

# 전자기력을 이용한 판재 성형공정에 대한 수치적 연구 Numerical Investigation on Sheet Metal Forming Process using Electromagnetic Force

\*서영호<sup>1</sup>, 김 정<sup>2</sup>, #강범수<sup>2</sup>

\*Y. H. Seo<sup>1</sup>, J. Kim<sup>2</sup>, #B. S. Kang(bskang@pusan.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 항공우주공학과 대학원, <sup>2</sup> 부산대학교 항공우주공학과

Key words : Electromagnetic Forming, Lorentz Force, Coupled-Field, FEM

## 1. 서론

전자기 성형(Electromagnetic Forming : EMF)은 전자기장을 직접 응용하여 금속을 성형하는 고에너지·고속 성형법의 하나이며, 성형코일에 펄스를 통과시켜 기계적 접촉없이 금속을 성형하는 기술로 자기 펄스 성형이라고도 한다. 전자기 성형은 비접촉 성형이기 때문에 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 없으며 다양한 형태의 성형을 고속으로 수행할 수 있고 반복적인 성형도 가능하다. 전자기 성형법은 미국에서는 1960 년경에 개발 및 실용화가 시작되어 현재 산업적, 이론적으로 많은 발전이 있었고, 일본에서도 1970 년 초반부터 많은 연구가 시작되었다. 이러한 가공법은 냉간 가공법으로 재료의 기계적 성질을 유지할 수 있고 가공이 용이하여 생산성 향상에 기여할 수 있다[1][2].

전자기 성형 해석을 위해서는 Electromagnetic-field 와 Structural-field 의 연성해석을 해야 한다. ANSYS 10.0에서는 연성해석 방법으로 Sequential Method 와 Direct Method 를 제공한다(Fig. 1). 이 중 Direct Method 는 Electromagnetic-field 와 Structural-field 를 동시에 해석하여 Field 간의 정밀도가 높지만 Contact Element 가 지원되지 않는 단점이 있다. 그리고, 일반적으로 판재 성형은 소재의 두께에 비해서 성형량이 많으므로 Loosely Coupled Method 인 Implicit-Explicit Method 를 사용해야 한다. 하지만, 이 방법을 사용하기 위해서는 Direct Method 과정을 거쳐야 하므로 본 논문에서는 Implicit-Explicit Method 를 사용하기 위한 전 단계로서 먼저 Direct Method 를 이용한 자유형상 가공에 대해서 검토하고자 한다[3][4].

## 2. 수치해석모델

전자기 성형의 기본원리는 축전기에 연결된 솔레노이드 코일 안의 전자기력을 이용하는 것이다. 코일 속을 흐르는 전류는 코일내의 자기장과 피가공물의 유도전류를 형성하고, 자기장과 유도전류의 상호작용으로 피가공물을 고속으로 가속시키는 전자기력, 즉 로렌츠 힘이 생성된다. 로렌츠 힘은 아래의 식 (1)으로 표현가능하며[1], 본 논문에서는 상용 FE 프로그램인 ANSYS 10.0 을 해석에 사용하였다.

$$F = i(d \times B) \quad (1)$$

실제 성형과정에서 피가공물인 어떤 금속도 작업온도에서 완전한 도체(저항이 0 인 도체)가 아니므로 자기장이 금속 내로 침투하게 되는데 그 정도는 금속의 비저항에 의해서 결정된다. 짧은 펄스가 효과적으로 금속을 성형하기 위

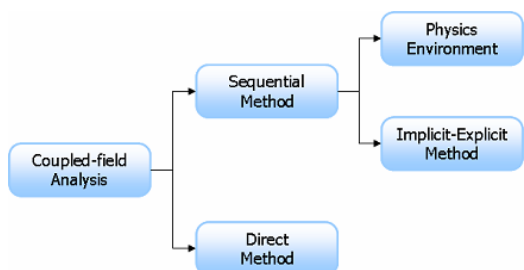


Fig. 1 Coupled-field analysis method by ANSYS 10.0

해서는 자기장의 침투가 Skin Depth 라는 얇은 층에 한정되어야 한다. 따라서, 재료의 두께와 Skin Depth 를 비교함으로써 전자기 성형의 적합여부를 결정할 수 있는데, 성형될 재료의 두께가 Skin Depth 와 같거나 크도록 하는 것이 일반적이다. 이 법칙은 절대적이지 않으며, 자기장이 상당부분 재료속으로 확산되는 것이 허용될 수도 있고 Skin Depth 가 재료의 두께보다 큰 경우도 있다[1]. Skin Depth 는 다음 식으로 표현되며[5], 코일에 흐르는 전류는 Load 로서 코일의 Skin Depth 에 부여되며 Table 1 에 나타내었다. 또한 유한요소 해석 모델을 Fig. 2 와 같이 구성하였다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \gamma}} \quad , \quad \mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (2)$$

본 논문에서는 일반적인 전자기 성형에 대한 연구에 앞서 다음과 같은 제약 조건을 설정하여 특정 경우에 대한 연구를 수행하였다[6].

- 피가공물의 두께는 Skin Depth  $\delta$  보다 큰 1mm 로 가정하였다.
- 전류의 주파수는 30KHz 이하로 하여 전자기파를 고려하지 않는다.
- 피가공물은 등방성 재질이며 자성을 띠지 않는다.
- 피가공물의 변형에 있어서 공기의 저항을 고려하지 않는다.
- 성형 중 온도에 대한 영향은 고려하지 않는다.
- 변형 속도에 대한 영향은 고려하지 않는다.

Table 1 Current-Induced Load

$I(t) = \exp(-\gamma t) \sin(\omega_d t)$	$I_0$ (A)	100,000
	$\gamma$ (s <sup>-1</sup> )	5,302.17
	$\omega_d$ (rad/s)	50,670.85

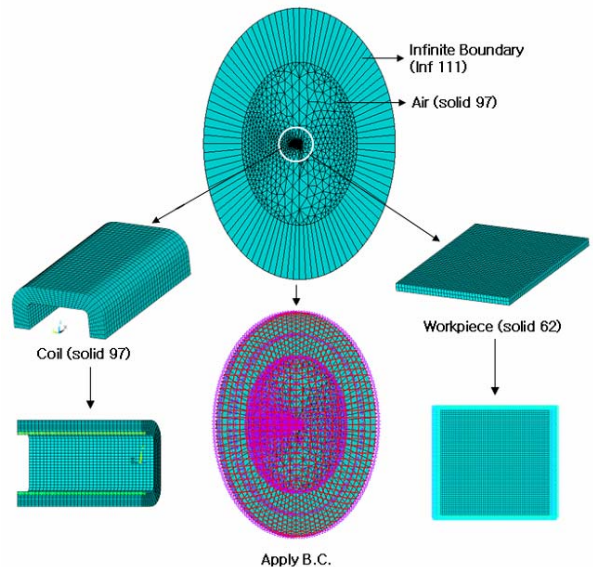


Fig. 2 Finite-element configuration

### 3. 자유형상 가공 수치해석결과

전자기 성형에서 필요한 만큼의 변형량을 얻기 위해서는 전기적 상수들의 적절한 선택이 필요하다. 하지만 이 부분에 대한 정량적인 결과가 제시된 바가 없으므로 유한요소해석을 이용한 다수의 시행착오를 통해서 공정변수를 도출하였다. 본 논문에서는 참고문헌 [6]에 사용된 전기적 상수들을 참조하여 연구를 수행하였다.

입력전류와 Air Gap(코일과 피가공물 사이의 공기층)에서의 시간에 따른 자기장의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 입력전류는 Fig. 3(a)와 같이 흐르며, Air Gap에서의 자기장은 Fig. 3(b)와 같이 변한다. 코일의 전류에 의해 유도된 피가공물에서의 전류는 일정한 흐름을 가지며, 이는 로렌츠 힘이 일정한 방향으로 작용하게 하는데 기여한다.

입력전류가 최대치에 다다른 32 $\mu$ s 일 때 Air Gap에 Fig. 4와 같이 자기장이 생성되는데, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 각각 비교해보면 피가공물이 존재하지 않을 때 자기장의 최대세기는 2.06T 이고 균일하게 분포한다. 반면 피가공물이 존재할 때는 자기장의 최대세기는 5.94T로 코일과 피가공물 사이에 자기장이 강하게 분포하는데 이는 유도전류로 인하여 자기장이 도체 속을 통과하지 못하기 때문에 국부적으로 자기선속의 밀도가 높아지기 때문이다.

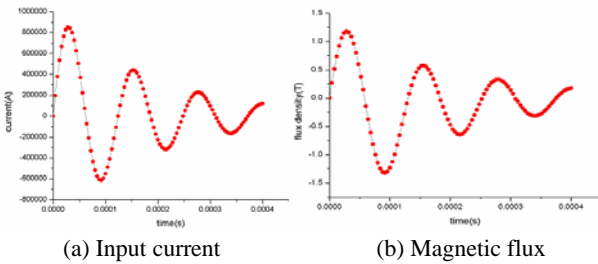


Fig. 3 The input current and magnetic flux density, in the middle of the modeled coil length and also in the middle of the gap between the coil and workpiece

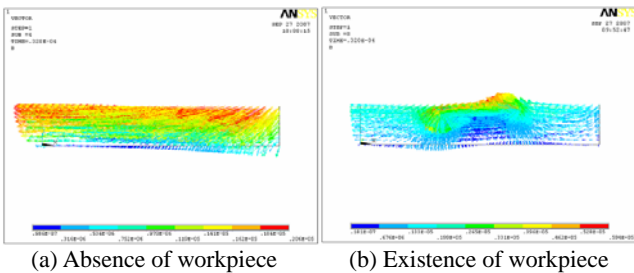
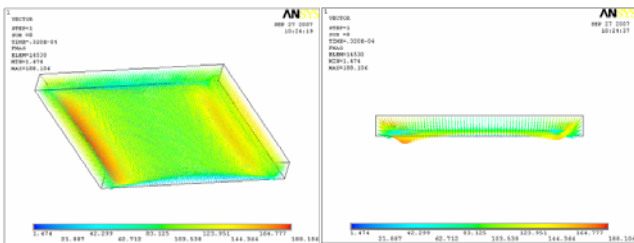
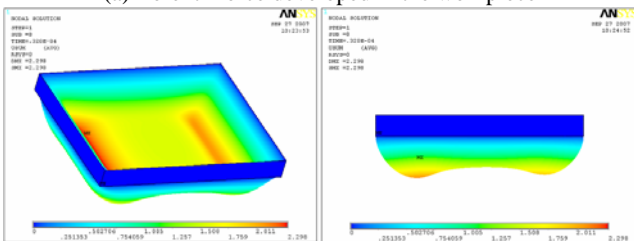


Fig. 4 Magnetic flux density of air gap



(a) Lorentz force developed in the workpiece



(b) Deformation of workpiece

Fig. 5 Lorentz force and deformation of workpiece

식 (1)에서처럼 로렌츠 힘은 유도전류와 자기장에 의해서 결정되며 국부적으로 형성된 강한 자기장은 유도전류와 함께 피가공물의 변형을 일으키는 강한 힘을 발생시킨다.

Fig. 5는 32 $\mu$ s 일 때 피가공물에 작용하는 로렌츠 힘과 피가공물의 자유형상 가공된 결과를 나타낸다. 로렌츠 힘의 방향은 유도전류와 자기장에 의해서 결정되었고 최대 크기는 188N이며, 피가공물의 최대 변위는 2.3mm 이고 이 순간 성형에 필요한 하중을 충분히 얻을 수 있음을 확인하였다. 자기 펄스의 시간 조정은 1 $\mu$ s의 정확도로 제어 가능하며 자기 펄스의 크기는 전자적으로 매우 정확하게 제어할 수 있다[1]. 또한 자기 펄스의 전형적인 유효시간은 약 30 $\mu$ s 이므로 해석 결과는 상당한 신뢰성을 가진다고 판단할 수 있으며 전자기력을 이용한 판재 성형의 가능성을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 논문에서는 전자기력을 이용한 판재 성형의 수치적 해석을 위한 초기단계로서 유한요소해석 상용 프로그램인 ANSYS 10.0 이 제공하는 Direct Method 를 사용하여 Electromagnetic-field 와 Structural-field 의 해석을 동시에 수행하였다. 그 결과 판재 성형에 필요한 전자기력을 충분히 얻을 수 있음을 확인하였고, 성형 가능성을 제시하였다. 하지만, 공기저항, 변형속도, 온도 등 많은 제약 조건들이 존재하기 때문에 일반적인 해를 구할 수 없다. 이를 해결하기 위해서 우선적으로 전자기력을 이용한 판재 성형의 가능성을 Implicit-Explicit method 를 통해서 다시 한번 검증하고 제약 조건들에 대한 연구가 수행되어야 한다. 또한 성형력을 높이기 위한 대책으로 자기 펄스에 쉽게 반응하는 알루미늄 중간재(Driver)의 사용, 성형 코일에 유도되어 피가공물에 에너지를 전달하는 자속집중기(Field Shaper)의 사용 등 다방면의 연구가 이루어진다면 적은 전력으로도 스테인리스강과 같은 작은 전기 전도도를 가진 금속도 전자기력을 이용하여 성형이 가능할 것으로 판단되어진다.

### 후기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과이며, 아울러 2 단계 BK21 사업 및 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 이동녕, "전자기 성형의 원리와 응용," 機械와 材料, 3 권 4 호, 17~29, 1991
2. 이종수, "전자기 성형법에 대하여," 대한기계학회지, 2 권 호, 476~486, 1988
3. ANSYS 10.0 manual
4. Oliveria, D.A., Worswick, M.J., Finn, M., Newman, D., "Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model," Journal of Material Processing Technology, 1, 350~362, 2005
5. Belyy, I.V., Fertik, S.M., Khinenko, L.T., "Electromagnetic Metal Forming Handbook," 1977 (Altynova, M., Translated from Russian, The Ohio State University, 1996)
6. Mamalis, A.G., Manolakos, E.E., Kladas, A.G., Koumoutsos, A.K., "Physical principles of electromagnetic forming process: a constitutive finite element model," Journal of Material Processing Technology, 1, 1, 294~299, 2005