 논문

Slope plate 공법을 이용한 반응고 박판 및 제조 장치 개발

구자윤 · 배정운 · 진철규 · 강충길^{*†}

부산대학교 대학원 정밀가공시스템공학과, *부산대학교 기계공학부

Fabrication of Thin Plate of Semisolid Material using Slope Plate Process and Development of Fabrication Apparatus

Koo-Ja Yoon, 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, semi-solid thin plate of A 356 aluminum alloy was fabricated by using slope plate apparatus and vacuum pressurization. Slope plate was used to produce semi-solid material with spheroidal microstructures. After molten metal was poured into the slope plate connected to the pouring hole of die, semi-solid material flowed into the die cavity by vacuum degree. The primary crystals of the cast metal became spheroidal. In order to increase the working pressure, gas pressurization of U shape was designed for fabrication of thin plate. For 3 bar of gas pressure and 60 mmHg of vacuum degree, thin plate was fabricated without defects on surface.

Key words: Slope plate, Vacuum pressurization, Bipolar plate, Semi-solid, A356 alloy.

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

1. 서 론

1970년대의 오일쇼크 이후 세계적으로 에너지 효율화 및 절약이 추진되어 왔지만, 소비는 일관되게 증가하고 있어 에너지의 안정 확보는 세계 각국의 큰 과제로 대두되어 있다[1].

화석연료의 경우 심각한 공해물질을 배출함으로써 지구 온난화 및 환경오염의 직접적인 원인이 되고 있다. 기존의 화석연료를 대체하기 위한 새로운 재생 에너지 기술이 필요한 실정이다. 현재, 화석연료를 대체하는 방안으로 연료전지 분야에 집중적인 연구가 진행 중이다. 연료전지 시스템은 기존의 에너지 변환방식에 비하여 고출력, 무공해, 무소음의 열병합 발전 시스템이며, 연료로 천연가스, 나프타, 메탄올 등의 다양한 연료를 사용할 수 있다는 점에서 중요성이 커지고 있다[2,3].

연료전지 시스템 중 고분자 연료전지(Proton exchange membrane fuel cell)는 고 출력밀도 등 여러 가지 장점이 있다. PEM fuel cell의 상용화 측면에서 가장 핵심적인 구성요소들

중 하나인 분리판(Bipolar plate)의 국산화 개발을 통해 원천 기술을 확보하여 연료전지 보급을 촉진시켜야 한다.

분리판에 요구되는 특성은 얇고 (두께 1 mm 이하) 가벼워야 하며, 연료전지 스택에 적층시 압축력에 견딜수 있는 내구성 및 기계적 강도가 필요하다. 제작 조건으로는 반응가스를 전달하는 채널을 정밀하게 가공할 수 있는 대량생산체제 및 저가의 공정이 요구된다. 금속 분리판은 흑연과 탄소복합체 분리판 보다 가격, 생산성, 전기전도성 등 여러 장점이 있다. 분리판을 알루미늄으로 생산하였을 경우 두께 0.2 mm 분리판 1장 무게는 약 30 g 이며 이를 880장 적층하여 연료전지 스택으로 사용하여도 약 27 kg로 무게를 약 3배가량 줄일 수 있다.

알루미늄 분리판을 제조하기 위해서 적용될 수 있는 공법으로 단조와 주조 공정이 있다. 주조 공정은 환경오염과 부품의 기계적 성질의 저하 등을 유발하고, 단조 공정은 최종부품을 생산하기까지 공정횟수의 증가, Net Shape 성형 한계성 및 금형 수명 단축 때문에 생산원가 상승을 유발할 뿐 아니라 환경

[†]Corresponding author: Chung-Gil Kang

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

친화형 생산이 불가능하다.

주조와 단조 공정의 문제점을 극복하기 위한 새로운 공정기술로써 반응고 제조기술이 있다. 반응고 가공법은 재료를 액상선과 고상선사이의 온도로 유지하면서 강한 교반을 가하여 구상화 조직상태를 갖는 슬러리를 제조하여 성형하는 방식이다. 반응고 슬러리 제조방식으로 기계식 교반(Mechanical stirring) [4], 전자식 교반(Electromagnetic stirring) [5], 입자미세화제 첨가 방법(Chemical grain refining) [6], 경사판(Cooling slope plate) 공법 등이 있다.

이러한 공법들 중 경사판 공법은 일본의 Motegi [7] 교수에서 연구가 시작되어 Haga [8] 교수로부터 많은 연구가 진행되었다. 경사판은 제작 및 운영비용이 매우 저렴하며, 경사판을 흘러 내린 용탕은 결정립이 제어된 구상화 조직을 갖는 반응고 슬러리 상태가 되는 원리이다.

본 연구에서는 이상에서 언급한 경사판을 이용한 반응고 소재로 연료전지의 분리판 기술에 적용될 수 있는 박판을 제조하였다. 또한, 박판 제조를 위한 U자형 진공 가스가압 장치를 개발하여 연료전지 분리판의 기반이 되는 두께가 1 mm인 박판을 대량으로 생산할 수 있는 원천기술의 기반을 확립하였다.

2. Slope plate를 이용한 박판 성형 실험

2.1 이론적 배경

경사판(Slope Plate)을 이용하는 방법은 결정유리설의 이론을 바탕으로 한다. 결정 유리설은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주벽상에 핵생성한 결정이 용질의 편석에 의해 근원의 성장이 억제되고 안정한 응고각이 형성되기 이전의 단계에서 유리를 한다는 것이다. 즉, 급속의 응고가 주상정대가 먼저 생성되고 등축정대가 생성된다는 기존의 이론보다는 주벽의 중앙의 등축정대를 형성하는 결정이 먼저 생성된 후에 외부에 주상정대가 생긴다는 이론이다. 용탕중에서의 결정의 핵생성과 응고각을 만드는 수지상정의 가지의 용단유리가 등축정대의 주 생성원인이라 할 수 있다. 주벽상에 생성한 결정은 결정의 근원부가 잘록

Fig. 1. Schematic of the separation of equiaxed crystal at the mold wall.

해지고 머리쪽이 성장하면서 유리한다. 그 유리한 후에 또 바로 다음의 결정이 핵생성하고 같은 모양으로 성장하여 유리한다. 이러한 방법으로 결정의 생성유리가 연속적으로 일어나고 곧 온도가 저하되면 주벽면에서는 수지상정으로부터 이루어진 안정한 응고각이 형성된다. 주벽으로부터 등축정이 유리되고, 안정된 응고각이 형성되는, 즉 주상정대가 형성되는 것이다[10].

이러한 이론을 바탕으로 경사진 냉각판을 이용한 Seed Pouring[9]법이라는 것이 만들어졌다. 용탕이 흐르는 판을 차갑게 해두고, 그 위를 용탕이 흘러내리는 동안에 원하는 온도까지 냉각하는 방법인 것이다. 경사판의 표면이 결정을 유리되기 쉽게 처리하여 미세한 조직을 얻을 수 있다는 것이다.

2.2 Slope plate 제작

결정 유리설을 바탕으로 설계된 경사판을 Fig. 2에 나타내었다. 용탕의 흐름을 원활히 하기 위하여 용탕 출구 부분으로 갈수록 좁아지도록 설계하였으며, 전체 경사판의 길이는 500 mm로 제작되었다. Fig. 2에서 보이듯 경사판은 기구학적으로 설계되어 경사판의 각도를 변경할 수 있도록 하였으며, 향후 박판 성형장치에 사용할 수 있도록 높이 조절이 가능하게 제작하였다. 경사판 표면부(용탕의 유동부)에 BN을 도포하지 않은 경우 경사판 위 소재의 냉각속도가 빨라져 경사판 하부에 응고셀이 형성되고, 소재는 용탕의 점성 때문에 이동이 어려워 용탕이 굳어버리는 경우가 발생한다. 따라서 경사판 표면부에 BN이형체를 코팅하여 사용하였다. 경사판은 용탕이 넘치지 않도록 벽면부를 세웠으며, 원하는 경사판의 기울기에서 고정시킬 수 있도록 볼트를 사용하였다.

2.3 Slope plate 반응고 소재 제조

Slope plate를 이용하여 반응고 소재를 제조하였다. 실험에 사용된 소재는 A356이다. A356 합금의 성분 분석표를 Table 1에 도표하였다.

용탕주입온도 즉, 초기 용탕의 온도는 700°C로 일정하게 유

Fig. 2. Photograph of slope plate device.

Table 1. Chemical composition of A356 alloy after composition analysis.

Si	Mg	Ti	Fe	Ni	Mn	Zn	Pb	Al
7.08	0.35	0.17	0.08	0.07	0.01	0.01	0.01	Bal.

지한 상태에서 냉각판과 용탕의 경사 길이를 200 mm로 일정하게 하고 경사판의 각도의 변화에 따른 반응고 소재를 제작하였다. 경사판의 각도는 10°, 20°, 30°로 변경하며 실험을 실시하였다.

경사판을 통해 제조된 반응고 소재는 용탕 출구부분에 소재 용기를 받쳐 제조된 소재를 바로 quenching한 후 조직사진을 관찰하였다. 조직 부위는 소재의 중심부분을 절단하여 관찰하였다. 실제 성형 공정에서는 slope plate를 통과한 소재가 바로 용탕주입부를 통하여 금형의 캐비티로 유동이 될 것이므로, 용기 벽면부의 조직은 조사하지 않고 중심부의 조직사진만을 조사하였다.

Fig. 3에 각각의 경사각에 따른 조직사진을 나타내었다. 제조된 소재의 미세조직은 전체적으로 다소 구형의 형상을 가지나 전자기반의 결정립 제어에 의하여 현저히 떨어지는 효과를 보인다. 하지만 간단히 제작할 수 있는 경사판과 반응고 소재 제작 방법이 쉽고, 소재 제조 시간이 적어 반응고 소재를 연속적으로 제조할 수도 있는 등 다양한 장점 또한 가지고 있다.

경사판의 각도의 변화에 따라 조직변화를 관찰한 결과 냉각판의 경사각이 클수록 초정입자들이 커짐을 확인 할 수 있었다. 이는 경사판의 각도가 작을수록 용탕이 경사판에서 흘러내리는 속도가 늦기 때문에 경사판에 의한 냉각효과가 크기 때문이라 생각된다. 경사판 각도가 커질수록 용탕과 경사판의 접촉시간이 적으므로 냉각효과가 적어 초정의 조대화가 일어났다고 생각된다. 경사판이 10° 일 경우는 용탕이 경사판에 있는 시간이 높음에 비해 고상율이 다른 조건에 비해 크게 차이가 나지 않는 것은, 경사판의 냉각효과가 커서 초정의 성장시간이 충분하지 못했을 것이라 생각할 수 있다. 또한 경사판의 각도가 30° 일 경우 대부분의 수지상정 조직이 파괴되어 구상화된

Fig. 3. Microstructures according to the angle of slope plate: (a) 10°, (b) 20°, (c) 30°.

Fig. 4. Microstructures of 30 degree angle of slope plate.

레오로지 소재를 확인 할 수 있었다.

Fig. 4는 경사판의 각도가 30° 일때 고배율 조직사진을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 Si 입자들이 부분적으로 제어되어 침엽수 형상이 많이 사라진 것을 확인할 수 있다. Si 입자 부분에서는 경사판 각도가 크게 차이가 없으며, 냉각속도와 전단력에 의하여 일정이상의 조건에서는 Si 입자들이 제어됨을 확인 할 수 있다.

2.4 Slope plate를 이용한 박판 제조 실험 장치 및 방법

경사판을 이용한 알루미늄 박판 제조 실험 장치의 전체적인 개략도는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 알루미늄 박판 제조 두께는 1 mm이며, 박막제조를 위하여 진공시스템을 이용하여 금형 내부의 가스를 뽑아 낼 수 있도록 설계하였다. 유압실린더는 금형의 상, 하부를 분리시켜 주는 역할뿐만 아니라 금형

Fig. 5. Schematic of vacuum pressurization apparatus with slope plate for fabrication of thin plate.

Fig. 6. Schematic of thin plate mold: (a) top view of lower mold, (b) mold assembly.

Fig. 7. Photograph of thin plate mold: (a) upper mold, (b) lower mold.

사이의 틈새를 통하여 공기가 유입되지 않도록 가압하는 역할도 한다.

금형부는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상부금형과 하부금형으로 나뉘어져 있으며 각각 카트리지 히터를 통하여 온도제어가 가능하게 설계하였고, 상부금형과 하부금형은 독립적으로 온도를 제어할 수 있다.

금형부는 진공펌프를 통하여 진공도를 유지할 수 있도록 설계하였으며, 열손실을 줄이기 위해 단열판을 전체적으로 장착하였다. 또한 금형 내부를 진공상태로 유지할 수 있도록 제작함으로써 박판 성형 시 생길 수 있는 기공발생을 예방하고, 소재의 유입을 원활히 하여 우수한 성형품을 얻을 수 있도록 제작하였다. 캐스트부 차단박스는 성형 시 주입된 소재가 진공밸

Fig. 9. Photograph of thin plate apparatus using by slope plate.

브에 빨리 들어가지 않게 하기 위해 소재를 걸러주는 역할을 하는 지그재그 형상으로 설계하였다.

박판 성형 시 금형의 온도가 낮게 되면 성형이 완료되기 전에 캐비티 안에서 반응고 소재가 응고 될 수 있다. 따라서 최대 500°C 까지 온도 제어가 가능하도록 제작하였으며, 금형의 전면을 단열판을 이용하여 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 또한 금형을 가열하는 카트리지 히터부는 직경 16 mm, 상부 10개, 하부 9개로 금형의 전부분을 신속하고, 일정한 온도로 가열할 수 있도록 직경 설계하였다.

몰드와 파이프부가 연결되는 런너(Runner)부위는 금형 내부에 진공실링을 제작하여 진공도를 유지할 수 있도록 하였다.

Fig. 7에는 실제로 제작된 금형의 모습을 보여주고 있다. 금형의 표면에는 알루미늄 소착을 방지하기 위하여 이형제를 금형 표면에 바른 모습이다.

Fig. 8에 경사판을 이용한 박판 성형 공정의 개략도를 나타내었다. 경사판에 부어진 용탕은 경사판을 흘러가며 반응고 상태의 소재로 제조되며, 이 반응고 소재가 바로 금형 상판부의 용탕 주입구로 주입되고, 진공에 의하여 금형 캐비티 내로 흘러 들어가게 된다. 용탕 주입구에는 깔대기를 제작하여 경사판을 흘러내린 반응고 소재가 금형의 상판부에 주입되기 용이하게 하였으며, 깔대기에는 단열재를 도포하여 깔대기 통과시 소재의 온도가 급격하게 떨어지는 것을 방지하였다.

Fig. 8. Schematic of thin sheet forming process with slope plate: (a) pouring semi-solid Al alloys, (b) forming using by vacuum pump system, (c) extracting the sheet.

Table 2. Experimental conditions for manufacturing thin plate with vacuum system.

No	Vacuum level (mmHg)	Mold Temperature (°C)
1	760	300
2	760	400
3	760	500
4	460	300
5	460	400
6	460	500
7	260	300
8	260	400
9	260	500
10	60	300
11	60	400
12	60	500

Fig. 9(a)는 유압실린더와 금형 및 베이스의 모습고, Fig. 9(b)는 경사판을 이용하여 금형 상단부에 반응고 소재를 주입하는 모습을 나타내었다.

상, 하부 금형은 소재의 응고에 따른 미성형을 방지하기 위해 예열하여 금형온도를 올린 상태에서 성형된다. 또한, 반응고 소재가 금형부에 주입되기 전 이미 작동되어진 진공 시스템에 의해 금형내의 공기를 빨아들여 진공상태를 유지시킨다. 성형 시에도 진공펌프는 계속 작동되며, 금형 내 반응고 소재의 유동이 원활하게 하였다. 성형이 끝나면 유압실린더를 작동시켜 상부 금형을 들어 올린 후 제작된 알루미늄 박판을 취출하게 된다.

본 연구에서 제작하고자 하는 박판의 크기는 가로 및 세로가 130×100 mm이며, 두께 1 mm 인 알루미늄 박판이다. 슬리브의 직경은 36 mm이며, 게이트 부의 직경은 25 mm 로 설계되었다.

박판 성형 실험 시 고려되어진 성형 변수로는 금형의 온도와 진공도이다. 성형 시 용탕 주입부에 반응고 소재를 바로 주입하면서 성형하는 성형 공정을 채택하였으므로 금형 내부가 진공이 되지는 않는다. 하지만 진공시스템에서의 진공도의 셋팅은 진공펌프를 통하여 빨아들이는 힘이 달라지므로 이를 변수로 채택하여 실험하였다. 경사판 반응고 소재 제조 조건은 경사판 앞 절에서 설명한 바와 같이 경사판 각도를 30° 로 유지한 상태로 실험하였다.

성형 실험에 사용된 실험 조건은 Table 2에서 확인할 수 있다. 진공도는 760 mmHg 부터 시작하여 60 mmHg까지 실험하였으며, 금형의 온도는 300°C 부터 500°C 까지를 반응고 소재 제조 변수로 실험하였다.

3. U자형 진공 가스가압 장치의 박판 성형 실험방법

소재에 가하는 압력을 높여주기 위하여 진공시스템에 가스가

Fig. 10. Schematic and photograph of U shape equipment for manufacturing the thin-plate with gas injection and vacuum system.

압 방식을 이용하여 알루미늄 박판을 성형하였다. Slope plate 박판 성형실험을 통하여 새롭게 설계된 장치의 개략도를 Fig. 10(a)에 나타내었다.

가스 가압시스템에서 가압되는 가스는 수분 함유율이 높고 용탕과의 반응성이 있는 질소가스 보다는 불활성 가스인 아르곤을 이용하여 실험하였고, 용탕 주입 후 진공상태를 만들 수 있도록 용탕 주입부에 밸브를 장착하였다. 또한 반응고 소재는 상부금형에 바로 주입되는 것이 아니라 가스압을 이용하여 U자형상의 게이트부를 통하여 하부금형에 이송되도록 설계하였다. 반응고 소재가 금형 캐비티에 주입되기 전 응고되는 것을 방지하기 위해 U자형상의 관부분을 감싸는 로(가로×세로×폭 = $520 \times 290 \times 100$ mm)를 제작하여 카트리지 히터로 800°C 까지 가열 가능하도록 제작하였다.

로의 사이즈는 캐비티 부의 사이즈가 작아 충전되는 소재의 양이 작다. 따라서 파이프 관의 직경 및 게이트 부 직경은 25 mm 로 설계하여 제작하였다. 파이프 관의 길이가 길어지거나 직경이 크게 되면 성형 후 금형에 충전되지 못하고 다시 U자형 관으로 유입되는 잔탕이 남을 수 있고, 이 잔탕이 U자형 파이프와 하부금형의 연결부에 소착이 되거나 응고가 되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 게이트부와 캐스트부를 채울 수 있는 정량을 계산하여 U자형 관 사이즈를 선택하였다. Fig. 10(b)에 가스가압 및 진공시스템을 통한 박판 성형을 위하여 제작된 장치의 사진을 표시하였다.

U자형 진공 가스 가압 장치의 성형 공정을 Fig. 11에 나타내었다. U자형 박판성형 장치의 성형공정은 slope plate 박판 제조 공정과 비슷하나 성형 시 소재를 주입한 후 밸브를 잠그고 파이프 내부와 금형내부를 진공상태로 만들 수 있도록 밀폐하는 것과 진공펌프로 공기를 빼냄과 동시에 가스를 가압하여 성형한다는 점에 다소 차이가 있다.

Slope plate 박판 제조 공정의 실험결과를 바탕으로 U자형 박판성형 장치의 진공도를 60 mmHg로 유지하며 가스 가압을 실시하였으며, 금형의 온도는 소재와의 소착을 고려하여 400°C

Fig. 11. Schematic of thin sheet forming process: (a) pouring molten Al alloys, (b) forming using by gas injection and vacuum pump, (c) extracting the sheet.

로 설정하여 성형을 수행하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 Slope plate를 이용한 박판 제조 결과

Fig. 12에 Table 2 조건에 따른 실험 후 성형된 시제품의 형상을 정리하였다. 금형내를 진공상태로 만들지 않고, 온도만 가열하여 금형내 공기를 연속적으로 빼내는 것으로는 완벽한 박판을 제조할 수는 없었다. 또한 금형부에 진공 시스템 없이 용탕을 주입하면 중력만으로 박판 성형을 위한 유동을 만들어 낼 수 없음을 확인할 수 있었다. 금형내의 진공도를 60 mmHg 이하의 조건으로 공기를 흡입하면 반응고 소재가 캐비티를 채울 수 있는 유동을 야기하기는 힘들다는 것을 알 수 있었다. 이는 용탕 상태보다 반응고 소재의 높은 점도 때문이라고 사료된다. 또한 충분한 가압력 없이 박판 끝단부에 부분적으로

미성형이 생길 수 있으며, 제품의 두께가 얇으므로 금형 캐비티를 채우기 전에 응고가 됨을 확인할 수 있었다.

금형의 온도에 대한 시제품의 형상은 반응고 소재의 온도가 액상선 온도보다 높지 않기 때문에 박판 성형 시 주요 인자로 작용함을 확인할 수 있었다. 반면 금형의 온도를 높이면 냉각속도에 따른 조직의 영향 및 알루미늄 소재의 소착, 박판 사이즈가 커질 경우 금형의 거대화 현상에 따른 금형의 가열 방법 등을 고려해 볼 때, 일정한 금형 온도 이상에서는 충분한 가압력으로 성형속도를 높이고, 소재가 완전히 응고되기 전 소재에 높은 압력을 가할수록 효과적일 것으로 생각된다.

4.2 U자형 진공 가스가압 장치의 박판 제조 결과

가스 가압력이 3 bar 이상 진공도가 60 mmHg일 경우 Fig. 13에서 보이는 바와 같이 레오로지 박판 성형품을 얻을 수 있었다. 금형내를 진공상태로 만들지 않고 성형했을 때 와 비교

Fig. 12. Photographs of thin plate fabricated by different mold temperatures and vacuum levels.

Fig. 13. Photograph of thin plate fabricated by gas pressure and vacuum system.

Fig. 14. Image magnified by a factor of 40 (a) Cross section to filling direction, (b) Surface.

Fig. 15. Microstructures of thin plate fabricated by gas pressure and vacuum system.

했을 때 소재가 캐비티를 충전하여 130 mm × 100 mm × 1 mm 크기의 박판을 성형할 수 있었다.

Fig. 14는 박판의 단면과 표면의 상태를 나타낸 것이다. 단면 측정은 시편을 절단하여 폴리싱 작업 후 디지털현미경을 이용하여 측정하였다(40배). 위 사진에서 확인할 수 있듯이 기공 같은 결함은 나타나지 않았다.

Fig. 15는 샘플의 조직사진을 나타낸 것이다.

용탕이 경사판을 흘러내리면서 대부분의 수지상정 조직이 파괴되어 초정 α 상이 구상화 되었고, 조직이 미세화 됨을 확인할 수 있었다.

이는 진공 시스템에 의해서만 성형한 경우보다 양호한 성형 결과를 얻을 수 있었으나, 파이프 관 부분의 소착 문제와 금형의 런너부, 슬리브의 연결부분의 응고 문제, 파이프 관의 잔류

용탕 등의 문제점들이 야기되었다. 본 실험은 가스 가압력과 진공 시스템을 이용한 성형 공정의 가능성을 테스트 함으로써 알루미늄 박판을 제조하기 위한 가스가압 장치의 실험 Database를 확립하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 Slope plate 장치에 U자형 진공 가스가압장치를 개발하여 레오로지 소재의 박판을 제조하였다. 반응고 박판 제조 공정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 금형에 용탕을 주입하여 중력만으로는 박판 성형을 위한 유동을 만들어 낼 수 없다.
- 2) 금형의 진공도가 60 mmHg 이하 이면 금형부의 공기를 흡입하여도 반응고 소재가 캐비티를 채울 수 없다는 것을 알 수 있다.
- 3) 금형의 온도를 높이면 냉각속도에 따른 조직의 영향 및 알루미늄 소재의 소착이 발생할 가능성이 높다. 일정한 금형 온도 이상에서는 충분한 가압력을 통하여 성형속도를 높이는 것이 더욱 효과적이다.
- 4) U자형 박판성형 시 금형 온도는 400°C, 진공도를 60 mmHg로 유지하며 가스 가압 3 bar 이상으로 가압해야 한다.
- (5) 실험장치에 U자형 가스가압 장치를 추가함으로써 130 mm × 100 mm × 1 mm 크기의 박판을 성형할 수 있었다.

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] K. Jayakumar, S. Pandiyan and N. Rajalakshmi, 2006, "Cost-Benefit Analysis of Commercial Bipolar Plates for PEMFC's", Journal of Power Sources, Vol. 161, pp. 454-459
- [3] E. Middelma, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen and E. de Waal, 2003, "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells", Journal of Power Sources, Vol. 118, pp. 44-46
- [4] M. C. Flemings, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metallurgical and Materials Transactions B, 22B (1991) 269-293
- [5] 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

-
- [6] S. Nafisi, R. Ghomashchi, "Effects of modification during conventional and semi-solid metal processing of A356 Al-Si alloy", MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A, 415 (2006) 373-285
- [7] A. Ohno, T. Motegi, "Solidification: The separation Theory and its Practical, Applications", International Cast Metals Journal 3 (1977) 28
- [8] T. Haga, P. Kapranos., "Simple rheocasting processes", Journal of Material Processing Technology, 130-131 (2002) 594-598
- [9] Y. Birol, 2007, "A357 Thixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 186, pp. 94-101