

Al₂TiO₅-점토 복합체를 이용한 적외선 방사체의 개발

신대용 · 한상목*

강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터

*강원대학교 공과대학 신소재공학과

(1999년 11월 5일 접수)

Development of Al₂TiO₅-Clay Composites for Infrared Radiator

Dae Yong Shin and Sang Mok Han*

CACP, Kangwon Nat. Uni., Chuncheon 200-701, Korea

*Dept. of Advanced Materials Eng., Kangwon Nat. Uni., Chuncheon 200-701, Korea

(Received November 5, 1999)

초 록

적외선 방사체용 Al₂TiO₅-점토 복합체를 제조하기 위하여 합성 Al₂TiO₅분말에 10~50 wt%의 점토를 첨가하여 열팽창성, 열적 안정성, 기계적 강도 및 적외선 방사 특성을 조사하였다. 1,200°C에서 3시간 열처리한 Al₂TiO₅-점토 복합체의 3,400~2,500 cm⁻¹의 분광방사율은 약 0.3, 2,500~400 cm⁻¹의 분광방사율은 0.92 이상으로 점토의 첨가량이 증가함에 따라 분광방사율이 증가하였다. 점토의 첨가량과 열처리 온도가 증가함에 따라 흡수율은 감소하였으며 부피비중과 3점곡강도는 증가하여 12.00°C에서 3시간 열처리한 50 wt% Al₂TiO₅-50 wt% 점토 복합체의 3점곡강도는 80 MPa로서 적외선 방사체로 사용이 가능하였다. 점토의 첨가량이 증가함에 따라 Al₂TiO₅-점토 복합체의 이력현상은 감소하였으며 열팽창계수는 증가하여 1,200°C에서 3시간 열처리한 50 wt% Al₂TiO₅-50 wt% 점토 복합체의 평균열팽창계수는 5.78×10⁻⁶/°C이었다.

ABSTRACT

The thermal expansion, thermal stability, mechanical strength and infrared radiative property of Al₂TiO₅-clay composites, prepared from synthesized Al₂TiO₅ and clay, were investigated to develop a material for far infrared radiators. The emittance of composites containing 10~50 wt% clay, heated at 1,200°C for 3 h, increased with increasing clay content and emittance was about 0.3 and 0.92 in the ranges of 3,400~2,500 cm⁻¹ and 2,500~400 cm⁻¹, respectively. The bulk density and bending strength of the Al₂TiO₅-clay composites increased with increasing clay content. 50 wt% Al₂TiO₅-50 wt% clay composite, heat-treated at 1,200°C, had an adequate strength for infrared radiators; 80 MPa. The degree of thermal expansion hysteresis decreased with increasing clay content and the mean thermal expansion coefficient increased with increasing clay content. The thermal expansion coefficient of 50 wt% Al₂TiO₅-50 wt% clay composite heated at 1,200°C was 5.78×10⁻⁶/°C.

Keywords: Al₂TiO₅-clay composites, Infrared radiators, Emittance, Radiation energy, Thermal expansion coefficient

1. 서 론

세라믹스는 우수한 적외선 방사 특성과 내열성으로 인하여 예로부터 β-spodumene, cordierite, zircon 및 탄소계의 세라믹스가 적외선 방사체로 이용되고 있다.¹⁻³⁾ 이들 재료 중, β-spodumene 및 cordierite는 적외선 방사율이 우수하나 소결온도 폭이 좁아 최근에는 넓은 소결온도, 낮은 열팽창율, 내열충격성이 우수하며 고온에서도 사용이 가능한 Al₂TiO₅^{4,5)}의 적외선 방사체 활용에 관한 연구가 진행되고 있다.⁶⁾ 그러나, Al₂TiO₅는 결정축에 따른 열팽창계수의 이방성에 의한 냉각과정 중 미세균열의 발생, 고온에서 급격한 Al₂TiO₅입자의 성장, 냉각시 800~1,300°C에서 α-Al₂O₃와 rutile 형인 TiO₂로 분해되는 열적인 불안정성과 출발물질보

다 낮은 Al₂TiO₅의 이온밀도에 의하여 발생하는 10~15%의 부피팽창 등에 의한 낮은 소결성과 기계적 강도의 감소 때문에 Al₂TiO₅ 세라믹스의 공업적 응용에는 많은 제한이 따르고 있다.^{4,5)} Al₂TiO₅의 가소성과 기계적 강도를 향상시키기 위하여는 MgO, Fe₂O₃, Cr₂O₃ 및 GaO₂를 첨가하여 Fe₂TiO₅, MgTiO₅ 및 (Al,Cr)₂TiO₅고용체를 형성시켜 안정화시키는 열역학적 방법과 SiO₂, Li₂O 및 Be₂O₃를 첨가하여 Al₂TiO₅와 고용체를 형성하지 않고 매트릭스 내 제2상으로서 Al₂TiO₅의 입자성장을 억제시켜 안정화시키는 속도론적 방법이 제안되고 있다.⁷⁻⁹⁾ 이와 같이 Al₂TiO₅ 단미 또는 소량의 첨가제를 이용하여 제조한 소결체의 기계적·열적 성질에 관하여 연구가 진행되었으나, 저열팽창성 등의 우수한 열적 성질과 기계적 강도를 동시에 향상시키기 위한 타성분

과의 복합소결체 제조에 관한 연구는 Sugiyama⁶⁾와 Yano¹⁰⁾의 연구를 제외하고는 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Al₂TiO₅ 세라믹스의 가소성, 기계적·열적 성질의 향상과 우수한 적외선 방사체를 제조하기 위하여 강원도 정선군의 점토를 합성 Al₂TiO₅분말에 첨가하여 Al₂TiO₅-점토 복합체를 제조하고 점토의 첨가량과 열처리 조건에 따른 기계적 강도, 열팽창계수 및 적외선 방사특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조

TiO₂(Wako Chem. Co.)와 Al₂O₃(Wako Chem. Co.)를 1:1 (mol비)로 불밀을 이용하여 5시간 습식혼합한 후, 60°C로 건조한 분말을 1,500°C에서 3시간 소결하여 Al₂TiO₅(AT)분말을 합성하였다. 35 mesh이하로 분쇄한 AT분말에 Table 1의 화학성분을 갖는 점토를 10~50 wt% 첨가한 후, 불밀을 이용하여 5시간 습식혼합하고 60°C에서 건조하여 Al₂TiO₅-점토(AC) 혼합분말을 합성하였다. AC혼합분말을 50 MPa의 압력으로 4×4×50 mm³의 각주상의 시편과 지름 50 mm, 두께 3 mm의 원형 시편을 제조하여 1,200~1,400°C에서 3시간 열처리하여 AC소결체를 제조하였다.

2.2. 특성분석

점토의 성분은 X-선형광분석기(XRF, Philips, PW1480, Netherlands)를 이용하여 분석하였으며, AT와 AC시편의 부피비중과 흡수율을 KS L 3304와 KS F 2533을 이용하여 측정하였다. 점토의 첨가량과 열처리 온도에 따른 AC시편의 결정상의 변화를 관찰하기 위하여 CuK α , Ni filter, 40 kV, 30 mA의 조건으로 X-선회절분석(XRD, Philips, PW1710, Netherlands) 분석을 행하였다. AT와 AC시편의 3,300~400 cm⁻¹의 적외선 분광방사율과 방사에너지를 조사하기 위하여 지름 50 mm, 두께 3 mm의 AT와 AC시편을 40°C로 가열한 후, 적외선분광광도계(FT-IR, Mide, U.S.A.)를 이용하여 측정하였다. AT와 AC시편의 열팽창계수는 각 주형의 시편을 압봉식 열팽창계(Anter, 1161, U.S.A)를 이용하여 실온~1,300°C의 가열·냉각곡선을 측정하여 100~1,300°C의 평균열팽창계수를 구하였다. 3점곡강도의 측정은 각주형의 시편을 만능시험기(MTS 180, U.S.A)를 사용하여 변위제어 하에서 0.5 mm/min의 cross head speed로 측정하였다. AT시편과 AC시편의 미세구조를 관찰하기 위하여 3점곡강도 시험을 행한 시편의 파단면에 Au를 코팅하여 주

사전자현미경(Akashi, SS130, Japan)관찰을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

1,500°C와 1,200~1,400°C에서 3시간 열처리 한 AT, 점토(JC) 및 AC시편의 XRD분석을 Fig. 1에 보인다. AT시편은 미반응의 Al₂O₃와 TiO₂의 피크는 관찰되지 않고 Al₂TiO₅의 피크만 관찰되어 1,500°C의 3시간 열처리에 의하여 순수한 Al₂TiO₅의 합성이 가능하였다. 1,200°C에서 3시간 열처리한 점토에는 비정질, quartz 및 mullite의 피크가 관찰되었으나 1,300°C로 열처리한 시편은 quartz와 mullite의 용융에 의하여 비정질만 관찰되었다.¹¹⁾ AC시편의 경우, 비정질, Al₂TiO₅ 및 mullite의 피크가 관찰되었으나 점토의 첨가량이 증가함에 따라 비정질과 mullite의 피크가 증가하고 Al₂TiO₅ 피크는 감소하였다. 또한, 점토의 첨가량과 열처리 온도가 증가하여도 Al₂O₃와 TiO₂의 피크는 관찰되지 않아 Al₂TiO₅의 분해는 발생하지 않음을 알 수 있었다. Al₂TiO₅의 분해 기구는 Al₂TiO₅의 열팽창계수의 이방성에 의하여 입계에 부가되는 압축응력 때문에 분해가 촉진되나 점토의 첨가에 의하여 소결체에 생성된 mullite가 제2상으로 존재하여 Al₂TiO₅입자의 성장을 억제시켜 입계에 부가되는 압축응력을 감소시켜 Al₂TiO₅의 분해가 억제되었다.⁹⁾

1,500°C와 1,200°C에서 3시간 열처리한 AT와 AC시편의 미세구조를 Fig. 2에 보인다. AT시편(a)에는 냉각과정 중 열팽창의 이방성에 의하여 발생한 미세균열이 존재하는 약 5~10 μ m의 Al₂TiO₅입자가 관찰되었다. 10 wt%의 점토를 첨가한 A1C시편(b)의 경우, SEM사진에 의하여 mullite입자의 관찰이 곤란하지만 XRD분석으로부터 Al₂TiO₅입자 주위의 mullite에 의하여 Al₂TiO₅의 입자성장이 억제되어 약 3~5 μ m의 Al₂TiO₅입자가 관찰되었다. 그러나, 점토의 첨가량이 작아 소결체 내에는 Al₂TiO₅입자끼리의 접촉이 많고 미소균열이 관찰되었다. 점토의 첨가량이 20, 30, 및 40 wt%인 A2C(c), A3C(d) 및 A4C시편(e)의 경우, Al₂TiO₅의 입자성장이 억제되어 약 2~3 μ m의 Al₂TiO₅입자와 액상에 의한 치밀화가 관찰되었으나 소결체 내에 큰 기공이 관찰되었다. 50 wt%의 점토를 첨가한 A5C시편(f)은 약 2 μ m의 Al₂TiO₅입자가 소결체 내에 분산되어 있는 치밀한 구조와 기공이 관찰되었다. 1,300°C에서 열처리한 A5C시편(g)의 Al₂TiO₅입자의 크기는 1,200°C의 A5C시편(f)과 같은 약 2 μ m이었으나, 1,400°C의 A5C시편(h)은 입자간 소결이 진행되어 약 3~5 μ m의 Al₂TiO₅입자가 관찰되었다.⁶⁾

1,500°C와 1,200°C에서 3시간 열처리한 AT와 AC시편을

Table 1. Chemical Composition of Jungsun Clay

(unit: wt%)

| Comp. | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | TiO ₂ | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | Ig.loss |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|---------|
| Jungsun Clay | 57.22 | 16.0 | 8.24 | 2.02 | 2.52 | 0.86 | 0.40 | 2.95 | 0.51 | 0.19 | 9.09 |

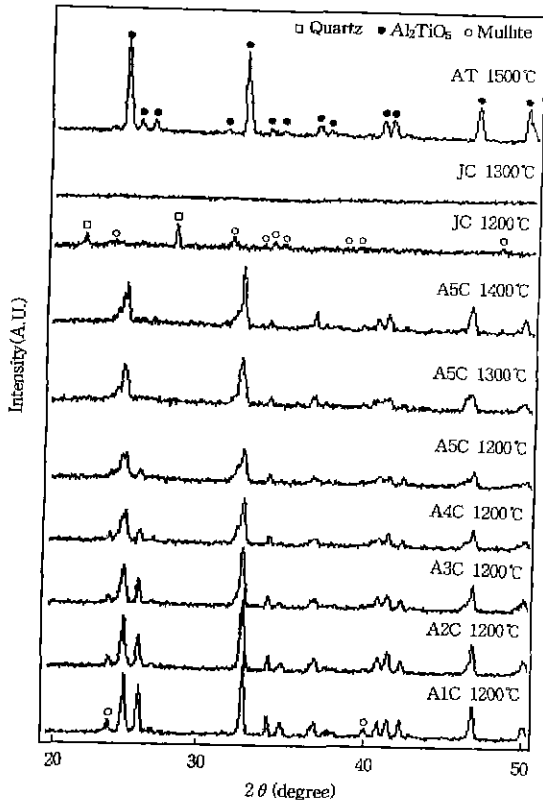


Fig. 1. XRD Patterns of AT, JC and AC heated at different temperatures for 3 h.
 AT: Al_2TiO_5 , JC: Jungsun Clay, A_xC : $AT(x \times 10)JC$.

40°C로 가열하여 측정한 적외선분광방사율을 Fig. 3에 보인다. AT시편은 고파수영역인 $3,300 \sim 2,500 \text{ cm}^{-1}$ 에서 0.2~0.3의 분광방사율을 나타내었지만 저파수영역인 $2,500 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 에서 0.91의 높은 분광방사율을 나타내었다. AC시편의 경우, $3,300 \sim 2,500 \text{ cm}^{-1}$ 에서 0.2~0.3의 분광방사율과 $2,500 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 에서는 0.92이상의 높은 분광방사율을 나타내었다. 점토의 첨가량이 50 wt%인 A5C시편의 분광방사율은 0.94로서 점토의 첨가량이 증가함에 따라 분광방사율은 증가하였으며, 1,300과 1,400°C에서 열처리한 A5C시편의 분광방사율은 1,200°C의 A5C시편과 비슷한 결과를 나타내었다.

AT와 1,200°C에서 3시간 열처리한 AC시편의 적외선 분광방사율 측정 결과를 이용하여 구한 분광방사에너지를 Fig. 4에 보인다. AT시편의 분광방사에너지는 $366.42 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$, A5C시편은 $378.5 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ 로서 AT시편에 비하여 보다 높은 분광방사에너지를 나타내었으며 점토의 첨가량 증가에 따라 최대 분광 방사에너지는 고파수영역으로 약간 이동하였다. 일반적으로 적외선 방사체는 전방사에너지에 대한 $2,500 \text{ cm}^{-1}$ 이하의 원적외선 방사에너지가 점유하는 비율을 이용하여 평가를 행한다.⁶⁾ Sugiyama 등에 의하면 Al_2TiO_5 에 0~50 mass%의 Kibushi(木節)점토를 첨가하여 1,500°C에서 3시간 열처리한 후, 500°C에서 분광방사에너지를 측정 한 결과, 전방사 에너지에 대한 $2,500 \text{ cm}^{-1}$ 이하의 원적외선

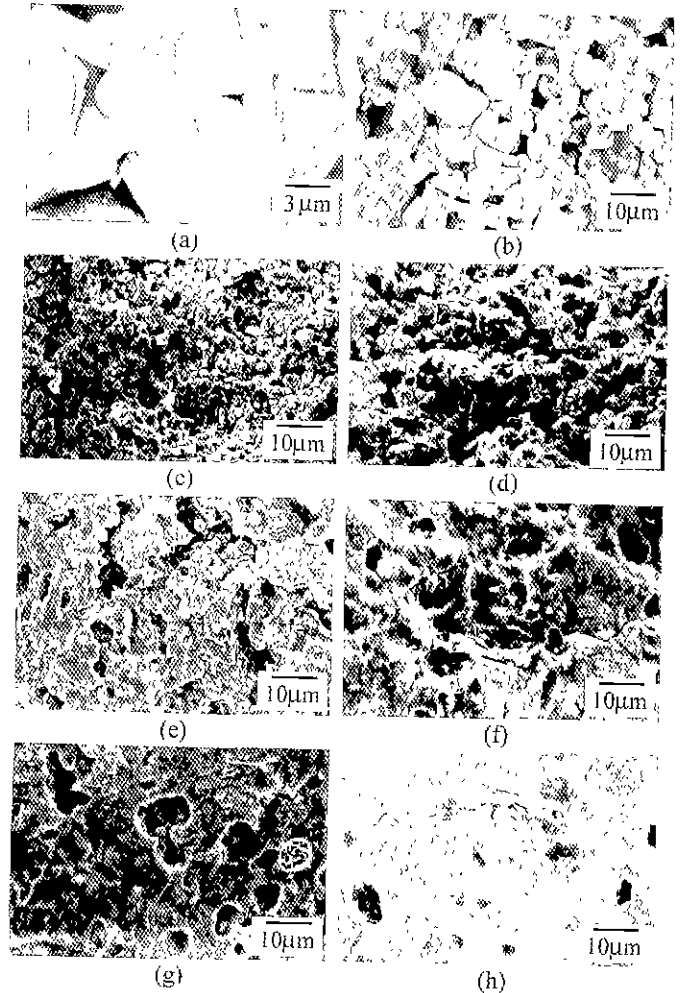


Fig. 2. SEM photographs of AT heated at 1,500°C(a), A1C(b), A2C(c), A3C(d), A4C(e) and A5C(f) heated at 1,200°C, 1,300°C(g) and 1,400°C(h) for 3 h.

방사에너지가 점유하는 비율은 Al_2TiO_5 단미 85.8%, Kibushi 점토를 50 mass%첨가한 소결체는 86.4%로서 Kibushi점토를 첨가한 시편이 보다 높은 분광방사에너지를 나타내었다.⁶⁾ 그러나, 본 실험의 적외선 분광방사율의 측정은 40°C로 가열한 시편을 $3,300 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 에서 측정하여 Sugiyama 등의 실험 결과와 비교가 곤란하지만 1,200°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 전방사 에너지에 대한 2500 cm^{-1} 이하의 원적외선 방사에너지가 점유하는 비율은 AT시편은 86.4%, A5C시편은 87.8%로서 Al_2TiO_5 -Kibushi점토 소결체보다 높은 적외선 방사율과 $2,500 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 의 원적외선 방사에너지의 양이 많음을 알 수 있다.

AT와 AC시편의 점토 첨가량과 열처리 온도에 따른 흡수율과 부피비중의 변화를 Fig 5와 6에 보인다. Table 1로부터 본 실험에서 사용한 점토는 Al_2O_3 에 대한 SiO_2 의 상대비율($SiO_2/Al_2O_3 \approx 3.6$)이 높아 점토의 첨가량과 열처리 온도가 증가할수록 시편 내 생성된 mullite와 액상에 의하여 치밀화가 진행되어 흡수율은 감소하였으나 부피비중은 증가하

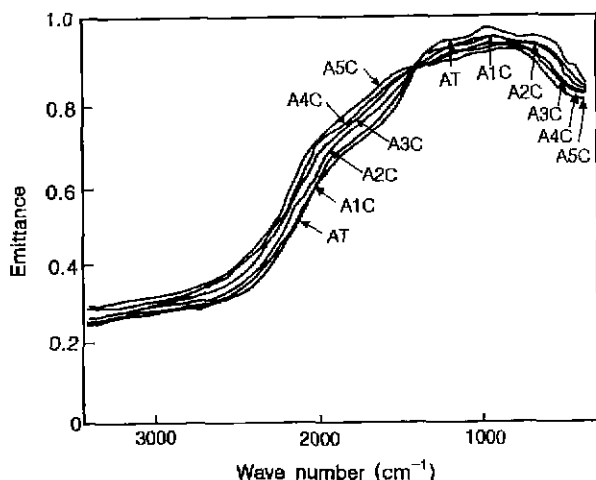


Fig. 3. Spectral emittances of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

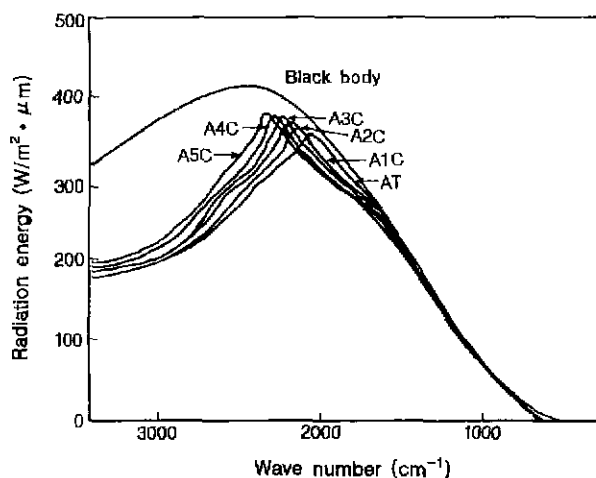


Fig. 4. Radiation energies of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

였다. Akazawa 등에 의하면 cordierite 소결체의 적외선 분광방사율은 액상 생성 등의 구성상의 변화에 따른 미세구조와 소결체의 상대밀도에 의존하여 열처리 온도가 증가함에 따라 적외선 방사율은 향상된다.¹²⁾ Al₂TiO₅의 높은 용융온도로 인하여 AT시편 내에는 액상이 생성되지 않으나 AC시편의 경우, 점토의 첨가량이 증가함에 따라 소결체 내 액상량의 증가를 Fig. 2의 SEM사진으로부터 확인할 수 있다. 따라서, 본 실험에서 제조한 AC시편은 점토의 첨가량이 증가함에 따라 형성된 액상에 의한 소결체의 치밀화와 표면요철의 소멸에 의하여 적외선 분광방사율이 향상되었음을 알 수 있다.

AT시편과 AC시편의 점토의 첨가량과 열처리 온도에 따른 3점곡강도의 변화를 Fig. 7에 보인다. 1,500°C로 열처리한 AT시편의 3점곡강도는 15 MPa로서 1,300°C와 1,400°C의 AT시편의 3점곡강도와 비슷한 결과를 나타내었다. AC시편의 경우, 점토의 첨가량과 열처리 온도가 증가함에 따라

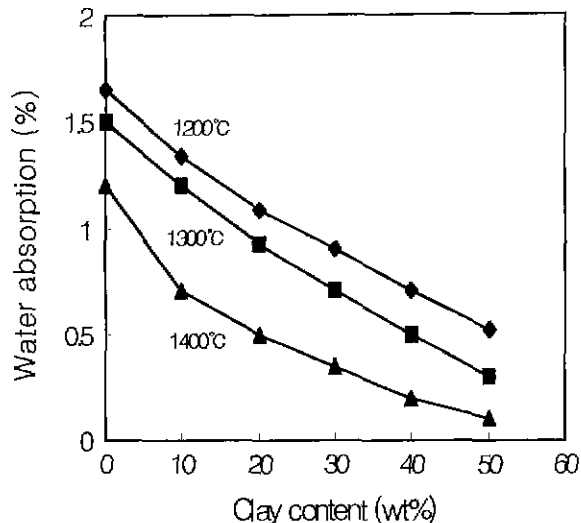


Fig. 5. Water absorptions of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

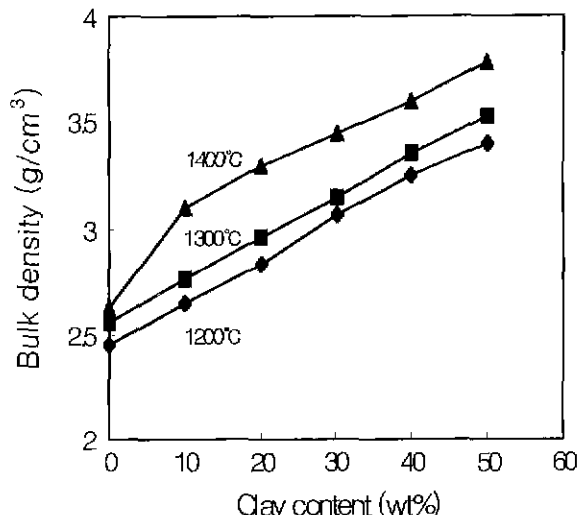


Fig. 6. Bulk densities of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

라 소결체 내에 생성된 mullite가 Al₂TiO₅의 입자성장을 억제하여 3점곡강도는 증가하였다. 12,00°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 3점곡강도는 80 MPa로서 적외선 방사체로 사용하기에 충분한 강도임을 알 수 있다.

AT시편과 1,200°C에서 3시간 열처리한 AC시편의 점토의 첨가량에 따른 승온 및 냉각과정의 열팽창곡선을 Fig. 8과 9에 보인다. Fig. 8의 승온과정 중 AC시편은 점토의 첨가량이 증가함에 따라 시편 내 미세균열이 감소하여 AT시편에 비하여 열팽창율이 증가하였으며 약 1,000~1,150°C에서 수축에 의한 변곡점이 관찰되었다. 이는 800~1,300°C에서 Al₂TiO₅(밀도 3.7 g/cm³)가 α-Al₂O₃(밀도 3.99 g/cm³)와 rutile형의 TiO₂(밀도 4.25 g/cm³)로 분해되어 약 11%의 부피수축이 발생하므로 이 변곡점은 Al₂TiO₅의 분해에 의한 것

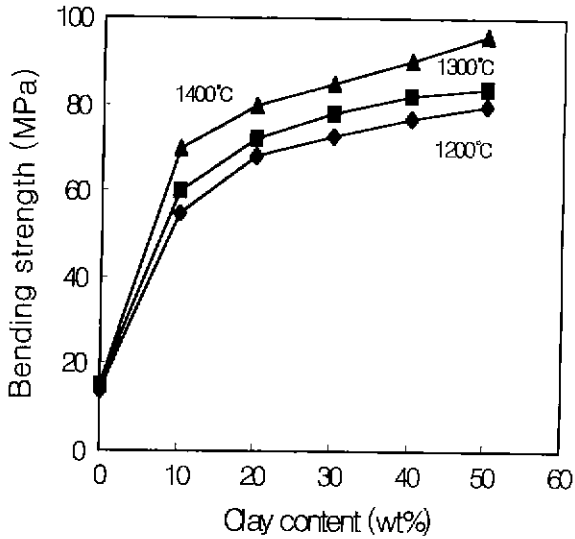


Fig. 7. Bending strengths of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

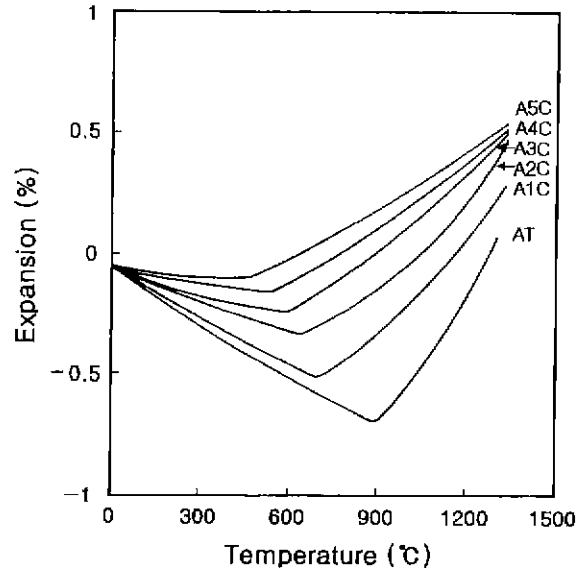


Fig. 9. Thermal expansion curves on cooling stage of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

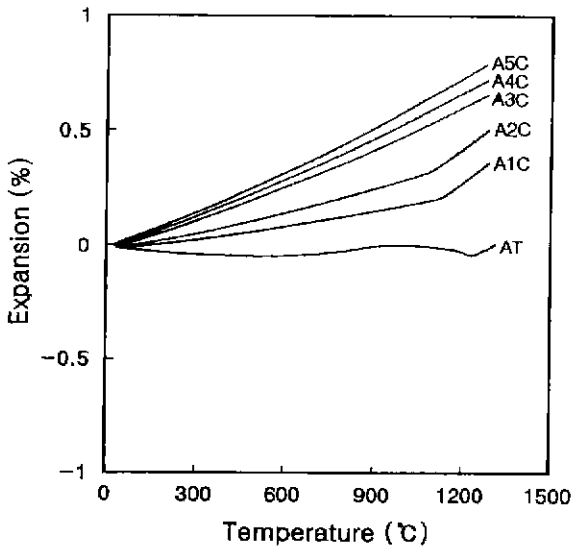


Fig. 8. Thermal expansion curves on heating stage of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

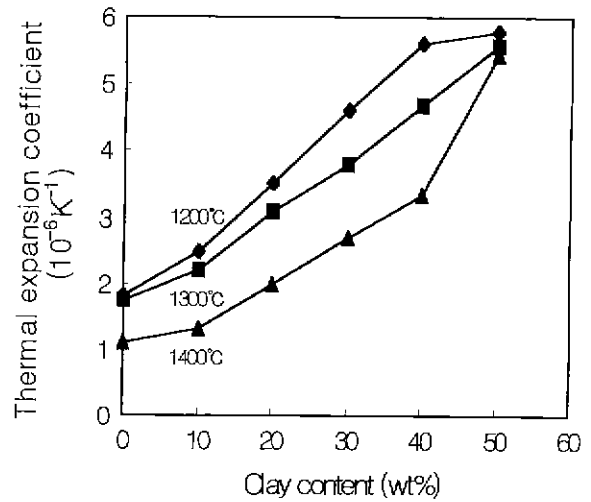


Fig. 10. Thermal expansion coefficients of AT heated at 1,500°C and AC heated at 1,200°C for 3 h.

임을 알 수 있다.¹⁰⁾ 그러나, 점토의 첨가량이 증가할수록 Al_2TiO_5 의 분해억제, 기공의 생성과 부피팽창에 의하여 완만한 수축이 관찰되었다. Fig. 9의 냉각과정 중의 AT시편은 큰 열팽창수축의 이력현상(hysteresis)을 보이지만 점토의 첨가량이 증가함에 따라 이력현상은 감소하여 30 wt%의 점토를 첨가한 시편에는 이력현상이 관찰되지 않았다. 또한, 점토의 첨가량이 증가함에 따라 미세균열 발생온도(microcracking temperature)가 낮아져 AC시편 내 미세균열이 감소하였다. 이는 점토의 첨가에 의하여 Al_2TiO_5 의 입자성장이 억제되고 미세균열이 감소하여 3점곡강도가 증가한 Fig. 7의 결과와 일치하였다.

AT와 AC시편의 점토의 첨가량과 열처리 온도에 따른 열

팽창계수의 변화를 Fig. 10에 보인다. AT시편은 열처리 온도가 증가함에 따라 열팽창계수가 감소하였는데, 이는 저온 열처리시 AT시편의 소결이 충분히 진행되지 않아 소결체 내 Al_2TiO_5 입자의 크기가 작아 저열팽창성의 원인인 입계균열의 발생이 작기 때문이다.¹⁰⁾ AC시편의 경우, 점토의 첨가량이 증가함에 따라 소결체 내 생성된 mullite에 의한 Al_2TiO_5 입자의 성장억제와 기공의 생성 및 부피팽창에 의하여 열팽창계수가 증가하였다. 그러나, 1,400°C에서 열처리한 AC시편은 Al_2TiO_5 입자간 소결의 진행에 의하여 Al_2TiO_5 입자가 성장하여 열팽창계수가 감소하였다. 1,200°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 평균열팽창계수는 $5.78 \times 10^{-6}/^{\circ}C$. 1300°C와 1400°C의 경우, $5.56 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 와 $5.42 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 를 나타내었다.

4. 결 론

Al₂TiO₅ 세라믹스의 가소성, 기계적·열적 성질의 향상과 우수한 적외선 방사체를 제조하기 위하여 정선점토를 합성 Al₂TiO₅분말에 첨가하여 Al₂TiO₅-점토 복합체를 제조하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 1200°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 2,500~400 cm⁻¹의 분광방사율은 0.94로서 AT시편의 분광방사율 0.91에 비하여 향상되었으며, 점토의 첨가량이 증가함에 따라 소결체 내에 생성된 액상에 의한 치밀화와 표면요철의 소멸에 의하여 분광방사율이 증가하였다. AT시편의 분광방사에너지는 366.42 W/m²·μm, A5C시편은 378.5 W/m²·μm로서 AT시편에 비하여 높은 분광방사에너지를 나타내었다.

2) 점토의 첨가량과 열처리 온도의 증가에 따른 소결체의 치밀화에 의하여 흡수율은 감소하였으나 부피비중은 증가하였다. 점토의 첨가량과 열처리 온도가 증가함에 따라 소결체 내 mullite가 제2상으로 존재하여 Al₂TiO₅입자의 성장을 억제하여 3점곡강도는 증가하였으며 1200°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 3점곡강도는 80 MPa로서 적외선 방사체로 사용이 가능하였다.

3) 승온과정 중의 AC시편은 점토의 첨가량이 증가함에 따라 미세균열이 감소하여 열팽창율이 증가하였으며 냉각과정의 AT시편은 큰 열팽창수축의 이력현상(hysteresis)을 나타내었지만 점토의 첨가량이 증가할수록 이력현상은 감소하여 30 wt%의 점토를 첨가한 AC시편은 이력현상이 관찰되지 않았다. 점토의 첨가량이 증가함에 따라 소결체 내 생성된 mullite에 의한 Al₂TiO₅입자 성장의 억제, 액상 생성에 의한 기공의 생성과 부피팽창에 의하여 열팽창계수가 증가하였다. 1200°C에서 3시간 열처리한 A5C시편의 평균열팽창계수는 5.78×10⁻⁶/°C, 1300°C와 1400°C의 경우, 5.56×10⁻⁶/°C와 5.42×10⁻⁶/°C를 나타내었다.

감사의 글

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

REFERENCES

1. T. Omori, "Far Infrared Technology," *Ceramics of Japan*, **23**(4), 294-299 (1988).
2. K. Takada, "Far-Infrared Radiant Ceramics and Its Application." *Ceram. of Jpn.*, **23**(4), 310-315 (1988).
3. R. Ikegami, "Application of Far Infrared-Ray in the Industrial Heating Field," *Ceram. of Jpn.*, **23**(4), 315-321 (1988).
4. 김익진, 이형복, 고영신, "Aluminum Titanate- Part 1. -Al₂TiO₅ 세라믹스의 자동차 엔진에의 응용-" 세라믹기술, **10**(1), 68-74 (1995).
5. 김익진, 이형복, 고영신, "Aluminum Titanate- Part 2. -Al₂TiO₅ 세라믹스의 고온구조 재료 산업에의 응용-" 세라믹기술, **10**(3), 283-288 (1995).
6. T. Sugiyama and H. Takashima, "Development of Aluminum Titanate-Clay Composites for Infrared Radiator." *J. of the Ceramic Society of Japan*, **105**(11), 991-995 (1997).
7. K. Hamano, Z. Nakagawa, K. Sawano and M. Hasegawa, "Effects of Additives on Several Properties of Aluminum Titanate Ceramics." *The Chem. Sci. of Jpn.*, **10**, 1647-1655 (1981).
8. Y. Ohya, K. Hamano and Z. Nakagawa, "Effects of Additives of Fe₂O₃ on Microstructure and Mechanical Strength of Aluminum Titanate Ceramics," *Yogyo-Kyokai-Shi*, **92**(5), 261-267 (1984).
9. K. Hamano, Z. Nakagawa, K. Sawano and M. Hasegawa, "Effects of Additives on Several Properties of Aluminum Titanate Ceramics," *Chemistry of Inorganic Materials of Japan*, **10**, 1647-1655 (1981).
10. T. Yano, N. Nagai, M. Kiyohara, K. Saito and N. Otsuka, "Thermal and Mechanical Properties Strength of Aluminum Titanate-Mullite Composites," *Yogyo-Kyokai-Shi*, **94**(9), 44-50 (1986).
11. 한상목, 신대용, 강상규, "저급점토를 이용한 다공성 세라믹스 제조," 세라믹학회지, **35**(6), 575-582 (1998)
12. T. Akazawa, H. Matsubara, J. Takahashi and K. Kodaira, "Sintering and Infrared Radiation Property of Mn²⁺-Substituted Cordierite Solid Solutions," *J. Ceram. Sci. of Jpn.*, **101**(9), 991-995 (1993).