

반용융 단조를 위한 복합재료의 수직형 고주파 유도가열

이동건*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 허재찬***(부산대 대학원 정밀기계공학과),
강충길(부산대 기계공학과)

Induction Heating of Vertical Type for Semi-Solid Forging with Metal Matrix Composites

D.G. Lee(Mech. & Precision Eng. Dept., PNU), J.C. Heo(Mech. & Precision Eng. Dept., PNU), C.G. Kang(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

In part forming process of metal matrix composites, the die casting and squeeze casting process are limited the size and dimension in term of final parts without machining. 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.

Key Words : Metal matrix composites(금속복합재료), Thixoforming(탁소오포오밍), Reheating(재가열)

1. 서론

금속복합재료의 반용융성형을 위해서는 재가열에 관한 연구가 필수적이다. 현재까지의 알루미늄 재료의 재가열 방법은 저주파코일을 이용한 유도가열방식인데, 이러한 방식에서 코일의 크기, 소재와 코일 내경의 가열온도와 시간의 데이터 등이 고려되어 성형시 빌렛의 온도가 균일하게 되도록 가열하는 방법 등이 연구되었다[1][2]. 현재 까지 알루미늄 재료에 대한 재가열 연구에 비해서, 금속 복합재료에 대한 연구는 아직 보고되고 있지 않다.

저자는 금속복합재료의 재가열을 위하여 코일 설계방법을 제안하여 코일을 제작하였다[3]. 실험을 통하여 재가열중 빌렛 단면에 있어서 온도편차를 최소화하고, 고상을 약 50~55% 범위 내에서 Thixoforming이 가능한 재가열 조건을 제안한 것이다. 이론적으로 구한 재가열온도와 고상을 사이의 관계를 가열 중 강화재의 변화에 따른 빌렛의 온도변화를 측정한 결과 가열시간에 따라 복합재료 단면에 있어서 온도변화가 불규칙한 결과를 보여주었다.

본 연구에서는 수직형 코일로 빌렛을 재가열할 때 빌

렛의 붕괴와 온도편차 등을 규명함으로써 Thixoforming에 필요한 재가열 조건에 활용이 가능하도록 하였다.

2. 금속복합재료의 제조장치 및 방법

장화재의 균일한 분산을 위해서 장화재가 일정 온도를 가진 채, 정량적으로 투입되는 것이 중요하다. 기지재의 초정 a 의 크기가 균일분산에 큰 영향을 끼치므로, 일정온도의 장화재가 정량 투입되고, 기지재의 온도제어가 신속히 이루어지면서 강재교반할 수 있는 장치가 필요하다. 저자가 복합재료를 제조하기 위하여 제작한 장비는 강화재의 정량주입과 온도제어가 불가능하여 강화재의 균일분산과 기공제어가 원활하지 못하였다[3]. 따라서 본 연구에서는 정량주입과 온도제어가 가능하도록 장비를 보완하여 복합재료의 제조에 이용하였다. 특히 강화재의 분산이 Fig.1에서 보여주는 바와 같이 도가니로의 밀 부분에서 분산되도록 하여 균일 분산이 되도록 하였다.

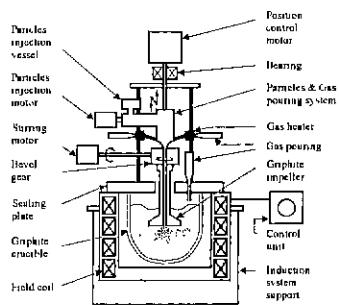


Fig. 1 Schematic diagram of fabrication equipment for particulates reinforced metal matrix composites

본 연구에서 사용한 복합재료는 기지재와 강화재를 각각 A357과 SiCp로 제조되었다. 여기서, 복합재료의 강화재의 체적함유율은 10%와 20%의 조건에서 실험을 하였다.

3. 재가열 실험

3.1 재가열 실험 방법

재가열 실험은 50kW, 50Hz의 저주파 유도로를 이용하였다. 소재를 가열하기 위한 코일은 Table.1에 그 치수를 나타내었다.

저주파 유도로의 재가열 온도 제어는 K-type CA 열전대를 Main부에 삽입하여 측정된 온도로 제어하였으며, 소재 내부의 온도 측정은 각각 소재의 중앙부(Ⓐ), 중간부(Ⓑ) 및 표면부(Ⓒ)에서 이루어졌다.

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

Volume Fraction ($V_r \%$)	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

Table.2는 강화재의 체적함유율에 따른 금속기지 복합재료의 재가열 조건을 나타낸 것이다.

3.2 재가열 실험 고찰

다른 조건을 일정하게 하고, Table.2에 나타낸 재가열 조건에 따라 실험한 결과, Fig.2에서 보는 바와 같이 강화재의 함유율이 높을수록 빌렛의 내부 온도가 빨리 가열되는 경향이 관찰되었다. 이는 기지재의 열전도도($152\text{W/m}\cdot\text{K}$)[4]가 강화재의 열전도도($106\text{W/m}\cdot\text{K}$)[5]보다 상대적으로 큰 값을 가지지만 강화재의 체적함유율이 높아질수록 소재의 열용량이 적어지기 때문에 재가열 온도가 상승

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

Exp Spe	Particle Size (μm)	Volume Fraction (%)	Heating time			Heating Temp T _h (°C)	Holding Time		
			t _a (min)	t _b (min)	t _c (min)		t _{h1} (min)	t _{h2} (min)	t _{h3} (min)
SO	-	0	3	2	1	450	570	575	1
SS	13	10	3	2	1	450	570	580	1
LS	25	10	3	2	1	450	570	580	1
SL	14	20	3	2	1	400	585	601	1
LL	25	20	3	2	1	400	585	595	1

하는 것으로 사료된다. 또한 SiCp와 기지상 간에 불완전한 계면 접합이 이루어지기 때문에 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. 일정한 열량 하에서 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 유지온도(T_{h3})에 도달하자마자 성형을 위하여 금형 내부로 이송되었기 때문에 최종 가열 시간(t_{h3}) 장에서 재가열 공정이 끝나게 되었다.

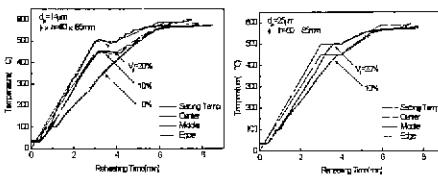


Fig. 2 Temperature-time curve during reheating process of paticulates reinforced metal matrix composites

Fig.3은 강화재의 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 금속복합재료의 중앙부에서 재가열 온도 편차를 나타낸 것이다. 이를 통해 금속복합재료의 강화재 분산 정도가 20%보다는 10%가 균일하게 분산되었음을 알 수 있다. $25\mu\text{m}$ 의 경우는 전체적으로 $14\mu\text{m}$ 에 비하여 온도 편차가 감소하였으며, $14\mu\text{m}$, 20%의 경우 온도 편차 그래프는 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.

Fig.4은 중앙부와 중간부의 재가열 온도 편차를 나타낸 것이다. 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.2에서와 같이 20%

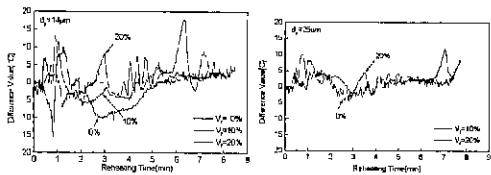


Fig. 3 Temperature difference between center and edge position during reheating process of paticulates reinforced metal matrix composites

의 경우 소재 상부와 중부 사이에 열전도가 가장 빠르게 진행되는 현상이 관찰되며, 이는 소재 높이 방향에 대해서 비교적 균일한 강화제의 분산이 이루어졌음을 의미한다. 반면 10%의 경우는 0%인 경우에 비하여 온도 편차를 회복하지 못하는데 이는 높이 방향으로 강화제의 비균일 분산에 기인한 것으로 사료된다.

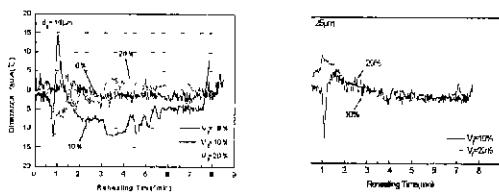


Fig. 4 Temperature difference between center and middle position during reheating process of paticulates reinforced metal matrix composites

또한 재가열 공정에 있어서 중요한 것은 유도가열 되는 소재의 양호한 구상화 조직의 분포 정도와 적정한 고상을 (60~65%)을 갖는 범위에서 액상 유출에 의하여 재료손실이 적도록 재가열 온도(최종유지온도, T_{h3})를 설정하는 것이다. 이를 위해 재가열 온도에 따라 비강화된 소재와 강화제 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 소재에 대하여 미세조직 변화를 검토하였다.

한편, 체적 함유율이 각각 0%, 10%, 20%일 때 강화제 크기가 $14\mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 재가열 시간이 5min 이후의 온도분포는 0%인 경우 중심, 중간, 끝부분에서 재가열 최종유지온도(T_{h3})는 각각 570°C , 572°C 및 575°C 이며, 재료손실은 각각 재가열 최종유지온도(T_{h3})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 결단했을 때는 575°C 로 재가열된 소재의 절단성이 양호하였다. 실제 반용융 성형에 있어서는 재가열된 소재를 다이캐비티 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.

강화제의 체적함유율이 0%의 경우와 같이 강화제의 크기가 $14\mu\text{m}$ 이고 체적함유율이 10%, 20%의 경우에도 최종유지온도(T_{h3})를 0%인 경우와 같은 방법으로 설정하였다. 이에 대하여 $V_f=10\%$ 일 때의 중심, 중간, 끝부분의 온도는 575°C , 580°C 및 585°C 이며, $V_f=20\%$ 일 때의 각 부위의 온도는 각각 575°C , 585°C 및 601°C 임을 알 수 있었다.

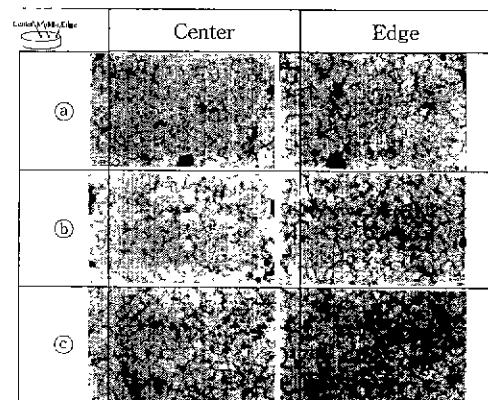


Fig. 5 Microstructure of matrix alloy fabricated by mechanical stirring after reheating process
ⓐ 570°C , ⓑ 572°C , ⓒ 575°C

Fig.5은 Fig.5 (a)의 ⓑ, ⓑ 및 ⓒ의 재가열 온도에 따른 미세 조직을 나타내었다. Fig.7 ⓑ인 570°C 일 때는 공정 조직이 용해되기 시작하여 초장 조직이 점차 구형화되기 시작하는 시점으로, 비교적 초기 소재의 형상을 유지하였다. 재가열 온도가 572°C 인 경우에는 표면부에서는 공정 조직의 용해가 진행되었으나, 중앙부에서는 아직 완전 용해가 진행되지 않았음이 관찰되어졌으며, 소재의 거시적 변화에서는 표면부위에서 용융되어 Elephant foot effect가 발생되기 시작하였다. 빌렛의 중앙부와 표면부에서 공정 조직이 모두 용해되어 구상화 조직의 초점이 관찰되었다.

Fig.6은 SS($14\mu\text{m}$, 10%)인 소재의 재가열 시의 미세조직을 나타낸 것이다. 강화제의 함유율에 따라서 고상율이 증가하므로 비교적 재가열 온도가 5°C 상승하여 양호한 조직을 가짐을 관찰할 수 있으며, 소재의 거시적인 변화는 0%의 소재와 같은 경향을 가졌다.

Fig.7는 SL($14\mu\text{m}$, 20%)인 소재의 재가열 시의 미세조직을 나타낸 것이다. 고상율이 비교적 높기 때문에 Fig.7 ⓒ의 601°C 인 경우에 대하여 재가열 온도를 설정하였다. 따라서 강화제의 체적함유율이 20%인 경우는 강화제의 평균 입자 크기에 관계없이 금속복합재료의 재가열 최종유지온도(T_{h3})가 설정되었다.

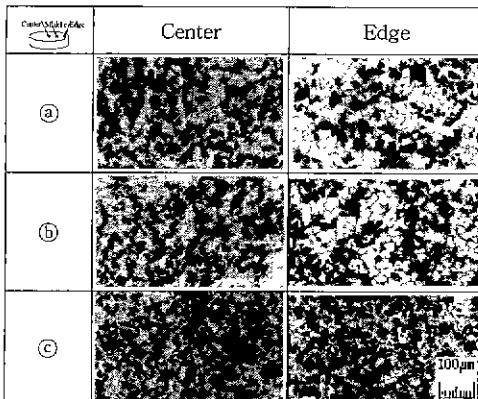


Fig. 6 Microstructure of metal matrix composites of particle size $14\mu\text{m}$ and V_f 10% fabricated by mechanical stirring after reheating process
(a) 575°C (b) 580°C (c) 585°C

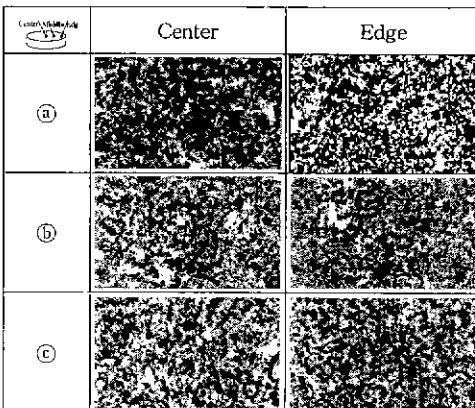


Fig.7 Microstructure of metal matrix composites of particle size $14\mu\text{m}$ and V_f 20% fabricated by mechanical stirring after reheating process
(a) 575°C (b) 585°C (c) 601°C

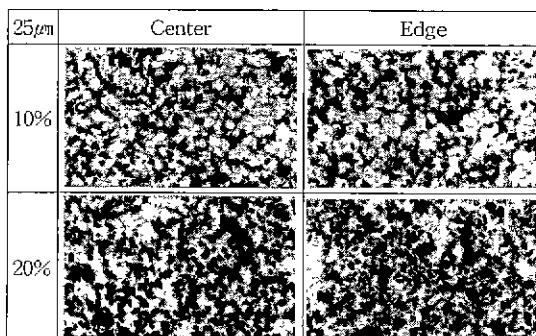


Fig. 8 Microstructure of metal matrix composites of particle size $25\mu\text{m}$ and V_f 10, 20% fabricated by mechanical stirring after reheating process
(580°C, 596°C)

Fig.8는 강화재의 크기가 $25\mu\text{m}$ 일 때, 재가열 온도 지점에서 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°C로 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 금속복합재료를 이용하여 Thixoforming을 할 수 있는 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°C임을 알 수 있었다.

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

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

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) H.K. Jung, C.G. Kang and YH 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
- (3) 임해정, 강충길, 조형호, "전자기식 교반법을 이용한 입자강화형 금속복합재료의 제조 및 Thixoforming을 위한 재가열 공정", 한국소성가공학회지 제9권 제15호, 2000년, pp.494~503
- (4) Metal Handbook 3rd Edition, Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol 2-1, 1996, pp.166
- (5) Sales Technical Bulletin, Showa Denko, A-32-2