

재가열 공정과 유도 가열의 FEM 해석

정홍규*, 손영익*, 강충길*

* 부산대학교 기계공학부

Reheating Process and FEM Analysis of Inductive Heating

H. K. Jung*, Y. I. Son*, C. G. Kang*

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

Abstract

For the thixoforming process beside an existing solidus-liquidus interval, the reheating conditions to obtain the globular microstructure are very important. It relies on the control of globular microstructure of semi-solid alloys that contain non-dendritic particles. To obtain the globular microstructure in cross section of billet, the optimal design of the induction coil is necessary. Therefore, in this paper the optimal coil design to minimize electromagnetic end effect will be proposed. The results of coil design were also applied to the reheating process to obtain a fine globular microstructure. Finally, reheating data base of aluminum alloys for thixoforming and FEM model for induction heating based on the optimal coil design have been proposed.

Keywords: Thixoforming(반용융 성형), Reheating Condition(재가열 조건), Optimal Coil Design(최적 코일설계), Globular Microstructure(구상화 조직), FEM Model(유한요소 모델)

1. 서 론

Thixoforming 공정에서 가열 시간의 단축 및 빌렛을 균일 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계가 중요하다. 코일과 빌렛을 구성하는 시스템에서, 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량이 균일하지 않기 때문에 온도 분포가 균일하지 않다. 따라서 코일 설계의 최적화 과정에서 고려되어야 할 점은 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다.⁽¹⁾ 빌렛의 온도가 낮은 곳은 충진시 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 곳은 액상이 고상으로부터 유출되는 액상 편석 현상이 발생하여 기계적 성질이 균일하지 못한 제품이 된다. 반용융 소재의 종류와 크기에 따라서 재가열 조건이 다르기 때문에 Thixoforming을 위해서는 재가열 조건에 관한 D/B 구축이 극히 중요하다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구에서는 반용융 소재의 종류와 크기에 따라서 구상화된 조직을 얻을 수 있는 상용 유도 가열 시스템(반용융 성형용: 60Hz)의 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 재가열 실험 및 FEM 해석을 통하여 코일 설계의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 균일 재가열을 위한 유도 가열 시스템의 코일 설계

균일 재가열을 위하여 본 연구에서는 Fig. 1에서 표시한 바와 같이 반용융 성형용 유도 가열 시스템(주파수: 60Hz)의 코일 길이 H와 코일의 내경 D_i 를 설계하였다.⁽¹⁾ 이론적으로 코일을 설계한 결과 시편의 크기가 $d \times l = 60 \times 90$ (mm)인 A356, Al2024 소재 및 $d \times l = 76 \times 70$ (mm)인 ALTHIX 86S 소재를 가열하기 위한 코일의 크기를 Table 1과 같이 제안하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 반용융 성형용 유도 가열 시스템(주파수: 60Hz)의 코일의 크기는 합금의 종류와 크기에 따라서 소재의 전단면에 걸쳐 균일한 온도 분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 유도 가열 조건의 D/B 구축에 유용할 것으로 사료된다.

Table 1 Designed dimensions of induction heating device ($f=60\text{Hz}$, $\delta=10.7\text{mm}$, $k=0.57$ for A356, $k=0.56$ for Al2024 and $k=0.58$ for ALTHIX 86S)

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	60	84	72	97~147	
Al2024	60	84	78	103~153	10
ALTHIX 86S	76	100	141	166~216	

여기서, k 와 δ 는 각각 실제와 이상화된 표면-중심간의 온도차의 비 및 전류 침투깊이를 나타낸다.

3. 재가열 실험

본 실험에서 사용된 SSM 소재는 일반적으로 자동차 부품개발에 많이 이용하는 주조용으로 프랑스 PECHINEY에서 전자기 교반으로 제조되어진 A356과 ALTHIX 86S 및 구조용 소재로 압출비 9.73에서 열간압출로 제조되어진 Al2024를 사용하였다. Table 2는 각 소재의 화학조성을 나타내었으며, 재가열전 소재의 미세조직을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical compositions of A356, ALTHIX 86S and Al2024

		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
Al2024	Min(%)	-	-	3.8	0.3	1.2	-	-	-	-
	Max(%)	0.50	0.70	4.9	0.9	1.8	0.10	0.25	0.15	-
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

Fig.2에서 볼 수 있듯이 A356, Al2024 및 ALTHIX 86S의 원소재는 구상화 조직을 이루고 있는 것이 아니라 아주 미세한 입자로 이루어져 있음을 알 수 있다.

A356, Al2024 소재 및 ALTHIX 86S 소재를 각각 Fig.1과 같이 $d \times l = 60 \times 90$ (mm) 및 $d \times l = 76 \times 70$ (mm)의 빌렛으로 가공하여 출력 50KW(주파수: 60Hz) 유도로를 이용해서 재가열 실험을 하였다. 유도로의 가열 코일은 Fig.1에서와 같이 A356, Al2024 소재는 $D_o \times H = 104 \times 120$ (mm), ALTHIX 86S 소재는 $D_o \times H = 120 \times 180$ (mm)로 설계, 제작하여 시편이 균일하게 가열될 수 있도록 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 유지시간(t_h) 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세조직을 관찰하였다. 각 합금별 최적의 재가열 조건을 Table 3에 나타내었으며, Table 3에 사용된 기호의 정의는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3 The reheating conditions for semi-solid aluminum alloys (A356 and Al2024 with $d \times l = 60 \times 90$ (mm) and ALTHIX 86S with $d \times l = 76 \times 70$ (mm))

Alloys	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}		
A356	4	4	1	1	2	1	350	565	576	13	12.5
Al2024	"	3	"	"	3	"	"	603	616	13	8.6
ALTHIX 86S	"	"	"	"	"	3	"	567	578	15	5.544

4. 재가열 실험 결과 및 고찰

Fig.4는 고상을 50%와 55%에 대응하는 A356의 미세조직을 나타낸 것이다. 고상을 50%(584 °C)일 때는 재가열 후 자중의 효과에 의하여 빌렛의 하부가 붕괴되는 현상이 발생하여 재가열된 시편을 금형으로 이송할 수가 없다. 따라서 성형 실험을 하기 위하여 고상을 55%(576 °C)로 재가열 실험을 하였다. 고상을 55%로 구상화 정도는 나빠지지만 고상과 액상의 구분이 명확하게 나타났다. 그리고 고상을 55%로 구상화 정도는 나빠지지만 고상과 액상의 구분이 명확하게 나타났다. 그리고 고상을 55%로 구상화 정도는 나빠지므로 입자의 미세화 정도가 개선되었다. Fig. 5는 고상을 55%인 경우 재가열 조건 중 t_{h3} 를 1, 3, 5, 8 min으로 변화시켰을 때 Al2024의 조직 변화를 나타낸 것이다. A356은 t_{h3} 가 증가함에 따라 조직의 조밀화 정도가 뚜렷이 나타났음을 알 수 있었다.^{(1), (3)~(4)} 그러나 Al2024는 t_{h3} 가 증가함에도 불구하고 조직의 구상화 정도가 A356에 비해 분명하지 않음을 알 수 있다. Fig.6은 Fig. 1의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서 관찰된 ALTHIX 86S의 미세한 구상화 조직을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 재가열 조건이 적절하다는 사실이 입증되었다.

이상의 실험에 의하면 적절한 구상화 조직을 얻기 위해서는 소재의 직경과 길이에 따라서 각 단계에서 온도와 시간사이의 관계를 정립하는 것이 극히 중요함을 알 수 있었다.⁽¹⁾ 소재의 재가열시 고상을 55%로 구상화 정도는 나빠지므로 금형에 충전되는 것에는 유리하나 자중 효과로 인한 시편하부의 붕괴 현상과 이송의 어려움 때문에 고상을 55%로 재가열 하는 것이 바람직하다고 생각된다. 본 연구에서 제안된 재가열 D/B는 미세한 구상화 조직을 얻는데 유용할 것으로 사료된다.

5. 유도 가열의 FEM 해석

유도 가열공정은 열전달, 전자기 효과들의 상호작용을 포함한다. 기하학적인 변수들뿐만 아니라 각각의 효과들에 대한 소재의 물성치는 공정거동을 제어한다. 유도 가열의 FEM 해석의 목적은 빌렛의 크기, 코일의 크기, 입력 주파수와 같은 다양한 공정변수의 영향을 결정하기 위한 FEM 해석 방법을 개발하기 위함이다. 유도 코일 설계와 유도 가열공정의 FEM 해석을 위해서, 범용 코드인 ANSYS™을 사용하였다. ANSYS™은 와전류(Eddy Current)의 유도로 인한 주울 가열과 전도, 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.⁽²⁾

유도 가열의 FEM 해석에 필요한 물성치는 유도 코일 설계와 재가열 실험을 토대로 하였다. Fig.7은 SSM의 열해석에 사용된 경계조건을 나타내고 있다. Fig.7에서 알 수 있듯이 주울 가열에 의해 빌렛의 표면이 가열되며 열전도에 의해 빌렛의 표면으로부터 중심까지 열확산이 일어난다. 또한, 유도 가열에서는 빌렛 표면의 열대류와 열복사 손실이 고려되어야 한다. Fig.8은 축대칭 열해석에 사용된 Mesh와 온도분포에 대한 FEM 해석 결과를 나타내고 있다. 유도 코일 설계와 재가열 실험을 토대로 한 FEM 해석을 통하여, 빌렛을 가열하는 데 필요한 총 에너지는 빌렛의 질량, 열 및 전자기 물성치의 함수이지만 그 관계는 비선형적이라는 사실을 알 수 있었다. 더욱이 SSM의 종류 및 크기에 따른 최적 코일 설계를 토대로 한 유도 가열의 FEM 해석 결과는 유도 가열 실험 결과와 일치하였다.⁽⁴⁾ 본 FEM 해석 결과는 SSM의 종류 및 크기에 따라서 균일한 온도분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 D/B 구축에 유용할 것으로 사료된다.

6. 결 론

A356, Al2024 소재 및 ALTHIX 86S를 이용한 재가열 실험 및 유도 가열의 FEM 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) SSM의 종류와 크기에 따라서 전자기 끝단 효과(Electromagnetic End Effect)를 최소화할 수 있는 상용 유도 가열 시스템(반용융 성형용: 60Hz)의 최적 코일 설계를 제안하였다.
- (2) SSM의 종류와 크기에 따라서 소재의 전단면에 걸쳐서 균일한 온도 분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 유도 가열 조건의 D/B를 구축하였다.
- (3) 최적 코일 설계와 유도 가열의 CAE를 통하여 새로운 FEM 해석 모델을 제안하였다.

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소(ERC/NSDM)의 지원에 의하여 이루어진 연구의 일부분입니다.

7. 참고문헌

- (1) 정홍규, 1999, "A Study on Coil Design and Heating D/B Construction of Semi-Solid Aluminum Alloys for Thixoforming", 부산대학교 석사학위 논문, pp. 5-129.
- (2) M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax, 1996, "Computer Based Numerical Analysis of Semi-Solid Metalworking", Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, UK, pp. 120-125.
- (3) C. G. Kang, H. K. Jung, N. S. Kim, 1999, "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modelling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials", International Journal of Mechanical Sciences, in Press.
- (4) 정홍규, 강충길, 1998, "Thixoforming을 위한 Al-7%Si-0.3%Mg 합금의 유도 가열 조건이 구상화 조직에 미치는 영향", 한국 주조 공학회지 제18권 제5호, pp. 450-461.

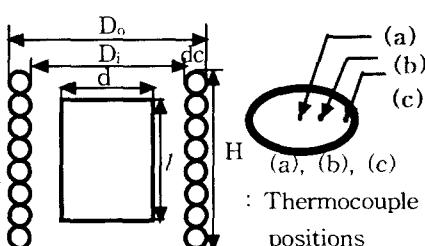
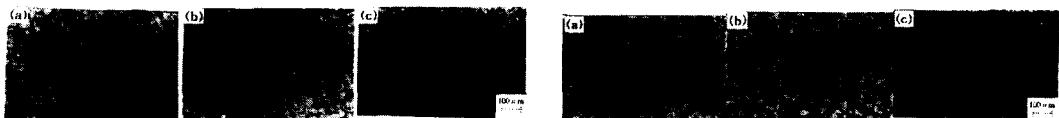
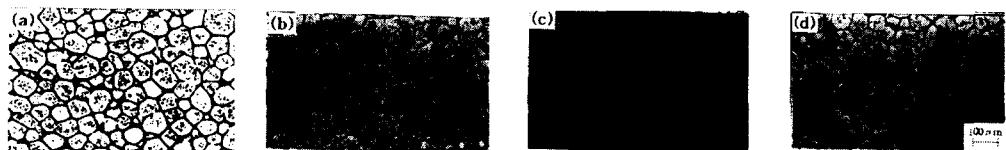


Fig.1 Schematic Illustration of (a) A356 (b) Al2024 (c) ALTHIX 86S Induction coil and Fig.2 Microstructures of raw materials billet (A356, Al2024 and ALTHIX 86S)





(a) $f_s=50\%$, $Th_3=584^\circ C$
(b) $f_s=55\%$, $Th_3=576^\circ C$
Fig.4 Microstructures of semi-solid alloy obtained by three-step reheating (A356)



(a) $t_{h3} = 1\text{min}$ (b) $t_{h3} = 3\text{min}$ (c) $t_{h3} = 5\text{min}$ (d) $t_{h3} = 8\text{min}$
Fig.5 Evolution of the microstructures of semi-solid alloy for variations of holding time ($f_s=55\%$, $616^\circ C$, Al/2024)



Fig.6 Microstructure of semi-solid alloy (ALTHIX 86S,
 $f_s=55\%$, $t_{a1}=4\text{min}$, $t_{a2}=3\text{min}$, $t_{a3}=1\text{min}$, $Th_1=350^\circ C$,
 $Th_2=567^\circ C$, $Th_3=578^\circ C$, $th_1=1\text{min}$, $th_2=3\text{min}$,
 $th_3=3\text{min}$, $Q=5.544\text{KW}$)

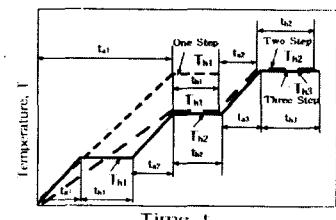


Fig.3 Input data diagram of
heat controller

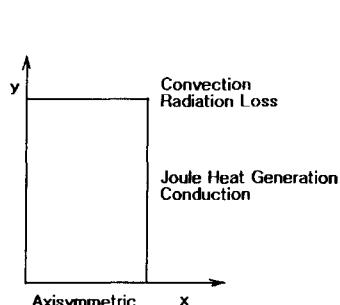
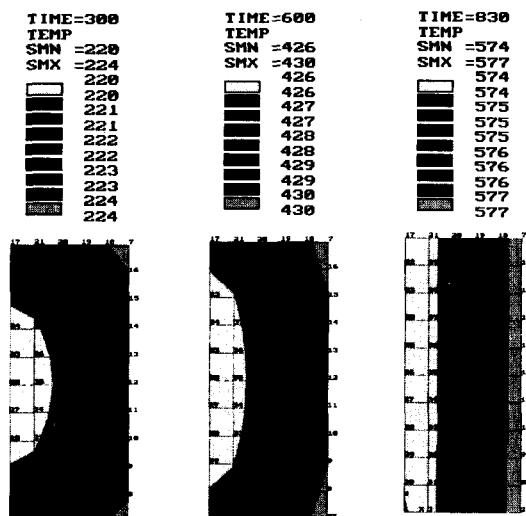


Fig.7 Boundary conditions to induction
heating process with inductive
coil design



(a) after 300 seconds (b) after 600 seconds (c) after 830 seconds
Fig.8 In the case of $f_s=55\%$, temperature distribution of reheated
A356 billet with $d \times l=76 \times 90$ (mm)