

論文

엔진경량화용 Al/Al₂O₃ 금속복합재료의 제조조건

양유청* · 송정일* · 봉하동* · 한경섭*

Fabrication Condition of Al/Al₂O₃ Metal Matrix Composites for Lightweight Engine

Y. C. Yang*, J. I. Song*, H. D. Bong* and K. S. Han*

ABSTRACT

The metal matrix composites(MMCs) are currently receiving a great deal of attention. These composites possess excellent mechanical and physical properties such as high modulus and strength, wear resistance and thermal stability, which make them very attractive for use in automotive piston and engine block.

The characteristics of preform determine the final properties of MMCs. The effects of organic binder and microwave drying on preform microstructure were analyzed by SEM. In the preform with organic binder, flocking processes were observed during drying process. Preform had uniform binder distribution and dried fast with microwave drying for internal and volumetric heating patterns.

The fundamental manufacturing process and controlling parameters, such as preform temperature, mold temperature, applied pressure and molten metal temperature, for fabrication of Al/Al₂O₃ composites by the squeeze casting were studied. MMCs had poor mechanical properties when temperatures of preform and molten metal were too high because of thermal shock of preform, oxidation of metal and thermal damages of fibers. Mold temperature barely affected the tensile strength of MMCs. High applied pressure reduced the voids and solidified the matrix faster. Optimum processing conditions for squeeze casting were suggested. Finally, the tensile strength of MMCs was improved by about 20% comparing to the matrix alloy.

Key Words : Metal Matrix Composites(금속복합재료), Organic Binder(유기성형제), Microwave Drying(초음파건조), Preform(예비성형체), Squeeze Casting Method(가압주조법).

초 록

최근 자동차업계를 중심으로 경량화재료에 대한 관심이 고조되고 있으며, 금속복합재료(MMCs)는 기존의 알루미늄합금에 비해 우수한 기계적성질, 고온 안정성, 열전도성, 내피로성 및 내마모성 등으로 피스톤, 커넥팅로드 등의 자동차 부품에 응용되고 있다.

본 연구에서는 자동차용 피스톤 재료를 복합재료로 대체하기 위한 기초연구로서 피스톤용 알루미늄 합금인 AC8A에 Al₂O₃를 보강한 금속복합재료의 제조조건에 대해 살펴보았다.

금속복합재료의 기계적 성질에 중요한 영향을 미치는 예비성형체는 2차가공이 가능하고 용침시

* 정회원, 포항공과대학 기계공학과

용침시 충분한 압축강도를 가져야 하며, 건조시간의 단축 및 섬유가 응집이 없이 균일하게 분포해야만 하는데, 이러한 요구조건을 만족하는 양호한 예비성형체를 제조하기 위하여 진공압추출, 초음파건조, 유기성형제 혼합 등의 다양한 제조방법을 이용하여 예비성형체를 제조한 후 제조방법에 따른 미세조직을 관찰하였다. 금속복합재료의 제조방법으로는 대량생산과 국소보강의 잇점 때문에 가압용침법을 사용하였고, 가압력, 용탕온도, 예비성형체 온도, 금형의 온도 등 복합재료의 물성에 중요한 영향을 미치는 가압용침법의 여러 변수들에 대한 복합재료의 인장강도 시험을 통해 최적의 제조조건을 실험적으로 구하였다.

1. 서 론

최근 자동차업계를 중심으로 연료절감화의 촉진 수단으로 경량화 재료에 대한 관심이 더욱 고조되고 있으며, 이를 위하여 주로 Al합금, Ti합금, Mg합금, 플라스틱, 세라믹등의 대체 경량재료의 적용과 부품의 최적설계에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이중 알루미늄합금은 경량재료로 널리 알려져 있으나, 기존의 철강재료 보다 열악한 상온 및 고온에서의 물성과 내마모성으로 인하여 자동차 부품으로의 폭넓은 적용에 많은 제약을 받고 있다. 이러한 알루미늄합금 대신에 기계적성질 및 고온 안정성, 열전도성, 내피로성, 내마모성[1~2]이 우수한 금속복합재료를 이용하여 자동차부품의 경량화 효과를 꾀할 수 있다. 이들을 이용하여 응용 가능한 자동차 관련 부품들은 엔진블럭(engine block), 피스톤(piston), 커넥팅로드(connecting rod), 로커암(rocker arm), 실린더라이너(cylinder liner) 등이 있다.

가압용침법은 유기 및 무기 성형제(binder)를 사용하여 보강재를 예비성형체(preform)로 만들고, 용융된 금속을 압력을 가하여 침투시킨 다음 응고 시킴으로써 제조하는 방법으로 대량생산이 용이하고, 기존의 주조공정과 흡사하여 생산기술이 널리 알려져 있으며, 가압하에서 용탕이 응고되기 때문에 양호한 조직을 얻을 수 있으며, 원하는 부분의 국부보강과 2차가공이 별로 요구되지 않는 near-net shape 주조 가능성 때문에 일찍부터 금속복합재료를 제조하기 위한 방법으로 이용되고 있다[3~12].

가압용침법에 의하여 금속복합재료를 제조하기 위해 필요한 예비성형체의 제조는 금속복합재료의 물성을 결정하는 중요한 요소이지만, 연구내용의

비공개와 많은 경험과 시행착오를 요구하는 기술적인 문제 때문에 제조상의 어려움이 있다. 지금까지 대략적으로 알려진 제조방법으로는 섬유의 응집을 막기 위한 초음파를 이용한 혼합[13], 섬유의 균일한 분포를 위한 진공압추출[13~14], 성형체의 균일한 분포를 위한 초음파 건조[15~16], 가공성의 향상을 위한 유기성형제의 혼합[17], 성형체의 양에 따른 강도 및 계면(interface) 연구[18] 등이 있다.

가압용침법의 제조공정변수들은 금속복합재료의 복합화 여부와 기계적 성질등에 큰 영향을 미치므로 물성을 극대화시킬 수 있는 최적제조조건 확립은 매우 중요하다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 예비성형체의 온도 및 분포, 가압력의 크기, 용탕의 온도, 가압시간, 가압속도, 금형의 설계 및 온도와 같은 제조조건에 대한 실험적[5, 6, 9] 및 이론적 연구[12]가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 자동차용 피스톤재료를 복합재료로 대체하기 위한 기초연구로서 다양한 제조방법을 이용한 예비성형체의 제조 및 피스톤용 알루미늄합금인 AC8A에 알루미늄(Al₂O₃) 단섬유를 보강한 금속복합재료의 최적 제조조건에 대해 살펴보았다.

2. 이론적 배경

2-1. 가압용침법의 제조공정변수

일반적으로 복합재료의 제조에 있어 가장 중요한 문제는 외부에서 가해지는 힘이 기지재료에서 보강섬유로 완전하게 전달될 수 있느냐 하는 것이다. 따라서 용침이 원만히 이루어지는 최적의 공정조건에 의한 금속복합재료의 제조는 기지재료와 보

강섬유의 결합력을 극대화시킬 수 있다. 가압용침법으로 제조된 금속복합재료의 물성에 주요한 영향을 미치는 제조공정조건은 용탕 및 예비성형체의 온도 용침속도, 가압력, 금형의 설계등으로 밝혀졌다[5~12].

이론적으로 용탕을 예비성형체로 용침시키기 위해 필요한 압력차이(pressure difference)는 유동관(flow channel)의 단면이 일정한 경우는 식(1)의 Hagen-Poiseuille의 방정식으로, 일정하지 않는 경우는 식(2)의 Darcy's law로서 표현될 수 있다[5].

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \mu de^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{-\mu U}{K} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, μ , u , de , U , K 는 각각 점성계수, 유동의 평균속도, 유동 직경, 섬유가 없는 예비성형체에서의 유동속도, 용침계수를 의미한다. (1), (2)는 용침속도(infiltration velocity)가 증가할수록 필요한 압력은 더욱 커진다는 것을 보여주고 있으며, 실제로 계산된 값은 0.5MPa정도이다. 여기에 모세관저항(capillary resistance)을 극복하기 위한 압력을 고려하면 알루미늄에 38%의 장섬유 SiC(Nicalon)를 보강한 복합재료의 경우, 0.45MPa정도로 전자의 압력까지 고려하여 합해도 약 1MPa정도로 낮다[6].

가압용침법에서 대부분의 제조변수를 고려한 일방향(unidirectional) 보강섬유의 경우 예비성형체 내에 존재하는 공기(air)를 무시하였을 때 예비성형체를 용침시키기 위한 최소 압력은 5~10MPa 정도이지만[7] 가스의 존재를 고려하면 예비성형체 내에 잔존하고 있는 가스로 인한 역압력(back pressure)에 의해 용탕의 최소 가압력은 증가한다[8]. 따라서 낮은 압력에서 발생하는 복합재료 내부의 가스 및 수축공의 형성등과 같은 문제를 제거하기 위해서 충분히 높은 압력을 가해 줄 필요가 있다. 알루미늄의 경우 주조시 액상(liquid)에서 고상(solid)으로 변할 때 발생하는 낮은 압력에 의한 수축결함(shrinkage defect)을 피하기 위해서는 약 100MPa 정도가 되어야 하지만, 30MPa 정도에서도 양호한 복합재료를 제조할 수 있다고 보고되고 있

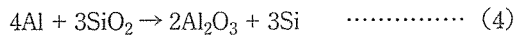
다[9]. 일반적으로 가압용침법에 의한 제조는 가압력이 50~80MPa정도인데[10], 용탕안에 있는 보강재는 용탕이 응고되기 전이므로 정수압(hydrostatic pressure)을 받기 때문에 150MPa 정도에서도 섬유의 손상없이 주조할 수 있다고 한다[9].

높은 잠열(latent heat)을 가진 용탕은 낮은 잠열을 가진 용탕에 비해 예비성형체로 용탕의 침투 거리는 증가한다. 용탕의 예비성형체로의 용침은 용탕의 속도가 임계점에 도달할 때, 즉 용탕의 온도가 금속의 녹는점(melting point)에 도달할 때 중지하게 되는데, 용탕이 미리 응고되는 현상을 피하기 위한 최소의 용탕과열온도(superheat)는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[12].

$$\Delta T = (T_m - T_f) (C_f/C_m)[V_f/(1-V_f)] \dots\dots (3)$$

여기서, T_m , T_f , C_f , C_m , V_f 는 각각 용탕의 녹는 온도, 초기 예비성형체 온도, 예비성형체 및 용탕의 비열, 예비성형체 부피분율을 의미한다.

용탕 온도는 일반적으로 기지재료 용융점 보다 30~50°C정도 높은 온도에서 예열시키면 복합재료를 제조할 수 있는데, 낮은 용탕온도는 용탕의 급속한 응고를 도와주어 미세한 조직을 얻을 수 있는 잇점이 있다[9]. 하지만 온도가 너무 낮으면 용탕이 미리 응고되는 현상이 발생하므로 최적의 온도범위에 대한 검증이 필요하다. 용탕의 온도가 약 900°C 정도까지 높게 되면 예비성형체에 성형체로 첨가되는 SiO₂가 다음과 같이 알루미늄과 반응을 일으킬 뿐만 아니라, 높은 온도에 의한 산화에 의한 손상을 입기가 쉽다[9].



한편, 용탕이 섬유로 유입되는 운동역학을 규명하는데 중요한 변수인 용침속도는 다음과 같은 식에 의해서 표현될 수 있다[5].

$$U = D V/s (1-V_f) \dots\dots\dots (5)$$

여기서, U 는 용침속도, D 는 plunger의 직경, V 는 plunger속도, s 는 용탕앞면의 면적을 의미한다. 식(5)의 용침속도는 (1)식의 압력구배와 연관이 있으므로 한 변수를 제어함으로써 다른 변수도 제

어할 수 있다. 많은 경우에 있어 용탕의 유동 흐름은 Reynolds number가 100 이하인 층류(lamina flow) 이므로 용탕과 섬유사이의 유동에 의한 상호작용은 무시할 만하다고 보면, 용침속도가 1~5cm/sec 사이에서는 Al_{pure}/SiC 복합재료의 인장강도는 용침 속도에 따라 큰 차이가 없지만, 용침속도가 20cm/sec 이상이 되면 10% 단섬유복합재료의 경우 섬유강도의 저하(degradation)가 발생한다고 한다 [5].

3. 제조 및 실험방법

3-1. 사용재료

본 연구에서는 기지재료로 주물용 알루미늄합금인 AC8A를 사용하였다. 이 합금은 주조물성이 우수하고, 우수한 내열강도, 내마모성, 내열팽창성등 기계적, 열적 안정성 때문에 자동차의 피스톤재료로 주로 사용되고 있다. Table 1[19]은 그 화학적 성분을 나타낸 것으로 Cu, Mg의 첨가로 큰 열처리 효과를 얻을 수 있으며, Ni는 내열강도, 내마모성에 크게 기여하는 성분으로 알려져 있다. 강화제는 "Saffil" 알루미늄나(Al₂O₃) 단섬유 RF grade로서 δ-결정상이고 3~4% 정도의 무기성형제인 silica를 포함하고 있으며, 제원은 Table 2[20]에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of AC8A Al alloy[19]

Chemical composition							Mechanical property		
Si	Cu	Mg	N	Fe	Mn	Al	T.S (Mpa)	E (GPa)	Elong. (%)
12.7	1.1	0.9	1.6	0.8	0.1	Rem.	275 이상	73	1미만

Table 2. Specifications of Al₂O₃ fiber(Saffil RF grade)[20]

Material	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Length (μm)	Aspect ratio (1/d)	T.S (GPa)	E (GPa)
Al ₂ O ₃	3.3	3	150	50	2.0	310

3-2. 예비성형체의 제조

가압용침법에 의한 금속복합재료의 제조에 필요한 예비성형체는 종이의 제조법을 응용한 진공압 추출법을 사용하여 제조하였고, 제조 후 건조방식은 건조방식에 따른 성형체의 분포를 관찰하기 위하여 일반건기로건조 및 초음파건조 두가지 방식을 사용하였다. 또한 성형체의 효과를 확인하기 위하여 무기성형제만을 사용한 경우와 무기성형제와 유기성형제를 혼합하여 사용한 경우를 각각 제조하였다.

진공압 추출을 위한 제조장치의 기능은 다음과 같다.

(1) 유압프레스 :

유압프레스의 작동은 부피분율을 제어하기 편리하도록 10 ton 유압 수동프레스를 사용하였다.

(2) 제조 및 섬유함유율을 제어하기 위한 금형 :

보강재의 형상과 크기에 맞게 아크릴 몰드를 사용하였고, 섬유의 함유율은 동일한 체적에 질량을 변화시켜 제어하였다.

(3) 섬유의 균일한 분포를 제어하기 위한 배수 및 진공장치 :

높이 방향에 따른 섬유의 밀도 차이의 차이를 최소화 하기 위하여 진공압으로 수용액을 추출할 수 있도록 진공펌프와 배수상자를 부착하였다. 또한 압력조절을 위하여 배수상자와 진공펌프 사이에 진공게이지 및 게이트 밸브를 설치하였다.

초음파건조는 발진주파수가 2.45GHz인 초음파 오븐(microwave oven)을 사용하였으며, 성형체는 무기성형제로 silica colloid(SiO₂), 유기성형제로는 전분(glucose)을 각각 사용하였다.

예비성형체는 다음과 같은 조건으로 제조하였다.

(1) 증류수와 무기 성형제를 95 : 5의 질량비율로 혼합한다. 유기성형제는 무기성형제 질량의 약 1/3 정도를 사용한다.

(2) 예비성형체 부피의 15%에 해당하는 보강재와 (1)의 성형제 수용액을 서로 혼합하고 보강재끼리의 응집을 억제하기 위하여 회전하는 교반기에 넣은 후 일정 속도로 5분 동안 교반한다.

(3) 교반된 수용액을 예비성형체 몰드에 넣어 진공압을 30~40mmHg로 유지하면서 진공펌프를 작

동시킨다. 이때, 성형체내에 물기가 완전히 제거 되지 않으면 예비성형체의 형상을 유지할 수 없으므로 수분이 충분히 제거될 수 있도록 적절한 시간을 유지한다.

(4) (3)에서 만들어진 성형체를 유압프레스로 가압하여 직경 110mm, 높이 20mm, 보강재의 부피 분율이 15%인 예비성형체를 완성한다.

(5) 완성된 예비성형체를 일반건조의 경우 100°C의 전기로에서 4시간 동안 건조시킨 후 성형체내의 불순물을 제거하기 위하여 1000°C에서 2시간 소결시킨다. 초음파 건조의 경우는 건조시간에 따른 효과를 확인하기 위하여 20분, 60분의 2가지 다른 건조시간으로 건조하였다.

3-3. 금속복합재료의 제조

금속복합재료는 가압용침법으로 Table 3과 같이 제조조건의 변수를 두고 각각의 경우에 대하여 다음과 같은 방법으로 제조하였다.

(1) 알루미늄합금을 질소(N₂) 분위기의 전기로에서 용융시키고 금형과 예비성형체를 각각 예열한다. 이때, 알루미늄이 금형에 소착되는 현상을 방지하기 위하여 공구강으로 제작된 금형내부에 카본이형체를 뿌린 후 예열시킨다.

(2) 예열된 금형을 가압주조장치에 위치시킨 후 예비성형체를 금형내에 위치시킨다.

(3) 용탕주입과 동시에 가압속도 0.85cm/sec로 펀치를 가압한 후 60초동안 초기설정 압력을 유지하여 원형의 잉곳(지름; 11cm, 높이; 3cm)을 제작한다. 금형의 밑부분은 복합재료 내부의 기공을 제거하기 위하여 직경 2mm의 테이퍼로 된 공기

구멍을 두었다.

(4) 제조된 금속복합재료를 T6열처리한다(용체화 처리: 510°C에서 4시간 → 수냉 → 시효처리: 170°C에서 6시간 → 공냉).

일반건조 및 초음파건조, 무기 및 유기성형체 등의 다양한 조건으로 제조된 예비성형체는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 섬유와 결합과 분포 변화를 관찰하였고, 그에 따른 금속복합재료의 물성변화는 각각의 예비성형체를 사용하여 가압력 25MPa, 용탕온도 800°C, 예비성형체 및 금형의 온도 500°C, 가압속도 0.85cm/sec, 가압시간 60초의 조건으로 금속복합재료를 제조한 후 T6 열처리를 하여 인장시험을 통해 알아보았다.

가압력, 용탕온도, 예비성형체 및 금형의 온도 등 가압용침법의 제조변수에 따른 금속복합재료의 강도는 인장시험을 통하여 측정하였으며, 인장 시험편의 개수는 각각 3개를 사용하였다. 시험편은 ASTM E8에서 규정된 조건을 만족하도록 하였고, 그 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 인장시험은 UTM을 이용하여 0.5mm/min의 변위제어로 수행하였다.

Unit : mm

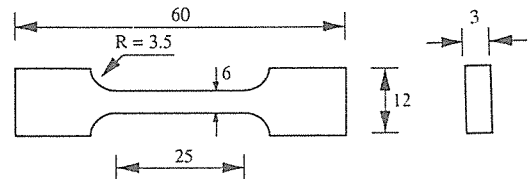


Fig. 1. Configuration and dimension of tensile specimen

4. 결과 및 고찰

4-1. 예비성형체의 제조

예비성형체는 2차 가공이 가능하고 용침시 충분한 압축강도를 가져야 하며, 건조시간의 단축 및 섬유가 응집이 없이 균일하게 분포해야만 하는데, 이러한 요구 조건을 만족하는 양호한 예비성형체를 제조하기 위하여 본 연구에서는 진공압추출, 초음파건조, 유기성형체와 무기성형체 혼합 등의 다양한 제조방법을 이용하였다.

Table 3. Processing variable and conditions of direct squeeze infiltration method

Variable	Unit	Conditions
Molten Al temperature	°C	750, 800, 850
Upper mold temperature	°C	350, 500
Lowcap temperature	°C	350, 500
Preform temperature	°C	500, 800
Ram speed	cm/sec	0.85
Applied pressure	MPa	15, 25, 40
Holding time	sec.	60

수용액속에서 보강재와 성형제의 균일한 혼합 및 보강재의 뭉침을 억제하기 위하여 상하좌우로 회전가능한 교반기를 사용하여 1차적인 뭉침을 억제시켰고, 진공압 추출을 통하여 보강재 부피분율의 정확한 제어 및 균일한 분포를 꾀하였다. 진공압은 30~40mmHg을 유지하도록 하였는데 진공압이 20mmHg 보다 작으면 46 μ m의 망크기(mesh size)를 갖는 필터를 통해 수용액이 빠져나가는 시간이 많이 소요되어 높이 방향으로 부피분율의 차이가 존재하였다.

Fig. 2는 건조방식에 따른 예비성형체 제조시 보강재와 성형제의 결합상태를 나타내고 있다. 그림에서 성형제의 분포양상은 건조방식에 영향을 받을 수 있다. Fig. 2(a)는 일반 전기로를 이용하여 건조한 예비성형체이고, Fig. 2(b)는 초음파에 의해 건조된 예비성형체의 내부 및 외부의 SEM사진 결과이다. Fig. 2(a)의 경우는 100 $^{\circ}$ C에서

건조할 때 예비성형체 내부에 함유되어 있는 수분이 증발하면서 무기성형제를 예비성형체의 표면으로 이동시키기 때문에[15], 외부에는 성형제가 과다하게 분포되어 있으나 내부에는 성형제가 거의 존재하지 않는다. 그러나 Fig. 2(b)의 경우는 외부와 내부에 골고루 형성제가 분포되어 있는데, 이는 일반전기로를 이용한 건조방식과 초음파건조의 건조방식의 차이에서 기인한다.

Fig. 3은 이 두 경우의 건조방식의 차이를 나타내고 있다. 즉, 일반전기로의 경우, 열이 외부의 열원에서 발생되어 시편에 전도, 복사되어 건조되지만 초음파건조에서는 시편자체가 발열함으로써 건조가 이루어진다. 즉, 초음파건조는 내부 및 부피발열(internal and volumetric heating)에 의해 시편내부의 온도구배 및 열흐름(heat flow) 방식이 일반건조방식과 반대현상을 나타내며, 이러한 특성으로 인해 크고 복잡한 형상의 시편도 빠르고

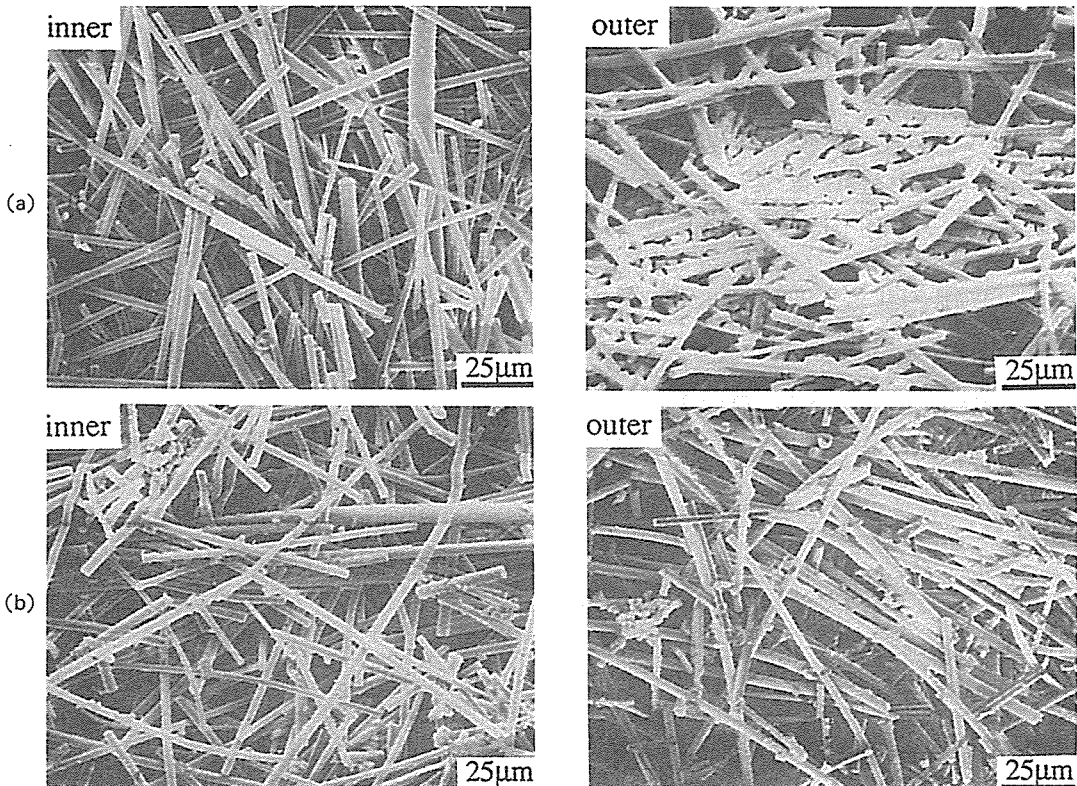


Fig. 2. SEM photographs of preform inner and outer side (a) conventional dried (b) microwave dried

균일하게 건조 및 소결할 수 있고, 보강재의 열응력을 감소시켜 균열방지 및 균일한 미세구조를 얻을 수 있는 것이다[16]. 예비성형체 건조시 일반건조에서는 4시간정도 소요되는 것에 비해서 초음파건조의 방법을 이용할 때 30분 정도로 건조시간의 단축을 꾀할 수 있다.

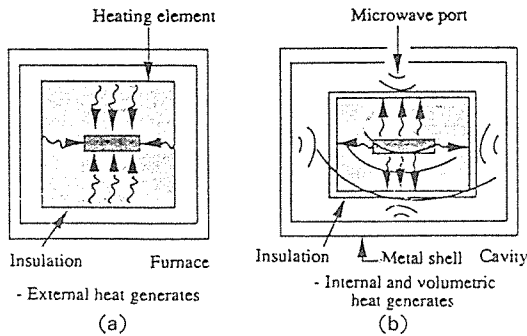


Fig. 3. Heating patterns in (a) conventional and (b) microwave furnaces[16]

Fig. 4는 초음파건조시 건조시간을 달리하였을 때의 예비성형체 외부의 성형제 분포경향을 보여 준다. 초음파건조를 이용한 건조방식에서도 증발 속도는 성형제의 분포에 영향을 미침을 알 수 있다. 건조시간을 1시간으로 한 경우, 성형제가 일반건조의 경우와 비슷하게 외부에 과다하게 분포하는 경향을 보였다.

Fig. 5는 유기성형제의 작용을 나타낸 것이다. G. Kruger[17]에 의하면, 소량의 유기성형제를 사

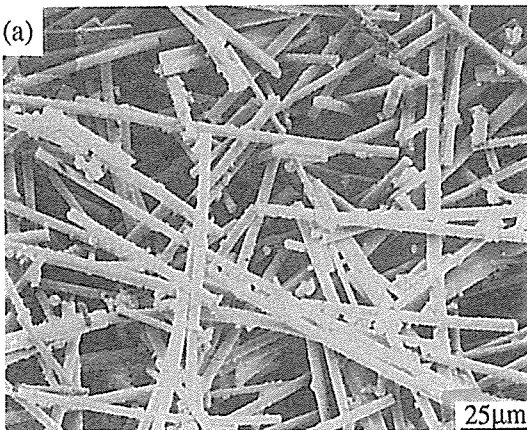


Fig. 4. SEM photographs of preform dried by microwave (a) for 20 min. (b) for 60min.

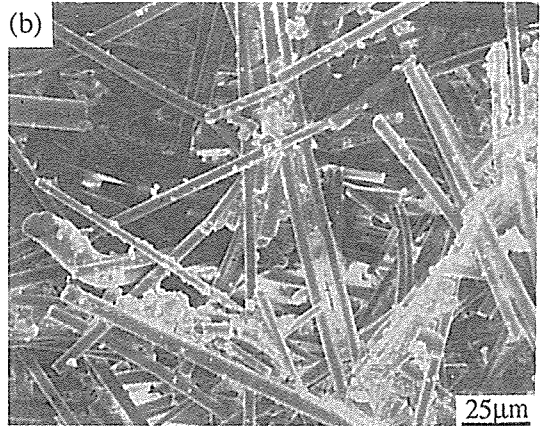


Fig. 4. (Continued)

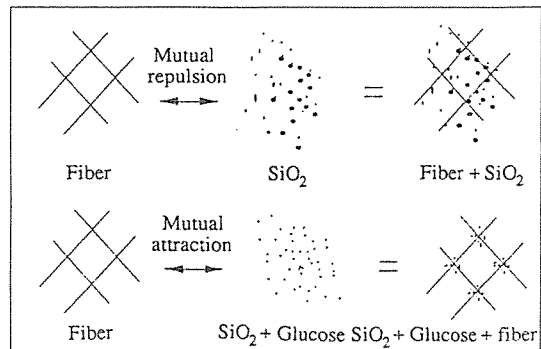


Fig. 5. Schematic illustration of the flocking process

용하면 그림과 같이 예비성형체의 건조 후 1000°C 까지 소결하는 과정에서 예비성형체의 성형성 및 강도유지의 목적으로 첨가되는 무기성형제가 섬유와 섬유의 교차점에 분포하도록 하는 효과를 가진다고 한다.

Fig. 6(a)는 초음파 건조시 무기 성형제만을 사용한 경우, Fig. 6(b)는 유기성형제를 첨가한 경우의 예비성형체의 내부를 SEM으로 관찰한 사진이다. Fig. 6(a)는 무기성형제가 섬유의 길이방향으로 분포하는데 비해 Fig. 6(b)의 경우는 무기성형제인 silica가 섬유와 섬유사이에서 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 앞에서 언급한 유기성형제의 성질에서 기인하는데, 이는 예비성형체 자체의 성형성 유지에는 유리한 반면, 금속 복합재료의 강도면에서는 불리하게 작용하여 재료 내부의 결함으로 작용함을 알 수 있다.

Table 4의 인장실험한 결과는 위의 사실을 뒷받침하고 있는데, 무기성형제만을 사용하여 일반건조한 예비성형체에 비해 초음파건조한 예비성형체는 금속복합재료의 인장강도가 307MPa에서 317MPa로 다소 향상된 경향을 나타내고 있으며, 유기성형제를 사용한 경우는 290MPa으로 전자에 비해 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 초음파 건조의 경우, 일반건조에 비해 강도상승의 효과와 성형체의 균일한 분포에 의한 성형성의 향상을 기대할 수 있고, 건조시간을 단축할 수 있는 잇점 때문에 대량생산의 관점에서 의미가 있는 방법이라고 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 무기성형제(SiO₂)에 유기성형제(glucose)를 첨가한 경우는 섬유와 섬유 사이에 성형제가 교량역할을 하는 효과에 의한

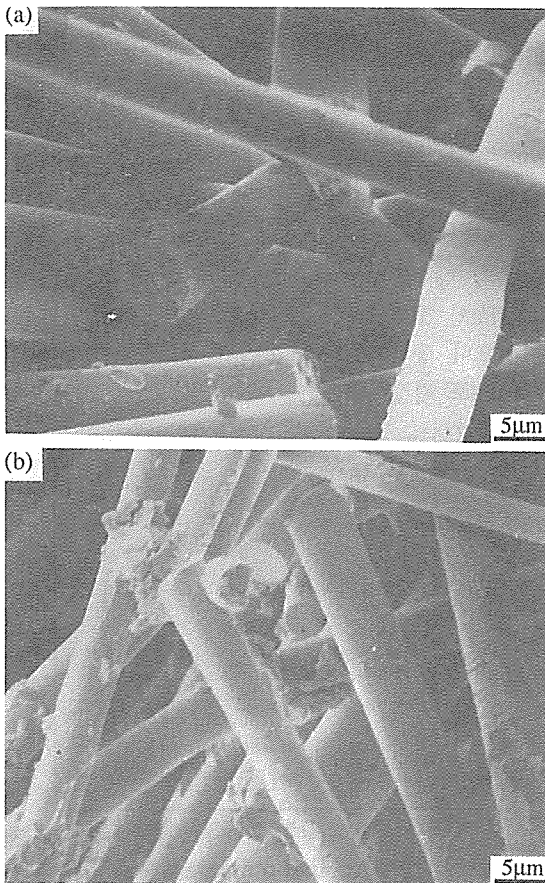


Fig. 6. SEM photographs of preform (a) used only inorganic binder (b) mixed inorganic binder with organic binder

Table 4. Tensile strength of Al/Al₂O₃ composites according to drying method of perform

	Conventional drying (inorganic)	Microwave drying	
		inorganic binder	inorganic+organic binder
Tensile strength (MPa)	307	317	290

예비성형체의 가공성 향상은 기대되나, 금속복합재료의 인장강도 향상에는 크게 영향을 미치지 않는다.

4-2. 가압용침법의 제조공정변수

가압용침법은 가압방식에 따라서 직접과 간접 압입 가압법으로 분류되며, 장치는 본체 형태에 따라 수직형과 수평형, 주탕방식에 따라 상부주탕법과 하부주탕법으로 분류된다. 본 연구에서는 50ton 용량의 수직형 프레스로 직접 압입 가압, 상부주탕방법을 할 수 있도록 금형을 제작하였다.

Fig. 7은 금속복합재료의 제조 후 T6 열처리과정 중 시효처리 시간에 따른 경도 변화를 측정한 것으로 본 연구에서의 시효처리시간은 그림에서 최고 경도가 나타나는 시간으로 결정하였다. 일반적으로 세라믹 단섬유보강 알루미늄복합재료는 보강재와 기지금속의 열팽창계수의 차이로 인한 보강섬유



Fig. 7. Effect of aging time for Al/Al₂O₃(15%) composites

주위의 전위밀도 증가에 따라 기지금속의 석출경화의 속도가 빨라지는데[21], 본 실험결과에서는 금속복합재료의 최고경도 도달시간이 6시간으로 기지재료인 AC8A가 10시간[19]인 것에 비해 약 4시간 빠른 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 금속복합재료의 제조조건 변화에 따른 인장강도의 변화를 나타내고 있는 것으로, 제조변수는 가압력, 용탕의 온도, 예비성형체 온도, 금형의 온도 등 가압력, 용탕의 온도, 예비성형체 온도, 금형의 온도 등으로 하였다. 이외에도 용침 속도에 영향을 주는 유압프레스의 램(ram) 속도를 제조변수로 들 수 있으나 H. Fukunaga[5]에 의하면, 압력을 가할 때 사용되는 램의 속도가 0.85 cm/sec일때 용침속도가 1.13cm/sec정도로서 섬유 파괴나 물성저하(degradation) 등의 현상은 일어나지 않는다고 판단되어 램의 속도는 0.85cm/sec로 고정시켰다.

Fig. 8(a)의 용탕의 온도에 따른 복합재료 인장강도는 750~800°C에서는 비슷하였고, 850°C에서는 인장강도가 감소하는 경향을 보였다. 850°C에서의 인장강도의 감소는 높은 용탕온도로 인한 기재의 산화가능성과 섬유의 손상때문이라고 판단된다. 가압용침법에 의한 금속복합재료의 제조는 용탕이 보강섬유로의 원활한 침투를 위해서 금속의 용융점에서 일정온도 과열(super heating) 시켜야 하

는데, 식(3)에 의하면 용탕의 과열온도는 기지금속의 용융온도, 보강섬유의 초기온도, 각 재료의 비열, 섬유 부피분율의 함수로 표현되며, $T_m = 565^\circ\text{C}$, $T_f = 500^\circ\text{C}$, $C_m = 0.9$, $C_f = 0.6$, $V_f = 0.15$ [23~24]를 대입하면, 과열온도는 7.65°C 정도로 낮다. 그러나 실제 주조과정에서는 전기로에서 예열된 후 가압하기까지의 지연시간이 약 30초 정도 되므로 이론적으로 계산한 온도 보다 높은 과열온도가 필요하다. 따라서 예비성형체 내부로의 완전한 용침과 기지금속의 산화 및 보강재의 손상의 방지를 위하여 용탕은 기지금속의 실제 용융온도에서 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 정도 과열시키는 것이 바람직하다.

한편, Fig. 8(b)의 가압력에 따른 인장강도는 15MPa, 25MPa에서는 증가하다가 40MPa에서는 25MPa인 경우와 비슷한 경향을 보였다. 가압력이 낮은 범위에서는 압력이 증가함에 따라서 금속복합재료 내부의 기공을 줄이고 응고속도를 증가시켜 강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 가압력이 지나치게 큰 경우, 금속복합재료는 치밀한 조직을 갖지만 그에 따른 보강섬유 손상의 결과로 기계적 물성의 향상을 기대하기 어렵게 된다. 가압력이 40MPa인 경우 25MPa일 때와 비슷한 인장 강도를 가졌으나 생산효율성을 고려할 때 최적 가압력은 25MPa로 결정하는 것이 바람직하다.

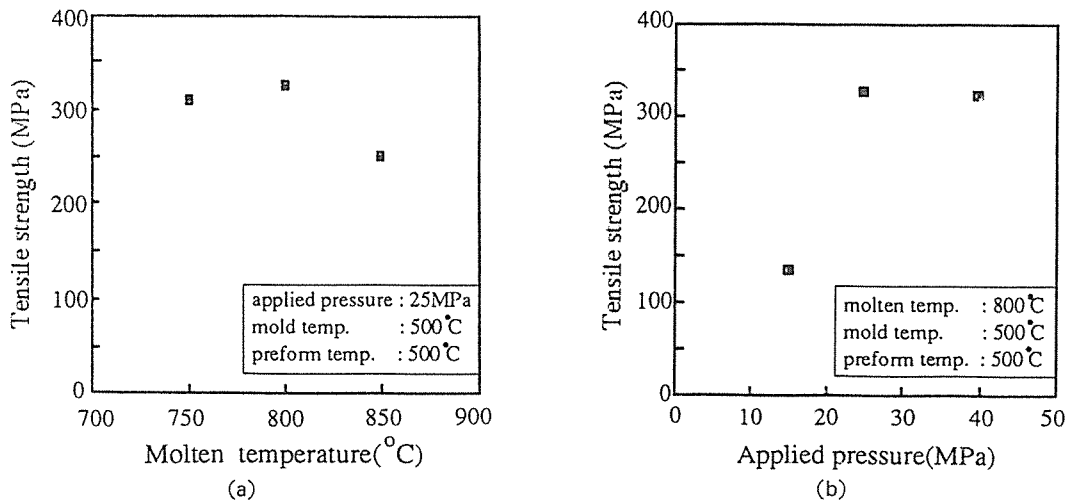


Fig. 8. Effect of fabrication conditions on tensile strength (a) molten temperature (b) applied pressure (c) mold temperature (d) preform temperature

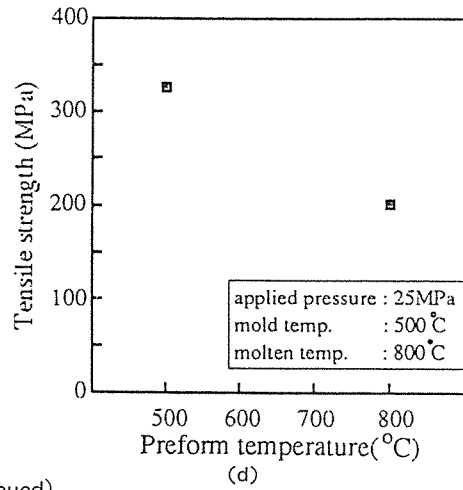
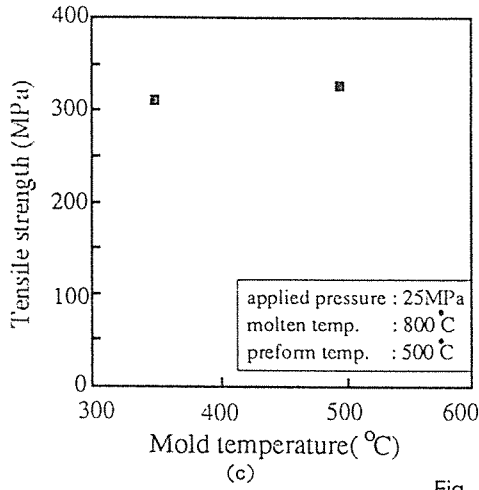


Fig. 8. (Continued)

Fig. 8(c)는 금형온도를 350°C와 500°C로 각각 변화시켰을 때의 인장강도를 비교하였는데, 이 결과로 볼 때 금형의 온도는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8(d)의 예비성형체의 온도 변화에 따른 결과는 800°C일때의 인장강도가 500°C의 60% 정도로 낮다. 이는 800°C의 고온에서 예열된 예비성형체를 전기로에서 꺼냈을 때 재료가 받게 되는 열충격(thermal shock)으로 인해 예비성형체를 예열한 금형에 소입하는 과정에서 성형체의 갈라지는 현상 때문인 것으로 판단된다. 따라서 섬유의 열충격을 최소화하면서 용탕의 응고를 막는 최소온도를 결정할 필요가 있는데, 예비성형체 온도가 500°C에서는 인장강도가 기지재료에 비해서 20% 정도 증가하므로 유효하다고 볼 수 있다.

이상의 실험결과로 볼 때 본 연구에서 기지재료 사용한 AC8A에 15% 부피분율의 알루미늄(Al₂O₃)을 보강한 금속복합재료의 최적 제조조건은 금형 온도 500°C, 예비성형체 온도 500°C, 가압력 25 MPa, 용탕온도 800°C이며, 제조한 금속복합재료를 T6 열처리한 결과 모재에 비해 인장강도가 20% 정도 향상되었다.

Fig. 9는 AC8A 알루미늄합금을 금형주조(permanent mold casting)와 가압주조 방식을 이용하여 제조한 것과, 가압주조 방식에 의해 동일한 재료로 제조된 상용피스톤에서 채취한 시편의 인장강도

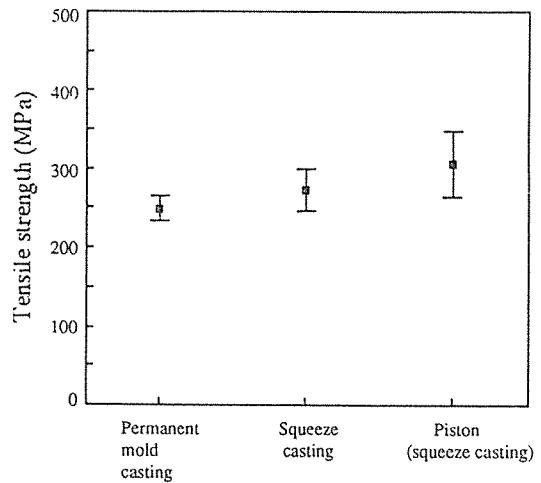


Fig. 9. Effect of fabrication methods on tensile strength of AC8A Al alloy

차이를 나타내었다. 그림으로부터 가압주조의 인장강도가 금형주조 보다 10% 정도로 향상된 것을 알 수 있다. 그 이유는 가압용침법은 금형주조에 비해 가압을 통한 응고방식으로 제조되므로 재료의 미세구조를 치밀화시키고, 재료내부의 기공을 제거시키기 때문이다[22]. Fig. 10은 주조방식에 따른 AC8A 알루미늄 합금의 미세조직을 SEM으로 관찰한 것으로 가압주조가 금형주조에 비해 기공이 적고, 원주형의 수지상물기(dendrite)가 더 미세하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

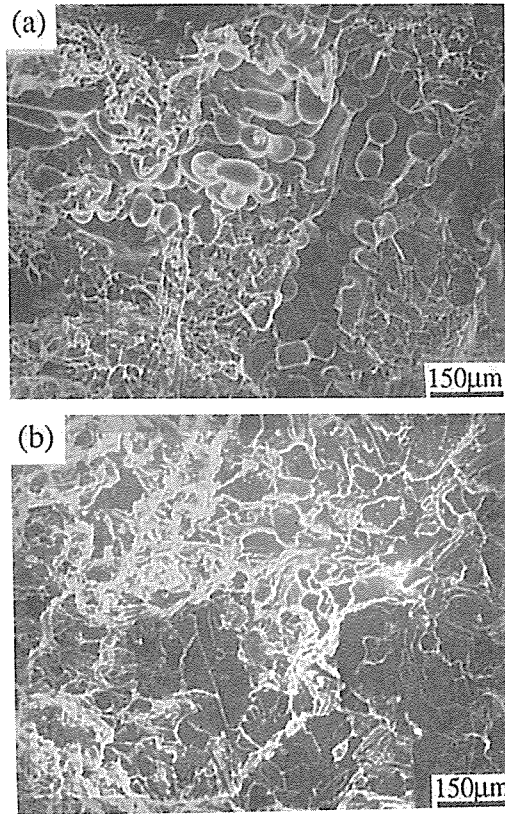


Fig. 10. SEM photographs of AC8A Al alloy fabricated by (a) permanent mold casting and (b) squeeze casting

5. 결 론

본 연구는 피스톤용 알루미늄 합금인 AC8A에 알루미나 단섬유를 보강한 금속 복합재료의 최적 제조조건에 대한 연구로서 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 금속복합재료의 물성에 직접 영향을 미치는 예비성형체를 제조하기 위한 제조공정에 대해 연구하였다. 진공압추출을 통하여 예비성형체의 높이 방향으로 보강섬유의 불균일한 분포를 제거할 수 있다.

(2) 예비성형체의 건조시 초음파건조를 사용했을 때는 일반건조 방식을 사용하여 제조한 금속복합재료에 비해 인장강도가 다소 향상된 경향을 보였

으며, 예비성형체 내부에 성형제가 고르게 분포하여 성형성의 향상을 기하였고 건조시간의 단축을 꾀할 수 있었다.

(3) 예비성형체 제조에서 성형제는 유기성형제가 첨가된 경우, 무기성형제를 보강제의 교차점으로 유도하여 예비성형체 자체의 성형성과 강도유지에 바람직한 결과를 보였으나 금속복합재료의 인장강도 향상에는 크게 영향을 미치지 않았다.

(4) 예비성형체의 온도 및 용탕의 온도가 지나치게 높은 경우 열충격, 기지금속의 산화, 섬유열손상으로 금속복합재료의 인장강도는 감소하였으며, 가압력이 일정범위까지 커짐에 따라 금속복합재료 내부기공의 감소와 응고속도의 향상으로 인장강도는 증가하였다. 금형의 온도는 큰 영향을 주지 않았다.

(5) 가압용침법으로 Al/Al₂O₃ 금속복합재료를 제조한 결과 최적의 제조조건은 금형온도 500°C, 예비성형체 온도 500°C, 용탕온도 800°C, 가압력 25 MPa로 결정되었으며 기지금속에 비하여 인장강도가 약 20% 향상되었다.

참 고 문 헌

1. R.D.Maier, M.D.Smalc, T.W.Krueck, and B.O.Budinger, "Fatigue behavior of squeeze cast metal matrix composites for diesel pistons," *SAE Technical paper series*, No.920456, 1992.
2. Nobuhiro Miura, Noriaki Miyake, "Ceramic fiber reinforced piston for high performance diesel engines," *SAE Technical paper series*, No.830252, 1983.
3. J.Dinwoodie, "Automotive applications for MMC's based on short staple alumina fibres," *SAE Technical paper series*, No.870437, 1987.
4. Folgar, F. and Krenger, "Fibre FPMCMs in reciprocating engines," *Proceedings of CCM Conference*, University of Delaware, Sep., 1984.
5. H.Fukunaga, "Squeeze casting processes for fibre reinforced metals and thier mechanical properties," *Cast reinforced metal composites*, ASM,

1988, pp.101-108.

6. J.M. Quenisset, R.Fedou, F.Girot, "Effect of squeeze casting conditions on infiltration of ceramic preforms," *Cast reinforced metal composites*, ASM, 1988, pp.133-138.

7. G.Chadwick, "Production, properties and applications of MMC's," *Cast reinforced metal composites*, ASM, 1988, pp.3-13.

8. H. Fukunaga, K.goda, Y.Kurita, "Strength and reliability of silicon carbide reinforced aluminum composites by squeeze casting including a vacuum system," *ICCM VI*, Vol.2, 1987, pp.362-371.

9. A.A.Das, A.J.Clegg, "Enhancement in the properties of a squeeze cast aluminum magnesium alloy containing-alumina fibre," *Cast reinforced metal composites*, ASM, 1988, pp.217-224.

10. N.W.Rasmussen, P.N.Hausen and S.F. Hausen, "High pressure die casting of fibre-reinforced aluminum alloys," E-MRS symposium, 1990.

11. Mortensen, "Pressure casting of fibre-reinforced metals," *ICCM6-ECCM2*, 1987, Vol.2, pp.320-329.

12. T.W.Cylne and J.F.Mason, "The squeeze casting process for fabrication of MMC's," *Metall, Trans.*, Vol.18A, August, 1987, pp.1519-1531.

13. Saeed Ahmed, V.Gopinathan, P.Ramakrishnan, "Squeeze casting and property evaluation of alumina fibre reinforced aluminum silicon alloy matrix composite," *Cast reinforced metal composites*, ASM, 1988, pp.149-153.

14. 유용문, 김진, 이상관, 장도연, "용탕단조법에 의한 NCG + Al₂O₃ 휘스커강화 2024 알루미늄 금속복합재료의 제조공정에 관한 연구," 추계복합재료학회 논문초록집, 1992, pp.211Al₂O₃215.

15. "Ludox colloidal silica binders for refractory fiber insulation manual," Du Pont LTD.

16. Williard H. Sutton, "Microwave processing of ceramic materials," *Ceramic bulletin*, Vol.68, No.2, 1989, pp.376-386.

17. G.Kruger, K.U.Kainer, "Characterization of ceramic fibre preforms," *ICCM9*, Vol.2, 1993, pp.15-22.

18. S.Dionne, S.H.J.Lo and G.J.C.Carpenter, "Mechanical properties of squeeze cast zinc-aluminum composites," *ICCM9*, Vol.1, 1993, pp.195-202.

19. Data sheet from JIS-H5202.

20. Data sheet from ICI Co.

21. 홍순형, 이길근, 김진, "Squeeze casting에 의해 제조된 Al₂O₃/Al-Si 금속복합재료의 고온 강도 및 계면 반응," 대한 금속학회지, Vol.28, No.7, 1990, pp.615-622.

22. S.W.Tsai and N.J.Parano, "Invariant properties of composite materials," Composite Materials Workshop, Technomic Pub., Stanford, 1968, pp.233-253.

23. Minoru Taya and Richard Arsenault, *Metal matrix composites for thermal behavior*, Pergamon Press, 1989.

24. Metal handbook, 10th edition, Vol.2, 1989.