

최적설계를 위한 금속접합용 초음파혼의 해석

Analysis of ultrasonic metal welding horn for optimal design

*김선아¹, 장호수¹, 김은미¹, #박동삼²

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

¹ 인천대학교 기계공학과 대학원, ² 인천대학교 기계공학과

Key words : Ultrasonic metal welding, Horn, Modal analysis, Resonant Frequency

1. 서론

초음파 에너지는 플라스틱이나 금속의 접합이나 드릴링 등 다양한 가공분야에 사용되고 있다. 최근 전기전자, 기계 등 여러 산업분야에서 제품은 가벼워지고, 단단해졌으며 고성능, 다기능화된 부품이 요구됨에 따라 초소형 전자소자와 같은 정밀한 부품에 관한 연구가 진행되고 있다. 부품이 소형화, 정밀화 됨에 따라 기존의 접합공정보다 더 정밀하고 안전하게 접합하는 기술이 필수적인 생산기술로 활용범위가 급속히 확산되고, 그 중요성이 점차 커지고 있다. 또한 전자제품 접합에 Solder를 이용한 용접공정이 친환경적인 공정으로 바뀜에 따라 제약을 받게 되었다. 초음파 금속 용접은 전기에너지를 진동에너지로 변환하여 금속용접에 적합하도록 증폭시켜 Actuator의 가압부를 이용하여 밀착하여 용착물을 마찰시켜 냉접부(cold weld)를 형성하여 저온에서도 가능한 접합공정으로 50Hz or 60Hz의 전류를 20,000Hz or 40,000Hz 초음파 전류로 변환시키는 파워서플라이(power supply)와 전기에너지를 기계적 진동에너지로 변환시키는 진동자(transducer), 진동자의 진폭을 감소 또는 증폭시키는 부스터(booster)와 용착물에 진동에너지를 전달하여 용착시키는 혼(Horn)으로 구성된다. 이러한 초음파금속용착은 금속간의 분자결합으로 접합특성이 매우 우수하며 Solder를 이용하지 않아 경제적이며 친환경적인 방법이다. 그러나 초음파 용착기의 제작에 고도의 축척된 기술이 필요하고 기계, 물리, 재료, 전기 등 복합적인 기술이 요구되어 많은 연구가 필요하다. 진동자, 부스터, 혼은 각각의 모양, 길이, 질량 등의 설계에 따라 구동주파수와 진동 모드에 영향을 미치므로 정확한 설계와 제작방법이 필요하다. 플라스틱의 초음파 용착에는 보통 종진동이 사용되어지지만 초음파 금속용착에서는 횡진동이 쓰여진다. 횡진동은 에너지 전달 및 혼(Horn)의 팁(tip)의 크기에 한계가 있어 넓은 면적을 용착하는 경우 대응이 힘들어 정밀한 소형부품 용착에 쓰인다. 본 논문에서는 횡진동을 사용하는 초음파 금속 용착기의 부품 중 핵심인 혼의 해석을 통해 최적의 설계를 찾고자 하였다.

2. 봉의 종진동

봉의 길이를 L이라 할때 이 값이 봉의 반파장의 정수배와 같으면 공진을 한다. 봉의 단면적이 일정한 균일봉의 진동방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{또는} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서 C는 봉의 변위나 응력의 전파속도이며, 봉의 영률 E와 봉의 밀도 ρ와 식(2)와 같은 관계를 가진다. u는 변위, t는 시간을 나타낸다. 이때 양단이 자유로운 봉의 고유진동수는 식(3)과 같다.

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad , \quad f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

여기서 n은 모드의 차수를 표시한다. 전파장의 혼에선 혼의 중심부에서 최대의 변위를 얻어야 하므로 봉의 길이를 n = 1인 종진동 진행파의 λ를 l로 결정한다. λ는 종진동 진행파의 길이이며 l은 혼의 길이이다. λ는 식(4)의 관계를 가진다.

$$\lambda = \frac{c}{f_n} \quad (4)$$

3. 혼의 설계

혼은 초음파 에너지가 효율적으로 전달될 수 있도록 공진이 발생하면서 원하는 증폭도를 얻을 수 있도록 설계하여야 한다. 진동자나 부스터, 혼의 고유진동수가 일치하지 않는 경우에는 혼의 출력단에 가공에 필요한 초음파 진동이 전달되지 않기 때문에 공구혼에 대한 공진설계가 중요하다. 초음파 진동의 진폭은 혼의 입력면과 출력면 사이의 거리가 음파의 1/2파장에서 진폭이 최대가 되며, 금속용착의 경우 혼 양 끝단에서 압력이 작용하여 용착을 하기 때문에 혼의 길이는 전파장이 되며 가운데에 팁이 위치하게 된다. 따라서 좌우 대칭형상을 가진다. 혼은 열처리된 HAP72를 사용하여 설계하였으며 Table 1은 HAP72의 물성치이다.

Table 1 Material properties of Horn

Material	HAP72
Density	8230 kg/m ³
Modulus of Elasticity	242.5e009 N/m ²
Poisson's ratio	0.33

위의 물성치로부터 식(2)에서 구한 음속은 5428m/s이며 설계하고자 하는 공진주파수 f_n=40,000Hz 에서의 혼의 길이 l은 135.7mm임을 알수있었다. 이를 토대로 직경 30mm의 진동자에 사용하는 혼설계를 위해 Fig. 1의 형상에서 A와 B의 길이를 변화시켜가며 modal해석을 수행하였다.

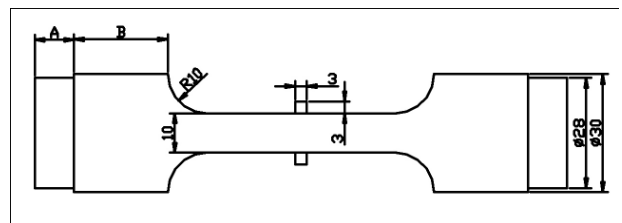


Fig. 1 A drawing of Horn

4. 혼의 해석

Table 2 Dimensions of Horn

	Dimensions (mm)
Horn l	135.7
A	10
B	24.375

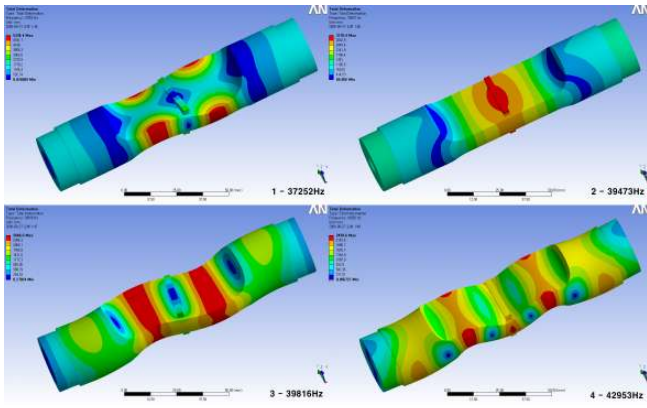


Fig. 2 Modal analysis of Horn

Table 2는 최적 설계된 혼의 치수로 전체길이 l 은 λ 의 길이로 135.7mm이다. 혼의 끝에서 스텝이 시작된 부분까지의 길이 Fig.1에서 A+B는 34.375mm로 설계하였다. 초음파 진동의 진폭은 파장의 1/2지점에서 최대를 보이므로 혼Tip의 위치를 혼의 1/2지점인 67.85mm에 위치하게 하였다. 혼의 끝부분인 진동의 입력면에서부터 혼Tip까지 거리의 1/2인 34.375mm부터 스텝이 시작되게 하였으며 응력집중을 막기위해 라운드를 주었다. 고유진동수를 40,000kHz인 혼으로 설계하기 위하여 혼의 양 끝에 단을 주었으며 단의 폭을 달리하여 고유진동수를 측정 한 결과 A=10mm의 형상에서 40,000kHz에 가까운 고유진동수를 보였다. 다음 Table 3은 설계한 혼의 35,000Hz에서 45,000Hz까지의 해석된 고유진동수 값을 나타내었다. 2차모드에서의 고유진동수 값이 39,413Hz로 종진동 모드를 나타내었다.

Table 3 Natural frequency in 35~45kHz range

Mode	Frequency (Hz)
1	37252
2	39473
3	39816
4	42953

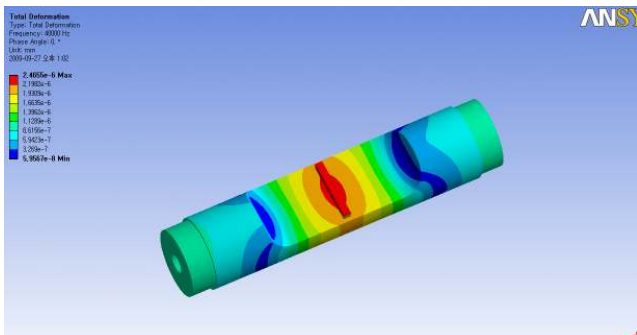


Fig. 3 Harmonic Response analysis of Horn

Fig. 3은 설계한 혼의 하모닉 해석의 결과이다. 가진주파수를 설계한 혼의 공진주파수 범위인 35,000Hz에서 45,000Hz까지 40간격으로 입력하여 해석하였다. Tip부분에서의 변형이 집중되었으며, 모달해석에서의 2차모드와 그 형태가 같다.

Fig. 4는 하모닉해석의 진동응답을 진동수와 진폭의 그래프로 나타낸 것이다. 35,000Hz에서 45,000Hz까지 40간격으로 입력된

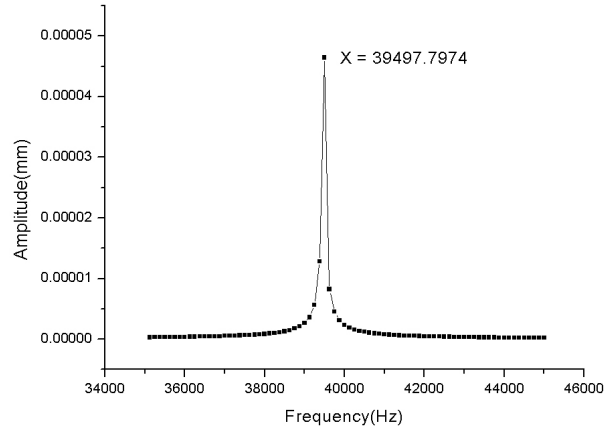


Fig. 4 Vibration properties of horn

주파수를 용착시 금속용착물과 접하는 Tip에서 측정하였으며, 39,497Hz에서 가장 큰 진폭을 나타내었다. 모달해석에서의 2차 모드에서의 고유진동수 값과 유사한 값을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파 금속용착기의 Horn의 최적설계를 위하여 봉의 종진동 방정식을 이용하여 혼의 형상치수를 결정하고, 공진주파수 40,000Hz의 혼 제작을 위하여 형상을 단계별로 조정하여 최적설계를 찾았다. 또한 혼의 진동모드를 해석을 통해 예측하였고, 응답해석을 통해 해석결과를 검증하였다.

(1) 초음파 금속용착에 사용되는 혼의 모드형상은 한파장의 종진동 모드로 혼 전체 길이의 1/2되는 지점의 Tip부분에서의 진폭이 가장 크게 나타났다.

(2) 스텝형상이 혼 경우 스텝시작부 부터 진폭이 커지며, 혼의 끝단과 스텝시작부간의 치수와 혼의 끝단에서 단차를 준 치수를 통해 혼의 고유진동수를 Tuning하여 원하는 가진주파수에 맞는 고유진동수를 가진 혼을 설계할수 있다.

(3) 혼의 고유진동수와 같은 가진주파수를 인가하였을때 용착물과 직접만나 접합하는 Tip부분에서의 진폭이 가장 커짐을 알수 있었다.

본 연구에서는 간단한 모델을 통해 초음파 금속용착용 혼의 진동특성을 파악하였다. 최적설계를 위한 진동해석을 통해 혼의 형상을 포함한 혼의 제작에 많은 영향을 미칠것으로 기대한다.

참고문헌

1. "차세대 IT부품 저온 접합시스템 개발," 지식경제부 생산시스템 전략기술지원단, 2008
2. 이봉구, 김광래, 김강은, "유한요소법을 이용한 초음파 진동 공구 혼 설계에 관한 연구," 한국공작기계학회논문집, 17,6, 63-70, 2008.
3. 이수일, 홍상혁, "플립칩 접합용 초음파 혼 모델의 비선형 해석," 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 523-528, 2007.
4. 김일광, 홍상혁, 이수일, "플립칩 접합용 초음파 혼의 진동해석," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 364-367, 2008.
5. 김선락, 이재학, 유중돈, "초음파 접합용 실린더 혼의 설계," 대한용접접합학회, 27, 4, 404-410, 2009