

진동성형용 ρ -알루미나결합 알루미나 캐스터블 내화재료의 제조와 특성

천승호 · 전병세[†]

경남대학교 신소재공학부
(2003년 7월 7일 접수; 2003년 7월 15일 승인)

Preparation and Properties of ρ -alumina Bonded Alumina Vibrated Castable Refractory

Sungho Cheon and Byungsei Jun[†]

Division of Advanced Materials Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea
(Received July 7, 2003; Accepted July 15, 2003)

초 록

진동성형용 캐스터블을 제조하기 위하여 ρ -알루미나를 주결합체로 사용하였으며 결합강도를 증진시키기 위하여 나노크기의 점토를 첨가하는 등 특별한 결합기구를 도입하여 기존 캐스터블보다 고밀도, 저기공율 그리고 높은 강도를 얻을 수 있었다. 그리고 적은 수분첨가로 치밀한 캐스터블을 제조할 수 있었다. 캐스터블의 매트릭스 부분을 잘 조절함으로써 치수 안정성을 확보한 기계적 강도 및 침식저항 특성이 개선되었다. 1500°C에서 열처리한 후의 꺾임강도와 압축강도는 각각 92.34 kgf/cm² 및 370 kgf/cm²이고 플라이트 형성을 위한 활성화에너지는 11.47 kcal/mol이다.

ABSTRACT

The special binding mechanism developed provides higher density, lower porosity and higher strengths compared with conventional castables. ρ -alumina was employed as a binder materials and nano-sized clay colloidal was added to enhance the drying strength preparing for the alumina vibrated castable. Lower water requirement for casting results in a denser product. The mechanical properties with dimensional stability and corrosion resistance behaviors have been improved by controlling the matrix compositions of the castable. The modulus of rupture and compressive strength after heat treatment at 1500°C are 92.34 kgf/cm² and 370 kgf/cm² respectively. The activation energy of mullite formation is 11.47 kcal/mol.

Key words : ρ -alumina, Nano-sized clay, Alumina vibrated castable

1. 서 론

진동성형용 캐스터블 내화물은 터빈의 내장재와 내침식성 및 열충격성이 요구되는 전기로의 천정부위와 용융 금속물과 직접 닿는 래들의 벽면까지 사용 영역이 확대되어 왔다.¹⁾ 래들에 사용될 때, 슬래그의 침식이나 용융 금속물의 침식 및 용강로에서 유입되는 용융 금속물에 의한 열적 및 기계적 충격 등 가혹한 조건에서 사용되기 때문에 고온에서 슬래그 침식과 관련한 화학적 안정성과 열충격과 관련한 열적 및 기계적 안정성 확보가 요구되었다.^{2,4)} 그리고 진동성형용 캐스터블의 경우 상온에서 기계적 강도를 발현하기 위해 결합체로서 알루미나 시멘트가 첨가되었는데 이것은 캐스터블의 작업성 확보를 위해 많은 양의 수분이 요구되며, 이로 인해 치밀성이

떨어지고 알루미나 시멘트성분 중 CaO 성분이 미분부 와 비교적 낮은 온도에서 저융점의 화합물을 형성하여 고온 강도가 저하되는 문제점이 있었다.^{5,6)}

이러한 문제점을 개선하기 위해 시멘트 함량을 줄이는 대신 미분부에서 초미분 즉, 마이크로 실리카와 알루미나를 충전제로 사용하여 성형밀도를 높이고, 초미분에 의한 가소성을 다소나마 부여하는 등 일련의 공정 개선을 통해 침식, 열충격 및 마모 저항 그리고 기계적 강도를 증진시키고 치수 안정성 확보에도 기여하였다.⁷⁾

그러나 비록 소량의 알루미나 시멘트가 첨가되더라도 저온에서 CaO 성분에 의해 저융점 화합물을 형성하는 등 고온안정성과 관련한 문제점을 여전히 가지고 있다. 따라서 알루미나 시멘트를 전혀 첨가하지 않은 캐스터블을 개발하기 위하여 인산, 인산염, 몰유리, 염화마그네슘(조셀 시멘트 결합기구)과 무기고분자 등을 사용하였다.⁸⁾ 이러한 화학결합 물질들이 결합체나 응결제로 사용되었지만 고온특성이 그다지 우수하지도 않을 뿐만 아니라 일부는 보관하기도 어렵고 가열할 때 열분해에 의해 조직

[†]Corresponding author : Byungsei Jun
E-mail : bsjun@kyungnam.ac.kr
Tel : +82-55-249-2694 Fax : +82-55-248-5033

이 영성해지는 등 다양한 문제점이 노출되었다.

새로운 결합제 개발을 위해 수경성을 나타내면서도 캐스터블의 결합제로 사용시 고온 특성이나 침식거동에 오히려 장점이 될 수 있는 ρ -알루미나의 사용을 검토하게 되었다.⁹⁾ 그러나 ρ -알루미나는 알루미나 시멘트에 비하여 양생강도가 너무 떨어져 단독으로 사용하기에는 문제가 있다. 이러한 이유로 최근에는 전혀 알루미나 시멘트나 ρ -알루미나 및 화학결합 물질들을 전혀 사용하지 않고 단지 입도 조절과정에서 초미세 분말을 과량 첨가하여 가소성을 증진시켜 건조강도를 증진시키는 등의 새로운 공정을 개발하고 있다.¹⁰⁾ 그러나 이러한 공정은 초미세 분말을 다량 사용함으로써 기본적인 제조비용이 높기 때문에 범용으로 사용하기에는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 알루미나 시멘트를 결합제로 전혀 사용하지 않고 캐스터블의 특성을 향상시킬 수 있는 재료를 고려하여, 결합력은 다소 떨어지지만 캐스터블의 고온특성에 오히려 이점을 가진 ρ -알루미나를 주결합제로 사용하고 보조결합제로 점토를 첨가할 것을 고려하게 되었다. 점토를 나노크기로 분쇄하여 첨가할 경우 극히 소량의 첨가로 건조강도를 증진시킬 수 있을 것으로 기대되고, 또한 매트릭스부분에 알루미노실리케이트 성분으로 인한 저 용점 화합물의 형성을 줄여줌으로써 고온특성을 향상시키고자 하는 것이 연구목적이다.

2. 실험방법

2.1. 출발 원료 및 원료 조합

진동성형용 알루미나 캐스터블을 제조하기 위하여 골재로서 보옥사이트(bauxite)와 미분부는 홍주석(andalusite)을 사용하였고, 주결합제로서 ρ -알루미나(ρ -alumina) 그리고 보조결합제로서 나노크기 점토(kibushi)를 첨가하였다. 작업성 향상을 위해 초미세 분의 마이크로실리카(microsilica)를 사용하였으며, 고온에서 마이크로실리카와의 반응으로 매트릭스 부분에 플라이트상을 형성시키기 위해 초미세 알루미나(alumina)를 사용하였다. 치밀질의 고강도 캐스터블을 제조하기 위하여 연속입도분포를 유지하였으며, 원료 조합 성분을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 물리적 성질 및 침식저항 측정

시편제조를 위하여 $40 \times 40 \times 120$ mm의 금형에 캐스터블을 유입하고 진동을 30초 가하여 시편을 제조한 후 상온에서 24시간 양생하고, 105°C 에서 12시간동안 건조를 하였다. 이때 캐스터블의 작업성을 위해 사용된 수분함량은 6.5 wt%에서 7.2 wt% 사이이다. 그리고 건조된 시편들을 전기로에서 1000°C 까지는 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 씩 일률적으로 승온하였으며, 그 이후 온도는 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 씩 1400, 1450, 그리고 1500°C 의 온도까지 승온한 후 3시간 동안 유지하여 열처

Table 1. Batch Composition for Castable

Materials		Size	Amount of composition (wt%)
Refractory aggregate	Bauxite	+3 mm	13
		1-3 mm	21
		-1 mm	18
	Andalusite	74 μm	29
Alumina ¹⁾		4 μm	4
Microsilica ²⁾		0.5 μm	3
ρ -alumina ³⁾		30 μm	8
Clay ⁴⁾		100 nm	4
NaHMP ⁵⁾			0.1
P-P fiber			0.05

1): AM-21, Sumitomo Co., Japan.

2): SILICA FUME SF-98, Australian Fused Materials Pty Ltd.

3): Showadenko, Japan.

4): Kibushi, Japan.

5): Hexasodium metaphosphate, $(\text{NaO}_3\text{P})_6$.

Table 2. The Chemical Composition of Slag (L/F)

Component	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	MnO
Content (wt%)	14.42	26.43	39.0	18.81	0.67	0.68

리를 행하였다. 각 온도에서 처리한 시편들에 대해 KSL 3505에 의한 방법으로 꺾임 강도를 측정하였다. 그리고, 꺾임 강도를 측정하고 난 후의 시편을 $40 \times 40 \times 40$ mm의 크기로 절단하여 압축 강도를 측정하였다. 각 온도별로 수은침입 기공을 측정기(Mercury intrusion porosimeter; Poresizer 9320, Micromeritics Instrument Co.)를 사용하여 기공율, 기공크기 및 분포를 측정하였다. 슬래그에 대한 내 침식성은 KSL 3130의 기준에 따라 $70 \times 70 \times 65$ mm의 시편에 직경 30 mm, 깊이 35 mm의 도가니 형태로 만들어 Table 2와 같은 조성을 가진 국내 A철강 회사의 래들에서 사용한 슬래그(L/F slag)에 대해 침식율을 측정하였다.

2.3. 상분석 및 미세구조 관찰

온도변화에 대한 매트릭스 부분의 상변화를 관찰하기 위하여 알루미나, 마이크로실리카, ρ -알루미나 및 나노크기 점토분말을 캐스터블 제조에 첨가되는 조성 비율로 혼합한 후, 1400°C , 1450°C , 그리고 1500°C 에서 소성하여 내부표준법(Internal Standard Method)에 의하여 플라이트화 과정을 동정하였다. 형석(CaF_2)을 표준시료를 20 wt% 첨가한 후, 플라이트 생성상 강도(I)와 표준시료 강도(I_s)의 비율(I/I_s)을 계산하였다. 여기서 사용된 X-선 회절분석기는 PW-3017(Philips Co., Holland)를 사용하였다. 그리고, 정량분석에 의해 나타난 결과를 기초로 플라이트가 상전이하는데 필요한 활성화 에너지(activation energy)를 구하였다. 매트릭스에 생성된 플라이트상을 확인하기 위해 각

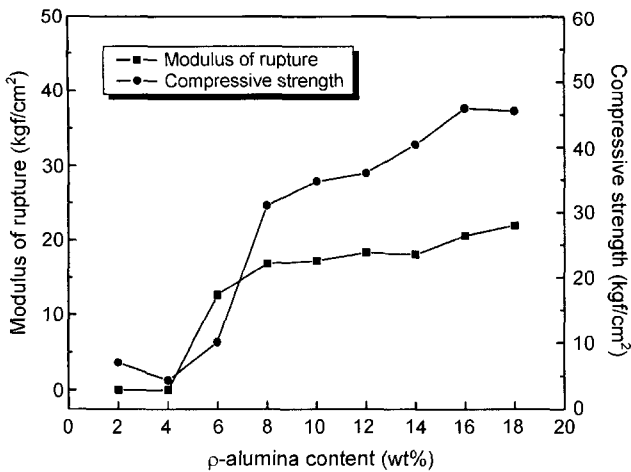


Fig. 1. The compressive strength and modulus of rupture as variation of ρ-alumina content.

각의 온도에서 소결한 캐스터블 시편들의 파단면을 주사 전자현미경(SEM, ABT-32 Topcon, Japan)을 사용하여 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열처리에 따른 강도변화

Fig. 1에는 주골재인 보오크사이트, 미분부인 안달루사이트 그리고 초미세 미분부인 마이크로실리카와 알루미나에 주결합제인 ρ-알루미나의 첨가량에 따른 건조 꺾임강도와 압축강도의 변화를 나타내었다. 이 ρ-알루미나는 알루미나 중간화합물의 한 형태로서 60%의 ρ-알루미나와 소량의 χ-알루미나와 γ-알루미나 및 베마이트(boehmite)로 이루어져 있으며 상온에서 4~5개의 물분자와 결합하여 베라이트(bayerite)를 형성하고, 1~2개의 물분자를 포함하고 있는 베마이트 겔(boehmite gel)을 형성한다.^{11,12)} 이와 같은 수경성의 성질을 가지고 있기 때문에 ρ-알루미나를 알루미나 시멘트 대신 내화물의 결합제로 사용이 검토되고 있다. 따라서 ρ-알루미나를 결합제로 사용하여 충분한 양생강도를 얻기 위해서는 알루미나 시멘트와 마찬가지로 응결이 일어나도록 항온항습조에서 1일 보관한 후 건조하여야 한다.

건조 후 꺾임강도의 경우, ρ-알루미나 첨가량이 증가함에 따라 급증하다가 8 wt%에 이르러 포화상태에 도달되었다. 이와 같은 상태에서 16 wt%까지 계속 첨가하여도 결국 꺾임강도는 22.61 kgf/cm²로서 한국공업규격에 규정한 알루미나 캐스터블 꺾임강도의 최소 요구조건인 25 kgf/cm²를 만족시키지 못하고 있다. 압축강도의 경우 8 wt% 이상으로 첨가할 경우 계속 증가하고 있으나 16 wt%까지 첨가하여도 46.84 kgf/cm²로서 기준치인 80 kgf/cm²에 부합되지 못하였다. 이와 같은 결과를 고려해 볼 때 단지

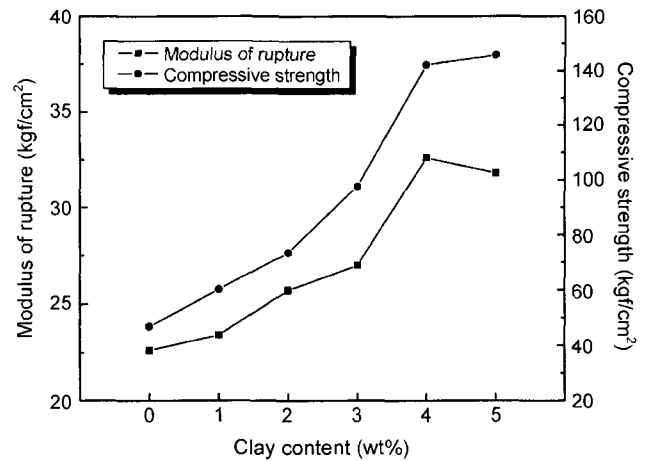


Fig. 2. The variation of compressive strength and modulus of rupture as adding nano-sized clay to the 8 wt% ρ-alumina composition.

압축강도의 상승요인만을 고려하여 ρ-알루미나를 16 wt%까지 첨가할 경우 ρ-알루미나의 수화반응을 위한 과도한 수분 첨가로 기공율을 상승시키게 된다.

Fig. 2에서는 ρ-알루미나 첨가에 의한 꺾임강도와 압축강도의 변화를 동시에 고려해 볼 때 결합제 첨가량을 8 wt%로 고정시키고, 보조 결합제인 나노크기 점토를 첨가하여 건조강도 증진 효과를 나타내었다. 이 경우 점토 첨가량이 증가할수록 강도 값이 증가하다가 4 wt% 정도에서 포화되는 것을 관찰 할 수 있었다. 이 조성에서 꺾임강도와 압축강도가 각각 32.6 kgf/cm² 그리고 142.5 kgf/cm²로서 점토 첨가로 인해 상당히 향상되었으며 또한 이 수치는 KSL 3511의 알루미나질 캐스터블 내화물을 위한 건조강도 요구값을 만족시키고 있다.

일반적으로 알루미나질 캐스터블의 서비스 온도를 고려하여 강도비교는 1500°C까지 시편을 가열하여 상대적으로 비교하고 있다. 따라서 본 연구도 각 시편을 건조 후 1400°C, 1450°C와 1500°C에서 열처리하여 강도값의 변화를 동정하였다. Fig. 3은 각 온도에서 열처리된 시편에 대한 꺾임강도와 압축강도를 나타낸 것으로 1400°C, 1450°C에서 소성된 시편의 경우 각각 꺾임강도가 84 kgf/cm²와 87 kgf/cm²이며 압축강도는 두 시편 모두 350 kgf/cm² 정도로 거의 비슷한 값으로 측정되었으며, 1500°C에서 소성된 시편의 경우 꺾임강도와 압축강도 값이 각각 92.34 kgf/cm²와 370 kgf/cm²로서 알루미나함량이 75~85%인 기존의 고알루미나질 캐스터블의 꺾임강도인 50~100 kgf/cm² 그리고 압축강도 300~400 kgf/cm²와 비교해 볼때 우수한 특성을 나타내고 있다.

3.2. 매트릭스부의 가열변화와 침식

매트릭스 부분 중 마이크로실리카, 초미세 알루미나분말, 나노크기 점토 그리고 ρ-알루미나 등을 1400°C, 1450°C

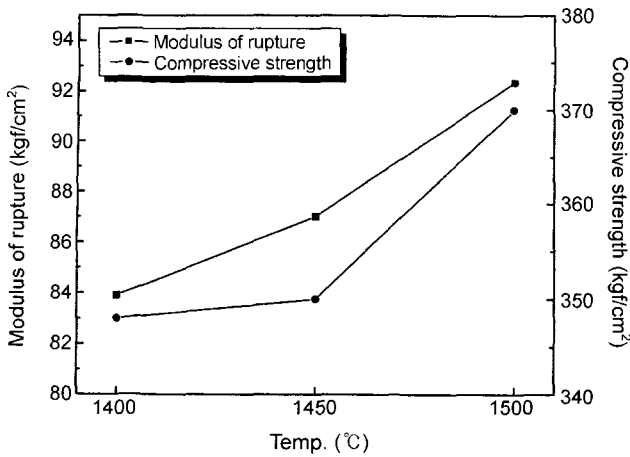


Fig. 3. The compressive strength and modulus of rupture as a function of firing temperature.

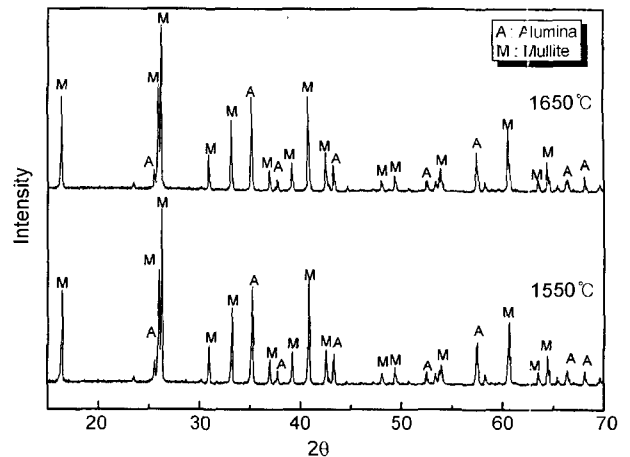


Fig. 6. XRD patterns of the matrix at the elevated temperature from 1550°C to 1650°C.

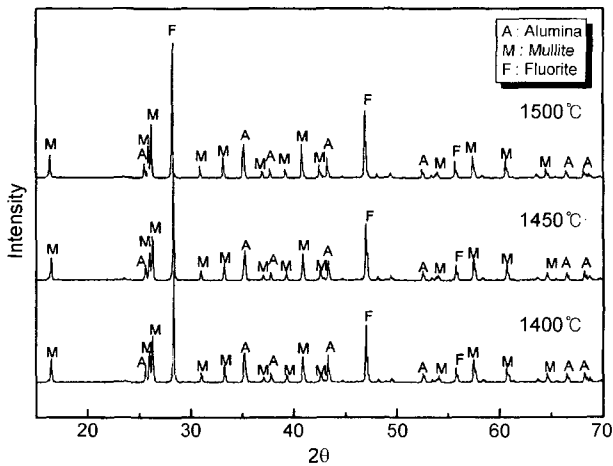


Fig. 4. XRD patterns of the matrix at the various firing temperature.

그리고 1500°C에서 각각 열처리한 후 엑스선회절분석을 행한 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 주로 물라이트와 알루미나로 이루어져 있으며 각각의 온도에서 형성된 매트릭스의 미세구조는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 이들을 일반적인 캐스터블의 서비스온도 보다 높은 온도인 1550°C

와 1650°C로 승온하여 열처리해 본 결과, Fig. 6과 같이 주된 광물상이 물라이트이고 알루미나도 공존하고 있으며 물라이트의 상대적 피크강도가 증가하고 있다.

각각의 온도에 따른 물라이트 생성량을 엑스선회절 분석법의 정량분석 방법인 내부표준법에 의해 형석(CaF₂)를 표준시료로 물라이트와의 상대강도를 계산한 결과를 기초로 물라이트가 상전이하는데 필요한 활성화 에너지를 구한 결과 Fig. 7에 나타내었으며 물라이트가 생성되는데 11.47 kcal/mol의 에너지가 소모되었다. 이와 같은 활성화 에너지 값은 알루미나 시멘트를 바인더로 사용하고 서브 마이크론 크기의 미분부로 조절된 캐스터블¹³⁾보다 낮다.

이들에 대해 격임강도 측정을 해본 결과, Fig. 8에서 보는바와 같이 1550°C의 경우는 1500°C 경우보다 증가폭이 40 kgf/cm² 정도이나 1650°C의 경우는 격임강도가 185 kgf/cm²이고 압축강도가 500 kgf/cm² 정도로서 대단히 높은 값을 나타내고 있다.

용융슬래그에 의한 침식을 줄일 수 있는 방법은 캐스터블의 기공율을 줄이는 것이다. 일반적으로 고급질 캐스터블의 경우 기공율이 17% 내외로서 잘 충전된 내화벽돌 수준까지 개발되고 있다.¹⁴⁾ Figs. 9와 10은 각 온도에

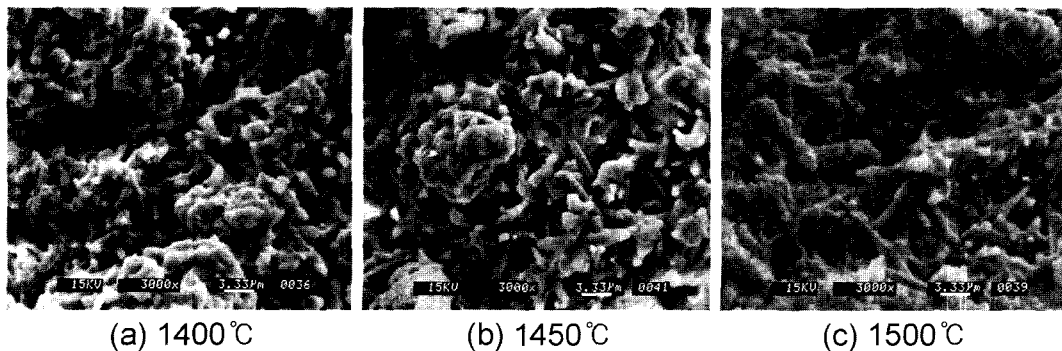


Fig. 5. The microstructure of the matrix after the heat treatment.

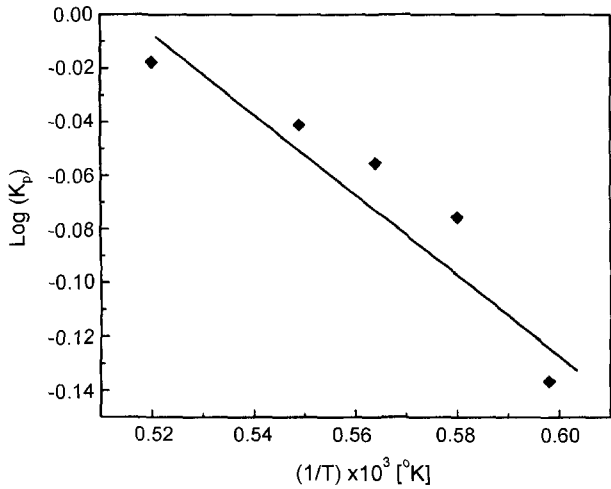


Fig. 7. Activation energy for mullite crystallization of the matrix.

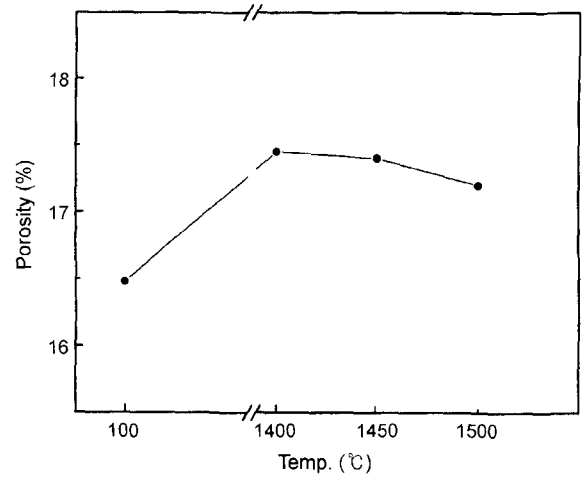


Fig. 9. The open porosity as a function of firing temperature.

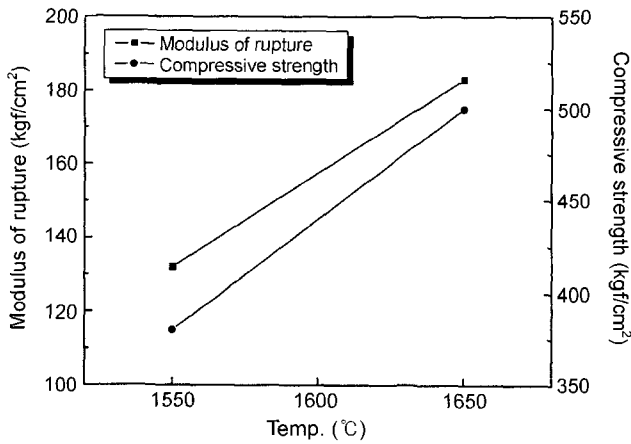


Fig. 8. The compressive strength and modulus of rupture as a function of firing temperature.

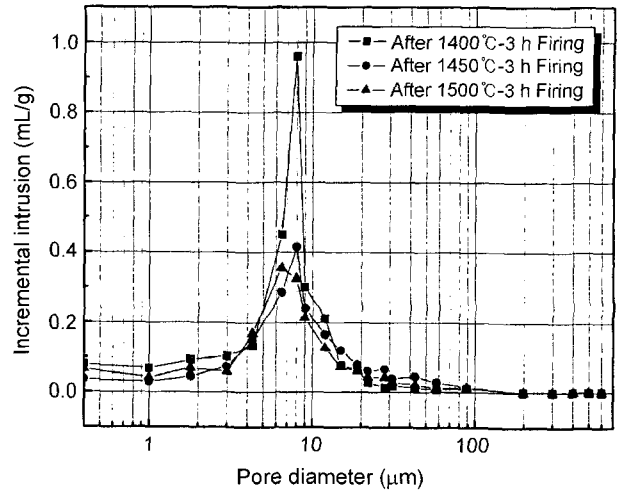


Fig. 10. The pore size distribution as a function of firing temperature.

서 제조된 캐스터블 내화물의 기공율과 기공크기 및 분포를 측정된 결과로서 건조 후에는 기공율이 약 16% 정도 되었고 소성후의 기공율은 약 17% 정도였다. 고온으로 갈수록 기공율이 높은 것은 캐스터블 시공시 수분의 첨가에 의한 부착수분의 탈수와 보오크사이트에 들어 있는 구조수의 탈락에 의한 미세기공의 증가로 보이며, 또한 캐스터블을 가열할 때 ρ -알루미나의 구조수분이 잘 방출되도록 첨가된 파이버(PP-fiber)가 소멸되면서 기공율이 증가한 것으로 추측되어진다. 그리고 캐스터블을 제조하기 위하여 첨가된 수분량이 7.2%로서 고기능성으로 개발된 알루미나 캐스터블의 경우 평균 6.5% 보다 다소 높다. 이는 나노크기로 첨가된 점토분말의 혼합으로 인한 증가 요인이지만 최종 기공율은 거의 비슷한 값으로 초미세분말의 도입에 의한 충전특성 향상에 의한 요인으로 판단된다. 그리고 ρ -알루미나 결합 캐스터블의 유변특성 연구에서 나타낸바 진동성형을 위한 요변특성을 잘 발현함으

로서 충전구조가 향상된 것으로 판단된다.¹⁵⁾

선수축의 결과만 보더라도 1000°C에서 평균 0.2% 그리고 최고온도에서 1.2%로서 치수안정은 우수한 것으로 나타나고 있다. 그리고, 기공크기 및 분포는 열처리 온도가 증가함에 따라 기공의 중심 입경이 줄어드는 경향을 나타내었다.

슬래그 침식 저항 시험을 한 결과를 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 슬래그부분, 침식부분 그리고 내화물 부분으로 침투경로가 점점 진행되고 있으며 이들 각 부분에 대하여 EDS 분석결과 침식거동이 점점 진행됨에 따라 칼시아 함량이 줄어들고 있다. 이는 주로 침식이 슬래그 성분 중 칼시아 성분에 의하여 좌우되는 과정으로 중성인 알루미나 함량이 증가할수록 침식저항이 증가할 수 있다는 증거이다. 그리고 시편의 전체 면적에 대비하여 슬래그에 의해 침식 용해된 부분의 면적은 약 13.0%였으며, 슬래그 시험 중 시편의 변형은 전혀 일어나지 않았고, 특정한

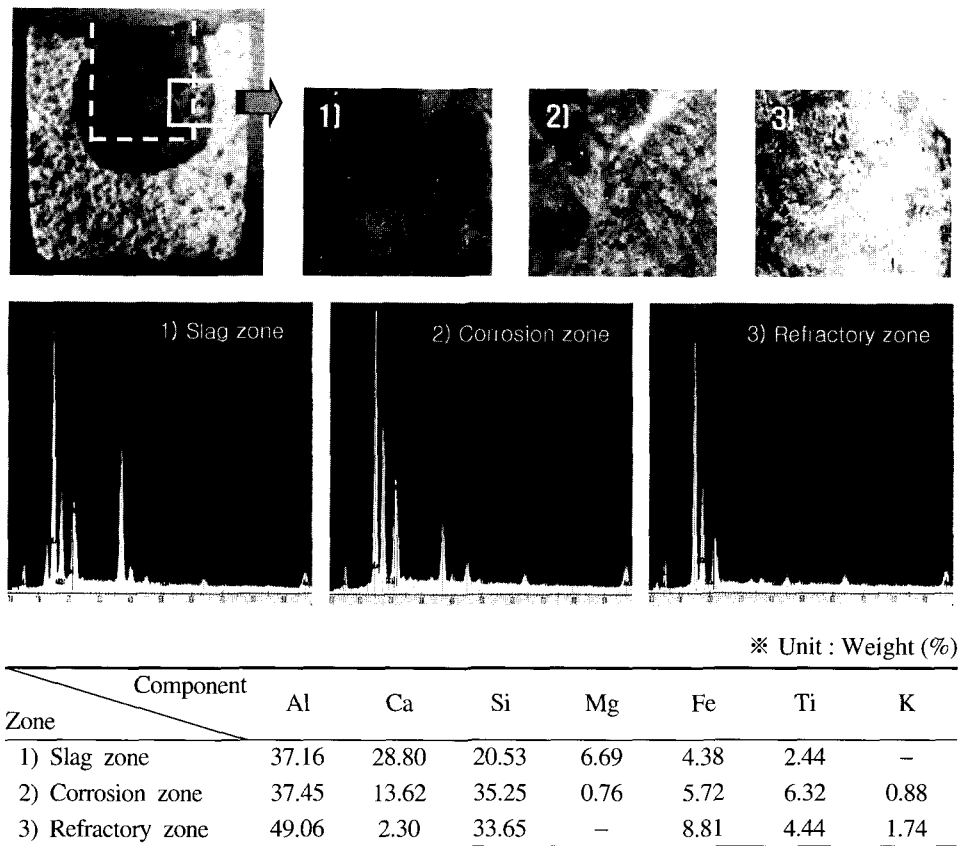


Fig. 11. Dissolution profiles of the matrix after the slag penetration at 1500°C.

부위에 대한 침투성을 보이지 않고 골고루 침식이 일어났다. 이 결과는 ρ -알루미나 결합 알루미늄 캐스터블이 슬래그에 대해 아주 우수한 저항성을 가졌다고 볼 수 있으며, 내화물의 수명을 연장할 수 있을 것으로 기대되어진다.

4. 결 론

1. ρ -알루미나 결합제 첨가량을 8 wt%로 고정시키고, 보조 결합제인 나노크기 점토를 첨가하여 건조강도 증진 효과를 본 결과, 점토 첨가량이 4 wt% 정도에서 포화였으며 이 조성에서 꺾임강도와 압축강도가 각각 32.6 kgf/cm² 그리고 142.5 kgf/cm²로서 이는 KSL 3511의 알루미늄 캐스터블 내화물을 위한 건조강도 요구값을 만족시키고 있다.

2. 소성된 시편의 꺾임강도와 압축강도 값이 각각 92.34 kgf/cm²와 370 kgf/cm²로서 기존의 고알루미나질 캐스터블의 꺾임강도와 비교해 볼때 우수한 특성을 나타내고 있다.

3. 플라이트로 상전이하는데 필요한 활성화에너지를 구한 결과 11.47 kcal/mol의 값을 나타내고 있다.

4. 슬래그에 의해 침식 용해된 부분의 면적은 시편의 전체 면적에 대비하여 약 13.0%로서 슬래그에 대한 저항성이 크다고 볼 수 있으며, 내화물의 수명을 연장할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 경남대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J. Homeny and R. C. Bradt, "Aggregate Distribution Effects on the Mechanical Properties and Thermal Shock Behavior of Monolithic Refractory Systems," *Adv. in Ceram.*, **13** 110-30 (1985).
2. Y. Oguchi and J. Mori, "Wear Mechanism of Castable for Steel Ladle," *Refractories(Japan)*, **44** [5] 255-62 (1992).
3. B. Nagai, O. Matumoto, and T. Isobe, "Development of High Alumina Castable for Steel Ladle(Part I. A Few Results on Spinel Formation in the Alumina-magnesia Castable)," *Refractories(Japan)*, **40** [5] 284-89 (1988).
4. K. C. Park, Y. S. Choi, M. H. Han, Y. J. Chang, and K. W. Park, "A Study on Steel Wire Fiber Reinforced Refractory Castable," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **17** [2] 69-74 (1980).
5. S. H. Cheon, K. H. Hwang, and B. S. Jun, "Preparation and Properties of Mullite Bonded Alumina Castable," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36** [12] 1296-302 (1999).
6. G. Maczura, J. E. Koparda, and F. J. Rohr, "Calcium Aluminate Cements for Emerging Castable Technology," *Adv.*

- in *Ceram.*, **13** 285-301 (1985).
7. T. Eguchi, I. Takita, J. Yoshitomi, S. Kiritani, and M. Sato, "Low Cement Bonded Castable Refractories," *Refractories (Japan)*, **40** [4] 200-17 (1988).
 8. A. R. Studart, Z. Gallo, and V. C. Pandolfelli, "Citric and Polyacrylic Acids as Dispersants for High Alumina Refractory Castables," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **81** [4] 36-44 (2002).
 9. A. R. Studart, W. Zhong, and V. C. Pandolfelli, "Rheological Design of Zero-cement Self-flow Castables," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **78** [5] 65-72 (1999).
 10. M. D. Innocentini, A. R. Studart, R. G. Pileggi, and V. C. Pandolfelli, "How PSD Affects Permeability of Castables," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **80** [5] 31-6 (2001).
 11. N. Jovanovic, T. Novakovic, J. Janackovic, and A. T. Baricevic, "Properties of Activated Alumina Obtained by Flash Calcination of Gibbsite," *J. Coll. Interface. Sci.*, **150** [1] 36-41 (1992).
 12. Z. J. Galas, S. Janiak, W. Mista, J. Wrzyszczyk, and M. Zawadzki, "Morphological and Phase Change of Transition Alumina During their Rehydration," *J. Mat. Sci.*, **28** 2075-78 (1993).
 13. S. H. Cheon, K. H. Hwang, and B. S. Jun, "Preparation and Properties of Mullite Bonded Alumina Castable," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36** [12] 1296-302 (1999).
 14. E. P. Weaver, R. W. Talley, and A. J. Engel, "High Technology Castables," *Adv. in Ceram.*, **13** 219-29 (1985).
 15. S. H. Cheon and B. S. Jun, "Effects of the Ultrafine and Nano-sized Clay on Rheological Behavior of the Matrix of ρ -alumina Bonded Castable," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [7] 632-36 (2003).