

순차적 전자기-구조 연성해석을 통한 전자기성형 공정 해석

김 정[#] · 노학곤¹ · 고세진² · 김태정²

Analysis of Electromagnetic Forming Using Sequential Electromagnetic-Mechanical Coupled Simulations

J. Kim, H. G. Noh, S. J. Ko, T. J. Kim

(Received August 27, 2012 / Revised October 15, 2012 / Accepted October 17, 2012)

Abstract

A sequential coupled field analysis of electromagnetic free bulging was performed by using FEM. A 2D axisymmetric electromagnetic model based on the magnetic vector potential is proposed for the calculation of magnetic field and Lorentz's forces. The Newmark integration method is used to calculate the transient dynamic plastic deformation of sheet during free bulging. In the finite element model, the effect of sheet deformation on the electromagnetic field analysis is taken into consideration. In order to confirm the sequential electromagnetic-mechanical coupling analysis, an experiment with an electromagnetic forming apparatus was conducted. The results showed that the final bulge height of the sheet predicted from the proposed method is in good agreement with experimentally measured height.

Key Words : Electromagnetic Forming, Sequential Coupling Simulation, Electromagnetic-Structural Coupling, ANSYS /Multiphysics, High Speed Forming , Morphing , Lorentz's Force

1. 서 론

전자기 성형기술(EMF, Electromagnetic forming)은 고속성형(High speed forming) 기술의 하나로서 강한 전이 자기장을 가공하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 물리적 접촉 없이 고속(15~300m/s)으로 금속을 성형하는 기술이다. 근래에는 자동차 경량화를 위해 사용되는 고강도강의 스프링백 또는 알루미늄 합금 등 낮은 성형성 문제를 개선하기 위한 방안 중 하나로서 전자기 성형 기술이 제시되면서 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2].

전자기 성형 공정설계를 위해서는 성형 코일에 따른 자기장과 전자기력의 세기와 분포, 가공물의

기계적, 열적 변형 거동 등을 예측할 수 있는 성형 공정해석이 반드시 필요하며 이를 위한 유한요소법과 같은 해석기술이 절실히 요구된다. 특히 전자기 성형해석은 기계, 전자기, 열을 모두 포함하는 다양한 물리현상에 대한 해를 동시에 구해야 하는 다중물리(Multi-physics) 문제로서 많은 계산비용과 각 물리 현상을 연계할 때 발생하는 오차로 인하여 해의 정확도를 높이는 것이 상당히 어렵다.

Haiping 등[3]은 ANSYS를 사용하여 2 차원 축대칭 축관에 대하여 순차적 연성해석을 수행하여 느슨한 연성(Loosely coupled) 해석보다 더 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 보였다. Unger 등[4]은 3 차원 전자기-구조 연성해석을 수행할 때 시간과

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원
2. 현대·기아연구개발총괄본부, 자동차강관개발TFT
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,
E-mail:greatkj@pusan.ac.kr

비용을 줄일 수 있는 효과적인 솔리드-셀 정식화와 전자기장 모델의 수렴조건 등을 제시하였다. Karch와 Roll[5]은 ANSYS를 이용하여 전자기력에 의한 축관 공정에 대하여 관재의 변형을 고려한 유한요소해석을 수행하여 실험결과와 잘 일치함을 보였다. 이와 같이 기존의 연구에서는 순차적 연성해석 결과의 정확도를 높이기 위하여 전자기력에 의하여 변형된 가공물의 형상과 그에 따른 주위 공기영역의 변화를 동시에 고려하여 전자기장해석을 수행하고 있지만, 소재 변형으로 인한 전자기장 및 성형력에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 ANSYS/Multiphysics를 사용하여 냉간압연강판(SPCC)의 자유벌지(Free bulge) 전자기성형에 대하여 순차적 전자기-구조 연성해석을 수행하여 소재 변형이 전자기장 및 성형력에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, 6.25kJ 용량의 전자기성형 장비를 사용한 자유벌지 실험결과와 비교하여 해석결과의 신뢰성을 보였다.

2. 전자기-구조 연성 유한요소해석

2.1 유한요소모델

우선, 전자기장 해석을 위한 전류 입력은 RLC 회로를 구성하여 코일에 속한 절점과 하나의 요소로서 연결시킨다. Fig. 1은 자유벌지 성형해석을 위한 유한요소해석 모델의 개념도를 보여준다. RLC 회로를 구성하기 위하여 ANSYS의 CIRCU124 요소를 사용하였으며, 저항 R 값은 0.01 Ω, 인덕턴스 L 값은 2.4μH, 커패시턴스 C 값은 500μF, 초기 커패시터 전압은 전자기성형 장비에서 직접 부가하는 전압값을 준다. 냉간압연강판(SPCC)의 자유벌지 전자기성형해석을 2 차원 축대칭 문제로 가정하고, 가공물 변형에 따른 공극과 주위 공기영역 변화를 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 모핑영역(Morphing region)을 지정하였다. 가공물과 주위 공기는 Z 축 자기 벡터 포텐셜(Magnetic vector potential, AZ) 자유도를 가지는 ANSYS의 PLANE53 요소를 사용하였으며, INFIN110 요소를 사용하여 무한 공간영역을 고려할 수 있도록 하였다. 코일은 회로-연성 전도체(Circuit-coupled massive conductor) 특성과 자기 벡터 포텐셜(AZ), 전류(CURR), 기전력(EMF) 자유도를 가지는 PLANE53 요소를 사용하였다. 자기 물성치로서 상대투자율(Relative permeability)은 공기와

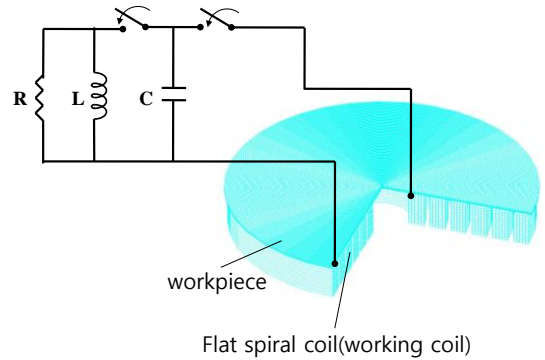


Fig. 1 Schematic view of finite element model with RLC circuit

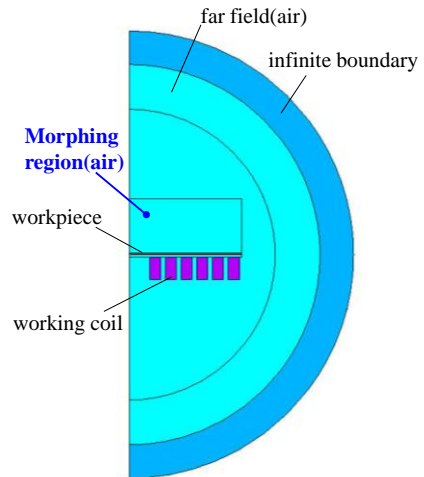


Fig. 2 Morphing region for updating electromagnetic field according to shape change

코일이 1, 가공물인 냉간압연강판이 100의 값을 가지도록 하였으며, 저항값은 코일이 1.72e-8 μΩ, 가공물은 1.43e-7 μΩ이다. 그림 3은 가공물, 코일과 주위 공기 중 모핑영역에 대한 유한요소모델을 보여준다. Fig. 4는 초기 전압을 3kV로 부가했을 때 커패시터를 통해 코일에 순간적으로 짧은 시간(900μs)에 최대 피크치 45kA의 대전류가 방전되고 있음을 잘 보여주고 있으며, 유한요소해석에 의한 예측치와도 잘 일치함을 알 수 있다.

2.2 전자기장 해석결과

초기 커패시터 전압을 5kV로 부가할 때, 가공물 변형에 따른 주위 공기영역 변화를 고려한 경우(실선)와 고려하지 않은 경우(점선)의 전류밀도(Current density)값의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

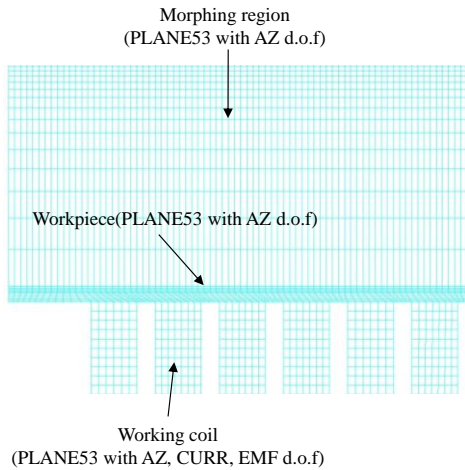


Fig. 3 Finite element model of the morphing region

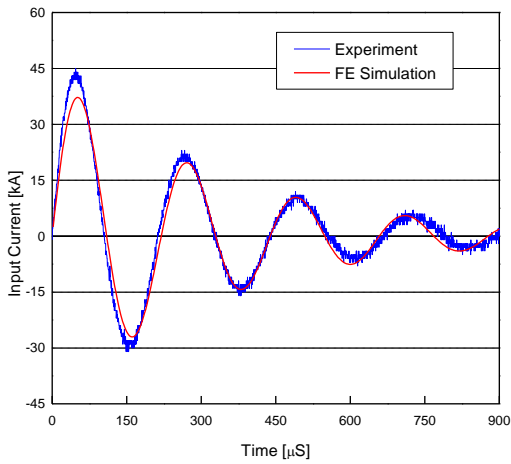


Fig. 4 Discharge current in the working coil with initial capacitor voltage of 3kV

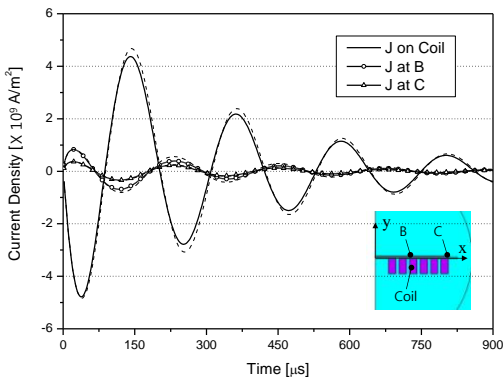


Fig. 5 Current density in the coil and the blank

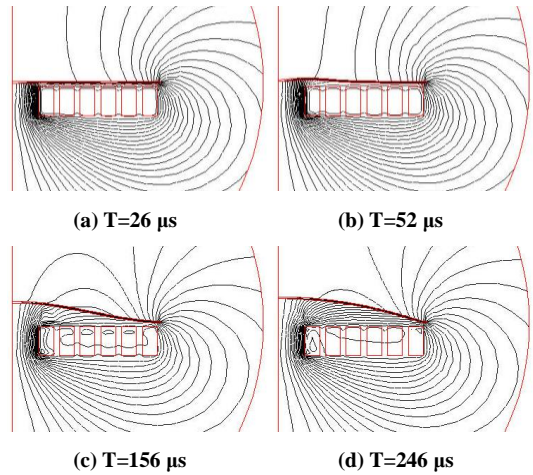


Fig. 6 Line contour of magnetic vector potential with different processing time

여기서 J 는 전류밀도를, B 와 C 는 가공물의 1/4 지점과 끝 단 부위를 의미한다. 가공물의 변형을 고려한 경우가 전류밀도치가 다소 낮음을 알 수 있다. ANSYS/Emag에서는 전류 밀도값의 부호가 음(-)인 경우가 코일의 단면을 기준으로 할 때 전류 방향이 지면을 뚫고 나오는 방향이며, Fig. 4와 같이 순간적으로 짧은 시간 이내에 감쇠하는 전류를 방전하게 되면 자속(Magnetic flux)의 변화로 인해 주위의 가공물에 유도 기전력이 발생하게 되는데, 이 유도 기전력에 의해 도체인 가공물에 입력 전류와 반대되는 유도 전류(Induced current)가 발생함을 Fig. 5(가공물 B, C 지점의 전류밀도 변화 참조)에서 잘 보여준다. 이러한 자기장내에서 전류가 흐르는 도체가 받는 힘을 로렌츠의 힘(Lorentz's force)라 하며, 이 힘이 전자기성형에서 가공력으로 작용하게 된다. Fig. 6은 성형시간에 따른 자기 벡터 포텐셜 분포 변화를 보여준다. 가공물의 변형에 따라 가공물과 코일사이의 공극이 점점 증가함을 알 수가 있으며, 자기 벡터 포텐셜 곡선이 조밀할수록 자기장의 세기가 크다.

Fig. 7은 성형시간에 따른 자속밀도(Magnetic flux density) 분포를 보여주고 있으며, 입력전류가 양(+)인 경우(Fig. 7(a), (b)와 (d))에는 자속밀도가 반시계 방향으로 분포함을 알 수 있으며, Fig. 7(c)와 같이 음(-)인 경우는 시계방향으로 분포한다. 입력 전류의 최대 피크치가 발생하는 $T=52\mu s$ 일 때, 자속밀도가 최대가 되며 그 값은 4.055Tesla

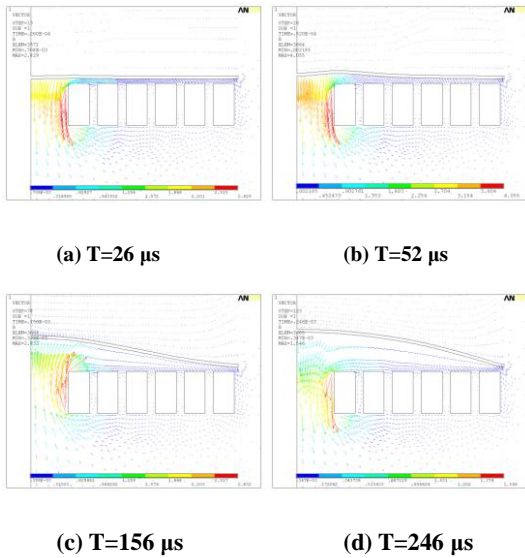


Fig. 7 Vector plot of magnetic flux density with different processing time

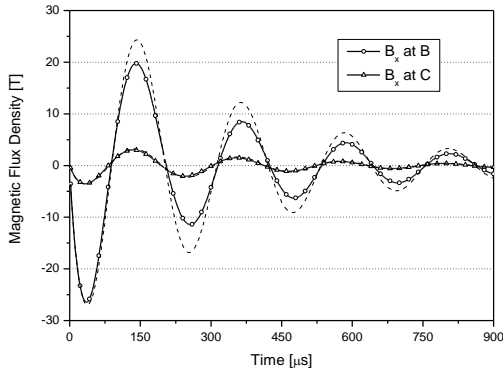


Fig. 8 Comparison of magnetic flux density with and without considering of shape change

(Wb/m²)이다. Fig. 7 과 같이 자기장이 변화하면 가공물에 Fig. 5 와 같이 유도전류가 흐르게 되고 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의하여 유도전류에 의한 기존의 자기장과 반대 방향으로의 자기장이 형성되는데, Fig. 8 은 유도전류에 의한 자기장의 세기를 가공물의 1/4 지점(B)과 끝단(C) 지점의 수평방향 자속밀도(B_x)로 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 가공물 변형에 따른 주위 공기영역 변화를 고려한 경우(실선)에는 최대 자속밀도가 19.75Tesla 이고, 고려하지 않은 경우(점선)가 24.32Tesla 로서 가공물의 변형에 기인하는 공극의

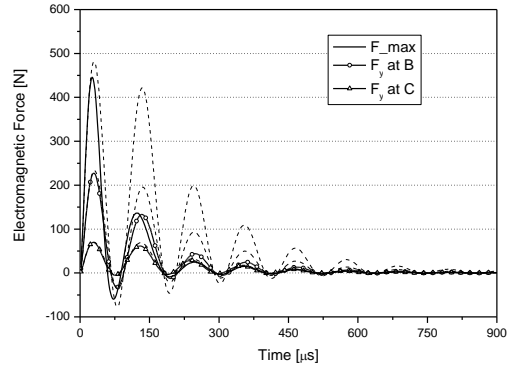


Fig. 9 Comparison of Lorentz's forces with and without considering of shape change

변화가 자기장의 세기에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 공극이 증가할수록 자속밀도가 낮아져 자기장의 세기 또한 낮아지게 되고, 동일한 입력전류 값에도 로렌츠의 힘이 작아지게 된다. Fig. 9 는 로렌츠력(F_y)을 나타낸 것으로서, 가공물 변형에 따른 주위 공기영역 변화를 고려한 경우(실선)에는 최대값이 446.6N 이고, 고려하지 않은 경우(점선)가 481.8N 으로서 한 주기 이내에는 차이가 크지 않지만, 두 번째 주기 이후에는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 가공물의 변형을 고려하지 않은 로렌츠력을 가공물에 작용하는 성형력으로 사용하게 되면 정확한 성형해석 결과를 도출하기가 어려울 수 있다.

2.3 자유벌지 성형해석결과

두께 0.7mm 인 SPCC 소재의 판재와 직경 100mm 의 가운데 구멍이 뚫려있는 금형을 사용하여 로렌츠력을 이용한 자유벌지 전자기성형 해석을 수행하였다. 실제 전자기 성형해석은 변형률 속도가 1000/s 이상의 초고속 성형으로서 변형률 속도에 의존적인 재료거동 모델을 사용해야 하지만 본 논문에서는 초기 커패시터 전압이 상대적으로 높지 않아 변형률 속도의 의한 영향은 무시할 수 있다고 가정하였다. 따라서 소재의 응력-변형률 관계식은 $\bar{\sigma} = 528.57\bar{\epsilon}^{0.23}$ 이고, ANSYS 에서 다중선형 등방성 가공경화(Multilinear isotropic hardening) 재료비선형 특성을 부여한 후 비선형 과도동적해석(Transient dynamic analysis)을 수행한다. 전자기장해석에 사용되었던 요소들은 모두 제거하고 가공물에 해당되는 요소들만 ANSYS 의 PLANE183 으로 대체한다. Fig. 10 은 전자기장 해

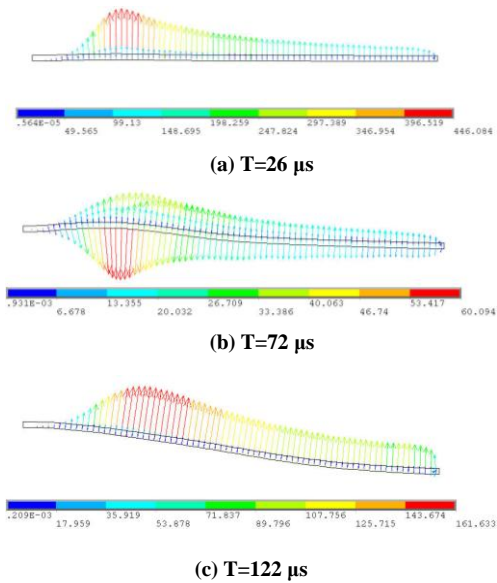


Fig.10 Load conditions transferred from Lorentz's forces

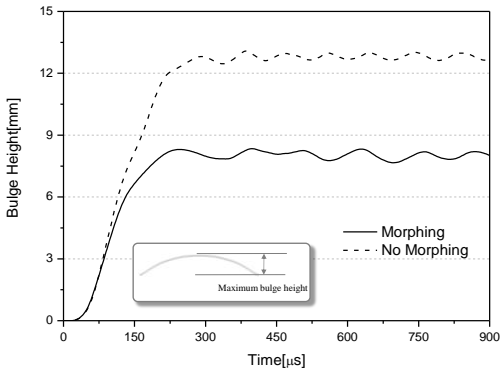


Fig.11 Comparison of maximum bulge height with and without considering of shape change

석결과인 로렌츠력을 가공물에 작용하는 하중으로 변환시켜 성형해석을 수행한 후 가공물의 변형된 모습과 그때의 변환된 하중분포를 보여준다. 가공물 변형에 따른 주위 공기영역 변화를 고려하지 않은 종전의 연구결과들에서는 하중이 초기 가공물 표면(수평면)에 항상 수직하게 작용하게 되지만, 가공물의 변형 형상을 고려하게 되면 하중이 수평면에 대하여 더 이상 수직하게 작용되지 않음을 알 수 있다. Fig. 11 은 성형시간에 따라 가공물의 정 가운데 지점의 자유 벌지 높이를 보여준다. 가공물 변형에 따른 주위 공기영역 변

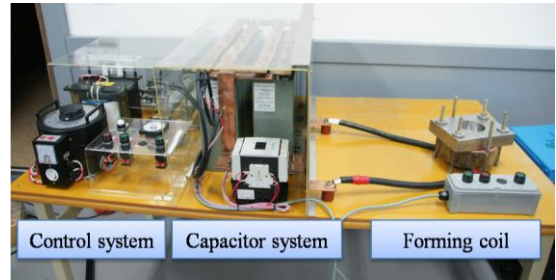


Fig.12 Experimental setup for free bulge test using electromagnetic forming

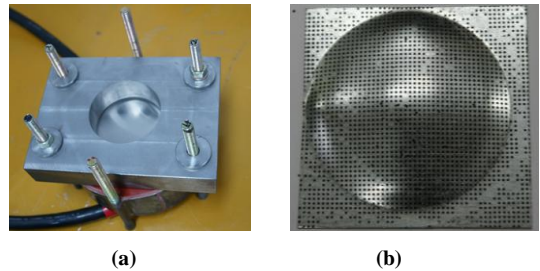


Fig.13 (a) Die and working coil, (b) deformed sheet under free bulge test

화를 고려한 경우(실선)의 최대 변형량이 대략 8.01mm 이고, 고려하지 않은 경우(점선)가 12.66mm로서 자유 벌지 높이의 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다.

3. 자유벌지 전자기성형실험

가공물 변형에 따른 주위 공기영역의 변화를고려한 전자기-구조 연성 유한요소해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 동일한 조건으로 자유벌지 전자기성형 실험을 수행하였다. Fig. 12 는 6.25kJ 용량의 전자기성형장비를 보여주고 있다. 본 장비는 50μF 용량의 커패시터 10 개를 병렬 연결하였고, 5kHz 의 공진 주파수를 갖도록 설계되어 있으며, 입력 전압에 따라 커패시터에 저장되는 에너지를 조절할 수 있도록 하였다. 성형코일은 5mm×10mm 의 단면을 가지는 구리를 이용하여 지름 110mm, 6 회 감긴 횡수를 가지도록 설계하였다. 또한, 성형코일은 에폭시(Epoxy)를 이용하여 절연을 시키고 금형과 성형코일은 볼트 체결방식으로 결합할 수 있도록 제작을 하였다. Fig. 13(a)에

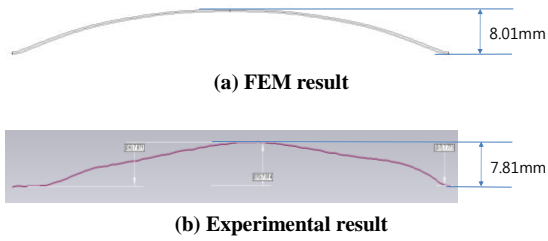


Fig.14 Comparison of deformed shape between FEM and experimental results

Table 1 Comparison of maximum bulge height between FEM and experimental results

FEM		Experiment	Error
Morph	8.01mm		
No morph	12.66mm		

성형코일 위에 체결된 자유벌지 금형을 보여주고 있으며, 5kV 입력 전압을 부가하여 전자기 성형된 소재의 변형된 모습을 Fig. 13(b)에 나타내었다. Fig. 14 는 유한요소해석과 전자기성형 실험에 의한 최종 변형된 단면 형상을 비교하였다. 전자기-구조 연성 유한요소해석에 의한 최대 벌지 높이가 8.01mm, 전자기 성형실험에 의한 벌지 높이가 7.81mm 로서 대략 2.6%의 오차를 보이고 있다. 표 1 에 가공물의 변형을 고려한 경우(Morph)와 그렇지 않은 경우(No morph)의 유한요소해석 결과와 실험치를 비교하였다. 표에서 알 수 있듯이, 전자기성형에 의한 소재의 변형거동을 정확하게 예측하기 위해서는 가공물의 변형을 고려한 전자기-구조 연성 유한요소해석을 수행하는 것이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 ANSYS/Multiphysics 를 사용하여 전자기성형에 의한 자유벌지 공정해석을 위하여 전자기-구조 연성 유한요소해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전자기성형에 의한 소재의 변형거동을 정확

하게 예측하기 위해서는 가공물의 변형을 고려한 전자기-구조 연성 유한요소해석을 수행해야 한다.

(2) 5kV 입력 전압을 부가한 0.7mm 두께 냉간압연강판(SPCC)의 자유벌지 성형공정에 대한 전자기-구조 연성 유한요소해석 결과는 최대 벌지 높이가 8.01mm 로서 실험결과인 7.81mm 대비 대략 2.6%의 오차를 보였다.

후 기

본 논문은 현대엔지니어링(주)의 지원을 받아 수행된 연구결과이고, 또한, 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2026095)으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [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] Y. U. Haiping, L. I. Chunfeng, D. E. N. G. Jianghua, 2009, Sequential Coupling Simulation for Electromagnetic-mechanical Tube Compression by Finite Element Analysis, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, No. 2, pp. 707~713.
- [4] J. Unger, M. Stiemer, M. Schwarze, B. Svendsen, H. Blum, S. Reese, 2008, Strategies for 3D Simulation of Electromagnetic Forming Processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 199, No. 1-3, pp. 341~362.
- [5] C. Karch, K. Roll, 2005, Transient Simulation of Electromagnetic Forming of Aluminum Tubes, Adv. Mater. Res., Vols. 6-8, pp. 639~648.