

Waelz Kiln 슬래그로부터 고품위 철 농축산물의 생산을 위한 최적 물리적 처리공정

§한요셉*** · 김성민* · 한성수* · §§김영재***

*한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터, **과학기술연합대학원대학교 자원공학, ***인하대학교 신소재공학과

The Optimal Physical Treatment Process for Production of High-grade Iron Concentrate from Waelz Kiln Slag

§Yosep Han***, Seongmin Kim*, Seongsoo Han* and §§Youngjae Kim***

**Mineral Processing & Metallurgy Research Center, Resources Utilization Division,*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

***Resource Engineering, University of Science Technology (UST), 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea*

****Department of Materials Science and Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea*

요 약

본 연구에서는 Waelz Kiln(WK) 공정에 의해 발생하는 슬래그로부터 물리적 처리에 의해 60% 이상의 품위를 가지는 철 농축산물을 얻고자 하였다. 대상 WK 슬래그는 수 mm 크기의 조립자로서 슬래그의 T-Fe 함량은 40.24%, ZnO 함량은 1.03%으로 확인되었다. WK 슬래그는 실험실 로드밀을 이용하여 다양한 분쇄시간 동안 분쇄하였으며, 분쇄된 시료는 우선 저자력(0.05 T) 세기에서 선별되었다. 그 결과, 10분 분쇄된 시료에서 가장 높은 철 품위를 나타내었으며, 20분 분쇄시료를 대상으로 자력세기에 따라 실험한 결과, 보다 고자력인 0.8 T에서 가장 높은 품위 및 최고 수준의 회수율이 관측되었다. 앞선 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 최적의 관련 물리적 처리공정을 제안하였으며, 최적 공정에 의해 얻어진 철 농축산물의 품위 그리고 농축율은 각각 61.34% 그리고 1.52으로 평가되었다.

주제어 : Waelz Kiln 슬래그, 물리적 처리, 철 농축산물, 품위

Abstract

The aim of this study was to develop a physical treatment method for obtaining iron concentrate with a grade higher than 60% from slag generated in the Waelz Kiln (WK) process. The size of the WK slag used in this work was several millimeters, with T-Fe and ZnO contents of 40.24% and 1.03%, respectively. The slag samples were pulverized in a laboratory rod mill for various grinding times, followed by a magnetic separation test under a low magnetic intensity of 0.05 T initially. The results showed that the highest iron grade was obtained from samples with a grinding time of 10 min. Additionally, for a grinding time of 20 min, the highest grade and recovery ratios were achieved at a magnetic intensity of 0.8 T. Based on these findings, the optimal physical treatment process proposed in this study resulted in iron concentrates with a grade of 61.34% and an enrichment ratio of 1.52.

Key words : Waelz Kiln slag, physical treatment, iron concentrate, grade

· Received : January 21, 2023 · Revised : April 12, 2023 · Accepted : April 13, 2023

§ Corresponding Author : Yosep Han (E-mail : yosep@kigam.re.kr)

Mineral Processing & Metallurgy Research Center, Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahank-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

§§ Co-corresponding Author : Youngjae Kim (E-mail : youngjae@inha.ac.kr)

Department of Materials Science and Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, 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

대한민국은 2020년 10월 28일 2050 탄소중립 실현을 선언 및 그해 12월 7일 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 공개 발표하였다. 그리고 이후, 2021년 8월 31일 탄소중립·녹색성장기본법(이하 탄소기본법)이 국회를 통과하였으며, 2021년 11월 2일 영국 글래스고에서 열린 ‘제26차 유엔기후변화협약 당사국(COP26) 정상회의’에서 상기내용으로 기조 연설함에 따라 대한민국은 국제무대에서 설정된 온실가스 배출량 감량을 이행하는 목표 및 국제적 약속을 하게 되었다¹⁾. 여기서, 대한민국은 연간 4.17% 온실가스 배출량 감량을 목표로 설정하였는데, 이는 미국(3.07%) 그리고 일본(3.56%)보다 높은 수준인 것으로 알려져 있다²⁾.

따라서, 탄소중립을 실현하기 위한 국내 관련 산업체를 비롯한 많은 사회구성원들이 참여하여 관련 온실가스 배출 억제 및 감량을 하기 위한 노력을 수행하고 있다. 온실가스 발생 주역은 주로 전력, 산업, 건물, 수송, 폐기물, 농축수산 및 수소 등 여러 가지 구분할 수 있다. 기존 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution, 18년 대비 감축률)대비 NDC 상향안에 따르면 모든 분야에서 온실가스 감축량이 크게 증가하였으며, 전력은 28.5%→44.4%(15.9%상향) 및 건물은 19.5%→32.8%(13.3%상향)으로 정하였다. 특히, 산업분야의 경우, 기존 NDC에서는 6.4%에서 NDC 상향안은 14.5%으로 8.1%으로 다른 부문보다는 상대적으로 적게 설정되어 있다. 여기서, 산업내 주요 감축 방안을 살펴보면 철강 2.3%, 석유화학 20.2%, 시멘트 12% 그리고 기타 28.1%로 이었다²⁾. 결국, 철강 공정 전환을 통하여 철강산업내 발생하는 온실가스 감축을 추진함에도 불구하고 다른 부문 및 산업에 비하여 매우 적은 온실가스 감축률로 설정됨을 알 수 있다. 이것은 철강 산업 특성 상 매우 많은 온실가스를 발생함에 따라 상대적으로 온실가스 감량이 쉽지 않기 때문이다.

잘 알려진바와 같이, 대한민국은 중국, 인도, 일본, 미국 다음으로 세계 5위 조강생산국으로서 2019년 기준으로 조강생산량은 7,141만 톤을 생산하였다. 이처럼 많은 철을 생산함에 따라 함께 발생하는 제철부산물들은 국내 연간 평균 18,000천 톤으로 발생되고 있는 실정이다³⁾. 이렇게 대량으로 발생하는 제철부산물은 거의 99% 이상이 재활용되고 있으며, 주로 시멘트 원료, 성토용 골재, 도로용

골재 그리고 비료용으로 활용되고 있다.

다양한 제철부산물 중에서 고로슬래그 및 제강슬래그와 달리 전기로 분진은 일반적으로 제강분진(EAF dust)으로 불리며, 전로 및 전기로 공정에서 주로 발생한다⁴⁾. 특히, 제강분진은 철강에서 불순물을 제거하는 제강 공정에서 발생하는 분진으로서 다량의 유해 중금속을 포함하고 있으며 특히 철강 제품을 제조하는 방법에서 철광석 그리고 스크랩(고철)을 원료로 사용하게 된다. 여기서, 스크랩을 전기로에서 녹이는 과정에서 발생하는 분진은 철광석을 이용한 선철의 제강분진에 비해 유해물질을 더 많이 포함하는 특징을 가지고 있으며 납, 아연, 수은 등 중금속 물질이 포함되어 있기 때문에 지정폐기물로서 처리되고 있다. 일반적으로 철 100톤 생산할 경우 대략 1.5톤 정도의 분진이 발생되며 아연 15-25%, 납 1-4% 그리고 카드뮴 0.03-0.4% 등을 함유한다고 알려져 있다^{4,5)}.

이와 같이, 높은 아연 함량을 가지는 제강분진의 경우는 습식회수를 통하여 제강슬러지로서 포집하여 처리하고 있으며, 높은 아연 함량으로 인하여 재자원화 2차 처리 기업으로 판매하고 있는 실정이다. 2차 처리기업에서는 아연을 회수하기 위한 여러 가지 방법으로 효과적인 아연을 회수하고 있으며, 주로 건식, 습식 그리고 건·습식 복합방식을 사용하고 있다. 특히 건식처리 방식에서는 노의 형상에 따라 길른형, 용융환원형, 회전노상형, 샤프트형 등으로 구분된다. 이 중 Waelz Kiln(WK) 공정은 스위스의 Global Steel Dust사에서 개발한 기술로서 현재 전세계적으로 전기로 제강분진의 85% 이상을 처리하고 있는 것으로 보고되고 있다^{4,5)}. WK 공정은 제강분진 뿐만 아니라 다양한 장입물을 사용할 수 있으며 간단한 설비 구조를 가지며 높은 에너지 효율성 및 가동성 등의 특징을 가지고 있다. 주요 설비인 로터리 킬른이 2-3도의 각도를 가지고 대략 1.0 rpm으로 회전하기 때문에 제강분진 등의 고체 장입물의 체류시간이 8-10시간 정도로 조절한다. 이때, 배출구 근처로 도달하면 아연이 반응에 의하여 증발되어 CO 가스와 역방향으로 흘러가게 되고 배출구에는 슬래그만 배출된다. 이때 배출되는 슬래그를 WK 슬래그로 불러지며 Zn 농도가 매우 낮은 특성을 가지게 된다.

WK 공정에 의하여 발생된 슬래그는 장입되는 제강분진 특성에 따라 달라지지만 대체적으로 상대적으로 낮은 Zn 농도를 함유하고 있으며 유해 중금속 함량도 적다. 따라서 발생하는 슬래그의 산화철도 환원되므로 용선이나

환원철로서 제강사에 일반적으로 공급되고 있다. 그러나, WK 공정에서 발생하는 슬래그내 철 함량은 대략 35-40%을 가짐에 따라 제강사 공급 또한 제한되고 있기 때문에 재활용으로 사용 또한 매우 제한적인 실정이다. 따라서, 온실가스 발생이 없고 친환경적인 방법으로 WK 슬래그내 철의 함량을 높을 수 있다면 제강사로 공급을 원활하게 해 줄뿐만 아니라 대형 제철소로 다시 제공하여 제강 공정에서 스크랩 또는 저품위 철광석 대신으로 재사용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 WK 공정에 발생하는 슬래그로부터 물리적 처리 및 선별 기술로부터 고품위 철 농축산물 생산하기 위한 최적 공정을 설계하고자 하였다. 출발원료 WK 슬래그의 분쇄 그리고 선별 공정으로 설정하였으며, 최종 철 농축산물의 목표 품위는 60% 이상으로 설정하였다. 출발원료 WK 슬래그는 로드밀로 분쇄를 수행하였으며, 선별은 습식 자력선별 기술을 적용하였다. WK 슬래그로부터 고품위 철 농축산물을 얻기 위한 최적공정 설계를 하기 위해 분쇄에 의한 최적 입도 크기 설정 그리고 자력선별에서 자력세기에 따른 분리/선별 특성을 평가하였다. 따라서, 본 연구에서의 대상인 WK 슬래그로부터 품위 60% 이상 철 농축산물 생산 가능한 최적공정을 도출하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. WK 슬래그 시료

본 연구에서 사용된 대상원료는 Waelz Kiln 공정으로 발생된 슬래그(G사)를 사용하였으며, WK 슬래그의 화학적 조성은 X-ray fluorescence(XRF, Sequential XRF-1800, Shimadzu)을 이용하여 확인하였다. 얻어진 WK 슬래그의 입자는 수mm 크기 이상으로 확인됨에 따라 체를 통하여 3구간 범위 입도 크기 분포를 설정하여 측정하였다. 대상 WK 슬래그의 결정구조를 확인하기 위해 X-ray 회절(XRD, Bruker D8 ADVANCE, Germany) 분석기를 사용하였다.

2.2. 로드밀에 의한 분쇄 수행 및 평가

대상 WK 슬래그의 분쇄실험은 로드밀을 이용하여 분쇄시간에 따른 입자크기를 먼저 평가하였다. WK 슬래그의 로드밀 분쇄조건은 습식으로 수행하였으며, 광택농도

는 70%이었다. 분쇄메디아의 직경 및 길이는 2 cm 그리고 32 cm으로서 총 12개를 사용하였으며, 추가로 직경 및 길이가 1.5 cm 그리고 3.2 cm으로서 8개를 분쇄메디아로서 사용하였다⁶⁾. 분쇄회전 속도는 임계속도로 설정하였으며, 분쇄 시간은 5, 10, 20, 30 그리고 60분으로 설정하여 수행되었다. 이에, 최종 얻어진 분쇄된 WK 슬래그 시료의 입자크기는 레이저회절 입도측정기(MasterSizer 2000, Malvern, England)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 습식 자력선별 수행 및 평가

자력선별 실험은 실험실용 드럼형태의 습식 자력 선별기로 수행되었으며, 선별 실험을 위한 시료량은 500 g으로 고정하여 수행되었다. 먼저, 앞선 로드밀에 의해 분쇄된 WK 슬래그 산물로부터 0.05 T에서 1.0 T 범위의 다양한 자력세기에 의하여 철 농축산물 선별 특성을 확인하고자 하였다. 모든 시료의 화학적 성분 분석은 유도결합플라즈마(ICP-OES, Optima-5300DV, Perkin Elmer) 그리고 X-ray fluorescence(XRF, Sequential XRF-1800, Shimadzu)으로 구분하여 분석하였다. 회수율(recovery, %)은 철 농축산물에서 회수되는 시료에 포함된 총 철 금속의 백분율로서 정의하였으며, 철 농축산물의 회수유른식 (1)의 방정식에 의하여 계산되었다⁷⁾.

$$\text{Recovery (\%)} = Cc/Ff \times 100 \quad (1)$$

여기서, C는 자성산물의 무게(g), c는 자성산물의 품위, F 그리고 f는 각각 투입시료의 무게(g)와 품위이다. 농축율(enrichment ratio, ER)은 투입시료의 품위(f)에 대한 정광의 품위(c)의 비율이다⁸⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1. WK 슬래그 화학성분 및 입도 크기

본 연구에서 사용된 WK 슬래그의 화학적 성분 결과를 Table 1에 나타내었다. 제강분진을 대상으로 Waelz Kiln 공정에 의해 Zn 회수하고 난 후, 발생된 슬래그로서 ZnO 함량은 1.03%으로 확인되었다. 일반적으로 알려진 고로 슬래그 및 제강슬래그는 대략 5-10% 이상의 ZnO 함량을 가지는 것에 비해 상대적으로 매우 낮은 함량을 가지는 것으로 나타났다. 그리고, T-Fe 함량은 40.24%으로 가장

Table 1. Chemical compositions of the WK slag samples used in this study

Component	ZnO	Pb ₂ O ₃	T-Fe	V ₂ O ₅	Na ₂ O	CuO	SO ₃
wt.%	1.03	0.39	40.24	0.08	0.68	0.25	1.95
Component	K ₂ O	CaO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	
wt.%	0.27	11.47	10.34	3.88	4.20	5.54	

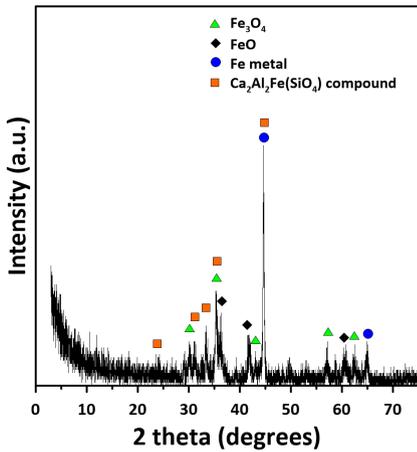


Fig. 1. X-ray diffraction (XRD) pattern of the WK slag samples used in this study.

많이 존재하는 것으로 관찰되었으며, CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO 그리고 MnO 순서로 높은 함량을 가지는 것으로 확인되었다. 본 연구의 회수되는 T-Fe 품위는 60% 이상으로 설정됨에 따라 농축율(ER)은 1.5 이상 달성해야 하며, 그에 따른 회수율을 함께 평가해야 할 것이다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 WK 슬래그의 XRD 분석을 통하여 얻은 X-ray 패턴 프로파일 결과이며, 광중성분 결과를 함께 나타내었다. 앞선 XRF를 통한 화학적 성분 결과에서 가장 많은 철 함량을 가짐에 따라 마찬가지로 Fig. 1에서도 WK 슬래그내 주로 다양한 철 화합물이 관찰되었다. 자철석(magnetite, Fe₃O₄), 산화철(FeO) 그리고 금속 철이 함께 나타났다. 특히, 일반적으로 잘 알려진 슬래그 내 철성분은 고온에서의 열처리로 인하여 다양한 비철금속과의 결합된 합금금속 화합물이 형성하게 된다. 본 연구에서 사용된 WK 슬래그 또한 Ca₂Al₂Fe(SiO₄) 화합물이 금속 철 및 자철석과 동일한 피크에서 함께 나타났다. 이것은 철 성분들이 단일결정 철 결정의 존재와 함께 다량의 합금형태의 철 화합물로 존재함을 의미하게 된다⁹⁾. 따라서, 물리적 처리공정을 수행함에 있어 철 농축산물 회

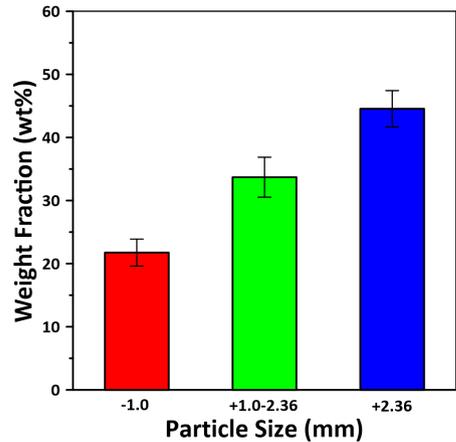
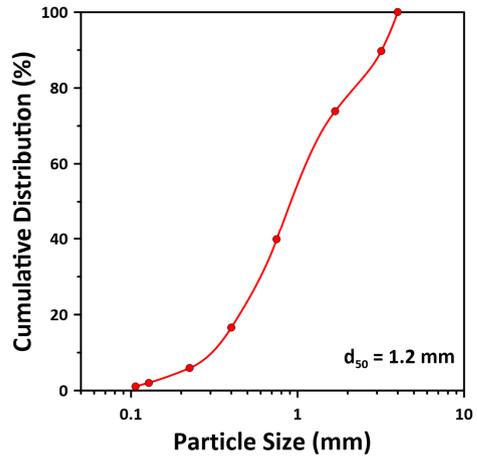


Fig. 2. Particle size distribution and weight fraction of the WK slag samples used in this study.

수에 부정적인 영향을 가질 것으로 사료된다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 WK 슬래그 시료의 입자크기 분포 및 크기별 무게분율을 나타내었다. 가장 작은 크기는 대략 0.1 mm로 확인되었으며, 그 이하는 관찰되지 않았다. 가장 큰 입자는 대략 5 mm 가 관찰되었다. Waelz Kiln에서 바로 얻어진 슬래그에 대한 평균 입자크기는 대략 1.2 mm로 확인되었다. 분포가 매우 넓게 가지는 것으

로 확인되었으며, 수 mm 크기의 입자를 가짐에 따라 분쇄 실험은 로드밀이 적합한 것으로 판단되었다. 따라서, 분쇄 실험은 입도분포로부터 확인되어 로드밀을 사용하였다. 이때, WK 슬래그내 상대적 미립입자(d_{20})크기는 0.35 mm 그리고 거대입자(d_{80})은 2.2 mm으로 관찰되었다.

3.2. WK 슬래그의 분쇄 및 저자력 세기에서 자력선별 특성 평가

Fig. 3은 대상 WK 슬래그의 분쇄시간에 따른 입자크기 분포를 나타낸 결과이다. 당연하게도 분쇄시간이 증가됨에 따라 WK 슬래그의 입자크기는 감소하였다. 전반적

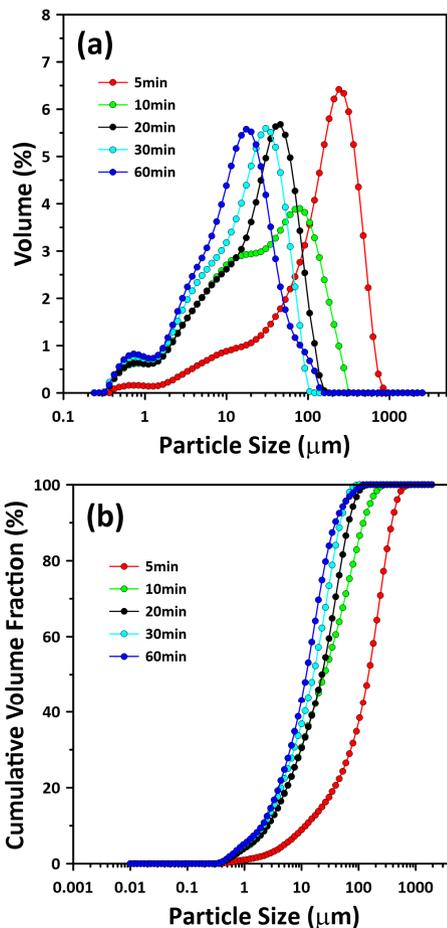


Fig. 3. Particle size distributions of the WK slag samples milled with various grinding time used in this study: volume fraction percentage (a) and cumulative distribution percentage (b).

으로 분쇄시간 증가에 의한 거대입자(d_{80})의 분쇄속도는 상대적으로 미립입자(d_{20})에 비해 매우 빠르게 일어나는 것으로 관찰되었다⁸⁾. 이것으로 보아 출발원료인 WK 슬래그는 Zn 회수를 위한 열공정 과정에서 입자-입자 결합으로 인하여 철산화물들의 합금화 보다는 주변 열에너지로 인한 고상소결로 인하여 WK 슬래그가 커짐을 의미하는 것으로 판단된다.

앞선, 출발원료인 WK 슬래그의 분쇄공정에 의하여 6개의 분쇄시간에 따른 입도분포가 다른 6개의 시료를 확보하였다. 이렇게 얻어진 분쇄산물로부터 다양한 자력세기에 의하여 습식자력선별을 수행하였다. 다양한 분쇄산물에 대한 자력세기 조건에 의해 얻어지는 자성산물의 철 함량을 평가하였으며, Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 저자력세기 0.05T 조건에서 습식 자력선별에 의해 다양한 입자크기 분포를 가지는 시료들로부터 얻어진 자성산물에 대한 철 품위 그리고 회수율을 나타내었다. 흥미롭게도 자력선별 결과를 토대로 품위 그리고 회수율에 대한 차이가 관찰되었다. 5분 분쇄된 시료에서는 가장 낮은 품위와 회수율이 관찰되었으나, 10분 분쇄된 산물에서 가장 높은 철 품위 53.61%을 가지는 것으로 확인되었다. 20분 이상 분쇄된 산물에서 수행되어 얻어진 자성산물은 약간 감소하는 것으로 확인되었다. 회수율 경우, 품위와 다른 경향

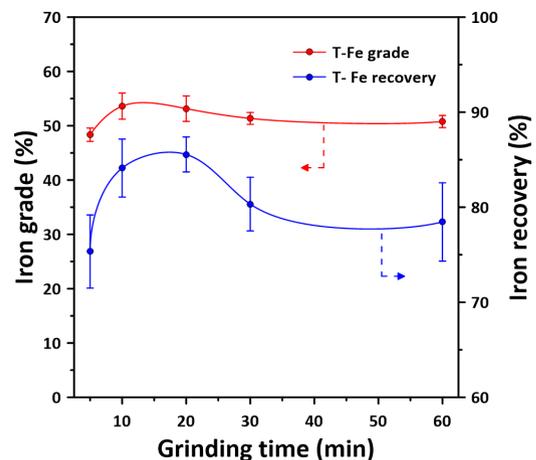


Fig. 4. Grade (red circle) and recovery (blue circle) of total iron from the magnetic concentrates obtained at 0.05 T magnetic intensity as a function of the grinding time. Error bars denote standard deviations and where not visible are smaller than the marker. Repeated experiments were performed at least 3 times.

이 관찰되었으며, 얻어진 분쇄산물의 분쇄시간이 20분까지 시료에서는 회수율이 크게 증가하였다. 특히, 20분 분쇄산물에서는 철 회수율 85.55%로 확인되었다. 그러나, 분쇄시간이 크게 증가한 30분 이상부터 회수율이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 우리는 철 산물은 고자화율 특성을 가짐에 따라 저자력세기에서도 높은 철의 품위 및 회수율을 가질 것으로 예상하였다. 그럼에도 불구하고 우리가 목표하였던 품위 60%는 달성하지 못하였으며, 분쇄시간 조건에 따라 큰 변동을 가지는 회수율 결과를 가지는 것으로 확인되었다.

이 결과를 토대로 우리는 두 분쇄조건(i.e., 입자크기)에서 얻어진 시료를 대상으로 공정을 설계해야 할 것으로 판단하였다. 따라서, 우리는 분쇄시간 10분의 거대입자(d_{80}) 105 μm 시료 그리고 분쇄시간 20분의 거대입자(d_{80}) 74 μm 로 선정하여 철 농축산물을 얻기 위한 공정 설계대상 시료로 선정하였다. 이는 아마도 많은 분쇄시간으로 통하여 철 입자가 줄어들어 따라 저자력에서 충분한 자력함에 의하여 자석 흡착이 이루어지지 않는 것으로 사료된다. 특히, 74 μm 시료는 가장 높은 회수율을 가짐에 따라 다양한 자력세기에서 최대 품위 및 회수율 평가를 수행하고자 하였다.

3.3. 다양한 자력세기에서의 선별 특성 평가

앞선, 저자력 세기에 가장 회수율을 가지는 분쇄조건 20분($d_{80}=74 \mu\text{m}$) 시료를 대상으로 다양한 자력세에서 얻고자 하는 철 자성산물의 품위 및 회수율을 평가하고자 하였다. 일반적으로 자력세기가 증가할수록 상대적으로 낮은 자화율을 가지는 산물을 회수가 됨으로서 품위가 낮아지지만 반대로 회수율을 증가시킬 수 있다⁸⁾. 따라서, 본 연구에서 설정되어 제작된 분쇄산물 중에서 20분 시료를 대상으로 자력선별 특성을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5를 보시면 0.05 T에서 1.0 T까지 다양한 자력세기에서 20분 분쇄된 WK 슬래그로부터 철 품위 그리고 회수율 결과를 나타내었다. 전반적으로 자력세기가 증가함에 따라 철 품위가 약간 증가하는 것으로 관찰되었으며, 0.05 T 세기에서 철품위는 53.15% 그리고 0.8 T 세기에서는 58.12%의 철 품위로 나타났다. 그러나, 가장 높은 자력세기 1.0 T에서 오히려 철품위가 51.48%으로 크게 감소되는 것으로 확인되었다. 흥미롭게도 회수율은 자력

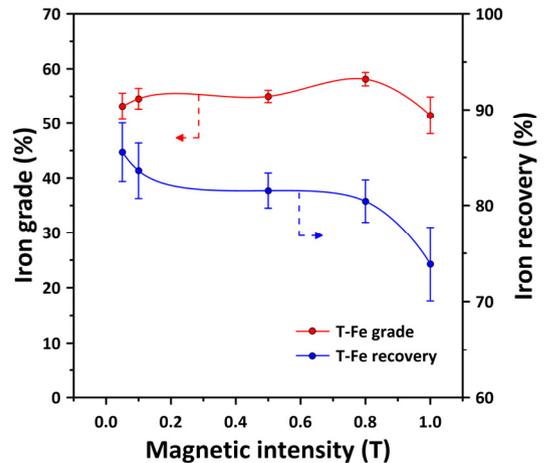


Fig. 5. Grade (red circle) and recovery (blue circle) of total iron in the magnetic concentrates as a function of the various magnetic intensity. The WK slag sample milled for 20 min using a rod mill was used. Error bars denote standard deviations and where not visible are smaller than the marker. Repeated experiments were performed at least 3 times.

세기 증가로 인하여 감소되는 것으로 확인되었다. 특히 하계도 자력세기가 0.05 T에서 철 회수율 85.55% 이었으며, 0.8 T까지 80.44% 회수율으로 감소가 나타났으며, 1.0 T 자력세기에서 회수율을 급격히 감소되어 73.88%으로 나타났다.

다양한 자력세기 조건에서 자력세기가 0.8 T에서 얻어진 자성산물에서 철 품위가 가장 우수하였으며, 전반적으로 감소되는 회수율에서 0.8 T까지는 크게 감소되지 않았다. 따라서, 높은 철 품위를 유지하고 회수율 감소를 최소화하는 0.8 T 자력세기에서 1차적인 선별을 수행하는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 일반적으로 높은 자력세기 조건으로 상대적으로 목적물질인 철이 아닌 상대적인 약자성 화합물을 회수함에 따라 자력세기 증가할수록 품위가 감소하고 회수율은 증가되는 경향이 관찰된다. 그러나, 이와 달리 높은 자력세기로 인하여 오히려 철의 품위가 증가하고 회수율은 크게 감소되는 것으로 나타났다. 아마도 이것은 WK 슬래그내 철은 단일성분으로 존재보다는 화합물로 존재하는 물질이 많음에 따라 높은 자력세기에서의 선별에서 오히려 높은 품위를 유도하는 것으로 보여진다¹⁰⁾.

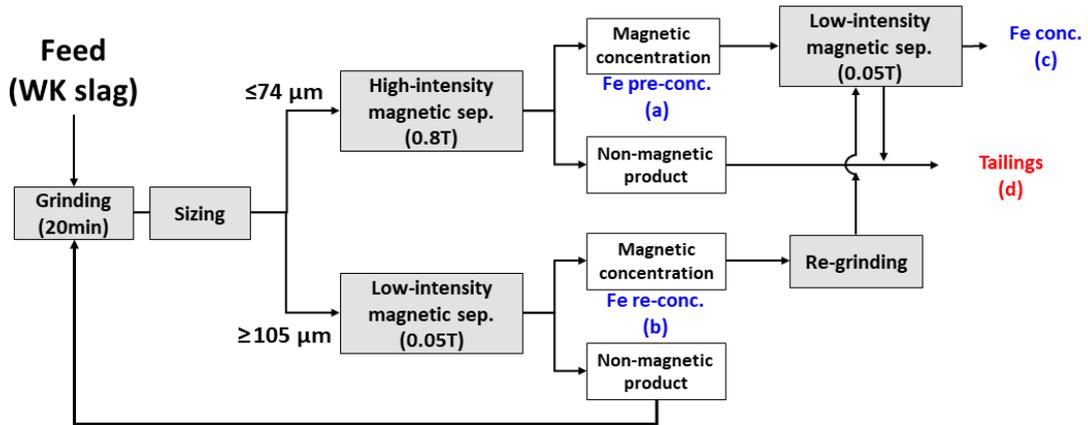


Fig. 6. A flowchart for the effective recovery of the concentrates of total iron by optimized magnetic separation process from the WK slag used in this study.

3.4. 제안된 최적의 다단 자력선별 공정 설계

본 연구에서 사용된 WK 슬래그로부터 고품위 철 농축산물을 얻고자 로드밀로부터 다양한 입자크기를 가지는 분쇄산물로부터 저자력 세기에서의 조건을 도출하였다⁸⁾. 특히, 상대적으로 입자크기가 큰 분쇄시간 10분 시료에서 가장 높은 철 품위가 관찰되었으며, 20분 분쇄시료에서 높은 회수율을 나타냈다. 이에, 20분 시료에서는 다양한 자력세기에서 철 농축산물 회수를 위한 실험을 수행하였다. 따라서, 우리는 20분 분쇄된 산물을 기반으로 거대입자(d_{80})를 $74 \mu\text{m}$ 이하 그리고 $105 \mu\text{m}$ 이상으로 분급하여 0.05 T 그리고 0.8 T 자력세기에서 단계별 자력선별 하기 위해 설계되었으며, Fig. 6과 같은 다단 자력선별 공정을 설계하여 최종적으로 얻게 되는 철 농축산물의 품위와 회수율을 평가하고자 하였다.

Fig. 6에 제시된 바와 같이 20분 분쇄조건에 의해 얻어진 분쇄산물을 두 입자크기로 분급하여 상대적으로 미립크기 시료는 고자력 0.8 T에서 자력선별을 수행하였으며, 상대적으로 조대입자 시료는 저자력에서 각각 선별하였다. 이때, 고자력 0.8 T에서 얻어진 자성산물은 Fe pre-conc.로 설정하였으며, 저자력 0.05 T에서 생산된 자성산물은 Fe re-conc.으로 설정하였다. 그리고 Fe-reconc.은 다시 $74 \mu\text{m}$ 이하로 재분쇄 및 분급을 수행하여 다시 저자력 0.05 T에서 클리닝 공정을 수행토록 하여 높은 철 농축산물을 얻고자 하였다. 그리고 저자력 0.05 T에서 클리닝 공정에서 최종 수행된 산물이 우리가 얻고자 하는 고품위 철 농축산물로 설정하였다.

Table 2. Chemical composition of the magnetic products and the tailings from the proposed multi-stage magnetic separation process.

Sample	T-Fe (%)	ZnO (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)
Feed	40.24	1.03	11.47	10.34
(a) Fe pre-conc.	58.58	0.73	9.85	8.73
(b) Fe re-conc.	53.85	0.42	8.76	6.11
(c) Fe conc.	61.34	0.32	7.27	7.32
(d) Tailings	26.52	3.52	14.67	15.21

앞선 분쇄 및 자력선별 결과를 기반으로 제안된 최적 공정으로부터 얻게된 산물 및 부산물에 대한 성분 결과는 Table 2에 나타내었다. 본 연구결과를 토대로 제안된 공정으로부터 최종 (c) Fe-conc. 농축산물에서 철 품위는 61.34%을 달성하였으며, 농축율도 1.52로서 (a) Fe pre-conc. 그리고 (b) Fe re-conc.의 농축율 1.45 그리고 1.33에 비해 크게 증가함을 알 수 있다. 게다가, 대표적인 불순물인 ZnO, CaO 그리고 SiO₂ 함량이 감소되는 것으로 확인되었다. 그리고 최종 부산물인 (d) Tailings은 상대적으로 낮아진 철 함량 그리고 높아진 불순물이 관찰됨에 따라 본 연구에서 사용된 물리적 처리로 인하여 효과적인 철 농축산물을 얻기 위한 분리-선별이 가능한 것으로 확인되었다. 따라서, 제안된 공정으로부터 WK 슬래그로부터 분쇄 및 선별공정으로 구성된 물리적 처리공정에 의해 60% 이상의 품위를 가지는 철 농축산물을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Wealz Kiln 공법에 의해 Zn 회수이후 발생하는 제철부산물인 슬래그를 대상으로 분쇄 및 자력 선별 공정 기반인 물리적 처리공정을 통하여 60% 이상의 철 농축산물을 얻고자 다양한 분쇄조건 및 자력선별 조건에서 체계적인 실험을 수행하였다. 게다가, 실증화 공정으로 적용하고자 연속 다단 물리적 처리공정을 설계하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1. 출발원료 WK 슬래그는 수 mm크기의 조립자로서 다양한 철 화합물을 가지고 이었다. 발생된 슬래그로서 ZnO 함량은 1.03%으로 확인되었다. 이는, 일반적으로 알려진 고로슬래그 및 제강슬래그에 비해 상대적으로 매우 낮은 함량을 가지는 것으로 보이며, T-Fe 함량은 40.24%으로 관측되었다.
2. 로드밀로 분쇄 결과, 상대적으로 거대입자가 미립입자보다 더 신속하게 분쇄가 일어나는 것으로 확인되었다. 분쇄시간에 따른 WK 슬래그 분쇄산물을 저자력 세기에서 자력선별 결과, 분쇄시간 10분에서 가장 높은 철 품위를 가지며 20분 동안 분쇄된 시료에서는 상대적으로 약간 높은 회수율이 관찰되었다.
3. 다양한 자력세기 조건에서 수행한 결과, 0.8 T 자력세기에서 58.12% 철 품위가 관찰되었다. 자력세기 증가로 인하여 회수율은 감소되었지만 0.8 T까지는 회수율이 약간 감소되었지만 가장 높은 1.0 T에서 회수율이 급격히 감소되었다.
4. 설정된 분쇄산물로부터 자력세기 조건별 실험 결과로부터 연속 다단 습식자력 선별공정을 제안하였으며, 품위 61.34% 그리고 농축율 1.52를 가지는 최종 철 농축산물을 생산할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 자체사업인 ‘저탄소 실현을 위한 제철부산물로부터 Zn 및 Fe 물리적 공정 기술 개발 연구(JP2020-002, 22-7507)’ 그리고 ‘국내 부존 바

나둠(V) 광물자원 선광/제련/활용기술 개발(GP2020-013, 23-3212)’ 과제의 일환으로 수행되었다.

References

1. Korea Ministry of Culture, <https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562>, November 8, 2021.
2. Moon, J.Y., Oh, S.H., Park, Y., et al., 2020 : Increasing Global Climate Ambition and Implications for Korea, KIEP Research Paper, pp.20-21.
3. Kim, K.H., Lim, J.Y., Ryu, D.H., et al., 2007 : The present situation of production and it's utilization of electronic arc furnace oxidizing slag in korea and other countries. Magazine of the Korea Concrete Institute, 19(6), pp.51-57.
4. Sohn, H.S., 2018 : Status of pyrometallurgical treatment technology of EAF dust, Resources Recycling, 27(2), pp.68-76.
5. Sohn, H.S., 2019 : Current Status of Zinc Smelting and Recycling. Resources Recycling, 28(5), pp.30-41.
6. Han, Y., Go, B., Kim, S., et al., 2021 : Magnetic separation behavior of V, Ti, and Fe of fractured products from domestic vanadium titanium-magnetite (VTM) Ore, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 58, pp.10-16.
7. Han, Y., Han, S., Kim, B., et al., 2019 : Flotation separation of quartz from apatite and surface forces in bubble-particle interactions: Role of pH and cationic amine collector contents. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 70, pp.107-115.
8. Han, Y., Kim, S., Go, B., et al., 2021 : Optimized magnetic separation for efficient recovery of V and Ti enriched concentrates from vanadium-titanium magnetite ore: Effect of grinding and magnetic intensity, Powder Technology, 391, pp.282-291.
9. Grudinsky, P.I., Zinoveev, D.V., Dyubanov, V.G., et al., 2019 : State of the art and prospect for recycling of Waelz slag from electric arc furnace dust processing. Inorganic Materials: Applied Research, 10(5), p.1220-1226.
10. Go, B., Han, Y., Jeong, D., et al., 2021 : Development of separation technique for the production of vanadium from domestic vanadium titanomagnetite ore, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 58, pp.2-9.

한요셉

- 한양대학교 자원환경공학 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 책임연구원,
과학기술연합대학원대학교 자원공학 부교수
- 당 학회지 제30권 3호 참조

김성민

- 한양대학교 자원환경공학 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부
선임연구원
- 당 학회지 제30권 3호 참조

한성수

- 한양대학교 자원환경공학 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부
선임연구원

김영재

- The University of Tokyo 재료공학 공학박사
- 한국지질자원연구원 자원활용연구본부
선임연구원
- 현재 인하대학교 신소재공학과 조교수