

20kHz 급 금속 초음파 용착용 스텝형 바 혼의 최적설계

김지선¹, 김재웅^{1*}, 김인주¹, 서주환²

¹한국생산기술연구원 스마트가공공정그룹, ²한국산업단지공단 광주전남지역본부 대불지사

Analysis of Optimum Design of Stepped Bar Horn for 20kHz Metal Ultrasonic Welding

Jisun Kim¹, Jaewoong Kim^{1*}, In-ju Kim¹, Joowhan Seo²

¹Smart Manufacturing Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

²Daebul Branch, Korea Industrial Complex Cooperation.

요약 본 연구에서는 초음파 용접기의 진동에너지를 모재에 전달하는 금속 용접용 혼의 형상설계를 위해 해석적 기법을 적용하였으며, 20kHz 영역에서 사용되는 한파장 바 형상을 갖는 용접용 혼의 형상설계를 위해 FEM(Finite Element Method)을 사용하였다. 봉의 종진동 이론을 Ansys APDL(Ansys Parametric Design Language)에 적용하여 혼의 형상을 최적화하였다. 적절한 혼의 형상을 도출하기 위해 진동의 입력면과 출력면의 면적비와 혼의 축방향 길이비를 이용하여 총 25가지의 모델을 설계하였으며, Modal 해석과 Harmonic 해석을 통해 균일한 진동특성을 확보하고자 하였다. 스텝 바혼의 끝단부(팁)의 균일도 90%이상을 확보하기 위해 Harmonic 해석을 통해 길이비, 면적비를 결정하였고 이에 따라 혼의 총길이 130mm, 스텝 길이 65mm, 출력단 면적 28.79mm²의 혼을 설계하였다. 설계치수를 바탕으로 Titanium (Ti-6Al-4V)-GR5 재료를 이용하여 혼을 제작하였다. 또한, 별도로 구성된 초음파 용접시스템을 이용하여 혼의 끝단부의 진동 진폭률 및 변위특성을 평가하였다. 최적화된 혼의 진폭률은 51%까지 향상됨을 확인하였다. 최종적으로 균일한 종방향 스텝 바혼을 설계하였으며, 끝단부(팁)의 균일도 97.4%이상을 확보하였다.

Abstract In this study, the FEM technique was applied to design the shape of the horn that transmits ultrasonic vibration energy to the base material, and the shape of the welding horn with a one-wavelength bar shape used in the 20kHz region was designed. The shape design of the horn was performed by applying the rod longitudinal vibration theory to Ansys APDL (Ansys Parametric Design Language). Twenty-five models were designed using the ratio of the area of the input and output surfaces of the vibration and the length of the horn to derive the appropriate horn shape. The horn was designed with a total length of 130mm, a step length of 65mm, and an output area of 28.79mm². The horn was fabricated using the optimized dimensions, and the vibration and displacement characteristics of the horn were evaluated using the measurement system. Finally, a uniform longitudinal step horn was designed, and more than 97.4% of the uniformity of the tip was secured. The amplitude ratio of the optimized horn was improved by 51%.

Keywords : Ultrasonic Welding, Horn Design, Uniformity, Step Bar Horn, Modal Analysis

1. 서론

다양한 용접기법중 초음파 용접은 소성유동을 이용한

용접기술이며, 진동에너지에 의해 금속확산 현상을 이용해 금속표면의 산화막 및 불순물을 제거하며 접합을 수행한다. 이러한 이유로 전기 저항이 적고 높은 전도율을

본 논문은 서주환의 2016년도 박사 학위논문의 데이터를 활용하여 재구성하였음.

*Corresponding Author : Jaewoong Kim(Korea Institute of Industrial Technology)

email: kjw0607@kitech.re.kr

Received August 21, 2019

Revised September 27, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

확보할 수 있기 때문에 버스바(Bursbar), 니켈탭(Nickel tab) 등에 사용된다.

최근에는 이중금속에도 적용되고 있으며, 용착시간이 매우 짧고 금속에 가해지는 입열량이 적기 때문에 얇은 호일등에 사용되고 있다[1,2]. 초음파 용접에 있어 중요 기술은 2가지를 뽑을 수 있다. 하나는 초음파 용접시스템의 기구의 최적 설계기술이며, 두 번째는 소재에 따른 용접조건 최적화 기술이다[3]. Shahid[4]등은 초음파 용접기의 시스템 설계를 위해 발전기 출력 회로를 설계하고 시뮬레이션을 통해 신호변화 및 FFT 이용하여 혼의 공진 주파수와 일치하는 시스템을 설계하였다. 김선락[5]은 고상 접합용 종방향 초음파 혼설계를 위해 진동해석 개념을 도입하였으며, 혼의 형태에 따라 진동특성을 분석하였다. 또한, 박우열[6-8]등은 유한요소법을 이용한 초음파 진동공구혼을 설계하였으며, 실제 제품에 적용하여 혼의 특성을 분석하였다. 그러나, 앞서 연구한 설계기술은 혼의 모양에 따른 진동특성만을 관찰하였으며, 종방향 또는 횡방향 진동 여부를 판단하는 수준이었다. 또한, 혼에 적용되는 진동의 주파수의 영역을 분석하고 이에 대한 공진주파수영역에 맞는 혼의 형태를 결정하는 평가하는 방식으로 초음파 용접시스템을 설계하였다.

대부분의 초음파 시스템의 설계는 2차전지 모듈의 접합기술에 적용되기 위해 호일용 접합기구로 설계되었으며, 와이어 본딩용 공구혼의 설계에 국한되어 있다. 그러나 최근에는 0.1t 이상의 박판재에도 초음파 용접기술이 적용됨에 따라, 혼의 강건 설계가 필수적이다[9].

혼의 공진시 발생하는 용접부의 변위량에 대한 정량적 측정과 설계 변수에 따른 변화특성에 대한 분석이 필수적임에도 불구하고 현재까지 이에 대한 연구가 진행되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 초음파 용접기의 진동에너지를 모체에 전달하는 20kHz대의 한파장 혼의 형상설계를 위해 FEM을 사용하였으며[10], 봉의 종진동 이론을 Ansys APDL(Ansys Parametric Design Language)에 적용하여 혼의 형상설계를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 스텝 바 혼의 형상 설계 조건은 진동의 입력면과 출력면의 면적비, 스텝의 길이비를 이용하였으며, 총 25개의 모델을 설계하여 Modal 해석을 수행하였다. 초음파 시스템과 혼의 공진현상을 이용하기 위해 설계된 혼의 공진주파수 영역을 분석하였으며, 모드(Mode) 분석을 통해 원하는 변형형태를 나타내는 형상조건을 도출하였다. 또한, 해석 결과를 바탕으로 혼을 제작하여 20kHz 초음파 용접기에 적용하여 진동특성을 분석 하였다.

2. 본론

2.1 초음파 금속 용착공정 및 혼설계 방식

초음파 금속 용착기는 Fig. 1. 과 같이 전원공급장치(Power Supply), 진동자(Converter), 부스터(Booster), 혼(Horn)으로 구성되며, 발전기에서 들어온 50~60Hz의 전기에너지를 진동자를 통해 20,000~40,000Hz의 기계적 진동에너지로 변환하여 부스터에서 미세한 진동을 금속용착에 이용할 수 있도록 증폭시키면 혼을 통해 용착금속에 진동에 의한 마찰열에 의해 금속표면의 산화막과 오염막이 파괴되어 금속간 결합이 이루어진다.

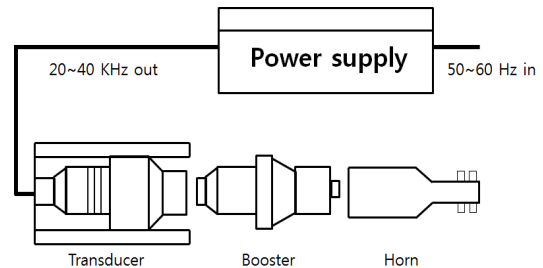


Fig. 1. Ultrasonic welding process setup

초음파 금속 용착은 BLT(Bolt clamped Langevin type Transducer)진동자의 출력 단에 진동자와 같은 고유진동수를 가진 부스터와 혼을 부착하여 공진에 의한 증폭작용을 이용, 초음파 금속 용착에 필요한 진동에너지를 얻게 된다. BLT의 출력 단에서 발생하는 진폭은 매우 작기 때문에 BLT 출력 면에 부착된 부스터와 혼을 이용하여 진폭을 증가시키며, 혼의 증폭비는 혼 형상에 의해 결정된다. 그러나 부스터와 혼의 고유진동수가 진동자의 진동수와 일치하지 않는 경우에는 혼의 출력단에 용착에 필요한 초음파 진동이 전달되지 않기 때문에 혼에 대한 공진설계가 요구된다. 혼은 통상 반파장 또는 한파장의 공명체로 그 재질은 고속공구강 또는 티타늄 합금이 사용되고 있다. 혼의 설계 시 가장 중요하게 여기는 변수는 혼 재료의 가진 주파수에 따른 파장이다. 이 파장은 공구혼의 재료 내에 전파하는 파동의 정확한 음속도에 따라 결정된다. 파장은 혼을 설계하는 중요한 변수로 혼의 길이를 결정하는데 영향을 미치고, 혼의 초음파 진동을 발생시켜 공진을 발생하는 요소가 된다.

금속 용착의 경우 횡진동이 쓰이며, 초음파 혼의 재질은 금속부재의 재료와 혼의 무게에 따라 선택되어야 하며, 강도와 경도가 혼 재료 선택의 중요한 변수가 된다.

혼의 설계시 혼의 길이와 형상은 각각 공진 주파수와 증폭비를 결정한다. 혼을 설계하는데 일반적으로 적용하는 절차는 다음과 같다.

- (1) 파동방정식을 이용한 가진주파수에 따른 혼의 길이를 계산한다.
- (2) 혼의 증폭비로부터 혼의 형상을 계산한다.
- (3) 유한요소법을 이용하여 혼의 고유진동수와 진동 모드(Mode)를 계산한다.
- (4) FEM의 결과를 검토하여 혼의 형상과 길이를 정하여, 원하는 특성을 얻을 때까지 수정을 반복한다.
- (5) 가공된 혼이 원하는 주파수에서 공진이 발생하는지 여부를 실험을 통해 확인한다.

이와 같은 혼의 설계 과정은 일반적으로 사용되는 절차이며, 특히 FEM을 이용한 모드해석(Modal analysis)은 혼의 성능을 확보하기 위해 시행착오를 줄임으로써 매우 유용하다.

2.2 기본 혼 모델

혼의 형태에 따른 진폭은 각 혼의 입력부와 출력부의 면적비가 일정하더라도 스텝형 (Step), 지수형 (Exponential), 코니칼(Conical)형 에 따라 진폭확대율이 달라진다. 본 연구에서는 알루미늄 합금 및 동합금의 용착에 사용되는 혼의 형상 설계를 위해 FEM을 이용하여 혼을 설계하였으며, 설계에 기본이 되는 스텝형 바 혼 (Stepped bar horn)을 이용하였다. Fig. 2.는 해석 모델의 기본 형상을 나타낸다.

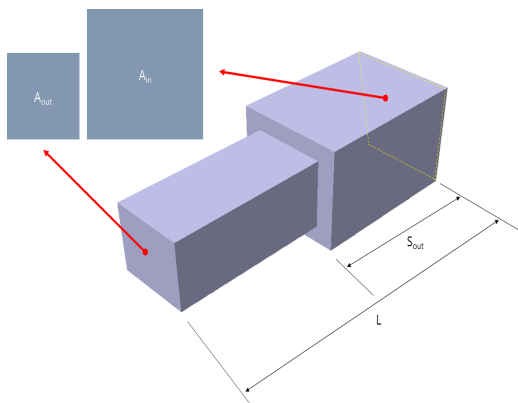


Fig. 2. Basic bar horn model for 20kHz ultrasonic welding systems

Table 1. Specifications of ultrasonic welding system

Term	Specifications
Frequency	20kHz
Booster Out-face connecting option	M-8 Screw bolting, Area 1,764mm ² = Dia 47Ø
Max. stroke	18mm
Compressed air	1 bar ~ 6 bar

혼의 기본형상은 초음파 발전시스템의 사양에 의해 결정되어야 하며, Table 1은 본 연구에 사용된 초음파 용착기의 기본 사양이다. 혼의 총길이 L은 식(1)에 의해 계산된 한파장의 정수배로 결정하였다. 혼의 입력면적은 부스터와의 직경에 맞춰 42mm × 42mm로 설계되었으며, 부스터와 진동자간의 연결을 위해 M8 나사부를 가지며, 고유진동수가 20,000Hz에 맞게 설계하였다.

2.3 초음파 혼의 모드해석

모드 해석 또는 고유 진동 해석은 진동이나 주기적인 하중을 받는 부품을 설계하고 검증할 때 자주 사용된다. 결과적으로 특정한 구속을 받는 구조물에 대한 공진 진동수를 계산하고 이러한 진동수에 대응하는 모드 형상을 알 수 있으며, 이를 제품 설계에 있어 반영할 수 있다.

조화 가진을 하는 구조물의 설계에서는 고유 진동의 예측이 매우 중요하며, 고유 진동수와 비슷한 진동수로 가진이 되면 가진이 증폭되어 예측하지 못한 큰 진동을 일으키거나 심한 경우 파손될 수 있다. 따라서 고유 진동 해석의 목적은 동적 시스템의 고유 진동수를 예측하고 이에 근접하지 않도록 하여 공진을 예방하는데 있다. 하지만 본 연구에서는 초음파 가진의 진폭을 증폭시키기 위해 고유 진동수와 의도적으로 일치시켜 용접효율을 높이도록 시스템을 설계해야 한다. 본 연구에서 혼제작에 사용한 재료는 티타늄 소재이며, 소재의 기계적 물성은 Table 2에 나타내었다. 소재의 물성은 초음파 혼의 길이를 결정하게 된다.

Table 2. Mechanical properties of horn material

Material	Density (g/cm ³)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Ultimate tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)
Titanium	4.42	120	0.31	549	524

혼의 탄성계수(Modulus of elasticity)과 밀도(Density)에 의해 음속이 결정되고 파장의 정수배로 결

정된 혼의 길이(L)는 130mm 이다. 이와 관련된 수Eq. (1)과 같다.

$$L = \frac{c}{2f_n} = \frac{1}{2f_n} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$A = \frac{A_{out}}{A_e} \quad (2)$$

$$S = \frac{S_{out}}{L} \quad (3)$$

여기서, L은 초음파 혼의 길이를 나타내며, c는 음속, f_n 은 주파수, E는 탄성계수, ρ 는 밀도를 나타낸다. 총 25종류의 모델은 수식 Eqs. (2),(3)의해 설계되었다. Eq. (2)은 입력면적(A_e)과 출력면적(A_{out})의 관계식이며, Eq. (3)은 스텝혼의 길이비율(s)이다. 길이비율은 0.1부터 0.5까지, 스텝비는 0.2부터 0.8까지 다섯단계로 증가 시켜 모델을 설계하였으며, 설계된 모델은 Fig. 3. 에 나타내었다.

Table 3. Horn model for modal analysis

Term	Dimensions (mm)
L	130
Input area	42 × 42
In/out area ratio	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Step ratio	0.2, 0.35 0.5, 0.65, 0.8

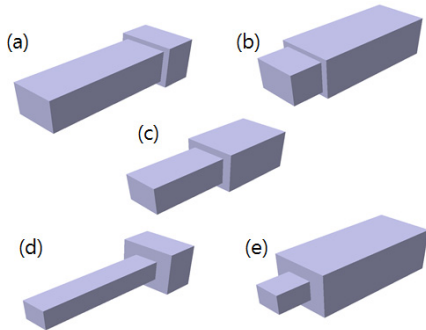


Fig. 3. Ultrasonic horn model according to design parameters; a)area ratio 0.5, step length ratio 0.2, b) area ratio 0.5, step length ratio 0.8, c) area ratio 0.3, step length ratio 0.5, d) area ratio 0.1, step length ratio 0.2, e) area ratio 0.1, step length ratio 0.8

모드 해석을 위해서 사용 코드인 Ansys 의 Solid 45 모델을 사용하였으며 경계조건은 Free-Free 상태로 모드해석을(Modal analysis)을 수행하였다. 총 25개의

모델을 이용하여 모드해석을 수행하였으며, 진동모드의 형상을 관찰하고자 하였다. 해석에 사용된 모델은 Fig. 4에 나타낸 것과 같다. 각 조건별 엘리먼트 형상은 Brick mesh 유형이며, 모델사이즈는 0.05이다. 모드 해석은 총 20차 모드의 형상을 관찰하였으며, 공진주파수대인 20kHz 대의 모드 형상과 인접주파수 영역을 확인하였다.

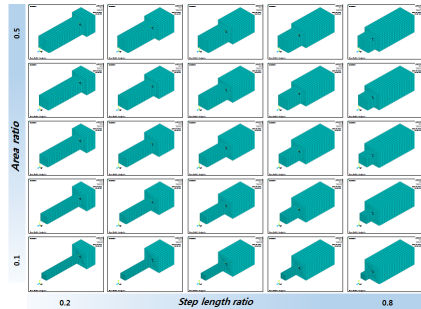


Fig. 4. Ultrasonic horn model and element type according to design parameters

2.4 초음파 혼의 모드해석 결과

총 25회 모드해석 결과, 공진주파수인 20kHz에서 10차~13차 Mode가 나타났다. 스텝형 바혼에서 대표적인 진동형태는 비틀림, 굽힘, 복합변형(비틀림+굽힘)형태가 나타났으며, 해석결과는 Fig. 6. 에 나타내었다. 초음파 용접에 있어 혼의 변형 형태 대표적으로 3가지 형태이며, Fig. 5. 에 나타낸것과 같이 용접에너지의 전달형태의 효율성 측면에서 매우 중요하다. 비틀림과 굽힘 경우 용접 모재에 전달하는 에너지가 매우 불안정하다. 가장 이상적인 변형형태는 종방향 변형이다. 초음파 금속용접의 경우 모재를 혼의 종방향으로 진동시켜 모재와 모재사이의 마찰에너지를 이용해 용접되기 때문에 종방향 진동품질이 우수해야한다. 해석결과를 Fig. 7. 에 진동의 형태에 따라 구분하여 나타내었으며, 종방향 변형은 길이비율이 0.35, 0.5일 때 일부 구간에서 나타났다. 그 이외의 영역에서는 비틀림과 굽힘 형태의 변형이 관찰되었다.

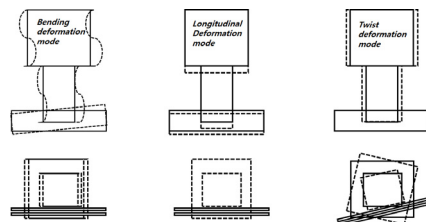
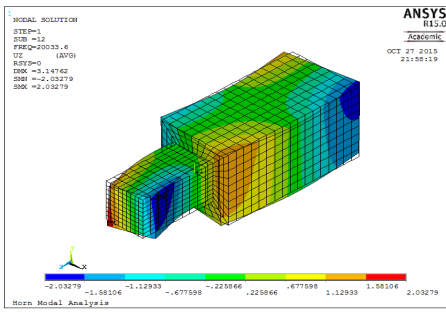
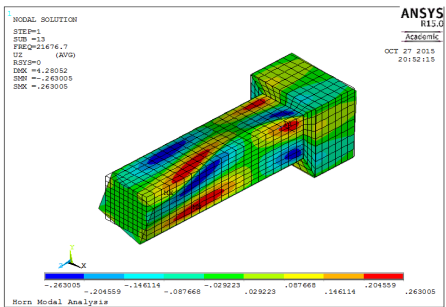


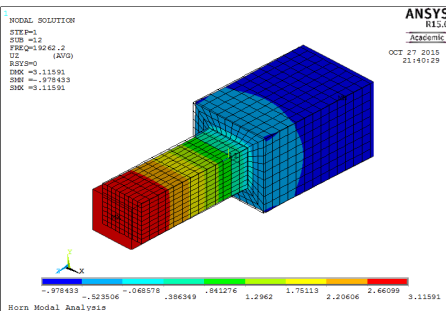
Fig. 5. Characteristics of ultrasonic horn according to vibration mode



a) Bending deformation shape (area ratio 0.3, step length ratio 0.65)



b) Twist deformation shape (area ratio 0.3, step length ratio 0.5)



c) Longitudinal deformation shape (area ratio 0.3, step length ratio 0.5)

Fig. 6. Representative case characteristics of ultrasonic horn according to vibration mode

	0.2	0.35	0.5	0.65	0.8
0.5	Twist (mode 13)	Longitudinal (mode 12)	Longitudinal (mode 10)	Twist (mode 10)	Twist & bending (mode 10, 11)
0.4	Twist (mode 13)	Longitudinal (mode 12)	Twist & bending (mode 11, 12)	Twist (mode 10)	Twist & bending (mode 10, 11)
0.3	Twist (mode 13)	Longitudinal (mode 12)	Longitudinal (mode 12)	Twist & bending (mode 11, 12)	Twist & bending (mode 10, 11)
0.2	Twist & bending (mode 13, 14)	Longitudinal (mode 12)	Longitudinal (mode 12)	Twist & bending (mode 11, 12)	Twist & bending (mode 10, 11)
0.1	Twist (mode 13)	Twist & bending (mode 13, 14)	Longitudinal (mode 12)	Twist & bending (mode 11, 12)	Twist & bending (mode 10, 11)

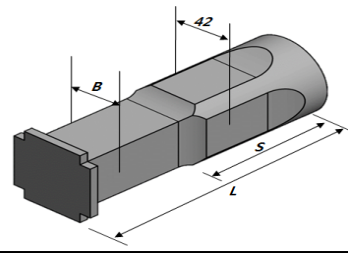
Fig. 7. Results of modal analysis

2.5 초음파 혼의 가공

선정된 길이비, 면적비를 이용하여 혼의 중요 치수를 선정하였다. 혼의 총길이 L은 재료의 밀도, 탄성률, 가진 주파수에 의해 결정되며, 결정된 총길이 L과 선정된 길이비로 혼의 스텝형상이 결정되었다. 또한, 부스터와 연결되는 혼의 입력면적은 42mm × 42mm 정사각형으로 초음파 용접시스템 사양에 의해 결정되어 있기 때문에 1,764mm² 을 기준으로 출력면의 면적이 결정되었다. Table 4는 해석결과를 최적화된 길이비, 면적비에 의해 결정된 20kHz 한파장 혼의 형상 치수이다.

Table 4. Optimal dimension of one wave length step horn with 20kHz

Term	Dimension (mm)
Horn length (L)	130
First step length(S)	65
Second step area(B)	28.79



혼의 제작은 Titanium (Ti-6Al-4V)-GR5으로 제작되어졌으며, 국부적인 응력집중 등을 방지하기 위해 혼 스텝부에 라운드를 가공하였다. Fig. 8은 제작이 완료된 한파장 20kHz 스텝형 바 혼을 나타낸다.



Fig. 8. 20kHz one-wave stepped bar horn for ultrasonic metal welding

2.6 초음파 혼의 진동특성 분석

제작되어진 혼의 진동 및 변위특성을 평가하기 위해 초음파 용접 혼 분석시스템을 구축하였다. 20kHz대의 혼의 진폭특성을 위해 가속도센서(Acceleration sensor)를 이용하여 혼팁의 진폭을 측정하였으며, LDV(Laser Doppler Vibrometer) 센서를 이용하여 혼팁의 변위를 측정하였다. Fig. 9. 는 혼의 진동특성을 분석하기 위한 전체 시스템의 블록 다이어그램이며, 실험장비로 사용된 Komax 2050 초음파 용접기와 계측시스템을 통합하여 장비를 구성한 것이다.

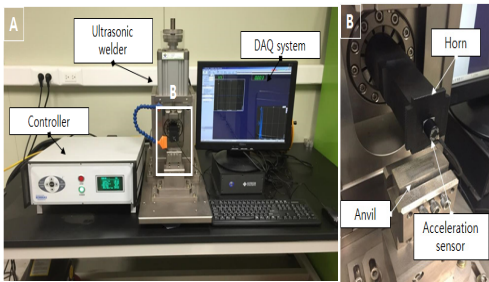


Fig. 9. A) Ultrasonic metal welding matching setup, B) configuration of horn, anvil, and acceleration sensor

혼의 진동특성평가를 위해 측정된 측정점은 Fig. 10. 과 같이 3개 위치이며, 혼의 상부에서 측정된 3개의 측정점은 혼의 입력 면에서부터 출력 면까지 진동이 전달됨에 있어 진폭의 변화량을 측정하기 위해 수행되어졌다. 각각의 위치는 입력면으로부터 10mm, 60mm, 130mm 에 가속도 센서를 부착하여 진폭을 측정하였다.

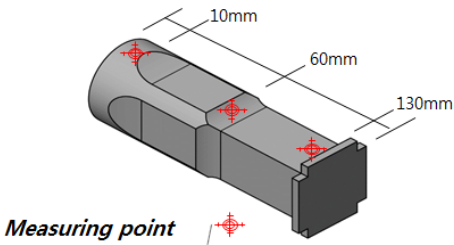


Fig. 10. Measuring point for 20kHz stepped bar horn

실험에 사용된 초음파 용접시스템의 진동특성은 20kHz대에 진폭 40um이다. 이는 혼에 전달되는 진동에너지가 최대 20kHz이며, 증폭기를 통해 증폭되어 혼의 입력면에 전달되는 진폭이 40um이라는 의미이다. 실험에 사용된 용접시간은 0.1sec이다.

2.6.1 균일도

LDV를 이용하여 혼 팁 끝단부의 변위특성을 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 혼 팁 끝단부의 변위는 최대 89.98um 이며, 최소는 84.16이다. 제작되어진 혼의 팁의 균일도는 97.4%로 나타났다. 이는 모달해석과 조화 가진 해석을 이용하여 최적화된 혼의 공진특성이 우수함을 의미한다.

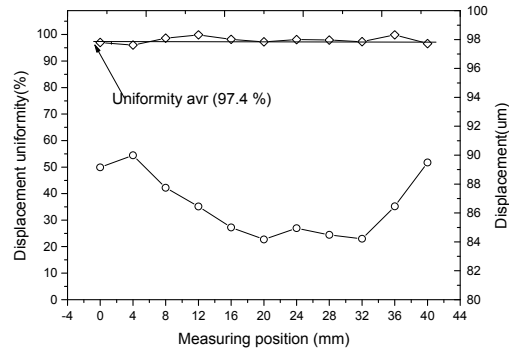


Fig. 11. Uniformity and displacement at horn tip position

2.6.2 증폭률

앞서 언급한 것과 같이 초음파 혼은 외력의 진동수와 혼의 고유진동수의 고의적 일치를 통해 공진을 일으켜 혼의 팁(끝단부)의 진동변위를 극대화 시키는 것이 가장 중요한 기술이다. 이는 외력이 가지는 변위량을 어느정도 증폭하느냐에 따라 혼설계의 적정성이 판별된다. 측정실험을 통해 혼에 외력이 가해지는 입력면으로부터 용접모재에 진동에너지를 전달하는 출력면 사이에 진폭을 측정함으로써 혼의 진폭률을 측정하였다. Fig. 10. 은 측정점의 세부 위치를 나타내며, Figs. 12-15.는 측정된 결과를 나타낸다. 측정위치 10mm 지점에서 측정된 진동변위량은 +58.891um, -44.82 이며, 60mm 지점에서 측정된 진동변위량은 +67.1, -67.39, 130mm 지점에서는 +85.26, -67.39로 나타났다. 이는 입력면으로부터 길이가 멀어질수록 변위량이 증가하고 있음을 의미한다. 위치에 따른 증폭률을 분석하면, 길이가 증가할수록 증가율이 증가함을 확인할 수 있다. 10mm 측정점에서 60mm 측정점까지 약 30%의 증가율을 보이며 끝단부까지는 약 51%의 증가율을 보인다. 또한, 변위량의 증가는 증폭이 발생하고 있음을 의미하고 혼의 적절한 설계가 이루어짐을 의미한다.

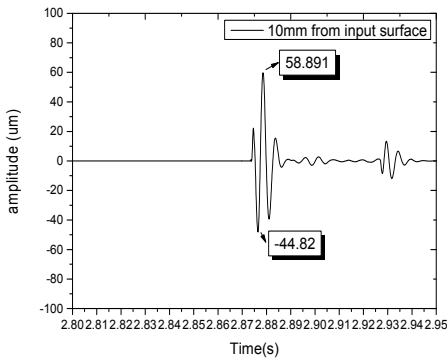


Fig. 12. Amplitude of 10mm point from input surface

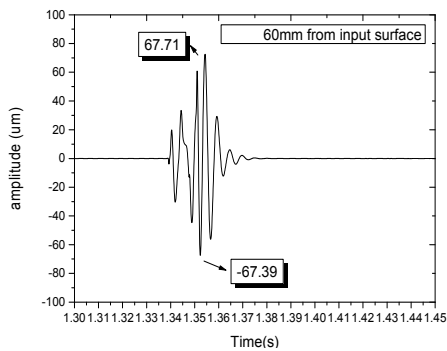


Fig. 13. Amplitude of 60mm point from input surface

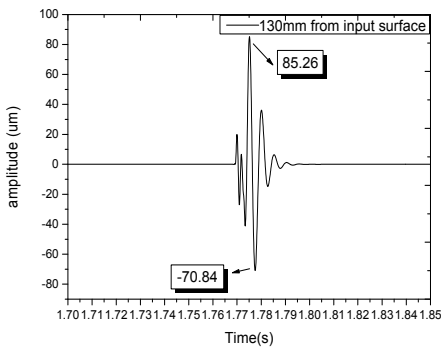


Fig. 14. Amplitude of 130mm point from input surface

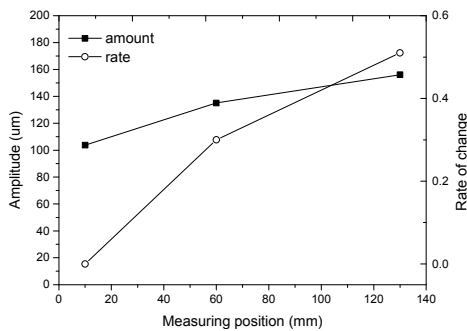


Fig. 15. Rate of Amplitude change according to measuring position

3. 결론

본 연구에서는 20kHz 한파장 특성을 갖는 금속초음파 용접흔을 설계하여, 스텝형 바흔의 최적 치수와 설계 기준을 제시하였고, 실험을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 본 장의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

20kHz대의 고유진동수를 갖는 스텝형 바흔을 설계하기 위해 Ansys APDL을 이용하여 Modal 해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 흔의 주요치수(스텝의 길이비, 입출력단의 면적비)에 따른 흔의 모드형을 관찰하였다. 스텝 바흔의 끝단부(팁)의 균일한 진동특성을 확보하기 위해 Harmonic 해석을 통해 길이비 ($S=0.5L$), 면적비 ($B=\sqrt{0.47A^2}$)를 결정하였고 이에 따라 흔의 총 길이 130mm, 스텝 길이 65mm, 출력단 면적 28.79mm²의 흔을 설계하였다.

설계치수를 바탕으로 Titanium (Ti-6Al-4V)-GR5 재료를 이용하여 흔을 제작하였다. 진동해석을 통해 설계된 스텝형 바흔의 설계 타당성을 검증하기 위해 가속도 센서, 레이저 변위센서를 이용하여 흔의 진동특성을 분석하였으며, 97.4%의 균일성을 가지는 흔을 개발하였다. 또한, 증폭률 51%를 확보하였다.

References

- [1] W. Y. Park, H. S. Jang, J. H. Kim, D. S. Park, "Evaluation of the Weldability of Cu Sheet through the Ultrasonic Metal Welding Experiment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.21, No.4, pp. 613-618, Aug. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.4.613>
- [2] M. Kang, W. Chol and S. Kang, "Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing" Journal of Welding and Joining, Vol.32, No. 44, pp. 52-59, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8>
- [3] K. Prakasan, V. Jaiganesh, "Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 51, No. 1-4, pp. 163-171, Nov. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007%2Fs00170-010-2627-1>
- [4] M. B. Shahid, D. S. Park, "Effect of Welding Parameters on Joint Strength in Ultrasonic Metal Welding" Proceedings of Fall Conference on Korean society for precision engineering, Korea, pp. 417-417, May. 2019.

<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08742804>

- [5] S. Kim, J. H. Lee and C. Yoo "Design of bar horn for ultrasonic bonding" Journal of Welding and Joining, Vol.27, No. 5, pp. 67-73, Oct. 2009.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01275747>
- [6] W. Y. Park, H. S. Jang, and D. S. Park, "A study Vibration Analysis and shape design of Ultrasonic cutting Tool" Proceedings of Conference on Korean Society of Mechanical Engineers, Korea, pp. 1228-1231, Nov. 2011.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02041824>
- [7] H. S. Jang, W. Y. Park and D. S. Park, "Design and analysis of Ultrasonic metal welding tool horn" Proceedings of Conference on Korean Society of Mechanical Engineers, Korea, pp. 1232-1236, Nov. 2011.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02041825>
- [8] H. S. Jang, W. Y. Park and D. S. Park, "Design and Weldability Verification of the 40kHz Horn for Ultrasonic Metal Welding" Proceedings of Conference on Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Korea, pp. 55-60, Arp. 2013.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02158121>
- [9] K. E. Kim, B. G. Lee and S. J. Choi, "Modal Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for RFID TAG Micro-pattern Forming" Journal of Korea Academy Industrial Cooperation Society, Korea, pp. 652-658, Dec. 2006.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07200151>
- [10] Lee, S. H., Kim, E. S., Yoon and K. Y., "Analytical Study on Vibrational Properties of Vibro-hammer" Journal of Korea Academy Industrial Cooperation Society, Korea, pp. 3577-3581, Jul. 2013.
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07212632>

김 지 선(Jisun Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (학사)
- 2011년 2월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (석사)
- 2018년 8월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (박사)
- 2012년 5월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

용접 및 접합 기술, 고밀도 에너지 용접

김 재 웅(Jaewoong Kim)

[정회원]



- 2006년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(학사)
- 2013년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(박사-석박통합)
- 2012년 9월 ~ 2016년 9월 : 대우조선해양 중앙연구원
- 2016년 9월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 선임연구원

<관심분야>

LNG연료추진탱크 제작/용접, 레이저 용접

김 인 주(Inju Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (일반기계석사)
- 2004년 8월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (일반기계박사)
- 2007년 5월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

레이저브레이징 및 아크용접공정 자동화

서 주 환(Joohwan Seo)

[정회원]



- 2008년 2월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (일반기계석사)
- 2016년 2월 : 목포대학교 공과대학 기계공학과 (일반기계박사)
- 2008년 5월 ~ 현재 : 한국산업단지공단

<관심분야>

조선기자재, 초음파 용접