

경량합금의 마찰교반접합(FSW)시 틀 형상에 따른 접합부의 열분포 및 역학적 거동 특성에 관한 연구

The Study on Thermal distribution & Mechanical Behavior of Friction Stir Welded Lightweight Alloy according to the Tool pin shape

김홍주*, 장응성*, 방한서**

* 포항산업과학연구원(RIST) 용접센터

** 조선대학교 선박해양공학과

1. 서 론

알루미늄 합금과 마그네슘 합금들은 경량화 및 경제성을 위해서 수송기계용 분야에 많은 적용되고 있다, 이는 기존의 철계 합금을 대체 했을 보다 연료 절감 및 경량화에 많은 이점을 제공하고 있다. 이렇게 경량합금 소재의 사용의 증가 및 소재의 발전과 더불어 이에 대한 가공기술 또한 많은 발전을 이루고 있으며 기존 용융용접에 의한 어려움을 해소하기 위해서 새로운 용접법의 개발이 요구 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 수송기계용 경량합금인 알루미늄 6000계열 합금 합금을 이용하여 마찰 교반접합 (FSW)을 이용하여 접합 이음부의 열거동 및 역학적 특성에 관해 규명 하였다. 이를 위하여 마찰교반 접합 시 가장 중요한 용접 공정변수인 틀 핀의 디자인에 따라서 접합부의 온도 분포 및 잔류응력 분포 특성을 파악 하였으며, 또한, 알루미늄 합금에 대한 마찰교반접합 실험 및 해석을 실시하였다. 주 접합변수인 틀의 회전속도와 이동속도를 주인자로 하여 마찰교반 접합 실험을 실시하였으며 열전대를 이용하여 접합부의 온도분포 특성을 파악 하였다. 또한 마찰교반접합부의 유한요소해석에 필요한 용접열원에 대해서 발전 시켰으며, 특히 틀 형상에 따른 접합부의 특성을 파악 하여 마찰교반접합에서 틀에 의한 접합부의 열분포 특성을 확인 할 수 있었다.

2. FSW 열전도 해석 이론

FSW 접합시 접합 모재를 고정된 후 경한 재질

을 지닌 비소모성 회전 Tool과 접합 모재의 상대적 운동에 의해 접촉면에서의 마찰열과 회전 Rotating Pin 부근에서의 너깃부의 소성변형을 열원으로 하여 접합이 이루어진다.

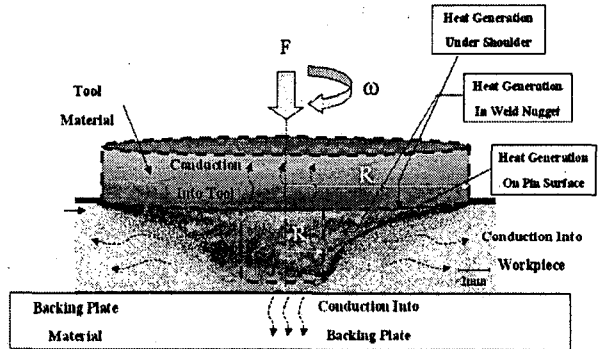


Fig. 1 Heat generation model of FSWelding

Fig. 1은 FSW 접합을 간략히 나타낸 그림으로서, 접합 모재를 고정된 후 경질의 비소모성 회전 Tool 과 접합 모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 Tool 에 삽입된 Pin 주위로 기계적 열영향부(이하 TMAZ)가 생기게 된다. FSW 접합에 의한 열전도 해석시 Tool 솔더와 모재 사이의 접촉면에서의 마찰과 회전 Pin 부근의 접합부에서 발생하는 소성변형을 주 열원으로 고려하였으며, 이를 고려한 입열식은 식(1)과 같다.^{5)~8)}

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

(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.

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

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

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

{θ}; 온도의 함수 [K]: 열전도 Matrix
[C]: 열용량 Matrix {F}: 열유속 Vector

3. 해석 모델 및 해석 방법

본 연구에 사용된 시편은 Al-Mg-Si계 합금 요소로서, 기계적 성질이 우수하고 성형 가공성, 내식성도 양호하며, 적합한 성분의 용가재를 사용하면 용접성은 나쁘지 않으나 용접부가 용접열 때문에 열화 하는 결점을 가지고 있는 열처리 합금 Al 6061-T6을 선정하였다. 그리고, 열분포 수치해석 시 사용된 해석모델의 좌표계는 용접선 길이 방향을 x, 용접선 직각 방향 y, 판두께 방향을 z로 하였으며, 해석모델의 크기는 길이 (L) = 300 mm, 폭 (B) = 300 mm, 판 두께 (T) = 4 mm이다. 또한 본 연구에서 사용된 모재의 화학적 성분 및 기계적 특성은 Table 1에 나타내었으며, Table 2는 해석에 사용된 접합 조건을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition and Mechanical properties of specimen

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

Table 2 Welding Conditions

| Parameter | Conditions |
|----------------|-----------------|
| Rotation speed | 1000~1500 (rpm) |
| Welding speed | 200 (mm/min) |
| Shoulder (D) | 18mm |
| Pin (D) | 6mm |

본 연구의 열탄소성 프로그램에서 탄성 및 소

성 전 영역에 걸쳐 온도 의존성을 고려한 Al 6061 합금의 열전도율, 탄성계수 등의 재료정수는 Fig. 2와 Fig.3에 나타내었다. FSW 접합부의 열적 특성을 규명하기 위해 비정상 열전도 유한 요소 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 유한 요소식으로 정식화 한 후 4절점 아이소 파라메터 요소를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하여 열적 특성을 파악하였다. Fig. 4는 해석 시 큰 영향을 줄 것으로 사료되는 부분인 접합부를 Tool shoulder와 Pin의 직경을 고려하여 0.2mm× 0.2mm로 mesh 하였으며, 요소수는 8200개이고 절점수는 8631개이다.

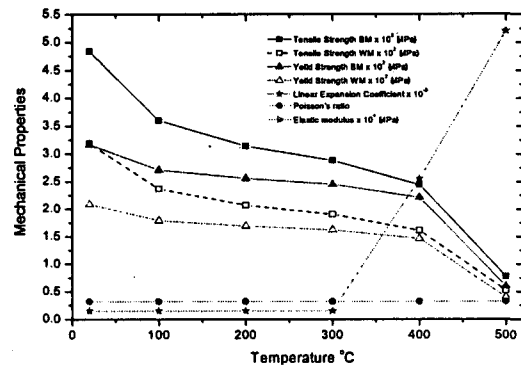


Fig.2 physical properties of Al606-T6 Alloy

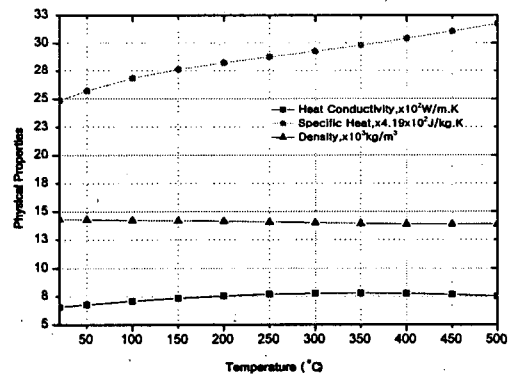


Fig. 3 Mechanical properties of Al606-T6 Alloy for thermal elasto-plastic analysis

Table 3 Dimensions of tool pin

| Pin shape | Shoulder dia. (mm) | Pin dia. (mm) | Pitch length (mm) |
|-----------------|--------------------|---------------|-------------------|
| Cylindrical pin | 18 | 6 | 0 |
| Threaded pin | 18 | 6 | 1 |
| Frustum pin | 18 | 6 | 0 |

본 연구에 사용된 접합용 틀은 Table 3의 제원을 가지고 각기 형태가 다른 (1) Cylindrical pin, (2) Threaded pin, (3) Frustum pin으로서 3가지 종류의 핀을 사용하여 열 및 역학적 특성을 비교하였다.

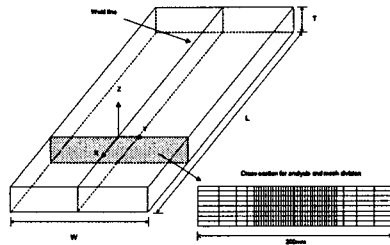


Fig. 4 Two-dimensional model for finite element analysis

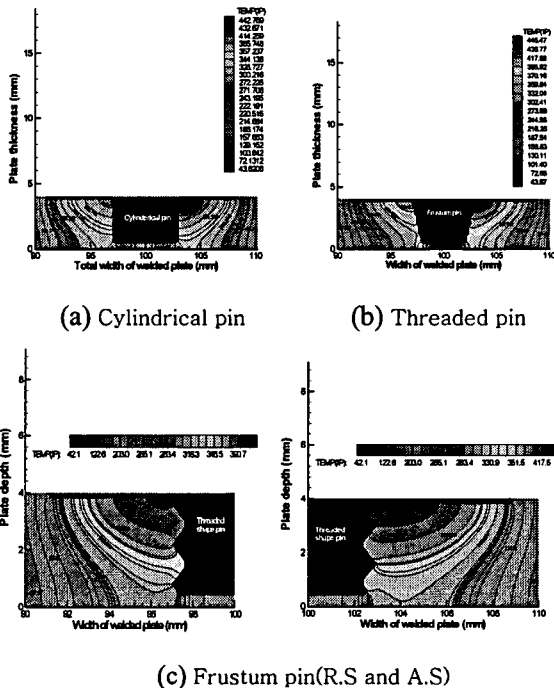


Fig. 5 Calculated temperatures distribution according to the Cylindrical tool pin shape (Al6061-T6)

Fig. 5(a)는 2차원 비정상 열탄소성 열전도 프로그램을 사용 수치 해석을 한 온도분포로서, 틀의 회전 방향과 접합 방향이 동일한 advancing side(AS)의 틀솔더에서 가장 높은 온도 분포를 보인다. 최고 온도는 Al합금의 녹는점인 660℃ 보다 낮은 440℃에서 온도 분포를 형성한다. 그리고 회전방향과 접합 방향이 반대방향인 retreating side(RS)에서는 약 410℃의 온도분포가 이루어짐을 해석을 통해서 알 수 있었다. 그리고 Fig. 5(b) Threaded pin의 온도 분포는 advancing side(AS)에서는 최고 온도분포는 약

448℃, retreating side(RS)에서는 최고 온도는 약 396℃를 보인다. 마지막으로 Fig. 5(c) Frustum pin의 경우는 advancing side(AS)에서는 최고 온도분포는 약 441℃, retreating side(RS)에서는 최고 온도는 약 417℃를 보인다.

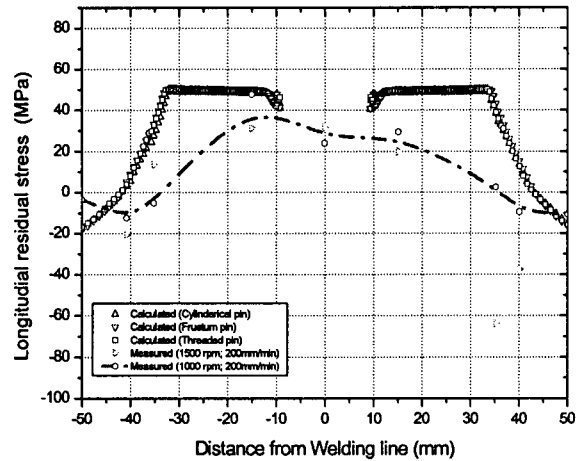


Fig. 6 Comparison the residual stress distributions from simulation and experimental results in Al 6061 T6 alloy FSW joint

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. 6은 잔류 응력 성분 중 응력 성분을 주도하는 접합선 방향 응력 (σ_x)에 대하여 수치해석과 실험에 의한 접합부 잔류 응력을 비교 한 그래프이다. 실험에 의한 접합부 잔류 응력은 접합부 표면을 측정하였으며, 해석에 의한 결과와 비교시 잔류 응력의 값은 차이는 있지만 그래프 분포 형상은 거의 유사함을 알 수 있었다.

5. 결 론

수치해석에 의한 Al6061 합금의 마찰교반접합시 틀 핀의 형상에 따른 접합부의 열분포 특성과 역학적 특성을 파악하였으며 틀 핀의 형상에 따른 최고 온도 분포는 Frustum pin (448.47℃) > Cylindrical pin (442.76℃) > Threaded pin (441.02℃) 순이며, 틀 핀의 형상의 변화에 따라서도 다른 열분포 특성을 보였다.