

Bar 성형 코일을 이용한 전자기 성형에 관한 기초 연구

심지연*, 강봉용⁺, 박동환⁺⁺, 김일수⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 04. 18, 심사완료일 2011. 05. 19)

A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil

Ji-Yeon Shim*, Bong-Yong Kang⁺, Dong-Hwan Park⁺⁺, Ill-Soo Kim⁺⁺⁺

Abstract

MPF(Magnetic pulse forming) process refers to the high velocity and high strain rate deformation of a low-ductility materials driven by electromagnetic forces that are generated by the rapid discharge current through forming coil.

The goal of this study was to find the characteristics of dynamic behavior of workpiece and to find the main design process on MPF using bar forming coil. For these purposes, thin Al5053 sheet were used for the experiment. The measured strain data were analyzed by developed electromagnetic FE-model. The main design parameter is location of coil, electromagnetic force. In case of the bar forming coil, there exists the dead regions where the low electromagnetic force applied on the workpiece

Key Words : Magnetic pulse forming(전자기펄스성형), Forming coil(성형코일), Magnetic power source(전자기발생장치), Electromagnetic force(전자기력)

1. 서론

소형 디지털 전자제품의 외장 케이스 경우 디자인을 중요시 하는 소비자들의 욕구가 그대로 반영되는 부품으로 Ti합금 및 플라스틱 재료를 활용한 프레스성형과 사출성형이 주를 이루고 있으나 최근 슬림화에 따른 케이스 내구성이 중요성해지고 고급스러운 이미지가 요구되면서 경량소재의 사용이 검토되고 있다. 그러나 대표적인 경량재인 알루미늄, 마그네슘 등은 대표적인 난성형재료로서 알루미늄은 전 연신율, 굽힘 가공성의 척도인 굽힘 연신율 등이 낮고, 마그네슘의 경우 HCP구조(Hexagonal Close Packed lattice)로서 고온에서는 슬립계의

증가로 인한 연신율 증가로 성형성이 우수하지만 상온에서는 성형이 매우 어렵다⁽¹⁻²⁾. 이러한 이유로 난성형재 프레스 성형 방법으로 고온성형이 적용되고 있으나 금형의 적정온도 제어가 어려울 뿐만 아니라 성형 후 냉각공정을 거쳐야 하므로 공정시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또한 소형 디지털 제품 케이스와 같이 모서리부의 굽힘 반경이 적은 정밀한 성형부가 존재하는 경우 이러한 기술로는 불량률이 높은 단점이 있다. 이러한 이유로 난성형재를 상온에서 효과적으로 성형할 수 있는 공정개발이 요구된다. 전자기 성형(Magnetic pulse forming)이란 성형코일과 성형재 사이의 고강도 자기장을 이용하여 고속으로 금속을 성형하는 기술로서 고속의 전자기력이 성형재

* 주저자, 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

+ 교신저자, 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터 (kanbo@kitech.re.kr)

주소: 전주시 덕진구 팔복동 716-10번지

++ 웰메이트(주)

+++ 북포대학교 기계공학과

에 작용하여 성형재의 연신율이 증가됨으로서 정밀성형이 가능한 기술이다. 고속의 성형기술로서 생산성이 높고 상부금형만이 필요하고 성형코일은 영구적으로 사용할 수 있어 원가절감의 효과도 높다.

전자기 펄스 성형 시스템의 핵심 요소인 성형 코일은 감김 형상에 따라 helical, flat, bar 성형 코일등으로 분류되며 미국의 EWE(Edsion Welding Institute), OSU(Ohio State University)에서는 spiral coil을 이용한 알루미늄 자동차 도어 판별 시제품 제작을 위한 연구를 진행하고 있으며 캐나다 Waterloo 대학 등은 flat coil을 이용한 전자기 성형 실험을 통한 전자기 성형 공정 특성 분석 및 공정최적화 연구를 진행중이나 bar 성형 코일에 대한 연구는 아직 보고되지 않았다⁽³⁻⁵⁾. 국내의 전자기 성형 연구는 일부 대학에서 flat coil을 이용한 실험이 시도되었으나 이는 성형장치 개발에 따른 성능평가 실험으로서 성형 코일 형상에 따른 성형특성에 대한 연구는 미비한 실정이다⁽⁶⁾. 따라서 본 연구는 bar 성형코일을 이용한 전자기 성형 시 성형재의 거동 특성을 분석하고자 0.5mm 두께의 알루미늄 판재를 이용하여 전자기 성형 실험을 실시하였다. 실험 후 변형률을 측정하고 이를 전자기해석 모델을 이용하여 분석하였다.

2. 전자기 펄스 성형

2.1 전자기 성형 원리

전자기 성형은 고자기장을 이용하여 고속으로 금속을 성형하는 기술로 고속 가공기술(High velocity technology)의 일종이다. 충전된 고용량의 전하를 200us 이내에 순간적으로 코일에 방출하여 발생하는 기전력에 의해 성형재의 표면에 유도 전류를 발생시켜 코일과 성형재 사이의 전자기력(로렌츠 힘)을 이용하여 성형이 이루어진다. 자기장으로 인하여 코일에는 식 (1)과 같이 로렌츠 힘(F)이 발생된다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

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

여기서 I 는 도체에 흐르는 전류, l 는 도체의 길이, B 는 자속 밀도이다. 이러한 로렌츠 힘에 의하여 성형재는 고속 성형이 되며 이때 발생하는 전자기력 P 은 다음과 같이 정의된다.

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (2)$$

여기서 H 는 자기장 세기이고 μ_0 는 진공투자율이다⁽⁴⁾.

고속의 전자기력에 의해 성형재는 금형에 충돌하며 단열가열(Adiabatic heating) 효과에 순간적으로 연신율이 개선됨

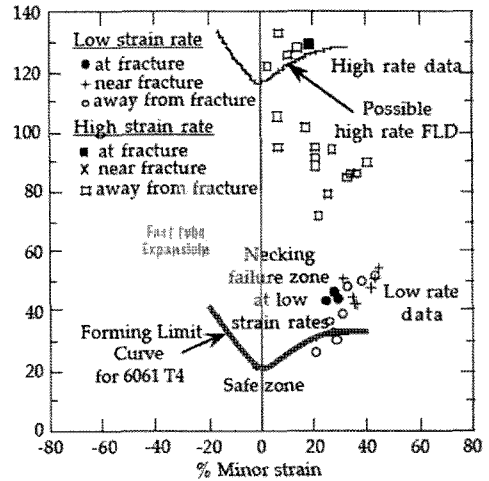


Fig. 1 Forming limit diagram 6061-T4 with high velocity forming data⁽¹¹⁾

으로써 성형성이 대폭 향상된다. 기 보고된 연구에 따르면 알루미늄의 경우 그림1과 같이 고속 성형시 성형성이 약 3배 이상 증가된다⁽¹¹⁾.

2.2 전자기 성형 시스템

전자기 성형 시스템은 고에너지를 충전하기 위한 전자기력 발생장치와 충전된 고에너지의 순간 방전을 위한 성형 코일, 프레스 시스템으로 구성되어 있다.

전자기력 발생장치는 동력 공급장치, 에너지 저장을 위한 콘덴서, 제어회로, 순간방전을 위한 스위치 장치로 구성된다. 사용자에 의해 미리 설정된 전압에 따라 전자기력 발생장치 내 콘덴서에 충전된 에너지는 이그나이트론 스위치 장치에 의해 성형코일로 순간 방전된다. 성형코일은 가공물 표면에 순간적으로 고자기장을 생성시켜 성형재를 금형에 충돌하게 하는데 성형재의 종류와 사양에 의해 치수를 결정하며 공정중의 충격력에도 견뎌내며 안전성을 유지하기 위한 충분한 기계적 강도와 질량을 갖도록 설계한다. 일반적으로 감김 횟수와 형상에 따라 helical coil, flat spiral coil, bar coil등으로 분류되며 기계적 강도가 크고 전기저항이 적은 베릴륨동을 가공하여 수지나 강화 플라스틱으로 보강, 절연하여 제작한다. 프레스 시스템은 전자기력 발생장치와 성형코일을 연결하며 상부와 하부에는 금형과 성형코일이 각각 설치된다.

3. 실험

3.1 실험방법 및 순서

난성형성 경량재인 알루미늄의 전자기 성형 실험을 위하여 Fig. 2와 같이 한국생산기술연구원과 웰메이트(주)에서 공동으로 개발한 'W-MPF12'를 사용하여 성형 실험을 실시하였

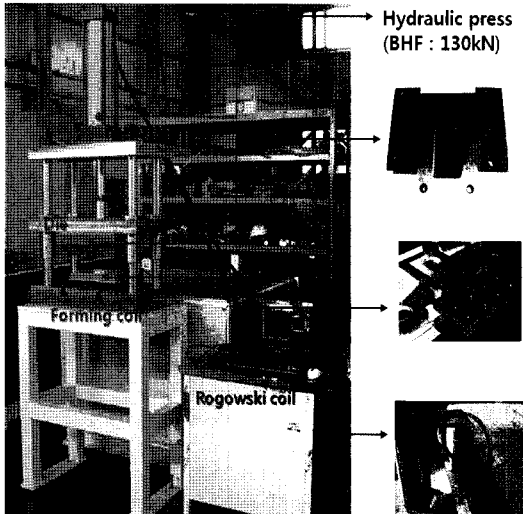


Fig. 2 MPF system

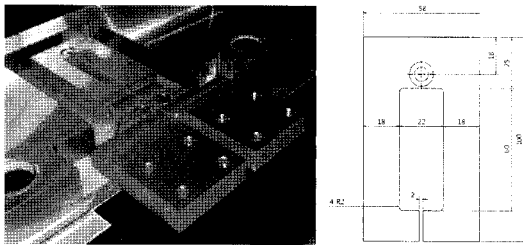


Fig. 3 Bar forming coil

다. 공정 속도 및 최대 전류 측정을 위하여 로고우스키 코일 (rogowski coil)을 전자기력 발생장치와 성형코일 연결부에 감아 방전파형을 측정하였다. 성형재는 항복강도 103MPa, 고 유저항 2.90uΩ-cm인 두께 0.5mm의 Al 5053를 사용하였으며 성형면에 0.5mm간격의 그리드를 실크 인쇄하였다. 성형코일은 bar 형상으로 Fig. 3과 같이 베릴륨 동으로 설계 제작하였으며 에폭시를 이용하여 절연하였다. 금형깊이는 6mm로 유압 프레스의 BHF(blank holding force)는 130kN이다. 실험 셋업 후 전자기력 발생장치의 충전 전압 조정 스위치를 이용하여 3, 4, 5, 6kV를 충전 후 방전하여 실험을 진행하였다. 실험 후 성형재 표면의 그리드의 변형량을 측정하였다.

3.2 실험결과

충전전압 3-6kV의 조건에서 전자기 성형을 실시하였으며 충전된 에너지를 성형코일에 방전시 측정된 파형은 Fig. 4와 같이 감쇠진동의 sin파 형상이 기록되었다. 방전주기는 25us로 성형은 약 25us내에서 완료됨을 확인할 수 있었으며 성형 코일에서 발생하는 피크 전류(peak current)는 Table 1과 같이 3kV, 6kV 충/방전시 각각 약 44.5kA, 77.5kA이다.

성형부 관찰 결과 성형이 거의 이루어지지 않은 3kV를 제외

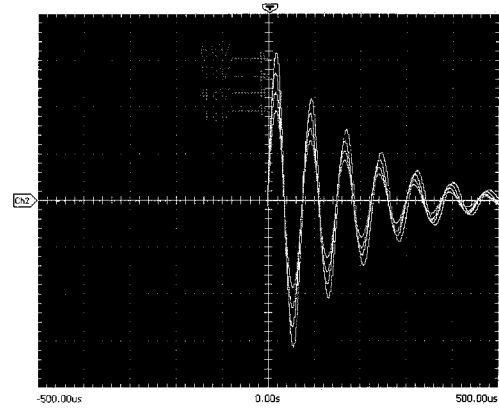


Fig. 4 Discharge waveform (Y: 5v/div, X: 100us/div)

Table 1 Forming condition and peak current

Charge voltage(kV)	Charge Energy(kJ)	Peak Voltage(V)	Peak Current(kA)
3	2.1	9.5	47.5
4	3.8	11.5	57.5
5	6	13.5	67.5
6	8.6	15.5	77.5
Calibrated conversion factor (1V)			5kA

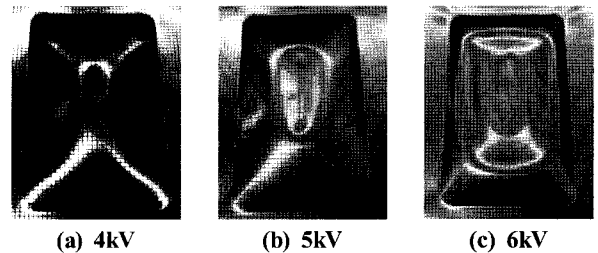


Fig. 5 Results of MPF according to various charged voltage

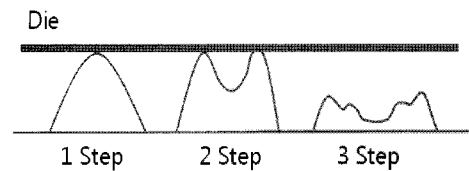


Fig. 6 Prediction of Al workpiece behavior during process

한 4.5,6kV에서 Fig. 4와 같이 성형이 이루어졌으며 충전전압이 증가함에 따라 변형량은 증가하였다. 특히 성형재의 표면에는 인쇄된 그리드가 원을 그리며 손상되었다. 이는 전자기력에 의해 성형재가 깊이 6mm의 금형에 충돌하면서 발생한 것으로 충전전압 4, 5kV에서는 Fig. 5(a), (b)와 같이 한번의 표면 손상이 관찰되었다. 반면 6kV에서는 Fig. 5(c)와 같이 두 번의 표면손상이 관찰되었으며 안쪽이 바깥쪽에 비하여 심하게 손

상되었다.

이는 Fig. 6과 같이 성형재가 금형에 충돌(1step)하며 리바운드 현상(2step)이 발생되어 표면이 손상된 것으로 충전전압이 증가함에 따라 발생하는 전자기력이 더욱 증가하여 성형재는 금형에 반복 충돌하며 두 번의 리바운드 현상(3step)이 발생된 것을 확인할 수 있다.

기 보고된 연구에 따르면 전자기력에 의해 성형재는 금형에 충돌하며 유동현상을 시작하는데 이때 코일의 형상에 따라 성형재에 작용하는 전자기력의 분포는 일정하지 않으므로 성형재의 일부분 즉 중앙부가 먼저 금형에 충돌하고 리바운드 현상이 발생된다⁽⁴⁻⁵⁾. 따라서 제작된 코일의 전자기력 분포를 확인하고자 FEM을 이용한 수치해석을 실시하였다.

4. Bar 성형 코일의 전자기력 분포

4.1 해석방법 및 절차

전자기장 수치해석 프로그램인 ANSYS/Emag를 사용하여 성형재에 작용하는 전자기력을 조사하였다. 해석을 위하여 지배방정식은 아래와 같이 Maxwell 방정식을 사용하였다⁽¹²⁻¹³⁾.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{3}$$

$$\nabla \times \vec{D} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{5}$$

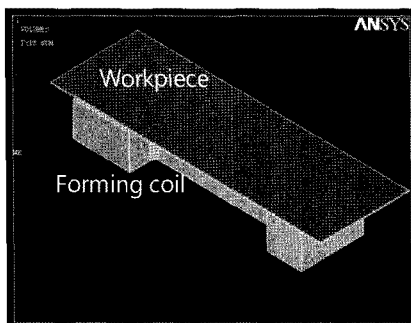


Fig. 7 3D axisymmetric problem setup

Table 2 Material properties for analysis

Material	Electrical Resistivity (ohm-cm)	Magnetic Susceptibility	Relative permeability (μ)
Al	2.7e-006	6e-007	1
Becu	1.7e-006	8e-008	1
Air	-	-	1

여기서 D 는 자속밀도, J 는 전류밀도이다. 경계조건은 자속 수직, 수평조건을 이용하였다.

모델은 Fig. 7과 같이 축대칭으로 5kV 충/방전시 발생하는 67.5kA, 25kHz의 전류를 입력하여 시간 이력 해석(transient Analysis)을 실행하였다. Table 2는 해석에 사용된 성형 코일 및 성형재의 전기적 성질을 나타낸다.

4.2 해석결과

Fig. 8은 전류밀도로서 성형 코일에 67.5kA의 전류가 흐르고 있음을 확인하였으며 고전류가 순간적으로 도체에 흐를 때 표피효과(Skin effect)로 인하여 도체의 외곽에 자속은 집중하게 됨에 따라 Fig. 9(a)와 같이 성형코일 외곽에 자속은 집중되

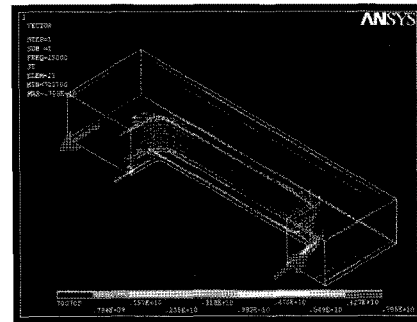
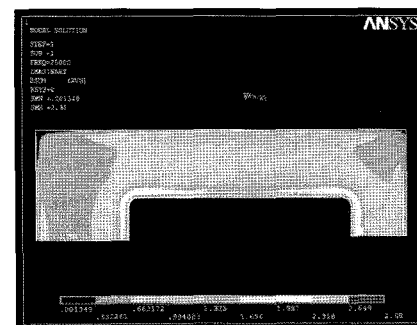
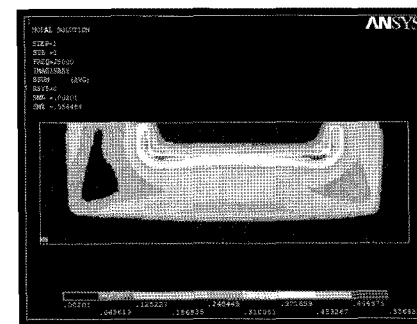


Fig. 8 Current density (vector plot)



(a) Forming coil



(b) Workpiece

Fig. 9 Flux density

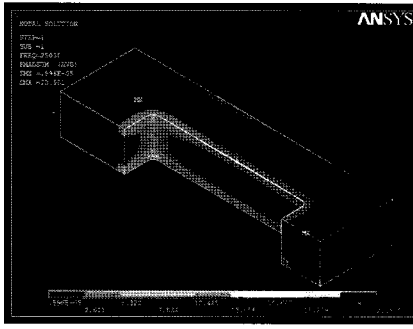


Fig. 10 Magnetic force

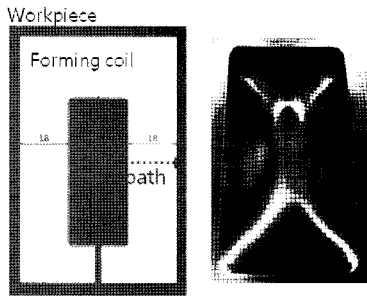


Fig. 11 Schematic defining the measurement of major strain

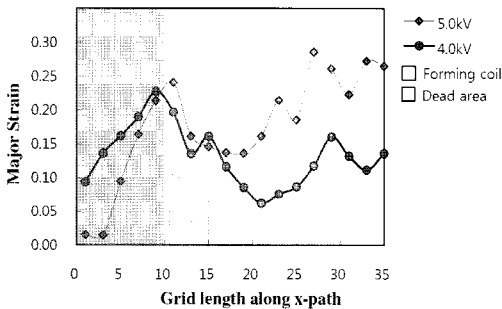


Fig. 12 Major strain of workpiece

어 최대 2.98wb/m² 자속밀도가 나타났다. 성형 코일 외곽에 자속이 집중됨에 따라 Fig. 9(b)와 같이 성형재 역시 코일의 외곽과 겹침부에서 높은 자속이 발생됨을 확인하였다.

이때 발생하는 전자기력은 Fig. 10과 같이 코일의 외곽에서 집중된다. 해석 결과 성형 코일의 형상에 따라 전자기력은 성형재의 외곽부분에만 가해지기 때문에 성형재에는 전자기력이 작용하지 않는 영역(dead area)이 존재한다.

충전전압 4, 5kV에서 성형된 결과물을 Fig. 11과 같이 성형 코일의 중심에서 x방향으로 성형재의 변형률을 측정하였다.

Fig. 12는 성형재의 변형률로 충전전압이 증가함에 따라 변형률은 증가하였으며 특히 성형코일의 외곽과 인접한 부분에서 최대 29%의 변형률이 나타났다.

반면 전자기력이 작용하지 않는 영역(dead area)에는 변형이 관찰되지 않았다.

결국 코일 외곽과 겹침부에서 전자기력이 작용하여 변형이 이루어지고 이후 금형에 충돌하며 Fig. 6과 같이 리바운드 현상을 야기함을 확인하였다. 따라서 성형재에 균일한 전자기력이 작용되도록 bar 성형코일이 아닌 helical coil으로 설계해야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

전자기 성형을 이용한 난성형재의 정밀성형을 위한 기초연구로서 bar 성형코일을 이용한 전자기 성형 시 성형재의 거동 특성을 연구하였다. 충전전압이 증가함에 따라 성형코일에서 발생하는 전자기력은 증가하였으며 bar 성형코일의 외곽에 전자기력이 집중됨에 따라 성형재에 전자기력이 거의 작용하지 않는 영역(dead area)이 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 불균일한 전자기력에 의해 성형재의 일부에서만 변형이 일어나 성형재의 중심에서는 리바운드 현상 발생된다. 이러한 리바운드 현상은 충전전압이 증가함에 휘수가 증가하였으며 성형재의 표면의 손상을 야기하였다. 따라서 소형 디지털 제품의 케이스와 같이 평편한 형상을 성형하기 위해서는 성형재에 균일한 전자기력 분포하는 성형코일 개발이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) Toros, S. O., and Kacar, F., 2008, "Review of Warm Forming of Aluminum-magnesium Alloys," *Journal of materials processing technology*, Vol. 207, No. 1, pp. 1 ~ 12.
- (2) Li, L., Chen, Y., and Lin, S., 2003, "Laser Forming Thin Aluminum Sheets," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 13, No. 1, pp. 161 ~ 164.
- (3) Kamal, M., and Daehn, G. S., 2007, "Agile Manufacturing of a Micro-embossed Case by a Two-step Electromagnetic Forming Process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 190, No. 1, pp. 41 ~ 50.
- (4) Seth, M., Vohnout, V. J., and Daehn, G. S., 2005, "Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact," *Journal of materials processing technology*, Vol. 168, No. 3, pp. 390 ~ 400.
- (5) Oliveira, D. A., Worswick, M. J., Finn, M., and Newman, D., 2005, "Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet: Free-form and Cavity Fill Experiments and Model," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1, pp. 350 ~ 362.

- (6) Lee, H. M., Kang, B. S., and Kim, J., 2010, "Development of Sheet Metal Forming Apparatus Using Electromagnetic Lorentz Force" *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 1, pp. 38~43.
- (7) Lee, J. S., 1988, "Electro-magnetic forming," *KSME*, Vol. 28, No. 5, pp. 476~4.
- (8) Shim, J. Y., Kim, I. S., Kim, I. J., and Kang, B. Y., 2009 "Development of Experiment Model Prediction of Leakage Pressure in MPW," *J. of the KSMTE*, Vol. 19, No. 6, pp. 652~657.
- (9) Kang, B. Y., Shim, J. Y., Kim, I. S., Park, D. H., Kim, I. J., and Lee, K. J., 2009, "Development of Working Coil for Magnetic Pulse Welding," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 6~12.
- (10) Kang, B. Y., Shim, J. Y., Kang, M. J., and Kim, I. J., 2008, "Principle and Application of Magnetic Pulse Welding," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 5~11.
- (11) Amit, A. T., Marina, M. A. and Daehn, G. S., 1996, "Effect of Sample Size on Ductility in Electromagnetic Ring Expansion," *Scripta Materialia*, Vol. 34, No. 8, pp. 1345~1350.
- (12) Zhang, P., 2003, *Joining enabled by high velocity deformation*, A Thesis for a Doctorate, Ohio State University, USA.
- (13) ANSYS, 2010, *ANSYS User's Manual Version 10.0*, ANSYS Inc.