

## 40kHz 초음파 커팅용 혼의 설계와 크랙발생에 대한 고찰

서정석<sup>+</sup>, 이윤정<sup>+</sup>, 백시영<sup>++</sup>, 박동삼<sup>\*</sup>

(Manuscript received: Jul, 23, 2012 / Revised: Sep, 12, 2012 / Accepted: Sep, 13, 2012)

### Prediction of Crack Initiation and Design of 40kHz Blade Horn for Ultrasonic Cutting

Jeong-Seok Seo<sup>+</sup>, Yoon-Jung Lee<sup>+</sup>, Si-Young Beak<sup>++</sup>, Dong-Sam Park<sup>\*</sup>

#### Abstract

Ultrasonic Cutting which uses a tuned blade resonant in a longitudinal mode, has been used to cut a range of materials from confectionery, baked products and frozen foods, to wood, bone, foams and composites. The Blade design typically uses finite element analysis, and it could be predicted vibration mode, gain and amplitude uniformity of the blade tip at resonant frequency. In this paper, FEA used to predict the vibration characteristic of the blade, and then the results were verified by analysis system of resonant frequency using the processed blade. The crack of the blade which is predicted from FEA was compared with the crack occurred by cutting experiment of rubber materials using the processed blade.

**Key Words :** Ultrasonic cutting(초음파 커팅), Blade horn(커팅 혼), FEA(유한요소분석), Vibration amplitude(진동 진폭), Crack initiation (크랙 발생)

### 1. 서론

종진동 모드로 조정된 Blade 혼의 공진을 사용하는 초음파 커팅 장치는 금속, 고무, 플라스틱, 목재, 음식 등 다양한 소재의 커팅에 사용되고 있다. 초음파 커팅 기술은 대량생산이나 소량생산에 관계없이 빠른 작업시간과 소모성 부품이 필요 없어 에너지를 절감할 수 있고, 일반 Role 커팅 작업 시 분진과 소음이 발생하는데 비해 초음파 커팅은 그러한 분진이나 소음이 없어 친환경적인 기술로서 산업 전반에 사용되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

제품을 가공 분리하는데 초음파 발생 시 커팅 모서리 분리 영역에서 열적변형이 일어나고 절삭력(Cutting Force)과 절삭 경로, 절삭속도, 절단면(Blade Flank)에 영향을 받는다<sup>(3)</sup>.

초음파 커팅 시스템은 일반적으로 파워서플라이(또는 제너

레이터), 진동자, 부스터와 혼으로 구성되며, 전기적인 에너지가 기계적 진동 에너지로 변환되는 결합체로 이루어져 있다. 진동자와 부스터는 대부분의 응용에서 특정주파수에 맞춰 표준사양으로 설계되어 사용된다. 초음파 혼은 최대로 증폭된 진폭으로 커팅 제품에 진동에너지를 직접 전달하는 역할을 한다. 혼의 치수와 형상은 공작물의 크기와 형상, 재료에 의해 결정되며 진동 출력 면에서의 좋은 성능과 효율적인 에너지 전달을 위해 더욱 정확하고 정밀한 설계가 요구된다.

Fig. 1은 초음파 혼의 설계과정을 나타낸 흐름도이다. 혼의 설계는 이론적으로 대략 혼의 길이를 계산한 후 FE(Finite-element) 모델을 가지고 진동모드와 고유주파수를 해석하여 혼의 형상과 치수를 결정하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다<sup>(4-6)</sup>. FEA를 바탕으로 실제 제작한 혼의 성능은 해석결과와 어느 정도의

<sup>+</sup> 인천대학교 대학원 기계시스템공학부

<sup>++</sup> 인하대학교 기계공학부

<sup>\*</sup> 교신저자, 인천대학교 기계시스템공학부 (dspark@incheon.ac.kr)

주소: 406-772 인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)

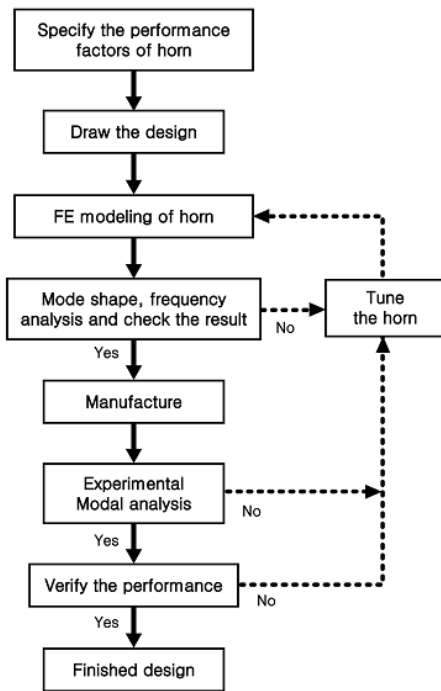


Fig. 1 Flow chart of ultrasonic horn design

오차가 발생하기 때문에 정확하게 혼을 조정(Tune)하기 위해 형상과 단면을 수정가공을 하고 성능을 평가하는 과정을 여러 번 반복한다.

본 연구에서는 종진동 모드로 공진하는 40kHz Blade 혼을 설계하였다. FEA를 이용하여 혼의 고유주파수, 진폭의 증폭비 등 진동특성을 확인하여 설계 계획을 수립하였으며, 이를 기반으로 혼을 가공하고 조정을 거쳐 혼의 설계를 완성하였다. 또한 여러 개의 혼을 제작하고 타이어 절단가공에 적용하여 설계 시 나타난 크랙발생 부위를 예측하고 가공결과 부 혼에 발생한 크랙과 비교하였다.

## 2. Blade 혼의 설계

Blade 혼은 초음파 커팅의 고출력 시스템에서 사용되는 혼으로, 타이어 제조 시 고무 소재의 커팅에 일반적으로 사용되는 Blade 혼의 형상은 Fig. 2와 같다.

Blade 혼의 설계는 3개의 주요 성능을 만족시키는데 중점을 두어야 한다. 종진동 모드로 초음파 발진을 하면서 이웃한 부차적 공진 모드 사이와 충분한 주파수 분리가 이루어져야 한다. 그리고 테이퍼 형상을 통해 구동주파수에서 높은 진폭 증폭비(Gain)를 가져야 한다. 진폭 균일도(Uniformity)는 진동 출력면에서 진동의 최대 진폭에 대한 최소 진폭의 비로 나타낸다.

불충분한 주파수 분리는 뜻하지 않게 발진기가 부차적 공진으로 건너뛰어 혼의 모션이 일그러지는 불규칙한 성능을 발생시키

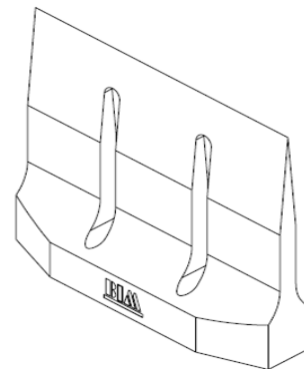


Fig. 2 The illustration of blade horn

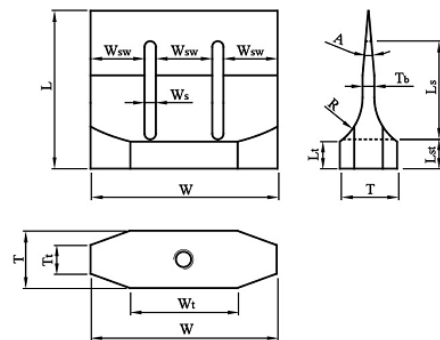


Fig. 3 Drawing and parameters of blade horn

거나 응력이 지나치게 높아지며 불균일하고 불균형적인 진폭을 발생시켜 진폭 균일도를 저하시키는 요인이 되기도 한다.

Blade 혼의 종진동 모드 방향으로 두께 방향을 관통하는 가늘고 긴 구멍, 즉 슬롯(Slot)의 여부에 따라 더 나은 진폭 균일도를 얻을 수 있다<sup>(7-9)</sup>. 슬롯은 또한 방열을 개선시켜 작업에서 발생하는 핫스팟(Hot Spot)의 생성을 예방할 수도 있다<sup>(6)</sup>.

### 2.1 설계 인자

본 연구에서 설계한 Blade 혼의 도면을 Fig. 3에 나타내었다. 혼은 일반적으로 음파의 반파장 또는 정수배로, 혼의 공진 길이는 혼 소재의 종방향 음속을 기반으로 구할 수 있다. 혼의 길이를  $l$ 이라 할 때 양단에 자유로운 혼의 고유진동수는 식 (1)과 같다.

$$w_n = \frac{n\pi}{l} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$\lambda$ 는 종진동 진행파의 길이로  $\lambda = c/f_n$ 이다. 반파장 혼에서는 혼의 끝단부에서 최대변위를 얻어야 하므로 혼의 길이를  $n=1/2$ 인 종진동 진행파의 파장 $\lambda$ 는  $l/2$ 로 결정한다. 혼의 형상과 진폭 증폭비에 맞춰 공진주파수에 맞게 길이를 결정하게 된다<sup>(2)</sup>.

## 2.2 소재 선택과 유한요소분석(FEA)

Blade 혼의 소재는 높은 강도와 안정성 때문에 Table 1의 물성을 갖는 티타늄 합금으로 결정하였다. 혼의 소재를 선택한 후에는 FEA 수행을 위해 작업환경과 일치하는 구속조건을 적용하여야 한다. Fig. 4는 유한요소 해석에 사용될 3D 모델로 진동자와 연결되는 볼트구멍의 면에 반경방향과 탄젠트방향의 자유도를 구속하고 오직 축 방향으로의 진동만을 허용하였다.

Table 1 Mechanical properties of horn material

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density	Hardness
120GPa	0.31	4.42g/cm <sup>3</sup>	HRC 33

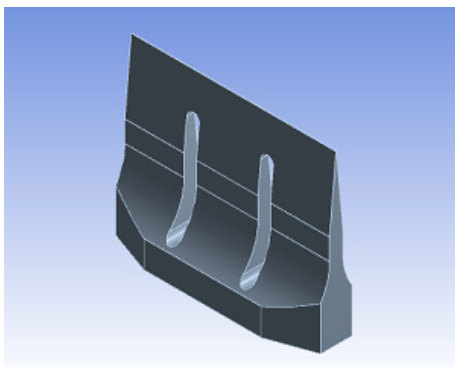
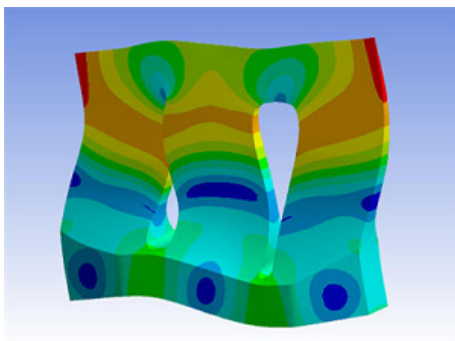
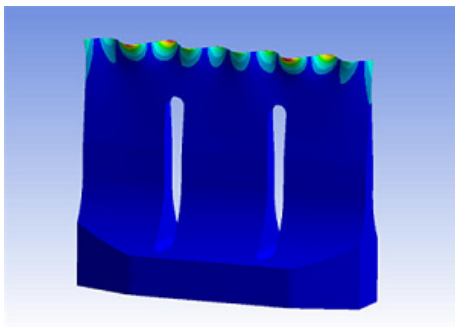


Fig. 4 3D model of blade horn for FEA



(a) mode 1



(b) mode 2

Fig. 5 Non-longitudinal mode

Fig. 5는 종진동 모드인 Fig. 6과 이웃하는 비종진동 모드를 나타낸 것으로, Fig. 5(a)는 고유주파수 39,670Hz이고 Fig. 5(b)는 40,165Hz이다. 이러한 비종진동 모드들은 공구의 파괴 등 나쁜 영향을 미치게 되므로 종진동 모드를 필요로 하는 초음파 커팅에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

종진동 모드인 Fig. 6의 고유주파수는 구동주파수 40kHz와 근접한 39,878Hz로 진동 출력 면에서 최대 진폭을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 구동주파수를 적용하여 설계된 혼은 폭(W) 83mm, 기장(L) 68mm, 두께(T)는 25.4mm이다.

Fig. 7은 응력 해석결과로 슬롯을 일부 확대하여 나타낸 것이다. 응력집중은 크게 Blade 두께가 얇아지는 테이퍼 형상의 날 끝 부위와 슬롯의 라운드 가장자리 부위에 많이 발생하며, 가장 큰 응력이 집중하여 발생하는 것을 알 수 있다. Blade 혼의 진동모드 결과와 응력 해석결과를 토대로 슬롯의 라운드가 끝나는 부분에서 Blade 출력부 중 진동 발진이 가장 큰 Blade 양 끝 쪽으로 크랙이 발생할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

## 3. 혼의 성능평가

### 3.1 Blade 혼의 진동 측정

초음파 Blade 혼의 설계를 위한 FE modeling 접근법의 검증 을 위해 가공한 Blade 혼의 진동을 측정하였다. 진동측정은 Fig. 8과 같이 구성된 진동 분석시스템을 사용하였다. 진동 분석시

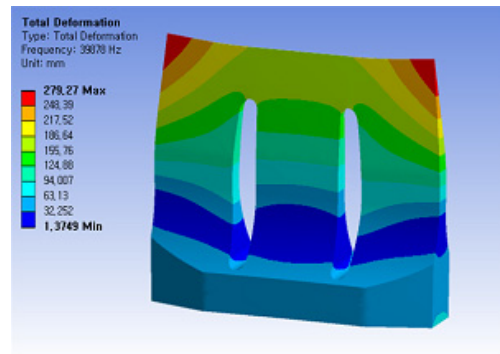


Fig. 6 Longitudinal mode of blade horn

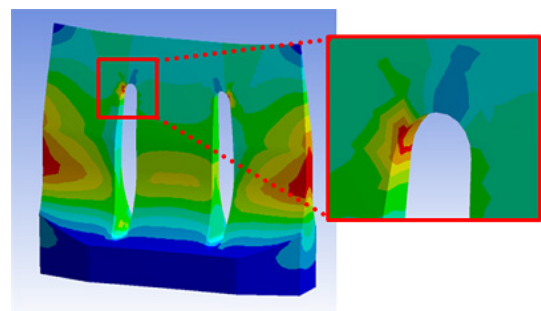


Fig. 7 Stress of blade horn

시스템은 혼의 진동을 광섬유 센서(Optical Fiber Sensor)에서 감지하고 AD Board를 통하여 진동데이터가 PC로 전달되어 분석하는 원리이다. Table 2는 광섬유 센서의 주요 사양으로 분해능(Resolution)이 0.1 $\mu$ m로 정밀한 측정이 가능하다.

Fig. 9는 진동 분석시스템에 의한 측정을 나타낸 것으로, 혼과 광섬유 센서를 세팅할 때는 혼의 진동 출력면의 진동방향에 대하여 최대한 직각도를 유지하여 광섬유 센서를 설치하여야 보다 더 정확한 측정이 가능하다.

진동 분석시스템을 이용하여 주파수를 측정한 결과 최고 값이 39,976Hz, 최저 값이 39,702Hz로 평균 주파수 값이 약 39,817Hz이며 이는 설계과정에서 예측된 주파수 39,878Hz와 99% 이상 근접하며 약 0.2% 정도 오차를 보였다.

Fig. 10은 혼의 진동 출력면을 4~5mm 간격으로 측정한 진

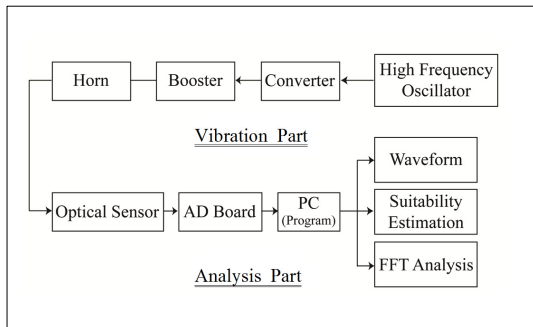


Fig. 8 Configuration of system for frequency vibration analysis using optical fiber sensor

Table 2 Specification of optical sensor

Model	D63-H1T4
Total range	3mm
Linear range	0.76mm
Nominal standoff	0.66mm
Nominal sensitivity	2.8mV/ $\mu$ m
Resolution DC-100kHz	0.1 $\mu$ m
Minimum measurement spot	2.1mm

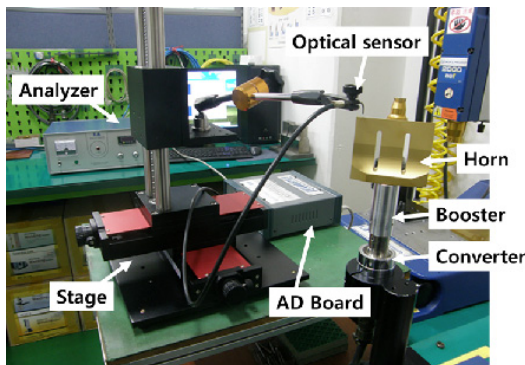


Fig. 9 The Vibration analysis system set up

폭 값을 나타낸 그래프이다. FEA 해석결과에서 나타나듯이 진동이 진동 출력면의 중심보다 양 끝에서 더 크게 발진되는 것을 확인할 수 있다.

진폭의 최소값, 최대값과 진폭 균일도를 Table 3에 나타내었다. 진동 출력면에서의 진폭 최소값은 35.4 $\mu$ m이고 최대값은 56.2 $\mu$ m로 약 62.9%의 진폭균일도를 갖는 것을 알 수 있다.

### 3.2 Crack 발생 원인과 해결 방법

실제 수십 개의 혼을 제작하여 현장에서 타이어 절단가공에

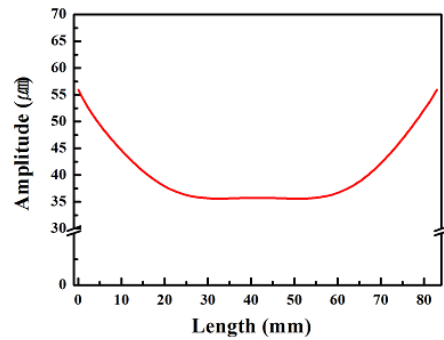


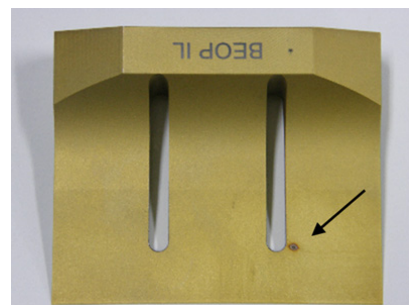
Fig. 10 Amplitude Graph of the blade

Table 3 Amplitude uniformity of the blade

Amplitude Min.	Amplitude Max.	Uniformity
35.4 $\mu$ m	56.2 $\mu$ m	62.9%

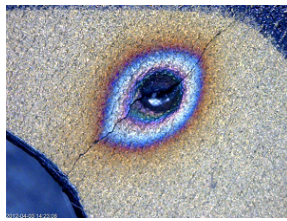


(a) Good product

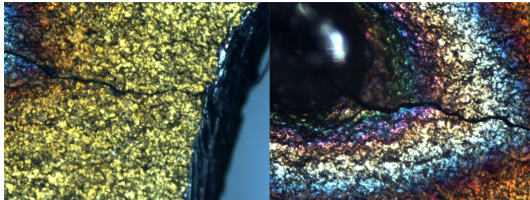


(b) Defective product

Fig. 11 Crack of blade horn



(a) x20



(b) x50

Fig. 12 Microscope images of crack

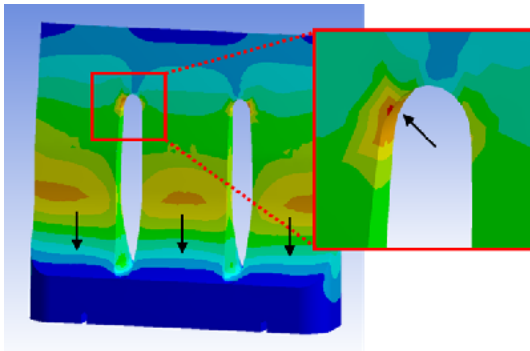


Fig. 13 FEA result after modification of slot modeling

적용한 결과 Fig. 11(b)와 같은 크랙 현상을 발견하였다. Fig. 12는 크랙 부분을 공구현미경으로 x20, x50 배율로 확대한 것으로 크랙 발생 지점은 응력이 가장 크게 발생하는 슬롯의 라운드 부위에서부터 시작된다. 크랙의 방향은 슬롯으로부터 시작하여 진폭 발진이 가장 크게 나타나는 Blade의 모서리 방향으로 향해 있다. 이것으로 미루어 보아 설계 과정에서 예측한 Fig. 7과 같이 응력이 가장 강하게 발생하는 부분과 진동 발진이 가장 큰 부분 사이에서 생기는 공진으로 인해 크랙이 발생한 것으로 예측할 수 있다. 또한 크랙의 성장은 슬롯의 라운드 부분에서부터 모서리 날 끝 방향으로 계속 성장할 것으로 보이며, Fig. 12의 크랙과 같은 불량은 약 10% 정도 발생하였다. 앞으로 더 많은 실험과 비교, 분석으로 크랙의 정확한 원인을 찾아야 할 것이다.

크랙의 예방책으로 Fig. 13과 같이 Blade의 하단부의 부피를 줄이거나 슬롯의 라운드 부위의 반경을 수정설계 하는 등의 절차를 거쳐 크랙을 해결할 방법을 찾을 수 있을 것이다.

## 4. 결론

종방향 진동 모드를 갖는 40kHz Blade 혼을 FEA를 이용하여 설계한 후 이를 검증하고자 하였다. 또한 최적으로 설계한 혼을 제작한 후 가공에 적용한 결과 Blade 혼에서 크랙 현상을 발견하였으며 이에 대한 원인을 해석하려 하였다.

- (1) FEA에 의해 40kHz Blade 혼을 설계하여 고유주파수 39,878 Hz에서 종진동 모드 공진이 발생하는 것을 확인하였으며 이때 혼의 폭(W)은 83mm, 전장(L)은 68mm, 두께(T)는 25.4mm이다.
- (2) FEA를 통한 이론상의 모델과 실제 가공한 커팅 혼의 비교 결과, 가공 시 약간의 공차에 따라 혼의 고유주파수 값에 차이가 발생하는 것을 확인하였다.
- (3) 진동 모드 해석 및 응력 해석으로 응력이 가장 큰 슬롯에서부터 진동이 가장 큰 Blade의 모서리 방향으로 크랙 현상이 발생할 수 있음을 예측할 수 있었으며, 실제 절단 공정 중 혼에 크랙이 발생하였다.
- (4) 앞으로 크랙부의 다양한 형상변화를 예측하여 분석하고 그 결과를 근거로 혼을 제작하여 비교를 통해 원인을 찾고 슬롯의 설계를 수정하는 등의 절차를 통하여 크랙 발생을 최소화하면서 Blade 혼의 최적 설계 및 제작이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

## References

- (1) Jeong, H. S., 1997, "Fundamentals of Ultrasonic Welding," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 24~31.
- (2) McCulloch, E., 2008, *Experimental and Finite Element Modelling of Ultrasonic Cutting of Food*, A Thesis for a Master, University of Glasgow, United Kingdom, pp. 48~50.
- (3) Susann, Z., Yvonne, S., and Harald, R., 2006, "Ultrasonic Cutting of Food: Effect of Excitation Magnitude and Cutting Velocity on the Reduction of Cutting Work," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 7, Issue. 4, pp. 288~293.
- (4) Amin, S. G., Ahmed, M. H. M., and Youssef, H. A., 1995, "Computer-aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-element Analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, Issues. 3-4, pp. 254~260.
- (5) Seo, J. S., 2009, "Vibration Analysis for Optimal

- Design of Horn,” *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 380~383.
- (6) Seo, J. S., Jang, S. M., and Baek, S. Y., 2012, “One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 70~75.
- (7) Ensminger, D., 1988, *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications*, Ed. Marcel Dekker, New York, USA.
- (8) Cardonic, A., and Lucas, M., 2002, “Enhanced Vibration Performance of Ultrasonic Block Horns,” *Ultrasonics*, Vol. 40, Issue. 1-8, pp. 365~369.
- (9) Adachi, K., and Ueha, S., 1986, “Modal Vibration Analysis of Ultrasonic Plastic Welding Tools using the Finite Element Method,” *Proc. of Ultrasonic International*, pp. 727~732.