

반용융 알루미늄 합금의 재가열 및 Thixoforging 부품의 기계적 성질

정홍규* · 강충길*

(1999년 1월 11일 접수)

Reheating of Semi-Solid Aluminum Alloys and Mechanical Properties of Thixoforged Product

H. K. Jung and C. G. Kang

Abstract

The reheating of the billet in the semi-solid state as quickly and homogeneously as possible is one of the most important parts. To obtain a fine globular microstructure in cross section of billet, the optimal design of the induction coil for variation of alloys and specimen sizes is necessary. For the thixoforging process the construction of the reheating data base is very important, because the reheating conditions are different for variation of SSM and billet sizes. So in this study, the optimal coil design of A356 (ALTHIX) and A12024 with $d \times l = 60 \times 90$ (mm) to obtain the globular microstructure is theoretically proposed. The suitability of an optimal coil design will be demonstrated by reheating experiments. Finally, the thixoforgability of an arbitrarily shaped product is evaluated by its forming variables. The defects and mechanical properties are also investigated.

Key Words : Thixoforging, Reheating Condition, Induction Coil, Globular Microstructure, Arbitrarily Shaped Product

1. 서론

기존의 알루미늄을 이용한 자동차 부품의 개발은 주로 액체 상태에서 원하는 형상의 부품을 직접 제조하는 다이캐스팅(Die Casting)이나 용탕단조법(Squeeze Casting)에 의해 이루어지고 있다. 그러나 전자는 복잡한 형상의 부품을 대량으로 생산할 수 있는 반면에 용탕이 캐비티(Cavity) 내부에 유입될 때 난류로 인한 공기의 포집과 수축에 의한 결함 때문에 강도가 요구되는 부품에는 적합하지 않다. 후자는 용탕의 과열도 때문에 금형의 수명을

단축시키는 결점이 있다. 단조 공정의 경우, 복잡한 형상의 부품을 성형할 때는 성형 압력이 높아지고 절삭 등과 같은 후가공으로 인하여 경쟁력있는 가격의 부품을 생산할 수 없다.

Thixoforging 공정은 적은 하중과 낮은 온도에서 소재를 금형의 캐비티 내에 완전히 충전이 되도록 할 수 있을 뿐만 아니라 성형중 액상과 고상이 공존하기 때문에 가스의 함유율이 다이캐스팅에 비하여 적어 결함을 현저히 줄일 수 있다. 따라서 기존의 부품 성형 공정의 장점을 이용하고 단점을 보완할 수 있는 Thixoforging에 관한 많은

* 부산대학교 기계공학부

연구가 진행되고 있다.^(1~5) 고체와 액체가 공존하는 Thixoforging 공정에서 소재의 전단면에 걸쳐서 균일한 온도 분포를 얻는 것이 매우 중요하다.

결과적으로, Thixoforging을 위해서는 초기 공정 온도 즉, 초기 고상율이 반응용 가공 공정의 성패를 좌우하는 만큼 온도 제어가 용이한 유도 가열 방법이 필수적이다.^(4~7) Thixoforging 공정을 위해서는 단면 전체에 걸쳐서 고상율과 구상화 조직이 균일하게 되도록 가열하여야 한다. 전기로에서 빌렛을 재가열할 때는 가열 시간이 너무 길고 빌렛의 온도를 균일하게 제어하기 힘들기 때문에 유도 가열 방법을 사용한다. 유도 가열은 짧은 시간 동안에 빌렛의 온도를 정확히 제어할 수 있지만 가열 시간이 짧기 때문에 단면 전체에 걸쳐서 온도 구배가 발생할 수 있다. 빌렛의 온도가 낮은 곳은 충전시 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 곳은 액상이 고상으로부터 유출되는 액상 편석현상이 발생하여 기계적 성질이 균일하지 못한 제품이 된다.

재가열에 관한 연구 동향으로서 Midson⁽⁶⁾은 전자기 끝단 효과를 방지하기 위한 코일 설계의 필요성을 제안하였고, Garat⁽⁹⁾은 A356 및 A357의 다단 출력 재가열 조건을 제시하였다. Witulski⁽¹⁰⁾는 빌렛 가열시 안정성이 중요하므로 자중에 의해 빌렛이 변형되지 않도록 하는 고상율의 제어가 필요하다고 제안하고 있다. Matsuura⁽¹¹⁾는 직경이 76.2 mm, 길이가 (170~180) mm인 빌렛을 상온에서 843K (570℃) ±5K 까지 가열하였다. 정 등^(7, 12)은 반응용 소재(SSM)의 종류와 크기에 따라서 전자기 끝단 효과(Electromagnetic End Effect)를 최소화할 수 있는 상용 유도가열 시스템(반응용 성형용: 60Hz)의 최적 코일설계를 제안하였다. 정 등^(4~5)은 $d \times l = 76 \times 70$ (mm)인 ALTHIX 86S 합금의 유도가열시 결정립 성장기구를 통해서 조대화를 예방할 수 있는 방안을 제안하였다.

Thixoforging 공정에 관한 연구 동향으로서 Kouji⁽¹³⁾는 Thixoforging을 실시하여 일반적인 중력 주조법에 의한 제품의 기계적 성질을 비교하였는데, 그 결과 두 방법 모두 응고시 냉각속도가 빠를수록 제품의 인장특성, 피로 특성 그리고 충격특성이 현저히 증가된다고 보고하고 있다. Kitamura 등⁽¹⁴⁾은 반응용 다이캐스팅 공정으로 실험을 하여 자동차부품 키넥팅 로드에서 적용하였는데 기존의 금속 주조법에 의한 제품의 기계적 성질과 비교해 볼 때 제품의 강도, 연신율은 거의 같은 반면에, 거시편석, 금형의 열적부하, 치수 정밀도, 제품의 외관 등이 주조법에 비하여 현저히 개선됨을 보여주고 있다.

강 등^(15~16)은 자동차 브레이크 시스템에 사용되는 마스터 실린더(Master Cylinder)를 기존의 주조후 절삭공정으로 제조하지 않고 A356과 A357 소재를 사용하여 Thixoforging에 의하여 제조하는 방법 및 금형설계 법을 제안하였다.

반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 재가열 조건이 다르기 때문에 Thixoforging을 위해서는 재가열 조건에 관한 D/B 구축이 극히 중요하다.^(4~5, 12)

Thixoforging을 이용한 임의형상 부품성형에서 결함이 없고 기계가공의 양을 최소화 하기 위해서는 반응용 성형성(Thixoformability) 및 성형품의 기계적 성질이 파악되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 반응용 소재의 종류, 직경 및 길이가 다양하게 변할 때 Thixoforging 공정에 이용할 수 있는 재가열 조건을 실험적으로 도출하였다. 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. 또한 임의형상 부품의 성형변수에 따른 반응용 성형성 및 기계적 성질에 대한 정량적인 평가를 통하여 제품의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

2. 유도 코일 설계의 필요성

Thixoforging 공정에서 가능한 빨리 그리고 균일하게 반응용 상태로 빌렛을 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계는 실제로 중요한 측면이다. 코일과 빌렛을 구성하는 실제 시스템에서는, 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량은 보통 등분포하지 않고, 그 결과로 비균일 온도 분포가 생긴다. 따라서 코일 설계의 최적화를 위한 중요한 점이 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다.^(4~5, 7, 12)

따라서 본 연구에서는 반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 구상화된 조직을 얻을 수 있는 상용 유도 가열 시스템(반응용 성형용: 60Hz)의 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 실험을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하고자 한다.

3. 균일 재가열을 위한 유도코일 설계

균일 재가열을 위하여 본 연구에서는 Fig. 3에서 표시한 바와 같이 유도 가열 장치의 최적 코일 길이 H와 코일의 내경 D_1 를 다음과 같이 설계하였다.

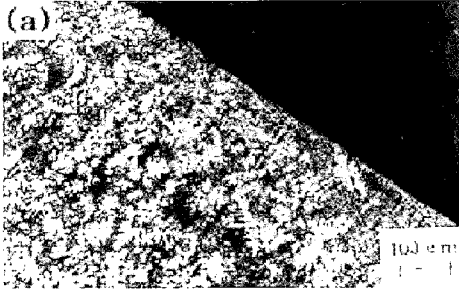


Fig. 1 Microstructure of raw aluminum alloy (A356)



Fig. 2 Microstructure of raw aluminum alloy (A12024)

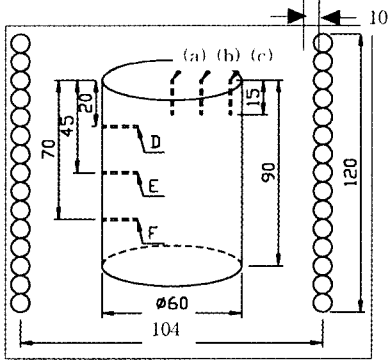


Fig. 3 Schematic diagram of induction coil and positions of temperature measurement

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

$$\delta_F = \sqrt{\frac{2\rho_a}{\mu\omega}} \quad (1)$$

소재의 크기가 $d \times l = 60 \times 90(\text{mm})$ 인 A356과 A12024의 경우 p_a 는 다음과 같이 각각 계산된다.

$$A356: p_a = \frac{P_s(\theta_s - \theta_c)_{idealized}}{\theta_s - \theta_c} = \frac{7.01_k(\theta_s - \theta_c)}{d} \quad (2-1)$$

$$A12024: p_a = \frac{P_s(\theta_s - \theta_c)_{idealized}}{\theta_s - \theta_c} = \frac{7.14_k(\theta_s - \theta_c)}{d} \quad (2-2)$$

여기서 $\frac{\theta_s - \theta_c}{(\theta_s - \theta_c)_{idealized}} = k$ 는 빌렛의 반지름 $\frac{d}{2}$ 와 소재의 유한 침투 깊이 δ_F 의 비로부터 구할 수 있다.⁽¹⁷⁾

여기서 $\rho_a, \mu, \omega, k, \theta_s - \theta_c$ 는 각각 A356 및 A12024의 저항도, 자기 상수, 각 주파수, 열전도도, 표면과 중심부의 최대 온도차를 나타낸다.

$d \times l = 60 \times 90(\text{mm})$ 인 A356 및 A12024 빌렛 14개를 단위 시간당 각각 584℃와 616℃까지 재가열 한다고 가정하면, Stansel⁽¹⁸⁾의 계산 조건(빌렛 1 Kg을 510℃까지 가열할 경우, 열용량 $Q = 145\text{kW h/t}$, 생산율 $Pr = 0.01\text{t/h}$)과 선형 보간법을 이용하여 열용량 Q 와 생산율 P_r 이 계산되므로, 최소 가열 표면적 A_s 와 최소 가열길이 l_w 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

코일의 내경 D_i 와 최적 코일 길이 H 를 결정하기 위하여 계산에 필요한 물성치를 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

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

$$H = l_w + (25 \sim 75) \quad (5)$$

따라서, 이론적으로 코일을 설계한 결과 시편의 크기가 $d \times l = 60 \times 90(\text{mm})$ 인 A356 및 A12024 소재를 가열

Table 1 Recommended air gaps [$1/2 (D_i - d)$] for through-heating coils⁽¹⁷⁾

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 2 Property values to calculate the optimal coil length (Specimen size: $d \times l = 60 \times 90$ mm, $f=60$ Hz, $\delta=10.7$ mm⁽¹⁹⁾, $l=90$ mm, $k=0.57$ for A356 and $k=0.56$ for A I2024)

Parameter	Symbol	Unit	Values		Ref.
			A356	A I2024	
Maximum Surface-Center Temperature Difference	$\theta_s - \theta_c$	K	4	4	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	159	151	(20)
Idealized Power Density	P_s	kW/m ²	42.35	40.24	
Resistivity	ρ_a	$\mu\Omega$ m	0.0421	0.045	(20)
Magnetic Constant	μ	H/m	$4\pi \times 10^7$	$4\pi \times 10^7$	(17)
Angular Frequency	ω	rad/s	120π	120π	
Finite Current Depth of Penetration	δ_F	m	1.3×10^{-2}	1.38×10^{-2}	
Actual Power Density	P_a	kW/m ²	74.3	71.87	
Thermal Power	P_t	kW	1.02	1.06	
Production Rate	P_r	Dimensionless	0.01 t/h	0.01 t/h	(18)
Thermal Capacity	Q	kW	102 h/t	106.5 h/t	
Minimum Heated Surface Area	A_c	m ²	13.7×10^3	14.75×10^3	
Billet Diameter	d	mm	60	60	
Minimum Heated Length	l_w	mm	72	78	

Table 3 Designed dimensions of induction heating device ($f=60$ Hz, $\delta=10.7$ mm⁽¹⁹⁾, $l=90$ mm, $k=0.57$ for A356 and $k=0.56$ for A I2024)

Alloys	Billet Diameter (d;mm)	Coil Inner Diameter (D_i ;mm)	Min. Heating Length (l_w ;mm)	Optimal Coil Length (H;mm)
A356	60	84	72	97~147
A I2024	60	84	78	103~153

하기 위한 코일의 크기를 Table 3과 같이 제안하여 실험을 수행하였다.

이론적으로는 열전도도가 큰 A356 소재가 A I2024 소재보다 코일의 길이가 조금 짧아짐을 알 수 있다.

4. 재가열 실험

본 실험에서 사용된 알루미늄 재료는 일반적으로 자동차

Table 4 Chemical compositions of A356 and A I2024

Alloys		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb
A356	Min(%)	6.5	-	-	-	0.30	-	-	-	-
	Max(%)	7.5	0.15	0.03	0.03	0.40	-	0.05	0.20	0.03
A I2024	Min(%)	-	-	0.8	0.3	1.2	-	-	-	-
	Max(%)	0.05	0.70	4.9	0.9	1.8	0.10	0.25	0.15	-

Table 5 Experimental conditions for reheating of semi-solid aluminum alloy (A356), with $d \times l = 60 \times 90$ (mm)

No	Heating Time t_a (min)			Holding Time t_h (min)			Heating Temperature T_h (°C)			Total Time (min)	Capacity Q (kW)
	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{h1}	t_{h2}	t_{h3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}		
1	10						584			10	8.8
2	8	1		3	2		575	584		14	"
3	4	4	1	1	2	1	350	565	584	13	"
4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.8
5	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	10.5
6	"	"	"	"	"	"	"	"	576	"	12.5
7	"	"	"	"	"	1	"	"	"	13	"
8	"	"	"	"	"	"	"	560	567	"	"
9	"	"	"	"	"	1	"	"	"	13	"
10	4	4	1	1	1	3	"	560	567	14	"
11	4	3	1	1	3	2	"	565	575	14	9.1
12	4	3	1	1	3	1	"	560	567	13	"
13	"	"	"	"	"	"	"	"	570	"	8.9
14	"	"	"	"	"	"	"	567	572	"	"
15	"	"	"	"	"	"	"	569	574	"	"
16	"	"	"	"	"	"	"	573	584	"	"
17	"	"	"	"	"	"	"	565	570	"	"
18	"	"	"	"	"	3	"	562	567	15	7.1
19	"	"	"	"	"	5	"	"	"	17	"
20	"	"	"	"	"	8	"	570	576	20	"
21	"	"	"	"	"	3	"	"	"	15	"
22	"	"	"	"	"	5	"	"	"	17	"
23	"	"	"	"	"	8	"	"	"	20	"

차 부품 개발에 많이 이용하는 주조용 재료로 프랑스 Pechiney에서 전자기 교반으로 제조되어진 A356 및 주조용 재료로 압출비 9.73에서 열간 압출로 제조되어진

Table 6 Experimental conditions for reheating of semi-solid aluminum alloy (A356), with $d \times l = 60 \times 90$ (mm)

No	Heating Time t_a (min)			Holding Time t_h (min)			Heating Temperature T_h (°C)			Total Time (min)	Capacity Q (kW)
	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{h1}	t_{h2}	t_{h3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}		
1	15	1		1			622	635		18	8.6
2	17			0.5			635			17.5	8.6
3	4	4	1	1	2	1	350	610	620	13	8.6
4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	4	4	1	1	3	2	"	607	616	13	12.1
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.2
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	8.8
11	4	3	1	1	3	2	"	603	612	14	"
12	"	"	"	"	"	1	"	"	"	13	8.6
13	"	"	"	"	"	"	"	"	616	"	"
14	"	"	"	"	"	3	"	"	612	15	"
15	"	"	"	"	"	5	"	"	"	17	"
16	"	"	"	"	"	8	"	"	"	20	"
17	"	"	"	"	"	3	"	607	616	15	"
18	"	"	"	"	"	5	"	"	"	17	"
19	"	"	"	"	"	8	"	"	"	20	"

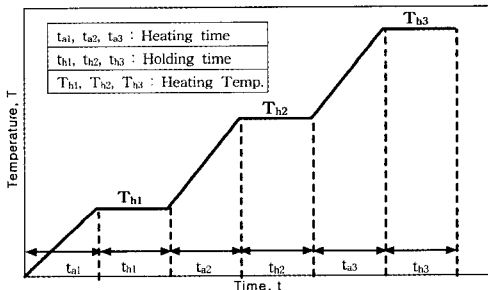


Fig. 4 Input data diagram of heat controller to obtain the globular microstructure

A I2024를 사용하였다. Table 4는 각 재료의 화학조성을 나타내었으며, 재가열전 소재의 미세조직을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 A356 및 A I2024의 원소재는 구상화 조직을 이루고 있는 것이 아니라 아주 미세한 입자로 이루어져 있음을 알 수 있다.

재가열 실험은 최대 50kW 출력의 유도로(유도가열 시스템의 주파수: 60Hz)를 사용하여 가열하였다. 유도로의 가열코일은 Fig. 3과 같이 $D_0 \times H = 104 \times 120$ (mm)로 설계하여 제작하였다.^(7, 12) 각각의 빌렛은 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)로 가공하였고, 소재의 표면으로부터 15 mm의 위치에 직경 2.4 mm인 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하여 시간의 변화에 따라서 온도를 측정하였다. 온도측정은 1.6 mm의 K-Type CA 열전대를 사용하여 재가열 실험중 시편 각부의 온도를 측정하였다. 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간(t_a), 재가열 온도(T_h), 재가열 온도에서의 유지 시간(t_h)을 변화시키며 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세조직을 관찰하였다. 온도구배가 작고 미세한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 재가열 조건을 찾기 위해 Table 5와 Table 6의 실험 조건으로 재가열 실험을 실시하였다. Table 5와 Table 6에 사용된 기호의 정의는 Fig. 4에 나타내었다.

5. Thixoforging 실험

최대 하중이 200ton, 최대 속도가 200 mm/sec인 복동식 유압 프레스를 사용하였다.

Thixoforging 실험에 사용된 금형(Die Set)의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 금형과 편치의 재료는 고온 공구강인 SKD 61을 HRC55~60로 열처리하였고, 금형을 가열하기 위해 비교적 취급이 용이한 카트리지 히터를 사용하였다.

상부 금형에 14개, 하부 금형에 9개의 카트리지 히터를 삽입하여 금형의 온도가 균일하게 되도록 가열하였다.

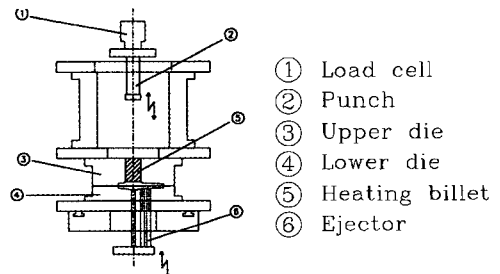


Fig. 5 Schematic diagram of die used for thixoforging

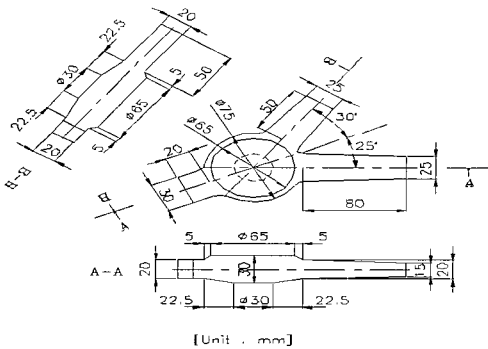


Fig. 6 Schematic diagram of thixoforged product

Ø 1.6 mm의 K-Type 열전대를 용량 15kW의 상부 금형 및 용량 10kW의 하부 금형에 삽입하여 상·하부 금형의 온도를 각각 제어하였다.

금형의 예열온도는 반응용 성형성(Thixoformability) 및 기계적 성질 평가를 위해서 250℃, 300℃, 350℃ 및 400℃로 변화시켰으며, 가압속도는 200 mm/sec로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 6은 Thixoforging으로 만들어진 제품의 개략도를 나타낸 것이다.

금형의 온도가 성형 온도에 근접하였을 때 SSM의 크기가 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A356과 A12024 빌렛의 전 단면에 걸쳐서 (60~100)µm의 크기를 가지는 구상화 조직을 갖도록 유도 가열로를 사용하여 소재를 3단 재가열하여 실시하였다.⁽⁴⁾ 소재가 원하는 고상율의 온도에 도달하면 소재를 금형에 장입한 후 실험을 하였다. 일반적으로 소재의 이송은 로봇을 이용한 자동화⁽²⁾가 되어 있는데, 본 실험에서는 소재의 이송을 위하여 집계를 사용하였다. 소재와 집계 사이의 열손실을 줄이기 위하여 집계를 석면으로 감싼 뒤에 유리 섬유를 붙여서 단열시켰다. 집계가 소재와 접촉하는 영역은 소재 높이 정도로 하여 소재의 반경 방향의 열손실을 방지하였다.

가압력이 반응용 성형성 및 제품의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위해 가압력을 100 MPa과 150 MPa로 변화시켰으며, 가압유지 시간은 20 sec로 하였다. 가압 후 프레스의 하부 램을 이용하여 제품을 추출한 후 성형품의 기계적 성질을 측정하기 위해 인장시험을 수행하였다. 인장 시험기는 최대하중 25ton인 Dynamic MTS를 사용하였다.

금형 온도와 가압력의 변화에 따라서 성형되어진 제품의 반응용 성형성, 제품의 각종 결함 및 기계적 성질을 조사하였다.

6. 재가열 실험결과 및 고찰

재가열된 소재는 단면 전체에 걸쳐서 조직이 미세하고 균일한 구상화 조직이 되어야 Thixoforging이 가능하다. 이러한 목적에 맞는 반응용 상태의 가열 온도를 결정하기 위해 소재의 고상율 계산은 다음과 같은 Scheil의 방정식을 이용하였다.⁽²¹⁾

$$f_L = \left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right)^{-1/k} \quad (6)$$

여기서, T_M 과 T_L 은 각각 순금속의 용점온도와 액상온도이다.

이 식은 고상율과 온도와의 관계식을 보여주는 것으로 본 연구에서 A12024의 경우는 시험편의 온도를 측정하여 고상율을 식(6)에 의하여 산출하였다. A356의 온도와 고상율의 관계는 참고문헌⁽²²⁾에서 도입한 것을 사용하였다. 각 소재의 온도에 따른 고상율의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Table 7은 A12024의 T_M , T_L , k 를 각각 나타낸 것이다.

A356의 재가열 실험에서 가열 단계의 변화에 따른 조직변화를 알기 위해 가열 단계를 변화시켜 보았다. 실험 1, 2, 3은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 제1단, 제2단 및 제3단으로 가열한 것이다. 제1단 가열후의 조직은 어느 정도 구상화가 진행되고 있으나 고상과 액상의 분리가

Table 7 Melting temperature, liquidus temperature and distribution coefficient for A12024⁽²⁰⁻²¹⁾

Melting Temperature T_M (°C)	Liquidus Temperature T_L (°C)	Distribution Coefficient k
502	638	1.22

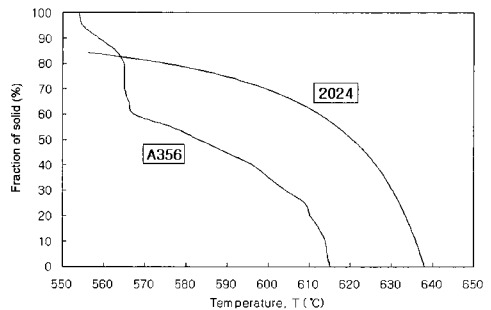


Fig. 7 Relationships between temperature and solid fraction for A356 and A12024

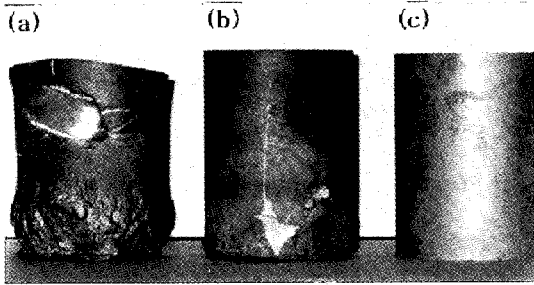


Fig. 8 The billet deformation shape according to the solid fraction throughout reheating process with A356 alloy (a) 50% (584 °C) (b) 55% (576 °C) (c) 60% (567 °C)

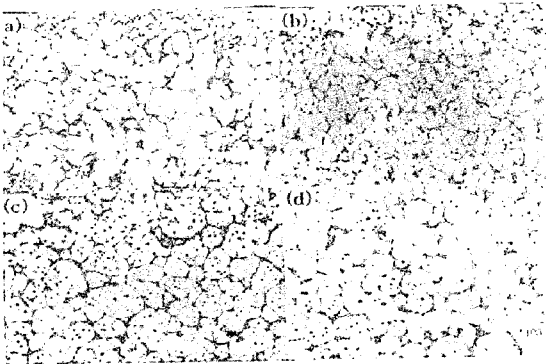


Fig. 9 Evolution of the microstructures of semi-solid alloy for variations of t_{h3} (fs=55 %, 576 °C), A356 (a) t_{h3} =1 min (b) t_{h3} =3 min (c) t_{h3} =5 min (d) t_{h3} =8 min

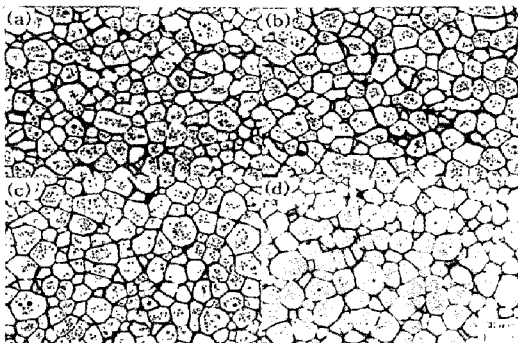


Fig. 10 Evolution of the microstructures of semi-solid alloy for variations of t_{h3} (fs=55 %, 616 °C), Al2024 (a) t_{h3} =1 min (b) t_{h3} =3 min (c) t_{h3} =5 min (d) t_{h3} =8 min

거의 이루어지지 않았고, 제2단 가열후의 조직은 구상화가 완료되지 않고 진행중인 것을 알 수 있지만 시편 바깥 부분의 조직은 고상과 액상이 분리되어 구상화의 형태가 진행되어 가고 있음을 알 수 있었다. 반면에 제3단 가열후의 조직은 시편의 전 부분에 걸쳐 구상화가 이루어졌고, 그 분포도 균일한 것을 볼 수 있었다.

고상율이 50%(584°C) 일 때는 재가열후 자중의 효과에 의하여 빌렛의 하부가 붕괴되는 현상이 발생하여 재가열된 시편을 급형으로 이송할 수가 없다. 따라서 성형 실험을 하기 위하여 고상율을 55%(576°C), 60%(567°C)로 변화시켜 재가열 실험을 하였다.

고상율이 높아질수록 구상화 정도는 나빠지지만 고상과 액상의 구분이 명확하게 나타났다. 그리고 고상율이 높아질수록 T_{h3} 온도가 낮아지므로 입자의 미세화 정도가 개선되었다.

Fig. 8은 고상율을 달리하여 재가열된 빌렛의 외형을 비교한 사진이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 고상율 50%에서는 자중의 효과에 의하여 빌렛의 하부가 붕괴되는 현상이 발생했으며 고상율이 55%, 60%로 증가할수록 이런 현상이 감소하였다. 따라서 Thixoforging을 위해서는 고상율 55%로 재가열 하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

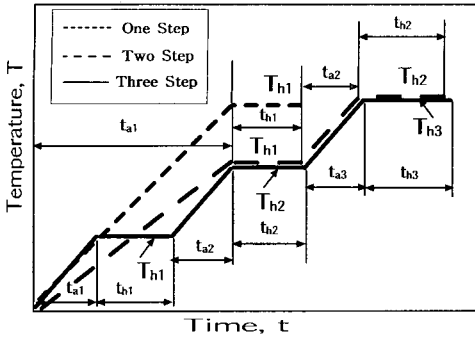
결정립 크기와 재가열 시간과의 관계를 조사하기 위하여 소재의 재가열 과정 중 t_{h3} 시간을 변화시켜 실험을 하였다. Fig. 9~Fig. 10은 고상율이 55%인 경우 재가열 조건중 t_{h3} 를 1, 3, 5, 8 min으로 변화시켰을 때 A356과 Al2024의 조직 변화를 각각 나타낸 것이다. 여기서 A356은 t_{h3} 가 증가함에 따라 조직의 조대화 정도가 뚜렷이 나타났음을 알 수 있었다. 그러나 Al2024는 t_{h3} 가 증가함에도 불구하고 조직의 구상화 정도가 A356에 비해 분명하지 않음을 알 수 있다. 이는 결정립 크기의 성장이 시간에 의해 좌우되기 때문인 것으로 사료된다.^(12, 23)

이상의 실험에 의하면 소재의 재가열은 각 단계에서 온도와 시간사이의 관계를 정립하는 것이 극히 중요함을 알 수 있었다.^(4-7, 12, 24) 소재의 재가열시 고상율이 낮을수록 급형에 충전되는 것에는 유리하나 본 실험에서 사용한 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 시편의 크기와 자중 효과로 인한 시편 하부의 붕괴 현상과 이송의 어려움 때문에 고상율 55%로 재가열 하는 것이 바람직하다고 생각된다. 설정온도에 도달한 후 유지 시간이 길수록 구상화 입자의 크기가 증가하는 경향이 있으므로 적절한 구상화 조직을 얻기 위해서는 소재의 직경과 길이에 따라서 적절한 온도 및 유지 시간의 제어가 필요하다.⁽⁴⁻⁷⁾

7. Thixoforging 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 반응용 성형성 및 기계적 성질을 평가하기 위하여 A356 소재의 경우는 금형 온도를 400℃, 350℃, 300℃ 및 250℃로 하였으며, A/2024는 400℃, 350℃ 및 300℃로 하였다.

금형 온도와 가압력의 변화에 따른 A356 및 A/2024의 반응용 성형성(Thixoforability) 평가를 조사한 결과, A356과 A/2024의 충전한계 금형 온도인 $T_d=300℃$ 와 $T_d=350℃$ 이상에서는 가압력(100 MPa, 150 MPa)에 상관없이 완전충전이 이루어졌으나 충전한계 금형 온도 이하인 $T_d=250℃$ 와 $T_d=300℃$ 에서는 미충전 되었으며, 충전한계 금형 온도인 $T_d=300℃$ 와 $T_d=350℃$ 에서는 부분충전 되었다. 위의 원인은 유동성은 A356이 A/2024보다 좋지만 A/2024의 경우 수축 캐비티 형성에 민감하기 때문이다. 따라서 반응용 성형성 향상을 위해서는 재료의 유동에 대한 정량적인 평가를 위한 반응용 유동 가시화 및



Alloys	Billet Size d × l (mm)	Optimal Reheating Conditions							Step	Ref.	
		ta(min)	ta2	ta3	th1	th2	th3	Th(°C)			Q(kW)
A356	39 × 85	10		2				573	3.3	1	(25)
	60 × 90	4	4	1	1	2	1	350 565 576	12.5	3	
	76 × 60	8	1		3	2		570 576	3.0	2	(25)
	76 × 90	4	3	1	1	3	2	350 570 576	12	3	(6)
A/2024	60 × 90	4	3	1	1	3	1	350 603 616	8.6	3	

Fig. 11 Input data diagram of optimal reheating conditions to obtain the globular microstructure for variations of alloys and specimen sizes

Fig. 11은 소재의 크기와 종류에 따라서 Thixoforging에 적합한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 재가열 조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A356 소재의 경우에는 $t_{a1} = 4$ min, $t_{a2} = 4$ min, $t_{a3} = 1$ min, $t_{h1} = 1$ min, $t_{h2} = 2$ min, $t_{h3} = 1$ min, $T_{h1} = 350℃$, $T_{h2} = 565℃$, $T_{h3} = 576℃$, $Q = 12.5$ kW인 3단 재가열 조건에서, $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A12024 소재의 경우에는 $t_{a1} = 4$ min, $t_{a2} = 3$ min, $t_{a3} = 1$ min, $t_{h1} = 1$ min, $t_{h2} = 3$ min, $t_{h3} = 1$ min, $T_{h1} = 350℃$, $T_{h2} = 603℃$, $T_{h3} = 616℃$, $Q = 8.6$ kW인 3단 재가열 조건에서 Thixoforging에 적합한 구상화 조직을 얻을 수 있었다. 소재의 크기가 커질수록 재가열 유지 시간이 길어지고 열전도도가 높은 소재일수록 재가열 유지 시간이 짧아진다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제한한 반응용 성형용 유도 가열 시스템(주파수: 60Hz)의 코일의 크기 및 재가열 조건은 합금의 종류와 크기에 따라서 소재의 전단면에 걸쳐 균일한 온도 분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 조건의 D/B 구축에 유용할 것으로 사료된다.

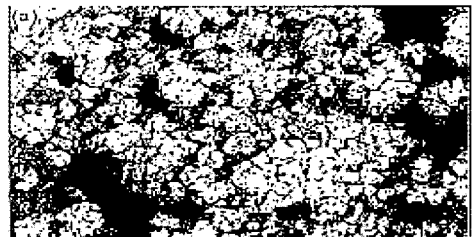
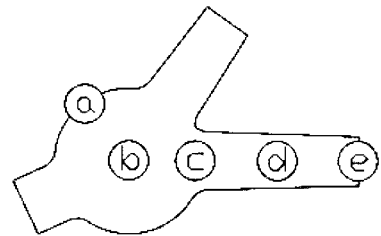


Fig. 12 The porosity of samples at position of © (a) A356 (b) A/2024

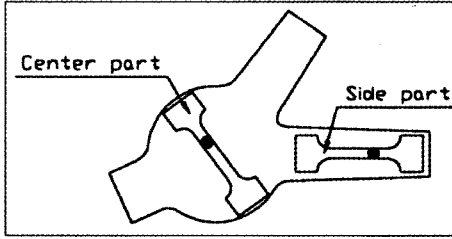


Fig. 13 Location of tensile specimen

몰드의 유동경로 끝단에서 다이의 충전압력과 응고압력에 대한 데이터를 얻을 수 있는 2개의 내부압력 센서의 설치가 필요할 것으로 사료된다.⁽¹⁰⁾

Fig. 12는 A356과 A12024의 충전한계 금형 온도인 $T_d=300^\circ\text{C}$ 와 $T_d=350^\circ\text{C}$ 에서 각각 성형한 시편의 돌출부분(조직관찰 위치 ©)의 미세조직 결함을 관찰한 사진이다. 충전한계 온도 이상의 금형 온도에서는 유동한계성이 증가되어 기공이 관찰되어지지 않았다. 위의 원인은 충전한계 온도이하에서는 반응용 상태의 소재가 급속히 응고되어 응고완료 전까지 충분히 가압이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 기공과 같은 내부결함은 제품의 기계적 성질을 저하시킬 것으로 생각된다. Fig.12에서 보여주는 바와 같이 A/2024의 경우가 A356보다 일반적으로 기공이 크게 관찰되었다. 충전한계 온도이하에서는 고상입자에서의 응집현상이 촉진됨과 동시에 고상입자 사이에 있는 액상영역이 중력의 작용에 의하여 유동되기 때문에 생긴 기공이며, A/2024의 경우 주조성(Castability)의 부족으로 인하여 고온크랙 민감성이 상대적으로 높기 때문인 것으로 사료된다.⁽¹⁰⁾ 기공의 발생은 고온크랙과 응고수축에 두드러진 민감성을 나타냄을 알 수 있다.

성형품의 전단면에 걸쳐서 균일한 구상화 조직을 가진 제품을 성형하기 위해서는 Thixoforging 부품의 기계적 성질은 특히 표면 주조결함에 민감하므로⁽²⁶⁾ (300~400) μm 정도의 기계가공이 필요하다. 가장 유해한 결함들은 다이 캐비티로 충전되는 동안에 형성되거나 빌렛의 표면에서 부품으로 유입되는 산화막이다.⁽⁹⁾ 따라서 러너(Runner) 시스템은 빌렛의 산화막이 부품으로 유입되는 것을 방지할 수 있도록 설계되어야 하고, 다이 캐비티로 충전되는 동안에 형성된 산화막들은 유동 교차부(Flow Junction Zones)에 큰 오버플로우(Overflow)를 설치하거나 충분한 벤팅(Venting)에 의해서 제거되어야 할 것으로 사료된다. Thixoforging 성형공정에 있어서 제품표면과 단면중심에

서 구상화 조직의 균일한 분포 및 크기를 제어하기 위한 표면처리 기술⁽²⁷⁾ 및 실시간 사출제어 시스템에 의한 성형 조건의 확립은 향후 해결되어야 할 문제점으로 생각된다.

성형된 시편을 인장시편으로 가공한 후 A356 (용체화 처리 : 540°C 에서 8시간 → 퀴칭 → 시효처리 : 160°C 에서 5시간)과 A12024 (용체화 처리 : 500°C 에서 4시간 → 퀴칭 → 시효처리 : 170°C 에서 10시간)를 T6 열처리하였다. Fig. 13은 성형된 시편으로부터 채취된 인장시편의 부위를 나타낸 것이다.

Fig. 14는 금형 온도 변화에 따른 시편 중심부의 인장강도, 항복강도를 나타낸 것이다. 직선형 금형의 경우 Thixoforging을 위한 소재의 위치가 캐비티(Cavity)내에 존재하기 때문에 재료의 열손실이 적다. 따라서 금형 온도가 높을수록 인장강도 및 항복강도가 다소 감소하나, 단지

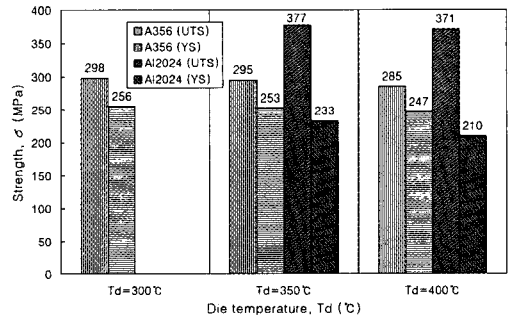


Fig. 14 The ultimate strenght (UTS) and yield strength (YS) for variation of die temperature in A356 and A12024 samples fabricated by the thixoforging, Center part ($f_s=55\%$, $P=100\text{ MPa}$)

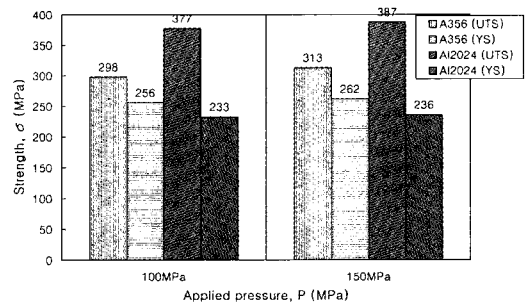


Fig. 15 The ultimate strenght (UTS) and yield strength (YS) for variation of applied pressure in A356 and A12024 samples fabricated by the thixoforging, Center part ($f_s=55\%$)

시 소재가 완전히 충전된과 동시에 가압에 의하여 조직의 미세화가 이루어지기 때문에 항복강도의 변화는 금형의 온도변화에 거의 무관함을 알 수 있다.⁽²⁸⁾ 본 실험결과에서 A356/A12024의 항복강도의 크기는 Tietmann⁽²⁹⁾의 결과치와 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 14의 금형 온도가 350℃와 400℃인 경우 중심부와 표면부에서의 강도가 상당한 차이를 보이고 있다. 위의 원인은 금형 온도가 높은 경우, Thixoforging시 소재의 유동성 향상으로 인하여 충전은 잘되나 액상영역에서 미세한 주상정 조직이 관찰되기 때문이다.

Fig. 15는 가압력을 100 MPa에서 150 MPa로 증가시켰을 때의 시편 중심부의 인장강도 및 항복강도를 나타낸 것이다. 가압력이 증가할수록 강도가 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며 Idegomori⁽³⁰⁾의 실험에서 가압력의 증가(70MPa에서 100MPa)에 따른 실제 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 위의 이유는 가압으로 인하여 조직이 치밀화(Densification) 되어 강도가 향상되는 것으로 사료된다.⁽²⁸⁾

직접 가압력을 받는 중심부는 비교적 강도가 얻어지나 가지부에서는 현저하게 강도가 감소하였다. 직선형 금형의 경우는 Thixoforging시 산화물이 제품 내부로 유입되었기 때문에 기계적 성질이 균일하지 못함을 알 수 있다. 따라서 Thixoforging시 제품의 기계적 성질은 SSM의 초기 고상입자의 크기⁽⁴⁻⁵⁾ 뿐만 아니라 게이트의 형상에 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 위의 원인은 수치 해석 결과로부터 알 수 있듯이 최종 응고부위가 결정적으로 영향을 미치기 때문이다.⁽³¹⁾

본 연구에서는 금형 온도와 가압력의 변화에 따라서 성형되어진 임의 형상의 제품의 반응용 성형성, 제품의 각종 결합 및 기계적 성질을 조사하였다. 재가열시 발생하는 산화막(Oxide Film)이나 소재의 이송시 열손실에 의한 표면부의 응고층 등을 제거하도록 금형의 탕구 부분을 오리피스형으로 하여, 가압유지를 함으로서 응고시 발생하는 수축에 의한 충전 불량, 공정 편식 및 강도 저하를 감소시켜야 하겠다. 아울러 재가열된 소재의 충전 거동이 제품 표면부의 고상 및 액상 분포와 칠층(Chill Zone)의 형성에 미치는 영향을 파악하여 불필요한 액상을 제거하거나 제품의 후가공에 의해 소실되는 부위에 위치하도록 하는 표면처리 기술의 개발이 필요하겠다. 성형이 이루어졌을 때, 충전되는 지점까지는 재가열된 소재의 열손실을 최소화하고 양호한 성형성을 얻기 위해 고속 구간(편치속도 200 mm/sec 이상)을 주고, Thixoforging 직후 취출된 제품에 좋은 단련 효과를 주기 위해서 2~3 mm의 저속 구

간을 주어야 할 것으로 사료된다.

반응용 성형성 향상을 위해서는 재료의 유동에 대한 정량적인 평가를 위한 반응용 유동 가시화 및 몰드의 유동경로 끝단에서 다이의 충전압력과 응고압력에 대한 데이터를 얻을 수 있는 2개의 내부압력 센서의 설치가 필요함을 알 수 있었다.

8. 결 론

$d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A356과 A12024 소재를 유도 가열하기 위한 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 코일을 제작하였다. 재가열 실험을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하였으며 Thixoforging 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Thixoforging 공정에 흔히 이용되는 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A356과 A12024 빌렛에 대하여, 알루미늄 소재의 재가열에 사용할 수 있는 코일(유도 가열 시스템의 주파수 60Hz)의 크기를 이론적으로 제안하여 설계하였다.

(2) 고상율이 낮을수록 금형의 캐비티 내에 소재가 충전되는데는 유리하나 자중 효과에 의한 빌렛의 변형으로 인하여 Thixoforging에 필요한 고상율은 $f_s = 55\%$ 의 고상율로 재가열 하는 것이 바람직하다.

(3) 소재의 크기와 종류에 따라서 Thixoforging에 적합한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 재가열 조건을 제안하였다.

(4) Thixoforging 부품의 가장 유해한 결함인 산화막 제거를 위해서 러니 시스템은 빌렛의 산화막이 부품으로 유입되는 것을 방지할 수 있도록 설계되어야 하고, 다이캐비티로 충전되는 동안에 형성된 산화막들은 유동 교차부(Flow Junction Zones)에 큰 오버플로우(Overflow)를 설치하거나 충분한 벤팅(Venting)에 의해서 제거하는 것이 타당하다.

(5) 최종 응고부위의 위치가 Thixoforging시 제품의 기계적 성질에 결정적으로 영향을 미치기 때문에 직접 가압력을 받는 중심부 및 가지부에서 균일한 강도를 얻기 위해서는 게이트의 형상 및 치수가 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

(6) 양호한 성형성을 얻기 위해서는 충전되는 지점까지는 재가열된 소재의 열손실을 최소화할 수 있도록 고속 구간(편치속도 200 mm/sec 이상)을 주고, Thixoforging 직후 취출된 제품에 좋은 단련 효과를 주기 위해서 2~3 mm의 저속 구간을 주어야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터 (ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단(KOSEF) 우수연구센터 지원금에 의한 연구의 일부분입니다.

참 고 문 헌

(1) R. F. Decker, R. D. Carnahan, R. Vining and E. Eldener, 1996, "Progress in Thixomolding," Proceedings of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, pp. 221~224.

(2) T. Witulski, A. Winkelmann and G. Hirt, 1996, "Thixofforming of Aluminum Components for Lightweight Structures," Proceedings of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, pp. 242~247.

(3) K. P. Young, 1996, "Recent Advances in Semi-Solid Metal(SSM) Cast Aluminum and Magnesium Components," Proceedings of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, pp. 229~233.

(4) H. K. Jung and C. G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg Alloy for Thixofforming," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, No. 12, pp. 1~11.

(5) 정홍규, 강충길, 1999, "Thixofforming을 위한 Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg 합금의 유도 가열 공정에 관한 연구," 한국주조공학회지, 제19권 제3호, pp. 225~235.

(6) 정홍규, 강충길, 1998, "Thixofforming을 위한 Al-7%Si-0.3%Mg 합금의 유도가 조건이 구상화 조직에 미치는 영향," 한국 주조 공학회지 제18권 제5호, pp. 450~461.

(7) 정홍규, 1999, "A Study on Coil Design and Heating D/B Construction of Semi-Solid Aluminum Alloys for Thixofforming," 부산대학교 석사학위 논문, pp. 1~129.

(8) S. Midson, V. Rudnev and R. Gallik, 1998, "The Induction Heating of Semi-Solid Aluminum Alloys," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, pp. 497~504.

(9) M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W. R. Loué, 1998, "Aluminium Semi-solid Processing : From the Billet to the Finished Part," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, pp. xvii-xxxi.

(10) T. Witulski, U. Morjan, I. Niedick and G. Hirt, 1998, "The Thixofmability of Aluminium Alloys," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, pp. 353~360.

(11) F. Matsuura and S. Kitamura, 1998, "Induction Aluminum Billet Heater for Semi-Solid Processing," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, pp. 489~496.

(12) C. G. Kang, H. K. Jung and Y. J. Jung, 1999, "Coil Design of Inductive Heating and Reheating Process of Aluminum Alloys for Thixofforming," Proceedings of the 6th Int. Conf. on Technology of Plasticity (6th ICTP), Nuremberg, pp. 1689~1694.

(13) S. Kouji, 1997, "The Characteristics of Thixofforming Product," Proceedings of the 175th JSTP Symposium for Semi-Solid Metals Forming, Tokyo University of Technology, pp. 25~33.

(14) K. Kitamura, Y. Ando, K. Hironaka, S. Yahata and C. Yoshida, 1994, "DieCasting of Aluminum Alloy in Semi-Solid State," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Tokyo, pp. 181~190.

(15) 박형진, 강충길, 김병민, 최재찬, 1999, "반응용 단조품의 제조 공정 및 금형설계," 한국 주조 공학회지 제19권 제2호, pp. 142~149.

(16) 박형진, 강충길, 김병민, 최재찬, 1999, "반응용 단조품의 제조," 한국 정밀공학회지 제16권 제6호, pp. 45~51.

- (17) E. J. Davies, 1990, "Conduction and Induction Heating," Peter Peregrinus Ltd., London, pp. 100~222.
- (18) N. R. Stansel, 1949, "Induction Heating," McGraw-Hill, New York, p. 178.
- (19) V. I. Rudnev, L. C. Raymond, D. L. Loveless and M. R. Black, 1997, "Induction Heat Treatment," Marcel Dekker Inc, New York, pp. 775~911.
- (20) Metals Handbook, 1990, "Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," ASM International, Vol. 2, 10th Edition, pp. 70~73.
- (21) M. Kiuchi and S. Sugiyama, 1991, "Measuring Method of Solid Fraction for Semi-Solid Metals-1," Proceedings of the 42th JSTP Conference, Tokyo University of Technology, pp. 647~650.
- (22) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski and M. Zillgen, 1994, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion," Journal of Materials Processing Tech., 45, pp. 359~364.
- (23) K. Dibworth, H. V. Atkinson, D. H. Kirkwood and ARA McLelland, 1996, "Thixoforging of a normally Wrought Aluminium Alloys," Proceedings of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, pp. 83~86.
- (24) C. G. Kang and H. K. Jung, 1999, "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modeling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1423~1445.
- (25) C. G. Kang, J. C. Choi, B. M. Kim, H. J. Park, H. K. Jung and J. H. Park, 1998, "Development of Compound Forging Technology of Semi-Solid Materials and Its Commercialization," Technical Report, Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, No. NSDM 9514-0909-00-01-1.5, pp. 1~179.
- (26) W. Lou, M. Brimont, C. Pluchon, P. Y. Menet and M. Garat, 1995, "Metallurgical Aspects of Thixoforming of A356.0 and A357.0 Alloys," Proceedings of the 18th Int. Die Casting Conference and Exposition, Indianapolis, pp. 389~396.
- (27) G. Chiarmetta, 1996, "Thixoforming of Automobile Components," Proceedings of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, pp. 204~207.
- (28) C. G. Kang, S. S. Kang and H. K. Jung, 1999, "Influence of Process Parameters on the Defects in Thixoforming of Cast and Wrought Aluminum Alloys," Proceedings of the 6th Int. Conf. on Technology of Plasticity (6th ICTP), Nuremberg, pp. 1701~1706.
- (29) A. Tietmann, T. Bremer, G. Hirt and R. Kopp, 1992, "Preliminary Results in Thixoforging Aluminum Wrought Alloys," Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Massachusetts Institute of Technology, pp. 170~179.
- (30) T. Idegomi, H. Hirono, O. Ito, S. Kimishima and K. Mizoue, 1998, "The Manufacturing of Automobile Parts Using Semi-Solid Metal Processing," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, pp. 71~77.
- (31) C. G. Kang, H. K. Jung and K. W. Jung, 1999, "Thixoforming of Aluminum Component with Designed Die by Process Simulation," Proceedings of the Int. Symposium on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology (AFDM' 99), Pusan, pp. 83~88.