

이종접합을 위한 초음파 트랜스듀서의 최적 설계

Optimization Method for Ultrasonic Transducer Design to the Bonded Dissimilar Materials

*정안목¹, 권익식¹, #김철호²

*A.M. Jeong¹, E. S. Jeon¹, #C.H. Kim²(cheolho@kitech.re.kr)

¹ 공주대학교 대학원 기계공학과, 공주대학교 기계자동차 공학부 ² 한국생산기술연구원

Key words : Transducer, Resonance Frequency, Bonding of Dissimilar Materials, Nodal plane

1. 서론

초음파의 응용분야는 음파의 파동 성질을 이용하는 정보 측정 분야와 초음파의 고에너지를 이용한 초음파 용접 및 가공 등을 들 수 있다. 초음파 용접은 종방향 또는 횡방향으로 초음파 진동을 가하여 열가소성 플라스틱이나 이종 금속을 접합하며,⁽¹⁾ 원리는 접합하고자 하는 소재에 초음파 진동을 주어 그 진동에너지에 의해 접합 재료의 접착부 원자가 서로 확산되어 접합이 되는 것이다. 이러한 초음파 접합은 일반적인 용접법으로는 접합이 불가능한 금속이나 플라스틱의 접합, 서로 다른 금속끼리의 접합이 가능하다는 특징을 갖는다. 최근 신재생에너지가 활발히 연구되면서 이러한 초음파 용접의 이점을 이용하여 태양광 에너지를 활용할 수 있는 이종재료의 접합에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 초음파 용접기는 60 Hz의 AC 전류를 20 kHz 이상의 초음파 전류로 변환시키는 초음파 발전기와 전기 에너지를 기계적 진동 에너지로 변환시키는 초음파 진동자(transducer) 그리고 공구혼(tool horn)으로 구성된다. 초음파 진동자로는 압전세라믹재료(PZT)가 많이 사용하며, 산업용 진동자는 디스크 형태의 PZT를 적층시키고 볼트로 고정한 BLT(bolt clamped Langevin-type transducer)를 사용한다.⁽²⁾ BLT에서는 PZT 자체만으로 발생하는 진동 진폭은 매우 작기 때문에 진동 전파 전방으로 진폭 확대를 위한 공구혼이 위치하며 이 혼의 형상에 따라 진동 진폭 크기를 결정지을 수 있다.

Wang 등⁽³⁾은 초음파가공 공정의 동적 해석을 연구하였으며, Kang⁽⁴⁾은 초음파 진동 절삭 공구 혼의 길이 및 외경 치수를 유한요소법을 이용하여 고유진동수를 해석함으로써 결정하여 혼 제작에 이용하였다. Lee⁽⁵⁾는 이종 플라스틱의 초음파 용접성에 대한 연구를 하였고, Lee 등⁽⁶⁾은 초음파 용접을 이용하여 전선의 접합을 연구하였으며, Kim 등⁽⁷⁾은 초음파 용접을 위한 혼 설계에 관한 연구를 하였다. 초음파 용접 시 압력과 진동에 의한 반복수는 2차적 인자로 발열 에너지를 경유해서 기여한다. 따라서 용접 시 압전진동자의 진동에너지가 혼의 고유진동수를 추종하며, 소모되는 에너지를 최소화하기 위해 압전진동자의 공진 주파수와 일치된 혼의 설계가 필요하다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 운동방정식을 이용한 혼의 이론적 적용을 검토하였으며, 최적 설계를 위하여 수치해석을 통한 기본적인 진동 해석을 수행하였다. 이를 통하여 이종 재료의 접합을 위한 60 kHz의 공진주파수를 갖는 BLT의 효과적인 설계 방안을 제안하였다.

2. 초음파 혼의 설계

2.1 압전 진동자

압전진동자의 원리는 크리스털의 결정 방향에 대해 기계적 응력을 가했을 때 전기적 분극이 생기는 압전효과의 반대적 현상인 역압전 효과를 이용한 것이다. 전기에너지와 기계적 에너지간의 변환효율을 나타내는 전기기계결합계수(K)는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{K^2} = a \cdot \frac{f_r}{f_a - f_r} + b \tag{4}$$

위의 식(4)에서 a와 b는 진동자의 형태에 의해 정해지는 상수로

원통형이 종진동하는 경우에는 $a=0.405$, $b=0.810$ 이 되며, f_r 은 압전세라믹의 공진주파수, f_a 은 압전세라믹의 반공진주파수를 나타낸다. 압전세라믹에 교류전압을 인가하여 전압주파수를 변화시키면 일정 주파수에서 압전세라믹이 매우 강하게 진동하게 되는데, 이 주파수를 공진주파수라 하며 이러한 공진주파수를 이용한 진동은 높은 기계적 진동을 이끌어낼 수 있다.

2.2 초음파 공구혼의 설계

전기적인 고주파 신호를 압전진동자에 의한 기계적 진동으로 변환하여 용접에 사용하기 위해서는 진동의 전달 매체가 필요하다. 이러한 진동을 전달하는 매체로 혼을 사용 하게 되며, 이러한 혼은 진동자의 진동 전달 방향으로 부착되며, 종진동 전달과정에서 진폭을 증폭 시킬 수 있는 형태로 설계되어야 한다. 또한 가공 모양에 따라 혼의 출력 끝단면 형상이 달라지는데 이에 따라 혼의 설계가 달라지기도 한다.

원통형 혼에서 혼의 길이는 진폭 확대율이 최대가 되는 파장 길이의 1/2(n/2중 가장 짧은 길이)로 하는 것이 일반적이며 혼의 대체적인 길이는 다음과 같다.

$$l_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{f} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \tag{1}$$

여기서, l_0 : 혼의 길이(mm), c : 매질의 음속, f : 가진주파수, λ : 진동파장

Fig. 1 과 같이 종파만을 고려한 혼의 대단면적을 S_1 , 소 단면적을 S_2 라 하고 입력단으로부터 거리 x 되는 지점의 단면적을 S_x , 봉의 영률을 E , $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, ρ 는 밀도라 하면 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} (S_x \frac{\partial u}{\partial x}) \tag{2}$$

식 (2)을 이용하여 혼의 길이와 단면적을 결정할 수 있다. 혼의 직경과 길이는 고유 진동수에 관계하며, 길이는 초음파 용접의 작업 시 회전 에 의한 관성력이 작용하여 정확한 위치 이동의 장애가 될 수 있다. 따라서 초음파에 의한 혼의 진동의 파장(λ_h)을 이용한 길이비로 축소해야 한다.

$$\lambda_h = \frac{\sqrt{\frac{Y_h^E}{\rho_h}}}{f_r} = \frac{c_h}{f_r} = 2l_1 \tag{3}$$

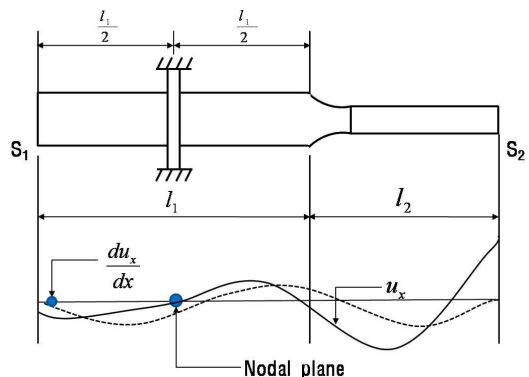


Fig. 1 Configuration of ultrasonic transducer and wavelength of longitudinal vibration

식 (3)에 의해 Fig. 1에서와 같이 진동의 반과장을 유도하여 중점에서 진동절면(nodal plane)이 생기도록 한다. 진동절면은 트랜스듀서의 지지대로 사용하며, 초음파 진동에너지의 소모를 극소로 줄일 수 있다. 더욱이 진동절면의 유도를 정확하게 하기 위해서는 진동절면의 위치에서 계단(step)형을 만들어 진동 파장의 불연속적인 부분을 만들어 사용할 수 있다.

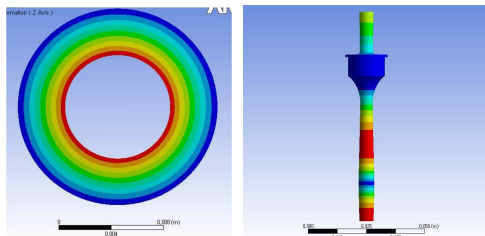
3. 초음파 혼 FEM 해석

공구혼의 재질은 Titanium이며, 압전진동자는 PZT8계열이다. 파트별 물성은 Table 1 과 같다.

Table 1. Materials properties

	Materials	Young Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m ³)
Tool Horn	Titanium	113.85	0.31	4,430
Actuator	PZT	71	0.31	7,700

Fig. 2은 압전진동자와 공구혼의 모드해석 결과이다. 압전진동자와 공구혼은 각 각 1차모우드로 60537Hz, 60386Hz로 압전진동자와 공구혼의 공진주파수의 오차가 약 0.23%이므로 압전진동자와 공구혼의 공진주파수가 일치된 설계를 하였다.

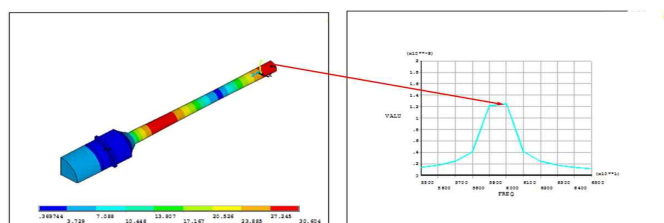


(a) Piezoelectric (b) Toll horn

Fig. 2 Modal analysis of piezo actuator and toll horn

혼은 종진동의 진동모우드를 나타내어야 하며, 이러한 진동모드는 공구혼의 출력부에서 최대 진폭의 종진동이 발생하여야 한다. 본 연구는 압전진동자와 공구혼이 결합되어 있는 볼트조임 랑지방 트랜스듀서의 공진주파수를 60kHz로 설정하였다. 모델을 자유단으로 진동모우드 해석을 하였고, Fig. 3(a)은 모우드해석을 통해 설계된 트랜스듀서의 고유진동수와 진동특성 결과를 보여준다. 유한요소 해석 결과 진동모우드에서 출력부의 종방향 변위가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 구해진 고유진동수는 60,008Hz로 주파수 60kHz와의 오차는 약 0.013%이므로 적절한 혼의 모델링 결과를 확인할 수 있다.

모우드해석을 수행하고 주파수별로 실제의 가진 입력에 대한 혼의 응답을 구하기 위하여 주파수응답해석을 수행하였다. 관심 대상인 혼의 끝단에서의 진폭을 확인하기 위해 모우드해석 결과인 혼의 고유 주파수 영역에서 ±500Hz의 구간을 설정하였으며, 주파수응답 해석 결과 60kHz에서 진폭이 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.Fig. 3(b)



(a) Modal analysis of transducer (b) Harmonic response analysis of transducer

Fig. 3 Modal analysis of transducer and harmonic response analysis of transducer

초음파 트랜스듀서 설계 시 진동절면 선정은 매우 중요하며, 초음파 트랜스듀서를 고정할 수 있는 지지대로 사용된다. 진동절면은 진동이 “0”이 되는 지점으로 초음파 진동에너지의 소모를 극소로 줄일 수 있으며, Fig. 4에서 초음파 트랜스듀서의 계단(step)부분이 진동절면인 것을 확인할 수 있다.

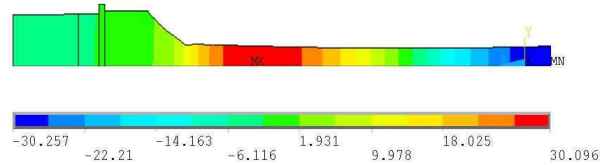


Fig. 4 Nodal plane of ultrasonic transducer

4. 결론

본 연구에서는 압전진동자의 초음파 가진을 통하여 이중 접합에 활용되는 초음파 트랜스듀서 설계를 하였다. 최적설계를 위해 운동방정식을 이용하여 혼의 형상과 치수를 결정하고 FEM 해석으로 공구혼에 작용하는 진동 모우드 특성과 공진주파수를 확인하였다. 압전 진동자와 공구혼이 결합되어 있는 트랜스듀서의 해석결과 고유진동수는 0.013%내에서 일치하였으며, 주파수응답해석을 수행하여 출력단에서의 진폭이 가장 크게 발생하는 것을 확인하였다. 초음파 용접시 초음파 진동에너지의 소모를 극소로 줄일 수 있도록 진동절면을 선정하여, 트랜스듀서의 제작 및 최적 설계가 가능함을 확인하였다.

후기

본 연구는 현장맞춤형기술개발사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. D. Yoo, " Design of Ultrasonic Welding Horn, Journal of KWJS, 26, 1, 9-11, 2008
2. Engminger, D, " Solid Cone in Longitudinal Half-Wave Resonance," Journal of the Acoustical Society of America, 32, 2, 194-206, 1960
3. Z. Y. Wang and K. P. Pajurkar, " Dynamic Analysis of the Ultrasonic Machining Process," Journal of the Manufacturing Science and Engineering, 118, 3, 376-381, 1996
4. J. P. Kang, " A Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn," Journal of the KSPE 8, 3, 55-63, 1991
5. C. K. Lee, " A Study on the Ultrasonic Weldability of the Dissimilar Plastics," Journal of the KWJS 9, 1, 48-57, 1991
6. C. K. Lee, B. J. Hwang and I. H. Heu, " Bonding of Electric wire by Ultrasonic Welding," Journal of the KSTME, 9, 4, 41-47, 2000
7. S. R. Kim, J. H. Lee, and C.D. Yoo, " Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding," Journal of the KWJS, 27, 4, 60-66, 2009
8. Xingyu Zhao, Fujun Wang and Dawei Zhang, " Design Methodolgy of High Frequency Ultrasonic Transducer for Wire Bonding," Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation
9. B.K. Lee, K. L. Kim and K. E. Kim, " Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM," Transactions of the KSMTE, 17, 6, 63-70, 2008