

## 전자기력을 이용한 고속 성형 원리 및 기술 동향

노학곤<sup>1</sup> · 송우진<sup>2</sup> · 김 정<sup>1</sup>

1. 부산대학교 항공우주공학과
2. 부산대학교 융합학부

## High Velocity Electromagnetic Sheet Metal Forming Technology

H. G. Noh, W. J. Song, J. Kim

1. Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Busan, Korea
2. Graduate School of Convergence Science, Pusan National University, Busan, Korea

### 1. 개요

최근 산업이 첨단화 및 정밀화되고 부품의 경량화 및 다양화되고 있다. 일반적인 판재 성형에서 금형을 통한 프레스 성형(press working)의 한계성으로 인해 새로운 성형공법에 대한 수요가 산업계에서 증가하고 있다. 또한, 고강도강판, 알루미늄합금, 마그네슘합금 등과 같은 난 성형 경량소재의 적용이 확대됨에 따라 소재의 낮은 성형성과 성형 후 탄성복원에 따른 형상 불일치의 문제점이 프레스 성형에서 극복과제로 대두되고 있다.

고속성형(high velocity forming)은 전도체에 고강도의 에너지를 저장하여 에너지를 순간적으로 성형판재에 가하는 성형공법으로 마이크로 시간( $\mu s$ ) 내의 고속으로 성형된다. 고속성형은 일반적으로  $10^2 \sim 10^4$  변형률 속도(strain rate)를 가지게 된다. 일반성형과의 비교를 위해 Table 1에 각 공정별 변형률 속도를 정리하였다. 이러한 고속특성으로 인해 알루미늄, 스틸, 마그네슘 재료 등의 성형성을 향상시킬 수 있다. 이러한 성형성 향상은 고속으로 인한 관성효과(inertia effect) 및 초소성(super plasticity) 특성으로 나타나게 된다[1]. 고속성형의 다른 장점은 표면결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 발생하지 않으며 반복적인 성형이 가능하다는 장점이 있다. 현재 활

발히 연구가 진행되고 있는 대표적인 고속 성형방법은 전자기성형(electromagnetic forming), 액중방전성형(electro hydraulic forming) 등이 있다. 이중 전자기성형은 강한 전자기력을 사용하여 피 가공재에(workpiece) 유도전류를 직접 인가시켜 제품을 성형하는 기술로서 기계적인 접촉이 없으며 고속 성형 공정으로서 장점을 가지고 있다. 본 기술동향서는 전자기성형공법을 활용한 고속성형 기술에 대해 정리하고자 한다.

**Table 1 Approximate forming velocities in various conventional and high speed forming [1]**

Process	Forming velocity	Strain rate
	m/s	$s^{-1}$
Hydraulic press	0.03	$10^0$
Brake press	0.03	$10^0$
Mechanical press	0.03-0.73	$10^0$
Drop hammer	0.24-4.2	$10^0-10^1$
Gas-actuated ram	2.4-82	$10^0-10^2$
Explosive forming	9-228	$10^2$
Electromagnetic forming	27-228	$10^3-10^4$
Electrohydraulic forming	27-228	$10^3-10^4$

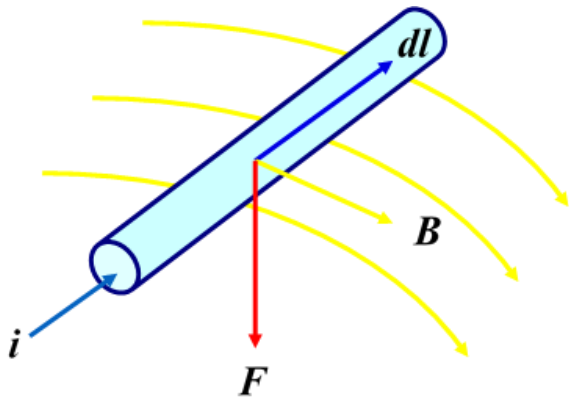


Fig. 1 Lorentz force on current-carrying wire in a magnetic field

## 2. 전자기성형 원리 및 방법

전자기성형 기술(EMF, electromagnetic forming)은 폭발 성형 등과 함께 고속 성형기술의 하나로서 강한 전자기장을 가공하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 물리적 접촉 없이 고속(15~300m/s)으로 금속 가공물을 성형하는 기술이다. 임의의 폐 회로에서 자속이 시간에 따라 변하게 되면 자속의 시간변화율과 같고 방향은 반대인 유도기전력이 유도된다. 이를 패러데이 법칙(Paraday's law)이라 하고 식 (1)과 Fig. (1) 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. 2 와 같이 수백  $\mu\text{s}$ 의 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 표현되며 기전력의 크기가 클수록 자속의 시간이 짧을수록 크기가 커진다.

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

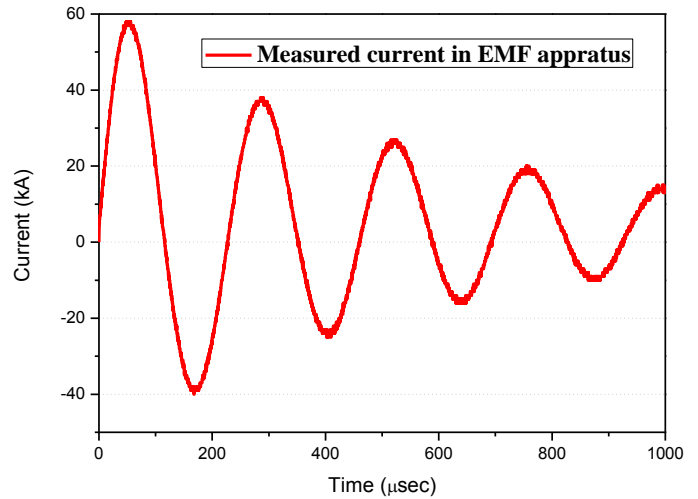


Fig. 2 Primary current wave form [2]

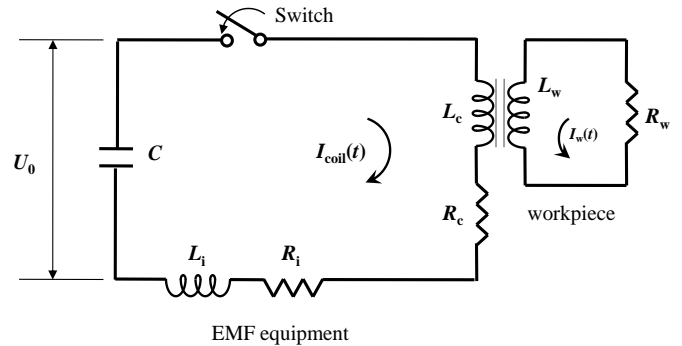


Fig. 3 Schematic of electromagnetic forming circuit [3]

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 정의되는 면에 수직으로 로렌츠의 힘이 발생하게 된다. 이 힘이 전자기 성형에서 성형력이 된다[2].

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 충격 전류가 흐르게 된다.

코일에 인가되는 입력전류는 Fig. 2와 같이 수백  $\mu\text{s}$  이내에 감쇠하면서 성형코일에 강력한 자기장을

발생 시키게 된다. 성형코일의 강한 자기장은 패러데이의 법칙에 의해 피가공체에 반대 방향의 유도 전류를 발생시키고 로렌츠의 힘에 의해 성형력이 발생되어 성형이 이루어진다. 이때의 성형력은 수십 내지 수 백  $\mu\text{s}$ 의 짧은 순간에 작용되기 때문에 효과적인 성형이 이루어지기 위해서는 피가공체에 충분한 운동에너지를 줄 수 있을 정도로 소재의 항복응력의 수배 이상의 성형력이 발생되어야 한다[3].

### 3. 전자기성형 장비 및 구성

#### 3.1 커패시터

에너지 저장 장치인 커패시터는 성형 코일에 순간적으로 충격전류를 보내기 위해 전하를 저장하는 장치로서 저장 에너지 용량에 따라 전자기 성형 장치의 성능을 결정하는 핵심 부품이다. 전자기 성형에 사용되는 커패시터는 임펄스 동안 최대의 에너지를 전달하기 위해 내부 인덕턴스가 낮고 고전류를 견딜 수 있게 설계해야 한다. 일반적으로 장비의 효율을 위해서 Fig. 4 와 같이 병렬연결을 하여 구성을 한다. 전자기성형 장비의 용량을 커패시터에 충전 가능한 에너지(kJ)로 나타내며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[4]. 여기서  $E$  는 커패시터에 저장되는 에너지,  $C$  는 커패시터의 커패시턴스(capacitance),  $V$  는 작동전압을 나타낸다. 전자기성형 장비의 에너지는 일반적으로 20kJ~100kJ 정도의 수준이다.

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

#### 3.2 제어시스템

전자기성형 장비의 입력 전압의 조절을 통한 커패시터의 저장 에너지 제어와 충전 및 방전을 위한 시스템, 일정 전류계를 통해 커패시터를 안정적으로 충전하기 위한 제어 시스템의 구축이 필요하다. 커패시터의 에너지 제어장치와 충전/방전 스위치 장치, 변압장치 등으로 구성되며 특히 수백 kA를 견딜 수 있는 제어 스위치의 선정이 중요하다.

#### 3.3 성형 코일

자기성형 코일은 직접 전류를 인가하여 성형력 및 형상에 결정적인 영향을 미치는 가장 중요한

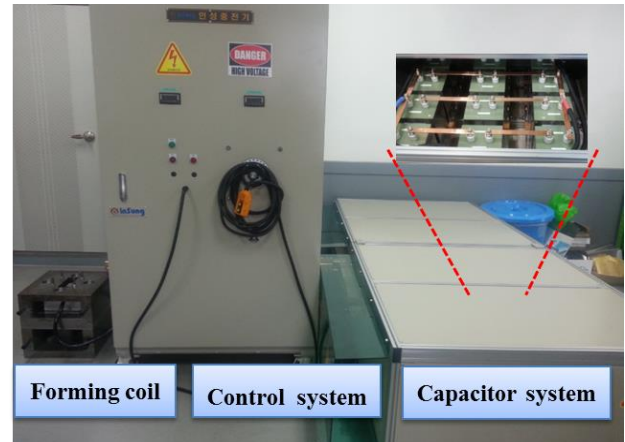


Fig. 4 Electromagnetic forming [4]

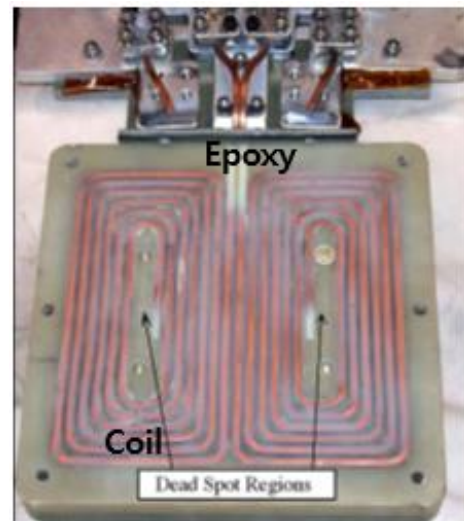


Fig. 5 Spiral type forming coil [5]

부품이다. 코일을 직접 커패시터와 연결하여 고전류가 인가될 수 있도록 구성하며 에너지 효율을 최대로 하기 위해서 코일 자체의 인덕턴스를 낮게 가지도록 설계하는 것이 유리하다. 성형의 목적 및 형상에 따라 형상 및 턴 수, 직경, 길이 등을 고려하여 설계해야 한다. 또한 고전류가 직접 인가되기 위해 Fig. 5와 같이 코일을 에폭시(epoxy)로 감싸서 절연 처리를 해야 한다. Fig. 5의 코일은 원형(spiral) 타입의 성형 코일로써 관재성형 시 강한 자기력을 소재가 변형되는 중앙 부분에 집중시키는데 유리하다[5].

### 4. 고속특성을 고려한 물성획득

앞서 보듯이, 전자기성형의 변형률 속도는  $10^2\sim$

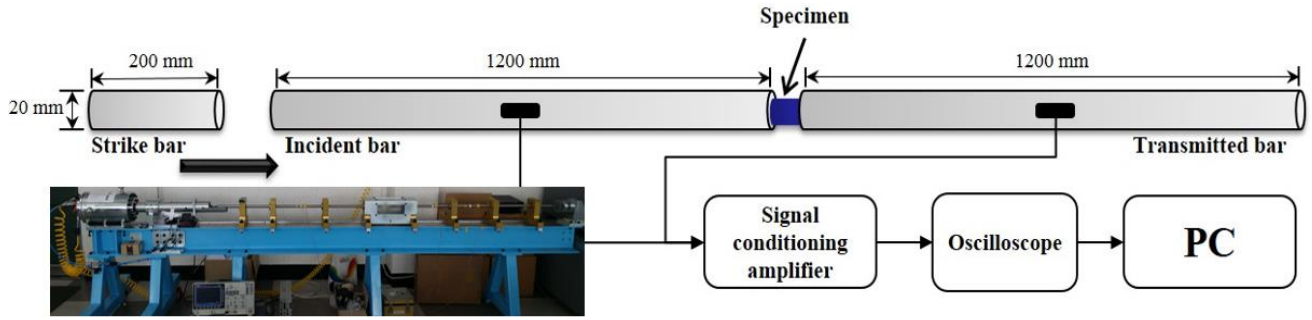


Fig. 6 Schematic view of hopkinson pressure bar[6]

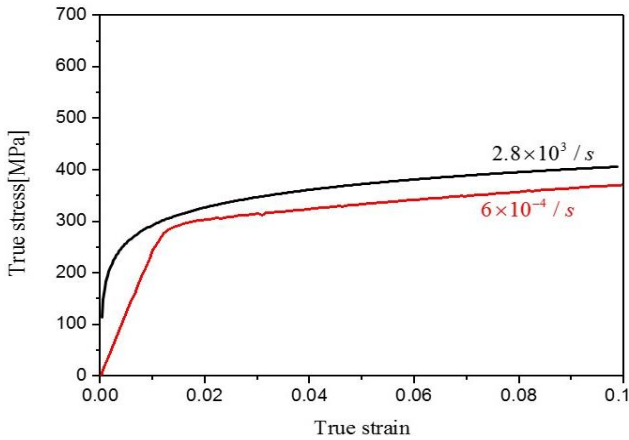


Fig. 7 Stress-strain relationship in dynamic state [6]

$10^4/s$  범위에 해당하는 고 변형률 속도 구간이다. 재료의 응력과 변형률 관계를 얻기 위한 기본적인 인장실험 등은 준 정적 상태에서 이루어진다. 그러나 전자기성형과 같은 고속 성형 공정에서는 고 변형률 속도를 기반으로 한 재료의 특성이 고려되어야 한다. 재료의 응력과 변형률 관계를 얻기 위한 실험은 변형률 속도(strain rate)에 따라 여러 가지 방법이 있다. 주로 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)기법이 고속 거동특성을 규명하기 위해 널리 쓰이는 방법이다. SHPB 실험 장치는 Fig. 6과 같이 충격봉(strike bar), 입력봉(incident bar) 그리고 출력봉(transmitted bar)으로 구성된다. 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 위치시킨 후 임의의 속도의 충격봉이 충돌하면 압축성 탄성파가 생성된다. 생성된 압축파는 입력봉 내에 전달되고, 입력봉과 시편의 경계에 도달하게 되면 입력봉과 시편의 임피던스(impedance) 차이로 인해 압축파 일부는 반사되고 일부는 시편을 투과하여 출력봉으로 전달된다. 이 때의 입사파, 반사파 그리고 투과파는 세가지 종류의 탄성파를 이용하여 시편의 응력, 변형률 속도, 변형률을 도출해 낼 수

있다. 각각 시편에 봉을 통해 전달되는 반사파와 투과파의 시간에 따른 변화는 입력봉과 출력봉의 각각 가운데 부분에 설치된 두 개의 스트레인 게이지를 통하여 측정할 수 있다. 스트레인 게이지를 통해 측정된 신호는 신호 증폭기(signal conditioning amplifier)를 거쳐 오실로스코프(oscilloscope)에서 시간에 따른 전압변화로 나타난다. 이 데이터를 이용하여 탄성과 전달이론에 적용하면 Fig. 7과 같은 변형률 속도 변화에 따른 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다[5].

### 5. 전자기성형 적용 사례

전자기성형의 적용은 2000년도 미국의 오하이오 주립대학(OSU), 독일의 프라운호퍼(IWU), 캐나다의 워털루대학(UW) 및 PST, Bmax社 등에서 활발히 연구가 진행되고, 국내에서는 재료연구소(KIMS), 생산기술연구원(KITECH), 부산대학교와 일부 대기업에서 과제를 진행하며 연구 개발 중이다. 전자기성형은 단일공정을 적용하여 다양한 성형공정에 적용할 수 있다. 그뿐만 아니라 복잡한 형상도 효과적으로 성형할 수 있어 자동차 산업과 항공 산업 등 다양한 분야에 적용을 하였다[7]. 전자기성형을 통해 측관 및 확관, 판재성형, 접합, 용접 등 다양한 성형공정에 관하여 연구를 시도 하였다. 공정 형태에 따라서 성형 코일의 형상 및 위치만 변경하면 커패시터와 제어시스템은 동일하게 사용하면 된다. Fig. 8은 성형공정에 따른 코일의 위치와 가공되는 소재의 형상을 보여준다. 측관 시에는 감싸는 형태의 원통형 코일 내에 피 가공재를 위치시켜 성형을 수행하며 확관은 이와 반대로 원통형 코일의 바깥 면에 피 가공재를 위치시켜 성형을 수행하게 한다. 전자기성형법을 이용한 측관/확관은 가장 많

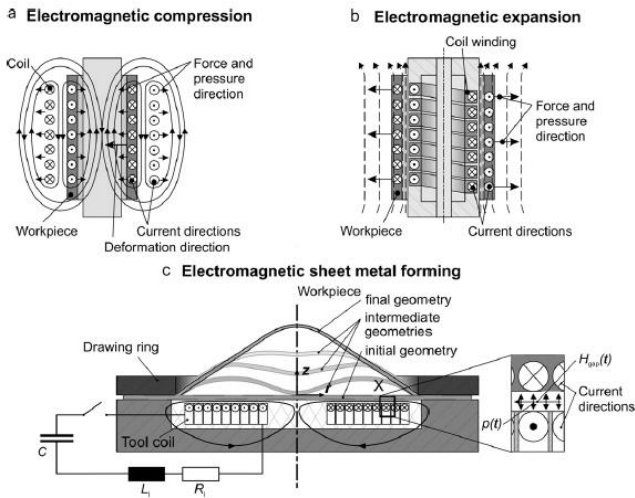


Fig. 8 Forming type of electromagnetic method [7]



Fig. 9 Example of expansion and compression[8]

이 이용되고 있다. 기계적인 축관/확관 보다 균일한 형상을 가지며 재현성이 우수하며 자동화를 통해 효율적으로 생산할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 9는 독일의 전자기성형장비 업체인 PST社의 확관 및 축관 성형 예시이다. 전자기력을 통한 강한 압력으로 제품의 형상이 균일분포를 보이고 있다. 이와 유사한 형태로 전자기력을 이용한 이종재료간의 접합에 대해서 다양한 연구가 진행되고 있다. Fig. 10에서 보듯이 알루미늄-스틸, 구리-알루미늄 등의 이종재료 접합 등에 적용되며 접합재료간의 계면 촬영과 인장실험 및 누수실험을 거쳐 실제 제품성형 공정의 자동화 시스템을 구축하여 상용화에 적용 중이다[8]. 고속성형의 장점인 성형성

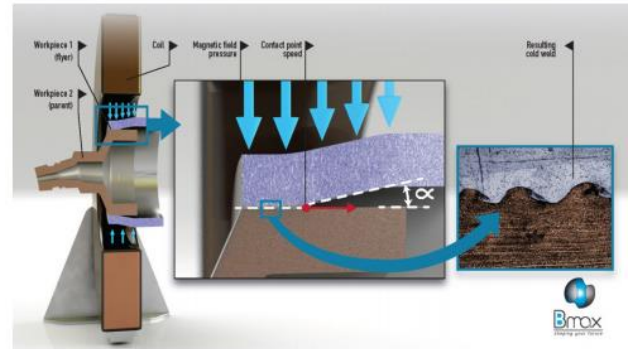


Fig.10 Example of joining by EMF[9]



Fig.11 Aluminum case made by EMF[10]

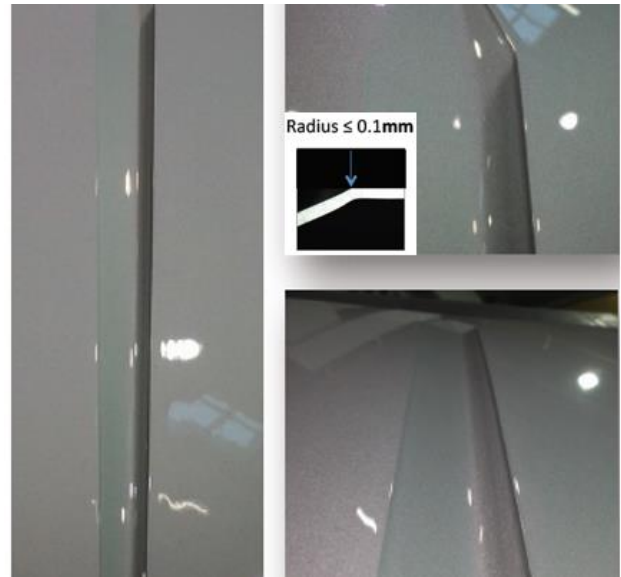


Fig.12 Example of assist forming with EMF [11]

증가를 기대하여 전자기력을 이용한 판재성형 역시 연구가 진행되고 있다. Fig. 11은 전자기성형법을 이용한 판재성형의 예시를 보여준다. 전자기성형법을 이용한 판재성형은 고속특성(~250m/s)으로 인해서 변형되는 소재가 성형되기 시작하면 금형과 코

일 사이에 매개체가 없으므로 금형 다이와 충돌 시 튕겨져 나오는 바운싱(bouncing) 현상이 발생하여 피 가공재의 주름과 파단을 야기시킨다. 그래서, 전자기성형법을 이용하여 기존의 판재성형을 완전히 대체하는 것은 어렵고 기존 공법과 결합하여 성형이 어려운 영역에 보조적인 역할로서 적용이 가능할 것으로 판단된다[9]. Fig. 12는 자동 차 판넬에 전자기성형을 적용한 사례로서 기존의 성형공법으로 Pre-form 형태를 만든 후 코너 부에 곡률값( $R$ )을 줄이기 위해 전자기성형 코일을 코너 부에 위치시키고 성형력을 가해 기존공법으로는 구현하지 못하는 곡률 값을 만들었다. 이렇듯 전자기력을 이용한 판재성형은 단일공정으로는 실용성이 떨어지지만, 기존공정과 결합으로 시너지 효과를 낸다[11].

## 6. 결론

전자기성형은 전자기력을 순간적으로 방출하여 고에너지로 피 가공재를 직접 성형하는 기술로서 기계적인 접촉은 없으면서 고속성형 기술의 장점이 있어 다양한 분야에 적용할 수 있다. 환관/축관, 접합 등의 고속 충격특성을 이용한 성형 분야는 PST, Bmax社 등의 업체에서 자동화 시스템을 갖추고 양산이 가능한 수준까지 연구가 진행되었으나, 판재성형 분야는 전자기성형 단일공정으로는 생산성의 한계가 있는 것으로 판단된다. 그러나 기존 성형공정과 복합공정으로서 적용 가능성이 있다. 지속적인 연구 진행을 통해서 실제 양산적용 가능한 부품을 찾고 현실적으로 기존공법 대비 비용적으로 얼마나 효율성이 있는지를 판단하며 연구를 진행해야 할 것이다. 최근 자동차나 전자부품 분야의 디자인이 중요시 되면서 복잡한 부품형상이 요구되고 있다. 기존 공법의 한계로 인한 신공정의 필요성이 증가하고 있다. 전자기성형법 이외에도 액중방전성형(electro hydraulic forming) 및 전기소성효과(electro plasticity)를 고려한 고속성형 등 다양한 형태의 전자기력을 이용한 성형공법의 연구가 진행되고 있다. 전자기력을 이용한 고속성형 공법은 기존 공법을 완전히 변화시키는 혁신공법이 아닌 상호 보완적인 공법으로 적용한다면 성형기술의 산업적 활용도가 한층 높아질 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] T. Altan, A. E. Tekkaya, 2012, Sheet Metal Forming: Process and Application, ASM International.
- [2] H. M. Lee, B. S. Kang, J. Kim, 2010, Development of Sheet Metal Forming Apparatus using Electromagnetic Lorentz Force, Trans. Mater. Process, Vol. 19, pp. 38~43.
- [3] H. G. Noh, H. G. Park, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2013, Effect of Process Parameters in Electromagnetic Forming Apparatus on Forming Load by FEM, J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, pp. 733~740.
- [4] H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2014, 3-D Numerical Analysis and Design of Electro-Magnetic Forming Process with Middle Block Die, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 5, pp. 855~865.
- [5] D. A. Oliveria, M. J. Worswick, M. Finn, D. Newman, 2005, J. Mater. Process. Technol., Vol. 170, pp. 350~362.
- [6] W. J. An, M. A. Woo, H. G. Noh, B. S. Kang, J. Kim, 2016, Design and Fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for Acquisition of Dynamic of Dynamic Material Property of AL6061-T6, J. Kor. Soc. Precis. Eng. (Accepted).
- [7] V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, 2011, Electromagnetic Forming-A Review, J. Mater. Process. Technol Vol. 211, pp.787~829.
- [8] S. Kallee, R. Schafer, P. Pasquale, 2010, Automotive Application of Electromagnetic Pulse Technology (EMPT), PST Products.
- [9] J.-P. Cuq-Lelandais, S. Ferreira, G. Avrillaud, G. Mazars, B. Rauffet, 2014, Magnetic Pulse Welding: Welding Windows and High Velocity Impact Simulations, 6<sup>th</sup> International Conference on High Speed Forming, pp. 199~206.
- [10] M. Kamal, G. S. Daehn, 2007, A Uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets, J. Manuf. Sci. Eng., Vol.129, pp. 369~379.
- [11] G. Avrillaud, 2015, Reviewing High Impact Velocity Forming and Welding for Lightweight Designs, Global Automotive Lightweight Materials 2015, Presentation.