

바이오매스 폐기물의 에탄올 생산 공정의 기술경제성 평가

곽인섭 · 황종하 · 이시훈[†]

전북대학교 자원·에너지 공학과
(2016년 1월 14일 접수, 2016년 2월 15일 심사, 2016년 2월 22일 채택)

Techno-economic Evaluation of an Ethanol Production Process for Biomass Waste

In-seop Gwak, Jong-Ha Hwang, and See Hoon Lee[†]

Department of Mineral Resource & Energy Engineering, Chonbuk National University, South Korea
(Received January 14, 2016; Revised February 15, 2016; Accepted February 22, 2016)

초 록

세계 각국은 석유자원의 고갈로 인한 고유가, 지구온난화 등의 환경문제를 해결하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 그중 기존 화석연료를 대체할 수 있는 재생 가능한 청정 에너지원으로 바이오 연료가 주목받고 있다. 그러나 기존의 바이오연료 생산기술은 식량자원인 사탕수수, 옥수수 등을 사용하므로 이를 대체하는 기술개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 식량자원을 대체할 폐기물의 가스화와 혼합 알코올 합성공정이 연계된 간접 알코올 전환 공정의 기술 경제성 평가를 수행하였다. 국내에서 공급되는 바이오매스 폐기물 자원량을 고려한 2000톤/일 급의 전환 공정에서 매일 533000 L의 연료용 에탄올을 생산한다고 가정하였고 이를 위해 필요한 경제성 자료는 기발표된 자료들로부터 계산되어 경제성 분석에 이용되었다. 경제성 분석은 원금회수기간과 내부수익률(internal rate of return, IRR) 및 순현재가치(Net Present Value, NPV)로 진행되었으며, 원료비용과 초기 투자비, 주요 공정비용 및 에탄올 가격 변화, 운용비용의 민감도 분석을 진행하여 각 항목별 민감도를 고찰하였다.

Abstract

Extensive efforts from all over the world have been made to solve energy problems, such as high oil prices, global warming due to the depletion of oil. Among them, biofuel has been drawing attention as a clean energy, which can replace fossil fuels. However, conventional biofuels were often converted from eatable biomass such as sugar cane, corn and soy which should be replaced with uneatable biomass. In this study, a techno-economical evaluation of the gasification of biomass waste with mixed alcohol synthesis process was performed. Considering available domestic biomass wastes, a 2000 ton/day conversion plant were assumed to produce 533000 L/day ethanol. Also, financial data from previous studies were evaluated and used and economical sensitivities with various operation conditions were established. Economic analysis were conducted by the payback period and internal rate of return (IRR) and net present value (NPV). Sensitivity analyses of raw material costs, initial investment, the major process cost, ethanol price changes and operating costs were all performed.

Keywords: Biomass waste, Alcohol, Sensitivity analysis, Economic evaluation

1. 서 론

빠르게 고갈되는 화석연료들에 대한 우려와 지구 온난화로 대표되는 환경 문제에 적극적으로 대처하기 위하여 전 세계의 모든 국가들은 다각적으로 노력을 기울이고 있다. 특히 지구 온난화로 인해 대기 중의 이산화탄소 농도를 450 mg/L 수준으로 낮추어야 한다고 주장한 국제에너지기구(International Energy Association, IEA)는 수송 및 산업, 건물, 발전 등 다양한 이산화탄소 배출원에서 이산화탄소 배출을 현저히 저감시켜야 한다고 발표하였다. 이를 위해 모든 분야에서 신

재생에너지의 사용이 증가하고 있는 추세다[1-3].

태양광, 풍력 등의 널리 이용되고 있는 신재생에너지 자원들과 태양에너지에 의해서 지속가능하게 생산되는 식물, 그 식물을 이용하는 동물의 잔류물, 가정에서 지속적으로 발생하는 유기성 폐기물 등으로 분류되는 바이오매스를 비교하면, 다른 신재생에너지 자원들에 비해서 바이오매스 자원의 활용도가 매우 높다. 특히 바이오매스 자원은 석탄과 같이 이산화탄소를 배출하지만 성장을 위하여 대기 중의 이산화탄소를 소비하기 때문에 탄소 중립 자원으로 인정받고 있어 이산화탄소 저감 자원으로도 크게 각광을 받고 있다[2,3].

바이오매스를 통해 생산된 바이오에너지는 다양한 형태로 공급되고 있다. 기존의 석탄처럼 발전소에서 직접 연료로 이용되고 있으며 바이오디젤, 바이오에탄올과 같이 수송용 대체 연료로서 전환되어 이용되기도 한다. 이 중 바이오에탄올은 미국, 브라질을 중심으로 휘발유와 혼합되어 이용됨으로써 석유를 대체하는 효과적인 에너지원으로

[†] Corresponding Author: Chonbuk National University,
Department of Mineral Resource & Energy Engineering, South Korea
Tel: +82-63-270-2362 e-mail: donald@jbnua.ac.kr

Table 1. Gasifier Operating Parameters

Gasifier Variable	Value	
Temperature	890 °C	
Pressure	1.6 bar	
Gasifier outlet gas composition	mol% (wet)	mol% (dry)
H ₂	15.0	25.1
CO ₂	7.4	12.4
CO	25.1	41.9
H ₂ O	40.2	-
CH ₄	9.0	15.1
C ₂ H ₂	0.3	0.4
C ₂ H ₄	2.5	4.1
C ₂ H ₆	0.1	0.2
C ₆ H ₆	0.1	0.1
tar(C ₁₀ H ₈)	0.1	0.2
NH ₃	0.2	0.3
H ₂ S	0.04	0.07
H ₂ : CO molar ratio	0.6	
Gasifier Efficiency	76.6% HHV basis 76.1% LHV basis	

로 인식되고 있다. 이는 바이오에탄올이 바이오매스 자원으로부터 생산된 이산화탄소 중립자원이며 휘발유와 혼합되어 이용됨으로써 별도의 인프라 구축이 없이 바로 활용이 가능하기 때문이다. 이로 인해 바이오에탄올은 친환경적이고 재생 가능한 경제적인 에너지원으로 인식되고 있다. 바이오에탄올을 생산할 수 있는 바이오매스 자원이 풍부한 미국, 브라질과 자원이 부족하고 대용량 공정을 위한 비용이 소비되는 국내에서는 아직까지 바이오에탄올이 활성화되지 못하였다. 그러나 2015년부터 신재생 연료 혼합의무화 제도(Renewable Fuel Standard, RFS)가 시행되어 2017년부터 바이오에탄올 혼합이 의무화되면서 바이오 연료의 보급이 확대될 것으로 예상되고 있다[4].

수송용 연료로서의 바이오에탄올 생산은 2000년 중반 이후 증가하였으나 2010년부터는 생산량이 감소 또는 정체되는 경향을 보이고 있다. 바이오에탄올을 생산하는 대표적인 원료로서 옥수수, 사탕수수, 밀 등이 이용되나 이들은 동물 또는 인간이 식용으로 이용하기 때문에 바이오에탄올 생산량의 급증은 옥수수, 사탕수수, 밀 등의 이용 증가를 야기하고 이로 인해 가격 급증, 식량 자원의 부족 등의 경제적, 사회적 문제를 야기했기 때문이다. 이로 인해 바이오매스 이용은 식용 자원 중심에서 비식용 자원 중심으로 전환되기 시작하였다[2,3].

곡물류의 식용 바이오매스 자원이 아닌 목재, 왕겨, 유기성 폐기물 등의 비식용 바이오매스 폐기물로부터의 에너지 전환은 기존의 화석 연료들의 에너지 전환에 이용되는 열화학적 전환 공정의 이용이 적극적으로 모색되고 있다[5]. 특히 청정에너지원으로 널리 알려진 수소를 생산할 수 있는 가스화 공정은 이미 석탄과 다양한 바이오매스 물질들의 혼합을 통한 합성가스 생산이 가시화되어 있다. 또한 합성가스는 다양한 촉매 공정들 및 가스 터빈을 통해서 휘발유부터 전기까지 다양한 형태의 에너지원으로 이용될 수 있는 방법이 연구 및 개발되었다. 또한 최근에는 합성가스로부터 에탄올을 생산하는 연구도 활발하게 연구되었다[5-12].

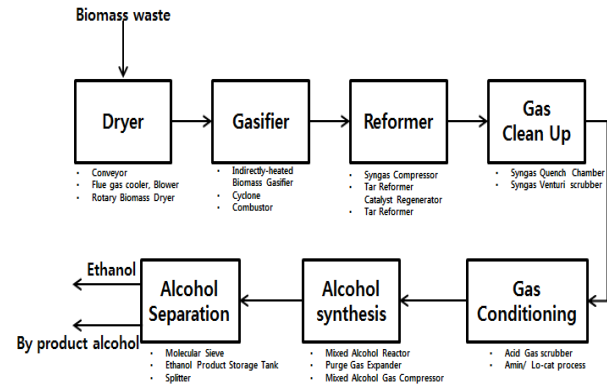


Figure 1. Ethanol production process flow chart.

이와 같은 개발 노력에도 불구하고 아직까지 비식용 바이오매스 자원의 이용은 적극적으로 확대되지 못하고 있다. 이는 비식용 바이오매스 자원의 에너지화에 필수적인 열화학적 전환 공정들이 경제성을 확보하기 위해서는 대규모로 개발되어야 하기 때문이다. 즉, 대규모의 연료 공급이 필수적이거나 바이오매스 자원을 대규모로 확보하기 위해서는 수집 비용이 과다하게 증가하기 때문이다. 또한 바이오매스 자원의 종류가 매우 다양하고 넓게 분포하고 있으며 발생 시기도 다양하여 예측 가능한 바이오매스 자원량을 계산하기 어렵다. 그러나 최근 국내의 비식용 바이오매스 자원 지도의 분석이 진행되어 국내에서 이용 가능한 바이오매스 자원량의 분석이 가능해졌다[2,3].

이에 본 연구에서는 국내 바이오매스 자원맵 분석 결과를 이용하여 건설 가능한 바이오매스 가스화 및 에탄올 전환 공정의 기술-경제성 분석을 수행하였다. 이용된 바이오매스 자원 및 자원량은 모두 비식용 바이오매스 폐기물로서 기발표된 자료를 토대로 계산되었다. 특히 바이오매스 에너지화의 극복 과제인 수송비용에 따른 경제성 분석 결과를 토대로 다양한 운전 및 상황 인자들의 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 바이오매스 폐자원의 복합 알코올 전환 공정의 경제성 자료는 국가 에너지원 및 이를 이용한 발전 산업, 정책 결정의 기본 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 에탄올 생산 공정

2.1. 가스화 및 혼합 알코올 합성공정

에탄올을 생산하는 복합공정은 가스화와 혼합 알코올 합성공정이 연계된 공정이다. 이 공정의 경제성 분석은 미국 국립신재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 발표한 Nexant사의 기술을 기초로 진행되었다[12]. Figure 1에 복합공정의 간략한 개략도를 나타내었다. 그림에서 보면 가스화 공정을 통해서 생산된 합성가스는 정제 및 Reforming 공정을 거친 후, 압축되어 에탄올 합성 반응기로 주입되어 최종적으로 바이오에탄올이 얻어진다. 본 연구에서 검토된 혼합공정은 건조공정, 가스화공정, Gas Clean-up과 Conditioning, 혼합 알코올 합성공정, 분리공정, Heat&Power공정으로 구분할 수 있다. 복합공정의 원료인 폐기물은 전처리 과정을 통해 수분을 제거한 뒤 가스화기에 주입된다.

가스화 공정은 바이오매스 폐기물을 스팀 가스화하여 Syngas로 전환하는 공정이다. 가스화기는 유동층 간접가열 바이오매스 가스화기로 Battelle Columbus Laboratory (BCL) 9 ton/day의 시험설비를 기준으로 상업에서 운전되는 Dual Circulating Fluidized Bed로 가정하였고,

Table 2. Biomass Waste Analysis

Analysis	Raw material			
	Food waste	Waste wood	Waste paper	
Proximate Analysis (%)	N	1.7	0.1	0.1
	C	49.1	48.3	32.4
	H	6.6	6.1	5.1
	S	0.2	0	0
Ultimate Analysis (%)	Cl + O + Ash	42.4	45.5	62.4
	Moisture	78.3	8.3	6.1
	Volatile	17.1	82.0	73.3
	Ash	1.0	1.1	14.6
	Fixed Carbon	3.6	8.6	6.0

Table 3. Scaling Factor of Process

Process	Scaling factor
Dryer	0.65
Gasification	0.65
Reforming	0.60
Synthesis Process	0.62
Separation Process	0.91
Heat&Power	0.54
Other Process	0.68

Table 1에 운전조건과 가스조성, 효율을 나타내었다[13]. 가스화기는 890 °C, 1.6 bar에서 조업되며 가스화기의 효율은 76.6%로 계산하였다. Gas Clean-up과 Conditioning 공정은 에탄올을 더 많이 생산하기 위해 Syngas를 개질 및 불순물을 제거하는 공정이다. 이 공정에서는 발생된 Tar를 Reforming하여 CO와 H₂를 추가로 생성하고 분진과 같은 불순물을 제거하며, CO₂와 H₂S 등 산성 가스를 제거한다. Tar Reformer는 890 °C에 온도에서 운전되고 배기가스의 조성은 H₂와 CO의 몰 비가 1 : 1로 되는 것으로 가정하였다. 깨끗해진 Syngas는 압축되어 고정층 촉매에 의해 알코올로 변환되며 전환되고 남은 잔여 가스는 Tar Reformer로 재순환된다[14]. 알코올 합성공정은 300 °C, 1000 기압에서 조업이 되며 H₂와 CO의 몰 비가 1 : 1이고, CO₂는 5.0 mol%, 황은 0.05 ml/L가 배출되는 것으로 가정하였다[15].

경제성 분석에 사용된 원료는 음식폐기물과 폐목, 폐지이며, 이들의 공업 및 원소분석표를 Table 2에 나타내었다. 원료에 따라 바이오에탄올 수율이 변화할 것으로 예상되지만, 현재 개발이 진행되고 있어 상용 공정의 정확한 수율 자료가 없어 본 연구에서는 기발표된 자료의 물질 및 에너지 수지를 이용하여 에탄올 생산량을 예측하였다. 원료의 탄소량을 기준으로 가스화기를 거치면서 이산화탄소로 39.04%의 탄소가 제거가 되며 전체 공정을 통해 알코올로 전환되는 탄소 전환율은 32.66%이다[12]. 생성물은 메탄올, 에탄올, 고분자의 합성알코올 3종류로 메탄올은 Molecular Sieve로 주입되어 추가로 에탄올을 생산하고, 에탄올과 합성 알코올은 냉각되어 생성물 탱크에서 저장된다. 합성 알코올은 공정에 필요한 전력 생산을 위해 전량 사용되며 에탄올만 판매한다고 가정하였다.

2.2. 경제성 평가기법

경제성 분석에 적용되는 비용 요소는 건설비, 초기 운전 자금 등 지출에 해당하는 초기투자비와 매년 설비의 유지, 보수비용과 더불어 운영 및 인건비 등 운용비용이 있다. 이 비용들은 생산량에 비례하지 않는 고정비와 비례하는 변동비로 나눌 수 있는데 초기 투자비는 고정비, 운용비용은 변동비로 구분된다. 초기투자비는 설비를 건설하고 공정이 될 때까지 소요되는 모든 지출을 의미하고 설비를 한 번에 건설한다고 가정할 때 소요되는 비용이며 운용비용은 원료구입비 및 촉매 등 공정에 필요한 비용과 변동비, 인건비 및 세일즈, 마케팅 비용 등으로 계산한다. 더불어 제품 생산에 따른 매출액과 순이익의 분석을 통하여 경제성 분석이 진행된다. 하지만 이러한 비용은 기업의 핵심 정보이므로 실제 확보하기는 어려움이 있기 때문에 동일한 기술을 사용하는 기존의 공장에서의 알려진 비용을 사용하였다[12,16,17]. 기존 공장에서의 알려진 비용을 사용하게 되면 설계의 상세정도, 자료의 정확성, 산출을 위해 사용한 시간에 따라 정확도가 달라진다.

따라서 제작되는 설비, 건설비용 등은 NREL 자료를 기초로 하여 단위 공정의 규모와 시간에 따른 비용 변화를 고려해 재산정하여야 한다. 이를 위하여 규모 인자(Scaling factor)를 사용하여 규모 변화에 따른 총 비용을 산출하였고 이것을 식 (1)에 적용하여 계산하였다[18]. 식 (1)에서 n은 Scaling factor이며 일반적으로 기계압축 공정에서는 0.8-0.9가 사용되지만 석유화학 공정에서는 0.7로 사용이 된다. 특정 공정에 대한 자료가 부족하면 0.6으로 사용하지만 본 연구에서는 정확한 경제성 분석을 하기 위해 NREL 자료를 이용하여 각 공정에 따른 Scaling factor를 적용하였다. 각 공정에 맞는 Scaling factor는 Table 3에 나타내었다. 표에서 보듯이 대부분의 Scaling factor값은 일반적으로 사용되는 0.6-0.7 범위 안에 속해있는 것을 알 수 있다.

$$C_2 = C_1 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^n \tag{1}$$

- 여기서 n = scaling factor
- C₂ = 생산능력이 S₂인 공장의 총비용
- C₁ = 생산능력이 S₁인 공장의 총비용

더불어 비용 산출을 위해 이용되는 자료들은 최근 자료가 아니므로 이를 현재 자료로 산정하여야 한다. 인플레이션, 디플레이션 등과 같은 돈의 가치 변동에 따라 플랜트를 건설하는데 필요한 자본 비용을

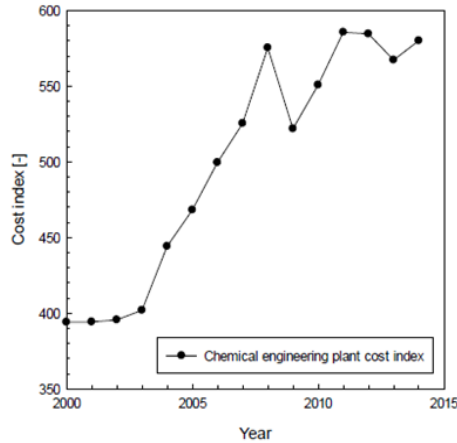


Figure 2. Chemical engineering plant cost index.

수정하기 위한 값으로 Plant index 값을 사용하였다. Figure 2를 보면 index 값은 2000년 초반에는 큰 변화가 없었지만, 2008년까지 급격히 증가하였다. 하지만 2008년 금융위기 뒤에 index 값이 크게 감소하였지만 서서히 증가하여 현재에는 2008년과 비슷한 수준에 도달하였다. 신규 플랜트를 건설하기 위한 비용으로 식 (2)를 사용하여 참고로 삼고 있는 비용과 현재 연도를 비교하여 구하였다.

$$C_{2015} = C_Y \left(\frac{I_{2015}}{I_Y} \right) \tag{2}$$

여기서 C_{2015} = 2015년으로 환산된 비용
 C_Y = Y년의 비용
 I_{2015} = 2015년 Plant index
 I_Y = Y년 Plant index

2.3. 경제성 분석의 가정

- 본 경제성 분석의 기본 가정은 다음과 같다.
- 각 플랜트는 신규건설을 가정하였다.
- 토지구입비용 및 주민 보상비는 없다고 가정하였다.
- 운전 및 유지비용은 1차년도를 기준으로 전체 운전 기간에 동일하게 적용하였다.
- 주 원료 및 제품의 소비량과 생산량은 NREL에서 제시한 수치를 사용하였다.
- 원료는 서울, 경기지역에서 발생하는 폐기물을 사용하였으며 별도의 구입비용이 들지 않는 것으로 가정하고 수송비만을 사용하여 톤당 만원으로 계산하였다.
- 물가상승률은 3%, 에탄올 판매가격은 1154 원/L로 가정하였다[19].
- 감가상각비는 15년 균등분할상환으로 가정하였다.
- 본 연구에서는 기존 상업 공정[12,17]과 동일한 효율로서 전체 공정을 적용하였다.
- 플랜트의 소득세는 24.2%로 적용하였고 가동률은 95%로 가정하였다.

에탄올 생산 공정 플랜트를 신축 건설하게 되면 투자비, 운용비용, 건설비용 등의 비용과 생산된 에탄올 판매에 따른 수입이 발생된다. 이를 이용하여 경제성 분석을 진행하였고 경제성 분석에는 원금회수 기간과 내부수익률(Internal rate of return, IRR) 및 순현재가치(Ne-

Table 4. Investment Cost

Process	Cost (unit : 100 million Won)
Drying	16556
Gasification	17723
Reforming	72573
Synthesis Process	28284
Separation Process	9889
Heat & Power	23038
Other process	4993

Table 5. Operating Cost

Item	Cost (unit : 100 million Won)
Catalysts	282
Olivine	564
Other raw materials	423
Waste disposal	423
Fixed costs	17088

present value, NPV)를 이용하였으며, 민감도 분석은 원료구입비, 초기 투자비, 주요공정 비용, 에탄올 판매가격을 변수로 하는 민감도 분석을 진행하였다.

원금회수기간은 공장 가동일로부터 생산된 생산품의 판매가격에서 원료비, 세금, 운영비 등의 비용을 제외한 순수익의 합이 초기투자비를 초과하는 기간으로 계산하였다. NPV는 투자로부터 공정의 최종년도까지 얻게 되는 이익에서 이자 및 운영비를 제외한 순수익의 흐름을 현재가치로 계산하고, 이를 합한 것이다. NPV가 0보다 크면 경제성이 있고 0보다 작으면 경제성이 없는 의사결정의 기준을 정할 수 있다. 하지만 NPV는 할인율로 사용되는 자본비용의 정확한 계산이 어렵다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 IRR을 사용하였다. IRR은 투자에 쓰이는 현재가치와 투자로부터 얻는 기대수익의 현재가치가 동일하게 되는 할인율이다. 즉 미래의 현금수입액이 현재의 투자 가치와 동일하게 되는 수익률이며 기존의 식을 이용하여 계산되었다 [15,20]. 이와 같은 원금회수기간과 IRR 및 NPV는 미래의 불확실한 가격을 현재로 가져 온 것이므로 오류를 최소화하기 위해 한 가지 조건만을 변화시켜 이에 따른 경제성 변화를 분석하는 민감도 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 경제성 분석

본 연구에서 533000 L/day의 에탄올 생산 공정 플랜트의 초기 투자비는 앞에 언급된 NREL를 기준으로 산정되었으며 공정별 비용은 Table 4에 나타내었다. 초기 투자비는 직접비와 각 공정의 건설 및 기술비용의 합으로 산출하였으며 각 공정의 건설 및 기술비용은 Table 4와 같이 Drying, Gasification, Reforming, Synthetic and Separation process, Heat&Power 등으로 나누어서 계산하였다. 그 결과 Reforming 공정이 725억원으로 가장 높게 나타났고, 그 뒤로 Synthetic process, Heat & Power순으로 높게 나타났다. 반면에 Separation process와 Other process는 각 98, 49억원으로 다른 공정에 비해 낮게 나타났다.

Table 6. Sensitivity Analysis of the Raw Material Costs

Raw material Costs (Won/ton)	Payback period (year)	IRR (%)	NPV (100 million won)
5000	5.47	16.4	1792
10000	6.18	13.9	1273
15000	7.11	11.2	754
20000	8.37	8.4	235

Table 7. Sensitivity Analysis of the Investment Costs, Ethanol Price

Base		Payback period (year)	IRR (%)	NPV (100 million won)
		6.18	13.9	1273
Investment Costs	+25%	7.78	9.6	571
	-25%	4.60	20.4	1976
Ethanol Price	+25%	4.36	21.7	2929
	-25%	10.61	4.7	-383

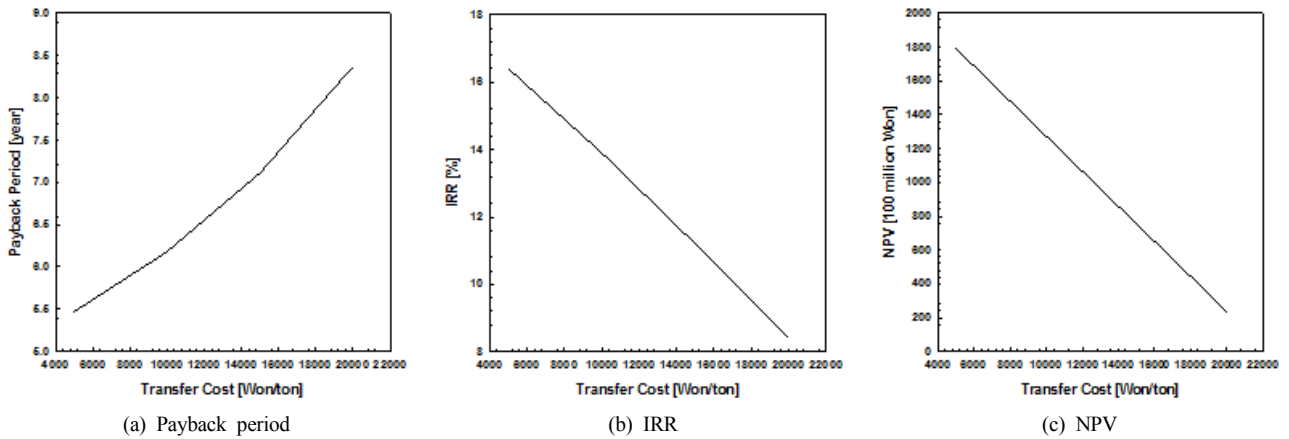


Figure 3. Sensitivity analysis of the raw material costs.

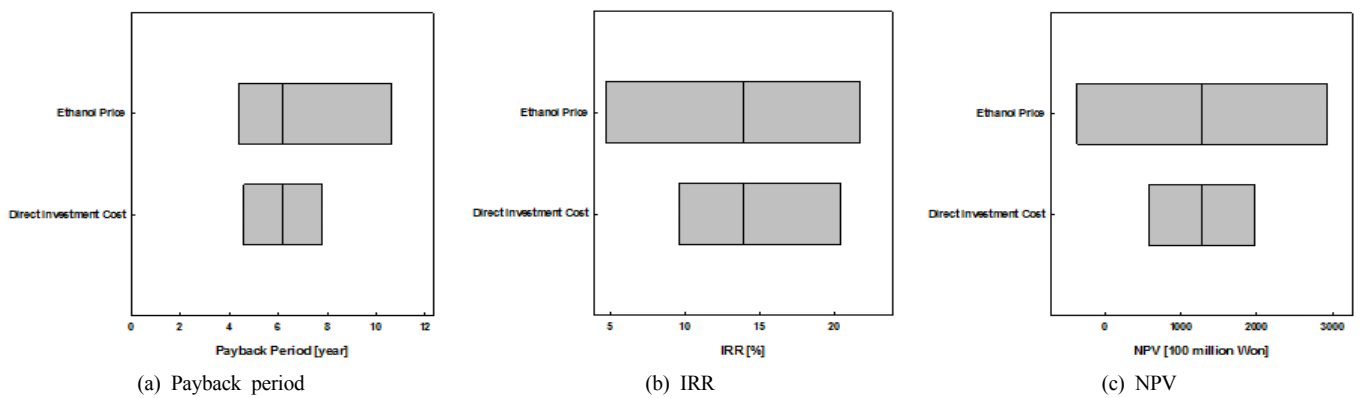


Figure 4. Sensitivity analysis of the Investment costs, Ethanol price.

연간 매출액은 에탄올 가격에 연간 생산량을 곱하여 계산하였다. 원료비는 음식폐기물과 폐지, 폐목을 사용하였고 2000 ton/day 기준으로 각 500, 1000, 500 ton/day를 사용하는 것으로 가정하였으며, 각 원료는 폐기물로서 별도의 구입비용은 없다고 가정하였기 때문에, 원료비는 원료의 수송비만을 고려하였다. 또한 인건비는 30억/yr로 산정하였고 세일즈 마케팅 비용은 연 수입의 3%로 가정하였으며 운용비용

은 촉매 및 다른 원료비용, 폐수처리비, 고정비 등으로 나누어서 Table 5에 나타내었다. Table 5에 나타난 것과 같이 다른 운용비용들에 비해 고정비가 170억으로 매우 높게 계산되었다. 이는 유지보수비용, 보험료, 청소용 연료, 인건비 등으로 계산되는데 그중 유지보수비용과 인건비가 높은 가격으로 산출하였기 때문으로 판단된다.

2000 dry-ton/day의 플랜트규모를 기준으로 초기투자비는 2460억,

Table 8. Sensitivity Analysis of the Processing Costs

Base		Payback period (year)	IRR (%)	NPV (100 million won)
		6.18	13.9	1273
Drying	+25%	6.29	13.5	1226
	-25%	6.07	14.2	1320
Gasification	+25%	6.30	13.5	1223
	-25%	6.07	14.2	1324
Reforming	+25%	6.65	12.4	1066
	-25%	5.71	15.5	1480
Synthesis Process	+25%	6.36	13.3	1193
	-25%	6.00	14.5	1354
Separation Process	+25%	6.24	13.7	1245
	-25%	6.12	14.1	1301
Heat & Power	+25%	6.33	13.4	1208
	-25%	6.03	14.3	1339
Other process	+25%	6.21	13.8	1259
	-25%	6.15	14.0	1287

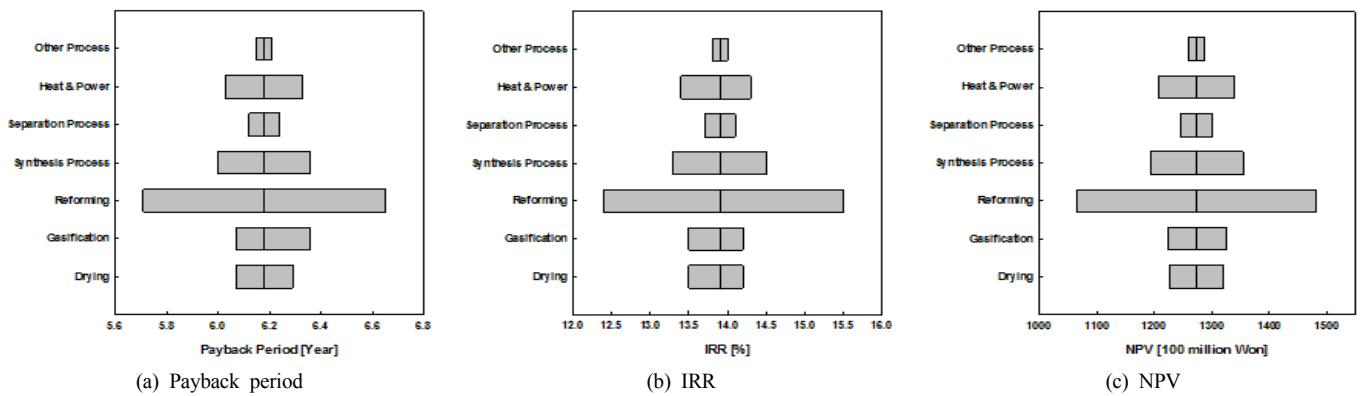


Figure 5. Sensitivity analysis of the Processing costs.

운용비용은 187억, 원료비는 10000원/ton, 에탄올 판매가격을 1154원/L로 계산하여 원금회수기간, IRR과 NPV를 산출하여 경제성 분석을 진행하였다. 그 결과 원금회수기간은 6.18년, IRR은 13.9%, NPV는 1273억원으로 산출되었는데, 이는 상당히 높은 수익률을 가지는 것으로 판단된다. 이는 원료비용이 별도의 구입비가 없는 폐기물을 이용하여 수송비로만 계산되어 높은 수익률을 가지는 것으로 예측된다. 또한 에탄올의 판매가격이 높게 산정되어있고, 더불어 보상비 및 토지 구입비용을 제외하였기 때문으로 판단된다.

3.2. 민감도 분석

경제성 분석결과를 이용하여 에탄올 생산 공정의 경제성에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소에 변화를 주어 민감도 분석을 진행하였다. 민감도 분석은 원료구입비, 초기투자비, 에탄올 판매가격, 주요공정 비용, 운용비용의 변화를 주어 진행하였다. 원료구입비가 5000, 10000, 15000, 20000원/ton으로 변할 때와 초기투자비, 주요공정비용, 에탄올 판매가격, 운용비용이 현재 가격에서 ± 25%의 변동비를 주어 원금회수기간, IRR 및 NPV를 계산하였다. Table 6과 Figure 3은 원료구입비 변화에 따른 원금회수기간 및 IRR, NPV를 나타내었다.

원료비가 5000, 10000, 15000, 20000원/ton으로 변할 때 원금회수기간은 5.47, 6.18, 7.11, 8.37년, IRR은 16.4, 13.9, 11.2, 8.4%, NPV는 1792, 1273, 754, 235억원으로 변동비가 큰 것으로 보아 원료비는 민감한 변수로 작용됨을 알 수 있다. 원료비가 변함에도 NPV 값은 양의 값을 가지는 것으로 보아 경제성이 있는 것으로 분석되었지만 원료비가 20000원/ton으로 변하였을 때 IRR 값이 8.4%로 변한 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 투자타당성을 검토할 때 IRR값이 9-10% 이상이 되어야 투자를 진행하게 되는데 원료비가 20000원/ton일 때는 그 이하이므로 경제성이 좋지 않은 것으로 판단된다.

초기투자비, 에탄올 판매가격이 ± 25% 변경되는 경우의 민감도를 분석하여 Table 7과 Figure 4에 나타냈다. 그림에서 보면 초기투자비가 기준가격보다 25% 증가하면 기존 조건보다 원금회수기간은 1.58년으로 줄어들고, IRR은 6.5%, NPV는 703억원으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 에탄올 판매가격이 25% 증가하는 경우에는 원금회수기간은 1.82년으로 줄어들고, IRR은 7.5%, NPV는 1656억원 증가하는 것으로 보아 초기투자비보다 에탄올 판매가격이 더 민감한 것으로 확인되었고, 특히 에탄올 판매가격이 -25%로 감소하게 되면 IRR은 4.7%, NPV는 -383억원으로 감소하였다. NPV가 음의 값을 가지며

Table 9. Sensitivity Analysis of the Operating Costs

	Base	Payback period (year)	IRR (%)	NPV (100 million won)
		6.18	13.9	1273
Operating costs	+25%	6.73	12.2	949
	-25%	5.71	15.5	1597

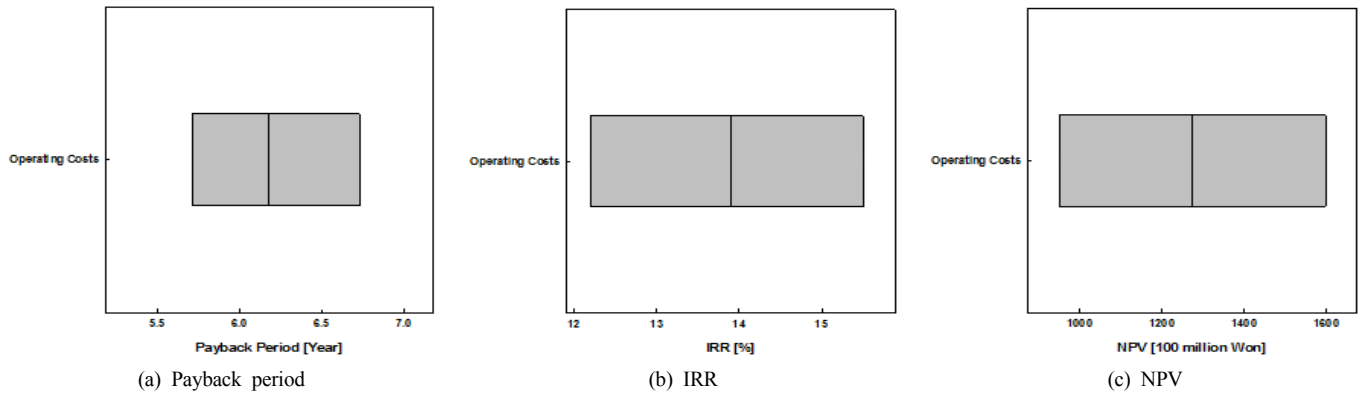


Figure 6. Sensitivity analysis of the operating costs.

로 경제성이 없는 것으로 판단되며, 에탄올 판매가격이 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 8과 Figure 5에서는 주요 공정비용에서의 민감도 분석 결과를 나타냈다. 민감도 분석 결과 Reforming, Synthesis Process, Heat&Power, Gasification, Drying, Separation Process, Other Process 순으로 민감도가 큰 것으로 나타났다. 가장 민감한 Reforming 공정비용이 25% 증가할 경우 원금회수기간은 0.47년 증가하고, IRR은 1.5% NPV는 207억원이 감소하였다. 가장 영향을 덜 받는 항목인 Other Process비용이 기존 공정비용보다 25% 증가하게 되면 원금회수기간은 0.3년 증가하고, IRR은 0.1%, NPV는 14억원으로 감소한다. 하지만 가장 영향을 많이 끼치는 Reforming 공정과 덜 받는 Other Process 모두 IRR값은 12% 이상, NPV는 1,000억원 이상이므로 초기투자비나 에탄올 판매가격 보다는 덜 민감한 것으로 판단된다.

운용비용의 민감도 분석 결과는 Table 9와 Figure 6에서 도시하였으며, 기존 비용에 비해 ± 25% 증감하게 되면 원금회수기간은 ± 0.5년, IRR은 ± 1.6% NPV는 ± 324억원 정도의 변동을 가져왔다. IRR이 모두 12% 이상이고 NPV도 큰 변화가 크게 없으므로 전체 경제성에 낮은 영향을 끼치는 것으로 확인되었다.

민감도 분석결과 알코올 판매가격, 초기투자비, 원료구입비, 운용비용, 주요공정비용 순으로 경제성에 큰 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 특히 원료구입비, 알코올 판매가격, 초기투자비가 변할 때마다 경제성 또한 변동이 큰 것으로 보아 민감한 항목인 것을 확인할 수 있었다. 하지만 주요 공정비용과 운용비용의 변화에는 크게 변하지 않으므로 원료구입비, 알코올 판매가격, 초기투자비에 비해 덜 민감한 것으로 판단된다. 그러므로 알코올 판매가격의 유지와 안정된 원료구입비와 원자재 가격이 플랜트의 수익성을 극대화 할 수 있는 조건으로 판단된다.

4. 결 론

바이오매스 폐기물을 이용한 알코올 합성 공정의 경제성을 원금회수기간 및 IRR, NPV를 이용하여 분석하였다. 알코올 생산량이 533000 L/day인 복합 공정을 적합한 검토기준을 세워 비용 및 매출액 등을 산정하고, 변수들의 가격 변동에 의한 민감도 분석을 진행하였다. 플랜트 규모는 2000 dry-ton/day, 초기 투자비는 2460억원, 운용비용은 187억원, 원료구입비는 10000원/ton, 에탄올 판매가격은 1154 원/L로 계산한 결과 원금회수기간은 6.18년, IRR은 13.9%, NPV는 1273 억원으로 나타났다. 이를 이용하여 원료구입비, 에탄올 판매가격과 초기투자비, 주요공정비용과 운용비용변화에 따른 민감도 분석을 진행하였다. 그 결과 에탄올 판매가격, 초기투자비, 원료구입비, 운용비용, 주요공정비용 순으로 민감한 것을 확인하였고, 원료구입비는 가격이 2배 증가하게 되면 경제성이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히 에탄올 판매가격이 -25%로 감소하면 경제성이 없는 것으로 나타났다. 더불어 주요공정별 민감도 분석에서는 Reforming, Synthesis Process, Heat&Power, Gasification, Drying, Separation Process, Other Process 순으로 민감도가 큰 것으로 나타났지만 전체 경제성에서는 거의 영향을 끼치지 못하는 것으로 확인되었다. 이와 같이 폐기물로써 처리비용이 드는 음식폐기물, 폐목, 폐지를 이용하여 바이오에탄올을 생산함으로써 폐기물이 아닌 자원으로 이용할 수 있을 것을 경제성 분석을 통해 확인할 수 있었다.

감 사

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원(No. CRC-15-07-KIER)을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. IEA, World Energy Outlook (2012).
2. J. W. Kook and S. H. Lee, Analysis of biomass energy potential around major cities in South Korea, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 178-183 (2015).
3. J. W. Kook, S. J. Jeon, S. Y. Park, H. S. Yoo, J. H. Shin, and S. H. Lee, Analysis of energy potential from biomass resource map, *J. Kor. Soc. Waste Manag.*, **30**(5), 505-511 (2013).
4. A. Y. Lee, J. K. Koo, Intermediate indicators and sustainability of Renewable Fuel Standard, *J. Kor. Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **22**(1), 20-26 (2014).
5. J. W. Kook, J. H. Shin, I. S. Gwak, and S. H. Lee, A reaction Kinetic Study of CO₂ Gasification of Petroleum Coke, Biomass and Mixture, *Appl. Chem. Eng.*, **26**(2), 184-190 (2015).
6. Y. Yun, Coal gasification technologies: past experience and future direction in Korea, Clean Coal Day in Japan 2006, 1-20 (2006).
7. H. W. Ra, S. H. Lee, S. J. Yoon, Y. C. Choi, J. H. Kim, and J. G. Lee, Entrained-flow coal water slurry gasification, *Korean J. Chem. Eng.*, **48**(2), 129-139 (2010).
8. S. H. Lee, S. J. Yoon, Y. C. Choi, J. H. Kim, and J. G. Lee, Characteristics of coal methanation in a hydrogasifier, *Korean J. Chem. Eng.*, **44**(6), 631-635 (2006).
9. S. J. Yoon, Y. C. Choi, S. H. Lee, and J. G. Lee, Thermogravimetric study of coal and petroleum coke for co-gasification, *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(3), 512-517 (2007).
10. S. H. Lee, K. B. Choi, J. G. Lee, and J. H. Kim, Gasification characteristics of combustible wastes in a 5 ton/day fixed bed gasifier, *Korean J. Chem. Eng.*, **23**(4), 576-580 (2006).
11. E. M. A. Edreis, G. Luo, A. Li, C. Chao, H. Hu, S. Zhang, B. Gui, L. Xiao, K. Xu, P. Zhang, and H. Yao, CO₂ co-gasification of lower sulphur petroleum coke and sugar cane bagasse via TG-FTIR analysis technique, *Bioresour. Technol.*, **136**, 595-603 (2013).
12. S. Phillips, A. Aden, J. Jechura, and D. Dayton, Thermochemical Ethanol via Indirect Gasification and Mixed Alcohol Synthesis of Lignocellulosic Biomass Technical Report NREL/TP-510-41168 (2007).
13. Spath, P. Aden, A. Eggeman, T. Ringer, M. Wallace, and B. Jechura, J. Biomass to Hydrogen Production Detailed Design and Economics Utilizing the Battelle Columbus Laboratory Indirectly-Heated Gasifier Technical Report NREL/TP-510-37408 (2005).
14. Nexant, Inc., Equipment Design and Cost Estimation for Small Modular Biomass Systems, Synthesis Gas Cleanup, and Oxygen Separation Equipment. Task 9: Mixed Alcohols from Syngas- State of Technology, Technical Report NREL/SR-510-39947 (2006).
15. P. Forzatti, E. Tronconi, and I. Pasquon, Higher Alcohol Synthesis, *Cat. Rev. Sci. Eng.*, **33**(1-2), 109-168 (1991).
16. J. W. Park, J. S. Bae, Y. J. Kweon, H. J. Kim, J. Jung, and C. Han, Economic Evaluation of DCL/ICL processes, *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(6), 781-787 (2009).
17. L. V. Bibber, E. Shuster, J. Haslbeck, M. Rutkowski, S. Olson, and S. Kramer, Technical and economic assessment of small-scale fischer-tropsch liquids facilities, DOE/NETL-2007/1253, NETL, USA (2007).
18. NETL, Capital cost scaling methodology, DOE/NETL-341/013113, National Energy Technology Laboratory, USA (2013).
19. <http://www.tradingeconomics.com/commodity/ethanol>.
20. J. M. Lee, D. W. Kim, J. S. Kim, J. J. Kim, and H. S. Kim, Economic feasibility of conversion of the pulverized coal firing boiler using korean anthracite into a circulating fluidized bed boiler, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(5), 489-497 (2006).