

Thixoforming을 위한 연주 Billet의 수평형 재가열

박상문* · 강충길**

Horizontal Reheating of Aluminium Alloys for Thixoforming

S. M. Park and C. G. Kang

Abstract

The semi-solid casting will have a higher internal integrity, mechanical properties and dimensional accuracy than the conventional castings. This process can reduce the manufacturing costs and finished weight for critical components. The semi-solid casting are capable of greater dimensional repeatability, this supplies considerable savings when extensive machining, salvage and scrap are key variables in the current automotive product. One of the most important factor regarding the semi-solid die casting process are the reheating method of the raw materials to the semi-solid state. Therefore, in this present work, the horizontal type induction heating system to obtain the optimal reheating conditions suitable for semi-solid die casting process was designed and manufactured. And the microstructure of reheated materials was investigated.

Key Words : Horizontal Type Induction Heating System, Globular Microstructure, Reheating Condition

1. 서 론

반용융성형(Thixoforming)법은 복잡한 형상을 가진 부품을 생산하고자 할 때 구상화 조직을 가진 반용융 소재를 금형에 완전히 충전시키는 것이 가능하다. 이때 충전하는동안 고상과 액상이 공존하기 때문에 순수 액상만 존재하는 경우에 비해서 응고시간이 감소하므로 내부기공을 획기적으로 개선할 수 있다. 또한 반용융 성형온도에서는 점성이 액체상태보다 더 높으므로 충전시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 자유면의 속도장이

균일하게 충전시킬 수 있다. 따라서 충전시 용탕의 흐름에 기인하는 가스 결함이 적어지는 등 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 반용융 성형공정을 이용하여 제품을 개발하는데 있어 중요한 요소는 소재의 재가열 방법, 기계의 사양, 사출 조건의 결정 및 금형 구조 등이다. 수직형 유도가열의 경우는 공정 조직의 용해 전후에서 고상율이 급격히 변화하기 때문에 온도를 올리기 위해 필요이상의 열량을 주게되면 액상의 유출, 자중에 의한 좌굴(Elephant foot effect) 및 전자기 끝단 효과(Electro-magnetic end effect)가 발생한다.

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부

수평형 유도 코일에서는 자중에 의한 좌굴현상은 거의 나타나지 않고 액상의 유출현상은 현저하게 줄어들어 관찰할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 전자교반법에 의해 제조된 A357, A390과 같은 소재를 이용하여 재가열 최적조건을 도출하기 위해 수평형 유도 코일을 설계·제작하였다.

2. 실험

2.1 재가열 실험

반용융 성형 공정에서 가열 시간의 단축 및 빌렛을 균일 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계가 중요하다. Dantzig⁽¹⁾는 빌렛의 유도 가열에 의한 온도분포 연구에서 빌렛의 중앙보다는 가장자리가 훨씬 온도가 높음을 보였다. Hirt⁽²⁾는 온도에 따른 열적, 전기적 물성치와 대류와 복사에 의한 표면 열전달을 정확히 파악한다면 시뮬레이션한 온도와 실험한 온도가 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있다고 발표하였다. Kapranos⁽³⁾는 시뮬레이션을 통해 유도가열시 균일한 가열에 필요한 사항을 요약하고 있다.

코일과 빌렛을 구성하는 시스템에서 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량이 균일하지 않기 때문에 온도 분포가 균일하지 않다.

빌렛의 온도가 낮은 곳은 충전시 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 반용융 성형 공정을 위해서는 구상화된 조치가 극히 중요하다.

본 실험에서 사용된 반용융 소재는 일반적으로 자동차 부품개발에 많이 이용하는 주조용으로 프랑스 페시니에서 전자기 교반으로 제조되어진 A357과 A390을 이용하였다. 소재의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다⁽⁴⁾.

Table 1 Chemical compositions of ALTHIX

		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
A357	Min	6.5	-	-	-	0.50	-	-	-
	Max	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.20
A390	Min	16.0	-	4.0	-	0.5	-	-	-
	Max	17.0	0.4	5.0	0.1	0.65	0.01	0.05	0.20
A380		9.0	0.81	3.5	0.17	0.25	0.07	1.41	-

반용융 성형을 위해서는 소재가 원하는 온도에서 적절한 구상화 조적을 가지도록 재가열하는 기술이 중요하다.

본 실험에서는 수평형 유도 코일을 설계 및 제작하여 빌렛을 재가열하였다. 재가열 실험은 350Hz, 50Kw용량의 유도가열로를 사용하였다. 소재는 $\phi 120\text{mm} \times \phi 76\text{mm}$ 로 가공하여 Fig. 1에 나타낸 것처럼 A, B, C 세 지점에 K-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다.

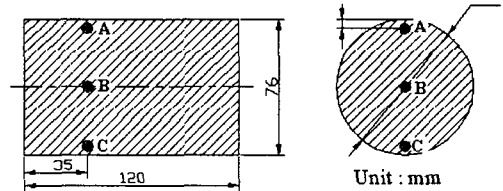


Fig. 1 Temperature measuring point of billet

B 지점의 온도를 유도로에 연결하여 소재의 온도를 제어하였다. 온도구배를 최소화하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 것처럼 계단식 3단계가열의 조건에서 재가열하여 실험을 수행하였다.

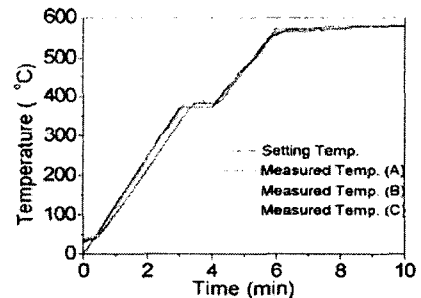


Fig. 2 Experimental reheating condition of A357 and temperature profile

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수평형 유도가열

반용융 성형을 위해서는 빌렛을 반용융 상태로 가열해야 한다. 전자기 유도 가열은 짧은 시간 동안에 빌렛의 온도를 정확히 제어할 수는 있지만 재가열된 빌렛에 온도구배가 발생할 수 있다. 빌렛의 온도가 균일하지 못하면 고상율이 다르게 되어 온도가 낮은 부분은 충분한 유동성을 갖기 힘들고, 온도가 높은 부분은 액상이 고상으로부터 빠져 나와 밖으로 흘러내려 취급이 곤란하다.

수평형 유도가열 시스템에서는 빌렛의 가열시간을 3단 10분에서 원하는 공정조적을 얻을 수 있었다. 재가열은 빌렛을 반용융상태로 가열하는 것이 목적이지만 재가열 과정동안 빌렛의 미세조적이 제어되기 때문에 전자기식

교반에 의해 제조된 페시니 재료를 수평형 고주파 유도 로에서 실험을 수행하였다.

재가열시 빌렛 각 부분의 균일한 온도분포를 확인하기 위해서 Fig.1에서 나타낸 것처럼 대기와 접하고 있는 빌렛의 표면부(A), 중심부(B), 단열재와 접하고 있는 하단부(C)에 K-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다. B 지점의 온도를 제어값으로 받아 소재의 온도를 제어하였다.

특히 빌렛의 표면부(A)와 단열재와 접하고 있는 하단부(C)에서의 온도편차가 크므로 최종 가열시간과 최종 유지시간을 변수로 두 지점의 온도편차를 줄여나가면서 실험을 수행하였다. Table 2에서는 각각의 소재에 대한 반응용 성형을 위한 재가열 조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Reheating conditions

	Reheating Time			Holding Time			Holding Temperature			Total Time (min)	Exp. Temp (°C)
	ta (min)			th (min)			Th (°C)				
	ta1	ta2	ta3	th1	th2	th3	Th1	Th2	Th3		
A357	3	2	1	1	1	2	380	578	585	10	581
A390	3	2	1	1	1	2	460	564	574	10	570

3.2 수평유도가열 시스템

본 실험에서는 수평형 유도 코일을 설계, 제작하여 균일한 온도구배를 얻기 위해 재가열 실험을 하여 Fig.2에 나타낸 것처럼 소재의 균일한 가열을 위해 3단 재가열 조건을 확립하였다.

수직유도가열 시스템의 액상의 유출, 자중에 의한 좌굴, 전자기 끝단 효과 등의 결점을 보완하고, 재가열의 시간단축 및 균일한 온도구배를 얻기 위해서 수평유도가열 시스템을 설계, 제작하였다.

알루미늄 소재의 재가열을 목적으로 한 다단 고주파 유도도 가열장치로서 최대가열 알루미늄 소재의 규격은 $\Phi 5" \times 100\text{mm}$, $\Phi 3" \times 150\text{mm}$ 이고 용량은 50kw, 주파수는 350 Hz이다. 이 시스템은 시간-출력, 시간-온도를 단계별 개별 동작 및 제어가 가능하며 시간, 출력, 온도에 대한 제어결과를 실시간으로 받아서 연구·분석자료로의 활용을 위해 소재가열을 위한 고주파 전원장치, 연속적인 소재 공급을 위한 다단가열 Index장치로 구성되어 있다. 이러한 장치는 컴퓨터에 의해 자동제어 되고 있다.

다단 고주파 유도도 장치의 주 조작화면에서는 제어를 위해 입력한 3단 재가열 설정값을 그래프로 나타내고 가열기동시 생성된 출력결과를 실시간으로 화면에 표시해

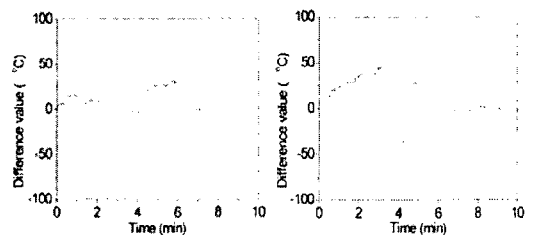
준다. 사용중인 온도센서는 제어판넬의 K-type 열전대와 pyrometer의 절환 S/W에서 선택된 온도센서가 설정된다. 제어번호 설정부는 제어패턴 번호를 변경하면 제어번호에 종속된 모든 자료들이 자동 저장되며 선택 가능한 모드는 출력과 온도모드이다. 제어값을 설정하기 위한 입력부에서는 설정값이 '0'이 되면 end-data로 인식하게 된다. P·I·D제어는 전압출력을 위한 범위설정부인 Gain값을 조절함으로써 가능하며 최종결과 데이터는 ASCII 코드로 변경할 수 있다.

3.3 재가열시 단면 전체의 온도구배

재가열시 빌렛 각 부분의 균일한 온도분포를 확인하기 위해서 대기와 접하고 있는 빌렛의 표면부(A)와 단열재와 접하고 있는 하단부(C)에서의 온도편차가 크므로 최종 가열시간과 최종 유지시간을 변수로 두 지점의 온도편차를 줄여나가면서 최종 단계에서의 각 위치별 온도편차를 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내가 되게 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 Table 2의 조건으로 재가열 할 때 A357의 온도상승곡선을 나타내고 있다. 전체 가열시간이 10분으로서 설정된 3단 가열조건을 잘 만족하고 있다.

Fig. 3의 (a), (b)는 각각 A357의 대기와 접하고 있는 표면부(A)와 중심부(B), 단열재와 접하고 있는 하단부(C)의 온도차이를 표시한 것이다. A357은 재가열 전 과정에서 중심부(B)와 단열재와 접하고 있는 하단부(C)의 온도차이가 일부구간에서 최대 50°C 정도의 온도차이를 보이나 최종 유지단계에서 각 위치별 온도차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로서 균일한 온도분포를 나타내었다.



(a) between point A and B (b) between point B and C
Fig. 3 Temperature difference during reheating of A357

Fig. 4는 A390의 온도상승곡선을 나타내고 있다. A390의 경우 A357과 달리 과공정(Hyper-eutectic) 합금으로서 공정온도 이상에서는 변화가 심하기 때문에 초기 온도상승구간에서 A357의 온도보다는 약 100°C 정도 높게 설정을 하였고, 비례적으로 최종 온도상승구간과 유지구간의 온도차를 줄여 적절한 구상화 조직을 가지도록 재가열 실험을 수행하였다. 전체 가열시간이 10분으로서

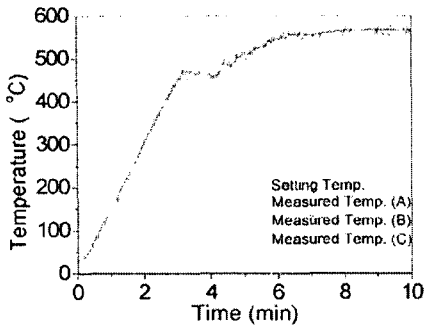
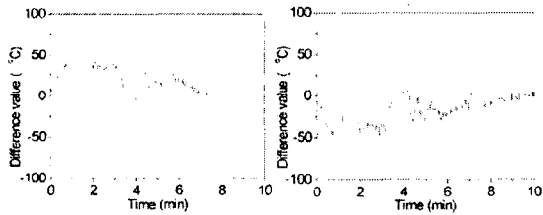


Fig. 4 Experimental reheating condition of A390 and temperature profile

설정된 3단 가열조건을 잘 만족하고 있다. Fig. 5의 (a), (b)는 A390의 각 부위별 온도차이를 나타내고 있다. A357의 경우보다 약간 큰 온도차를 보이고 있지만 최종 유지단계에서 온도차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내로서 균일한 온도분포를 얻을 수 있었다.



(a) between point A and B (b) between point B and C
Fig. 5 Temperature difference during reheating of A390

	A357		A390	
	$\times 100$	$\times 500$	$\times 100$	$\times 500$
A				
B				
C				

Fig. 6 Comparison of spheroidization and eutectic structure

3.4 재가열 조건에 따른 결정립

Fig. 6은 Table 2의 재가열 조건으로 각각의 소재에 대한 구상화 미세조직을 나타낸 것이다.

A357의 경우 구상화 정도는 $70\sim 90\mu\text{m}$ 의 결정립 크기를 나타내고 있고, 전체적으로 균일하고 미세한 공정조

직을 보이고 있다. $\times 100$ 일 때 단열재와 접하고 있는 하단부(C)보다 대기와 접하고 있는 빌렛의 표면부(A)에서 약간의 액상분포를 나타내고 있고, $\times 500$ 에서 균일한 공정조직을 관찰할 수 있었다.

A390의 경우는 $\times 100$ 와 $\times 500$ 에서 균일한 구상화 정도와 공정조직을 나타내고 있으며, $20\sim 30\mu\text{m}$ 정도의 결정립 크기를 나타내고 있다.

4. 결론

반응용성형을 위한 수평형 재가열 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수평형 유도가열 시스템을 설계, 개발하여 수직형 시스템의 결점을 보완할 수 있었다.
- (2) 전체 재가열 시간을 10분으로 단축하여, 반응용 성형시 소요되는 cycle time을 줄일 수 있게 하였다.
- (3) 소재의 종류에 따라 빌렛의 중심부, 표면부, 단열재와의 접촉부에서 균일한 온도분포를 가지고, 균일하고 미세한 구상화 미세조직을 얻을 수 있는 반응용성형에 적합한 재가열 조건을 도출하였다.

참고 문헌

- (1) Jonathan A. Dantzig and Stephen P. Midson, 1992, "Billet Heating for Semi-Solid Forming", Proc. of 2nd Int. Conf. on the Semi-Solid processing of Alloys and Composites, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, June 10-12, edited by Stuart B. Brown and Merton C. Flemings, pp. 105~118.
- (2) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, 1994, "Semi-Solid Forming of Aluminium Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Material Processing Tech., 45, pp. 359~364.
- (3) P. Kapranos, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars, 1996, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", Proc. of 4th Int. Conf. on the Semi-Solid processing of Alloys and Composites, University of Sheffield, England, June 19-21, edited by DH Kirkwood and P Kapranos, pp. 148~152.
- (4) Althix Billets, 1996, Aluminium Pechiney(2) Bassani, J. L., 1977, "Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties", Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651~156.