

熔湯攪拌法에 의한 $Al_2O_3(p)/LXA$ 複合材料의 기계적 성질에 관한 연구

이 현 규 · 공 창 덕*

A study on the Mechanical Properties of $Al_2O_3(p)/LXA$ Composites by Melt-stirring Method

Hyun-Kyu Lee · Chang-Duk Kong*

ABSTRACT

Casting of metal matrix composites is an attractive process since it offers a wide selection of materials and processing conditions. Among the casting methods, melt-stirring technology is much attractive route in industrial application because it is more simple and inexpensive compared to squeeze casting or powder metallurgy. In the present work, effects of particle size, volume fraction of particles and Mg addition on mechanical properties and thermal expansion coefficients of $\alpha-Al_2O_3(p)/LXA$ composites were studied. It is shown that $\alpha-Al_2O_3$ particles formed at the interface of $\alpha-Al_2O_3$ particles and matrix made an important role on mechanical properties. Ultimate tensile strength of most composite materials was not increased. But in the case of 5vol% addition of $16\mu m$ $\alpha-Al_2O_3$ particle, Ultimate tensile strength of composite materials with 3wt.% Mg was increased. Volume fraction of reinforcements and Mg content were thermal expansion coefficients of composite materials were decreased.

초 록

금속기지 복합재료의 주조는 폭넓은 재료의 선택과 공정조건들을 제공하는 좋은 공정이다. 용탕교반기술은 압착주조 또는 분말야금과 비교하면 매우 간단하고 값이 싸기 때문에 주조방법중에서 산업응용에 가장 널리 쓰이는 좋은 방법이다. 최근에는 $\alpha-Al_2O_3(p)/Lo-Ex$ alloy 복합재료의 입자크기, 입자의 부피분율, 기계적 성질에 있어서 Mg첨가 그리고 열팽창계수등이 연구되어 왔다. $\alpha-Al_2O_3$ 는 입자계면과 기지에 형성되어 기계적 성질에 중요한 역할을 하였다. 대부분 복합재료의 인장강도는 증가하지 않지만 $16\mu m$ $\alpha-Al_2O_3$ 입자를 5vol%로 첨가한 경우, 3wt.% Mg를 첨가한 복합재료의 인장강도는 증가한다. 강화제의 부피분율과 Mg는 복합재료의 열팽창계수를 감소시켰다.

조선대학교 공과대학 재료공학과(Chosun Univ. Dept. of Material Science Eng.)

* 조선대학교 공과대학 우주항공공학과(Chosun Univ. Dept. of Aerospace Eng.)

1. 서 론

복합재료의 기본원리는 서로 다른 성질을 갖는 재료를 용도에 맞게 조합시키는 기술(materials combination technology)이다. 따라서 기지상과 강화상, 사용 용도, 가격등에 따른 여러 가지 조합 방법이 있다. 현재 연구개발이 진행되고 있는 복합재료 중 금속을 기지상으로 하는 복합재료(Metal Matrix Composites: MMCs)는 (1) Mg, Al, Ti등을 기지상으로 하여 주로 경량화를 목적으로 하며 또 플라스틱을 기지로 하는 재료로는 견딜 수 없는 온도 영역에서의 사용을 목적으로 하는 것, (2) Fe, Cr, Al, Y 합금등과 같이 경량화보다는 오히려 금속재료가 견디기 어려운 고온 영역에서의 사용을 목적으로 하는 것이 있다.

금속기복합재료는 우수한 비강도와 비강 성, 고온에서의 안정성, 내마모성이 우수하며 낮은 열팽창계수를 지니고 있는 특성을 갖고 있다.¹⁻⁵⁾ 금속기복합재료는 입자분산강화형, 섬유상화형, 휘스커강화형으로 나누어지며 강화재와 제조방법의 높은 비용 때문에 그 응용분야가 우주 항공, 군사용 구조재 연구에 한정되어 있었으며 최근에 와서 자동차용 기능재료로서 휘스커강화재료보다 저가인 단섬유강화 피스톤이 실용화되고 있는 실정이다.

입자분산강화 금속기복합재료는 1946년 스위스의 Irmann이 개발한 SAP(Sintered Aluminium Powder)에서 시초를 찾을 수 있지만 이 SAP의 우수한 고온강도가 알루미늄 기지중에서 분산되어 있는 알루미늄 입자때문인 것으로 밝혀진 이후 각종 합금계에서 분산강화법을 이용한 연구가 성행하였다. 입자분산강화 금속기복합재료의 제조방법으로는 크게 분말야금(Powder metallurgy)법⁶⁻⁸⁾과 주조(Casting)법으로 나누어지며 주조법은 분말야금법에 비해 제조공정이 간단한 장점이 있다. 이 주조법은 다시 콤포캐스팅(Compocasting)법⁹⁻¹¹⁾과 용탕교반(Melt-string)법¹²⁻¹⁵⁾으로 나누어지며 콤포캐스팅은 기지합금을 반응용 상태에서 교반하는 것으로서 강화재가 슬러리 중 고상 사이에 포획되기 때문에 강화재의 부유, 침강 등을 방지할 수 있으나 가스포획이 단점이다. 이에 비해 용탕 교반법은 교반 중 가스포획이 적고 교반온도가 높기 때문에 기지와 강화

재간 젖음성이 비교적 좋은 특징을 갖고 있다. 지금까지 연구, 보고된 바에 의하면 강화재 종류와 입도 및 양에 따른 인장성질¹⁶⁻¹⁸⁾이나 마모특성¹⁹⁻²³⁾에 관한 연구가 대부분이었으며 용탕교반 시간에 따른 영향은 거의 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 자동차용 피스톤합금인 Lo-Ex alloy에 알루미늄 입자를 용탕 교반법에 의해 분산시켰다. 기지재로 사용한 Lo-Ex alloy는 낮은 열팽창계수, 내마모성이 우수한 특징을 갖고 있다. 본 실험에서는 Lo-Ex alloy를 약칭 LXA라 칭한다. 앞선 연구²⁴⁾를 통하여 강화재의 분율 및 강화재 입도에 따른 LXA 복합재료의 인장강도 및 열팽창계수에 대하여 조사, 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 LXA Al합금은 낮은 열팽창계수와 고온 안정성 그리고 우수한 내마모성을 특징으로 하며 기존의 자동차 피스톤용 재료로서 널리 사용되고 있는 LXA 합금으로써 합금 조성과 개략적인 실험과정, 복합재료 제조 조건 및 열간압출 조건은 앞선 연구²⁴⁾에서 나타내었다. 기계적 성질을 조사하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다.

2.1 경도 측정

경도시험은 열간 압출을 행한 시편을 사용하였으며 Rockwell 경도 시험기를 F-scale로 측정하였고, 측정부위를 달리하여 5번 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 평균값을 구하였다.

2.2 인장시험 및 파면관찰

상은 인장시편과 고온 인장시편의 규격과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 인장시험은 Instron에서 2mm/min의 cross head speed로, 고온인장은 300℃, 400℃에서 행하였으며, 인장시험 후 파면 관찰은 주사전자 현미경(SEM)을 사용하였다.

2.3 마모시험

마모시험은 Fig. 2에 나타난 pin-on-disk 형태의 마모시험기를 사용하였으며 대기 중에서 건식 마

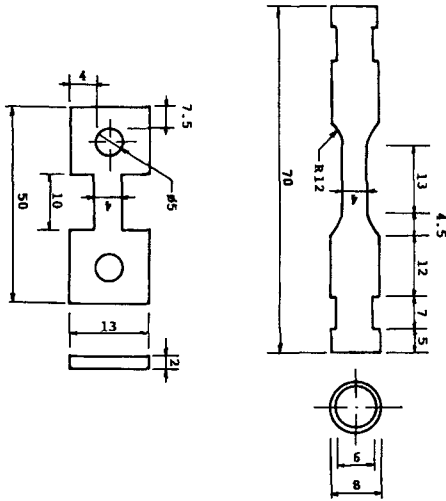


Fig. 1. The shape and size of the tension test specimen.

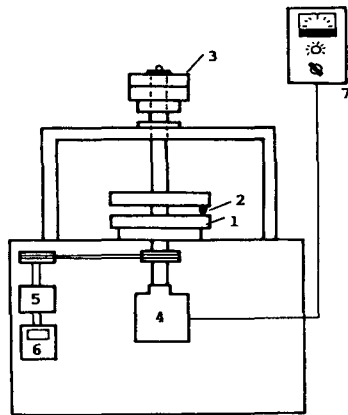


Fig. 2. Schematic diagram of the pin-on-disc type wear machine.
 (1 Disc(SM45C), 2 Specimen, 3 Weight, 4 Motor, 5 Rotary Encoder, 6 Digital Tachometer, 7 Controller)

Table 1. Condition for wear test

Specimen size(mm)	4×4×10
Revolving disc material	SM45C(63HRC)
Sliding distance(m)	800
Sliding speed(m/sec)	0.93
Final load(kg)	0.5, 1.0, 3.0, 5.0

모시험을 행하였고, 마모조건은 Table 1와 같다. 마모량은 마모 전후의 시편의 질량을 화학 저울을 사용하여 10^{-4} g까지 측정함으로써 알 수 있었다. 하중은 각각 500g, 1000g, 3000g, 5000g 으로 하였으며 하중에 따른 마모량의 변화를 조사하였다. 또한 마모시험 후 마모면의 조직변화는 SEM으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 경도 측정

Fig. 3은 열간 압출한 시편의 경도 측정 결과이다. Mg 첨가효과는 경도값을 62.5(HRF)에서 73.6(HRF)으로 증가하였으며, 강화재 첨가에 따라서도 증가함을 알 수 있다. 또한 입자의 크기가 작아짐에 따라, 교반 시간이 증가함에 따라 약간의 증가를 보이고 있다. 그런데 교반 시간이 5분인 경우 측정 부위에 따라 경도값의 변화가 큰 반면, 20분인 경우는 비교적 균일한 값을 갖는 것으로 보아 교반 시간이 증가함에 따라 입자의 분산 상태가 향상되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 강화재의 첨가로 재료의 경도 값을 증가시킬 수 있었고, 교반 시간의 증가에 대해서는 약간의 증가가 일어났다.

3.2. 인장시험 및 파면관찰

열간 압출한 시편에 대해 상온인장 시험을 한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 강화재를 첨가하지 않은 경우 기지재의 Mg첨가는 인장강도가 193MPa에서 250MPa로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 Mg의 고용강화 효과에 기인한 것이라 사료되며, LXA/ $Al_2O_3(p)$ (57 μ m)-5min. 교반한 경우 Al_2O_3 입자를 첨가함에 따라 14%의 인장강도 증가를 나타내고 있는데, 그 이유는 강화재로 첨가한 Al_2O_3 입자들의 분산 강화에 의해 Al_2O_3 입자들이 전위의 이동이 방해하기 때문이라 생각된다. 교반 시간이 증가함에 따라서도 인장강도의 증가가 나타나는데, 이것은 교반 시간이 증가함에 따라 입자의 편중현상이 감소되고 균일한 분산상태를 갖기 때문이며, 같은 조건 하에서 입자의 크기가 작아짐에 따라 인장강도 값이 증가하는 것은 입자의 크기감소에 따른 입자간 평균

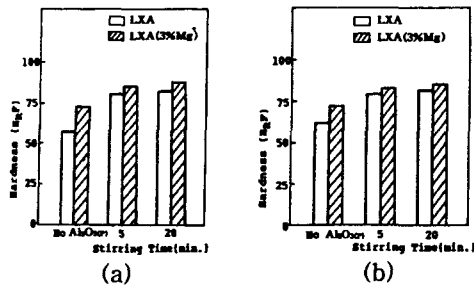


Fig. 3. Relation between stirring time and hardness (a) 28 μ m Al₂O₃(P) (b) 57 μ m Al₂O₃(P)

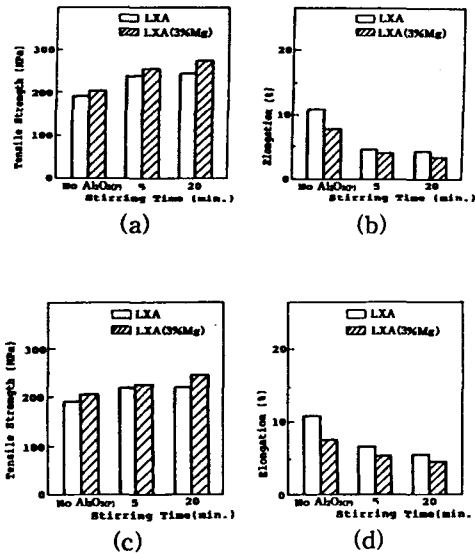


Fig. 4. Relation between stirring time and mechanical properties at room temp. (a) Tensile strength for 28 μ m Al₂O₃(P) (b) Elongation for 28 μ m Al₂O₃(P) (c) Tensile strength for 57 μ m Al₂O₃(P) (d) Elongation for 57 μ m Al₂O₃(P)

거리 감소에 기인한다고 사료된다. 또한 Mg 첨가는, 교반 시간이 증가할수록, 입자의 크기가 감소할수록 연신율은 감소함을 보여 준다.

상온인장 시험 후 SEM에 의한 파면 관찰 결과를 Fig. 5에 나타내었다. LXA(3%Mg)에서는 dimple 형태의 전형적인 연성 파괴를 보여주고 있으며, 강화재로 Al₂O₃ 입자가 첨가된 복합재료의 경우, 기지재에서는 미소한 dimple 형태의 연성파괴를

나타내고 있는 반면, 입자와 입자사이를 따라서 균열이 전파된 모습을 보여주고 있다. 따라서 복합재료의 상온인장은 연성파괴와 취성파괴가 두 형태가 동시에 존재하고 있음을 알 수 있다.

한편 젖음성이 향상이 인장강도에 미치는 영향과 교반시간 증가에 의한 분산상태 향상이 인장강도에 미치는 영향을 앞의 젖음성 측정결과와 비교해서 생각해 보면, 기지재가 LXA인 경우 5분 경과시 보다는 20분 경과시 젖음성이 우수했고, LXA(3%Mg)인 경우 5분 경과시나 20분 경과시 젖음성이 비슷했으므로 LXA/Al₂O₃(P)(57 μ m)-5min.와 LXA(3%Mg)/Al₂O₃(P)(57 μ m)-5min.의 인장강도값의 차이를 젖음성 향상에 의한 것이라 생각할 수 있으나 LXA에 비해 LXA(3%Mg)의 인장강도 값이 증가하는 것으로 보아 Mg의 고용강화에 의한 기여가 더 큼을 알 수 있다.

고온 인장시험을 300 $^{\circ}$ C와 400 $^{\circ}$ C에서 행하였는데 그 결과를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. LXA에 비해 복합재료의 인장강도 값이 증가했으며 교반시간이 증가함에 따라 역시 인장강도 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편 LXA에서 온도가 상온에서 300 $^{\circ}$ C, 400 $^{\circ}$ C로 증가함에 따라 인장강도 값은 193.9MPa에서 73.1MPa, 19.3MPa로 감소하여 상온에서 400 $^{\circ}$ C로 증가했을 때 상온인장의 90%정도 감소한 반면, LXA(3%Mg)/Al₂O₃(P) (28mm)-20min.인 경우는 274.9MPa에서 119.6MPa, 63.7MPa로 감소하여 상온인장의 76% 정도 감소한 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에 고온인장 시험 후 SEM에 의한 파면관찰 결과를 나타내었는데, 전반적으로 연성파괴 양상을 띠며, 특히 400 $^{\circ}$ C, LXA(3%Mg)에서는 분화구 모양의 움푹 파진 것들이 관찰되는 것으로 보아 전형적인 연성파괴임을 알 수 있다.

Fig. 9에는 온도에 따른 인장강도 값의 변화를 입자 크기별로 나타내었는데, 입자의 크기가 큰 경우(57 μ m) 온도가 증가할수록 인장강도 값은 줄어들며 Al₂O₃ 입자의 크기가 첨가 유무에 따라 인장강도 값 차이도 작아지는 반면, 입자의 크기가 작은 경우(28 μ m) 400 $^{\circ}$ C에서 Al₂O₃ 입자가 첨가 유무에 따른 차이가 큼을 알 수 있다. 따라서 복합재료에서는 Al₂O₃ 입자의 크기가 큰 경우보다는 작은 경

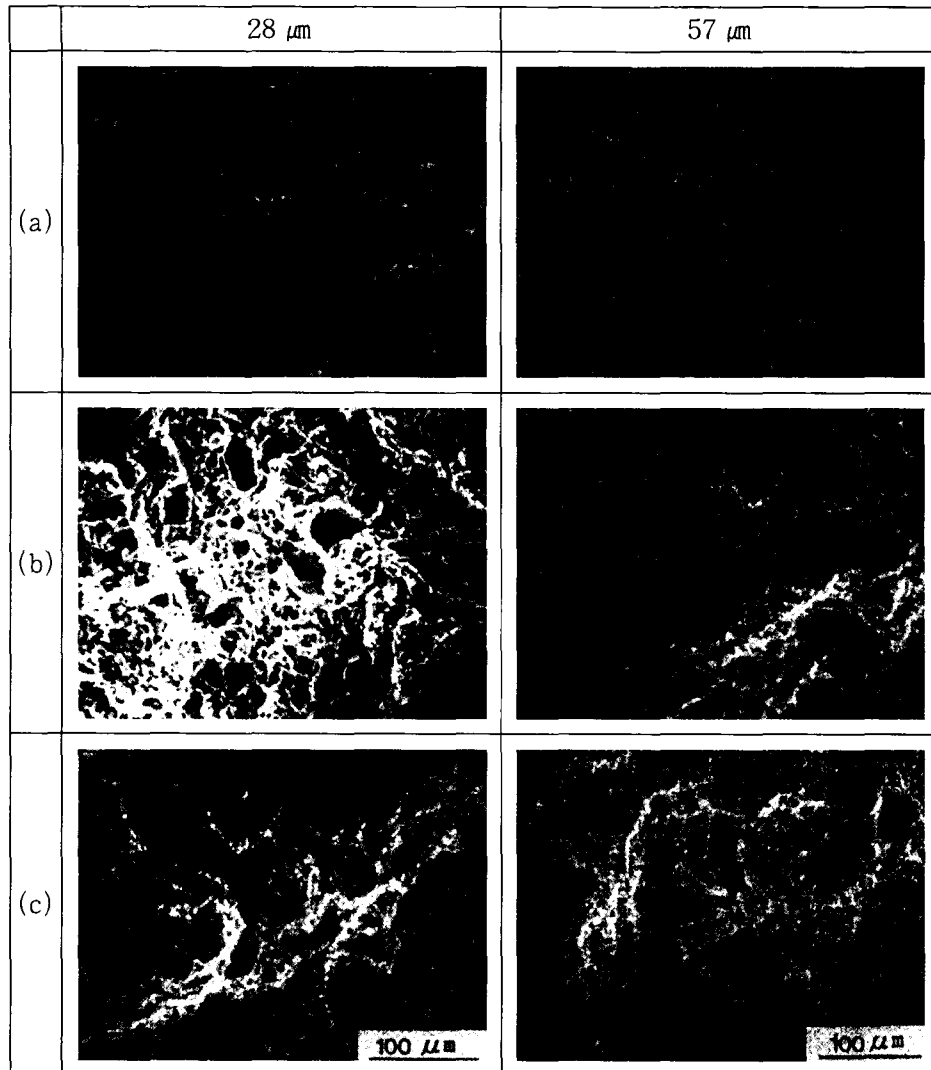


Fig. 5. SEM micrograph of the fracture surfaces at room temp.

(a) LXA(3%Mg) (b) $Al_2O_3(p)/LXA(3%Mg)$ (5min, stirring) (c) $Al_2O_3(p)/LXA(3%Mg)$ (20min, stirring)

우가 고온에서의 인장성질이 우수함을 알 수 있다.

3.3 마모 시험

Fig. 10, Fig. 11은 마찰 하중에 대한 기저금속 및 복합재료의 마모면을 각각 나타내었다. 기저재인 LXA(3%Mg)의 경우 저하중에서는 마찰면에서의 약간의 마찰력과 마찰하중에 의한 소성변형에 의해 가공경화 현상이 일어나고 경화되지 않은 부분과의 사이에 균열이 발생하여 성장함에 따라 모재로부터

경화층이 분리되면서 마모가 진행된다. 하중이 증가함에 따라 증가된 마찰력과 하중에 의해 plastic flow 현상이 현저해지며, 마찰열에 의해 활성화된 마찰 면에서 대기중의 산소와 반응하여 산화물을 형성하게 되는데 이 산화물은 마찰면에서 윤활작용도 하지만 ploughing을 발생시킨다. 하중이 더욱 증가하면 높은 마찰열에 의해 표면에서 국부적인 용융 현상이 일어나고 상대 disc의 회전력에 의해 마찰 방향으로 심한 plastic flow를 일으킨다. 이에 반해

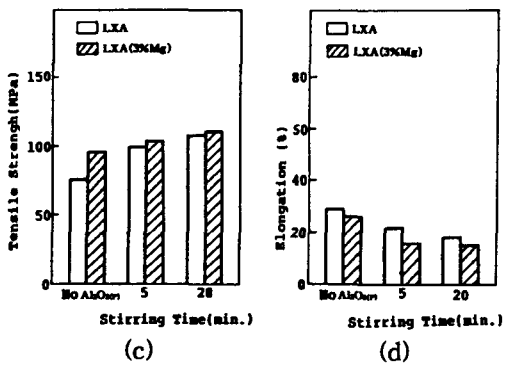
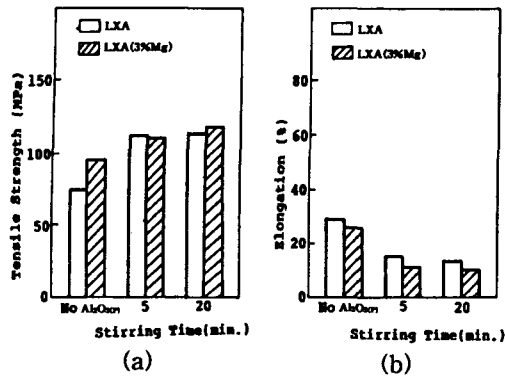


Fig. 6. Relation between stirring time and mechanical properties at 300°C
 (a) Tensile strength for 28µm Al₂O_{3(P)}
 (b) Elongation for 28µm Al₂O_{3(P)}
 (c) Tensile strength for 57µm Al₂O_{3(P)}
 (d) Elongation for 57µm Al₂O_{3(P)}

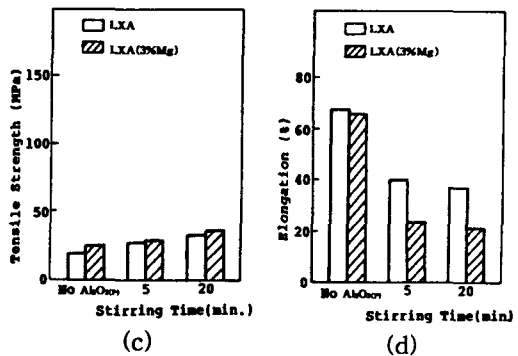
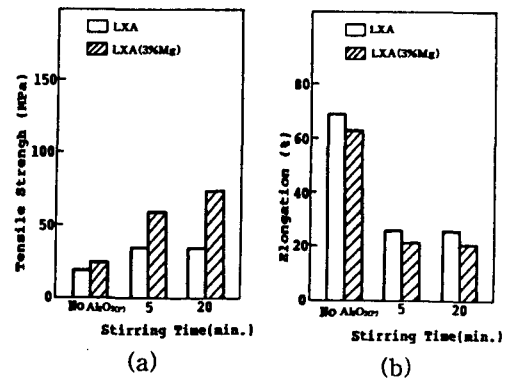


Fig. 7. Relation between stirring time and mechanical properties at 400°C
 (a) Tensile strength for 28µm Al₂O_{3(P)}
 (b) Elongation for 28µm Al₂O_{3(P)}
 (c) Tensile strength for 57µm Al₂O_{3(P)}
 (d) Elongation for 57µm Al₂O_{3(P)}

복합재료의 경우, 약간의 plastic flow가 관찰되며
 지지금속의 비해 mild 마모면과 우수한 내마모성을
 나타내는데, 그것은 Al₂O₃ 입자의 우수한 내열 및
 내마모성과 Al₂O₃ 입자가 기지의 탈락을 방해하기
 때문이라 사료된다. 그리고 지지내 Mg 첨가효과,
 용탕 교반시간의 변화 및 Al₂O₃ 입자 크기의 변화
 에 따른 마모시험 결과를 각각 Fig. 12, Fig. 13,
 Fig. 14에 나타내었다. Mg 첨가효과와 용탕 교반시
 간의 변화에 대해서는 뚜렷한 양상을 보이지 않았으
 나, 저하중(0.5kg, 1.0kg)에서는 Al₂O₃ 입자크기에
 따른 마모량의 차이가 거의 없지만, 고하중(3.0kg,
 5.0kg)에서는 Al₂O₃ 입자의 크기가 작을수록 우수한
 마모성질을 나타내고 있다. 이것은 하중이 증가할수

록 마모깊이가 증가하기 때문에, Al₂O₃ 입자의 같은
 부피분율에서 입자의 크기가 작을수록 surface area
 가 크므로 마모에 대한 저항이 크기 때문이라 사료
 된다.

4. 결 론

750°C에서 용탕교반법에 의해 Al₂O_{3(1P)}/LXA 복합
 재료를 제조하고 500°C에서 열간압출을 한 시편의
 기계적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻
 었다.

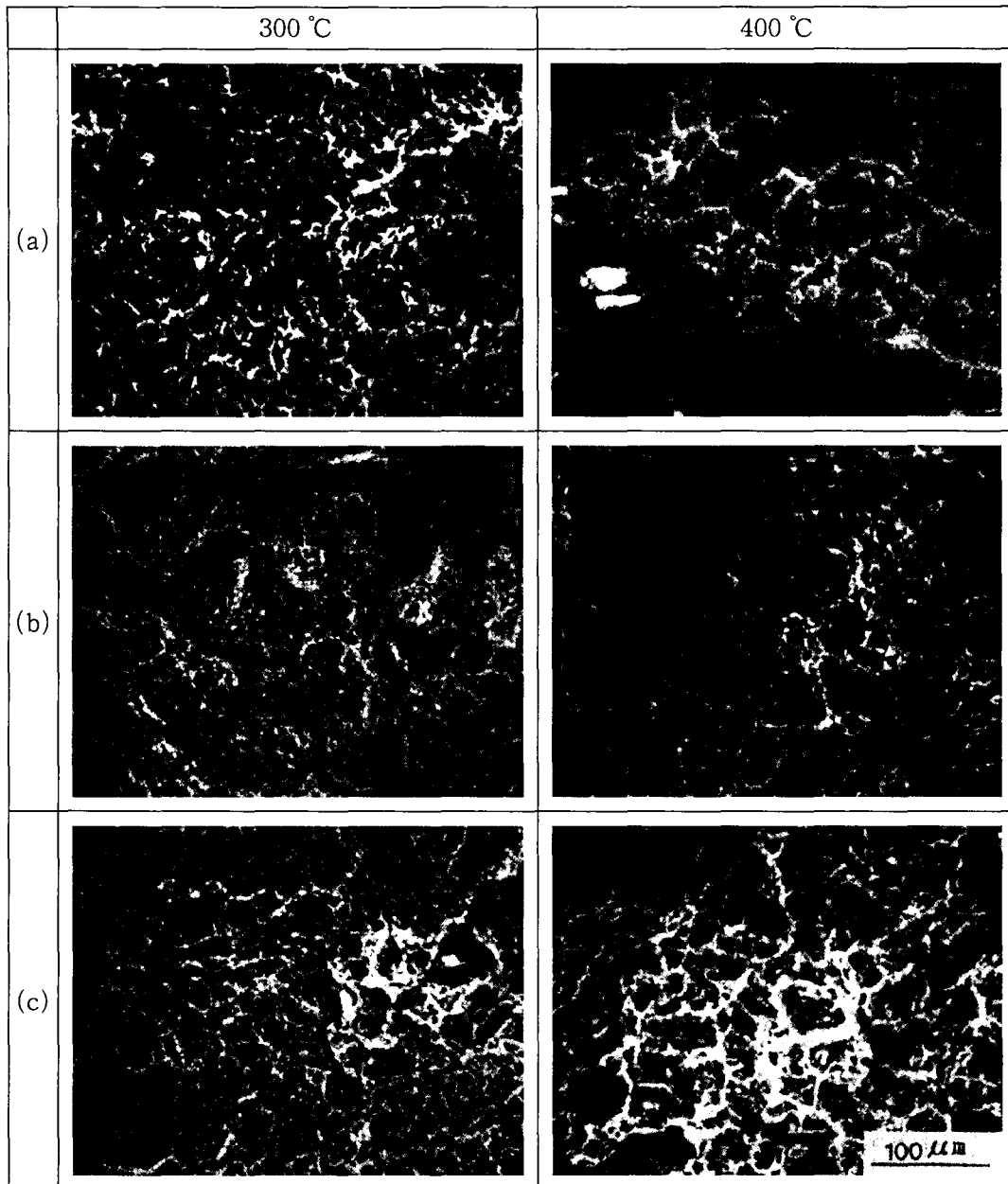


Fig. 8. SEM micrograph of the fracture surfaces at 300 °C and 400 °C ($28\mu\text{m}$ $\text{Al}_2\text{O}_{3(p)}$)
(a) LXAl(3%Mg)
(b) $\text{Al}_2\text{O}_{3(p)}$ /LXA(3%Mg)(5min. stirring)
(c) $\text{Al}_2\text{O}_{3(p)}$ /LXA(3%Mg)(20min. stirring)

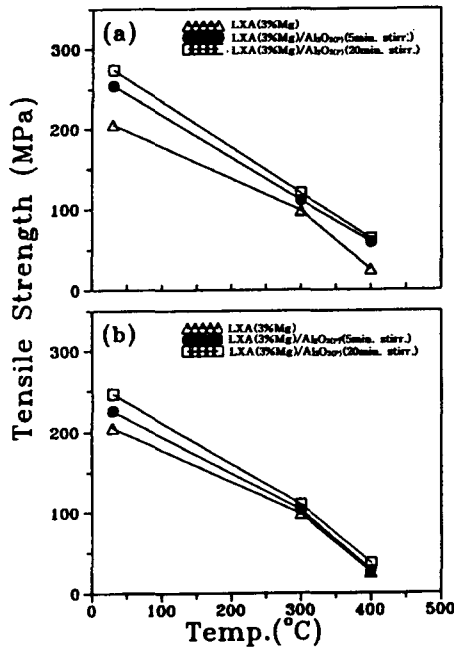


Fig. 9. Effect of testing temperature on the tensile strength in LXA(3%Mg)/Al₂O_{3(p)} composites
(a) 28 μ m Al₂O_{3(p)} (b) 57 μ m Al₂O_{3(p)}

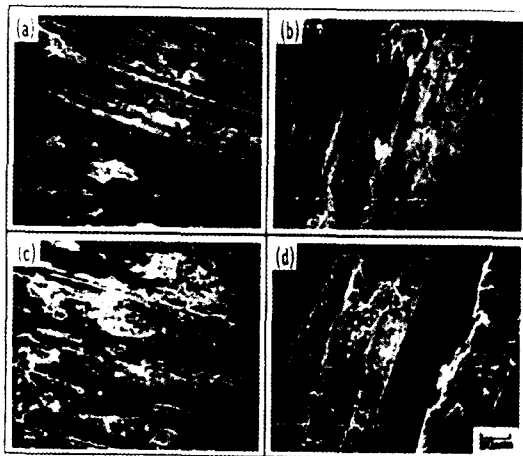


Fig. 10. SEM micrograph of the wear surfaces in the LXA(3%Mg)
(a) 0.5kg (b) 1.0kg
(c) 3.0kg (d) 5.0kg

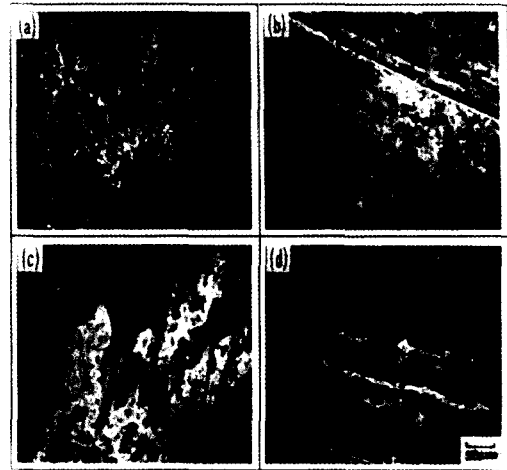


Fig. 11. SEM micrograph of the wear surfaces in the LXA(3%Mg)/Al₂O_{3(p)}(28 μ m) (20 min. stirr.)

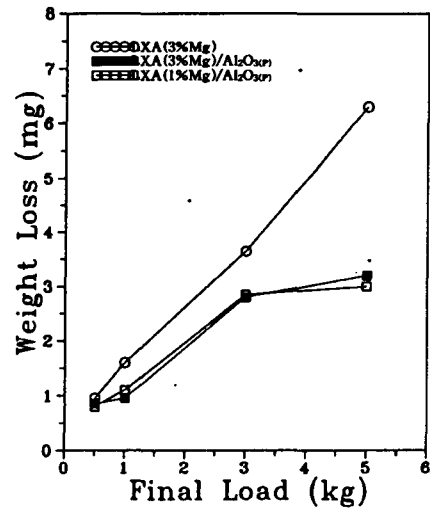


Fig. 12. Effect of Mg on the weight loss in the LXA/Al₂O_{3(p)}(28 μ m) (20min. stirr.)

1. 강화재를 첨가함으로써 인장강도가 향상되었으며 교반 시간이 증가함에 따라, 강화재의 입도가 작아짐에 따라 인장강도가 증가하였다.
2. 인장시험 후 파면은 Al₂O₃ 입자가 첨가된 경우는 dimple 형태의 전형적인 연성 파괴를 보여 주었으며, 기지재는 입자 사이를 따라 균열이 전파하는 취성파괴로 두가지 형태의 파괴가 존재함을 알 수 있었다.

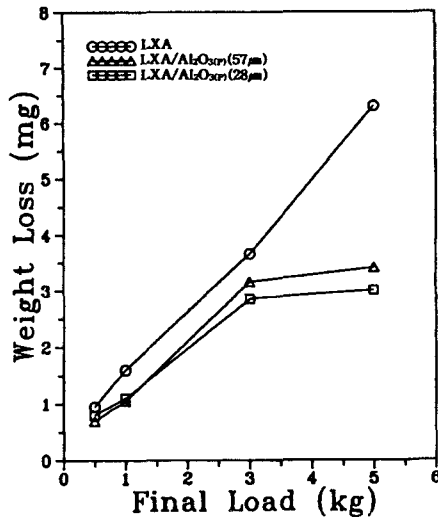


Fig. 13. Effect of Al₂O₃ particle size on the weight loss in the LXA/Al₂O₃(P)(28µm) (20min. stirr.)

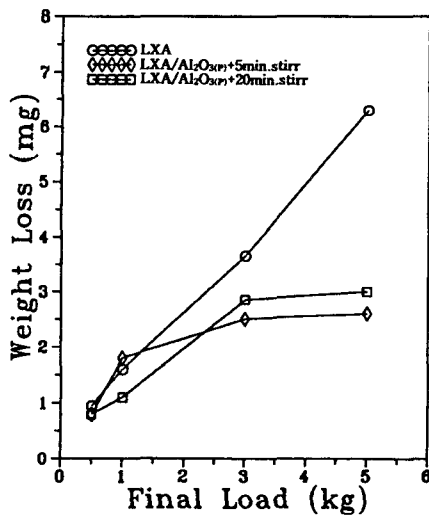


Fig. 14. Effect of stirring time on the weight loss in the LXA/Al₂O₃(P)(28µm)

3. 용탕 교반시간이 증가에 따른 내마모성 향상은 관찰되지 않았으며, 강화재로 첨가한 Al₂O₃ 입자의 크기가 작을수록 고하중에서의 내마모성이 우수하였다.

6. 참고 문헌

1. J.A. Carnie, Y.M. Chiang and J.M. Collins

; Ceramic Bulletin, 65(1986) 293.
 2. G. Geiger ; Ceramic Bulletin, 70(1991) 212.
 3. D.E. Hammond ; Modern casting, Aug. (1989) 29.
 4. P.M. Bralower ; Modern casting, Aug. (1989) 32.
 5. I.A. Ibrahim, F.A. Mohamed and E.J. Lavernia ; J. Mat. Sci, 26(1991) 1137.
 6. 최용규, 김영환, 권동일, 이성학 ; 대한금속학회지, 31(1993) 373.
 7. 최용규, 김영환, 권동일, 이성학 ; 대한금속학회지, 31(1993) 381.
 8. S.I. Hong and G.T. Gray ; Acta Metall, 40(1992) 3329.
 9. 이학주, 홍준표 ; 주조 11(1991) 71.
 10. 이학주, 홍준표 ; 주조 12(1992) 67.
 11. R. Mehrabian, R.G. Riek and M.C. Flemings ; Met. Trans, 5(1974) 1899.
 12. 彦坂武夫 ; 愛知懸工業技術センター-技術資料
 13. 香川 豊 ; 金屬, 2月號 (1989) 34.
 14. M.K. Surrapa and P.K. Rohatgi ; J. Mat. Sci. 16(1981) 983.
 15. M.K. Surrapa and P.K. Rohatgi ; Metals Technology. Oct.(1987) 358.
 16. J. J. Arsenault, J. P. Lucas, and F. M. Hosking; Scripta Met., 22(1988) 1307
 17. T. S. Srivatsan and R. Auradkar; J. of Materials Science Letters, 10(1991) 500
 18. 岩村宏, 森本啓之, 城野圭司, 輕金屬學會 第81回 秋期大會개요집(1991) 66
 19. K. J. Bhansali and R. Mehrabian; J. of Metals, Sept.(1982) 30
 20. 심상환, 정용근, 박익만; 주조, 10(1990) 43
 21. 이학주, 광현만, 홍준표; 주조, 11(1991) 30
 22. F. Rana and D. M. Stefanescu; Met. Trans., 20A(1989) 1564
 23. F. M. Hosking, F. Folgarportillo, and R. Wunderlin; J. of Materials Science, 17(1982) 477
 24. 이현규, 신관수; 조선대학교 생산기술연구소 제 20-2집(1998) 9-23.