

論 文

용탕단조한 Al/Al₂O₃ 복합재료에서의 예비성형체 변형 및 섬유열처리 영향

지동철*, 정성실*, 조경목*, 박익민*, 김진**

Preform Deformation and Fiber Heat-Treatment Effect in Squeeze Cast Al/Al₂O₃ Metal Matrix Composites

Dong-Chul Ji*, Sung-Sill Jung*, Kyung-Mok Cho*, Ik-Min Park*, and Jin Kim**

Abstracts

This study presents the effect of applied pressure on the preform deformation during squeeze casting of Al₂O₃ short fiber reinforced aluminum alloy (AC8A) metal matrix composites. A preliminary model based on the general beam theory is suggested for the prediction of the preform deformation. Two different commercially available Al₂O₃ short fiber (Saffil, Kaowool) were used to study the influence of the fibers on the microstructure and mechanical properties of the squeeze cast Al/Al₂O₃ composites. The composites were fabricated with the applied pressure of 75 MPa which was found to be the optimum condition for the squeeze casting of the composites in this study. For the amorphous Kaowool fiber, hard crystalline Mullite phase was formed with heat treatment. Both of amorphous and the crystallized Kaowool fibers were used to fabricate Al/Al₂O₃ composites. Microhardness of crystallized Kaowool fiber revealed higher than that of the amorphous Kaowool fiber in the squeeze cast composites. It was also found that the wear resistance of Kaowool fiber reinforced composites increased with the amount of Mullite.

1. 서 론

금속복합재료(MMC)는 비강도 및 비강성이 우수하고 내열성, 내마모성, 열전기특성이 우수하여 자동차 부품, 항공기 구조재료, 전기접점재료 등에서의 응용이 확대되어 가고 있다.^{1~5)}

금속복합재료의 제조방법으로는 크게 확산접합법, 분말야금법 등과 같은 고상법과 교반주조(stir-casting)법, 용탕단조(squeeze casting)법 등과 같은 액상법으로 대별할 수 있다. 액상법은 고상법에 비해 제조공정이 간단하여 경제적으로 유리하다.^{6, 7)} 특히 액상법 중 용탕단조법은 가압

력에 의해 보강섬유 사이로 기지재료의 함침이 용이하고, 제조시간이 짧아 보강섬유와 기지재료 간의 화학반응이 적으며, near-net-shape형상으로 대량생산할 수 있어 실용적인 측면에서 가장 효율적인 방법으로 보고되고 있다.⁴⁾ 이러한 장점으로 인해 용탕단조법으로 제조된 Al/Al₂O₃ 등의 금속복합재료가 자동차용 piston 부품 등에 일부 개발 적용되고 있다.⁵⁾

그러나 금속복합재료의 자동차용 부품에로의 대량공업화를 위하여서는 보다 저가이면서도 기계적성질이 우수한 보강섬유의 개발이 요구되고 있고 또한 용탕단조 제조공정인자, 가압력, 예비

* 부산대학교 금속공학과(Dept. Metallurgical Engineering, Pusan National University)

** 자동차부품연구소(Korea Automotive Technology Institute)

성형체의 예열온도, 계면반응의 영향 등에 대한 면밀한 검토가 요구되고 있다^{8, 9)}. 특히 금속복합재료 제조시에 가압력에 의하여 발생하는 예비성형체의 수축변형은 near-net-shape성형에 제약을 주므로 예비성형체의 수축변형의 제어가 요구되고 있다.^{11~15)} 또한 가압력에 의한 함침거리 및 함침속도, 젖음성, 기계적 특성 등에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나 가압력에 따른 예비성형체의 변형에 관한 연구는 부족한 실정이다.^{16~18)}

따라서 본 연구에서는 Al/Al₂O₃ 금속복합재료를 용탕단조법으로 제조하면서 가압력 변화에 따른 예비성형체의 실질 수축변형량을 측정하고, 이를 일반보 이론을 적용한 모델링을 통하여 얻은 이론적인 수축변형량과 상호 비교하여 가압력에 따른 예비성형체의 수축변형에 대해 검토조사하였다. 또한 저가이지만 기계적성질이 떨어지는 비정질 alumino-silicate(Kaowool) 단섬유를 결정화 열처리를 통해 보강섬유의 기계적성질의 향상을 꾀하고, 기계적성질은 우수하지만 고가인 δ-Al₂O₃(Saffil) 보강섬유와 비교하면서 금속복합재료를 제조하여 기계적 특성을 조사하고 계면분석 등 미세조직의 변화를 관찰검토하였다.

2. 실험방법

2.1 구성 재료

본 연구에서 사용된 보강섬유로는 ICI(Imperial Chemical Industries)사에서 제조된 직경 3μm, 길이 200μm의 δ-Al₂O₃인 결정질 단섬유 Saffil(Al₂O₃ 97%-SiO₂ 3%)과 Isolute사에서 제조된 직경 2.8μm, 길이 20μm-3mm의 비정질 alumino-silicate 단섬유 Kaowool(Al₂O₃ 47%-SiO₂ 53%)을 사용하였다. 단섬유 Saffil은 기계적성질은 우수하지만 고가이고, Kaowool 단섬유는 비정질로 기계적성질은 떨어지지만 가격이 저렴하다.¹⁰⁾ 따라서 단섬유인 Kaowool의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 결정화 열처리를 행하였다. 결정화열처리는 각각 1200, 1300°C에서 1시간 유지한 후 냉각하였다. 기지재료로는 내열성, 내마모성이 우수하며 열팽창계수가 작아 자동차의 내연기관 등에 주로 사용되고 있는 AC8A Al 합금(Al-12.5Si-1.1Cu-0.9Mg-0.1Zn-0.8Fe-1.6Ni-0.1Mn-0.1Ti)을 사용하였다.

2.2 금속복합재료의 제조

2.2.1 예비성형체의 제조

본 연구에서는 vacuum suction법⁸⁾을 이용하여 예비성형체를 제조하였다. 예비성형체의 제조시 단섬유와 증류수를 혼합하고 단섬유간의 상호 결합력을 유지하기 위하여 약 5 Vol%의 Silica colloid 바인더를 첨가하였다. 적정 섬유체적율(V_f)의 복합재료를 제조하기 위하여 용탕단조 시 예비성형체의 변형을 고려한 후 단섬유량을 정하고, 진공압을 이용하여 예비성형체의 크기를 조절하였다. 이와같은 방법으로 Saffil, 비정질 Kaowool 및 열처리된 Kaowool섬유의 예비성형체를 복합재료의 섬유체적율이 10%가 되도록 제조하였다. 제조되어진 예비성형체는 상온에서 3일간 건조시킨 후 80°C 항온 유지의 전기오븐에서 일주일간 건조시켰다. Photo 1.은 예비성형

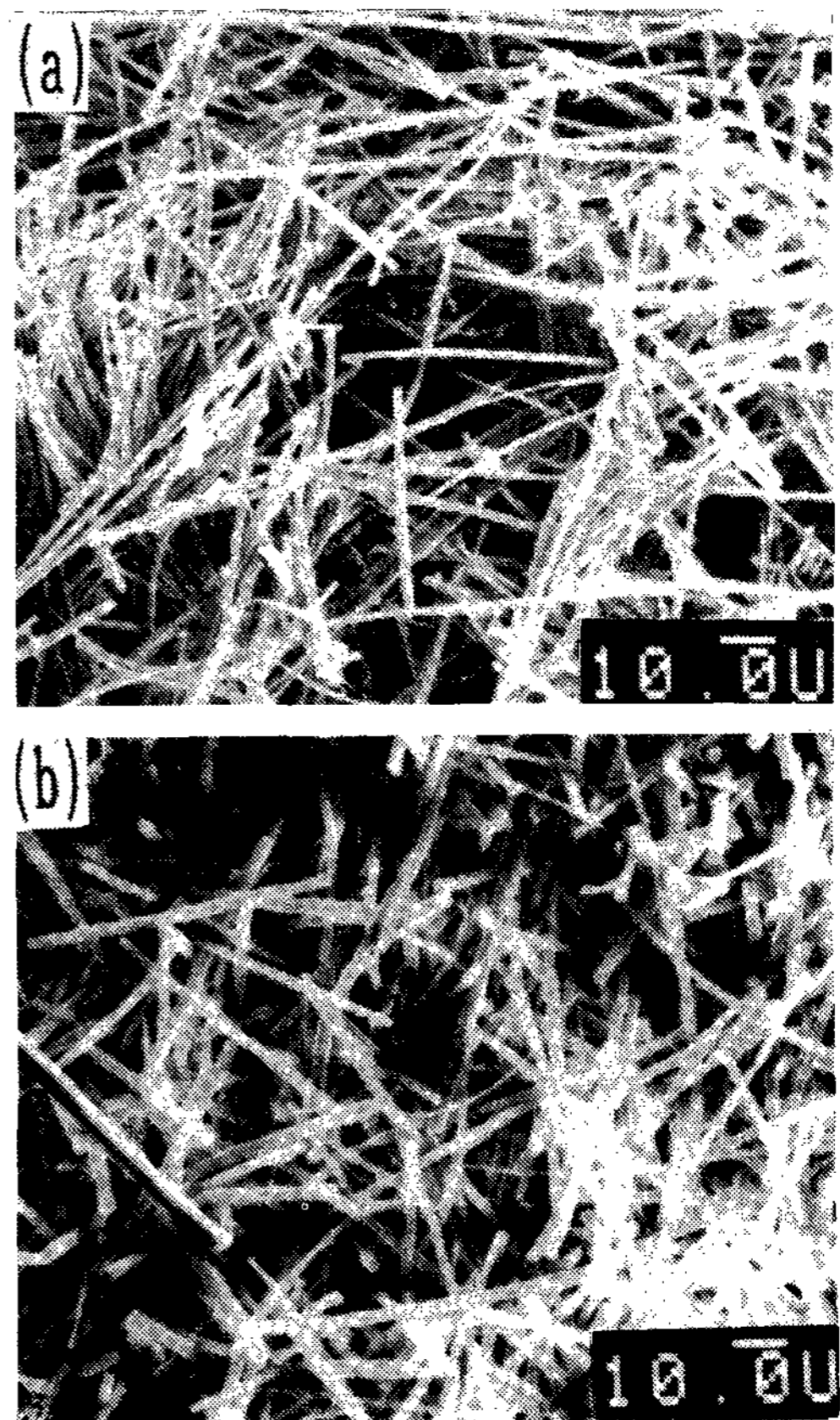


Photo 1. SEM micrographs showing the fiber distribution in preforms to fabricate squeeze cast composites with V_f=10% of (a) Saffil and (b) Kaowool (amorphous).

체의 SEM사진을 나타낸다. (a)Saffil과 (b)비정질 Kaowool의 예비성형체는 비교적 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

2.2.2 금속복합재료의 제조

본 실험에서 사용한 용탕단조 장치는 최대하중 100ton의 유압식 프레스, 최고용해온도 1000°C의 furnace, 최고온도 800°C의 예비성형체 예열용 furnace, 그리고 최고가열온도 500°C의 금형과 plunger 등으로 구성되어 있다.¹⁹⁾ 복합재료는 용탕온도 800°C의 기지금속을 예비성형체가 장착된 금형내에 주입하고 plunger로 가압하여 제조하였다. 복합재료의 제조시 강화섬유와 기지금속간의 젖음성을 향상시키기 위하여 예비성형체는 예열용 furnace에서 400°C로 예열하여, 400°C로 가열된 금형내에 장착하였다. Plunger의 이동속도는 10mm/sec로 하였고, 가압력 50-100MPa, 가압유지 시간 1분, 가압지연 시간 7초로 하였다. 가압력은 load-cell을 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 가압력을 50, 75, 100MPa로 변화시키면서 단섬유 Saffil을 보강섬유로 한 Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료를 제조하여 가압력에 따른 예비성형체의 수축변형을 검토하였다. 또한 가격이 저렴한 비정질 Kaowool 단섬유를 열처리하여, 강화섬유를 열처리에 따른 복합재료의 미세조직과 기계적특성을 조사하였다. 이를 위하여 예비실험결과 적정 가압력으로 사료된 75MPa에서 비정질 Kaowool, 열처리된 Kaowool, Saffil 단섬유 강화 AC8A Al 복합재료를 제조하여 비교, 조사하였다.

2.3 조직관찰 및 마멸시험

열처리에 따른 비정질 Kaowool 단섬유의 결정화 과정은 X-선 회절시험을 통하여 석출상 및 회절 X-선의 강도 및 반가폭 등을 분석하여 조사하였다. 회절시험은 Cu(K α) X선을 사용하여 행하였다.

용탕단조법으로 제조된 Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료의 미세조직은 Keller시약으로 etching한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 SEM과 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)를 이용하여 Mg 등과 같은 활성원소의 계면분석 등을 분석하였다. 복합재료의 기지 및 강화재의 미세경도는

Micro-Vickers 경도기를 이용하여 측정하여 복합재료의 기계적특성과의 연관관계를 고찰하였다. 경도는 하중 15kg, 하중시간 15초의 조건에서 15회 측정하여 평균치로 구하였다.

복합재료의 마멸특성은 TE53 Multi-Purpose Friction & Wear tester를 사용하여 rolling/sliding 방법으로 평가하였다. 마멸시험은 final load 3kg, sliding distance 2km로 고정시키고 sliding speed를 변화시키면서 행하여, 12.7×12.7×12.7 mm의 시험편의 마멸량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Squeeze casting 가압력에 의한 예비성형체의 변형

Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료의 용탕단조 제조시의 가압력 변화에 따른 예비성형체의 변형은 Photo 2에 나타나 있다. Table 1에는 예비성형체의 변형량을 나타내었는데, 변형량은 각 가압력 별로 5회 이상 복합재료를 제조하여 측정한 평균값으로 구하였다.

가압력에 따른 예비성형체의 변형량은 가압력이 증가할수록 증가하고 50, 75MPa의 경우 높이 방향으로의 수축변형(ΔH)만 발생하나 100MPa의 경우에는 높이 방향으로의 수축변형 외에 넓이 방향으로의 팽창변형(ΔD)이 동시에 일어나는 것으로 나타났다. 가압력 50MPa의 경우에는 주조결함을 육안으로도 관찰할 수 있어

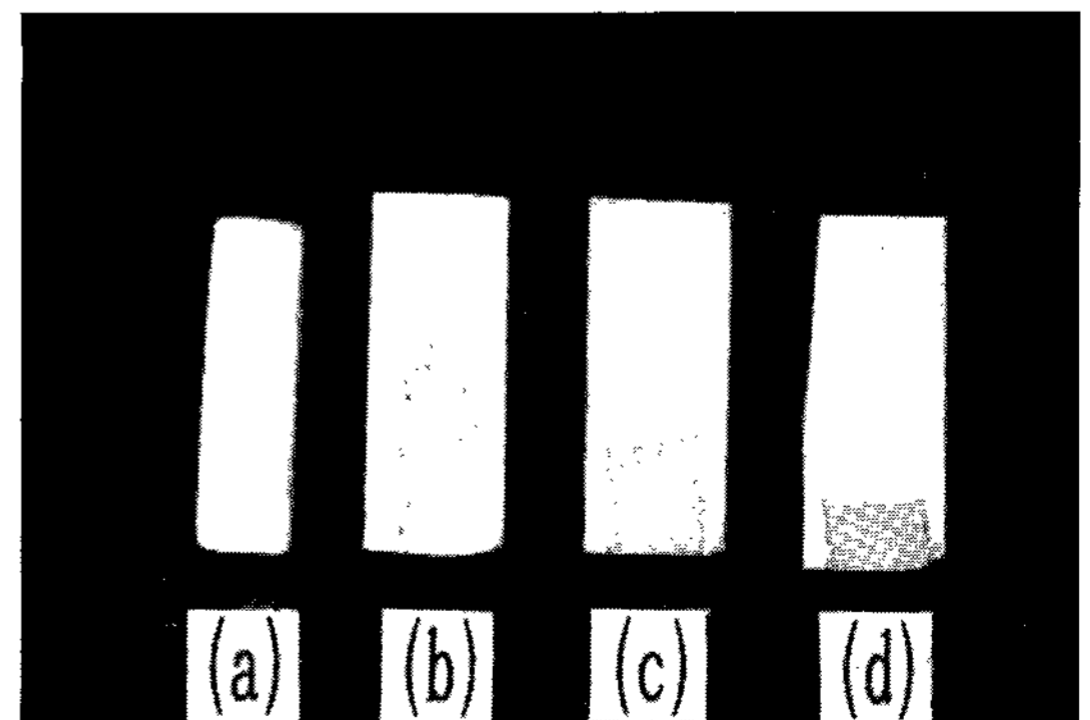


Photo 2. Preform deformation in the squeeze cast Al/Al₂O₃(saffil) composites with variation of applied pressure : (a) Preform (b) 50MPa (c) 75MPa (d) 100MPa

Table 1. Preform deformation

Specimen No.	Applied Pressure	H	D	L	ΔH	ΔD	ΔL
1	50MPa	12.8	6.0	57	7.0	0	0
2	75MPa	7.5	6.0	57	12.30	0	0
3	100MPa	4.15	6.2	57	15.65	+0.2	0

(unit : mm)

양호한 복합재료의 제조를 위하여는 충분한 가압력에 도달하지 못했음을 알 수 있다.

용탕단조 시 가압력에 의한 예비성형체의 변형을 다음과 같은 모델링을 통하여 해석하고자 하였다. 보강섬유로 사용된 Al₂O₃ 단섬유를 일정한 직경과 길이를 가진 하나의 보(beam)의 형태로 생각하면 예비성형체는 이러한 보의 집합으로 가정할 수 있고, 예비성형체의 변형은 주어진 압력에 대한 보의 최대변형의 합으로 계산할 수 있다.²⁰⁾ 예비성형체 내의 단섬유의 배열이 Fig. 1과 같이 직경이 d이고 길이가 ℓ인 보의 적층으로 가정하였다. 용탕단조 시 가압력에 의한 예비성형체의 변형은 Fig. 2와 같이 단순보(simple beam) 혹은 내다지보(cantilever beam) 두가지 경우에서 주어진 압력 (P)에 대한 최대변형(δ_{max})으로 생각하여 다음과 같이 계산하였다.

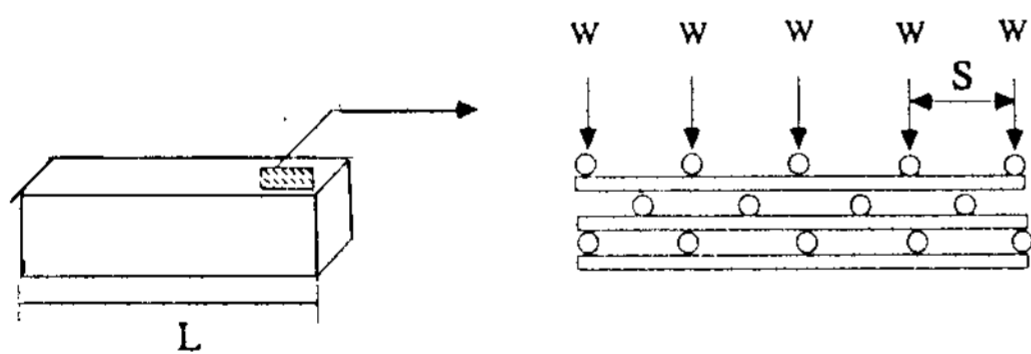


Fig. 1. An idealized schematic of the fiber arrangement in Al₂O₃ preform.

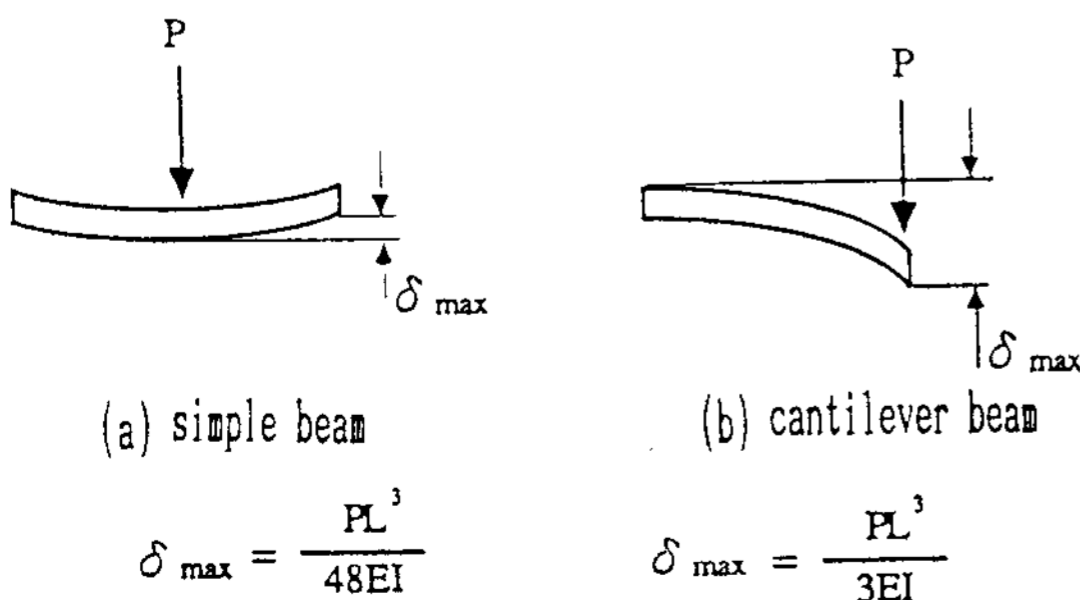


Fig. 2. Deflection of beams :
(a) simple beam and (b) cantilever beam

i) 단순보의 경우

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \dots\dots\dots(1)$$

ii) 내다지보의 경우

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI} \dots\dots\dots(2)$$

여기서

- P : pressure
- L : fiber length
- E : Young's modulus
- I : moment of inertia

이다.

예비성형체의 길이를 L, 두께를 D, 높이를 H 라고 하면 fiber 간격(interfiber spacing) S는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S = \frac{L}{(1-V_f)n} \dots\dots\dots(3)$$

V_f : fiber volume fraction

n : fiber number in upper area

여기서, 각 fiber에 걸치는 하중 W을 P/n으로 하고 N을 예비성형체내의 fiber 총갯수라 두면

i) 단순보의 변형량은

$$\delta_s = \frac{W \times (S + 3\mu m)^3}{48EL} \dots\dots\dots(4)$$

ii) 내다지보의 변형량은

$$\delta_c = \frac{W \times ((S + 3\mu m)^3 / 2)}{3EL} \dots\dots\dots(5)$$

와 같으므로 예비성형체의 변형량은 보의 변형량의 총합인 δ_c × N으로 된다. Saffil 단섬유 강화 AC8A Al 복합재료에서 식 (4), (5)을 이용하여 이론적으로 계산한 예비성형체의 변형량과 실제로 측정된 예비성형체의 변형량을 Fig. 3에 나타내었다. 예비성형체의 수축량은 내다지보로서 계산한 결과와 단순보로서 계산한 결과의 사이에 있으나, 단순보로서 계산한 결과에 더 접근하고 있다. 이는 예비성형체에서 단섬유들이 양쪽 끝에서 모두 다른 단섬유에 걸쳐져 있지 못하여 예비

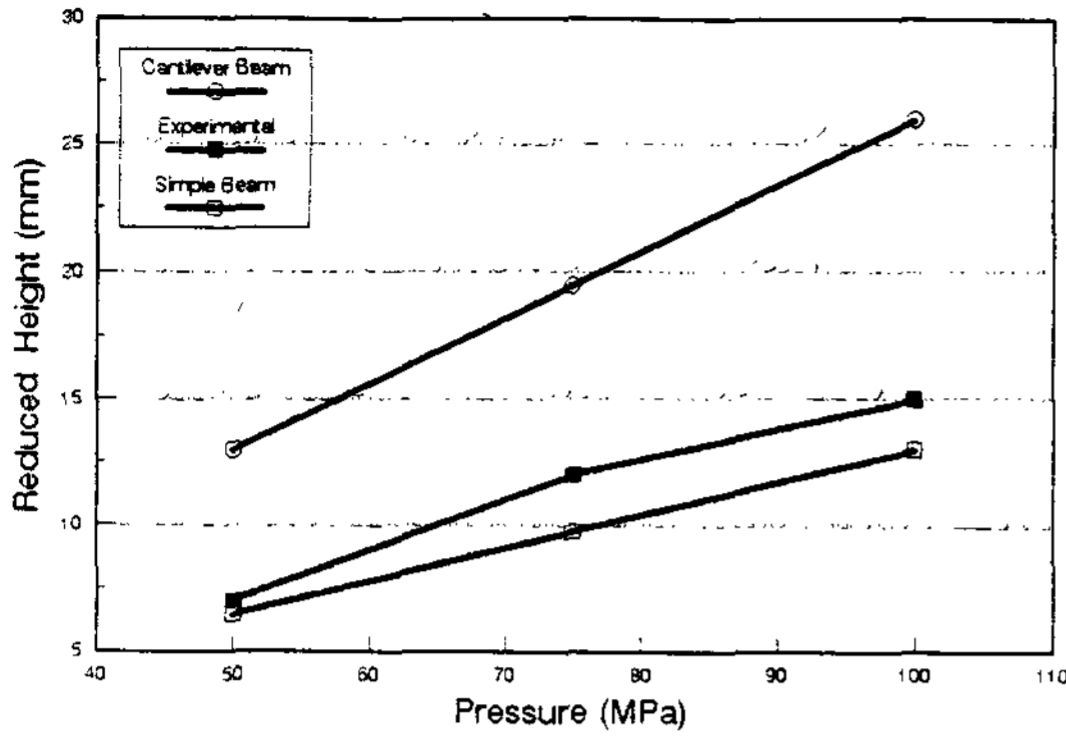


Fig. 3. Experimentally measured and theoretically calculated values for preform deformation in squeeze cast Al/Al₂O₃ composite.

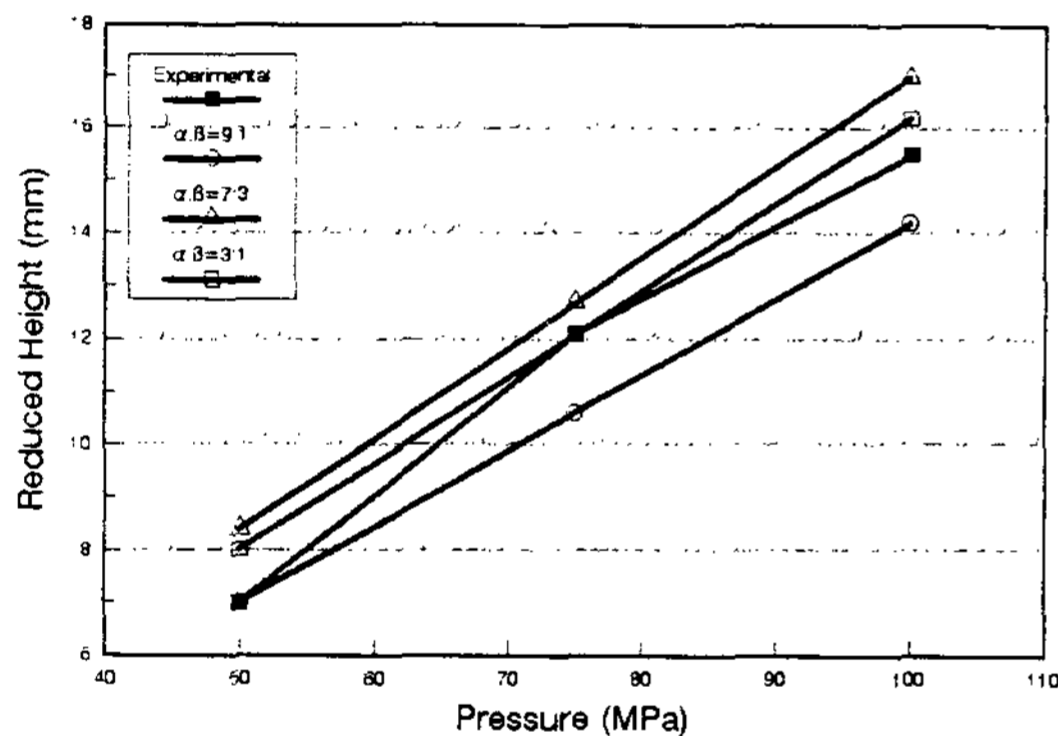


Fig. 4. The plot of preform deformation calculated by a model based on the general beam theory.

성형체 변형은 내다지보의 변형에 가깝고, 변형이 진행됨에 따라 단섬유간의 접촉이 증가하여 예비성형체 변형의 후반에는 단순보 형상의 변형이 생길 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 예비성형체의 실질 수축이 단순보와 내다지보의 혼합된 변형으로 가정하여 다음과 같은 실험식을 이용하여 예비성형체의 변형량을 예측하여 보았다.

$$\delta_{max} = \alpha\delta_c + \beta\delta_c \dots\dots\dots(6)$$

여기서 α 와 β 는 상수이다. Fig. 4에는 식 (6)을 이용하여 예비성형체의 수축량을 계산한 결과를 나타내었다. 가압력 50MPa에서는 Photo 1.에서 나타난 바와 같이 가압력이 충분하지 못하여 예비성형체의 수축량이 적고 단순보의 변형량에 가까운 결과를 나타내고 있으나, 적정가압력

으로 생각되어지는 75MPa에서는 단순보의 변형량과 내다지보 변형량의 비가 3 : 1($\alpha=3/4, \beta=1/4$)일때가 예비성형체의 실질 수축량과 상당히 일치하는 것으로 나타났다. 예비성형체의 실질 수축량은 가압력이 증가함에 따라 수축율이 감소함을 알 수 있는데(즉 가압력 50MPa과 75MPa 사이에서 보다는 75MPa과 100MPa 사이에서 수축량의 변화가 작다)이는 Table 1에서 나타나듯이 가압력 100MPa의 경우 높이 방향으로의 수축외에 넓이 방향으로의 팽창이 동시에 일어남에 의한 것으로 사료된다. 따라서 가압력 100MPa의 경우에 식 (6)으로 계산된 예비성형체의 수축량($\alpha=3/4, \beta=1/4$)이 실질 수축량보다 다소 큰 것도 이에 연유한 것으로 사료된다.

3.2 섬유열처리에 따른 복합재료의 특성변화

비정질 Kaowool 단섬유는 열처리를 통하여 결정화가 진행되었는데, 열처리에 따른 Kaowool의 결정화 정도는 X선 회절시험 결과(Fig. 5)로부터 상변화 등을 분석하여 확인하였다. Fig. 5 (a)는 열처리 하지 않은 비정질 Kaowool, (b)는 1200°C에서, (c)는 1300°C에서 1시간 유지한 후

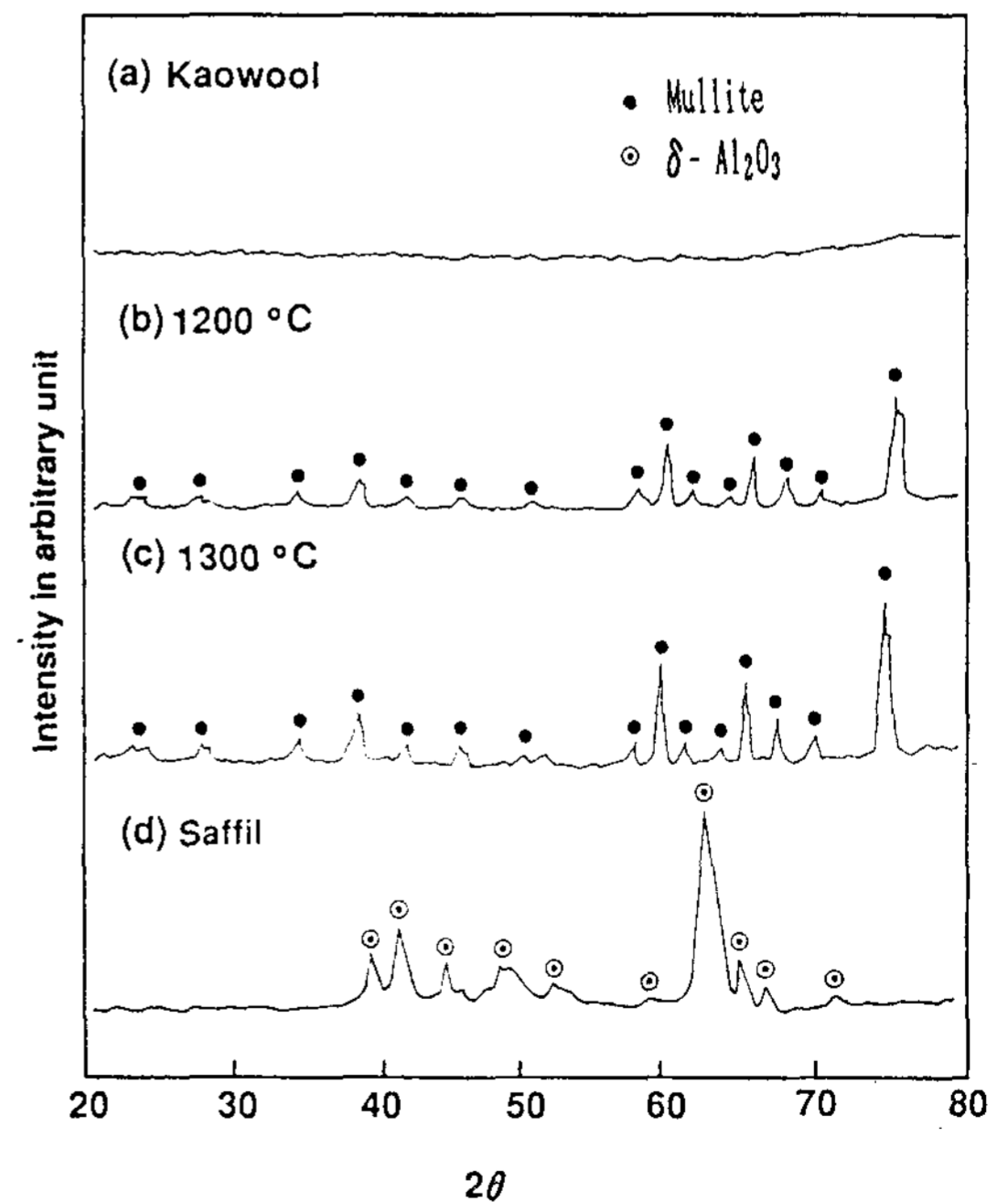
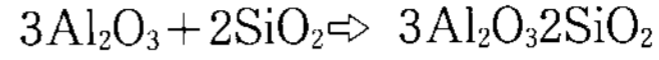


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of Al₂O₃ fibers : (a) Amorphous Kaowool (b) Kaowool(1200°C) (c) Kaowool(1300°C) (d) Saffil

노냉처리한 Kaowool 단섬유, 그리고 (d)는 Saffil 단섬유의 회절 pattern이다. 회절 pattern (a)에서는 열처리하지 않은 Kaowool 단섬유가 완전 비정질상인 것을, 그리고 (b), (c)에서는 열처리에 의하여 Kaowool 단섬유가 결정화가 진행됨을 확인할 수 있었다. (d)에서는 Saffil 단섬유는 준안정 결정상인 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 로 이루어져 있음을 확인하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 회절 peak의 강도는 증가하고 반가폭이 약간 감소하는 것으로 보아 온도가 상승함에 따라서 결정상의 생성량이 증가하는 것으로 생각된다. X-선 회절 분석결과 열처리한 Kaowool 단섬유에서 생성된 결정상은 mullite($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$)인 것으로 확인되었다. 안정한 결정상인 mullite는 다음과 같이 비정질의 alumina와 silica가 반응하여 생성된 것으로 사료된다.



예비실험 결과 적정가압력으로 생각되어지는 75MPa의 조건에서 Saffil, 비정질 Kaowool, 열처리한 결정화 Kaowool(1200°C 및 1300°C) 단섬유를 보강섬유로 하여 4종류의 Al/Al₂O₃ 금속 복합재료를 제조하였다. Photo 3 에는 이들의 광학현미경 조직 사진을 나타낸다. Photo 3.(a)는 Saffil, (b)는 비정질 Kaowool, (c)는 1200°C 열처리 Kaowool, (d)는 1300°C 열처리 Kaowool 단섬유를 보강하여 제조한 복합재료이다. 광학현미경 상으로는 미세조직의 큰차이를 발견할 수 없었고, 보강섬유의 분포는 균일하여 양호한 조직의 복합재료가 제조되었음을 확인할 수 있었다.

용탕단조 Al/Al₂O₃ 금속 복합재료의 미세조직 및 계면분석 등을 알아보기 위하여 SEM과 EDS 분석을 행하였다. Photo 4 (a)는 SEM으로 관찰한

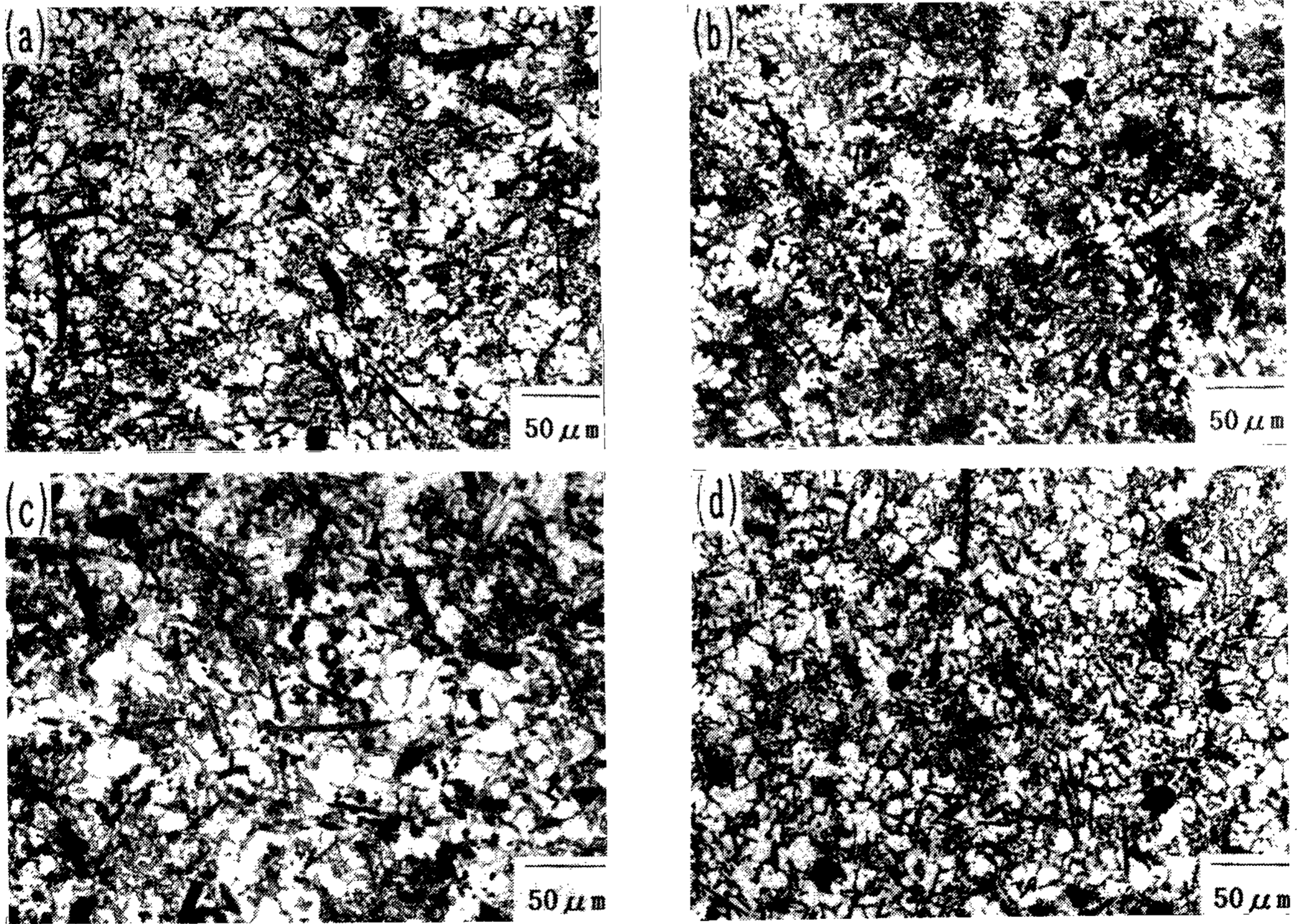


Photo 3. Optical micrographs of squeeze cast Al/Al₂O₃ composites with applied pressure of 75MPa. Reinforced fibers are
 (a) Saffil (b) Kaowool(amorphous)
 (c) Kaowool (1200°C) (d) Kaowool(1300°C)

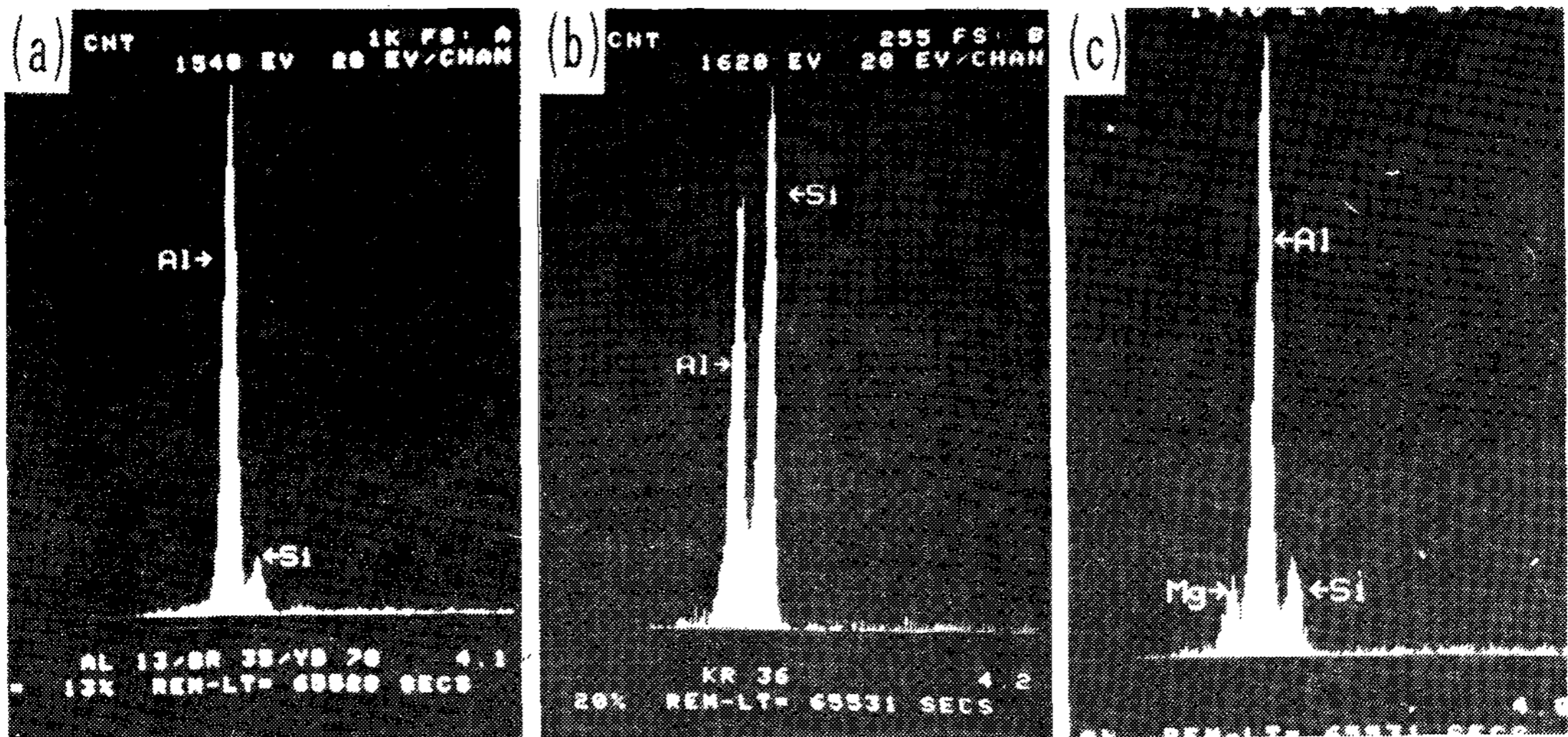
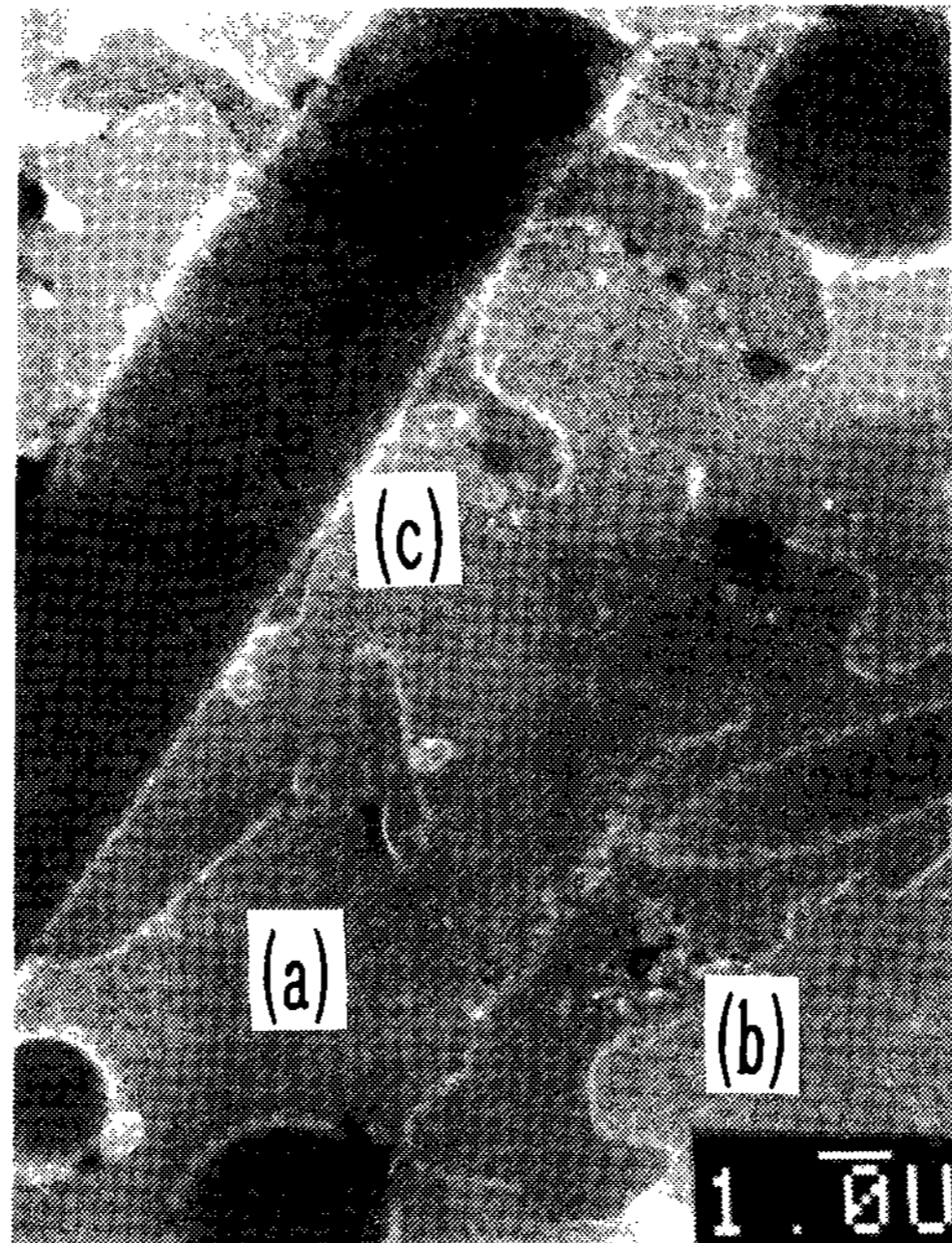


Photo 4. Energy dispersive spectroscopy of Al₂O₃ composites in (a) & (b) matrix (c) interface

Al/Al₂O₃(Saffil) 복합재료의 미세조직이며, (b)와 (c)는 기지금속, (d) Al/Al₂O₃ 계면의 EDS 분석 결과이다. 기지금속에서는 Al과 Si가 검출되는 것으로 보아, 이는 초정 α상 및 Al-Si 공정상에 의한 것으로 사료된다. Al/Al₂O₃ 계면에서는 Mg이 검출되는 것으로 보아 활성화 원소인 Mg이 계면에서 편석되어 있는 것으로 판단된다. T. Suganuma¹⁰⁾등은 비정질 Kaowool 섬유와 결정

질 Kaowool 섬유로 보강된 Al 금속기 복합재료에서 계면편석을 비교 분석하였다. 비정질 Kaowool 섬유강화 복합재료에서는 기지중 Mg이 심하게 계면으로 편석되고 섬유와 반응하여 섬유의 열화를 초래하는 반면, 결정질 Kaowool 섬유강화 복합재료에서는 Mg의 계면편석이 적어서 기계적특성이 더 양호한 복합재료를 제조할 수 있었다고 설명하고 있다. 그러나 본 연구에서

Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료의 Mg 계면 편석량을 면밀히 조사한 결과 Kaowool 섬유의 열처리에 따른 계면편석의 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다. Photo 5는 용탕단조법으로 제조한 비정질

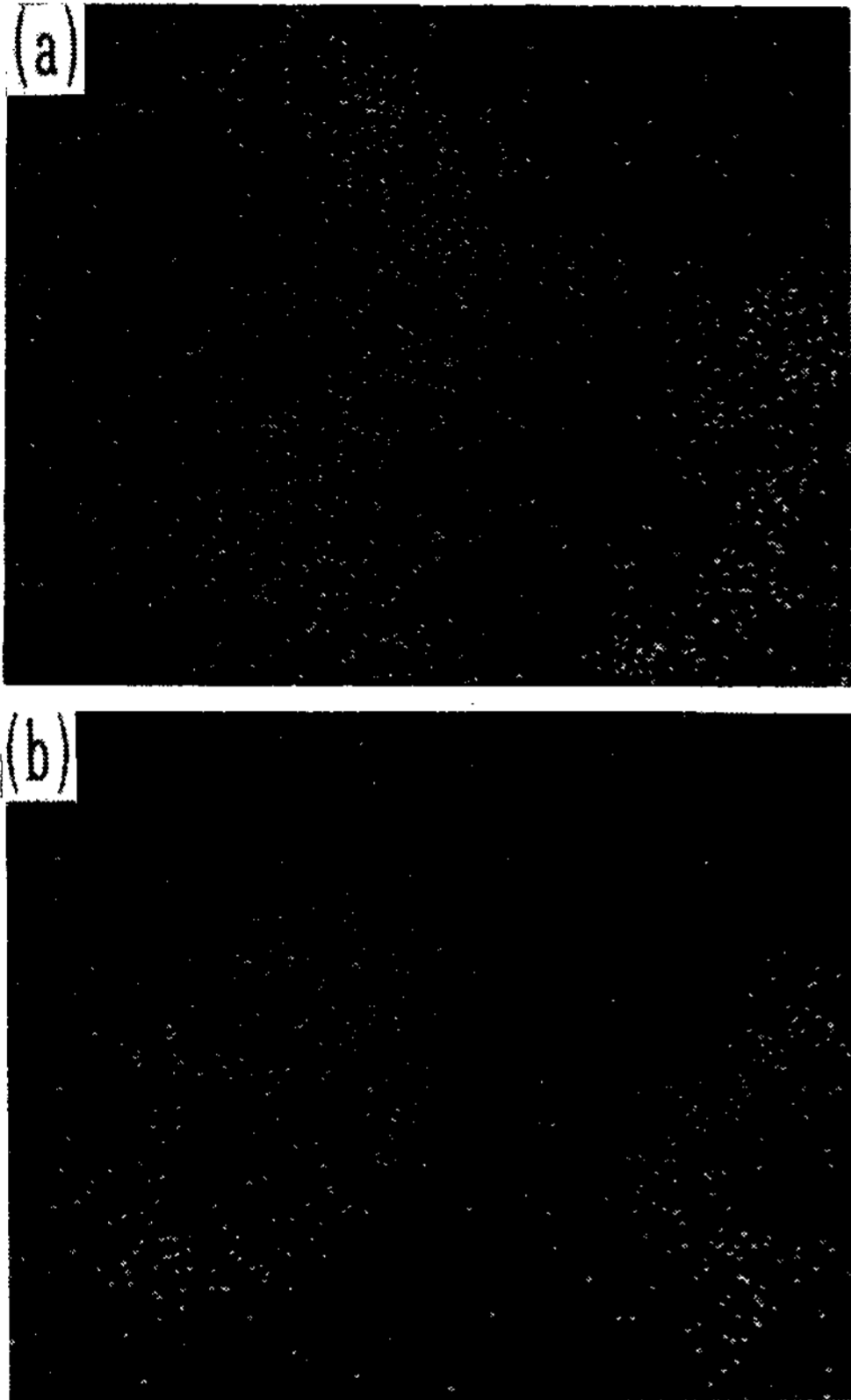


Photo 5. X-ray mapping showing the segregation of Mg at the interface between the matrix and fibers :
(a) Kaowool(amorphous)
(b) Kaowool(crystallized)

및 결정질 Kaowool 섬유강화 복합재료의 계면을 EDS로 분석한 결과이다.

제조한 4종류의 복합재료에서 측정된 보강섬유의 경도값은 Saffil 1050Hv, 비정질 Kaowool 660Hv, Kaowool(1200°C 열처리) 860Hv, Kaowool(1300°C 열처리) 870Hv로, Saffil의 경도값이 가장 높게 나타났고 비정질 Kaowool의 경우가 가장 낮게 나타났다. 비정질 Kaowool 보다 결정화 열처리한 Kaowool의 경도값이 높은 것은 경한 mullite상의 생성에 기인한 것으로, 결정화 열처리 온도가 증가함에 따라 경도값이 증

가하는 것은 mullite 생성량 증가에 기인한 것으로 사료된다. 상기 4종의 복합재료에서 기지의 경도값은 102-109Hv의 범위에서 측정되었으며 보강섬유의 종류에 큰 상관성이 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 4종류의 용탕단조 Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료의 마멸시험 결과를 나타내었다. 마멸량의 측정결과 Saffil 단섬유 보강 복합재료가 내마멸성이 가장 우수하고, 열처리한 Kaowool 단섬유 보강 복합재료가 비정질 Kaowool 단섬유 복합재료 보다는 내마멸성이 우수한 것으로 나타났다. 앞서 EDS 분석결과 섬유의 종류에 따른 계면편석의 차이가 크지 않는 것으로 보아 복합재료의 마멸특성은 주로 보강섬유의 경도값의 차이에 의한 것으로 사료된다. 즉, 경도값이 가장 높은 Saffil 단섬유 보강 복합재료가 내마멸성이 가장 우수하고, 경도가 가장 낮은 비정질 Kaowool 단섬유 보강 복합재료가 내마멸성이 떨어지는 것으로 나타났다. 열처리한 Kaowool 단섬유 보강 복합재료는 경한 mullite의 생성으로 인하여 경도가 증가하였고 내마멸성도 증가한 것으로 나타났다.

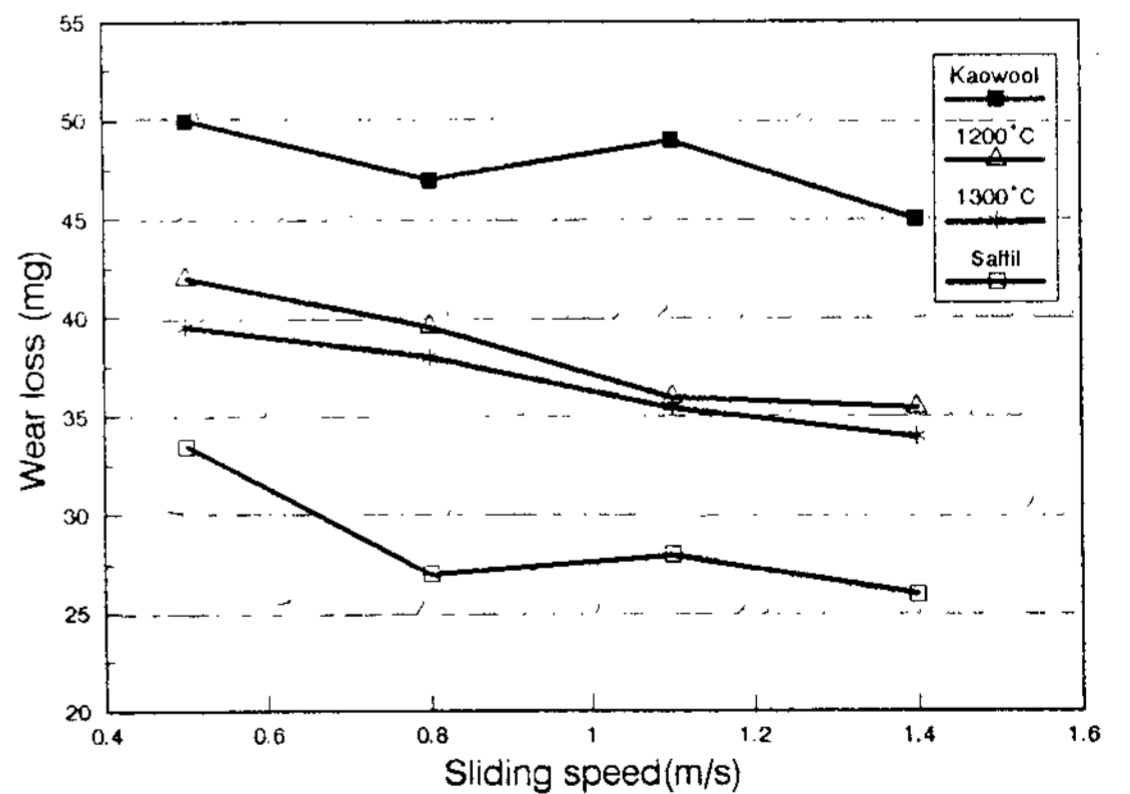


Fig. 6. Wear loss of Al/Al₂O₃ composites as a function of sliding speed.

4. 결 론

1. 용탕단조 시 가압력에 의한 예비성형체의 변형은 일반보 이론을 적용한 모델을 제시하여 예측해 보았다. 가압력에 의한 예비성형체의 실질 수축변형은 대체로 단순보로 예측한 변형에

가까왔다. 적정가압력으로 생각되어지는 75MPa에서 예비성형체의 수축변형은 단순보와 내다지보로 예측한 변형의 비율을 3:1로 계산하였을 때 측정치와 가장 잘 일치하였다.

2. 비정질 Kaowool 단섬유를 열처리하면 경한 mullite가 생성되면서 결정화가 이루어지고, 이로 인하여 보강섬유의 미소경도값이 상승하였다. 용탕단조가 Al/Al₂O₃ 금속기 복합재료에서 비정질 Kaowool 단섬유와 결정질 Kaowool 단섬유 보강의 경우 Mg의 계면편석은 차이가 없었으며, 후자의 내마멸성 증가는 열처리 후 결정화에 의한 섬유강도의 증가에 주로 기인한 것으로 사료된다. 그러나 열처리한 결정질 Kaowool 단섬유 보강 복합재료에서도 내마멸성은 Saffil 단섬유 보강 복합재료 보다 우수하지는 못하였다.

후 기

본연구의 일부는 급속응고신소재공학연구센터의 지원으로 행해졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Rohatgi : J. of Metal, 4(1991)10
2. A.K.Lee, L.E.S.Caldera, S.T.Oktay and N.P. Suh : Adv. Mat. & Pro., 8(1992)27
3. A.Mortensen, J.A.Cornie and M.C.Flemings : J. of Metal, 2(1988)12
4. 박익민, 신광선, 윤의박 : 한국주조공학회지, 8(1988)412
5. 조경목, 박익민, 제1회 자동차경량화 심포지움, (1992), 포항, 239
6. 박익민 : 제2회 응고기술심포지움, 서울

- (1991)86
7. D. O. Kennedy : Adv. Mat. & Pro. 6(1991) 42
8. H. Fugunaga : Proc. Int. Sym. on Advanced Cast MMC, Chicago, (1988)101
9. T. W. Clyne and M. G. Bader, Proc. ICCM-5th, 1985, 755
10. T. Suganuma and A. Tanaka : Tetsu-to-Hagane, 75(1989)1790
11. A. Mortensen and V. Michaud : Met. Trans., 21A(1990) 2059
12. S. Nagata, K. Matsuda : IMONO, 53, (1981)300
13. H. Fukunaga, K. Goda : J. Jpn. Inst. Met., 49(1985)78
14. T. W. Clyne, J. F. Mason : Met. Trans., 18A(1987)1519
15. H. Fukunaga, K. Goda : Bull. JSME, 27 (1984)1245
16. A. Mortensen, J. A. Cornie, M. N. Gungor, M. C. Fleming : Proc. of the Fifth Int. Conf. on Composites Mat., ICCM5, San Diego (1985)809
17. J. A. Cornie, L. Masur : American Superconductor Corp.(1988)7
18. H. Aukunaga, k. Goda : Bull of the Jap. Soc. of Mechanical Eng.(1985)1
19. 김대업, 김진, 박익민 : 한국주조공학회지, 11 (1991)208
20. S. H. Crandall, N. C. Dahl and T. J. Lardner : An Introduction to Mechanics of Solids, 2nd ed., (1978) McGraw Hill.