

초음파 혼의 Tip 면적과 Cu 박판의 용착성

장호수^a, 강은지^a, 박동삼^{b*}

Area of Horn's Tip and Weldability of Cu Sheets

Ho Su Jang^a, Eun Ji Kang^a, Dong Sam Park^{b*}^a Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Incheon National Univ.(406-772)119, Academy-ro, YeonSu-Gu, Incheon, Republic of Korea^b Div. of Mechanical System Engineering, Incheon National Univ.(406-772)119, Academy-ro, YeonSu-Gu, Incheon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	March	2014
Revised	28	March	2014
Accepted	1	April	2014

Keywords:

Ultrasonic welding
Horn
Vibration analysis
Tip area

ABSTRACT

In this study, a 20,000Hz ultrasonic horn was designed and fabricated using a finite element analysis. The horn's resonate frequency was 19,991Hz, and the harmonic response frequency was 20,000Hz. In order to observe the developed horn's performance, 4,000 pieces of displacement data were obtained using an optical sensor and were analyzed using a fast Fourier transform. Finally, the developed horn's resonate frequency was found to be 19,992Hz. The effect of the tip area of the developed horn on the weldability of a Cu sheet was experimentally investigated. It was found that the welding strengths of specimens welded using a small tip area were generally higher than those of specimens welded using a large tip area.

1. 서론

최근 세계적으로 환경문제가 부각됨에 따라 탄소배출을 억제하는 각종 규제들이 시행되고 에너지 절약에 대한 관심이 높아지고 있다. 이로 인하여 저비용·고효율 생산기술이 각광받고 있는데 그 중 초음파를 이용한 용접법은 기존용접에서 사용되던 특수 가스나 접합용제가 불필요한 친환경적인 용접법으로 플라스틱이나 금속류의 용접에 크게 활용되고 있다.

초음파 금속용착은 초음파 진동에 의해 2개의 금속 접합면에 기계적인 진동을 가하여 물리적인 확산작용으로 금속표면에 존재하는 산화막을 제거하고 용착하기 때문에, 높은 기계적 강도와 전기 저항이 거의 없는 특성을 갖는다^[1]. 뿐만 아니라 친환경 전기자동차, 수소자동차 개발 단계에서 경량화를 위해서는 자동차 차체 경

량화가 요구됨에 따라 경량재료의 동종 및 이종재료간 용접이 필수적이며 초음파 용접은 이에 가장 적합하다^[2].

초음파 금속 용접의 과정은 파워 서플라이를 통해 들어온 전기적 에너지가 진동자를 통해 기계적인 진동에너지로 바뀐 뒤 부스터로 그 진폭을 증폭시켜 형성된 초음파 진동에너지가 혼을 통해 금속 부자에 전달되면 금속부재의 접합면의 강제적 확산에 의하여 강력한 결합이 이루어지게 된다^[3].

초음파 용접에서 핵심적인 요소는 혼(Horn)으로 이는 사용자가 원하는 수준의 진폭을 얻을 수 있도록 진동을 증폭하고 진동자에서 발생한 진동 에너지를 용착 소재에 전달하는 역할을 한다^[4].

한편, 용접소재와 직접 접촉하여 용접소재를 고정하고 진동을 전달하는 팁(Tip)의 크기나 형상도 용접성능에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되나 이에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-32-835-4531

Fax: +82-32-835-0793

E-mail address: dspark@incheon.ac.kr (Dong Sam Park).

본 연구에서는 20 kHz의 공진진동수를 가지는 혼을 개발하기 위하여 진동방정식과 유한요소해석법을 통하여 모드해석과 조화반응 해석을 기초로 혼을 설계하고 제작하였다. 또한, 각종 전자 부품 단자부에 많이 사용되고 Cu 박판을 대상으로 개발된 혼의 팁 형상 변화에 따른 용착성을 평가하였다.

2. 초음파 용접용 혼의 해석

2.1 혼의 설계

혼의 설계는 이론적으로 대략 혼의 길이를 계산한 후 FEA (Finite element analysis)를 이용한 모드 해석으로 고유진동수와 진동모드(Mode shape)를 구하여 혼의 형상과 치수를 결정하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다^[5-8].

본 연구에서 사용된 혼은 반과장 혼이며 혼의 길이는 균일 단면 봉의 종진동 방정식으로부터 구하였다^[8]. 봉 형상의 혼의 끝 부분에서 최대 변위가 나타나도록 하기 위해 혼의 전체 길이는 종진동과장인 λ 의 1/2이 되도록 설계하였다.

Fig. 1은 설계 혼의 2D 도면을 나타낸 것으로, 초음파 금속 용착기의 진동자에 부여되는 작업 주파수는 20 kHz로 고정되어 있다.

혼의 재질은 음향적 성질과 강도가 뛰어난 티타늄 합금으로 하였으며, Table 1은 FEA 해석을 위한 티타늄 합금의 물성치를 나타내었다.

설계한 혼을 Ansys Tool을 이용하여 모드해석과 조화반응해석

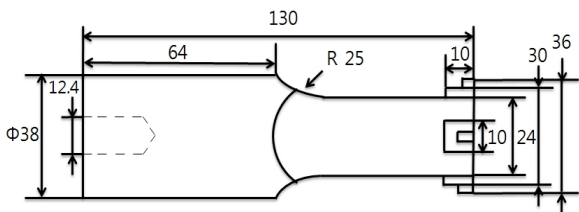


Fig. 1 2D Drawing of the horn

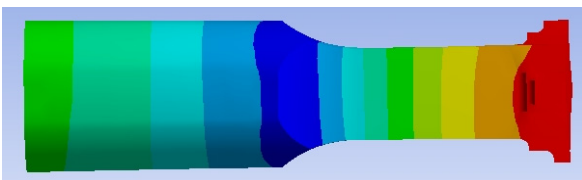


Fig. 2 Mode shape and natural frequency (10th mode - 19,991Hz)

Table 1 Mechanical properties of the horn material

Density	4.36 g/m ³
Poission's Ratio	0.34
Young's Modulus	118 GPa

을 수행하였다. Fig. 2는 모드해석을 수행한 결과로 10차 모드에서 20 kHz에 근접한 19,991 Hz의 고유진동수를 얻을 수 있었으며 혼의 끝단부인 팁에서 최대진폭이 발생하였다.

Fig. 3은 설계된 혼의 입력면에 10 kHz~30 kHz까지의 주파수로 가진 했을 때 출력면인 팁 부분에서의 주파수 응답을 구하기 위해 조화반응해석을 수행한 결과로 공진주파수 20 kHz를 얻을 수 있었다.

본 실험에서는 팁의 용착물과의 접촉 면적에 따른 용착성을 평가하기 위하여 두가지 형상의 팁을 설계하고 팁에 면적에 따른 초음파 금속 용착성 평가 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 혼의 끝단부인 팁을 나타낸 것으로 Fig. 4의 (a)는 팁 A의 형상으로 가로 4 mm, 세로 4 mm의 정사각형이며 피치는 0.6 mm이다. Fig. 4의 (b)는 팁 B의 형상으로 가로 6 mm, 세로 6 mm의 정사각형으로 피치는 0.7 mm이다.

2.2 혼의 진동특성 검증

진동 해석을 바탕으로 설계하고 제작된 혼의 진동특성을 검증하기 위하여 혼을 20 kHz용 용착기에 장착한 후 광센서를 직각으로 설치하여 팁 부분의 진동신호를 측정하였다. 측정 주기는 100 kHz이며 측정된 진동신호를 이용하여 센서의 민감도로 부터 변위값을 구하고 FFT 분석을 하였다.

Fig. 5는 광센서로 혼의 팁 부의 진동신호를 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

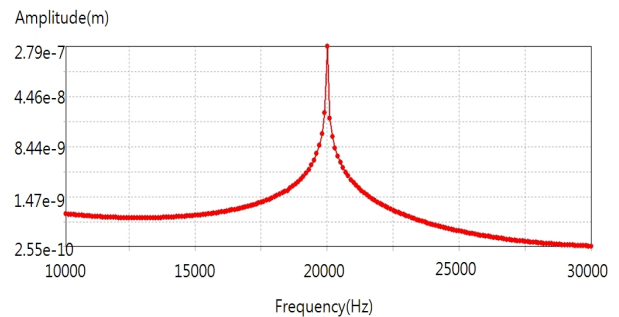
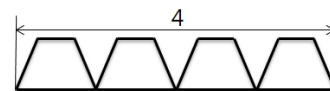
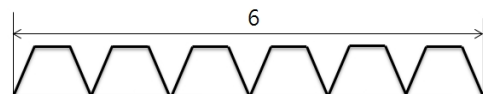


Fig. 3 Harmonic analysis of the optimum horn



(a) Tip A - 4 mm (16 mm²)



(b) Tip B - 6 mm (36 mm²)

Fig. 4 Tip types of the horn

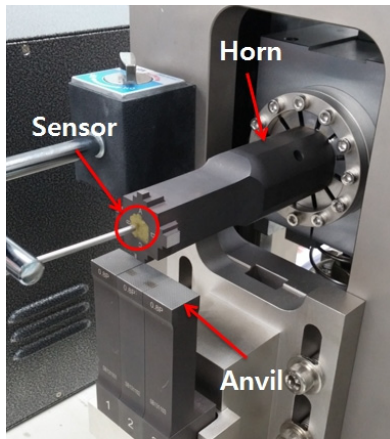


Fig. 5 Experimental set-up for measuring tip vibrations

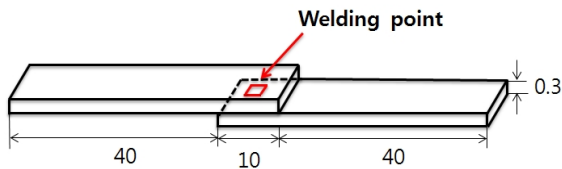


Fig. 6 Welding point

팁 부 진동신호의 FFT 분석 결과로서 피크 주파수는 19,922 Hz로 원래 설계하고자 했던 공진주파수 20 kHz와 거의 유사하여 설계가 정상적으로 이루어졌음을 알 수 있었다.

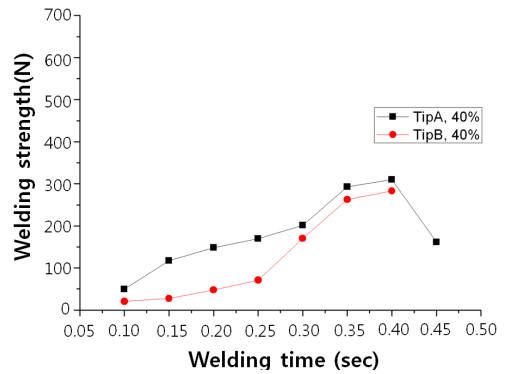
3. 용착성 실험

3.1 실험 방법

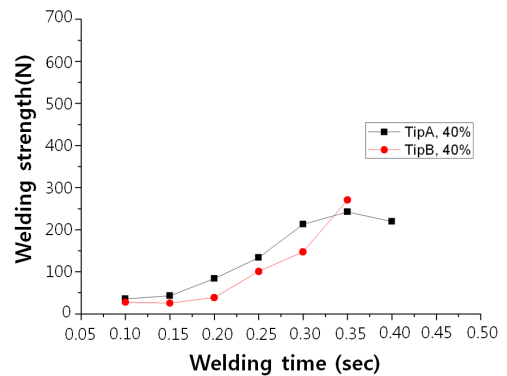
Fig. 6은 실험에 사용된 Cu 시편의 형상을 나타낸 것으로 $50 \times 10 \times 0.3$ mm의 크기로 시편을 제작하였고, 용착부위는 각 소재의 가로 10 mm와 폭 10 mm를 포개어 용착실험을 수행하였다.

본 실험에서는 Cu 박판의 용착성을 평가하기 위하여 용착 변수로는 용착압력, 진동진폭 및 용착시간을 선정하였으며, 용착압력은 4 bar와 6 bar, 진폭은 40%, 60% 및 80%, 용착시간은 0.10~0.35 sec로 0.05 sec씩 증가시키며 실험을 수행하였다. 이러한 용착조건으로 팁 A와 팁 B의 팁의 면적에 따른 Cu 박판의 금속 용착성을 비교 분석하였다.

각 실험조건마다 각각의 7개의 Cu 시편들을 용착하였으며 용착 강도는 인장시험기를 이용하여 Cu 시편이 용착부에서 분리될 때의 최대 인장력으로 구하였다. 또한, 데이터의 신뢰성을 높이기 위하여 최대인장력과 최소인장력을 제외한 5개 인장력의 평균값을 구하였다.

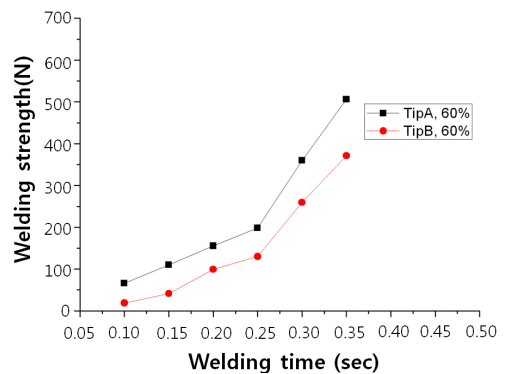


(a) Pressure 4 bar

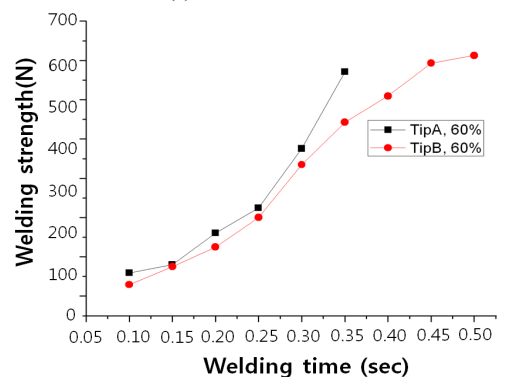


(b) Pressure 6 bar

Fig. 7 Welding strength variations (amplitude 40%)



(a) Pressure 4 bar



(b) Pressure 6 bar

Fig. 8 Welding strength variations (amplitude 60%)

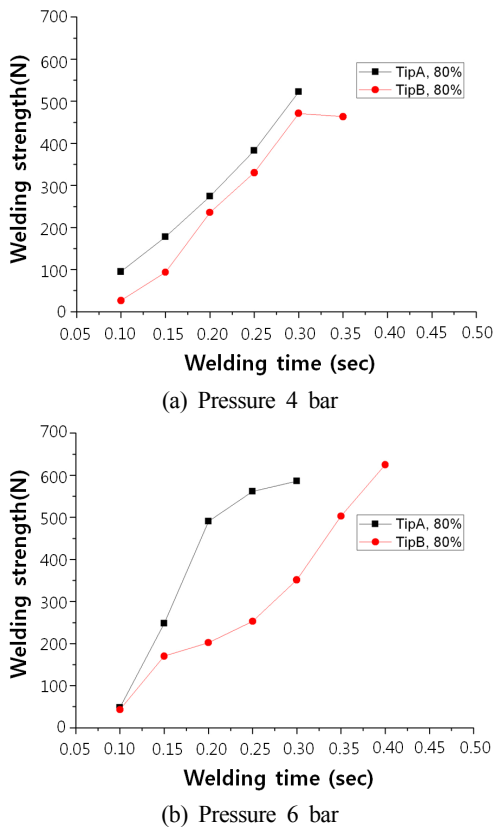


Fig. 9 Welding strength variations (amplitude 80%)

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7~Fig. 9는 팁 A, B를 이용한 용착 후 시편의 인장시험을 통한 인장강도 즉 용착강도를 나타낸 것으로, 용착조건이 특정조건 이상일 경우 인장시험에서 Fig. 10(c), (d)와 같이 시편의 용착부가 아닌 다른 부위에서 파손이 발생하였는데 그 이상의 조건에서는 용착실험을 하지 않았다.

전반적인 경향을 살펴보면 어떤 조건에서든 용착시간이 증가함에 따라 용착강도도 증가하나 Fig. 7에서 보듯이 팁 A의 경우 진폭이 40%일 때 용착시간이 길어짐에 따라 오히려 용착강도가 떨어지는 현상이 나타났다. 압력의 증가에 따라 용착강도도 일정부분 증가하는 경향이 뚜렷한 차이는 나타나지 않는다. 또한, 전반적으로 볼 때 진폭이 증가함에 따라 인장강도도 증가하는 것을 알 수 있는데 특히 진폭이 40%로 낮을 경우는 용착강도가 크게 떨어진다는 것을 확인할 수 있다.

팁의 면적변화에 따른 용착강도를 살펴보면 거의 모든 조건에 걸쳐 팁의 면적이 작은 A의 경우 용착강도가 크게 나타나고 있다. 이는 예상과는 다른 것으로 팁의 면적이 작을 때에 용착시편간의 초음파 마찰열이 팁 부위의 용착시편에 집중되어 두 용착부 사이의 Cu의 확산(Diffusion)이 보다 용이하게 이루어져 용착이 더 강하

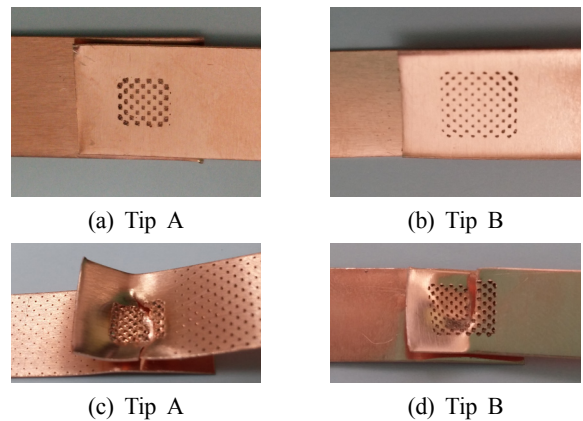


Fig. 10 Specimens before and after tensile test

게 이루어진 결과라고 판단된다.

한편, 팁 A를 이용한 최대 용착강도는 압력 6 bar, 진폭 80%, 용착시간 0.30s에서 586.3 N이며, 팁 B의 경우는 압력 6 bar, 진폭 80%, 용착시간 0.40s에 625.116 N인 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 팁 A, B를 이용한 용착후 시편의 윗면 모습이며, Fig. 10의 (c)와 (d)는 인장시험 과정에서 시편의 용착면이 분리되지 않고 용착부 외의 부위에서 파손이 일어난 시편의 모습을 나타내었다. 용착부가 아닌 곳에서 파손이 일어난 것은 필요 이상의 과도한 조건을 용착한 것으로, Cu의 초음파 용착시 최대 인장강도 조건임을 알 수 있는데 Fig. 7~Fig. 9에서 보듯이 진폭 40%일 때를 제외하고는 팁 면적이 작은 A형의 경우 용착부 외 파손이 먼저 일어난다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 각종 전자 부품 단자부에 많이 사용되고 있는 Cu 박판의 초음파 용착을 위하여 공진주파수 20 kHz인 반파장 혼을 설계, 제작하였으며, 팁의 면적 변화에 따른 Cu 박판간의 용착성 평가를 수행하였다. 20 kHz의 공진주파수를 갖는 혼은 진동방정식과 모드해석 및 조화반응해석을 통하여 설계하였으며, 제작된 혼의 팁 부분 진동신호의 FFT 분석을 통하여 진동성능을 검증하였다. 팁의 면적에 따른 용착성 평가를 위해 두 종류의 팁 형상을 설계하고 두께가 0.3 mm인 Cu 시편간의 용착실험과 용착 후 시편에 대한 인장시험을 통하여 용착강도를 비교 분석하였다.

20 kHz의 공진진동수를 갖는 혼의 길이는 봉의 진동방정식을 이용하여 전체 길이를 130 mm로 설계하였으며, 모드해석 결과 10차 모드에서 고유진동수 19,991 Hz의 최적의 종진동 모드를 얻었으며, 조화반응해석 결과 혼의 팁 부분에서 20 kHz의 진동수를 얻었다. 혼 제작 후 진동특성을 광학센서로 측정하고 FFT 분석한

결과 설계하고자 하였던 20 kHz와 아주 비슷한 19,922 Hz의 공진 주파수를 얻었다.

한편, 팁의 면적변화에 따른 용착강도는 거의 모든 조건에 걸쳐 팁의 면적이 작은 경우 용착강도가 어느정도 크게 나타났으며, 이는 용착부의 면적이 작을 때에 용착시편간의 초음파 마찰열이 팁 부위의 용착시편에 집중되어 용착부 사이의 Cu의 확산이 보다 용이하게 이루어져 용착이 더 강하게 이루어진 결과라고 판단된다. 또한, 인장시험 시 용착시편의 손상 형태는 팁의 면적이 작을 때에 용착강도도 클 뿐만 아니라 용착부 외의 위치에서 파손이 먼저 일어나는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구 되었음.

References

- [1] STAPLA Ultrasonic Corp, viewed 13 December 2013, Ultrasonic metal welding - Horizontal oscillation direction, <<http://www.staplaltrasonics.com/index.php>>.
- [2] MIRIAN KISTI Report, viewed 13 December 2013, The trend of technology for Vehicle Light Weight Materials and development strategy <http://mirian.kisti.re.kr/publication/view.jsp?record_no=83618&cont_cd=GE>.
- [3] Branson Ultrasonic Corp, viewed 13 December 2013, Ultrasonic metal welding for wire splicing and termination <<http://www.emersonindustrial.com/en-US/branson/Products/metal-welding/Pages/MetalWeldingLiterature.aspx>>.
- [4] Seah, K. H. W., Wong, Y. S., Lee, L. C., 1993, Design of tool holders for ultrasonic machining using FEM, Journal of Materials Processing Technology 37 810-816.
- [5] Lee, B. G., Kim, G. L., Kim, K. E., 2008, Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining Using FEM, KSMTE Trans. 17:6 63-70.
- [6] Amin, S. G., Ahmed, M. H. M., Youssef, H. A., 1995, Computer-aided design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-element analysis, Journal of Materials Processing Technology 55 254-260.
- [7] Seo, J. S., 2009, Vibration Analysis for Optimal Design of Horn, Proceedings of the KSMTE Spring Conference, 380-383.
- [8] Seo, J. S., Jang, S. M., Baek, S. Y., 2012, One-wavelength Ultrasonic Horn Design for Ultrasonic Machining of Mobile Phone Battery Terminal Welding, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 21:1 70-75.