

전자기 성형시 금형과 소재의 접촉에 따른 성형성 개선 예측

이연희¹ · 김홍교¹ · 노학곤¹ · 안우진¹ · 김 정[#]

Prediction of the Formability Enhancement from Electromagnetic Forming due to Interaction between Tool and Blank Sheet

Y. H. Lee, H. K. Kim, H. G. Noh, W. J. An, J. Kim

(Received January 5, 2015 / Revised January 16, 2015 / Accepted January 27, 2015)

Abstract

Electromagnetic Forming is a high speed forming technology which uses electromagnetic (Lorentz's) forces to shape sheet metal parts. In the current study the effect of the tool-sheet interaction during electromagnetic forming on formability enhancement is investigated using FEM. The decrease in void volume fraction by having the sheet contact with die helps to improve formability. The main purpose of the current study was to predict improvement of formed sheets whether the sheet contacts or does not contact the die under experimental conditions and 3-D finite element analysis. The results show that fractures caused by the voids in the forming sheet appear only in some specific cases and the bulge height of the conical shape was shorter than the height with a free bulge. For the same height conditions, however, the formability was improved for the conical-shaped die when there is sheet contact with the die.

Key Words: Electromagnetic Forming, Conical-Shaped Die, Free Bulge Die, Void, LS-DYNA EM-Module, Contact

1. 서 론

고속 성형 기술(High speed forming)의 하나인 전자기 성형기술(EMF, Electromagnetic forming)은 가공하고자 하는 금속에 물리적 접촉 없이 전자기력을 작용하여 성형하는 기술이다. 짧은 시간(50~200 μ s) 동안 캐패시터로부터 방전된 전류가 코일에 가해지면 자속이 변화하고, 유도 전류가 흐르고 있는 금속 가공물은 로렌츠 힘(Lorentz's force)을 받게 되어 성형된다. 성형 공정 중에 코일과 금속 가공물 사이에 직접적인 물리적 접촉이 없으므로 가공물 표면의 결함, 윤활, 마멸 등으로 생기는 문제가 없고 코일 하나로 다양한 형상의 부품을 성형할 수 있는 장점 때문에 비교적 적은 시간에 반복적인 성형이 가능

하며 가공물의 재료적 성질은 유지가 가능하다. 근래 들어 전자기 성형 기술은 경량화를 위해 사용되는 고강도 강 스프링 백, 경량화 소재의 낮은 성형성 등을 개선하기 위한 방안 중 하나로 제시되고 있다. 기존의 전자기 성형 기술은 주로 접합공정에서 적용되었는데, 최근에는 전자기 성형의 단점을 보완하기 위하여 전자기 복합 공정 연구가 시도되고 있다[3, 4]. 하지만, 아직까지 기존 성형공법에 대비하여 전자기성형 공정에서 성형성이 개선되는 이유에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 전자기 성형 시 판재의 성형성에 금형과 판재의 접촉 여부를 달리하여 실험한 후 그 결과를 공극 체적률과 관련 지어 분석하였다. 그 후 3-D 전자기 성형 해석을 이용하여 가공물의

1. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail : greatkj@pusan.ac.kr



(a) Working coil (b) Actual equipment

Fig. 1 Electromagnetic forming apparatus

공극 체적을 값을 얻고 실제 결과물과 비교하였다. 그 결과, 금형의 간섭이 있는 경우 가공물의 성형성이 더 좋음을 알 수 있었다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 두 가지 금형을 이용한 전자기성형 실험 전자기 성형시 금형과 판재의 접촉에 따라 판재의 성형성에 어떤 영향을 미치는지 관찰하기 위하여 Fig. 1와 같은 장비를 이용하여 다음과 같은 실험을 진행하였다. 알루미늄 판재를 성형하기 위하여 최고 가용 전압 15kV, 가용 전기 에너지 32kJ인 성형장치와 실험 소재는 두께 0.8mm, 항복강도 193MPa, 고유저항 4.99 $\mu\Omega$ 인 Al 5052-H32를 사용하였다[9]. 사용된 금형의 모형은 가운데 부분이 완전히 뚫려있는 자유 벌지(Free bulge)와 원뿔 모양(Conical Shape)으로, 판재와 금형이 접촉하는 경우의 성형성을 관찰하였다. Fig. 2는 차례대로 자유 벌지 금형, 원뿔형 금형의 단면도이다. 특히 원뿔형 금형은 소재와 금형 옆면의 θ 를 자유 벌지 성형 시 파단된 소재의 각도를 기준으로 제작하였고, 35°, 37°, 39°로 변화시키면서 실험하였다. 코일에는 Fig. 3과 같이 세가지 전압을 인가하였다. 이 때 x축은 시간, y축은 인가 전압의 크기를 의미하고 각각 최대값 68, 72, 78kA를 가진다. 그 후 각 조건에서 실험한 판재의 성형성을 관찰하기 위하여 3D 스캔을 이용하여 성형된 판재의 높이를 비교하였다. 이 결과를 이용하여 자유 벌지 금형을 이용했을 때와 원뿔형 금형을 이용했을 때의 결과를 서로 비교하고 분석하였다.

2.2 유한요소 해석

자유 벌지, 원뿔형 금형을 이용한 판재 성형 실험

Table 1 Materials properties of CW004A

Material	Property	Value(Unit)
CW004A (Copper)	Density	7940kg/m ³
	Young's Modulus	117GPa
	Poisson Ratio	0.35
	Electrical Conductivity	5.8500E+7 Siemens/m



(a) free bulge test (b) conical test

Fig. 2 Schematic diagram of apparatuses

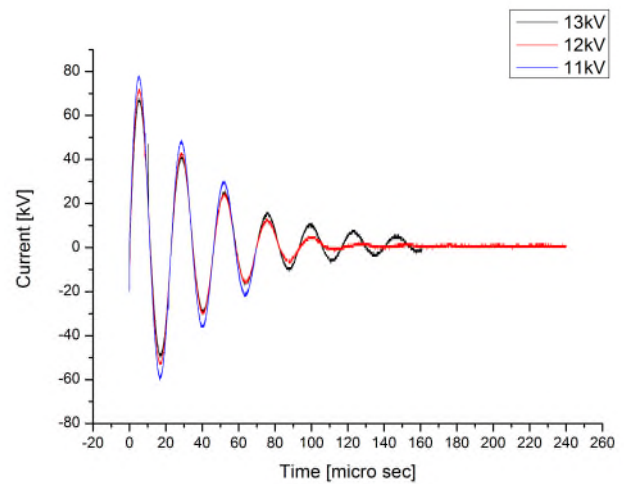
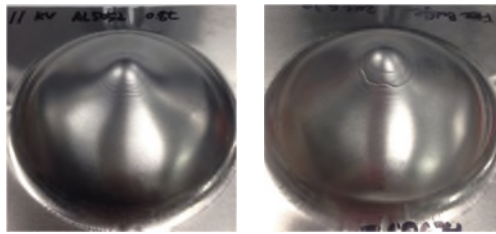


Fig. 3 Input currents

험(이하 자유 벌지형 실험, 원뿔형 실험)을 3D 해석으로 구현하기 위하여 LS-DYNA EM-Module을 사용하였다. 해석 모델의 거동을 예측하기 위하여 코일에는 MAT_ELASTIC, EM_MAT_001을 적용하였고 type EQ. 2에는 Table 1의 값을 적용하였으며 코일에는 실험과 같은 세 가지 전류를 인가하였다. 그리고 특히 파단을 예측하기 위하여 Gurson model을 적용하였다. 그 후 얻어진 결과값으로 자유 벌지와 원뿔형 금형을 이용한 가공물을 비교, 분석하였고 실험값과도 비교하여 성형성 개선 여부를 확인하였다.

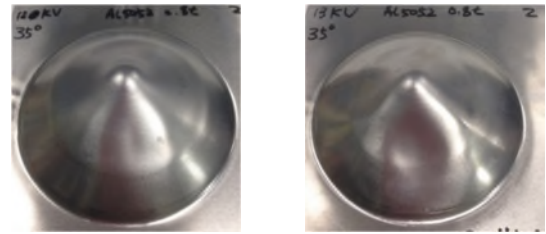


(a) 11kV (b) 12kV

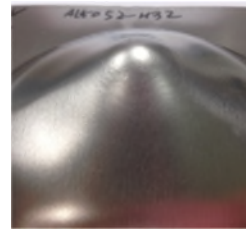


(c) 13kV

Fig. 4 Experimental sheets of free bulge



(a) 12kV, 35° (b) 13kV, 35°



(c) 12kV, 37°



(d) 13kV, 39°

Fig. 6 Experimental sheets of conical die

Table 2 Bulge height data of free bulge experiment

	Voltage [kV]	Height [mm]	Bursting
1	11	30.560	X
2	12	X	○
3	13	X	○

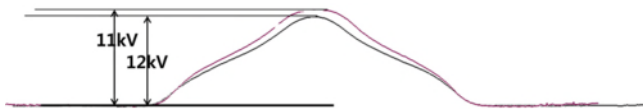


Fig. 5 3-D Scanned cross-sections of free bulge

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

우선 자유 벌지 금형으로 Al 5052-H32 소재를 성형하였고, 이 때 성형된 소재의 높이를 비교하기 위하여 3D 스캐닝을 이용하여 벌지의 가장 높은 곳의 높이를 측정하고 파단 여부를 관찰한 결과 Table 2와 같았다. Fig. 4 (a), (b), (c)와 같이 인가 전압이 11kV일 때 벌지의 끝 부분(Bulge tip) 주변에서 깊은 주름(Wrinkling)이 발생하는 것을 확인할 수 있고, 12kV부터 소재가 파단 되는 것을 관찰할 수 있다. 특히 13kV일 때에는 소재가 완전히 파단 되어 분리되었다. 그렇기 때문에 11, 12kV 일 때의 높이는 관

찰할 수 있었던 반면 13kV를 가하였을 때는 높이를 측정할 수 없었다. 성형성 개선 여부를 판단할 때 벌지의 높이와 파단 여부를 관찰해야 비교가 가능하지만 이 경우에는 높이를 비교할 수 없으므로 가공물 간 성형성을 비교 할 때, 파단 여부로 결과를 비교하였다. 이처럼 소재에 파단이 발생한 이유는 연성 금속의 공극 성장(Void growth) 현상으로 설명할 수 있다. 이 경우, 소재에 전자기력이 가해지면 금형에는 소재의 변형에 영향을 주는 요소가 없기 때문에 소재가 힘과 평행한 방향으로 자유롭게 변형되어 내부의 공극 성장이 촉진 되고, 이로 인해 소재 일부분의 공극 체적률(Void volume fraction)이 급격하게 증가하여 결국 파단이 발생하게 된다[1]. 특히 벌지의 끝 부분 주변에서 이 현상이 두드러지는 것을 확인할 수 있다. 코일 형성 때문에 전자기력이 고르게 분포 되지 않고 가공물의 중앙에 집중되어 끝 부분 주변에서 연신이 가장 많이 일어나게 된다. 이 때문에 소재의 그 부분에는 공극 성장의 한계를 넘어 파단이 발생하는 것이라고 볼 수 있다. 한편, 벌지의 끝 부분은 파단 발생 없이 뭉툭하게 변형되는 것을 볼 수 있다. 이것으로 보아 소재가 순간적으로 연신 되면서 벌지의 꼭대기 주변 부분이 취약해지기 때문에 파단이 발생한 것으로 볼 수 있다. 또한 이러한 원리로 파단이 발생하는 위치가 각 조건마다 비슷하다고 할 수 있다.

앞과 같은 조건에서 소재와의 각도가(θ) 35°, 37°,

39°인 원뿔형 금형에 세 가지 전류를 가한 결과 벌지 높이는 Table 3 과 같았다. 이 때 대부분의 경우에 아무런 파단이 발생하지 않았고, 벌지 끝 부분의 높이는 같은 전압 조건에서 자유 벌지 금형을 사용했을 때보다 1~2mm차이로 낮았다. 원뿔형 실험 가공물은 같은 전압 조건에서 자유 벌지 실험 가공물보다 높이가 낮아졌고 파단이 발생하지 않았다. 하지만 높이가 같은 가공물을 비교했을 때, 자유 벌지 실험 가공물에는 파단이 발생했고 원뿔형 실험 가공물에는 파단이 발생 하지 않은 것을 관찰할 수 있다. 성형성 개선여부를 판단하기 위하여 자유 벌지 실험 가공물의 높이와 원뿔형 실험 가공물의 높이가 $\pm 0.5\text{mm}$ 차이가 있는 것을 비슷한 높이로 판단 하기로 했고, 결과물을 중 case 1과 case 5, 6, 11을 파단을 기준으로 관찰, 비교하였다. 11kV의 자유 벌지의 가공물은(case 1) 30.560mm로, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 벌지 끝 부분 주변에 파단이 발생한 것을 관찰할 수 있다. 원뿔형의 가공물 높이는 각각 31.397mm, 30.093mm, 30.652mm이고, Fig. 6(a)~(c)와 같다. 이 경우 끝 부분 주변의 주름이 앞의 경우와 비교했을 때 아주 미세하거나 없는 것을 관찰할 수 있고, 전압이 세질수록 주름이 점점 더 선명해지지만 파단은 발생하지 않았다. 즉, 각 금형을 사용하여 얻은 가공물 중, 높이가 같은 것들의 파단여부를 비교 해봤을 때 원뿔형 금형을 사용했을 때가 성형성 개선에 보다 효과적이라는 것을 증명한다. 또한, case1 보다 원뿔형 금형을 사용하였을 때 37°, 13kV의 벌지 높이가 약 1.1mm 높음에도 불구하고 파단이 발생하지 않았다. 이는 같은 전압, 각도 조건에서 가공물간 높이를 비교하여 파단 여부를 판단하는 것보다 자유 벌지 금형 가공물과 비슷한 높이의 원뿔형 금형 가공물을 관찰하는 것이 성형성 개선 여부를 판단하는데 효과적이라는 것을 보여준다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 자유 벌지 경우와 반대로, 성형이 일어나는 동안 소재의 외부면이 금형의 벽면에 지속적으로 접촉, 충돌하여 가공 도중 소재의 공극 성장이 제한되어 파단 되는 현상이 지연되거나 억제되었기 때문이다. 금형과 접촉하기 직전에 소재의 바깥은 인장응력이 작용하여 공극 성장이 급격하게 증가하는 반면, 안쪽은 압축응력이 작용하기 때문에 두께방향으로 공극 성장이 지연된다 [1]. 이와 같이 가공이 진행되는 동안 압축과 인장의 상호 작용이 공극 성장을 제한, 지연시켜 결국

Table 3 Bulge height data of conical-shape experiment

	Angle [deg]	Voltage [kV]	Height [mm]	Bursting
4	35	11	28.073	X
5		12	31.397	X
6		13	30.093	X
7	37	11	27.141	X
8		12	29.879	X
9		13	31.682	X
10	39	11	27.370	X
11		12	30.652	X
12		13	X	O

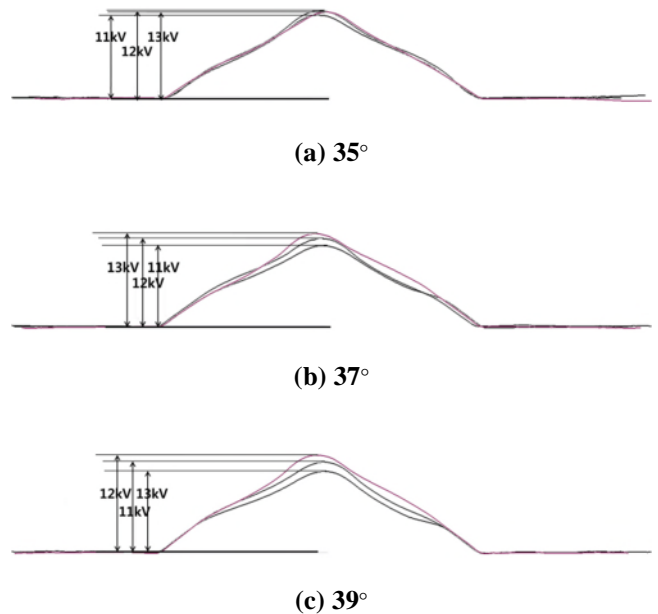


Fig. 7 3-D Scanned cross-sections of the conical-shaped bulges

자유 벌지 금형을 이용했을 때와 같은 높이로 성형 되어도 대부분의 경우에 파단이 발생되지 않아 성형성이 개선되는 것이다. 한편, 원뿔형 실험의 결과물은 자유 벌지형 실험 결과보다 높이가 낮은 경향성을 보이는 것은 소재가 지속적으로 금형과 충돌하다 보니 성형되는 높이가 어느 정도 제한이 있고, 소재가 순간적으로 폐쇄된 금형 안에서 힘을 받다 보니 압축된 공기가 다시 팽창하는 과정, 에어바운스(Air bounce) 때문에 전체적인 높이가 낮아진 것이

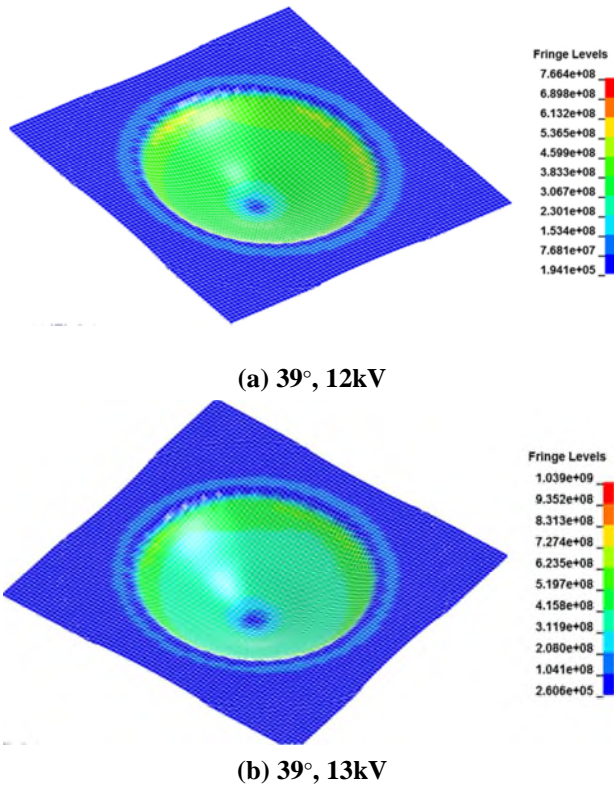


Fig. 8 Lorentz force distribution of blanks

라고 추측할 수 있다.

원뿔형 금형을 사용하였을 때 파단이 발생한 유일한 경우는 case 12 (Fig. 6(d))이다. 이는 앞서 설명했던 공극 성장과 관련된다. 다른 조건에서 금형과 소재의 접촉이 지속되면서 공극 성장이 지연되었던 반면, 이 경우에는 두 물체 간의 접촉은 지속되지만 공극 성장이 한계치를 넘게 되고, 결국 소재의 연신이 한계에 도달했을 것이다. 즉, 소재내부에서 공극 체적이 유지되지 못하기 때문에 더 이상 압축과 인장의 상호작용이 지속되지 못해서 파단이 발생한 것이다. 마지막으로 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 case 13같이 Table 3에서 금형의 각도가 일정할 때 전압이 세질수록 벌지의 높이가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 인가 전압이 세면 곧 전자기력의 세기도 큰 것을 의미하기 때문에 소재의 연신이 가능한 범위에서 벌지의 높이가 더 높게 측정되는 것이다.

3.2 해석 결과

전자기 성형 같은 고속 성형 공정에서 소재와 금형 간의 접촉이 있다면 공극 체적률이 줄기 때문에

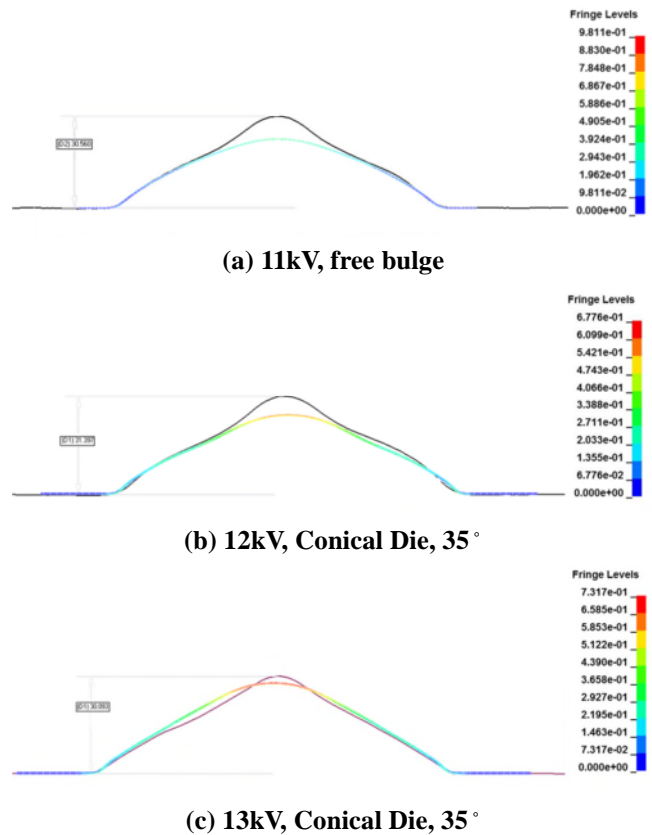


Fig. 9 Profile comparison between experiment and numerical results

파단 가능성이 감소한다. 이를 해석적으로 보이기 위하여 Al 5052-H32 소재를 이용하여 3-D 해석을 LS-DYNA EM-Module 로 수행한 후 실제 실험 결과와 비교하였다. 앞서 언급했듯이, 해석에 사용된 금형은 Fig. 2 와 같다. 이 때 실제 실험과 같이 세가지의 전류를 가하여 Fig. 9 과 같은 결과를 얻게 되었다. 실제 실험에서 얻은 자유 벌지 가공물의 높이를 기준으로 $\pm 0.5\text{mm}$ 범위의 높이를 가지는 원뿔형 금형 가공물을 비교 대상으로 택하였다. 그 결과, 금형의 모형, 인가 전압의 크기, 원뿔형 금형의 각도에 따라 공극 체적률 값이 서로 다른 것을 알 수 있고, 이때 공극 체적률의 값을 서로 비교했을 때 수치가 높을수록 파단 가능성이 높다고 판단하였다. Fig 9 에서 볼 수 있듯이, 해석 결과와 실험 결과는 어느 정도 오차가 존재한다. 본 실험은 고속 성형 실험이기 때문에 일반적인 소성영역 물성과는 다른 고속 물성치의 변형률 속도가 고려되는 반면, 해석에 적용된 변형률 속도는 그 값과 일치하지 않기 때문에 오차가 발생하는 것이다. 현재 그에 대한 정

확한 데이터를 얻기 어려우므로 약간의 오차를 감안하고 해석을 진행하였다. Case 1에서 성형 도중 금형과 소재와의 접촉이 없기 때문에 공극 체적률 값이 가장 크다. 그렇기 때문에 해석 결과 역시 case 1을 기준으로 다른 결과 값들과 수치적으로 비교하였다. 높이가 비슷할 때 꼭대기 부분의 공극 체적률 값은 차례대로 0.6867, 0.5421, 0.6585이다. Fig. 9(a)의 경우 수치가 가장 높으므로 파단 가능성이 높다고 생각할 수 있고, 나머지 두 경우는 끝 부분에서의 수치가 더 낮으므로 파단 가능성이 비교적 적다고 할 수 있다. 즉, 각 금형으로 성형된 가공물의 높이가 같아도 소재와 금형이 서로 접촉하며 성형이 진행되는 경우 가공물의 공극 체적률이 더 낮기 때문에 성형성이 개선된다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전자기력을 이용한 성형 실험에서 금형과 소재의 접촉에 따른 성형성을 실험적, 해석적으로 비교해보았고 다음과 같은 결론을 얻었다. 자유 벌지 금형으로 성형했을 때 소재가 아무런 제약 없이 변형 되어 내부의 공극 성장이 촉진되고, 이로 인해 국소적으로 급격한 변형이 발생하였기 때문에 변형된 소재의 끝부분 주변에서 파단이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 벌지의 높이가 같은 가공물을 비교해보면, 자유 벌지 금형 가공물에서 끝부분 주변에 아주 깊은 주름이 발생한 반면, 원뿔형 금형 가공물에서는 주름이 확연히 덜 선명한 것을 알 수 있다. 이로써 소재와 금형 사이에 접촉이 존재할 때 가공물의 성형성이 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이는 성형되는 동안 소재의 외부면이 금형의 단면과 지속적으로 충돌하면서 내부의 공극 손상이 억제되었기 때문이다. 이 경우 자유 벌지형 가공물보다 높이가 더 낮게 측정되었는데, 에어바운스의 영향을 덜 받도록 시편에 구멍을 뚫는다면 벌지의 높이가 자유 벌지 금형 가공물보다 높을 것으로 추측할 수 있다. 그 후 LS-DYNA EM-Module을 이용하여 해석을 진행하여 분석한 결과, 실제 실험 결과보다 가공물의 높이가 낮았고 공극 체적률 값을 수치적으로 비교 하여 파단을 예측한 결과 실험과 해석에 어느 정도 차이가 있었다. 이는

실제 소성영역에서의 변형률 속도가 정확하게 고려되지 않았기 때문으로 추측된다. 앞으로 소재의 정확한 변형률 속도를 얻을 수 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었으며, 또한, 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2026095)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2013, Study on Formability Enhancement of Electromagnetic Forming using Gurson Plasticity Material Model, Trans. Kor. Soc. Automot. Eng., Vol. 21, No. 3, pp.98~104.
- [2] J. Imbert, M. Worswick, 2012, Reduction of a Preformed Radius in Aluminum Sheet Using Electromagnetic and Conventional Forming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 212, No. 9, pp. 1963~1972.
- [3] D. Liu, C. Li, H. Yu, 2009, Numerical Modeling and Deformation Analysis for Electromagnetically Assisted Deep Drawing of AA 5052 Sheet, T. Nonferr. Metal. Soc., Vol.19, No. 5, pp. 1294~1302.
- [4] A. L. Gurson, 1977, Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 99, pp. 2~17.
- [5] V. Tvergaard, 1981, Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions, Int. J. Fract., Vol. 17, No. 4, pp. 389~407.
- [6] M. J. Worswick, P. Pelletiera, 1998, Numerical Simulation of Ductile Fracture during High Strain Rate Deformation, Eur. Phys. J. Appl. Phys., Vol. 4, No. 3, pp. 257~267.
- [7] H. K. Kim, H. G. Noh, B. S. Kang, J. Kim, 2014, Design of a Free Bulge Test Coil Using Electromagnetic Forces and Comparison between Experimental and Numerical Results, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 7, pp. 431~438.