

Dynamic Load를 이용한 박막 금속 분리판 성형기술

구자윤¹ · 강충길[#]

Forming of Metallic Bipolar Plates by Dynamic Loading

J. Y. Koo, C. G. Kang

(Received Augst 4, 2011 / Revised December 5, 2011 / Accepted December 21, 2011)

Abstract

The weight of the bipolar plate is one of the crucial aspects of improving power density in PEMFC stacks. Aluminum alloys have good mechanical properties such as density, electrical resistivity, and thermal conductivity. Furthermore, using aluminum in a bipolar plate instead of graphite reduces the bipolar plate cost and makes machining easier. Therefore in this study, an aluminum alloy was selected as the appropriate material for a bipolar plate. Results from feasibility experiments with the aim of developing fuel cells consisting of Al bipolar plates with multiple channels are presented. Dynamic loading was applied and the formability of micro channels was estimated as a function of punch pressure and die radius. Sheets of Al5052 with a thickness of 0.3mm were used. For a die radius of 0.1mm the formability was optimized with a sine wave dynamic load of 90kN at maximum pressure and 5 cycles of a sine wave punch travel. The experimental results demonstrate the feasibility of the proposed manufacturing technique for producing bipolar plates.

Key Words : Bipolar Plate, Formability, Stamping, Dynamic Loading, Al5052 Plate

1. 서 론

연료전지는 공급 연료의 화학 에너지를 전기에너지로 직접 변화시켜 직류 전류를 생산하는 발전시스템으로 40%이상의 높은 에너지 효율과 무공해, 무소음 등 다양한 장점을 갖춘 차세대 핵심기술이다. 특히, 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 높은 효율과 낮은 반응온도, 빠른 시동조건을 특징으로 하는 수송분야, 발전시스템, 휴대용 장치 등 여러 분야에 적용된다[1, 2].

연료전지의 다양한 부품요소 중에서 분리판은 스택 무게의 60~80%를 차지하고, 가격측면에서 스택의 50%의 높은 비중을 차지하므로 PEMFC의 상용화에 가장 핵심적인 부품이다[3].

현재 연료전지에 사용되고 있는 분리판은 높은 내식성과 전기 전도성을 갖는 그래파이트(graphite) 분리판을 적용하고 있다. 그러나 그래파이트 소재는 가공성이 좋지 않고, 외부 충격이나 진동에 약한 특성 때문에 새로운 금속 분리판이 요구되고 있다. 그 중 스테인레스 소재는 가공성과 기계적 강도, 전기 전도도 등 우수한 특성을 가지고 있지만, 부식에 의한 전해질 막의 오염과 분리판 표면의 산화 막 형성으로 전기 전도도가 감소하는 문제점을 가지고 있다. 반면 알루미늄 소재는 스테인레스 보다 부식저항이 크고 낮은 밀도(2.70g cm⁻³), 우수한 성형성과 내 산화성, 전기전도성 2.6Ω, 열전도성 (56.5W cm⁻¹K⁻¹ at 20℃)으로 분리판의 여러 가지 요구 조건을 충족시킨다[4].

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템
교신저자: 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터, E-mail: cgkang@pusan.ac.kr

금속 분리판의 성형 공정으로는 CNC 밀링[5], 스탬핑(Stamping)[6], 하이드로포밍[7], 에칭[8], 다이캐스팅[9] 등이 있다. 그 중 금속 분리판의 기계가공 및 절단가공은 가공시간이 길고 재료비용에 비해 가공비용이 너무 높아 저가격화를 실현시키는 데에는 큰 어려움이 있다. 반면 스탬핑 공정은 대량생산에 의한 제조비용을 낮추는 방법으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 실제 연료전지 분리판 성형 시 적용되고 있다. 하지만, 미세 채널을 설계한 치수대로 정밀하게 성형 할 수 없는 성형 한계성의 문제점이 있고, 탄성회복으로 인한 스프링백이 발생하게 된다[10]. 이는 연료전지의 성능저하를 가져오는 단점으로 작용된다[11].

따라서 본 연구에서는 기존의(Conventional) 스탬핑 공정의 성형 한계성을 개선하고 정밀한 분리판을 성형하기 위해 Al5052 0.3mm의 소재로 사인파(Sine), 사각파(Square), 삼각파(Ramp)의 동적 하중(Dynamic Load)을 이용한 스탬핑 성형을 시행하였다. 또한 스탬핑에 적합한 동적 하중의 종류와 진동수, 성형하중, 사이클(Cycle) 횟수를 도출하고 기존의 스탬핑 공정과 비교해서 성형성을 평가하였다. 이러한 일련의 과정으로 연속적인 금속 분리판을 성형하고 동적 하중에 의한 스탬핑 공정의 산업화 활용가능성을 파악하며 알루미늄 분리판 개발에 관한 기초 성형 데이터 베이스를 구축하고자 한다.

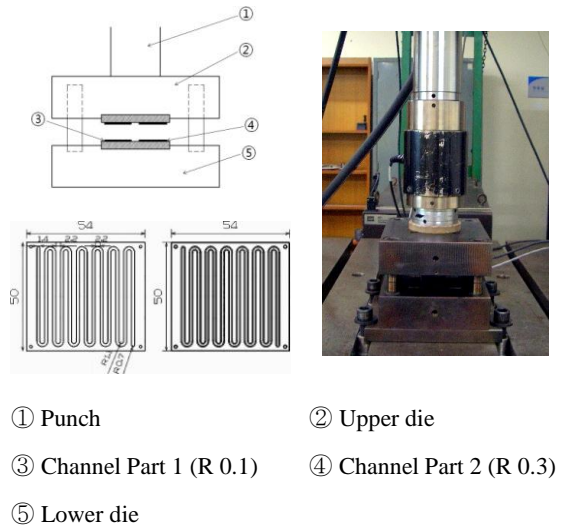
2. 실험

2.1 실험장치

실험에 사용된 장비는 MTS(동적 재료시험기)를 사용하였다. MTS 프레스는 속도 및 하중제어가 쉽고 사인파, 사각파, 삼각파의 다양한 진동의 구현이 가능해서 정밀한 하중이 요구되는 동적 하중을 이용한 스탬핑 실험에 적합하다.

Fig. 1 은 동적 하중으로 분리판을 제조하는 실험 장비를 나타낸 것이다. 실험 장비는 펀치, 상부 다이, 채널 파트-I, 채널 파트-II, 하부 다이 등 5개의 요소로 구성되어 있다.

Table. 1 은 미세채널이 성형되는 코어다이의 개략도와 어깨부 곡률(R)의 변화에 따른 치수를 나타낸 것이다. 이때 어깨부 곡률의 치수를 각각 0.1mm, 0.3mm의 금형 구조로 파트-I, 파트-II 로 정의하였다.



① Punch
② Upper die
③ Channel Part 1 (R 0.1)
④ Channel Part 2 (R 0.3)
⑤ Lower die

Fig. 1 Schematic diagram of stamping die

Table 1 Die dimensions of serpentine type stamping core-die

Dimensions of Part-I, Part-II (unit: mm)		
Part-I	Part-II	
H=0.6	H=0.6	
S=0.8	S=0.8	
W=1.4	W=1.4	
R=0.1	R=0.3	

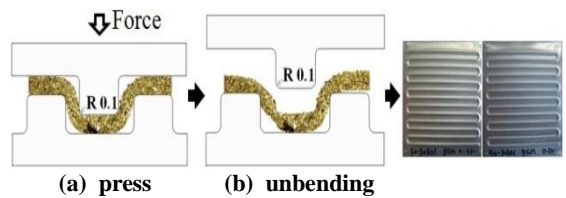


Fig. 2 Sketch of stamping process

2.2 실험 조건 및 방법

Fig. 2 는 스탬핑의 성형단계를 도식적으로 나타낸 것이다. 상부 펀치가 하부 금형을 가압하면 알루미늄 소재는 탄성영역을 지나 소성변형을 시작한다. 소성변형이 시작된 소재가 하부 금형의 캐비티에 충전하게 되는데 이 과정에서 사인파, 사각파, 삼각파의 동적 하중을 사이클 횟수에 따라 연속적으로 압력을 가하여 박판의 미세 채널을 성형하는 것이다.

Table 2 The chemical compositions of selected(wt. %)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al5052	0.149	0.291	0.008	0.032	2.365	0.168	0.001	0.014	Bal

Table 3 The conditions of aluminum stamping experiments

	Stamping	Dynamic Load
Load type	Stamping	Sine, Square, Ramp
Punch pressure (kN)	70, 80, 90	50~70, 50~80, 50~90
Velocity	1kN/s	0.5Hz (frequency)
Cycle	1	2, 3, 4, 5
Channel round (mm)	0.1, 0.3	0.1, 0.3

실험 시편의 소재는 두께 0.3mm의 Al5052 알루미늄 합금 판재를 가로(압연방향) 55mm×세로 50mm 의 크기로 가공하여 사용하였으며, 시편의 성분은 Table 2 와 같다.

Al5052의 경우 강도는 낮지만 열·전기전도성이 높으며 성형성, 내식성, 내해수성이 우수하다. 따라서 금속 분리판에 주로 사용되는 스테인레스와 비교했을 때 전기 저항적 측면에서 1/15로 낮으며, 열전도도는 8.5배 뛰어나고 무게는 1/2배 가벼워 분리판의 성능향상 및 경량화에 기여할 수 있다.

Table 3 은 기존의 스탬핑 성형실험과 동적 하중에 의한 스탬핑 성형실험을 위한 조건을 나타낸 것이다. 실험변수는 하중의 종류, 펀치압력, 속도 및 진동수, 사이클 횟수, 분리판 어깨부 곡률의 크기이다.

알루미늄 두께가 0.3mm인 분리판을 성형하기 위해 최소 50kN의 하중이 필요하다[12]. 따라서 동적 하중을 이용한 스탬핑 성형 시 펀치의 최소 하중을 50kN으로 설정하여 펀치가 최소하중 상태에서 분리판이 계속 성형 될 수 있도록 실험을 시행하였다. 또한 0.5Hz의 진동수로 사인파, 사각파, 삼각파의 동적 하중의 종류에 따라 사이클 5 회까지 성형실험을 하였다.

Fig. 3 은 Table 3 에서 설정한 조건으로 동적 하

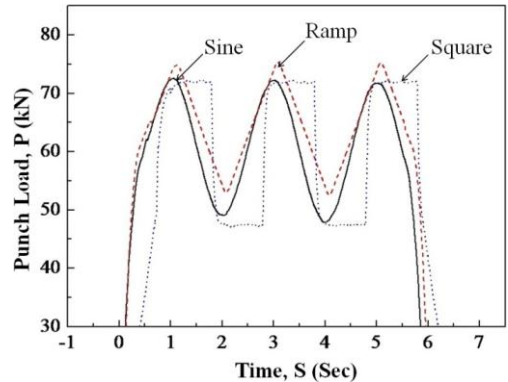


Fig. 3 The Load-Time curves according to different type of dynamic load

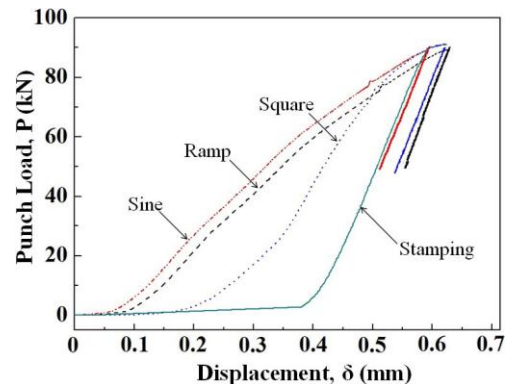


Fig. 4 The Load-Displacement curves at stamping, sine, square and ramp dynamic load

중을 이용한 스탬핑 성형실험을 실시하여 시간의 변화에 따른 동적 하중의 변화를 나타낸 것이다. 동적 하중의 종류 중 사각파를 사인파, 삼각파와 비교했을 때 하중의 최대, 최소가 급격한 변화를 보였고, 펀치가압 시간이 가장 길게 나타났다.

Fig. 4 는 기존의 스탬핑 성형과 동적 하중을 이용한 스탬핑 성형을 실시하여 펀치의 변위(δ)에 따른 성형하중의 변화를 나타낸 것이다. 사인파, 삼각파의 경우 펀치의 변위에 따른 성형하중이 일정하게 증가하는 반면, 기존의 스탬핑으로 성형 시 펀치의 변위가 0.38~0.6mm 구간에서 급격한

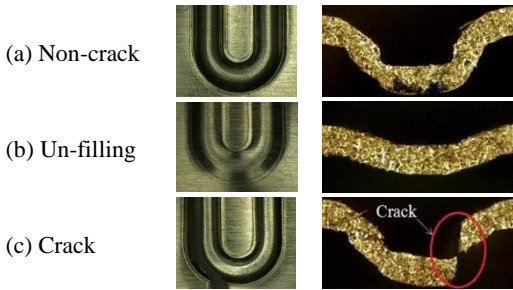


Fig. 5 The criterion for specimens of the stamping process

Table 4 The facture diagrams at different punch pressure(70kN, 80kN, 90kN) and die rounds (R 0.1, R 0.3)

	70kN	80kN	90kN
R 0.1mm	△	△	X
R 0.3mm	△	△	O

(O : Noncrack, △ : Un-filling, X : Crack)

하중 증가를 보였다. 또한 사각과의 경우 펀치의 변위에 따른 하중의 증가가 기존의 스탬핑과 비슷한 경향을 보였다.

2.3 실험 결과

Fig. 5는 스탬핑 성형 실험으로 제조된 분리판에 나타난 미크랙(Non-crack), 미성형(Un-filling), 크랙(Crack)의 형상을 보여주는데 마이크로 사진이다. Fig. 5 (a)는 미크랙을 나타낸 것으로 분리판이 결함 없이 성형이 잘된 것이고, Fig. 5 (b)는 미성형을 나타낸 것으로 펀치의 하중이 부족하여 분리판이 제대로 성형되지 않은 것을 의미한다. Fig. 5 (c)는 크랙을 나타낸 것으로 분리판의 곡률부분에서 펀치 하중을 견디지 못하고 파단이 일어난 것을 나타낸다.

기존의 스탬핑 성형실험에서 펀치의 하중과 어깨부 곡률의 크기에 따른 분리판 성형결과를 Table 4에 나타내었다. 90kN의 펀치 하중으로 성형된 어깨부 곡률 0.3mm의 분리판은 크랙과 미성형된 부분이 나타나지 않았지만, 어깨부 곡률이 0.1mm인 경우 채널의 곡률부분에서 크랙이 발생하였다. 또한 80kN의 펀치 하중으로 성형 시 분리판에서 미성형된 부분이 관찰되었다. 위의 이유는 두께가 0.3mm 알루미늄 분리판 성형 시 90kN이상의 펀치 하중으로 가압해야 미세채널이 성형되

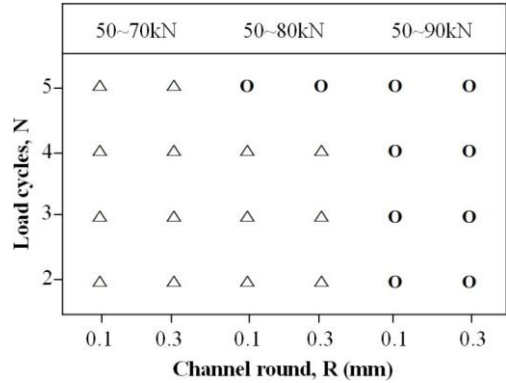


Fig. 6 The fracture diagrams according to dynamic load(sine) 0.5Hz

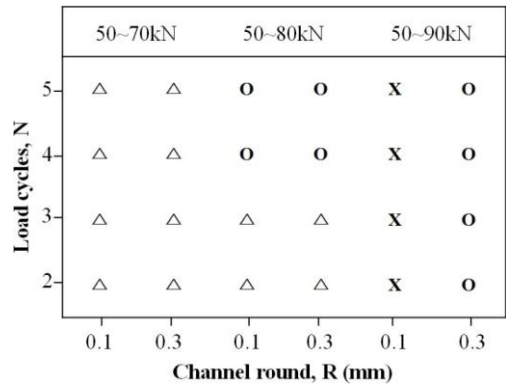


Fig. 7 The fracture diagrams according to dynamic load(square) 0.5Hz (O : Noncrack, △ : un-filling, X : Crack)

기 때문이다. 따라서 최대하중이 90kN인 동적 하중의 조건으로 실험을 실시하였다.

Fig. 6, 7은 동적 하중을 이용한 스탬핑 성형 결과를 나타낸 것이다. 사진과의 동적 하중을 가하여 성형된 분리판에서 크랙 및 미성형된 부분이 나타나지 않았다. 이는 Fig. 4에 보이는 바와 같이 기존의 스탬핑과 동적 하중을 이용한 스탬핑을 비교했을 때 하중에 따른 변위의 기울기가 상대적으로 크다는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 분리판의 변형 속도가 커지면 소성변형을 일으키는 유동응력이 증가하는 경향이 있다[13]. 따라서 연신율이 감소하므로 기존의 스탬핑으로 성형 시 크랙이 발생하는 것으로 사료된다. 반면 사각과의 최대 펀치하중 90kN의 조건으로 성형된 분리판에서 곡률부분의 크랙이 발생하였다. 이러한 현상의 원인은 펀치하중의 최대, 최소가 급격한 변화를

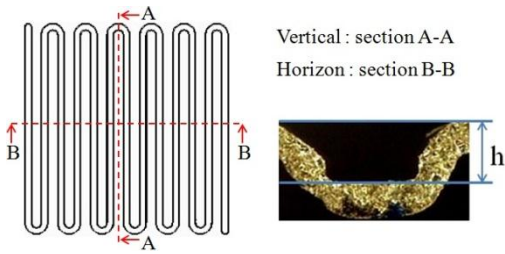


Fig. 8 Observation points for measuring the stamping depth

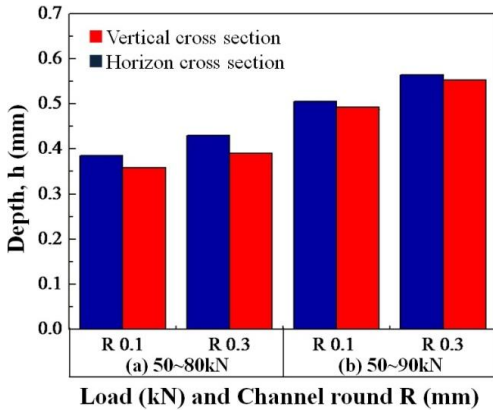


Fig. 9 Channel depth according to different load of bipolar plate(5 cycles)

보이는 사각파의 특성 때문에 분리판의 어깨부에서 하중을 견디지 못하고 파단이 일어난 것이다. 따라서 어깨부 곡률이 0.1mm인 분리판의 성형에 적합하지 않다고 판단된다. 최대하중과 최소하중의 변화가 사인파 보다는 크고 사각파 보다는 작은 삼각파의 경우가 최대 펀치하중 90kN, 사이클 4회, 5회의 조건으로 성형된 분리판에서 크랙이 발생하였다.

사인파로 최대 펀치하중이 90kN인 경우가 어깨부 곡률 0.1mm 분리판의 성형하기에 가장 적합한 조건이며 사이클 횟수에 관계없이 크랙 및 미성형된 부분이 나타나지 않았다. 또한 최대 펀치하중 90kN의 조건으로 어깨부 곡률이 0.3mm인 분리판 성형시 사인파, 사각파, 삼각파의 동적 하중의 종류, 사이클 횟수에 관계없이 분리판에서 크랙 및 미성형된 부분이 나타나지 않았다.

최대 펀치하중과 동적 하중의 종류, 사이클 횟수에 따른 분리판 성형 깊이를 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 분리판의 채널을 절단하여 수직(Vertical) 방향의 채널 깊이와 수평(Horizon) 방향 채널의 평

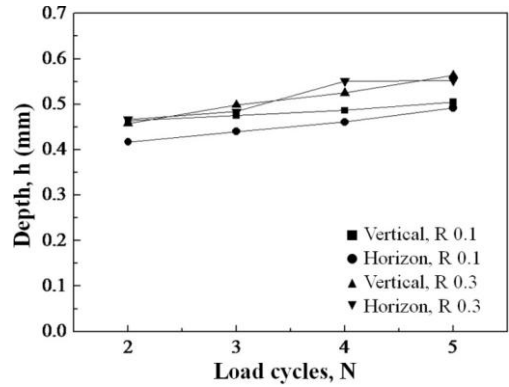


Fig.10 Relations between cycle number(sine 50~90kN) and channel depth

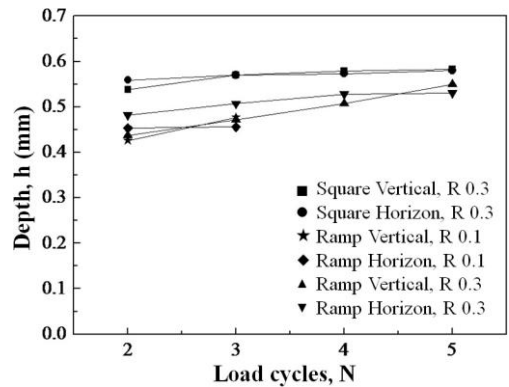
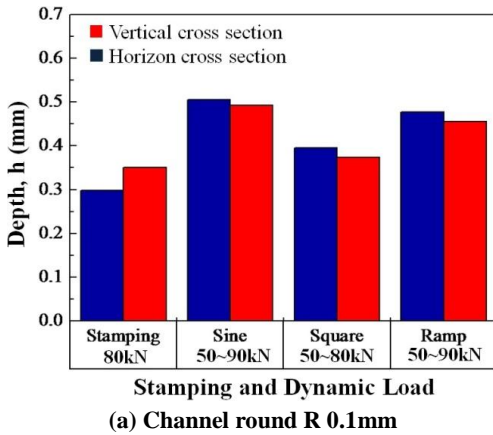


Fig.11 Variation of forming depth in according to load type with respect to the cycle number (50~90kN)

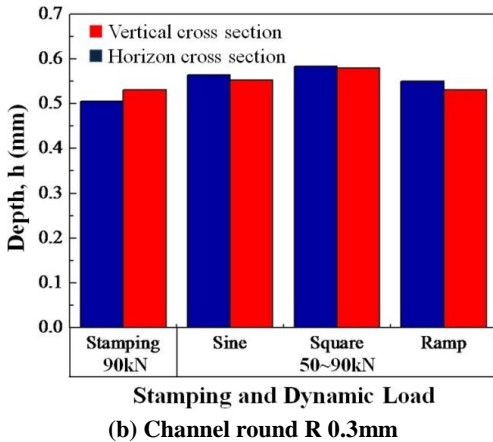
균 깊이를 측정하였다.

Fig. 9 는 사인파의 최대 펀치하중 80kN과 90kN 으로 사이클 5회 성형한 분리판의 깊이를 측정한 것이다. 어깨부 곡률이 0.1mm인 경우 최대 펀치하중 90kN으로 성형된 분리판이 80kN으로 성형된 분리판 보다 단면 A-A, B-B에서 채널의 깊이(h)가 0.12mm, 0.135mm로 34% 깊게 성형 되었음을 알 수 있다. 따라서 분리판의 미세채널 성형 시 80kN 의 최대 펀치하중보다 90kN의 최대 펀치하중으로 성형하는 것이 정밀한 분리판을 성형하는 것에 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 10, 11 은 사인파, 사각파, 삼각파의 최대 펀치하중이 90kN일 때 사이클 횟수의 증가에 따른 성형 깊이를 측정 한 것이다. 어깨부 곡률이 0.3mm인 분리판의 경우는 사인파로 사이클 5회의 조건으로 성형한 분리판과 사이클 2회의 조건으로



(a) Channel round R 0.1mm

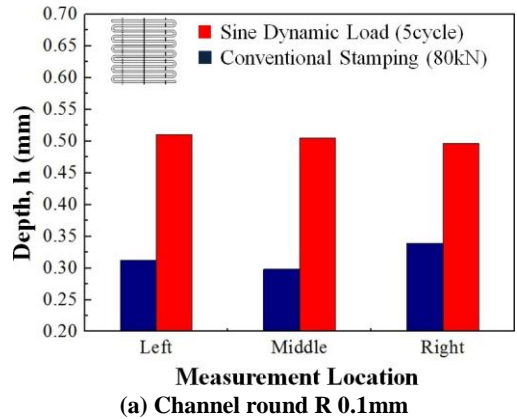


(b) Channel round R 0.3mm

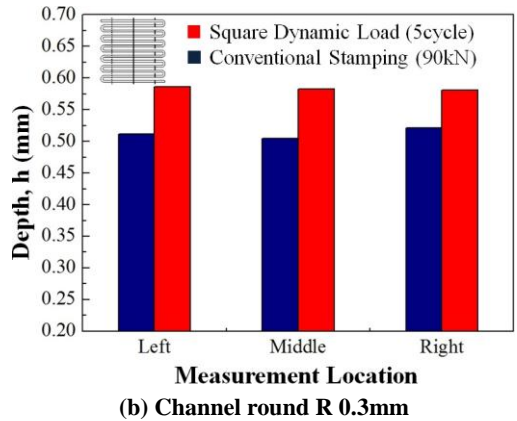
Fig.12 Channel depth concerning dynamic load(5 cycles) and stamping

로 성형한 분리판의 단면 A-A, B-B에서 채널 깊이의 차이가 0.106mm, 0.085mm로 측정되었다. 사이클이 5회의 조건으로 성형한 분리판의 성형 깊이가 사이클 2회의 조건으로 성형한 분리판에 비하여 21%만큼 채널이 깊게 성형이 되었다. 이는 사이클 횟수가 증가함에 따라 분리판의 채널이 더욱 정밀하게 성형되고, 펀치의 가압시간이 증가할수록 분리판의 성형 깊이가 증가하는 비례관계임을 알 수 있다. 또한 사이클 횟수가 증가함에 따라 분리판 단면 A-A, B-B에서 채널의 깊이가 서로 균일해지는 경향을 보였다.

Fig. 12(a)는 어깨부 곡률이 0.1mm인 경우 기존의 스탬핑 성형과 동적 하중에 의한 스탬핑 성형 중 가장 정밀하게 성형된 분리판 채널의 깊이를 나타낸 것이다. 기존의 스탬핑으로 성형된 분리판은 단면 A-A, B-B에서 채널 깊이가 0.298mm, 0.35mm



(a) Channel round R 0.1mm



(b) Channel round R 0.3mm

Fig.13 Channel depth according to position of bipolar plate

로 측정되었다. 또한 스탬핑 성형 시 사인파의 동적 하중을 가하여 사이클 5회로 성형한 분리판의 경우 단면 A-A, B-B에서 채널 깊이 0.505mm, 0.492mm까지 성형이 가능했으며, 기존의 스탬핑으로 성형된 분리판 보다 채널의 깊이가 0.2mm, 0.14mm로 55%만큼 깊게 성형되었다.

Fig. 12(b)는 어깨부 곡률 0.3mm 분리판을 기존의 스탬핑 성형과 동적 하중에 의한 스탬핑 성형 중 가장 정밀하게 성형된 분리판 채널의 깊이를 나타낸 것이다. 기존의 스탬핑으로 성형된 분리판은 단면 A-A, B-B에서 채널 깊이가 0.505mm, 0.531mm로 성형되었고, 사각파의 동적 하중을 가하여 사이클 5회 성형한 분리판의 경우 단면 A-A, B-B에서 채널 깊이가 0.58mm, 0.583mm까지 성형이 가능하였다. 기존의 스탬핑 성형보다 사각파를 이용한 스탬핑으로 성형된 분리판이 단면 A-A, B-B에서 0.07mm, 0.05mm로 12%만큼 채

널이 깊게 성형되었다. 이는 박판 성형 공정 이후 탄성회복시 연속적으로 힘을 가하여 성형함으로써 기존의 스탬핑 보다 정밀하게 성형되는 것이다.

Fig. 13은 분리판의 위치에 따른 채널의 깊이를 측정 한 것이다. 기존의 스탬핑으로 성형된 어깨부 곡률 0.1mm의 경우 분리판의 위치에 따른 최대와 최소의 깊이 차이가 0.041mm로 채널의 깊이 차이가 15% 발생함을 확인 할 수 있다. 반면 사인파의 동적 하중의 조건으로 성형할 경우 최대 및 최소 깊이의 차이가 0.008mm로 분리판 위치에 따른 채널의 깊이 차이를 1%미만으로 감소시킬 수 있었다. 이는 동적 하중의 사이클 횟수가 증가할수록 분리판 위치에 따른 채널 깊이가 균일해 진 것이라 사료된다.

3. 결론

Al5052 판재를 사용하여 기존의 스탬핑 실험과 동적 하중을 이용한 스탬핑 실험을 실시하여 금속 분리판을 성형한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Al5052 0.3mm의 금속 분리판 스탬핑 성형 시 편치하중 90kN 이상 필요하다.

(2) 0.5Hz인 사인파로 사이클 5회의 조건으로 어깨부 곡률이 0.1mm인 분리판을 성형했을 때 기존의 스탬핑으로 성형된 분리판 보다 55%의 채널이 깊게 성형되었다. 또한 곡률 0.3mm인 경우는 0.5Hz인 사각파로 사이클 5회인 조건으로 성형했을 때 기존의 스탬핑으로 성형된 분리판 대비 12%의 채널이 깊게 성형되었다.

(3) 어깨부 곡률 0.1mm 분리판의 경우, 성형성을 확보하기 위해 하중의 최대, 최소가 사각파보다 상대적으로 작은 사인파와 삼각파의 동적 하중이 적합하다.

(4) 동적 하중에 의한 스탬핑 성형 시 편치하중의 가압시간이 증가할수록 분리판이 더욱 정밀하게 성형되는 비례관계임을 알 수 있다.

(5) 최대 편치하중 90kN의 동적 하중을 가하여 사이클 5회로 성형해서 분리판의 위치에 따른 채널의 깊이 차이를 1%미만으로 감소시켰다.

(6) 동적 하중에 의한 스탬핑 공정으로 성형된 어깨부 곡률이 0.1mm인 분리판은 84%의 성형성을 확보하였고, 0.3mm인 분리판의 경우 97%의 성형성을 확보하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] H. Tawfika, Y. Hung, D. Mahajan, 2007, Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell, J. Power Sources, Vol. 163, No. 2, pp. 755~767.
- [2] P. Costamagna, S. Srinivasan, 2001, Technical Cost Analysis for PEM Fuel Cells, J. Power Sources, Vol. 109, No. 1, pp. 71~75.
- [3] T. Matsuura, M. Kato, M. Hori, 2006, Study on Metallic Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cell, J. Power Sources, Vol. 161, No. 1, pp. 74~78.
- [4] G. O. Mepsted, J. M. Moore, 2003, Handbook of Fuel Cell, John Wiley & Sons Ltd, England, Vol. 3, pp. 289~290.
- [5] J. C. Hung, T. C. Yang, K. C. Li, 2010, Studies on the Fabrication of Metallic Bipolar Plates-Using Micro Electrical Discharge Machining Milling, J. Power Sources, Vol. 196, No. 4, pp. 2070~2074.
- [6] L. Shuo-Jen, L. Chi-Yuan, Y. Kung-Ting, K. Feng-Hui, L. Ping-Hung, 2008, Simulation and Fabrication of Micro-scaled Flow Channels for Metallic Bipolar Plates by the Electrochemical Micro-machining Process, J. Power Sources, Vol. 185, No. 2, pp. 1115~1121.
- [7] K. Muammer, M. Sasawat, 2007, Feasibility Investigations on a Novel Micro-manufacturing Process for Fabrication of Fuel Cell Bipolar Plates: Internal Pressure-assisted Embossing of Micro-Channels with In-die Mechanical Bonding, J. Power Sources, Vol. 172, No. 2, pp. 725~733.
- [8] H. S. Jang, D. S. Park, 2010, Microfabrication of Microchannels for Fuel Cell Plates, Sensors, Vol. 10, No. 1, pp. 167~175.
- [9] C. K. Jin, C. G. Kang, 2011, Fabrication Process of Aluminum Bipolar Plate for Fuel Cell using

- Vacuum Die Casting, J. Kor. Foundrymen's Soc., Vol. 31, No. 2, pp. 71~78.
- [10] S. U. Lee, D. T. Nguyen, N. K. Kim, S. H. Yang, Y. S. Kim, 2011, Application of Incremental Sheet Metal Forming for Automotive Body-In-White Manufacturing, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 4, pp. 279~283.
- [11] S. Mahabunphachai, O. N. Cora, M. Koc, 2010, Effect of Manufacturing Processes on Formability and Surface Topography of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plates, J. Power Sources, Vol. 195, No. 16, pp. 5269~5277.
- [12] H. J. Kwon, C. G. Kang, 2011, Formability of Aluminium Embossing Sheets with Controlled Stamping Machine for PEM Fuel Cell, Mater. Res. Innovations, Vol. 15, pp. s126~s130.
- [13] W. J. Song, S. C. Heo, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim, 2011, Evaluation of Strain, Strain Rate and Temperature Dependent Flow Stress Model for Magnesium Alloy Sheets, Trans. Mater. Process. Vol. 20, No. 3, pp. 229~235.