

MgO와 Al의 테르밋 반응생성물이 첨가된 MgO-C계 내화재료의 용손 기구

최태현 · 전병세

경남대학교 무기재료공학과

(1996년 5월 4일 접수)

Wear Mechanism of MgO-C Refractory with Thermite Reaction Products of MgO and Al

T. H. Choi and B. S. Jun

Dept. of Inorg. Mater. Eng., Kyungnam Univ

(Received May 4, 1996)

요 약

MgO-C계 내화벽돌의 용강과 슬래그에 대한 침식저항, 내산화성 및 기계적 스포링등의 특성을 개선하기 위하여 MgO와 Al 혼합물의 테르밋 반응생성물을 첨가하였다. 침식시험한 결과 테르밋 반응생성물이 첨가된 벽돌(MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계)은 염기도(CaO/SiO₂)가 3.3인 슬래그에 대해 MgO-C계나 MgO-C-Al계 보다 침식율이 작게 나타났다. MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계에서 미반응 Al은 산화 방지의 효과를 나타내었으며, MgAl₂O₄ 스피넬은 고융점과 슬래그에 대한 내침식성이 우수하고 AlN의 높은 열전도율과 낮은 열팽창성으로 열적특성이 우수하였다. MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계의 열간 곡강도는 1400°C에서 210 kg/cm²이고 내산화도 시험은 900°C에서 12%의 질량 감소가 되었다.

ABSTRACT

Thermite reaction products of MgO and Al were added to MgO-C refractory to improve the properties of corrosion against the attack of slag, oxidation and mechanical spalling. Corrosion rate of MgO-C-MgAl₂O₄ spinel refractory at the ratio of 3.3 (CaO/SiO₂) slag was smaller than that of MgO-C and MgO-C-Al refractory. The excellent corrosion resistance of the MgO-C-MgAl₂O₄ spinel refractory against the slag attack was appeared by Al and MgAl₂O₄ spinel with high melting point and corrosion resistance, and the high thermal conductivity and low thermal expansion of AlN. Hot M.O.R at 1400°C and the resistance of oxidation weight loss at 900°C were 210 kg/cm² and -12%, respectively.

Key words: Thermite, MgO-C, Refractory, Corrosion, Spalling

1. 서 론

최근 철강산업은 수요증대 및 제품 고급화의 요구로 설비의 대형화와 가혹해진 작업조건 등으로 인해 내화물 수명에 대한 개선이 요구되고 있다. 특히 아크 전기로 및 레이드(ladle), 돔(dome)형의 천정, 출강로의 castable, tundish^{1,2)} 등은 가혹한 조건 속에서 사용되고 있으며 철강정련 방법도 염기성법에 의해 행하여지고 있어 내화물의 수명은 점차 저하되어지고 있다. 마그네시아 내화물은 대표적인 강염기성 내화물로 내화도가 높고 각종 용융금속 및 슬래그에 대한 내침식성 내마모성이 우수하다. 대부분 마그네시아-카본(MgO-C)질 내화 벽돌³⁾의

형태로 제조되며 마그네시아는 고융점과 내마모성 등의 특성으로 인해 주 골재로 사용되어지고 카본은 침식저항과 높은 열전도율의 특성이 있어 이들이 결합되어질 때 내스폴링성이 증대된다^{4, 5)}. 그러나 카본을 함유한 내화물의 단점은 산화저항성이 약하므로 마그네시아-카본질 내화벽돌은 사용중 카본의 열간 산화현상이 발생하여 카본이 급격히 소모되는데 Yamaguchi⁶⁾는 이를 보완하기 위해 SiC와 Al을 첨가하여 산화방지의 방향을 제시하였다. 내화물 사용중 SiC는 SiO 증기를 발생하고 CO 가스와 반응하여 매트릭스에 SiO₂를 석출함으로 카본의 산화를 방지하고, Al은 고온의 용강으로 인해 액상으로 CO 가스와 반응하여 벽돌표면에 알루미늄이나 보

호층을 형성하여 카본의 산화방지에 도움이 될 수 있다고 보고하였다. 이를 근거로 Shibata등¹⁰⁾은 SiC, Al을 첨가하여 내화벽돌로 제조하여 실험한 결과 기계적, 열적 성질이 우수함을 입증하였고 Kyoden등⁹⁾은 Al, Al-Mg 혼합물을 첨가하여 물성을 향상시키기 위해 연구하였다. 그러나 SiC는 산화되어 SiO₂로 되며 SiO₂ 양이 증가할 수록 구조적 스펀링이 문제점으로 발생되었고 그의 산소와 친화력이 큰 금속 Al, Si 등^{10,11)}을 소량 첨가하여 양호한 결과^{12,13)}를 얻을 수 있었으나 Al, Si 등은 약 1000°C에서 Al₄C₃나 SiC 등과 같은 탄화물로 되나 1000°C가 넘으면 산화반응 기구로 나타난다. 용강의 온도가 일반적으로 1350°C 이상임을 감안하면 이러한 금속을 사용하여 산화현상을 억제하기엔 많은 어려움이 따른다. 결국 Al 첨가의 경우 생성된 알루미늄은 MgO와 결합하여 최종적으로 MgAl₂O₄ 스피넬화 된다. 래이들을 내화재료에서 슬래그 라인부분은 용손이 가장 심한 부분이다. 이 경제영역에서는 탈탄부위 침식기구가 내화물 수명을 결정함으로 탈탄후의 미세구조를 제어할 필요가 있다. MgO-C계 내화물에서 카본이 산화되고 나면 MgO 골재 주변에는 큰 공간이 남고 이 부분으로 슬래그가 침투하여 화학침식작용이 진행된다. 따라서 침식이 심한 접합부분의 내화벽돌은 화학적 안정성과 탈탄 후 슬래그 침투 저지를 위한 입자충진 특성 그리고 열충격저항과 섯음성 등을 고려하여 설계되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 연소합성법에 의한 MgO와 Al 혼합물의 테르밋반응 생성물인 MgAl₂O₄, 스피넬, AlN과 미반응 Al 및 MgO를 MgO-C계 내화물에 첨가제로 사용하였다. SHS 공정 중 테르밋 반응은 이론적으로는 합성이 완결될 수 있으나 실제로 미반응물질과 공기중 반응사 반드시 AlN이 생성된다. 합성물이 내화벽돌에 첨가되면 Al은 내산화성 증진 등의 효과를 높여주리라 기대되고 특히, 중간 생성물인 AlN은 열전도도가 높아 열적, 기계적 스펀링성은 매우 우수하리라 예견되어지며, MgAl₂O₄, 스피넬^{15,16)}은 고용점, 내마모성 등의 특성으로 열기성 슬래그나 산에 대한 침식 저항이 우수하다. 이러한 특성의 기대로 MgO-C계 내화물에서 첨가물에 의한 내산화성, 내식성 등의 침식특성에 대하여 연구 하였다.

2. 실험방법

출발물질로는 MgO(중국산)와 C(Junsei Co.)분말 그리고 Al(D.S.P Gr Reagent)을 사용하였으며 순도는 Table 1에 나타내었고 입도분포는 Table 2에 나타내었다. 첨가

Table 1. Chemical Composition of Starting Materials

Materials	Chemical Composition (wt.%)						Ig-loss
	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C	
Fused MgO	99.03	0.26	0.54	0.08	0.02		tr.
Graphite						99.06	tr.
Aluminium	Al	Si	Cu	Fe	N		Ig-loss
	99.0	0.5	0.05	0.3	0.008		tr.

Table 2. Particle Size Distribution of MgO, C and Al

Materials	MgO (%)	C (%)	Al (%)
Particle size (μm)			
5660~4000	0.99	.	.
4000~3360	7.17	.	.
3360~2380	5.16	.	.
2380~1680	14.31	.	.
1680~1000	22.44	.	.
1000~590	14.65	.	.
590~350	8.64	.	.
350~250	5.56	64.40	.
250~125	5.14	27.30	8.12
125~74	1.95	2.42	54.72
74~	14.00	5.88	37.16

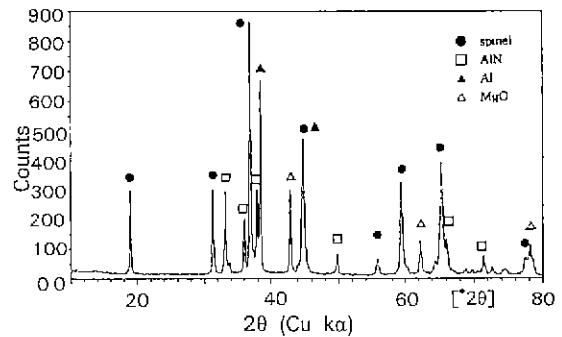


Fig. 1. XRD patterns of SHS reaction spinel.

제는 테르밋 반응생성물¹¹⁾을 사용하였는데 조성은 Fig. 1에 나타낸 바와 같고 내부표준법에 의해 정량분석을 해본결과 spinel은 51.2%, MgO는 20.5%, Al은 14.6%, AlN은 13.7%이다. 그리고 SEM 관찰 결과 평균입도는 0.5~0.6 μm이다. 원료배합은 용융 MgO 그리고 C의 함량을 20% 고정된 기본조성의 MgO-C계와 산화방지용

으로 금속 Al을 4 wt.% 첨가된 MgO-C-Al계 조성 그리고 테르밋 반응 생성물 중에 미반응 Al이 4 wt.%가 첨가되도록 조합하여 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 조성으로 하였다. 결합제로 열경화성 수지(phenol resin)를 3.5 wt.% 첨가시켜 혼련 후 150 ton friction press에서 성형하였고 300°C에서 가열 건조하였으며 Table 3에 각 별들의 기본물성 측정값을 나타내었다. 열간에서 꼭강도 시험을 위해 230×114×41 mm 치수로 성형하고 40×40×160 mm의 치수로 가공하여 가스분사로의 환원분위기에서 분당 15°C씩 승온시켜 1500°C까지 3점꼭강도를 측정하였으며, 산화정도를 조사하기 위해 시험편을 500°C에서 200°C 간격으로 1500°C까지 1시간 유지 후 냉각하여 산화율을 측정하였다. 또한 열적특성을 살펴보기 위해 열팽창계수 및 열전도도를 측정하였다. 내화물의 침식시험을 위한 시험용 슬래그는 아크 전기로 조업중 생성된 것을 이용하였으며 조성은 Table 4와 같고 염기도(CaO/SiO₂)의 비가 약 3.3이다. 내화물에 대한 침식시험은 230×114×41 mm 치수로 성형하고 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 가공(A)하였으며 침식지수를 비교하기 위해 각각의 시험편을 정치(B)한 후 고주파 유도용해로(富士電液工業株式會社 : FBT-50 R, Japan)에서 행하였다. 침식시험은 1650°C 온도에서 3시간 동안 유지한 후 침식상태를 조사하였다. 슬래그와 반응성을 관찰하기 위해 전자현미경과 X-선 분석기를 이용하여 미세구조와 결정상을 조사하였다. 실험에 대한 전체 공정도는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3. Properties of MgO-C, MgO-C-Al, MgO-C-MgAl₂O₄ spinel Bricks Dried at 300°C for 5 hrs.

Properties Bricks	Bulk density	Absorption (%)	Compressive strength (kg/cm ²)	M.O.R (kg/cm ²)
MgO-C	2.75	1.54	395	163
MgO-C-Al	2.82	1.53	400	175
MgO-C-MgAl ₂ O ₄ spinel	2.89	1.48	405	175

Table 4. Chemical Composition of Slag

Chemical comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CaO/SiO ₂
wt.%	16.02	21.38	0.26	52.71	9.03	0.34	0.13	0.01	0.24	0.10	3.29

3. 결과 및 고찰

침식시험은 슬래그의 염기도와 매우 밀접한 관계가 있으므로 제강공정의 환원 정련작업에서는 환원 슬래그를 만들어 주기 위해 강제 탈산법을 주로 이용하며 생석회 등을 강제로 투입시켜 슬래그의 유동성을 부여한다.

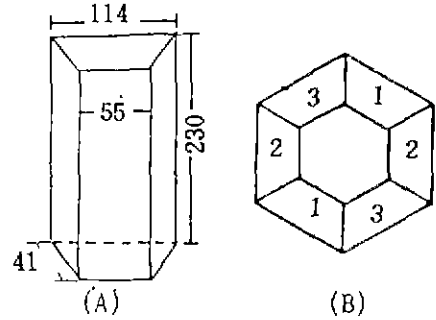


Fig. 2. Specimen for high frequency induction furnace. (A) specimen size/mm, (B) setup of specimens

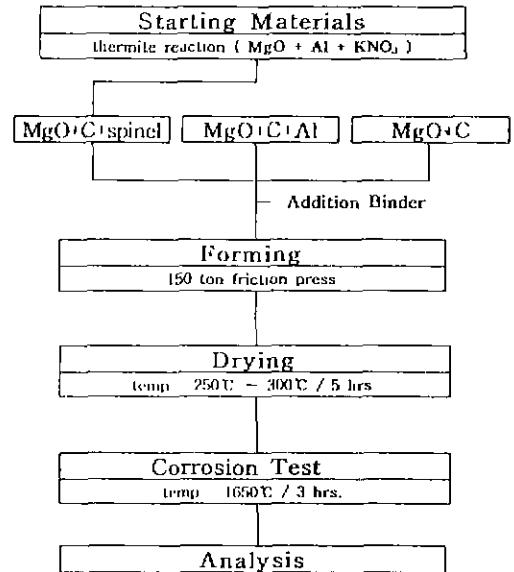


Fig. 3. Experimental procedures.

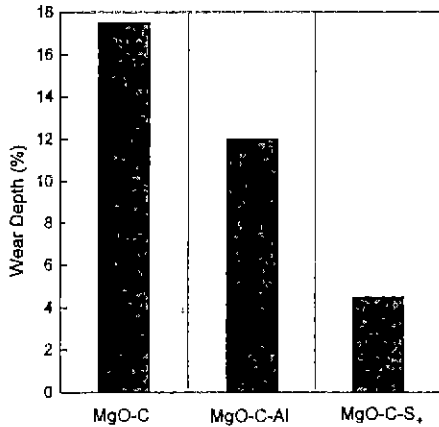


Fig. 4. Wear depth of specimen after corrosion test at 1650°C/3 hours.



Fig. 5. Results of brick after corrosion test. (A) MgO-C, (B) MgO-C-Al, (C) MgO-C-MgAl₂O₄ spinel

실제로 산성의 슬래그에서 염기도가 3 정도로 상승하였을 때 사용수명은 약 40% 이상을 상회하여 60~70회에서 100회 내외로 증가하였다. 이때의 공정은 산화정련을 하여 탄소의 적정수준과 용강의 최고온도를 유지하여 불순물이 많이 함유된 슬래그를 제거 후 환원정

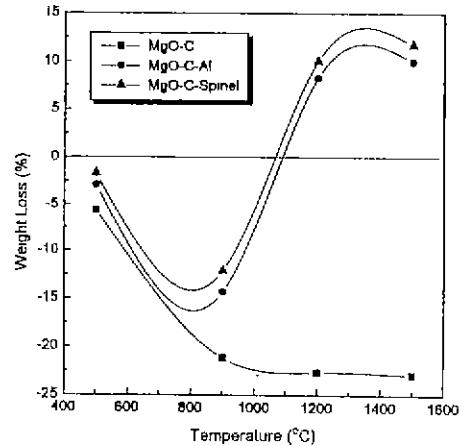


Fig. 6. Weight loss of bricks after oxidation test in air.

련에서 용강중의 탈황 및 탈산을 행한다. 이 과정에서 내화물의 용손은 가장 가혹하게 침식되어지며 이러한 탈황속도는 황의 확산에 의해 비례하므로 유동성이 양호한 염기성 슬래그로 만들어 주어야 한다. 시험편을 고주파유도용해로에서 1650°C에서 3시간 침식 시험하여 침식지수를 측정된 결과 Fig. 4에 나타낸 바 MgO-C계 시험편에서 약 17%의 용손율을 보이고 MgO-C-Al계의 경우 약 12%의 용손율을 보이고 있으며 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계의 경우 약 4%의 용손율을 보였다. 실제 용손 상태를 관찰하기 위해 Fig. 5에 나타내었다. 슬래그에 대해 내화물의 손상이 심하게 일어난 부위는 용강과 슬래그의 가동면(working zone)부분으로 MgO-C계 시험편 (A)에서 침식이 심하게 나타나고 있는데 카본은 높은 열전도율의 특성으로 용강과 결합시 젖음성(wetting) 저항성이 우수하여 네스폴링성이 증대되어지지만 낮은 산화저항성으로 충분한 특성을 나타내지 못한다. Fig. 6과 같이 산화도 시험에서 나타낸 바 MgO-C계 시험편은 900°C에서 급격한 산화현상으로 20%의 중량 감소를 보여주고 있다. 또한 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 MgO-C계는 저온에서의 강도값은 높지만 온도가 상승할 수록 특히 300~400°C에서 강도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다 이는 resin의 소실로 인한 강도 저하의 요인 효과라고 사료되어진다. 그리고 온도가 상승할 수록 반응은



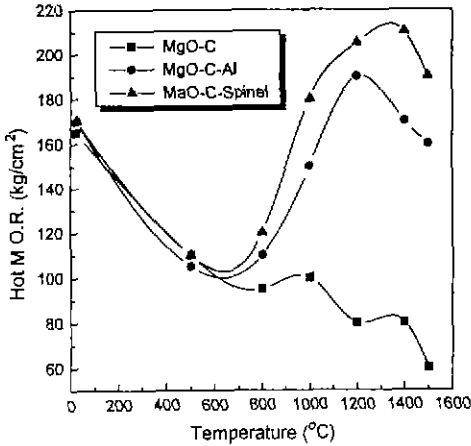


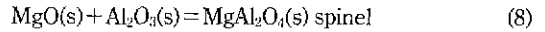
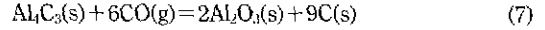
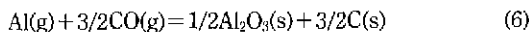
Fig. 7. Hot modulus of rupture.



로 C이 산화되면서 강도 값이 낮아진다. 또한 열기도 상승시 첨가된 생석회등과 반응되어 MgO 입자의 경계면에서 저융점 화합물로 생성되고 슬래그로 입자들이 용출되어 침식 현상이 높아졌다고 예상된다. Fig. 5의 MgO-C-Al계 시험편 (B)에는 Al이 첨가되어 용손이 적게 나타나고 있는데 이는 우선 Al 첨가로 인한 탄소의 산화방지효과로 설명할 수 있다. 이는 Al이 산화방지제로 작용한 것으로 Al의 산화방지 효과의 보고¹⁹⁾와 일치한다. Fig. 6과 같이 산화도 시험에서 나타난 바 MgO-C-Al계의 시험편은 900°C까지 무게 감량을 보여주지만 점점 중량이 증가되는데 이는 산화방지제로 첨가한 Al 또는 AlN이 탄소의 산화를 방지하고 Al과 AlN의 산화로 인한 무게 증가의 요인이라 사료된다. Fig. 7에서 나타난 바 고온 강도가 1200°C에서 최고치를 나타내고 이상의 온도에서 완만한 차이를 보여주고 있는데 이는 Al이 Al₂O₃ 및 Al₂C₃ 같이 상변태 되고 MgO 골재 사이에 충전되어 기계적 강도를 증가시켜주는 요인으로 사료되며 반응식은 다음과 같다.



(5) 식의 반응은 약 1000°C에서 Al₂C₃ 등과 같은 탄화물을 만들지만 1000°C가 넘으면 2C + O₂ → 2CO의 산화반응 기구로 나타난다. Al은 CO 가스와 반응하여 Al₂O₃를 생성하며 (5)식에서 반응된 Al₂C₃가 CO와 반응하여 (6)식과 같이 Al₂O₃로 된다. 반응식은 다음과 같으며



최종적으로 (8)식과 같이 MgAl₂O₄ spinel로 된다. 그리고 1000°C 이상에서는 Al 첨가시 팽창경향이 커지므로 가동면과 배면사이의 온도구배에 의한 열적스프링 현상으로 경계면에서 용강 및 슬래그의 침입에 대한 저항성이 적다고 보고¹⁹⁾된 바 있다. Fig. 5의 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 시험편 (C)에서는 용손율이 상대적으로 미비하였다. MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 벽돌에 흡착된 슬래그 성분은 벽돌의 경계를 침투하여 확산 용해를 하며 특히 CaO, Al₂O₃, SiO₂ 등으로 형성된 슬래그에 의해 침식된 것으로 나타났다. 특히 가동면 부근에서 치밀층 형성은 내부의 MgO가



반응으로 Mg가 가동면에서 Fe 산화물들과 반응하여 2차 periclase 치밀층(Mg + FeO → MgO + Fe)으로 만들어져 슬래그의 침입을 방지하여 내침식 저항을 향상시킨다고 보고¹⁴⁾ 되었다. 따라서 용손이 가장 적은 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 시험편에 대하여 조직상태를 자세히 검토하고자 Fig. 8에 나타난 바 용강부위, 반응면, 내화물로 구분하여 관찰하였다. 용강과 내화벽돌과의 반응면에서는 내화물이 함유된 현상을 나타내고 있는데 이는 용강과 내화물 사이에서 산화반응으로 간주될 수 있다. MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계의 경우 첨가제에 미반응 Al이 존재하여 열간반응에서 MgO-C-Al계의 경우와 같이 낮은 산화율을 나타낸다. 그리고 고온강도는 Fig. 7에서 보는 바와같이 1400°C에서 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계가 가장 높은 강도값을 보여주고 있으며 이들의 결과는 탈탄 후 MgO 골재 사이에 첨가된 미립자의 테르밋 반응 생성물이 스피넬화 되어 결합력과 충진율을 높여주기 때문으로 사료된다. 그러나 테르밋 반응으로 합성한 MgAl₂O₄ 스피넬에서 중간 생성물인 AlN은 용강의 열간반응에서 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. AlN은 열전도율(170 W/m·K)이 알루미늄(20 W/m·K)보다 높은 특성을 가지고 있고 열팽창 계수(4 × 10⁻⁶ /°C)는 매우 작으며 용강과 내화물의 계면에서 쉽게 젖음이 발생하지 않아 고온의 용강과 반응시 열화를 최소화할 수 있는 열충격 저항성을 가지고 있다. AlN은 CO와 반응하여 2AlN + 3CO = Al₂O₃ + 2N + 3C로 되어 내산화성 증진 특성을 향상시킨다. 따라서 AlN이 포함된 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 벽돌이 가스와의 화학반응과 용강 및 슬래그에



① Hot face →← ② Decarburized layer →← ③ Original texture

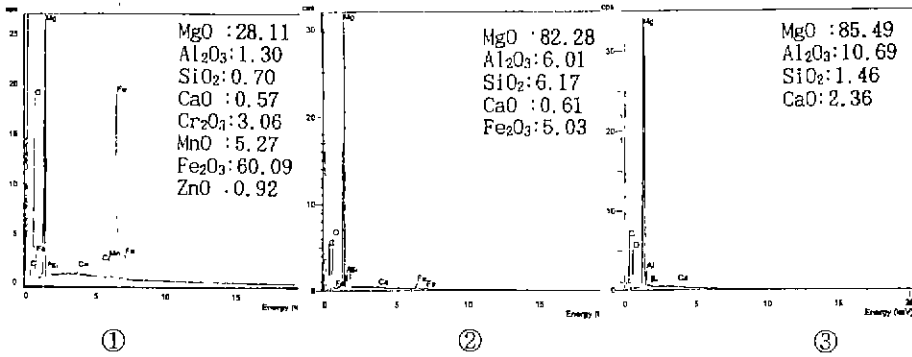


Fig. 8. SEM microstructure and EDAX of MgO-C-MgAl₂O₄ spinel brick.

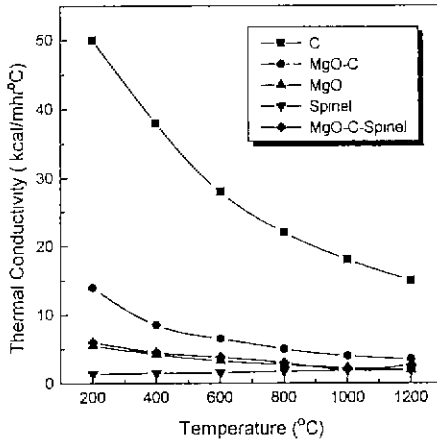


Fig. 9. Thermal conductivity of MgO-C bricks.

대한 침식저항성이 높게 나타났다고 사료된다. Fig. 9에서 각각 벽돌의 열전도도 측정시 MgO-C계 벽돌이 가장 우수하나 사용중 산화되는 문제점을 안고 있고 MgO-C-

MgAl₂O₄ spinel계 벽돌이 양호하게 나타났으며 이러한 특성들이 Fig. 5의 용손시험 결과를 뒷받침 하고 있다.

4. 결 론

MgO-C계 기본조성에 Al 그리고 MgO와 Al의 테르밋 반응생성물을 첨가하여 침식저항 대한 실험 결과 테르밋반응 생성물을 첨가한 MgO-C-MgAl₂O₄ spinel계 벽돌이 MgO-C, MgO-C-Al계 벽돌보다 우수하였다. 이는 내산화 시험결과 테르밋반응 생성물중의 Al과 AlN이 카본의 산화를 방지하며, AlN이 열전도도가 높아 기계적 스푼링저항성의 증가에 의한 요인으로 사료된다. 또한 열간 곡강도값을 측정하여 본 결과 온도가 높아질 수록 MgO-C계 벽돌에서는 급격히 낮았으며, Al이 첨가된 벽돌은 증가하였고, 테르밋반응 생성물이 첨가된 벽돌은 1000°C에서 210 kg/cm²로서 MgO-C계나 MgO-C-Al계 벽돌보다 높게 나타났다. 이러한 요인효과가 내침식성을 향상시킨 것으로 분석된다

REFERENCES

1. S. Sakaki and H. Hashimoto, "Gas Permeability of Low Cement Castables," *Refractories, Japan*, **41**(8), 443 (1989).
2. N. Hiroki, Y. Sato, H. Joguchi and M. Uchida, "Application of Alumina Spinel Castable to Teeming Ladle," *Refractories, Japan*, **42**(10), 516 (1990).
3. Hiroshi Yasui, "Magnesia-Carbon Bricks," *Refractories, Japan*, **47**(4), 177-186 (1995).
4. Hiroshi Yasui, Satoshi Hayashi, Kazuo Nonobe, Hirokuni Takahashi, and Akira Watanabe, "Evaluation of Mechanical properties of MgO-C Brick," *Refractories, Japan*, **46**(9), 454 (1994).
5. 김의훈, 오영우, 이철수, 김종성, 김종희. "전로용 MgO-C 질 내화벽돌의 손상요인," 한국요업학회지, **23**(1), 51-59 (1996).
6. Akiea Watanabe, Hirokuni Takahashi, Shigeyuki Takanaga, Nobuo Goto, Osamu Matsuura and Syoji Yoshida, "Thermal and Mechanical Properties of Al_2O_3 -MgO-C Brick," *Refractories, Japan*, **41**(10), 537 (1989).
7. Akira Yamaguchi, "Behaviors of SiC and Al added to Carbon Containing Refractories," *Taikabutsu*, **35**(11), 617-622 (1983).
8. Hidetoshi Shibata, Mitsuru Kondo and Shigeki Kashio, "Study of Wear Mechanism of Bottom Refractories for Torpedo Ladle," *Taikabutsu*, **36**(4), 193-201 (1984).
9. Hiroshi Kyoden, Hideaki Nishio, Katsunori Ito and Syuzo Horita, *Taikabutsu*, **38**(4), 242-250 (1986).
10. Hirobumi Ninomiya, *et al.*, "Effect of Si on Corrosion and Thermal Shock Resistance of Trough Material," *Refractories, Japan*, **3**(11), 1 (1990).
11. Akira Watanabe, Hirokuni Takahashi, Shigeyuki Takanaga, Nobuo Goto, Kenji Anan, and Mineo Uchida, "Behavior of Different Metals Added to MgO-C Bricks," *Refractories, Japan*, **38**(11), 740 (1986).
12. Ichikawa Kenji, Hideaki Nishio, Osamu Nomura and Yasuhiro Hoshiyama, "Effects of Aluminum on Oxidation of MgO-C Bricks," *Refractories, Japan*, **46**(6), 312 (1994).
13. Seiji Hanagiri, Toshiya Harada, Seiji Aso, Shigeru Fujihara, Hieosho Yasui, Shigeyuki Takanaga, Hirokuni Takahashi and Akira Watanabe, "Effects of Addition of Metal and CB to Magnesia Carbon Brick for Converter," *Refractories, Japan*, **44**(9), 470 (1992).
14. 최태현, 전병세, "SHS법에 의한 Magnesia-Alumina Spinel 제조와 특성," 한국요업학회지, **33**(2), 235-241 (1996).
15. W.T. Bakker and J.G. Lindsay, "Reactive Magnesia Spinel Preparation and Properties," *J. Am. Ceram. Soc.*, **46**(8), 381-387 (1963).
16. Louis Navias, "Preparation and Properties of Spinel Made by Vapor Transport and Diffusion in the System MgO- Al_2O_3 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, **44**(9), 434-46 (1961).
17. S.M. Kim, P.S. Nicholson and W.K. Lu, *Cera. Bull.*, **57**(7), 649 (1978).
18. H.J. Kim, I.S. Kim, and S.W. Lee, "Properties of Castable Refractories Containing Metallic Al Powder," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **27**(8), 877-882 (1990).
19. Akira Watanabe, Hirokuni Takahashi, Toshiyuki Matsuki, and Masashige Takahashi, "Some Properties of Magnesia-Carbon Bricks Containing Mg and Al," *Refractories, Japan*, **36**(12), 2 (1984).