



용융탄산염연료전지와 터보팽창기를 이용한 천연가스 정압기지의 열역학적 분석

성태홍 · †김경천

부산대학교 기계공학부

(2014년 3월 29일 접수, 2014년 4월 22일 수정, 2014년 4월 22일 채택)

Thermodynamic Analysis on Hybrid Molten Carbonate Fuel Cell - Turbo Expander System for Natural Gas Pressure Regulation

Taehong Sung · †Kyung Chun Kim

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea

(Received March 29, 2014; Revised April 22, 2014; Accepted April 22, 2014)

요 약

일반적인 천연가스 정압기지에서는 압력제어밸브를 이용하여 고압으로 수송되는 천연가스를 감압하여 내보낸다. 이 과정에서 버려지는 폐압에너지는 터보팽창기를 도입하여 추가적인 전력생산이 가능하나 터보팽창기를 통과하는 유체에서는 감압에 의한 Joule Thompson 효과에 의하여 온도가 급격히 떨어져 파이프라인 외부에 동결을 일으키거나 파이프라인 내부에 메탄하이드레이트와 같은 고체 물질이 형성될 위험이 있다. 현재 터보팽창기를 채용한 천연가스 정압기지에서는 냉열발생에 따른 부작용을 방지하기 위하여 터보팽창기의 전단에 보일러를 설치하여 팽창 전 천연가스를 예열하고 있다. 용융탄산염연료전지와 같은 고온 연료전지는 천연가스를 연료로 사용할 수 있고 친환경적인 고온 배출가스를 방출하며 동시에 추가적인 전력을 생산하여 시스템의 효율을 높일 수 있다. 이 논문에서는 천연가스 정압기지에 용융탄산염연료전지와 터보팽창기를 설치하여 얻을 수 있는 열역학적 이득에 대해서 연구하였다. 연료전지를 기저부하로 사용함에 따라서 얻을 수 있는 이익에 대하여 분석하였다.

Abstract - In the natural gas pressure regulation station, high pressure natural gas is decompressing using pressure regulation valves. Waste pressure occurred in the pressure regulation process can be recovered through adopting turbo expanders. However, in the waste pressure recovery process, Joule Thompson effect causes below 0°C and this low temperature freezes outside land of pipeline or generates methane hydrate in the pipeline which can block the pipeline. Therefore, turbo expander systems are accompanying with a boiler for preheating natural gas. Molten carbonate fuel cell (MCFC), one of the high temperature fuel cell, can use natural gas as a direct fuel and is also exhausting low emission gas and generating electricity. In this paper, a thermodynamic analysis on the hybrid MCFC-turbo expander system is conducted. The fuel cell system is analyzed for the base load of the hybrid system.

Key words : pressure regulation, waste pressure, turbo expander, high temperature fuel cell, molten carbonate fuel cell, base load, hybrid system

†Corresponding author: kckim@pusan.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

최근 미국에서는 셰일가스의 생산을 통해 천연가스 기반의 산업이 성장하고 있다. 한국은 한미 FTA를 통해 그동안 천연자원 금수조치로 도입하지 못했던 미국산 셰일가스를 수입하고 있다. 일본도 미국 에너지부와 캐나다의 승인을 얻어 2017년부터 연간 소비량의 30%에 달하는 물량을 수입하기로 하였다. 셰일가스의 가격은 기존의 천연가스 가격과 비교하여 10~20% 저렴하며 전세계적에 막대한량이 매장되어 있다는 점을 감안해 볼 때 앞으로 천연가스가 주요 에너지원으로 떠오를 것을 예측해 볼 수 있다.

현재 천연가스는 액화상태로 운반·보관 뒤 기체 상태로 변화시킨 뒤 배관망을 통해 공급된다. 100 km 이상의 천연가스 수송에는 약 50~100 bar 수준으로 가압을 하여 이루어지는데 현재 가스공사는 약 70 bar 수준으로 가압을 하여 천연가스를 공급하고 있다. 고압의 가스는 다시 도시나 수요처로 보내질 때 25bar 또는 8.5bar 수준으로 감압된다[1]. 현재 천연가스의 감압에는 압력제어밸브를 사용하며 이 과정에서 막대한 양의 압력이 버려지고 있다. 천연가스 공급시스템을 하나의 사이클로 간주하여 보면 액상에서 가압한 뒤 기화시킨 천연가스의 에너지를 버리고 있는 것과 같다 [2].

압력제어밸브를 대신하여 터보팬창기를 설치하면 버려지는 폐압을 활용하여 추가적인 전력을 생산할 수 있다. 동시에 터보팬창기를 사용하면 동일한 압력감소 조건에서 큰 엔탈피 변화에 따라서 큰 온도감소가 발생한다. 압력제어밸브를 사용하는 것과 같은 조건에서 터보팬창기를 설치할 경우에는 터보팬창기 출구 온도가 정압기지의 허용 설계 온도 이하로 떨어져 배관 내부에 메탄하이드레이트와 같은 고체물질이 발생할 위험이 있고 배관 외부에는 냉열을 방출해 파이프라인이 묻혀있는 땅을 얼리는 현상이 발생할 수 있다. 현재 터보팬창기를 채용하고 있는 일부 천연가스 정압기지에서는 터보팬창기의 상부에 보일러를 설치하여 터보팬창기에 유입되는 천연가스를 예열하여 출구의 온도가 설계 허용치 이하로 내려가는 것을 방지하고 있다. 이때 예열에 사용하는 보일러는 천연가스를 직접 연소함에 따라서 연소가스에 NO_x, SO_x 등이 포함되는 문제가 있다.

고온에서 작동하는 연료전지는 보일러와 마찬가지로 고온의 배출가스를 발생시킨다. 연료전지는 전기화학적 반응의 결과로 에너지를 발생시키고 화학물을 생성하기 때문에 보일러에서 문제가 되는 배출가스가 거의 발생하지 않는다. 동시에 600℃ 이상의 온도에서 작동하기 때문에 천연가스가 연료전지 내부

에서 개질을 통해서 연료로 사용가능하다.

용융탄산염연료전지는 Fuel Cell Energy와 같은 기업에서 수백kW 모듈의 상용화에 성공하였으며 철과 같은 싼 촉매를 사용하기 때문에 저온 연료전지와 비교해 대형화에 필요한 경제성을 만족시킬 수 있다. 한편 용융탄산염연료전지는 전해질의 수명이 짧기 때문에 일반적인 작동환경이 요구하는 부하변동에 대응하기가 힘들어 그 용도가 기저부하로 제한된다. 캐나다에서는 연료전지와 터보팬창기를 결합한 시스템의 실증연구를 수행 중에 있다[3].

본 논문에서는 용융탄산염연료전지를 사용하는 터보팬창기 천연가스 정압기지를 열역학적으로 분석하였다. 또 기저부하로 설계된 연료전지의 용량에 따른 열원모듈의 효율 및 이용률을 분석하였다.

II. 용융탄산염연료전지 개요

용융탄산염연료전지는 600-700℃에서 고상의 전해질이 용해되어 액상의 전해질을 통해 탄산이온이 통과하는 연료전지이다. 용융탄산염연료전지는 메탄을 연료로 사용하는 경우 45-50%의 효율을 보여준다[3,4].

2.1. 용융탄산염연료전지의 구조와 동작원리

Fig. 1은 용융탄산염 연료전지의 구조를 나타낸다. 연료전지의 양극에서는 식 (1)과 같이 산소와 이산화탄소가 반응하여 전해질을 통과하는 물질인 탄산이온을 생성한다.

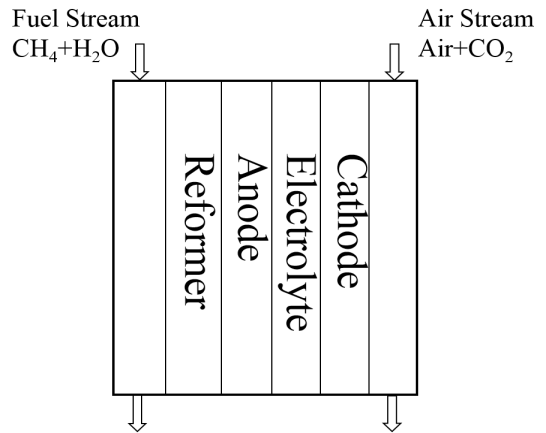
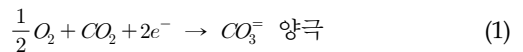
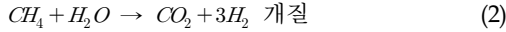
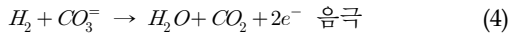


Fig. 1. Schematics of MCFC.

한편 연료전지의 음극에서는 식 (2,3)과 같이 물과 메탄이 고온에서 반응하여 수소와 이산화탄소를 생성하는 개질반응이 일어난다.



전해질을 통과한 탄산이온은 식 (4)와 같이 내부 개질반응에서 생성된 수소이온과 반응하여 물과 이산화탄소를 생성한다.



2.2. 용융탄산염연료전지의 전력생산

연료전지의 출력은 실험식에 따라서 구해낼 수 있다. 하이브리드 시스템의 시뮬레이션에 사용하는 연료전지는 Table 1과 같은 Fuel Cell Energy사의 300kW급 용융탄산염연료전지의 실험결과를 적용하였다[7]. 연료전지의 출력은 식 (5)와 같은 전류 I와 셀전압 V_{cell} 을 곱해 구할 수 있다. 연료전지의 셀전압 V_{cell} 은 개방전위 V_0 에 촉매반응에서 오는 손실 η_{act} , 물질전달 속도의 한계에서 오는 손실 η_{conc} , 전해질의 이온전달속도의 한계에서 오는 손실 iz 의 차로 실험식을 적용하여 유도하였다. 셀의 개방전위는 식 (6)과 같은 양극 음극 생성물에 대한 Nernst 방정식을 통해 유도할 수 있다[4,5,7].

$$V_{cell} = V_0 - \eta_{act} - \eta_{conc} - iz \quad (5)$$

$$V_0 = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2,a} P_{O_2,c}^{0.5}}{P_{H_2O,a}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{CO_2,c}}{P_{CO_2,a}} \quad (6)$$

연료전지의 효율은 깃스자유에너지와 연료의 엔탈피, 이상적인 셀전위와 실제 셀전압의 관계식을

Table 1. MCFC operating condition [6]

Operating Temperature	650	°C
System Pressure	3	bar
Cell Voltage	0.8	V
Current Density	150	mA/cm^2
Power Density	1.2	kW/m^2
Net Thermal Efficiency	48.2	%
Fuel Utilization	80	%
O2 Utilization	30	%
CO2 Utilization	40	%

통해 다음 식 (7)과 같이 구할 수 있다[4,5].

$$\eta_{th,fc} = \frac{\Delta G_{ng,650^\circ C}}{\Delta H_{ng,650^\circ C}} \frac{V_{actual}}{V_{ideal}} \quad (7)$$

연료전지는 단위 셀을 다수 설치하여 목표 출력을 달성할 수 있다. 650°C에서 해당 연료전지는 48.2%의 효율을 나타내며 273kW의 전력을 생산한다. 300kW급 연료전지의 경우 1640kg/hr의 공기($N_2:O_2=0.79:0.21$) 유량을 필요로 한다.

III. 터보팽창기 개요

3.1. 터보팽창기의 구조와 동작원리

터보팽창기는 일반적인 터보기계와 마찬가지로 고압의 유체가 통과하며 발생하는 압력감소를 이용하여 회전에너지를 발생시키는 장치이다. 유체가 터빈 팽창기의 블레이드를 통과하면서 속도와 압력이 변화하면서 블레이드를 회전시킨다. 팽창기를 통과한 유체는 압력이 떨어지는 동시에 온도가 감소한다 [2]. Fig. 2는 동일한 입출구 조건에서 터보팽창기와 압력밸브의 작동특성을 T-s선도 상에 나타낸 것이다. 동일한 압력감소 조건에서 터보 팽창기의 온도 감소 (엔탈피 변화)가 큰 것을 확인할 수 있다. 천연 가스 정압 기지의 압력 제어 범위인 팽창비 3 수준에서 엔탈피 변화의 차이는 압력제어밸브와 비교하여 7~10배에 달한다.

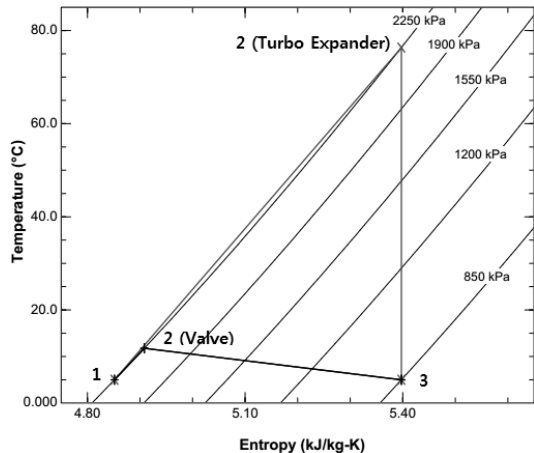


Fig. 2. T-s diagram for comparison between pressure regulation valve and turbo expander (from 2250kPa to 850kPa).

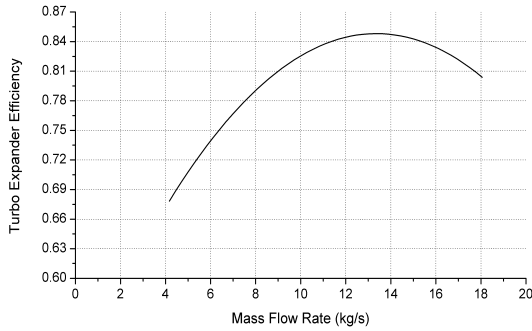


Fig. 3. Turbo expander efficiency curve.

3.2. 터보팽창기의 전력생산

터보팽창기는 정격의 설계에 대해 130%에서 30% 수준에서 전력을 생산할 수 있다[2]. 터보팽창기의 전력생산량은 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$P_{exp} = \dot{m}_{ng} (h_{exp.in} - h_{exp.out}) \eta_{exp} \eta_{gear} \eta_{generator} \quad (8)$$

이때 \dot{m}_{ng} 는 천연가스의 질량 유량, η_{exp} 는 터보팽창기의 효율, η_{gear} 는 기어박스의 효율, $\eta_{generator}$ 는 발전기의 효율을 나타낸다. 터보팽창기의 효율은 일반적인 터보기계의 성능과 천연가스 정압시설의 용량을 고려하여 14kg/s로 설계 하였다. 터보팽창기의 탈설계 유량에 대한 효율은 Fig. 3과 같다[1].

IV. 하이브리드 시스템 구성 및 설계

용융탄산염연료전지와 터보팽창기의 하이브리드 시스템은 Fig. 4와 같이 터보팽창기의 전단에 연료전지와 보일러의 출가스로부터 예열을 획득하는 열교환기를 병렬 설치하여 구성할 수 있다.

고온형 연료전지의 하나인 용융탄산염연료전지는 전해질의 사이클 수명이 낮아 on/off 제어가 요구되는 상황에 적용하기 힘들며 일반적으로 기저부하의 용도로 사용된다. 가스정압기지의 경우 계절에 따라서 변화하는 천연가스 수요에 대응하여 정압기지를 통과하는 유량이 변화하며 동시에 외기온도의 변화에 따라서 정압기지로 공급되는 천연가스의 온도도 변화한다. 용융탄산염연료전지는 정격이외의 작동이 난해한 관계로 연료전지를 채용하는 하이브리드 정압기지의 경우 중래의 터보팽창기를 설치하는 경우와 마찬가지로 천연가스 보일러를 상단부에 병렬 설치하여 기저부하 이상의 천연가스 유량에 대응할 수 있다. 연료전지의 부분부하 대응 한계성에

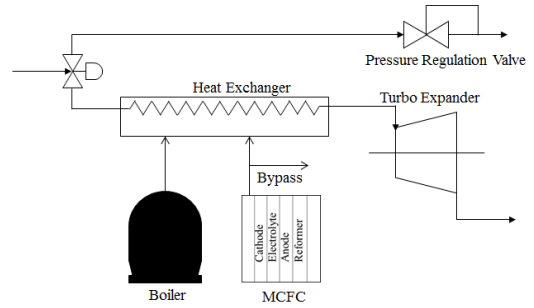


Fig. 4. Schematics for hybrid MCFC-turbo expander system for natural gas regulation station.

서 오는 시스템의 복잡성은 차후 부분부하의 구동이 가능한 고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)의 발달과 함께 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

천연가스 정압기지는 70바 수준의 가스를 25바 수준으로 감압하는 경우, 25바 수준의 가스를 8.5바 수준으로 감압하는 경우, 8.5바 수준의 가스를 다시 2.5바 수준으로 감압하는 경우 등 압력비 3배 내외의 감압이 이루어진다.

터보팽창기를 통과하는 천연가스는 터보팽창기의 효율에 따라서 50~70℃ 수준의 온도감소를 겪게 된다. 정압기지의 온도감소의 양과 목표 온도를 고려해 볼 때 용융탄산염연료전지에서 발생하는 배출가스의 온도는 매우 높다. 천연가스가 저온에서 메탄 하이드레이트를 형성하는 문제와 마찬가지로 천연가스는 고온에서 개질 및 발화 등의 현상을 겪을 수 있다. 터보팽창기의 전력생산은 전후단의 압력비에 연관되어 있기 때문에 설계압력비를 유지해야 하는 천연가스정압기지에서 천연가스의 온도를 설계온도 이상 올리더라도 성능향상을 기대할 수는 없다.

4.1. 터보팽창기 설계

Fig. 2.에서 나타난 것과 같이 압력이 2250kPa에서 850kPa로 떨어지는 경우에 대해서 터보팽창기의 성능을 평가하였다. 입구온도로 설정한 65℃는 설계 효율인 85%효율에서 출구 온도 5℃를 얻을 수 있는 온도이다. 터보팽창기의 출구 온도는 유량변화에 대해서 변화하는 팽창기효율의 결과로 Fig. 5.와 같이 유량의 증감에 따라서 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6.은 천연가스 유량변동에 따른 터보팽창기의 출력으로 팽창기효율에 따른 변동을 나타내고 있다. Fig. 7.은 천연가스 유량변동에 따른 예열요구량으로 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

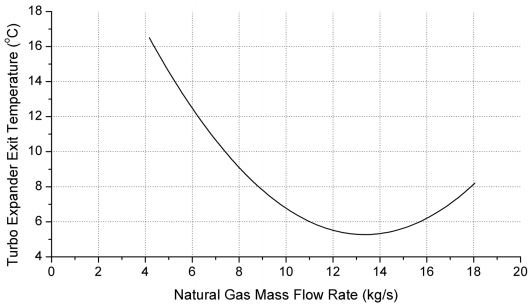


Fig. 5. Turbo expander exit temperature corresponding to mass flow rate.

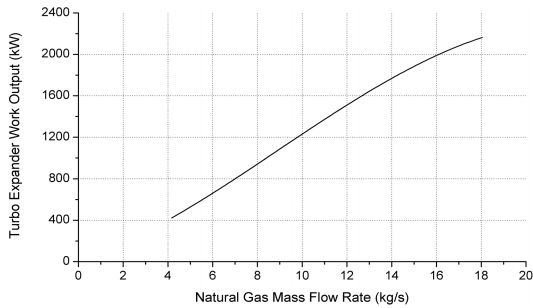


Fig. 6. Turbo expander work output corresponding to mass flow rate.

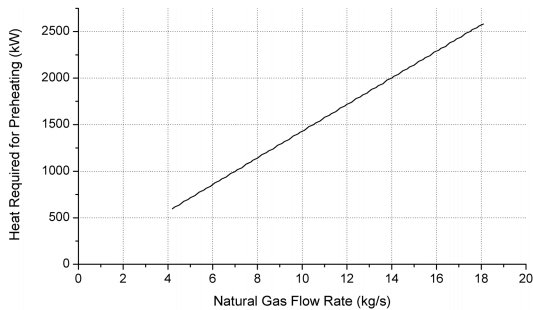


Fig. 7. Natural gas preheating required corresponding to mass flow rate.

4.2. 연료전지 설계

연료전지의 출력은 300kW 출력의 스택을 설계 출력만큼 설치하여 달성할 수 있다. 스택 수 변화에 따른 출력은 Fig. 8과 같이 선형적으로 증가한다고 가정하였다.

연료전지에서 발생하는 폐열의 온도는 높기 때문에

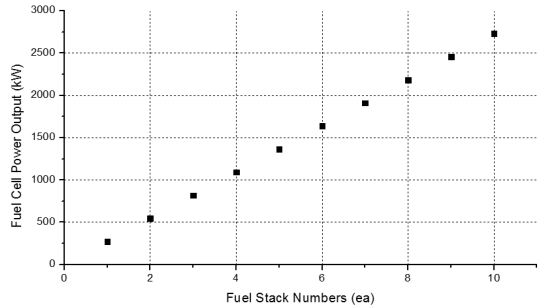


Fig. 8. Fuel cell (MCFC) power output corresponding to stack numbers.

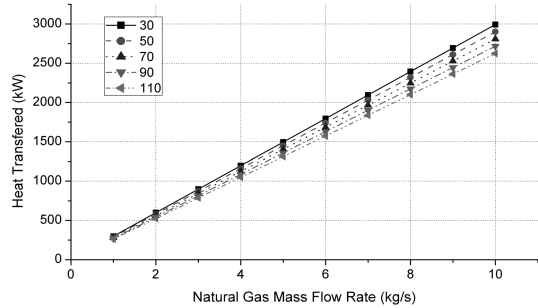


Fig. 9. Fuel cell (MCFC) heat output corresponding to stack numbers and heat exchanger exit temperature.

폐열을 모두 활용하는 연료전지를 설계한다면 그 크기가 커지게 된다. 열교환기의 출구온도 설계에 따른 열교환량은 Fig. 9와 같다. 연료전지 출구 온도를 높게 설정할수록 열교환량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하이브리드 시스템은 폐열의 대부분을 활용하는 경우인 열교환기 온도 50°C에 대해서 설계를 진행하였다.

4.3. 연료전지 용량변화에 따른 기저부하 분석

천연가스 정압기지를 통과하는 유량은 지역별로 그 패턴이 상이하다. 용융탄산염연료전지의 전해질인 알칼리 탄산염(Alkali Carbonate)은 쉽게 부식되는 특성이 있어 설계운용범위 밖에서 작동하기가 어렵다. 유량이 설계치를 넘어가는 경우에는 추가적으로 필요한 열량만큼 보일러를 작동하여 터보팽창기 후단의 과냉을 예방할 수 있다. 한편 유량이 설계치에 못 미치는 경우에는 연료전지의 폐열의 일부를 바이패스를 통해 배출할 필요가 있다. 연료전지의 온도가 매우 높기 때문에 열교환기를 통과한 천연가

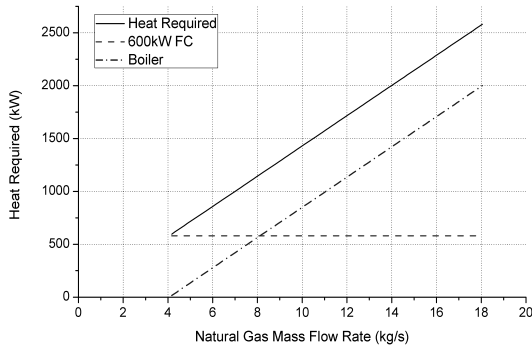


Fig. 10. Heat produced from fuel cell and boiler, base load design.

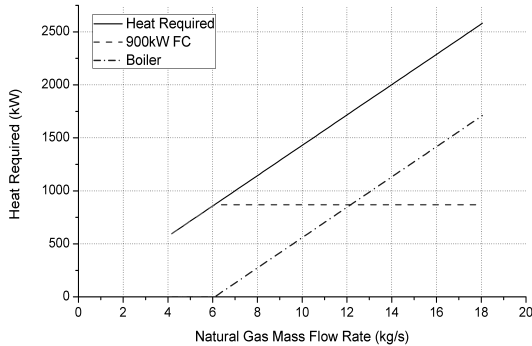


Fig. 11. Heat produced from fuel cell and boiler, bypass design.

스의 온도를 일정수준 이상으로 상승시켜 터보팬창기 등의 허용온도 이상으로 상승할 위험이 있기 때문이다.

천연가스 정압기지의 유량 패턴에 따라서 연료전지의 용량은 Fig. 10.과 같이 기저부하의 용도로 설계하거나 Fig. 11.과 같이 기저부하 이상의 용량으로 설계할 수 있다. 기저부하의 용도로 설계한 경우에는 유량증가에 따라서 증가하는 예열요구량을 보일러가 대체할 수 있는 것을 보여준다.

기저부하 이상으로 용량을 설계하는 경우에는 용융탄산염연료전지가 단순 on/off 제어가 힘들기 때문에 설계유량보다 낮은 유량의 경우 Fig. 4.에 나타난 것과 같은 바이패스를 설치해 과도한 열량 공급에 따라서 천연가스가 일정온도 이상 가열되는 것을 대비할 필요가 있다.

Fig. 12.는 연료전지의 용량과 천연가스 유량에 따라서 바이패스되는 열량을 나타낸다. 연료전지가 커질수록 저유량 범위에서 바이패스 되는 열이 커지

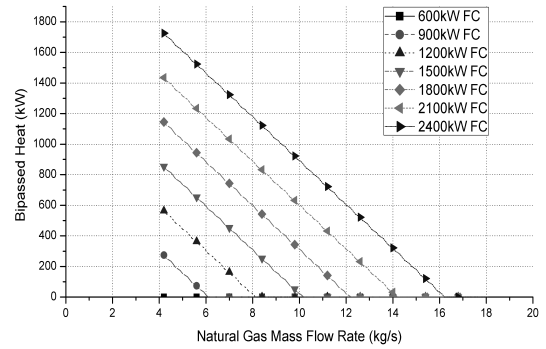


Fig. 12. Bypassed heat corresponding to stack numbers and natural gas mass flow rate.

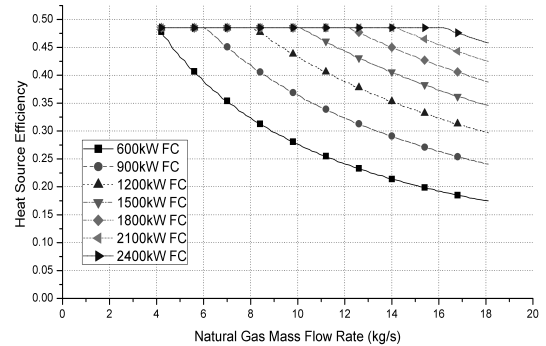


Fig. 13. Heat source thermal efficiency corresponding to stack numbers and natural gas mass flow rate.

는 것을 확인할 수 있다.

연료전지와 보일러를 포함한 열원의 전력변환 효율은 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_{th,h} = \frac{W_{FC}}{(Q_{FC} + W_{FC}) + Q_{Boiler}} \quad (9)$$

Fig. 13.은 유량과 연료전지의 용량에 따른 열원의 전력변환 효율을 나타낸다.

연료전지와 보일러를 포함하는 열원에서 발생하는 열이 천연가스의 가열에 이용되는 비율은 식 (10)을 통해서 계산할 수 있다.

$$\eta_{reuse} = \frac{Q_{HEX}}{Q_{FC} + W_{FC} + Q_{Boiler}} \quad (10)$$

Fig. 14.는 유량과 연료전지의 용량에 따른 열원의

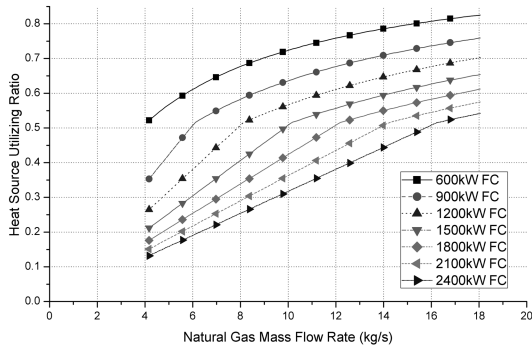


Fig. 14. Heat source utilizing ratio corresponding to stack numbers and natural gas mass flow rate.

천연가스 예열량 비율을 나타낸다. 보일러에서 발생하는 열이 증가할수록 연료전지에서 발생하는 전력과 비교해 열량 이용률이 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

V. 결론

천연가스 정압기지에서 발생하는 폐열을 활용하기 위해 터보팽창기와 용융탄산염연료전지를 결합한 하이브리드 시스템을 제시하였다.

천연가스 정압기지에서 터보팽창기를 이용하여 전력을 생산하기 위해서는 생산되는 전력과 비슷한 예열이 필요하다. 650°C 수준의 고온에서 동작하는 용융탄산염연료전지의 폐열을 활용하여 천연가스 예열이 가능하다.

부분부하 구동이 어려운 용융탄산염연료전지는 설계유량보다 낮은 유량이 공급될 때에는 바이패스를 이용하여 천연가스의 과열을 방지할 수 있다. 연료전지의 크기에 따라서 탈철계 유량에서 발생하는 바이패스 열량과 추가적인 보일러 구동에 따른 열역학적 특성을 보였다.

향후 용융탄산염연료전지의 제한적인 구동조건을 보완하기 위해 축열매체를 추가하여 짧은 주기의 천연가스 유량 변동에 대응하는 연구와 천연가스의

팽창과정에서 발생하는 냉열자체를 활용하는 연구를 통해 제안된 하이브리드 시스템의 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0030013)과 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20112010100030).

REFERENCES

- [1] J.M. Ha et al, "Turbo Expander Power Generation Using Pressure Drop in Natural Gas Pipeline", KIGAS, Vol.16, No.3, pp.1~7, (2012)
- [2] J.M. Ha et al, "Thermodynamic analysis on the feasibility of turbo expander power generation using natural gas waste pressure", KIGAS, Vol.6, No.6, pp136~142, (2012)
- [3] Clifford R. Howard, "Hybrid Turbo Expander and Fuel Cell System for Power Recovery at Natural Gas Pressure Reduction Stations", (2009)
- [4] M.D. Lukas et al, "An explicit dynamic model for direct reforming carbonate fuel cell stack", IEEE T. Energy Convert, Vol.16, No.3, pp.289-295, (2001)
- [5] J. Larminie A. Dicks, "Fuel Cell System Explained", John Willey & Sons, Ltd.
- [6] J.H. Hirschenhofer et al. "Fuel Cell Handbook 4th Edition", FTEC
- [7] Fuel Cell Engineering Corporation, "Santa Clara 2-MW fuel cell demonstration power plant test report", prepared for EPRI, TR-108252, USA, (1997)
- [8] T.L. Wolf et al, "Molten carbonate fuel cell performance model", J. Electrochem. Soc., Vol.130, No.1, pp48~55, (1983)