

Al-6061합금의 마찰교반접합시 접합부의 잔류응력분포 특성에 관한 연구

A Study on the Residual Stress Distribution Characteristics of FSW with Al-6061 Alloys

방한서 *, 김홍주 **, 오종인 **

* 조선대학교 공과대학 선박해양공학과

** 조선대학교 대학원

1. 서론

Al 합금은 가벼우면서 인장강도 및 연신율이 우수하고 인성이 풍부하여 고하중에도 잘 견디는 고유의 성질과 열간 및 냉간 가공성이 우수하며 내부식성이 뛰어나 자동차, 선박 및 각종 기기 등의 경량화 재질로 많이 사용되어지고 있다. FSW를 이용한 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 규명하였다.

2. 열탄소성 해석 이론

용접잔류응력 해석용 프로그램에서는 탄·소성 전 영역에 걸쳐 항복강도, 탄성계수 등의 재료정수의 온도의존성을 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 및 열변형율의 합으로써 구성되었다.

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

3. 해석 방법 및 접합조건

해석에 사용된 시편은 Al 6061-T6 합금이고, 시편의 사이즈는 $300 \times 300 \times 4\text{mm}$ ($W \times L \times T$)이며, 재료의 화학적 조성 과 물성치는 Table. 1에 나타내었다. 시험체 접합시 열이력을 입력 데이터로 하고 열탄소성시 경계 조건은 수축과 팽창 및 시험편 제작시 현상을 고려하여 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 해석시 사용된 시편은 Shouder부의 가압을 일정 하게 한 후 FSW 접합에서 각종 공정변수들 중 회전속도와 접합 속도의 공정변수를 바꿔가며 건전한 Bead를 얻을 때까지 반복 실험하였다.

Table 1. Chemical composition and Mechanical property of base metal

Materials	Chemical composition (wt%)								
	Al	Fe	Si	Cr	Mg	Ti	Cu	Mn	Zn
Al 6061-T6 Alloy	98	0.7	0.4-0.8	0.04-0.35	0.8-1.2	0.15	0.15-0.4	0.15	0.25
	Mechanical property								
	Yield stress(MPa)	Elongation(%)		Tensile stress	Heat conduction coff.	Density (g/cc)	E (kg/cm ²)		
55	25		240	0.40	2.7	7070			

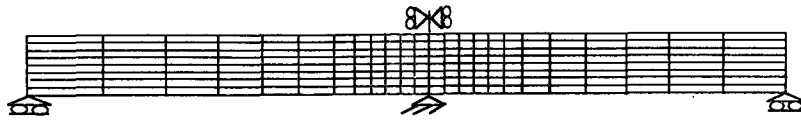


Fig. 1 Boundary Condition

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 제한상을 규명하였다. Fig. 2은 잔류응력 성분 중 응력 성분을 주도하는 용접선 방향 응력(σ_x)에 대해 나타낸 그림으로서, 시험체 중앙에서 인장이 걸리고 있으며, 끝단으로 멀어질수록 압축응력을 보이고 있다. 시험체 중앙부($X=-3\sim 3\text{mm}$)는 Pin의 마찰에 의해 응력성분의 경향이 인장과 압축을 교차함을 보이고 있다. 또한, 접합부의 SZ, TMAZ 및 HAZ영역에서 집중적인 응력 분포를 보이고 있다. Fig. 3는 시험편 전영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형률을 나타낸 그림으로서, 접합이 이루어진 SZ에서 HAZ부분까지는 압축소성변형률을 보이고 있으며, 끝단으로 갈수록 인장소성 변형률을 보이고 있음을 알 수 가 있다. 그리고, HAZ와 모재 사이에서 압축과 인장변형률이 급격한 교차를 보이고 있다.

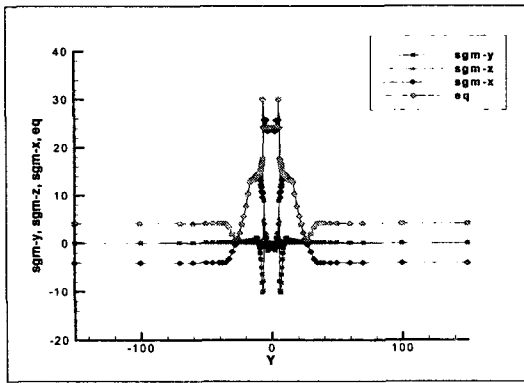


Fig. 2 Residual Stress Distribution of FSW

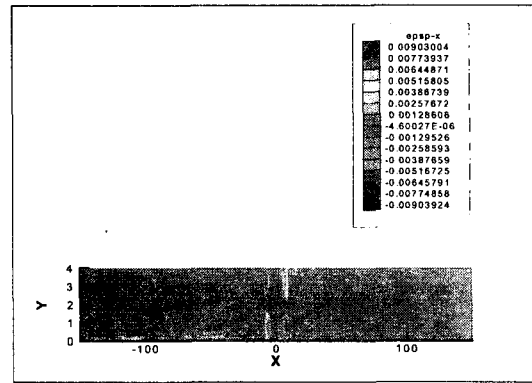


Fig. 3 Plastic Strain Distribution of FSW

Fig. 4에서는 Al 6061 합금의 접합중 가장 양호한 접합 면에서 모재 방향으로 0.5mm 간격으로 200g의 하중을 주어 경도값을 측정된 결과이다. 접합부에서 최대 경도는 접합부 중심에서 나타났으며, SZ, TMAZ 및 HAZ영역에서는 모재에 비해 경도값이 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고, 연화폭은 거의 15mm이내임을 보인다. Fig. 5에서는 FSW접합시 일정 가압 후 Rotation speed와 Welding speed를 고려하여 제작한 시험편의 표면 Bead형상과 X-RAY 및 미세조직을 나타낸 그림이다. 여기서 회전속도 1000rpm, 접합속도 500mm/min일 때 가장 좋은 접합부를 얻을 수 있었으며, 미세조직 그림에 의하면 균열이 발생함을 볼 수 있는데 이 현상은 마찰열에 의한 잔류응력의 생성과 Rotation speed와 Welding speed의 접합변수 때문이라 사료된다.

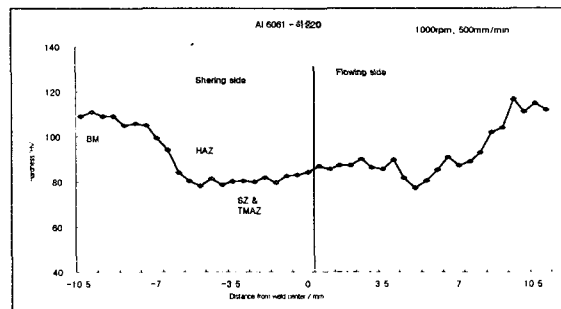


Fig. 4 Hardness Distribution of FSW

Al 6061 -T6	Surface appearance	X-ray photograph	Macro structure	Al 6061 -T6	Surface appearance	X-ray photograph	Macro structure
N=1000 V=500				N=1500 V=1500			
N=500 V=500				N=1500 V=250			
N=1500 V=1000				N=2500 V=500			

(Rotation speed :N(rpm), Plate speed: V(mm/min))

Fig. 5 Macrostructure of FSW

5. 결론

이상과 같이 수치해석을 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수치 해석을 통해 FSW 접합이 각종 공정변수들 중 Rotation speed와 Welding speed의 공정변수에 의해 응력 값의 크게 좌우된다.
2. 수치 해석을 통한 잔류응력 분포를 보면 접합부 중앙에서 압축을 받고 있음을 알 수 있었으며, 응력의 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순 이었다.
3. Pin에 의한 마찰교반작용에 의해 SZ, HAZ, TMAZ에서 집중적인 응력분포를 보이며, 소성 변형을 분포는 HAZ와 모재 구간에서 급격한 교차를 보이거나 크기는 작음을 알 수 있었다.
4. 접합부에서 최대 경도는 접합부 중심에서 나타났으며, SZ, TMAZ및 HAZ영역에서는 모재에 비해 경도값이 약간의 차이가 있음으로 보아 모재에 비해 연화된 조직을 보였다.

참고문헌

1. Kazuhiro NAKATA, Young Gon KIM, Masao USHIO : "Weldability of High Strength Aluminum Alloys ,ISIJ International, Vol.49 (2000), Supplement
2. Paul Colegrove: "3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process " The University of Adelaide
3. Yuh J.Chao and Winhai Qi : "Heat Transfer and Thermal-Mechanical Analysis of Friction Stir Joining of AA6061-T6 Plates"
4. 房漢瑞 : "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解析", 大韓造船學會誌, 第27卷 第4號, pp.44~50, 1990.
5. 房漢瑞 : "후판용접부의 역학적 특성". 大韓熔接學會, Vol.10, No.4, pp.250~258, 1992.