http://dx.doi.org/10.14577/kirua.2021.23.1.1

농촌지역 혼합건설폐기물의 중·소규모 배출현장용 이동식 분리선별기 제작 및 선별 효율 성능평가

Fabrication of Movable Separator for Site to Discharge Medium and Large-Scale Mixed Construction Waste from Agricultural Areas and Its Efficiency Evaluation

김 병 윤* 박 지 선**
Kim, Byung-Yun Park, Ji-Sun

Abstract

In this study, a real-sized experimental equipment (pilot plant) was built at the site based on the preliminary research data to develop a movable separator for the mixed construction waste that can be implemented in agricultural areas to review its feasibility through the evaluation of its separation efficiency by waste types. The final construction of the movable separator and experimental results of the separation efficiency are summarized as follows. 1) The separation performance according to the blade type was the best for the combustible wastes either with 26 numbers of L-type blades and 32 numbers of pin type blades. As far as combination of blade types, when the L-type and pin-type were combined, the best separation efficiency was achieved. 2) The separation efficiency for waste wood by the conveyor type and angle of inclination (slope) of the trommel was the best when the conveyor had ribs of seagull shape with the angle of inclination 45°. 3) The separation efficiencies by process showed that 65.9% was separated as inorganic demolition wastes, 18.2% as waste woods, and 16.0% as combustible wastes at conveyor speed of 2-3 rpm, and the error rate was the least from the waste types generated in the dismantle site.

주 요 어 : 트롬멜, 혼합건설폐기물, 분리선별기, 재활용, 성능평가
Keywords : Trommel, Mixed Construction Waste, Separator, Recycling, Performance Evaluation

1. 서 론

정부에서는 지속가능한 사회 구축을 위하여 다양한 정책을 추진하고 있다. 한정된 자원을 효과적으로 활용하는 방안, 교통체계 구축을 통한 이동의 편리성 제공, 깨끗한 물과 공기질 관리를 통한 건강한 삶의 터전 마련 등 많은 정책을 추진하고 있다. 폐기물관리도 국가가 관리하는 중요한 정책 중에 하나라고 할 수 있다. 필연적으로 발생하는 폐기물을 어떻게 처리할 것인가를 고민하고, 최적의 처리를 위한 정책 및 시설을 운영하고 있다.

혼합건설폐기물의 처리 및 관리에 관한 정책은 중앙정부에서 수립하고 있으나, 실행은 모두 지방자치단체를 중심으로 이루어지고 있다. 따라서, 혼합건설폐기물의 수거 및 처리에 관한 일체의 행위는 중앙정부의 지침을 기준으로 하여 수행하거나, 필요시 별도의 지방자치단체 조례를 적용하고 있다. 혼합건설폐기물의 재활용 효율성을 높이기 위해서는 가능한 폐기물의 배출단계에서 이물질이 섞이지 않도록 하는 것이 중요하며, 이후 최대한 짧은 처리단계에서 성상별로 분리하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 단순매립 또는 소각 처리되는 건설폐기물의 재활용률을 높이기 위해서는 배출단계 또는 중간 처리단계에서 성상별로 분리선별하는 것이 필요하다. 이를 위하여 배출지 현장에서 분리선별 할 수 있는 장치를 만들고 1차로 가연성 및 무기성 폐기물과 목재를 분리하는 작업이 이루어져야 한다[1].

특히, 이러한 혼합건설폐기물이 중·소량으로 배출되는 농촌 또는 소도시 지역에서는 분리선별 하여 재활용하는 업체가 적을 뿐만 아니라, 그 재활용률도 매우 낮아 배출현장에서 적용가능한 이동식 소형 분리선별기 개발이 매우 절실하며, 적용 효과도 클 것으로 기대된다.

따라서, 본 연구에서는 농촌지역 혼합건설폐기물의 이동식 분리선별기 개발을 위한 기초 선행연구[2]를 기반으로, 실물 시험설비(Pilot Plant)를 현장에 제작·설치하고, 폐기물 성상별 분리선별 효율성을 평가하여 실용화 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 분리선별기 제작

2.1 1차 제작

(1) 설계 개요

장치 제작은 트롬멜 지름과 길이를 결정하고 타공망의 간격

* 가톨릭관동대학교 건축공학과 교수, 공학박사
** 한국건설기술연구원 건축안전연구센터 수석연구원, 공학박사
(Corresponding author : Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, batsun@kict.re.kr)

1) 송태협·이세현·박지선, 건축물 분리 해체 도입방안 마련 연구, 환경부, 2012.
2) 김병윤·박지선, 농촌지역 혼합건설폐기물의 중·소규모 배출현장용 이동식 분리선별기 개발을 위한 기초연구, 2019.

및 철판의 두께 결정을 우선하여 실시하였다. 본 장비는 필요로 하는 장소에 이동 설치하여 분리선별하는 장치로 운반이 가능하도록 제작이 이루어져야 한다[3].

장치의 운반 방법에는 견인 방식과 상차 방식으로 나눌 수 있다. 일반적으로 견인 방식은 제작비용이 과다하게 소요되고, 현장의 조건에 따라 운반하기가 어려운 상황이 발생할 수 있으므로 본 제작에서는 상차 방식에 의한 운반을 전제로 장치 제작을 하였다.

따라서, 장치는 최소 2.5 ton 트럭으로 운반할 수 있도록 기계의 폭과 높이를 결정하여야 한다. 도로교통법에 따른 차륜의 높이와 차량의 탑재 부위의 넓이를 고려하여 장치의 크기를 결정하였고, 이에 따른 트롬멜의 직경을 결정하였다. 트롬멜의 직경은 클수록, 길이는 길수록 분리효율을 극대화 할 수 있으나, 앞서 서술한 바와 같이 길이, 높이 및 폭의 제한이 있으므로, 본 장치에서는 전체 높이는 2.4 m, 길이는 3.6 m 폭은 2.2 m 이내로 한정하여 제작하여야 한다. 이를 바탕으로 트롬멜의 직경은 1,500 mm로 하였으며, 이는 트롬멜 외부에 부착되는 브러쉬 및 기타 부속 장비와의 결합을 고려하고, 하단으로 배출되는 골재류의 배출을 용이하게 하는 것이다. 트롬멜의 길이는 2,400 mm 이상으로 설계하였으며, 전반부는 잔골재를 분리하는 15 mm 타공을 형성하고, 후반부는 30 mm 골재를 분리할 수 있는 시스템으로 구성하였다.

투입되는 폐기물을 정량 공급하는 호퍼와 장치가 전단부에 배치되기 때문에 장치의 길이는 트롬멜의 길이보다 약 1,000 mm 정도 길게 형성되는 것으로 설계하였다.

주 구동 모터의 용량은 7.5 HP 마력이고, 트롬멜의 회전수 조절이 가능한 DC 모터를 적용하였다. 트롬멜 내부의 분리된 폐기물의 이송을 위한 컨베이어벨트는 일정한 속도를 유지할 수 있도록 가변형이 없는 형태의 3 HP의 보조 모터를 사용하였다. 따라서 본 장치 구동을 위하여 총 10.5 HP의 마력이 소요된다.

표면 타공은 트롬멜 내부 강성의 유지와 분리의 효율성을 높이기 위하여 두께 3 mm의 강철판을 사용하였으며, 타공 간격은 직경의 2/3를 유지하여 배치하였다.

회전수는 최대 30 rpm까지 가능하도록 설계하였으나 장비에 무리한 외력을 가하지 않고, 소음 저감을 위하여 최대 사용은 15 rpm에서 활용하도록 하였다. 또한, 장비의 경사각은 사전 실험에서 도출한 결과를 바탕으로 폐기물이 자연적으로 이송할 수 있는 최소 경사각을 유지하는 것으로 하여, 3° 이내의 각도 조절이 가능하도록 제작하였다. 경사 컨베이어의 길이는 1,000 mm로 설계하여, 30~45°까지 경사각을 변화할 수 있도록 계획하였으며, 갈매기형 돌출부를 컨베이어 표면에 부여하고, 분리효율을 향상하기 위하여 돌출부 앞부분을 제거하여 전단부와 돌출부가 평행하도록 제작하였다.

특히, 가연성폐기물의 분리선별을 위한 내부 블레이드 제작은 실험과정을 통하여 많은 변수에 따라 변동될 수 있는 사항으로 다양한 형태의 블레이드를 준비하여 실험에 반영하고, 투입된 폐기물의 성상에 따른 최적 조합을 도출하고자 하였다. 블레이드에 의하여 분리선별 된 가연성폐기물을 이송하는 내부 컨베이어의 경우, 견고하게 지지하기 위하여 시작과 끝단의 구속방법을 새롭게 구상하여 적용하였으며 특히, 가연성폐기물이 이송되면서 가장자리에 걸쳐 적층 되지 않도록 블레이드 외 최대한 이격시키도록 제작하였다. 분리선별기의 부위별로 적용한 기술 내용을 요약하면 <Table 1>과 같다.

Table 1. Technical content of the pilot plant

구분	기술 내용
내부 블레이드	●가연성폐기물의 효율적인 분리를 위하여 트롬멜 내부에 날개를 부착함 ●날개는 트롬멜 내부에 일직 선상으로 되게 하는 방법과 일정크기의 형태로 분산 배치하는 방식을 고려함 ●날개의 재질은 금속과 경질 고무 등을 활용할 수 있으며, 교체가 쉽게 탈부착하도록 설계함 ●날개의 형태는 일직선 형이 될 수도 있으나, 골재 및 무기질 재료의 상부 이송을 제한하기 위하여 역 V 형태(∧)로 적용이 가능함
내부 컨베이어	●트롬멜 내부 중앙 하단부에 선별된 가연성폐기물 이송을 위한 컨베이어벨트 배치 ●내부 날개를 이용하여 상부로 이동시킨 가연성 건설폐기물을 중력에 의하여 상부 지점에서 낙하시켜 컨베이어에 내려놓은 후 이를 외부로 배출하는 형태임
트롬멜 표면 타공	●트롬멜 타공부는 직경 15, 30 mm로 하여, 골재류의 형태는 모두 트롬멜 하단으로 분리될 수 있도록 함 ●목재류 등 길게 성형된 제품은 트롬멜 끝단부 배출이 될 수 있도록 설계함
트롬멜 상단 브러쉬	●트롬멜 타공부의 막힘을 예방하기 위하여 브러쉬 형태의 것을 트롬멜의 환전과 연동하도록 함 ●브러쉬 다음 단계로 나이프형 에어 분사 노즐을 이용하여 막힘을 방지하도록 설계함
경사 컨베이어	●30 mm 이상 무기폐기물과 폐목재를 분리하기 위해 트롬멜 끝단에 경사 컨베이어 설치함 ●밀도가 높은 무기폐기물은 아래로 이동 ●밀도가 비교적 낮은 폐목재는 컨베이어에 의해 상단으로 이동 후 외부 배출됨

(2) 실물 제작

혼합건설폐기물 분리선별기를 제작하기 위해 기존 특허 및 신기술 등을 검토하고[4], 관련 전문가와 현장 관계자들과 상의한 후 건설폐기물 분리선별 시험설비(Pilot Plant)를 설계 및 제작하였으며, 관련 장비 제작 업체인 충북 S사에 의뢰하여 제작하였다<Fig. 1>.

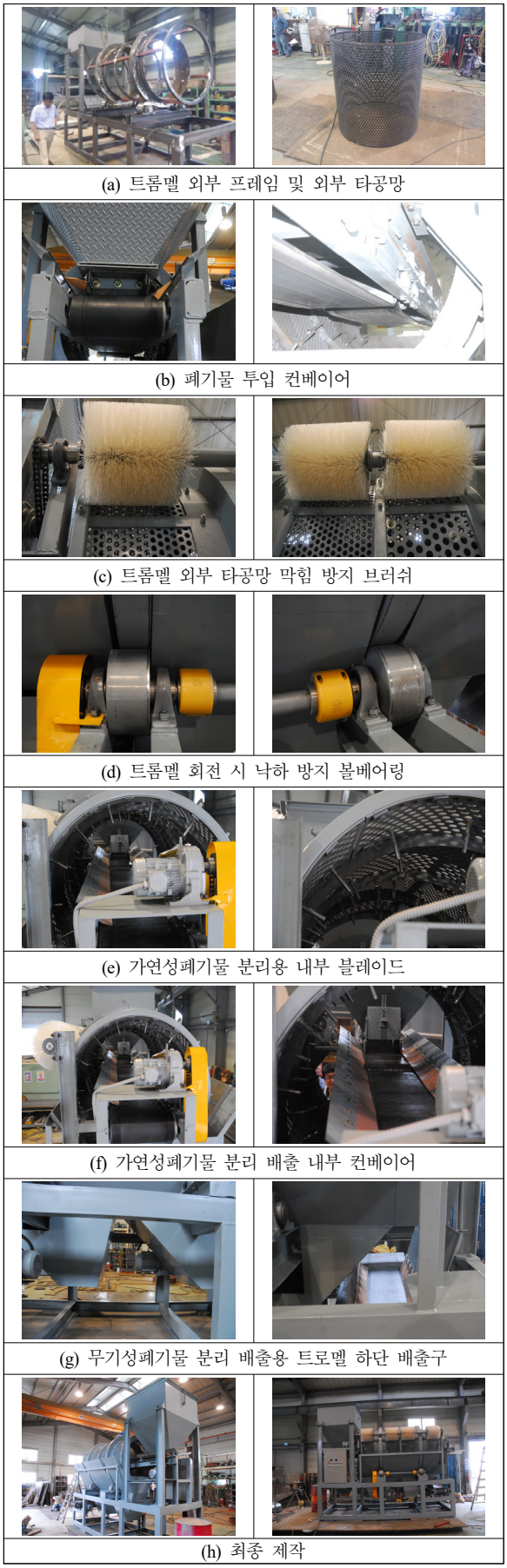
(3) 시험가동

① 실험계획

혼합건설폐기물의 분리선별 시험설비를 현장에 설치 후 폐기물 분리선별 성능을 검증하고자 <Table 2>와 같이 실험 결과의 재현성을 위해 각 성상의 폐기물을 일정 비율로 한 혼합폐기

3) 송태협·박지선, 혼합건설폐기물의 단일 공정 분리·선별 장치 개발 및 성능평가, 한국건설순환자원학회논문집, 4(4), 2016.

4) 환경신기술정보시스템, https://www.koetv.or.kr/home/index.do



(a) 트롬멜 외부 프레임 및 외부 타공망

(b) 폐기물 투입 컨베이어

(c) 트롬멜 외부 타공망 막힘 방지 브러쉬

(d) 트롬멜 회전 시 낙하 방지 볼베어링

(e) 가연성폐기물 분리용 내부 블레이드

(f) 가연성폐기물 분리 배출 내부 컨베이어

(g) 무기성폐기물 분리 배출용 트로멜 하단 배출구

(h) 최종 제작

Fig. 1. Pilot plant manufacturing site

물을 제조하여 실험하였다.

Table 2. Test plan of Pilot Plant

ID	실험 인자		측정항목
	기울기	폐기물 비율 (Wt.%) (무기폐재류 : 폐목재 : 가연성)	
A1	0 °	5 : 3 : 2	분리선별 효율
A2		5 : 2 : 3	
A3		7 : 2 : 1	

② 평가결과

폐기물 성상에 따라 트롬멜 내부 체류시간 차이는 있었으나, 그 차이는 미미한 것으로 나타났다<Table 3>.

무기폐재류의 경우 15 mm 및 30 mm 이하 입도의 것은 트롬멜 타공망을 통해 분리배출 되어, 트롬멜 하부로 75% 이상 이동하는 것으로 나타났다. 하지만 가연성폐기물 배출장소인 내부 컨베이어와 폐목재 분리장소인 경사 컨베이어에 잔여 25% 무기폐재류가 혼입된 상태로 배출되는 문제점이 발생하였다. 폐목재의 경우 분리배출 장소인 경사 컨베이어 상부를 통해 55% 정도 배출되었으며, 가연성폐기물 분리장소와 30 mm 이상 무기폐재류 배출장소를 통해 나머지 45%가 배출되었다<Table 4>.

Table 3. Residence time

ID	Pilot 각도	체류시간	분리선별 효율
A1	0 °	5분 30초	하
A2		6분 00초	하
A3		5분 00초	하

Table 4. Separation efficiency

ID	폐기물 성상	분리 전 (kg)	분리 후 (kg)		분리선별 효율 (%)
			계획 장소	이외 장소	
A1	무기폐재류	50	38	12	76.0
	폐목재	30	17	13	56.7
	가연성폐기물	20	7.4	12.6	37.0
A2	무기폐재류	50	39	11	78.0
	폐목재	20	11	9	55.0
	가연성폐기물	30	14.3	15.7	47.7
A3	무기폐재류	70	57	13	81.4
	폐목재	20	12	8	60.0
	가연성폐기물	10	4.5	5.5	45.0

가연성폐기물은 분리배출 장소인 내부 컨베이어 끝단을 통해 약 40% 정도만 배출이 되었으며, 60% 정도가 폐목재 분리장소인 경사 컨베이어와 30 mm 이상 무기폐재류 배출장소를 통해 배출되는 현상이 발생하였다.

실험은 3회 반복실험을 통해 평균값을 나타낸 것으로 유사한 경향이 반복되었으며, 혼합건설폐기물 분리선별 시험설비의 현장 적용을 위해 실험을 통해 보완하였다.

③ 분석 및 개선방안

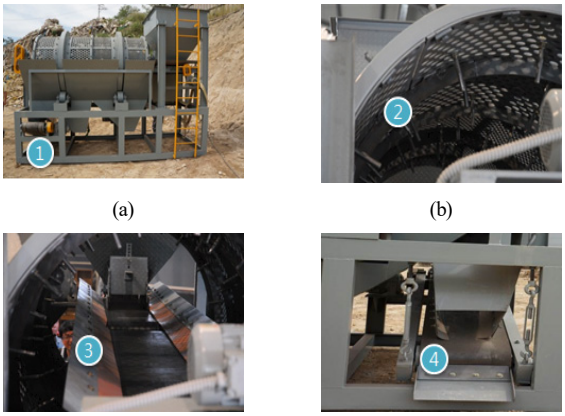
제작한 분리선별 시험설비를 현장 설치 후 시험가동 한 결과, 다음과 같은 문제점이 발생하였다<Table 5>.

혼합폐기물 이송을 위해 트롬멜 자체 경사각 대신 내부에 나선형의 스파이럴을 설치하였으나, 중력에 의한 자유낙하가 아닌 수평 방향 운동으로 밀도가 낮은 가연성폐기물의 정체 현상이 발생하였다. 가연성폐기물을 분리선별을 위해 트롬멜 내부에 블레이드를 설치하였으나, 폐목재도 함께 분리되는 경향도 나타났다. 또한, 폐목재 분리선별용 경사 컨베이어에서는 밀도차에 의해 폐목재와 30 mm 이상의 무기폐재류를 분리선별 하기 위한 경사 컨베이어의 효율저하로 인한 분리선별 효율이 저하하는 것으로 나타났다.

상기와 같은 문제점을 분석한 후 개선을 위해 <Table 6>과 같은 방안을 모색하여, 혼합건설폐기물 분리선별 시험설비를 수정·제작하였다.

Table 5. Problem analysis

구분	성능 문제점	해당 부위
(a)	폐기물 이동 속도 지체로 인한 정체 현상	①
(b)	폐기물 분리효율 저하	①②③④
(c)	가연성폐기물 분리선별 컨베이어 상단 폐목재 및 무기폐재류 혼입	②③
(d)	폐목재와 무기 이물질 분리효율 저조	④



(a) (b) (c) (d)

2.2 2차 제작

(1) 장치 개선

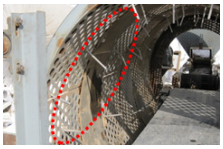
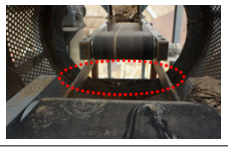
앞서 분석한 문제점을 바탕으로 혼합건설폐기물 분리선별 시험설비장치 개선작업을 실시하였다.

개선된 내용은 트롬멜 본체 경사각 부여, 트롬멜 내부 스파이럴 제거, 트롬멜 내부 블레이드 변경, 폐기물 공급 컨베이어와 가연성폐기물 분리선별 컨베이어 위치변경 및 이격거리 조정, 가연성폐기물 분리선별 컨베이어 거더 제거, 폐목재 분리선별 경사 컨베이어 변경 등이다<Table 7>.

Table 6. Problem solution

현행	문제점	해결방안
트롬멜 경사각 0° 스파이럴을 이용한 폐기물 이송	스파이럴에 의한 폐목재, 무기폐재류 가연성폐기물 컨베이어 혼입	•스파이럴 제거 •트롬멜 경사각 부여 •중력으로 폐기물 이송
봉 타입의 블레이드 50개 설치	폐목재 가연성폐기물 분리선별 컨베이어 혼입	•가연성 폐기물 선별 효율 증대용 블레이드 변경
컨베이어 트롬멜 1단 끝부분 위치	트롬멜 1단 사용효율 저하	•트롬멜 1단 시작지점으로 폐기물 공급 컨베이어 이격
컨베이어 이격 거리 20 cm	좁은 이격거리로 인한 무기폐재류 분리효율 저하	•가연성폐기물 분리 컨베이어 위치 이동으로 폐기물 공급 컨베이어와 거리 증대
가연성폐기물 낙하방지용 거더 1조 설치	컨베이어 거더에 가연성폐기물 적재로 정체 현상 발생	•컨베이어 거더 제거 •가연성폐기물 혼입 방지를 위해 컨베이어 내부 공간 밀폐

Table 7. Improvement of pilot plant

구분	개선 및 보완사항	개선 효과
트롬멜 본체 경사각		•폐기물 이송을 위한 트롬멜 내부 스파이럴 제거 •중력방향으로 폐기물 이송각도 변경 가능
트롬멜 내부 스파이럴 제거		•스파이럴에 의한 가연성폐기물 분리배출 컨베이어에 폐목재 및 무기폐재류 혼입 방지 억제 •스파이럴 제거 후 폐기물 이송은 트롬멜 경사각 이용
트롬멜 내부 블레이드 변경		•기존 봉 타입에서 핀 타입, L 타입으로 변경 •핀 타입 스테인리스 재질과 직선형과 꺾임형 혼용 •가연성폐기물 벨트 위 낙하율 상승
공급 컨베이어 이격 증대		•폐기물 공급 컨베이어 트롬멜 1단 시작지점으로 위치변경 •위치변경으로 인한 폐기물 분리효율 상승
컨베이어 이격 증대 및 거더 제거		•가연성폐기물 배출 컨베이어와 폐기물 공급컨베이어 간격 이격 •거더 제거에 의한 가연성폐기물 적재 현상 감소

(2) 개선 후 실험계획

건설폐기물 분리선별기 개선 후 폐기물 분리선별 성능을 검증하고자, <Table 8>과 같은 실험을 계획하였다.

Table 8. Experiment plan after improvement

ID	실험 인자		측정항목
	기울기	폐기물 비율 (wt.%) (무기폐재류 : 폐목재 : 가연성)	
A1	0 °	5 : 3 : 2	분리선별 효율
A2		5 : 2 : 3	
A3		7 : 2 : 1	
B1	1.5 °	5 : 3 : 2	
B2		5 : 2 : 3	
B3		7 : 2 : 1	
C1	3 °	5 : 3 : 2	
C2		5 : 2 : 3	
C3		7 : 2 : 1	

(3) 평가결과

<Table 9>와 같이 폐기물 성상과 트롬멜 각도에 따라 내부 체류 시간에 차이가 있었으며, 이로 인한 분리선별 효율은 확연한 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 트롬멜 각도에 따라 폐기물 이송 속도가 결정되며, 과도한 이송각은 폐기물의 이송 속도를 증가시켜 폐기물 분리선별 효율을 저하시키는 작용을 하는 것으로 분석된다.

Table 9. Time to stay inside Trommel

ID	Pilot 각도	체류 시간	분리선별 효율
A1	0 °	4분 22초	하
A2		4분 40초	하
A3		3분 12초	하
B1	1.5 °	3분 14초	상
B2		3분 42초	상
B3		3분 00초	상
C1	3 °	2분 24초	중
C2		2분 55초	중
C3		2분 17초	중

또한, <Table 10>과 같이, 시험설비 개선 전과 후를 살펴보면 개선 전 무기폐기물의 경우 15 mm 이하와 30 mm 이하의 입도를 갖는 것은 트롬멜 타공망을 통해 분리배출 되어, 트롬멜 하부로 75% 이상 이동하는 결과를 나타내었다. 그러나, 개선 후의 경우 트롬멜 각도 0°일 경우 83% 이상, 1.5°일 경우 91% 이상, 3°일 때 82% 이상의 분리효율을 나타내어 시험설비 개선 후에 분리효율은 상승한 결과를 나타냈다.

폐목재의 경우 분리배출 장소인 경사 컨베이어 상부를 통해 트롬멜 각도에 따라 81%~95%가 분리배출 되었으며, 가연성폐기물 분리장소의 30 mm 이상 무기폐재류 배출장소를 통해 나머지 9% 이하가 배출되었다. 시험설비개선 전의 경우 55%~60% 정도의 효율을 보인 반면 시험설비 개선 후 30% 이상 분리효율이 상승한 것으로 나타났다.

Table 10. Separation and sorting efficiency

ID		폐기물 성상	분리 전 (kg)	분리 후 (kg)		분리선별 효율 (%)
				계획 장소	이외 장소	
변경전	A1 (0°)	무기폐재류	50	38.0	12.0	76
		폐목재	30	17.0	13.0	57
		가연성폐기물	20	7.4	12.6	37
	A2 (0°)	무기폐재류	50	39.0	11.0	78
		폐목재	20	11.0	9.0	55
		가연성폐기물	30	14.3	15.7	48
	A3 (0°)	무기폐재류	70	57.0	13.0	81
		폐목재	20	12.0	8.0	60
		가연성폐기물	10	4.5	5.5	45
변경후	A1 (0°)	무기폐재류	50	41.6	8.4	83
		폐목재	30	24.2	5.8	81
		가연성폐기물	20	15.8	4.2	79
	A2 (0°)	무기폐재류	50	42.0	8.0	84
		폐목재	20	16.5	3.5	83
		가연성폐기물	30	24.1	5.9	80
	A3 (0°)	무기폐재류	70	61.0	9.0	87
		폐목재	20	17.2	2.8	86
		가연성폐기물	10	8.2.0	1.8	82
	B1 (1.5°)	무기폐재류	50	44.0	6.0	88
		폐목재	30	26.5	3.5	88
		가연성폐기물	20	17.0	3.0	85
	B2 (1.5°)	무기폐재류	50	45.0	5.0	90
		폐목재	20	18.0	2.0	90
		가연성폐기물	30	26.0	4.0	87
	B3 (1.5°)	무기폐재류	70	65.0	5.0	93
		폐목재	20	18.0	2.0	90
		가연성폐기물	10	8.7	1.3	87
	C1 (3°)	무기폐재류	50	41.2	8.8	82
		폐목재	30	24.8	5.2	83
		가연성폐기물	20	16.3	3.7	82
	C2 (3°)	무기폐재류	50	43.2	6.8	86
		폐목재	20	16.7	3.3	84
		가연성폐기물	30	24.3	5.7	81
	C3 (3°)	무기폐재류	70	61.0	9.0	87
		폐목재	20	17.5	2.5	88
		가연성폐기물	10	8.4	1.6	84

가연성폐기물은 시험설비 개선 전 분리배출 장소인 가연성폐기물 분리선별 컨베이어 끝단을 통해 약 40% 정도만 배출이 되었지만, 시험설비 개선 후 79%~92% 정도가 분리배출되었으며, 폐목재 분리장소인 경사 컨베이어와 30 mm 이상 무기폐재류 배출장소를 통해 21%~8% 정도 배출되는 현상이 발생하였다.

시험설비 개선 전과 후의 분리선별 효율 성능을 살펴보면 폐기물의 종류와 상관없이 평균 30% 이상 분리선별 효율이 상승하였으며, 특히 트롬멜 경사각 1.5°일 경우가 그 효율은 가장 높

은 것으로 나타났다. 각 실험은 3회의 반복실험을 통해 평균값을 나타낸 것으로 유사한 경향이 반복되었다.

시험설비 개선 후 트롬멜 내부 폐기물 체류 시간을 측정한 결과 무기폐재류가 차지하는 비율이 높고 가연성폐기물 비율이 작은 경우가 체류 시간이 대체로 짧은 것으로 나타났다. 이는 비교적 밀도가 낮은 가연성폐기물이 트롬멜 내부 불레이드에 의해 분리되어 배출되기까지 시간이 지체되며, 이 양이 많을수록 지체 현상은 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 트롬멜 경사각이 클수록 토출되는 시간은 짧아져 체류 시간 또한 짧아지는 것으로 나타났다.

3. 실물 시험설비 성능평가

3.1 블레이드 종류별 분리효율

(1) 실험계획

시험설비의 가연성폐기물 분리선별 효율평가를 위하여 블레이드 종류 및 장착 개수에 따른 가연성폐기물 분리효율을 <Table 11>과 같은 계획에 따라 평가하였다. 운전조건으로 투입되는 폐기물은 대표적인 성상인 무기성폐재류와 가연성폐기물, 폐목재를 매립지 폐기물 성상과 동일하게 하였으며, 선 실험 결과 효율이 가장 좋은 트롬멜 각도 1.5°로 설정하였다.

블레이드 종류는 봉-타입과 L-타입, 핀-타입으로 구성하였으며 봉-타입과 L-타입 혼합, L-타입과 핀-타입 혼합도 고려하였다, 또한 사용한 블레이드 개수도 크기와 면적을 고려하여 그 수를 달리하여 효율을 검토하였다.

Table 11. Experimental plan for blade efficiency evaluation

ID	실험 인자		측정항목
	블레이드 종류	수	
A1	봉 타입	20	분리선별 효율
A2	봉 타입	32	
A3	봉 타입	44	
B1	L 타입	18	
B2	L 타입	26	
B3	L 타입	34	
C1	핀 타입	20	
C2	핀 타입	32	
C3	핀 타입	44	
D1	봉 타입, L 타입 혼합	32, 26	
D2	봉 타입, L 타입 혼합	40, 26	
E1	L 타입, 핀 타입 혼합	26, 32	
E2	L 타입, 핀 타입 혼합	26, 40	

(2) 평가결과

총 13 수준을 실험한 결과 E1 수준인 L-타입 26개, 핀-타입 32개인 경우가 가연성폐기물 분리선별 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 각 수준별 평가결과를 살펴보면 봉-타입의 경우 트롬멜 회전의 가연성폐기물 상승효율이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 재료 자체의 재질이 매끄럽지 못하고 형상이 원형으로 가연성폐기물을 분리 컨베이어까지 충분히 이송하지 못하였으며, 봉 수에 따른 효율 변화는 없는 것으로 나타났다. L-타입의 경우 3타입 중 가장 효율이 높은 것으로 나타났다.

이는 L-타입에 의해 대상 폐기물을 안정적으로 끌고 올라가 분리 컨베이어에 낙하하는 효율이 높은 것으로 판단된다. 하지만 그 수가 너무 많은 경우, 가연성폐기물뿐만 아니라 무기폐재류와 폐목재도 함께 상승시켜 배출 컨베이어로 이송하는 문제점이 있는 것으로 나타나, L-타입의 적정 사용 개수는 26개 정도가 높은 효율을 나타낼 것으로 판단된다.

핀-타입의 경우 봉-타입과 비교하였을 때 가연성폐기물을 분리 컨베이어까지 상승하는 효율이 높았으며, 이는 재질이 매끄러운 스테인리스 재질로 폐기물 상승 후 낙하 시 원활한 낙하가 이루어지며, 형상 또한 길고 얇은 형태로 가볍고 연한 재질인 가연성폐기물을 상승하는데 더 나은 것으로 판단된다.

2가지 타입조합을 살펴보면 봉-타입과 L-타입 혼합보다 L-타입과 핀-타입 혼합이 분리선별 효율이 더 높은 것으로 나타났으며, 특히 봉-타입 40개, L-타입 26개 조합인 D2의 경우 폐기물 성상과 상관없이 모든 폐기물을 상승시켜 분리배출 컨베이어로 이송하는 문제점이 발생하였다. 상기 실험 결과, 단일 타입의 블레이드를 사용하는 것보다 두 가지 타입의 블레이드를 적정하게 조합하였을 때 분리선별 효율은 높아지는 것으로 나타났으며, 본 시험설비는 L-타입 26개, 핀-타입 32개 조합이 가장 효율이 높은 것으로 관찰되었다.

3.2 경사 컨베이어 형태별 분리효율

(1) 실험계획

본 분리선별 시험설비는 폐목재를 분리하기 위하여 트롬멜 끝단에 경사 컨베이어를 설치 운영하였다. 경사 컨베이어를 이용한 폐목재 분리원리는 트롬멜 내부를 통과한 혼합폐기물 중 30 mm 이하는 트롬멜 하단으로 분리 배출되고 30 mm 이상의 골재와 폐목재는 트롬멜 끝단으로 이동 낙하 후 경사 컨베이어를 통해 비중차에 의해 비교적 무거운 30 mm 이상의 무기폐재류는 하단으로 비교적 가벼운 폐목재는 경사 컨베이어에 의해 상단으로 이송되어 분리되는 원리를 이용하였다.

Table 12. Experimental plan for evaluating the efficiency of conveyors

ID	실험 인자		측정항목
	컨베이어 타입	경사 (°)	
A1	민무늬 타입	30	분리선별 효율
A2		45	
A3		60	
B1	갈매기 요철 타입	30	
B2		45	
B3		60	

따라서, 본 실험에서는 경사 컨베이어에 의한 폐목재 분리선별 효율을 검토하고자 <Table 12>와 같은 실험계획을 수립하여 평가하였다. 운전조건으로 트롬멜 각도는 1.5°로 고정 설정하였다. 경사 컨베이어 종류는 민무늬와 갈매기 요철 타입을 이용했으며, 경사 각도는 30°, 45°, 60° 수준으로 분리선별 효율을 검토하였다.

(2) 평가결과

<Table 13>은 트롬멜 경사 컨베이어 종류와 경사각에 따른 분리선별 효율 결과를 나타낸 것이다. A1～3, B1～3의 총 6 수준을 실험한 결과 B2 수준인 갈매기 요철 타입, 경사각 45°인 경우가 폐목재 분리선별 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 수준별 실험 결과를 살펴보면 민무늬 타입의 경우 경사각이 가장 높은 60°인 경우 효율이 가장 떨어지는 것으로 나타났으며, 컨베이어 유형과 상관없이 경사각 45°가 효율이 가장 높았으며, 60° 경사가 효율이 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

Table 13. Separation efficiency result

폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	A1		A2		A3	
			분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
			kg	%	kg	%	kg	%
무기 폐재류	2,485	71	2,730	78.0	2,636	75.3	2,804	80.1
폐목재	560	16	224	6.4	375	10.7	182	5.2
가연성 폐기물	420	12	546	15.6	490	14.0	515	14.7
기타	35	1	-	0.0	-	0.0	-	0.0
합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	B1		B2		B3	
			분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
			kg	%	kg	%	kg	%
무기 폐재류	2,485	71	2,534	72.4	2,408	68.8	2,569	73.4
폐목재	560	16	434	12.4	574	16.4	413	11.8
가연성 폐기물	420	12	532	15.2	518	14.8	518	14.8
기타	35	1	-	0.0	-	0.0	-	0.0
합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

민무늬 타입의 경우 트롬멜 끝단에서 낙하하는 폐기물이 무기폐재류와 폐목재가 분리되지 않고 혼합 상태로 상단과 하단으로 배출되는 특성을 보였으며, 특히 컨베이어 경사 각도가 큰 경우는 낙하에너지보다 컨베이어 마찰에너지가 더 작아 하단으로 배출이 집중되는 현상을 나타냈다. 갈매기 요철 타입의 경우 분리선별 효율이 높은 것으로 나타났으며, 이는 요철에 의하여 무기폐재류 낙하에너지보단 작고 폐목재 낙하에너지보다는 큰 마찰에너지 생성으로 인하여 비중차에 의한 분리효율이 상승한 것으로 판단된다.

3.3 공정별 분리효율

(1) 실험계획

농촌지역의 신축 또는 해체과정에서 발생하는 혼합건설폐기물의 성상 및 비율이 일정하지 않기 때문에 본 평가실험에서는 일반적인 분리선별 효율평가를 위한 무기성폐재류를 60%, 폐목재는 20%, 가연성폐기물 18%로 하여, 실물 시험설비에 혼합 투입한 후 분리된 전량을 회수하여 각 폐기물 성상별 투입대비 회수율로 평가하였다.

(2) 평가결과

① RPM 2～3의 분리효율

<Table 14>는 트롬멜 RPM 2～3 수준일 때, 분리선별 효율을 나타낸 것이다. 총 10회의 반복실험결과 무기폐재류의 경우 69.2%, 폐목재 16.2%, 가연성폐기물 14.5%의 점유율을 나타내고 있으며, 분리 전 폐기물 성상 점유율과 비교 시 무기폐재류는 약 9.2%, 폐목재 약 3.8%, 가연성폐기물 3.5%의 오차율을 보이는 것으로 나타났다.

Table 14. Separation efficiency (RPM 2~3)

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	1		2		3		4	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A1	무기 폐재류	2,100	60	2,405	68.7	2,422	69.2	2,419	69.1	2,405	68.7
	폐목재	700	20	550	15.7	588	16.8	567	16.2	564	16.1
	가연성 폐기물	630	18	546	15.6	490	14.0	515	14.7	532	15.2
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	5		6		7		8	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A1	무기 폐재류	2,100	60	2,408	68.8	2,412	68.9	2,457	70.2	2,426	69.3
	폐목재	700	20	574	16.4	571	16.3%	550	15.7	564	16.1
	가연성 폐기물	630	18	518	14.8	518	14.8	494	14.1	511	14.6
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	9		10		평균		분리효율 (%)
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	
				kg	%	kg	%	kg	%	
A1	무기 폐재류	2,100	60	2,440	69.7	2,443	69.8	2,423	69.2	86.7
	폐목재	700	20	567	16.2	592	16.9	568	16.2	81.2
	가연성 폐기물	630	18	494	14.1	466	13.3	508	14.5	80.7
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	

② RPM 4～6의 분리효율

<Table 15>는 트롬멜 RPM 4～6 수준일 때, 분리선별 효율을 나타낸 것이다. 총 10회의 반복실험결과 무기폐재류의 경우 65.9%, 폐목재 18.2%, 가연성폐기물 16.0%의 점유율을 나타내

고 있으며, 분리 전 폐기물 성상 점유율과 비교 시 무기폐재류는 약 5.9%, 폐목재 약 1.8%, 가연성폐기물 2.0%의 오차율을 보이는 것으로 나타났다.

Table 15. Separation efficiency (RPM 4~6)

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	1		2		3		4	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A2	무기 폐재류	2,100	60	2,300	65.7	2,268	64.8	2,289	65.4	2,335	66.7
	폐목재	700	20	655	18.7	637	18.2	609	17.4	623	17.8
	가연성 폐기물	630	18	546	15.6	595	17.0	602	17.2	543	15.5
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	5		6		7		8	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A2	무기 폐재류	2,100	60	2,335	66.7	2,359	67.4	2,335	66.7	2,324	66.4
	폐목재	700	20	613	17.5	648	18.5	655	18.7	637	18.2
	가연성 폐기물	630	18	553	15.8	494	14.1	511	14.6	539	15.4
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	9		10		평균		분리효율 (%)
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	
				kg	%	kg	%	kg	%	
A2	무기 폐재류	2,100	60	2,265	64.7	2,244	64.1	2,305	65.9	91.1
	폐목재	700	20	648	18.5	644	18.4	637	18.2	91.0
	가연성 폐기물	630	18	588	16.8	613	17.5	558	16.0	88.6
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	

③ RPM 7~8 분리효율

<Table 16>은 트롬멜 RPM 7~8 수준일 때, 분리선별 효율을 나타낸 것이다. 총 10회의 반복실험결과 무기폐재류의 경우 70.1%, 폐목재 17.0%, 가연성폐기물 12.9%의 점유율을 나타내고 있으며, 분리 전 폐기물 성상 점유율과 비교 시 무기폐재류는 약 10%, 폐목재 약 3.0%, 가연성폐기물 5.1%의 오차율을 보이는 것으로 나타났다.

4. 결 론

농촌지역에서 중·소규모로 발생하는 혼합건설폐기물의 효율적인 재활용을 위한 이동식 분리선별기의 최종 제작 및 분리선별 효율평가에 대한 실험적 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 직경 1,500 mm, 길이 2,400 mm인 분리기의 블레이드 종류별 분리효율 평가결과, L-타입 26개, 핀-타입 32개인 경우와 L-타입과 핀-타입을 조합한 장치가 폐기물 선별 효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

Table 16. Separation efficiency (RPM 7~8)

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	1		2		3		4	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A3	무기폐 재류	2,100	60	2,443	69.8	2,447	69.9	2,492	71.2	2,496	71.3
	폐목재	700	20	585	16.7	578	16.5	588	16.8	602	17.2
	가연성 폐기물	630	18	473	13.5	476	13.6	420	12.0	403	11.5
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	5		6		7		8	
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율
				kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
A3	무기폐 재류	2,100	60	2,524	72.1	2,384	68.1	2,391	68.3	2,443	69.8
	폐목재	700	20	623	17.8	613	17.5	609	17.4	567	16.2
	가연성 폐기물	630	18	354	10.1	504	14.4	501	14.3	490	14.0
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0

ID	폐기물 성상	분리전 (kg)	비율 (%)	9		10		평균		분리효율(%)
				분리량	분리율	분리량	분리율	분리량	분리율	
				kg	%	kg	%	kg	%	
A3	무기폐 재류	2,100	60	2,419	69.1	2,492	71.2	2,453	70.1	85.6
	폐목재	700	20	588	16.8	592	16.9	594	17.0	84.9
	가연성 폐기물	630	18	494	14.1	417	11.9	453	12.9	71.9
	기타	70	2	-	0.0	-	0.0	-	0.0	0.0
	합계	3,500	100	3,500	100.0	3,500	100.0	3,500	100.0	

2) 트롬멜 컨베이어 종류와 경사각에 따른 선별성능평가 결과, 갈매기 요철 타입에 경사각 45°인 경우가 폐목재 분리선별 효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

3) 공정별 분리효율을 평가한 결과에서는 RPM 2~3 수준에서 무기폐재류 65.9%, 폐목재 18.2%, 가연성폐기물 16.0%로 투입 전 해체현장 발생 폐기물 성상과의 오차율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김병윤, 박지선, 농촌지역 혼합건설폐기물의 중·소규모 배출현장용 이동식 분리선별기 개발을 위한 기초연구, 한국농촌건축학회논문집, 21(3), 2019.
2. 송태협, 박지선, 혼합건설폐기물의 단일 공정 분리·선별 장치 개발 및 성능평가, 한국건설순환자원학회논문집, 4(4), 2016.
3. 송태협, 이세현, 박지선, 건축물 분리 해체 도입방안 마련 연구, 환경부, 2012.
4. 환경신기술정보시스템, https://www.koetv.or.kr/home/index.do

접 수 일 자 : 2020. 12. 02
초 심 완 료 일 자 : 2021. 02. 03
게 재 확 정 일 자 : 2021. 02. 20