

Al 6061 합금의 마찰교반접합시 접합부의 역학적 특성에 관한 연구

방한서* · 김홍주** · 고민성*** · 장웅성****

* 조선대학교 선박해양공학과

** 조선대학교 포항산업연구원과정 대학원

*** 조선대학교 선박해양공학과 대학원

**** 포항산업연구원 용접센터

A Study on the Mechanical Characteristic in Al 6061 Alloys welded by Friction Stir Welding

Han Sur Bang*, Heung Ju Kim**, Min Sung Go*** and Woong Seong Chang****

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

**Graduate school, Course of RIST, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

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

****Welding center, RIST, Pohang 790-330, Korea

Abstract

Al-alloy is utilized widely as a light-weight material to an automobile, a vessel and many kind of equipment, due to the light-weight and its characteristics that is a good tensile strength, elongation and tenacity for bearing heavy load and weight. Al-alloy has the good property of hot working, cold working and corrosion-resistant. But the existing fusion welding by using Al has some economical and technical problems, but on the other hand, Friction Stir Welding (FSW) that is new joining method can settle the disadvantages that occur to the fusion welding and is being applied and extended into the various industry fields. On this study, To analyze accurately the mechanical properties of joining area by FSW in Al 6061 alloy by using finite analysis program with finite element method. The size of HAZ and the thermal distribution is simulated and the mechanical properties around the FSW joining area to the Al-alloy 6061 is examined.

(Received February 1, 2001)

Key Words : FSW, Finite element, HAZ, Elongation, Tenacity, Hot working, Cold working, Corrosion-resistant

1. 서 론

Al 합금은 가벼우면서 인장강도 및 연신율이 우수하고 인성이 풍부하여 고하중에도 잘 견디는 성질을 가지고 있다. 또한, 열간 및 냉간 가공성이 우수하며 내부 식성이 뛰어나 자동차, 선박 및 각종 기기 등의 경량화 재질로 많이 사용되어지고 있으나, 기존의 용융용접 방법을 이용하여 Al 합금을 용접하는 경우는 경제성, 기술적인 측면에서 많은 문제점이 있다. 그러나, 신 개념의

접합법인 비용융식 고상접합인 마찰교반접합(이하FSW)은 용융 접합에 발생하는 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 새로운 기술로서 다양한 산업분야에 적용 확대되고 있다^{1,2)}.

이에 본 논문에서는 FSW에 의한 Al 6061 합금에 나타나는 접합부의 역학적 특성들을 유한요소법에 의한 열탄소성 유한해석 프로그램을 이용하여 정도 높게 해석하기 위해, 열이력에 의한 열영향부의 크기와 용접시의 온도 분포를 시뮬레이션하고 이를 입력값으로 하여 Al 6061 합금에 대한 FSW접합부의 역학적 특성을 규

명하였다^{3,4)}.

2. 열탄소성 해석 이론

용접 잔류응력 해석용 프로그램에서는 탄·소성 전 영역에 걸쳐 항복강도, 탄성계수 등의 재료정수의 온도 의존성을 고려하였고, 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow)이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정도를 높였다. 또한, 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-Mises 항복조건을 항복함수로 사용하였다. 전변형율(Total strain)증분 $\{d\epsilon\}$ 은 아래 식과 같이 탄·소성 열변형율의 합으로써 구성되었다^{5,6)}.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\}$$

여기서, ϵ^e : 탄성 변형율, ϵ^p 소성 변형율,
 ϵ^t : 열 변형률

3. 해석 방법 및 접합조건

마찰교반접합 시험편의 재원은 Fig. 1과 같이 길이(L)=300mm, 폭(B)=300mm, 판두께(t)=4mm이며, 수치해석에 사용된 Al 6061-T6 재료의 화학적 조성과 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Shoulder부의 가압을 일정 하게 한 후 FSW 접합에서 각종 공정변수들 중 회전속도와 접합 속도의 공정변수를 바꿔가며 건전한 Bead를 얻을 때까지 반복 실험한 결과값을 Table 1에 나타내었다⁷⁾.

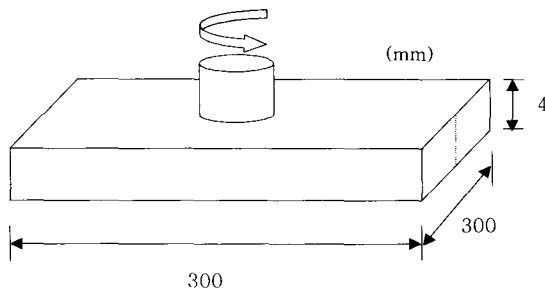


Fig. 1 Configuration of FSW specimen

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

Table 2 Chemical composition and Mechanical properties of specimen

Chemical composition (wt%)			
Al	Fe	Si	Cr
98	0.7	0.4-0.8	0.04-0.35
Mg	Cu	Mn	Zn
0.8-1.2	0.15-0.4	0.15	0.25
Mechanical properties			
Yield stress(MPa)	Elongation (%)	Tensile stress (MPa)	
55	25	240	
Density (g/cc)	Heat conduction coeff.	E (kg/cm ²)	
2.7	0.40	7070	

FSW 접합에 의한 접합부의 역학적 특성을 정도 있게 해석하기 위해서 유한요소법에 의한 열탄소성 이론을 도입하여, 요소분할은 4절점 아이소파라메터를 사용하였으며, 해석시 큰 영향을 줄 것으로 사료되는 부분인 접합부를 Tool shoulder와 Pin의 직경을 고려하여^{8,9)} Fig. 2와 같이 접합선 중심의 y방향 요소의 크기는 0.3mm로 세밀하게 mesh하였고, 접합부에서 멀어질수록 크게 mesh하였으며, 요소수는 2820개이고 절점수는 2945개 이다. 그리고, 시험체 접합시 열이력을 입력 데이터로 하였으며 열탄소성시 경계 조건은 수축과 팽창 및 시험편 제작시 현상을 고려하여 Fig. 3의 그림과 같은 경계조건을 선정하였다¹⁰⁻¹²⁾.

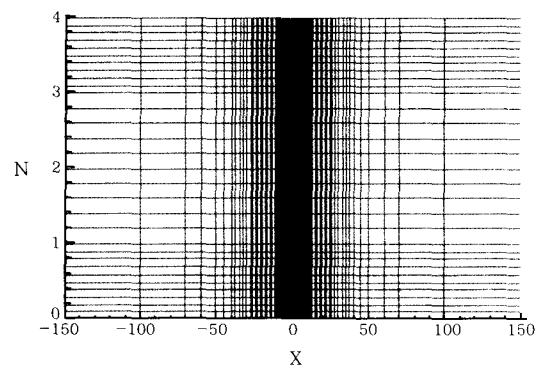


Fig. 2 Mesh generation (Unit:mm)

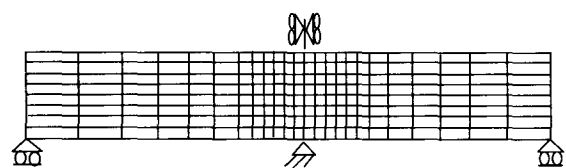


Fig. 3 Boundary condition

4. 수치해석 잔류응력 분포 고찰

열탄소성 해석의 입력 데이터는 열전도 해석시의 전과정의 온도분포 이력을 입력 데이터로 사용하여, Al 6061-T6 합금에 대하여 열탄소성 프로그램을 사용하여 해석 결과에 대한 역학적 제현상을 규명하였다. Fig. 4(a)는 잔류 응력 성분 중 응력 성분을 주도하는 접합선 방향 응력 (σ_x)에 대해 나타낸 그림으로서, 접합부의 SZ, TMAZ 및 HAZ 영역에서 집중적인 응력 분포를 보이고 있다. 시험체 중앙부(X=-3, 3mm 부근)는 Pin의 마찰에 의해 응력성분의 가장 큰 인장응력을 보이며, 끝단으로 멀어질수록 압축응력을 보이고 있다. 그리고, Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 접합선 직각방향 (σ_y) 응력과 판 두께 방향 (σ_z) 응력을 도시한 그림으로서, Pin 부근에서 약간의 인장응력이 발생하고 접합부에서 멀어질수록 압축응력을 보이고 있다.

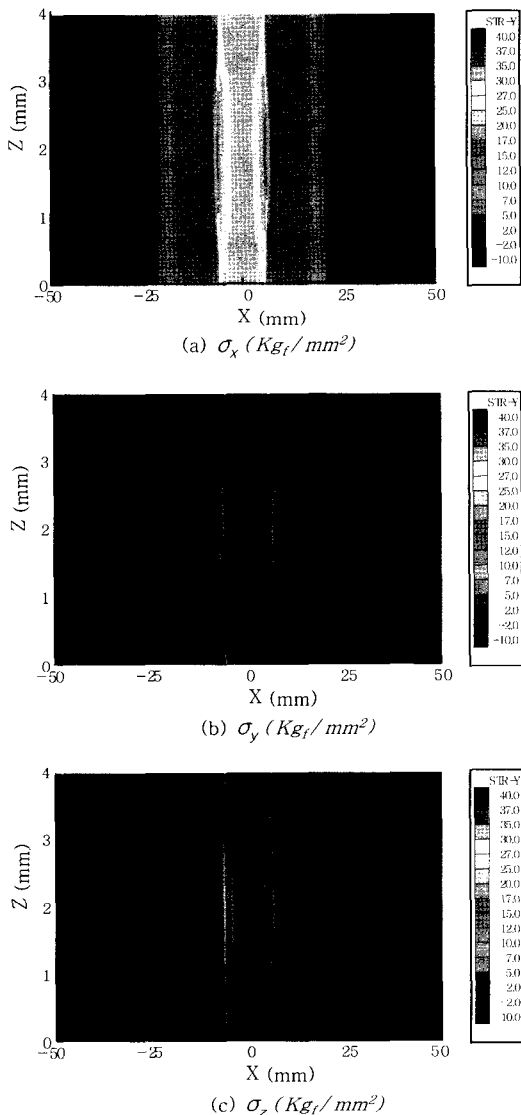


Fig. 4 Residual stress distribution of FSW

Fig. 5는 상표면에서 폭방향으로 접합 잔류응력 성분 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)을 σ_x 비교한 그림이다. Pin 부근의 위치에서 잔류응력값이 차이를 보이고 있으며, 접합선 방향의 응력성분 (σ_x)이 폭방향 (σ_y) 및 두께방향 (σ_z)의 응력성분 보다 높아 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순이었으며, 접합선 방향의 응력성분 σ_x 는 압축에서 인장을 나타내었다.

Fig. 6은 시험편 전영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형률 ($\epsilon_x^p, \epsilon_y^p$)을 Contour 형태로 그래픽 처리하여 나타낸 것으로서, Pin 주위와 모재 사이 구간에서 압축과 인장변형률이 교차함을 보이고 있음을 알 수가 있다.

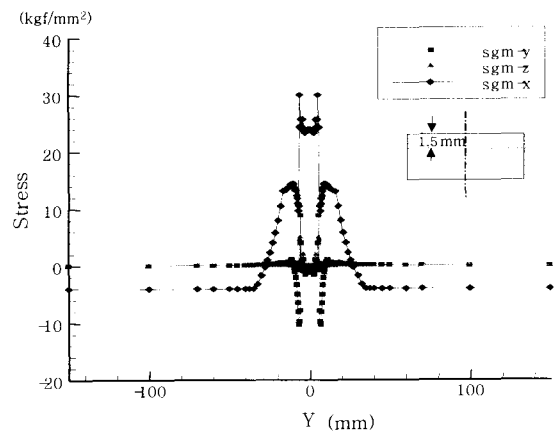


Fig. 5 Residual stress distribution of FSW

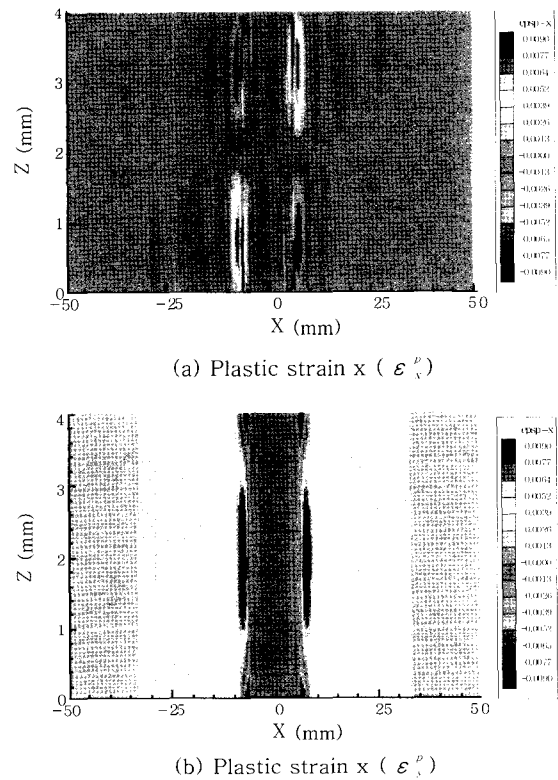


Fig. 6 Plastic-strain distribution of FSW

그리고, 접합선 길이 방향 성분의 변형률 (ϵ_x^p)이 폭 방향 변형률 (ϵ_y^p)보다 높게 나타나며, 접합이 이루어진 SZ 영역에서 HAZ영역 부분까지는 압축소성변형률을 보이고 있으며, 끝단으로 갈수록 인장소성 변형률을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고, HAZ 영역과 모재 사이에서 압축과 인장변형률이 급격한 교차를 보이고 있다. Fig. 7은 시험체 중앙단면의 상표면 1.5mm 아래인 지점에서의 소성 변형율을 나타낸 것으로서, 접합선 길이방향 성분 ϵ_x^p 은 SZ, TMAZ, HAZ 영역에서 압축성분을 나타내며 모재에서는 인장성분을 나타내고 있으며, SZ, TMAZ, HAZ 영역에서의 소성 변형률을 알 수 있었다. 그리고, ϵ_y^p 는 ϵ_x^p 와 반대의 양상을 보이고 있으며, HAZ부근 영역과 모재 구간에서 압축과 인장이 교차하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그 크기는 $\epsilon_x^p > \epsilon_y^p$ 임을 알 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 FSW 접합부의 역학적 특성을 고찰하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존의 용융용접은 모재의 용융온도 이상까지 가열하여 가열된 부분이 녹아서 용접이 이루어 졌으나, FSW는 모재의 용점이하에서 모재와 Pin, Shoulder의 마찰에 의해서 접합이 이루어지며, 수치 해석에 의한 접합부의 특성은 FSW 접합이 각종 접합공정변수들 중 Rotation speed와 Welding speed에 의해 응력 값이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

2) 수치 해석을 통한 잔류응력 분포를 보면 접합부 중앙에서 인장을 받고 있음을 알 수 있었으며 응력의 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순 이었다. 이는 시험편의 기하학적 구속현상에 의한 강성에 기인하는 것으로 사료된다.

3) Pin에 의한 마찰교반작용에 의해 SZ, HAZ,

TMAZ 영역에서 집중적인 응력분포를 보이며, 소성 변형율 분포는 HAZ와 모재 구간에서 급격한 교차를 보이나 크기는 작음을 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. C. J. Dawes, W. M. Thomas, *Welding Journal*, **75-3** (1996),41~45
3. Han-Sur Bang: Analysis on the two dimensional unstationary heat conduction sheet plate, *Journal of KWS*, **27-4**(1990), 44~50 (in Korean)
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. 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)
6. 失川元基 外1人: "有限要素法による熱応力・クリープ・熱傳導解析", (株)サイエンス, 1985. (in Japanese)
7. Kazuhiro NAKATA, Young Gon KIM, Masao USHIO: Weldability of High Strength Aluminum Alloys, *ISIJ International*, **49**(2000), Supplement
8. Paul Colegrove: 3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process, The University of Adelaide, TWI FSW Symposium (2000), Supplement
9. 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
10. O.Frigaard, O. Gong: Modelling of Heat phenomena in Friction Stir Welding Aluminium Alloys, *INALOO* 98,197~207
11. 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
12. Michal J. Russell, Hugh R. Shercliff: Analytical Modelling of Friction Stir Welding, *INALOO* 98,185~195

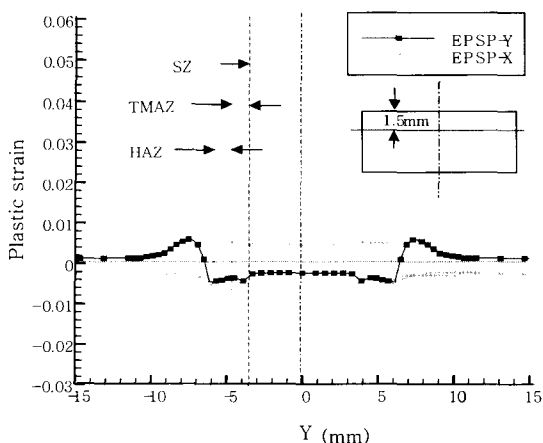


Fig. 7 Comparison of plastic strain distribution