

## 반응용알루미늄재료의 재가열공정

강성수\*, 도영진\*, 강충길\*

\*부산대학교 기계공학부

### Reheating Process of Semi-Solid Aluminum Alloy

S.S.Kang, Y.J.Do, C.G.Kang

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

**keywords:** semi-solid aluminum, reheating process, spherical microstructure, electric-magnetic stirring condition

#### ABSTRACT

A semi-solid forming has a lot of advantages compared to the die casting, squeeze casting and conventional forging, therefore, semi-solid forming process are now becoming of industrial interest for the production of metal components and metal matrix composites. However, the material behaviour in the semi-solid temperature range is not sufficiently known although it controls the whole process through forces and geometry evolutions because the behaviour of metal slurries is complex. The semi-solid materials(SSM) fabricated under electric-magnetic stirring condition is necessary to be applicate in forming process. A reheating conditions were studied with the reheating time, holding time and reheating temperatures. The microstructure of SSM (which specimen size:d40×φ60) on condition of heating time 10min and heating temperature 590°C is most globular and finest one. The microstructure of SSM(specimen size:d75×φ60) reheated under the three step reheating conditions is most globular and finest.

#### 1. 서론

최근 자동차 산업 분야에서는 연료의 절약과 환경오염 등의 문제로 경량화에 대한 중요성이 크게 인식되고 있다. 다이캐스팅은 용탕이 캐비티 내부로 유입될 때 난류로 인한 공기의 포집과 수축에 의한 결함이 있고 용탕단조법은 용탕을 과열하기 때문에 금형의 온도 상승으로 인해 금형의 수명이 단축되는 결점이 있으며 두 방법 모두 응고시 수지상정조적이 존재하게 되어 제품의 기계적 성질이 균일하지 못하다.

반용융 다이캐스팅공정은 이러한 결점을 보안할 수 있기 때문에 최근 소재의 제조부터 성형에 이르기까지 많은 관심의 대상이 되고 있다.

반용융상태의 다이캐스팅 및 단조공정을 위하여 구상화조직을 얻을 수 있는 재가열조건의 설정은 매우 중요하다. 복사 가열로 빌렛을 재가열할때는 가열 시간이 너무 길고 빌렛의 온도를 균일하게 제어하기 힘들기 때문에 전자기 유도 가열 방법을 사용한다. 전자기 유도 가열은 짧은 시간 동안에 빌렛의 온도를 정확히 제어할 수는 있지만 가열이 짧은 시간 동안에 이루어지기 때문에 재가열된 빌렛에 온도구배가 발생할 수 있다. 빌렛의 온도가 균일하지 못하면 고상율이 다르게 되어 온도가 낮은 곳은 성형시 다이에 충전되기 위한 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 곳은 성형공정중 액상이 고상으로부터 유출되어 균일한 제품을 얻을 수 없다.

반용융소재의 재가열공정에 관한 연구 동향으로써 Dantzig<sup>(1)</sup>는 빌렛의 유도 가열에 의한 온도 분포에 관한 연구에서 솔레노이드 코일과 채널 코일을 사용하여 계산된 온도와 실험 온도가 상당히 일치함을 보였고 빌렛의 중앙보다는 가장자리가 훨씬 온도가 높음을 보였다. Hirt<sup>(2)</sup>는 온도에 따른 열적, 전기적 물성치와 대류와 복사에 의한 표면 열전달을 정확히 파악한다면 시뮬레이션한 온도와 실험한 온도가 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단하고 있다. Young<sup>(3)</sup>는 단위 시간, 단위 kg당 1KW의 출력으로 원형 컨베이어에 장착된 각각의 유도로에서 다단 재가열을 하였다. Tims<sup>(4)</sup>는 ANSYS를 사용해서 유도 가열 과정을 시뮬레이션 하였다. Kapranos<sup>(5)</sup>는 시뮬레이션을 통해 유도가열시 균일한 가열에 필요한 사항을 요약하고 있다. Kahrmann<sup>(6)</sup>는 유도 가열로에서 직경×길이(75mm×150mm)의 시편을 590±5℃에서 300초~350초 동안 재가열실험을 하였으나 구상화의 정도를 정확히 파악하지 못 하였다.

반용융소재의 아이캐스팅 및 단조공정에 필요한 재가열시간, 시편의 크기 및 가열 온도가 빌렛의 미세조직에 미치는 영향에 대해서 아직 발표되지 않고 있다. 따라서, 본연구에서는 다이캐스팅 및 단조공정에서 절대적으로 필요한 소재의 재가열조건이 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재가열온도, 재가열 유지 시간, 유도로의 출력 등을 변수로 하여 조직의 구상화 정도를 조사하였다. 또한 재가열시 빌렛의 온도구배를 줄일 수 있고, 구상화된 조직을 얻을 수 있는 최적의 재가열조건을 실험적으로 제안하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재가열 실험

다이캐스팅 및 단조성형을 위해서는 빌렛을 반용융상태로 가열해야 한다. 재가열은 빌렛을 성형할 수 있는 반용융상태로 가열하는 것이 목적이지만 재가열 과정 동안 빌렛의 미세 조직을 제어할 수 있기 때문에 성형 공정에서 재가열 과정은 대단히 중요하다. 전자기식 교반에 의해 제조된 ALTHIX재료를 고주파 유도로에서 재가열을 했다. 고주파 유도로의 가열코일은 Fig. 1에 나타

낸 것처럼 제작하여 재가열 시편이 코일내에 충분히 담겨져 균일하게 가열될 수 있도록 제조하였다. 시편의 크기가 각각  $d=75$ 와  $40\text{mm}$ 일 때 코일의 경을 각각  $D=90\text{mm}$ ,  $65\text{mm}$ 를 사용하여 소재의 표면과 코일사이의 거리가 일정하게 되도록 하였다.

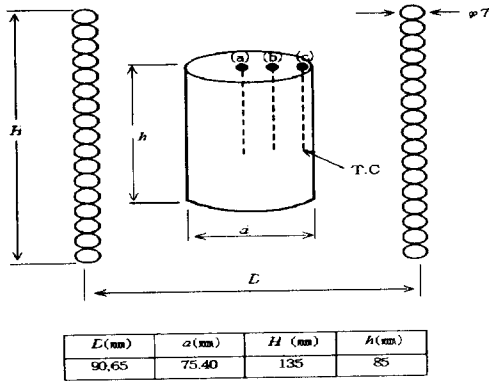


Figure 1 Schematic diagram of induction heating of cylindrical specimen

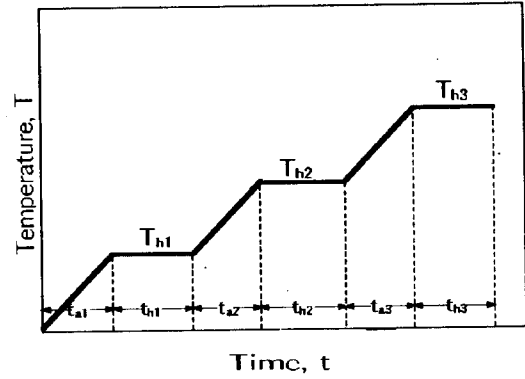


Figure 2 Schematic diagram for reheating conditions to obtain of the semi-solid material

Expe. No	'Test specimen (mm)	Heating time $t_a$ (minute)			Heating temperature $T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			Holding time $t_h$ (minute)			Capacity Q(KW)	Temp distribution and micro structure
		$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_{a3}$	$T_{h1}$	$T_{h2}$	$T_{h3}$	$t_{h1}$	$t_{h2}$	$t_{h3}$		
1	d 40 × ϕ60	5			573			2			3.3	Fig.5,6
2		10			"			"			"	"
3		13			"			"			"	"
4		5			590			2			"	Fig.7,8
5		10			"			"			"	"
6		13			"			"			"	"
7		10			"			4			1.3	Fig.9,10
8		"			"			6			"	"
9	d 75 × ϕ60	5			"			2			4.97	Fig.11,12
10		10			"			"			"	"
11		13			"			"			"	"
12		8			575			0			3.00	Fig.13,14
13		8			575			3			"	Fig.13,15
14		10	2		560	590		3	2		4.97	Fig.17,18
15		8	1		575	584		3	2		3.00	"
16		4	4	2	350	575	584	1	3	2	4.97	Fig.19,20
17		4	3	1	350	575	584	1	3	2	3.00	"

Table 1 Experimental conditions for reheating of semi-solid with aluminum alloy(A356) and Test specimen size( $d 40 \times \phi 60$  and  $d 75 \times \phi 60\text{mm}$ )

고주파 유도로의 출력(Q), 재가열 시편의 형상, 재가열온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도( $T_h$ ), 재가열 온도에서의 유지 시간( $t_h$ ) 등을 변화시켜 가면서 빌렛의 온도 분포와 미세 조직을 관찰하여 온도구배가 가장 작고 미세한 구상화조직을 얻을 수 있는 최적재가열 조건을 찾기 위해

Table 1의 실험 조건으로 재가열 실험을 실시하였다. Table 1에 사용된 기호의 정의는 Fig. 2에서 그림으로 나타내었다. Fig. 3은 직경 d=75mm와 40mm의 소재를 재가열할 때 가열시간의 변화에 따라 온도변화를 측정하기 위하여 열전대의 위치를 나타낸 것이다.

재가열에 사용되어진 ALTHIX의 화학적 성분과 고상율은 Table 2에 나타내었다.

	Si	Mg	Fe	Cu	Pb+Sn	Mn	Ti	Zn	Sr	Ni
Min	6.5	0.3	-	-	-	-	-	-	.01	-
Max	7.5	0.4	0.15	.03	.03	.03	.20	.05	.05	.03

Table 2 Chemical composition of ALTHIX

본 연구에서 고상율  $f_s=58\%$ 에 대응하는 온도인  $573^\circ\text{C}$ 에서 실험을 한 것은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 이 온도 근처에서 ALTHIX의 고상율이 급격하게 변화하기 때문에 이의 물리적 현상을 파악하기 위해서이다.

고상율의 측정은 CA열전대를 소재에 삽입하여 온도를 측정한 후 고상율을 정의한 다음 식을 이용하여 재료의 고상율을 구하였다.

$$f_s = \left( \frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right)^{\frac{1}{2}}$$

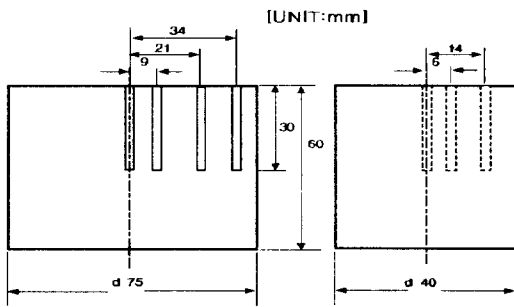


Figure 3 Schematic diagram of reheating conditions to obtain the semi-solid material

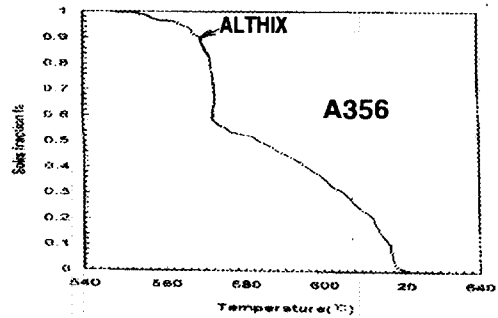


Figure 4 Relationship between solid fraction and temperature of the ALTHIX A356 aluminum alloy

## 2.2 실험 결과

전자기 교반된 반응용재료를 d 40×160(mm), d 75×160(mm)의 두 가지 크기로 가공하여 재가열 실험을 하였다. Table 1의 실험 1에서 실험 8까지는 d 40×160(mm)의 크기로 빌렛을 기계 가공하여 재가열 실험을 하였고 Table 1의 실험 9부터 실험 17까지는 d 75×160(mm)로 빌렛을 기계 가공하여 재가열 실험을 하였다.

가열 시간의 변화에 따른 조직의 변화를 알아보기 위해 Table 1의 실험 1, 실험 2, 실험 3에서는 가열 시간만을 변화시켜서 실험을 실시했다. Fig. 5, Fig. 6는 유도로의 출력이 3.3kW인 경우 5

분, 10분, 13분동안에 재가열 온도 573℃까지 가열한 후 573℃에서 2분간 유지하였을 때 온도변화와 조직사진을 각각 나타낸 것이다. Fig 6에서 보여주는 바와 같이  $t_{al}=(5-10)$ 분간 가열한 시편의 조직 사진은 중앙에서 가장자리로 갈수록 구상화가 뚜렷하지 않았으며 특히 가장자리에서는 구상화가 전혀 이루어지지 않았다.  $t_{al}=13$ 분 동안 가열한 시편의 조직 사진을 보면 중앙부에는 고상의 응집 현상이 많이 관찰되었으며, 가장자리 부근은 액상이 유출되어 구상화가 되지 않고 있음을 알 수 있다. 5~10분간 가열시험편은 13분간 가열한 시편의 조직보다는 고상의 응집 현상이 줄어들어 결정립의 크기도 작고 전체적으로 고상과 액상이 균일하게 분포 되었음을 얻을 수 있었다.

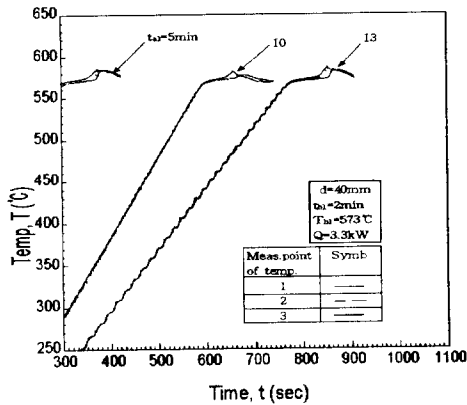


Figure 5 Relationship between reheating time and temperature to obtain globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

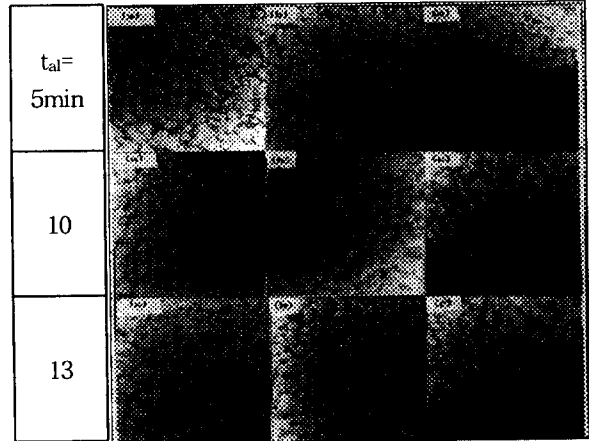


Figure 6 relationship between reheating time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

재가열 온도를 590℃로 하여 재가열 온도까지의 가열 시간의 변화에 따른 조직의 변화를 알아보기 위해 Table 1의 실험 4, 실험 5, 실험 6에서는 재가열 온도까지의 가열 시간을 5분, 10분, 13분으로 변화시켜서 재가열실험을 실시했다. 실험 4, 실험 5, 실험 6은 5분, 10분, 13분동안에 590℃까지 가열한 후에 590℃에서 2분간 유지하였고, 유효로의 출력은 3.3kW로 하였다. 실험 4, 실험 5, 실험 6의 조건에서 재가열할 때 시편의 온도변화와 조직사진을 각각 Fig. 7 ~ Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7의 온도 분포를 살펴보면  $t_{al}=5$ min에서 시편의 온도 편차가 크게 나타났고, Table. 1의 실험5에 대응하는 조건  $t_{al}=10$ min에서는 가열하는 동안 온도 차이가 나타나지만 재가열온도에서는 상당히 일치하고 있으며,  $t_{al}=13$ min(Table. 1의 실험6)에서는 시편의 온도 차이가 전체적으로 가장 작게 나타났지만 shooting현상이 발생하는 전후로 하여 온도 차이가 크게 나타났다. Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 위 세 실험 중에서 실험 5[Fig. 8의  $t_{al}=10$ 분]의 시편의 조직이 고상영역과 액상영역의 경계가 뚜렷할 뿐 아니라 구상화가 잘 되어 있고, 온도 차이도 작게 나타났기 때문에 가

열 시간은 10분으로 고정하고 다음 실험을 계속하였다.

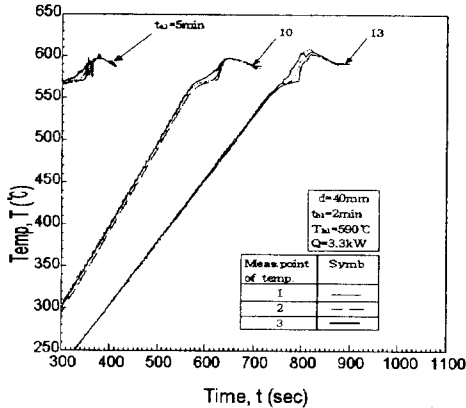


Figure 7 Relationship between reheating time and temperature to obtain globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

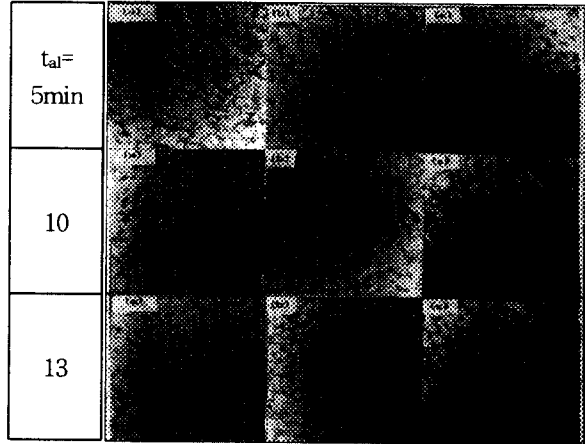


Figure 8 relationship between reheating time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 실험 4의 조직 사진(Fig. 8의  $t_{al}=5\text{min}$ 인 경우)에서는 시편 전체에서 구상화가 이루어지지 못하고 고상간의 응집현상이 많이 나타나 결정립이 증가하였다. 실험 5의 조직 사진(Fig. 8의  $t_{al}=10\text{분}$ 인 경우)에서는 전체적으로 미세하고 구상화가 잘되었으며 특히 중앙부와 가장자리에서 미세하게 구상화가 양호한 조직을 볼 수 있다. 실험 6(Fig.8의  $t_{al}=13\text{분}$ 인 경우)에서는 가열 시간이 실험 4(Fig. 8의  $t_{al}=5\text{min}$ )나 실험 5(Fig. 8의  $t_{al}=10\text{min}$ )보다 길기 때문에 실험 6의 조직보다 결정립의 크기가 증가하였다.

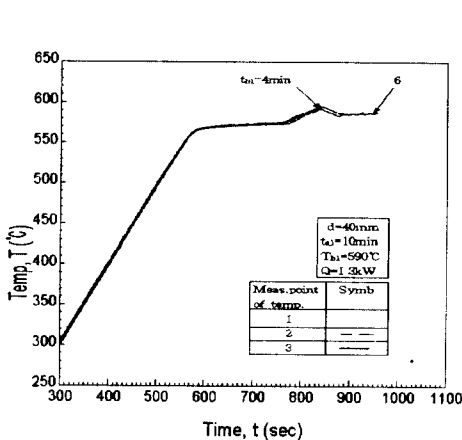


Figure 9 Relationship between reheating time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

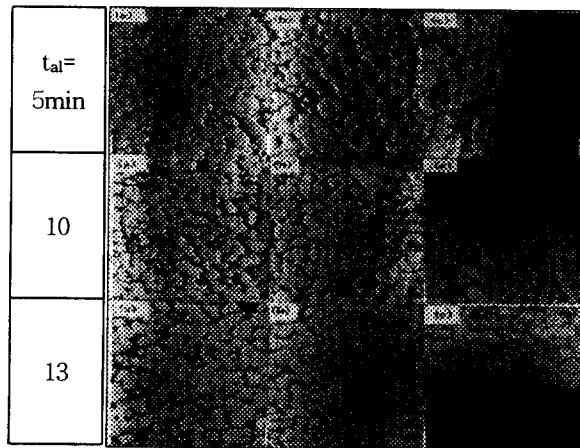


Figure 10 relationship between reheating time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

재가열온도에서 유지 시간의 변화에 따른 조직의 변화를 파악하기 위해서 실험 7와 실험 8은 10분동안에 재가열 온도인 590°C까지 가열한 후 590°C에서 가열 유지 시간을 4분, 6분으로 하고

유도로의 출력은 실험 4~실험 6에서 shooting현상이 발생했기 때문에 1.3kW로 낮추어 재가열 실험하였다. 실험 7, 실험 8의 온도 분포와 조직 사진을 Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다.

$t_{al}=10\text{min}$ 인 경우에 있어서 Table. 1의 실험 2, 실험 5을 실험 7,8과 비교하면 가열유지시간  $t_h$ 가 증가할수록 구상화가 잘 되어 있음을 Fig. 10로부터 알 수 있다. 실험 4~6에서 나타난 shooting 현상은 실험 7, 실험 8에서는 발생하지 않았고 시편의 온도 차이도 작게 나타났다. 재가열온도를 590℃로 한 실험 4~실험 8을 통해 가장 양호한 재가열 조건은 재가열 온도까지 가열 시간은 10분, 재가열 온도에서 유지 시간  $t_{al}=6\text{min}$  출력  $Q=1.3\text{kW}$ 일때가 가장 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있었다. 실험 9부터 실험 17는  $d 75 \times \phi 60(\text{mm})$  크기의 시편을 사용하여 재가열 실험을 하였다. 우선  $d 40 \times \phi 60(\text{mm})$ 에서 한 실험과 같이 가열 시간의 변화에 따른 미시 조직의 변화를 파악하기 위해서 재가열온도까지의 가열 시간만을 변화시켜서 Table 1의 실험 9, 실험 10 및 실험 11을 실시했다. 실험 9부터는 시편의 형상이 Table 1의 실험 No.1~8보다 크기 때문에 유도로의 출력을 4.97kW로 높여서 재가열을 하였다. Table 1의 실험 9, 실험 10, 실험 11은 재가열온도 590℃에서 유지 시간을 2분으로 동일하게 하고 590℃까지 가열 시간을 각각 5분, 10분, 13분으로 변화시키면서 실험을 실시하였다.

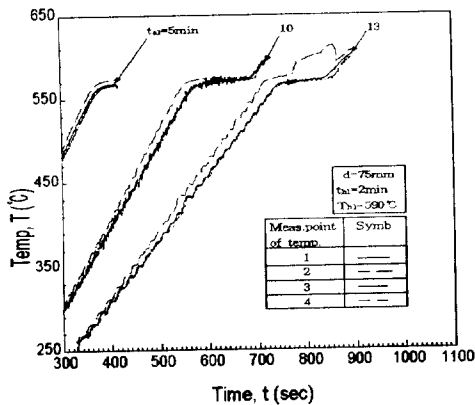


Figure 11 Relationship between reheating time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy in the case of experimental No 11, 12 and 13

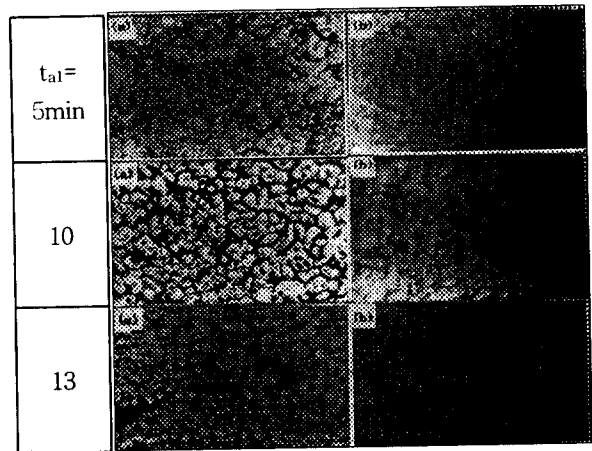


Figure 12 (a)~(b) Microstructure of ALTHIX reheated at condition of  $T_h=590^\circ\text{C}$ ,  $t_h=2$ ,  $Q=4.97\text{kW}$ , specimen size= $d 75 \times 60(\text{mm})$

실험 9, 실험 10, 실험 11의 온도 분포와 조직 사진을 Fig. 11~Fig. 12에 각각 나타내었다. 실험 9의 온도 분포와 조직 사진을 살펴보면 5분만에 가열이 이루어졌기 때문에 Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 시편단면에 있어서 온도 차이가 크게 나타나 시편의 바깥쪽은 반응용상태까지 가열이 된 반면 시편의 중앙부는 반응용상태까지 가열되지 못했다. 실험 10와 실험 11의 온도 분포는 모두 반응용상태까지 충분히 가열되었다. 특히 Fig. 12의  $t_{al}=10\text{min}$ 에 대응하는 실험 10에서는 시편 전체에서 구상화가 잘 된 미세한 조직을 얻을 수 있었지만 가열 시간이 실험 10보다 3분이 긴 실험 11에서는 중앙에서 가장자리로 갈수록 온도가 높기 때문에 Fig. 11의  $t_{al}=13\text{min}$ 에서 보여주는

바와 같이 고상간의 응집 현상이 시편의 표면에 많이 나타나 고상의 크기가 증가하였음을 알 수 있다. Table 1의 실험 9, 실험 10, 실험 11에 대응한 온도 분포를 살펴보면 시편의 고상율이 급격하게 변하는 570°C 부근에서는 온도가 130초정도 변함없이 일정하게 나타났다. 이 온도에서 A356의 공정 조직이 용해되고 있기 때문에 이와 같은 온도변화가 발생한 것으로 추측되며 이를 확인하기 위해 온도가 일정하게 나타나기 시작하는 시점에서 시편의 미세 조직과 끝나는 시점에 있어서 시편의 미세 조직을 Table. 1의 실험 12, 실험 13의 조건에서 실험을 하여 시험편에서 관찰하였다. 실험 12은 8분동안에 575°C까지 가열한 후에 퀘칭하였고 실험 13은 8분동안에 575°C까지 가열한 후에 575°C에서 3분간 유지한 후 퀘칭하여 조직을 관찰하였다. 실험 12과 실험 13의 온도 분포 및 조직 사진을 Fig. 13~Fig. 15에 각각 나타내었다.

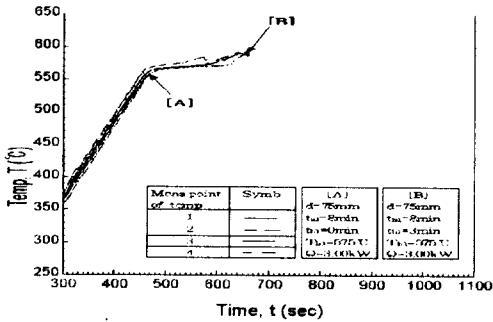


Figure 13 Relationship between holding time and temperature to obtain the globular microstructure from semi-solid aluminum alloy

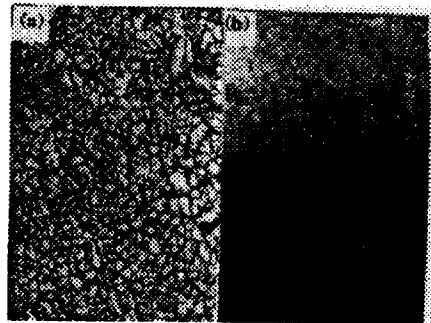


Figure 14 (a)~(b) Microstructure of ALTHIX reheated at condition of  $t_h=8$ ,  $T_H=575^\circ\text{C}$ ,  $t_H=0$ ,  $Q=3.0\text{kW}$ , specimen size= $d75 \times 60(\text{mm})$

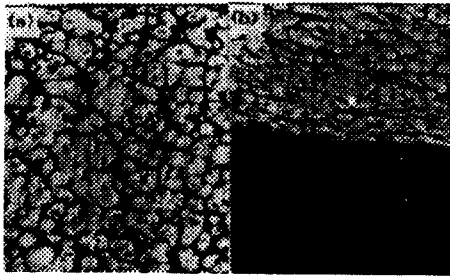


Figure 15 (a)~(b) Microstructure of ALTHIX reheated at condition of  $t_h=8$ ,  $T_H=575^\circ\text{C}$ ,  $t_H=3$ ,  $Q=3.0\text{kW}$ , specimen size= $d 75 \times 60(\text{mm})$  Fig. 14

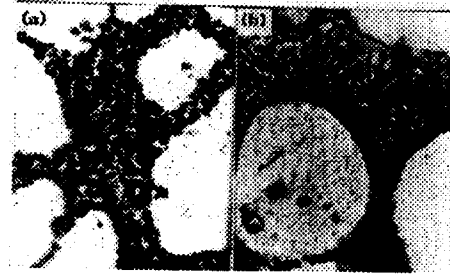


Figure 16 (a)~(b) Eutectic Microstructure of ALTHIX reheated at condition of experiment No 12 and experiment No 13

와 Fig. 15을 비교해 보면 Fig. 14는 전 단면에 걸쳐 균일한 구상화가 형성되지 않았음을 알 수 있으며 Fig. 15에서는 구상화조직을 가진 것에 반하여 소재표면쪽에서는 용해된 부분이 관찰되었다. Fig. 14의 중앙부의 액상이 응고한 부분을 1000배로 확대한 사진이 Fig. 16(a)이고 Fig. 15의 중앙부의 액상이 응고한 부분을 1000배로 확대한 사진이 Fig. 16(b)이다. Fig. 16(a)에서는 공정 조직이 용해되지 않고 그대로 나타나 있지만 Fig. 16(b)에서는 공정 조직이 완전히 용해된 것을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 13에서 보여주는 바와 같이 570°C 부근에서 130sec 동안 온도가 변화하지



않고 일정하게 되는 이유는 이 온도 영역에서 공정 조직이 용해되기 때문이다. 즉 공정 조직이 용해되기 위해서는 많은 열에너지와 시간이 필요하기 때문에 공정 조직이 용해될 수 있을 만큼의 열에너지가 공급될 때까지 온도의 상승은 없으며, 공정 조직이 용해되는 시간을 전후로 해서 고상율이 급격하게 변하게 된다. 이러한 온도 상승 현상 때문에 온도의 차이가 크게 나타났고 재가열 온도를 정확히 제어하기가 힘들다. 따라서 보다 정확한 재가열 온도의 제어와 시편의 균일한 온도 분포를 얻기 위해서는 반응용재료를 다단으로 재가열하는 방법을 사용하여 다음과 같은 방법으로 실험을 실시했다.

Table. 1의 실험 14는 유도로 출력을 4.97kW로 해서 상변화가 일어나기 시작하는 온도인  $t_{a1}=10$  분 동안  $T_{h1}=560^{\circ}\text{C}$ 까지 가열한 후  $T_{h1}=560^{\circ}\text{C}$ 에서  $t_{h1}=3$ 분간 유지하고, 다시  $t_{a2}=2$ 분 동안  $T_{h2}=590^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하여,  $T_{h2}=590^{\circ}\text{C}$ 에서  $t_{h2}=2$ 분간 유지하였다. 실험 15은 유도로 출력을 3.00kW로 해서 8분동안에 상변화가 끝나는 온도인  $T_{h1}=575^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하여,  $T_{h1}=575^{\circ}\text{C}$ 에서  $t_{h1}=3$ 분간 유지하고 다시  $t_{a2}=1$ 분동안에  $T_{h2}=584^{\circ}\text{C}$ 까지 가열한 후  $584^{\circ}\text{C}$ 에서  $t_{h2}=2$ 분간 유지하였다. 이 두 실험에서 실험 15의 유도로의 출력과 두 번째로 재가열온도  $T_{h2}=584^{\circ}\text{C}$ 로 낮춘 것을 실험 14에서 가열 시간이 길어짐으로 해서 충분히 가열된 시편에서 액상이 유출되어 실험이 힘들었기 때문이다. 실험 14와 실험 15의 온도 분포 및 시편의 증상과 가장 자리의 조직 사진을 Fig. 17, Fig. 18에 나타내었다.

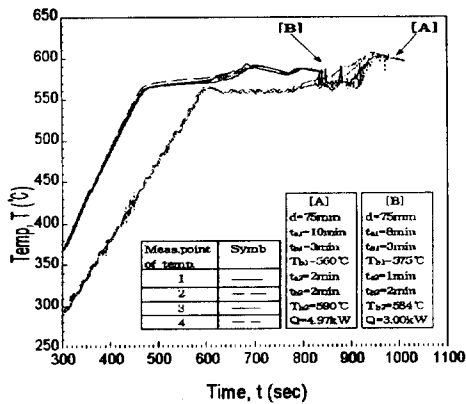


Figure 17 Temperature distributions in two steps reheating process of semi-solid alloy

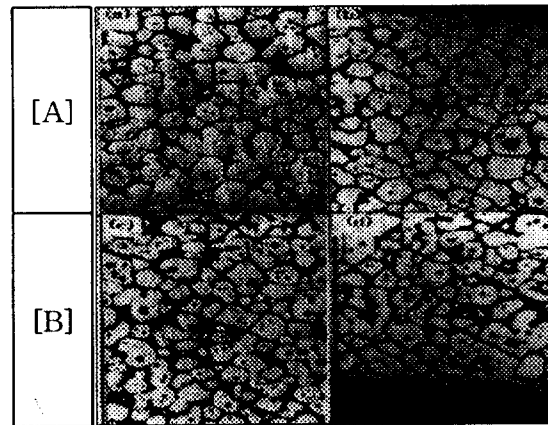


Figure 18 Microstructure in two steps reheating process of semi-solid alloy

두 실험의 온도 분포를 Fig. 17에서 살펴보면 실험 14의 온도 분포는 실험 9, 실험 10, 실험 11에 비해 재가열 온도까지 가열되는 구간에서는 온도 차이가 작게 나타났지만 상변화가 일어나는 구간 이후부터는 전체적인 온도 편차도 크게 나타났다. 실험 15에서는 총가열시간이 14분으로 실험 10에 비해 1분이 더 짧고, 실험 11에 비해 3분이 더 짧지만 상변화를 전후로 해서 시편의 온도도 상당히 안정되었다. 실험 14와 실험 15의 조직 사진을 살펴보면 두 실험 모두 단계별로 가열을 하지 않은 실험 9~10의 고상의 크기가 약  $60\mu\text{m}$ 인데 비하여 2단으로 가열하였음에도 불구하고 고상의 크기가 오히려  $100\mu\text{m}$ 로 증가하였다. 위의 원인은 단계별로 가열을 하였으나 실험 14,15에서는 고온에서 유지시간이 3분정도 증가 되었기 때문으로 생각된다. 총가열 시간이 더 긴

실험 14에서는 시편의 가장자리에서 고상의 크기가 큰 것은  $130\mu\text{m}$ 나 되었고 액상영역에서 성장하고 있는 고상의 크기도 실험 15의 조건보다 훨씬 크게 나타났다. 2단으로 시편을 재가열하게 되면 단을 주지 않고 재가열할 때보다 더 균일한 온도 분포를 얻을 수는 있지만 고온에서 유지 시간이 길어지면 고상의 응집과 성장 때문에 고상의 크기가 증가함을 알수 있었다.

Table. 1의 실험 16, 실험 17는 3단으로 시편을 재가열하였는데 실험 16은 유도로의 출력을  $4.97\text{kW}$ 로하여  $t_{a1}=4$ 분동안에  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ 까지 가열하여  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ 에서  $t_{h1}=1$ 분간 유지하고, 다시  $t_{a2}=4$ 분동안에 상변화가 끝나는 온도인  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ 까지 가열한 후 충분한 가열이 이루어질 수 있도록  $575^\circ\text{C}$ 에서  $t_{h2}=3$ 분간 유지한 후  $t_{a3}=2$ 분동안에  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ 까지 가열한 후  $584^\circ\text{C}$ 에서  $t_{h3}=2$ 분간 유지하였다. 실험 16에서는 액상이 유출되었기 때문에 실험 17에서는 출력을  $3.0\text{kW}$ 로 줄였으며, 실험 16의 총 가열 시간이 16분으로 너무 길기 때문에 4분동안에  $350^\circ\text{C}$ 까지 가열하여,  $350^\circ\text{C}$ 에서 1분간 유지하고, 가열단계가 끝나는 온도인  $575^\circ\text{C}$ 까지는 3분동안에 가열한 후, 충분한 가열이 이루어질 수 있도록  $575^\circ\text{C}$ 에서 3분간 유지한 후 1분동안에  $584^\circ\text{C}$ 까지 1분간 가열한 후  $584^\circ\text{C}$ 에서 2분간 유지하여 총 가열 시간을 14분으로 줄였다. 실험 16, 실험 17에서 시간의 변화에 따른 온도 분포와 조직사진을 각각 Fig. 19, Fig. 20에 각각 나타내었다.

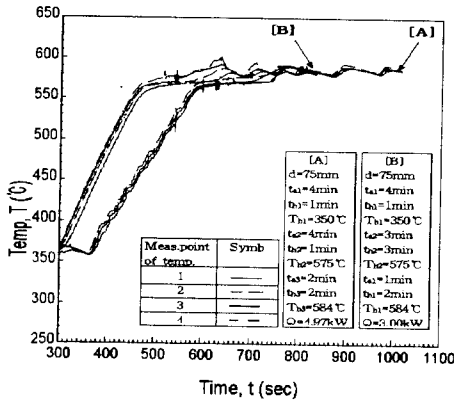


Figure 19 Temperature distributions of three steps reheating process of semi-solid alloy in condition of exp. No. 17 and 18 of Table. 1

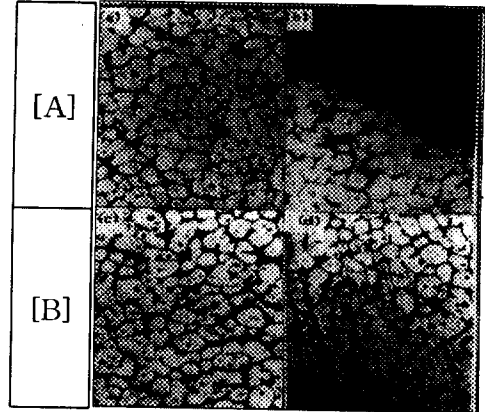


Figure 20 Microstructure in three steps reheating process of semi-solid alloy

Fig. 19에서 실험 17의 조직 사진(Fig. 20[B])과 온도 분포(Fig. 19)를 살펴보면 중앙부와 가장자리에서 고상인자의 크기가 큰 차이가 없이 균일하며 실험 16에 비해 총 가열시간이 2분이 적기 때문에 실험 16의 조직에 비해 고상인자의 크기도 작고 구상화도 잘되었다.

실험 16에 대응한 Fig. 20의 [A]에서 보여주는 조직 사진을 보면 표면쪽으로 갈수록 액상에 존재하는 고상의 결정입이 증가하였고, Fig. 17의 [A]에서 보여주는 바와 같이 실험 14에서는 상변화가 끝나는 지점에서 온도 차이가 나타나지 않았지만 마지막 재가열 공정에서 온도가 균일하지 못하고 변화하면서 설정된 온도에 수렴하였다. 위의 원인은 유도로의 출력이 너무 커서 시편이 쉽게 과열되기 때문으로 생각된다. 실험 16의 결과를 실험 14와 비교해 보면 조직의 차이는 없지만, 실험 16의 총가열시간이 실험 14의 총가열시간에 비해 1분정도 감소하였지만 Fig. 17,19의 [A]에

서 보여주는 바와같이 전체적인 시편의 온도 차이는 크게 나타났다.

3단으로 시편을 재가열한 한 실험 16과 실험 17를 2단으로 재가열 한 실험 14와 실험 15을 비교해 보면 실험 16, 실험 17의 온도 차이가 실험 14, 실험 15의 온도 차이보다 클뿐아니라 조직의 향상도 없었기 때문에 3단으로 시편을 재 가열하는 것은 재가열 공정만 복잡해지고 총가열 시간이 길어질 수 있기 때문에 d 75× 160(mm)의 재가열에는 적합하지 못한 것으로 판단된다.

다단으로 가열하여 가장 양호한 조직과 온도 분포를 얻은 실험 15의 총가열 시간은 14분이지만 연속가열한 실험 11의 가열 시간은 15분으로 1분이 더 길지만 실험 11의 경우가 고상입자가 더 미세하다. 위의 원인은 실험 11이 실험 15에 비해 총 가열 시간이 1분 길지만 실험 11은 고온에서 유지 시간이  $t_{h1}=2$ 분인 반면 실험 15은 고온에서 가열 시간이  $5(t_{h1}+t_{h2})$ 분으로 3분이나 더 길기 때문에 고온에서 원자의 운동이 매우 활발하고 확산 속도도 빠르기 때문에 고상 성장이 고온에서 빨리 일어나기 때문이다. 따라서 총가열 시간 중에서도 고온에서 유지 시간이 길수록 결정립은 보다 더 증가함을 알 수 있다. 또한 총가열 시간이 긴 실험 12에서 온도 차이가 더 크게 나타난 것으로 보아 2단으로 가열하는 것이 연속으로 가열하는 것보다 시편 내의 온도 차이가 작음을 알 수 있었다.

실험 9에서부터 실험 17까지 총 가열 시간이 길어질수록 시편의 온도 차이는 줄일 수 있었지만 고상영역이 성장하여 결정립이 조대화되어 미세조직을 얻을 수 없었다.

### 3. 결론

반응용소재의 크기가 각각 d 40× 160(mm), d 75× 160(mm)인 소재를 반응용다이캐스팅 및 단조공정에 응용 하기 위하여 최적재가열조건은 실험적으로 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1). d 40× 160(mm) 크기의 시편의 재가열 실험은 재가열 온도까지 가열 시간을 10분으로 하고 유지 시간을 2분으로 하였을 때가 가장 미세하고 구상화가 잘된 조직을 얻을 수 있었고, 시편의 온도 차이도 작게 나타났다.
- (2). d 75× 160(mm) 크기의 시편을 사용한 재가열 실험은 2단으로 재가열한 실험 15의 재가열 조건으로 가열한 결과 시편의 온도 차이가 적고 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.
- (3). 재가열 시 총가열 시간이 작을수록 고상입자의 크기는 작아졌지만 시편의 온도 차이는 증가하였다.
- (4). 총가열시간이 같으면 연속 가열하는 것보다는 2단으로 가열하는 것이 시편 내의 온도 차이를 줄일 수 있다.
- (5)시편을 가열할 때 570℃부근에서는 공정조직의 용해로 인하여 130sec동안에 시편의 온도가 상승하지 않고 일정한 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터의 지원금에 의한 연구의 일부분입니다.

#### 4. 참고문헌

1. Jonathan A. Dantzig and Stephen P. Midson, "Billet heating for Semi-Solid", The 2nd Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, p107.
2. G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen., 1994, "SSM-Forming of usually Wrought Aluminium Alloys", The 3rd Int' 1 Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 107-116.
3. Kenneth P. Young and Rudolf Ritze, "semi-Solid Metal Cast Aluminium Automotive Components", The 3rd Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 155-189.
4. M. L. Times, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax., 1996, "Computer Based Numerical Analysis of Semi-Solid Metalworking", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp120-131.
5. Kapranos. P, Kirtwood D. H and C. M. Sellars., 1996, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 148-152.
6. Wilfred Kahmann, Robert Schragner and Kenneth Young., 1996, "Free Standing Raw Material Production System for SSM Recycling", The 4th Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp154-158.