技術論文 한국정밀공학회지 제14권 제8호 (1997년 8월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 8. August. 1997.

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

반용융 단조를 위한 소재의 유도 가열

최 재 찬*, 박 형 진**, 김 병 민*

Induction Heating of a Billet for Semi-Solid Forging

J.C. Choi*, H.J. Park**, B. M. Kim*

ABSTRACT

Semi-solid forging is a compound forging technology to develop conventional forging process. Among several steps of semi-solid forging process, the heating step of a billet prior to semi-solid forging step is necessarily required to obtain globular microstructure. For the forming operation to work properly, it is also important to heat the billet uniformly for the uniformity of solid-liquid distribution. To satisfy these requirements, induction heating has been generally used for a long time. This paper presents the method to find heating condition and the temperature distribution inside a billet with a induction heating apparatus by comparing the computer simulation with experiment for aluminium alloys Al2024 and A356.

Key Words : Induction Heating(유도 가열), Semi-Solid Forging(반용융 단조), Solid Fraction(고상률), Globular Microstructure(구상화 조직), Soaking Period (균일화 기간), Step Heating(계단식 가열)

1. 서 론

자동차와 항공기등 일반 기계류의 제조 공정에 있어서 소재를 경량화하여 정형(near net shape) 부품을 성형하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 반용융 단조(semi-solid forging)와 같은 복합 단조 기술은 다이캐스팅(die casting) 및 스퀴즈 캐스팅(squeeze casting)과 같은 일반적인 성형 공정에 비하여 에너지를 절감하고 제조 공정을 단축시키며 제품의 품질과 생산성을 향상시킬 수 있고 작업 환경을 개선할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 그 응용 범위가 확대되어 가고 있다[1].

반용융 단조는 소재를 고상과 액상이 공존하는 반용융 상태로 가열하여 구상화 조직(globular microstructure)으로 만들어서 성형하는 것이다. 반용융 단조의 가열 단계에서는 소재를 원하는 고상률(solid fraction)로 균일하고 신속하게 가열하여야 하고 가열 조건의 재현성을 유지하여야 한다. 전기로를 이용한 복사 가열 방법은 시간이 오래 걸리므로 효과적이지 못하고, 일반적으로 유도 가열 방법을 사용하는데, 적절한 가열 조건의 설정과 제어가 간단하지 않다. 유도 가열은 그 특성상 소재의 표면이 먼저 가열되기 때문에 소재의 온도가 전체적으로 균일하게 되는 조건을 찾기 위해서는 상당한 시행착오를 요구한다. 그리고 원하는 고상률을 얻기 위하여 설정 온도를 제어할 때에는 해당 온도로 정확히 제어하여야 하고, 소재의 중심부와 표면의 온도 차이를 최소로 하여야만 균일한 구상화 조직을 얻을 수 있다.

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터
** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

반용융 단조를 위한 소재의 유도 가열에 관한 연구로는 Jonathan등[2]이 구리 합금 소재에 대한 온도 분포를 유한요소법을 이용하여 계산하는 방법을 제안하였으며, Hirt등[3]은 유한차분법을 이용하여 알루미늄 합금 소재에 대한 온도 분포를 계산하였다. 그리고 Kapranos등[4]은 높은 용융점을 갖는 스테인레스 스틸 합금 소재에 대한 온도 분포를 실험과 비교하였다.

본 연구에서는 유도 가열 방법을 이용하여 Al2024와 A356과 같은 알루미늄 합금 소재를 가열할 때, 소재의 온도를 균일하게 하기 위한 유도 가열 장치의 온도 설정 조건을 실험으로 찾고자 한다. 그리고 열전도 방정식과 잠열을 고려하기 위한 온도회복법을 사용하여 소재 내부의 온도 분포를 계산하고, 계산 결과를 실험과 비교하여 해석 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 유도 가열에 의한 실린더형 소재의 온도 분포 해석

반경이 R인 실린더형 소재에서 일정한 표면 유도 전력(surface power) P_0가 주어지는 경우의 온도 분포 문제에 대한 해는 다음과 같이 Carslaw와 Jaeger에 의해서 제안된 식을 사용하였다[5].

$$\theta = \frac{P_o R}{k}\left[2\tau + \frac{r^2}{2R^2} - \frac{1}{4} - 2\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 \tau}\frac{J_o[\beta_n (r/R)]}{\beta_n^2 J_0(\beta_n)}\right] \quad (1)$$

여기서,

θ : 시간 t 경과 후 반경 r 에서의 온도

τ : $kt/\gamma cR^2$

k : 열전도계수 [W/mK]

t : 시간 [sec]

γ : 밀도 [kg/m^3]

c : 비열 [J/kgK]

이다.

식 (1)에 의하여 계산한 결과에 의하면 소재의 표면과 중심부에서 온도차가 생기며, 이 차이를 최소화하기 위하여 균일화 기간이 필요하다. 그러므로 Carslaw와 Jaeger는 실린더형 소재에서 초기의 온도 분포가 $\theta = f(r)$일 때, 열 공급이 없는 상태에서는 다음과 같은 해를 제시하였다[5].

$$T' = \frac{2}{R^2}\left[\int_0^R r\, f(r)dr + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n^2 \tau}\frac{J_o(r\alpha_n/R)}{J_0^2(\alpha_n)}\int_0^R r\, f(r) J_0(\alpha_n r/R)dr\right] \quad (2)$$

따라서 본 연구에서는 일정 시간 동안 소재를 가열할 때는 식(1)을, 균일화 기간에서는 식(2)를 이용하여 소재 내부의 온도를 계산하였다.

그리고 가열시 상(phase) 변화에 의한 잠열을 고려하기 위하여 다음과 같은 온도회복법(temperature recovery method)을 사용하였다[6].

$$\int_{T_s}^{T} \rho c dT + \int_{T_s}^{T} \rho L\left(\frac{\partial f_s}{\partial T}\right)dT = \int_{T_s}^{T'} \rho c dT \quad (3)$$

여기서, T는 잠열을 고려한 실제 온도이고, T'는 잠열을 고려하지 않고 구한 온도이며, f_s는 고상률이다.

3. 실험방법

실험에 사용한 소재는 상용 알루미늄 합금인 Al2024와 수입한 구상화 소재인 A356 MHD(magneto hydro dynamic) 빌렛이고, 그 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of aluminium alloys

aluminium	chemical composition [%]									
alloys	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ti	Al
Al2024	0.30	0.14	4.40	0.72	1.51	0.09	0.02	0.02	-	REM
A356	6.59	0.01	0.12	0.005	0.39	-	0.005	-	0.005	REM

각 소재에 대한 가열 온도는 Al2024의 경우에 고상률 70 %에 해당하는 633 ℃로, A356에 대해서는 고상률 50 %에 해당하는 583.1 ℃로 하였는데, 고상률에 대한 가열 온도는 Al2024의 경우에 Kiuchi등[7]이 제안한 방정식으로 소재의 평형상태도를 이용하였으며, A356의 경우에는 G.Hirt등[8]의 실험 결과를 이용하여 구하였다.

소재를 가열하기 위하여 220 V, 15KW, 23.5KHz의 용량을 가진 유도 가열 장치를 사용하였고, 실험 장치는 Fig.1에 나타내었다. 유도 코일은 내경이 118 ㎜, 외경이 138 ㎜, 높이 212 ㎜, 권수가 17인 것을 사용하였고, 소재의 이송 장치는 공기압을 이용하였다. 그리고 유도 코일 내에 놓여진 소재의 온도는 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정하였다. 사용한 열전대는 K 타입(type)이고, 소재의 중심부와 표면에서 3 ㎜ 위치에 구멍을 가공하여 열전대를 삽입한 후에 지그(jig)로 고정하였다. 열전대로 측정한 온도는 데이터 레코더를 이용하여 1초 간격으로 기록하였다.

Fig. 1 Experimental setup for induction heating

4. 가열 조건

소재의 가열 조건으로 동일한 코일 내에서 같은 직경의 소재에 대하여 높이를 달리 했을 경우의 가열 효과를 보기 위하여 Al2024에 대하여 10KW로 출력을 일정하게 하여 가열하였다. 소재의 직경은 36 ㎜로 동일하게 하고, 높이를 30 ㎜, 72 ㎜로 다르게 하였다.

또한 소재의 높이를 같게 하여 소재 내부에서 높이 방향으로 다른 위치에서 온도를 측정하기 위하여 Al2024 소재에 대하여 10KW의 출력으로 가열 하였다. 소재의 직경을 36 ㎜, 높이를 54 ㎜로 가공하여 아랫면에서 높이 방향으로 27 ㎜와 47 ㎜ 위치의 온도를 측정하였다.

그리고 출력 변화에 의한 소재 내부의 온도 분포를 보기 위하여 직경 75 ㎜, 높이 50 ㎜로 가공한 A356 소재에 대하여 10KW와 4.77KW의 출력으로 가열하였다.

또한 실제 성형 공정에서 유도 가열 장치를 이용하여 직경75㎜, 높이 50㎜인 A356 소재를 가열할 경우에 콘트롤라(controller)의 설정 온도를 결정하기 위하여 4.77KW의 출력으로 접촉식 온도 센서를 설치할 수 있는 장소에서의 온도와 소재 내부의 온도를 측정하여 비교하였다.

마지막으로 소재를 원하는 고상률로 가열할 때, 한번만에 목표 온도에 도달하게 하면 표면과 중심부에서 온도차가 큰 상태에서 균일화시켜야 하는데, 이것을 줄이기 위하여 계단식 가열(step heating)을 하였다. 이 온도 차이를 줄일수록 소재 전체의 온도를 균일하게 하는 시간을 단축시킬 수 있고, 조직을 균일화시킬 수 있다. 직경 75 ㎜, 높이 100 ㎜인 A356 소재를 사용하여 2가지 경우의 계단식 가열을 하였다. 첫번째 경우는 출력을 10KW로 일정하게 하고, 400 ℃까지 가열하여 균일화 기간을 가진 후에 다시 500 ℃까지 가열하여 균일화 기간을 가지고 목표 온도인 583.1 ℃까지 가열하였다. 두번째 경우는 출력을 10KW로 550 ℃까지 가열하여 균일화 기간을 가진 후에 출력을 4.77KW로 낮추어 목표 온도인 583.1℃까지 가열하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 높이가 다른 소재의 가열

동일한 코일 내에서 같은 직경의 소재에 대하여 높이를 달리 했을 경우의 가열 효과를 보기 위하여 Al2024 소재에 대하여 10KW로 출력을 일정하게 하여 가열하였다. 그리고 소재의 온도는 동일하게 윗면으로부터 20 ㎜ 위치에서 측정하여 Fig.2에 그 결과를 나타내었다.

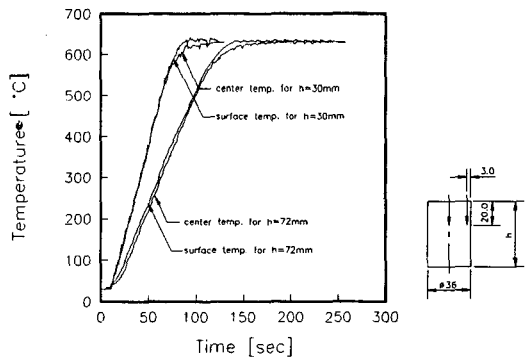


Fig.2 Variation of temperature on the heating time for different height of a billet

Fig.2에서 알 수 있는 것은 동일한 코일을 사용하여 다른 높이의 소재를 가열할 경우에 목표 온도에 도달하는 시간이 서로 다르다는 것이다. 즉, 높이가 긴 소재가 목표 온도에 도달하는 시간이 길다는 것을 알 수 있다.

5.2 소재의 높이 방향의 온도

동일한 코일 내에서 소재의 직경과 높이가 같을 때, 그 소재 내부의 높이 방향으로 다른 위치에서 온도를 측정하기 위하여 아랫면을 기준으로 27㎜, 47㎜에서 측정하여 Fig.3에 그 결과를 나타내었다.

Fig.3으로 부터 같은 소재 내부의 온도 분포는 반경 방향과 높이 방향으로 다르다는 것을 알 수 있다. 그리고 높

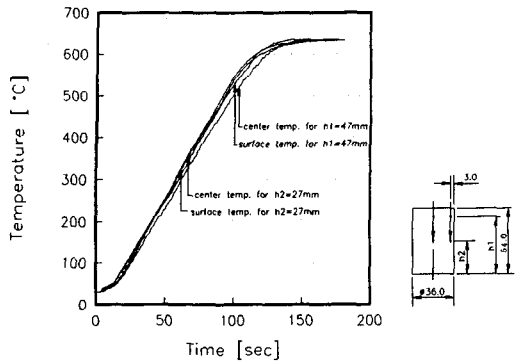


Fig.3 Variation of temperature on the heating time at different height in vertical direction

이 방향으로 끝단에 가까울수록 목표 온도에 도달하는 시간이 길다는 것을 알 수 있다.

5.3 출력 변화에 의한 가열

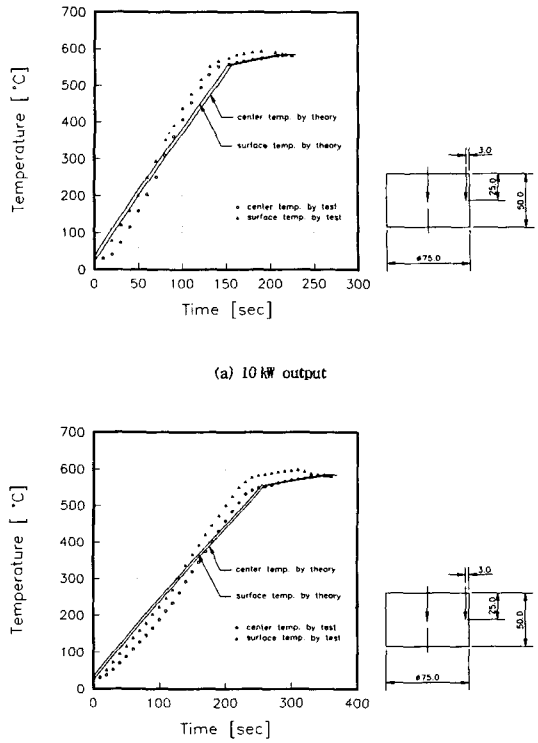
유도 가열 장치의 출력을 다르게 했을 때 소재의 온도가 어떻게 변화하는지를 살펴 보고자 하였다. Fig.4는 A356 소재에 대하여 10KW와 4.77KW의 출력을 사용했을 때 시간에 대한 온도의 변화를 나타낸 것이다.

Fig.4에서 해석과 실험 결과는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있고, 4.77KW의 출력을 사용했을 경우 목표 온도에 도달하는 시간은 360 초이고 10KW인 경우에는 225 초이므로 출력을 증가시키면 목표 온도에 도달하는 시간이 단축됨을 알 수 있다.

그리고 출력이 높을 경우에 소재의 표면과 중심부의 온도 차이가 더 클 것이라고 생각하였는데, 실험에서 초기에는 10KW 출력인 경우가 더 큰 온도 차이를 보였지만 시간이 경과할수록 4.77KW 출력의 경우가 더 큰 온도 차이를 보였다. 그러므로 A356 소재를 사용할 경우에 4.77KW와 같은 낮은 출력으로 처음부터 가열하는 것은 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

5.4 유도 가열로의 온도 측정

유도 가열 장치의 코일 내에서 소재를 가열할 때 소재 내부의 위치별로 온도가 다르므로 어느 한 위치를 기준으로 하여 콘트롤라의 목표 온도를 설정하여 가열한 뒤 균일화 기간을 가지는 것이 바람직하다. 그리고 실제의 반용융 단조 공정중에는 실험에서와 같이 소재에 열전대를 삽입할 수 있는 구멍을 가공할 수 없으므로 콘트롤라의 접촉식 온도 센서를 소재의 아랫면 중앙에 위치시키고 이



(a) 10 kW output

(b) 4.77 kW output

Fig.4 Variation of temperature on the heating time for different output of induction heating apparatus

온도로서 전체 소재의 온도를 조절하여 균일한 고상률을 얻는 것이 바람직하다.

이것을 확인하기 위하여 직경 75㎜, 높이 50㎜인 A356 소재를 사용하여 온도를 측정하였다. 실제 공정에서 소재의 아랫면의 온도를 콘트롤라에서 설정하기 위하여, 원하는 고상률에 해당하는 소재 내부의 온도와의 차이를 알아야 하므로 소재의 표면, 중심부 및 아랫면의 온도를 측정하여 Fig.5에 나타내었다. 소재의 내부가 최종 목표 온도에 도달할 때 소재의 아랫면 온도는 표면 및 중심부보다 약 20℃정도 낮게 나타나므로, 이 온도를 콘트롤라의 설정 온도로 하여 실제 공정에 사용하는 것이 바람직하다고 생각한다.

5.5 계단식 가열(step heating)

소재를 원하는 고상률로 가열할 경우 한 번만에 목표 온도에 도달하게 할 경우에 표면과 중심부의 온도 차이가 존재하는데, 이것을 줄일 목적으로 계단식(step)가열을

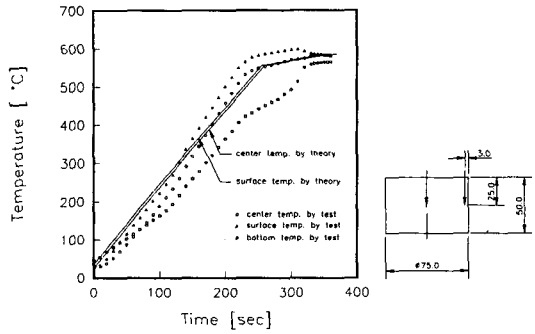


Fig.5 Variation of temperature on the heating time for measurement of temperature in induction heating apparatus

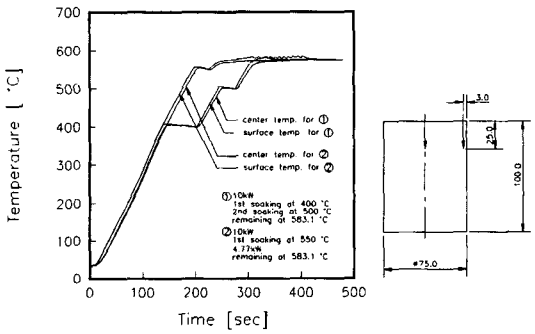


Fig. 6 Variation of temperature on the heating time for step heating

하였다.

Fig.6의 ①은 첫번째 경우에 대한 결과이고 Fig.6의 ② 는 두번째 경우에 대한 결과이다.

계단식 가열을 한 경우에 기대한 것처럼 온도가 완전하기 균일화 되지는 않았고 시간도 많이 걸렸다. 첫번째 경우는 균일화 기간을 고 · 액 공존 영역 전에 설정한 것인데, 이 때 잠열이 없는 상태에서 열전도만에 의해서는 온도가 완전하게 균일화 되기는 어렵다는 것을 알 수 있다. 두번째 경우는 첫번째 균일화 기간 후에 낮은 출력으로 가열한 것으로 훨씬 빨리 균일화 되었고, 표면과 중심부의 온도 차이도 줄어들었다.

6. 결 론

본 연구에서는 실린더형 알루미늄 합금 소재에 대하여 반용융 단조 공정 중의 하나인 유도 가열 과정에서 고려하여야 할 온도 분포 해석과 실험을 하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

(1) 온도 분포 계산 결과는 실험 결과와 잘 일치하여 유도 가열시 온도 분포 예측에 활용할 수 있음을 알 수 있다.

(2) Al2024 재료에 대하여 동일한 코일을 사용하여 같은 직경의 소재에 대하여 높이를 다르게 했을 경우에 높이가 긴 소재의 가열 시간이 길어짐을 알 수 있다.

(3) Al2024 재료에 대하여 직경과 높이가 같을 경우에 높이 방향으로 서로 다른 위치에서 온도는 다르고 그 중에서 높이 방향으로 끝단에 가까울수록 목표 온도에 도달하는 시간이 길다는 것을 알 수 있다.

(4) A356 재료에 대하여 10KW와 4.77KW로 출력을 다르게 하여 가열할 경우에 10KW인 경우가 목표 온도에 도달하는 시간이 짧게 됨을 알 수 있다.

(5) 유도 가열 장치에서 접촉식 온도 센서를 사용할 경우에 콘트롤라의 온도는 소재의 아랫면 중앙부의 온도로 설정하여 전체 소재의 온도를 조절하여 균일한 고상률을 얻는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

(6) 계단식 가열은 표면과 중심부의 온도 차이를 줄일 수 있는 방안으로 첫번째 균일화 기간을 가진 후에는 그 때까지 사용한 것보다 낮은 출력으로 목표 온도에 도달시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. T.Witulski, A.Winkelmann, G.Hirt, "Thixoforming of Auminium Components for Lightweght Structures", 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, pp.242-247, 1996.
2. Jonathan A. Dantzig, Stephen P. Midson, "Billet Heating for Semi-Solid Forming", 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, MIT, pp.105-118, 1992.
3. G.Hirt, R.Cremer, A.Winkelmann, T.Witulski, M.Zillgen, "SSM-Forming of Usually Wrought Aluminium Alloys", 3rd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, Tokyo, pp.107-116, 1994.
4. P.Kapranos, RC.Gibson, DH.Kirkwood, CM.Sellars, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixo-

formable Alloys", 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, pp.148-152, 1996.
5. J.Davies, P.Simpson, "Induction Heating Handbook", McGRAW-HILL Book Company, pp.341-345, 1979.
6. Yin-Heng Chen, "Study of Solidification, Shrinkage and Natural Convection in Casting Processes", Ph. D. Dissertation, The Ohio state Univ., pp.15-23, 1990.
7. 木內學, 杉山澄雄, "半鎔融 · 半凝固金屬の固相率の測定法-1", 第42回 塑性加工聯合講演會, 日本塑性加工學會, pp.647-650, 1991.
8. G.Hirt, R.Cremer, A.Winkelmann, T.Witulski, M.Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Technology 45, pp.359-364, 1994.