

사업장 열적처리 잔재물의 특성에 따른 매립저감 가능성 연구

이수영^a, 김규연^{bt}, 전태완^c, 신선경^d

A Study on Landfill Reduction Possibility by Characteristics of Industrial Thermal Treatment Residues

Suyoung Lee^a, Kyuyeon Kim^{bt}, Taewan Jeon^c, Sunkyoung Shin^d

(Received: Feb. 27, 2019 / Revised: Mar. 21, 2019 / Accepted: Mar. 24, 2019)

ABSTRACT: The government is promoting recycling of waste resources through the enactment of Fundamental Law on Resource Circulation, the revision of the Wastes Control Act and zero-landfilling of untreated waste through improved processes such as recycling and diversification. As of 2015, the total amount of landfilled waste is 38,308 ton/day in Korea. The amount of landfilled waste from industrial sectors is 23,577 ton/day, accounting for 62 % of total landfilled waste. In the study, we investigated the characteristics of the thermal treatment residue among inorganic wastes and estimated the landfill reduction potential according to the relevant recycling criteria, which can go through recycling paths. As a result, it is estimated that about 5~42 % of the landfilled waste can be reduced in case mandatory recycling and landfill suppression policies such as recycling criteria for thermal processing residues and expansion of recycling obligation targets should be implemented. In order to minimize landfill disposal, it is necessary to expand the diversity of waste recycling type and the usage of recycled products.

Keywords: Thermal treatment residue, Characteristic analysis, Landfill reduction, recycling

초 록: 정부는 ‘자원순환기본법’의 제정 및 ‘폐기물관리법’의 개정으로 폐자원의 재활용 방향성을 확대하고 재활용 다양화 등 처리개선을 통한 미처리폐기물의 매립제로화를 추진하고 있다. 2015년 기준 국내 전체 폐기물 매립처분량은 38,308 톤/일이며 그중 사업장배출시설계폐기물의 매립처분량은 23,577 톤/일로 매립폐기물 중 약 62 %를 차지하고 있다. 본 연구에서는 주로 유기성 및 가연성 물질의 연소 및 소각, 특정 성분의 추출 및 공정 구성에서 활용된 후 폐기처분되는 열적처리잔재물의 특성을 파악하여 재활용 관련 기준에 따른 매립저감 효과 예측 및 매립 처분 감소 가능성을 추산하여 고찰하였다. 그 결과, 사업장배출시설계폐기물의 매립처분량은 전체 매립량의 약 62 %로, 이 중 소각재, 연소재 등의 열적처리잔재물류가 45.1 %을 차지하고 있다. 2035년 국가 매립목표 1 % 달성을 위해 열적처리 잔재물이 매립억제 주요대상 폐기물로 판단되었다. 또한 열적처리 잔재물의 재활용 기준을 확대하고 매립억제 정책 추진 시 현재 매립처분량 대비 약 5~42 %의 매립감소가 가능할 것으로 추산되었으며 매립처분 최소화를 위해 폐자원 재활용 유형의 다양성 확대와 재활용 제품의 의무사용 확대 방안이 필요할 것으로 판단되었다.

주제어: 열적처리잔재물, 특성분석, 매립저감, 재활용

^a 국립환경과학원 환경자원연구부 전문위원(Researcher, NIER)

^b 국립환경과학원 환경자원연구부 연구관(Senior researcher, NIER)

^c 국립환경과학원 환경자원연구부 과장(Director, NIER)

^d 국립환경과학원 환경자원연구부 부장(Director general, NIER)

† Corresponding author(e-mail: qykim@korea.kr)

1. 서론

정부는 미처리폐기물의 매립 제로화를 추진하고 2035년 매립률 1%의 목표를 설정하여 달성하고자 한다. ‘자원순환기본법’의 제정 및 ‘폐기물관리법’의 개정으로 폐자원의 재활용 방향성을 확대하고 있으며 재활용 다양화 등 처리개선을 통한 매립억제방안 도출 및 효과 분석 등 대책 마련이 필요한 실정이다. 이에 환경부는 자원순환기본법에서 미처리된 폐기물의 매립을 최소화하기 위한 경제적 유인책으로 폐기물처분부담금제도를 도입했다.¹⁾ EU 국가들은 매립·소각 부담금제와 미처리 폐기물 매립금지 제도를 도입하여 매립 제로화를 실현하고자 노력하고 있다.²⁾

2015년 기준 국내 전체 폐기물 매립처분량은 38,308 톤/일이다. 그중 사업장배출시설계폐기물의 매립처분량은 23,577 톤/일이며 매립폐기물 중 약 62%를 차지하고 있다. 사업장배출시설계폐기물의 열적처리잔재물류 매립처분량은 10,637 톤/일로 나타났으며, 특히 소각재 매립량이 4,283 톤/일로 발생량 대비 74%가 매립처분 되고 있다.

본 연구에서는 유기성 및 가연성 물질의 연소 및 소각, 특정 성분의 추출 및 공정 구성에서 활용된 후 폐기처분되는 열적처리잔재물을 대상으로 지정 폐기물을 제외한 사업장배출시설계폐기물 중 매립처분 비율이 높은 폐기물을 선정하였다. 또한 매립억제와 관련한 반입규제 및 재활용 관련 기준 등에 따른 매립저감 효과 예측 및 매립 처분 감소 가능성을 추산하여 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 선정기준 및 시료채취

본 연구의 대상 시료를 선정하기 위하여 전국 폐기물 발생 및 처리현황(2015)을³⁾ 바탕으로 지정폐기물을 제외한 사업장배출시설계폐기물 중 매립처분 비율이 높은 불연성폐기물을 선정하였다. 또한 사업장폐기물의 배출, 수집, 운반, 최종처리까지 과정을 나타낸 전자인계관리시스템을 이용하여 관리하는 올바로시스템(2015년)⁴⁾ 입력 데이터를 통해 총 폐기물 발생량 중에서 매립처분 비율이 높은 사업장배출시설계폐기물의 열적처리잔재물 발생 및 처리현황 세부내역을 조사하였다.

자료 분석결과 광재류, 분진류, 소각재, 연소재, 폐내화물 및 폐도자기조각, 폐주물사 및 폐사 등 6가지 열적처리잔재물류 폐기물을 매립 저감 대상 폐기물 대표 시료로 선정하고자 하였다. 주로 유기성 및 가연성 물질의 연소 및 소각, 특정 성분의 추출 및 공정 구성에서 활용된 후 폐기처분되는 열적처리잔재물의 시료 채취는 Table 1과 같이 매립처분량에 따라 광재류 5개, 분진류 10개, 소각재 26개, 연소재 12개, 폐내화물류 5개, 폐주물사 및 폐사 6개를 포함하여 총 64개의 시료를 채취하였다.

현장 시료채취의 분석과 함께 여러 문헌에 기 보고된 분석결과를 수집, 선별하여 폐기물별 특성 조사의 신뢰도를 제고하고자 하였다. 활용된 참고문헌의 분석결과는 배출특성에 따라 재활용 가능 항목 별로 분류하고 그에 대한 관련 법적기준을 제시하여 재활용 가능성을 가중치로 나타내었다.

Table 1. Classification of Samples in the study

Item	Samples	
	Sampled facilities	No. of samples
Total	-	64
Slag	Nonferrous metal smelting process	5
Dust	Manufacturing(plate glass, automobile parts, petroleum refining, metal, chemicals)	10
Incineration ash	MSW pyrolysis-melting incineration	26
Power plant ash	Power plant, Bio plant, SRF boiler	12
Waste refractory	Manufacturing(metal, oil refinery), Power plant	5
Waste molding sand	Manufacturing(automobile parts, oil refinery, chemicals), Power plant	6

2.2. 분석방법

매립처분되는 유기·가연성 열적처리잔재물의 재활용 가능성을 검토하기 위해 사업장별 배출되는 광재, 분진, 소각재, 연소재, 폐내화물 및 폐도자기 조각, 폐주물사 및 폐사에 대한 성분분석을 실시하였다. 성분분석은 수분, 가연분, 회분의 삼성분과 강열감량, 원소분석(Leco Co. CHN628, Sulfur Add-on Module)을 통한 시료의 C, H, N, S에 대한 함량 및 XRF 분석기기(WD-XRF, Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer)에 의한 대상폐기물의 화학적 조성을 확인하였다. 수분 분석을 제외한 시료의 준비는 건조를 통해 수분을 제거한 뒤 2 mm 이하로 미분쇄하여 분석시료로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국내 열적처리잔재물의 발생 및 처리현황
전국 폐기물발생 및 처리현황(2015)과 올바로시스

템(2015)의 인수인계 정보를 통해 사업장에서 배출된 열적처리잔재물 매립현황을 조사하였다. 국내 전체 폐기물 발생량은 418,523 톤/일이다. 매립처분량은 38,308 톤/일로 발생량 대비 9.2 %의 매립비율을 나타내고 있다. 매립처분량 중 사업장배출시설계폐기물이 23,577 톤/일로 약 62 %를 차지하고 있다.

올바로시스템에 등록된 데이터를 이용하여 열적처리잔재물 발생 사업장 및 처리현황을 조사하였다. 올바로시스템에서는 폐기물관리법 시행규칙 [별표4] 폐기물의 종류별 세부분류에 명시되어 있는 폐기물과 분류번호로 세분화하여 등록되어 있으며, 사업장배출시설계폐기물의 열적처리잔재물류의 발생량 및 처리현황은 Table 2와 같다. Fig. 1과 같이 열적처리잔재물 전체 발생량은 26,173,421 톤/년이며, 매립처분량은 2,002,584 톤/년(7.7 %), 재활용량은 23,799,183 톤/년(90.9 %)이다. 열적처리잔재물류의 80 % 이상이 재활용 처리되었으나 소각재의 경우 발생량의 78.8 %가 매립처분 되는 것으로 나타났다.

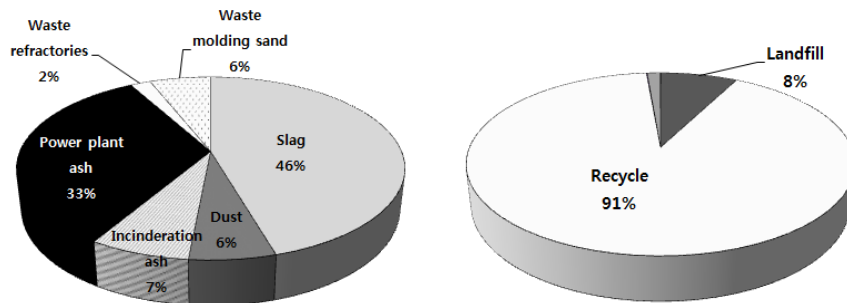


Fig. 1. Sharing status of landfill industrial waste.

Table 2. Current Status of Inorganic Waste Management by the All-baro System (2015)

Item	Generation		Landfill		Recycle		Others	
	ton/year	ton/year	ton/year	%	ton/year	%	ton/year	%
Total	26,173,421	2,002,584	2,002,584	7.7	23,799,183	90.9	371,656	1.4
Slag	11,901,234	165,003	165,003	1.4	11,700,246	98.3	35,985	0.3
Dust	1,545,538	134,328	134,328	8.7	1,363,276	88.2	47,934	3.1
Incineration ash	1,901,730	1,498,833	1,498,833	78.8	397,252	20.9	5,646	0.3
Power plant ash	8,675,942	34,691	34,691	0.4	8,610,786	99.2	30,465	0.4
Waste refractory	508,545	68,843	68,843	13.5	413,061	81.2	26,642	5.2
Waste molding sand	1,640,432	100,886	100,886	6.2	1,314,562	80.1	224,984	13.7

3.2. 열적처리잔재물별 특성분석

열적처리잔재물 시료에 대한 수분과 강열감량 분석결과, Fig. 2와 같이 수분함량은 0.0~46.2 %로 나타났으며 평균 5 % 이하로 분석되었고 열적처리 과정을 거쳐 배출되기 때문에 수분함량은 미량으로 나타났다. 강열감량(Loss on ignition, LOI)은 0.0~50.6 %, 평균 7 %이하로 분석되었으며 평균 강열감량 이상의 높은 값들은 석유화학제조공정에서 배출되는 폐기물이 높은 열량을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 동일한 배출 폐기물이라도 사업장 제품 특성 및 배출 폐기물의 성상에 따라 수분과 강열감량이 높게 나타나는 경우도 있었다. 원소분석 결과 탄소(C) 함

량은 0.0~47.6 %, 수소(H) 함량은 0.5~1.4 %, 질소(N) 함량은 0.0~1.5 %, 황(S) 함량은 0.1~23.1 %의 범위로 분석되었다.

열적처리잔재물류의 화학적 조성 및 성분을 파악하기 위해 XRF 분석을 실시하였다. Table 3과 같이 사업장 제품 특성 및 배출 폐기물의 성상에 따라 성분 함량이 상이함을 확인할 수 있었다. 광재는 Fe 성분 비율이 평균 38.4 % (2.3~69.9 %)로 나타나 상당량이 Fe로 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 분진의 경우 Mg, Al, Si, Ca 등 다양한 형태의 원소들이 함유되어 있었으며 Ca 성분이 평균 18.7 % (0.5~57.5 %)로 높게 나타났고 Si 성분이 평균 25.6 % (1.3~55.6 %)로

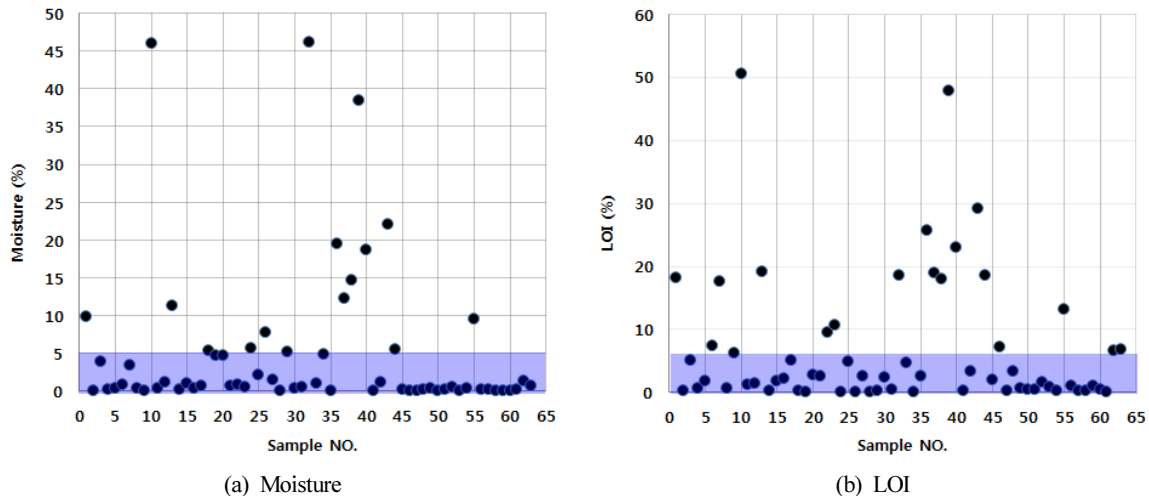


Fig. 2. Results of moisture and LOI (%).

Table 3. XRF Analysis Result of Industrial Thermal Treatment Residues (%)

Item	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
avg. (min-max)												
Slag	2.0 (1.1~3.6)	4.0 (0.9~9.5)	9.5 (2.3~23.4)	0.6 (0.6~0.7)	8.1 (0.5~23.1)	2.3 (0.6~3.9)	11.0 (0.9~23.1)	10.9 (0.3~29.9)	38.4 (2.3~69.9)	0.5 (0~0.5)	4.8 (0.2~9.4)	3.7 (0~3.7)
Dust	2.8 (0.3~7.7)	18.2 (0.9~41.6)	25.6 (1.3~55.6)	1.5 (0.6~2.9)	11.8 (0.5~39.9)	10.9 (0.5~39.3)	18.7 (0.5~57.5)	9.2 (0.1~42.1)	3.2 (0.7~9.0)	-	1.3 (0~1.3)	0.2 (0~0.2)
Incineration ash	2.4 (1.2~3.4)	6.7 (1.6~13.6)	14.6 (3.0~45.5)	3.2 (0.7~8.0)	2.1 (0.1~5.3)	3.5 (0.3~14.7)	39.2 (6.9~62.9)	0.2 (0.1~0.5)	7.3 (2.2~16.7)	0.6 (0.2~1.1)	1.7 (0.1~5.0)	0.5 (0.2~1.7)
Power plant ash	3.3 (1.1~5.4)	12.4 (4.8~22.4)	27.9 (3.6~57.1)	1.3 (0.9~1.9)	3.6 (0.1~11.9)	4.4 (1.3~7.5)	25.8 (4.1~55.9)	0.2 (0.1~0.4)	9.3 (2.4~17.0)	0.3 (0.2~0.6)	1.1 (0.3~1.9)	0.3 (0.2~0.4)
Waste refractory	15.7 (0.4~59.7)	36.3 (6.8~52.5)	22.4 (9.9~38.4)	1.3 (1.2~1.5)	0.6 (0.1~1.3)	1.4 (0.3~4.5)	11.5 (3.4~27.6)	3.5 (0.1~10.1)	5.3 (3.1~9.4)	-	-	0.9 (0~0.9)
Waste molding sand	3.9 (2.6~5.5)	6.8 (4.4~8.6)	48.8 (7.8~74.9)	1.9 (1.1~2.6)	0.3 (0.2~0.6)	2.9 (2.1~4.2)	16.1 (3.0~29.1)	2.2 (0.1~7.9)	13.4 (5.0~37.7)	0.3 (0~0.3)	1.4 (0.3~2.6)	-

나타났다. 연소재의 경우 대부분 Si, Ca 성분으로 이루어져 있었으며, Si는 평균 27.9 % (3.6~57.1 %), Ca는 평균 25.8 % (4.1~55.9 %) 함유되어 있음을 확인할 수 있었다. 소각재의 경우도 Mg, Al, Si 등 다양한 원소 성분을 함유하고 있었으며 특히 Ca 성분이 평균 39.2 % (6.9~62.9 %)로 소각재의 주요 구성요소라는 것을 확인할 수 있었다. 폐내화물 및 폐도자기조각의 XRF 분석결과 Al 성분이 평균 36.3 % (6.8~52.5 %)로 나타났으며, 폐주물사 및 폐사는 Si 성분으로 대부분 형성되어 있었으며 평균 48.8 % (7.8~74.9 %)로 나타났다.

3.3. 열적처리잔재물의 매립처분 저감 가능량 추산

올바로시스템 통계정보로부터 사업장 열적처리 잔재물의 발생원별 매립처분량을 추출하고, 관련 재활용 법적기준을 충족하는 재활용 가능한 양에 대해 방법별 중복을 포함하여 매립처분 저감 가능량을 평가하였다. 본 연구의 시료채취 분석결과와 여러 문헌에 기 보고된 열적처리잔재물의 중금속 용출, 함량 분석결과에 대표성을 부여하였으며 Table 4에 문헌의 분석결과를 평균, 최소값, 최대값으로 정리하여 나타내었다.

매립처분되는 열적처리잔재물의 저감 가능량을 추산한 결과 Table 5에 나타난 분석결과와 같이 광재류는 1.5~23.4 %, 분진류는 0.0~8.0 %, 소각재는 4.5~48.2 %, 연소재는 0.7~73.1 %, 폐내화물류는 1.8~4.7%, 폐주물사류는 22.5~38.3% 재활용 가능할 것으로 평가되었다.

3.3.1. 광재류의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

광재류는 금속제조업에서 발생하는 비철금속제련 공정의 광재로 구분되며 38,593 톤/년 매립처분 되었다. 「폐기물관리법」 시행규칙 제2조의 지정폐기물 유해물질 함유기준에 기준치 미만으로 모두 나타났으며 재활용 가능성 유·무를 판단하였을 때 지정폐기물이 아닌 재활용 가능한 폐기물로 나타났다.

광재를 시멘트 대체원료로 재활용 할 때 매립처분 감소량을 산정한 결과 「자원의 절약과 재활용 촉

진에 관한 법률」 시행규칙 제20조의3제3항에 따라 철 대체원료의 경우 기준치는 Pb(1,000 mg/kg 미만), Cu(3,000 mg/kg 미만), Cd(60 mg/kg 미만), As(500 mg/kg 미만), Hg(2.0 mg/kg 미만)으로 평가자료의 약 32 %가 기준치 미만으로 나타나 매립처분되는 광재 중에서 12,449 톤/년이 재활용 가능할 것으로 추산되었다.

철 외의 대체원료의 경우, 기준치는 Pb(150 mg/kg 미만), Cu(800 mg/kg 미만), Cd(50 mg/kg 미만), As(50 mg/kg 미만), Hg(2.0 mg/kg 미만)이며 평가자료의 약 23 %가 기준치에 적합하였으며 8,714 톤/년 재활용 가능할 것으로 추산되었다.

광재를 시멘트 원료 및 부원료로 활용하기 위한 화학적 함량(SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃) 조성의 기준치 적합 여부를 판단하였다. 평가자료 분석결과 철 원료인 Fe₂O₃ 성분기준이 40~90 %이며 매립처분량 중 약 83 %가 기준에 충족하고 재활용 가능량은 32,161 톤/년으로 추산되었다.

또한 콘크리트용 혼화재로 재활용할 때, 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」의 철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침에 따라 MgO, SO₃, 강열감량, 염화물이온의 품질기준을 제시하고 있으며 염화물이온을(0.02 %이하) 제외하고 MgO, SO₃, 강열감량 기준에 만족하여 재활용 가능할 것으로 나타났다.

폐기물 매립시설의 복토재로 재활용하는 경우, 재활용 대상 폐기물 또는 일반토사와 혼합한 폐기물은 「토양환경보전법」 시행규칙 별표3에 따른 토양오염 우려기준 중 2지역의 함량기준을 충족해야 한다. 평가자료를 바탕으로 재활용 가능량을 추산한 결과 기준치에 약 30 % 충족하여 11,204 톤/년 재활용 가능할 것으로 계산되었다. 콘크리트 혼화재, 매립시설 복토재로는 일부 광재류만 재활용 가능한 것으로 보인다.

3.3.2. 분진류의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

분진은 유리, 자동차부품 등 제조업과 금속제련공정에서 발생하였으며 용출시험결과 평가자료의 약 34 %가 지정폐기물 유해물질 함유기준 미만으로 재

Table 4. Results of Heavy Metal Leaching and Contents Analysis Reference Review

Item	Slag ^{5,6,11,14}	Dust ^{5,15}	Incineration ash ^{7,13}	Power plant ash ^{8,9}	Waste molding sand ^{10,12,16,17}	
Leaching test (mg/L) avg. (min-max)	Pb	ND	6.0 (ND~33.7)	5.7 (0.1~42.3)	ND	0.1 (ND~2.4)
	Cu	ND	6.8 (ND~31.5)	1.60 (ND~5.0)	ND	0.2 (ND~3.4)
	Cd	0.1 (ND~0.1)	41.6 (ND~229.2)	0.28 (ND~1.5)	ND	0.0 (ND~0.0)
	As	0.8 (ND~1.1)	0.4 (ND~1.8)	0.66 (0.0~1.0)	ND	0.0 (ND~0.0)
	Hg	ND	1.4 (ND~7.4)	1.3 (ND~2.1)	ND	0.0 (ND~0.0)
	Cr ⁶⁺	ND	5.4 (ND~18.6)	0.1 (ND~0.1)	ND	0.0 (ND~0.1)
	CN	ND	8.1 (ND~108.4)	ND	ND	0.0 (ND~0.0)
Contents (mg/kg) avg. (min-max)	Pb	12,987.0 (ND~66,400.0)	93,650.0 (ND~105,800.0)	969.7 (545.0~1598.0)	19.2 (3.9~53.0)	15.7 (10.2~23.5)
	Cu	76,350.0 (ND~364,900.0)	79,725.0 (22,400~188,400.0)	2268.0 (259.0~3333.4)	21.2 (6.1~53.2)	142.2 (60.0~385.0)
	Cd	64.6.0 (ND~550.2)	987.1 (33.7~3485.4)	13.2 (6.6~24.1)	0.4 (0.1~1.1)	ND
	As	15.0 (ND~203.0)	223.5 (ND~223.5)	84.5 (63.1~103.6)	10.4 (2.9~25.3)	ND
	Hg	ND	7.7 (0.4~23.7)	0.2 (0.0~0.8)	0.5 (0.0~1.2)	ND
	Cr ⁶⁺	1.0 (ND~2.9)	0.9 (ND~1.1)	ND	-	-
	CN	0.9 (ND~2.1)	7.9 (0.5~16.8)	ND	-	-
Reference	- Park et al. (2016) ⁵⁾ - Kim et al. (2015) ⁶⁾ - Choi et al. (2007) ¹¹⁾ - Gorai B et al. (2003) ¹⁴⁾	- Park et al. (2016) ⁵⁾ - Jeong et al. (2012) ¹⁵⁾	- Park et al. (2010) ⁷⁾ - Lee et al. (2014) ¹³⁾	- Park et al. (2013) ⁸⁾ - Maeng et al. (2014) ⁹⁾	- Rhee et al. (2004) ¹⁰⁾ - Kim et al. (2010) ¹²⁾ - Lee et al. (1997) ¹⁶⁾ - Rhee et al. (2014) ¹⁷⁾	

활용 및 매립시설의 복토용으로 가능할 것으로 나타났다.

그밖에도 분진을 시멘트 대체원료로 재활용 하는 경우, 철 대체원료의 경우 기준치는 Pb(1,000 mg/kg 미만), Cu(3,000 mg/kg 미만), Cd(60 mg/kg 미만), As (500 mg/kg 미만), Hg(2.0 mg/kg 미만)이다. 평가자료 분석결과 Pb는 ND~105,800.0 mg/kg, Cu는 22,400.0~

188,400.0 mg/kg, Cd 33.7~3485.4 mg/kg, As ND~223.5 mg/kg, Hg는 0.4~23.7 mg/kg의 범위로 분석되었으며 시멘트 대체원료 재활용 기준에 모두 초과하는 것으로 나타났다. 동 제련공정에서 발생하는 분진으로 As의 농도는 함량 기준보다 낮게 나타났으나 대부분 함량기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 분진을 성·복토재로 재활용하는 경우 기준치

Table 5. Estimation of Landfill Reduction Potential

Item	Landfill	Recyclable*	
	ton/year	ton/year	%
Total	2,002,584	93,474~838,912	4.7~41.9
Slag	165,003	2,490~38,593	1.5~23.4
Dust	134,328	0~10,760	0.0~8.0
Incineration ash	1,498,833	66,771~722,342	4.5~48.2
Power plant ash	34,691	243~25,359	0.7~73.1
Waste refractory	68,843	1,271~3,240	1.8~4.7
Waste molding sand	100,886	22,699~38,618	22.5~38.3

* Estimation of the amount of recyclable landfill including redundant landfill

초과로 인해 매립시설의 복토재로 재활용은 가능하지 않은 것으로 나타났다.

3.3.3. 소각재의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

평가자료의 소각재는 하수·폐기물처리, 원료재생 및 환경복원업에서 발생하는 소각재로서 1,135,109 톤/년 매립처분되었다. 지정폐기물의 유해물질 함유 기준미만인 폐기물만 재활용 및 매립시설의 복토용이 가능하다. 사업장에서 발생하는 소각재의 용출시험 결과 매립처분량의 64 %가 유해물질 함유기준 미만으로 재활용 및 매립시설의 복토용으로 재활용 가능할 것으로 나타났다.

「폐기물관리법」 제14조의3 제1항 관련 폐기물의 재활용 기준의 경우 비산재, 바닥재 등 소각재의 중금속 용출농도는 약 10 %가 재활용 기준에 적합한 것으로 나타나 매립처분량중 재활용 가능량은 103,192 톤/년으로 추산하였다.

요업제품의 원료로 재활용할 때, 「폐기물관리법」 제14조의3 제1항과 관련하여 중금속 용출 및 함량 기준의 적합여부에 따른 재활용 가능성은 모두 기준치 초과로 나타났다.

소각재를 시멘트 원료 및 부원료로 활용하기 위한 화학적 함량 SiO₂(20~30 %), CaO(20~30 %), Al₂O₃, (10~20 %) Fe₂O₃(~10 %) 조성의 기준치 적합 여부를 판단하였다. 소각재의 분석결과 CaO는 5.2~56.2 %, Al₂O₃ 1.0~19.0 %, SiO₂ 3.0~57.9 %, Fe₂O₃ 0.6~12.2 % 범위로 나타났다. 평가자료를 분석한 결과 소각재는

Fe₂O₃ 성분을 대부분 포함하고 있었으며 SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ 의 조성 기준치에 모두 충족하는 소각재는 약 6 %가 적합하였으며 매립처분량 1,135,109 톤/년 중에서 약 66,771 톤/년 재활용 가능할 것으로 추산되었다.

3.3.4. 연소재의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

연소재는 발전소 및 기타제조업에서 발생하는 매립 연소재로서 매립처분량은 25,359 톤/년 이다. 평가자료로 분석된 시료의 지정폐기물 유해물질 함유 기준은 모두 기준치 이하로 나타났다.

「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」 제25조 1항의 철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침에 따라 비산재를 시멘트의 원료로 사용할 때, SiO₂, 수분, 강열감량, CaO, SO₃ 등의 품질기준을 만족해야 시멘트 원료로 사용 가능하다. 연소재의 분석결과 SiO₂ 5.2~60.2 %, 수분 0.1~1.5 %, 강열감량 0.4~7.3 %, CaO 7.1~42.9 %, SO₃ 1.8~11.2 % 로 나타났다. 수분 1.0 이하 및 강열감량 5.0 이하 기준에 평가자료의 약 82 %가 기준치 이하로 나타났으며, SiO₂, CaO, SO₃ 항목에서 대부분 기준치를 초과하였다. 발전소에서 발생하는 비산재의 경우 품질기준에 충족하였다. 매립처분량 중에서 재활용 가능량으로 추산하였을 때 2,305 톤/년 가능할 것으로 나타났다.

연소재를 혼화재료로 재활용하기 위해서는 고속도로 건설재료품질기준(KS L 5405)의 Na₂O(2 %이하), SiO₂(45 %이상) CaO(10 %이하) 수분(1 %이하), 강열

감량(3 % 이하)의 항목의 품질기준을 만족해야 혼화 재료로 사용 가능하다. Na_2O 는 0~17.7 %, SiO_2 5.2~60.2 %, CaO 7.1~42.9 %, 수분 0.1~1.5 %, 강열감량 0.5~9.5 %의 범위로 분석되었으며, 수분, 강열감량은 기준치에 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 혼화재료로서 재활용 가능량은 8,453 톤/년 가능할 것으로 추산되었다.

연소재의 시멘트 재활용 가능성을 판단하기 위하여 4대 화학성분을 분석한 결과 CaO 는 2.3~46.9 %, Al_2O_3 6.7~27.7 %, SiO_2 5.4~67.1 %, Fe_2O_3 2.2~12.9 % 범위로 나타났다. 연소재의 경우, Al_2O_3 성분의 기준은 10~30 %이고 Fe_2O_3 3~10 %, SiO_2 40~65 %, CaO 5~20 %이다. 연소재의 매립처분량 중 243 톤/년 재활용 가능할 것으로 추산되었다.

3.3.5. 폐내화물류의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

폐내화물류는 발전소 및 석유 및 화학 제조업에서 발생하는 폐내화물로서 매립처분량은 3,814 톤/년이다. 철 대체원료 및 철 외의 대체원료로서 시멘트로 재활용할 경우 Pb , Cu , Cd , As , Hg 항목의 기준을 나타내었다. 폐내화물의 함량시험 분석 결과 Pb 는 24.1~8,995.0 mg/kg, Cu 는 117.2~253.4 mg/kg, Cd 불검출, As ND~20.9 mg/kg, Hg 는 ND~8.5 mg/kg로 분석되었다. 대부분 함량기준 보다 낮게 나타났고 Pb , Hg 의 농도가 함량 기준보다 높게 나타났다. 폐내화물류의 매립처분량 중 1,271 톤/년은 재활용 가능할 것으로 추산되었다.

폐기물 매립시설의 복토재로 재활용하는 경우 토양오염우려기준 중 2지역의 함량기준에 Cd , As , Hg , CN , Cr^{6+} 모두 기준치 이하 및 불검출 되었으며 Pb 기준치(400 mg/kg), Cu 기준치(500 mg/kg) 이상으로 기준치를 초과하는 것으로 나타났으며 재활용 가능량은 3,240 톤/년으로 추산되었다.

3.3.6. 폐주물사류의 재활용 방법별 매립처분 감소량 산정

폐주물사 및 폐사의 경우 유해물질 함유기준을 충족하고 시멘트 대체원료로서 사용 가능하며 시멘트 원료로 활용하기 위한 화학적 함량 조성 또한 시멘

트 대체원료로 재활용할 때, 철 대체원료 및 철 외의 대체원료로서 재활용할 경우 함량시험 결과 Pb 는 10.2~23.5 mg/kg, Cu 는 60.0~385.0 mg/kg, Cd , As , Hg 은 불검출 되었다. 모두 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 재활용 가능량은 22,699 톤/년으로 추산되었다.

폐주물사류의 시멘트 재활용 가능성을 판단하기 위하여 4대 화학성분을 분석한 결과 CaCO_3 는 0.1~27.3 %, Al_2O_3 3.9~21.3 %, SiO_2 12.3~93.8 %, Fe_2O_3 0.1~32.6 % 범위로 나타났다. 폐주물사의 경우, Fe_2O_3 성분 기준은 5~15 %인데 대부분 기준 초과로 나타났으며, Al_2O_3 성분의 기준 5~15 %, SiO_2 기준 50~80 %, CaO , 5 % 이하로 CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 성분은 기준치에 모두 만족하였으며 시멘트 재활용에 필요한 성분이 다량 포함되어 있음을 확인하였다. 폐주물사류의 재활용 가능량은 38,618 톤/년으로 추산되었다.

토양오염우려기준 중 2지역의 기준에 Cd , As , Hg , CN , Cr^{6+} 은 모두 기준치 이하 및 불검출 되었으며 폐기물 매립시설의 복토재로 재활용이 가능할 것으로 판단되었고 매립처분량 중에서 재활용 가능량은 22,699 톤/년으로 추산되었다.

3.4. 열적처리잔재물의 평가기준별 재활용 가능성 검토 및 관리항목 고찰

매립처분되는 사업장 열적처리잔재물의 재활용 가능성을 평가하기 위해 매립처분 감소 가능량 추산결과를 바탕으로 Table 6에 열적처리잔재물의 재활용 가능 항목별로 분류하고 그에 대한 관련규정 및 폐기물 기준의 적합여부에 따라 가중치를 두어 표현하였다. 먼저, 중금속 유해물질 함유기준을 검토하여 재활용 가능성 유·무를 판단하고 대상 폐기물의 시멘트 대체원료 기준, 시멘트 원료 및 부원료로 활용하기 위한 화학적 함량 조성, 도로기층, 성토, 매립복토로의 이용 확대 가능한 중금속 함량시험 결과를 각각의 품질기준과 비교하여 검토하였다.

검토 결과, 광재는 유해물질 함유 기준에서 중금속 용출기준에 적합하여 재활용이 가능하게 나타났으며 시멘트 대체원료 기준, 시멘트 원료 성분에 적합하게 나타났다. 하지만 콘크리트 혼화재, 매립시설 복토재로는 일부 광재류만 가능한 것으로 보여진다. 분진의 경우, 유해물질 함유 기준에서 일부만 기

Table 6. Review on Recyclability of Inorganic Wastes by Evaluation Criteria

Item	Toxic substance ¹⁾	Cement alternative raw material ²⁾	Cement subsidiary raw material ³⁾	Admixture ^{4),5)}	Use cover · bank material ⁶⁾
Standard	Designated wastes (heavy metal)	Alternative subsidiary raw material	SiO ₂ , CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	Concrete admixture* Fly ash admixture**	Cover material, bank material, landfill cover material
Slag*	◎	○	○	△	△
Dust	△	×	×	-	×
Incineration ash	○	△	△	×	×
Power plant ash**	◎	△	△	△	◎
Waste refractory	-	△	×	-	○
Waste molding sand	◎	◎	◎	-	◎

◎ : Fits all sample standards, ○ : ≥50 %, △ : ≤30 %, × : Exceeds all sample standards

- 1) WASTES CONTROL ACT (toxic substance contained in designated wastes)
- 2) ACT ON THE PROMOTION OF SAVING AND RECYCLING OF RESOURCES Enforcement Rule Article 20-3, 3paragraph
- 3) WASTES CONTROL ACT Enforcement Rule attached table 5-2
- 4) ACT ON THE PROMOTION OF SAVING AND RECYCLING OF RESOURCES
- 5) Highway Construction Material Quality Standard (Korea Expressway Corporation, 2015)
- 6) WASTES CONTROL ACT Worrysome Level of Soil Contamination

준치 이하로 재활용 가능하였으며 시멘트 대체원료, 시멘트 원료 성분, 매립시설 복토재로 재활용은 가능하지 않은 것으로 나타났다. 소각재의 경우 중금속 용출기준치 이하로 유해물질 함유 기준 및 시멘트 대체원료 재활용 시 대부분 가능한 것으로 나타났다. 연소재는 유해물질 함유기준 및 성·복토재로 활용이 가능할 것으로 나타났으며 폐내화물은 중금속 용출, 함량 분석결과 재활용 가능성이 낮은 것으로 나타났다. 폐주물사 및 폐사의 경우 유해물질 함유기준을 충족하고 시멘트 대체원료로서 사용 가능하게 나타났다. 폐주물사 및 폐사의 경우 유해물질 함유기준을 충족하고 시멘트 대체원료로서 사용 가능하게 나타났다. 폐주물사 및 폐사의 경우 유해물질 함유기준을 충족하고 시멘트 대체원료로서 사용 가능하게 나타났다.

자료조사 및 평가자료의 분석 결과를 바탕으로 추산한 결과 열적처리잔재물의 약 5~42% 매립처분 감소가 가능할 것으로 판단되나, 매립지에 반입되는 열적처리잔재물의 매립처분 최소화를 위해서는 열적처리잔재물류 재활용 유형 확대에 따른 재활용산업의 활성화, 순환골재품질기준이나 생산자책임재활용기준에 따른 재활용제품 의무사용대상 확대 적용 등이 정책으로 뒷받침 되어야 할 것으로 판단되었다. 처분부담금 징수 등 간접적인 경제적 유인책과 더불어 적극적인 매립처분 최소화를 위해서는 매립지 반입폐기물의 관리항목을 함수뿐만 아니라

라 화학조성, 고위발열량(HHV), 강열감량(LOI) 등으로 확대하여 관리할 필요가 있으며 제품의 생산자만이 아닌 재활용 제품의 수요처에서도 재활용의 의무를 권고할 수 있는 재활용 제품의 의무사용 확대 방안이 필요할 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 매립처분량이 많은 사업장배출시설계 무기성폐기물 중 열적처리잔재물의 재활용 가능성 검토를 위해 국내 열적처리잔재물의 처리현황 조사 및 특성분석을 통해 매립처분 감소 가능량을 추산하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 국내 폐기물은 발생량 대비 9.2%가 매립처분되고 있으며, 사업장배출시설계폐기물의 매립처분량은 전체 매립량의 약 62%로, 이 중 소각재, 연소재 등의 열적처리잔재물류가 45.1%를 차지하고 있다. 2035년 국가 매립목표 1% 달성을 위해 열적처리 잔재물이 매립억제 주요 대상 폐기물로 판단되었다.
2. 열적처리 잔재물의 약 5~42% 매립처분 감소가 가능할 것으로 판단되나, 매립지에 반입되는 열

적처리 잔재물의 매립처분 최소화를 위해서는 열적처리잔재물류 재활용 유형 확대에 따른 재활용산업의 활성화, 순환골재품질기준이나 생산자책임재활용기준에 따른 재활용제품 의무사용대상 확대 적용 등의 적극적인 재활용과 매립 억제 정책 추진이 뒷받침 되어야 할 것으로 판단되었다.

3. 매립처분 최소화를 위해 폐자원 재활용 유형의 다양성 확대와 더불어, 매립지 반입관리항목으로 함수율뿐만 아니라 고위발열량(HHV), 강열감량(LOI) 등 반입관리항목 도입을 통한 적극적 관리와 재활용 제품의 의무사용 확대 방안이 필요할 것으로 판단되었다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2017-01-01-045).

References

1. Park, S. W., "Enforcement of the fundamental law of resource circulation and waste management : the EU's resource efficiency policy trend", J of Korea Society of Waste Management, 34(3), pp. 215~223. (2017).
2. Park, S. W., "Disposal of municipal solid waste and energy recovery from incinerated waste: focus on OECD countries", J of Korea Society of Waste Management, 34(1), pp. 1~12. (2017).
3. Ministry of environment, Status of waste generation and disposal in Korea (2015).
4. All-baro system, <http://www.allbaro.or.kr>, (2016).
5. Park, S. O., Um, N. I., Kim, W. I., Choi, H. H., Yoon, C. W., Kim, T. H., Kang, Y. Y., Jeon, T. W., and Shin, S. K., "A study on copper and copper alloy characteristics of waste generated in smelting process", J of Korea Society of Waste Management, 33(3), pp. 285~293. (2016).
6. Kim, W. I., Jeong, M. J., Jeong, Y. W., Cho, N. H., Kim, Y. J., Kim, M. J., Jeon, T. W., and Shin, S. K., "Study on management of industrial waste for alternative resource of natural materials(III)", National Institute of environmental Research, pp. 1~39. (2015).
7. Park, J. S., "Physico-chemical characteristics of municipal solid waste generated from T city and leaching characteristics of the incineration ash", J. of KORRA, 18(2), pp. 84~92. (2010).
8. Park, D. W., Choi, H. N., Woo, N. C., Kim, H. J., and Chung, D., "Evaluation of leaching potential of heavy metals from bottom ashes generated in coal-fired powerplants in Korea", J. Soil & Groundwater Env., 18(7), pp. 32~40. (2013).
9. Maeng, J. H., Kim, T. Y., and Suh, D. H., "Minimizing environmental impact in accordance with the thermal power plant ash management", Korea Environment Institute, pp. 1~216. (2014).
10. Rhee, S. H., and Yoon, H. H., "Study on physico-chemical property and extraction characteristics of spent foundry sands", J of Korea Society of Waste Management, 21(8), pp. 851~858. (2004).
11. Choi, S. W., Kim, V., Chang, W. S., and Kim, E. Y., "The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries", J of the Korea Concrete Institute, 19(6), pp. 28~33. (2007).
12. Kim, Y. J., and Chung, M. H., "Study on the reuse and recycling of the used foundry sands", J of KORRA, 18(4), pp. 38~44. (2010).
13. Lee, W. C., Shin, D. C., and Dong, J. I., "Investigation of characteristics of incinerator bottom ash and assessment for recycle due to the change of MSW composition", Applied Chemistry for Engineering, 25(1), pp. 103~106. (2014).
14. Gorai, B. et al., "Characteristics and utilisation of copper slag-a review", Resources, Conservation and Recycling, 39(4), pp. 299~313. (2003).

15. Jeong, S. K., Kim, W. I., Shin, S. K., Kang, Y. Y., Yeon, J. M., Kim, M. S., Cho, Y. A., Kim, N., and Oh, G. J., “Study on Leaching Behavior on Dust Produced from Metal Manufacturing Processes”, *J of Korea Society of Waste Management*, 29(7), pp. 642~649. (2012).
16. Lee, S. H., “Study on tne environmental hazard of waste foundry by mold type and proper management plan”, *Korea Institute of Industrial Technology*, pp. 1~148. (1997).
17. Rhee, S. W., “Stabilization of spent foundry sand to recycle as auxiliary material in pavement subbase”, *J of Korea Society of Waste Management*, 31(6), pp. 646~653. (2014).