

폐기물 관리시설 설계를 위한 재활용성 생활폐기물의 겉보기밀도 평가에 관한 연구

§김병태 · 김명운 · 이창해
대전대학교 에너지환경공학부

Estimation of the Bulk Density for Recyclable Residential Wastes

§Byung-Tae Kim, Myeong-Woon Kim and Chang-Hae Lee

Division of Energy and Environmental Engineering, Daejin University, Kyunggi-do, 11159, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 생활폐기물 내 재활용성 물질을 대상으로 선별품목별 겉보기밀도와 조성비로 산정한 혼합폐기물의 겉보기밀도치를 평가함으로써 재활용성 폐기물의 관리 및 시설설계에 활용할 수 있도록 겉보기밀도에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다. 4회에 걸쳐 선별장에 반입된 1,800 kg의 재활용성 폐기물을 대상으로 선별품목별 중량 및 부피조성비, 선별 전·후의 겉보기밀도를 조사하였다. 선별품목별 겉보기밀도는 병류가 379.0 kg/m³로 가장 높았으며, 고철류, 잡쓰레기, 기타, 캔류, 플라스틱류의 순으로 나타났다. 또한 선별품목별 조성비는 중량기준으로는 병류와 플라스틱류가 40.6%, 32.6%를 차지하였으나 부피기준 적용 시 플라스틱류는 60.2%로 대폭 증가하는 반면에 병류는 8.9%로 크게 낮아져 조성비 적용방식에 따라 품목별 조성비의 변동폭이 다르게 나타났다. 또한 재활용성 혼합폐기물의 겉보기밀도는 조성비를 부피기준으로 적용하는 방식이 중량기준 적용방식보다 실측치에 유사하게 나타났다. 이러한 조사결과를 바탕으로 폐기물 처리설비 설계에 사용되는 재활용성 혼합폐기물의 겉보기밀도 산정 시에는 부피기준 조성비를 적용하는 방식이 적절한 것으로 평가되었다.

주제어 : 겉보기밀도, 조성비, 재활용성 폐기물, 생활폐기물, 선별과정

Abstract

To estimate the bulk density applying the composition rate for recyclable residential waste, the composition rates by volume and weight basis, the bulk densities of the separated and commingled wastes were investigated four times respectively for recyclable waste of 1,800 kg transported to waste recovery facility. The bulk densities for separated wastes were 379.0 kg/m³ of glass bottles that is highest and metals, residues, others, cans, plastics in order. The composition rates for each separated waste were changed widely depending on either volume basis or weight basis. The composition rate by weight basis as 40.6% of the glass bottles, 32.6% of the plastics were changed to 60.2% of the plastics and 8.9% of the glass bottles in that by volume basis. The bulk density of the commingled wastes applying the composition rate by volume basis showed the similar value to the measured density than by weight basis. So it was estimated that the composition rate by volume basis was appropriate for determining the bulk density of the commingled recyclable wastes.

Key words : bulk density, composition rate, recyclable waste, residential waste, separation process

· Received : November 16, 2017 · Revised : November 29, 2017 · Accepted : December 5, 2017

§ Corresponding Author : Byung Tae Kim (E-mail : btkim@daejin.ac.kr)

Division of Energy and Environmental Engineering, Daejin University, Hoguk-ro 1007, Pocheon-si, Kyunggi-do, 11159, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. 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. 서 론

밀도는 폐기물의 특성을 판별하기에 유용한 물리적 지표로서, 폐기물의 수집·운반과정에서 보관함 및 수거 차량의 적재량 산정, 선별·파쇄 및 처리설비 설계 등 폐기물흐름과 관련된 다양한 분야에 사용되어지는 중요한 인자이다.

밀도는 단위부피당 질량으로 정의되며, 걸보기밀도는 재료물질의 성상, 보관상태 및 저장기간, 압밀정도, 운반조건 등의 인위적 요인과 계절적 요인 등에 따라 밀도치가 변화한다. 또한 걸보기밀도는 측정방법에 따라 서로 다르게 나타나므로 걸보기밀도 측정 시에는 측정과정 전반에 대한 일관된 통일성이 요구된다. 밀도 측정방법에 대하여 우리나라의 폐기물공정시험기준¹⁾에는 밀도측정에 관한 시험항목이 없으며, 건설분야에서는 골재^{2,4)}, 흙^{5,6)}, 광산분야에서는 석탄⁷⁾ 등의 밀도 측정방법이 있으나 이들 재료는 균질의 단일물질을 대상으로 하고 있어 폐기물과 같이 이종의 복합물질에 적용하기는 어려운 측면이 있다. ASTM⁸⁾에서 폐기물의 걸보기밀도 측정방법을 제시하고 있으나 파손되거나 형태가 변하기 쉬운 재활용성 폐기물에 그대로 적용하기에는 곤란한 점이 있다.

우리나라의 경우 선별장에 반입되는 선별품목 및 혼합폐기물의 걸보기밀도에 대한 연구자료가 부족하여 폐기물시설 설계업체에서는 소규모로 자체 측정하거나 외국의 문헌자료⁹⁾를 주로 이용하고 있는 실정이다. 그러나 측정자료 또는 인용자료에 대한 낮은 신뢰도 및 걸보기밀도 산정방식 오류 등으로 설계시설의 처리용량 부족에 따른 분쟁이 일어나기도 한다. 따라서 폐기물설비의 기본설계 또는 실시설계 시 걸보기밀도를 사용하기 위하여는 이의 산정과정 및 적용방식에 대한 표준화 작업이 필요하다. 본 연구에서는 선별장에 반입되는 재활용성 생활폐기물을 대상으로 선별품목 및 혼합폐기물의 걸보기밀도를 실측하고 또한 선별품목 조성비를 기반으로 산정된 혼합폐기물의 걸보기밀도치를 평가함으로써 재활용성 폐기물의 관리 및 시설 설계계원으로 활용될 수 있도록 걸보기밀도에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 재활용성 폐기물의 선별방법

서울시에 위치한 B선별장에 진입한 재활용성 생활폐

Table 1. Classification of recyclable residential wastes loaded in collection truck

Classification	Properties
Plastics	Plastics except styrofoam
Cans	Including metal cans and aluminum cans
Glass bottles	All kinds of glass bottles
Metals	Metal materials except cans
Styrofoam	Non-recyclable styrofoam
Others	Other materials as textile, rubbers and leathers, etc. except for classification
Residues	Residues after separation process

기물 수거차량을 임의로 선정하여 적재폐기물을 모두 하차한 후에 Table 1의 선별품목별로 전량을 수선별하였다.

본 연구에서의 선별품목은 가정에서 배출되어 선별장에 반입된 생활폐기물 중 재활용이 가능한 품목을 중심으로 플라스틱류, 캔류, 병류, 고철류, 스티로폼(이물질이 포함되어 있거나 파손되어 재활용이 불가능한 스티로폼), 기타류, 잡쓰레기로 나누었다. 선별작업으로의 이송설비인 컨베이어(Conveyor)에 투입되기 전에 제거되는 양호한 성상의 스티로폼은 제외하였다. 이러한 조사는 일자를 달리하여 4회에 걸쳐 실시되었으며, 실측된 재활용성 생활폐기물의 총 중량은 1,800 kg이었다.

2.2. 선별품목별 걸보기밀도 측정방법

선별품목별 걸보기밀도는 사전에 부피와 무게가 실측된 용기에 선별품목을 용기 용적의 3/4 정도 채우고 균일한 압밀을 위하여 용기를 좌우로 20 cm 정도로 3회 흔든 후 용기 상단면까지 대상품목을 채워 선별품목별 중량을 측정하였다.

2.3. 차량을 이용한 혼합폐기물의 걸보기밀도 측정방법

품목별로 걸보기밀도를 측정한 폐기물은 차량무게가 사전 계측된 수거차량 적재함에 고르게 혼합하여 상차하고 현장여건과 유사하게 균일한 적재가 되도록 수거차량을 4 km 도로 주행한 후에 적재부피와 차량중량을 계측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 선별품목별 걸보기밀도

Table 2. Measured bulk densities of the recyclable wastes.

Classification	Bulk density (kg/m ³)				
	Average	Field survey no.			
		1	2	3	4
Plastics	43.6	38.4	49.0	40.2	46.7
Cans	74.6	79.0	82.3	60.6	76.6
Glass bottles	379.0	358.3	376.5	389.3	391.8
Metals	172.3	-	-	172.3	-
Styrofoam	8.2	7.4	7.3	9.9	8.2
Others	120.3	68.2	110.5	193.9	108.6
Residues	145.2	141.7	136.1	178.1	124.7

4회에 걸쳐 조사된 선별품목별 평균 겉보기밀도는 Table 2와 같이 병류가 379.0 kg/m³로 가장 높고 고철류가 172.3 kg/m³, 잡쓰레기와 기타품목이 각각 145.2 kg/m³, 120.3 kg/m³의 순으로 나타났으며, 캔류와 플라스틱류는 74.6 kg/m³, 43.6 kg/m³의 낮은 겉보기밀도를 나타내었다. 이러한 결과는 국내 측정자료¹⁰⁾의 플라스틱류 36 kg/m³, 캔류 53 kg/m³, 병류 364 kg/m³와 비교하면 모든 품목에서 높게 나타났으며 이는 조사 방법 및 실측과정에서의 압밀정도에 따른 차이에 기인한다고 여겨진다.

또한, Table 3에서 평균밀도 대비 최대와 최소밀도 간의 변동폭을 비교하면 겉보기밀도가 가장 높은 병류는 8.8%에 불과하나 플라스틱류, 캔류, 스티로폼, 잡쓰레기류는 24.4%~36.7%로 점차 넓어지고, 기타류는 104.4%의 높은 변동폭을 보여주고 있다. 이에 따라 선별품목별 변이계수(coefficient of variation)는 병류가

4.0%로 가장 낮으며, 플라스틱류, 캔류, 스티로폼, 잡쓰레기류는 12.9%~15.9%, 기타류는 43.9%를 나타내고 있다. 이는 반입되는 선별품목별 재질과 규격화 여부의 정도에 따라 겉보기밀도 변동폭이 다르게 나타남을 보여주고 있다. 즉 병류와 같이 재질이 동일하고 규격이 일정한 품목들은 적재 시 형태 변형이 없고 압밀이 발생하지 않아 겉보기밀도의 변동폭이 크지 않은 반면에, 플라스틱류와 캔류는 재질과 규격이 비교적 다양하여 적재 시 품목 간 공간이 넓어지고 또한 적재 방식에 따라 형태 변형과 압밀현상이 발생하기 쉬우며 특히 기타품목은 해당 품목의 종류, 재질 및 규격 등이 워낙 상이하여 겉보기밀도가 크게 달라지기 때문이라 여겨진다.

3.2. 선별품목별 조성비

재활용성 폐기물의 선별품목별 조성비율은 전체 배출 중량을 기준으로 하는 중량조성비와 전체 부피를 기준으로 하는 부피조성비로 나눌 수 있다.

4회에 걸쳐 측정된 선별품목별 평균조성비는 Fig. 1에서와 같이 중량기준과 부피기준에 따라 크게 달라지고 있다. 중량기준 조성비의 경우 병류와 플라스틱류가 각각 40.6%, 32.6%로 전체 중량의 73.2%를 차지한다. 이를 부피기준 조성비로 환산하면 플라스틱류는 60.2%를 차지할 정도로 높아지나 병류는 8.9%로 낮아지고 있다. 이는 선별품목별 물리적 특성에 따른 영향으로, 무겁지는 않으나 부피를 많이 차지하는 플라스틱류, 스티로폼 등의 부피기준 조성비가 중량기준에 비하여 높아지게 됨에 따라 겉보기밀도가 높고 부피 변화가 크지 않은 병류의 부피기준 조성비는 상대적으로 낮아지고 있다.

Table 3. Variation ranges of bulk densities of the recyclable wastes.

Classification	Bulk density (kg/m ³)		Variation range (%) ((max.-min.)/(A))	Coefficient of variation
	Average (A)	Measured range		
Plastics	43.6	38.4~49.0	24.4%	11.7%
Cans	74.6	60.6~82.3	29.1%	12.9%
Glass bottles	379.0	358.3~391.8	8.8%	4.0%
Metals	172.3	-	-	-
Styrofoam	8.2	7.3~9.9	32.0%	14.7%
Others	120.3	68.2~193.9	104.4%	43.9%
Residues	145.2	124.7~178.1	36.7%	15.9%

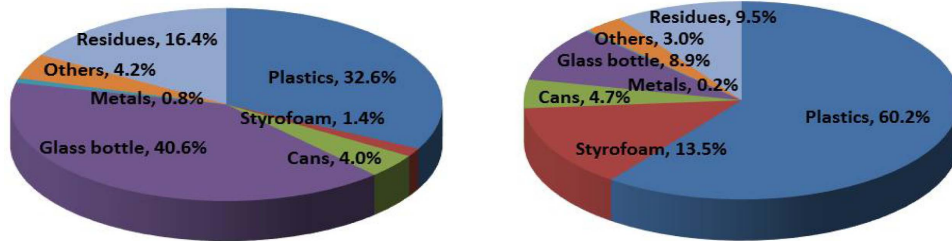


Fig. 1. Composition rate of recyclable wastes by weight and volume basis.

3.3. 혼합폐기물의 겉보기밀도

혼합폐기물의 겉보기밀도는 1) 선별된 품목들을 혼합·적재하여 현장 측정하는 방식과 2) 선별품목별 조성비율과 겉보기밀도를 이용하여 산정하는 방식으로 구분할 수 있다.

3.3.1. 차량적재를 이용한 혼합폐기물 겉보기밀도 실측

Table 4에서 선별장으로 반입되어 선별된 품목들을 차량에 모두 적재하고 4 km 도로 주행 후에 측정된 혼합폐기물의 평균 겉보기밀도는 91.5 kg/m³로 나타났다. 현장 조사된 겉보기밀도의 측정범위는 65.9~115.7 kg/m³로서 비교적 변동폭이 크게 나타났으며 이는 겉보기밀도가 품목별 조성비와 적재 및 주행과정에서의 압밀현상 등에 의하여 달라질 수 있음을 보여주고 있다.

3.3.2. 선별품목별 조성비를 이용한 혼합폐기물 겉보기밀도 산정

현장에서의 혼합폐기물 겉보기밀도 측정이 어려운 경우에는 각각의 선별품목별로 조성비율과 겉보기밀도를

곱하고 이를 합산함으로써 혼합 겉보기밀도를 산정할 수 있으며, 이 과정에서 선별품목별 조성비는 중량기준 또는 부피기준 조성비를 적용할 수 있다. 4회에 걸쳐 산정된 혼합폐기물의 겉보기밀도는 선별품목의 조성비 적용방식에 따라 커다란 차이를 보여, 중량기준 혼합폐기물의 평균 겉보기밀도는 201.8 kg/m³로서 부피기준 시의 82.2 kg/m³에 비하여 245%나 높은 겉보기밀도를 나타내고 있다.

3.3.3. 산정방법별 혼합폐기물의 겉보기밀도 평가

현장에서 실측한 혼합폐기물 겉보기밀도 91.5 kg/m³와 조성비 적용방법별 겉보기밀도를 비교하면 Fig. 2에서와 같이 부피기준 조성비를 적용한 겉보기밀도 82.2 kg/m³가 중량기준 겉보기밀도 201.8 kg/m³에 비하여 실측치에 유사한 겉보기밀도임을 나타내고 있다. 또한 혼합 겉보기밀도 변동범위는 부피기준 적용방식이 중량

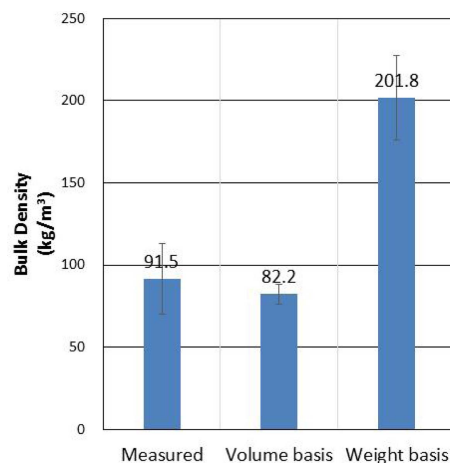


Fig. 2. Comparison of the bulk densities for mixed recyclable wastes.

Table 4. Bulk densities for mixed recyclable wastes by determination method.

Determination method	Bulk density(kg/m ³)				
	Average	Field survey no.			
		1	2	3	4
Measured by collection truck	91.5 (21.4)	100.5	65.9	115.7	84.0
Weight basis	201.8 (25.6)	195.1	172.8	234.6	204.7
Volume basis	82.2 (6.0)	80.3	75.7	90.1	82.8

(): Standard deviation

기준 적용방식보다 낮아 상대적으로 안정적인 겉보기밀도 산정방식임을 보여주고 있다.

이러한 평가결과를 바탕으로 혼합폐기물의 겉보기밀도 산정 시의 조성비는 폐기물 종류별 성상을 고려하여 선별적으로 적용되어야 함을 알 수 있다. 즉, 중량기준 조성비는 적재 시 폐기물 내부 및 폐기물 간의 공간이 적거나 압축되어 있는 폐기물에 적용되어야 하며, 폐기물 내부에 빈 공간이 많거나 중량에 비하여 상대적으로 부피가 큰 병류, 캔류, 플라스틱류 등의 재활용성 폐기물에는 부피기준 조성비가 적용되어야 할 것이다.

4. 결 론

폐기물관리 및 시설설계에 필요한 기초제원으로서의 겉보기밀도를 산정하기 위하여 선별장에 반입되는 재활용성 생활폐기물을 대상으로 선별품목별 조성비와 겉보기밀도를 실측하고 조성비 적용방식에 따른 혼합밀도치를 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 선별품목별 평균 겉보기밀도는 병류가 379.0 kg/m³로 가장 높고 고철류, 잡쓰레기와 기타품목 등이 120.3~172.3 kg/m³, 캔류와 플라스틱류는 74.6 kg/m³, 43.6 kg/m³으로 조사되었다.

2. 겉보기밀도의 변동폭은 선별품목별 재질과 규격정도에 따라 달라지고 있어, 선별품목별 변이계수(coefficient of variation)는 병류가 4.0%로 가장 낮으며, 플라스틱류, 캔류, 스티로폼, 잡쓰레기류는 12.9~15.9%, 기타류 43.9%의 순으로 높아지고 있다.

3. 선별품목별 조성비는 품목별 물리적 특성에 따라 다르게 나타나고 있다. 병류와 플라스틱류의 중량기준 조성비는 각각 40.6%, 32.6%로 전체중량의 73.2%를 차지하나 부피기준 조성비로 환산하면 플라스틱류가 전체부피의 60.2%를 차지할 정도로 높아지며 병류는 8.9%로 낮아지고 있다.

4. 현장에서 실측한 혼합폐기물 겉보기밀도와 비교하여 부피기준 조성비를 적용한 방식의 겉보기밀도가 중량기준 적용방식에 비하여 실측치에 유사하였으며 또한 낮은 변동범위를 나타내 상대적으로 안정적인 겉보기밀도 산정방식임을 보여주고 있다.

5. 이러한 조사결과를 바탕으로 혼합폐기물의 겉보기밀도 산정 시 조성비를 적용하기 위하여는 폐기물 품목별 성상이 고려되어야 하며, 재활용성 생활폐기물에는

부피기준 조성비를 적용하는 것이 적절하다고 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

References

1. National Institute of Environmental Research, 2017 : Korean standard methods for the examination of waste.
2. Korean Standards Association, 2014 : KS F 2503, Standard test method for density and absorption of coarse aggregate.
3. Korean Standards Association, 2014 : KS F 2504, Standard test method for density and absorption of fine aggregate.
4. H. S. Kim, J. Y. Lim and J. H. Kim, 2017 : Change of sea sand density by washing, J. of Korean Inst. of Resource of Recycling, 26(2), pp.66-70.
5. Korean Standards Association, 2016 : KS F 2311, Test method for soil density by the sand replacement method.
6. Korean Standards Association, 2014 : KS F 2593, Standard test method for moisture density of soil.
7. Korean Standards Association, 2014 : KS E ISO 5072, Brown coals and lignites-Determination of true relative density and apparent relative density.
8. ASTM, 2009 : E1109-86, Standard test method for determining the bulk density of solid waste fractions.
9. G. Tchobanoglous, H. Theisen and S. A. Vigil, 1993 : Integrated solid waste management, pp.70-71, Mc-Graw Hill.
10. Kangnam-Gu, 2010 : Report on the basic and working design for Kangnam environmental resource center, p.91.



김 병 태

- 서울대학교 대학원 환경계획학과 박사
- 현재 대전대학교 에너지환경공학부 교수



김 명 운

- 서울대학교 대학원 미생물학과 박사
- 현재 대진대학교 에너지환경공학부 교수



이 창 해

- 한양대학교 대학원 토목공학과 박사
- 현재 대진대학교 에너지환경공학부 교수

공 지 사 항

- 항상 본 학회에 관심을 가지고 참여해주셔서 감사합니다. 그간 한국자원리사이클링학회는 회원 여러분의 참여와 활동으로 많은 발전을 하였습니다.
- 당 학회에서는 국문학회지 “資源리사이클링”에 게재되는 원고에 대해 20부의 별쇄를 제작하여 우편으로 보내드렸습니다. 그러나 ‘온라인투고시스템’ 및 출판환경의 변화로 별쇄가 필요하지 않은 상황이 되었으며, 모든 원고는 pdf 파일로 관리가 가능한 시스템이 갖춰졌습니다.
- 이에 당 학회에서는 편집위원회와 이사회의 논의를 거쳐 ‘별쇄 20부’의 인쇄물을 저자분들께 제공하지 않는 것으로 결정하였습니다. 학회지 제27권 1호(2018년 2월 발간)에 게재되는 원고부터는 별쇄를 제공하지 않고, pdf 파일로 보내드릴 예정입니다. 다만, 저자의 요청이 있을 경우 제작이 가능합니다.
- 별쇄 인쇄는 학회지가 발행되는 짝수월(2,4,6,8,10,12월) 20일 전까지 요청하시면 인쇄가 가능합니다.
- 별쇄 인쇄비는 기본 20부/20,000원, 추가 10부당/10,000원씩 추가되며 원고게재료와 함께 청구합니다.
- 당 학회에서 발간하는 국문학회지 “資源리사이클링”은 한국연구재단의 등재학술지로 1992년 창간호를 시작으로 25년이 넘는 학회의 역사와 함께한 학회지입니다. 회원여러분의 많은 관심과 투고를 부탁드립니다.
- 원고의 투고는 당 학회의 홈페이지 <http://www.kirr.or.kr> 또는 <https://kirr.jams.or.kr> 에 회원가 입을 하시고 투고하여 주시면 됩니다.
- 연락처 : 한국자원리사이클링학회 사무국
전화 02-3453-3541~2, 팩스 3453-3540, E-mail : kirr@kirr.or.kr, <http://www.kirr.or.kr>