

초음파 금속 용착을 위한 반파장 혼의 설계 및 제작

김은미*, 장호수⁺, 박동삼⁺⁺
(논문접수일 2010. 09. 27, 심사완료일 2010. 11. 02)

A Horn of Half-wave Design and Manufacture for Ultrasonic Metal Welding

Eun Mi Kim*, Ho Su Jang⁺, Dong Sam Park⁺⁺

Abstract

This paper designed the horn of half-wave needed for Ultrasonic metal welding. The horn has to be designed and manufactured accurately, because measurements such as the shape, length, mass and etc. have effects on the resonant frequency and the vibration mode. Designed horn of half-wave has the feature of 40,000Hz of nature frequency, and maximizes vibration range in the Tip by resonance in the frequency of ultrasonic wave machine. In this study, we calculated and analyzed the natural frequency to find the optimal design of the horn that amplified the amplitude about double by the modal analysis and harmonic analysis using ANSYS. And we did FFT analysis of the manufactured horn.

Key Words : Ultrasonic Metal Welding(초음파 금속 용착), Modal Analysis(모달 해석), Harmonic Analysis(하모닉 해석), FFT(FFT 주파수 분석)

1. 서론

현재 매우 크게 성장한 전자제품과 통신기기들의 초소형화 추세와 경량화, 슬립화, 대용량화, 고기능화의 생산기반 기술은 접합이다. 연구 결과에 의하면 초음파 금속 용착에 의한 플립칩 장착기법이 초미세 핀간격에 대응할 수 있는

가장 우수한 방법으로 알려지고 있다⁽¹⁾. 또한 용착 시간 및 용착에 의한 접촉 저항의 측면에서도 매우 우수한 것으로 발표되었다⁽²⁾. 또한 통상의 방법으로는 용접하기 어려운 동종 금속이나 이종 금속의 용접에 용이하고⁽³⁾, 낮은 온도에서 용착이 가능하여 열 변형이 작아 열 손상을 최소화 하며, solder를 이용하지 않아 친환경적인 장점이 있다.

* 인천대학교 기계공학과 대학원 (heane@incheon.ac.kr)
주소: 406-772 인천광역시 연수구 송도동 12-1번지 인천대학교 공과대학 A동 207호
+ 인천대학교 기계공학과 대학원
++ 인천대학교 기계공학과

이러한 초음파 금속 용착기는 Fig. 1과 같이 초음파 발전기(Power Supply), 진동자(Transducer), 부스터(Booster), 혼(Horn)으로 구성되어지며, 발전기에서 들어온 50~60Hz의 전기에너지를 진동자를 통해 20,000~40,000Hz의 기계적 진동에너지로 변환하여 미세한 진동을 금속용착에 이용할 수 있도록 증폭한다. 기구부의 공기압을 이용한 밀착 상태에서 횡진동하여 순간적으로 용착하는데, 그 모식도는 Fig. 2와 같다.

앞으로 전자 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야 등 과학 기술 분야의 발전이 이루어짐에 따라, 새롭게 요구될 신소재의 정밀 접합 기술개발이란 측면에서 중요성이 검토되고 있다.

본 논문에서는 40,000Hz의 주파수에서 진동자와 부스터로부터 출력된 진동진폭을 2배로 증폭시키는 초음파 금속 용착용 반파장 혼을 최적 설계하였고, 그 혼을 제작하여 진폭성능을 검토하였다.

2. 혼의 설계

초음파 금속 용착의 공구 혼은 초기에 부스터와 연결을 위한 조임 나사와 진폭 변화를 위한 몸통 그리고 실제 용착

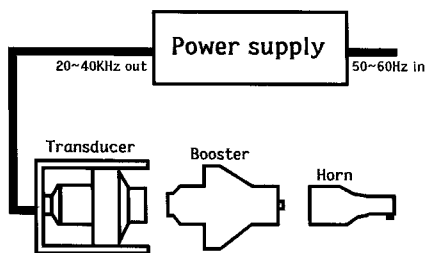


Fig. 1 Basic Mechanism of Ultrasonic metal welding

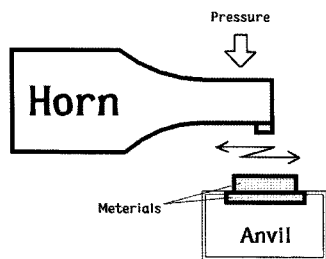


Fig. 2 Basic principle of Ultrasonic metal welding

을 하는 팁(Tip)의 세 부분으로 구성되어 있었다. 이와 같은 구조는 변위가 작고 에너지가 작은 용접에서는 사용이 가능하였으나 보다 많은 변위와 에너지를 요구하는 시스템에서는 불필요한 진동을 유발하고 결국은 조임 나사, 팁, 혼 자체를 손상하게 되어 이러한 구조를 개선해 현재는 일체로 구성된 방식을 사용하고 있다.

혼의 주요한 기능은 사용자가 원하는 수준의 진폭을 얻을 수 있도록 진동을 증폭하고 진동자에서 발생한 진동에너지를 용재에 전달하는 역할을 한다⁽⁴⁾. 초음파 혼은 다양한 형상과 크기로 제작되는데, 가장 널리 사용되는 형상은 실린더(cylinder)형, 스텝(step)형, 코니컬(conical)형, 카테노이드(catenoidal)형, 익스포넨셜(exponential)형 등이 있다. 이러한 초음파 혼의 설계와 해석에 관한 연구가 많이 진행되어져 왔는데, 혼 형태에 따른 진폭은 각 혼의 양단 면적비가 일정 하더라도 혼의 형태에 따라 스텝형, 카테노이드형, 익스포넨셜형, 코니컬형의 순으로 진폭 확대율이 높다.

2.1 진동방정식과 혼의 길이

Fig. 2와 같은 균일단면 봉의 종진동(Longitudinal Vibration) 방정식을 통해 반파장 혼의 대략적인 길이를 구한다⁽⁵⁾.

이때 σ 는 축방향 응력, E는 Young을, u 는 축방향 변위, 그리고 $\partial u / \partial x$ 는 축방향 변형률, c 는 매질내의 음속, k 는 파수(wave number), λ 는 파장(wave length)이다.

자유진동 방정식 식(2)는 식(1)에서 $f=0$ 로 놓음으로써 얻을 수 있다. 수식(3)을 변수분리하기 위해서 $u(x,t)=U(x)\exp(i\omega t)$ 라고 정리하여 변위진폭 $U(x)$ 에 관한 수식(4)를 얻는다. 경계조건 식(3)을 이용하면 수식(4)의 해로부터 봉의 고유진동수 식(5)를 구할 수 있다. 봉 형상의 혼의 끝 부분에서 최대의 변위가 나타나도록 하기 위해 전체 길이는 종진동 파장인 λ 의 1/2길이로 한다. 따라서 최대 변위 진폭을 갖게

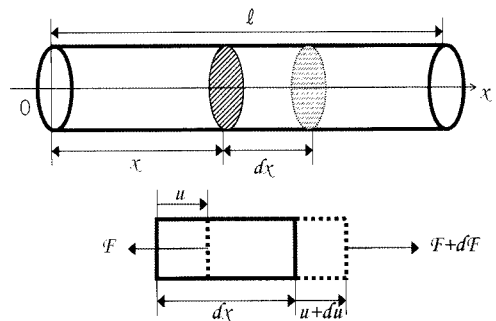


Fig. 3 Model of the longitudinal vibration

Table 1. Material properties of Horn

Properties	
Young's Modulus	116GPa
Poisson's Ratio	0.34
Density	4.5g/cm ³

하는 반파장 혼의 공진 길이 L 은 식(6)과 같다⁽⁶⁾.

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) + f(x,t) = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t) \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}(\ell,t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + k^2 U = 0, \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$\ell = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

혼은 통상 반파장의 공명체로 그 재질은 일반적으로 알루미늄(Aluminum) 합금이나 티타늄(Titanium) 합금이 사용되고 있다. 그 중에서도 티타늄 합금은 음향학적 성질 및 강도 성질이 우수하기 때문에 넓게 쓰이고 있고 혼에 적합한 재질이다. 따라서 설계하고자 하는 혼의 재질은 티타늄 합금으로 하였으며 그 물성치는 Table 1에 나타냈다.

2.2 혼의 형상설계

Fig. 4는 혼의 설계도를 나타낸 것으로 본 설계의 경우 초음파 금속 용착기의 진동자에서 부여되는 가진 주파수는 40,000Hz로 고정되어 있기 때문에 이 주파수에서 공진이 발생하도록 수식(6)을 통해 최대 변위 진폭을 갖게 하는 혼의 길이 L 을 63mm로 정하였다. 진동을 전달받는 혼의 입력면 지름은 초음파 금속용착 기구부의 부스터와 맞닿아 진동을 전달할 수 있도록 부스터와 같은 $\varnothing 24$, 부스터에 체결되

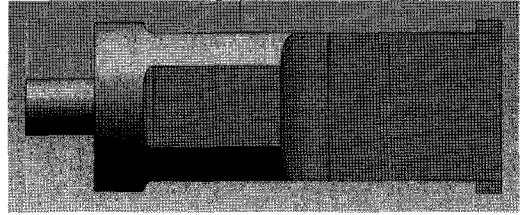


Fig. 4 Modeling of Horn

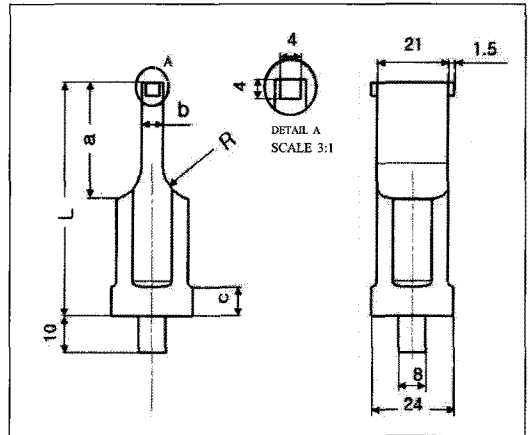


Fig. 5 drawing of Horn

는 부분은 $\varnothing 8$, 혼의 길이방향 끝은 $\varnothing b$, 팁 사이즈는 $4 \times 4 \times 1.5$ 로 설계하였다. 혼의 스텝 부분에서 발생하는 응력 집중을 완화하기 위하여 R값을 주었으며⁽⁷⁾, R값은 입력면 반경과 b 의 1/2길이 차와 동일하다. b 는 입력면 지름에 비례하여 축소된 길이로 설정하여 혼이 가진 주파수 40,000Hz에 근사한 고유진동수를 갖도록 modal 해석을 하였고, 더 정밀한 공진설계를 위해 팁이 있는 편평한 부분이 대칭이 되도록 c 길이를 변화시켜가며 다시 modal 해석을 통해 혼의 형상을 설계하였다.

3. 혼의 해석결과

3.1 혼의 modal 해석

혼의 설계에 있어 b 의 길이를 변수로 하여 Table 2와 같은 b 의 값을 혼의 입력면 지름에 비례하여 축소된 길이로 설정하였으며, Table 2의 길이에 따라 혼을 설계 하여 modal 해석한 결과, b 길이 변화에 따라 혼은 Fig. 6과 같은 고유진동수의 변화를 보였다. 이때 b 의 길이가 입력면 지름의 1/8이

면 가진주파수 40,000Hz에 가장 근접한 고유진동수를 가진 것을 알 수 있었다. 그리고 혼의 설계에 있어 c의 길이를 변수로 하여 Table 3과 같이 혼의 종진동 방정식에서 구한 길이에 대한 비율로 값을 설정하여 modal 해석한 결과, c길이 변화에 따라 혼은 Fig. 7과 같은 고유진동수의 변화를 보였다. 이때 c의 길이가 L/8인 경우 혼의 고유진동수가 39998 Hz로 공진 형상이 되었으며 초음파 금속 용착용 혼이 최적 설계 되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 혼의 modal 해석한 결과에서 12, 13, 15, 16mode의 결과를 나타낸 것이고, Fig. 9는 축방향 종진동 하는 14mode의 modal해석 결과를 나타낸

것이다.

3.2 혼의 Harmonic 해석

Fig. 10은 최적 설계한 horn의 입력면을 40,000Hz로 가 진했을 때 혼의 팁 부분에서 진폭변화를 보기 위해 Harmonic 해석을 수행한 것으로, 40,000Hz 부근에서 금속 용착이 이루어지는 혼의 팁부분이 가장 큰 진폭의 변화를 보이며 진동함을 확인하였다.

3.3 혼의 축방향 변위해석

Fig. 11은 초음파 금속 용착기에 장착된 부스터 출력면에서 진폭을 측정한 결과를 바탕으로⁽⁸⁾ 혼의 입력변위를 6 μ m로 하였을 때, 혼의 축방향으로 line을 그어 변위분포를 해석한 결과이다. 혼의 중심부분은 변위가 0인 nodal포인트가 있고, 혼의 입력면의 변위는 약 -4 μ m이고 출력면의 변위는 약 12 μ m임을 알 수 있다. 따라서 혼의 최대 변위는 약 16 μ m이고, 혼은 약 2.6배의 증폭도를 가진다.

Table 2 Natural frequency of length b

Length of b	Natural frequency(Hz)
입력면 지름의 1/4	39103
입력면 지름의 1/6	38987
입력면 지름의 1/8	40402
입력면 지름의 1/10	40804
입력면 지름의 1/12	41696

Table 3 Natural frequency of length c

	Length of c	Natural frequency(Hz)
1	L-L/9	40615
2	L-L/8	40674
3	L-L/7	40742
4	L-L/6	40818
5	L-L/5	40865
6	L-L/4	40894
7	L-L/3	40832
8	L/2	40402
9	L/3	40073
10	L/4	39924
11	L/5	39937
12	L/6	39950
13	L/7	39976
14	L/8	39998
15	L/9	40018
16	L/9.5	40070
17	L/60	40151
18	0	40247

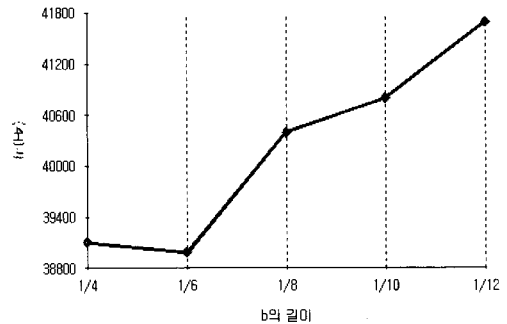


Fig. 6 Graph of Table 2

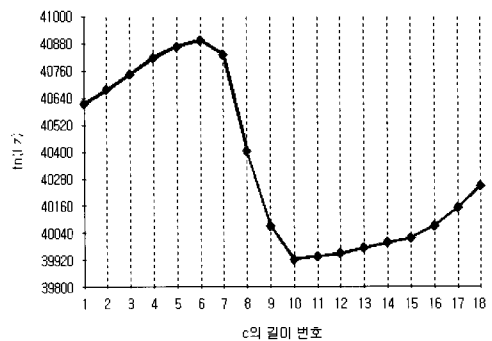
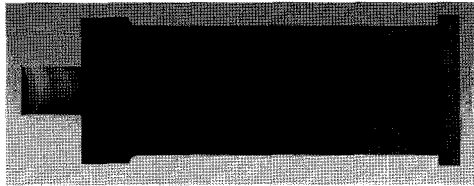
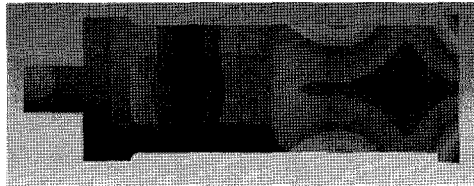


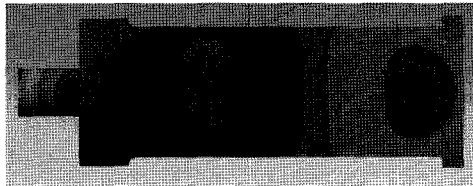
Fig. 7 Graph of Table 3



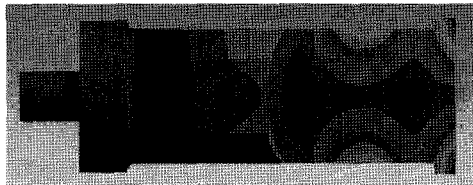
(1) 12mode



(2) 13mode



(3) 15mode



(4) 16mode

Fig. 8 mode shapes of horn

4. 혼의 진폭 측정

최적설계한 혼의 타당성을 검증하기 위해 혼을 제작하여 혼의 끝부분에서 Fig. 12와 같은 분석시스템을 이용하여 진폭을 측정하였다. Table 6에는 분석시스템에 나타난 Optical sensor의 주요 사양으로 1 μ m 당 2.8mV의 전압을 출력하고, 분해능(Resolution)이 DC-100kHz로 Optical sensor에 의해 출력된 전압값을 분해능에 따라 디지털 값으로 변환하여 혼의 진동 진폭을 계산할 수 있다.

Fig. 13과 같이 혼과 Optical Sensor를 세팅할 때는 혼의 축방향 진동 진폭을 정확하게 측정하기 위하여 혼의 진동출력부의 끝부분에 직각이 되도록 설치해야 한다. Optical Sensor에 의해 측정된 전압 4096개의 Data를 sampling하여 sensor의 sensitivity에 따라 진폭 Data를 얻어 Origin을

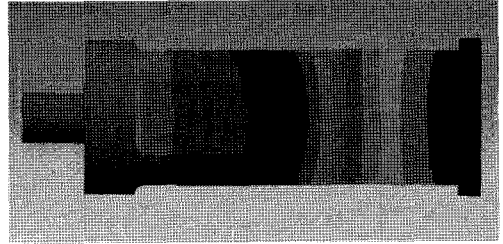


Fig. 9 14mode shape of horn

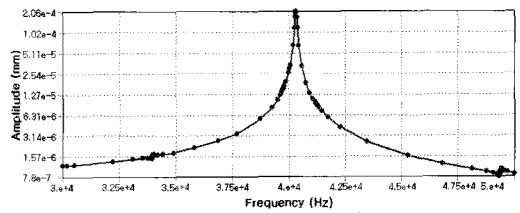


Fig. 10 Harmonic analysis of Horn

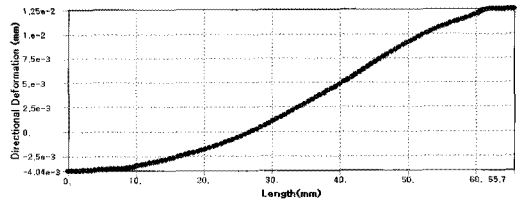


Fig. 11 Axial Deformation

Table 4 Specification of Optical Sensor

Model	D63-H1T4
Total range	3mm
Linear range	0.76mm
Nominal standoff	0.66mm
Nominal sensitivity	2.8mV/ μ m
Resolution DC-100kHz	0.1 μ m
Minimum measurement spot	2.1mm

이용해 FFT 분석하였다. 그 결과 40,000Hz에서 RMS Amplitude 값이 약 9 μ m였으며, ANSYS해석을 통해 구한 혼의 최대진폭 값과의 비교를 위해 제작한 혼의 최대진폭을 Fig. 14에 나타내었으며, 그 값은 약 13 μ m인 것을 알 수 있다.

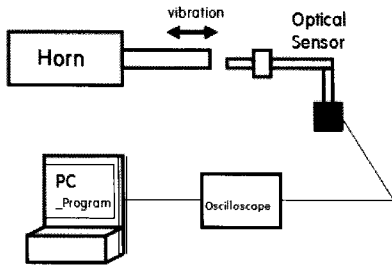


Fig. 12 Frequency analysis system

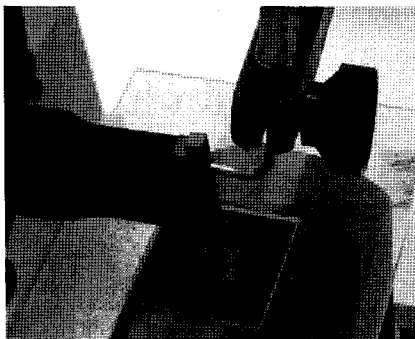


Fig. 13 horn & Optical Sensor set up

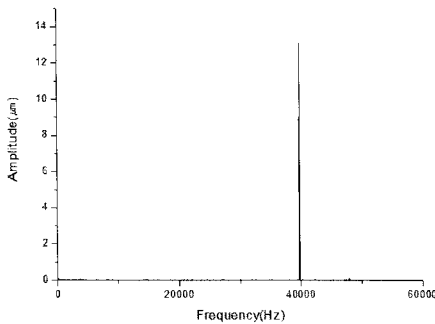


Fig. 14 Natural frequency spectrum by FFT analysis

혼의 진폭 측정치는 유한요소 해석을 통해 산출한 최대진폭과 약간의 차이를 보이나, FFT 분석에서와 같이 부스터에서의 6 μ m진폭을 약13 μ m로 약 2.2배 증폭하였다. 따라서 본 논문에서 설계하고자 한 진동진폭을 2배 증폭시키는 혼을 최적설계 하였음을 확인하였다.

5. 결론

40,000Hz의 주파수에서 진동자와 부스터로부터 출력된 진동진폭을 2배 증폭시킬 수 있는 초음파 금속 용착을 위한 사각팁의 반파장 혼을 최적 설계하였고, 그 혼을 제작하여 진폭성능을 검토하였다.

- (1) 혼의 고유진동수가 40,000Hz가 되도록 진동방정식을 통해 혼의 길이를 결정하였고, 혼의 형상변수를 변화시켜 가면서 modal 해석과 harmonic 해석을 통해 가진주파수 40,000Hz에서 공진하여 진동 진폭을 증폭시킬 수 있도록 혼을 최적설계 하였다.
- (2) 혼을 제작하여 혼의 팁부분에서 Optical Sensor를 이용하여 진폭을 측정한 결과 최대진폭이 13 μ m임을 확인하였다. 부스터로부터 혼의 입력면에 6 μ m 진폭의 진동이 전달되는 것을 고려하면 이는 진동진폭을 약 2배 증폭시킨 값이며, 혼의 축방향 변위해석에서 구한 진폭 증폭률과 거의 일치한다. 따라서 진동진폭을 약 2배 증폭시키는 최적의 혼이 설계되었음을 검증하였다.

참고 문헌

- (1) Hiroki, M., Yoshihito, S., Yoshiharu, U., and Tadanori, O., 2004, "Ultrasonic Flip Chip Bonding on FPC," *Fujikura Technical Review*, No. 33, pp. 36~39.
- (2) Furukawa, R., 2002, "High Pin-Count Ultrasonic Flip-Chip Bonding and Plasma Cleaning Technology," *Proceedings of 9th Annual KGD Workshop*, Napa, California.
- (3) Kim, H. T., 2004, "Joining of Aluminum Alloys to Dissimilar Metals by Ultrasonic Soldering," *ReSeat Monitoring Information Analysis Rreport*, pp. 1~6.
- (4) Seah, K. H. W., Wong, Y. S., and Lee, L. C., 1993, "Design of tool holders for ultrasonic machining using FEM," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 37, No. 1-4, pp. 801~816.
- (5) Rao, S. S., 2004, *MECHANICAL VIBRATIONS, 4th Edition*, PEARSON, Republic of Korea, pp.623~624.
- (6) Lee, B. G., Kim, K. L., and Kim, K. E., 2008, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for

Micromachining Using FEM,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63~70.

(7) Cardoni, A. and Lucas, M., 2005, “Strategies for Reducing Stress in Ultrasonic Cutting Systems,”

2005 Blackwell Publishing Ltd, pp. 11~18.

(8) Guangping, Z., 2000, “The performance and design of ultrasonic vibration system for flexural mode,” *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 979~984.