논문

진공 다이캐스팅 공법의 사출조건에 따른 연료전지용 분리판 성형 해석 및 제조 공정

진철규 · 장창현 · 김재성 * · 최재원 ** · 강충길 ***†

부산대학교 대학원 정밀가공시스템공학과, *CAST TECH, **NSC, ***부산대학교 기계공학부

Fabrication Process and Forming Analysis of Fuel Cell Bipolar Plate by Injection Condition of Vacuum Die Casting

Chul-Kyu Jin, Chang-Hyun Jang, Jae-Sung Kim*, Jae-Won Choi** and Chung-Gil Kang***†

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

*CAST TECH Co., Ltd, Busan 612-030, Korea

**NSC Ind. Co., Ltd, Changwon 645-840, Korea

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

Abstract

The vacuum die casting is a promising candidate of the stamping process for fabrication of fuel cell bipolar plate due to its advantages, such as precision casting, mass production and short production time. This study proposes vacuum die casting process to fabricate bipolar plates in fuel cell. Bipolar plates were fabricated under various injection conditions such as molten metal temperature and injection velocity. Also, according to injection velocity conditions, simulation results of MAGMA soft were compared to the experimental results. In case of melt temperature 650°C, misrun occurred. When the melt temperature was 730°C, mechanical properties were low due to dendrite microstructure. Injection velocity has to set at more than 2.0 m/s to fabricate the sound sample. When melt temperature, injection velocity (Fast shot), and vacuum pressure are 700°C, 2.5 m/s and 30 kPa respectively, sample had good formability and few casting defects. Simulation results are mostly in agreement with experimental results.

Key words : Vacuum die casting, Injection condition, 3D casting simulation, Bipolar plate, Silafont-36 alloy.

(Received August 24, 2011 ; Accepted September 20, 2011)

1. 서 론

연료전지는 전기분해(물을 전기분해 하면 수소와 산소 발생)를 역으로 이용하는 원리로서 연료인 수소(H_2)를 양극(Anode)에 공급하고 공기 중의 산소(O_2)를 음극(Cathode)에 공급하여 전기화학적으로 결합시켜 연속적으로 전기와 물을 발생시킨다.

연료전지 스택은 여러 개의 단위전지가 적층되어 구성된다. Polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFCs)의 단위전지 구성 부품을 Fig. 1에 나타내었다. 단위 전지의 구조는 화학반응에 필요한 가스를 채널을 통해 흐르게 하는 분리판(Bipolar plate)과 반응 가스를 밀봉하는 가스켓(Gasket) 그리고 화학반응을 통해 실제 전기가 만들어지는 전해질막 전극 집합체(Membrane electrode assembly)로 구성된다. 전해질막 전극 집합체는 다공성 촉매층(Catalyst layer)과, 전극(Electrode) 용 다공성 가스 확산층(Gas diffusion layer)으로 조립되어 있다[1].

연료전지 스택의 구성 부품 중 분리판은 화학반응에 필요한 가스를 채널을 통해 흐르게 하여 다공성 확산층으로 전달시키며, 단위 전지에서 발생하는 전하를 전지에 전달, 스택 내에서

화학반응으로 생성된 물과 열 제거, 반응물질 누수 방지, 그리고 구성요소들을 구조적으로 지지하는 중요한 역할을 한다. 현재, 차량용으로 사용되고 있는 PEMFC 스택의 경우, 400~500개의 분리판이 적층되어 사용되고 있으며, 분리판은 스택의 무게에는 약 60~80%를 제작비용에는 35~45%를 차지한다[2].

그러므로 연료전지의 성능과 비용을 고려할 때 분리판은 얇고(< 1 mm) 가벼워야 하며, 동일한 채널의 폭과 깊이로 제작할 수 있는 공정 및 대량생산 체제가 필요하다.

분리판 제작공법으로는 스탬핑(Stamping), 하이드로포밍(Hydroforming), 기계가공(Milling), 러버 패드 포밍(Rubber pad forming), 진공 다이캐스팅(Vacuum die-casting), 반용융 단조(Semi-solid forging) 등으로 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 금속 분리판의 기계가공 및 절단가공은 시간 및 비용면에 있어서 대량생산에 적합하지 않다. 스탬핑과 하이드로포밍 공법은 대량생산체제로서 많은 연구가 진행 중이며, 현재 실제 연료전지 스택에 사용되고 있다[3,4] 하지만, 탄성회복(Spring back) 및 크랙(Crack) 등에 의한 문제점으로 인해 미세 채널을 설계한 형상대로 정밀하게 성형할 수 없는 성형 한계성에 부딪히고 있으

†E-mail : cgkang@pusan.ac.kr

- ① Bipolar Plate with gas flow channel (anode)
- ② Bipolar Plate with gas flow channel (cathode)
- ③ Membrane Electrode Assembly

Fig. 1. Schematic of a polymer electrolyte fuel cell assembly.

며, 이는 연료전지의 성능이 감소되는 단점으로 작용되고 있다.

성형 한계성의 문제점을 해결할 수 있는 공법으로서 액상공정 (Liquid process)이 있다. 다이캐스팅은 금형 주조 공법으로서 복잡한 형상의 제품을 한번에 제작할 수 있으며, 대량생산 체제로서 생산성이 높아 제조 단가를 줄일 수 있는 공법이다. 하지만, 고속 사출로 인하여 금형 내에서 용탕이 난류로 유입되기 때문에 제품 내에 가스 함유량(20~30 cc / 100 gAl)이 높아 기공으로 인한 기계적 성질이 낮고 열처리 및 용접이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하는 진공 다이캐스팅은 금형 캐비티 내부를 진공상태로 유지하여 주조함으로써 제품 내 가스 함유량 (2~5 cc / 100 gAl)을 줄여 표면의 치밀성 및 기계적 성질을 향상시키며, 두께 2 mm 정도의 박판 제품을 생산할 수 있다[5,6]. 그러나 아직까지 연료전지 분리판의 제작 조건인 두께 1 mm 이하의 제품 제작에 대한 기술 및 연구가 미비하며, 소재 산업의 영역에서도 제한을 받고 있다.

그러므로 본 연구에서는 이전 연구[7]에서 사용된 금형 설계를 기반으로 하여 분리판 금형 설계를 수행하였다. 분리판 형태는 양쪽 면에 채널이 새겨져 있는 양면방식(Both side channel) 분리판이다. 양면방식 분리판은 연료전지로 사용되기 위한 필수 조건으로서, 한쪽에는 수소가 흐르고 반대쪽에는 산소가 흐를 수 있는 방식이다.

분리판의 면적에 해당하는 캐비티의 사이즈는 가로 및 세로가 각각 200 mm 이며, 두께는 0.8 mm 인 박판 형태이다. 채널의 폭과 깊이는 연료전지 최적의 성능을 고려하여 각각 1 mm와 0.3 mm로 설정하였다[8,9]. 그러므로 분리판 두께에 채널의 깊이를 포함한 전체 두께는 1.1 mm이다.

현재 스탬핑 공법에서 제작된 분리판은 용접공정을 거친 후에 두께가 대략 1 mm가 된다. 그러므로 이번에 디자인된 분리판은 현재 스탬핑 공법에서 제작된 분리판보다 두껍지만, 용접에 의한 후처리 공정을 줄일 수 있다. 특히, 균일한 채널 형상에 의한 높은 전류밀도를 생성할 수 있으므로 연료전지의 성능을

보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 성형 한계성의 문제점이 있는 스탬핑 공정을 대체하는 방안으로서 진공 다이캐스팅 공정으로 미세채널을 가진 박판제조의 가능성을 제안하고자 한다. 실험에 사용된 소재는 독일의 Aluminum Rheinfelden GmbH 사가 개발한 Silafont 36 (Al-Si-Mg-Mn) 으로서 주조성이 우수하고 부식에 강하며, 기계적 성질이 뛰어난 다이캐스팅 알루미늄 합금이다[10,11].

다이캐스팅 공법의 주요변수인 용탕 온도와 사출속도 조건에 대한 분리판의 성형성 및 기계적 성질의 영향력을 조사하기 위해 각각의 용탕 온도(650, 700, 730°C)에 따른 플런저(Plunger)의 스트로크(Stroke) 제어 조건(저속 및 고속구간의 속도 조건)을 변경하면서 실험을 실시하였다. 또한, 주조해석 프로그램 (MAGMA Soft)을 이용하여 사출 조건에 대한 변수값을 시뮬레이션에 적용함으로써 용탕의 충전 및 응고 해석에 대한 결과를 실제 진공 다이캐스팅의 실험 결과와 비교하였다.

성형성 및 기계적 성질에 대한 최적의 실험조건을 선정하였으며, 이 조건에서 제작된 샘플을 T5 및 T6 열처리를 시행하여 열처리전과 비교하였다.

2. 실험 조건

2.1 금형 설계

실험에서 사용된 3차원 금형도를 Fig. 2(a)와 (b)에 나타내었고, Fig. 2(c)는 제품부의 형상이다. 양면방식 분리판의 미세

Fig. 2. 3D die design: (a) ejector die (b) cover die (c) structure of product (d) expanded partial diagrams of front (dual channel for anode), (e) expanded partial diagrams of back (single channel for cathode) (unit: mm).

Fig. 3. A partial cross-section A-A of bipolar plate channel to filling direction (unit: mm).

채널 형상을 보여주고자 부분 확대도를 Fig. 2(d)와 (e)에 나타내었다. 분리판 앞면에 형성된 채널은 수소가 흐를 수 있는 듀얼 유로 채널(Dual flow channel)이며, 뒷면은 산소가 흐를 수 있는 싱글 유로 채널(Single flow channel)이다.

제품부에 해당하는 캐비티(Cavity) 사이즈는 가로 200 mm, 세로 200 mm, 두께 0.8 mm이며, 분리판의 활성면적에 해당하는 채널의 면적은 가로가 110 mm, 세로는 150 mm 이다. 분리판의 채널의 형상은 Serpentine flow 채널 형태이며, 채널의 부분 단면도(Section A-A)를 Fig. 3에 나타내었다. 채널의 폭과 깊이는 연료전지 최적의 성능을 고려하여 각각 1 mm와 0.3 mm로 설계하였다. 이로 인한 분리판의 전체 두께는 1.1 mm 이다. 용탕이 채널 부분을 지날 때 균일한 유동성을 확보하고, 사출 후에는 제품을 찢어짐 없이 금형에서부터 제거하고자 채널 폭에는 40도의 구배와 채널에서 리브(Rib) 부분으로 이어지는 모서리 부분에는 0.2 mm 라운드를 형성하였다.

오버플로우(Overflow)는 제품의 성형성 및 기계적 성질에 영향을 미치는 부분이다. 이전 연구[7]에서는 캐비티 벽면부의 급격한 용탕 속도로 인한 탕주름이 발생하였고, 캐비티 끝부분에서는 오버플로우로 빠져나가지 못한 응고된 용탕으로 인해 수축 결함과 크랙이 발생하였다. 그러므로 이번 연구에서는 금형 캐비티 내에서 동일한 속도의 유동을 확보하기 위해 캐비티 벽면부에 오버플로우를 추가하였다. 또한, 초기에 유입된 산화층을 제거하고 용탕의 흐름 개선을 통한 미성형(Misrun) 및 결함을 방지하기 위해서 캐비티 끝부분의 오버플로우를 추가 및 수정하였다(Fig. 2(c)). 오버플로우 끝 부분에 진공 블럭과 연결되는 진공 벤트(Vacuum vent)를 설정하여 난류 상태에 의한 용탕 내 가스 함량과 이물질을 제거하고자 한다.

사출 후에는 제품을 이젝터(Ejector)에 의해 찢어짐 없이 금형으로부터 제거하고자 캐비티 부분에 직경 25 mm 이젝터 홀 6개와 런너와 오버플로우 부분에 각각 직경 10 mm 홀 3개와 4개를 설계하였다.

2.2 실험 및 해석 절차

알루미늄 용탕 내에 잔재하는 공기포나 수소는 제품 결함의 원인이 되므로 사출 전에 용탕을 탈가스 처리하여 용탕을 안정화 시킨 다음, 용탕의 수소량을 측정하는 것이 중요하다. 사출 실험에 앞서 탈가스 처리인 GBF(Gas bubbling filtration) 실시하여 용탕 내에 잔재하는 수소 및 이물질 함량을 제거하였으며, GBF가 끝난 후 감압응고시험(Reduced pressure test)을 시행하여 Density index를 확인하였다.

Fig. 4. (a) GBF, (b) buhler die casting machine.

Table 1. Chemical composition of Silafont 36 alloy after component analysis (wt. %).

Si	Mn	Mg	Ga	Fe	Ti	Zn	Cu	Cr	Ca	Al
9.91	0.662	0.372	0.011	0.07	0.07	0.002	0.001	0.001	0.0005	Bal

Density index가 1% 이상일 경우 GBF를 재 실시하며, 1% 이하일 때는 사출 실험을 시작하는 것으로, 본 실험에서는 Density index(Test pressure: 350 mbar)가 0.8%로 확인되었다.

Fig. 4(a)는 용탕을 탈가스 처리하는 GBF 과정을 보여주며, Fig. 4(b)는 실험에 사용된 Buhler 660 ton 콜드 챔버 다이캐스팅 머신을 나타낸다. 사출 슬리브(Shot sleeve)의 길이는 470 mm이며, 플런저의 직경은 75 mm 이다. 진공 시스템은 진공 펌프, 진공 탱크, 진공 밸브로 구성되어 있다.

실험에 사용된 Silafont 36 소재는 Fe 성분을 0.13% 이하로 줄이고, Mn을 첨가하여 금형의 소착을 방지시키며, Mg의 함량에 따라 기계적 성질(고연성)을 증가시킬 수 있는 다이캐스팅 합금이다. 또한, 주조성 및 내식성이 우수하고, 용접성과 가공성이 좋다. 이러한 장점으로 인해 수소산업의 구조용 및 안전 부품에 사용되고 있다[12]. 본 실험에서는 Silafont 36 소재의 우수한 주조성과 내식성이 분리판 성형 및 사용조건에 적합할 것으로 판단하여 실험에 사용하였다.

감압응고 시험 후, 용탕의 성분 분석이 완료된 Silafont 36의 합금 성분을 Table 1에 표시하였다.

저속 및 고속구간의 속도에 따른 사출 슬리브 시스템의 진공 다이캐스팅 공정도를 Fig. 5 나타내었다. 용탕이 사출 슬리브의 용탕 주입구로 부어지면 진공 펌프가 작동을 한다. 플런저는 저속(V_1)으로 움직이면서 용탕 주입구를 지나게 된다. 이때 진공펌프는 300 mbar의 압력으로 금형 캐비티를 감압하여 진공 상태로 유지시킨다(Fig. 5(a)). 플런저는 V_1 의 속도로 움직이면서 슬리브의 405 mm 지점(저속구간의 끝)으로 이동하며(Fig. 5(b)), 저속구간을 지나 고속구간에서는 고속(V_2)으로 470 mm까지 플런저가 이동하면서 500 bar의 압력으로 캐비티를 가압한다. 이때 용탕이 캐비티 내에 응고되어 제품이 형성된다(Fig. 5(c)). 금형을 열어 이젝터를 작동시켜 제품을 취출한 후에는(Fig. 5(d)), 제품의 조직상태에 의한 기계적 성질 확보를 위해 물에 곧바로 냉각(Water quenching)을 한다.

진공펌프가 작동하는 동안 금형의 캐비티 내에서는 대기압보다 낮은 진공압이 생성되면서 사출 시에 용탕에 잔재하는 가스

Fig. 5. Schematic diagram of a vacuum die casting process: (a) pouring melt, (b) slow shot (V_1), (c) fast shot (V_2), (d) ejecting.

Table 2. Process parameters of vacuum die casting.

	Material	Silafont 36
Melt	Liquidus temperature (T_L)	590°C
	Solidus temperature (T_S)	550°C
	Pouring temperature	650, 700, 730°C
Die	Material	SKD 61
	Temperature	250°C
	Active length of shot sleeve	470 mm
	Working pressure	50 MPa
	Vacuum degree	30 kPa

및 이물질들이 오버플리우로 빠져나간다.

V_1 은 플런저의 저속구간 속도를 의미하며, 플런저가 저속구간을 이동할 때 용탕은 게이트 부분을 채우게 된다. V_2 는 고속구간 속도를 의미하고, 고속구간에서는 용탕이 게이트를 지나서 캐비티를 완전히 채우게 된다.

사출 실험에 대한 공정 조건은 Table 2와 같다. 금형의 재질은 SKD 61종이며, 금형 온도는 용탕의 응고 및 소작 방지를 위하여 250°C로 설정하였다. 실 사출 전에 금형 온도에 따른 용탕의 유동 특성을 배제하고자 5회 예비 사출을 통해 금형의 온도를 250°C로 안정화하였다.

용탕 온도와 사출 속도 제어 조건에 대한 성형성 및 기계적 성질에 대한 영향력을 조사하기 위해 용탕의 주입온도를 각각 650°C, 700°C, 730°C 으로 설정하였다. 사출 속도 조건은 $V_1 = 0.3$ m/s으로 고정하고, V_2 를 4가지 조건으로 변경하여 실험하였다. 각 용탕 온도에 따른 사출 속도 조건을 Table 3에 나타내었으며, 각 실험 조건당 제품을 5회씩 사출하였다.

제작된 제품의 위치별 기계적 성질 및 미세조직을 분석하기 위한 시편의 위치를 Fig. 6에 나타내었다.

사출 실험 조건에 대한 변수값들을 구조전용 소프트웨어인 MAGMA soft에 적용하여 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 검토하였다.

해석에 이용된 소재(Cast)의 재질은 Silafont 36 합금과 유사한 MAGMA soft 내에 AlSi10Mg를 사용하였다. MAGMA soft의 요소분할은 FVM (Finite Volume Method)이며 다이캐스팅 모듈에 적합한 mesh solver 5를 이용하여 메시를 생성하였다. 직교좌표 분할에 의해 분할된 전체 요소의 개수는 9,922,560

Table 3. Experimental conditions of vacuum die casting.

No.	Pouring temperature(°C)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)
1	650	0.3	1.5
2			2.0
3			2.5
4			3.0
5			1.5
6	700	0.3	2.0
7			2.5
8			3.0
9			1.5
10			2.0
11	730	0.3	2.5
12			3.0

(V_1 : Slow shot velocity, V_2 : Fast shot velocity)

Fig. 6. Schematic diagram of specimen position.

개이며, 소재에 해당하는 metal cell의 요소수는 465,582개이다.

소재와 금형 사이의 열전달 계수(h_m)는 7,000 W/m²K이며, 금형과 금형 사이(h_d)는 1,000 W/m²K 로 설정하였다[13]. 금형 온도에 따른 유동 특성을 배제하고, 실제 실험과 유사한 해석 결과를 위하여 5회 사이클을 수행한 후 충전 및 응고 해석 결과를 도출하였다.

Fig. 7. Results of filling test: (a) experiment, (b) simulation (velocity).

3. 실험 결과

3.1 충전 실험

용탕을 사출 슬리브에 주입하여, 금형 캐비티 내로 고압 및 고속으로 주입할 때에 게이트를 지나서 캐비티로 유입되는 용탕의 충전 거동을 분석하고자 충전 실험(Filling test)을 시행하였다.

실험 조건은 용탕 온도를 700°C, 저속구간의 속도(V_1)는 0.3 m/s로 하였다. 슬리브에서 플런저의 움직임이 저속에서 고속으로 변환되는 지점인(저속구간의 끝) 405 mm까지 플런저를 이동시킨 후, 샘플을 취출하였다. 취출한 샘플의 사진은 Fig. 7(a)이며, 동일한 조건의 시뮬레이션(사출 속도) 결과는 Fig. 7(b)이다. 실험 결과의 샘플은 런너와 게이트가 모두 채워졌으며, 캐비티는 1/5 정도가 채워졌다. 다만, 이젝터 홀에 해당하는 부분은 채워지지 않은 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션도 82% 충전된 결과와 동일한 충전 양상을 보인다.

충전 속도 결과를 보면 82% 충전 후에 83%가 충전되면서 용탕의 속도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 플런저의 움직임이 저속에서 고속으로 변하는 것을 나타낸다. 이것은 Fig. 5의 사출 슬리브 공정처럼 저속구간에서 용탕이 게이트 부분만을 채우는 것이 아니라 실질적으로 캐비티를 대략 1/5 정도 채운 후에 고속구간으로 변경된다는 것을 알 수 있다.

3.2 사출 실험

3가지 용탕 주입 온도의 4가지 사출 속도 조건에 따른 실험 조건 14가지에 대한 성형성 결과를 Fig. 8에 표로 나타내었다. 성형성 결과를 4가지 기호로 표시하였으며, 각각의 기호는 표의 밑에 보이는 결과의 샘플 사진처럼 분류하였다. X는 캐비티 끝 부분 및 오버플로우 미충전, ▲는 오버플로우까지 충전이 되었지만 캐비티 내에 결함이 많음, ■는 캐비티 내에 일부분 결함이 있음, 그리고 ●는 진공 불록까지 완벽하게 충전된 동시에 표면에 눈에 띄는 결함 없이 건전함을 나타낸다.

용탕의 주입 온도를 650°C로 설정하여 실험했을 때에는 대부분 캐비티 끝단부와 오버플로우가 미성형되었고, 캐비티 내 결함이 심하였다. 700°C에 대한 결과로는 고속구간의 속도가 2.0 m/s 이상일 때 성형성이 좋으며, 이하일 때는 결함이 많은 샘플이 발생된다. 용탕 주입 온도를 730°C로 설정할 경우에는 결함이 많은 샘플 1개만을 제외하고는 사출 속도의 모든 조건에서 우수

Fig. 8. Chart of experimental results (X: misun, ▲: most defects, ■: partial defects, ●: perfect).

한 성형성이 확보되었다.

이전 연구와 달리 용탕 주입 온도 650°C를 제외한 모든 조건에서 성형성이 확보된 이유는 사출속도의 영향보다는 Silafont 36 소재의 우수한 주조성에 의한 것이라 판단된다.

4. 결과 분석

4.1 용탕 온도의 영향

용탕 주입 온도에 대한 성형성 및 기계적 성질의 영향력을 조사하기 위해 사출 속도 조건($V_1=0.3$ m/s, $V_2=3.0$ m/s)은 동일하고, 용탕 주입 온도만 다른 4, 8, 12 조건에 대한 실험 및 해석 결과를 비교하였다.

용탕 온도에 따른 시뮬레이션 및 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 사출 속도 조건을 $V_1=0.3$ m/s, $V_2=3.0$ m/s로 설정할 경우, 용탕은 사출 슬리브를 지나 1.268 s에 비스킷부에

Fig. 9. Results of simulation and experimental by different temperature ($V_1 = 0.3$ m/s, $V_2 = 3.0$ m/s): (a) 650°C, (b) 700°C, (c) 730°C.

도달하며, 오버플로우까지 채워지는 최종 충전 시간은 1.365 s이다. 그러므로 캐비티가 채워지는 시간은 0.097 s로서 상당히 짧은 것을 알 수 있다.

용탕의 금형 충전 거동에 대한 해석 결과로서 용탕 주입 온도가 650°C일 경우 캐비티에 충전되는 온도는 대략 638°C이며, 캐비티 끝단부인 최종 충전 부분에서는 628°C로 온도가 떨어진다. 동일 조건으로 제작된 샘플에서 볼 수 있듯이 오버플로우가 미충전 되었으며, 캐비티 끝 부분에서도 미성형된 구멍들이 다수 존재한다. 용탕 온도를 700°C 설정한 해석결과는 캐비티 끝 부분 및 좌우 오버플로우 입구 부분에서 대략 675°C로 떨어지는 응고 부분이 발생하였다. 실험 결과를 보면 응고 부분에도 불구하고 진공 블록까지 완벽하게 성형이 되었으나, 오버플로우 입구와 채널 끝 부분이 접한 곳에 크랙이 발생하였다. 또한, 오

Fig. 10. Vickers hardness according to position by different temperature.

Fig. 11. Microstructure in B2 position by different temperature: (b) 700°C, (c) 730°C.

버플로우 입구와 캐비티 중앙 부분에서 탕주름이 형성된 것을 볼 수 있다. 용탕온도를 730°C로 주입한 해석 결과를 볼 때, 캐비티 끝부분에 응고된 부분이 존재하지 않는다. 캐비티 중앙부터 오버플로우까지는 대략 705°C이며, 게이트에서 채널의 중앙까지는 최종 충전부분의 오버플로우가 채워지기까지 용탕이 지속적으로 유입되기 때문에 715°C에서 충전이 완료된다. 제작된 샘플에는 약간의 탕주름을 제외하고는 결함이 존재하지 않는다.

각 사출 조건에서 제작된 샘플을 Fig. 6처럼 위치별 시편을 9개 절단하여 비커스 경도(Vickers hardness)를 측정하였다. 650°C에서 제작된 샘플의 경우 미충전된 부분과 결함으로 인해 시편 제작이 불가능하였다. 700°C 및 730°C에서 제작된 샘플의 비커스 경도를 Fig. 10에 나타내었다. 700°C에서 제작된 샘플은 A3 위치에서 108.5 Hv로 가장 높은 경도 값을 보이며, 위치별 평균 경도 값은 98.7 Hv이다. 730°C에 제작된 샘플은 B3 위치에서 97.1 Hv로 가장 높고, 평균 경도 값은 90.6 Hv이다.

700°C에서 제작된 샘플이 C1의 위치를 제외한 모든 위치에서 730°C에 제작된 샘플보다 비커스 경도가 높다. 이는 Fig. 11의 조직사진에서 원인을 확인할 수 있다. 용탕 온도가 700°C인 샘플의 조직에는 구상인 알루미늄 초정 (α (Primary α -Al))와 공정조직이 고르게 분포하지만, 730°C인 샘플의 조직에는 조대한 수지상 조직(Coarse dendrite)이 분포하고 있기 때문에 경도가 낮은 것으로 판단된다. 초정 알루미늄상의 비커스 경도는 65 Hv ~ 76 Hv이며, 공정상은 115 Hv ~ 130 Hv이다.

Fig. 9의 응고 거동에 대한 해석 결과를 보면 충전 후 0.654s

가 지난 응고 결과로서 채널 부분을 제외한 캐비티 부분이 고상선(595°C) 이하로 응고가 된다. 650°C의 용탕 온도는 채널 부분이 대부분 응고가 되었으며, 용탕의 주입 온도가 730°C로 설정된 응고 결과는 700°C 보다 채널 부분에 응고되지 않은 부분이 더욱 많다는 것을 볼 수 있다. 730°C의 경우 용탕의 응고 시간이 지연되면서 수지상정 조직이 성장한 것으로 판단된다.

4.2 사출 속도의 영향

사출 속도에 대한 성형성 및 기계적 성질을 조사하고자 용탕 주입 온도는 730°C이고, 사출 속도만을 변경한 9, 10, 11 그리고 12 조건에 대한 실험 및 해석 결과를 비교하였다. 사출 조건에 의한 시뮬레이션 및 실험 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

저속구간의 속도(V_1)는 4가지 조건 모두 0.3 m/s로 동일하며, 고속구간의 속도(V_2)는 1.5 m/s에서 0.5 m/s씩 증가시키면서 3.0 m/s까지 실험을 하였다.

실험 조건 9번($V_2=1.5$)과 10번($V_2=2.0$)의 경우 게이트에서 용탕의 속도가 각각 35.25 m/s와 46.96 m/s이며, 캐비티 내에 평균 속도는 대략 25 m/s와 45 m/s로서 최종 충전시간은 1.370 s와 1.367 s이다. 실험 조건 11번($V_2=2.5$)과 12번($V_2=3.0$)은 게이트에서 용탕의 속도가 각각 58.75 m/s와 70.49 m/s이고, 캐비티 내 용탕의 평균 속도는 50 m/s, 55 m/s이다. 이에 대한 최종 충전 시간은 각각 1.366 s와 1.365 s이다.

고속구간의 속도를 0.5 m/s로 증가시킬수록 게이트에서 용탕의 속도가 11.7 m/s 증가한다. 채널 부분에서 용탕의 속도는 채널의 깊이로 인하여 속도가 감소되며, 최종 충전 부분의 중앙 오버플로우 입구에서는 진공압의 영향과 좁은 입구 단면적 때문에 100 m/s 이상의 속도층이 형성된다.

캐비티 내 에어압 분포를 비교할 때, 실험 조건 9번과 10번에서는 캐비티 후면부에서 60 kPa의 에어압이 형성된다. 이는 충전 시 캐비티 좌우 벽면부에 부딪친 용탕의 속도가 캐비티 내의 평균속도 보다 훨씬 빨라서 용탕의 흐름이 좌우면에서 분산되기 때문이다. 벽면에 부딪친 분산된 급격한 용탕의 속도층이 오버플로우로 빠져나가지 못하고 캐비티 내로 다시 역류하는 백플로우 현상(Back flow) 발생한다. 용탕의 백플로우는 오버플로우 입구를 막게 되고 이로 인하여 진공효과가 일시적으로 작용하지 않게 된다. 그리하여 용탕 내 잔재하는 가스가 오버플로우로 빠져나가지 못하고 캐비티 후면부에 갇히게 된다. 제작된 샘플에서도 진공 블록의 미성형이 발생하였고, 캐비티 내 결합 부분도 해석과 동일한 위치에서 발생하였다.

반면 11번과 12번 조건은 게이트에서 용탕의 속도가 빠르므로(55 m/s 이상) 캐비티 중앙부의 속도층과 벽면부의 속도층이 격차가 크게 발생하지 않고, 캐비티 끝부분의 최종 충전까지 벽면부의 용탕이 캐비티 끝부분에서 역류되지 않는다. 에어압 분포에 대한 해석 결과에서도 캐비티 내에 에어압이 고르게 분포되어 있다. 실험 결과 역시 진공 블록까지 완벽하게 성형되었고, 캐비티 내에 결함이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다.

비커스 경도를 측정한 결과(Fig. 13) 고속구간의 속도 V_2 가 1.5 m/s인 조건 9번의 위치별 평균 경도는 95.0 Hv, $V_2=2.0$ m/s인 10번은 93.6 Hv이며, $V_2=2.5$ m/s인 11번은 97.9 Hv로서 가장 높은 경도 값이 측정되었다. 그리고 사출 속도가 가장 높

Fig. 12. Results of simulation and experimental by different injection velocity (fixed: melt $T = 730^\circ\text{C}$, $V_1 = 0.3$ m/s): (a) $V_2 = 1.5$ m/s, (b) $V_2 = 2.0$ m/s, (c) $V_2 = 2.5$ m/s, $V_2 = 3.0$ m/s.

은 조건인 12번($V_2=3.0$ m/s)의 경우 90.6 Hv로 가장 낮은 값이 측정되었다.

사출 속도 조건에 대한 경도 값의 차이를 Fig. 14의 조직상태에서 확인할 수 있다. 실험 조건 9번, 10번, 11번의 경우 수지상 가지가 떨어져 나간 길쭉한 타원 형상 및 장미상 형태의 초정 α 가 분포하고 있지만, 12번의 경우 수지상 조직이 많이 분포되어 있으며, 수지상 조직 사이로 액상 편석된 부분이 다수

Fig. 13. Vickers hardness according to position by different injection velocity.

Fig. 14. Microstructure in B2 position by different injection velocity (fixed: melt T = 730°C, $V_1 = 0.3$ m/s): (a) $V_2 = 1.5$ m/s, (b) 2.0 m/s, (c) 2.5 m/s, (d) 3.0 m/s.

존재한다. 또한, 실험 조건 12는 캐비티 후면의 채널 부분에서 용탕의 속도가 75 m/s 이상으로 높으므로 Fig. 15처럼 액상 편석이 심한 구간과 Cold shut이 발생된 부분이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 기계적 성질 외에도 캐비티 내 평균 충전 속도가 높으므로 금형 내에 용탕이 소착될 가능성이 크다. 이로 인하여 2,000 shots 이상의 장기적인 실사출시 금형 수명이 악화될 수 있다.

4.3 최적의 실험 조건

용탕 주입온도가 650°C이면 미성형이 발생되고, 730°C인 경우에는 수지상정 조직이 분포하여 기계적 성질이 악화된다.

고속구간의 속도는 2.0 m/s 이하이면 최종 충전 부분에 결함이 발생하며, 3.0 m/s에 달하면 높은 충전 속도로 인해 액상 편석이 발생하여 조직상태가 고르지 않다. 또한, 장기적인 사출시 금형 수명이 악화될 수 있다. 그러므로 두께 0.8 mm 분리판 제작에 적합한 최적의 사출 조건은 용탕 주입온도가 700°C

Fig. 15. Microstructure in C2 position of sample fabricated by 12 condition: (a) liquid segregation, (b) cold shot.

Fig. 16. Vickers hardness of sample fabricated by 7 condition according to position.

이며, 저속 및 고속구간의 속도는 각각 0.3 m/s와 2.5 m/s에 진공압 30 kPa이 적용된 7번 조건이다.

Fig. 16은 이 조건에서 제작된 샘플의 경도와 T5 및 T6 열처리 후의 경도를 비교한 것이다. 제작된 샘플을 Fig. 6처럼 9개의 시편을 채취하여 T5와 T6 열처리를 하여 비커스 경도를 측정하였다. T5 열처리는 170°C에서 7시간 동안 시효처리(Artificial aging)를 하였고, T6 열처리는 490°C에서 3시간 동안 용체화처리(Solution heat treatment)를 한 다음 물에서 냉각(Water quenching) 후 170°C에서 7시간 동안 시효처리를 하였다.

열처리를 하기 전의 평균 비커스 경도는 99.92 Hv로서 8~12번 사출 조건에서 제작된 샘플의 경도 보다 모두 높다. 경도가 가장 높은 위치는 보압의 영향을 받는 A2위치로서 107.35 Hv이며, 최종 충전 부분인 캐비티 끝단부의 C그룹은 95 Hv이하로 낮은 값이 측정되었다. 이는 Fig. 17의 조직사진에서처럼 (a)와 (b)는 조정 α 가 구상이고 공정조직이 균일하게 분포되어 있지만, (c)의 경우 조정 α 가 구상이지 않고, 입계면(Grain boundary)이 뚜렷하지 않기 때문이다.

T5 열처리 후, 평균 경도가 103.22 Hv로서 열처리 전보다 3.4 Hv 향상되었다. T6 열처리 후의 평균 경도는 110.42 Hv이며, 열처리 전보다 10.5 Hv 향상되었다. 특히 C그룹의 경도는 열처리 전보다 14 Hv 향상되었는데, 이러한 원인은 Fig. 18(b)의 조직사진에서 볼 수 있듯이 불규칙한 형태의 공정상이 용체

Fig. 17. Microstructure according to position: (a) A2, (b) B2, (c) C2.

Fig. 18. Microstructure in B2 position before and after heat treatment: (a) F (as cast), (b) T6.

화 처리 시에 구상화된 실리콘과 망간상(Spheroidized Si and Mn particles)으로 바뀌어 고르게 분포되기 때문이다[10,14].

샘플의 위치별 두께를 Fig. 19에 나타내었다. 샘플의 위치별 두께를 측정하고자 Fig. 6처럼 위치에 따라 시편을 총 9개 절단하였다. 마이크로미터기로 두께를 측정할 경우 소재의 표면이 눌러져서 정확한 두께를 측정할 수 없다. 그리하여 절단면에 폴리싱을 한 다음 디지털 현미경을 이용하여 Fig. 19(b)처럼 샘플의 두께를 측정하였다. 게이트와 접한 중앙 부분이 가장 두꺼운 0.86 mm인 것을 제외하고는 전체적으로 0.8 mm에 근접하였다.

5. 결 론

진공 다이캐스팅 공법으로 Silafont 36 소재를 사용하여 연료전지 분리판을 완벽하게 성형할 수 있었다. 용탕 온도 및 사출 속도 조건을 변수로 한 연료전지 분리판 성형 실험 결과는 다음과 같다.

1) 용탕 주입 온도가 700°C, 고속구간의 사출 속도가 2.0 m/s 이상이어야 분리판의 성형성이 확보되며, 730°C 일 경우에는 성형성은 우수하지만, 기계적 성질이 낮아진다.

2) 고속구간의 사출 속도가 2.0 m/s 이하이면 최종 충전 부분에 결함이 발생하고, 3.0 m/s 일 경우 조직상태가 불균일하다. 박판 성형에 적합한 고속구간의 속도는 2.5 m/s 적당하다.

Fig. 19. (a) Thickness of sample according to positions (b) thickness measurement of channel and plate part by digital microscope (unit: mm).

3) 분리판 제작에 적합한 사출 조건은 용탕온도가 700°C, 저속 및 고속구간의 속도가 각각 0.3 m/s와 2.5 m/s이다. 이 조건에서 제작된 분리판의 비커스 경도는 99.9 Hv이며, T5와 T6 열처리 후에는 103 Hv와 110 Hv로 각각 향상된다.

4) 실험 결과와 시뮬레이션 결과는 대체적으로 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0000306). 그리고 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20104010100540).

참고문헌

- [1] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol., Int. J. Hydrogen Energy, "Bipolar Plates for PEM fuel cells: A review", Vol. 30, 2005, 1297-1302.
- [2] E. Middelmann, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen, E. de Waal., J. Power Sources, "Bipolar plates for PEM fuel cells", Vol. 118, 2003, 44-46.
- [3] S. Mahabunphachai, O. N. Cora, M. Koc, J. Power Sources, "Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", Vol. 195, 2010, 5269-5277.
- [4] F. Dundar, E. Dur, S. Mahabunphachai, M. Koc., J. Power Sources, "Corrosion resistance characteristics of stamped and hydroformed proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", Vol. 195, 2010, 3546-3552.

- [5] G. M. Yoon, D. H. Kang, Y. J. Ko, J. D. Lim., KSAE 2009 Annual Conference, "Application of High Level Vacuum Die-Casting for the Automotive Parts", 1540-1546.
- [6] X. P Niu, B. H. Hu, I. Pinwill, H. Li., J. Mater. Proc. Technol, "Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys", Vol. 105, 2000, 119-127.
- [7] C. K. Jin, C. G. Kang., J. Kor. Foundry's Soc., "Fabrication Process of Aluminum Bipolar Plate for Fuel Cell using Vacuum Die Casting", Vol. 31, 2011, 71-78
- [8] J. Park, X. Li. J. Power Sources, "An experimental and numerical investigation on the cross flow through gas diffusion layer in a PEM fuel cell with a serpentine flow channel", Vol. 163, 2007, 853-863.
- [9] R. Boddu, U. K. Marupakula, B. Summers, P. Majumdar, J. Power Source, "Development of bipolar plates with different flow channel configurations for fuel cells". 2009. 1083-1092.
- [10] A. Zovi, F. Casarotto., METALLURGIA ITALIANA, "Silafont-36, the low iron ductile die casting alloy development and application", Vol. 99, 2007, 33-38.
- [11] Koch. H, Hielscher. U, H. Sternau, A. Franke., Light Metals, TMS book, "Silafont-36, the new lowiron high pressure die casting alloy", 1995, 1011-1018.
- [12] Website, <http://www.rheinfelden-alloys.eu/web/guest/anwendungsgebiete18>.
- [13] D. H. Lee, C. G. Kang, S. K. Lee., J. Kor. Foundry's Soc., "Prediction Defect of Automotive Components by Filling and Solidification Analysis, Vol. 20, No 3, 2000, 159-166.
- [14] L. Y. Pio., J. Applied Sciences, "Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical properties of Gravity Die Cast A356 Aluminium Alloy", Vol. 11. 2011, 2048-2052.