

# Thixoforming을 위한 재가열용 유도코일 설계의 최적화

정 홍 규\*, 김 남 석\*, 강 충 길\*  
\* 부산대학교 기계공학부

## Optimization of Induction Coil Design for Reheating in Thixoforming Process

H. K. Jung\*, N. S. Kim\* and C. G. Kang\*

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

### Abstract

The coil design of induction heating systems and their optimization are of paramount importance for semi-solid processing (SSP). The authors of this paper present the coil design and optimization of a 60 Hz induction heating system for ALTHIX 86S (Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg) alloy. An objective function on the basis of the optimization process for the coil design is proposed by introducing an optimization technique. Finally, the results of the optimal coil design are also applied to the induction heating process to obtain a fine globular microstructure. The proposed new objective function based on the computational techniques would contribute to obtaining the thixoformed components with good mechanical properties and reducing lead time.

**Keywords:** Optimization, Induction Coil Design, Objective Function, Induction Heating Process, Globular Microstructure, Computational Techniques

### 1. 서 론

유도코일 설계와 유도가열은 리드타임(Lead Time) 단축, 균일한 온도분포 및 미세조직을 제어 할 수 있기 때문에 반응용 성형공정에서 대단히 중요하다. 유도코일 설계 및 반응용 소재(SSM)의 유도가열에 관한 연구 동향으로서, Garat 등<sup>(1)</sup>은  $d \times l = 76 \times 110(\text{mm})$ 인 A356 및 A357 소재를 555°C까지는 25kW의 출력으로, 555°C~570°C까지는 4.5kW의 출력으로, 570°C~580°C까지는 3.0kW의 출력으로 다출력 유도가열 실험을 수행하였으나, 구상화의 정도를 정확히 파악하지 못하였다. 정 등<sup>(2-3)</sup>은 유도가열 시스템(주파수:60Hz)의 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 SSM의 종류와 크기에 따라서 액상편석 및 초정의 조대화를 예방할 수 있는 반응용 성형에 적합한 유도가열 D/B를 구축하였다.

유도가열은 표면에서부터 빌렛의 내부로 열전도에 의한 열전달이 일어나 가열된다. 따라서 유도가열을 이용하여 소재를 가열할 경우 열 유동에 대한 연구가 필요하다. 반응용 소재의 종류와 크기에 따라서 재가열 조건이 다르기 때문에 성형을 위해서는 유도코일 설계의 최적화 및 재가열 조건에 관한 정량적인 D/B 구축이 중요하다. 지금까지 발표되어진 연구에서는 코일설계에 있어서 정량적인 것보다 경험적, 실험적 현장 지식을 바탕으로 하여 코일의 직경과 길이를 구하였으나 본 연구에서는 이론적인 유도코일 설계를 기초로 하여 범용 코드인 ANSYS<sup>TM</sup>를 이용한 수치해석 결과를 이용하여 FORTRAN Code로 코일 길이, 온도와 시간을 매개변수로 하여 요구하는 고상율( $f_s$ )에 따른 요구 온도( $T_m$ ), 총 재가열 시간( $t_m$ )과 유효 코일 길이(H)에 따른 마지막 유지 시간( $t_{h3}$ ) 및 재가열 총 시간( $t_w$ )의 향으로 표현된 목적함수(Objective Function)를 제안하여 최적화 기법으로 최적의 코일 길이( $H_{opt}$ )를 제안하고자 한다. 또한, 수치해석 및 FORTRAN Code로 해석적인 검증을 통하여 코일을 제작하였으며, 유도가열 실험을 통하여 코일설계의 최적화에 대한 타당성을 실험적으로 검증하였다.

### 2. 재가열용 유도코일 설계의 최적화

Fig. 1은 유도코일 설계의 최적화 알고리즘의 Flow Chart를 나타낸 것이며, 본 논문에서는 고강도의 주조용 알루미늄 합금인 ALTHIX 86S(프랑스 페시니사에서 제조, ASTM 규격의 A319와 유사함)의 재가열용 유도코일 설계의 최적화 과정을 소개하고자 한다.

코일과 빌렛의 끝단에서 가열 양상의 불균일성은 전자기장의 뒤틀림과 관계가 있다. 이 뒤틀림 현상을 "전자기 끝단 효과"라고 한다. 일반적으로, 전자기 끝단 효과는 유도가열에서 가장 복잡한 문제를 중의 하나이다. 이 효과는 빌렛 끝단의 과열(Overheating) 또는 아열(Underheating)의 결과라고 할 수 있다. 따라서 코일설계의 최적화 과정에서 고려되어야 할 점은 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다.<sup>(2-3)</sup>

전자기 끝단 효과를 최소화(균일 유도가열) 하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2에서 표시한 바와 같이 유도가열 장치의 유효 코일 길이 H와 코일의 내경 Di를 정 등<sup>(3, 5)</sup>이 제안한 유도 코일 설계법을 이용하여 설계하였다. 열전도도( $\kappa$ ) 및 저항도( $\rho_o$ )와 같은 매개변수는 상온에서 반응용 상태의 온도까지 변한다. 따라서, 유도코일 설계의 최적화 과정에서 이러한 매개변수들의 변화를 고려하기 위해서 ANSYS<sup>TM</sup>을 이용하였다. ANSYS<sup>TM</sup>은 문자와 숫자를 포함하는 변수들(Alphanumeric Variables)로 모델을 설정하는 데 사용되는 Parametric Design Language (PDL)이라는 기능을 포함하고 있다.<sup>(2-4)</sup> 따라서, 이론적으로 코일을 설계한 결과 빌렛의 크기가  $d \times l = 76 \times 70(\text{mm})$ 인 ALTHIX 86S 소재를 유도가열하기 위한 유효 코일의 크기를 Table 1과 같이 제안할 수 있다.

Table 1 Designed dimensions of induction heating device (f=60 Hz, l=70 mm)

Billet Diameter (d ; mm)	Coil Inner Diameter (D <sub>i</sub> ; mm)	Min. Heating Length (L <sub>w</sub> ; mm)	Effective Coil Length (H ; mm)
76	100	141	166~216

Table 1의 유효 코일 길이를 기초로 한 유도가열 공정의 수치해석 및 최적화 기법을 도입한 목적 함수를 통해서 최적 코일 길이(H<sub>opt</sub>)를 결정하였다. 유도가열의 수치해석에 필요한 물성치는 유도코일 설계 결과를 기초로 하였으며, Table 2의 물성치를 이용하였다. Fig. 3은 ALTHIX 86S의 수치해석에 사용된 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 주울 가열에 의해 빌렛의 표면이 가열되며 열전도에 의해 빌렛의 표면으로부터 중심까지 열 확산이 일어난다. 또한, 유도가열에서는 빌렛 표면의 열 대류와 열 복사 손실이 고려되어야 한다.

Table 2 Property values for numerical simulation of induction heating process with designed coil dimensions (ALTHIX 86S with d×l=76×70 mm, f=60 Hz, fs=55 %)

Parameter	Symbol	Unit	Values	Ref.
Convection Coefficient of Air	h <sub>t0</sub>	W/m <sup>2</sup> K	30	
Density of ALTHIX 86S	ρ	kg/m <sup>3</sup>	2790	(6)
Specific Heat of ALTHIX 86S	C	J/kgK	963	(6)
Reheating Time	t	sec	895	
Coil Wall Thickness	d <sub>c</sub>	mm	10	(7)
Coil Inner Diameter	D <sub>i</sub>	mm	100	
Coil Outer Diameter	D <sub>o</sub>	mm	120	
Effective Coil Length	H	mm	180	
Billet Diameter	d	mm	76	
Billet Length	l	mm	70	
Thermal Conductivity	κ	W/mK	109	(6)

Fig. 4는 유효 코일 길이가 180mm인 경우 고상율 55%로 유도가열된 ALTHIX 86S 빌렛 내부의 온도분포에 대한 수치해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 재가열 시간이 경과함에 따라 열전도에 의해서 빌렛 반경 방향으로 온도분포의 균일화가 이루어짐을 알 수 있다. 일반적으로 아공정(Hypoeutectic) 알루미늄 합금의 유도가열에서는 공정조직이 완전히 용해되어야 반응용 성형시에 우수한 기계적 성질의 제품을 성형할 수 있다.<sup>(6-8)</sup> 유도가열 공정의 수치해석 결과로부터, ALTHIX 86S의 공정 온도인 572℃ 이상의 온도에서 공정 조직의 충분한 용해와 빌렛 표면과 중심의 온도차를 최소화하기 위한 관점에서 최적의 코일 길이(H<sub>opt</sub>)는 180mm로 밝혀졌다.

유효 코일 길이가 길어짐에 따라서 주울 열 발생량의 증가로 인하여 빌렛의 표면과 중심간의 온도차이가 선형적으로 증가한다. 재가열 시간이 경과함에 따라서 유효 코일 길이의 변화에 따른 빌렛의 표면과 중심간의 온도차이가 뚜렷이 나타났으며, 온도차이가 감소하는 양상이 유사하기 때문에 코일 길이를 최적화하기 위해서는 각 단계별 온도차이와 요구 온도 차이 및 최종 가열 온도가 일정할 때 설계 변수(H)에 따른 각 단계별 총 가열시간과 요구 총 재가열 시간이 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 목적함수를 제안하였으며 이 함수를 ALTHIX 86S의 재가열용 유도코일 설계의 최적화를 위한 제 1 목적함수로 정의한다.

$$\eta = C_1 \times \frac{(T_s - T_c)_a}{(T_s - T_c)_m} + C_2 \times \frac{t_a}{t_m} \quad (0 < C_1 < 1, 0 < C_2 < 1) \quad (1)$$

식 (1)에서, (T<sub>s</sub> - T<sub>c</sub>)<sub>a</sub>와 (T<sub>s</sub> - T<sub>c</sub>)<sub>m</sub>은 재가열 시간이 일정할 때 설계 변수(Design Variable, H)에 따른 각 단계별 온도차이와 요구 온도차이(5℃)이고, t<sub>a</sub>와 t<sub>m</sub>은 각각 최종 가열 온도가 일정할 때 설계 변수(H)에 따른 각 단계별 총 가열 시간과 요구 총 재가열 시간이다. C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>는 가중치로 빌렛의 온도차를 줄이고자 하면 C<sub>1</sub> > C<sub>2</sub>, 빌렛의 총 가열

시간을 줄이고자 한다면  $C_2 > C_1$ 으로 하면 된다. Fig. 5는  $C_1 = C_2 = 1$ 일 때의 유효 코일 길이의 변화에 따른 목적 함수의 값을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이  $C_1 = C_2 = 1$ 일 때 최적 코일 길이( $H_{opt}$ )가 181mm로 구해졌으며, 수치해석에 의해 구해진 최적 코일 길이( $H_{opt}$ ) 180mm와 거의 일치하였다. Fig. 6은 반응용 성형에 적합한 미세한 구상화 조직을 얻기 위한 유도가열 실험에 적용하여 코일설계 최적화에 대한 타당성을 실험적으로 검증한 결과를 나타낸 것이다.

이상의 연구 결과로부터 이론적인 유도코일 설계, 유도코일 설계 결과를 기초로 한 수치해석, 최적화 기법을 도입하여 제안된 목적함수 및 미세한 구상화 조직을 얻기 위한 유도가열 실험의 타당성이 검증되었다. ALTHIX 86S는 Cu의 첨가로 인한 시효경화로 인하여 주조 용융 금속에서는 아주 고강도이다. 하지만, Cu와 Si의 상호작용에 의해서 편석이 발생하기 쉽다. 따라서 본 연구에서 제안한 편석 방지<sup>(8,9)</sup> 및 구상화 조직을 얻을 수 있는 유도가열 공정의 수치해석 모델 및 목적함수는 반응용 성형을 위한 유도가열 D/B 구축 및 유도코일 설계 자동화에 이용되어 질 것으로 사료된다.

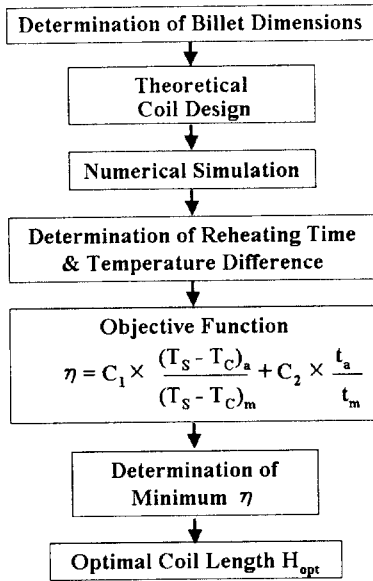


Fig. 1 Computational flow chart of the optimization algorithm for inductive coil design.

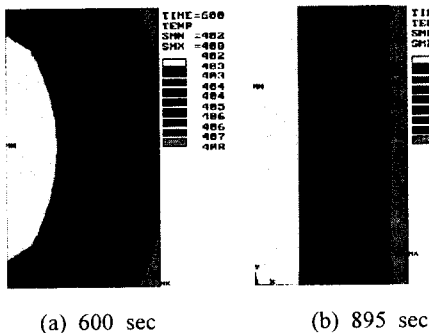


Fig. 4 In the case of  $H=180$  mm, temperature distribution after induction heating.

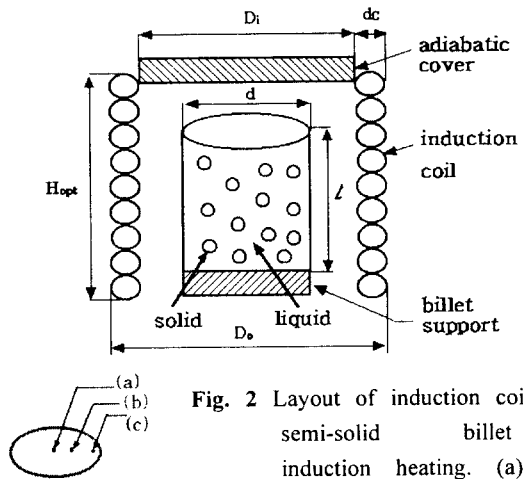


Fig. 2 Layout of induction coil and semi-solid billet for induction heating. (a), (b) and (c) are the positions to observe the microstructures.

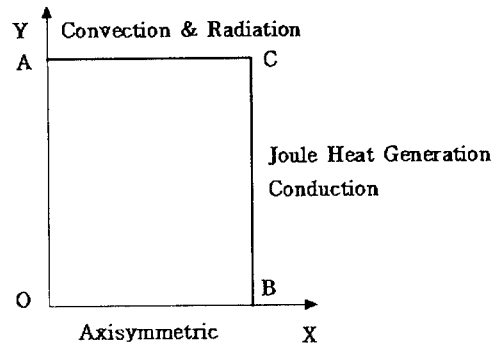


Fig. 3 Boundary conditions to simulate induction heating process with the designed coil dimensions.

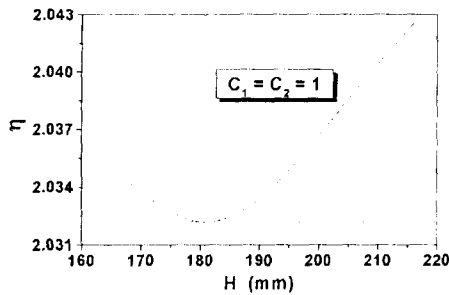


Fig. 5 Values of objective function ( $n$ ) according to the effective coil length ( $H$ ) at  $C_1=C_2=1$ .

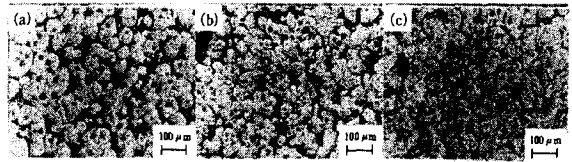


Fig. 6 Microstructure in three step reheating process of semi-solid aluminum alloy (ALTHIX 86S,  $f_s=55\%$ ,  $t_{a1}=4$  min,  $t_{a2}=3$  min,  $t_{a3}=1$  min,  $T_{h1}=350$  °C,  $T_{h2}=567$  °C,  $T_{h3}=578$  °C,  $t_{h1}=1$  min,  $t_{h2}=3$  min,  $t_{h3}=3$  min,  $Q=5.54$  kW).

### 3. 결론

유도코일 설계 자동화를 위한 이론적인 코일설계, 수치해석, 최적화 기법 및 유도가열 실험을 통한 코일설계 최적화에 대한 검증을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 전자기 끝단 효과(가열 불균일 양상)를 최소화하기 위한 이론적인 유도코일 설계를 통하여 빌렛 길이와 코일 길이 사이의 정량적인 관계를 규정하였다.
- (2) 유도코일 설계를 기초로 한 수치해석을 통하여 빌렛 내부의 온도 분포를 예측하였으며, 공정 조직의 충분한 용해 및 빌렛 표면과 중심의 온도차를 최소화하기 위한 관점에서 최적의 코일 길이( $H_{opt}$ )는 180mm로 밝혀졌다.
- (3) 최적화 기법을 도입하여 ALTHIX 86S의 재가열용 유도코일 설계의 최적화를 위한 목적 함수를 제안하였다.
- (4) Thixoforming 공정을 위한 코일설계 최적화에 대한 타당성을 실험적으로 검증하였다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- (1) M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W.R. Loue, 1998, "Aluminium Semi-Solid Processing : From the Billet to the Finished Part," Proc. of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, USA, pp. xvii~xxxii.
- (2) C.G. Kang, H.K. Jung and Y.J. Jung, 1999, "Coil Design of Inductive Heating and Reheating Process of Aluminium Alloys for Thixoforming," Proc. of the 6th Int. Conf. on Technology of Plasticity (6th ICTP), Friedrich-Alexander University, Germany, pp. 1689~1694.
- (3) 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 Thixoforming," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, No. 12, pp. 1~11.
- (4) H.K. Jung, C.G. Kang and Y.H. Moon, 1999, "Effect of Multi-Capacity Induction Heating Process on Globular Microstructure in Semi-Solid Aluminum Alloy," Scripta Materialia, to be accepted.
- (5) 정 홍규, 강 충길, 1999, "Thixoforming을 위한 Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg 합금의 유도가열 공정에 관한 연구," 한국 주조 공학회지, 제19권, 제3호, pp. 225~235.
- (6) Metals Handbook, 1990, "Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," ASM International, Vol. 2, 10th Edition, pp. 70~73.
- (7) 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.
- (8) C.G. Kang and H.K. Jung, 1999, "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modelling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1423~1445.
- (9) C.G. Kang, H.K. Jung and K.W. Jung, 1999, "Thixoforming of Aluminum Component with Designed Die by Process Simulation," Proc. of Int. Symp. on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology (AFDM'99), Pusan National University, Korea, pp. 83~88.