

## 전자기 성형 시 온도에 따른 알루미늄 파이프의 전자기-구조 연동해석

강한빈<sup>1</sup> · 탁승민<sup>1</sup> · 백인석<sup>1</sup> · 최진규<sup>1</sup> · 이석순<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 대학원 기계항공공학부, Engineering Research Institute(ERI)

### Electromagnetic-structure Co-simulation Analysis of Aluminum Pipe with Electromagnetic Forming according to Temperature

Hanbin Kang<sup>1</sup>, Seungmin Tak<sup>1</sup>, Inseok Baek<sup>1</sup>, Jinkyu Choi<sup>1</sup>, and Seoksoon Lee<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, ERI

#### Abstract

The high-velocity electromagnetic forming (EMF) process is based on the Lorentz force and the energy of the magnetic field. The advantages of EMF include improved formability, wrinkle reduction, and non-contact forming. In this study, the electromagnetic-structural interlocking analysis was performed in order to analyze the moldability of aluminum pipe using electromagnetic molding. The magnetic flux density was decreased due to increasing electrical resistance as the temperature increased, and the stress-strain curve decreased. The higher the temperature, the lower the flow stress, increasing deformation.

#### 초 록

고속 전자기 성형 (EMF) 과정은 로렌츠 힘과 자기장의 에너지를 기반으로 한다. EMF의 장점은 향상된 성형성, 주름 감소 및 비접촉 성형 등이 있다. 본 연구에서는 전자기 성형을 통한 알루미늄 파이프의 온도에 따른 성형성을 분석하기 위해 전자기-구조 연동해석을 수행하였으며, 온도가 증가함에 따라 전기저항이 커지므로 인해 자속 밀도는 감소하고, 응력-변형률 곡선에서 온도가 높아질수록 유동 응력이 낮아지므로 변형량은 상대적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Electromagnetic Forming:EMF(전자기 성형), High-Velocity Forming(고속 성형), Lorentz Force (로렌츠 힘), Skin Effect(표피 효과), Rogowskii coil(로고스키 코일)

### 1. 서 론

전자기 성형기술(Electromagnetic forming: EMF)은 고강도의 자기장을 이용하여 축관/확관 등의 공정에 적용이 가능하고 성형 공정시간이 고속(15~300 m/s)인 기술이다. 전자기 성형기술은 콘덴서에 저장된 초기 전자 에너지를 수 ns ~ 수 ms의 짧은 시간 안에 발생시켜 에너지를 집중, 공급하는 기술이다.

전자기성형법은 Fig. 1과 같이 성형 코일에 의해 순간적으로 전류가 방전되고 주위의 자속 변화 때문에 피 가공체에 유도기전력이 발생한다. 이러한 유도전류가 가공물에 흐르게 되면 로렌츠 힘(Lorentz force)으로 피 가공물이 성형된다[1-2].

전자기 성형의 물리적 원리는 J. C. Maxwell(1873)에 의해서 정립되었으며 그는 순간적인 자기장의 변화가 근처 전도체에 와전류를 유도하고, 자기장과 유도전류가 상호작용으로 도체에 힘(로렌츠 힘)을 가한다고 설명하였다. 이후 P. L. Kapitsa (1924)는 납축전지를 사용하여 3 ms 동안 50만 가우스의 자기장을 발

생시켜 전자기 성형 과정의 기초를 연구하였다. 미국에서는 1960년경 개발 및 실용화의 노력이 경주되어 산업적이나 이론적으로 많은 발전이 있었고, 일본에서도 1970년 초반에 연구가 시작되었다[3].

전자기 성형법은 어떠한 물리적 접촉 없이 성형이 이루어지므로, 표면 결함, 윤활, 마모 등의 문제가 발생하지 않으며 반복적인 성형이 가능하다. 또한 축관/확관, 판재 성형, 접합 공정 등 다양한 성형 공정에 적용이 가능하며, 복잡한 형상도 효과적으로 성형이 가능하여 자동차 산업과 항공 산업 등 다양한 분야에 응용할 수 있다.

최근 자동차 분야에서는 부품 경량화를 위해 기존에 사용했던 재료인 연강에 비해 더 가볍고 강도가 높은 초 고강도 강과 알루미늄 합금을 자동차의 부품으로 적용하는 방법을 시도하고 있다[4-5].

따라서, 본 연구에서는 전자기-구조 연동해석을 통해 알루미늄 파이프의 온도에 따른 경향성을 확인하고 전자기 성형에서 소재 성형 온도에 따른 성형 효과를 확인하였다.

## 2. 수치해석 모델 개발

### 2.1 지배방정식

알루미늄 파이프와 성형 코일을 2차원 축대칭 모델로 Fig. 2와 같이 간단하게 도식화하였으며, 코일에 인가되는 전류는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{NI}{A} \tag{1}$$

여기서,  $J$ 는 전류밀도( $A/m^2$ ),  $I$ 는 코일에 인가되는 전류( $A$ ),  $A$ 는 코일의 단면적( $m^2$ ),  $N$ 은 코일의 감김수를 나타낸다. 먼저 감김수  $N$ 은 Volume current 모델로 모델링을 하지 않고, Fig. 2와 같이 와이어 형상으로 모델링 했으므로 실제 감김수 49번을 적용하지 않고 1을 적용하였고, 인가되는 전류  $I$ 는 Fig. 5의 오실로스코프로 측정된 펄스 파형으로 적용하였다. 따라서 전류밀도  $J$ 는 코일 1권선에 대한 단면적의 역수로 200,000을 적용하였다.

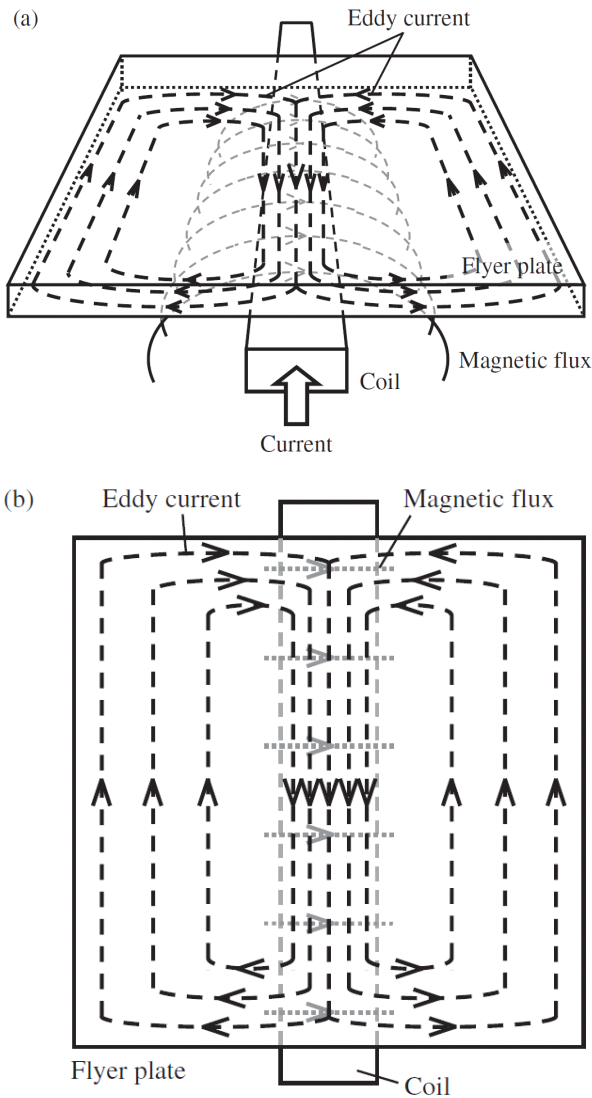


Fig. 1 Schematic illustrations for flow mechanics of the eddy current. (a)Side view. (b)Top view

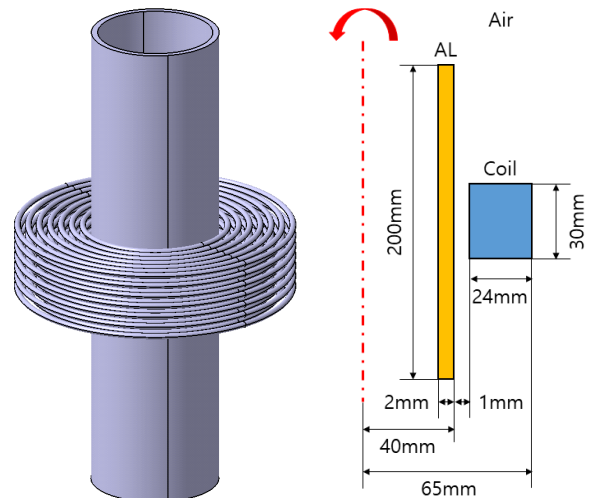


Fig. 2 Schematic diagram of analysis model

지배방정식은 아래와 같이 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 사용하였다[6].

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{2}$$

$$\nabla \times \vec{D} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{4}$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{5}$$

여기서,  $E$ 는 전기의 세기( $V/m^2$ ),  $H$ 는 자계의 세기( $A/m^2$ ),  $D$ 는 전속밀도( $Coul/m^2$ ),  $B$ 는 자속밀도( $Wb/m^2$ ),  $J$ 는 전류밀도( $A/m^2$ )이다.

매질 내에서 이러한 맥스웰 방정식과 관련된 전자기학적인 물성을 연관시키기 위하여 다음 방정식을 사용하였다. 즉, 전속밀도  $D$ 는 전기의 세기  $E$ 와 관련이 되며, 동일한 방법을  $B, H, J, E$  등에 적용하였다.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{6}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{7}$$

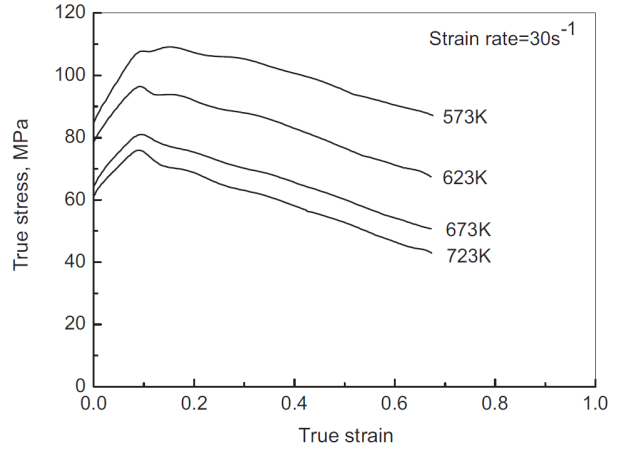
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{8}$$

여기서,  $\epsilon$ 는 유전률( $F/m$ ),  $\sigma$ 는 도전률( $S/m$ ),  $\mu$ 는 투자율( $H/m$ )이다.

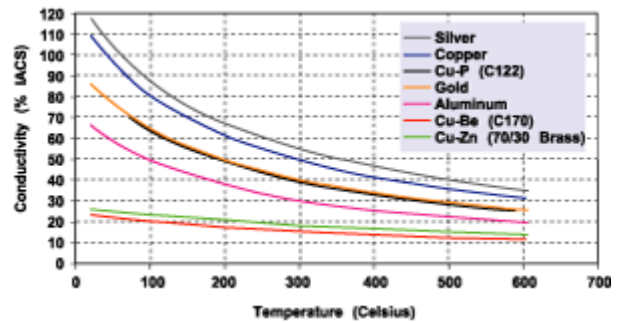
Table 1은 본 연구에 적용된 공기(Air)와 알루미늄(AL6061)에 대한 재료 물성치를 나타내고, Fig. 3과 Fig. 4는 각각 온도에 따른 알루미늄에 대한 응력-변형률 곡선을 나타내었으며, AL6061에 대한 전기전도도 물성치를 확보하는데 어려움이 있어 일반적인 알루미늄에 대한 물성치를 적용하였다[7-8].

**Table 1** Material properties for analysis

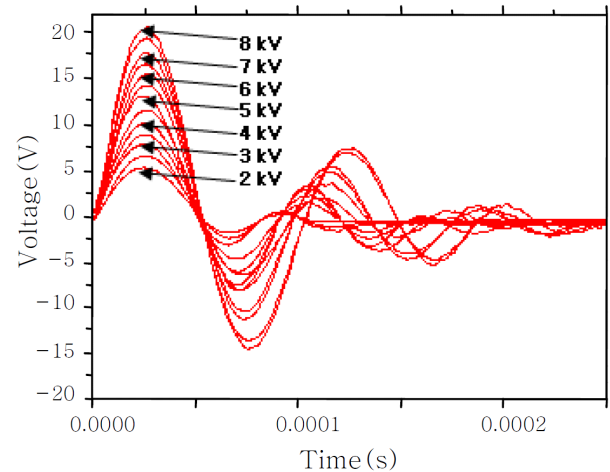
Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield Stress (GPa)	Poisson's ratio	Magnetic permeability (H/m)
Air	-	-	-	1.26E-6
Aluminum	2,740	68.9	0.33	1.26E-6



**Fig. 3** Flow stress-strain curves of AL6061 in compression for the temperatures[7]



**Fig. 4** Electrical conductivity curve of Aluminum with temperature[8]



**Fig. 5** Pulse waveform of EMF(8kV) measured by Rogowskii coil

### 2.2 해석 방법 및 절차

본 연구에서는 전자기장 수치해석 프로그램인 ABAQUS Electromagnetic을 사용하여 자속밀도와 온도에 따른 알루미늄 파이프의 변형에 관한 연구를 수행하였다. 격자(Mesh) 생성은 사각 형태(Quad type)인 EMC3D8 을 사용하였으며, 해석의 펄스 파형은 고주파 성분을 포함하고 있기 때문에 이와 같이 높은 주파수 대역의 전자기장 해석 모델의 구성 시 반드시 표피효과를 고려해야 하므로 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위하여 표피효과를 고려한 도체의 안쪽 영역으로 들어갈수록 격자의 길이가 작아지게 격자를 생성하였으며 격자 수렴(mesh convergence)을 통한 최적의 격자 개수는 노드 수 77,265, 요소의 개수 74,432의 모델을 적용하였다.

펄스 파형은 Fig. 5와 같이 인가전압 2~8kV일 때 오실로스코프 상의 펄스 파형을 나타낸 것으로 성형코일의 출력단에 감아 방전 파형을 측정하였다. 각 파형은 인가전압에 따라 피크 전압이 증가하며 감쇠진동의 사인파(Sine wave) 형상이 기록되었다. 최초 피크에 이르는 시간은 거의 동일한 것으로 나타났으며, 본 연구는 8kV일 때의 파형을 인용하여 사인파를 갖는 시간 이력해석을 수행하였고, Table 2는 인가되는 온도에 따른 입력조건을 나타내었다[9].

이때, 전류( $I$ )는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$I = V_{scope} \times K_{rog} \tag{9}$$

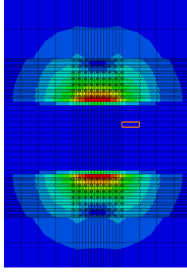
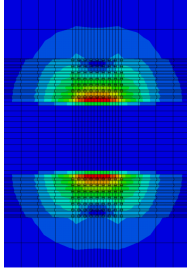
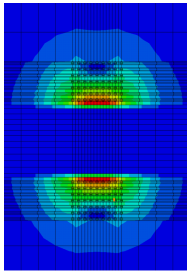
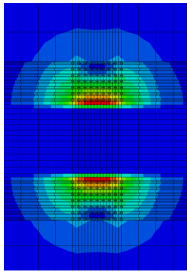
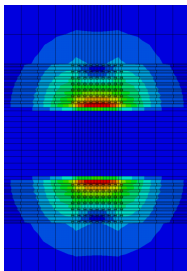
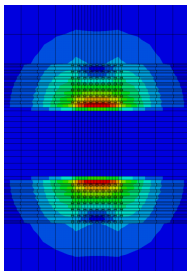
여기서,  $V_{scope}$  는 오실로스코프 전압,  $K_{rog}$  는 로고스키(Rogowski) 코일의 고유 상수이며 측정에 사용된 코일의 상수 값은 0.1이다.

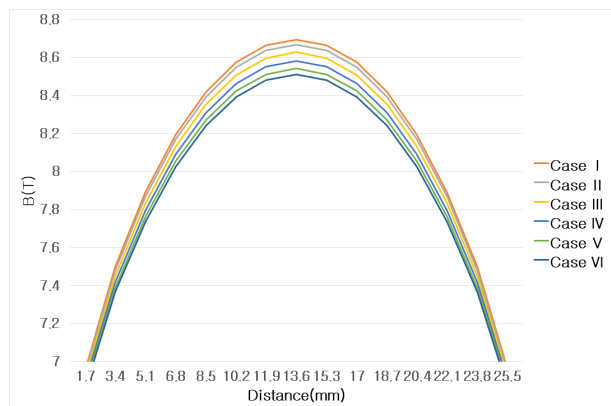
**Table 2** Input condition employed in simulation

Case	T* (°C)
I	20
II	100
III	200
IV	300
V	400
VI	500

\* Initial temperature of Aluminum pipe

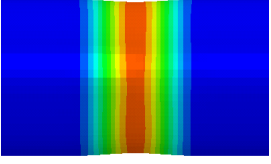
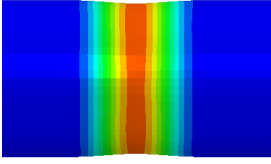
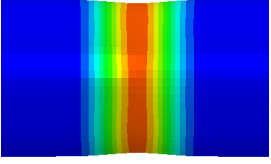
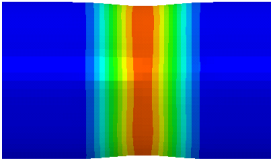
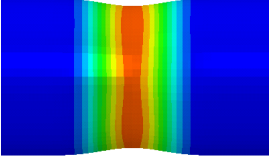
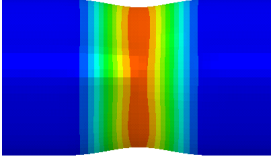
**Table 3** Max. magnetic flux density at each case

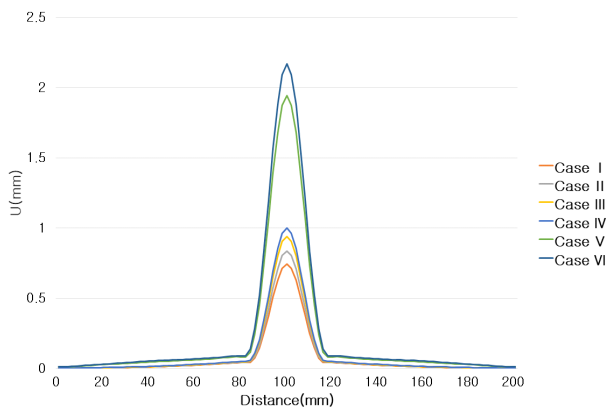
Case I	Case II
	
8.695 T	8.669 T
Case III	Case IV
	
8.628 T	8.583 T
Case V	Case VI
	
8.542 T	8.511 T



**Fig. 6** Distribution of magnetic flux density

**Table 4** Max. deformation at each case

Case I	Case II
	
0.835 mm	0.941 mm
Case III	Case IV
	
1.058 mm	1.127 mm
Case V	Case VI
	
2.219 mm	2.485 mm



**Fig. 7** Distribution of deformation

### 3. 해석 결과 및 고찰

전자기-구조 연동해석 수행 결과로 얻은 자속밀도와 초기 온도에 따른 알루미늄 파이프의 변형량을 통해 결과를 비교/분석 하였다.

#### 3.1 자속 밀도

Table 3은 각 Case별 최대 자속 밀도를 나타내며, 온도가 상온(20 ℃)일 때 자속밀도는 코일의 중심에서 8.695 T, 200 ℃일 때 8.583 T, 500 ℃일 때 8.511 T를 나타내었다. 따라서 초기 온도인 상온(20 ℃)에서 500 ℃까지 약 2.2% 감소하였다. Figure 6은 성형 코일의 상단에서 하단까지의 거리(25.5 mm)에 대한 구간별 자속 밀도를 그래프로 나타내었고, 코일의 중심에서 가장 큰 자속 밀도가 발생하였다.

#### 3.2 변형량

Table 4은 각 Case별 알루미늄 파이프의 최대 변형량을 나타내며, 온도가 상온(20 ℃)일 때 변형량은 코일의 중심에서 0.835 mm, 200 ℃일 때 1.058 mm, 500 ℃일 때 2.485 mm를 나타내었다. 따라서 초기 온도인 상온(20 ℃)에서 500 ℃까지 약 66.4% 증가하였다. Figure 7은 파이프 상단에서 하단까지의 거리(200 mm)에 대한 구간별 변형량을 그래프로 나타내었고, 코일의 중심에서 가장 큰 변형량이 발생하였다.

Table 5는 각 Case별 결과에 대한 요약표이며, 동일한 전류가 인가될 때 온도가 증가할수록 자속 밀도는 점차 감소하는 것에 비해 알루미늄 파이프의 변형량은 온도에 따라 점차 증가하고 일정 온도(400 ℃) 이상의 구간에서 크게 발생하는 것으로 나타났다.

**Table 5** Summary of the EMF analysis

Case	T (℃)	B(T)	U(mm)
I	20	8.695	0.835
II	100	8.669	0.941
III	200	8.628	1.058
IV	300	8.583	1.127
V	400	8.542	2.219
VI	500	8.511	2.485

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 알루미늄 합금 계열 중에서도 주변에서 구하기 쉽고 가공이 용이하며 내식성을 가진 AL6061 소재를 선정하였으며, 온도에 따른 알루미늄 파이프의 성형성을 확인하기 위해서 전류밀도를 선정하고 전자기-구조 연동해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전자기 성형 시 온도에 따른 자속 밀도와 변형량에 대한 경향성을 분석하였으며 온도가 증가함에 따라 전기저항이 커지므로 인해 자속 밀도는 감소하고, 응력-변형률 곡선에서 온도가 높아질수록 유동 응력이 낮아지므로 변형량은 상온 대비 66.4% 증가하였다.

2) 초기 성형온도 가정을 통한 400 °C 이상의 구간에서 변형량이 급격하게 증가하는 것을 통해 알루미늄 소재의 전자기 성형 시 400 °C 이상의 초기 조건을 부여함으로써 보다 높은 성형 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 BK21 플러스사업 차세대기계항공 창의 인재양성사업단과 한국산업기술진흥원의 WC300 프로젝트 R&D 지원 사업과 한국연구재단(No. 2017R1D1A3B03035371)에 의해 연구되었다.

#### References

- [1] H. G. Noh, H. G. Park, W. J. Song, B. S. Kang and J. Kim, "Effect of process parameters in electro magnetic forming apparatus on forming load by FEM", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 30, no. 7, pp. 733-740, July 2013.
- [2] S. W. Kim, "Working coil technology of electro-magnetic pulse welding", *Journal of Welding and Joining*, vol. 27, no. 3, pp.1-3, June 2009.
- [3] V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, "Electromagnetic forming-A review", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp.787-829, 2011.
- [4] M. A. Woo, H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang and J. Kim, "Development of electrohydraulic forming apparatus and its experimental study", *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 25, no. 2, pp.236-241, March 2017.
- [5] K. Mori, P. F. Bariani, B. -A. Behrens, A. Brosius, S. Bruschi, T. Maeno, M. Merklein, J. Yanagimoto, "Hot stamping of ultra-high strength steel parts", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, pp.755-777, 2017.
- [6] J. Y. Sim, H. H. Kim, J. S. Kim, B. Y. Kang, D. H. Park, "A study on electromagnetic force distributions in magnetic pulse welding using a finite element method", *The Korean Welding & Joining Society*, vol. 48, pp.285-287, November 2017.
- [7] G. Chunlei, X. Yongdong and W. Mengjun, "Prediction of the flow stress of Al6061 at hot deformation conditions", *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp.4199-4203, March 2011.
- [8] Electrical conductivity, (<http://www.thefabricator.com/article/consumables/caring-for-your-contact-tips>)
- [9] S. W. Kim, C. K. Chun and S. H. Kim, "Effect of the stand-off distance on the weld strength in magnetic pulse welding", *Journal of Welding and Joining*, vol. 26, no. 6, pp.48-53, December 2008.
- [10] B. T. Spitz and V. Shribman, "Magnetic pulse welding for tubular applications", *The Tube & Pipe Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 32-34, March 2000.
- [11] 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, June 2013.
- [12] A. V. Mamutov, S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov and J. J. Bonnen, "Modelling of electro hydraulic forming of sheet metal parts", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 219, pp.84-100, May 2015.