

## 반용융 성형에서 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열 방법에 관한 연구

박준홍\*, 최 영#

### A Study on Induction Heating with Forced Surface Cooling in Semi-Solid Forming Process

Joon Hong Park\*, Young Choi#

#### ABSTRACT

The procedure of semi-solid forming is composed of heating a billet, forming, compression holding and ejecting step. There are several methods to heat a billet during semi-solid forming process such as electric heating and induction heating. Usually in semi-solid forming process, induction heating has been adopted to achieve more uniform temperature of semi-solid material. Although induction heating is better method than any others, however, there is still difference of temperature between internal part and surface part of semi-solid material. Worse yet, in case of high liquid fraction of semi-solid material, liquid of the billet will flow down though solid of the billet still remains, which is very difficult to handle.

In the present study, induction heating of semi-solid material with compulsive surface cooling has been performed to obtain uniform distribution of temperature. Distribution of temperature of the billets was measured and compared with that of conventional distribution of temperature. By this new induction heating method, not only temperature over the whole billet become uniform, but also control of temperature is possible.

**Key Words** : Induction heating(유도가열), Semi-solid forming(반용융 성형), Forced cooling(강제냉각)

#### 1. 서론

환경과 에너지 절감 문제의 해결을 위한 저공해 배출공정기술의 개발과 경량화 및 난가공재를 이용한 부품 성형공정에서 원소재로부터 최종형상에 가장 가까운 정형제품(Net shape product)을 원하는 기계적 성질과 동시에 경제적으로 생산하기 위한 방

법으로서 반용융 가공법(Semi-solid forming process)에 관한 연구가 1970년대 초반 MIT에서 개발되어진 이후 활발히 진행되어져 왔다<sup>1</sup>.

반용융 가공법은 금속재료를 고상(Solid phase)과 액상(Liquid phase)이 공존하는 반용융 혹은 반응고 상태에서 단조, 압출, 압연, 용탕단조 및 다이캐스팅 등의 각종 가공 프로세스를 수행하여, 기

접수일: 2004년 7월 2일; 게재승인일: 2004년 10월 7일

\* 동아대학교 신소재가공첨정공정개발연구소

# 교신저자: 인제대학교 기계자동차공학부

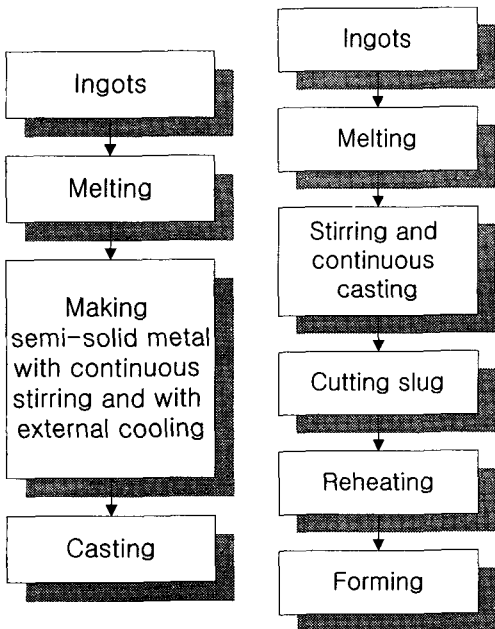
E-mail ychoi@inje.ac.kr Tel. (055) 320-3755

존의 가공법에서 얻을 수 없는 신기능의 금속 제품을 제조할 수 있는데, 반응용 상태의 금속은 변형 속도가 증가함에 따라 점성도가 감소하는 의가소성(Pseudo-plasticity) 성질과 유변학적(Rheology) 성질을 가지며, 이러한 특성으로 성형시 에너지 절감과 복잡한 형상의 제품 성형이 가능하다.

반응용 가공법은 리오캐스팅(Rheocasting)과 틱소포밍(Thixoforming)으로 분류할 수 있는데, 리오캐스팅은 반응용 금속의 유변학적 특성을 이용하여 응고 중에 성형하는 기술인 반면에 틱소포밍은 반응용 금속을 먼저 상온으로 냉각하여 이것을 성형에 필요한 체적만큼 절단한 후에 반응용 상태로 재가열(Reheating)하여 성형하는 기술인데 소재를 적당한 점도로 유지시킬 수 있으므로 취급하기 용이하다는 장점을 가지고 있다.

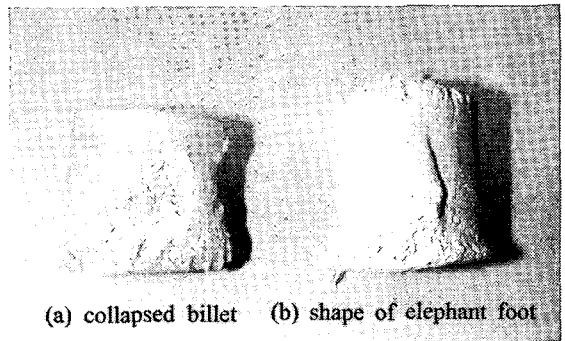
이러한 틱소포밍에서는 소재를 가열한 후의 성형방법에 따라서 틱소캐스팅(thixocasting), 틱소압출(thixoextrusion), 틱소롤링(thixorolling), 그리고 틱소포징(thixoforging) 등으로 구분한다<sup>2</sup>.

리오캐스팅과 틱소포밍의 개략도를 Fig. 1에서 나타내고 있으며, 두 공정의 큰 차이점은 재가열 공정의 유무이다.



(a) rheocasting (b) thixoforming  
Fig. 1 Flowchart of rheocasting and thixoforming

틱소포밍은 소재의 재가열, 제품 성형, 가압유지(Compression holding), 제품 취출의 단계로 구성되며, 특히, 소재의 재가열 방법에는 전기로를 사용한 방법, 유도 가열로를 사용한 방법 등이 있다. 특히 틱소포밍에서는 균일한 가열을 위해 유도 가열로를 사용하고 있지만, 유도 가열을 사용한 경우에도 소재의 표면과 중심부와의 사이에는 2-3℃의 온도 차이가 존재한다. 틱소포밍에서 재가열 온도는 고상과 액상이 공존하는 구간으로서, 1℃의 변화에도 고상률과 액상률의 변화에 아주 큰 영향을 끼치는 민감한 영역이므로 온도 조절과 균일한 가열이 아주 중요하다. Fig. 2는 재가열 영역에서 불균일 가열로 인한 소재 표면의 과도한 액상이 유출된 경우의 사진을 나타내고 있다.



(a) collapsed billet (b) shape of elephant foot  
Fig. 2 Photograph of collapsed billets due to non-uniform induction heating

반응용 성형에서 유도 가열에 관한 연구로는 Kang 등<sup>3</sup>이 소재의 크기에 따른 최적의 재가열 조건을 실험에 의하여 제시하였고, Choi 등<sup>4</sup>은 유도 가열을 고려한 반응용 성형의 유한요소해석을 수행하였으며, Kang 등<sup>5</sup>은 유도 가열 공정 변수가 소재의 미세조직(Microstructure)과 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하였다.

이렇게 소재의 재가열 단계에서 균일한 온도 분포를 얻기 위해 전기로를 사용한 방법보다는 유도 가열로를 사용한 방법을 주로 채택하고 있으나 여전히 소재의 표면과 내부의 온도차가 발생한다<sup>5</sup>.

따라서 본 논문에서는 반응용 성형의 소재 가열 단계에서 유도 가열을 할 때, 소재의 표면을 강제 냉각하여 표면과 내부의 온도차를 균일하게 하고자 한다. 특히 기존의 유도 가열방법에서 액상율이 높은 경우 표면이 먼저 과도하게 가열되어 소재 함몰

되는 현상이 발생하는데, 표면 냉각 방법을 통하여 소재 표면의 온도를 제어할 수 있으므로 이를 방지할 수 있다.

## 2. 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열

소재의 유도 가열에서 강제 표면 냉각을 위한 장치를 구성하였으며, Fig. 3은 가열 장치인 유도 코일과 냉각을 위한 개략도를 나타내고 있다<sup>6</sup>.

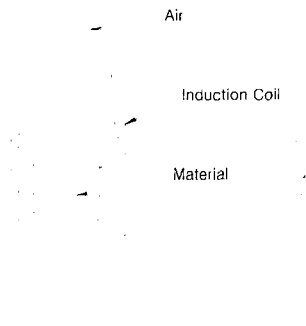


Fig. 3 Schematic drawing of induction heating system with forced air cooling



Fig. 4 Photograph of induction heating system

Fig. 3에서와 같이 기존의 유도 가열 장치에서 소재를 삽입한 후 유도 가열과 동시에 팬을 사용하여 공기를 불어 넣어 준다.

Fig. 4는 강제 표면 냉각과 동시에 유도 가열을 하기 위한 장치를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 유도 가열 장치에 수동으로 팬(fan)을 사용하여 공기를 주입하였다.

소재는 길이 100mm, 직경 76mm인 구상화된 A356 소재를 사용하였으며, 소재의 온도가 상승하

는 것을 비교적 정확하게 측정하기 위하여 고온용 INCONEL  $\Phi$  1.6 K-Type 열전대를 사용하여 온도를 측정하였으며, 이 열전대는 오차가  $2^{\circ}\text{C}$  이하로 비교적 낮다. Fig. 5는 초기 소재의 크기와 열전대를 사용한 온도 측정 지점을 나타내고 있는데, 열전대 설치를 위하여 시편의 중심부와 중심에서 30mm 떨어진 지점에 직경 2mm, 깊이 20mm의 홈을 가공한 후 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

유도 가열 온도는 10분동안  $578^{\circ}\text{C}$ 에 도달하도록 가열 장치를 설정하였다.

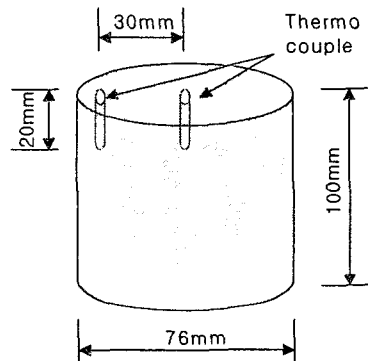
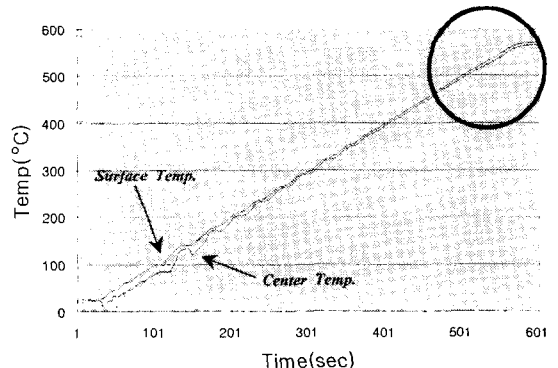


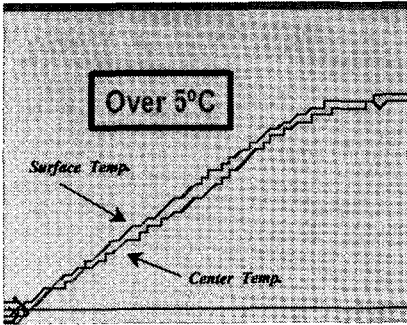
Fig. 5 Schematic drawing of shape of test specimen and measuring points

## 3. 결과 및 고찰

강제 표면 냉각에 의한 유도가열 실험에서 풍속을 2m/sec, 4m/sec, 6m/sec로 하여 각각 실험을 수행하였으며, Fig. 5와 같이 중심부의 온도와 표면 부위의 온도를 측정하였다. 먼저 강제 표면 냉각을 하지 않고 유도 가열을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.



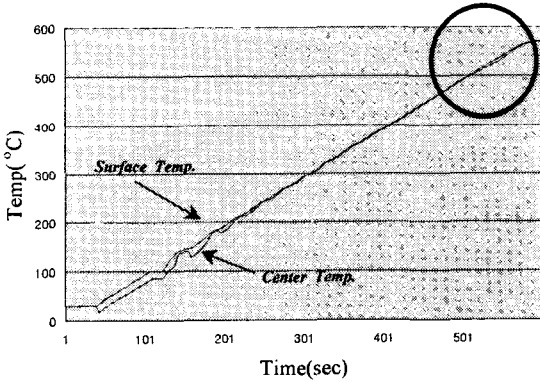
(a) temperature of the whole range of heating time



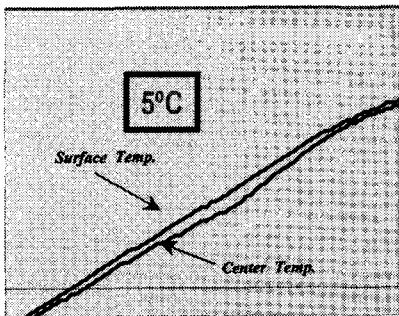
(b) detailed temperature profile of circle in Fig. 6 (a)  
 Fig. 6 Result of induction heating without compulsive surface cooling

Fig. 6에서 점선 원 안의 온도 분포를 확대하여 나타내었는데, 소재 표면 부위의 온도가 중심 온도보다 5°C 이상 높음을 알 수 있다.

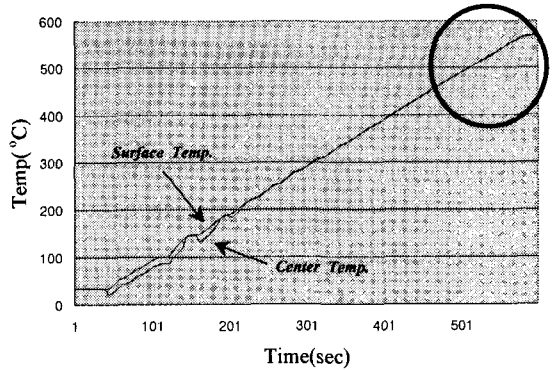
풍속 2m/sec의 강제 냉각과 동시에 유도 가열을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.



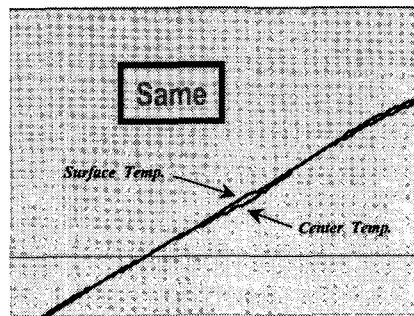
(a) temperature of the whole range of heating time



(b) detailed temperature profile of circle in Fig. 7 (a)  
 Fig. 7 Result of induction heating with compulsive surface cooling (2m/sec)



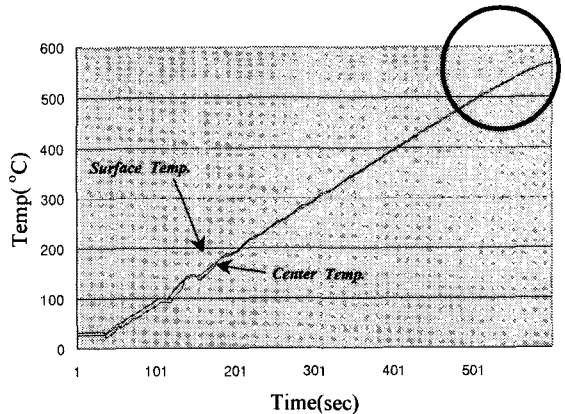
(a) temperature of the whole range of heating time



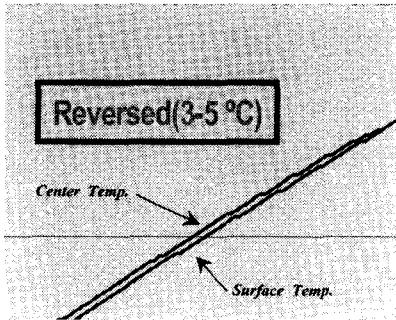
(b) detailed temperature profile of circle in Fig. 8 (a)  
 Fig. 8 Result of induction heating with compulsive surface cooling (4m/sec)

풍속 4m/sec의 강제 냉각과 동시에 유도 가열을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

풍속 6m/sec의 강제 냉각과 동시에 유도 가열을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.



(a) temperature of the whole range of heating time



(b) detailed temperature profile of circle in Fig. 9 (a)  
 Fig. 9 Result of induction heating with compulsive surface cooling (6m/sec)

강제 표면 냉각을 하지 않은 상태에서의 유도 가열 실험에서는 Fig. 6에서와 같이 유도 가열의 초기에는 소재의 표면과 내부가 20℃ 정도의 온도 차이를 나타내고 있으며 유도 가열의 후반기에도 약 5℃의 차이를 나타내고 있다.

풍속을 2m/sec로 한 유도 가열 실험에서는 Fig. 7에서와 같이 유도 가열의 초기에는 15℃, 후반기에는 3℃ 정도의 온도차로서 표면 냉각을 하지 않았을 때 보다 표면과 내부의 온도차이가 감소했음을 알 수 있다.

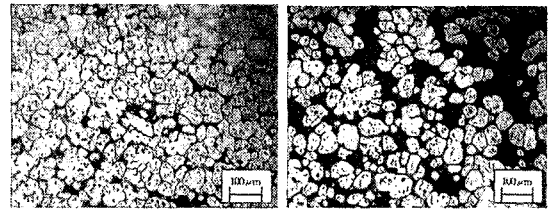
Fig. 8에서와 같이 풍속을 4m/sec로 한 유도 가열 실험에서는 유도 가열의 초기에는 앞의 두 실험과 비슷한 온도차를 보이고 있지만 250초 이후에는 표면과 내부가 거의 같은 온도를 나타내고 있다.

Fig. 9의 풍속을 6m/sec로 한 유도 가열 실험에서는 초기에서부터 10℃ 이하의 온도 차이를 나타내다가 200초 이후부터는 소재 표면의 온도가 내부의 온도보다 반대로 약 2-3℃ 정도 낮게 나타남을 알 수 있다.

위와 같은 결과로부터 기존의 유도 가열 실험에서는 여전히 소재 표면의 온도와 내부 온도가 차이가 있고, 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열 실험에서는 이러한 온도 차이를 크게 개선할 수 있다. 또한 풍속을 크게 할수록 표면의 온도가 감소하여 내부 온도와의 차이가 줄었으며, 풍속이 6m/sec 일 때는 표면의 온도가 오히려 내부 온도보다 더 낮음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 표면 냉각을 하지 않고 유도 가열을 하였을 때의 소재 표면과 중심의 조직 사진을 나타내었다.

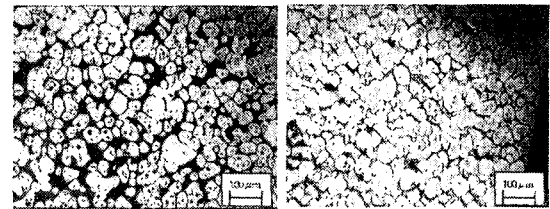
Fig. 10 (a)와 Fig. 10 (b)를 비교하면 소재 표면의 온도가 높음으로 인하여 소재 표면에서 액상률이 높음을 알 수 있고, 중심부에서는 고상률이 높음을 알 수 있다.



(a) center (b) surface

Fig. 10 Microstructure of the billet without surface cooling (×100)

하지만 Fig. 11은 풍속을 6m/sec로 하여 강제 표면 냉각을 했을 때의 소재 표면과 중심의 조직을 사진을 나타내었는데, Fig. 10과는 반대로 소재 표면의 온도가 중심부의 온도보다 오히려 낮아서 소재 중심부에 액상이 많이 분포하고 표면에는 대부분 고상이 분포됨을 알 수 있다.



(a) center (b) surface

Fig. 11 Microstructure of the billet with surface cooling (×100)

따라서 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열 방법은 기존의 유도 가열 방법보다 더 균일한 소재의 온도 분포를 얻을 수 있고, 또한 소재 표면의 과도한 온도 상승으로 인한 소재 함몰을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 소재의 온도를 사용자가 원하는 방향으로 제어할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 반응용 성형의 유도 가열 단계에서 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열 방법을 개발하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 강제 표면 냉각에 의한 유도 가열 방법은 기존의 유도 가열 방법보다 소재의 온도가 더 균일함을 알 수 있었다.
2. 강제 표면 냉각에서 풍속이 커짐에 따라 소재의 표면과 내부의 온도차가 줄어들었으며, 유도 가열의 후반기에는 오히려 표면의 온도차가 더 낮음을 알 수 있었다.
3. 강제 표면 냉각에 의한 소재의 유도 가열 방법은 과도한 온도 상승으로 인한 소재의 합물을 방지할 수 있으며, 풍속에 따라 소재의 온도를 원하는 방향을 제어할 수 있다.

### 참고문헌

1. Spencer, D.B., Mehrabian, R. and Flemings, M.C., "Rheological Behavior of Sn-15% Pb in the Crystallization Range," Metall. Trans., Vol.3A, pp.1925-1932, 1972.
2. Park, H.J., "A Study on the Manufacturing of Net Shape Product and the Characteristics of Semi-Solid Forging Process," PhD Thesis, Pusan National University, 1998.
3. Jung, H.K. and Kang, C.G., "Reheating Process of Cast and Wrought Alluminum Alloys for Thixoforging and Their Globularization Mechanism," J. of Materials Processing Technology, Vol. 104, pp. 244-253, 2000.
4. Choi, J.C., Park, H.J. and Kim, B.M., "The Influence of Induction Heating on the Microstructure of A356 for Semi-solid Forging," J. of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 46-52, 1999.
5. Youn, S.W. and Kang, C.G., "Effect of Process Parameters of P/M and Induction Heating on the Cell Morphology and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 222-229, 2003.
6. Choi, J.C., Choi, Y. and Park, J.H., "Method of Induction Heating by Surface Cooling Control," Korea Patent No. KPTN200200324037, 2002.