시멘트 제조에 사용되는 선별된 폐플라스틱 폐기물류 원료로서의 기초 특성 평가

§한종민* · 강봉희** · 박재용* · 이정욱* · 김남규*

*한국건설생활환경시험연구원, **아세아시멘트 기술연구소

The Foundation Performance of Selected Waste Plastic Wastes Used in Cement Manufacturing

§Jong-Min Han*, Bong-Hee Kang**, Jae-Yong Park*, Jeong-Wook Lee* and Nam-Gyu Kim*

*Incheon & Gyeonggi Branch, Korea Conformity Lab., Incheon, Gyeonggi-do, 21591, Korea

**R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, Chungcheongbuk-do, 27125, Korea

요 약

본 연구는 시멘트 소성 공정에 사용되는 선별된 폐플라스틱 폐기물류를 선별 및 파분쇄 공정을 거쳐 2종으로 분류하여 그에 따른 각각의 특성을 분석하고, 이를 기반으로 시멘트 소성 후의 강도에 대한 상관관계를 분석한 연구이다. 실험 변수로는 연질과 경질 폐플라스틱 폐기물로 분류하였으며 그에 따른 발열량, 염소, 수분 등의 상관관계를 분석하였다. 또한 각 폐기물 중 일부를 채취하여 용융시킨 후 조직 및 발열량을 분석하여 기초 특성을 평가하였다. 실험 결과 시멘트 소성에 사용되기 위해서는 연질 폐플라스틱 폐기물류 분리시키고 그 중 유사한 특성을 갖는 소재로 소성하는 것이 열원을 얻기에 적합한 것으로 평가되었다. 시멘트 소성 후의 강도별로 폐기물류에 대해 검토한 결과 경질 플라스틱류의 사용은 1일 및 28일 압축강도에 크게 기여하며, 연질 플라스틱류의 사용은 28일 압축강도에 기여하는 것으로 분석되었다. 그러나 이런 특성들은 폐기물을 일부만 채취하여 평가한 것으로 폐기물의 편차가 발생하기에 지속적인 관리가 필요하며 폐기물의 사용에 따른 환경적 문제에 대한 후속 연구가 요구된다.

주제어 : 선별, 시멘트 소성, 폐플라스틱, 폐기물류, 연질, 경질, 발열량

Abstract

In this study, the selected waste plastic waste logistics used for cement sintering were classified into two types through the process of sorting and crushing, analyzing the characteristics of each, and analyzing the correlation of the strength after cement manufacturing. The experimental variables were classified into soft and hard waste plastic waste, and the correlations between calorific value, chlorine, and moisture were analyzed. In addition, some of each waste was selected and melted, and the basic characteristics were evaluated by analyzing the structure and calorific value. The results of the experiment showed that it was evaluated that it is suitable to obtain a heat source by separating soft waste plastic wastes and sintering them with materials having similar properties. As a result of examining the wastes by strength after cement manufacturing, it was analyzed that the use of hard plastics greatly contributes to the compressive strength on the 1st and 28th, and the use of soft plastics contributes to the compressive strength on the 28th. However, these characteristics are evaluated by collecting only a part of the waste, and since the deviation of the waste occurs, continuous management is required, and a follow-up study on the environmental problems caused by the use of waste is required.

Key words : Sorting, cement sintering, waste plastic, waste, soft, hard, calorific value

· Received : November 17, 2020 · Revised : December 9, 2020 · Accepted : December 16, 2020

§ Corresponding Author : Jong-Min Han (E-mail : jmhan@kcl.re.kr)

Joongbu Business Division Incheon & Gyeonggi Branch, Korea Conformity Laboratories, 85, Dambang-ro, Namdong-gu, Incheon 21591, 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

폐기물은 가연성 폐기물과 불연성 폐기물로 분류할 수 있으며, 가연성 폐기물 중 큰 비중을 차지하는 폐기물은 페플라스틱이다. 국내 페플라스틱은 발생량은 2011년 약 506만 톤에서 2015년 약 691만톤으로 증가 추세이며, 다른 가연성 폐기물에 비해서도 발생량이 증가하고 있다. 가연성 폐기물 발생량이 2011년에 비해 2015년 약 19% 증가한 것과 비교하여 페플라스틱 발생량은 동일 기간 약 36% 증가하고 있다¹⁾.

페플라스틱을 처리할 수 있는 방법은 재활용, 소각, 매립이며 재활용 > 소각 > 매립 순으로 처리되고 있다. 재활용은 2011년 52%에서 2015년 60%로 증가하였으나, 소각은 2011년 41%에서 2015년 35%로 감소하였다. 이는 가연성 폐기물 소각처리를 감소시키고 재활용을 증가시키고자 하는 정책 취지 때문이다. 그러나 이런 재활용에 집중한 결과 문제점이 발생하였으며, 그중 가장 큰 문제점인 수출이나 처리업체에서의 불법 매립이 재활용으로 보고되고 있다²⁾. 이런 문제를 해결하기 위해 소각에 집중하는 것으로 한다.

소각은 페플라스틱을 포함한 가연성 폐기물을 소각시설에서 태우는 것으로, 오염물질 배출의 방지를 위해 저감시설 등을 설치하고 있고, 소각로에서 발생하는 열을 에너지원으로 이용된다. 재활용 중 에너지 재활용의 한 방법인 고형연료(SRF: Solid Recovered Fuel)는 페플라스틱을 포함한 가연성 폐기물을 전처리 과정을 거쳐 오염물질을 제거하고 일정한 열량을 가질 수 있도록 하여 산업체 등에서 열원으로 사용된다. 또한 불법 폐기물에 관련하여 환경부(장관 조명래)는 2019년 1월 전수조사로 확인된 전국 불법폐기물 120만 3천 톤 중 7월 말 기준으로 원인자 처리 등을 통해 55만 톤(45.7%)이 처리되고 있다. 이는 지난 2월 21일 정부가 발표한 ‘불법폐기물 관리 강화 대책’에 따른 2019년 처리목표 49만 6천 톤을 이미 초과한 성과이다³⁾.

환경부는 2월 21일 대책에 따라 당초 2022년까지 불법폐기물을 처리할 계획이었으나, 대책 발표 이후 조속히 처리해달라는 지역민원의 급증 해결을 비롯해 국민 불편 최소화 및 2차 환경피해 예방 등을 위해 당초 계획보다 3년이나 앞당겨 올해 말까지 전량 처리할 계획으로 제시하고 있다. 그러나 이런 계획에도 불구하고 불법 폐기물 처

Fig. 1. Shape of waste plastic.

리방법이 현재까지도 명확하게 제시되지 못하고 있다³⁾.

시멘트 산업은 페비닐류, 페플라스틱류, 폐고무류 등 다양한 산업부산물 및 생활폐기물을 대체연료로 사용함으로써 자원순환에 기여하고 있다. 특히 시멘트 제조과정 중 소성 공정에 사용되는 폐기물은 페플라스틱류, 재생연료유, 폐합성 고무 등이다. 특히, 생활폐기물을 직접 취급(선별, 파쇄 등)하는 것으로 Fig. 1과 같이 페플라스틱도 성상에 따라 단단한 재질의 경질 플라스틱(PP, PET 등)과 부드러운 재질의 연질 플라스틱(비닐류 등)으로 구분하여 소성 공정에 투입되고 있다⁴⁾. 제조공정은 유연탄 등 많은 양의 연료를 사용해 석회석을 1450°C의 고온으로 가열하는 것이 핵심으로, 폐기물을 자원으로 재활용하는 것은 사회적, 환경적으로 매우 큰 효과를 갖는다. 특히, 시멘트는 1450°C에 이르는 높은 온도로 원료를 구워내는 과정을 반드시 거쳐야 하기 때문에 단순 소각처리 시 우려되는 다이옥신 등 유해물질이 대부분 분해된다. 시멘트에서 재활용할 수 있는 폐기물은 크게 원료 및 연료로 구분되며, 원료로는 지정부산물(철강슬래그, 석탄재 등), 석탄재, 폐주물사, 도자기 조각, 오폐수 등이며 연료로 재활용되는 것으로는 폐타이어, 폐목재, 폐합성수지, RDF, RPF, 재생연료유 등이 있다. 한국리사이클링학회에서 발표한 “순환자원 처리방법에 따른 LCA 비교”(2016년) 연구결과에 따르면, 시멘트업계에서 시멘트 1톤을 생산할 때 유연탄 대신 폐타이어 등 폐기물을 연료로 사용함으로써 약 16kg의 유연탄을 대체하고 순수 저감량 기준 약 9kg, 국가 전체적인 측면에서 약 41kg의 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있으며, 이를 연간으로 환산할 경우 약 79만톤의 유연탄 절약과 순저감 기준 약 43만톤의 이산화탄소 배출이 저감효과가 있다⁵⁻⁹⁾.

이에 본 연구에서는 시멘트 소성에 사용되는 생활 폐기물 중 페플라스틱 폐기물을 시멘트 소성에 맞게 비중별로

분류하여 각각에 대한 발열 및 염소, 열량, 수분 등을 검토하는 것으로 하였다. 폐기물에 대한 수분이 많을 경우에는 발열에 영향을 미칠 수 있으며 특히 소성 온도를 저하하기 때문에 천연 연료를 사용을 증가시키는 요소가 될 것으로 예측되어 수분에 대한 검토를 실시하였다. 염소는 시멘트 제조 후 시멘트의 품질에 대한 팽창, 균열 등을 발생시킬 수 있고 폐기물이 생활 폐기물로 음식 등을 보관하던 폐기물도 존재하기에 이에 대한 분석을 실시하였다. 또한 폐플라스틱의 종류에 대한 시멘트를 생산하여 시멘트의 강도에 미치는 영향도 검토하였다. 이런 영향에 대해 검토하는 것은 추후 폐기물을 소성 원료로 사용할 경우 시멘트의 품질에 영향을 줄 수 있기에 시멘트의 강도에 대해 검토하고 추후에는 클링커 광물에 미치는 요인에 대한 분석하는 것으로 한다. 이상의 내용을 기반으로 생활 폐기물을 시멘트 소성에 사용될 수 있는 연료로서의 기초 연구자료로 제시하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험의 시멘트 제조 공정에 사용되는 생활 폐기물 중 폐플라스틱 폐기물류는 선별된 폐플라스틱과 비선별된 폐플라스틱으로 구별할 수 있으며 주로 선별과정을 거쳐서 활용하게 되고 비선별의 경우 폐기물은 대형, 고중량 이물질이 혼입되어있어 활용도가 많이 감소된다. 또한 연질 플라스틱과 경질 플라스틱으로 구분하며 시멘트 제조에 사용되는 폐플라스틱은 다양한 크기와 형태를 갖고 특히 재활용 업체에서 선정된 것이 사용되고 있다. 이런 폐플라스틱 폐기물류를 자력 및 풍력 선별, 파쇄 공정 등을 거쳐 2종으로 분류한다. 2종은 연질 플라스틱 폐기물류로 비중 0.5g/cm^3 의 크기 30mm 이하를 갖는 것을 의미하며 경질 플라스틱 폐기물류는 크기 50mm 이하의 크기로 불연소 회분이 10wt%이하를 의미한다¹⁰⁾. 본 실험에서 사용된 샘플은 재활용 업체에서 받은 샘플의 원재료인 연질, 경질 폐플라스틱과 용융과정을 거친 연질 경질 폐플라스틱을 활용하여 시험에 필요한 샘플을 확보하였다.

2.2. 실험계획 및 방법

2.2.1. 실험계획

폐플라스틱 폐기물류의 연질과 경질로 분류하며 각각

의 성상별에 따른 발열량과 열적 거동, 염소, 발열량, 수분 분석 등을 분석하였으며 그 중 일부의 분광 분석 및 조직을 분석하였다. 이상의 실험계획은 Table 1과 같다.

2.2.2. 시험 개요

폐기물류의 발열량은 Fig. 2의 자동 발열량 측정기를 이용하였으며 시료 준비는 Fig. 3과 같이 준비하였다.

또한 열적거동 분석은 Fig. 4의 시차주사열량계(Heat flux type DSC)를 사용하며, DSC 측정에 사용된 샘플은 Fig. 5와 같이 각각의 폐플라스틱을 용융한 샘플과 용융

Table 1. The experimental plan

Factor	Test items
Soft waste plastic	Shape of waste Calorific value of melting phase Chlorine content
Hard waste plastic	Moisture content Internal organization analysis Intensity effect

Fig. 2. Automatic calorimeter.

Fig. 3. The calorific value analysis procedure.

Fig. 4. DSC (Differential scanning calorimetry).

Fig 8. FT-IR (Fourier-transform infrared spectroscopy).

Fig. 5. DSC of samples.

Fig. 6. Arrangement process.

Fig. 9. XT H 225_Micro Computed Tomography (CT).

및 압출성형을 한 샘플로 구분하였으며, 측정 대상 샘플을 밀폐하여 DSC 샘플을 제작하고 DSC 측정에 필요한 샘플을 준비하였다. DSC의 샘플배치 과정이며 총 3개의 캡으로 되어있으며 가장 안쪽에는 샘플 2개를 넣을 공간이 존재한다. Fig. 6의 오른쪽에는 빈 샘플을 넣고 왼쪽에는 측정하고자 하는 샘플을 넣어 두 샘플의 차이를 비교 분석하여 그래프에 나타나는 원리로 분석하였다.

또한 연질 플라스틱류 폐기물과 경질 플라스틱류 폐기물을 수거하여 염소(ppm), 발열량(kcal/kg), 수분(%)에 대해 분석하였다. 염소함량 시험은 시료 속 염소이온을 전

위차측정기를 이용하여 질산은용액으로 측정하는 방법을 사용했으며 발열량 시험은 생활폐기물의 열효율 평가를 통한 활용가능성 분석을 위해 환경부고시 제 2014-135호 (고형연료제품 품질 시험·분석방법에 따라 시험을 수행하였다. 수분함량 시험은 건조감량 등 열중량 분석 접근법으로 수분함량을 측정하였다. 각 시험 결과를 기반으로 연질 플라스틱류 압출 성형하여 발열량의 변화를 측정하고 그에 따른 조직 및 분광 분석을 실시하여 적합성을 검토하였다. Fig. 8은 FT-IR의 분석 장비이며, Fig 9. Micro Computed Tomography (CT)는 XT H 225 관측 장비를 사용하여 촬영하였다.

Fig. 7. Sample photos by fuel type (x 100).

Table 2. Caloric value by fuel type

Sample	Unit	High caloric value
Vinyl	kcal/kg (MJ/kg)	4,357 (18.242)
Vinyl-M		9,814 (41.088)
Plastic-PP-M		8,774 (36.738)
Plastic-PE-M		10,839 (45.380)
Plastic-PE		10,530 (44.085)

*M : Samples that have undergone melting

Fig. 7는 시험에 사용될 샘플을 종류별로 나타내었으며 M은 용융된 샘플에 표시하였다. 일반적으로 PE, PP는 범용플라스틱 중 하나로 압출, 사출, 블로우 등 가공성이 용이한 소재이므로 활용도가 높아 시험 재료로 선택하였다. 본 시험에서는 5가지 샘플들을 활용하여 각 시험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 폐기물류의 성상 및 용융상태의 발열량

Fig. 7과 Table 2는 폐기물류의 성상 및 용융 상태에 따라 발열량(고위)를 분석한 결과이며, 시료 Plastic-PP-M(용융), Plastic-PE-M(용융), Plastic-PE로 PE 시료의 경우 용융 전, 후 모두 10,000kcal/kg 이상의 값을 나타내어 PP 시료보다 높은 값을 나타냈고 용융 후 시료에서 다소 높은 경향을 보인다. 일부 이물질이 있을 경우에는 PP 8,500kcal/kg 이상, PE 10,000kcal/kg 이상의 발열량을 가진다. 이런 발열량 결과를 이용하여 PE가 주로 이루어질 경우 소성의 천연 연료를 사용량을 저감할 것으로 보인다.

3.2. 폐PP의 열적거동 분석

DSC 시험은 폐PP만을 사용하여 샘플을 제작하였고 제작된 샘플의 결과 LLDPE(합성수지), PP 용융 Peak가 관찰되었으며 원료 육안 관찰 결과 분리되지 않은 다른 색상의 이물질은 확인되지 않았다. Fig. 10과 같이 시험은 3 번 수행하였으며 시험결과 163°C에서 마지막 반응이 있었으므로 해당 소재를 가공하기 위한 가공온도는 163°C 이상으로 열을 가해야가공을 할 수 있는 것으로 나타났다. 대체적으로 원료의 구성 원료가 유사한 것으로 확인되어 제품 원료로 활용 시 안정적인 원료 공급이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 10. Test result of DSC.

3.3. 폐기물류의 염소, 발열량, 수분과의 상관관계

Fig. 11은 연질 플라스틱류 폐기물 중 종류별 시료 505 개(폐기물 반입처 8개소)에 대해 염소(ppm), 발열량(kcal/kg), 수분(%) 분석결과를 산점도 행렬로 나타낸 것으로 발열량과 수분 간에는 반비례 관계가 수립하는 것으로 판단되며, 염소 함량은 열량, 수분과 일정한 상관관계가 관찰되지 않았다. Fig. 12는 발열량과 수분간의 상관관계를 확인하기 위해 회귀분석한 것으로 발열량(kcal/kg) = $7449 - 283.7 \times \text{수분}(\%)$ ($r^2 = 43.5$)의 상관관계를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 발열량에 수분의 관계는 수분이 낮은 경우 발열이 잘 이루어지는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 연질 플라스틱류 폐기물 중 염소, 발열량, 수분 분석결과를 Box plot으로 나타낸 것이다. 전체적으로 염소의 경우 평균 6,584ppm, 표준편차 23,613, 변동계수 358.66으로 시료에 따라 염소함량의 변동폭이 매우 큰 것으로 분석되었다. 열량은 평균 6,584kcal/kg, 표준편차

Fig 11. A matrix of scatter plots of chlorine, calories, and moisture in soft plastic waste by the waste supplier.

Fig 12. Results of regression analysis between moisture and calorific value of soft plastic waste.

913kcal/kg, 변동계수 13.84로, 수분은 평균 3.04%, 표준편차 2.16%, 변동계수 71.03으로 분석되었다. 분석결과를 종합하면 시멘트 연료로 연질 플라스틱류를 사용할 경우 염소함량의 편차로 인해 공정 및 품질에 영향을 미칠 우려가 있으며, 발열량 및 수분은 비교적 일정해 공정 및 품질에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 연질 폐플라스틱에 따른 염소 및 발열량, 수분 분석결과를 나타낸 것으로 폐기물 처리 업체에 따라서도 염소의 함량에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 염소는 시멘트의 강도 및 품질에 영향을 주기에 염소에 대한 일정 수치로 제한하고 있다. 이런 염소 차이로 인해서 시멘트 소성 전에 입고되는 폐기물류에 대해서는 염소 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Fig 13. Box diagram of chlorine, calories and moisture in soft plastic waste.

Fig 14. Box diagram of chlorine, calories, and moisture in soft plastic waste by waste importer.

Fig. 15. A matrix of scatter plots of chlorine, calories, and moisture in hard plastic waste by the waste supplier.

Fig. 16. Results of regression analysis between moisture and calorific value of hard plastic waste.

Fig. 15는 경질 플라스틱류 폐기물 중 종류별 시료 293개 (폐기물 반입처 8개소)에 대해 염소(ppm), 발열량(kcal/kg), 수분(%) 분석결과를 산점도 행렬로 나타낸 것으로 발열량과 수분 간에는 반비례 관계가 수립하는 것은 연질 플라스틱류 폐기물의 경우와 동일하나, 연질 플라스틱과는 다르게 수분의 분포가 다양하게 나타나고 있다. 이런 이유로 경질 플라스틱을 사용할 경우 수분 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 16은 발열량과 수분과의 상관관계를 확인하기 위해 회귀분석한 것으로 발열량과 수분은 발열량(kcal/kg) = $6,340 - 122.2 \times \text{수분}(\%)$ ($r^2 = 65.1$)의 상관관계를 갖는 것으로 확인되었다. 이런 상관관계는 연질에 비해 경질 플라스틱의 수분이 존재하기에 발열량을 저하시키는 것으로 판단된다.

Fig. 17. Box diagram of chlorine, calories and moisture content in hard plastic waste.

Fig. 18. Box diagram of chlorine, calories, and moisture in hard plastic waste by waste importer.

Fig. 17은 경질 플라스틱류 폐기물 중 종류별 시료 293개에 대해 염소, 발열량, 수분 분석결과를 Box plot으로 나타낸 것이다. 전체적으로 염소의 경우 평균 6,245ppm, 표준편차 7,841, 변동계수 125.55로 연질 플라스틱류 폐기물에 비해서는 편차의 폭이 작지만, 일반적인 천연연료에 대해서는 염소함량의 변동폭이 큰 것으로 분석되었다. 발열량은 평균 4,486kcal/kg, 표준편차 1009 kcal/kg, 변동계수 22.51로 연질 플라스틱류 폐기물에 비해 발열량(평균 6,584.9kcal/kg)도 낮고 변동 폭(변동계수 13.87)도 컸는데, 이는 수분 분석결과(평균 16.8%, 표준편차 6.752, 변동계수 40.30) 연질 플라스틱(평균 3.0%)에 비해 많은 양의 수분이 함유되어 있기 때문으로 판단된다. 분석결과를 종합하면 시멘트 연료로 경질 플라스틱류를 사용할 경

Fig. 19. FT-IR test result (Vinyl-M).

우 염소함량의 편차로 인해 공정 및 품질에 영향을 미칠 우려가 있으며, 연질 플라스틱류 폐기물에 비해 수분 함량이 높기 때문에 기대되는 발열량도 낮아 상대적으로 효율이 낮다.

Fig. 18은 시료의 염소 및 발열량, 수분 분석결과를 나타낸 것으로 폐기물 처리 업체에 따라서도 염소의 함량에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 염소에 대한 함량 차이로 인하여 시멘트의 품질에 영향을 줄 것으로 예측되기에 염소에 대한 관리가 필요할 것으로 예측된다.

3.4. 연질 폐플라스틱 폐기물류의 조직 분석

Fig. 19는 발열량을 기반으로 하여 폐비닐의 용융한 샘플에 대해 분광 분석이다. 문헌조사를 통한 대표적인 PP Peak를 분석한 결과 PP에서 나타나는 2950(a), 1377(e), 730(f)¹⁰⁾와 유사한 PP로 추정되는 Peak Point가 관찰되었으며 후반에 CH_3 가 나타난 것으로 확인되어 PE/PP의 성분이 함유되어 있는 것으로 추정하였다. 이런 특성에 의해 폐기물을 소성할 경우 CH_3 가 적게 발생할 수 있어 대기오염에 대해 안정성에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단된다.

Fig. 20은 압출성형 전후의 내부적인 영향을 분석하기 위해 Micro-CT 촬영으로 내부 구조를 분석하였다. 시험은 샘플의 상단층, 중간층, 하단층으로 나누어 3부분을 촬영하였다. 분석 결과 미세 공극이 유사하게 나타나는 것으로 원소재에 따라 조직에는 미세 공극이 있는 것으로 나타났다. 미세 공극이 많을 경우 미세한 구멍들로 인해 표

NO	Before molding	After molding
1-High		
1-Middle		
1-Bottom		
2-High		
2-Middle		
2-Bottom		

Fig. 20. Structure analysis before and after molding.

면적이 증가하여 열효율이 증가 하게 되며 열효율을 높이기 위해 몰드 성형을 할 경우 큰 공극이 생성될 수 있기에 기존 연질 폐플라스틱 폐기물류로 투입하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.5. 시멘트의 압축강도와 폐기물류의 상관관계

Fig. 21은 폐기물과 시멘트의 강도에 대한 상관관계를 산점도 행렬로 분석한 것으로 연질 및 경질 플라스틱의 사용할 경우 각각 압축강도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 플라스틱의 종류와 상관없이 플라스틱을 사용할 경우 천연 연료를 사용량이 감소하고 그에 따라 소성 온도의 발열이 시멘트 광물의 조성에 영향을 준 것으로 판단된다. 경질의 경우 시멘트 광물 중 초기와 장기에 영향을 주는 C3A, C2S에 영향을 준 것으로 보이며 연질의 경우에는 C3S에 영향을 준 것으로 판단된다. 이에 추후 각각의 폐기물만을 사용한 후의 클링커 광물에 대한 분석을 실시하는 것으로 하고자 한다.

Fig. 21. Correlation between compressive strength of cement and wastes.

4. 결 론

본 연구에서는 생활 폐기물을 사용한 시멘트 소성 중 폐기물의 성상에 대해 2종으로 분류하고 이를 사용할 때 발열량, 염소, 수분에 대해 검토하였으며, 이를 기반으로 생활 폐기물을 처리 방법 중 하나인 시멘트 소성의 원료로 사용할 수 있는지를 검토한 것이다. 특히 시멘트 소성 후 품질 관리 항목으로 강도에 대한 상관 관계를 분석하여 시멘트 제품에 영향을 주지 않는 범위에서의 생활 폐기물을 사용이 가능한 것에 대한 기초 자료로 제시하고 한 것이다. 본 연구의 실험 결과를 토대로 얻어진 결론은 아래와 같다.

- 1) 폐기물류의 발열량은 폐비닐인 PE 소재의 경우 용융 전, 후 모두 10,000kcal/kg 이상의 값을 나타내어 PP 시료보다 높은 값을 나타냈고 용융 후 시료에서 다소 높은 경향을 보인다. 이런 발열량 결과를 이용하여 PE가 주로 이루어질 경우 소성의 천연 연료를 사용량을 저감할 것으로 보인다.
- 2) 폐기물 중 폐PP만을 사용할 경우 소재의 가공온도는 163°C 이상으로 열을 가해야 가공이 가능하다. 일반적으로 폐기물류의 구성 원료가 유사한 것으로 확인될 경우 안정적으로 열을 발현하는 것으로 나타났다.
- 3) 연질 플라스틱류 폐기물은 염소의 경우 평균 6,584ppm, 표준편차 23,613, 변동계수 358.66으로 시료에 따라 염소함량의 변동폭이 매우 큰 것으로 분석되었다. 열량

은 평균 6,584kcal/kg, 표준편차 913kcal/kg, 변동계수 13.84로, 수분은 평균 3.04%, 표준편차 2.16%, 변동계수 71.03으로 분석되었다. 시멘트 연료로 연질 플라스틱류를 사용할 경우 염소함량의 편차로 인해 공정 및 품질에 영향을 미칠 우려가 있으며, 발열량 및 수분은 비교적 일정해 공정 및 품질에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

- 4) 경질 플라스틱류 폐기물은 염소의 경우 평균 6,245ppm, 표준편차 7,841, 변동계수 125.55로 연질 플라스틱류 폐기물에 비해서는 편차의 폭이 작지만, 일반적인 연료에 비해서는 염소함량의 변동폭이 큰 것으로 분석되었다. 발열량은 평균 4,486kcal/kg, 표준편차 1009kcal/kg, 변동계수 22.51로 연질 플라스틱류 폐기물에 비해 발열량(평균 6,584.9kcal/kg)도 낮고 변동폭(변동계수 13.87)도 컸는데, 이는 수분 분석결과(평균 16.8%, 표준편차 6.752, 변동계수 40.30) 연질 플라스틱(평균 3.0%)에 비해 많은 양의 수분이 함유되어 있기 때문으로 판단된다.
- 5) 연질 플라스틱류 폐기물의 열효율을 높이기 위한 용융 전후의 상태에 대해 분석한 결과 미세 공극이 유사하게 나타나는 것으로 원소재에 따라 조직에는 미세 공극이 있을 것으로 판단되었다. 또한 열효율을 높이기 위해 몰드 성형을 할 경우 큰 공극이 생성될 수 있기에 기존 연질 폐플라스틱 폐기물류로 투입하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
- 6) 폐기물을 시멘트 소성의 원료로 사용한 경우 시멘트에

대한 강도에 영향을 준 폐기물을 분석한 결과 경질 플라스틱류의 사용은 1일 및 28일 압축강도에 기여하였으며 연질 플라스틱류의 사용은 28일 압축강도에 기여하는 것으로 분석되었다. 이는 경질은 클링커 광물 중 C3A에 주요 영향을 준 것으로 예측되며 연질의 경우 C3S에 영향을 준 것으로 판단된다.

이후에는 두 폐기물류를 혼합하여 시멘트 소성의 연료, 이산화탄소 발생 등에 대한 추가적인 연구와 폐기물의 성상에 대해 다각도로 검토할 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국환경산업기술원 생활폐기물 재활용 기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 2020002740001)으로 수행되었으며, 관련 기관에 감사드립니다.

References

1. Waste Plastic Recycling And Market Activation Report, 2017 : Korea Environmental Industry & Technology Institute, pp.2093-2332.
2. Korean Social Trends, 2018 : Generation and Recycling of Waste Plastics, pp.263-269.
3. Ministry of Environment, 2019 : Measures to Strengthen Illegal Waste Management, pp.15-22.
4. Choi, Jaewon, Kwon, Sangjin, Kang, Bonghee, et al., 2020 : Study on the Correlation between Air Emission Gas and Alternative Fuels Used in Cement Sintering Process, Journal of the Korea construction recycle institute, 8(3),

- pp.286-293.
5. Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 2018 : Life Cycle Assessment(LCA) of Rubber Recycling Process in Waste Tire, 27(1), pp.74-83.
 6. Germanov, Elitza S., Andrea D. Marshall, Lars Bejder, et al., 2018 : Microplastics: No Small Problem for Filter-Feeding Megafauna, Trends in Ecology & Evolution, 33(4), pp.227-232. doi: 10.1016/j.tree.2018.01.005.
 7. Roland Geyer, Jenna R. Jambeck, Kara Lavender Law, 2017 : Production, use, and fate of all plastics ever made, Science Advances, 3(7), pp.1-5. doi: 10.1126/sciadv.1700782
 8. Yong Choi, Hyeong-Jin Choi, Seung-Whee Rhee, 2018 : Perspective on Recycling of Plastic Waste in Korea(Republic of), The 13th International Conference on Waste Management and Technology, Beijing, Tsinghua University, 2018. 3, pp.175-201.
 9. Susan A. Thorne, Keith A. Weitz, Jenna Jambeck, 2005 : Moving from solid waste disposal to materials management in the united states. For presentation at the tenth International Waste Management and Landfill Symposium in Cagliari, pp.1-11.
 10. Melissa R. Jung, F. David Horgen, Sara V. Orski, et al., 2018 : Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms, Marine Pollution Bulletin, 127, pp.704-716.

한 중 민

- 전북대학교 토목공학과 박사
- 현재 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원

박 재 용

- 청주대학교 건축재료공학과 석사
- 현재 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

강 봉 희

- 충남대학교 건축공학과 박사수료
- 현재 아세아시멘트 기술연구소 연구실장

이 정 욱

- 한양대학교 산업융합학부 재학
- 현재 한국건설생활환경시험연구원 주임연구원

김 남 규

- 군산대학교 토목공학과 석사
- 현재 한국건설생활환경시험연구원 연구원