

산업단지 내 CHP Hybrid System 최적화 모델에 관한 연구

오광민 · 김래현*[†]

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과

*서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과

(2019년 7월 17일 접수, 2019년 8월 6일 수정, 2019년 8월 8일 채택)

Optimization Process Models of Gas Combined Cycle CHP Using Renewable Energy Hybrid System in Industrial Complex

Kwang Min Oh · Lae Hyun Kim*[†]

Department of New Energy Engineering, Graduate School of Energy & Environment,
Seoul National University of Science & Technology,

*Department of Chemical & Biomolecular Engineering, College of Energy and Biotechnology,
Seoul National University of Science & Technology

(Received 17 July 2019, Revised 6 August 2019, Accepted 8 August 2019)

요 약

본 연구는 산업단지 내 Gas Combined Cycle CHP와 연계 가능한 신재생에너지원을 조합하여 최적의 설비용량을 산정하고자 하였다. 특히 2013~2016년도 에너지사용계획 협의 대상 산업단지 중 집단에너지 공급대상 지역 지정 연료사용량 요건은 연간 3.8만 TOE로 미달되지만, 열밀도가 92.6 Gcal/km²·h로 높은 세종첨단일반산업단지를 연구 대상으로 하였다. 그리고 신재생에너지 Hybrid System 경제성 분석 프로그램인 HOMER Pro를 이용하여 연료전지와 태양광발전을 연계한 FC-PV Hybrid CHP System의 최적화 운영 모델에 대해 분석하였다. 또 CHP의 주 공급 에너지원인 열에너지에 있어, 열수요량 뿐만 아니라 우점 업종에 대한 열수요 패턴을 분석하여 연구의 신뢰도를 높이고자 하였으며, 경제성 분석을 추가하여 상대적 편익을 비교하고자 하였다.

연구 결과, 신규 조성 중인 세종첨단일반산업단지의 전체 간접열 수요는 연간 378,282 Gcal이며, 이중 제지업종이 연간 293,754 Gcal인 약 77.7%를 우점하고 있었다. 산업단지 전체 간접열 수요에 대해 단일 Combined Cycle CHP의 최적 설비용량은 30,000 kW로, 이때 열생산은 CHP가 275,707 Gcal, 72.8 %를 분담하고, 첨두부하보일러 PLB가 103,240 Gcal, 27.2 %를 분담하는 것으로 분석되었다. 그리고 CHP와 연료전지, 태양광 조합에서는 최적 설비용량이 각 30,000 kW, 5,000 kW, 1,980 kW이며, 이때 열생산은 Combined Cycle CHP가 275,940 Gcal, 72.8%, 연료전지가 12,390 Gcal, 3.3%, PLB가 90,620 Gcal, 23.9%를 분담하였다. 여기서 CHP 용량이 감소하지 않은 것은, CHP 용량 감소에 따른 부족한 열 생산량에 대해 PLB의 과다한 운전이 요구되는 경제적이지 못한 대안이 도출되었기 때문이었다. 한편 우점 업종인 제지업종의 간접열 수요에 대해서는 Combined Cycle CHP, 연료전지, 태양광 조합의 최적 설비용량은 25,000 kW, 5,000 kW, 2,000 kW로, 이때 열생산은 CHP 225,053 Gcal, 76.5%, 연료전지 11,215 Gcal, 3.8%, PLB가 58,012 Gcal, 19.7%를 분담하는 것으로 분석되었다. 그러나, 현행 전력시장 및 가스시장에서의 경제성 분석결과는 모두 투자비 회수가 불가능한 것으로 확인 되었다. 다만, 우점 업종인 제지업종만을 대상으로 CHP와 연료전지, 태양광을 조합한 CHP Hybrid System이 단일 CHP System에 대해 연간 약 93억원의 경영여건을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 산업단지, 가스복합 열병합발전, 신재생에너지, 하이브리드 시스템

Abstract - The study attempted to estimate the optimal facility capacity by combining renewable energy sources that can be connected with gas CHP in industrial complexes. In particular, we reviewed industrial complexes subject to energy use plan from 2013 to 2016. Although the regional designation was excluded,

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-2-970-6620 E-mail: lhkim@seoultech.ac.kr:

Sejong industrial complex, which has a fuel usage of 38 thousand TOE annually and a high heat density of 92.6 Gcal/km²h, was selected for research. And we analyzed the optimal operation model of CHP Hybrid System linking fuel cell and photovoltaic power generation using HOMER Pro, a renewable energy hybrid system economic analysis program. In addition, in order to improve the reliability of the research by analyzing not only the heat demand but also the heat demand patterns for the dominant sectors in the thermal energy, the main supply energy source of CHP, the economic benefits were added to compare the relative benefits.

As a result, the total indirect heat demand of Sejong industrial complex under construction was 378,282 Gcal per year, of which paper industry accounted for 77.7%, which is 293,754 Gcal per year. For the entire industrial complex indirect heat demand, a single CHP has an optimal capacity of 30,000 kW. In this case, CHP shares 275,707 Gcal and 72.8% of heat production, while peak load boiler PLB shares 103,240 Gcal and 27.2%. In the CHP, fuel cell, and photovoltaic combinations, the optimum capacity is 30,000 kW, 5,000 kW, and 1,980 kW, respectively. At this time, CHP shared 275,940 Gcal, 72.8%, fuel cell 12,390 Gcal, 3.3%, and PLB 90,620 Gcal, 23.9%. The CHP capacity was not reduced because an uneconomical alternative was found that required excessive operation of the PLB for insufficient heat production resulting from the CHP capacity reduction. On the other hand, in terms of indirect heat demand for the paper industry, which is the dominant industry, the optimal capacity of CHP, fuel cell, and photovoltaic combination is 25,000 kW, 5,000 kW, and 2,000 kW. The heat production was analyzed to be CHP 225,053 Gcal, 76.5%, fuel cell 11,215 Gcal, 3.8%, PLB 58,012 Gcal, 19.7%. However, the economic analysis results of the current electricity market and gas market confirm that the return on investment is impossible. However, we confirmed that the CHP Hybrid System, which combines CHP, fuel cell, and solar power, can improve management conditions of about KRW 9.3 billion annually for a single CHP system.

Key words : Industrial Complex, Gas Combined Cycle CHP, Renewable Energy, Hybrid System

1. 서론

우리나라는 '15년 제21차 기후변화협약 당사국 총회를 통해 파리협정(Paris Agreement)을 채택하고, '17년 「미세먼지 관리 종합대책」 등을 제시면서, 온실가스 배출 감축 및 환경 친화적인 에너지 정책을 추진하고 있다.[1] 「2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안」(18.7)에서는 가장 많은 배출량을 차지하는 산업부문의 '30년 목표로 BAU(Business As Usual) 전망 배출량 481백만톤 대비 20.5%를 감축하는 382.4백만톤을 목표로 설정하였다.[2] 산업부문의 감축 수단으로써 설비 및 공정 효율화, 업종별 신기술·혁신기술 개발 및 보급 그리고 온실가스 저배출 연

료 및 원료의 대체(산업단지의 주연료인 석탄을 LNG 및 바이오매스 연료로 대체)를 제시하였다. 또, 「제8차 전력수급기본계획」(17.12)에서는 재생 에너지를 '30년 발전량의 20%로 확대 및 노후석탄 조기폐지와 석탄발전의 LNG 전환 등을 추진하는 것을 기본방향으로 설정하였다.[3] 이러한 주요 정책들의 이행계획 및 목표에 현실적으로 가장 적합한 핵심전원은 여러 국가 계획 등에서 제시된 바와 같이 열병합발전이 될 것이다. 따라서, 온실가스 감축목표 달성 및 미세먼지 저감을 위해서는 산업부문이 다수 입주해 있는 산업단지를 대상으로 집단에너지시스템의 핵심인 열병합발전의 확대 보급을 추진 할 필요가 있다.

한편, 우리나라는 산업단지에 집단에너지를 공

Table 1. Regional designation of districts to be supplied with integrated energy for industrial complexes

	Item	Requirements
New industrial complex	<ul style="list-style-type: none"> · Fuel consumption · Thermal density · Energy production ratio · Power generation capacity 	<ul style="list-style-type: none"> · more than 50,000 TOE per year · more than 60 Gcal/km²h · heat production capacity exceeds power production capacity · more than 20,000 kW

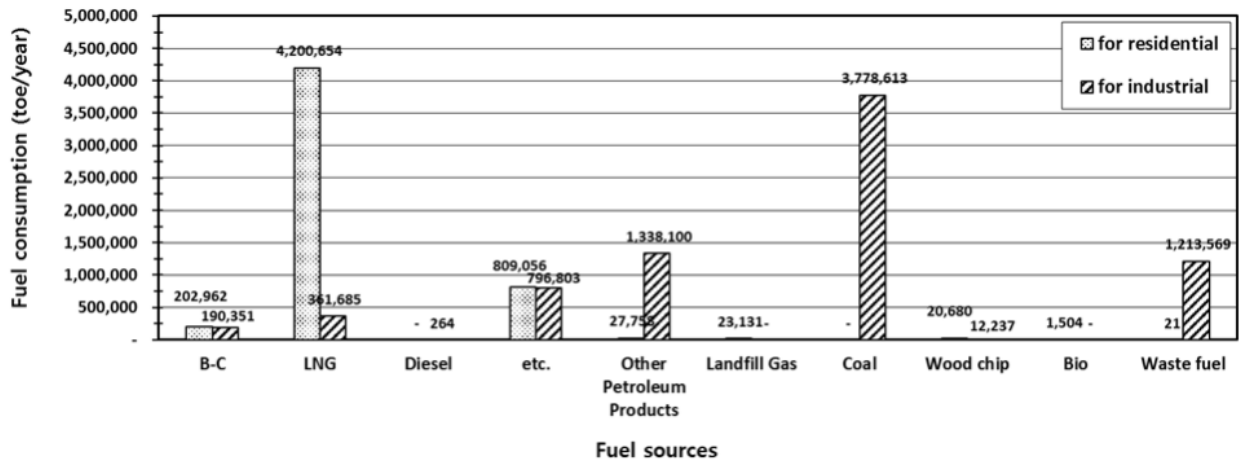


Fig. 1. Fuel consumption by fuel source for integrated energy producers in 2016.

급하고, 공급대상 지역지정이 되기 위해서는 집단 에너지사업법과 집단에너지공급기본계획에 근거하여 자가소비량을 제외한 열생산용량이 시간당 30 Gcal 이상으로써, Table 1과 같은 기준요건을 충족해야 한다.[4],[5]

그러나 지난 '13~'16년 에너지사용계획 협의 대상 신규 산업단지 21개소를 분석한 결과, 국가산업단지 1개소를 제외한 20개소가 집단에너지 공급대상 지역지정에서 제외 되었다. 이는 '16년 기준 국내 최종에너지 소비의 약 62.2 %를 차지[6]하고, Fig.1과 같이 고체연료를 주 연료원으로 사용하는 산업부문에서 청정연료원으로서의 에너지전환 검토가 보다 적극적으로 이루어질 필요가 있음을 보여준다. 즉, 종합효율이 우수한 청정연료원을 기반으로 하는 집단에너지사업의 활성화를 위해 집단에너지 공급대상 지역지정 기준을 보완 하거나, 중소형 집단에너지 공급설비 적용 가능성에 대해 연구 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 '13~'16년도 에너지사용계획 협의 대상 신규 산업단지 20개소 중 집단에너지 공급대상 지역지정이 되지 못한 산업단지를 비교, 분석 하였다. 이중 열밀도, 연료사용량 및 최대 전력부하 등이 가장 높은 세종첨단일반산업단지를 연구 대상으로 선정하였다. 그리고 전통적인 Gas Combined Cycle CHP(Combined Heat & Power, 열병합발전)와 입지 상 적용가능성이 높은 신재생에너지원을 조합한 CHP Hybrid System Model에 대해 최적화 프로그램을 통해 최적의 설비용량을 산정 하고자 한다. 이를 통해 산업단지 내에 중소형 집단에너지시스템 보급 확대 가능성을 분석하여 온실가스 감축 및 미세먼지 저감 목표 달성의 실현을 위한 개선 방향성을 확인하고자 한다.

2. 열수요 분석 및 최적화 모델 구성

2-1. 열수요량 산정

CHP Hybrid System의 최적 설비용량을 산정하기 위한 기초 에너지 수요량은 에너지사용계획 협의를 인용하기로 한다. 특히 CHP 설비 목적 상 열에너지(공정용으로 사용하는 직접열은 제외)를 분석하고, 산업단지에 필요한 전기에너지는 계통연계를 고려하는 것으로 가정한다.

세종첨단일반산업단지는 '15년 4월 기정 계획에서 '15년 10월 토지이용계획의 변경으로 에너지사용량이 기정 계획 대비 약 97.6 % 증가하였고, 변경된 에너지사용계획 협의서[7]에 따른 에너지수요는 Table 2와 같다. 산업단지의 지원시설 및 오폐수처리장의 간접열을 포함하면 연간 378,282 Gcal의 열수요가 있으며, 제지업종의 열수요는 산업단지 전체의 약 77.7 %인 293,754 Gcal이다. 전력사용량에 있어서도 제지업종이 전체 연간 부하 278,487 MWh 중 약 59.2%인 164,897 MWh의 부하를 차지하고 있다. 따라서 세종첨단일반산업단지는 제지업종이 전체 에너지수요에 대해 우점 업종임을 확인 할 수 있다.

2-2. 열수요 패턴 분석

앞서 살펴본 바와 같이 세종첨단일반산업단지는 제지업종이 에너지수요를 우점하고 있기에, 열수요 패턴은 제지업종의 열수요 패턴과 유사할 것임을 예상 할 수 있다. 이에, 제지업종에 대한 선행 연구자료를 분석하여 적용하기로 한다.

Table 2. The forecasting result of industrial process heat and power demand in Sejong industrial complex

	Industrial Process Heat (Gcal/year)			Power Demand (MWh/year)	
	Direct	Indirect	Sub-Total		
Total	130,794	378,282	100 %	509,076	278,487
Industrial Facility site	130,794	377,451	99.8 %	508,245	272,501
· Manufacture of pulp, paper and paper products	52,654	293,754	77.7 %	346,408	164,897
· Manufacture of chemicals and chemical products	8,927	17,175	4.5 %	26,102	4,439
· Manufacture of pharmaceuticals, medicinal chemical and botanical products	6,731	12,949	3.4 %	19,680	10,223
· Manufacture of fabricated metal products	7,824	1,580	0.4 %	9,404	4,571
· Manufacture of electronic components, computer ; visual, sounding and communication equipment	1,158	1,639	0.4 %	2,797	4,978
· Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	805	1,784	0.5 %	2,589	6,043
· Manufacture of electrical equipment	10,001	4,860	1.3 %	14,861	13,636
· Manufacture of other machinery and equipment	647	284	0.1 %	931	957
· Manufacture of electrical equipment	3,143	1,452	0.4 %	4,595	4,314
· Manufacture of fabricated metal products	4,884	1,779	0.5 %	6,663	4,671
· Manufacture of pharmaceuticals, electronic components, computer	18,145	25,264	6.7 %	43,409	38,625
· Manufacture of electronic components, precision	656	713	0.2 %	1,369	1,898
· Sector omitted	15,219	14,218	3.8 %	29,437	13,249
Other Facility site	0	831	0.2 %	831	5,986

제지업종은 에너지다소비업종으로 개별 업체별로 자가발전기 또는 소각장을 보유하는 형태로 운영하는 사례가 많다. 그러나 신규 산업단지의 유치되는 제지업종은 이러한 별도 자가발전기 또는 소각장 운영은 없는 것으로 가정하는 것이 타당할 것이다. '13~'15년도의 온실가스 명세서의 시설별 규모 및 가동시간 조사결과[8]를 보면, 제지업종은 연중 지속적으로 운영되고 있으며, 일일 평균 가동시간은 19.9시간, 연간 평균 가동일수는 296.4일로 분석되었다. 그리고 제지업종의 전력부하 패턴은 전력거래소의 보고서[9]를 통해 1차금속, 시멘트, 화학 등 타 업종과 유사하며, 일일 시간대별 부하는 '일자형'인 것을 확인 할 수 있었다.

한편, 제지업종에 대한 열수요 패턴과 관련된 선행 연구는 많지 않으나, '07년과 '09년에 단위

법(Per Unit Method; p.u.)을 통해 보고된 자료[10]에 따르면, 제지업종의 열부하 상대계수는 시간대별 변화가 규칙적인 경향을 보이며, 요일별 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다. 다만, 계절별로는 전체적인 열수요량의 차이만 발생하는 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 선행 연구자료의 계절별 최대, 최소 p.u. 수치를 통해 월별 상대적 가중치를 산정하고, 세종첨단일반산업단지 내 제지업종의 열과 전력 수요량에 대해 재추정한 상대계수를 적용하여 시간대별, 월별 수요패턴을 분석하였다. Fig. 2, Table 3은 세종첨단일반산업단지의 월별 p.u. 계산값과 열 부하율을 나타낸 것으로, 본 연구 다음 단계의 최적화 모델 구성 시에 분석 시나리오를 구분하고, 열부하 모델을 구성하였다.

Table 3. Monthly heat load rate in Sejong industrial complex

month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
%	11.0	11.0	9.0	8.5	8.5	6.0	6.0	6.0	7.5	7.5	8.0	11.0

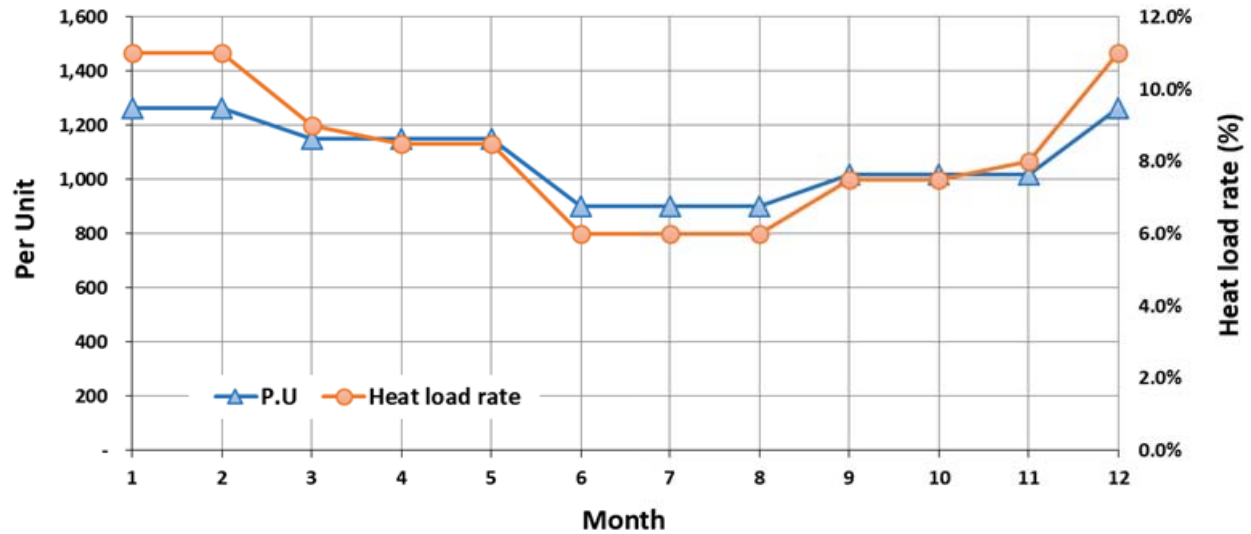


Fig. 2. Monthly heat load relative factor(p.u) and heat load rate in Sejong industrial complex.

Table 4. Legal classification of renewable energy in Korea

legal classification	review
Hydrogen energy	· byproduct hydrogen : minor amount generatd · hydrogen production technology : research stage
Fuel cells	· commercialization completed
Energy from liquefied or gasified coal, and energy from gasified heavy residual oil which fall within the criteria and scope prescribed by Presidential Decree	· restrictions on production, transportation and use due to geographical conditions
Solar energy	· commercialization completed
Wind power	· wind resource constraints due to geographical conditions
Water power	· no energy source
Marine energy	· no energy source
Geothermal energy	· restricted to the development of Pohang earthquake in September 2016
Bio energy converted from biological resources which falls within the criteria and scope prescribed by Presidential Decree	· restrictions on production, transportation and use due to geographical conditions

2-3. CHP 조합 신재생에너지원

본 연구는 NG를 연료로 하는 CHP와 세종첨단 일반산업단지에 조합 가능한 신재생에너지원을 선

정하여 설비를 조합하여 최적의 설비 용량을 분석하고자 하는 것이다. 현행 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법’ 제2조[11]에 따른

신재생에너지를 세종첨단일반산업단지의 입지·환경, 정책 방향을 고려하여 Table 4와 같이 비교하였다. 그 결과 즉시 최적화 모델에 조합 가능하고, 계통연계가 가능한 에너지원은 연료전지와 태양에너지로 분석되었다. 따라서, 본 연구에서는 세종첨단일반산업단지의 제반 여건을 고려하여 Gas CHP와 연료전지(Fuel Cell, FC), 태양광(Photovoltaic system, PV)을 조합하는 모델을 적용하기로 하였다.

2-4. 시뮬레이션 계획 및 최적화 모델 제안

일반적으로 열병합발전을 포함한 발전설비의 최적설비 용량 산정에 사용하는 프로그램에는 미국 Thermoflow사가 개발한 GT Pro, ST Pro, Thermoflex, Peace 등과 GE Energy사가 개발한 Gate-Cycle, SOAPP 등이 있다.[12] 한편, 본 연구에서는 신재생에너지를 조합한 최적화 공정모델을 제시하고자 하는 것으로 이러한 프로그램에서는 신재생에너지 설비를 추가할 수 없다. 이에 특정 지역의 기후환경 및 부하패턴을 이용하여 분산형 전원의 최적 조합을 고려한 설계를 위해 하이브리드 시스템 경제성 분석이 가능한 대표적인 프로그램인 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 HOMER(Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) Pro 3.13.3 버전을 통해 시뮬

레이션을 수행하고자 한다.[13] HOMER는 여러 가지 변수에 따라 발전설비들을 조합해 봄으로써 요구되는 부하량을 만족시키는 발전 설비들의 최적 용량을 결정하며, 총 순 현재비용이 증가하는 순으로 시스템 설비조합을 제시 할 수 있다. HOMER의 이러한 경제성 분석은 다음 formula (1)과 같이 계산함으로써 최적 용량을 제시하고 있다.[14],[15],[16]

$$Min(NPC_t) = Min \sum_{i=1}^n \frac{(K_{t+i} + RP_{t+i} + OM_{t+i})}{(1+r)^i} \quad (1)$$

먼저, HOMER의 주요 입력변수들은 시나리오를 산업단지 전체 에너지수요와 대표업종인 제지업종의 에너지수요에 대해 분석하는 것으로 구분하여 보다 경제적인 대안이 비교 될 수 있도록 하였다. 그리고 일반적인 단일 CHP만으로 설비를 구성하는 경우와 앞서 선정한 연료전지와 태양광 에너지를 조합한 CHP Hybrid System을 적용하는 경우로 나누어 최적설비용량과 경제성 분석을 수행하였다. 기타 경제성 분석에 필요한 시장변수는 시장에서 통용되는 일반적인 수치와 더불어 발전 에너지업종의 실적자료(건설비, 운영비 등)를 반영하였다. 그리고 설비규모는 CHP의 경우 전기사업법에 공급설비 요건으로 명시된 전력수요의 60% 이상의 공급능력에 해당하는 20 MW급 설비로 예

Table 5. Simulation and main equipment combination scenario using HOMER

scenario		Case 1	Case 2	Case 3
energy demand	heat (Gcal/year)	378,282		293,754
	power (MWh/year)	278,487		164,897
facility composition		CHP	CHP + FC + PV	
system architecture in HOMER				
remarks		total energy demand in Sejong industrial complex		energy demand in the paper industry

Table 6. Main market variables and equipment conditions

		unit	value	remarks
market environment (revenue)	SMP unit price	won/kWh	76.04	land average weighted SMP unit price from Jan. 2016 to Oct. 2016
	REC unit price	won/REC	126,975	average trading price from Jan. 2016 to Oct. 2016
	REC weight of FC	-	2.0	
	REC weight of PV	-	1.0	
	heat selling unit price	won/Gcal	59,040	district heating fee as of Oct. 2016
market environment (fuel cost)	CHP fuel cost	won/Nm ³	582.9134	JB city gas rate unit price as of Oct. 2016
	FC fuel cost	won/Nm ³	520.3579	JB city gas rate unit price as of Oct. 2016
	PLB fuel cost	won/Nm ³	704.8147	JB city gas rate unit price as of Oct. 2016
	fuel calorific value	MJ/Nm ³	42.7	average calories from the highest and lowest calories reported since 2015
market environment (finance)	other capital ratio	%	70.0	
	interest rate	%	5.0	
construction cost	CHP construction cost	won/kW	4,830,500	unit price by applying inflation rate of 2% to unit cost of KDHC-like plant in 2008
	FC construction cost	won/kW	5,500,000	construction unit price suggested by the manufacturer
	PV construction cost	won/kW	1,560,000	construction unit price suggested by the manufacturer
	converter construction cost	won/kW	300,000	construction unit price suggested by the manufacturer
operating costs	CHP's O&M unit cost	won/kWh	8.56	unit price reflecting adjusted operating expense of KDHC and Genco.
	FC's O&M unit cost	won/kWh	0.86	assumes 10% of CHP O&M unit cost
	PV's O&M unit cost	won/kWh	10,000	estimated annual cost by the manufacturer
depreciation period		years	25	

상하였다.[17] 이에 전기와 열을 동시에 공급하는 20 MW급의 유사규모 설비로써 한국지역난방공사의 동남권 CES 설비의 기술적 자료를 인용하였으며, 연료전지와 태양광설비는 실제 제작사의 제시안을 통해 입력하였다.[18] 그러나, 이러한 CHP Hybrid System 도입의 적정성 판단은 산업단지 건설(준비)기간에 이루어짐을 고려 할 필요가 있을 것이다. 따라서, 결과론적인 해석을 피하기 위해 에너지사용계획 협의서가 심의되는 단계 시점에 대해서 적정성 판단을 수행하고자 한다. 세종첨단일반산업단지는 '15년 10월 토지이용계획의 변경이 이루어진 점을 반영하여, 열 및 전력매출, 연료비의 기준 기간은 토지이용계획 변경 이후 1년 내로 하여 경제성을 분석하기로 한다. Table 5는 시뮬레이션의 시나리오를, Table 6은 경제성 분석에 필요한 주요 시장환경

변수와 설비의 가정 조건을 정리한 것이다.

3. 연구 결과 및 고찰

3-1. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 세종첨단일반산업단지의 전체 에너지수요 및 대표업종인 제지업종의 에너지수요에 대하여 단일 CHP를 적용한 사례와 CHP Hybrid System을 적용한 사례로 구분하여 HOMER를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 열부하 모델링에는 HOMER의 입력변수 단위가 전력량 단위인 kWh이므로 열수요량 단위인 Gcal/h를 에너지법 시행규칙 별표에 따른 환산기준 '1 kWh = 860 kcal'를 적용[19]하여 단위환산을 수행하였다.

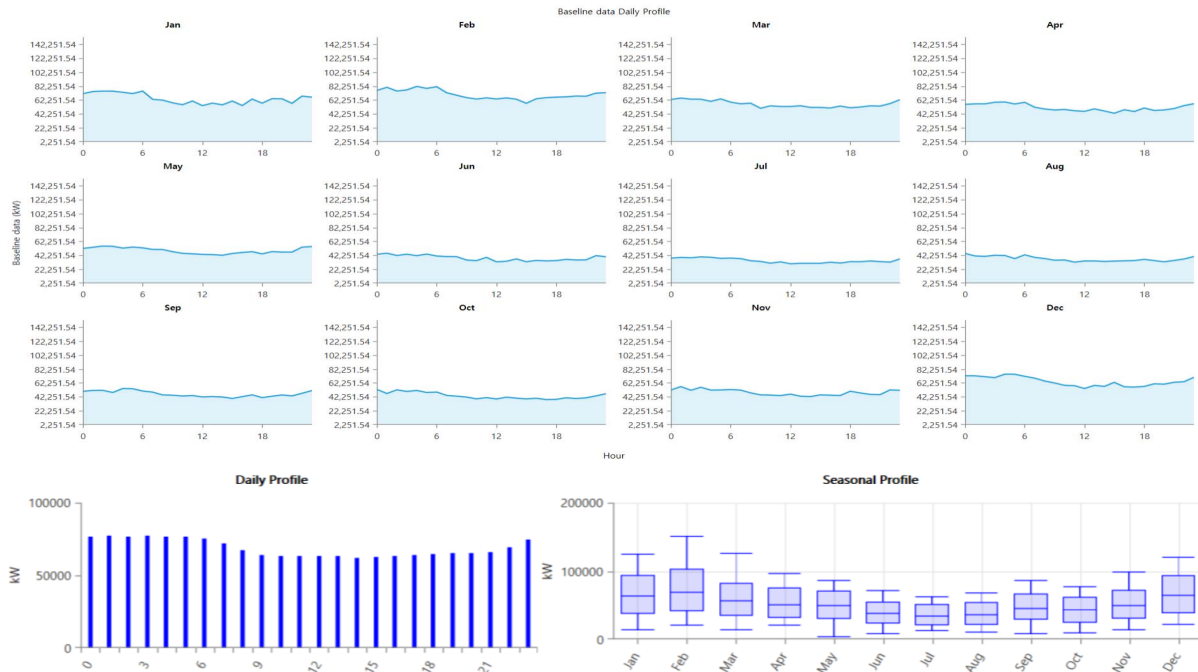


Fig. 3. Load profile of the overall heat demand of the industrial complex.

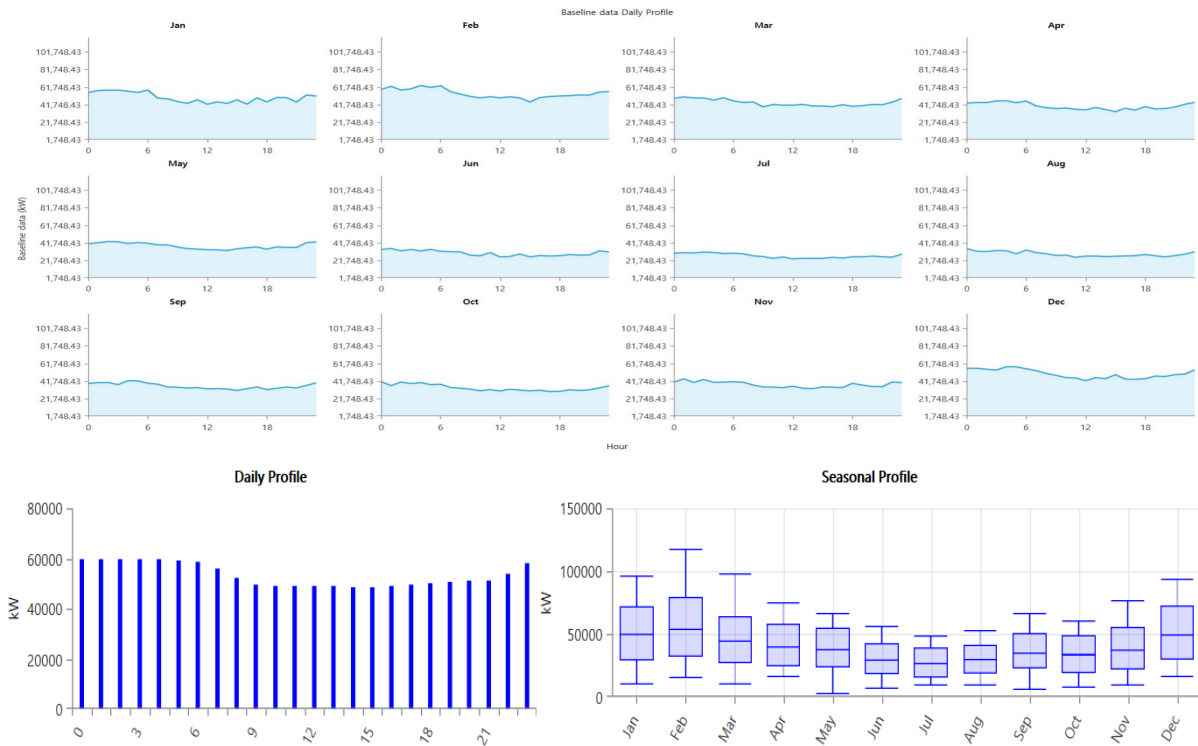


Fig. 4. Load profile of paper industry heat demand.

앞서 검토한 열수요 패턴 분석결과를 바탕으로 HOMER를 통해 열부하 모델링을 실시한 결과

Fig. 3, Fig. 4와 같은 profile을 확인 할 수 있었다. 산업단지 내에 대표업종인 제지업종의 부하

점유율이 약 77.7 %를 차지하고 있어, 수요량에서는 차이가 발생하지만, 시간대별, 월별 부하 패턴은 유사하게 분석 되었다.

첫 번째 시나리오인 산업단지 전체 에너지수요에 대한 단일 CHP 시뮬레이션을 수행하였고, HOMER 분석 결과, 순 현재비용(NPC; Net Present Cost)이 최소화 되는 최적의 CHP 설비용량은 Table 7과 같이 30,000 kW로 제시 되었다. 이 경우의 순 현재비용은 10,400 억원으로, 균등화발전비용(LCOE; Levelized Cost Of Energy)은 75.74 원/kWh로 분석 되었다. 그리고 국내 시장에 맞게 경제성 분석을 조정, 수행한 결과 총 투자비 1,594.1 억원에 연간 영업이익은 -190.1 억원으로 손실이 발생하여 타당성이 없는 것으로 확인 되었다. Fig. 5는 Case 1에 있어 월별 요구되는 CHP와 PLB의 에너지 생산량을 산출한 결과이며, Fig 6은 월별 요구되는 전력수요에 대해 CHP와 계통연계(Grid)를 통해

공급되는 전력량을 산출한 결과이다.

두 번째 시뮬레이션은 앞의 산업단지 전에 에너지수요에 대해 CHP와 FC, PV를 조합한 CHP Hybrid System을 적용하는 경우이다. Case 1에서 시스템 조합을 변경하여 순 현재비용인 NPC가 최소가 되도록 시뮬레이션을 수행한 결과, CHP 열 생산 분담률 대비 PLB 열생산 분담률이 과도하게 높게 도출 되었다. 집단에너지사업자 중 CHP보다 PLB를 우선적으로 가동하는 경우가 있긴 하지만, 본 연구에서는 앞서 분석한 Case 1과 비교하기 위해, CHP 용량을 동일한 30,000 kW로 설정하고 발전단가 비용(COE; Cost Of Energy)이 최소화 되는 조건에서 CHP Hybrid system의 최적 설비용량을 Table 8과 같이 조정, 도출하였다. Case 1의 단일 CHP를 적용하는 경우보다 연료전지와 태양광을 조합하게 되면, 운영비는 다소 감소하게 되나, 전체적인 투자비, 순 현재비용, 연료비용 등이

Table 7. Cost summary of a single CHP for the overall energy demand of the industrial complex

	optimal capacity (kW)	total NPC (100 mil. won)	LCOE (won/kWh)	operating cost (100 mil. won)	fuel cost (100 mil. won)
CHP	30,000	10,400	75.74	523.7	8,164.4

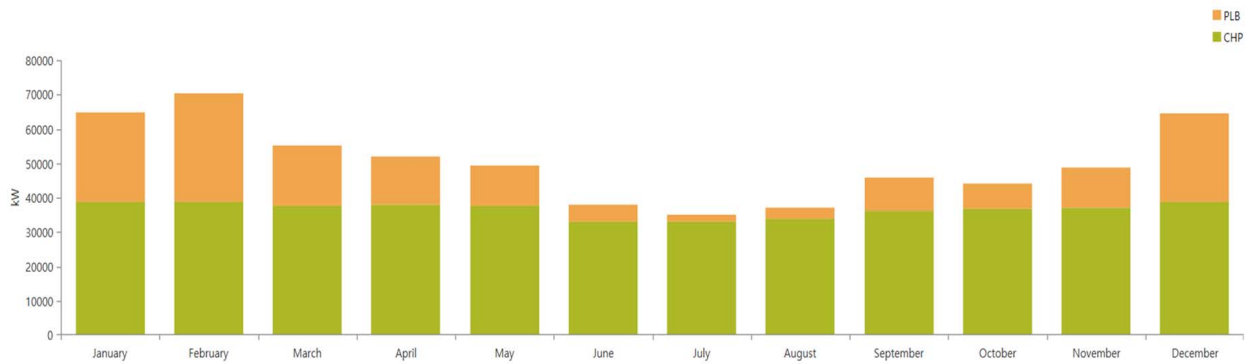


Fig. 5. Monthly CHP and PLB heat production for total heat demand in Sejong industry complex(Case 1).

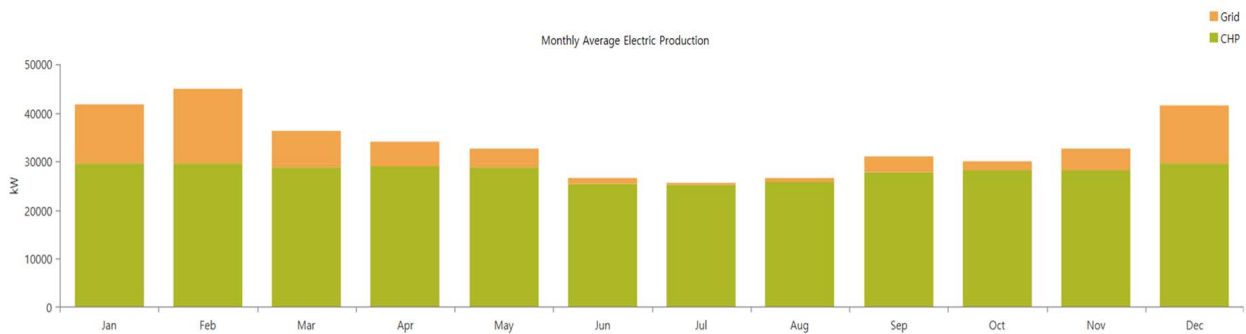


Fig. 6. Monthly CHP and Grid power supply for total power demand in Sejong industry complex(Case 1).

증가하게 된다. 총 투자비 1,949.1 억원으로 단일 CHP 보다 투자비는 증가하였으나, 신재생에너지 원이 조합되어 REC 발급에 따른 추가 매출이 발생하게 됨으로써 연간 영업이익은 -127.5 억원으로 분석되었다. Case 2 역시 경제적인 타당성은 없으나 단일 CHP를 적용하는 구성에 비해 손실 규모는 줄일 수 있음을 확인 할 수 있었다. Fig. 7은 Case 2에 있어 월별 요구되는 각 설비의 에너지 생산량을 산출한 결과이며, Fig 8은 월별 요구되는 전력 수요에 대해 CHP, FC, PV와 계통연계(Grid)를 통해 공급되는 전력량을 산출한 결과이다.

Case 1, Case 2와 같이 산업단지 전체 에너지수요에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 상대적으로 열 수요량이 낮아지는 하절기에 상대적으로 연료비가 비싼 PLB의 운전을 최소화하는 경우를 고려한다면, 단일 CHP 설비용량은 약 40,000 kW급으로

구성될 필요가 있다. 또한, 연료전지, 태양광발전을 조합하더라도 여전히 산업단지 전체 에너지수요를 충족하기 위해서는 운영손실 규모가 큼을 확인 할 수 있었다. 이에, 하절기와 동절기의 PLB 운전을 최소화하는 방안으로써, 산업단지 전체가 아닌 대표업종인 제지업종으로 에너지수요를 한정 짓게 되면, 아직 분양이 완료되지 않은 산업단지의 상황을 고려할 때 초기 투자비 부담 완화와 향후 운영에 따른 손실을 최소화 할 수도 있을 것이다. Case 3은 이러한 여건을 고려하여, 산업단지 내 대표업종인 제지업종에 한해 에너지수요량을 축소, 변경한 경우이다. 그리고 CHP와 연료전지, 태양광을 조합하여 시뮬레이션을 수행함으로써 최적의 설비용량을 분석하고, 경제성을 비교하고자 한다. 특히 Case 3에서는 보다 정교한 분석과 비교를 위해, Case 1에서 산정한 CHP 설비용량 30,000 kW는

Table 8. Cost summary of CHP hybrid system for the overall energy demand of the industrial complex

optimal capacity (kW)			total NPC (100 mil. won)	LCOE (won/kWh)	operating cost (100 mil. won)	fuel cost (100 mil. won)
CHP	FC	PV				
30,000	5,000	1,980	10,770	81.50	513.2	8,415.4

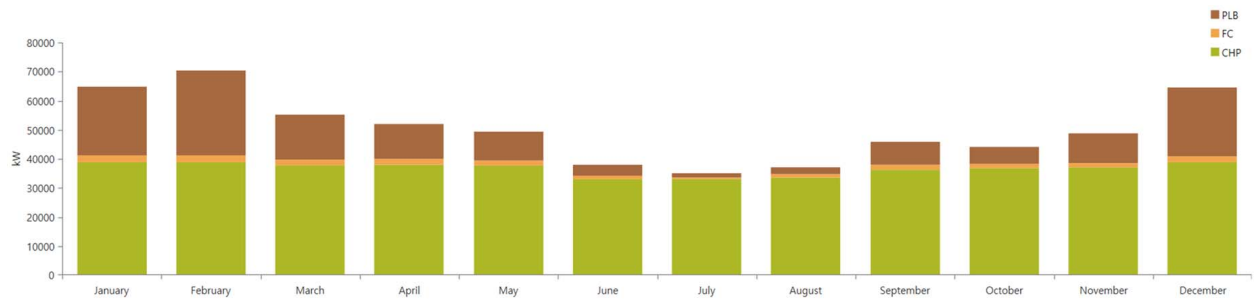


Fig. 7. Monthly CHP, FC and PLB heat production for total heat demand in Sejong industry complex(Case 2).

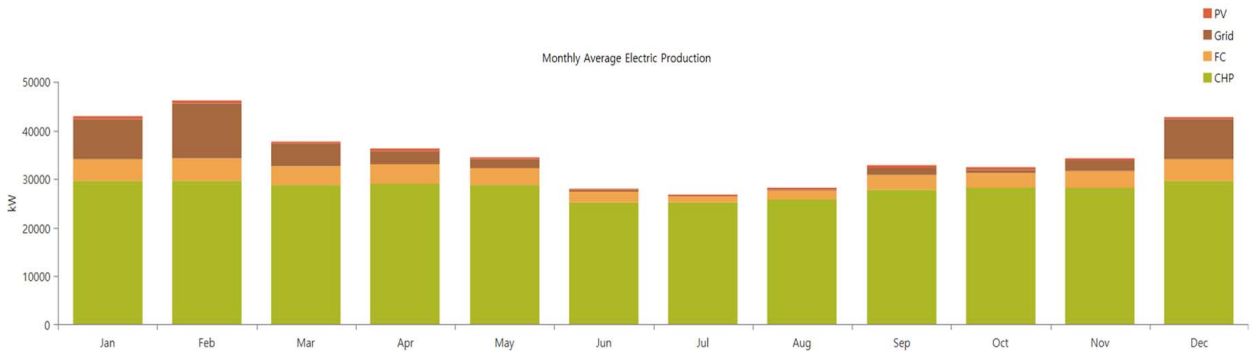


Fig. 8. Monthly CHP, FC, PV and Grid power supply for total power demand in Sejong industry complex(Case 2).

초과하지 않도록 제한하고, CHP 설비용량을 5,000 kW 단위로 변화시키면서 최적의 설비용량이 도출되도록 분석하였다.

제지업종의 열수요를 충족하면서 연료전지와 태양광 설비를 조합하여 최적의 설비용량을 분석한 결과 CHP는 25,000 kW, 연료전지는 5,000 kW 그리고 태양광발전은 2,000 kW로 도출되었다. 총 투자비 1,683.9 억원으로 Case 2 보다 13.6 %의 투자비가 절감된 반면, 영업이익은 23.8 % 개선되었다. 그러나 여전히 영업이익이 -97.1 억원으로 손실 규

모는 줄일 수 있었으나 경제성은 떨어짐을 확인 할 수 있었다. Table 9는 CHP 설비용량을 30,000 kW로 분석한 Case 2와 최적 설비용량을 비교한 것이다. Fig. 9는 Case 3에 있어 월별 요구되는 각 설비의 에너지 생산량을 산출한 결과이며, Fig 10은 월별 요구되는 전력수요에 대해 CHP, FC, PV와 계통연계(Grid)를 통해 공급되는 전력량을 산출한 결과이다.

산업단지 전체 에너지수요와 대표업종인 제지업종에 대한 에너지수요에 대해 단일 CHP System과

Table 9. Comparison of cost summary of CHP hybrid system Case 2 & Case 3 for the paper industry

Case	optimal capacity (kW)			total NPC (100 mil. won)	LCOE (won/kWh)	operating cost (100 mil. won)	fuel cost (100 mil. won)
	CHP	FC	PV				
Case 2	30,000	5,000	1,980	10,770	81.50	513.2	8,415.4
Case 3	25,000	5,000	2,000	8,271	78.74	384.5	6,636.3

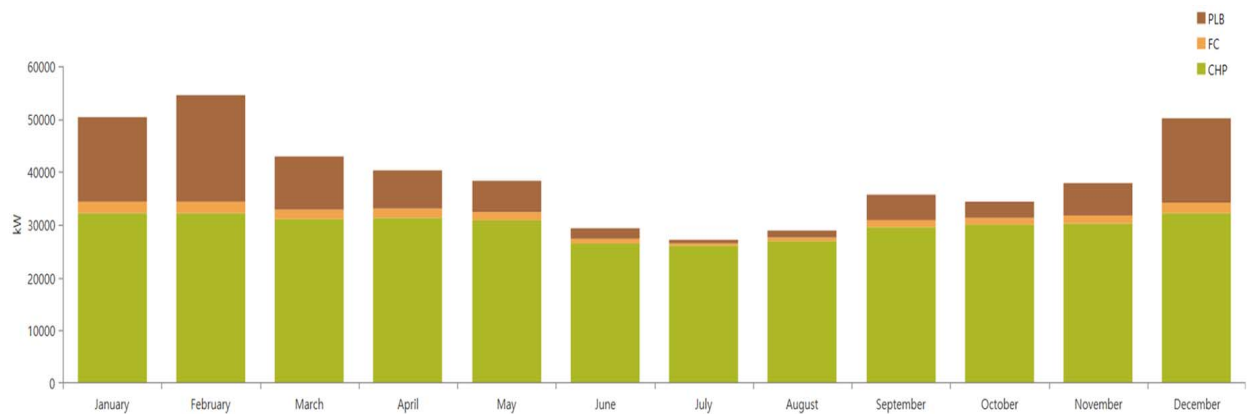


Fig. 9. Monthly CHP, FC and PLB heat production for the heat demand of paper industry(Case 3).

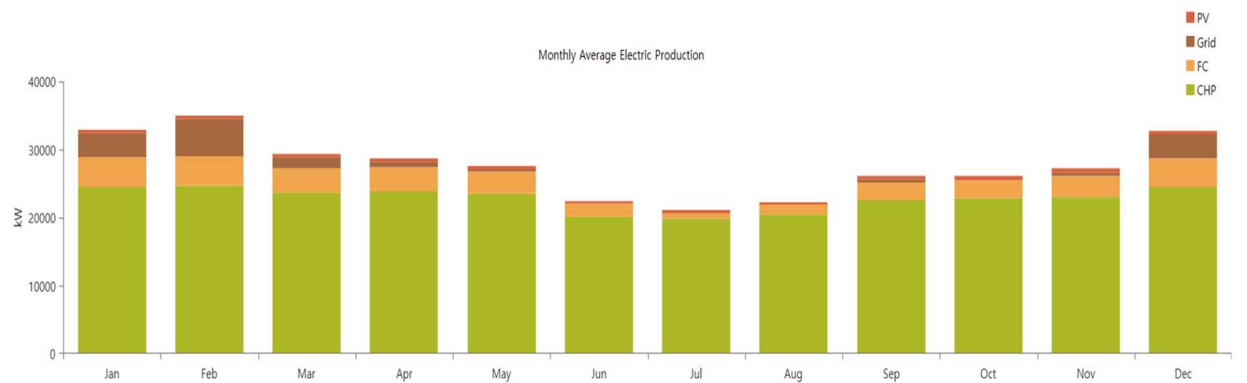


Fig. 10. Monthly CHP, FC, PV and Grid power supply for the power demand of paper industry(Case 3).

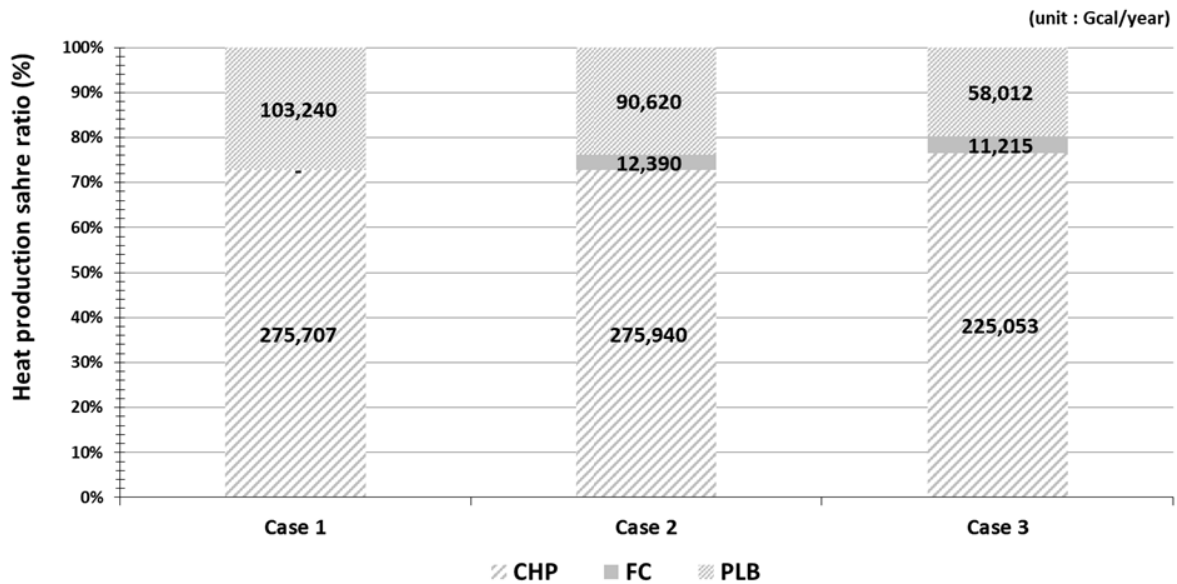


Fig. 11. Annual share of heat output of each facility by case.

연료전지, 태양광을 조합한 CHP Hybrid System으로 구분하여 HOMER를 이용한 시뮬레이션 수행하였다. 이를 통해 각 Case에 있어 최적의 설비용량을 분석하고, Fig. 11과 같이 각 Case 별 설비의 연간 최적화 운영 시 열생산량 분담비율을 비교하였다. 또, 국내 시장 조건에서의 개략적인 경제성을 검토하여, CHP Hybrid System을 적용한 경우에도 여전히 타당성 문제가 있음을 확인 할 수 있었다.

3-2. 산업단지 집단에너지 보급확대를 위한 대안 제시

서론에서 확인한 바와 같이 산업단지 집단에너지사업자는 유연탄, 아역청탄과 같은 석탄제품과 석유코크스, B-C와 같은 석유제품 그리고 폐기물, 목재펠릿 등을 주 연료원으로 운영하고 있다. 이러한 연료원들은 집단에너지사업의 경제성을 높이고, 열을 공급받는 업체들의 제조원가를 낮추는데 기여를 하고 있다. 그러나, 세계적으로 변화하는 온실가스 감축 흐름과 국내에서 강화되고 있는 대기오염물질(미세먼지 포함) 배출 제한 기조에 따라 연료전환이 이루어지지 않으면 이러한 글로벌 트렌드에 적응, 대응하기는 쉽지 않을 것이다. 한편, 집단에너지시스템은 개별 보일러와 비교했을 때 에너지 절감 및 환경개선 효과가 분명하고, 분산형 전원확보 차원에서 국가 전력수급다양화에 기여하기에 국가적으로도 일정 규모 이상의 신규택지 또는 산업단지에 대해 집단에너지 공급대상 지역을 지정하고 있다. 이에 소규모 분산전원 보급 확대와 기후환경 대응을 위해 공급대상 지역으로 지정되지 못하였지만, 상대적으로 열밀도가 높

고, 열수요량이 많은 신규 산업단지에 대해 NG를 주 연료원으로 하는 CHP System의 최적화 모델을 분석하였다. 그러나, 단일 CHP와 CHP Hybrid System 어느 경우에도 현재의 시장조건에서는 보급 확대에 한계가 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 대상지역에 예상되는 열수요를 충족하기 위한 비용이 최소화되는 조합 설비들의 최적 설비용량은 시뮬레이션을 통해 분석 할 수 있었지만, 경제적인 타당성이 떨어져 산업단지 집단에너지사업의 보급 확대는 기대할 수 없는 것이다.

한편, 본 연구에서 수행한 연료전지, 태양광발전을 조합한 CHP Hybrid System의 경제성을 살펴보면 몇가지 주요 조건들이 조정되어야 현실적인 사업검토가 가능한 수준으로 경제성이 향상 될 수 있음을 확인 할 수 있었다. 먼저, 전기생산 매출과 관련된 것으로, 현행 전력시장은 ‘전력시장 운영규칙’에 따라 정산되고 있다. 고정비를 보상하는 차원에서 지급하는 용량요금(CP; Capacity Payment)은 전력거래소에 중앙급전발전기로 등록된 20 MW 이상의 설비에 한정된다.[20] 산업단지 집단에너지의 경우 수용가의 열수요에 맞는 열공급을 위해 열 추종 운영을 할 수 밖에 없어 전력거래소에 중앙급전발전기로 등록하기 어려운 운전 조건이며, 20 MW 미만의 소규모 발전설비들은 등록조차 하기 어려워 분산형 전원에는 대한 혜택이 부재하다. 다만, 변동비의 경우, SMP를 결정하는 한계발전기들이 대부분 NG를 연료로 하는 복합발전기에 해당하여, 보다 저렴한 연료원을 사용하는 산업단지 집단에너지의 경우에는 변동비에 대해서

는 충분한 보상을 받고 있다 할 수 있다. 그러나, 기후환경 변화에 대응하기 위해 고가의 연료인 NG를 주 연료원으로 사용하게 된다면, 변동비에서도 보상이 충분히 이루어지지 않아 경쟁력은 더욱 낮아지게 될 것이다.

그리고 CHP Hybrid System에서 조합한 연료전지, 태양광발전이 추가되면, 단일 CHP에서는 발생하지 않는 REC(Renewable Energy Certificate)를 발급받게 되어 추가 매출항목이 생긴다. 이때 REC 발급 수량은 신재생에너지를 통한 단위 전력 생산량 1 MWh에 대해 가중치를 부여하게 되는데, 이는 신재생에너지원별 발전비용을 보상해주는 개념에 가깝다. 본 연구에서는 연료전지에서 생산한 전기는 가중치 2.0, 태양광발전에서 생산한 전기는 가중치 1.0을 반영하였다.[21] 단일 연료전지, 태양광발전과 달리 CHP와 조합하여 최적의 설비운영을 도모하는 경우 이 가중치들을 일부 조정하여 전체적인 CHP Hybrid System의 발전비용을 보상해 줄 수 있는 방안도 검토 해 볼 수 있을 것이다.

또, NG를 연료로 사용하는 발전사업자 및 집단에너지사업자는 도시가스사업법에 따라 시설용량 100 MW 이상에 대해서만 한국가스공사로부터 도매요금으로 연료를 공급 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서 산정한 최적 설비용량인 25 MW급의 CHP는 지역 도시가스회사로부터 소매요금으로 연료를 공급받아 사용하게 된다. 지난 2013년 3월부터 2016년 9월까지 열병합시설과 열원시설에 대한 한국가스공사가 고시한[22] 발전용 요금과 도시가스 요금을 분석한 결과, 도시가스 요금이 발전용 요금 대비 열병합은 약 12.6 %, 열원시설의 경우 약 22.6 % 높은 것을 확인 할 수 있었다.

CHP Hybrid System으로 조합된 Case 3를 기준

으로, 이러한 전력매출 보정, CHP와 결합된 신재생 에너지에 대해 REC 조정 그리고 연료비 조정에 대해 영업이익이 적자에서 흑자로 전환되는 조건을 분석하였다. 전력매출의 경우 적정 변동비 보상을 위해서는 앞서 가정한 SMP 단가를 76.04 원/kWh에서 118.3 원/kWh 수준으로 약 155% 이상 크게 높여야 하는데, 이는 현행 변동비 반영 시장에서는 임의 조정하기 어려운 조건이다. 그리고 REC 가중치, 특히 설비용량과 이용률이 높은 연료전지의 REC 가중치만을 조정해야 하는 경우는 현행 가중치 2.0에서 5.0으로 250% 이상 상향해야 한다. 이러한 조정 역시 SMP와 유사하게 임의 조정하기 어려울 것이다. 한편, NG 연료비만을 조정할 경우에는 설비별 요금단가를 구분하지 않고 일괄적으로 441.2 원/Nm³인 기존 요금단가 대비 최소 85 % 수준으로 인하하면 흑자 전환이 가능할 것으로 분석되었다. 이 요금단가는 분석기간의 한국가스공사 집단에너지용 요금단가와 유사한 수준으로 실현 가능성이 상대적으로 높을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 개별 시장변수만으로 시장 환경을 조정하기에는 시장뿐만 아니라 정부도 큰 부담이 될 것이다. 따라서 기후변화 대응을 위한 분산형 전원과 재생에너지의 보급확대 기조에 따라 앞의 두 가지 이상의 변수를 상호 보완하는 것이 보다 타당할 것이다. Table 10은 최소한의 경제성 확보를 위한 주요 변수들의 시장조건을 정리한 것이며, 별도로 제시안도 포함한 것이다. CHP Hybrid System에 있어 CHP와 조합된 신재생에너지 설비의 REC 가중치를 일부 상향하고, 소규모 CHP 및 이와 연계된 보조열원들의 연료비를 집단에너지용 도매요금단가 수준으로 인하 하는 것이다.

Table 10. Scenarios and proposal for CHP Hybrid System in the industrial complex to turn to profit

	reference conditions	scenario A	scenario B	scenario C	proposal
SMP (won/kWh)	76.04	118.3	same as ref.	same as ref.	same as ref.
REC weight of FC	2.0	same as ref.	5.0	same as ref.	2.4
fuel cost (won/Nm ³)	CHP	582.9134	same as ref.	441.2	457.9
	FC	520.3579			
	PLB	704.8147			
remarks					similar to unit price for wholesale rate of KOGAS CHP

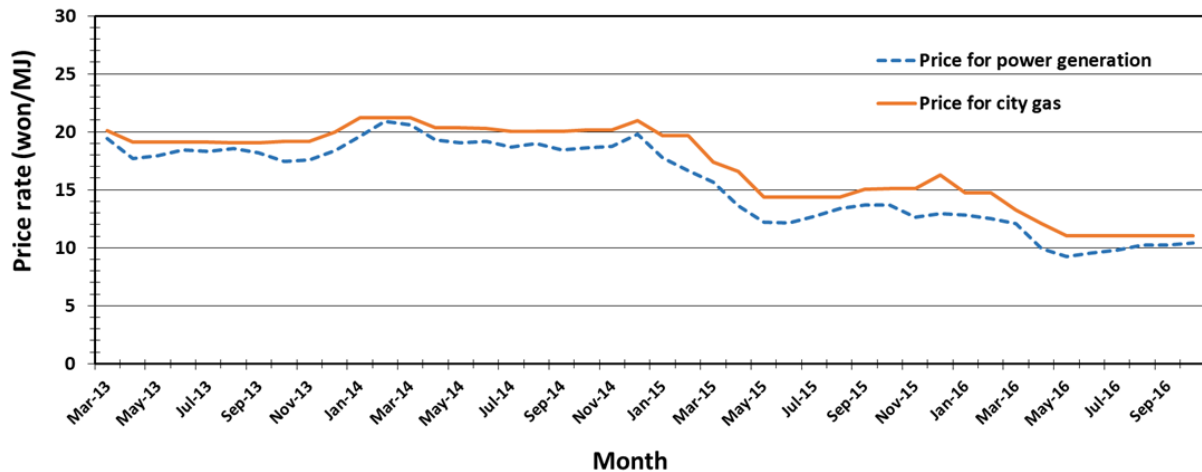


Fig. 12. Comparison of monthly KOGAS price for power generation and city gas.

4. 결론

본 연구는 신규 산업단지를 대상으로 온실가스 및 미세먼지 배출 저감, 소규모 분산형 전원 및 재생에너지 보급 확대에 따라 가장 현실적인 대안으로써 Gas CHP 기반의 연료전지와 태양광발전 을 연계 한 CHP Hybrid System의 최적화 모델을 분석하였다. 2013~2016년도 에너지사용계획 협의 대상 산업단지 중 열밀도가 $92.6 \text{ Gcal/km}^2 \cdot \text{h}$ 로 가장 높은 세종첨단일반산업단지의 전체 열수요량 $378,282 \text{ Gcal/year}$ 와 대표업종인 제지업종의 열수요량 $293,754 \text{ Gcal/year}$ 에 대하여 열수요 패턴을 분석하였다. 제지업종은 일일 평균 가동시간이 19.9 시간, 연중 평균 가동일수는 296.4일로 분석되었으며, 열수요는 시간대별 규칙적인 경향을 보이며, 요일별 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다.

산업단지 전체 열수요량을 충족하기 위한 단일 CHP의 최적 설비용량은 $30,000 \text{ kW}$ 이며, CHP가 전체 열수요의 72.8 %인 $275,707 \text{ Gcal/year}$ 의 열 생산을 분담하고, 나머지 열수요 27.2 %는 PLB가 분담하는 것으로 분석 되었다. 그리고 CHP Hybrid System에서의 최적 설비용량은 CHP $30,000 \text{ kW}$, 연료전지 $5,000 \text{ kW}$, 태양광 $1,980 \text{ kW}$ 로, CHP의 열생산 분담량은 단일 CHP 경우와 유사한 $275,940 \text{ Gcal/year}$ 이나, 연료전지가 $12,390 \text{ Gcal/year}$ 를 분담함으로써 PLB 열생산 분담량이 23.9 % 수준인 $90,620 \text{ Gcal/year}$ 로 감소하였다. 한편, 대표업종인 제지업종의 열수요량을 충족하기 위한 CHP Hybrid System의 최적 설비용량은 CHP $25,000 \text{ kW}$, 연료전지 $5,000 \text{ kW}$, 태양광 $2,000 \text{ kW}$ 로, CHP의 열생산 분담량은 76.5 %인 $225,053 \text{ Gcal/year}$ 로 약간 증가하였으나, PLB 열생산량 분담량이 19.7 % 수준인 $58,012 \text{ Gcal/year}$ 로 크게 감소하였다.

또, 신규 산업단지가 조성중인 2016년의 시장조건을 반영하여 경제성 분석을 수행하였다. 산업단지 전체 열수요량을 충족하기 위한 단일 CHP 모델에서는 총 투자비 1,594.1 억원에 NPC가 10,400 억원, LCOE는 75.74 원/kWh 로 분석되었으며, 연간 영업이익은 -190.1 억원으로 타당성이 없었다. 그리고 산업단지 전체 열수요량을 충족하기 위한 CHP Hybrid System은 총 투자비 1,949.1 억원에 NPC가 10,770 억원, LCOE는 81.50 원/kWh 로 분석되었으며, 연간 영업이익은 -127.5 억원으로 여전히 타당성이 없었다. 또, 대표업종인 제지업종의 열수요량을 충족하기 위한 CHP Hybrid System의 총 투자비는 1,683.9 억원으로, NPC가 8,271 억원, LCOE는 78.74 원/kWh 로 분석되었고, 연간 영업이익은 -97.1 억원으로 분석되어 모든 최적화 모델에 있어 타당성은 없는 것으로 확인되었다.

이 연구는 신규 산업단지의 에너지사용계획 협의서의 열수요 추정량을 반영하여 최적화 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 최적의 설비용량을 시뮬레이션 하였다. 이는 산업단지 조성이 완료되고 실제 유치하게 되는 업종과 규모가 달라질 수 있으므로 최적의 설비용량이 달라질 수 있음에 유의해야 한다. 또 특정 기간의 시장조건을 반영하여 경제성 분석을 수행하였기에 분석기간에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 전력시장과 가스시장이 변화함에 따라 그 실현 여부가 달라질 가능성이 높다. 그럼에도 불구하고 본 연구를 통해 단일 CHP System 보다 신재생에너지를 조합한 CHP Hybrid System이 손실 규모를 줄일 수 있음을 확인 할 수 있었다. 다만, CHP Hybrid System의 실질적인 경제성을 확보하기 위해서는 고정비 일부를 보상하거나, 분산형 전원 및 재생에너지 확대 정책 기조에 따른 CHP 연계형 신재생에너지에 대한 보

전방안 마련, 그리고 연료비 조정 등 다방면에서의 제도개선이 함께 이루어질 필요가 있을 것이다. 앞으로도 산업단지에 대한 다양한 연구들이 지속적으로 이루어져, 기후변화 대응을 위한 국가의 온실가스 배출 저감 및 에너지절감 목표를 달성할 수 있는 다양한 방안들이 제시되기를 기대한다.

References

1. Joint ministries, 2016, Special measures for fine dust management, pp. 4-5.
2. Joint ministries, 2018, Amendment to the Basic Roadmap to Achieve National Gas Reduction Goals by 2030, pp. 8-9.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, The 8th Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand(2015-2029), pp. 35-37.
4. Article 2 (1) of the Enforcement Decree of the Integrated Energy Supply Act.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy, 2014, The 4th Master Plan for Integrated Energy Supply, pp. 4-5.
6. Korea Energy Agency, 2017, 2017 Korea Energy Agency Handbook, pp. 22.
7. Sejong Industrial Complex, 2015, Negotiation on Energy Use Plan of Sejong industry complex - Energy demand forecast, pp. 92-93.
8. Eco & Partners, 2016, 2013-2015 greenhouse gas statement facility uptime survey results.
9. Korea Electric Power Exchange, 2015, Estimation of Appropriate Capacity of Demand Response Resources and System Improvement for Efficient Power Market Operation, pp. 146-147.
10. Kim Y., H., 2007, Design of Heat Trading Mechanism between Collective Energy Providers", Incheon University, pp. 29-30.
11. Act on The Promotion of the Development, Use and Diffusion of New and Renewable Energy.
12. Hyun G., S., 2008, CHP Optimal Capacity Estimation Program Development, KDHEC, pp. 200-202.
13. HOMER Pro 3.13.3, <http://www.homerenergy.com>
14. Lee, S. J., 2017, Optima Process Model of CHP Using New & Renewable Energy Hybrid System in CES, Master's thesis of Seoul National University of Science and Technology, Seoul, pp. 24.
15. W. O. Amor, H. B. Amar, Moez Ghariani, 2015, Energetic and Cost Analysis of Two Conversion Systems Connected To The Grid By Using HOMER Pro, International Journal of Renewable Research, Vol.5, No.3, 926-935.
16. S. Bahramara, M. Parsa Moghaddam and M.R. Haghifam, 2016, Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 62, pp. 609-620.
17. Article 4 (1) of the Enforcement Decree of the Electric Utility Act.
18. Korea District Heating Corporation, 2009, Heat Balance Diagram of CES in Southeast Distribution Complex, pp. 9.
19. Attached Table 1 of the Enforcement Decree of the Energy Act.
20. Korea Electric Power Exchange, 2018, Rules on Operation of Electricity Market, pp. 11-12.
21. Korea Electric Power Exchange, 2015, The Regulations on the Issuance of Supply Certificates and Operation of the Trading Market - Attachment 1, pp.27-28, 35 .
22. Korea Gas Corporation., <http://www.kogas.or.kr>