

Flux법에 의한 알파 알루미나 판상체의 마이크로파 합성

박성수* · 김준호* · 김성완 · 이성환 · 박재현 · 박희찬[†]

부산대학교 무기재료공학과

*부경대학교 화학공학부

(2002년 4월 1일 접수; 2002년 5월 10일 승인)

Microwave Synthesis of Alpha Alumina Platelets Using Flux Method

Seong Soo Park*, Jun Ho Kim*, Sung Wan Kim, Sung Hwan Lee,
Jae Hyun Park and Hee Chan Park[†]

Department of Inorganic Materials Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

*Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

(Received April 1, 2002; Accepted May 10, 2002)

초 록

Flux법과 마이크로파 가열법으로 $Al_2(SO_4)_3+2Na_2SO_4$ 및 $\gamma-Al_2O_3+2Na_2SO_4$ 분말혼합물로부터 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체(platelets)를 합성하였다. $\alpha-Al_2O_3$ 판상체 형성에 미치는 마이크로파의 영향을 조사하기 위하여 DTA-TG, XRD 및 SEM을 이용하였다. $Al_2(SO_4)_3+2Na_2SO_4$ 혼합물의 경우, 마이크로파로 가열된 시료는 재래식으로 가열된 시료에 비하여 입자의 크기가 작고 응집체로 구성된 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체로 나타났다. $\gamma-Al_2O_3+2Na_2SO_4$ 혼합물의 경우, 마이크로파 가열에 의한 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체 형성온도는 재래식 가열에 의한 형성온도 보다 낮았다. 또한 마이크로파로 가열된 시료의 형상은 재래식으로 가열된 시료의 형상과 유사하였다. 그러나 마이크로파로 가열된 시료는 재래식으로 가열된 시료에 비하여 입자의 크기가 작았다.

ABSTRACT

$\alpha-Al_2O_3$ platelets were synthesized by microwave heating the two different powder mixtures of $Al_2(SO_4)_3+2Na_2SO_4$ and $\gamma-Al_2O_3+2Na_2SO_4$ using flux method. DTA-TG, XRD and SEM were used to investigate the effect of microwave on the formation of $\alpha-Al_2O_3$ platelets. In the case of the mixture of $Al_2(SO_4)_3+2Na_2SO_4$, the microwave heated sample was $\alpha-Al_2O_3$ platelets composed of aggregates with smaller particle size compared to the conventionally heated sample. In the case of the mixture of $\gamma-Al_2O_3+2Na_2SO_4$, the temperature to form $\alpha-Al_2O_3$ platelets by the microwave heating was lower than that by the conventional heating and the morphology of the microwave heated sample was similar to that of the conventionally heated sample except that the microwave heated sample had smaller particle size compared to the conventionally heated sample.

Key words : Microwave, Alpha alumina platelets, Flux, Synthesis

1. 서 론

탄성 계수, 인성 및 강도 등과 같은 기계적 성질을 향상시키기 위한 목적으로 휘스커 또는 판상체 형태의 세라믹 입자들을 금속 또는 세라믹 재료의 보강제로 사용한다. 휘스커형 세라믹 분말은 매트릭스 내에 균일하게 분산시키기 어렵지만, 판상형 세라믹 분말은 균일하게 잘 분산되므로 작업성을 용이하게 하는 장점이 있다. 특히, 세라믹 분말인 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체(platelets)를 glass, hydroxyapatite, TiO_2 , mullite, ZrO_2 , sialon, $Ce-ZrO_2+Al_2O_3$ 등에 첨가하였을 때, 이들의 기계적 성질이 향상된다고 보

고되어 있다.^{1,2)} 또한 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체는 열전도도가 유기물에 비하여 열전도도가 높으므로 열 방출을 요구하는 고분자 전자재료들에 열전도성이 양호한 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체를 첨가하여 이들의 열전도성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.^{3,4)} $\alpha-Al_2O_3$ 판상체는 flux법 또는 수열합성법에 의하여 합성되는데 이들 합성법 및 합성체 특성에 관한 연구결과가 보고되어 있다.^{4,6)} 그러나 마이크로파 열원을 이용한 $\alpha-Al_2O_3$ 판상체 합성에 대한 연구 보문은 없다.

마이크로파는 재료 내부로 침투하여 재료 전체를 빠르게 동시 가열시키는 특성 때문에 기존의 재래식 열원에 비하여 부피가열, 급속 가열, 선택적 가열 등의 장점이 있다.⁷⁾ 이러한 특성들을 가진 마이크로파를 응용하는 많은 연구가 재료의 건조, 재료의 합성 및 추출, 유기물의 합

[†]Corresponding author : hcpark2@hyowon.pusan.ac.kr
Tel : 82-51-510-2388 Fax : 82-51-512-0528

성, 세라믹스의 소결과 접합, 폐기물의 처리, 글라스의 가열 등의 분야에 활발히 진행되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 마이크로파 에너지는 물질간의 확산속도를 증가시키므로 하소 또는 소결에 요구되는 치밀화 활성화 에너지를 감소시켜서 상대적으로 낮은 온도와 짧은 시간에 하소 또는 소결을 가능케 하며, 향상된 물성 또는 상이한 미세구조 특성을 가진 세라믹 재료들을 제조할 수 있다고 보고되어 있다.¹¹⁾

본 연구에서는 flux법⁶⁾에 의한 α - Al_2O_3 판상체 합성에서, 이 합성물 생성에 미치는 마이크로파 열원의 영향을 조사 연구하였다. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 와 γ - Al_2O_3 분말에 각기 flux로 Na_2SO_4 를 혼합한 후, 재래식 전기열원 및 마이크로파 열원으로 α - Al_2O_3 판상체⁶⁾를 합성하였고, 이들의 열적 거동, 결정화 거동, 입자 형상 및 크기 등을 상호 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료 합성

출발 물질로 본 실험실에서 합성한 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ^{11,12)}(순도 98%)를 일반 전기로에서 약 300°C, 13시간동안 열처리하여 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 를 제조하였고, 제조된 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 의 일부를 약 900°C, 3시간동안 열처리하여 γ - Al_2O_3 분말을 제조하였다. 이 제조된 분말들을 X선 회절법으로 분석한 결과, 각각 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 와 γ - Al_2O_3 상만이 존재하는 것을 확인하였다. 얻어진 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 및 γ - Al_2O_3 분말들과 flux로 사용되는 Na_2SO_4 (Yakuri Pure Chemical Co., 99%)를 주어진 몰비로 칭량하여 소량의 아세톤 용액 내에서 균일하게 혼합하여 혼합 시료들을 제조하였다. 이 시료들로부터 약 10g 정도를 취한 후, 알루미늄 도가니에 투입하고 알루미늄 시트로 밀폐하였다. 밀폐된 알루미늄 도가니를 일반 전기로(SEF-101, Shin Saeng Instrument Co.)와 마이크로파 가열 장치(Hankuk Microwave Instrument Co., 주파수 2.45 GHz, 가변 최대 출력 3kW)내에 넣은 후, 약 1000°C 및 1100°C에서 약 1시간동안 열처리하고 상온으로 로냉시켰다. 냉각된 시료 내에 잔존하는 Na_2SO_4 를 제거하기 위해 1N HCl 수용액 내에서 약 80°C, 1시간동안 방치한 후, 증류수로 여러 번 세척하였고, 이들을 건조하여 최종 생성물을 얻었다.

2.2. 시료분석

시료들에 존재하는 결정상 또는 상전이를 분석하기 위하여 X-선 회절 장치(RINT 2000, Rigaku Co., Japan)를 사용하였으며, 측정 조건은 Ni-filtered $\text{CuK}\alpha$, 30 kV-25 mA, 5°/min의 주사 속도로 하였다. 시료의 열분해 거동 및 중량 감소 경향을 조사하기 위하여 10°C/min의 승온 조건에서 DTA/TG(SSC-5200, Seiko. Co., Japan)를 사용하였다. 시료들의 미세구조 및 크기는 SEM(JSM-5400, JEOL Co., Japan)을 이용하여 관찰하였다.

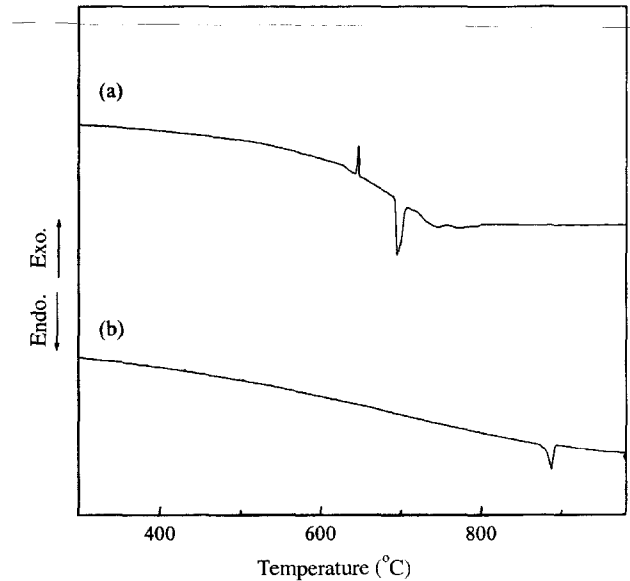


Fig. 1. DTA curves of powder mixtures of (a) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ and (b) $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$.

3. 결과 및 고찰

3.1. 혼합 시료들의 열적 거동

Fig. 1에서 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 및 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 조성을 가진 혼합 시료에 대한 DTA 시험결과 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 경우, 약 647°C에서 발열 피크가 나타났고, 약 694°C에서 흡열 피크가 나타났다. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 경우, 약 887°C에서 흡열 피크만이 나타났다. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-Na}_2\text{SO}_4$ 계 상태도¹⁴⁾를 참고로 하면, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 DTA 곡선에서 694°C에 존재하는 흡열 피크는 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 및 Na_2SO_4 성분의 공융에 기인된 것으로 사료된다. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 DTA 곡선에 존재하는 흡열 피크는 Na_2SO_4 ¹⁵⁾의 용융에 기인된 것으로 사료된다. 이 결과는 Hashimoto와 Yamaguchi⁶⁾의 연구와 거의 일치한다.

DTA 곡선에 나타난 발열 피크의 온도 전 후에서 마이크로파 열원의 영향을 분석하기 위하여 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료들을 약 10°C/min의 속도로 약 642°C 및 652°C까지 각각 재래식 및 마이크로파 열원으로 가열시킨 후 상온으로 냉각시킨 시료들을 X선 회절로 분석한 결과들을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 X선 회절 패턴들을 살펴보면, 재래식 열원으로 가열된 시료들에서는 652°C까지 가열했을 때 $\text{Na}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ 의 결정화가 일어났지만, 마이크로파 열원으로 가열된 시료들에서는 642°C 및 652°C에서 모두 $\text{Na}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ 의 결정화가 일어난 것을 볼 수 있다. 재래식에 비하여 마이크로파 열원으로 열처리하면 보다 낮은 온도에서 결정화가 잘 일어난다고 말할 수 있다. 또한, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 DTA

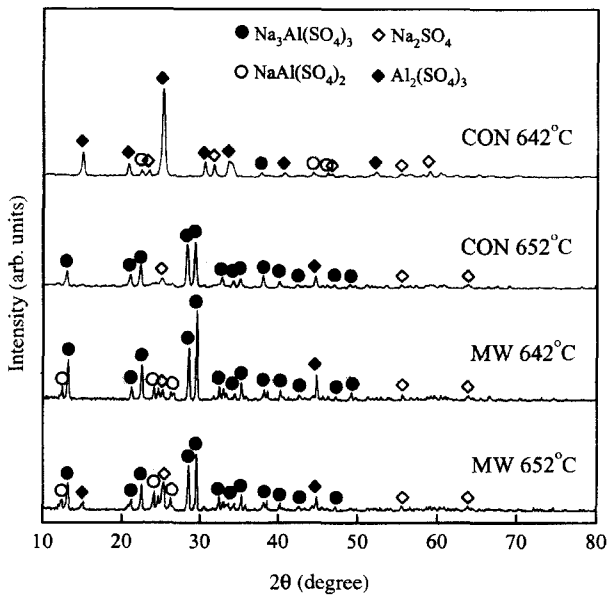


Fig. 2. XRD patterns of samples obtained by conventional heating and microwave heating a mixture of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$. Samples were heated to given temperatures at a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ and then cooled to room temperature (CON and MW denote conventional heating and microwave heating, respectively).

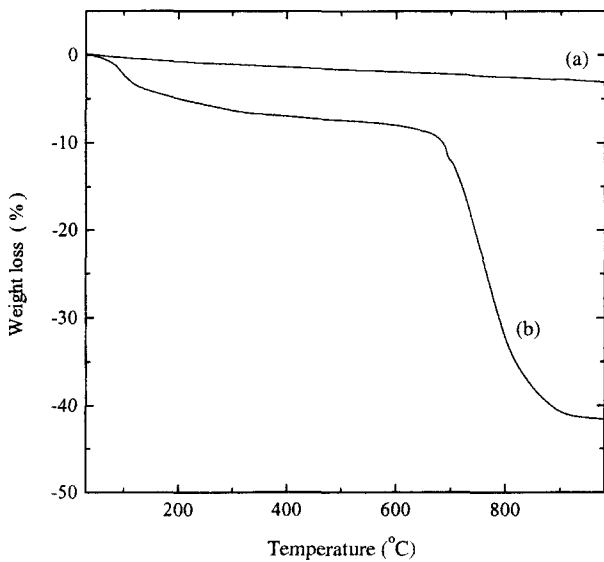


Fig. 3. TG curves of powder mixtures of (a) $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ and (b) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$.

곡선에서 나타난 발열 피크는 $\text{Na}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ 의 결정화에 기인되었다고 볼 수 있다.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 및 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 조성을 가진 혼합 시료들의 TG를 측정된 결과들을 Fig. 3에 나타내었다. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 경우, $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온 속도로 1000°C 까지 가열될 때, 약 3 wt% 정도의 중량 감

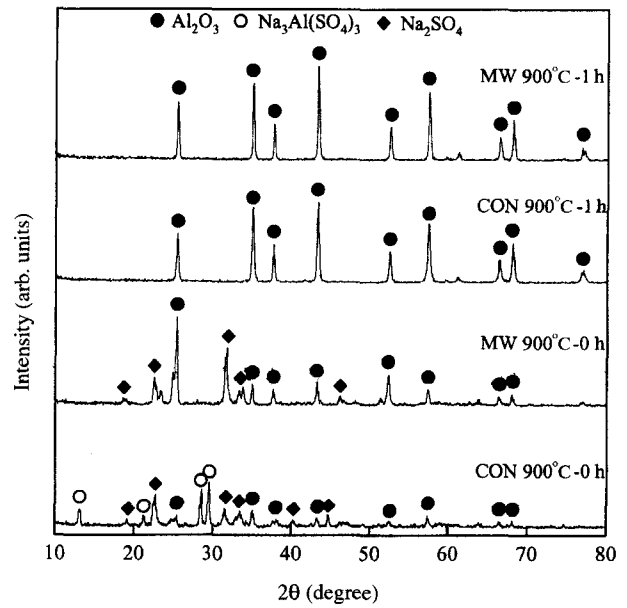


Fig. 4. XRD patterns of samples obtained by conventional heating and microwave heating a mixture of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ at 900°C with holding time for 1 h and without holding time.

소가 일어났다. 한편, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 경우, 약 670°C 에서 중량이 감소되기 시작하여 약 900°C 에서 약 42 wt%의 중량이 감소되었고, 900°C 이상에서는 거의 중량이 감소되지 않았다.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료의 중량 감소의 원인 및 마이크로파 열처리 효과를 조사하기 위하여 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료들을 재래식 및 마이크로파 열원으로 약 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 약 900°C 까지 가열시킨 후 유지시간(holding time)없이 즉시 상온으로 냉각시킨 시료들과 약 900°C 에서 1시간동안 열처리한 시료들을 X선 회절로 분석한 결과들을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 X선 회절 패턴들을 살펴보면, 약 900°C 까지 가열시킨 후 즉시 상온으로 냉각시킨 시료들에서는 마이크로파 열원으로 가열시킨 시료에서 Na_2SO_4 와 함께 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상만 존재함을 알 수 있고, $\text{Na}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ 상은 재래식 열원으로 가열된 시료에서만 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서 시료가 마이크로파로 열처리되는 동안에 마이크로파 에너지 효과가 시료내의 결정화 거동에 영향을 미쳤다고 말할 수 있다. 한편, 900°C 에서 1시간동안 재래식 및 마이크로파 열원으로 열처리된 시료들에서는 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상만이 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 약 42 wt%의 중량 감소는 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 로부터 열분해 되는 $\text{SO}_3(\text{g})$ 의 중량에 해당되는 것임을 알 수 있다.

3.2. 알루미나 판상입자의 합성 및 특성

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료를 각각 1000°C 와 1100°C

에서 1시간동안 재래식 및 마이크로파 열원으로 열처리하여 얻어진 최종 합성물의 XRD 및 SEM 분석 결과를 각각 Figs. 5 및 6에 나타내었다. Fig. 5에서 시료의 X선

회절 패턴을 살펴보면, 최종 합성물들은 모두 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상으로만 존재함을 볼 수 있다. Fig. 6의 SEM 미세 사진을 살펴보면, 최종 합성물들의 미세구조는 작은 육각형 판상

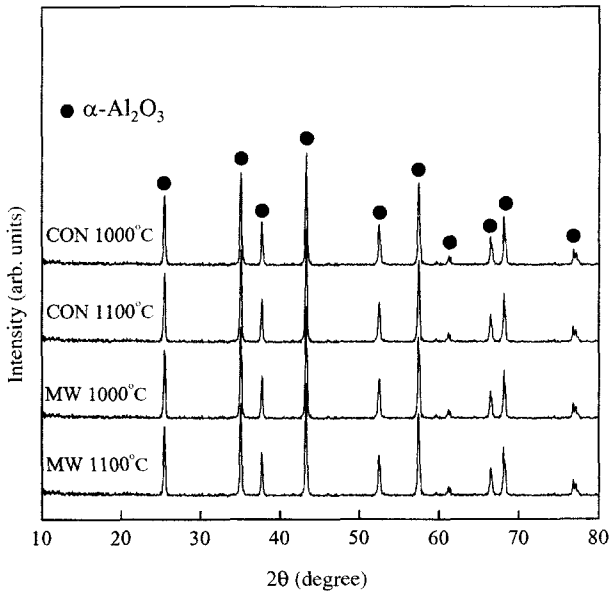


Fig. 5. XRD patterns of samples obtained by conventional heating and microwave heating a mixture of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ at 1000°C and 1100°C for 1 h.

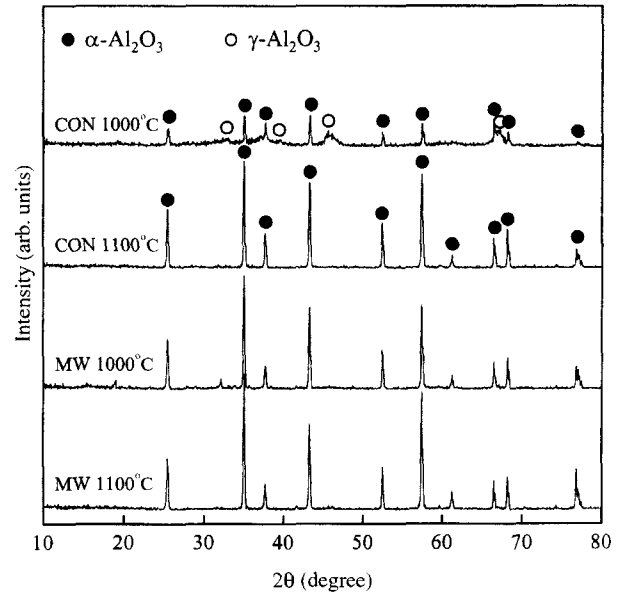


Fig. 7. XRD patterns of samples obtained by conventional heating and microwave heating a mixture of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ at 1000°C and 1100°C for 1 h.

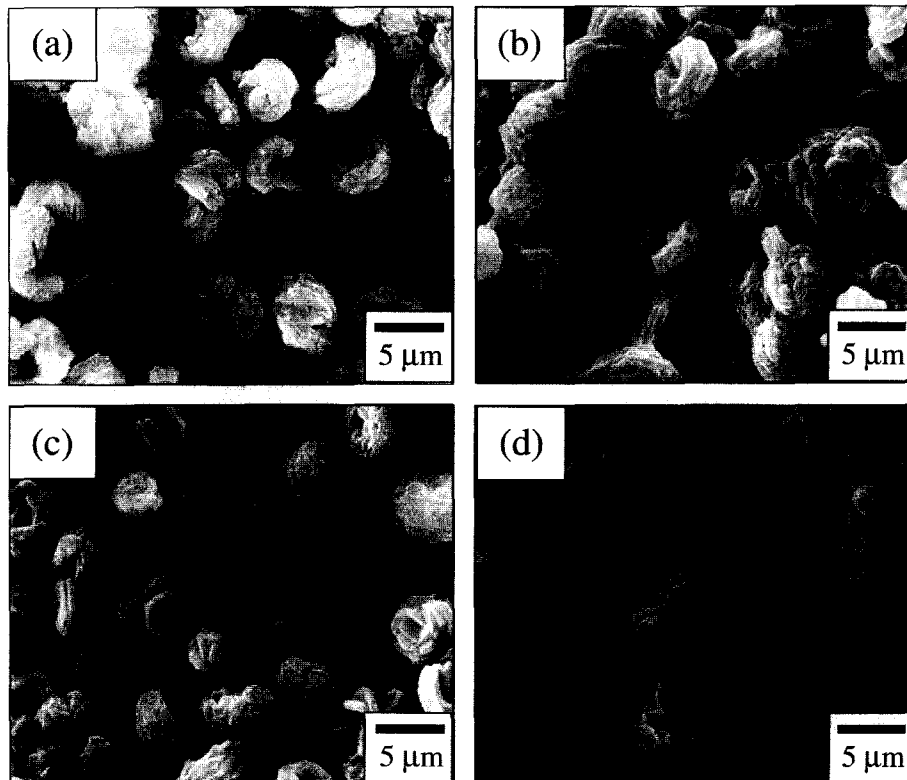


Fig. 6. SEM micrographs of samples obtained from a mixture of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ by conventional heating at (a) 1000°C and (b) 1100°C and by microwave heating at (c) 1000°C and (d) 1100°C for 1 h.

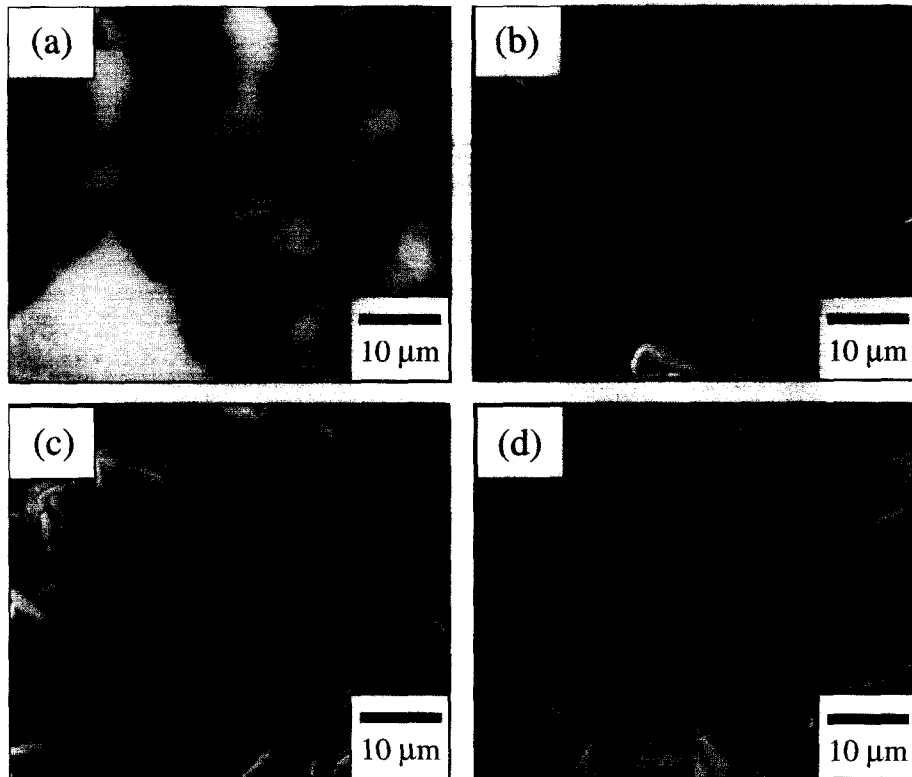


Fig. 8. SEM micrographs of samples obtained from a mixture of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ by conventional heating at (a) 1000°C and (b) 1100°C and by microwave heating at (c) 1000°C and (d) 1100°C for 1 h.

체 입자들의 응집체 형태이다. 1100°C 에서 재래식 및 마이크로파 열원으로 열처리하여 얻어진 최종 합성물들의 평균 응집체의 크기는 각각 약 7 및 $3.6\ \mu\text{m}$ 이었다. 따라서, 재래식에 비하여 마이크로파 열원으로 열처리하여 얻어진 최종 합성물의 응집체들이 상대적으로 크기가 작음을 알 수 있다.

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료를 각각 1000°C 와 1100°C 에서 1시간동안 재래식 및 마이크로파 열원으로 열처리하여 얻어진 최종 합성물들의 XRD 및 SEM 분석 결과를 각각 Figs. 7 및 8에 나타내었다. Fig. 7에서의 X선 회절 패턴을 살펴보면, 1000°C 에서 재래식 열원으로 열처리하여 얻어진 최종 합성물에서만 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 와 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상이 공존하고, 나머지 최종 생성물들에서는 모두 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상만이 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 SEM 사진을 살펴보면, 1000°C 에서 재래식 열처리하여 얻어진 최종 합성물의 미세 구조는 응집체 덩어리 형태이었고, 다른 최종 합성물들의 미세 구조는 모두 잘 발달된 육각형 판상체 입자 형태이었다. 1100°C 에서 재래식 및 마이크로파 열처리하여 얻어진 최종 합성물의 평균 입자 크기가 각각 약 12 및 $5\ \mu\text{m}$ 이었다. 이 결과들로부터 재래식에 비하여 마이크로파 열처리하여 얻어진 최종 합성물의 입자들이 상대적으로 크기가 작음을 알 수 있다.

동일한 물비의 flux에 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 또는 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를 출발 물질로 사용함에 따라 열처리된 혼합 시료들의 미세 구조가 상이한 것은 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료에서는 900°C 이상이면 액상인 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 계(공융점; 694°C)내에서 열분해된 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 으로부터 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 핵들이 생성되고, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 의 연속적인 열분해는 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 핵들로부터 결정 성장의 원동력이 되기 때문이라고 사료된다. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료에서는 900°C 이상이면 Na_2SO_4 액상(융점; 884°C) 내에서 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 가 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 상으로 상전이가 일어나면서 용액 침전 반응이 일어나기 때문이라고 사료된다.⁷⁾ 한편, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 및 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 혼합 시료들이 마이크로파 열처리되었을 때 재래식에 비하여 낮은 온도에서 결정화가 진행된 것은 마이크로파 에너지 효과에 기인한다고 볼 수 있을 것이다. 즉, 마이크로파에 의하여 물질의 확산속도를 증가시키므로 결정화 활성화 에너지를 감소시켜 재래식 열원에 비해 낮은 온도에서 용이하게 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 판상이 형성되었다고 보아진다.

4. 결 론

본 연구에서는 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 및 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 에 Na_2SO_4 를 flux로 혼합하여 재래식 및 마이크로파 열원 하에서 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 육

각형 판상체를 합성하고, 최종 합성물의 결정화 거동, 입자 크기 및 형태 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재래식 및 마이크로파 열처리하여 $Al_2(SO_4)_3+2Na_2SO_4$ 혼합 시료로부터 얻어진 최종 합성물은 작은 육각 판상체 $\alpha-Al_2O_3$ 응집체로 존재하였고, 입자의 크기는 마이크로파에 의하여 작아졌다. $\gamma-Al_2O_3+2Na_2SO_4$ 혼합물의 경우, $1000^\circ C$ 에서 재래식으로 가열된 시료는 $\alpha-Al_2O_3$ 응집체로 존재하였다. 같은 온도에서 마이크로파 열원으로 가열된 시료는 잘 발달된 육각 판상 $\alpha-Al_2O_3$ 입자로 존재하였다. $1100^\circ C$ 에서 마이크로파 열원으로 가열된 육각 판상 $\alpha-Al_2O_3$ 의 입자크기는 재래식 가열체에 비하여 작았다.
2. 마이크로파 열원에 의하여 결정화 촉진 및 입자크기를 조절할 수 있었고, 같은 온도에서 마이크로파 열원으로 가열된 시료는 재래식 열원으로 가열된 시료에 비하여 $\alpha-Al_2O_3$ 육각 판상체의 크기가 작았다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 과제번호 R01-2000-00225 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. P. S. Form, R. Pyrz, B. Clausen and E. O. Nielsen, "Indentation and Acoustic Emission in Filtration Processed Platelet Reinforced Ceramics," *Mater. Sci. Eng.*, **A197** 231-36 (1995).
2. Y. Yang, Z. Yang and Q. Yuan, " Al_2O_3 Platelet and Tetragonal Zirconia Particle Incorporation Reinforced Mullite Matrix Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, **15** 185-86 (1996).
3. D. M. Bigg, "Thermal Conductive Polymer Composites," *Polym. Compos.*, **7** [3] 125-40 (1986).
4. R. F. Hill, R. Danzer and R. T. Paine, "Synthesis of Aluminum Oxide Platelets," *J. Am. Ceram. Soc.*, **84** 514-20 (2001).
5. S. Hashimoto and A. Yamaguchi, "Formation of Porous Aggregations Composed of Al_2O_3 Platelets Using Potassium Sulfate Flux," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **19** 335-39 (1999).
6. S. Hashimoto and A. Yamaguchi, "Synthesis of $\alpha-Al_2O_3$ Platelets Using Sodium Sulfate Flux," *J. Mater. Res.*, **14** [12] 4667-72 (1999).
7. W. H. Sutton, "Microwave Processing of Ceramic Materials," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **68** [2] 376-86 (1989).
8. S. E. Lee, B. W. Kim, S. S. Park and H. C. Park, "The Study for the Characteristics of Microwave Coupled $V_2O_5-PbO-TeO_2$ Glass System(in Kor.)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [5] 438-45 (2001).
9. S. S. Park, K. S. Jung, B. W. Kim, S. E. Lee and H. C. Park, "The Synthesis and Characterization of Beta Alumina Powder by Microwave Extraction and Calcination Method(in Kor.)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [8] 749-54 (2001).
10. S. S. Park, E. H. Hwang, B. C. Kim and H. C. Park, "Synthesis of Hydrated Aluminum Sulfate from Kaolin by Microwave Extraction," *J. Am. Ceram. Soc.*, **83** [6] 1341-45 (2000).
11. H. K. Kang, K. H. Kim and H. C. Park, "Preparation of Fe-Free Alumina Powder from Kaolin," *J. Mater. Sci. Lett.*, **14** 425-27 (1995).
12. H. C. Park, J. H. Park, B. W. Kim, S. E. Lee, J. H. Kim and S. S. Park, "A Study for the Synthesis and Characterization of γ -Alumina Powder by Ultrasonic Irradiation(in Kor.)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [10] 921-27 (2001).
13. M. A. Janney, H. D. Kimrey, W. R. Allen and J. O. Kiggans, "Enhanced Diffusion in Sapphire during Microwave Heating," *J. Mater. Sci.*, **32** [7] 1347-55 (1997).
14. E. M. Levin and H. F. McMurdie, Phase Diagrams for Ceramists 1975 Supplement, American Ceramic Society, Ohio, 1975.
15. I. Brain, Thermochemical Data of Pure Substances, Part II, La-Zr, 2nd Ed., p. 1003, VHC, Germany, 1993.