93

Table 1에 나타내었다. 접선은 본 연구의 주요 목적인 터빈입구에서 가스의 일부를 바이패스 하는 것을 나타낸다.

2.2. 해석 방법

가스터빈은 설계점 회전수를 유지하며 각각의 연료전지 설계 조건에 맞추어 작동점이 변화하는 것으로 모사하였다. 연료전지에서 주요 설계 변수는 연료전지의 작동온도와 셀 입출구 온도차이며, 설계 작동온도가 변화하더라도 셀의 전류밀도는 일정하게 유지하면서 설계되도록 하였다. 연료전지의 작동전압(V)은 Nernst전압(E_N)에서 전기분극에 의한 전압손실(polarization: E_P)과 내부저항(ohmic resistance: E_R)을 차감하여 계산된다.

$$V = E_N - E_P - J(\rho_a L_a + \rho_e L_e + \rho_c L_c) \quad (1)$$

J 는 전류밀도이며, L 은 anode, cathode 그리고 electrolyte의 두께이고 각각의 극성손실은 알려진 관계식⁽⁷⁾을 사용하여 계산하였다. 셀은 단일 검사체적으로 다루었으며, 따라서 연료전지 출구온도는 셀의 작동온도(FCT)와 동일하게 두었다. 셀 입출구 온도차이는(ΔT_c)는 공기극 입구 온도(CIT: Cell Inlet Temperature)와 셀 작동온도의 차이로 정의하여 사용하였다.

$$\Delta T_c = FCT - CIT \quad (2)$$

이 온도차는 커질수록 연료전지의 출력이 향상되고 하이브리드 시스템의 효율을 향상시키는 것으로 예상되나⁽⁸⁾, 고온에서 작동하는 SOFC의 경우에 이 온도차

Table 2 Design parameters of the fuel cell

Fuel cell temperature	900oC, 1000oC
Temperature difference fuel cell	100oC, 150oC
Current density	400 mA/cm2
Fuel utilization factor	0.7
Steam carbon ratio	3.0
Fuel compressor efficiency	0.75
Conversion efficiency	0.93

가 너무 클 경우 셀 내부에서의 열응력 문제가 야기될 가능성이 높을 것이다. 이러한 점들을 고려하여 대체로 선행연구들에서는 200°C 이하에서 해석을 수행하였다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 이 온도차의 효과도 고찰하기 위하여 100, 150°C의 두 가지(각각 case 1, case 2로 칭함)를 대상으로 하였다.

연료전지 입구 예열기는 열교환기의 효율을 고정하지 않고 각 연료전지 설계조건에서 셀 입출구 온도차이를 주어진 조건에 만족시키는 효율 값을 사용하였고, 터빈출구가스의 열회수에 사용되는 열교환기의 효율은 가스터빈이 단독 운전하는 시스템의 열교환기 효율과 동일한 값을 사용하였다. 연료전지를 포함한 주요 설계대상 구성부의 설계값들(혹은 범위)을 Table 2에 나타내었다. 연료전지 작동온도(FCT)는 상용화를 위하여 개발 중인 시스템의 온도^(2,3)를 참고하여 900°C 이상(900°C 와 1000°C 두 가지 대상)으로 선정하였다. 식 (1)에 따라서 계산된 연료전지 작동전압은 900°C에서 약 0.77 V, 1000°C에서 약 0.83 V이다. 연료전지로 공급되는 연료량에 따라서 전류가 계산되고, 이로부터 연료전지의 교류출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC,AC} = V \cdot I \cdot \eta_{conv} \quad (3)$$

가스터빈 압축기의 작동특성은 성능선도로 묘사하였으며, 터빈은 아래의 Stodola 관계식으로 묘사하였다.

$$\frac{\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}} / P_{in}}{(\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}} / P_{in})_d} = \frac{\sqrt{1 - (P_{out} / P_{in})^2}}{\sqrt{1 - (P_{out} / P_{in})_d^2}} \quad (4)$$

터빈입구의 교류출력은 아래의 식과같이 계산되며, 바이패스 비율은 연료전지 출구 가스 중에 터빈으로 공급되지 않고 바로 터빈 출구로 분리되는 유량의 비율을 의미한다.

$$\dot{W}_{GT,AC} = \{(\dot{m}_t \Delta h_t) \eta_{me} - \dot{m}_c \Delta h_c\} \cdot \eta_{gen} \quad (5)$$

압축기 성능선도와 식(4)로 주어진 터빈 작동특성 그리고 압축기와 터빈 사이에 위치한 연료전지에서의 압력 강하 및 바이패스 비율 등이 다 고려된 매칭조건에 의하여 각 시스템 설계조건에서의 가스터빈 운전점이 결정된다. 가스터빈 축의 회전수는 설계 값으로 유지된다.

하이브리드 시스템의 출력과 효율은 아래와 같이 계산되며, 해석은 상용프로그램⁽¹⁰⁾으로 수행하였다.

$$\dot{W}_{total,AC} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} - \dot{W}_{AUX} \quad (6)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{total,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{fuel}} \quad (7)$$

3. 해석 결과

본 연구의 해석 결과에 앞서서 바이패스가 없는 기존의 연구결과⁽⁶⁾를 요약하면 다음과 같다. 셀온도(FCT)를 높게 설계하면 연료전지 성능뿐 아니라 터빈 입구온도 및 압력비 증가로 가스터빈 성능도 향상시킨다. 그러나 가스터빈 측면에서 보면 애초 설계에서는 없었던 연료전지 등 부속적 장치들이 압축기와 터빈 사이에 삽입되고 이로 인한 압력 손실이 추가적으로 발생한다. 따라서 이러한 변화된 운전 조건을 만족시키기 위하여 동일한 압축기 출구압력(동일한 압력비)에서 터빈입구 압력이 상대적으로 낮아지므로 터빈 작동특성에 의하여 터빈입구온도도 애초 설계시보다 낮아지게 되어 설계 압축기 압력비에서 가스터빈 성능이 낮아진다. 만일 터빈입구온도를 애초 설계 값에 근접시키려 한다면 반대로 압축기 압력비가 설계 값보다 커지면서 서지점으로 근접하게 된다.

본 논문에서는 바이패스를 사용하여 터빈 유량을 감소시킴으로써 이러한 서지 접근 문제를 완화 시킬 가능성에 대해서 해석한다. 먼저 셀 입구온도차(ΔT_c)를 100°C 로 설계하는 경우(case 1)에 대해 살펴보았다. Fig. 2에 연료전지 설계조건을 고정시키고 터빈입구공기를 바이패스 했을 때 case 1의 터빈입구온도를 나타내었다. 가압형 하이브리드 시스템은 고온의 연료전지 출구가스가 터빈으로 유입되게 된다. 따라서 이러한 고온의 가스 중 일부가 터빈에서 팽창하지 않고 터빈 출구로 바이패스되면 터빈출구가스의 온도가 상승하게 되고 재생기에서 압축공기와 열교환을 통

해 바이패스를 하지 않았을 때에 비해 상대적으로 높은 셀 입구온도를 가지게 된다. 따라서 셀 입구에서의 예열량이 감소하게 되어 터빈 입구 온도는 바이패스의 비율을 높일수록 증가하는 경향을 나타내게 된다. 연료전지 작동온도가 높은 시스템의 터빈입구 온도는 작동온도가 낮은 시스템의 터빈입구온도에 비해 높다. 기존의 바이패스를 하지 않은 가압형 하이브리드 시스템의 경우 연료전지가 압축기와 가스터빈의 사이에 위치하며 압력손실이 생기고 이로 인해 설계 압축기 압력비에서 가스터빈이 단독으로 운전할 때의 설계조건(948°C)에 비해 터빈입구온도가 상대적으로 낮지만 바이패스를 할 경우 터빈입구온도가 설계조건보다 높은 경우도 생긴다. 그러나 터빈입구온도가 증가하더라도 터빈에 공급되는 공기유량이 감소하게 되어 압축기 작동점이 서지점에서 충분히 멀리 위치한다. 이것은 추후 Fig. 5에서 설명할 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4에 연료전지와 가스터빈의 출력과 하이브리드 시스템의 효율을 나타내었다. 바이패스 비율이 증가할수록 터빈입구온도는 증가하지만 터빈으로 유입되는 가스 유량이 감소하게 되므로 가스터빈의 출력은 감소하게 된다. 압축기 작동점이 변화하며 압력비가 바뀌게 되고 따라서 연료전지의 작동압력이 달라지지만 이러한 변화는 연료전지 출력에 큰 영향을 주지 않고 따라서 바이패스 비율이 증가하게 되면 터빈 출력의 감소에 의해 시스템의 총 출력은 바이패스를 하지 않은 경우에 비해 감소하게 되고 시스템의 효율도 감소하는 경향을 나타내게 된다.

Fig. 5는 연료전지 설계조건과 터빈입구 바이패스의 비율을 바꾸어가며 해석한 설계점들을 압축기 성능선도에 나타낸 것으로 실선은 압축기의 회전수가 일정한 작동선이다. 가스터빈만의 단독운전시 압축기 설계작동점은 유량이 1kg/s일 때이다. FCT가 900°C이고 바이패스가 없는 시스템은 하이브리드 시스템의 압축기 작동점이 가스터빈이 단독으로 운전할 때의 압축기 작동점에 비해 압력비가 낮은 점에 위치한다. 하이브리드 시스템을 구성하게 되면 압력손실이 증가하여 동일한 압축비에서 터빈입구온도가 낮아지게 되고, 가스터빈이 단독으로 운전할때와 동일한 터빈입구온도로 운전하려면 압축기의 압축비가 더 커져야 하기 때문에 일반적으로 하이브리드 시스템의 압축기 작동점은 서지점에 근접하게 된다. 하지만 FCT가 900°C이고 바이패스가 없는 시스템의 경우 Fig. 2에서 확인 할 수 있듯이 터빈입구온도가 가스터빈이 단독으로 운전할 때

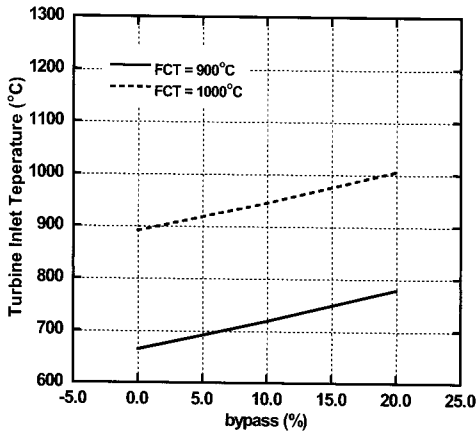


Fig. 2 Turbine inlet temperature for $\Delta T_c=100^\circ\text{C}$

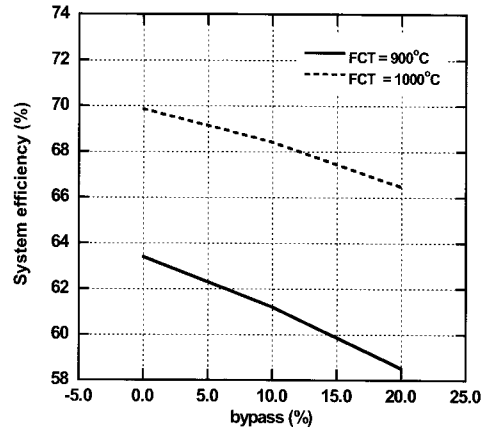


Fig. 4 System efficiency for $\Delta T_c=100^\circ\text{C}$

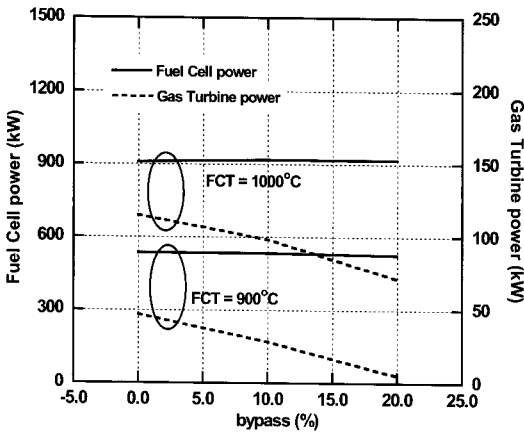


Fig. 3 Fuel cell and gas turbine powers for $\Delta T_c=100^\circ\text{C}$

의 설계 터빈입구온도에 비해서 상당히 낮다. 결국 압축비가 낮아 하이브리드 시스템의 압축기 작동점이 가스터빈이 단독으로 운전할 때의 압축기 작동점보다 오른쪽에 위치하게 된다. 이 경우를 제외한 나머지 세 경우에는 모두 바이패스가 없는 경우에 터빈입구 온도가 충분히 높아서 운전점이 설계점보다 압력비가 증가한, 즉 서지점에 접근하는 경향을 가진다.

한편 본 결과는 어떤 경우에도 바이패스를 하게 되면 운전점들의 압력비가 감소함을 보여준다. 앞서 언급한 것처럼 터빈으로 공급되는 유량이 일정할 때 터빈입구온도가 증가하게 되면 압축기 압력비가 증가하여 압축기의 작동점은 서지점으로 근접하게 된다. 하지만 터빈입구 바이패스를 하면 터빈입구온도의 증가보다 터빈으로 유입되는 가스 유량의 감소가 더 커 압축기의 압력비가 감소된다. 즉, 터빈으로 유입되는 가

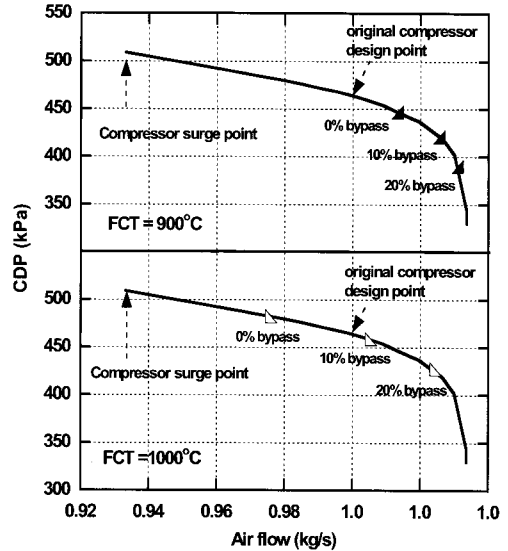


Fig. 5 Various system design points on the compressor operating line for $\Delta T_c=100^\circ\text{C}$

스의 양을 조절해 주게 되면 터빈입구 온도가 증가하더라도 압축기의 작동점을 서지점에서 더 멀리 이격시킬 수 있다.

Figs. 6~9는 셀입구온도차 (ΔT_c)를 150°C 로 설계하는 경우(case 2)의 결과이다. 이 경우 앞의 예보다 셀 입출구 온도차가 크므로 동일한 연료전지 작동온도에서 셀 입구 온도가 낮게 되고 예열량이 감소하여 다른 조건이 동일 할 때 터빈입구온도가 case 1보다 높고 결국 압축기 작동점이 case 1에 비해 상대적으로 서지점에 근접하게 나타난다. 하지만, 경향은 case 1과 유사하다. 고온의 터빈입구가스를 출구로 바이패스 하

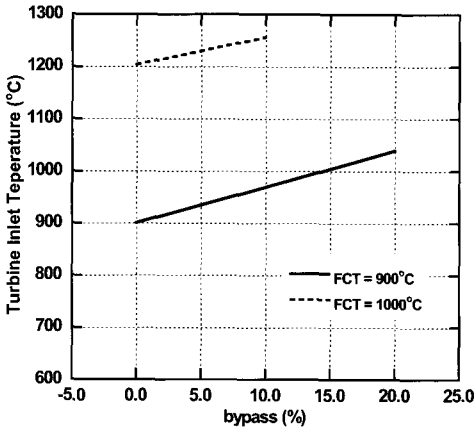


Fig. 6 Turbine inlet temperature for $\Delta T_c=150^\circ\text{C}$

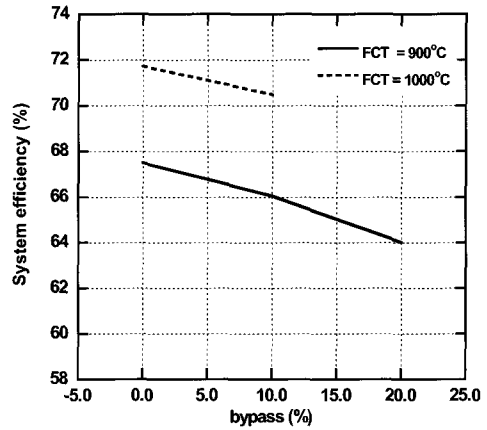


Fig. 8 System efficiency for $\Delta T_c=150^\circ\text{C}$

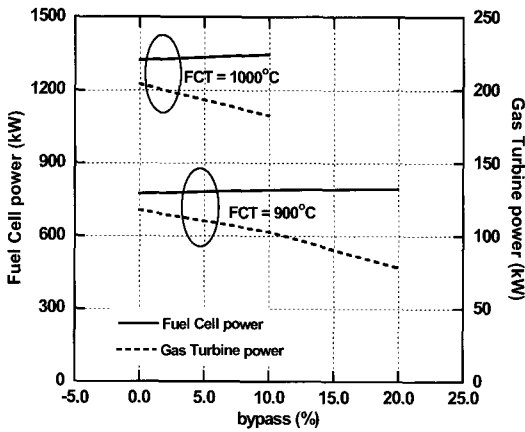


Fig. 7 Fuel cell and gas turbine powers for $\Delta T_c=150^\circ\text{C}$

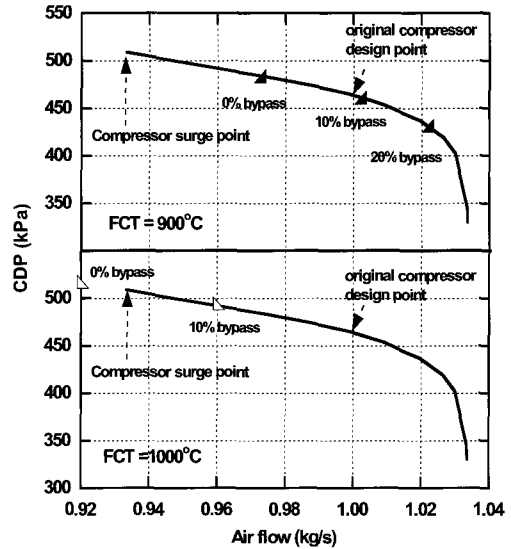


Fig. 9 Various system design points on the compressor operating line or $\Delta T_c=150^\circ\text{C}$

므로 터빈입구 온도는 증가하게 되지만 터빈으로 유입되는 유량이 감소하여 터빈 출력은 감소하게 되어 시스템의 효율은 바이패스 비율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 연료전지 온도가 1000°C 인 경우는 터빈입구가스를 20% 바이패스하게 되면 터빈입구 온도가 너무 높아 재생기의 효율이 일정한 조건에서는 셀 입출구 온도차를 주어진 조건에 만족시킬 수 없게 되어 결과에서 제외하였다. 그러나 이 범위뿐 아니라 연료전지 온도 1000°C , 그리고 셀온도차 150°C 로 큰 경우에는 터빈입구 온도가 전체적으로 너무 높고 서지점에 너무 근접하기 때문에 사실상 시스템 설계가 불가능할 것이다.

이상에서 살펴 본 바에 따르면 연료전지 작동온도가 높아 압축기 작동점이 서지점에 근접하는 시스템의 경우 터빈입구 바이패스를 통하여 해결 할 수 있다. 물

론 연료전지 작동온도가 동일 한 경우 바이패스를 통해 안정적인 시스템의 운전은 가능하지만 바이패스를 하지 않은 시스템에 비해 총 출력과 효율은 감소하게 된다. 하지만 설계시 압축기 작동점이 서지점에 근접하게 되어 연료전지 작동온도를 낮춰서 설계하는 것 보다는 연료전지 작동온도는 유지하고 터빈입구 바이패스를 사용하는 것이 더 나음을 알 수 있다. 즉, 연료전지 작동온도를 낮춰 설계해야만 안정적인 운전이 가능한 시스템에서 연료전지 작동온도는 유지하고 터빈입구 바이패스를 통해 낮은 연료전지 작동온도 시스템의 압축기 작동점과 동일한 작동점에서 운전하도록 설

계하는 것이 더 효율적이다. 예를 들어 case 1의 연료 전지 작동온도 900°C, 10% 바이패스와 1000°C, 20% 바이패스를 비교하면 압축기의 작동점은 거의 유사하지만 출력과 효율은 후자가 훨씬 높은 것을 확인할 수 있다. 즉 이것은 바이패스를 통한 유로변경에 의하여 시스템의 안정적인 운전과 더 나은 성능을 갖는 시스템을 설계할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 기 제작된 가스터빈을 사용하여 하이브리드 시스템을 구성했을 때 발생할 수 있는 압축기 서지문제를 터빈입구 바이패스를 통해 해결 할 수 있음을 해석을 통하여 예시하였다. 연료전지 작동온도가 고온일 경우 시스템의 출력과 효율이 모두 작동온도가 낮은 시스템에 비해 상대적으로 높지만 압축기 작동점이 서지점으로 근접하여 일정 온도 이상으로 올리기는 힘든 문제가 발생하게 된다. 즉, 가스터빈 압축기 작동조건이 시스템 설계에 중요한 요소로 작용하게 된다. 연료전지 작동온도가 높거나 셀 입출구 온도차이가 커 터빈입구온도가 높아 압축기 서지문제 가 발생하는 시스템에서 터빈입구 바이패스 양을 조절함으로써 작동점을 압축기 서지점에서 충분히 멀게 설계할 수 있음을 보였다. 또한 바이패스를 하지 않을 경우에 압축기의 안정적 운전을 위하여 연료전지 온도를 낮추어야 할 가능성이 있었으나, 바이패스를 하게 되면 연료전지 온도를 충분히 높게 설계하는 것도 가능하며, 이 경우 전체 시스템 성능이 더 높다.

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) 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," *Trans. ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 124 pp. 845~849.

(3) 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.

(4) Tucker, D., Lawson, L. and Gemmen, R., 2005, "Evaluation of Hybrid Fuel Cell Turbine System Startup with Compressor Bleed," ASME paper GT2005-68784.

(5) Hildebrandt, A. and Assadi, M., 2005, "Sensitivity Analysis of Transient Compressor Operation Behaviour in SOFC-GT Hybrid System," ASME paper GT2005-68744.

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

(7) Massardo, A. F., Lubelli, F., 2000, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel-Gas Turbine Combined Cycles(IRSOFC-GT) : Part A-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," *ASME J. Eng, Gas Turbine Power*, Vol. 122, pp. 27~35.

(8) 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," *Journal of Power Source*, Vol. 160, pp. 462~473.

(9) 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.

(10) Aspen Technology, HYSYS, ver. 2004. 2.