

폐비닐의 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 경제성 평가

서수빈¹, 조일호², 윤현표², 강서영¹, 김형우¹, 이시훈^{1,*}

¹전북대학교 자원에너지공학과
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
²(주)씨아이이코텍
07236 경기도 포천시 소흘읍 송우로 197

(2019년 8월 23일 접수; 2019년 9월 4일 수정본 접수; 2019년 9월 9일 채택)

Economic Evaluation of a Crush-screen Hybrid Pretreatment Process for Waste Vinyl

Su Been Seo¹, Il Ho Cho², Hyun Pyo Yun², Seo Yeong Kang¹, Hyung Woo Kim¹, and See Hoon Lee^{1,*}

¹Department of Mineral resources and energy engineering, Chonbuk National University
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896 Republic of Korea
²C.I. Ecotech, Seoul, Korea
197 Songwuro in Soheul-eup, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 07236 Republic of Korea

(Received for review August 23, 2019; Revision received September 4, 2019; Accepted September 9, 2019)

요 약

비닐, 플라스틱의 사용이 전 세계에서 지속적으로 증가하고 있으나, 세계 각국의 폐비닐 또는 폐플라스틱의 처리를 위한 수입이 금지됨에 따라 자국 내의 친환경적 처리 또는 이용이 요구되고 있다. 폐비닐, 폐플라스틱의 친환경적인 처리에 대한 수요가 점차 증가하고 있으나, 폐비닐에 묻어 있는 이물질로 인하여 환경친화적인 재활용 방법이 제한되고 있다. 또한 기존의 매립, 소각 방법은 2차 오염의 발생과 처리 비용의 증가를 야기시키고 있다. 따라서 폐비닐에 포함되어 있는 타재질 및 이물질의 선별 제거는 폐비닐의 고부가가치 재활용을 가능케 할 수 있다. 특히 파쇄/선별이 단일 기기에서 동시에 이루어지는 신공정은 자원 재활용을 극대화시킨다. 본 연구는 파쇄/선별 융합 공정을 통해 이루어지는 폐비닐의 분리, 열적 재활용, 물질 재활용의 기술경제성을 평가하였다. 특히 국내 환경 정책에 따른 다양한 지원금들의 변화가 미치는 영향을 고찰하였다. 재활용 인센티브의 가격과 소각에 참여하는 폐비닐의 수율에 따라서 순현재가치와 내부수익률이 크게 변동되었다.

주제어 : 폐비닐, 파쇄, 선별, 경제성 평가

Abstract : Though the usage of vinyls and plastics produced from fossil fuels has been increasing in the world, the eco-friendly domestic disposal or recycling of waste vinyls has to be executed because the migration or importation of waste vinyls or waste plastics are globally prohibited. Even though the eco-friendly domestic disposal or recycling of waste vinyls and waste plastics should be developed, promising eco-friendly recycling methods are few because there are extraneous substances in waste vinyls and waste plastics. Also, conventional incineration and landfill methods result in secondary contamination and then increase disposal costs. Therefore, the selective elimination of extraneous substances or other materials included in waste vinyls and waste plastics could make valuable recycling or reuse possible. In particular, the novel hybrid process in which crushing and screening are simultaneously conducted in a rotary kiln type reactor can domestically maximize the material recycling or reuse. In this study, the feasibility study for a crushing/screening hybrid process developed in Korea was performed and evaluated in case of thermal recycling (TR) and material recycling (MR). The effect of various subsidies on economic efficiency was especially evaluated by means of domestic recycling plans. The incentive revenues from waste vinyl recycling and the incineration share of waste vinyls affected the net present values and internal rate of returns of the hybrid process.

Keywords : Waste vinyl, Crush, Screen, Economic evaluation

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: donald@jbnu.ac.kr; Tel: +82-63-270-2362; Fax: +82-42-8687284

doi: 10.7464/ksct.2019.25.4.287 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

세계에서 사용되는 에너지 및 물질의 대부분은 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료 자원으로부터 공급되고 있으며 사회 구조의 고도화로 인해 에너지 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 에너지 소비의 증가는 필연적으로 화석 자원들을 고갈시키고 있으며 증가하는 화석 자원들의 이용은 온실가스의 배출을 증가시키고 이로 인한 기후 이상 현상을 야기시키는 것으로 인식된다. 에너지 및 환경 분야에서 직면하고 있는 문제들은 전 세계 국가들에게 환경친화적인 자원 이용을 요구하는 반면, 편리한 생활에 대한 요구도 높아져, 화석 자원으로부터 인위적으로 생산되는 플라스틱류 및 비닐류의 이용도 지속적으로 증가하는 추세이다. 따라서 자연적으로 처리되지 않는 폐플라스틱 및 폐비닐의 발생 또한 모든 국가에서 증가하고 있어 이의 처리가 사회 문제로 대두되고 있다[5-7].

탄화수소 물질들로부터 얻어지는 플라스틱류 및 비닐류는 화석연료 자원들처럼 이용될 수 있기에 이미 많은 국가들에서 재생에너지 자원으로 인식되고 있다. 이에 따라 많은 국가들에서 폐플라스틱 및 폐비닐의 재활용 또는 재이용이 정책적으로 장려되어 왔다[7]. 분리수거된 폐플라스틱 및 폐비닐은 대부분 재활용에 이용되고 있으나 분리되지 않은 폐플라스틱 및 폐비닐은 대부분 소각으로 처리되고 있는 실정이다. 특히 국내에서 농업용으로 사용되었던 폐비닐의 발생량은 2017년 기준으로 314.475톤이며 수거량은 198.576톤으로 63%이다[8]. 그러나 수거량의 30%는 흙 등의 이물질로 구성되어 있으며 수거된 량의 55%만이 재활용되고 45%는 매립되거나 불법소각 또는 방치되고 있다[9]. 또한 전 세계의 재활용 쓰레기 중 56%를 수입하고 있는 최대 수입국인 중국은 2018년에 재활용 쓰레기의 수입을 중단한다는 발표를 하였다. 이는 자국 내에서 발생된 폐플라스틱 및 폐비닐과 같은 재활용 쓰레기들을 중국과 같은 국외로 반출하지 않고 자국 내에서 처리해야 함을 의미한다[10].

폐플라스틱과 폐비닐의 재활용에 있어 석유의 소비를 감소시킬 수 있는 재생원료로의 사용은 수요가 공급에 비해 부족하고 재질에 따라 상이하여 국내 발생 폐플라스틱 또는 폐비닐보다 국외 시장에 의존하고 있다. 이에 따라 재활용쓰레기 수출길이 막히고 미국, 유럽 등의 재활용쓰레기 수입량이 증가하면서 수거업체들의 수익도 현저하게 감소하였다[10]. 수익 감소는 쓰레기의 방치를 야기하여 전국적으로 ‘쓰레기 산’이 점점 증가하게 되었다[10-12]. 소각이라는 단기적 처방을 통해 증가하는 폐플라스틱, 폐비닐을 처리하고 있으나 인체에 유해한 오염물질이 다량으로 배출될 뿐만 아니라 혐오 시설로 인식되는 소각장에 대한 지역 사회의 반발도 소각 처리의 확대를 가로막고 있다. 국내 폐기물 부분의 배출원별 온실가스 배출량은 매립대신 소각처리로 폐기물 정책을 전환함에 따라서 2020년까지 지속적으로 증가하고 있다. 폐기물의 재자원화의 핵심 기술로 인정받는 고형연료화(solid refuse fuel) 처리방법은 폐플라스틱 및 폐비닐과 같은 연료화할 수 있는

폐기물의 부피를 현저하게 감소시키면서 소량의 소각재만 발생하기에 다량의 폐기물 처리에 유리하고 공간적인 제약이 없으며 기존 매립지의 사용연한도 연장할 수 있기에 큰 인기를 얻고 있다[12]. 또한 발전 플랜트 및 산업용 보일러를 통한 전력 및 열의 생산을 통해 추가적인 수익을 창출하거나 주변 지역에 온수 및 난방을 공급할 수도 있다. 환경부의 정책 변화를 통해 매립율은 17.2%에서 2.0%로 현저하게 감소하고 에너지화는 17.0%까지 상승할 것으로 예상되었다[6]. 그러나 소각처리량의 증가는 악취, 대기오염물질 배출 증가를 야기시키고 온실가스인 CO₂, CH₄, N₂O의 배출도 증가시킨다. 폐비닐을 둘러싼 정책 및 사회 구성원들의 인식 변화는 폐비닐의 발생을 줄이고 친환경적인 처리를 요구하게 되었다. 그럼에도 불구하고 1인 가구의 확대에 의한 포장재의 지속적인 증가는 폐비닐 발생량을 증가시키는 요인이 되고 있다. 또한 고형연료에 대한 규제가 강화되어 이물질 혼입 또는 이물질이 묻어있는 폐비닐의 재활용은 매우 제한적이다. 따라서 전국에 쌓여가는 폐비닐을 감소시키고 오염물질의 배출량을 저감시킬 수 있는 효과적인 방안은 폐비닐의 선별을 통해 이물질과 분리하여 물질 재활용 및 연료 재활용을 극대화하는 것이다. 폐비닐의 선별 분리를 위하여 크기가 작은 원통 형태의 스크린을 이용하여 선별하는 원형 스크린, 경사진 고무평면의 스크린망을 진동시켜 체분류하여 선별하는 진동 스크린 등이 있다. 또한 가연성분과 비가연성분 분리를 위해 회전 레이크 방식의 기계식 가연성분을 분리하는 공정과 풍력 및 풍력흡입장치를 이용하여 가연성분을 분리하는 장치 등이 이용되고 있다[13-14].

그러나 단순한 스크린 이용과 가연성분의 분리만으로는 폐비닐의 물질 재활용으로의 이용은 어렵다. 또한 낮은 분리 효율과 고부가가치 물질로의 재활용이 어려워 폐비닐의 국내 이용 확대에 한계를 갖는다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 단일 공정 내에 폐비닐의 파쇄와 선별을 동시에 구현하는 하이브리드 공정이 최근 개발되었다. 폐비닐의 물질 및 열 재활용의 확산을 위하여 개발된 공정의 경제성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 폐비닐의 전처리에 이용될 파쇄/선별 융합 전처리 시설의 경제성을 분석하였다. 특히 경제성에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 다양한 정책들 및 처리 비용의 변화가 폐비닐 전처리 공정에 미치는 경제적인 효과를 분석함으로써 새롭게 개발되는 공정의 경제적인 확대를 위한 정책의 나아갈 방향을 제시하였다. 또한 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 조건별 운전에 따른 민감도 분석을 통해서 선별 효율, 물질 재활용 및 열적 재활용이 전체 전처리 공정 운전에 미치는 영향도 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 파쇄/선별 융합 전처리 공정

폐비닐의 비용경제적 재활용을 위하여 파쇄/선별이 하나의 설비에서 구현되는 융합 전처리 설비를 경제성 평가를 위한

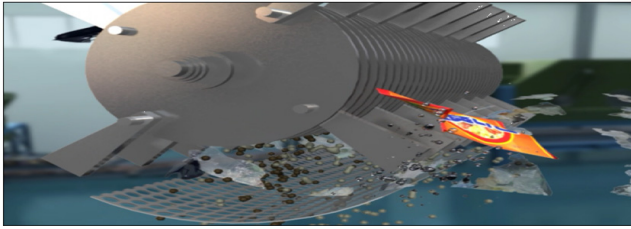


Figure 1. Conceptual design of crushing/screening hybrid pretreatment facility.

공정으로 선정하였다. Figure 1은 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 운전 개념을 형상화한 것이다. 그림에서 보듯이 파쇄/선별 융합 전처리 공정은 폐비닐의 재활용을 막는 이물질의 선별 제거를 위하여 폐비닐에 직접적인 연속 타격을 이용하고 있다. 회전식 타격형 선별기술의 타격날은 70-100여개가 이용된다. 일반적으로 수거된 폐비닐은 별도의 선별과정을 거치지 않고 압축하여 대부분 소각처리 된다. 그러나 수작업이 필요한 파봉작업이 대부분 실시되지 않아 재활용이 가능함에도 불구하고 재활용이 잘 안되는 상황이다. 따라서 비중이 가벼운 폐비닐을 Figure 1처럼 파쇄날과의 접촉면 개선을 통해 파봉함으로써 수작업이 아닌 기계적인 선별 분리를 가능케 한다.

폐비닐의 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 처리 단계는 Figure 2와 같이 진행된다. 그림에서 보면 폐비닐이 파쇄/선별 융합 전처리 공정에 투입되어 이물질과 재활용 가능자원으로 분리되고 트롬멜과 자력선별기를 통해서 필름류와 가연물로 최종 처리되도록 구성된다. 파쇄 및 파쇄/선별 공정을 통해서 분리되는 이물질은 소각로로 운반되어 소각되고 최종 잔류물은 매립처리된다. 재활용 가능자원 중, 과속 방지턱, 주차장 방지턱 등과 같은 제품으로 제조될 수 있는 선별된 폐비닐은 제품 제작 업체로 이송되어 물질 재활용된다. 그 외에 남은 물질들은 높은 발열량을 가지고 있기에 고품연료로 제작되어 열적 재활용 처리된다.

2.2. 경제성 평가

새롭게 개발되는 공정의 상용화를 위해서는 최근 경제성 평가를 진행하고 이를 통해서 개발되는 공정의 상용급 개발

을 검토하게 된다. 경제성 평가에는 개발 공정을 통해 창출되는 부가 가치와 이를 위해 사용되는 비용을 직접적으로 이용하는 순현재가치(net present value, NPV)가 일반적으로 이용된다. NPV는 투자를 시작할 때부터 사업이 종료되는 시점까지 얻게 되는 이익에서 원료비, 운영비, 이자 등을 제외한 순이익의 흐름을 현재가치로 계산하고 이를 합한 것이다. 이 방법은 미래에 발생할 모든 편익과 비용의 현금흐름을 적절한 할인율로 할인하여 현재가치로 나타내며 장기투자결정에 이용된다. NPV가 0보다 크면 경제성이 있고 0보다 작으면 경제성이 없는 의사결정의 기준을 정할 수 있다. 하지만 NPV법은 할인율로 사용되는 자본비용의 정확한 계산이 어렵다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 내부수익률법(internal rate of return, IRR)을 사용하였다[1-3].

IRR은 투자에 쓰이는 현재가치와 투자로부터 얻는 기대수익의 현재가치가 동일하게 되는 할인율이다. 즉 미래의 현금수입액이 현재의 투자가치와 동일하게 되는 수익률로서 NPV에 의해서 계산되는 결과값을 이용하여 계산한다. NPV와 마찬가지로 IRR도 투자사업의 수익성을 평가하는 기본지표로서 IRR이 현재의 이자율보다 높으면 투자 가치가 있는 것으로 평가된다. 새로운 기술 개발 사업에 이용되는 경제성 평가 기법인 IRR 및 NPV는 미래의 불확실한 수입과 지출을 현재의 가격으로 할인하는 방법을 이용하고 있다. 따라서 수입 및 비용과 관련된 다양한 인자들의 변화에 따른 NPV 및 IRR의 변화를 고찰하는 민감도 분석을 수행함으로써 미래의 환경 변화에 따른 개발 사업의 경제성 변화를 예측하도록 하였다. 민감도 분석은 다른 조건이 일정한 경우에 분석하고자 하는 조건이 변화하였을 때 경제성 분석 변화를 민감한 정도를 보는 것이다[1-3].

경제성 분석에 적용되는 비용 요소는 건설비, 초기 운전 자금 등 지출에 해당하는 초기투자비와 매년 설비의 유지, 보수 비용과 더불어 운영 및 인건비 등 운용비용을 대상으로 한다. 이 비용들은 생산량에 비례하지 않는 고정비와 비례하는 변동비로 나눌 수 있는데 초기 투자비는 고정비, 운용비용은 변동비로 구분된다. 초기 투자비는 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,

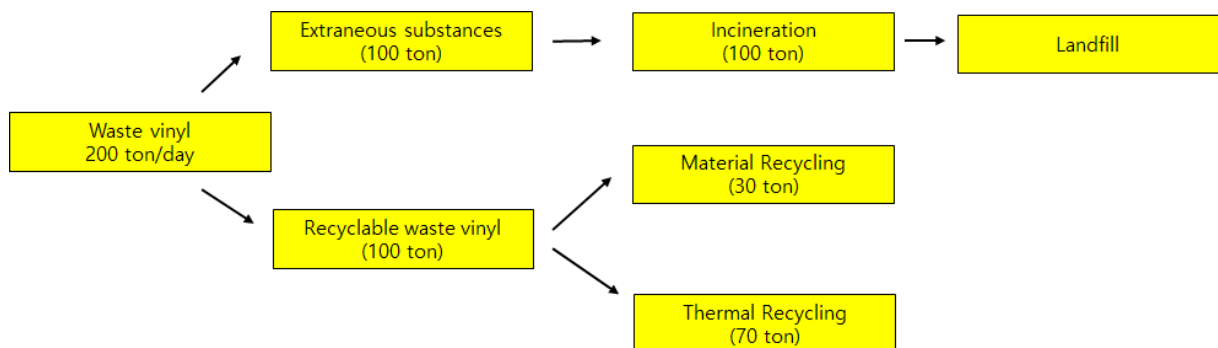


Figure 2. Mass balance of waste vinyl.

Table 1. Basic recovery selection subsidy

Recycling method	Unit price (won ton ⁻¹)
MR	30,000
TR	30,000

마케팅 비용 등으로 계산한다. 더불어 제품 생산에 따른 매출액과 순이익의 분석을 통하여 경제성 분석이 진행된다. 하지만 이러한 비용은 기업의 핵심 정보이므로 실제 확보하기는 어려움이 있어 동일한 기술을 사용하는 기존의 공장에서의 알려진 비용을 사용하였다. 기존 공장에서의 알려진 비용을 사용하게 되면 설계의 상세정도, 자료의 정확성, 산출을 위해 사용한 시간에 따라 정확도가 달라진다[15-16].

2.3. 경제성 평가 방법 및 가정

파쇄/선별 융합 전처리 공정을 새롭게 건설하게 되면 투자비, 운용비용, 건설비용, 폐비닐 운반비용, 소각 비용 등의 비용과 폐비닐 처리, 열적 재활용, 물질 재활용 등에 따른 수입이 발생된다. 이를 이용하여 경제성 분석을 진행하였고 경제성 분석에는 NPV, IRR을 이용하였으며, 민감도 분석은 재활용 인센티브, 폐비닐 선별 비율, 물질 재활용 비율 등에 따른 NPV, IRR의 영향을 고찰하였다. 공정의 제조 비용은 기업에서 제공한 자료를 이용하였으며 공정의 규모가 다른 경우에 일반적으로 적용되는 규모 인자를 적용하였다. 일반적으로 특정 공정에 자료가 부족한 경우에 0.6의 인자를 적용하기에 비슷하게 적용하였다. 그러나 실제로 1년 안에 설계부터 건설이 완료되기에 기업에서 제공받은 자료를 공정 운전이 시작되는 2020년 가격으로 계상하여 이용하였다. 특히 장치비를 비롯한 공정 운전과 관련된 자료는 기업으로부터 획득하였다[14]. 더불어 경제성 평가에 이용된 중요한 가정은 다음과 같다.

- 각 플랜트는 신규건설을 가정하였다.
- 토지구입비용 및 주민 보상비는 없다고 가정하였다.
- 폐비닐의 처리량은 국내 발생량 및 기업체 자료 고려하여 200 ton d⁻¹로 산정하였으며 매월 20일의 운전을 고려하여 연간 처리량은 48,000톤으로 계상하였다.
- 파쇄/선별 융합 공정의 투자비는 15억원으로 가정하였다.
- 운전 및 유지비용은 1차년도를 기준으로 전체 운전 기간에 동일하게 적용하였다.
- 물가상승률은 3%로 하였다.
- 감가상각비는 15년 균등분할상환으로 가정하였다.
- 플랜트의 소득세는 24.2%로 적용하였다.
- 이물질에 제거된 재활용 가능자원은 물질재활용(MR), 열적재활용(TR)으로 재사용된다.
- 폐비닐의 비용은 고려하지 않았으나 운반비는 물질들마다 다르게 고려하였다. 원료 물질인 폐비닐과 소각시설로 운반되는 비재활용 물질들은 톤당 20,000원으로 고려하였으며, MR 재활용은 MR 재활용 업체가 운반비를 지불하고 TR 재활용의 운반비는 톤당 15,000원으로 하였다.

Table 2. Incentives based on composite material recovery sorting grade

grade	Unit price (won ton ⁻¹)
A	90,000
B	80,000
C	70,000
D	60,000
E	50,000

- 폐비닐의 처리비는 톤당 90,000원이며 소각을 위한 위탁 처리비는 톤당 160,000원이다. 재활용에 따른 수익은 회수선별 지원금으로 톤당 30,000원이다(Table 1 참조). 또한 회수선별 등급제에 따른 추가 인센티브가 수익으로 발생한다(Table 2 참조). 더불어 MR 재활용 업체로부터 MR 판매금을 톤당 70,000원을 받았다.
- 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 운전 효율은 기업체에서 제시한 50%를 기준으로 하였으며 MR과 TR 재활용의 비는 3:7로 가정하였다.
- Table 2와 같이 복합재질 회수선별 등급제가 사용되고 있으며 A등급(톤당 90,000원), C등급(톤당 70,000원), E등급(톤당 50,000원)에 따른 경제성을 평가하였다.
- 설비의 운전은 10명으로 하였으며 중소기업 표준 임금 체계에 맞추어 임금을 산정하여 계상하여 운영비에 포함시켰다.

3. 결과 및 고찰

폐비닐의 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 경제성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 국내에서 지속가능하게 공급 가능한 200톤/일 규모의 공장을 고려하여 진행하였다. 이미 10톤/일 규모의 파일럿 설비가 설치 운전되고 있기에 이 설비에서 나온 원료 폐비닐, 재활용급의 폐비닐, 소각재로 처리되는 이물질들을 분석하여 Table 3에 나타내었다. 표에서 보듯이 처리되지 않은 폐비닐에서 연소 처리되지 않은 다양한 이물질들을 제거함으로써 발열량은 30% 이상 향상되고 회재가 거의 포함되지 않는 재활용 가능한 폐비닐로의 전처리가 가능함을 확인할 수 있다. 특히 폐비닐에 묻어 있는 염소 성분이 이물질로 많이 전이됨을 확인할 수 있다.

국내에서 지속가능하게 공급 가능한 전처리 공정 규모는 200톤/일로 가정하였으며 매월 20일의 운전을 가정하여 연간 48,000톤을 처리하는 규모로 본 연구의 대상 공정을 선정하였다. 10톤/일 규모의 pilot 규모의 공정 운전 결과에 기초하여 주입된 폐비닐들이 전처리되어 50%는 재활용 폐비닐로 이송되고 50%는 소각로로 운반되어 소각처리 된다. 고부가가치 재활용인 물질 재활용으로 이용되는 폐비닐은 재활용 가능 폐비닐의 30%이다. 폐비닐, 재활용 폐비닐, 소각처리용 폐비닐 모두 운반을 위해 비용이 드나 물질 재활용은 운반 비용이 발생하지 않는 구조를 가지고 있다. 이와 같은 조건을 기본으로 하여 Table 2의 인센티브에 따른 IRR의 변화를

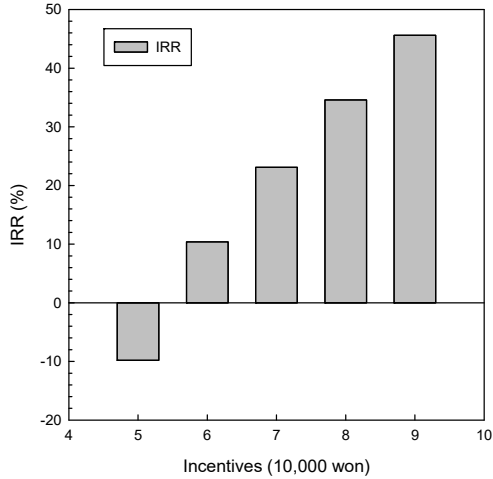


Figure 3. Effect of the treatment incentives of waste vinyl on IRR.

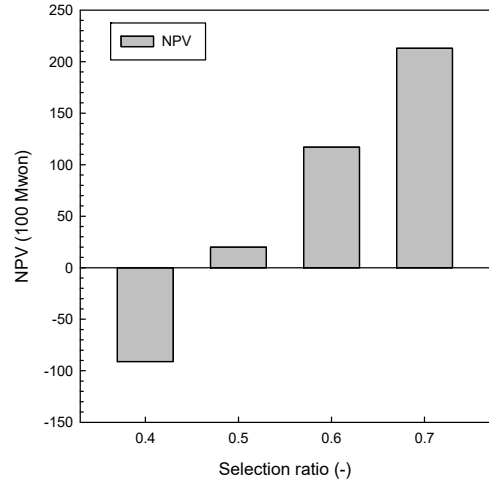


Figure 5. Effect of selection ratios of the hybrid process on NPV.

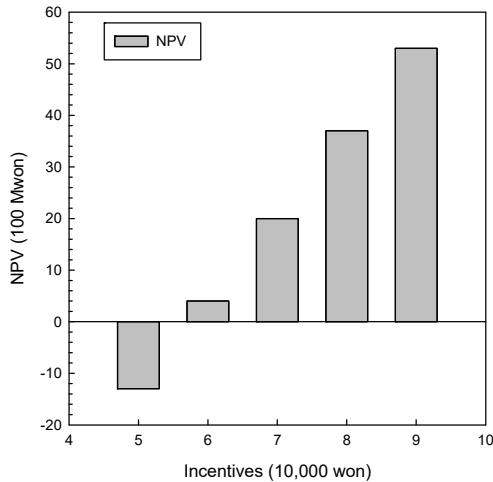


Figure 4. Effect of the treatment incentives of waste vinyl on NPV.

Figure 3에 나타내었으며 NPV 변화는 Figure 4에 나타내었다. 기준이 되는 C등급의 인센티브를 받게 된다면 IRR은 23.1%로 나타나 현재 3-5%의 할인율에 비하면 매우 경제적인을 확인할 수 있다. 처리된 폐비닐이 A등급의 고품질을 가진다면 IRR은 거의 45%에 도달해 높은 품질로의 전처리가 경제성에

큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 이에 비해 E 등급을 받게 된다면 IRR이 -값을 가지는 것을 통해 투자대비 이윤이 발생하지 않음을 알 수 있다. 15년의 가동 기간에서 얻을 수 있는 순이익으로 대체할 수 있는 NPV값은 C등급에서 20억원, A등급은 50억원에 달해 15억의 투자로 2배 이상의 수익을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 E등급을 받게 된다면 -12억의 투자 손실이 발생하게 되어 원금 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

폐비닐의 파쇄/선별 융합 전처리 공정에서 폐비닐의 재활용 가능 폐비닐 수율에 따른 경제성 변화를 검토하기 위하여 선별 효율에 따른 NPV 변화를 Figure 5에 나타내었다. 융합 전처리 공정에서 재활용 폐비닐 수율만 변경하였으며 물질 재활용율은 0.3으로 고정하였다. 그림에서 보면 기본 수율인 0.5보다 낮은 0.4의 수율을 얻으면 거의 100억에 가까운 손실이 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 재활용율이 0.5에서 0.6, 0.7로 상승한다면 NPV값이 100억원을 초과하여 8배에서 거의 16배의 수익을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 폐비닐의 처리를 위하여 톤당 90,000원을 받지만 재활용을 통해 얻어지는 회수선별 지원금과 재활용 등급에 따른 인센티브들이 전처리 공정의 경제성에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 따라

Table 3. Proximate Analysis and Ultimate analysis result of waste vinyl

	Analysis	Result			Unit
		Vinyl before process	Vinyl after process	Extraneous substances	
Proximate analysis	Low calorific power	7490	9090	2320	kcal kg ⁻¹
	Moisture	15.0	4.3	23.6	wt.%
	Ash	4.8	2.6	19.5	wt.%
Ultimate analysis	N	0.63	0.53	0.93	mg kg ⁻¹
	C	70.25	70.53	35.17	mg kg ⁻¹
	H	11.60	11.69	4.78	mg kg ⁻¹
	O	12.32	14.50	39.05	mg kg ⁻¹
	S	0.04	0.01	0.06	mg kg ⁻¹
	Cl	0.36	0.14	0.51	mg kg ⁻¹

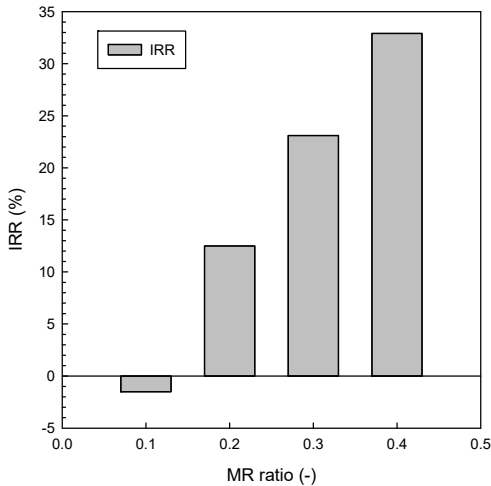


Figure 6. Effect of MR ratios of the hybrid process on IRR.

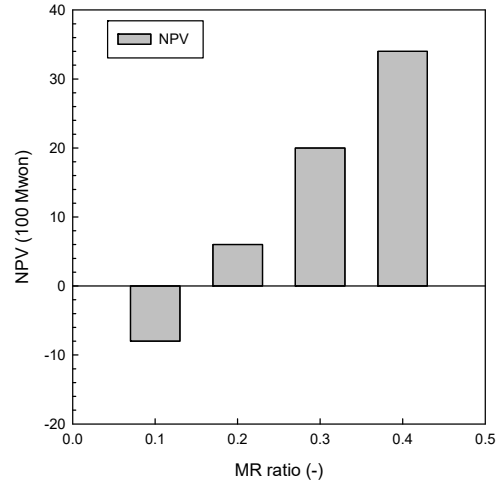


Figure 7. Effect of MR ratios of the hybrid process on NPV.

서 경제성을 향상시키기 위해서는 재활용 가능 폐비닐의 수율을 지속적으로 향상시켜야 한다.

재활용 폐비닐의 수율을 0.5로 고정시킨 상태에서 물질 재활용의 변화에 따른 경제성 변화를 고찰하기 위하여 MR 비율에 따른 IRR 및 NPV 결과를 Figure 6과 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 보면 기준 MR 비율인 0.3에서 MR 재활용이 떨어지면 경제성이 떨어짐을 볼 수 있다. MR 재활용 비율이 0.1 떨어진 0.2의 IRR은 13%로서 경제성을 가지는 것으로 판단되나 MR 재활용 비율이 0.1인 경우에는 IRR이 -값을 나타내 전혀 경제적이지 않음을 확인할 수 있다. MR 재활용 비율에 따른 경제성을 나타내는 또 다른 지표인 NPV 결과를 보면 IRR 결과와 같이 0.1인 경우에는 -8억원으로 수익이 전혀 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 MR 재활용 비율도 0.2 이상을 유지해야만 전체 공정이 수익을 발생시킬 수 있다. 그러나 MR 재활용 비율 0.1의 증가로 얻어지는 수익은 대략 10억원 수준으로 나타나 재활용 가능 폐비닐 수율 변화로 얻어지는 경제성보다는 작은 것으로 나타났다. 따라서 폐비닐의 파쇄/선별 융합 전처리 공정의 경제성을 극대화하기 위하여 재활용 인센티브를 높게 유지하고 소각 처리되는 폐비닐의 양을 최소화해야 한다. 폐비닐의 정책적 지원이 현재와 같이 고정된다면 MR 재활용의 증가보다는 재활용으로 처리할 수 있는 폐비닐의 절대량을 증가시킬 필요가 있다.

4. 결론

국내에서 발생되어 처리되지 않고 버려지는 폐비닐의 환경친화적 이용 확대는 필연적으로 폐비닐의 전처리를 필요로 한다. 이의 확대를 위하여 본 연구에서는 폐비닐의 물질 및 열적 재활용을 위한 하루당 200톤 규모의 파쇄/선별 융합 전처리 공정에 대한 기술 경제성을 평가하였다. 현재 시행되고 있는 재활용 인센티브에 따라 톤당 70,000원을 받으면 IRR이 23% 이상을 유지하게 되어 새로운 공정 개발이 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 소각으로 처리되는 폐비닐 양에 따라서 경제성이 큰 폭으로 변하게 됨을 확인하였다.

또한 물질 재활용의 증가도 경제성을 향상시킨다. 따라서 폐비닐의 전처리 공정은 70,000원 이상의 재활용 인센티브, 0.5 이상의 재활용 회수율, 0.3 이상의 물질 재활용이 유지된다면 경제적으로 처리할 수 있을 것이다.

감사

이 논문은 한국환경산업원 환경정책기반공공기술개발사업(No. RE20180007)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Lee, S. H., Lee, T. H., Jeong, S. M., and Lee, J. M., "Economic Analysis of a 600 MWe Ultra Supercritical Circulating Fluidized Bed Power Plant Based on Coal Tax and Biomass Co-Combustion Plans", *Renew. Energy*, **138**, 121-127 (2019).
- Gwak, Y. R., Kim, Y. B., Gwak, I. S., and Lee, S. H., "Economic Evaluation of Synthetic Ethanol Production by Using Domestic Biowastes and Coal Mixture", *Fuel*, **213**, 115-122 (2018).
- Shin, J. H., Lee, L. S., and Lee, S. H., "Economic Assessment of a Indirect Liquefaction Process using a Gasification with Petroleum Coke/Coal Mixtures", *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**, 1-9 (2016).
- Ko, J. C., and Choi, S. H., "The Development of N₂O Emission Factor at Municipal Solid Waste Incinerator", *Clean Technol.*, **25**, 40-45 (2019).
- Lee, H. D., Cho, J. H., Kim, I. D., Kim, Y. S., and Oh, K. J., "Environmental Assessment and Characteristic of Refue Derived Fuel by Mixed Biomass with Binder", *Clean Technol.*, **17**, 336-345 (2011).
- Kim, S. S., and Park, S. Y., "Study of Dechlorination Sorbent for Pyrolysis of PVC Containing Wastes", *Clean Technol.*, **19**, 233-242 (2013).

7. Song, K. S., "The Technology Development Trend of Disposal and Recycling of Waste Plastics", Konetic reports No. 2016-064, Seoul, Korea (2016).
8. www.recycling-info.or.kr, accessed on 08. 10, 2019.
9. Shim, S. H., Kim, W. H., Keel, S. I., Yun, J. H., Jeong, S. H., and Ahn, K. Y., "Saving of Energy in a Recycling Process for Waste Mulching Vinyl", Proceedings of Korea Energy Engineering Association, 229-234 (2003).
10. Hong, S. Y., "A Garbage Crisis Which was Opportunity for a Blessing in Disguise in 2018", Seoul Solution World City Information, (2018).
11. Lee, S. H., "Recycling Waste Crisis Causes and Countermeasures", KDB report (2018).
12. <http://www.forest.go.kr>, accessed on 08. 20, 2019.
13. Cho, I. H., Korean Patent 10-1546356 (2015).
14. CI Ecotech, accessed on 03. 20, 2019.
15. Park, J. W., Bae, J. S., Kweon, Y. J., Kim, H. J., Jung, H., and Han, C., "Economic Evaluation of DCL/ICL Processes", *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**, 781-787 (2009).
16. Bibber, L. V., Shuster, Erik, Haslbeck, J., Rutkowski, M., Olson, S., and Kramer, S., "Technical and Economic Assessment of Small-Scale Fischer-Tropsch Liquids Facilities", DOE/NETL-2007/1253, National Energy Technology Laboratory, USA (2007).