

가축분뇨 고체연료 제조 및 발전시설의 경제성 분석

김창규^{a,b}, 윤영만^{c,d†}

Economic Analysis of Livestock Manure Solid Fuel Manufacturing and Power Generation Facility

Chang-Gyu Kim^{a,b}, Young-Man Yoon^{c,d†}

(Received: May. 30, 2022 / Accepted: Jun. 14, 2022)

ABSTRACT: The government promotes the 2050 carbon-neutral policy. Therefore, the concern to convert livestock manure into energy is increasing for the reduction of greenhouse gases generated in the livestock industry sector. In this study, the economic feasibility of the livestock manure solid fuel power generation facility, which is a major consumer of livestock manure solid fuel, was assessed to expand the demand for livestock manure solid fuel. The production cost of livestock manure solid fuel showed the lowest production cost of 97.4 thousand won/ton when dried using solid fuel at a 200 ton/day scale bio-drying facility. The livestock manure solid fuel power generation facility showed economic feasibility at a REC weight of 1.5 in the case of the bio-drying facility, so it was necessary to set a REC weight of 1.5 or more to expand the demand for livestock manure solid fuel. The conversion of livestock manure into solid fuel has various environmental benefits, such as the reduction of greenhouse gases and the effect of reducing non-point pollutants in the water system. Therefore, in order to expand livestock manure solid fuel production facility, it was required to review the feasibility including various environmental benefits.

Keywords: Livestock manure, Solid fuel, Biomass electric generation, Renewable energy certificate

초 록: 정부는 최근 2050년까지 국가 온실가스 순배출량을 “0”으로 하는 2050 탄소중립 정책을 추진하고 있다. 이에, 축산업 부문 2050 탄소중립을 위한 핵심적인 수단으로 가축분뇨 에너지화에 대한 관심이 증가하고 있다. 가축분뇨 고체연료화 기술은 가축분뇨를 건조 또는 탄화시켜 고체연료로 제조하는 기술로서 가축분뇨 고체연료 제조시설 및 발전시설의 경제성 문제로 인하여 보급 확산이 미미한 상황이다. 본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 제조 및 이용 촉진을 위하여 가축분뇨 고체연료의 잠재적인 수요처인 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성을 평가하고자 하였다. 가축분뇨 고체연료 제조원가는 200톤/일 규모의 발효건조 과정에서 97.4 천원/톤으로 가장 낮은 제조원가를 보였다. 가축분뇨 고체연료 발전시설은 신재생에너지공급인증서(REC) 가중치 1.5에서 경제성을 나타냈다. 가축분뇨 고체연료화는 온실가스 저감, 수계 비점오염원 저감 등 다양한 환경적 편익을 지니고 있다. 따라서 가축분뇨 고체연료 생산시설을 확산 보급을 위해서는 다양한 환경 편익을 포함한 경제성 검토가 요구된다.

주제어: 가축분뇨, 고체연료, 바이오매스 발전, 신재생에너지 공급 인증서

^a 환경대학교 바이오가스연구센터 연구원(Researcher, Biogas Research Center, Hankyong National University)

^b 환경대학교 식물생명환경과학과 박사과정생(Ph.D. Candidate, Department of Plant Life & Environmental Science, Hankyong National University)

^c 환경대학교 바이오가스연구센터 센터장(Head of Biogas Research Center, Biogas Research Center, Hankyong National University)

^d 환경대학교 식물생명환경과학과 교수(Professor, Department of Plant Life & Environmental Science, Hankyong National University)

† Corresponding author(e-mail: yyman@hknu.ac.kr)

1. 서론

정부는 『2050 탄소중립 추진전략』(MOTIE, 2020)¹⁾을 발표하고 경제구조의 저탄소화, 신유망 저탄소 산업 생태계 조성, 탄소중립 사회로의 공정전환 등 3대 정책 방향을 추진 중에 있다. 2018년 기준 농업 분야 온실가스 총배출량은 약 21.2 백만톤 CO₂eq.로 국가 총배출량의 약 2.9%를 차지하고 있으며, 1990년 대비 1.0%, 전년 대비 1.1%가 증가한 것으로 보고하고 있다(GIR, 2020)²⁾. 또한, 2018년 기준 농업 분야의 부문별 배출량 비중은 벼재배 29.7%, 농경지토양 25.8%, 가축분뇨처리 23.3%, 장내발효 21.1%, 작물잔사소각 0.1%의 순으로 축산부문에서의 온실가스 배출량이 약 44.4%를 차지하였다. 특히, 축산 관련 부문은 육류소비 증가에 따른 사육두수의 증가로 장내발효 부문 배출량이 1990년 대비 1.5 백만톤 CO₂eq.(51.0%) 증가하였으며, 가축분뇨처리 부문 배출량은 1990년 대비 2.1 백만톤 CO₂eq.(73.5%) 증가하였다. 따라서, 농업 분야 탄소중립 추진을 위해서는 축산 관련 부문의 온실가스 배출량 저감이 시급한 상황이다.

농식품부는 농업분야 탄소중립 실현을 위하여 『제2차 농업·농촌분야 기후변화 대응 기본계획』(MAFRA, 2021)³⁾을 수립하고 가축의 장내발효와 가축분뇨 처리 분야에서의 온실가스 저감 방안으로 가축분뇨의 에너지화 및 정화처리 비중 확대로 온실가스 감축을 추진하고 있다. 특히, 가축분뇨 에너지화를 통한 재생에너지 생산시설은 가축분뇨의 처리 과정에서 발생하는 온실가스 감축과 함께 신재생에너지 생산으로 화석연료를 직접 대체할 수 있다는 점에서 가축분뇨 처리 분야 온실가스 배출 저감을 위한 유력한 대안으로 평가되고 있다⁴⁾. 과거 농식품부는 2009년 가축분뇨 공동자원화(에너지화) 시범사업을 시작으로 농업·농촌 부문에 가축분뇨 바이오가스화 및 고체연료화 시설을 확대 보급하는 정책을 추진하였으나, 가축분뇨 바이오가스화 시설의 경우, 2020년 기준 9개 시설이 설치·가동 중으로 추진실적이 매우 미미한 상황이며, 가축분뇨 고체연료화 시설의 경우, 추진 사례가 전무한 상황이다.

가축분뇨 고체연료는 『가축분뇨 관리 및 이용에 관한 법률』(MOLEG, 2021)⁵⁾에서 “가축분뇨를 분리·

건조·성형 등을 거쳐 고체상의 연료로 제조한 것”으로 정의하고 있으며, 2015년에 그 품질기준을 규정함으로써 제도화되었다. 가축분뇨 고체연료의 정의에서 나타난 바와 같이, 가축분뇨 고체연료의 제조공정은 건조기술을 핵심공정으로 하고 있다(MOE, 2013)⁶⁾. 건조기술은 원료물질을 가열하여 수분을 기화시키는 단순기술임에도 불구하고, 물리적으로 약 540 kcal/kg의 기화열이 요구된다는 점에서 공정에너지 소비가 크게 요구되는 단점이 있다. 특히, 가축분뇨 고체연료 제조에 주로 사용되는 우분의 경우, 원료의 수분함량이 70% 이상으로 보고⁷⁾되고 있어 가축분뇨 고체연료 제조 과정에서 요구되는 과도한 건조에너지 소비로 인하여 가축분뇨 고체연료 제조의 경제성 문제가 제기되고 있다. 따라서, 가축분뇨 고체연료 제조와 관련한 연구는 효율적인 가축분뇨 건조기술 개발에 집중하고 있으며, Jeong(2016)⁸⁾과 Jeong(2017)^{9,10)}, Lim(2018)¹¹⁾, Liu(2020)¹²⁾등 여러 연구자들은 원료물질의 건조 특성 분석, 기계적 탈수 효율 및 건조방식 개선을 통해 가축분뇨 고체연료 제조의 경제성 향상을 위한 기술적 방안 연구를 진행한 바 있다. 그러나, 가축분뇨 고체연료 제조기술은 다양한 기술적 연구에도 불구하고 아직까지 상용화 시설의 설치 및 운영사례가 미미하고, 가축분뇨 고체연료 제조의 경제성 문제가 지속적으로 제기되는 상황이다. 이러한 가축분뇨 고체연료 제조시설의 경제성 문제는 가축분뇨 고체연료 제조시설의 보급 및 확산을 저해하는 가장 중요한 요인이 되고 있다. 특히, 가축분뇨 고체연료의 주요한 수요처인 발전사의 경우, 가축분뇨 고체연료의 높은 제조원가로 인하여 발전사업의 경제성이 낮아 가축분뇨 고체연료의 수요처 확대에도 큰 어려움이 있다.

정부는 경제성이 낮은 신재생에너지의 보급 및 확산을 위하여 신재생에너지의무할당제(RPS)를 운영하고 있다. RPS는 신재생에너지 발전 전원에 대하여 경제성을 고려하여 신재생에너지공급 인증서(REC)의 가중치를 차등화함으로써 경제성이 낮은 발전 전원의 경제성을 향상시켜 신재생에너지의 보급을 촉진시키는 제도이다. 그러나 가축분뇨 고체연료를 이용한 바이오매스 발전의 경우, 아직까지 REC를 인정받지 못하고 있어, 가축분뇨 고체연료 수요처 확대

를 위한 제도적인 방안이 부재한 상황에 있다. 따라서, 본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 제조시설의 보급·확산을 위하여 가축분뇨 고체연료의 잠재적인 수요처인 발전시설의 경제성 향상 방안으로 REC 적정 가중치를 도출하고자 하였다. 이를 위해 가축분뇨 고체연료 제조시설의 공정 특성별 고체연료의 제조원가를 분석하였고, 10 MW_{el}급 바이오매스 발전의 경제성 향상을 위한 적정 REC 가중치를 검토하였다.

제성을 분석하였다. 가축분뇨 고체연료의 제조원가 분석을 위한 가축분뇨 고체연료 건조공정의 유형을 발효건조와 화력건조로 설정하였으며, 제조공정 유형별 건조에너지 소비량과 고체연료 제품의 생산량을 추산하기 위하여 제조시설 유형별 물질 및 에너지 수지를 분석하여 제조원가 분석의 기초자료로 활용하였다. 가축분뇨 고체연료 제조원가를 산정한 후 10 MW_{el}급 가축분뇨 고체연료 발전시설을 대상으로 경제성을 분석하였으며, 고체연료 발전시설의 경제성 확보를 위한 REC 가중치를 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 분석방법

본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성 분석을 위하여 <Fig. 1>와 같이 가축분뇨 고체연료 제조원가를 분석하고 10 MW_{el}급 가축분뇨 고체연료 바이오매스 발전시설에서의 전력생산의 경

2.2. 가축분뇨 고체연료 제조원가 분석

2.2.1. 가축분뇨 고체연료 제조시설 유형

가축분뇨 고체연료 제조원가에서 가장 큰 비중을 차지하는 비용 항목은 가축분뇨 고체연료의 건조에너지 비용이다. 따라서, <Table 1>와 같이 가축분뇨 고체연료 제조원가 분석을 위한 고체연료 제조시설

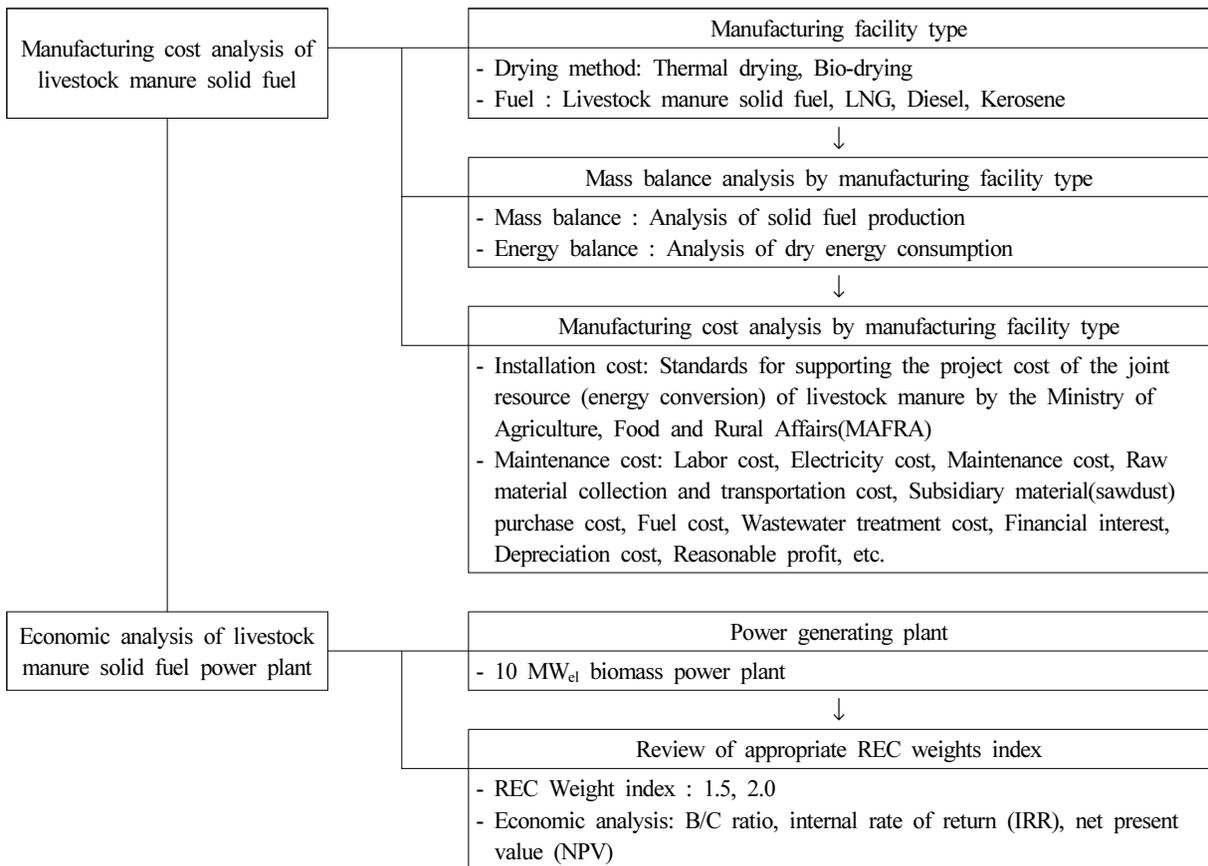


Fig. 1. Flow of economic analysis of livestock manure solid fuel power generation facility.

의 유형은 제조시설의 주요 건조공정의 종류를 달리하여 발효건조 공정(Type I)과 화력건조 공정(Type II) 유형으로 구분하였다. 또한, 건조연료의 종류별로 제조원가에 미치는 영향을 파악하기 위하여 세부유형으로 고체연료(Type I-1, Type II-1), LNG(Type I-2, Type II-2), 경유(Type I-3, Type II-3), 등유(Type I-4, Type II-4) 유형을 설정하였다. 발효건조공정은 <Fig. 2>과 같이 유입 가축분뇨의 수분함량은 67%로 설정하였으며¹³⁾, 발효건조공정은 수분함량 45%까지 건조 후 화력건조를 통해 수분함량 20%까지¹⁴⁾ 건조시켜 고체연료제품을 생산하는 공정체계를 설정하였다. 화력건조공정은 <Fig. 3>와 같이 발효건조공정과 동

일하게 유입 가축분뇨의 수분함량은 67%로 설정하였으며, 화력건조를 통해 수분함량 20%까지 건조시켜 고체연료제품을 생산하는 공정체계를 설정하였다.

2.2.2. 물질 및 에너지 수지 분석 기준

본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 제조원가 분석을 위해 제조시설 유형별 물질 및 에너지수지를 제조시설의 시설규모별(70, 100, 150, 200 톤/일)로 분석하였으며, 물질 및 에너지 수지 분석 기준은 <Table 2>과 같다. 가축분뇨 제조시설의 물질수지 분석은 시설 유형별로 생산되는 가축분뇨 고체연료 제품의 생산량을 산출하는데 사용하였으며, 에너지수지 분

Table 1. Manufacturing Facility Types for Analysis of Manufacturing Cost of Livestock Manure Solid Fuel

Type	Type I	Type II
Summary	Fermentation drying	Thermal drying
Raw material moisture content ¹⁾	- 67%(w/w)	- 67%(w/w)
Process Features	- Dry to 45% moisture content through fermentation drying, then dry to 20% ²⁾ moisture content through thermal drying	- Dry up to 20% moisture content through thermal drying
Subtype ³⁾	- Type I-1 : Solid fuel - Type I-2 : LNG - Type I-3 : Diesel - Type I-4 : Kerosene	- Type II-1 : Solid fuel - Type II-2 : LNG - Type II-3 : Diesel - Type II-4 : Kerosene

1) : Utilization of the results of self-analysis targeting livestock manure from sawdust barns.

2) : The Act on the Management and Use of Livestock Manure stipulates that the moisture content of livestock manure solid fuel is less than 20%.

3) : Separate types according to the types of raw materials used in thermal drying.

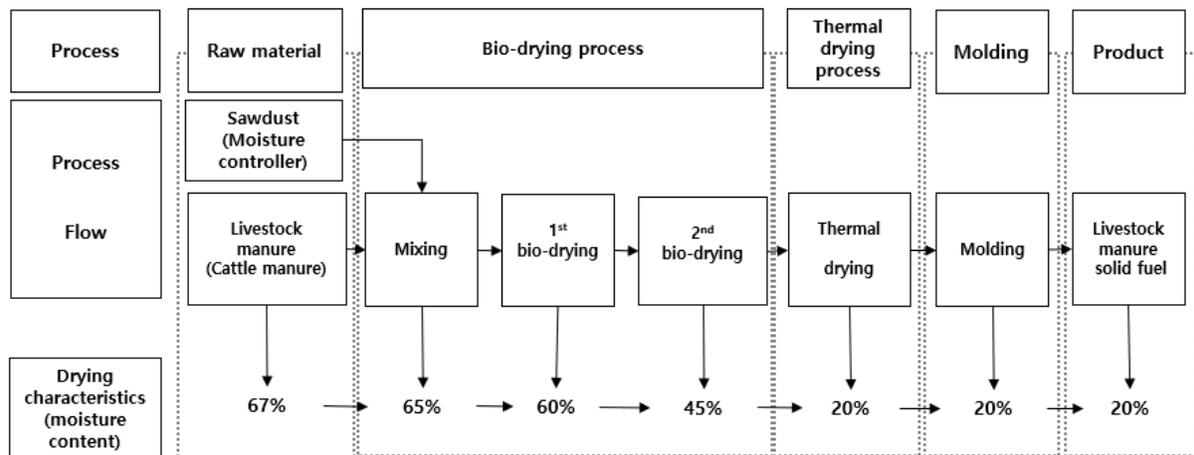


Fig. 2. Process and drying characteristics of livestock manure solid fuel plants(Type I).

석은 시설 유형별로 소비되는 건조에너지량을 추산하여 건조에너지 비용을 산출하는데 사용하였다.

2.2.3. 가축분뇨 고체연료 제조원가 분석

가축분뇨 고체연료 제조시설 유형별 제조원가 분석을 위하여 <Table 3>과 같이 제조원가 분석기준을 설

정하였다. 시설설치비는 농식품부 가축분뇨 공동자원화(에너지)시설 설치비 기준 단가를 적용하였으며, 유지관리비는 인건비, 전력비, 톱밥 등 부재료구입비, 연료비(건조연료), 폐수처리비, 금융이자, 감가상각비, 적정이윤의 항목을 산출하였다. 유지관리비 항목 중에서 톱밥 등 부재료구입비, 연료비(건조연료), 폐수

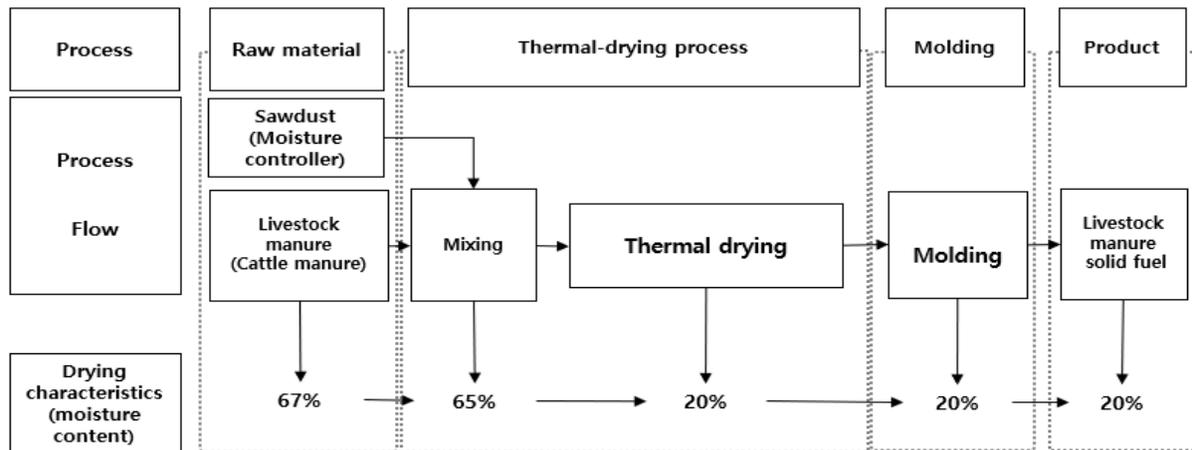


Fig. 3. Process and drying characteristics of livestock manure solid fuel facility(Type II).

Table 2. Criteria for Calculating the Material and Energy Balance of Livestock Manure Solid Fuel Manufacturing Facilities.

Process classification		Type of manufacturing facility	
		Type I	Type II
Raw material	Livestock manure ¹⁾ (Cattle manure)	Inflow(ton/day) 70, 100, 150, 200	70, 100, 150, 200
		Moisture content(%) 67	67
		Bulk density(ton/m ³) 0.8	0.8
Moisture controller ²⁾ (Sawdust)		Inflow(ton/day) 3.5, 5.0, 7.5, 10	3.5, 5.0, 7.5, 10
		Moisture content(%) 25	25
		Bulk density(ton/m ³) 0.3	0.3
1st blow-type fermentation drying		Hydraulic retention time(day) ³⁾ 15	-
		Heat capacity for evaporation(kcal/kg) ⁴⁾ 900	-
		Heat capacity by decomposition of organic matter(kcal/kg) ⁵⁾ 4,500	-
		Organic matter decomposition rate(%/day) ⁶⁾ 0.7	-
		Target moisture content(% ⁷⁾ 60	-
Fermentation drying process		Hydraulic retention time(day) 16	-
		Heat capacity for evaporation(kcal/kg) 900	-
		Heat capacity by decomposition of organic matter(kcal/kg) 4,500	-
		Organic matter decomposition rate(%/day) 1.0	-
		Target moisture content(% 45	-

Table 2. Continued

Process classification			Type of manufacturing facility	
			Type I	Type II
Heat capacity for evaporation(kcal/kg)			900	900
Target moisture content(%)			20	20
Thermal drying process	Solid fuel ⁸⁾	Lower Heating Value(kcal/kg)	3,000	3,000
	LNG	Lower Heating Value(kcal/Nm ³)	9,550	9,550
	Diesel	Lower Heating Value(kcal/L)	8,450	8,450
	Kerosene	Lower Heating Value(kcal/L)	8,350	8,350

1) : 70, 100, 150, and 200 ton/day facility capacity set for facility types I and II, respectively.

2) : Moisture controller(sawdust) inflow(ton/day) = (Livestock manure inflow(ton/day) × (Livestock manure moisture content(%) - Target moisture content(%)) / (Target moisture content(%) - Sawdust moisture content(%))).

3) : Reaction time(days) during which raw materials stay in the process = Total volume of process reactor(m³)/daily raw material input(m³/day).

4) : The amount of heat consumed for evaporation(vaporization) of water and the physical heat of vaporization of water are 540 kcal/kg, but set to 900 kcal/kg in consideration of the thermal efficiency of the process.

5) : Respiratory heat generated by microorganisms decomposing organic matter in the fermentation and drying process (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, etc. 2009).

6) : Decomposition rate of organic matter in the fermentation and drying process(%/day).

7) : Moisture content management target of the effluent for each process step for the production of livestock manure solid fuel(%).

8) : Livestock manure solid fuel, livestock manure solid fuel manufactured in the process is used as dry fuel.

Table 3. Criteria for Manufacturing Cost Analysis of Livestock Manure Solid Fuel

Classification	Criteria for cost analysis
Installation cost ¹⁾	- Applied unit price based on installation cost of livestock manure joint resource(energy) facility by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. - Project cost by construction type: Civil engineering 25%, Construction 25%, Machinery 30%, Electricity 10%, Other 15% applied.
Labor cost ²⁾	- Office workers, machinery, temperature, environment, safety and safety ratings (70 tons/day size 7 people, 100 tons/day size 8 people, 150 tons/day size 9 people, 200 tons/day size 10 people applied)
Electricity cost	- Existing common resource conversion(energy conversion) facility power consumption survey case application - Agricultural use(B, high voltage), contract power 500kW, operating days 330 days/year
Sawdust purchase	- Calculation of sawdust consumption based on material balance calculation results (imported sawdust 200 won/kg)
Maintenance cost	Fuel cost (Heat drying) - Based on the mass balance calculation result - Fuel type: Livestock manure solid fuel product, LNG, Diesel, Kerosene
	Wastewater consignment treatment cost - Based on the mass balance calculation result, the amount of wastewater generated is calculated - Consignment processing cost 10,000 won/ton applied
Financial interest	- 3-year deferral, 7-year repayment, 2% per annum
Depreciation cost	- Residual value 10%, straight-line method applied - Endurance: 10 years in mechanical and electrical fields, 20 years in civil engineering and construction fields
Reasonable profit	- 8%/year of investment(self-pay + loan, 30% of project cost)

1) : Reorganized by the Ministry of Agriculture and Food (2021).

2) : The labor cost standards for each job of the Korea Engineering & Consulting Association (2020) are applied.

Table 4. Criteria for Power Generation Cost Analysis of Livestock Manure Solid Fuel

Installed capacity ¹⁾ (MW _{el})	Estimated investment cost (100 million won)	Utilization rate ²⁾ (%)	The amount of electricity generation (GWh/year)	Discount rate (%)	Depreciation cost (100 million won/year)	O&M cost ³⁾ (100 million won/year)
10	640(545) ⁴⁾	80	62	4.56	27	107

Data source) Refer to Korea East-West Power internal data.

- 1) Facility capacity is based on the amount of electricity generated per day.
- 2) Utilization rate: 80% (70GWh/87.6GWh), power generation efficiency: 28.4%, Power consumption rate in power plant: 11.68%.
- 3) O&M cost: Fuel cost + Operating cost + Insurance premium + Tax, etc.
- 4) Excluding residual value.

처리비는 가축분뇨 고체연료 제조시설의 유형별 물질 및 에너지 수지분석 결과에 기초하여 산출하였으며, 이를 통해 시설유형이 제조원가에 미치는 영향을 반영하였다.

2.3. 가축분뇨 고체연료 발전사업 경제성 분석

가축분뇨 고체연료 발전사업의 경제성 분석을 위하여 10MW급 가축분뇨 고체연료 발전시설을 기준으로 <Table 4>와 같이 가축분뇨 고체연료 발전원가 분석기준을 설정하였으며, 추정투자비는 시설투자비 예상소요액 640억원에서 잔존가치 94억원을 고려하여 545억원을 시설투자비 기준으로 산정하였다. 가축분뇨 고체연료 발전사업의 경제성 평가는 비용편익비율(B/C 비율), 내부수익율(IRR), 순현재가치(NPV)을 분석하였으며, 가축분뇨 고체연료 발전사업의 경제성 확보를 위한 REC 가중치는 1.5와 2.0에서 검토하였다. 또한, REC 가중치 검토에서 생산 전력의 판매가격은 5개월(2020.2~2020.6)간의 SMP 70~80원/kWh, REC 66~100원/kWh(계약시장)의 변동 수준에서 수행하였다.

3. 경제성 분석 결과

3.1. 물질 및 에너지수지 분석

가축분뇨 고체연료 제품의 원가분석을 위하여 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 발효건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type I)의 물질수지를 분석하였다. 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모별 원료 유입처리량은 발효건조를 위한 수분조절제 투입량을 합하여 73.5, 105.0, 157.5, 210.0 톤/일이었으며, 고체연료 생산량은 각각 24.18, 34.54,

51.80, 69.07 톤/일이었다. 공정단계별 가축분뇨 수분함량 변화는 원료 65.0%에서 1차 발효건조 후 59.81%, 2차 발효건조 후 45.04%, 가축분뇨 고체연료 20.0%로 나타났다. 발효건조 후 추가적인 건조를 위한 화력건조에서 소비되는 에너지량을 세부 시설유형별로 살펴보면, 가축분뇨 고체연료 이용(Type I-1)은 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 각각 3,304, 4,727, 7,081, 9,442 kg/일의 연료가 소비되었으며, LNG 이용(Type I-2)은 각각 1,038, 1,483, 2,224, 2,966 Nm³/일의 연료가 소비되는 것으로 분석되었다<Table 5>. 경유 이용(Type I-3)은 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 각각 1,173, 1,676, 2,514, 3,352 L/일의 연료가 소비되었으며, 등유 이용(Type I-4)은 각각 1,187, 1,696, 2,544, 3,392 L/일의 연료가 소비되는 것으로 분석되었다. 가축분뇨 고체연료 제조시설 (Type I)의 1차 발효건조 과정은 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 각각 2.70, 3.86, 5.79, 7.72 톤/일의 유기물이 분해되었고, 이 과정에서 각각 12,155, 17,346, 26,047, 34,729 Mcal/일의 발효건조 에너지가 발생하였으며, 2차 발효건조 과정은 각각 3.68, 5.26, 7.89, 10.53 톤/일의 유기물이 분해되었고, 이 과정에서 각각 16,577, 23,682, 35,532, 47,363 Mcal/일의 발효건조 에너지가 발생하였다. 따라서 발효건조 과정에서 유기물 분해로 인한 최종 가축분뇨 고체연료 제품의 생산량 감소가 나타나는 반면, 미생물 호흡열로 수분함량을 45.04%까지 건조가 가능하였다.

<Table 6>에서 화력건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type II)의 경우, 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모별 원료 유입처리량은 발효건조를 위한 수분조절제 투입량을 합하여 73.5, 105.0, 157.5, 210.0 톤/일이며 발효건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type I)과 동일하였으며, 고체연료 생산

량은 각각 32.16, 45.94, 68.91, 91.88 톤/일으로 발효 건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type I)과 비교하여 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모 전체에서 약 33% 증가하였다. 가축분뇨 고체연료

Table 5. Treatment Facility Operation Mass Balance by Facility Capacity(Type I)

Process classification		Facility capacity(ton/day)				
		70	100	150	200	
Raw material	Cattle manure Inflow(ton/day)	70	100	150	200	
	Sawdust Inflow(ton/day)	3.5	5.0	7.5	10.0	
	Mixed raw materials ¹⁾ Inflow(ton/day)	73.5	105.0	157.5	210.0	
	Moisture content(%)	65.0	65.0	65.0	65.0	
1st blow-type fermentation drying	Solid content(inflow)(ton/day)	25.73	36.75	55.13	73.50	
	Solid content(spill)(ton/day)	23.02	32.39	49.33	65.78	
	Reduction of solids content(ton/day) ²⁾	2.70	3.86	5.79	7.72	
	Amount of heat decomposed from organic matter(Mcal/day) ³⁾	12,155	17,364	26,047	34,729	
	Water evaporation(ton/day) ⁴⁾	13.51	19.29	28.94	38.59	
	Fermented dried product production(ton/day)	57.29	81.85	122.77	163.70	
	Fermented dried product moisture content(%)	59.81	59.81	59.81	59.81	
	Fermentation drying process	Solid content(inflow)(ton/day)	23.02	32.89	49.33	65.78
		Solids content(spill)(ton/day)	19.34	27.63	41.44	55.25
		Secondary Reduction of solids content(ton/day)	3.68	5.26	7.89	10.53
mechanical Amount of heat decomposed from organic matter(Mcal/day)		16,577	23,682	35,523	47,363	
drying Water evaporation(ton/day)		18.42	26.31	37.47	52.63	
Fermented dried product production(ton/day)		35.19	50.27	75.41	100.54	
Fermented dried product moisture content(%)		45.04	45.04	45.04	45.04	
Thermal drying process		Solid content(inflow)(ton/day)	19.34	27.63	41.44	55.25
		Solid content(spill)(ton/day)	19.34	27.63	41.44	55.25
		Water evaporation(ton/day) ⁵⁾	11.01	15.74	23.60	31.47
	Amount of solid fuel production(ton/day) ⁶⁾	24.18	34.54	51.80	69.07	
	Solid fuel moisture content(%)	20.0	20.0	20.0	20.0	
	Solid fuel(kg/day)	3,304	4,721	7,081	9,442	
	Fuel consumption ⁷⁾	LNG(Nm ³ /day)	1,038	1,483	2,224	2,966
		Diesel(L/day)	1,173	1,676	2,514	3,352
		Kerosene(L/day)	1,187	1,696	2,544	3,392

1) : Livestock manure (Cattle manure) + Moisture controller(Sawdust) mixture.

2) : Reduction of solids(ton/day) = Content of solids(inflow)(ton/day) × Organic matter decomposition rate(%/day)(Table 7) ÷ 100 × Hydraulic retention time(days).

3) : Amount of heat decomposed from organic matter(Mcal/day) = Reduction of solids content(ton/day) × Amount of heat decomposed from organic matter(kcal/kg)(Table 7) × 1,000(kg/ton) ÷ 1,000(kcal/Mcal).

4) : Water evaporation(ton/day) = Amount of heat decomposed from organic matter(Mcal/day) ÷ Latent heat of evaporation of water(900 kcal/kg)(Table 7).

5) : Water evaporation(ton/day): The amount of water evaporation required to meet the water content of solid fuel(20%) quality standards.

6) : Livestock manure solid fuel product with 20% moisture content.

7) : Consumption by fuel required for the production of livestock manure solid fuel products with a moisture content of 20% in the thermal drying process.

Table 6. Mass balance of treatment facilities by facility capacity(Type II)

Process classification			Facility capacity(ton/day)				
			70	100	150	200	
Raw material	Cattle manure	Inflow(ton/day)	70	100	150	200	
	Sawdust	Inflow(ton/day)	3.5	5.0	7.5	10.0	
	Mixed raw materials ¹⁾	Inflow(ton/day)	73.5	105.0	157.5	210.0	
		Moisture content(%)	65.0	65.0	65.0	65.0	
Thermal drying process	Solid content(inflow)(ton/day)		25.73	36.75	55.13	73.50	
	Solid content(spill)(ton/day)		25.73	36.75	55.13	73.50	
	Water evaporation(ton/day) ²⁾		41.34	59.06	88.59	118.13	
	Amount of solid fuel production(ton/day) ³⁾		32.16	45.94	68.91	91.88	
	Solid fuel moisture content(%)		20.0	20.0	20.0	20.0	
	Solid fuel(kg/day)		12,403	17,719	26,578	35,438	
	Fuel consumption ⁴⁾	LNG(Nm ³ /day)		3,896	5,566	8,349	11,132
		Diesel(L/day)		4,403	6,291	9,436	12,581
		Kerosene(L/day)		4,456	6,366	9,549	12,732

1) : Livestock manure(Cattle manure) + Moisture controller(Sawdust) mixture.

2) : Water evaporation(ton/day): The amount of water evaporation required to meet the water content of solid fuel(20%) quality standards.

3) : Livestock manure solid fuel product with 20% moisture content.

4) : Consumption by fuel required for the production of livestock manure solid fuel products with a moisture content of 20% in the thermal drying process.

제조시설(Type II)의 화력건조에서 소비되는 에너지량을 세부 시설유형별로 살펴보면, 가축분뇨 고체연료 이용(Type II-1)은 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 각각 12,404, 17,719, 26,578, 34,438 kg/일의 연료가 소비되었으며, LNG 이용(Type II-2)은 각각 3,896, 5,566, 8,349, 11,132 Nm³/일의 연료가 소비되는 것으로 분석되었다. 경유 이용(Type II-3)은 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설규모에서 각각 4,403, 6,291, 9,436, 12,581 L/일의 연료가 소비되었으며, 등유 이용(Type II-4)은 각각 4,456, 6,366, 9,549, 12,732 L/일의 연료가 소비되는 것으로 분석되었다. 따라서 화력건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type II)의 화석연료 소비량은 전체 시설규모에서 발효건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설(Type I)의 화석연료 소비량 대비 약 275% 증가한 것으로 나타났다. 이는 가축분뇨 고체연료의 건조를 위하여 (Type I)의 가축분뇨 고체연료 제조시설의 발효건조 에너지를 화석연료로 대체하는 과정에서 화력건조 에너지 요구도가 크게 증가한 것이다.

3.2. 가축분뇨 고체연료 제조원가 분석

가축분뇨 고체연료 제조시설의 건조방식별 비용과 편익을 분석을 통해 가축분뇨 고체연료 생산 원가를 분석한 결과, <Table 7>에서 발효건조 후 가축분뇨 고체연료를 이용(Type I-1)하여 건조를 실시하는 경우, 가축분뇨 고체연료 제조원가는 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설 규모에서 각각 155.0, 135.4, 112.1, 97.4 천원/톤이었으며, LNG 이용(Type I-2)에서 각각 154.6, 137.6, 117.5, 104.9 천원/톤으로 산출되었다. 경유 이용(Type I-3)에서는 각각 190.3, 173.3, 153.3, 140.6 천원/톤이었으며, 등유 이용(Type I-4)에서 각각 173.8, 156.9, 136.8, 124.1 톤/일으로 산출되었다. <Table 8>에서 화력건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설의 제조원가는 가축분뇨 고체연료 이용(Type II-1)의 경우, 시설용량 70, 100, 150, 200 톤/일 시설 규모에서 각각 179.1, 158.4, 133.8, 118.3 천원/톤이었으며, LNG 이용(Type II-2)의 경우, 각각 168.6, 155.8, 140.8, 131.2 천원/톤이었다. 경유 이용(Type II-3)에서 가축분뇨 고체연료 제조원가는 각각 239.4, 256.6, 241.5, 232.0 톤/일이었으며, 등유이용(Type II-4)에서는 각

Table 7. Analysis of Economic Feasibility and Manufacturing Cost of Livestock Manure Solid Fuel Manufacturing Facility(Type I)

Classification		Facility capacity(ton/day)				
		70	100	150	200	
Direct convenience (1,000 won/year)	Livestock manure treatment cost	462,000	660,000	990,000	1,320,000	
	Sum	462,000	660,000	990,000	1,320,000	
Cost (1,000 won/year)	Personnel expenses	377,631	435,255	492,879	545,549	
	Electricity cost	96,177	137,396	206,094	274,792	
	Vehicle maintenance cost	11,317	16,167	24,250	32,333	
	Facility maintenance cost	140,000	184,000	243,000	292,000	
	Sawdust purchase	231,000	330,000	495,000	660,000	
	Fuel cost	Type I-1(Solid fuel)	0	0	0	0
		Type I-2(LNG)	165,536	236,480	354,720	472,960
		Type I-3(Diesel)	450,449	643,499	965,249	1,286,998
		Type I-4(Kerosene)	319,247	456,067	684,100	912,134
	Wastewater treatment cost	36,350	51,929	77,894	103,858	
	Financial interest	28,000	36,800	48,600	58,400	
	Depreciation	441,000	579,600	765,450	919,800	
	Sum	Type I-1(Solid fuel)	1,361,475	1,771,147	2,353,166	2,886,733
		Type I-2(LNG)	1,527,011	2,007,627	2,707,886	3,359,693
Type I-3(Diesel)		1,811,925	2,414,646	3,318,415	4,173,731	
Type I-4(Kerosene)		1,680,722	2,227,213	3,037,266	3,798,866	
Reasonable profit(1,000 won/year)	168,000	220,800	291,600	350,400		
Amount of solid fuel production. (ton/year)	Type I-1(Solid fuel) ¹⁾	6,887	9,839	14,758	19,678	
	Type I-2(LNG)	7,978	11,397	17,095	22,794	
	Type I-3(Diesel)	7,978	11,397	17,095	22,794	
	Type I-4(Kerosene)	7,978	11,397	17,095	22,794	
Solid fuel manufacturing cost ²⁾ (1,000 won/ton)	Type I-1(Solid fuel)	155.0	135.4	112.1	97.4	
	Type I-2(LNG)	154.6	137.6	117.5	104.9	
	Type I-3(Diesel)	190.3	173.3	153.3	140.6	
	Type I-4(Kerosene)	173.8	156.9	136.8	124.1	

1) : Excluding solid fuel consumption for drying from solid fuel production.

2) : Solid fuel manufacturing cost(1000 won/ton) = (Cost - Direct convenience - Reasonable profit) ÷ Amount of solid fuel production.

Table 8. Analysis of Economic Feasibility and Manufacturing Cost of Livestock Manure Solid Fuel Manufacturing Facility(Type II)

Classification		Facility capacity(ton/day)			
		70	100	150	200
Direct convenience (1,000 won/year)	Livestock manure treatment cost	462,000	660,000	990,000	1,320,000
	Sum	462,000	660,000	990,000	1,320,000
Cost (1,000 won/year)	Personnel expenses	377,631	435,255	492,879	545,549
	Electricity cost	96,177	137,396	206,094	274,792
	Vehicle maintenance cost	11,317	16,167	24,250	32,333
	Facility maintenance cost	140,000	184,000	243,000	292,000
	Sawdust purchase	231,000	330,000	495,000	660,000

Table 8. Continued

	Classification	Facility capacity(ton/day)			
		70	100	150	200
Fuel cost	Type I-1(Solid fuel)	0	0	0	0
	Type I-2(LNG)	621,309	887,585	1,331,377	1,775,169
	Type I-3(Diesel)	1,690,679	2,415,255	3,622,883	4,830,510
	Type I-4(Kerosene)	1,198,234	1,711,762	2,567,644	3,423,525
Cost (1,000 won/year)	Wastewater treatment cost	136,434	194,906	292,359	389,813
	Financial interest	28,000	36,800	48,600	58,400
	Depreciation	441,000	579,600	765,450	919,800
Sum	Type I-1(Solid fuel)	1,461,559	1,914,124	2,567,632	3,172,687
	Type I-2(LNG)	2,082,869	2,801,708	3,899,009	4,947,856
	Type I-3(Diesel)	3,152,238	4,329,379	6,190,515	8,003,197
	Type I-4(Kerosene)	2,659,793	3,625,886	5,135,275	6,596,212
Reasonable profit(1,000 won/year)		168,000	220,800	291,600	350,400
Amount of solid fuel production. (ton/year)	Type I-1(Solid fuel) ¹⁾	6,519	9,312	13,968	18,624
	Type I-2(LNG)	10,612	15,159	22,739	30,319
	Type I-3(Diesel)	10,612	15,159	22,739	30,319
	Type I-4(Kerosene)	10,612	15,159	22,739	30,319
Solid fuel manufacturing cost ²⁾ (1,000 won/ton)	Type I-1(Solid fuel)	179.1	158.4	133.8	118.3
	Type I-2(LNG)	168.6	155.8	140.8	131.2
	Type I-3(Diesel)	269.4	256.6	241.5	232.0
	Type I-4(Kerosene)	222.9	210.2	195.1	185.6

1) : Excluding solid fuel consumption for drying from solid fuel production.

2) : Solid fuel manufacturing cost(1000 won/ton) = (Cost - Direct convenience - Reasonable profit) ÷ Amount of solid fuel production.

각 222.9, 210.2, 195.1, 185.6 천원/톤이었다. 따라서, 발효건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설이 화력건조 방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설과 비교하여 상대적으로 제조원가가 낮은 것으로 나타났으며, 가축분뇨 고체연료 제조시설의 규모가 증가함에 따라 제조원가가 낮아졌다.

3.3. 가축분뇨 고체연료 발전사업 경제성 분석

본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 제조시설의 건조방식별 고체연료 제조원가를 분석하고, 10MW_{el}급 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성을 분석하였으며<Tables 9, 10>, 신재생에너지공급인증서 가중치 1.5와 2.0에서 가축분뇨 고체연료 제조시설의 경제성을 계통한계가격(SMP) 70~80원/kWh과 REC 계약시장가격 66~100원/kWh의 변동 수준에서 검토한 결과 <Figs. 4, 5, 6>과 같다. 발효건조 방식(Type I)

에서 가장 낮은 제조원가(97.43 천원/톤)를 기준으로 경제성을 분석한 결과, REC 가중치 1.5에서 IRR은 5.9%, B/C 비율 1.04, NPV 6.23십억원으로 경제성이 있는 것으로 나타났다. 화력건조 방식(Type II)에서 가장 낮은 제조원가(118.29 천원/톤)를 기준으로 경제성을 분석한 결과, REC 가중치 1.5에서 IRR은 2.7%, B/C 비율 0.95, NPV -7.65십억원으로 나타나 경제성이 없는 것으로 평가되었다. REC 가중치를 2.0으로 향상시키는 경우, 발효건조 방식(Type I)의 경우, IRR은 11.6%, B/C 비율 1.22, NPV 35.34십억원으로 경제성이 크게 향상되었으며, 화력건조 방식(Type II)의 경우, IRR은 9.0%, B/C 비율 1.12, NPV 21.46십억원으로 경제성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서, 근래의 계통한계가격과 REC 계약시장가격을 기초로 할 때, 발효건조 방식의 고체연료 제조시설은 REC 가중치 1.5에서도 경제성이 나타났으며, 화력건조

Table 9. Results of Economic Analysis of Livestock Manure Solid Fuel Power Generation Business (REC Weight Index 1.5)

Manufacturing facility type	Drying method	Solid fuel manufacturing cost (1000 won/ton)	Economic evaluation index ¹⁾		
			IRR	B/C	NPV
Type I	Fermentation drying	97.43	5.9%	1.04	6.23 billion won
Type II	Thermal drying	118.29	2.7%	0.95	-7.65 billion won

1) Analysis at SMP 70 won/kWh and REC 100 won/kWh.

Table 10. Results of Economic Analysis of Livestock Manure Solid Fuel Power Generation Business (REC Weight Index 2.0)

Manufacturing facility type	Drying method	Solid fuel manufacturing cost (1000 won/ton)	Economic evaluation index ¹⁾		
			IRR	B/C	NPV
Type I	Fermentation drying	97.43	11.6%	1.22	35.34 billion won
Type II	Thermal drying	118.29	9.0%	1.12	21.46 billion won

1) Analysis at SMP 70 won/kWh and REC 100 won/kWh.

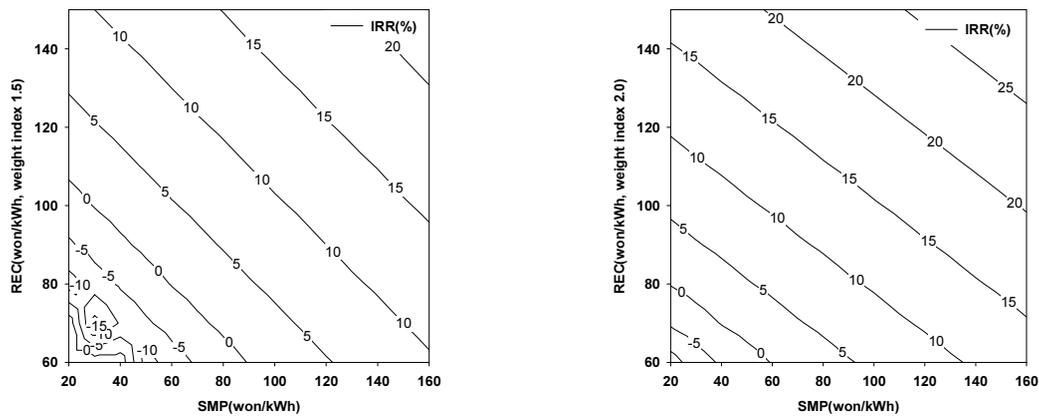


Fig. 4. Changes in IRR of livestock manure solid fuel power generation business.

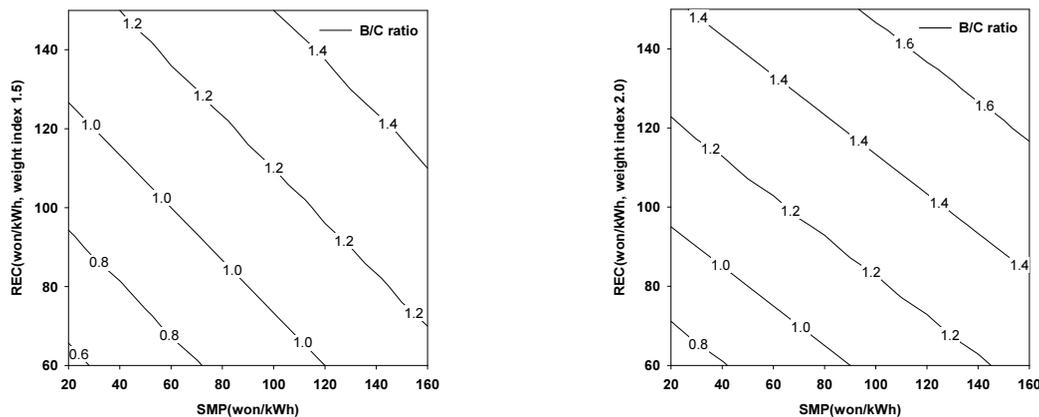


Fig. 5. Changes in B/C ratio of livestock manure solid fuel power generation business

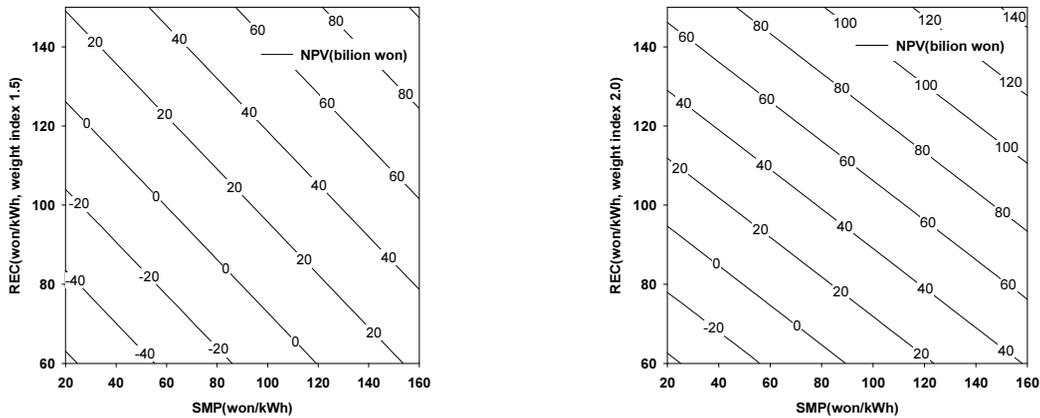


Fig. 6. NPV variation of livestock manure solid fuel power generation business.

방식의 가축분뇨 고체연료 제조시설은 REC 가중치 2.0에서 경제성이 나타났다.

4. 결론

정부는 2050 탄소중립 정책 추진으로 가축분뇨 처리 과정에서 발생하는 온실가스 저감을 위한 방안으로 가축분뇨 에너지화의 필요성이 증대되고 있다. 가축분뇨 고체연료는 2015년에 제도화되었으나, 가축분뇨 고체연료 제조시설과 가축분뇨 고체연료의 주요한 수요처인 발전시설의 낮은 경제성은 고체연료 제조시설의 보급 확산을 저해하는 주요한 원인이 되고 있다. 가축분뇨 고체연료 제조시설의 경제성 향상을 위해서는 공정에서 소비되는 에너지의 효율 개선 중요하다. 그러나, 가축분뇨 고체연료 제조기술은 가축분뇨 중의 수분을 제거하는 건조기술을 중심으로 하고 있어, 건조기술의 공정 원리상 현격한 에너지 효율의 개선에는 한계가 있다. 특히, 가축분뇨 고체연료를 이용하는 발전사업은 RPS 제도에 미등록되어 있어 가축분뇨 고체연료의 수요처 확대에도 어려움이 있는 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 정부의 RPS 제도와 연계하여 가축분뇨 고체연료의 주요한 수요처인 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성을 향상시킴으로써 가축분뇨 고체연료의 수요처를 확대하는 방안을 검토하였으며, 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성을 향상을 위한 적정 REC

가중치를 도출하고자 하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 가축분뇨 고체연료 제조시설의 주요 건조기술에 따라 발효건조 방식(Type I)과 화력건조 방식(Type II)의 두 가지 유형으로 구분하였으며, 각각의 유형별 건조에 사용되는 연료의 종류에 따라 가축분뇨 세부 유형(고체연료(Type I-1, Type II-1), LNG(Type I-2, Type II-2), 경유(Type I-3, Type II-3), 등유(Type I-4, Type II-4))을 설정하였다. 또한, 각각의 가축분뇨 제조시설의 유형별로 시설용량 70, 100, 150, 200톤/일 규모에서 제조원가를 분석하였다. 제조원가 분석결과, 가축분뇨 고체연료 제조원가는 발효건조 방식(Type I)이 화력건조 방식(Type II)보다 상대적으로 낮았으며, 가축분뇨 고체연료 제조시설의 규모가 증가함에 따라 제조원가가 낮았다. 건조 연료의 종류별 제조원가 분석에서는 자체 생산한 고체연료를 이용하는 방식이 낮은 제조원가를 보였다. 따라서 가축분뇨 고체연료의 제조원가는 200톤/일 규모의 발효건조 시설에서 고체연료 이용 건조 시에 97.4천원/톤의 가장 낮은 제조원가를 나타내었다. 특히, 70톤/일 규모 발효건조 시설에서 경유 이용 건조 시에 190.3천원/톤의 제조원가를 보여, 가축분뇨 고체연료 제조시설의 시설 규모와 건조 연료 종류의 변동에 따라 약 2배까지의 제조원가의 차이를 보였다. 가축분뇨 고체연료 발전시설의 경제성은 발효건조 방식의 경우, REC 가중치 1.5에서도 경제성을 보였으며, 화력건조 방식의 경우, REC 가중치 2.0에서 경제성을 보였다. 따라서, 가축분뇨 고체연료 수요처

확대를 위해서는 1.5 이상의 REC 가중치 설정이 필요하였으며, 이와 함께 가축분뇨 고체연료 제조시설의 제조원가 절감을 위한 효율적인 건조기술의 개발이 요구되었다. 가축분뇨 고체연료화는 축산분야 2050 탄소중립 추진을 위한 온실가스 저감 방안이기도 하지만, 최근 환경부가 도입하고자 하는 지역단위 양분관리제도의 주요한 대응 방안이기도 하다. 가축분뇨 고체연료화에 따른 온실가스 저감효과, 수계 비점오염원 저감효과 등 다양한 환경적 편익을 지니고 있다. 따라서, 향후, 가축분뇨 고체연료화의 활성화를 위해서는 정책적인 측면에서 다양한 환경적 편익을 포함하는 사업의 타당성 검토가 요구되고 있다.

사사

본 연구는 농림축산식품부 2025 축산현안대응 산업화기술개발사업(과제번호: 321093-2)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), "2050 Carbon Neutral Promotion Strategy". (in Korean) (2020)
2. Greenhouse Gas Information Center, "2020 National Greenhouse Gas Inventory Report". (in Korean). (2020).
3. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) and Ministry of Environment(ME), "The 2nd Basic Plan for Response to Climate Change in Agriculture and Rural Areas". (in Korean). (2021).
4. Kim, Y. S., Yoon, Y. M., Kim, C. H. and Giersdorf, J., "Status of biogas technologies and policies in south Korea", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp. 3430~3438, (2012).
5. Ministry of Government Legislation(MOLEG), "Regulations on the Management and Use of Livestock Manure" (Law No. 18027). (in Korean). (2020).
6. Ministry of Environment(ME), "Research report on establishing quality standards for livestock manure solid fuel products". (in Korean) (2013).
7. Oh, S. Y., Kim, C. H. and Yoon, Y. M., "The bioenergy conversion characteristics of feedlot manure discharging from beef cattle barn", *Journal of Soil Science and Fertilizer*, 48(6), pp. 697~704, (2015).
8. Jeong K. H., Kim, J. G., Lee D. J., Zo, W. M., Ravindran, B. and Kwag, J. H., "Effect of Drying Process on Cow Manure Solidified Fuel Applications", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 24(4), pp. 105~112. (2016).
9. Jeong K. H., Kim, J. G. and Lee D. J., "Feasibility test for Solidified Fuel with Cow Manure", *Journal of soil and groundwater environment*, 22(6), pp. 112~119. (2017).
10. Jeong K. H., Kim J. K., Lee D. J., Ravindran, B. and Kwag J. H., "Analysis of the Composting Effect on Cow Manure by Aeration and Comparison of Characteristics of Cow Manure Pellet Composts According to Granulation Processing Method", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 25(2), pp. 69~76. (2017).
11. Liu N., Kim S. and Chung J. D., "A Numerical Study on Gasification using Solid Fuel of Cow Manure", *Journal of the Korea Society of Waste Management.*, 37(6), pp. 429~434. (2020).
12. Lim, S. H. and Chung, J. D., "Study on the Lab Scale Drying Characteristics of Cow Manure", *Journal of Korea Society of Waste Management*, 35(5), pp. 459~163. (2018).
13. Rural Development Administration(RDA), "Development of combined wet and dry anaerobic digestion system for improving biogas production". (in Korean). (2015).
14. Ministry of Environment(ME), "Notification on installation of livestock manure solid fuel facility, etc.". (in Korean). (2020).