

Al 6061 합금의 마찰교반접합시 접합부의 열거동에 관한 연구

방한서* · 김흥주** · 고민성*** · 김규훈***

* 조선대학교 선박해양공학과

** 포항산업과학연구원 용접센터

*** 조선대학교 선박해양공학과 대학원

A Study on the Thermal Behavior of Friction Stir Welding in Al 6061 Alloys

Han Sur Bang *, Heung Ju Kim**, Min Sung Goh*** and Gyu Hun Kim***

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

**Welding Research Center, RIST, Pohang 790-330, Korea

***Graduate school, Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

Abstract

In the various industry such as shipbuilding and automobile, etc., Al-alloys are used to reduce weight and improve economical efficiency, and they are mainly utilized in the process of Friction Stir Welding (FSW). A number of studies have been carried out on the metallurgical characteristics of friction stir welding in Al-alloys. However, research on the thermal behavior of FSW by using numerical analysis is not sufficient in the domestic and abroad. In this paper, therefore, numerical simulation was used to find out thermal behaviour of FSW by finite element method. We considered heat source that occurred by friction between tool shoulder including pin and base metal. To confirm the result of simulation, macrostructure is examined and compared after welding. The result of numerical simulation shows that Al-alloy is welded under a melting point of Al around pin by FSW.

(Received February 1, 2002)

Key Words : Friction stir welding (FSW), Finite element method, Pin, HAZ, Numerical analysis, Tool shoulder

1. 서 론

우주 항공산업, 선박, 자동차등의 여러 공업, 산업분야에서 구조물의 경량화 및 경제성을 목적으로 경량합금인 Al합금의 비강도, 리사이클성 등을 고려하여 많은 연구가 되어 지고 있다. 현재, Friction Stir Welding (이하 FSW) 접합법의 Process 과정은 Al합금을 중심으로 많은 연구가 진행되어지고 있으며 금속류, 비금속류에 관한 이종 재료 접합에 대한 연구까지 진행되고 있는 실정이나, 국내외적으로 수치해석에 의한 FSW 접합부에 대한 열분포 특성 연구가 아직까지 미비한 실정이다¹⁾. 이에 본 연구에서는 Al 6061-T6 합금에 대한

FSW 접합시 열분포 특성을 유한요소법²⁻⁴⁾에 의한 유한해석 프로그램을 이용하여 열분포 해석을 하였다.

2. 유한요소법에 의한 FSW 열전도 이론

Fig. 1은 FSW 접합을 간략히 나타낸 그림으로서, 접합 모재를 고정된 후 경질의 비소모성 회전 Tool과 접합 모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 Tool에 삽입된 Pin 주위로 기계적 열영향부(이하 TMAZ)가 생기게 된다. FSW 접합에 의한 열전도 해석시 Tool shoulder와 모재 사이의 접촉면에서의 마찰과 회전 Pin부근의 접합부에서 발생하는 소성변형을 주 열원으로 고려하였으며, 이를 고려한 입열식은 식(1)과 같다⁵⁻⁸⁾.

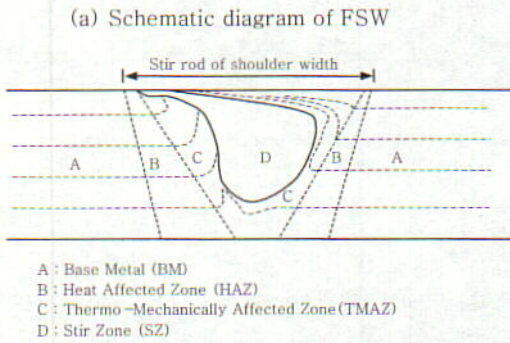
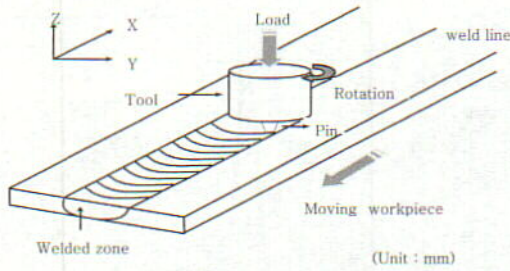


Fig. 1 Configuration of FSW specimen

$$q_0 = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \text{ (watt/ m}^2\text{)} \quad (1)$$

- μ : Friction Coefficient,
- P: Pressure distribution (MPa),
- N: The rotation speed (rpm),
- R: The surface radius (mm)

재료가 등방성(Isotropic)일 때 연속체의 비정상 열전도문제의 지배방정식(Governing equation)은 식(2)와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad (2)$$

식(2)를 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분 적분한 후 Fourier법칙의 경계조건을 대입하여 Matrix화하면 식(3)과 같다.

$$\sum [K]\{\theta\} + \sum [C] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum [F] \quad (3)$$

- $\{\theta\}$: 온도의 함수 [K]: 열전도 Matrix
- [C]: 열용량 Matrix [F]: 열유속 Vector

3. 해석 모델 및 해석 방법

본 연구에 사용된 시편은 Al-Mg-Si계 합금요소로서, 기계적 성질이 우수하고 성형 가공성, 내식성도 양

호하며, 적합한 성분의 용가재를 사용하면 용접성은 나쁘지 않으나 용접부가 용접열 때문에 열화 하는 결점을 가지고 있는 열처리 합금 Al 6061-T6을 선정하였다. 그리고, 열분포 수치해석시 사용된 해석모델의 좌표계는 용접선 길이 방향을 x , 용접선 직각 방향 y , 판두께 방향을 z 로 하였으며, 해석모델의 크기는 길이 (L) = 300mm, 폭 (B) = 300mm, 판두께 (T) = 4mm로 하였으며, Fig. 2(a)에 나타난 것과 같다. FSW 기기를 이용하여 Butt 접합을 하였으며, 접합조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Welding condition

Al 6061-T6	Rotation speed(rpm)	Welding speed (mm/min)	Shoulder (D)
	1500	500	15mm
300×300×4	Pin (D)	P (MPa)	Friction coeff.
	5mm	50	0.42

FSW 접합부의 열적 특성을 규명하기 위해 비정상 열전도 유한요소 수치해석 이론식을 이용하여 해석을 수행하였으며, 이들 결과를 비교 검토함으로써 프로그램의 타당성을 입증하고자 하였다. 이를 위해, FSW 접합부의 열분포를 정도 높게 해석하기 위해 재료의 온도 변화에 따른 온도의존성을 고려한 2차원 비정상 열전도 이론을 도입하고, 이들을 유한요소식으로 정식화한 후 4절점 아이소파라메티요소를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하여 열적 특성을 파악하였다. Fig. 2(b)는 해석시 큰 영향을 줄 것으로 사료되는 부분인 접합

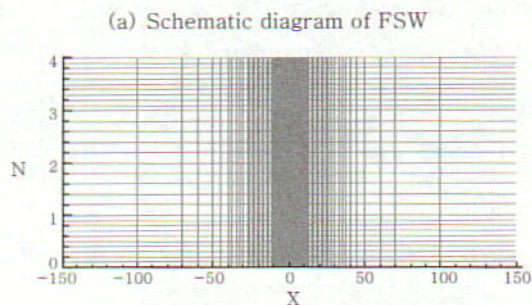
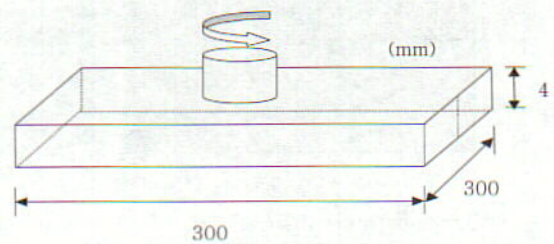


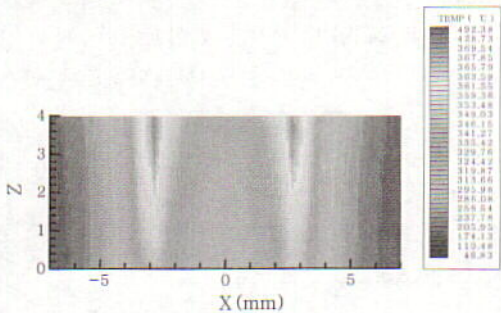
Fig. 2 Analysis model of FSW (Unit:mm)

부를 Tool shoulder와 Pin의 직경을 고려^{9,10})하여 접합선 중심의 y방향 요소의 크기는 0.3mm로 세밀하게 mesh하였고, 접합부에서 멀어질수록 크게 mesh하였으며, 요소수는 2820개이고 절점수는 2945개이다.

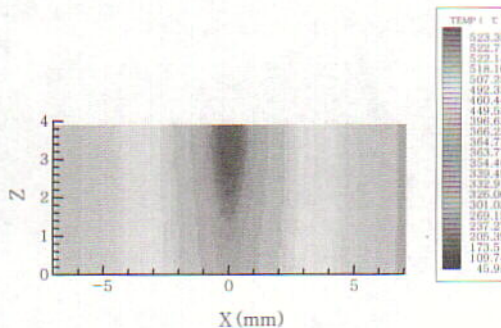
4. 수치해석에 의한 온도분포 고찰

2차원 비정상 열전도 프로그램을 이용하여 수치 시뮬레이션에 의해 나타난 현상을 고찰하였다. Fig. 3(a)는 접합 시작 후 1sec대의 온도분포를 보여주고 있다. 그림을 보면, 모재와 Tool이 맞닿는 부분(X=-3mm, 3mm)에서 고온을 형성하고 있는데 이는 Tool의 회전력에 의하여 모재에서 마찰열이 발생하여 나타나는 현상이라 사료된다^{11,12}).

Fig. 3(b)는 접합후 2sec대 온도분포를 나타낸 그림으로서, 최고 온도분포를 나타내고 있다. 여기서 주목해야 할 점은 Al의 용점 660℃에 비해 Pin의 주위에서 용점이하의 소성유동을 일으키는 530℃ 정도에서 접합을 보이고 있다. 또한, 최고온도분포는 Pin의 외부 원주를 따르고 있으며, 시편의 물리적 성질에 의해 온도가 좌우됨을 고찰하였다. Fig. 4는 시험체 중앙단면의 상표면에서 두께방향으로 1.5mm 아래인 지점에서의 시간대별 냉각곡선을 나타낸 그래프로서, 접합 후 2sec에서 Al의 용점온도 이하의 최고 온도를 보이고 있으며, 온도구배가 급격한 경사를 이루는 것을 볼 때, 고온역에서 빠른 속도로 냉각됨을 보여주고 있다. Fig. 5



(a) Temperature distribution of FSW at 1sec



(b) Temperature distribution of FSW at 2sec

Fig. 3 Temperature distribution of specimen

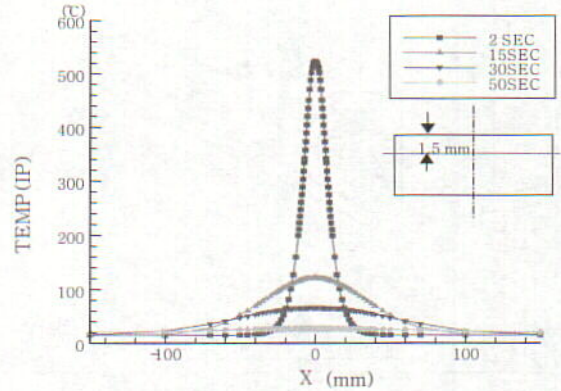


Fig. 4 Cooling curve along the time

는 너깃부(SZ), 열-기계적 영향부(TMAZ), 열영향부(HAZ) 및 모재(BM)의 시간에 따른 온도이력을 도시하였으며, 열전도 해석의 경우 각각의 영역에서 온도구배가 약 12초 정도에서 거의 동일함을 알 수 있으며, 접합부에서 급냉함을 알 수 있다. 요소는 시편과 동일한 위치의 요소로 접합부의 중앙에서 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, 10mm떨어진 요소를 추출하였다.

Fig. 6은 수치해석에 의한 온도 그래프와 실험에 의한 접합부의 단면에서 각각의 미세조직을 영역별 분포 및 크기를 나타낸 그림으로서, (a) 열영향부(HAZ)영역은 450~480℃, (b) 열-기계적영향부(TMAZ)영역은 480~500℃, (c) 너깃부(SZ)영역은 500~530℃의 온도분포를 보이며, Fig. 6(c)에서는 열-기계적영향부(TMAZ)와 너깃부(SZ)의 경계면으로서 소성유동에 의한 조직 변화와 부분적인 동적 재결정 성장을 보이고 있음을 조직사진의 관찰로서 알 수 있다. 또한, 미세조직의 형성은 FSW의 공정변수와 모재의 상태, 접합 중에 생기는 열이력(Thermal History)에 의해 결정됨을 알 수 있다.

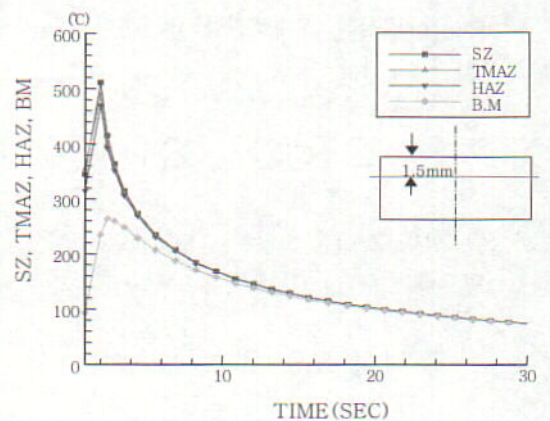


Fig. 5 Thermal history of SZ, TMAZ, HAZ, BM elements

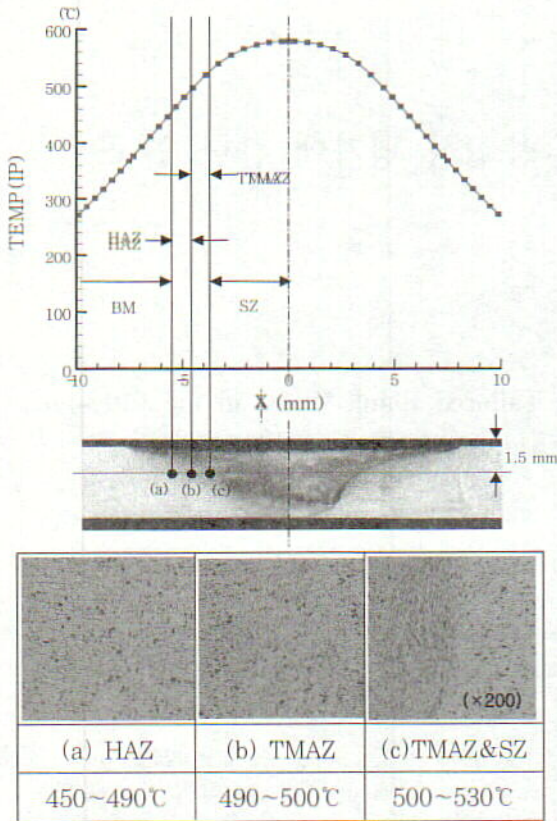


Fig. 6 Macrostructure of FSW on the cross section

5. 결 론

FSW 접합시 열분포 특성을 수치해석 고찰해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 접합 시작후 1sec대의 온도분포는 모재와 Tool이 맞닿는 부분에서 고온을 형성하고 있는데 이는 Tool의 회전력에 의하여 모재에서 마찰열이 발생하여 나타나는 현상이라 사료된다.

2) 접합 후 2sec대에서 최고온도분포를 보이며, 시간대별 냉각곡선으로부터 온도구배가 급격한 경사를 이루는 것을 볼 때, 고온역에서 빠른 속도로 냉각됨을 보여주고 있다.

3) Al의 용점 660°C에 비해 Pin의 주위에서 용점이 하의 소성유동을 일으켜 보다 낮은 530°C 정도에서 접합됨을 보이고 있다.

4) 수치해석에 의한 온도분포와 미세 조직관찰을 통하여 접합부의 SZ, TMAZ, HAZ 영역을 고찰한 결과 열-기계적 영향부(TMAZ)에서 소성 변형에 의한 부분적인 동적 재결정이 일어남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Woong-Seong Chang, Ki-Yong Choi, Moon-Jin Kang and Young-Gak: up-and-Coming Friction Stir Welding, Journal of KWS, 18-6(2000),704~712 (in Korean)
2. Han-Sur Bang: A study on the mechanical behavior of welded part in thick plate, Journal of KWS,10-4 (1992), 250~258 (in Korean)
3. 夫川元基 外1人 : "有限要素法による熱應力・クリープ・熱傳導解析", (株)サイエンス, 1985. (in Japanese)
4. Han-Sur Bang, You-Chul Kim: Analysis on the three-dimensional unstationary heat conduction on the welding of thick plate by F.E.M.,Journal of KWS, 9-2(1991), 37-43 (in Korean)
5. Paul Colegrove et al: 3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process ,The University of Adelaide, TWI FSW Symposium(2000), Supplement (in Korean)
6. Yuh J.Chao and Winhai Qi : "Heat transfer and Thermal-Mechanical Analysis of Friction Stir Joining of AA 6061-T6 Plates, TWI FSW Symposium (1999), Supplement
7. Kazuhiro NAKATA, Young Gon KIM, Masao USHIO: Weldability of High Strength Aluminum Alloys ,ISIJ International, Vol. 49 (2000), Supplement
8. O. Frigaard, O. Gong: Modelling of Heat phenomena in Friction Stir Welding Aluminium Alloys, INALOO98,197~207
9. C. J. Dawes, W. M. Thomas, Welding Journal,75-3 (1996),41~45
10. McClure, J.C. ,Z.Feng ,T.Tang, J.E .Gould L.E.Murr and X.Guo: A Thermal Model of Friction Stir Welding,5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA,1-5 June (1998),Supplement
11. Michal J. Russell, Hugh R. Shercliff: Analytical Modelling of Friction Stir Welding, INALOO 98,185~195.
12. Han-Sur Bang: Analysis on the two dimensional unstationary heat conduction sheet plate, Journal of KWS, 27-4(1990), 44~50