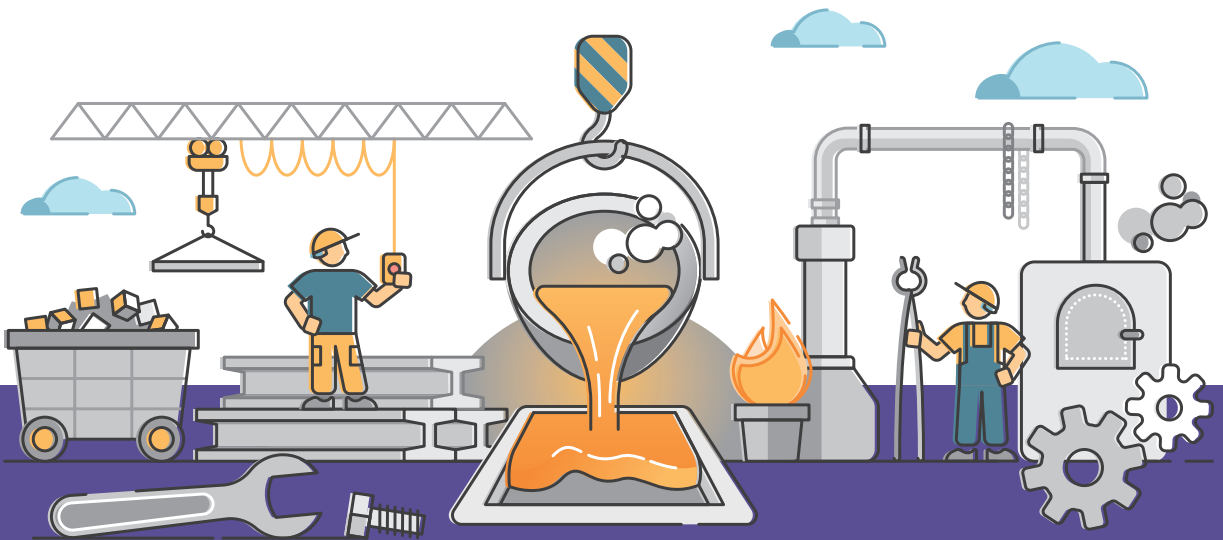


재료산업인적자원 개발위원회 **ISC**

이슈리포트 | 2024년 4분기

제철 부산물 활용 기술 연구 동향



목 차

제철 부산물 활용 기술 연구 동향

요약	5
1 철강산업 탄소중립 동향	8
2 현재의 제철 부산물 활용 현황	15
3 미래의 제철 부산물 활용 기술	18
4 맺음말	27
참고 문헌	29

■
비상업 목적으로 본 보고서 내용을 인용 또는 전재 시 출처를 명시하면 자유롭게 인용
하실 수 있으며, 보고서 내용에 대한 문의는 아래로 주시기 바랍니다.

재료산업인적자원개발위원회 사무국

김지웅 선임연구원

jiwoong.kim@ekosa.or.kr

02-559-3564

이슈리포트 저자

공주대학교 그린스마트 건축공학과

김진만 교수

jmkim@kongju.ac.kr

1. 철강산업의 탄소중립 노력

- 탄소중립 국제 동향
 - 교토의정서(1997), 파리협정(2015)을 기점으로 탄소중립 노력이 본격화되었고, IPCC(2018)는 2050년까지 탄소중립 달성 경로 제시
 - 유엔 기후행동 정상회의(2019)에서 기후 대응 강조로 글로벌 온실가스 감축 정책 강화
- 국내 동향
 - 한국은 2050 탄소중립 비전을 선언(2020)하고, 관련 법률과 정책(녹색성장 기본법)을 통해 기후위기 대응 강화
 - 철강산업은 국가 산업 부문 배출량의 약 40%, 국가 전체 배출의 15%를 차지하는 온실가스 다배출 산업으로, 탄소 감축 기술 개발이 핵심 과제로 대두
- 철강산업의 온실가스 배출 구조
 - 주로 제선공정(고로)에서 발생, 전체 배출의 약 80%가 이 공정에 집중
 - 고로 공정 온실가스 배출원 단위는 다른 공정보다 최대 10배 이상 높음
- 철강산업의 온실가스 감축 전략
 - 기존 공정 최적화(블루 철강)
 - : 에너지 효율 개선, CCS(Carbon Capture and Storage), 철스크랩 기반 전기로 확대 등
 - 혁신 공정 개발(그린 철강)
 - : 수소환원제철, 철광석 전기 분해 기술 등 새로운 기술을 도입해 탄소 배출을 획기적으로 저감

2. 제철 부산물 활용 현황

- 제철 부산물 재활용률
 - 철강 부산물(슬래그)의 재활용률은 90~100%로 높은 수준.
 - 고로 슬래그는 주로 시멘트 원료(88.5%)로 사용되며, 제강 슬래그는 도로용 골재, 성복토 등에 활용
- 부산물 출처별 재활용
 - 고로 슬래그: 수경성을 가져 시멘트 제조에 적합
 - 제강 슬래그: 철(Fe) 함량이 높아 시멘트 제조와 같은 고부가가치 용도로 활용에 제약

- 전기로 산화 슬래그, 환원 슬래그, 2차 정련 슬래그 등 다양한 부산물이 특수 목적에 따라 연구 및 활용
- 제철 부산물 활용 시 문제점
 - 철강 부산물 관련 규격은 제한적(9종)이며, 특히 고부가가치 활용이 일반화되지 못함

3. 미래 제철 부산물 활용 기술

- 철강 공정 변화에 따른 슬래그 특성 변화
 - 수소환원제철 공정으로의 전환, 전기로 공정 확대가 진행됨에 따라, 고로 슬래그 발생량은 감소하고 Fe 산화물 함량이 많은 현재의 제강 슬래그와 유사한 조성을 가진 슬래그가 증가할 것으로 예상
- Fe 제거 및 재활용 기술
 - 철강 공정의 변화 시점에 맞추어 용융 상태에서 원심분리를 통해 슬래그의 Fe 성분을 저감하는 기술을 심도있게 연구할 필요가 있음
 - 제강 슬래그에서 Fe 제거 후에 남는 잔재물은, 용융 상태에서 조성 변화와 급냉을 통해 페라이트계 시멘트를 만들 수 있으며, 이는 CO₂ 배출량을 최대 25%까지 저감 가능

4. 주요 연구 및 실증 사례

- 페라이트 시멘트 개발
 - 페라이트계 시멘트는 C₃S를 줄이고 Ferrite를 증가시킨 High ferrite cement와 C₃S를 생성하지 않고 낮은 온도에서 생성되는 C₂S-C₄A₃F-Ferrite 조성물로 구성된 BCSAF(BYF) cement로 분류
 - 생산 과정에서 소성 온도를 낮추고 석회석 사용량을 줄여 탄소 배출 감축
- 슬래그 배출 공정 변화를 통한 새로운 클링커의 생산
 - 페콘크리트를 철강 공정의 플렉스로 사용해 슬래그를 급냉함으로써 기존 클링커와 유사한 새로운 클링커 생산, 이 기술로 영국 내 연간 약 2.2Mt의 클링커 생산 가능성 제시(영국 케임브리지대학 연구팀, 2023)

5. 인력 양성 및 정책 제언

- 기술 변화에 따른 인력 수요
 - 제강 공정 변화와 재활용 기술 개발을 위해 제선·제강 기술과 부산물 재활용 지식을 겸비한 인력이 필요하나, 현재 금속·재료 관련 학과 축소로 전문 인력 확보가 어려움
- 전문 인력 양성 방안
 - 신공정 운영 및 부산물 재활용 기술 심화 교육
 - 고부가가치 재활용 기술 개발 전문 인력 육성
- 시사점
 - 탄소중립 실현을 위한 기술 혁신 필요성
 - 기존 공정의 탄소 배출 감축 노력 외에도 혁신 공정으로의 전환 필수
 - 부산물의 고부가가치 활용
 - 슬래그 Fe 제거 및 재활용 기술은 환경·경제적 이점을 동시 창출 가능
 - 폐자원 활용 및 시멘트 대체재 개발로 순환 경제 달성 가능
 - 정책 및 인력 양성의 중요성
 - 탄소중립에 적합한 기술과 인력 양성을 위한 교육·정책적 지원 필요

1 철강산업 탄소중립 동향

탄소중립을 위한 범세계적 노력

- 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol) 채택 이후, 유럽을 중심으로 대기 중 온실가스를 감축을 위한 국제적 노력이 본격화 되었으며, 2015년 파리협정(Paris Agreement) 채택 이후에는, 모든 당사국이 산업화 이전 대비 지구 평균 기온 상승을 1.5°C 이하로 제한하기 위한 온실가스 감축 정책을 적극 추진하고 있음
- 2018년 IPCC(기후 변화에 관한 정부 간 협의체)는 ‘1.5°C 특별 보고서’를 발간하여 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 경로를 제시하였음
- 2019년 개최된 유엔 기후행동 정상회의(Climate Action Summit)를 계기로, 국제 사회의 기후 위기 대응 행동 강화에 대한 공감대가 형성됨

그림 1 탄소중립을 위한 범세계적인 노력



국내의 탄소중립 동향

- 한국은 2020년 12월, 2050 탄소중립 비전을 대내외에 공표하였으며, 이듬해 후속 조치로서 탄소중립위원회를 발족하고 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장기본법」을 제정하는 등 적극적인 탄소중립 정책을 추진하고 있음
- 아울러, 2021년 10월에는 탄소중립 사회의 미래상을 제시하고, 부문별 정책 추진 전략과 함께 탄소중립 글로벌 중추 국가로의 도약을 비전으로 하는 4대 전략과 12대 과제를 수립하였음.

그림 2

우리나라의 탄소중립 정책 추진 현황

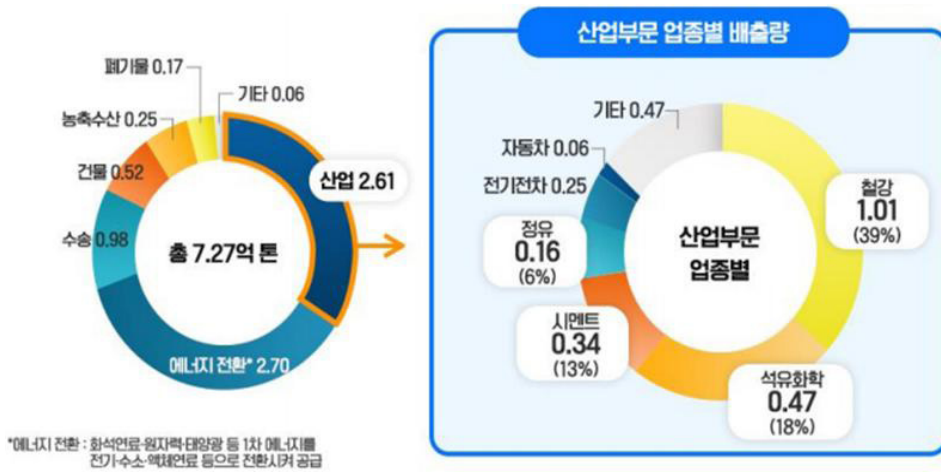


철강산업의 탄소 배출량 기여율

- 철강산업은 기초 금속 소재를 공급하며 우리나라의 산업 발전을 견인하고 있으며, 글로벌 경쟁력을 갖춘 주력 산업임
- 그러나 대표적인 온실가스 다배출 업종으로서 탄소 중립이라는 시대적 도전에 직면해 있음
- 국내 산업 부문 배출량의 약 40%, 국가 총배출량의 약 15%를 차지함

그림 3

철강산업의 탄소 배출 비율

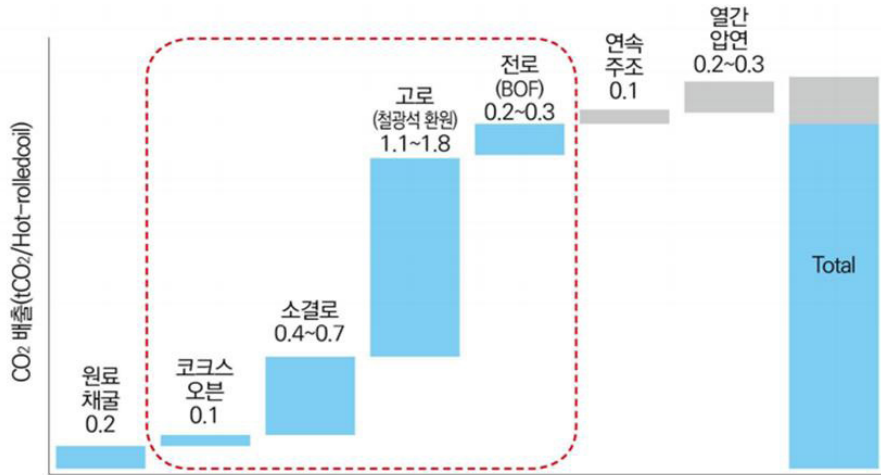


철강산업의 온실가스 배출 구조(이재윤, 양진혁, 2022)

- 일관제철 공정에서 발생하는 온실가스의 약 80%가 제선 공정에서 배출
- 철광석 환원이 이루어지는 고로 공정의 온실가스 배출원 단위는 소결 공정 대비 3배, 코크스 공정 대비 10배 수준임
- 2019년 기준 철강산업의 CO₂ 배출량은 직접 배출 약 9,577만 톤, 공정 배출이 약 574만 톤, 간접 배출 1,511만 톤 수준으로 집계되었음
- 철강 제조 공정에서 석탄 사용이 필수적인 산업의 특성상 CO₂ 배출은 철강 생산과 밀접하게 연계되어 있음

그림 4

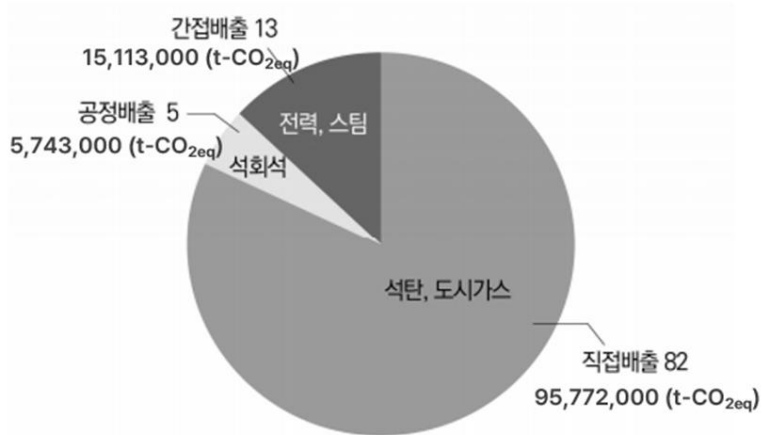
고로 및 전로 공정의 단계별 온실가스 배출 집약도



| 출처 | 산업연구원(원자료 : Carbon trust(2011))

그림 5

철강산업의 이산화탄소 배출 구조(2019, %)

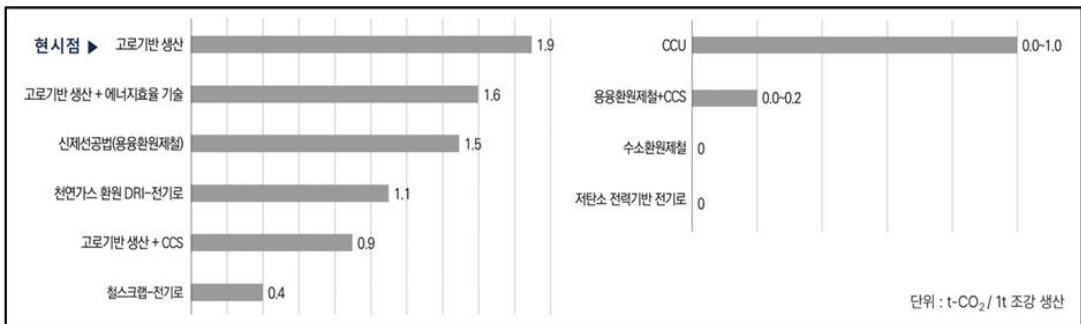


| 출처 | 온실가스 종합정보센터, 한국에너지공단

철강산업의 온실가스 감축 전략(C. Li et al., 2017)

- 철강산업은 단일 산업으로서 온실가스를 가장 많이 배출하는 산업이기 때문에 탄소 저감을 위한 다양한 시도가 이루어지고 있음
- 철강산업의 저탄소기술은 다음과 같이 두 가지로 분류됨
 - ① 기존 고로, 전기로 방식의 설비를 활용하여 탄소 배출을 일부 저감하는 방식(블루철강) : 에너지 효율 개선, CCS 설비 도입, 용융환원제철, 천연가스 방식 DRI, 철스크랩 기반 전기로 등
 - ② 새로운 혁신 기술을 도입하여 공정의 전면적 개편을 통해 탄소 배출을 획기적으로 저감하는 방식(그린철강) : CCU의 전면적인 활용, 용융환원제철과 CCS의 접목, 수소환원제철, 철광석 전기 분해 등
- 특히, 기술 개발이 가장 활발한 수소 기반 DRI-전기로 방식의 수소환원제철은 무탄소 전력 활용 시 배출 집약도가 0에 근접함

그림 6 철강 탄소 저감 방식의 배출 집약도 비교(현 생산 공정 기반, 유럽 기준)



| 출처 | 산업연구원

- 철강산업의 높은 온실가스 배출 비중, 설비 수명(40~50년), 기존 설비의 교체 시기 도래 등을 고려할 때, 2030년까지가 탄소중립의 기반 구축의 중요한 시기임
- 국내 여건에 비추어 봤을 때, 수소환원제철 등 혁신 기술의 조기 개발 및 적용이 한국 철강 산업 탄소중립 달성의 관건이며, 이미 상용화된 파이넥스 설비를 활용한 한국형 수소환원제철 기술 및 설비 개발이 추진될 예정임
- 또한, 철스크랩 기반 전기로 제강 비중 확대 등 산업 구조 고도화 필요

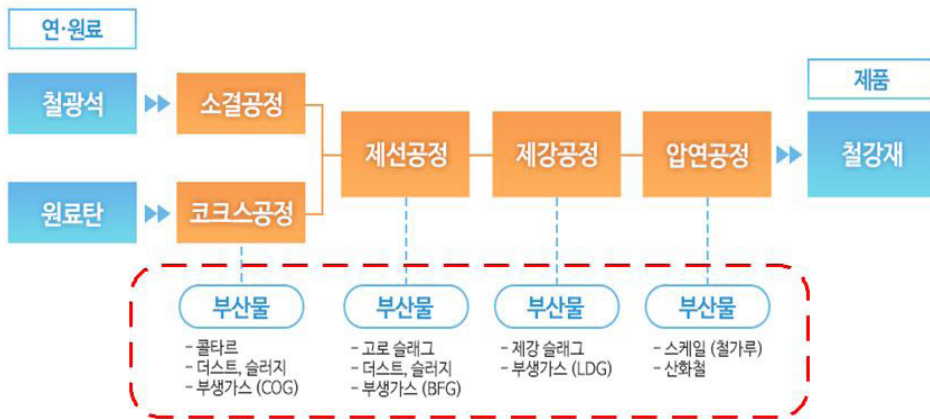
표 1	철강산업의 탄소중립 시기별 추진 내용
시기	주요 개발 내용
<p>~2025 (탄소중립 기반 조성)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • (기존 공정) 고로 조업 원 단위 개선, 부산물 회수 증가, 코크스 건식 소화 설비 확대 등과 같은 단기적 온실가스 저감 수단 도입, 스마트팩토리 적용 확대를 통한 에너지 효율 개선 • (신공정) 철강 탄소중립 기술 개발을 위한 정부 및 민간의 투자 계획 수립 및 시행
<p>~2030 (NDC 목표 달성과 탄소중립 핵심 기술 개발 완료)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • (기존 공정) 현존하는 7개 에너지 효율 개선 기술을 모두 적용하고 CCUS, 고로 스크랩 투입 확대와 같은 중간 단계의 혁신 기술을 적용하여 에너지 효율 개선 극대화(300만 톤 규모 전기로 신설 등) • (신공정) 수소환원제철 기술 및 기존 공정 기반 혁신 기술(하이퍼고로, 초고속 전기로, 하공정 대체 연료 기술 등) 개발 완료 <ul style="list-style-type: none"> - 수소환원제철 100만 톤 급 실증 설비 구축
<p>~ 2040 (탄소중립 여건 확보)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • (기존 공정) 기존 공정 기반 혁신 기술 상용화를 통한 가시적 온실가스 감축 • (신공정) 수소 환원 상용화 기술 확보 및 고로 교체 계획 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 수소환원제철 300만 톤급 상용 설비 구축
<p>~ 2050 (수소 기반 철강산업으로의 전면적 전환)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2050년(수소기반 철강산업으로의 전면적 전환) <ul style="list-style-type: none"> - 고로의 수소 환원 공정 설비로 순차적 교체를 완료하고 철스크랩 전기로를 추가 확대하여 2050년 철강산업 탄소중립 달성 - 2018년 대비 배출량 95% 감축 달성

| 출처 | 산업연구원

철강산업 부산물의 활용의 필요성

- 향후 철강산업 탄소중립 전략 이행에 따라 기존 공정에서 수소환원제철공정으로의 전환이 이루어질 것으로 전망됨
- 이에 따라 고로 슬래그 발생이 중단되고, 고로 슬래그와 제강 슬래그의 중간 조성을 보유한 환원철 슬래그가 연간 1,000~1,500만 톤 규모로 발생할 것으로 예상됨
- 기존 제강 슬래그와 미래의 환원철 슬래그를 포함한 높은 철(Fe) 함량을 갖는 제철 부산물의 고부가가치화 및 재활용 추진이 필요함

그림 7 현재의 철강 공정 input 및 output



| 출처 | 포스코 뉴스룸

2 제철 부산물 활용 현황

제철 부산물의 재활용률

- 철강슬래그는 석회, 규소, 알루미늄 성분을 다량 함유하여 시멘트 원료 및 토목용 골재 등으로 활용되며, 연간 재활용률은 100%에 육박함

표 2

연도별 철강 슬래그 재활용률

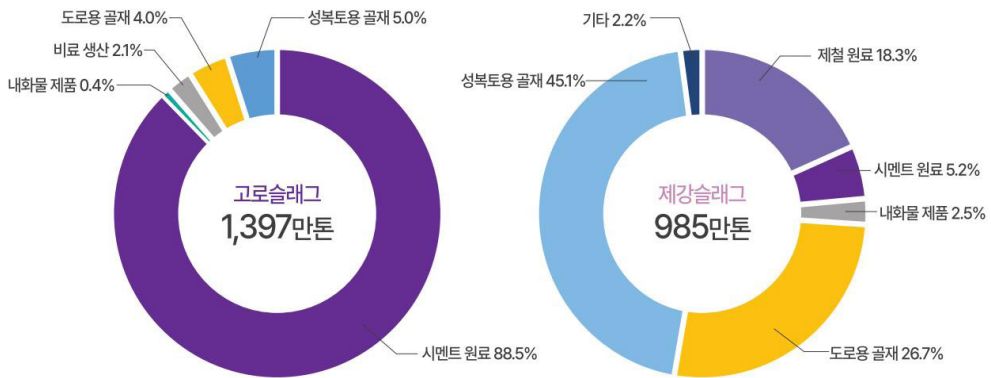
연도	고로 슬래그	제강 슬래그	계
2018	96.5%	94.6%	95.7%
2019	99.3%	96.9%	98.4%
2020	99.7%	101.0%	100.2%
2021	99.5%	105.5%	101.9%
2022	98.5%	94.0%	96.7%
2023	95.6%	92.1%	94.1%
2024(목표)	100.0%	98.7%	99.5%

| 출처 | 한국철강협회

제철 부산물의 용도별 활용

- 철강 슬래그의 절반가량을 차지하는 고로 슬래그는 대부분 시멘트 원료로 활용(88.5%)되며, 그 외 복토용, 도로용 등으로 활용
- 제강 슬래그는 성복토용, 도로용, 제철 원료 순으로 재활용
- 전기로 산화 슬래그 : 산화 정련 과정에서 발생하는 슬래그로 철 성분이 많이 포함되어 있으며 주로 도로 기층재, 골재, 시멘트 원료로 재활용
- 전기로 환원 슬래그 : 환원 정련 과정에서 발생하며, 철 성분을 환원해 회수한 후 남은 슬래그로 시멘트 혼화재, 특수 시멘트 원료로 연구 및 적용
- 2차 정련 슬래그 : 제강 2차 정련 과정에서 불순물을 제거하고 성분을 조정한 후 발생하는 슬래그이며, 건설 자재, 특수 시멘트 원료로 사용
- 페로니켈 슬래그 : 니켈 제련 과정에서 발생하는 슬래그로 주로 골재로 활용

그림 8 철강 슬래그의 종류별 재활용 현황



| 출처 | 한국철강협회

제철 부산물 관련 규격

- 제철 부산물 관련 한국산업규격은 시멘트계 재료와 골재 규격이 대부분이며, 암면 원료 등 특수 용도 활용 기준을 포함하여 9종에 불과함
- 시멘트의 원료 활용과 관련하여 고로 슬래그 시멘트, 고로 슬래그 미분말 규격이 제정되어 있으며, 포틀랜드 시멘트 규격 내 혼합재로서의 품질 기준이 규정되어 있음.
- 골재 관련 규격은 콘크리트용 골재, 도로 및 아스콘용 골재, 케이슨 채움재, 미끄럼 방지용 골재 등 5종이 있으나, 최대 수요처인 콘크리트용으로서의 사용은 일반화되지 못하고 있음.

표 3

철강 부산물 관련 KS 표준

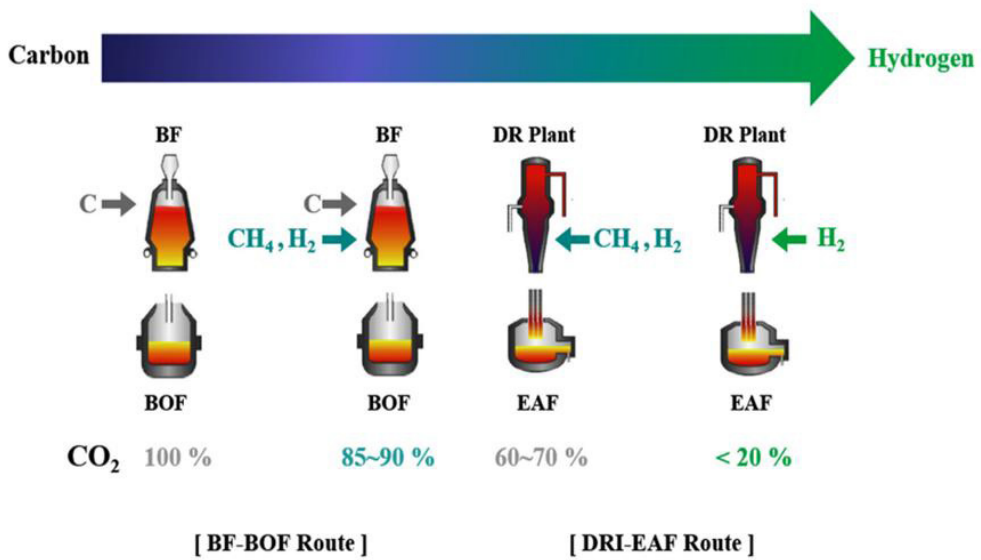
용도	관련 규격 및 설계 시공 지침
1. 시멘트 원료	KS L 5210 : 고로 슬래그 시멘트
2. 콘크리트용 혼화재	KS L 5201 : 포틀랜드 시멘트
3. 암면 원료	KS F 2563 : 콘크리트용 고로 슬래그 미분말
4. 콘크리트용 골재	KS L 9102 : 인조 광물 섬유 단열재
	KS F 2527 : 콘크리트용 골재
5. 도로용-아스콘용골재	KS F 2535 : 도로용 철강 슬래그
	도로공사 표준 시방서(건설교통부 고시)
6. 케이슨 채움재	KS F 2579 : 케이슨 채움재용 슬래그
7. 미끄럼방지용 골재	KS F 2532 : 아스팔트 표면 처리용 부순 골재·부순 슬래그 및 골재

3 미래의 제철 부산물 활용 기술

철강 공정 변화에 따른 슬래그의 조성 변화

- 철강 생산의 친환경화 및 탄소중립을 목표로 하는 전 세계적인 흐름 속에서 스크랩 사용 및 전기로 공정 확대 및 수소환원제철공정으로의 전환이 확대될 것으로 예상됨

그림 9 BF-BOF 공정과 DRI-EAF 공정 간의 CO₂ 배출량 비교



| 출처 | 이상호 et al.(2021)

- 이에 따라 슬래그 중에서 가장 높은 부가가치성을 지닌 고로 슬래그의 발생량은 점차 감소할 것으로 예측되며, 현재의 제강 슬래그와 유사한 조성을 지닌 슬래그가 발생할 것으로 전망
- 고로 슬래그는 그 자체로 수경성을 지니고 주성분 구성이 시멘트와 동일하여 시멘트 제조에 적합한 반면, 제강 슬래그는 수경성이 낮고 Fe 함량이 높아 시멘트 원료와 같은 고부가가치 용도 활용에 어려움 존재
- 따라서 미래 철강 공정의 변화에 따라 발생할 것으로 예상되는 제철 부산물에서 높은 Fe 함량의 효과적 저감 공정 개발과 함께 높은 Fe 함량을 가진 슬래그 활용 기술 개발 필요

표 4

고로 슬래그 및 제강 슬래그의 화학 조성

화학 조성 (wt%)	슬래그 종류	
	고로 슬래그	제강 슬래그
SiO ₂	33.8	13.8
CaO	41.8	44.3
Al ₂ O ₃	11.8	1.5
T-Fe	0.5	21.2
MgO	6.9	5.3
SO ₃	0.5	-

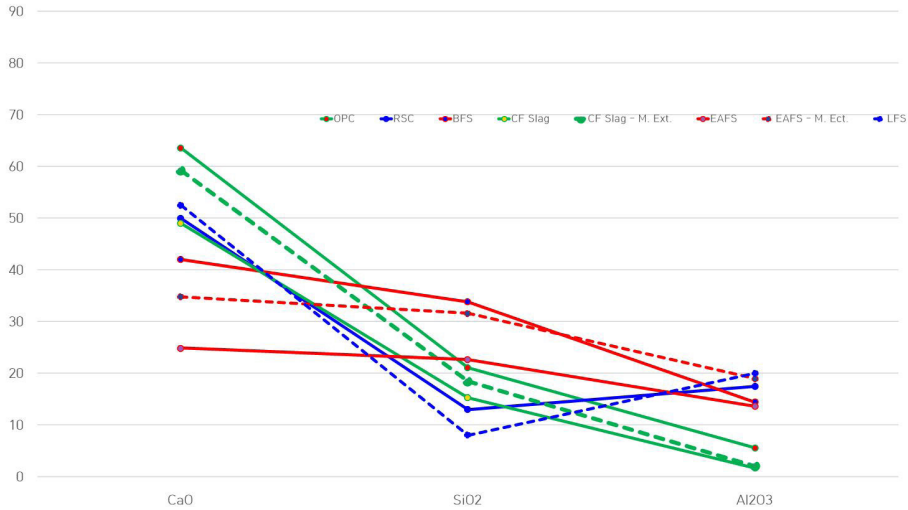
| 출처 | 한국철강협회

슬래그의 조성 변화를 고려한 새로운 재활용 방안

- 응고된 슬래그에서 Fe를 회수하는 것은 거의 불가능하지만, 용융 상태에서는 Fe 분리 가능성이 기술적으로 열려 있음
- 현재 발생하는 슬래그에서도 Fe를 제거하면, 전로 슬래그는 OPC*와 유사하고, 전기로 산화 슬래그는 고로 슬래그와 유사한 조성을 갖게 됨.

*OPC : 일반 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)

그림 10 칼슘, 실리카, 알루미나를 중심으로 슬래그 종류별 Fe 제거 전후의 조성 변화



- 따라서, 용융상의 슬래그에서 원심분리를 통해 Fe를 분리하고, 슬래그 내의 FeO 직접 저감 기술을 개발하여 제철·제강 공정의 변화 시점에 맞추어 실용화 추진 필요.
- 제강 슬래그에서 Fe를 제거하여 Fe 함량이 낮아져도 여전히 시멘트에서의 함량보다는 높은 페라이트 시멘트계 시멘트로 활용이 가능함.
- 또한 Fe를 제거한 고온 용융상의 슬래그에 시멘트 성능을 향상할 수 있는 성분 조절 물질을 투입하여 수화 활성도가 높은 페라이트 클링커를 제조하는 것이 가능함.
- 새로운 재활용 기술의 개발을 통하여 최종적으로 현재의 고로 슬래그와 같이 대부분 재활용되는 환경 구축 가능

그림 11 슬래그의 활용 방안 개념도

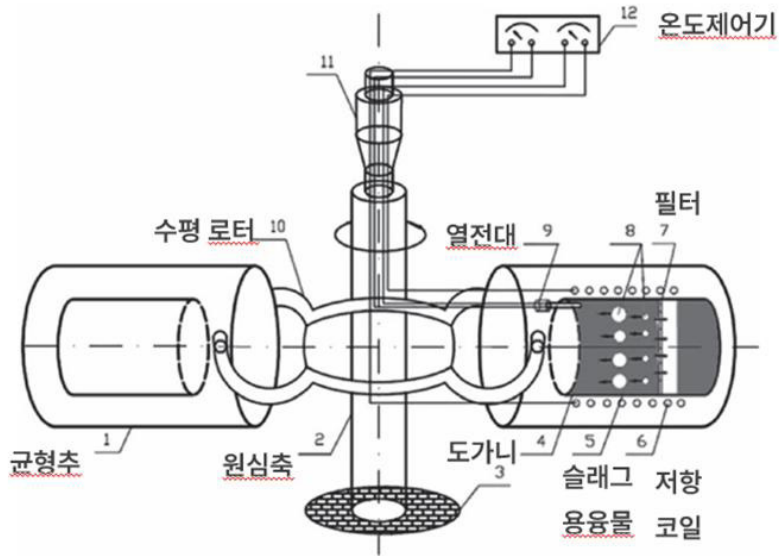


원심력을 이용한 용융상 슬래그로부터의 Fe 분리

- Fe가 많이 함유된 슬래그 내의 조성 물질 간 비중 차이를 이용하여 Fe 저감 가능
- C. Li et al.(2017)은 원심분리로 제강 슬래그에서 철 성분 분리 방법 연구
- 슬래그를 1,390°C로 가열하여 용융 상태로 만든 후 중력계수 G가 600인 상태에서 최대 15분간 원심분리하여 FeO 성분을 23.99%에서 13.14%까지 저감시킴

그림 12

원심분리 실험 장치 모식도



| 출처 | C. Li et al.(2017)

표 5

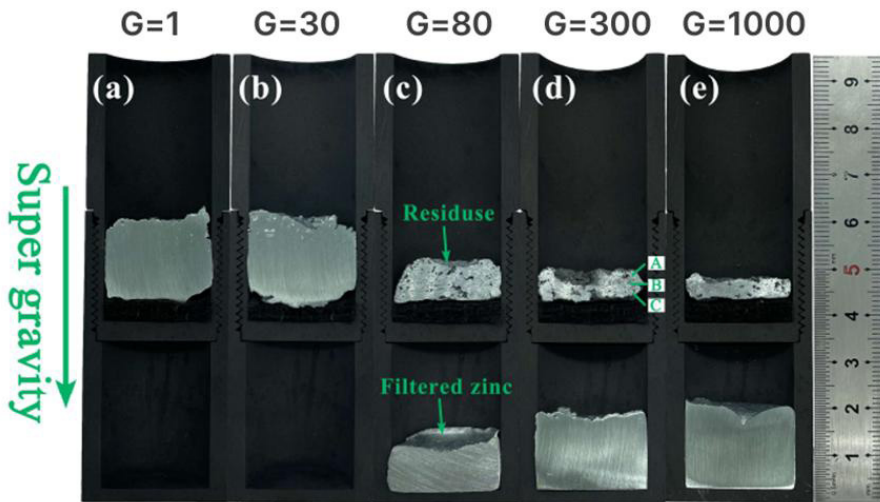
원심분리 전후의 슬래그 조성

시료	화학 조성 (wt%)								
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	
처리하지 않은 슬래그	48.13	23.99	14.67	5.39	2.49	2.24	1.87	1.20	
원심분리 후의 슬래그	P-bearing slag	54.20	13.14	20.78	4.59	5.36	1.85	1.08	0.76
	Fe-bearing slag	39.97	38.67	6.35	6.47	1.04	2.77	2.94	1.79

| 출처 | C. Li et al.(2017)

- 해당 연구팀에서는 같은 기술을 활용하여 아연 도금 슬래그의 불순물을 정제하는 연구를 수행함(Zhang S. et al., 2023)
- 다양한 변수를 조절하여 원심분리 최적 조건을 탐색하였고, 아연 도금 슬래그에서 Fe 성분을 원시료 대비 96% 저감하였음
- 기존의 정제 방법인 전기 분해, 진공 증류, 화학적 처리 등에 비해서 효율적이고 경제적 방법이기 때문에 산업적으로 확대시키기 더 유용한 방법이라고 주장함

그림 13 다양한 중력 가속도로 원심분리한 아연도금 슬래그



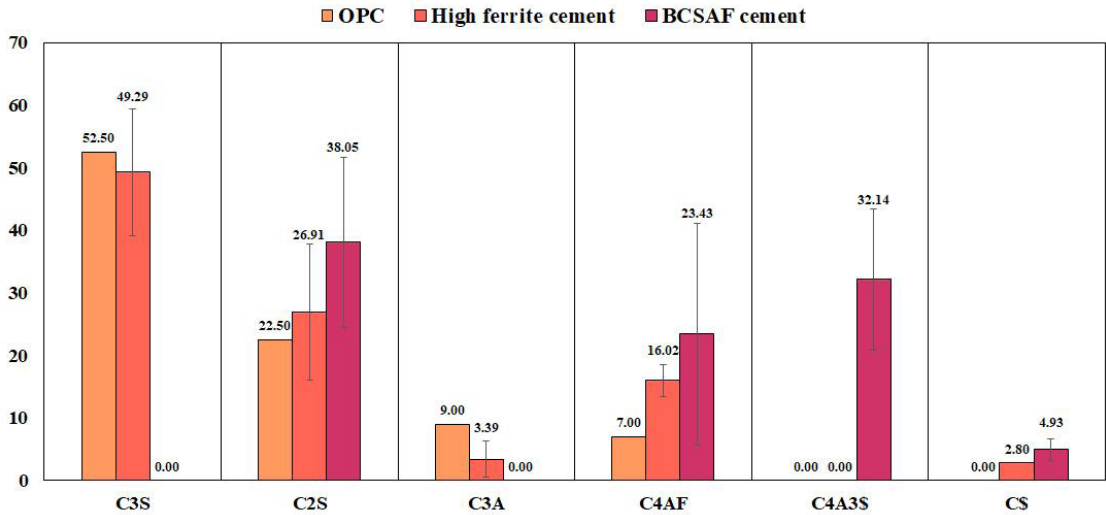
| 출처 | S. Zhang et al. (2023)

Fe 함량을 줄인 페라이트 시멘트의 개발

- 페라이트계 시멘트는 C_3S 를 줄이고 Ferrite를 증가시킨 High ferrite cement와 C_3S 를 생성하지 않고 낮은 온도에서 생성되는 $C_2S-C_4A_3S$ -Ferrite 조성물로 구성된 BC SAF(BYF) cement로 분류됨.
- 다양한 문헌을 통해 검토한 페라이트 시멘트와 OPC의 광물 조성을 비교한 결과, OPC에 비해 C_3S 의 비율이 적고 C_4AF 및 C_2S, C_4A_3S (Ye'elimite)의 비율이 크게 나타남.

그림 14

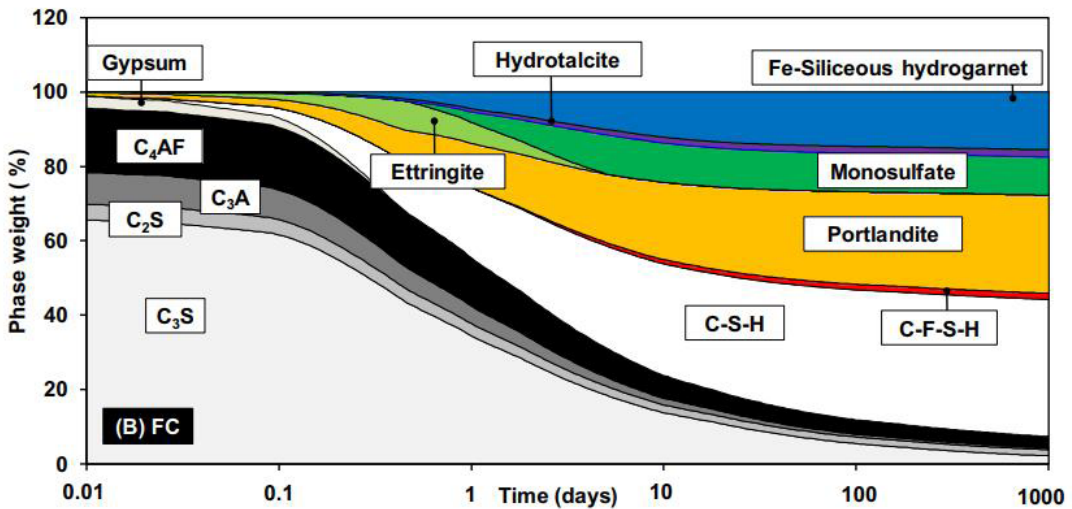
OPC의 조성과 비교한 2종류의 페라이트계 시멘트(고함량 페라이트 시멘트, BCSAF 시멘트)의 조성



- N. Noguchi et al.(2021)은 Ferrite가 풍부한 시멘트(ferrite 17.2%) 를 대상으로 OPC와 수화 모델링 결과를 비교하는 연구를 수행함
- 높은 Ferrite의 함량으로 인해 C-F-S-H, Fe-Siliceous hydrogarnet의 많은 생성이 보고됨

그림 15

고함량 페라이트 시멘트의 열역학적 수화 모델링

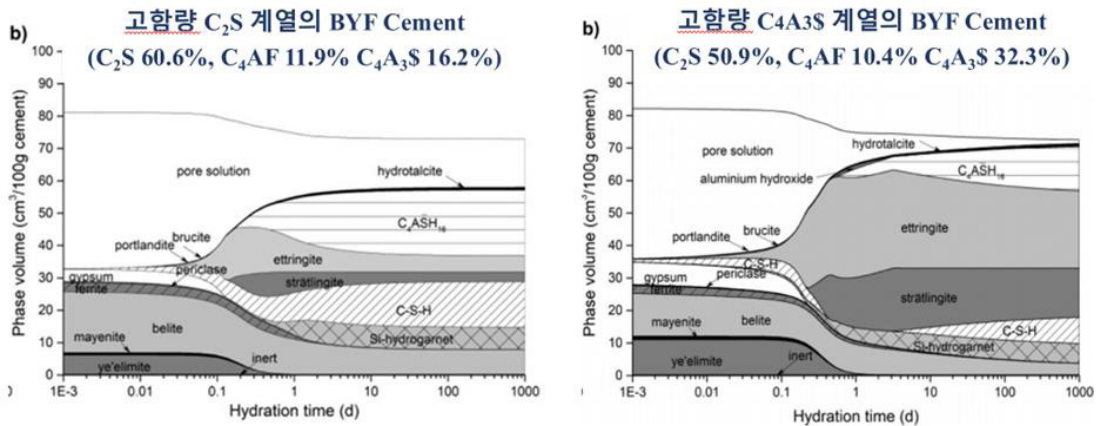


| 출처 | N. Noguchi et al. (2021)

- M. Mark et al.(2024)은 두 종류의 BYF cement를 실험적으로 검토하고, 열역학적 모델링과 비교하는 연구를 수행함
- BYF-B cement는 C_2S 가 많이 포함되어 있어 C-S-H와 다른 수화 생성물이 형성되며, 이는 압축 강도를 높이는 데 기여함
- 반면, BYF-Y cement는 C_4A_3S 가 많이 포함되어 있어 더 많은 ettringite와 stratlingite와 같은 수화 생성물을 형성하며, 이는 초기 압축 강도를 발현에 기여할 수 있음

그림 16

2종류의 페라이트계 시멘트를 대상으로 한 열역학적 수화 모델링

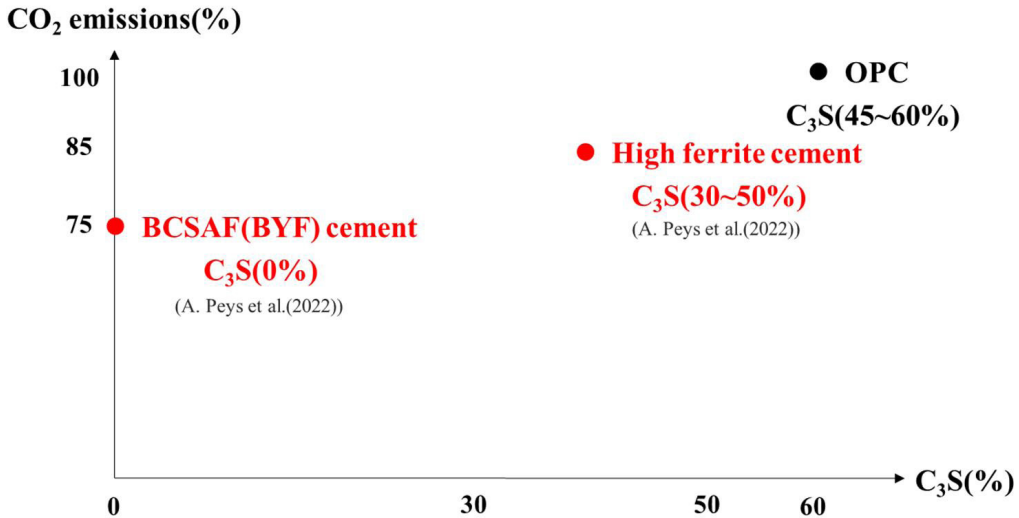


출처 | M. Mark et al. (2024)

- 페라이트 시멘트의 주 조성 광물은 C_3S 가 아닌 상대적으로 낮은 온도에서 형성되는 C_2S 와 Ye'elimite, Ferrite이므로 소성 온도를 1,250~1,350°C 수준까지 저감시킬 수 있음.
- 또한, 페라이트 시멘트 주요 원료 중 석회석의 비율 감소와 동시에 Fe, Al 계 산업 부산물의 가용성을 높이기 때문에 공정 CO_2 를 저감시킬 수 있음
- 이러한 특징을 기반으로 High ferrite cement는 기존 OPC 대비 CO_2 배출량을 15% 줄일 수 있다고 보고하였고(A. Peysetal.(2022)), 또 다른 연구에서는 OPC 대비 탄소 배출량을 최대 20% 이상 줄일 수 있다고 보고함(E. Gartner et al.(2018))
- UN Environment에서는 BYF cement의 CO_2 배출계수 0.62~0.66 수준으로 Clinker+gypsum에 비해 약 25%가량 적은 수준이라고 발표하였음

그림 17

페라이트계 시멘트의 OPC 대비 이산화탄소 배출량



슬래그 배출 공정을 변화를 통한 새로운 클링커의 생산

- 영국 케임브리지대학 연구팀(2023)은 전기로에 페콘크리트(RCP) 및 생석회(CaO) 등의 추가 원료를 투입하고, 발생하는 슬래그를 급냉하여 기존의 클링커와 유사한 조성을 가진 새로운 클링커를 제조하는 기술을 제시함
 - * 클링커(Clinker) : 고온에서 소성하여 시멘트의 원료가 되는 3~25mm 크기의 덩어리
- 이 연구에서는 석회 플럭스의 일부를 RCP로 대체하였는데, 고온도의 로 내에서 RCP는 알루미나, 실리카, 석회와 혼합되어 리클링커링(Reclinkering)됨
- 이와 같은 방법으로 슬래그 성분을 일부 조정하여 급냉하면, 제강 공정에 비용을 추가하지 않고도 재활용 시멘트를 얻을 수 있다고 주장함
- 변화하는 철강 공정에 위와 같은 개념의 기술을 발전시키고 적용함으로써 기존 클링커와 유사한 조성을 가진 슬래그를 배출할 수 있음
- 아래의 표는 위와 같은 성분 조절을 통해 시멘트계 재료로 사용이 가능한 슬래그 조성물의 유형을 제시하고 있음

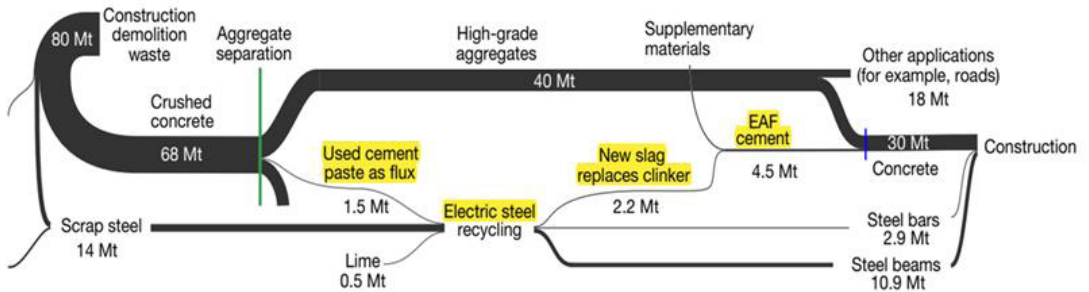
표 6 성분 조절을 통해 제조 가능한 슬래그 조성물의 예

슬래그의 분류	조성 (wt%)								
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	C ₂ AS	C	Fe	Others
High alite	60.9	14.8	8.6	0.7	0	4.6	5.0	2.4	3.1
Medium alite	53.9	24.7	10.1	0.8	0.2	3.7	2.7	1.5	2.5
High C ₂ AS	0	1.4	0	5.5	0	87.2	0	0	6.0
Medium C ₂ AS	0	58.2	2.3	2.1	0	27.0	0	0	10.5
High C ₃ A	10.3	33.2	23.0	23.6	0.9	0.4	0	0	8.7
High belite	24.0	52.5	14.1	3.9	0.2	1.5	0.9	1.1	1.9

| 출처 | C. F. Dunant et al.(2021)

- 해당 연구에서는 이러한 기술을 상용화 할 경우 영국 기준 연간 약 2.2Mt의 새로운 클링커를 생산할 수 있다고 예측함.
- 이를 소성 점토와 혼합하면 약 4.5Mt의 LC3-50(EAF cement) 시멘트를 제조하는 것이 가능하다고 주장함
- 이렇게 제조된 시멘트는 RCP의 선별, 혼합 및 펠렛화, 수송 시의 탄소 배출량을 제외하고는 탄소 배출량이 발생하지 않는 것으로 산정될 수 있음
- ‘The Economist’ 기사에 의하면 이러한 시멘트를 시험 생산하여 건설 현장에 적용할 예정이라고 하며, 또한 다량의 RCP 공급이 가능한 경우 영국 내 총 시멘트 소요량의 절반 수준까지 생산하는 것도 가능하다고 발표함

그림 18 캠브리지대학 연구팀에서 제안한 페콘크리트를 철강산업의 플렉스로 활용할 때의 물질 흐름도



| 출처 | C. F. Dunant et al.(2021)

4 맺음말

철강산업의 제철 부산물 재활용 기술 동향

- 철강산업의 탄소중립을 위해 철강 공정은 수소환원제철과 같이 고로 공정을 생략한 공정으로의 변화가 진행 중임.
- 이러한 미래의 철강 공정에서 배출되는 슬래그는 현재의 고로 슬래그와 유사한 슬래그는 감소하거나 없어지고, 현재의 제강 슬래그와 유사한 Fe 산화물 조성이 높은 슬래그의 발생이 증가할 것으로 예상됨
- 제강 슬래그에서 Fe를 회수하는 다양한 연구가 진행되고 있으며, 응고된 상태에서의 분리는 효율성이 낮으나, 용융상 슬래그 내 Fe 제거가 가능하다는 연구가 보고되고 있음.
- 그러므로 용융상 슬래그에서 원심분리에 의해 Fe를 회수하고, 남는 슬래그는 페라이트 시멘트로 활용하는 것에 관한 기술 개발이 필요함.
- 또한 이러한 공정에 콘크리트 폐기물을 플렉스로 활용함으로써 슬래그를 시멘트로 만드는 새로운 슬래그 배출 자원화 공정의 개발이 필요함.



Vision

미래의 제철 부산물 완전 재활용

탄소중립 시대에 발맞춰 변화할 철강산업의 구조를 고려하여 새로운 기술의 개발 및 연구가 미리 진행될 필요가 있음

Mission

Fe 저감 기술 개발

산업적으로 적용 용이한 기술을 개발하고 발전

페라이트 시멘트 개발

Fe 풍부한 원료를 사용한 저탄소 시멘트 개발

새로운 시멘트 생산경로

슬래그 자체가 활용성을 가진 부산물이 되도록 새로운 공정 도입

제철 부산물 활용 기술 발전에 따른 인력 양성 제안

- 탄소 배출량 저감을 위한 제선·제강 기술이 변화함에 따라 슬래그의 성분이 변화하게 되고, 이를 재활용을 위한 다양한 기술이 개발 중임
 - 원심분리에 의한 Fe 회수
 - Fe 함량 저감 페라이트계 시멘트 개발
 - 슬래그 배출공정 변화를 통한 새로운 클링커 개발
- 이러한 제철 슬래그 재활용 기술을 연구·개발 가능한 인력은 제선·제강 지식과 더불어 재활용 분야(시멘트 등)의 지식의 겸비가 필요함
- 그러나 현재 교육기관 내 금속과 같은 재료 분야의 학과는 통·폐합되며 축소되거나 사라지고 있는 경향성이 강해지고 있음
- 특히, 미래 산업으로 분류되는 반도체 및 이차전지 중심으로 학과가 개편되면서 고급 전문 인력을 양성하기 점차 어려워지고 있는 실정
- 이에 아래와 같이 탄소중립 전문 인력 양성이 필요함

1. 탄소중립 목표 달성을 위한 전문 인력 양성

- (배경) 탄소중립 목표 달성을 위해서는 공정 혁신과 부산물 활용 기술 역량 필요
- (목적) 부산물 활용 기술 효율성 극대화 도모를 위한 전문 인력 양성
- (제안 사항)
 - 신공정 운영 및 부산물 재활용 기술에 대한 심화교육 프로그램 운영
 - 새로운 슬래그 활용 방안 연구 개발 전문 인력 양성

2. 미래 철강 부산물 활용의 고부가가치화

- (배경) 고로 슬래그와 달리 재활용이 어려운 제강 슬래그의 고부가가치 활용 필요
- (목적) 제강 슬래그의 고부가가치 활용을 위한 연구·개발 전문 인력 양성
- (제안 사항)
 - 제강 슬래그 화학적 특성 이해 및 산업 부산물 활용 기술 개발 기여 인력 양성
 - 부산물 고부가가치 활용 기술 상용화 전문가 교육 및 산업협력 네트워크 구축

3. 순환 경제 체제 확립을 위한 인력 확보

- (배경) 지속 가능한 산업 운영을 위하여 슬래그 재활용 공정 경제성 향상 및 새로운 자원화 기술 필요
- (목적) 재료 분야 순환 경제 활성화 전문 인력 양성
- (제안 사항)
 - 철강 부산물 재활용 및 순환 경제 전환에 필요한 정책 기획 및 관리 인력 양성
 - 부산물 재활용 공정에서 발생 가능한 환경 문제 진단 등 환경 전문 인력 양성

참고 문헌

- 이재윤, 양진혁, 철강산업의 탄소중립 추진 전략과 정책 과제, 산업연구원, ISSUE PAPER 2022-06, 2022
- Li C., Gao J., Wang Z., Ren H. & Guo. Z., Separation of Fe-bearing and P-bearing phase from the steel making slag by super gravity, ISIJ International, 57(4), pp. 767-769, 2017
- Zhang S., Wang Z., Lan X., Shi L. & Guo Z., Purification and Recovery of Hot-Dip Galvanizing Slag via Super gravity-Induced Cake-Mode Filtration, Metals, 14(1), pp. 100, 2024
- Noguchi N., Siventhirarajah K., Chabayashi T., Kato H., Nawa T. & Elakneswaran Y., Hydration of ferrite-rich Portland cement: evaluation of Fe-hydrates and Fe uptake in calcium-silicate-hydrates, Construction and building materials, 288, pp. 123-142, 2021
- Mark M., Winnefeld F., Lothenbach B., Legat A. & Dolenc S., Experimental study and thermodynamic modelling of the temperature effect on the hydration of belite-ye'elimite-ferrite cements, Construction and Building Materials, 411, 134260, 2024
- Dunant C. F., Joseph S., Prajapati R. & Allwood J. M., Electric recycling of Portland cement at scale. Nature, pp. 1-7, 2024

ISC ISSUE REPORT

재료산업인적자원개발위원회
이슈리포트 | 2024년 4분기

