

특집 : 마찰 교반 접합

FSW에 대한 수치 Simulation 연구 동향
- 용접 강도 -

방한서 · 김홍주 · 김영표 · 장웅성

Research Trends on the Numerical Simulation of FSW

Han Sur Bang, Heung Ju Kim, Young Pyo Kim and Woong Seong Chang

1. 서 론

최근, 각종 산업분야에 있어서 경량화 구조가 증가하고 있으며 특히 수송기계분야(철도차량, 자동차, 항공기 등)에 있어서 경량화에 의한 연비 절감 및 환경오염 방지를 위한 경량 금속의 수요가 크게 증가하고 있다. 따라서, 이들 금속(Al, Mg, Cu합금 등)의 효율적인 접합을 위해 최근 개발된 FSW 접합이 크게 주목받고 있으며 이에 대한 연구가 크게 증가하고 있다. FSW 접합의 경우 기존 용융 용접에서 문제시 되는 응고 균열, 기공, 산화 등의 결함을 최소화 할 수 있으며, 기존의 마찰용접법과 상이한 메카니즘으로 인해 용접체 설계의 다양성을 확보할 수 있으며, 기존의 용접 방법보다 우수한 품질과 경제성을 확보 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 현재 경량화 금속들 중 Al 합금의 수요가 가장 많으며 이러한 경량화 구조의 채택과 더불어 구조체의 강도적 측면이 크게 중요시되어 지고 있다.

국내외적으로 FSW에 대한 연구 동향을 보면 경금속 관련 산업이 활성화된 여러 선진국들에서는 FSW Tool의 개발 및 설계, Process, FSW 기기 개발을 중심으로 활발한 활동이 진행되고 있으며, 이러한 개발과 더불어 FSW 기기의 산업적용과 FSW에 대한 관심이 더욱 고조되어지고 있는 실정이다. 또한, 미국용접학회(AWS), 일본용접학회(JWS)등의 학술대회에서 마찰용접 Session에서 FSW 접합에 관련된 논문이 점차적으로 증가하고 있으나, Fig. 1 과 같이 그 발표 내용은 FSW 접합부의 금속학적 측면과 적용에 관한 내용이 주로 발표가 되어지고 있을 뿐, 접합부의 역학적 특성에 관한 연구가 거의 없는 실정이다. 또한, FSW 기술이 TWI와의 특허권 문제와 관련하여 여러 분야로 확대되지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 보고에서는 타 연구에 비해 연구가 미진

한 수치해석에 의한 Al합금의 FSW접합부의 열분포 특성 및 역학적 특성 즉, 용접 강도적 측면에 대한 연구 동향 및 내용을 파악하고자 한다.

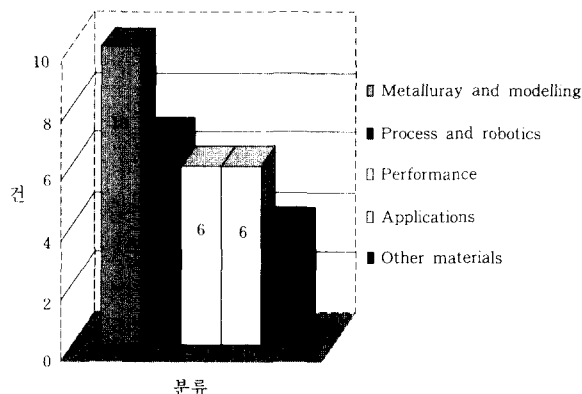


Fig. 1 Classification of presented paper by contents

2. FSW 접합부의 온도 분포 특성

선행 연구자들 (McClure, Paul Colegrove, Yuh J. Chao, Dong, Ulysse, O. Frigaard, M. J. Russell등)의 경우 Shoulder와 pin을 고려하여 열흐름 및 잔류응력을 해석하였으나, FSW 접합부의 열분포 및 역학적 특성에 관한 연구내용이 아직까지는 정확한 이론으로서 정립이 되지 않는 상태이며, 접합부의 소성유동에 의한 재료의 역학적 특성의 변화 등은 고려하지 않은 가정을 전제로 하고 있기 때문에 향후 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 대표적인 선행 연구 결과의 FSW 접합부의 열분포 특성에 대하여 보고된 내용은 다음과 같다.

FSW 열전도 해석시, Fig. 2와 같이 Tool의 shoulder와 Pin 부근의 접촉면에서의 마찰열을 주 열원으로 고려하였으며, 이에 대한 입열식은 다음 식(1)과 같이 가정되어졌다. 식(1)로부터 하중, 회전속도,

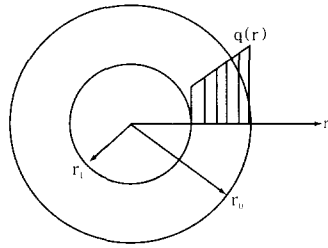


Fig. 2 Heat distribution simulating the heat generated from the friction at the interface between the shoulder and the workpiece

마찰계수를 변수로 하여 시편의 Heat input 비율은 식(2)와 같이 나타내어질 수 있다.

$$q(r) = \frac{3Qr}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\pi\omega\mu F(r_o^2 + r_o r_i + r_i^2)}{45(r_o + r_i)} \quad (2)$$

F : Downward force(Mpa)

ω : Tool rotational speed(rpm)

μ : Friction coefficient

Fig. 3은 Paul Colegrove의 FSW 접합부의 온도 분포에 관한 결과로서 최고온도분포는 460℃의 온도분포를 보이며, Al 용점이하에서 접합을 이루어지고 있다.

FSW 접합부의 최고온도는 Fig. 3에 보이는 것처럼 Tool의 Shoulder외부 원주 주위(2~4mm)에서 최고 온도를 보이며, 실험에 의한 온도값과 유한 요소법에 의한 수치해석 결과 값이 거의 유사함을 알 수 있다.

또한, 식(2)와 같이 시편의 입열 비율은 Tool의 중심으로부터의 거리에 비례하며, 시편의 최고 입열은 모재와 마찰을 일으키는 Shoulder의 외부 원주와 Pin에 따른다. 결과적으로 접합부의 중심인 Pin 부근에

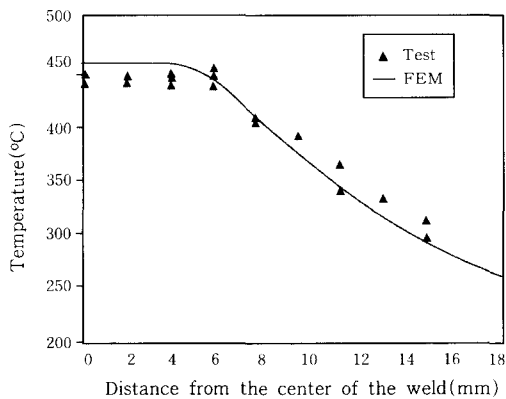


Fig. 3 Comparison of the temperature in the transverse

서 최고온도 분포를 보이지 않고, Shoulder부의 접촉면에 의해 최대 온도가 나타남을 기술 하고 있다. 또한, 접합과정동안 기계적 교반으로 인한 변형은 미세 조직의 형성에 크게 영향을 미친다. 또한, 저자들의 FSW 접합부의 열분포 해석에 관한 내용을 살펴보면, Fig. 4와 Fig. 6과 같은 해석결과를 도출하고 있다.

즉, 접합 시작 후 초기 온도분포는 모재와 Tool이 맞닿는 부분에서 마찰에 의한 고온을 형성하고 있으며 이는 Tool의 회전력에 의해 모재에서 마찰열이 발생함을 나타내며, 열전도가 큰 Al 합금의 고유 특성에 따라 시간에 의한 고온역에서 급격한 냉각 온도구배가 나타남을 알 수 있었으며, 전술한 연구의 내용과 동일한 현상을 보여주고 있다.

수치해석에 의한 온도 그래프와 실험에 의한 접합부 단면의 접합조직에 대해 영역별 분포와 크기는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다.

- (a) 열영향부(HAZ) 450-480℃
- (b) 열-기계적 영향부(TMAZ) 480-500℃
- (c) 너깃부(SZ) 500-530℃

또한, Al의 용점 660℃에 비해 Pin의 주위에서 용점보다 낮은 530℃ 정도에서 접합됨을 보이고 있으며 이는 소성 유동(기계적 교반작용) 특성에 기인한 것으로 고려된다.

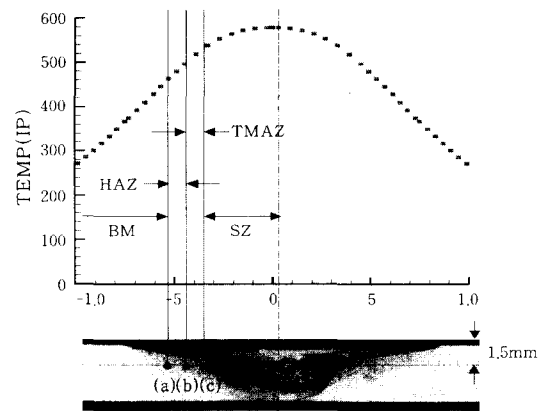


Fig. 4 Temperature Distribution of FSW

3. FSW 접합부의 잔류응력분포 및 변형 특성

저자들의 연구 결과에 의하면, FSW 접합부에 잔류응력에 대한 분포 특성은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 것처럼 다음과 같은 결과를 보이고 있다.

Fig. 5의 FSW 접합부의 응력해석 결과에서 보이면 Jig에 의한 구속 지점과 접합부에서 최고값을 보이며, 구속을 해방한 후에는 감소하는 특성을 보인다.

Fig. 6 또한, FSW 접합부의 잔류응력 분포를 나타

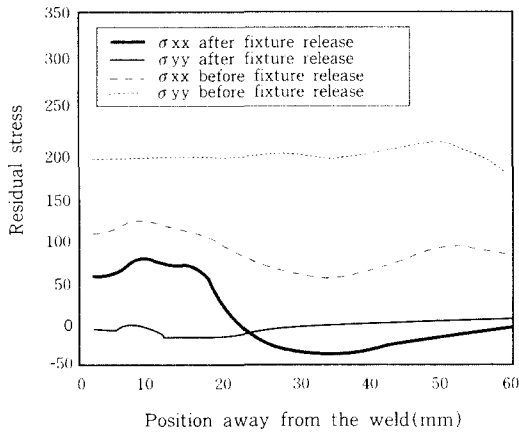


Fig. 5 Residual stress in the FSW plate along the line(X,Y,Z) = (225, Y, 1.5mm)

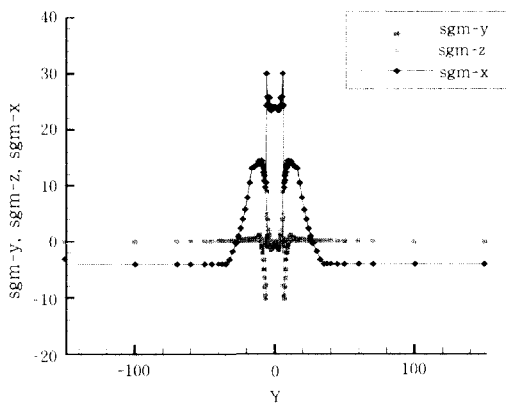


Fig. 6 Comparison of Residual Stress of FSW

내고 있으며, 접합부 중앙에서 압축 잔류응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 한편, 응력의 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났으며, 위의 수치 해석에 의한 결과를 통해 볼 때 각종 공정변수들 중 회전속도와 접합속도의 공정 변수에 의해 응력값이 크게 좌우되고 있다. 또한, FSW

접합 후의 변형을 각종 해석 및 실험을 통해 고찰해 본 결과 용융 용접에 비해 작게 나타나는 특성을 보였다.

4. 맺음말

현재까지 FSW에 대한 현상구명과 이해가 충분히 이루어지지 않고 있으며 향후 지속적인 연구개발 노력이 필요하다. 또한, FSW 프로세스 발전과 더불어 접합부의 강도적 측면의 이해가 보다 더 요구되어지며, 이에 본 보고에서는 이러한 측면을 고려하여 FSW 접합부에 대한 열분포와 잔류응력 및 변형 특성에 대한 연구동향 및 결과를 살펴보았다.

현재 FSW 접합의 원천 기술에 대한 TWI의 특허권 보유로 인해 자유로운 연구가 이루어지지 못하는 실정 이지만, 향후 광범위한 산업분야에서 FSW 접합이 수행되어지고, 접합부에 대한 강도적 측면의 연구가 타 연구들과 병행되어져 여러 방향으로 활발히 전개되어 질 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Paul Colegrove: "3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process", TWI FSW Symposium(2000)
2. 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)
3. Kazuhiro NAKATA, Young Gon KIM, Masao USHIO : "Weldability of High Strength Aluminum Alloys ,ISIJ Intern ational, Vol.49 (2000), Supplement
4. 방한서, 김홍주: "A study on the thermal behavior and the residual stress distri-bution characteristics of F.S.W with Al-6061 alloys", 대한용접학회, 추계학술발 표대회개요집, Vol.38(2001), pp.202~207



- 방한서(房漢瑞)
- 1951년생
- 조선대학교 항공·조선공학부
- 용접역학 및 공정
- e-mail: hsbang@mail.chosun.ac.kr



- 김영표(金泳杓)
- 1969년생
- 조선대학교 항공·조선공학부 대학원
- 용접역학 및 공정
- e-mail: ypkim@stmail.chosun.ac.kr



- 김홍주(金興柱)
- 1975년생
- 조선대학교 항공·조선공학부 대학원
- 용접역학 및 공정
- e-mail: juju9393@hotmail.com



- 장웅성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철재료 개발, 용접야금, 용접재료, 마찰교반용접
- e-mail : wschang@rist.re.kr