

Thixoforming을 위한 입자강화형 금속복합재료의 Reheating 공정

이동건* · 안성수** · 강충길***

Reheating Process of Particulates Reinforced Metal Matrix Composites for Thixoforming

D.K.Lee, S.S.Ahn and C.G.Kang

Key Words: Electro-magnetic stirring, Coil design, Thixoforming, Solid fraction

Abstract

A both mixing process of electro-magnetic stirring and mechanical process technique were used to fabricate particulate metal matrix composites(PMMCs) for variation of particle size. The PMMCs were tested for their tensile test for with and without heat treatment with T6. PMMCs fabrication processing conditions for both electrical and mechanical process are also suggested. In order to thixoforming of PMMCs, fabricated billet are reheated by using the optimal 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 are investigated with calculated solid fraction theory proposed as a function of matrix alloy and volume fraction of reinforcement.

기호설명

V_f : 강화재의 체적함유율 [%]
 M_p : 강화재의 질량 [Kg]
 M_c : 기지재의 질량 [Kg]
 ρ_p : 강화재의 밀도 [Kg/m^3]
 ρ_m : 기지재의 밀도 [Kg/m^3]
 f_c : 복합재료의 고상율 [%]
 f_x : 기지재의 고상율 [%]
 T_c : 복합재료의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_x : 기지재의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

1. 서론

금속복합재료는 기존의 재료들에 비하여 비강도, 비강성, 내열성, 내마모성, 내충격 파손성 및 진동 감쇄성능과 같은 기계적 특성이 우수할 뿐 아니라 조정 가능한 열전도도, 낮은 열팽창계수와 같은 열적 특성을 가지고 있어서, 현재 자동차 엔진의 피스톤 링 및 실린더 라이너, 커넥팅로드, 구동축 및 엔진 부품의 제조에 응용되고 있다(1)~(3). 금속복합재료는 강화재와 기지재의 종류뿐만 아니라 강화재의 형태에 따라 최종 복합재료의 특성이 결정되므로 다양하게 설계할 수 있지만, 기지재로서 Al합금에 강화재료인 SiC, Al_2O_3 의 입자나 단섬유를 보강한 형태로 주로 제조되고 있다. 금속복합재료의 제조공정은 주로 액상법이 이용되고 있다. 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(4),(5). 또한 용융 상태의 Al기지재에 강화입자를 함유시킨 상태에

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 대학원
*** 부산대학교 기계공학부

서 용탕 단조 공정을 바로 적용할 경우는 형상이 복잡한 입자강화형 금속복합재료의 부품을 제조할 수 있다. 그러나, 기지재와 강화재의 밀도 차이로 인하여 강화재가 침전 혹은 부상되어 전체적으로 강화재가 균일하게 분산된 제품을 얻기가 어렵다. 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 설계, 제작한 후 실험을 통하여 재가열 조건을 도출하였다.

2. 실험

2.1 금속복합재료의 제조

2.1.1 실험재료

금속복합재료의 제조를 위해 사용되어진 기지재는 프랑스 PECHINEY에서 전자기식 교반에 의해 제조된 주조용 알루미늄 합금인 ALTHIX A357을 이용하였다. Table.1은 성분분석기를 이용하여 구한 A357 합금 조성비를 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	-

강화재로서는 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 ₂	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 체적비로 정의되며, 다음의 식을 적용하여 사용하였다.

$$V_f = \frac{\frac{M_p}{\rho_p}}{\frac{M_m}{\rho_m} + \frac{M_p}{\rho_p}} \times 100\% \quad (1)$$

2.1.2 제조장치

본 연구에서는 입자강화형 금속복합재료의 제조를 위하여 설계 및 제작된 제조장비의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 또한 기지재를 용해시키기 위해 20kW 고주파 유도 가열로를 이용하였다. 고주파 유도 가열로는 소재를 설정온도까지 비교적 신속히 가열한 후 설정된 용탕 온도의 유지가 비교적 용이하다. 또한 기지재가 완전 용탕 상태일 때 가열코일에 의해 생성된 자기장의 형성으로 용탕 내부에 일정한 유동을 줄 수 있으므로 강화재의 분산 효과를 증대시킬 수 있다.

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. 본 장치는 금속복합재료의 제조에 있어 교반 임펠러의 상하 이동 및 회전수의 자유로운 조절이 용이하며, 완충 스프링과 내열재를 이용한 커버 부는 제조 중 정확한 온도 측정을 위한 열전대 삽입 및 고정, 임펠러의 회전 가이드 및 베어링 역할을 동시에 수행할 수 있도록 하였다.

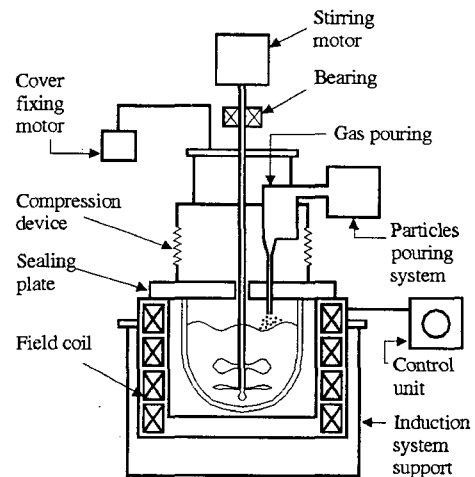


Fig.1 Schematic diagram to fabrication of metal matrix composite by using electro-magnetic and mechanical stirring process

2.1.3 제조방법

적절한 용량(750~780g)의 기지재를 아세톤으로 세척하여 20kW 고주파 유도 가열로에 장착되어 있는 흑연 도가니에 넣고 액상선 온도(615℃)보다 높은 온도로 유도 가열하여 완전 용탕 상태(630℃ 이상)로 만들었다. 용탕의 표면이 대기에 노출되어 있으므로 용탕 표면에 생성된 산화막을 제거한 후 Cover fixing motor를 구동하여 도가니에 Cover를 부착하도록 하였다. 교반 임펠러를 구동하면서 용탕 온도를 670℃로 유지하고 1분간 교반하였으며, 20kW 고주파 유도 가열로의 입력전류를 20A로 설정하여 최대 출력을 얻게 하였다. 강화재로 사용되어진 일본 Showa Denko社의 SiCp를 내열 도가니에 담아 전기로를 이용하여 400℃로 예열하고, 예열된 SiCp를 10g/min 정도로 교반 중인 기지재에 투입한다.

교반용 임펠러는 장시간 용탕과 접촉하므로 미국 Carborundum社에서 제조된 Fiber frax coating cement로 코팅 후 500℃ 정도로 예열하였다. 강화입자의 투입이 끝난 후 15분 동안 회전수 600rpm으로 임펠러를 구동하고 강화입자의 균일한 분산을 얻기 위해 상하로 움직여가며 교반하였으며, 흑연 몰드에 주입한 후 1분간 냉각하여 신속히 쉐칭 하였다. 이상의 방법으로 제조되어진 금속 복합 재료의 크기는 직경 40mm, 높이 180~200mm이며, Thixoforming을 위한 재가열용 Billet (φ 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(δ)라고 한다. 전류 침투 깊이는 금속의 종류에 따라 다른 값을 가지며 주파수의 함수이다. 코일과 빌렛의 끝단에서 가열 양상의 불균일성은 이 영역에서 전자기장의 뒤틀림 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 코일의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 지금까지 연구하여 제작, 설계된 유도 코일을 재가열 시스템에 설치하고 이에 따른 재가열 조건을 도출하였다(6).

2.2.2 재가열 온도의 설정

설계된 유도 코일과 재가열 될 금속복합재료 빌렛으로 구성되는 실제 시스템에서는, 알루미늄 기지재인 A357내에 강화입자가 균일하게 분산되어 있는 복합재료 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량은 대개 등분포하지 않고, 그 결과로 비균일 온도 분포가 생긴다. 따라서 코일 설계의 최적화를 위한 중요한 점이 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다(6).

입자 강화형 금속 복합 재료는 이중의 소재가 혼합되어 있는 상태이므로 기존 금속 합금에 대한 재가열 D/B를 직접 적용할 수가 없다. 그러므로 Thixoforming 공정을 위한 소재의 재가열 시 고상을 예측에 필요한 온도와 강화재의 체적 함유율 사이의 관계가 정확히 규명되어야 한다. 본 연구에서는 입자 강화형 금속복합재료의 재가열 온도를 기지재의 온도와 고상을 사이의 실험 데이터를 이용하여 설정하였다.

일반적으로 복합재료가 아닌 경우는 고상율과 온도사이의 관계는 응고이론에 의하여 나타낼 수 있으나 본 연구에서는 G.Hirt(7) 등이 실험에 의하여 구한 A357 재료의 온도와 고상율 사이의 관계식을 기준으로 하여 복합재료의 재가열 온도를 설정하였다.

기지재의 고상율이 f_x 인 조건에서 강화재의 양을 V_f 만큼 증가시킨 경우 고상율이 상대적으로

V_f 만큼 증가되어 온도는 ΔT_x 만큼 감소한다. 따라서 복합재료의 재가열 온도를 체적 함유율의 증가에 따라서 ΔT_x 온도 이내로 증가시켜 재가열 온도를 설정하였다. 이때 복합재료의 고상율을 다음과 같이 정의하였다.

$$f_c = f_x + V_f \quad (2-1)$$

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

소재의 재가열을 3단계로 나누어 각 단계마다 가열 시간 및 유지시간을 제어함으로써 소재의 균일한 가열을 얻을 수 있다(8). 또한 강화재의 체적 함유율이 (5~15%)이므로 재가열 시편의 전체 고상율 50%를 기준으로 마지막 단계에서 고상율이 50%일 때 온도보다 ΔT_x 만큼 증가시켜 재가열 실험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재가열 결과 및 고찰

재가열에 의한 반응용 소재의 제조는 성형공정에서 중요한 공정으로 재가열을 거쳐 제조된 소재는 미세하고 균일한 구상화 조직을 얻을 수 있고, Thixofoming시 다이 탕구로의 이송이 가능하도록 최종 단계의 온도(T_3)에서 빌렛의 형상을 유지할 수 있어야 한다. Fig.2는 재가열 시 복합재료 내부에 삽입되는 열전대의 위치와 유도 코일 단면부의 개략도이다.

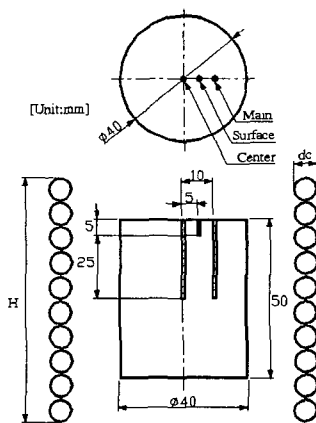


Fig.2 Thermocouple positions to temperature measurement during reheating process of particulates reinforced metal matrix composites

본 연구에서 제안되어진 재가열 마지막 단계에서의 온도는 강화재 체적 함유율 5, 10, 15%일 때 각각 1단 가열 온도(T_1), 2단 가열 온도(T_2) 및 3단 가열 온도(T_3)는 592, 600, 601°C이었으나 실험 결과 시편의 형상을 유지하며 균일한 구상화 조직을 얻을 수 있는 온도는 강화재의 평균 입자 크기 25 μm 의 경우 각각 T_1, T_2, T_3 는 592, 596, 602°C, 14 μm 의 경우 각각 592, 598, 602°C이었다.

Fig.3과 Fig.4는 강화재의 함유율이 0%, 10%인 경우의 부위별 온도차를 나타내었으나, 강화재의 체적 함유율과 강화재의 평균 입자크기에 따른 온도차이는 가열시간에 따라 (4~8)min의 구간을 제외하고는 온도편차가 거의 없이 균일하게 가열되고 있음을 알 수 있다.

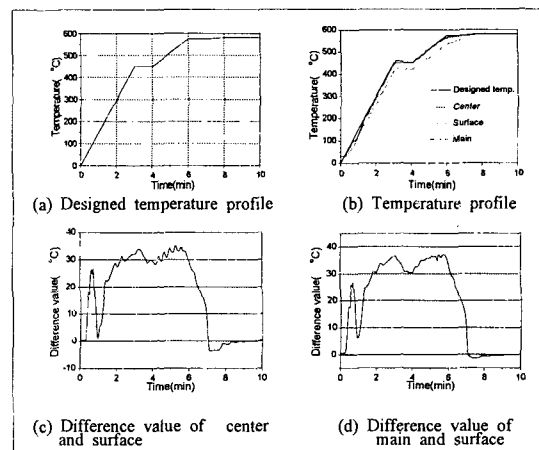


Fig.3 Designed temperature and measured temperature-time curve during reheating process of A357 billet

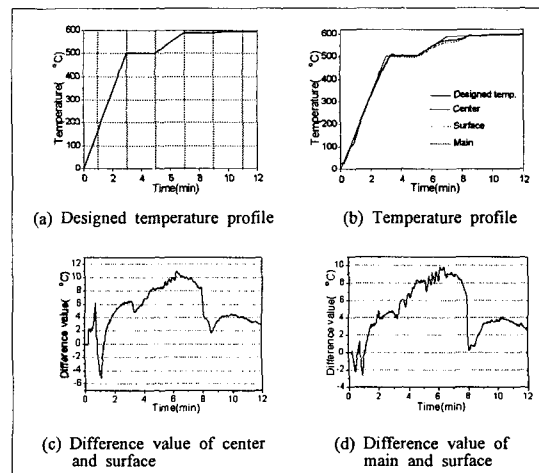


Fig.4 Designed temperature and measured temperature-time curve during reheating process of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process (Particle size 25 μm , 10vol%)

Fig.5는 강화재의 입자 크기가 14 μm 이고 체적 함유율이 10%인 경우의 부위별 온도차를 나타내었다. 입자 크기의 변화에도 Fig.3과 Fig.4의 경우와 같이 가열시간에 따른 온도편차의 양상이 비슷하며, 균일하게 가열되고 있음을 알 수 있다.

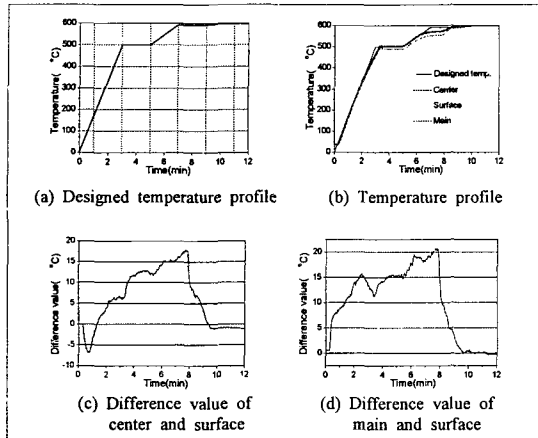


Fig.5 Designed temperature and measured temperature-time curve during reheating process of metal matrix composites fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process (Particle size 14 μm , 10vol%)

Fig.7와 Fig.8은 재가열 후 켄칭한 각 조건별 금속복합재료의 중심부와 가장자리의 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig.6의 0% 재가열 조직과 비교하였을 때 위치에 따른 구상화 조직의 차이는 크지 않았으나 강화재의 평균입자크기가 14 μm 인 경우 Fig.8에서 보는 바와 같이 강화재가 분산되어 있지 않은 부위에서 기지재의 구상화 조직이 성장한 상태(A부분)를 관찰 할 수 있었다.

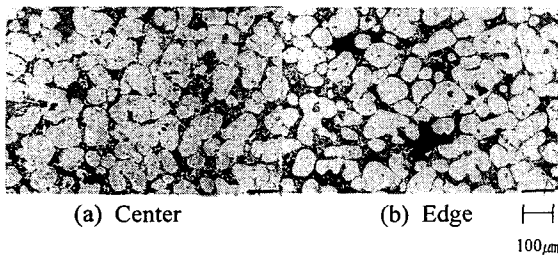


Fig.6 Microstructure of A357 after reheating process

기지재와 강화재의 열전도도 차이에 의하여 시편 내부에는 온도 구배가 생기며 일정한 온도분포를 얻기 위하여 출력이 높아지게 되고 강화재

가 분산되어있지 않은 부위는 과열(Overheating)되어 구상화 조직이 성장하게 된다. 그러므로 기지재의 균일한 구상화 조직을 얻기 위해서는 강화재의 균일한 분산이 필요하다.

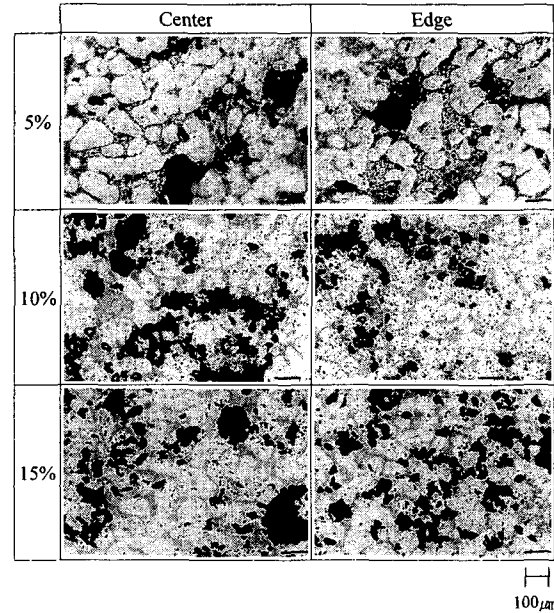


Fig.7 Microstructure of metal matrix composites after reheating process (fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process, SiCp 25 μm)

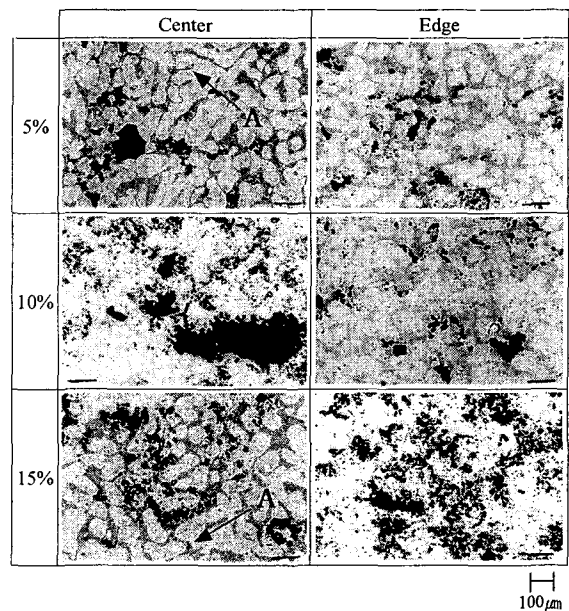


Fig.8 Microstructure of metal matrix composites after reheating process (fabricated by electro-magnetic and mechanical stirring process, SiCp 14 μm)

4. 결론

고주파 유도 가열로를 이용하여 알루미늄 기지재와 SiCp 14 μ m, 25 μ m의 입자형 강화재의 교반을 통해 제조된 금속복합재료(PMMC) 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 15분으로 하여 기계식 교반 효과와 유도 코일에 의한 전자기식 교반 효과를 동시에 얻어 강화입자의 뭉침 현상을 줄일 수는 있었으나 제조된 시편 전체적으로 고른 분산정도는 얻지 못하였다.

(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 μ m의 경우 592, 596, 602 $^{\circ}$ C일 때, 14 μ 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 온도가 증가하였으며, 체적 함유율 10%의 경우 제안되어진 온도보다 4 $^{\circ}$ C 낮은 온도에서 Thixoforming에 적합한 조건을 찾을 수 있었다.

(4) 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.

참고문헌

- (1) L. C. Davis and J. E. Allison, "Residual Stresses and Their Effects on Deformation in Particle-Reinforced Metal-Matrix Composites", Metallurgical Transaction A, Vol. 24A, 1993, pp. 2487~2496
- (2) J. E. Allison and G. S. Cole, "Metal Matrix Composites in the Automotive Industries: Opportunity and Challenge", J. Mater., Vol.45, 1990, pp. 19~24
- (3) V. K. Lindroos and M. J. Talvitie, "Recent Advances in Metal Matrix Composites", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 53, 1995, pp. 273~284
- (4) 국방과학연구소, "항공기 재료로 각광받는 MMC", 전자저널, 1998, 8월호
- (5) V. J. Michaud, "Liquid-State Processing", in Fundamentals of Metal Matrix Composites, Butterworth-Heinemann, S. Suresh, A. Mortensen, A. Needleman (eds.), 1993, pp. 23~41
- (6) H. K. Jung and C. G. Kang, "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 A, Vol.30A, 1999, pp. 2967~2977
- (7) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski and M. Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45, 1994, pp. 359~362
- (8) 정홍규, 강충길, "Thixoforging 공정에 있어서 반응용 알루미늄 합금의 충전거동과 기계적 성질", 한국주조공학회, 주조, 제19권, 제4호, 1999, pp. 330~340