



초본계 바이오매스 활용 석탄발전소 연료전환 모형 경제성분석 연구

An Economical Analysis on Fuel Switching Model of Coal Power Plant using Herbaceous Biomass

엄병환^{a,†} · 강찬호^b

Um, Byung Hwan · Kang, Chan Ho

ABSTRACT

The project to utilize kenaf as thermal power plant fuel has a positive effect on the unused energy utilization, greenhouse gas reduction, and farm income. However, it is analyzed that it is difficult to secure economical efficiency because the fuel cost of kenaf is higher than that of power by thermal power plant and Renewable Energy Certification (REC). The project of power generation using kenaf is meet the government's major policies, while government support is essential for securing economical efficiency. As a result of the sensitivity analysis on the ratio of the government subsidies, to secure economical efficiency, the power generation prices using kenaf through the direct financial support of the government indicate that 47% and 76% of kenaf fuel cost are supported by government in case of the Saemangeum reclamation and Gangneung-si, respectively. In the case of the government indirect policy support, if kenaf is included as a renewable energy source of Renewable Energy Portfolio Standard and REC is granted, the economic efficiency of Saemangeum reclamation and Gangneung-si is obtained when REC secured at 1.05 or more and 2.43 or more, respectively. The results of this study are meaningful in that the direct and indirect effects of the government on the development of the herbaceous energy crop, kenaf, were evaluated economically. These results are to suggest the need for demonstration study, but economics analyze and evaluate are necessary based on operational data through the demonstration phase in the future.

Keywords: Kenaf; biomass; thermal power plant; economical analysis; renewable energy certificate

1. 서 론

2017년 12월 산업통상자원부 공고에 의하면 '17년에서 31년까지 전력수급에 대한 기본적인 방향은 국민의 안전과 환경에 미치는 효과를 고려한 계획으로 수립되었다 (MOTIE, 2017). 2017년 10월 정부는 원전의 단계적 감축과 신·재생에너지에 대한 발전량의 확대를 내용으로 에너지전환로드맵을 발표하였다 (MOTIE, 2017). 2017년 9월에는 미세먼지 국내 배출량의 30% 이상을 감축하기 위하여 노후 석탄발전소를 폐지하고 석탄발전을 LNG로 전환하고 재생에너지 발전 비중을 2030년까지 20%로 확대하는 대책을 발표하였다 (Kim and Lee, 2018). 특히, 프랑스 파리에서 2015년 12월 9일 개최된 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 채택된 「파리 기

후협정문」에 따라 국가 전체적으로 2030년 까지 온실가스 배출량 전망치(Business As Usual, BAU) 대비 37%의 온실가스 감축의무가 있으며, 발전부문은 19.9%의 온실가스 감축이 필요한 실정이다 (MOTIE, 2017).

2017년 에너지원별 발전량을 보면 국내 총 발전량 553,225 GWh에서 유연탄, LNG 등 화석연료 발전량은 336,950 GWh로 61%의 비중을 차지하고 있는 반면, 신·재생에너지 발전량은 513 GWh로 0.09%에 머무르고 있다 (KESIS, 2018). 에너지전환(발전) 및 온실가스·미세먼지 등 환경분야의 정부정책은 모두 석탄화력발전을 감소하고 신·재생에너지 발전량을 확대하는 방향으로 설정되어 있어 향후 신·재생에너지 발전이 획기적으로 확대되지 않으면 정부에서 발표한 정책과 계획의 목표를 달성할 수 있는지에 대한 의문이 발생한다.

2018년 1월 농림축산식품부는 2018년 업무계획에 2019년까지 벼 재배면적 5만ha의 감축을 첫 번째 내용으로 발표하였다 (MAFRA, 2018). 쌀수급과 관련하여 벼 재배 위주로 논을 활용하여 쌀이 과잉 공급되는 구조를 탈피하고 논에 타 작물 재배를 유도하는 정책의 시행이 주요 내용이다. 이에 따라, 벼 재배를 감축하려는 농가에서는 벼와 비교하였을 때 유사한 수익성을 가질 수 있는 대체 작물이 필요한 상황이다. 새만금간척지의 토지이용계획에 따르면 농업용지 면적은 8,570 ha이고 식량생산단지는 3,629 ha로 계획되어 있으나 정부의

^a Professor, Department of Chemical Engineering and Interagency Convergence Energy on New Biomass Industry, Hankyong National University

^b Researcher, Crop Food Division, Jeollabuk-Do Agricultural Research and Extension Services

† **Corresponding author**

Tel.: +81-31-670-5208 Fax: +81-31-670-5209

E-mail: bhum11@hknu.ac.kr

Received: April 3, 2019

Revised: May 13, 2019

Accepted: May 14, 2019

벼 재배면적 감축 정책에 따라 벼 이외의 수익성 작물이 재배 될 것으로 예상된다 (Choi and Kim, 2012).

농업과 발전산업의 동반성장을 도모하고 국제적인 협약에 따라 대한민국이 제시한 온실가스 감축목표를 달성하기 위한 방안의 모색이 필요하며, 농지에서 재배하여 지속가능성이 담보되는 초본계 에너지작물인 케냐프를 활용한 발전연료전환사업이 하나의 해결방안이 될 수 있다. 정부정책 측면에서 발전부문 석탄화력발전 감소와 농업부문 벼 재배면적 감축 정책을 모두 충족하는 사업구조이다.

농업부문에서 생산되는 작물을 이용한 발전연료 전환의 경제성 분석과 관련된 국내 선행연구는 활성화되지 않았으며, 다수의 연구가 현재 신·재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)에 포함되어 있는 신·재생에너지원에 중점되어 있다. 특히, 미이용 산림바이오매스(목재펠릿) 전소설비의 경제성과 관련된 다수의 연구가 선행되었다. 선행 연구에 의하면 미국, 유럽 등 해외 선진국들은 1990년대 후반부터 RPS 제도의 대응수단으로 발전부문에서 바이오매스 혼소를 시행하고 있으며, 국내에서도 석탄화력발전소에 목재펠릿을 혼소하는 경우 경제성을 확보하는 것으로 제시하고 있다 (Jeong and Kim 2010). 2012년부터 RPS제도가 시행되어 산림자원을 활용한 목질계 바이오매스 발전연료 사업은 석탄 화력발전의 이용율이 80%이상인 경우 충분한 경쟁력을 가지게 된다고 분석결과를 제시한다 (Kang 2012). 미이용 산림 바이오매스 발전에 대한 신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC) 가중치가 1.5에서 2.0으로 상향조정되어 목재펠릿 단가가 138,800원/ton인 경우 경제성을 확보하는 것으로 나타났다 (Park 2019). 목질계 바이오매스 발전의 투자회수기간 단축을 위하여 목재펠릿 구매단가의 상향조정 등 정부의 지원 정책이 필요하다는 연구결과를 제시하고 있다 (Lee and Kang 2013). 미이용산림바이오매스 전소발전과 동일한 REC 가중치를 적용하여 초본계 바이오매스 연료전환 발전에 대한 경제성 분석결과 경제성 확보가 가능하다는 선행연구 결과도 있다 (Kim 2017). 현행 정부의 바이오매스 확대정책이 산림자원에 국한되어 있기 때문에 선행연구 또한 목질계인 산림자원의 발전연료전환에만 머무르고 있다. 농업 분야 바이오매스 확대와 관련된 연구는 정부의 목질계 바이오매스 정책을 적용한 소수의 결과가 제시되고 있다. 농업분야에서 신·재생에너지는 수력, 풍력, 태양광 발전과 관련된 연구가 대부분이다. 또한, 농업 공정내 신·재생에너지의 소비와 관련된 연구 결과가 소수 발표되었다 (Kim, Ahn and Um 2018).

본 연구의 목적은 농업과 발전분야의 동반성장 및 온실가스 감축에 대한 국가목표를 달성하기 위한 방안으로 농지에

서 지속가능하게 재배되는 초본계 에너지작물을 활용한 화력 발전 연료전환 사업의 경제성을 확인하는데 있다. 초본계 바이오매스 화력발전 연료전환에 대한 선행연구는 목재펠릿의 여건을 적용하여 분석되어 초본계 에너지작물의 여건이 반영된 연구가 거의 없는 실정이고, 이에 따라 정부의 바이오매스에 대한 신·재생에너지 정책도 목질계 바이오매스에 머무르고 있다. 본 연구의 결과가 신·재생에너지원으로써 초본계에 대한 정책적 기여와 농업업의 활성화에 기여하기를 기대한다.

II. 초본계 바이오매스 화력발전 경제성 분석 방법론

1. 사업구조 및 분석대안

본 연구는 초본계 에너지 작물인 케냐프 재배지역에 따라 크게 두가지 분석대안을 가진다. 첫 번째는 새만금 간척지의 농업용지에서 위탁농업으로 케냐프를 재배하고 인근지역에서 펠릿화하여 신규 초본계 바이오매스 화력발전소에 연료로 공급하는 사업구조이다. 두 번째는 현재 벼를 재배하고 있는 절대농지에서 농가가 직접 재배한 케냐프를 펠릿화하여 신규 초본계 바이오매스 화력발전소에 연료로 공급하는 사업구조이다. 신규 초본계 바이오매스 화력발전소의 규모는 케냐프 면적당 생산수율과 토지의 이용 가능성을 고려하여 소규모인 5MW를 적용하였다.

새만금 간척지는 농가가 아닌 정부, 공공기관, 대학 등에서 토지의 소유권을 가지고 있으며, 농업, 산업, 연구, 주거 등 목적에 따라 기대수익은 크게 차이가 발생한다. 케냐프 재배에 대한 토지의 기대수익을 정의하고 산정하는 것은 연구자의 주관이나 특정목적에 따라 연구결과의 변동성 측면에서 높은 위험과 불확실성을 가지고 있다. 이에 따라, 새만금 간척지의 케냐프 생산원가는 비교 작물의 원가접근법으로 산정하였다. 원가접근방법은 비교 작물의 생산원가를 경제성 분석에 적용되는 케냐프 생산원가로 적용하는 방법이다. 여기서 비교 작물은 쌀을 적용하였고 2013년에서 2017년까지의 10 a당 생산원가 평균에 규모의 경제성을 반영하여 산정하였다. 규모의 경제성은 2013년에서 2017년까지 재배면적별 10 a당 생산원가 추세에 로그함수를 적용하여 규모의 경제성 추정식을 도출하였다 (Table 1).

규모의 경제성 로그추정에 대한 결정계수는 직접 생산원가 0.933, 간접 생산원가 0.803, 총 생산원가 0.909로 간접 생산원가에 대한 결정계수가 총 생산원가에 대한 결정계수보다 낮기 때문에 직접 생산원가와 간접생산원가를 구분하여 추정하

Table 1 Economics log determination coefficient on production cost and scale by rice cultivation scale

Classification	Cost per production area (KRW/ha)									Determination coefficient
	0.5ha	1.0ha	1.5ha	2.0ha	2.5ha	3.0ha	5.0ha	7.0ha	10.0ha	
Directly Production cost	556,765	514,099	493,588	473,727	430,123	430,828	411,090	365,977	359,199	0.933
Indirect Production cost	257,343	251,884	261,585	276,208	277,704	287,260	297,788	307,044	294,056	0.803
Total Production cost	814,108	765,983	755,173	749,935	707,827	718,088	708,878	673,021	653,255	0.909

지 않고 총 생산원가로 추정하였다.

다음의 식 (1)은 재배면적에 대한 생산원가의 경제성분석 추정식이며, 자연로그 함수형태로 새만금 간척지의 케냐프 재배면적(ha)이 증가할수록 단위(10 a)당 케냐프 생산원가가 감소한다. 자연로그 함수의 기울기는 (-)65,540으로 우하향하는 형태를 가지고 있다.

$$C = -65,540 \ln(X) + 820,589 \quad (1)$$

여기서,

C : 10 a당 케냐프 생산원가(원/10 a)
 X : 케냐프 재배면적(ha)

벼를 재배하고 있는 절대농지의 소유권은 농가에 있고 작물을 재배하기 위한 목적으로 보유하고 있으므로, 케냐프 생산원가는 비교 작물의 기대수익으로 산정하는 수익접근방법을 적용하였다. 수익접근방법은 비교 작물의 수입을 경제성 분석에 적용되는 케냐프 생산원가로 적용하는 방법에 해당한다. 이는 농가에서는 비교 작물인 쌀보다 케냐프의 수입이 낮으면 케냐프를 재배하지 않을 것이기 때문에 절대농지에서 케냐프는 벼의 대체작물이 될 수 없다. 원가접근방법은 재배 규모가 증가함에 따라 생산원가가 감소하는 형태로 나타나기 때문에 규모의 경제성을 반영하였지만 수익접근법은 비교 작물의 재배면적에 대한 평균 수입으로 케냐프 생산원가를 추정하였기 때문에 규모의 경제성은 반영하지 않았다. 절대농지의 위치는 한국남동발전 영동에코발전본부 인근에 위치하여 운송비용의 최소화가 가능한 강릉시를 대상으로 분석하였

다. 이에 따라, 비교 작물인 쌀의 연간 수입은 2016년 강릉시 평균인 921,719 원/10a를 적용하였다 (RDA, 2017) (Table 2).

초본계 바이오매스 화력발전은 초본계 자체의 온실가스 흡수효과와 바이오매스 발전 측면에서 온실가스 감축효과가 발생됨에도 현행 신·재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)의 신·재생에너지원에 포함되어 있지 않다. 반면, 목재펠릿은 0.5의 신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC) 가중치가 부여되어 있으며 미이용산림바이오매스 전소설비의 경우 2.0의 높은 가중치가 부여되어 있다 (Lee et al., 2018) (Table 3). 본 연구의 사업구조는 초본계 바이오매스 전소 화력발전으로 RPS 제도에 포함된다면 목재펠릿 수준의 REC 가중치가 부여된다고 가정하였다. 이에 따라 경제성 분석에 목재펠릿과 동일한 REC 가중치를 적용하였다. REC 가중치 변동에 따른 위험은 민감도 분석에서 제시하였다.

사업구조 및 분석대안에서 검토되어 본 연구에 적용된 데이터의 정보는 다음과 같다 (Table 4).

2. 초기투자비 및 경제성 분석기준

신규 초본계 바이오매스 화력발전소 초기투자비는 참고한 자료에 국내 정보가 없기 때문에 대표적인 미국의 바이오매스 설비 단가 72.03 USD/MWh를 적용하였고, 초기투자비를 산정하기 위한 할인율은 10%를 적용하였다 (IEA, 2015) (Table 5).

바이오매스 설비 단가에는 간접투자비용과 건설이자비용이 반영되어 있다 (IEA, 2015). 본 연구에서 초본계 바이오매스 발전은 국내 석탄화력발전소 발전량을 대체하는 것으로 가정하였다. 이에 따라, 초본계 바이오매스 발전설비의 시설

Table 2 Gangneun-si rice farmers imports in 2016 (RDA, 2017)

Classification	Amount (kg/10a)	Unit cost (KRW/kg)	Sum (KRW/10a)	Note
Rice total income	542	1,700	921,719	Amount : based on jeonggok Annually average for 2016

Table 3 Renewable Energy Certificate (REC) Weight by new and renewable energy source in Korea (Korea Energy Agency, 2019)

category	REC weight	Energy source and criteria	
		Facility type	Criteria
Solar PV	1.2	Facility installed on general site	Less than 100kw
	1.0		More than 100kW
	0.7		More than 3,000kW
	0.7	Facility installed on forest land	-
	1.5	Facility installed on existing buildings	Less than 3,000kW
	1.0		More than 3,000kW
	1.5	Facilities floating on the water	
	1.0	In case of trade electricity through private power generation facilities	
	5.0	ESS (connected to Solar PV)	'18, '19
	4.0		'20
Others	0.25	IGCCC, Byproduct gas, Waste energy, Bio-SRF	
	0.5	Land fill gas, Wood pellet, Wood chip	
	1.0	Hydro, onshore wind, tidal power (with embankment), other bioenergy(bioheavy-oil, bio-gas etc.) In case of trade electricity through private power generation facilities	
	1.0~2.5	Geothermal heat, tidal power (without embankment)	Fixed
			Variable
	1.5	Hydrothermal, Mixed fuel firing facilities using unused forest biomass	
	2.0	Fuel cell, tidal current, unused forest biomass(only bioenergy fuel firing facilities)	
	2.0	Offshore wind	grid connection shorter than 5km
	2.5		grid connection longer than 5km shorter than 10km
	3.0		grid connection longer than 10km shorter than 15km
	3.5		grid connection longer than 15km
	4.5	ESS (connected to wind power)	'18, '19
4.0	'20		

Table 4 Business structure and analysis alternative summary

Classification	Content	Note
Kenaf production	Saemangeum	Agricultural land of Saemangeum land use plan
	Gangneung-si	Near Yeongdong Eco-power plant of Korea South-East Power Co.
Production cost calculation method	Cost Approach	Cost of rice production cost per 10a
	Income Approach	Rice sales income per 10 a in Gangneung-si
REC weight	0.5	Wood pellet

Table 5 Investment Cost of electricity for Biomass (IEA, 2015)

Country	Technology	Net capacity (MWe)	Capacity factor (%)	Investment Cost* (USD/MWh)		
				3%**	7%**	10%**
United States	Biomass	100	85	32.37	53.16	72.03

* Investment cost includes overnight cost (with contingency) as well as the implied IDC.

** Discount rate

Table 6 Korea South–East Power Coal–Fired Power Generator Utilization Rate in 2017 (KEPCO, 2018)

Plant	Capacity (MW)	Power generation (MWh)	Consumption power for inner plant (MWh)	Utilization rate (%)
Yeongdong#2	200	792,037	52,197	42.23%
Samcheonpo#1	560	3,317,187	198,242	63.58%
Samcheonpo#2	560	3,883,470	256,029	73.94%
Samcheonpo#3	560	3,596,801	187,555	69.50%
Samcheonpo#4	560	4,480,452	244,577	86.35%
Samcheonpo#5	500	4,110,063	174,891	89.84%
Samcheonpo#6	500	3,450,475	145,400	75.46%
Yeongheung#1	800	6,207,532	322,115	83.98%
Yeongheung#2	800	5,860,066	298,947	79.35%
Yeongheung#3	870	6,580,272	338,417	81.90%
Yeongheung#4	870	7,137,170	351,037	89.04%
Yeongheung#5	870	6,734,989	383,674	83.34%
Yeongheung#6	870	6,880,068	392,579	85.12%
Average utilization rate (based on power generation)				81.00%

Table 7 Initial investment cost of power plant using herbaceous biomass

Classification	Content	Note
Plant scale (MW)	5	
Annual power generation (MWh)	35,480	Plant scale(MW) X 8,760 hours X Utilization rate (81.00%)
Total generation for 40 years (MWh)	1,419,184	
Present value of total generation for 40 years (MWh)	346,957	Discount 10 %
Plant cost per power generation (USD/MWh)	72.03	
Initial investment cost of power plant (USD)	24,991,307	
Exchange rate(KRW/USD)	1,070.5	Average of exchange rate in 2017
Initial investment cost of power plant (one hundred million KRW)	267.53	

규모대비 연평균 전력생산량 비율인 이용율은 2017년 남동발전 석탄화력발전기 이용율인 81.00%를 적용하였으며, 발전기 투입대비 발전 열량인 열효율은 2017년 기력 발전단 기준 38.66%를 적용하였다 (KEPCO, 2018) (Table 6).

초본계 바이오매스 연간 발전량은 발전기 규모에 8,760 시간과 이용율을 곱하여 35,480 MWh/yr으로 산정되었으며, 초기투자비는 설비 내용연수 40년 동안의 발전량을 현재가치로 환산한 값인 346,957 MWh에 설비단가를 곱하여 24,991,307 USD로 산정하였다. 바이오매스 화력발전소의 내용연수는 화력발전 내용연수를 적용하였으며, 2017년 평균환율 1,070.5 원/USD를 적용하여 초기투자비는 267.53 억원으로 산정되었다. (IEA, 2015; Statics Korea, 2018) (Table 7).

Table 8 Kenaf production capacity in Saemangeum reclamation (100ha)

Soil pollution (EC=ds/m)	Area (ha)	Kenaf production capacity (Ton)
under 3.0	54	1,580
3.0~4.0	8	208
4.0~6.0	4	65
6.0~8.0	8	78
above 8	26	85
Sum	100	2,016
Production capacity per 1 ha (Ton)		20.16

Table 9 Kenaf production capacity in Gangneung-si

Saturn classification	Area (ha)	Kenaf production capacity (Ton)
Best area	9,515	309,238
Right area	4,469	130,495
Potential area	17,307	449,982
Low productive area	70,355	1,371,922
Other	2,223	28,899
Sum	103,869	2,290,536
Production capacity per 1 ha (Ton)		22.05

면적 1ha당 케냐프 생산량은 새만금 간척지의 경우 20.16 Ton/ha이며, 강릉시의 경우 22.05 Ton/ha를 적용하였으며, 케냐프 발열량은 저위발열량 3,910 kcal/kg을 적용하였다 (Kim 2014; Lee et al., 2018) (Table 8)(Table 9).

새만금 간척지의 케냐프 생산원가는 식(1)에 재배면적 1,113 ha를 반영하여 3,608,381 원/ha로 산정되었다. 재배면적 추정식은 대상면적 중 건축물, 도로 등을 차감한 토지이용율 90%를 적용하여 (2)와 같다.

경제성 분석의 가격기준은 2017년 12월이며, 2017년 1월~12월의 기준가격을 적용하였다. 다만, 미국 바이오매스 설비 단가를 설비 투자비 단가로 적용하였으며, 미국의 2015년부터 2017년까지 소비자물가지수(Consumer Price Index, CPI)의 상승률은 1.17%로 발표되었으나, 바이오매스 발전설비 단가의 변동은 없는 것으로 가정하였다.

분석기간은 총 41년으로 초본계 바이오매스 발전소 건설기간 1년과 사업기간 40년으로 구성되어 있으며 사업기간은 초기투자비 산정에 적용한 발전소 내용연수와 동일하게 적용하였다.

케냐프 연료단가는 연간 면적당 케냐프 생산원가를 연간 면적당 생산수율로 나누어 산정된 무게(Ton) 단위당 케냐프 생산단가인 새만금 간척지 178,987 원/Ton, 강릉시 417,972 원/Ton에 국산재 목재펠릿과 유사하게 펠릿제조비용 100,000 원/Ton과 운송비용 40,000원/Ton을 가산하고 경관보전직불금 1,700 천원/ha, 발고정직불금 500 천원/ha를 차감하여 산정하였다 (MAFRA, 2018) (Table 10)(Table 11).

발전소 운영인력에 대한 인건비는 2017년 한국남동발전 연간 평균보수액인 81,000 천원/인에 8명 투입인력을 곱하여 산정하였으며, 투입인력은 법률에서 요구하고 있는 기술인력 3명, 운영인력 4명과 발전소장을 합하여 8명으로 추정하였다 (Table 12).

기타비용은 운영, 관리, 수선유지 및 폐기와 관련된 비용으로 발전량에 미국 바이오매스 설비의 운영 및 유지비(Operating and Maintenance cost, O&M cost) 단가 14.46 USD/MWh와 2017년 평균환율 1,070.5 원/USD를 곱하여 적용하였다 (IEA, 2015). 설비 투자비와 동일하게 바이오매스 설비의 운영 및 유지비 측면에서도 2014년 이후 단가의 변동은 없는 것으로 가정하였다.

전력판매단가는 2015년에서 2017년까지 계통한계가격 (System Marginal Cost, SMP) 월별 평균 86.27 원/kWh를 적용

Table 10 Fuel cost of kenaf

Classification	Saemangeum reclamation	Gangneung-si	Note
Kenaf production cost (KRW/ha/yr) (A)	3,608,381	9,217,190	
Kenaf production yield (Ton/ha/yr) (B)	20.16	22.05	
Kenaf production cost (KRW/Ton) (C)	178,987	417,972	(A) / (B)
Manufacturing cost of pellet (KRW/Ton) (D)	100,000	100,000	
Shipping Cost of pellet (KRW/Ton) (E)	40,000	40,000	
Kenaf government subsidy (KRW/Ton) (F)	109,127	99,763	
Fuel cost of kenaf	209,860	458,209	(C) + (D) + (E) - (F)

Table 11 Subsidy of landscape conservation and fixed farm of kenaf

Classification	Saemangeum reclamation	Gangneung-si	Note
Subsidy of landscape conservation (KRW/ha) (A)	1,700,000	1,700,000	
Subsidy of fixed farm (KRW/ha) (B)	500,000	500,000	
Sum (KRW/ha) (C)	2,200,000	2,200,000	(A) + (B)
Kenaf production yield (Ton/ha) (D)	20.16	22.05	
Kenaf government subsidy (KRW/Ton)	109,127	99,763	(C) / (D)

Table 12 Plan of worker in power plant

Classification	Role	People (number)	Note
Technology	Director	1	
Technology	Electrical safety officer	1	Electric utility act ww,na73
Technology	Fire safety officer	1	Fire service act 20 (hazardous)
			Fire service act 9 (Fire prevention)
Technology	Environment manager	1	Clean air conservation act 24
			Water quality conservation act 23
			Noise and vibration control act 21
Manage	Manage leader Operation team leader	1	
Manage	Operator	3	
Sum		8	

Table 13 REC sales price

Classification	Complex price (KRW/ Gcal)	Weight	Fuel cost price (KRW/ Gcal)
Spot market Monthly average REC trading price in 2015~2017	126,202	50%	63,101
Contract market monthly average REC trading price in 2015~2017	78,575	50%	39,287
REC sales price			102,388

하였으며, 전력판매수입은 발전량에 전력판매단가를 곱하여 산정하였다 (EPSIS, 2018). 발전소 소내사용 전력량이 발전소 이용율을 산정할 때 반영되었기 때문에 판매량이 아닌 발전량을 기준으로 전력판매수입을 산정하였다. REC 판매단가는 2015년에서 2017년까지 월별 평균 거래가격으로 적용하였으며, 현물(Spot)시장과 계약(Contract)시장 각각 50% 가중치를 반영하여 102,388 원/REC로 추정하였다 (Lee et al., 2016) (Table 13).

경제성 평가모형에 반영된 할인율은 사회적할인율 4.5%를 적용하였다 (Lee et al., 2016; Kim and Lee 2018).

초기투자비 및 경제성 분석기준에서 검토되어 본 연구에 적용된 데이터의 정보는 다음과 같다 (Table 14).

3. 경제성 평가모형

경제성 평가모형은 화폐가치로 환산하여 경제성을 평가하는 방법인 순현재가치법(Net Present Value, NPV)과 내부수익률법(Internal Return Rate, IRR)을 적용하였다. 화폐가치를 적용하는 경제성 평가방법은 평가에 주관이 개입될 여지가 적고, 균일한 척도로 비교가 가능한 방법이다.

순현재가치법은 (3)과 같이 사업 또는 프로젝트와 관련된 현금흐름을 현재가치로 할인하여 합산한 값으로 순현재가치

를 산정하는 방법이다. 순현재가치가 ‘0’보다 크면 경제성이 있다는 의미로 해석할 수 있다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

여기서,

NPV : 순현재가치

B_t : t 시점의 Benefit

C_t : t 시점의 Cost

r : 할인율 10%

n : 사업기간(또는 분석기간)

내부수익률법은 아래 (4)와 같이 사업 또는 프로젝트의 순현재가치가 ‘0’이 될 때의 할인율인 ‘내부수익률’을 산정하는 방법이다. 내부수익률이 사업 또는 프로젝트의 목표수익률보다 크면 경제성이 있다는 의미로 해석할 수 있다.

Table 14 Economics analysis standard

Classification	Content	Note
Price basis	2017	2017.01.01.~2017.12.31. Constant price basis
Business period	1 year	Construction period
	40 years	Operating period
Capital investment	72.03 USD/MWh	Discount rate 10%, US facility unit price (IEA, 2015)
Depreciation	40 years	Depreciation durable years
	Straight-line method	Depreciation method
Power plant utilization rate	81.00%	Thermal power generator utilization rate of Korea South-East Power CO.
Thermal efficiency of power plant	38.66%	Energy efficiency
Kenaf production yield	20.16 Ton/ha	Saemangeum reclamation
	22.05 Ton/ha	Gangneung-si
Kenaf caloric value	3,910 kcal/kg	
Land use rate	90%	
Manpower	8 people	General management, Technical manpower, Operating personnel
Operating expenses	14.46 USD/MWh	US operation maintenance cost unit (IEA, 2015)
Exchange rate	1,070.5 KRW/USD	Average exchange rate in 2017
Electricity selling price	86.27 KRW/kWh	2015~2017 monthly average SMP(EPSS)
REC price	120,388 KRW/REC	2015~2017 monthly average market price (Spot market : Agent market = 50 : 50)
Discount rate	4.5%	Social discount rate

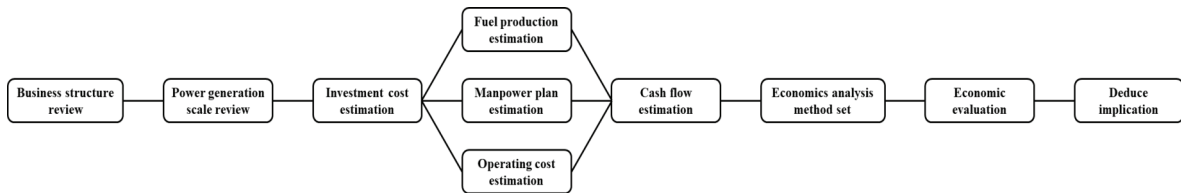


Fig. 1 Project economics evaluation procedure

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+R)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+R)^t} \quad (4)$$

여기서,

- R : 내부수익률
- B_t : t시점의 Benefit
- C_t : t시점의 Cost
- n : 사업기간(또는 분석기간)

사업 또는 프로젝트의 현금흐름은 현금유입에서 현금유출을 차감하여 산정하고 현금유입은 전력판매수입과 REC 판매

수입의 합이며, 현금유출은 초기 발전설비에 대한 투자비, 연료비, 인건비 및 기타경비의 합으로 산정하였다. 현금의 유출이 없는 감가상각비는 경제성 분석에서 현금유출에 해당하지 않으며, 현금유출과 현금유입에 대한 산정식은 (5), (6)과 같다.

$$\text{현금유입} = \text{전력판매수입} + \text{REC 판매수입} \quad (5)$$

$$\text{현금유출} = \text{초기투자비} + \text{연료비} + \text{인건비} + \text{기타경비} \quad (6)$$

III. 초본계 바이오매스 화력발전 경제성 평가결과

1. 분석대상 지역별 경제성 평가결과

사업의 구조와 분석대안, 초기투자비와 경제성 분석기준에 따라 분석대안별 초본계 바이오매스 화력발전의 경제성 확보 여부를 경제성 평가모형에서 제시한 방법으로 평가하였다. 평가결과 새만금 간척지의 NPV는 -35,395백만원으로 산정되었으며, IRR은 41년 동안 모든 연도의 현금흐름이 음(-)의 수로 나타나 산정이 불가능하였다. 강릉시의 NPV는 -123,670백만원으로 나타나 새만금 간척지의 경제성 보다 3.5배 낮은 것으로 도출되었다. 강릉시의 경제성이 새만금 간척지보다 낮은 것은 수익접근방법의 생산원가가 원가접근방법의 생산원가보다 2.55배 높기 때문이다. 경제성 평가결과는 새만금 간척지와 강릉시 모두 수입의 증가 또는 비용의 절감이 없는 경우 케냐프 바이오매스 화력발전에 대한 경제성을 확보하지 못하는 것으로 해석할 수 있다.

2. 새만금 간척지 경제성 민감도 분석결과

케냐프 바이오매스를 활용한 발전은 쌀 재배면적 감소에 따른 대체작물로서 역할과 지속가능한 전환(발전) 부문 온실가스 감축수단의 역할을 동시에 담당할 수 있다는 장점이 있는 사업모형이다. 또한, 농지는 국민의 식량안보와 밀접하게 관련되어 있기 때문에 농지 이외의 타 용도로 변경하여 토지를 이용하는 것은 국가 안보상 위험을 초래할 수 있으나, 에너지작물은 농지의 고유기능을 유지하면서 발전연료로 활용가능하다는 장점도 가지고 있다. 이러한 다양한 장점을 가지는 초본계 에너지작물인 케냐프를 활용한 바이오매스 화력발전의 경제성 확보를 위한 대안의 모색이 필요할 것이다. 이에 따라, 경제성평가에 영향을 미치는 주요변수의 변동에 대한

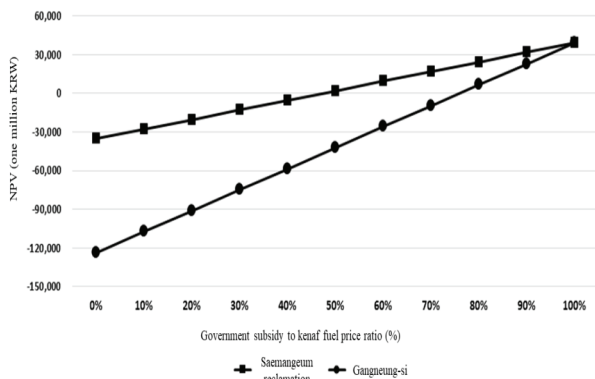


Fig. 2 Sensitivity analysis result about business in accordance with government subsidy increase by herbaceous biomass fuel price

민감도를 분석하였다. 여기서 민감도 분석대상인 주요변수는 다음과 같다.

- (1) 케냐프 연료단가에 대한 정부지원금의 변동
- (2) REC 가중치의 변동

민감도는 케냐프 연료단가 대비 정부지원금율이 0%에서 100%까지 10%씩 증가할 때와 REC 가중치가 0.50에서 2.50까지 0.25씩 증가할 때의 NPV 변화를 분석하였다. 민감도 분석결과 케냐프 연료단가 대비 새만금 간척지 47.4%, 강릉시 75.9%를 정부에서 지원하거나, REC 가중치가 새만금 간척지 1.05, 강릉시 2.43인 경우에 NPV는 '0'으로 최소한의 경제성을 확보하는 것으로 분석되었다(Fig. 2)(Fig. 3)(Fig. 4). 경제성을 확보가능한 정부지원금 수준은 새만금 간척지 99,747 원/Ton이고, 강릉시는 347,780 원/Ton으로 분석되었다.

케냐프 연료단가에 대한 정부지원금 수준과 REC 가중치

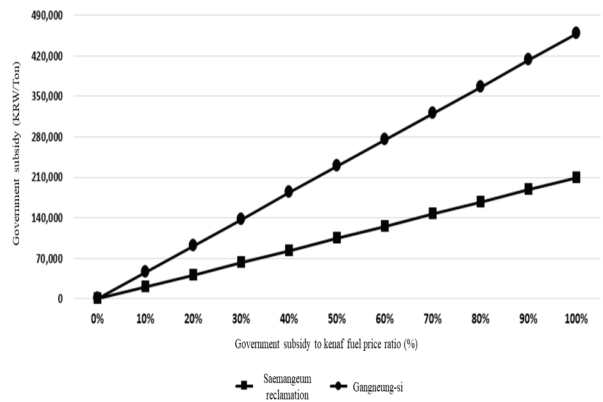


Fig. 3 Government subsidy by rate of government subsidy scenario

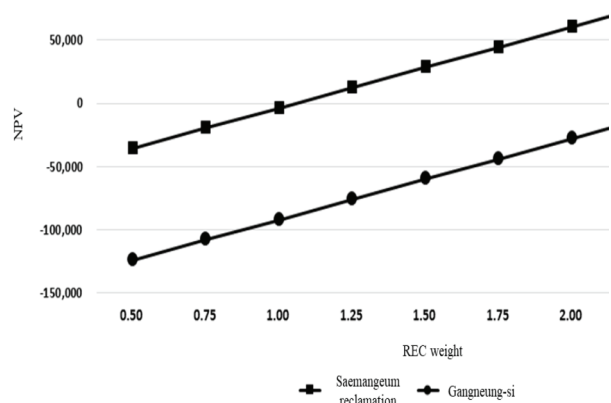


Fig. 4 Sensitivity analysis result about business in accordance with REC increase

Table 15 Government subsidy ratio and REC weight matrix analysis (Saemangeum reclamation)

(Unit : million KRW)

Government subsidy ratio \ REC weight	5%	10%	15%	20%
0.75	-15,673	-11,943	-8,213	-4,484
1.00	319	4,049	7,779	11,509
1.25	16,312	20,041	23,771	27,501
1.50	32,304	36,033	39,763	43,493

Matrix analysis result : Net Present Value (NPV)

Government subsidy ratio : Ratio of government subsidy to kenaf fuel cost

Table 16 Government grants subsidy and REC weight matrix analysis (Gangneung-si)

(Unit : million KRW)

Government subsidy ratio \ REC weight	40%	50%	60%	70%
0.75	-42,530	-26,243	-9,956	6,331
1.00	-26,538	-10,251	6,036	22,323
1.25	-10,546	5,741	22,028	38,315
1.50	5,447	21,734	38,021	54,308

Matrix analysis result : Net Present Value (NPV)

Government subsidy ratio : Ratio of government subsidy to kenaf fuel cost

수준에 대한 매트릭스 분석결과 새만금 간척지는 케냐프 연료단가 대비 정부지원금율이 5% 이더라도 REC 가중치가 1.00 이상인 경우 NPV가 '0' 이상으로 경제성을 확보하는 것으로 분석되었다(Table 15). 강릉시의 경우 정부지원금율이 40%일 때 REC 가중치가 1.50, 50%일 때 1.25, 60%일 때 1.00, 70%일 때 0.75인 경우 경제성을 확보하는 것으로 분석되었다 (Table 16).

IV. 결 론

케냐프 바이오매스 화력발전 사업모형은 본 연구의 분석기준과 초기투자비용 등을 적용하여 경제성을 평가한 결과 재배지역의 특성과 무관하게 NPV가 "0" 이하로 나타나 경제성 확보가 어려운 것으로 나타났다.

연간 현금흐름유출 내역을 검토하면 새만금 간척지의 경우 연료비가 총 현금흐름 유출의 78%를 차지하고 있으며, 총 현금흐름 유입대비 87% 수준으로 케냐프 생산원가 자체가 높은 것으로 나타난다. 이와 같이 원가접근방법에서도 경제성을 확보하지 못한다는 것은 사업자의 투자금에 대한 적정 이윤을 확보하지 못할 뿐 아니라 투자금 자체의 회수도 하지 못하는 것이므로 사업자 측면에서의 추진은 어려울 것이다. 재배

면적 감소에 대한 대응과 기후변화와 관련된 온실가스 감축이 정부의 주요 정책으로 계획 및 실행되는 것을 고려하면 케냐프 바이오매스 화력발전 사업에 대한 정부의 재정적인 지원 또는 정책적인 지원이 필수적이다. 이에 따라, 재정적 지원 측면에서 정부지원금에 대한 민감도 분석결과 케냐프 연료단가의 새만금 간척지의 경우 47.4%, 강릉시의 경우 75.9% 수준을 정부에서 지원하는 경우 사업의 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이 경우 농민은 쌀과 유사한 수익성을 가지는 초본계 에너지작물인 케냐프를 재배하고 발전 사업자는 사업자 경제성을 확보할 수 있기 때문에 사업에 대한 경제적 유인이 농민과 발전사업자 모두에게 발생할 것이다.

정책적 지원 측면에서 REC 가중치에 대한 민감도 분석결과 새만금 간척지의 경우 1.05이상, 강릉시의 경우 2.43이상 가중치를 부여하는 경우 사업의 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 바이오매스 화력발전에 대한 정부 측면의 활성화 방안은 직접적인 재정지원 또는 간접적인 정책지원이 있으며 이를 적절히 혼합한 정부의 지원이 필요할 시점이다.

경제성 확보와 무관하게 식량안보와 관련된 농지의 용도변경 없이 생산 측면에서 지속가능한 바이오매스를 활용하는 화력발전 모형은 국가, 농가, 사업자, 소비자(전력) 측면에서 확실히 긍정적인 효과가 발생한다. 그러나, 경제성을 확보하

지 못하는 사업모형은 사업자 측면에서 추진하기 어려울 것이다. 이에 본 연구에서는 지속가능한 케냐프 바이오매스 화력발전에 대한 정부의 재정 및 정책 지원효과를 경제성 평가 측면에서 분석한 것에 의미가 있다. 민감도 분석결과에서 정부의 정책은 사업 추진 및 활성화와 높은 연관성을 가지는 것으로 나타났다. 반면, 본 연구는 문헌조사에 기반한 경제성 분석 결과를 제시하였다는 것에 한계가 있다. 향후 본 연구에서 제시한 사업모형이 보편화되기 위해서는 실증을 통한 운영 데이터에 기반한 경제성 평가결과가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 한경대학교 연구년 경비의 지원에 의한 것임. 또한, 연구수행을 위하여 도움을 주신 한국남동발전에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, Notification 2017-611, <http://www.motie.go.kr>
2. Kim, Y. M., and W. H. Lee, 2018. A study on methods for developing by nurturing clean thermal power generation technology. *Journal of Climate Change Research* 9(2): 197-207. doi:10.15531/KSCCR.2018.9.2.197.
3. Korea Energy Statistical Information System, 2018. Energy Consumption Survey, <http://www.ksesis.net/>
4. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2018. Major work plan for 2018, <http://www.mafra.go.kr/>
5. Choi, K. S., and H. D. Kim, 2012. A study on water supply plans for horticulture and livestock complexes within the Saemangeum Area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 125-132. doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.125.
6. Jeong, N. Y., and L. H. Kim, 2010. The study of economic feasibility of wood pellet in domestic power plants sector. *Journal of Energy Engineering* 19(4): 251-257.
7. Kang, H. K., 2012. The feasibility analysis for energy utilization of forest biomass. Seoul National University of Science and Technology, Master's degree Thesis.
8. Park, Y. K., 2019. Economic evaluation of biomass power plant using domestic non-use forest resources. Seoul National University of Science and Technology, Master's degree Thesis.
9. Lee, J. C., and K. Y. Kang, 2013. Analyses of GHG reduction effectiveness and economic feasibility in the wood pellet fuel switching project. *J. Korean Wood Sci & Tech.* 41(6): 594-605. doi:10.5658/WOOD.2013.41.6.594.
10. Kim, J. S., 2017. A Study on utilization plan of woody and herbaceous biomass materials as fuels of power generation. Chonnam National Univeristy, Master's degree Thesis.
11. Kim, G. H., C. S. Ahn, and B. H. Um, 2018. Evaluation on the environmental and social value awareness of the heat supply for the horticultural greenhouse using thermal effluents from power plant. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 125-134. doi:10.5389/KSAE.2018.60.5.125.
12. Rural Development Administration, 2017. <http://www.rda.go.kr/>
13. Lee, B. H., S. B. Kim, C. J. Lee, Y. J. Sung, C. B. Lee, S. J. So, and T. H. Kim, 2018. Analysis on industrial structure and stable supply and demand of wood chip. *Journal of Korea TAPPI* 50(3): 53-61. doi:10.7584/JKTAPPI.2018.06.50.3.53.
14. International Energy Agency (IEA), 2015. Projected Costs of Generating Electricity (2015 Edition).
15. Korea Electric Power Corporation, 2018. <http://home.kepco.co.kr/kepco/>
16. Statics Korea, 2018. <http://www.index.go.kr/>
17. Kim, S. B., 2014. The properties and potential for the production of bio-energy with before and after flowering kenaf. Chonnam National Univeristy, Master's degree Thesis.
18. Lee, Y. J., J. W. Choi, J. H. Park, H. Namkung, G. S. Song, S. J. Park, D. W. Lee, J. G. Kim, C. H. Jeon, and Y. C. Choi, 2018. Techno-economical method for the removal of alkali metals from agricultural residue and herbaceous biomass and its effect on slagging and fouling behavior. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2(10): 13056-13065. doi:10.1021/acssuschemeng.8b02588.
19. Electric Power Statistics Information System, 2018. <http://epsis.kpx.or.kr/>
20. Lee, J. W., S. K. Kim, and G. W. Kim, 2016. An expert survey on the social discount rate in Korea. *Korean Energy Economic Review* 15(1): 207-237.
21. Kim, Y. K., and E. B. Lee, 2018. Optimization simulation, using steel plant off-gas for power generation: a life-cycle cost analysis approach. *Energies* 11: 2884. doi:10.3390/en11112884.