

# Cu박판의 초음파 금속 용착 실험을 통한 용착성 평가

박우열\*, 장호수<sup>+</sup>, 김정호<sup>+</sup>, 박동삼<sup>++</sup>

(Manuscript received: May, 7, 2012 / Revised: Jun, 12, 2012 / Accepted: Jun, 19, 2012)

## Evaluation of the Weldability of Cu Sheet through the Ultrasonic Metal Welding Experiment

Woo Yeol Park\*, Ho Su Jang<sup>+</sup>, Jung Ho Kim<sup>+</sup>, Dong Sam Park<sup>++</sup>

### Abstract

The Ultrasonic metal welding is used in the solid-phase welding method at room temperature or low temperature state. In welding process, the high frequency vibration energy is delivered to the welding part under the constant pressure for welding.

In this study, we aimed to design and manufacture a 40,000 Hz band horn through finite element analysis. By performing modal analysis and harmonic response analysis, the modal analysis result is that the horn frequency was 39,599Hz and the harmonic response result that the horn frequency was 39,533Hz. These results were similar. In order to observe the designed horn's performance, about 4,000 voltage data was obtained from a light sensor and was analyzed by FFT analysis using Origin Tool. The result RMS amplitude was approximately 8.5 $\mu$ m at 40,000Hz, and maximum amplitude was 12.3 $\mu$ m.

Using this manufactured horn along with an ultrasonic metal welder and tension tester, the weldability of Cu sheets was evaluated. The maximum tensile force was 66.53 N in the welding condition of 2.0 bar pressure, 60% amplitude, and 0.32 s welding time. In excessive welding conditions, it was revealed that weldability is influenced negatively.

**Key Words :** Ultrasonic Metal Welding(초음파 금속 용착), Modal Analysis(모달 해석), Harmonic Analysis(하모닉 해석), FFT(FFT 주파수 분석), Tensile Test(인장시험)

## 1. 서론

최근 기계 부품의 소형화, 정밀화로 인해 미세 용착기술이 각광받고 있으며, 이런 용착 기술은 다양한 산업분야에서 기존의 용착 방식보다 더 정밀하고 안전하게 용착하는 기술 중 초음파 금속 용착 기술의 활용이 커지고 있다.

초음파 금속 용착은 용착 시간 및 용착에 의한 접촉 저항 측면에서도 매우 우수한 것으로 알려져 있고, 연구결과에 의하면 초음파 금속 용착에 의한 플립 칩 장착 기법이 초미세 핀 간격에 대응할 수 있는 가장 우수한 방법으로 발표 되었다<sup>(1,2)</sup>. 또한, 초음파 금속 용착은 일반적인 솔더(Solder) 방식을 사용하지 않아 친환경적인 기술이다<sup>(3)</sup>.

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

초음파 금속 용착은 진동에 의한 금속의 확산현상으로 산화막과 불순물을 제거해가며 용착하기 때문에 전기적 저항이 적고<sup>(4)</sup>, 기존의 방법으로 접합하기 어려운 동종금속이나 이종금속도 용착이 가능하며, 용착시간이 매우 짧아 금속에 가해지는 영향이 타 용착방법에 비해 적어 얇은 박판의 용착에 주로 쓰이고 있다<sup>(5,6)</sup>.

초음파 금속 용착의 과정은 파워서플라이(Power supply)를 통해 들어온 전기적 에너지가 진동자(Transducer)를 통하여 기계적인 진동에너지로 바뀐 뒤 부스터(Booster)로 그 진폭(amplitude)을 증폭시켜 형성된 초음파 에너지를 혼(Horn)을 통하여 금속 부재에 전달한다<sup>(7)</sup>. Fig. 1은 초음파 금속 용착기의 주요 핵심부를 나타낸 것이다.

초음파 금속 용착은 두 금속부재에 상하로 작용하는 압력에 의해 혼이 부재와 접촉, 진동이 전달되어 용착이 이루어진다. 용착과정 중 혼의 양 끝에 작용하는 가압을 제어시키고, 진동이 전달되는 진동자, 혼을 상하로 움직여 부재와 접촉, 용착이 이루어지게 하는 구동부 전체를 액츄에이터라 한다.

초음파 금속 용착의 순서는 진동자와 용착공구 혼에 밀착된 소재의 위치 선정 후 용착공구에 일정하중을 가한 상태에서 모재와 접촉하여 초음파의 진동이 시작된다<sup>(8)</sup>.

초음파 금속 용착에서 적용되는 중요한 용착 변수(Welding parameter)로는 용착압력(Welding Pressure), 용착시간 (Welding time), 진폭(Amplitude)이 있다. 건전한 용착을 얻기 위해서는 이 변수들이 최적으로 이루어져야만 하며, 용착압력이 증가 할수록 인장강도가 증가하지만 적정범위를 넘어서게 될 경우 과도한 변형에 의해 오히려 하락하는 경향을 나타낼 수 있으므로 최적의 인장강도를 얻기 위해서는 적절한 가압력이 정하고, 정해진 적정 가압력의 범위 내에서 진폭을 변화시킬 필요가 있다<sup>(7,10)</sup>.

본 연구에서는 각종 전자 부품의 단자부에 많이 사용되는 Cu 소재의 박판을 초음파 금속 용착기를 이용한 용착성을 평가하기 위하여 유한요소법으로 혼을 설계하고, 초음파 금속 용착기를 이용하여 용착 변수에 따른 인장 강도를 인장시험기를 이용하여 평가함으로써 Cu 박판의 용착성을 확인하였다.

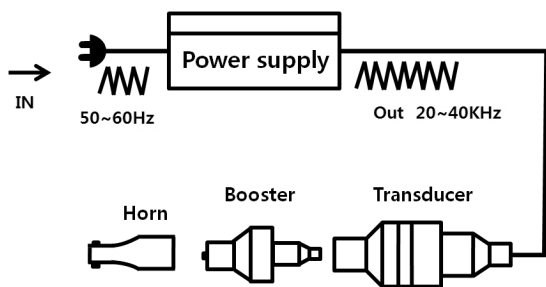


Fig. 1 Structure of ultrasonic metal welding machine

## 2. 혼의 설계

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<sup>(9)</sup>. 금속 용착의 경우 횡진동이 쓰이며 Fig. 2는 횡진동을 사용하는 초음파 금속 용착을 도식화 하였다.

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

Table 1은 본 연구에 사용된 티타늄 합금의 물성치를 나타내었다.

혼의 설계 시 가장 중요하게 여기는 변수는 혼 재료의 가진 주파수에 따른 파장이다. 이 파장은 공구 혼의 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<sup>(10)</sup>.

초음파 금속 용착시 혼의 용착 팁에 진동이 전달되기 때문에 혼에 대한 공진설계가 매우 중요하다. 본 연구는 진동자가 40,000Hz의 고유공진 특성을 갖기 때문에 초음파 에너지가 효율적으로 전달될 수 있도록 공진주파수가 40,000Hz이고 혼의 용착 팁에서 원하는 증폭도를 얻을 수 있도록 Fig. 3과 같이 혼을 설계하였다. 혼의 길이는 파장의 1/2이고, 초음파 진동의 진폭은 혼

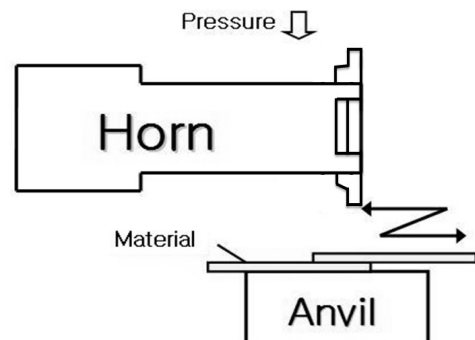


Fig. 2 Basic principle of ultrasonic metal welding

Table 1 Material properties of horn

Properties	
Density	4.5g/cm <sup>3</sup>
Poission's Ratio	0.34
Young's Modulus	116GPa

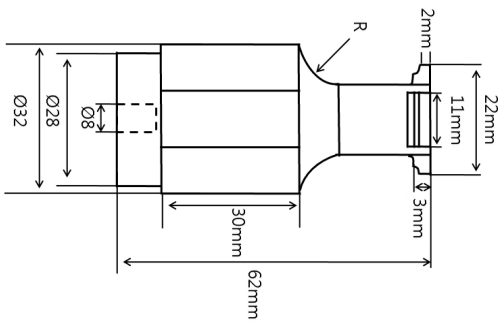


Fig. 3 Drawing of horn

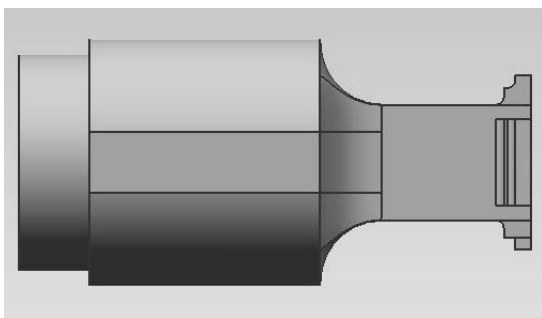


Fig. 4 Modeling of horn

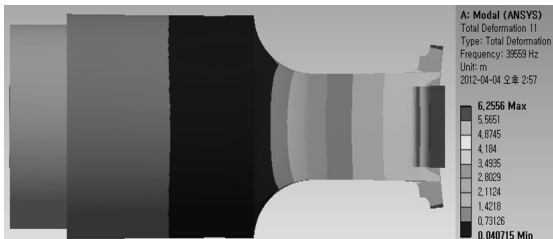


Fig. 5 Modal analysis of horn

의 끝에서 최대가 되므로, 용착 탑은 horn의 끝에 위치하게 된다.

Fig. 3은 설계한 horn의 2D 도면이며 Fig. 4는 설계한 horn의 모습이다.

설계한 horn을 해석 Tool을 이용하여 Fig. 5와 같이 modal 해석을 수행한 결과 10차 mode에서 진동자의 고유진동수에 근접한 39,559Hz의 공진특성을 갖는 횡 진동 모드의 운동을 보였다.

Fig. 6은 Harmonic 해석을 통해 horn의 tip 부분에서의 진동 응답을 진동수와 최대 진폭을 그래프로 나타낸 것으로 40,000Hz와 근접한 39,533Hz에서 가장 큰 진폭을 나타냈으며, modal 해석과 비슷한 결과를 보였다.

40,000Hz의 공진주파수를 갖는 horn을 최적 설계하여, 제작 가능성을 검토하였으며, 이를 제작하여 horn의 공진주파수에서의 진폭을 구하고자, Optical Sensor를 이용하여 4096개의 측정된 진폭값을 Origin을 이용해 FFT분석을 수행 하였으며, 그 결과 RMS

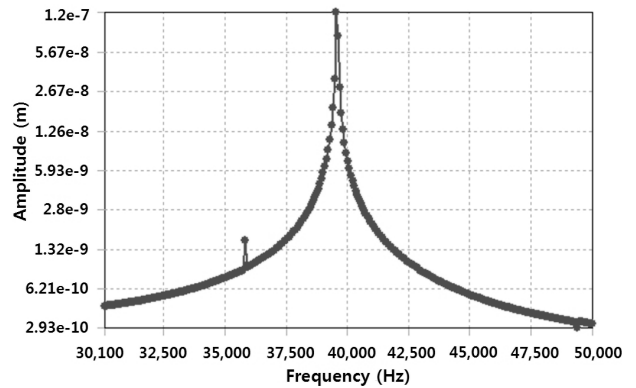


Fig. 6 Harmonic analysis result of the horn

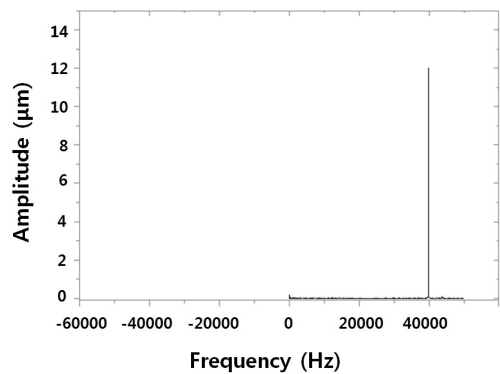


Fig. 7 Natural frequency spectrum by FFT analysis

진폭 값이 8.5um이 나왔다. Fig. 7은 유한요소 해석의 최대 진폭 값과 비교를 하기 위해 제작된 horn의 최대 진폭값을 나타낸 것으로 그 값은 약 12.3um으로 해석 결과와 비슷한 것을 확인하였다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Fig. 8은 Cu 박판의 용착성을 평가하기 위해 사용한 초음파 금속 용착기로 주요성능은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 9는 Cu 박판의 용착성 실험을 위한 최대 인장력을 측정하는 인장시험기로 주요 성능으로는 1kN, 1/5,000의 분해능을 가진 장비이며 주요 성능은 Table 3에 나타내었다.

#### 3.2 실험 방법

초음파 금속 용착기의 용착성을 테스트하는 소재로는 Cu 박판으로 하였으며, Fig. 10에서 나타낸 것과 같이 양면 모두 50×10×0.1mm로 제작하였으며, 용착부는 각 소재의 가로 10mm, 폭 10mm 부분을 포개어 용착시험을 수행하였다.

Cu 박판의 초음파 금속 용착기의 용착성 실험에서 용착의 변수로는 용착시간(Welding time), 압력(Pressure), 진폭(Amplitude)

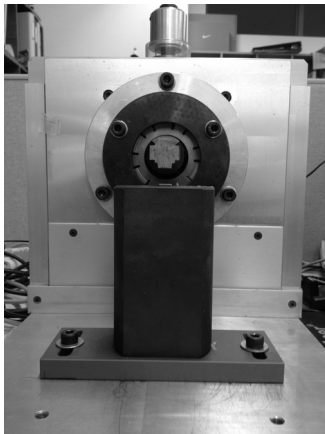


Fig. 8 Ultrasonic metal welder

Table 2 Specification of Ultrasonic metal welder

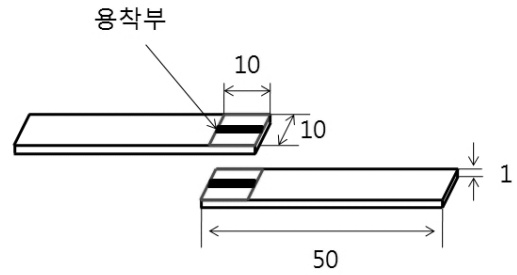
Welding parameters	Ranges
Power	800W
Working Frequency	40kHz
Welding speed	3m/min
Pneumatic cylinder	Φ 50
Pressure	0~14MPa
Amplitude	7~18㎜



Fig. 9 Ultrasonic metal welder

Table 3 Specification of tensile tester

Capacity	1kN
Max. travel	400mm
Space	Φ 100mm
Force resolution	1/5,000
Stroke resolution	0.005mm
Dimension	400×300×600mm
Power	100~240 VAV1 Φ 2A



Material : Cu

Fig. 10 Drawing of the metal welding condition

Table 4 Welding condition of ultrasonic metal welding

Welding Pressure (bar)	1.5, 2.0
Amplitude (%)	40, 60, 80
Welding Time (s)	0.10~0.34

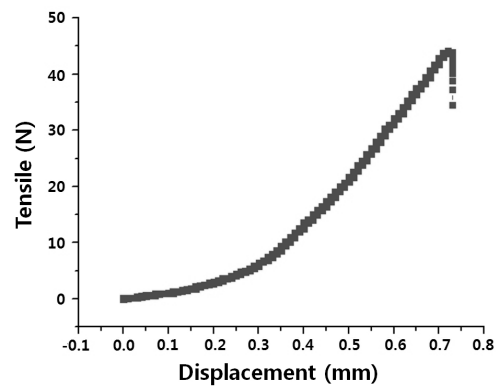


Fig. 11 A graph of the Tensile Load (0.24s, 1.5bar, amplitude 60%)

의 변수가 있는데 용착 대상의 소재 종류나 크기 또는 흔의 형상에 따라 다양한 용착조건을 갖게 된다.

본 연구에서는 최적의 용착조건을 찾기 위해 용착시간, 압력, 진폭을 변수로 실험을 수행 하였으며, 일정한 압력과 진폭에 따라 용착시간을 0.10~0.34초의 변화를 주어 Cu 박판의 초음파 금속 용착성을 평가 하고자 하였다.

Table 4는 Cu 박판의 초음파 금속 용착성을 평가하기 위한 초음파 용착기의 용착조건을 나타내었다.

Fig. 11은 초음파 금속 용착기를 이용하여 실험 조건 중 압력 1.5bar, 진폭 60%, 용착시간 0.24초로 Cu 박판을 용착하여 Fig. 8의 인장 시험기를 이용하여 최대 인장력을 측정된 것을 나타낸 것으로, 최대 이송거리 0.731mm, 최대 인장력은 44.13N을 나타내었다. 이와 같은 측정 방법으로 각 용착 조건마다 최대 인장력을 측정하여 Cu의 용착시간에 따른 최대 인장력의 값을 얻을 수 있었다.

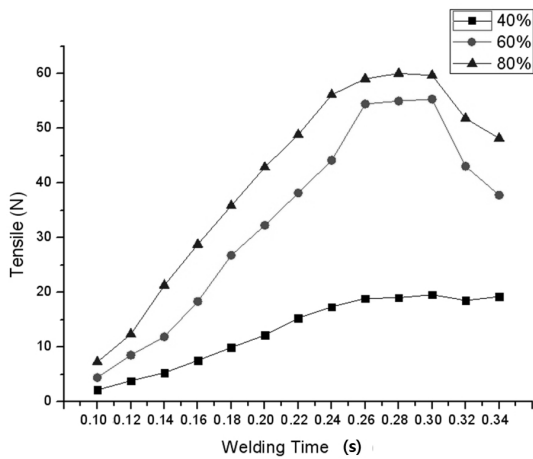


Fig. 12 Relationship between the welding time and tensile load (Welding Pressure 1.5 bar)

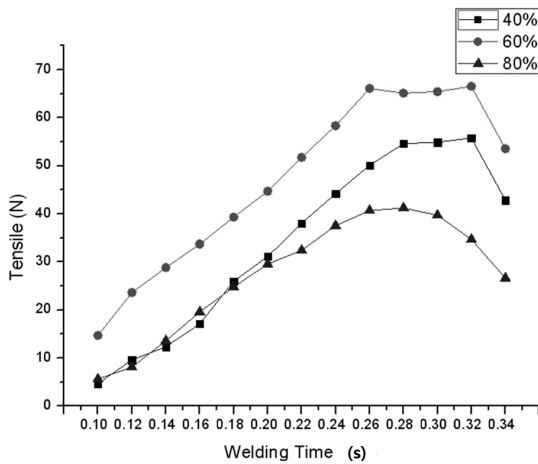


Fig. 13 Relationship between the welding time and tensile load (Welding Pressure 2.0 bar)

#### 4. 실험 결과

Cu 박판을 Fig. 10과 같은 크기로 제작하여 초음파 금속 용착기를 이용하여 Table 4의 조건으로 각 조건마다 10개씩의 시편을 용착하여 인장시험기로 최대 인장력 값을 측정하였으며, 각 조건 10개의 결과를 최대, 최소값을 뺀 후 평균값을 계산하여 결과를 도출하였다.

Fig. 12는 압력 1.5bar일 때 진폭 40, 60, 80%의 초음파 금속 용착 조건에서 인장력 측정 결과 값을 나타낸 것으로, 진폭에 따른 최대 인장력이 비례하여 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 13은 압력 2.0bar일 때 진폭 40, 60, 80%의 초음파 금속 용착 조건에서 인장력 측정 결과 값을 나타낸 것으로, 진폭 80% 일 때의 최대 인장력은 40, 60% 일 때 보다 낮은 것을 알 수 있었는데, 이를 통해 용착조건이 과도하게 되면 오히려 최대 인

장력이 낮아져 용착성이 저하 되는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서는 Cu 박판의 용착 조건을 확인하기 위해 유한요소 해석을 통하여 혼을 설계 하고 혼의 검증을 위해 혼의 최대 변위량을 변위센서를 통해 확인 하였으며, 제작된 혼을 이용하여 압력 1.5bar, 2.0bar의 조건에 진폭 40, 60, 80%의 조건으로 실험을 진행하였으며, 이 실험을 통하여 초음파 금속 용착을 이용한 구리 박판의 최대 인장력은 압력 2.0bar 진폭 60%, 0.32초에 66.53N인 것을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

Cu 박판의 초음파 금속 용착을 통한 용착성 평가를 하기 위해 고유 진동수 40,000Hz를 가지는 혼을 봉의 진동 방식식과 유한요소 해석을 통해 설계 및 제작하였으며, 초음파 금속 용착기와 인장시험기를 이용하여 Cu 박판의 용착성 및 용착 조건을 확인하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 40,000Hz의 가진 주파수와 공진이 발생되도록 고유진동수 40,000Hz의 값을 가지게 하는 혼을 유한요소 해석을 통하여 설계 하였다.
- (2) 혼의 형상변수를 변화시켜가며 Modal 해석을 수행하였고, 그 결과 39,559Hz의 값을 확인 할 수 있었으며, Harmonic 해석을 통해 39,533Hz 값을 확인 할 수 있었다.
- (3) 혼의 성능 검증을 위해 혼을 제작하여 혼의 출력부에 광센서를 이용하여 혼의 종방향 최대 변위를 측정 하였다. 그 결과 RMS 값은 8.5 $\mu$ m, 최대 변위는 12.3 $\mu$ m 인 것을 확인 할 수 있었다.
- (4) Cu 박판의 최대 인장력은 2.0bar 진폭 60%, 0.32 초에 66.53N인 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 1.5bar 진폭 40%일 때 최대 인장력이 매우 낮은 것을 보아 용착조건이 너무 약하면, 용착력이 매우 약하다는 것을 확인 할 수 있었다.
- (6) 2.0bar 진폭 80% 일 때의 최대 인장력은 40, 60% 일 때 보다 낮은 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 용착조건이 과도하게 되면 오히려 최대 인장력이 낮아져 용착성이 저하 되는 것을 확인 할 수 있었다.

#### References

- (1) Fujikura, R., 2002, "High Pin-count Ultrasonic Flip-chip Bonding and Plasma Cleaning Technology," *Proceedings of 9th annual KGD Workshop*, Napa, California.
- (2) Maruo, H., Seki, Y., Unami, Y., and Ominato, T., 2004, "Ultrasonic Flip Chip Bonding on FPC," *Fujikura Technical Review*, pp. 36~39.

- (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) Jeong, H. S., 1997, "Fundamentals of Ultrasonic Welding," *Journal of Korean Welding and Joining Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 24~31.
- (6) *Ultrasonic Metal Welding-Horizontal Oscillation Direction*, STAPLA Ultrasonic Corp.
- (7) John, W., *Ultrasonic Metal Welding for Wire Splicing and Termination*, Branson Ultrasonic Corp.
- (8) Lee, B. G., Kim K. L., and Kim, K. E., 2008, "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM," *Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 63~70.
- (9) Shim, K. S., and Nam, H. K., 2006, "A Fast Parameter Estimation of Time Series Data using Discrete Fourier Transform," *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 55, No. 7, pp. 265 ~ 272.
- (10) 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.