

FEM을 이용한 초음파 용착부의 온도분포 해석

강은지^a, 민경탁^{b*}Temperature Distribution Analysis of Welding Parts
in Ultrasonic Welding by Using FEMEun-Ji Kang^a, Kyung-Tak Min^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Incheon National University,
119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea^b Division of Mechanical System Engineering, Incheon National University,
119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	February	2016
Revised	4	April	2016
Accepted	6	April	2016

Keywords:

Ultrasonic metal welding
Finite element analysis
Transient thermal analysis
Frictional heat flux
Heat affected zone
Temperature distribution

ABSTRACT

Ultrasonic metal welding, unlike the conventional welding techniques, does not require an external heat source, welding rod, or filler metal. Therefore, ultrasonic metal welding is not only economical but also environment-friendly, and hence, it has been receiving much attention. In ultrasonic welding, heat is generated because of the plastic deformation and the friction between both surfaces of the welded materials. It is important to identify the heat-affected zone by measuring the temperature generated at the weld. In this study, the effects of the welding pressure, welding time, and vibration amplitude on the temperature distribution in the weld were evaluated by performing a transient thermal analysis of the heat generated during ultrasonic metal welding. The experimental results indicated that the temperature of the weld tends to increase with the welding time and vibration amplitude. However, an increase in the pressure does not affect the temperature of the weld largely.

1. 서론

최근 조선, 자동차, 반도체 등의 분야에서 복합소재의 개발 및 활용이 증가함에 따라 이종 금속 소재 간 결합의 필요성이 대두되고 있으며, 마찰이나 진동을 통해 접합하는 마찰용접이나 초음파 용착의 활용이 증가하고 있다.

또한, 세계적으로 환경문제가 크게 부각됨에 따라 탄소배출을 억제하는 각종 규제들의 시행과 에너지 절약에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 초음파를 이용한 용접법은 기존의 용융용접과 달리

별도의 열원, 용접봉 등이 불필요하며 접합과정에서 유해 광선이나 유해 물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서 친환경적인 접합 기술로 각광받고 있다^[1].

초음파 용착이 이루어지는 동안 소성변형(plastic deformation), 탄성 히스테리시스(elastic hysteresis) 및 마찰은 용착되는 두 소재의 접촉부에 열을 발생시키게 된다. 지금까지 초음파 용접에서 용접 시간이나 초음파 진폭 및 압력 등의 용접조건이 용착성에 미치는 실험적 연구^[2,3]나 두 접촉면 사이의 온도에 대한 연구가 이루어져 왔으며 특히 용접부에서 발생하는 온도를 측정하는 것은 열영

* Corresponding author. Tel.: +82-32-835-8416

Fax: +82-32-835-0793

E-mail address: minkt@inu.ac.kr (Kyung-Tak Min).

향부(HAZ: heat affected zone)를 규명하는데 매우 중요하다.

일반적으로 용접공정은 여러 가지 접합법 중에서 효율이나 강도가 가장 우수하기 때문에 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 용접공정은 재료를 부분적으로 가압하여 접합시키고 냉각하는 공정으로 재료 내부에 불균일한 온도분포가 형성된다. 재료 내부의 불균일한 온도분포로 인해 각 위치에서 열팽창량이 다르므로 내부에서 열팽창과 수축에 의한 열변형 및 열응력이 발생하게 되며, 변형과정에서 소성영역이 생기면서 냉각 후 응력 등이 잔류하게 된다. 용접 중 발생하는 잔류응력의 원인 및 방지대책에 관해서는 과거부터 많은 연구가 진행되어 왔으며 지금도 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾.

하지만 실제 용접구조의 기하학적 형상이 복잡하고, 용접공정은 재료의 특성이나 온도 의존 및 소성변형 등을 포함한 비선형 문제이므로 이론적으로 정확한 해를 얻는 것은 거의 불가능하다^{7,8)}. 최근 용접분야에서도 컴퓨터 시뮬레이션을 응용한 공정 및 재료개발의 실용화가 적극 추진되고 있다. 그 중 초음파 금속 용착은 기반산업의 파급효과가 큰 원천기술 산업으로 초음파 기술의 개발과 더불어 다양한 소재간의 용착과 용착변수에 따른 용착성 평가에 관한 실험적 연구는 많이 진행되고 있으나 초음파 용착의 기본 기구 규명을 위한 초음파 용착 시 용착부의 열발생 해석에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 초음파 용착 시 용착압력, 용착시간 및 용착용 혼(horn)의 진동진폭이 용착 소재인 금속에서 발생하는 열과 온도분포에 미치는 영향을 해석함으로써 용착조건을 보다 용이하게 선정할 수 있게 함은 물론 우수한 용착 성능을 얻는데 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 초음파 금속 용착의 원리

초음파 금속 용착은 Fig. 1과 같이 용착 할 금속 시편을 작업대 위에 중첩한 후 혼의 팁에 정압력을 가한 상태에서 용착면에 평행하게 진동을 인가하여 접합이 진행된다. 수평 진동에 의해 초음파의 진동에너지가 혼을 통해 금속 용착물에 전달되고 금속 접합면에

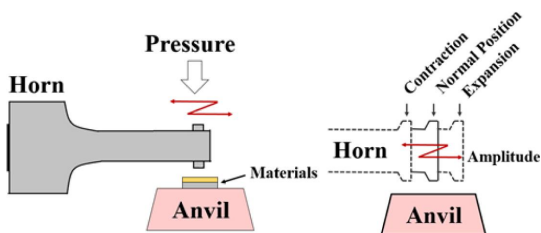


Fig. 1 Basic mechanism of the ultrasonic welding

기계적인 진동이 가해짐으로써 두 금속 소재의 분자간 물리적인 확산작용(diffusion)으로 강력한 접합이 이루어지는 공법이다.

초음파 진동에 의한 금속 접합면의 확산현상으로 인하여, 금속 표면에 상존하는 금속 산화막을 제거하며 용착하기 때문에 높은 기계적 강도와 저항이 거의 없는 우수한 전기적 특성을 얻을 수 있다⁹⁾.

3. 초음파 용착에서 FEM을 이용한 온도분포 해석

3.1 용착에 의한 온도분포 해석용 모델링

온도분포 해석을 위한 시편 형상은 Fig. 2와 같으며 축대칭 형상의 열전달을 지배하는 편미분 방정식은 다음 식 (1)과 같다¹⁰⁾.

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Fig. 3과 같이 혼의 팁 면적 A_W 에 대하여 실제 마찰영역은 면적 ($A_R - A_W$)에 상당한다고 가정한다¹¹⁾. 해석에 사용된 혼, 앤빌 및 용착소재의 물성치는 Table 1과 같다.

3.2 열발생 및 용착부에서의 열전달

용착과정 동안 용착부 접촉면에서 열이 발생된다. 소성변형과 마찰에 기인하는 혼의 윗면과 주위에도 열이 발생하게 된다. 이러한 열의 발생과 온도의 연속적인 변화는 용착부의 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

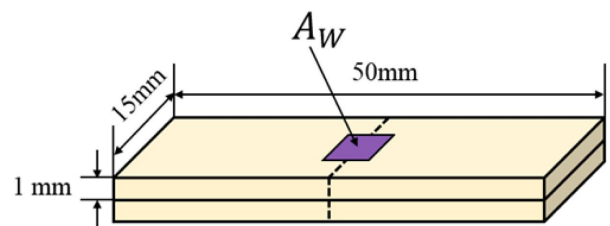


Fig. 2 Standard specimen

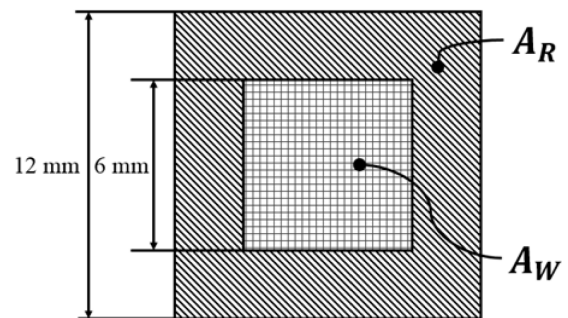


Fig. 3 Area of square tip of a hone and frictional area

Table 1 Properties of horn, anvil and weld materials

Material	Thermal Conductivity (W/(m°C))	Specific heat (J/(kg°C))	Density (kg/m ³)
Steel (Anvil)	24.3	460	7,800
Titanium (Horn)	21	522	8,140
Copper (Sheet)	393	385.2	8,900
Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)
Steel (Anvil)	210	0.3	1.51 × 10 ⁻⁵
Titanium (Horn)	207	0.3	0.86 × 10 ⁻⁵
Copper (Sheet)	117	0.3	1.66 × 10 ⁻⁵

용착 초기단계에서 혼과 용착소재 사이의 접촉면에서 소성변형이 일어난다. 이때 용착소재의 상면을 혼의 팁의 널(knurl)이 파고 들게 된다. 이로 인해 열이 발생되나 실제 용착과정은 이러한 초기 용착단계보다 20~25배 길기 때문에 초기 발열단계는 무시된다. 실용적인 목적을 위하여 소성변형과 마찰에 기인하는 열을 각각 분리하였으며, 소성변형에 기인하는 가열은 혼의 팁 면적 A_W 과 동일한 소성변형 영역에 국한시켰으며, 마찰에 기인하는 가열은 용접부 주위의 마찰면적 $A_{FR}(A_R - A_W)$ 에 국한시켰다.

3.3 소성변형에 의한 열발생^[9]

소성변형에 의한 열발생은 용착면적에 분산되는 동력(power)으로 볼 수 있으며 식 (2)와 같이 용착력(weld force)에 의존한다.

$$Q_W = \frac{P_{Total}}{A_W} = \frac{F_W \times V_{avg}}{A_W} \tag{2}$$

용착력은 식 (3)과 같이 항복응력과 가압력(clamping force)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_W = \sqrt{\left(\frac{Y_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{F_N/A_{DZ}}{2}\right)^2} \times A_{DZ} \tag{3}$$

혼의 평균속도는 다음 식 (4)와 같다.

$$V_{avg} = 4 \times \zeta_0 \times f_W \tag{4}$$

따라서 변형에 기인하는 heat flux는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$Q_W = \frac{\sqrt{\left(\frac{Y_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{F_N/A_{DZ}}{2}\right)^2} \times A_{DZ} \times V_{avg}}{A_W} \tag{5}$$

용착종료 시점에서 변형영역의 면적 A_{DZ} 는 용착부 면적 A_W 와 같아지게 되므로 이를 식 (5)에 적용하면 변형에 기인하는 heat flux

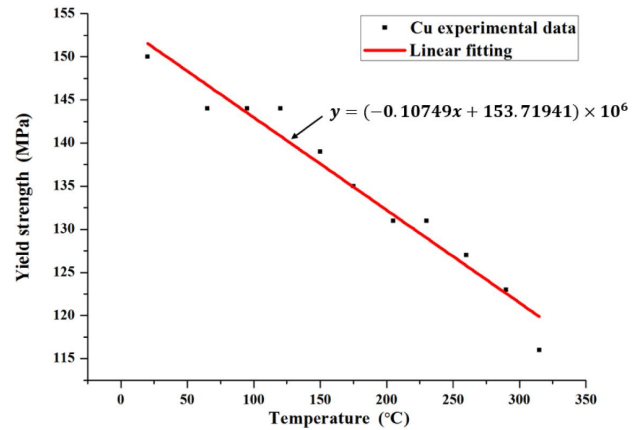


Fig. 4 Curve fitting of yield strength and temperature

Table 2 Clamping forces (F_N) by welding pressure

Pressure (bar)	Pressure (MPa)	Clamping force (N)
2	0.2	160.8495
3	0.3	241.2743
4	0.4	321.6991

는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_W = \sqrt{\left(\frac{Y_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{F_N/A_{DZ}}{2}\right)^2} \times V_{avg} \tag{6}$$

구리의 온도에 따른 항복응력은 기존의 실험 데이터^[12,13]를 이용하여 직선으로 근사화하여 실험식을 구하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다.

따라서 온도 변화에 따른 평균 항복응력은 다음 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_T &= \frac{\int_0^{350} (-0.1075 T + 153.72) \times 10^6 dT}{\Delta T} \tag{7} \\
 &= \frac{[(-0.1075 T^2/2) + 153.72 T \times 10^6]_0^{350}}{\Delta T} \\
 &= 134.9075 \times 10^6 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

Table 2는 압력에 따른 가압력(F_N)을 나타내었다. 20 kHz 초음파 금속 용착기의 압력 실린더(cylinder)의 면적 A 는 804.2477 mm²이며, F_N 은 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 3은 혼의 진폭 값을 이용하여 혼의 평균속도를 구한 것이다. 따라서 Table 4는 용착조건에 의해 변형에 기인하는 heat flux를 정리하여 나타내었다.

Table 3 Average hone speed (V_{avg}) by 20 kHz and amplitude

Amplitude (%)	Amplitude (μm)	V_{avg} (m/s)
40	4.4	0.352
60	6.6	0.528
80	8.8	0.704
100	11	0.88

Table 4 Heat flux by deformation and welding conditions

Pressure (bar)	Amplitude (%)	Heat flux (w/m^2)
2	40	23.73×10^6
	60	35.6×10^6
	80	47.46×10^6
	100	59.33×10^6
3	40	23.71×10^6
	60	35.57×10^6
	80	47.43×10^6
	100	59.29×10^6
4	40	23.69×10^6
	60	35.54×10^6
	80	47.38×10^6
	100	59.23×10^6

3.4 마찰에 의한 열발생^[11]

원형 팁을 사용할 경우 용착부의 마찰면적은 팁의 반지름의 2배가 되는 연구결과로부터 본 연구에서도 이를 응용하여 Fig. 3과 같이 정사각형 팁의 경우 마찰면적은 변의 길이의 2배로 가정하였다.

따라서 마찰면적 A_{FR} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{FR} = A_R - A_W = (12 \times 12) - (6 \times 6) = 108 \text{mm}^2$$

소요 동력은 마찰력 F_{FR} 과 혼의 평균 진동속도의 곱으로 계산된다. 이 Flux는 마찰력에 의해 분산되며 다음 식 (8)과 같다.

$$Q_{FR} = \frac{P_{FR}}{A_{FR}} = \frac{F_{FR} \times V_{avg}}{A_{FR}} \quad (8)$$

마찰력은 다음 식 (9)로 구하며 구리의 마찰계수는 $\mu=0.55$ 이다.

$$F_{FR} = \mu \times F_N \quad (9)$$

Table 5는 용착 압력에 따른 가압력을 나타낸 것이다. 마찰에 기인하는 heat flux는 다음 식 (10)과 같다.

$$Q_{FR} = \frac{\mu \times F_N \times V_{avg}}{A_{FR}} \quad (10)$$

Table 5 Clamping forces (F_{FR}) by welding pressure

Pressure (bar)	Pressure (MPa)	Clamping force (N)
2	0.2	88.47
3	0.3	132.7
4	0.4	176.93

Table 6 Heat flux by friction and welding conditions

Pressure (bar)	Amplitude (%)	Heat flux (w/m^2)
2	40	288,346.67
	60	432,520
	80	576,693.33
	100	720,866.67
3	40	432,503.70
	60	648,755.56
	80	865,007.41
	100	1,081,259.26
4	40	576,660.74
	60	864,991.11
	80	1,153,321.48
	100	1,441,651.85

Table 6은 용착조건에 의해 마찰에 기인하는 heat flux를 정리하여 나타내었다.

4. FEM을 이용한 온도분포 해석방법

4.1 해석 모델링

Fig. 5는 해석을 위한 모델을 나타내었으며 혼에 대해 축대칭(axial symmetry)을 사용하였다.

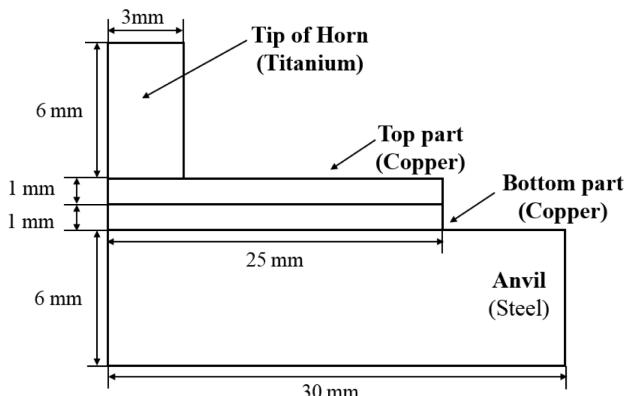
4.2 해석 조건

초기 온도는 상온으로 25°C 로 가정하였으며, Cu Sheet는 정육면체 형상의 메시로 한 변의 길이를 9×10^{-4} m로 선정하였으며, 팁과 앤빌은 자동메시로 생성시켜 17,103개의 node들과 2,828개의 elements를 갖는 유한요소 모델에 대한 해석을 수행하였다.

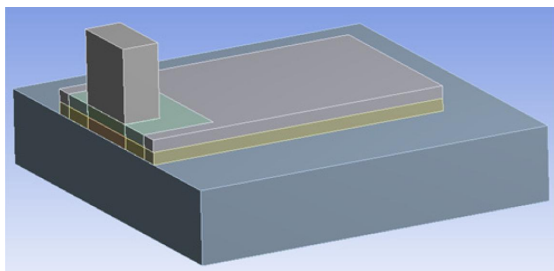
4.3 해석 경계조건

‘Convection’ 조건은 두 용착소재 중 위에 설치에 시편의 윗면과 상하 두 시편의 측면에서 주위로 대류되는 열손실을 나타내는 것으로 해석 시 5W/m^2 로 설정하였다.

‘Contact’ 조건은 Fig. 6과 같이 설정하였다. 접촉부 ①과 ③은 ‘No Separation’으로 접촉은 유지하지만 분리가 되지 않는 상태를 뜻하며, 접촉부 ②는 Cu Sheet와 Cu Sheet의 접촉면으로써



(a) 2D Modeling



(b) 3D Modeling

Fig. 5 Modeling for transient thermal analysis

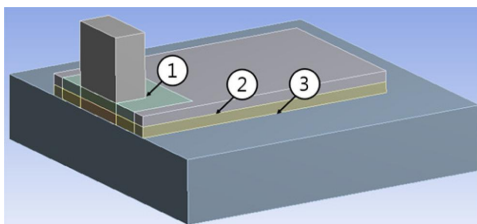


Fig. 6 Boundary conditions for 'Contact'

Table 7 Welding parameters for transient thermal analysis

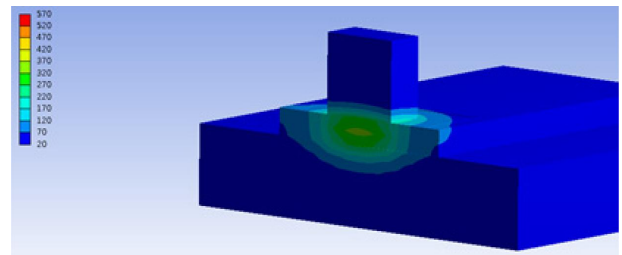
Pressure (bar)	2, 3, 4
Amplitude (%)	40, 60, 80, 100
Time (sec)	0.1~0.5

'Frictional'을 선택하였다.

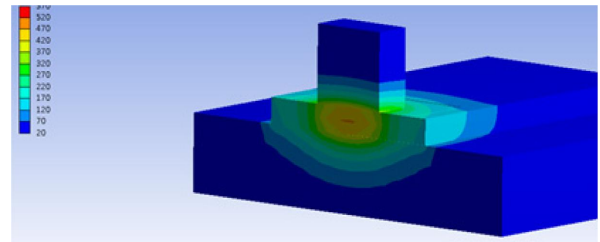
4.4 해석 방법

초음파 금속 용착의 변수로 용착압력, 진동 진폭 및 용착시간을 선정하였으며, 용착압력은 2bar, 3bar 및 4bar, 진폭은 40%, 60%, 80% 및 100%, 용착시간은 0.1 sec~0.5 sec로 하여 해석하였다.

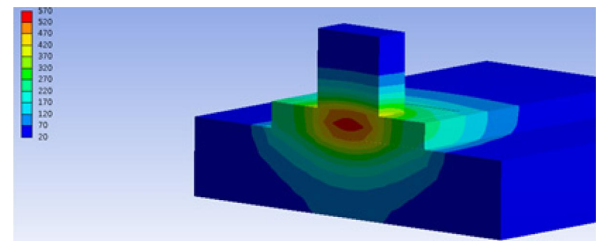
변형에 기인하는 heat flux는 혼의 팁이 접촉하는 면적 A_W 에만 적용하여 Table 4를 이용하고, 마찰에 기인하는 heat flux는 마찰 면적 A_{FR} 에만 적용하여 Table 6을 이용하여 해석하였다.



(a) 0.1 sec (338.45°C)



(b) 0.3 sec (478.13°C)



(c) 0.5 sec (550.31°C)

Fig. 7 Temperature distribution with welding time (pressure 4bar, amplitude 100%, time 0.5 sec)

5. FEM을 이용한 온도분포 해석결과

5.1 용착시간 경과에 따른 온도분포

Fig. 7은 최대 온도가 나타나는 압력 4bar, 진폭 100%, 용착시간 0.5 sec일 때, 용착시간 진전에 따른 0.1, 0.3 및 0.5 sec일 때의 온도분포 해석결과를 나타낸 것으로 시간이 경과함에 따라 용착부의 온도가 급격히 상승하고 고온영역이 확대되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 0.5 sec까지 전체 시간경과에 따른 용착부 최대 온도 변화를 나타낸 것으로 0.15 sec까지는 온도가 급격히 상승하나 그 이후에는 거의 직선적으로 완만하게 상승함을 알 수 있다.

5.2 용착조건 변화에 따른 온도 분포

Fig. 9는 압력과 진폭 및 시간의 변화에 따른 용착부의 최대 온도를 나타낸 그림으로 진폭과 용착시간이 증가할수록 용착온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 입력 변화에 따른 최대 온도는 Fig. 9의 (a), (b), 및 (c)에서 보듯이 거의 미미할 정도의 차이만 보이고 있어 초음파 금속 용착에서 용착압력은 용착온도 변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

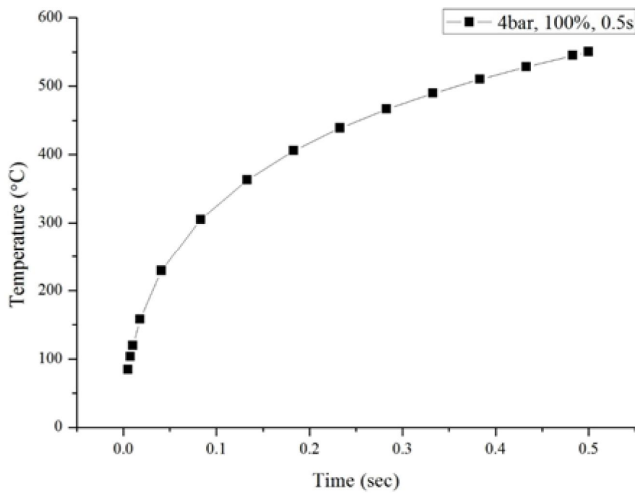


Fig. 8 Temperature with welding time variation (pressure 4bar, amplitude 100%, time 0.5 sec)

6. 결론

본 연구에서는 FEM을 이용하여 금속의 초음파 용착 시 열발생 해석을 통하여 용착압력, 용착시간 및 혼의 진폭이 용착부의 온도 분포에 미치는 영향을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두께 1 mm의 두 Cu Sheet를 대상으로 압력 2bar, 3bar, 4bar 진폭 40%, 60%, 80% 및 100%, 용착시간 0.1~0.5 sec까지 조건에서 전이온도해석(transient thermal analysis)을 통하여 용착조건 변화에 따른 온도분포를 해석하였다.

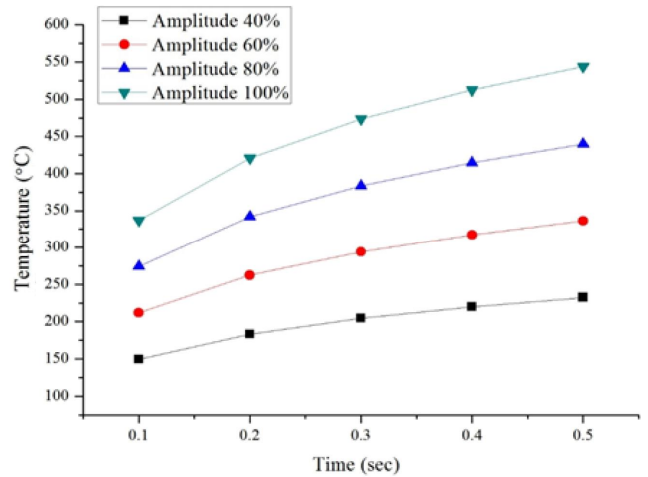
(2) 용착조건 변화에 따른 최대 온도분포는 진폭과 시간이 증가할 때 최대 용착온도도 거의 비례하여 증가하는 경향을 보였으나, 압력의 변화에 의해서는 변화가 미미한 것으로 보아 일정수준의 가압력은 필요하지만 그 일정 수준 이상은 의미가 없는 것을 알 수 있었다.

(3) 온도분포 해석을 수행한 결과 압력 2bar, 진폭 40%, 용착시간 0.1 sec에서 149.73°C의 용착부 최소 온도값을 얻었으며, 압력 4bar, 진폭 100%, 용착시간 0.5 sec에서 550.31°C의 용착부 최대 온도를 얻었을 수 있었다.

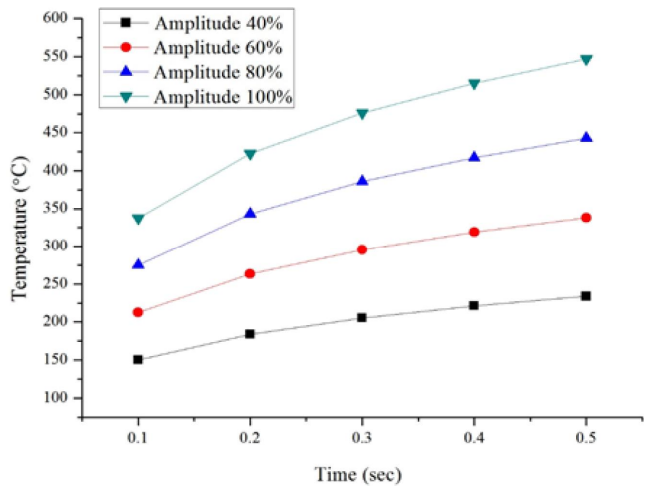
(4) 특정 용착조건에서 용착시간의 진전에 따른 용착부 최대 온도를 구한 결과 최초 약 0.15 sec까지는 온도가 급격히 증가하나 그 이후에는 거의 직선적으로 완만하게 증가함을 알 수 있었다.

후기

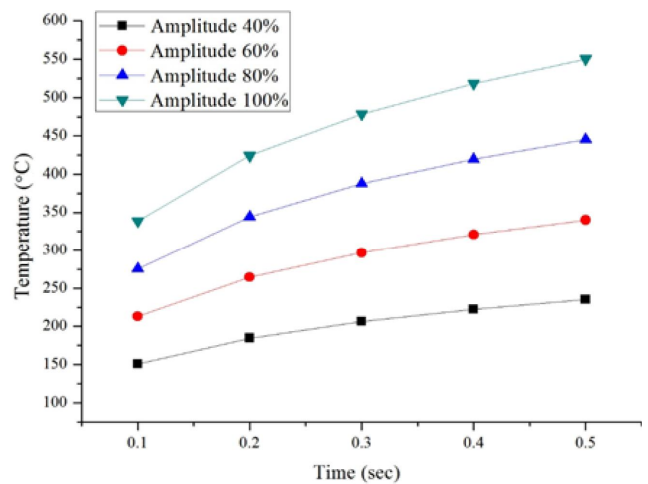
이 연구는 2014년도 인천대학교 자체연구 연구비 지원에 의하여 연구되었음.



(a) 2bar



(b) 3bar



(c) 4bar

Fig. 9 Max. temperature with variation of welding conditions

References

[1] Kim, J. H., 2013, KISTI Market Report, KISTI, Republic of Korea.

- [2] Jang, H. S., Park, W. Y., Park, D. S., 2011, The Establishment of Bonding Conditions of Cu Using an Ultrasonic metal Welder, Korean society of Manufacturing Technology Engineers, 20:5 570-575.
- [3] Seo, J. S., Park, D. S., 2010, Establishment of Conditions for Ultrasonic Welding of Cu sheet, Korean society of Manufacturing Technology Engineers, 19:2 282-287.
- [4] Masubuchi, K., 1980, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, NewYork.
- [5] Matthew, R., 1997, Combining Quadrilateral and Triangular Meshing Using the Advancing Front Approach, Proceedings of 6th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, 337-348.
- [6] Zacharia, T., David, S. A., Vitek, J. M., Kraus, H. G., 1995, Surface Temperature Distribution of GTA Weld Pools on Thin Plate 304 Stainless Steel, Welding Journal, 74:11 353-362.
- [7] Roper, R., Vossle, J., Osborn, D., 1992, Thermal Stress and Strain Analysis in Travel Autogenous Welds, MARC User's conference, 313-333.
- [8] Krutz, G. W., Segerlind, L. J., 1987, Finite Element Analysis of Welding, Welding Journal, 57 211-217.
- [9] Jeong, H. S., 1997, Fundamentals of Ultrasonic Welding, Journal of the KWJS, 15:6 24-31.
- [10] Lienhard, J. H., Lienhard, J. H., 2006, A Heat Transfer Text Book, 3rd ed., Phlogiston Press, Massachusetts.
- [11] Edgar, D. V., 2004, Mechanics and Mechanisms of Ultrasonic Metal welding, A Thesis for a Doctorate, The Ohio State University, USA
- [12] Davis, J., 2001, Copper and Copper Alloys, ASM International, USA.
- [13] Davis, J., 2004, Concise Metals, ASM International, USA.