

란쥬반형 진동자의 형상에 따른 진동특성 변화

Changes of Vibrational characteristics due to the spaces
of the Langevin type vibrators

박민호, 정동석, 박태곤, 권오영*
(Min-Ho Park, Dong-Seok Jeong, Tae-Gone Park, Oh-Young Kwon)

Abstract

Bolt-tightened Langevin type vibrators using longitudinal mode of bar were designed and fabricated. In order to amplify the displacement of the tip of the vibrators, stacked ceramics were used and five different shapes of the horns were designed and fabricated. Resonant frequencies and vibrational characteristics of vibrators and horns were analyzed by ANSYS(finite element analysis computer program), and the displacements of tips of the horns were measured.

As results, when the number of the stacked ceramics were increased, the displacements of the tips were increased and the driving voltages were decreased. Step1 horn(BLT-St1) showed maximum displacement of 36.92[μm] at 36.7[kHz] with 45[Vrms] and 0.11[A]. The displacement amplification ratio was about 5.2. But, the stress of step1 horn was concentrated on intersection, where two diameters meet. To lessen the stress, step3 shaped horn is recommended

Key Words : Langevin type vibrator, horn, displacement, stress, ANSYS

1. 서 론

란쥬반형 진동자는 1922년 프랑스의 P.Langevin에 의해 최초로 개발되었다. 1950년 BaTiO₃를 사용한 란쥬반형 진동자가 개발되었고, 접착제 대신 볼트에 의한 결합방법이 개발되어 인장력에 약한 압전세라믹의 약점을 보완해 더욱 안정된 출력을 얻을 수 있게 되었다. 최근에는 진동자 톱(tip)부분의 미소진동을 변위 확대기구인 혼(horn)을 이용하여

창원대학교 전기공학과
경남 창원시 사림동 9
Fax: 055-263-9956
E-mail: tgpark@sarim.changwon.ac.kr

진폭을 확대함으로써 초음파 용착, 표면가공 등 사용목적에 따라 다양하게 개발되고 있다. 본 연구에서는 봉의 1차 종진동 모드를 이용한 볼트 조임형 란쥬반형 진동자(BLT)를 봉의 진동이론에 따라 설계하였다. 전체 두께가 같은 범위에서 세라믹 한 장의 두께를 조정하여 2, 4, 8, 12 층의 세라믹을 적층(stack)하여 설계하고, 또한 이 진동자의 표면에서 발생되는 미소진동을 증폭시키기 위한 변위 확대기구인 혼을 5가지의 다양한 형상으로 설계하였고, 란쥬반형 진동자와 결합시켜 공진주파수에서의 변위와 응력분포를 확인하였다. 그리고 이러한 과정들을 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 그 타당성을 검토하였고 실제로 제작 및 구동을 하여 그 특성을 비교하였다.

2. 란쥬반형 진동자의 설계

2.1 진동자의 길이와 주파수

본 논문에서는 세라믹의 공진주파수 43[kHz]에 맞추어 다음의 식들을 이용하여 진동자를 설계하였다.

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{E_2}{\rho_2}} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \frac{c_1}{f_n}, \quad \lambda_2 = \frac{c_2}{f_n} \quad (2)$$

$$a = \alpha \frac{\lambda_2}{4}, \quad b = \beta \frac{\lambda_1}{4} \quad (3)$$

표 2. 세라믹의 치수 및 재료정수(KPZ12 : 경원 퀘라이트)

Table 1 Size and material properties of ceramics

Size, property and units	Value
내경 ψ_{in} [mm]	15
외경 ψ_{out} [mm]	35
접촉면의 단면적 S_1 [mm^2]	785.4
세라믹 두께 b [mm]	6
밀도 ρ_1 [kg/m^3]	7600
전파속도 c_1 [N/m^2]	3162
Young's modulus E_1 [N/m^2]	7.6×10^{10}
공진주파수 f_r [kHz]	42.8 ~ 43.1
비유전율 ϵ_{33}/ϵ_0	1250
압전상수 $d_{33} (\times 10^{-12}) [\text{m}/\text{V}]$	290
압전전압계수 $g_{33} (\times 10^{-3}) [\text{V} \cdot \text{m}/\text{N}]$	27
품질계수 Q_m	1800

단, c_1 : 세라믹 매질내부의 전파속도, c_2 : 금속 매질내부의 전파속도, E_1 : 세라믹의 영률, E_2 : 금속의 영률, ρ_1 : 세라믹의 밀도, ρ_2 : 알루미늄의 밀도, a : 금속의 두께, b : 세라믹의 두께이다. 식 (1)에 재료정수를 대입하여 세라믹의 전파속도 c_1 과 알루미늄의 전파속도 c_2 을 구하고, 세라믹의 공진주파수 f_n 로부터 세라믹의 두께 b

를 결정하면 식(2)와 (3)에서 알루미늄의 길이 a 를 구할 수 있다. 세라믹과 알루미늄의 치수 및 재료정수는 표 1. 및 표 2.와 같고, 표 3.은 위의 식으로부터 계산된 란쥬반형 진동자의 치수를 나타내었다.

표 2. 알루미늄의 재료정수(Alloy6061)

Table 2 Material properties of Alloy 6061

Characteristics and units	Value
Modulus of Elasticity E [N/m^2]	7.6×10^{10}
Poisson Ratio σ	0.33
Density ρ [kg/m^3]	2700

표 3. 진동자의 크기

Table 3 Size of transducer unit : [mm]

Size	Value
내경 ψ_{in}	15
외경 ψ_{out}	35
알루미늄의 두께 a	22.5
세라믹의 두께 b	6
전극판의 두께 t	0.15
전체길이 l	57

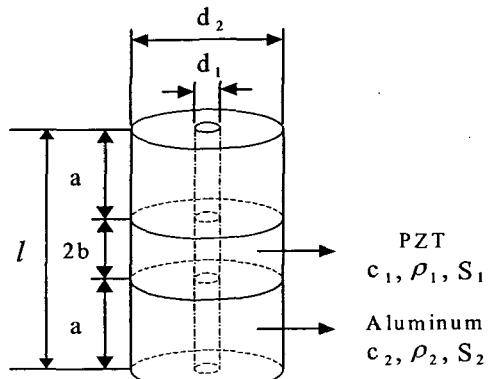


그림 1. 진동자의 구조

Fig. 1 Structure of transducer

2.2 혼의 설계 및 치수결정

란쥬반형 진동자 종단의 변위는 수 [μm] 이하

로 아주 미소하다. 이 미소한 진폭을 초음파 가공 등에 사용될 수 있는 큰 진폭으로 증폭시키기 위하여 끝이 가늘어지는 형상의 혼을 만들어 진동자의 종단부에 접합시켰다. 이 혼의 형상으로는 단면이 지수함수적으로 변하는 지수함수형 혼(exponential horn), 원추형의 원추형 혼(conical horn), 진동이 절부에서 불연속적으로 가늘어지는 단부가형 혼(stepped horn) 및 이것을 조합한 step 1, step 2, step 3의 형상으로 설계하였다. 혼의 기하학적인 치수는 진동자 종단부의 직경(35 [mm])에 일치시켜 혼의 저면을 결정하고, 각 종류의 혼의 변위를 비교하기 위하여 상단부의 직경은 10[mm]로 고정

하여, 5종류의 혼을 공진주파수 43 [kHz]에 맞추어 길이를 설계하였다. 그림 2는 설계된 5종류의 혼의 기하학적인 형상을 나타낸 것이다.

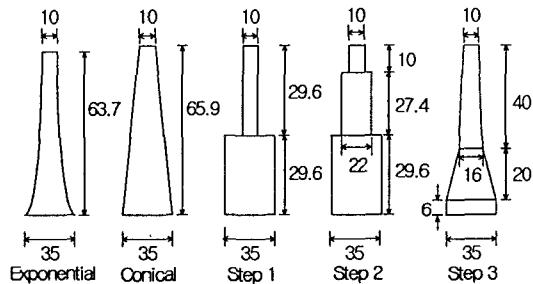


그림 2. 혼의 형태 및 치수
Fig. 2 Configure and size of horns

3. 유한요소 해석 및 측정

3.1 진동자의 모드해석

표 3의 치수로 설계된 진동자를 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 해석 조건으로는 진동자에 외부 가진력이 없는 free-free 상태로, 전극부분의 인가전압은 0[Vrms]인 상태에서 해석을 실시하였다. 그림 3은 설계된 2층의 세라믹 진동자를 모드 해석한 결과이다. 공진주파수에서 진동자의 변형된 형상으로 43.67[kHz]부근에서 진동자가 1차 종진동모드를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 진동자 설계시의 공진주파수 43[kHz]와 거의 일치한다.

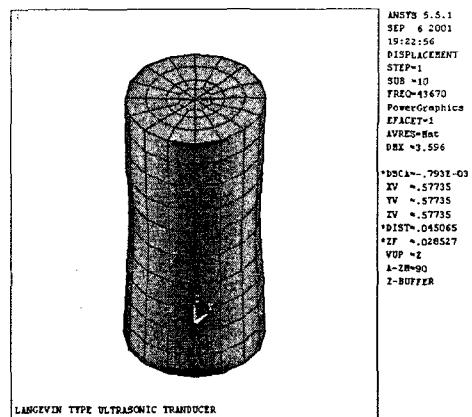


그림 3. 진동자의 모드해석
Fig. 3 The modal analysis of transducer

3.2 혼의 모드해석

그림 2의 혼의 형태 및 치수를 바탕으로 5종류의 혼을 축 대칭 2차원모델로 설계하여 모드해석을 실시하였다. 해석에 적용한 재질은 두랄루민(6061)으로써 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각 $E=7.6 \times 10^10$ [N/m²], $\rho=2700$ [kg/m³], $\sigma=0.3$ 이다. 그림 4는 설계한 혼의 공진주파수에서의 진동모드를 나타내었다. 해석결과 종류별 혼의 공진주파수는 설계시의 공진주파수 43[kHz]와 약간의 차이를 보이는 표 4와 같았다.

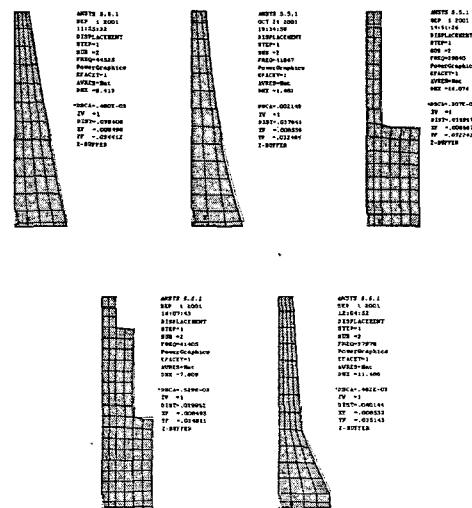


그림 4. 혼의 모드해석

Fig. 4 Modal analysis of horns

표 4. 혼의 공진주파수

Table 4 Resonance frequencies of horns

Horn Type	Conical	Exponential	Step1	Step2	Step3
Resonance Frequency	44525	41867	39840	41405	37978

3.3 혼이 결합된 진동자의 변위해석

세라믹의 공진주파수 43[kHz]에 맞추어 봉의 1차 종진동을 만족하는 진동자를 설계하였다. 원추형, 지수함수형, 단부가형, 변형된 단부가형 등 총 5종류의 혼을 세라믹의 공진주파수 43[kHz]와 일치하게 설계하고 진동자와 결합하여 전체가 봉의 2차 진동모드가 되게 하였다. 그림 5는 각각의 혼과 결합된 진동자에 교류전압 45[Vrms]을 인가했을 때의 변위를 ANSYS로 해석했을 때와 실측값을 비교하여 나타내었다. 해석결과와 실험에서 모두 step 1 혼(BLT-St1)이 최고의 변위확대 비율을 보였다.

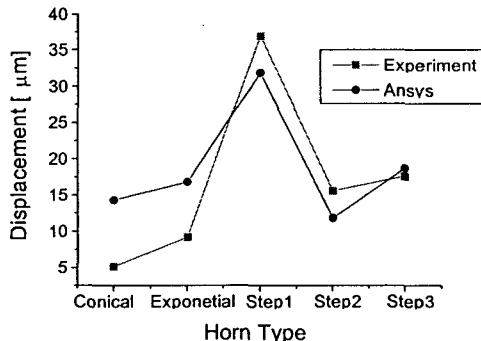


그림 5. 혼이 결합된 진동자의 변위 비교

Fig. 5 Comparison of displacement of transducers with horn

그림 6은 지수함수형 혼을 연결한 진동자(BLT-Exp)의 조화응답해석시 공진주파수 39.6[kHz]에서의 형상이다. 그림 7은 step 1 혼을 연결한 진동자(BLT-St1)의 중심노드에서 변위의 변화를 나타내었다. 진동자 중심부의 변위는 거의 0에 가깝게 나타났고, 혼의 종단부에서 변위가 확

대됨을 확인할 수 있다.

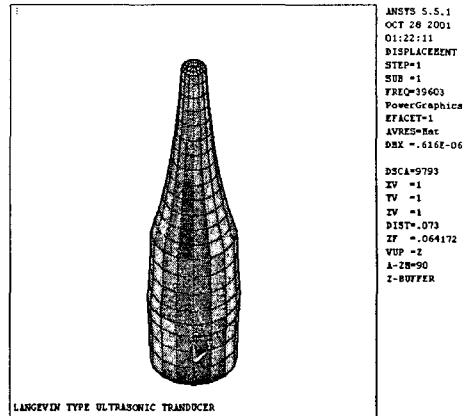


그림 6. 지수함수형 혼진동자(BLT-Exp)의 조화해석

Fig. 6 Harmonic analysis of BLT-Exp

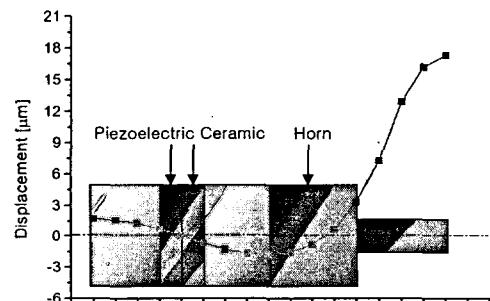


그림 7. 중심노드 위치에 따른 변위의 변화
(BLT-St1)

Fig. 7 Vibration of displacement at central node

그림 8은 BTL-St1이 인가전압 45[Vrms], 공진주파수 37.6[kHz]에서의 등가응력분포(equivalent stress; Von Mises stress)를 나타내었다. 높은 변위를 나타냄에도 불구하고 혼의 절부분에 집중된 응력분포 때문에 문제가 될 수 있으므로 그 적용성이 용이하지 못하다. 이를 보완하기 위해 그림 9의 step 3 혼의 형태를 취함으로써 변위는 다소 줄었지만 절 부분에서의 응력분포를 절반가량 분산시킬 수 있었다.



그림 8. Step1 혼 진동자의 등가응력분포
(BLT-St1)

Fig. 8 The equivalent stress of BLT-St1

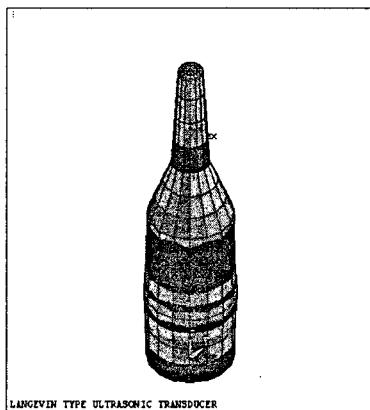


그림 9. Step3 혼 진동자의 등가응력분포
(BLT-St3)

Fig. 9 The equivalent stress of BLT-St3

그림 10은 BLT-St1의 공진주파수 37.6[kHz]에서 인가전압의 변화에 따른 변위와 전류의 변화를 나타냈다. ANSYS와 실험결과 모두 0~45[Vrms]까지 인가전압의 증가에 따라 변위와 전류가 증가함을 보였고 45[Vrms]에서 최대 전류 0.106 [A]가 훌렸다. 그림 11은 BLT-2-St1에 인가전압 45[Vrms]에서 인가주파수를 32~39.7[kHz]까지 가변한 결과 공진주파수 37.6[kHz]부근에서 최대변위 36.92[μm]를 나타냈고 이때 인가전류도 최대 0.114[A]가 됨을 확인하였다.

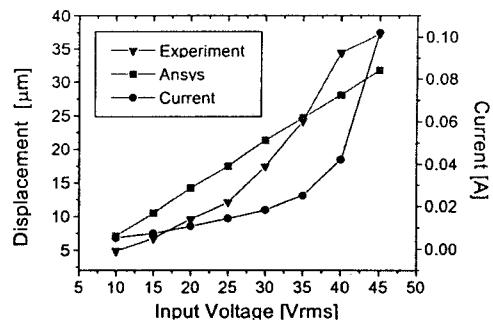


그림 10. 인가전압에 따른 변위(BLT-St1)

Fig. 10 The displacement of BLT-St1 with accordance of input voltage

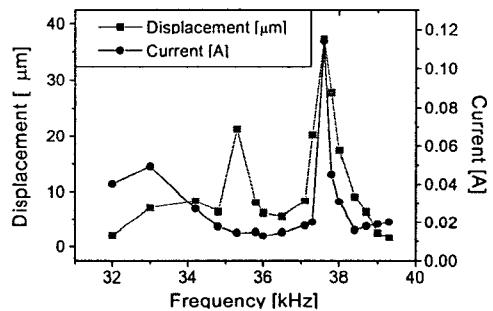


그림 11. 주파수변화에 따른 변위(BLT-St1)

Fig. 11 The displacement of BLT-St1 with accordance of frequency

3.4 세라믹 충수에 따른 변위 특성

세라믹의 총 두께를 일정하게 두고 세라믹의 총 수를 2, 4, 8, 12층으로 변화시켜 진동자 tip의 변위를 해석하고 그 변위를 측정하여 비교한 결과를 그림 11에 나타내었다. 해석 및 측정결과 세라믹 2 층 진동자(BLT-2)가 약 7.1[μm]의 변위를 보였고, 세라믹 12층 진동자(BLT-12)는 42.3[μm]까지 증가하였다. 진동자의 충수가 증가할수록 변위가 증가함을 보였고, 실험에서는 45[Vrms] 인가시 2, 4, 8층에서는 변위가 각각 5.0, 4.66, 7.69[μm]의 변위를 나타내었다. 그러나, BLT-12는 실험 중 2[A]이상의 과전류가 흘러 power amplifier에서 overload 경고가 나타나서 측정을 하지 못하였다.

따라서 인가전압을 25[Vrms]까지 줄인 결과 overload 경고가 해제되어 측정을 계속할 수 있었다. 그 결과 BLT-2에서 $0.9[\mu m]$ BLT-12에서 $3.24[\mu m]$ 로 층수의 증가에 따라 변위가 증가함을 보였다.

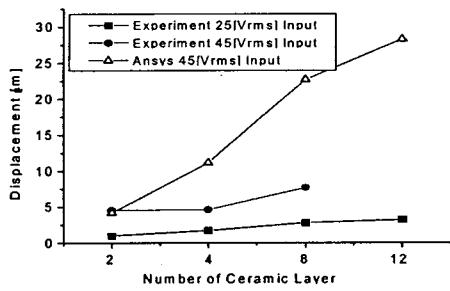


그림 12 세라믹 층수별 변위 비교

Fig. 12 Comparison of displacements due to the ceramics layers

4. 결 론

봉의 1차종진동 모드를 이용한 란쥬반형 진동자를 설계하여 제작하고 그 진동특성을 측정하였다. 세라믹의 적층수가 증가할수록 진동자 표면의 변위가 증가하며, 구동전압을 낮출 수 있었다. 또한, 진동자의 표면에서 발생되는 미소진동을 증폭시키기 위한 변위확대기구인 혼을 다양한 형태로 설계하여 공진주파수 및 진동특성 알아본 결과, 진동자에 부착된 혼의 형태에 따라 변위의 증폭량이 큰 차이를 보였다. step 1 혼은 인가전압 45[Vrms], 공진주파수 $37.6[\text{kHz}]$ 에서 최대 $36.92[\mu m]$ 의 변위를 나타냈으며, 혼의 첨두 부분에서 변위 증폭율은 5.2배로 아주 높은 증폭율을 나타냈다. 그러나, step 1 혼의 변위증폭율은 높지만 혼의 절부분에서 응력의 집중현상을 보이므로, 이를 보완하기 위해 절부분에 원추형 혼 형태가 가미된 step 3 혼의 형태가 바람직한 혼의 형태로 판단된다. BLT-2-St1에 인가전압 45[Vrms]에서 인가주파수를 $32\sim39.7[\text{kHz}]$ 까지 가변한 결과 공진주파수 $37.6[\text{kHz}]$ 부근에서 최대변위 $36.92[\mu m]$ 를 나타냈고 이때 인가전류도 최대 $0.114[A]$ 가 됨을 확인하였다.

<감사의 글>

“이 논문은 2001년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음”

[참고문헌]

- [1] P. Langevin, French Patent, 505, 703, 1920
- [2] 박태곤, 박창엽, 한득영, “란쥬반형 진동자에 관한 연구”, 대한전기학회지, 제 30권 제1-2호, pp.47-54, 1980
- [3] Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] 近野:メカニカルフィルタ、3、(1964)、共立出版株式會社
- [5] 阿部, 田中ほか:電氣三學會連合大會 講演論文集, 1,(1952, 5), 80.
- [6] 篠森聰雄, “やさしい超音波の應用” 秋密出版株式會社, p136-146 , 1995