

전자기력을 이용한 박판 성형 공정 해석 및 성형성 평가

서영호¹ · 허성찬¹ · 구태완² · 송우진³ · 김 정² · 강범수[#]

Thin Sheet Metal Forming Process Analysis and Formability Evaluation using Electromagnetic Force

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

Abstract

Electromagnetic forming (EMF) technology, which is one of the high speed forming methods, has been used for the forming process in various industry fields. Numerical approach by finite element simulation of the EMF process is presented in this study. The implicit code is 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. In addition, the body forces generated in the workpiece are used as the loading condition to analyze deformation of thin sheet metal workpiece using explicit code. Numerical approach for a dimpled shape by EMF process is carried out and the simulated results of the dimpled shape by EMF are reviewed in view of the deformed shape and formability evaluation.

Key Words : Electromagnetic Forming (전자기 성형), Electromagnetic Force (전자기력), Coupled-Field Analysis (연성해석), Forming Limit Diagram (성형한계선도)

1. 서론

전자기 성형(electromagnetic forming : EMF)은 전자기장을 응용하여 금속을 성형하는 고에너지 · 고속 성형법의 하나이다. 이 방법은 비접촉 성형 방식이기 때문에 표면 결함, 윤활, 마멸 등의 문제가 없으며 기존의 프레스 성형으로는 불가능한 형태의 성형을 고속으로 수행할 수 있고 반복적인 성형도 가능하다. 이러한 전자기 성형법은 미국과 일본에서 많은 발전이 있었다[1~2]. 반면, 국내에서는 1990년대 초반에 수치적 연구가 시도되었으나, 실제 가공 공정에 적용되지 못하였으며, 아직까지도 기술기반과 관련 경험이 부족하여, 활용되고 있지 못하고 있는 실정이다.

지금까지의 전자기 성형 해석에 관한 연구에 있어서 사용된 해석 방법으로는, (1) 전자기 압력[3],

(2) Fully Coupled Method(FCM, [4]), (3) Loosely Coupled Method(LCM, [2])가 있다. 이 중에서 Fig. 1 과 같이 전자기 압력(magnetic pressure)을 수치적으로 계산하고, 이를 성형하중으로 간주하여 해석한 연구들이 주를 이루고 있다. 하지만 전자기 압력은 피가공물의 단위 부품 두께에 대한 하중 분포를 결정하지 못하므로 전자기 압력을 이용한 해석적 접근은 신뢰성을 가지지 못한다[5]. 또한 FCM을 이용한 연구는 모두 자유형상 가공이나 축관 혹은 환관 성형을 다루고 있다. 이는 접촉까지 고려한 전자기 성형 공정을 FCM으로 해석할 수 있는 프로그램이 없기 때문이다. 그리고, LCM은 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].

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

3. 부산대학교 산학협력단

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과

E-mail: bskang@pusan.ac.kr

박판 성형은 소재의 두께에 비해서 성형량이 많으므로 외연적 코드로 해석하여야 하며, 본 연구에서는 딩플(dimple) 형상에 대한 전자기 성형 해석을 수행하기 위해서 LCM인 내연적-외연적 접근법(implicit-explicit method)을 사용하였다. 이 방법을 사용하기 위해서는 우선 내연적 코드로 피가공물에 작용하는 전자기력을 해석하고, 이를 성형하중으로 활용하여 외연적 코드에서 성형 해석을 수행해야 한다. 따라서 본 연구에서는 내연적-외연적 방법을 이용한 딩플 성형을 위한 박판 성형 공정에 대한 수치 해석 결과를 보이고자 하였다.

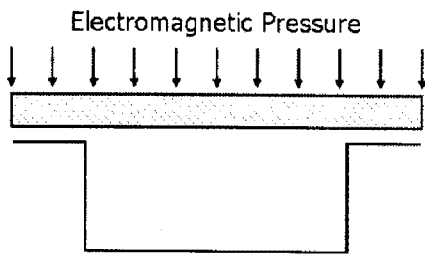


Fig. 1 Schematic view of electromagnetic forming using electromagnetic pressure

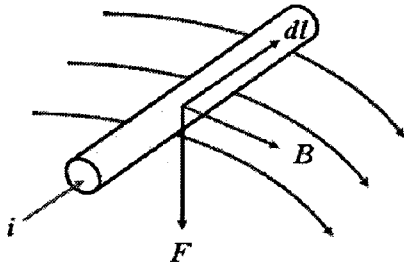


Fig. 2 The force that current affects a conductor in a magnetic field

2. 전자기 성형원리

2.1 기본원리

전자기 성형법은 축전기에 연결된 솔레노이드(solenoid) 코일 안의 전자기력(electromagnetic force), 즉 로렌츠 힘(lorentz force)을 이용하여 피가공물을 성형하는 방법이다. Fig. 2에서처럼 자기장으로 인하여 전류가 흐르는 도체가 받는 전자기력은 식 (1)과 같이 표현 가능하다.

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

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 유도 전류가 흐르게 된다. 이 유도전류는 식 (1)의 i 가 된다.

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

2.2 Skin Depth

실제 성형 공정에서 피가공물은 작업 온도에서 완전한 도체가 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 비교하여 전자기 성형의 적합성을 결정할 수 있지만 절대적이지는 않다. 스킨 깊이는 식 (3)과 같이 표현되며, 입력 전류는 load로서 코일의 스킨 깊이에 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.

3. 딩플 형상 전자기 성형 해석

3.1 전자기장해석

본 논문에 사용된 전자기장 해석모델은 Fig. 3과 같으며, Fig. 4는 피가공물에 작용하는 성형력이 최대가 되는 순간(12.8 μ s 일 때)의 전자기력과 입력 전류가 최대치에 이르는 30 μ s 일 때 피가공물이 자유형상으로 가공된 모습이다. Fig. 4에서 전자기력의 최대 크기는 대략 123N으로 성형력이 충분함을 확인할 수 있었으며, 피가공물의 최대 변위는 약 5.3mm이다.

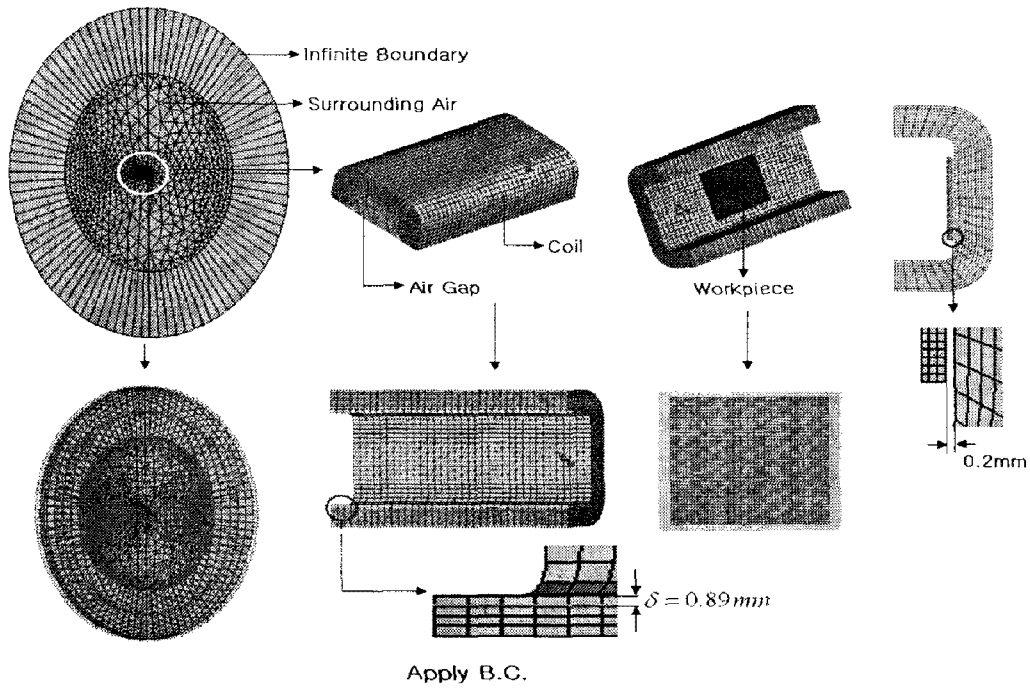
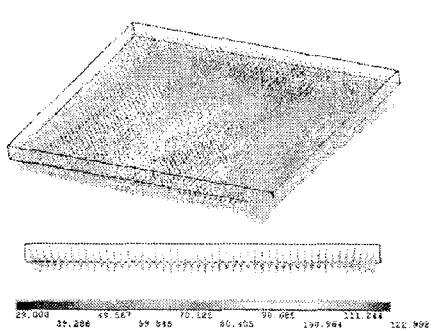
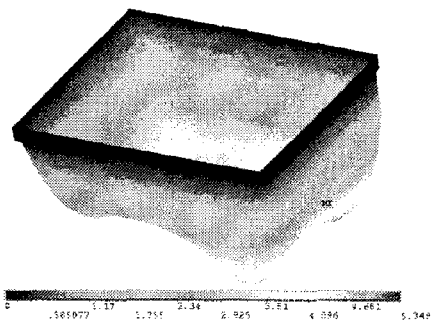


Fig. 3 Finite element model and its details for EMF simulation



(a) Electromagnetic force distribution in workpiece



(b) Simulation result : 3-D view

Fig. 4 Electromagnetic force distribution and deformation results by EMF

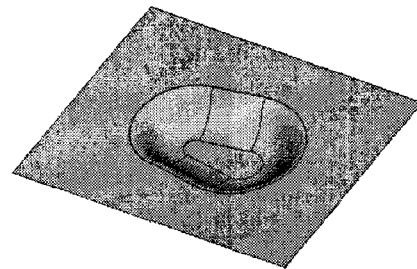


Fig. 5 Dimple shape

3.2 전자기 성형해석

본 연구에서는 3.1절로부터 얻어진 절점하중 (nodal force)을 외연적 코드를 이용한 성형 해석에서 성형력(전자기력)으로 사용하는 내연적-외연적 성형 해석 기법을 사용하였다. 뎀플 형상은 Fig. 5와 같으며, 해석 결과로서 전자기 성형 공정에 대한 뎀플 형상의 변화와 단면의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 성형된 박판에 대한 변형률 기반 성형한계선도(FLD : strain based forming limit diagram)를 보여주고 있으며, 전자기 성형 해석 결과 박판의 모든 요소에 있어서 주변형률이 모두 성형한계선도 하단에 존재함을 알 수 있다. 따라서 성형된 뎀플은 성형 불량 없이 가공될 것으로 판단된다.

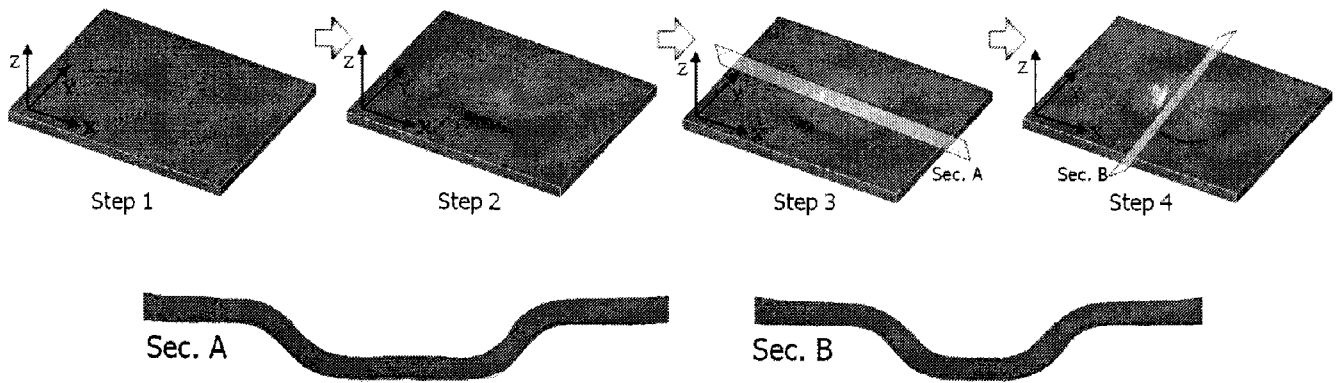


Fig. 6 Simulation result and cross-sectional view of dimple forming by EMF process

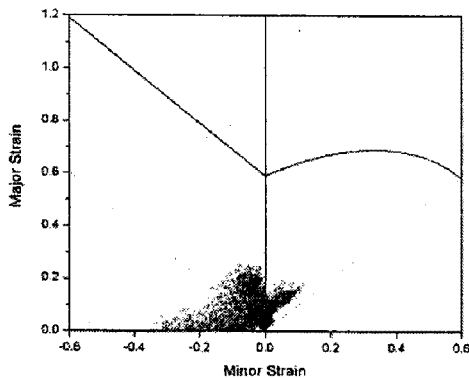


Fig. 7 Evaluation of formability using FLD

4. 결론

본 연구에서는 전자기력을 이용한 박판 성형의 수치적 해석을 위한 초기 단계로 유한요소 해석 상용 프로그램인 ANSYS 10.0 이 제공하는 연성 해석 직접법을 사용하여 전자기장 해석을 수행하였다. 그 결과로 박판 성형에 필요한 전자기력을 충분히 얻을 수 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 LCM 을 활용하여 전자기력을 이용한 두께 0.5mm 인 박판에 있어서 딤플 형상 성형 해석을 상용 프로그램인 LS-DYNA 를 이용하여 수행하였고, 전자기 성형 해석 결과의 안정성은 성형한계 선도를 통하여 검증하였다.

본 연구에서는 전자기 성형 해석의 초기 접근 방법으로써 전자기 성형 기술의 박판 성형으로의 적용 가능성 여부를 검토하고자 하였으며, 많은 제약 조건을 수반하고 있음을 확인하였다. 특히, 전자기 성형은 초고속 성형 기술의 하나이기 때문에 재료의 변형 속도에 대한 연구가 필수적이며 이에 대한 연구가 향후 수행될 것이다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과이며, 아울러 2단계 BK21사업 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] 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.
- [4] 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.
- [5] I. V. Belyy, S. M. Fertik, L. T. Khienko, 1970, Electromagnetic metal forming handbook, The Ohio State University(M. Altynova, Translated from Russian, The Ohio State University, 1996).