

재활용원료의 첨가량과 입경에 따른 재생 Al_2O_3 세라믹스의 소결 특성

신대용[†] · 한상목* · 김경남**

강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터

*강원대학교 신소재공학과

**삼척대학교 신소재공학과

(2001년 10월 8일 접수; 2001년 11월 19일 승인)

Sintering Properties of Renewed Al_2O_3 Ceramics with Particle Size and Addition Amount of Recycling Powder

Dae Yong Shin[†], Sang Mok Han* and Kyeong Nam Kim**

Research Center for Advanced Mineral Aggregate Composite Products, Kangwon Nat'l University, Chuncheon 200-701, Korea

*Department of Advanced Materials Engineering, Kangwon Nat'l University, Chuncheon 200-701, Korea

**Department of Advanced Materials Engineering, Samchok Nat'l University, Samchok 245-711, Korea

(Received October 8, 2001; Accepted November 19, 2001)

초 록

재활용 Al_2O_3 분말인 구조재료용 Al_2O_3 세라믹스의 분쇄분말과 폐 Al_2O_3 흡착제의 첨가량과 입경에 따른 재생 Al_2O_3 세라믹스의 소결특성을 조사하였다. $1,650^\circ C$ 에서 5시간 소결한 순수 Al_2O_3 시편을 급랭하여 분쇄한 -40 과 $+40 \mu m$ 의 Al_2O_3 분말과 폐 Al_2O_3 흡착제를 순수한 Al_2O_3 분말에 10~50 wt% 첨가한 후, 재소결하여 재생 Al_2O_3 세라믹스를 제조하였다. 재활용 Al_2O_3 분말의 첨가량과 입경에 관계없이 소결온도가 증가함에 따라 시편의 밀도와 3점곡강도는 증가하였으나, 동일 소결온도에서는 재활용 Al_2O_3 분말의 첨가량이 증가함에 따라 밀도와 3점곡강도는 감소하였다. ~30 wt%의 Al_2O_3 분쇄분말($-40 \mu m$), ~20 wt%의 Al_2O_3 분쇄분말($+40 \mu m$) 및 10 wt%의 폐 Al_2O_3 흡착제를 첨가한 시편의 3점곡강도는 200 MPa 이상이었다. 재생 Al_2O_3 시편의 치밀화를 위하여 5~20 wt%의 폐유리분말을 첨가하여 $1200 \sim 1650^\circ C$ 에서 5시간 소결한 시편은 폐유리분말의 첨가량이 증가함에 따라 최대 밀도와 3점곡강도를 나타내는 온도는 감소하였으나, $1400^\circ C$ 이상에서는 폐유리분말을 첨가하지 않은 시편에 비하여 밀도와 3점곡강도가 감소하여 재생 Al_2O_3 세라믹스의 소결성 향상에는 기여하지 못하였다.

ABSTRACT

The sintering behaviors of the renewed Al_2O_3 ceramics were investigated as functions of the addition amount and particle size of recycling Al_2O_3 powder, such as crushed powder of structural Al_2O_3 ceramics and waste Al_2O_3 adsorbent, were investigated. Pure Al_2O_3 sample was fabricated by sintered at $1,650^\circ C$ for 5 h and it was crushed into powder ($-40 \mu m$ and $+40 \mu m$ in particle size) by thermal shock treatment and crushing. Then, 10~50 wt% of crushed Al_2O_3 powder and waste Al_2O_3 adsorbent were mixed with pure Al_2O_3 powder and were subjected to re-sintering to renewed Al_2O_3 sample. The density and the 3-point bending strength increased with increasing the sintering temperature without regard to the addition amount and particle size of recycling Al_2O_3 powder, and that of the samples at the same sintering temperature decreased with increasing the addition amount and particle size of recycling Al_2O_3 powder. Samples over 200 MPa of 3-point bending strength were obtained by mixing ~30 wt% of crushed Al_2O_3 powder ($-40 \mu m$), ~20 wt% of crushed Al_2O_3 powder ($+40 \mu m$) and 10 wt% of waste Al_2O_3 adsorbent. 5~20 wt% of waste glass powder containing renewed Al_2O_3 samples for densification were fabricated by sintered at $1200 \sim 1650^\circ C$ for 5 h. The temperature of maximum density and 3-point bending strength decreased with increasing the addition amount of waste glass powder, however, these samples at above $1400^\circ C$ showed lower density and bending strength than renewed Al_2O_3 samples. The addition of waste glass powder did not improved the densification of renewed Al_2O_3 sample.

Key words : Renewed Al_2O_3 ceramics, Recycling Al_2O_3 powder, Al_2O_3 adsorbent, Waste glass powder, Sintering

1. 서 론

Al_2O_3 세라믹스는 우수한 기계적, 전기적, 화학적 및 열적 특성에 의하여 구조재료, 전기·전자재료 및 생체재료 등의

응용분야가 광범위하나,¹⁻³⁾ Al_2O_3 세라믹스의 실용화를 위하여는 고가원료의 사용에 의한 제조원가의 상승과 $1,500 \sim 1,650^\circ C$ 의 높은 소결온도에 의한 에너지 소비가 문제된다.⁴⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제조과정 중에 발생하는 불량품이나 사용 후 폐기되는 Al_2O_3 세라믹스를 재활용하거나 용융온도가 낮은 유리분말을 재활용 Al_2O_3 분말과 혼

[†]Corresponding author : shinmater@hanmail.net

합하여 Al_2O_3 세라믹스의 재생이 가능하면 제조원가의 절감과 에너지 감소에 의한 Al_2O_3 세라믹스의 상용화가 기대된다.

Al_2O_3 세라믹스는 일정기간 사용되고 폐기되나 Al_2O_3 의 함량이 95% 이상인 중요한 자원이다.⁵⁾ 현재, 구조재료용 Al_2O_3 세라믹스나 정유공장에서 공기의 정제를 위한 흡착제 및 촉매로 사용하는 Al_2O_3 세라믹스는 사용 후 주로 매립에 의하여 전량 폐기 처분되고 있으나, 국내 사정상 매립지의 확보가 곤란하여 폐기물의 재활용에 의한 매립난의 해소와 외국으로부터 전량 수입하는 귀중한 유가자원의 폐기에 의한 경제력 손실을 해결하기 위하여 Al_2O_3 세라믹스의 재활용에 관한 연구가 요구되고 있다.⁶⁾ 유리, 슬래그 및 석분 슬래지 등을 이용한 구조용 세라믹스의 재활용에 관한 연구는 광범위하게 연구되어 일부 실용화 단계에 이르렀으나,⁷⁻¹¹⁾ 구조용 Al_2O_3 세라믹스의 재활용에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 구조재료용 세라믹스로 응용이 광범위한 Al_2O_3 세라믹스의 재활용에 관한 기초연구로서 Al_2O_3 세라믹스의 분쇄분말과 폐 Al_2O_3 흡착제의 첨가량과 입경에 따른 재생 Al_2O_3 세라믹스의 소결특성 및 폐유리분말의 첨가에 의한 재생 Al_2O_3 세라믹스의 치밀화 거동을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조

본 연구에서 사용한 시료는 국내에서 시판되는 공업용 Al_2O_3 분말(대정화학, 순도 96%, 평균입경 10 μm , PA로 명명), 국내 정유공장에서 발생하는 폐 Al_2O_3 흡착제(WA)와 유리 가공공장에서 발생하는 폐유리(WG) 분말을 이용하였다. 시편의 제조는 PA 분말을 일축유압프레스를 이용하여

50 MPa의 압력으로 12×5×60 (mm^3)의 각주상의 시편을 1차 성형 후, 냉간정수압성형기(CIP, Reaction Eng. R.O.K)를 이용하여 150 MPa의 압력으로 2차 성형하였다. 2차 성형시편을 5°C/min의 승온속도로 1,200~1,650°C에서 5시간 소결한 후 로빙하여 Al_2O_3 시편(P10)을 제조하였다. 폐기 구조재료용 Al_2O_3 세라믹스의 대체원료로서 1,650°C에서 5시간 소결한 P10 시편을 담랭하여 시편의 표면에 균열을 발생시킨 후, -40 μm 와 +40 μm 으로 분쇄한 Al_2O_3 (RA) 분말과 폐 Al_2O_3 흡착제(WA)를 PA 분말에 Table 1과 같이 10~50 wt% 첨가하여 P10 시편의 제조방법과 동일하게 PR 및 PW 시편을 제조하였다. 또한, PR 및 PW 시편에 폐유리(WG) 분말을 5, 10, 15 및 20 wt% 첨가하여 위와 동일한 방법으로 PRG 및 PWG 시편을 제조하였다.

2.2. 특성 분석

시료의 화학조성과 입도분석은 XRF(Philips, PW 140, Holland)와 입도분석기(SA-CP3, Shimazu, Japan)를 이용하였으며, 시편의 결정상 분석은 X-선회절분석장치(Philips, Co. Pw1720, Holland)를 이용하여 $CuK\alpha$, Ni filter, 30 kV, 20 mA의 조건으로 측정하였다. 시편의 밀도는 Archimedes법을 이용하여 측정하였다(신뢰구간 95.45%, 표준불확도 $k=2$, 확장불확도=0.002). 시편의 3점곡강도는 KS L 1591에 의하여 각주형 시편을 만능시험기(Universal Testing Machine, SFM, United Co., U.S.A)를 사용하여 0.5 mm/min의 cross head speed로 측정하였으며(신뢰구간 95.45%, 표준불확도 $k=2$, 확장불확도=0.009), 시편의 미세구조는 3점곡강도 시험을 행한 시편의 파단면에 Au를 코팅하여 주사전자현미경(Akashi Co. SS130, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 폐 Al_2O_3 흡착제와 혼합비에 따른 PW 시편의 중금속용출은 환경처 고시 폐기물공정시험법¹²⁾에 따라 시료 1g을 증류수 100 ml에 45일간 담지시킨 후, HNO_3 을 첨가하여

Table 1. The Experimental Composition of Renewed Al_2O_3 Sample

Sample	Recycling Pow.	Al_2O_3 Powder (PA)	Crushed Al_2O_3 Powder (RA)	Waste Al_2O_3 Adsorbent Powder (WA)	Waste Glass Powder (WG)
P10(P10G0.5~2)		100	-		(5, 10, 15, 20)
P9R1(P9R1G0.5~2)		90	10	-	(5, 10, 15, 20)
P8R2(G1)		80	20	-	(10)
P7R3(P7R3G1)		70	30	-	(10)
P6R4(P6R4G1)		60	40	-	(10)
P5R5(P5R5G1)		50	50	-	(10)
P9W1(P9W1G0.5~2)		90	-	10	(5, 10, 15, 20)
P8W2(P8W2G1)		80	-	20	(10)
P7W3(P7W3G1)		70	-	30	(10)
P6W4(P6W4G1)		60	-	40	(10)
P5W5(P5W5G1)		50	-	50	(10)

Table 2. The Chemical Composition of Recycling Powder

(wt%)

Sample \ Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Ig.loss
PA	1.42	95.45	0.33	0.48	0.45	0.44	0.48	0.40	-	0.55
RA	1.40	95.77	0.16	0.45	0.39	0.41	0.46	0.43	-	0.56
WA	0.12	88.76	0.05	0.04	0.07	0.02	-	0.10	-	10.84
WG	71.40	0.55	0.12	9.32	2.22	0.13	0.60	14.43	0.34	0.89

제조한 용액을 ICP/MS(HP-4500 series, USA)를 이용하여 Mg, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, 및 Pb의 중금속 성분을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시료 특성

본 연구에서 사용한 시료의 화학조성을 Table 2에 표시하였다. PA 분말과 1,650°C에서 5시간 소결하여 분쇄한 RA 분말의 화학조성은 Al₂O₃의 함량이 95 wt% 이상이었으며, WA 분말은 Al₂O₃의 함량이 88.76 wt%로서 강열감량 10.84 wt%를 제외하면 Al₂O₃의 함량은 97 wt% 이상이었다. WG 분말은 소다석회유리 가공부산물로서 SiO₂, Na₂O 및 CaO로 이루어져 있다.

PA, RA, WA 및 WG 분말의 입도분석 결과를 Table 3에 표시하였다. PA 분말은 평균입경이 10.5 μm로서 3~50 μm의 입도분포를 나타내었으며, -40 μm와 +40 μm의 RA 분말의 평균입경과 입도분포는 33.8 및 74.3 μm, 3~200 및 5~250 μm, WA 분말과 WG 분말의 평균입경은 32.5 및 24.3 μm, 3~300 및 1~500 μm의 입도분포를 나타내었다.

Table 3. The Mean Average Particle Size and Particle Size Distribution of Recycling Powder (μm)

Sample \ Property	Mean Average Particle Size	Particle Size Distribution
PA	10.5	3~50
RA(-40 μm)	33.8	3~200
RA(+40 μm)	74.3	5~250
WA	32.5	3~300
WG	24.3	1~500

Table 4. The Leached Amount of Heavy Metals from Waste Al₂O₃ Adsorbent

(ppm)

Sample \ Component	As	Cd	Pb	T-Cr	Cr ⁶⁺	Hg	Zn	Fe	Cu
Standard of Extraction	1.5	0.3	3	1.5	1.5	0.005	-	-	3
WA	ND	0.003	0.194	0.077	ND	ND	0.034	0.015	0.004

WA 분말의 중금속용출 결과를 Table 4에 표시하였다. 중금속용출시험은 사업장 폐기물에 함유된 오염물질이 매립 처분 후, 용출되는 정도를 사전에 예측하는 검사방법으로서 9개 분야 폐기물에 대한 지정폐기물의 환경 또는 매립방법을 결정하기 위한 판단자료로 활용된다.⁶⁾ 본 연구에서 사용한 용출시험 대상 지정폐기물인 WA 분말은 Pb와 Cr의 용출량이 0.194 ppm 및 0.077 ppm으로서 다른 중금속원소에 비하여 다소 높은 측정치를 나타내었으나, 용출량이 극 미량으로서 WA를 이용한 Al₂O₃ 세라믹스 재생시 중금속에 의한 오염은 문제가 없음을 알 수 있었다.

PA 분말에 RA 및 WA 분말을 10 wt% 첨가한 P9R1 및 P9W1 시편의 소결온도에 따른 XRD 분석을 Fig. 1에 나타내었다. PA 분말과 RA 분말의 주결정상은 α-Al₂O₃로 1,500 및 1,650°C의 P9R1 시편에서도 α-Al₂O₃의 피크만 확인되었다(Fig. 1(a)). WA 분말은 RA 분말과는 달리 주결정상이 γ-Al₂O₃이었으며, γ-Al₂O₃는 높은 비표면적(150~300 m²/g)과 30~120 Å의 기공을 포함하며 전체 기공부피가 0.3~1.0 ml/g이고 표면활성이 우수하여 흡착제, 흡수제 및 촉매담체로 이용된다.¹³⁾ WA 분말의 첨가량이 10 wt%인 P9W1 시편은 700°C에서 α-Al₂O₃와 γ-Al₂O₃, 800°C의 시편은 α-Al₂O₃와 γ-Al₂O₃ 이외에 γ-Al₂O₃의 전이에 의한 θ-Al₂O₃의 피크가 관찰되었다. 1,000°C의 시편은 α-Al₂O₃와 θ-Al₂O₃의 피크만 관찰되었으며, 1,100°C의 시편에는 θ-Al₂O₃의 α-Al₂O₃로의 전이에 의한 α-Al₂O₃의 피크만 관찰되었다(Fig. 1(b)).

3.2. 시편의 소결 특성

-40 μm와 +40 μm인 RA 및 WA 분말의 첨가량과 소결 온도에 따른 PR 및 PW 시편의 밀도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 소결온도가 증가함에 따라 RA 및 WA 분말의 첨가량과 입경에 관계없이 시편의 밀도는 증가하여 1,650°C

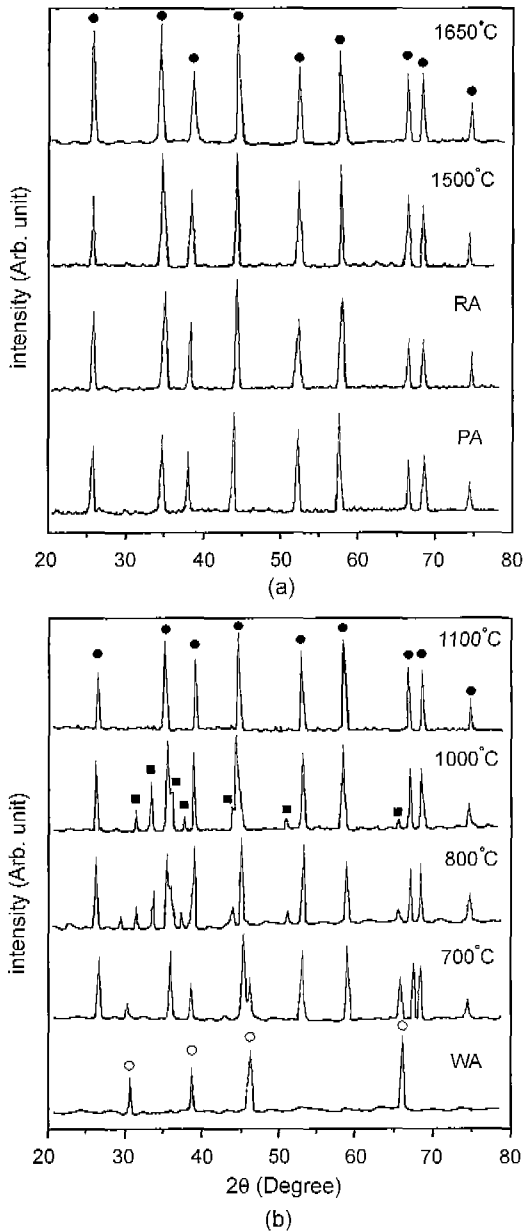


Fig. 1. XRD patterns of (a) P9R1(-40 μm) and (b) P9W1 sample with sintering temperature.
 ● ; α-Al₂O₃, ○ ; γ-Al₂O₃, ■ ; θ-Al₂O₃.

에서 5시간 소결한 P10, P9R1(-40 μm와 +40 μm) 및 P9W1 시편의 밀도는 3.85~3.89 g/cm³으로 Al₂O₃ 세라믹스의 이론밀도인 3.93 g/cm³의 97%의 상대밀도를 나타내었다.¹⁾ 그러나, 동일 소결온도에서는 RA 및 WA 분말의 첨가량이 증가함에 따라 밀도는 감소하였다. 이는 첨가된 RA 및 WA 분말의 평균입경이 Table 3과 같이 PA 분말의 평균입경(10.5 μm)에 비하여 크기 때문에 냉간정수압성형시 성형체의 충전율이 감소하여 소결 후 시편 내에 잔존하는 기공 때문이라 사료된다.¹⁴⁾ 1,650°C로 소결한 P9R1(-40 μm) 시편의 밀도는 3.89 g/cm³이었다(Fig. 2(a)). +40 μm의 RA

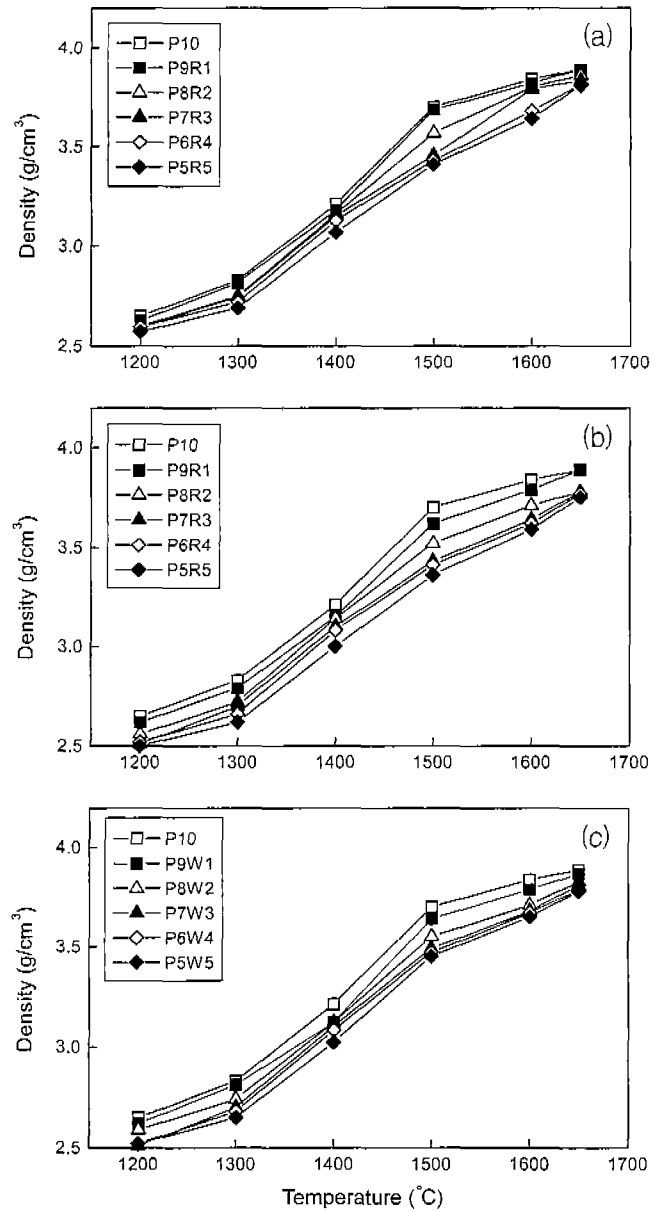


Fig. 2. The density of (a)PR(-40 μm), (b) PR(+40 μm) and (c) PW sample with addition amount of RA, WA and sintering temperature.

분말을 첨가한 시편의 밀도는 -40 μm의 RA 분말을 첨가한 시편에 비하여 밀도가 감소하였는데, 이는 RA(+40 μm) 분말의 평균입경이 74.3 μm로서 평균입경의 증가에 따른 입자의 비표면적 감소에 의하여 시편의 치밀화가 완전히 진행되지 않았기 때문이라 사료된다. 1,650°C로 소결한 P9R1(+40 μm) 시편은 밀도는 3.87 g/cm³로서 Al₂O₃ 세라믹스의 재생시 시료의 입경이 작을수록 물리적 성질이 향상됨을 알 수 있었다(Fig. 2(b)). WA 분말을 첨가한 PW 시편은 Table 2와 같이 10.84 wt%의 강열감량에 의하여 소결 중에 형성된 기공, WA 분말의 주결정상인 γ-Al₂O₃와 중간상인

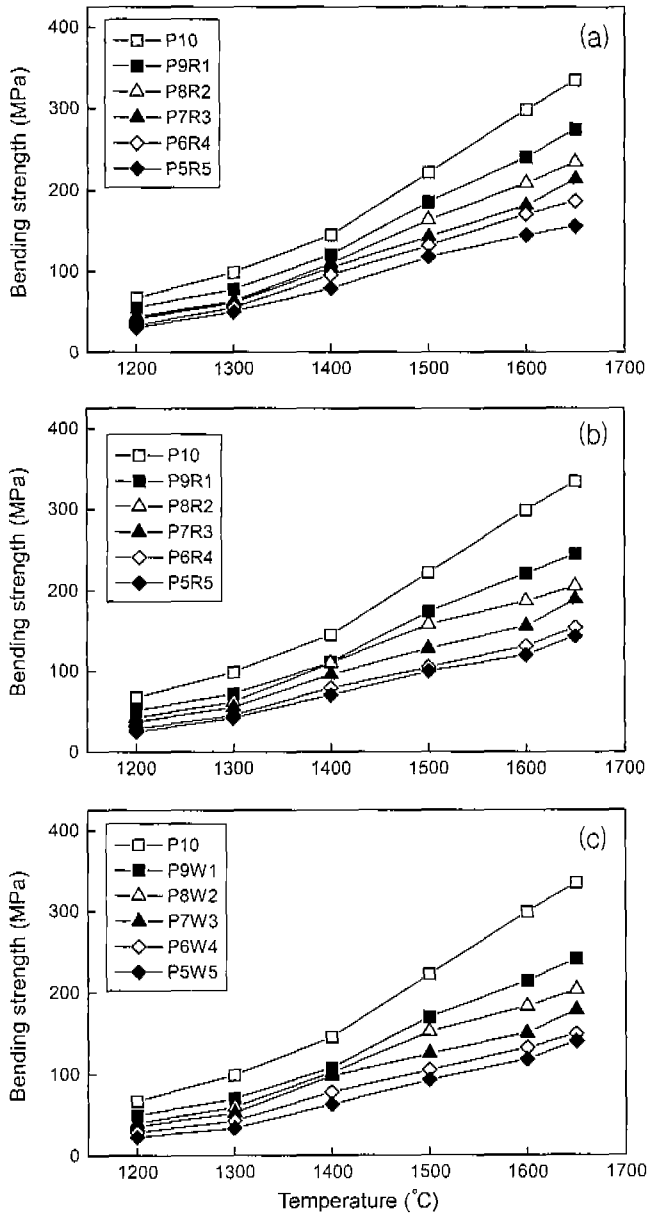


Fig. 3. The bending strength of (a) PR(-40 μm), (b) PR(+40 μm) and (c) PW sample with addition amount of RA, WA and sintering temperature.

θ-Al₂O₃의 낮은 분말밀도와 상전이에 의한 입자자체의 수축으로 인한 부피차이로 인하여 기공이 생성되고 이러한 기공이 입계 내에 분포하여 쉽게 제거되지 않기 때문에 PR 시편에 비하여 밀도가 감소하였다.¹⁵⁾ 1,650°C로 소결한 P9W1 시편의 밀도는 3.86 g/cm³이었다(Fig. 2(c)).

RA 및 WA 분말의 첨가량과 소결온도에 따른 PR 및 PW 시편의 3점곡강도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 시편은 소결온도가 증가함에 따라 밀도의 변화와 마찬가지로 3점곡강도가 증가하였으나, RA 및 WA 분말의 첨가량이 증가함에 따라 3점곡강도는 감소하였다. 또한, RA 및 WA

분말의 입경과 3점곡강도간에는 소결온도와 RA 및 WA 분말의 첨가량이 같다면 입경이 작을수록 입자의 비표면적 감소에 의한 치밀화가 진행되어 3점곡강도는 증가하였다.⁴⁾ 즉, 첨가한 RA 및 WA 분말의 입경에 따른 밀도는 큰 변화를 나타내지 않았으나, 시편 내 기공의 분포나 크기의 변화에 의하여 3점곡강도는 큰 변화를 나타내었다. 따라서, 구조용 재료로서 Al₂O₃ 세라믹스의 실용화 강도를 200 MPa로 예상한다면,¹⁴⁾ RA(-40 μm) 분말을 이용하여 1,650°C로 소결한 시편은 PA 분말의 30 wt%까지(Fig. 3(a)), RA(+40

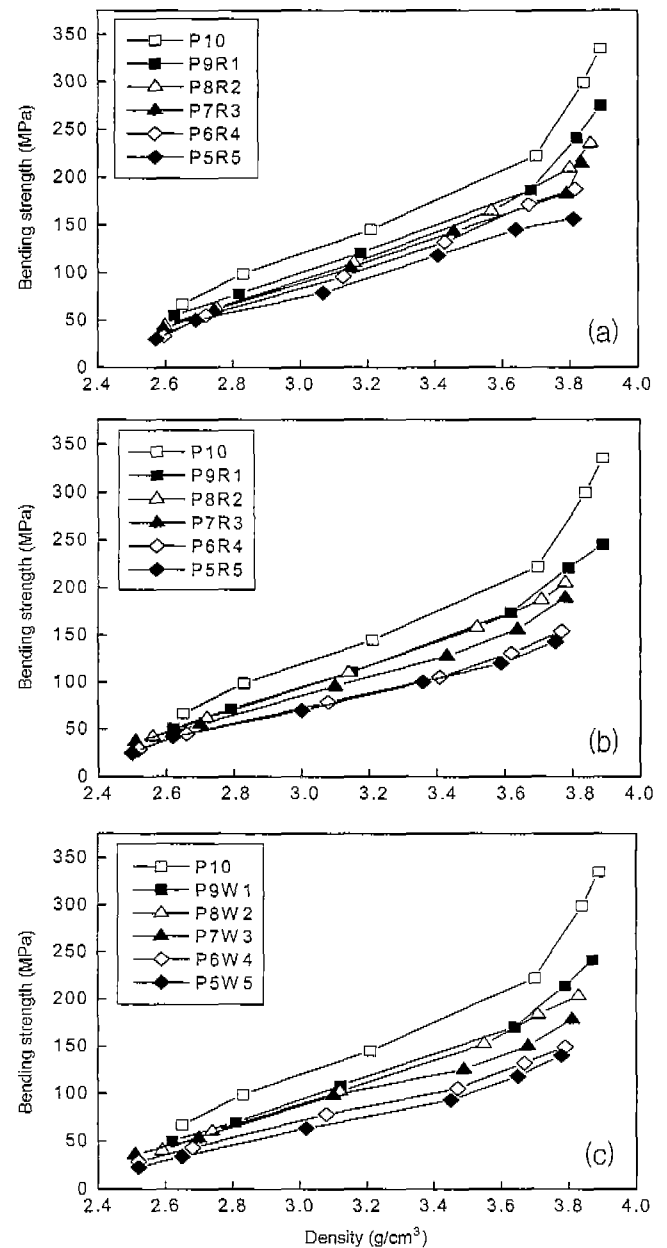


Fig. 4. The relationship density and bending strength of (a) PR(-40 μm), (b) PR(+40 μm) and (c) PW sample with addition amount of RA, WA and sintering temperature.

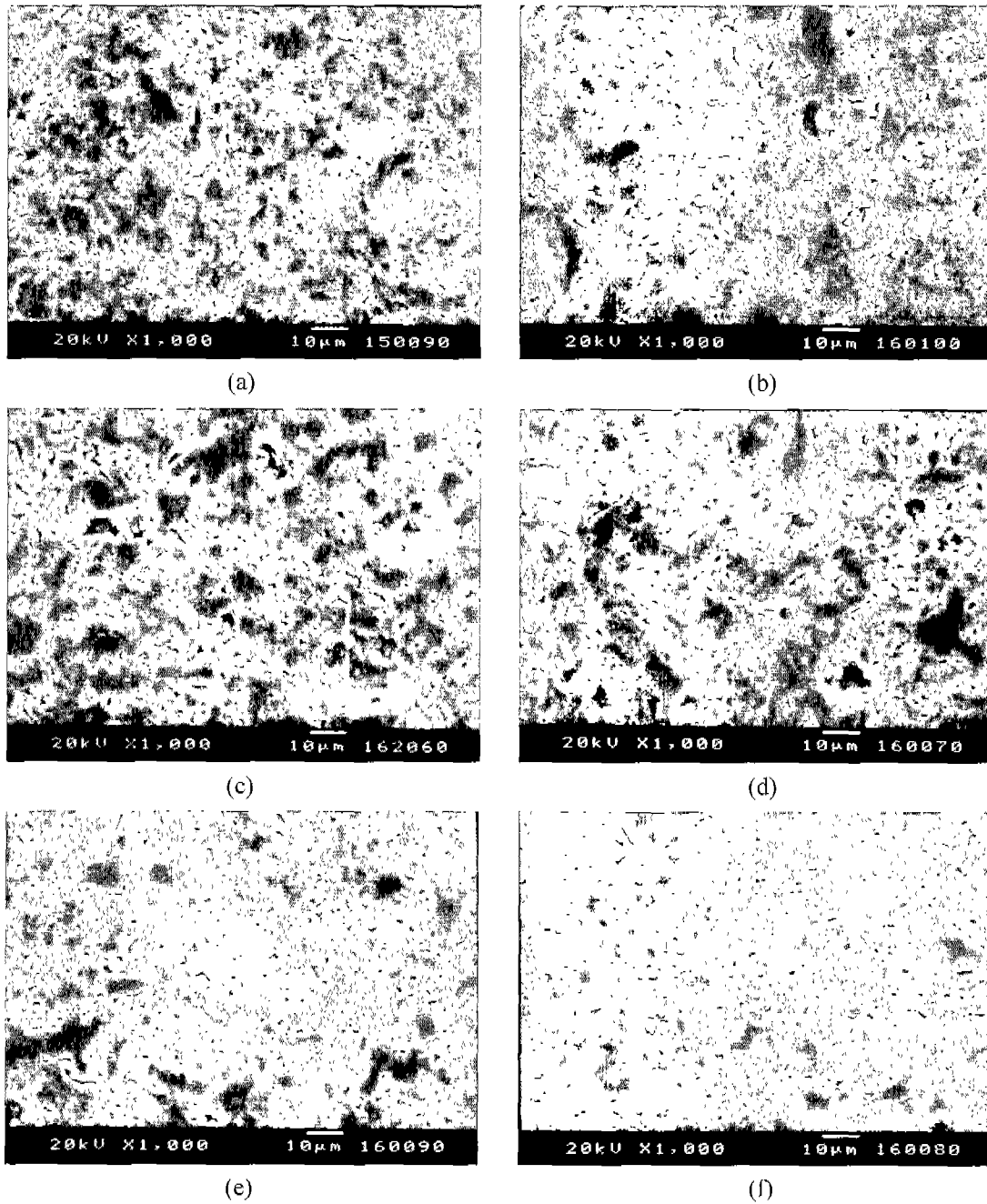


Fig. 5. SEM photographs of (a) P10, (b) P9R(-40 μm)1, (c) P7R(-40 μm)3, (d) P5R(-40 μm)5, (e) P9R(+40 μm)1 and (f) P9W1 sample heated at 1,650°C for 5 h.

μm) 분말을 이용한 시편은 20 wt%까지 대체가 가능하였다 (Fig. 3(b)). 이와 같이, RA 및 WA 분말의 입경이 작을수록 3점곡강도가 증가하는 것은 PA 분말의 평균입경에 근접하여 일정 이상의 강도를 유지할 수 있기 때문이라 사료된다. WA 분말을 첨가한 PW 시편은 PR 시편과 비슷한 결과를 나타내었지만, WA 분말의 주결정상인 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 와 소결 중의 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \theta\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 로의 상전이에 의하여 강도발현의 원인인 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 결정성 부족으로 3점곡강도는

PR 시편에 비하여 감소하였다. 1,650°C에서 소결한 PW 시편은 PA 분말의 10 wt%까지 대체가 가능하였다(Fig. 3(c)). PR 및 PW 시편의 밀도와 3점곡강도의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

1,650°C에서 소결한 RA 및 WA 분말의 첨가량에 따른 PR 및 PW 시편의 미세구조를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(b)의 P9R1(-40 μm) 시편은 P10 시편의 미세구조와 비교하여 큰 변화는 관찰되지 않았으나, RA 분말의 첨가량이

증가함에 따라 시편 내에 기공이 증가하였다(Fig. 5(c, d)). RA(+40 μm)와 WA 분말을 첨가한 시편(Fig. 5(e, f))은 RA(-40 μm) 분말을 첨가한 시편에 비하여 기공의 증가가 관찰되었다. RA 및 WA 분말의 첨가량이 증가함에 따라 3점곡강도가 감소하는 것은 이와 같이 시편 내에 형성된 기공의 연결에 의한 내부결함의 크기 및 형상 차이에 의한 것으로 사료된다.¹⁴⁾

3.3. 폐유리분말 첨가에 의한 소결 거동

PR 및 PW 시편에 10 wt%의 WG 분말을 첨가한 PRG 및 PWG 시편의 소결온도에 따른 밀도와 3점곡강도의 변화를 Fig. 6에 WG 분말의 첨가량과 소결온도에 따른 밀도와 3점곡강도의 변화를 정리하여 Table 5에 표시하였다. PA 분말에 10 wt%의 WA 분말을 첨가한 PG 시편은 P10 시편에 비하여 밀도와 3점곡강도는 1,400°C까지 증가하였으나, 소

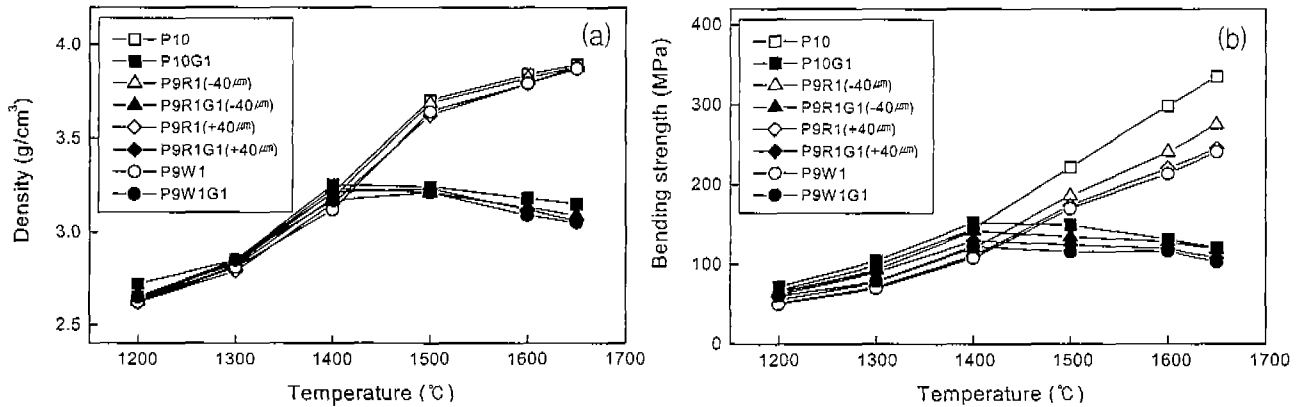


Fig. 6. The density (a) and the bending strength (b) of PRG and PWG sample added in 10 wt% WG powder with sintering temperature.

Table 5. The Physical Properties of Renewed Al₂O₃ Ceramics with Addition Amount of Waste Glass Powder and Sintering Temperature

Property \ Sample	Density (g/cm ³)						3-point bending strength (MPa)						
	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C	1600°C	1650°C	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C	1600°C	1650°C	
P10	2.65	2.83	3.21	3.7	3.84	3.89	67	99	145	222	299	335	
P10G0.5	2.69	2.82	3.22	3.27	3.20	3.17	69	99	149	153	139	127	
P10G1	2.72	2.85	3.25	3.24	3.18	3.15	72	105	153	150	132	121	
P10G1.5	2.77	2.88	3.26	2.99	-	-	81	112	159	117	-	-	
P10G2	3.08	3.27	2.85	-	-	-	118	149	101	-	-	-	
P9R1(-40 μm)	2.63	2.82	3.18	3.69	3.82	3.88	55	78	121	186	241	275	
P9R1G0.5(-40 μm)	2.62	2.83	3.19	3.25	3.18	3.13	61	83	127	159	136	124	
P9R1G1(-40 μm)	2.64	2.84	3.23	3.21	3.13	3.09	65	93	143	135	129	119	
P9R1G1.5(-40 μm)	2.73	2.86	3.26	2.89	-	-	78	106	149	121	-	-	
P9R1G2(-40 μm)	3.06	3.24	2.80	-	-	-	118	145	93	-	-	-	
P9R1(+40 μm)	2.62	2.79	3.15	3.62	3.79	3.88	51	72	111	174	221	245	
P9R1G0.5(+40 μm)	2.63	2.82	3.17	3.23	3.15	3.06	61	81	123	128	127	112	
P9R1G1(+40 μm)	2.63	2.84	3.21	3.23	3.12	3.04	62	90	130	125	120	108	
P9R1G1.5(+40 μm)	2.69	2.85	3.25	2.88	-	-	75	93	127	113	-	-	
P9R1G2(+40 μm)	2.99	3.21	2.77	-	-	-	108	138	87	-	-	-	
P9W1	2.62	2.81	3.12	3.64	3.79	3.87	50	70	108	170	214	241	
P9W1G0.5	2.62	2.82	3.15	3.21	3.12	3.07	61	74	107	117	108	103	
P9W1G1	2.65	2.85	3.17	3.21	3.09	3.05	64	79	123	116	112	100	
P9W1G1.5	2.67	2.81	3.20	2.82	-	-	72	88	121	106	-	-	
P9W1G2	2.96	3.20	2.69	-	-	-	103	131	82	-	-	-	

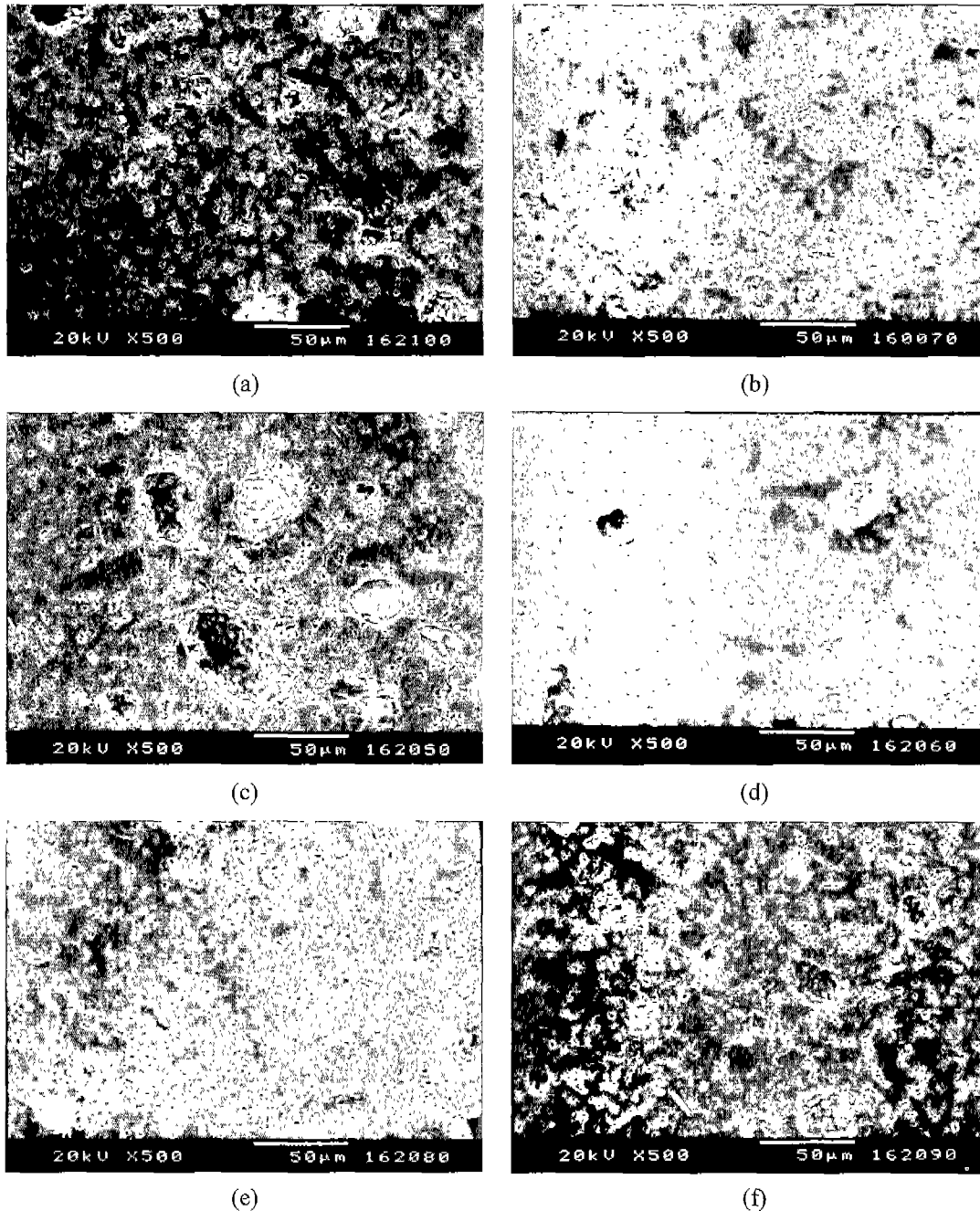


Fig. 7. SEM photographs of (a) P10G1, (b) P9R(-40 μm)1G1, (c) P7R(-40 μm)3G1, (d) P5R(40 μm)5G1, (e) P9R(+40 μm)1G1 and (f) P9W1G1 sample heated at 1,650°C for 5 h.

결온도가 증가함에 따라 밀도와 3점곡강도는 감소하였다. P9R1G 및 P9W1G 시편도 같은 경향을 나타내었다. 이는 PR 및 PW 시편에 첨가된 WG 분말에 의하여 1,400°C까지 치밀화가 진행되어 밀도와 3점곡강도는 증가하였으나,¹⁴⁾ 그 이상의 온도에서는 냉각 중 유리용융액의 응고수축에 의하여¹⁶⁾ Fig. 7의 미세구조와 같이 시편 내에 다량의 기공이 존재하여 밀도와 3점곡강도가 감소하였다. Table 5와 같이 WG 분말의 첨가량이 증가함에 따라 최대 밀도와 3점곡강

도를 나타내는 소결온도는 감소하여 WG 분말의 첨가에 의하여 PR 및 PW 시편에 비하여 저온에서 치밀화가 이루어졌으나, WG 분말의 첨가량이 15 wt% 이상인 시편은 1500°C에서 시편 내에 형성된 다량의 유리용융액에 의하여 일정한 형상의 시편 제조가 불가능하였다. 또한, WG 분말을 첨가한 시편은 구조재료용 Al_2O_3 세라믹스의 실용화 강도와 이 른밀도에는 그 값이 못미쳐 WG 분말의 첨가가 재생 Al_2O_3 시편의 소결성 향상에는 기여하지 못하였다.

4. 결 론

1. Al₂O₃ 분쇄분말과 폐Al₂O₃ 흡착제의 주결정상은 α-Al₂O₃와 γ-Al₂O₃로서 Al₂O₃의 함량은 95 wt% 이상이었으며, 폐Al₂O₃ 흡착제의 Pb와 Cr의 용출량은 0.194 ppm 및 0.077 ppm으로서 Al₂O₃ 세라믹스의 재생시 중금속에 의한 오염은 문제가 없었다.

2. 재활용 Al₂O₃ 분말의 첨가량과 입경에 관계없이 소결 온도가 증가함에 따라 시편의 밀도와 3점곡강도는 증가하였으나, 동일 소결온도에서는 재활용 Al₂O₃ 분말의 첨가량이 증가함에 따라 밀도와 3점곡강도는 감소하였다. 10 wt%의 재활용 Al₂O₃를 첨가하여 1,650°C에서 5시간 소결한 재생 Al₂O₃ 시편의 밀도는 3.85~3.89 g/cm³이었으며, ~30 wt%의 Al₂O₃ 분쇄분말(-40 μm), ~20 wt%의 Al₂O₃ 분쇄분말(+40 μm) 및 10 wt%의 폐Al₂O₃ 흡착제를 첨가한 시편의 3점곡강도는 200 MPa 이상으로 구조재료용 Al₂O₃ 세라믹스로 사용이 가능하였다.

3. 폐유리분말 첨가량이 증가함에 따라 최대 밀도와 3점곡강도를 나타내는 온도는 감소하여 1400°C까지 치밀화가 이루어졌으나, 그 이상의 온도에서는 폐유리분말을 첨가하지 않은 시편에 비하여 밀도와 3점곡강도가 감소하여 재생 Al₂O₃ 세라믹스의 소결성 향상에는 기여하지 못하였다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 “석재복합 신소재제품 연구센터”의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

1. K. Wefers, Nomenclature, Preparation and Properties of Aluminum Oxides, Oxide Hydroxides and Trihydroxides, pp. 16-22 in Aluminum Chemicals: Science and Technology Handbook, ed. by L. D. Hart, The American Ceramic Society, Westerville, OH., 1990.
2. W. H. Gitzen, Alumina as a Ceramic Material, The American Ceramic Society, W. Dawhil *et al.*, Ber. Dtsch. Keram. Ges., **41**, 85-96 (1964).
3. C. S. Whang, C. Y. Lin and H. H. Lu, “Effect of SiO₂ and TiO₂ and the Sinterability and Microstructure of Alumina Ceramics,” *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **101**(6), 649-653 (1993).
4. H. M. Lee and H. L. Lee, “Low Temperature Sintering of Alumina by Boehmite Sol-gel Method,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **34**(11), 1187-1197 (1997).
5. J. I. Lee, J. S. Oh, H. H. Lee and J. K. Lee, “A Production of Aluminum Sulfate from Waste Alumina,” *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.*, **15**(6), 653-659 (1998).
6. Doojin Co., “A Study of Recycling Process of Designation Wastes and Effects on the Environment,” *Wastes Kor*, **12**, 70-89 (1997).
7. H. Imagawa, “Scientific Research for Recycling Production of Glasses,” *Ceramics Jpn.*, **34**(2), 118-120 (1999).
8. B. S. Hun, “Development of a Construction Materials Using Waste Glass,” *Ceramist*, **2**(1), 23-26 (1999).
9. M. C. Wang, M. H. Hon and N. C. Wu, “Process and Properties of Ceramic Tile Prepared from Blast Furnace Slag Raw Materials,” *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **101**(5), 509-513 (1993).
10. S. M. Han, “The Preparation of Lightweight Aggregates Using Waste Coal and Casting Sand,” Kor. Patent 96-013226, 1996.
11. B. M. Lee, S. M. Han, D. Y. Shin and K. Kimura, “Preparation of Glass Ceramics Using Chulwon Blast,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(3), 205-210 (2000).
12. The Ministry of Environment : Test Method of Waste Treatment Process (1995).
13. B. K. Park, J. K. Suh, J. M. Lee and D. S. Suh, “The Rehydration Properties of Amorphous Alumina Powder in Low Water/Alumina Ratio,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35**(10), 1085-1093 (1998).
14. K. Kageyama, H. Kato, K. Ohi and S. Kobayashi, “Evaluation of Mechanical Properties of Sintered Alumina with Recycling Powder,” *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **107**(5), 482-486 (1999).
15. C. E. Kim, J. H. Kim and H. W. Lee, “Preparation and Sintering Behavior of Alumina Poeders Synthesized from Aluminum Alkoxide,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **28**(7), 568-575 (1991).
16. D. H. Park, B. C. Kim, J. J. Kim and L. S. Park, “Effects of Glass Particle Size on Sintering Behaviors of the Glass-alumina Composites for Low Firing Temperature,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(7), 638-644 (2000).