

## 초음파 진동 딥 드로잉 공정에서의 마찰감소효과 분석을 위한 유한요소해석 및 실험

김상우<sup>#</sup> · 손영길<sup>1</sup> · 이영선<sup>1</sup>

### FEA and Experiment Investigation on the Friction Reduction for Ultrasonic Vibration Assisted Deep Drawing

S. W. Kim, Y. G. Son, Y. S. Lee

(Received March 18, 2014 / Revised July 3, 2014 / Accepted July 16, 2014)

#### Abstract

The current study presents experimental and numerical results on the effect of ultrasonic vibrations on a cylindrical cup drawing of a cold rolled steel sheet(SPCC). An experimental apparatus, which can superimpose high frequency oscillations during deep drawing, was constructed by installing on the tooling ultrasonic vibration generators consisting of a piezoelectric transducer and a resonator. Conventional and vibration-assisted cylindrical deep drawing tests were conducted for various drawing ratios, and the limiting drawing ratios(LDR) for both methods were compared. To evaluate quantitatively the contribution from the ultrasonic vibrations to the reduction of friction between tools and material finite element analyses were conducted. Through a series of parametric analyses, the friction coefficients, which minimized the differences of punch load data between the experiments and simulations, were determined. The results show that the application of ultrasonic vibration effectively improves the LDR by reducing the friction between the tools and the material.

**Key Words** : Deep Drawing, Ultrasonic Vibration, LDR, FEM, SPCC

#### 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 금

속소재의 변형에 있어서 초음파 진동이 작용하는 근본적 원리를 완벽하게 규명하지 못하였으나, 다양한 소재와 공정에 대한 실험을 통해 초음파 진동의 적용이 금속소재의 유동응력 감소를 유발하는 효과가 있을 뿐만 아니라 금형과 소재간의 마찰감소 또는 표면품질 향상의 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]과 Lee 등[4]은 초음파

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

진동 적용 인발 공정에서의 진동의 방향, 주파수, 진폭, 인발속도 등 공정변수에 따른 영향을 분석하고자 금형의 초음파 진동을 강제 운동으로 가정하여 유한요소해석을 수행한 바 있다. 또한 Bungee 과 Ngaile[5]은 미세 성형공정에서 초음파 진동을 적용함으로써 타공정에 비해 마찰의 효과가 지배적인 미세 성형공정에서 발생할 수 있는 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 적용할 가능성을 보인 바 있으며, Pasierb 와 Wojnar[6], Jimma 등[7]은 판재의 딥드로잉 금형에 초음파 진동을 적용함으로써 한계드로잉비를 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, Siddiq 와 Sayed[8]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 성형하중 감소, 한계드로잉비의 증가, 표면품질향상 등 유익한 체적 또는 표면효과가 있음을 보였으나, 이러한 효과를 정량적으로 나타내지는 못하였다.

본 연구에서는 SPCC(cold rolled steel sheet)의 원통컵 드로잉 공정에서의 초음파 진동효과를 분석하기 위한 실험 및 유한요소해석을 수행하였다. 1차원 파동방정식과 모드해석을 통해 진동자의 가진 주파수에서 공진이 발생하여 최대진폭을 발생하고, 종방향 유효진동모드를 나타낼 수 있도록 일체형 혼/부스터를 설계하였으며, 기존의 드로잉 금형에 압전 세라믹 진동자 및 일체형 혼과 부스터로 구성된 초음파 발진장치를 장착하여 초음파 진동을 부과할 수 있도록 하였다. 또한, 다양한 드로잉비에 대한 원통컵 드로잉 실험을 통해 초음파 가진 여부에 따른 진동효과를 비교하였으며, 유한요소해석을 통해 초음파 가진 특성을 드로잉 공정에서의 마찰계수의 변화로 표현함으로써 이를 정량화하고자 하였다.

## 2. 초음파 진동 드로잉 실험

### 2.1 초음파 진동 혼 설계

초음파 진동기는 일반적으로 초음파 발전기(generator), 진동자(transducer), 부스터(booster) 및 혼(horn)으로 구성된다. 발전소에서 송전되는 60Hz의 교류파형 전류는 발전기에 의해 특정 주파수의 교류파형으로 변환되고, 진동자에 전달되어 진동자의 압전 특성에 의해 일정진폭을 생성하는 기계적 에너

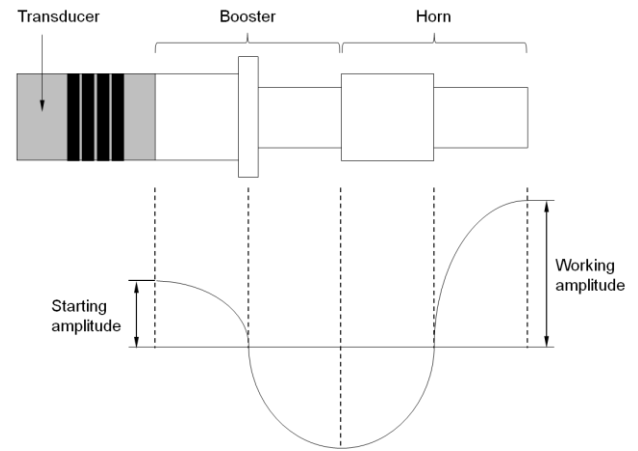


Fig. 1 Amplitude variation through booster and horn

지로 변환된다. Fig. 1 과 같이 진동자의 출력면에서 전달되는 미세진동을 최대 증폭시키기 위해서 부스터와 혼은 진동자의 가진 주파수와 동일한 고유진동수를 갖도록 설계되어 공진(resonance)에 의한 증폭이 가능하도록 해야 하며, 이때 종진동(longitudinal vibration) 모드를 갖도록 설계되어야 한다. 초음파 가진 주파수 및 혼과 부스터의 재질이 결정되면 원형단면 봉의 1 차원 파동방정식에 의해 도출된 식(1)을 이용하여 1/2 파장 혼의 개략적인 길이를 구하고, 유한요소해석을 통해 고유진동수와 진동모드가 원하는 특성을 보이는지 검토한다. 본 연구에서는 진동자의 가진 주파수가 27kHz 일 경우, 밀도가 4.43 g/cc, 탄성계수가 114GPa 인 Ti-6Al-4V 합금소재로 설계된 일체형 혼과 부스터의 전체길이를 식(1)에 의해 188mm 로 1 차 설계하였으며, 입력단과 출력단의 직경비는 1:0.8로 결정하였다.

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$  는 진동주기,  $f$  는 진동주파수,  $c$  는 매질의 음속,  $\rho$  와  $E$ 는 각각 매질의 밀도, 탄성계수이다.

상기 1차원 파동방정식을 기초로 한 해석하는 문제의 간소화로 인해 실제와 차이를 나타낼 수 있으므로, 개략적 설계형상을 참조하여 유한요소해석을 통한 상세설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 설계된 형상의 고유진동수 및 진동모드를 분석하기 위해 상용 해석코드인 ABAQUS-Standard를 사용하여 모드해석(modal analysis)을 수행하였다. 그 결과,

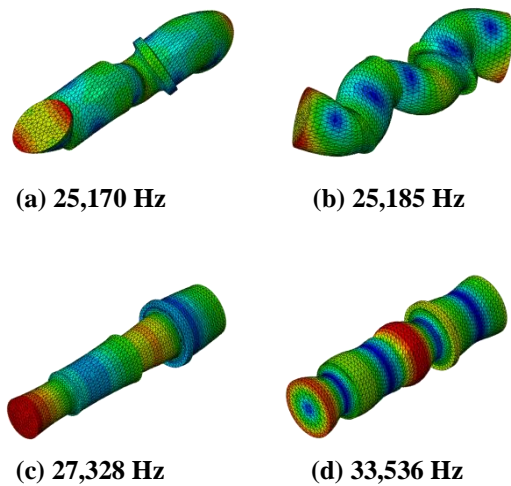


Fig. 2 Mode shapes of horn-booster

일체형 혼과 부스터의 전체길이가 176mm일 경우 27,328Hz에서 종 진동 모드가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 설계 목표인 27kHz와 328Hz의 차이를 보이고 있으나, 발전기의 출력 오차범위  $\pm 500\text{Hz}$ 를 감안하면 가진 주파수 영역에서 종 진동 모드의 공진이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2 초음파 진동 금형 설계

원통컵 드로잉 공정에 초음파 진동을 부과하기 위하여 Fig. 3 과 같이 소재의 수직방향으로 진동이 부과될 수 있도록 네 개의 초음파 진동기를 장착하였다. 초음파 진동자는 네 개의 PZT 진동자를 적층하고 볼트로 고정된 BLT(bolt-clamped Langevin type transducer) 진동자를 사용하였으며, 공진 주파수는 27kHz, 최대소비전력은 400W 이다. 진동자에 의해 생성되고, 혼과 부스터를 통해 증폭되어 금형으로 전달되는 초음파 에너지는 소재와 금형간의 미세한 진동을 유발함으로써 금형과 소재간의 접촉면적을 주기적으로 감소시킴으로써 마찰력 감소의 효과를 보일 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 진동자에 의해 전달된 진동 에너지가 효율적으로 전달되도록 하기 위해 하부 다이는 사각형상의 10mm 두께의 진동판(vibration plate)과 원통형상의 지지 다이(support die)로 분할하였으며, 진동판의 네 모서리에 혼의 끝단을 볼트 체결하여 진동이 잘 전달될 수 있도록 하였다. 앞 절의 모드해석결과와 같이 일체형 혼/부스터는 진동자의 공진조건과 동일한 고유진동수를 갖도록 설계되었으나, 진동판과의 결합시

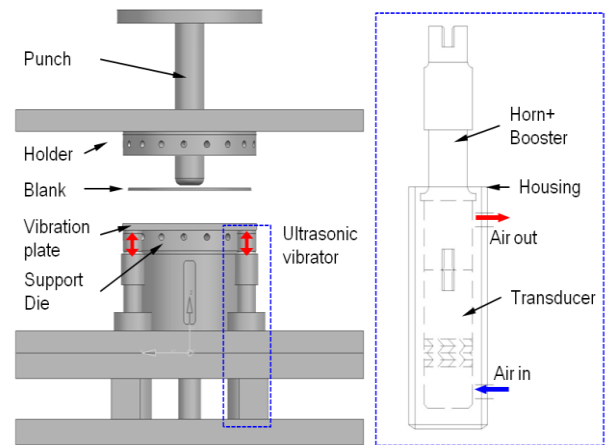


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic vibration-assisted deep drawing system

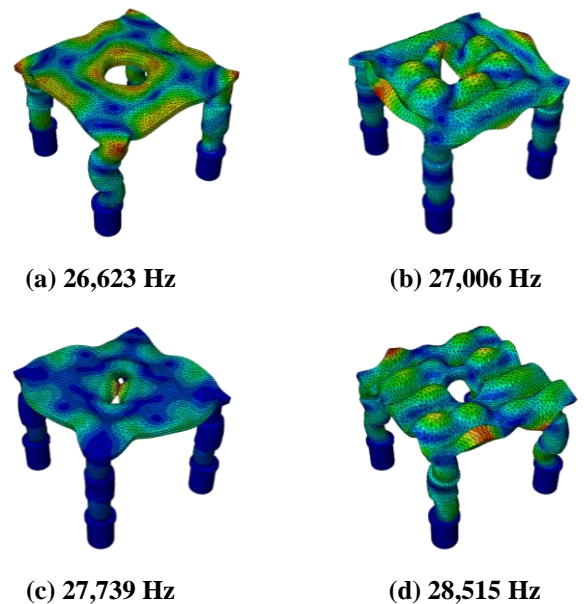


Fig. 4 Mode shapes of vibration plate and horn-booster assembly

동일한 공진특성을 보일 수 있는지에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 일체형 혼/부스터와 진동판이 결합된 어셈블리에 대한 모드해석을 추가로 수행하여 고유진동수 및 진동모드를 분석하였다. 그 결과, Fig. 4에서와 같이 다양한 진동모드가 예측되었으며, 특히, 가진 주파수와 동일한 27,006 Hz에서 진동판의 수직방향으로의 진동모드가 예측됨에 따라 소재와 금형간의 마찰저감을 위한 유효진동모드를 나타낼 수 있을 것으로 판단되었다.

### 2.3 초음파 진동 드로잉 실험

원통컵 드로잉 공정에서의 초음파 진동효과를 분석하기 위하여 초음파 진동이 부과되었을 경우와 그렇지 않을 경우에 대한 원통컵 드로잉 실험을 수행하였다. 소재는 1mm 두께의 SPCC판재를 사용하였으며, 소재의 직경을 달리함으로써 1.74, 1.96, 2.14, 2.34의 네 가지 드로잉비(DR: drawing ratio)에 대한 실험을 수행하였다. 직경 50mm의 펀치를 사용하여 0.5mm/s의 일정속도로 드로잉 하였으며, 소재와 홀더 간의 간격을 0.1mm로 고정하여 홀딩하중에 의해 초음파 진동이 상쇄되지 않도록 하였다. 또한, 조기 파단을 유도하기 위하여 소재와 금형의 접촉면은 무윤활 조건에서 실험을 수행하였다.

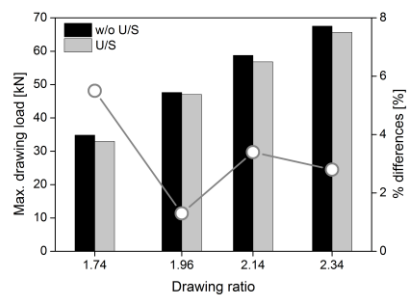
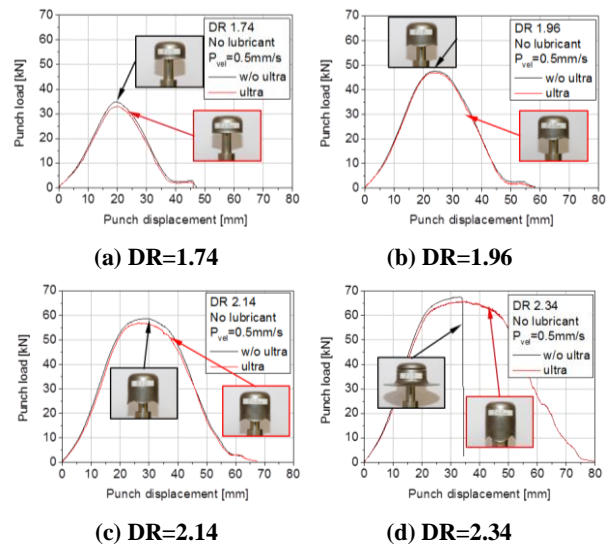
동일한 조건에서 5회 반복 실험한 결과 Fig. 5에서와 같이 드로잉비 2.14이하에서는 두 경우 모두 파단 없이 드로잉이 완료되었으나, 드로잉비 2.34에서는 초음파 진동을 부과한 경우 성공적으로 드로잉된 반면, 그렇지 않은 경우 파단이 발생하였다. Fig. 6에는 드로잉 공정 중 측정된 하중을 비교하였다. 로드셀에 의해 측정된 하중 그래프는 27kHz의 미세한 초음파 진동에 의한 하중의 변화를 상세하게 표현할 수는 없으므로, 진동에 의한 최대·최소 하중의 평균값으로 가정하였다. 그 결과, 최대 펀치 하중은 드로잉비에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 각각의 드로잉비에 대해 초음파를 부과한 경우에는 최대 펀치 하중이 작게 나타나는 경향을 보였는데 특히, 드로잉비 1.74에서 최대 5.5% 작게 나타났다. 드로잉 하중의 감소는 초음파 진동부과에 의한 응력중첩, 동공, 전위, 입계 등 국부영역에서의 초음파에너지 흡수, 마찰의 감소, 열 발생 등 다양한 원인에 기인하는 것으로 알려져 있다[9].



Fig. 5 Photographs of drawn specimen for various DRs; (a) with and (b) without ultrasonic vibration

### 3. 초음파 진동 효과의 정량화

앞 절에서 원통컵 드로잉 실험을 통해 초음파 진동의 적용이 한계 드로잉비의 증가와 성형하중의 감소에 효과가 있음을 확인하였다. 이러한 현상은 앞 절에서 기술한 바와 같이 다양한 원인에 의한 복합적인 현상으로 추측될 수 있으나, 본 연구에서는 진동자로부터 생성된 초음파 진동이 소재뿐만 아니라 금형으로 전달되어 다양한 경로로 흡수됨에 따라 소재내부에 체적효과를 유발할 만큼 집중적으로 전달되지 못하므로 초음파 진동의 효과는 전적으로 소재와 금형간의 마찰감소에 기인한다고 가정한다. 따라서, 초음파 진동에 의한 효과는 성형시 소재와 금형간의 마찰계수의 변화로 정량화될 수 있다. 본 연구에서는 초음파에 의한 금형의 진동을 직접 조사하지 않고, 마찰계수를 변화시켜 실험과 동일한 최대 펀치 하중을 만족하는 값을 마찰계수로 결정하고 비교하였다.



(e) Max. punch load and % differences  
Fig. 6 Comparison of punch load-displacements

**Table 1** Material properties of SPCC

Elastic properties		Hardening parameters (Swift power-law)	
$E$ [GPa]	210	$\epsilon_0$	0.01
$\nu$	0.3	$K$ [MPa]	198.95
-	-	$n$	0.242
Anisotropy parameters (Hill'48)			
F	0.709	L	2.544
G	0.673	M	2.544
H	1.327	N	2.544

### 3.1 유한요소 모델링

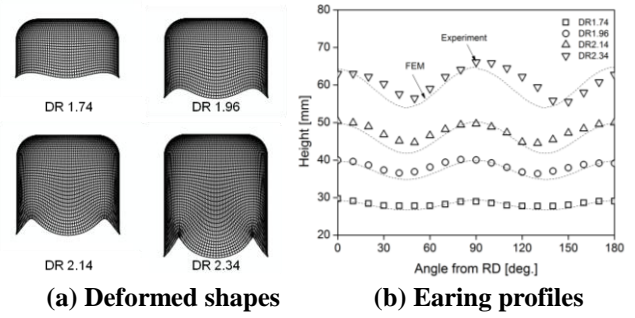
유한요소해석은 상용해석 코드인 ABAQUS-Standard 를 사용하였으며, 소재의 면내 이방성을 고려하기 위해 식(2)와 같이 Hill의 1948년 이차항복함수[10]를 사용하였다.

$$2\bar{\sigma}^2 = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (2)$$

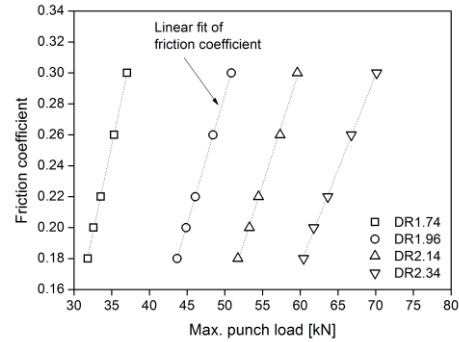
시편은 판재로부터 RD, 45°, TD방향으로 ASTM-E8의 규격에 따라 채취한 후 인장시험을 수행하여 Lankford 상수를 구하고 상관 관계식을 이용하여 이방성 계수를 구하였다. 해석에 사용된 Swift의 경화 모델에 의한 압연 방향의 경화식을 비롯한 이방성 계수 및 탄성 물성치는 Table 1에 나타내었다. 유한요소모델은 항복함수의 특성과 대칭성을 고려하여 1/4모델을 이용하였으며, 소재는 S4R 4-노드 쉘 요소로 모델링 하고, 금형은 강체로 가정하였다.

### 3.2 유한요소 해석결과

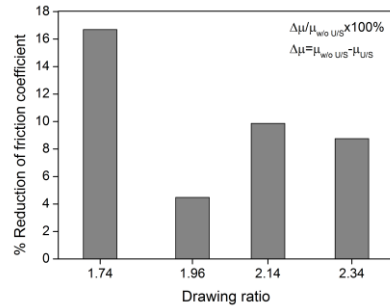
유한요소해석은 각각의 드로잉비에 대해 마찰계수를 0.18, 0.20, 0.22, 0.26, 0.30 로 변화시키면서 수행하였다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각의 드로잉비에 대해 마찰계수가 0.18인 경우에서의 변형형상 및 귀 예측 결과를 보여주고 있는데, 실험과 비교적 잘 일치하는 경향을 보임으로써, 유한요소해석이 재료의 소성 변형거동을 예측하는데 있어서 큰 오차를 포함하지 않을 것으로 판단되었다. 다섯 가지 마찰계수에 대한 반복해석을 수행한 후, 예측된 최대 편치 하중은 Fig. 8(a)와 같이 마찰계수에 선형으로 비례하는 특성을 보였으며, 선형회귀분석을 통해 최대편치하중을 독



**Fig. 7** FE analysis results



**(a)** Relationship between friction coefficient and max. punch load



**(b)** Comparison of % reduction of friction coefficients

**Fig. 8** Predictions of friction coefficient

립변수로 하고, 마찰계수를 종속변수로 하는 1차 함수형태로 표현하였다. 실험결과 얻어진 각 경우에 대한 최대편치하중을 이용하여 마찰계수를 추정하고, 초음파 진동의 부가에 따른 마찰계수의 감소율을 Fig. 8(b)에 도시하였다. 상기와 같은 실험하중과 해석결과의 비교를 통한 마찰계수의 추정방법은 유한요소해석이 정확한 하중을 예측할 수 있다는 것이 전제되어야 하나, 본 연구에서는 마찰계수를 제외한 모든 해석조건이 동일하므로, 해석결과의 오차는 모두 동일하게 적용되었다는 가정하에 초음파 진동부과 유무에 따른 상대적인 마찰계수의 감소율로 표현하

Table 2 Predicted friction coefficients

		Drawing Ratio				
		1.74	1.96	2.14	2.34	
Max. Punch load, P [KN]	Exp	w/o U/S	34.8	47.7	58.8	67.6
		with U/S	33	47	56.9	65.7
Punch load, P [KN]	Sim	$\mu=0.18$	31.8	43.7	51.7	60.4
		$\mu=0.20$	32.6	44.9	53.3	61.8
		$\mu=0.22$	33.6	46.1	54.5	63.6
		$\mu=0.26$	35.3	48.4	57.3	66.8
		$\mu=0.30$	37	50.9	59.6	70.1
Linear fit ( $\mu=a \times P+b$ )		a	0.023	0.017	0.015	0.012
		b	-0.545	-0.551	-0.606	-0.561
% Reduction of friction coefficient			16.7	4.5	9.9	8.8

였다. 초음파 진동을 부과한 경우, 드로잉비에 따라 4.5~16.7% 마찰계수의 감소효과를 보였으며, 특히 5.5%의 최대 편치 하중 감소를 보인 드로잉비 1.74인 경우에는 최대 16.7%의 마찰계수 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 이상의 결과는 Table 2에 정리하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 드로잉 공정에서의 초음파 진동효과를 분석하기 위하여 SPCC 판재의 실험 및 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 초음파 진동은 금형과 소재간의 마찰을 저감시킴으로써 동일한 조건에서 한계 드로잉비를 향상시킬 수 있음을 보였다.

(2) 초음파 진동효과를 정량화 하기 위하여 유한요소해석을 통해 마찰계수와 최대편치하중의 상관관계로부터 추정된 마찰계수를 비교한 결과 4~16.7%의 마찰계수 감소의 효과가 있는 것으로 나타났다.

초음파 진동 효과는 진동자의 가진 주파수 및 진폭(진압)뿐만 아니라 소재의 기계적 물성에 따라 다른 특성을 보이므로, 다양한 조건에 대한 특성을 정량 분석할 필요가 있다. 향후, 다양한 소재 및 진동 조건에 대한 추가 연구를 진행할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 미래창조과학부/국가과학기술연구회 융

합연구사업의 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. Process. 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. Process. Technol., Vol. 140, No. 1, pp. 30~35.
- [4] K. H. Lee, B. M. Kim, 2010, Design and Manufacture of Ultrasonic Vibration Drawing Tool, Trans. Mater. Process., Vol.19, No.6, pp. 363~371.
- [5] C. Bunget, G. Ngaile, 2011, Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-extrusion, Ultrason., Vol. 51, No. 5, pp. 606~616.
- [6] 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. Process. Technol., Vol. 34, No. 1, pp. 489~494.
- [7] 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. Process. Technol., Vol. 80-81, pp. 406~412.
- [8] A. Siddiq, T. E. Sayed, 2012, Ultrasonic-assisted Manufacturing Processes: Variational Model and Numerical Simulations, Ultrason., Vol. 52, No. 4, pp. 521~529.
- [9] Y. Liu, Q. Han, L. Hua, 2012, Finite Element Simulation Analysis of the Ultrasonic Vibration Forging of an Aluminum Cylinder Workpiece, Light Met., pp. 257~264.
- [10] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.