

論文

용탕단조법에 의한 금속복합재료의 성형공정에 있어서
예비성형체의 변형과 인장 거동에 관한 연구

강충길* · 구광서** · 이해욱***

A Study on Preform Deformation and Tensile Behaviour of
Metal Matrix Composites Fabricated by Squeeze Casting

C.G. Kang*, G.S. Ku** and H.W. Lee***

ABSTRACT

Experimental data are presented for injection of Al2024 melts into preforms which are composed of δ -alumina short fiber of SAFFIL with a silica binder. The deformations of preforms during the infiltration process are measured with relation to such forming parameters as fiber volume fraction, applied pressure, weight of binder and with and without clearance between mold and preform. Tensile properties of metal matrix composites fabricated by squeeze casting are evaluated with relation to the various fabrication conditions. To investigate bonding phenomena between fiber and matrix and reinforcement behavior, the microstructure of the fracture surface are also examined with SEM.

초 록

SAFFIL사의 δ -알루미나 섬유와 silica 결합재를 사용하여 예비성형체를 제조한 후, 기지금속으로 Al2024를 이용하여 함침 실험을 하였다. 섬유체적함유율, 가압력, 결합재의 양 및 예비성형체와 금형의 틈새유무 등을 성형변수로 예비성형체의 변형을 측정하여 변형을 줄일 수 있는 성형조건을 찾았다. 또한 용탕단조법에 의해 제조된 금속복합재료의 탄성계수, 인장강도 및 연신율등의 성형조건에 따른 변화를 관찰하였으며, 강화재와 기지금속 사이의 계면 접합 상태 및 강화재의 거동 등을 조사하기 위해 인장시편의 파단면을 주사현미경을 이용하여 관찰하였다.

1. 서 론

용탕단조법에 의한 금속복합재료의 제조공정은 예비성형체(Preform)의 제조와 함침성형 공정으로 구분할 수 있으며, 금속복합재료의 기계적 성질은 공정인자의 변화에 따라 크게 영향을 받는다. 예비성형체의 제조에 있어서 성형인자는 결합재의

체적율, 진공가압시간, 진공압력, 증류수의 양, 교반시간 등이 있고, 함침성형 공정의 성형인자는 금형 온도, 예비성형체의 온도, 용탕 온도, 강화재의 체적함유율, 가압력, 가압속도 등이 있다. 성형시 함침한계성과 금속복합재료의 기계적성질에 미치는 공정인자의 영향에 관련한 연구는 함침시간과 함침거리와의 실험 및 이론적 관계[1-3], 함

* 부산대학교 정밀기계과

*** 현대자동차

** 연암공전 기계설계과

침완료후 금속복합재료의 기계적 성질 및 계면 관찰[4-5], 가압력과 용탕의 주입온도 등을 고려한 온도해석 등이 주류를 이루고 있다[6-8]. 또한 실제의 부품형상을 갖는 예비성형체의 성형실험을 행하여 성형인자에 따른 예비성형체의 상태를 관찰하고 제조된 예비성형체를 가지고 함침성형실험을 행하여 성형인자에 따른 함침한계성의 결과를 도출하였다[9].

함침성형이 완료된 후 금속복합재료가 갖는 기계적 성질에 관한 연구도 이제까지 많이 발표되었다. 강화재의 체적함유율에 따른 인장 특성 곡선 및 경도의 변화, 강화재의 형상 및 배향에 따른 기계적 성질의 변화, 열처리 효과에 따른 금속조직의 변화, 고온 인장 특성, 피로 및 파괴 거동 등 여러 관점에서의 실험적 연구가 있다[10-11]. 동일한 섬유체적함유율 및 열처리 조건일지라도 가압성형시의 가압력 및 결합재의 양에 따라서 금속복합재료의 미세조직이 변화하게 되어 결과적으로 기계적 성질도 변화하게 되는데 대부분의 연구가 동일 성형조건에서의 기계적 성질을 파악하는데 초점이 맞추어져 왔다[12]. 따라서 이러한 성형조건에 따른 기계적 성질의 변화를 파악하는 것은 양호한 금속복합재료를 얻기 위하여 반드시 필요하다.

본 연구에서는 함침한계성에 관한 연구의 연속으로, 함침성형시 예비성형체의 변형을 가압력, 결합재의 양, 예비성형체와 금형사이의 틈새 유무, 강화재의 체적함유율 등에 따라 정량적으로 관찰하여 예비성형체의 변형을 최소화 할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 인장시험과 SEM관찰에 의해, 제조되어진 금속복합재료의 기계적 성질과 파단기구를 가압력, 결합재의 양, 섬유체적함유율과 같은 성형조건과 관련지어 파악하였다.

2. 실험방법

2-1. 예비성형체의 제조

본 실험에서 사용한 강화재는 ICI사의 SAFFIL RF Grade인 δ - Al_2O_3 단섬유이며 물성치를 Table 1

에 나타내었다. 결합재는 SiO_2 silica colloid를 사용하였다. 예비성형체의 제조를 위한 금형은 자체 설계, 제작하였으며 예비성형체의 제조는 진공 가압법을 사용하였다[6]. 양호한 상태의 예비성형체를 얻기위한 성형조건은 성형인자를 변화시켜 가면서 여러번의 시행착오를 거쳐 구하여 진공가압 시간 30분, 진공압력 20mmHg, 종류수의 양 750cc, 교반시간 10분으로 하였으며, 결합재의 양은 예비성형체 무게의 10~30%를 사용하였다. 본 실험에서는 길이×폭×두께가 각각 100mm×20mm×24mm이며 섬유체적함유율 V_f 가 각각 10, 15 및 20%인 3가지 종류의 예비성형체를 제조하였으며, 제조된 예비성형체는 상온에서 일정시간 건조시킨 후 전기오븐에서 가열하여 수분을 완전히 제거하였다.

Table 1. Properties of SAFFIL fiber δ - Al_2O_3

Fiber Length	70 [mm]
	150 [mm]
Diameter	3 [mm]
Melting Point	>2000 [°C]
Maximum use temperature	1600 [°C]
Density	3.3 [g/cm ³]
Tensile Strength	2000 [MPa]
Young's Modulus	300 [GPa]
Hardness	7 [Moh scale]
Crystal Phase	δ - Al_2O_3
Chemical Composition	Al_2O_3 : 96-97 %
	SiC : 3-4 %

2-2. 금속복합재료의 제조

본 실험에서 사용한 기지재료는 유동성이 좋지 않아 함침성형 도중 예비성형체의 변형이 문제로 되어 있는 AI2024를 사용하였다[13]. 제조장치는 기지재의 종류 및 강화재의 체적함유율 등에 따라 성형조건을 변화시킬 수 있도록 설계, 제작되었다. 그 주요부는 크게 압력 및 속도제어용 유압프레스 부분과 금속복합재료의 제조를 위한 금형부분으로 나누어져 있으며, 유압프레스는 최대 100톤까지 가압이 가능하며 금형내부에는 직경 1.6mm의 열전대를 설치하여 온도를 제어할 수 있도록 하였다.

용탕단조법에 의한 금속복합재료의 성형공정을 Fig. 1(a)-(d)에 개략적으로 나타내었다. 성형조건에 따라 예비성형체의 변형과 함께 기지재의 용탕이 예비성형체에 완전히 함침되는 경우와 완전히 침투되지 못하는 경우가 있다. 따라서 완전하게 함침이 이루어지는 성형조건을 찾는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 Al2024에 대한 함침 실험중에서 두께가 24mm인 예비성형체에 함침이 완전히 이루어진 성형조건에서 실험한 후 예비성형체의 변형정도를 측정하였다. 성형 조건은 기지재의 온도 $T_1=800^{\circ}\text{C}$, 예비성형체의 예열 온도 $T_p=800^{\circ}\text{C}$, 금형의 예열 온도 $T_m=400^{\circ}\text{C}$, 펀치의 가압속도 $V=10\sim11\text{m/sec.}$, 가압지연시간은 $t=20\text{sec.}$ 로 하였다. Fig. 2는 용탕단조후 예비성형체의 변형상태를 나타낸 것이다. 예비성형체의 변형이 불균일하게 되어 있음을 알 수 있고, 금형과의 접촉부분에서 변형이 많이 일어남을 알 수 있다. 위의 원인은 가압지연 시간동안 금형내에 있는 용탕의 온도가 균일하지 않기 때문으로 생각된다. 완전히 함침이 이루어지는 성형조건에서도 어느 정도의 예비성형

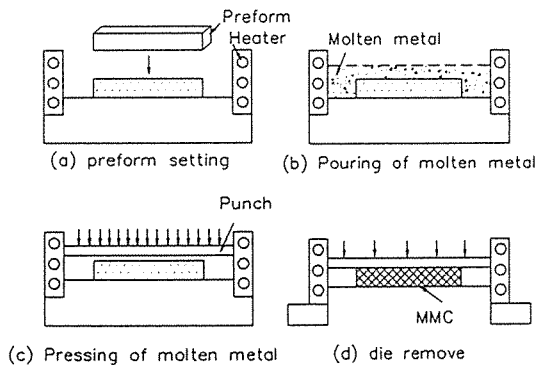


Fig. 1. (a)-(d) Fabrication process of MMCs by squeeze casting

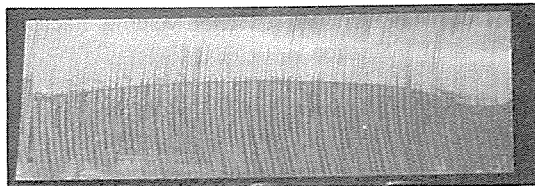


Fig. 2. Appearance of metal matrix composites after infiltration

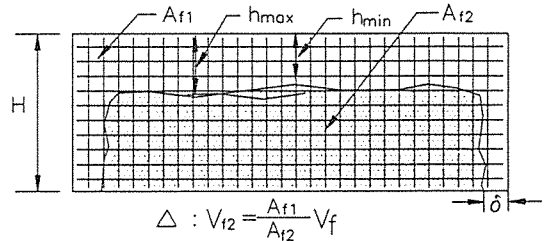


Fig. 3. Shape of preform deformation and volume fraction definition after infiltration

체의 변형은 불가피하다. 이는 용탕이 가압에 의해 예비성형체내로 함침될 때 용탕의 가압력과 용탕의 온도 하강에 따른 점성력의 증가에 기인한 것으로 생각된다. 본 연구에서 예비성형체의 변형을 정량적으로 조사하기 위해 Fig. 3에 금형과 예비성형체 사이의 틈새 유무, 용탕의 가압력, 섬유의 체적함유율 및 결합재의 양을 성형변수로 하여 함침한 후, 예비성형체의 변형을 측정하였다. 이때 틈새의 크기는 $2\sim4\text{mm}$ 로 하였다. 성형후 예비성형체의 변형량을 조사하기 위하여 변형후 예비성형체의 최대, 최소의 변형량을 각각 h_{\max} , h_{\min} 으로 정의하였으며, 또한 성형후 예비성형체의 체적함유율 V_{12} 는 변형전후의 예비성형체의 면적을 계산하여 다음과 같이 정의하였다.

$$V_{12} = (A_{f1}/A_{f2}) \times V_f$$

제조된 금속복합재료의 인장거동을 파악하기 위하여 ASTM 규격에 따라 인장시편을 제작하였다. 인장 시편은 492°C 에서 90분간 용체화 처리를 한후 191°C 에서 12시간동안 인공시효시키는 T6 열처리를 하였다. 인장실험은 용량 15Ton의 Instron에서 0.4 mm/min. 의 속도로 인장하였다. 또한 예비성형체 내에서의 결합재의 유무를 확인하고 인장시험 후 파단면의 상태를 관찰하기 위하여 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4(a)(b)는 예비성형체와 금형사이에 틈새 δ 을 $2\sim4\text{mm}$ 둔 경우와 두지 않은 경우에 있어서 예비성형체의 최대, 최소 변형 깊이를 측정 비교한

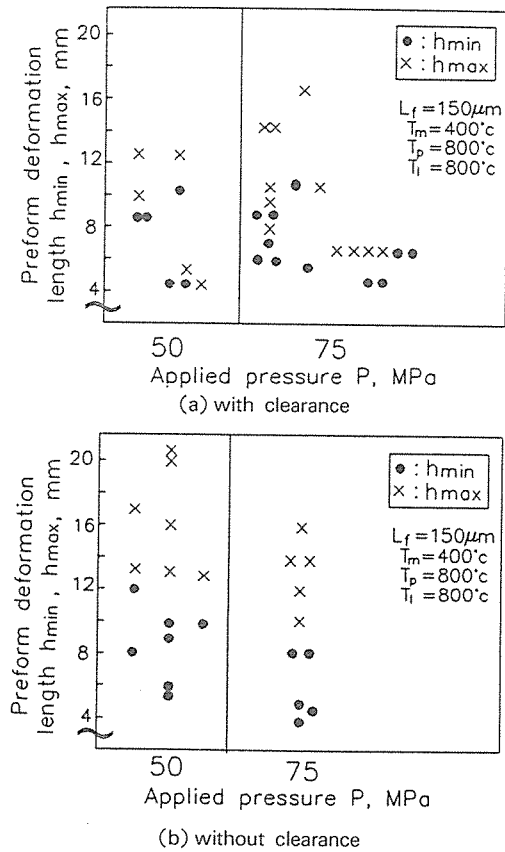


Fig. 4. (a)(b) Preform deformation with and without clearance between preform and die

것이다. 실험결과와 편차가 있지만 가압력에 관계 없이 틈새 δ 를 뚫으므로 예비성형체의 변형이 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 가압력이 50MPa인 경우를 보면 틈새가 없는 경우의 평균변형량 12mm에서 틈새가 있는 경우의 평균변형량 8mm로 약 33%의 변형량 감소를 나타내었다. 또한 가압력이 75MPa인 경우를 보면 틈새가 없는 경우의 평균변형량 10mm에서 틈새가 있는 경우의 평균변형량 8mm로 약 20%의 변형량 감소를 나타내었다. 이는 금형과 예비성형체 사이에 용융상태의 기지재가 존재하기 때문에 예비성형체의 온도 저하를 지연시켜 결과적으로 침투하고 있는 용융금속의 응고 지연에 기인한다고 생각된다.

Fig. 5(a)–(c)는 함침후의 체적함유율 V_{f2} 를 가압력을 변수로 하여 나타낸 것이다. 예상과는 달리

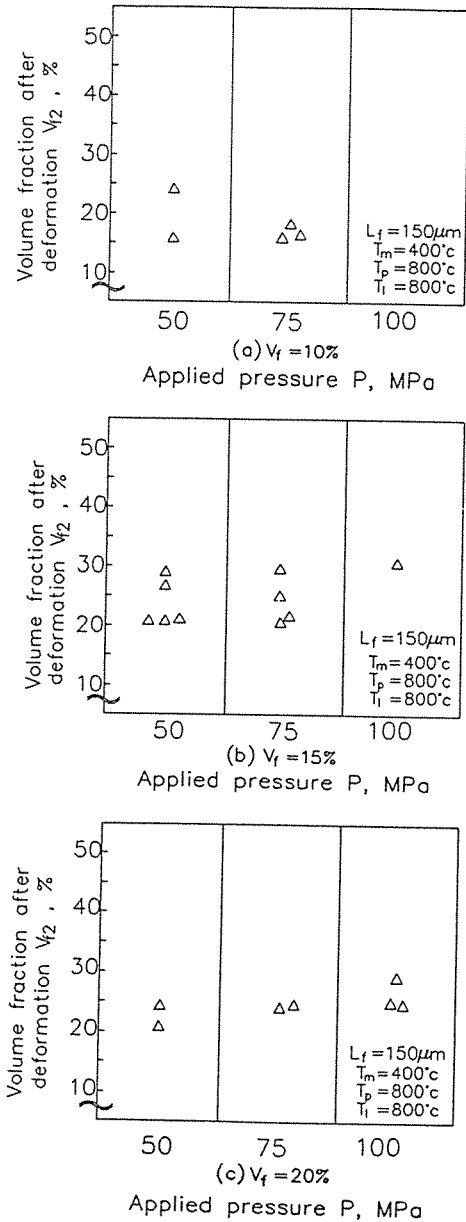


Fig. 5. (a)–(c) Variation of fiber volume fraction after infiltration

가압력의 변화에 따른 섬유체적함유율의 변화가 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 함침전의 섬유체적함유율이 높을수록 함침후의 체적함유율 변화가 상대적으로 작은 것을 알 수 있는데, 이는 예비성형체에 기공이 감소하여 섬유사이의 결합력

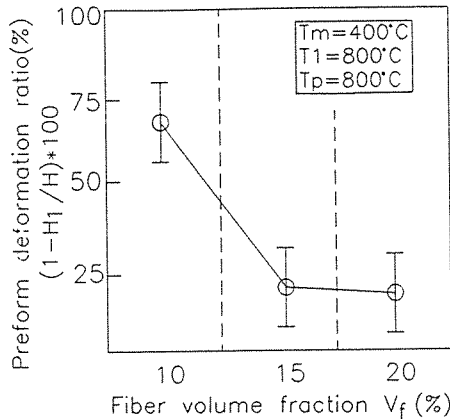


Fig. 6. Preform deformation ratio according to fiber volume fraction

이 크기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 6.은 체적함유율에 따른 예비성형체의 변형을 나타내고 있다. 여기서 H는 함침전 예비성형체의 높이이고 H_1 는 변형된 예비성형체의 10점 평균 높이이다. 체적함유율이 높을수록 예비성형체의 변형이 줄고 있으나 체적함유율 15%와 20%에 있어서는 그차가 미미하다. 이는 어떤 성형조건이 주어졌을 때 예비성형체의 변형이 섬유체적함유율에 따라 거의 변화가 없는 임계체적함유율이 있음을 나타내고 있다.

Fig. 7.은 섬유체적함유율이 30%인 경우 예비성형체의 변형을 결합재의 양에 따라 나타낸 것이다. 결합재의 양이 많을수록 예비성형체의 강성이 증

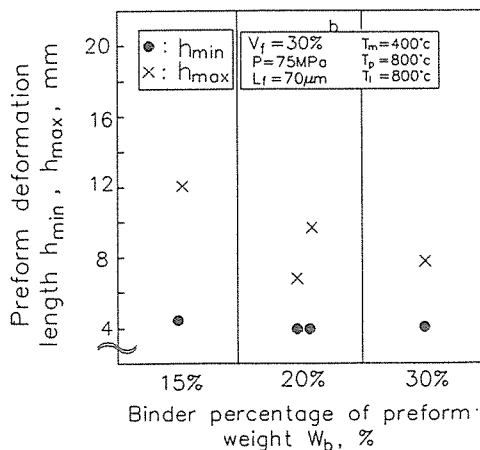


Fig. 7. Effect of amount of binder on preform deformation

가하여 변형이 점점 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러나 적정량을 초과한 결합재는 금속복합재료의 강도를 저하시키는 원인이 되기도 한다.

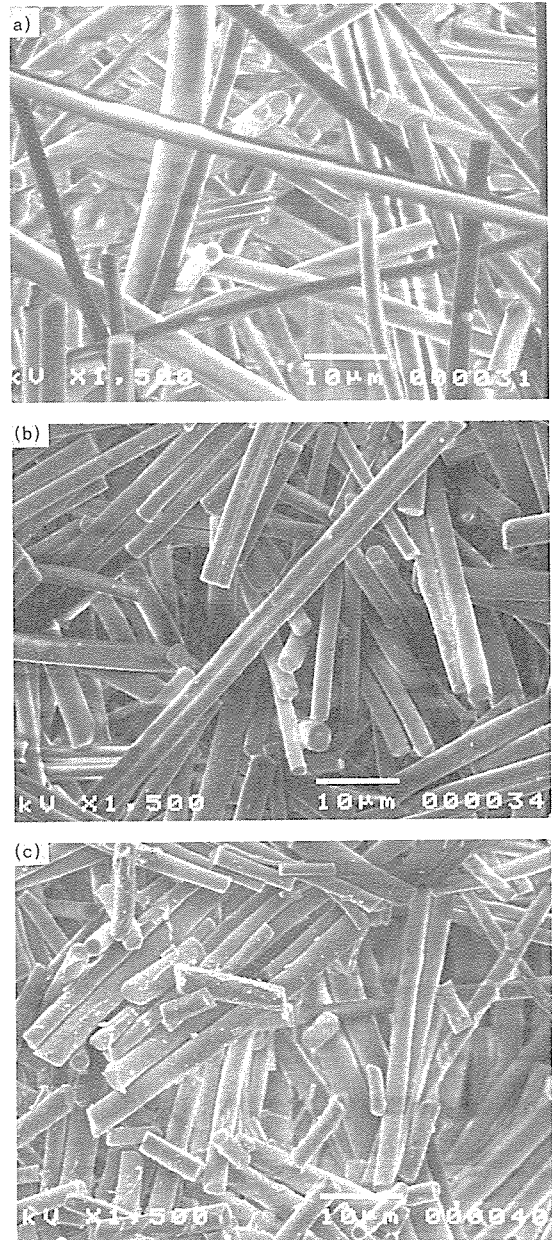


Fig. 8. (a)-(c) SEM micrographs of preform with binder (a) $W_b=20\%$ (home made) (b) $W_b=30\%$ (home made) (c) $W_b=30\%$ (kaowool made)

Fig. 8(a), (b)는 결합재를 예비성형체 무게의 20%와 30%만큼 사용하였을 때 예비성형체내에 있어서 결합재의 잔류상태를 나타낸 SEM사진이다. $W_b=20\%$ 인 경우는 결합재가 비교적 섬유표면에 균일하게 분산되어 있으나 $W_b=30\%$ 인 경우는 섬유표면층에 덩어리 형태의 결합재가 다수 관찰되었다.

Fig. 9.는 섬유체적함유율이 15%일때 결합재의 양에 따른 인장강도의 변화를 나타내고 있다. 결합재의 양이 예비성형체 무게의 30%일 때 10%와 20%에 비해 인장강도가 많이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 8.에서 보았듯이 결합재가 예비성형체의 표면에 존재하므로써 함침 후 기지금속과 섬유 사이의 계면강도를 저하 시키는 요인이 되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 결합재는 예비성형체의 강성을 유지하는 범위에서 가능한 한 적은 양을 사용하여야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 결합재의 양을 금속복합재료의 기계적 성질에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 최대 20%로 제한하였다. Fig. 10은 섬유체적함유율의 증가에 따른 인장강도의 변화를 가압력을 매개 변수로 하여 나타내고 있다. 섬유강화에 의한 금속복합재료의 강도향상의 정도를 파악하기 위하여 용탕단조에 의하여 제조된 기지금속의 인장강도를 함께 나타내었다. 섬유체적함유율이 증가함에 따라 인장강도가 증가함을 알 수 있다. 기지금속 Al2024의 인장강도가 370.1MPa인데 비해 초기 섬유체적함유율이 10%, 15% 및 20%인 금속복합재료의

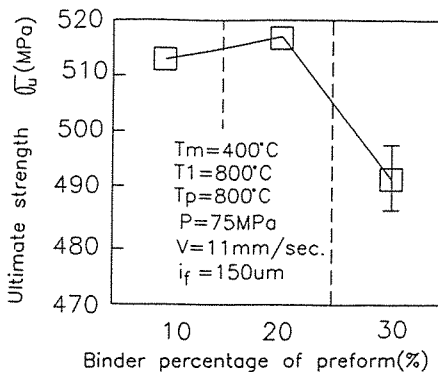


Fig. 9. Effect of amount of binder on ultimate strength

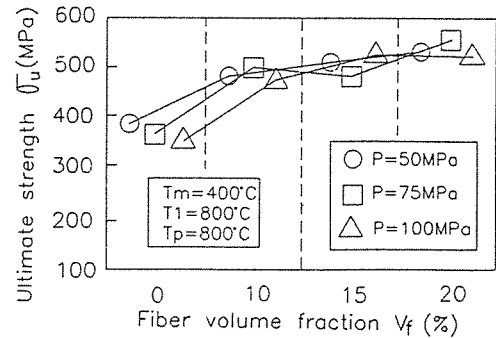


Fig. 10. Relation of ultimate strength to fiber volume fraction and applied pressure

인장강도는 각각 494.2MPa, 514MPa 및 539.2MPa로 향상되어 매우 높은 강화효과를 나타내고 있다. 그러나 가압력의 변화에 따른 인장강도의 변화는 본 실험에서 행한 가압력 범위내에서는 거의 무시할 수 있을 정도로 작았다.

Fig. 11은 가압력에 따른 탄성계수의 변화를 나타내고 있다. 기지금속의 탄성계수가 69GPa인데 비해 섬유체적함유율이 각각 15%와 20%인 금속복합재료의 평균탄성계수는 80GPa와 95GPa로 향상되어 인장강도와 마찬가지로 높은 강화효과를 나타내고 있다. 그러나 인장강도의 경우와 다르게 탄성계수가 가압력에 따라 차이가 있음을 보여주고 있다. 특히 섬유체적함유율이 15%인 경우는 본 실험에서의 가압력 범위에서는 거의 직선적으로

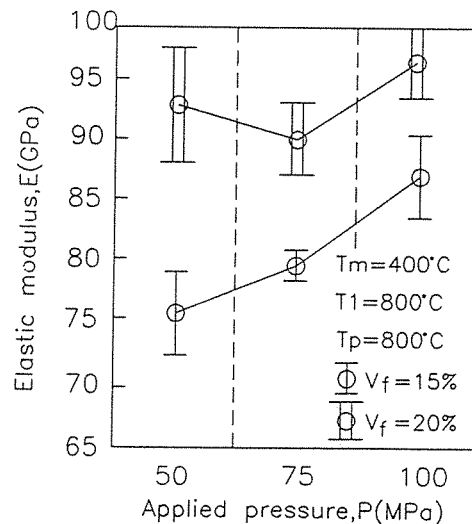


Fig. 11. Elastic modulus of composites for variation of applied pressure

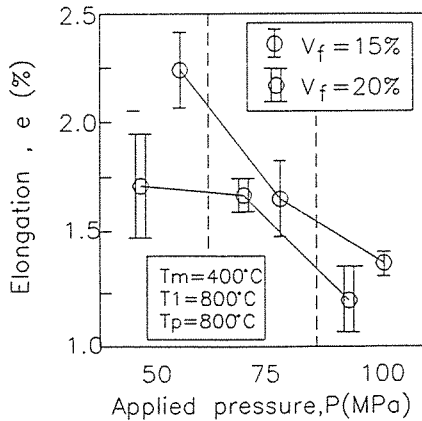


Fig. 12. Elongation of short fiber reinforced metal matrix composites for variation of applied pressure

증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12에 가압력에 따른 연신율의 변화를 나타내었다. 섬유체적함유율에 관계없이 가압력의 증가에 따라 연신율이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이는 가압력의 증가가 기공을 제거하고 금속복합재료의 조직을 치밀하게 하는 효과보다 섬유를 파손시키는 효과가 크기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 13는 본 실험에서 제조한 예비성형체를 평가하기 위하여 자체 제조한 예비성형체와 Kaowool 사로 부터 구입한 예비성형체를 사용하여, 같은 조건에서 제조한 금속 복합재료의 인장강도를 가

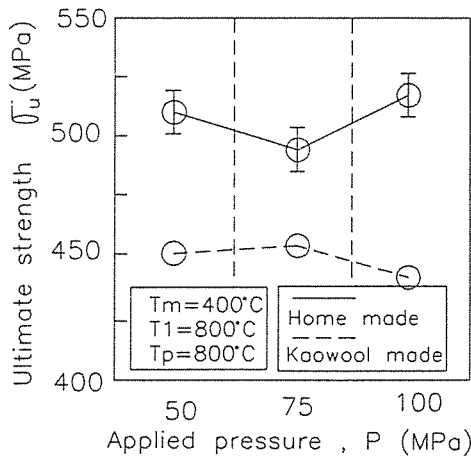


Fig. 13. Comparison of ultimate strength for metal matrix composites using home made and commercial Kaowool made preform

압력의 변화에 따라 나타낸 것이다. 함침전 섬유체적함유율은 두 경우 모두 15%이며 금형온도 $T_m=400^\circ\text{C}$, 용탕온도 $T_1=800^\circ\text{C}$, 예비성형체의 온도 $T_p=800^\circ\text{C}$ 로써 제조 조건은 동일하다. 자체 제

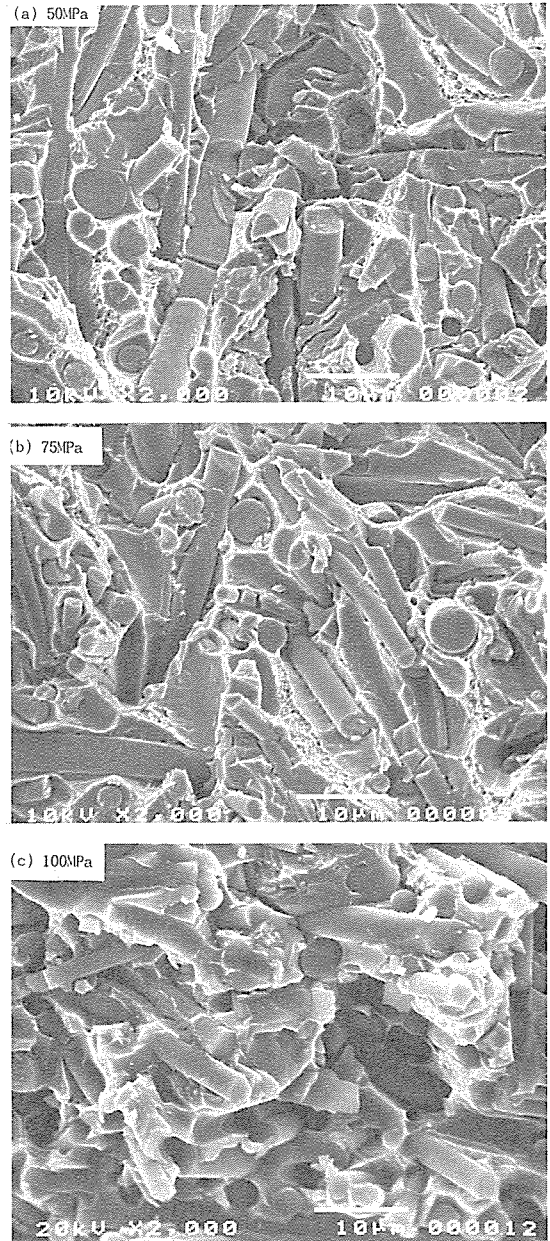


Fig. 14. (a)-(c) Fracture surface of tensile specimen for applied pressure

조한 예비성형체를 이용한 금속복합재료의 강도가 구입한 예비성형체를 사용한 경우 보다 높다는 것을 알 수 있다. 이는 자체 제조한 예비성형체의 섬유길이 $l_f=150\ \mu\text{m}$ 가 구입한 예비성형체의 섬유길이 $l_f=70\mu\text{m}$ 보다 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 14(a)-(c)는 가압력의 변화에 따른 파단면의 SEM 조직을 나타낸 것이다. 전체적으로 계면접착이 우수하여 연성파괴가 발생하였으며, 간혹 섬유의 pull-out이 관찰되었다. 또한 섬유의 길이방향과 평행한 파단이 가압력의 크기와 관계없이 다수 관찰되었는데 이는 함침성형시 예비성형체의 온도를 높게 유지함으로써 섬유의 열화에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 완전 함침이 가능한 범위에서는 예비성형체의 온도를 낮게하여 섬유의 열화를 억제하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

용탕단조법에 의한 함침성형시, 섬유체적함유율, 가압력, 결합재의 양 및 예비성형체와 금형사이의 틈새유무등을 성형변수로 예비성형체의 변형과 금속복합재료의 인장특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가압력이 각각 50MPa, 75MPa 일때 금형과 예비성형체 사이에 틈새를 2~4mm 둠으로써 예비성형체의 변형을 각각 33%, 20% 줄일 수 있다.
- 2) 섬유체적함유율이 각각 10%, 15% 및 20%인 금속복합재의 인장강도는 각각 493.2MPa, 514.8 Mpa 및 539.2MPa로 기지금속 Al2024의 평균 인장강도 370.1MPa에 비해 높았다.
- 3) 함침 성형 후 금속복합재료의 기계적성질에 악영향을 미치지 않는 결합재의 양은 예비성형체 무게의 20% 이하임을 알았다.
- 4) 예비성형체의 온도가 800℃에서 제조한 복합재료의 파단면에 대한 SEM사진 관찰결과 가압력의 크기와 관계없이 섬유의 길이방향과 평행한 파단이 다수관찰 되었다.

참 고 문 헌

1. Masur, L.J., Mortensen, A., Cornie, J.A.

and Flemings, M.C., "Infiltration of Preforms by Pure Metal," *Metall. Trans.*, Vol.20A, 1988, pp.2549-2557.

2. Martins, G.P., Olson, D.L. and Edwards, G.R., "Modeling of Infiltration Kinetics for Liquid Metal Processing of Composites," *Metall Trans.* Vol.198, 1988, pp.95-101.

3. Maxwell, P.B., Martins, G.P., Olson, D. L. and Edwards, G.R., "The Infiltration of Aluminum into Silicon Carbide Composites," *Metall. Trans.*, Vol.21B, 1990, pp.475-489.

4. Bader, M.G., Clyne, T.W., Cappleman, C.R. and Hubert, P.A., "The Fabrication and Properties of Metal Matrix Composites Based on Aluminum Alloy Infiltrated Alumina Fibre Preforms," *Composites Science and Tech.*, Vol.23, 1985, pp.287-305.

5. Sample, R.J., Bhagat, R.B. and Amateau, M.F., "High Pressure Squeeze Casting of Unidirectional Graphite Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites," *J. of Composite Materials*, Vol.23, 1989, pp.1021-1029.

6. Girot, F.A., "On the Squeeze casting Conditions of Aluminum Matrix Composite Materials," *J. of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.9, 1990, pp.456-469.

7. Aghajanian, M.K., Barke, J.T., White, D.R. Nagelberg, A.S., "A New Infiltration Process for the Fabrication of Metal Matrix Composites," 34th International SAMPLE Symp., 1989, pp.817-823.

8. 長田純夫, 松田公扶, "加壓鑄造法により金屬粒子系複合材を鑄造するときの製條件と粒子臨界豫熱溫度との關係," *鑛物*, 第53卷, 第2號, 1981, pp.30-34.

9. 강충길, 구광서, "용탕단조법에 의한 금속복합재료의 성형공정에 있어 함침 한계성에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제 17 권, 제 7 호, 1993, pp.1751-1760.

10. 白柳格, 西田義則, 松原弘美, 中西勝, 加

藤銳次, “アルミナ短纖維強化AC8A合金複合材料の疲勞舉動,” 輕金屬, 第 43 卷, 第 1 號, 1991, pp. 20-25.

11. 武高輝, 河野紀雄, 渡邊久藤, 高橋恒夫, “A1203/6061粒子分散型複合材料の加壓排氣鑄造,” 輕金屬, 第 40 卷, 第 3 號, 1990, pp.176-181.

12. Mcdanels, D.L., “Analysis of Stress-Strain, Fracture, and Ductility Behavior of Alu-

minum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement,” Metall. Trans., Vol, 16A, 1985, pp.1105-1115.

13. 강충길, 김진, 김진석, “용탕단조법에 의한 MMC의 성형공정에 있어서 Infiltration 한계성,” 한국 복합재료학회 추계강연회 논문집, 1992, pp. 253-241.

