

초음파 금속 용착기를 이용한 Cu 박판의 용착성 실험

장호수*, 박우열⁺, 박동삼⁺⁺

(논문접수일 2011. 09. 06, 수정일 2011. 09. 15, 심사완료일 2011. 09. 30)

The Establishment of Bonding Conditions of Cu Using an Ultrasonic Metal Welder

Ho Su Jang*, Woo Yeol Park⁺, Dong Sam Park⁺⁺

Abstract

Ultrasonic metal welder is consisted of power supply, transducer, booster, and horn. Precise designing is required since each parts' shape, length and mass can affect driving frequency and vibration mode.

This paper analyzed Cu sheet deposition characteristics using ultrasonic metal welder and tension tester. A horn suitable for 40,000Hz was attached to the ultrasonic metal welder in order to weld Cu plates. The Cu sheet welding was done with different amplitude, pressure, and welding time, and its maximum tension was measured with tension tester. Maximum tension of 153.87N was obtained when the pressure was 2.0bar, amplitude was 80%, and welding time was 0.30s. Therefore, excessive welding condition negatively influences maximum tension measurement result.

Key Words : Ultrasonic Metal Welding(초음파 금속 용착), Modal Analysis(모달해석), Harmonic Analysis(하모닉해석), FFT(FFT 주파수 분석), Tensile Test(인장시험)

1. 서론

최근 반도체, 통신기기들의 정밀화, 경량화, 소형화가 빠르게 진행됨에 따라 기존방식보다 더욱 안전하고 정밀하게 접합할 수 있는 기술의 필요성이 요구되고 있다. 근래 소비자들이 가전 제품, 전기 제품 등의 다기능화를 요구함으로써 신호처리가 빠른 고성능 반도체 칩 개발을 통해 소비자 욕구를 충족시키려 하고 있다. 기존의 용착방식인 솔더(Solder)를 이용한 고온 용착방식은 열의 영향을 많이 받는 고성능, 다기능 반도체 부품들의 용착에 어려움이 있는데, 이러한 열의 매우 민감한 반도체 부품 용착의 어려움을 저온 용착⁽¹⁾ 방식인 초음파 용착 방식으로 해결하고자 연구가 진행되고 있다⁽²⁾.

초음파 금속 용착 기술은 상온에서 용착이 가능하고 용착시간이 수초 이내로 짧으며 전기적인 특성 및 신뢰성이 좋은 동시에 용착 매개물이 필요 없는 직접용착기술이기 때문에 용착공정이 간단하고 제조원가가 낮은 장점을 가지고 있다⁽³⁾.

초음파 금속 용착의 접합기술은 국부적인 가열을 통하여 접합공정에서 열팽창계수 차이로 발생하는 열응력을 최소화하면서 초정밀 IT부품을 접합하는 공정을 지칭한다. 초음파 금속 용착은 전기에너지를 진동에너지로 변화한 후 금속용착의 적합하도록 증폭시켜 액츄에이터(Actuator)의 가압부를 용착물의 밀착시켜 마찰시킨 후 냉접부(Cold weld)를 형성하기 때문에 금속을 저온에서 접합시킬 수 있다. 또한 용착시간 및 용착에 의한 접촉 저항의 측면에서도 매우 우수한 것으로 발표되었

* 인천대학교 기계공학과 대학원 (jang9714@incheon.ac.kr)
주소: 406-772 인천광역시 연수구 송도동 12-1번지 인천대학교 공과대학 A동 207호
+ 인천대학교 기계공학과 대학원
++ 인천대학교 기계공학과

고⁽⁴⁾, 진동에 의한 마찰 에너지는 두 용착면 사이에서 상대적인 수평 혹은 수직 움직임에 의해 발생하는데, 용착계면에서 발생한 진동 에너지는 계면에 분산된 금속의 산화막과 불순물을 제거해 가며 용착하기 때문에 기존 용착 기술로 접합이 어려웠던 동종금속이나 이종금속의 용착에 용이할 뿐만 아니라⁽⁵⁻⁶⁾, 솔더를 이용하지 않아 친환경적인 장점이 있다.

초음파 금속 용착기는 두 금속 부재에 상하로 작용하는 압력에 의해 혼의 부재와 접촉, 진동이 전달되어 용착이 이루어 지는데, 용착 과정중 혼의 양 끝에 작용하는 가압을 제어시키고, 진동이 전달되는 진동자, 혼을 상하로 움직여 부재와 접촉, 용착이 이루어지게 하는 구동부 전체를 액추에이터라 한다.

액추에이터는 상하구동기구부와 가압제어기구부로 크게 나누어진다. Fig.1은 액추에이터를 포함한 초음파 금속 용착기의 주요 핵심부를 나타낸 것으로, 주요 핵심부는 50 or 60Hz 전류를 20-40KHz 전기에너지로 변환시키는 파워서플라이(Power Supply)와 전기에너지를 기계적 진동에너지로 변환시키는 진동자(Converter), 진동자의 진폭(Amplitude)을 증폭 또는 감소시키는 부스터와 금속부재에 진동에너지를 전달하여 용착시키는 혼으로 구성된다⁽⁷⁾.

초음파 금속 용착에서 적용되는 중요한 용착 변수로는 용착 압력, 용착 시간, 진폭이며 건전한 상태의 용착을 얻기 위해서는 이 변수들이 최적으로 설정이 이루어 져야만 하며, 용착 압력이 증가 할수록 인장강도가 증가하고 적정범위를 넘어서게 될 경우 과도한 변형에 의해 오히려 하락하는 경향을 나타낼 수 있으며, 적절한 인장강도를 얻기 위해서는 적절한 가압력이 정해져야 하며, 적정 가압력의 범위 내에서 진폭을 변화시킬 필요가 있다⁽⁷⁻⁸⁾.

본 연구에서는 Cu 소재의 박판을 초음파 금속 용착기를 이용하여 용착성 평가하기 위하여 유한요소 해석을 통하여 혼을 설계 및 제작 하였고, 초음파 금속 용착기와 인장 시험기를 이용해 용착성 평가를 수행하여 Cu 박판의 최적의 용착 조건을 찾고자 하였다.

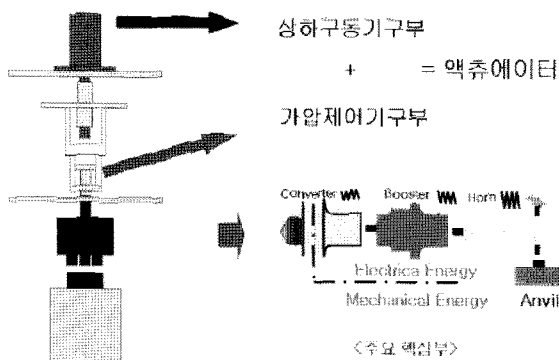


Fig. 1 Structure of ultrasonic metal welding machine

2. 유한요소 해석

혼의 주요 기능은 사용자가 원하는 수준의 진폭을 얻을 수 있도록 진동을 증폭하고 진동자에서 발생한 진동에너지를 용재에 전달하는 역할을 한다⁽⁹⁾.

혼은 통상 반파장의 공명체로 그 재질은 일반적으로 알루미늄 합금이나 티타늄 합금이 사용되고 있는데, 음향학적 성질과 강도 성질이 우수한 티타늄 합금이 넓게 쓰이고 있다. 그중에서 본 연구에서는 티타늄 합금을 사용하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 티타늄 합금의 물성치를 나타내었다.

봉의 길이를 L이라 할 때 이 값이 봉의 반파장의 정수배와 공진을 한다. 봉의 단면적이 일정한 균일봉의 진동 방정식은 (1)과 같다. 이때 E는 Young 윌, u는 축방향 변위, $\partial u / \partial x$ 는 축방향 변형률, $f(x,t)$ 는 단위 길이당 외력, c는 매질내 음속, k는 파수, λ 는 파장이다.

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) + f(x,t) = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t) \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,t) = 0 , \frac{\partial u}{\partial t}(l,t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + k^2 U = 0 , \lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

자유진동 방정식 (2)는 식 (1)을 $f=0$ 으로 하여 얻을 수 있다. 경계 조건인 식 (3)은 양단 자유조건이며, 축방향의 운동이 가능하여 양단 자유조건으로 설정하였다.

식 (3)을 $u(x,t)=U(x)\exp(i\omega t)$ 로 변수분리 하여 정리하면 변위진폭 U(x)의 관한 식 (4)가 되고, 식 (4)에서 봉의 고유진동수를 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

식 (5)은 혼의 끝부분에서 최대 변위가 나타나도록 하기 위해

Table 1 Material of horn

Properties	Titanium alloys
Density	4.5g/cm ²
Poission's Ratio	0.34
Young's Modulus	116GPa

전체 길이는 종진동 방향의 파장인 λ 은 1/2 길이로한 최대 변위 진폭을 가지게 하는 혼의 공진 길이 L 이다⁽⁸⁾. Fig. 2는 설계한 혼의 2D 도면이다.

설계한 혼을 ANSYS Tool을 이용하여 Modal 해석과 Harmonic Response 해석을 수행 하였다. Fig. 3은 Modal 해석을 수행한 결과로 40,000Hz에 근접한 39,956Hz의 해석 결과를 얻을 수 있었으며, Fig. 4는 Fig. 3의 최적 설계된 혼의 입력면에 30,000Hz 에서 50,000Hz 까지의 주파수를 가진 했을 때 출력면인 팁 부분에서의 주파수 응답을 위해 Harmonic Response 해석을 수행한 결과로 Modal 해석 결과와 비슷한 39,933Hz를 얻을 수 있었다.

설계된 혼의 검증을 위하여 티타늄 합금 소재를 이용하여 혼

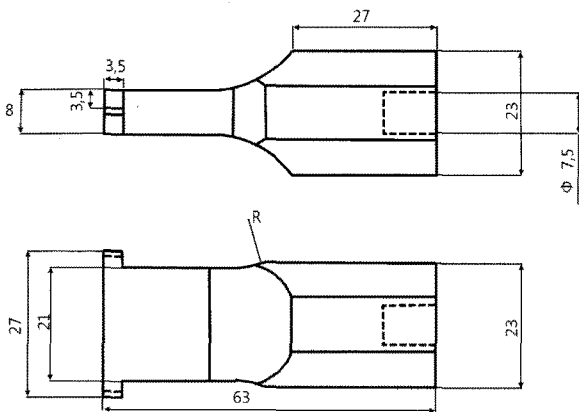


Fig. 2 Drawing of horn

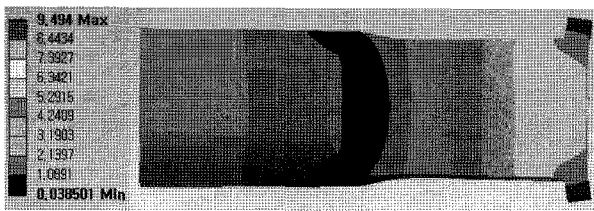


Fig. 3 Modal analysis of the horn

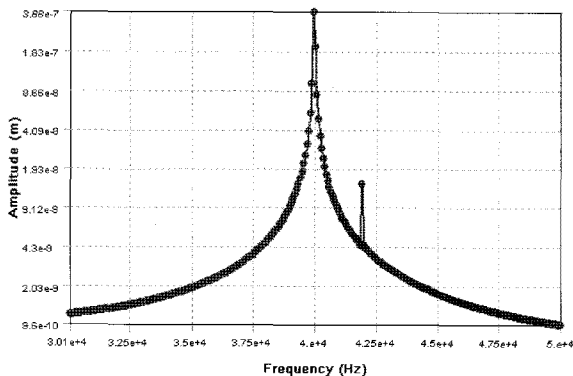


Fig. 4 Harmonic analysis result of the horn

을 제작하였으며, 광센서(Optical sensor)를 이용하여 혼의 진폭을 측정하였다. Table 2는 광센서의 주요 사양을 나타내었다.

광센서로 진폭을 측정할 때 혼의 축 방향 진동 진폭의 정확한 측정을 위해 혼 출력면에 직각이 되도록 측정하여야 한다. 광센서에 의하여 측정된 약 4,000여개의 전압 측정값을 받아 센서의 민감도(Sensitivity)에 따라 진폭값을 얻고 Origin Tool을 이용하여 FFT 분석을 하였다. 그 결과 40,000Hz에서 RMS진폭 값이 약 8.6 μ m이다. Fig. 5은 광센서의 측정하는 과정이며, 혼의 최대 진폭은 약 12.5 μ m로 나왔으며, Fig. 6에 나타내었다

Table 2 Specification of optical sensor

Model	D63-H1T4
Total range	3mm
Linear range	0.76mm
Nominal standoff	0.66mm
Nominal sensitivity	2.6mV/ μ m
Resolution DC-100kHz	0.1 μ m
Minimum measurement spot	2.1mm

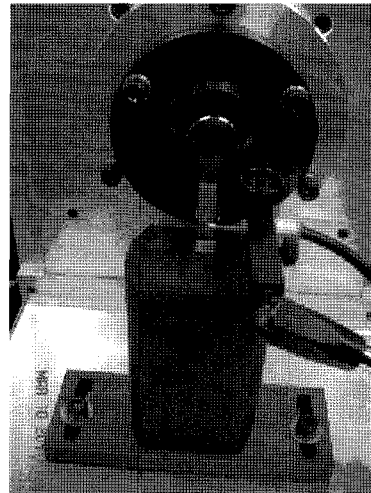


Fig. 5 Optical sensor set up

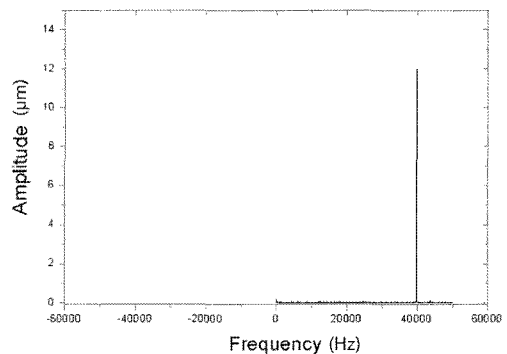


Fig. 6 Natural frequency spectrum by FFT analysis

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 7은 Cu 박판의 용착성 평가를 위해 이용한 초음파 금속 용착기이며, 초음파 금속 용착기의 주요 성능은 Table 3에 나타 내었다.

Fig. 8은 Cu 박판의 용착성 평가를 위한 최대 인장력을 측정 하는 인장시험기이며, 주요 성능은 Table 4에 나타 내었다.

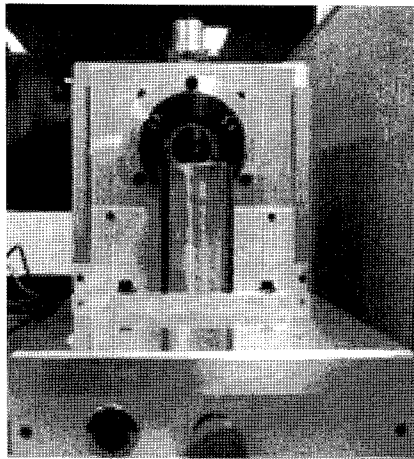


Fig. 7 Ultrasonic metal welder

Table 3 Specification of ultrasonic metal welder

Welding parameters	Ranges
Power	800W
Working Frequency	40kHz
Welding speed	3m/min
Pneumatic cylinder	Φ 50
Pressure	0 ~ 14MPa
Amplitude	7 ~ 18μm

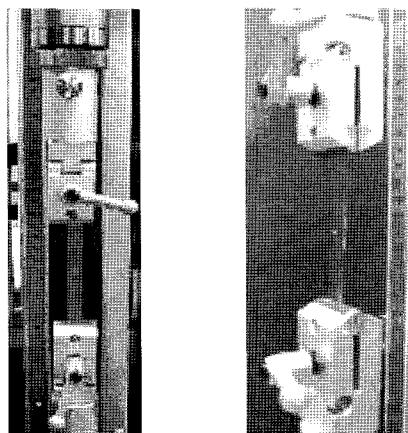


Fig. 8 Tensile tester

Table 4 Specification of tensile tester

Capacity	1KN
Max. travel	400mm
Space	Φ 100mm
Speed	5-500mm/min
Force resolution	1/5000
Stroke resolution	0.005mm
Dimension	400×300×600mm
Power	100~240 VAV1 Φ 2A

3.2 실험 방법

초음파 금속 용착기의 용착성 실험을 수행하는 소재로는 각종 전자 부품의 단자부에 많이 사용 되는 Cu 소재를 사용 하였 으며, Fig.9에서 나타낸 것과 같이 양면 모두 50mm×10mm ×0.1mm로 제작하였으며, 용착부는 각 소재의 가로 10mm, 폭 10mm 부분을 포개어 용착시험을 수행하였다.

초음파 금속 용착의 용착성 평가 실험에서 중요한 용착 변수로는 용착 가압력(Pressure), 용착 시간(Welding time), 진폭 (Amplitude)이 있는데, 용착 대상의 소재 종류나 크기 또는 혼 의 형상에 따라 다양한 용착조건을 가지게 된다.

본 연구에서는 최적의 용착조건을 찾기 위해 진폭 40%일때 의 압력 1.5, 2.0bar의 조건과 진폭 60%일 때 압력 1.5, 2.0bar, 80%일 때 1.5, 2.0bar로 변수를 지정하였으며, 각 조건마다 Cu 박판의 용착 시간에 따른 용착성을 알아보기 위해 0.04s~0.34s 의 용착변수로 각각 10개의 시편을 용착하였으며, 인장시험기 를 이용하여 최대 인장력 시험을 수행하였다.

Table 5는 Cu 박판의 초음파 금속 용착의 최적 조건을 찾기 위한 초음파 금속 용착기의 접합 조건을 나타내었다.

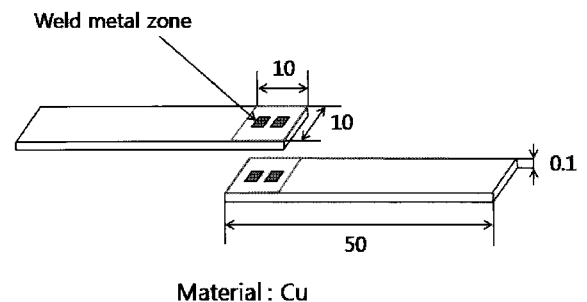


Fig. 9 Drawing of the metal welding condition

Table 5 Welding condition of ultrasonic metal welding

Welding Pressure (Bar)	0.15, 0.2
Amplitude (%)	40, 60, 80
Welding Time (sec)	0.04~0.34

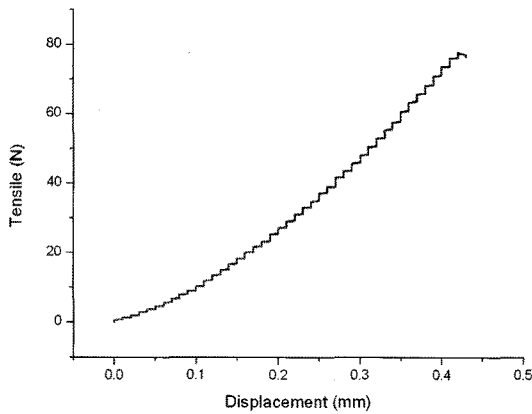


Fig. 10 A graph of the tensile load (0.10s, 2bar, amplitude 60%)

Fig. 10은 초음파 금속 용착기를 이용하여 실험 조건중 0.2s의 용착시간, 2.0 Bar의 압력, 60%의 진폭의 조건으로 Cu 박판을 용착하여 Fig. 8의 인장 시험기를 이용하여 최대 인장력을 측정할 것을 나타낸 것으로, 최대 인장력은 0.426mm의 이송거리와 77.86N의 최대인장력을 보였다. 이와 같은 측정 방법으로 각 용착 조건마다 최대 인장력을 측정하여 Cu 박판의 최대 인장력의 값을 얻을 수 있었다.

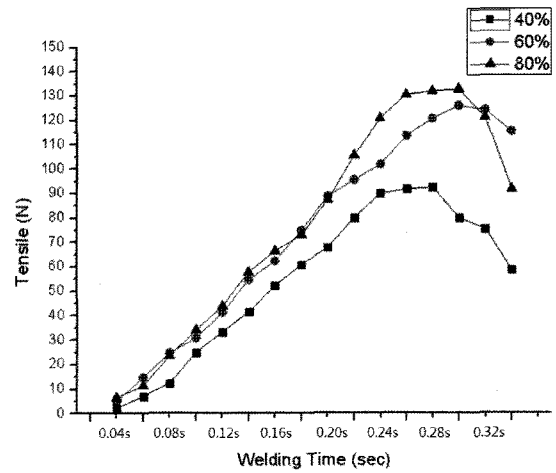
4. 실험 결과

Cu 박판을 Fig. 9와 같은 크기로 제작하여 초음파 금속 용착기를 이용하여 Table 5의 조건으로 각 조건마다 10개씩의 시편을 용착하여 인장시험기로 최대 인장력 값을 측정하였으며, 각 조건 10개의 결과를 최대, 최소값을 뺀 후 평균값을 계산하여 결과를 도출하였다.

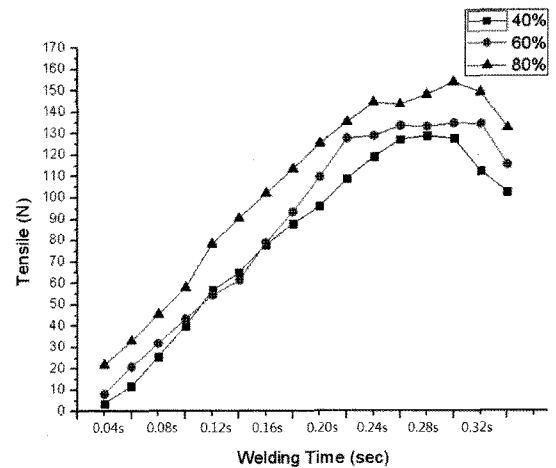
Fig. 11 (a)는 압력 1.5bar일때 진폭 40, 60, 80%의 초음파 금속 용착 조건에서 인장력 측정 결과 값을 나타낸 것으로, 진폭에 따른 최대 인장력이 비슷함을 알 수 있었다. 0.04s~0.20s 용착시간에서 진폭 60%와 80%의 조건이 비슷한 최대 인장력을 보였는데, 이는 상대적으로 낮은 압력과 진폭으로 인하여 용착성이 악화된 것으로 보인다.

Fig. 11 (b)는 압력 2.0bar일때 진폭 40, 60, 80%의 초음파 금속 용착 조건에서 인장력 측정 결과 값을 나타낸 것으로, 진폭변화에 따른 최대 인장력이 비례하여 높아짐을 알 수 있었다. 0.30s의 용착시간을 갖는 최대 인장력의 결과값부터는 오히려 인장력이 하락하는걸 볼 수 있는데 이는 과도한 용착 조건에서는 오히려 인장력에 악영향을 미친다는것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 Cu의 최적 용착조건을 찾기 위해 압력 1.5bar, 2.0bar의 조건에 진폭 40, 60, 80%의 조건으로 실험을 진행하였으며, 최대 인장력은 압력 2.0bar, 진폭 80%, 용착시간 0.30s의 조건에서 153.87N을 보였다.



(a) Welding pressure 1.5bar



(b) Welding pressure 2.0bar

Fig. 11 Relationship between the welding time and tensile load

5. 결론

Cu 박판의 초음파 금속 용착을 위해 40,000Hz 혼을 설계 및 제작하여 검증하였다. 또한, Cu 박판의 용착성 평가를 위해 인장시험기를 이용하여 최대 인장력을 측정하였으며, 이를 통해 Cu 박판의 초음파 금속 용착성 시험 및 초음파 금속 용착의 접합조건 연구의 결론을 다음과 같이 얻었다.

- (1) 40,000Hz의 가진 주파수와 공진이 발생하는 고유진동수 40,000Hz의 값을 얻기 위하여 혼의 길이 “L”을 봉의 진동 방정식을 통하여 결정하였다.
- (2) 혼의 형상변수 “b”를 정수배만큼 변화를 주어 Modal 해석을 수행하였고, 그 결과 39,956Hz의 고유 진동수를 얻을 수 있었으며, Harmonic 해석을 통하여 39,933Hz의 고유 진동수를 얻었다.
- (3) 혼을 제작하여 혼의 출력부인 팁 부분에 광센서를 사용하

여 중방향 최대 변위치를 측정하였다. 그 결과 12.5 μ m의 결과를 얻을 수 있었다.

- (4) Cu 박판의 초음파 금속 용착 조건중 압력 2.0bar, 진폭 80%, 용착시간 0.30s의 조건에서 최대 인장력 153.87N의 결과를 얻을 수 있었다.
- (5) 압력 2.0bar 40, 60, 80%의 진폭의 조건에서 용착시간 0.30s부터 최대 인장력 결과값이 하락하는데 이는 과도한 용착조건에서는 인장력에 악영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.
- (6) 압력 2.0bar 진폭 40, 60%조건인 최대 인장력 측정 결과값에서 0.04s~0.18s의 용착시간을 갖는 용착조건에서는 비슷한 결과값이 나오는 걸 알 수 있었는데, 압력, 진폭, 용착시간 이 세가지 조건을 충족하지 못하였기에 나오는 결과값으로 과도한 용착 조건에서는 인장력에 오히려 악영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 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, No. 3, pp. 1143~1150.
- (2) Song, Y., Yim, B. S., Jeong, J. S., and Kim, J. M., 2010, "ACF Flip Chip Bonding using Thermosonic" *The Korea Society of Mechanical Engineers autumn conference*, pp. 141-142.
- (3) Lee, C. K., Hwang, B. J., and Heu, I. H., 2008, "Bonding of Electric Wire by Ultrasonic Welding," *Journal of the Korean Society of machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 41~47.
- (4) Furukawa, R., 2002, "High Pin-count Ultrasonic Flip-chip Bonding and Plasma Cleaning Technology," *Proceedings of 9th Annual KGD Workshop*, Napa, California.
- (5) Jung, J. P., 2008, "Ultrasonic Bonding of Electronic Parts," *The Korean Welding and Joining Society autumn conference*, pp. 7~9.
- (6) Kim, H. T., 2004, "Joining of Aluminum Alloys to Dissimilar Metals by Ultrasonic Soldering," *ReSeat monitoring Information analysis report*, pp. 1~6.
- (7) Wnek, J., n.d., viewed 14 May 2010, "Ultrasonic Metal Welding for Wire Splicing and Termination," <http://www.amtechultrasonic.com/articles_theory.asp>.
- (8) Lee, B. G., Kim, K. L., and Kim, K. E., 2008, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17. No. 6. pp. 63~70.
- (9) Seah, K. H. W., Wong, Y. S., and Lee, L. C., 1993, "Design of Tool Holders for Ultrasonic Machining using FEM," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, No. 1-4, pp. 810~816.
- (10) Rao, S. S., 2004, *Mechanical Vibrations 4th Edition*, Korea, pp. 623~624.