論 文

Thixoforming을 위한 Al-7%Si-0.3%Mg 합금의 유도 가열 조건이 구상화 조직에 미치는 영향

정홍규 · 강충길

Effect of Induction Heating Conditions on Globular Microstructure of Al-7%Si-0.3%Mg Alloy for Thixoforming

Hong-Kyu Jung and Chung-Gil Kang

Abstract

The optimal reheating conditions to apply the thixoforging and semi-solid die casting process were investigated by changing the reheating time, the holding time, the reheating temperatures, the capacity of the induction heating system, and the adiabatic material size. In the case of solid fraction fs=50% (for semi-solid die casting), the microstructure of SSM (specimen size:d76×*l*90) at the condition of the first elevating time of 4 min, holding time of 1 min and holding temperature of 350°C, the second elevating time of 3 min, holding time of 3 min and holding temperature of 575°C, the third elevating time of 1 min, holding time of 2 min and holding temperature of 584°C, capacity of Q=8.398KW is obtained with globular microstructure and finest. In addition, in the case of solid fraction fs=55% (for thixoforging), the SSM (specimen size:d76×*l*90) at the condition of the first elevating time of 4 min, holding time of 1 min and holding temperature of 350°C, the second elevating time of 3 min, holding time of 3 min and holding temperature of 570°C, the third elevating time of 1 min, holding time of 2 min and holding temperature of 576°C, capacity of Q=12.04KW is obtained with the finest globular microstructure. We saw that the most important factor in a three-step reheating process is the final holding time. (Received May 22, 1998)

1. 서 론

고체와 액체가 공존하는 반용융 성형공정에 의하여 최종 부품을 생산하기 위해서는 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 조건의 설정이 매우 중요하다. 반용융 소재의 재가열 공정에 관한 연구 동향으로써 Dantzig [1]는 빌렛의 유도 가열에 의한 온도 분포에 관한 연구에서 솔레노이드 코일과 채널 코일을 사용하여 계산된 온도와 실험 온도가 상당히 일치함을 보였다. Hirt [2]는 온도에 따른 열적, 전기적 물성치와 대류와 복사에 의한 표면 열전달을 정확히 파악 한다면 해석한 온도와 실험한 온도가 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것이라고 하였다. Young[3]은 단위 시간, 단위 kg당 1 KW의 출력으로 원형 컨베이어에 장착된 각각의 유도로에서 다단 재가열을 하였다. Tims[4]는 상용코드인 ANSYS를 이용하여, 유도 가열 공정의 온도 분포를 해석하였다. Kapranos[5]는 공구강과 같은 용융점이 높은 소재에 대하여 가열, 전도공정 및 전원 차단 단계에서 5점의 측정온도를 이론치와 비교하였다. Kahrmann[6]은 유도 가열로에서 d×*l*=75×150 (mm)의 시편을 590±5°C에서 300~350초 동안 재가열 실험을 하였으나 구상화의 정도를 정확히 파악하지 못하였다. 강 등[7]은 반용융 소재의 크기가 각각 d×*l*=39×85(mm), d×*l*=76×60(mm)인 소재를 반용융 다이캐스팅 및 단조 공정에 응용하기 위하여 최적 재가열 조건을 실험적으로 구하였다.

재가열한 빌렛의 이송 및 취급은 반용융 성형공정에서 빌렛의 온도 저하 방지 및 형상 유지의 측면에서 고려하여야 할 중요한 요소이다. 독일 EFU의 경우는 네 개의 유도 코일을 이용하여 단위 시간당 직경 100 mm와 길이 250 mm에 이르는 빌렛을 25개까지 생산할 수 있는 설비를 구축하여 자동 이송 장치에 의하여 소재를 금형에 이송하고 있다[8]. Clauser등은 7자유도를 가진 로보트를 이용하여, 재가열 공정 전, 후에 있

부산대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

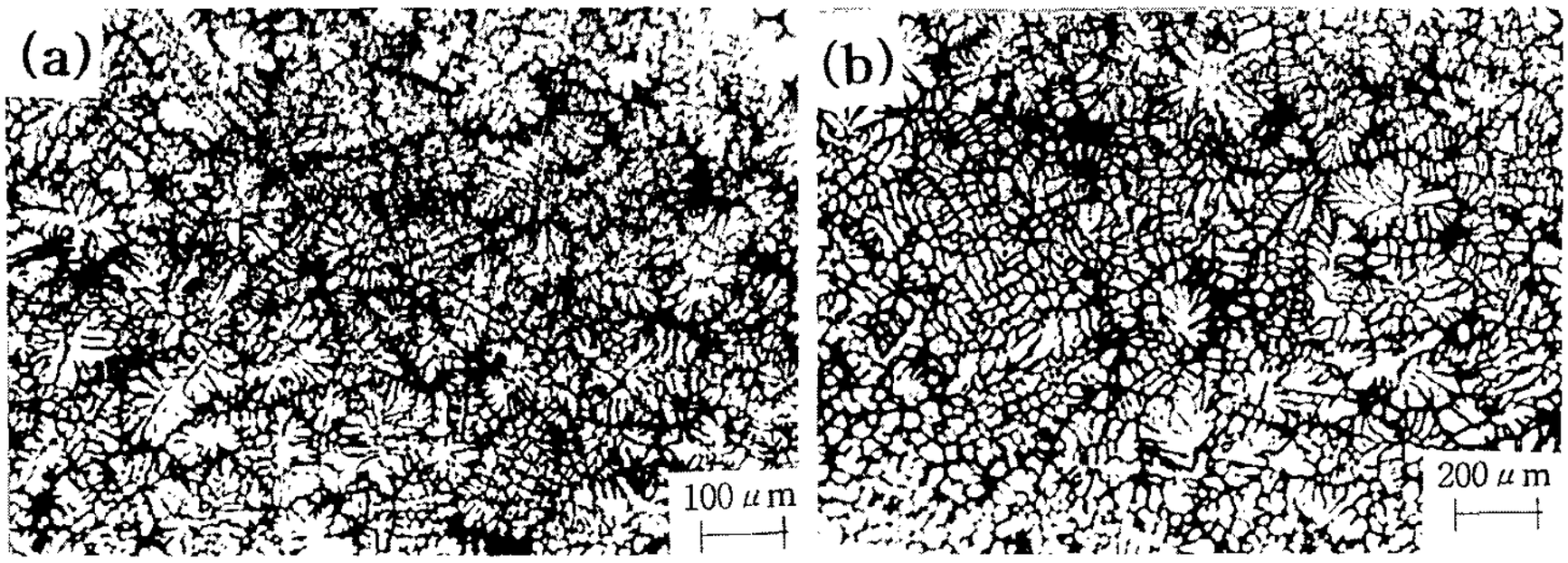


Fig. 1. Microstructure of raw A356 AL-THIX.

어서 빌렛의 표면이 그립에 고착하는 것을 방지하고 재현성을 확보할 수 있는 연구를 진행 중에 있다[9]. 반용융 소재의 다이캐스팅 및 단조 공정에 필요한 재가열 시간, 시편의 크기 및 가열 온도가 빌렛의 미세조직에 미치는 영향 등을 종합적으로 관찰한 결과는 아직 발표되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 반용융 다이캐스팅 및 단조 공정에서 절대적으로 필요한 소재의 재가열 조건이 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재가열 시간, 재가열 온도, 재가열 유지시간, 단열재의 크기 및 유도로의 출력 등을 변수로 하여 조직의 구상화 정도를 조사하였다. 또한, 재가열시 빌렛의 온도 구배를 줄일 수 있고, 구상화된 조직을 얻을 수 있는 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 코일을 제작하였으며, 실험을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하였다.

2.1 유도 가열의 특징

유도가열로는 기존의 전기로에 비해 빌렛을 가열하는 시간이 짧으므로, 산화막과 금형수명 단축을 유발하는 스케일링(Scaling)이 생성되는 시간을 줄일수 있다는 장점이 있다. 기존의 전기로에서 3~4%에 이르는 스케일링양을 유도가열 방식을 이용함으로써 0.5%로 줄일수 있다[10]. 유도가열을 이용하여 소재를 가열할 경우 시간과 온도의 관계를 정확히 제어하여야 시편 단면에서 균일한 온도를 얻을 수 있다. Thixoforming을 위해서는 초기 공정온도 즉, 초기 고상율이 반용융 가공 공정의 성패를 좌우하는 만큼 온도제어가 용이한 유도가열 방법이 필수적이다.

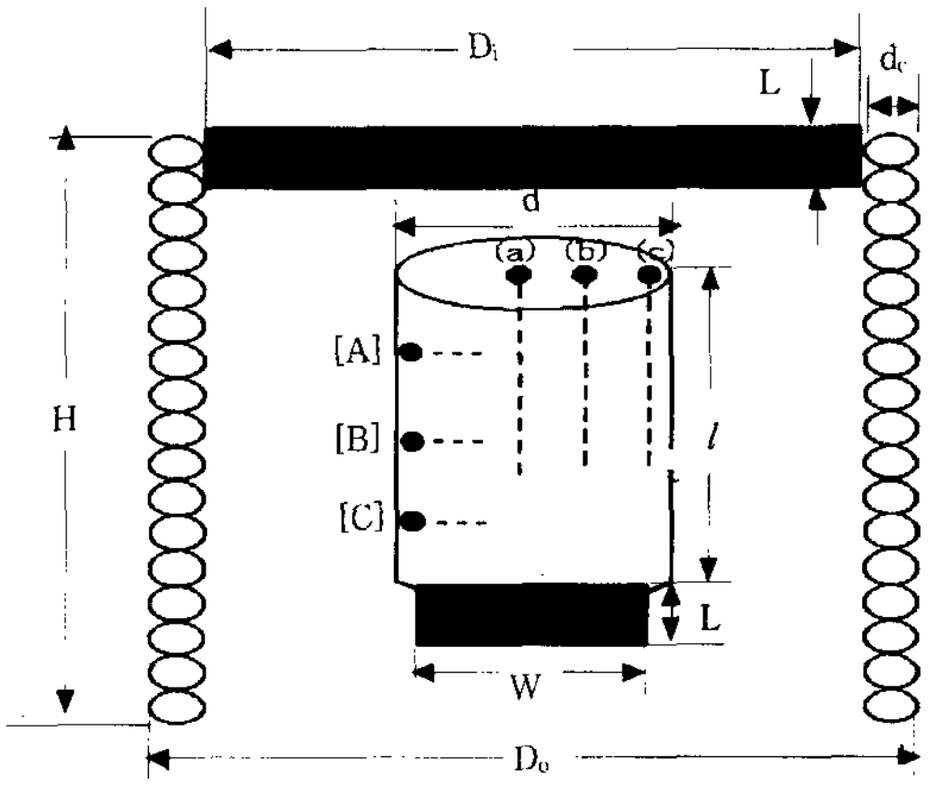
2.2 코일 설계

균일 재가열을 위하여 본 연구에서는 Fig. 2에서 표시한 바와 같이 유도 가열 장치의 최적 코일 길이 H와 코일의 내경 Di를 다음과 같이 설계하였다.

유도 가열시 열손실중에서 중요 부분인 표면의 복사 손실을 고려하기 위하여, 이상화된 전력밀도 P_s는 빌렛의 반지름 $\frac{d}{2}$와 소재의 유한 전류 침투 깊이 δ_F의 비($d/2\delta_F$)에 의해서 수정되어진 실제 전력밀도 P_a로 표시되어야 한다.

$$\delta_F = \sqrt{\frac{2\rho_a}{\mu\omega}} \tag{1}$$

$$P_a = \frac{P_s\,(\theta_s - \theta_c)_{idealized}}{\theta_s - \theta_c} = \frac{6.46\,\kappa(\theta_s - \theta_c)}{d} \tag{2}$$



[A] [B] [C] : Thermocouple positions
(a) (b) (c) : ″

D_o(mm)	D_i(mm)	d(mm)	H(mm)	l(mm)	d_c(mm)	L(mm)	W(mm)
120	100	76	120	90	10	19, 20	53, 50

Fig. 2. Schematic diagram of induction heating of cylindrical specimen.

여기서 $\frac{\theta_s-\theta_c}{(\theta_s-\theta_c)_{idealized}}=k$는 빌렛의 반지름 $\frac{d}{2}$와 소재의 유한 침투 깊이 δ_F의 비(d/2 δ_F)로 부터 구할 수 있다[10].

여기서 ρ_a, μ, ω, κ, $\theta_s-\theta_c$는 각각 A356의 저항도, 자기 상수, 각 주파수, 열전도도, 표면과 중심부의 최대 온도차를 나타낸다.

단위 시간당 d×*l*=76×90(mm)인 A356 빌렛 10개를 584°C까지 재가열 한다고 가정하면, Stansel[11]의 계산 조건(빌렛 1 kg을 510°C까지 가열할 경우, 열용량 Q=145KW h/t, 생산율 $P_r=0.01$t/h)과 선형 보간법을 이용하여 열용량 Q와 생산율 Pr이 계산되므로, 최소 가열 표면적 A_s와 최소 가열길이 l_w는 다음과 같이 구해진다.

$$A_s=\frac{P_t}{P_a}=\frac{P_r\times Q}{P_a} \quad (3)$$

$$l_w=\frac{A_s}{\pi d} \quad (4)$$

코일의 내경 Di와 최적 코일 길이 H를 결정하기 위하여 계산에 필요한 물성치를 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1의 값들을 이용하여 선형 보간하면 코일의 내경 D_i가 계산되고, 식(4)의 결과로부터 최적 코일 길이 H가 다음과 같이 계산된다.

$$H=l_w+(25\sim75) \quad (5)$$

따라서, 이론적으로 코일을 설계한 결과 시편의 크기가 d×*l*=76×90(mm)인 소재를 가열하기 위한 코일의 크기를 Table 3과 같이 제안하여 실험을 수행하였다. Table 3에서 k는 $\frac{\theta_s-\theta_c}{(\theta_s-\theta_c)_{idealized}}$를 나타낸다.

2.3 재가열 실험

다이캐스팅 및 단조 성형을 위해서는 빌렛을 반용융 상태로 가열해야 한다. 재가열은 빌렛을 성형할 수 있는 반용융 상태로 가열하는 것이 목적이지만 재가열 과정 동안 빌렛의 미세조직을 제어할 수 있기 때문에 성형 공정에서 재가열 과정은 대단히 중요하다.

본 실험에서 사용된 알루미늄 합금은 자동차 부품 개발에 많이 이용되는 주조용으로 프랑스의 Pechiney

Table 1. Recommended air gaps [1/2 (D_i-d)] for through-heating coils [10]

Frequency	Billet Temperature (°C)	Billet Diameter (d; mm)		
		0-60	60-125	125-250
50/60 Hz	550	12	12	12
	850	12	20	40

Table 3. Designed dimensions of induction heating device (f = 60Hz, δ = 10.7 mm, *l* = 90 mm, k = 0.62)

Billet Diameter (d; mm)	Coil Inner Diameter (D_i; mm)	Min. Heating Length (l_w; mm)	Optimal Coil Length (H; mm)
76	100	93	118~168

Table 2. Property values to calculate the optimal coil length (f = 60Hz, δ = 10.7 mm, *l* = 90 mm, k = 0.62)

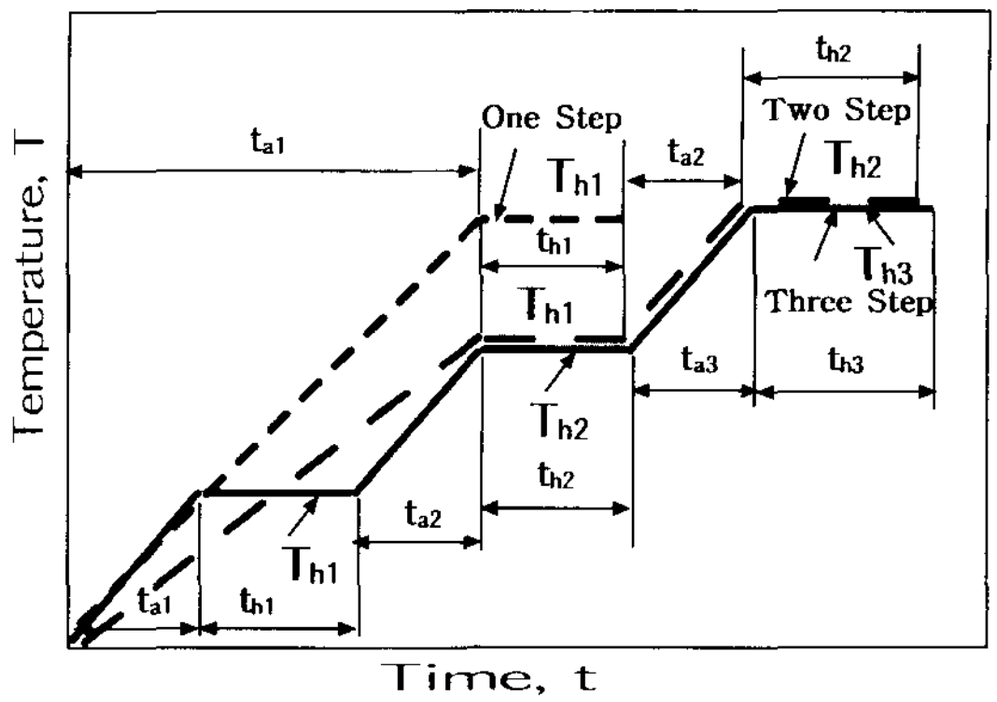
Parameter	Symbol	Unit	Value	Ref.
Maximum Surface-center Temperature Difference	θ_s-θ_c	K	5	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	159	[12]
Idealized Power Density	P_s	KW/m^2	41.85	
Resistivity of A356	ρ_a	$\mu\Omega$m	0.0421	[12]
Magnetic Constant	μ	H/m	$4\pi\times10^{-7}$	[10]
Angular frequency	ω	rad/s	120π	
Finite Current Depth of Penetration	δ_F	m	1.3×10^{-2}	
Actual Power Density	P_a	KW/m^2	67.5	
Thermal Power	P_t	KW	1.5	
Production Rate	P_r	Dimensionless	0.01 t/h	[11]
Thermal Capacity	Q	KW	150 h/t	
Minimum Heated Surface Area	A_s	m^2	22.2×10^{-3}	
Billet Diameter	d	mm	76	
Minimum Heated Length	l_w	mm	93	

Table 4. Chemical compostion of A356

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb
Min(%)	6.5	–	–	–	0.30	–	–	–	–
Max(%)	7.5	0.15	0.03	0.03	0.40	–	0.05	0.20	0.03

사에서 전자기적 교반에 의해 제조되어진 A356을 사용하였다. A356 재료의 화학 조성은 Table 4에 나타내었으며, 원소재의 미세조직은 Fig. 1에 나타내었다.

전자기적 교반에 의해 제조 되어진 A356 재료를 d×*l*=76×90(mm)의 빌렛으로 가공하여 출력 50KW 유도로(유도가열 시스템의 주파수: 60Hz)를 이용해서 Fig. 2와 같이 재가열 실험을 하였다. 유도로의 가열 코일은 Fig. 2에서와 같이 D_o×H=120×120(mm)로 제작해서 시편이 균일하게 가열될 수 있도록 하였다. 소재의 표면으로부터 45mm의 위치에 직경 3 mm로, 측면으로부터 10 mm의 위치에 직경 3 mm로 가공하여 ϕ1.6 mm의 K-Type CA열전대(Sheath Type)를 삽입해서 재가열 실험시 시편의 각 부분의 온도를 측정하였다. 열전대는 100°C로 끓는물에 넣어서 보정 하였으며, 열전대의 오차는 0.2% 정도 되었다. 그리고 측정기기는 데이터 로거 TDS-302(주식회사 동경 계기 연구소)를 사용하였으며, 가열 온도는 Fig. 2의 열전대 위치 (b)를 기준으로 하였다.



t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}	t_{h1}, t_{h2}, t_{h3}	T_{h1}, T_{h2}, T_{h3}
Elevating Time	Holding Time	Holding Temperature

Fig. 3. Input data diagram of reheating conditions to obtain the semi-solid material.

유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간(t_a), 재가열 온도(T_h), 재가열 온도에서의 유지시간(t_h), 재가열 스텝, 단열재 크기 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직을 관찰하여 온도 구배가 작고 미세한 구상화 조직을 갖는 최적의 재가열 조건을 찾기 위해 Table 5의 실험 조건으로 재가열 실험을 실시하였다. Table 5에 사용된 기호의 의미를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 5. Experimental conditions for reheating of semi-solid aluminum alloy (A356), Test specimen size: d×*l*76×90 (mm)

No	Elevating Time t_a (min)			Holding Temperature T_h (°C)			Holding Time t_h (min)			Total Time (min)	Capacity Q(Kw)	Adiabatic Material Size (mm) D×W×L
	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}	t_{h1}	t_{h2}	t_{h3}			
1	4	4	2	350	575	584	1	3	2	16	3.00	Without
2	4	4	2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	16	3.30	〃
3	4	4	2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	16	4.94	〃
4	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	6.30	〃
5	4	4	2	350	575	584	1	3	2	16	7.00	〃
6	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	7.50	〃
7	4	4	2	350	575	584	1	3	2	16	7.796	〃
8	4	4	2	350	575	584	1	3	2	〃	8.398	〃
9	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	8.398	75×70×19
10	10			584			2			12	7.796	75×70×19
11	10			〃			〃			12	8.398	53×53×19
12	8	1		575	584		3	2		14	8.398	〃
13	4	3	1	350	575	584	1	3	2	14	〃	〃
14	4	3	1	350	575	584	1	3	1	13	〃	53×53×19
15	〃	〃	2	〃	〃	〃	〃	2	〃	13	〃	53×53×19
16	〃	〃	〃	〃	560	〃	〃	3	〃	14	8.398	53×53×19
17	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	2	2	14	〃	〃

3. 재가열 실험 결과 및 고찰

소재를 재가열한 후의 미세 조직의 상태는 균일한 구상화 조직이 되어야 하고, 또한 유도로에서 금형으로 이송될 때 소재의 형태가 유지되어야 한다. 따라서, 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간(t_a), 재가열 온도에서의 유지시간(t_h), 재가열 온도(T_h), 재가열 단계, 단열재 크기 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직 등을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다.

반용융 상태의 가열 온도를 결정하기 위해 소재의 고상율은 참고 문헌[13]에서 도입한 것을 사용하였다.

Fig. 4는 A356 재료에 있어서 온도와 고상율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 공정 온도인 575°C[14-16]보다 10°C정도 낮은 565°C 근처에서 ALTHIX의 고상율이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다.

고상율 50%, 55%에 대응한 온도는 참고 문헌[13]에 의하면, 각각 584°C, 576°C에 해당한다.

3.1 고상율 50%

실험 1~실험 21까지는 고상율 fs=50%에 대해서 재가열 실험을 수행하였다.

가열 시간에 따른 최적의 출력 조건을 알아보기 위해서 Table 5의 실험 1~실험 9에서는 재가열 조건을 t_{a1}=4 min, t_{a2}=4 min, t_{a3}=2 min, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C로 고정시키고 유도로의 출력을 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 유도로의 출력이 7.796 KW와 8.398 KW인 경우에 시편 내부의 온도차가 미소한 상태에서 설정 온도에 도달하였다.

따라서 실험 10과 실험 11에서는 t_{a1}=10 min, t_{h1}=2 min, T_{h1}=584°C로 고정시키고 유도로의 출력을 각각 7.796 KW, 8.398 KW로 하였으며 단열재의 크기는 실험 10에서는 D×W×L=75×70×19(mm), 실험 11에서는 D×W×L=53×53×19(mm)로 하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 실험 10과 실험 11의 시편의 온도 분포와 조직 사진이다. 두 경우 모두 시편 내의 온도차는 미소하였으며 전체적으로 입자의 크기는 작으나 구상화가 이루어지지 않았다. 상 변화를 전 후로 해서 고상과 액상간의 분리와 고상이 구상화될 수 있는 충분한 유지 시간의 부족으로 인하여 시편의 크기 d×*l*=76×90(mm)에 대해서는 1단 재가열이 적절하지 않다는 것을 알 수 있었다.

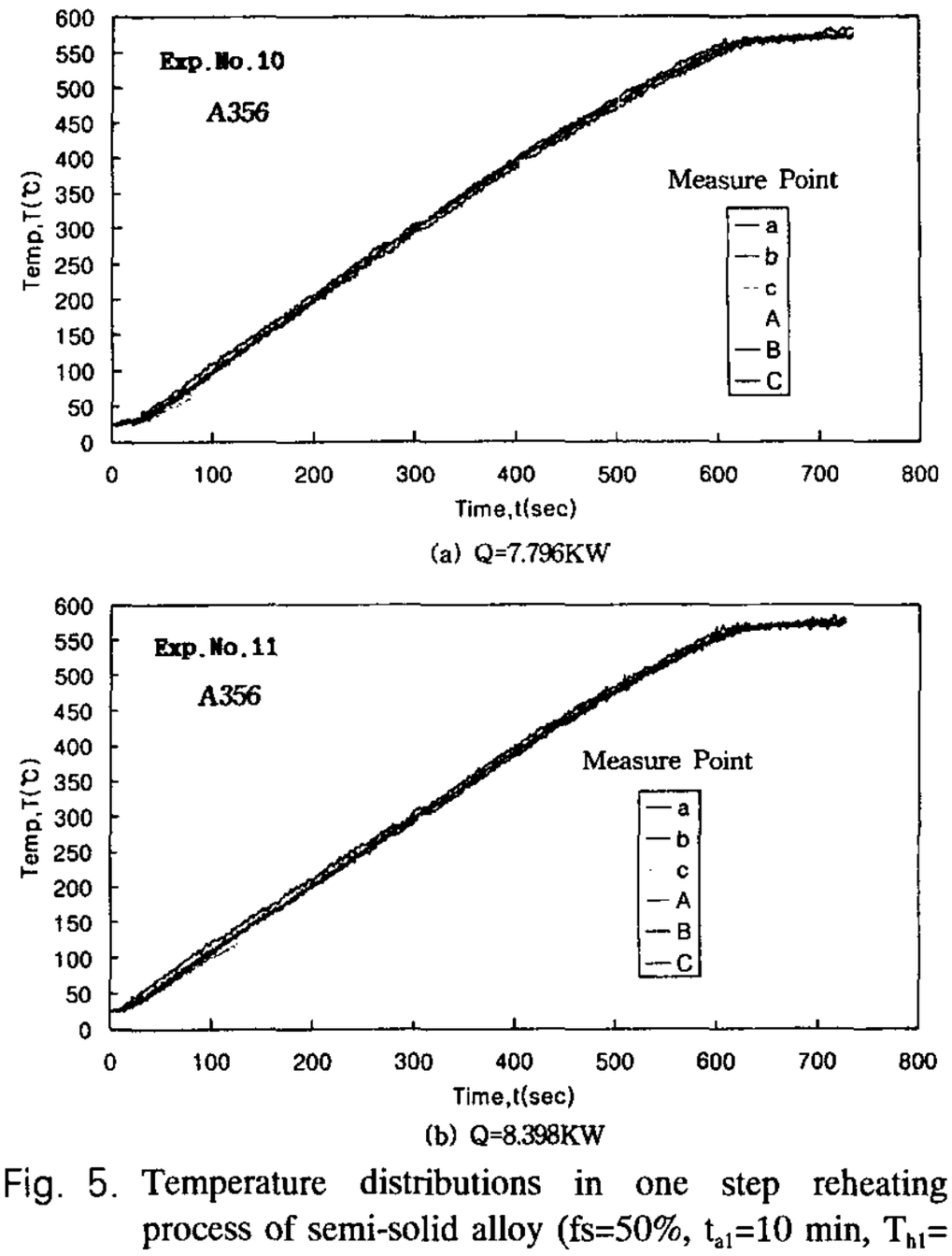


Fig. 5. Temperature distributions in one step reheating process of semi-solid alloy (fs=50%, t_{a1}=10 min, T_{h1}=584°C, t_{h1}=2 min).

실험 12에서는 t_{a1}=8 min, t_{a2}=1 min, t_{h1}=3 min, t_{h2}=2 min, T_{h1}=575°C, T_{h2}=584°C로 하였으며 유도로의 출력은 8.398 KW, 단열재의 크기는 D×W×L=53×53×19(mm)로 하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 실험 12의 시편의 온도 분포와 조직 사진이다. 시편 내부의 온도차는 미소 하였으며, Fig. 2의 열전대 위치 (a),(b),(c)에서는 구상화가 잘 되었고 구상화 정도는 (a)와 (b)가 비슷하고 (c)는 조대화된 입자가 관찰되었다.

실험 13에서는 t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, t_{h1}=1

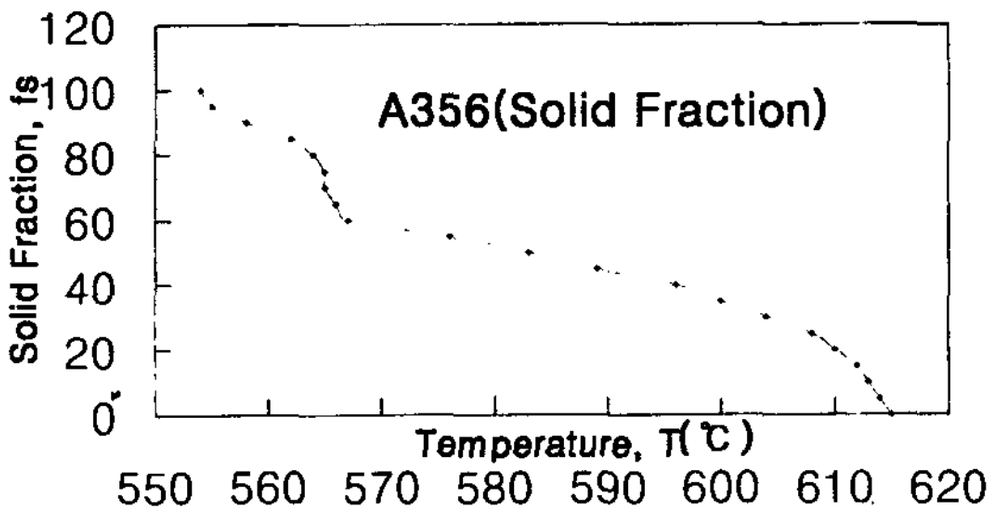


Fig. 4. Relationships between temperature and solid fraction for A356 ALTHIX.

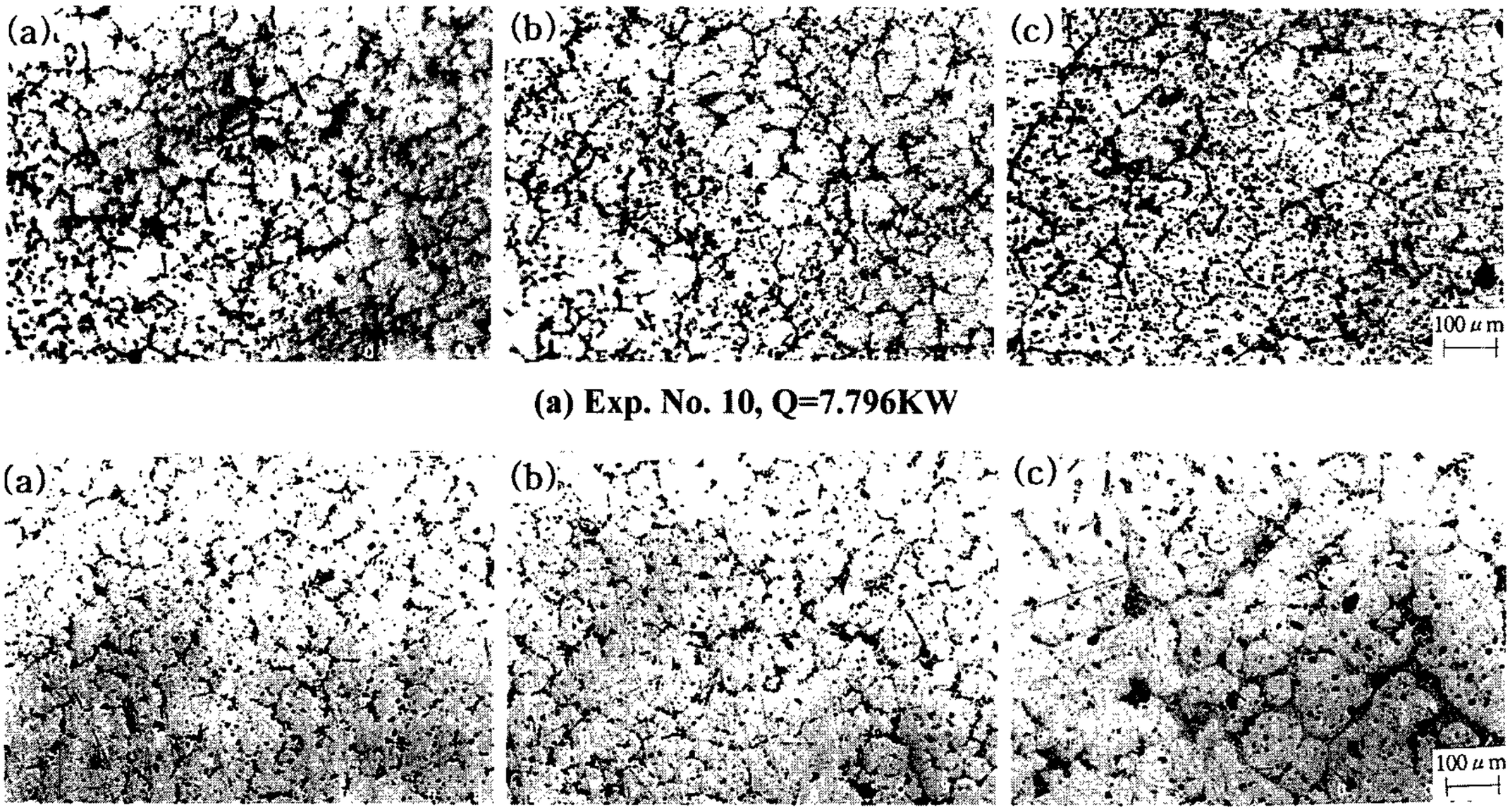


Fig. 6. Microstructure in one step reheating process of semi-solid aluminum alloy (A356, fs=50%, t_{a1}=10 min, T_{h1}=584°C, t_{h1}=2 min).

min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C로 하였으며 유도로의 출력은 8.398KW, 단열재의 크기는 D×W×L=53×53×19(mm)로 하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 실험 13의 시편의 온도 분포와 조직 사진을 나타낸 것이다. 시편 내부의 온도차는 미소 하였으며 Fig. 2의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서는 아주 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.

2단으로 재가열한 실험 12와 3단으로 재가열한 실험 13을 비교하면 시편 내부의 온도차이는 두 경우 미소 하였다. 실험 12보다 3단으로 재가열한 실험 13의 경우가 조직이 미세하고 구상화가 잘 된 조직을 얻을 수 있었다.

실험 14와 실험 20에서는 실험 13의 조건에서 각각 t_{h3}=1 min, t_{h3}=3 min으로 하여 실험을 수행하였다. Fig.9와 Fig. 10은 실험 14, 실험 13, 실험 20에 대응한 온도 분포와 조직 사진을 나타낸 것이다. 시편 내부의 온도차는 미소 하였으며 실험 14에서는 Fig. 2의 열전대 위치(a)와 (b)에서는 구상화가 이루어지지 않았고 (c) 위치에서는 구상화가 진행중임을 알 수 있다.

실험 20의 조건에서 실험한 Fig. 2(a)~(c) 위치에서는 구상화가 잘 되었지만 조대화된 고상 입자가 관찰되었다.

실험 19와 실험 21에서는 T_{h2}=565°C, T_{h2}=575°C로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 실험 19와 실험 21에 대응한 온도 분포와 조직 사진을 나타낸 것이다. 실험 19에서는 Fig. 2의 열전대 위치 (a)에서는 구상화가 되지 않았으며 (b) 위치에서는 구상화가 진행중이었고 (c) 위치에서는 미세한 구상화 조직이 관찰되었으며, 실험 21의 경우 시편 내부의 온도차이는 실험 19보다 증가하였으며 Fig. 2의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서는 구상화가 잘 되었지만 고상간의 응집 현상이 관찰되었다.

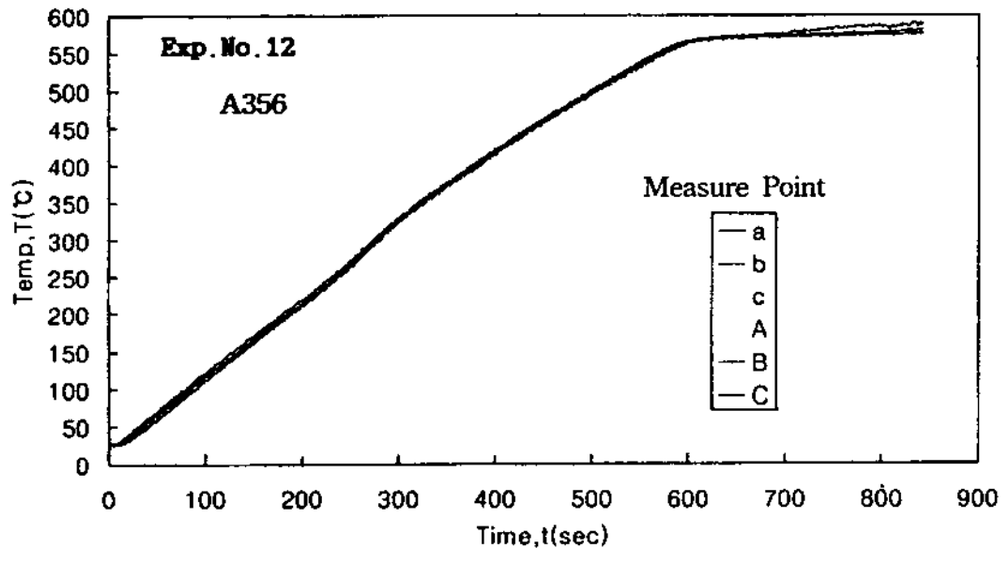


Fig. 7. Temperature distributions in two step reheating process of semi-solid alloy (fs=50%, t_{a1}=8 min, t_{a2}=1 min, T_{h1}=575°C, T_{h2}=584°C, t_{h1}=3 min, t_{h2}=2 min, Q=8.398 KW).

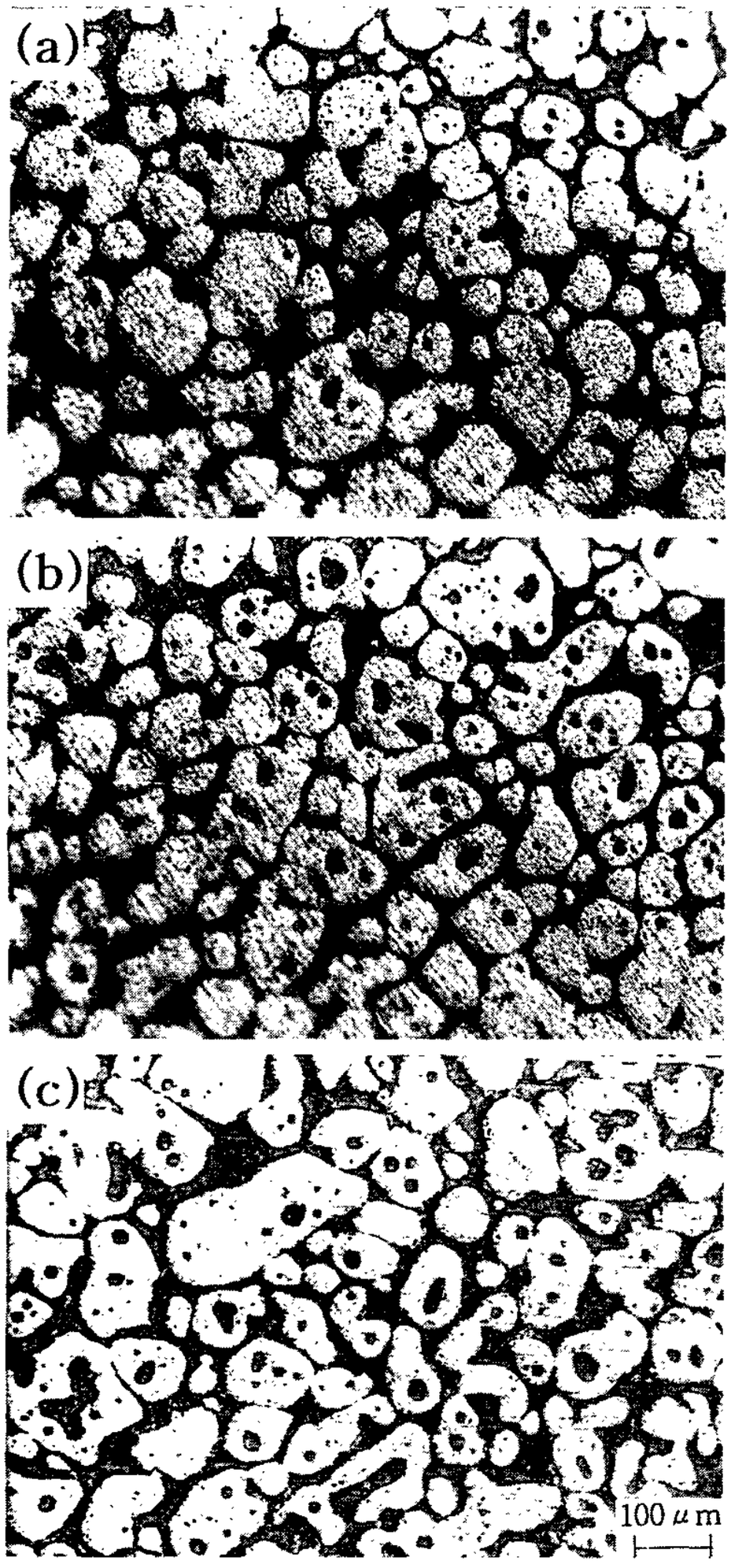


Fig. 8. Microstructure in two-step reheating process of semi-solid aluminum alloy (Exp. No. 12, A356, fs=50%, t_{a1}=8 min, t_{a2}=1 min, T_{h1}=575°C, T_{h2}=584°C, t_{h1}= 3 min, t_{h2}=2 min, Q=8.398 KW).

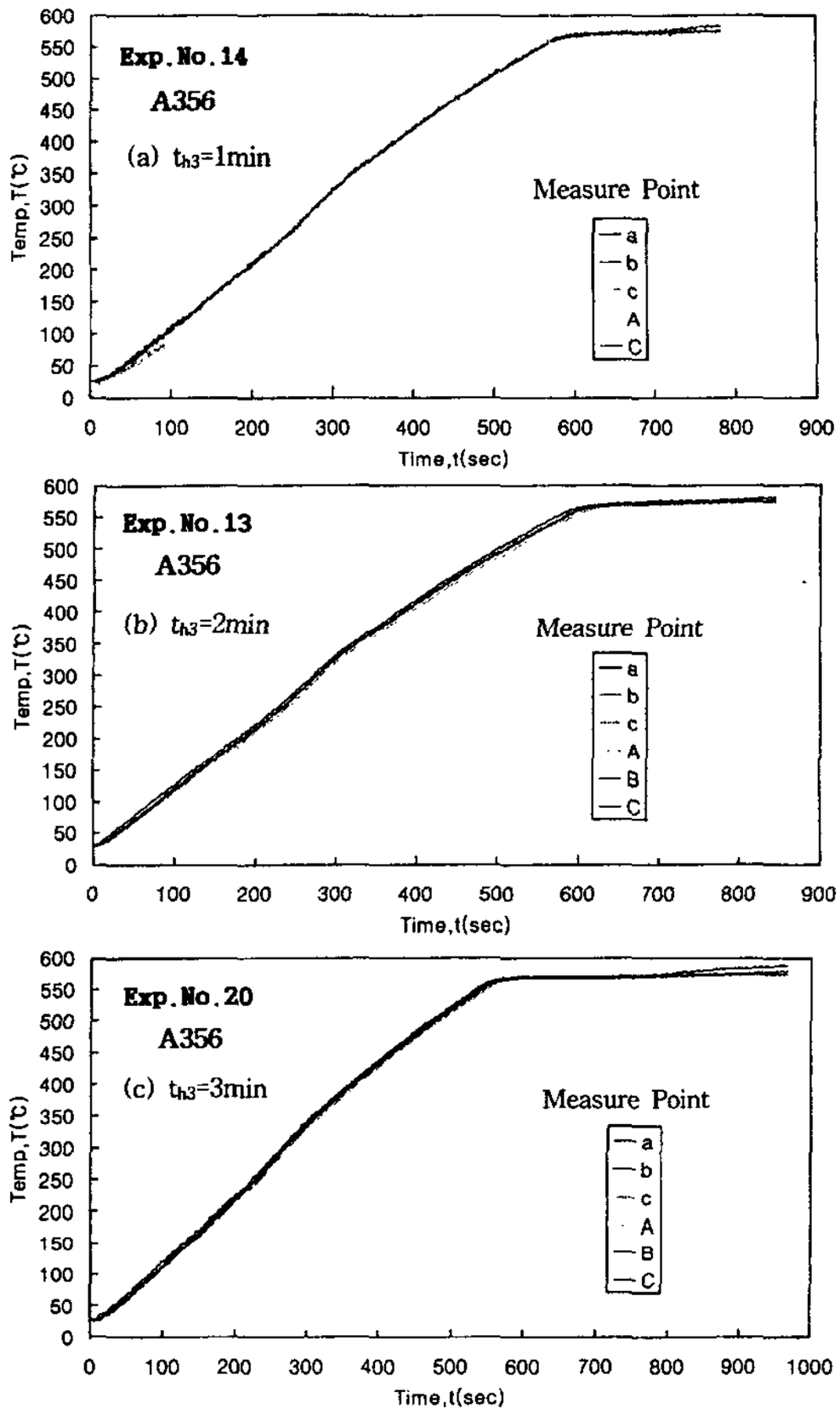


Fig. 9. Temperature distributions in three-step reheating process of semi-solid alloy (fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}= 3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, Q=8.398 KW).

3.2 고상율 55%

실험 22~실험 28까지는 고상율 f_S=55%에 대해서 재가열 실험을 하였다.

최적의 출력 조건을 찾기 위해서 실험 22~실험 26까지는 t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C로 고정시키고 단열재의 크기는 실험 22~실험 25까지는 D×W×L=53×53×19(mm)로 하였고, 실험 26에서는 D×W×L=50×50×20(mm)로 하였으며 유도로의 출력을 각각 8.398 KW, 9.174 KW, 10.376 KW, 11.44 KW, 12.04 KW로 변화시켜 가면서 재가열 실험을 하였다. 유도로의 출력이 12.04 KW인 경우에 시편 내부의 온도차가 미소한 상태에서 설정 온도에 도달하였다.

실험 26과 실험 27에서는 다른 조건들은 고정시키고 각각 t_{h3}=2 min, t_{h3}=1 min으로 하여 재가열 실험을 하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 실험 26과 실험 27의 경우 시편의 온도 분포와 조직 사진을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 시편 내부의 온도 차이는 미소 하였으나 Fig. 2의 열전대 위치 [C]에서는 Shooting 현상이 관찰되었다. Fig. 2의 열전대 위치 [C]에서는 다소 높은 출력으로 인하여 순간적으로 과열되기 때문이다. 또한 본 연구에서는 짧은 시간 간격에서 Shooting 현상이

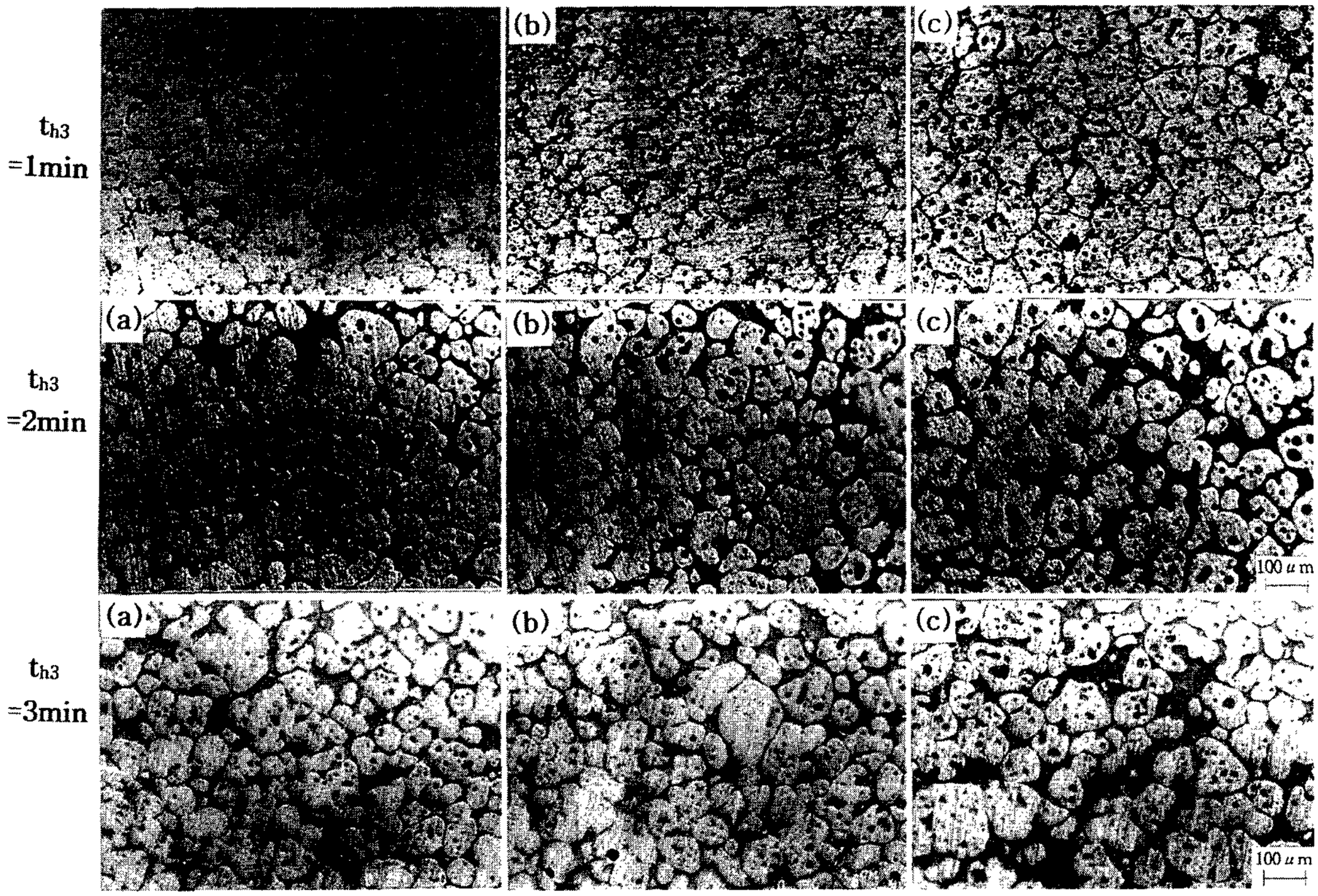
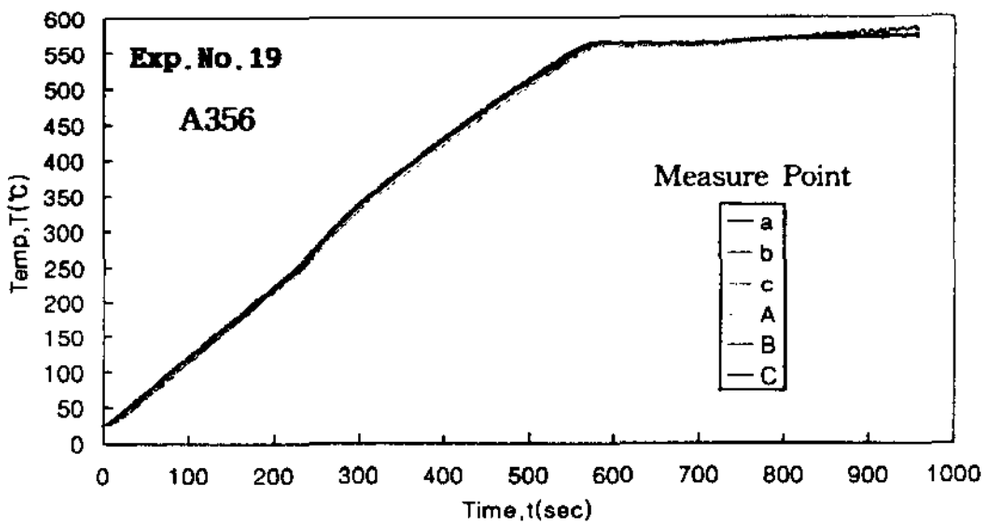
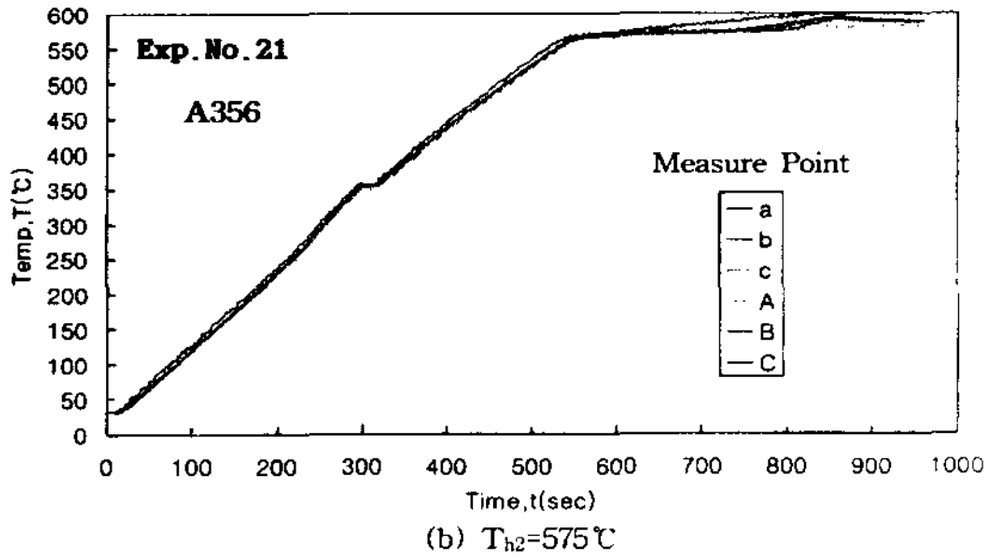


Fig. 10. Microstructure in three step reheating process of semi-solid aluminum alloy (A356, fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, Q=8.398 KW).



(a) T_{h2}=565℃



(b) T_{h2}=575℃

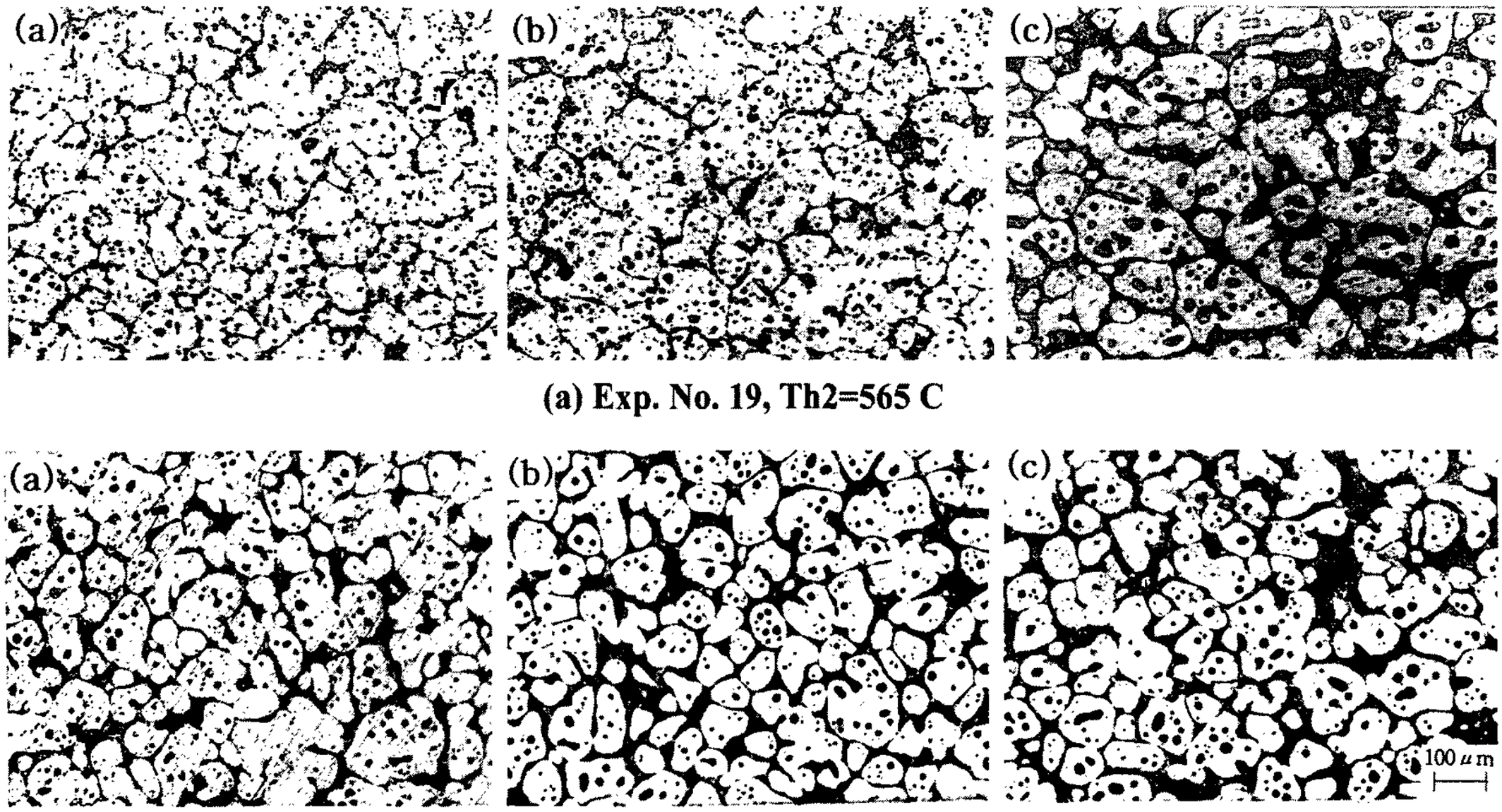
Fig. 11. Temperature distributions in three-step reheating process of semi-solid alloy (fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=4 min, t_{a3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, Q=8.398 KW).

발생하는 온도 범위가 작으므로 고상율에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 실험 26의 경우 열전대 위치 (a), (b), (c) 위치에서는 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었으나 실험 27에서는 (a)와 (b) 위치에서는 구상화가 이루어지지 않았고 (c)는 상 변화를 전 후로 해서 고상과 액상간의 분리와 고상의 구형화에 의해서 구상화가 진행되려는 중임을 알 수 있었다. 실험 26과 비교해 볼 때 실험 27은 상 변화를 전 후로 해서 고상과 액상간의 분리와 고상의 구형화에 의해서 구상화가 일어나기 위한 재가열 유지 시간이 부족한 것으로 사료된다.

3.3 고상율 50%와 55%의 비교

고상율이 50%와 55%인 경우의 재가열 실험을 통해서 고상율이 높아질수록 구상화 정도는 나빠지지만 고상과 액상 간의 구분이 명확하게 나타났다.

Fig. 15와 Fig. 16 (a)~(b)는 고상율 50%와 55%에서 가장 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었던 실험 13과 실험 26의 공정 조직을 관찰하기 위해서 1000배로 확



(a) Exp. No. 19, Th2=565 C

(b) Exp. No.21, Th2=575 C

Fig. 12. Microstructure in three-step reheating process of semi-solid aluminum alloy (A356, fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=4 min, t_{a3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, Q=8.398 KW).

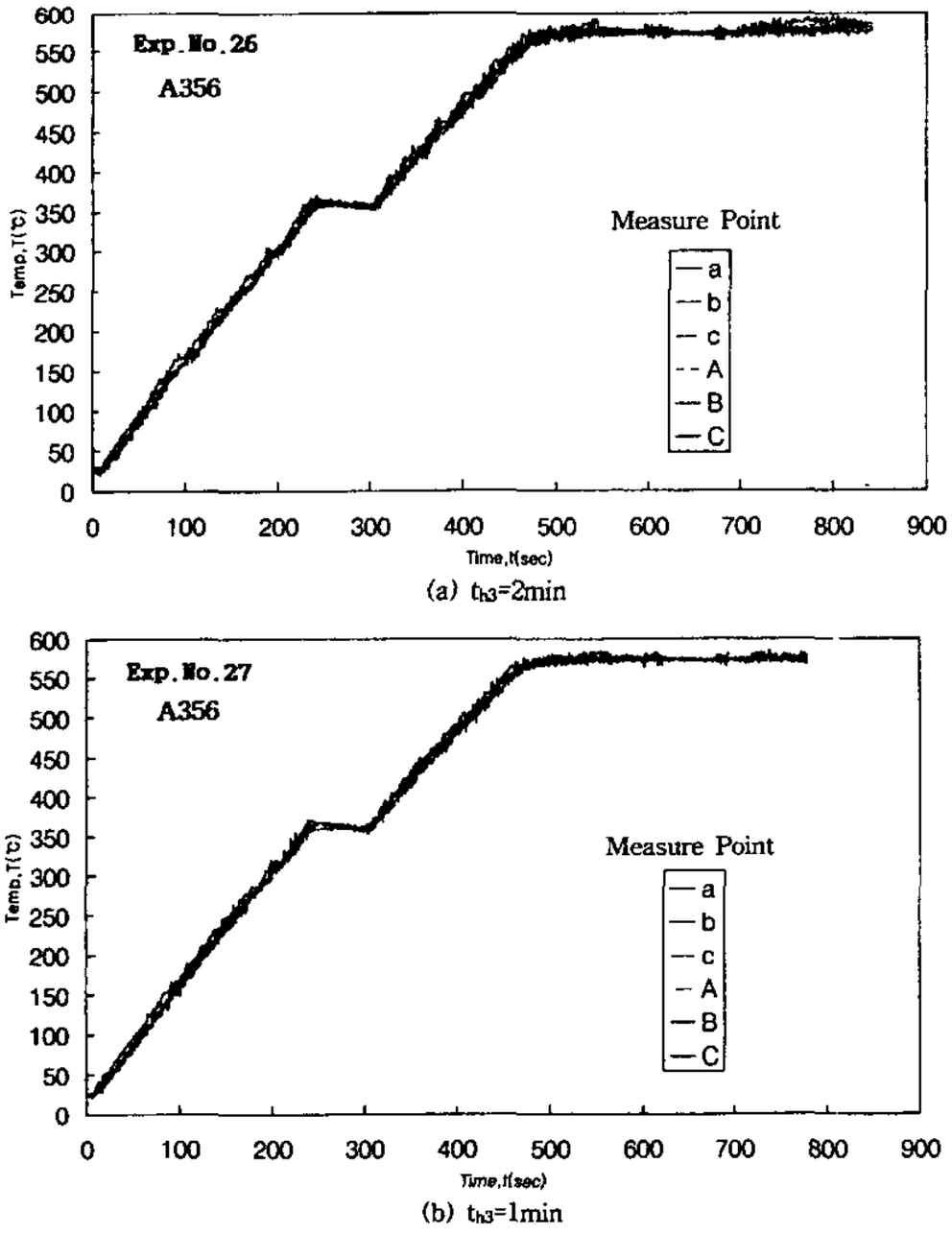
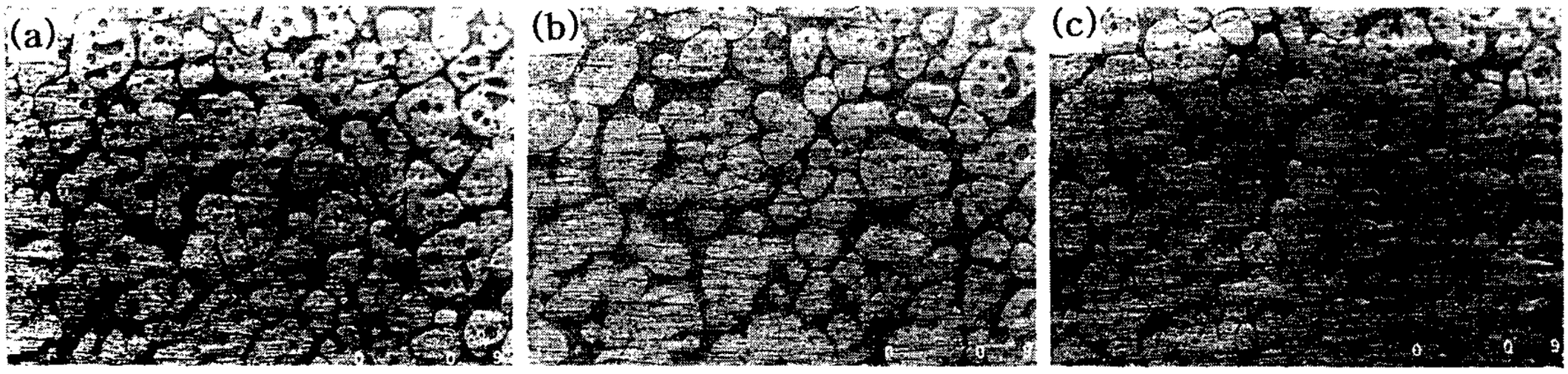


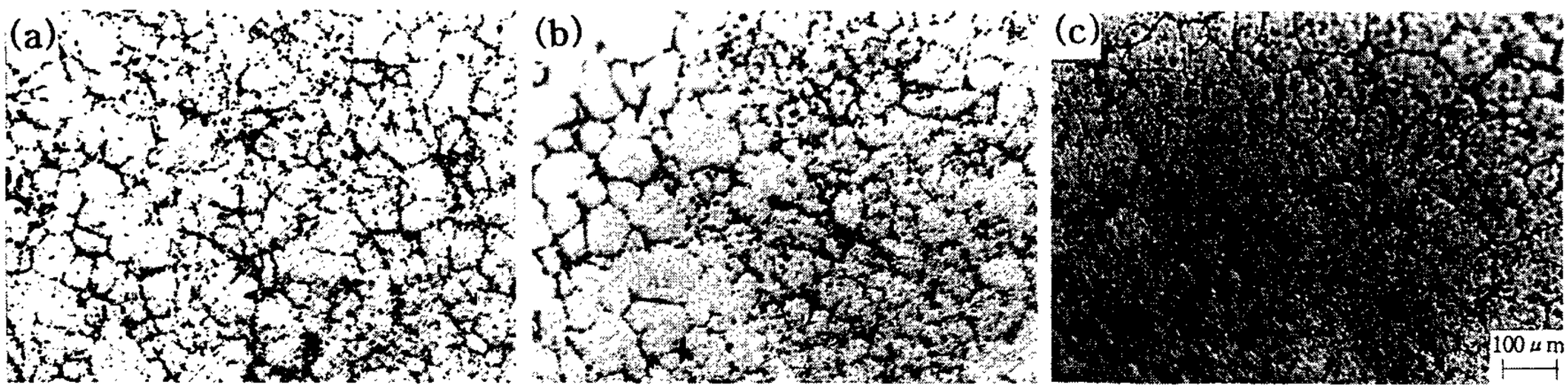
Fig. 13. Temperature distributions in three-step reheating process of semi-solid alloy (fs=55%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, Q=12.04 KW).

대한 시편의 조직 사진과 수냉 후의 시편의 표면 거칠기 상태를 나타낸 것이다. Fig. 15(a)와 (b)에서 공정 조직이 완전히 용해된 모습을 볼 수 있었다. 따라서 A356의 공정 온도인 575°C 부근에서 120~130초정도 온도의 변화없이 유지된 후에, 고상율이 급격하게 변하는 것은 이 온도 영역에서 공정 조직이 용해되고 있기 때문이다. 미세한 구상화 조직을 얻기 위해서는 575°C 이상의 온도에서 공정 조직이 충분히 용해될 수 있는 재가열 시간이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 즉 공정 조직이 용해되기 위해서는 많은 열에너지와 시간이 필요하기 때문에 공정 조직이 용해될 수 있을 만큼의 충분한 열에너지가 공급될 때까지 온도 상승은 없으며, 공정 조직의 용해 전후로 해서 고상율이 급격하게 변하게 되며 공정 조직이 용해되는 순간 급속한 온도의 상승도 나타나게 된다. 이런 온도 상승 현상 때문에 온도의 차이가 크게 나타나게 되고 정확히 재가열 온도를 제어하기가 힘들다. 따라서 보다 정확한 온도 제어와 시편의 균일한 온도 분포를 위해서는 3단으로 시편을 재가열해야 한다.

Fig. 16(a), (b)에서 볼 수 있듯이 고상율 f_s=50%인 경우보다 f_s=55%인 경우가 수냉후의 표면 상태가 양호하였다.



(a) Exp. No. 26, t_{h3}=2 min



(b) Exp. No. 27, t_{h3}=1 min

Fig. 14. Microstructure in three-step reheating process of semi-solid aluminum alloy (A356, fs=55%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}= 1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, Q=12.4 KW).

$d \times l = 76 \times 90$(mm)의 크기를 가진 소재를 재가열할 경우 Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 1단 재가열은 구상화 입자의 크기는 작으나 완전히 구상화가 이루어지지 않음을 알 수 있었다. Fig. 8, Fig. 10, 그리고 Fig. 12, Fig. 14를 통해서 알 수 있듯이 2단보다 3단 재가열이 입자의 크기도 작고 구상화 정도가 양호함을 알 수 있다.

3단 재가열에서는 마지막 단계의 재가열 유지시간이 아주 중요하다. 마지막 단계의 재가열 유지시간이 짧으면 Fig. 10(a), Fig. 14(b)에서 볼 수 있듯이 상 변화 전 후로 해서 고상과 액상간의 분리와 고상의 구형화에 의해서 구상화가 일어 날 수 있는 재가열 유지시간이 부족하여 구상화가 이루어지지 않고 마지막 단계의 재가열 유지시간이 길면 Fig. 10(c)에서와 같이 조대화 현상이 발생하므로, 적절한 구상화조직을 얻기 위한 최적의 재가열 유지시간은 2분으로 하는 것이 좋다.

$d \times l$=39×85(mm)와 $d \times l$=76×60(mm)을 이용하여

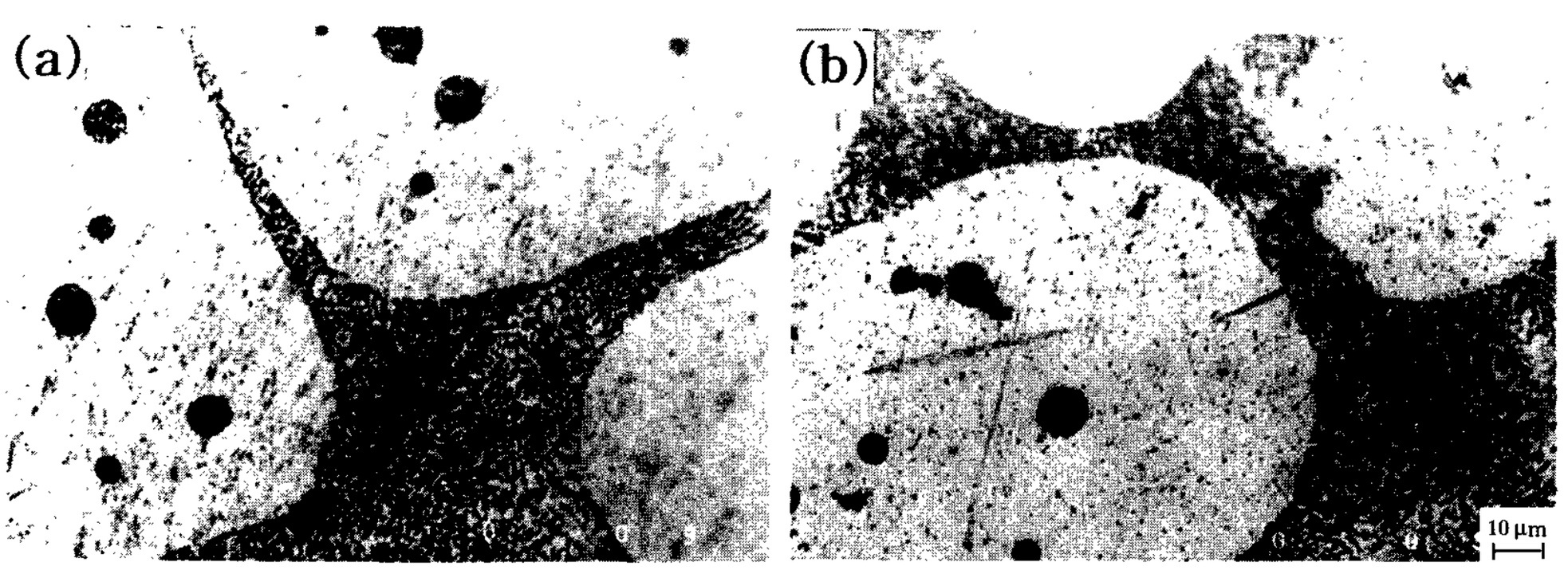
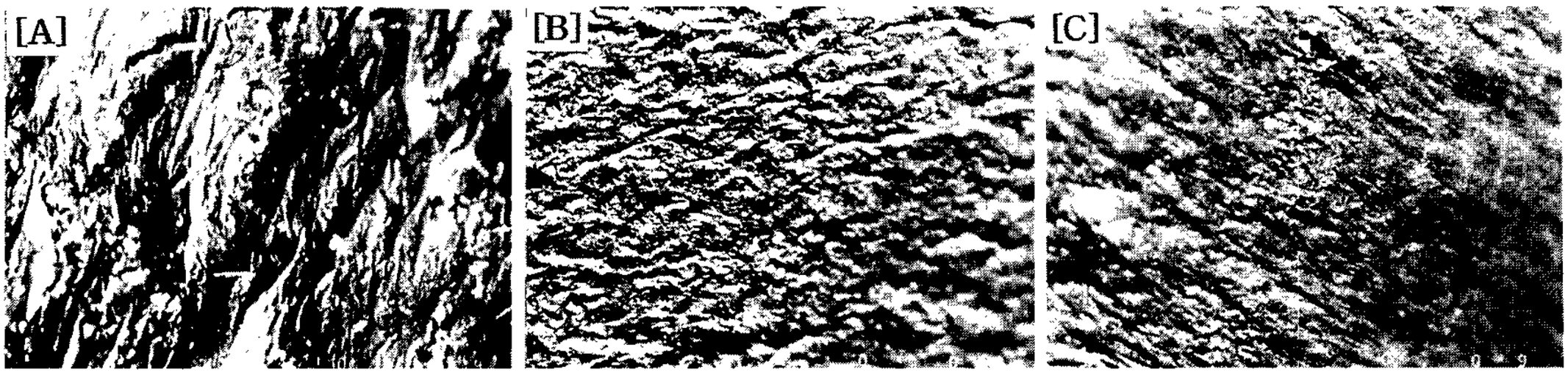


Fig. 15. Eutectic microstructure of semi-solid alloy (a) Exp. No. 13, fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}= 575°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=2 min, t_{h3}=2 min, Q=8.398 KW (b) Exp. No. 26, fs=55%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}= 1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, Q=8.398 KW



(a) Exp. No. 13, fs=50%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, Q=8.398 KW.

(b) Exp. No. 26, fs=55%, t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, Q=12.04 KW.

Fig. 16. Surface roughness of specimen after water-quenching

강 등[7]이 실험한 재가열 조건과 비교해 보면, 시편의 크기가 d×*l*=39×85(mm)인 경우에는 제1단 재가열 조건(t_{a1}=10 min, t_{h1}=2 min, T_{h1}=573°C, Q=3.3KW), d×*l*=76×60(mm)인 시편의 경우에는 제2단 재가열 조건(t_{a1}=8 min, t_{a2}=1 min, t_{h1}=3 min, t_{h2}=2 min, T_{h1}=575°C, T_{h2}=584°C, Q=3.00KW)에서 가장 미세하고 구상화가 잘 된 조직을 얻을 수 있다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 고상율 50%로 재가열 했을 경우에는 t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=575°C, T_{h3}=584°C, Q=8.398KW, 단열재의 크기 D×W×L=53×53×19(mm)의 3단 재가열 조건에서, 고상율 55%로 재가열 했을 경우에는 t_{a1}=4 min, t_{a2}=3 min, t_{a3}=1 min, t_{h1}=1 min, t_{h2}=3 min, t_{h3}=2 min, T_{h1}=350°C, T_{h2}=570°C, T_{h3}=576°C, Q=12.04KW, 단열재의 크기 D×W×L=50×50×20(mm)의 3단 재가열 조건에서 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.

재가열 공정에서 구상화 현상에 관한 이론적 기구의 연구와 합금 성분에 따른 결정립 성장의 과정을 이론적으로 규명함을 향후 연구과제로 남겨둔다.

4. 결　　론

A356(ALTHIX) 반용융 소재의 크기가 d×*l*=76×90(mm)인 소재를 반용융 다이캐스팅 및 단조 공정에 적용하기 위해서 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 코일을 제작하였다. 또한 실험을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 반용융 성형공정에 흔히 이용되는 d×*l*=76×90(mm)인 A356 빌렛에 대하여, 알루미늄 소재의 재가열에 사용할 수 있는 코일(유도가열 시스템의 주파수: 60Hz)의 크기를 이론적으로 제안하여 설계하였다.

2) 소재의 크기가 커질수록 다단 재가열이 적합하며, 가열시간과 고주파 유도로의 출 력을 증가시켜야 하고, 마지막 단계의 재가열 유지시간을 2분으로 하여야 한다는 사실을 알 수 있다.

3) d×*l*=76×90(mm)의 크기를 가진 소재의 재가열에서는 2단보다 3단 재가열이 입자의 크기도 작고 구상화 정도도 좋으므로 적절하다.

4) 3단 재가열 공정의 경우 마지막 단계의 재가열

유지시간이 짧으면 구상화가 이루 어지지 않고 길면 조대화 현상이 발생하므로 적절한 구상화조직을 얻기 위한 마지 막 단계의 최적의 재가열 유지시간은 2분정도 됨을 알 수 있었다.

5) fs=50%인 경우는 균일 재가열을 위한 단열재의 크기는 D×W×L=53×53×19(mm), 시편 상부와 Coil 상부와의 높이 차이는 19 mm이며, fs=55%인 경우는 D×W×L=50×50×20(mm), 시편 상부와 Coil 상부와의 높이 차이를 20 mm로 했을 경우이다.

후 기

본 연구는 부산 대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터의 지원에 의한 연구의 일부분 입니다.

참 고 문 헌

[1] Jonathan A. Dantzig and Stephen P. Midson : "Billet heating for Semi-solid Forming", The 2nd Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1992) 107.

[2] G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen : "SSM-Forming of usually Wrought Aluminium Alloys", The 3rd Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1994) 107-116.

[3] Kenneth P. Young and Rudolf Fitze : "Semi-solid Metal Cast Aluminium Automotive Components", The 3rd Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1994) 155-189.

[4] M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax : "Computer Based Numerical Analysis of Semi-solid Metalworking", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1996) 120-131.

[5] Kapranos. P, Kirkwood D. H and C. M. Sellars : "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1996) 148-152.

[6] Wilfred Kahmann, Robert Schragner and Kenneth Young : "Free Standing Raw Material Production System for SSM Recycling", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1996) 154-158.

[7] 강충길, 도영진, 강성수 : "반용융 알루미늄 재료의 재가열 조건이 구상화 조직에 미치는 영향", 한국 소성가공학회지 제7권 제3호, (1998) 215-224.

[8] T Witulski, A Winkelmann and G.Hirt : "Thixoforming of Aluminium Components for Lightweight Structures", The 4th Int' l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1996) 242-246.

[9] Gl Clauser, A Ravaioli, F Ciselli and M vassallo : "Advancing the Frontier of Aluminium Technology: The Multilink Project" The 4th Int' l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1996) 234-238.

[10] Davies E. J. : "Conduction and Induction Heating", Peter Peregrinus Ltd.(1990), 100, 164-179, 202-222.

[11] Stansel, N.R. : Induction Heating, McGraw-Hill, New York, (1949) 178.

[12] Metals Handbook : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Vol. 2, 10th Edition, (1990) 164-166.

[13] G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Tech., 45, (1994), 359-364.

[14] C. Pluchon, W. Loue, M. Garat, "Production of Thixotropic Aluminium Alloys Billets", 97 고액 공존 금속의 성형기술 심포지엄, (1997), 80-95.

[15] Willem Loue, Michel Garat, "Recent Industrial Developments in the Field of Thixocasting", 97 고액 공존 금속의 성형기술 심포지엄, (1997), 96-104.

[16] Aluminium Pechiney, "Althix Billets", 97 고액 공존 금속의 성형기술 심포지엄, (1997), 105-113.