 논문

레오로지 박판의 전자교반을 응용한 진공 저압주조 제조공정

장신규 · 배정운 · 진철규 · 강충길 *†

부산대학교 대학원 정밀가공시스템공학과, *부산대학교 기계공학부

Fabrication Process of Rheology Material Thin Plate Using Vacuum Low Pressure Die-casting Process with Electromagnetic Stirring

Sin-Kyu Jang, Jung-Woon Bae, Chul-Kyu Jin, and Chung-Gil Kang*†

Department of Mechanical and Precision Engineering, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract

In this study, we develop the lower pressure die casting with rheo-forming process of A356 aluminum alloy and vacuum system which can control the crystal size and obtain the high strengthened-light material. Using this process, we fabricate the thin plate for bipolar plate through the low pressure die casting with electromagnetic stirring and vacuum-evacuation which can control the crystal grain by electromagnetic stirring. Thin plate (110 mm × 130 mm × 1 mm) is fabricated by this process. The average Vickers hardness of thin plate is about 77 HV.

Key words: Electromagnetic stirring, Rheology material, Low pressure die casting, Thin plate, A356 alloy.

(Received August 24, 2011 ; Accepted December 7, 2011)

1. 서 론

환경과 에너지 문제의 해결을 위한 저공해 배출공정기술의 개발 및 에너지 절약을 위한 고강도 경량소재 개발이 요구됨에 따라, 주조와 단조 공정의 문제점을 해결하기 위한 새로운 공법으로 반응용 공법이 활발히 연구되어 오고 있다. 반응용 공법은 소재를 고상과 액상의 경계영역인 레오로지(Rheology) 상태의 빌렛(Billet)을 만들어서 프레스 장치로 가압하는 복합성형 공법이다. 액체상태보다 높은 점성으로 인해 금형 내에 용탕이 층류상태로 유입됨으로써 제품 내부에 가스나 기공으로 인한 결함을 줄일 수 있으며, 두께가 얇은 제품을 제작할 수 있다[1].

반응용 빌렛을 제작하는 방식으로 M.C Flemings 교수의 연구에서 시작된 기계식 교반(Mechanical stirring) [2], 일본의 Ohno 교수의 경사판(Slope plate process) [3], 전자기력으로 용탕을 교반하는 전자 교반법(Electromagnetic stirring, EMS) [4] 등이 있다. 이러한 공법들 중 전자 교반법은 용탕부에 전단력을 가하여 알루미늄 응고시 발생하는 수지상 조직을 파괴시켜 구상

화된 초정입자를 갖는 슬러리(Slurry) 상태로 레오로지 소재를 제조한다.

지금까지 전자교반법으로 빌렛을 제조하여 단조 프레스나 다이캐스팅기로 제품을 성형하는 연구가 진행되어 왔으며[5,6], 저압주조에 적용된 사례는 없다.

저압주조법은 1917년 프랑스에서 제작되어 일본에서 자동차공업의 발전과 더불어 급속도로 발전했다. 이 공법은 비교적 작은 0.2~0.35 bar의 압력을 기체에 의하여 가압하여 슬리브를 통하여 중력의 반대방향으로 용탕을 밀어올려 금형 캐비티(Cavity)를 채우는 주조공법이다. 중력주조법의 경우 주입중량에 대한 제품중량이 약 절반 정도 이지만, 저압주조법은 90% 이상의 회수율(Return scrap)이 확보되는 장점이 있다[7].

저압주조의 단점은 금형 내로 원활한 용탕의 유입이 되지 않으며, 주조 결함으로 인한 불량율과 주물의 품질이 좋지 않은 점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 기존의 저압주조 공법에 진공 장치를 구축하였으며, 슬리브에 전자교반기를 적용하여 레오로지 소

†Corresponding author: Chung-Gil Kang

[Tel: +82-51-510-2335, E-mail : cgkang@pusan.ac.kr]

재의 박판을 제작하였다. 제작된 박판(100 mm × 130 mm × 1 mm)은 연료전지의 핵심부품인 분리판이나 열교환기의 냉각기 부품, 그리고 전자제품의 외장 케이스 등에 사용될 수 있다.

저압주조기에 의한 성형 공정의 실험결과와 함께 주조 전용 해석 프로그램인 MAGMA soft를 이용하여 충전시 용탕 주입 온도, 금형 온도, 진공도 조건에 따른 용탕의 충전거동을 분석하였으며, 응고시 용탕의 응고 거동을 분석하여 실험 결과와 비교하였다.

2. 실 험

2.1 레오로지 저압주조 실험 장치 설계 및 실험 방법

전자교반을 이용한 레오로지 저압주조 성형 공정 실험의 소재는 주조용 소재인 A356 알루미늄 합금을 사용하였다. DSC 분석을 통한 A356 합금의 성분 분석표를 Table 1에 도표하였다.

Fig. 1. Schematic of vacuum low pressure apparatus with EMS.

레오로지 진공 저압주조를 위한 장비의 개략도 및 각 부위별 설명을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 실험에 사용된 진공 저압주조 장치로서 Fig. 2(a)는 금형이 장착된 프레임 구조이며, Fig. 2(b)는 도가니에 슬리브(Sleeve)가 장착되어 전자교반기가 설치된 장치다.

진공금형 장치를 이용하여 반응고 재료의 박판을 제조하기 위하여 설계된 장비는 도가니의 상부 쪽에 위치한 가스 투입구(7)로 투입되는 가스압에 의하여 슬리브를 통해서 금형 내부의 캐비티로 주입되는 방식으로 기존의 성형방식인 저압주조 공정과 유사한 공정기법이다.

하지만 본 장치는 저압주조 시 도가니에서 하부금형 게이트(Gate) 부까지 연결되어 있는 슬리브(5) 외측에 전자교반 장치(1)를 장착하여 전자교반력에 의한 구성화된 결정립이 생성되도록 설계되어 있다. 슬리브를 통과하는 반응고 소재의 온도 제어를 위하여 슬리브 외측 전체를 둘러싸는 히팅장치(3)를 설계하여 소재의 유동성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 또한, 슬리브는 비자성체 소재인 SUS 316으로 제작하여 전자교반시 교반 효과를 받지 않도록 하였다.

금형을 지지하는 이송플레이트(14)가 유압실린더(12)에 의하여 상하로 승강이 가능하도록 설계하여 슬리브의 단부를 금형부에 보다 용이하게 체결할 수 있으며, 상부 슬리브는 하부금형의 게이트 부까지 체결되어 반응고 소재의 용융금속이 금형까지 주입될 시 가스의 유출이 없도록 하였다.

박판 성형 금형은 Fig. 3에서 보이듯 금형부는 상부금형과 하부금형으로 나뉘어져 있으며 각각 카트리지 히터를 통하여 온도제어가 가능하게 설계하였고, 상부금형과 하부금형은 독립

Fig. 2. Photographs of low pressure apparatus: (a) frame, (b) Crucible incorporated with EMS.

Table 1. Chemical compositions (wt%) and thermal characteristics of A356 Al alloy

	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Al	T _L	T _S	T _L -T _S
A356	0.01	0.33	0.01	0.13	7.00	0.01	0.01	Bal.	615°C	554°C	60°C

Fig. 3. Schematic of thin plate mold: (a) top view of lower mold, (b) mold assembly.

적으로 온도를 제어할 수 있다.

2.2 전자교반 실험

본 실험에서는 레오로지 단조 실험 공법인 용탕을 비자성체 컵에 넣고 전자교반을 하여 빌렛을 제작하는 경우와는 달리 저압주조 시 전자교반이 적용되어야 한다. 그러므로 용탕이 슬리브를 통하여 금형으로 유입될 때에 전자교반이 적용되므로 교반시간이 한정적이다. 또한 전자교반기의 내경과 온도제어 시스템 및 하부 금형의 게이트 부 직경을 고려하여 설계한 슬리브 내경의 직경은 35 mm로 기존의 전자교반 조건으로 교반을 수행하기는 어려운 실정이다. 또한 현재 저압주조 박판장치는 슬리브 내에서 소재가 정체하면 용탕이 응고가 될 수 있으므로 전자교반 시간을 4초로 한정하여 교반 실험을 실시하였다. 교반 시간을 짧게 하는 대신 교반력을 높여 전자교반 효과를 높일 수 있도록 실험하였다.

전자교반 실험시 슬리브 온도 상태와 동일하게 실험하기 위하여 슬리브 내경(35 mm) 및 두께(12.5 mm)가 동일한 컵을 제작하였으며, Fig. 4에서 보여지는 가열로를 통하여 컵을 가열하여 슬리브의 최대 온도와 동일하게 설정하고 전자교반을 수행하였다. 슬리브의 최대 온도는 교반기와 슬리브의 크기에 따른 사이즈의 제약으로 560°C이며, 히팅 장치를 Fig. 5에 나타내었다.

용탕의 온도는 컵에 용탕을 부었을 때 액상선 온도 근처가 되도록 하였다. 이는 예비 성형 실험을 통하여 고상율(Solid fraction)이 10% 이내에서 슬리브 내에 소재의 응고가 일어나지 않았기 때문이다. 소재의 고상율이 증가하게 되면 슬리브의 벽면부에 응고셀이 형성되며, 이 응고셀은 용탕의 흐름을 방해하여 응고셀의 성장을 야기시킨다. 따라서, 최대 고상율이 15%가 넘지 않도록 전자교반 실험을 실험하였다.

전자교반력에 따라 제조되어진 A356 레오로지 소재의 조직을 Fig. 6에 나타내었다. 교반전류가 100 A가 넘는 경우는 작은 내

Fig. 4. Photographs of cup heating system.

Fig. 5. Photograph of sleeve heating device with controller.

Fig. 6. Microstructures of A356 alloy according to the stirring current: (a) 100 A, (b) 80 A.

경으로 인하여 원심력이 증가하여 슬리브 내의 용탕의 유동 방향과 반대방향의 힘이 세어져서 층류 유동에 방해가 된다. 교반 전류가 80 A인 경우 텐드라이트 조직들이 거의 파쇄되지 않았으나, 교반전류가 100 A인 경우에는 텐드라이트 조직들이 다소 파쇄되는 조직을 얻을 수 있었다. 따라서, 본 실험에서는 전자교반 전류가 100 A인 경우가 가장 적합한 조건이라고 생각된다.

2.3 슬리브 제작

본 실험에 앞서 예비 성형 실험을 수행한 결과, 슬리브 내에 알루미늄의 소착성 때문에 성형공정을 계속적으로 수행할 경우 슬리브 내부 표면 알루미늄 소착 때문에 슬리브 내에 용탕이 굳는 현상이 발생하였다. 슬리브 내의 표면처리를 수행하여도 알루미늄의 산화막과 소착성 때문에 성형공정을 2~3회 이상 수행할 경우 소재의 유동이 방해되며, 슬리브 내에 용탕이 응고 되는 현상이 발생하였다. 이에 슬리브를 일체형(Fig. 7(a))으로 수정하여 제작하였으며, 도가니와 슬리브의 연결부위에 카트리지 히터를 장착해 온도저감이 적도록 수정하였다.

또한, 슬리브 내의 알루미늄 소착 방지 및 온도저감을 적게 하게 위하여 슬리브 내에 실리콘 파이프를 삽입하여 단열효과 및 알루미늄 소재의 소착을 방지할 수 있도록 하였다. Fig. 7(b)에 슬리브 내에 삽입한 실리콘 파이프를 나타내었다.

2.4 레오로지 진공 저압주조 성형실험

알루미늄 용탕의 온도는 가압되는 아르곤의 온도가 낮고, 슬리브를 이동하며 소재의 온도가 약 5~7°C 이내로 온도 강하가 일어남으로 액상선 온도 615°C에서 2°C 높은 온도로 설정하여 박판 성형 실험을 수행하였다. 용탕의 온도가 낮으면 슬리브 내에서 용탕의 응고가 일어남으로 전자교반이 이루어지는 슬리브 부분에서 고상율이 10% 이하가 되도록 용탕 온도를 설정하였다.

Fig. 7. Photographs of improved sleeve system: (a) sleeve, (b) Silicon pipe for inserting in the sleeve.

Table 2. Process parameters of low pressure die casting

Classification	Condition
Material	A356
Mold temperature	350°C
Stirring current	100 A
Vacuum degree	60 mmHg

Table 3. Experimental conditions of low pressure die casting

No	Melt temperature (°C)	Gas pressure (bar)	Stirring current (A)
1	670	5	0
2	670	7	0
3	670	9	0
4	615	12	100
5	615	15	100

진공 저압주조 실험에 사용된 공정 및 실험 조건을 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 전자교반 전류는 앞 절에서 선행 수행한 것과 동일하게 100 A 설정하여 실험하였다. 금형의 온도는 350°C로 설정하였다. 금형의 온도가 높으면 금형과 성형된 제품의 소착현상으로 탈형(demolding)이 힘들며 표면 거칠기가 좋지 않게 된다. 이러한 조건들을 바탕으로 용탕 온도와 아르곤 가스압에 따라 박판 성형 실험을 수행하였다. 용탕 온도가 670°C인 조건은 전자교반기를 작동시키지 않았으며, 615°C인 조건은 전자교반기를 작동시켰다.

3. 해 석

해석에 사용된 캐스트 재질은 실험과 동일한 A356의 소재를 이용하여 성형해석을 수행하였으며, 성형 변수로는 금형 온도, 용탕 온도, 진공도 3가지 조건이다. MAGMA soft의 A356 “틱소(thixo)” 모듈을 이용하여 박판에 대한 충전 및 응고 거동을 수행하였다.

3.1 지배방정식

일반적으로 MAGMA soft에 사용되어지는 연속 방정식은 Navier Stoke's equation의 에너지 방정식과 VOF(Volume of Fluid) method 이 사용되어진다. 반응고 소재의 Ostwald-de Waele model 유동 거동식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\eta = \rho \cdot m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

η : apparent dynamic viscosity(Pa.s)

ρ : density(kg/m³)

m : Ostwald-de Waele coefficient (m²/s)

$\dot{\gamma}$: shear rate (1/s)

n : Ostwald-de Waele exponent

3.2 해석 조건

MAGMA soft의 해석에 사용된 3차원 모델링 형상을 Fig. 8에 나타내었다. 캐비티 사이즈는 충전 방향으로 130 mm, 세로 방향으로 110 mm 이며, 두께는 1 mm이다. 게이트의 두께는 0.8 mm 이다. 직사각형의 요소들은 4,9819,944개의 수직좌표로 나누었고, 금형 캐비티 안의 요소(Metal cell)의 수는 199,332 개이다. 그리고 해석을 수행하기 위한 알루미늄 A356 소재의 물성치와 해석 조건들을 Table 4에 나타내었다.

DSC 분석을 통한 A356 합금의 성분 분석표와 MAGMA 해석 프로그램에서 적용되는 액상선 및 고상선의 온도에서 차이가 있었다. 하지만 실제 사용한 소재와 해석 프로그램에서 적용되는 소재의 고상율에 맞게 적용하였기 때문에 큰 차이는 없을 것으로 사료된다.

MAGMA 해석 결과로부터 레오로지 소재의 유동 특성을 예측 가능할 뿐만 아니라, 성형품의 압력 구배, 온도 구배, 응고

Fig. 8. Geometry of thin plate for simulation of MAGMA soft.

Table 4. Properties used in semi-solid casting simulation by using A356 alloy

Parameters	Values
Solidus temperature(T_s)	547°C
Liquidus temperature(T_l)	617°C
Latent heat(Q)	430 kJ/kg
Melt temperature(T_m)	670, 616, 612°C
Die temperature(T_d)	350, 200°C
Vacuum degree	100, 500 mbar
Heat transfer coefficient between mold and mold(h_d)	7,000 W/m ² K
Heat transfer coefficient between cast and mold(h_m)	1,000 W/m ² K
Mesh number of control volumes	4,981,944
Mesh number of metal cells	199,332

시간 등을 예측 하여 기본 성형 조건을 확립할 수 있다.

4. 실험 및 해석 결과

4.1 MAGMA 해석 결과

용탕의 주입 온도 즉 고상율에 따른 유동해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

금형의 온도는 350°C, 진공도는 500 mbar 이며, 용탕의 온도는 670°C(Liquid), 616°C($f_s=10\%$), 612°C($f_s=20\%$)로 설정하여 해석을 수행하였다.

소재가 금형의 캐비티를 채우는 양을 바탕으로 충전 현상을 표현하였다. 용탕 온도가 670°C인 완전 액상의 경우 용탕이 게이트를 지나면서 캐비티의 중앙과 좌우면이 분리되면서 난류 상태로 유입된다. 하지만 616°C와 612°C인 레오로지 소재의 경우 점성의 영향으로 인해 게이트를 따라 D 형상으로 충전이 이루

Fig. 9. Filling behavior(at 64% filling stage) and air entrapment by different melt temperatures: (a) 670°C, (b) 616°C, (c) 612°C.

Fig. 10. Temperature distribution by different die temperatures: (a) 200°C, (b) 350°C.

어 진다. 용탕의 흐름이 게이트와 캐비티 사이에서 분산되는 이유는 게이트와 캐비티의 두께 차이로서 게이트 두께는 0.8 mm, 캐비티 두께는 1.0 mm 이다. 그러므로 캐비티 윗부분 0.2 mm는 최종 충전 부분이 된다. 용탕이 액상 상태이면 흐름이 심하게 분산되며, 고상이 높을수록 점성에 의하여 분산이 작은 것을 확인할 수 있다.

금형 온도에 따른 유동해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 용탕의 주입온도는 고상율이 10%인 616°C, 진공도는 500 mbar로 설정하여 유동 특성을 확인하였다. 금형 온도를 200°C와 350°C로 성형해석을 수행하였을 때 금형 온도가 낮은 경우는 게이트 모서리 부분과 캐비티 끝단부에서 온도가 떨어지며, 캐비티 내에 온도 분포가 고르지 않다. 반면 금형 온도가 350°C로서 높은 경우 온도가 떨어지는 부분없이 대체적으로 캐비티 내에 온도 분포가 균일한 것을 볼 수 있다. 레오로지 소재는 초기 성형 온도가 낮기 때문에 박판의 경우 금형 온도가 낮으면 충전 중에 용탕이 응고되어 미성형이 발생할 가능

Fig. 11. Filling behavior and velocity distribution by different vacuum degrees: (a) 500 mbar, (b) 100 mbar.

성이 높다.

진공도에 따른 유동 특성을 파악하기 위하여 용탕 온도는 616°C, 금형 온도 350°C로 하였으며, 진공도는 500 mbar(375 mmHg)와 100 mbar(75 mmHg) 두 가지로 설정하였다. 진공도에 따른 해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 진공도가 500 mbar는 D 형상으로 충전 거동이 되어 캐비티 중앙부와 벽면부가 먼저 충전되지만, 100 mbar의 경우 캐비티 벽면부만을 제외하고는 균일한 거동이 확보된다. 이는 캐비티 내에 중앙 오버플로우(Overflow)에서 작용되는 높은 감압 효과로 인해 게이트와 캐비티 사이에서 분산되어 벽면으로 향하는 용탕을 중앙으로 다시 이끌기 때문이다. 이로 인한 용탕의 속도 분포가 게이트를 지나면서 중앙에서 증가하다가 다시 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 500 mbar가 적용된 해석 결과는 용탕 흐름의 앞부분 속도가 높은 것을 볼 수 있다.

따라서, 가스 가압력 및 진공도가 작을 경우 게이트와 캐비티 사이에서 소재가 응고되어 미성형이 일어 날 것이라 예상할 수 있다

용탕 온도와 금형 온도 그리고 진공도에 따른 해석 결과를 바탕으로 할 때 용탕 온도는 616°C, 금형 온도는 350°C, 진공도는 100 mbar로 설정한 조건이 최적이라 판단된다. 이 조건의 충전 및 응고과정에 대한 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 일반 주조공정과 달리 레오로지 소재는 점성에 의하여 유동이 난류 상태로 발달하지 않고 게이트를 따라 점진적으로 캐비티를 채우는 양상을 보인다. 또한, 캐비티 벽면을 따라 흐르는 용탕의 속도가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 게이트와 캐비티의 두께 차이로 인하여 캐비티 앞부분에서 용탕의 흐름이 분산되기 때문에 진공박스가 채워진 후에 마지막으로 분산된 부분이 채워진다. 금형 캐비티를 100% 채운 온도 분포를 보면 게이트 모서리에 온도가 떨어지는 부분이 발생하여 실제

Fig. 12. Filling and solidification behavior, air entrapment and feeding by optimal condition (melt temperature: 616°C, die temperature: 350°C vacuum degree: 100 mbar).

실험에서 결함이 발생할 가능성이 높다.

응고 거동에 대한 해석 결과는 충전 후 0.732 s에 게이트 부분과 캐비티 벽면 그리고 A부분이 고상선 이하로 응고가 되며, 0.738 s에는 캐비티 앞부분과 끝부분의 응고 속도차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 응고 속도가 빠른 곳이 더딘 곳보다 상대적으로 두께가 얇기 때문인 것으로 판단된다.

공기포집(Air entrapment)와 공급(Feeding)의 결과를 보면 최종 충전 부분인 캐비티 앞부분에서 포집된 공기양과 공급(Feeding)도가 높다. 노란색으로 표시된 부분이 공급(Feeding)이 높은 것을 나타내며, 이는 기공이 분포 한다는 결과를 의미한다. 그러므로 캐비티 앞부분이 상대적으로 두께가 두껍지만, 내부에 결함이 많이 존재 할 수 있는 것으로 판단 할 수 있다.

4.2 레오로지 진공 저압주조 실험 결과

Fig. 13에 Table 3의 실험 조건에 따른 박판 시제품들의 사진을 나타내었다. 용탕 온도 670°C, 아르곤 가스압을 5 bar가 적용된 실험 조건 1의 경우 절반까지 성형이 이루어 졌으며, 가스압이 증가함에 따라 미성형 부분이 줄어 든 것을 확인할

Fig. 13. Thin plate fabricated by different experimental conditions: (a) condition 1, (b) condition 2, (c) condition 3, (d) condition 4, (e) condition 5 (F: front, B: back).

수 있다. 진공도의 효과로 가스압이 크지 않아도 박판 성형이 이루어지나 박판의 끝단부에 미성형이 발생하였다. 가스압이 7 bar 이하 이면, 캐비티 중앙에서 용탕이 응고되어 진공의 영향을 받는 중앙 부분과 속도가 빠른 벽면부만 충전이 이루어져서 캐비티 끝의 중앙은 미성형이 발생하게 된다. 실험 조건 3(670°C, 9 bar)으로 제작된 샘플의 뒷면을 보면 Fig. 8의 Air entrapment 결과와 동일하게 게이트에서 캐비티 중앙까지 난류

Fig. 14. The thickness of thin plate fabricated by condition 5 (unit: mm).

상태에 의한 용탕의 흐름 상태를 확인할 수 있다.

용탕 온도를 615°C, 가스압을 12 bar, 전자교반력을 적용(실험 조건 4)하여 제작한 샘플은 캐비티 끝부분에서 미성형된 부분이 있다. 가스압을 15 bar로 증가시켜 제작한 샘플은 미성형된 곳 없이 캐비티 부분이 완전히 충전되었다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 게이트와 캐비티가 접하는 부분에서 포집된 공기로 인한 표면 상태가 좋지 않다. 또한, 시뮬레이션 결과에서 진공 감압에 의하여 게이트 중앙부분에서부터 용탕의 높은 속도층이 형성되는 것을 볼 수 있듯이 게이트 입구에서 중앙 오버플로우까지 탕무니 자국이 형성되었다.

전자교반을 적용한 진공 저압주조 공법으로 두께가 1 mm의 레오로지 박판을 용탕 온도 615°C, 진공도 60 mmHg 및 가스압 15 bar 조건으로 제작할 수 있었다.

성형 되어진 샘플의 조직 측정을 위한 위치 및 각 부분의 두께를 Fig. 14에 나타내었다. 각 부분의 두께 측정치는 크게 차이가 없었으며, 박판의 끝단부인 A₃, B₃ 지점이 다소 낮게 나옴을 확인 할 수 있었다. 위치별 박판의 평균 두께는 1.046 mm이다.

금형 내 캐비티의 높이설계는 다양한 샘플의두께 실험을 위해 높이가 다른 Mold판을 이용하여 탈부착이 가능한 형태의 금형을 설계 하였다. 하지만 Mold판의 설치에 1 mm의 정확한 캐비티 높이 설정은 한계가 있었다. 이로 인하여 1 mm이상의 샘플 두께가 측정 되었음을 확인 할 수 있었다.

조직 관찰은 용탕 유동 방향과 수직방향인 박판의 단면부를 선정하여 수행하였으며, 중심부와 외곽부 그리고 인렛부분과 박판의 중심부, 끝단부로 나누어 소재의 특성을 파악하였다.

Fig. 15의 조직사진 결과는 각 부분에서의 구상화된 조직사진을 얻지 못하였다. 레오로지 소재가 캐비티를 충전하여 박판이 성형된 후 시험편을 취출하는 동안 박판은 이미 상온 상태로 온도가 떨어지기 때문에 최종 성형 시의 조직은 얻지 못하였다. 조직 사진 결과 끝단부의 미성형 및 슬리브 내의 응고 방지를 위하여 가스압을 높게 성형할 수 밖에 없어서 슬리브 내에서

Fig. 15. The microstructures of thin plate at different positions.

Fig. 16. Hardness of thin plate at different positions.

의 전자교반의 효과는 크지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 16에 각 부위의 비커스 경도값을 나타내었다. 박판의 중심부분(A₁, A₂, A₃)이 외각부(B₁, B₂, B₃) 보다 다소 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 중심부분의 평균 경도값 71.6 HV이며, 외각부는 81.9 HV이다. 박판의 끝단부(A₃, B₃)가 용탕의 투입부(A₁, B₁)보다 경도값이 16.3 HV 높음을 알 수 있다.

이는 외각 부분이 먼저 응고 되고 지속적인 유입을 받기 때문이라 생각되며, 앞부분과 중심부는 시뮬레이션 결과에서처럼 결함으로 인하여 경도 값이 낮은 것으로 생각된다.

5. 결 론

금형의 진공도와 가스압을 이용한 전자교반이 적용된 진공 저압주조식 레오로지 박판 제조 공정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1) 전자교반 실험을 통하여 저압주조기의 슬리브에 적용되는 최적의 교반전류값이 100 A를 도출하였다. 교반전류가 100 A이면 텐드라이트 조직들이 파쇄된 조직이 형성된다.

2) 진공 저압주조 방식을 이용하여 전자교반기의 장착이 가능한 레오로지 성형용 실험 장비를 설계 및 제작하였고, 가스압과 진공압을 이용하여 100 × 130 mm (가로 × 세로), 두께 1 mm 인 알루미늄 박판을 제작하였다.

3) 시편의 중심부분이 외각부 보다 다소 낮은 비커스 경도값을 가짐을 알 수 있고, 끝단부가 용탕의 투입부 보다 경도값이 높음을 알 수 있다. 평균 경도값은 77 HV 였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2011-0000306), 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20104010100540).

참고문헌

- [1] L. Xianquo and S. Imran, 2004, "Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-field Designs", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 359-371
- [2] M. C. Flemings, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metallurgical and Materials Transactions B, 22B (1991) 269-293
- [3] A. Ohno, T. Motegi, "Solidification: The separation Theory and its Practical, Applications", International Cast Metals Journal, 3 (1977) 28
- [4] E. J. Zoqui, M. Paes, E. Es-Sadiqi, "Macro- and Microstructure Analysis of SSM A356 Produced by Electromagnetic Stirring", Journal of Materials Processing Technology, 120 (2002) 365~373
- [5] K. D. Jung, C. G. Kang, "The Effects of Fabrication Conditions on Forging Limitation and Mechanical Property in Semi-Solid Forging Process", Transactions of Materials Processing, 10(3) (2001) 214-222
- [6] C. G. Kang, Y. C. Lee, "Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixoforming Process of Semi-Solid Aluminium Alloys", Transactions of Materials Processing, 8(3) (1999) 188-199
- [7] J. K. Lee, C. S. Park, M. H. Kim, "Effects of the Mold Temperatures on the Microstructure and Mechanical properties of Low Pressure Die-Cast Product", Journal of the Korean Foundrymen's Society, 18(3) (1998) 254-261