

복합교반법으로 제조한 금속복합재료의 Thixoforming용 재가열공정

이동건* · 강충길**

(2001년 2월 26일 접수)

Reheating Process of Metal Matrix Composites Fabricated by Combined Stirring Process for Thixoforming

D. G. Lee and C. G. Kang

Abstract

The forming process of metal matrix composites by the die casting and squeeze casting process are limited in size and dimension in term of final parts. The melt stirring method have the problems that the homogeneous distribution of the reinforcements is difficult due to the low weldability and the density difference between the molten metal and the reinforcement. The thixoforming process for metal matrix composites has numerous advantages compared to die casting, squeeze casting and compocasting. However, for the thixoforming process, the billet with the desired volume fraction must be heated to obtain a uniform temperature distribution over the entire cross-sectional areas. To obtain the reheating conditions of composites, the particulate reinforced metal matrix composites for thixoforming were fabricated by combined stirring process which is simultaneously performed with electro-magnetic stirring and mechanical stirring process. The matrix alloy and reinforcement are used to aluminum alloy(A357) and SiCp with diameter 14, 25 μ m, respectively. The microstructure characteristics were investigated by changing the volume fraction and reinforcement size. The heating conditions to obtain the uniform temperature distribution in cross section area of fabricated metal matrix composites billet are proposed with heating time, the heating temperature and the holding time.

Key Words : Metal Matrix Composites, Thixoforming, Reheating

1. 서론

금속복합재료를 이용한 부품성형공정은 주로 다이캐스

팅, 스키즈캐스팅 공정을 이용하고 있다. 다이캐스팅과 스키즈캐스팅 공정에 의한 부품개발은 단섬유를 이용하여 진공 가압법에 의하여 제조한 예비 성형체를 예열하

* 부산대학교 대학원
부산대학교 기계공학부

여 금형의 캐비티 내에 주입한 후 용융상태의 지지체를 함침시켜 정밀정형 부품을 제조하고 있다.^(1~2)

액상법은 예비성형체의 형상 제한 때문에 복잡하고 임의형상을 가진 부품을 제조할 수 없는 단점을 가지고 있다.^(3~4) 또한 콤포캐스팅 방법을 이용하여 부품을 제조할 수 있으나 임의의 형상의 복잡한 부품은 성형에 한계가 있다.^(5~6)

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 주조법에 의하여 제조한 금속복합체의 빌렛트를 반응용상태로 가열하여 직접 부품을 성형하는 공정에 관한 연구가 시도되고 있다.^(7~8)

금속복합재료의 반응용성형을 위해서는 소재의 재가열 방법에 관한 연구가 필수적이다. 현재까지 반응용성형을 위한 알루미늄 재료의 재가열 방법은 저주파코일을 이용한 유도가열방식을 취하고 있다. 이러한 방법은 코일의 크기, 소재와 코일 내경의 가열온도와 시간사이의 입력 데이터 등이 고려되어 성형시 빌렛트의 온도가 균일하게 되도록 가열하는 방법 등이 연구되었다.^(9~10) 현재까지의 연구내용은 전자교반식 방법을 이용하여 수직, 수평 연속주조법에 의하여 제조한 반응용 알루미늄 소재의 재가열 방법에 관한 연구가 대부분이다.

금속복합재료는 열전달계수가 다른 두 가지의 소재가 혼합되어 있기 때문에 재가열조건도 알루미늄 소재와 다르다. 또한 강화재의 함유율에 따른 재가열 조건도 다르게 하여야 재가열중 일정한 크기의 빌렛트가 붕괴되지 않고 반응용 성형이 가능하다.

저자는 금속복합재료의 재가열을 위하여 코일 설계방법을 제안하여 코일을 제작하였다.⁽¹¹⁾ 실험을 통하여 재가열방법과 결과를 제시하였다. 이론적으로 구한 재가열온도와 고상율 사이의 관계를 가열 중 강화재의 변화에 따른 빌렛트의 온도변화를 측정한 결과 가열시간에 따라 복합재료 단면에 있어서 온도변화가 불규칙한 결과를 보여주었다.

재가열중 빌렛트 단면에 있어서 이러한 불규칙한 온도 변화는 지지체의 초정 α 의 크기를 불균일하게 하는 원인이 된다. 또한 재가열중 빌렛트 단면의 불균일한 온도 분포 현상은 Thixforming에 필요한 가열시간을 증대시켜 빌렛트 표면의 산화층을 크게하여 성형 후 제품의 기계적 성질을 저하시키는 원인이 된다. 지지체내에서 강화재의 불균일 현상은 재가열중 빌렛트 단면의 온도 변화에 크게 영향을 미친다.

본 연구에서는 재가열중 빌렛트 단면에 있어서 온도편차를 최소화하고, 고상율이 50~55% 범위 내에서 Thixo

forming이 가능한 재가열 조건을 제안한 것이다. 수직형 코일을 이용하여 빌렛트를 재가열할 때 빌렛트의 붕괴현상과 온도편차 등을 규명함으로써 Thixforming에 필요한 재가열 조건(가열조건, 온도 및 강화재의 함유량과의 관계)에 활용이 가능하도록 하였다.

2. 금속복합재료의 제조장치 및 방법

강화재를 지지체내에 균일하게 분산시키기 위해서는 일정한 온도를 가진 강화재를 지지체내에 정량적으로 주입하는 것이 중요하다. 일정온도를 가진 강화재가 지지체내에 주입될 때 지지체의 초정 α 의 크기는 균일분산에 영향을 크게 미치며 지지체의 온도제어가 신속히 이루어지면서 강제교반할 수 있는 장치가 필요하다. 저자가 복합재료를 제조하기 위하여 초기에 설계·제작한 장비는 강화재의 정량주입과 온도제어가 불가능하여 강화재의 균일분산과 교반 중 기공제어가 원활하지 못하였다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서 개발한 장비는 강화재의 정량주입과 정량주입시 강화재의 온도제어가 가능하도록 장비를 보완하여 복합재료의 제조에 이용하였다. 특히 강화재의 분산이 탕면에서 일어나지 않고 Fig.1에서 보여주는 바와 같이 도가니로의 밑 부분에서 분산되도록 하여 균일 분산이 되도록 하였다.

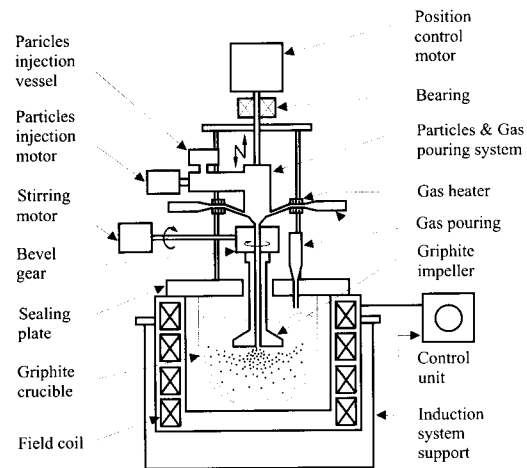


Fig. 1 Schematic diagram of fabrication equipment for particulates reinforced metal matrix composites

본 연구에서 사용한 복합재료는 Fig. 1에서 보여주는 장비를 이용하여 복합재료를 제조하였다. 기지재와 강화재를 각각 A357과 SiCp를 이용하였으며, 강화재의 초기 체적함유율은 10%와 20%의 조건에서 실험을 하였다.

3. 재가열 실험

3.1 재가열 실험 방법

재가열 실험은 50KW, 50Hz의 저주파 유도로를 이용하였으며, 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 동관의 보호를 위해 내열 실리콘 튜브로 제작된 코일은 코일의 동관 표면을 따라 전류가 흐르며 빌렛 지지대에 놓여진 소재에 전자기장을 형성하여 가열하고, 동관 내부를 따라 냉각수가 분사되어 소재의 가열 온도를 일정하게 유지시킨다.

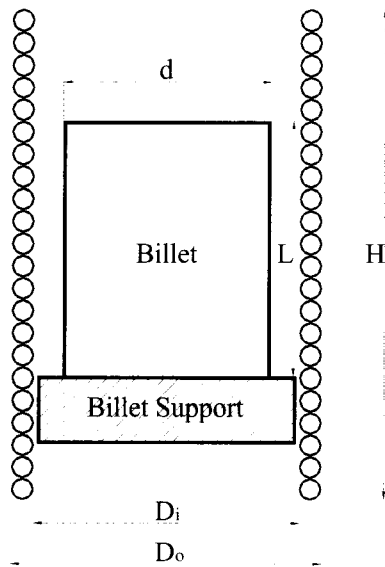


Fig. 2 Schematic diagram of coil size and billet dimensions for reheating process

소재를 가열하기 위한 코일은 기존의 제작된 코일을 이용하였으며, Table 1에 코일의 치수를 나타내었다.

저주파 유도로의 재가열 온도 제어는 $\phi 1.6\text{mm}$ 의 K type CA열전대를 Main부에 삽입하여 측정된 온도를 이용하여 제어하였으며, 소재 내부의 온도 측정은 각각 소재의 중앙부(a), 중간부(b) 및 표면부(c)의 재가열 온도를 측정하였다.

Table 1 Dimensions of induction heating coil for particulate reinforced metal matrix composites fabrication ($f=50\text{KHz}$)

Volume Fraction (V_f :%)	Billet Diameter (d:mm)	Coil Inner Diameter (D_i :mm)	Coil Wall Thickness (d_c :mm)	Coil Outer Diameter (D_o :mm)	Coil Length (H:mm)
0~20	60	84	7	98	160

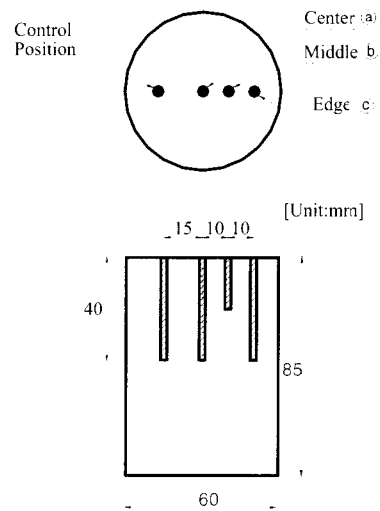


Fig. 3 Positions of thermocouple insertion for temperature measurement during reheating process

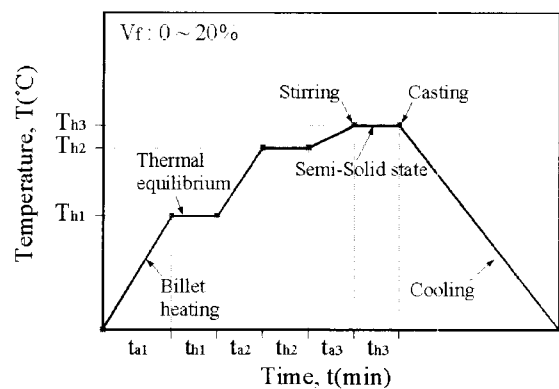


Fig. 4 Schematic diagram of induction heating condition for particulates reinforced metal matrix composites billets fabrication before controlling primary α -Al of A357 aluminium alloy

재가열 되는 소재의 온도 측정 부위를 Fig. 3에 나타내었다. 소재 전체의 온도 측정을 위해 반경 방향으로 3등분하여 $\phi 2.2\text{mm}$ 크기로 드릴링 가공하였다. 소재의 가열방식은 가열시간(t_a), 유지온도(T_h), 유지시간(t_b)을 조합한 3단 가열 방식을 채택하였으며, 저주파 유도로의 최대 출력(Q)은 강화재의 체적함유율에 관계없이 모든 경우에 대해서 5.5Kw로 고정하였다. 재가열중 빌렛 단면에서 균일한 온도분포를 얻기 위하여 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 다단 재가열 방법으로 가열실험을 하였다. 이때 빌렛가 형상을 유지하면서 기지재가 구상화조직이 나타나는 최대온도를 최종유지온도(T_{h3})로 정의하였다. 최대 출력(Q)을 일정하게 하여 강화재 체적함유율에 따른 3단 가열 시 금속복합재료 소재 내부의 온도 변화를 측정하였다. 최종 유지 온도(T_{h3})에 도달한 후 Table 2에서 제시한 바와 같이 1분 유지한 후($t_{b3}=1\text{분}$) 반응용 성형을 위하여 소재를 신속히 금형의 탕도로 이송하였다. Table 2는 강화재의 체적함유율에 따른 금속기지 복합재료의 재가열 조건을 나타낸 것이다.

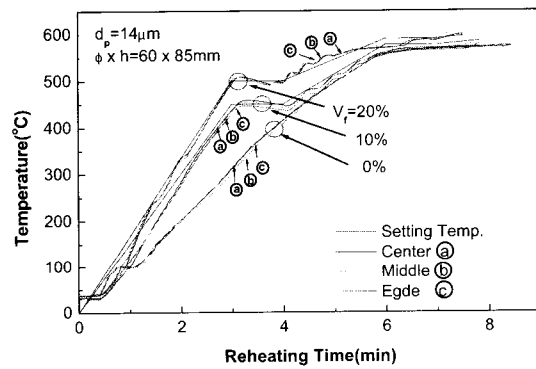
Table 2 Reheating conditions of particulate reinforced metal matrix composites for variation of volume fraction

Exp. Spe.	Particle Size (μm)	Volume Fraction (%)	Heating time t_a (min)			Heating Temp. T_h ($^{\circ}\text{C}$)			Holding Time t_b (min)		
			t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}	t_{b1}	t_{b2}	t_{b3}
SO	-	0	3	2	1	450	570	575	1	1	1
SS	14	10	3	2	1	450	570	580	1	1	1
LS	25	10	3	2	1	450	570	580	1	1	1
SL	14	20	3	2	1	400	585	601	1	1	1
LL	25	20	3	2	1	400	585	595	1	1	1

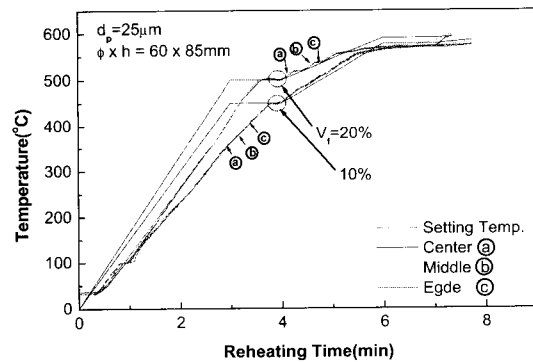
3.2 재가열 실험 고찰

Fig. 5는 Table 2에 나타낸 조건에 따라서 재가열 할 때의 금속기지 복합재료의 내부 온도 변화를 나타낸 것이다. 가열 시간(t_a), 유지 시간(t_b) 및 최대 출력(Q)이 강화재의 체적함유율에 관계없이 모두 같은 경우, 강화재의 함유율이 높을수록 빌렛의 내부 온도가 빨리 가열되는 경향이 관찰되었다. 이는 기지재의 열전도도($152\text{W/m}\cdot\text{K}$)¹²⁾가 강화재의 열전도도($106\text{W/m}\cdot\text{K}$)¹³⁾보다 상대적으로 큰 값을 가지지만 강화재의 체적함유율이 높아질수록 기지상의 체적함유율이 적어져 가열되는 소재의 열용량이 적어지기 때문에 재가열 온도가 상승하는 것으로 사료된다. 또한 세라믹과 금속간 결합, 즉 SiCp와 기

지상 간의 계면 접합에 있어서 불완전한 계면 접합이 이루어지기 때문에 접합부의 열저항이 높아져 소재 내부의 열전도도가 상승하거나 소재 내부에 잔류하는 기공에 의하여 재가열 온도가 빠르게 상승하는 것으로 사료된다. 강화재의 크기가 $25\mu\text{m}$ 인 경우에는 $14\mu\text{m}$ 의 재가열 경향과 같이 강화재의 체적함유율이 높을수록 재가열 온도의 상승이 빠르게 관찰되었다. 또한 최대 열량(Q)을 5.5Kw로 일정하게 유지하였기 때문에 0%의 경우에는 3단 가열 조건의 설정치를 따라가지 못하고 전체적으로 1단 가열되었다. 반면 강화재가 교반된 10%, 20%의 경우에는 3단 가열 조건을 따라 재가열 되었으나, 소재 내부의 재가열 온도가 최종 유지 온도(T_{h3})에 도달하자마자 성형을 위하여 금형 내부로 이송되었기 때문에 최종 가열 시간(t_{a3}) 상에서 재가열 공정이 완료되었다.



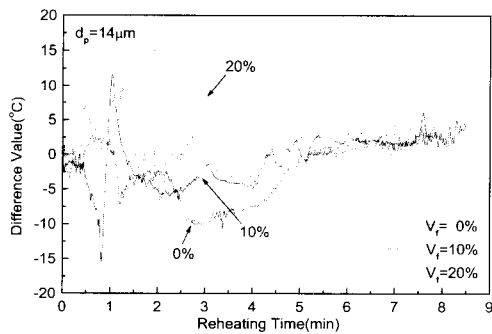
(a) $d_p = 14\mu\text{m}$ (Particle size)



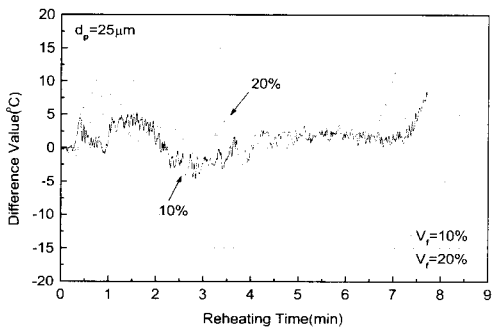
(b) $d_p = 25\mu\text{m}$ (particle size)

Fig. 5 Temperature-time curve during reheating process of particulates reinforced metal matrix composites

Fig. 6은 강화재의 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 금속복합재료의 중앙부(Fig. 3의㉓)와 표면부(Fig. 3의㉔)에서 재가열 온도 편차를 나타낸 것이다. 중앙부와 표면부의 온도 편차는 강화재의 함유율이 0%, 10%인 경우가 20%인 경우보다 적게 나타났다. 이는 금속복합재료의 강화재 분산 정도가 20%보다는 10%가 균일하게 분산되었음을 의미한다. $25\mu\text{m}$ 의 경우는 전체적으로 $14\mu\text{m}$ 에 비하여 온도 편차가 감소하였으며, 급형에 이송되기 직전의 온도편차는 10%의 경우 $\pm 7^\circ\text{C}$, 20%의 경우 $\pm 3^\circ\text{C}$ 를 보여준다. 또한 $14\mu\text{m}$, 20%의 경우 온도 편차 그래프는 재가열 시간이 4~6min 구간에서 온도 편차가 없는 0°C 선상에서 0%, 10%에 비해 빠르게 만나는 것을 볼 수 있다. 이는 강화재의 함량이 많을수록 재가열 온도가 급격히 상승하는 현상과 마찬가지로 소재의 단면부인 중앙부와 표면부에서도 열전도가 가장 빠르게 진행됨을 의미하며, 다음으로 10%, 0% 순으로 열전도가 진행됨을 알 수 있다.



(a) $d_p = 14\mu\text{m}$ (Particle size)

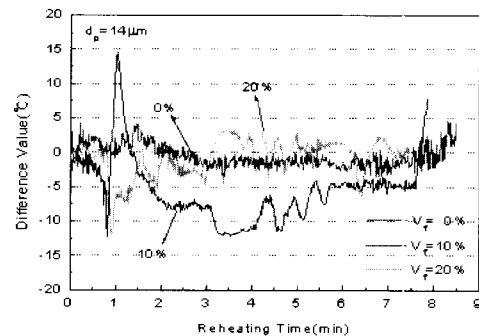


(b) $d_p = 25\mu\text{m}$ (Particle size)

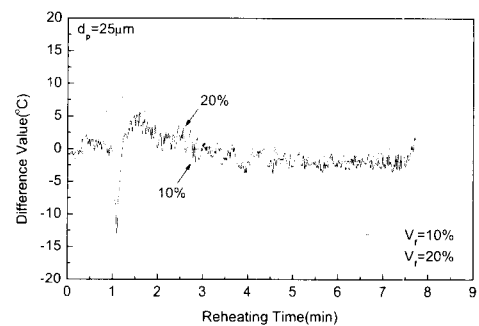
Fig. 6 Temperature difference between center and edge position during reheating process of particulates reinforced metal matrix composites

Fig. 7은 중앙부와 중간부의 재가열 온도 편차를 나타낸 것이다. 이 경우 Fig. 3의 중앙부와 표면부에서의 재

가열 온도 편차와 비교하여 강화재 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 경우 전체적으로 온도 편차는 강화재의 체적함유율이 0%, 20%가 적고 10%는 최대 12°C 의 온도 편차를 가진다. 또한 Fig. 6에서와 같이 20%의 경우 소재 상부와 중부 사이에 열전도가 가장 빠르게 진행되는 현상이 관찰되며, 이는 소재 높이 방향에 대해서 비교적 균일한 강화재의 분산이 이루어졌음을 의미한다. 반면 10%의 경우는 0%인 경우에 비하여 온도 편차를 회복하지 못하는데 이는 높이 방향으로 강화재의 비균일한 분산에 기인한 것으로 사료된다. 강화재 크기가 $25\mu\text{m}$ 인 경우에는 강화재의 체적함유율이 10%, 20%일 때 초기 2min 동안에는 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이상의 온도편차를 가지지만 2min 이후로는 $\pm 3^\circ\text{C}$ 의 편차로 줄어들었다. 이는 빌렛의 유도 가열시 발생하는 전자기장의 형성에 따른 가열 양상에 기인한 것으로 사료된다. 즉, 재가열 동안 소재 내부에서 발생하는 유도가열에 의한 온도 구배가 중앙부와 중간부에서 비교적 유사한 값을 가지기 때문이다.



(a) $d_p = 14\mu\text{m}$ (Particle size)



(b) $d_p = 25\mu\text{m}$ (particle size)

Fig. 7 Temperature difference between center and mid-edge position during reheating process of particulates reinforced metal matrix composites

또한 재가열 공정에 있어서 중요한 것은 유도가열 되는 소재의 양호한 구상화 조직의 분포 정도와 적절한 고상율(60~65%)을 갖는 범위에서 액상 유출에 의하여 재료손실이 적도록 재가열 온도(최종유지온도, T_{R3})를 설정하는 것이다. 이를 위해 재가열 온도에 따라 비강화된 소재와 강화재 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 소재에 대하여 미세조직 변화를 검토하였다.

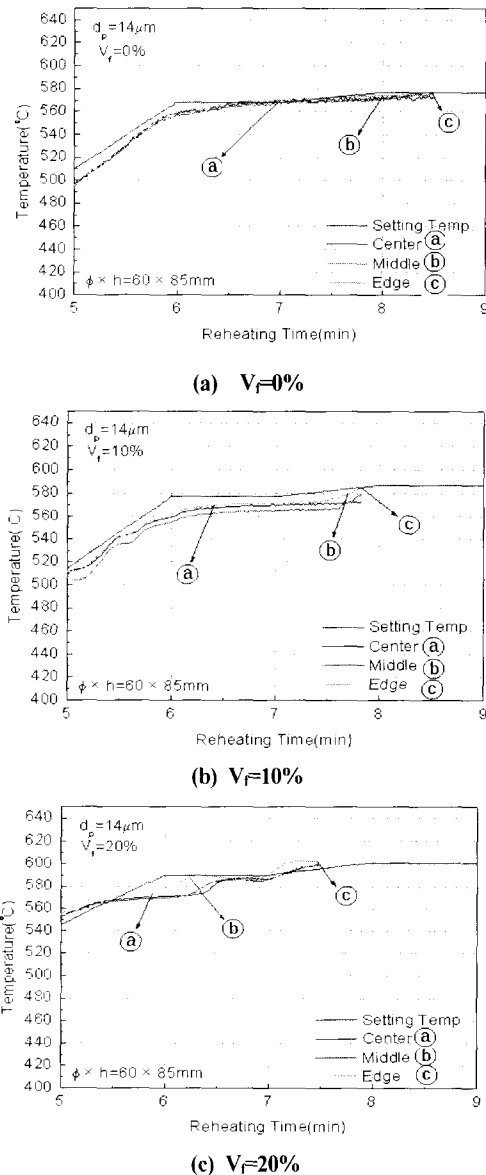
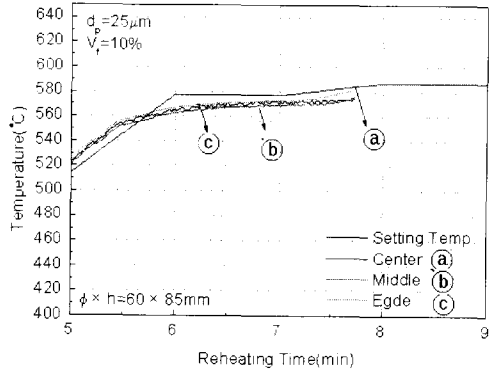


Fig. 8 Measured temperature-time curve after 5min during reheating process

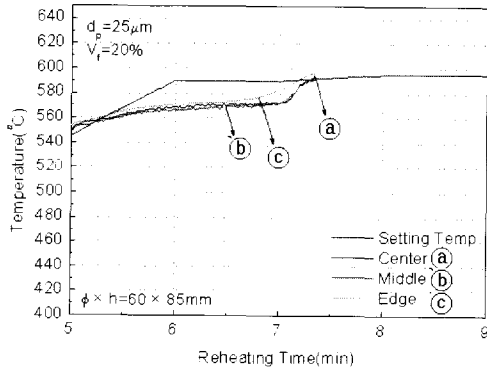
Fig. 8은 체적함유율이 각각 0%, 10%, 20%일 때 강화재 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 재가열 시간이 5min 이후의 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 8의 0%인 경우 Fig. 3의 열전대 위치 ①, ② 및 ③ 위치에서 재가열 최종유지온도(T_{R3})는 각각 570°C , 572°C 및 575°C 이며, 재료손실은 각각 재가열 최종유지온도(T_{R3})가 572°C , 575°C 일 때 3.47% 및 7.22%의 값을 가졌다. 한편 재가열되는 소재의 재료손실은 572°C 일 때가 575°C 보다 적으나, 가늘고 긴 강편을 이용하여 높이 방향으로 재가열된 소재를 절단했을 때는 575°C 로 재가열된 소재의 절단성이 양호하였다. 실제 반응용 성형에 있어서는 재가열된 소재를 다이 캐비티 탕구로 이송하는데 소요되는 이송시간과 소재를 잡는 기구와의 온도차로 인해서 소재의 온도는 하강하게 된다. 따라서 575°C 로 재가열된 경우가 572°C 로 재가열된 경우보다 거시적으로 성형성이 양호할 것으로 사료되었다. 재가열 최종유지온도(T_{R3})가 575°C 를 넘는 580°C 의 경우 다량의 액상이 자중에 의해 유출되었다.

강화재의 체적함유율이 0%의 경우와 같이 강화재의 크기가 $14\mu\text{m}$ 이고 체적함유율이 10%, 20%의 경우에도 최종유지온도(T_{R3})를 0%인 경우와 같은 방법으로 설정하였다. 이에 대하여 Fig. 8 (b)는 $V_f=10\%$ 일 때의 Fig. 3에서 표시한 열전대 위치, ①, ② 및 ③의 온도는 575°C , 580°C 및 585°C 이며, Fig. 8 (c)는 $V_f=20\%$ 일 때의 ①, ② 및 ③ 위치에서의 온도는 각각 575°C , 585°C 및 601°C 임을 알 수 있었다.

Fig. 9는 강화재의 크기가 $25\mu\text{m}$ 이고 체적함유율이 10%, 20%일 때 최종유지온도(T_{R3})의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8의 최종유지온도(T_{R3}) 설정과 유사한 방법으로 설정하였다. 즉, Fig. 9의 (a) $V_f=10\%$ 일 때, 580°C 로, (b) $V_f=20\%$ 일 때, 596°C 로 설정하였으며, 강화재 크기가 $14\mu\text{m}$ 의 최종유지온도(T_{R3})와 비교하여 강화재의 체적함유율이 증가할수록 최종유지온도(T_{R3})가 증가하였으며, 강화재의 평균 입자 크기에 따라서는 비교적 차이가 없었다. 이는 Lim⁽¹¹⁾의 보고와 유사한 경향을 가진다. 즉, 20Kw 저주파 유도가열 장치를 사용해 재가열할 경우 재가열 최종유지온도(T_{R3} , ①부위)에서 강화재의 평균 입자 크기에 따른 재가열 온도는 차이가 없으나, 체적함유율의 증가에 따라 시험편 단면에서의 온도편차가 증가되었다고 보고하였다. 이 때 비강화된 알루미늄 합금(A357)을 재가열하는 경우의 온도편차는 $\pm(1.5\sim 2)^\circ\text{C}$, 체적함유율이 15%로 강화된 금속복합재료의 경우 온도편차는 $\pm(3\sim 4)^\circ\text{C}$ 로 보고하였다.



(d) $V_f=10\%$



(e) $V_f=20\%$

Fig. 9 Measured temperature-time curve after 5min during reheating process

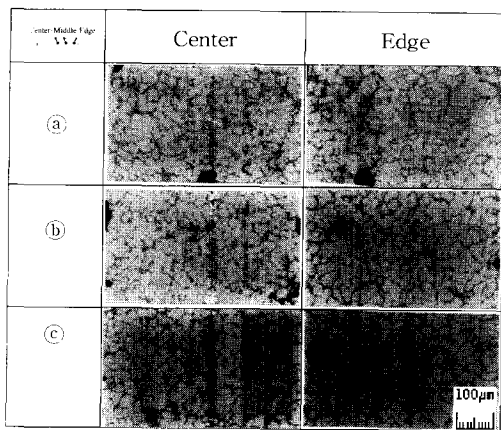


Fig. 10 Microstructure of matrix alloy fabricated by mechanical stirring after reheating process (a) 570 °C, (b) 572 °C, (c) 575 °C

Fig. 10은 Fig. 8 (a)의 (a), (b) 및 (c)의 재가열 온도에 따른 미세 조직을 나타내었다. Fig. 10 (a)인 570°C일 때는 공정 조직이 용해되기 시작하여 초정 조직이 점차 구형화 되기 시작하는 시점으로, 소재의 거시적 변화에서도 액상 유출이 없고 비교적 초기 소재의 형상을 유지하였다. 재가열 온도가 572°C인 Fig. 10 (b)의 경우에는 표면부에서는 공정 조직의 용해가 진행되었으나, 중앙부에서는 아직 완전 용해가 진행되지 않았음이 관찰되었으며, 소재의 거시적 변화에서는 표면부위에서 용융되어 액상이 자중에 의하여 중력 방향으로 흘러내리는 Elephant foot effect가 발생되기 시작하였다. Fig. 10 (c)의 경우에는 빌렛의 중앙부와 표면부에서 공정 조직이 모두 용해되어 구상화 조직의 초정이 관찰되었다.

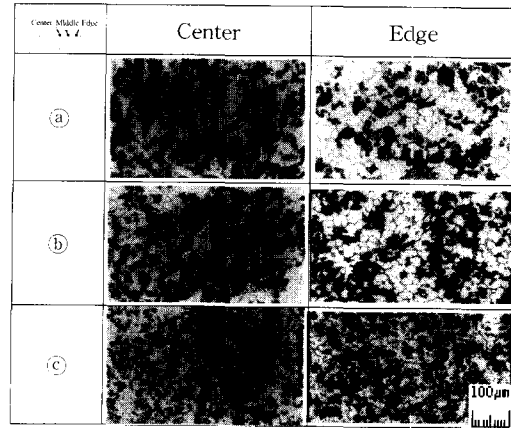


Fig. 11 Microstructure of metal matrix composites of particle size 14 μm and V_f 10% fabricated by mechanical stirring after reheating process (a) 575 °C (b) 580 °C (c) 585 °C

Fig. 11은 SS(14 μm , 10%)인 소재의 재가열시 미세조직을 나타낸 것이다. 강화재의 함유율에 따라서 고상율이 증가하므로 비교적 재가열 온도가 5°C 상승하여 580°C인 Fig. 11 (b)부위에서 양호한 조직을 가짐을 관찰할 수 있으며, 소재의 거시적인 변화는 0%의 소재와 같은 경향을 가졌다.

Fig. 12는 SL(14 μm , 20%)인 소재의 재가열 시의 미세조직을 나타낸 것이다. 고상율이 비교적 높기 때문에 Fig. 12 (c)의 601°C인 경우에 대하여 재가열 온도를 설정하였다. 이는 재가열 온도에 따른 기지재의 양호한 구상화 조직보다는 소재의 거시적 변화에 의존하여 재가열 온도를 설정한 것이다. 따라서 강화재의 체적함유율이 20%인 경우는 강화재의 평균 입자 크기에 관계없이 금속복합재료의 재가열 최종유지온도(T_{H3})가 설정되었다.

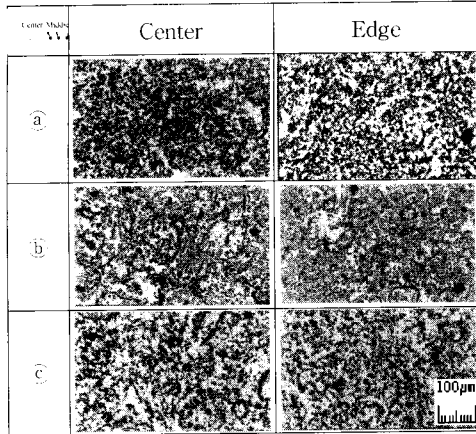


Fig. 12 Microstructure of metal matrix composites of p-art icle size $14\mu\text{m}$ and V_f 20 % fabricated by mechanical stirring after reheating process (a) 575°C (b) 585°C (c) 601°C)

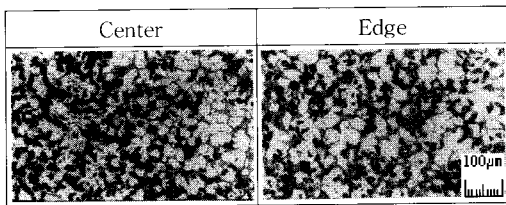


Fig. 13 Microstructure of metal matrix composites of particle size $25\mu\text{m}$ and V_f 10% fabricated by mechanical stirring after reheating process (580°C)

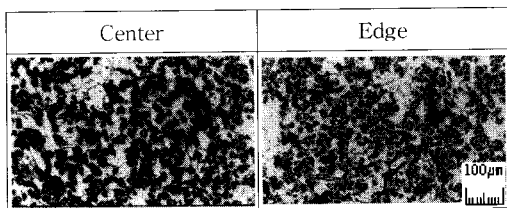


Fig. 14 Microstructure of metal matrix composites of particle size $25\mu\text{m}$ and V_f 20% fabricated by mechanical stirring after reheating process (596°C)

Fig. 13과 Fig. 14는 강화재의 크기가 $25\mu\text{m}$ 일 때, Fig. 9 (d), (e)에 나타난 재가열 온도 지점(②)에서 소재의 미세 조직을 나타낸 것이다.

강화재의 체적함유율이 높을수록 강화재의 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 경우와 유사하게 재가열 온도가 상승하였다. 10%와 20%일 때, 재가열 설정 온도는 각각 580°C , 596°C 로

설정하였다. 이와같이 강화재의 평균 입자 크기가 $14\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$ 일 때 강화재의 체적함유율이 증가할수록 재가열 온도가 증가되는 경향을 보였다.

4. 결 론

기계식 교반법과 전자기식 교반법을 동시에 이용하여 제조한 금속복합재료의 Thixoforming을 위한 재가열 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 강화재의 평균입자의 크기가 $14\mu\text{m}$ 이고 체적함유율이 10%, 20%일 때 Elephant foot effect를 무시할 수 있는 재가열의 최종단계의 온도를 각각 580°C , 601°C 임을 알 수 있었다.

(2) 강화재의 평균입자의 크기가 $25\mu\text{m}$ 이고 체적함유율이 0%, 10%, 20%일 때 빌렛이 초기형상을 유지하는 재가열의 최종온도는 각각 575°C , 580°C , 596°C 이며, 기지재의 최종 재가열온도는 복합재료에 비하여 $5\sim 26^\circ\text{C}$ 정도 낮게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 3단 재가열의 경우 강화재의 함유량이 0~20%일 때 전체 재가열시간은 9분 정도 소요되었으며, 강화재의 체적함유율에 무관함을 알 수 있었다.

(4) 복합교반법에 의하여 균일하게 분산된 복합재료를 재가열하는 도중 소재단면에 있어서 온도차이는 강화재의 함유량이 클수록 감소함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1998년도 학술진흥재단의 지원(과제번호 : 1998-001-E00265)과 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소의 지원에 의하여 수행된 연구의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) C.G. Kang, G.S. Ku, "An Experimental investigation on limit and the mechanical properties of Al_2O_3 short fiber reinforce metal composites fabrication by squeeze casting", J. of Composites Materials 29-4, 1995, pp.444~462.
- (2) 강충길, 구광서, 박봉수, "용탕단조법에 의한 금속복합재료의 제조공정에 있어서 예비성형체의 변형과 그 방지책에 관한 연구", 한국주조공학회, 14-3, 1994, pp.331~338.
- (3) J. A. Cornie, H. K. Moon, M. C. Flemings, "A

- Review of Semi-Solid Processing of Al Matrix Composites", Proc. of an International Conf. on Fabrication of Particulates Reinforced Metal Matrix Composites, ASM International, Montréal, Québec, Canada, 17-29, Sep., 1990, pp.63~78.
- (4) J. Hashim, L. Looney and M. S. J. Hashmi, "Metal Matrix Composites : production by the stir casting method", J. of Materials Processing Tech. 92-93, 1999.
- (5) I. Jin, D. J. Lloyd, "Solidification of Sic Particulate Reinforced Al-Si Alloy Composites", Proc. of an International Conf. on Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites, ASM International, Montréal, Québec, Canada, 17-29, Sept., 1990, pp.47~52.
- (6) Y. Morita, K. Ozawa, Y. Ando, S. Yahata and A. Nanba, "Compocasting conditions and mechanical properties of aluminum matrix composite reinforced by SiC particles", Proc. of 3th. Int. Conf. on semi-solid processing of alloy and composites, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Tokyo, Japan, June 13-15, 1994, pp.429~439.
- (7) B. C. Pai, R. M. Pillai and K. G. Satyanarayana, "Semi-Solid Processed Aluminium Alloy Matrix Composites", Proc. of 5th. Int. Conf. on semi-solid alloys and composites, Golden. Colorado, June 23-25, 1998, pp.423~430.
- (8) Jea-Chul Lee, Ji-Young Byun, Chang-Seok Oh and Ho-In Lee, "Alloy design of Thixoformable Wrought SiC/Al Alloy Composites(in Korean)", J. of the Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 35, No.11, 1997, pp.1529~1539.
- (9) H.K. Jung, C.G. Kang, "An induction heating process with coil design and solutions avoiding coarsening phenomena of Al 6% SiCu 0.3% Mg alloy for thixoforming", Metallurgical and Materials Transaction 30A November, 1999, pp.2967~2977.
- (10) H.K. Jung, C.G. Kang and Y.H. Moon, "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 2000, pp.12~23.
- (11) 임해정, 강충길, 조형호, "전자기식 교반법을 이용한 입자강화형 금속복합재료의 제조 및 Thixoforming을 위한 재가열 공정", 한국소성가공학회지 제9권 제15호, 2000년, pp.494~503.
- (12) Metal Handbook 3th Edition, Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol.2-1, 1996, p.166.
- (13) Sales Technical Bulletin, Showa Denko, A-32-2
- (14) H.J. Lim, C.G. Kang and H.H. Jo, "Fabrication of reinforce metal matrix composites by electro-magnetic stirring and reheating process for thixoforming (in Korean)", Transactions of Materials Processing, Vol.9, No.5, 2000, pp.494~503.