

산소분리기술을 사용한 연료전지/순산소연소 발전시스템 해석

*박 성구¹⁾, **김 동섭²⁾, 손 정락³⁾, 이 영덕⁴⁾

Analysis of Solid Oxide Fuel Cell/Oxy-fuel Combustion Power Generation System Using Oxygen Separation Technology

*Sung Ku Park, **Tong Seop Kim, Jeong Lak Sohn, Young Duk Lee

Key words : Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), oxy-fuel system(순산소연소 시스템), Power generation system(발전 시스템), Ion Transfer Membrane(이온분리막), CO₂ separation(이산화탄소 분리)

Abstract : This study aims to devise and analyze a power generation system combining the solid oxide fuel cell and oxy-fuel combustion technology. The fuel cell operates at an elevated pressure, constituting a SOFC/gas turbine hybrid system. Oxygen is extracted from the high pressure cathode exit gas using ion transport membrane technology and supplied to the oxy-fuel power system. The entire system generates much more power than the fuel cell only system due to increased fuel cell voltage and power addition from oxy-fuel system. More than one third of the power comes out of the oxy-fuel system. The system efficiency is also higher than that of the fuel cell only system. Recovering most of the generated carbon dioxide is major advantage of the system.

Nomenclature

E	: voltage Potential
I	: current
LHV	: lower Heating Value
\dot{m}	: mass flow rate
V	: voltage
\dot{W}	: power
η	: efficiency

subscript

ac	: alternating Current
aux	: auxiliary
exp	: expander
FC	: fuel Cell
GT	: gas Turbine
N	: nernst
P	: polarization
R	: resistance
ST	: steam Turbine

1. 서 론

순산소 연소 사이클은 Rankine 사이클을 기반으로 산화제로 공기대신 산소를 사용하는 시스템으로 응축기에서의 응축과정을 통해 고농도의 CO₂를 회수하기에 용이하고 연료량이 저감되어 기후 변화협약 및 화석에너지 자원고갈에 대처할 수 있다는 장점이 있다. 현재 이러한 순산소 사이클을 이용한 동력시스템은 여러 국가에서 많은 연구가 진행 중이다.^(1,2) 연료전지 또한 고효율이며 환경 친화적인 발전설비로 각광 받으며 미국의 주도로 많은 연구의 대상이 되고 있을 뿐 아니라 실용화를 위한 노력도 진행 중에 있다.⁽³⁾ 연료전지는 stack 반응만으로 보았을 경우 청정한 시스템

-
- 1) 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : sku@inhaian.net
Tel : (032)876-7308 Fax : (032)860-1718
 - 2) 인하대학교 기계공학과
E-mail : kts@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7308 Fax : (032)860-1718
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : jlsohn@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7434 Fax : (02)889-6205
 - 4) 한국기계연구원
E-mail : ydlee@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7945 Fax : (042)868-7284

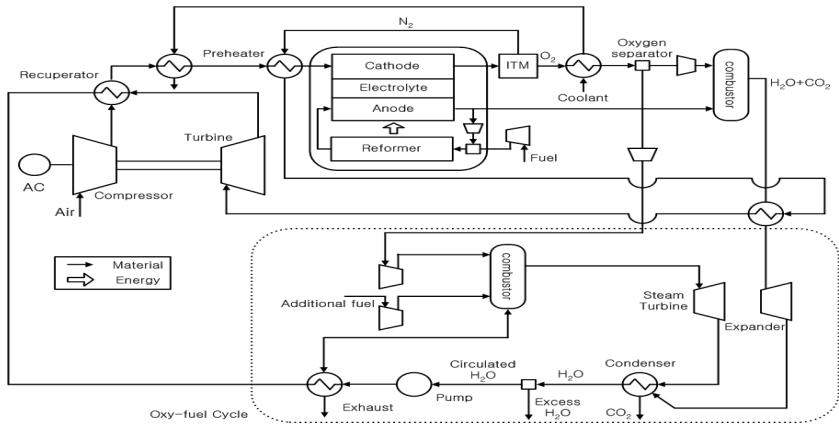


Fig. 1 System configuration of the pressurized hybrid system

이지만 개질반응과 후연소과정에서 CO_2 가 발생하게 된다. 하지만 연료전지의 후연소기에서 순산소연소를 고려할 경우 순산소 연소 사이클과 마찬가지로 응축과정을 통해 H_2O 와 CO_2 로 구성된 후연소기 배출가스에서 CO_2 를 분리해 낼 수 있고⁽⁴⁾, 이러한 시스템의 연구 역시 진행되고 있다.⁽⁵⁾

하지만 순산소연소를 고려한 시스템들의 경우 산화제로 순수산소를 사용함으로 인해 터빈입구 온도가 급격히 상승하고, 순수산소를 생산하는데 필요한 에너지로 인한 효율저하가 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 그 결과, 기존의 cryogenic 방식뿐 아니라 경제적인 경쟁력이 있는 ITM을 사용하여 공기로부터 순수 산소를 분리해 내는 기술이 연구되고 있으며^(6,7) 특히 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)분야에서 활발한 연구가 진행중이다.⁽⁸⁾

ITM은 공기 내 구성요소들의 분압을 이용하여 순수산소를 분리하는 장치로 고온/고압의 작동조건을 요구하며^(6,7), 이러한 작동조건을 유지하기 위해 필요한 에너지는 순산소 연소 시스템의 효율 감소를 유발하게 된다. 하지만 고온형 연료전지가 가압상태로 작동하게 될 경우 고온/고압의 공기를 공기극 출구로부터 ITM으로 직접 공급할 수 있어 추가적인 에너지의 공급없이 순수 산소를 분리해 낼 수 있다. 물론 연료전지 공기극 출구가스는 연료전지 미반응 연료에 비해 상대적으로 많은 양의 산소를 포함하고 있기 때문에 분리된 산소를 모두 연료전지 후연소기에 공급하게 되면 후연소기 출구가스에는 H_2O 와 CO_2 외에 잉여 산소가 존재하게 되어 응축과정으로 CO_2 를 분리하기가 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 가스터빈 출구가스의 열회수를 통해 순산소 연소 시스템으로 공급되는 연료량을 감소시키고, ITM을 사용하여 연료전지 공기극 출구 가스로부터 순수 산소를 분리하여 연료전지 후연소기와 순산소 연소 시스템으로 공급한 후 응축과정을 통해 CO₂를 분리하는 것을 고려한 발전시스템을 모사하고 성능을 해석 하는 것을 목적으로 한다.

2. 시스템 구성 및 해석방법

2.1 시스템 구성

Fig.1에 시스템의 구성도를 나타내었다. ITM과

순산소 연소 시스템을 제외하면 연료전지 출구까지의 구성은 기존의 가압형 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템⁽⁹⁾과 동일하다. 고온/고압의 연료 전지 공기극 출구의 공기는 ITM으로 공급되어 순수산소가 분리되고 분리된 순수산소는 cooling 과정을 거쳐 연료전지 미반응연소에 필요한 만큼은 후연소기로 나머지 산소는 순산소 연소 시스템으로 공급된다. 산소가 분리된 공기는 셀 입구 공기 및 후연소기 출구가스와 두 번의 열교환 후 가스터빈으로 공급되어 팽창하고 가스터빈 재생기(recuperator)와 순산소 연소 시스템에서 순환되는 물과 열교환 후 방출된다. 순산소 연소 시스템으로 공급된 산소와 추가적으로 공급된 연료는 연소기에서 반응하고 스팀터빈으로 공급되어 팽창하고 응축기로 공급된다. 연료전지 후연소기 출구 가스 역시 산소가 분리된 가스와 열교환후 팽창기(expander)에서 팽창하고 응축기로 공급된다. 응축기에서는 공급된 가스(H_2O+CO_2)의 응축과정을 통해 응축된 물과 이산화탄소를 분리하여 방출한다. 응축기로부터 방출된 물중 순환되는 유량을 제외한 잉여유량은 외부로 방출된다.

2.2 해석방법

시스템을 구성하는 각각의 구성요소는 하나의 검사체적으로 가정하여 모델링하였으며, 시스템 설계에 사용된 주요 파라미터들은 Table 1에 나타내었다.

대기조건은 15°C, 1atm으로 가정하였으며, 연료는 메탄(CH₄)을 사용하였고 연료가 개질되는 반응과 연료이용률(U_f), SCR(Steam Carbon Ratio) 그리고 개질반응 및 셀 반응은 기존의 가압형 하이브리드 시스템과 동일하게 정의하였다.⁽⁹⁾

연료전지의 주요 설계변수는 연료전지의 작동온도/압력과 셀 입출구 온도차이이며 셀 입출구 온도차이는 공기극 입구온도와 셀 작동온도(공기극 출구온도)의 차이로 정의하였다. Nernst전압(E_N)에서 전압손실과 내부저항(E_R)을 차감하여 계산되는 전압⁽¹⁰⁾과 공급되는 연료량에 따라 계산되는 전류(I)로부터 연료전지의 교류출력은 다음과 같이 계산된다.

$$V = E_N - E_P - E_R \quad (1)$$

$$\dot{W}_{\text{FC,ac}} = (V \bullet I) \eta_{\text{conv}} \quad (2)$$

가스터빈의 출력은 기계적 효율과 발전효율을 고

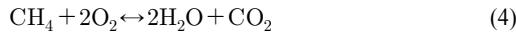
Table 1 Design parameters

Fuel Cell	
Fuel Cell temperature	900°C
temperature difference	200°C
U_f / SCR	0.7 / 3.0
Cell Voltage	0.7574V
Current density	400mA/cm ²
Gas Turbine	
Pressure ratio	8.5
recuperator effectiveness	0.75
Oxy-fuel combustion system	
Turbine inlet temperature	600°C
Pump pressure	8.3bar
Condensing pressure	0.08bar
Pinch temperature in condenser	7°C
Ion Transfer Membrane	
Operating temperature	900°C
Operating Pressure	7.9bar
etc	
Fuel LHV	50030kJ/kg
Pressure drop	0.5~3.5%
Gas/Steam Turbine efficiency	0.85 / 0.90
Compressor/Pump efficiency	0.83 / 0.75
Inverter/Generator efficiecy	0.93 / 0.93

려하여 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{GT,ac} = (\dot{W}_T \cdot \eta_m - \dot{W}_C) \eta_{gen} \quad (3)$$

각각의 연소기에서의 반응은 아래와 같고, 연료 전지 후연소기에서는 3가지 반응이 모두 일어나며 순산소 연소 시스템의 연소기에서는 식(4)의 반응이 일어나게 된다.



스팀터빈, 팽창기 및 보조출력을 고려한 총 시스템의 총 출력과 효율은 아래와 같이 계산되며, 해석은 상용프로그램⁽¹¹⁾으로 수행하였다.

$$\dot{W}_{total} = (\dot{W}_{FC} + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} + \dot{W}_{exp}) - \dot{W}_{aux} \quad (7)$$

$$\eta_{total} = \frac{\dot{W}_{HS}}{(\dot{m}_{FC} + \dot{m}_{add})_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4}} \quad (8)$$

Table 2 Design performance of oxy-fuel cycle

	supply pure O ₂	using ITM
TIT	600°C	600°C
Fuel mass flow	0.0305kg/s	0.0376kg/s
Circulation water	0.4428kg/s	0.4428kg/s
Excess water	0.0676kg/s	0.0676kg/s
ST power	661.42kW	661.42kW
Expander power	-	143.04kW
Compressor power	141.88kW	295.36kW
Pump power	5.448kW	5.448kW
Total power	514.1kW	503.7kW
System efficiency	33.76%	26.79%

3. 해석결과

순산소 연소 시스템만을 고려하여(Fig. 1의 점선 부분) 이러한 순산소 연소 시스템에서 산소분리가 시스템 성능에 미치는 영향을 해석하기 위해 순수 산소를 직접 공급한 시스템과 ITM을 사용한 시스템을 해석하여 Table 2에 나타내었다. ITM을 사용하여 순수 산소를 공급할 경우 ITM의 작동압력을 맞춰주기 위해 추가적인 동력이 필요하게 되지만 공기에서 산소를 분리하고 남은 고온/고압의 가스를 팽창기를 통해 팽창시켜 추가적인 동력을 얻을 수 있기 때문에 순환되는 물의 유량이 동일한 조건에서는 출력이 크게 감소하지 않는다. 하지만 ITM의 작동온도를 맞춰주기 위해서 추가적인 연료의 공급과 연소를 통한 열교환 과정이 필요하게 되고 이러한 연소과정 중에 CO₂가 발생하게 되며 시스템효율은 감소하게 된다. 결국 ITM을 사용하는 시스템은 순수 산소를 직접 공급하는 시스템에 비해 상대적으로 약 20.65% 감소된 효율을 나타내게 된다.

연료전지가 단독으로 작동할 경우의 해석 결과를 Table 3에 나타내었다. 가압상태의 연료전지가 단독으로 작동하게 되면 고온, 고압의 연료전지 출구 가스가 그대로 배출되게 되어 효율측면에서 좋지 않기 때문에 가스터빈과의 결합을 통한 하이브리드 시스템으로 구성하는 것이 좋다. 따라서 연료전지가 단독으로 작동할 경우는 상압 상태로 작동하는 것이 일반적이며 이럴 경우 공기극 출구 온도는 충분히 높지만 압력이 낮아 ITM이 작동하기에 충분한 조건을 갖추지 못하게 되고, 결국 ITM을 사용하려면 공기극 출구 공기의 압축이 필요하게 된다. 하지만 고온의 공기를 압축하는 것은 저온의 공기를 압축하는 것보다 더 많은 동력을 필요로 함은 물론 압축기 토출 온도가 너무 높아질 위험이 있다. 또한, 후연소기에서 순산소 연소를 하지 못하기 때문에 응축과정을 통한 CO₂의 분리도 어렵다.

Table 4에는 연료전지/순산소 연소 발전시스템의 해석결과를 나타내었다. ITM을 사용하기 위해 연료전지를 가압상태로 작동시키려면 압축기가 필요하게 되고 압축기의 소요동력은 산소가 분리된 고온, 고압의 가스가 가스터빈에서 팽창하며 생산된 전력으로 공급해주게 된다. 이러한 발전시스템은 연료전지가 단독으로 작동하는 시스템에 비해 상대적으로 약 9.73% 효율 상승을 나타낸다. 물론 이것을 순산소 연소 시스템과의 하이브리드 효과라고 보기是很 어렵다. 왜냐하면 하이브리드 시스템에서의 연료전지는 가압상태로 작동하기 때문에 작동압력이 높아 연료전지가 단독으로 작동하는 시스템에 비해 전압이 높기 때문이다. Table 4에 나타난 결과와 같이 연료전지/순산소 연소 발전시스템에서 연료전지의 전압은 연료전지가 단독으로 작동하는 시스템에 비해

Table 3 Design performance of fuel cell

FCT	900°C
Air mass flow	1.0kg/s
Fuel mass flow	0.0238kg/s
Voltage	0.6923
compressor power	23.71kW
blower power	5.52kW
Fuel Cell power	636.9kW
System Efficiency	50.87%

Table 4 Design performance of the hybrid system

	Fuel Cell		Gas Turbine
Air mass flow	1.0kg/s	Turbine power	399.8kW
fuel mass flow	0.03183kg/s	compressor power	293.1kW
Fuel Cell power	938.2kW	GT power	84.37kW
Aux power	26.75kW		Expander
	Oxy fuel	expander power	116.43kW
Circulation water	0.4428		Overall System
fuel mass flow	0.02633kg/s	Total fuel mass flow	0.05816kg/s
ST power	643.65kW	Total power	1624.4kW
Aux power	131.50kW	System efficiency	55.82%

상대적으로 약 9.4% 높다. 즉, 연료전지/순산소 연소 발전시스템의 효율이 높게 나타나는 것은 연료전지 전압상승의 효과가 크다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 연료전지에 비해 상대적으로 효율이 낮은 순산소 연소 시스템으로 공급되는 추가적인 연료 때문이다. 하지만 연료전지/순산소 연소 발전시스템의 경우 동일한 양의 공기가 연료전지로 공급될 때, 연료전지가 단독으로 운전하는 시스템에 비해 더 큰 출력을 나타내며 시스템 구동 중(연료전지 후연소 및 순산소 연소반응)에 발생하는 CO₂를 분리해 낼 수 있다.

4. 결 론

ITM을 사용하여 순수산소를 분리하고 응축과정을 통해 CO₂의 분리가 가능한 연료전지/순산소 연소 발전시스템의 성능을 해석하고 순산소 연소 및 연료전지가 단독으로 작동하는 시스템의 설계 성능과 비교 분석하였다.

순산소 연소 시스템의 경우 산소를 공급하는데 필요한 에너지를 고려할 경우 효율이 크게 감소하였다. 또한 ITM을 사용할 경우 작동온도가 높아 추가적인 연소 및 열교환 과정이 필요하여 이러한 과정에서 CO₂가 추가적으로 발생하게 된다. 따라서 순순산소 연소 시스템이 단독으로 작동할 경우 ITM은 적합하지 않다고 판단된다. 하지만 연료전지/순산소 연소 발전시스템을 고려할 경우 ITM의 작동시키기 위해 필요한 에너지를 공급하지 않아도 되는 장점을 가지게 되고, CO₂ 분리를 고려하지 않은 연료전지가 상압상태에서 단독으로 작동할 때에 비해 높은 출력과 효율을 나타내었다. 물론 이러한 성능 향상이 기존의 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템과 순산소 연소 시스템과의 결합효과보다는 연료전지 전압상승의 효과가 크지만, 응축과정을 통해 CO₂를 분리할 수 있다는 장점을 가진다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비지원(CH3-101-03)으로 수행되었습니다.

References

- [1] Anderson, R. E., MacAdam, S., Viteri, F., Davies, D. O., Downs, J. P. and Paluszewski, A., 2008, "Adapting Gas Turbines to Zero

Emission Oxy-Fuel Power Plants," ASME paper, GT2008-51377.

- [2] Sanz, W., Jericha, H., Bauer, B. and Göttlich, E., 2008, "Qualitative and Quantitative Comparison of Two Promising Oxy-Fuel Power Cycles for CO₂ Capture," ASME J. of Eng. Gas Turbines Power, Vol. 130, pp.031702-1-031702-11.
- [3] Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Programs," J. of Power Sources, Vol. 159, pp.1241-1247.
- [4] Maurstad, O., Bredesen, R., Bolland, O., Kvamsdal, H. M. and Schell, M., 2005, Proceeding of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies 5, Vol. I, pp.279-281, Elsevier Ltd.
- [5] 2007, "Office of Fossil Energy, Fuel Cell Program Annual Report" pp.17-19.
- [6] Dyer, R. N., Richards, R. E., Russek, S. L. and Taylor, D. M., 2000, "Ion Transfer Membrane Technology for Oxygen Separation and Syngas Production," Solid State Ionics, Vol.134, pp.21-33.
- [7] Chen, C. M., Bennett, D. L., Carolan, M. F., Poster, E. P., Schinske, W. L. and Taylor, D. M., 2004, "ITM Syngas Ceramic Membrane Technology for Synthesis Gas Production," Studies in Surface Science and Catalysis, Vol.147, pp.50-55.
- [8] Jaeger, H., 2008, "ITM Oxygen Offers 15% More Power and Over 10% Better Plants Efficiency," Gas Turbine World 2008 IGCC Reference Guide, pp.34-38.
- [9] 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," J. of Power Sources, Vol.160, pp.462-473.
- [10] Massardo, A. F. and Lubelli, F., 2000, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles(ITSOFC-GT) : Part A - Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," ASME J. of Eng. Gas Turbines Power, Vol.122, pp.27-35.
- [11] Aspen Technology, HYSYS, ver.2006.5.