

유한요소법을 이용한 초음파 진동 공구혼 설계에 관한 연구

이봉구*, 김광래⁺, 김강은⁺⁺
(논문접수일 2008. 7. 7, 심사완료일 2008. 10. 21)

Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM

Bong-Gu Lee*, Kwang-Lae Kim⁺, Kang Eun Kim⁺⁺

Abstract

Conical horn is used in many high frequency ultrasonic horns, to achieve a longitudinal vibration mode across a wide ultrasonic tool horn output surface. Modal analysis is method for designing tuned ultrasonic tool horn and for the prediction natural frequency of ultrasonic tool horn vibration mode. The design of ultrasonic horn is based on prototype estimate obtained by FEM analysis. The FEM simulated ultrasonic tool horn is built and characterized experimentally through laser vibrometer and electrical impedance analysis. In this paper, FEM analysis is developed to predict the natural frequency of ultrasonic tool horn and use of in the optimal design of ultrasonic horn shape.

Key Words : ultrasonic machining(초음파가공), Resonant Frequency(공진주파수), Tool horn(공구혼), Amplitude(진폭), FEM(유한요소법), Modal analysis(모드해석)

1. 서론

최근 정밀 가공기술의 발전과 함께 제품의 고정밀화, 고성능화가 요구되면서 반도체 부품, 전자 및 통신기기 등 첨단 산업 전반에 고경도, 고내열성, 고강도의 우수한 기계적 성질을 갖는 재료가 요구되며, 이와 더불어 취성재료와 같은 난삭재의 정밀 가공기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

현재 고부가가치 부품소재로 사용되고 있는 대표적인 난

삭재 재료로는 세라믹(Ceramic), 광학유리(Optical glass), 웨이퍼(Wafer) 등이 있다. 이러한 재료들은 최첨단 산업인 반도체, 자동차, 원자력, 항공 우주산업에 사용되고 있는 고성능, 고기능성 소재들이다.

난삭재 가공의 경우 전통적인 절삭공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭가공으로 가공하기 어려운 문제점이 있기 때문에 이들 재료의 가공은 레이저 가공, 이온빔가공, 방전가공, 화학적 가공 등의 다양한 특수가공법에 의존하고

* 연세대학교 기계공학과 (grimbee@yonsei.ac.kr)
주소: 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

+ 인덕대학 기계자동차과

++ 한국생산기술연구원

있다⁽¹⁾. 그러나 이러한 가공법들은 각 공정의 특성에 따라 모든 재료에 적용되지 못하는 제한점과 가공을 위해서 많은 비용과 고가의 장비가 필요하다는 문제점을 가지고 있는 실정이다. 현재까지 난삭재 가공에는 CBN 슷돌에 의한 연삭 가공이 주로 사용되고 있으나 연삭저항의 크고, 글레이징, 로우딩 등의 현상으로 장시간 능률적인 가공이 어렵다.

레이저 가공(LBM)은 난삭재 가공의 대안으로 주목받고 있지만 아직까지는 열에 의한 표면품질저하가 상대적으로 높은 문제점을 지니고 있다⁽²⁾.

최근들어 방전가공(EDM)을 이용한 취성재료의 가공사례가 보고되고 있지만 전기적으로 전도성 재료만을 가공할 수 있는 단점이 있다⁽³⁾. 이러한 문제점을 해결하기 위한 가공법으로 초음파 가공이 사용되기도 한다⁽⁴⁻⁶⁾. 현재 사용되고 있는 초음파 가공법으로는 용접, 절단, 세정, 측정 및 검사, 미세가공 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 미세구멍 가공용 초음파 진동 절삭공구 장치의 구성은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 전기적 에너지를 공급하는 발전기, 초음파 진동자(transducer), 부스터(booster), 공구혼으로 구성된다⁽⁷⁾.

초음파 진동자는 압전 세라믹(PZT)을 적층시키고 볼트로 고정된 BLT(Bolt Langevin type Transducer)를 사용한다. BLT 진동자의 출력단에 진동자와 같은 고유진동수를 가진 부스터와 공구 혼을 부착하여 공진에 의한 증폭작용으로 초음파 미세 구멍가공에 필요한 진동에너지지를 얻게 된다. 그러나 부스터와 공구혼의 고유 진동수가 진동자의 진동수와 일치하지 않는 경우에는 공구혼의 출력단에 가공에 필요한 초음파 진동이 전달되지 않기 때문에 공구혼에 대한 공진설계가 요구된다. 최근에 유한 요소법을 공구혼의 설계에 이용하기 시작하였다. 본 연구에서는 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 축대칭 및 3차원 형상의 미세 구멍 가공용 공구혼에 대한 고유 진동수를 계산하여 공구혼의 최적 설계에

이용할 수 있도록 하였다.

2. 초음파 공구혼(Tool horn) 설계

초음파 공구혼의 설계시 무엇보다 공구혼의 공진주파수와 진폭 및 출력단에서의 진폭의 균일도를 들 수 있다. 공구혼의 공진주파수는 초음파 발전앰프의 가진 주파수가 일치해야 하며, 공진 상태에서 초음파 진동에너지가 가장 효율적으로 혼의 출력단에 전달된다. Fig. 2는 공구혼에서 변화하는 초음파 진동의 진폭을 나타내며, 공구혼의 입력면과 출력면사이의 거리가 음파의 1/2 파장에서 진폭이 최대가 되며, 혼의 길이도 음파의 반파장 길이 또는 두배가 된다. 부스터와 혼의 내부에는 진폭이 영(zero)이 되는 노드가 존재하며, 노드의 주변에서 최대응력이 발생하므로 혼의 설계시 각 노드점에서의 응력분포에 주의해야 한다. 최대응력의 분포로 높은 열이 발생하여 압전소자의 물성값의 변화의 우려가 있어 공구혼의 진동특성이 변하기 때문에 압축공기와 같은 냉각장치를 구성해야 된다. 혼에서 전달되는 파동의 전파속도인 음속도는 무한 공간 중의 음속과는 약간의 차이가 있으나 대개 10% 이하의 오차로 이용 가능하다. 공구혼은 1/2 파장의 길이에서 공진이 되므로 대부분의 공구혼의 길이는

$$\text{혼의 길이} = 1/2 \times C/F \tag{1}$$

여기서 C : 재질내의 파동전파속도(음속도), F : 주파수 이다. 위 식은 일반적인 공구혼의 길이를 예측하는 식으로서, 혼의 재질에 따라 음속도(C)가 결정되고, 발전기에서 입력되는 가진 주파수가 결정되면 식 (1)에 따라 혼의 길이는 1/2 파장에 해당된다. 초음파 미세구멍 가공기에 사용되는 대부분의 소형혼의 경우에는 그 혼의 해석에 있어서 공구혼의 파동전파에 있어서 종진동뿐만이 아니라 횡진동의 성분이 있기 때문에 가공기의 성능에 커다란 장애가 될 뿐만 아니라 해석하는데 많은 문제를 초래한다. Fig. 2는 초음파 공구혼의 형태에 따른 진폭의 변화를 나타낸다. 초음파 가공기에서 사용

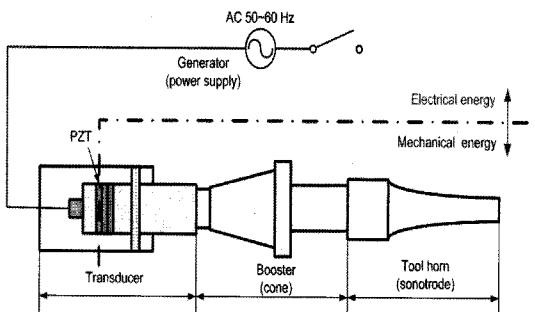


Fig. 1 Schematic of diagram ultrasonic horn assembly

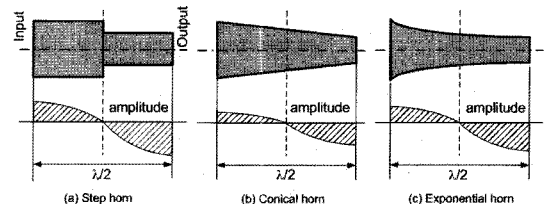


Fig. 2 Schematic of diagram ultrasonic horn and amplitude

되는 대표적인 공구흔은 형상이 단순한 스텝형(step), 코니칼형(conical), 지수형(exponential) 등이 사용된다⁽⁸⁾.

흔의 형태에 따른 진폭은 각 흔의 입력부와 출력부의 면적비가 일정하더라도 흔의 형태에 따라서 스텝형, 지수형, 코니칼형 순으로 진폭확대율이 높다. 진폭비가 상대적으로 큰 스텝형 흔을 일반적으로 많이 사용하나, 재료 내부의 진동응력과 내부손실이 크기 때문에 흔이 파손될 우려가 있다. 공구의 단면적이 크지 않고 입력단과 출력단의 진폭비를 증폭할 필요가 없을 경우에는 코니칼형과 지수형 흔을 사용하는 데 지수형은 제작상의 어려움 때문에 실용적인 코니칼형 흔을 사용하는 것이 좋다. 일반적으로 미세구멍가공과 같이 작은 가공면적에는 코니칼형을 사용하고, 가공면적이 큰 경우에는 스텝형을 사용한다. 본 연구에서는 미세 구멍가공을 위해 초음파 미세가공기의 핵심부분인 초음파 진동 공구흔을 파동방정식과 유한요소법 결과를 기초로 하여 효과적으로 설계하고 제작하기 위해서 코니칼 흔의 형상과 치수를 결정하였다. 1차원 파동방정식에 의해 결정된 치수로 FEM 모델링하고, 축대칭 및 3차원 코니칼 공구흔에 대한 고유진동수와 진동 모드형상을 유한요소법의 모드해석을 통하여 예측하고 실제 초음파 진동 공구흔 형상설계에 적용할 수 있도록 하였다.

2.1 코니칼 흔(Conical horn)의 설계

일반적으로 가공면적이 작은 경우에는 코니칼형, 가공면적이 큰 경우에는 스텝형을 사용한다. 이 중에서 현재 사용하고 있는 코니칼형의 운동방정식과 길이를 구하는 식은 다음과 같다. Fig. 3과 같이 입력단에서 거리가 x인 점의 단면적을 S, 봉의 Young 계수를 E라 하면, 1차원 파동 방정식은 (2)식과 같다.

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \tag{2}$$

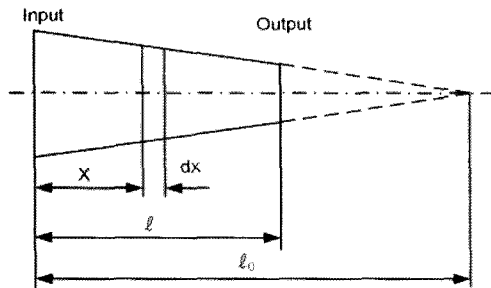


Fig. 3 Design of Conical horn

단, 여기서 ρ : 밀도, u : 변위, t : 시간

식 (2)를 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 를 이용하여 다시 쓰면

$$S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \tag{3}$$

Fig. 3과 같이 코니칼형 흔의 종진동은 경계조건에 의하여 $x=0$ 과 $x=l$ 에서 미분값이 "0"이 되기 때문에

$$x=0, x=l \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

을 이용하여, 공진 조건식을 이끌어 내면 (4)식이 된다.

$$\tan \alpha \ell = \frac{\omega \ell c (D_1 - D_2)^2}{c^2 (D_1 - D_2)^2 + \omega^2 \ell^2 D_1 D_2} \tag{4}$$

단, $\alpha = \frac{\omega}{c}$ 또 단면이 원형일 경우, 양단면적을 S_1, S_2 라 하면

$$\tan \alpha \ell = \frac{\omega \ell c (\sqrt{S_1} - 1)^2}{c^2 (\sqrt{S_1} - 1)^2 + \omega^2 \ell^2 \sqrt{S_1}} \tag{5}$$

식 (5)가 된다. 이와 같이 흔 양단면의 직경 또는 단면적 및 공진주파수가 정해지면 길이 ℓ 이 구해진다⁽⁹⁾.

코니칼 흔의 입력단의 직경(D_1)은 20mm, 출력단의 직경(D_2)은 10mm를 혼설계 운동방정식을 적용하여 흔의 길이를 85mm로 흔의 치수를 결정하였다. 미세구멍 가공용 초음

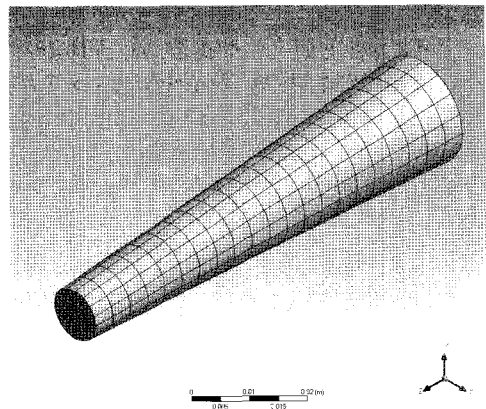


Fig. 4 FEM model of Conical horn

파 가공기에 이용하는 종진동(longitudinal)모드의 혼을 사용하게 되는데, 운동방정식에 의해 결정된 형상치수를 FEM 모델링 하여 Fig. 4에 나타내었다.

결정된 코니칼 혼의 진동 모드는 미세공구가 장착되는 출력부에서 최대 진폭이 발생해야 된다. 이것은 출력부에 공구를 장착하였을 경우 발생한 종진동을 미세공구에 진동 에너지의 전달효율을 높일 수 있기 때문이다. 이렇게 설계된 실제 공구혼에서 미세구멍 가공에 필요한 종진동(longitudinal vibration) 모드가 형성되는지를 FEM 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 모드해석을 하였다.

2.2 공구혼(Tool horn)의 재질

미세구멍 가공기용 초음파 공구혼의 재질은 피가공물의 재료와 공구혼의 무게에 따라 선택되어야 하며, 강도와 경도가 중요한 공구혼 재료 선택의 중요한 변수가 된다. 우선, 피가공물의 재질이 공구혼 보다 경도가 강하게 되면 가공에 사용되는 연마재에 의하여 공구혼도 같이 가공이 되기 때문에 피가공물의 재질보다 경도가 높은 재료를 선택하는 것이 바람직하다. 또한 초음파 진동자(transducer)가 진동함에 따라 공구혼의 부피가 커지면 이로 인하여 재료 내부의 초음파 진동의 전달손실이 커진다. 또한 공구혼의 단면비가 줄어들지 않을 경우에는 초음파 공구혼의 출력부의 진폭이 원하는 만큼 발생하지 않는 경우가 많다. 초음파 미세 가공기에 주로 사용되는 공구혼의 재질은 주로 티타늄 합금이나 알루미늄 합금을 사용 한다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 사용하여 FEM 해석을 하였으며 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

공구혼의 설계, 제작시 가장 중요하게 여기는 변수는 공구혼 재료의 가진 주파수에 따른 파장의 길이이다. 이 파장의 길이는 공구혼의 재료내에 전파하는 파동의 정확한 음속에 따라 결정된다. 파장의 길이는 공구혼을 설계, 제작하는

중요한 변수로 혼의 길이를 결정하는데 영향을 미치고, 공구혼의 초음파 진동을 발생시켜 공진을 발생하는 요소가 된다.

공구혼의 길이를 결정함에 따라 초음파 공구혼의 공진주파수가 결정이 된다. 그러나 본 연구의 경우 초음파 가공기의 발전기에서 부여되는 가진 주파수는 30kHz로 고정되어 있기 때문에 공구혼의 길이를 조정하면서 공진주파수를 30kHz로 튜닝(tuning)해야 된다.

2.3 FEM에 의한 고유 진동수 해석

혼의 끝단에 공구를 부착하지 않은 3차원 축대칭 코니칼 혼은 종진동의 진동모드에 따라 그대로 공구에 전달하여 초음파 진동을 이용한 가공이 진행하게 된다. 이러한 혼의 진동 모드는 Fig. 2(a)와 같이 공구혼의 출력부에서 최대 진폭의 종진동이 발생해야 된다. 코니칼 혼의 1차원 파동 방정식에 의하여 결정된 혼의 치수(혼의 입력단의 직경(D₁)=20mm, 출력단의 직경(D₂)=10mm, 혼의 길이= 85mm)로 모델링하여 실제 혼의 종진동(Longitudinal)모드와 고유 진동수를 FEM 해석을 통하여 검증하고, 초음파 공구혼의 공진설계에 적용하였다. FEM 해석에 사용된 모델은 혼의 출력부에 공구를 장착하지 않는 축대칭 3차원 코니칼 형에 대한 고유 진동수와 ANSYS의 모드해석의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 유한요소해석 결과 진동모드에서 출력부의 축방향 변위가 더 크게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 입력부보다 출력부의 진폭이 더 증폭된다는 것을 알 수 있으며 고유 진동수가 해석 결과와 일치함을 알 수 있다. FEM 해석 결과 초음파 혼의 출력부에 무부하(load)가 상태의 진동 특성을 확인 할 수 있다.

그러나 실제 가공 상태에서는 공구의 장착, 그리고 가공물과의 접촉상태에 따라 혼의 특성이 달라진다는 것을 예상 할 수 있었다.

유한요소 해석에 적용한 FEM 모델의 Element type은 solid 186을 선택하여 solid 바디로 적용하여 실제의 혼과

Table 1 Mechanical properties of horn material

Material	Mechanical properties			
	Density (g/cm ³)	Elastic module (GPa)	Hardness (HRB)	Poisson's ratio
Titanium (Ti6Al4V)	4.43	113.85	334	0.31
Aluminium (7075)	2.81	71.7	60	0.34

Table 2 Natural frequency in 20~40kHz range(without tool)

No	Natural frequency(Hz)	Vibration mode
1st-(a)	30,341	Transverse
2nd-(b)	30,938	Longitudinal
3rd-(c)	33,382	
4th-(d)	33,384	

가장 흡사한 형태로 모델링하여 해석하여 고유 진동수를 예측 오차를 최소화 하였다. 해석에 사용된 solid 요소는 free mesh를 이용하여 요소 분할하여 해석한 결과값이 Table 2에 나타내었다. 발진앰프에서 주어지는 가진 주파수가 30kHz 이기 때문에 고유 진동수 해석범위는 20~40kHz로 하여 고유진동수를 구하였다. 해석결과 1,2차 진동 모드는 가진 주파수 30kHz에 일치하였으나, 진동모드 형상의 비교결과 1차 모드는 공구흔 출력부에서 횡진동(transverse) 모드가 발생하여 공구가 파괴되는 등 나쁜 영향을 미치게 되므로 종진동 모드가 필요로 하는 미세구멍 가공용 초음파 가공기에는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 2차 모드인 종진동 모드를 선택하여 공구흔을 제작하였다.

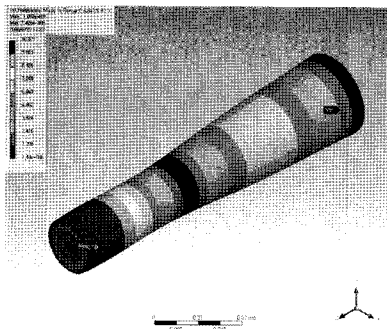
Fig. 6은 축대칭 코니칼 공구흔의 출력단에 미세구멍가공용 공구형상의 공구를 부착한 것으로 실제 초음파 미세구멍 가공기의 공구흔을 모델링하여 고유진동수와 진동모드를 유한 요소 해석한 결과를 나타내었다. 이와같이 공구흔의 출력단에 공구의 장착으로 인하여 공구흔의 진동모드 특성이 공구를 장착하지 않은 공구흔의 고유진동수와 진동모드형상이

다른 특성을 확인할 수 있었다.

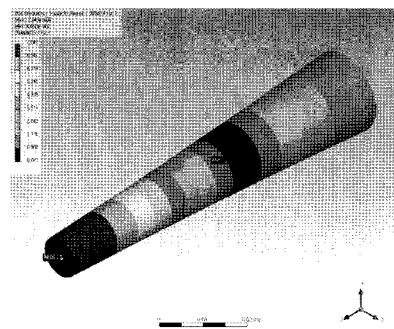
초음파 발진앰프의 가진 주파수인 30kHz에서의 진동모드를 비교한 결과, 공구가 없는 경우의 고유진동수는 30,938 kHz로 공구흔의 출력단에 최대진폭이 발생하였고, 공구가 장착된 공구흔의 진동모드는 공구의 끝단에 최대진폭이 발생하여 미세구멍 가공기의 종진동 모드에 적합한 모드 형상을 예측할 수 있었다. 해석결과 30,704kHz로 가진주파수 보다 더 적합한 진동모드임을 알 수 있었다. 또한 진동모드형상 역시 공구의 끝단에 최대진폭이 발생하는 종진동 모드형

Table 3 Natural frequency in 20~40kHz range(with tool)

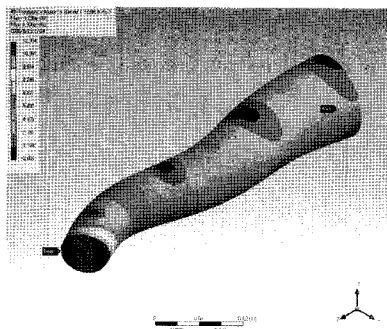
No	Natural frequency(Hz)	Vibration mode
1st-(a)	29,988	Transverse
2nd-(b)	30,704	Longitudinal
3rd-(c)	31,967	Lateral
4th-(d)	32,059	



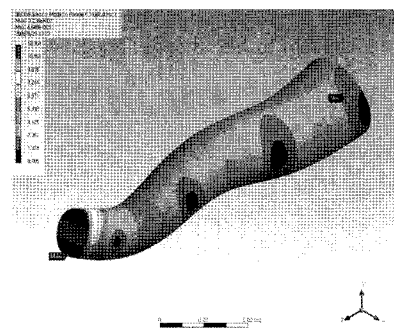
(a) Mode 1: 30,341Hz



(b) Mode 2: 30,938Hz

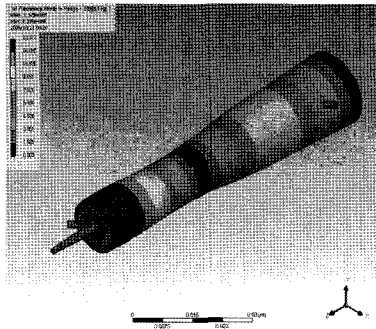


(c) Mode 3: 33,382Hz

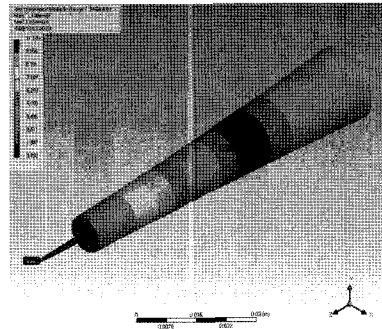


(d) Mode 4: 33,384Hz

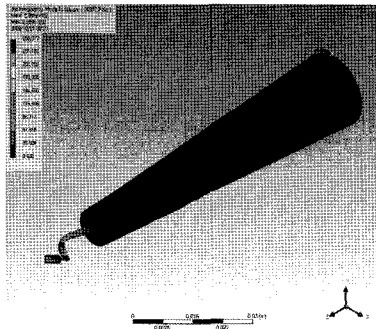
Fig. 5 Vibration mode shape for conical horn without tool



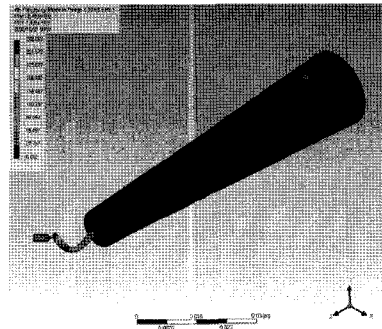
(a) Mode 1: 29,988Hz



(b) Mode 2: 30,704Hz



(c) Mode 3: 31,967Hz



(d) Mode 4: 32,059Hz

Fig. 6 Vibration mode shape for conical horn with tool

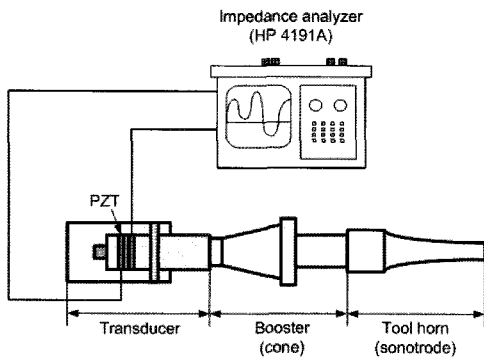


Fig. 7 Measurement system for electrical impedance and phase analyzer

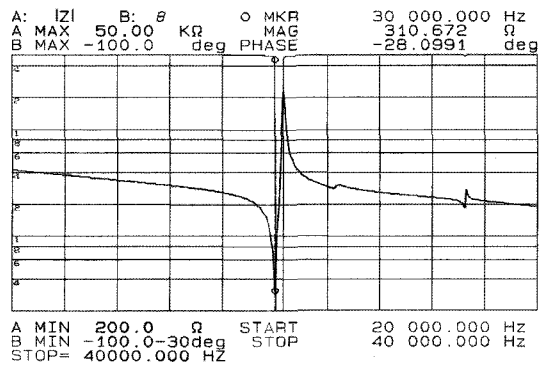


Fig. 8 Electrical impedance and phase angle as function of frequency for the ultrasonic conical horn

상으로 미세구멍가공에 가장 적합한 진동모드상태임을 알 수 있다. FEM 해석을 통하여 제작된 공구혼을 Fig. 7과 같이 임피던스(impedance) 분석기를 이용하여 임피던스를 측정하였다. 임피던스 측정은 진동자(transducer), 메인혼, 공구

혼을 모두 체결하여 진동계 전체의 임피던스를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 임피던스 측정기는 HP4194A 제품을 사용하여 제작된 혼을 측정하게 되는데 측정범위를 20~40kHz로 설정한 후 측정을 하게 되고, 공구혼의 재료마다 고유 주

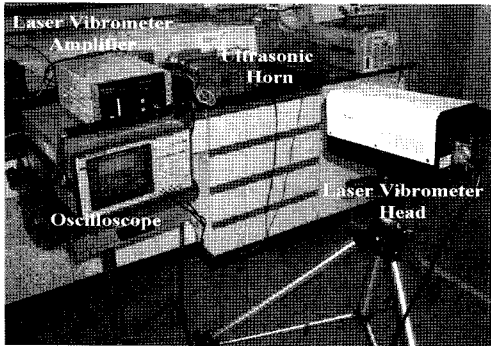


Fig. 9 measurement system for ultrasonic vibration properties

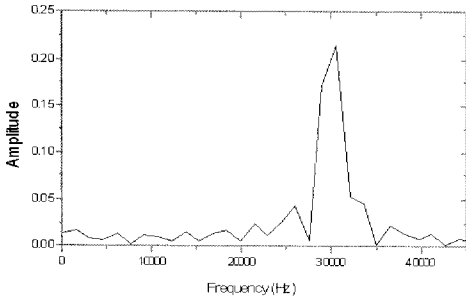


Fig. 10 Vibration properties of the ultrasonic horn

파수에서 각 상이 급격하게 변하게 되면서 임피던스를 측정하게 된다. 이렇게 측정한 값은 Fig. 8과 같다.

FEM 모드 해석을 통하여 제작된 코니칼 혼의 임피던스 측정값은 30,000Hz이고, 모드 해석의 결과값은 30,704Hz을 비교하면 234Hz차이가 발생하게 된다. 이 값은 실제 가진 주파수로 적용되는 30kHz와 약 2.3% 이내 오차를 보임으로 적합하게 혼의 설계가 되었다고 판단 할 수 있다.

그리고 초음파 발진앰프의 가진 주파수가 30kHz 라고 해서 정확하게 공구혼의 공진 주파수가 30kHz가 일치해야 되는 것은 아니다. 이것은 초음파 진동자의 발진앰프에서 어느 정도의 영역 내에서는 공진이 되게 되어 있고 발진앰프 자체에서도 500Hz 정도는 가변 할 수 있게 되어 있기 때문이다.

유한요소해석을 통해 제작된 초음파 코니칼 혼의 출력단의 초음파 특성을 알아보기 위해서 Fig. 8과 같이 초음파진동 앰프의 출력을 20%에서 초음파 공구혼을 가진 시킨 후 초음파 혼의 끝단 속도를 비접촉식 Laser vibrometer로 측정하여 초음파 특성을 측정하였다. Fig. 9은 초음파 혼의 출력부의 특성을 측정할 수 있는 시스템 사진으로 초음파 공구혼을 가

진 할 수 있는 발진 Amp, laser system(max frequency: 100kHz), 오실로스코프로 구성되어 있다. 공구혼의 출력부에 공진 주파수 측정값을 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 9의 측정 결과는 발진앰프에서 30kHz 가진 주파수를 인가 했을때 공구혼에 전달되어 출력부에서 측정한 속도값으로 인가된 주파수와 출력부의 주파수가 일치하는 것으로 봐서 공구혼의 공진 설계가 적합하다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 난삭재의 미세가공에 이용되는 초음파 가공기의 공구혼 최적설계를 위하여 1차원 파동방정식을 이용하여 공구혼의 형상치수를 계산하고 공진 주파수 30kHz의 코니칼 혼을 제작하였다. 또한 공구혼에 작용하는 진동 모드 특성을 FEM 해석을 통하여 예측하였고, 초음파 공구혼을 포함한 재질 및 공정의 최적설계에 영향을 미치는 주요 인자에 대해서도 알아보았다. 미세구멍가공용 초음파 공구혼에 사용되는 모드형상은 1/2파장의 종진동 모드이며, 입력부와 출력부에서 최대 진폭이 발생 되는 모드로 FEM 모델링 및 해석을 통하여 진동모드 형상을 해석하고 예측하여 공구혼 설계에 적용가능성을 고찰하였다. 특히 코니칼 공구혼의 경우 출력부의 단면적이 작을수록 초음파 진동 전달 효율이 우수하다는 것을 알았다. 공구혼 설계에 있어서 FEM 해석을 통하여 얻은 진동특성에 대한 해석 결과값 30,704kHz와 제작된 혼의 초음파 특성실험값이 발진앰프의 가진 주파수인 30kHz에 근접하는 것으로 보아 혼의 설계 오차를 2.3% 이내로 최소화 하면서, 공구혼의 최적설계 및 제작이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Amin, S. G., M. H., Ahmed, 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, pp. 254~260.
- (2) Copley, S. M., 1985, *Handbook of High speed Machining Technology*, Chapman and Hall, New York, pp. 1771~1775.
- (3) Koenig, W., Dauw, D. F., Levy, G., and Panten, U., 1998, "EDM future steps towards the machining of ceramics," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp.

623~631.

- (4) Choi, H. J., 1996, Development of ultrasonic machine, *Korea Institute of industrial Technology*, pp. 31~36.
- (5) Pei, Z. J., Kapoor, P. M., and Haselkorn, S. G., 1995, "Rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics," *International Journal Machine Tools Manufacture*, Vol. 35, pp. 1033~1046.
- (6) Choi, I. H. and Kim, J. D., 1996, "Characteristics of chip generation with ultrasonic vibration cutting in the extremely low cutting velocity," *Transaction of KSME*, Vol. 21, pp. 655~662.
- (7) Lee, S. W. and Choi, H. Z., 2001, "A Study on the micro ultrasonic machining using ultrasonic vibrator," *Advances in Abrasive Technology*, pp. 969~972.
- (8) Kang, J. H., 1996, "A Study on an ultrasonic vibration Assisted Grinding for Ceramics," *Transaction of KSME*, Vol. 4, No. 5, pp. 37~48.
- (9) Ensminger, D., 1960, "Solid Cone in Longitudinal Half-Wave Resonance," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 32, No. 2, pp. 194~206.