

## 다출력 유도 가열 시스템에 의한 반응용 소재의 재가열

김 남 석\*, 정 흥 규\*, 강 충 길\*

\* 부산대학교 기계공학부

### Reheating of Semi-Solid Material Using Multi-Capacity Induction Heating System

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

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

#### Abstract

Many processing times for fabricating complex shaped parts by near net shape process such as thixoforming or semi-solid forming, are required due to the time for die design, induction heating and forming process. Therefore, for the thixoforming process, multi-capacity induction heating process is very important due to the reduction of the processing time and cost. It is indispensable to adopt a power-time heating pattern which manages to conciliate complete eutectic melting at the core with limited overheating at the periphery. The total reheating time is thus dependent on billet diameter; in inches ( $\pm 20\%$ ). Typically, high frequency is used for the rapid reheating of the billet to the eutectic temperature range and low frequency for the remelting of the desired fraction of liquid and for the radial homogeneization of the liquid fraction. So in this study, the multi-capacity induction heating conditions of ALTHIX 86S alloy to reduce the processing time and cost would be proposed. The suitability of multi-capacity induction heating conditions would be verified through the comparison to Garat's data.

**Keywords:** Thixoforming(반응용 성형), Multi-Capacity Induction Heating Process(다출력 유도 가열 공정), Processing Time(공정 시간), Power-Time Heating Pattern(출력-시간 가열 패턴)

#### 1. 서 론

다출력 유도 가열은 공정 시간 및 생산 비용을 절감 할 수 있기 때문에 반응용 성형 공정에서 대단히 중요하다.

다출력 유도 가열은 필연적으로 과열된 빌렛 주위와 중심부 사이의 온도 구배가 생긴다. 중심부에서의 완전한 공정 용해와 주위에서의 제한된 과열을 절충할 수 있는 출력-시간 가열 패턴을 조절하는 것이 불가결하다. 따라서 전체 가열 시간은 빌렛의 직경에 종속적이며, 거의 인치 단위로 빌렛 직경의 제곱과 같다( $\pm 20\%$ )<sup>(1)~(2)</sup>. 일반적으로, 높은 출력은 빌렛을 공정 온도 범위까지 급속 재가열하는데 사용되고, 낮은 출력은 재용해 및 반경 방향으로 액상율의 균일화에 사용된다<sup>(1)~(2)</sup>.

다출력 유도 가열에 관한 연구 동향으로서 Pechiney의 Garat<sup>(1)</sup>는  $d \times l = 76 \times 110(\text{mm})$ 인 A356 및 A357 소재를  $555^\circ\text{C}$ 까지는 25KW의 출력으로,  $555^\circ\text{C} \sim 570^\circ\text{C}$ 까지는 4.5KW의 출력으로,  $570^\circ\text{C} \sim 580^\circ\text{C}$ 까지는 3.0KW의 출력으로 다출력 유도 가열 실험을 수행하였으나 구상화의 정도를 정확히 파악하지 못하였다.

지금까지 발표되어진 연구는 A356 및 A357의 다출력 유도 가열 조건에 관해 조사한 것이 유일하고, 실제 공정 시간 및 생산 비용 절감을 위하여 ALTHIX 86S 소재를 이용한 다출력 유도 가열 실험을 한 예는 보고되지 않고 있다. 다출력 유도 가열 공정에 있어서 다출력 유도 가열 조건이 구상화 조직에 미치는 영향을 조사한 보고는 아직까지 발표되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Thixoforming 공정에 필요한 반응용 소재의 최적 다출력 유도 가열 조건을 조사하기 위하여 유도도의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도( $T_h$ ), 재가열 온도에서의 유지시간( $t_h$ ) 등을 변수로 하여 조직의 구상화 정도를 파악하였다.

#### 2. 다출력 유도 가열 실험

본 연구에서는 일반적으로 자동차 부품개발에 많이 이용하는 주조용 프랑스 PECHINEY에서 전자기 교반으로 제조되어진 ALTHIX 86S 재료를  $d \times l = 76 \times 70(\text{mm})$ 의 빌렛으로 가공하여 출력 50KW 유도도(유도가열 시스템의 주파수: 60Hz)를 이용해서 Fig.1과 같이 다출력 유도 가열 실험을 하였다. Table 1은 ALTHIX 86S 소재의 화학조성을 나타내었으며, 재가열전 소재의 미세조직을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of ALTHIX 86S

|        |        | Si  | Fe   | Cu  | Mn   | Mg   | Cr | Zn   | Ti   | Pb   |
|--------|--------|-----|------|-----|------|------|----|------|------|------|
| ALTHIX | Min(%) | 5.5 | -    | 2.5 | -    | 0.30 | -  | -    | -    | -    |
| 86S    | Max(%) | 6.5 | 0.15 | 3.5 | 0.03 | 0.40 | -  | 0.05 | 0.20 | 0.03 |

유도로의 가열 코일은 Fig.1에서와 같이  $D_o \times H = 120 \times 180$ (mm)로 제작해서 시편이 균일하게 가열될 수 있도록 하였다<sup>(2)-(3)</sup>. 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도( $T_h$ ), 재가열 온도에서의 유지시간( $t_h$ ) 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직을 관찰하여 온도 구배가 작고 미세한 구상화 조직을 갖는 최적의 다출력 유도 가열 조건을 찾기 위해 Table 2의 실험 조건으로 다출력 유도 가열 실험을 실시하였다. Table 2에 사용된 기호의 의미를 Fig.3에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions for multi-capacity reheating of semi-solid aluminum alloy (ALTHIX 86S), Test specimen size:  $d \times l = 76 \times 70$  (mm)

| No | Reheating Time |          |          | Holding Temperature |          |          | Holding Time |          |          | Total Time (min) | Capacity Q(Kw) |                           |
|----|----------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|------------------|----------------|---------------------------|
|    | $t_a$ (min)    |          |          | $T_h$ (°C)          |          |          | $t_h$ (min)  |          |          |                  | Up to $T_{h2}$ | From $T_{h2}$ to $T_{h3}$ |
|    | $t_{a1}$       | $t_{a2}$ | $t_{a3}$ | $T_{h1}$            | $T_{h2}$ | $T_{h3}$ | $t_{h1}$     | $t_{h2}$ | $t_{h3}$ |                  |                |                           |
| 1  | 3              | 2        | 1        | 350                 | 567      | 578      | 1            | 2        | 1        | 10               | 8.398          | 4.096                     |
| 2  | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | 10               | 7.480          | "                         |
| 3  | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | 10               | 8.398          | 5.544                     |
| 4  | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | "                | 7.480          | "                         |
| 5  | 3              | 2        | 1        | 350                 | 567      | 578      | 1            | 2        | 1        | 10               | 8.398          | 3.912                     |
| 6  | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | "                | 7.480          | "                         |
| 7  | 3              | 2        | 1        | 350                 | 567      | 578      | 1            | 2        | 1        | 10               | 12.255         | 8.398                     |
| 8  | 3              | 2        | 1        | 350                 | 567      | 578      | 1            | 2        | 1        | "                | "              | 7.480                     |
| 9  | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | "                | "              | 5.945                     |
| 10 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | "                | "              | 3.912                     |
| 11 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | 1            | 2        | 1        | 10               | "              | 4.096                     |
| 12 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | "                | "              | 4.941                     |
| 13 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | 10               | "              | 5.292                     |
| 14 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | 10               | "              | 5.482                     |
| 15 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | "        | 10               | "              | 5.544                     |
| 16 | "              | "        | "        | "                   | 567      | "        | "            | "        | 2        | 11               | "              | "                         |
| 17 | "              | "        | "        | "                   | "        | "        | "            | "        | 3        | 12               | "              | "                         |
| 18 | 3              | 2        | 1        | 350                 | 540      | 578      | 1            | 2        | 1        | 10               | 12.255         | 5.544                     |
| 19 | "              | "        | "        | "                   | 567      | "        | "            | "        | "        | "                | "              | "                         |
| 20 | "              | "        | "        | "                   | 550      | "        | "            | "        | "        | "                | "              | "                         |
| 21 | "              | "        | "        | "                   | 560      | "        | "            | "        | "        | "                | "              | "                         |

### 3. 다출력 유도 가열 실험 결과 및 고찰

지금까지의 연구내용<sup>(2)-(3)</sup>에서,  $d \times l = 76 \times 70$ (mm) 이상의 크기를 가진 반응용 소재의 경우 3단 재가열에서 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었으므로 재가열 스텝은 3단으로 고정하였다. 따라서, 유도로의 출력(Q), 재가열 온도에 도달하는 시간( $t_a$ ), 재가열 온도에서의 유지시간( $t_h$ ), 재가열 온도( $T_h$ ) 등을 변화시키면서 빌렛의 전체적인 온도 분포와 미세 조직 등을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 21의 경우 Fig.1의 열전대 위치 (a), (b), (c)에서 아주 균일한 온도 분포를 얻을 수 있었다. Fig.4(a)는 아주 균일한 온도 분포를 얻을 수 있었던 실험 21에 대응한 조직 사진을 나타낸 것이다. 실험 21에서는 Fig.1의 열전대 위치 (a)~(c)에서 미세한 구상화 조직이 관찰되었다. Fig.4(b)는 다출력 유도 가열 조건에서 가장 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었던 실험 21의 공정 조직을 관찰하기 위해서 1000배로 확대한 시편의 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig.4(b)에서 공정 조직이 완전히 용해된 모습을 볼 수 있었다. 따라서 미세한 구상화 조직을 얻기 위해서는 ALTHIX 86S의 공정 온도인 572°C 이상의 온도에서 공정 조직이 충분히 용해될 수 있는 재가열 시간이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 공정 조직이 용해되기 위해서는 많은 열에너지와 시간이 필요하기 때

문에 공정 조적이 용해될 수 있을 만큼의 충분한 열에너지가 공급될 때까지는 온도 상승이 일어나지 않는다<sup>(2)~(3)</sup>. 공정 조적이 용해되는 전후에서 고상율이 급격하게 변하게 되며 공정 조적이 용해되는 순간 급속한 온도의 상승도 나타나게 된다. 이런 온도 상승 현상 때문에 다출력 유도 가열에서는 정확한 온도 제어와 시편의 균일한 온도 분포를 위해서 높은 출력에서 빌렛을 공정 온도 범위까지 급속 재가열하고, 낮은 출력에서 재용해 및 반경 방향으로 액상율의 균일화가 되도록 시편을 재가열해야 한다.

특히 높은 출력에서 급속 재가열되는 구간의 경우는 고상과 액상의 비가 위치에 따라서 달라질 수 있으므로 다출력 유도 가열시  $T_{h2}$ 는 고상과 액상이 균일하게 분포된 시편을 얻는데 중요한 실험 변수임을 알 수 있다.

#### 4. 다출력 유도 가열 조건의 검증

본 연구에서는  $d \times l = 76 \times 70(\text{mm})$ 인 ALTHIX 86S의 다출력 유도 가열을 통하여 기존의 14~16분 이던 가열 시간<sup>(3)~(5)</sup>을 10분으로 줄였다.

Table 3은 Thixoforming에 적합한 구상화 조직을 얻기 위한 최적의 다출력 유도 가열 조건을 Garat가 제안한 조건과 비교한 것이다.  $d \times l = 76 \times 110(\text{mm})$ 인 A356 및 A357 소재를 이용하여 Garat 등<sup>(1)</sup>이 실험한 다출력 유도 가열 조건과 비교해 보면, 시편의 크기가  $d \times l = 76 \times 110(\text{mm})$ 인 A356 및 A357 소재의 경우에는  $555^\circ\text{C}$ 까지는  $Q=25\text{KW}$ ,  $555^\circ\text{C} \sim 570^\circ\text{C}$ 까지는  $Q=4.5\text{KW}$ ,  $570^\circ\text{C} \sim 580^\circ\text{C}$ 까지는  $Q=3.0\text{KW}$ 의 다출력 유도 가열 조건에서 가장 균일한 온도 분포를 얻을 수 있다고 보고하고 있다. 본 연구에서는  $d \times l = 76 \times 70(\text{mm})$ 인 ALTHIX 86S를 다출력 유도 가열하기 위해서는  $t_{a1}=3\text{min}$ ,  $t_{a2}=2\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=2\text{min}$ ,  $t_{h3}=1\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=560^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=578^\circ\text{C}$ ,  $560^\circ\text{C}$ 까지는  $12.255\text{KW}$ ,  $560^\circ\text{C} \sim 578^\circ\text{C}$ 까지는  $5.544\text{KW}$ 의 다출력 유도 가열 조건에서 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었으며, Garat<sup>(1)</sup>가 제안한 조건에서 보다 온도 구배가 더 작고 균일한 온도 분포를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 제안한 ALTHIX 86S의 다출력 유도 가열 조건은 공정 시간 단축 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있는 유도 가열 조건의 D/B 구축에 유용할 것으로 사료된다.

Table 3 Comparison to multi-capacity induction heating conditions proposed by Garat<sup>(1)</sup> in Pechiney

| Proposer   | Alloys        | Specimen Size:<br>$d \times l$ (mm) | Total Heating<br>Time (min) | Multi-Capacity<br>Conditions<br>Q (KW)   |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| Garat      | A356 and A357 | $76 \times 110$                     | 10                          | 25KW Up To $555^\circ\text{C}$<br>4.5KW From $555^\circ\text{C}$ To $570^\circ\text{C}$<br>3.0KW From $570^\circ\text{C}$ To $580^\circ\text{C}$ |
| H. K. Jung | ALTHIX 86S    | $76 \times 70$                      | 10                          | 12.255KW Up To $560^\circ\text{C}$<br>5.544KW From $560^\circ\text{C}$ To $578^\circ\text{C}$  |

#### 5. 결론

공정 시간 단축을 위한 ALTHIX 86S의 다출력 유도 가열 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 다출력 유도 가열에서는 정확한 온도 제어와 시편의 균일한 온도 분포를 위해서 높은 출력에서 빌렛을 공정 온도 범위까지 급속 재가열하고, 낮은 출력에서 재용해 및 반경 방향으로 액상율의 균일화가 되도록 시편을 재가열해야 한다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 높은 출력에서 급속 재가열되는 구간의 경우는 고상과 액상의 비가 위치에 따라서 달라질 수 있으므로 다출력 유도 가열시  $T_{h2}$ 는 고상과 액상이 균일하게 분포된 시편을 얻는데 중요한 실험 변수임을 알 수 있었다.
- (3)  $d \times l = 76 \times 70(\text{mm})$ 인 ALTHIX 86S를 다출력 유도 가열하기 위해서는  $t_{a1}=3\text{min}$ ,  $t_{a2}=2\text{min}$ ,  $t_{a3}=1\text{min}$ ,  $t_{h1}=1\text{min}$ ,  $t_{h2}=2\text{min}$ ,  $t_{h3}=1\text{min}$ ,  $T_{h1}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{h2}=560^\circ\text{C}$ ,  $T_{h3}=578^\circ\text{C}$ ,  $560^\circ\text{C}$ 까지는  $12.255\text{KW}$ ,  $560^\circ\text{C} \sim 578^\circ\text{C}$ 까지는  $5.544\text{KW}$ 의 다출력 유도 가열 조건에서 균일한 온도 분포 및 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.

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

## 6. 참고문헌

- (1) M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W. R. Loué, 1998, "Aluminium Semi-Solid Processing : From the Billet to the Finished Part", Proceedings of the 5th Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, USA, pp. vii-xxxi.
- (2) 정 홍규, 1999, "A Study on Coil Design and Heating D/B Construction of Semi-Solid Aluminum Alloys for Thixoforming", 부산대학교 석사학위 논문, pp. 5-129.
- (3) 정 홍규, 강 충길, 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.
- (4) C. G. Kang, J. S. Choi, 1998, "Effect of Gate Shape and Forging Temperature on the Mechanical Properties in the Injection Forging Process of Semi-Solid Aluminum Material", Journal of Materials Processing Technology 73, pp. 251-263.
- (5) L. Salvo, W. R. Loué, M. Suéry, 1994, "Influence of Thermo Mechanical History on the Structure and Rheological Behavior of Semi-Solid Al-Alloys", Proceedings of the 3rd Int' 1 Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Tokyo, Japan, pp. 261-270.

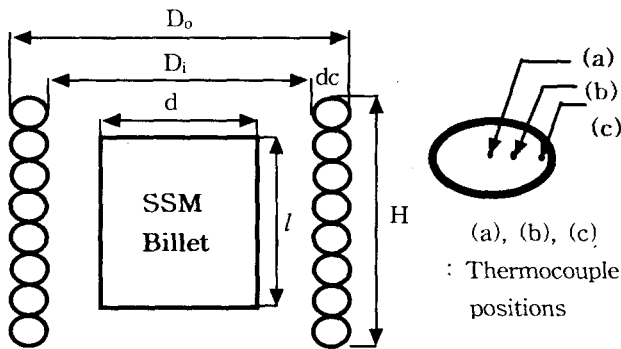


Fig.1 Schematic diagram of induction coil and billet

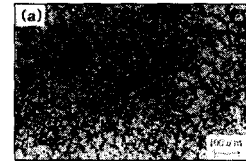
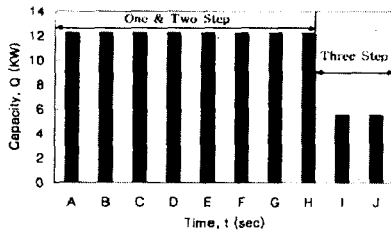
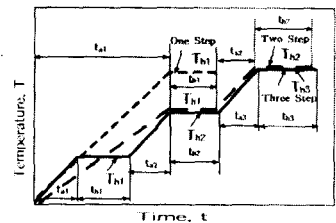


Fig.2 Microstructure for raw material of ALTHIX 86S

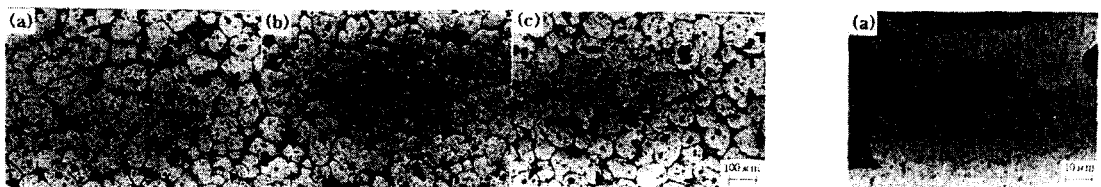


(a) Multi-capacity conditions



(b) Input data diagram

Fig.3 Relationship between heating time and capacity of induction heater



(a) Globular microstructure

(b) Eutectic microstructure of semi-solid alloy

Fig.4 Globular microstructure and eutectic microstructure in multi-capacity reheating process of semi-solid alloy (Exp. No. 21, ALTHIX 86S, fs=55%,  $t_{a1}$ =3min,  $t_{a2}$ =2min,  $t_{a3}$ =1min,  $T_{h1}$ =350°C,  $T_{h2}$ =560°C,  $T_{h3}$ =578°C,  $t_{h1}$ =1min,  $t_{h2}$ =2min,  $t_{h3}$ =1min,  $Q$ =12.255KW up to 560°C,  $Q$ =5.544KW from 560°C to 578°C)