연료전지 분리판의 마이크로 채널 제작을 위한 가변성형공정의 실험적 및 수치적 연구

김홍석[#] · 심재민¹

Experimental and Numerical Analyses of Flexible Forming Process for Micro Channel Arrays of Fuel Cell Bipolar Plates

H. S. Kim, J. M. Shim

(Received October 24, 2012 / Revised November 16, 2012 / Accepted November 19, 2012)

Abstract

The fuel cell is a very promising power generation system combining the benefits of extremely low emissions, high efficiency, ease of maintenance and durability. In order to promote the commercialization of fuel cells, a flexible forming process, in which a hyper-elastic rubber is adopted as a medium to transmit forming pressure, is suggested as an efficient and cost effective manufacturing method for fuel cell bipolar plates. In this study, the ability of this flexible forming process to produce the micro channel arrays on metallic bipolar plates was first demonstrated experimentally. Then, a finite element (FE) model was built and validated through comparisons between simulated and experimental results. The effects of key process parameters on the forming performance such as applied load and punch velocity were investigated. As a result, appropriate process parameter values allowing high dimensional accuracy without failure were suggested.

Key Words : Fuel Cell, Bipolar Plate, Flexible Forming, Micro Channel, Finite Element Analysis

1. 서 론

최근 환경 및 연료고갈 문제에 대한 인식이 증가하면서 새로운 대체에너지 개발이 시급한 과제로 제기되고 있다. 수소와 산소를 연료로 사용하는 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 높은 효율과 빠른 시동, 낮은 반응온도, 안전성 등의 장점을 가지고 있어 대체에너지 중 가장 가능성이 높은 미래형 에너지원으로 떠오르고 있다[1].

고분자 전해질 연료전지의 보급을 확대하기 위해서는 주요 부품의 성능과 신뢰성을 향상시키고 시스템 가격을 낮추는 것이 무엇보다 중요하다.

연료전지의 다양한 부품들 중에서 분리판(Bipolar plate)은 반응가스를 공급하고 전기를 이동시키는 역할을 수행하는 핵심 부품으로서 연료전지 전체 시스템 무게의 60% 이상과 가격의 30% 이상을 차지하고 있다[2]. 따라서 고분자 전해질 연료전지의 상용화를 위해서는 분리판의 효과적인 제조공법 개발이 필수적이다.

가변성형공정(Flexible forming process)[3]은 고무소재 등을 이용하여 블랭크(Blank)에 균일한 압력을 부가하여 성형하는 공법으로, 공정이 단순하여 제작 시간과 비용을 절감할 수 있고, 제품의 높은 성형성 및 우수한 표면 품질도 구현할 수 있다.

1. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology
Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
E-mail: hongseok@seoultech.ac.kr

따라서 가변성형공정은 연료전지 금속 분리판 제작에 매우 효과적인 가공방법으로 주목 받고 있으며, 다양한 관련 연구가 진행되고 있다. Browne와 Battikha[4]는 고무 소재를 이용한 가변금형을 통하여 알루미늄 박판을 성형하였고 클램핑 힘과 마찰특성이 성형성능에 미치는 영향을 고찰하였다. Ramezani 등[5]은 천연고무(Natural rubber), 실리콘 고무(Silicone rubber), 폴리우레탄 고무(Polyurethane rubber) 등 서로 다른 소재를 이용한 가변성형공정에서 고무의 물성과 성형속도에 따른 성형제품의 두께와 응력변화를 관찰하였다. Liu 등[6]은 소재의 변형특성 고찰을 통해 성형 채널의 종횡비(Aspect ratio)에 따라 오목형(Concave) 혹은 볼록형(Convex) 가변성형공정을 설계할 것을 제안하였다. 또한 최근에는 유한요소해석(Finite element analysis)을 이용하여 금속 분리판의 효율적인 설계와 다양한 공정변수들의 영향을 분석하는 연구가 많이 진행되고 있다. Peng 등[7]은 우레탄(Urethane) 고무를 사용한 SS304 분리판의 가변성형공정에서 유한요소해석을 이용하여 마이크로 채널의 형상과 성형 제품의 품질과의 관계를 연구하였다. Ramezani 등[8]은 블랭크와 성형 툴 사이의 마찰특성 변화에 따른 성형성능의 변화를 유한요소해석을 통하여 고찰하였다.

이와 같이 가변성형공정에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만 금속 분리판 제작의 상용화에 적용하기 위해서는 여전히 비선형적 공정특성과 최적화된 공정설계 등에 대한 많은 연구가 필요하다. 특히 가변성형공정에 대한 유한요소해석은 단순한 이차원 채널구조에 관한 것들이 많아 실제 공정을 정확히 묘사하기 어렵다. 본 연구에서는 실리콘 고무를 성형 툴로 사용하는 가변성형공정을 이용하여 알루미늄 분리판에 800 μ m 크기의 나선형 유동채널(Flow channel)을 제작하였다. 또한 삼차원 유한요소해석 모델을 수립하고 그 유효성을 검증함으로써 금속 분리판 제작공정을 효율적으로 설계하고자 하였다. 성형 힘과 성형속도, 탄성체의 물성 등 주요 공정변수들이 성형성능에 미치는 영향을 고찰하였으며, 성형성을 높일 수 있는 공정조건을 제시하였다.

2. 실험장치

금속 분리판 제작을 위한 가변성형 실험장치를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 펀치(Punch) 상

Fig. 1 Sketch of the tooling for bipolar plate fabrication by flexible forming

Fig. 2 Dimensions of the rigid die with micro channel arrays

단에 성형 힘이 가해지면 펀치가 하향 운동을 하고 고무패드(Rubber pad)가 탄성적으로 변형하게 된다. 여기서 발생하는 균일한 크기의 역압(Counter pressure)이 블랭크를 다이 캐버티(Cavity)로 가압하여 미세채널을 성형하게 된다.

만능재료시험기(Universal testing machine)를 이용하여 펀치에 성형 힘을 부가하였고 블랭크 소재는 200 μ m 두께의 Al1050을 사용하였다. 블랭크를 가압하는 탄성체로는 두께 15mm의 실리콘 고무를 사용하였다.

Fig. 2에 금속 분리판 제작을 위하여 설계된 다이의 형상을 나타내었다. 분리판의 전체 크기는 25mm $\times$ 25mm이고 채널의 구배각은 15 $^\circ$, 깊이는 600 μ m, 곡률반경을 300 μ m로 설계되었다. 소재의 두께를 고려하면 최종적으로 800 μ m 폭의 채널을 가지는 분리판을 성형하게 된다. 다이는 금형강을 절삭가공하여 제작하였고, 열처리를 통하여 경도를 향상시켰다.

Fig. 3 A 3D finite element model for flexible forming process

Fig. 4 True stress vs. true strain curve of Al1050 alloy

3. 유한요소해석

보다 효과적인 가변성형공정의 설계와 분리판 제작을 위하여 삼차원 유한요소해석 모델을 수립하였다. Fig. 3에 나타난 것처럼 펀치와 다이는 강체(Rigid body)로 가정하여 모든 자유도를 구속하였고 접촉면은 이상적인 평면으로 가정하였다. 또한 해석을 단순화하기 위하여 컨테이너 대신 탄성체의 측면방향 변형을 구속하였고, 탄성체와 다이 사이의 마찰계수는 0.2, 탄성체와 블랭크의 마찰계수는 0.1로 가정하였다[9]. 해석은 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하였고, 인장시험을 통

한 Al1050의 물성[9]은 Fig. 4에 나타내었다.

본 연구에서는 성형 힘을 전달하는 매개체로 초탄성(Hyperelastic) 성질을 가지는 실리콘 고무를 사용하였다. 고무와 같은 물리적 성질을 가지는 물질은 낮은 응력에서도 높은 변형률을 가지기 때문에 기존의 탄성계수(Young's modulus)와 훅의 법칙(Hook's law)에 따라 재료의 거동을 표현하기 어렵다.

이와 같은 대변형(Large deformation)의 탄성거동은 변형률 에너지 밀도(strain energy density) ϕ 를 이용하여 다음과 같이 묘사한다[10].

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (1)$$

여기서 σ_{ij} 와 ϵ_{ij} 는 각각 Piola-Kirchhoff 응력 텐서와 Green-Lagrange 변형률 텐서를 나타낸다. 유한요소해석을 위하여 고무의 초탄성 거동을 일차 Ogden 모델[10]을 이용하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$\phi = \frac{2\mu}{\alpha^2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주 신장률(Principal stretch ratio)를 나타내고 α 는 변형경화 계수, μ 는 재료계수를 나타낸다. 일축 압축이나 인장상태에서 소재의 비압축성을 가정하면 주 신장률의 관계를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \quad (3)$$

따라서 식(1)의 변형률 에너지 밀도를 일축 응력 상태에 적용하여 다음을 유도해 낼 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{2\mu}{\alpha} (\lambda_1^{\alpha-1} - \lambda_1^{-\alpha/2}) \quad (4)$$

Ogden 모델을 이용하여 실리콘 고무의 비선형 거동[11]을 예측한 결과는 Fig. 5에 나타내었고, 실험결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5 Engineering stress vs. stretch ratio of silicone rubber in uniaxial compression

4. 결과 분석

Fig. 6 에 가변성형공정 실험 및 유한요소해석을 통하여 성형된 알루미늄 분리판의 예를 나타내었다. 20kN의 성형 힘 조건에서는 재료의 파단이 관찰되지 않았으며 제품의 표면특성도 주름(Wrinkling) 등의 발생 없이 양호한 것으로 판단되었다. 또한 채널의 코너 부분에 소성변형이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

성형 후 분리판 채널의 두께를 측정하기 위하여 방전가공(Electrical discharge machining)을 통해 분리판을 반으로 분리하였고, Fig. 7 에 나타난 것처럼 절단면을 따라 두께 변화를 현미경으로 측정하였다.

Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 성형 힘 20kN의 조건에서 최대 20%의 두께 감소가 관찰되었다. 채널의 두께 감소는 채널의 상부와 하부 평면을 연결하는 측면 부위에서 주로 진행된 것을 관찰할 수 있다. 유한요소해석을 통해서도 실험과 유사한 두께 분포를 예측할 수 있었다. 최대오차는 10% 이내로 모델의 정확성을 확인할 수 있었다. 하지만 유한요소해석에서는 채널의 상부 평면의 두께가 하부 평면보다 작게 관찰되었으나 실험에서는 측정오차 등으로 이를 확인할 수 없었다.

Fig. 8 은 다양한 성형 힘 및 속도 조건에서 분리판 채널의 깊이를 측정한 결과를 보여주고 있다. 유한요소해석의 결과는 실험에서 측정한 채널의 깊이와 매우 유사하여 모델의 건실성을 다시 한번 확인할 수 있었다.

성형 힘과 성형 속도가 증가할수록 채널의 깊이

(a) Experiment

(b) FEA (front and backside view)

Fig. 6 Aluminum bipolar plate fabricated by flexible forming process (F=20kN)

가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 성형 속도는 성형 힘에 비하여 상대적으로 민감도가 작은 것으로 관찰되었다. 이는 성형 소재의 변형률 민감도(Strain rate sensitivity)가 상온에서 두드러

Fig. 7 Comparison of FEA and experimental thinning results of the formed part (F=20kN)

Fig. 8 Channel heights of the formed part at various forming load

지지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 유한요소해석에서 변형률 민감도는 고려하지 않았고 준정적(Quasi-static) 상태를 가정하여 해석을 실시하였다. 실험 결과 성형 힘 25kN 이상에서는 재료의 파단이 관찰되었다. 이는 같은 조건의 유한요소해석에서 최대 두께 감소율 33%에 해당하기 때문에 이를 본 연구에서의 파단기준(Failure criterion)으로 설정하였다. 본 공정에서 채널의 성형성은 소재의 인장파괴 특성과 밀접한 관련이 있기 때문에 설정된 파단기준은 소재의 인장시험에서 얻어진 파단변형률(Failure strain)의 값($\epsilon_f=0.3\sim0.45$)과 유사하다.

Fig. 9(a)에 나타난 것처럼 소재의 파단은 변형이 가장 심한 채널의 코너 부분(Region I)에서 관찰되었으며, 채널의 길이방향으로도 다이의 어깨(Shoulder) 및 측벽(Side wall) 부분(Region II)에서

(a) Experiment

(b) FEA

Fig. 9 Comparison of critical failure region in the formed part between FEA and experiment (F=27kN)

상당한 두께감소가 관찰되었다. 이는 다이의 어깨부에 접촉한 시편이 굽힘 및 인장하중을 받아 변형할 때 마찰 및 블랭크 홀딩(Blank holding) 힘에 의해 유동을 제한 받기 때문에 나타나는 것으로 딥드로잉(Deep drawing) 및 스트레치 벤딩(Stretch bending) 공정에서도 유사한 파단을 관찰할 수 있다. Fig.9(b)에 나타난 것처럼 유한요소해석에서 예측한 파단위치는 실험결과와 잘 일치하였다.

본 연구에서 개발된 유한요소해석 모델은 소재 물성 및 접촉특성 모델링 오차, 성형 툴 가공오차, 측정오차 등의 많은 오차요인에도 불구하고 분리판의 두께 분포, 채널 깊이, 파단 위치 등의 측면에서 가변성형공정의 실험결과를 비교적 정확하게 예측하고 있어 향후 효율적인 공정 및 제품설계에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 가변성형공정의 설계변수는 채널의 구배각, 폭, 곡률반경과 성형 압력, 속도 프로파일, 고무 물성

Fig.10 Effect of rubber properties on forming performance

등 다양한 기하학적 변수와 공정변수로 구성되어 있기 때문에 유한요소해석은 설계변수의 영향 및 그 비선형적 상호관계 분석, 공정최적화 등을 수행하는데 많은 시간과 비용을 절약하게 할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 그 일부분으로 고무의 탄성거동 특성을 변화시켜 성형성능에 미치는 영향을 고찰하고, 성형성을 향상시킬 수 있는 공정조건을 제시하고자 하였다. Fig. 10에 나타난 것처럼 μ 를 감소시켜 고무의 경화특성을 변화시켰을 때, 같은 성형 힘 조건에서 경화계수가 감소할수록 성형된 채널의 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 μ 의 감소가 탄성체의 변형응력을 감소시켜 더 많은 탄성변형과 역압을 발생시키기 때문인 것으로 판단된다. 또한 동일한 채널 깊이에서 분리판 채널의 두께 감소율을 측정한 결과 μ 가 작아질수록 두께 감소율이 작아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 소프트한 탄성체가 보다 균일한 압력으로 소재의 국부적인 변형을 방지하기 때문인 것으로 보인다. 하지만 지나친 고무 소재의 연화는 성형 시스템의 내구성을 감소시키며, 또한 성형 성능도 고무의 물성 뿐만이 아닌 경도, 형상, 두께 등 많은 요인에 따라 변화할 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다

5. 결론

(1) 본 연구에서는 연료전지 금속 분리판의 효율적인 생산을 위하여 탄성체를 통하여 성형 힘을 전달하는 가변성형공정에 대한 실험적 및 수치적 연구를 수행하였다. 성형 힘 25kN 미만의 조

건에서는 재료의 파단이나 표면 주름이 없는 알루미늄 분리판을 성공적으로 제작할 수 있었다.

(2) 삼차원 유한요소해석 모델을 수립하여 실험 결과와 두께 분포를 비교하였을 때에는 최대오차가 10% 미만이었으며 채널 깊이 측면에서는 최대 15%미만의 오차를 보였다. 채널의 코너 부분이 두께 감소율이 가장 큰 위험부분으로 관찰되었고, 분리판을 반으로 분리하여 두께 변화를 관찰하였을 때에는 채널의 측벽 부위에서 두께 감소가 집중되는 것을 관찰할 수 있었다.

(3) 본 연구의 실험조건에서는 성형 힘이 성형 속도보다 분리판의 성형에 미치는 영향이 현저하였다. 또한, 고무의 물성변화가 성형성능에 미치는 영향을 고찰하였으며 소재의 변형경화 계수가 작아질수록 성형 채널의 깊이는 증가하고 채널의 두께 감소율을 작아지는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Mun, J. H. Jang, T. H. Kim, H. J. Lee, Y. H. Moon, 2011, Characterization of Direct Laser Melting Technology for the Fabrication of Fuel Cell Bipolar Plate, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 2, pp. 118~123.
- [2] 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.
- [3] S. Thiruvardchelvan, 2002, The Potential Role of Flexible Tools in Metal Forming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 122, No. 2-3, pp. 293~300.
- [4] D. J. Browne, E. Battikha, 1995, Optimisation of Aluminium Sheet Forming using a Flexible Die, J. Mater. Process. Technol., Vol. 55, No. 3-4, pp. 218~223.
- [5] M. Ramezani, Z. M. Ripin, R. Ahmad, 2010, Sheet Metal Forming with the Aid of Flexible Punch, Numerical Approach and Experimental Validation, CIRP J. Manuf. Sci. Technol., Vol. 3, No. 3, pp. 196~203.

- [6] Y. Liu, L. Hua, J. Lan, X. Wei, 2010, Studies of the Deformation Styles of the Rubber-pad Forming Process used for Manufacturing Metallic Bipolarplates, *J. Power Sources*, Vol. 195, No. 24, pp. 8177~8184.
- [7] L. Peng, D. Liu, P. Hu, X. Lai, J. Ni, 2010, Fabrication of Metallic Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Flexible Forming Process-numerical Simulations and Experiments, *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, Vol. 7, No. 3, pp. 031009-1~031009-9.
- [8] M. Ramezani, Z. M. Ripin, R. Ahmad, 2009, Computer Aided Modelling of Friction in Rubber-pad Forming Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 10, pp. 4925~4934.
- [9] X. Cui, J. Mo, S. Xiao, E. Du, 2011, Magnetic Force Distribution and Deformation Law of Sheet using Uniform Pressure Electromagnetic Actuator, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 21, No. 11, pp. 2484~2489.
- [10] R. W. Ogden, 1972, Large Deformation Isotropic Elasticity-on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids, *Proc. R. Soc. London A*, Vol. 326, No. 1567, pp. 565~584.
- [11] O. A. Shergold, N. A. Fleck, D. Radford, 2006, The Uniaxial Stress Versus Strain Response of Pig Skin and Silicone Rubber at Low and High Strain Rates, *Int. J. Impa. Eng.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1384~1402.