

60 kHz 초음파 공구 혼을 이용한 이종재료접합의 공정조건 최적화

이동욱¹, 전의식^{2*}

¹공주대학교 기계공학, ²공주대학교 기계자동차공학부

The optimization of processing condition of dissimilar material bonding using the 60 kHz ultrasonic transducer

DongWook Lee¹ and EuySick Jeon^{2*}

¹Division of Mechanical Engineering, Kongju National University

²Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 논문에서는 유리와 구리의 이종재료 접합을 위해 고유진동수를 60 [kHz]로 갖는 초음파 혼을 설계하고자 하였다. 초음파 혼의 입력단과 출력단의 단면비, 혼의 길이 등 관계식을 통해 설정하였으며 설계된 혼의 타당성 분석을 위해 모달해석을 수행하였다. 기초실험을 통하여 공정변수 및 반응변수를 설정하였으며, 초음파 공구 혼을 이용하여 이종재료 접합 강도 실험을 실시하였다. 또한 실험 결과를 통해 최적 공정조건을 도출하였다.

Abstract In this paper, the ultrasonic horn having the natural frequency with 60 [kHz] for the dissimilar material bonding of the glass and solder tried to be designed. The ultrasonic horn was designed through the relational formula including the aspect ratio of the input terminal and output terminal, length of the ultrasonic horn. The modal analysis was performed for the propriety analysis of the designed horn. The parameters and response was set through the basic experiment. The dissimilar material bonding strength analysis using the ultrasonic transducer was done. The optimal process parameters having maximum bonding strength was derived.

Key Words : Horn design, Modal analysis, Ultrasonic bonding, DOE

1. 서론

전자 부품의 소형화와 휴대성 증가를 목적으로 패키징 기술의 고집적화 및 미세접합기술의 적용이 증가되고 있다. 이러한 미세접합기술은 솔더링(Soldering) 접착제를 이용한 접합, 저항 및 레이저 용접, 초음파 접합 등이 있다[1]. 초음파 접합기술은 국부적인 열원을 가하기 때문에 도체를 용착하는 과정에서 발생하는 열의 영향을 최소화하여 제품의 소형화와 소재의 특성을 그대로 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 재료의 고기능화, 고성능화를 도모하기 위한 기술로 제품의 경량화 내

식성 및 도전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 초음파 접합을 이용한 이종재료간의 접합은 진공유리(Vacuum Glass), 태양전지(Solar cell)의 봉지 공정이나 LCD, PDP 및 플립 칩 본딩(Flip Chip Bonding) 등 다양한 산업분야에 적용되고 있으며, 향후 초음파를 이용한 이종재료 접합 기술의 적용분야는 확산 될 것이다. 선행연구로는 Kim[2] 등은 중방향 초음파를 이용한 솔더링 공정의 모델링을 수행하고 해석에 필요한 솔더의 물성치를 측정하였으며, Lee[3] 등은 난삭재의 미세가공에 이용되는 초음파 가공기의 공구혼 최적설계를 위하여 파동방정식을 이용하여 공구혼 형상치수를 계산하고 공진 주파수가 30

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업의 연구수행으로 인한 결과임

*Corresponding Author : EuySick Jeon(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9284 email: osjun@kongju.ac.kr

Received February 20, 2013

Revised March 6, 2013

Accepted March 7, 2013

[kHz]의 코니칼 혼을 제작하고 진동모드 특성을 FEM 해석을 통해 예측하는 연구를 하였다. 초음파 진동자 설계나 모델링에 대한 연구는 많이 연구되고 있지만 이중재료 접합에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다. 또한 이중재료 접합에 대한 연구는 대부분 가압방식을 이용하여 이중재료 접합을 수행하고 있다.

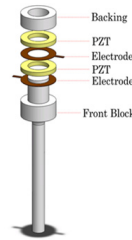
이에 본 논문에서는 유리와 구리의 이중재료 접합을 위해 고유진동수 60 [kHz]를 만족하는 종방향 초음파 혼을 설계하였고, 설계된 초음파 진동자의 모달 해석을 통해 혼 출력부의 종방향 변위 및 고유진동수를 확인하였다. 또한 60 [kHz] 초음파 진동자를 이용하여 가압방식이 아닌 솔더를 용융시킨 후 초음파를 인가하여 유리-구리간 접합을 실시하였다. 초음파 인가를 통해 유리와 구리간의 보이드, 홀 및 크랙을 제거하였다. 최적 공정조건을 도출하기 위해 실험계획법을 이용하여 실험을 실시하였고 유리-구리간 접합에 사용된 소재는 주성분이 인듐인 하나의 소재를 가지고 실험을 실시하였으며, 기초실험을 통하여 공정변수 및 반응변수를 설정하였다. 공정변수는 초음파 조사시간, 구동 전압을 설정하였고 반응변수는 유리-구리간 접합강도로 설정하였다. 접합강도를 측정하기 위하여 만능인장시험기(MTS 858)을 이용하여 유리-구리간 접합 강도 실험을 수행하였고 공정변수에 대한 최적 공정조건을 도출하기 위해 다구짜 실험계획법을 이용하여 실험을 실시하였다.

2. 초음파 진동자 해석

2.1 초음파 혼의 구성

초음파 접합 장치는 고주파 전원으로 진동자를 진동계 전체의 공진주파수로 공진 시키고, 이 진동을 진동공구에 전달하여 큰 진동진폭을 만들고 접합하고자 하는 대상에 압력과 진동에너지를 이용하여 접합하는 방식이다[4]. 란주방형 진동자는 변위를 증폭시키기 위해 Fig. 1과 같이 링 타입의 압전소자를 마주보도록 겹치고 그 사이에 금속 블록을 부착하여 볼트로 조인 BLT 구조이다. 압전소자는 구동신호를 받아 기계적인 진동으로 변환시킨다. Front block은 PZT에 발생한 미소 진동을 진동의 전파 방향으로 증가시키며, Backing은 PZT에 의해 상방향으로 파장을 반사시켜 하 방향으로 파장이 합산되게 한다. 볼트를 조임으로 압축강도에 비해 인장강도가 약한 압전세라믹의 단점을 보완할 수 있어 강력 진동에 무리를 가지 않게 할 수 있다. 또한 BLT 진동자는 일반적으로 공진점에도 값이 높아 에너지 손실이 적고 전기음향 변환

효과율이 90% 이상이며 역계수 값도 커 부하변동에서 안정된 출력이 나올 뿐만 아니라 금속블록 형태의 구조를 갖기 때문에 간단하며 분해 조립이 용이한 장점을 가지고 있다[5].



[Fig. 1] Bolt-clamped langevin type transducer

2.2 초음파 진동자 설계

초음파 진동자에서 발생하는 제한된 진폭은 이중재료를 접합하기에는 어려움이 있어 혼을 결합하여 그 진폭을 증가 시킨다. 또한 가공되는 혼의 형상에 따라 출력단면부의 형상이 달라지기 때문에 혼과 진동자는 탈부착이 가능하여야 한다.

초기 변위가 0이고 free-free 인 공구 혼의 길이는 식(1)에 나타낸바와 같이 매질의 탄성계 E와 밀도 ρ 및 가진주파수를 이용하여 계산이 가능하다.

식(2)는 모드 차수 및 식(1)을 통해 계산된 공구 혼의 길이를 통해 단면에서의 진동변수를 구하기 위한 식이다 [6].

경계조건은 대단면으로 부터 $l/1$ 의 위치에 x축의 원점을 잡으면 식(3)와 같이 도출이 된다. 이때 공진조건 식은 식(4)와 같이 만들어 지고 본 논문에서 설계한 스텝형 혼의 일반해 식이 된다. $x=0$ 의 점이 진동의 절점이 되기 때문에 공진조건이 되어 식(5)이 얻어진다. 도출한 관계식으로부터 60 kHz 초음파 혼의 출력 단면 비 및 혼의 길이 등을 도출하였다.

$$l = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$u = u_0 \cos \frac{n\pi}{l} x \sin \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} t \quad (2)$$

$$x = -l_1 \rightarrow \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0$$

$$x = -0 \rightarrow u_1 = u_2, \quad s_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} s_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}$$

$$x = l_2 \rightarrow u_2 = u_3, \quad s_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = s_3 \frac{\partial u_3}{\partial x}$$

$$x = -l_2 + l_3 \rightarrow \frac{\partial u_3}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

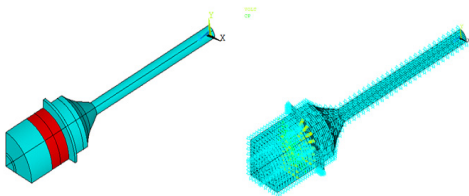
$$\tan \alpha l = \frac{\frac{s_3}{s_1} \tan \alpha l_3 + \frac{s_2}{s_1} \tan \alpha l_2}{1 - \frac{s_3}{s_2} \tan \alpha l_2 \cdot \tan \alpha l_3} \tag{4}$$

$$\tan \alpha l_2 \cdot \tan \alpha l_3 = \frac{s_2}{s_3} \tag{5}$$

where,

- E : 탄성계수 GPa
- ρ : 밀도(Density) kg/m^3
- l : horn의 길이 mm
- w_n : 공진주파수 Hz
- S : 단면적
- n : 모드의 차수
- u : 단면에서의 진동변위

2.3 초음파 혼의 Modal 해석



[Fig. 3] Modeling of stepped type horn

[Table 1] Material properties

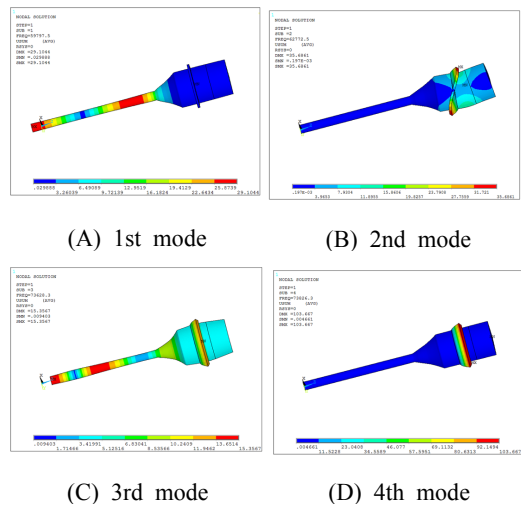
Part	Materials	Young's Modules (GPa)	Poisson Ratio	Density (kg/m^3)
Horn	Titanium	113.85	0.31	4,430
Actuator	PZT8	71	0.31	7,700

본 논문에서는 초음파 공구 혼의 고유진동수를 60 [kHz]로 설정하였다. 초음파 공구 혼은 종진동 모드를 나타내며 공구혼의 출력부에서 진폭의 종진동이 발생하는지를 알아보기 위해 유한요소 해석을 실시하였고 Brick, Couple 요소(Element)를 사용하였다. 경계 조건은 free-free 상태로 모드해석을 하였다. 초음파 공구 혼의 웨이브 가이드 재질은 마모율을 높이기 위해 표면 처리가 된 Titanium이며, 압전 소자는 기계 및 유전 손실이 적은

Hard 계열의 압전 세라믹(PZT8)을 사용하였다. 사용된 Titanium 물성은 Table 1과 같다.

2.4 결과 및 고찰

유한요소 해석 결과 진동모드에서 출력부의 종방향 변위가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 구해진 고유진동수는 Fig. 4의 (A)처럼 59797.4 Hz 공진주파수를 확인할 수 있었다. 진동자에서의 주파수 60 [kHz]와의 오차는 약 0.34%이므로 적절한 혼의 모델링 결과를 확인할 수 있었다. Table 2에 각 모드별 주파수를 나타내었다.



[Fig. 4] Modal analysis of BLT

[Table 2] BLT Natural frequency in 40-80 [kHz] range

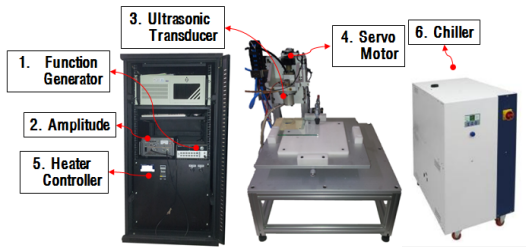
Part	Frequency (Hz)
1 st	59.80
2 nd	62.78
3 rd	73.62
4 th	73.83

3. 초음파 접합 실험 및 강도 실험

3.1 초음파 접합 실험 장치의 구성

60 [kHz] 초음파 진동자를 갖는 실험장치의 구성은 초음파 진동자를 구동할 수 있는 전기적 신호를 발생시키는 함수발생기(Function Generator)와 함수 발생기에서 들어온 전기적인 값을 증폭시키는 증폭기(amplitude), 입

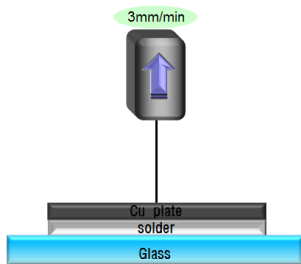
력된 전기적 신호를 진동에너지로 변환하고 대상물을 접합하는 초음파 공구 혼(Ultrasonic Horn), 솔더를 용융시키기 위한 히터(Heater), 히터의 온도를 조절할 수 있는 컨트롤러(Controller) 압전소자와 주변 기구물에 열 영향을 최소화하기 위한 냉각 장치 칠러(Chiller)로 구성 된다. Fig. 5는 60 [kHz]의 초음파를 갖는 초음파 접합장치를 나타낸 것이다. 또한 Table 3는 유리-구리간 접합에 사용된 솔더의 성분을 나타낸 것이다.



[Fig. 5] 60 kHz Ultrasonic bonding system

[Table 3] Component analysis of the solder

Element	Series	norm.C [wt, %]	atom.A [at, %]	Error [wt, %]
Carbon	K	6.41	30.16	3.39
Oxygen	K	7.83	27.64	5.15
Indium	L	85.76	42.20	8.26



[Fig. 6] Schematic diagram of bonding strength test

[Table 4] Process Parameters

	Parameters	Level		
		1	2	3
A	Bonding temperature (°C)	240	250	260
B	Distance(μm)	54	55	56
C	Driving time of ultrasonic (s)	20	25	30

[Table 5] Orthogonal array table L₉(3³)

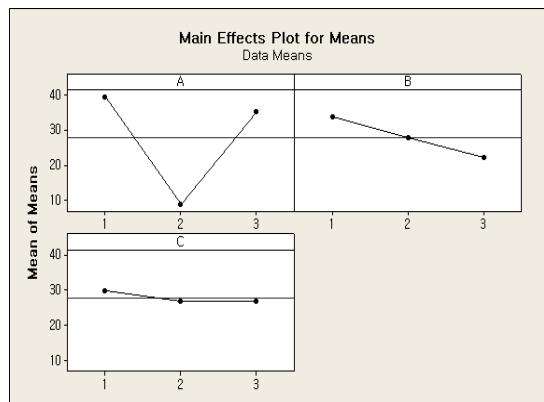
No.	A	B	C	Strength [N]	Strength [N]	S/N ratios
1	1	1	1	48	47	33
2	1	2	2	40	39	31
3	1	3	3	33	30	29
4	2	1	1	12	13	21
5	2	2	3	8	7	17
6	2	3	1	7	6	19
7	3	1	3	40	43	32
8	3	2	2	37	35	31
9	3	3	1	28	29	29

3.2 강도 실험장치의 구성

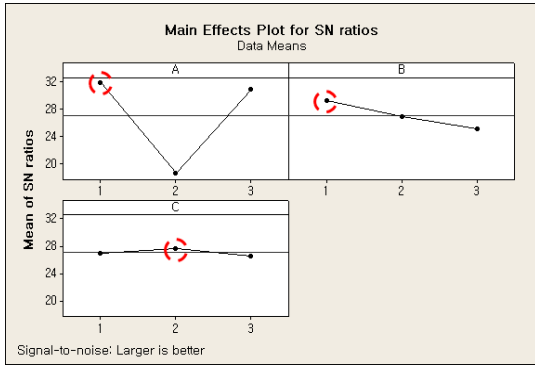
유리와 구리를 설계된 60 [kHz] 초음파 공구 혼을 이용하여 초음파 접합 후 Fig. 6의 만능인장시험기(MTS 858) 측정 장비를 사용하여 3 mm/min의 속도로 유리와 동판을 분리시키며 접합부의 강도를 측정하였다.

3.3 접합 실험 및 강도 실험

공정 변수로는 초음파 조사시간 및 접합 온도 그리고 거리로 선정하였으며 기초 실험을 통하여 공정 조건을 Table 4와 같이 설정하였다. 실험계획법을 이용하여 3요인 3수준계 L₉(3³)의 직교 배열표를 수립하였고 유리와 구리의 접합을 실시하였다. 반응변수는 유리와 구리사이의 접합강도로 설정하였으며 망대특성을 적용하였다. Table 5는 수립된 직교배열표와 실험결과 값을 나타낸 것이다.



[Fig. 7] Main effects Plot for Means



[Fig. 8] Main effects for S/N ration

3.4 실험 결과 및 고찰

실험결과 초음파 진동자를 이용하여 유리-구리 접합 강도에 큰 영향을 미치는 요인은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 접합온도(A)와 거리(B), 조사시간(C) 순으로 나타났다. Fig. 8을 통해 최적공정조건을 확인할 수 있다.

Table 6은 실험결과를 토대로 분산분석을 실시한 결과 초음파 접합 온도와 초음파 접합 거리에 대하여 P값이 0.05이하로 나타났고 95%이상의 유의성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 전체 시험에 대해서 R-square 99%로 분석되었다.

Table 7은 최적공정 조건을 도출한 결과이다. Table 7의 결과를 가지고 다구찌 기법의 예측 값과 실제 실험에 의한 결과 값의 비교를 통한 재현성의 검토가 필요하다. 결과 값을 예측하기 위해 식 (6)을 사용하였다.

[Table 6] Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F	P
A	2	1660.06	830.03	176.81	0.006
B	2	204.39	102.19	21.77	0.044
C	2	20.06	10.03	2.14	0.319
Error	2	9.39	4.69		
Total	8	1893.89			
S		2.16667	R-square	99.50%	

[Table 7] Result of optimal process condition

	Bonding temperature (°C)	Distance (μm)	Driving time of ultrasonic (s)
Value	240	54	25

$$\hat{u} = (A_1, B_1, C_2) = \bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2 - 2\bar{T} \quad (6)$$

where,

$\hat{u}(A_1, B_1, C_2)$ = 최적설계 안에서 평가 특성치 예측 값
 $\bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2$ = 각 설계인자의 해당 수준별 평가 특성치의 평균 값

\bar{T} = 전체 실험에 대한 특성치 평가 값

다구찌 결과 예측에 따른 유리-구리간 접합강도는 실제 실험한 결과 값과 비교를 하였을 때 최대 9%의 오차가 발생하였다. 이 결과는 다구찌 실험계획법을 통해 유리-구리간 접합강도의 최적 공정조건 도출에 대한 타당성을 나타낸다. Table 8은 유리-구리간의 접합 강도를 최적 공정조건에 대해 다구찌 결과 예측을 실시한 값과 추가 실험 결과 값을 나타낸 것이다.

[Table 8] Strength results of optimal proccs conditions

Level			Prediction	Experiment
A	B	C	Strength [N]	Strength[N]
1	1	2	44	40
				42
				48

4. 결론

본 논문에서는 이종 접합에 활용되는 60 [kHz] 란주반형 초음파 진동자를 설계하였고 최적 설계를 위해 운동방정식을 적용하여 혼의 형상과 치수를 결정하였다. FEM 해석을 통해 진동자에 작용하는 진동 모드 특성과 공진 주파수를 확인하였다. 혼의 해석 결과 출력단면에서의 고유 진동수는 60 [kHz]와 비교를 하였을 때 0.34%내에서 일치하였다.

또한 설계된 초음파 진동자를 이용하여 유리-구리간 이종재료 접합을 실시하였다. 접합시 접합 강도에 영향을 미치는 공정변수를 설정하였고 실험계획법을 이용하여 접합을 실시하였다. 분석결과 접합강도에 큰 영향을 미치는 요인은 구동전압, 거리, 조사시간 순으로 나타났고 실험 결과를 토대로 최적 공정조건을 찾아 낼 수 있었다. 실험에 대한 타당성을 검증하기 위해 다구찌 기법의 예측 값과 실제 실험에 의한 결과 값을 비교하였다.

향후 유리-구리간 접합강도를 증가 시키기 위해 유리-구리간 이용되는 솔더의 종류를 변경하여 접합실험 및 강도 실험을 실시할 계획이다.

References

- [1] J. S. Seo, S. D. Park R. Ahuja, K. D. Hong, K. S. Hong, et al., "Establishment of Conditions for Ultrasonic in Welding of Cu Sheet", Proc, J. of The Korean Society of Machine Tool Engineers, pp. 282-287, April, 2010.
- [2] J. H. Kim, J. H. Lee, J. D. Yoo, D. S. Choi, et al., "Modeling of Soldering Process using Longitudinal Ultrasonic", Proc, J. of The Korean Welding and Joining Society, pp. 65-70, April, 2003.
- [3] B. G. Lee, K. L. Kim, K. E. Kim, et al., "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM", Proc, J. of The Korean Society of Machine Tool Engineers, pp. 63-70, October. 2008.
- [4] H. S. Jang, W. Y. Pack, S. D. Park, et al., "Optimal Design of Tool Horn for Ultrasonic Metal Welding ", Proc, J. of The Korean Society Manufacturing Technology Engineers, pp. 263-267, May, 2011.
- [5] S. L. Lee, H. J. Choi, S. W. Lee, N. B. Lim, G. Ch. Lee, Ch. H. Kim, et al., "Development of Ultrasonic Machine (I)", Proc, KITECH, June, 1996.
- [6] Willam T.Thomson, Marie Dillon Dahleh,. "Theory of vibration with applications 5/e.", 1998.

전 의 식(Euysic Jeon)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1989년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학, 반도체-자동차공학

이 동 욱(Dong-Wook Lee)

[준회원]



- 2012년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학학사)
- 2012년 3월 : 공주대학교 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>

초음파 접합, 진동