

## 論文

In-situ 반응에 의한  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 기 복합재료의 제조

김재동\* · 정해용\*\* · 고성위\*\*\*

Fabrication of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  Composites by in-situ Reaction Process of Molten Al

J. D. Kim\*, H. Y. Jeong\*\* and S. W. Koh\*\*\*

## ABSTRACT

The fabrication process of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  composite by in-situ process was investigated. The effects of processing variables such as addition type and content of Mg, processing temperature and time on the infiltration behavior of molten Al, microstructure and hardness were investigated. When the pure Al was infiltrated into mixtures of Mg and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder, processing temperature required to spontaneous infiltration was decreased, and the content of Mg was the most powerful variable for infiltration of molten Al. But when the Al-Mg alloy was infiltrated into  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles, infiltration ratio indicated nearly same value regardless of Mg content in alloy and processing temperature, and critical processing temperature required to spontaneous infiltration was 800℃. The  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  composites which were fabricated by mixtures of Mg and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powders resulted in high hardness value, but hardness values were scattered due to non uniform dispersion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles by excessive reaction of Mg.

## 초 록

In-situ process에 의한  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 기 복합재료 제조시, Mg의 첨가형태와 함량, 공정온도 및 유지시간이 용융Al의 침투거동과 미세조직 및 경도에 미치는 영향을 조사하였다. Mg분말과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자의 혼합분말에 순 Al을 침투시켜 복합재를 제조하는 경우, 침투율에 영향을 주는 가장 유력한 변수는 Mg분말의 함량이며, Mg의 활발한 반응으로 700℃의 낮은 온도에서도 침투가 가능했다. 한편 Al-Mg합금을  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자에 침투시켜 복합재를 제조하는 경우 Mg함량과 공정온도에 관계없이 거의 동일한 침투율을 나타냈으며 침투 가능한 공정온도는 800℃이었다. Mg과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 혼합분말로 제조한 복합재가 Al-Mg합금으로 제조한 복합재 보다 월등히 높은 경도를 나타냈으나, 과도한 계면반응에 의한 불균일한 강화상의 분산으로 경도의 산포도는 컸다.

## 1. 서 론

금속기지복합재료(metal matrix composites :

MMC)는 경량의 금속 기지에 입자, 휘스카 및 장·단 섬유 등의 형태를 갖는 강화재를 첨가시켜 강화재의 강도 및 강성과 금속 기지의 연성 및 인성을 조합하여,

\* 경상대학교 해양산업연구소

\*\* 부경대학교 재료공학과

\*\*\* 부경대학교 제어기계공학과

기지금속에 비해 비강도, 비강성, 마모 및 피로저항에서 개선된 기계적 특성을 갖는다.

MMC 제조기술의 핵심은 강화재와 기지금속 간의 계면결합 즉 젖음성(wettability)을 충분히 얻는 것과 강화재를 기지금속 속으로 균일하게 분산시키는데 있다. 강화재의 젖음성과 균일한 분산은 강화재의 크기가 작고 기지금속과 강화재의 밀도 차가 클수록 더욱 어려워지는데[1], 기존의 MMC 제조방법인 분말야금학적 고상제조법과 금속주조법을 이용한 액상제조법과는 개념을 달리한 in-situ process에 의한 MMC 제조법은 이러한 젖음성과 균일 분산의 문제를 획기적으로 향상시킬 수 있어 최근 연구가 활발해지고 있다. in-situ 복합재료 제조법은 내부에서 화학반응에 의해 강화재가 직접 생성되기도 하고, 기지금속에 반응원료를 첨가하여 반응생성물을 형성·분산시켜 기지금속과 강화재의 젖음성 및 균일분산을 향상시키는 제조법이다. in situ 복합재료 제조법은 반응계에 따라 고상-고상반응, 기상-액상반응 및 고상-액상반응으로 나눌 수 있는데, 고상-고상반응을 이용하는 제조법에는 기존의 분말야금법에 상당하는 XD process[2]가 있고, 기상-액상반응을 이용한 제조법은 용융금속에 취입한 가스의 반응을 이용한 VLS process와 DIMOX[3,4] 및 PRIMEX법[5-7]이 있으며, in-situ 반응 금속분말을 강화재 입자와 조합하여 고상-액상반응을 이용하는 방법[8,9] 등이 있다.

본 연구에서는 Al합금의 표면장력을 감소시키고 고체-액체 계면에서의 화학반응을 증진시켜 강화재와의 젖음성을 향상시킨다고 알려진 Mg을, Al에 여러 함량별로 첨가하고 공정온도 및 시간을 변화하여 in-situ 반응에 의한  $Al_2O_3$  입자강화 Al기 복합재료의 제조를 시도하였으며, 특히 Mg의 첨가 형태와 함량, 공정온도 및 시간이 용융Al의 침투거동과 미세조직 및 경도에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용한 강화재는 순도 99.9%, 평균입경이 각각  $4\mu m$  및  $45\mu m$ 인  $Al_2O_3$ 입자를  $100^\circ C$  대기 중에서 1시간 가열 처리한 후 사용하였다. 기지재는 99.99%의 고순도 Al과  $700^\circ C$  아르곤 분위기의 전기로에서 제조한 설계조성이 Al-3wt%Mg, Al-5wt%Mg, Al-7wt%Mg 및 Al-10wt%Mg 인 Al-

Mg합금을 사용하였다.

강화재와 기지재의 조합은 반응원료인 Mg을 분말의 형태로 하여  $Al_2O_3$ 입자와 혼합한 후 순 Al을 침투시키는 경우와, Al-Mg합금을 직접  $Al_2O_3$ 입자에 침투시키는 두 가지 경우로 하였으며, 이때 모든 조건에서 강화재의 기지재에 대한 부피분율(Vf)은 20%로 일정하게 조성하였다. 조성된 재료는 내용적 약 40cc의 원통형 알루미늄 도가니에 넣고 분위기로에 장입한 뒤 가열하였으며, 분위기로는 가열 전에 진공펌프로  $1 \times 10^{-2}$  torr까지 진공한 후, 질소개스를 연속 주입하면서 출구에서 미량의 질소개스를 배출시켜 항상 질소 분위기 환경을 유지하도록 하였다. 분위기로의 가열은 약  $300^\circ C/h$ 의 속도로 승온시켰고, 일정시간 동안 유지 후 산화 방지를 위하여  $600^\circ C$ 까지 노냉을 시킨 다음, 노에서 꺼내 대기 중에서 실온까지 냉각시켰다. 공정변수로서 Al에 대한 Mg함량은 두 경우 모두 3, 5, 7 및 10wt%로 각각 조성하였으며, 공정온도는  $700^\circ C$ ,  $800^\circ C$ ,  $900^\circ C$  및  $1,000^\circ C$ , 유지시간은 1시간, 3시간 및 5시간으로 하였다.

제조된 복합재는 Mg함량, 공정온도 및 유지시간에 따른 Al의 침투거동을 조사하였다. 또한  $Al_2O_3$ 입자의 분포와 기공의 유무 및 계면의 결합상태 등을 광학현미경, SEM/EDX 및 EPMA에 한 미세조직 관찰과, 마이크로 비커스경도기에 의한 미소경도 측정에 의해 관찰하였다. 경도는 복합재의 측정방향 및 반경방향으로 2mm 등간격으로 각각 10부위 측정하였으며, 경도기의 하중은 500g, 유지시간은 10초로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용융Al의 침투거동

Table 1은 Mg분말과  $Al_2O_3$ 입자를 혼합한 시료에 순 Al을 침투시킨 경우 유지시간을 3시간으로 하였을 때의 침투 결과로, 질소개스 분위기에서 Mg함량이 3wt% 이상이고  $700^\circ C$ 이상 일 때 Al은  $Al_2O_3$ 입자 속으로 자발적 침투가 가능함을 알 수 있다. 이와같이 제조된 복합재의 개략적인 형상은 Fig. 1과 같이 나타나고 있다.

In-situ 복합재료의 제조에서 젖음성이 불량한 용융금속과 세라믹입자 사이에 젖음이 일어나, 용융금속이 세라믹입자 사이로 자발적인 침투가 가능한 것은 첨가원소인 Mg과 질소분위기의 영향 때문이다. Mg은 합

Table 1. Results of infiltration behavior of  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al}$  composites fabricated by mixtures of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles and Mg powder in nitrogenous atmosphere with various processing condition.

Mg <sub>(p)</sub> wt%	Temp.(°C)	700	800	900	1000
Pure Al		none			
Al-2Mg <sub>(p)</sub>		none			
Al-3Mg <sub>(p)</sub>		Partial	Partial	Partial	Partial
Al-5Mg <sub>(p)</sub>		Partial	Partial	Partial	Partial
Al-7Mg <sub>(p)</sub>		Partial	Partial	Partial	Partial
Al-10Mg <sub>(p)</sub>		Partial	Full	Full	Full

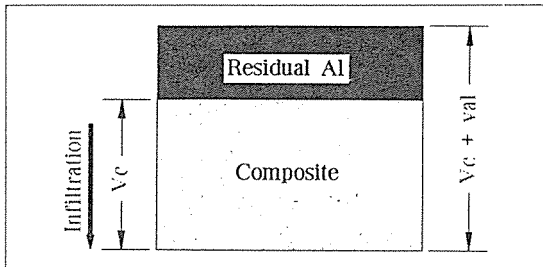


Fig. 1. Schematic drawing of fabricated composites

금의 표면장력과 고체-액체 계면에너지를 감소시키며, 고·액간 계면의 화학반응을 야기시킨다[10]. 침투에 있어서 모세관현상의 흡인력은 용융금속의 표면장력, 계면에너지 및 접촉각이 관계하는 다음의 Washburn 식으로 나타낼 수 있다

$$P = (2\gamma_{LV} \cos \theta) / r \quad (1)$$

여기서,  $P$  : 침투에 필요한 압력,  $\gamma_{LV}$  : 표면장력,  $\theta$  : 액체-고체 접촉각,  $r$  : 모세관 반경.

즉 Mg의 첨가는 용융금속의 표면장력과, 계면반응을 통한 용융금속과 강화재의 접촉각을 변화시켜 침투에 필요한 압력에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 또한 Al-Mg계에 질소개스가 유입되면 600°C 부근에서 Mg와 질소개스가 반응하여 Mg-N화합물을 형성하고, Mg-N화합물은 용융Al과 강화재 사이의 젖음성을 더욱 증진시켜, 용융Al의 강화재 입자 속으로 자발적 침투를 유도하는 것으로 사료된다.

Fig. 2~3은 Mg분말과 평균입경 4 $\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자의 혼합분말에 순 Al을 침투시킨 경우, Al에 대한 Mg 함량, 공정온도 및 유지시간 변화에 따른 침투율을 나

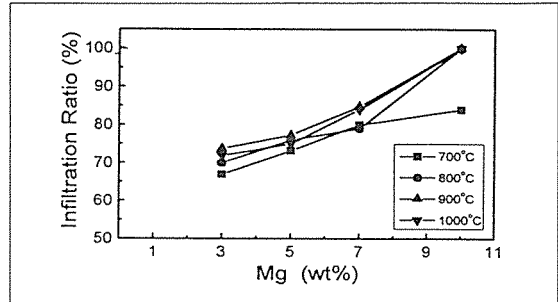


Fig. 2. Variation of infiltration ratio as a function of Mg powder content at various processing temperature for 3h

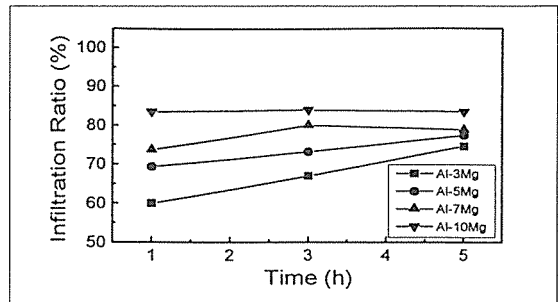


Fig. 3. Variation of infiltration ratio as a function of processing time at 700°C

타내고 있다. 여기서 침투율( $\alpha$ )은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 침투 후 응고된 층 부피에 대한 복합재의 부피, 즉  $\alpha = 100(V_c / (V_c + V_{al}))$ 로 부터 구했다. Fig. 2는 공정유지시간을 3시간으로 하고 Mg함량과 공정온도를 변화시켰을 때의 침투거동을 보이고 있다. Mg함량과 공정온도의 증가에 의해 침투율은 상승하고 있으며, Mg함량이 10wt%이상이고 800°C이상으로 가열되어 질 때 용융 Al은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자 속으로 완전 침투됨을 알 수 있다. 또한 공정온도의 증가보다는 Mg함량의 증가가 침투율에 더욱 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 3는 공정온도 700°C에서 유지시간을 변화시켰을 때의 침투율을 나타낸 것으로, Mg함량이 낮을 때는 유지시간이 침투율에 영향을 주나 Mg함량이 증가함에 따라 유지시간은 침투율에 크게 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. 이상의 침투실험 결과에서 용융 Al의 자발적 침투에 영향을 주는 가장 유력한 변수는 Mg함량에 있다는 것을 알 수 있으며, 공정온도와 유지시간은 Mg함량이 적을 때는 침투율에 영향을 주나, Mg함량이 많을 경우에는 침투율에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Table 2는 in-situ 반응원료인 Mg이 기지금속 Al

Table 2. Results of infiltration ratio of  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al}$  composites fabricated by Al-Mg alloy in nitrogenous atmosphere with various processing condition.

Temp.(℃) Mgwt%	700	800	900	1000
Al-3Mg	none	60	63	63
Al-5Mg	none	64	63	62
Al-7Mg	none	64	63	64
Al-10Mg	none	64	66	60

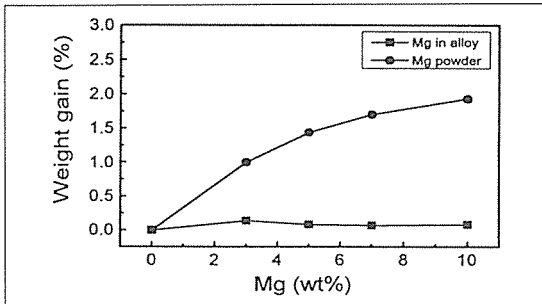


Fig. 4. Variation of weight gain according to addition type of Mg

에 합금원으로 첨가된 Al-Mg합금을 사용하여, 평균입경  $45\mu\text{m}$ 의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자 속으로 침투시켰을 경우의 침투율을 나타내고 있다. Al-Mg합금의 경우  $700^\circ\text{C}$ 에서는 Mg함량이 증가해도 전혀 침투가 일어나지 않았으나,  $800^\circ\text{C}$  이상의 온도에서는 Mg함량과 공정온도에 관계없이 전 조건에서 거의 비슷한 침투율 결과를 보이고 있다.

Fig. 4는 Mg이 기지에 합금원으로 포함되었을 경우와 분말로 강화재와 혼합하여 반응시켰을 경우의, Mg함량에 따른 반응 후의 무게증가를 보이고 있다. Al-Mg합금의 경우는 무게증가가 0.2% 이하로 극히 작고 Mg함량의 변화에 따른 무게증가의 변화가 거의 없는 데 비해, Mg분말을 강화재에 혼합하여 침투시킨 경우는 Mg함량이 증가함에 따라 무게증가가 증가하며, Mg함량이 10wt%의 경우 약 2%로 비교적 큰 무게증가를 보이고 있다. 이러한 결과는 Mg분말과 강화재 입자를 혼합한 혼합분말에 Al을 침투시킨 경우, Mg의 강한 반응성으로 젖음성을 돕는 계면반응물 이외에도 많은 다른 반응생성물이 형성되었음을 알 수 있다. 그러므로 침투만을 고려한다면, Mg을 기지에 합금원으로 첨가하는 것 보다 강화재에 직접 첨가시켜 Mg의 강한 반응성을 적극 이용하는 것이 침투율을 더욱 상승시킬 수 있고, 자발적 침투에 필요로 하는 공정온도

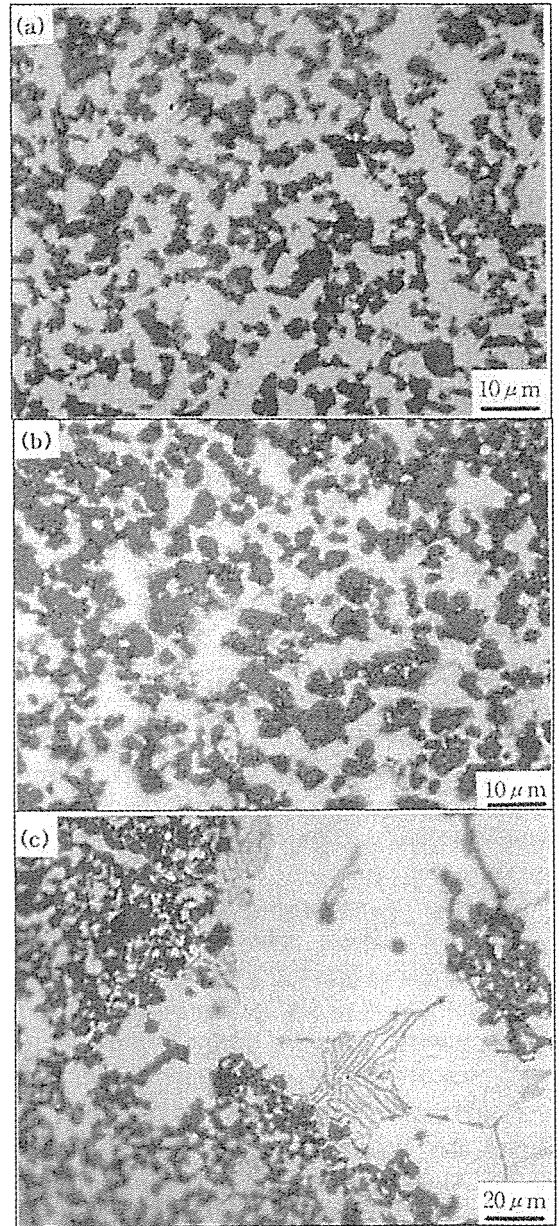


Fig. 5. Optical micrograph showing distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles in composites fabricated at  $700^\circ\text{C}$  for 3h. : (a)  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-3Mg}_{(p)}$  composite, (b)  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-10Mg}_{(p)}$  composite and (c) non uniform distribution part of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles for  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-10Mg}_{(p)}$  composite

를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

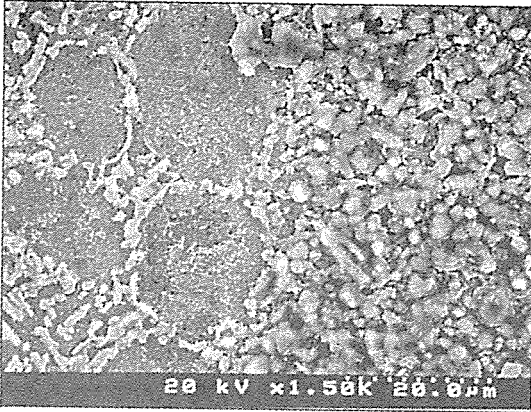


Fig. 6. SEM photograph showing boundary of composite and residual Al in  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-10Mg}_p$  composite fabricated at  $700^\circ\text{C}$

### 3.2 미세조직

Fig. 5는 Mg분말과 평균입경이  $4\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자의 혼합분말에 순 Al을  $700^\circ\text{C}$ 에서 3시간 유지시켜 제조한 복합재의 Mg함량에 따른 강화상의 분포상태와 미세조직을 관찰한 것으로, Mg함량이 증가함에 따라 강화상 주위에 반응생성물의 형성에 의해 강화상의 형상이 커지는 것을 알 수 있다. 한편 Mg의 함량이 증가함에 따라 기지에는 (c)와 같은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자가 존재하지 않는 비교적 큰 Al영역과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 강화상이 묻쳐 있는 영역이 관찰되어 강화상의 분산이 잘 이루어지지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6은 10wt% Mg분말과 평균입경이  $4\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자를 혼합하여  $700^\circ\text{C}$ 에서 제조된 복합재로, Mg분말의 함량이 높음에도 불구하고 상부에 침투되지 않은 Al이 남아 있는 것을 볼 수 있는데, 잔류Al과 복합화된 부분과의 경계부분을 SEM으로 관찰한 것이다.

Fig. 7은 평균입경  $45\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자에 Al-Mg합금을  $800^\circ\text{C}$ 에서 3시간 유지시켜 제조한 복합재의 Mg함량에 따른 강화상의 분포상태를 관찰한 것으로, Mg분말과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자의 혼합분말에 침투시킨 경우 생기는 큰 Al영역과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 강화상의 뭉침이 전혀 없이 복합재의 전 부위에 걸쳐 강화상이 매우 균일하게 분포된 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 반응생성물

Fig. 8~Fig. 10은 10wt% Mg분말과 평균입경이  $4\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자의 혼합분말에 순 Al을  $800^\circ\text{C}$ 에서 3시간 침투시켜 제조한 복합재의 계면반응 생성물을 관

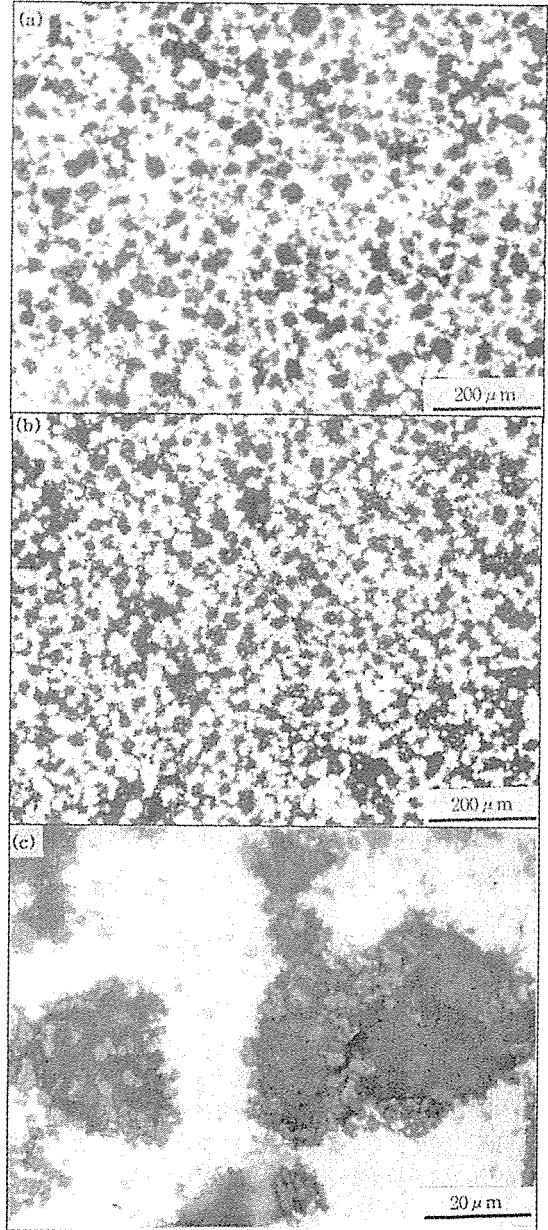


Fig. 7. Optical micrograph showing distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles in composites fabricated at  $800^\circ\text{C}$  for 3h. : (a)  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-3Mg}$  composite, (b)  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-10Mg}$  composite and (c) high magnification of (b)

찰한 것으로, Fig. 8은 Al, Mg 및 질소 원소의 EPMA에 의한 dot mapping image와 SEM 사진으로, Mg과 질소의 강도가 기지 속에 높게 분포되는 것

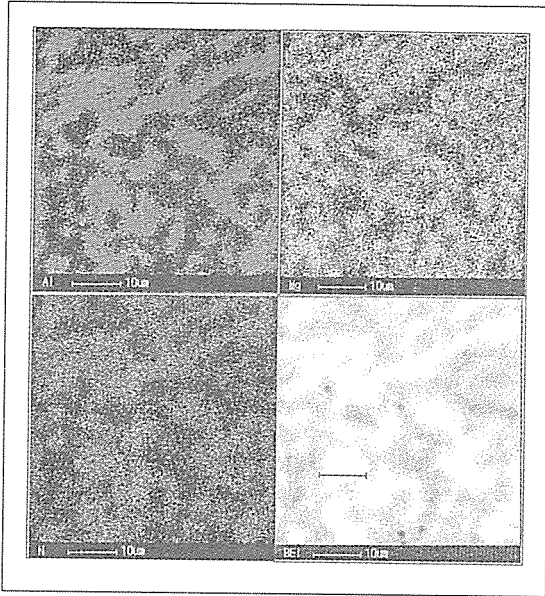


Fig. 8. EPMA mapping images of Al, Mg, N elements and SEM photograph for  $(Al_2O_3)_p/Al-10Mg_{(p)}$  composite fabricated at  $800^\circ C$

을 보이고 있다. Fig. 9는 Fig. 8의 back scatter image에 표시된 강화상의 계면에서 기지간의 원소를 EPMA로 선분석한 결과로,  $Al_2O_3$ 입자와 기지의 계면 부분에서는 기지에 비해 Mg의 강도가 매우 높고 산소의 강도 또한 비교적 높으나, 기지 속으로 가면서 Mg과 산소의 강도는 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 10은  $Al_2O_3$ 입자 계면의 SEM/EDX에 의한 결과를 나타냈는데, SEM 사진은  $Al_2O_3$ 입자 계면에 반응층이 형성되어 있는 것을 보이고 있고, EDX 분석 결과 계면에서 Mg와 산소가 관찰되고 있다. 이상의 결과로 보아  $Al_2O_3$ 입자의 계면에서  $MgAl_2O_4$ 이 생성[11,12]된 것으로 판단된다.

$MgAl_2O_4$ 를 생성하기 위한 생성식은 다음과 같다.

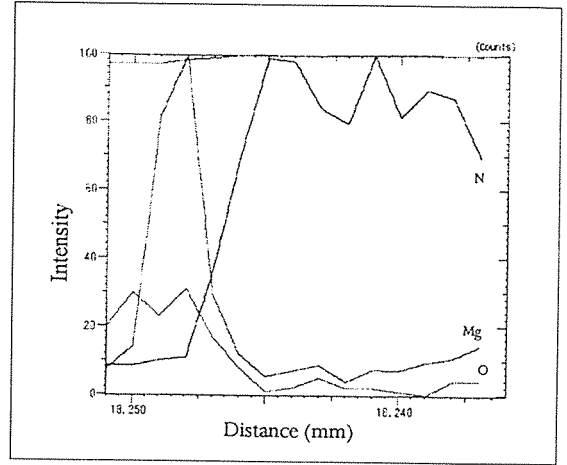
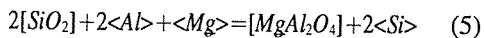
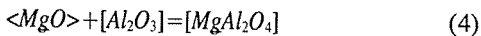
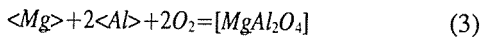
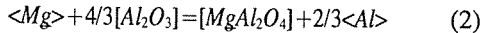


Fig. 9. EPMA line scan of Mg, N and O elements between interface of  $Al_2O_3$  particle and Al matrix for  $(Al_2O_3)_p/Al-10Mg_{(p)}$  composite fabricated at  $800^\circ C$

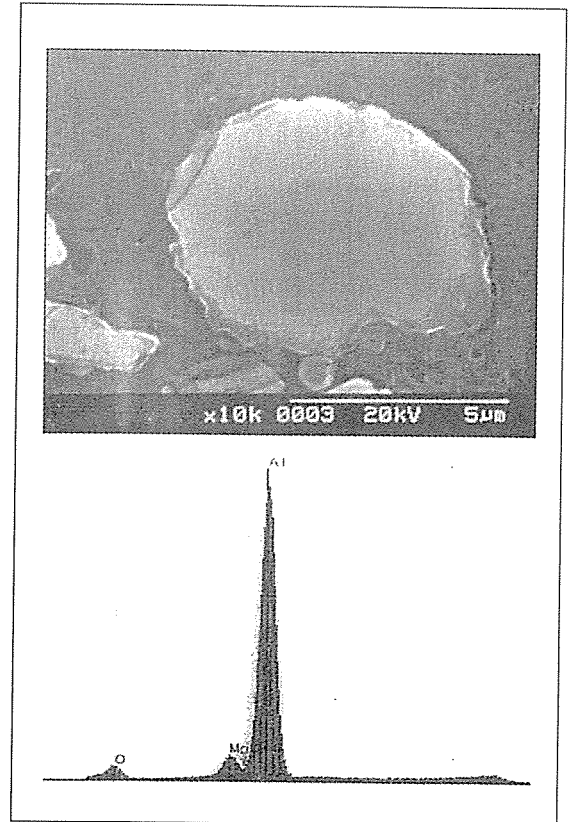


Fig. 10. SEM photograph and EDX analysis of interface of  $Al_2O_3$  particle for  $(Al_2O_3)_p/Al-10Mg_{(p)}$  composite fabricated at  $800^\circ C$

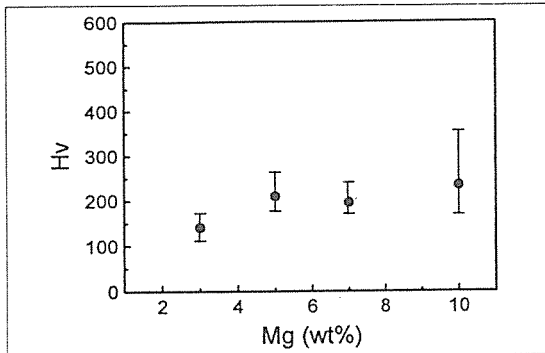


Fig. 11. Variation of hardness with Mg powder content for  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-Mg}(p)$  composites fabricated at  $700^\circ\text{C}$  for 3h.

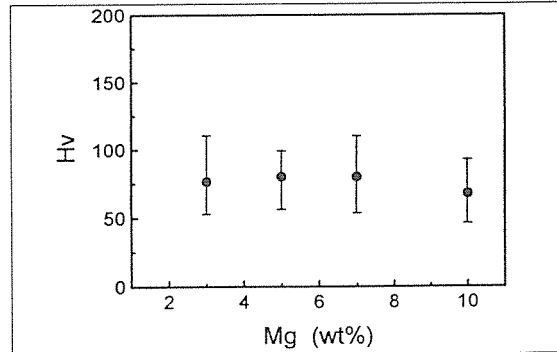


Fig. 13. Variation of hardness with Mg content for  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-Mg}$  composites fabricated at  $800^\circ\text{C}$  for 3h.

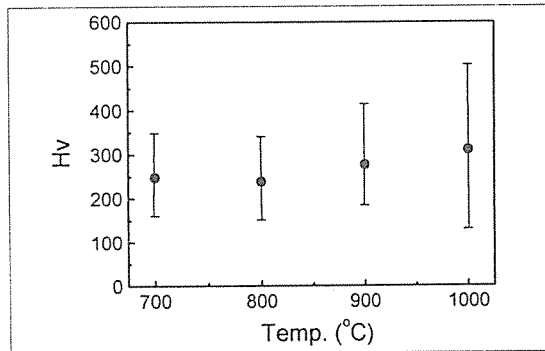


Fig. 12. Variation of hardness with processing temperature for  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al-10Mg}(p)$  composites.

여기서 < >와 [ ]는 각각 Al 용탕 내에서 액상으로 존재하는 원소와 고상으로 존재하는 원소를 나타낸다. 본 실험에서는 Mg이 분말 형태로  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자와 혼합하여 조성된 재료를 산소의 영향이 억제된 질소분위기에서 반응시켜 제조하였으므로, 용융된 Mg이  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자와 계면에서 직접 반응하여  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 와 순 Al을 생성시키는 식 (2)에 의해  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 이 생성되었을 것으로 생각된다.

한편 Fig. 9의 EPMA에 의한 선분석에서, 질소는 계면부에서는 강도가 낮으나 기지 속으로 갈수록 강도가 높아지는 것으로 나타나고 있는데, 이것은 Al-Mg 계에 유입한 질소개스의 in-situ 질화반응에 의해 기지재 속에 AlN이 생성되었기 때문인 것으로 생각된다. Mg는 개스와 용탕간의 용질이동을 향상시키는 성질이 있는 것으로 알려지고 있다[13]. 그러므로 분위기로부터 질소개스의 대류에 의한 Al용탕으로의 유입은 미미하겠지만, Mg이 기체상태의 N원자를 액체상태의 Al

용탕에 공급해 주는 중간매개체 역할을 하여 AlN의 형성이 가능하게 된 것이라 판단된다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 침투실험 후의 반응에 의한 무게증가가 Mg함량과 공정온도가 증가할 때 커지는 것은, 이러한 Mg의 성질에 기인한 AlN의 생성에 의한 것이라 생각된다.

### 3.4 경도

Fig. 11은 Mg분말과 평균입경  $4\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자를 혼합한 시료에, 순 Al을  $700^\circ\text{C}$ 에서 3시간 유지시켜 제조한 복합재의 Mg함량에 따른 경도 측정 결과이다. Mg함량의 증가에 따라 경도값이 증가하는데 이러한 경도의 증가는 반응생성물이 증가하기 때문이다. 그러나 Mg함량의 증가에 따라 기지상에 입자가 분산되지 않은 커다란 Al상과,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자와 반응생성물이 조밀하게 엉켜있는 부위가 많아지고 있어 경도값의 산포도는 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 10wt% Mg분말과 평균입경  $4\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 혼합분말에 순 Al을 침투시켜 제조한 복합재의 공정온도에 따른 경도의 변화를 나타내고 있다. 공정온도의 상승에 의해 계면반응물과 생성강화상이 많아짐에 따라 경도값은 증가하고 있으며, 경도값의 산포도가 더욱 큰 것은 강화상이 침투되지 않은 Al영역과 강화상이 밀집된 부위가 많아졌기 때문이다. 생성강화상의 경도값은 대략 Hv 300 이상의 값을 나타냈으며, 매우 취성적이어서 다이아몬드 압흔 주위에 잔 균열이 생기고 있다. 한편 일부 실험의 결과에서 보고되고 있는 복합재의 측방향 및 반경방향으로의 경도의 경사[14,15]는, 본 실험에서 제조된 복합재에서는 거의 나타나지 않았다.

Fig.13은 평균입경이  $45\mu m$ 인  $Al_2O_3$ 입자에 Al-Mg 합금을  $800^\circ C$ 에서 3시간 유지시켜 제조한 복합재의 Mg함량에 따른 경도값을 보여주고 있다. Mg분말을 사용하여 제조된 복합재에 비해 경도값은 상당히 낮아 지고 있으나, 상대적으로 경도값의 산포도는 작아 매우 균일한 강화재의 분포를 나타내고 있으며, Mg함량에 따른 경도의 변화도 거의 나타나지 않고 있다.

#### 4. 결 론

In-situ process에 의한  $(Al_2O_3)_p/Al$ 기 복합재료의 제조시, Mg의 첨가형태와 함량, 공정온도 및 유지시간 이 용융Al의 침투거동과 미세조직 및 경도에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Mg분말과  $Al_2O_3$ 입자의 혼합분말에 순 Al을 침투시켜 복합재를 제조하는 경우, 용융 Al의 자발적 침투에 영향을 주는 가장 유력한 변수는 Mg함량이며, 공정온도와 유지시간은 Mg함량이 낮을 때는 침투율에 영향을 주나, Mg함량이 높을 경우에는 침투율에 크게 영향을 주지 않는다. 한편 이 경우 Mg의 활발한 반응으로 용융Al의 침투가능한 공정온도는 낮아졌다.

2) Mg이 합금원소로 첨가된 Al-Mg합금을  $Al_2O_3$  입자에 침투시켜 복합재를 제조하는 경우, Mg함량과 공정온도에 관계없이 거의 동일한 침투율을 보이며, 침투가능한 임계공정온도는  $800^\circ C$ 이었다.

3) Mg분말과  $Al_2O_3$ 입자를 혼합한 혼합분말에 Al을 침투시키는 경우, 반응생성물로  $MgAl_2O_4$ 와 AlN이 형성되었으며, Mg함량이 증가함에 따라  $MgAl_2O_4$ 와 AlN의 형성이 증가하였다.

4) Mg분말과  $Al_2O_3$ 입자를 혼합한 혼합분말에 Al을 침투시킨 경우가, Al-Mg합금을  $Al_2O_3$ 입자에 침투시켜 복합재를 제조하는 경우보다 월등히 높은 경도를 나타냈으나, 과도한 계면반응에 의한 불균일한 강화상의 분산으로 경도값의 산포도는 컸다.

#### 참고문헌

1. Franck, A. G., Quenisset, J. M. and Naslain, R., "Discontinuously-Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Comp. Sci. & Tech.*, Vol.30, 1987, pp.155-183.

2. Brinkman, H. J., Duszczek, J. and Katgerman, L., "Influence of matrix alloying elements on reactive synthesis of 2124 aluminium alloy metal matrix composites", *Mat. Sci. & Tech.*, Vol.14, 1998, pp.873-876.

3. Aghajanian, M. K., Macmillan, N. H., Kennedy, C. R., Luszcz, S. J. and Roy, R., "Properties and microstructures of Lanxide  $Al_2O_3$ -Al ceramic composite materials", *J. of Mat. Sci.*, Vol.24, 1989, pp.658-670.

4. Urquhart, A. W., "Novel reinforced ceramics and metal : a review of Lanxide's composite technologies", *Mat. Sci. & Eng.*, Vol. A144, 1991, pp.75-82.

5. Aghajanian, M. K., Rocazella, M. A., Burke, J. T. and Keck, S. D., "The fabrication of metal matrix composites by pressureless infiltration technique", *J. of Mat. Sci.*, Vol.26, 1991, pp.447-454.

6. Aghajanian, M. K., "Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites Via Pressureless Metal Infiltration", *Research Guideline for Aluminum Product Application in Transportation and Industry : ASME Workshop*, 1993, pp.45-53.

7. Aghajanian, M. K., Langensiepen, R. A., Rocazella, M. A., Leighton, J. T. and Anderson, C. A., "The effect of particulate loading on the mechanical behavior of  $Al_2O_3/Al$  Metal-Matrix composites", *J. of Mat. Sci.*, Vol.28, 1993, pp. 6683-6690.

8. Nakata, H., Chou, T. and Kanetake, N., "Development of Spontaneous Infiltration in-situ Production Process for Fabrication of Particulate Reinforced Aluminum Composites", *J. of Japan Inst. of Met.*, Vol.58(7), 1994, pp.803-809.

9. Nakata, H. and Chou, T., "In-situ Formation of Carbide Particles in Liquid Aluminum", *J. of Japan Inst. of Met.*, Vol.57(11), 1993, pp.1317-1324.

10. Pai, B. C., Ramani, G., Pillai, R. M. and Satyanarayana, K. G., "Review : Role of magnesium in cast aluminum alloy matrix composites", *J. Mat. Sci.*, Vol.30, 1995, pp.1903-1911.



11. Dudek, H. J. and Borath, R., "Spinel growth in the interface of  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fibre reinforced aluminum piston alloys", J. Mat. Sci., Vol.31, 1996, pp.795-805.

12. Papworth, A. and Fox, P., "Formation of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  at interface between a squeeze cast piston alloy and Saffil fibre reinforcement", Mat. Sci. & Eng., Vol.13, 1997, pp.912-917.

13. 전형준, 김도향, 이명수, 신광선, "Al-Mg 합금에서 in-situ 반응에 의한 AlN의 형성", 대한금속학회지, Vol.36(5), 1998, pp.706-714.

14. Chen, Y. and Chung, D. D. L., "Aluminum-matrix silicon carbide whisker composites fabricated by pressureless infiltration", J. of Mat. Sci., Vol.31, 1996, pp.407-412.

15. Kobashi, M., Ohura, T. and Chou, T., "In situ processing of  $\text{TiB}_2$ , AlN/Al composites by spontaneous infiltration technique and the hardness of the composites", J. of Japan Light Metal, Vol.45(7), 1995, pp.397-402.