

Arbitrary Lagrange-Eulerian 기법을 활용한 액중 방전 성형의 해석적 연구

우민아¹ · 노학곤¹ · 송우진² · 강범수¹ · 김 정[#]

Numerical Study of Electrohydraulic Forming Using an Arbitrary Lagrange-Eulerian Method

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

(Received November 13, 2015 / Revised December 2, 2015 / Accepted December 3, 2015)

Abstract

Electrohydraulic forming (EHF) is a high-speed forming process that uses an electric arc discharge in water. Shock waves resulting from the electric arc discharge are propagated to the blank through water and the blank moves toward the die. Advantages of EHF include improved formability due to the high-speed process and reduction of the bouncing effect. In the current study, a numerical simulation of EHF was developed using LS-DYNA. In the simulation, the model for the electric arc was assumed as an adiabatic gas expansion and an Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) multi material formulation was used to describe the interaction between the electric arc and the water. In order to model the Fluid-Structure Interaction (FSI), a coupling mechanism was used. The blank of Al 1100-O was simulated using shell elements. The results of the simulation showed that the blank was deformed due to the pressure propagation of water and the bouncing effect did not affect the formability of blank.

Key Words : Electrohydraulic Forming, Bouncing Effect, Arbitrary Lagrange-Eulerian, Fluid-Structure Interaction

1. 서 론

최근 성형 기술이 발달함에 따라 소재를 고속으로 성형시키는 액중 방전 성형(electrohydraulic forming, EHF), 전자기 성형(electromagnetic forming, EMF), 폭발 성형(explosive forming, EF) 등의 기술들이 개발되고 있다. 고속 성형 공정에서는 1ms 이내의 아주 짧은 시간 동안 소재의 성형이 진행되며 소재의 변형률 속도가 1000/s 이상이다. 선행 연구는 변형률 속도 1000/s 이상의 고속 성형 공정에서 고속 충격에 의한 높은 압력으로 인해 소재의 성형

이 기존의 성형 공정보다 더욱 개선된다는 결과를 보였다[1, 2]. 또한 소재를 고속으로 성형시킬 경우 소재와 금형간의 접촉이 발생할 때 소재 내부 공극의 생성 또는 성장이 지연되거나 억제되기 때문에 파단 가능성을 감소시키므로 소재의 성형성을 향상시킬 수 있다[3]. 이러한 성형성 향상은 알루미늄 합금, 마그네슘, 티타늄, 철강 등의 재료에서 보이며 성형성 향상으로 인해 복잡한 형상도 성형이 가능하다[4].

최근에는 자동차 분야에서 기존의 연강을 비교적 가벼운 초고강도강(advanced high strength steels, AHSS)

1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 부산대학교 일반대학원 융합학부

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

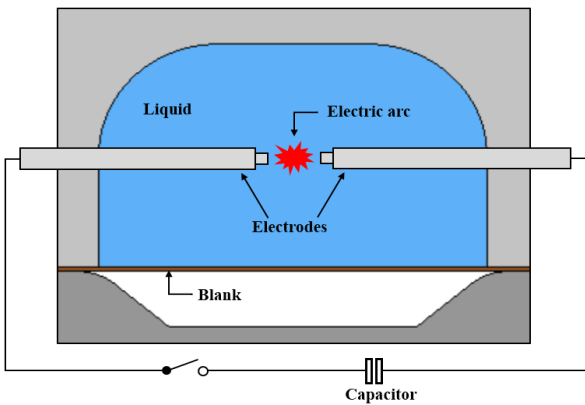


Fig. 1 Schematic view of electrohydraulic forming

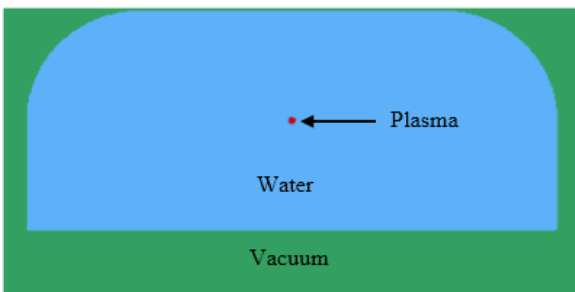


Fig. 2 Fluid parts for EHF simulation

으로 대체하여 연료 효율을 높이기 위한 연구가 진행되었다. 초고강도강은 가볍고 강도가 높은 반면 연강에 비해 성형성이 낮아 기존의 공법으로는 원하는 형상으로 성형이 어려우며 추가적인 공정이 필요하다. 따라서 액중 방전 성형 공법을 사용하여 초고강도강과 같이 성형성이 낮은 소재 또한 복잡한 형상으로 성형이 가능함을 보였다[5].

액중 방전 성형은 유체 안의 전극 방전으로 인해 순간적으로 발생하는 전기적 에너지를 유체를 통해 기계적 에너지로 바꾸어 금속을 성형하는 기술이다.

Fig. 1 과 같이 장치가 구성되어 있고 유체는 주로 물을 사용한다. 커패시터(capacitor)에 저장된 에너지를 순간적으로 방전시키면 커패시터와 연결된 두 전극의 끝에서 고온, 고압의 아크가 발생하여 물을 플라즈마 상태로 만든다. 이 때 플라즈마가 팽창하며 압력파가 유체를 통해 소재로 전달되고 소재를 빠른 속도로 성형시킨다. 액중 방전 성형은 고속 성형으로 인해 스프링백(springback) 현상을 저감시킬 수 있으며 복잡한 형상도 성형이 가능하다[5].

고속 성형에서는 바운싱 효과(bouncing effect)의 영향으로 성형 불량 발생할 수 있다. 여기서 바운싱이란 소재가 성형될 때 금형에 제대로 접촉되지 못

하고 튀어 오르는 현상을 뜻한다. 바운싱에 의해 소재에 주름과 같은 불량이 발생할 수 있는데 액중 방전 성형은 고속 성형임에도 불구하고 바운싱이 거의 없어 불량 발생의 확률이 낮다. 따라서 바운싱 효과의 영향을 받는 기존의 전자기 성형을 한층 개선할 수 있는 공법이라 할 수 있다[6].

본 연구에서는 이러한 장점들을 바탕으로 알루미늄 합금의 성형 문제를 개선하기 위해 LS-DYNA 상용 프로그램을 사용하여 액중 방전 성형 기술에 대한 연구를 진행하였다. 단순화된 평면 변형률(plane strain) 모델로 해석을 수행하여 유체 파트의 압력 분포를 확인하고 3 차원 1/4 모델을 이용하여 소재의 변형 거동을 확인하였다.

2. EHF 유한요소해석 모델링

2.1 유체 파트의 유한요소모델

액중 방전 성형 공정을 해석적으로 보이기 위하여 LS-DYNA를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 유체의 압력 거동을 확인하기 위해 평면 변형률 모델을 이용하였다.

액중 방전 성형은 커패시터의 에너지를 방전시켰을 때 발생한 플라즈마가 순간적으로 팽창하며 물을 통해 압력을 소재로 전달하는 공법이다. 여기서 유체 파트는 Fig. 2와 같이 플라즈마, 물, 진공으로 이루어져 있다. 플라즈마는 단열적으로 팽창하는 이상기체로 가정하였으며 초기의 작은 아크로부터 발생하여 크기가 점차 커지므로 반지름 1mm의 원으로 모델링 하였다. 또한 플라즈마 내의 에너지는 부피에 따라 균일하다고 가정하였고 단열 팽창 이상 기체의 에너지 평형을 나타내는 상태방정식(equation of State)을 이용하여 계산될 수 있다[7].

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

P 는 플라즈마 내 압력, ρ 는 질량 밀도, ρ_0 는 초기 질량 밀도, E 는 에너지, γ 는 플라즈마의 단열지수로 보통 1.24~1.26의 값을 가지므로 1.25로 정한다.

LS-DYNA 내에서 식 (1)과 같은 에너지 평형식을 정의하기 위해 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK 키워드를 사용하였고 이 키워드

Table 1 Material property of Al 1100-O

Material	Property (Unit)	Value
Al1100-O	Density (g/cc)	2.71
	Young's modulus (GPa)	68.9
	Poisson ratio	0.33
	Yield stress (MPa)	58.74

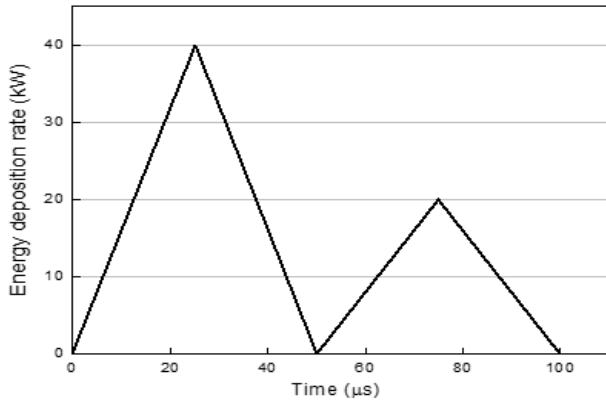


Fig. 3 Energy deposition rate

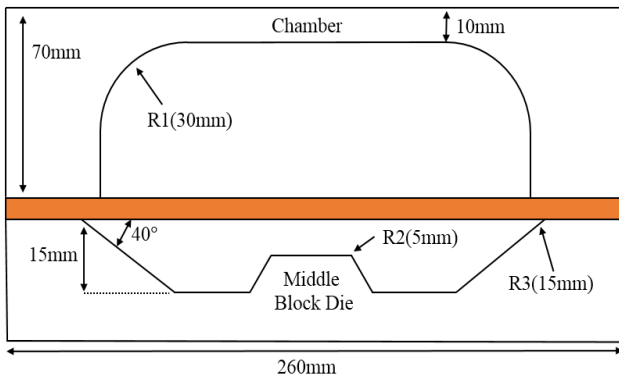


Fig. 4 Structure parts for EHF simulation

내의 상태방정식은 (3), (4)와 같다.

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

$$\mu = 1/V - 1 \quad (4)$$

여기서 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 는 사용자 지정 상수, $V(= \rho/\rho_0)$ 는 상대 체적, E 는 초기 체적당 내부 에너지이다. 식 (3)을 식 (1)과 같이 표현하기 위하여 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ 이고 $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 로 정하였다. 그리고 식 (3)의 E 에 전기 에너지를 입력하고 폭발을 표현할 수 있도록 하였다. 여기서 에너지

는 실험적으로 얻은 전압과 전류의 곱인 전력을 시간에 따른 그래프로 나타내어 입력한다. Mamutov 등 [7]의 실험 데이터를 참조하여 에너지의 형태는 비슷하지만 본 연구의 평면 변형률 모델에 맞도록 값을 조절하여 Fig. 3과 같은 에너지를 입력하였다.

물은 밀도 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 이며 체적탄성률(bulk modulus) $K = 2.35 \text{ GPa}$ 이다.

유체 파트는 유체 해석에서 흔히 쓰이는 오일러리안(eulerian) 요소가 아닌 LS-DYNA 내의 Arbitrary Lagrange Eulerian(ALE) 기법을 이용하여 요소를 생성하였다. ALE 기법은 오일러리안 요소에서는 확인할 수 없는 유체 파트의 이동을 볼 수 있고, 라그랑지안(lagrangian) 요소의 요소 뒤틀림(mesh distortion) 문제가 없다는 장점이 있다. 또한 라그랑지안 요소를 사용하였을 때에는 플라즈마와 물 사이의 상호작용을 정의하기가 거의 불가능한데 ALE 기법을 사용하면 파트 사이의 노드(node)를 결합함으로써 정의가 가능하다. 따라서 유체 파트들의 상호 작용을 정의하고 유체 파트의 요소 뒤틀림 문제를 해결하기 위해서 ALE 기법을 해석에 적용하였다.

2.2 구조 파트의 유한요소모델

구조 파트는 Fig. 4와 같이 챔버, 다이, 소재로 구성되어 있다. 패턴 성형을 위해 다이의 중앙에 사다리꼴 모양의 블록을 위치시켰고 이 때 챔버와 다이는 강체(rigid body)로 가정하였다. 소재는 Al 1100-O를 사용하였으며 shell 요소를 적용하였다.

액중 방전 성형은 아주 빠른 속도 하에서 소재를 성형하는 공정이므로 해석 시 소재에 가해지는 변형률 속도의 영향을 고려하여야 한다. 따라서 고속 성형 해석에 적합한 Cowper-Symonds 구성 모델을 소재에 적용하였다. Cowper-Symonds 구성 모델은 식 (5)와 같다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{p} \right)^m \right] \quad (5)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 유효 소성 변형률 속도, p 와 m 은 변형률 속도 매개변수, 그리고 σ_y 는 변형률 속도를 고려하지 않은 항복 응력이다. Al 1100-O의 경우 $p = 7854$, $m = 0.3338$ 이고 소재의 물성치는 Table 1과 같다.

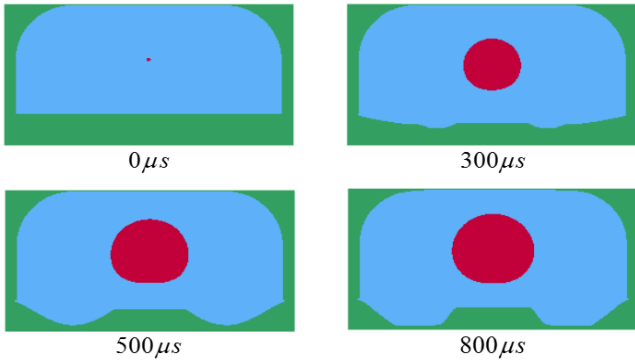


Fig. 5 Simulation results of fluid parts

액중 방전 성형의 유한요소모델을 만들기 위해서는 유체와 소재의 상호작용이 잘 이루어지도록 하는 것이 중요하다. 물과 소재 사이, 즉 유체와 구조 파트 사이의 상호 작용(fluid-structure interaction, FSI)을 정의하기 위해 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 키워드를 사용하였다. FSI가 제대로 정의되지 않으면 유체의 누출(leakage)이 발생하여 정확한

해석 결과를 얻을 수 없다. 따라서 키워드를 사용하여 FSI를 정의하고 누출이 발생하지 않도록 하였다. 또한 이 키워드를 사용하기 위해서는 유체 파트와 구조 파트의 요소가 일부 겹쳐져 있어야 한다. 따라서 진공 파트를 Fig. 2와 같이 여유 있는 크기로 모델링하여 구조파트와 요소가 겹쳐질 수 있도록 하였다.

3. EHF 유한요소해석 결과

3.1 2차원 평면 변형률 모델 해석 결과

Fig. 3의 에너지를 입력하여 액중 방전 성형의 해석을 수행하였고 유체 파트의 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. ALE 기법을 적용했기 때문에 Fig. 5와 같이 유체의 움직임을 확인할 수 있다. 초기에 플라즈마는 아주 작지만 에너지 입력 후 점점 커지고 동시에 물이 움직인다. 성형이 거의 완료되었을 때인 800 μ s의 결과에서 다이의 모서리에 물이 다 차 있

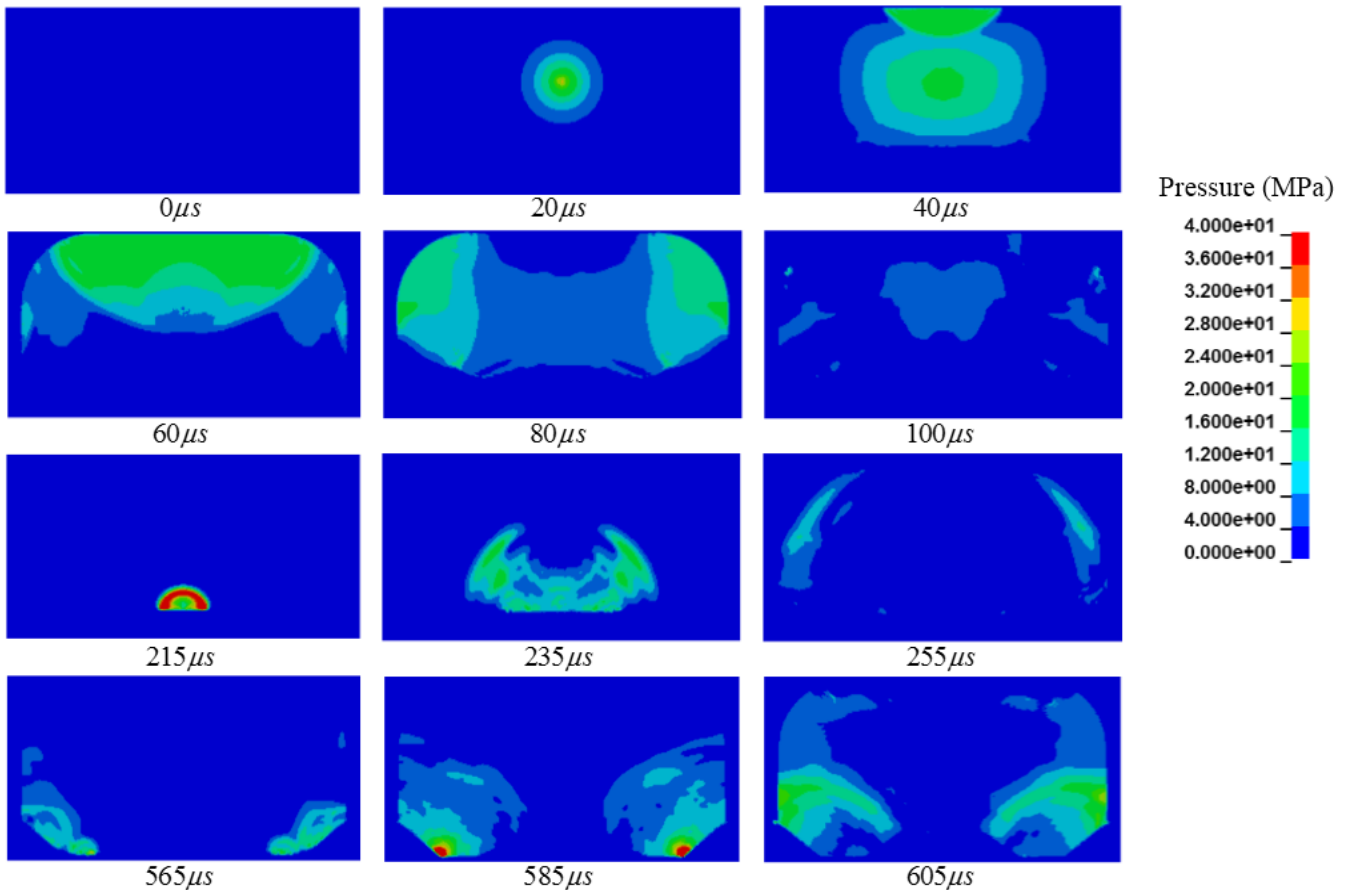


Fig. 6 Pressure distribution of fluid parts

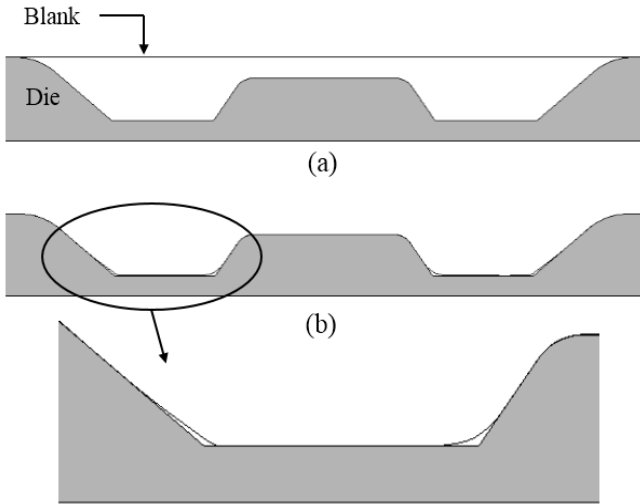


Fig. 7 Simulation results of the blank (a) $t = 0\mu s$, (b) $t = 800\mu s$

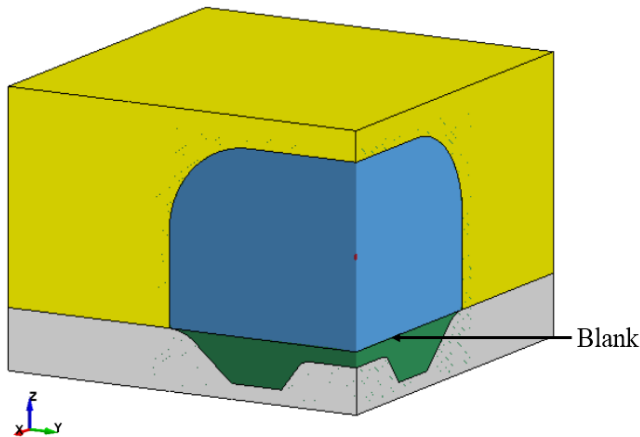


Fig. 8 Three dimensional quarter model for EHF simulation

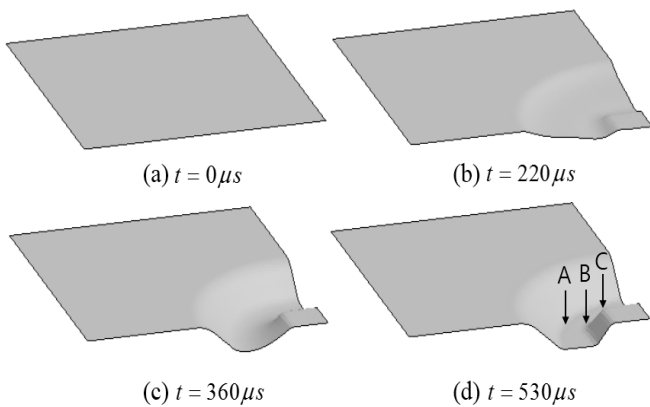


Fig. 9 The plastic deformation behavior of the blank

는 것으로 보아 물이 소재를 제대로 성형시켰다는 것을 알 수 있다. 또한 FSI가 제대로 정의되어 유체부의 누출 없이 해석이 잘 진행된 것으로 판단된다.

에너지가 입력된 시점부터 Fig. 6과 같이 압력파가 발생하여 중앙에서부터 전체적으로 압력이 퍼진다. 초기 $0 \sim 30\mu s$ 에서는 압력의 전파가 뚜렷하게 관찰되며 그 이후로는 압력파가 챔버에 의해 반사되면서 비교적 복잡한 형태를 보인다. 초기에 발생한 높은 압력에 의해 물이 움직이게 되고 소재가 다이에 닿는 순간인 $215\mu s, 585\mu s$ 에서 한 번 더 큰 압력이 발생한다. 물이 움직이는 동시에 소재의 성형도 진행 되는데 Fig. 7과 같이 다이와의 접촉이 제대로 이루어져 바운싱 없이 소재가 원하는 형상으로 성형이 된 것을 볼 수 있다.

3.2 3차원 1/4 모델 해석 결과

2차원 평면 변형률 모델을 사용하여 물에서 발생한 압력파로 인해 소재가 성형되는 것을 확인한 다음 소재의 성형 거동을 보기 위하여 3차원 1/4 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 완전한 성형 형상을 보기 위해서는 3차원 전체 모델을 사용해야 하지만 챔버와 다이 사이의 공간을 모두 채워야 하는 유체 파트로 인해 전체 요소 개수가 증가하므로 해석의 효율을 위해 1/4 모델을 사용하고 x-z, y-z평면에 대칭 조건을 부여했다.

액중 방전 성형의 해석에서 요소를 생성할 때 물과 소재의 요소 크기가 중요하다. 요소의 크기를 동일하게 일치시킬 필요는 없지만 하중의 전달을 정확하게 하기 위하여 밀도를 비슷하게 해야 한다. Fig. 8과 같은 모델을 사용하여 물과 소재의 요소 크기를 비슷하게 생성하였을 때 전체 요소 개수는 약 30만개이다.

Fig. 3와 같은 형태의 에너지를 3차원 1/4 모델에 맞게 값을 조절하여 해석을 수행하였고 시간에 따른 소재의 성형 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 플라즈마와 가까운 중앙의 블록에 먼저 접촉된 다음 바깥쪽 모서리, 안쪽 모서리의 순서로 해석이 진행되며 1/4 모델 역시 바운싱 없이 소재가 다이에 잘 접촉되었다. 성형 결과를 자세히 보기 위하여 Fig. 10과 같이 소재의 최종 성형 형상과 다이의 z축 변위를 비교하였다. 소재와 다이의 z축 변위가 거의 일치하며 모서리 부분도 잘 채워진 것을 볼 수 있다.

Fig. 9에 표시된 위치에서의 변형률 속도를 Fig. 11에

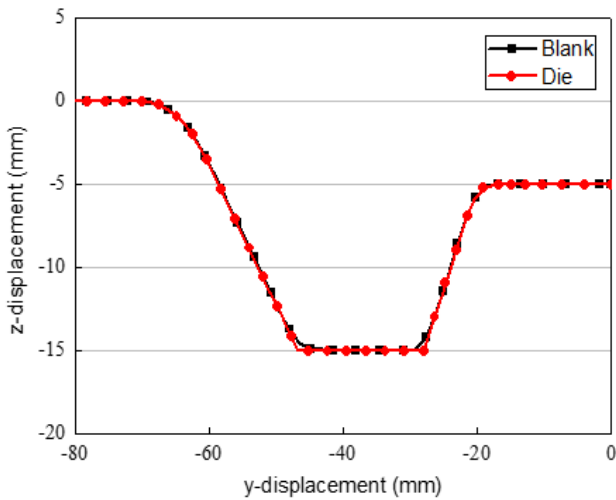


Fig.10 Comparison of z-displacement of blank and die

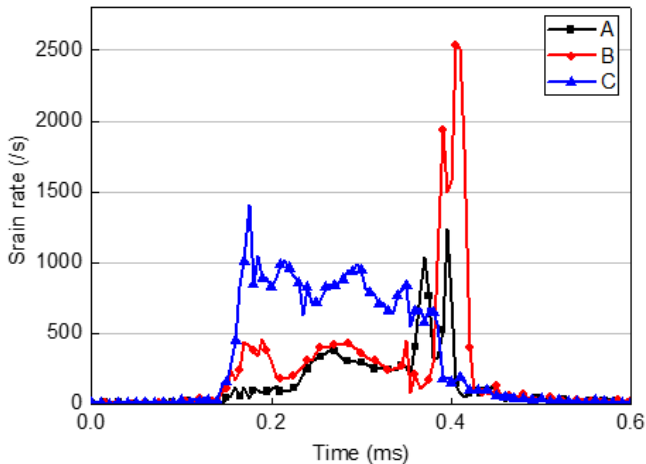


Fig.11 Strain rate of the blank at the different location

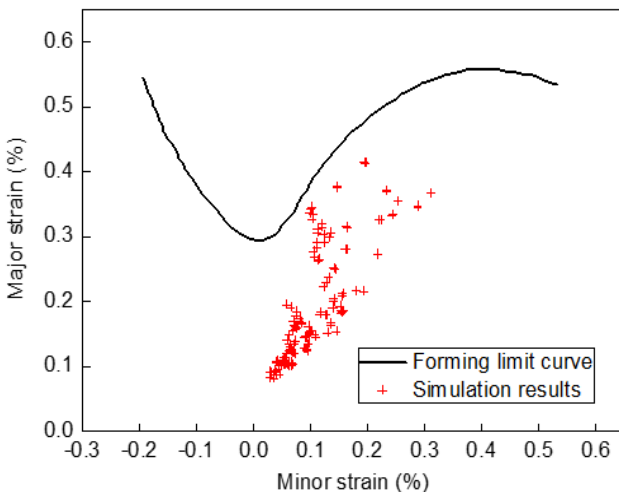


Fig.12 Forming limit diagram

나타내었다. 소재의 최대 변형률 속도는 B 점에서 약 2532.8/s로 소재가 아주 빠른 속도로 성형된다는 것을 알 수 있다. 1000/s 이상의 고속 성형 공정에서는 소재가 다이에 접촉할 때 제대로 접촉하지 못하고 바운싱에 의해 소재에 불량 발생 할 수 있다[8]. 하지만 액중 방전 성형의 해석 결과에서는 그러한 현상이 발생하지 않는데 이는 소재를 성형시키는 압력을 전달하는 매개체가 물이기 때문이다. 에너지 입력으로 인해 물에 압력파가 생기고 이로 인해 높은 압력을 가진 물이 소재 위에서 눌러주는 역할을 하여 소재의 바운싱을 억제시키는 것으로 판단된다. 따라서 주름과 같은 불량의 발생 확률이 적으므로 Fig 9와 같이 원하는 형상으로 성형이 가능하다.

해석 결과를 바탕으로 소재의 파단 여부를 확인하기 위하여 Al 1100-O의 성형 한계도(forming limit diagram)가 사용되었다[9]. 성형 한계도는 파단을 발생시키는 소재의 최대 주변형률 및 최소 주변형률의 값을 최대 및 최소 주변형률 평면상에 곡선으로 나타낸 것이다. 성형된 소재의 변형률이 곡선 아래에 위치하면 파단으로부터 안전하다고 판단할 수 있다.

LS-PrePost를 사용하여 해석이 완료된 소재의 주 변형률을 확인할 수 있다. 전체 소재에서 파단 가능성이 있는 다이 중앙의 블록 주변에 위치한 요소들의 주 변형률만 따로 저장하여 Fig. 12와 같이 그래프에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 성형된 소재의 변형률 분포는 모두 성형 한계 곡선 아래에 위치한다. 따라서 해석에 입력한 조건 하에서 소재는 파단이 발생하지 않고 불량 없이 성형이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LS-DYNA를 사용하여 액중 방전 성형을 해석적으로 구현하고 소재의 성형성을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액중 방전 성형을 해석적으로 구현하기 위하여 LS-DYNA내의 ALE 기법을 사용하여 유체의 요소를 생성함으로써 물의 움직임을 확인할 수 있도록 하였다. 또한 FSI를 정의하여 유체 파트의 누출이 발생하지 않는 액중 방전 성형 해석 기법을 확립하였다.

(2) 액중 방전 성형의 해석 결과, 변형률 속도가 1000/s 이상인 고속 성형이지만 바운싱 효과가 소재의 성형성에 미치는 영향이 적어서 소재가 다이에 잘 접촉되었다. 따라서 불량 발생 없이 원하는 형상으로 소재가 성형 되었다.

(3) 소재의 파단 여부를 더욱 정확하게 판단하기 위해서는 동일한 에너지를 이용한 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 Press Actuator for Electromagnetic Processes of Sheet Metal, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 16, No. 4, pp. 455~460.
- [2] M. Kamal, G. S. Daehn, 2007, A Uniform Press 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] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. H. Lee, H. K. Kim, H. G. Noh, W. J. An, J. Kim, 2015, Prediction of the Formability Enhancement from Electromagnetic Forming due to Interaction between Tool and Blank Sheet, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 3, pp. 199~204.
- [7] V. S. Mamutov, S. F. Golovashchenko, A. V. Mamutov, 2014, Simulation of High-Voltage Discharge Channel in waterat Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®, *FEA Inf. Eng. J.*
- [8] 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.
- [9] S. Kohara, 1993, Forming-limit Curves of Aluminum and Aluminum Alloy Sheets and Effects of Strain Path on the Curves, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 38, No. 4, pp. 723~735.