

초음파 금속 용착용 혼의 설계 및 해석

Design and analysis of Ultrasonic metal welding horn

*김은미¹, 장호수¹ #박동삼²

*E. M. Kim¹, H. S. Jang¹, #D. S. Park(dsparm@incheon.ac.kr)²

¹ 인천대학교 기계공학과 대학원, ² 인천대학교

Key words : Horn, Ultrasonic metal welding, Modal analysis, Harmonic analysis

1. 서론

최근 초음파 진동을 이용한 금속 용착 기술은 미세부품을 정밀하고 안전하게 접합하는 기술로 각광받고 있어 wire bonding, 2차 전지 foil 및 캔바닥, tubular type의 인테이크 매니폴드 등 기계, 전자 및 통신기기 부품의 정밀접합에 적용되고 있다.

초음파 금속 용착기는 초음파 발전기(Power Supply), 진동자(Transducer), 부스터(Booster), 혼(Horn)으로 구성되어지며, 발전기에서 들어온 50~60Hz의 전기에너지를 진동자를 통해 20~40kHz의 기계적 진동에너지로 변환하여 미세한 진동을 금속 용착에 이용할 수 있도록 증폭한다. 기구부의 공기압을 이용한 밀착 상태에서 진동하고 순간적으로 금속의 확산작용(Diffusion)을 일으켜 접합 특성이 우수한 용착이 가능하다.

본 논문에서는 회전하는 물체에 전기를 공급할 때 이용되는 슬립링 등과 같은 Tubular type의 금속부품 용착에 필요한 혼을 40kHz의 고유공진 특성을 갖도록 형상설계 하고자 한다.

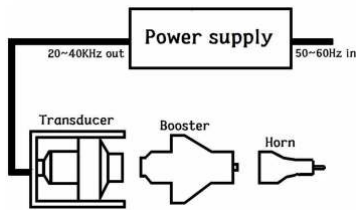


Fig. 1 Basic Mechanism of Ultrasonic metal welding

2. 진동방정식

연속체 진동시스템인 봉의 종진동(Longitudinal Vibration)모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

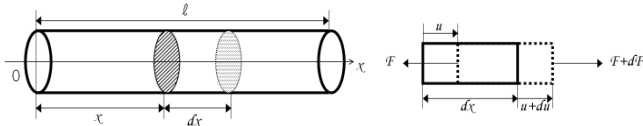


Fig. 2 Model of the longitudinal vibration

길이방향 변위 $u(x,t)$ 는 오직 인장력 F 에 의한다고 가정하고 Fig. 2와 같은 봉의 종방향(x)에 관한 힘의 평형조건을 뉴턴-오일러의 방정식을 적용하여 유도하면 수식[3]의 운동방정식과 같다.

$$m\ddot{x} = \Sigma F, \quad x = \frac{d^2u}{dt^2} \quad [1]$$

$$F = \sigma A = EA \cdot \frac{\partial u}{\partial x}(x,t), \quad \sigma = E\epsilon, \quad \epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad [2]$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t), \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3]$$

E: 탄성계수, ρ : 밀도, c: 음속

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + k^2 U = 0, \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{1}{\lambda} \quad [4]$$

k: 파수(wave number) λ : 파장(wave length)

$$\omega = \frac{n}{2\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad n=1,2,3... \quad [5]$$

$$\ell = \frac{1}{2k} \quad [6]$$

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. 경계조건을 이용한 수식[4]의 해로부터 길이 ℓ 인 봉의 고유진동수를 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 하는 혼의 길이는 수식[6]과 같다.

3. 진동진폭

초음파 용착기에서 진동자에 의해 발생한 진동은 혼을 통해 전달되는데, 진동자의 압전체의 진폭은 약 1~3 μm 로 미소한 진동만이 혼의 진동 입력면에 전달되므로 효율적인 금속 용착을 위해서 혼을 통한 진동의 증폭이 이루어진 후 금속 용착에 전달되어야 한다. 따라서 진폭 증대를 위해 혼의 길이방향 단면의 크기를 혼의 출력면에서 축소되도록 설계한다.

공진이란 물체가 그 고유진동수가 같은 진동수를 가진외력을 주기적으로 받아 진폭이 뚜렷하게 증가하는 현상으로 공진을 이용한 초음파 금속 용착을 위해서 혼의 고유진동수는 초음파 진동자의 가진 주파수와 일치하게 설계되어야 한다.

Fig. 3은 혼의 형태에 따른 진동의 진폭 변화를 도식화한 것이다. 혼의 Step부분에 진동절면을 생기게 하면 초음파 진동에너지를 소모를 극소로 줄일 수 있으며, 또한 초음파 진동에 의한 진동 절면에서의 응력보강재로도 쓰일 수 있는 이점이 있다.

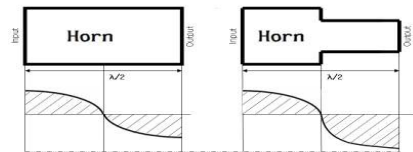


Fig. 3 Amplitude and Ultrasonic horn

4. 혼의 설계

혼은 통상 반과장의 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.

Table 1 Material properties of Horn

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

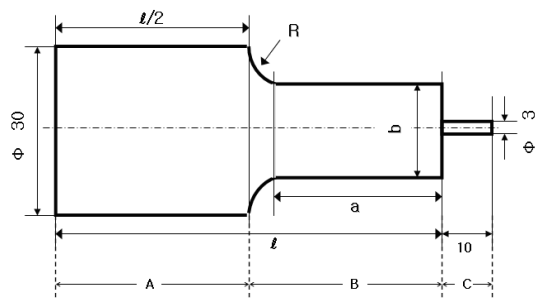


Fig. 4 A drawing of Horn

본 설계의 경우 초음파 금속 용착기의 진동자에서 부여되는 가진 주파수는 40kHz로 고정되어 있기 때문에 이 주파수에서 공진이 발생하도록 수식[6]을 통해 최대 변위 진폭을 갖게 하는 혼의 길이를 정하였다.

Fig. 4는 혼의 설계도를 나타낸 것이며 A구간의 지름은 초음파 금속용착 기구부의 부스터와 맞닿아 진동을 전달할 수 있도록 부스터와 같은 Ø30, B구간의 지름은 진동의 진폭을 위해 step을 주어 Øb, C 구간은 용착면에 닿은 Tip 부위로 Tubular 안쪽에 금속용착을 할 수 있도록 지름을 Ø3으로 설계하였다.

혼의 노드(node) 주변에 존재하는 응력집중을 막기 위하여 R값을 주었는데, 이 R값에 따라 혼의 형상변수인 a, b의 길이를 변화시켜가며 modal 해석을 통해 혼의 형상을 설계하였다. 구간C에는 고유진동수에 영향을 주지 않는 R값 1mm를 주었다.

$$a = \frac{\ell}{2} - R \quad b = \Phi 30 - 2R \quad [7]$$

수식[6]에 의한 혼의 길이 ℓ 은 73.45mm이고, 이는 한파장(λ)의 1/2길이와 같다. 구간 A, B는 혼 길이의 1/2인 31.725mm로 공진주파수 40,000Hz에 가까운 고유진동수를 얻기 위한 최적의 치수로 설계하였다. 그리고 modal 해석을 통해 최적 설계한 치수 R은 12mm, a는 25.725mm, b는 Ø6mm이 되었다.

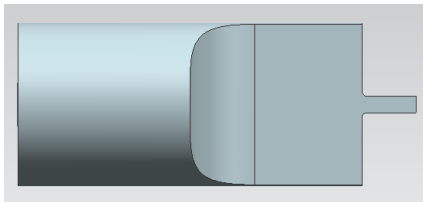


Fig. 5 A modeling of Horn

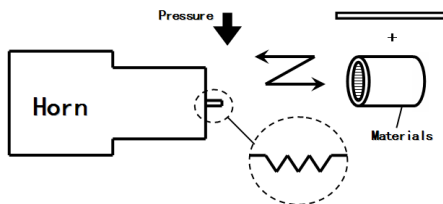


Fig. 6 A Principle of Ultrasonic metal welding

4. 해석결과

R의 길이에 따라 형상이 다른 혼들을 modal 해석하여 각각의 혼이 횡진동을 하면서 고유진동수가 40kHz에 가장 근접한 mode를 찾아 Table 2와 Fig. 7에 나타내었다.

형상의 R값을 Table 2와 같이 점차 늘려가며 해석한 결과, R값이 커질 수록 수식[5]에 의하여 고유진동수가 커짐을 알 수 있었고, R이 12mm 일때 고유진동수가 가진주파수 40,000Hz와 거의 일치하는 39,994Hz임을 보였다. 따라서 R이 12mm인 혼이 최적설계된 혼임을 알 수 있으며 Fig. 8의 modal 해석한 결과를 나타냈다.

최적 설계한 hom을 Harmonic 해석하여 주파수 40,000Hz 부근에서 혼의 팁 부분의 진폭변화가 가장 큼을 확인하였다

Table. 2 Nature frequency of horns

R 값 (mm)	Wn (Hz)	R 값 (mm)	Wn (Hz)
8	38173	11	39019
8.5	38198	11.5	39424
9	38255	12	39994
9.5	38354	12.5	40709
10	38505	13	41731
10.5	38722		

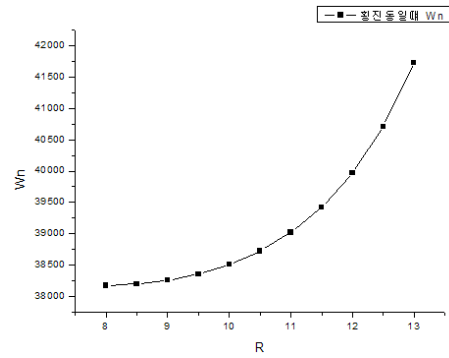


Fig. 7 Graph of the nature frequency

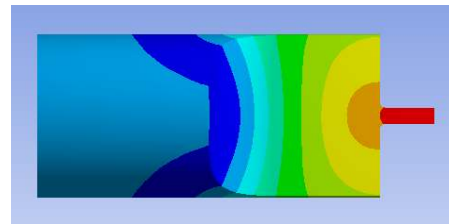


Fig. 8 Modal analysis of horn

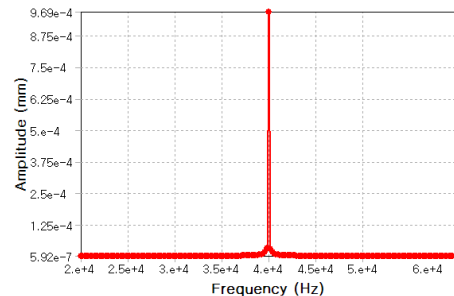


Fig. 9 Harmonic analysis of horn

결론

본 연구에서는 초음파 금속용착을 이용하여 슬립링 등 Tubular type에 금속 부품 접합하기 위한 초음파 금속용착용 혼을 설계하였다. 혼의 고유진동수가 40kHz이 되도록 진동방정식을 통해 혼의 길이를 결정하였고, 혼의 노드 면에 존재하는 응력집중을 막기 위한 R값을 통해 혼의 형상을 결정하였다. Harmonic 해석을 통해 설계한 혼의 팁 부분에서 진동 진폭이 최대가 되는 것을 검토하였으며 이를 통해 슬립링 등 Tubular type 금속용착용 초음파 공구혼의 제작 가능성을 검토하였다.

후기

본 결과물은 교육과학기술부-지식경제부의 출연금으로 수행한 인천대학교 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. B.Y.Park, "Vibrations, an Introduction", 2003
2. J. P. Kang, "A Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn", Journal of the Korean Society of Precision engineering, 8, 3, 1991.
3. Bong-Gu Lee, Kwang-Lae Kim, Kang Eun Kim, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 17, 6, 63-70 2008.
4. S. G Amin, M.H.M, Ahmed, H.A. Youssef, "Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis", Journal of Materials Processing Technologym 55, 254-260, 1995.