

폐기물을 보조연료로 이용한 환원철 제조 및 환원거동 분석

제현모 · 김경석 · 추용식 · §노동규

한국세라믹기술원 에너지환경소재센터

Preparation and Characterization of Reduced Iron by Using Wastes as Auxiliary Fuels

Hyun-Mo Je, Kyoung-Seok Kim, Yong-Sik Chu and §Dong-Kyu Roh

Energy Environment Materials Centet, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology (KICET),
Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 자원 재활용 및 생산비용 절감을 위해 폐기물을 국내 저급 철광석의 고품위 환원철(Direct Reduction Iron, DRI) 제조를 위한 보조연료로 사용하였으며, 폐기물이 환원철 제조에 미치는 영향을 알아보려 한다. 석탄을 주연료 및 환원제로 사용하였으며, 폐기물을 보조연료로 사용하여 주연료의 대체 가능성을 확인하였다. 다양한 폐기물의 성상 및 발열량 분석을 통하여 연료 및 환원제로서의 가능성을 평가하였으며, 선별된 폐기물은 보조연료로 이용하여 반응온도 및 시간 제어를 통해 고품위 환원철을 제조하였다. 제조된 환원철은 금속화율 측정을 통해 산화철이 Fe 금속으로 환원이 잘 이루어졌음을 확인하였다. 환원철의 금속화율은 폐기물의 발열량이 높을수록 증가하는 경향을 보였으며, 특히 발열량과 휘발분 함량이 높은 페타이어와 페비닐의 경우 1,200°C에서 1시간 반응 조건에서 폐기물을 사용하지 않을 때 보다 더 높은 금속화율이 관찰 되었다. 고발열량의 휘발성 폐기물은 연료로서 우수한 물성을 가지고 있으며, 반응온도 및 시간의 최적화를 통해 고품위 환원철 제조를 위한 보조연료로 사용이 가능함을 확인하였다.

주제어 : 폐기물, 보조연료, 재활용, 환원철, 금속화율

Abstract

In this study, the wastes were used as fuels for direct reduction iron (DRI) production to reduce production cost and recycle the wastes. We examined the effects of wastes on the reduction behavior of DRI manufacture and the possibility of using wastes as auxiliary fuels. The proximate and Ultimate analysis were carried out to confirm the properties of wastes as fuels, and high-quality reduced irons were fabricated by using the waste as an auxiliary fuel. The metallization of reduced irons increased as the calorific value increase of auxiliary fuel. Especially, the reduced irons fabricated from the waste tires and vinyl plastics which had high heat energy and volatile matters showed higher metallization than the others. The high calorific value and volatility of waste were significant properties as fuel. The high quality DRI could be fabricated with wastes as auxiliary fuels through optimization of reaction conditions.

Key words : waste, auxiliary fuels, waste recycling, reduction iron, metallization

· Received : November 5, 2018 · Revised : December 11, 2018 · Accepted : December 18, 2018

§ Corresponding Author : Dongkyu Roh (E-mail : rohdk@kicet.re.kr)

Energy Environment Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, 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

직접환원철(direct reduction iron, DRI)은 철광석을 환원제(C)와 환원가스(CO, H₂)를 이용하여 철광석내 산화철의 산소를 제거하는 환원공정을 통해 제조된 높은 Metal-Fe 함량을 가지지는 고순도 물질로 전기로 제강법의 주원료인 철스크랩의 대체원료로서 각광받고 있다. 또한 저급 철광석 및 함철 부산물의 DRI제조를 통한 고품위화가 가능하여 자원 재활용 및 고부가가치산업으로 많은 연구가 이루어지고 있다¹⁾. 현재 DRI는 중동지역에서 주로 풍부한 gas 자원을 기반으로 저렴하게 제조되고 있으며, 국내에서는 상대적으로 비싼 생산비용의 문제로 대부분 수입에 의존하고 있다. 최근 들어 전기로를 이용한 철강 생산량의 급격한 증가와 제품의 고급화 수요가 증대됨에 따라 부족한 고품위 철스크랩 대체 가능한 저렴한 고품위 DRI의 제조기술 개발이 필요하다.

DRI 제조에 있어서 무연탄, 유연탄, 천연가스, 수소 등 다양한 연료들이 환원제 및 에너지원으로 사용되어지고 있다²⁾. 에너지 자원이 부족한 국내에서는 천연가스나 수소와 같이 가격이 비싼 연료보다는 보다 저렴한 석탄이 산업 연료로 더 많이 사용되어지고 있는 실정이다. 유연탄은 가격이 저렴하고 발열량이 높으나 전량 수입에 의존하고 있으며, 국내산 무연탄은 한정된 매장량과 비싼 가격으로 인해 이를 대체할 수 있는 저렴한 폐기물 보조연료를 사용하는 다양한 연구들이 진행되고 있다³⁻¹¹⁾. 특히 폐기물 중 고분자 소재의 페플라스틱과 페타이어는 연소 및 열분해 과정에서 높은 열에너지를 발생하여 에너지 자원으로 재활용하고자 하는 많은 연구들이 활발히 진행되어지고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 폐기물은 현재 사용의 어려움과 유해 가스의 발생으로 DRI 제조에는 널리 적용되고 있지는 않으나, rotary kin을 주로 사용하는 시멘트 산업에서는 폐기물을 대체 연료로 이용하여 시멘트를 생산하는 연구들이 이미 많이 진행되어 왔다¹³⁻¹⁵⁾. Rotary kiln을 이용한 환원 공정에서는 폐기물

의 사용이 보다 용이하며, 일부 폐기물은 높은 에너지 발생 및 환원가스 생성으로 DRI를 제조를 위한 보조연료의 조건에 부합한 물성을 갖추고 있다. 그렇기에 시멘트 산업에 활발히 적용되는 폐기물을 DRI 제조 연구에 연계하여 폐기물을 재활용하는 방안을 찾는 연구의 진행이 필요하다.

본 연구에서는 폐기물을 에너지 자원으로 재활용하고, 국내의 저급 철광석을 원료로 고부가가치의 환원철을 제조하기 위해 폐기물을 이용하여 환원철을 제조하는 연구를 진행하였다. 다양한 폐기물을 선별하여 그 성상 및 에너지 발생량 등을 분석하여 연료로서의 물성을 평가하였으며, 이를 보조연료로 이용하여 환원철을 제조함으로써 폐기물이 환원거동에 미치는 영향 분석하였다. 본 연구를 통해 폐기물의 환원철 제조를 위한 보조연료로서의 적용 가능성을 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료

환원철 제조를 위해 한덕철광에서 선광된 200 mesh 이하의 정광(Fe 52%)을 공급받아 철원으로 사용하였다. 국내산 무연탄은 철광석 환원을 위한 주원료로 사용하였으며, 페타이어, 페비닐, 우드펠릿 그리고 톱밥은 환원철 제조를 위한 보조연료로 사용하였다(Fig. 1). 모든 원료와 연료는 별도의 정제 과정 없이 공급받은 그대로 사용하였다.

2.2. 환원철 제조 실험

환원철을 제조하기 위해 먼저 공급받은 정광을 이용하여 생 펠릿을 제조 하였다. 생 펠릿은 물을 이용하여 무게 약 2g의 직경 약 10mm 크기의 원형으로 제조 하였으며, 제조된 펠릿은 150°C 오븐에서 2시간 건조하여 수분을 모두 제거 후 상온으로 냉각하여 사용하였다. 제조된 생 펠릿은 연료와 1:2 무게비로 혼합하여 환원 반응을 진행하였다. 반응에 사용된 연료는 무연탄을 주

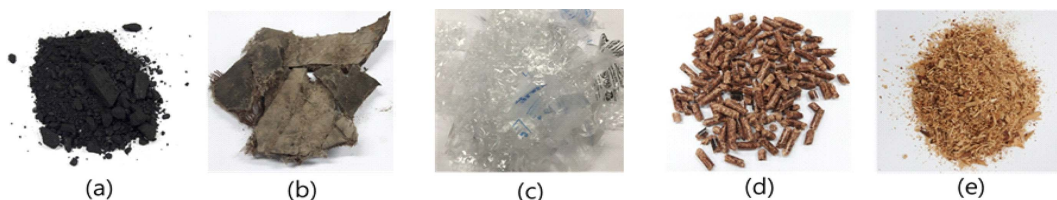


Fig. 1. Image of coal and wastes; (a) Anthracite coal, (b) waste tire, (c) waste vinyl, (d) wood pellet, (e) saw dust.

연료로 4가지의 폐기물을 보조연료로 혼합하여 사용하였으며, 혼합된 각각의 보조연료 비율은 연료 전체 무게의 5 wt%로 고정하였다. 세라믹 도가니에 혼합된 시료를 넣은 다음 전기로를 이용하여 반응을 진행하였으며, 1,100°C에서 1,250°C의 온도조건에서 각각 1h, 3h 반응을 수행하였다. 반응 후 샘플은 전기로에서 꺼내어 상온에서 1시간 켄칭 후 최종 환원철을 제조하였다. 제조된 환원철은 metal-Fe 함량과 total-Fe 함량 측정을 통해 금속화율을 분석하였다.

2.3. 특성 분석

연료 물성 분석을 위해 공업분석 및 원소 분석을 실시하였으며, 한국에너지기술연구원의 분석의뢰를 통해 물성을 측정하였다. 연료의 열분해 특성은 thermal gravimetric analysis (TGA, TGA/DSC 1/LF/1100)를 이용하여 분석하였으며, 상온에서 1,000°C의 범위에서 5°C/min 속도로 온도를 승온하며 측정하였다. 환원철 제조 후 제조된 샘플은 금속화율 분석을 통해 환원된 정도를 확인하였으며, 금속화율 계산은 아래 식 (1)과 같다.

$$\text{Metallization} = \frac{\text{Metal Fe}}{\text{Total Fe}} \quad (1)$$

Total-Fe의 측정방법은 KS규격의 KS E ISO 2597-1 : 2007의 방법을 토대로 실시하였고, Metal Fe 측정은 KS규격의 KS E ISO 5416 : 20011의 분석방법으로 실시하였다. 환원철의 결정상을 확인하기 위해 X-ray diffractometer (XRD, D/MAX-2500V (Rigaku))를 이용하였으며, 40 kV, 200 mA에서 CuK α ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) target과 Ni filter를 이용해 $2\theta = 10\text{-}80^\circ$ 의 범위에서 5°/min의 스캔 속도로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료 및 연료 성분 분석

본 연구에서는 XRF 분석을 통해 환원 전 철원의 성분 분석을 진행하였으며, 원료의 조성은 Table 1에 나타내었다. 철원의 성분분석 결과 total-Fe 함량은 약 52%이며 이외 맥석성분은 주로 SiO₂와 MgO로 구성되어 있음을 확인하였다. XRD 분석 결과 철원의 주성분은 magnetite (Fe₃O₄)로 구성되어 있음을 확인하였다.

환원실험에 사용된 연료는 국내산 무연탄과 폐기물 4종(페타이어, 페비닐, 우드펠릿, 톱밥)이며 연료의 물성 분석을 위해 공업분석과 원소분석을 진행하였다. 분석 결과는 아래 Table 2와 3에 각각 정리하여 나타내었다. Table 2의 공업분석 결과에서 무연탄의 고정탄소 함량은 약 71.1%이며, 휘발성분은 약 14%로 다른 연료들에 비해 높은 고정탄소 함량과 낮은 휘발분 함량을 가지고 있었다. 반면, 보조연료 4종은 모두 휘발분이 70% 이상으로 매우 높은 비율을 차지하고 있었으며 상대적으로 고정탄소 함량은 30% 이하로 낮음을 확인하였다. 특히, 페비닐의 경우 휘발분 함량이 99% 이상으로 대부분이 휘발분으로 구성되어 있었다. 보조연료의 높은 휘발분과 낮은 고정탄소 함량은 반응 초기에 연소의 촉진작용으로 인해 높은 열량을 제공할 수 있으나 빠르게 연소되어 반응 후반의 열량 기여에는 유리하지 않을 것으로 생각된다. 연료는 열에너지의 공급원으로 높은 반응 에너지가 필요한 고온 환원공정에서 고발열량은 연료의 에너지 효율측면에서 요구되어지는 중요한

Table 1. Chemical Composition of iron ore (unit: wt%)

	Fe ₃ O ₄	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	S
Iron ore	68.9	1.8	2.6	10.1	14.4	0.1

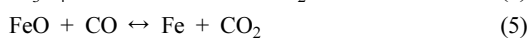
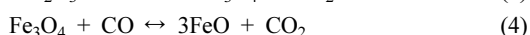
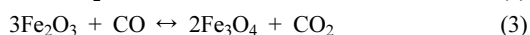
Table 2. Proximate analysis of fuel samples

Samples	Proximate analysis (wt%)				Hh (kcal/kg)	HI (kcal/kg)
	M	A	VM	FC		
Anthracite coal	1.9	13.3	13.8	71.1	7,180	6,990
Waste tire	1.0	5.8	68.0	25.2	9,040	8,650
Waste vinyl	0.18	0.35	99.5	-	9,960	9,330
Wood pellet	8.1	0.4	72.8	18.7	4,780	4,420
Saw dust	12.5	0.4	70.7	16.4	4,610	4,220

Table 3. Ultimate analysis of fuel samples

Samples	C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	N (wt%)	S (wt%)	P (wt%)
Anthracite coal	75.7	3.1	17.1	1.9	0.3	0.14
Waste tire	78.9	7.8	4	1	1.4	0.02
Waste vinyl	61.6	4.7	26.9	0.2	-	-
Wood pellet	47.2	6.8	43.3	0.2	0.1	-
Saw dust	44.4	6.6	41.6	0.1	0.1	-

물성이다. 연료의 발열량 측정결과, 무연탄의 발열량은 7,000 kcal/kg 이상으로 우수한 발열량을 보였다. 보조연료의 발열량은 폐비닐, 페타이어, 우드펠릿, 톱밥 순으로 나타났으며, 특히 폐비닐과 페타이어는 9,000 kcal/kg 이상의 높은 발열량을 보였다. 이는 무연탄보다 높은 값으로 폐비닐과 페타이어를 보조연료로 활용하면 외부로부터 공급되는 열에너지의 소비를 저감할 수 있을 것으로 보인다. 목질계 연료인 우드펠릿과 톱밥의 발열량은 5,000 kcal/kg 미만으로 다른 연료들 대비 상대적으로 낮은 값을 보였다. 두 연료는 폐비닐과 페타이어 대비 청정에너지원이나 연료로 사용할 경우 열에너지 측면에서는 불리한 물성을 가지고 있었다. Table 3의 원소분석 결과 실험에 사용된 연료는 모두 탄소와 산소의 함량이 주를 이루고 있음을 확인하였다. 무연탄, 페타이어, 폐비닐은 탄소 함량 높은 반면 목질계 연료는 산소의 함량이 높게 관찰되었다. 연료내 탄소는 철산화물의 환원반응시 환원가스(CO)를 생성하여 철산화물을 환원시키는 작용을 한다. 철산화물의 환원반응은 다음 Eq. (2)-(5)과 같다¹⁶⁻¹⁹.



석탄을 이용한 환원반응은 연료의 연소시 발생하는 CO가스에 의해 주로 이루어지며, 고온에서 반응이 진행되기 때문에 탄소의 함량과 발열량이 중요하다. 페타이어의 탄소 함량은 78.9%로 보조연료 중 가장 높은 탄소 함량을 보였으며, 목질계 연료는 탄소의 함량이 50% 이하로 다소 낮은 값을 가지고 있었다.

TGA 분석을 통해 무연탄 및 보조연료 4종의 온도에 따른 무게변화를 확인하였으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 무연탄의 경우 400°C까지는 뚜렷한 무게감소가 나타나지 않았으며, 400°C 부근에서부터 무게가 감

소하기 시작하여 400°C-600°C 사이에서 열분해 및 연소에 의한 약 93% 내외의 무게감소를 보였다. 반면 보조연료들은 무연탄 대비 낮은 온도에서 분해가 시작하였다. 폐비닐의 경우 350°C-500°C 사이에서 약 98% 내외의 무게감소를 보였으며, 휘발분 함량이 높아 다른 연료에 비해 급격한 분해가 이루어 졌다. 페타이어의 경우 200°C-400°C 사이에서 약 44% 내외의 1차 무게감소를, 400°C-580°C 사이에서 약 40% 내외의 2차 무게감소를 보였으며, 이는 타이어의 첨가물과 고무 조성물의 분해에 의한 것으로 총 약 84%의 무게감소를 보였다. 580°C-700°C 사이에서 약 5% 내외의 3차 무게감소를, 700°C 이상의 고온에서는 약 10%의 미분해물이 남았는데 이는 각각 타이어 내부 카본블랙의 분해와 미분해된 무기필러에 의한 것이다. 목질계 연료 2종은 서로 유사한 무게감소 경향을 보였으며, 초기 약 10% 내외의 무게감소를 보였는데 이는 건조에 의한 내부 수분 증발이다. 150°C-350°C 사이에서 약 48% 내외의 무게감소를, 350°C-550°C 사이에서 약 42%의 무게감소를 보였는데 이는 각각 휘발분의 분해와 연소에 기인한 것으로 판단된다²⁰. 보조연료는 휘발분에 의한 저온

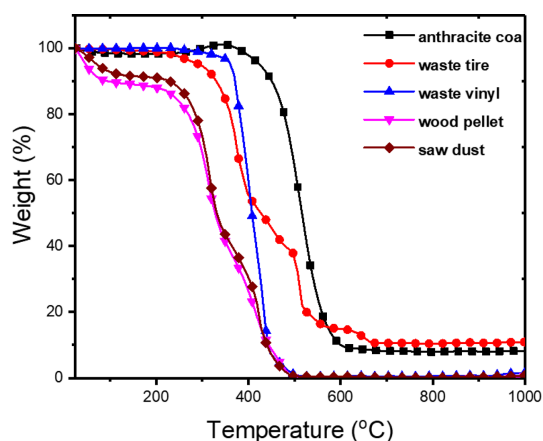


Fig. 2. TGA analysis of varied fuels.

분해 및 빠른 열전달과 연소가 이루어지기에 연료 투입 및 연소 제어가 필요하다.

3.2. 환원철 제조 및 금속화율 분석

생 펠릿을 주연료 또는 주연료와 보조연료가 혼합된 연료를 이용하여 반응 온도와 시간 제어를 통해 환원철을 제조하였으며, 금속화율 분석을 통해 환원된 정도를 확인하였다. Fig. 3과 Table 4의 금속화율 결과에서 제조된 환원철의 금속화율은 반응온도가 높아질수록 반응 시간이 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 무연탄만을 이용한 환원반응에서 지은 3시간 반응대비 고온에서 1시간 반응이 더 높은 금속화율을 보였으며, 이는 반응시간보다 반응온도가 환원반응에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 1,100°C 반응에서 보조연료를 혼합할 경우 금속화율이 낮아지는 것을 확인하였다. 그러나 폐비닐과 페타이어를 혼합한 1,200°C에서 1시간 반응 조건에서는 무연탄만을 사용하여 제조된 환원철의 금속화율 72.3% 보다 더 높은 금속화율이 측정되었다. 1,200°C 3시간으로 반응시간이 증가함에 따라 모든 연료조건에서 약 83%의 유사한 금속화율을 가지는 환원철이 제조 되었다. 휘발분의 함량이 99% 이상인 폐비닐의 경우 다른 연료대비 반응시간과 온도에 더 큰 영향을 받았으며, 반응온도가 증가함에 따라 페타이어의 금속화율보다 낮아지는 경향을 보였다. 이는 연료내 높은 휘발성분과 발열량으로 인해 반응초기에는 환원작용을 촉진하나 고온/장시간 반응시 빠른 연소로 인해 반응 후반에는 연료 및 환원제로써의 효과가 낮아지면서 반응시간 및 온도의 증가에 따른 금속화율의 증가율이 감소하는 것으로 보인다. 목질계 연료인 우드펠릿과 톱밥은 탄소함량과 발열량이 낮아 저온에서는 폐비닐과 페타이어 대비 낮은 금속화율을 가지는 환원철이 제조 되었다. 하지만 고온반응 조건에서는 유사한 금속화율을 보였다. 이는 목질계의 높은 휘발분이 환원반응을 촉

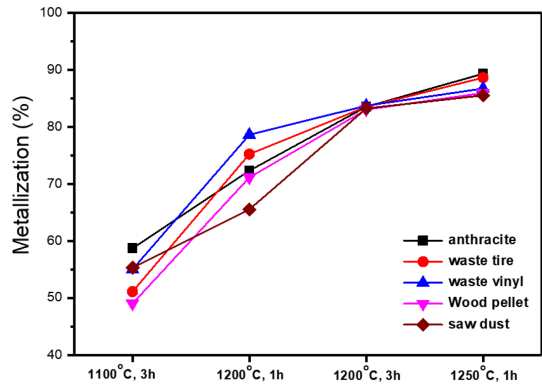


Fig. 3. Metallization degree of reduction irons.

진하며 고온에서 탄화되면서 생성되는 숯(C)이 환원제로써 역할을 하여 폐비닐 또는 페타이어와 유사한 금속화율을 가지는 환원철이 제조된 것으로 보인다.

제조된 환원철의 결정상을 확인하기 위해 X-ray diffraction (XRD) 분석을 실시하였다. XRD분석 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 환원 전 철원료의 XRD 그래프를 보면 18.4°, 30.2°, 35.6°, 37.1°, 43.2°, 53.4°, 57.0°, 62.6°에서 magnetite (Fe₃O₄) 피크를 확인할 수 있었으며, 이외 다른 결정상은 관찰되지 않은 것으로 보아 주로 magnetite로 구성되어 있음을 확인하였다. Fig. 4(b)-(d)의 환원반응 후 XRD 분석결과, 모든 시료에서 magnetite의 피크는 감소하면서 44.6°의 metal-Fe 피크가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 1,200°C 이상의 고온 반응 후 대부분의 magnetite (Fe₃O₄)가 환원되어 Fe로 되었다. XRD 결정상 분석 결과 환원반응이 진행됨에 따라 초기 철원료의 주성분인 Fe₃O₄ 피크가 감소하면서 36.5°와 42.1°의 FeO 피크가 증가하였으며, 환원반응이 더 진행됨에 따라 FeO 피크가 감소하고 44.6°의 metal-Fe 피크가 증가하는 것이 관찰되었다. 이는 철산화물이 환원 반응이 진행됨에 따

Table 4. Summarization of metallization degree

(unit: %)

Cond.	Anthracite coal 100%	Waste tire 5%	Waste vinyl 5%	Wood pellet 5%	Saw dust 5%
1,100°C, 3 h	58.7	51.1	55.0	49.0	55.3
1,200°C, 1 h	72.3	75.2	78.6	71.1	65.5
1,200°C, 3 h	83.5	83.5	83.7	83.0	83.2
1,250°C, 1 h	89.3	88.6	86.7	85.9	85.5

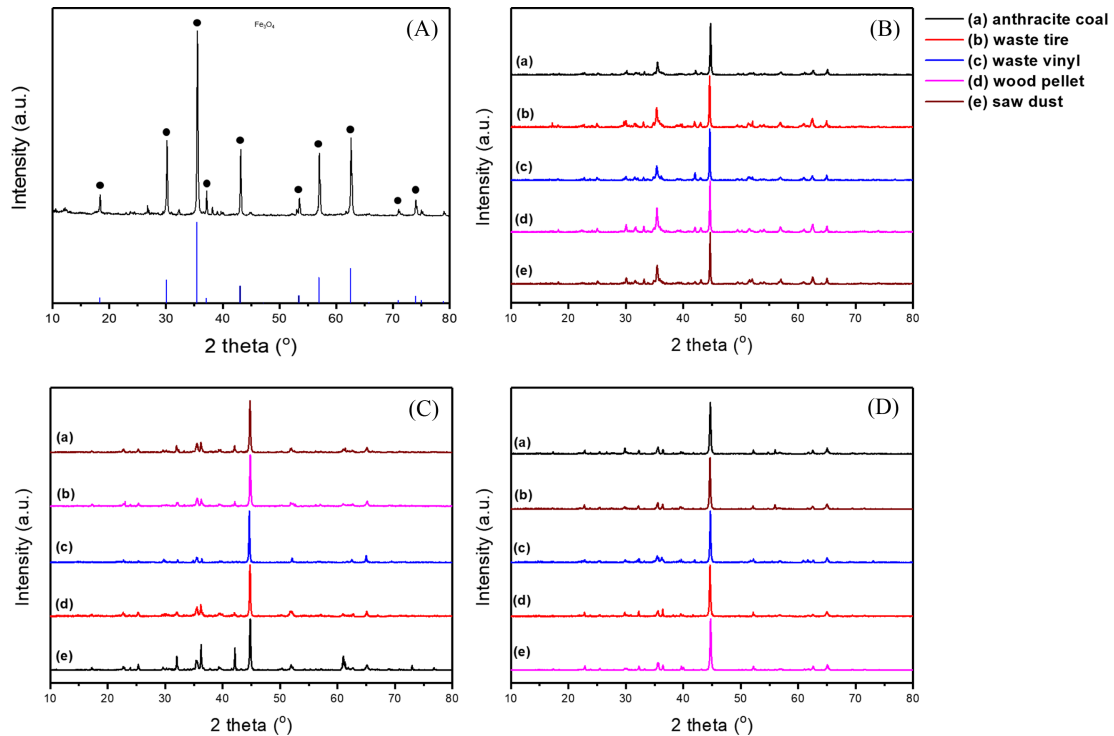


Fig. 4. XRD patterns of pattern of iron ore (A) and reduction irons; (B) 1,100°C-3 hour, (C) 1,200°C-1 hour, (D) 1,250°C-1 hour.

라 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 로 환원되었음을 의미한다. 보조연료 사용에 따른 결정상의 변화는 차이점이 관찰되지 않았으며, 다만 환원철의 환원 정도에 따라 Fe_3O_4 , FeO , Fe 각각의 피크의 세기가 달라졌다. 금속화율의 변화에 따라 모든 시료에서 유사한 결정상의 변화 양상을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 폐기물을 이용한 환원철 제조 실험을 통해 폐기물을 환원철 제조를 위한 보조연료로의 활용 가능성을 확인하였다. 4종의 폐기물을 선별하고 성분을 분석을 통해 연료의 물성을 확인하였으며, 특히 페타이어와 폐비닐은 무연탄 보다 높은 발열량을 가지고 있어 연료로서 우수한 열에너지원이 될 수 있음을 확인하였다. 선별된 폐기물 4종은 무연탄 대비 휘발성분이 높고 고정탄소 함량이 낮아 반응초기 연소 촉진 및 환원가스 생성에는 유리할 수 있으나 탄소 결정체인 석탄에 비해 환원능력은 다소 낮음을 확인하였다. 폐기물을 5 wt% 사용하여 환원철을 제조 시에 금속화율은 다소 감소하

는 경향을 보였으며, 발열량이 높을수록 금속화율 감소가 줄어드는 경향을 보였다. 발열량과 휘발분 함량이 높은 페타이어와 폐비닐의 경우 1,200°C에서 1시간 반응 조건에서 오히려 폐기물을 사용하지 않을 때 보다 더 높은 금속화율이 관찰되기도 하였다. 소량의 고발열량·휘발성 폐기물은 금속화율의 감소를 크게 유발하지 않았으며, 반응온도 및 시간의 최적화를 통해 환원철 제조를 위한 우수한 보조연료로 사용 가능성을 확인하였다. 또한, 탄재 내장 및 환원가스의 제어 통해 금속화율의 향상이 가능할 것으로 예상되며, 이에 따른 폐기물의 사용량을 보다 높일 수 있을 것으로 기대되어 진다. 다만, 많은 양의 폐기물 사용은 급격한 금속화율 감소와 함께 다량의 유해가스의 생성을 유발할 수 있기에 연료 내 폐기물의 사용 비율을 높이기 위해서는 반응조건의 최적화와 함께 유해가스 감축을 위한 연구도 수반되어 질 필요가 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술평

가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘10077989’).

References

1. Baikadi, A., Runkana, V., and Subramanian, S., 2016 : *Operability Analysis of Direct Reduction of Iron Ore by Coal in an Industrial Rotary Kiln*, IFAC-PapersOnLine 49(1), pp.468-473.
2. Dabin Guo, et al., 2015 : *Kinetics and mechanisms of direct reduction of iron ore-biomass composite pellets with hydrogen gas*, Int. J. Hydro. Energy, 40, pp.4733-4740.
3. Ankit, Sethi, S., Mahobia, G. S., and Sinha, O. P., 2015 : *Reduction behavior of iron ore pellets with addition of plastics along with conventional reducing agents*, J. Metall. Mater. Sci., 57(3), pp.167-171.
4. Milandia, A. and Oediyani, S., 2015 : *Reduction of Low Grade Iron Ore Using a Mixture of Polyethylene (HDPE/LLDPE) and Coal as an Alternate Reductant*, Adv. Mater. Res., 1112, pp.515-518.
5. Oh, K. J., Lee, H. D., Seo, J. B., et al, 2010 : *Pyrolytic Reaction Characteristics of a Mixed Fuel of Municipal Solid Wastes and Low-grade Anthracite*, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 32(11), pp.1046-1053.
6. Strezov, V., 2006 : *Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modelling*, Renewable Energy, 31, pp.1892-1905.
7. Hata, Y., et al., 2009 : *Biotar Ironmaking Using Wooden Biomass and Nanoporous Iron Ore*, Energy Fuels, 23, pp.1128-1131.
8. Hu, Q., et al., 2018 : *Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets*, Energy Convers. Manage., 161, pp.205-214.
9. Guo, D., et al., 2017 : *Direct reduction of iron ore/biomass composite pellets using simulated biomass-derived syngas : Experimental analysis and kinetic modelling*, Chem. Eng. J., 327, pp.822-830.
10. Zuo, H. B., Hu, Z. W., et al., 2013 : *Direct reduction of iron ore by biomass char*, Int. J. Miner., Metall. Mater., 20(6), pp.1-8.
11. Alsaleh, A. and Sattler, M. L., 2014 : *Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties*, Curr. Sustainable/Renewable Energy Rep., 1, pp.129-135.
12. Lee, G. J., 2015 : *The Reaction Kinetic Study of SRF and Industrial Waste Using TGA (Thermo Gravimetric Analysis)*, New & Renewable Energy, 11(1), pp.20-26.
13. Kaantee, U., et al., 2004 : *Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling*, Fuel Process. Technol., 85, pp.293-301.
14. Conesa, J. A., et al., 2008 : *Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels*, J. Hazard. Mater., 158, pp.585-592.
15. Nam, S. N., et al., 2009 : *Impact of Input Wastes on Contents of Heavy Metals in Clinker and Cement*, Journal of KSWM, 26(8), pp.694-701.
16. Yun, Y. M., et al., 2015 : *Phase Transition and Metalization of DRI According to the Quality of Iron Oxide*, J. Korean Ceram. Soc., 52(5), pp.389-394.
17. Murakami, T. and Kasai, E., 2011 : *Reduction Mechanism of Iron Oxide-Carbon Composite with Polyethylene at Lower Temperature*, ISIJ Int., 51(1), pp.9-13.
18. Liu, G. S., et al., 2004 : *Thermal investigations of direct iron ore reduction with coal*, Thermochem. Acta, 410, pp.133-140.
19. Man, Y., et al., 2014 : *Influence of temperature and time on reduction behavior in iron ore-coal composite pellets*, Powder Technol., 256, pp.361-366.
20. Kim, D. W., et al., 2010 : *Study on the Combustion Characteristics of Wood-pellet and Korean Anthracite Using TGA*, Korean Chem. Eng. Res., 48, pp.58-67.



제 현 모

- 경상대학교 금속재료공학과 학사
- 현재 부산대학교 화학공학전공 석사과정
- 현재 한국세라믹기술원 학생연구원



김 경 석

- 경북대학교 신소재공학과 학사
- 현재 연세대학교 신소재공학과 석사과정
- 현재 한국세라믹기술원 학생연구원



추 용 식

- 한양대학교 신소재공학과 박사
- 라파즈한라시멘트 연구원
- 현재 한국세라믹기술원 에너지환경 소재본부 에너지효율소재센터 수석 연구원

노 동 규

- 연세대학교 화공생명공학과 박사
- LG화학 과장
- 현재 한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 에너지저장소재센터 선임연구원

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調査의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外의 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 揭載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.