

## 전자기식 교반법을 이용한 입자강화형 금속복합재료의 제조 및 Thixoforming을 위한 재가열 공정

임해정\* · 강종길\*\* · 조형호\*\*\*

(2000년 3월 23일 접수)

### Fabrication of Particulates Reinforced Metal Matrix Composites by Electro-Magnetic Stirring and Reheating Process for Thixoforming

H. J. Lim, C. G. Kang and H. H. Jo

#### Abstract

The electro-magnetic stirring and mechanical process were applied to fabricate particulate metal matrix composites(PMMCs) with various particle size. The mechanical test on PMMCs was carried out in order to clarify the effect of T6 heat treatment on tensile behaviors. In order to study the thixoforming of PMMCs, fabricated billet are reheated by using the coil designed as a function of length between PMMC billet and coil surface, coil diameter and billet length. The effect of reinforcement distribution on billet temperature variation has been investigated with the calculated solid fraction theory based on a function of matrix alloy and volume fraction of reinforcement.

**Key Words** : Electro-magnetic Stirring, Reheating, Thixoforming, Solid fraction

#### 1. 서 론

금속복합재료는 비강도, 비강성, 내열성, 내마모성, 내충격 파손성 및 진동 감쇄성능과 같은 기계적 특성이 우수할 뿐 아니라 열 전도도, 열팽창계수와 같은 열적 특성이 우수하기 때문에 현재 자동차 엔진의 피스톤 링 및

실린더 라이너, 커넥팅 로드, 구동축 및 엔진 부품의 제조에 응용 되고 있다<sup>(1-4)</sup>. 금속복합재료는 강화제와 기지재의 종류뿐만 아니라 강화제의 형태 및 종류에 따라 복합재료의 특성이 결정되므로 다양하게 부품을 설계 할 수 있다. 기지재로서 Al 합금에 강화재료인 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 입자나 단섬유를 보강한 형태로 주로 제조되고 있다.

\* 부산대학교 대학원  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 한국생산기술연구원

용융 기지 금속을 이용하는 액상법은 공정이 용이하고 다양한 형상의 부품을 저렴하게 제조할 수 있을 뿐 아니라, 일반적인 주조 시설 및 기술을 그대로 활용할 수 있다는 장점이 있으므로 현재 금속복합재료의 제조에 가장 널리 이용되고 있다<sup>(5,6)</sup>. 용융 상태의 Al 기지재에 강화 입자를 함유시킨 상태에서 용탕 단조 공정을 바로 적용할 경우는 형상이 복잡한 입자강화형 금속복합재료의 부품을 제조할 수 있다<sup>(7,8)</sup>. 그러나, 액상법은 기지재와 강화재의 밀도 차이로 인하여 강화재가 침전 혹은 부상되어 전체적으로 강화재가 균일하게 분산된 제품을 얻기가 어렵다. 알루미늄의 반응용 성형의 경우는 금형 수명의 연장, 기존 주, 단조 공정의 보완 및 정밀 정형 기술의 응용 때문에 최근에 많은 연구가 시도되고 있다. 그러나 금속복합재료의 반응용 성형에 필요한 재가열 공정에 관한 연구는 아직까지 발표되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 전자기 교반식과 기계식 교반법을 겸용한 입자강화형 금속복합재료의 제조와 반응용 성형을 위한 재가열에 관한 연구를 수행하였다. A357 합금을 기지재로 한 입자강화형 금속복합재료의 제조에 있어서 강화재의 균일한 분산을 위하여 유도 가열식 교반법을 응용한 제조조건을 도출하였다. 또한 복합재료의 반응용 성형에 필요한 재가열 코일을 제작한 후 실험을 통하여 재가열 조건을 확립하였다.

## 2. 실험

### 2.1 금속복합재료의 제조

#### 2.1.1 실험재료

금속복합재료의 제조를 위해 사용되어진 소재는 프랑스 PECHINEY에서 전자기식 교반에 의해 제조된 ALTHIX A357이며 주로 주조용으로 쓰이는 알루미늄 합금으로 부품성형을 위한 Thixoforming에 적당한 재료이다. Table 1은 성분분석기를 이용하여 구한 조성을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of A357

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn
A357	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.20	0.03	-

강화재로는 일본 Showa Denko Company의 Silicon Carbide 입자를 이용하였으며 그 화학성분 및 PH를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical composition of Silicon Carbide Particle

	SiC	F · C	F · SiO <sub>2</sub>	T · Fe	PH
GC	99.0	0.04	0.55	0.07	5.0~7.0

금속복합재료의 제조 시 기지재에 첨가되는 강화재의 체적 함유율(Volume fraction)  $V_f$ 는 기지재와 강화재의 전체 체적에 대한 강화재의 체적으로 정의하였다.

#### 2.1.2 제조장치

본 연구에서는 입자강화형 금속복합재료의 제조를 위하여 제조장치를 직접 설계, 제작하였고 장비의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

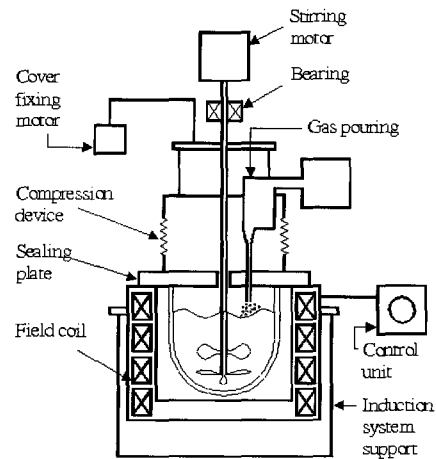


Fig. 1 Schematic diagram of the metal matrix composite fabrication apparatus using electro-magnetic and mechanical stirring process

기지재를 용해시키기 위해 20kW 고주파 유도 가열로를 이용하였고 기계식 교반에 의한 복합재료의 제조가 끝난 후 흑연 몰드에 용탕을 주입하기 쉽게 가열로의 회전동동이 가능하게 설계 되어있다. 분위기 온도를 조절하는 전기로와 비교하면 고주파 유도 가열로는 소재를 설정온도까지 신속히 올릴 수 있고 제조온도를 일정하게

유지하기가 용이하며 기지재가 완전 용탕상태일 때 유도 가열코일에 의한 자기장의 형성으로 내부의 유동이 관찰된다.

교반장치의 구성은 크게 세가지로 나누어져 있다. 임펠러의 상하 가동을 위한 구동 모터 및 콘트롤 부, 대기와의 접촉을 최소화하고 교반용 임펠러의 진동 방지 및 가이드 역할을 하는 커버 부, 교반용 임펠러의 토크 형성을 위한 구동 모터 및 콘트롤 부로 구성되어 있다. 토크 형성을 위한 구동 모터는 직류 모터이며 콘트롤 부에서의 입력 전압에 따라 회전수가 달라지는 방식으로 되어 있다. 본 장비는 금속복합재료의 제조 중 교반용 임펠러의 상하 가동 및 회전수의 자유로운 조절이 가능하며 완충 스프링과 내열재를 이용한 커버 부는 제조 중 정확한 온도 측정을 위한 열전대 삽입, 임펠러의 회전 가이드 및 베어링 역할을 동시에 수행하는 다기능을 가지고 있다.

### 2.1.3 제조방법

적절한 용량(750~780g)의 기지재를 아세톤으로 세척하여 20kW 고주파 유도 가열로에 장착되어 있는 흑연 도가니에 넣고 기지재의 액상선 온도(615°C) 이상의 온도로 유도 가열하여 완전 용탕 상태(630°C 이상)로 만들었다. 대기 노출에 의해 생성된 용탕 표면의 산화막을 제거한 후 Fig.1에서 보여 주는 바와 같이 Cover fixing motor를 구동하여 도가니에 Cover를 부착하도록 하였다. 교반 임펠러를 구동하면서 온도를 670°C로 유지하고 일정유동을 얻기 위해 1분간 교반하였으며 20kW 고주파 유도 가열로의 입력전류를 20A로 설정하여 제조실험중 최대의 출력을 얻게 하였다. 강화제로 사용되어진 일본 Showa Denko社의 SiCp를 내열 도가니에 담아 전기를 이용하여 400°C로 예열 하였고, 예열 되어진 SiCp를 분당 10g 정도로 교반 중인 기지재에 투입한다.

교반용 임펠러는 장시간 용탕과 접촉하므로 미국 Carborundum社에서 제조된 Fiber frax coating cement로 코팅 후 용탕과의 직접 접촉에 의한 용탕의 급격한 온도 하강을 방지하기 위해서 500°C 정도로 예열하였다. 강화 입자의 투입이 끝난 후 15분 동안 회전수 600rpm으로 임펠러를 구동하고 강화 입자의 균일한 분산을 얻기 위해 상하로 움직여가며 교반 한 후 클램핑한 흑연 몰드에 주입하여 1분간 냉각한 후 켄칭 하였다. 제조되어진 금속 복합 재료의 크기는 직경 40mm, 높이 (180~200)mm이며, Thixoforming을 위한 재가열용 Billet ( $\phi$  40mm×150mm)으로 가공하였다.

## 2.2 금속복합재료의 재가열

### 2.2.1 재가열 코일

유도 코일에 작용하는 교류 전압은 코일 회로에서 교류 전류를 발생시킨다. 교류 코일 전류는 주위에 코일 전류와 같은 주파수를 가지고 시간에 따라 변하는 자기장을 생성한다. 이 자기장은 코일 내부에 위치하는 금속복합재료 빌렛에 와전류(Eddy Current)를 유도한다.

알루미늄 빌렛의 유도가열을 포함해서 대부분의 상용 유도가열 시스템에서 유도된 와전류는 금속복합재료 빌렛 내부에서 균일하게 분포하지 않는다. 일반적으로 전류 밀도의 최대치는 표면 위에 위치한다. 전류 밀도는 금속복합재료 빌렛의 표면에서 중심으로 갈수록 감소한다. 금속복합재료 빌렛의 단면 내에서 불균일한 전류 분포 현상을 표면 효과(Skin Effect)라 한다. 표면 효과 때문에, 전력의 약 86%가 빌렛의 표면층에 집중되며, 이 층을 전류 침투 깊이( $\delta$ )라고 한다. 전류 침투 깊이는 금속의 종류에 따라 다른 값을 가지며 주파수의 함수이다. 코일과 빌렛의 끝단에서 가열 양상의 불균일성은 이 영역에서 전자기장의 뒤틀림(Distortion) 현상과 관계가 있다. 이 뒤틀림 현상을 전자기 끝단효과(Electro-magnetic End Effect)라고 한다. 일반적으로 전자기 끝단효과는 유도가열에서 가장 복잡한 문제이다.

원하는 온도분포는 주파수, 빌렛과 코일 사이의 간격(Air Gap), 빌렛의 기계적 성질, 방사율, 코일 내화성 재료(Coil Refractory) 및 전력밀도에 종속적이다. 따라서 전자기 끝단효과를 최소화하기 위한 유도 코일이 필요하다. 본 연구에서는 저자가 지금까지 연구하여 제작한 재가열 시스템을 이용하여 반응용 성형에 필요한 가열 조건을 제안하였다<sup>(9,10)</sup>.

### 2.2.2 재가열 온도의 설정

코일과 빌렛을 구성하는 실제 시스템에서는, 알루미늄이 기지재인 A357내에 강화입자가 균일하게 분산되어 있는 복합 재료 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량은 보통 등분포하지 않고, 그 결과로 비균일 온도 분포가 생긴다. 따라서 코일 설계의 최적화를 위한 중요한 점이 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다<sup>(11,12)</sup>.

입자 강화형 금속 복합 재료는 이종의 소재가 혼합되어 있는 상태이므로 기존의 금속 합금의 재가열에 관한 데이터를 직접 적용할 수가 없다. 그러므로 Thixoforming 공정을 위한 소재의 재가열 시 고상율 예측에 필요한 온도와 강화제의 체적 함유율 사이의 관계가 정확히

구명되어야 한다. 본 연구에서는 입자 강화형 금속복합재료의 재가열 온도는 기지재의 온도와 고상율 사이의 실험 데이터를 이용하여 설정하였다.

일반적으로 복합재료가 아닌 경우는 고상율과 온도사이의 관계는 응고이론에 의하여 나타낼 수 있으나 본 연구에서는 Fig.2에서 보여주는 바와 같이 G.Hirt<sup>(13)</sup> 등이 실험에 의하여 구한 A357 재료의 온도와 고상율 사이의 관계식을 기준으로 하여 복합재료의 재가열 온도를 설정하였다.

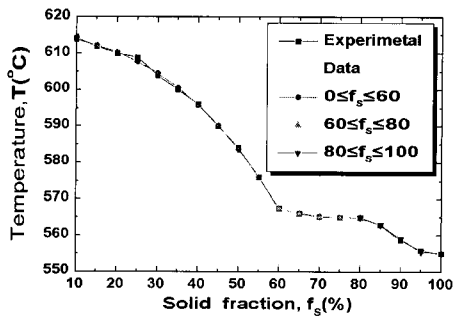


Fig. 2 Relationship between temperature and solid fraction in semi-solid alloy A357

Fig.3에서 보여주는 바와 같이 기지재의 고상율이  $f_x$  인 조건에서 강화재의 양을  $\Delta f_x$ 만큼 증가시킨 경우 고상율이 상대적으로  $\Delta f_x$ 만큼 증가되어 온도는  $\Delta T_x$  만큼 감소한다. 따라서 복합재료의 재가열 온도를 체적함유율의 증가에 따라서 Fig.3의  $\Delta T_x$  만큼 온도를 증가시켜 재가열 온도를 설정하였다. 이때 복합재료의 고상율을 다음과 같이 정의하였다.

$$f_c = f_x + \Delta f_x \quad (1)$$

$$f_c = f(T_x) + f(\Delta T_x) \quad (2)$$

소재의 재가열을 3단계로 나누어 각 단계마다 가열 시간 및 유지시간을 제어함으로써 소재의 균일한 가열을 얻을 수 있다<sup>(10)</sup>. 따라서 본 연구에서는 재가열 온도를 3단으로 설정하였다. 고상율이 50%에 대응하는 온도가 반응용 성형에 적합하다. 본 연구에서는 고상율이 (5~15)%에 해당하는 강화재를 기지재와 혼합하여 사용하기 때문에 복합재료의 고상율이 50%가 되도록 하기 위해서

는 강화재의 함유율(5~15)%에 대응하는 온도만큼 가열 온도를 상승시켜 복합재료의 고상율이 50%가 되도록 재가열 조건을 설정하였다<sup>(14)</sup>.

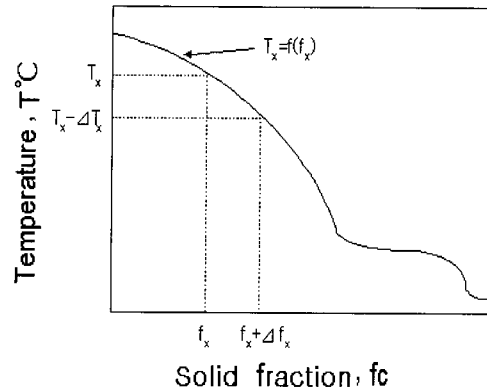


Fig. 3 Relationship between the solid fraction and temperature for the semi-solid aluminum alloys

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 제조실험

Fig.4와 Fig.5은 입자의 크기가 각각 25 $\mu$ m과 14 $\mu$ m일 때 본 제조실험에서 사용되었던 20kW 고주파 유도 가열로를 이용하여 액상 교반법으로 제조된 금속복합재료의 조직사진이다. 유도 가열로의 경우 기지재가 완전 용탕상태일 때 자기장에 의한 유동이 관찰되었으며 기계식 교반기의 교반과 함께 강화재의 분산에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어진다.

강화재의 분산정도를 파악하기 위하여 시편 입의의 단면의 중심부와 가장자리 부로 나누어 조직을 관찰하였다. 강화재의 평균입자크기가 25 $\mu$ m인 경우는 Fig.4에서 보여주는 바와 같이 강화재의 심한 뭉침 현상은 줄어들었으나 제조된 시편 각 부분에서의 균일한 분산정도는 얻을 수 없었다. 제조 후 도가니에 투입된 강화재가 많이 묻어있는 상태였다. 완전 용융상태에서 복합재료를 제조할 때에는 임펠러의 회전속도가 (300~400)rpm이면 기지재가 임펠러와 같이 회전하는 양상을 보였다. 임펠러의 회전속도가 높으면(1200rpm) 유동상태는 좋았으나 제조 후 도가니 가장자리에 강화재가 많이 남아있었다. 따라서 본 연구에서는 600rpm으로 실험을 하여 Fig.4.5에서 보여주는 바와 같은 분산 상태를 얻었다.

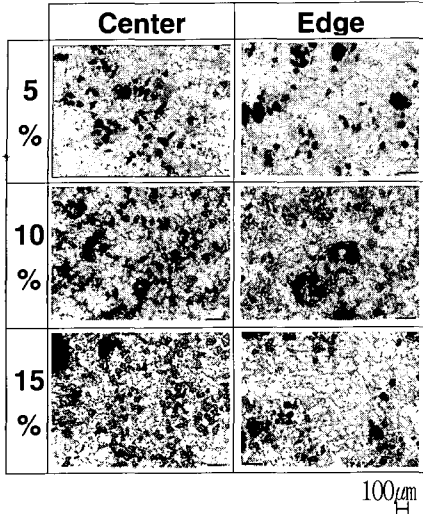


Fig. 4 Microstructure of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process with solid fraction 5%, 10% and 15% in liquid state (670°C, Particle size 25µm)

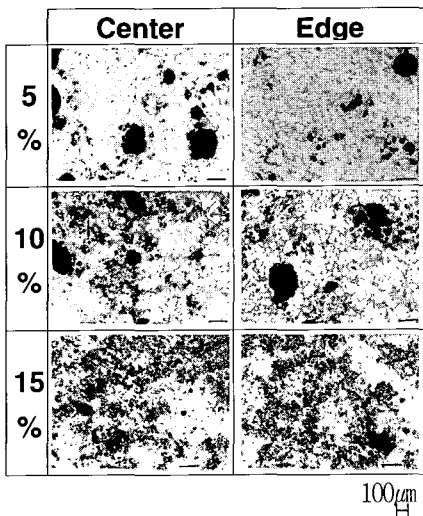


Fig. 5 Microstructure of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process with solid fraction 5%, 10% and 15% in liquid state (670°C, Particle size 14µm)

3.2 제조된 금속 복합 재료의 기계적 성질

전자교반식 주조법에 의하여 제조한 복합재료의 기계적 성질과 재가열 한 후 반응용 성형을 한 복합재료의 기계적 성질을 향후에 비교하기 위하여 본 연구에서는 인장실험을 수행하였다. 전자교반식 액상교반법에 의해

제조한 금속복합재료의 빌렛으로부터 인장 시험편을 가공하여 실험을 하였다. 인장 시험은 MTS를 이용하여 인장 속도 V=10mm/min으로 하여 실시하였다. 인장시험의 변수로는 강화 입자의 체적 함유율, 강화재의 크기, 열처리 유무에 따른 기계적 성질이다. 열처리는 530°C에서 2시간 용체화 처리 후 퀘칭한 후 175°C에서 8시간 시효 처리 후 공냉하는 T6 열처리를 하였다.

Fig.6(a),(b)는 강화재의 평균 크기가 각각 25µm, 14µm인 경우 체적 함유율의 변화와 열처리 유무에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. 강화재가 혼합되어있는 복합재료가 같은 방법으로 제조되어진 0%의 경우보다 인장강도가 높게 나왔으나 강화재 체적 함유율에 따른 인장강도의 변화는 뚜렷하지 않았다. 열처리를 한 경우에는 인장강도가 높아진 것을 볼 수 있다.

강화재의 평균 크기가 14µm인 Fig.6(b) 경우 체적 함유율의 변화와 열처리 유무에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. 복합재료인 경우 오히려 체적 함유율의 증가에 따라서 인장강도가 감소하고 있음을 볼 수 있다.

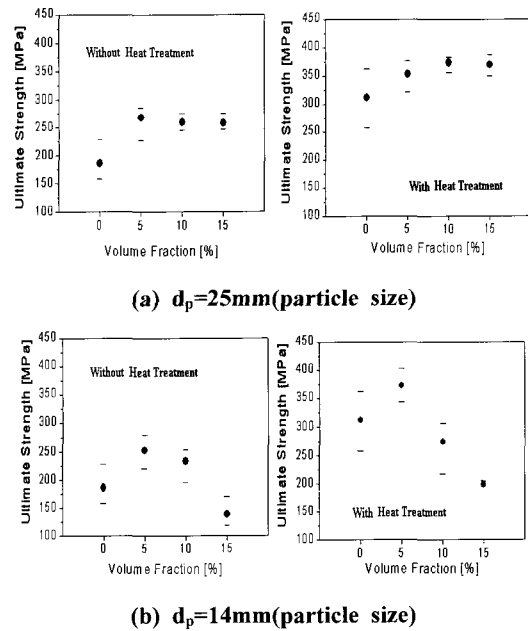


Fig. 6 (a),(b) Ultimate strength of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process in liquid state

Fig.7는 강화재의 평균 입자크기가 14µm인 경우 체적 함유율 별로 파단면을 SEM 촬영한 결과이다. 사진에서

볼 수 있듯이 강화재 주위로 소성변형부위(A부분)가 많이 관찰되고 있으며 강화재와 기지재의 접합 상태도 좋은 것으로 판단된다. 강화재와 기지재의 계면에서 접합 강도가 높을수록 계면에서 기지재의 소성변형이 심하게 일어난다. 그러나 Fig.7(b),(c)에서 볼 수 있듯이 강화재가 기지재와 접합하지 않고 단순히 묻쳐있는 크리스트 조직(B부분)이 10%, 15%에서 관찰되었다. 크리스트 조직은 복합재료의 강도를 저하시킬 수 있기 때문에 Fig.6(b)에서 보여 준 바와 같이 체적 함유율의 증가에 따라서 오히려 인장강도가 감소된 것으로 판단된다. 또한 기공에 의한 영향이 인장강도를 저하하는 원인으로 판단된다. Fig.4,5에서 보는 바와 같이 가압하지 않고 몰드에 주입한 후 퀘칭한 복합재료의 경우 내부에 기공이 다수 존재하게 되고 인장 시 초기 파단의 원인으로 작용한 걸로 판단된다.

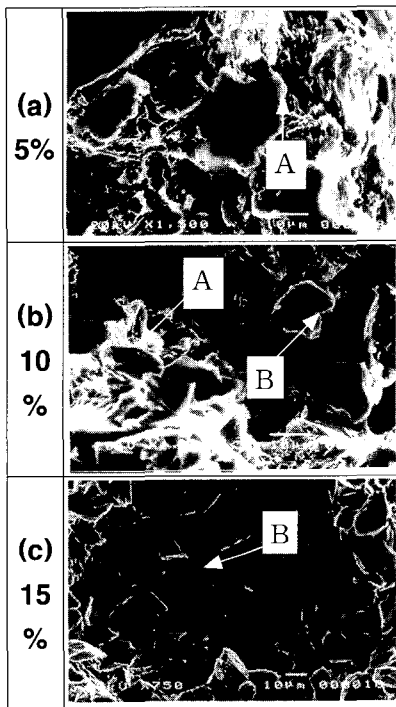


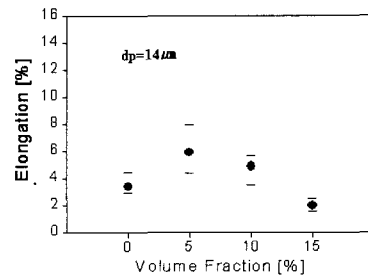
Fig. 7 SEM fractograph of A357/SiCp tensile specimen (Particle size  $14\mu\text{m}$ )

Fig.8는 강화재의 크기가  $14\mu\text{m}$ 인 경우 열처리 유무에 따른 연신율을 나타낸 것이다. 강화재의 체적 함유율이 증가할수록 연신율이 감소하고 있으며 열처리 전과 후의

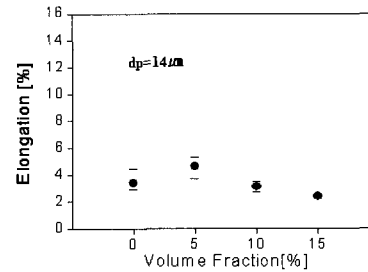
연신율은 큰 차이가 없었다.

강화재의 크기가  $25\mu\text{m}$ 경우도 열처리와 관계없이 Fig.8과 비슷한 결과를 얻었다. 강화재의 함유량이 증가함에 따라서 연신율이 감소하는 이유는 기지재내에 강화재를 주입할 때 기공의 증가가 주요원인으로 생각된다.

Graphite Mold에 기지재와 강화재가 혼합된 슬러리를 주입하여 일정시간 냉각한 후 퀘칭하여 제조된 금속복합재료의 기계적 성질은 크게 향상되지 않았으나 Thixoforming에 의한 2차 가공에 의하여 기계적 성질을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Without Heat Treatment



(b) With Heat Treatment

Fig. 8 Elongation of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring method in liquid state (Particle size  $14\mu\text{m}$ )

### 3.3 재가열 결과 및 고찰

재가열에 의한 반응용 소재의 제조는 부품성형공정에서 중요한 공정중의 하나이다. 재가열을 거쳐 제조된 소재는 미세하고 균일한 구상화 조직이 되어야 하고, 유도 로에서 금형으로 이송 될 때 소재의 형태가 유지되어야 한다. 설정온도의 최종 단계에서 빌렛의 형상을 유지할 수 있고 균일한 미세 조직을 얻을 수 있는 조건을 실험적인 방법으로 도출하였다.

Fig.9는 재가열중 복합재료의 온도를 측정하기 위한 열전대의 위치와 시험편의 크기를 나타낸 것이다. 시험편의 직경과 높이는 각각 40mm와 50mm이다. 열전대의 깊이는 5mm와 30mm이며, 시험편의 중앙에서부터 각각 5mm, 10mm위치의 온도를 각각 측정하였다.

본 연구에서 제안되어진 재가열 마지막 단계에서의 온도는 강화재 체적 함유율 5, 10, 15%일 때 각각 592, 600, 601°C이었으나 실험 결과 시험편의 형상을 유지하며 균일한 조직을 얻을 수 있는 온도는 592, 596, 602°C이었다.

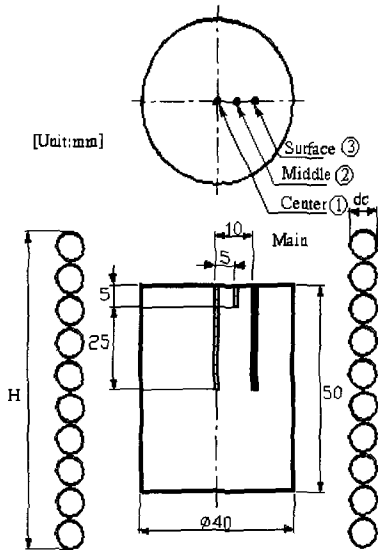


Fig. 9 Positions of thermocouples during the reheating process of metal matrix composites

Fig.9에서 보여 주는 각 위치에서의 온도 변화를 보여 주기 위하여 기지재료(A356)와 복합재료에 대하여 각각 재가열 실험을 수행하였다. Fig.10은 기지재료(A356)를 재가열 할 때 재가열의 입력조건(Fig.10(a)), 재가열 중 Fig.9의 각 위치에서의 온도분포(Fig.10(b)) 및 온도차이(Fig.10(c),(d))를 각각 나타내었다. Fig.10(a),(b)에서 보여 주는 바와 같이 재가열중 시간과 온도의 입력값에 따라서 온도제어가 잘 이루어지고 있음을 보여 주고 있다. 재가열중 시험편 각 위치(Fig.9의 중앙①, 중간② 및 표면③)에서의 온도차이는 가열시간이 7sec 이후부터는 단면 전체에 걸쳐서 온도차이가 거의 없음을 알 수 있다.

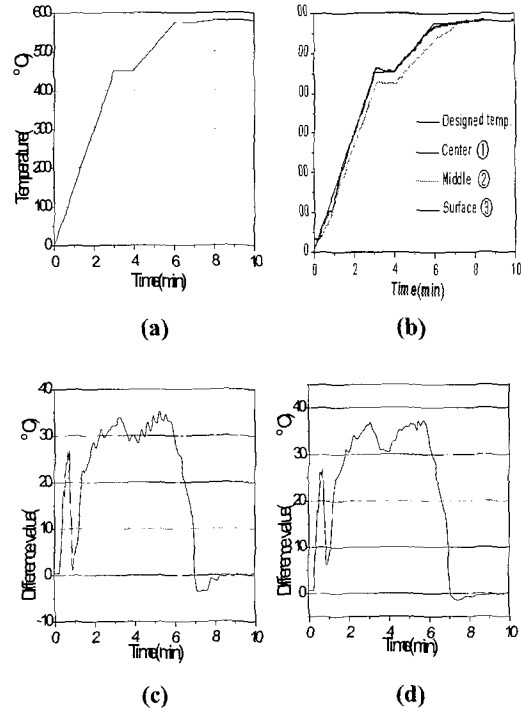
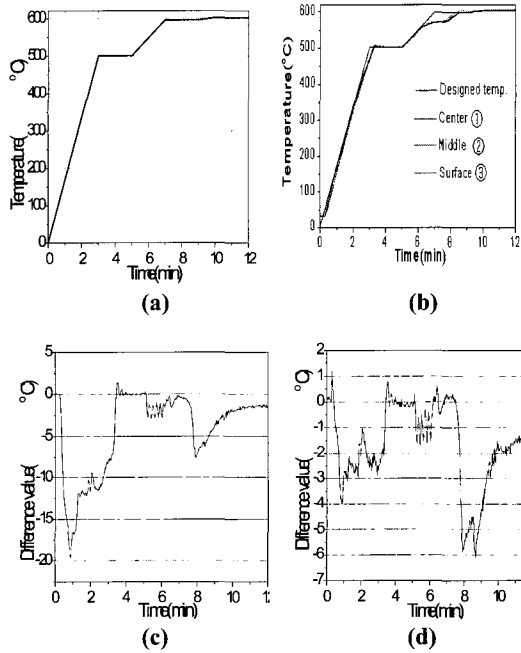


Fig. 10 Designed and measured temperature-time curve during reheating process of A357 billet  
 (a) Designed temperature profile  
 (b) Temperature profile  
 (c) Difference value of center ① and middle position ②  
 (d) Difference value of surface ③ and middle position ②

Fig.11은 강화재의 크기와 체적 함유율이 각각 25 $\mu$ m와 15%인 복합재료를 재가열 하였을 때 재가열의 입력조건과 출력데이터(Fig.11(a),(b)) 및 Fig.9에서 보여 주는 각 위치에서의 온도차이(Fig.11(c),(d))를 각각 나타낸 것이다. 재가열시 입력조건(Fig.11(a))에 대응하는 시험편의 각 위치에서의 온도값(Fig.11(b))은 거의 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 그러나 재가열중 시험편의 각 위치에서의 온도차이는 최대 20°C 정도이다.(Fig.11(c)에서 t=3.8분). 가열시간이 11분 이후부터는 각 단면에서의 온도차이는 (1.5~2)°C 정도임을 알 수 있다. 기지재료와 복합재료의 경우 가열시간이 각각 9분, 11분 이후부터는 시험편의 각 위치에 있어서 온도차이가 거의 일정함을 알 수 있었다. 기지재의 경우는 재가열 시간이 9분 이후부터는 시험편의 각 위치에서의 온도차이가 거의 관찰되지 않았으나 (Fig.10(c),(d)), 재가열 시간이 12분인 복합

재료의 경우는 각 단면에서의 온도차이가 기지재료에 비하여 (1.5~2)℃ 정도 차이가 더 많이 나타남을 알 수 있다.

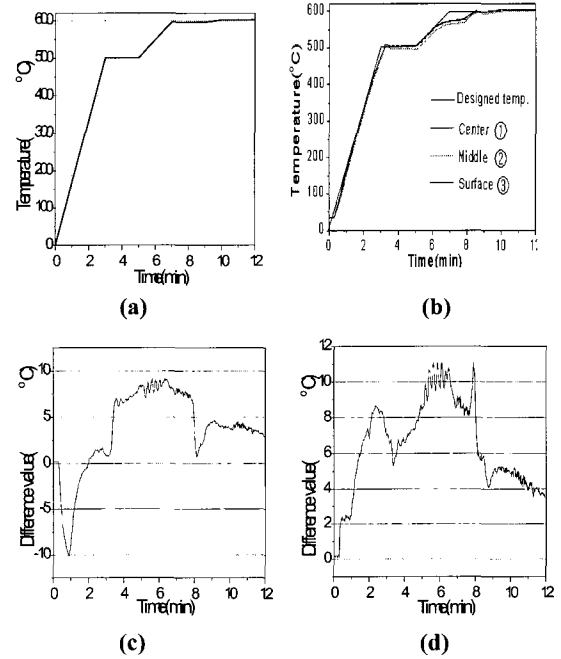
위의 원인은 복합재료 내에 존재하는 강화재의 분산상태와 열전도도의 차이에 기인한 것으로 생각된다.



**Fig. 11** Designed and measured temperature-time curve during reheating process of metal matrix composites fabricated by electromagnetic and mechanical stirring process (Particle size 25 $\mu$ m, 15vol%)  
 (a) Designed temperature profile  
 (b) Temperature profile  
 (c) Difference value of center① and middle position②  
 (d) Difference value of surface③ and middle position②

Fig.12는 강화재의 크기와 체적 함유율이 각각 14 $\mu$ m와 15%인 복합재료를 재가열할 때 나타나는 온도변화와 각 지점에서의 온도차이를 나타낸 것이다. 재가열시 시간과 온도의 입력 데이터와 출력 데이터는 강화재의 크기가 25 $\mu$ m인 Fig.11과 유사하다. 그러나 Fig.9에서 보여 주는 중앙지점①과 중간지점②의 온도차이를 나타내는 Fig.12(c)에서는 t=12분에서 온도차이가 3℃ 정도임을 알 수 있다. 또한 표면지점③과 중간지점②의 온도차이는 4℃ 가까이 됨을 알 수 있다. 강화재의 입자크기가 작을수록 시험편 단면에서 온도차이가 많이 나타남을 알 수

있었다. 또한 체적 함유율이 감소할수록 재가열 도중 시험편 단면에서의 온도차이가 감소함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 강화재의 크기가 작을수록 균일 분산이 어려워 각 단면에서 온도차이가 더 많이 나타나기 때문이다.



**Fig. 12** Designed and measured temperature-time curve during reheating process of metal matrix composites fabricated by electromagnetic and mechanical stirring process (Particle size 14 $\mu$ m, 15vol%)  
 (a) Designed temperature profile  
 (b) Temperature profile  
 (c) Difference value of center① and middle position②  
 (d) Difference value of surface③ and middle position②

Fig.13은 재가열 후 퀘칭한 각 조건별 금속복합재료의 중심부와 가장자리의 조직 사진을 나타낸 것이다. 강화재의 평균입자크기가 14 $\mu$ m인 경우는 Fig.13에서 보여 주는 바와 같이 강화재가 분산되어 있지 않은 부위에서 기지재가 구상화 조직이 성장한 상태를 관찰 할 수 있었다. ( Fig.13의 A부분) 유도 가열에 의하여 복합재료를 재가열 할 때 기지재와 강화재의 열전도도 차이에 의하여 시편 내부에 온도 구배가 많이 발생하였으며, 강화재가 분산되어있지 않은 부위는 과열(Overheating)되어 구상화 조직이 성장하였다.



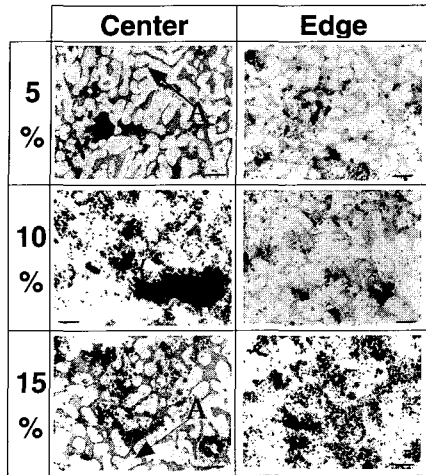


표 6

100 $\mu$ m

Fig. 13 Microstructure of metal matrix composites after the reheating process (Metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process with solid fraction 5%, 10% and 15% , SiCp 14 $\mu$ m)

### 3. 결 론

고주파 유도 가열로를 이용한 입자강화형 금속복합재료의 제조 및 재가열에 관한 코일설계, 재가열 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고주파 유도 가열로를 이용한 입자강화형 금속복합재료의 제조실험에서는 용탕온도 670 $^{\circ}$ C, 입력전류 20A, 교반시간 15분 및 교반회전수 600rpm으로 하여 기계식 교반 효과와 유도 코일에 의한 전자기식 교반 효과를 동시에 얻어 강화입자의 뭉침 현상을 줄일 수는 있었다.

(2) d $\times$ l=40 $\times$ 50(mm)인 금속복합재료 빌렛에 대하여 Thixoforming에 이용할 수 있는 코일 크기(유도 가열 시스템의 주파수: 20kHz)를 이론적으로 제안하여 설계 및 제작하여 실험한 결과 강화재의 평균 입자크기가 25 $\mu$ m의 경우 592, 596, 602 $^{\circ}$ C일 때, 14 $\mu$ m의 경우 592, 598, 602 $^{\circ}$ C일 때 양호한 재가열 조건을 얻었다.

(3) 강화재 평균 입자크기에 따른 재가열 온도는 큰 차이는 없었으며 체적 함유율의 증가에 따라서 재가열 마지막 단계에서 시험편 단면에서의 온도차이가 증가하였다. 체적 함유율 10%의 경우는 제안되어진 온도보다

4 $^{\circ}$ C 낮은 온도에서 Thixoforming이 가능함을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 1998년도 한국 학술 진흥 재단의 지원에 의하여 연구되었음(1998-001-E00265)

### 참 고 문 헌

- (1) J. E. Allison and G. S. Cole, 1990, "Metal Matrix Composites in the Automotive Industries: Opportunity and Challenge", J. Mater., Vol. 45, pp.19~24.
- (2) V. K. Lindroos and M. J. Talvitie, 1995, "Recent Advances in Metal Matrix Composites", J. of Materials Processing Technology, Vol. 53, pp.273~284.
- (3) C. H. K. Dharan and S. Kobayashi, 1991, "Forming of Metal Matrix Composites", in Numerical Modelling of Material Deformation Processes, P. Hartley, I. Pillinger, C. Sturgess(eds.), pp.358~379.
- (4) C. G. Kang and G. S. Ku, 1995, "An Experimental Investigation on Infiltration Limit and the Mechanical Properties of Al203 Short Fiber Reinforce Metal Matrix Composites Fabrication by Squeeze Casting", J. of Composites Materials, Vol. 29, No.4, pp.444~462.
- (5) V. J. Michaud, 1993, "Liquid-State Processing", in Fundamentals of Metal Matrix Composites, Butterworth-Heinemann, S. Suresh, A. Mortensen, A. Needleman (eds.), pp.23~41.
- (6) C. G. Kang, K. S. Yun and G. S. Ku, 1996, "Fabrication of Metal Matrix Composites by Die Casting Techniques and Evaluation of their Mechanical Properties", J. of Materials Processing Technology, Vol. 62, pp.116~123.
- (7) 土取 功, 福永 秀春, "高壓凝固法によるルチル型TiO<sub>2</sub>粉末/アルミニウム複合材料の製造と組織的特性", 軽金属, Vol.43, No.1, 1993, pp.22~32.
- (8) 山内利夫, 西田義則. "SiCウイスカプリフォームへのAC8Aアルミニウム合金の加圧含浸挙動", 日本金属学会誌, 第58巻, 第12号, 1994, pp.143

- 6~1443.
- (9) H. K. Jung, C. G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6%Si-3% Cu-0.3%Mg Alloy for Thixoforming", Metallurgical and Materials Transactions B, in Press
- (10) H. K. Jung, C. G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6%Si-3% Cu-0.3%Mg Alloy for Thixoforming", The Korean Foundrymen's society, Vol. 19, No.3, pp.225~235.
- (11) C. G. Kang, H. K. Jung, Y. J. Jung, 1999, "Coil Design of Inductive Heating and Reheating Process of Aluminum Alloys for Thixoforming", Proceedings of the 6th Int. Conf. on Technology of Plasticity, Nuremberg. in Press
- (12) E. J. Davies, 1990, "Conduction and Induction Heating", Peter Peregrinus Ltd., pp100~222.
- (13) G. Hirt, R-Cremer, A. Winkelmann, T. Witulskiand, M. Zillgen, 1994, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45, p.359.
- (14) H. K. Jung, C. G. Kang and Y. H. Moon, 2000, Induction heating of semi solid billet and control of globular microstructure to prevent coarsening phenomena, J. of materials engineering and performance, Vol .9, No.1, February, pp.12~23.