

이종재료 접합을 위한 초음파 진동자 설계

Design Method for Ultrasonic Transducer to Bonding with Dissimilar Materials

정 안 목*·김 철 호†

An Mok Jeong and Cheol Ho Kim

(2011년 5월 12일 접수 ; 2011년 11월 17일 심사완료)

Key Words : BLT(볼트조임 란주반형 진동자), Resonance Frequency(공진주파수), Vibration Characteristics (진동특성)

ABSTRACT

In an attempt to improve adhesion strength between glass and metal due to use of Pb-free solder as a sealant between glass and metal in the manufacturing process of vacuum insulation window glass to maintain the vacuum volume, ultrasonic energy is often applied during the process of Pb-free sealing. In this study, we propose an ultrasonic vibrator with a 4 mm end tip radius which performs resonance frequency of 60 kHz and 14 μ m or higher vibration displacement. A frequency variation due to applied pressure on piezo disks, which was excluded in the computer simulation, was verified experimentally, and we have demonstrated a 17 μ m vibration displacement at 50 V input through the performance test of a vibrator constructed with our specification.

1. 서 론

초음파의 응용 분야는 음파의 파동 성질을 이용하는 정보, 측정 분야와 초음파의 고에너지를 활용하는 분야로 대표되며⁽¹⁾, 초음파의 고에너지를 활용한 예로는 초음파 용접기와 가공기⁽²⁾ 등을 들 수 있다. 최근 세계 각국들은 국가 경쟁력 향상을 위한 전략으로 “녹색성장 정책”을 발표하였고, 이에 따른 신재생에너지에 대한 사회적 관심이 높아지면서 녹색 건축물 보급이 확산되어 지고 있다. 이러한 녹색 건축물에 에너지 손실을 최소화하기 위하여 진공단열 유리창을 사용하게 되는데 이를 사용함으로써 약 30% 이상의 에너지 손실을 줄일 수 있다.

이러한 진공단열 유리창을 제작을 위한 공정은 glass edge sealing, 진공압을 견딜 수 있도록 지지해 주는 spacer형상 및 배치기술 그리고 진공부의 밀봉 기술로 나눌 수 있는데, 이중 밀봉 기술은 기존에 납이 포함된 저융점유리본드를 사용하였으나 2006년 EU의 RoHS의 실행으로 무연 솔더를 사용하고 있다. 이 무연 솔더는 접합 강도가 작은 단점이 있어 새로운 접합 기술인 초음파 에너지를 이용한 접합 방식이 대두되었다⁽³⁾. 진공을 유지하기 위하여 공기를 빼낸 유리 구멍을 금속을 이용하여 공기가 들어가지 못하도록 무연 솔더를 이용하여 유리 와 금속을 접합을 하게 되는데 접합 시 초음파 에너지를 조사하기 위한 초음파 진동자가 필요하다.

초음파 진동자 설계 관련하여 Kang⁽⁴⁾ 등은 초음파 진동 절삭 공구 혼 설계를 위하여 고유진동수를 해석함으로써 혼의 길이 및 외경 치수를 결정하여 혼을 설계하였다. Lin⁽⁵⁾는 혼의 감쇠상수를 변화시켜서 길이방향 진동과 비틀림 진동이 동일한 주파

† 교신저자; 정회원, 한국생산기술연구원
E-mail : cheolho@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8313, Fax : (041)589-8460
* 한국생산기술연구원

수에서 발생하도록 길이방향 - 비틀림 합성 모드의 익스퍼넨셜 혼을 설계하고, 제작을 통해 혼 설계의 타당성을 검증하였다. Sherr⁽⁶⁾ 등은 Mason's model을 이용하여 스텝 혼을 등가회로로 모델링 하였다. 스텝혼을 bolt와 piezoelectric stack, backing layer, horn의 세 부분으로 모델링 하고 혼의 임피던스와 가속도를 계산하고 해석결과는 실험을 통해 모델링 결과를 증명하였다. Kim⁽⁷⁾ 등은 유한요소 해석을 이용하여 단순 실린더 혼과 스푼 혼을 설계하고, 실험계획법을 이용하여 스푼 혼의 그루브(groove) 형상이 진폭 균일도에 미치는 영향을 분석하였으며, 혼의 형상에 따른 응력과 공진주파수의 변화를 해석하고, laser doppler vibrometer를 이용하여 해석 결과를 검증하였다. 또한 Kim⁽⁸⁾ 등은 콜릿(collet)을 가지는 횡 방향 초음파 혼을 분석하기 위해 유한요소 해석 모델을 수립하고, 기본적인 진동 실험을 통해 성능을 검증하였다.

이 연구에서는 유리-금속의 이중금속 접합을 위하여 요구되어지는 60 kHz의 진동수를 이용하며 필요한 끝단 지름 4 mm에서 14 μ m 이상의 진폭 성능 갖는 진동자를 설계하였다. 먼저 수치 해석을 통한 압축력이 없는 혼의 설계와 이를 이용하여 제작한 진동자의 압축력에 의하여 변하는 구동주파수와 진폭을 측정하여 설계 방안을 검토하였다.

2. 초음파 진동자 설계

2.1 볼트조임 란주반형 진동자

볼트조임 란주반형 진동자(BLT)는 Fig. 1과 같이 링 타입의 지름 25 mm, 두께 4 mm의 압전소자 2매를 서로 마주 보도록 배치한 후 전기적으로 병렬로 연결하고 상단 및 하단에 금속 블록을 부착하였으며 이들을 backing이 닿는 front block 부위 나사를 내고 backing 중앙에 탭을 내어 backing을 이용하여 조인 구조이다. 압전소자는 잡아당기는 응력에는 약하나 압축응력에는 강하므로 볼트로 조여 압축력을 인가해 줌으로써 큰 진폭 동작이 가능하다. 기본적 구성은 단순하나, 기계 및 전기적 특성을 충분히 실현할 수 있도록 압전소자와 금속 블록을 효과적으로 결합하여야 하며, 접합면의 형상이나 마무리 처리, 볼트를 조이는 힘 조절 등의 기술이 필요하다⁽⁹⁾. 볼트로 조이는 경우 그 구조상 압전소자는

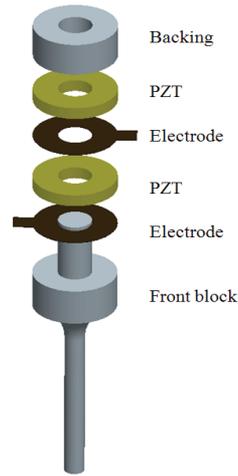


Fig. 1 Bolt-clamped Langevin type transducer

작수장을 사용하며 곁에 있는 것끼리 분극방향이 서로 반대가 되도록 배치해야 한다. 또한 소자를 진동의 마디 위치에 삽입하면 진동자의 힘 계수를 크게 할 수 있으며, 전극판은 탄성이 좋은 베릴륨동이나 인청동이 사용된다⁽¹⁰⁾.

BLT 진동자의 경우 압전소자는 구동회로로 부터 구동 신호를 인가받아 기계적인 진동으로 변환시켜 주는 역할을 하며 이때 구동주파수는 압전소자의 공진주파수가 아니라 조립된 진동자 형태의 종방향 진동 공진주파수로 인가되므로 양자 사이에는 주파수 차이가 있다. 압전소자 후방의 금속 블록(backing)은 압전소자에 비해 현저히 낮은 음향 임피던스를 지니며, 압전소자에 의해 전후 양방향으로 발생하는 초음파 진동 중 후방향으로의 파장을 반사시켜 전방향으로 합산되도록 하는 역할 및 진동자에서 발생한 열을 흡수, 냉각시키는 역할을 한다. 압전소자 전방의 금속 블록(front block)은 압전소자에서 두께모드로 발생한 미소진동의 진폭을 일정한 단면적 비로 증폭시키는 역할을 한다.

2.2 초음파 진동자의 모드해석

이 연구에서는 Fig. 2와 같이 진동자 끝단에서 많은 진동에너지를 얻기 위하여 이보다 큰 면적의 압전소자를 이용하여 스텝형 혼의 개념 설계를 하였으며, 진동자의 압전소자와 접촉부분의 하부금속에 진동절면(nodal plane)을 유도하였다. 진동절면은 초음파 진동자를 고정할 수 있는 지지대로 사용하며,

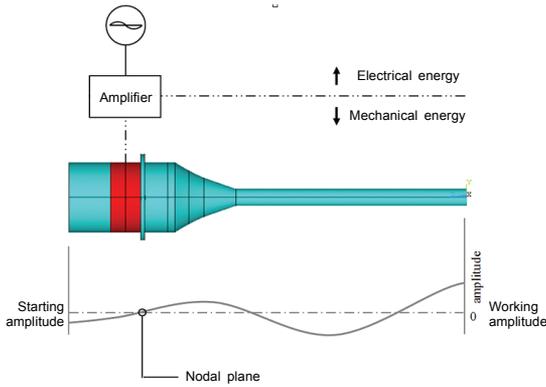


Fig. 2 Configuration of ultrasonic transducer and wavelength of longitudinal vibration

Table 1 Material properties of transducer

Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio	Density(kg/m ³)
113.85	0.31	4,430

초음파 진동 에너지의 소모를 최소화할 수 있다.

유한요소 해석을 위해 상용 소프트웨어를 사용하였으며, 자유경계조건으로 모드해석을 수행하였다. 초음파 진동자의 웨이브 가이드 재질은 티타늄(titanium T-6)이며, 압전소자는 기계 및 유전 손실이 적은 hard 계열의 압전소자(PZT8)를 사용하였다. 사용된 티타늄의 물성값은 Table 1과 같다.

수치해석 시 볼트 조임 압력 경계조건을 무시하였기에 조임 압력이 적용되어 제작된 진동자와는 공진주파수에서 차이를 보인다. 조임 압력에 의한 공진주파수 상승을 고려하여 약 5 kHz 작은 공진주파수를 갖도록 설계를 하였다. Fig. 3은 초음파 진동자의 모드 해석 결과로서 55,520 Hz에서 공진주파수를 보이며, 이때의 진동 모드는 종방향 진동 모드인 것을 확인 할 수 있다. 초음파 진동자 설계 시 공진주파수를 근접 주파수와 분리시켜야 하는데 이는 작동 주파수와 가까운 모드와 중첩 되거나, 모드 스위칭이 발생하지 않도록 하기 위해서이다. 모드 중첩이 되거나 모드 스위칭이 발생할 경우 축방향 진동이 왜곡되거나 진동의 증폭도, 진폭 균일도를 감소시키는 원인이 되기 때문이며, Table 2에 각 모드 별 주파수를 정리하였다. 1차 공진주파수와 2차 공진주파수 사이에 약 15 kHz 이상으로 충분히 차이가 나는 것을 알 수 있다.

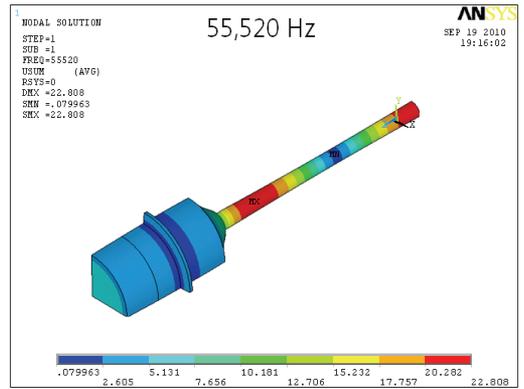


Fig. 3 Modal analysis of BLT

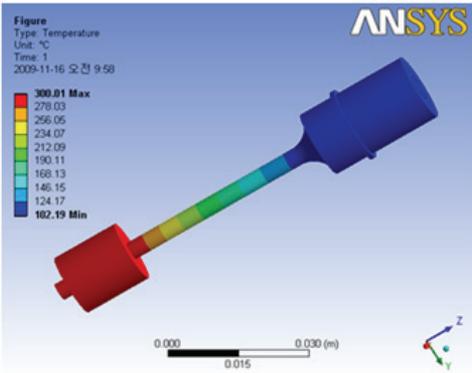
Table 2 1st & 2nd natural frequency of BLT

Longitudinal mode	Frequency(Hz)
1st	55,520
2nd	70,338

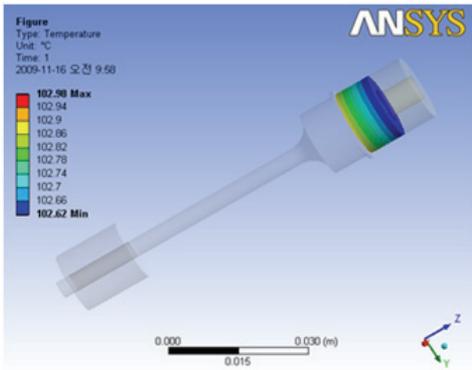
일반적으로 압전소자를 이용한 초음파 진동에는 열을 동반하게 되는데 이 연구에 사용된 압전소자의 경우 발생하는 열의 온도가 150 ℃ 이상으로 올라가게 되면 압전소자의 분자구조 변형을 동반하며 이에 따른 압전소자 변형을 가져와 사용할 수 없기에 일정 온도 이하로 유지시키는 것이 중요하다.

유리-금속 접합을 위하여 무연 솔더를 용융시키는 과정이 필요한데 이를 위하여 진동자 끝단부터 5~20 mm에 걸쳐 히터를 이용하여 약 250 ℃의 열을 가하게 된다. 이렇게 가해지는 열에 의하여 압전소자의 온도가 상승하여 특성 변화를 가져올 수 있기에 압전소자의 온도 변화를 예측하여 안전 여부를 확인하였다.

열전달 해석을 위해 접합 시험 시 끝단에 위치하는 히터를 가상 금속으로 두어 히터의 온도보다 높은 300 ℃의 조건을 주었으며 진동자가 열평형 상태일 때의 예측 값을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 열평형 상태일 때의 초음파 진동자의 온도 프로파일을 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 압전소자 부분만의 온도 프로파일을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 적층된 압전소자 온도는 최고 102.98 ℃인 것을 확인 할 수 있으며, 실험을 통한 접촉식 온도계를 이용하여 측정된 결과 103.3 ℃가 측정되었다.



(a) Thermal equilibrium temperature profile of BLT



(b) Thermal equilibrium temperature profile of PZT

Fig. 4 Thermal equilibrium temperature profile



Fig. 5 Bolt clamped Langevin type transducer

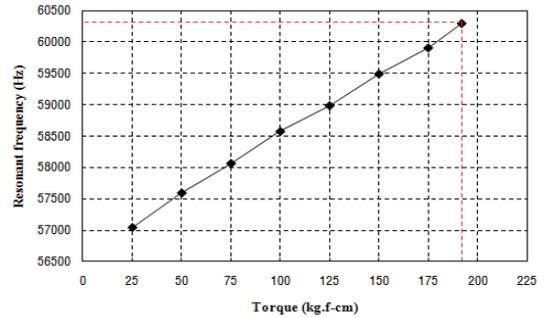


Fig. 6 Resonance frequency according to bolt torque

3. 초음파 진동자 제작 및 진동 진폭 분석

3.1 초음파 진동자의 공진주파수 분석

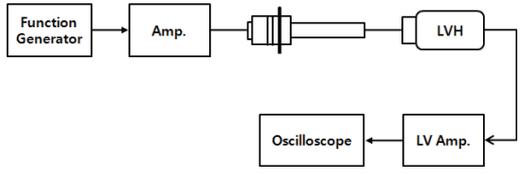
수치해석 결과의 설계 인자에 따라 제작된 초음파 진동자는 Fig. 5와 같으며 임피던스 분석기 HP 4194A를 이용하여 공진주파수를 측정하였다. 2.1 절에 언급한 바와 같이 진동자의 구조가 볼트조임 구조를 갖으며, 볼트 조임 가압력에 따라 공진주파수가 달라진다. 처음 진동자 설계 시 60 kHz의 주파수를 갖는 진동자를 제작하는 것이 목표였기 때문에 진동자 제작 시 볼트 조임 가압력에 따라 주파수를 최적으로 조율하였으며, Fig. 6에 임피던스 해석기를 이용하여 압전소자를 조이는 힘에 따른 공진주파수의 변화를 나타내었다. 가압력 25~190 kgfcm 따라 5~6 kHz의 공진주파수 변화 범위를 보이며, 약 192 kgfcm에서 60,300 Hz의 공진주파수가 확인 되었다. 그래프에서 알 수 있듯이 압전소자를 조이는 힘이

‘0’일 경우 약 56,500 Hz의 공진주파수가 예상되는 것을 알 수 있으며, 이는 유한요소 해석 결과인 55,520 Hz와 약 1.8%의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

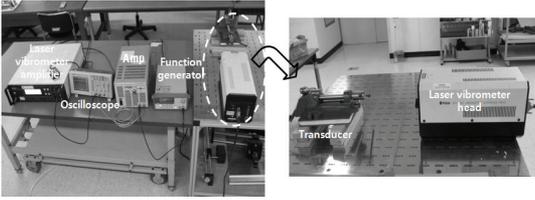
3.2 초음파 진동자의 진동 특성 분석

제작된 초음파 진동자 출력단의 진동폭에 따라 접합력에 영향을 미칠 것이라 판단되어 지기 때문에 전압의 입력과 진동자 출력간의 관계를 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 시스템을 구성하여 진동 특성 실험을 수행하였다. 시스템 구성은 초음파 진동자를 가진할 수 있는 함수발생기와 발진앰프, 그리고 진동자의 진동 진폭을 측정하기 위한 Polytec사의 Laser Vibrometer System(LVS) 그리고 측정된 속도를 확인하기 위한 오실로스코프로 구성되어 있다.

함수발생기의 출력단은 발진앰프의 입력단과 연결되며, 다시 발진앰프의 출력은 초음파 진동자에



(a) Block diagram of test



(b) Measurement set-up

Fig. 7 Measurement system for ultrasonic vibration properties

연결된다. 여기서 함수발생기에서 주파수와 전압의 가변을 통하여 초음파 진동자를 구동시킨다. 발진앰프의 모니터는 오실로스코프로 연결되고, LVS는 초음파 진동자 끝단의 출력을 스캔하고 그 값을 LV Amp.가 받아 오실로스코프 모니터에 출력하게 된다.

임피던스 해석기를 이용하여 구해진 공진주파수 값을 토대로 공진주파수를 변화하였으며 60,380 Hz에서 최대 진동 속도가 측정되었다. 따라서 진동자의 공진 설계가 적합하다는 것을 알 수 있으며, 출력단의 변위는 LVS로 측정한 속도를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} d &= A \cos \omega t \\ v &= -\omega A \sin \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

이때 측정 신호의 최대값을 고려하면, $d = A$

$$v = -\omega A \Rightarrow A = -\frac{v}{\omega} = -\frac{v}{2\pi f} \quad (2)$$

여기서 f 는 측정된 진동주파수를 나타내며, 측정된 진동 속도를 이용하여 진동자의 변위를 구하였다.

60,380 Hz 진동을 통하여 측정된 속도와 이를 변환한 변위를 Figs. 8, 9에 나타내었으며 50 V 입력에 16.7 μm 의 진폭이 발생하는 것을 확인하였다. 그림에서 보듯이 입력 전압에 따라 선형적인 진동 변화를 볼 수 있다. 입력 값에 따라 약 2.7 $\mu\text{m}/\text{V}$ 의 선형적인 변위를 보이며 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

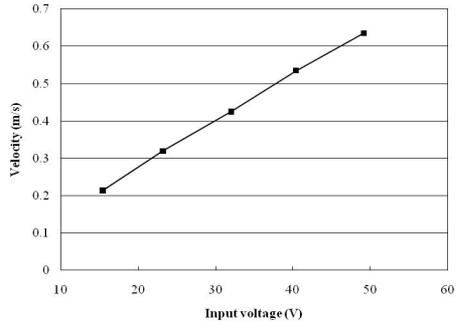


Fig. 8 Output velocity of ultrasonic transducer

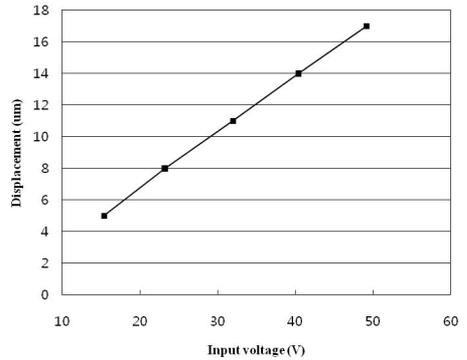


Fig. 9 Output displacement of ultrasonic transducer

4. 결 론

무연 솔더를 사용하여 유리-금속 접합 시 접합 강도를 높이기 위하여 필요한 초음파 에너지를 발생하는 초음파 진동자를 수치해석을 통하여 설계하였으며, 제작된 진동자의 압전자 가압력에 따른 공진주파수 변화를 알아보았다. 진동자 제작을 위한 가압력에 따라 공진주파수가 약 18.6 Hz/kgfcm로 선형적으로 변화하는 것을 알았으며 제작된 진동자 끝단의 진폭은 가해지는 전압에 대하여 약 2.7 $\mu\text{m}/\text{V}$ 로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

이 연구에서는 진공단열 창문 제작 시 필요한 밀봉 기술에서 유리-금속 간 접합력을 높이기 위하여 필요한 초음파 진동자의 성능인 공진주파수 60 kHz, 끝단 진동 진폭 14 μm 이상의 초음파 진동자를 제작하였다. 초음파 진동자를 60 kHz의 공진주파수로 설정하는 방안과 이를 통하여 50 V 입력 전압에 대하여 16.7 μm 의 끝단 진폭을 가지는 초음파

진동자를 설계 할 수 있었다.

후 기

이 연구는 산업단지공단 현장맞춤형기술개발사업으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Yoo, C. D., 2008, Design of Ultrasonic Welding Horn, Journal of the Korea Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 1, pp. 9~11.
- (2) Byun, J. W. and Han, S. H., 2011, Design of a Ultrasonic Cutting-tool Utilizing Resonance Condition of Transverse Vibration of Beam Type Structure, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 720~725.
- (3) Jeong, A. M., Jeon, E. S. and Kim, C. H., 2011, A Study on the Metal-glass Bonding Using Ultrasonic, Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 103~108.
- (4) Kang, J. P., 1991, A Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn, Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 55~63.
- (5) Lin, S., 1996, Study on the Longitudinal-torsional Composite Mode Exponential Ultrasonic Horns, Ultrasonic, Vol. 34, No. 7, pp. 757~762.
- (6) Sherrit, S., Dolgin, B. P. and Bar-Cohen, Y., 1999, Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Application, Ultrasonic Symposium, Vol. 1, pp. 647~651.
- (7) Kim, S. R., Lee, J. H. and Yoo, C. D., 2009, Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding, Journal of the Korea Welding and Joining Society, Vol. 27, No. 4, pp. 60~66.
- (8) Kim, I. K., Hong, S. H. and Lee, S. I., 2008, Vibration Analysis of Ultrasonic Horn for Flip-chip Bonding, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 364~367.
- (9) Lee, D. H., Park, S. J., Tao, Y., Kim, D. O. and Yun, C. H., 2007, Transducer Design for Ultrasonic Metal Welder, Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Proceedings of the KIPE Conference, pp. 337~339.
- (10) 上羽貞行, 富川義朗, 2000, 超音波電動機の理論と應用, pp. 168~170.