

## 고속 가공기용 란쥬반형 진동자의 설계 및 구동특성

### Design and driving characteristics of Langevin type transducer for high speed processing machine

박민호, 정동석, 박태곤, 김명호\*

(Min-Ho Park, Dong-Suk Jung, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim)

#### Abstract

The cutting performance of a machine depends on the ability of the design of the acoustic horn to facilitate an increase in tool-tip vibration, allowing a significant amount of material to be removed. In this paper, three kinds of acoustic horns were designed and FEM was used to estimate displacement magnifications of horn tips. An optimization procedure for the profile has been followed to obtain maximum magnification, for higher rate of material removal and safe working stresses for the horn material

**Key Words** : Langevin type ultrasonic transducer, acoustic horn, Piezoelectric ceramics, FEM, ANSYS

#### 1. 서론

란쥬반형 진동자는 압전세라믹스를 알루미늄 봉 사이에 적층한 구조로 되어있으며, 봉의 종진동을 이용하므로 전기-기계변환효율이 커서 강력 진동자로의 적용이 가능하다. 최근 소재개발의 초점을 고강도, 고경질의 재료개발에 두고있어, 이러한 재료들의 가공에는 기존의 방법보다는 초음파가공기와 같은 초고속, 미세가공의 방법등이 요구되어지고 있다.

본 논문에서는 봉의 1차 종진동 모드를 이용한 공진주파수 43 [kHz]의 란쥬반형진동자의 변위를 증폭시키기 위한 여러 가지 형태의 혼을 설계하였다. 매질내의 전파속도에 의한 최대 종진동 조건을 만족하는 혼의 치수를 계산하였다. 또한 이를 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여, 설계모델의 형상의 공진주파수를 해석하고, 란쥬반형 진동자와 결합한 혼의 공진시 변위와 응력분포를 확인하였다. 혼의 형태에 따른 변위를 비교하여 혼구조의 최적조

건을 제시하였다.

#### 2. 봉의 종진동

봉의 자유진동은 파동방정식(wave equation)으로부터 유도되며, 모든 공진자는 이 식에 의해 그 길이가 결정된다. 봉의 단면적이 일정한 균일봉의 진동 방정식은 식(1)과 같다.

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t) \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서  $c$ 는 봉을 통과하는 파장의 속도이며, 식(2)와 같은 관계를 가지고,  $u$ 는 변위,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 봉의 밀도,  $E$ 는 봉의 영률을 나타낸다. 이때 봉이 길이가  $l$ 이고 그 양단이 자유로울 경우 공진주파수는 식 (3)과 같다.

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

이 때 봉의 종단부에서 최대의 변위를 얻기 위해서는 식(5)와 같이 봉의 길이를  $n=1$  인 종진동 진행

\* : 창원대학교 전기공학과 세라믹공학과  
(경남 창원시 사림동 9번지 창원대학교)  
Fax: 055-263-9956  
E-mail: mino23@dreamwiz.com)

파의 1/2 되는 지점으로 결정한다.

$$\lambda = \frac{c}{f_n} \quad (4)$$

$$l = \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

여기서  $l$  과  $\lambda$ 는 진동자의 길이와 종진동 진행파의 길이이다.

### 3. 혼의 설계

진동자 종단의 변위는 수 [ $\mu m$ ] 이하로 아주 미소하다. 하지만 초음파가공에서는 이보다 큰 진폭이 요구된다. 이와 같이 진동자의 작은 진폭에서 공구의 큰 진폭을 얻기 위해서는 강도가 강한 재료로 끝을 가늘게 한 혼을 만들어 이것을 진동자에 접착하고 진동 에너지를 소면적으로 집중시켜야 한다.

혼의 형상으로는 단면이 지수함수적으로 변하는 지수함수혼, 원추형의 원추혼, 진동이 절부에서 불연속적으로 가늘게 한 단부가혼 및 이것을 조합한 형태등이 있다. 어느 것이나 진동자의 공진 주파수보다 반파장 정수배의 공진을 하도록 설계되어 있다.

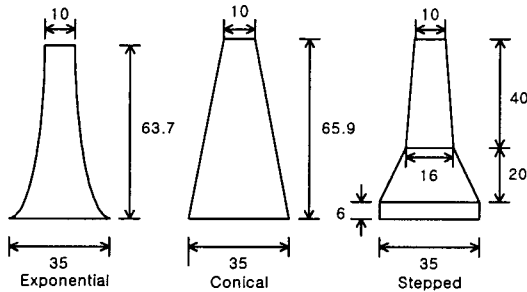


Fig. 1. Contours and size of exponential, conical and stepped horn (Unit:[mm])

山梨大學의 杉長介와 東京工業大學의 森榮同가 완전히 적립한 지수함수형, 원추형, 단부가형 혼설계방법에 따라서 진동자의 공진주파수(약 43 [kHz])와 동조를 시킨 3가지 종류의 혼을 설계하였다. 설계혼을 설치할 진동자 종단부의 직경(35 [mm])에 일치시켜 혼의 저면을 결정하고 각 종류의 혼의 변위를 비교하기 위하여 상단부의 직경은 10[mm]로 정하여, 3종류의 혼을 공진주파수 43 [kHz]에 맞추어 길이를 설계하였다. 여기서 단부가혼은 절 부분의 응력집중현상을 피하기 위해 원추혼과의 조합형태로 설계를 하였다. Fig. 1은 설계된 3종류 혼의 기하학적 형상을

나타내었다.

## 4. 유한요소 해석

### 4.1 혼의 모드해석

유한요소해석법은 공학분야에서 설계, 변형 및 모드해석 등에서 가장 효과적이고 강력한 방법일 것이

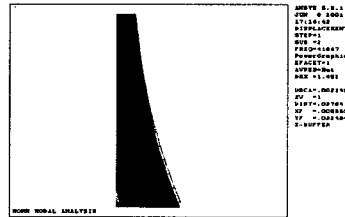


Fig. 2. Modal analysis of exponential horn



Fig. 3. Modal analysis of conical horn

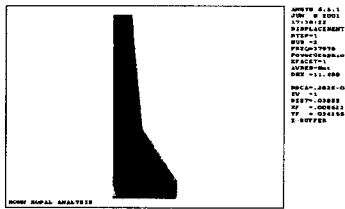


Fig. 4. Modal analysis of stepped horn

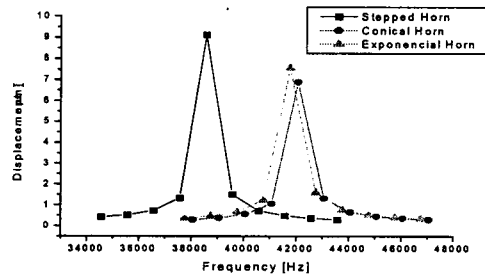


Fig. 5. Resonance frequencies and displacements of horns

다. 앞에서 계산된 3종류의 혼을 축대칭 2차원모델로 설계하고 그 고유주파수를 설계 공진주파수와 비교하기 위하여 모드해석을 실시하였다.

해석에 적용한 재료는 듀랄루민(6061)으로 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각  $E=7.6 \times 10^{10} [N/m^2]$ ,  $\rho=2700[kg/m^3]$ ,  $\sigma=0.3$  이다.

Fig.2.-Fig.4.는 각각 지수함수, 원추, 단부가혼의 고유주파수에서 진동모드를 나타낸다. 모드해석결과 고유주파수는 설계주파수 43 [kHz]와는 약간의 오차가 있었지만, 지수함수형 혼은 약 42 [kHz]에서 원추형 혼은 약 44 [kHz]에서 그리고 단부가혼은 약 38 [kHz]에서 고유주파수를 가지고 그 모드는 1차 종진동이 주모드로 적절한 설계가 되었다고 판단되어진다.

### 3.2 진동자의 변위해석

혼이 진동자에 결합되면 진동자와 혼의 공진주파수가 변하게 된다. 따라서 진동자에 3종류의 혼을 부착했을 때의 3차원 모델을 설계하고 조화해석을 통해 공진주파수의 변화와 변위를 알아보았다. 그 결과 Fig.5와 같이 나타났고 공진주파수는 원추혼이 약 42 [kHz]로 가장 높았고 단부가혼이 38.5 [kHz]로 가장 낮았다. 이는 같은 재료에서 파장이 혼을 통과하는 길이나 면적이 커질수록 공진주파수 또한 높아지는 것으로 나타났다. 이 현상은 다음절에서 해석할 단부가혼의 해석에서도 같은 결과를 보였다. 변위는 단부가혼이 약 9 [ $\mu m$ ]로 최대로 나타났다.

Fig.6-Fig.7은 3종류의 혼과 진동자의 중심노드에서 변위의 변화를 확인하였다. 모두 붕의 2차 종진동 모드의 형상을 나타냈고, 진동자의 중심부와 혼의 중심부에서는 변위가 거의 0에 가깝게 나타났고

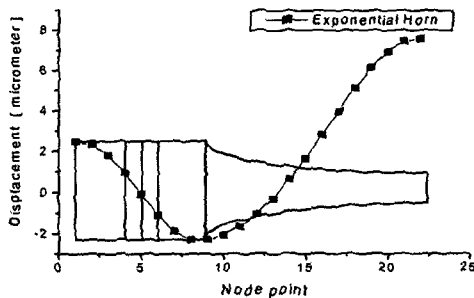


Fig. 6. Displacement of exponential horn at axial node

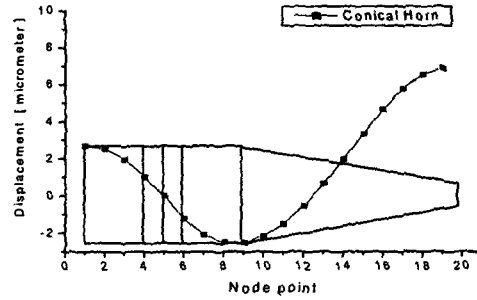


Fig. 7. Displacement of conical horn at axial node

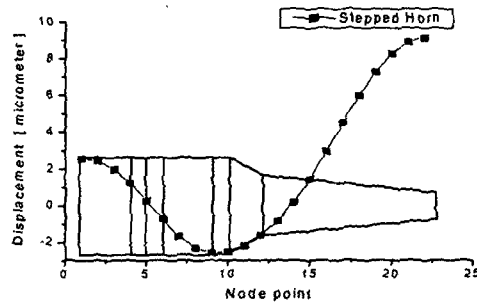


Fig. 8. Displacement of stepped horn at axial node

혼의 종단부에서 변위가 확대함을 확인할 수 있었다. 혼의 형상에 따라서 변위의 확대율이 확연히 차이남을 확인할 수 있다. 여기서는 변형된 단부가혼의 변위 확대율이 큼을 알 수 있다.

혼의 형태에 따른 변위를 비교한 결과 원추혼, 지수함수혼, 단부가혼의 변위확대율은 각각 2.72, 3.12, 3.68로 단부가혼의 변위확대율이 가장 우수한 것으로 계산되었다.

### 3.3 단부가혼의 최적설계

이상 3종류 혼의 진동자의 변위 증폭율을 비교해 볼 때 단부가혼의 증폭율이 가장 우수함을 확인하였다. 따라서 단부가혼의 형상에 따른 변위를 확인함으로써 최적조건을 구할 수 있다.

단부가혼은 일반적으로 절의 부분에서 불연속적으로 가늘게 하는 것으로 지수함수혼이나 원추혼에 단을 붙이면 양단의 면적비가 같은 경우 단을 붙이지

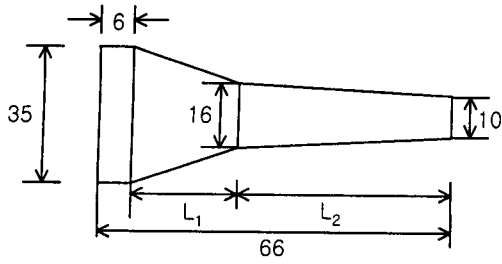


Fig. 9. Double-conical stepped horn (Unit:[mm])

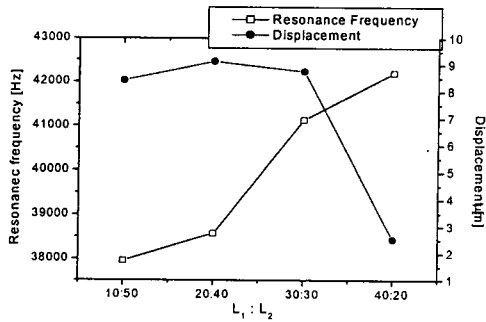


Fig. 10. Displacement and resonance frequency of stepped horn according to the ratio of  $L_1:L_2$

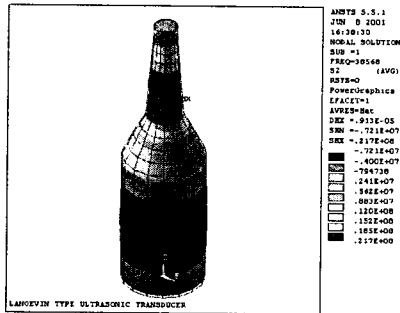


Fig. 11. Stress distribution in resonance mode of stepped horn

많은 경우보다 큰 진폭확대율이 얻어진다. 따라서 Fig.9와 같이 모델을 설계하고  $L_1$ 과  $L_2$ 의 비를 가변하여 공진주파수 및 변위를 확인하였다. 그 결과 Fig.10과 같이  $L_1$ 과  $L_2$ 의 비가 증가할수록 공진주파수는 증가함을 보였고 변위는  $L_1$ 과  $L_2$ 의 비가 20:40일 때 최고의 변위를 나타냈다. Fig.11.은 진동자에 결합된 비율 20:40 모델의 단부가혼의 응력 및 변위를 나타내었다. Fig.12는 실제 제작된 지수함수혼을 진동자에 부착한 모습과 구동회로이다.

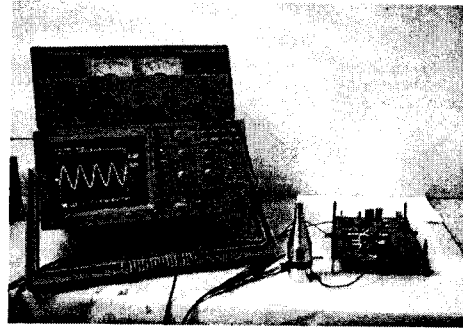


Fig. 12. Langevin type ultrasonic transducer and its driving circuit

#### 4. 결론

봉의 1차 종진동 모드를 이용한 공진주파수 43 [kHz]의 란쥬반형진동자의 변위를 증폭시키기 위한 3종류의 혼을 설계하였다.

1. 매질내의 전파속도에 의한 최대 종진동 조건을 만족하는 지수함수혼, 원추혼, 그리고 단부가혼의 혼의 치수를 계산하고 이를 유한요소 해석을 통해 공진주파수를 해석하였다. 그리고 란쥬반형 진동자와 결합한 혼의 공진시 변위와 응력분포를 확인하였다.
2. 혼의 형태에 따른 변위를 비교한 결과 원추혼, 지수함수혼, 단부가혼의 변위확대율은 각각 2.72, 3.12, 3.68로 단부가혼의 변위확대율이 가장 우수한 것으로 계산되었다.
3. 변위확대율이 가장 우수한 변형된 단부가혼의 일부분의 위치를 가변하여 해석한 결과 최대 변위확대점 점은  $L_1$ 과  $L_2$ 의 비가 20:40일 때임을 확인했고 앞서 언급한 혼의 재질 및 치수에서 변형된 단부가혼의 최적조건을 제시하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Toshiiku Sashida, Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", OXFORD, 1993.
- [2] 籾森聽雄, "やさしい超音波の應用" 秋密出版株式會社
- [3] S.G. Amin, M.H.M. Ahmed, H.A. Youssef, "Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis" J. Mpt. Vol.55 pp.245-260, 1995
- [4] 阿部, 田中ほか: 電氣三學會連合大會 講演論文集, 1,(1952, 5), 80.
- [5] Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.