

## 전자기 로렌츠력을 이용한 성형장비 개발

이현민<sup>1</sup>· 구자경<sup>1</sup>· 노학곤<sup>1</sup>· 송우진<sup>2</sup>· 구태완<sup>3</sup>· 강범수<sup>3</sup>· 김 정<sup>#</sup>

### Development of Forming Equipment Using Electromagnetic Lorentz Force

H. M. Lee, J.K. Ku, H. G. Noh, W. J. Song, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim

#### Abstract

Electromagnetic forming(EMF) is a high-velocity forming process which uses electromagnetic Lorentz force. Advantages of this forming technique are improved formability, reduction in wrinkling, non-contact forming and applications of various forming process. But the application of electromagnetic forming technique is still limited in industry. Thus for continuous research and development of technique based on experiments, develop the forming equipment and carry out the forming experiments for validation of forming equipment.

**Key Words :** Electromagnetic Forming (전자기 성형), High-Velocity Forming Process(고속 성형법), Induced Current (유도전류), Lorentz Force (로렌츠력)

#### 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 성형법으로서 폭발성형(explosive forming), 방전가공(electrohydraulic forming)과 더불어 대표적인 고속 성형법 중의 하나이다(high-velocity forming process) [1].

전자기 성형법은 성형코일에 의해 발생된 자기장을 통해 압력이 가공물에 직접 가해져 어떠한 물리적 접촉이 없이 성형이 이루어지므로, 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 발생하지 않으며 반복적인 성형이 가능하다는 장점이 있다. 또한 냉간 가공법으로서 기계적 성질을 그대로 유지가 가능하며, 축관/확관, 평판 성형, 접합 공정 등 다

양한 성형공정에 적용이 가능하다. 뿐만 아니라 복잡한 형상도 효과적으로 성형이 가능하여 자동차 산업과 항공 산업 등 다양한 분야에 응용할 수 있다.

하지만 전자기 성형에 대한 연구는 이론적 접근만 있었을 뿐 실용화 단계에 접어들지는 못했다. 국내에서는 1990년대 초반에 국외에서 장비를 도입해 수치적 접근과 실험결과를 비교하는 등의 연구가 진행 되었으나 기술 기반과 경험의 부족으로 실용화 되지 못하고 있다. 국외에서도 미국과 유럽, 일본, 중국 등지에서 전자기 성형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 부분적으로 실용화 되고 있는 실정이다 [2].

따라서 본 연구에서는 고부가 가치 기술인 전자기 성형의 성형 공정 및 실용화를 위한 기반 확보를 위해 전자기 성형장비의 설계 및 개발 기술 확보와 실험을 통한 검증을 수행하였다.

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 산학협력단

3. 부산대학교 항공우주공학과

# 교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,

E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

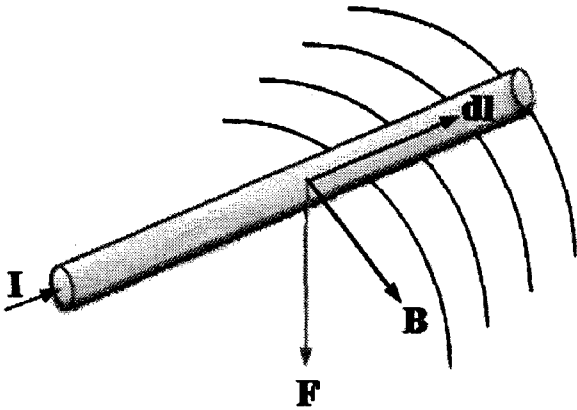


Fig. 1 Lorentz force on current-carrying wire in a magnetic field

## 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(Paraday'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 전류를 방전하게 되면 자속의 변화로 인해 주위의 피가공재(workpiece)에 유도기전력이 발생하게 된다. 이 유도기전력에 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.

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

여기서  $I$ 는 도체에 흐르는 전류,  $dl$ 은 도체의 길이,  $B$ 는 자속밀도,  $F$ 는 로렌츠의 힘이다. Fig 1와 같이 도체의 길이  $dl$ 과 자속밀도  $B$ 에 의해 정의되는 면에 수직으로 로렌츠의 힘이 발생하게 된다. 이 힘이 전자기 성형에서 성형력이 된다 [3].

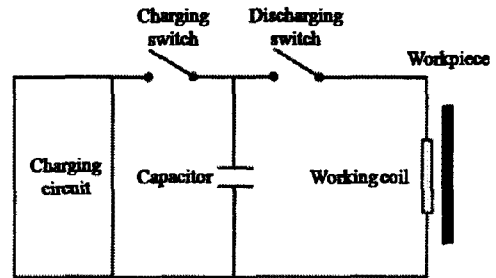


Fig. 2 Schematic of electromagnetic forming circuit

### 2.2 전자기 성형의 방법

전자기 성형 장비는 고용량의 커패시터와 성형코일, 커패시터를 충전하기 위한 제어 회로 및 전력공급장치, 스위치, 금형으로 구성되어 있으며 기본적인 회로 구성도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2와 같이 충전된 고용량의 커패시터(capacitor)를 순간적으로 방전시켜 성형코일(coil)에 충격전류를 보내게 되면 강한 자기장이 발생하게 된다. 이러한 성형코일의 강한 자기장은 패러데이의 법칙에 의해 피가공재에 반대 방향의 유도전류를 발생시키고 로렌츠의 힘에 의해 성형력이 발생되어 성형이 이루어진다. 이때의 성형력은 수십 내지 수백  $\mu s$ 의 짧은 순간에 작용되기 때문에 효과적인 성형이 이루어지기 위해서는 피가공재에 충분한 운동에너지를 줄 수 있을 정도로 소재의 항복응력의 수배 이상의 성형력이 발생되어야 한다.

## 3. 전자기 성형장비 설계

### 3.1 커패시터

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 커패시턴스  $50\mu F$ , 최대 작동 전압  $5kV$ , 최대 전류  $25kA$ 의 성능을 가지는 커패시터 10개를 병렬 연결하도록 설계를 하였다. Table 1에 전체 커패시터 시스템의 성능을 나타내었다. 커패시터는 2~10개까지 유동적으로 연결이 가능하도록 설계하여 커패시턴스의 조

Table 1 Specification of capacitor system

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

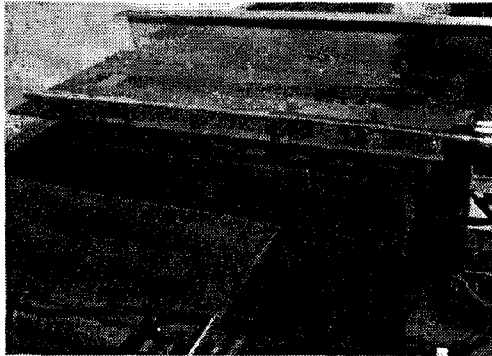


Fig. 3 Parallel connection of capacitors

절을 통해 저장 에너지의 제어가 가능하도록 하였다.

### 3.2 성형코일

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 (3)으로 구할 수 있다. 여기서 L은 성형코일의 인덕턴스(inductance), f는 공진 주파수, C는 커패시터의 커패시턴스이다. 식 (3)을 이용해 성형코일의 인덕턴스를 계산하면 2 $\mu$ H를 구할 수 있다.

위의 인덕턴스 값으로 식 (4)와 (5)를 통해 성형코일의 상세 설계가 가능하다. Fig. 4는 식 (4)와 (5)의 기호 정의와 설명을 도시적으로 나타내었다. 위의 식을 바탕으로 지름 11cm, 6번을 감은 성형코일을 Fig. 5와 같이 제작하였다.

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (3)$$

$$A = \frac{D_i + N(W + S)}{2} \quad (4)$$

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

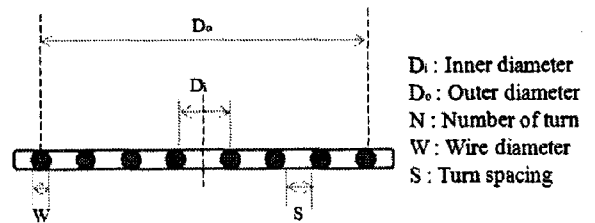


Fig. 4 Schematic of coil design and definition of parameters

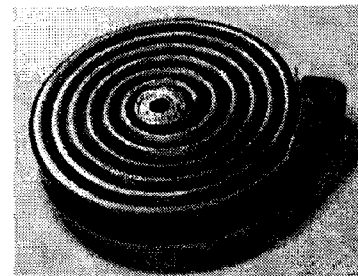


Fig. 5 Forming coil and control system

### 3.3 제어 시스템

커패시터의 에너지 제어장치와 충전/방전 스위치 장치, 변압장치 등을 Fig. 6과 같이 제작하였다. 입력 전압의 조절 장치를 통해 커패시터의 저장 에너지의 조절을 가능하도록 하고 이를 전압계를 통해 커패시터의 전압을 확인 할 수 있다.

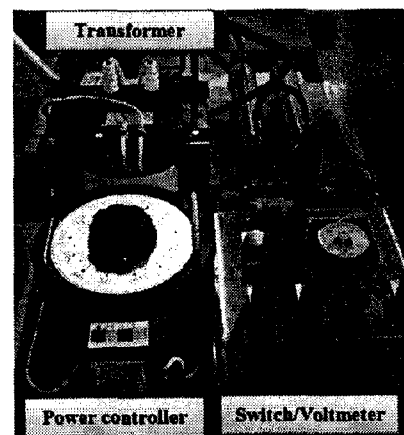


Fig. 6 Control system

### 3.4 전자기 성형장비

구성 부품의 설계 및 제작을 통해서 Fig. 7과 같이 전자기 성형장비를 제작하였다. 전자기 성형실험은 전압 조절 장치를 통해 입력 전압을 결정한

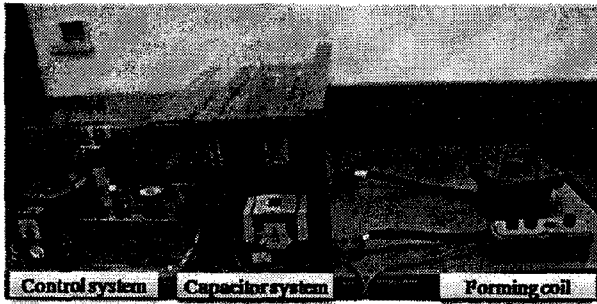


Fig. 7 Electromagnetic forming equipment

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.

### 3. 전자기 성형 실험

전자기 성형 장비의 신뢰성 검증을 위해 전자기 성형 실험을 하였다. 소재는 0.5mm 두께의 Al 1050-H14를 사용하였고 Fig. 8과 같이 자유 형상 성형을 위해 지름 9cm의 구멍이 뚫려 있는 금형을 제작하였다. 금형과 성형코일은 볼트 체결 방식을 이용하여 Fig. 9와 같이 조립할 수 있도록 하였다. Table 2는 Al 1050-H14의 물성치를 나타낸다.

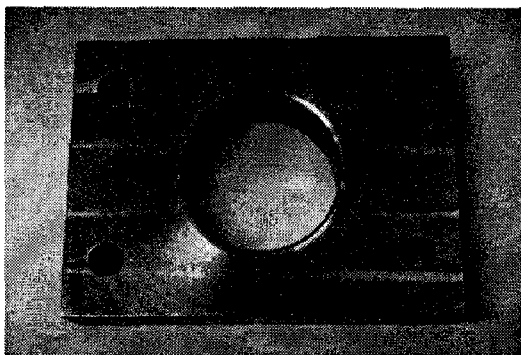


Fig. 8 Free forming die

Table 2 Material property of Al 1050-H14

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

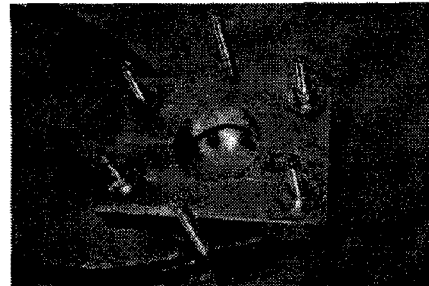
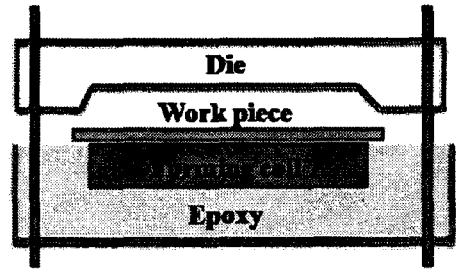
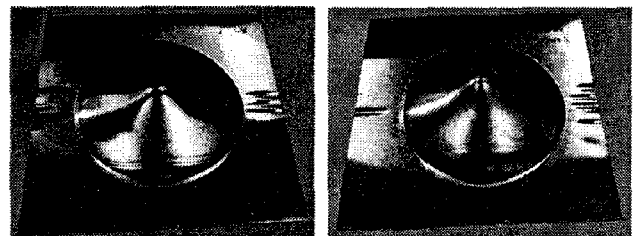


Fig. 9 Assembly of forming coil and die

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. 10과 Fig. 11에 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.



(a) 2.5kV(1.56kJ)

(b) 3kV(2.25kJ)



(c) 3.5kV(3kJ)

Fig. 10 Result of electromagnetic forming experiment according to various forming energy

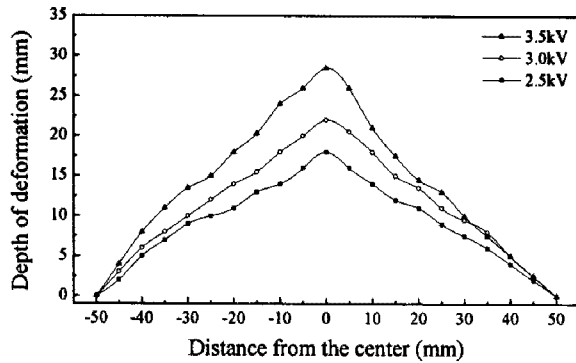


Fig. 11 Comparison of Depth of deformation

성형코일에 인가되는 최대 전류는 식(6)으로 표현된다. 여기서  $V_0$ 는 입력 전압,  $E$ 는 저장 에너지,  $f_1$ 은 전체 시스템의 저항을 함수로 하는 상수로 본 시스템에서는 0.93의 값을 가진다.  $L_{sys}$ 는 전체 시스템의 인덕턴스로 식 (7)를 통해 구할 수 있다. 식 (7)에서  $t_{rise}$ 는 최대 전류에 도달하는 시간으로 5kHz 공진 주파수를 가지도록 전자기 성형 장비의 설계가 이루어 졌으므로  $50\mu s$ 의 값을 가진다. 따라서 3kV의 입력 전압일 때 식 (6)과 식 (7)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 12와 같이 46kA의 최대 전류를 가진다. 측정 결과에서 볼 수 있듯이 이론적으로 예측한 값과 거의 일치함을 알 수 있다 [4].

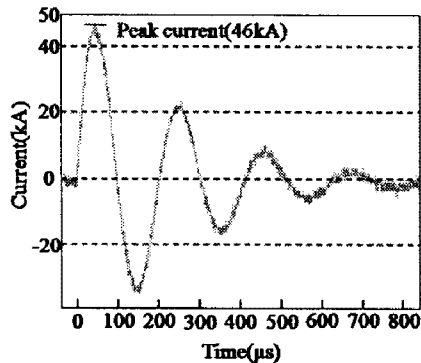


Fig. 12 Experimental current wave at 3kV

$$I_{max} = f_1 V_0 \sqrt{C/L_{sys}} = f_1 \sqrt{2E/L_{sys}} \quad (6)$$

$$L_{sys} = 4t_{rise}^2 / \pi^2 C \quad (7)$$

## 4. 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 예측이 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.

## 후기

이 논문은 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 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 이종수, 1988, 전자기 성형법에 대하여, 대한기계학회지, 제28권, 제5호, pp. 476-486.
- [2] 서영호, 허성찬, 구태완, 송우진, 강범수, 김정, 2008, 전자기력을 이용한 박판 성형공정의 해석적 연구, 한국소성가공학회지, 제17권, 제1호, pp. 35-45.
- [3] Mitchell E. Schultz, 2009, Grob's basic electronics (10th ed), McGraw-Hill
- [4] 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.