전자기력 자유벌지 실험을 위한 성형코일 설계 및 3-D 해석비교

김홍교¹·노학곤¹·강범수¹·김 정[#]

Design of a Free Bulge Test Coil Using Electromagnetic Forces and Comparison between Experimental and Numerical Results

H. K. Kim, H. G. Noh, B. S. Kang, J. Kim

(Received June 23, 2014 / Revised August 13, 2014 / Accepted October 13, 2014)

Abstract

For electromagnetic forming(EMF) the most important feature is a forming coil which creates the electromagnetic force(Lorentz force), using current density and a magnetic field. Most previous papers have concentrated on the final configuration of the blank or the efficiency of EMF process. Studies focused on the design parameters affected by the forming coil performance have not been conducted. In order to design a suitable forming coil for an object, the current study uses LS-DYNA EM-Module to not only optimize the coil but also to examine the effect of coil performance. By this method a suitable forming coil was made and tested to determine whether or not good formability was achieved in a free bulge test Numerical analysis was also used. The workpiece was Al 1100-O with a thickness of 1.27mm and the coil was made from copper CW004A, which has good electrical conductivity and is suitable for electrical components.

Key Words : Electromagnetic Forming, Spiral-Type Forming Coil, LS-DYNA EM-Module, High Speed Forming, Lorentz's Force, Electromagnetic-Structural Coupling

1. 서 론

전자기 성형기술 (Electromagnetic forming)은 기존의 성형기술과는 달리 순간적으로 짧은 시간(50~200µs) 동안 고속으로(15~300m/s) 금속 가공물을 성형하는 (High speed forming) 기술이다. 성형코일에서 만들어지 는 자기장과 금속 가공물이 상호 영향을 일으켜 밀어 내는 전자기력(Lorentz's force)을 만들어 내고 이 힘을 이용하여 금속가공물을 성형하는 것이다. 전자기력은 가공물에 직접적인 물리적 접촉 없이 성형이 이루어 지므로 표면의 결함, 윤활, 마멸과 같은 문제없이 반 복적인 성형이 가능하며 기계적 성질은 그대로 유지 가 가능하다. 짧은 시간 고속으로 금속을 가공한다면 기존의 성형 방법보다 성형성이 좋아진다는 연구도 제시되고 있으며 하나의 코일로 여러 형상의 부품을 성형할 수 있는 장점이 있다[1,2].

이러한 장점을 이용하여 세계적으로 활발한 연구가 진행 중이다. 최근 경량화에 필요한 고강도강과 낮은 성형성의 알루미늄 합금의 문제를 개선하기 위한 공 법으로 전자기 성형기술과 이를 유한요소법을 이용하 여 예측 가능한 성형공정이 제시 되었다[3].

또, 기존의 유한요소법 해석은 실시간으로 변화하는 소재의 모양이 아닌 초기 판재형상을 이용하여 해석을 수행하였으나 최근에는 2차원 축대칭 문제 에 관하여 ANSYS를 이용하여 변화하는 소재의 모 양이 전자기장 및 성형력에 어떠한 영향을 미치는지

^{1.} 부산대학교 항공우주공학과 # Corresponding Author : Pusan National University,

E-mail : greatkj@pusan.ac.kr:

순차적 전자기-구조 연성해석을 통해 예측하는 연구 나, 또 주위 공기 영역 변형을 고려한 해석을 수행 하여 변형을 고려하지 않은 해석보다 더 정확한 결 과를 얻을 수 있는 연구 결과도 보고되고 있다[4~6].

한편, ANSYS를 이용하여 기존의 2차원 모델 해석 에서 발전한 3차원 축대칭 솔리드-쉘 모델해석을 수 행하였다. Bar type 성형코일을 이용하여 코일의 전류 밀도, 자속밀도, 전자기력의 분포를 파악하여 전자 기 성형시 소재의 거동 특성을 분석하였다[7].

지금까지의 연구는 주로 코일에서 만들어지는 전 류밀도, 자속밀도, 전자기력의 분포에 따른 소재의 거동, 해석의 효율성을 위한 단순화에 중점을 두고 연구를 진행하였지만 전자기력을 만들어내는 성형코 일의 어떠한 설계요소들이 전류밀도, 자기장, 전자기 력에 영향을 미치는지 구체적인 연구는 이루어 지지 않았다. 본 연구에서는 성형 목적에 맞는 성형코일 설계방법을 제시하고 이에 따라 만들어진 성형코일의 성형성을 검증하고자 한다. 전자기력을 이용한 공정 에서는 기계, 전자기등 다양한 물리적 현상을 고려해 야 하며, 이들을 모두 포괄하는 유한요소법 해석기술 이 필수적이다. LS-DYNA EM-Module은 기계, 전자기, 열적 거동을 종합적으로 예측할 수 있는 상용 프로그 램으로써 본 연구와 같은 기계, 전자기 연차적 해석 을 수행하는데 용이하다. 특히 기계적 해석은 유한요 소법(FEM) 전자기 해석은 경계요소법(BEM)을 적용 하여 기존에 널리 쓰이는 다른 상용프로그램보다 해 석 시간이 적게 소요되는 장점이 있다. 본 연구는 LS-DYNA EM-Module을 이용하여 성형코일의 전류밀 도, 자속밀도, 전자기력의 분포를 예측하고 이러한 요 인들이 성형시 어떠한 영향을 미치는지 유한요소법으 로 예측하고 실험을 통하여 검증을 하였다. 실험에 이용한 소재는 Al 1100-O 1.27mm이며 성형성은 자유 벌지(Free bulge) 실험으로 검증하였다.



Fig. 1 Schematic diagram of a free bulge test apparatus

2. 자유 벌지 성형코일 설계

2.1 성형코일 해석 모델

3-D 자유 벌지 실험에 사용할 Spiral-type 성형코 일 선정을 위해 LS-DYNA EM-Module을 이용하여 설계변수에 따른 코일 성능 분석을 하였다. 실험에 사용되는 금형은 축방향 단면이 Fig. 1과 같은 원기 둥으로 중심이 비어있는 두꺼운 파이프 모양이다. 외부 반지름은 130mm, 내부 반지름은 45mm이며 내부 원 가장자리는 반지름 15mm로 필렛(fillet) 하 였다.

코일 설계요소는 코일의 크기(반지름, 단면적)와 최대 전류 값으로 선정하였다. 코일의 반지름은 금 형을 기준으로 소재가 전자기력을 받아 성형이 가 능한 영역인 금형 중심의 빈 공간, 60mm 이하로 하였다. 코일의 단면적을 정하기 위해서는 장비 최 대 전류 값이 필요하다. 코일과 장비의 구성에 따 라 저항, 인덕턴스, 전기용량은 설계변수가 되어 결과적인 장비의 최대 출력전류를 기준으로 코일 을 선정 하였다. 현재 본 연구자가 보유한 장비의 최대전류 측정치는 논문을 참조하여 약 80kA로 알 수 있었다[8]. 도체는 단면적에 따른 저항의 영향을 받아 단면적에 따른 최대허용전류가 형성된다. 최 대전류 80kA에서 최소 단면적은 ASTM B285-08의 기준에 따라 50mm²로 설정하였다[9]. 이 단면적 값 을 기준으로 단면적의 가로, 세로, 그리고 균일한 성형력을 발생시키기 위해 조건별 코일간의 간격 을 일정하게 하는 회전 수를 변수로 설정하였다. 전자기 성형코일 선정 조건은 성형코일이 파손되 지 않으면서 코일의 전 영역에서 일정한 변형률 속도를 유지할 수 있는 고른 전자기력이 발생하는 것이다.

Table 1 Design	ı parameters fo	or selecting proper coil
----------------	-----------------	--------------------------

Case	Width	Height	Number of Turns
1	1mm	50mm	13
2	2mm	25mm	10
3	5mm	10mm	6
4	10mm	5mm	3
5	15mm	3.33mm	2



Table 2 Materials properties of CW004A and Al 1100-O

Material	Property	Value(Unit)	
Copper CW004A	Density	7940kg/m ³	
	Young's Modulus	117GPa	
	Poisson Ratio	0.35	
	Electrical	5.8500E+7	
	Conductivity	Siemens/m	
Al 1100-O	Density	2712kg/m ³	
	Young's Modulus	68.895GPa	
	Poisson Ratio	0.33	
	Electrical	3.445E+07	
	Conductivity	Siemens/m	

Table 1에서 선정한 성형코일의 성능 분석을 위해 Fig. 2와 같이 각각 모델링을 하였으며, 해석을 위한 물성치는 Table 2의 값을 적용하였다. 전류는 Fig. 2 (f)와 같이 12kV의 전압을 인가하였을 때 흐르는 전 류를 측정하여 코일의 안쪽부분에서 시작하여 바깥 부분으로 흐르게 하였다.

2.2 성형코일 해석 결과

코일을 통하여 인가되는 전자기력을 구하기 위해 서는 코일의 전류밀도와 자속밀도를 고려해야 한다. 식 (1)은 전류밀도로 다음과 같이 나타낸다.

$$J = -\sigma \frac{\partial A_{\sigma}}{\partial t} \tag{1}$$

A_θ는 마그네틱 벡터 포텐셜, σ는 전기 전도도를 나타낸다. 식 (1)을 통하여 전자기 성형시 코일에 흐르는 전류밀도를 구할 수 있고 식(2)을 통해 성형 시 생성되는 전자기력을 구할 수 있다.

$$F = J \times B \tag{2}$$

여기서, 자기장의 밀도 *B* 와 식(1)의 전류 밀도 *J*를 통하여 전자기 성형시 코일을 통하여 소재에 가해 지는 전자기력을 구할 수 있다.

해석결과로 코일의 전류밀도, 자속밀도, 전자기력 은 Table 3과 같이 나타났다. Table 3의 최대 값은 동 시간의 결과값이 아니다. 코일의 형상에 따라 저향, 인덕턴스값이 달라지므로 같은 전류를 인가하더라 도 다른 시간에 각각의 최대값이 나오기 때문이다.

자속밀도의 최대값은 Case 3, 자기장의 최대값은 Case 1이지만 전자기력은 식 (1)에서 알 수 있듯이 자속밀도와 자기장의 상호작용으로 발생되는 힘이 다. 그 결과 전자기력의 최대값은 Case 1에서 나타 났다. 하지만 과도한 전자기력은 코일의 기계적 안 전성을 해치므로 성형코일 제작에 사용되는 구리 CW004A의 0.2% 안정강도 200~340MPa내를 유지하 여야 한다[10]. Fig. 3 (f)의 적색 선이 안전강도를 나 타내며 안전강도 이하에서 최대 항복응력이 발생하 는 Case 3을 성형 최적 성형코일로 선정하였다.

Fig. 4은 코일 설계 Case 3을 기초로 만들어진 전 자기 성형 실험에 사용될 코일과 12kV전압을 인가 하였을 때 코일에 흐른 전류-시간 그래프이다. 이



Table 3 Current density, magnetic field and Lorentz force distribution and maximum value





Fig. 4 Forming coil based on analysis and input current with input voltage 12kV



Fig. 5 Electromagnetic forming apparatus (PNU_32)

그래프는 Fig. 5와 같이 구성하여 측정할 수 있다. 코일의 전류 입력부분에 로고스키코일 내부에 위치 시킨다. 성형장비 시스템에 전류가 흐르면 폐곡선으 로 이루어진 로고스키코일에 유도 기전력이 발생하 게 되고 그 유도 기전력은 시스템 내부에 흐르는 전류의 크기에 비례하여 나타나게 된다. 로고스키코 일에 흐르는 유도 전압을 오실로스코프로 측정하고 그 전압에 비례하는 전류를 알아냄으로써 성형코일 에 흐르는 전류를 측정할 수 있다. 선정된 성형코일 은 코일의 반지름 55mm보다 큰 95mm의 반지름을 가지는 하우징안에 들어갈 수 있도록 제작되었다. 코일은 하우징의 바닥으로부터 7mm이격된 곳에 위 치하며 코일의 절연과 전자기력으로 인한 물리적 영향을 최소화 하기 위하여 하우징에 에폭시를 넣 었다. 또, 이 에폭시는 항복응력 값을 넘은 전자기 력이 발생하였을 때 구조적 안전성을 가질 수 있도 록 코일을 고정시켜준다.

3. 자유 벌지 전자기 성형 유한요소 해석

앞서 선정된 성형코일을 이용하여 Table 4와 같 이 3가지 경우로 나눠 유한요소법을 이용한 자유 벌지 실험 해석을 하였다. 공통적인 실험 조건으 로는 Table 6의 파트 타입, Table 2와 Table 5의 물성 치를 적용 하였다. 코일은 소재와 7mm 떨어져 있 으며 각 파트 사이 공간은 공기로 간주된다. 접촉 하고 있는 소재-하우징, 소재-금형의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 코일이 하우징 안에서 에폭시로 고정된 것은 모든 자유도에 대해 구속으로 표현 하였다.

전자기 성형은 짧은 시간에 빠른 속도로 성형하는 기술로서 기존의 프레스 성형이나 단조 등과 달리 높은 변형률 속도에서 성형이 이루어지므로 기존의 준정적 응력-변형률이 아닌 동적 응력-변형 률이 필요하다. 또한 마찰에 의한 소재의 유입과 변형률 속도가 소재의 변형에 어떠한 영향을 미치 는지 알 필요가 있다. 이를 위해 식 (3) 변형률 속 도를 고려한 Cowper-Symonds 모델을 이용하였다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_{y} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{p}\right)^{m} \right]$$
(3)

 $\dot{\varepsilon}$ 은 유효변형률속도, p 와 m은 변형률속도 계수,

Table 4 Cases of numerical simulation		
Case	Blank Holder Force	Strain Rate
1	Not Applied	Not Applied
2	Not Applied	Applied
3	Applied	Applied

Table 5 Material relative permeability of CW004A, Al1100-O and Air used in electromagnetic FEM

Material	Value(Unit)
Copper (CW004A)	1
Al 1100-O	100
Free space(Air)	1

 Table 6 Each part materials types

Part	Material type	
Die	MAT_RIGID	
Forming coil	MAT_ELASTIC	
Blank	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTIC	

 σ_{v} 은 항복응력이다. 여기서 $p = 6500 \, s^{-1}, m = 0.25$ 이 다[11]. 이 식을 이용하여 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선을 만들었으며, 이 곡선들을 table로 유 한요소해석에 적용 하여 탄성영역 이후의 소성영역 소재 거동을 나타내었다. 위의 고려사항을 기초로 하여 첫 번째 해석은 Fig. 6와 같이 코일, 소재, 금 형만 있는 경우로써, 변형률 속도는 고려하지 않았 다. 두 번째 경우는 첫 번째 조건 Fig. 7와 같이 같 은 모습이지만 소재의 변형률 속도를 고려하여 해 석 하였다. 세 번째 경우는 Fig. 7과 같이 코일, 하 우징, 소재, 금형, 변형률 속도까지 모두 고려한 해 석을 진행하였다. 실제 사용되는 금형은 윗부분의 덮게 부분이 완전한 하나의 금형으로 체결되기 때 문에 소재의 윗부분에서 누르는 체결력이 존재한다. 이 누르는 힘을 하우징의 윗부분에 적용함으로써 실제 현상과 유사하게 구연하여 해석하였다. 체결력 은 코일의 자중 64.68N, 윗금형의 자중 440N, 볼트 의 보증하중(F_n) 71370N을 더하여 71874.7N을 적용 하였다. 보증하중은 식 (4)에 따라 얻을 수 있으며



Fig. 6 Numerical free bulge test model of case 1 and 2



Fig. 7 Numerical free bulge test model of case 3

*S_p*는 보증강도, *A*,는 인장응력에 대한 면적이다 [12]. 실험에 사용되는 볼트는 고탄소강 M8로 *A*,는 36.6mm², *S_p*는 650MPa 이다.

$$F_p = S_p A_t \tag{4}$$

4. 자유 벌지 전자기 성형 실험

실험에 사용되는 장비는 PNU_32로 Fig. 8과 같다. 전자기 성형장비는 333µF 용량의 커패시터 3개 병 렬 연결한 1세트를 직렬로 10세트 연결하였다. 최 대 출력 전압은 15kV이다. 이 커페시터 통제 장치 를 이용하여 커패시터에 저장된 전기에너지를 코일 로 방출하면 코일에 전류가 흐르고 전자기력이 발 생하여 전자기 성형이 이루어진다. 실험에 사용된 소재는 Al 1100-O 1.27mm이며 실험 조건은 해석과 동일한 전압, 체결상태를 유지하였다. 변형 완료된 소재는 3-D Scan을 통하여 변형된 단면을 측정하였 으며, 이를 유한요소법 해석결과와 비교하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 실험한 소재의 3-D Scan 단면과 해석 결과를 비교한 것이다. 그리고 실험과 해석결과에서 의 최대 높이를 Table 7에 정리하였다.

Case 1의 결과를 보면 16.92%의 오차가 나는 것을 볼 수 있다. 이러한 오차가 나는 이유는 식 (3)을 보



Fig. 8 Electromagnetic forming apparatus (PNU_32)



(c)

-3.221e-02 -3.629e-02

-4.037e-02

Fig. 9 Profile comparison between experiment and numerical results

면 알 수 있다. 응력은 변형률 속도에 따라 증가하 지만 기존의 인장시험기를 통하여 얻은 준정적 응 력-변형률 데이터는 변형률 속도가 낮은 영역에서 일정한 값을 유지하기 때문에 이 데이터를 적용시 키는데 한계가 있다. 변형률 속도를 고려한 Case 2 에서는 최대 높이 오차가 1.27%로 확연히 줄어든 것을 볼 수 있다. Case 3 에서는 변형률 속도에 체결 조건까지 구현한 것으로 최대높이의 오차는 5.76% 로 Case 2 보다 크게 나왔지만, 벌지의 경사도 부분 에서 더 정확하게 예측되는 것을 볼 수 있었다.





 Table 7 Comparison of the highest deformed height

 between experiment and numerical

Case	FEM	Experiment	Error
1	50.09mm		16.92%
2	42.29mm	42.838mm	1.27%
3	40.37mm		5.76%

5. 결 론

본 연구에서는 전자기력 자유 벌지 실험과, LS-DYNA를 사용하여 3-D 자유 벌지 공정 유한요소해 석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험 결과와 유한요소법을 이용한 해석결과의 차이는 실시간으로 변하는 변형률 속도를 정확하게 구현하지 못하는 것에 기인한다. 이를 위해 변형률 속도를 고려한 응력-변형률 선도를 획득하거나, 변 형률 속도를 고려하는 물성모델을 유한요소 해석에 적용해야 한다.

(2) Blank holder force(BHF)를 정확하게 측정한 값 을 사용하지 않아 소재의 자유 벌지 실험에서 소재 의 유입이 정확하게 구현되지 않았다. 또한 변형률 속도를 고려한다면 최대높이뿐만 아니라 변형된 경 사부분의 오차도 줄어들 것이다.

(3) 자유 벌지 실험을 정확하게 하기 위해서는 소재의 가장자리를 정확하게 잡아주는 장치(Blank holder)가 필요하며 정확한 실험을 위해서는 변형 률 속도가 일정할 수 있는 수단을 강구해야 할 것 이다. (4) Case 1이 가장 큰 전자기력이 발생하는 이유는 skin depth effect로 인한 가장자리로의 전류밀도 집중, 성형 코일 단면의 밑변이 작아 회전수가 많으므로 자속밀도 증가하기 때문이다. 전자기 성형코일 제작 시 skin depth effect를 이용하면 자속밀도를 부분적으 로 집중시킬 수 있어 중요한 설계 변수가 될 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원 으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012 R1A5A1048294)과 지역혁신인력양성사업(No. 2012H1B 8A2026095)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관 계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] H. G. Noh, H. G. Park, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2009, Effect of Process Parameters in Electromagnetic Forming Apparatus on Forming Load by FEM, J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 7, pp.733~740.
- [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, No. 1, pp. 38~43.
- [3] V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, 2011, Electromagnetic Forming-A Review, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 5, pp. 787~829.
- [4] J. Kim, H. G. Noh, S. J. Ko, T. J. Kim, 2012, Analysis of Electromagnetic Forming Using Sequential

Electromagnetic-Mechanical Coupled Simulations, Trans. Mater. Process, Vol. 21, No. 7, pp. 441~446.

- [5] A. El-Azab, M. Garnich, A Kapoor, 2003, Modeling of the Electromagnetic Forming of Sheet Metals: State-of-the-art and Future needs, J. Mater. Process. Technol., Vol. 142, No. 3, pp. 744~754.
- [6] J. Deng, C. Li, Z. Zhao, F. Tu. H. Tu, H. Yu, 2007, Numerical Simulation of Magnetic Flux and Force in Electromagnetic Forming with Attractive Force, J. Mater. Process. Technol., Vol. 184, No. 1, pp. 190~ 194.
- [7] J. Y. Shim, B. Y. Kang, D. H. Park, I. S. Kim, 2011, A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil, Trans. Korean Soc. Mech. Eng., Vol. 20, No. 3, pp. 292~297.
- [8] 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. 1~11.
- [9] ASTM, 2002, Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductor, ASTM B285-08.
- [10] BSI, 2012, Copper and copper alloys. Cast unwrought copper products, BS EN 1976:2012.
- [11] A. G Mamalis, 2006, Electromagnetic Forming Tools and Processes Condition: Numerical Simulation, Mater. Manuf. Processes, Vol. 21, No. 4, pp. 411~423.
- [12] A. C. Ugural, 2004, Mechanical Design : An Integrated Approach, 1st edition, McGraw-Hill/Higher Education, Boston., USA, pp. 572~627.