

반용융 성형공정에서 표면 및 내부 조직 제어에 관한 연구

정 홍 규*, 이 동 건*, 강 충 길*

* 부산대학교 기계공학부

A Study on Control of Surficial and Internal Microstructure in Thixoforming Process

H. K. Jung*, D. K. Lee* and C. G. Kang*

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

Abstract

Thixoforming process has been accepted as a new method for fabricating near net shaped products with lightweight aluminum alloys. The thixoforming process consists of reheating process of billet, billet handling, filling into the die cavity and solidification of thixoformed part. In this paper, the thixoforming experiments are performed with two different die temperatures ($T_d=200\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$) and orifice gate type. The microstructures of SSM (A357, A390 and ALTHIX 86S) fabricated in thixoforming process are evaluated in terms of globularization and grain size. Effect of alloying elements on the surface and internal defects is investigated. Finally, the methods to obtain the thixoformed products with good mechanical properties are proposed by solutions for avoiding the surface and internal defects.

Keywords: Thixoforming, Orifice Gate Type, Globularization, Grain Size, Surface and Internal Defects

1. 서론

기존의 다이캐스팅을 이용하여 제조된 제품은 내부에 편석, 기공 등의 결함을 가지며, 용탕 단조법은 용탕을 과열하기 때문에 금형의 수명이 단축되며 에너지 소비적인 측면에서 단점을 가지는 반면에, 고액 공존 영역에서 성형하는 반용융 성형공정은 액상과 고상이 공존하기 때문에 순수 액체 상태의 점성이 비교적 높아 금형 캐비티에 충전 시 난류의 발달이 적어 결함을 줄이고, 응고시 발생하는 편석, 균열 등의 발생을 억제할 수 있으므로 균일한 기계적 성질을 얻을 수 있다. 미세조직의 측면에서는 원소재를 구상화된 소재로 재가열한 후 성형하므로 수지상 조직의 소재보다 고상이 액상에 비교적 균일하게 분포하여 고강도의 경량 부품을 생산할 수 있으며, 적은 공정수로 정밀 정형품을 제조할 수 있기 때문에 다이 수명 연장 및 생산비용 절감 효과 등을 기대할 수 있다. 반면에 반용융 성형시의 문제점으로는 균일한 고상율을 얻을 수 있는 재가열 공정 시스템과 임의 형상에 대한 알루미늄 합금별 재가열 D/B 구적이 미비하며, 성형시 표면의 산화층(Oxide Film)과 불순물 제거 등의 제조 공정과 관련한 최적의 금형 설계 및 자동화된 전용 단조 장비의 개발 등을 들 수 있다. 아울러 반용융 성형에 대한 노하우 및 전문가 시스템의 개발과 고도의 전문인 양성이 필수적이다.

반용융 성형공정에 관한 연구 동향으로서는 강 등^(1~3)은 다이 캐비티의 탱구 형상이 오리피스형인 경우가 양호한 조직을 얻는데 적합함을 실험 및 수치 해석을 통해 검증하고, 고상 입자의 변형을 고려한 분리계수를 이용하여 반용융 재료에 적합한 유동 응력식을 제안하였다. Kitamura 등⁽⁴⁾은 반용융 다이캐스팅 공정을 자동차 부품인 커넥팅 로드(Connecting Rod) 부품에 적용하여 기존의 금속 주조법에 의한 제품의 기계적 성질과 비교하였으며, 제품의 인장응력, 연신율은 거의 같은 반면, 거시적 분리현상 감소, 금형의 열적부하 감소, 치수 정밀도의 향상 및 반용융 금속의 외관이 양호함을 밝혔다. Nicholas 등⁽⁵⁾은 반용융 단조 공정에서 성형 직후, 소재를 일정한 시간 동안 가압 유지를 함으로써 소재 내부의 잔류 액상의 수축으로 인한 미충전을 제거할 수 있다고 제안하였다. 정 등⁽⁶⁾은 알루미늄 합금을 이용한 반용융 단조공정에 있어서 소재의 재가열 조건이 빌렛의 미세조직을 제어할 수 있기 때문에 성형 공정에서 중요한 변수임을 고려하여 알루미늄 합금(A356, ALTHIX 86S, A12024)에 대하여 이론적인 최적 코일 설계를 제안한 후 임의의 빌렛에 대한 3단 재가열 과정을 통해 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있음을 보였다.

지금까지의 연구에서는 반용융 성형공정을 이용해 제조된 부품의 표면부에 있어서 구상화 분포 및 고액간의 분리 현상 등을 종합적으로 관찰한 결과는 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 전자기 교반법에 의해 제조된 A357, A390, ALTHIX 86S 소재를 3단 재가열한 후, 임의의 형상의 금형에 대한 반용융 성형공정을 수행하여 표면 처리용 샘플을 성형하였으며, 이 때 발생하는 칠층(Chill Zone) 및 각종 결함의 원인을 규명하고자 한다.

2. 반용융 성형실험

반용융 성형공정은 일반적으로 소재의 재가열 및 성형, 가압유지, 이젝팅(Ejecting)의 순서로 구분되며, 이 과정에서 특히 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있는 재가열 조건의 설정이 중요하다. 따라서 본 실험에서는 일반적으로 자동차 부품 개발에 주로 이용되는 프랑스 PECHINEY사에서 전자기 교반으로 제조된 주조용 합금인 A357, A390, ALTHIX 86S 합금을

사용하였다. Table 1에 각 알루미늄 합금의 화학 성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of ALTHIX (A357, 86S, A390) billets

Alloys	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb+Sn	Ti	Sr
A357	6.5				0.50					0.01
	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.03	0.20	0.05
ALTHIX	5.5		2.5		0.30					0.01
86S	6.5	0.15	3.5	0.03	0.40	0.03	0.05	0.03	0.20	0.05
A390	16.0		4.0		0.50					
	18.0	0.40	5.0	0.10	0.65	0.10	0.05	0.03	0.20	-

실제 소재의 체적(재가열시의 재료 손실, 다이 캐비티, 탕구, 탕구와 펀치와의 스트로크 차(差) 및 버어(Burr)의 체적 함)을 고려하여 최적의 빌렛 크기를 $d \times l = 76 \times 30(\text{mm})$ 로 설정하였다. 최대 출력이 50kW이고, 주파수가 60Hz인 유도 가열로를 이용하여 재가열 실험을 수행하였으며, 구상화된 조직을 얻을 수 있는 합금별 코일의 크기를 이론적으로 계산하여 설계 및 제작된 코일을 이용하였다. 반응을 성형실험을 하기 위해서 고온 공구강인 STD 61종을 HRC 50~55로 열처리하여 금형과 펀치를 제작하였다. 금형의 가열을 위하여 고온(400℃)에서 견딜 수 있는 400W 용량의 열선을 상부에 8개, 하부에 6개를 장착하였다. 금형의 온도를 제어하기 위하여 상하부 각각 열전대를 측면에 삽입하여 좌우 분할 금형의 온도를 균일하게 제어하였다. 온도 측정을 위하여 $\phi 1.6\text{mm}$ 의 K-Type 비접촉식 열전대를 사용하였으며, 좌·우 금형의 용량이 각각 2.8kW가 되도록 균일하게 금형을 예열하였다. 또한 금형 예열시 그라페이스 이형제를 사용하여 금형 캐비티와 소재의 소착 현상을 방지하고 성형 후 취출이 용이하도록 하였으며, 가압시의 금형의 온도 변화에 따른 충전현상을 파악하기 위하여 금형 온도를 $T_{die}=200^\circ\text{C}$ 와 300°C 로 하여 실험을 하였다. 반응용 성형실험을 위해서 200ton 복동식 고속 유압 프레스를 이용하였으며, 가압속도는 최대 200mm/sec, 가압력은 80MPa로 일정하게 하였다. 성형이 이루어졌을 때, 오리피스형 탕구의 윗면과 펀치의 밑면의 스트로크 차가 10mm가 되도록 소재의 체적을 계산하였으며, 10mm의 충전되는 지점까지는 재가열된 소재의 열손실을 최소화하고 양호한 성형성을 얻기 위해 고속 구간(펀치속도 $V_p=200\text{mm/sec}$)을 주었으며, 단조가 이루어진 직후 취출된 제품에 좋은 단련 효과를 얻도록 2~3mm의 저속 구간을 주었다. 저속 구간에서의 가압력은 110MPa, 좌우 분할 금형의 클램핑 하중은 최대 100ton이 되도록 하여 분할 금형이 열리지 않도록 하였다. 저속 충진이 이루어진 이후에 20초 동안 가압 유지하였다. 가압 후 분할 금형을 열어 제품을 취출하고 성형품의 각 단면에 있어서 구상화의 변화과정을 조사하기 위해서 신속히 금냉시켰으며, 성형된 표면 처리용 샘플에 대하여 충전 현상 및 각종 결함, 미세조직, 칠층(Chill Zone)을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1의 두께가 각각 3.5mm, 4mm를 가지는 샘플 성형을 통해서 재가열된 소재의 충전 거동이 표면부의 고상 및 액상 분포와 칠층의 형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 펀치 속도도 200mm/sec, 금형 온도를 300℃, 성형 하중을 80MPa로 일정하게 하였다. 재가열시 발생하는 산화막이나 소재의 이송시 열손실에 의한 표면부의 응고층 등을 제거하도록 금형의 탕구 부분은 오리피스형으로 하였으며, 가압유지를 함으로서 응고시 발생하는 수축에 의한 충전 불량, 공정 편석 및 강도 저하를 감소시키고자 하였다. 금형 온도의 변화에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위하여 초기 실험에서는 금형 온도를 200℃, 300℃로 하여 성형하였다. Fig. 1은 미세조직을 관찰한 부위의 개략도이다.

Fig. 2~Fig. 3은 A390, A357 및 ALTHIX 86S를 이용하여 성형한 샘플의 결함부위를 나타낸 사진이다. Fig. 2~Fig. 3에서 볼 수 있듯이 A390은 최종 응고부위에서 표면 결함이 관측되었으며 A357은 미충전, ALTHIX 86S는 결함 충전되었다. 합금별 결함부위에서 차이가 나는 원인은 과공정 조성의 A390의 경우 높은 Si 및 Cu의 함유율로 인하여 유동성이 좋은 반면에 아공정 조성의 A357은 낮은 Si의 함유율로 인하여 유동성이 떨어지며 ALTHIX 86S의 경우 아공정 조성이지만 Si와 Cu의 복합적인 작용으로 인하여 과공정 성향을 나타내기 때문이다. Fig. 4는 Fig. 2의 (a) 샘플에 대하여 Fig. 1에 나타낸 위치에 따라 (a)~(f) 부위까지 관찰한 조직사진이다. Fig. 4의 (a), (b), (c)에서는 결함이 없는 구상화 조직이 관찰되었으나 표면 부위인 (a)에서 중앙 부위인 (c)로 갈수록 고상의 응집 현상 및 조대화가 증가되었다. (d)에서는 표면으로부터 300~400 μm 크기의 칠층 및 양호한 구상화 조직과의 경계부가 관찰되었다. (e), (f)에서는 결함 부위가 없으며, 가압을 직접적으로 받는 부위인 (b), (c)에서 보다 고상간의 응착현상이 감소되었다. Fig. 5의 (A)-(g), (h), (i)는 Fig. 3의 (B)-(a) 샘플에 대한 결함 부위의 미세조직을 나타낸 것이다. (g)에서는 표면 부위에서 100~150 μm 범위의 구상화된 조직과 기공이 관찰되었으며 (h)와 (i)에서는 전체적으로 구상화된 초정(Primary)위에 결함이 관찰되었다. Fig. 5의 (B)-(g), (h), (i)에서는 A357을 소재로 한 Fig. 3의 (A)-(b) 샘플에 대한 미세조직을 관찰한 것이다. 전체적으로 결함 부위는 관찰되지 않았으며, 고상간의 응집 현상이 관찰되었다.

과공정 조성의 A390은 유동용력이 낮아 온도에 민감하며, 재가열중에 액상편석 및 재료

손실율(Metal Loss)이 높다. 따라서 유출된 액상이 표면 장력, 응집현상에 의해서 양호한 구상화 조직을 가지는 부위와 함께 다이 캐비티 내로 성형됨에 따라 결함이 발생한 것으로 사료된다. 반응용 빌렛으로부터 유출된 액상은 소재 밑면에 모이므로 불필요한 액상을 제거하거나 제품의 후가공에 의해 소실되는 부위에 위치하도록 하는 러너(Runner) 및 오버플로우(Overflow)⁽¹⁾의 설계가 필요하다. 아울러 소재의 상하를 바꾸어 성형함으로써 액상 부위를 실제 샘플에 성형되지 않고 탕구 부위에 성형되도록 하여 결함을 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 성형중 빌렛 전체에 걸쳐서 고상과 액상영역이 고르게 분포하기 위해서는 200mm/s 이상으로 사출속도의 증가가 필요하며, 합금의 유동성과 수축 캐비티 형성의 민감성을 고려한 견직한 부품 제조를 위해서는 다이 충전의 철저한 분석 및 충전중 고상과 액상의 편석을 포함한 재료의 유동거동을 모델링하는 기술이 선결되어야 할 것으로 사료된다. 다이 캐비티 충전되는 동안에 형성된 산화막들은 유동 교차부에 큰 오버플로우를 설치하거나 충분한 벤딩에 의해서 제거되어야 할 것으로 생각된다. 반응용 성형공정에 있어서 제품표면 및 마무리 치수의 향상을 위해서는 윤활막이 얇으면서도 눌러 붙음 방지나 미찰을 감소시킬 수 있는 인염계 첨가제 배합유의 개발 및 성능 분석이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 이상의 반응용 성형시의 표면 및 내부 결함의 원인 분석을 통해서 연재 컴프레서 부품인 Scroll⁽¹⁾ 및 알루미늄 Frame 부품을 개발중에 있으며 실시간 사출제어 시스템에 의한 성형조건 확립은 향후 해결되어야 할 문제로 생각된다.

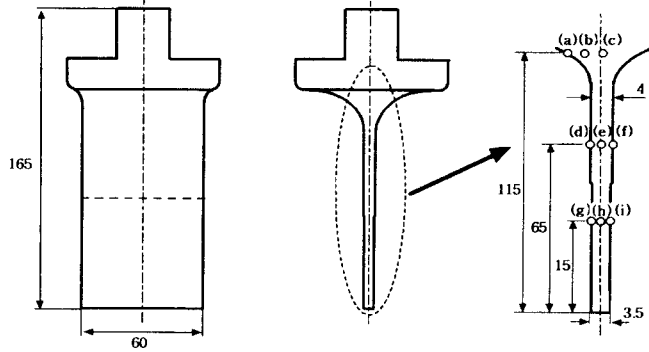


Fig. 1 Schematic diagram for the position of microstructure observation in the direction of the thickness and width.

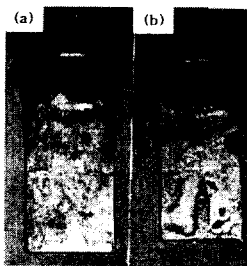
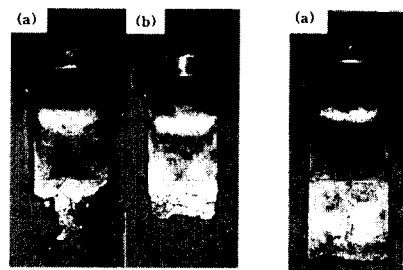


Fig. 2 Various defects in thixoforging process of A390 alloy.



(A) A357 (B) ALTHIX 86S

Fig. 3 Various defects in thixoforging process of A357 and ALTHIX 86S alloys.

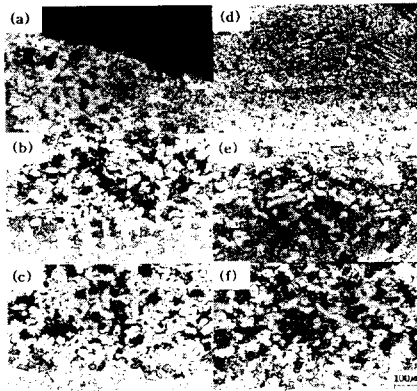


Fig. 4 Microstructure in the direction of the thickness for samples with defects used for A390 alloy

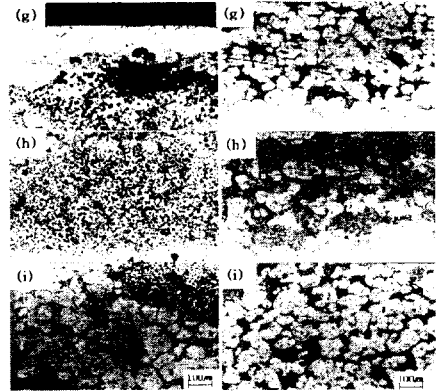


Fig. 5 Microstructure in the direction of the thickness for samples with defects used for ALTHIX 86S, A357 alloy

4. 결론

(1) $d \times l = 76 \times 30$ (mm)인 A357, A390, ALTHIX 86S 소재를 이용한 반응용 성형실험을 통하여 입의의 형상을 가진 제품의 반응용 성형시 발생하는 표면 및 내부결합의 원인을 규명하였으며, 결함이 없는 우수한 기계적 성질을 가진 반응용 성형품을 얻을 수 있는 방안을 제안하였다.

(2) 현재 Thixoforging(High Solid Fraction) 및 Thixocasting(Low Solid Fraction)을 위한 SSM의 D/B를 구축 중에 있으며 각 공정에서 SSM의 고상입자의 변형, 충전결합, 액상편석, 성형하중 및 고상율의 분포 등을 정확히 예측하여 기계적 성질이 우수한 제품을 양산할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단(KOSEF) 우수연구센터 지원금에 의한 연구의 일부분입니다.

참고문헌

- (1) C.G. Kang, H.K. Jung and K.W. Jung, 1999, "Thixoforging of Aluminum Component with Designed Die by Process Simulation," Proc. of Int. Symp. on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology (AFDM'99), Pusan National University, Korea, pp. 83~88.
- (2) C.G. Kang and D.W. Kang, 1996, "Forging Process Analysis of Semi-Solid Aluminum Materials," Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, UK, pp. 120~125.
- (3) C.G. Kang and H.K. Jung, 1999, "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modelling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1423~1445.
- (4) K. Kitamura, Y. Ando, K. Hironaka, S. Yahata and C. Yoshida, 1994, "Die Casting of Aluminum Alloy in Semi-Solid State," Proc. of the 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, University of Tokyo, Japan, pp. 181~190.
- (5) N. Nicholas, W. Haws, L. Lane and J. Marder, 1996, "Semi-Solid Metal Formed Small Components of Aluminum and Aluminum-Beryllium Alloys," Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield, UK, pp. 215~224.
- (6) H.K. Jung and C.G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6%Si-3%Cu-0.3%Mg Alloy for Thixoforging," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, No. 12, pp. 1~11.