

연료전지 삼중열병합 시스템의 성능개선 R&D 효과에 대한 경제성 분석 연구

안종득^{1),2)*} · 이관영³⁾ · 서석호⁴⁾

Economic Analysis Study on the R&D Effect of Performance Improvement of the Tri-generation Fuel Cell System

Jong-Deuk Ahn^{1),2)*} · Kwan-Young Lee³⁾ · Seok-Ho Seo⁴⁾

Received 12 March 2022 Revised 16 March 2022 Accepted 24 March 2022 Published online 21 April 2022

ABSTRACT Considering the recent substantial increase in national research and development (R&D) budgets in the energy sector there has been increased interest in the effectiveness of government R&D investments. We conducted a case study to calculate the allowable scale and effectiveness of R&D investment by calculating the direct performance improvement effect resulting from R&D investment as an economic value. Using conditions that existed prior to R&D investments as a reference, five cases in which performance improved due to R&D investments were compared and analyzed. The government's financial investment is increasing rapidly in line with the establishment of the national hydrogen roadmap. R&D is needed to enhance the current low technology readiness level of hydrogen fuel cells compared to solar and wind energy fields. Therefore, an R&D project to improve the performance of the fuel cell system was selected as this case study's subject. Using the results in this study, the allowable level of investment in the task unit of national R&D projects could be calculated. Moreover, it is advisable to provide a standard for rational decision making for new R&D investments since it is possible to determine investment priorities among a large number of candidates.

Key words National R&D(국가연구개발), R&D Investment(R&D 투자), Effectiveness(효과성), Trigeneration system(삼중열병합시스템), Fuel Cell(연료전지)

Nomenclature

TGEN : tri-generation system

PEMFC: proton exchange membrane fuel cell

C : cost

N : number of TGEN

r : discount rate

k : business year

T : operation time of TGEN

X : fuel consumption rate

P_{grid} : electricity demand

Q : cold heat

η_P : generation efficiency of PEMFC system

1) Ph.D. Candidate, Green School, Graduate School of Energy and Environment, Korea University

2) Director, Hydrogen Energy Division, Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning

3) Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

4) Chief Researcher, Blue Economy Strategy Institute Co., Ltd.

*Corresponding author: jdahn@ketep.re.kr

Tel: +82-2-3469-8340

Fax: +82-2-556-1033

η_Q	: heat efficiency of PEMFC system
LHV	: lower heating value
COP	: coefficient of performance
PUE	: power usage effectiveness
IT	: information technology
HVAC	: heating, ventilation, and air conditioning

Subscript

H ₂	: hydrogen
FC	: fuel cell
max	: maximum
mtn	: maintenance
ABS	: absorption chiller
load	: electric load
g → l	: grid to load
cool, load	: cooling load
elec	: electricity

1. 서론

에너지 분야의 국가연구개발 투자는 지속적으로 확대되어 왔으며, 2022년도 에너지R&D 예산은 1조 2,460억원으로 5년 전에 비해 61% 증가하였다.^[1] 특히, 신재생에너지 분야의 정부 R&D 투자는 2022년 기준 3,935억원으로 5년 전과 비교하여 89% 증가하여 에너지 전체 평균을 크게 상회한다. 이는 친환경 중심의 에너지산업 환경 구축으로 탄소중립을 실현하고 급성장하고 있는 세계 신재생에너지 시장^[2]에 대응하여 기술 주도권을 확보하겠다는 국가 R&D 전략 방향이 반영된 결과이다.^[3] 이러한 세계 각국의 정책과 투자의 기민한 움직임 속에서, 에너지분야에 대한 정부 R&D 투자는 지속적으로 확대될 전망이며 그에 따른 투자 효과성에 대한 관심도 고조될 것으로 예상된다.

국가연구개발 투자 효과의 관점에서 기존 연구는 예산, 체제(Regime), 성과 등에 대한 적정성 또는 유효성을 논하는 연구로 나뉘 볼 수 있다. 예산 배분에 대하여는 국가연구개발 전체를 하나의 단위 또는 사업, 유망 분야 등의 범주로 나뉘 거시적인 관점에서 정부 R&D 투자의 효율성을

분석하는 연구가 선행되었고,^[4~6] 성과 체제 측면에서는 국가연구개발사업 성과평가제도와 연계하여 성과 요인 또는 문제점을 분석하여 제도의 개선 방향을 제시하고자 하였다.^[7,8] 그리고, 자료포락분석법(Data Envelopment Analysis)을 이용하여 정부 R&D 예산의 투입과 특허, 논문, 사업화 실적 등의 산출물 간의 유효성을 규명하는 연구가 상당수 선행되었는데^[9~12] 사업의 목적과 성과 지표 간의 유효성을 확인할 수 있었다. 한편 국가연구개발에서 예산 배분이 나눠지는 최종 단계인 R&D 과제 단위에서 투입된 예산의 규모가 적정한가에 대한 연구의 필요성이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 R&D 투자로 발생하는 직접적인 성능개선 효과를 경제적 가치로 산출하여 허용 가능한 R&D 투자 비용과 투자효과를 산정하는 사례연구를 실시하였다. R&D 투자 이전의 기존 조건을 기준으로 삼아 R&D 투자에 따라 성능이 개선되는 5가지 사례를 비교 분석하였다.

연구 대상은 데이터센터에 적용되는 연료전지 시스템의 성능개선 R&D 프로젝트를 고려하였다. 수소·연료전지 분야는 최근 수소경제 이행계획 수립으로 정부 재정 투자가 가파르게 증가하고 있고 태양광, 풍력 분야에 비하여 기술 성숙도(TRL)가 상대적으로 낮아서 성능개선에 대한 R&D가 요구되는 상황이며, 데이터센터는 에너지다소비 건물의 일종이면서 부하변동에 따른 변수 통제가 용이한^[13,14] 특징이 있다.

본 연구 결과를 통하여 R&D 투자효과에 따른 우선순위 결정 기준을 제시할 수 있으므로, 국가연구개발사업의 R&D 기획 과정에서 합리적인 의사결정 기준으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 분석방법

2.1 시스템 구성

본 사례연구에서 고려하는 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 한전으로부터 수전되는 전기, 전기냉동기, 냉각탑으로 구성되는 기존 구조에서, 본 연구결과품인 삼중열병합시스템이 결합되는 구조이다. 삼중열병합시스템은 수소를 연료로 사용하는 고온PEMFC시스템과 흡수식냉동기를 의미한다.

데이터센터의 전기 및 냉방 부하는 기존에는 한전으로부터

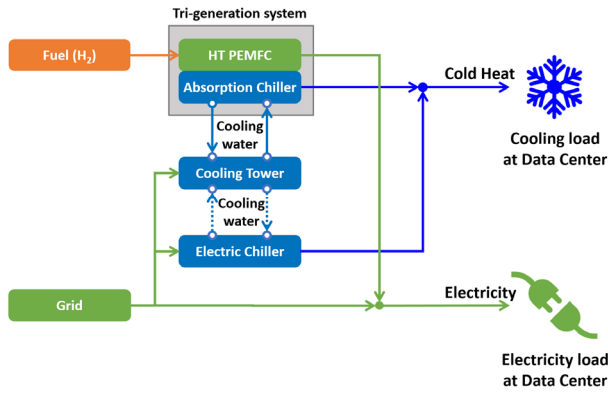


Fig. 1. Schematic diagram

터 수전되는 전기와 전기냉방기에서 생산되는 냉열이 담당 하였으나, 삼중열병합시스템이 새롭게 도입되면서 전기 및 열 부하를 분담하게 된다. 즉, 고온PEMFC시스템으로부터 전기와 열이 생산되어 이 중 전기는 데이터센터의 전기 부하로 사용되며, 열은 흡수식냉동기의 열원으로 사용된다. 전기냉방기와 흡수식냉동기에서 생산되는 약 7°C의 냉수는 공기순환을 통해 데이터센터 실내를 냉각하는데 사용된다. 냉각탑은 흡수식 냉동기와 수냉식 전기 냉방기에 사용되는 냉각수의 냉각에 사용된다.

2.2 선형계획법을 이용한 최적용량 산정

2.2.1 목적 함수 정의

삼중열병합시스템의 용량을 산정하기 위하여 Matlab에서 제공하는 혼합 정수 선형계획법 Solver(intlinprog)를 이용하였고, 다음 식과 같다.

$$\min f^T x \text{ subject to } \begin{cases} x(\text{intcon}) \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases} \quad (1)$$

여기서, f , x , intcon , b , b_{eq} , lb , ub 는 벡터이고 A 와 A_{eq} 는 행렬을 의미한다.^[15]

목적 함수는 삼중열병합시스템의 고정비와 변동비의 합으로 정의되며 다음 식과 같이 표현된다.

$$C_{TGEN} N + \sum_k (1+r)^{-k} \left[\begin{aligned} & c_{H_2}(Y_k) T N X_{FC} \\ & + \sum_t c_{grid}(t | t \in Y_k) P_{grid}(t | t \in Y_k) \\ & + 12 c_{grid,base} P_{grid,max}(Y_k) \\ & + N \{ c_{FC,mtn}(Y_k) + c_{ABS,mtn}(Y_k) \} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

여기서, $TGEN$ 은 삼중열병합시스템, C_{TGEN} 은 삼중열병합시스템 1대당 초기투자비(기자재비+설치공사비), N 은 삼중열병합시스템 대수, r 은 할인율, k 는 사업연도(1, 2, ..., Y_{final}), $c_{H_2}(Y_k)$ 는 해당 사업연도(Y_k)의 수소연료요금, T 는 1년 중 삼중열병합시스템 운전시간, X_{FC} 는 고온 PEMFC 시스템(FC)의 연료소비량, $c_{grid}(t)$ 는 한전 전력사용량 요금, $P_{grid}(t)$ 는 전력사용량, $c_{grid,base}$ 는 한전 기본요금, $P_{grid,max}(Y_k)$ 는 해당연도(Y_k)의 최대 수요 전력, $c_{FC,mtn}(Y_k)$ 와 $c_{ABS,mtn}(Y_k)$ 는 고온PEMFC시스템과 흡수식냉동기의 해당 사업연도(Y_k)의 유지보수비를 각각 의미한다.

2.2.2 제약 조건

데이터센터의 전기부하는 수전 전력과 삼중열병합시스템에서 생산되는 전기의 합과 같은 전기 에너지 밸런스를 만족해야 하며 다음 식과 같이 정의된다.

$$P_{load}(t) = P_{g \rightarrow l}(t) + P_{TGEN} N \quad (3)$$

여기서, $P_{load}(t)$ 는 해당 시간의 전기 부하, $P_{g \rightarrow l}(t)$ 는 수전전력 중 전기부하에 공급되는 전력, P_{TGEN} 은 삼중열병합에서 생산되는 전기를 각각 의미한다.

또한 수전전력은 데이터센터 전기부하, 기존 전기냉동기와 냉각탑의 소비전력의 합과 같아야 하며 다음 식과 같이 정의된다.

$$P_{grid}(t) = P_{g \rightarrow l}(t) + P_{g \rightarrow c}(t) + P_{g \rightarrow tower}(t) \quad (4)$$

여기서, $P_{grid}(t)$ 는 해당 시간의 수전 전력, $P_{g \rightarrow c}(t)$ 는 수전전력 중 기존 전기냉동기에 공급되는 전력, $P_{g \rightarrow tower}(t)$ 는 수전전력 중 냉각탑에 공급되는 전력을 각각 의미한다.

또한 해당 사업연도의 각 시간별 수전전력은 최대수요전력과 같거나 작아야 한다는 부등식 조건이 요구된다.

$$P_{grid}(t | t \in Y_k) \leq P_{grid,max}(Y_k) \quad (5)$$

데이터센터의 냉방부하는 기존 전기냉동기에서 생산되는 냉열과 삼중열병합시스템의 흡수식냉동기에서 생산되는 냉열의 합과 같아야 하며 다음 식과 같이 정의된다.

$$Q_{cool,load}(t) = Q_{cool,ERF}(t) + Q_{cool,TGEN}N \quad (6)$$

여기서, $Q_{cool,load}(t)$ 는 t 시간에서의 데이터센터 냉방 부하, $Q_{cool,ERF}(t)$ 는 기존 전기냉동기(ERF)에서 생산되는 냉열, $Q_{cool,TGEN}$ 는 삼중열병합시스템에서 생산되는 냉열, N 은 삼중열병합시스템의 대수를 각각 의미한다.

삼중열병합시스템에서 생산되는 전기와 냉열은 고온PEMFC 시스템의 정격출력, 발전효율, 열효율과 흡수식냉동기의 냉방COP를 이용하여 다음 식과 계산될 수 있다.

$$P_{TGEN} = \eta_P X_{TGEN} LHV \quad (7)$$

$$Q_{TGEN} = \eta_Q X_{TGEN} LHV \quad (8)$$

$$Q_{cool,TGEN} = COP_{TGEN} Q_{TGEN} \quad (9)$$

여기서, η_P 는 고온 PEMFC 시스템의 발전효율, η_Q 는 고온 PEMFC시스템의 열효율, X_{TGEN} 는 수소 연료량, LHV 는 수소 연료의 저위발열량, COP_{TGEN} 는 삼중열병합시스템의 흡수식냉동기의 성적계수를 의미한다.

또한 기존 전기냉동기에서 생산되는 냉열과 냉각탑에서 소비되는 동력은 다음 식과 같이 각각 정의된다.

$$Q_{cool,ERF} = COP_{ERF} P_{g \rightarrow c}(t) \quad (10)$$

$$P_{g \rightarrow tower}(t) = F_{ERF} Q_{cool,ERF}(t) + F_{TGEN} Q_{cool,TGEN}N \quad (11)$$

여기서, F_{ERF} 는 기존 전기냉동기의 단위 냉방출력당 냉각탑 소비전력 계수, F_{TGEN} 은 삼중열병합시스템 단위 냉방출력당 냉각탑 소비전력 계수를 의미한다.

2.3 R&D 투자효과 분석

본 연구에서 제안하는 허용 R&D 투자비용은 R&D투자 후 내부수익률이 R&D투자 전 내부수익률보다 큰 최대 R&D 투자비용으로 정의된다. 여기서, R&D투자 후 내부수익률은 R&D투자를 통하여 성능(효율, 내구성)이 개선된 연구 개발품을 적용하는 경우에 경제성 분석을 실시하여 계산된 내부수익률을 의미하고, R&D투자 전 내부수익률은 R&D 투자 이전의 제품을 적용하는 경우에 경제성 분석을 실시하여 계산된 내부수익률을 의미한다. 또한 R&D투자 효과는 허용 R&D투자비용에 대한 R&D 투자 전·후의 내부수익률 차로 다음 식과 같이 정의된다. 식으로부터 알 수 있듯이 R&D 투자를 통해 성능이 개선된 연구개발품을 적용하더라도 계산된 내부수익률이 R&D 투자 전 내부수익률보다 작다면 R&D 투자의 효과가 없음을 의미하며 이러한 경우는 R&D 투자보다는 기존 제품을 적용하는 것이 더 경제성이 있음을 의미한다.

$$R\&D\text{투자효과} = \frac{IRR_{R\&D\text{투자 후}} - IRR_{R\&D\text{투자 전}}}{\text{허용 } R\&D\text{투자비용}} \quad (12)$$

3. 결과 및 토의

3.1 부하 조건의 산정

R&D 투자에 대한 경제성 사례 분석을 수행하기 위해서는 분석 대상에 대한 부하 조건, 성능 조건, 비용 조건을 정의하고 산정하는 과정이 필요하다

본 연구결과품이 적용됨으로써 부하 밸런스의 변화가 발생하므로 연구설계의 전체 범위에 대한 부하가 정의되어야 한다. 즉, 연구결과품이 적용되는 수요처에 대한 총 부하가 산정되어야 하며, 그 부하를 담당하는 구성품 간의 부분 부하가 추정되어야 한다. 그리고, 전체 시스템 구성에서 에너지밸런스가 유지되어야 하고, 비용이 최소화되는 조건이 만족되어야 한다.

Table 1은 총 부하에 해당하는 데이터센터의 월별 전력 사용량, 냉방부하를 제외한 전력사용량, 냉방부하에 사용된 전력사용량 및 PUE(Power Usage Effectiveness) 정보를 나타낸다. PUE는 데이터센터의 효율성과 생산성을

Table 1. Monthly power consumption of the data center^[20]

Month	Summation (kWh)	IT_{elec} (kWh)	$HVAC_{elec}$ (kWh)	PUE
1	1,805,440	1,228,012	577,428	1,470
2	1,621,525	1,114,501	507,024	1,455
3	1,724,211	1,176,624	547,588	1,465
4	1,796,244	1,226,615	569,629	1,464
5	1,765,590	1,129,218	636,372	1,564
6	1,791,649	1,144,928	646,721	1,565
7	2,096,640	1,290,002	806,638	1,625
8	1,854,486	1,192,382	662,103	1,555
9	1,888,203	1,227,414	660,789	1,538
10	1,747,201	1,156,957	590,244	1,510
11	1,678,229	1,125,181	553,048	1,492
12	1,765,590	1,206,911	558,680	1,463
Sum.	21,535,008	14,218,745	7,316,264	1,515

나타내는 지표로써 얼마나 효율적으로 전력을 사용하는지를 측정하는 기준으로 다음 식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 PUE &= \frac{\sum_t Total_{elec}(t)}{\sum_t IT_{elec}(t)} \\
 &= \frac{\sum_t IT_{elec}(t) + \sum_t HVAC_{elec}(t)}{\sum_t IT_{elec}(t)} \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기서, $Total_{elec}(t)$ 는 시간별 데이터센터에서 소비되는 총 전력사용량, $IT_{elec}(t)$ 는 시간별 IT 서버 등에 소비되는 전력사용량, $HVAC_{elec}(t)$ 은 공조 및 냉방에 소비되는 전력사용량을 각각 의미한다.

본 연구에 활용한 데이터센터의 정보는 연간 실제 부하 정보에 기초하여 삼중열병합시스템이 운전되는 기간 20년에 대한 정보는 매년 동일하다는 가정으로 반영하였다. 본 연구에서 고려한 데이터센터의 연간 전력사용량($Total_{elec}$)은 약 21.5 GWh이며 이 중에서 냉방부하에 소비되는 전력사용량($HVAC_{elec}$)은 약 7.3 GWh, 냉방부하 이외의 IT 서버 등에 소비되는 전력사용량(IT_{elec})은 약 14.2 GWh이며 연평균 PUE는 1.515의 값을 갖는다.

Table 2. Electricity and cooling load of the data center^[20]

Item	Electricity load (kWe)		Cooling load (kWth)	
	Value	Date and time	Value	Date and time
Min. Load	1,396	(May 7th) 06:00, 22:00	2,532	(March 7th) 6:00, 22:00
Avg. Load	1,623	-	3,124	-
Max. Load	1,863	(July 24th) 18:00	4,357	(July 24th) 19:00
Difference between Max. and Min. load	467	-	1,825	-

Table 2는 1년 중 전기 및 냉방 부하가 최대 및 최소가 되는 시간을 나타낸다. 7월 24일 18시에 최대 부하(1,863 kWe)가 발생함을 알 수 있고 5월 7일 06시와 22시에 최소 부하(1,396 kWe)가 발생함을 알 수 있으며 연평균 전기 부하는 1,623 kWe이고 최대 및 최소 부하의 차이는 467 kWe임을 확인할 수 있다. 여기에서 전기 및 냉방부하 값은 2.2 절에서 설명한 데이터센터에 도입되는 삼중열병합시스템의 최적용량을 결정하는데 사용되므로 중요한 지표로서 의미가 있다.

Fig. 1의 시스템 구성에서 보면, 냉방부하에 소요되는 전력 중에서 15%는 냉각탑 소비전력으로, 나머지 85%는 기존 전기냉동기 소비전력으로 사용되며, 기존 전기냉동기 냉방 COP를 4.4로 가정하여 산출하였다.

3.2 성능 조건의 산정 및 결과

본 사례 연구에서는 R&D 대상인 삼중열병합시스템의 정격발전출력을 25 kWe로 고려하였고, R&D 변수 조건은 연구개발품의 효율개선과 수명개선으로 보았다.

효율개선은 삼중열병합시스템에 탑재된 고온PEMFC의 발전효율과 열효율 변화를 고려하였고, 흡수식냉동기의 냉방효율 변화를 조건(CASE)으로 고려하였다. 수명개선 조건은 고온PEMFC의 연료전지 스택의 내구성 개선으로 하였다. 그리고, 본 사례연구 결과의 효과를 비교하기 위하여, 현재 수준의 삼중열병합시스템에 대한 정보를 비교기준으로 삼았다.

Table 3은 상기 설명과 같이 본 사례 연구에서 수행한 현재 조건 (즉, Reference 조건), 효율 및 수명 개선에 따른 5

Table 3. Performance of Tri-generation system

Item	Unit	AS IS	Target				
		Reference	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Nominal power (P_{TGEN})	kWe	25	25	25	25	25	25
Generation efficiency (η_P)	%	35	41	35	41	35	41
Thermal efficiency (η_Q)	%	55	54	55	54	55	54
COP (COP_{TGEN})	-	0.8	0.8	1.2	1.2	0.8	1.2
Replacement time of stack	Year	5	5	5	5	10	10

가지 사례 (즉, CASE 1~5)를 나타낸다. 여기서, COP_{TGEN} 은 삼중열병합시스템의 흡수식냉동기 성적계수, Q_{TGEN} 은 삼중열병합시스템의 발생 열량, η_Q 는 고온 PEMFC시스템의 열효율, X_{TGEN} 는 수소 연료량, P_{TGEN} 은 삼중열병합시스템 정격발전출력, η_P 는 고온 PEMFC 시스템의 발전효율, LHV 는 수소 연료의 저위발열량(119.83 MJ/kg)을 각각 의미한다.

Table 4는 정격냉방출력($Q_{cool, TGEN}$)과 정격연료유량(X_{TGEN}) 계산 결과를 나타낸다. 연구 개선 변수로 설정한 발전효율의 개선에 따라 정격연료유량이 감소하고 냉방효율의 개선에 따라 정격냉방출력이 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 위 계산 결과는 흡수식냉동기의 초기투자비, 유지보수비용 및 냉각탑에서 소비되는 동력을 산출하는데 사용되는 지표를 의미한다. 여기서, 정격냉방출력($Q_{cool, TGEN}$)과 정격연료유량(X_{TGEN})은 식 (7), 식 (8), 식 (9)를 이용하여 아래와 같이 계산될 수 있다.

Table 4. Nominal cooling power and fuel flow rate of Tri-generation system

Item	Unit	AS IS	Target				
		Reference	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Nominal cooling power ($Q_{cool, TGEN}$)	kWth	31,43	26,34	47,14	39,51	31,43	39,51
Nominal fuel flow rate (X_{TGEN})	kg/hr	2,146	1,832	2,146	1,832	2,146	1,832

$$Q_{cool, TGEN} = COP_{TGEN} Q_{TGEN} \quad (14)$$

$$= COP_{TGEN} \eta_Q X_{TGEN} LHV$$

$$X_{TGEN} = \frac{P_{TGEN}}{\eta_P LHV} \quad (15)$$

다른 성능 조건으로 기존 전기냉동기의 성적계수는 4.4, 냉각탑 소비동력 변환계수는 단위 냉방출력 kWth당 0.04 kWe를 적용하였고, Fig. 1의 시스템 구성도에서 보듯이 냉각탑은 흡수식 냉동기와 전기냉동기를 공용으로 사용하는 구조이므로 기존 전기냉동기와 삼중열병합시스템을 운영하는데 필요한 냉각탑 소비동력 변환계수는 동일하다고 가정하였다.

3.3 비용 조건 및 산정 결과

비용은 비용효과 또는 편익분석에 있어 투입 지표로 사용되어 경제성 평가의 결과를 나타내는 핵심 지표이다. 따라서, 본 사례연구를 포함한 R&D 프로젝트의 분석에 있어 비용에 포함되는 조건 값을 얼마나 합리적으로 산정하여 반영하는지가 사례연구 결과의 신뢰도 측면에서 매우 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 경제성 분석에 필요한 비용으로 고정비용과 변동비용을 고려하였다. 고정비용은 삼중열병합시스템 도입비용을 초기투자비로 고려하고, 변동비용은 유지보수비, 부품 교체비, 전기 및 수소의 연료요금을 고려하였다.

3.3.1 삼중열병합시스템 도입 비용의 산정 결과

고정비용으로는 삼중열병합시스템의 도입 비용을 고려하였다. 연료전지 시스템 가격은 LBNL^[16]에서 제안한 연간 1만대 양산 기준의 연료처리장치를 제외한 10 kW와 50 kW급의 연료전지 시스템 가격을 기준으로 지수(log) 선형 보간법을 이용하여 25kW급 연료전지 시스템의 가격을 추정하였다. 또한, 흡수식냉동기 가격은 Table 3, Table 4에서 CASE 3을 기준으로 1RT당 1백만원의 투자비를 산정하였고 모든 CASE에서 동일한 비용을 적용하였다.

상기 추정 조건에 따라 본 연구에서의 고정비용은 Table 5의 결과를 얻었다.

Table 5. Initial investment cost per unit of Tri-generation^[20] system

Item		Annual production scale (Millions Won)			
		100 Units/y	1000 Units/y	10000 Units/y	50000 Units/y
Fuel cell system (kW)	1	27,827	10,711	7,733	6,460
	5	40,185	20,190	15,305	13,170
	10	47,080	26,530	20,540	17,900
	25	82,150	53,175	43,700	38,550
	50	125,150	90,000	77,350	68,850
	100	199,700	150,900	130,800	118,600
	250	421,750	347,750	306,000	283,500
Tri-generation system	5	42,443	22,448	17,563	15,428
	25	93,439	64,464	54,989	49,839
	100	244,857	196,057	175,957	163,757

3.3.2 변동비용의 산정 결과

삼중열병합시스템 도입에 따른 변동비용으로는 시스템이 운전되는 사업기간 동안에 발생하는 정기 유지보수비와, 부품 교체로 인하여 발생하는 비정기적 유지보수비를 구분하여 고려하였다.

정기 유지보수비는 삼중열병합시스템의 1대당 초기투자비(54,989 백만원)의 2.6%를 고려하여 1,430 백만원으로 적용하였다. 비정기적 유지보수비는 스택교체비용과 흡수식냉동기의 부품 교체비용을 고려하였다.

스택 교체 비용은 첫 번째 교체에서는 삼중열병합시스템의 초기투자비의 약 50%로 가정하여 27.5 백만원을 적용하였으며, 두 번째 교체에서는 첫 번째 스택교체비용의 70% 수준, 세 번째는 두 번째 스택교체비용의 70% 수준으로 가정하였다. 여기에, 스택 교체 주기에 따라 5년 주기 변경 조건에서는 매 5년마다 반영하였고, 10년 주기 변경 조건에서는 10년차에 이를 반영하였다. 그리고, 사용기간에 따른 스택 성능 감소는 본 연구에서는 고려하지 않았다.

마지막으로, 흡수식냉동기의 부품 교체 비용은 Table 4에서 제시하는 각 정격냉방출력(26.34 kWth, 31.43 kWth, 39.51 kWth, 47.14 kWth)에 대하여 Table 7의 사업연도별 교체비용단가(원/RT)를 고려하여 반영하였다.

3.3.3 연료비의 산정 결과

본 사례 연구에서 발생하는 연료비는 크게 전기요금과

수소연료요금으로 구분된다. 전기요금은 한전으로부터 수전되는 전기로써 데이터센터의 전기부하에 사용된 전기와, 전기냉동기, 냉각탑의 구동에 사용되는 전기 사용료를 의미한다. 전기요금은 다시 기본요금과 전력량요금으로 구분되며 요금단가는 한국전력의 기본공급약관에 따라 ‘일반용(을) 고압A 선택II 기준을 적용하였다.^[17]

본 연구에서 2030년 예상 전기요금은 삼중열병합시스템이 도입되어 운영되는 사업기간(2030년~2049년)을 고려하여 가정된 전기요금을 의미하며, 기본요금은 현재와 동일(8,320원/kW)하고 전력량요금은 1.2배를 적용하여 2030년 예상 전기요금을 추정하였다. 또한 사업기간(2030년~2049년) 동안 전기요금 인상은 없는 것으로 가정하였다. 그리고, 해당 시간별로 전력량요금이 달라지므로 2.2절에서 설명하였듯이 1년 8760시간별 전기 및 냉방부하를 고려하는 요금을 적용하였다.

수소연료요금은 DOE에서 제시한 연료요금을 적용하였으며^[18] 사업기간(2030년~2049년) 동안 연료요금 인하는 없는 것으로 가정하였다.

3.4 사례연구(CASE Study) 조건

본 연구에서 고려한 사례(CASE)의 조건은 5가지이며 Table 3과 같다. CASE 1은 발전효율과 열효율의 합을 의미하는 시스템 효율을 90%에서 95%로 개선된 사례를, CASE 2는 발전효율과 열효율은 고정된 상태에서 흡수식냉동기의 냉방COP를 0.8에서 1.2로 개선된 사례를, CASE 3은 시스템 효율과 흡수식냉동기 냉방 COP가 개선된 사례를 각각 의미한다. CASE 1, CASE 2, CASE 3의 스택 교체 주기는 모두 5년으로 동일하다. CASE 4는 시스템 효율과 흡수식냉동기 냉방 COP 조건은 변경 없이 스택교체주기가 5년에서 10년으로 증가된 사례를, CASE 5는 CASE 4 조건에서 시스템 효율과 흡수식냉동기의 냉방 COP 조건을 CASE 3과 같도록 개선된 사례를 각각 의미한다. 여기에, 성능과 비용에 따라 각 CASE에 동일한 기준으로 적용되어야 하는 공통조건과, CASE별로 달리 적용되어야 하는 변동조건을 설정하였고, Table 6과 Table 7에 이를 요약하여 정리하였다.

3.5 경제성 분석 결과

본 사례조사 연구에서 수행한 삼중열병합시스템의 성능

Table 6. Common conditions for CASE Studies

Type	Description	
Load	Hourly electricity and cooling load (Refer to 3.1)	
Performance	Nominal Power of Tri-generation (kWe)	25
	COP of Electric Chiller COP	4.4
	Power consumption factor of Cooling tower per cooling power (kWe/kWth)	0.04
	LHV of Hydrogen (MJ/kg)	119.83
Cost	Initial investment cost of trigeneration per unit (Millions won)	54,989
	Regular O&M cost rate per initial investment cost (%)	2.6
	Fuel cost (won/kg)	1,320
	Multiplication of power consumption unit cost at January 1 in 2021 (base charge is not changed)	1.2

개선에 대한 경제성 분석결과를 Table 8에 종합하여 나타내었고 사례(CASE)별 결과에 대하여 분석하고자 한다.

우선, CASE별 조건을 보면, CASE 1, 2, 4는 삼중열병합 시스템에서 하나의 조건만 개선하는 경우이다. 즉, CASE 1은 시스템 효율을 현재 90%(발전효율 35%, 열효율 55%)에서 95%(발전효율 41%, 열효율 54%)로 5%p 개선하여 적

Table 7. Variable conditions for CASE Studies

Type	Description									
Performance	(Nominal cooling power (kWth)) Refer to Table 4									
	(Nominal fuel flow rate (kg/hr)) Refer to Table 4									
Cost	(Cost for replacing Stack, Millions won/unit)									
	Replacement cycle		5 th year	10 th year	15 th year					
	per 5year		27,500	19,25	13,475					
	per 10year		-	27,5	-					
	(Cost for replacing parts of absorption chiller according to business year, won/RT)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	10,000	10,000	66,000	10,000	10,000	194,530	10,000	10,000	346,500	10,000
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	10,000	194,530	10,000	10,000	66,000	10,000	10,000	541,030	10,000	10,000

용하는 경우이고, CASE 2는 흡수식냉동기의 냉방 COP를 현재 0.8에서 1.2로 개선한 경우이며, CASE 4는 스택 교체 주기를 현재 5년에서 10년으로 개선한 조건을 적용하는 경우이다. CASE 3는 CASE 1과 2의 개선 조건을 함께 적용하는 경우이고, CASE 5는 CASE 1, 2, 4의 조건을 모두 적용하는 경우이다.

Table 8. Summary of economic analysis results

Type	ITEM	AS IS	Target				
		Reference	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Performance	Generation efficiency (%)	35.0%	41.0%	35.0%	41.0%	35.0%	41.0%
	Thermal efficiency (%)	55.0%	54.0%	55.0%	54.0%	55.0%	54.0%
	COP (-)	0.8	0.8	1.2	1.2	0.8	1.2
	Replacement Cycle (year)	5	5	5	5	10	10
Results of optimal capacity assessment	Units installed (Units)	55	55	53	55	55	55
	Capacity installed (kW)	1,375	1,375	1,325	1,375	1,375	1,375
	Initial investment (Million won)	3,024	3,024	2,914	3,024	3,024	3,024
Results of economic analysis	Cumulative NPV (Millions won)	3,186	4,969	5,495	7,078	4,491	8,383
	Cumulative NPV (including Initial Investment, Millions won)	162	1,945	2,581	4,054	1,466	5,359
	IRR (%) (①)	5.0889%	11.0841%	13.5424%	17.6902%	10.0017%	22.3041%
	IRR ranking		4	3	2	5	1
R&D investment effectiveness	IRR (%)		5.0910%	5.0893%	5.0896%	5.0914%	5.0893%
	Allowable R&D investment cost (Millions won)(②)		1,694	2,308	3,702	1,255	4,958
	Investment effectiveness (③)=(①IRRcase-①IRRref)/②(%/billions won)		3.5391	3.6627	3.4039	3.9146	3.4722
	Investment effectiveness ranking		3	2	5	1	4

3.5.1 Reference 조건의 경제성 분석 결과

Table 8에서 현재수준 Reference 조건은 데이터센터에 별도의 R&D 수행 없이 현재 수준의 성능 조건을 갖는 삼중 열병합시스템이 도입되었을 때의 결과를 의미한다. 성능 조건은 고온PEMFC시스템 효율 90%(발전효율 35%, 열효율 55%), 스택 교체주기 5년, 흡수식냉동기의 냉방COP 0.8을 고려하였고 경제성 분석을 수행하기 위한 다른 부하, 성능 및 비용 조건은 Table 6의 공통조건과 동일하게 적용하였다.

2.2절에서 설명한 선형계획법을 이용한 삼중열병합시스템의 최적 용량 산정 결과를 살펴보면, 정격발전출력 25 kW급 삼중열병합시스템 총 55대가 선정되어 총 설치용량은 1,375 kW이고 Table 6의 공통조건 중 1대당 삼중열병합시스템 초기투자비 54.989 백만원을 고려하면 총 초기투자비는 3,024 백만원임을 알 수 있다. 경제성 분석을 실시하여 초기투자비를 고려한 누적 순현재가치(NPV)가 “0”보다 크거나, 사업시행에 따라 기대되는 현금 유입과 현금 유출의 현재가치가 같게 되는 할인율을 의미하는 내부수익률(IRR)이 사회적 할인율(4.5%)보다 높을 경우 재무적 타당성 있다고 판단된다.^[19]

경제성 분석 결과를 살펴보면, 내부 초기투자비를 포함한 운영기간 누적 NPV는 162 백만원으로 “0”보다 크고 내부수익률(IRR) 역시 사회적 할인율(4.5%)보다 높으므로 재무적 타당성이 있음을 확인하였다.

Fig. 2는 사업연차별 할인율이 고려된 누적현금흐름을 나타낸다. 그림으로부터 5년, 10년, 15년차에 누적현금흐름이 감소함을 알 수 있는 주된 이유는 5년, 10년, 15년차

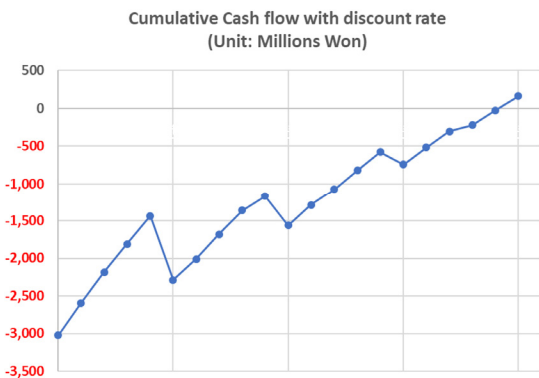


Fig. 2. Cumulative cash flow with discount rate by business year

의 스택 교체 비용으로 인하여 해당 연차의 순현재금흐름이 “-”값을 갖기 때문이다. 즉, 스택 내구성과 관련된 스택 교체 비용은 본 경제성 분석에 상당한 영향을 미치는 성능 변수임을 알 수 있다.

Table 9는 Reference 조건에서 고정비(초기투자비), 변동비(유지보수비, 연료비, 전기요금)를 포함하여 20년 운영기간 동안의 연차별 순현재금흐름과 누적현재금흐름을 나타낸다. 여기서, 순현재금흐름은 초기투자비, 유지보수비, 수소 연료비, 전기요금절감액의 합을 의미하며 해당 연차의 순현재금흐름이 “+” 또는 “-”값을 가질 수 있음을 알 수 있다.

55대의 25 kW급 삼중열병합발전시스템의 도입에 따라 운영에 필요한 수소연료비와 유지보수비가 발생하는 반면에, 전기요금은 절감된다. 1년차의 결과를 사례로 설명하면 순현재금흐름(450 백만원)은 유지보수비(-84 백만원), 수소연료비(-1,365 백만원), 전기요금 절감액(1,898 백만원)을 합한 금액을 의미한다. 이 중에서 유지보수비(-84 백만원)는 삼중열병합시스템 1대 기준의 정기유지보수비(1,430 백만원)와 냉방출력 31.43 kWth에 대한 흡수식냉동기의 부품 교체 비용(0.089 백만원)을 합한 1대당 1.519 백만원에 삼중열병합시스템 55대를 곱한 결과와 같음을 알 수 있다. 또한 수소연료비(-1,365 백만원)는 Reference 조건의 정격연료유량 2.146 kg/hr, 운영기간 1년(8760 hr), 삼중열병합시스템 55대와 연료요금(1,320 원/kg)을 각각 곱하여 적용한 비용임을 알 수 있다. 그리고 20년차의 할인율을 고려한 누적현재금흐름은 162백만원으로 Table 8의 해당 값과 같음을 알 수 있다.

Table 10은 1월 1일 시간별 전기 및 냉방 에너지 밸런스 결과를 나타낸다. Table 10으로부터 식 (3)에서 나타낸 바와 같이, 각 시간별 데이터센터의 전기부하는 수전전력과 삼중열병합시스템에서 생산되는 전기의 합과 같다는 전기 에너지 밸런스 식을 만족하고 각 시간에서 삼중열병합시스템에서 생산되는 전기가 1,375 kWe이므로 선정된 25 kW급 삼중열병합시스템 55대가 모두 운전되고 그 때의 삼중열병합시스템 냉방출력은 1,729 kWth임을 알 수 있다. 0시에 냉각탑에서 소비되는 전력은 112 kW이며 이는 식 (11)에 의해 산출될 수 있으며, 식 (6)에서 나타낸 바와 같이 각 시간별 데이터센터의 냉방부하는 기존 전기냉동기에서 생산되는 냉열과 삼중열병합시스템의 흡수식냉동기에서 생

Table 9. The hourly results of the electricity and cooling energy balance on January 1st at reference condition

Time	Electricity (kWe)				Cold Heat (kWth)		
	P_{grid}	P_{TGEN}	P_{load}	$P_{g \rightarrow tower}$	$Q_{cool,ERF}$	$Q_{cool,TGEN}$	$Q_{cool,load}$
0:00	211	1375	1586	112	1061	1729	2790
1:00	211	1375	1586	112	1061	1729	2790
2:00	211	1375	1586	112	1061	1729	2790
3:00	204	1375	1579	111	1049	1729	2777
4:00	204	1375	1579	111	1049	1729	2777
5:00	197	1375	1572	111	1036	1729	2764
6:00	219	1375	1594	112	1074	1729	2802
7:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
8:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
9:00	211	1375	1586	112	1061	1729	2790
10:00	219	1375	1594	112	1074	1729	2802
11:00	240	1375	1615	114	1112	1729	2840
12:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
13:00	204	1375	1579	111	1049	1729	2777
14:00	240	1375	1615	114	1112	1729	2840
15:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
16:00	240	1375	1615	114	1112	1729	2840
17:00	247	1375	1622	114	1124	1729	2853
18:00	247	1375	1622	114	1124	1729	2853
19:00	240	1375	1615	114	1112	1729	2840
20:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
21:00	197	1375	1572	111	1036	1729	2764
22:00	233	1375	1608	113	1099	1729	2828
23:00	219	1375	1594	112	1074	1729	2802

산되는 냉열의 합과 같다는 냉방 에너지 밸런스 식을 만족함을 알 수 있다.

식 (10)으로부터 0시의 기존 전기냉동기의 냉방출력(1061 kWth)과 기존 전기냉동기 COP(4.4)를 고려하면 0시에 기존 전기냉동기에서 소비되는 전력은 241 kWe로 계산된다. 그러므로 0시의 총 사용전력(564 kWe)은 전기부하에 공급되는 수전(211 kWe), 냉각탑에서의 소비동력(112 kWe)과 기존 전기냉동기에서의 소비동력(241 kWe)의 합으로 계산된다. 기본요금과 전력량요금으로 구성되는 한전 전기요금 체계에 따라서 0시에서 1시까지의 1시간 동안 사용한 전력량(564 kWh)에 대한 전력량요금은 육지, 겨울철 경부하시 간대 2030년 예상전기요금의 전력량요금단가(69.7 원/kWh)를 적용하면 39,311원임을 알 수 있다. 나머지 운전시간에

대해서도 마찬가지로 방법을 이용하여 1년간 총 전력량요금(590 백만원)을 산정할 수 있다. 그리고, 기본요금은 최근 1년 중 최대부하를 요금적용전력으로 적용하여 월 기본요금단가를 곱하여 매월 과금하는 방식이다. 본 연구에서는 1년 중 최대부하(1,260.1 kW¹)를 요금적용전력으로 적용하

1) Table 3의 최대부하 발생 시각인 7월 24일 18시에 발생되며(전기 부하 1863.3 kWe, 냉방부하 4,357.5 kWth), 전력부하 총합은 ①수전(Grid to Load), ②냉각탑 소비동력, ③기존 전기냉동기 소비동력의 합임. ①수전(Grid to Load)은 삼중열병합시스템 55대에서 생산되는 전력은 1,375 kWe이므로 그 나머지에 해당하는 수전은 488.3 kWe임. ②냉각탑 소비동력은 총 냉방부하가 4,357.5 kWth이고 여기에 냉각탑에서의 단위 냉방출력당 소비전력변환계수(0.04 kWe/냉방 kWth)를 고려하면 174.3 kWe임. ③기존 전기냉동기 소비동력은 총 냉방부하가 4,357.5 kWth이고 삼중열병합시스템 55대에서 생산되는 냉방출력은 1,728.6 kWth이므로 기존 전기냉동기에서 2,628.9 kWth의 냉열을 생산함. 여기에 기존 전기냉동기 소비동력 COP 4.4를 고려하면 597.5 kWe임. 따라서, 전체 전

Table 10. Net cash flow, initial investment cost, variable cost, and cash flow at reference condition (Unit: Millions Won)

Business Year	Net cash flow	Initial Investment cost	O&M cost	Fuel cost	Electricity cost			Cumulative CF (without Discount rate)	Net CF (With Discount rate)	Cumulative CF (with Discount rate)
					Savings (①-②)	① (After introduction)	② (before introduction)			
0	-3,024	-3,024	0	0	0	0	0	-3,024	-3,024	-3,024
1	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-2,574	431	-2,594
2	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-2,124	412	-2,181
3	423	0	-111	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,701	370	-1,811
4	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,251	377	-1,434
5	-1,062	0	-1,596	-1,365	1,898	-814	-2,712	-2,314	-852	-2,286
6	359	0	-174	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,954	276	-2,010
7	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,504	331	-1,679
8	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,054	317	-1,363
9	285	0	-249	-1,365	1,898	-814	-2,712	-769	192	-1,171
10	-609	0	-1,142	-1,365	1,898	-814	-2,712	-1,378	-392	-1,563
11	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-928	277	-1,286
12	359	0	-174	-1,365	1,898	-814	-2,712	-568	212	-1,074
13	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	-118	254	-820
14	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	332	243	-577
15	-319	0	-852	-1,365	1,898	-814	-2,712	14	-165	-741
16	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	464	223	-519
17	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	914	213	-306
18	189	0	-345	-1,365	1,898	-814	-2,712	1,103	86	-220
19	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	1,553	195	-25
20	450	0	-84	-1,365	1,898	-814	-2,712	2,003	187	162

고 기본요금단가(8,320 원/kW·월)에 12개월을 고려하는 것으로 가정하였고 그 결과 기본요금은 126 백만원으로 산정되었다. 따라서, 기본요금과 전력량요금을 합한 세전 전기요금은 716 백만원이며, 여기에 부가가치세(10%)와 전력산업기반기금(3.7%)를 고려하면 1년차 도입 후 전기요금은 814 백만원으로 Table 10과 같음을 알 수 있다.

3.5.2 CASE 1 조건의 경제성 분석 결과

CASE 1은 Reference 조건보다 5% 성능 개선된 삼중열병합시스템(발전효율 41%, 열효율 54%)을 데이터센터에 도입하는 경우의 최적용량 산정결과 및 경제성 분석 결과를 나타낸다. 삼중열병합시스템의 최적용량 산정 결과를 살펴

보면, Reference 조건에서의 결과와 동일하게 정격발전출력 25 kW급 삼중열병합시스템 총 55대가 선정되었음을 알 수 있다. 따라서, 총 설치용량은 1,375 kW이고 초기투자비는 3,024 백만원임을 알 수 있다. 경제성 분석 결과를 살펴보면 삼중열병합시스템의 성능이 90%에서 95%로 개선되었을 때 내부수익률(IRR)은 11.0841%로 Reference 조건에 비하여 약 6.0%p 증가함을 알 수 있으며 이 결과는 시스템 효율 향상에 소요되는 R&D 투자 비용을 고려하지 않는 경우의 내부수익률을 의미한다. 따라서, R&D 비용이 증가할수록 투자비로 반영되므로 내부수익률(IRR)의 감소를 유발하게 된다. 또한, 현재 수준의 성능 조건을 의미하는 Reference 조건보다 내부수익률(IRR)이 감소하게 되면 현재 수준의 성능 조건을 갖는 시스템을 채택하는 것이 경제성 측면에서 효과적이므로 성능 개선을 위한 투자 동인이 사라지게 된다. 따라서, 새로운 R&D 투자는 Reference 조

력부하는 ①수전(Grid to Load) 488.3 kW, ②냉각탑 소비동력 174.3 kW, ③기존 전기냉동기 소비동력 597.5 kW의 합인 1,260.1 kW로 계산됨.

건의 내부수익률(IRR)보다 클 때 실행할 수 있다. 따라서, Table 8에 제시된 허용R&D투자비용은 내부수익률 11.0841%를 나타낸 CASE 1의 결과에서 투자금을 반영하였을 때 Reference 조건의 내부수익률(IRR)보다 최소한으로 클 때까지 반영할 수 있는 투자비용의 최대치를 백만원 단위로 나타낸 값을 의미하며 이 경우 내부수익률(IRR)은 5.091%가 되고 운영기간 누적NPV는 251만원임을 알 수 있다. 그리고 Table 8에서 제시된 투자효과는 CASE 1의 조건과 Reference 조건 간의 내부수익률(IRR) 차이를 허용R&D 투자비용(10억원 기준)으로 나눠 산출한 결과를 의미한다. 이는 현재 기준 즉, Reference 조건에서 새로운 시스템 즉, CASE 1을 도입할 경우 발생하는 경제적 편익을 새로운 시스템의 개발에 요구되는 R&D 비용을 반영하여 경제적 효과 즉, 내부수익률(IRR)을 산출할 수 있게 한다.

3.5.3 경제성 분석 결과 요약

삼중열병합시스템의 최적 용량 산정 결과를 살펴보면, CASE 2를 제외한 나머지 모든 CASE에서 정격발전출력 25kW 삼중열병합시스템 총 55대가 선정되었음을 알 수 있다. 이는 데이터센터에 적용되는 삼중열병합시스템의 총 설치용량이 1,375 kW로 동일하고 담당한 전기부하 역시 같다는 것을 의미한다. 또한, 초기투자비도 3,024 백만원으로 같으므로 누적현금흐름, 내부수익률(IRR) 등의 경제성 분석에서 초기투자비용이 동일하게 반영되었다는 것을 알 수 있다. 반면, CASE 2는 삼중열병합시스템이 총 53대가 선정되었는데, 이는 Table 4에서 알 수 있듯이 정격냉방출력이 크게 증가하여 총 냉방출력의 합이 Table 2에서 제시된 최소 냉방부하(2,532 kWth) 이상으로 공급될 수 없기 때문이다.

경제성 분석 결과를 살펴보면, 초기투자비를 포함한 20년 운영기간 동안의 누적 NPV는 CASE 5가 5,359 백만원으로 가장 많으며 CASE 3(4,054 백만원), CASE 2(2,581 백만원), CASE 1(1,945 백만원), CASE 4(1,466 백만원) 순으로 높음을 알 수 있다. CASE 1과 CASE 4의 결과를 살펴보면, 고온PEMFC의 시스템 효율 5%를 개선하는 것이 스택 교체 주기를 5년에서 10년으로 개선한 것에 비해 누적 NPV가 479 백만원 크다는 것을 알 수 있다. 그리고, CASE 1과 CASE 2의 결과를 비교하면 고온PEMFC의 시스템 효

율 5% 개선보다 흡수식냉동기의 COP를 0.8에서 1.2로 개선한 경우의 누적NPV값이 636 백만원 더 많음을 알 수 있다. CASE 3은 고온PEMFC 시스템 효율과 흡수식냉동기 냉방효율을 모두 개선하였으므로 그에 따라 경제성 효과가 증가했음을 알 수 있고, CASE 5는 CASE 3에서 스택 교체 주기 개선 조건이 추가로 반영된 사례이므로 CASE 전체에서 누적NPV 결과가 가장 크다는 것을 알 수 있다.

지금까지 설명한 20년 운영기간 동안의 누적NPV 값에는 삼중열병합시스템 도입에 따른 초기투자비가 반영되어 있는데, 이 “초기투자비”는 기자재비용 즉, 삼중열병합시스템 제품 구매비용과 시스템 설치공사비용의 합을 의미한다. 이는 현재의 조건보다 우수한 성능 조건을 갖는 시스템으로 교체하는 경우에 시스템 교체 비용 즉 구매비용과 설치비용만 반영하여 시스템 운영기간 20년 동안의 누적현금흐름을 산출한 사례에 해당한다. 따라서, Table 8의 경제성 분석 결과에 제시된 운영기간 누적 NPV 결과는 현재보다 우수한 성능을 갖는 대체품으로 교체할 경우, 즉, 현재 성능의 Reference 조건보다 개선된 CASE로 교체할 경우, 운영기간 동안 발생하는 경제적 효과를 산정하는데 활용할 수 있다. 또한, 고려 가능한 CASE가 복수일 경우, 상호 간에 비교 분석을 통하여 비교 우위의 CASE를 채택하는데 활용할 수 있다.

한편 Table 8에 제시된 경제성 분석 결과를 R&D 관점에서 살펴보면, 기술개발을 통하여 성능이 개선된 시스템을 도입하는 경우에는 R&D 비용이 투자비에 반영되어야 한다. 그리고, 허용 가능한 R&D 비용의 최대값은 현재의 조건보다 경제성이 훼손되지 않아야 하므로 Reference 조건의 내부수익률(IRR) 보다 최소한으로 큰 수준까지가 된다. 본 연구에서 분석한 각 CASE별 허용 가능한 R&D 비용은 Table 8에 제시하였고 각 CASE별 허용 가능한 R&D 비용은 내부수익률(IRR)의 순서와 동일하게 CASE 5 > CASE 3 > CASE 2 > CASE 1 > CASE 4 순으로 크다는 것을 알 수 있다. 또한 식 (12)에 의해 계산되는 R&D투자효과는 허용 R&D 비용을 10억원 투자하는 경우, 증가되는 내부수익률의 비율을 의미하며 이는 다양한 허용 R&D 비용과 내부수익률의 증가분을 하나의 변수로 고려하여 R&D 투자의 우선순위를 비교하는데 사용된다. 10억원당 투자효과를 살펴보면, CASE 4의 투자효과가 3.9146%로 가장 높으며,

CASE 2(3.6627%), CASE 1(3.5391%), CASE 5(3.4722%), CASE 3(3.4039%) 순으로 높음을 알 수 있다. 즉, R&D 비용을 반영하지 않은 경제성 분석 결과에서는 CASE 4의 내부수익률이 가장 낮지만, 성능 개선에 필요한 R&D투자비용을 고려한 투자효과 관점에서는 CASE 4가 가장 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 R&D 투자에서 발생하는 직접적인 성능(효율, 내구성) 개선 효과를 경제적 가치로 산출하고 그 값을 통하여 합리적인 R&D 투자비용 규모를 파악하고자 하였다. 연구대상은 고온 PEMFC가 탑재된 삼중열병합시스템을 가정하였고, 직접적인 경제효과는 데이터센터에 적용되었을 때 발생하는 편익을 산출하였다. 비교 분석을 위하여, R&D 투자 이전의 현재 조건에서의 분석을 먼저 수행하여 기준(Reference)으로 삼았고, R&D 투자에 따른 사례분석은 성능개선 조건을 달리한 5개의 사례(CASE)를 가정하여 분석하였다. 또한, 연구 전과 후의 에너지밸런스를 분석하여 연구 설계와 결과 값이 일치한다는 것을 확인하였다.

본 사례연구의 결론을 종합하면 다음과 같다.

첫째, R&D 투자로 발생하는 직접적인 경제성 효과를 산출하는 방법을 제시하였다. 즉, R&D 투자에 따른 비용과 편익의 경로를 추적하고 제약조건과 에너지밸런스를 만족하는 합리적인 방법론을 제시하였다. 그에 따른 사례연구로 연료전지시스템의 R&D 효과를 분석하였다.

둘째, R&D 투자에서 허용 가능한 투자규모를 산출하였다. 즉, R&D 투자의 순(+) 가치는 최소한 R&D 투자 이전인 현재의 조건(Reference) 이상일 경우 발생하므로 현재의 조건을 기준으로 R&D 투자에 따른 직접적인 효과를 편익으로 산출하여 허용 가능한 투자규모를 제시하였다.

셋째, 복수의 사례연구에서 투자효과에 따른 투자우선순위를 제시하였다. 5가지 사례연구를 수행하여, R&D 투자효과 분석에서 R&D 개발 비용의 포함 전과 후의 투자 우선순위가 달라짐을 확인하였다. 이는 복수의 R&D 투자 후보군의 선택적 투자결정에 있어, 허용가능한 R&D 규모를 정확히 산출하고 이를 비용에 반영하는 것이 중요하다는 것을 의미한다.

본 연구에서 도출된 결과는 R&D 기획 단계에서 성능개선을 목적으로 하는 신규 R&D 투자의 실행을 결정함에 있어 합리적인 의사결정을 위한 가이드라인을 제시할 수 있다는 점에서 정책적인 시사점이 있다. 국가연구개발사업은 편성된 예산의 제한성으로 인하여 비교 우위의 R&D 과제를 선택적으로 지원하게 되는 구조이다. 따라서, 투입 예산 대비 효과가 기대되는 과제를 선정하는 것이 중요하게 되며, 그 첫 단계는 과제기획에서 출발한다. 선정된 후보군 중에서 비교 우위의 과제를 선정하는 기획 절차에 있어서 본 연구의 결과는 R&D 투자효과에 대한 기준으로 활용될 수 있다.

그러나, 본 연구는 성능개선을 주제로 한 사례연구이므로 이외 다양한 주제에 대한 연구는 필요할 것이다. 또한, 본 연구는 R&D 투자에서 발생하는 직접적인 투자효과를 산출한다는 특징이 있으나, 일반적으로 연구 시행착오에 따른 위험비용이나 산업적 기여도 등이 반영되는 R&D 예산의 산정과는 차이가 있다. 따라서, R&D 과제 단위에서의 적정 예산 규모 추정은 본 연구 결과를 토대로 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 국가연구개발 투자 결정 과정에서는 경제성 이외에도 정책성, 사회적 등에 관한 가치가 평가 또는 판단 요소에 포함될 수 있으므로 이에 대한 후속 연구도 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 한국에너지기술연구원 연료전지 연구실 그리고 (주)블루이코노미전략연구원 관계자분들께 감사드립니다.

References

- [1] Ministry of Science and ICT, 2022, “Explanatory data on the national R&D budget and fund management plan”, <https://www.msit.go.kr/contents/cont.do?sCode=user&mPid=75&mId=82>.
- [2] IRENA, 2021, “Renewable capacity highlights”, <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publicat>

- ion/2021/Apr/IRENA_-RE_Capacity_Highlights_2021.pdf?la=en&hash=1E133689564BC40C2392E85026F71A0D7A9C0B91.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021, “Carbon-neutral strategy in the industrial and energy sectors”, http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=163606.
- [4] Kim D.H., and Ahn, S.G., 2011, “System dynamics modeling for the allocation of national R&D investment”, *Korean System Dynamics Review* **12**(2), 153-176.
- [5] Jung, M.J., and Park, N.E., 2018, “Improvement of the R&D budget coordination for small-scale new program”, *Journal of Budget and Policy*, **7**(2), 1-27.
- [6] Bae, Y.H., Jung, J.H., Hwang, S.W., Seo, B.S., Go, M.J., Jung, H.J., and Kim, J.S., 2016, “Study on optimal R&D resource allocation between government and private sector”, Science and Technology Policy Institute, Republic of Korea.
- [7] Kim, Y.M., and You, H.S., 2016, “A study on empirical analysis and a plan to improve the policy for performance assessment of national R&D projects”, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, **19**(1), 191-229.
- [8] Choi, K.H., 2021, “A study on derivation of performance factors of government energy R&D projects : From the theory of the Technical Regime”, *Journal of Energy Engineering*, **30**(1), 65-82.
- [9] Choi, G.B., Kim, M.J., Cho, I.K., Kim, E.S., and Heo, E.Y., 2014, “Analysis of efficiency for domestic energy technology development programs using DEA technique”, *Int. J. Inov.*, **9**(2), 77-98.
- [10] Woo, C.W., 2019, “A study on R&D efficiency of clean technology: Focused on new and renewable energy R&D projects”, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, **22**(4), 690-708.
- [11] Lee, J.W., and Yang, J.S., 2017, “Effect of government energy R&D investment on the sales of beneficiary firms”, *New. Renew. Energy*, **13**(1), 72-79.
- [12] Kim, H.S., and Choi, G.H., 2020, “A study on R&D efficiency of new and renewable energy core technology: focusing on qualitative achievements”, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, **23**(5), 890-903.
- [13] Cho, J.K., Hong, M.H., Sung, R.C., Jeong, C.S., and Kim, B.S., 2006, “A study on load profiles and energy consumption for the thermal environment control in the data center”, *Proceeding of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers Conference of Korea*, 451-456.
- [14] Wahlroos, M., Pärssinen, M., Manner, J., and Syri, S., 2017, “Utilizing data center waste heat in district heating e Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks”, *Energy* **140**(1), 1228-1238.
- [15] Mathworks, 2019, “Mixed-integer linear programming (MILP)”, <https://kr.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>.
- [16] Wei, M., Lipman, T., Mayyas, A., Chien, J., Chan, S.H., Gosselin, D., Breunig, H., Stadler, M., McKone, T., and Beattie, P., *et al.*, 2014, “A total cost of ownership model for high temperature PEM fuel cells in combined heat and power applications”, *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*, 117.
- [17] KEPCO, 2022, “Basic supply terms and conditions and electricity bill”, <https://cyber.kepco.co.kr/kepco/front/jsp/CY/D/C/CYDCHP00101.jsp>, 118.
- [18] EERE, 2021, “Five things you might not know about hydrogen shot”, <https://www.energy.gov/eere/articles/five-things-you-might-not-know-about-hydrogen-shot>.
- [19] Ministry of Economy and Finance, 2019, “Criteria for financial analysis, general guidelines for conducting preliminary feasibility studies”, 10.
- [20] KIER, 2021, “A study on economic analysis of the operation of tri-generation system including HT PEMFC system at data center, Project No. C2-2417”.