

초음파 금속 용착을 위한 공구혼의 최적설계

장호수*, 박우열+, 박동삼++

(논문접수일 2011. 03. 28, 심사완료일 2011. 05. 03)

Optimal Design of Tool Horn for Ultrasonic Metal Welding

Ho-Su Jang*, Woo-Yeol Park⁺, Dong-Sam Park⁺⁺

Abstract

Ultrasonic metal welding can be used to weld different metals together safely and precisely, without solder, flux and special preparation. Ultrasonic metal welding machine consists of a power supply, a transducer, a booster and a horn. This paper designed the horn 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. The designed horn 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 paper, we calculated and analyzed the natural frequency to find the optimal design of the horn that had the amplitude about 12 μ m by the modal analysis and harmonic analysis using ANSYS. And we analyzed FFT analysis of the manufactured horn.

Key Words : Ultrasonic Metal Welding(초음파 금속 용착), Modal Analysis(모달해석), Harmonic Analysis(하모닉해석), FFT(FFT 주파수 분석)

1. 서론

최근 기계 부품의 소형화, 정밀화로 인해 미세 용착기술이 각광받고 있으며, 이런 용착 기술은 다양한 산업 분야에서 기존의 용착 방식보다 더 정밀하고 안전하게 용착하는 기술 중 초음파 금속 용착 기술의 활용이 커지고 있다.

초음파 금속 용착은 용착 시간 및 용착에 의한 접촉 저항 측면에서도 매우 우수한 것으로 알려져 있고, 연구결과에 의하면 초음파 금속 용착에 의한 플립칩 장착방법이 초 미세 핀 간격에 대응할 수 있는 가장 우수한 방법으로 발표 되었다⁽¹⁻²⁾. 또한, 초음파 금속 용착은 일반적인 솔더(Solder)방식을 사용

하지 않아 친환경 적인 기술이다⁽³⁾.

Fig. 1은 초음파 금속 용착기의 주요 핵심부를 나타낸 것으로 파워서플라이(Power Supply)에서 들어온 50~60Hz의 전기 에너지를 20,000~40,000Hz 기계적 진동 에너지로 변환시키는 진동자(Transducer), 진동자의 진폭(Amplitude)을 감소 또는 증폭시키는 부스터(Booster)와 금속부재에 진동 에너지를 전달하여 용착시키는 혼(Horn)으로 구성된다. 초음파 금속 용착의 과정은 파워서플라이를 통해 들어온 전기적 에너지가 진동자를 통해 기계적인 진동 에너지로 바뀐 뒤 부스터로 그 진폭을 증폭시켜 형성된 초음파 진동 에너지가 혼을 통해 금속 부재에 전달되면 금속 부재의 접합면에 강제적 확산에 의한

* 인천대학교 기계공학과 대학원 (jang9714@incheon.ac.kr)

주소 : 406-772 인천광역시 연수구 송도동 12-1번지 인천대학교 공과대학 A동 207호

+ 인천대학교 기계공학과 대학원

++ 인천대학교 기계공학과

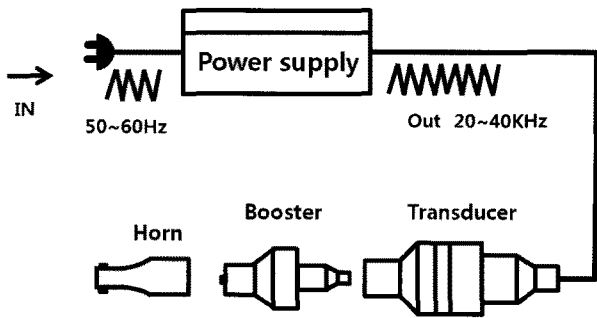


Fig. 1 Ultrasonic metal welding process

강력한 결합이 이루지게 된다⁽⁴⁾.

초음파 금속 용착은 초음파 진동에 의해 2개의 금속 접합면에 기계적인 진동을 가함으로써 물리적인 확산작용(Diffusion)으로 인하여 금속 표면에 상존하는 산화막을 제거하고 용착하기 때문에 높은 기계적 강도와 저항이 거의 없는 전기적인 특성을 가지는 공법이다⁽⁵⁾. 또한, 정밀 부품 분야에 있어 서로 다른 이종금속의 활용이 증가하고 있는데 초음파 금속 용착은 비교적 용이하게 이종금속의 용착이 가능하다는 장점을 가지고 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 40,000Hz의 가진 주파수를 갖는 초음파 금속 용착용 Tool인 혼을 진동방정식을 통하여 전체길이를 결정하였고, Modal 해석을 통하여 40,000Hz 혼의 최적설계를 하였다. 또한 혼을 제작하여 진폭성능 시험과 FFT분석 통하여 혼의 종 방향의 최대변위를 확인 하였다.

2. 혼의 설계

혼의 주요 기능은 사용자가 원하는 수준의 진폭을 얻을 수 있도록 진동을 증폭하고 진동자에서 발생한 진동에너지를 용재에 전달하는 역할을 한다⁽⁷⁾.

초음파 금속 용착기에 사용되는 혼의 재질은 금속부재의 재료와 혼의 무게에 따라 선택되어야 하며, 강도와 경도가 혼 재료 선택의 중요한 변수가 된다. 금속부재의 재질이 혼보다 경도가 강하게 되면 가공에 사용되는 혼도 같이 가공이 되기 때문에 금속부재의 재질보다 경도가 높은 재료를 선택하는 것이 바람직하다⁽⁸⁾.

초음파 금속 용착용 혼은 일반적으로 스텝(Step)형, 지수(Exponential)형, 코니칼(Conical)형 순으로 진폭확대율이 높다. 혼은 통상 반파장의 공명체로 그 재질은 일반적으로 알루미늄 합금이나 티타늄 합금이 사용되고 있는데, 음향학적 성질과 강도 성질이 우수한 티타늄 합금이 넓게 쓰이고 있다. 그중에서 본 연구에서는 티타늄 합금을 사용하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 티타늄 합금의 물성치를 나타내었다.

Table 1 Material of horn

Properties	
Density	4.5g/cm ²
Poission's Ratio	0.34
Young's Modulus	116GPa

2.1 봉의 종진동

봉의 길이를 L이라 할 때 이 값이 봉의 반파장의 정수배와 공진을 한다. 봉의 단면적이 일정한 균일봉의 진동 방정식은 (1)과 같다. 이때 E는 Young 윌, u는 축방향 변위, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 는 축방향 변형률, f(x,t)는 단위 길이당 외력, c는 매질내 음속, k는 파수, λ는 파장이다.

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

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

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

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

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

자유진동 방정식 식(2)는 식(1)을 f=0으로 하여 얻을 수 있다. 경계 조건인 식(3)은 양단 자유조건이며, 축방향의 운동이 가능하여 양단 자유조건으로 설정하였다.

식(3)을 u(x,t)=U(x)exp(iωt)로 변수분리 하여 정리하면 변위진폭 U(x)의 관한 식(4)가 되고, 식(4)에서 봉의 고유진동수를 구할 수 있다⁽⁹⁾.

식(5)은 혼의 끝부분에서 최대 변위가 나타나도록 하기 위해 전체 길이는 종진동 방향의 파장인 λ은 1/2 길이로한 최대 변위 진폭을 가지게 하는 혼의 공진 길이 L이다⁽⁸⁾.

2.2 혼의 형상 모델링

Fig. 2는 혼의 3D 모델링 형상이며, Fig. 3은 2D 도면을 나타낸 것으로, 초음파 금속 용착기의 진동자에 부여되는 가진 주파수는 40,000Hz로 고정되어 있기 때문에 본 연구에서는 주파수 공진이 발생하도록 봉의 진동방정식을 통하여 진폭의 변위를 최대로 갖게 하는 혼의 전체 길이를 63mm로 설정하였다. a 길이는 가진 주파수 40,000Hz에 가장 근접한 혼의

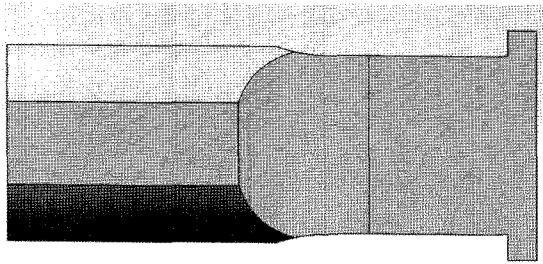


Fig. 2 3D Modeling of the horn

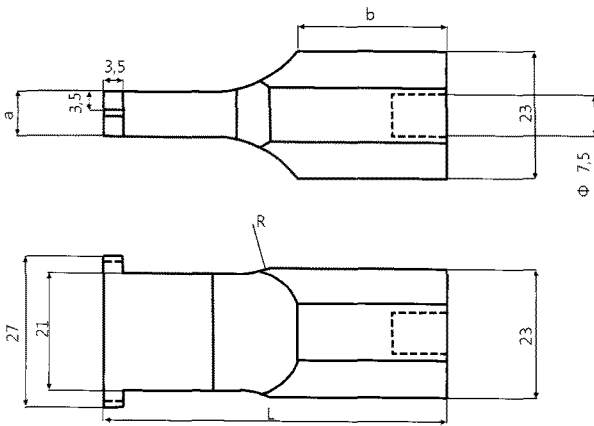


Fig. 3 Drawing of horn

전체 길이의 약 1/8인 8mm로 설계 하였다⁽¹⁰⁾.

부스터와 맞닿는 혼의 입력면 직경은 부스터와 같은 23mm, 부스터와 볼트 체결 부분의 직경은 7.5mm, 팁의 크기는 3.5×3.5×1의 크기로 2개의 팁으로 설계하였다. 혼의 스텝 부분에서 발생하는 집중응력을 최소화시키기 위하여 R값을 주었으며, 혼의 형상변수에 따라 혼의 고유진동수가 변화하므로, 가진 주파수 40,000Hz에 근접한 고유진동수를 갖기 위해 형상변수 b의 값을 정수배 만큼 변화시켜가며 modal 해석을 하여 혼을 설계 하였다.

3. 혼의 해석

3.1 Modal 해석

설계한 혼을 ANSYS Tool을 이용하여 modal 해석을 수행하였다. Table 2 는 전체 길이는 일정하게 고정하고, Fig. 3의 나타난 b 의 길이를 정수배만큼 변화시킨 수치이다.

Fig. 4는 혼의 경계 조건을 나타낸 것으로 부스터와 볼트 체결하는 체결부에 실린더 구속을 주었으며, 축방향의 변위는 자유로 하여 혼을 해석하였다.

Table 2 에 따라 "b"의 길이를 변화시켜 혼을 설계하여 해석하였다. Table 3.의 표로 나타내었다. Fig. 5은 "b"의 길이를 27mm로 설정하였을 때의 7, 8, 10, 11차 모드를 나타낸 것이

Table 2 Length of "b"

No.	Length
1	25mm
2	26mm
3	27mm
4	28mm
5	29mm

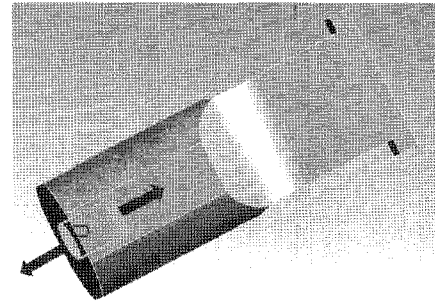
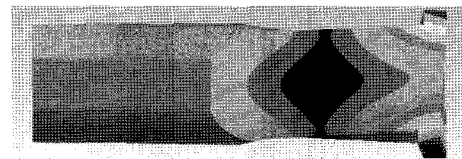


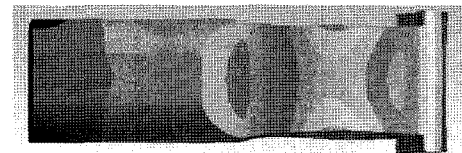
Fig 4. Constrains of the horn

Table 3 Natural frequency of length "b"

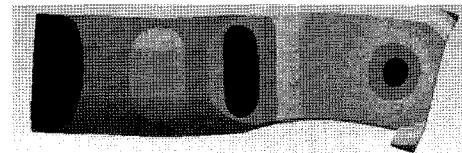
Length of "b" (mm)	Natural frequency (Hz)
25	39,128
26	39,591
27	39,956
28	40,541
29	41,019



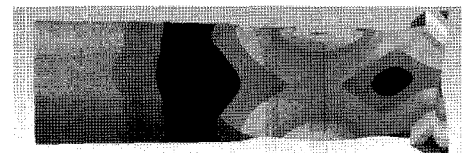
(a) 7th mode



(b) 8th mode



(c) 10th mode



(d) 11th mode

Fig. 5 Mode shapes of horn

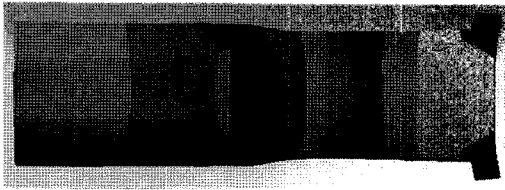


Fig. 6 9th mode shape of horn

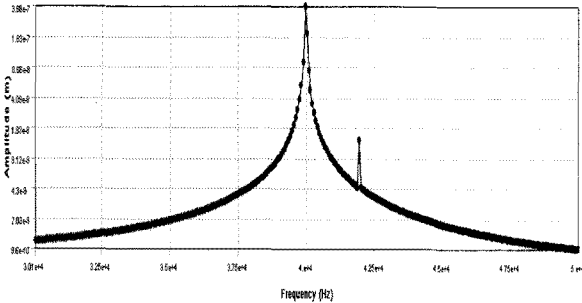


Fig. 7 Harmonic analysis result of the horn

며, Fig. 6은 40,000Hz에 가장 근접한 39,956Hz의 결과를 나타낸 9차 모드이다.

3.2 Harmonic analysis

Fig. 7은 최적 설계된 혼의 입력면에 30,000Hz에서 50,000Hz 까지의 주파수를 가진 했을 때 팁 부분의 주파수 응답을 위해 Harmonic 해석을 수행한 것으로 39,933Hz의 주파수 응답을 확인할 수 있었다. 이 결과는 modal 해석 결과와 비슷하게 나온걸 알 수 있었다.

4. 진폭 측정

설계된 혼의 검증을 위하여 티타늄 합금 소재를 이용하여 혼을 제작하였으며, 광센서(Optical sensor)를 이용하여 혼의 진폭을 측정하였다. Table 4는 광센서의 주요 사양을 나타내었고, Fig. 8는 분석과정을 나타내었다.

광센서로 진폭을 측정할 때 혼의 축 방향 진동 진폭의 정확한 측정을 위해 혼 출력면에 직각이 되도록 측정하여야 한다. 광센서에 의하여 측정된 약 4,000여개의 전압 측정값을 받아 센서의 민감도(Sensitivity)에 따라 진폭값을 얻고 Origin Tool을 이용하여 FFT 분석을 하였다. 그 결과 40,000Hz에서 RMS진폭 값이 약 8.6 μ m이다. Fig. 9은 광센서의 측정하는 과정이며, 혼의 최대 진폭은 약 12.5 μ m로 나왔으며, Fig. 10에 나타내었다.

Table 4 Specification of optical sensor

Model	D63-HIT4
Total range	3 mm
Linear range	0.76 mm
Nominal standoff	0.66 mm
Nominal sensitivity	2.6 mV/ μ m
Resolution DC-100kHz	0.1 μ m
Minimum measurement spot	2.1 mm

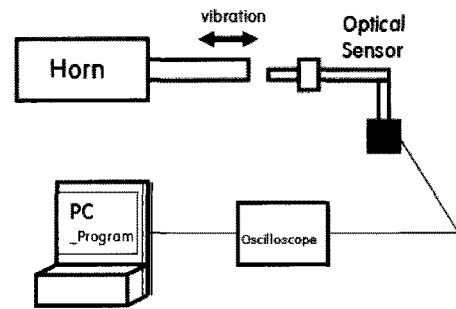


Fig. 8 Process of optical sensor

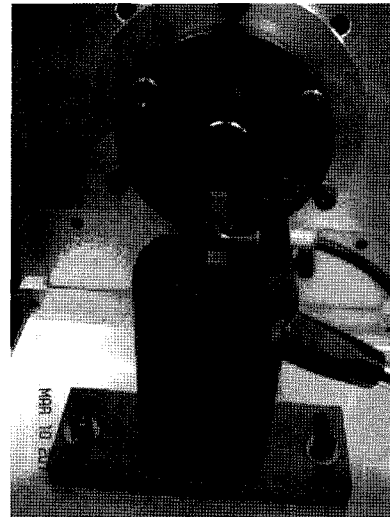


Fig. 9 Optical sensor set up

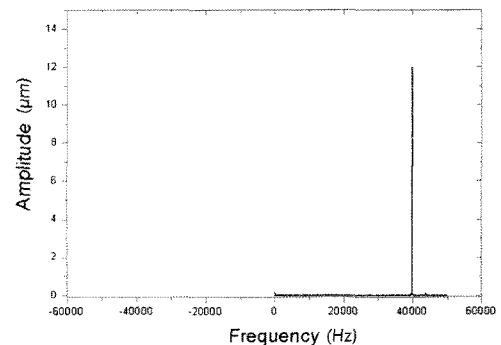


Fig. 10 Natural frequency spectrum by FFT analysis

5. 결론

40,000Hz의 가진 주파수를 갖는 초음파 금속 용착기에 주파수 공진이 발생하도록 하는 고유 진동수 40,000Hz의 혼을 설계 및 제작, 검증 하였다.

- (1) 40,000Hz의 가진 주파수와 공진이 발생하는 고유 진동수 40,000Hz의 값을 얻기 위하여 초음파 금속 용착용 혼의 길이 “L”을 봉의 진동 방정식을 통하여 결정 하였다.
- (2) 혼의 형상변수 “b”를 정수배 만큼 변화를 주어 Ansys Tool을 이용하여 Modal 해석을 수행하였고, 그 결과 39,956Hz의 고유 진동수를 얻을 수 있었으며, Harmonic 해석을 통하여 해석한 결과로는 39,933Hz의 고유 진동수를 얻었다.
- (3) Modal 해석과 Harmonic 해석을 통해 얻을 결과로 혼을 제작 하였으며, 혼의 출력부인 팁 부분에 광센서를 사용하여 종 방향 최대 변위를 측정하였다. 그 결과 12.5 μ m의 결과를 얻을 수 있었다.
- (4) 40,000Hz의 고유 진동수에 근접한 초음파 금속 용착용 혼을 설계 하였으며, 종 방향 최대 변위 측정을 통해 혼이 최적 설계 되었음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Fujikura, R., 2002, “High Pin-Count Ultrasonic Flip-Chip Bonding and Plasma Cleaning Technology,” *Proceedings of 9th annual KGD Workshop.*, Napa, California.
- (2) Maruo, H., Seki, Y., Unami, Y., and Ominato, T., 2004, “Ultrasonic Flip Chip Bonding on FPC,”

Fujikura Technical Review., pp. 36~39.

- (3) Lee, C. K., Hwang, B. J., and Heu, I. H., 2008, “Bonding of Electric Wire by Ultrasonic Welding,” *Journal of the Korean Society of machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 41~47.
- (4) Wnek, J., n.d., viewed 14 May 2010, “Ultrasonic metal welding for wire splicing and termination,” <http://www.amtechultrasonic.com/articles_theory.asp>.
- (5) STAPLA Ultrasonic Corporation, n.d., viewed 20 September 2010, “Ultrasonic metal welding - Horizontal oscillation direction,” <<http://www.staplaltrasonics.com>>.
- (6) Watanabe, T., Sakuyama, H., and Yanagisawa, A., 2009, “Ultrasonic Welding between Mild Steel Sheet and Al.Mg Alloy Sheet,” *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 5475~5480
- (7) Seah, K. H. W., Wong, Y. S., and Lee, L. C., 1993, “Design of tool holders for ultrasonic machining using FEM,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 810~816.
- (8) Lee, B. G., Kim, K. L., and Kim, K. E., 2008, “Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM,” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17. No. 6. pp. 63~70.
- (9) Rao, S. S., 2004, *MECHANICAL VIBRATIONS 4th Edition*, Korea, pp. 623~624
- (10) Kim, E. M., Jang, H. S., and Park, D. S., 2010, “A horn of Half-wave Design and Manufacture for Ultrasonic Metal Welding.” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 790~796.