

인산형 연료전지와 유기랭킨사이클 연계시스템에 대한 경제성 평가

김득수*, 유호선*†

*한국중부발전, *†대한기계설비산업연구원

Economic Assessment on an Integrated system of Phosphoric Acid Fuel Cell and Organic Rankine Cycle

Deug Soo Kim*, Hoseon Yoo*†

*Korea Midland Power CO.,LTD, *†KRIMFI

ABSTRACT : In this study, the operational characteristics of the 7.48 MW fuel cell power plant consisting of 17 units of 440 kW Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) in operation since its commercial operation in December 2017 were explained and the heat recovery process of the plant using Organic Rankine Cycle (ORC) was simulated. The fuel cell system performance improvement and economic assessment were analyzed by calculating the amount of heat recovery and electric power available when connecting a 125 kW XLT Model ORC for hot water heat sources with 105°C, 40.8 t/h. The result of the study shows that integrating the 125 kW ORC to PAFC power plant would improve generating efficiency by about 0.6% through annually 851,472 kWh of electricity produced by ORC, and fuel cell and ORC integrated systems were calculated to have a 0.35% higher Internal Return Ratio and more Net Present Value of 1,249 million KRW than not installing ORC despite installation costs.

초록 : 본 연구에서는 “D”사의 440 kW 인산형 연료전지 17대로 구성된 7.48 MW급 연료전지 발전소를 대상으로 운전 특성에 대하여 알아보고, 유기랭킨사이클을 이용한 연료전지 발전소 열 회수 공정을 모델링하였다. 온도 105°C, 유량 40.8 t/h의 온수 조건에서 상용화된 125 kW급 유기랭킨사이클을 적용 시 회수 가능한 전기출력을 산출하여 설치 전·후의 연료전지 시스템 성능과 사업경제성에 대하여 비교 분석하였다. 연구결과 유기랭킨사이클을 연계 시 연간 851,472 kWh의 전력을 연료전지 소내 전원으로 사용함으로써 유기랭킨사이클의 미사용 공정대비 발전효율이 약 0.6% 향상되는 것으로 검토되었으며, 내부수익률은 0.35%, 순현재가치는 약 1,249백만원이 각각 더 높게 산출되었다.

Key words : Phosphoric Acid Fuel Cell(인산형 연료전지), Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Economic Rankine Cycle (경제성분석), System Performance(시스템성능)

-기호설명-

A : 이용률 (%)	FC : 연료전지	t : 시간 (h)
AUX : 소내 보조 동력	I : 연계시스템	Ẇ : 전기출력 (kW)
EF : 온실가스 배출계수	K : 열량보정계수	W : 전기출력량 (kWh)
F : 연료사용량 (ton)	Q : 온실가스 배출량	η : 발전효율 (%)

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

연료전지는 수소를 연료로 사용하는 친환경에너지 신에너지기술로 국내를 비롯하여 미국, 일본, EU에서 녹색 산업으로 육성되고 있으며, 국내 발전용 연료전지는 신재생에너지 공급의무화 제도(Renewable portfolio standard, 이하 RPS)[1]의 지원으로 2018년 기준 누적 347 MW 규모의 설비가 설치, 운영중이다[2].

연료전지에서 생산된 전력은 한국전력거래소에 판매되고 생산된 전력생산량에 가중치를 곱하여 신재생에너지 공급인증서(Renewable energy certificate, 이하 REC)가 발급되며 연료전지 스택 내부에서 산소와 전기화학 반응을 통하여 전기를 생산하는 과정에서 발생하는 열에너지는 집단에너지 사업자를 통해 수용가에 판매된다.

하절기, 공휴일의 경우 난방 수요급감으로 인해 다량의 폐열에너지가 미활용 소비되고 있는 실정이므로, 산업현장에서는 미활용 폐열회수를 통해 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 방안을 다각적으로 모색하고 있다.

유기랭킨사이클(Organic rankine cycle, 이하 ORC)은 산업체에서 버려지는 미활용 열에너지를 회수하여 전기에너지를 생산하기 위한 시스템으로 증발온도가 낮은 유기물질을 작동유체로 하여 발전하는 시스템을 말하며 저온의 열을 전기로 전환시킬 수 있어 최근에는 연료전지에서 생성된 폐열을 ORC를 통해 회수하는 연구[3]가 활발히 수행 중이다.

본 연구의 목적은 "D"사에서 제작한 7.48 MW 규모의 인산형 연료전지(Phosphoric acid fuel cell, 이하 PAFC)에 "A"사의 125 kW급 XLT ORC (이하 연구대상 ORC)를 적용 시 미활용 폐열을 전력에너지로 전환함에 따른 시스템 성능, 사업경제성 및 환경적 효과에 대하여 평가하는 것이다.

1.2 연구내용 및 방법

발전소 성능은 전기출력, 발전효율을 통해 측정이 가능하며 전기출력은 연료전지에서 생산하는 발전출력에서 발전소 부대설비의 소비전력을 제외한 순수 판매 가능한 전기

출력을 의미하고, 발전효율은 순수 판매 가능한 전기출력을 투입된 연료량으로 나눈 값이다.

ORC 설치 전·후의 연료전지 발전소 전기출력과 발전효율 산출을 통해 성능을 비교하였으며, 사업기간 전기출력과 매출액을 산출하고 초기 투자비 및 연료비 등을 고려하여 연료전지와 ORC의 사업 경제성을 평가하였다.

매출액과 연료비 산출을 위해 전력시장가격 및 REC 가격 전망보고서[4]를 적용하였고, 주요 기술 데이터로는 연료전지 주기기 제작사에서 보증하는 연간발전량, LNG 사용량과 연료전지 온수 설계데이터를 기준으로 "Advanced thermal modeling tool"을 통해 산출된 ORC 성능 데이터를 반영하였다.

2. 연료전지-유기랭킨사이클 연계시스템

2.1 연료전지 발전소

본 연구의 대상이 되는 "B" 연료전지 발전소(이하 본 발전소)는 440 kW PureCell Model 400 17대로 구성된 7.48 MW급 인산형 연료전지 단지로 LNG 복합발전소 인근 부지에 설치되어 2017년 12월 상업운전 개시 및 운영 중이다.

Fig. 2-1은 본 발전소의 전경으로 연료전지 모듈, 천연가스과 물 등을 공급할 수 있는 보조 설비 및 연료전지로부터 발생한 열을 회수하기 위한 열 회수 설비로 구성된다. 연료전지에서 생산된 전력은 배전계통을 통해 수용가에 공급되고 전력 생산과정 중 발생한 폐열을 활용하여 온수를 생산한다.



Fig. 2-1 Phosphoric acid fuel cell power plant

인산형 연료전지와 유기랭킨사이클 연계시스템에 대한 경제성 평가

Fig. 2-2는 본 발전소의 내부공정을 간략하게 나타낸 것으로 연료전지 단위모듈은 저온(Low grade, 이하 LG)의 열을 회수할 수 있는 저온 열교환부와 고온(High grade, 이하 HG)의 열을 회수할 수 있는 고온 열교환부를 내부에 포함하고 있다[5].

저온 열교환부의 출구온도 범위인 60℃ 저온 열원은 소비처가 없어 연료전지 내부에서 소비하고 있고, 고온 열교환부의 출구온도 범위인 105℃의 열원을 활용하기 위해 열수요처인 인근 수산 종묘 배양장내에 해수 열교환기(Heat exchanger)와 Hot water tank로 공급할 수 있도록 배관이 설치되어 있다.

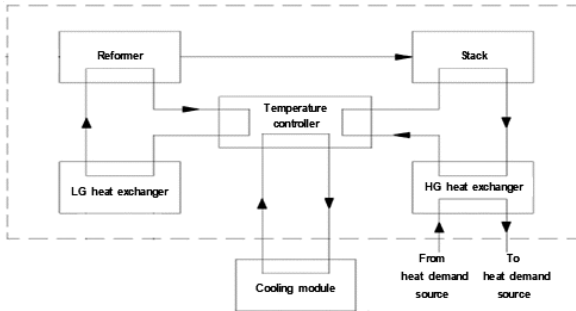


Fig. 2-2 Internal process of phosphoric acid fuel cell

Fig. 2-3은 본 발전소의 폐열 온수계통을 나타낸 것으로 수산종묘배양장에 공급되는 해수의 온도를 19℃로 유지하기 위하여 연료전지의 온수공급 대수를 조절하는 방식으로 열교환기의 입구 온수온도를 제어하며 현장 운전실적을 분석한 결과 해수온도가 낮아지는 동절기 기준 전체 17대의 연료전지 중 최대 5대의 연료전지에서 온수를 공급하여 열

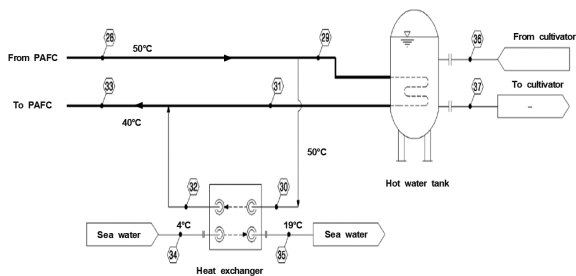


Fig. 2-3 Phosphoric acid fuel cell waste heat system pipe and instrumentation diagram

교환기 입, 출구 온수 온도를 각각 50℃, 40℃로 제어하였으며, 온수를 공급하지 않는 나머지 연료전지는 본체 상부에 설치된 냉각모듈을 통해서 대기로 열을 배출하고 있다.

본 발전소는 12대의 연료전지가 정격운전(5,280 kW)시 발생하는 열량(2.353 Gcal/h)을 기준으로 온도 105℃, 유량 40.8 t/h 규모의 온수가 일정하게 수요처로 공급될 수 있도록 제어

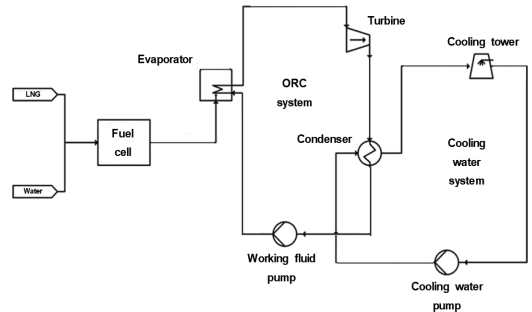
하며, 12대 이상 운전되거나 스택 성능저하로 인해 발생하는 초과 열원은 연료전지 본체에 설치된 냉각모듈을 통해 대기로 배출하도록 시스템이 설계되어 있다. 현 운전조건에서 연간 18,966 Gcal의 폐열에너지 회수가 가능하나 수산종묘배양장에서 사용된 누적 열에너지는 605.8 Gcal로 활용실적이 저조한 것으로 분석되었다. 연료전지의 주기기 운전 및 정비는 장기유지보수계약(Long term service agreement, 이하 LTSA)을 통하여 주기기 제작사에서 수행하고 있으며 이용률 90%, 발전효율 40%, 연평균 연료 사용량 12,887,430 Nm³을 보증하고 있다.

2.2 유기랭킨사이클 연계시스템

2.2.1 유기랭킨사이클 개요

유기랭킨사이클은 저온 열을 회수하기 위하여 물보다 끓는점이 낮은 작동유체를 사용하는 일종의 랭킨사이클이며, 일반적으로 터빈·발전기, 콘덴서, 펌프, 증발기(Evaporator)로 구성된다.

Fig. 2-4는 연료전지 온수계통에 연결한 ORC의 내부 공정을 간략하게 나타낸 것으로[6], 작동유체는 작동유체펌



1. Flow diagram of the overall process for a simple ORC system integrated into an MCFC power plant.

Fig. 2-4 Flow diagram of the overall process for a simple organic rankine cycle system integrated into fuel cell power plant

프를 통해 증발기로 공급되며 연료전지의 열원으로부터 열을 회수하여 터빈내부의 흐름을 통해 팽창된다. 회수된 열은 터빈 축에 연결된 발전기를 통해 전기에너지로 전환되며 팽창된 작동유체는 콘덴서에서 응축된다.

2.2.2 연계시스템 모델링

본 발전소는 2.1에서 설명한 바와 같이 전체 17대 단위 연료전지 중 12대 이상 운전 시 ($\geq 5,280$ kW) 온도 105°C, 유량 40.8 t/h 규모의 온수가 일정하게 공급되도록 설계되어 있으며 Fig. 2-5는 본 발전소의 2019년 월별 발전단 출력을 나타내고 있다. 유지보수를 위한 발전정지와 일부 출력감발을 제외하면 상시 12대 이상의 연료전지가 운전되어 연중 일정 조건의 온수 공급이 가능한 것을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 본 발전소의 온수조건을 열원으로 Calnetix Technology사에서 개발한 “Advanced thermal modeling tool”[7]을 통해 연구대상 ORC를 대상으로 공정모사를 시행하였다.

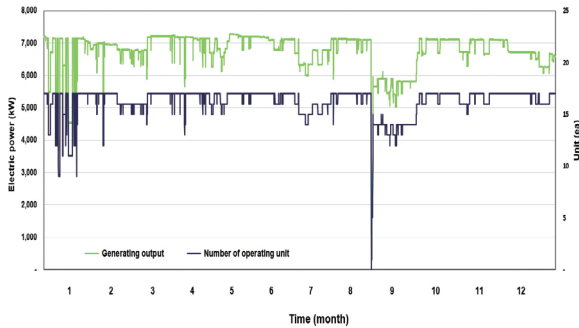


Fig. 2-5 Monthly profile of generating output in 2019

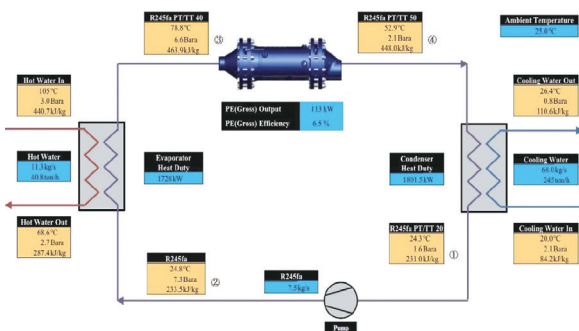


Fig. 2-6 Organic rankine cycle flow process diagram

Fig. 2-6은 연구대상 ORC에 R245fa를 작동유체로 공정모사하는 과정을 나타내고 있다. 온도 105°C, 유량 11.3 kg/s (40.8 t/h), 압력 3.0 Bar 조건의 열원을 공급 시 연구대상 ORC에서는 발전기 후단의 인버터 기준 113 kW의 전력이 생산되며 냉각탑과 순환펌프 등 약 5 kW 규모의 ORC 시스템 자체 소내 소비전력을 반영하면 최종적으로 108 kW의 전력이 외부로 공급 가능한 것으로 산출되었다.

2.2.3 연계시스템 구성

2.2.2에서 연구대상 ORC의 성능모델링을 통해 산출된 증발기 출구단의 연료전지 온수온도는 약 68°C로 현재 동절기기준 수산종묘배양장 열교환기에서 사용되는 입구 온수온도인 50°C를 상회하는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 2-7에 나타난 바와 같이 연료전지 온수배관 출구배관에 ORC를 설치하여[8] ORC에서 연료전지 폐열을 1차적으로 전기에너지로 변환 후 ORC 증발기 출구의 온수를 수산종묘배양장에 공급하도록 배관을 구성하고 해수열교환기 입구에 온수 유량조절밸브를 설치 시 온수의 유량을 조절을 통해 해수온도의 조절이 가능한 것으로 검토되었다.

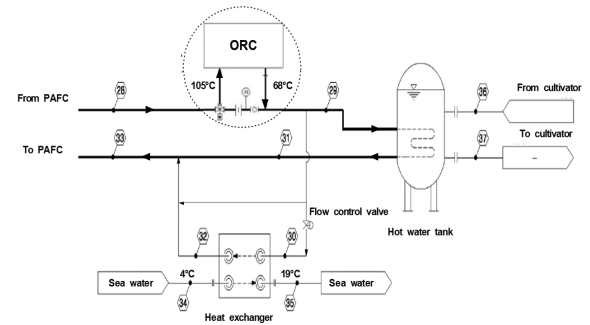


Fig. 2-7 Phosphoric acid fuel cell waste heat system modification pipe and instrumentation diagram

본 발전소의 폐열을 활용하여 ORC에서 생산된 전력을 연료전지 소내 전원계통에 연계할 경우 연료전지와 ORC 연계시스템의 성능 향상을 통하여 공급 가능한 순수 전기출력이 증가하게 되므로 전력판매수익과 REC 판매수익의 향상효과를 거둘 수 있다.

연료전지 발전소의 소내 소비전력은 단위 연료전지 모듈의 정격출력을 생산하기 위해 내부 인버터, 공기냉각 시스

인산형 연료전지와 유기랭킨사이클 연계시스템에 대한 경제성 평가

템, 공기 송풍기 등의 부하에 소요되는 직접 소내 소비전력과 발전소 운영에 필요한 제어실 냉난방, 컴퓨터, UPS, AVR, 조명설비 등에 필요한 간접 소내 소비전력으로 구분된다. 본 발전소의 연료전지 단위 모듈당 440 kW의 전력을 생산하기 위해서는 약 22 kW의 직접 소내 소비전력이 필요하며 17대의 모듈이 운전 시 총 374 kW의 전력이 소비되고 있으며 설비 규격서에 명시된 간접 소내 소비전력은 104 kW이다.

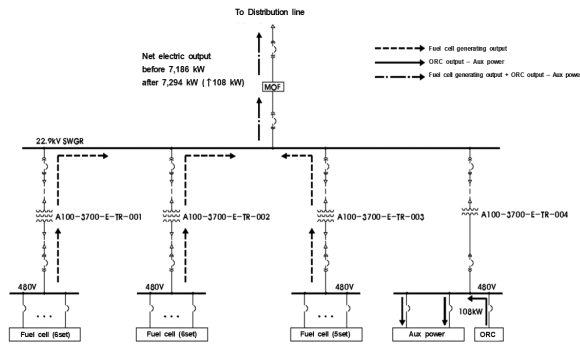


Fig. 2-8 Single line diagram of integrated system of fuel cell and organic rankine cycle

Fig. 2-8에 나타난 것과 같이 연구대상 ORC 전기출력 단자를 본 발전소 소내 전원계통에 연결 시 ORC에서 생산된 전력은 1차적으로 연료전지 발전소를 운전하기 위한 간접 소내 동력으로 소비하고 남은 전원은 연료전지 모듈 내부의 직접 소내 동력으로 소비될 수 있도록 구성된다.

본 발전소의 송전단 기준 순시 최대 전기출력은 2019년 5월에 기록한 7,186 kW로 ORC에서 생산된 108 kW의 전력을 소내 전원으로 소비하여 송전 가능한 출력이 증가되더라도 설비용량인 7,480 kW를 초과하지 않는 것을 알 수 있다.

3. 연계시스템 경제성 고찰

3.1 시스템 성능향상

PAFC 연료전지는 매년 약 1%의 전압 감소로 인한 성능저하로 10년 주기로 스택을 교체하는 방식으로 유지보수를

시행하고 있으며 Table 3-1은 제작사에서 제시한 본 발전소의 연간 발전량과 연료 사용량을 나타내고 있다.

사업기간 평균 발전효율 η_{fc} 는 식 (3-1)을 통해 약 40%로 산출되며, 여기서 K_LNG는 LNG의 열량 보정계수(1 N m³ = 9,500 kcal)를 나타낸다.

$$\eta_{fc} = \frac{(W_{fc} - W_{aux}) \cdot 860}{F \cdot K_{LNG}} \quad (3-1)$$

Table 3-1 Annual generation and LNG consumption of 7.48 MW phosphoric acid fuel cell

[Unit : MWh/kNm³]

Year	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Generation	59,420	59,419	58,470	57,928	57,250	56,707	56,029
Fuel Consumption	13,050	12,961	12,931	12,930	12,869	12,867	12,835
Year	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Generation	55,486	54,808	54,266	59,420	59,419	58,470	57,928
Fuel Consumption	12,833	12,800	12,798	13,050	12,961	12,931	12,930
Year	2032	2033	2034	2035	2036	2037	Average
Generation	57,250	56,707	56,029	55,486	54,808	54,266	56,978
Fuel Consumption	12,869	12,867	12,835	12,833	12,800	12,798	12,887

연구대상 ORC를 본 발전소의 소내 전력계통에 연계할 경우 연료전지 보충 이용률을 적용하여 식 (3-2)을 통해 연간 851,472 kWh의 전력이 추가로 생산가능한 것으로 산출되었다. 따라서 본 발전소와 연구대상 ORC의 연간 전력량을 합산하여 식 (3-3)을 통해 산출된 시스템 종합 발전효율은 약 40.6%로, ORC 설치하기 전 대비 약 0.6%의 시스템 성능 향상효과를 기대할 수 있다.

$$W_{orc} = \dot{W}_{orc} \cdot t \cdot A_{fc} \quad (3-2)$$

$$\eta_i = \frac{(W_{fc} - W_{aux} + W_{orc}) \cdot 860}{F \cdot K_{LNG}} \quad (3-3)$$

3.2 사업경제성

본 연구에서는 사업경제성 평가를 위해 `18년부터 `37년

까지 본 발전소의 운영기간 동안 전력판매수익, REC 정산 수익, 연료비, 설치투자비 및 LTSA를 포함한 유지보수비용 등을 평가인자로 반영하였고, 부지매입비, 인건비 및 재원 조달 수수료 등은 검토항목에서 제외하였다.

2018년 전기연구원에서 발표한 SMP, REC와 LNG의 중장기 가격전망을 반영하여 전력판매수익은 Table 3-1의 연간 전력생산량에 연도별 계통한계가격을 곱하여 산출하고, REC 정산수익은 연간 전력생산량에 연료전지의 REC 가중치(2)를 곱하여 REC 발급량을 산출한 후 연도별 REC 전망단가를 곱하여 산출하였다.

Table 3-2 Comparison of economic feasibility of phosphoric acid fuel cell with/without organic rankine cycle

[Unit : 10³ KRW/MWh/kNm³]

Items	Fuel cell	ORC	Fuel cell with ORC
Installation cost	37,200,000	998,547	38,198,547
Maintenance cost	80,983	7,000	87,983
Annual LTSA	2,346,000	-	2,346,000
Annual generation	56,978	851	57,829
Annual fuel consumption	12,887	-	12,887
IRR (%)	8.45	18	8.8 (0.35 ↑)
NPV (10 ⁶ KRW)	8,039	1,249	9,288 (1,249 ↑)
Payback period (year)	8.4	5.28	8.24 (0.16 ↓)

■ Discount rate : 5.25% ■ Depreciation : fixed amount

■ Tax : less than 2×10⁶ KRW 11%, over 2×10⁶ KRW 22%

Table 3-2는 본 발전소를 대상으로 ORC 설치 전, 후의 사업경제성 비교데이터를 나타낸 것으로 125 kW급 ORC를 연계할 경우 설치비와 유지보수비가 추가되나 ORC를 통해 생산된 전력을 소내 소비전원으로 소비함으로써 송전단 전기출력 증대로 전력판매 수익 및 REC 정산 수익을 추가로 확보할 수 있다.

신규 연료전지 발전소를 대상으로 ORC를 연계할 경우 내부수익률과 순현재가치에 대하여 각각 0.35%, 1,240백만원의 향상 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 기존에 운영 중인 연료전지 발전소를 대상으로 ORC를 설치하는 경우에도 5~6년 내에 ORC의 설치비 회수가 가능한 것으로 검토되었다.

3.3 온실가스 감축효과

연료전지는 LNG (CH₄)를 주연료로 사용하므로 연료 사용량에 비례하여 온실가스(CO₂)가 발생한다. 본 발전소는 연간 56,978 MWh의 전력을 생산하기 위해 연평균 10,410 ton의 LNG를 소비하므로 식 (3-4)에 의해 연간 온실가스 배출량을 산출할 수 있으며, 여기서 EFLNG는 LNG의 온실가스 배출계수 (2.7657 tCO₂/ton)를 의미한다. 또한 단위출력에 대한 온실가스가 배출량 q는 식 (3-5)를 통해 약 0.5053 tCO₂/MWh로 산출되었으며, 연료전지의 미활용 폐열을 ORC를 통해 전기에너지로 전환하여 소내 전원으로 소비하는 전력량에 해당하는 만큼의 온실가스 감축효과를 기대할 수 있다. 따라서 본 발전소에 연구대상 ORC를 연계 시 예상되는 온실가스 절감량인 ΔQ는 식 (3-6)을 통해 연간 약 412 tCO₂로 산출되었다.

$$Q = F \cdot EF_{LNG} \tag{3-4}$$

$$q = Q/W_{fc} \tag{3-5}$$

$$\Delta Q = q \cdot W_{orc} \tag{3-6}$$

3. 결론

본 연구는 7.48 MW급 인산형 연료전지 발전소에서 발생하는 미활용 폐열을 회수하는 방안의 일환으로서 온도 105℃, 유량 11.3 kg/s인 온수가 일정하게 공급되는 조건에서 125 kW급 유기랭킨사이클을 대상으로 “Advanced thermal modeling tool”을 통해 공정모사를 시행하였다. 공정모사 결과를 반영하여 연료전지와 유기랭킨사이클의 연계시스템 구성방안을 제시하였으며, 연계시스템에 대한 성능 분석 및 사업경제성을 평가하였다. 연구내용을 토대로 유기랭킨사이클 도입 시 예상효과를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유기랭킨시스템의 연계를 통해 연료전지의 미활용 폐열을 연간 851.472 kWh의 전기에너지로 전환하여 연계시스템의 발전효율을 약 0.6% 향상시킬 수 있다.

인산형 연료전지와 유기랭킨사이클 연계시스템에 대한 경제성 평가

- (2) 연간 1,702 REC 규모의 신재생에너지 공급인증서를 추가로 확보하여 1,249백만원의 순현재가치 향상 효과를 거둘 수 있고, 5~6년 사이에 유기랭킨사이클 설치에 대한 투자비 회수가 가능하다.
- (3) 미활용 폐열에너지를 연료전지 발전소 소내 전원으로 활용함으로써 연간 412 tCO₂의 온실가스 절감효과를 거둘 수 있다.

참고문헌

- (1) 신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침, 2020, 산업 통상 자원부.
- (2) 신재생에너지 보급통계, 2019, 한국에너지공단.
- (3) wanghak Huh., 2016, "Installation and performance analysis of 125 kW organic rankine cycle for stationary fuel cell power plant". Proceedings of ASME Turbo Expo 2016.
- (4) 신재생에너지 공급인증서 증장기 가격전망 분석, 2018, 한국전기연구원.
- (5) 한일호, 2016, "인산형 연료전지 발전소에서 히트펌프 사용유무에 따른 경제성비교".
- (6) Kyungtae Park., 2018, "Techno-economic optimization of the integration of an organic rankine cycle into a molten carbonate fuel cell power plant".
- (7) Mirmobin P., 2015, "Advanced Thermodynamic Model of Organic Rankine Cycle", Proceedings of the ASME-ORC 2015 3rd International Seminar on ORC Power Systems, Brussels, Belgium.
- (8) 보령 제2 연료전지 폐열회수 타당성 검토 용역보고서, 2020, 경동엔지니어링.
- (9) 온실가스 배출권 거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침, 2017, 산업통상자원부.