

## 고분자 전해질 연료전지용 극박 금속재 성형 기술

봉혁종<sup>1</sup>

1. 오하이오 주립대학교 재료공학부

### Ultra-Thin Sheet Metal Forming Technologies for PEM Fuel Cell Application

H. J. Bong

1. Department of Materials Science and Engineering, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

#### 1. 개요

최근 자동차 업계에선 배기가스와 같은 환경 문제로 인하여 기존의 내연 기관을 대체할 연료전지에 대한 관심이 증대되고 있다. 현재 개발 중인 다양한 연료전지 중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)는 기타 연료전지에 비해 우수한 저온 작동성, 높은 전류 및 출력밀도, 지속 시간, 간단한 구조 등으로 인해 가장 큰 관심을 받고 있다. 고분자 전해질 연료전지는 다양한 범위의 출력을 낼 수 있기에 여러 분야에 적용 가능하다. 현재는 가정용 발전 전원이나 연료전지 자동차에 집중되어 연구가 진행중에 있고 여러 시제품이 발표 및 시운전 중에 있다.

고분자 전해질 연료전지의 다양한 구성 요소 중 분리판은 전체 연료전지의 60-80%의 무게와 30-45%의 비용을 차지하기 때문에[1] 분리판의 경량화와 함께 가격을 낮추는 것이 매우 중요하다. 과거부터 연료전지 분리판용 재료로 고밀도 그라파이트가 많이 이용되어 왔다. 하지만 고밀도 그라파이트가 가지는 취성으로 인해 기계적인 가공이 어려워 현재는 지양되는 추세이다. 대신 우수한 기계적, 전기적, 열적 성질을 가지고, 가공비가 적게 드는 금속 재료에 관심이 집중되고 있다[1,2].

고분자 전해질 연료전지 하나에는 대략 수 백장

이상의 분리판이 적층되기 때문에, 실제 자동차용 연료전지에 금속재를 적용하고 이를 상용화 시키기 위해선 재료의 두께를 최소화하여 연료전지 무게와 부피를 줄여야 한다. 이를 위해선 매우 얇은 재료 두께가 요구된다. 하지만 현재 이같은 극박재의 성형성 평가에 관한 표준 실험법이 정립되어 있지 않고, 성형 공정에 대한 논문이나 자료가 매우 부족하여 극박재의 성형에는 수 많은 제약이 따르게 된다 [3~5].

본 논문에서는 가장 먼저 일반 두께의 금속 판재와 다르게 나타나는 극박재의 기계적 특성에 대해 간략히 살펴보고, 현재까지 연료전지용 극박 금속재의 성형에 관해 발표된 논문 내용을 바탕으로 각 성형 공정의 장단점에 대해 간략히 소개하고자 한다. 마지막으로 극박 금속재 성형시의 스프링백에 관해 논하고자 한다.

#### 2. 극박 금속재의 크기 효과(size effect)

일반적 두께의 금속 판재와 다르게 극박재에서는 크기 효과가 나타난다. 크기 효과는 결정립(grain) 크기와 시편 크기의 비율에 따라 재료의 물성이 달라지게 되는 현상으로, 판재의 경우 일반적으로 판재의 두께 방향으로 결정립의 수가 10개 이하가 될 때 나타난다고 알려져 있다[6]. Fig. 1은 각기 다른 결정립

크기를 가지는 0.4mm 두께의 구리 박판재료에서 나타나는 크기 효과를 보여주는데, 결정립이 커짐에 따라 전체적인 응력값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 기존의 거시적 관점의 연속체 역학을 직접적으로 극박 금속재의 성형 해석에 적용할 경우 크기 효과를 고려되지 않게 되어 해석의 정확도가 떨어지게 된다. 이 같은 문제점에 기반하여 크기 효과를 설명하기 위한 다양한 모델이 제시되었고, 이를 성형 해석에 접목시킨 다양한 예시가 보고되었다[7~9].

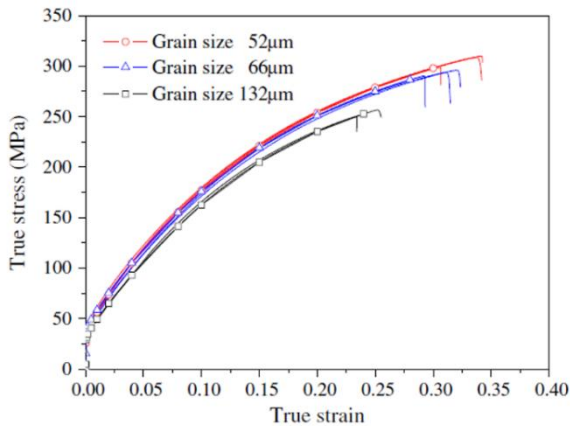


Fig. 1 Grain and specimen size effects on flow stress of copper foil [10]

이들 중 가장 일반적으로 잘 알려진 모델은 표면층 모델(surface layer model)이다. 이 모델에서는 Fig. 2에 도시된 것과 같이 재료에 존재하는 결정립들을 내부 결정립(internal grain)과 표면 결정립(surface grain)으로 나누어 크기 효과를 설명한다. 전위학의 관점에서 표면 결정립에 위치한 전위들은 결정립계(grain boundary)로 인한 이동의 제약이 내부 결정립에 존재하는 전위들에 비해 상대적으로 덜하기 때문에 강도가 낮게 나타난다. 이를 표현하기 위해 다음과 같은 표면층 모델이 제안되었다[7,8].

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{N_s \sigma_s + N_i \sigma_i}{N} \quad (1)$$

위 식에서  $\sigma$ 는 재료의 응력,  $\sigma_s$ 와  $\sigma_i$ 는 각각 표면 결정립과 내부 결정립의 응력,  $N_s$ 와  $N_i$ 는 각각 표면 결정립과 내부 결정립의 개수,  $N$ 은 총 결정립의 수를 나타낸다. 위 모델을 접목시킨 성형 해석을 통해 크

기 효과가 실제 분리판 성형시의 펀치(punch) 하중과 재료 응력 분포에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다[8].

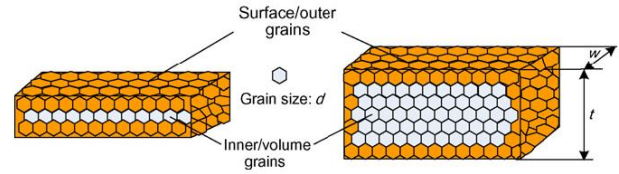


Fig. 2 Surface and inner grains in the sheet specimen [8]

### 3. 극박 금속재의 성형 공정

고분자 전해질 연료전지 스택의 개념도가 Fig. 3에 도시되어 있다. 기본적으로 막-전극 집합체(membrane electrode assembly)와 분리판이 반복적으로 적층되어 있는 구조이다. 여기서 분리판은 핵심부품으로 미세 유로(micro channel)를 통하여 반응 가스(산소, 수소)를 공급해주고 연료전지 운전 시 생기는 물을 제거하는 통로 역할을 하는 동시에 열을 방출하기 위한 냉각관의 역할도 한다. 이때 연료전지의 효율 향상을 위해 분리판 미세 유로의 치수 정밀도와 깊이가 매우 중요하다.

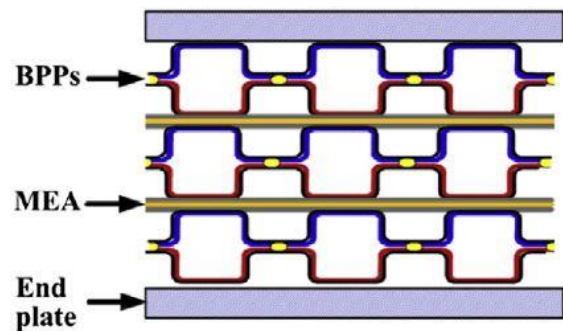


Fig. 3 Typical structure of PEMFC stack [2]

현재까지 다양한 성형법들을 통해 미세 유로의 치수 정밀도와 깊이를 향상 시키기 위한 연구가 진행되었다. 여러 성형법들 중에서 스탬핑(stamping), 서보 프레스(servo-press), 액압성형(hydroforming), 고무성형(rubber forming), 방전가공(electro discharge machining)등이 가장 흔하게 적용되어 왔는데, 이들과 기타 성형법들의 장단점을 소개하고, 추후 개선 방향에 대해 간략히 논하고자 한다.

### 3.1 스탬핑

위의 성형 공정 중 가장 적은 비용과 가장 높은 생산성의 장점을 가지는 스탬핑 공정은 현재까지 극박 금속재의 성형에 가장 흔하게 이용되어 왔다. 그 중 성형 속도 및 하중과 같은 스탬핑 공정 인자에 관한 연구가 가장 활발히 진행 되었다[11,12].

일반 스탬핑 공정을 이용한 분리판 성형 시 가장 큰 문제는 펀치와 다이(die)부에서 재료에 국부 necking(localized necking)이 크게 나타난다는 것인데, 이를 보완하기 위해 다단 성형법이 제안 되었다. 실제로 다단 성형 공정법으로 일반 스탬핑 공정에 비해 재료의 두께 감소율을 40% 이상 감소시키면서 미세 유로의 깊이를 25% 이상 향상시킨 연구결과가 발표되었다[4].

### 3.2 서보 프레스

최근 들어 각광받고 있는 성형 기술중에 하나인 서보 프레스 성형법은 기존의 스탬핑 기술과 비교하여 다양한 장점을 가진다. 서보 프레스의 가장 큰 장점은 Fig. 4와 같이 프레스의 슬라이드(slide)를 자유자재로 제어할 수 있다는 것이다. 이를 통해 성형성의 향상이나 스프링백(springback)의 개선과 같은 효과를 가져올 수 있기에 이를 통한 공정 최적화에 대한 연구가 주로 진행되고 있다.

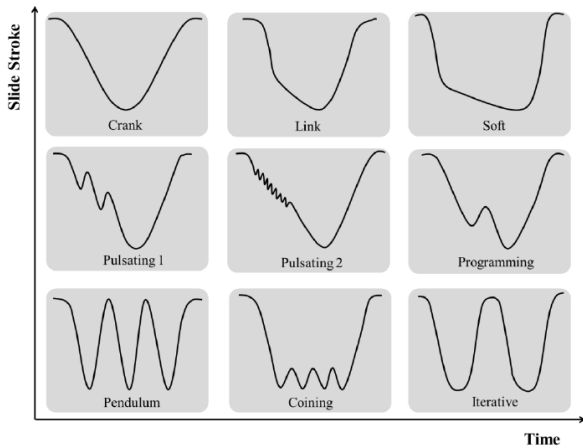


Fig. 4 Typical slide motions in servo-press

최근 들어, 서보 프레스는 연료전지 분리판 성형에 다양한 형태로 적용되고 있다. 최근의 한 연구에선, 극박 오스테나이트계 스테인리스강을 이용한 분리판 성형에서 서보프레스의 슬라이드 제어를 통해 미세 유로의 깊이를 증가시킨 결과가 발표되었다[13].

하지만, 위 논문에선 시행착오(trial-and-error)에 기반한 실험 결과만을 보여주었고, 추후에 성형 해석을 통한 연구를 통해 서보 프레스 성형시의 재료의 성형 성향상은 재료내의 응력 완화(stress relaxation) 그리고 툴과 재료의 접촉 조건 변화에 기인한다고 밝혀졌다[5].

### 3.3 액압 성형

액압 성형법은 주로 파이프 형태로 가공된 폐단면 구조 판재의 중간부에 내압을 가해 가공하는 성형 기술이다. 본 기술은 스탬핑 기술에 비해 성형 후 표면 품질이 우수하고[12] 스프링백이 적게 발생한다는 장점이 있기에 연료전지 분리판 성형에도 흔하게 적용되어 왔다. Fig. 5에 도시된 것처럼, 액압 성형법을 이용한 연료전지 성형시 상하부 다이 사이에 판재가 위치하게 되고 액압을 통해 판재가 금형 캐비티(cavity)로 밀려 들어가게 되면서 미세 유로 형태로 성형되게 된다.

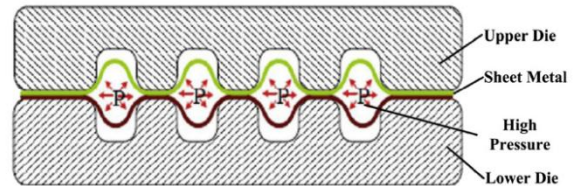


Fig. 5 Schematics of hydro forming process [14]

하지만 액압 성형법을 이용한 분리판 성형시 일반적으로 미세 유로의 반경부에서 충분한 치수 정밀도를 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 개선하려면 고압의 장비를 갖추어야 하는데 이를 위해선 매우 큰 공간을 확보해야 하는 문제점이 생긴다. 또한, 고압을 버티기 위한 소재의 실링(sealing) 문제 역시 대두된다. 이 같은 문제를 동시에 해결하기 위해 액압 성형을 이용해 예비 성형한 판재를 최종단계에서 스탬핑 기술을 이용해 최종 성형하는 공정이 개발 되었다[15]. 하지만 이에선 두 개의 개별적인 공정과 장비가 필요하기에 비용과 효율성 측면에서 상용화에는 한계가 있다.

### 3.4 고무 성형

고무 성형법은 Fig. 6에 나와있는 것과 같이 경질의 다이와 고무만을 이용하는 간단한 성형법이다. 따라

서 고무 성형에는 상하부의 금형을 모두 제작해야 하는 스탬핑, 액압 성형과는 달리 하나의 다이만 제작하면 되기에 금형 제작에 시간 및 비용이 적게 들고, 상하부 금형의 얼라인먼트(alignment)가 필요 없이 자가 어셈블리(self-assembly)가 된다는 장점이 있다. 하지만 고무 성형법은 고무의 탄성 변형이 너무 크기 때문에 충분한 치수 정확도를 달성하기가 어려운 큰 단점이 있다. 특히 응력이 집중되게 되는 다이의 반경부에서의 치수 정밀도가 확연히 떨어지게 된다.

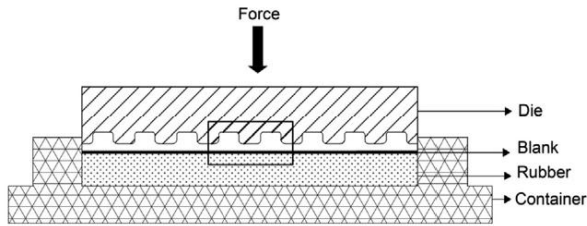


Fig. 6 Schematics of rubber forming process [16]

일반적인 고무 성형시 Fig 7 (a)와 같이 편평한 형태의 고무를 사용하는데, 성형이 시작됨과 동시에 판재가 다이와 고무 사이에 강한 압력으로 고정되게 되어 캐비티로 밀려 들어가지 못하게 되는 큰 문제점이 있다. 이는 치수 정밀도를 떨어지게 할 뿐 아니라, 다이의 반경부에서 판재의 국부 네킹을 야기시킨다. 최근에는 이 같은 문제를 해결하기 위해 Fig. 7 (b)와 같이 미세 유로 형상으로 가공된 하부의 고무를 이용하여 치수 정밀도를 향상 시키고자 하는 연구도 진행되었다[17]. 하지만, 이는 고무 성형이 가지는 가장 큰 장점인 금형 제작 시간 및 비용 측면에서의 유리함을 잃게 만들기에 이에 대한 고찰이 필요하다.

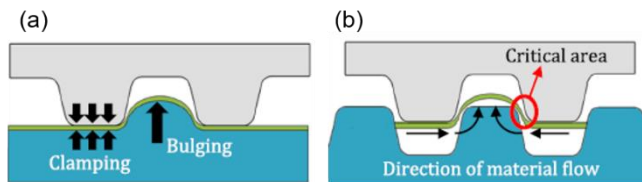


Fig. 7 Schematics of (a) conventional and (b) semi-rubber forming processes [17]

### 3.5 기타 성형 기술

앞서 살펴본 성형 공정 이외에도 방전가공 [18]

전자기 성형[19], 진공 다이캐스팅[20,21], 전기화학가공[22], LIGA(Lithography Gavanik Abformung) 공정[23] 등의 성형법들이 극박 금속재 분리판의 성형에 적용되어 왔다. 하지만, 이들은 아직 개발 단계 수준으로, 앞서 살펴본 성형 공정들에 비해 비용도 많이 들고 생산성도 떨어지기 때문에, 이 같은 단점들을 개선하기 위한 연구가 필요하다. 현재까지 발표된 극박 금속재 분리판의 성형에 관한 연구 결과를 성형법, 재료 및 두께, 미세 유로 깊이에 관해서 Table 1에 정리하였다.

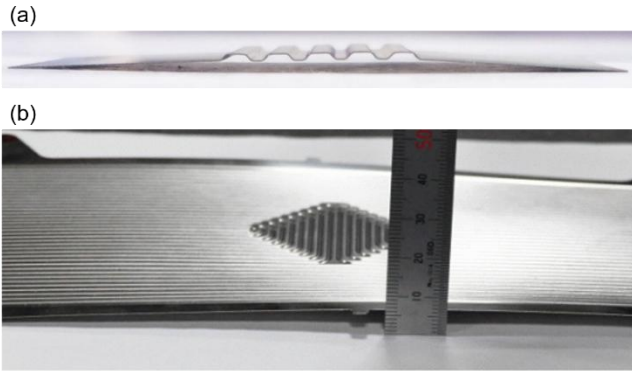
Table 1 Summary of recent achievement in fuel cell bipolar plate forming using ultra-thin sheet metals

공정	재료	두께 (μm)	유로 깊이 (mm)	참조
스탬핑	SS316L	51	0.75	[11]
	SS470	75	0.50	[4]
서보 프레스	SS304	300	0.60	[13]
	SS470	100	0.49	[5]
액압 성형	SS304	110	0.56	[15]
	AA6061-T6	500	1.40	[24]
고무 성형	SS316L	100	0.90	[16]
	SS316	100	0.75	[17]
	AA1050	200	0.40	[25]
	AA1050	200	0.40	[26]
방전 가공	SS316L	100	0.50	[18]
전자기 성형	SS439	100	0.26	[19]
진공 다이 캐스팅	Silafont-36	800	0.30	[20]
	Al-Mg3	800	0.80	[21]
전기화학 가공	SS316	600	0.20	[22]
LIGA	SS304	2600	0.20	[23]

## 4. 극박 금속재의 스프링백

극박 금속재를 연료전지 분리판에 적용하기 위해 지금까지 살펴본 성형성뿐 아니라 스프링백 역시 반드시 개선되어야 한다. 일반적으로 판재의 스프링백은 재료 두께에 반비례 하기 때문에 극박재의 스프링백은 일반 두께의 판재에 비해 매우 크게 나타나게 된다. 가장 흔하게 발생하는 극박 금속재의 스프링백 양상이 Fig. 8에 예시로 나와 있다. Fig. 8 (a)는 미세 유로 부분의 잔류 응력으로 인해 나타나는 스프링백, Fig 8 (b)는 비대칭 형태의 분리판 디자인으로 인해 성형 후 전체적으로 분리판이 뒤틀린 예를 보여준다. 하나의 연료전지에는 수백장 이상의

분리판이 적층 되기 때문에 이와 같이 수 mm에 달하는 스프링백은 적층 과정에서 문제점을 야기하게 된다. 따라서 스프링백에 관한 연구 역시 극박 금속재의 연료전지 분리판 적용에 매우 중요하다.



**Fig. 8 Example of springback of ultra-thin sheet (a) microscopic springback (b) macroscopic twist springback [27]**

하지만, 극박 금속재의 성형성에 관한 연구에 비해 상대적으로 스프링백에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 스프링백의 개선은 스프링백의 정확한 예측에 기반하여야 하는데, 이를 위해서 하중의 방향 전환시 소재의 경화 거동을 정확히 측정 혹은 예측하여 성형 해석에 접목 시켜야 한다. 이를 위해 가장 일반적으로 인장/압축 시험 혹은 단순 전단 시험 등이 이용이 된다. 하지만, 이 같은 방법들은 좌굴이나 주름 문제로 인하여 극박 금속재에 직접적으로 적용되기 어렵다는 것이 밝혀졌다[27]. 이 같은 실험법들을 대체하기 위해 최근 들어 소성결정학 유한요소해석을 이용하여 극박재의 물성을 예측하는 연구도 진행되고 있다[28].

### 5. 결론

가정용, 자동차용 전원의 미래 기술로 개발되고 있는 고분자 전해질 연료전지의 상용화를 위해 분리판의 경량화와 함께 가격 경쟁력을 갖추는 것이 매우 중요하다. 여기서 가격 경쟁력은 재료 자체의 가격뿐만 아니라 분리판 가공 비용을 포함한다. 특히, 분리판의 경량화를 위해 재료의 두께를 줄이면서 야기되는 재료 성형성 및 스프링백에 관련된 문제점들과 그에 대한 극복 방안에 관한 연구가 전 세

계적으로 다양한 방법으로 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내적으로 최근에서야 분리판 재료 개발과 그 성형 공정에 관한 연구가 시작되었고 이로 인해 아직 고유의 기술을 확보하지 못한 실정이다. 따라서 외국과의 기술격차를 줄이고 경쟁력을 확보하기 위해 다양한 연구 기관들의 역량 결집과 또 그에 필요한 정부적 투자가 필요하다.

### REFERENCES

- [1] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, 2005, Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 30 pp. 1297~1302.
- [2] L. Peng, P. Yi, X. Lai, 2014, Design and Manufacturing of Stainless Steel Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 39, pp. 21127~21153.
- [3] H. J. Bong, F. Barlat, M.-G. Lee, D. C. Ahn, 2012, The Forming Limit Diagram of Ferritic Stainless Steel Sheets: Experiments and Modeling, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 64, pp. 1~10.
- [4] H. J. Bong, J. Lee, J.-H. Kim, F. Barlat, M.-G. Lee, 2017, Two-stage Forming Approach for Manufacturing Ferritic Stainless Steel Bipolar Plates in PEM Fuel Cell: Experiments and Numerical Simulations, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 42, pp. 6965~6977.
- [5] H. J. Bong, F. Barlat, M.-G. Lee, 2016, Probing Formability Improvement of Ultra-thin Ferritic Stainless Steel Bipolar Plate of PEMFC in Non-conventional Forming Process, *Metall. Mater. Trans. A.*, Vol. 47 pp. 4160~4174.
- [6] M. A. Meyersm, E. Ashworth, 2007, A Model for the Effect of Grain Size on the Yield Stress of Metals, *Philos. Mag. A.*, Vol. 46, pp. 737~759.
- [7] L. Peng, F. Liu, J. Ni, X. Lai, 2007, Size Effects in Thin Sheet Metal Forming and Its Elastic-plastic Constitutive Model, *Mater. Des.*, Vol. 28, pp. 1731~1736.
- [8] L. Peng, X. Lai, H.-J. Lee, J.-H. Song, J. Ni, 2009, Analysis of Micro/mesoscale Sheet Forming Process with Uniform Size Dependent Material Constitutive Model, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 526, pp. 93~99.
- [9] S. Mahabunphachai, M. Koç, 2008, Investigation of Size Effects on Material Behavior of Thin Sheet Metals using Hydraulic Bulge Testing at Micro/

- meso-scales, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 48, pp. 1014~1029.
- [10] J. G. Liu, M. W. Fu, J. Lu, W. L. Chan, 2011, Influence of Size Effect on the Springback of Sheet Metal Foils in Micro-bending, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 50, pp. 2604~2614.
- [11] F. Dundar, E. Dur, S. Mahabunphachai, M. Koç, 2010, Corrosion Resistance Characteristics of Stamped and Hydroformed Proton Exchange Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plates, *J. Power Sources.*, Vol. 195, pp. 3546~3552.
- [12] S. Mahabunphachai, Ö. N. Cora, M. Koç, 2010, Effect of Manufacturing Processes on Formability and Surface Topography of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plates, *J. Power Sources. Voll.* 195 pp. 5269~5277.
- [13] N. Hagino, J. Endo, S. Kato, S. Okudera, M. Maruyam, M. Kubota, 2008, Processing of a Metallic Fuel Cell Separator by Stamping, *Proc. 9th Int. Conf. Technol. Plast.*, pp. 974~979.
- [14] X.-D. Wang, Y.-X. Huang, C.-H. Cheng, J.-Y. Jang, D.-J. Lee, W.-M. Yan, A. Su, 2009, Flow Field Optimization for Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Varying Channel Heights and Widths, *Electrochim. Acta.*, Vol. 54, pp. 5522~5530.
- [15] M. B. Osia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorgi, 2013, Forming Metallic Micro-feature Bipolar Plates for Fuel Cell using Combined Hydroforming and Stamping Processes, *Iran. J. Energy Environ.*, Vol. 4, pp. 91~98.
- [16] R. Kolahdooz, S. Asghari, S. Rashid-Nadimi, A. Amirfazli, 2017, Integration of Finite Element Analysis and Design of Experiment for the Investigation of Critical Factors in Rubber Pad Forming of Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cells, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 42, pp. 575~589.
- [17] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee, M. Hosseinzadeh, 2017, Fabrication of Metallic Bipolar Plates in PEM Fuel Cell using Semi-stamp Rubber Forming Process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1~12.
- [18] J.-C. Hung, T.-C. Yang, K. Li, 2011, Studies on the Fabrication of Metallic Bipolar Plates-Using Micro Electrical Discharge Machining Milling, *J. Power Sources.*, Vol. 196, pp. 2070~2074.
- [19] G. S. Daehn, S. Hatkevich, J. Shang, L. Wilkerson, 2010, Commercialization of Fuel Cell Bipolar Plate Manufacturing by Electromagnetic Forming, 4th Int. Conf. High Speed Form., pp. 47~56.
- [20] C. K. Jin, C. G. Kang, 2012, Fabrication by Vacuum Die Casting and Simulation of Aluminum Bipolar Plates with Micro-channels on Both Sides for Proton Exchange Membrane(PEM) Fuel Cells, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 37, pp. 1661~1676.
- [21] C. K. Jin, C. G. Kang, 2011, Fabrication Process Analysis and Experimental Verification for Aluminum Bipolar Plates in Fuel Cells by Vacuum Die-casting, *J. Power Sources.*, Vol. 196, pp. 8241~8249.
- [22] S.-J. Lee, C.-Y. Lee, K.-T. Yang, F.-H. Kuan, P.-H. Lai, 2008, Simulation and Fabrication of Micro-Scaled Flow Channels for Metallic Bipolar Plates by the Electrochemical Micro-machining Process, *J. Power Sources.*, Vol. 185, pp. 1115~1121.
- [23] S.-J. Lee, Y.-P. Chen, C.-H. Huang, 2005, Electroforming of Metallic Bipolar Plates with Micro-featured Flow Field, *J. Power Sources.*, Vol. 145, pp. 369~375.
- [24] G. Palumbo, A. Piccininni, 2013, Numerical-experimental Investigations on the Manufacturing of an Aluminium Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells by Warm Hydroforming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 69, pp. 731~742.
- [25] S. S. Lim, Y. T. Kim, C. G. Kang, 2013, Fabrication of Aluminum 1050 Micro-channel Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plate using Rubber-pad-Forming Process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 65, pp. 231~238.
- [26] C.-Y. Son, Y.-P. Jeon, Y.-T. Kim, C.-G. Kang, 2012, Evaluation of the Formability of a Bipolar Plate Manufactured from Aluminum Alloy Al 1050 using the Rubber Pad Forming Process, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, Vol. 226, pp. 909~918.
- [27] H. J. Bong, Ph.D thesis: Forming of Ultra-Thin Ferritic Stainless Steel Sheets, Pohang University of Science and Technology, 2015.
- [28] H. J. Bong, J. Lee, M.-G. Lee, F. Barlat, D.Y. Kim, Springback Prediction of Ultra-thin Ferritic Stainless Steel Incorporated with Dislocation-density Based Crystal Plasticity Finite Element, In Preparation.