

서울시 생활계폐기물 소각시설에서 발생하는 소각철 처리현황 분석을 통한 개선방안 검토

김주원* · 손민희** · 조용성***†

*고려대학교 에너지환경정책대학원 박사과정, **싱가포르국립대학 에너지연구소 연구원, ***고려대학교 식품자원경제학과 교수

Iron separation by magnetic separation of household waste incineration bottom ash in Seoul

Kim, Juwon* · Son, Minhee** and Cho, Yongsung***†

**Doctoral Student, Graduate School of Energy and Environmental Policy, Korea University, Seoul, Korea*

***Research Fellow, Energy Studies Institute, National University of Singapore, Singapore*

****Professor, Department of Food and Resource Economics, Korea University, Seoul, Korea*

ABSTRACT

The incineration rate of combustible household waste discharged using standard waste bags in Seoul city increased by about 6 times compared to about 20 years ago, reaching 58% as of 2022. From 2018 to 2022, the waste metals mixed in standard waste bags of Seoul city are the source of incinerated-iron, the discharge of which increases every year. However, the proportion recovered as incinerated-iron is varied, ranging from 4.7% to 39.7%, and the recovery rate is decreasing over the years. The proportion of incinerated-iron recovered from bottom ash is 1.2% to 2.1%, and the proportion of incinerated-iron among the recovered metals is 94.3% to 99.6%. All recovered incinerated-iron is sold, but its price is lower than the market price. The low recovery rate and low selling price are the current problems of incinerated-iron of Seoul. The recovery rate can be affected by the type of incoming waste, the performance of the magnetic separator, and the size and shape of incinerated-iron, and continuous research is needed to analyze these interrelationships. In addition, the low sales price of incinerated-iron is related to its quality and use. Incinerated-iron is recovered as iron oxide and sold with the incineration bottom ash still on the surface, greatly reducing usage. Future research is needed to improve the recovery quality of incinerated-iron and expand its uses.

Key words : Incinerated-Iron, Combustible Household Waste, Magnetic Separation, Bottom Ash, Iron Recovery

1. 서론

서울시 가연성 생활계폐기물의 소각 비율은 2003년 10%에서 2022년 58%로 증가한 반면, 매립 비율은 2003년 61%에서 2022년 25%로 감소했다(Resource Circulation Information System, 2018). 소각 비율의 증가는 배출된 생활계폐기물의 부피를 감소시켜 매립지의 사용기간을 연장하고(Kuroki et al., 2019), 폐기물의 직매립으로 인한 토지

의 환경부하를 낮추는 효과가 있다(Jadhav and Hocheng, 2012). 이에 제한적인 국토를 가진 우리나라에서는 소각처리가 효율적인 폐기물 처리방법의 하나로 주목받고 있다. 소각처리 후 배출된 잔재물은 대부분 매립처분 하였으나, 『순환경제사회촉진법』이 2024년 1월부터 시행됨에 따라 소각처리 후 잔재물의 재활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 서울시는 2022년 소각재를 재활용한 시멘트 연구개발 협약을 체결하였으며, 이를 통해 폐기물 매립량 감소와 함

†Corresponding author : yscho@korea.ac.kr (145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3037)

ORCID 김주원 0009-0000-9619-2876
손민희 0000-0003-1692-9968

조용성 0000-0002-1382-6261

계 폐자원의 순환이용을 유도하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2024). 그러나 선행연구에 의하면, 소각 잔재물은 인체 및 환경에 유해한 금속을 함유하고 있으며(Ahn, 2006; Shin et al., 2000), 잔존금속은 화학적으로 불안정한 특징을 가지고 있어(Ahn, 2006; Um et al., 2007) 소각재의 재활용을 어렵게 한다.

이에 연구자들은 해법 강구를 위한 기초연구를 실시했다. 국내 소각시설로 유입되는 철의 함유량은 3~11%이며(Um et al., 2007), 소각재의 약 85~90%를 차지하는 바닥재에는(Kim, 2016; Um et al., 2009) 약 5~11%의 철과 구리, 망간 등 비철금속을 함유하고 있다고 밝혔다(Ahn, 2006; Chung et al., 2001). 특히 Um et al. (2007)은 바닥재의 재활용률을 높이기 위해, 바닥재에 포함된 철금속류의 크기와 자력세기에 따른 철금속류를 분리하는 연구를 진행했다. 선행연구들은 소각재에서 금속을 회수하는 것은 소각재의 재활용 측면에서 중요하며, 금속이 토지에 매립되는 것을 방지할 수 있어 환경적인 측면에서도 중요하다는 점을 부각시켰다. 그럼에도 현재까지 소각시설에서 회수되는 금속류에 대한 공개된 정보와 통계자료가 없어, 금속 회수여부에 대한 파악이 어렵다. 다만, 2006년부터 현재까지 일부 소각시설에서 회수된 철에 대한 공개매각 정보는 확인이 가능하므로, 이 자료들로부터 철이 별도로 회수되는 것을 추정할 수 있다(Seoul Metropolitan City Resource Recovery Facility, 2024).

한편, 해외에서는 소각재에 함유된 금속에 대해 적극적으로 연구하고 활용하고 있다. 순환경제체제를 이미 시행하고 있는 유럽연합(EU)은 2014년 소각잔재물에 대한 폐기물 목록을 작성하였고 바닥재로부터 회수된 철금속을 폐기물 항목으로 구분하여 지정하였다. Tang (2012)은 스위스의 ‘재활용폐기물 및 지속가능한 자원관리개발 센터’에서 생활폐기물의 소각처리 후 배출된 0.7 mm ~ 5 mm 크기의 바닥재로부터 철을 비롯하여 알루미늄을 분리 및 회수하는 기술을 개발했으며, 회수율은 96.8% 수준이라 언급했다. Honma and Ogasawa (1995)는 일본의 자력선별기술을 이용한 폐기물 성상에 따른 금속 및 비철금속 회수에 대한 방법을 제시하였다. Sierra et al. (2024)은 바닥재에서 회수되는 철 스크랩은 3 mm 이하의 크기이며, 3 mm 이상인 경우에 자력선별기에서 회수된다고 언급하였다. 이처럼 해외에서는 소각 후 발생하는 바닥재에서 금속을 회수하는 방안에 관한 많은 연구가 진행되었을 뿐만 아니라, 회수 금속에 대한 재활용 방법과 용도를 밝히고 있다. 소각시설에서 회수한 철을 일본과 스위스는 산

업계에 매각하고 있으며(Bunge, 2016; Sakanakura, 2018), 네덜란드와 프랑스는 자동차 산업에 활용하는 등 재활용률을 높이고 있다. 그러나 국내에서는 실제 소각시설로부터 철금속 회수방법뿐만 아니라, 회수된 금속의 재활용 방법과 용도 등 전반적인 관련 연구가 부족한 상황이다.

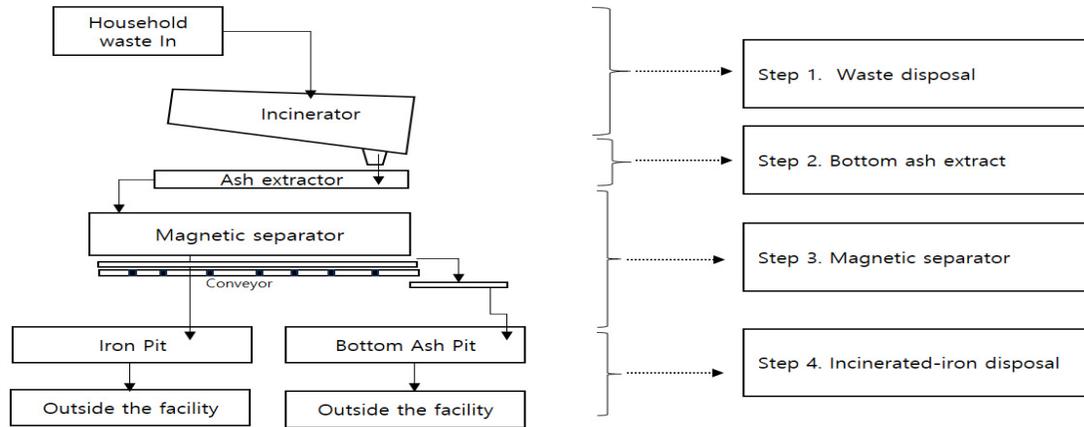
따라서 본 연구는 실제 소각시설에서 회수되는 철금속에 대한 현황을 알아보는데 그 목적을 두었으며, 종량제 봉투 대상폐기물의 소각시설 유입부터 회수된 철의 소각시설 반출까지 전과정을 4단계로 구분하여 현황을 파악하였다. 또한 서울시 자원회수시설 내 자력선별기의 시설 및 철의 회수과정 등 현황을 정리했다. 이를 바탕으로 서울시의 생활계폐기물로부터 회수되는 철의 재활용 증대 및 이용 촉진을 위한 시사점을 도출하고자 한다. 본 연구는 생활계폐기물의 소각시설 유입부터 회수된 철의 매각까지 전과정에 대한 현장의 실제 데이터를 바탕으로 진행하여 기존의 실험연구들과 차별성을 두고 있으며, 생활계폐기물의 소각잔재물과 관련된 순환이용연구의 기초자료로 기여하고자 한다.

2. 연구방법 및 분석자료

본 연구는 서울시 생활계폐기물의 소각처리과정에서 발생하는 소각철을 분석대상으로 하였다. 소각철(Incinerated-iron)이란 소각잔재물 혹은 소각부산물의 일부로서 일정한 크기 이상의 철이 자력선별기를 통해 선별되어 경제적 가치가 있어 매각가능한 철을 지칭한다. 소각철이란 용어는 관련 업계 및 매각 공고 시 사용하고 있으며, 시설물에서 회수되는 ‘고철’과 구분된다.

공간적 연구범위는 종량제봉투 대상폐기물 처리 관련 자료를 확보할 수 있는 서울시를 대상으로 했다. 다만, 서울시의 25개 구 중 구로구, 금천구의 종량제봉투 대상폐기물의 처리는 서울시가 아닌 광명시와 김포매립지를 이용하고 있어 분석대상에서 제외하였다.

분석을 위해 사전에 서울시 자원회수시설의 소각철 회수시설의 현황과 처리공정을 정리하였다. 이후 소각철의 회수현황을 살펴보았으며, 국가 폐기물 통계자료를 바탕으로 Fig. 1과 같이 소각철 회수 흐름을 총 4단계로 구분하여 각 단계별 현황을 정리했다. 첫 번째 단계는 ‘종량제 봉투내의 폐금속류 배출현황’을 파악하였다. 종량제 봉투에는 분리수거 되지 않은 불연물 중, ‘폐금속류’가 포함되어 있으며, 이중 폐철류는 소각철의 직접적인 배출원이 된다. 따라서 자원회수시설 별 종량제봉투 유입량(이하



Source: Reconstitution of the incinerator process of Seoul City facility by author

Fig. 1. Process for recovering incinerated-iron from household waste

‘종량제봉투 유입량’)과 유입된 종량제봉투 속 폐금속류의 양(이하 ‘폐금속류량’)을 조사하였다. 두 번째 단계는 ‘바닥재 배출’로 생활계폐기물의 소각처리를 통해 배출되는 바닥재와 바닥재에 포함되는 폐금속류를 정리하였다. 세 번째 단계는 ‘자력선별기를 통한 소각철 회수’로 바닥재가 자력선별기를 통과하며 회수되는 폐금속류와 소각철의 양을 정리하였다. 네 번째 단계는 소각철의 매각 정보를 이용하여 최근 5년 동안의 서울시 자원회수시설의 소각철 매각량과 매각금액을 조사하였다. 이를 바탕으로 서울시의 소각철 재활용 및 활성화를 위한 향후 과제를 검토하였다.

분석에 사용한 연구자료는 환경부에서 매년 공표하는 <전국 폐기물 발생 및 처리 현황> 통계자료 중 <생활계폐기물 발생 및 처리 현황> 부분의 ‘종량제봉투 배출량’, ‘종량제봉투 속 폐금속류 혼합량’을 사용하였고, <사업장 배출 시설계폐기물 발생 및 처리 현황> 부분의 ‘바닥재 처리방법’, <전국 폐기물 처리업체 현황> 부분에서 ‘자원회수시설 세부내용’을 활용하였다. ‘소각시설 유입량’은 서울시 자원회수시설 홈페이지의 시설운영 현황 자료를 사용하였다. 소각재, 비산재, 바닥재, 소각철 회수 내용 등은 정보공개청구를 통하여 자료를 확보했다. 소각시설 내 자력선별기의 세부사양, 도안, 시방서, 운용현황, 소각철 회수공정 등은 기기 제조업체 관련자, 서울시 자원회수시설의 전문가들에 대하여 전화 및 대면 인터뷰를 통하여 관련정보를 확보하거나 실물 자료를 제공받았다. 다만 관련 시설과 환경부에서 발표한 자료에서 통계수치의 차이가 있을 경우에는 환경부 통계를 기준으로 사용하였다.

서울시에서 운영 중인 소각시설은 5개소로서 영문약자인 대문자(G, N, M, Y, E)로 간략 표시하였다. 분석기간은 2018년부터 2022년까지 최근 5개 년도를 대상으로 하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 소각철 회수시설 현황

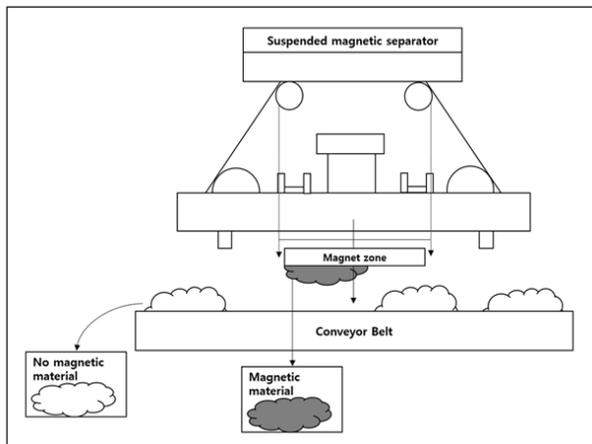
자원회수시설로 유입되는 종량제봉투는 소각처리 후에 바닥재와 비산재를 배출한다. 이때 재활용가능자원으로 분리 배출되지 못하고 종량제봉투에 섞여 배출된 폐금속류는 불연물로 바닥재와 함께 섞여 배출되며, 폐금속류를 별도로 분리하여 회수하기 위해 자력선별기를 사용하게 된다.

서울시 5개소의 자원회수시설에는 자력선별기가 모두 설치되어 있으며, 설치기준으로는 자력선별기의 전력소비가 우선순위로 고려된다. 자원회수시설별로 기계형태, 표면자력강도, 회수물(철, 비철) 등에서 시설 설비의 차이를 보이며 이를 Table 1에 정리했다. 현재 서울시 소각시설에서 사용하는 자력선별기는 서스펜디드형과 마그네틱 드럼형의 두 종류가 있다(Lee et al., 2018). 서스펜디드형은 Fig. 2와 같은 원리로 운용되며, G, N, M 시설에서 사용 중이다. 표면자력강도는 6,000G에서 7,000G 정도이며, 자력과 컨베이어 벨트의 거리가 30 cm ~ 52 cm 이내일 경우, 3 kg ~ 6 kg 이하의 소각철은 대다수 선별이 가능하다. 드럼선별기는 Fig. 3과 같은 원리로 운용되며, Y, E 시설에서 사용 중이다. 표면자력강도는 2,800 G에서 3,000 G 정

Table 1. Magnetic separator type and intensity at incinerator facility in Seoul City

	Incinerator facility in Seoul City				
	G	N	M	Y	E
Incinerator type	Stoker	Stoker	Stoker + Rotary Kiln	Stoker	High temp. Melting
Magnetic separator type	Suspended	Suspended	Suspended	Magnetic drum	Magnetic drum
Magnetic field intensity (GS)	6,700	Approximately 6,000	Approximately 7,000	2,800	Approximately 3,000
Operation start (year)	2001.12	1997.04	2005.06	1996.03	2009.02

Source: The Seoul Institute (2023) & expert interview



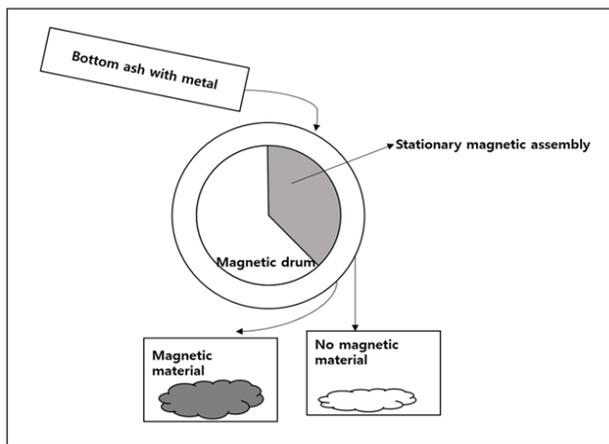
(a) Diagram of suspended type-magnetic separator of M incineration facility



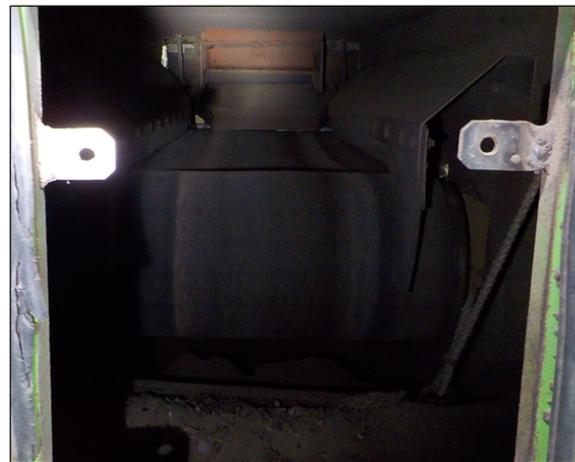
(b) Machines of suspended type-magnetic separator in M incineration facility

Source: (a) The author reorganized the materials provided by M incineration facility

Fig. 2. Diagram and machines of suspended type-magnetic separator of M incineration facility



(a) Diagram of magnetic drum separator of E incineration facility



(b) Machines of magnetic drum separator of E incineration facility

Source: (a), (b) The author reorganized the materials provided by E incineration facility

Fig. 3. Diagram and machines of magnetic drum separator of E incineration facility

도이며, 소각철의 무게가 15 kg 이내일 경우, 거리와 상관 없이 대다수 선별이 가능하다. 이론적으로 자력선별기의 성능을 초과하는 중량을 가진 소각철이 배출될 경우 수동 분류하는 경우가 있을 수 있으나, 배출되는 종량제봉투는 크기와 무게를 정책적으로 제한하고 규격화하고 있어, 자력선별기의 성능을 초과하는 폐금속류가 포함되기 힘들기 때문에 대부분 자동 분류되고 있다.

3.2. 소각철 회수 공정

서울시에서 운영하고 있는 대표적인 소각철 회수공정인 M자원회수시설의 자력선별기를 통한 소각철 회수 공정을 시설물의 사진과 함께 Fig. 4에 정리했다. M시설에서는 3개의 소각로에서 바닥재가 회수된다(Fig. 4(1)). 회수된 바닥재는 컨베이어 벨트로 이동하고, 바닥재의 높은 온도를 낮추기 위해 일반적으로 수냉각을 하지만, M시설은 긴 이동거리를 통과하는 과정에서 바닥재 온도가 낮아져 별도처리를 하지 않고 있다(Fig. 4(2)). 바닥재는 금속과 함께 자력선별기로 유입되고(Fig. 4(3)), 선별기로 바닥재에서 소각철이 분리된다(Fig. 4(4)). 분리된 소각철은 철 피트로 이동하여 일시 보관하고(Fig. 4(5)), 이후 마대를 이용하여 계근된 후 시설에서 반출된다(Fig. 4(6)). M시설의 경우 철 이외에 비철금속도 별도 회수하고 있다.

3.3. 소각철 회수 현황

2018년부터 2022년까지 서울시 23개구에서 배출된 생활계폐기물(Table 2[A])에서 회수된 소각철의 매각량(Table 2[G])을 Table 4에 정리했다. Fig. 1의 단계별 구분에 따라 Table 2에 Step 1부터 Step 4까지 구분하여 정리하였다.

Table 2의 Step 1은 폐기물의 발생단계이며, 소각철의 배출원이 되는 불연물인 폐금속류량이 종량제봉투에 담겨 소각시설로 유입되는 것을 확인할 수 있는 단계이다. 23개구의 생활계폐기물의 배출양(Table 2[A])은 2018년 1,042,100 t, 2019년 1,297,200 t, 2020년 1,162,000 t, 2021년 1,301,200 t, 2022년 1,169,100 t으로 매년 증감을 반복하고 있다. 이중 소각시설로 유입되는 생활계폐기물(Table 2[B])에 포함된 폐금속류량을 Table 2[C]에 정리했다. 유입되는 폐금속류량은 2018년 5,221 t, 2019년 6,024 t, 2020년 4,894 t, 2021년 7,130 t, 2022년 23,497 t으로 2020년을 제외하고 매년 증가하는 경향을 보인다. 특히 2022년은 2018년의 약 4.5배에 달하는 폐금속류 유입량이 확인되었다.

Table 2의 Step 2는 소각시설로 유입된 폐기물(Table 2[B])이 소각처리된 후의 잔재물인 바닥재의 양을(Table 2[D]) 나타내고 있다. 바닥재에는 폐금속류가 포함되어 있으며, 2018년 99,591 t, 2019년 107,362 t, 2020년 99,382 t, 2021

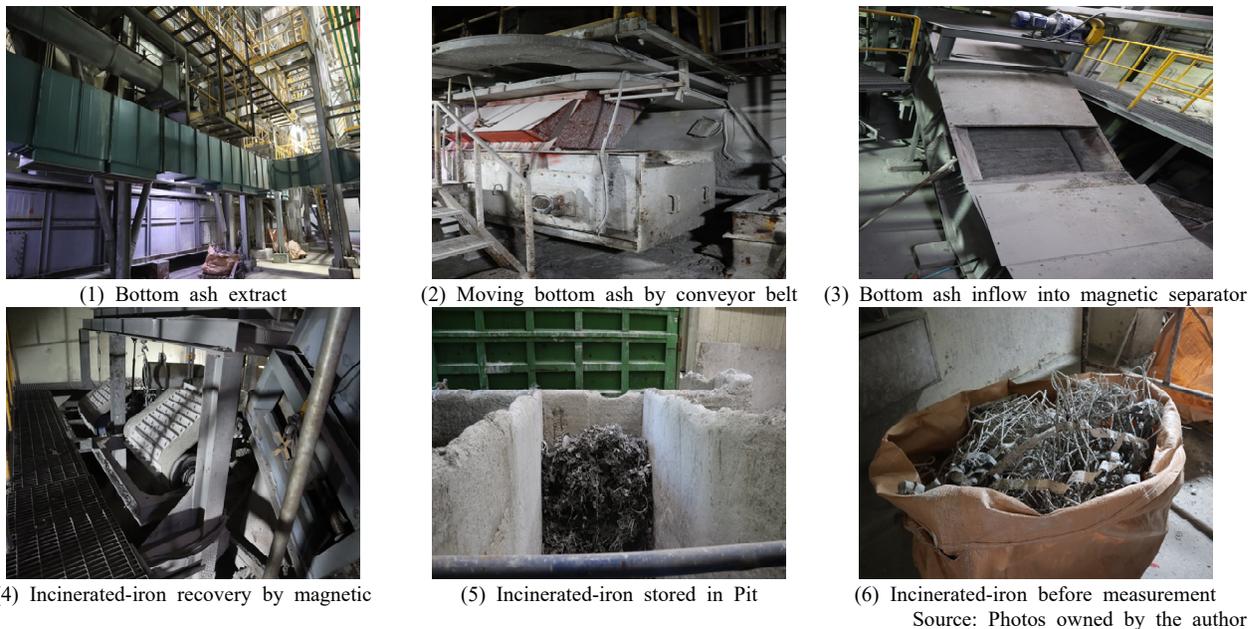


Fig. 4. Status quo of incinerated-iron recovery process using magnetic separation at M facility in Seoul City

Table 2. 2018 ~ 2022 Statistical data from combustible-standard waste bags entering the incinerators to incinerated-iron being removed from the incinerators in Seoul City

Step	Item	2018	2019	2020	2021	2022
1	[A] Amount of combustible-standard waste bag (tones/year)	1,042,100	1,297,200	1,162,000	1,301,200	1,169,100
	[B] Amount of 5 incinerators inflow combustible-standard waste bag (tones/year)	739,929	713,909	715,619	712,236	688,626
	[C] Amount of metals in the combustible-standard waste bag flowing into incinerators (tones/year)	5,221	6,024	4,894	7,130	23,497
2	[D] Amount of bottom ash extraction containing metals (tones/year)	99,591	107,362	99,382	91,476	91,443
3	[E] Total amount of recovered metals from 5 incinerators in Seoul city (tones/years)	2,097	1,874	1,252	1,245	1,105
	[F] Amount of recovered incinerated-iron (tones/year)	2,075	1,865	1,181	1,240	1,100
4	[G] Sales volume of incinerated-iron from 5 incinerators in Seoul city (tones/year)	2,075	1,865	1,181	1,240	1,100
	[H] Total price of incinerated-iron from 5 incinerators in Seoul city (Thousands KRW)	228,745	196,998	69,504	108,597	136,758

Source: The waste generation and treatment status (MOE, 2018 ~ 2022), Status of incinerator facility in Seoul City (Seoul City Resource Recovery Facility, 2018 ~ 2022) and Seoul City Government's internal data (Seoul City Government, 2018 ~ 2022)

년 91,476 t, 2022년 91,443 t이 배출됐다.

Table 2의 Step 3은 바닥재(Table 2[D])가 컨베이어 벨트로 이동된 후 자력선별기를 통과하며 분리된 폐금속류양(Table 2[E])과 그 중 소각철양(Table 2[F])만 별도로 분리한 것을 정리하고 있다. 폐금속류양과 소각철양의 차이는 비철금속류량이다. 폐금속류양은 2018년 2,097 t, 2019년 1,874 t, 2020년 1,252 t, 2021년 1,245 t, 2022년 1,105 t이 바닥재로부터 회수되었다. 그 중 소각철량은 2018년 2,075 t, 2019년 1,865 t, 2020년 1,181 t, 2021년 1,240 t, 2022년 1,100 t이다. 회수되는 폐금속류량과 소각철량은 매년 감소하는 경향을 보인다. 특히 2022년의 소각철 회수량은 2018년 회수량의 약 53% 수준이다.

Table 2의 Step 4는 소각철의 매각량(Table 2[G])과 매각금액(Table 2[H])을 정리했다. 소각철의 매각량은 소각철의 회수량(Table 2[F])과 동일하며, 회수되는 전량이 매각되었다. 매각액은 시가를 반영하며, 이에 따른 매각액은

2018년 228,745천원, 2019년 196,998천원, 2020년 69,504천원, 2021년 108,597천원, 2022년 136,758천원이다.

3.4. 결과에 대한 고찰

Table 3에는 Table 2에 정리한 데이터로부터 지표를 산출하여 정리하였다. 산출 지표로는 소각시설로 유입된 종량제봉투 중에 포함된 폐금속류양의 비중(Table 3[I]), 종량제봉투에 포함된 폐금속류 중 회수된 소각철양 비중(Table 3[J]), 바닥재 중 회수된 소각철양 비중(Table 3[K]), 회수된 금속류 중 소각철양 비중(Table 3[L])으로 총 4가지이다. 이를 바탕으로 현재 소각철의 회수현황과 관련하여 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, Table 3[I]에 따르면 최근 5년간 종량제봉투 속 폐금속류의 비중이 매년 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 분리수거가 제대로 이행되고 있지 않다는 근거가 될 수 있다. 폐금속류의 양은 2022년 3.41%로 2018년

Table 3. 2018 ~ 2022 Indicators from source to end product of incinerated-iron

	Formula	2018	2019	2020	2021	2022
[I] Ratio of metals in the combustible-standard waste bag inflow into the incinerators	[C]/[B]	0.71%	0.84%	0.68%	1.00%	3.41%
[J] Ratio of recovered incinerated-iron over waste metals in combustible-standard waste bag inflow into the incinerators	[F]/[C]	39.74%	30.96%	24.13%	17.39%	4.68%
[K] Ratio of recovered incinerated-iron over extracted bottom ash	[F]/[D]	2.08%	1.74%	1.19%	1.36%	1.20%
[L] Ratio of recovered incinerated-iron over recovered metals	[F]/[E]	98.95%	99.52%	94.33%	99.60%	99.55%

에 비해 약 4.8% 증가했음을 확인할 수 있다.

둘째, Table 3[J]와 Table 3[K]에 따르면 소각철의 회수량이 매년 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. Table 3[J]의 경우 2018년 39.74%, 2019년 30.96%, 2020년 24.13%, 2021년 17.39%, 2022년 4.68%로 종량제봉투에 포함된 폐금속류 중 회수된 소각철량의 비중이 매년 줄어들고 있다. 불연물인 폐금속류는 유입된 만큼 전부 회수되어야 하나, 2022년도는 소각시설로 유입된 폐금속류의 4.68%에 해당하는 만큼만 소각철로 회수되었고, 나머지 95.32%는 그 내용을 확인할 수 없다. 이 경우 3가지의 가능성이 있는데, (1) 폐금속류에는 철류 이외의 비철류를 포함하기 때문에, 소각철의 회수량이 줄은 반면, 비철류의 회수량이 증가한 경우가 있을 수 있다. 실제 서울시의 비철금속 회수량은 Table 2의 [E]-[F]로 산출 가능하며, 2018년 22 t, 2019년 9 t, 2020년 71 t, 2021년 5 t, 2022년 5 t으로 비철금속의 회수량도 줄어들고 있다. 이 바탕에는 서울시의 경우 단 2곳의 자원회수시설에서만 비철금속을 회수하고 있기 때문에 비철금속의 회수량을 산정할 수 없어 정확한 확인이 불가능한 실정이다. (2) 회수되지 않은 폐금속류 중 소각철이 자력선별기에 회수되지 않을 만큼 작은 크기인 경우이다. 이 경우 소각철은 바닥재에 포함되어 배출되며, 바닥재는 매립장으로 이동하여 매립되기 때문에, 이 또한 소각철량의 확인이 힘들다. 소각철의 경우 바닥재와 함께 땅에 매립되면, 또 다른 환경문제로서 토양, 지하수를 오염시킬 수 있으므로 소각철의 회수율을 높게 할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다. (3) 마지막으로 자력선별기의 노후화로 인한 성능저하를 들 수 있다. 자력선별기는 소각시설이 설계 및 시공될 때 같이 설치되어 지금까지 사용되어 왔다. 서울시 자원순환시행계획 2차 보고서에 따르면 2020년 12월 31일 기준 자원회수시설의

평균연한은 약 19년이며, 이와 함께 자력선별기의 연한 또한 노후화를 추론할 수 있다. 그러나 소각철의 회수량에 대하여 최근 5년만을 검토하고 있는 관계로 자원회수시설의 노후화와의 인과관계는 확인이 불가능하므로, 이와 관련하여 추가적인 연구가 필요하다.

Table 3[K]는 바닥재에서 회수되는 소각철의 비중으로 2018년 2.08%, 2019년 1.74%, 2020년 1.19%, 2021년 1.36%, 2022년 1.20%이다. 2022년은 2018년의 약 50% 감소한 수치를 보여주고 있다. 소각철 회수와 관련하여 자력선별기는 필수 요소이지만, 회수율은 자력선별기의 성능, 형태 등에 영향을 받는다. 그러나 국내에서는 소각시설에서 사용되는 자력선별기에 대한 연구가 많지 않을 뿐만 아니라, 자력선별기에 맞는 최대 효율을 위한 소각철의 크기, 형태 등에 대한 연구도 부족하다. 예를 들어 스위스의 경우, 소각 바닥재는 크러셔로 유입되어 바닥재 속 큰 금속을 작게 분쇄하는 과정을 거친 후, 자력선별기를 통해 금속을 회수하며, 이 과정은 바닥재와 철의 분리를 용이하게 만들고 철의 회수율을 높인다(Bunge, 2016). 따라서 전처리시설이 없는 서울시는 자력선별기의 연구와 함께, 소각철의 회수율을 높일 수 있는 연구가 동시에 진행되어야 할 것이다.

셋째, Table 3[L]에 따르면 회수되는 폐금속류 중 소각철이 대부분인 것으로 확인가능하다. 2018년 98.95%, 2019년 99.52%, 2020년 94.33%, 2021년 99.60%, 2022년 99.55%의 비중으로 소각철이 회수됐으며, 최근 5개년 평균 98% 수준이다. 이는 소각철 회수설비에 집중되어 있는 것을 뜻하며, 종량제봉투 대상폐기물의 소각처리를 통해 회수되는 폐금속류의 비중을 높이기 위해선 비철금속의 회수에도 관심을 가져야 할 것이다.

넷째, Table 4에서는 소각철의 낮은 판매가격을 확인할

Table 4. 2018 ~ 2022 Economic value of incinerated-iron and iron scrap price

	Formula	2018	2019	2020	2021	2022	5 years average
[M] Average selling price of incinerated-iron in Seoul City (KRW/kg)	[H]/[G]	110	106	59	88	124	97
[N] Average selling price of iron scrap in capital area (Seoul, Gyeonggi, Incheon) (KRW/kg)	-	239	227	199	382	421.9	294

Source: Seoul City Government's internal data (Seoul City Government, 2018 ~ 2022) & Recyclable resource price survey (Circular Resources Information Center, 2018 ~ 2022)

수 있다. Table 4[M]은 연도별 서울시 소각철 평균 매각 가격으로, 소각철 1 kg당 판매가격을 정리했으며, Table 2에 정리된 소각철 매각금액[H]과 소각철 매각량[G]을 나누어 산출하였다. 소각철 평균가격은 2018년 110원, 2019년 106원, 2020년 59원, 2021년 88원, 2022년 124원이다. 반면 [N]은 수도권지역 경량 B급 철스크랩 평균가격으로 2018년 239원, 2019년 227원, 2020년 199원, 2021년 382원, 2022년 421.9원이다. 따라서 5개년 평균 소각철의 판매가격은 1 kg당 97원으로, 수도권지역 경량 B급 철스크랩 5개년 평균가격의 약 33% 정도에 거래되었다. 소각철의 판매가격이 낮은 이유는 낮은 품질과 제한된 용도가 주요한 원인으로 추정된다. 낮은 품질은 Fig. 4(6)에서도 확인할 수 있으며, 소각철의 표면에 소각재가 붙어 있다. 이는 자원회수시설 내에서는 소각잔재물에 대한 재가공 및 재처리, 재위탁 처리가 법적으로 금지되어 있어 소각재가 묻은 상태로 매각된다. 또한 소각철은 산화철로 회수되어 재활용 시 부피변화로 인한 안정성의 문제를 야기하므로(Um et al., 2007) 용도에 한계가 있다. 국내 고철을 취급하는 일반기업으로 유입된 소각철은 사용용도 및 사용처가 알려지지 않는 경우가 많으나, 수도권 남부 일부 기업에서는 납품증량을 늘리는 용도로 소각철을 사용하고 있는 것으로 조사되었다(Son, 2020). 한정된 시장과 낮은 품질은 매각액에 부정적인 영향을 미치므로, 회수되는 소각철의 품질 상승과 용도확대에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구는 서울시 25개 구 중 서울시가 아닌 광명시 자원회수시설과 김포매립지를 이용하고 있는 구로구와 금천구를 제외한 23개 구를 대상으로 생활계폐기물을 소각한 후에 발생하는 잔재물인 바닥재 중의 소각철에 대하여

처리현황을 검토하였다. 2018년부터 2022년까지 종량제 봉투내의 폐기물중 소각철의 배출원부터 회수 후 매각까지를 총 4단계로 흐름을 구분하여 살펴보고, 서울시 5곳의 생활계폐기물 자원회수시설에 설치된 소각철 자력선별기의 시설현황과 처리공정을 정리했다. 이를 바탕으로 소각철의 문제점을 도출하고 개선방안에 대하여 검토하였다.

서울시의 자원회수시설은 소각처리 전, 전처리시설을 통한 폐금속류의 분리선별을 진행하지 않는 공통점을 가지고 있다. 이에 소각처리 후 배출되는 소각재에서 금속류를 회수하고 있는데, 회수시설은 서스펜디드형과 마그네틱 드럼형의 자력선별기를 사용하고 있다. 종량제봉투에 혼합 배출되는 폐금속류는 소각철의 배출원이며, 매년 배출량이 증가한다. 하지만 소각철로 회수되는 비중은 4.68%~39.74%로 회수 폭이 넓으며, 매년 회수율이 낮아지고 있다. 바닥재로부터 회수되는 소각철의 비중은 1.19%~2.08%이며, 회수된 금속 중 소각철의 비중은 94.33%~99.6%이다. 회수된 소각철은 전량 매각되지만 그 가격은 수도권지역 경량 B급 철스크랩 평균가격에 비해 낮은 가격으로 매각되고 있다.

이를 바탕으로 낮은 회수율과 낮은 매각액을 소각철 현황의 문제점으로 언급할 수 있다. 회수율은 유입성상, 자력선별기의 성능, 소각철의 크기와 형태 등이 영향을 미칠 수 있으므로 상호 연관성을 갖고 지속적인 연구가 필요하다. 또한 소각철의 낮은 매각액은 소각철의 품질, 용도와 연관이 있다. 소각철은 산화철로 회수되고, 표면에 소각재가 붙은 상태로 매각 처분되어 그 활용처가 많지 않다. 소각철의 회수품질을 높이는 연구와 활용처 확대를 위한 연구가 지속되어야 한다.

본 연구에 있어서 한계점은 다음과 같다. 첫째, '소각로에서 직접배출 되는 금속이 포함된 바닥재량'의 측정데이

터를 구할 수 없어, 소각시설에서 외부로 반출되는 ‘바닥재량’과 ‘금속류량’의 합으로 산출하여 정리했으므로 실제 값과 오차가 있을 수 있다. 둘째, 화격자 시설 등으로부터 회수되는 소각철의 양은 별도로 산출이 불가능하여, 실제 종량제봉투대상폐기물의 소각처리를 통한 소각철의 양과는 차이가 있을 수 있다. 셋째, 자력선별기를 통해 회수 가능한 소각철의 최대 중량은 시방서 등을 통해 확인이 가능하나, 최소 중량은 확인이 불가능하였으며, 자력선별기로 선별이 불가능한 크기의 소각철은 바닥재와 함께 섞여 배출되는 경우가 있을 수 있어 회수 가능한 소각철의 양과는 차이가 있을 수 있다.

본 연구는 생활계폐기물의 소각시설 유입부터 회수된 철의 매각까지 전과정에 대한 현장의 실제 데이터를 바탕으로 분석하여 기존의 실험연구들과 차별화하였으며, 향후 생활계폐기물의 소각잔재물과 관련된 자원순환연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

References

- Ahn J-W. 2006. Treatment technologies of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI)-bottom ash (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geosyst Eng* 43(3): 258-267.
- Ahn J-W, Oh M-H, Han C. 2008. A study about Recycling from Municipal Solid Waste Incineration bottom ash (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Resour Recycl* 17(1): 3-11.
- Blasenbauer D, Huber F, Lederer J, Quina MJ, Blanc-Biscarat D, Bogush A, Bontempi E, Blondeau J, Chimenos JM, Dahlbo H, et al. 2020. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. *Waste Manag* 102: 868-883. doi: 10.1016/j.wasman.2019.11.031
- Bunge R. 2016. Recovery of metals from waste incinerator bottom ash. In: Holm O, Thome-Kozmiensky E (eds). *Removal, treatment and utilisation of waste incineration bottom ash*. Nietwerder, Germany: Thomé-Kozmiensky. p. 63-143.
- Chung D, Kim Y, Yun Y, Kim Y. 2001. Hazardous characteristics of metals in bottom ash from Municipal Solid Waste Combustors (MSWC) of Korea (in Korean with English abstract). *Anal Sci Technol* 14(3): 253-258.
- Circular Resources Information Center. 2018-2022. Monthly recyclable resource price survey (2018-2022); [accessed 2024 July 1]. <https://www.re.or.kr/info/listCirPricePage.do>.
- Honma T, Ogasawa M. 1995. Magnetic and electrical separation technologies applied to the recycling. *J Soc Powder Technol Jpn* 32(6): 396-400. doi: 10.4164/sptj.32.396
- Jadhav UU, Hocheng H. 2012. A review of recovery of metals from industrial waste. *J Achiev Mater Manuf Eng* 54(2): 159-167.
- Kim D. 2016. Recycling of bottom ash from local municipal solid waste incinerators for ceramic raw material and sub-base layer materials of the roads [dissertation] (in Korean with English abstract). Myongji University.
- Kuroki R, Ohya H, Ishida K, Yamazaki K. 2019. Development of metal recovery process for Municipal Incineration Bottom Ash (MIBA). *J Korean Inst Resour Recycl* 28(3): 21-25. doi: 10.7844/kirr.2019.28.3.21
- Lee S, Yang I, Choi S, Park J. 2018. Application and type of magnetic separator (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Resour Recycl* 27(6): 11-22. doi: 10.7844/kirr.2018.27.6.11
- Resource Circulation Information System. 2018. The waste generation and treatment status(2003, 2018~2022); [accessed 2023 Sep 2]. <https://www.recycling-info.or.kr/rrs/stat/envStatList.do?menuNo=M13020201>
- Sakanakura H. 2018. Status of resource recycling of municipal solid waste incineration residues and related issues. *Mater Cycles Waste Manag Res* 29(5): 339-348. doi: 10.3985/mcwmr.29.339
- Seoul City Resource Recovery Facility. 2024. Resource recovery facility operation status; [accessed 2023 Sep 2]. <https://rrf.seoul.go.kr/index.do>
- Seoul Metropolitan City Resource Recovery Facility. 2006. A scrap metal sales company selection; [accessed 2024

- Feb 10]. <https://rrf.seoul.go.kr/content/bcref262view.do?pageIndex=42&srchCategory=&menuId=bcref262&subPage=2&menuNm=%EC%9E%85%EC%B0%B0%EC%A0%95%EB%B3%B4&seqno=50&srchSj=>
- Seoul Metropolitan Government. 2024. Seoul city, incineration ash and sewage sludge into eco-friendly cement... MOU agreement 2022; [accessed 2024 May 29]. https://www.seoul.go.kr/news/news_report.do#view/372961?tr_code=snews.
- Shin C, Kim S, Lee K, Kwon M, Lee J, Jeong S, Song G, Park K, Song S, Kim K. 2000. A study on the proper treatment of incineration residues from MSW incinerator (I) - On the basis of bottom ash. Incheon, Korea: National Institute of Environmental Research.
- Sierra HM, Syc M, Korotenko E. 2024. Wet shaking table operating parameters optimization for maximizing metal recovery from incineration bottom ash fine fraction. *Waste Manag* 174: 539-548. doi: 10.1016/j.wasman.2023.12.030
- Son J. 2020 Apr 13. Southern metropolitan area distribution industry clearly avoids purchasing incinerated-iron. *Steel Daily*; [accessed 2024 Apr 23]. <https://www.steeldaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=145446>
- Tang J. 2012. A cost-benefit analysis of waste incineration with advanced bottom ash separation technology for a Chinese Municipality-Guanghan [dissertation]. Vienna University of Technology.
- The Seoul Institute. 2023. The 2nd Seoul Metropolitan Government resource circulation implementation plan: 2023~2027. Seoul, Korea: Seoul Metropolitan Government.
- Um N, Han G, You K, Cho H, Ahn J. 2007. Separation of ferrous materials from municipal solid waste incineration bottom ash (in Korean with English abstract). *Resour Recycl* 16(3): 19-26.
- Um N, Han G, You K, Kim H, Ahn J. 2009. Characteristic of treatment process from Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) bottom ash (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Miner* Energy Resour Eng 46(6): 767-775.
- Van Caneghem J, De Coster E, Vandenberghe K, De Broyer S, Lambrix N, Weemaels L. 2019. Closing the household metal packaging cycle through recovery of scrap from waste-to-energy bottom ash: The case study of Flanders. *Resour Conserv Recycl* 144: 115-122. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.01.028