

# 전자기 로렌츠력을 이용한 박판성형 장비 개발

이현민<sup>1</sup>·강범수<sup>2</sup>·김정<sup>#</sup>

## Development of Sheet Metal Forming Apparatus Using Electromagnetic Lorentz Force

H. M. Lee, B. S. Kang, J. Kim

(Received November 27, 2009 / Revised December 1, 2009 / Accepted December 16, 2009)

### Abstract

Electromagnetic forming (EMF) method is one of high-velocity forming processes, which uses electromagnetic Lorentz force. Advantages of this forming technique are summarized as improvement of formability, reduction in wrinkling, non-contact forming and applications of various forming process. In this study, the EMF apparatus is developed. It is designed to be stored in 10 capacitors connected in parallel, each with a capacitance of 50 $\mu$ F and maximum working voltage of 5kV. The system has capacitance of 500 $\mu$ F and maximum stored energy of 6.25kJ. And EMF experiments are carried out to verify the feasibility of the EMF apparatus, which has enough forming force from the results of EMF experiment. In addition, peak current carrying a forming coil is predicted from theoretical background, and verified the predicted value compared with experimental value using the current measurement equipment. Consequently, EMF apparatus developed in this study can be applied to various EMF researches for commercialization.

**Key Words** : Electromagnetic Forming, High-Velocity Forming Process, Induced Current, Lorentz Force

### 1. 서론

전자기 성형(electromagnetic forming:EMF)이란 고강도의 자기장을 이용하여 고속(15~300m/s)으로 금속을 성형하는 기술이다. 즉, 자계가 가지는 에너지를 직접 금속의 성형에 이용하는 성형법으로 폭발성형(explosive forming), 방전성형(electrohydraulic forming)과 더불어 대표적인 고속 성형법 중의 하나이다(high-velocity forming process)[1].

전자기 성형법은 성형코일의 자기장이 작용하는 범위 내에서 성형이 이루어지기 때문에 피가공재의 성형 범위에 제한이 따른다. 또한 전기 전도도가 낮은 소재는 성형을 위한 충분한 성형

력을 얻기 위해 구리와 같은 고전도성 드라이버(driver)를 이용해야 하는 단점이 있다. 하지만 전자기 성형법은 성형코일에 의해 발생된 자기압력이 가공물에 직접 가해져 어떠한 물리적 접촉 없이 성형이 이루어지므로, 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 발생하지 않으며 반복적인 성형이 가능하다는 장점이 있다. 또한 냉간 가공법으로서 기계적 성질을 그대로 유지하는 것이 가능하며 축관/확관, 평판 성형, 접합 공정 등 다양한 성형공정에 적용이 가능하다. 뿐만 아니라 복잡한 형상도 효과적으로 성형이 가능하여 자동차 산업과 항공 산업 등 다양한 분야에 응용할 수 있다[2].

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원  
2. 부산대학교 항공우주공학과  
# 교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,  
E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

전자기 성형에 대한 연구는 이론적 접근만 있을 뿐 실용화 단계에 접어들지는 못했다. 국내에서는 1990년대 초에 국외에서 장비를 도입해 수치적 접근과 실험 결과를 비교하는 등의 연구가 진행되었고 2005년에는 자동차의 spaceframe에 적용하기 위한 단계로서 알루미늄 튜브의 접합공정에 대한 연구가 진행되었으나 기술 기반과 경험의 부족으로 실용화 되지 못하고 있다[3]. 국외에서도 미국과 유럽, 일본, 중국 등지에서 전자기 성형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 부분적으로 실용화 되고 있는 실정이다[4].

따라서 본 연구에서는 전자기 성형의 성형 공정 및 실용화를 위한 연구 기반 확보를 위해 전자기 성형장비의 설계 및 개발 기술 확보와 실험을 통한 개발 장비의 검증에 수행하였다.

## 2. 전자기 성형 원리 및 방법

### 2.1 패러데이의 법칙 및 로렌츠의 힘

임의의 폐회로에서 자속이 시간에 따라 변하게 되면 자속의 시간변화율과 같고 방향은 반대인 유도기전력이 유도된다. 이를 패러데이 법칙(Faraday's law)이라 하고 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\varepsilon$ 은 유도 기전력,  $\Phi$ 는 자속,  $t$ 는 시간을 나타낸다. 전자기 성형에서 커패시터를 통해 코일에 순간적으로 Fig. 1과 같이 수백  $\mu$ s의 짧은 시간 이내에 감쇠하는 전류를 방전하게 되면 자속의 변화로 인해 주위의 피가공재(workpiece)에 유도 기전력이 발생하게 된다. 이 유도 기전력에 의해 도체인 피가공물에 유도전류(induced current)가 흐르게 된다.

자기장으로 인하여 전류가 흐르는 도체가 받는 힘을 로렌츠의 힘(Lorentz's force)이라고 하고 식 (2)로 표현된다.

$$F = Idl \times B \quad (2)$$

여기서  $I$ 는 도체에 흐르는 전류,  $dl$ 은 도체의 길이,  $B$ 는 자속밀도,  $F$ 는 로렌츠의 힘이다. 도체의 길이  $dl$ 과 자속밀도  $B$ 에 의해 정의 되는 면에 수직으로 Fig. 2와 같이 로렌츠의 힘이 발생하게 된다. 이 힘이 전자기 성형에서 성형력이 된다[5].

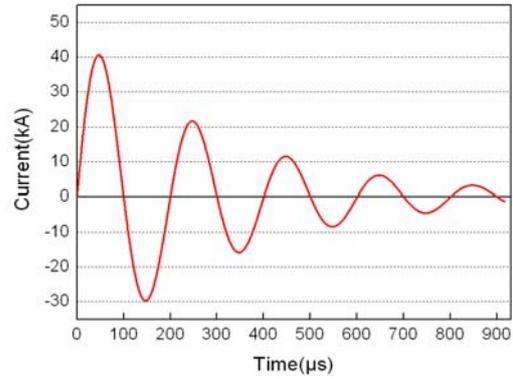


Fig. 1 Primary current wave form

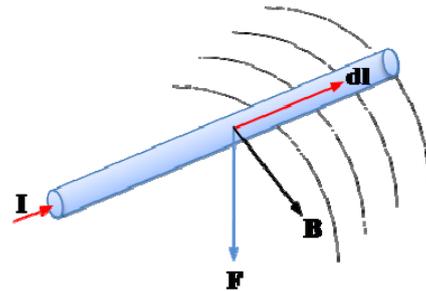


Fig. 2 Lorentz force on current-carrying wire in a magnetic field

### 2.2 전자기 성형의 방법

전자기 성형 장비는 고용량의 커패시터와 성형 코일, 커패시터를 충전하기 위한 제어 회로 및 전력공급장치, 충/방전 스위치, 금형으로 구성되어 있으며 기본적인 회로 구성도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3과 같이 전력공급장치와 연결된 고용량의 커패시터(capacitor)는 충전 스위치를 통해 충전이 이루어지게 된다. 성형을 하기 위한 목표 에너지까지 커패시터가 충전이 되면 방전스위치를 통해 순간적으로 방전시킴으로써 성형코일(forming coil)에 충격전류가 흐르게 된다. 코일에 인가되는 입력전류는 Fig. 1과 같이 수백  $\mu$ s 이내에 감쇠하면서 성형코일에 강력한 자기장을 발생 시키게 된다. 성형코일의 강한 자기장은 패러데이의 법칙에 의해 피가공재에 반대 방향의 유도전류를 발생시키고 로렌츠의 힘에 의해 성형력이 발생되어 성형이 이루어진다. 이때의 성형력은 수십 내지 수백  $\mu$ s의 짧은 순간에 작용되기 때문에 효과적인 성형이 이루어지기 위해서는 피가공재에 충분한 운동에너지를 줄 수 있을 정도로 소재의 항복응력의 수배 이상의 성형력이 발생되어야 한다.

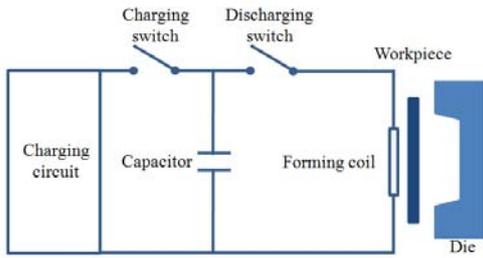


Fig. 3 Schematic of electromagnetic forming circuit

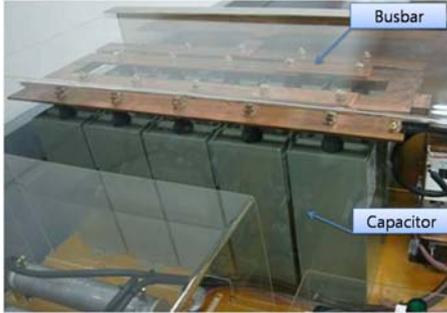


Fig. 4 Parallel connection of capacitor

Table 1 Specification of capacitor system

Capacitance	500 $\mu$ F
Max. working voltage	5kV
Peak current	250kA
Max. stored energy	6.25kJ

### 3. 전자기 성형 장비 설계

#### 3.1 커패시터

에너지 저장 장치인 커패시터는 성형코일에 순간적으로 충격전류를 보내기 위해 전하를 저장하는 장치로서 저장 에너지 용량에 따라 전자기 성형장치의 성능을 결정하는 핵심 부품 중 하나이다. 전자기 성형에 사용되는 커패시터는 임펄스 동안 최대의 에너지를 전달하기 위해 자체 내부 인덕턴스를 낮게 설계 해야 한다.

본 연구에서는 50 $\mu$ F의 커패시턴스, 최대 작동전압 5kV, 최대전류 25kA의 성능을 가지는 커패시터를 병렬연결 하도록 설계하였다. 전체 커패시턴스는 병렬연결일 때 각 커패시턴스의 합과 같다. 커패시터는 Fig. 4와 같이 전기전도성이 좋은 동

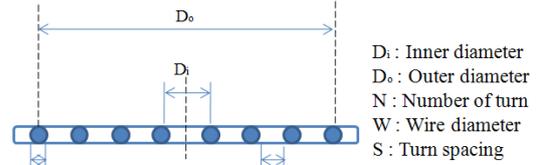


Fig. 5 Schematic of coil design and definition of parameters

제질의 평판 부스바(flat busbar)를 이용해 상기의 성능을 가지는 커패시터 10개를 병렬연결 하였다. 또한, 2개에서 10개까지 커패시터를 유동적으로 연결이 가능하도록 설계를 하여 커패시턴스의 조절을 통해 저장 에너지의 제어가 가능하도록 하였다. 커패시터에 저장되는 에너지는 식 (3)으로 구할 수 있다[5]. 여기서 E는 커패시터에 저장되는 에너지, C는 커패시터의 커패시턴스, V는 작동전압을 나타낸다. 전체 커패시터 시스템의 성능은 Table 1에 나타내었다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$

#### 3.2 성형코일

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (4)$$

$$L = \frac{N^2 \times A^2}{30A - 11D_i} \quad (5)$$

$$A = \frac{D_i + N(W + S)}{2} \quad (6)$$

고강도의 자기장을 발생시키기 위해서는 100~200 $\mu$ s의 짧은 주기로 커패시터가 방전이 되어야 한다. 본 연구에서는 5kHz의 공진 주파수를 가지도록 전자기 성형 장비를 설계하였다. 5kHz의 공진 주파수를 가지기 위한 성형코일의 인덕턴스는 식 (4)로 구할 수 있다. 여기서 L은 성형코일의 인덕턴스(inductance), f는 공진 주파수, C는 커패시터의 커패시턴스이다. 식 (4)를 이용해 성형코일의 인덕턴스를 계산하면 2 $\mu$ H를 구할 수 있다[6].

위의 인덕턴스 값으로 식 (5)와 (6)을 통해 성형코일의 상세 설계가 가능하다. Fig. 5는 식 (5)와 (6)의 기호 정의와 설명을 도식적으로 나타낸다. 위의 식을 이용하여 2 $\mu$ H의 인덕턴스를 가지는



Fig. 6 Forming coil

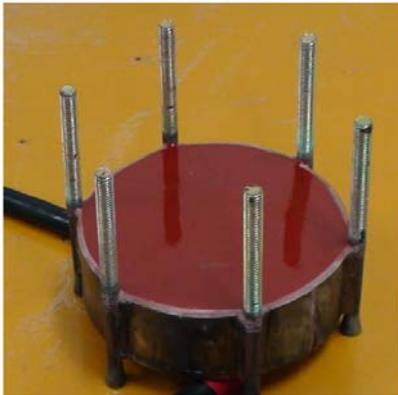
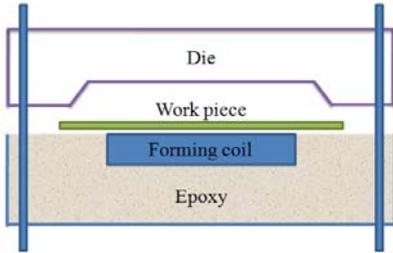


Fig. 7 Design for assembly of forming coil and die

성형코일을 Fig. 6과 같이 제작을 하였다. 5mm×10mm의 단면을 가지는 동선을 이용하여 지름은 110mm, 6번의 turn을 가지도록 성형코일을 설계하였다. 또한 성형코일은 Fig. 7과 같이 에폭시(Epoxy)를 이용하여 절연을 시키고 금형과 성형코일은 볼트 체결방식으로 결합할 수 있도록 제작을 하였다[6, 7].

### 3.3 제어시스템

전자기 성형장비의 입력 전압의 조절을 통한 커패시터의 저장 에너지 제어와 충전 및 방전을 위한 시스템, 일정 전류계를 통해 커패시터를 안

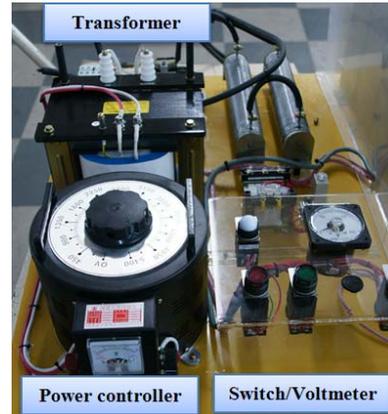


Fig. 8 Control system



Fig. 9 Electromagnetic forming apparatus

정적으로 충전하기 위한 제어 시스템의 구축이 필요하다. 커패시터의 에너지 제어장치와 충전/방전 스위치 장치, 변압장치 등을 Fig. 8과 같이 제작하였다. 입력 전압 조절 장치를 통해 커패시터의 저장 에너지 조절을 가능하도록 하고 이를 전압계를 통해 커패시터의 전압을 확인 할 수 있다.

### 3.4 전자기 성형장비

구성 부품의 설계 및 제작을 통해서 Fig. 9와 같이 전자기 성형장비를 제작하였다. 전자기 성형실험은 전압 조절 장치를 통해 입력 전압을 결정한 후 충전 스위치를 이용해 커패시터를 충전하게 된다. 그리고 전압계를 통해 커패시터가 목표 전압에 도달했을 때 방전 스위치를 이용해 커패시터의 방전이 이루어지면서 소재와 코일간의 전자기장 반발력으로 전자기 성형이 이루어지게 된다.

## 4. 전자기 성형 실험

전자기 성형 장비의 신뢰성 검증을 위해 전자기 성형 실험을 수행 하였다. 소재는 0.5mm 두께



Fig.10 Free forming die



Fig.11 Assembly of forming coil and die

**Table 2 Material properties of Al 1050-H14**

Yield strength	103MPa
Resistivity	2.90 $\mu\Omega$ -cm

의 Al 1050-H14를 사용하였고 Fig. 10과 같이 자유형상 성형을 위해 지름 9cm의 구멍이 뚫려 있는 금형을 제작하였다. 금형과 성형코일은 볼트 체결 방식을 이용하여 Fig. 11과 같이 결합할 수 있도록 하였다. Table 2는 Al 1050-H14의 물성치를 나타낸다.

2.5kV, 3kV, 3.5kV의 입력 전압에 따른 전자기 성형 실험을 수행하였다. 2.5kV는 1.56kJ, 3kV는 2.25kJ, 3.5kV는 3kJ의 저장 에너지를 가진다. 각각의 성형 실험 결과와 중심으로부터 거리에 따른 변형 깊이를 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 실험 결과로부터 1.56kJ일 때는 18mm, 2.25kJ는 22mm, 3kJ는 28.5mm로 중심에서 최대 변형 깊이로 성형이 되며 저장 에너지가 커질수록 성형 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

성형코일에 인가되는 최대 전류는 식 (7)로 표현된다[6]. 여기서  $V_0$ 는 입력 전압, E는 저장 에너지,  $f_1$ 은 전체 시스템의 저항을 함수로 하는 상수



(a) 2.5kV(1.56kJ)

(b) 3kV(2.25kJ)



(c) 3.5kV(3kJ)

Fig.12 Result of electromagnetic forming experiment according to various forming energy

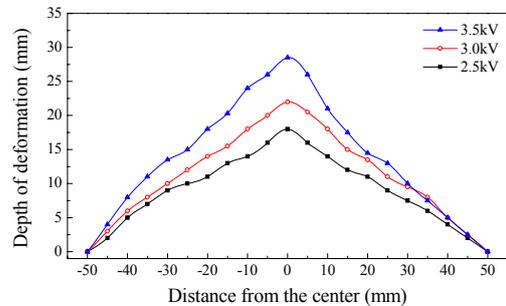


Fig. 13 Comparison of depth of deformation

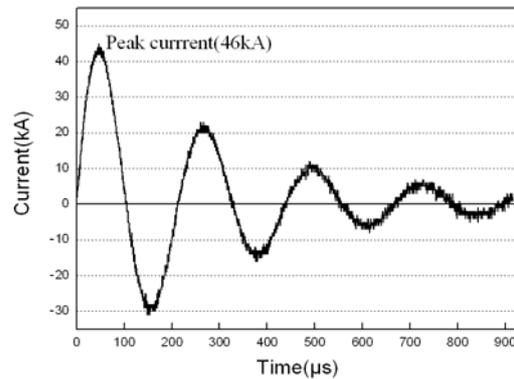


Fig. 14 Experimental current wave at 3kV

로 본 시스템에서는 0.93의 값을 가진다.  $L_{sys}$ 는 전체 시스템의 인덕턴스로 식 (8)을 통해 구할 수 있다. 식 (8)에서  $t_{rise}$ 는 최대 전류에 도달하는 시

**Table 3 Comparison of peak current between predicted and experimental value**

		Predicted value	Experimental value
$I_{\max}$	2.5kV	35kA	35kA
	3.0kV	48.25kA	46kA
	4.0kV	56kA	57kA

간으로 5kHz 공진 주파수를 가지도록 전자기 성형 장비의 설계가 이루어 졌으므로 50 $\mu$ s의 값을 가진다. 따라서 3kV의 입력 전압일 때 식 (7)과 식 (8)을 이용하면 48.25kA의 최대 전류를 예측할 수 있다. 이론적으로 구한 최대 전류를 검증하기 위해 로고스키 코일(Rogowski coil)을 이용하여 3kV일 때의 전류를 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 14와 같이 46kA의 최대 전류를 가진다. 측정 결과에서 볼 수 있듯이 이론적으로 예측한 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 2.5kV, 3kV, 4kV일 때의 최대 전류 예측값과 측정값을 Table 3에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 두 결과값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

$$I_{\max} = f_1 V_0 \sqrt{\frac{C}{L_{\text{sys}}}} = f_1 \sqrt{\frac{2E}{L_{\text{sys}}}} \quad (7)$$

$$L_{\text{sys}} = 4t_{\text{rise}}^2 / \pi^2 C \quad (8)$$

## 5. 결론

본 연구에서는 전자기 성형 장비의 개발과 성형 실험을 통한 장비의 신뢰성을 검증하였다. 장비를 구성하는 모든 부분의 설계 및 제작을 통해 전자기 성형 장비 개발 기술을 확보할 수 있었고 전자기 성형 실험으로 소재를 충분히 가공할 수 있는 성형력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이론적으로 예측한 성형코일에 인가되는 최대 전류를 실험을 통해 측정하여 예측값과 측정값이 거의 일치함을 알 수 있었다. 이를 통해 저장 에너지에 따른 인가 전류를 측정하지 않고 예측하는 것이 가능하여 앞으로 수행할 전자기 성형 해석에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

지금까지의 연구 결과를 바탕으로 향후 전자기

성형 해석 기법 및 다양한 성형 공정의 개발 연구를 통해 실용화할 수 있는 기술 기반의 확립을 목표로 연구를 수행할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2008-331-D00034), 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. S. Lee, 1988, Electromagnetic forming method, Trans. of the KSME, Vol. 28, No. 5, pp. 476~486.
- [2] S. C. Chung, G. B. Choi, H. C. Sin, N. H. Kim, J. S. Lee, 1993, Analysis of tube compression with a mandrel by electromagnetic forming, Trans. of the KSME, Vol. 17, No. 2, pp. 371~379.
- [3] Young-Bae Park, Heon-Young Kim, Soo-ik Oh, 2005, Design of axial/torque joint made by electromagnetic forming, THIN-WALLED STRUCTURES, Vol. 43, pp. 826~844.
- [4] Y. H. Seo, S. C. Heo, T. W. Ku, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2008, Numerical simulation of thin sheet metal forming process using electromagnetic force, Trans. of Materials Processing, Vol. 17, No. 1, pp. 35~45.
- [5] Mitchel E. Schultz, 2009, Grob's basic electronics (10th ed), McGraw-Hill.
- [6] Manish Kamal, Grenn S. Daehn, 2007, A uniform pressure electromagnetic actuator for forming flat sheet, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 129, pp. 369~379.
- [7] H. M. Lee, J. K. Ku, H. G. Noh, W. J. Song, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim, 2009, Development of Forming Equipment Using Electromagnetic Lorentz Force, KSTP 2009 conference, pp. 313~317.