

초임계 이산화탄소 사이클을 이용한 연료 재순환 MCFC의 폐열회수

이재윤*, 안지호*, 김동섭**†

*인하대학교 대학원, **인하대학교 기계공학부

Waste heat recovery of recirculated MCFC using supercritical carbon dioxide power cycle

Jae Yoon Lee*, Ji Ho Ahn*, Tong Seop Kim**†

*Graduate School, Inha University,

**Department of Mechanical Engineering, Inha University

ABSTRACT : The molten carbonate fuel cell has a high temperature of waste heat and can constitute a bottoming cycle to increase the efficiency. Previous study used a bottoming cycle as steam turbine cycle. In this study, we are going to replace the bottoming cycle with a supercritical carbon dioxide power cycle. The system power was compared to consider replacing the bottoming cycle. As a result, the power of the supercritical carbon dioxide power cycle at the present development stage is lower than that of the steam turbine cycle, but theoretically, the power can be larger than the steam turbine cycle. If the supercritical carbon dioxide power cycle improves the isentropic efficiency of the turbine by 89%, the isentropic efficiency of the compressor by 83%, and the effectiveness of the recuperator by 0.9, the power can be same to the steam turbine cycle.

초 록 : 용융탄산염 연료전지는 폐열의 온도가 높아 하부 사이클을 구성하여 효율을 높일 수 있다. 이러한 목적으로 연료를 재순환하는 용융탄산염 연료전지에 하부 사이클로 증기 터빈 사이클을 적용한 선행 연구가 있었다. 본 연구는 하부 사이클을 증기 터빈 사이클에서 초임계 이산화탄소 사이클로 대체하는 것을 고려하였다. 그리고 출력을 비교하여 하부 사이클을 대체하는 것에 대한 검토를 하였다. 그 결과 현재 개발 단계의 초임계 이산화탄소 사이클의 출력은 증기 터빈 사이클보다 낮지만, 이론적으로 증기 터빈 사이클보다 출력이 더 커질 수 있음을 확인하였다. 만약 초임계 이산화탄소 사이클이 터빈의 등엔트로피 효율을 89%, 압축기의 등엔트로피 효율을 83%, 복열기의 유용도를 0.9의 수준으로 향상 시킨다면 증기 터빈 사이클과 동등한 출력을 낼 수 있다.

Key words : Molten Carbonate Fuel Cell(용융탄산염 연료전지), Supercritical Carbondioxide Power Cycle (초임계 이산화탄소 사이클), Steam Turbine Cycle (증기 터빈 사이클), Bottoming Cycle (하부 사이클)

- 기호설명 -

EC : 절탄기

EV : 증발기

HT : 고압 터빈

HRSG : 배열 회수 보일러

LT : 저압 터빈

MCFC : 용융탄산염 연료전지

sCO₂ : 초임계 이산화탄소 사이클

ST : 증기 터빈 사이클

SH : 과열기

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr

1. 서론

용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell; MCFC)는 폐열의 온도가 높으므로 하부 사이클과 결합하여 더욱 높은 시스템 효율 및 출력을 얻을 수 있다. 기존의 MCFC의 폐열은 350°C 전후로 이에 적합한 하부 사이클인 유기 랭킨 사이클을 결합하려는 연구(1)가 있었다.

안지호 등(2)은 MCFC의 발전 과정에서 생성되는 물과 미반응 연료를 재순환하여 기존의 MCFC 보다 효율이 높은 시스템을 제시하였다. 해당 연구에서는 폐열로 물을 예열하는 과정이 없기 때문에 폐열의 온도는 기존보다 높은 593°C를 형성한다. 또한, 폐열의 온도가 높으므로 유기 랭킨 사이클이 아닌 증기 터빈 사이클(Steam Turbine Cycle; ST)을 적용하여 회수하여 시스템의 효율을 더욱 향상시켰다.

본 연구는 안지호 등이 제시한 연료 재순환 MCFC 복합 시스템의 하부 사이클을 초임계 이산화탄소 사이클(Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle; sCO₂)로 대체하고자 한다.

sCO₂는 작동 유체가 초임계 상태이므로 작은 압력비에도 높은 출력을 기대 할 수 있다. 또한, 사이클 내에서 초임계 압력 이상의 고압을 유지하여 작동 유체의 부피가 작아지므로 ST보다 하부 시스템의 크기를 줄일 수 있다.

본 연구는 연료를 재순환하는 MCFC 시스템의 폐열을 sCO₂로 회수하는 시스템을 제시 하였다. 그리고 기존의 ST로 작동하는 시스템과 출력을 비교하여 sCO₂의 적용을 검토하고자 한다.

2. 시스템 설명

본 연구의 시스템 구성 및 해석에 사용된 프로그램은 Aspen사의 HYSYS 7.3(3)이며, 초임계 이산화탄소 사이클은 NIST의 REFPROP(4)의 물성을 이용하여 계산하였다.

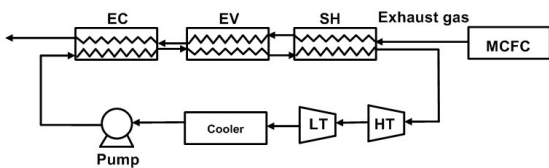


Fig. 1 MCFC Waste heat recovery by Steam Turbine

Table 1 MCFC and ST Design Parameters

	Parameters	Value
MCFC	Fuel supply [kg/.s]	0.033
	Current density [A/m ²]	1393.9
	Cell voltage [V]	0.7512
	Fuel cell power [kW]	1015.7
	Efficiency [%]	62.2
	Exhaust gas temperature [°C]	593.4
ST	Flow rate [kg/s]	0.203
	HT inlet temperature [°C]	482.2
	HT inlet pressure [kPa]	980.7
	Pinch temperature difference [°C]	10.0
	Pump isentropic efficiency	0.80
	LT&HT isentropic efficiency	0.64
	Bottoming Cycle Power [kW]	133.0

2.1 MCFC 및 ST

MCFC의 폐열을 ST로 회수하는 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 폐열을 회수하는 과정에서 물의 상 변화가 일어나기 때문에 HRSG 형태로 설계하였다. HRSG로 생성된 증기로 터빈에서 추가적인 출력을 생산한다.

안지호 등(2)이 제시한 연료 재순환 MCFC과 폐열 회수 ST의 하이브리드 시스템의 작동 조건을 Table 1에 정리하였다

2.2 sCO₂ 모델링

MCFC의 폐열을 sCO₂로 회수하는 시스템의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. sCO₂는 폐열 회수 과정에서 작동유

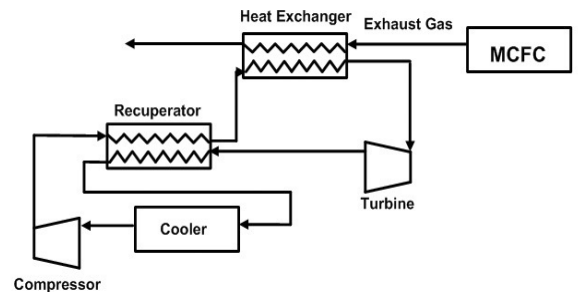


Fig. 2 MCFC Waste heat recovery by sCO₂ Cycle

Table 2 sCO₂ Design Parameters

Parameters	Case-(A)	Case-(B)
Pump Inlet Temperature [°C]	32	32
Pressure Ratio [-]	3.3	1.8
Recuperator effectiveness [-]	0.95	0.89
Compressor isentropic efficiency [-]	0.88	0.65
Turbine isentropic efficiency [-]		0.92

체의 상 변화가 없기 때문에 하나의 열 교환기로 폐열 회수를 하였다. sCO₂는 터빈의 팽창비가 낮아 터빈 출구 온도가 높다. 터빈 출구 유체의 에너지를 활용하기 위하여, 터빈 출구 유체를 복열기를 사용하여 압축기 출구 유체와 열 교환하는 재생 사이클로 설계하였다. sCO₂의 각 구성부(터빈, 압축기, 복열기)의 성능을 두 가지 자료에서 인용하였다. 이론적으로 설계한 sCO₂의 각 구성부의 성능을 인용⁽⁵⁾한 시스템을 Case-(A)로 칭하였다. 그리고 실제로 제작된 sCO₂에서 각 구성부의 성능을 인용⁽⁶⁾한 시스템을 Case-(B)로 칭하였다. 각 시스템의 주요 설계 변수를 Table 2에 정리하였다.

3. 결과

sCO₂의 사이클 성능을 Table 3에 정리하였다. 실제로 제작된 구성부의 성능을 사용한 sCO₂인 (B)의 경우 ST보다 66.3kW 낮은 출력을 보인다. 하지만 이론적인 유체기계 및 복열기의 성능을 제시한 (A)의 경우엔 ST보다 23.4kW 높은 출력을 나타내는 것을 볼 수 있다. 두 결과를 근거로 현재 제작된 sCO₂의 출력은 ST보다 낮지만, 구성부의 성능을 향상시키면 ST보다 높은 출력을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다. sCO₂의 터빈의 등엔트로피 효율은 89%, 압축기의 등엔트로피 효율을 83%, 복열기의 유용도 0.90으로 설정 할 경우 ST과 동등한 출력을 생산한다.

4. 결론

본 연구는 연료를 재순환하는 MCFC 시스템의 폐열을 회수하는 방안으로 sCO₂를 적용하고, 기존에 널리 쓰인

Table 3 Comparison of sCO₂ Performance by Cases

Parameters	Case-(A)	Case-(B)
Working fluid mass flow [kg/s]	1.85	1.85
Turbine inlet temperature [°C]	416.6	453.1
Turbine power [kW]	229.2	106.1
Compressor power consumption [kW]	72.8	39.36

ST과 출력을 비교하였다. 현존하는 sCO₂의 경우엔 ST에 비해 66.3kW 낮은 출력을 보인다. 하지만 이론적인 모델링에서 제시된 수준으로 각 구성부의 성능이 향상 될 경우 ST보다도 높은 출력을 얻을 수 있다. 현재 sCO₂는 개발 초기 단계이므로 성능 향상에 대한 기대를 할 수 있다. ST의 성능 또한 향상 될 여지가 있다. 하지만 기술이 성숙기에 접어든 ST의 경우 현재보다 성능을 증가시키는 것은 어려우므로 두 사이클간의 성능 차이는 점차 줄어들 것으로 예상된다. 재생을 고려한 sCO₂에서 터빈의 등엔트로피 효율을 89%, 압축기의 등엔트로피 효율을 83%, 복열기의 유용도를 0.90의 수준으로 향상 시킨다면 현재의 ST과 동등한 수준의 출력을 얻을 수 있다. 만약 두 사이클이 동등한 출력을 생산한다면 sCO₂는 기존의 ST에 비해 설치 면적을 적게 차지하므로 하부 사이클로서 큰 경쟁력을 갖출 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201500)

참고문헌

- (1) Mamaghani, A. H., Najafi, B., Shirazi, A., Rinaldi, F., 2015, "4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (molten carbonate fuel cell) and ORC (organic Rankine cycle) system," Energy, Vol.

- 82, pp. 650~663.
- (2) Ahn, J. H., Jeong, J. H., Kim, T. S., 2018, "Performance Evaluation of a Molten Carbonate Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid System With Oxy-Combustion Carbon Capture, " Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2018-76014
- (3) VERSION, ASTen HYSYS. 7.3, 2011, ASTen Technology. Inc., Burlington, MA.
- (4) Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O., 2013, REFPROP 9.1., NIST Standard Reference Database, 23.
- (5) Ahn, Y., Bae, S. J., Kim, M., Cho, S. K., Baik, S., Lee, J. I., Cha, J. E., 2015, "Review of supercritical CO2 power cycle technology and current status of research and development, " Nuclear Engineering and Technology, Vol. 47(6), pp. 647-661.
- (6) Cho, J., Shin, H., Ra, H. S., Lee, G., Roh, C., Lee, B., Baik, Y. J., 2016, "Research on the development of a small-scale supercritical carbon dioxide power cycle experimental test loop, " In The 5th Supercritical CO2 Power Cycle Symposium. TX: San Antonio.