

# 수치적 변수들이 배면판을 이용한 고강도 강판의 전자기 성형 해석에 미치는 영향도 분석

박현일<sup>1,2</sup> · 이진우<sup>1</sup> · 이영선<sup>1</sup> · 김지훈<sup>2</sup> · 김대용<sup>#</sup>

## Sensitivity Analysis of Numerical Variables Affecting the Electromagnetic Forming Simulation of a High Strength Steel Sheet Using a Driver Sheet

H. Park, J. Lee, Y. Lee, J.H. Kim, D. Kim

(Received March 8, Year / Revised April 4, 2019 / Accepted April 8 2019)

### Abstract

Electromagnetic forming (EMF) simulations consider 3-dimensionally coupled electromagnetic-mechanical phenomenon using LS-DYNA, therefore the calculation cost is normally expensive. In this study, a sensitivity analysis in regard to the simulation variables affecting the calculation time was carried out. The EMF experiments were conducted to form an elliptically protruding shape on a high-strength steel sheet, and it was predicted using LS-DYNA simulation. In this particular EMF simulation case, the effect of several simulation variables, viz., element size, contact condition, EM-time step interval, and re-calculation number of the EM matrices, on the shape of elliptical protrusion and the total calculation time was analyzed. As a result, reasonable values of the simulation variables between the simulation precision and calculation time were proposed, and the EMF experiments with respect to the charging voltages were successfully predicted.

**Key Words** : Electromagnetic forming, 3-dimensionally coupled electromagnetic-mechanical phenomenon, LS-DYNA, simulation variable

### 1. 서 론

Maxwell [1]와 Lorentz [2]에 의해 전자기력 유도 이론이 발견된 후, 러시아에서 이를 이용하는 원천 기술이 개발되었고, 미국에서 Harvey와 Brower [3]에 의해 처음으로 전자기력인 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용한 전자기 성형(EMF: electromagnetic forming) 공정에 대한 특허가 등록되었다. 다음 Fig. 1은 대표적인 전자기 성형 장비의 외형을 나타내며, 해당 장비는 재료연구소(Korea Institute of Material Science)에 설치되어있다. 먼저, 코일 액츄에이터에 성형 시편을 장착한 후, 전원장치를 통해 고압 커패시터

(capacitor bank)에 고밀도의 전기 에너지를 충전한다. 충전 된 고밀도 전류가 트리거 시스템을 통해 마이크로 초 미만의 매우 짧은 시간 동안 코일로 방전 되면 전위차가 발생하게 되며, 자속의 시간 변화율 크기와 같고 방향은 반대인 유도 기전력(induced electromotive force)이 형성된다. 이를 패러데이 법칙(Faraday's law)이라 하며, 유도 기전력  $E$ 에 대한 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

여기서  $\Phi$ 는 방전으로 인해 발생한 자기장을 나타낸다. 이 유도 기전력은 코일 액츄에이터에 장착

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소, 변형제어연구실

2. 부산대학교, 기계공학부 정밀가공시스템전공

# Corresponding Author : Materials Deformation Department, Korea Institute of Materials Science, E-mail : daeyong@kims.re.kr, ORCID ID : 0000-0002-0786-718X

되어 있는 시편에 와전류(eddy current)를 유도 시킨다. 한편, 유도 코일에 전기가 흐르면, 앙페르의 오른손 법칙(Ampere's right hand screw law)에 의해 코일 도선을 기준으로 반 시계 방향으로 회전하는 자기장이 형성된다. 소재 위에 유도된 와전류와 코일 주변에 형성된 자기장 사이의 외적(cross product)방향으로 로렌츠 힘이 형성되고, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_L = I \times B \quad (2)$$

여기서  $F_L$ 가 로렌츠 힘일 때,  $I$ 는 소재 위에 유도된 와전류이며,  $B$ 는 코일 주변에 형성된 자기장이다. 이 로렌츠 힘을 이용해 고속으로 가속된 소재를 하형 금형(female die)에 충돌시켜 변형을 일으키는 공정을 EMF 공정이라 한다.

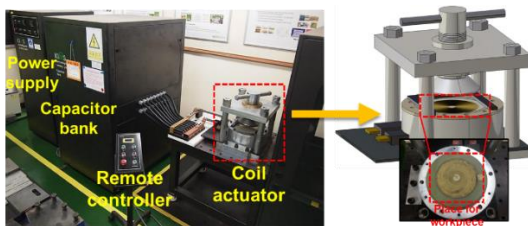


Fig. 1 Typical apparatus of EMF equipment

Boulger와 Wagner [3]는 EMF 공정의 잠재적 적용 가능성을 기술하였고, 로렌츠 힘의 크기 및 방향을 결정하는 코일의 배치와 모양에 따라 다양한 공정에 적용될 수 있음을 보여 주었다. 예를 들어 판금 나선형(spiral) 평판 코일로 형성되고, 튜브 부품은 와 선형(helix) 코일로 압축 및 팽창 될 수 있다. Erdösi와 Meinel [4]은 EMF 공정이 기계적인 성형 금형(forming die)이 아닌 로렌츠 힘에 의해 수행되기 때문에 금형 제작 비용이 절감되고, 윤활이 필요 없기 때문에 환경 친화적인 공정이라고 주장했다. 또한, Balanethiram et al. [5]은 EMF와 같은 고속 성형 공정에서의 높은 변형률은 소재의 성형성(formability)을 향상시킬 수 있다는 점을 밝혀냈고, Padmanabhan [6]은 EMF 공정을 이용한 판재 성형에서 스프링 백과 주름 감소가 관찰됨을 확인하였다.

최근 새로운 시스템의 등장으로 제기되는 부품화 과정에서, 기존 성형 공정으로 해결하지 못한 문제 해결을 위해 상기 언급한 코일의 형상에 따라

기존의 성형 공정으로는 접근 할 수 없는 공정에서의 적용, 고속 변형률에서의 성형성 증가와 스프링백 저감 효과 등의 EMF 장점들을 활용하고자하는 노력이 경주되고 있다. EMF 성형을 실 공정에 적용하기에 앞서, EMF 성형 도중 발생하는 공정 거동을 정확히 이해해야 한다. 그러나, EMF공정의 실제 소재 성형 시간은 마이크로 초 단위 미만이기 때문에, 이 짧은 시간 동안 공정 거동을 관측 하는 것은 쉽지 않다. 최근, 워털루대학의 Imbert와 Worswick [7]는 광자 도플러 속도계를 이용해 전자기 성형 도중 초고속 변위를 측정하는 연구를 수행하였고, 이를 통해 초고속 소재 물성 거동에 대한 이해를 높였다. 그럼에도 불구하고, 초고속 성형 도중 전자기 거동이나 열 등에 대한 측정 및 관측은 극히 제한적이며, 때문에 이를 위한 수치 해석이 필수 불가결하다.

기본적으로 EMF공정은 전자기 관계로부터 생성된 전자기력으로 소재를 변형 시키는 공정이다. 따라서, 전자기에 대한 물리현상, 전기저항으로 인해 발생하는 줄 열(joule heat)과 소재 변형 시 발생하는 소성 열을 고려하는 열에 대한 물리현상, 마지막으로 소재 변형에 대한 물리현상으로 구성된다. 수치 해석을 통해 EMF공정을 구현하기 위해서는 언급된 세가지 물리 현상들의 지배방정식들을 동시에 고려하면서 연계해야한다. 3차원에서 이러한 다 물리 현상 구현을 지원하는 대표적인 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA의 경우 전자기장(electromagnetic field)이 경계 요소 법(BEM: boundary element method)을 사용하여 고려되기 때문에 주변 공기에 대한 격자 요소를 모델링 하지 않아도 된다는 이점을 갖고 있어 EMF공정 해석에 다방면으로 이용되고 있다. 다 물리 현상을 고려한 3차원 EMF해석은 그 계산 시간이 여타 통상적인 성형 공정 해석에 비해 몇배 이상 소모되며, LS-DYNA에는 다 물리 해석 정밀도와 계산 시간에 영향을 미치는 몇몇 해석 변수들이 존재한다.

본 연구에서는 LS-DYNA의 다 물리 해석을 통해 EMF 공정을 구현할 때 영향을 미치는 해석 변수들에 대한 민감도를 분석하였다. 먼저, EMF 공정을 통해 고강도 강 판재에 타원형 돌출부(elliptical protrusion) 형상을 성형 하는 실험을 수행하였고, LS-DYNA 해석을 통해 이를 모사하였다. 이때, 여러 해석 변수들이 돌출부 성형 높이와 전체 계산 시간에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험 과정

### 2.1 소재 물성

본 연구에서는 EMF 를 사용하여 고강도 780 복합조직(DP: dual phase) 강관에 타원형 돌출부를 성형하는 실험을 수행하였다. 이때, DP780 강관은 높은 강도에 비해 낮은 전기전도도를 갖고 있기 때문에, 강도가 낮고 전기전도도가 높은 알루미늄 1050 합금(AA1050) 판재를 목표 소재의 성형을 돕는 드라이버(driver)로써 강관 하부에 덧대어 실험을 진행하였다. DP780 및 AA1050 판재의 두께는 각각 1.4mm 와 1.0mm 이고, 각 판재에 대한 물성은 일축 인장 실험을 통하여 획득하였다. 측정된 기계적 물성들은 전자기 물성들과 함께 다음 table 1 에 정리되었다.

Table 1 Material properties

	DP780	AA1050
Density (kg/m <sup>3</sup> )	0.0078	0.0027
Elastic modulus (GPa)	210	68.9
Yield strength (MPa)	546.9	89.3
Ultimate tensile strength (MPa)	832.4	107.7
Uniform elongation (%)	14.51	2.15
Total elongation (%)	23.89	6.01
Electric conductivity (mS/m)	3.5	35.6
Magnetic permeability (μH/m)	875	1.26

### 2.2 실험 설정

재료연구소에 설치되어있는 전자기 성형 장비가 사용되었고, 그 외관은 Fig. 1 과 같다. 전원 공급 장치, 고압 커패시터 뱅크, 코일 액츄에이터로 구성되어 있다. 고압 커패시터 뱅크는 약 673.6 μF 의 정전용량을 갖고 있고, 최대 약 119kJ 까지의 에너지를 저장 할 수 있다. 또한, 장비 가동 시 최대 약 17kV 까지의 충전 전압을 제어 할 수 있다. 또한 판재의 타원형 돌출부 성형을 위해 나선형 평판 코일이 삽입 되어있는 액츄에이터와 타원형 구멍이 가공되어 있는 개형 다이(open cavity die)가 사용되었다. 나선형 평판 코일은 30mm × 3mm 의 단면적을 갖고 있는 구리 스트립을 2.5mm 간격으로 15 번 감아 제작되었고, 절연과 함께 액츄에이터에 장착되었다. 코일

위에 장착된 DP780 및 AA1050 판재와 개형 다이의 모습과 각 부분들의 세부 치수들을 Fig. 2 에 나타내었다. 실험 중 장비 회로에 흐르는 전류 파형은 오실로스코프(digital storage oscilloscope)와 로고스키 코일(Rogowski coil)을 통해 측정되었다. 실험은 충전 전압을 약 3.98kV 에서 8kV 까지 순차적으로 올려가며 진행되었고, 성형 후 시편의 형상은 3 차원 접촉식 스캐너를 사용하여 측정되었다.

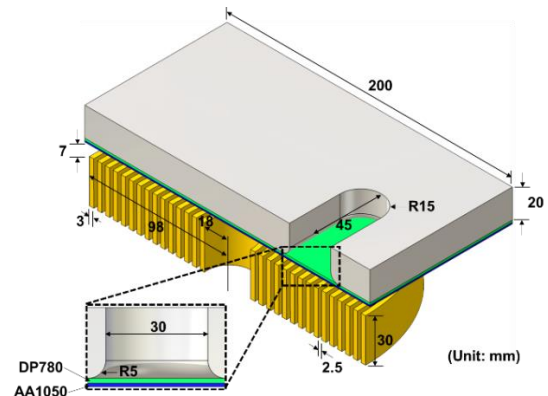


Fig. 2 Apparatus of tool sets and spiral coil

## 3. 해석 방법

### 3.1 해석 모델링

본 연구의 목적은 해석 변수들이 돌출부 성형 형상과 계산 시간에 미치는 영향을 분석하는 것이기 때문에, 단열이라고 가정하여 계산 시간에 영향을 미치는 열 물리현상을 배제하였다. 때문에 전자기와 변형 현상만이 고려되었으며, 전자기 현상의 경우 내연적(implicit) 방법으로, 변형 현상은 외연적(explicit) 방법으로 해석이 수행되었다. 또한, 전자기장(electromagnetic field)은 경계 요소 법(BEM: boundary element method)을 통해 계산이 진행되므로, 유한요소 격자 모델링이 필요 없지만, 코일의 전류와 소재에 유도되는 와전류의 흐름은 유한 요소 법(FEM: finite element method)으로 고려되기 때문에 전도체의 육면체 격자 요소 화가 필요하다. Fig. 3 에 타원형 돌출부 성형을 위한 EMF 모델의 유한 요소 모델을 나타내었다. DP780 과 AA1050 판재 및 나선 코일을 포함한 모든 전기 도체들은 전자기 와 기계적 계산을 동시에 처리 할 수 있도록 육면체 요소화 되었다. DP780 판재는 1.5mm x 1.5mm x 0.5mm 요소 53,067 개로 이산화 되었고 AA1050 판재는

1.5mm × 1.5mm × 0.5mm 의 요소 35,378 개로 이산화되었다. 나선 코일은 3.0 mm × 3.0 mm × 0.7 mm 의 요소 36,440 개로 이산화되었다. 반면에, 상부 개형 다이와 하부 홀딩 다이는 3.0 mm × 3.0 mm 의 크기를 갖는 사각 면 요소로 구성되었고, 각각 2,156 개 및 1,600 개로 이산화되었다. 판재와 다이 사이에는 면 대 면(surface-to-surface) 접촉 조건이 설정되었고, 금속 판재 성형 시 통상적으로 사용되는 0.1 의 마찰계수가 적용되었다[8]. 나선 코일과 상 하부 다이들은 강체로 간주되었고, 각 판재들은 변형체로 설정되었다.

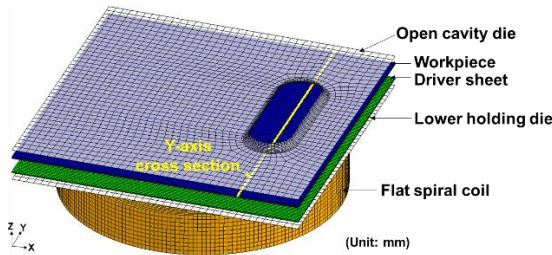


Fig. 3 Finite element meshes

DP780 판재의 변형률 속도 영향을 고려한 경화 거동을 적용하기 위해, Hollomon 과 VOCE 모델 항 및 변형률 속도 항으로 이루어져있는 H/V-R 경화 모델이 적용되었고, 다음 식 (3)으로 주어진다[9].

$$\sigma = \left[ \alpha(\dot{\epsilon}) F \epsilon^n + (1 - \alpha(\dot{\epsilon})) (G - J \exp(-L\epsilon)) \right] \cdot \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{m_1 + m_2 \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

여기서,

$$\alpha(\dot{\epsilon}) = \alpha_1 - \alpha_2 \ln(\dot{\epsilon}) \quad (4)$$

이며, 식(3)-(4)에서  $F, G, J, L, m_1, m_2, \alpha_1, \alpha_2$  는 경화 변수들이고,  $\epsilon$  과  $\epsilon_0$  은 변화하는 변형률과 준 정적 변형률을 의미한다. 또한, AA1050 판재의 경우 Mukai et al.[10] 의 연구에 따르면 변형률 속도 민감도가 크지 않다고 알려져 있기 때문에 VOCE 모델을 통해 준 정적 경화 거동만 모사 되었다. 식(3)에서  $\alpha(\dot{\epsilon})=0$  이라면 Hollomon 모델 항이 삭제 되고, VOCE 모델이 된다. 각 판재들에 대한 경화 변수들을 다음 Table 2 에 나타내었고, 피팅(fitting)된 경화 곡선들을 Fig. 4 에 나타내었다. 실험에서 오실로스코

프로 측정된 전류 파형들이 입력되었고, Kamal 과 Daehn 의 연구에 따르면[11], EMF 공정에서 소재를 성형하는 대부분의 로렌츠 힘은 장비에 인가된 전류 파형의 약 첫번째 최대 점 에서 발생하기 때문에, 본 연구에서는 측정된 전류 파형의 첫번째 최대 점 까지만 해석을 수행하였다. 해석에 입력된 충전 전압 별 전류 파형들을 Fig. 5 에 나타내었다.

Table 2 Hardening parameters

	DP780	AA1050
$G$	572.4	110.7
$J$	191.0	16.2
$L$	37.88	209.2
$\alpha_1$	0.189	-
$\alpha_2$	-0.0005	-
$F$	4007.7	-
$n$	0.241	-
$m_1$	0.0126	-
$m_2$	0.0007	-

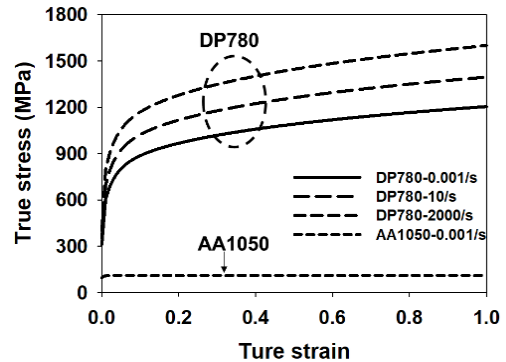


Fig. 4 Fitted hardening curves

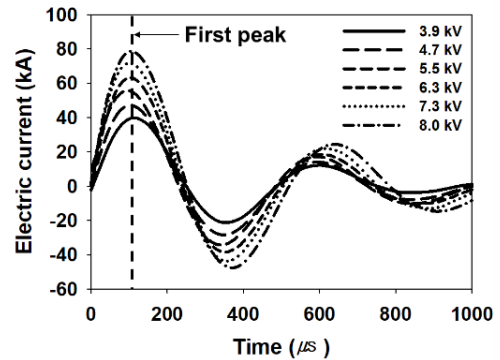


Fig. 5 Input electric current profile

### 3.2 해석 조건

해석 결과와 계산 시간(hr.)에 영향을 미치는 다양한 변수들에 대한 민감도를 분석하였다. 각각, 소재 요소의 평면(plane) 크기, DP780 판재와 AA1050 판재 사이의 접촉 조건 종류, 전자기 솔버의 시간 증분(EM-time step) 간격, 전자기 행렬의 재계산 간격인 N-cycle, 마지막으로 소재의 소성 이방 성에 대한 영향을 분석하였고, 각 변수들에 대한 세부 조건들을 Table 3 에 나타내었다. 충전 전압을 7.3kV 인가했을 때의 실험에서 측정된 전류 파형을 입력하여 민감도 해석을 수행하였고, Fig. 3 의 Y 축 기준 절단면(Y-axis cross section)의 형상을 계산 시간과 함께 비교하였다.

**Table 3 Condition variation**

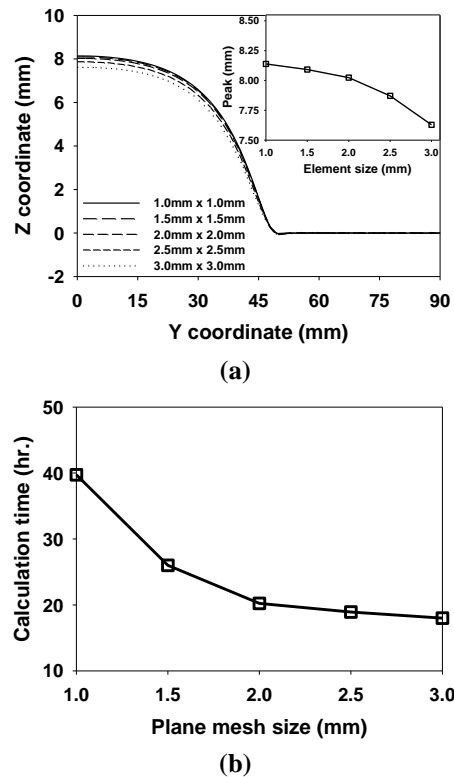
No.	Type	Variation (mm)
1	Element size in plane	1.0mm × 1.0mm,
		1.5mm × 1.5mm,
		2.0mm × 2.0mm,
		2.5mm × 2.5mm,
		3.0mm × 3.0mm
2	Contact conditions between DP780 and AA1050 sheets	Perfectly bonded (node share) solid-solid,
		Separated solid-solid,
		Separated shell-solid
3	EM-timestep interval	0.1μs, 0.5μs, 1.0μs,
		1.5μs, 2.0μs, 2.5μs,
		3.0μs, 3.5μs, 4.0μs
4	N-cycle	1, 5, 10, 15, 20, 25, 50,
		75,100

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 변수 민감도 분석

DP780과 AA1050 판재들의 평면 요소 사이즈에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 요소 크기에 대한 돌출부 성형 형상의 변화를 나타내는데, 요소 크기가 증가함에 따라 변형 가능한 질점의 수가 감소하기 때문에 일종의 강성 증가를 야기하여 성형 높이도 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 요소 크기가 2.0mm × 2.0mm보다 커지면서부터 크게 감소하는데, 2.5mm × 2.5mm일 때의

성형 높이 감소 비율은 그 전에 비해 2배 가량 증가함을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 요소 크기에 대한 계산 시간의 변화를 보여준다. 요소 크기가 1.0mm × 1.0mm일 때는 40시간 소모되지만 1.5mm × 1.5mm일 때는 크게 줄어들어 25시간, 2.0mm × 2.0mm보다 커지면 20시간 안팎으로 수렴하게 된다. 따라서, 계산 시간을 줄이기 위해 요소 크기를 2.0mm × 2.0mm보다 키우는 것은 큰 의미가 없음을 알 수 있다. 돌출부 성형 높이를 잘 구현하는 해석 정확도와 계산 시간 감소 효율을 고려했을 때의 합리적인 요소 크기는 1.5mm × 1.5mm ~ 2.0mm × 2.0mm라고 판단된다.



**Fig. 6 Effect of plane element size: (a) protrusion shape and (b) calculation time**

전기전도도가 높고 강도가 낮은 AA1050 판재를 목표 소재를 변형시키는 드라이버(driver)로써 DP780 판재 밑에 덧대어 EMF공정을 진행하였다. 때문에 드라이버와 목표 소재 간 접촉 조건을 고려하여야 한다. LS-DYNA를 이용한 EMF해석을 수행 할 시, 기계적인 접촉을 고려하면서 전자기 해석을 수행하는 것은 아직 불가능하다. 따라서, 목표 소재와 드라이버의 전류 거동을 동시에 분석하기 위해서는

둘 간 접촉면의 질점을 공유 시켜 하나의 몸체로 해석을 수행해야한다. Fig. 7(a)는 목표 소재의 드라이버 간 기계적 접촉을 고려하여 해석을 수행했을 시, Fig. 7(b)는 질점 공유로 해석을 수행했을 시, 목표 소재의 전류 거동을 나타낸다. 기계적 접촉을 고려하면 목표 소재 위의 전류 거동이 전무한 것을 확인할 수 있다.

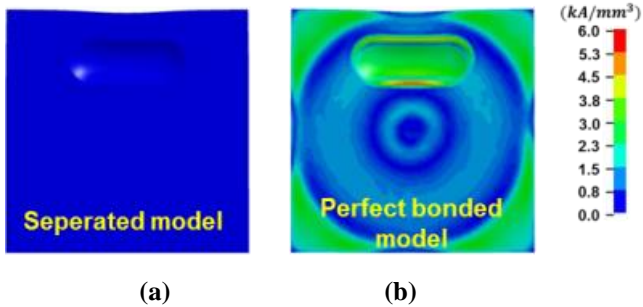


Fig. 7 Electric current density distribution: (a) separated model (consider the mechanical contact) and perfect bonded (node share on the contact surface) model

반면, 전자기 거동을 분석할 필요가 없거나, 성형 대상의 형상 구조가 복잡하여 드라이버의 형상과 많이 달라, 질점 공유가 쉽지 않을 경우에는 기계적 접촉 거동을 고려하고 전자기 거동 해석을 수행하지 않는다. 접촉 조건에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 접촉 조건에 대한 돌출부 성형 형상의 변화를 나타내는데, 일체형으로 해석을 수행했을 때의 결과가 가장 낮은 성형 높이를 보여주었다. 이는 목표 소재의 전류 거동이 성형에 영향을 미치는 정도가 미미하다는 것을 의미한다. 또한, 목표 소재가 육면체 요소 일 때와 사각면 요소일 때의 성형 높이 차이가 크지 않기 때문에, 복잡한 형상의 목표물을 성형 할 경우 면 요소를 사용해도 그 결과에 큰 영향이 없을 것으로 사료된다. Fig. 8(b)는 접촉 조건에 대한 계산 시간의 변화를 보여준다. 목표 소재의 전류 거동을 고려하는 일체형 조건에서 해석 시간이 가장 길었고, 사각면 요소 화 된 목표 소재로 기계적 접촉 거동을 고려했을 때의 해석 시간이 가장 짧았다. 그러므로, 목표 소재 위의 전류 거동을 분석할 필요가 없으면 목표 소재를 사각 면 요소로 고려하고, 전류 거동을 분석할 필요가 있을 경우 노드 공유를 통한 일체형

육면체 요소로 고려하여 해석을 수행하는 것이 합리적이라 판단된다.

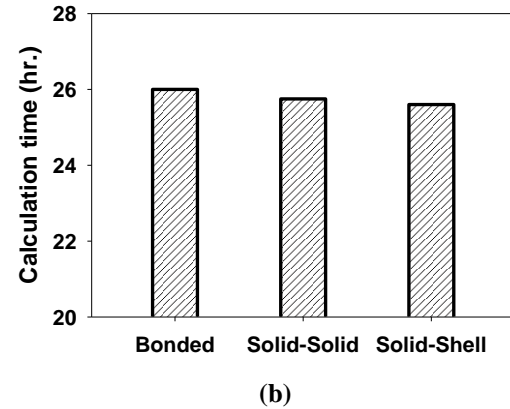
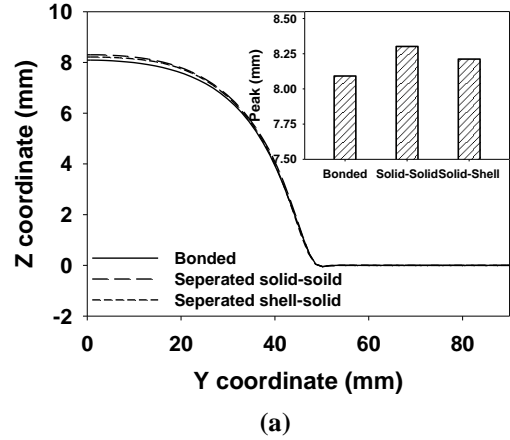


Fig. 8 Effect of contact condition: (a) protrusion shape and (b) calculation time

전자기 솔버의 시간 증분에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 시간 증분에 대한 돌출부 성형 형상의 변화를 나타내는데, 시간 증분이 증가함에 따라 성형 높이가 점차 증가하였다. 특히, 3.0 $\mu$ s 이상으로 증가할 때 그 성형 높이가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 시간 증분에 대한 계산 시간 변화를 나타낸다. 시간 증분이 0.1  $\mu$ s일 때는 약 430시간이 소모되지만 0.5 $\mu$ s일 때는 크게 줄어들어 약 100시간, 1.0 $\mu$ s일 때는 50시간, 1.5 $\mu$ s일 때는 35시간, 2.0 $\mu$ s 이상으로 증가하면 약 24시간 안팎으로 감소하게 된다. 돌출부 성형 높이를 잘 구현하는 해석 정확도와 계산 시간 감소 효율을 고려했을 때 합리적인 전자기 솔버의 시간 증분 크기는 2.0 $\mu$ s ~2.5 $\mu$ s 로 판단된다

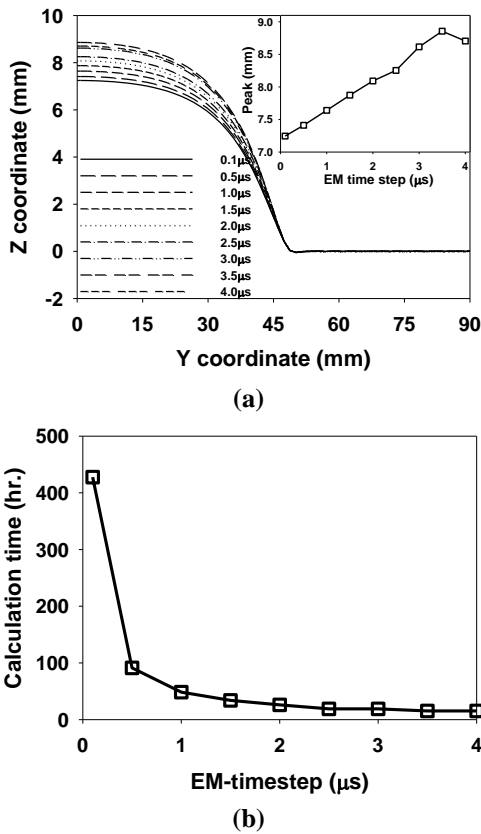


Fig. 9 Effect of EM-timestep: (a) protrusion shape and (b) calculation time

LS-DYNA를 이용한 EMF해석의 경우 전자기 행렬의 재계산 간격인 N-cycle을 정의해주어야 한다. 다음 Fig. 10에 N-cycle에 대한 정의를 나타내었다. N-cycle의 의미는 설정된 전자기 시간 증분의 N번째마다 전자기 행렬의 재 계산을 수행한다는 의미이다. N-cycle에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)은 N-cycle에 대한 돌출부 성형형상의 변화를 나타내는데, N-cycle이 증가함에 따라 성형 높이가 점차 증가하였다. 특히, 약 50 보다 커질 때 그 성형 높이가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 N-cycle에 대한 계산 시간의 변화를 보여준다. 1일 때는 약 400시간이 소모되지만 5일 때는 크게 줄어들어 약 90시간, 10일 때는 50시간, 15일 때는 35시간, 20이상으로 증가하면 약 24시간 안팎으로 감소하게 된다. 돌출부 성형 높이를 잘 구현하는 해석 정확도와 계산 시간 감소 효율을 고려했을 때 합리적인 N-cycle의 값은 20 ~ 50으로 판단된다.

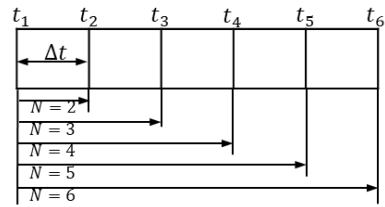


Fig. 10 Define of the N-cycle value with respect to EM-timestep

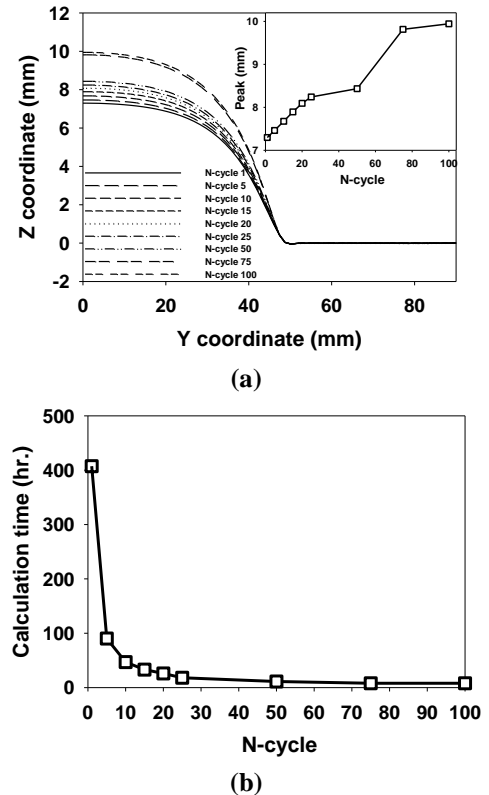


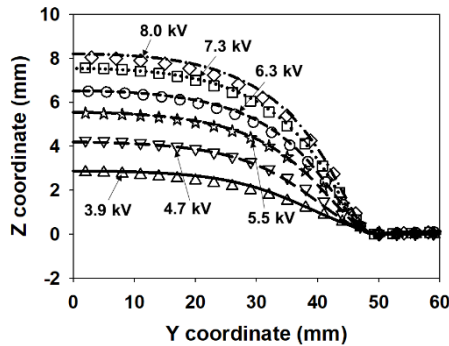
Fig. 11 Effect of EM-timestep: (a) protrusion shape and (b) calculation time

#### 4.2 실험 결과 예측

이전 단락에서 각 해석 변수들이 성형 결과와 계산 시간에 미치는 영향들을 분석하였고, 정밀도와 계산 효율을 고려한 합리적인 범위가 제안되었다. 이 범위 안에서, 앞서 수행된 충전 전압 별 타원형 돌출부 성형의 예측을 수행하기 위해 설정된 해석 변수 값들은 다음 Table 4에 정리되었다. 충전 전압에 따라 수행된 타원형 돌출부 성형 실험은 해석을 통해 성공적으로 예측되었고, 실험과 예측된 값들의 비교를 Fig. 12에 나타내었다. 총 계산 시간은 약 18시간이 소요되었다.

**Table 4 Recommended simulation variables**

No.	Type	Variation (mm)
1	Element size in plane	2.0mm × 2.0mm,
2	Contact conditions between DP780 and AA1050 sheets	Separated solid-solid
3	EM-timestep interval	2.0 $\mu$ s
4	N-cycle	20

**Fig. 12 Predicted protrusion shape with respect to the charging voltage**

## 5. 결론

본 연구에서는 LS-DYNA 의 다 물리 해석을 통해 EMF 공정을 구현할 때 영향을 미치는 다양한 해석 변수들에 대한 민감도를 분석하였다. 먼저, EMF 를 통해 고강도 강 판재에 타원형 돌출부(elliptical protrusion) 형상을 성형 하는 실험을 수행하였고, LS-DYNA 해석을 통해 이를 모사하였다. 이때, 여러 해석 변수들이 돌출부 성형 높이와 전체 계산 시간에 미치는 영향을 분석하였다. 연구를 통해 얻은 세부 결론들은 다음과 같다.

(1) 해석 정확도와 계산 시간 감소 효율을 고려했을 때의 합리적인 요소 크기는 1.5mm × 1.5mm ~ 2.0mm × 2.0mm, 전자기 증분 크기는 2.0 $\mu$ s ~ 2.5 $\mu$ s, 그리고 N-cycle의 값은 20 ~ 50으로 판단되었다.

(2) 목표 소재 위의 전류 거동을 분석할 필요가 없으면 목표 소재를 사각 면 요소로 고려하고, 전류 거동을 분석할 필요가 있을 경우 노드 공유를 통한 일체형 육면체 요소로 고려하여 해석을 수행하는 것이 합리적이라 판단되었다.

(3) 충전 전압에 따라 수행된 타원형 돌출부 성형 실험은 제안된 합리적인 해석 변수들을 통해 성공적으로 예측되었다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 기관 고유사업(주요사업, PNK6000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] Maxwell JC, 1873, A treatise on electricity and magnetism, Oxford: Clarendon Press, Vol. 1.
- [2] H.A. Lorentz, 1895, Attempt of a theory of electrical and optical phenomena in moving bodies, Leiden: Brill.
- [3] Boulger FW, Wagner HJ, 1960, High velocity metal working processes based on the sudden release of electrical energy, Defense Metals Information Center, Columbus, Ohio.
- [4] Erdösi J, Meinel M, 1984, High speed electrical processing. Prod. Technol. Oper., Vol. 34, No. 10, pp. 600~601.
- [5] Balanethiram VS, Hu X, Altynova M, Daehn GS, 1994, Hyperplasticity: Enhanced formability at high rates. J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, No. 94, pp. 595~600.
- [6] Padmanabhan M, 1997, Wrinkling and springback in electromagnetic sheet metal forming and electromagnetic ring compression, Ohio state university.
- [7] Imbert J, Worswick M, 2016, Development of an interrupted pulse expanding ring test, In: The 7th International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany.
- [8] Kim C, Lee J, Barlat F, Lee M-G, 2014, Frictional behaviors of a mild steel and a TRIP780 steel under a wide range of contact stress and sliding speed, J. Tribol. Vol. 136, No. 2, pp. 1~7.
- [9] Kim J-H, Kim D, Han HN, Barlat F, Lee M-G, 2013, Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling. Mater. Sci. Eng. A, Vol. 559, No. 1, pp. 222~231.
- [10] Mukai T, Higashi K, Tsuchida S, Tanimura S, 1993, Influence of strain rate on tensile properties in some commercial aluminum alloys, J. Japan. Inst. Light. Met., Vol. 43, pp. 252~257.
- [11] Kamal M, Daehn GS, 2007, A Uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets, J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 129, No. 2, pp. 369~379.