

## 합철부산물을 활용한 탄재 내장 단괴 제조에 관한 연구

유종영 · 양대영\* · 신희동\* · <sup>†</sup>손 일

연세대학교, \*호남석회공업(주)

### A Study on the Carbon Composite Briquette Iron Manufacturing Using Fe-containing Process Wastes

Jong Yeong Yu, Dae Young Yang\*, Hee Dong Shin\* and <sup>†</sup>Il Sohn

Materials Science and Engineering, Yonsei Univ. Seoul, Korea 120-749

\*Honam Lime Industrial Company Gwangyang City, Korea

#### 요 약

철강 산업에서의 원재료는 생산성, 품질, 가격경쟁력에 결정적인 역할을 하고 있다. 철강제품의 원재료를 합철부산물로 활용한다면, 합철부산물을 처리하기 위한 비용 및 환경오염문제를 해결할 뿐만 아니라 가격경쟁력을 높일 수 있다. 합철부산물들은 대부분 작음입도를 가지고 있어서, 제강공정 내에 직접 투입하게 되면 열 유동 및 원료 비산 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하고 추가적인 환원을 유도하기 위해 철원에 탄재를 혼합한 뒤 단괴를 성형하여 제강공정 내에 투입하는 방법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 합철부산물에 탄재를 혼합하여 단괴를 성형하는 방법에 대해 연구하였다. 합철부산물, 탄재, 용제, 바인더에 따른 CCBI (carbon composite briquette iron)의 성형성 및 압축강도를 확인하였다.

**주제어** : 합철부산물, 재활용, 탄재 내장 단괴, 성형성, 압축강도

#### Abstract

Raw materials in steel industry decide on the productivity, quality and price competitiveness. Utilizing iron-containing by-products as raw materials for steel products can save the cost of cleaning up iron-containing by-products and solve environmental issues. Iron-containing by-products have a small particle size. If they are directly inserted in a steel making process, it cause a problem such as poor heat flow and scattering. To solve these problems and induce the additional reduction, study concern with iron ore-coal mixed briquette technique are conducted by many researchers. In this paper, method of making carbon composite briquette iron(CCBI) using iron-containing by-products was studied. The effect of composition of Fe-containing process wastes, reducing agent, flux and binder on formability of CCBI (carbon composite briquette iron) was measured.

**Key words** : Fe-containing process wastes, Recycling, CCBI, Formability, compression strength

· Received : February 17, 2015 · Revised : March 24, 2015 · Accepted : April 15, 2015

<sup>†</sup>Corresponding Author : Il Sohn (E-mail : ilsohn@yonsei.ac.kr)

Department of Materials Science & Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, 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

중국을 포함한 신흥 개발국들이 자국의 부존자원을 앞세워 철강 생산량을 꾸준히 유지하면서 해외 수출 시장에서의 점유율을 높이고 있는 반면 국내 철강사들은 해외 자원에 전적으로 의존하기 때문에 국제 경쟁력이 저하되고 있다. 철광석을 포함한 철강 제품의 원재료가 가격은 전체 원가의 80% 이상 차지하고 있으며, 이는 생산성, 품질 및 가격 경쟁력에 결정적인 역할을 하고 있다. 국내 철강사들이 해외 자원을 이용하여 철강 제품을 생산하고 수출하는 데 있어, 낮은 가격의 원재료를 확보하고 이용률을 극대화함으로써 경제성과 국제 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 원료 처리부터 압연까지의 제철 공정에서 발생하는 더스트(dust), 스케일(scale), 슬러지(sludge) 등의 합철부산물은 연간 5백만 톤 이상 발생되어 원료의 이용률이 떨어지고 공정 중에 제품손실이 발생하여 합철부산물의 회수와 재활용이 필요하다. 이러한 폐기물을 처리하기 위해서는 소각과 매립으로 막대한 비용이 발생하고 처리 과정에서 토양과 수질 오염 등의 환경문제를 야기한다.<sup>1,2)</sup> 따라서 합철부산물을 새로운 철원으로 활용하여 공정 부산물을 재활용하면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

그러나 제강 공정 내 합철부산물을 가공 없이 직접적으로 투입하게 되면 열 유동과 발생가스에 의해 반응계면으로 원료가 정착되지 못하고 비산되어 크기 및 무게 비중이 어느 정도 확보된 원료의 형상제어가 필요하게 된다. 또한 제강 공정 내 용융환원이 용이할 수 있도록 환원제인 탄소가 추가되어야 하기 때문에 탄재 내장 단괴 (briquette) 형태로 성형해야 한다. 따라서 합철부산물과 탄소가 혼합된 상태의 단괴 즉 CCBI (carbon composite briquette iron)로 제작하여 합철부산물을 재활용 하고자 하였다.<sup>3)</sup> 탄재 내장 단괴의 환원에 관한 연구는 꾸준히 진행되었고, 실제 연구는 실험실 scale에서 진행할 수 있는 분체 응집물인 펠렛을 이용하여 진행되었다. Cha et. al.은 산화철에 흑연분말을 혼합하여 가압성형으로 만든 펠렛을 반응 온도에 따른 환원반응을 속도론적으로 분석하였다. 반응 온도가 상승함에 따라 반응속도가 상승함을 확인하였다.<sup>4)</sup> Sun과 Lu는 철광석에 탄재를 혼합하여 가압성형으로 만든 펠렛을 반응 온도, 펠렛 크기, 탄재함량에 따른 환원을 속도론적으로 분석하였다. 그 결과 반응 온도가 높을수록, 펠렛 크기가 작을수록, 탄재함량이 많을수록 환원속도가 상대

적으로 빨라짐을 확인하였다.<sup>5)</sup> Wi et al.은 전기로 더스트 또는 가열로 스케일에 흑연분말을 혼합하여 가압성형으로 만든 펠렛을 반응온도와 합철 부산물의 입도에 따른 환원반응을 속도론적으로 분석하였다. 반응 온도가 증가할수록 반응속도가 빨라짐을 확인할 수 있었고, 합철부산물의 입도는 펠렛의 녹는점 이하의 반응온도에서는 큰 영향을 미치지 않지만, 단괴의 녹는점 이후의 반응 온도에서는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 분석하였다.<sup>3)</sup> 탄재와 산화철 및 합철부산물로 만들어진 분체 응집물의 환원 연구는 위와 같이 많이 진행되었으나, 합철부산물을 활용한 분체 응집물(펠렛, 단괴)의 성형에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 합철부산물과 탄재를 혼합하여 단괴로 제작하는 과정에서 필요한 특성인 성형성에 대해 알아보았다. 합철부산물, 탄재, 바인더 및 용제 배합 비에 따른 정성적인 성형성 및 정량적인 특성인 그린강도를 통해 연구하였다.

## 2. 이 론

일반적인 철강공정의 순서도를 Fig. 1에 도시하였다. 부산물에 따라 어떤 공정에서 채집 되었는지 보여주고 있다. 전기로 B-F (baghouse-furnace) 더스트의 경우 고철을 용해시켜서 제강하는 과정 중에 발생하는 fume와 고철 속에 잔류하던 작은 불순입자들이 집진과정을 통해 포집된 것이다. 고로원료 EP (electrostatic precipitator) 더스트는 고로공정에 원료장입 전 발생하는 더스트를 포집한 것이고, 고로주상 BF (blast furnace) 더스트는 고로의 출선구에서 발생하는 더스트를 포집한 것이다. 또한 각 공정별로 철강 생산 공정에서 미세한 비산먼지를 포집할 때 물을 이용하여 포집을 극대화하며 이때 축적된 부산물을 슬러지로 칭한다. 제강 공정 중 전로에서 발생한 입자들이 집진기에 쌓인 슬러지를 제강 OG (off gas) 슬러지, 전기로 공정중 발생한 슬러지를 전기로 슬러지, 열연중 발생한 슬러지를 열연 슬러지라고 명명하였다. 스케일은 열연과정에서 슬라브나 바 표면에 붙어있는 산화물 층에 고압수를 분사하여 제거되는 물질이다.

합철부산물을 철원으로 재활용하기 위해 미세 분체를 직접적으로 사용하게 되면 배가스 유동에 의해 재 비산되는 문제가 발생하게 된다. 따라서 더스트, 스케일, 슬러지 등의 작은 입자상의 합철부산물을 철원으로 재활용하기 위해서는 큰 입자로 재구성하는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 입상화(size enlargement)라고 한다.

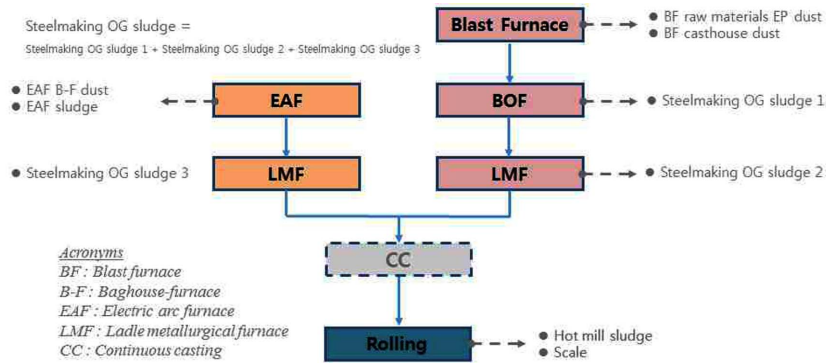


Fig. 1. Flow of typical steelmaking process and the various Fe-containing process wastes utilized within the present study.

입상화를 통하여 함철부산물을 입상조성물(granule, pellet, briquette)로 재구성할 수 있다. 입상화에는 1) 교반과 혼합에 의한 교반 혼합 성형법, 2) 압력을 이용한 압력법, 3) 교반 가압 성형을 한 뒤, 강도가 큰 단괴로 제작하는 소결법, 4) 액체 속에 현탁하는 부유 입자를 가교 결합제 등으로 결합시켜 응집 및 침전을 시키는 응결법 등의 방법이 있다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 입자 간의 기계적 엉킴과 부동성 액체에 의한 점결력을 이용하여 분체 간의 결합으로 작용하는 세 번째의 입상화 방법을 활용하여 압축에 의한 저온 단괴 형성 방법(cold briquetting method)을 채택하였다.<sup>5)</sup>



Fig. 2. Digital image of the milling machine.

### 3. 실험 방법 및 계획

#### 3.1. 실험방법

함철부산물의 전처리는 그 종류에 따라 다르게 수행하였다. 함철부산물 중 수분을 다량 함유한 고로주상 B/F 더스트는 상온(15~25°C)에서 48시간 건조만을 진행하였고, 슬러지류의 전처리는 상온(15~25°C)에서 48시간 건조한 후 분쇄공정을 2시간 진행하였다. 분쇄는 Fig. 2와 같은 원통형 드럼에 환봉이 들어간 자체제작 분쇄기를 사용하였다. 전술한 전처리를 거친 후에는 각 원료들을 실험에 따른 조성으로 준비한 후, 교반기를 이용하여 배합하였다. 원료 혼합물을 900 rpm (15 Hz)의 롤 속도, 50 ton의 롤 압력, 6 rpm (0.1 Hz)의 feeding speed 조건으로 Table 1에 나타낸 бри케팅 머신을 이용하여 Fig. 3로 관찰되는 성형 롤을 통해 단괴로 성형하였다. 성형성과 강도 평가는 단괴 조성변화에 따라 진행하였다. 성형성은 Fig. 4과 같이 성형의 정도에 따라 육안검사에 의해 양호, 보통, 불량, 불가의 4등분으로

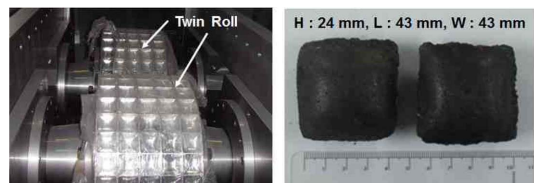





Fig. 3. Digital image of the twin roll briquetting machine and the resulting 24 mm·43 mm·43 mm briquette.

분류하였고, 강도는 5개의 CCBI를 일축 압축 시험기로 측정된 파괴 강도의 평균값으로 나타내었다. 그리고 물 유리로 코팅하는 후처리 여부에 따라 강도와 내구성(durability)을 추가로 평가하였다.

#### 3.2. 실험 원료 및 계획

함철부산물 중 현재 가용한 부산물을 취합 및 선별하여 본 실험에 사용한 부산물을 Table 2에 나타내었다.

**Table 1.** Specification of in-house raw materials feeding and briquetting machine

구분	내용		비고
Roll Speed	감속기	150 Hp × 50 : 1	
	Spec'	0 ~ 1800 rpm [Inverter (0 ~ 60 Hz 조정 Type)]	
	실험	900 rpm (35 Hz)	
Hydraulic pressure	유압모터	Max 140 kg/cm <sup>2</sup> (5Hp 유압모터)	
	실린더	φ 180 mm × 2	
	롤 압력	Max 71 톤 ( 실험조건 50 톤 )	
Feeding	Type	Gravity + 압축 Screw	
	감속기	5Hp × 60:1	
	Spec'	0 ~ 1500 rpm [Inverter (0 ~ 60 Hz 조정 Type)]	
	실험조건	6 rpm (15 Hz)	



**Fig. 4.** Formability evaluation of CCBI through visual inspection. Formability is divided into four categories with the highest formability having an index of 4 with non-formability corresponding to an index of 1.

실험에 사용한 환원제는 coke 기원의 CDQ 더스트와 coal 기원의 무연탄을 사용하였고, 조성은 Table 3과 같다. 용제로는 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 사용하였고, 입도가 75 mm의 체 100% 투과분을 이용하였다. 바인더로는 당밀과 물유리를 조합하여 사용하였고 성분은 Table 4와 같

다. 원료에 대한 미세조직을 관찰하기 위하여 Fig. 5와 같이 전자주사현미경 (SEM)을 활용하였으며 전기로 B-F 더스트가 가장 작은 입자들로 구성되는 것으로 정성적으로 평가되었으며 스케일의 경우 타 원료에 비해 입도가 매우 큰 것으로 확인할 수가 있었다. 그러나 각 원료의 크기가 모두 동일하지 않아 성형성에는 오히려 유리할 것으로 예측되었다. 실험의 변수로 탄재에 따른 성형성을 확인하기 위해 합철부산물을 스케일로 고정하고 환원제로 무연탄과 CDQ 더스트를 사용하여 실험하였다. 성분 표준을 개발하기 위해 합철부산물 중 고로 주상 BF 더스트와 열연 슬러지를 환원제로 추가적으로 사용하고, 스케일, 전기로 B-F 더스트, 전기로 슬러지, 제강 OG 슬러지, 고로원료 EP 더스트를 주 철원으로 사용하여 용제 및 바인더를 첨가하여 각각의 성형성, 입도, 강도에 대한 분석을 실시하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 탄재에 따른 성형성 확인

합철부산물 중 스케일로 철원을 고정한 뒤, CDQ 더스트와 무연탄을 이용한 실험 결과는 Table 5에 나타났다. 먼저 coke 기원의 CDQ 더스트를 사용한 실험은

**Table 2.** Composition of Fe-containing process waste

구 분		성분 (wt%)					평균입도 (Dx50,μm)
		Total Fe	Metal Fe	C	S	수분	
Dustt	고로원료 EP 더스트	46.21	0.61	5.24	0.098	2.61	50.4
	고로주상 BF 더스트	41.00	0.77	30.43	0.650	9.84	53.0
	전기로 B-F 더스트	37.25	1.02	2.34	0.950	0.22	9.6
Sludge	제강 OG 슬러지	51.20	9.73	4.19	0.060	15.40	25.2
	열연슬러지	69.51	0.41	3.04	0.089	17.96	46.8
	전기로슬러지	20~22	-	1.90	1.900	45.70	-
Scale	스케일	72.56	0.18	0.04	0.003	3.48	> 500

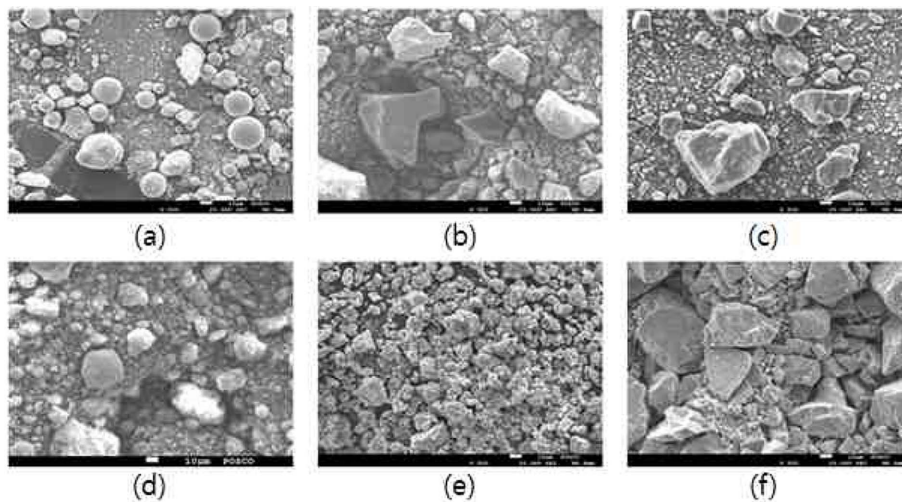
**Table 3.** Composition of reducing agent for the carbon composite briquette iron

구 분	기원	발열량 (kcal/kg)	성분 (wt%)				
			FC	FM	IM	VM	Ash
CDQ dust	Coke	6,767	72.5	25.1	1.04	1.53	13.86
Anthracite coal	Coal	6,010	77.2	7.5	4.86	5.81	10.44

Legend) FC: Fixed Carbon, FM: Free Moisture, IM: Inherence Moisture, VM: Volatile Material

**Table 4.** Chemical composition of the major constituents in the binder (a) molasses and (b) water glass

(a) Molasses	Item	당	비당유기물	탄수화물	무기물	물	비고
	%	48~52	9~10	2~4	8~12	22~23	@230원/kg
(b) Water glass	Item		Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	기타	물	비고
	%		14~15	34~36	< 1	48~51	KS M 1415@160원/kg



**Fig. 5.** SEM image of Fe-containing process wastes. (a) EAF B-F dust, (b) blast furnace raw materials EP dust, (c) blast furnace casthouse dust (d) steelmaking OG sludge, (e) hot sludge, and (f) scale. Courtesy of POSCO.

8~9% 함량의 더스트와 첨가량이 7% 내외의 바인더의 경우에는 성형성이 불량하였다. 양호한 성형성을 가지기 위해서는 바인더가 10% 이상 첨가되어야함을 알 수 있다. 특히, 바인더가 12%이상 함유된 단괴에서만 성형 지수가 높은 동시에 압축강도를 측정할 수 있었으며 CDQ 더스트 활용 시 바인더 최소첨가치가 존재함을 알 수 있었다. 바인더 조합비에서 당밀보다 몰유리 조

합비가 높을 경우에는 불량한 성형성을 나타내었다. 그리고 coal 기원의 무연탄을 환원제로 사용한 실험에서 8% 내외의 무연탄을 고정시키고 첨가량이 8% 내외의 바인더를 첨가한 경우에 성형성이 양호하였다. 몰유리를 단독으로 사용한 바인더 조합에서도 일부실험에서 양호한 성형성을 나타내었다. 이러한 결과를 통하여 coal 기원의 무연탄을 사용하

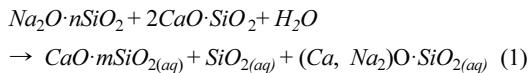
**Table 5.** Effect of raw material composition, reducing agent and binder material on the formability of CCBI for some samples

구 분	Raw Mix 조제 (wt%)												CCBI 평가	
	합철부산물					환원제				응제	Binder		성형성	강도 (kgf)
	스케일	더스트	슬러지	OG	EP	BF	열연	CDQ	무연탄	소석회	몰유리	당밀		
21	81.0							9.0		3.0	1.0	6.0	불가	N/D
22	81.0							9.0		3.0	6.0	1.0	불가	N/D
24	76.0							8.0		4.0	9.0	3.0	불량	20
23	79.0							8.0		3.0	4.0	6.0	양호	N/D
25	76.0							8.0		4.0	7.0	5.0	양호	54
31	80.0								8.0	3.2	6.4	2.4	불가	N/D
32	83.0								8.3	2.5	1.6	4.6	양호	73
33	82.6								8.3	2.5	6.6	-	불량	54
34	81.0								8.0	3.0	8.0	-	양호	82
41	70.0						17.5			2.3	7.5	2.7	양호	88
42	45.0							45.0		1.0	6.0	3.0	양호	124
43	45.0				40.0				4.5	1.0	8.0	1.5	양호	129
34	81.0								8.0	3.0	8.0		양호	82
51	26.5	44.0					17.5			-	9.0	3.0	양호	65
52	14.0	32.0						45.0		-	6.0	3.0	보통	N/D
53		49.5			40.0				4.5	-	4.5	1.5	불량	N/D
54		87.0							4.0	-	7.0	2.0	불가	N/D
61	18.0		54.0				18.0			-	8.0	2.0	양호	21
62	14.0		33.0					47.0		-	4.0	2.0	보통	21
63			47.0		42.3				4.7	-	5.0	1.0	보통	10
64			88.0						5.0	-	5.5	2.0	양호	29
71	27.0			45.0			18.0			-	7.0	3.0	양호	19
72	14.0			33.0				47.0		-	4.0	2.0	보통	30
73				52.0	37.5				4.5	-	5.0	1.0	보통	9
74				87.5					5.0	-	5.0	2.5	보통	29

주) 1. 합철부산물과 환원제에서 ‘스케일’은 스케일, ‘더스트’는 전기로 BF더스트, ‘슬러지’는 전기로 슬러지, ‘OG’는 제강OG슬러지, ‘EP’는 고로원료EP더스트, ‘BF’는 고로주상 BF 더스트, ‘열연’은 열연슬러지를 뜻함.

여 CCBI 원료 혼합물을 조제하여 단괴를 제작하는 것이 성형성 측면에서 효과적이다. 경제성 측면에서 역시 톤당 20~25만원에 단가가 형성되는 CDQ 더스트 보다 톤당 10~15만 원 정도의 시세인 무연탄을 사용하는 것이 효과적이라고 판단된다.

기존 연구들에 의하면 소석회인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 포함된 단괴의 경우 대기 중에  $\text{CO}_2$ 와 반응하여  $\text{CaCO}_3$ 가 생성되어 입자들의 응집력을 강화시키는 것으로 잘 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 물유리가 포함된 단괴에서 소석회( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )의 첨가는 단괴의 강도를 추가로 증가시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.  $\text{Ca}^{2+}$  양이온 다량 함유된 원료는 식 (1)과 같이 silicate 구조와 화학적 결합을 유도할 수 있어 단괴 강도가 상승할 수 있다.<sup>9)</sup>



특히, silicate구조가 포함된 물유리의 경우 소석회와 화학적 결합이 유도될 수 있어 binder와 같이 혼합하는 경향이 있다.

#### 4.2. CCBI 성분 표준 개발

원료 혼합물 중 탄소 함량을 4~6%를 유지하도록 주원료를 조합하고, coke 기원의 carbon을 함유하고 있는 합철부산물을 추가적으로 사용하였다. 환원제로는 고로주상 BF더스트와 열연 슬러지와 선행 실험 결과를 통해 적합하다고 판단한 무연탄을 선택하여 사용하였고, 2개의 합철부산물을 제외한 5개의 합철부산물을 철원으로 배합하여 Table 5와 같이 성분 표준을 개발하였다.

스케일을 CCBI의 철원으로 사용한 경우, 3종의 환원제 모두 양호한 성형성을 나타내었고, 2종의 바인더 모두 적절하였다. 전기로 B-F 더스트를 철원으로 단독 사용한 경우, 성형이 불가능하였으나 스케일과 같이 사용한 경우에는 성형이 가능하였다. 전기로 슬러지를 단독 혹은 스케일과 함께 사용한 경우, 무연탄을 환원제로 하여 CCBI 성형이 가능하였다. 전처리한 OG 슬러지를 사용한 경우, 성형성이 보통이었으나 3종의 환원제에 대해 성형이 가능하였다.

본 연구에서 분체 입자 간의 결합은 부동성 액체의 사용 및 기계적 영감을 통한 입자의 엮물림이 주된 결합 기구로 작용한다. 기계적 영감은 큰 입도 차이와 큰 입자 표면 조도에서 높은 엮물림 현상을 나타낸다. Table 2와 Fig. 5에 따르면 스케일 입자의 크기가

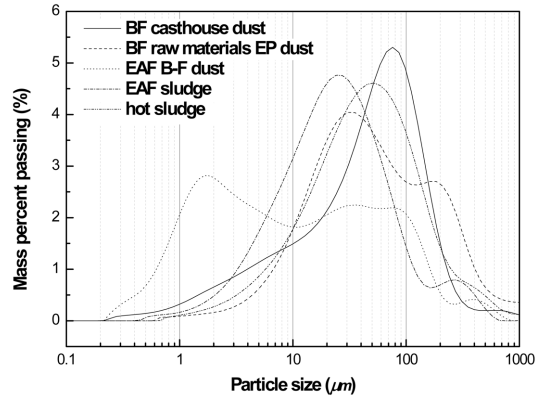


Fig. 6. Size distribution of Fe-containing process wastes used in the present study.

500 mm 이상이고, 각각의 입자가 구형이 아닌 부정형을 띄어 큰 입자 표면 조도를 가지는 스케일이 좋은 성형성을 나타낸다.<sup>4)</sup> 스케일을 제외한 합철부산물의 입도 분포는 Fig. 6에 나타내었다. 스케일의 경우 입도분석기의 최대 입도치를 상회하는 입도가 나와서 측정할 수 없었다. 스케일을 제외한 합철부산물의 평균입도가 매우 작고 입도 분포도 좁은 것을 확인할 수 있으며, 이는 고른 입도분포를 나타낸다. 따라서 스케일을 제외한 다른 부산물들을 이용해 단괴를 만들 때 낮은 결합력으로 성형성이 나쁘다. 하지만 스케일을 추가로 혼합하여 성형한 경우, 스케일과의 입도 차이와 큰 표면 조도에 영향을 받아 높은 성형성을 유도할 수 있다.<sup>10)</sup>

스케일이 주 철원인 경우에만 소석회의 첨가가 성형성에 좋은 영향을 미친다. 스케일은 입도가 아주 큰 반면, 소석회는 75 mm 이하의 작은 입도를 가지고 있기 때문에 단독으로 사용한 스케일 입자 사이의 기공에 충전하여 강한 기계적 영감을 유도한다. 반면에, 스케일을 제외한 다른 합철부산물은 스케일보다 고운 입도를 가지고 있기 때문에 유사한 입도의 소석회로는 효과적인 기계적 영감을 얻을 수 없기 때문이다.

#### 4.3. CCBI의 내구성

CCBI의 내구성을 Table 6에 표기한 조성에 따라 확인하였다. 내구성은 양생 후 8시간 뒤의 압축강도인 초기 압축강도와 7일간 실내 상온 보관으로 양생한 후의 압축강도인 7일 강도를 비교 측정하였다. 결과는 Fig. 7에 도시하였다. 대부분의 Lot에서 초기 강도보다 7일 강도가 향상되었음을 확인하였고, 7일간의 상온 실내 보관 조

**Table 6.** Durability and compression strength of CCBI and post processing CCBI

구분	Raw Mix (wt%)						Durability 평가 (강도; kgf)				비 고
	합철부산물		환원제	부원료	바인더		일반 시료		후처리 시료		
				소석회	물유리	당밀	Green	7D	Green	7D	
17	스케일	-	EP	4.0	1.0	6.0	72	89	95	110	
	81.0	-	8.0								
25	스케일	-	CDQ	4.0	7.0	5.0	54	74	70	109	
	76.0	-	8.0								
32	스케일	-	무연탄	2.5	1.6	4.6	73	84	85	120	
	83.0	-	8.3								
34	스케일	-	무연탄	3.0	8.0	-	82	100	101	137	
	81.0	-	8.0								
41	스케일	-	BF	2.3	7.5	2.7	88	99	110	125	
	70.0	-	17.5								
42	스케일	-	열연	1.0	6.0	3.0	124	147	148	180	
	45.0	-	45.0								
43	스케일	EP	무연탄	1.0	8.0	1.5	129	144	144	175	
	45.0	40.0	4.5								
51	더스트	스케일	BF	-	9.0	3.0	65	77	81	95	
	44.0	26.5	17.5								
61	슬러지	스케일	BF	-	8.0	2.0	21	12	35	42	
	54.0	18.0	18.0								
62	슬러지	스케일	열연	-	4.0	2.0	21	26	30	40	
	33.0	14.0	47.0								
63	슬러지	EP	무연탄	-	5.0	1.0	10	10	17	35	
	47.0	42.3	4.7								
64	슬러지	-	무연탄	-	5.0	2.0	29	32	41	50	
	88.0	-	5.0								
71	OG	스케일	BF	-	7.0	3.0	29	32	40	47	
	45.0	27.0	18.0								
72	OG	스케일	열연	-	4.0	2.0	41	40	53	52	
	33.0	14.0	47.0								
73	OG	EP	무연탄	-	5.0	1.0	10	12	14	29	
	52.0	37.5	4.5								
74	OG	-	무연탄	-	5.0	2.5	41	41	46	59	
	87.5	-	5.0								

- 주) 1. 구분은 Lot 번호이다.  
 2. '스케일'은 스케일, '더스트'는 전기로 BF더스트, '슬러지'는 전기로 슬러지, 'OG'는 제강OG슬러지, 'EP'는 고로원료 EP더스트, 'BF'는 고로주상 BF더스트, '열연'은 열연슬러지를 뜻함.  
 3. 후처리는 Green상태의 CCBI에 물유리로 코팅한 것을 뜻함.  
 4 'Green'은 Green상태의 CCBI 5개를 상온에서 8시간이상 양생한 후의 강도 측정치.  
 5. '7D'는 Green상태의 CCBI 5개를 7일간 실내 상온에서 보관한 후의 강도 측정치.



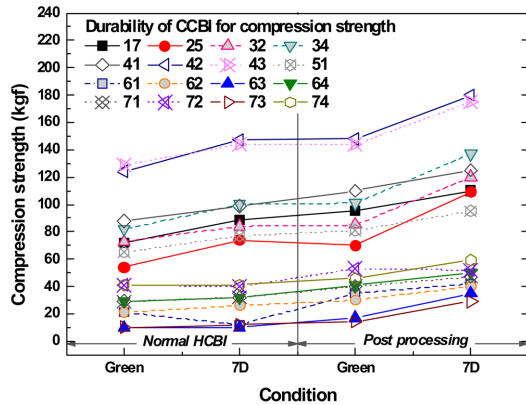


Fig. 7. Effect of 7 day curing of CCBI on the compression test and the effect of post-processing with glass-water on green briquette.

건에서는 내구성이 거의 모든 Lot에서 좋은 것으로 확인하였다. 물유리를 추가적으로 코팅하는 후처리를 한 CCBI는 대부분의 Lot에서 초기 압축강도와 7일 강도가 모두 향상되었다.

그러나 내구성 측면에서 물유리 코팅을 하는 후처리가 좋은 영향을 미치지만, 최종 목적인 함철부산물 내의 산화철 최종 환원율과 속도에 있어서는 좋지 않은 영향을 미친다. 이는 물유리 코팅 과정에서 기공 내로 물유리가 침투하여 예비 환원 시 CO가스와 산화철의 접촉을 막아 간접 환원의 효과를 저해할 수 있으며, 물유리 성분인  $\text{Na}^+$  이온은 전기로 내부의 내화재와 반응하여 내화재를 침식시킬 수 있기 때문이다.<sup>11)</sup> 이러한 이유로 내구성 측면뿐 아니라 후처리에 따른 환원 효율 및 내화재 침식 영향에 대한 연구 또한 진행하여 경제적이고 효율적인 방안을 모색하여야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 함철부산물, 탄재, 플럭스, 바인더를 배합하여 새로운 철원으로 사용할 수 있도록 단괴를 성형하는데 있어서 각 배합 비에 따른 단괴의 성형 특성을 파악하고자 하였다.

탄종에 따른 특성을 분석하기 위해 함철부산물을 스케일로 고정하고 coke기원의 CDQ 더스트와 coal기원의 무연탄을 탄재로 하여 단괴의 성형성을 비교 분석한 결과, 무연탄을 탄재로 사용한 단괴의 성형성 및 강도가 우수하였고, 바인더의 종류와 상관없이 성형성이 양

호하였다.

함철부산물에 따른 성형성 평가는 다음과 같다. 스케일을 주 철원으로 사용한 경우 3가지 탄재 및 타 함철부산물을 첨가한 모든 상황에서 바인더의 종류와 상관없이 성형성이 양호하였다. 스케일을 제외한 함철부산물은 단독으로 성형성이 좋지 않았으며, 스케일을 첨가하였을 때는 성형성이 좋아짐을 확인하였다. 스케일을 제외한 함철부산물의 경우, 매우 작은 입도를 가지지만, 첨가된 스케일의 입도가 아주 크고 형상이 부정형이어서 입도 분포와 표면 조도에 영향을 받는 기계적 영감이 강해져서 성형성이 더 좋은 것으로 판단한다.

플럭스인 소식회는 스케일에 첨가하였을 때에만 성형성이 좋았다. 이는 소식회의 입도가 아주 고운 입자로 스케일이 아닌 함철부산물의 입도와 비슷한 입도분포를 띄기 때문에 기계적 영감이 약하기 때문이다.

단괴의 내구성에 있어서는 초기 압축강도와 7일 강도를 비교하였을 때, 7일 강도가 상대적으로 높았고, CCBI를 물유리로 코팅하는 후처리는 초기 압축강도와 7일 강도 모두에서 강도 향상에 상당한 효과가 있었다. 강도 측면에서 물유리 코팅 후처리가 더 좋으나, 실제 CCBI의 목적인 함철부산물의 환원에 있어서 부작용이 발생할 우려가 있다. CCBI의 예비 환원에서 내부 기공에 채워진 물유리에 의해 CO가스와의 반응을 방해하고, 용융 환원에서 물유리의 조성이 전기로 내의 내화물과 반응하여 내화물 침식을 일으킬 우려가 있다. 따라서 이러한 부작용에 대한 연구를 추가적으로 진행하여 적합한 후처리를 통해 강도를 강화해야 할 것으로 예측한다.

## References

- Kim, Y. H., Yoo, J.M., Kim, D.S., Lim, J.H., and Yang S.H. 2013: A Study on the Recycling of Molten Ladle Slag Residue into LF Process, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 22(1), pp36-41
- Choi Sang-Won, Kim V., Chang W.-S. and Kim E.-Y., 2007: The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries, KCI, 19(6), pp. 28-33.
- Wi, C.H., Kim, S.M., Yun, K.W., You, B.D., Kim, D.S. and Choi, H.J., 2007: Reduction Behavior of Carbon Composite EAF Dust and Scale Briquettes, Korean J. Met. Mater, 45(6), pp. 368-376.
- Cha, Y.J., Kim, T.H., You, B.D., Han, J.W., Choi, E.S. and Lee, D.W., 2001: A Study on the Reduction Behavior of Carbon-Iron oxide Pellet, Korean J. Met. Mater, 40(2), pp.

- 237-243.
5. Sun K. and Lu W.K., 2008: Mathematical Modeling of the Kinetics of Carbothermic Reduction of Iron Oxides in Ore-Coal Composite Pellets, Metall. Mater. Trans. B., 40B, pp. 91-103.
  6. Capes C.E. and Darcovich K., 2000: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology-Size enlargement, John Wiley & Sons Inc., U.S.A., pp. 77-105.
  7. Sah R. and Dutta S.K., 2010: Effects of Binder on the Properties of Iron Ore-Coal Composite Pellets, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 31, pp. 73-85.
  8. Patil J.B., Kakkar N.K., Srinivasan T.M., Dharanipalan S., Patel B.B. and Nayak N.M., 1980: Production of cold bonded pellets, Trans. of the Indian Institute of Metals, 33(5), pp. 382-390.
  9. Goberis S. and Antonovich V., 2004: Influence of sodium silicate amount on the setting time and EXO temperature of a complex binder consisting of high-aluminate cement, liquid glass and metallurgical slag, Cement and Concrete Research, 34, pp. 1939-1941.
  10. Lee, D.J., Yoon, E.Y., Kim, H.N., Kang, H.S., Lee, E.S. and Kim, H.S., 2011: Quantitative Analysis of Roughness of Powder Surface Using Three-Dimensional Laser Profiler and its Effect on Green Strength of Powder Compacts, Korean Powder Metall. Inst., 18(5), pp. 406-410.
  11. Charles Schacht, 2004: Refractories Handbook, Alumina-Silica Brick, CRC press, U.S.A., pp. 104.



손 일

- 연세대학교 금속공학과 학사, 석사
- Carnegie Mellon University 석사, 박사, Post Doc.
- 현재 연세대학교 신소재공학과 부교수



유 종 영

- 연세대학교 금속공학과 학사
- 현재 연세대학교 신소재공학과 통합과정 재학중



신 희 동

- 1994년 전남대학교 자원공학과 학사
- 1997년 한라시멘트(주)
- 현재 호남석회공업(주)



양 대 영

- 2012 조선대학교 환경공학부 학사
- 현재 호남석회공업(주)