

전자기력을 이용한 박판 성형공정의 해석적 연구

서영호¹ · 허성찬¹ · 구태완² · 송우진³ · 강범수² · 김 정#

Numerical Simulation of Thin Sheet Metal Forming Process using Electromagnetic Force

Y. H. Seo, S. C. Heo, T. W. Ku, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim

(Received October 30, 2007)

Abstract

Electromagnetic Forming (EMF) technology such as magnetic pulse forming, which is one of the high velocity forming methods, has been used for the joining and forming process in various industry fields. This method could be derived a series of deformation of sheet metal by using a strong magnetic field. In this study, numerical approach by finite element simulation of the electromagnetic forming process was presented. A transient electromagnetic finite element code was used to obtain the numerical model of the time-varying currents that are discharged through the coil in order to obtain the transient magnetic forces. Also, the body forces generated in electromagnetic field were used as the loading condition to analyze deformation of thin sheet metal workpiece using explicit dynamic finite element code. In this study, after finite element analysis for thin sheet metal forming process with free surface configuration was performed, analytical approach for a dimpled shape by using EMF was carried out. Furthermore, the simulated results of the dimpled shape by EMF were compared with that by a conventional solid tool in view of the deformed shape. From the results of finite element analysis, it is confirmed that the EMF process could be applied to thin sheet metal forming.

Key Words : Electromagnetic Forming, Electromagnetic Force, Coupled-Field Analysis, Dimpled Shape, FEM

1. 서 론

전자기 성형(Electromagnetic Forming : EMF) 기술은 성형 코일에 의해 생성된 전자기장을 직접 응용하여 금속을 성형하는 가공법이다. 이 가공법의 가장 큰 장점은 성형 공정의 시간적 효율성이 높다는 것이다. 적절하게 설계된 전자기 성형 장비는 시간당 3,600 회 혹은 그 이상의 성형 공정을 수행할 수 있다[1]. 또한 기존의 금형 제작의 한계로 인해 프레스 성형으로는 가공하기 어려운 부분

까지 성형이 가능하여 다양한 형태의 성형을 고속으로 수행할 수 있다. 이 외에도 전자기 성형법은 비접촉 성형 방식이기 때문에 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 발생하지 않으며, 반복적인 성형이 가능하고 성형된 재료의 특성이 향상된다는 장점을 가지고 있다. 더군다나 이 가공법은 냉간 가공법으로써 재료의 기계적 성질을 유지할 수 있고 가공이 용이하여 생산성 향상에 기여할 수 있다.

이러한 전자기 성형 방법은 1960 년경에 미국에서 개발 및 실용화가 시작되어 현재 산업적·이

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원
2. 부산대학교 항공우주공학과
3. 부산대학교 산학협력단
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,
E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

론적으로 많은 발전이 있으며[1~2], 일본에서도 1970년대부터 많은 연구가 시작되었다[3]. 그러나, 국내에서는 1990년대 초반에 전자기 성형에 대한 수치적 연구가 시도되었으나, 실제 가공 공정에 적용되지는 못하였으며, 아직까지도 기술기반과 관련 경험이 부족하여 활용되고 있지 못하고 있는 실정이다[4~5].

지금까지의 전자기 성형 해석에 관한 연구에 있어서 사용된 해석 방법으로는, (1) 전자기 압력 [6], (2) Fully Coupled Method(FCM, [7]), 그리고 (3) Loosely Coupled Method(LCM, [2]) 등이 있다. 이 중에서 Fig. 1 과 같이 전자기장(Electromagnetic-field) 과 관련된 해석 없이 전자기 압력(Magnetic Pressure) 을 수치적으로 계산하고 이를 성형력으로 하여 해석한 연구들이 주를 이루고 있다. 하지만 전자기 압력은 피가공물의 단위 부품의 두께에 대한 힘의 분포를 결정하지는 못하기 때문에 전자기 압력을 이용한 해석적 접근은 신뢰성을 가지지 못한다[8]. 또한 FCM 을 이용한 연구들은 모두 접촉면이 없는 자유형상 가공이나 축관 혹은 환관 성형을 다루고 있다. 이는 접촉까지 고려한 전자기 성형 공정을 FCM 으로 해석할 수 있는 프로그램이 없기 때문이다. 그리고, LCM 은 내연적(Implicit) 코드를 사용하여 우선적으로 전자기장 해석을 수행하고, 피가공물의 전자기력을 이용하여 외연적(Explicit) 코드로 성형 해석을 수행하는 것으로써 아직 많이 알려져 있지 않은 방법이다[2].

상용 유한요소 코드인 ANSYS 10.0 은 전자기장의 해석 방법으로 스칼라 퍼텐셜 포물레이션(Scalar Potential Formulation : SPF)과 마그네틱 벡터 퍼텐셜 포물레이션(Magnetic Vector Potential Formulation : MVPF)을 제공하고 있다. 전자는 3 차원 정적 해석(3-D Static Analysis)에 주로 사용되며, 전류 공급원(Current Source)이 유한요소 모델의 일부로 존재하지 않아도 되기 때문에 후자에 비해서 모델링이나 해석면에 있어서 간결한 장점이 있다. 반면 후자인 MVPF 는 SPF 에 비해서 3 개의 마그네틱 벡터 퍼텐셜 자유도(A_x, A_y, A_z)를 더 가지며, 2 차원 정적 해석(2-D Static Analysis), 3 차원 정적 해석, 천이 그리고 조화 해석에 사용된다. 이 방법은 SPF 에 비해서 해석 모델이 복잡하고 해석 시간이 길다는 단점이 있지만, 전자기 성형에서 성형 코일의 펄스 형태의 전류가 공기층에 전자기장을 형성하여 피가공물에 유도 전류를 생성하기 위해서 천이 해석을 해야 하므로 MVPF 을 사용해야 한다[9].

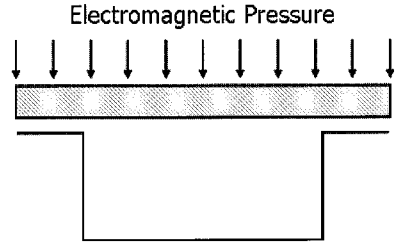


Fig. 1 Schematic view of electromagnetic forming using electromagnetic pressure

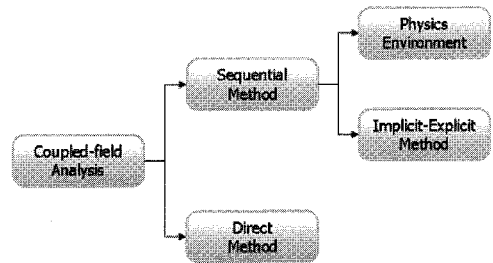


Fig. 2 Coupled-field analysis method of ANSYS 10.0

또한, 전자기 성형 해석에는 전자기장과 Structural-field 의 연성해석 방법이 사용되어야 하는데, ANSYS 10.0 에서는 연성해석 방법으로 Fig. 2 와 같이 순차법(Sequential Method)과 직접법(Direct Method)을 제공한다. 직접법은 앞서 말한 FCM 으로서 전자기장과 Structural-field 를 동시에 해석하여 필드(Field) 간의 정밀도가 높다. 하지만 접촉면을 포함하는 모델을 직접법을 통해서 해석하기 위해서는 Structural-field 와 전자기장의 자유도를 모두 가지는 접촉 요소가 필요하지만 마그네틱 벡터 퍼텐셜 자유도를 가지는 접촉 요소는 존재하지 않는다. 따라서 직접법은 접촉면이 없는 모델의 해석만 수행할 수 있다.

일반적으로 박판 성형은 소재의 두께에 비해서 성형량이 많으므로 외연적 코드로 해석하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 박판의 성형에 있어서 자유 곡면을 가지는 형상과 딴플(Dimple) 형상을 가지는 경우에 대한 전자기 성형 해석을 수행하기 위해서 LCM 인 내연적-외연적 접근법(Implicit-Explicit Method)을 사용하였다. 이 방법을 사용하기 위해서는 우선 내연적 코드로 직접법을 통해서 피가공물에 작용하는 전자기력을 해석하고, 이를 성형력으로 활용하여 외연적 코드에서 성형 해석을 수행해야 한다. 따라서 본 연구에서는 내

연적-외연적 방법을 사용하기 위한 전 단계로서 먼저 직접법을 이용한 자유형상 가공에 대해서 검토하고, 내연적-외연적 방법을 이용한 딥플 성형을 위한 박판 성형 공정에 대한 수치 해석 결과를 보이고자 하였다. 또한, 딥플 형상 성형을 위한 전자기 해석 결과를 동일한 형상에 대한 기존의 프레스 금형을 이용한 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

2. 전자기 성형 원리

2.1 기본 원리

전자기 성형기의 기본 회로는 Fig. 3 과 같다. 즉, 전자기 성형법은 축전기에 연결된 솔레노이드(Solenoid) 코일 안의 전자기력(Electromagnetic force), 즉 로렌츠 힘(Lorentz Force)을 이용하여 피가공물을 성형하는 방법이다[10~11].

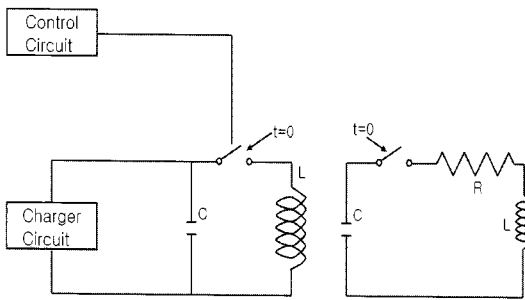


Fig. 3 Basic circuit of EMF apparatus

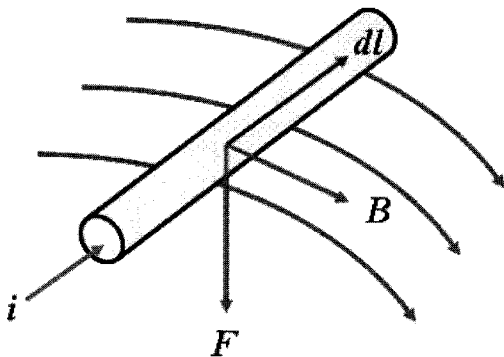


Fig. 4 The force that current affects a conductor in a magnetic field

Fig. 4 에서처럼 자기장으로 인하여 전류가 흐르는 도체가 받는 전자기력은 식 (1)과 같이 표현

가능하다.

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

여기서 F 는 전자기력, i 는 도체에 흐르는 전류, dl 은 도체의 단위길이 벡터, B 는 자속 밀도(벡터)이다.

힘 F 는 dl 과 B 로 정의되는 면에 수직인데 큰 성형력을 얻기 위해서는 도체에 흐르는 전류와 자기장의 크기가 커야 함을 알 수 있다. 솔레노이드 안에 전류가 갑자기 흐르게 되면 시간에 따라 변화하는 자기장이 형성되는데(전이자장), 이로 인해 피가공물에 식 (2)의 패러데이 법칙에 의하여 유도전류가 흐르게 된다. 이 유도전류는 식 (1)의 i 가 된다. 패러데이 법칙이란 임의의 폐회로에서 자속이 시간에 따라 변하면서 기전력이 유도되는 것을 말한다. 이 유도기전력은 식 (2)에서 보는 바와 같이 자속의 시간 변화율과 같고 방향은 반대이다.

$$\varepsilon = -d\Phi / dt \quad (2)$$

2.2 제약 조건

실제 성형 공정에서 피가공물은 작업 온도에서 완전한 도체(즉, 저항이 0 인 도체)가 아니기 때문에 자기장이 금속 내의 일정 두께까지 침투하게 되는데, 그 정도는 피가공물의 비저항에 의해서 결정된다. 그러므로 효과적인 성형을 위해서는 자기장의 침투가 스킨 깊이(Skin Depth)라는 얇은 층에 한정되어야 한다. 따라서 피가공물의 두께와 스킨 깊이를 비교함에 의해서 전자기 성형의 적합성을 결정할 수 있다. 이 법칙은 절대적이지는 않고 자기장이 피가공물 속으로 상당부분 침투하는 것이 허용될 수도 있으며, 스킨 깊이가 피가공물의 두께보다 큰 경우도 있다[10].

스킨 깊이는 식 (3)과 같이 표현되며, 입력 전류는 Load(Table 1 참조)로서 코일의 스킨 깊이에(Fig. 5의 δ) 부여된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_e}{\pi \mu_o \gamma}}, \text{ where } \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} (H/m) \quad (3)$$

여기서 δ 는 스킨 깊이, ρ_e 는 피가공물의 비저항, μ_o 는 자유 공간(Free-space)에서의 투과율, γ 는 입력전류의 주파수를 나타낸다.

Table 1 Current-Induced Load

$I_o e^{-\alpha} \sin(\omega_d t)$	$I_o (A)$	250,000
	$\gamma (s^{-1})$	5,302.17
	$\omega_d (rad / s)$	50,670.85

Table 1 을 참고하여 코일과 피가공물의 스킨 깊이를 구하면 각각 0.890mm, 5.177mm 이다. 앞서 언급하였듯이 피가공물인 박판재의 스킨 깊이와 두께의 관계는 절대적이지 않으므로, 이 스킨 깊이보다 작은 두께인 0.5mm 를 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 다음과 같은 제약 조건을 가정하였다.

- (1) 피가공물의 두께는 0.5mm 이다.
- (2) 전류의 주파수는 30KHz 이하로 하여 전자기파를 고려하지 않는다.
- (3) 피가공물은 등방성 재질이며 자성을 띠지 않는다.
- (4) 피가공물의 변형에 있어서 공기의 저항을 고려하지 않는다.
- (5) 성형 중 온도에 대한 영향은 고려하지 않는다.
- (6) 변형 속도에 대한 영향은 고려하지 않는다.

위의 제약 조건에 있어서, 코일의 입력 전류에 의해 비자성체인 피가공물에 유도전류가 흐르게 되면 자성을 띄게 되고, 이로 인해서 또 다른 자기장이 형성되게 된다. 이 현상으로 인해 자기장은 매우 복잡하게 나타나게 된다. 이에 본 연구에서는 단지 전류에 의한 자기장만을 고려하였고, 자성에 의한 자기장은 고려하지 않았다.

3. 자유형상 전자기 성형

3.1 해석모델

본 논문에 사용된 해석 모델은 Fig. 5 와 같으며 모델에 대한 설명은 Table 2 에 나타내었다. 전자기장의 안정적인 결과를 도출하기 위해서는 성형이 이루어지는 공간 이외의 주변 환경에 따른 영향을 고려해야 하기 때문에 성형부 주변을 주변 공기 (Surrounding Air) 영역 (Fig. 5 참조)으로 가정하여 성형부 코일의 전체적인 크기보다 충분히 큰 범위로 설정하였고, 최외각층에는 무한경계요소 (Infinite Boundary)를 사용하였다. 피가공물에 사용된 Solid 62 요소는 마그네틱 벡터 퍼텐셜 (A_x, A_y, A_z) 및 시간 적분 스칼라 퍼텐셜 (Time Integrated Scalar Potential, volt) 그리고 변위 자유도 (U_x, U_y, U_z)를 모두 가지고 있어 전자기장 해석과 구조 해석을 동시에 수행할 수 있다.

3.2 수치해석결과

전자기 성형에서 필요한 만큼의 변형량을 얻기 위해서는 전기적 상수들의 적절한 선택이 필요하다. 하지만 이 부분에 대한 정량적인 결과가 제시된 바가 없으므로 어느 정도의 전류가 필요한지를 파악하기 위해 입력 전류의 크기를 바꿔가면서 피가공물의 성형 정도를 시행착오를 거쳐서 파악하고 이를 바탕으로 성형 해석을 수행하였다. 그 결과 약 250,000A 의 입력 전류일 때의 전자기력으로 본 절에서의 자유 형상과 다음 장에서 언급할 덤플 형상을 충분히 성형할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이전 연구[7]에서 언급된 전기적 상수들을 참조하였다.

Table 2 Element details used for meshing of the model

Entity	Material	Specific Resistance(Ωm)	Density (kg / m^3)	Modulus of Elasticity(GPa)	Permeability	Finite Element	DOF
Infinite Boundary	-	-	-	-	1	INF111	A_x, A_y, A_z
Surrounding & Air Gap	Air	-	-	-	1	SOLID97	A_x, A_y, A_z
Coil	Copper	1.67×10^{-8}	-	-	1	SOLID97	$A_x, A_y, A_z, volt$
Workpiece	SUS 304	7.2×10^{-7}	8030	200	1	SOLID62	$A_x, A_y, A_z, volt$ U_x, U_y, U_z

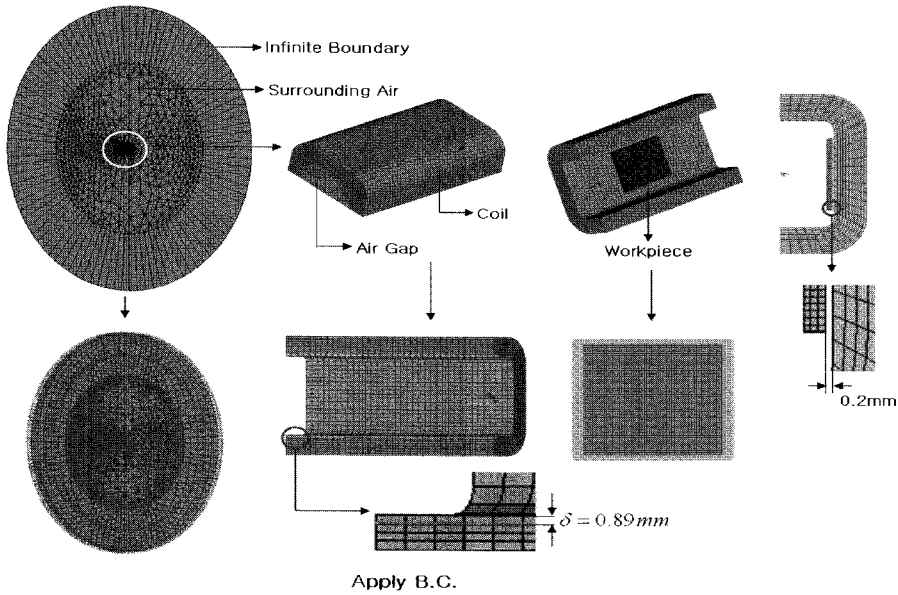
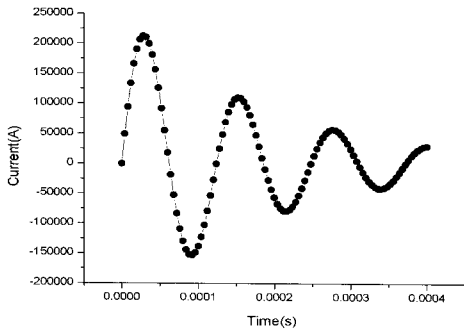
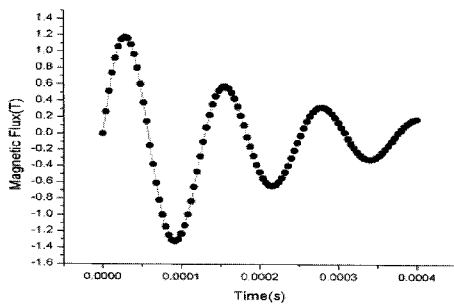


Fig. 5 Finite element model and its details for EMF simulation



(a) Input current



(b) Magnetic flux

Fig. 6 Input current and magnetic flux density, in the middle of the modeled coil length and the gap between the coil and workpiece

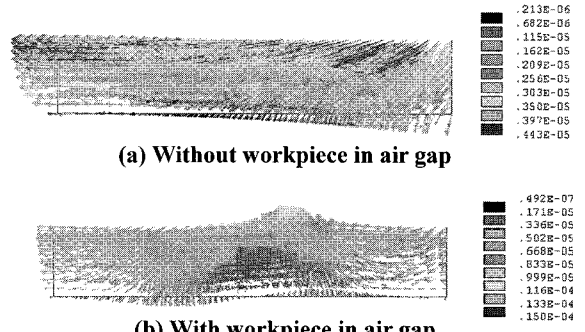


Fig. 7 Magnetic flux density distribution in air gap

Fig. 6은 입력 전류와 에어 갭(Air Gap, 코일 내부의 공기 존재 공간)에서의 시간에 따른 자기장의 변화를 나타낸 것이다. 입력 전류는 Fig. 6(a)에서와 같이 펄스 형태로 흐르며, 에어 갭에서의 자기장의 변화는 입력 전류의 거동과 유사하다.

코일의 전류에 의해 피가공물에 유도된 전류 흐름의 방향은 일정하며, 이는 전자기력이 피가공물에 일정하게 작용하는데 기여한다. 또한, 전자기력에는 자기장의 크기도 영향을 미치는데 Fig. 7에 피가공물의 존재 유무에 따른 에어 갭에서의 자기장을 나타내었다. Fig. 7(a)는 피가공물이 존재하지 않을 때이며, 자기장의 최대 세기는 4.43T이고 자기선속이 전체적으로 균일하게 분포한다. 반

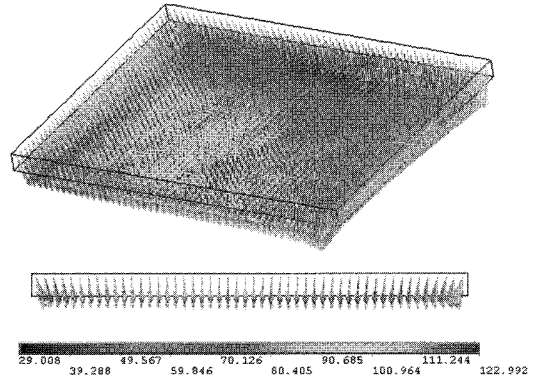
면에, 피가공물이 존재하는 Fig 7(b)를 보면 그 주위에 자기선속이 밀집되는 것을 볼 수 있고 자기장의 최대 세기 역시 15.0T 로 약 3 배 증가한다. 이는 피가공물의 유도전류로 인해서 자기장이 도체 속을 통과하지 못하기 때문에 국부적으로 자기선속의 밀도가 증가하기 때문이다. 또한, Fig. 7에서와 같이 코일과 피가공물이 대칭형상임에도 불구하고 자기선속이 비대칭적으로 구현되는 이유로는 코일로의 전류 흐름에 의해 자기장이 발생되고, 이 자기장의 흐름은 Fig. 7에서와 같이 우측에서 좌측으로 향하게 되며 피가공물의 주위에서는 유도 전류의 영향에 의해 반시계 방향으로 자기장이 형성되기 때문이다. 식 (1)에서 전자기력은 유도전류와 자기장에 의해서 그 크기와 방향이 결정되는데 국부적으로 형성된 강한 자기장은 유도전류와 함께 강한 성형력을 생성한다.

Fig. 8 은 피가공물에 작용하는 성형력이 최대가 되는 순간(12.8 μ s 일 때)의 전자기력과 입력전류가 최대치에 이르는 32 μ s 일 때 피가공물이 자유형상으로 가공된 모습이다. Fig. 8 에서 전자기력의 최대 크기는 약 123N 으로 성형력을 충분히 얻을 수 있음을 확인할 수 있었으며, 피가공물의 최대 변위는 5.349mm 로 나타났다. 자기 펄스는 1 μ s 의 정확도로 제어가능하며, 크기 역시 전자적으로 매우 정확하게 제어할 수 있다. 또한 자기 펄스의 유효시간은 약 30 μ s 이므로 본 해석 결과는 상당한 신뢰성을 가진다고 판단할 수 있었으며 전자기력을 이용한 박판 성형의 가능성을 확인 할 수 있었다.

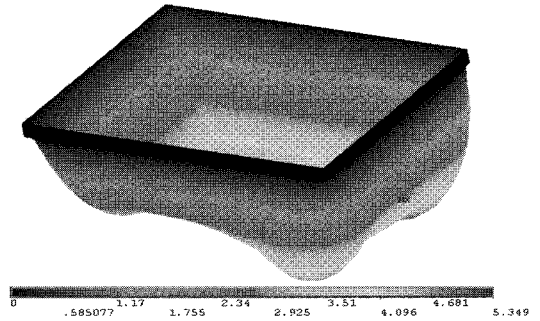
4. 딤플 형상 전자기 성형 해석

4.1 해석방법

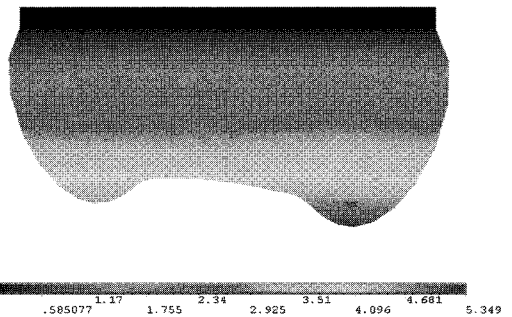
본 연구에 사용되는 LCM 은 타임 스텝(Time Step)의 선정이 중요하다. 타임 스텝 수를 많이 한다면 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있지만 해석 시간의 효율성을 고려한다면 무한히 많이 할 수 없다. 따라서 앞서 언급하였던 자유형상 전자기 성형 해석에 있어서 입력전류가 최대치에 이르는 32 μ s 를 해석 시간으로 하여 성형력이 최대치에 이르는 12.8 μ s 에서의 최대 절점력의 수렴성을 확인하였다. 또한 내연적 코드를 이용하여 딤플 성형 해석에 있어서 탄성 변형을 다루고, 이로부터 얻어진 절점력(Nodal Force)을 외연적 코드를 이용하여 딤플 성형 해석에 있어서 탄성 변형을 다루



(a) Electromagnetic force distribution in workpiece



(b) Simulation result : 3-D view



(c) Simulation result : side view

Fig. 8 Electromagnetic force distribution and deformation results by EMF

고, 이로부터 얻어진 절점력(Nodal Force)을 외연적 코드를 이용한 성형 해석에서의 성형력(전자기력)으로 사용하는 내연적-외연적 성형 해석 기법을 적용하였다. Fig. 9 에 타임 스텝에 따른 결과를 도시하였고 수렴성과 해석 시간의 효율성을 고려하여

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

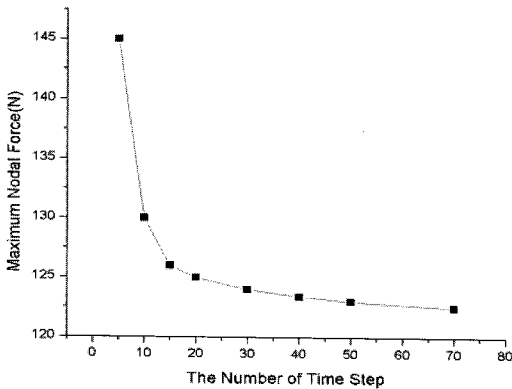


Fig. 9 Relationship between time step and Maximum nodal force

타임 스텝의 수를 50 으로 설정하였다. 이러한 타임 스텝에 따른 최대 절점력의 관계를 본 절에서 언급하고자 하는 딩플 형상에 대한 전자기 성형 해석에 동일하게 적용하였다.

4.2 형상 정의 및 유한요소 모델

본 절에서 언급하고자 하는 딩플 구조를 가지는 박판 성형을 위해 Fig. 10 과 같이 딩플 형상을 정의하였다. Fig. 10 에서의 딩플의 성형 깊이는 1mm 이며, 최대 폭은 4.28mm 그리고 최대 길이는 5.79 mm 이고, 사용된 소재의 두께는 0.5mm 이다. 이러한 딩플 형상은 피가공물의 두께에 비해 성형량이 많아 국부적 부위에서 연신이 크게 발생하여 성형공정에서 찢어지는 성형불량의 발생 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 전자기 성형 해석 결과에 대해 수치적 해석과 이론적 기반을 둔 성형한계선도를 이용한 성형성 평가를 하였다. 그리고 전자기 성형 해석 결과의 신뢰성을 검토하기 위해, 기존의 성형 방식인 프레스와 금형을 이용한 딩플 성형 공정에 대한 유한요소 해석을 부가적으로 수행하여, 딩플 성형 과정에서의 변형 형상을 비교·검토하였다.

일반적으로 소성가공에서는 재료의 소성영역에서의 거동에 관한 관심이 주를 이루고 있으며, 이와 같은 재료의 거동은 적합한 수학적인 관계로 표현이 가능하다. 탄성 변형을 무시할 수 있는 정도의 변형을 일으키는 강소성 가공경화 재료의 경우 금속 재료의 고유한 물성치인 소성강도계수 K 와 가공경화지수 n 으로 다음과 같이 정의된다.

본 연구에 있어서 사용된 박판 소재는 두께 0.5mm 의 SUS304 소재를 사용하였으며, 단순인장 시험을 통해 얻어진 물성계수는 Table 3 에 나타내었으며, 시험 결과로 얻어진 강소성 가공경화 관계식 $\bar{\sigma} = 1796.49\bar{\epsilon}^{0.591}$ (MPa) 을 유한요소 전자기 성형 해석에 사용하였다.

Table 3 Material properties of material

Material	SUS 304
Modulus of Elasticity (GPa)	200
Yield Strength (MPa)	215
Ultimate Strength (MPa)	505
Poisson's Ratio	0.29

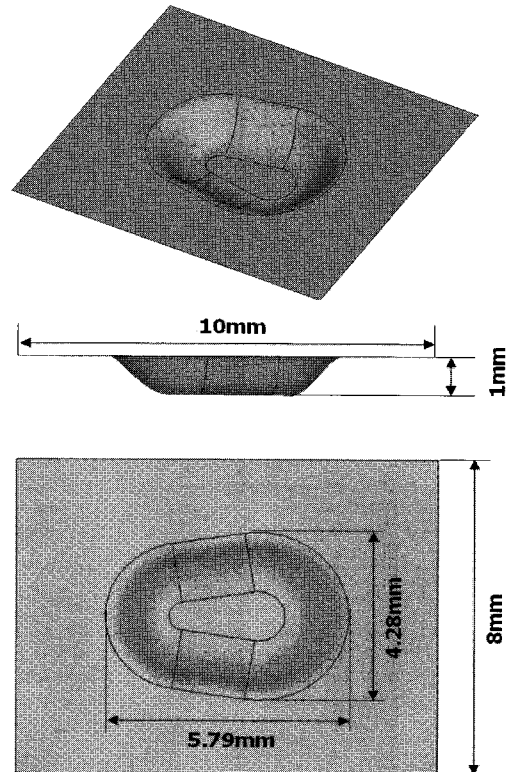


Fig.10 Specifications of dimple shape

두께 0.5mm의 박판 소재를 이용한 딴플 형상의 전자기 성형 해석을 위한 유한요소 모델을 Fig. 11에서와 같이 구성하였다. 즉, Fig. 11에서의 블랭크는 Fig. 8(a)에서의 블랭크와 동일한 형상과 크기를 가지며, 이때의 유한요소 모델은 동일하나 해석에 사용되는 요소의 타입은 다르게 하였다. 즉, 딴플 성형 해석에 있어서의 블랭크를 구성하는 요소는 외연적 3차원 구조 해석(3-D Structural Solid) 요소인 Solid 164 요소를 적용하였으며, 사용된 요소의 개수는 6,000개였다. 또한, 자유 형상 가공에 있어서 도출된 각 타임 스텝별 절점력을 딴플 형상 성형을 위한 절점력으로 동일하게 부여하였다.

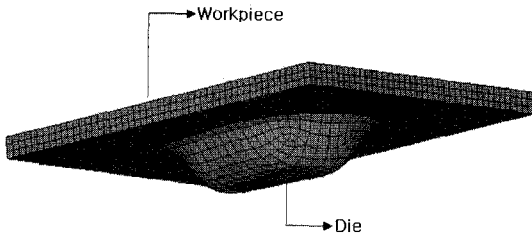


Fig.11 Workpiece and die of FE model for EMF

4.3 전자기 성형 해석 결과

4.1 절에서 제시한 해석 방법과 4.2 절에서의 딴플 형상을 이용하여 전자기 성형 해석을 수행하였다. 전자기 성형 해석에 있어서, 12.8 μ s까지의 타임 스텝별 절점력을 적용하여 외연적 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 성형해석을 수행하였고 후처리 과정은 LS-PREPOST를 사용하였다. Fig. 12에 전자기 성형에 의한 변형률 분포를 나타내었다.

4.4 프레스 성형 해석 결과

딴플 형상을 가지는 박판 성형 공정에 대한 유한요소 전자기 성형 해석 결과와의 비교를 위해 프레스를 이용한 박판 딴플 성형 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에 사용된 모델은 Fig. 10 및 Fig. 11과 동일한 모델을 이용하였으며, 해석에 사용된 소프트웨어는 외연적 프로그램인 LS-DYNA이었으며 후처리 과정은 LS-PREPOST를 활용하였다. Fig. 13에 프레스 성형 공정을 이용한 딴플 성형 공정에 있어서 변형률 분포를 나타내었다.

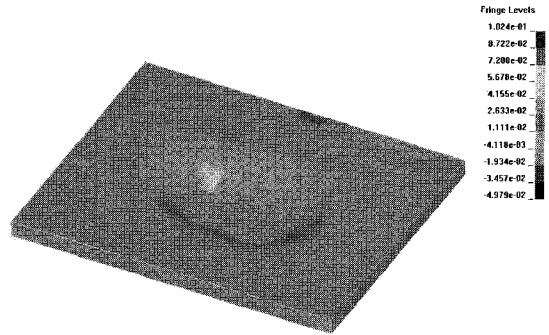


Fig.12 Effective plastic strain distribution by EMF process

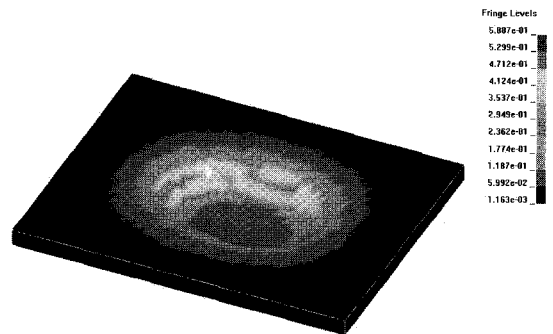


Fig.13 Effective plastic strain distribution by press forming process

또한, 전자기 성형 및 프레스 성형 공정에 대한 각 단계별 딴플의 변형 과정을 살펴보기 위해 Fig. 14와 Fig. 15에 딴플 형상의 변화와 단면의 형상을 나타내었다. 전체적으로 살펴보면, 변형이 동시 다발적으로 발생함을 알 수 있으며, 이로부터 판재의 유입에 의한 변형보다는 연신에 의한 변형이 지배적임을 알 수 있었다.

4.5 프레스 성형 및 전자기 성형 해석 결과 비교

4.3 절에서의 전자기 성형 해석 결과(Fig. 12 참조)와 4.4 절에서의 프레스 성형 해석 결과(Fig. 13 참조)를 비교해 보면, 유효변형률 분포가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 이는 프레스 성형 공정과 전자기 성형 공정이 전혀 다른 변형 거동을 내포하고 있다는 것을 의미한다. 즉, 프레스 성형의 경우 금형의 이동에 의해 피가공물의 변형이 발생하므로 금형과 피가공물이 접촉하는 부위에 주로 변형이 발생하는 특성을 가지게 되지만, 전자

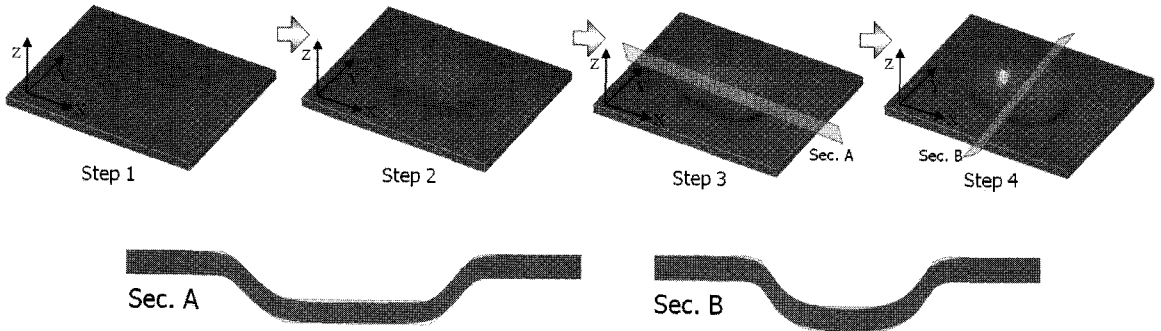


Fig.14 Simulation result and cross-sectional view of dimple forming by press forming

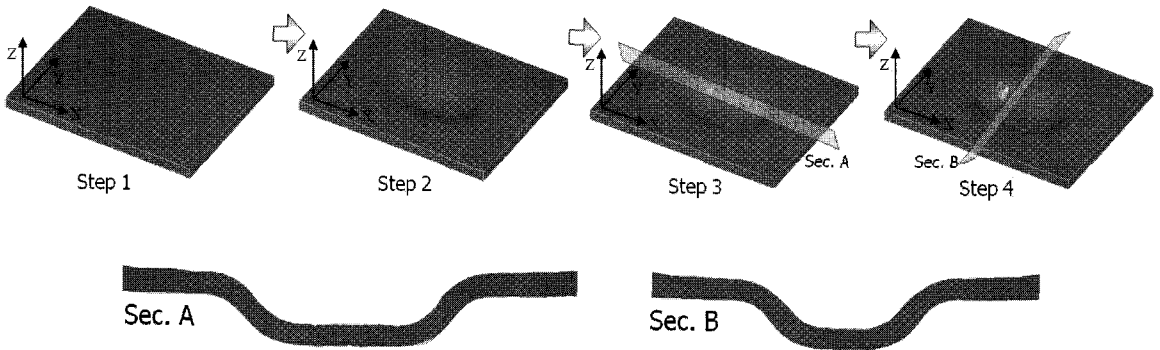


Fig.15 Simulation result and cross-sectional view of dimple forming by EMF forming

기 성형의 경우 피가공물 전체에 유도 전자기력이 작용하기 때문에 균일한 변형률 분포를 보이는 것으로 분석할 수 있었다.

그리고, Fig. 14와 Fig. 15에서 딤플의 측벽 부분에서 두께가 많이 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다. 특히, Fig. 15의 전자기 성형에 의한 변형 과정을 면밀히 살펴보면, 피가공물인 소재가 하부 금형을 침투한 것으로 나타났다. 이로부터 전자기 성형 공정이 프레스 성형 공정보다 동적 특성(Dynamic Effect)이 더 크다는 것을 유추할 수 있었다. 이러한 것들은 성형 과정에 있어서 성형 불량으로 이어질 수 있으며, 따라서 이러한 부분에 대하여 이론적인 근거를 바탕으로 한 안정성 검증이 요구되며 이를 위하여 본 연구에서는 성형한계선도를 이용하였다. 성형한계도에서는 도시된 변형률 데이터가 성형한계도선 아래에 존재할 경우 안전하게 성형이 될 수 있음을 의미한다.

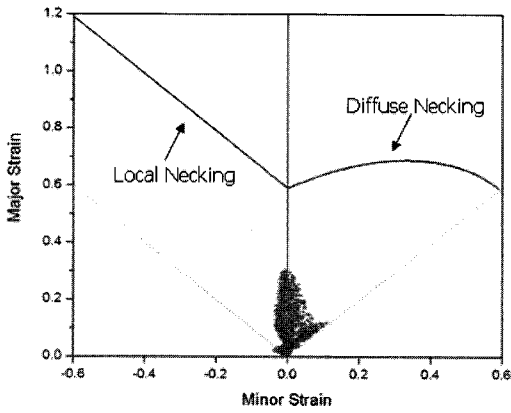
Fig. 16은 변형률 기반 성형한계선도(FLD : strain based forming limit diagram)를 나타내는데 프레스 성형과 전자기 성형 해석 결과로 판재에 해당하는 요소에서의 결과가 성형한계선도의 아래에 존재함을 알 수 있다. 따라서 딤플은 성형 불량없이 성형될 것으로 판단된다.

또한 성형 과정 중에 두께감소가 필연적으로 나타나게 되는데 Fig. 14와 Fig. 15에 도시되어 있는 X-방향과 Y-방향에 대해 피가공물의 두께(Z-direction) 변화를 Table 4와 Fig. 17에 나타내었다.

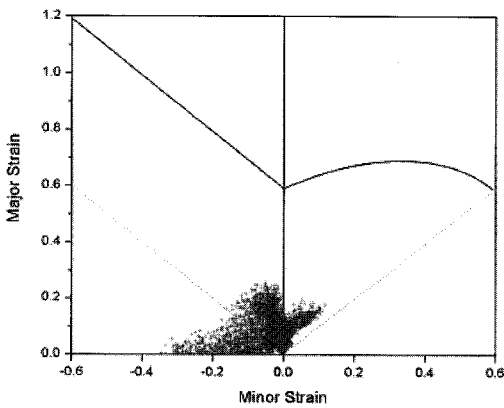
Table 4 Thickness distribution at each region

[unit: mm]

	Press Forming process			EMF process		
	Outside	wall	bottom	Outside	wall	bottom
X-direction	0	0.12	0.04	0.04	0.05	0.07
Y-direction	0	0.14	0.04	0.08	0.11	0.11



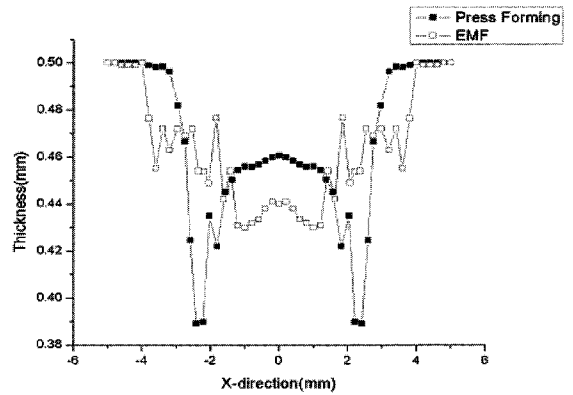
(a) Press Forming



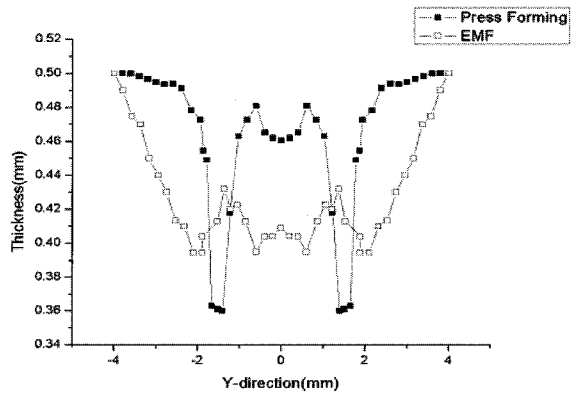
(b) Electromagnetic Forming

Fig.16 Evaluation of Formability using FLD

Fig. 17(a)를 살펴보면 프레스 성형시에는 덤플의 벽 부근에서 두께 감소가 약 0.12mm 발생하였으며 바닥 부근에서는 0.04mm 발생하였다. 또한 덤플 외곽 부분에서는 두께 감소가 거의 일어나지 않는 것으로 조사되었다. 반면에 전자기 성형시에는 피가공물에 전체적으로 성형력이 작용하므로 덤플 외곽 부분에서도 0.04mm의 두께 감소가 발생하였다. 하지만 덤플의 벽 부근에서의 갑작스러운 두께 변화가 일어나지 않으며 두께의 최대 크기는 약 0.05mm로 프레스 가공에 비해서 0.07mm 작게 일어남을 알 수 있었다. Fig. 17(b)에서도 전자기 성형시의 두께 감소가 피가공물에 전체적으로 일어나는 것을 확인할 수 있었으나, 벽에서의 최대 두께 감소량이 프레스 성형에 비해서 약 0.03mm 적게 일어남을 확인하였다.



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig.17 Comparison of thickness distribution between press forming and EMF simulations

이를 종합해 볼 때 프레스 성형과 전자기 성형 공정 모두 덤플의 측벽에서 두께 감소가 일어나지만 그 양은 전자기 성형 공정에서 작게 나타남을 알 수 있었다. 하지만 전자기 성형에서는 피가공물 전체적으로 두께 감소가 일어난다. 따라서 전자기 성형시에 자속 집중기(Field Sharper) 등을 이용하여 성형하고자 하는 부위에만 전자기력을 가해준다면 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전자기력을 이용한 판재 성형의 수치적 해석을 위한 초기 단계로 유한요소 해석 상용 프로그램인 ANSYS 10.0 이 제공하는 연성 해석 직접법(Coupled-Field Analysis Direct Method)을

사용하여 전자기장과 Structural-field 의 해석을 동시에 수행하였다. 그 결과로 판재 성형에 필요한 전자기력을 충분히 얻을 수 있었으며, 이를 바탕으로 LCM 을 활용하여 전자기력을 이용한 두께 0.5mm 인 박판에 있어서 딥플 형상 성형 해석을 수행하였고, 이를 프레스 성형 공정에 있어서의 해석 결과와 비교하였다. 프레스 성형과 전자기 성형 해석 결과의 안정성은 성형한계선도를 통하여 검증하였고, 이 두 가지 해석 결과에 대한 두께 분포를 비교·분석하였다.

전자기 성형에서 딥플의 벽에서 일어나는 두께 감소는 프레스 성형과 비교해서 약 0.04mm 작게 나타났다. 하지만 전자기 성형에서는 피가공물의 두께 분포가 불규칙적인 모습을 보이며 전자기력이 피가공물 전체에 가해짐으로서 성형력이 불필요한 부분까지 미치는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 성형 코일에 유도되어 피가공물에 에너지를 전달하는 자속집중기의 사용으로 극복할 수 있을 것이다. 또한 자기 필스에 잘 반응하는 알루미늄 중간재(driver)의 사용으로 전력 사용량을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 전자기 성형 해석의 초기 접근 방법으로써 전자기 성형 기술의 판재 성형으로의 적용 가능성 여부를 검토하고자 하였으며, 이에 따라 많은 제약 조건 및 가정을 수반하고 있다. 특히, 전자기 성형 기술은 초고속 성형 기술의 하나이기 때문에 재료의 변형 속도에 대한 연구가 필수적이며 이에 대한 연구가 향후 수행 될 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] M. Kamal, J. Shang, V. Cheng, S. Hatkevich, G. S. Daehn, 2007, Agile manufacturing of a micro-embossed case by a two-step electromagnetic forming process, *J. Mater. Process Tech.*, Vol. 190, pp. 41~50.
- [2] D. A. Oliveira, M. J. Worswick, M. Finn, D. Newman, 2005, Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet : Free-form and cavity fill experiments and model, *J. Mater. Process Tech.*, Vol. 170, pp. 350~362.
- [3] H. Suzuki, H. Negishi, Y. Yocouchi, M. Murata, 1986, Free expansion of tube under magnetic pressure, *J. JSTP*, vol.27, pp.1254~1260.
- [4] S. C. Chung, G. B. Choi, H. C. Sin, N. H. Kim, J. S. Lee, 1993, Analysis of Tube Compression with a Mandrel by Electromagnetic Forming, *KSME*, vol. 17, No. 2, pp. 371~379.
- [5] N. H. Kim, H. S. Son, W. S. Hwang, J. S. Lee, 1992, A Study on Electromagnetic Joining of Aluminum Tubes to Polyurethane Cores, *KSPE*, vol. 9, No. 1, pp. 66~74.
- [6] S. H. Lee, D. N. Lee, 1991, A Finite Element Analysis of Electromagnetic Forming for Tube Expansion, *KSME*, vol. 14, No 6, pp. 1872~1885.
- [7] A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos, 2005, Physical principles of electromagnetic forming process: a constitutive finite element model, *J. Mater. Process Tech.*, Vol. 161, pp. 294~299.
- [8] I. V. Belyy, S. M. Fertik, L. T. Khieneko, 1970, Electromagnetic metal forming handbook, The Ohio State University(M. Altynova, Translated from Russian, The Ohio State University, 1996).
- [9] ANSYS Release 10.0 User Manual
- [10] D. N. Lee, 1991, Principle and Application of Electromagnetic Forming, *Mechanics & Material*, vol. 3, No. 4, pp. 17~29.
- [11] J. S. Lee, 1988, The Electromagnetic Forming Method, *KSME*, vol. 28, No. 5, pp. 476-486.