

고속 성형 공정의 바운싱 현상을 줄이기 위한 액중 방전 성형의 해석적 연구

우민아¹ · 노학곤¹ · 송우진² · 강범수¹ · 김 정[#]

Numerical Study of Electrohydraulic Forming to Reduce the Bouncing in High Speed Forming Process

M. A. Woo, H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim

(Received May 31, 2016 / Revised July 14, 2016 / Accepted July 15, 2016)

Abstract

High-speed forming process is the forming technology that deforms the blank in a very short time, with the strain rate of the blank above 1000 s^{-1} . Among many high-speed forming processes, electromagnetic forming (EMF) employs the Lorentz force when deforms the blank. Because of the high strain rate, the formability of the blank can be improved. However, when the blank is formed into rather complex shapes, it is bounced from the die and the wrinkles are generated. Therefore, electrohydraulic forming (EHF) is suggested in this study to reduce the bouncing problem of the blank. EHF is a high-speed forming that uses high voltage discharge in liquid. The shockwave resulting from the electric discharge propagates to the blank and it deforms the blank into the die. In this study, two high-speed forming processes, EMF and EHF were compared numerically with trapezoidal middle block die. This comparison showed that EMF cannot deform the blank into the die because of the bouncing, while EHF can overcome the bouncing problem and deform the blank into the die shape successfully.

Key Words : High-speed Forming, Electromagnetic Forming, Electrohydraulic Forming, Bouncing

1. 서론

최근 성형 기술이 발달함에 따라 소재를 고속으로 성형시키는 기술들이 개발되고 있다. 1ms 이내의 아주 짧은 시간 동안 소재를 성형시킬 경우 소재의 변형률 속도가 1000 s^{-1} 이상이고, 높은 압력과 고속 충격 조건으로 인해 기존의 성형 공정보다 소재의 성형성을 향상시킬 수 있다[1, 2]. 이러한 고속 성형 공정에는 전자기성형(electromagnetic forming, EMF), 액중 방전 성형(electrohydraulic forming, EHF), 폭발 성형(explosive forming, EF) 등이 있다.

전자기 성형은 고강도의 자기장을 이용하여 소재를 고속으로 성형시키는 성형 기술이다. 성형 코일에서 발생된 자기장과 소재의 상호작용으로 인해 1ms 이내의 아주 짧은 시간 동안 전자기력(Lorentz force)이 만들어지고 이 힘으로 인해 물리적 접촉 없이 소재가 성형된다. 물리적 접촉이 없으므로 소재의 표면에 결함, 마멸 등의 문제가 발생하지 않는다는 장점이 있다.

그러나 전자기성형의 경우, 복잡한 금형의 형상으로 소재를 성형시킬 때 소재의 표면에서 바운싱 현상이 발생한다는 단점이 있다[4]. 바운싱 현상은 소

1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 부산대학교 일반대학원 융합학부

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

재가 성형될 때 금형에 완전히 접촉되지 못하고 소재의 표면이 튀어 오르는 현상을 말한다.

바운싱 현상이 발생하는 원인은 성형 코일과 소재 사이에 성형력을 지속시켜주는 매개체가 존재하지 않기 때문이다. 이러한 바운싱으로 인해 소재에는 주름 또는 파단과 같은 문제가 발생할 수 있다. 또한 [5]에 따르면 전자기 성형 공정에서는 금형이 복잡한 형상을 가질 때 소재를 한번에 성형시키는 것이 어려우므로 성형 코일을 두 개 이상 사용하거나 추가적인 공정이 필요하다.

전자기 성형의 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 또 다른 고속 성형인 액중 방전 성형 공정을 제시하였다. 액중 방전 성형은 유체 안의 전극 방전을 이용한 판재 성형 방법이다. 유체 안에서 전기에너지가 방전되면 커패시터(capacitor)와 연결된 두 전극 사이에서 고온, 고압의 플라즈마가 발생한다. 이 플라즈마에서 발생된 압력파가 유체를 통해 소재로 전달되고 소재를 고속으로 성형시킨다. 액중 방전 성형 공정에서는 소재가 바운싱 되지 않고 복잡한 형상으로도 잘 성형되는데[6], 이는 소재와 챔버 사이에 존재하는 물이 성형 압력을 전달하는 매개체 역할을 하기 때문이다. 소재의 성형이 진행되는 동안 물이 압력을 지속시켜주어 소재가 튀어 오르지 않고 원하는 형상으로 성형될 수 있다. 최근에는 이러한 장점을 이용하여 초고강도강을 성형하는데 액중방전 성형 공법을 적용하였고, 초고강도 강과 같이 성형성이 낮은 재료 또한 성형이 가능함을 보였다[7].

본 연구에서는 LS-DYNA 상용 프로그램을 이용하여 전자기성형과 액중 방전 성형을 해석적으로 비교해보았다. Al 6061-T6를 소재로 사용하였으며 복잡한 형상을 표현하기 위해 금형 중앙에 사다리꼴의 블록을 위치시켰다. 전자기 성형은 3차원 전체 모델을 이용하여 해석을 수행하였고 액중 방전 성형은 단순화된 평면 변형률(plane strain)모델을 먼저 해석에 적용하여 유체의 압력 분포를 확인하고 3차원 1/4 모델을 적용하여 소재의 변형 거동을 확인하였다. 유한요소 해석 결과, 전자기 성형의 경우 바운싱으로 인해 소재가 완전히 성형되지 못하고 주름이 발생하였다. 반면 액중 방전 성형 공정에서는 바운싱 없이 소재가 금형 형상으로 성형되었으며 성형한계선을 이용하여 파단을 예측한 결과, 파단도 발생하지 않음을 확인하였다.

Table 1 Material property of Al 6061-T6

Material	Property (Unit)	Value
Al 6061-T6	Density (g/cc)	2.70
	Young's modulus (GPa)	68.97
	Poisson ratio	0.33
	Yield stress (MPa)	276

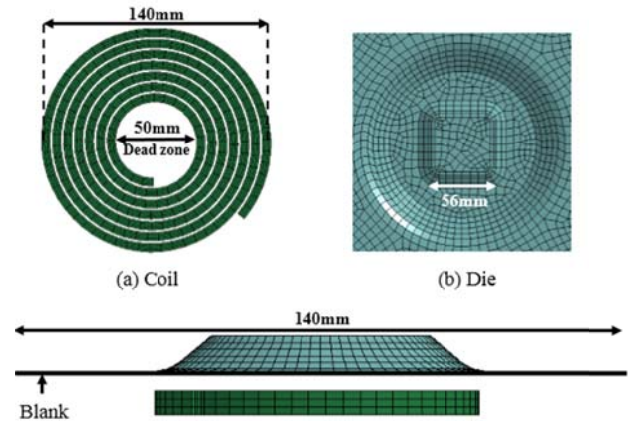


Fig. 1 Numerical model for EMF simulation

2. EMF 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델

LS-DYNA EM module을 사용하여 전자기 성형의 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 Fig. 1과 같이 성형코일, 소재, 금형으로 이루어져 있으며, 이 때 금형의 중앙에는 사다리꼴 형의 블록이 삽입되어 있다. 성형코일은 스프라이럴 형이며, 중앙에 50mm의 데드존(dead zone)을 가진다. 또한 성형코일의 비투자율은 1, 전기 전도도는 $5.8 \times 10^7 \text{S/m}$ 이다. 실험을 통하여 Fig. 2와 같이 11kV의 전압을 인가하였을 때 흐르는 전류를 측정하였고 이를 유한요소 해석에 적용하였다. 소재의 재료인 Al 6061-T6의 두께는 1mm이며, 물성치는 Table 1에 나타내었다[8].

전자기 성형은 아주 짧은 시간 동안 빠른 속도로 소재를 성형하는 방법이므로 유한요소 해석 시 소재의 변형률 속도 영향을 고려해야 한다. 따라서 Cowper-Symonds 구성 모델을 적용하였고 그 식은 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (1)$$

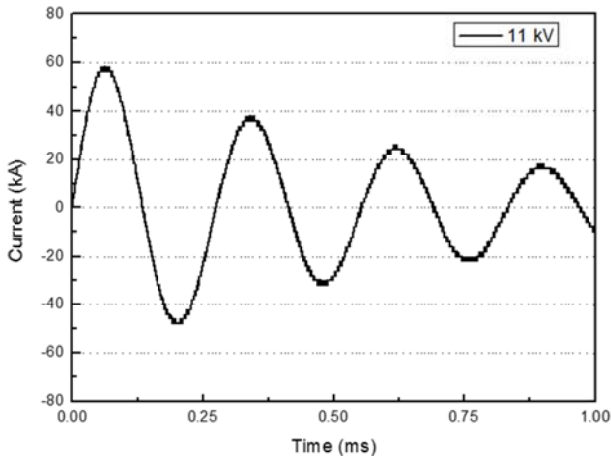


Fig. 2 Time variation of current wave at 11 kV

$\dot{\epsilon}$ 는 유효 소성 변형률 속도, C , p 는 변형률 속도 매개변수, σ_y 는 변형률 속도를 고려하지 않은 항복 응력이다. Al 6061-T6의 경우 $C=6500$, $p=4$ 이다[8].

2.2 유한요소 해석 결과

전자기 성형의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 초기에 소재는 중앙의 블록에 접촉하여 성형이 잘 되는 듯 보였으나 110 μ s 이후에 접촉이 유지되지 못하고 블록 주변부가 완전히 성형 되기도 전에 급형으로부터 바운싱 된 것을 볼 수 있다. Fig. 4에는 소재의 변형률 속도를 나타내었는데 A점과 B점에서 약 11000s⁻¹로 가장 큰 값을 보였다. 가장 작은 변형이 발생할 것이라 예상되는 A점에서 높은 변형률 속도가 발생하였는데 이는 Fig. 5의 소재의 성형 속도 그래프로 설명될 수 있다. A점에서 가장 낮은 약 -300m/s의 속도가 발생하였고 발생 직후 약 +180m/s로 급격하게 속도의 방향이 바뀌었다. 이렇게 급격한 속도의 변화가 소재에 갑작스러운 변형을 발생시켰고 그로 인해 A점에서 가장 높은 변형률 속도가 발생된 것이다. 소재의 속도 결과 또한 소재가 급형에 제대로 접촉되지 못하고 바운싱이 발생하여 성형이 제대로 진행되지 않은 것을 보여준다. 전자기 성형에서 소재에 바운싱이 발생하는 것은 소재와 성형 코일 사이에 성형력을 지속시켜주는 매개체가 없기 때문이다. 따라서 해석 결과와 같이 소재에 주름이 발생하게 되고 더 큰 입력 전압을 가하여 소재를 성형 시킬 경우에는 소재에 주름뿐만 아니라 파단이 발생할 가능성도 있다.

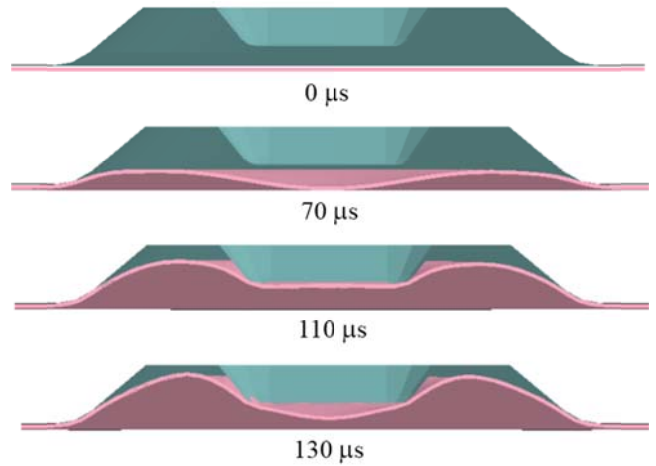


Fig. 3 Deformation behavior of the blank

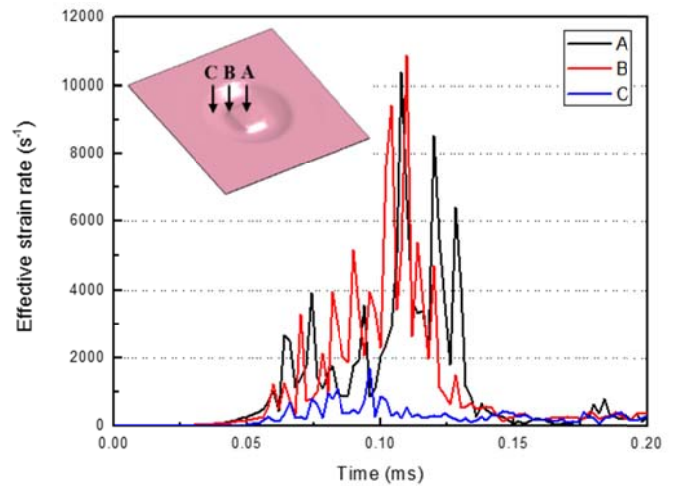


Fig. 4 Time variation of strain rate at points A, B, C

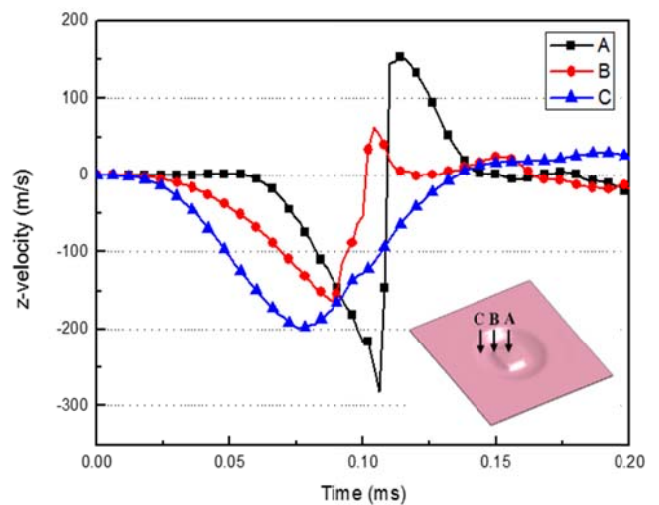


Fig. 5 Time variation of z-velocity at points A, B, C

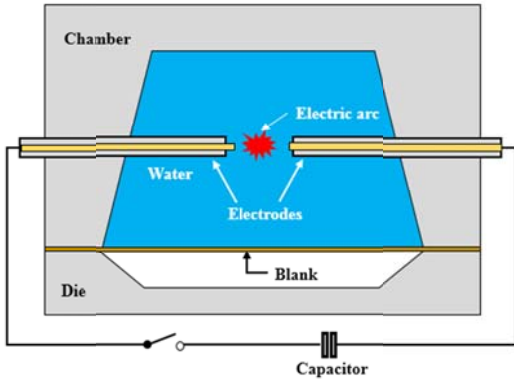


Fig. 6 Schematic view of electrohydraulic forming process

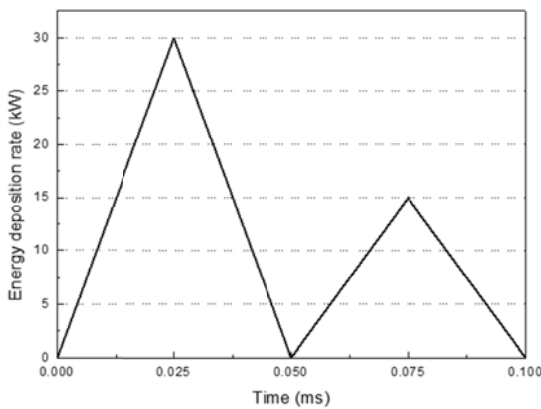


Fig. 7 Energy deposition rate in plasma part

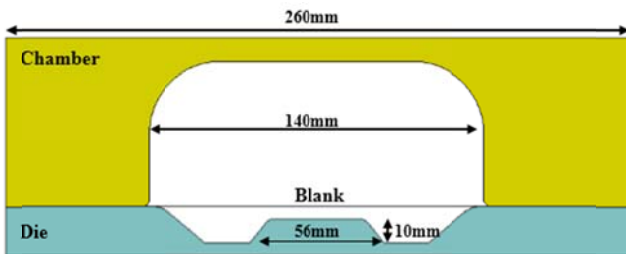


Fig. 8 Structural components for EHF simulation

3. EHF 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델

앞에서 언급한 전자기 성형의 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 액중 방전 성형 공법을 제시하였다. 액중 방전 성형은 Fig. 6과 같이 커패시터에 저장된 에너지를 순간적으로 방전시켜 유체 안에서 연결된 두 전극 사이에 플라즈마를 발생시키고, 이 플라즈마에서 발생한 압력파로 소재를 성형시키는

성형 공정이다. 유체는 주로 물을 사용한다. 유한요소 해석에서 유체부는 물, 진공, 그리고 플라즈마로 이루어져있다. 물의 밀도는 $\rho_0 = 1000kg / m^3$ 이며 체적탄성률(bulk modulus)은 $K = 2.35GPa$ 이다.

플라즈마는 단일 이상기체로 가정하였으며 초기 전극 방전으로부터 아주 작은 크기로 발생하므로 반지름 1mm의 원으로 모델링 하였다. 플라즈마 내의 압력은 식 (2)와 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$P = (\gamma - 1) \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) E \tag{2}$$

P 는 플라즈마 내 압력, ρ 는 질량 밀도, ρ_0 는 초기 질량 밀도, E 는 입력 에너지, γ 는 플라즈마의 단열지수로 보통 1.24~1.26의 값을 가지므로 1.25로 정하였다[10]. LS-DYNA 프로그램 내에서 식 (2)를 표현하기 위하여 식 (3), (4)를 포함하는 *EOS 키워드를 사용하였다.

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \tag{3}$$

$$\mu = 1/V - 1 \tag{4}$$

또한 플라즈마를 발생시키는 에너지를 입력하기 위하여 식 (3)의 E 에 전류와 입력 전압이 곱해진 전기 에너지를 그래프로 나타내어 입력해야 하는데 본 연구에서는 Mamutov 등 [10]의 데이터를 참조하여 Fig. 7과 같은 에너지를 입력하였다.

유체부의 요소를 생성할 기존의 유체 해석에서 사용되는 오일러리안(eulerian) 요소가 아닌 LS-DYNA 내의 Arbitrary Lagrange Eulerian (ALE) 기법을 사용하였다. ALE 기법을 사용하면 유체부의 이동을 확인할 수 있고 구조 해석에 흔히 사용되는 라그랑지안(lagrangian) 요소와 다르게 소재가 대 변형 할 경우에도 뒤틀림 문제가 없다는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 유체부에는 3가지 파트(진공, 플라즈마, 물)가 포함되어 있는데 이 파트들 사이의 중복되는 노드(node)를 결합함으로써 유체부의 상호작용을 쉽게 정의할 수 있다.

구조파트는 Fig. 8과 같이 챔버, 소재, 금형으로 구성되어있다. 금형과 소재는 앞의 전자기성형에서 사용된 것과 동일하다. 액중 방전 성형 해석의 경우,

물 파트의 요소 때문에 모델 전체의 요소 개수가 많아지므로 해석의 효율을 위하여 챔버와 금형은 강체(rigid body)로 가정하였고 소재는 shell 요소를 적용하였다.

3.2 유한요소 해석 결과

유체부의 압력 분포를 확인하기 위하여 평면 변형률 모델을 적용하여 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다. ALE 기법을 적용하였으므로 Fig. 9과 같이 거동을 확인할 수 있다. 초기 플라즈마는 반지름이 1mm인 작은 원이지만 전기에너지를 입력한 후 점점 팽창하게 되며 그로 인해 물도 움직인다. Fig. 10에는 유체부의 압력 분포를 나타내었는데 플라즈마로부터 압력파가 발생하고 이로 인해 유체 전체에 압력이 퍼지게 된다. 초기에는 압력의 전파가 뚜렷하게 관찰되지만 압력파가 챔버에 의해 반사된 이후에는 비교적 복잡한 형태를 보이게 된다.

2차원 평면 변형률 모델을 이용하여 유체의 압력 분포를 검토한 후, 소재의 성형 거동을 제대로 확인하기 위하여 3차원 1/4 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 소재의 완전한 성형 거동을 보기 위해서는 3차원 전체 모델을 사용해야 하지만 해석을 효율을 위하여 1/4 모델만 사용하였고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 플라즈마와 가장 가까운 금형의 가운데 블록에 소재가 먼저 접촉하고 금형의 바깥쪽, 안쪽 모서리 순서로 성형이 진행되며 앞의 전자기 성형 결과와 다르게 소재가 바운싱 없이 금형에 잘 접촉되며 모서리부 까지도 성형이 잘 되었다. 액중 방전 성형의 경우, 소재와 챔버 사이에 존재하는 물이 소재를 성형시키는 매개체이기 때문에 바운싱이 발생하지 않는다. 전기 에너지 입력 후 높은 에너지를 가지게 된 물이 소재 위에서 눌러주는 역할을 하여 바운싱을 억제하는 것이다. 따라서 주름과 같은 불량 발생하지 않는다는 장점이 있다.

유한요소 해석 결과를 바탕으로 Al 6061-T6 소재의 파단 여부를 확인하기 위하여 성형 한계도(forming limit diagram)를 적용하였다. 성형 한계도는 소재 안에서 파단을 발생시킬 수 있는 최대 주변형률과 최소 주변형률을 곡선으로 나타낸 것이다. 성형된 소재의 변형률이 이 선도보다 아래에 위치하면 소재에는 파단이 발생하지 않는다고 판단한다.

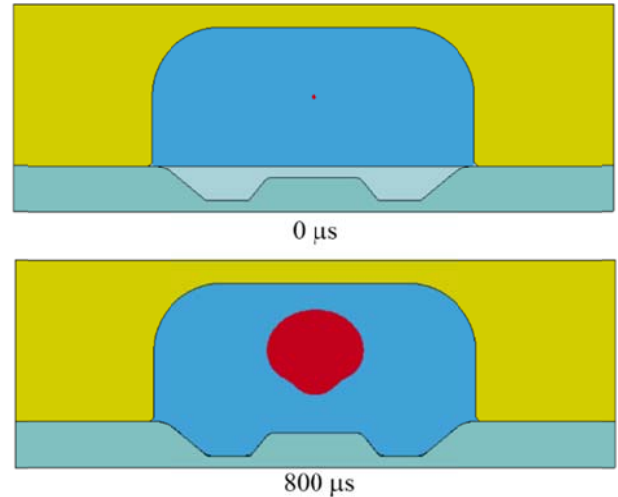


Fig. 9 Behavior of the fluid parts

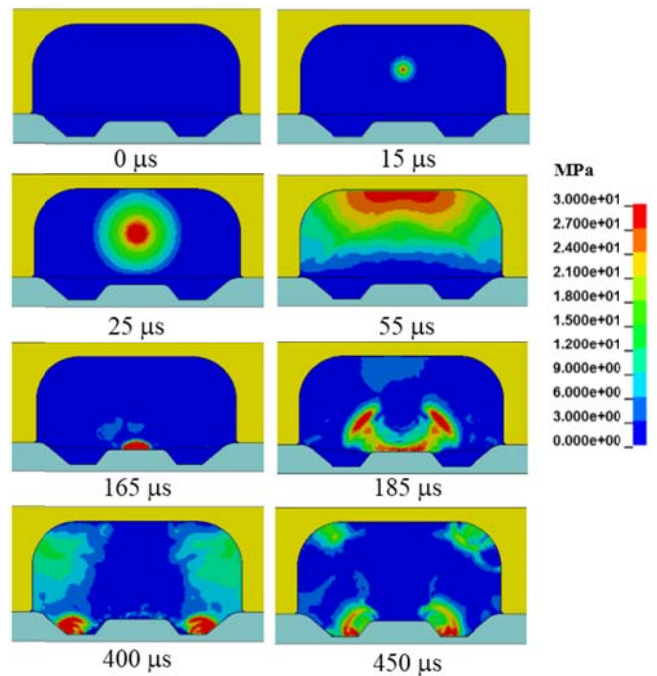


Fig.10 Pressure distribution of the fluid parts

액중 방전 성형의 경우 고속 조건에서 소재가 성형되므로 성형 한계도 또한 고 변형률 속도 조건에서 획득한 선도를 적용해야 한다. Fig. 12의 성형 한계도는 500s⁻¹ 조건에서 획득된 선도다[11]. 파단이 예상되는 중앙의 블록 주변 요소들의 변형률을 Fig. 12에 나타내었는데 그래프에서 알 수 있듯이 소재의 변형률이 모두 성형한계선 아래에 위치하므로 소재에 파단이 발생하지 않는다고 판단할 수 있다.

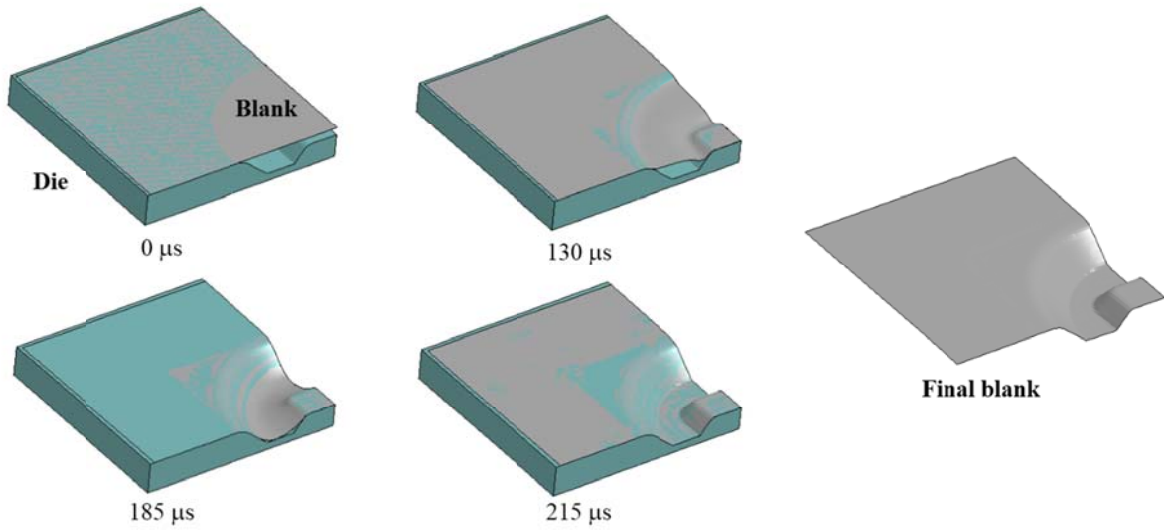


Fig.11 Deformation behavior of the blank

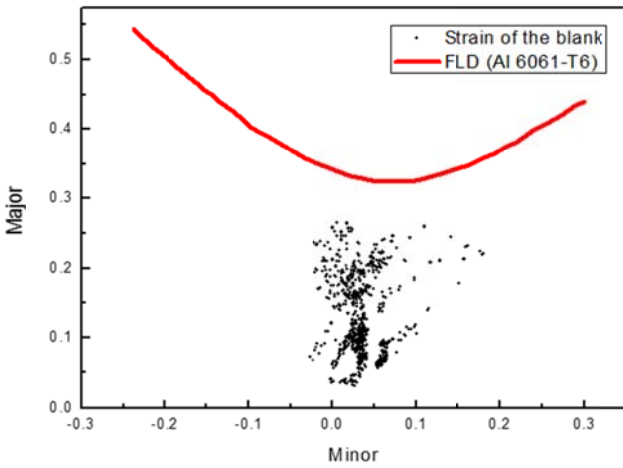


Fig.12 Forming limit diagram and strain distribution of the deformed blank

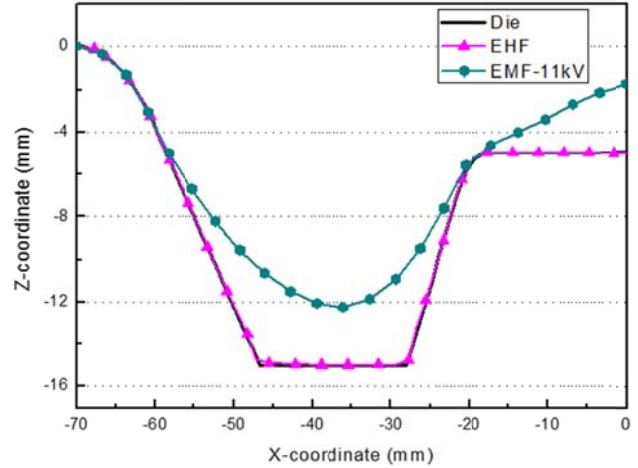


Fig.13 Comparison of EMF and EHF simulation results

4. EMF와 EHF의 비교

Fig. 13에 전자기 성형과 액중 방전 성형의 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 전자기 성형의 경우 단일 공정을 적용하였을 때 블록 주변부에서 소재가 완전히 성형되기도 전에 바운싱 효과 때문에 주름이 발생하여 소재가 제대로 성형되지 않았다. 반면 액중 방전 성형은 바운싱 없이 소재가 금형에 잘 접촉하여 모서리부까지 성형이 잘 되었고 성형 한계도를 적용하여 파단 또한 발생하지 않음을 확인하였다. 이러한 두 성형 공정의 비교를 통해 소재를 고속으로 성형시킬 때에는 소재에 힘을 지속시

켜주는 매개체가 바운싱을 억제시키는 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램을 사용하여 전자기 성형과 액중 방전 성형을 해석적으로 구현하고 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전자기 성형 공정의 경우, 성형 코일과 소재 사이에 힘을 지속시켜주는 매개체가 없기 때문에 소재가 금형으로부터 튀어 오르는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 소재의 성형성에 영향을 주었고, 소재에 주름을 발생시켰다.

(2) 반면 액중 방전 성형은 소재와 챔버 사이에 존재하는 물이 높은 에너지를 가지고 소재를 눌러 주는 역할을 하여 바운싱이 억제되었고 주름과 같은 불량 없이 소재가 원하는 형상으로 성형되었다. 또한 성형 한계도를 적용하여 소재의 파단을 예측한 결과, 파단 없이 소재가 잘 성형됨을 확인하였다.

(3) 더욱 더 정확한 비교를 위해서는 두 공정에 대하여 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No.2012R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No.2014R1A2A1A11054473)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. Golowin, M. Kamal, J. Shang, J. Portier, A. Din, G. S. Daehn, R. Bradley, K. E. Newman, S. Hatkevich, 2007, Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 16, No. 4, pp. 455~460.
- [2] M. Kamal, G. S. Daehn, 2007, A Uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 129 No. 2, pp. 369~379.
- [3] 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.
- [4] H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2014, Numerical and Experimental Approach to Reduce Bouncing Effect in Electromagnetic Forming Process using Cushion Plate, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 28, No. 8, pp. 3263~3271.
- [5] S. F. Golovashchenko, A. J. Gillard, A. V. Mamutov, 2013, Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 213, No. 7, pp. 1191~1212
- [6] A. Melander, A. Delic, A. Björkblad, P. Juntunen, L. Samek, L. Vadillo, 2013, Modelling of Electro Hydraulic Free and Die Forming of Sheet Steels, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 6, No. 2, pp. 223~231.
- [7] A. V. Mamutov, S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov, J. J. Bonnen, 2015, Modeling of Electrohydraulic Forming of Sheet Metal Parts, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 219, pp. 84~100.
- [8] Y. Tao, M. Chen, Y. Pei, D. Fang, 2015, Strain Rate Effect on Mechanical Behavior of Metallic Honeycombs under Out-of-plane Dynamic Compression, *J. Appl. Mech.*, Vol. 82, No. 2, 021007.
- [9] H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2015, Two-step Electromagnetic Forming Process using Spiral Forming Coils to Deform Sheet Metal in a Middle-block Die, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 76, No. 9-12, pp. 1691~1703.
- [10] V. S. Mamutov, S. F. Golovashchenko, A. V. Mamutov, 2014, Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®, 13th International LS-DYNA Users Conference, *FEA Information Eng. J.*
- [11] M. Gerdooei, B. M. Dariani, G. H. Liaghat, 2009, Effect of Material Models on Formability of Sheet Metals in Explosive Forming, *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, Newswood and International Association of Engineers, pp. 1741~1746.