

액중 방전 성형의 실험 장치 개발 및 실험적 연구

우민아¹⁾ · 노학곤¹⁾ · 송우진²⁾ · 강범수¹⁾ · 김정^{*1)}

부산대학교 항공우주공학과¹⁾ · 부산대학교 융합학부²⁾

Development of Electrohydraulic Forming Apparatus and Its Experimental Study

Mina Woo¹⁾ · Hakgon Noh¹⁾ · WooJin Song²⁾ · Beomsoo Kang¹⁾ · Jeong Kim^{*1)}

¹⁾Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²⁾Department of Convergence Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received 13 January 2017 / Revised 3 February 2017 / Accepted 9 February 2017)

Abstract : Electrohydraulic forming is a high-speed forming process that deforms a blank using electric discharge in liquid. When high voltage is discharged in the water, a shock wave is propagated from the tip of the electrodes to the blank, causing the blank to be deformed into the die. Electrohydraulic forming has many advantages including improved formability and reduced bouncing effect and springback. The objective of this paper was to conduct a feasibility study to identify the electrohydraulic effect. An electrohydraulic forming apparatus was developed and experiments were carried out. The results of the experiment showed that the developed apparatus had sufficient energy to deform the blank into the die. Using the hole to emit residual air in the die was more effective than using the vacuum pump in terms of saving on experiment time.

Key words : Electrohydraulic forming(액중 방전 성형), High-speed forming(고속 성형), Electric discharge(전기 방전), Shock wave(충격파), Residual air(잔류 공기)

1. 서론

최근 자동차 분야에서는 부품 경량화를 위해 기존에 사용했던 재료인 연강(Mild steel)에 비해 더 가볍고 강도가 높은 초 고강도 강과 알루미늄 합금을 자동차의 부품으로 적용하는 방법을 시도하고 있다.¹⁻³⁾ 그러나 초 고강도 강과 알루미늄 합금은 성형성이 낮으므로 기존의 저속 성형 공정으로는 냉간 성형이 어렵다. 따라서 이러한 성형성 문제를 개선하기 위한 방안으로 전자기 성형, 폭발 성형, 액중 방전 성형과 같은 고속 성형 공법이 제시되어 이에 대한 연구가 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾

소재가 1 ms 이내의 짧은 시간 동안 성형되면 소재의 성형성이 향상되어 비교적 복잡한 형상도 성형이 가능하며 고속에 의한 관성 효과로 인해 저속 조건일 때보다 스프링백(Spring back)이 저감된다는 장점이 있다.⁶⁻⁸⁾

그러나 전자기 성형의 경우, 성형력을 지속시켜 주는 매개체가 없기 때문에 소재가 금형에 접촉할 때 바운싱(Bouncing)이 발생하여 소재에 주름과 같은 불량 발생하며,⁹⁾ 소재의 전기 전도도가 낮으면 성형에 어려움이 있다. 또한 폭발 성형은 사용자가 직접 폭약을 사용하기 때문에 아주 위험하다는 단점이 있다.

*Corresponding author, E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

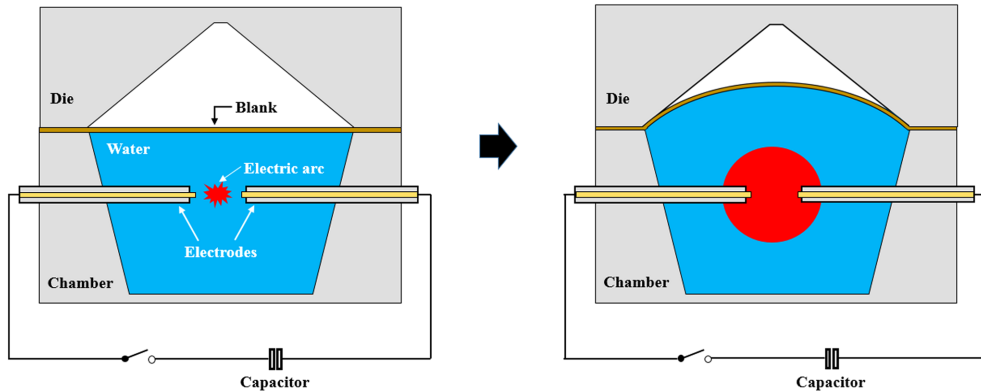


Fig. 1 The scheme of electrohydraulic forming process

따라서 이러한 고속 성형 공정의 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 액중 방전 성형을 제시하고자 한다. 액중 방전 성형(Electrohydraulic forming, EHF)은 고속 성형 기술 중 하나로서 유체 내의 전기 에너지 방전을 이용한 판재 성형 공정이다. 1 ms 이내의 짧은 시간 동안 커패시터(Capacitor)에 저장된 에너지를 순간적으로 방전시키면 Fig. 1과 같이 유체 내에 위치한 전극 사이에서 스파크가 발생하여 유체가 국부적으로 고온, 고압의 플라즈마 상태가 된다. 이때 플라즈마가 팽창하면서 유체에 충격파를 가하고 이로 인해 소재가 고속으로 성형된다.

액중 방전 성형은 고속 성형에서 흔히 발생하는 바운싱(Bouncing)이 저감된다는 장점이 있다. 소재가 성형될 때 성형력을 지속시켜주는 매개체 역할을 하는 유체가 존재하기 때문에 전자기 성형에 비해 바운싱이 훨씬 저감되어 주름 발생이 억제된다.¹⁰⁾

따라서 본 논문에서는 기존의 고속 성형 공정의 장점을 가진 동시에 바운싱도 발생하지 않는 액중 방전 성형 공정을 실제로 구현하기 위하여 성형 장치를 개발하고 실험을 수행하였다. 장치의 주요 요소인 챔버, 금형, 전극봉을 자체적으로 설계하고 개발된 장치를 이용해 금형 내부의 잔류 공기의 영향에 따른 실험과 에너지 수준에 따른 실험을 수행하여 소재의 성형 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 소재는 높은 강도와 우수한 항 부식성으로 자동차, 선박 등의 분야에 많이 사용되는 Al 6061-T6로 정하였다.

2. 액중 방전 성형 장치

액중 방전 성형 장치는 일반적으로 커패시터, 금형, 전극, 물, 챔버로 이루어져 있으며 장치의 설계도는 Fig. 2와 같다.

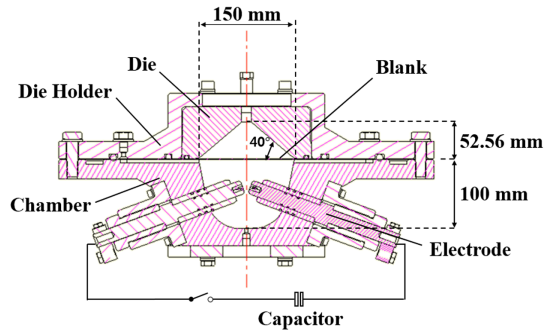


Fig. 2 Specification of electrohydraulic forming apparatus

2.1 커패시터

장치의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 커패시터이다. 커패시터에 저장되는 에너지(U)는 식 (1)과 같이 커패시터의 커패시턴스(C)와 입력 전압(V)에 의해 계산된다. 본 연구에 사용된 PNU-32의 커패시턴스는 $333 \mu\text{F}$, 최대 전압 15 kV로 최대 에너지는 32 kJ이다. 또한, 짧은 시간 안에 고 에너지를 발생시키기 위해 커패시터 내부의 인덕턴스가 낮은 값을 가지도록 설계하였다.

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

커패시터에서 방전으로 인해 발생하는 전기 에너지는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$U = \int i^2 R_v(i, t) dt \quad (2)$$

식 (2)에서 i 는 전류, R_v 는 전극 사이에 위치하는 와이어의 저항이다.

식 (2)를 이용하여 전기 에너지를 계산하기 위해서는 R_v 의 시간에 따른 값을 획득할 수 있어야 한다. 그러나 실험 시 유체 내에 위치하는 와이어의 저항을 측정하기는 쉽지 않다. 따라서 비교적 측정이 용이한 전류와 전압을 측정하여 식 (3)을 이용해 에너지를 계산한다.

$$U = \int i(t) V(t) dt \quad (3)$$

전류는 오실로스코프(Oscilloscope)와 로고스키 코일(Rogowski coil)을 이용하여 측정 가능하고 전압은 실험 시 커패시터에 충전하는 값이므로 쉽게 획득 가능하다.

2.2 금형, 금형 홀더, 챔버

액중 방전 성형 공정에서는 전기 에너지 방전으로 인해 챔버 내에서 높은 압력이 발생하고, 소재가 $10^2 m/s$ 수준의 높은 속도로 성형된다. 따라서 이로 인한 충격을 견딜 수 있도록 금형, 금형 홀더 그리고 챔버는 고강도 소재인 SKD 11을 사용하여 제작하였다.

금형은 Fig. 3과 같이 각도 40° 의 원뿔형 금형으로 제작하였으며 금형 홀더와 볼트로 체결된다. 금형과 결합된 금형 홀더는 챔버와 볼트로 체결되며, 이때 볼트의 체결력은 챔버-금형 홀더 사이에 놓인 소재를 잡아주는 블랭크 홀더 포스(Blank holder force)

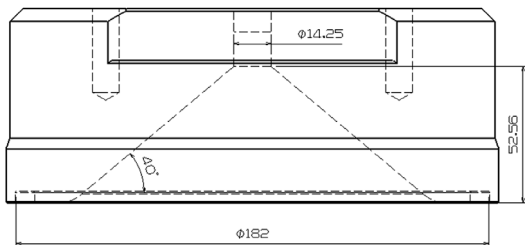


Fig. 3 Dimensions of the conical die

역할을 하므로 그 값이 균일해야 한다. 따라서 토크를 일정하게 부과할 수 있는 토크 렌치(Torque wrenches)를 이용하여 볼트를 체결하고 균일한 블랭크 홀더 포스가 소재에 가해질 수 있도록 하였다.

2.3 전극

전극은 커패시터로부터 발생한 에너지를 챔버 내부의 유체로 전달하는 중요한 장치이다. 전기 에너지를 잘 전달할 수 있도록 전기 전도도가 높은 재질인 알루미늄으로 제작하였고 Fig. 4와 같이 떨어져 있는 두 개의 전극 사이에 스테인리스 재질의 와이어(Wire)를 위치시켜 전기 에너지가 흐를 수 있도록 하였다. 전극의 끝부분과 연결된 커패시터에서 전기 에너지가 방전되면 전극 사이의 와이어로 고 전류가 흐르게 되고, 이로 인해 와이어가 터지면 유체 내에 충격파가 발생하여 이 힘으로 소재가 성형된다.

제작된 장치의 조립 형상은 Fig. 5와 같다.



Fig. 4 Electrodes with stainless wire

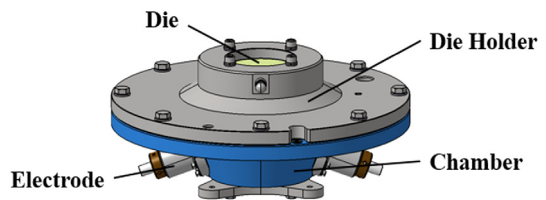
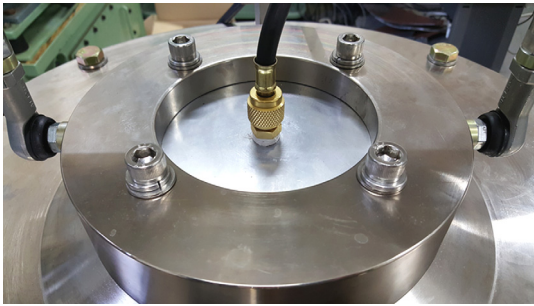


Fig. 5 Configuration of electrohydraulic forming apparatus

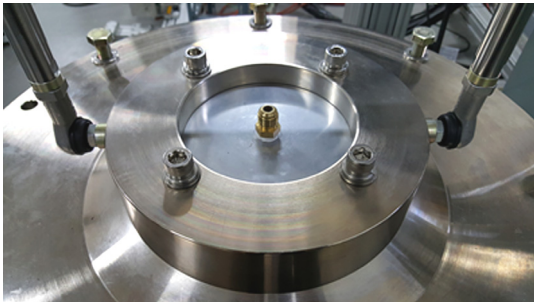
3. 액중 방전 성형 실험 및 결과

3.1 금형 내부의 진공 여부에 따른 실험 및 결과

액중 방전 성형 실험 시 폐쇄된 공간인 금형 내부에 잔류 공기가 존재하면 소재의 성형에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제는 진공 펌프를 이용하여



(a) Case 1 - with vacuum pump



(b) Case 2 - without vacuum pump

Fig. 6 The upper side of the die

금형 내부를 진공 상태로 만들거나(Case 1) 금형의 윗면에 구멍을 뚫어 소재가 성형될 때 공기가 배출될 수 있도록 만드는 방법(Case 2)을 적용하면 해결할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 경우를 모두 실험한 후 실험 효율이 더 높다고 판단되는 방법을 선택하여 실험을 진행하기로 하였다. Case 1은 Fig. 6(a)와 같이 금형의 윗면에 진공 펌프를 연결하여 금형 내부 기압을 $10^{-4} atm$ 수준으로 유지하였고, Case 2는 Fig. 6(b)와 같이 진공 펌프 배관을 제거하고 구멍이 뚫려 있는 상태에서 실험을 수행하였다.

Fig. 7에 동일한 전압 7 kV를 입력하였을 때 Case 1, 2의 성형 형상을 비교한 결과를 나타내었는데 금형 내부가 진공 상태인 Case 1에서 Case 2보다 소재의 최대 높이가 약 2 mm 더 높은 결과를 보였다. Case 2의 경우, 구멍을 뚫어 공기가 빠져나갈 수 있도록 하였지만 소재의 성형 속도가 너무 높기 때문에 짧은 순간에 공기가 완전히 다 빠져나가지 못하여 잔류 공기가 소재의 성형을 방해한 것으로 판단된다. 반면 Case 1에서는 금형 내부의 기압이 $10^{-4} atm$ 수준으로 공기가 거의 존재하지 않기 때문에 Case 2

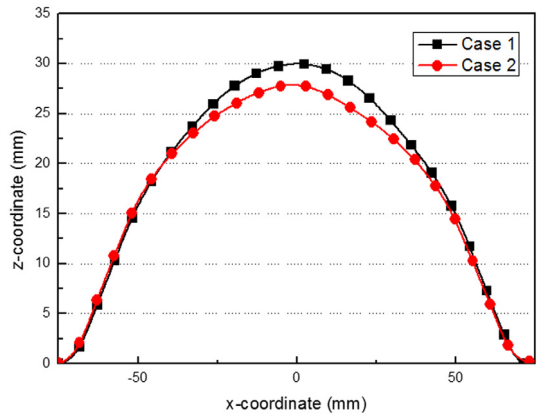


Fig. 7 Comparison of the bulge height of the blank

에 비해 최대 성형 높이가 더 높은 결과를 보였다.

동일한 입력 전압에서 Case 1의 최대 높이가 높으므로 성형 높이 결과만 확인했을 때는 진공 펌프를 사용하는 방법이 더 효율적이라고 판단할 수 있다. 그러나 금형 내부 공기를 제거하는데 상당한 시간이 소요되며, 소재에 과단이 발생할 경우 진공 펌프 배관에 물이 유입되기 때문에 이를 제거할 때 시간이 많이 소요되어 반복 실험 시 효율이 떨어진다. 또한 입력 전압이 높으면 성형 높이가 또한 높아지므로 Case 2의 경우에도 커패시터의 용량이 충분하다면 진공 펌프를 사용했을 경우와 유사한 실험 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 진공 펌프를 사용하지 않고 금형의 윗면에 구멍을 뚫어 잔류 공기를 배출하는 방법이 반복 실험 시 더욱 효율적이라 판단하고, 이 방법을 이용하여 에너지 수준에 따른 실험을 진행하였다.

3.2 에너지 수준에 따른 실험 및 결과

장치의 성능을 확인하기 위해 설계된 원뿔형 금형을 이용하여 액중 방전 성형 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 소재는 크기 250 mm × 250 mm, 두께 1 mm의 Al 6061-T6이다.

오실로스코프와 로고스키 코일을 이용하여 입력 전압 별 전류 그래프를 Fig. 8에 나타내었고, 8 kV의 전압을 입력하였을 때 발생한 전류와 전압 Fig. 9와 같이 획득하였다. 전압은 입력 시점부터 선형적으로 감소한다고 가정하여 Fig. 9와 같이 나타내었다.¹¹⁾ Fig. 9의 전압, 전류 그래프를 이용하여 식 (3)

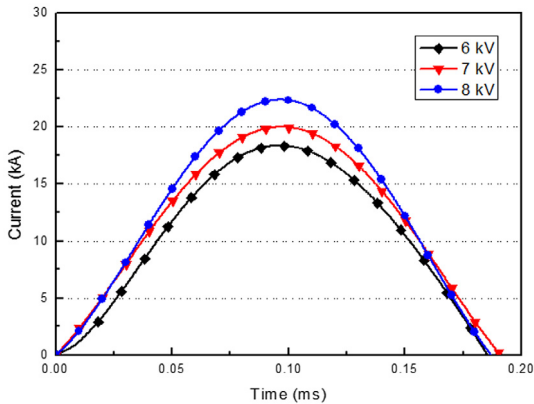


Fig. 8 Current waves at the different input voltage

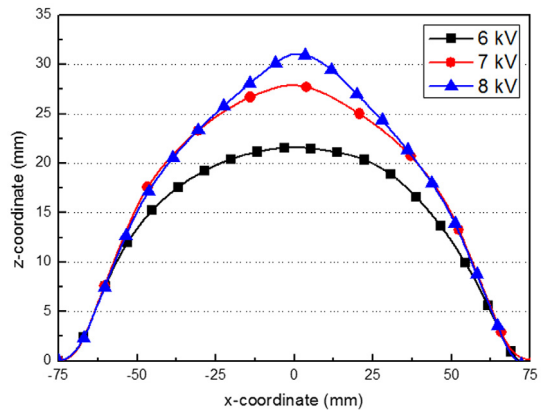


Fig. 11 The bulge height of the blank at 6, 7 and 8 kV

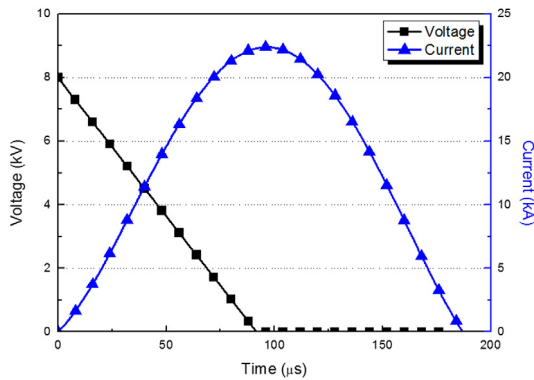


Fig. 9 Current and voltage wave at the 8 kV

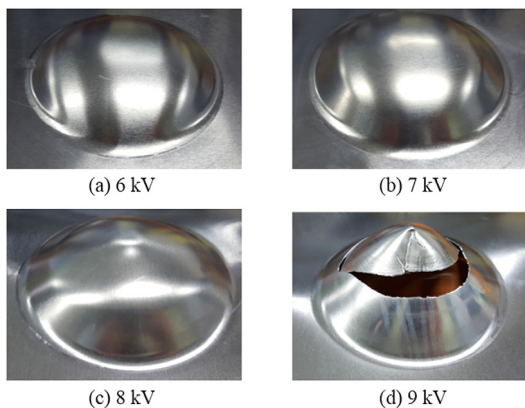


Fig. 10 Deformation results of the blank at different input voltage

에 의해 전력을 계산할 수 있고, 이때 최대 전력은 $45 \mu s$ 에서 약 52 MW이다.

Fig. 9의 전기 에너지 발생하였을 때 소재의 성형

결과는 Fig. 10과 같다. 3차원 스캐닝 장비를 사용하여 소재의 중앙 라인 좌표를 획득하여 Fig. 11에 그래프로 나타내었다. 소재의 최대 높이는 6 kV일 때 22 mm, 7 kV는 28 mm, 8 kV 일 때 31 mm이고 9 kV 이상에서는 소재에 파단이 발생하였다. 입력 전압이 높을수록 소재의 최대 높이가 증가하고, 소재의 좌우가 대칭인 것으로 보아 챔버-금형 홀더의 체결력이 균일하게 가해진 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 7에서 Case 1의 그래프와 Fig. 11에서 8 kV일 때의 소재의 성형 결과 그래프를 비교해보면 후자의 성형 결과가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 앞의 4.1장에서 언급한 금형 내부의 진공 여부에 따른 실험에서 입력 전압을 높여주면 잔류 공기를 배출하는 방법이 진공을 유지하는 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 액중 방전 성형 공정의 구현 가능성을 확인하기 위하여 실험 장치를 설계하고 개발하여 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 액중 방전 성형의 주요 요소인 챔버, 금형, 전극을 자체적으로 설계하여 성형 장치를 개발하였다. 금형 내부의 잔류 공기의 영향을 확인하기 위하여 실험을 수행한 결과, 진공 펌프 없이 금형의 뒷면에 구멍을 뚫어 잔류 공기를 배출시키는 방

법이 반복 실험 시 효율적이라고 판단하였다.

- 2) 원뿔형 금형을 이용하여 에너지 수준에 따른 실험을 수행하였다. Al 6061-T6 소재를 이용하였으며 입력 전압이 높을수록 소재의 최대 성형 높이가 높아졌고 9 kV 이상에서 파단이 발생하였다.
- 3) 제작된 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였고, 액중 방전 성형 공법으로 소재가 성형되는 것을 확인하였으므로 실험 기술을 확보하였다. 추후 실험을 통해 고속 물성을 획득하고 유한 요소 해석과의 비교를 통하여 정합성을 확보한다면 액중 방전 성형의 연구에 더욱 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자는 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. Melander, A. Delic, A. Björkblad, P. Juntunen, L. Samek and L. Vadillo, "Modelling of Electro Hydraulic Free and Die Forming of Sheet Steels," *International Journal of Material Forming*, Vol.6, No.2, pp.223-231, 2013.
- 2) A. V. Mamutov, S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov and J. J. Bonnen, "Modelling of Electrohydraulic Forming of Sheet Metal Parts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.219, pp.84-100, 2015.
- 3) K. P. Kim and S. H. Kim, "Optimization of Frontal Crashworthiness for the Weight Reduction Design of an Auto-body Member with the Advanced High Strength Steels," *Transactions of KSAE*, Vol.17, No.2, pp.104-111, 2009.
- 4) J. Kim, W. J. Song and B. S. Kang, "Study on Formability Enhancement of Electromagnetic Forming Using Gurson Plasticity Material Model," *Transactions of KSAE*, Vol.21, No.3, pp.98-104, 2013.
- 5) V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya and M. Kleiner, "Electromagnetic Forming-a Review," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.211, No.5, pp.787-829, 2011.
- 6) T. Altan and A. E. Tekkaya, "Sheet Metal Forming: Processes and Applications," *ASM International*, 2012.
- 7) S. Golowin, M. Kamal, J. Shang, J. Portier, A. Din, G. S. Daehn, R. Bradley, K. E. Newman and S. Hatkevich, "Application of a Uniform Press Actuator for Electromagnetic Processes of Sheet Metal," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.16, No.4, pp.455-460, 2007.
- 8) M. Kamal and G. S. Daehn, "A Uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.129, No.2, pp.369-379, 2007.
- 9) H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang and J. Kim, "Numerical and Experimental Approach to Reduce Bouncing Effect in Electromagnetic Forming Process Using Cushion Plate," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.28, No.8, pp.3263-3271, 2014.
- 10) M. A. Woo, H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang and J. Kim, "Numerical Study of Electrohydraulic Forming to Reduce the Bouncing in High Speed Forming Process," *Trans. Mater. Process*, Vol.25, No.4, pp.261-267, 2016.
- 11) S. F. Golovashchenko, "Electrohydraulic Forming of Near-Net Shape Automotive Panels," No. Doe-Ford-Go18128, Ford Motor Company, 2013.