

전산 열·구조해석에 의한 알루미늄 6061 마찰교반용접 특성 연구

A Study on Numerical Thermo-Mechanical Analysis for Aluminum 6061 Friction Stir Welding

박찬우¹, 팽진기^{1,✉}, 옥주선²

Chan Woo Park¹, Jin Gi Paeng^{1,✉}, and Ju Seon Ok²

¹ 경상대학교 항공우주시스템공학과 (Department of Aerospace and System Engineering, Gyeongsang Univ.)

² 경남테크노파크 항공센터 (Aerospace Center, Gyeongnam TP)

✉ Corresponding author: paengjig@gnu.ac.kr, Tel: 055-758-6124

Manuscript received: 2011.7.11 / Revised: 2011.12.30 / Accepted: 2012.2.15

A fully coupled thermo-mechanical model is adopted to study the temperature distribution and the material deformation in friction stir welding(FSW) process. Rotational speed is most important parameters in this research. Three dimension results under different process parameters were presented. Result indicate that the maximum temperature is lower than the melting point of the welding material. The higher temperature gradient occurs in the leading side of the workpiece. The maximum temperature can be increased with increasing the tool angular velocity, rpm in the current numerical modeling. In this research ABAQUS Ver.6.7 is to analyze a fully coupled thermo-mechanical model. ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) finite element formulation is used for the large deformation in FSW process and using the Mass scaling for the analysis time efficiency.

Key Words: Friction Stir Welding (마찰교반 용접), Friction Coefficient (마찰 계수), Finite Element Model (유한요소 모델), Thermo-Mechanical Model (열-구조 모델)

1. 서론

가스메탈 아크용접(GMAW)이나 저항용접 및 레이저용접으로 알루미늄을 접합하는 경우에는 용접속도가 느리고 생산성이 낮으며 용접성이 저하된다. 반면에 1991 년 영국의 TWI(The Welding of Institute)에서 특허 출원된 마찰교반용접(FSW, Friction Stir Welding) 기술은 고상접합기술로서 새롭고 독특한 공정이다.

항공기 구조물 제작 시 FWS 를 적용하는 경우 기대되는 이점은 매우 다양한데 원가 절감과 관련하여 리베팅보다 빠르고 조립이 단순하며 부품재고를 줄일 수 있다. 이러한 저 원가 이점 외에도 이음부 fastener, butt strap, doubler, bonding, rivet 등이

필요 없어져 동체중량이 가벼워지는 이점이 있어 항공 선진국들이 많이 연구하고 있다.

일본과 미국, 유럽에서는 TWI 와 연계하여 마찰교반용접 툴의 개발 및 설계, 용접공정 및 기기 개발 및 FSW 기술의 전반에 대해 수치해석을 통해 FSW 의 메커니즘을 연구하기 위한 방법으로 semi-coupled thermo-mechanical models¹⁻⁶ 은 FSW 모사를 위해 온도장에 실제 실험으로 측정된 값이나 대략적 온도장을 구성하여 수치해석을 수행한 것이며, fully coupled thermo-mechanical models⁷⁻¹¹ 은 FSW 중 마찰 슬라이딩 혹은 성형작업에서의 소산은 열에너지 평형 식 내에서 열원으로 작동되게 한다. 따라서 온도는 온도 의존 재료 특성을 통해 기계적 상태에 영향을 미치게 된다. CFD models^{12,13}

과 thermal model¹⁴ 은 FSW 를 유한체적 법으로 모체를 유동장으로하여 수치계산을 통해 tool 주위의 회전속도변화 및 온도변화를 구현하였다. 이와 같이 FSW 에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

이에 비해 국내의 연구개발 활동은 소수의 연구기관에서만 수행되고 있으며 기초적인 연구개발에 한정되어 있어 수치해석에 의한 FSW 접합부에 대한 열 분포 특성 연구가 아직까지 미비한 실정이다. 이에 본 논문에서는 선행연구 논문 중 Zhang et al¹ 의 논문을 기본으로 하여 알루미늄 6061 합금에 나타나는 FSW 접합부의 열 분포 및 역학적 특성을 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.7 로 해석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 FSW 의 원리 및 특성

기존의 마찰 용접은 선반 형태의 기계 척에 물체를 물려놓고 회전을 시키며 용접 대상물 면을 마찰 시키면 마찰열에 의해 용접하고자 하는 부분이 용융되면서 붙는 원리이다. 그러나 FSW 는 기존의 용접 공정과 달리 용융을 하지 않고 Fig. 1 과 같은 원리로 고상접합을 시키는 것이 다르다고 할 수 있다.

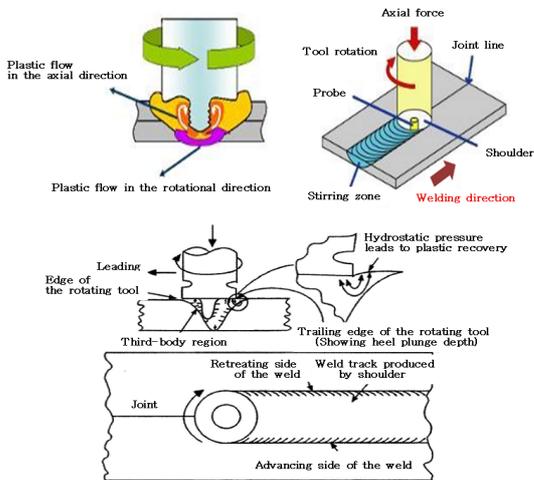


Fig. 1 Principle of friction stir welding

2.2 FSW 의 접합부 온도분포

FSW 접합부의 온도이력에 대해서는 다양한 결과들이 발표되고 있지만 그 측정은 간단하지 않

다. 그 이유는 접합부의 강한 소성유동에 의해 열전대 선단의 파손이 생기기 때문이다. 따라서 접합부 근처나 경계부의 측정값이 많은 편이다. Backlund 는 tool 직경 15mm 의 경우 판 두께 4mm 의 Al 6063-T6 재의 접합선 중앙에서 2mm 떨어진 지점에서 500℃를 초과하는 값을 측정하였다. 순 Al 의 경우 접합부 최고온도는 약 450℃로서 Al 의 용융점 660℃에 비해 용융점 이하의 소성유동을 일으키는 온도라는 것이 밝혀져 있다. TWI 의 실험결과에 있어서도 거의 용융점의 70% 정도가 최고온도로서 Al 의 경우 550℃를 넘지 않는다고 하여 접합부 최고온도는 500℃ 내외라고 판단된다.¹⁵

3. 수치해석

3.1 FSW 모델링 및 메쉬 모델

FSW 의 tool 과 모재의 geometry model 및 boundary condition 은 Fig. 2¹⁰ 에 나타내었다.

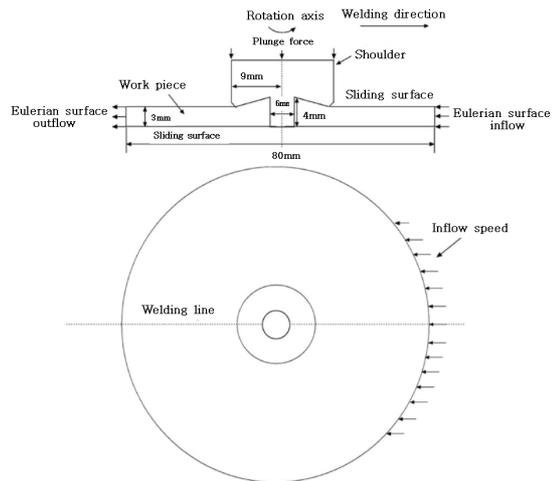


Fig. 2 Geometry model and boundary condition of FSW process

용접 모재는 격자 생성을 용이하게 하기 위하여 두께 3mm, 반지름 40mm 의 원형으로 구성하였으며, FSW tool 은 반지름 3mm, 높이 4mm 인 pin 과 반지름 9mm 인 shoulder 로 구성하여 Fig 3 와 같다.

용접 모재와 FSW tool 의 모든 요소는 변위와 온도의 영향을 고려할 수 있는 8 개의 절점을 가진 6 면체 요소(C3D8RT)¹⁶로 Table 1 과 같이 구성하였다.

Table 1 The number of Nodes and Elements

	Node	Element
FSW Tool	3,560	3,010
Work piece	28,060	22,080

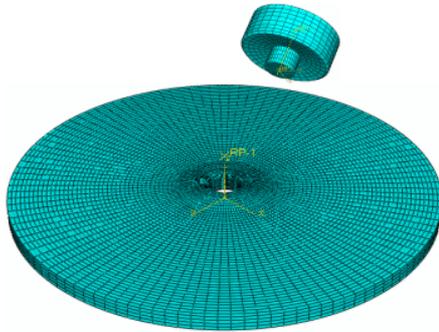


Fig. 3 Plate and Tool of mesh model

3.2 재료의 물성치

FSW tool 은 steel 재질을, 용접 모재는 Al 6061 재질을 선택하였다. 구조해석의 시간을 줄이고, 해석의 효율을 올리기 위해 FSW tool 은 강체로 가정하였다. 용접 모재로 선택된 Al 6061 은 온도의 영향에 의해 그 재료 물성치가 달라진다. 사용된 Al 6061 의 재료 물성치와 온도변화에 따른 재료의 기계적 특성은 Fig. 4¹⁷ 와 같다.

3.3 접촉 모델

마찰교반용접은 FSW tool 과 용접 모재의 마찰에 의해 접합이 이루어진다. FSW tool 의 pin, shoulder 와 용접 모재 사이의 Contact condition 은 열-구조해석의 중요한 인자 중의 하나로, 본 연구에서는 비소모성 FSW tool 과 용접 모재의 접합을 마찰 응력(Frictional stress)과 열 유속(Heat flux)으로 나타냈다.

3.3.1 마찰 응력

FSW Tool 과 용접 모재가 접촉하면서 운동하려고 할 때, 혹은 운동하고 있을 때 두 물체의 접촉면에서 발생하는 마찰 응력은 쿨롱의 마찰 법칙 (Coulomb's frictional law)인 식 (1)을 따른다.

$$\tau = \mu \times P_c \tag{1}$$

여기서, τ 는 마찰 응력(Frictional stress)
 μ 는 마찰계수(Friction coefficient)
 P_c 는 수직 하중(Normal load)

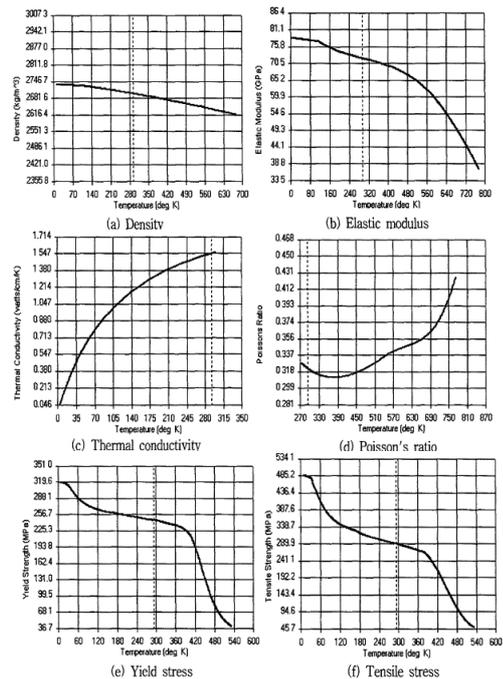


Fig. 4 Mechanical and thermal properties of Al 6061¹⁷

마찰계수(μ)는 대기의 먼지와 습도, 산화박막, 표면, 미끄럼 속도, 온도, 진동, 오염의 정도에 따라 민감하다. 따라서 현재까지 시험적인 방법을 통해 FSW tool 과 용접 모재 사이에 얻어진 정확한 마찰 계수의 결과는 확인되지 않고 있다. 그리하여 FSW tool 과 용접 모재의 Contact condition 에서 사용된 마찰 계수는 Avallone et al¹⁸ 를 참조하여 Fig. 5 와 같이 온도 변화에 따른 마찰 계수를 3 가지로 가정하여 적용하였다.

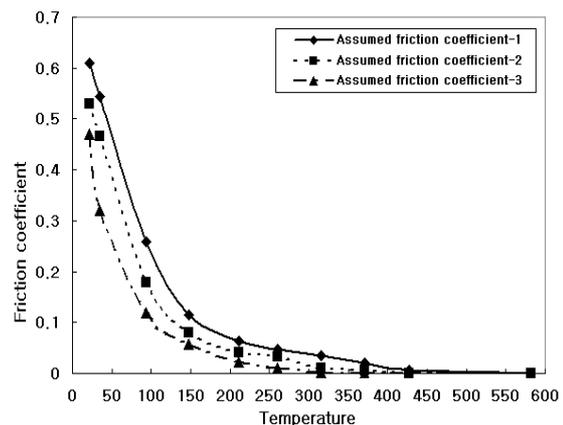


Fig. 5 Fiction coefficients according to temperature

3.3.2 열 유속

마찰교반용접 과정의 열의 대부분은 FSW tool 과 용접 모재의 마찰에 의해 발생한다.¹¹ 열 유속 (Heat flux)은 물체 내의 단위 면적을 단위 시간 동안 이동하는 열량으로, FSW tool 과 용접 모재에 접촉이 일어났을 때 용접 모재에 일어나는 열 유속은 다음의 식(2)에 나타내었다.

$$q_s = q_k + q_r + q_f \quad (2)$$

용접 모재에 발생하는 열 유속은 대류(q_k), 복사(q_r) 그리고 마찰(q_f)에 의한 열 유속의 합으로 나타낼 수 있다. 그러나 본 과제에서는 대류와 복사에 의한 열 유속은 마찰에 의한 열 유속에 비해 그 값이 극히 미미함으로 대류와 복사에 의한 열 유속은 무시하였다. 그리고 마찰에 의한 열 유속은 Fig. 6 에서처럼 FSW tool 의 중심축으로부터의 거리에 의한 함수로 하여 식(3)~(6)으로 계산할 수 있다.

$$q_f(R) = \tau \times \nu \quad (3)$$

$$\nu = 2\pi R \omega \quad (4)$$

$$q_f(R) = 2\pi R \omega \times \tau \quad (5)$$

$$q_f = \int_{R_0}^{R_i} q_f(R) dR \quad (6)$$

여기서, ν 는 회전 속도 (Rotational velocity)
 R 은 FSW tool 중심축으로부터의 거리
 ω 는 회전 속력(Revolutions per minute, RPM)

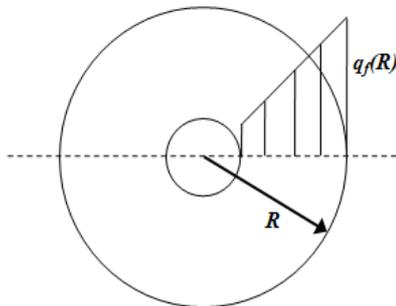


Fig. 6 Heat distribution from friction

FSW 과정에서 열 유속의 분포는 FSW tool 중심으로부터 거리에 비례함을 알 수 있다. FSW tool 과 용접 모재의 열 유속은 수직 하중, 마찰 계수, 단위시간당 회전수 그리고 FSW tool 중심축과의 거리에 의해 결정된다.

3.4 지배 방정식^{19,20}

물체의 표면에 대한 열적 경계조건은 물체 내에 온도 차가 존재하면 열은 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동한다는 푸리에 법칙(Fourier's law)을 따른다.

$$q(x) = k_x \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

여기서, dT/dx 는 열이 흐르는 방향의 온도 구배, k_x 는 열전도율[W/m°C]이다.

식 (7)을 기초로 하여 용접 모재인 Al 6061 과 같은 등방성(Isotropic) 재료일 때에는 미소 단위 체적에 유입되는 열량, 유출되는 열량을 3 차원 직교 좌표 계로 확장시킨 비정상 열전도 방정식인 식(8)에서 구할 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (8)$$

여기서, ρ 는 밀도[kg/m³], c 는 비열[J/kg°C]이고, Q 는 단위 시간당 입열량[W/m³]이다.

단위 시간당 발생하는 입열량(Q)은 용접 모재의 소성 변형에 의한 열로 식(9)과 같이 정의된다.

$$Q = \eta s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} \quad (i,j=x,y,z) \quad (9)$$

여기서, s_{ij} 는 용접 모재의 마찰면에 작용하는 응력(Deviatoric stress), $\dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$ 는 소성변형률(Plastic strain rate)이다.

3.5 ALE finite element formulation

ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 유한요소 정식화는 격자 영역(Mesh domain)을 고정 영역으로 하는 물체의 운동을 표현한 것이다. ALE 유한요소 정식화를 구성하는 Boundary 는 세 가지 방법 Lagrangian boundary, Sliding boundary, Eulerian

boundary 가 있다.

Lagrangian boundary 는 경계 내에서 node 가 material point 와 함께 거동하도록 구속되어 있어 대변형이 발생한 경우 요소의 왜곡 현상이 나타난다. Eulerian boundary 에서는 node 는 고정되고 material point 만 이동한다. 즉, material point 는 node 로 부터 독립적으로 거동한다. Sliding boundary 는 두 경계의 장점을 취해 material point 와 node 가 함께 거동하지만, 완벽하게 구속되어 있지 않다.¹⁶

본 연구에서는 FSW 과정 중에 발생하는 대변형에 의한 용접 모재의 극심한 왜곡 현상을 Sliding boundary 와 Eulerian boundary 를 적용하여 해결하였다. 용접 모재를 inflow surface 와 outflow surface 로 구분하여 이 두 면을 Eulerian boundary 로 각각 설정하였고, 두 Eulerian boundary 를 연결하는 용접 모재의 윗면을 Sliding boundary 로 지정하여 ALE 유한요소 정식화의 경계를 Fig. 2 에서 나타낸 것과 같다. 따라서 FSW tool 과 용접 모재의 contact model 에 적절한 경계로 본 논문에 적용되었다.

3.6 Mass scaling

구조해석에 사용되는 요소의 크기가 매우 작을 때, 구조해석에 걸리는 시간은 크게 증가한다. 또한 다양한 경계 조건, Contact condition 등에 의해서 많은 해석 시간이 요구된다.

FSW 과정에서는 경계 조건, 소성 변형, Contact condition, 대 변형과 같은 많은 해석 시간을 요구하는 비선형 요인들을 포함하고 있다. 그래서 본 과제에서는 구조해석 시간의 단축시키고 해석 효율을 높이고자 Mass scaling^{7,16} 을 도입하였다.

$$\Delta t = \left(\frac{L^e}{c_d}\right) \tag{10}$$

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{11}$$

여기서, Δt 는 응답 시간

L^e 는 가장 작은 요소의 길이

c_d 는 확장 속도

E 는 탄성 계수

ρ 는 밀도

식(10)과 (11)에서 알 수 있듯이 Mass scaling 은 밀도 의 함수로써, 밀도가 가중치 에 의해 스케일링 되었을 때, 확장 속도는 가중치 에 의해 결정된다. 그러나 Mass scaling factor 를 무작정 증가시켜 해석의 시간을 줄일 수 있는 것은 아니다. Mass scaling factor 가 커지면 관성력이 커지게 되는 현상이 나타남으로 가중치 결정을 적절하게 정의해야 한다. 일반적으로 Mass scaling factor 를 사용했을 때 내부 에너지(internal energy)에 대한 운동 에너지(kinetic energy)의 최대 비율이 10 을 초과하지 않아야 한다. 본 연구에 적용된 Mass scaling factor 는 10^6 을 사용하였다.

4. 수치해석 결과

본 논문은 앞서 언급한 용접 모재(Al 6061-T6) 에 재료 물성치와 기계적 특성을 적용하였으며, FSW tool shoulder 병진 속도는 1 mm/s 와 2 mm/s 각각에 대하여 shoulder 에 60 MPa 의 축 하중(P_c) 을 적용하였다. 또한 FSW 접합부에서 가정된 마찰계수들(Fig 5)을 적용하여 400, 500, 600, 700rpm 각각의 용접 tool shoulder 회전 속도에 대해 6 초 동안의 시간변화에 따른 용접 모재의 열 분포와 응력 특성을 파악하고자 한다.

Fig. 7 은 앞서 설명한 FSW tool shoulder 회전 속도 400rpm 과 700rpm 을 대표로 하였다. 또한 FSW tool shoulder 병진속도는 2 mm/s 이고 축 하중 경계 조건으로 제 자리 회전 2.5 초의 예열 시간 이후 FSW 접합부의 용접 모재에 대한 온도를 비교한 것이다. 여기서 (a)는 가정된 마찰계수들(Fig. 5)을 적용하여 400rpm 의 회전 속도에 대한 용접 모재의 최고온도를 나타낸 것이다. (b)는 (a)와 동일하며 600rpm 의 회전 속도에 대한 용접 모재의 최고 온도를 나타낸 것이다. 본 그림에서 Assumed friction coefficient-3 의 가정된 마찰계수가 FSW 접합부 선행연구자료(Reference-10)의 용접 모재에 대한 온도 분포가 유사함을 볼 수 있다.

용접 tool 의 회전속도 400~700rpm 에 대해 가정된 마찰계수(Assumed friction coefficient-3)을 적용하여 FSW tool shoulder 병진 속도 변화에 따른 모재의 온도 변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 본 그림에서 FSW tool shoulder 각각의 회전속도에 대해 FSW tool shoulder 병진 속도가 2m/s 일 때 2.5 초 이후부터 온도에 대한 정상상태 도달이 빨라짐을 볼 수 있다.

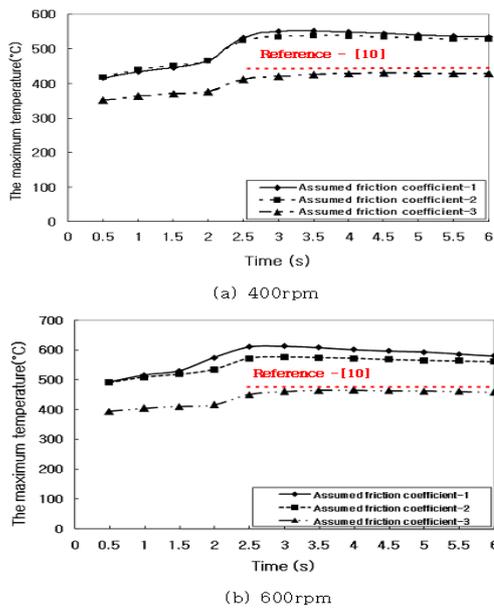


Fig. 7 Comparison of temperature from reference and assumed friction coefficients

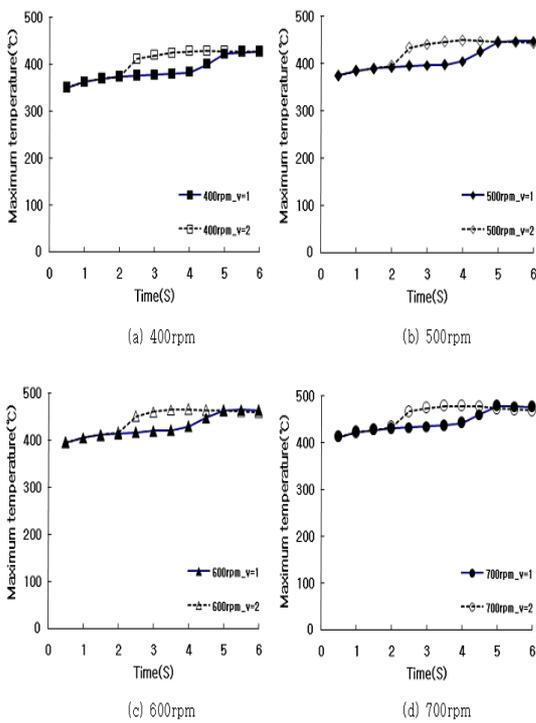


Fig. 8 Comparison of temperature according to tool rotation speed

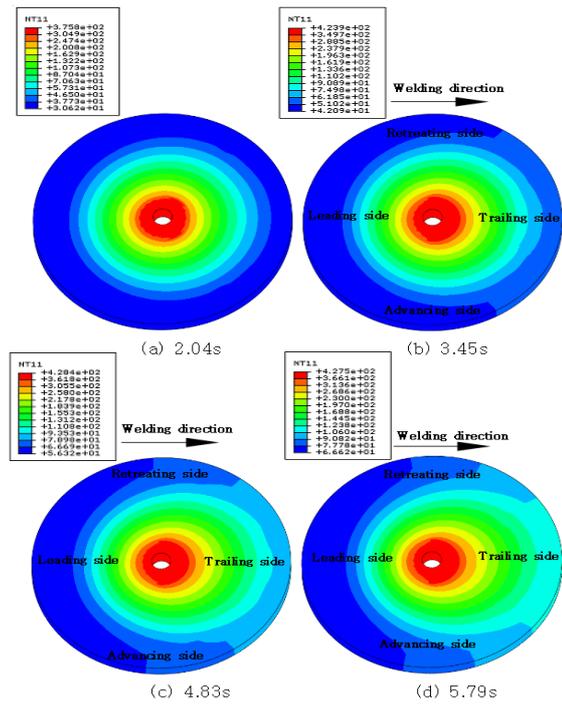


Fig. 9 Temperature history a different time when rotation speed is 400 rpm

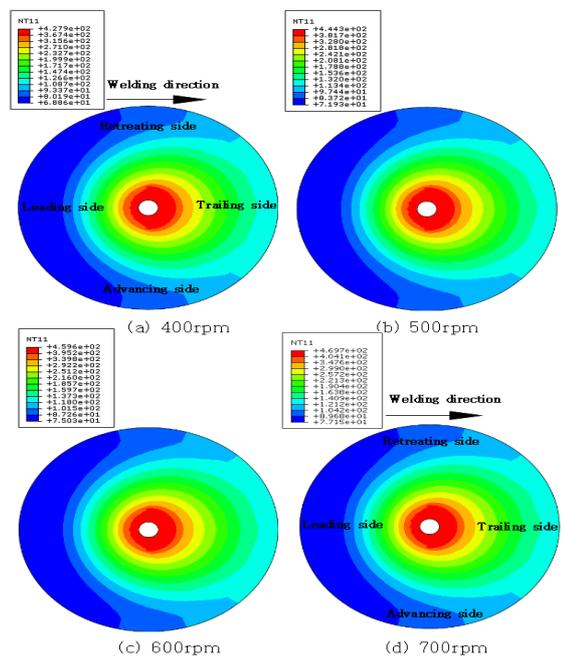


Fig. 10 Temperature fields under varying rotational speed

Fig. 9 는 가정된 마찰계수 Assumed friction coefficient-3 을 적용하여 400rpm 회전 속도에 대해 6 초 동안의 시간 변화에 따른 용접 모재의 온도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 10 은 가정된 마찰계수 Assumed friction coefficient-3 을 적용하여 400, 500, 600 그리고 700rpm 각각의 FSW tool 회전 속도에 대해 6 초일 때 용접 모재의 온도 분포를 나타낸 것이다. 본 그림에서 400, 500, 600 그리고 700rpm 각각의 FSW tool shoulder 회전속도에 대해 용접 모재의 최고 온도는 약 428, 444, 460 그리고 470℃를 나타내고 있다. 이는 앞서 Fig. 8 에서 나타낸 용접 모재 온도 분포로써 Al 6061 의 용융점인 582~652℃ 보다 낮은 일정 온도에서 더 이상 온도가 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 마찰교반용접이 고상용접임을 입증하는 것이다.

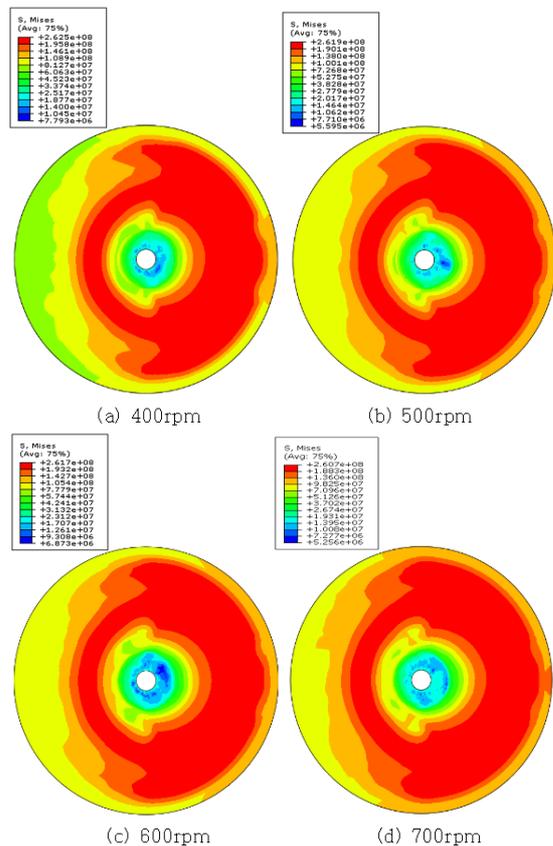


Fig. 11 Von Mises stress fields under varying rotational speed

Fig. 11 은 Fig. 10 에서 설명과 같으며 400, 500, 600 그리고 700rpm 각각의 FSW tool shoulder 회전 속도에 대해 6 초 일 때 용접 모재의 응력 분포를 나타낸 것이다. 본 그림에서 400, 500, 600 그리고 700rpm 의 각각의 FSW tool shoulder 회전속도에 대해 용접 모재의 최대 응력은 약 2.61 Mpa 로 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 동일한 구속조건과 하중 조건에서 대부분이 열에 의한 열 응력이므로 FSW tool shoulder 회전 속도가 증가함에 따라 온도차이가 미소하여 유사한 응력을 나타낸다고 판단된다.

5. 결론

본 논문은 FSW 접합부에 나타나는 역학적 특성들을 전산 수치적 시뮬레이션(Abaqus V6.7 Explicit)을 이용하여 FSW 과정에서 주요 공정 변수인 tool shoulder 회전 속도 변화와 병진 속도 변화에 따른 용접 모재의 열 분포 특성 및 역학적 특성을 규명하였다.

(1) 용접 모재의 온도 분포는 FSW tool shoulder 와 용접 모재 사이의 마찰계수에 의해 크게 좌우된다는 것을 확인하였으나, 현재까지 시험적인 방법을 통해 얻어진 정확한 마찰 계수의 결과는 확인되지 않고 있다. 따라서 Avallone et al¹⁸을 참조하여 가정된 마찰계수들 중 Assumed friction coefficient-3 을 적용하였을 때 선행연구 문헌자료와 유사한 용접 모재의 온도 분포를 확인할 수 있었다.

(2) FSW 과정 중에 용접 모재에 발생하는 온도 분포를 통해 FSW tool shoulder 가 용접 모재에 가장 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 FSW tool shoulder 회전 속도가 증가함에 따라 용접 모재의 온도 변화를 증가시켰으며, FSW tool shoulder 병진 속도가 증가함에 따라 모재 온도 변화에 통해 정상상태 도달이 빨라짐을 볼 수 있다. 따라서 모재의 온도 변화를 통해 FSW 과정에서 shoulder 의 크기, 회전속도, 병진속도가 주요 공정 변수임을 확인할 수 있었다.

(3) FSW tool shoulder 회전속도 변화에 따른 용접 모재의 최대 응력값은 유사한 값을 나타내었다. 이는 동일한 구속조건과 하중조건에서 응력의 대부분이 열에 의한 열응력으로 회전 속도가 증가함에 따라 최대온도가 유사하여 최대 응력 값도 유사하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2 단계 BK21 사업 및 기초기술연구회 지원하고 한국항공우주연구원이 주관하는 DRC 사업의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

- Zhang, Z. and Chen, J. T., "The simulation of material behaviors in friction stir welding process by using rate-dependent constitutive model," *Journal of Materials Science*, Vol. 43, No. 1, pp. 222-232, 2008.
- Zhang, H. W., Zhang, Z., and Chen, J. T., "The finite element simulation of the friction stir welding process," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 403, No. 1-2, pp. 340-348, 2005.
- Zhang, H. W., Zhang, Z., and Chen, J. T., "3D modelling of material flow in friction stir welding under different process parameters," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 1, pp. 62-70, 2007.
- Zhang, Z. and Zhang, H. W., "The simulation of residual stresses in friction stir welds," *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 2, No. 5, pp. 951-964, 2007.
- Li, T., Shi, Q. Y., and Li, H. K., "Residual stresses simulation for friction stir welded joint," *Science and Technology of Welding Joining*, Vol. 12, No. 8, pp. 634-640, 2007.
- Zhang, Z. and Zhang, H. W., "Material behaviors and mechanical features in friction stir welding process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 86-100, 2007.
- Zhang, Z. and Zhang, H. W., "A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 3-4, pp. 279-293, 2008.
- Zhang, Z. and Zhang, H. W., "Numerical studies on the effect of axial pressure in friction stir welding," *Science and Technology of Welding Joining*, Vol. 12, No. 3, pp. 226-248, 2007.
- Zhang, Z. and Zhang, H. W., "Numerical studies of pre-heating time effect on temperature and material behaviors in friction stir welding process," *Science and Technology of Welding Joining*, Vol. 12, No. 5, pp. 436-448, 2007.
- Zhang, Z., Bie, J., Liu, Y., and Zhang, H., "Effect of travers/rotational speed on material deformations and temperature distributions in friction stir welding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 24, No. 6, pp. 907-914, 2008.
- Schmidt, H. and Hattel, J., "A local model for the thermo-mechanical conditions in friction stir welding," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 77-93, 2005.
- Colegrove, P. and Shercliff, H. R., "3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, No. 2, pp. 320-327, 2006.
- Arora, A., Nandan, R., Reynolds, A. P., and DebRoy, T., "Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments," *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 1, pp. 13-16, 2009.
- Song, M. and Kovacevic, R., "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 43, No. 6, pp. 605-615, 2003.
- Threadgill, P., "Friction stir welds in aluminium alloys -preliminary microstructural assessment," *TWI Bulletin*, 1997.
- "Abaqus/CAE User's Manual Ver 6.7," SIMULIA, 2007.
- Schmidt, H. and Hattel, J., "A local model for the thermomechanical in friction stir welding," *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 77-93, 2005.
- Avallone, E. and Baumeister, T., "Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, 9th Ed.," McGraw Hill, 1987.
- Jang, S.-S., "A analysis on Thermal and mechanical strength problem in A5083 Alloy Friction Stir Welding process" Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chung-nam National University, 2002.
- Rajesh, S. R., Kim, H.-J., Bang, H.-S., and Chang, W.-S., "Friction Stir Welding : Heat Input Calculation," *J. of KWS*, Vol. 24, No. 4, pp. 11-14, 2006.