

## Thixoforging 공정을 위한 알루미늄 재료의 유도 가열

정 홍규\*, 강 충길\*

\*부산대학교 기계공학부

### Induction Heating of Aluminum Alloys for Thixoforging Process

H. K. Jung\*, C. G. Kang\*

\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735

#### Abstract

The semi-solid materials(SSMs) fabricated under electric-magnetic stirring condition are necessary to be applied in the thixoforging process. The optimal reheating conditions to thixoforging process were investigated with changing the reheating time, holding time, reheating temperatures, capacity, and adiabatic material size. In the case of solid fraction  $f_s=50\%$ , the microstructure of SSM (specimen size:  $d76 \times t90$ ) at the condition of the first reheating time 4min, holding time 1min and reheating temperature  $350^\circ\text{C}$ , the second reheating time 3min, holding time 3min and reheating temperature  $575^\circ\text{C}$ , the third reheating time 1min, holding time 2min and reheating temperature  $584^\circ\text{C}$ , capacity  $Q=8.398\text{KW}$ , and adiabatic material size 53mm is obtained with globular microstructure and finest.

Key Words : Thixoforging(반용융 단조), Solid Fraction(고상율)

Reheating Condition(재가열 조건), Holding Time(유지시간)

Globular Microstructure(구상화조직)

#### 1.서론

알루미늄 소재를 이용한 Thixoforging 공정은 액상과 고상이 공존하는 온도 영역에서 구상화 조직(Globular Microstructure)으로 만들어 최종 부품에 가깝게 성형하는 방법으로 에너지 절약, 공정 단축 등의 여러 가지 측면에서 많은 관심이 집중되고 있다. <sup>(1)(2)</sup>

그 중에서도 반용융 상태의 다이캐스팅 및 단조 공정을 위하여 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 조건의 설정은 매우 중요하다. 복사 가열로 빌렛을 재가열할 때는 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 온도 구배가 발생할 수 있다. 빌렛의 온도가 균일하지 못하면 고상율이 다르게 되어 온도가 낮은 곳은 성형시 다이에 충전되기 위한 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 곳은 성형

공정 중 액상이 고상으로부터 유출되어 균일한 제품을 얻을 수 없다. 반응용 소재의 다이캐스팅 및 단조 공정에 필요한 재가열 시간, 시편의 크기 및 가열 온도가 빌렛의 미세 조직에 미치는 영향 등을 종합적으로 관찰하여야 부품제조에 응용할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 반응용 다이캐스팅 및 단조 공정에서 절대적으로 필요한 소재의 재가열 조건이 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재가열 시간, 재가열 온도, 재가열 유지 시간, 단열재의 크기, 유도로의 출력 등을 변수로 하여 조직의 구상화 정도를 조사하였다. 또한, 재가열시 빌렛의 온도 구배를 줄일 수 있고, 구상화된 조직을 얻을 수 있는 재가열 조건을 실험적으로 제안하였다.

## 2. 재가열 실험

다이캐스팅 및 단조 성형을 위해서는 빌렛(Billet)을 반응용 상태로 가열해야 한다. 재가열은 빌렛을 성형할 수 있는 반응용 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 전자기적 교환에 의해 제조되어진 A356을 사용하였다. 성분 분석기를 이용하여 구한 A356의 화학 조성은 Table. 1에 나타내었으며, 원소재의 미세조직은 Fig.1에 나타내었다.

Table. 1 Chemical composition 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

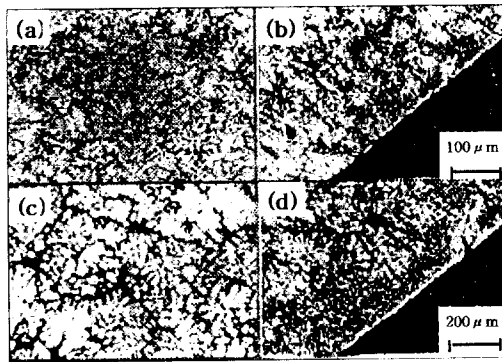
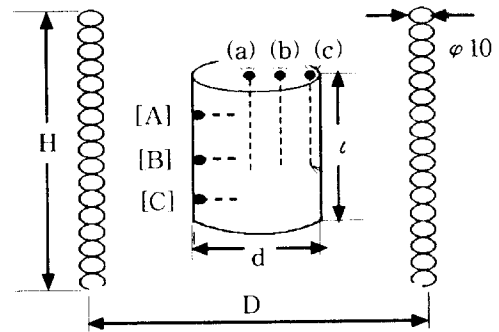


Figure 1 Microstructure of raw A356  
ALTHIX aluminium alloy



[A] [B] [C] : Thermocouple positions

(a) (b) (c) : "

D(mm)	d(mm)	H(mm)	l (mm)
120	76	120	90

Figure 2 Schematic diagram of induction heating of cylindrical specimen

A356 재료를 Fig.2과 같이  $d76 \times I90$ (mm)의 빌렛으로 가공하여 출력 50KW 고주파 유도로를 이용해서 재가열 실험을 하였다. 고주파 유도로의 가열 코일은 Fig.2에서와 같이  $D120 \times H120$ (mm)로 제작해서 시편이 균일하게 가열될 수 있도록 하였다. 소재의 표면으로부터 45mm, 측면으로부터 10mm의 위치에  $\phi 1.6$ mm의 K-Type CA열전대를 삽입해서 재가열 실험시 시편의 각 부분의 온도를 측정하였다.

고주파 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도( $T_h$ ), 재가열 온도에서의 유지시간( $t_h$ ), 재가열 단계, 단열재 크기 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직을 관찰하여 온도 구배가 작고 미세한 구상화 조직을 갖는 최적의 재가열 조건을 찾기 위해 재가열 실험을 실시하였다. Table. 2에 사용된 기호의 정리는 Fig.3에 나타내었다.

Table. 2 Experimental conditions for reheating of Semi-solid aluminum alloy

(A356), Test specimen size :  $d76 \times I90$ (mm)

No	Heating Time			Heating Temperature			Holding Time			Total Time (min)	Capacity Q(Kw)	Adiabatic Material Size(mm) D×W×L
	$t_a$ (min)			$T_h$ (°C)			$t_h$ (min)					
	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_{a3}$	$T_{h1}$	$T_{h2}$	$T_{h3}$	$t_{h1}$	$t_{h2}$	$t_{h3}$			
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	Without
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	"	"	1	"	575	"	"	3	3	15	"	"

### 3. 재가열 실험 결과 및 고찰

전자기 교반법으로 제조된 A356 소재를 재가열한 후의 미세 조직의 상태는 균일한 구상화 조직이 되어야 하고, 또한 고주파 유도로에서 급형으로 이송될 때 소재의 형태가 유지되어야 한다. 따라서, 고주파 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도에서의 유지시간( $t_h$ ), 재가열 온도( $T_h$ ), 재가열 Step, 단열재 크기 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직 등을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 반응용 상태의 가열 온도를 결정하기 위해 소재의 고상을 계산은 Hirt<sup>(3)</sup>가 제안한 실험적 Data를 이용하였다. 가열 시간에 따른 최적의 출력 조건을 알아보기 위해서

실험 1~실험 9에서는 재가열 조건을  $t_{a1}=4\text{min}$ ,  $t_{a2}=4\text{min}$ ,  $t_{a3}=2\text{min}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=3\text{min}$ ,  $t_{h3}=2\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ 로 고정시키고 고주파 유도로의 출력을 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 고주파 유도로의 출력이 7.796KW와 8.398KW인 경우에 시편 내부의 온도차가 미소한 상태에서 설정 온도에 도달하였다. 실험 10과 실험 11에서는  $t_{a1}=10\text{min}$ ,  $t_{h1}=2\text{min}$ ,  $T_{h1}=584^\circ\text{C}$ 로 고정시키고 고주파 유도로의 출력을 각각 7.796KW, 8.398KW로 하였으며 단열재의 크기는 실험 10에서는  $D75 \times W70 \times L19(\text{mm})$ , 실험 11에서는  $D53 \times W53 \times L19(\text{mm})$ 로 하였다. Fig.4와 Fig.5는 실험 10과 실험 11의 시편의 온도 분포와 조직 사진이다. 두 경우 모두 시편 내의 온도차는 미소하였으며 전체적으로 입자의 크기는 작으나 구상화가 이루어지지 않았다. 고상간의 확산이 일어날 수 있는 충분한 가열시간의 부족으로 인하여 시편의 크기  $d76 \times l90$ 에 대해서는 1단 재가열이 적절하지 않다는 것을 알 수 있었다.

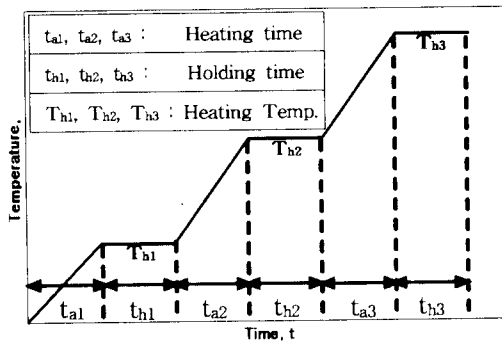


Figure 3 Schematic diagram of reheating conditions to obtain semi-solid material

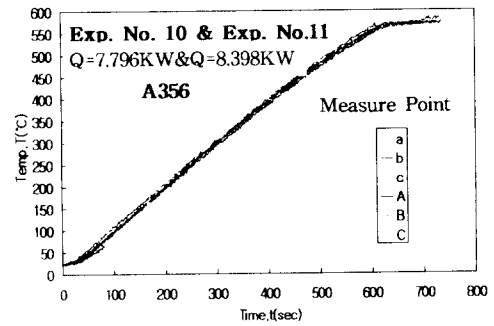


Figure 4 Temperature distributions in one step reheating process of semi-solid alloy ( $f_s=50\%$ ,  $t_{a1}=10\text{min}$ ,  $T_{h1}=584^\circ\text{C}$ ,  $t_{h1}=2\text{min}$ )

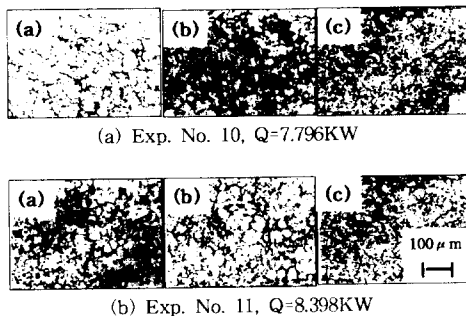


Figure 5 Microstructure in one step reheating process of semi-solid aluminum alloy ( $A356$ ,  $f_s=50\%$ ,  $t_{a1}=10\text{min}$ ,  $T_{h1}=584^\circ\text{C}$ ,  $t_{h1}=2\text{min}$ )

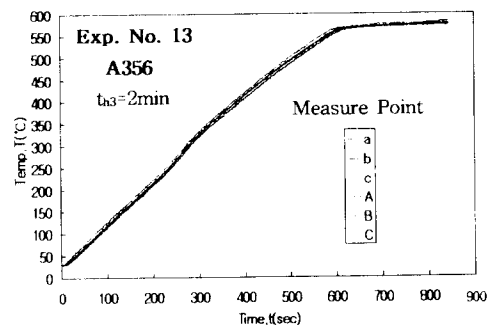


Figure 6 Temperature distributions in three step reheating process of semi-solid alloy ( $f_s=50\%$ ,  $t_{a1}=4\text{min}$ ,  $t_{a2}=3\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=3\text{min}$ ,  $Q=8.398\text{KW}$ )

실험 13에서는  $t_{a1}=4\text{min}$ ,  $t_{a2}=3\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=3\text{min}$ ,  $t_{h3}=2\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ 로 하였으며 고주파 유도로의 출력은 8.398KW, 단열재의 크기는  $D53 \times W53 \times L19(\text{mm})$ 로 하였다. 실험 14와 실험 17에서는 실험 13의 조건에서 각각  $t_{h3}=1\text{min}$ ,  $t_{h3}=3\text{min}$ 으로 하여 실험을 수행하였다. Fig.6과 Fig.7는 실험 14, 실험 13, 실험 17의 시편의 온도 분포와 조직 사진을 나타낸 것이다. 시편 내부의 온도차는 미소하였으며 실험 13에서는 Fig.2의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서는 아주 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.

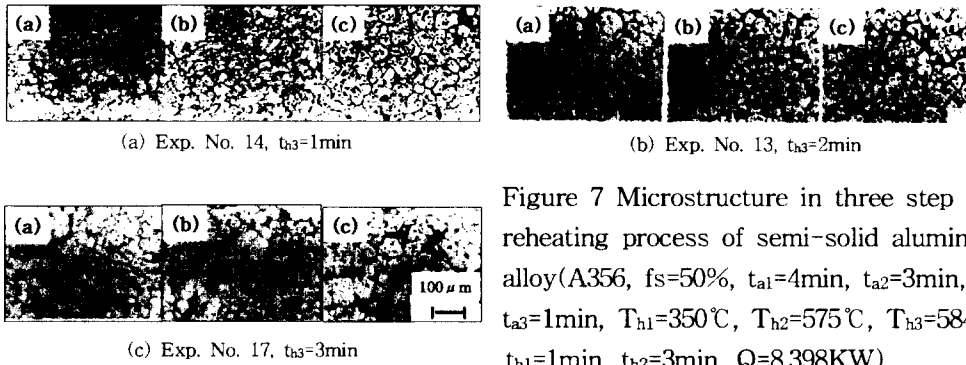


Figure 7 Microstructure in three step reheating process of semi-solid aluminum alloy(A356, fs=50%,  $t_{a1}=4\text{min}$ ,  $t_{a2}=3\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=3\text{min}$ ,  $Q=8.398\text{KW}$ )

실험 14에서는 Fig.2의 (a)와 (b) 위치에서는 구상화가 이루어지지 않았고 (c) 위치에서는 구상화가 진행중임을 알 수 있다. 실험 17에서는 Fig.2의 (a), (b), (c) 위치에서 모두 구상화가 잘 되었지만 조대화된 고상 입자가 보였다.

Fig.6에서 보여주는 바와 같이 공정 온도인  $575^\circ\text{C}$  부근에서 120~130초정도 온도의 변화없이 유지된 후에, 고상율이 급격하게 변하는 것은 이 온도 영역에서 공정 조직이 용해되고 있기 때문임을 알 수 있었고 미세한 구상화 조직을 얻기 위해서는  $575^\circ\text{C}$  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 좀 더 정확히 재가열 온도의 제어와 시편의 균일한 온도 분포를 위해서는 3단으로 시편을 재가열해야 한다.

3단 재가열에서는 마지막 단계의 재가열 유지시간이 아주 중요하다. 마지막 단계의 재가열 유지시간이 짧으면 Fig.7의 (a)에서 볼 수 있듯이 고상간의 확산이 일어날 수 있는 시간이 부족하여 구상화가 이루어지지 않고 마지막 단계의 재가열 유지시간이 길면 Fig.7의 (c)에서와 같이 조대화(Coarsening)가 발생하므로, 적절한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 재가열 유지시간은 2분으로 하는 것이 좋다. 강 등<sup>(4)</sup>이 실험한  $d39 \times \ell 85(\text{mm})$ 와  $d76 \times \ell 60(\text{mm})$ 인 소재의 재가열 조건과 비교해 보면, 소재의 크기가 커질수록 다단 재가열이 적합하며, 가열시간과 고주파 유도로의 출력을 증가시켜야 하고, 마

지막 단계의 재가열 유지시간을 2분으로 하여야 한다는 사실을 알 수 있다.

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

#### 4. 결론

A356 반응용 소재의 크기가  $d76 \times t90$ (mm)인 소재를 반응용 단조 및 Thixoforging 공정에 적용하기 위해서는 재가열 조건을 실험적으로 구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1)  $d76 \times t90$ (mm)의 크기를 가진 소재의 재가열에서 1단 재가열은 입자의 크기는 작으나 구상화가 이루어지지 않음을 알 수 있었다.
- (2) 반응용 단조 및 Thixoforging을 위한 3단 재가열의 경우,  $t_{a1}=4\text{min}$ ,  $t_{a2}=3\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=3\text{min}$ ,  $t_{h3}=2\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=575^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=584^\circ\text{C}$ ,  $Q=8.398\text{KW}$ 의 재가열 조건에서 가장 미세하고 구상화가 잘 된 조직을 얻을 수 있었으며 시편의 온도 차이도 작게 나타났다.
- (3) 3단 재가열 공정에 있어서 마지막 단계의 재가열 유지시간이 짧으면 구상화가 이루어지지 않고 길면 조대화(Coarsening)가 발생하므로 적절한 구상화조직을 얻기 위한 마지막 단계의 최적의 재가열 유지시간은 2분정도 됨을 알 수 있었다.
- (4) A356의 경우는 공정 온도가  $575^\circ\text{C}$ 이므로 미세한 구상화 조직을 얻기 위해서는  $575^\circ\text{C}$ 이상의 온도로 재가열해야 한다.

본 연구는 부산대학교 ERC/NSDM의 지원에 의하여 이루어진 연구의 일부분이다.

#### 5. 참고문헌

1. K.P. Young, "Semi-Solid Metal Forming Alloys and Composites", Nature and Properties of Semi-Solid Materials Proceedings of a Symposium by the TMS Solidification Committes of the Material Design and Manufacture Division, pp. 245-266, 1992.
2. M.C. Flemings, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metallurgical Transction, 27A, pp. 957-981, 1991.
3. 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, pp. 107-116, 1994.
4. 강 충길, 도 영진, 강 성수, "반응용 알루미늄 재료의 재가열 공정", 97 고액공존 금속의 성형기술 심포지엄, pp. 16-27, 1997.