

|||||||
論 文
|||||||

반용융 단조를 위한 유도가열용 코일설계의 최적화 및 실험적 연구

정흥규 · 김남석 · 강충길

An Optimization of Inductive Coil Design for Thixoforging and Its Experimental Study

Hong-Kyu Jung, Nam-Seok Kim and Chung-Gil Kang

Abstract

The reheating of the billet in the semi-solid state as quickly and homogeneously as possible is one of the most important aspects. From this point of view, an optimal design of the induction coil is necessary. The objective of inductive coil designs is a uniform induction heating over the length of the billet. The effect of coil length, diameter, the gap between coil surface and billet and axial position of the billet on temperature distribution of billet has been investigated. These design parameters have an important effectiveness on the electro-magnetic field. Therefore, in this study an optimal coil design to minimize electromagnetic ed effect will be proposed by defining the relationship between billet length and coil length. In particular, key point in induction heating process is focussed on optimizing the coil design with regard to the size of the heating billet and the frequency of induction heating system. After demonstrating the suitability of an optimal coil design through the FEM simulation of the induction heating process, the results of the coil design are also applied to the reheating process to obtain a fine globular microstructure. Its considered that the reheating conditions of aluminum alloys for thixoforging and a new CAE model of the induction heating process are very useful for thixoforging practitioners including induction heating ones. (Received July 26, 1999)

1. 서 론

자동차 부품의 경량화를 달성하기 위해서는 부품의 특성에 부합하는 맞춤형금(tailored alloy) 개발[1,2], 부품 제조를 위한 공정설계[3] 및 금형설계 기술[4-7]이 상호 유기적으로 연계되어 개발이 추진되어야 한다.

이러한 관점에서 알루미늄 합금을 이용한 부품 성형 공정은 에너지 절약 및 공정 단축 등의 측면에서 많은 관심의 대상이 되고 있으며, 정밀 정형 부품의 성형이 용이한 반용융 단조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-10].

반용융 단조 공정을 위해서는 단면 전체에 걸쳐서 고상율과 구상화 조직이 균일하게 되도록 가열하여야 한다. 유도가열은 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, Witulski[11]는 빌렛 가열시 안정성이 중요하므로 자중에 의해 빌렛이 변형되지 않도록 하는 고상율의 제어가 필요하다고 제안하고 있다. Midson[12]은 전자기 끝단효과를 방지하기 위한 코일설계의 필요성을 제안하였고, Garat[13]은 A356 및 A357의 다단 출력 재가열 조건을 제시하였다. Kouji[14]는 복수 코일을 구비한 유도가열 장치를 이용하여 빌렛을 반용융 상태로 가열한 후 6축 다관절 로봇을 이용하여 금형 하부에 위치한 가압 펀치 위로 이송한 후, 금형 내에 저가압으로 충전시키고 있다. 강 등[15]은 가열된 소재를 금형에 이송할 때 소재의 열이동을 최소화 하기 위하여 재가열 일체형 금형을 제안하였다. 정 등[1, 10]은 $d \times l = 76 \times 70 \text{mm}^2$ 인 ALTHIX 86S(프랑스 페시니의 86S, ASTM 규격의 A319와 유사함) 합금의 유도가열시 결정립 성장기구를 통해서 조대화를 예방할 수 있는 방안을 제안하였다.

유도가열은 표면에서부터 빌렛의 내부로 열전도에 의한 열전달이 일어나 가열된다. 그러므로, 유도가열을 이용하여 소재를 가열할 경우 열 유동에 대한 연구가 필요하다. 또한, 반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 재가열 조건이 다르기 때문에 반응용 단조를 위해서는 재가열 조건에 관한 D/B 구축이 극히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 재가열시 빌렛의 온도 구배를 줄일 수 있고, 구상화된 조직을 얻을 수 있는 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 코일을 제작하였으며, 유도가열 공정 시뮬레이션을 통하여 코일설계의 타당성을 검증하였다. 또한, 시뮬레이션의 결과를 유도가열 실험에 적용하여 반응용 소재의 종류, 직경 및 길이가 다양하게 변할 때 반응용 단조 공정에 이용할 수 있는 재가열 조건을 도출하였다.

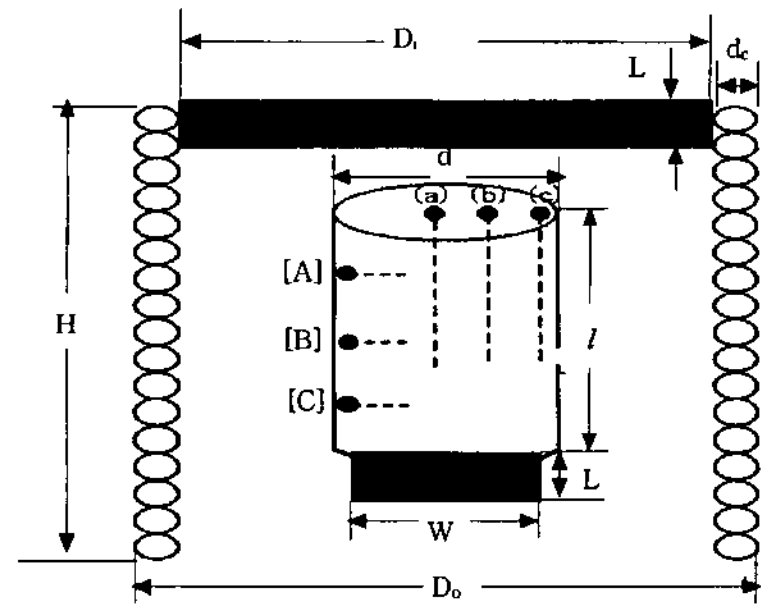
2. 이론적 배경

코일과 빌렛의 끝단에서 가열 양상의 불균일성은 이 영역에서 전자기장의 뒤틀림(distortion) 현상과 관계가 있다. 이 뒤틀림 현상을 전자기 끝단효과(electromagnetic end effect)라고 한다. 일반적으로 전자기 끝단효과는 유도가열에서 가장 복잡한 문제이다. 이 효과는 빌렛 끝단의 과열이나 아열(underheating)을 초래할 수 있다.

원하는 온도분포는 주파수, 빌렛과 코일 사이의 간격(air gap), 빌렛의 기계적 성질, 방사율, 코일 내화성 재료(coil refractory) 및 전력밀도에 종속적이다. 따라서 전자기 끝단효과를 최소화하기 위해서는 유도 코일 설계를 토대로 한 유도가열 공정의 시뮬레이션 모델이 필요하며, 리드 타임(lead time) 단축 및 신뢰성 있고 경쟁력있는 반응용 단조 제품의 생산을 촉진할 수 있을 것으로 사료된다.

유도가열시 전자기 끝단효과를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1에서 표시한 바와 같이 유도가열 장치의 최적 코일 길이 H와 코일의 내경 D_i 를 다음과 같이 설계하였다. 유도가열시 열손실중에서 중요 부분인 표면의 복사 손실을 고려하기 위하여, 이상화된 전력밀도 P_s 는 빌렛의 반지름 $d/2$ 와 소재의 유한 전류 침투 깊이 δ_f 의 비($d/2\delta_f$)에 의해서 수정되어진 실제 전력밀도 P_a 로 표시되어야 한다.

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



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

Alloys	D_o (mm)	D_i (mm)	d (mm)	H (mm)	l (mm)	d_c (mm)	L (mm)	W (mm)
A356	120	100	76	120	90	10	20	50
ALTHIX 86S	120	100	76	180	70	10	20	50

Fig. 1. Schematic illustration for induction heating of cylindrical billet

소재의 크기가 $d \times l = 76 \times 90 \text{mm}^2$ 인 A356 및 $d \times l = 76 \times 70 \text{mm}^2$ 인 ALTHIX 86S의 경우, P_a 는 다음과 같이 각각 계산된다.

$$A356: P_a = \frac{P_s(\theta_s - \theta_c)_{idealized}}{\theta_s - \theta_c} = \frac{6.46 k (\theta_s - \theta_c)}{d} \tag{2a}$$

ALTHIX 86S:

$$P_a = \frac{P_s(\theta_s - \theta_c)_{idealized}}{\theta_s - \theta_c} = \frac{6.89 k (\theta_s - \theta_c)}{d} \tag{2b}$$

여기서 $\theta_s - \theta_c / (\theta_s - \theta_c)_{idealized} = k$ 는 빌렛의 반지름 $d/2$ 와 소재의 유한 침투 깊이 δ_f 의 비($d/2\delta_f$)로부터 구할 수 있다[16].

여기서 $\rho_a, \mu, \omega, \kappa, \theta_s - \theta_c$ 는 각각 A356 및 ALTHIX 86S의 저항도, 자기 상수, 각 주파수, 열전도도, 표면과 중심부의 최대 온도차를 나타낸다.

$d \times l = 76 \times 90 \text{mm}^2$ 인 A356 및 $d \times l = 76 \times 70 \text{mm}^2$ 인 ALTHIX 86S 빌렛을 각각 10개 및 11개를 단위 시간당 각각 584°C 및 578°C 까지 재가열 한다고 가정하면, Stansel[17]의 계산 조건(빌렛 1Kg을 510°C 까지 가열할 경우, 열용량 $q = 145 \text{kW h/t}$, 생산율 $P_r = 0.01 \text{t/h}$) 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 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 D_i 와 최적 코일 길이 H 및 코일과 빌

Table 1. Recommended air gaps [$1/2 (D_i-d)$] for through-heating coils [16]

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 (A356 with $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$, $f = 60 \text{ Hz}$, $\delta = 10.7 \text{ mm}$ [18], $k = 0.62$)

Parameter	Symbol	Unit	Value	Ref.
Maximum Surface-Center Temperature Difference	$\theta_s - \theta_c$	K	5	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	159	[19]
Idealized Power Density	P_s	kW/m ²	41.85	
Resistivity of A356	ρ_a	$\mu \Omega \text{ m}$	0.0421	[19]
Magnetic Constant	μ	H/m	$4\pi \times 10^{-7}$	[16]
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	[17]
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 3. Property values to calculate the optimal coil length (ALTHIX 86S $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$, $f = 60 \text{ Hz}$, $\delta = 10.7 \text{ mm}$ [18], $k = 0.58$)

Parameter	Symbol	Unit	Values	Ref.
Maximum Surface-Center Temperature Difference	$\theta_s - \theta_c$	K	4	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	109	[19]
Idealized Power Density	P_s	kW/m ²	22.91	
Resistivity of ALTHIX 86S	ρ_a	$\mu \Omega \text{ m}$	0.0639	[19]
Magnetic Constant	μ	H/m	$4\pi \times 10^{-7}$	[16]
Angular Frequency	ω	rad/s	120π	
Finite Current Depth of Penetration	δ_f	m	1.64×10^{-2}	
Actual Power Density	P_a	kW/m ²	39.5	
Thermal Power	P_t	kW	1.33	
Production Rate	P_r	Dimensionless	0.01 t/h	[17]
Thermal Capacity	q	kW	133.08 h/t	
Minimum Heated Surface Area	A_s	m ²	30.67×10^{-3}	
Billet Diameter	d	mm	76	
Minimum Heated Length	l_w	mm	141	

Table 4. Designed dimensions of induction heating device ($f = 60 \text{ Hz}$, $\delta = 10.7 \text{ mm}$ [18])

Alloys	Billet Diameter (d ; mm)	Coil Inner Diameter (D_i ; mm)	Min. Heating Length (l_w ; mm)	Optimal Coil Length (H ; mm)	Coil Wall Thickness d_c (mm)
A356	76	100	93	118~168	10 [18]
ALTHIX 86S	76	100	141	166~216	

Table 5. Property values to simulate induction heating process with optimal coil design (A356 with $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$, $f = 60 \text{ Hz}$, $f_s = 55 \%$, $\delta = 10.7 \text{ mm}$ [18])

Parameter	Symbol	Unit	Values	Ref.
Convection Coefficient of Air	h_{fo}	$\text{W/m}^2\text{K}$	30	
Density of A356	ρ	Kg/m^3	2685	[19]
Specific Heat of A356	C	J/KgK	963	[19]
Heating Time	t	sec	830	
Coil Wall Thickness	d_c	mm	10	[18]
Coil Inner Diameter	D_i	mm	100	
Coil Outer Diameter	D_o	mm	120	
Coil Length	H	mm	120	
Billet Diameter	d	mm	76	
Billet Height	l	mm	90	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	159	[19]

렛 사이의 간격 [$1/2 (D_i - d)$]를 결정하기 위하여 계산에 필요한 물성치를 각각 Table 1 ~ Table 3에 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.

$$H = l_w + (25 \sim 75) \tag{5}$$

따라서, 이론적으로 코일을 설계한 결과 시편의 크기가 $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$ 인 A356 및 $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$ 인 ALTHIX 86S 소재를 가열하기 위한 코일의 크기를 Table 4와 같이 제안할 수 있으며 유도가열 공정의 유한요소 시뮬레이션 및 유도가열 실험을 통하여 코일설계의 적합성을 검증하였다. Table 2 ~ Table 3에서 k 는 $\theta_s - \theta_c / (\theta_s - \theta_c)_{idealized}$ 를 나타낸다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 열전도도가 높은 소재(A356)일수록 코일 길이가 짧아진다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 반용용 성형용 유도가열 시스템(주파수: 60Hz)의 코일의 크기는 합금의 종류와 크기에 따라서 소재의 전단면에 걸쳐 균일한 온도분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 유도가열 조건의 D/B 구축에 유용할 것으로 사료된다.

유도가열 공정은 열전달, 전자기 효과들의 상호작용을 포함한다. 기하학적인 변수들뿐만 아니라 각각의 효과들에 대한 소재의 물성치는 유도가열 공정거동을 제어한다. 유도 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션의 목적은 빌렛의 크기, 코일의 크기, 입력 주파수와 같은 다양한 공정변수의 영향을 결정하기 위한 유한요소 시뮬레이션 방법을 개발하기 위함이다.

유도 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션을 위해서, 범용 유한요소 코드인 ANSYS™을 사용하였다. ANSYS™은 와전류의 유도로 인한 주울 가열과 전도,

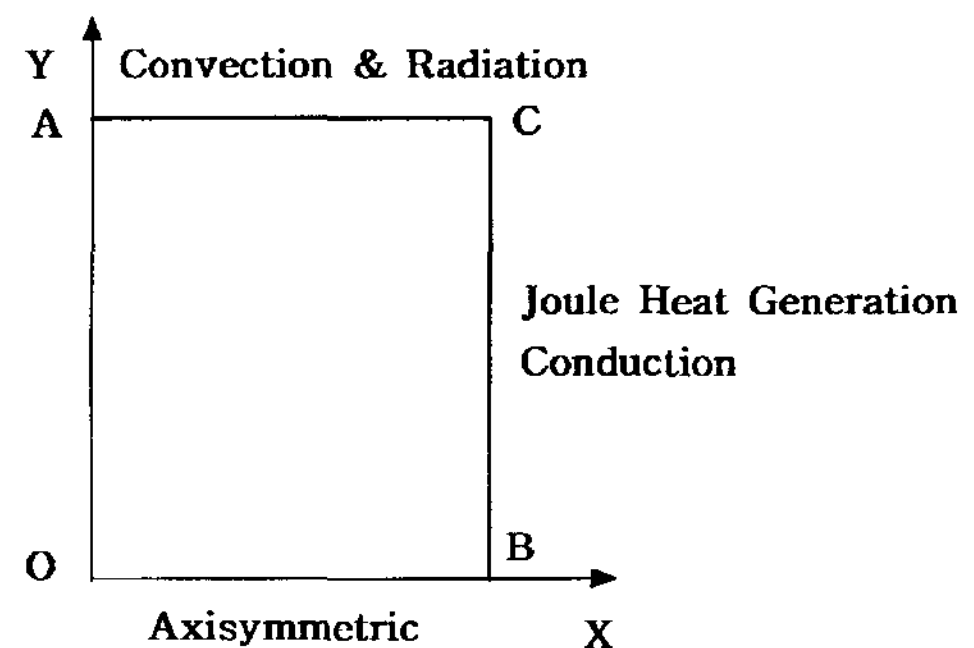


Fig. 2. Boundary conditions to simulate induction heating process with inductive coil design

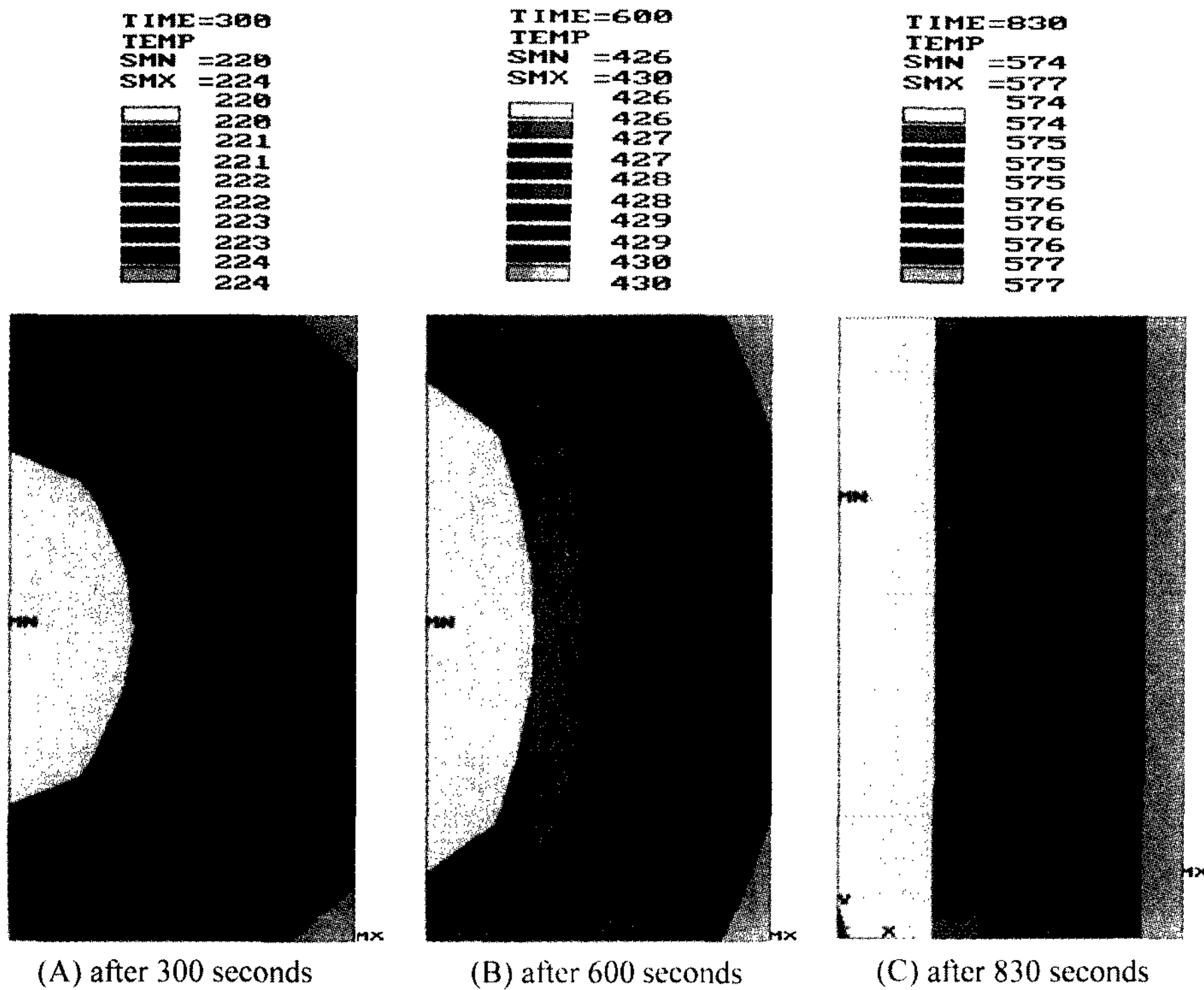


Fig. 3. In the case of $f_s = 55\%$, temperature distribution of reheated A356 billet with $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$

대류 및 복사로 인한 열전달을 동시에 모델링할 수 있다. 더욱이 ANSYS™은 문자와 숫자를 포함하는 변수들(alphanumeric variables)로 모델을 설정하는 데 사용되는 PDL(Parametric Design Language)이라는 기능을 가졌다[1-3, 20-22].

PDL은 기하학적인 형상, 재료의 물성치 및 제어 루프

순서의 변경을 손쉽게 한다.

유도가열 공정 시뮬레이션에 필요한 물성치는 유도 코일설계를 토대로 하였으며, Table 5 ~ Table 6에 물성치 값을 나타내었다. Fig. 2는 반응용 소재(SSM)의 열해석에 사용된 경계조건을 나타내고 있다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 주열 가열에 의해 빌렛의

Table 6. Property values to simulate induction heating process with optimal coil design (ALTHIX 86S with $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$, $f = 60 \text{ Hz}$, $f_s = 55\%$, $\delta = 10.7 \text{ mm}$ [18])

Parameter	Symbol	Unit	Values	Ref.
Convection Coefficient of Air	h_{fo}	$\text{W/m}^2\text{K}$	30	
Density of ALTHIX 86S	ρ	Kg/m^3	2790	[19]
Specific Heat of ALTHIX 86S	C	J/KgK	963	[19]
Heating Time	t	sec	895	
Coil Wall Thickness	d_c	mm	10	[18]
Coil Inner Diameter	D_i	mm	100	
Coil Outer Diameter	D_o	mm	120	
Coil Length	H	mm	180	
Billet Diameter	d	mm	76	
Billet Height	l	mm	70	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	109	[19]

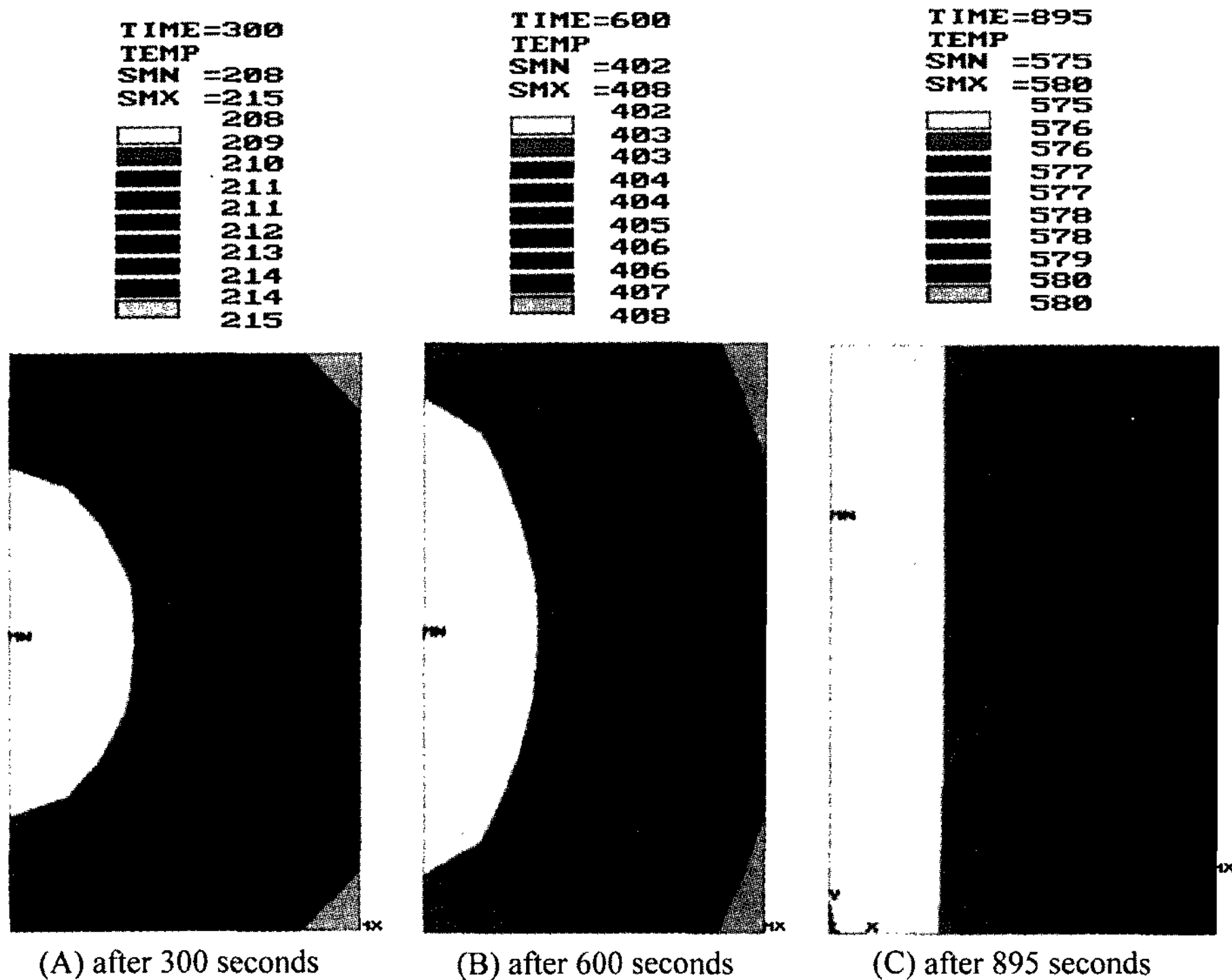


Fig. 4. In the case of $f_s = 55\%$, temperature distribution of reheated ALTHIX 86S billet with $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$

표면이 가열되며 열전도에 의해 빌렛의 표면으로부터 중심까지 열확산이 일어난다.

또한, 유도가열에서는 빌렛 표면의 열 대류와 열 복사 손실이 고려되어야 한다. Fig. 3 및 4는 고상율 55%로 재가열된 A356 및 ALTHIX 86S 소재의 온도분포에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig. 3 및 4에서 볼 수 있듯이 열전도도가 작은 ALTHIX 86S(109W/mK)가 A356 (159W/mK)보다 원하는 고상율까지 가열하는 데 많은 시간을 필요로 함을 알 수 있다.

유도 코일설계를 토대로 한 시뮬레이션 결과를 통하여, 빌렛을 가열하는 데 필요한 총 에너지는 빌렛의 질량, 열 및 전자기 물성치의 함수이지만 그 관계는 비선형적이라는 사실을 알 수 있었다. 반응용 소재의 종류 및 크기에 따른 최적 코일설계를 토대로 한 유도가열 공정 시뮬레이션 모델은 반응용 소재의 종류 및 크기에 따라서 전자기 끝단효과의 방지, 균일한 온도분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 D/B 구축 및 리드 타임(lead time) 단축에 유용할 것으로 사료된다.

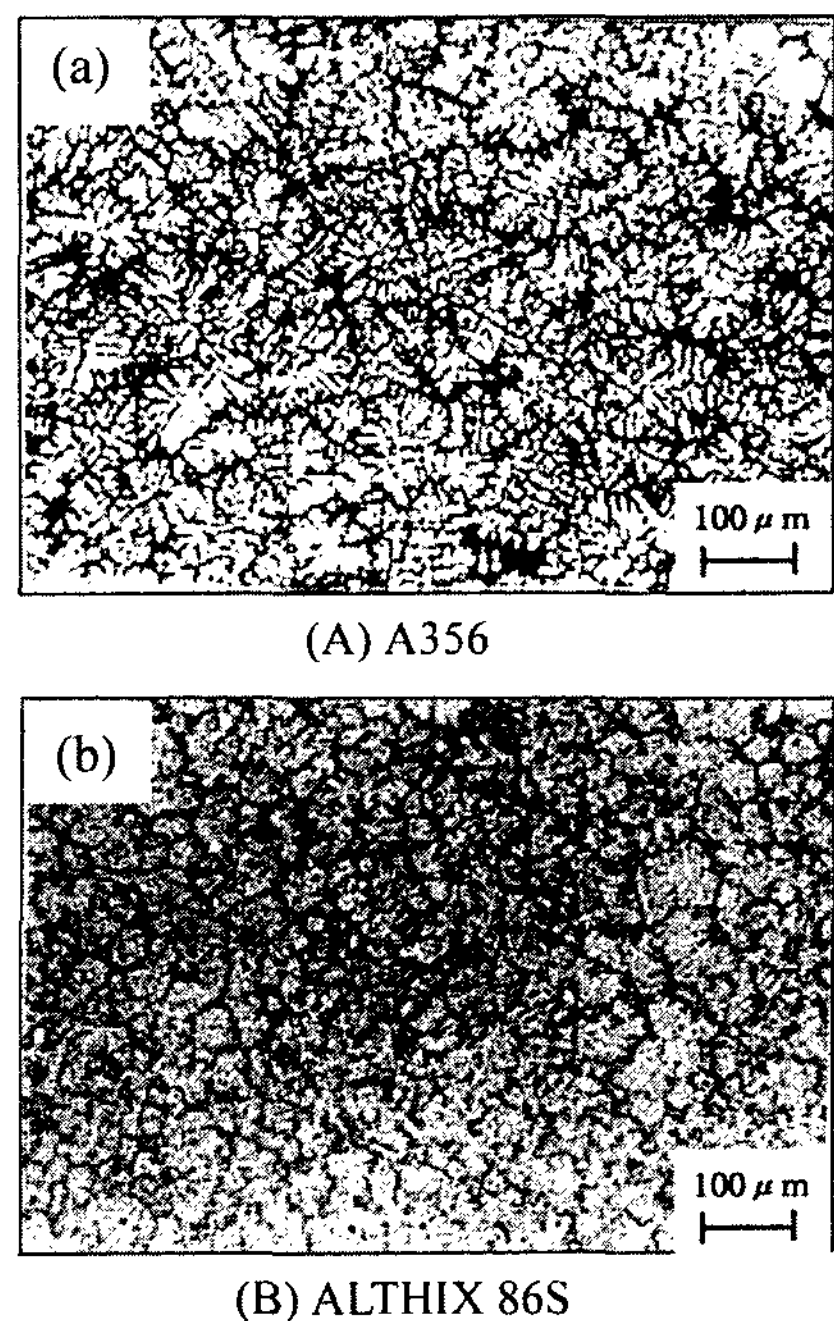


Fig. 5. Microstructures of raw materials (A356 and ALTHIX 86S)

Table 7. Chemical compositions of A356 and ALTHIX 86S

		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
ALTHIX 86S	Min (%)	5.5	-	2.5	-	0.30	-	-	-	-
	Max (%)	6.5	0.15	3.5	0.03	0.40	-	0.05	0.20	0.03

Table 8. Optimal reheating conditions for semi-solid aluminum alloys (A356 with $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$ and ALTHIX 86S with $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$)

Alloys	Heating Time t_a (min)			Holding Time t_h (min)			Heating Temperature T_h ($^{\circ}\text{C}$)			Total Time (min)	Capacity Q (kW)
	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{h1}	t_{h2}	t_{h3}	T_{h1}	T_{h2}	T_{h3}		
A356	4	3	1	1	3	2	350	570	576	14	12.04
ALTHIX 86S	"	"	"	"	"	3	"	567	578	15	5.544

3. 실험방법

본 실험에서 사용된 SSM 소재는 일반적으로 자동차 부품개발에 많이 이용하는 주조용으로 프랑스 페시니 (Pechiney)에서 전자기 교반으로 제조되어진 A356과 ALTHIX 86S를 사용하였다. Table 7은 각 소재의 화학 조성을 나타내었으며, 재가열전 소재의 미세조직을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 A356 및 ALTHIX 86S의 원소재는 구상화 조직을 이루고 있는 것이 아니라 아주 미세한 등축정 조직(equiaxed grains)으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

A356 및 ALTHIX 86S 소재를 각각 Fig. 1과 같이 $d \times l = 76 \times 90 \text{ mm}^2$ 및 $d \times l = 76 \times 70 \text{ mm}^2$ 의 빌렛으로 가공하여 출력 50kW(주파수: 60Hz) 유도로를 이용해서 재가열 실험을 하였다. 유도로의 가열 코일은 코일설계와 유도가열의 유한요소 시뮬레이션을 토대로 하여 Fig. 1에서와 같이 A356 소재는 $D_o \times H = 120 \times 120 \text{ mm}^2$

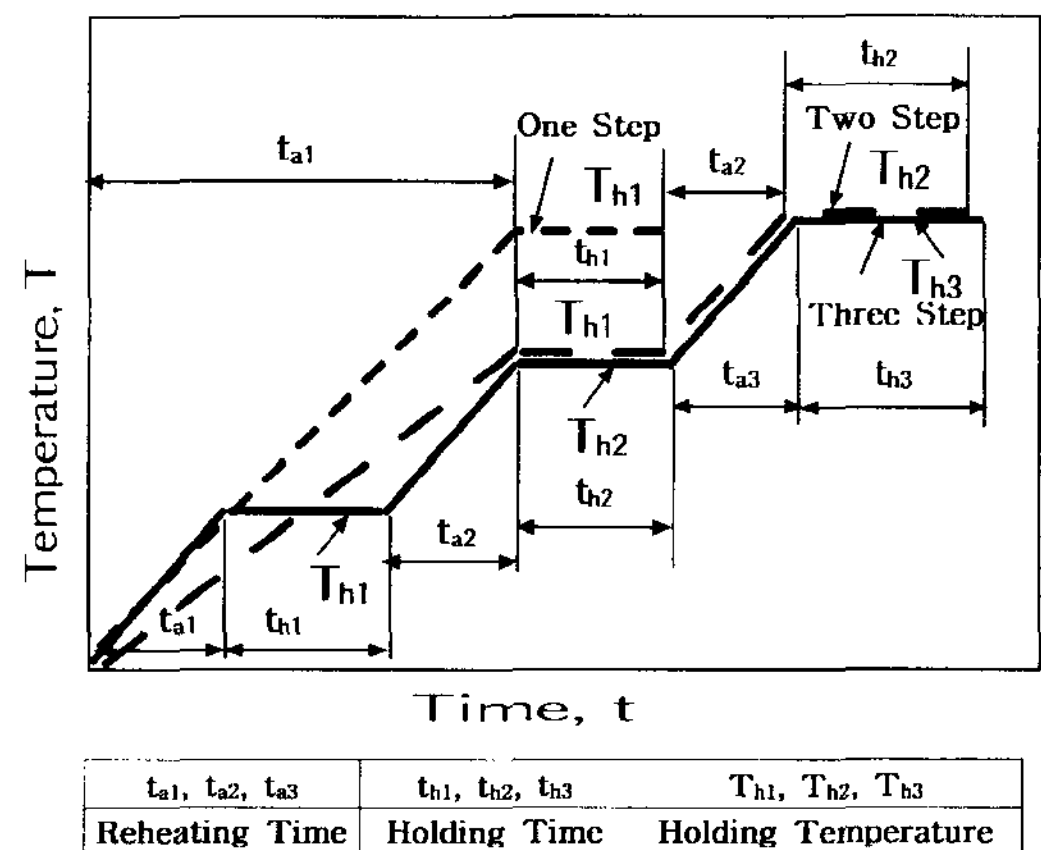


Fig. 6. Input data diagram of induction heater

22-23], ALTHIX 86S 소재는 $D_o \times H = 120 \times 180 \text{ mm}^2$ [1-3, 21, 24]로 설계, 제작하여 시편이 균일하게 가열될 수 있도록 하였다. 소재의 표면으로부터 45 mm의 위치에 직경 2 mm, 측면으로부터 10 mm의 위치에 직

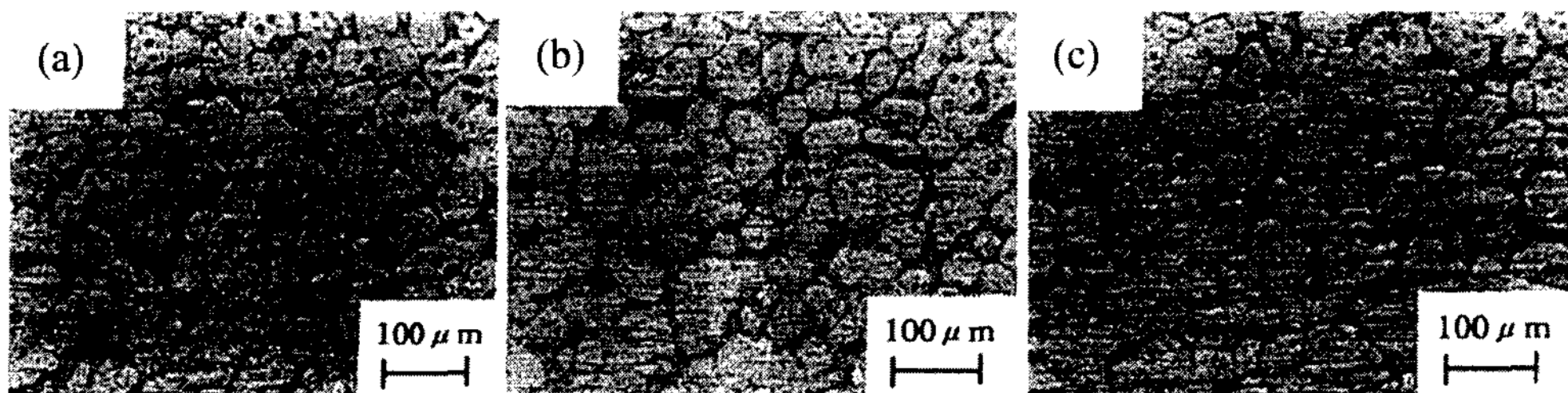


Fig. 7. Microstructure in three step reheating process of semi-solid aluminum alloy (A356, $f_s = 55\%$, $t_{a1} = 4 \text{ min}$, $t_{a2} = 3 \text{ min}$, $t_{a3} = 1 \text{ min}$, $T_{h1} = 350^{\circ}\text{C}$, $T_{h2} = 570^{\circ}\text{C}$, $T_{h3} = 576^{\circ}\text{C}$, $t_{h1} = 1 \text{ min}$, $t_{h2} = 3 \text{ min}$, $t_{h3} = 3 \text{ min}$, $Q = 5.544 \text{ kW}$)

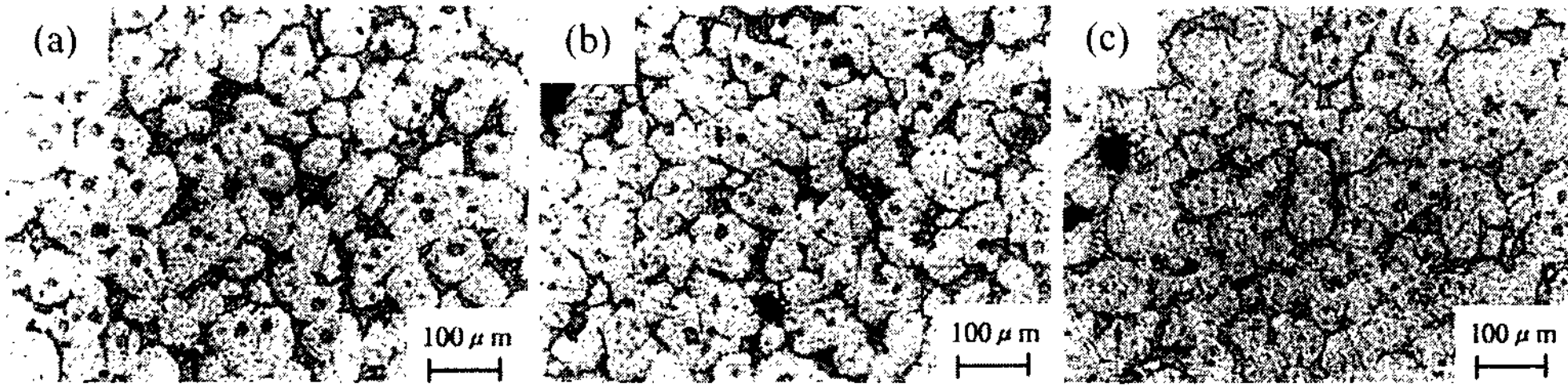


Fig. 8. Microstructure in three step reheating process of semi-solid aluminum alloy (ALTHIX 86S, $f_s = 55\%$, $t_{a1} = 4$ min, $t_{a2} = 3$ min, $t_{a3} = 1$ min, $T_{h1} = 350^\circ\text{C}$, $T_{h2} = 567^\circ\text{C}$, $T_{h3} = 578^\circ\text{C}$, $t_{h1} = 1$ min, $t_{h2} = 3$ min, $t_{h3} = 3$ min, $Q = 5.544$ kW)

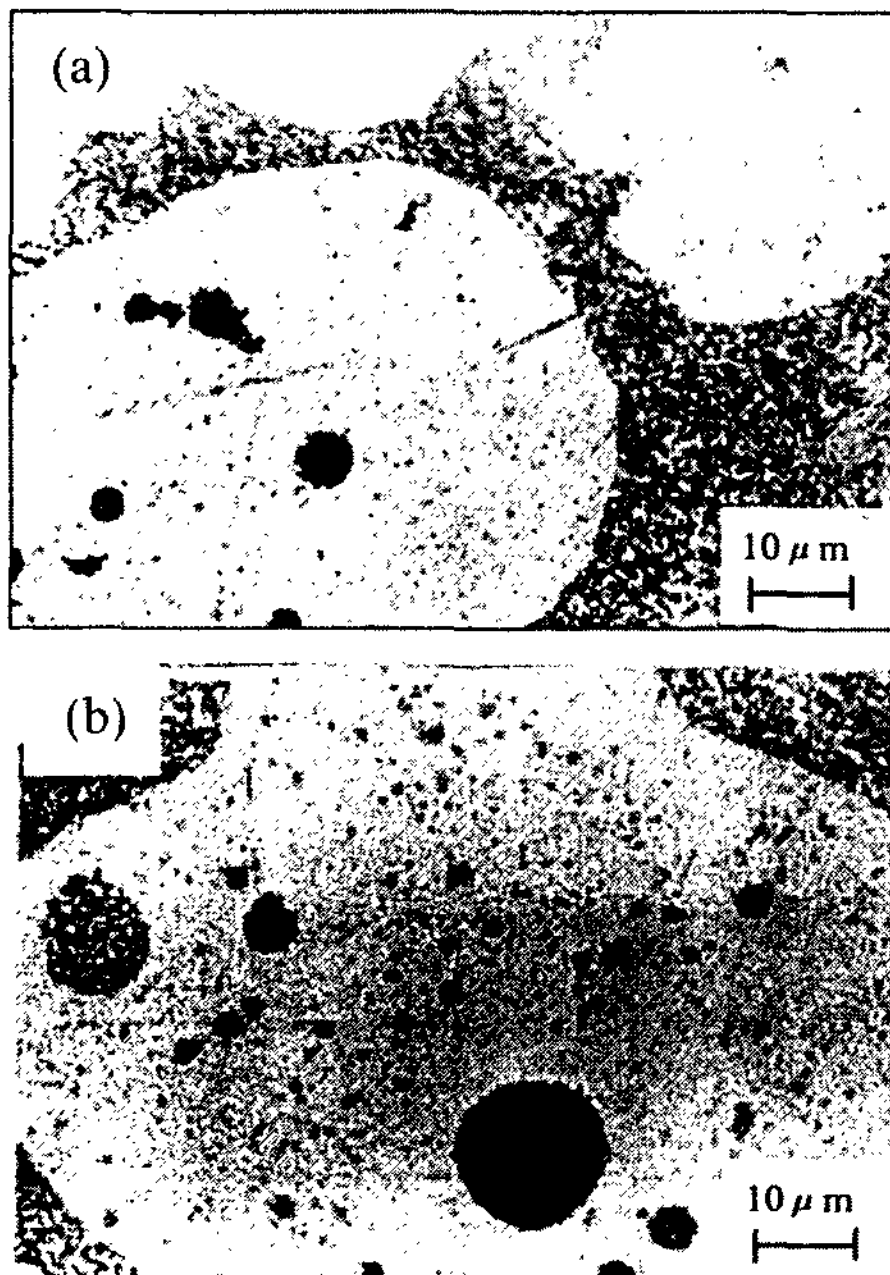


Fig. 9. Eutectic microstructures of semi-solid alloys (A356 and ALTHIX 86S) (a) A356, $f_s = 55\%$, $t_{a1} = 4$ min, $t_{a2} = 3$ min, $t_{a3} = 1$ min, $T_{h1} = 350^\circ\text{C}$, $T_{h2} = 570^\circ\text{C}$, $T_{h3} = 576^\circ\text{C}$, $t_{h1} = 1$ min, $t_{h2} = 3$ min, $t_{h3} = 2$ min, $Q = 12.04$ KW (b) ALTHIX 86S, $f_s = 55\%$, $t_{a1} = 4$ min, $t_{a2} = 3$ min, $t_{a3} = 1$ min, $T_{h1} = 350^\circ\text{C}$, $T_{h2} = 567^\circ\text{C}$, $T_{h3} = 578^\circ\text{C}$, $t_{h1} = 1$ min, $t_{h2} = 3$ min, $t_{h3} = 3$ min, $Q = 5.544$ KW

경 2 mm로 가공하여 ϕ 1.6 mm의 K-Type CA열전대를 삽입해서 유도가열 실험시 시편 각 부분의 온도를 측정하였다. 그리고 측정기기는 데이터 로거 TDS-302 (주식회사 동경 계기 연구소)를 사용하였으며, 가열 온도는 Fig. 1의 열전대 위치 (b)를 기준으로 하였다. 온도 구배가 작고 미세한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 재가열 조건을 찾기 위해 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간(t_a), 재가열 온도(T_h), 재가열 온도에서의 유지 시간(t_h) 등을 변화시키면서 빌렛의 전

체적인 온도분포와 미세조직을 관찰하였다.

각 합금별 최적의 재가열 조건을 Table 8에 나타내었으며, Table 8에 사용된 기호의 정의는 Fig. 6에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

소재의 재가열시 고상율이 낮을수록 금형에 충전되는 것에는 유리하나 자중 효과로 인한 시편 하부의 붕괴 현상과 이송의 어려움 때문에 고상율 55%로 재가열 실험을 수행하였다[3, 25].

Fig. 7과 8은 Fig. 1의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서 관찰된 고상율 55%로 재가열된 A356 및 ALTHIX 86S 소재의 미세한 구상화 조직을 나타낸 것이다. Fig. 9 (A)~(B)는 고상율 55%에서 가장 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었던 재가열 조건에서의 공정 조직을 관찰하기 위해서 1000배로 확대한 시편의 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig. 9 (A)~(B)에서 공정 α 의 편석이 없이 공정 조직이 완전히 용해된 모습을 볼 수 있었다. 따라서 미세한 구상화 조직을 얻기 위해서는 각 합금별 공정온도(A356: 575°C , ALTHIX 86S: 572°C)이상의 온도에서 공정 조직이 충분히 용해될 수 있는 재가열 시간이 필요하다는 사실을 알 수 있었다. 공정 조직이 용해되기 위해서는 많은 열에너지와 시간이 필요하기 때문에 공정 조직이 용해될 수 있을 만큼의 충분한 열에너지가 공급될 때까지는 온도 상승이 일어나지 않는다[1-3, 10, 21-22, 24]. 공정 조직이 용해되는 전후에서 고상율이 급격하게 변하게 되며 공정 조직이 용해되는 순간 급속한 온도의 상승도 나타나게 된다. 이런 온도 상승 현상 때문에 정확히 재가열 온도를 제어하기가 힘들다. 따라서 보다 정확한 온도 제어와 시편의 균일한 온도분포를 위해서는 3단으로 시편을 재가열해야 한다.

이상의 실험에 의하면 소재의 재가열은 각 단계에서 온도와 시간 사이의 관계를 정립하는 것이 극히 중요함을 알 수 있었다. 설정온도에 도달한 후 유지 시간이 길어질수록 구상화 입자가 조대화(coarsening)되는 경향이 있으므로 적절한 구상화 조직을 얻기 위해서는 소재의 직경과 길이에 따라서 적절한 온도 및 유지 시간의 제어가 필요하다[1-3, 10, 21-26].

유도가열 및 반응용 단조에 관한 연구, 개발 및 응용[26-27]은 범용성이 높은 Al-Si-Mg계 아공정(hypoeutectic) 합금인 A356 및 A357 합금에 의한 것이 대부분이다. 그런데 ALTHIX 86S 합금은 아공정 조성의 합금이지만 Cu와 Si의 상호작용으로 인하여 과공정 조성의 A390과 같이 액상편석(liquid segregation)의 발생 가능성이 높다[1-2, 24]. 따라서 반응용 단조 공정을 위해서는 초정 α 의 조대화 및 공정 α 의 편석[1-2, 28]이 없는 균일한 미세조직을 얻을 수 있는 코일설계 및 유도가열 조건의 설정이 극히 중요하다. 유도 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션 결과를 토대로 한 본 연구에서는 유도가열후의 조직관찰로부터 위에서 서술한 결함이 관찰되지 않았다.

이상의 연구결과로부터 반응용 단조를 위한 유도 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션 모델 및 유도가열 실험의 타당성을 입증하였다. 본 연구에서 제안한 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션 모델 및 유도가열 기술은 점차적인 반응용 단조 수요의 증가에 따른 대비책[29]과 국가 기술력 및 국제 경쟁력의 향상에 크게 공헌할 것으로 사료된다.

5. 결 론

반응용 소재의 크기가 $d \times l = 76 \times 90\text{mm}^2$ 인 A356 및 $d \times l = 76 \times 70\text{mm}^2$ 인 ALTHIX 86S를 이용한 유도 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션 및 재가열 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 전자기 끝단효과(electromagnetic end effect)를 최소화할 수 있는 상용 유도가열 시스템(반응용 성형용: 60Hz)의 최적 코일설계를 제안하였다.

2) 최적 코일설계와 유도가열 공정 시뮬레이션을 통하여 새로운 유한요소 해석 모델을 제안하였다.

3) 유도가열 공정의 새로운 유한요소 해석 모델을 토대로 소재의 재가열을 3단계로 나누어 각 단계마다 가

열 시간 및 유지 시간을 제어함으로써 빌렛이 균일하게 가열되어 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 반응용 단조에 적합한 재가열 조건을 도출하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] H. K. Jung and C. G. Kang : Metall. and Mater. Trans. A, Vol. 30A, No. 12 (1999) 1.
- [2] H. K. Jung and C. G. Kang : Trans. ASME, J. Manufacturing Sci. and Eng., (1999) to be accepted.
- [3] C. G. Kang, H. K. Jung and Y. J. Jung : 6th Int. Conf. on Technology of Plasticity (6th ICTP), Friedrich-Alexander University, Nuremberg, Germany, 19-23, Sep., (1999) 1689.
- [4] C. G. Kang, H. K. Jung and K. W. Jung : Int. Symp. on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology (AFDM'99), Paradise Beach Hotel, Pusan, Korea, 7-9, Sep., (1999) 83.
- [5] C. G. Kang, H. K. Jung, K. D. Jung and D. H. Lee : Korea-French Int. Joint Workshop on Metal Forming, KAIST, Daejeon, Korea, 18-19, August, (1999) 51.
- [6] H. K. Jung and C. G. Kang : J. of the Korean Foundrymen's Soc., Vol. 19, No. 4 (1999) 330.
- [7] C. G. Kang and N. S. Kim : J. Mater. Processing Tech., (1999) in Press.
- [8] G. Chiarmetta : 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 19-21, June, (1996) 204.
- [9] K. P. Young and R. Fitze : 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 13-15, June, (1994) 155.
- [10] H. K. Jung : Master Dissertation, Pusan National Univ., Korea (1999) 1.
- [11] T. Witulski, U. Morjan, I. Niedick and G. Hirt : 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, USA, 23-25, June, (1998) 353.
- [12] S. Midson, V. Rudnev and R. Gallik : 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, USA, 23, June, (1998) 497.
- [13] M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W. R. Lou : 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, USA, 23-25, June, (1998) xvii.

- [14] S. Kouji : 175th JSTP Symp. for Semi-Solid Metals Forming, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, 24-26, May, (1997) 25.
- [15] C. G. Kang, J. C. Choi, B. M. Kim, H. J. Park, H. K. Jung and J. H. Park : *Technical Report, Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National Univ., Korea, No. NSDM 9514-0909-00-01-1.5, (1998) 1.*
- [16] E. J. Davies : *Conduction and Induction Heating, Peter Peregrinus Ltd., London, (1990) 100.*
- [17] N. R. Stansel : *Induction Heating, McGraw-Hill INC., New York (1949) 178.*
- [18] V. I. Rudnev, L. C. Raymond, D. L. Loveless and M. R. Black : *Induction Heat Treatment, Marcel Dekker INC., New York (1997) 775.*
- [19] *Metals Handbook : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Vol. 2, 10th Edition, (1990) 164.*
- [20] M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax : *4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 19-21, June, (1996) 120.*
- [21] H. K. Jung, C. G. Kang and Y. H. Moon : *Scripta Materialia, (1999) to be accepted.*
- [22] H. K. Jung, C. G. Kang and Y. H. Moon : *J. Mater. Eng. and Performance, (1999) to be accepted.*
- [23] H. K. Jung and C. G. Kang : *J. of the Korean Foundrymen's Soc., Vol. 18, No. 5 (1998) 450.*
- [24] H. K. Jung and C. G. Kang : *J. of the Korean Foundrymen's Soc., Vol. 19, No. 3 (1999) 225.*
- [25] H. K. Jung and C. G. Kang : *Trans. Mater. Processing, Vol. 8, No. 5 (1999) 437.*
- [26] C. G. Kang and H. K. Jung : *Int. J. Mech. Sci., Vol. 41, No. 12 (1999) 1423.*
- [27] C. G. Kang and N. S. Kim : *J. of the Korean Soc. of Precision Eng., Vol. 16, No. 9 (1999) 123.*
- [28] C. G. Kang, K. D. Jung and H. K. Jung : *2nd Int. Conf. on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (IPMM'99), Honolulu, Hawaii, USA, 10-15, July, (1999) 593.*
- [29] C. G. Kang, S. S. Kang and H. K. Jung : *6th Int. Conf. on Technology of Plasticity (6th ICTP), Friedrich-Alexander University, Nuremberg, Germany, 19-23, Sep., (1999) 1701.*