

# 휴대폰 배터리 단자접합 초음파 가공을 위한 한파장 혼 설계

서정석\*, 장성민<sup>+</sup>, 백시영<sup>++</sup>

(논문접수일 2011. 07. 26, 수정일 2011. 09. 14, 심사완료일 2011. 09. 26)

## One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding

Jeong-Seok Seo\*, Sung-Min Jang<sup>+</sup>, Si-Young Beck<sup>++</sup>

### Abstract

The technique with ultrasonic vibration refers to the many industries. Especially Ultrasonic Connection Method is widely used for mobile battery, secondary battery, automobile components and also they recently started using it for terminal connecting of solar community battery. In this study, ultrasonic welding horn is analysed and designed with FEM, then manufactured based on it. Resonance frequency and amplitude of horn would be measured and compared with the designing result to judge the suitability. Al/Al specimen is welded by the manufactured horn and verify its performance via the weldability evaluation.

**Key Words :** Ultrasonic metal welding(초음파 금속 용착), Terminal welding(단자접합), Frequency analysis(주파수분석), Horn(혼)

## 1. 서론

초음파 진동을 이용한 기술은 기계, 전기, 전자 등 전 산업부 분야에서 적용되고 있으며 그 중 초음파 용착은 접착 및 접합기술의 일종으로 첨단산업분야에서 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 최근 이종재료간의 접합이 새로운 필수 기술로 인식되면서 중요성을 인식하게 되었으며, 특히 제품의 소형화와 소재의 특성을 그대로 유지할 수 있는 고상접합 기술을 이용한다는 점에서 더욱 각광 받고 있다.

고상접합기술은 신금속 및 신소재의 개발과 첨단산업의 발달로 크게 발전한 기술로서 모재의 용융점 보다 더 낮은 온도에서 접합하는 브레이징(Brazing), 확산접합, 마찰용접 등이 있다<sup>(2)</sup>.

초음파 용착은 마찰용접의 일종으로 솔더(Solder)와 같은 보조물이 필요하지 않아 경제적이고 친환경적인 기술이다. 1초 내외의 접합 시간으로 자동화 공정에 주로 사용되며 핸드폰 배터리, 이차전지 단자접합, 자동차 부품의 접합에 많이 사용되어 지며 최근에는 신 성장 동력인 태양열 전지의 단자접합에도 사용되고 있다<sup>(3,4)</sup>.

초음파 용착 혼의 설계 기술은 미국, 일본, 유럽에서 많이 발전하여왔으며<sup>(5-7)</sup> 국내에서도 그 기술이 점차 발전하고 있다. 특히 금속 용착용 혼의 경우 외국의 기술에 뒤지지 않는 수준이다<sup>(8-10)</sup>.

본 연구에서는 고품질의 용착을 목적으로 휴대폰 배터리 단자접합에 사용되는 혼의 최적 설계를 위하여 유한요소법(Finite Elements Method)을 이용하여 해석하였으며, 혼을 제

\* 인천대학교 기계공학과 대학원  
+ 조선이공대학 선박해양·기계과  
++ 교신저자, 순천향대학교 산학협력단 (beck@sch.ac.kr)  
주소: 336-745 충남 아산시 신창면 읍내리 646번지

작하고 공진주파수 측정과 금속용착 실험을 통한 검증을 수행하였다.

## 2. 초음파 혼의 설계

### 2.1 한파장 혼의 기초

초음파 혼은 용착물에 직접 맞닿아 가압하는 동시에 진동자로부터 변환된 기계적 진동 에너지를 전달하는 진동공구이다.

혼의 재질은 용착물보다 높은 강도와 경도를 가져 강한 진동에 견디고 쉽게 마모되지 않아야 한다. 일반적으로 티타늄이나 공구강 등이 사용된다.

혼은 형상에 따라 원추(Conical)형과 지수함수(Exponential)형, 단부가(Step)형 등으로 나뉘며 진폭의 증폭효과는 단부가형이 가장 좋으나 응력집중으로 인하여 안정성이 떨어져 지수함수형이나 원추형 혼이 더 많이 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 선단에서 큰 진폭비를 얻을 수 있는 단부가형 타입을 선택하여 혼을 설계하였다.

봉의 탄성계수  $E$ , 봉의 밀도  $\rho$ , 봉속을 전파하는 음속  $c$ , 변위  $u$ , 시간  $t$ 라 하면 단면적이 일정한 균일 봉의 진동은 식 (1)과 같은 1차원 파동 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

위 식에서 봉의 중심축에  $x$ 를 놓으면 식 (2)과 같이 되며 여기에서  $S_x$ 는 봉의 단면으로부터 거리가  $x$ 가 되는 점의 단면적,  $u_x$ 는 그 단면에서의 진동변위이다.

$$S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서, 혼의 경계조건으로 식 (3)을 이용하면 식 (4)와 같은 공진 조건을 얻을 수 있다. 단,  $\tan \varphi_n$ 은 식 (5)과 같으며  $n$ 은 제  $n$ 차의 공진을 나타낸다<sup>(5,9,11)</sup>.

$$x=0 \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \quad x=l \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$l_n = n \frac{c}{2f_n} \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_n} \quad n=1,2,.. \quad (4)$$

$$\tan \varphi_n = \frac{1}{2\pi n} \log_e \left( \frac{S_2}{S_1} \right) = \frac{\gamma l_n}{2\pi n} \quad (5)$$

혼의 길이를  $l$ 이라 할 때 양단에 자유로운 혼의 고유진동수

는 식 (6)과 같다.

$$w_n = \frac{n\pi}{l} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

$\lambda$ 는 종진동 진행파의 길이로  $\lambda = c/f_n$ 이다. 한파장 혼에서는 혼의 중심부에서 최대변위를 얻어야 하므로 혼의 길이를  $n=1$ 인 종진동 진행파의 파장  $\lambda$ 를  $l$ 로 결정한다. 구해진 길이를 참고하여 혼의 형상과 진폭 증폭비에 맞춰 공진주파수에 적합한 길이를 결정하게 된다.

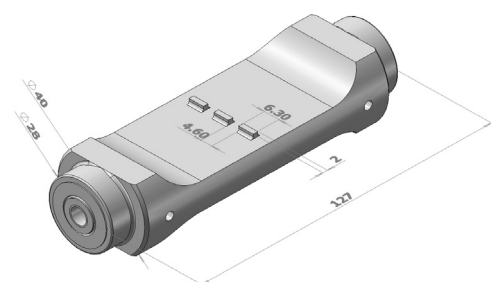
### 2.2 한파장 혼의 설계

본 연구에서 한파장 혼은 양쪽대칭의 형상을 가지고 양단지기로 사용되는 안정적인 용착을 목적으로 설계되었다. 초음파 장비의 요구 주파수는  $40\text{kHz} \pm 500\text{Hz}$ 로서 이를 벗어나게 되면 초음파 발전이 되지 않아 장비가 작동하지 않는다. 따라서 설계 시 고유진동수는 이 범위 안에 있어야 한다. 혼은 용착 대상물에 가압력을 인가한 상태에서 기계적 횡진동을 전달하므로 용착시키는 진동공구이다.

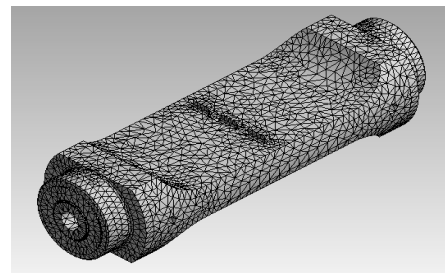
설계제작에 사용된 혼의 소재는 분말고속도공구강(HAP)으로 높은 경도와 우수한 진동 특성을 가지며 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of hom material

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density	Hardness
242.5GPa	0.30	8.21g/cm <sup>3</sup>	HRC 68



(a) 3D Modeling



(b) Auto mesh analysis

Fig. 1 FEM modal of one-wave length horn

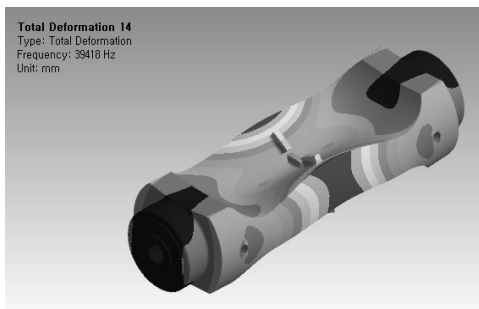
혼의 형상은 Fig. 1과 동일하며 치수는 전장 127mm, 직경 Ø40mm, 6.3mm×2mm의 3포인트 팁을 가지며 40kHz 대역의 한파장 혼을 설계하였다. 혼의 치수는 공식과 경험적인 지식을 적용하였으며 팁의 치수는 용착물에 맞게 설계하였다. 양단지지 혼은 양쪽의 탭에 볼트를 체결하여 한쪽은 진동자 다른 한쪽은 혼을 고정시키는 더미 부스터를 장착하여 사용한다.

혼의 해석은 3D 모델링 한 뒤 FEM 해석 프로그램인 ANSYS에서 모델링 한 혼을 자동 메쉬(Mesh)를 이용하여 나누었다.

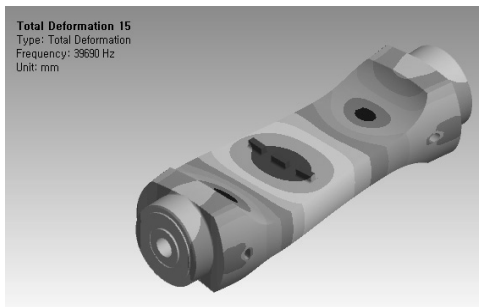
### 2.3 초음파 혼 해석

설계한 혼의 진동모드와 고유진동수를 알기위해 ANSYS Tool을 사용하여 모드 해석을 수행하였다. 혼의 경계조건으로 진동자(Converter)와 부스터(Booster)의 볼트체결부에 실린더 구속을 주어 축 방향으로 자유변위를 주었다.

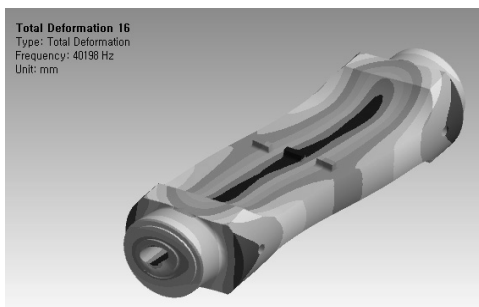
Fig. 2는 FEM해석을 통해 설계된 혼의 모드 해석 결과이다.



(a) 14th mode



(b) 15th mode



(c) 16th mode

Fig. 2 Modal analysis result

40kHz로 출력하는 진동자를 사용하는 혼으로 혼의 단면 비에 의한 최대진폭을 얻기 위해 단차를 두어 대칭을 이루는 형상으로 예비실험을 통해 여러 모델을 FEM해석하여 총 기장 L=127mm의 혼을 설계하였다.

Fig. 3은 최적 설계된 혼의 30차 모드까지 해석한 결과로 15차 모드에서 금속용착에 적합한 진동모드가 나왔으며, Table 2는 진동 모드에 따른 고유진동수 값으로 15차 모드에서의 고유진동수는 39,690Hz이다.

이와 같은 결과는 40kHz ± 500Hz에 들기 때문에 적합한 고유진동수로 판단된다. 가진부와 출력부에서 진폭비를 알아보기 위해 39,690Hz에서 Harmonic 해석을 수행하였다. 진폭비는 혼의 가진부와 출력부의 질량비로 결정되며 진폭비가 높을수록 혼은 불안정하다.

Fig. 4에서 가진부 수치는 40kHz 진동자의 진폭인 8μm이며 출력부의 수치는 12.9μm로 약 1:1.6의 증폭률을 가진다는 것을 알 수 있다. 진폭을 더 높이거나 낮출 수 있으나 안정적인 작동

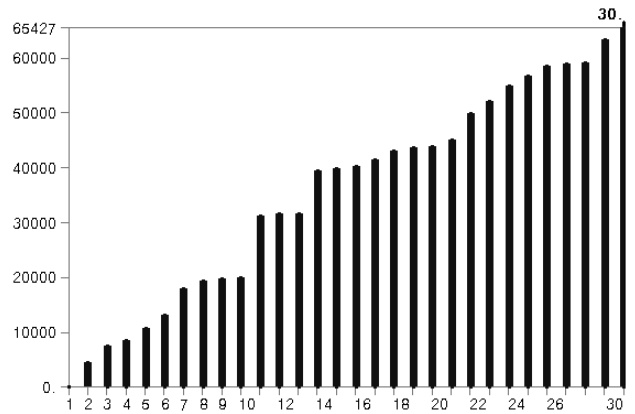


Fig. 3 1st to 30th modal analysis result

Table 2 Natural frequency mode

Mode	Natural frequency (Hz)
14 (a)	39,418
15 (b)	39,690
16 (c)	40,198

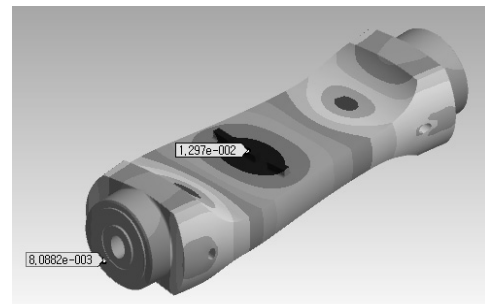


Fig. 4 Harmonic analysis result

이 목적이기 때문에 지금의 증폭률을 유지하기로 하였다.

### 3. 초음파 혼의 검증

#### 3.1 초음파 진동주파수 분석시스템

현재 사용되는 장비들은 생산용으로서 측정용은 아니지만 혼의 고유진동수를 자동적으로 탐색하여 진동을 전달해주는 기능이 있다. 하지만 장비에서 전달하는 고유진동수와 혼에서 발생하는 고유진동수는 완전 동일하다고 볼 수 없으므로 혼의 고유진동수를 측정할 장비가 필요하게 된다.

초음파 진동주파수 분석시스템은 최대 100만 Hz까지 측정이 가능하다. Fig. 5는 시스템의 구성을 나타낸 것으로, 센서부는 광센서(Optical sensor)로서 빛의 반사를 감지해서 아날로그 전압데이터를 전달하게 되며 A/D 보드에서 데이터를 변환한다. 센서에서 측정된 데이터는 FFT를 통해 고유진동수와 진폭을 측정한다. Table 3은 초음파 광센서의 사양을 나타낸 것이다.

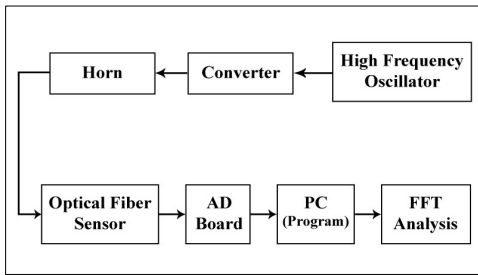


Fig. 5 Block diagram of ultrasonic vibration frequency analysis system

Table 3 System option of Optical sensor

Model	D63-H1T4
Total range	3mm
Linear range	0.76mm
Nominal standoff	0.66mm
Nominal sensitivity	2.8mv/ $\mu$ m
Resolution DC-100kHz	0.1 $\mu$ m
Minimum measurement Spot	2.1mm

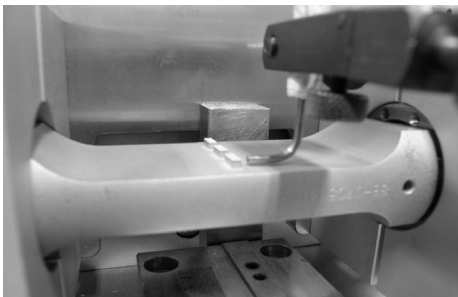


Fig. 6 Photograph of horn & optical sensor set up

#### 3.2 설계검증

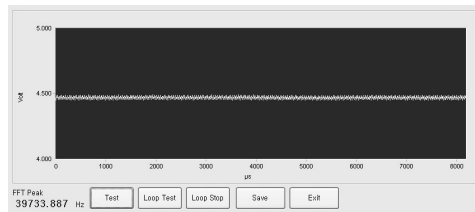
혼과 광센서를 세팅할 때는 Fig. 6과 같이 진동 출력부의 진동 방향에 맞춰 최대한 직각도를 유지하도록 설치 후 측정해야 정확한 측정 결과가 나오게 된다.

광센서로 측정된 데이터를 주파수 분석기에서 FFT를 통하여 혼의 고유진동수와 진폭을 측정하게 되는데 결과는 Fig. 7과 같다.

고유진동수는 39,724Hz이고 진폭은 12.7 $\mu$ m로 측정되었다. 해석결과인 39,690Hz와 비교할 때 오차는 1% 범위 안에서 존재하며 40kHz  $\pm$  500Hz 범위에 존재한다. 또한 실험에 사용된 진동자의 진폭이 8 $\mu$ m이므로 출력부에서 나온 12.7 $\mu$ m와 비교



(a) Analysis wave



(b) Suitability estimation

Fig. 7 Natural frequency & peak amplitude according to FFT analysis

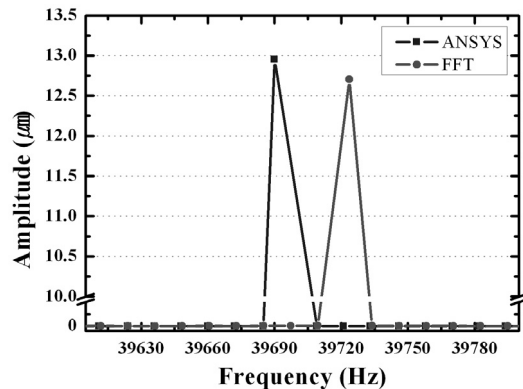


Fig. 8 Comparison of harmonic analysis result and natural frequency by FFT analysis result

했을 때 약 1:1.58의 증폭률을 갖는다. 따라서 Harmonic 해석을 통해 얻은 1:1.6과 거의 일치하는 결과를 보이므로 최적의 혼이 설계되었다고 판단 할 수 있다(Fig. 8).

#### 4. 초음파 혼 금속 용착 실험

##### 4.1 혼의 제작 및 시편

분말고속도공구강(HAP)을 사용하여 양쪽대칭의 형상을 갖는 직경 Ø40mm, 전장 127mm, 40kHz 대역의 한파장 혼을 제작하였다. 팁의 형상은 6.3mm×2mm로 3포인트로 직경의 단차부에 라운딩 처리를 하여 응력집중현상을 완화시키고 내마모성 및 용착 품질 향상을 위해 TiN 코팅 처리를 하였다. 시편은 초음파 금속용착 변수에 따른 용착성을 평가하기 위해 두께 0.2mm의 Al/Al 박판을 사용하였다. 시편의 규격은 KS B 0851 규격에 따라 가로 60mm, 세로 10mm의 크기로 제작하였으며, 합금조성이 99%이상인 순수 알루미늄 Al1050을 사용하였다.

##### 4.2 용착성 평가 실험

Fig. 9은 한파장 혼을 사용하도록 제작된 초음파 금속 용착기이다. 혼은 양단을 고정하여 장착되며 한편에는 진동자가, 다른 반대편은 부스터가 장착되는 구조로 용착기의 주요사양은 Table

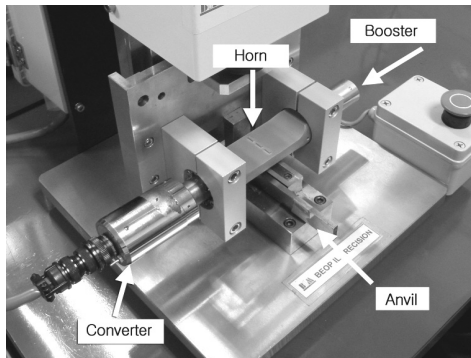


Fig. 9 Ultrasonic metal welder for one-wavelength horn



Fig. 10 Tensile tester for experimental of welding strength

4에 나타내었다.

초음파 용착의 주요 변수로는 시간, 압력, 진폭이 있다. 시간을 변화시키면 전체 공정에 영향을 주고 압력을 일정이상 가하면 진동 시 저항을 받기 때문에 일반적으로 진폭을 주요 변수로 본다.

본 실험에서는 Al/Al 시편은 압력 0.25MPa, 시간 0.25sec로 고정된 후 50~100%(µm)의 진폭을 10%씩 변화를 주어 각각의 조건 당 10개의 시편을 만들어 총 60개의 시편을 용착하였다.

용착된 시편의 용착성을 평가하기 위해 최대 1,000N의 인장강도 측정이 가능한 인장시험기를 이용하여 Al/Al 시편의 인장강도 평가를 수행하였다. 인장시험기는 Fig. 10에 나타내었으며, 그 사양은 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Specification of ultrasonic metal welder

Welding parameters	Ranges
Power	800watts
Frequency	40kHz
Welding speed	2m/min
Pneumatic cylinder	φ40
Pressure	0.1 - 1.0MPa
Converter amplitude	8 - 9µm

Table 5 Specification of tensile tester

Model	QC-508E
Capacity	1000N
Max. travel	400mm
Space	φ100mm
Speed	5 - 500mm/min
Force resolution	1/5000N
Stroke resolution	5µm
Dimension	400 × 300 × 600mm
Power	100 - 240 VAV1 φ2A

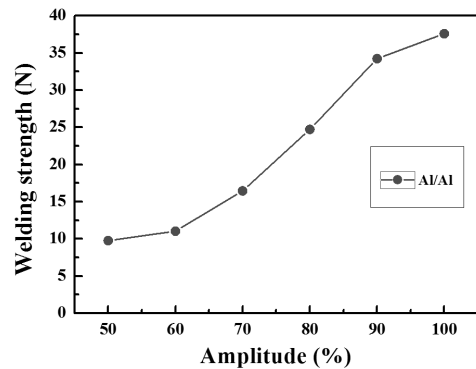


Fig. 11 Relation between welding strength and amplitude (pressure 0.25MPa, welding time 0.25sec)

### 4.3 실험결과

Fig. 11은 Al/Al 시편의 인장시험 결과이다. 용착강도는 진폭이 50%일 때 9.8N에서 100%일 때 37.6N까지 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 진폭 100%에서 인장강도 테스트 중 용착면이 떨어지지 않고 시편이 붙어있는 상태에서 파손되는 현상을 보였다. 그러나 혼을 설계하고 제작하여 단자접합에 적용하는 데에는 문제가 없는 것으로 사료되며, 인장시험 결과만으로 볼 때 효과적인 용착이라고 판단된다.

이와 같은 연구개발 결과는 여러 형상의 다양한 혼을 제작하는데 있어 불량률을 감소시키고 제작비용을 줄일 수 있으며 원하는 주파수 대역과 증폭률을 가지는 혼을 설계 개발할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 휴대폰 배터리 단자 접합을 위한 40kHz 대역의 초음파 가공용 한파장 혼의 최적 설계를 목적으로 혼의 출력부에서 최대 진폭을 가지는 혼을 설계하고 FEM을 이용하여 진동모드와 진폭을 해석하였다. 또한 설계된 혼을 제작하여 실제 고유진동수와 진폭을 측정하여 검증하였고 용착성 평가를 위한 인장시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FEM 해석 결과 고유진동수는 39,690Hz, 가진부와 출력부의 진폭비는 약 1:1.6이다.
- (2) 설계한 혼을 제작하여 고유진동수와 진폭을 실험적으로 파악한 결과 고유진동수는 39,724Hz, 최대 진폭은 12.7 $\mu$ m 그리고 증폭비가 약 1:1.58임을 확인 하였다.
- (3) FEM 해석과 실제 실험 결과에서 고유진동수, 진폭의 차이는 1% 이내로 거의 일치하는 것으로 나타나 최적의 혼을 설계 개발하였다고 할 수 있다.
- (4) Al/Al 시편의 인장강도 테스트 결과 압력 0.25MPa, 시간 0.25sec에서 진폭이 증가할수록 용착면의 인장강도가 증가하였으므로 우수한 용착면을 예상할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim J. H., Lee J. H., Yoo C. D., and Choi D. S., 2002, "Development of Ultrasonic Bonding Process for Micro Components," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 11, No. 7, pp. 596~600.
- (2) Maruo, H., Seki, Y., Unami, Y., and Ominato, T.,

- 2004, "Ultra Flip Chip Bonding on FPC," *Fujikura Technical Review*, pp. 36~39.
- (3) Koo, J. M., Kim, J. W., Yoon, J. W., Noh, B. I., Lee, C. Y., Moon, J. H., Yoo, C. D., and Jung, S. B., 2008, "Ultrasonic Bonding Technology for Flip Chip Packaging," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 31~35.
- (4) Imai, H., and Matsuoka, S. I., 2005, "Finding the Optimum Parameters for Ultrasonic Welding of Aluminum Alloys," *JSME International Journal*, Vol. 48, No. 4, pp. 311~316.
- (5) Amin, S. G., Ahmed, M. H. M., and Youssef, H. A., 1995, "Computer-aided Design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-element Analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, Issues. 3~4, pp. 254~260.
- (6) Yang, Y., Janaki Ram, G. D., and Stucker, B. E., 2009, "Bond Formation and Fiber Embedment during Ultrasonic Consolidation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, Issue. 10, pp. 4915~4924.
- (7) Elangovan, S., Semeer, S., and Prakasan, K., 2009, "Temperature and Stress Distribution in Ultrasonic Metal Welding - An FEA-based Study," *Journal of materials Processing technology*, Vol. 209, Issue. 3, pp. 1143~1150.
- (8) Yoo C. D., 2008, "Design of Ultrasonic Welding Horn," *Journal of KWJS*, Vol. 26, No. 1, pp. 9~11.
- (9) Beck, S. Y., and Jang, S. M., 2010, "One-wave Step Horn Design for Ultrasonic Machining for Metal Welding," *The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 4735~4741.
- (10) Lee B. G, Kim K. L., and Kim K. E., 2008, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63~70.
- (11) Lee, S. W., 2001, *A Study on the Conditioning for Improvement of Grinding Accuracy*, A Thesis for a Doctorate, Pusan National University, Republic of Korea, pp. 24~30.