

## 전자기력을 이용한 압인 패턴 성형의 실험적 연구

안우진<sup>1</sup> · 노학곤<sup>1</sup> · 강범수<sup>1</sup> · 김 정<sup>#</sup>

### Experimental Study of Pattern Emboss Forming using an Electromagnetic Force

W. J. An, H. G. Noh, B. S. Kang, J. Kim

(Received July 11, 2014 / Revised August 6, 2014 / Accepted September 11, 2014)

#### Abstract

Electromagnetic forming(EMF) is one of the high-speed forming methods, and has been used to deform metal sheets. The advantages of electromagnetic forming are reduced wrinkling due to non-contact characteristic and fine formability because of the high speed impact. In the current study, we suggest the application of electromagnetic forming to emboss pattern shapes using electromagnetic forces with only one forming coil and one punch. The high impact of the sheet at speeds of 100~300m/s produces significant coining pressure. In the current paper, electromagnetic forming was applied to Al 1100-O sheets; with thickness of 1.27mm and an area of 40mm × 40mm. Using a single spiral coil, totally different types of patterns were created. Four different patterns were successfully produced on the aluminum sheet. The length and depth of the patterns were measured by three-dimensional scanning. Comparisons to the die shape showed good agreement. The test results confirm that emboss pattern forming by EMF using a single die can be used to replace the costly conventional method.

**Key Words** : Electromagnetic Forming, High Speed Impact, Pattern Emboss Forming, Single Die

### 1. 서 론

전자기 성형(EMF, Electromagnetic forming)은 고속 성형(High speed forming) 기술의 하나로서 강한 전자기력을 가공하고자 하는 금속에 작용시켜 물리적 접촉 없이 고속(100~300m/s)으로 금속을 성형하는 기술이다. 알루미늄 합금의 낮은 성형성 문제와 자동차의 경량화를 위해 사용되는 고강도강의 스프링 백 현상 등을 개선하기 위한 방안으로 전자기 성형 기술이 제시되면서 이와 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

EMF를 통하여 기존의 기술의 성형 한계를 뛰어넘어 난해한 형태의 성형에 효과적으로 적용할 수

있다. Psyk등은 EMF의 장점으로 탁월한 성형성과 주름짐의 감소를 제시 및 검증하였다[1~2]. EMF의 비접촉 특성과 고속의 공정은 스프링 백을 줄이고 성형 성을 높여준다. 선행 연구에서 고속 충격에 의한 높은 압력으로 기존의 성형 법보다 다양한 제품의 성형이 가능함을 보였다[3~4]. EMF에서 판재에 가해지는 높은 압력은 압인에 기저가 되는 성형 다이의 미세한 윤곽과 판재를 합치시킨다. 통상적으로 하나의 소성체를 다른 소성체와 일치시키기 위해선 재료를 변형시키는 유동 응력의 3배에 가까운 압력이 요구되는데, 최근의 연구를 통해 이 규칙이 미세 구조의 압인 성형에도 적용됨이 보여졌다. 변형이 일어날 면적에는 충분히 높은 압력을 얻기 위해서

1. 부산대학교 항공우주공학과

# Corresponding Author : Pusan National University, E-mail : greatkj@pusan.ac.kr

대단히 높은 힘을 적용할 수 있는 프레스가 필요하다. 이는 종래의 기계적 압인이 주로 소형 제품에만 적용된 이유이다[5~6]. Vivek은 EMF로 소재의 압인에 유효하게 작용하는 10MPa의 힘을 얻을 수 있음을 보였다. 전자기 성형 기술은 소재와 성형 다이를 고속으로 접촉시키므로 폭과 깊이, 날카롭고 복잡한 형태 등을 동시에 변형시켜 표면의 특성을 얻어낼 수 있으며, 이는 기계적 압인과 구분된다[7].

본 연구에서는 상이한 4종의 압인 패턴을 얻기 위한 Al 1100-O 소재를 이용한 EMF를 제시하였다. 단일 면을 사용하는 성형 다이를 EMF에 사용하여, 다이의 한쪽 면이 전자기력을 받을 때, 반대쪽 면은 소재와 접촉한다 오직 하나의 코일을 사용하여 4종의 압인 패턴을 성형이 가능하도록 공정을 설계하였다[8]. 성형 코일의 폭과 두께 그리고 나선 방향의 회전 수는 선행 연구의 해석 결과를 토대로 결정하였다. 패턴 성형에는 각각 다른 4종의 펀치를 사용하였다. 펀치 표면의 패턴은 NC 절삭 가공을 하였고, Al 1100-O 소재를 이용하여 실험을 수행하였다.

2. 전자기 성형을 통한 압인 패턴 성형

2.1 전자기 성형 장비 구성

전자기 성형 장비는 고압의 DC전원과 높은 용량의 캐패시터, 솔레노이드 성형 코일, 연결선, 캐패시터 충전을 위한 전원 공급장치와 제어 회로 등으로 구성되어 있다. 이 중 가장 중요한 부분은 입력 전류(I)의 주된 영향을 미치는 방전압이다. 식 (1)로부터, 에너지(U)는 캐패시터의 용량(C)와 입력전압(V)에 의해 정의된다.

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \tag{1}$$

2.2. 전자기력을 이용한 압인 패턴 성형 실험 및 결과

전체 EMF시스템의 방전에너지는 32KJ이며 매개 변수들은 Table 1에 나타낸 것과 같다. Fig. 1은 장비의 구성을 보여준다. Fig. 1의 적색 화살표는 자속(magnetic flux)의 밀도와 유도 전류로부터 생성된 전자기력을 나타낸다. 실험은 1.27mm두께의Al 1100-O 판재로 수행하였다. 성형 코일은 10mm의 dead zone(Di=10)을 가지는 나선형으로 설계하였다. Fig. 2는

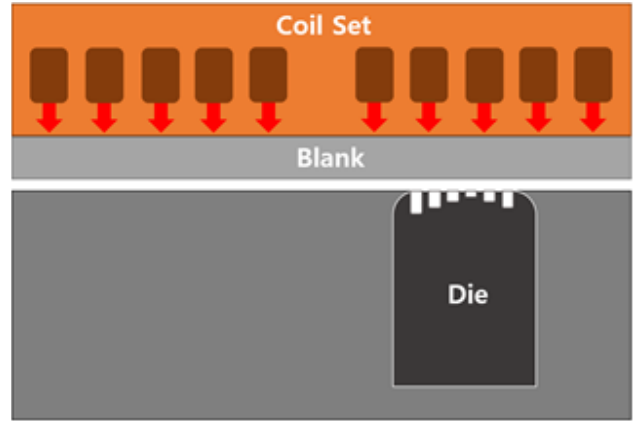
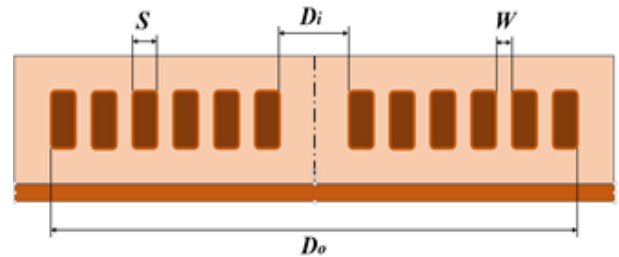
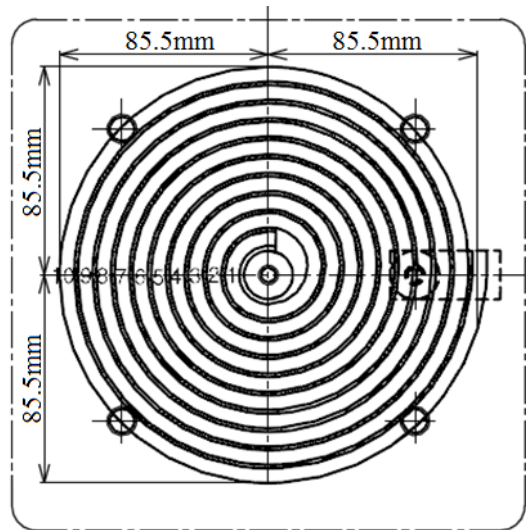


Fig. 1 Schematic view of embossed pattern forming process by EMF



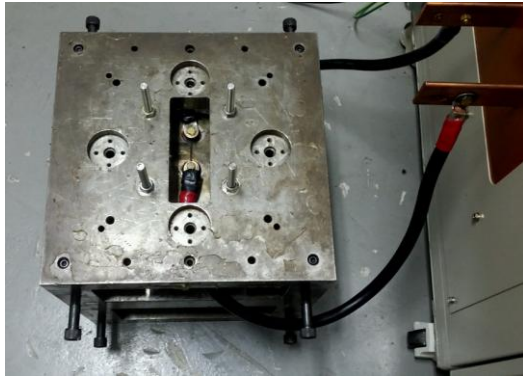
(a) Schematic of the spiral coil



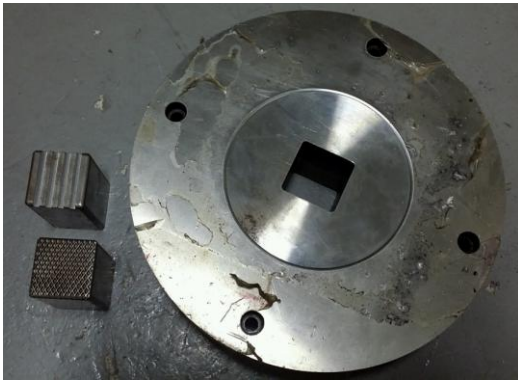
(b) Drawing of spiral coil (10 turns)

Fig. 2 Spiral coil for embossed pattern forming process by EMF

| Max energy(kJ) | Capacitance (μF) | Max voltage (kV) |
|----------------|------------------|------------------|
| 32             | 333              | 15               |



(a) Set-up the electromagnetic forming



(b) View of pattern and die

Fig. 3 Entire emboss pattern formation set

코일의 개요와 설계 변수를 보여준다. 5mm의 구리선( $W=5$ )은 패턴 모양의 다이를 성형하는데 사용된다. 절연 층은 코일 사이사이에 2mm( $S=2$ )의 일정한 간격으로 구성된다. 나선형 코일의 지름과 회전 수는 각각 170mm( $D_0=170$ )과 10회( $N=10$ )이다. Fig. 3은 실험에서 사용된 장비를 보여준다. 시험에서 사용되는 판재의 길이와 성형 코일의 지름은 동일하다. 편

치는 Fig. 4 에서와 같이 NC 절삭 공구를 이용하여, 실제 실험에 적용될 깊이와 모양을 가공하였다. 펀치의 크기는 40mm×40mm 이며 4 종의 펀치는 각각 다른 패턴의 표면을 가지고 있다. 부산대학교 Logo(PNU Logo)를 첫 번째 펀치로 하였고, 두 번째로 원형 미로 펀치, 세 번째로 이중 깊이 펀치, 마지막 펀치로 다이아몬드 펀치를 제작하였다. 특히, Fig. 4(b)에서와 같이 두 번째 펀치는 중심 부분에 기존의 성형법으로는 얻기 힘든 미세한 물결 무늬를 가지고 있다.

실험에는 EMF장비, PNU-32를 이용하여 12kV(27 kJ)의 출력 전압을 적용하였다. 판재에 각 패턴을 성형할 정도의 전자기력이 발생하기 위해서는 성형 코일과 성형 다이 사이에 충분한 성형 속도를 얻을 수 있도록 2mm정도의 간격이 필요하다. 판재는 나선형 코일의 아래 쪽에 있으며 패턴 성형 다이와 2mm정도 떨어져있다. EMF성형 공정 동안 코일은 다이에 볼트로 체결되고, 판재 고정대는 판재를 밀어준다. 실험에 쓰인 박판은 지면에 수직인 축에 대해 성형 다이와 성형 코일 사이에 위치시켰다. Fig. 5는 각 다이를 이용한 실험 결과를 보여준다. 패턴은 소재 표면의 면적, 40mm×40mm에서 일어나는 변형으로 성형된다. 나선형 코일의 비교적 강하고 균일한 부분을 판재에 적용시켜 실험을 수행하였다. EMF공정을 통해, 높은 속도로 하여금 소재에 강한 충격력을 적용하여 패턴 성형을 수행하였다.

성형된 패턴의 모양은 Fig. 5(a)에서 보여지듯 각각의 펀치의 표면과 일치한다. 원형 미로 패턴의 경우, 동심원 모양의 주요 패턴이 생기는 동시에, 원 중심부분의 미세한 물결 무늬까지 뚜렷하게 성형됨



(a) PNU-logo



(b) Circle maze



(c) Different height



(d) Diamond shape

Fig. 4 Emboss pattern punches with four different shapes

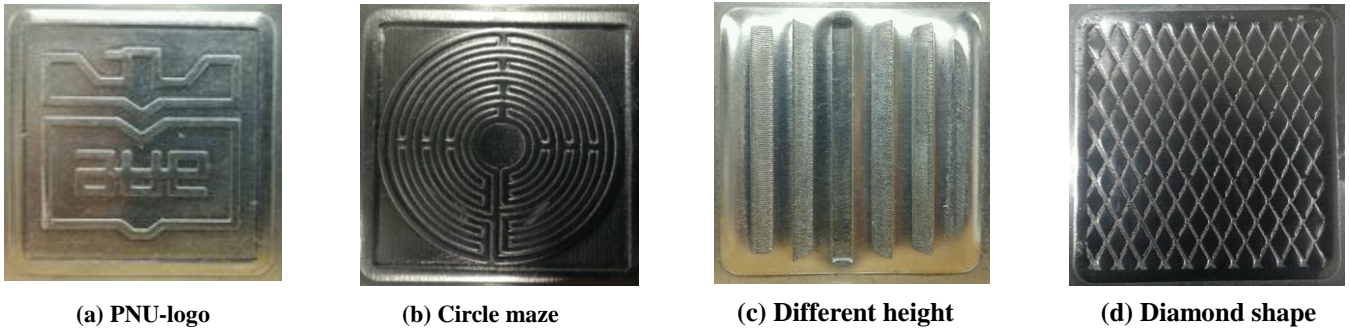


Fig. 5 Deformed Emboss pattern on the sheet

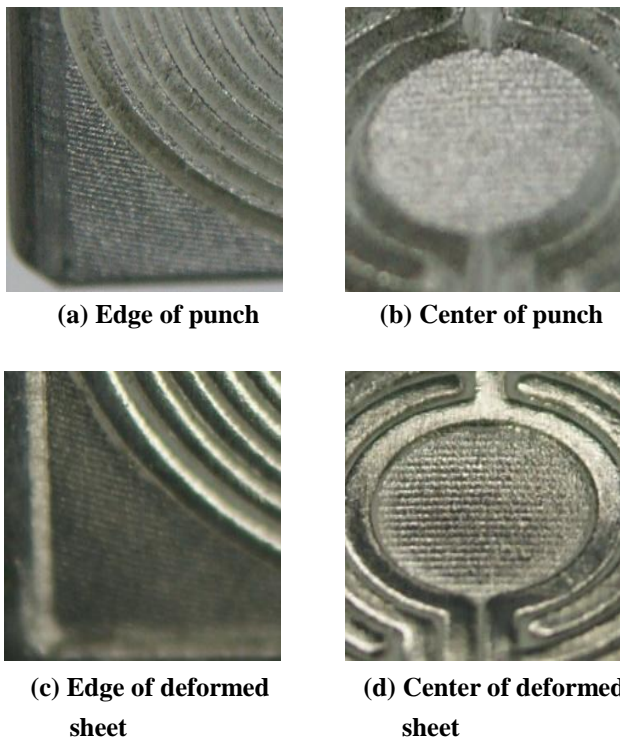


Fig. 6 Wave pattern on the sheet by circle maze shape

을 볼 수 있었다(Fig. 6(c), (d)). 이와 같이, EMF의 고속에 의한 강한 충격으로 펀치의 미세한 패턴의 성형까지 가능하다. 3D 스캐닝 장비를 사용하여 실험을 통해 성형된 패턴의 깊이와 폭을 측정하였다. Fig. 7(a)와 같이 PNU Logo의 경우 성형 다이의 깊이는 0.5mm일 때 판재는 0.42mm만큼 변형하였다. 원형미로 패턴은 다이의 깊이가 1mm일 때 0.8mm정도 변형하였다. 측정은 Fig. 8에서 보듯이 3종의 경우를 적색 선을 따라 수행되었다.

변형된 판재의 단면은 성형 다이의 단면과 잘 합치되는 것이 관찰되었는데, 이는 소재에 압인 패턴 성형이 성공적으로 이루어진 것을 보여준다. 하지만 이

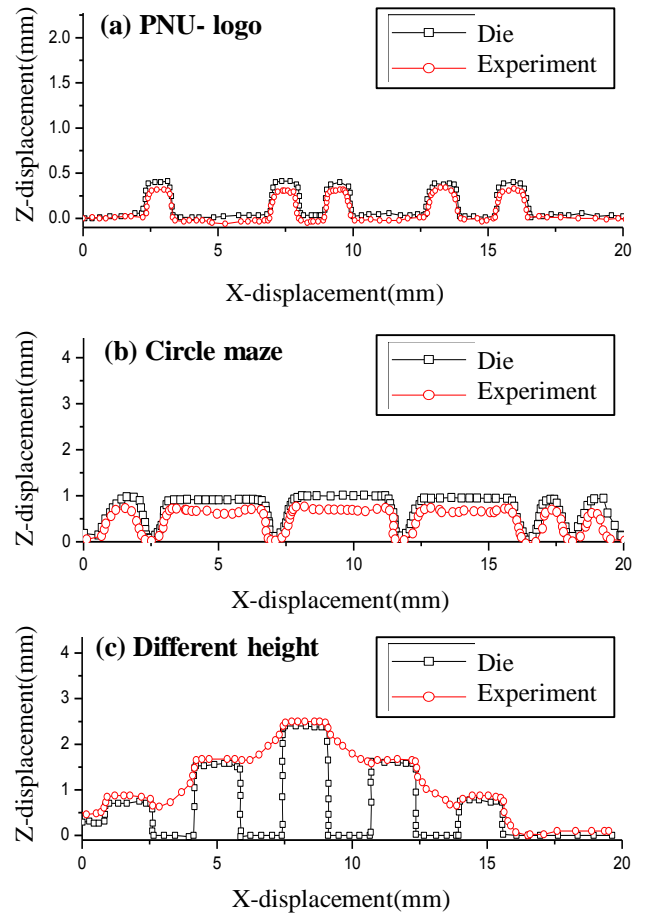
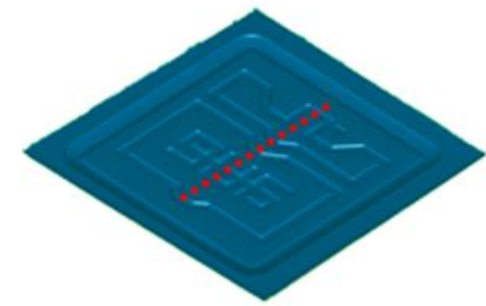
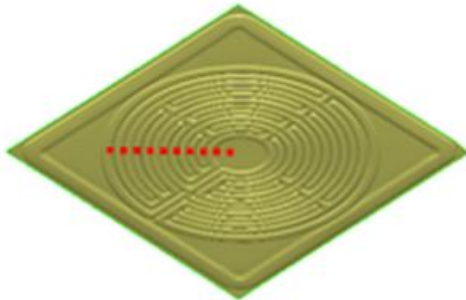


Fig. 7 Profiles of the experimental deformed sheet and the die

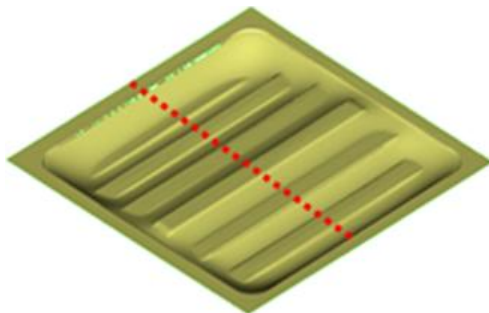
중 깊이 펀치의 경우 홈의 깊이와 폭에 따라 성형성에 차이를 보인다. Fig. 7(c)와 같이 판재가 펀치의 안쪽까지 닿지 않았다. 보다 완벽한 성형을 위해서는 성형이 가능한 폭과 깊이에 관한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다. 또한 자속(magnetic flux) 집중장치를 통해 추가적인 전자기력을 적용함으로써 문제점을 해결하는데 도움을 줄 수 있다.



(a) PNU- logo



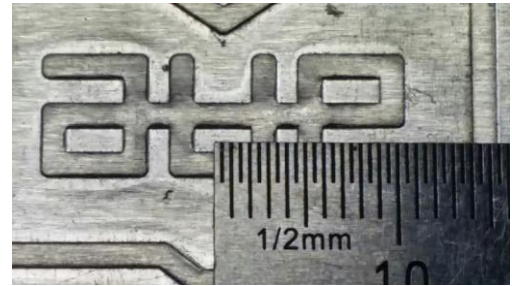
(b) Circle maze



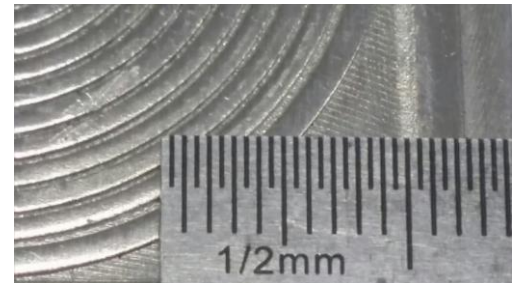
(c) Different height

Fig. 8 Measuring 3D scanning images for formed patterns

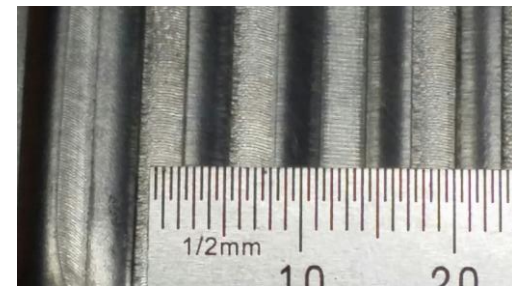
압인 패턴의 3D 스캔 이미지는 Fig. 9와 같이 성형 다이 표면의 밀리미터(mm) 단위의 모사를 보여준다. 기존의 성형 공정으로는 높은 충격력을 이용한 EMF로 얻은 이와 결과를 얻기 힘들다. 이처럼 단일 성형 다이를 사용하는 EMF성형은 종래의 성형 법을 대체 할 수 있다. 판재 모서리부분의 변형은 판재의 중심부분에 비해 다소 원활하지 못함을 볼 수 있는데, 이는 판재 중심과 비해 판재의 가장자리에는 다소 적은 전자기력이 작용하기 때문이다. 나아가 균일한 변형을 얻기 위해선 균일한 전자기력의 분포가 요구되며, 성형에 사용되는 코일의 크기 또한 성형 공정에 최적화 되어야 한다. 판재에서 패턴 성형에 사용된 부분을 제외한 부분은 폐기물에 해당된다.



(a) PNU- logo



(b) Circle maze



(c) Different height

Fig. 9 Comparing formed patterns against measuring instrument

### 3. 결론

본 연구에서 4 종의 상이한 펀치를 이용한 밀리미터(mm) 단위의 압인 패턴 성형에 EMF 공정을 적용시켜 보았다.

단일 성형 다이를 사용함에 따른 제작 비용 절감은 EMF의 상업적 적용 가능성을 확인할 수 있다. 단일 코일로 여러 가지 패턴을 성형할 수 있다는 것 또한 경제적으로 상당한 이점이다. EMF를 이용한 압인 패턴 성형의 상업적 적용을 위해서는 균일한 전자기력을 분포하는 코일의 설계가 요구된다. 본 논문에서 제안된 방법이 실제 산업에 적용되기 위해서는 비용분석뿐만 아니라 추가적으로 매개변

수와 최적화에 대한 연구가 뒷받침되어야 할 것이다. 추후에는 주로 레이저 성형 기술을 이용해왔던 정밀한 패턴 성형을 마이크로( $\mu$ ) 단위의 EMF공정으로의 대체에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012 R1A5A1048294)과 지역혁신인력양성사업(No. 2012H1B8A2026095)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [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] J. Imbert, M. Worswick, S. Winkler, S. Golovashchenko, V. Dmitriev, 2005, Analysis of the Increased Formability of Aluminum Alloy Sheet Formed using Electromagnetic Forming, SAE World Congress, Paper 2005-01-00827.
- [3] S. Golowin, M. Kamal, J. Shang, J. Portier, A. Din, G. S. Daehn, R. Bradley, K. E. Newman, S. Hatkevich, 2007, Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 16, No. 4, pp. 455~460.
- [4] M. Kamal, G. S. Daehn, 2007, A Uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets, J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 129, No. 2, pp. 369~379.
- [5] M. Seth, V. J. Vohnout, G. S. Daehn, 2005, Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact, J. Mater. Process. Technol., Vol. 168, No. 3, pp. 390~400.
- [6] G. S. Daehn, 2005, High Velocity Metal Forming, ASM Handbook Forming and Forging.
- [7] V. Anupam, John D. Defouw, G. S. Daehn, 2014, Dynamic Compaction of Titanium Powder by Vaporizing Foil Actuator Assisted Shearing, Powder Technol., Vol. 254, pp. 181~186.
- [8] M. Kamal, J. Shang, S. Cheng, S. Hatkevich, G. S. Daehn, 2007, Agile Manufacturing of a Micro-Embossed Case by a Two-step Electromagnetic Forming Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 190, No. 1, pp. 41~50.
- [9] 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. 26, No. 1, pp. 1~2.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] K. H. Lee, Y. E. Yoo, S. K. Kim, T. H. Kim, T. J. Je, D. S. Choi, 2007, Fabrication of Nano Pattern using the Injection molding, Korean Soc. Mech. Eng., Busan, Korea, pp. 927~931.
- [13] O. K. Kwon, J. H. Yun, K. Park, 2007, Improvement of Moldability for Ultra Thin-Wall Molding with Micro-Patterns, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 31, No. 5, pp. 556~561.
- [14] Y. E. Yoo, Y. H. Seo, T. J. Je, D. S. Choi, 2005, Injection Molding Technology for Micro/Nano pattern, J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol.22, No. 2, pp. 23~29.