

# 물질흐름분석을 이용한 1차금속 제조업 사업장폐기물의 자원순환율 연구

장연기<sup>1</sup> · 백영주<sup>1</sup> · 김 익<sup>2</sup> · 전의찬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국환경공단 자원순환처

<sup>2</sup>(주)스마트에코

<sup>3</sup>세종대학교 기후에너지융합학과

## A Study on the Resource circulation rate of Industrial Waste from Manufacture of basic metals Using Material Flow Analysis

Yeon Ki Jang<sup>1</sup> · Young Ju Baek<sup>1</sup> · Ik Kim<sup>2</sup> · Eui Chan Jeon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Resource Recirculation Korea Environment Corporation

<sup>2</sup>SMaRT ECO

<sup>3</sup>Sejong University

**ABSTRACT:** This study analyzed the recycling by statistical method and the actual recycling capacity by material flow for industrial waste generated in the Manufacture of basic metals. In 2019, the amount of waste generated in the Manufacture of basic metals was 34,304 thousand tons and recycling 33,232 thousand tons, with a recycling rate of 96.9%. However, as a result of applying the newly generated residues during the recycling process by material flow analysis, the actual recycling capacity was reduced to 29,115 thousand tons, and the recycling rate was found to be 84.9%.

**Key words:** Industrial wastes, Resource cycle performance management, Resource circulation rate, Material flow analysis, Residual wastes

**요약문:** 본 연구는 1차금속 제조업에서 발생하는 사업장폐기물에 대해 통계 방식에 의한 재활용과 물질흐름에 의한 실질재활용량을 분석하였다. 2019년도 1차금속 제조업에서 발생된 폐기물량은 34,304 천 톤, 재활용은 33,232 천 톤으로 재활용률은 96.9%이다. 그러나, 물질흐름분석에 의한 재활용 과정 중 새로이 발생된 잔재물을 적용한 결과, 실질재활용량은 29,115 천 톤으로 감소되었고, 순환이용률은 84.9%로 나타났다.

**주제어:** 사업장폐기물, 자원순환 성과관리, 자원순환율, 물질흐름분석, 잔재물

## 1. 서론

자원순환은 자원을 효율적으로 이용하여 폐기물의 발생을 최대한 억제하고, 발생된 폐기물은 기술적 또는 경제적으로 가능한 범위에서 순환이용하거나 적정한 처분을 하는 것이며, 최종적으로 매립을 최소화하는 것이다<sup>1)</sup>. 전국 폐기물 발생 및 처리현황 통계에 따르면, 2019년도 전체 폐기물 발생량은 181,492 천 톤으로 재활용 157,076 천 톤(86.6%), 매립 11,138 천 톤(6.1%)으로 나타났다. 이중 사업장폐기물은 전체 폐기물의 40.7%를 차지하는 73,956 천 톤이며 재활용률은 82.6%이다. 자원순환기본법에 의한 실질재활용량은 재활용량에서 잔재물의 양을 제외하여 산출하며, 이때 잔재물은 재활용 중 실제 재활용되지 않거나, 소각 등 중간처분 과정에서 소멸되지 않고 새로이 발생하는 폐기물을 말한다. 자원순환 성과관리는 폐기물 다

량 배출 사업자인 제조업 18개 업종을 대상으로 사업장폐기물의 순환이용률과 최종처분율의 자원순환 목표를 부여하고, 그 이행 여부를 성과 측정하며, 물질흐름에 의한 발생에서부터 재활용, 폐기 및 잔재물 등 전 과정에 대해 실제의 재활용량을 분석하고 있다.

본 연구 대상은 사업장폐기물 중 발생량이 가장 많은 업종인 1차금속 제조업을 중심으로 사업장폐기물의 실질재활용량을 분석하였다.

## 2. 폐기물 발생 및 처리현황

### 2.1 전국 폐기물 발생 및 처리량

우리나라 폐기물 통계<sup>2)</sup>는 전국 폐기물 발생 및 처리현황으로 생활폐기물, 사업장폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 분류되고, 1년 단위로 조사하여 매년 공표하고 있다.

**Table 1.** Waste generation and disposal(2019년)  
(unit: kt/year)

구분	생활	사업	건설	지정	계
발생량	21,156	73,956	80,702	5,678	181,492
매립	2,678	6,780	645	1,035	11,138
소각	5,445	2,987	227	825	9,484
기타	399	3,125	-	270	3,794
재활용	12,634	61,064	79,831	3,547	157,076

Table 1과 같이 2019년도 폐기물 전체 발생량은 181,492 천 톤으로 전년도 162,773 천 톤 대비 11.5% 증가하였다. 이는 사업장폐기물이 다른 폐기물 증가에 비해 20.8%로 크게 증가하였기 때문이다. 폐기물 종류별 발생 비율은 생활폐기물 11.7%, 사업장폐기물 40.7%, 건설폐기물 44.5%, 지정폐기물 3.1%로 나타났다.

폐기물 처리방법으로는 매립 11,138 천 톤(6.1%), 소각 9,484 천 톤(5.2%), 기타 3,794 천 톤(2.1%), 재활용 157,076 천 톤(86.5%)으로 나타났다. 재활용은 건설폐기물이 98.9%로 가장 높았고, 생활폐기물이 59.7%로 가장 낮았으며, 사업장폐기물도 82.6%로 높게 나타났다.

생활폐기물의 경우 OECD의 평균 재활용률<sup>3)</sup> 34.3%보다 월등히 높은 59.7%로 나타나는 등 우리나라는 세계적으로도 재활용의 모범국가라고 할 수 있다.

## 2.2 제조업 18개 업종 폐기물 발생 및 처리량

제1차 자원순환기본계획<sup>4)</sup>에 의한 2027년도 국가 자원순환 목표를 달성하기 위해 자원순환 성과관리제도는 통계청의 한국표준산업분류 제10차 기준으로 중분류 18개 업종에 속하는 사업장 중 지정폐기물 100톤 이상 또는 지정외폐기물 1,000톤 이상 배출하는 사업장을 선정하여 자원순환 목표를 매년 설정하여 부여하고 있다<sup>5)</sup>. 대상자는 국내 전체 배출사업장 40,319개소 중 약 3,300개소이고, 이들 사업장에서 발생하는 배출량은 57,997 천 톤으로 전체 발생량의 78.4%를 차지하고 있다(Table 2).

## 2.3 1차금속 제조업 폐기물 발생 및 처리현황

1차금속 제조업은 세분류 9개 업종으로 분류된다. 2019년도 1차금속 제조업의 전체 발생량은 34,304 천 톤이며, 이중 제철, 제강 및 합금철 제조업이 30,969 천 톤으로 전체 90.3%를 차지하고 있다. 폐기물 처리는 매립 2.4%, 소각 0.3%, 기타 0.4%이고, 재활용은 96.9%로 대부분 재활용되는 것으로 나타났다(Table 2).

## 3. 연구방법

### 3.1 연구 대상 및 데이터 수집

#### 3.1.1 연구 대상 선정

전국 폐기물의 발생 및 처리현황 기준으로 전체 폐기물

**Table 2.** Manufacturing industry 18 Waste generation and treatment results by industry

(unit: kt/year)

Manufacture	Waste generation	Waste treatment method				
		landfill	incineration	Other	recycling	recycling rate
food products	1,994	49	118	22	1,805	90.5%
beverages	289	1	2	2	283	98.0%
textiles, except apparel	171	23	9	3	136	79.4%
wearing apparel, clothing accessories and fur articles	9	-	-	-	9	99.8%
coke, briquettes and refined petroleum products	298	34	42	3	219	73.3%
chemicals and chemical products	2,188	248	260	72	1,609	73.5%
medicinal chemical and botanical products	155	2	40	6	107	68.7%
rubber and plastics products	390	12	25	20	334	85.7%
other non-metallic mineral products	3,425	75	19	463	2,868	83.7%
basic metals	34,304	829	114	129	33,232	96.9%
fabricated metal products, except machinery and furniture	447	84	38	9	316	70.8%
electronic components, computer	1,719	13	74	104	1,528	88.9%
medical, precision and optical instruments, watches and clocks	6	-	1	-	6	87.0%
electrical equipment	234	4	23	8	198	84.7%
other machinery and equipment	166	3	16	4	143	86.1%
motor vehicles, trailers and semitrailers	630	16	70	3	541	85.9%
other transport equipment	300	24	84	5	187	62.3%
Electricity, gas, steam and air conditioning supply	11,271	1,816	7	36	9,412	83.5%
Total	57,997	3,234	942	889	52,931	91.3%

**Table 3.** Manufacturing of basic metals Sub-category Waste generation and treatment results

(unit: kt/year)

Manufacture of basic metals	Waste generation	Waste treatment method				
		landfill	incineration	Other	recycling	recycling rate
basic iron, steel and ferro-alloys	30,969	427	70	88	30,384	98.1%
steel products by rolling, extrusion and drawing	1,198	40	12	4	1,142	95.3%
pipes, tubes and hollow profiles, of iron or steel	52	4	3	1	44	85.7%
other basic iron and steel	45	4	2	1	39	85.8%
smelting, refining and alloys of non-ferrous metals	1,271	334	18	12	906	71.3%
non-ferrous metal products by rolling, extrusion and drawing	108	13	7	2	86	79.9%
other basic precious and non-ferrous metals	12	0.3	0.2	-	11	95.1%
Casting of iron and steel	624	7	2	20	595	95.3%
Casting of non-ferrous metals	26	0.5	0.6	0.1	24	95.1%
Total	34,304	829	114	129	33,232	96.9%

발생량은 181,492 천 톤, 사업장폐기물은 40.7%를 차지하는 73,956 천 톤이며, 사업장폐기물 중 1차금속 제조업의 발생량은 34,304 천 톤에 해당한다. 이에 따라, 폐기물 발생량이 가장 많고, 재활용률에 영향력이 가장 크다고 판단되는 1차금속 제조업을 연구 대상으로 선정하였다.

본 연구는 사업장폐기물의 재활용량과 실질재활용량을 구분하여 비교 분석하였다. 재활용량은 폐기물이 발생된 후 자가 또는 위탁처리시설 사업장에 반입되는 실적을 기준으로 하여 산출되며, 이에 반해 실질재활용량은 현행 재활용량에서 재활용 과정 중에 발생된 잔재물을 제외하여 실제 재활용된 양으로 기준으로 하였다.

실질재활용량을 산정하는 기준에는 실증량, 처리업체 비율, 잔재물 배출계수가 있으며, 폐기물의 재활용 현장에 따라 적용되고 있다.

실증량은 폐기물을 자가 또는 위탁으로 처리하는 과정에서 실제 재활용하고 남은 잔재물량과 발생된 폐기물을 처리하는 방법에 따라 중량 단위로 관리되었을 때 적용된다. 처리업체 비율은 다수의 배출사업장의 폐기물을 혼합하여 일괄 재활용 처리하는 경우로 폐기물별 잔재물의 발

생량을 알 수 없을 때 적용된다. 잔재물 배출계수는 폐기물 종류별, 재활용 유형별 잔재물 배출계수로 산출하며, 이는 위탁처리시설의 폐쇄, 부도 등으로 잔재물 발생량을 산정할 수 없을 때 적용된다<sup>6)</sup>.

**3.1.2 연구 데이터 수집**

생활폐기물을 제외한 사업장, 건설, 지정폐기물은 올바로시스템(Allbaro)을 통해 배출할 때부터 운반과 처리까지 인계-인수서를 작성하여 적법하게 처리되도록 규정하고 있다. 올바로시스템에 입력된 폐기물의 실적은 국가통계의 기초가 되고, 폐기물 정책수립 시 중요한 근거가 되며, 자원순환 성과관리에 따른 사업장별 자원순환 목표관리의 기준실적이 되고 있다. 본 연구 데이터는 올바로시스템의 폐기물 배출 및 처리실적 보고서와 자원순환 성과관리시스템의 실적자료를 이용하여 수집하였다.

**3.2 물질흐름 소프트웨어**

물질흐름분석(Material Flow Analysis)은 특정 경제 안팎으로의 자연자원과 물질의 물리적 흐름에 관한 연구를 말한다. 물질흐름분석은 에너지를 포함한 물질의 흐름, 경제 및 무역 관계를 포함한 인간 활동 및 환경변화 간의 관계를 분석하기 위해 물질수지의 원칙을 사용하며, 물질은 어떤 물리적 과정에서도 창조되거나 파괴되지 않는다는 열역학의 제1 법칙에 기초하고 있다. OECD 안내서<sup>7)</sup>에 따르면, 시스템의 경계와 분석 대상 물질의 범위에 따라 다양한 종류의 물질흐름 분석을 실시할 수 있다. 모든 물질흐름은 Sankey 다이어그램 형태로 표시되며, 흐름의 너비는 값에 비례한다. 본 연구의 물질흐름분석은 STAN2.6 소프트웨어를 이용하여 수집된 데이터를 바탕으로 공정, 흐름, 시스템 경계 및 물질을 도표화된 모델로 표현하였다. STAN2.6에서는 사전 정의된 구성요소로 그래픽 모델을 구축한 후, 다른 층 및 기간에 대해 알려진 데이터를 입력하거나 가져와서 알 수 없는 양을 계산할 수 있다.

**Table 4.** Boundary setting for research subjects

경계	선정	하위대상
범위	사업장 폐기물	‘한국표준산업분류’ 제조업 중분류 18개 업종
시간적 경계	2019년	전국 폐기물 발생 및 처리현황
대상업종	1차금속 제조업	세분류 9개 업종

**Table 5.** Concept of recycling and resource circulation

구분	재활용	자원순환
법률	폐기물관리법	자원순환기본법
근거	통계	물질흐름분석
중량	재활용량	실질재활용량

### 4. 1차금속 제조업 사업장폐기물 물질흐름 분석

#### 4.1 사업장폐기물 물질흐름 데이터 수집

본 연구에서 1차금속 제조업 사업장폐기물의 물질흐름 분석 데이터는 2019년도 자원순환 성과관리 대상사업자가 제출한 실적을 기준하고, 기록되지 않은 일부 폐기물 실적은 올라보시스템의 폐기물 배출 및 처리 실적보고서 실적을 확인하여 적용하였다.

#### 4.2 1차금속 제조업종별 물질흐름 분석

##### 4.2.1 통계에 의한 재활용 실적

Table 3과 같이 1차금속 제조업 사업장폐기물 총발생량은 34,304 천톤이며, 이중 재활용 33,232 천 톤, 소각 1천 톤, 기타 1천 톤, 매립 8천 톤으로 나타났다. 업종별 발생량은 제철, 제강 및 합금철 업종이 30,969 천 톤으로 전체 90.3%를 차지하였고, 비철금속 제련, 정련 및 합금 업종은 1천 톤(3.7%), 철강 압연, 압출 및 연신제품 업종은 1천 톤(3.5%) 발생하였다. 특히, 제철, 제강 및 합금철 업종은 고로슬래그, 제강슬래그 등 광재류 발생량에 따라 큰 비중을 차지하였다.

재활용은 재활용의 방법 및 기준에 따라 원료제조는 24,294 천 톤으로 가장 많았고, 성토·복토재 5,375 천 톤, 직접제품제조 2,169 천 톤, 중간가공원료 1,187 천 톤, 수리재사용 등 순으로 재활용되고 있는 것으로 조사되었다. 통계 기준시 잔재물은 발생되지 않아 매립량은 829 천 톤으로 매립률은 2.4%로 나타났다(Fig. 1).

##### 4.2.2 물질흐름에 의한 실질재활용 분석

자원순환 실적은 재활용 및 소각처리 과정 중에서 잔재물의 발생량과 처리량을 확인하여 실질재활용량을 파악 분석해야 한다. 자원순환은 종전의 선형구조를 순환구조로 전환하는 것으로서, 천연자원-생산-소비-폐기-재활용-순환자원의 순환경제를 실현하는 것이다.

재활용 및 소각 등의 과정에서 새롭게 발생된 잔재물을 반영한 물질흐름분석 결과, 폐기물의 실질재활용량은 29,115 천 톤으로 감소하였고, 순환이용률은 84.9%로 낮아졌다. 최종처분량은 통계상의 매립량 829 천 톤과 잔재물 발생량 4,199 천 톤을 더하여 5,028 천 톤이 되고, 최종처분율은 14.7%로 높게 나타났다(Table 7).

Fig. 2는 물질흐름분석에 따른 1차금속 제조업의 폐기물 발생 및 처리를 나타낸다. 폐기물 발생량 34,304 천 톤 중 재활용은 33,232 천 톤이지만, 잔재물이 4,116 천 톤 발생되었다. 소각의 경우 1천 톤에서 잔재물 2천 톤 발생되고, 중간처리는 1천 톤에서 잔재물 5천 톤 발생되어 최종 처분량의 합계량은 5,028 천 톤이 되었다.

재활용 방법별 주요 생산원료는 원료제조에서 시멘트 원료 14,412 천 톤, 성토·복토재는 순환골재 4,490 천 톤,

Table 6. Recycling and resource circulation rate

	재활용	자원순환	
재활용률	96.9%	84.9%	순환이용률
매립률	2.4%	14.7%	최종처분율

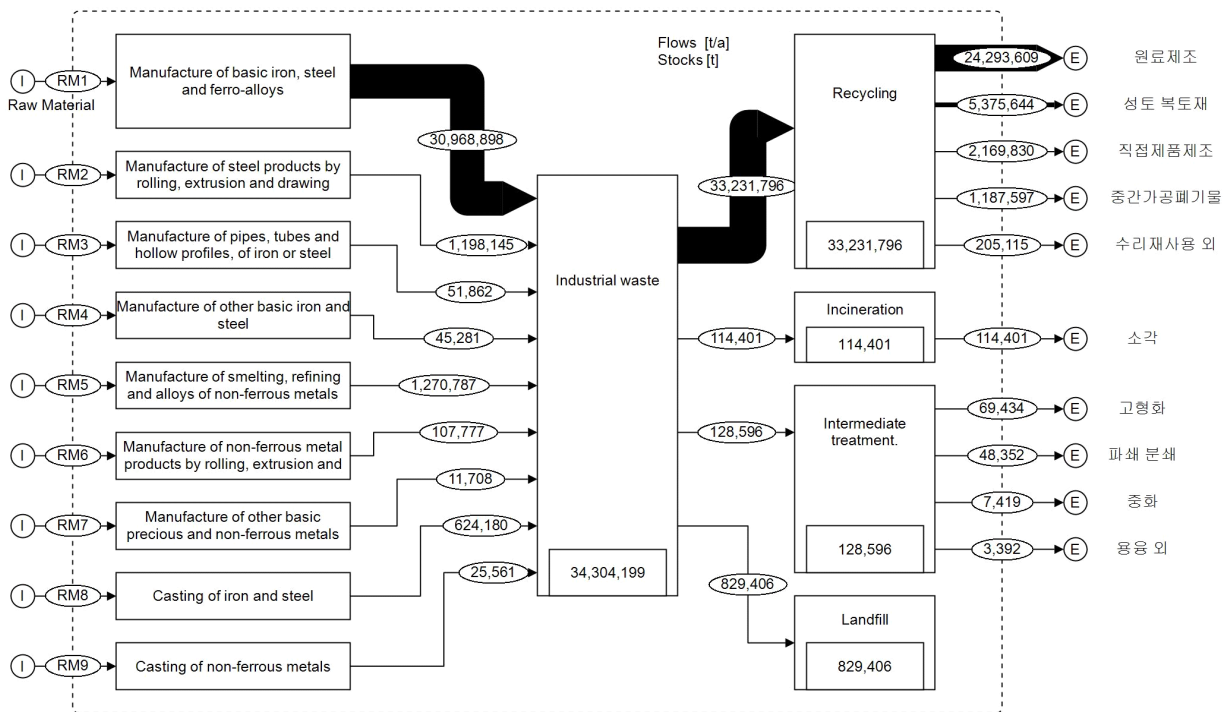


Fig. 1. Material flow diagram of recycling concept.

Table 7. Waste generation and treatment by material flow analysis

(unit: kt/year)

Manufacture	generation	landfill	Intermediate treatment		Other treatment		Actual recycling		final disposition
			incineration	Residual wastes	Other	Residual wastes	recycling	Residual wastes	
basic iron, steel and ferro-alloys	30,969	427	56	14	69	19	26,961	3,423	3,883
steel products by rolling, extrusion and drawing	1,198	40	10	2	-	4	1,023	118	165
pipes, tubes and hollow profiles, of iron or steel	52	4	2	1	-	1	33	12	17
other basic iron and steel	45	4	1	0	-	1	32	7	12
smelting, refining and alloys of non-ferrous metals	1,271	334	14	4	1	12	543	363	713
non-ferrous metal products by rolling, extrusion and drawing	108	13	6	1	-	2	49	37	54
other basic precious and non-ferrous metals	12	0	0	0	-	-	5	6	6
Casting of iron and steel	624	7	2	0	-	20	449	146	173
Casting of non-ferrous metals	26	0	1	0	-	0	20	5	5
<b>total</b>	<b>34,304</b>	<b>829</b>	<b>92</b>	<b>23</b>	<b>69</b>	<b>59</b>	<b>29,115</b>	<b>4,116</b>	<b>5,028</b>

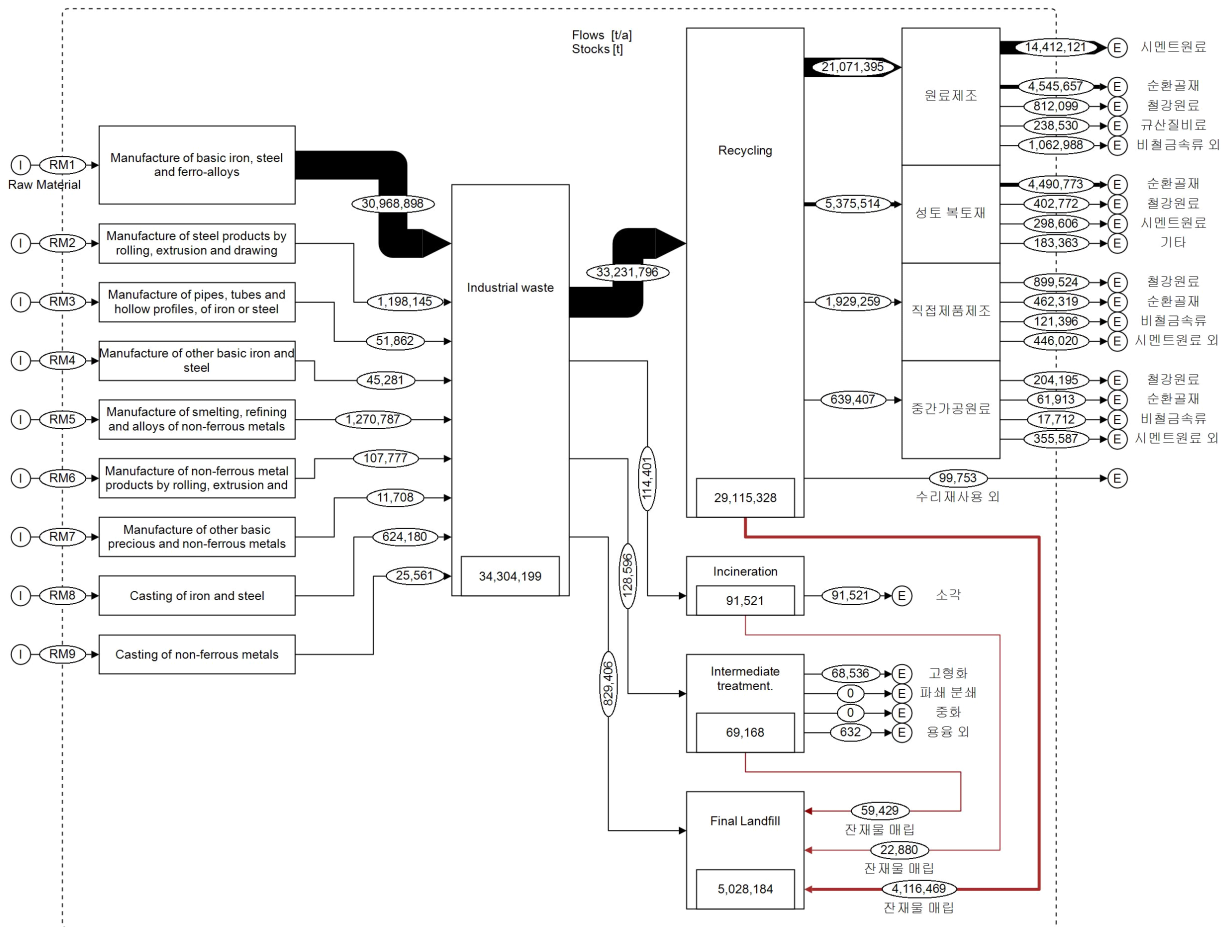


Fig. 2. Material flow diagram of the concept of resource circulation.

직접제품제조는 철강원료 899 천 톤, 중간가공원료는 철강원료 204 천 톤 생산되는 것으로 조사되었다. 1차금속 제조업 사업장폐기물의 주요 재활용원료는 크게 시멘트원료, 순환골재, 철강원료, 규산질비료, 아연 및 알루미늄, 비철금속원료 등이 생산되고 있는 것으로 나타났다<sup>8)</sup>.

## 5. 결론

우리나라의 폐기물 통계는 환경부의 전국 폐기물 발생 및 처리현황을 통해 폐기물별(생활, 사업장, 건설, 지정), 지역별, 업종별 발생량과 처리량을 조사하여 매년 공표하고 있다.

자원순환 성과관리제도는 폐기물의 처리 후 잔재물 발생량을 파악하여 실질재활용량을 분석하고, 자원순환 목표를 설정·부여하고 있다. 현재의 잔재물량은 실증량과 배출계수를 적용하고 있으나, 재활용업체의 비율 적용은 어려운 실정으로, 재활용 과정 중의 잔재물의 발생 및 처리량 관리가 이행되지 못하기 때문이다.

폐기물의 자원순환에 따른 실질재활용 실적관리를 위해서는 처리업체의 적극적인 이행과 법률적인 제도개선

및 보완이 필요하다.

우선, 처리업체의 경우 폐기물관리법에 따른 중간처분과 재활용 실적보고서 제출 시 잔재물 발생 및 처리내용을 정확하게 작성하여야 한다. 그리고, 잔재물에 대한 정의와 용어의 뜻을 폐기물관리법으로 규정할 필요가 있다. 마지막으로, 전국 폐기물 발생 및 처리현황 통계에서는 재활용과 실질재활용 개념에서 폐기물의 발생 및 처리통계를 구축하고 변화추이를 관리할 필요가 있다.

## REFERENCES

- 1) 「자원순환기본법」, 법률 제17326호 (2020).
- 2) 환경부, “2019년도 전국 폐기물 발생 및 처리현황” (2020).
- 3) OECD. Stat, “Municipal waste, Generation and Treatment”, <https://stats.oecd.org/>
- 4) 관계부처합동, 제1차 자원순환기본계획(2018~2027) (2018).
- 5) 한국환경공단, “자원순환성과관리제도 소개” (2019).
- 6) 「자원순환 성과관리 운영 등에 관한 고시」 [별표3].
- 7) OECD, “MEASURING MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY,” Volume I. The OECD Guide(2008).
- 8) 장연기, “전과정평가를 이용한 자원순환의 경제성 및 에코효율성 평가 연구” (2021).