

유한요소해석을 통한 전자기 성형장비 공정변수의 성형력에 미치는 영향

Effect of Process Parameters in Electromagnetic Forming Apparatus on Forming Load by FEM

노학곤¹, 박형규¹, 송우진², 강범수¹, 김정^{1,✉}
Hak Gon Noh¹, Hyeong Gyu Park¹, Woo Jin Song², Beom Soo Kang¹, and Jeong Kim^{1,✉}

¹ 부산대학교 항공우주공학과 (Department of Aerospace Engineering, Pusan National Univ.)
² 부산대학교 부품소재산업협력연구소 (Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National Univ.)
✉ Corresponding author: greatkj@pusan.ac.kr, Tel: +82-2-510-2477

Manuscript received: 2013.2.14 / Revised: 2013.4.3 / Accepted: 2013.5.28

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, numerical simulations were conducted to determine the practical parameters for the EMF process. A 2-D axis-symmetric electromagnetic model was used, based on a spiral-type forming coil. In the numerical simulation, an RLC circuit was coupled to the spiral coil to measure various design parameters, such as the system input current and the electromagnetic force. The simulation results show that even though the input peak current levels were at the same level in each case, the forming condition varied due to differences in the frequency of the input current. Thus, the electromagnetic forming force was affected by the input current frequency, which in turn, determined the magnitude of the current density and the magnetic flux density.

Key Words: Electromagnetic Forming(전자기 성형), High-Velocity Forming (고속 성형), RLC Circuit (RLC 회로), Lorentz Force (로렌쯔력)

기호설명

B = Magnetic flux density
 C = System capacitance
 ξ = Damping factor
 I = System current
 J = Current density
 L = System inductance
 ω = Frequency factor
 R = System resistance
 V = Input voltage

1. 서론

전자기 성형(Electromagnetic forming: EMF)은 고강도의 자기장을 이용하여 고속(15~300m/s)으로 금속을 성형하는 기술이다. 전자기성형법은 성형 코일에 의해 순간적으로 전류가 방전되고 주위의 자속 변화 때문에 피 가공재(workpiece)에 유도기전력이 발생한다. 이러한 유도전류가 가공물에 흐르게 되면 로렌쯔 힘(Lorentz force)으로 피 가공물이 성형된다. 전자기성형법은 성형코일에 의해 발생된 자기력이 가공물에 직접 가해져 어떠한 물리적

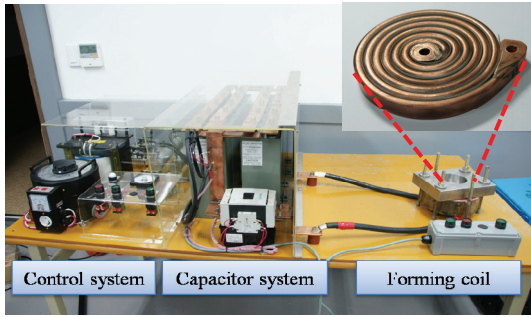


Fig. 1 Electromagnetic forming apparatus at PNU

접촉 없이 성형이 이루어지므로, 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 발생하지 않으며 반복적인 성형이 가능하다는 장점이 있다. 최근에는 전자기성형 공정과 스텝핑, 하이드로포밍과 같은 기존의 성형 공정의 단점을 보완한 전자기 복합(Hybrid)공정으로 자동차 부품을 성형하려는 연구가 시도되고 있다.¹ 전자기 성형 장비는 고용량의 커패시터와 성형코일, 커패시터를 충전하기 위한 제어 회로 및 전력공급장치, 충/방전 스위치, 금형으로 구성되어 있으며 기본적인 구성은 Fig. 1과 같다. 위의 그림과 같이 전력공급장치와 연결된 고용량 커패시터(Capacitor)는 충전 스위치를 통해 충전이 이루어지게 되고, 성형하기 위한 목표 에너지까지 커패시터가 충전되면 방전 스위치를 통해 순간적으로 방전시킴으로써 성형 코일(Forming coil)에 충격전류가 흐르게 된다.² 일반적으로 코일에 인가되는 입력전류는 수백 μs 이내에 감쇠하면서 성형 코일에 강력한 자기장을 발생시키게 된다. 성형 코일의 강한 자기장은 패러데이의 법칙에 의해 피가공체에 반대 방향의 유도전류를 발생시키고 로렌츠의 힘으로 성형력이 발생하여 성형이 이루어진다. 기존의 보유 장비는 약 6kJ 장비로써 Fig. 2와 같이 SPCC 성형에 있어서 작은 용량으로 인해 성형이 거의 이루어 지지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 판재성형이 용이한 용량을 가진 장비의 성형력 예측을 위해 유한요소 해석을 통해 공정변수에 따른 성형력을 도출하여야 한다. 또한, 장비의 용량 한계 때문에 해석을 통해 구한 입력전류를 이용하여 성형력 도출하는 것이 가능하다.^{3,4} 본 연구에서는 전자기성형의 공정변수가 성형력에 미치는 영향을 평가하기 위해서 고려되어야 하는 입력전압(V), 커패시터(C), 저항(R), 인덕턴스(L) 파라미터를 정하고 각각의 파라미터를 변화시켜 Case 별로 전자기장 해석을 수행하였다. 이때 전자기 성형 장비의

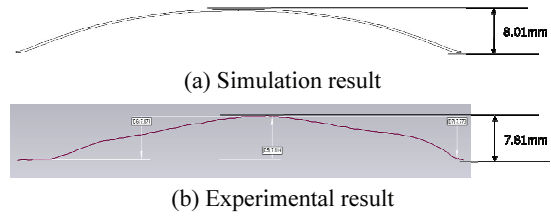


Fig. 2 Comparison of simulation and experimental result at 6kJ

인덕턴스 값과 저항값은 장비를 제작할 때 고유의 값이기 때문에 변화되는 변수는 입력전압과 커패시터의 용량이다. 해석 결과를 통하여 전자기성형 시 중요시되는 입력전류의 주기와 성형력의 관계를 확인하였고 전자기성형 장비의 성형력이 전류 밀도(J)와 자속밀도(B)의 집중이 짧은 시간 내에 성형 코일과 판재 사이에 일어나는 정도에 따라서 성형력 크기에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

2. 전자기성형 장비의 RLC 회로 모델

전자기성형 장비 운용 및 성형 조건의 중요 인자인 전자기성형 장비 전체 시스템이 가지는 인덕턴스, 저항, 최대전류, 성형 코일에 인가되는 초기 입력전류(Primary input current)를 도출하기 위해 본 연구에서는 개발된 전자기성형 장치의 시스템 변수와 성형 코일에 인가되는 초기 입력전류를 이론적으로 예측하였다. 전자기 성형 장비는 인덕턴스(L), 저항(R), 커패시터(C)로 구성된 RLC 회로라고 할 수 있다. RLC 회로에 대한 2차 미분 방정식(Differential equation)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁻⁷

$$\frac{d^2I(t)}{dt^2} + 2\xi\omega \frac{dI(t)}{dt} + \omega^2 I(t) = 0 \quad (1)$$

여기서 I 는 전류, ω 는 주파수, ξ 는 감쇠계수(damping factor), t 는 시간이다. 위의 식(1)로부터 전자기성형 코일을 통해서 인가되는 입력전류의 값은 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 V_0 는 코일을 통해서 초기 입력 전압이다. 식(2)

$$I(t) = \frac{V_0 \sqrt{C/L}}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin(\omega t) \quad (2)$$

의 주파수 ω 와 감쇠계수 ξ 는 저항 값 R 과 인덕

턴스 L 값, 커패시터 C 값 과의 관계를 이용하여 다음과 같은 식(3), (4)로 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \tag{3}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{4}$$

3. 전자기 성형의 성형력 평가를 위한 유한요소 해석

3.1 유한요소해석 모델

유한요소 해석 모델은 RLC회로를 구성하였고 코일에 하나의 절점을 선택하여 요소를 연결한다. ANSYS/Multi-Physics를 사용하였고 CIRCU124 요소를 사용하여 RLC회로를 구성하였다. 유한요소해석에서는 입력전압(V)과 커패시터(C) 용량을 변수로 하여 각 Case 별로 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 3과 같이 해석 모델은 2-D 축 대칭으로 가정하였고, 시스템 전체의 저항값은 $0.01\Omega m$, 인덕턴스의 값은 $2.4\mu H$ 이며 코일의 저항값을 $1.72e-08\Omega m$ 주고 유한요소 해석을 수행하였다. 가공물과 주위 공기는 Z 축 자기 벡터 포텐셜(Magnetic vector potential, AZ) 자유도를 가지는 ANSYS의 PLANE53 요소를 사용했으며 INFIN110 요소를 사용하여 무한 공간영역을 고려하여 해석을 수행 하였다. 코일은 회로-연성 전도체(Circuit-coupled massive conductor) 특성과 자기 벡터 포텐셜(AZ), 전류(CURR), 기전력(EMF) 자유도를 가지는 PLANE53 요소를 사용하였다.^{8,9}

3.2 성형 코일의 저항이 입력전류에 미치는 영향

전자기 성형 장비의 입력전압이 $4kV$ 이고 커패시터 용량 값이 $500\mu F$ 일 때의 경우 식(2)를 통해서 예측한 입력 전류값과 유한요소해석을 통해 구한 입력 전류값, 로고스키 코일을 통하여 직접 측정한 전류 값을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 입력전류의 최대(Peak current)값은 실험에서 측정한 값과 비교할 때 이론적으로 예측한 입력전류 값과 해석을 통해서 얻은 입력전류 값의 차이가 다소 있으나 전류 값이 감소해 나가면서 유한요소 해석으로 예측된 결과가 실험결과와 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 이는 RLC회로를 구성할 때 전자기성형 코일 또한 회로와 연결되어 있어 코일이 가지는 고유의 저항값이

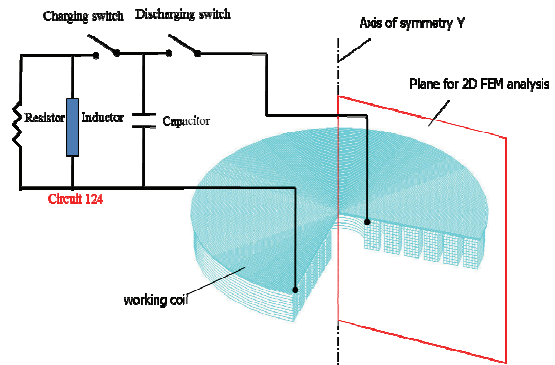


Fig. 3 Finite element model of EMF process

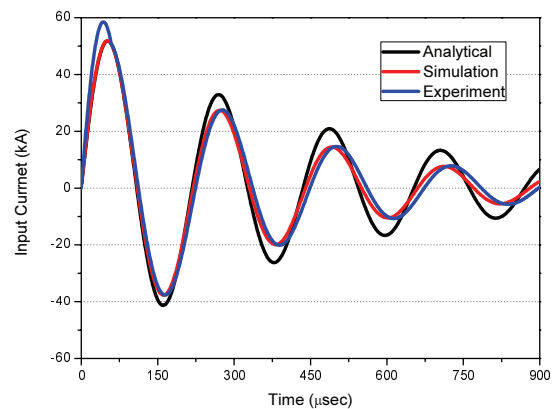


Fig. 4 Prediction of input current at each case

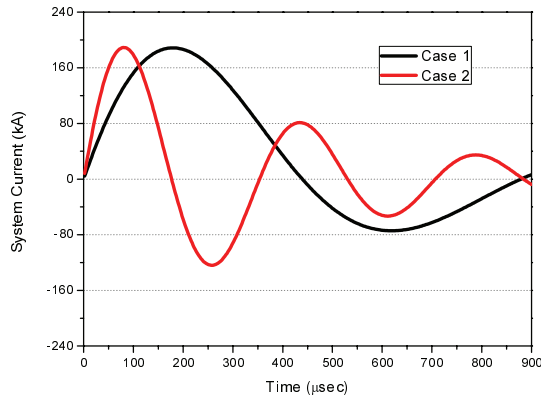
전체시스템 저항에 영향을 미치고, 때문에 입력전류의 감소 값에 영향을 준 것을 볼 수 있다.

3.3 공정변수가 성형력에 미치는 영향

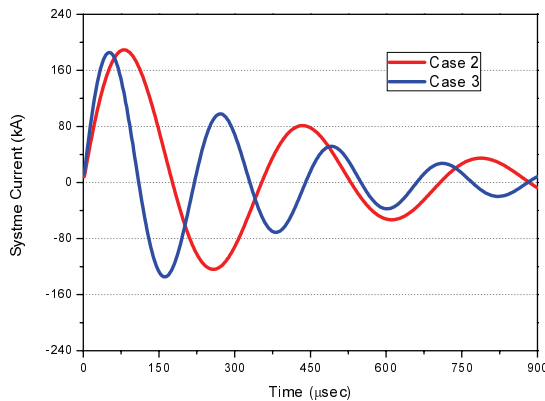
전자기 성형 장비의 공정변수가 성형력에 미치는 영향을 평가 하기 위해서 유한요소 해석을 아래의 Table 1과 같이 나누어 해석을 수행하였다. 같은 입력전류 값을 가질 때 공정변수에 따라서 성형력의 차이를 보기 위해 각각의 최대 입력 전류값(Peak Current)이 약 $190kA$ 가 나올 수 있도록 입력전압 값과 커패시터 용량 값을 조정하여 해석을 수행하였다. 각각 입력 전압은 $5kV, 10kV, 15kV, 20kV, 30kV$ 의 입력 전압값(V)을 넣었고 그때의 커패시터(C)의 용량이 각각 $7400\mu F, 1280\mu F, 500\mu F, 280\mu F, 130\mu F$ 의 용량을 가지도록 하였다. 해석은 전자기성형의 특성상 짧은 시간으로 설정을 하였다. 성형 해석 시간은 총 $900\mu Sec$ 로 대부분의 입력 전류가 감소되는 시점에서 해석이 끝나도록 하였다.

Table 1 Numerical simulation parameters at each case

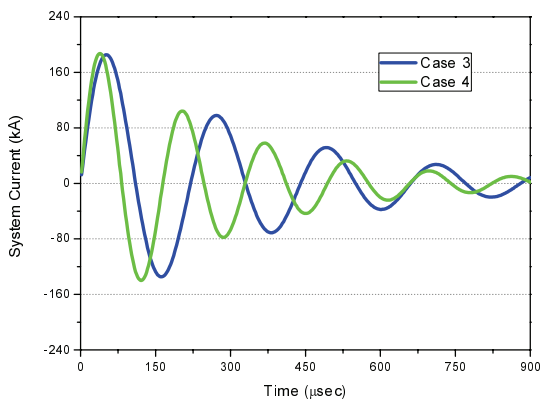
| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|------|------|-----|-----|-----|
| Input Voltage (kV) | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| System Capacitance (μF) | 7400 | 1280 | 500 | 280 | 130 |
| System Resistance (Ωm) | 0.01 | | | | |
| System Inductance (μH) | 2.4 | | | | |



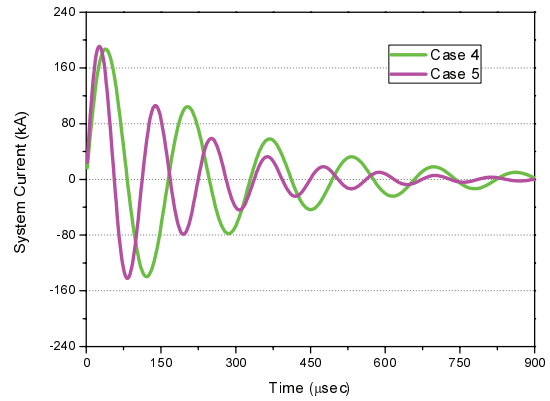
(a) Comparison between case 1 and case 2



(b) Comparison between case 2 and case 3



(c) Comparison between case 3 and case 4



(d) Comparison between case 4 and case 5

Fig. 5 System input current at each simulation case

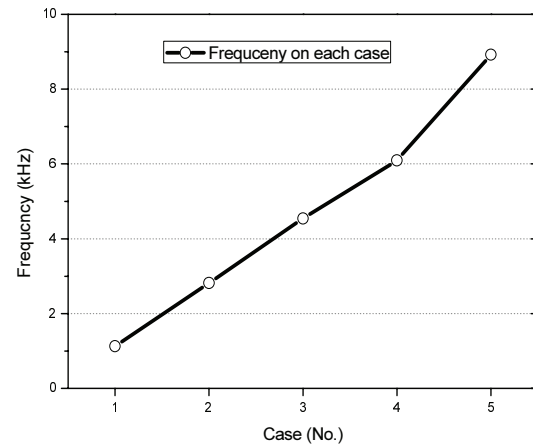


Fig. 6 Input current frequency at each simulation case

앞서 언급 하였듯이 전자기성형 장비 전체 시스템의 인덕턴스와 시스템 저항은 각각 $0.01\Omega m$ 와 $2.4\mu H$ 로 고정 인자로 두고 입력 전압과 커패시터 용량을 변화시켰고, 이러한 공정변수가 성형력에 미치는 영향을 고려하였다. 전자기성형은 굉장히 짧은 주기 내에 전자기 코일을 통하여 성형력이 가해져 성형이 이루어진다. 이것은, 입력전류의 주기가 짧아야 같은 코일을 통하여 인가되는 성형력의 손실이 적어지기 때문에 전자기 성형에서 매우 중요한 성형 인자이다. 따라서 각각의 입력전압과 커패시터값에 따라서 입력전류 값과 주기를 비교하였고 그때 코일을 통하여 인가되는 성형력을 비교 분석하였다. Fig. 5는 각각의 Case에 따른 전자기성형 코일을 통하여 인가되는 입력 전류를 코일의 저항을 고려하여 해석을 통해서 도출 하였다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 입력전류의 최대값이 같을 때 커패시터 용량의 크기에 따라서 주기가 급격하게 달라짐을 볼 수 있다. 이는 식(3)에서 확인할 수 있듯이 커패시터 용량이 증가할수록 입력전류의 감소값이 커패시터 용량의 루트에 비례하기 때문에 커패시터 용량이 증가할 때 감소되는 정도가 커짐을 볼 수 있고 식(4)에서 확인할 수 있듯이 커패시터 용량의 증가로 주파수 값에 영향을 주어 주기가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 전자기성형에서 매우 중요한 고려 사항이다. 입력전류의 주기가 짧을수록 더 크고 더 많은 횟수의 입력전류가 전가됨을 볼 수 있다. 또한, 같은 최대전류 값이 요구될 때 입력전압의 증가량 보다 커패시터 용량의 감소량이 더 큰 것을 볼 수 있다. 이것은, 입력전류의 값이 입력전압의 크기에 비례하는 데 반해 입력전류는 커패시터 용량에 루트값에 비례하고 감소값과 주파수에 영향을 주기 때문이다. 이처럼 같은 최대입력 전류값을 갖기 위해서는 입력전압의 값을 증가시키는 것이 커패시터 용량을 증가시키는 것보다 성형력에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 한편 코일을 통하여 인가되는 전자기력을 구하기 위해서는 코일과 가공재 사이의 전류밀도와 자속밀도를 고려해야 한다. 아래의 식(6)은 전류밀도를 다음과 같이 나타낸다.

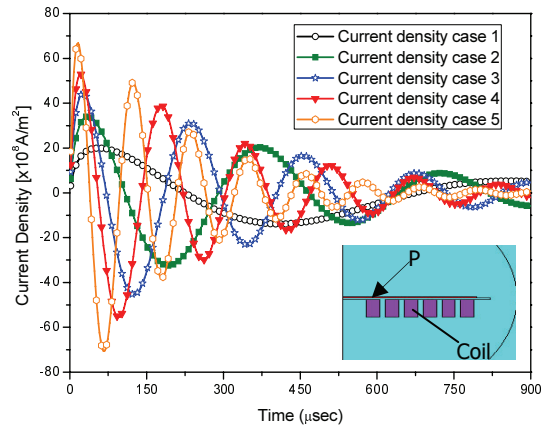
$$J = -\sigma \frac{\partial A_0}{\partial t} \tag{6}$$

여기서, A_0 는 마그네틱 벡터 포텐셜을 나타내고, σ 는 전기 전도도를 나타낸다. 식(6)을 통하여 전자기 성형 시 코일을 통하여 인가되는 전류밀도를 구할 수 있고 식(7)을 통해 성형 시 인가되는 전자기력을 구할 수 있다.

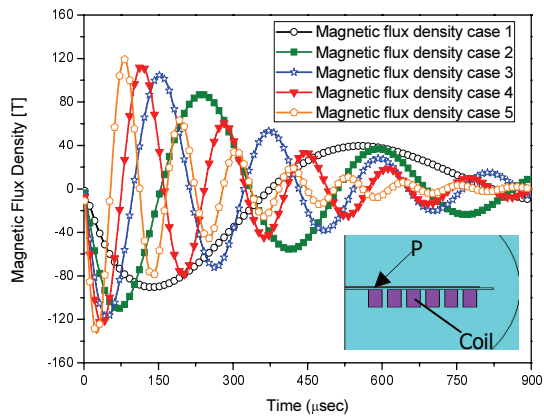
$$F = J \times B \tag{7}$$

여기서, 자기장의 밀도를 나타내는 B 와 식(6)의 전류 밀도 J 의 계산으로 전자기 성형 시 코일을 통하여 가공재에 가해지는 성형력을 구할 수 있다.

Fig. 8은 전자기성형 장비로 판재를 성형할 때 코일을 통해서 인가되는 성형력을 나타내고 있다. 이때의 성형력은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 코일과 가공재 사이의 최대 성형력이 가해지는 지점 P에서의 전류밀도와 자기력밀도를 식(7)과 같이 벡터로 계산한 결과이다. 이는 Fig. 9와 Table 2에 각각



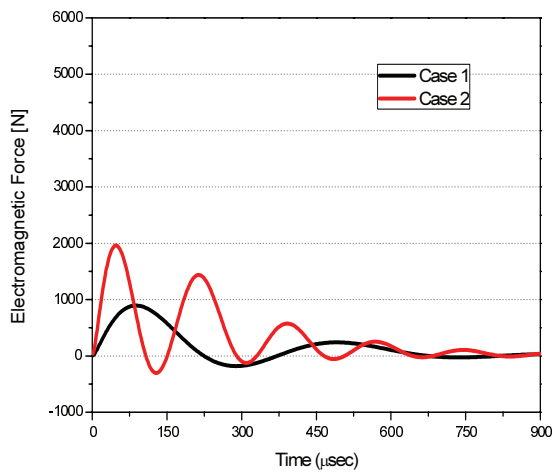
(a) Current density at each case at point P



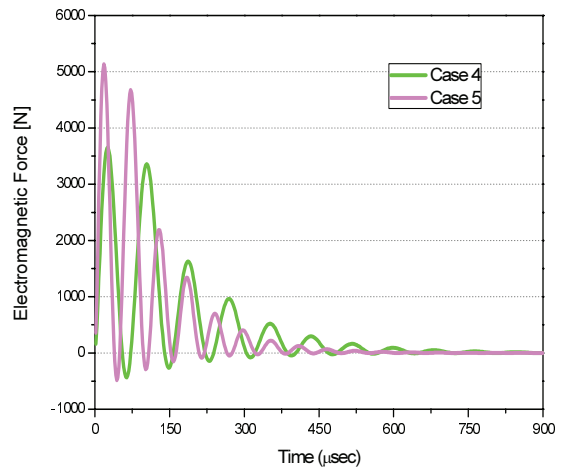
(b) Magnetic flux density at each case at point P

Fig. 7 Current density and magnetic flux density

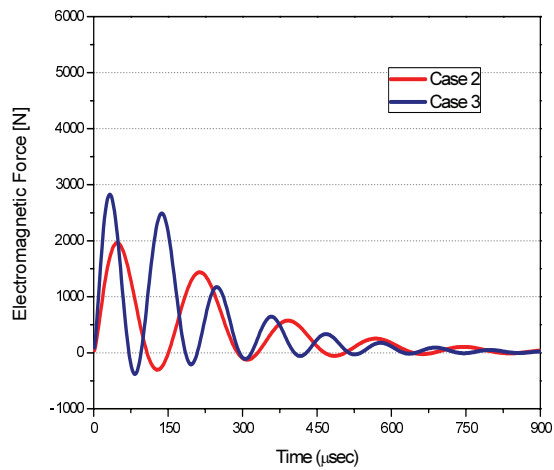
정리 하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 코일을 통하여 인가되는 입력전류의 최대값이 각각의 Case 별로 같더라도 입력전압 값과 커패시터값에 의한 감소 때문에 각각의 Case마다 주기와 입력전류의 크기가 달라지고 이러한 차이 때문에 코일과 판재 사이의 전류밀도와 자속밀도의 크기와 주기가 각 Case별로 차이가 나서 실제 판재를 성형할 수 있는 성형력에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이 같은 입력전류를 가지고 있어도 성형 시 판재와 코일 사이의 자속밀도와 전류 밀도 크기 차이 때문에 성형력의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 9는 각 Case 별로 최대 성형력을 그래프로 나타내었다. 입력전압의 값이 증가 할수록 코일을 통한 성형력이 비례적으로 증가함을 볼 수 있다. 특히, Case 1과 Case 5는 최대 약 5배 이상의 성형력 차이를 확



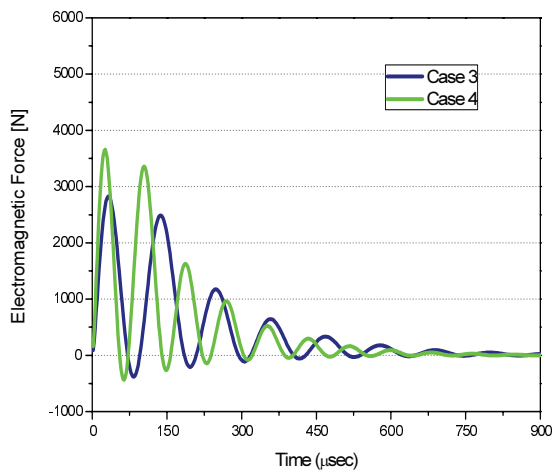
(a) Comparison between case 1 and case 2



(d) Comparison between case 4 and case 5



(b) Comparison between case 2 and case 3



(c) Comparison between case 3 and case 4

Fig. 8 Electromagnetic force at each simulation case

Table 2 Maximum forming force at each simulation case

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|-----|------|------|------|------|
| System Current (kA) | 188 | 189 | 185 | 187 | 190 |
| Maximum Force (N) | 894 | 1960 | 2825 | 3655 | 4674 |

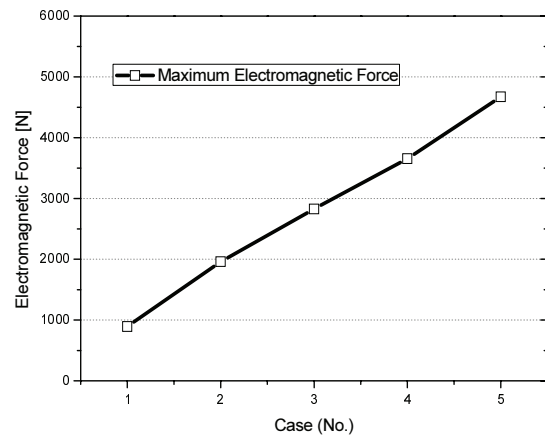


Fig. 9 Maximum electromagnetic force through the coil

인할 수 있다. 성형력에 영향을 미치는 전류밀도와 자속밀도 값을 아래의 Table 3과 같이 각 Case 별로 최대가 될 때를 정리하였고, 이를 Fig. 10에 나타내었다. 앞서 보았듯이 입력 전류의 크기와 주기차이로 가공재와 코일 사이에 인가되는 자속 밀도와 전류밀도의 값이 변화하여 성형력에 영향을 미쳤고, 뿐만 아니라 자속밀도와 전류밀도의

Table 3 Maximum current density and magnetic flux density at each simulation case

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|----|-----|-----|-----|-----|
| Maximum Current Density ($\times 10^8 \text{A/m}^2$) | 20 | 34 | 44 | 53 | 69 |
| Magnetic Flux Density (Tesla) | 90 | 110 | 117 | 124 | 132 |

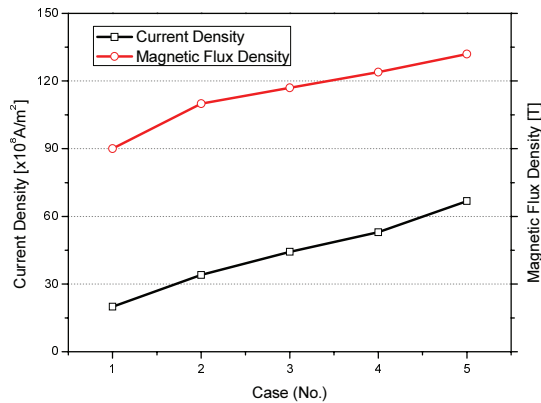


Fig. 10 Maximum current and magnetic flux density

주기 또한 짧아지기 때문에 같은 주기 내에 인가되는 에너지의 양이 더 크게 인가되어 성형력에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전자기 성형 장비를 RLC 회로를 구성하여 유한요소해석을 통하여 전자기성형 장비 제작 시 고려되어야 하는 커패시터와 입력전압의 관계를 이용하여 유한요소해석 Case를 나누고 각 Case 별로 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 이론적으로 계산한 시스템 입력 전류 값과 해석으로 도출한 입력전류 값을 실제 로고스키 코일을 이용하여 측정된 입력전류 값과 비교하였다. 초기의 최대 입력전류 값은 이론적/해석적으로 도출 값과 로고스키코일을 이용하여 측정된 값과 다소 차이가 났으나 실험과 거의 유사한 것을 확인하였다. 특히, 이론적으로 계산한 입력전류와 해석을 통하여 도출한 입력전류를 비교할 때 전자기성형 코일 고유의 저항 값으로 인해서 입력전류의 주기와 값에 영향을 미치는 것을 확인하였고 해석을 통하여 도출한 입력전류 값이 실험으로 측정된

결과와 유사한 것을 확인 하였다. 또한, 장비의 용량 한계로 인해 각 Case 별로 입력전류의 측정이 불가능하기 때문에 유한요소 해석을 통해 도출한 입력전류 값을 이용하여 코일을 통하여 인가되는 성형력을 도출하였다.

2) 전자기성형 해석의 입력 전류의 최대값이 190kA로 같은 경우 각 Case 별로 입력 전압값과 요구되는 커패시터 용량을 달리하여 해석을 수행하였다. 이를 통하여 각 Case 별로 입력값에 따라서 입력전류의 주기가 달라지는 것을 확인하였고, 특히 커패시터값이 증가할수록 주기가 길어지는 것을 확인하였다. 전자기성형은 매우 짧은 시간에 성형이 이루어지므로 이러한 주기 변화가 성형 코일을 통하여 인가되는 성형력에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3) 전자기성형의 입력 전류의 주기가 다를 때 코일을 통하여 인가되는 전류밀도와 자속밀도의 크기와 주기의 차이가 났고 이 때문에 전자기성형 시 코일과 가공재 사이의 자속밀도와 전류밀도의 최대값 차이가 발생함을 확인하였으며, 이것은 전류밀도와 자속밀도의 차이가 조밀할수록 성형력이 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 입력 전류의 주기가 짧고 입력 전압의 크기가 클수록 코일을 통하여 인가되는 성형력이 큰 것을 확인 하였다.

4) 입력 전압의 값은 최대한으로 늘리고 커패시터 용량이 최소가 될 때 입력 전류의 크기와 주기가 짧아져 전자기장비의 성형력이 최대가 될 수 있다 향후 해석 결과를 바탕으로 한 장비제작을 통하여 실제 실험을 통한 검증이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 선도연구센터지원사업(2012R1A5A1048294)지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. 또한, 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2026095)으로 수행된 연구결과 입니다.

참고문헌

1. Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B. L., Tekkaya, A. E., and Kleiner. M., "Electromagnetic Forming- A review," J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 5, pp. 787-829, 2011.
2. Lee, H. M., Kang, B. S., and Kim, J., "Development

- of Sheet Metal Forming Apparatus Using Electromagnetic Lorentz Force,” *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 1, pp. 34-43, 2010.
3. Kim, J., Noh, H. G., Ko, S. J., and Kim, T. J., “Analysis of Electromagnetic Forming Using Sequential Electromagnetic-Mechanical Coupled Simulations,” *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 7, pp. 441-446, 2012.
 4. Ryu, Y. K., Koh, K. W., and Kim, H. S., “A Non-contact Two-Dimensional Position Sensing Device Using Electromagnetic Induction,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1159-1163, 2012.
 5. An, Y. J., Oh, S. H., and Kim, C. N., “A Numerical Study on the Internal Flow Characteristics and Pumping Performance of Piezoelectric-based Micro pump with Electromagnetic Resistance,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 27, No. 10, pp. 84-92, 2010.
 6. Kamal, M., “A uniform pressure electromagnetic actuator for forming flat sheet,” Ph.D. Thesis, Materials Science and Engineering, Ohio State University, 2005.
 7. Li, F., Mo, J., Zhou, H., and Fang, Y., “3D Numerical simulation method of Electromagnetic forming for low conductive metals with a driver,” *Int. J. of Adv. Manuf. and Technol.*, Vol. 64, No. 9-12, pp. 1575-1585, 2012.
 8. Kim, J., Ko, S. J., and Kim, T. J., “Sequential Electromagnetic-Structural Coupling Method for Analysis of Electromagnetic Forming Process,” *Proc. of Trans. Mater. Process. Fall Conference*, pp. 189-192, 2012.
 9. Noh, H. G., Yoon, J. S., Song, W. J., Kang, B. S., and Kim, J., “Numerical Approach to Investigate Formability Enhancement of Electromagnetic Forming,” *Proc. of KSAE 2012 Annual Conference*, pp. 2232-2236, 2012.