

무가압 침윤법에 의한 Al_2O_3/Al 복합재료 제조와 기계적 특성

이동윤 · 박상환 · 이동복*

한국과학기술연구원 복합기능 세라믹스 연구센터

*성균관대학교 공과대학 금속공학과

(1998년 1월 5일 접수)

Fabrication and Mechanical Property of Al_2O_3/Al Composite by Pressureless Infiltration.

Dong-Yun Lee, Sang-Whan Park and Dong Bok Lee*

Multi-functional ceramics research center, KIST,

*Dept. Metallurgical Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

(Received January 5, 1998)

요 약

무가압 침윤에 의해 Al_2O_3/Al 복합재료를 제조하였으며, Mg 및 Si 합금원소, 침윤공정 및 분위기 등이 무가압 침윤공정에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 합금원소와 침윤분위기가 Al_2O_3/Al 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향에 관하여 조사하였다. Al_2O_3/Al -(Si)-Mg 복합재료의 무가압 침윤은 질소분위기와 Al내에 Mg가 함유되어 있을 때에만 가능하였다. Al 합금내의 Mg함량과 침윤공정에 따라 $700^\circ C$ 이상의 온도에서 무가압 침윤에 의한 Al_2O_3/Al 복합재료의 제조가 가능하였다. Al_2O_3/Al -Mg 복합재료의 파괴강도는 $800MPa$ 정도이며, Al_2O_3/Al -Si-Mg 복합재료는 $400MPa$ 정도로 나타났다. 합금원소로써 Si가 첨가되면 Al_2O_3/Al -Si-Mg 복합재료의 고온에서의 Al 합금의 유동성 증가에 의한 무가압 침윤을 촉진시키지만 Al 합금기지와 Al_2O_3 입자의 계면강도를 감소시켜 파괴강도가 감소되는 것으로 관찰되었다.

ABSTRACT

The fabrication of Al_2O_3/Al composite by pressureless infiltration was investigated by the change of Mg and Si content in Al alloy, infiltration process, and infiltration atmosphere. The effect of alloying elements, infiltration atmosphere, and interfacial reactants between Al alloy matrix and Al_2O_3 particles were investigated in terms of bending strength and hardness test. The fabrication of Al_2O_3/Al composite by the pressureless infiltration was done in nitrogen atmosphere with Mg in Al alloy. It was successfully fabricated at $700^\circ C$ according to Mg contents in Al alloy and infiltration condition. Because Mg in the Al alloy and nitrogen atmosphere of infiltration condition produced Mg-N compound (Mg_3N_2), it decreased the wetting angle between molten Al alloy and Al_2O_3 particles by coating on surface of Al_2O_3 particles. The fracture strength of Al_2O_3/Al -Mg composite was $800MPa$ and Al_2O_3/Al -Si-Mg composite was $400MPa$. Si in Al alloy decreased the interfacial strength between Al alloy matrix and Al_2O_3 particles.

Key words : Pressureless infiltration, Mg-N compound, Interfacial strength

1. 서 론

금속기지 세라믹스강화 복합재료는 우수한 내마모성, 고온강도, 피로저항 및 경량성 등의 우수한 특성으로 자동차 열기관, 항공기, 선박 등의 구조용 소재로의 응용과 환경오염, 열효율, 그리고 소재의 재활용 등의 측면에서 구조재료로써 중요한 소재로 인식되고 있다. 최근에는

MMC가 금속재료와 비교해 제조 가격 면에서 경쟁력을 갖추게 되었으며, Al의 저밀도와 고인성, 저렴한 가격 등의 우수한 성질 때문에 Al 합금 matrix에 particles, whisker, 또는 continuous long fiber등의 세라믹스 보강재를 사용한 세라믹스 강화 복합재료의 개발에 관한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다. 세라믹스 강화 금속기지 복합재료는 heat exchanger, high-tem-

perature furnace, aerospace 분야, 자동차 마찰마모재, electronic packaging 분야, optical system 분야 그리고, gas-turbine, rocket, piston engine 분야 등의 구조용 소재로서 응용이 가능한 것으로 알려져 있다. 세라믹스 강화 금속기지 복합재료의 제조방법에는 용탕 교반법, 반응고 주조법, 가압 침윤법, 분무 적층법, 무가압 침윤법 등이 일반적으로 사용되고 있다. 상압에서 용융 금속을 세라믹스 preform에 무가압으로 침윤시켜 세라믹스 입자 강화 Al기지 복합재료를 제조하는 방법은 일반적으로 사용되고 있는 용탕 교반법, 반응고 주조법 등에 비하여 제조 단가가 높고 대량생산이 곤란하다는 단점이 있다. 그러나 무가압 침윤법은 보강재의 표면 손상이 거의 없고, 보강재의 비율이 50vol.% 이상인 복잡한 형상을 갖는 복합재료를 net-shape 또는 near-net-shape으로 만들 수 있다는 장점 때문에 현재 무가압 침윤법의 연구가 활발히 이루어지고 있다.¹⁻³⁾

자동차 엔진부품에 사용되는 Al기지 복합재료내의 보강재의 비율은 세라믹스 입자(SiO_2 나 Al_2O_3) 강화 복합재료에서는 50 vol.%~70 vol.%이며 SiC , SiO_2 , Al_2O_3 , Carbon 등의 세라믹스 섬유 강화 복합재료에서는 50vol.% 이상 사용되고 있다. 따라서, 무가압 침윤에 의해 제조한 복합재료는 자동차용 부품의 소재로 응용이 가능할 것으로 생각된다.

Al_2O_3 bed에 대한 용융 Al의 무가압 침윤은 일반적으로 질소 분위기와 Al 합금내에 Mg가 일정량 이상 함유되어 있어야 가능한 것으로 알려져 있다.^{2,4)} 무가압 침윤이 일어나기 위한 Al 합금내 Mg의 함량은 5 wt.% 이상이어야 하며, 아르곤과 진공 분위기에서는 무가압 침윤이 일어나지 않고 질소와 아르곤의 혼합 가스를 사용할 경우 질소의 함유비가 10 vol.% 이상이 되면 부분적인 무가압 침윤이 일어나며 혼합 가스내의 질소가 25 vol.%를 넘으면 완전한 침윤이 일어난다고 알려져 있다.^{2,4)} 그러나, 정확한 침윤기구 규명 및 침윤조건은 확립되어 있지 않다.

본 연구에서는 무가압 침윤법에 의해 Al_2O_3 보강재 bed에 용융 Al 합금을 침윤시켜 Al_2O_3 , $Al_2O_3/Al-6wt.\%Mg$ 복합재료의 3점 굽힘강도는 800 MPa 정도이었고, Al 합금내 기 위하여 Mg 및 Si 합금원소의 함량, 침윤 공정 및 분위기 등을 변화시켜 최적 무가압 침윤공정 조건에 관하여 조사하였다. 또한 합금원소와 침윤 분위기와 Al 기지와 Al_2O_3 입자사이의 계면생성물이 Al_2O_3/Al 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

2. 실험방법

무가압 침윤 실험에서 사용한 Al_2O_3 분말은 일본 소화

Table 1. Composition of Al Alloy used for Pressureless Infiltration

Analyzed alloy Composition	Composition(Analysis : ICP, SP) wt%	
	Si	Mg
Pure Al	-	-
Al-6wt.%Mg	-	5.7
Al-3wt.%Si-6wt.%Mg	2.7	6
Al-5wt.%Si-6wt.%Mg	4.2	5.5

전공의 WA-#600(입자크기 20μ)의 Al_2O_3 분말이었으며, Al_2O_3 분말은 1400°C 대기중에서 1시간 열처리하여 분말 표면에 남아있을 OH-기를 제거한 뒤 사용하였다. 본 실험에 사용된 Al 및 Al 합금의 조성은 Table 1에서 보여주는 것과 같으며 Al 합금은 99.99%의 고순도 Al과 순도 99.9% 이상인 Mg 및 Si를 사용하여 700°C 아르곤 분위기의 유도 용해로에서 제조하였다. 제조된 Al 합금은 430°C~530°C의 범위에서 8~10시간 균질화 처리 한 뒤 hot water quenching 하여 100g 단위로 절단하여 사용하였다. 순수한 Al 및 Al 합금은 60°C 10 wt.% NaOH 수용액 및 50 vol.% HNO₃ 용액에서 세척하여 표면의 불순물을 제거한 후 아세톤으로 5분간 초음파 세척하여 무가압 침윤 실험에 사용하였다.

Al 및 Al합금의 무가압 침윤에 의한 Al_2O_3/Al 복합재료는 Al_2O_3 도가니내의 Al_2O_3 분말 위에 Al 및 Al 합금을 위치시킨 후 700°C~1100°C 온도 범위에서 5°C/min로 승온하여 Al 및 Al합금을 Al_2O_3 분말에 침투시켜 제조하였다. 무가압 침윤시 사용된 분위기는 진공(10^{-3} Pa이하), 고순도 아르곤(99.9999%) 및 질소(99.9999%) 분위기 이었다.

무가압 침윤법에 의해 제조한 복합재료는 광학현미경 및 SEM을 사용하여 복합재료의 미세조직 및 파단면을 관찰하였으며, Al_2O_3 입자와 Al 기지와의 계면에서 Al, Mg, Si, N, O 원소의 함량을 EPMA(CAMECA SX-50)를 사용하여 정량 분석하였다. 무가압 침윤법에 의해 제조한 Al/Al_2O_3 복합재료의 기계적 특성 측정에 사용된 시편은 $Al_2O_3/Al-6wt.\%Mg$, $Al-3wt.\%Si-6wt.\%Mg$, $Al-5wt.\%Si-6wt.\%Mg$ 이었으며 각 시편들은 750°C와 800°C, 1000°C에서 무가압 침윤법에 의해 제조하였다.

무가압 침윤법에 의해 제조한 Al_2O_3/Al 복합재료의 파괴강도와 경도는 침윤온도 및 합금조성에 따라 조사하였다. 파괴강도는 Instron (Model 4200)을 사용하여 3점 굽힘 강도 측정 방법으로 측정하였으며 load cell은 100 kg, cross head speed는 0.5 mm/min, lower span 길이는 10 mm로 하였으며, 파괴강도 측정용 시편의 크기는 $3 \times 4 \times 15$ mm 이었다. 복합재료의 경도 측정은 시

편을 SiC paper와 30 μm diamond paste로 연마하여 시편 표면을 Rockwell 경도로 시편당 8회 측정하여 평균치로 경도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Al₂O₃ 분말 bed에 대한 순수한 Al의 침윤은 700°C~1100°C 온도범위와 진공, 질소, 아르곤 분위기 모두에서 침윤이 일어나지 않았다. Mg이 첨가된 Al과 Al-Si합금에서도 진공과 아르곤 분위기에서는 모든 온도범위에서 무가압 침윤이 일어나지 않으며, 질소 분위기하 700°C 이상의 온도에서 용융 Al 합금의 Al₂O₃에 대한 무가압 침윤이 가능하였다.⁵⁾ 무가압 침윤에 의한 Al₂O₃/Al 복합재료의 제조는 질소 분위기에서의 Al 합금의 Mg함량에 따라 무가압 침윤 결과가 다르게 나타났으며, Al 합금내 Mg의 함량이 3wt.%이상일 때 Al₂O₃에 대한 침윤이 가능하였다. Al 합금내 Mg의 함량이 증가할수록 침윤 온도는 낮아지며 Mg의 함량이 6wt.%이상일 때는 700°C에서도 부분적인 침윤이 가능하였다.

세라믹에 대한 용융 금속의 자발적인 침윤은 세라믹스와 용융 금속의 wettability에 기인한다.²⁵⁾ 그러나, 세라믹스 기관에 대한 용융 Al 및 Al 합금의 wetting angle 측정 결과 900°C 이하의 온도에서는 진공, 아르곤, 질소분위기에서 적침이 일어나지 않았으나,^{5,6)} 본 실험의 무가압 침윤은 질소분위기와 Al 내에 Mg를 첨가

하였을 때 700°C에서도 침윤이 일어났다. Mg를 첨가한 Al 합금의 무가압 침윤은 Al 합금 표면에 형성된 Al₂O₃ 산화피막이 capillary force에 의해 파괴되고 Mg는 600°C부근의 온도에서 휘발하기 시작하며 휘발된 Mg 가스가 Al₂O₃ 입자 위에 질소가스와 반응하여 Mg-N화합물(Mg₃N₂)이 형성된다.⁵⁾ Al₂O₃ 입자 표면에 형성된 Mg-N화합물(Mg₃N₂)은 Al₂O₃ 입자와 용융 Al과의 wettability를 향상시켜 800°C이하의 온도에서도 무가압 침윤이 일어나 Al₂O₃/Al 복합재료를 제조할 수 있는 것으로 알려져 있다.^{4,5,7)} 또한, Mg₃N₂ 화합물의 형성이 더욱 용이해지는 600°C까지 진공을 유지한 뒤 질소가스를 주입한 공정에서는 Al 합금내 Mg의 함량이 3wt.%인 합금에서도 800°C이하의 온도에서 무가압 침윤에 의한 복합재료의 제조가 가능하였으며, Mg 함량이 6wt.%인 합금에서는 700°C에서도 부분적으로 Al₂O₃/Al 복합재료를 제조할 수 있었다. Fig. 1은 무가압 침윤법에 의해 800°C와 1000°C에서 제조한 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg와 Al-5wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료의 XRD 분석결과를 보여 준다. Fig. 1(a)와(b)는 무가압 침윤에 의해 800°C에서 제조한 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg와 Al-5wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료를 XRD 분석한 것으로 복합재료도 Al과 Al₂O₃로 이루어져 있음을 알 수 있다. Fig. 1(c)와 (d)는 1000°C에서 제조한 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg와 Al-5wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료의 XRD 분석 결과로써 Al과 Al₂O₃ 외에 Fig. 1(a)와 (b)에서는 관찰할 수 없었던 AlN이 검

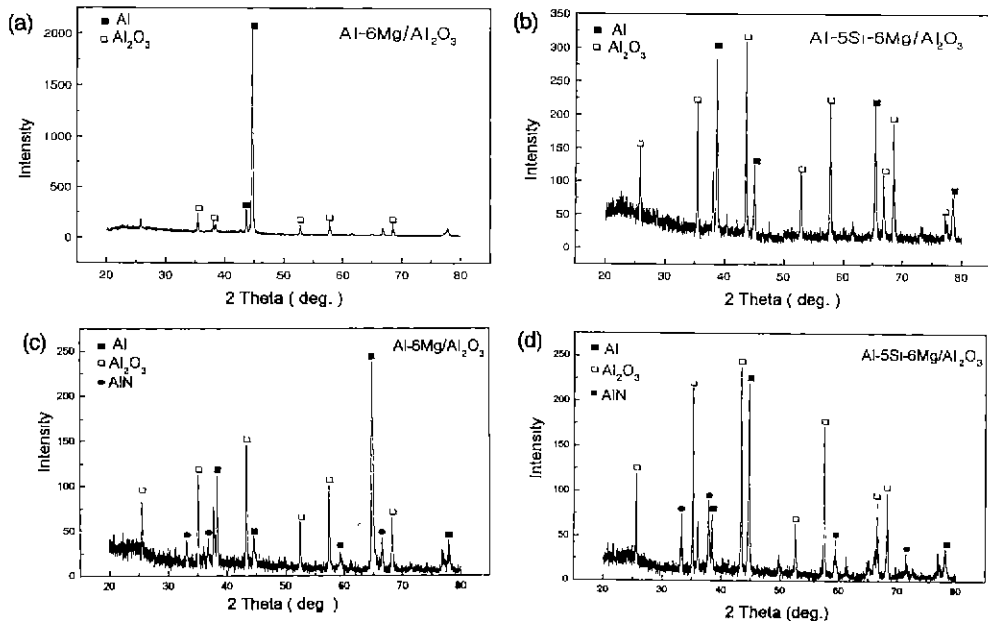


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of Al₂O₃/Al-Mg, Al-Si-Mg composites fabricated at (a),(b) 800°C and (c),(d) 1000°C.

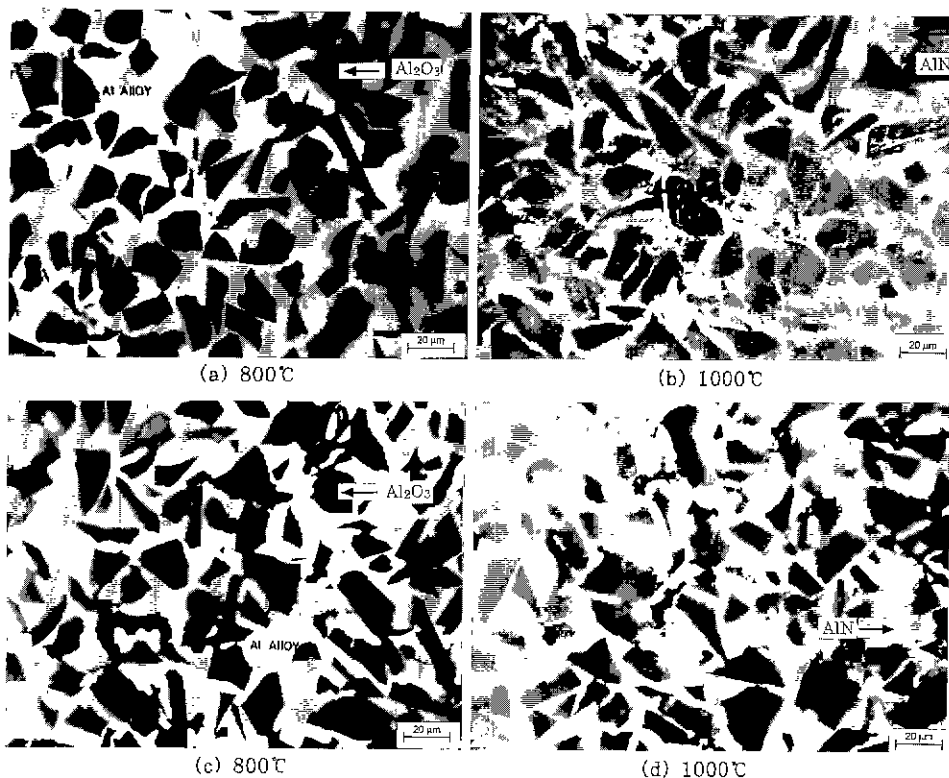


Fig. 2. Optical micrographs of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-Mg}$, Al-Sr-Mg composites fabricated by pressureless infiltration method using (a),(b) Al-6wt.%Mg alloy, (c),(d) Al-5wt.%Si-6wt.%Mg alloy.

출되었다. 그러나 무가압 침윤에 의한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료의 XRD 분석결과 Mg_3N_2 는 관찰할 수 없었다. Fig. 2는 800°C와 1000°C에서 무가압 침윤에 의해 제조한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-6wt.\%Mg}$ 와 $\text{Al-5wt.\%Si-6wt.\%Mg}$ 복합재료의 미세조직을 보여준다.

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료내의 Al_2O_3 입자가 Al 합금 기지 내에 균일하게 분포되어 있으며 기공이 없는 치밀한 미세구조를 보여준다. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료내 Al_2O_3 입자의 부피 분율은 평균 50vol.%를 유지하였다. 또한, 무가압 침윤에 의해 1000°C의 질소 분위기에서 제조한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료에서는 800°C에서 제조한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료에 비해 Al 합금 기지내에 침윤시 형성된 반응 생성물이 많음을 알 수 있으며, XRD 분석 결과로부터 고온에서는 Al과 질소의 반응에 의해 Al 합금기지내에 AlN이 형성되는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 무가압 침윤에 의해 750°C 및 1000°C에서 제조된 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-6wt.\%Mg}$ $\text{Al-5wt.\%Si-6wt.\%Mg}$ 복합재료의 Al 합금기지과 Al_2O_3 보강재의 계면을 경계로 하여 2 μm 단위로 5points로 나누어 Al, Si, Mg, O, N 원소들의 정량분석 결과를 보여준다. 750°C 및

1000°C에서 제조된 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-6wt.\%Mg}$, $\text{Al-5wt.\%Si-6wt.\%Mg}$ 복합재료에서는 Al 합금 기지와 Al_2O_3 입자의 계면에서 Mg와 N이 편석되어 계면에 Mg-N 화합물 (Mg_3N_2)이 형성됨을 알 수 있으며, Al-Mg합금에 Si가 첨가되면 Mg의 계면 편석은 상대적으로 감소하였다. 이것은 기지내에 Mg_2Si 의 형성에 의한 것으로 생각된다.⁸⁾ 또, 반응 온도가 증가할수록 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료내의 Mg의 양은 감소되는데, 이것은 Mg의 휘발과 Mg_3N_2 의 일부가 용융 Al과의 반응하여 AlN을 형성하기 때문으로 생각된다.⁴⁾ 무가압 침윤에 의해 1000°C에서 제조한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료는 계면 및 기지에서도 많은 양의 질소가 검출되었는데 이것은 고온에서의 AlN 형성에 의한 것으로 생각된다. 따라서 고온에서는 용융 Al과 질소의 직접적인 반응에 의하여 형성된 AlN과 Al합금기지과 Al_2O_3 입자와의 계면에 형성된 Mg_3N_2 가 용융 Al과 반응하여 AlN의 형성이 촉진되어 고온에서의 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료의 무가압 침윤을 촉진시키는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 800°C에서 제조한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 복합재료의 Si 함량에 따른 3점 굽힘강도의 변화를 보여준다. $\text{Al}_2\text{O}_3/$

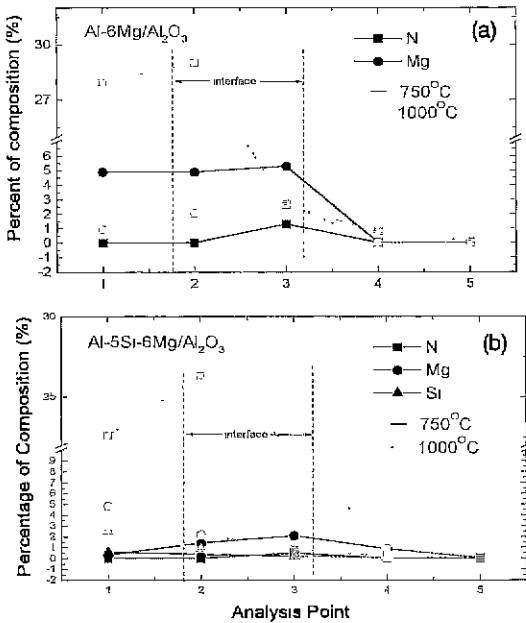


Fig. 3. Quantitative EPMA analysis of Al, Si, Mg, N, O elements at interfacial area between Al alloy matrix and reinforced Al₂O₃ particles. (a) Al₂O₃/Al-6wt.%Mg composite and (b) Al₂O₃/Al-5wt.%Si-6wt.5Mg composite.

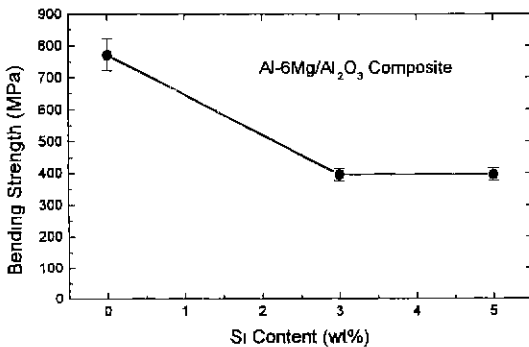


Fig. 4. The variation of bending strength of the Al₂O₃/Al-6wt.%Mg composites fabricated at 800°C as a function of Si content.

Al-6wt.%Mg 복합재료의 3점 굽힘강도는 800 MPa 정도이었고, Al 함금내 Si의 함량이 증가됨에 따라 제조된 복합재료의 강도값은 400 MPa 정도로 낮아졌다. Al₂O₃ 입자의 부피분율이 45~50vol.%인 Al₂O₃/Al-10wt.% Mg 복합재료의 파괴 강도값은 인장시험시 400~500 Mpa정도인 것으로 보고되고 있으며,²⁹⁾ 아래의 식으로 본 실험에서 측정된 굽힘강도를 지금까지 조사된 복합재료의 인장강도와 비교할 수 있다.

$$\frac{\sigma_{3p}}{\sigma_t} = [2(m+1)]^{\frac{1}{m}}$$

σ_{3p} , m , σ_t 는 각각 3-P. 굽힘강도, Weibull 계수. 그리고 인장강도를 나타낸다.

본 연구에서 측정된 m 값은 15.6으로 나타났으며, 이로부터 본 실험에서 제조된 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg 복합재료의 인장 강도는 528 MPa 이었으며, 이제까지 보고된 Al₂O₃/Al 복합재료의 인장 강도값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5는 800°C에서 제조된 Al₂O₃/Al-3wt.%Si-6wt.%Mg, Al-5wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료의 파단면의 SEM 사진을 보여준다. Al₂O₃/Al-6wt.%Mg 복합재료는 Al₂O₃/Al-3wt.%Si-6wt.%Mg와 Al₂O₃/Al-5wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료에 비해 세라믹스 입자의 파괴 단면이 선명한 입내파괴가 지배적인 것으로 나타났다. 무가압 침윤에 의해 제조된 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg 복합재료는 보강재인 Al₂O₃의 입내파괴가 지배적이며, Al₂O₃/Al-Si-6wt.%Mg 복

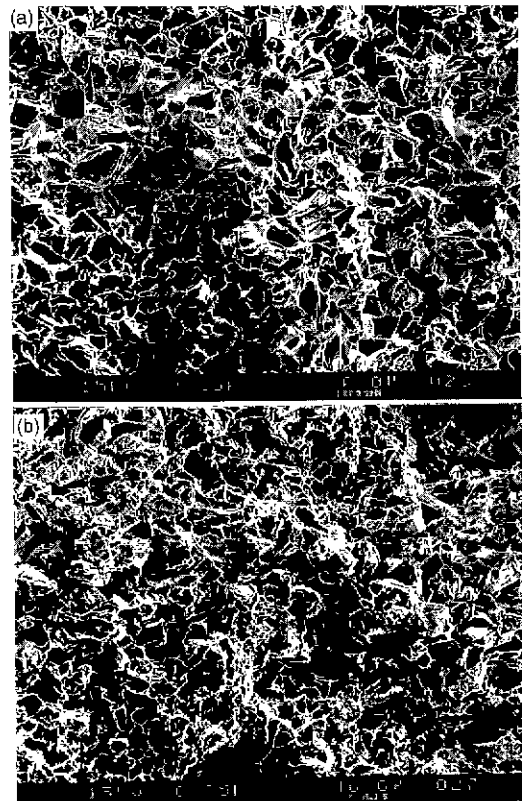


Fig. 5. SEM micrographs of fracture surface of Al₂O₃/Al-Mg, Al-Si-Mg composite fabricated using (a) Al-6wt.%Mg alloy and (b) Al-5wt.%Si-6wt.%Mg alloy.

합재료는 Al_2O_3 입자가 Al 합금기지에서 이탈되는 입계 파괴가 지배적으로 파괴강도의 감소가 일어났다. Al_2O_3 /Al 복합재료의 기계적 강도는 Al 합금 기지와 Al_2O_3 입자와의 계면 강도에 의해 직접적인 영향을 받는다. 계면 강도는 Al_2O_3 입자와 Al 합금기지 사이의 반응 생성물에 의한 계면 접착력의 변화와 Al_2O_3 입자 및 Al 합금기지의 열팽창 계수 차이에 의한 계면 접착력의 변화로 설명할 수 있다. 무가압 침윤에 의해 제조한 Al_2O_3 /Al-Mg 복합재료의 경우 Al_2O_3 와 Al 합금기지 사이의 계면에 형성되는 Mg_3N_2 에 의한 wettability의 향상과 용융 Al 합금과 Mg_3N_2 가 반응하여 형성되는 AlN에 의해 계면 접착력이 증가하게 되는 것으로 생각된다. 그러나, Al-6wt.%Mg 합금 기지에 Si가 첨가되면 Mg_2Si 의 형성에 의해 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 Al 합금 기지와 Al_2O_3 계면에 분포되는 Mg의 양이 감소되었으며, 계면 강도를 향상시키는 것으로 기대되는 AlN을 형성할 수 있는 Mg_3N_2 의 계면 생성이 감소될 것으로 생각된다. 따라서, Al 합금 기지에 첨가된 Si가 Al_2O_3 /Al 복합재료의 파괴강도를 감소시키는 것으로 생각된다.

또한, 계면강도에 미치는 열팽창 계수 차이의 영향은 정확히 설명하기 어려우나, Al-5wt.%Mg와 Al-10wt.%Mg 및 Al-5wt.%Si 등의 합금과 상용되는 Al 합금의 열팽창계수는 $20\sim 25 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 정도이고, Al_2O_3 는 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 로써 두 재료사이의 열팽창 계수는 상당한 차이가 있다. 무가압 침윤에 의해 제조한 Al_2O_3 /Al-Mg 복합재료의 경우 냉각시 Al_2O_3 입자와 Al 합금기지의 큰 열팽창 계수 차이에 의해 많은 수축을 일으키는 Al 합금기지에 의해 상대적으로 적은 수축을 일으키는 Al_2O_3 입자가 압축 응력을 받게됨으로써¹⁰⁾ 계면 결합력이 증가할 것으로 생각된다. 그러나, Al_2O_3 /Al-Si-Mg 복합재료의 경우 Al 합금기지에 형성된 Mg_2Si 와 냉각시 생성되는 취성을 가진 공정 Si 입자에 의해 Al 합금기지의 열팽창 계수가 감소되어¹¹⁾ Al_2O_3 /Al-Mg 복합재료에 비하여 냉각시 열팽창 계수 차이에 의한 Al 합금기지와 보강재인 Al_2O_3 와의 결합력은 감소할 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Al_2O_3 /Al-6wt.%Mg 복합재료의 Si 함량에 따른 경도 측정 결과를 나타낸 것으로 800°C에서 제조한 Al_2O_3 /Al-6wt.%Mg 복합재료의 경우 $HR_{15}=91$ 로 나타났다. 합금내 Si의 함량이 증가함에 따라 경도값이 80 정도로 감소하였다. 이것은 Al_2O_3 /Al-Mg 복합재료에 Si를 첨가함에 따라 나타나는 Al 합금기지와 Al_2O_3 입자 사이의 계면강도의 변화가 복합재료의 파괴강도에 미치는 영향과 같이 설명할 수 있다. Fig. 7은 Al_2O_3 /Al-3wt.%Si-6wt.%Mg 복합재료의 제조 온도에 따른 경도값의 변화를 보여주며, 침윤 온도가 증가함에 따라 경도가 증가하였다. 고온에서 제조한 Al_2O_3 /Al 복합재료의 경

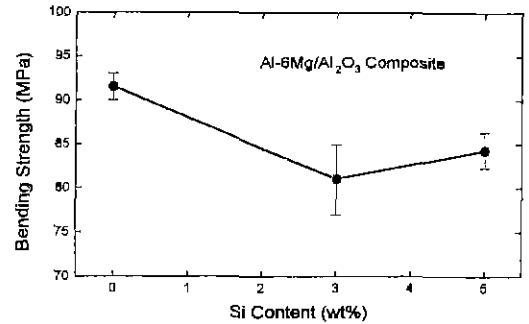


Fig. 6. The variation of hardness of Al_2O_3 /Al-6wt.% Mg composite fabricated at 800°C as a function of Si content.

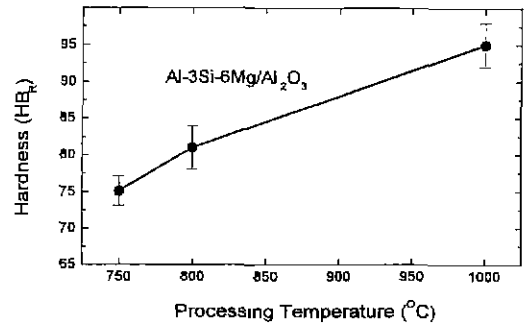


Fig. 7. The variation of hardness of Al_2O_3 /Al-3wt.%Si-6wt.%Mg composite as a function of the fabrication temperature

도가 저온에서 제조한 시편에 비해 높은 값을 나타내는 이유는 다음과 같이 두가지로 구분하여 설명할 수 있다. 무가압 침윤에 의한 복합재료 제조방법은 고상이 기공이 많은 세라믹스 분말에 먼저 형성되는 것을 제외하면 액상의 금속이 기공의 외부에서 무가압 침윤되는 동안 소결되는 액상 소결과 유사하게 생각할 수 있으며,¹²⁾ 침윤 온도가 증가됨에 따라 용융 Al합금의 유동성이 증가된다. 용융 금속의 유동성 증가는 세라믹스와의 반응성을 향상시켜 저온에서보다 용이하게 계면에서의 결합 발생을 줄일 수 있기 때문이다. 또한, 본 실험에서는 Al_2O_3 /Al 복합재료의 EPMA 분석 결과 1000°C에서 제조한 복합재료가 800°C에서 제조한 것보다 금속기지에서 다량의 질소가 검출되었으며, XRD 분석 결과 1000°C에서만 AlN이 검출됨을 알 수 있다. 질소분위기에서 Al_2O_3 /Al 복합재료 제조시 온도가 상승할수록 Al 합금기지에 AlN의 형성이 증가하게되며, Al 합금기지에 AlN의 형성이 증가될수록 Al 합금 기지의 경도가 증가되어 Al_2O_3 /Al 복합재료의 경도가 증가되는 것으로 생각된다.⁴⁾

4. 결 론

무가압 침윤에 의한 Al₂O₃/Al 복합재료는 용융 Al의 Al₂O₃에 대한 wetting을 향상시킴으로써 Al₂O₃ pre-form에 용융 Al 합금을 압력을 가하지 않는 방법으로 제조할 수 있다. 무가압 침윤에 의한 Al₂O₃/Al 복합재료는 질소분위기와 합금원소로서 Mg를 첨가했을때에 한해서 제조가 가능하였으며, Al-(Si)-Mg합금은 침윤시 Al₂O₃입자 표면에 Mg₃N₂가 형성됨으로써 Al₂O₃에 대한 Al합금의 wetting을 향상시켜 Al합금이 Al₂O₃ pre-form에 wetting됨에 따라 침윤이 일어나기 때문에 생각된다.

Al₂O₃/Al 복합재료의 기계적 특성은 보강재인 Al₂O₃ 입자와 Al 기지와의 계면에 형성되는 Mg₃N₂의 형성정도에 따라 달라진다. Al 합금내 Si의 함량이 증가함에 따라 Mg의 계면 분포를 감소시키고 Mg₃N₂의 형성을 억제하여 계면 접착력을 약화시키는 것으로 생각된다. 그러므로 wetting이 좋은 Al₂O₃/Al-6wt.%Mg 복합재료가 다른 조성의 Al₂O₃/Al 복합재료에 비해 높은 강도와 경도값을 가진다.

또한, 같은 조성의 복합재료의 제조 온도에 따른 경도는 고온에서 제조된 Al₂O₃/Al 복합재료가 저온에서 제조된 것에 비해 큰 경도 값을 나타낸다. 이는 고온에서는 Al합금 기지에 많은 양의 AlN이 형성되며 형성된 AlN이 재료의 경도를 증가시키기 때문에 생각된다.

REFERENCES

1. John. E. Allison and Gerald. S. Cole, "Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges" JOM, 5(1), 19 (1993).
2. M. K. Aghajanian, M. A. Rocazella, J. T. Burke and S. D. Keck, "The Fabrication of Metal Matrix Com-

- posites by a Pressureless Infiltration Technique" *J of Mat. sci.*, 26, 447 (1991).
3. T. J. Jonas, J. A. Cornie and K. C. Russell, "Infiltration and Wetting of Alumina Particulate Performs by Aluminum and Aluminum-Magnesium Alloys" *Metal. Trans.*, 26A, 1491 (1995).
4. M. K. Aghajanian, J. T. Burke, D. R. White and A. S. Nagelberg, "A New Infiltration Process for the Fabrication of Metal Matrix Composites" 34th Inter. SAMPE Sys. May 8-11, 817 (1989).
5. 이동윤, "무가압 액상 용침법에 의한 Al₂O₃/Al 복합재료 제조에 관한 연구" 공학 석사 학위 논문, 성균관대학교 (1996).
6. W. H. Jung, H. S. Song, S. W. Park and D. Y. Kim, "Variation of Contact Angles with Temperature and Time in the Al-Al₂O₃ System" *Metal. Trans.*, 27B, 51 (1996).
7. Qinghua Hou, Raj Mutharasan, Michael Koczak, "Feasibility of Aluminium Nitride Formation in Aluminium Alloys" *Mater. Sci. and Eng. A*, 195, 121-129 (1995).
8. 김우상, 정동섭, 이성학, "진공 Compo-Casting 방법으로 제조된 A356 Al-SiCp 복합재료의 미세조직과 기계적 성질" *대한금속학회지*, 34, 1074 (1996).
9. J. T. Burke, M. K. Aghajanian and M. A. Rocazella, "Microstructures and Properties of Discontinuous Metal Matrix Composites Formed by a Unique low Cost pressureless Infiltration Technique" 34th Inter. SAMPE sys. May 8-11, 2440 (1989)
10. D. Lewis, III "Strength and Toughness of Fiber-Reinforced Ceramics and Related Interface Behavior." "Whisker-and Fiber-Toughened Ceramics," Proceedings of an International Conference. Oak Ridge, Tennessee, USA. 7-9 June, pp.265 (1988).
11. 김영환, 이성학, 김낙준, 이두영, "주조 A356.0 Al-SiC 복합재료의 기계적 성질과 파괴과정에 대한 공정 Si 입자의 영향" *대한금속학회지* 29(2), 112 (1991).
12. ASM Handbook, 2, 989.