

## 알루미늄 실린더 압축실험에서의 고주파 진동의 영향

김상우<sup>#</sup> · 이영선<sup>1</sup>

### Effect of High Frequency Oscillation on Compression Tests of Aluminum Cylindrical Specimens

S. W. Kim, Y. S. Lee

(Received September 8, 2016 / Revised October 25, 2016 / Accepted October 27, 2016)

#### Abstract

Recent researches have reported that the superposition of ultrasonic vibrations in metal forming provides beneficial effects such as the reduction of forming load, flow stress and interfacial friction which improves the surface quality of end products. This paper presents experimental investigations on the effects of ultrasonic vibrations in upsetting tests of aluminum. The ultrasonic exciting system consists of piezoelectric transducer and resonator was designed and constructed to superimpose high frequency oscillation on the forming tools. Ultrasonic vibration-assisted upsetting tests were performed for three vibration modes five amplitudes, and the results were compared with those of conventional upsetting tests. The results showed that the superimposition of ultrasonic vibration reduces the upsetting load, and the load reduction is only dependent on the amplitude of the applied vibration regardless of deformation histories and vibration modes.

**Key Words** : Ultrasonic Vibration, Aluminum, Upsetting, Resonance, PZT, Transducer

#### 1. 서 론

초음파는 인간의 가청 주파수 범위(20kHz) 이상의 음향 진동으로 1920년대 Langevin 에 의해 초음파 측탐기가 개발된 이후 각종 탐지장치, 센서 등 통신적 응용분야와 가공기, 용착기, 세정기 등 동력적 응용분야에 다양하게 적용되고 있다.

1955년 Blaha 와 Langenecker[1]의 초음파 진동을 부과한 단결정 아연의 인장실험으로부터 유동응력의 감소효과를 발견한 이후, 많은 연구자들에 의해 다양한 소성가공공정에 초음파 진동을 적용하기 위한 노력이 진행되어 왔다. 이들 연구결과는 아직 금속소재의 변형에 있어서 초음파 진동이 작용하는 근본적 원리를 완벽하게 규명하지는 못하였으나, 다

양한 소재와 공정에 대한 실험을 통해 초음파 진동의 적용이 금속소재 유동응력의 감소를 유발하는 효과와 금형과 소재간의 마찰감소 또는 표면품질 향상 의 효과가 있음을 보였는데, 전자를 체적효과(volume effect), 후자를 표면효과(surface effect)라 통칭한다. Siegert 와 Möck[2]는 오스테나이트계 스테인레스 강선의 인발공정 금형에 초음파 진동을 부과함으로써 인발력 감소와 선재의 표면품질의 향상이 있음을 보였으며, Hayashi 등[3]은 초음파 적용 인발 공정에서의 진동의 방향, 주파수, 진폭, 인발속도 등 공정변수에 따른 영향을 분석하고자 금형의 초음파 진동을 강제운동으로 가정하여 유한요소해석을 수행한 바 있다. 또한 Bunget 과 Ngaile[4]은 미세 성형 공정에서 초음파 진동을 적용함으로써 타공정에 비

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소  
# Corresponding Author : Materials Deformation Department, Korea  
Institute of Materials Science, E-mail: kimsw@kims.re.kr

해 마찰의 효과가 지배적인 미세 성형공정에서 발생할 수 있는 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 적용할 가능성을 보인 바 있으며, Pasierb 와 Wojnar[5], Jimma 등[6]은 판재의 딥 드로잉 금형에 초음파 진동을 적용함으로써 한계 드로잉비를 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, Siddiq 와 Sayed[7]는 초음파에 의한 연화효과(acoustic softening effect)를 고려하기 위한 새로운 해석기법을 제안하여 판재성형, 선재 인발, 열간 업셋팅 공정에 적용한 바 있다. 이들 연구에서는 소성가공공정에서의 초음파 진동의 적용이 성형하중감소, 한계 드로잉비의 증가, 표면품질향상 등 유익한 체적 또는 표면효과가 있음을 보였으나, 이러한 효과를 정량적으로 나타내지는 못하였다. 저자는 앞선 연구에서 판재 드로잉 공정에서 초음파 진동의 효과의 정량적인 분석을 위해 SPCC 판재의 초음파 진동 드로잉 실험 및 유한요소해석을 수행한 바 있으며, 상기 연구결과로부터 초음파 진동이 소재와 금형간의 마찰을 감소시키는 효과가 있으며, 이로 인해 한계 드로잉비를 향상시킬 수 있음을 보인 바 있다[8].

본 연구에서는 체적성형공정에서의 초음파 진동의 효과를 분석하기 위하여 초음파 진동장치를 설계하고 제작하였으며, 실린더형 알루미늄 시편의 압축실험에 있어서 20kHz의 초음파 진동을 부여하고, 진동의 유무 및 진동조건에 대한 영향을 분석하였다. 특히, 기존연구에서 정량적으로 제어하지 못했던 진폭을 일정하게 제어할 수 있도록 장치를 고안함으로써 종래에 비해 정량적인 비교분석이 가능하도록 개선하였다.

## 2. 초음파 진동 시스템

초음파의 동력적 응용을 위한 진동장치는 발전기(generator)와 진동자(transducer) 및 증폭기(amplifier)로 구성된다. 발전기는 100~250V, 50~60Hz의 저전압, 저주파 전기입력을 변환하여 20kHz이상의 초음파 대역의 고전압 전기신호를 출력한다. 출력된 전기신호는 진동자로 전달되어 압전특성에 의해 기계적 진동으로 변환된다. 압전 진동자의 출력단에서 발생하는 기계적 진동은 진폭이 매우 미세하므로, 동력적으로 응용하기 위해서는 진동자의 설계주파수와 동일한 고유진동수를 갖도록 설계된 혼(horn)과 부스터(booster)를 부착하여 공진현상에 의해 진폭을

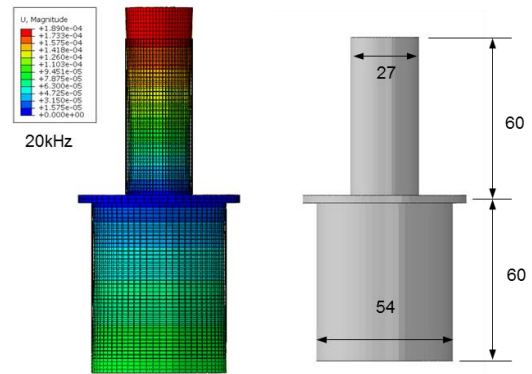


Fig. 1 Design of ultrasonic vibration booster

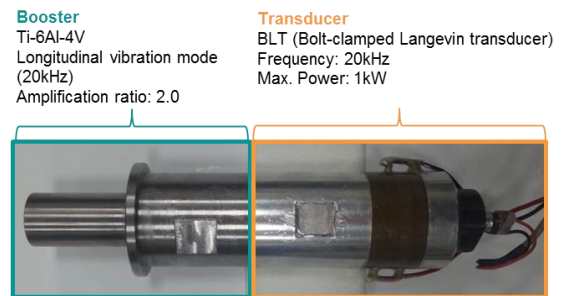


Fig. 2 Ultrasonic vibration transducer and booster

확대할 수 있다. 따라서, 초음파 진동이 최대 진폭을 나타내기 위해서는 진동자의 설계주파수에서 중진동 방향의 공진이 발생할 수 있도록 혼과 부스터의 공진설계가 매우 중요하다. 일반적으로 혼과 부스터의 공진설계는 1차원 진동방정식에 의해 대략적인 길이를 결정하고, 유한요소법을 이용한 고유진동수 해석을 통해 상세치수설계가 이루어진다[8]. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 입력단과 출력단의 면적비를 2:1로 고정하고, 1차원 진동방정식 및 유한요소해석을 통해 20kHz에서 중진동 모드가 발생할 수 있도록 부스터의 길이를 설계하였다. 초음파 진동을 이용한 실린더 압축실험을 위해 고유진동수 20kHz의 압전세라믹을 여러장 적층하고, 볼트로 고정된 최대 출력 1kW의 BLT(Bolt-clamped Langevin Transducer) 진동자를 사용함으로써 혼과의 공진현상을 유도하여 최대진폭을 발생시킬 수 있도록 하였다.

일반적인 초음파 진동 발전기는 출력에너지를 제어함에 따라 진폭제어가 불가능하였다. 본 연구에서는 초음파 진동자의 압전특성에 따라 출력진폭이 입력전압에 선형적으로 비례하는 특성을 이용하여 전압을 제어함으로써 출력단의 진폭을 제어하고자

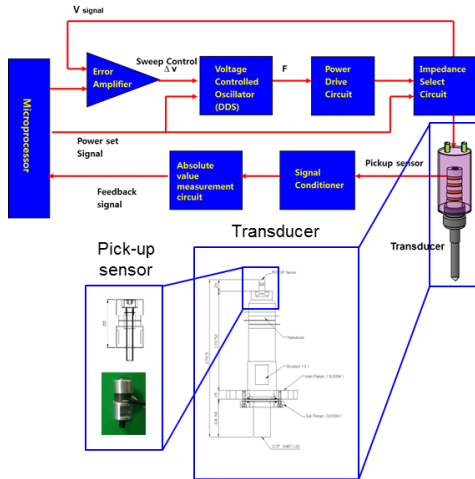


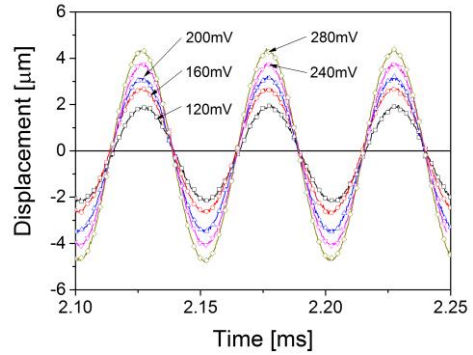
Fig. 3 Ultrasonic generator circuit diagram

하였다. Fig. 2와 3에서와 같이 진동자에 Pick-up 센서를 부착하고 진동자와 발진기간의 폐회로를 구성함으로써 Pick-up 센서를 통해 측정된 전압을 피드백하여 출력에너지를 제어함으로써 진폭제어가 가능하도록 구현하였다.

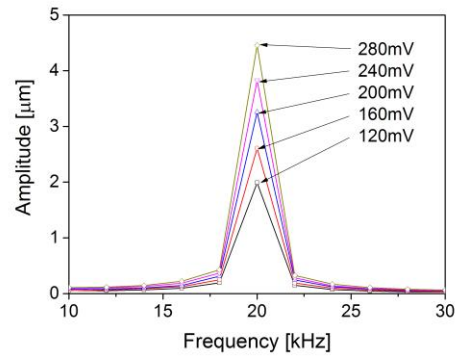
### 3. 초음파 진동 측정

상기와 같이 제작된 초음파 진동시스템의 출력 진폭을 측정하기 위하여 Microsense사의 2nm의 RMS 오차범위를 갖는 Gap sensor(5810module & 5503probe)를 이용하여 입력전압에 대한 부스터 끝단에서의 출력진폭을 측정하였다. Fig. 4(a)에서와 같이 출력단 변위는 시간에 따라 정현파 형태로 나타났으며, FFT(Fast Fourier Transformation)분석을 통해 주파수 영역으로 변환한 결과 Fig. 4(b)와 같이 모든 입력전압에서 20kHz 주파수에서 최대 진폭이 발생하는 것으로 측정되었다. 또한, Fig. 4(c)에서와 같이 출력진폭은 입력전압에 대해 선형적으로 비례함을 확인하였으며, 120mV에서 4.2 μm, 160mV에서 5.4 μm, 200mV에서 6.7 μm, 240mV에서 7.9 μm, 280mV에서 9.2 μm의 진폭을 발생시키는 것으로 측정되었다.

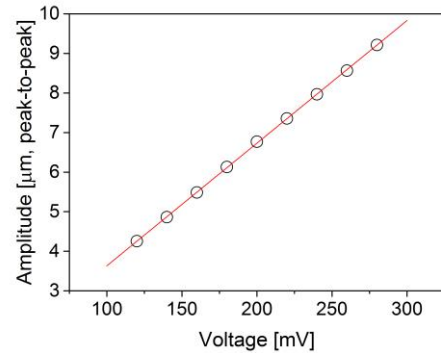
진동자 및 부스터로 구성된 초음파 진동장치는 부스터의 플랜지부를 고정하여 6개의 수직바로 구성된 치구에 볼트로 체결하고 압축실험을 위해 Fig. 5와 같이 인장시험기의 하부에 장착하였다. 부스터는 실린더형 시편압축을 위한 하부금형으로 사용하였으며, 상부금형으로는 부스터와 동일한 Ti-6Al-4V 소재로 제작된 원형평판 금형을 제작하여 10ton로드



(a) Time histories of displacement at the booster tip



(b) FFT analysis results



(c) Relationship between input voltage and amplitude

Fig. 4 Measurement of ultrasonic vibration amplitude

셀에 장착하였다. 상하부 금형은 동일한 조건으로 연마하여 표면조도에 의한 영향이 없도록 하였으며, 상기 초음파 진동장치는 상부금형의 하강시 하부금형의 역할을 수행함과 동시에 실린더형 시편의 압축시 하중과 동일한 방향으로 진동을 발생시킬 수 있도록 설계되었다.

실험은 직경 8mm, 높이 8mm의 실린더 형상의 A6061 알루미늄 합금시편을 사용하여 0.5mm/min의 속도로 압축하였으며, 레이저 신율계를 이용하여 압

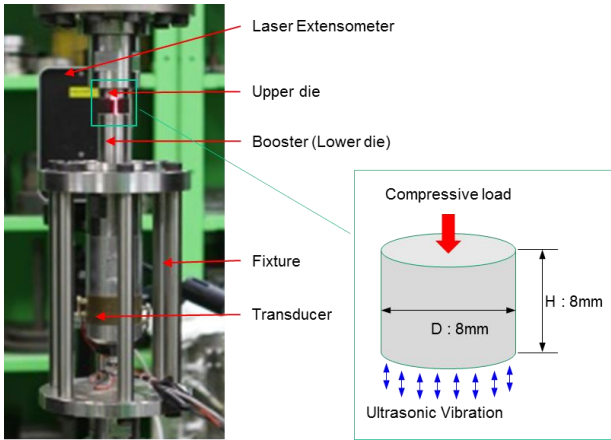


Fig. 5 Compression test with ultrasonic vibration

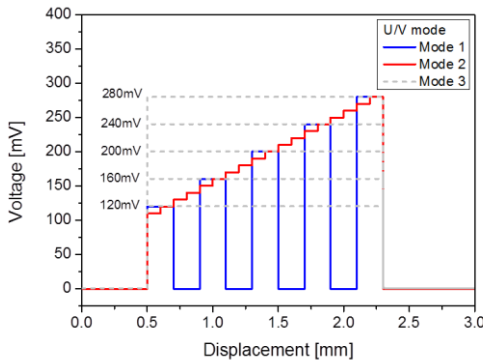


Fig. 6 Vibration modes

축변위를 측정하였다. 진동은 4.2~9.2  $\mu\text{m}$ 의 다양한 진폭 및 조건에 대해 부과하였으며, 소재와 금형간의 윤활작용을 위하여  $\text{MoS}_2$ 윤활제를 도포하였다.

#### 4. 초음파 진동 압축실험

진폭, 진동모드 및 변형이력에 대한 영향을 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 총 3가지 진동모드를 고려하였다. 모드1은 초음파 진동없이 0.5mm 압축 후 소성변형구간에서 4.2  $\mu\text{m}$ 의 진폭으로 초음파 진동을 부과하고 0.2mm 압축 후 진동을 제거하였다. 이후, 다시 진폭을 5.4  $\mu\text{m}$ 로 증가하여 진동을 부과하고 0.2mm 압축후 진동을 제거하였다. 이상의 과정을 반복하여 최대 9.2  $\mu\text{m}$ 까지 펄스형태로 진동을 부과하였다. 모드2는 모드1과는 달리 초기 0.5mm 압축 후 3.9  $\mu\text{m}$ 의 진폭으로 진동을 부과하고, 0.1mm 압축마다 0.3  $\mu\text{m}$ (40mV)씩 진폭을 점차적으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 마지막으로 모드3에서는 0.5mm 압축 후 일정한 진폭을 유지한 채로 초음

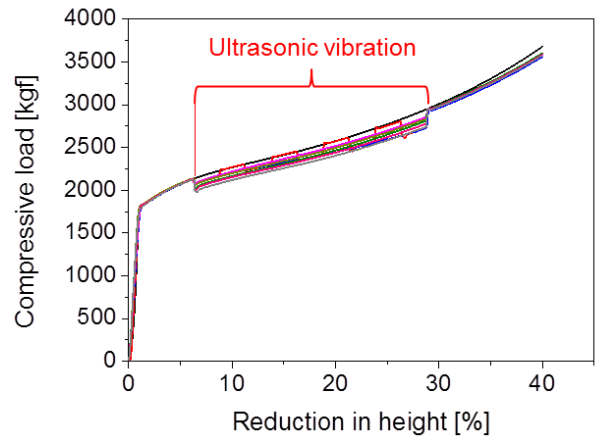


Fig. 7 Compressive loads with and without ultrasonic vibration

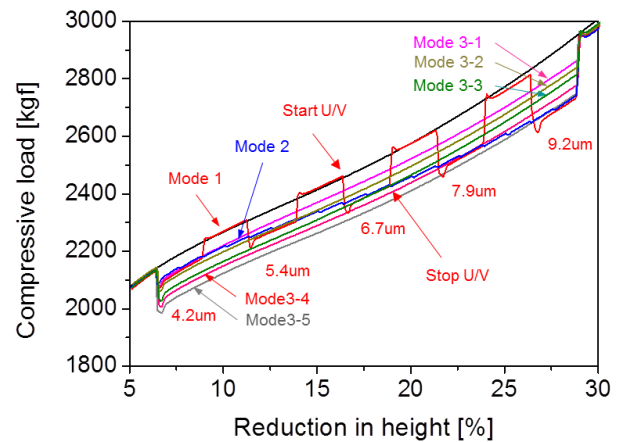


Fig. 8 Compressive loads for various vibration modes

파진동 압축실험을 수행하였으며, 4.2~9.2  $\mu\text{m}$  5가지 진폭에 대해 각각 실험하였다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 초음파 진동 압축실험결과 압축률에 대한 압축하중을 보여주고 있는데 변형 초기에서는 압축율이 증가함에 따라 압축하중이 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 소성변형영역 이후, 다양한 형태의 진동을 부과함에 따라 하중감소현상이 나타남을 알 수 있으며, 초음파 진동의 제거에 의해 하중이 원래 수준으로 회복되는 경향을 보였다. 초음파 진동이 부과된 영역만을 확대해서 살펴보면 Fig. 8과 같이 하중감소현상은 초음파 진동모드에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 모드1의 경우 구간별로 초음파 진동 및 제거를 반복적으로 수행한 결과로 초음

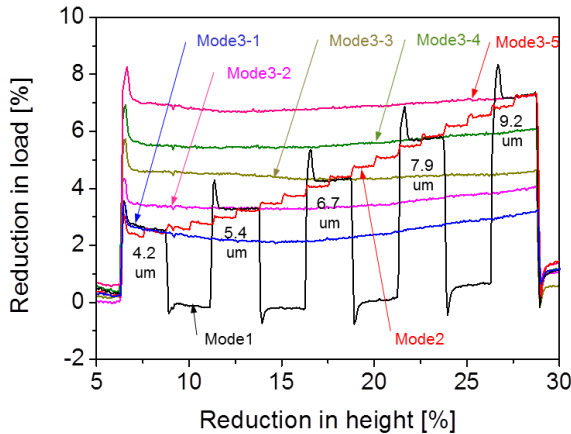


Fig. 9 Percentage variation of load reduction

파 진동이 중첩되는 영역에서만 하중이 일시적으로 감소하고 초음파 진동을 제거할 경우 순간적으로 회복하는 경향을 보였다. 모드2는 압축이 진행됨에 따라 지속적으로 진동을 부과하되 점차 진폭을 증가시킨 경우로, 진폭의 증가에 따라 하중감소량 역시 점차적으로 커지는 경향을 보였다. 모드3은 일정한 진폭의 진동을 지속적으로 부과한 경우로 초음파 진동에 의해 감소된 하중은 제거하기 이전까지 일정하게 유지하다 제거 후 순간적으로 회복하는 경향을 보였으며, 진폭이 클수록 하중감소량은 크게 나타났다. 모드1,2,3은 각각 초음파 진동이력 및 소재의 변형이력이 다름에도 불구하고 초음파 진폭의 크기가 동일한 조건에서는 모드에 무관하게 하중감소량은 동일한 것으로 나타났다.

Fig. 9는 초음파 진동에 의한 하중 감소량을 무진동 압축하중에 대한 비율로 나타낸 것이다. 모드1의 경우 진폭의 증가에 따라 하중감소율도 증가하며, 모드2의 경우 점진적인 진폭의 증가에 따라 하중감소율도 동일한 양상으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 모드3의 경우 일정한 진폭에서의 하중감소율은 압축률에 무관하게 일정하게 유지됨을 알 수 있으며, 진폭이 증가함에 따라 하중 감소율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 압축방향과 동일한 방향으로의 초음파 진동의 적용은 압축하중을 일시적으로 감소시키는 효과가 있으며, 하중감소량 및 비율은 진폭에 비례함을 알 수 있다. 또한 진동에 의한 압축하중의 감소는 진동모드 및 하중이력에 무관하며, 전적으로 진폭의 크기에 의존함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 공진 설계된 20kHz의 초음파 진동장치를 이용하여 알루미늄 A6061합금의 실린더 압축실험에서의 초음파 진동의 영향을 다양한 진폭 및 진동모드에 대해 알아보았으며, 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 압전세라믹 진동자는 입력전압과 출력진폭이 선형적 비례관계에 있으므로 입력전압을 제어함으로써 출력진폭을 제어할 수 있다.

(2) 압축실험에서의 초음파 진동의 적용은 일시적인 하중감소현상을 보이며, 진동의 제거에 따라 하중은 순간적으로 회복된다.

(3) 초음파 진동의 적용에 따른 하중감소량 및 감소율은 진폭의 크기에 정비례한다.

(4) 초음파 진동에 의한 하중감소현상은 하중이력 및 진동모드에는 무관하며, 진폭의 크기에 전적으로 의존한다.

초음파 진동에 의한 하중감소현상은 소재와 금형간의 마찰감소, 진동에 의한 발열, 소재내부의 재료학적 변화, 정하중 및 동하중에 의한 응력중첩현상 등 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다. 향후, 하중감소현상의 정확한 원인을 규명하기 위해 실험적, 해석적 검증을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합연구사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 B551179-11-02-0).

## REFERENCES

- [1] F. Blaha, B. Langenecker, 1955, Tensile Deformation of Zinc Crystal under Ultrasonic Vibration, *Naturwiss.*, Vol. 42, p. 556.
- [2] K. Siegert, A. Möck, 1996, Wire Drawing with Ultrasonically Oscillating Dies, *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 60, No. 1, pp. 657~660.
- [3] M. Hayashi, M. Jin, S. Thipprakmas, M. Murakawa, J. C. Hung, Y. C. Tsa, C. H. Hung, 2003, Simulation of Ultrasonic-Vibration Drawing using the Finite

- Element Method (FEM), J. Mater. Proc. Technol., Vol. 140, No. 1, pp. 30~35.
- [4] C. Bunget, G. Ngaile, 2011, Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-extrusion, Ultrason., Vol. 51, No. 5, pp. 606~616.
- [5] A. Pasierb, A. Wojnar, 1992, An Experimental Investigation of Deep Drawing and Drawing Processes of Thin-walled Products with Utilization of Ultrasonic Vibrations, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 34, No. 1, pp. 489~494.
- [6] T. Jimma, Y. Kasuga, N. Iwaki, O. Miyazawa, E. Mori, K. Ito, H. Hatano, 1998, An Application of Ultrasonic Vibration to the Deep Drawing Process, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 80-81, pp. 406~412.
- [7] A. Siddiq, T. E. Sayed, 2012, Ultrasonic-assisted Manufacturing Processes: Variational Model and Numerical Simulations, Ultrason., Vol. 52, No. 4, pp. 521~529.
- [8] S. W. Kim, Y. G. Son, Y. S. Lee, FEA and Experiment Investigation on the Friction Reduction for Ultrasonic Vibration Assisted Deep Drawing, Trans. Mater. Process, Vol.23, No. 7, pp. 413~418.