

# 보의 횡진동 공진특성을 이용한 초음파 진동절삭공구 설계 Design of a Ultrasonic Cutting-tool Utilizing Resonance Condition of Transverse Vibration of Beam Type Structure

변진우\* · 한상보†

JinWoo Byun and Sangbo Han

(2011년 4월 12일 접수 ; 2011년 6월 29일 심사완료)

**Key Words** : Ultrasonic Vibration Cutting(초음파 진동절삭), Horn(혼), Bite(바이트), Resonance Frequency(공진 주파수), Natural Frequency(고유진동수)

## ABSTRACT

Most ultrasonic vibration cutting tools are operated at the resonance condition of the longitudinal vibration of the structure consisting of booster, horn and bite. In this study, a transverse vibration tool with beam shape is designed to utilize the vibration characteristics of the beam. Design point of the transverse vibration tool is to match the resonance frequency of the bite to the frequency of the signal to excite the piezoelectric element in the booster. The design process to match the natural frequency of the longitudinal vibration mode of the horn and that of the transverse vibration mode of the bite is presented. Dimensions of the horn and bite are searched by trend analysis through which the standard shapes of the horn and bite are determined. After the dimensions of each component of the cutting tool consisting of booster, horn and bite are determined, the assembled structure was experimentally tested to verify that true resonant condition is achieved and proper vibrational displacement are obtained to ensure that enough cutting force is generated.

## 1. 서론

부품소재의 다양한 기능을 요구하는 항공·조선산업에서는 특수소재들이 사용되어지고 있고 이러한 소재들의 고정밀 가공을 위해서는 새로운 가공방법의 개발이 요구되어지며 새로운 가공법의 하나로 초음파 진동절삭<sup>(1-3)</sup>이 꾸준한 관심을 받아 오고 있다. 초음파 진동절삭이란 절삭공구를 초음파영역에

해당하는 진동수로 가진시켜 공구끝단에 미세한 절삭변위를 일으켜, 상용절삭이 어려운 인성이 강한 재료들에 대하여 가공 시 발생하는 구성인선(built up edge)이나 버(burr)의 생성을 억제하여 표면거칠기 개선과 공구수명을 증대시킬 수 있다. 그리고 미세한 절삭변위로 공구와 공작물 사이에 순간적인 분리로 절삭이 이루어지기 때문에 크랙(crack)이 발생하기 쉬운 취성재료를 가공할 때도 매우 유용하게 쓰인다.

초음파 진동절삭은 Fig. 1과 같이 부스터(booster), 혼(horn) 그리고 바이트(bite)로 구성되어 있는데 압전소자(piezoelectric element)에서 발생하는 진동이 부스터로 전해지면서 발생한 변위를 혼에서 증폭시키고, 이러한 증폭된 변위를 이용하여 바이트 끝단으로 가공하게 된다<sup>(4)</sup>. 생산 현장에서 일반적으로

† 교신저자; 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부  
E-mail : sbhan@kyungnam.ac.kr  
Tel : (055)249-2623, Fax : (0505)999-2160

\* 경남대학교 대학원 첨단공학과

# 이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

사용하고 있는 초음파 진동절삭은 Fig. 1의 (a)와 같이 부스터, 혼, 바이트가 하나의 구조물로 구성되어 이 구조물의 종진동 공진모드를 이용하는 종진동 공구를 많이 채택하고 있으나<sup>5)</sup>, 이 논문에서는 Fig. 1(b)와 같이 부스터와 혼의 종진동과 바이트의 횡진동이 결합된 공구의 설계 방법을 살펴보기로 한다. 이를 위해 수치해석을 토대로 공진주파수 및 절삭변위를 예측하고 예측된 결과들을 실험을 통해 검증해 보았다.

## 2. 종진동 공구와 횡진동 공구

Fig. 1의 (a)는 종진동 공구로써 바이트의 길이에 한계가 있기 때문에 복잡한 형상 또는 폴리과 같은 가공물의 내부를 절삭할 때 공구의 구조적인 특성상 혼이나 부스터의 간섭으로 인해 공구의 거치 위치와 절삭방향이 제한될 수밖에 없다. 그러나 Fig. 1의 (b)와 같은 횡진동 공구의 경우 바이트의 작동방향 때문에 폴리 형상의 내부 또는 복잡한 형상의 가공물을 절삭할 때 혼이나 부스터와 공작물 사이에 공간을 확보할 수 있으므로 절삭방향의 선택이 자유롭다는 이점이 있게 된다. 현재 현장에서 많이 사용되고 있는 초음파 진동절삭은 종진동 공구를 사용하는 것으로, 절삭력을 유지시키고 절삭방향의 변화를 일으키지 않기 위해 혼과 바이트가 일체형으로 제작된 경우가 대부분이다. 그러나 횡진동 공구는

혼과 바이트를 분리형으로 제작하여 바이트의 노드점(nodal point)을 지지함으로써 절삭방향을 조절할 수 있는 이점이 있다. 그리고 원하는 주파수로 절삭하기 위한 설계가 가능하고 다양한 종류의 혼과 바이트를 제작할 수 있다. 따라서 여러 종류의 분리된 혼과 부스터를 CNC선반의 ATC(automatic tool changer)에 장착하여 사용이 가능해 진다는 장점이 있다. 횡진동 공구에 체결되는 바이트는 공진에 의한 횡진동을 일으킴으로써 바이트 끝단에서 변위의 증폭이 종진동 공구보다 더 크게 나타나게 된다. 바이트의 횡진동을 이용하여 초음파 진동절삭을 하기 위해서는 절삭공구의 끝단변위가 최대가 되도록 공진조건을 만족시켜야 하며 동시에 공구끝단에서 충분한 절삭력이 발생하도록 하기 위해서는 이러한 조건을 모두 만족시키는 공구의 형상설계방법이 요구되어지고 있다. 이 논문에서는 공진조건을 만족하도록 혼과 바이트의 치수와 형상에 따른 고유진동수에 대한 경향성분석을 위해 수치해석 프로그램인 아바쿠스 6.7(ABAQUS 6.7)을 이용하였고 이러한 경향성을 토대로 설계된 공구를 제작하여 강제진동실험을 통해 공진주파수를 검증하고, 동시에 바이트 끝단의 변위를 실험적으로 측정해 보았다.

## 3. 수치해석을 이용한 설계방안

### 3.1 수치해석을 통한 혼과 바이트의 설계

#### (1) 혼의 설계

혼의 종류에는 형상에 따라 스텝(step), 익스포넨셜(exponential), 코니컬(conical), 코니컬&익스포넨셜(conical & exponential) 등이 있는데, 이 논문에서는 가공 방법이 가장 쉬운 Fig. 2와 같은 스텝 혼을 사용하였다. Table 1은 혼의 길이, 단면적에 따른 고유진동수의 경향성을 알아보기 위해 기준 치수(standard horn)보다 각각 2mm씩 줄였을 경우 종진동 고유진동수의 수치해석 결과를 나타낸 것이다.

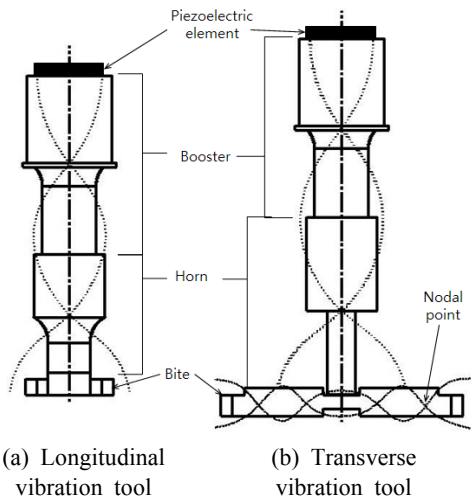


Fig. 1 Two types of ultrasonic vibration cutting tools

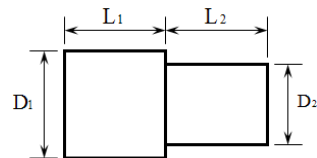


Fig. 2 Design factors of step horn

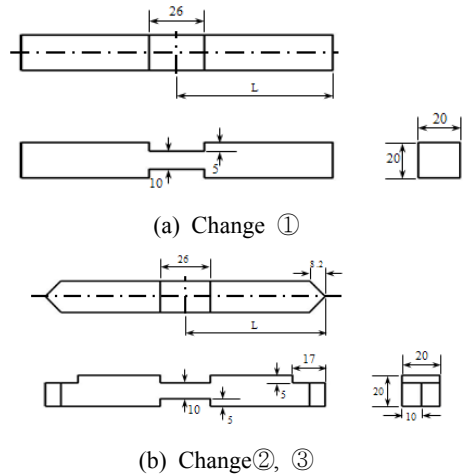
**Table 1** The effect of horn's size on the longitudinal natural frequency of the horn structure

	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	Natural frequency [Hz]	Reduced volume [mm <sup>3</sup> ]
Standard horn	66	58	50	20	19,671	
Change①	64	58	50	20	19,757	3,927
Change②	66	56	50	20	20,199	628
Change③	66	58	48	20	19,742	10,156
Change④	66	58	50	18	19,715	3,462

여기서 종진동 고유진동수는 혼의 길이와 단면적의 변화에 민감하게 변화한다는 것을 확인 할 수 있다. 특히 기준치수에서 감소된 체적이 Change①이 Change②보다 매우 큰 반면, 고유진동수는 Change①이 Change②보다 매우 작은 것으로 나타났는데 이는 결국 L<sub>1</sub>에서의 길이변화보다 L<sub>2</sub>에서의 길이 변화가 고유진동수에 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

(2) 바이트의 설계

바이트의 설계를 위해 보 형상 구조물을 20 kHz에 가장 가까운 고유진동수로 설계하였을 때를 바이트의 설계 기준이 되는 치수로 선정하였다. Fig. 3의 (a)는 혼과 바이트가 결합되기 위한 공간을 고려한 형상으로 체결 부위에서 종진동에 의해 발생하는 응력집중현상을 고려하여 위아래를 대칭으로 설계하였으며, 바이트에 일정한 힘을 전달하여 바이트 끝단이 규칙적인 변위를 일으키고 바이트를 교체하여 사용할 수 있도록 하기 위해 좌우대칭으로 설계한 것으로 Table 2의 Change①을 나타낸다. Fig. 3의 (b)는 바이트 양 끝단을 절삭날 형상인 인서트 팁(insert tip) 형상으로 가공되어야 할 것을 고려하여 설계하였으며(Change②), Change③은 절단된 바이트의 끝단에 해당하는 질량 손실분을 보정하여 바이트의 횡진동 고유진동수가 설계 기준인 고유진동수 20 kHz가 되도록 바이트의 길이가 늘어난 상태를 나타낸다. Table 2는 바이트의 길이와 끝단의 형상변화에 따른 횡진동 고유진동수의 경향성을 수치해석결과로 나타낸 것이다. 여기서 Change②는 기준치수와 동일한 길이에서 바이트 끝단의 형상만을 변화시켰고 Change③은 바이트의 양 끝단이 가공된



**Fig. 3** Design factors of beam type bite

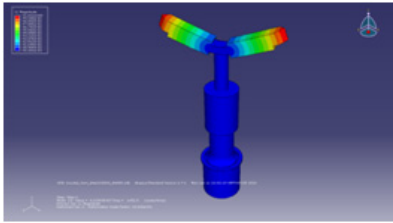
**Table 2** The effect of modification on the transverse natural frequency of the bite

	L [mm]	Contents	Natural frequency [Hz]	Natural frequency variation [%]
Standard bite	73.1	Beam type structure	20,190	
Change①	73.1	Considering stress concentration	19,138	-5.21
Change②	73.1	Space for the insert tip	21,486	12.3
Change③	80.4	Extend 'L' to compensate volume	18,383	-14.4

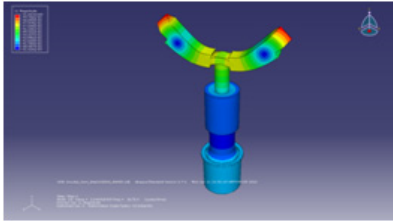
부피를 일정한 단면적으로 나누었을 때의 길이로 연장시켰을 때 고유진동수의 변화량을 비교해 본 결과인데 Change③이 Change②보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이런 경향성 파악의 결과들을 활용하면 최종 설계 형상을 얻기까지 각 바이트의 형상 변화와 그에 따른 고유진동수의 변화 경향에 대한 정성적인 정보를 얻을 수 있으며 그를 토대로 다음 절에서 기술되는 것과 같은 정확한 해석 대상 바이트의 형상을 결정할 수 있다.

3.2 혼과 바이트의 수치해석 결과

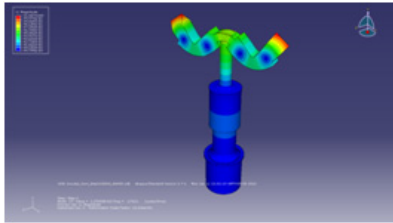
Fig. 4는 경향성분석을 통해 얻어진 혼과 바이트의 설계 자료를 토대로 결정된 횡진동 공구에 대하여 고유진동수를 해석한 결과를 나타낸다. 부스터, 혼, 바이트가 결합된 구조물이 횡진동 공구로 작동하기 위해서는 부스터와 혼으로 이루어진 부분은 종진동만을, 그리고 바이트는 횡진동만을 하는 모드를



(a) Mode : 10, natural frequency : 1,453 Hz



(b) Mode : 18, natural frequency : 8,179 Hz



(c) Mode : 27, natural frequency : 17,823 Hz

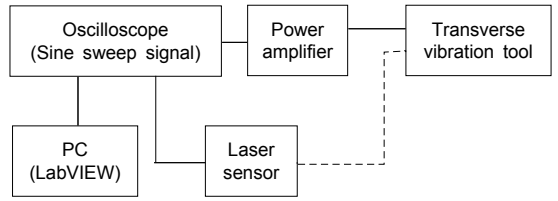
**Fig. 4** Mode shapes of assembled structure of the booster, horn and bite

찾아내야만 한다. 그래야만 고정된 주파수 성분을 가진 압전소자를 작동시키고 부스터와 혼을 통하여 증폭된 신호가 바이트로 전달될 수 있기 때문이다. 위의 조건을 만족하는 고유진동형만을 찾아낸 것이 Fig. 4에 주어진 10차, 18차, 그리고 27차 모드이다. 이 중, 초음파 영역의 진동수를 가지며 가공 시 충분한 지지력으로 바이트를 지지할 수 있는 짝수 개의 진동 절점을 가져야 한다는 설계 조건에 해당하는 모드는 27차 모드로써 고유진동수는 17,823 Hz로 초음파 진동수에는 못 미친다는 것으로 예측되었다. 이렇게 수치해석을 통해 얻어진 횡진동 공구의 공진주파수와 변위를 실제 제작된 바이트를 대상으로 실험하여 수치 해석의 결과를 검증해 보았다.

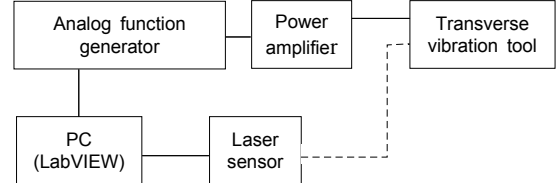
#### 4. 공진주파수 및 절삭변위 측정실험

##### 4.1 공진주파수 및 절삭변위 측정 시스템

수치해석에 의해 예측된 횡진동 공구의 실제 고유



(a) Natural frequency measurement using sine-sweep signal



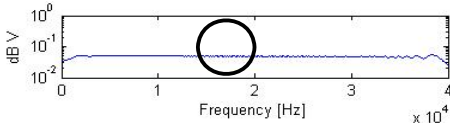
(b) Measurements of the resonance frequency and tip displacement using analog signal generator

**Fig. 5** Schematic diagram of experimental system

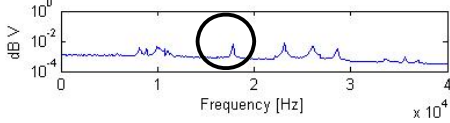
진동수를 검증하고 검증된 고유진동수로 횡진동공구를 공진주파수로 작동시킴으로써 발생하는 바이트 끝단의 절삭변위를 측정하기 위한 실험은 Fig. 5와 같은 장치를 이용하여 실시하였다. Fig. 5의 (a)는 디지털 오실로스코프에서 발생하는 사인 스위프 신호(sine sweep signal)를 증폭시켜 횡진동공구의 압전소자를 가진시키고 이때 진동하는 횡진동공구의 바이트 끝단의 변위를 레이저 센서로 측정하여, 이러한 측정 결과 신호를 Oscilloscope와 PC에 내장된 랩뷰(LabVIEW) 보드를 이용하여 동시에 분석하는 과정을 나타낸다. 그런데 이 실험에서 사용한 디지털 오실로스코프는 초음파 영역의 광대역 주파수를 포함할 경우 주파수 분해능이 100 Hz로 제한되기 때문에 100 단위 이하의 값에 해당하는 정확한 고유진동수를 측정할 수 없다. 따라서 Fig. 5(b)와 같이 아날로그 함수 발생기를 이용하여 1 Hz의 분해능을 가지는 정현파 신호를 발생시키고 이 신호로 횡진동 공구를 가진 한 후 공구의 끝단 진동 변위를 측정하고 랩뷰를 이용하여 분석하였다.

##### 4.2 공진주파수 및 절삭변위 측정결과

Fig. 6과 Fig. 7은 분해능 100 Hz의 디지털 신호로 가진된 경우의 오실로스코프와 랩뷰로 측정된 가진신호와 공구 끝단 변위 신호의 PSD(power spectral density)를 각각 나타낸 결과이다. Fig. 6의 (b)와 Fig. 7의 (b) 즉, 출력신호를 분석해 본 결과



(a) PSD of input signal (sine sweep) with 100 Hz of frequency resolution



(b) PSD of tip displacement signal with 100 Hz of frequency resolution

Fig. 6 PSDs measured with oscilloscope

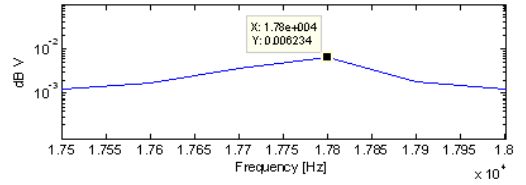
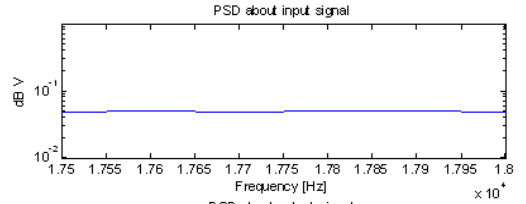
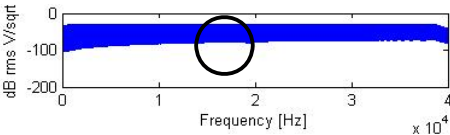
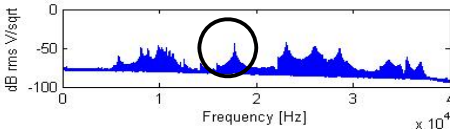


Fig. 8 PSDs of Fig. 6 zoomed at 17,800 Hz



(a) PSD of input signal (sine sweep) with 1 Hz of frequency resolution



(b) PSD of tip displacement signal with 1 Hz of frequency resolution

Fig. 7 PSDs measured with labVIEW

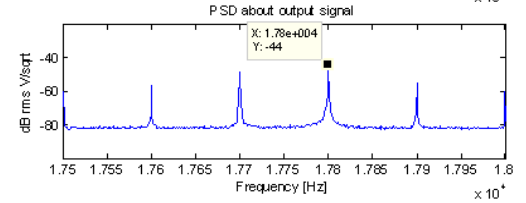
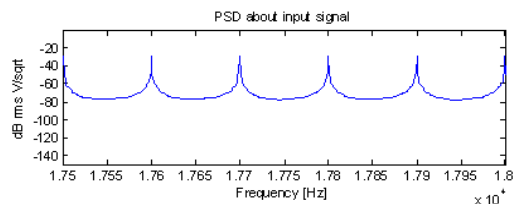


Fig. 9 PSDs of Fig. 7 zoomed at 17,800 Hz

17,800 Hz에서 횡진동공구의 고유진동수가 발생하는 것을 알 수 있다. 주파수 분해능이 100 Hz인 Fig. 6의 신호들은 완전한 입출력 신호의 관계를 보여주고 있지만 Fig. 7과 같이 주파수 분해능을 1 Hz로 확대한 측정 결과는 각각의 신호들이 빗살 형태의 부수적인 신호로 덮혀 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 신호들을 원으로 표시된 영역인 17,800 Hz 부근에서 확대한 그림이 Fig. 8과 Fig. 9이다. 오실로스코프에서 받아들인 신호가 주파수 분해능이 떨어질 경우에는 완전한 것으로 보이지만 사실상 Fig. 9에서 보는 바와 같이 100 Hz마다 피크점이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 오실로스코프에서 발생하는 디지털 신호의 주파수 분해능이 100 Hz인 것을 알 수 있다. Fig. 9의 출력신호를 살펴보면 17,700 Hz와 17,800 Hz에서 피크점이 크게 나타나고 있으므로 실제 공진진동수는 17,700 Hz와

Table 3 Sequence of finding resonance frequency using analog signal

Frequency[Hz]		Displacement[ $\mu\text{m}$ ]	
↑	17700	0.29656093	
	17750	0.91329659	
	17760	1.16517234	
	↕	17763	1.24140637
		17764	1.24473862
		17765	1.21106353
	17770	1.11195833	
17800	0.53882049		

17,800 Hz 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 실험에서와 같이 광대역 주파수 범위의 신호를 이용하여 주파수응답함수를 측정할 경우에는 가진신호의 주파수 분해능에 제한이 따른다는 것을 유의하여야 한다.

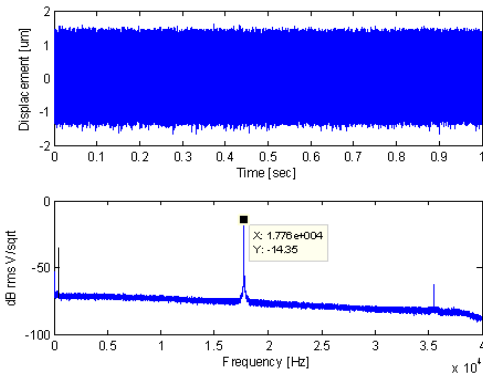


Fig. 10 Time domain signal and PSD of tip displacement signal at resonance

Table 3은 17,700 Hz와 17,800 Hz사이에서 아날로그 신호 발생기를 이용하여 고유진동수를 찾아가는 과정으로 변위값이 최대가 되는 17,764 Hz가 횡진동 공구의 공진주파수임을 확인할 수 있고 그때의 공구 끝단 변위는 1.245  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. Fig. 10은 공진 주파수로 가진된 공구 끝단의 변위 신호를 시간 영역에서 측정한 결과와 이 신호의 PSD를 나타낸다.

### 5. 결 론

이 논문에서는 현재 많이 사용되어지고 있는 초음파진동절삭을 좀 더 효과적으로 적용하기 위해서 바이트를 보의 형상으로 제작하여 착탈할 수 있는 횡진동 초음파 진동절삭 공구의 설계 방법을 제시하였다. 횡진동공구의 진동모드를 압전소자에서 발생하는 진동수와 일치시킴으로써 절삭을 위한 공구의 최대 진동 변위를 얻을 수 있다. 혼과 바이트의 치수 변화에 따른 고유진동수의 변화 경향을 검토하였고 이러한 경향성을 토대로 수치 해석을 실행하여 혼과 바이트가 결합된 횡진동 공구형상에 대

해 공진조건을 만족하는 특정형상의 설계가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 이 논문에서 제시된 설계 방법을 적용하여 다양한 형상의 진동절삭 공구를 제작함으로써 진동절삭 기술의 적용 범위를 더욱 확대시킬 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2010학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 이루어졌음.

### 참 고 문 헌

- (1) Kim, B. H., Kwon, Y. D. and Chu, J. N., 1994, A Study on the Analysis of the Precision Machining Characteristics Using Ultrasonic Vibration, Proceedings of the KSPE Annual Spring Conference, pp. 48-49.
- (2) Cha, J. H., 2009, A Study on the Design of Ultra-sonic Vibration Cutting Mechanism for the Process of Difficulty-to-cut Materials, Ph. D. Thesis, Kyungnam University Grad, School, pp. 17-20.
- (3) Kumabe, J., 1979, Precise Manufacture Vibration Cutting, Chitkyo Publication, Inc., Tokyo, pp. 149-191.
- (4) Kang, J. P., 1991, A Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 58-62.
- (5) Byun, J. W., 2010, Design of a Vibration Cutting Tool Utilizing Transverse Vibration Characteristics of Beam, M.S. Thesis, Kyungnam University Grad, School, pp. 7-33.