J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 23, No. 5, 2014, 12-20
http://dx.doi.org/10.7844/kirr.2014.23.5.12
pISSN : 1225-8326 eISSN : 2287-4380

≫ 연구논문 ≪

산업부산물을 활용한 제철·제강용 합성 칼슘 페라이트 특성 - (2)

박수현 · †추용식 · 서성관 · 박재완
한국세라믹기술원 에너지환경소재본부

The Properties of Synthetic Calcium Ferrite for Ironmaking and Steelmaking using Industrial By-products - (2)

Soo Hyun Park, †Yong Sik Chu, Sung Kwan Seo and Jae Wan Park
Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech.

요 약

칼슘 페라이트는 소결광 제조 시 생성되는 자용성 소결 광물의 일종으로, 제철 공정의 소결광용 결합제 및 제강용 융제로 사용된다. 기존 소결광용 결합제 및 제강용 융제보다 용융온도가 낮아 결합제 및 융제로서의 효과가 우수하다. 본 연구에서는 제철공정에서 발생하는 다양한 산업부산물을 시작원료로 사용하여 칼슘 페라이트를 제조하였다. 칼슘 페라이트 물성을 분석·평가하기 위해, 시멘트 제조공정 시험법을 준용하였다. 더불어 칼슘 페라이트의 물성을 평가하기 위해 결정분석, 파괴하중, 열분석 등을 시행하였다.

주제어 : 칼슘 페라이트, 소결광, 제강용 융제, 파괴하중, 열분석

Abstract

Calcium ferrite is a major bonding material self-fluxed sintered ore, and it is used as a flux in the steelmaking process. Calcium ferrite is more effective binder for making sintered ore and flux for steel making because of it's low melting temperature. In this Study, calcium ferrite was made by using variety industrial by-products from steel plant. The property of calcium ferrites was investigated on the basis of test method using in the cement manufacturing process. Crystal analysis, compression test as well as thermal analysis were carried out to evaluate physical properties of calcium ferrite.

Key words : Calcium ferrite, Sintered ore, Flux for steel making, Breaking load, Thermal analysis

1. 서 론

제철·제강공정에서 철 생산량 증대와 품질향상을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 더불어 고로 소결공정에서의 소결광 품질 향상을 위한 연구도 진행되고 있다.[1] 상기 노력의 일환으로 이대열 등은 철광석 소결광의 슬래그 부피를 재평가 하였으며, 더불어 소결광 조직특성 정량화 기술에 대해서도 언급하였다.[2] 신일본

· Received : August 29, 2013 · Revised : October 31, 2013 · Accepted : October 13, 2014
†Corresponding Author : Yong Sik Chu (E-mail : yschu@kicet.re.kr)
Energy & Environmental Division Eco Composite Meterials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 77, Digital-ro 10-gil, Geumcheon-gu, Seoul 153-801, Korea
Tel : +82-2-3282-7791 / Fax : +82-2-3282-2430
ⓒ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.

제철社의 Kenichi Higuchi 등은 소결광의 고온거동을 연구하기도 하였다. 이들의 연구 목적은 소결광 특성을 제어하여, 고로에서의 고출선비 조업을 달성하고자 하는 것이다.[2-3)]

칼슘 페라이트는 소결광용 결합제 뿐만 아니라 전로·전기로용 융제 (플럭스)로도 사용되고 있다. 전로·전기로용 융제는 제강공정에서 강의 물성 향상을 위해, 즉 용강 내 S와 P를 제거하기 위해서 사용하는 대표적인 제강용 첨가제이다. 이는 용융점이 낮은 칼슘 페라이트가 저온에서 녹아, 용강에 포함된 S 또는 P와 반응하도록 하는 것이다. 즉 융제의 Ca 성분과 용강 내의 S와 P가 반응·슬래그화 하여, 용강 내의 S와 P를 제거하는 것이다.[4-6)]

현재 중국 등 (Anyang Lishi Industrial Co., Ltd, ZhengZhou Whale Special Materials Co., Ltd 등) 일부 국가에서 생산?판매되는 칼슘 페라이트는 용융법으로 제조된다. 이는 석회질과 철질 원료를 혼합하여 전기로 내에서 용융하며, 용융물은 로에서 배출되어 고화·분쇄 과정을 거치며, 이후 최종 제품으로 판매된다. 용융법은 혼합원료를 충분히 용융시키기 위해 많은 열원을 소모하는 에너지 다소비 방법이며, 일정크기로 분쇄·체분리 해야 하는 추가 공정도 필요하다.[7,8)]

해외 제품 (중국 등의 칼슘 페라이트)의 용융온도는 1438°C를 상회한다. 더불어 1438°C 이상에서도 CaO는 용융 상태가 아닌 고체 상태로 존재 (CaO + Liquid)한다. 특히 용융물이 고체 상태로 냉각된 후, $2CaO \cdot Fe_2O_3$ 뿐만 아니라 CaO도 잔존하게 된다. 즉 칼슘 페라이트 생성시에 Fe_2O_3원이 부족하여, 칼슘 페라이트 생성 반응이 종료된 후에도 유리(遊離) CaO가 남아있게 된다. 유리 CaO는 생석회의 주성분으로, 대기 중의 수분과 반응하여 수화팽창 ($CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$) 한다. 즉 칼슘 페라이트를 대기 중에 방치할 경우, 일부 CaO의 수화 팽창압에 의해 칼슘 페라이트는 분화(分化)될 수도 있다. 따라서 칼슘 페라이트의 용융온도를 대폭 낮출 수 있고, 분화되지 않는 안전 조성범위가 검토되어야 한다.[9-11)]

그러므로 본 연구에서는 저융점 특성을 발현하여 '소결광용 결합제' 또는 '전로/전기로용 융제'로 사용가능한, "칼슘 페라이트"를 제조·분석 및 평가하였다. 특히 칼슘 페라이트의 원료로는 제철공정 자체 부산물들도 사용되었으며, 용융법이 아닌 소성법으로 실험하였다. 본 연구에서의 소성법은 공정 적용시, 소성 열에너지를 최소화할 수 있는 "시멘트 제조공정 시험법"을 기초 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 대표적 저융점 소결광용 결합제 또는 전로/전기로용 융제로 사용될 수 있는 칼슘 페라이트를 제조하기 위해서, 천연원료인 석회석 및 철광석 뿐만 아니라 산업부산물인 소성슬러지, 제강슬러지 및 고로 분진 등을 사용하였다. 이중 석회석과 소성슬러지는 석회질 (CaO원)로 사용되며, 철질 (Fe_2O_3원)로는 철광석, 제강슬러지, 고로 분진 등이 사용되었다. 이들 원료들은 진동밀로 분쇄하여 150 μm 통과분을 사용하였으며, 100°C에서 항량이 될 때까지 건조 (슬러지류는 건조 후 분쇄)하였다. 건조 후 습식 분석된 주요 화학성분은 Table 1에 나타내었으며, 이때 금속-Fe도 Fe_2O_3로 환산하여 표시하였다.

칼슘 페라이트의 융점을 최소화하기 위해서는 석회질 원료와 철질 원료의 적합한 조성제어가 필요하다. Fig. 1의 상태도로부터 유추할 수 있는 최저 융점은 1205°C이며, 이때 CaO와 Fe_2O_3의 조성은 약 22 ± 10 wt.% 및 78 ± 10 wt.% 범위임을 확인할 수 있다. 생성광물은 냉각조건에 따라 달라질 수 있으나, 칼슘 페라이트 결정으로 $CaO \cdot Fe_2O_3$, $CaO \cdot 2Fe_2O_3$, Fe 산화물로는 hematite (Fe_2O_3) 등이 생성된다. 이러한 결정들은 CaO/Fe_2O_3 조성비가 0.282 수준에서 생성되는 것을 알 수 있다.

Table 1. Chemical analysis of raw materials (Unit : wt%)

Type		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	C	SO_3	LOI	Moisture
CaO Soruce	Calcination sludge	2.08	0.79	1.87	49.50	0.83	0.08	0.26	12.5	0.11	42.60	14.99
	Limestone	0.22	0.04	0.10	52.00	0.85	0.02	0.05	-	0.03	43.60	-
Fe_2O_3 Soruce	Steel making sludge	0.58	0.28	85.09	6.10	2.63	0.10	0.17	2.26	0.10	-	22.79
	Blast furnace dust	1.25	0.23	98.39	0.47	0.01	0.07	0.2	5.25	0.44	1.77	-
	Iron ore	5.11	1.59	67.78	8.89	0.74	0.09	0.12	-	0.10	14.3	9.92

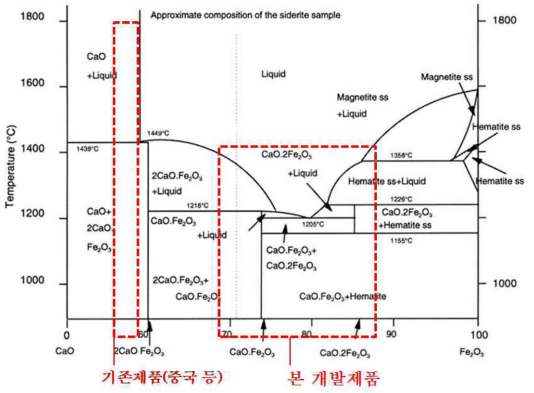


Fig. 1. Composition range of existing products and develop products.

Table 1의 화학성분을 갖는 원료들로 칼슘 페라이트 결합제/융제를 제조하였으며, 이때 Table 2와 같이 CaO와 Fe_2O_3의 조성비 (중량기준)는 0.282가 되도록 배합하였다. 석회질 원료로 소성 슬러지를 사용할 경우의 고로 분진 혼합량은 64.2%, 석회석을 사용한 경우에는 65.6%이다. 고로 분진 혼합량은 다른 철질 원료보다 낮은 양이며, 이는 고로 분진의 Fe_2O_3 함량이 98.39%로 가장 높기 때문이다. 이와 반대로 Fe_2O_3 함량이 적은 철광석 혼합량은 가장 높은 수준이기도 하다.

배합이 완료된 혼합원료에 혼합수 20% (Water/Powder = 0.20)를 첨가·혼합하였으며, 이후 무게 20 g, 지름 25 mm의 구형 성형체를 제조하였다. 성형체는 100°C에서 건조한 후, 1000°C, 1050°C, 1100°C, 1150°C, 1200°C의 온도에서 30분 동안 소성하였다. 소성이 종료된 성형체 시료는 미분쇄하여 XRD (3 kW, 40 kV, 40 mA), 에틸렌글리콜을 사용한 미반응 CaO (Free-CaO) 분석 및 TG-DTA (20 ~ 1100°C)를 사용한 열분석 등을 수행하였다. 특히 실공정에서 결합제/융제의 작업성 확보를 위한 파괴하중도 측정하였으며, 고온현미경(20 ~ 1250 °C)을 사용하여 소성이 완료된 칼슘 페라이트의 용융온도도 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 결정 분석

소성온도 및 사용원료별 칼슘 페라이트의 결정학적 특성분석을 위해, XRD 패턴을 분석하였으며, 1000°C-30분 소성된 칼슘 페라이트의 XRD 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 사용원료에 따라 최종 칼슘 페라이트에 존재하는 결정의 종류가 달라짐을 확인할 수 있었다. 소성슬러지와 제강슬러지가 사용된 칼슘 페라이트(No.1)는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정을 포함하고 있었다. 소성슬러지와 고로분진이 사용된 칼슘 페라이트(No.2)에서는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정이, 소성슬러지와 철광석이 사용된 칼슘 페라이트(No.3)는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정이 관찰되었다. 고로분진이 사용된 칼슘 페라이트(No.2)에서는 중간생성물인 $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$ 결정이 관찰되지 않았으며, 이는 철광석 및 제강슬러지보다 상대적으로 빠른 소결반응이 이루어져 최종 생성물인 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$로 전환되었기 때문이다. 석회질로 석회석을 사용한 No.4 ~ 6의 칼슘 페라이트에서도 No.1 ~ 3과 유사한 경향을 나타내었다. 이는 고로분진의 미세 입자(평균 입경 5.3 μm)가 소결반응에 좀 더 큰 기여를 했기 때문이다. 더불어 고로분진에 포함되어 있는 미연카본(graphite, 5.25%)도 소성과정에서 칼슘 페라이트의 생성반응에 일부 기여했을 것으로 추정된다.

1150°C-30분 소성된 칼슘 페라이트의 XRD 패턴을 Fig. 3에 나타내었다. 사용원료에 따라 칼슘 페라이트에 존재하는 결정의 종류가 달라짐을 확인할 수 있었으나, 1150°C 소성조건에서도 1000°C와 유사한 결정이 존재하였다. 소성슬러지와 제강슬러지가 사용된 칼슘 페라이트(No.1)는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정을 포함하고 있었다. 소성슬러지와 고로분진

Table 2. Blending design of raw materials for manufacturing calcium ferrite (Unit : wt%)

Fe_2O_3 / CaO	Steel making sludge	Blast furnace dust	Ironstone
Sintering sludge	No.1 [73.2 : 26.8][1)]	No.2 [64.2 : 35.8][2)]	No.3 [82.7 : 17.3]
Limestone	No.4 [74.4 : 25.6]	No.5 [65.6 : 34.4][2)]	No.6 [83.6 : 16.4]

* Fe_2O_3, CaO contents with blending design of raw materials
1) [73.2 : 26.8] = Fe_2O_3 : CaO
2) CF Clinker : No.2=[CaO 21.56%, Fe_2O_3 76.35%], No.5=[CaO 21.71%, Fe_2O_3 77.04%]

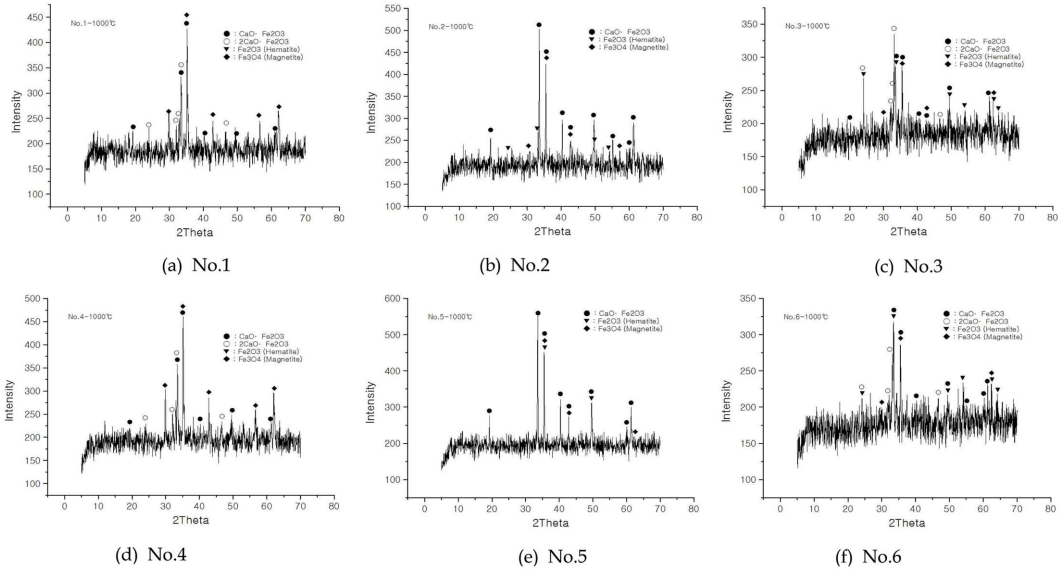


Fig. 2. XRD pattern of calcium ferrite specimens (1000°C-30min).

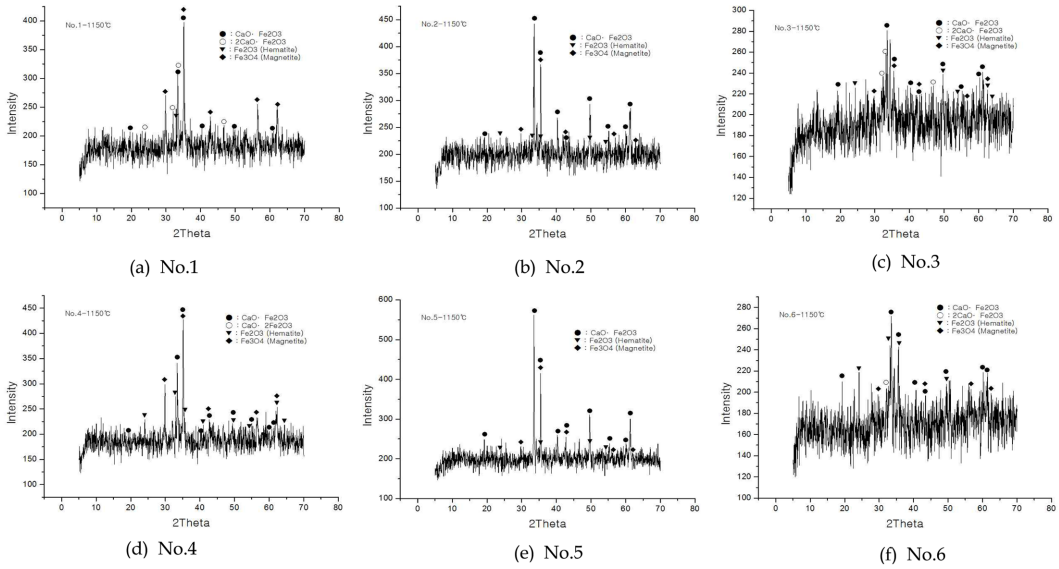


Fig. 3. XRD pattern of calcium ferrite specimens (1150°C-30min).

이 사용된 칼슘 페라이트(No.2)에서는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정이, 소성슬러지와 철광석이 사용된 칼슘 페라이트(No.3)는 $CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 결정이 관찰되었다. 고로분진이 사용된 칼슘 페라이트 (No.2)에서는 $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$ 결정이 관찰되지 않았다. No.4～6의 칼슘 페라이트에서도 No.1～3과 유사한 경향을 나타내었으나, No.4에서는 $CaO{\cdot}2Fe_2O_3$가 추가 관찰되었다. 소성온도 1000～1150°C에서 얻어진 칼슘 페라이트 시료의 광물상 종류를 Table 3에 나타내었다.

소성온도 상승에 따라 큰 차이를 나타내지 않았으나, No. 2에서는 소성온도가 상승함에 따라 33.6°-

Table 3. Mineral phase of calcium ferrite specimens.

Type	1000°C	1150°C
No.1	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4
No.2	**$CaO{\cdot}Fe_2O_3$**, Fe_2O_3, Fe_3O_4	**$CaO{\cdot}Fe_2O_3$**, Fe_2O_3, Fe_3O_4
No.3	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4
No.4	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $CaO{\cdot}2Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4
No.5	**$CaO{\cdot}Fe_2O_3$**, Fe_2O_3, Fe_3O_4	**$CaO{\cdot}Fe_2O_3$**, Fe_2O_3, Fe_3O_4
No.6	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4, CaO	$CaO{\cdot}Fe_2O_3$, $2CaO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4

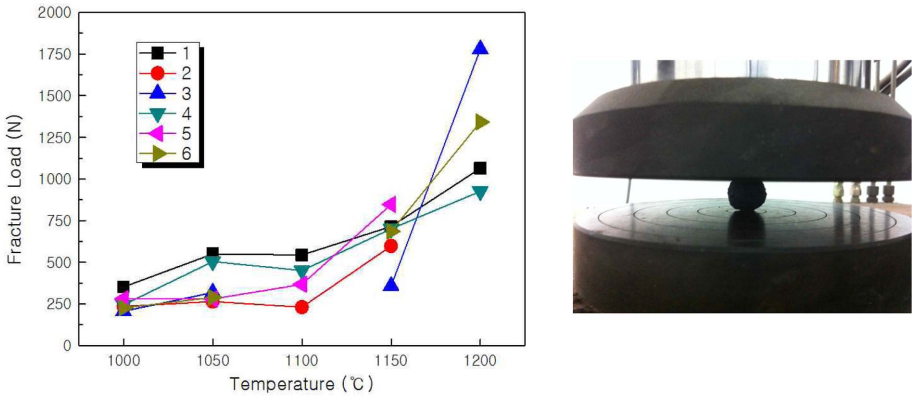


Fig. 4. Fracture load of calcium ferrite specimens.

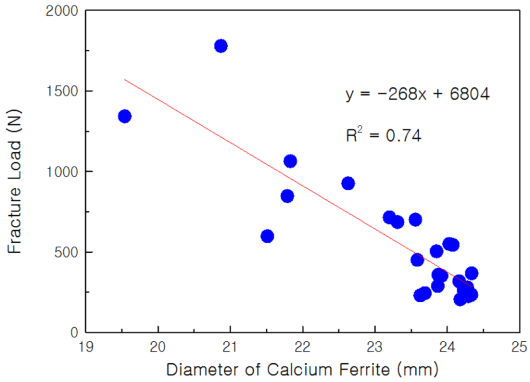


Fig. 5. Relationship between fracture load and diameter of calcium ferrite specimens.

$CaO{\cdot}Fe_2O_3$와 35.5°-($CaO{\cdot}Fe_2O_3 + Fe_3O_4$) 피크 강도비가 점차 증가함을 알 수 있었다. 또한 소성온도 상승에 따라 No. 3과 6은 결정 피크 강도가 전반적으로 감소하고, 비정질이 증가하는 현상도 관찰되었다.

3.2. 파괴하중

각각의 소성온도에서 소결된 칼슘 페라이트의 파괴하중을 측정하였으며, 파괴하중 값을 Fig. 4에 나타내었다. 소성온도 상승에 따라 파괴하중 값은 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 파괴하중 증가폭도 더욱 커졌다. 더불어 소성온도 상승에 따라 시편 종류별 파괴하중 차이(표준편차)가 증가하였다. 즉 1000°C에서의 파괴하중은 최소 206N, 최대 353N (차이 147N)이었으나, 1200°C에서는 최소 926N, 최대 1779N (차이 853N)이었다. 각각의 평균 및 표준편차는 1000°C : 254±53N, 1050°C : 368±126N, 1100°C : 398±133N, 1150°C : 651±165N, 1200°C : 1278±376N이었다. 또한 1100°C 이하에서의 파괴하중은 No.1과 6이, 1200°C에서는 No.3과 6의 파괴하중이 소폭 높은 값을 나타내었다.

파괴하중은 칼슘 페라이트 지름과도 일정부분의 상관성이 도출되었으며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 칼슘 페라이트의 지름이 증가할수록 파괴하중은 감소하였다. 이때 파괴하중과 지름과의 상관관계계수 (r)는 −0.86 (r2=0.74)이며, 선형 상관관계방정식은 식 (1)과 같다.

$$y = -268x + 6804 \quad (1)$$

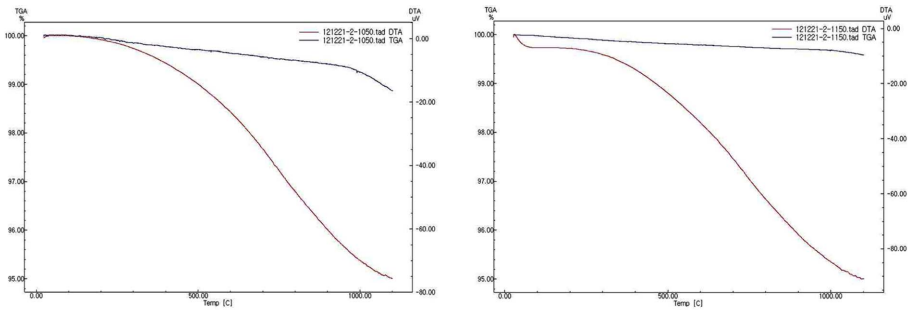
칼슘 페라이트 지름은 소결특성에 의해서도 영향을 받으며, 따라서 소결특성과 파괴하중과의 상관성은 매우 높을 것으로 추정할 수 있었다. 그러나 물리적 특성의 평가는 몇 개의 결과치만으로 평가하기 어려우며, 매우 많은 n수가 필요하다. 더불어 액상소결(액상량 등)은 파괴하중 값과 높은 상관성을 나타낼 것으로 판단되어, 향후 적극적인 추가 연구수행이 필요할 것이다.

3.3. 열분석

혼합원료 중 소성성이 가장 우수하고, 또한 용융점이 가장 낮은 No. 2 (소성슬러지 + 고로분진) 칼슘 페라이트를 1100°C까지 열분석 하였으며, 열분석 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

일본 동북대학교 Kasai 등은 칼슘 페라이트 결정 중 $CaO \cdot Fe_2O_3$의 발열반응을 발표하였다.[12] 이들은 $CaO \cdot Fe_2O_3$가 850°C에서 $CaFe_2O_4$로 결정 변태되며, 이때 5.07 × 105 J/kg의 발열반응이 일어난다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 850°C 부근의 발열피크가 관찰되지 않았으며, 향후 좀 더 자세한 분석을 통해 발열반응 여부를 평가할 예정이다.

1050°C-30분 소성한 No.2 칼슘 페라이트의 중량 감소분은 약 0.8%에 이르며, 1150°C-30분 소성시에는 0.3%의 중량 감소를 나타내었다. 이러한 중량감소는 혼합원료에 존재하는 알칼리와 황산화물의 휘발과도 밀접한 상관성이 있으리라 추정되었다. No. 2의 알칼리 함량($Na_2O + K_2O$)은 0.29%, SO_3는 0.32% 수준(SO_3 + 알칼리 = 0.61%), No. 5 알칼리 함량 ($Na_2O + K_2O$)은 0.20%, SO_3는 0.30% 수준 (SO_3 + 알칼리 = 0.50%)이었다. 그러나 열분석에서는 No.2의 휘발성분 함량보다 높은 중량감소가 발생하였다(Table 4, 5 참조). 또한 강열감량(LOI)을 제외한 소결체 계산값에서도 유사한 경향을 나타내었다. 상기 결과로부터 소성 후 칼슘 페라이트의 열분석 중량감소가 더 큰 경향의 원인은 탈탄산 정도와 graphite 휘발량의 정확한 분석이 어렵고, Fe 산화 등을 고려치 않았기 때문이다. 더불어 습식분석/장비 정확도 및 기타 실험적 오류도 포함된 종합적 결과라고 추정되었다.



(a) 1050℃-30min sintering (b) 1150℃-30min sintering

Fig. 6. Thermal analysis of calcium ferrite specimens (No. 2).

Table 4. Chemical composition of raw mixture (estimation data) (Unit : wt%)

Type	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
No.2	1.55	0.43	63.84	18.02	0.30	0.07	0.22	0.32	16.39
No.5	0.90	0.16	64.58	18.20	0.30	0.05	0.15	0.30	16.16

Table 5. Chemical composition of calcium ferrite specimens (estimation data) (Unit : wt%)

Type	SiO_2	Al_2O_3	**Fe_2O_3**	**CaO**	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
No.2	1.85	0.51	**76.35**	**21.56**	0.36	0.09	0.26	0.38
No.5	1.07	0.20	**77.04**	**21.71**	0.36	0.06	0.18	0.36

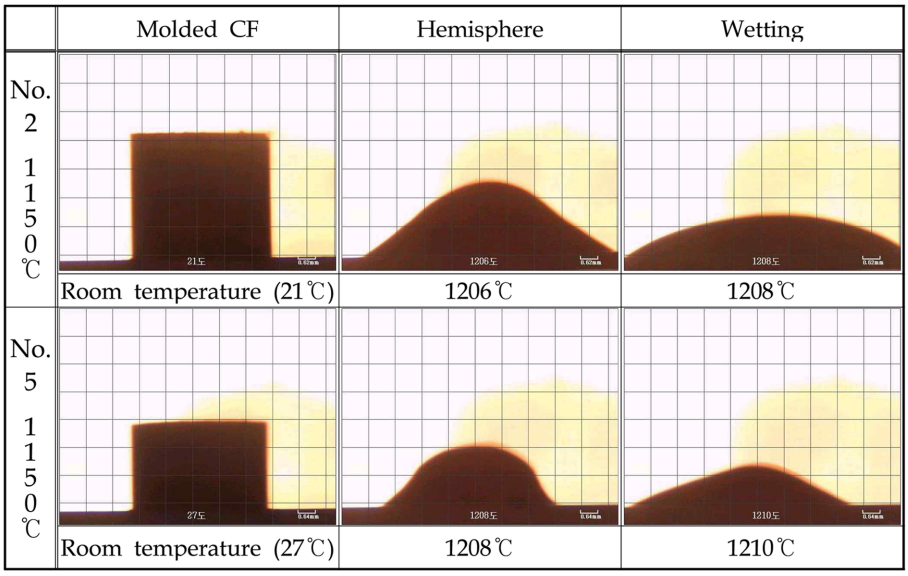
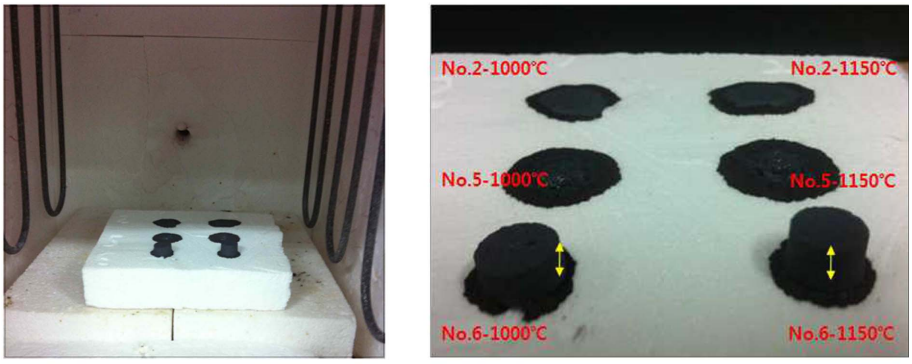


Fig. 7. Image of high-temperature microscopy of calcium ferrite specimen (No. 2, 5).



(a) furnace (b) 1200℃-30min

Fig. 8. Melting behavior of calcium ferrite specimens.

3.4. 용융 특성

상기 “3) 열분석”과 동일한 실험조건으로, No. 2 (소성슬러지 + 고로분진) 및 No. 5 (석회석 + 고로분진)의 혼합물을 가열하였을 때 생성되는 칼슘 페라이트의 고온현미경 사진을 Fig. 7에 나타내었다.

최종 제품인 칼슘 페라이트의 용융특성을 평가하기 위해서, 1000°C와 1150°C에서 소성된 칼슘 페라이트를 미분쇄한 후 5 × 5 × 5 mm 크기로 성형하였다. 성형된 칼슘 페라이트는 고온 현미경 내에 장착된 전기로에서 용융될 수 있도록 충분히 가열하였다. 가열과정에서 성형체가 반구로 변환되는 반구 온도(hemisphere temperature)와 젖음 온도(wetting temperature)를 측정하여 칼슘 페라이트들의 용융상태를 상호·비교하였다.

1150°C에서 소성된 No.2의 반구 온도는 약 1206°C, 젖음 온도는 1208°C이었으며, No. 5의 온도는 각각 1208°C와 1210°C이었다. No. 2와 5의 용융온도는 큰 차이가 없었으며, 이는 No. 2와 5에서의 출발원료 특성(입도, 화학조성 등)이 유사하기 때문이다. Fig. 8은 고온현미경 관찰 결과를 검증하기 위해, 또 다른 전기로에서 용융 시험한 결과이다.

1000°C와 1150°C에서 소성된 No. 2, 5 및 6 칼슘 페라이트를 원기둥 형태로 성형한 후 박스형 전기로 내

부에 장입하였다. 이후 전기로 내부 온도를 1200°C까지 상승시켜 30분간 유지한 후 로냉하였다. Fig. 8에서와 같이, No. 2와 5는 혼합원료의 최초 소성온도에 상관없이 1200°C-30분 조건에서 모두 용융되었다. 그러나 No. 6은 1000°C와 1150°C 소성조건 모두에서, 반구 또는 젖음 현상이 발생하지 않았다. 이는 No. 6의 용융 특성이 No. 2와 5보다 불량하다는 것이다. 또한 칼슘 페라이트 제조를 위한 혼합원료의 소성온도는 최종 제품인 칼슘페라이트의 용융 특성에 큰 영향을 미치지 못함을 의미하는 것이다. 그러므로 칼슘 페라이트 제조를 위한 혼합원료 소성온도 범위는 소성이 가능한 온도 범위 내에서, 가장 낮은 온도영역이 선택되어야 한다. 또한 상기 고온현미경 및 전기로 시험결과로부터, No. 2와 5의 용융온도는 반구 온도(hemisphere temperature) 1205~1208°C, 젖음 온도(wetting temperature) 1208~1210°C임을 확인·검증할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 제철·제강용 칼슘 페라이트를 제조하기 위해 제철공정에서 발생하는 다양한 산업부산물을 사용하였다. 최종 생성물인 칼슘 페라이트 물성을 분석·평가하기 위해, 시멘트 제조공정 시험법을 준용하였다. 칼슘 페라이트 제조를 위한 출발원료·혼합원료 및 이들의 소결특성과 더불어 칼슘 페라이트의 물성을 평가하였다.

(1) 칼슘 페라이트의 다양한 결정들은 화학조성 제어에 따라 일정부분 제어될 수 있음을 확인하였다. 또한 칼슘 페라이트의 파괴하중은 1000°C 소성조건에서 약 250N (25 Kgf)을 발현하였으며, 1150°C에서는 500N (49 Kgf)을 상회하였다. No.2와 5의 용융온도는 약 1200~1210°C로, 기존 결합제 및 융제 보다 매우 낮은 수준이었다.

(2) 제철·제강용 칼슘 페라이트 제조에 관한 연구 수행결과, 칼슘 페라이트는 모든 원료에서 제조 가능함을 확인하였으며, 최적 배합설계조건 (중량비 기준)은 석회석 : 고로분진 ≒ 66 : 34 임을 확인할 수 있었다. 또한 본 배합조건을 시멘트 제조공정에 적용할 경우, 칼슘 페라이트 제조를 위한 최적 소성온도 범위는 1000°C~1175°C 이었다. 상기 제조 조건으로 칼슘 페라이트를 제조할 경우, 시멘트 제조공정에서의 분쇄에너지와 소성에너지를 최소화할 수 있으며, 또한 칼슘 페라이트 물성도 최대화하여 제철·제강공정의 생산성 증대 및 에너지 절감에 기여할 수 있을 것으로 사료되었다.

References

1. S. Sato, et. al., 1986 : *Melting model for iron ore sintering*, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, **26**, pp. 282-290.
2. K. Higuchi, et. al., 2003 : *Influence of iron ore characteristics on penetrating behavior of melt into ore layer*, ISIJ International, **43**, pp. 1384-1392.
3. K. Higuchi, et. al., 2006 : *Quality improvement of sintered ore in relation to blast furnace operation*, Nippon Steel Technical Report, **94**, pp. 36-41.
4. Y. Takeda, S. Nakazawa, A. Yazawa, 1980 : *Thermodynamics of calcium ferrite slag at 1200 and 1300°C*, Canadian Metallurgical Quarterly, **19**, pp. 297-305.
5. H. P. Pimenta, V. Seshadri, 2002 : *Characterization of structure of iron ore sinter and its behaviour during reduction at low temperatures*, Ironmaking and Steelmaking, **29**, pp. 169-174.
6. I. Shigaki, M. Sawada, N. Gennai, 1986 : *Increase in low-temperature reduction of iron ore sinter due to hematite-alumina solid solution and columnar calcium ferrite*, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, **26**, pp. 503-511.
7. H. Wang, Y. Zhang, 1999 : *Measures to reduce energy consumption of sintering process*, Iron and Steel, **01**, pp. 5-11.
8. S. Lian, et. al., 2006 : *Research of reduction behavior of binary calcium ferrite*, Sintering and Pelletizing, **04**, pp. 12-18.
9. D. E. Rogers, L. P. Aldridge, 1977 : *Hydrates of calcium ferrite and calcium aluminoferrites*, Cement and Concrete Research, **7**, pp. 399-409.
10. H. Shi, Y. Zhao, W, Li, 2002 : *Effects of temperature on the hydration characteristics of free lime*, Cement and Concrete Research, **32**, pp. 789-793.
11. J. W. Jeon, S. M. Jung, Y. Sasaki, 2010 : *Formation of calcium ferrite under controlled oxygen potentials at 1273K*, ISIJ International, **50**, pp. 1064-1070.
12. E. Kasai, et. al., 1997 : *Thermal analysis of the sintering reactions of iron-ores*, Tetsu to Hagane, **83**, pp. 539-544.

박 수 현

• 인천대학교 화학과 학사
• 현재 한국세라믹기술원 위촉연구원

추 용 식

• 한양대학교 무기재료공학 박사
• 현재 한국세라믹기술원 책임연구원

서 성 관

• 숭실대학교 화학과 학사
• 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
(한양대학교 신소재공학과 석·박 통합 과정)

박 재 완

• 한국교통대학교 나노고분자공학과 학사
• 현재 한국세라믹기술원 위촉연구원

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解說	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解說, 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 解說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, 隋霜 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.