

AA5083-H18 판재의 마찰 교반 점 용접 공정에 대한 전산 해석

김돈건¹ · Badarinarayan Harsha² · 유일³ · 김지훈⁴ · 김종민⁵ · Okamoto Kazutaka⁶ · Wagoner R. H.⁴ · 정관수[#]

Numerical Simulation of Friction Stir Spot Welding Process with AA5083-H18

Dongun Kim · Harsha Badarinarayan · Ill Ryu · Ji Hoon Kim · Chongmin Kim · Kazutaka Okamoto · R. H. Wagoner · Kwansoo Chung

Abstract

Thermo-mechanical simulation of the Friction Stir Spot Welding (FSSW) processes was performed for the AA5083-H18 sheets, utilizing commercial Finite Element Method (FEM) and Finite Volume Method (FVM) which are based on Lagrangian and Eulerian formulations, respectively. The Lagrangian explicit dynamic FEM code, PAM-CRASH, and the Eulerian Computational Fluid Dynamics (CFD) FVM code, STAR-CD, were utilized to understand the effect of pin geometry on weld strength and material flow under the unsteady state condition. Using FVM code, material flow pattern near the tool boundary was analyzed to explain the weld strength difference between the weld by cylindrical pin and the weld by triangular pin, while the frictional energy concept using the FEM code had limitation to explain the weld strength difference.

Key Words: Friction stir welding, Thermo-mechanical Simulation, FVM, FEM, AA5083-H18, CFD, STAR-CD, PAM-CRASH

1. 서론

최근 자동차 및 항공기 그리고 선박과 같은 수송 차량에 대한 생산 고속화, 환경 보전 그리고 에너지 절약 등이 요구되고 있으며, 이러한 수요에 기인하여 다양한 비철금속 재료의 개발이 경량화 관점에서 요구되고 있다. 이러한 비철금속 재료를 구조체에 활용하기 위한 기술적 배경으로 마찰 교반 용접 공정이 각광을 받고 있다. [1]

마찰 교반 점 용접의 경우 구조체에 적용되는 판재의 용접성에 있어서 그 성능을 발휘하고 있

으며, 자동차, 항공기 그리고 선박 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 이러한 점 용접은 맞대기 용접과 비슷한 원리를 가지고 있으나 짧은 시간 안에 plunging, welding 그리고 retracting 공정이 모두 일어난다는 점에서 비정상상태라고 할 수 있다.

이러한 마찰교반용접 공정을 해석하기 위해서 비정상상태의 라그랑지안기법과 오일러리안기법을 이용한 전산 해석이 각각 수행되었으며, 온도 및 변형 결과를 계산하기 위해 질량 및 운동량 그리고 에너지 보존 법칙을 이용하였다. 용접 후 물성을 예측하기 위해 각각의 전산 해석 결과를 이용하였다.

1. 서울대 재료공학부, 한국
2. 히타치 연구 개발 연구소, 미국
3. 스탠포드 대학교 재료공학부, 미국
4. 오하이오주립대 재료공학부, 미국
5. 제너럴 모터스 재료 공정 연구소, 미국
6. 히타치 연구소, 일본
교신저자: 서울대 재료공학부, 한국, E-mail: kchung@snu.ac.kr

2. 배경 이론

마찰교반용접 시 온도분포와 변형형상을 계산하기 위해서 질량 및 운동량 그리고 에너지 보존 법칙이 사용하였다. 아래 식과 같이 적교법칙을 이용하여 비압축성 미지스 완전강소성거동을 보이는 구성방정식이 이용되었다.

$$S = 2\mu D$$

$$D = \dot{\bar{\epsilon}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial S} = \frac{3\dot{\bar{\epsilon}}}{2\bar{\sigma}} S = \frac{S}{2\mu} \quad \text{and} \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} S \cdot S} \quad (1)$$

D 와 S 는 rate of deformation tensor 와 deviatoric stress tensor 이며, $\bar{\sigma}$, $\dot{\bar{\epsilon}}$ 그리고 μ 는 Mises 유효 항복강도, 유효변형속도 그리고 점도이다. 항복강도 $\bar{\sigma}(T)$ 는 온도에 관한 함수이며 점도 $\mu(T, \dot{\bar{\epsilon}})$ 는 온도와 변형속도에 관한 함수이다. 아래의 식을 참고하자.

$$\mu = \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \quad (2)$$

위의 식 (1)~(2)들과 질량 및 운동량 그리고 에너지 보존법칙을 이용하여 마찰교반용접 공정 동안의 온도 및 변형형상에 대한 히스토리를 계산하였다.

3. 실험

컴퓨터수치제어 3-D 마찰교반용접 장비로서 7.5KW "HitSpin GR3DC5T"를 이용하여 1mm 두께의 AA6022-T4 판재와 1.64mm 와 1.24mm 두께의 AA5083-H18 판재에 대한 점 용접 공정을 수행하였다. 모루와 회전공구로는 저탄소강 1020과 공구강 H13이 사용되었다.

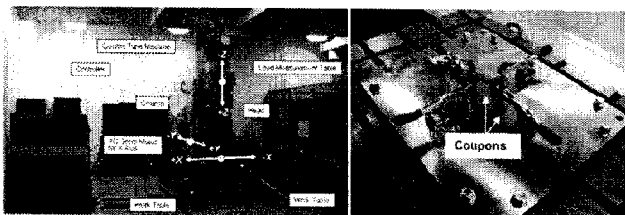


Fig. 1 CNC controlled 3-D linear FSW system 'HitSpin type GR3DC5T' Welding jig with a coupon in a cross-tension configuration

AA5083-H18 판재에 대한 회전공구와 핀의 반경은 각각 6mm와 2.5mm이며, 핀의 길이는 1.6mm이다. AA6022-T4 판재에 대해서는 각각 6mm와 2mm이며 그리고 1.2mm이다. 회전공구의 shoulder 부분은 10도의 요면형상을 가지며, 모서리는 0.2mm 삽입되었다. 1,500rpm의 회전 공구를 20mm/min의 속도로 삽입한 후 2초 동안 점 용접하였다. 본 연구에서는 원통 형태와 삼각기둥 형태의 공구에 대하여 비교 실험을 수행하였다.

4. 전산 해석

본 연구에서는 두 가지 전산 해석 기법이 이용되었는데 하나는 라그랑지안기법을 이용한 FEM 해석법이고, 다른 하나는 오일러리안기법을 이용한 FVM 해석법이다. 각각 PAM-CRASH [2]와 STAT-CD [3]를 이용하였다. 마찰교반 점용접 공정은 plunging, short welding 그리고 retracting의 세가지 단계로 이루어지는데, 짧은 시간 내에 모든 공정이 끝나기 때문에 비정상상태의 거동을 가진다.

FEM의 경우, 너비 및 길이 40mm 그리고 1mm 두께의 AA6022-T4 판재를 서로 겹쳐서 해석하였고, FVM 경우, 반경 50mm 그리고 위판 1.64mm, 아래판 1.24mm AA5083-H18 두께의 판재를 서로 겹쳐서 해석하였다.

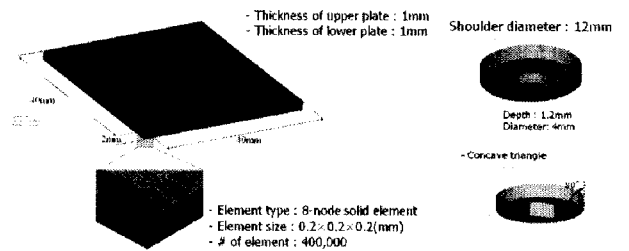


Fig. 2 Dimension of sheets and pin geometries for FEM analysis with AA6022-T4

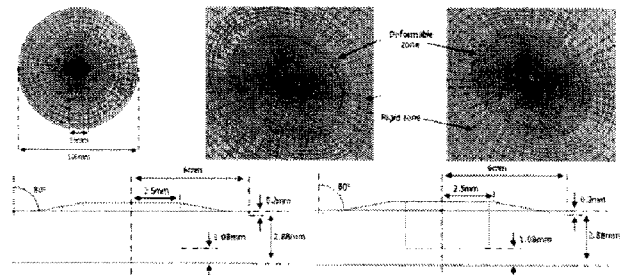


Fig. 3 Top view for cylindrical pin and triangular pin (upper), and model dimension (lower) for FVM analysis with AA5083-H18

FVM 해석법에서는 소성변형과 마찰에 의해 발생하는 열량의 합은 판재가 회전공구와 같은 속도로 움직인다는 가정하에 발생하는 소성변형의 열량과 같기 때문에 소성 변형에 의한 열량만을 고려하였다. [4]

각각의 전산 해석 기법을 이용하여 원통 형태와 삼각기둥 형태의 회전 공구에 대해서 해석하였으며, 실험과 같은 규격을 사용하였다.

AA6022-T4 판재를 이용한 FEM의 경우, 역학 모델만 해석하였으며 물성 조건은 table 2와 같이 주었다. [5~7] 공정 조건 또한 해석 시간이 너무 오래 걸리기 때문에 600mm/sec의 속도로 삽입한 후 0.005초 동안 12,000rpm으로 용접하는 것으로 수정하였다. 마찰계수는 0.2를 사용하였다. 본 연구에서는 원통 형태와 삼각 기둥 형태의 회전공구에 의한 용접 후 물성에 대한 상호 비교에 대해서 조사하였다.

Table 2 Material properties of AA6022-T4 at 25°C

| Material property | AA6022-T4 |
|--|-----------|
| Density(Kg/m ³) | 2,690.0 |
| Young's Modulus(GPa) | 69.0 |
| Yield Stress(MPa) | 172.0 |
| Poisson Ratio | 0.33 |
| Hardening Modulus(GPa) | 1.0 |
| Maximum plastic strain for element elimination(damage model) | (1.5) |

(The value in the parenthesis is assumed one)

AA5083-H18 판재를 이용한 FVM의 경우, 열역학 모델에 대해서 해석하였으며 실험과 같은 공정 조건을 사용하였다. 판재의 항복강도는 온도에 관한 함수이며, 이는 오하이주립대학에서 측정된 실험결과를 이용하였다. 하지만 측정결과가 400°C까지만 있기 때문에 이후에 대해서는 녹는점을[8] 향해서 감소하는 항복강도를 사용하였다.

점도는 식 (2)를 이용하였으며, STAR-CD 내부함수를 사용하였다. 밀도, 비열 그리고 열전도도 역시 온도에 관한 함수이다. AA5083-H18 판재에 대한 물성치가 없기 때문에 AA5052-H32의[9] 물성을 수정하여 사용하였다. 두 종류의 판재에 대한 상온에서의 물성치 비를 이용하여 전체온도영역에 대한 새로운 물성데이터를 계산하였다.

열전달 경계조건에 대해서는, 윗면과 옆면에서는 공기와 알루미늄간의 자연대류시스템에 의해 열이 전달되며 30W/m²C의 열전달계수를 가진다.[10] 그리고 밑면에서는 200W/m²C의 열전달계수를 가지며, 회전공구 바로 아래 부분은 용접시

강한 압력이 작용하므로 2,000W/m²C의 열전달계수를 가진다.[11]

Table 3 Temperature dependent yield stress

| Temp.(°C) | Y.S.(MPa) |
|-----------|-----------|
| 20 | 440 |
| 100 | 437 |
| 200 | 364 |
| 300 | 181 |
| 400 | 61 |
| 440 | 50 |
| 540 | 40 |
| 570 | 0 |

Table 4 Temperature dependent thermal conductivity, specific heat and density of AA5083-H18

| Temp.(°C) | Conductivity (W/m°C) | Specific Heat (J/Kg°C) | Density (Kg/m ³) |
|-----------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| -20 | 112.5 | 924.1 | 2673.9 |
| 80 | 122.7 | 984.2 | 2642.7 |
| 180 | 131.6 | 1039.6 | 2629.4 |
| 280 | 142.3 | 1081.2 | 2611.5 |
| 380 | 152.5 | 1136.6 | 2589.3 |
| 480 | 159.5 | 1178.2 | 2567.0 |
| 580 | 177.2 | 1261.4 | 2549.2 |

5. 결 과

AA6022-T4 판재를 이용한 FEM의 경우, 다양한 핀 모양에 대한 실험과 해석 수행되었다. 실험을 통해서 얻은 용접부 강도와 시뮬레이션으로부터 나온 마찰에너지가 서로 상응할 것이라고 가정하였다. 하지만 Fig. 4에서 보여지듯이 마찰에너지는 원통 형태의 회전 공구를 사용할 때 더 많이 발생한 반면 용접부 강도는 삼각 기둥 형태의 회전 공구를 이용한 것이 2배 정도 높았다.

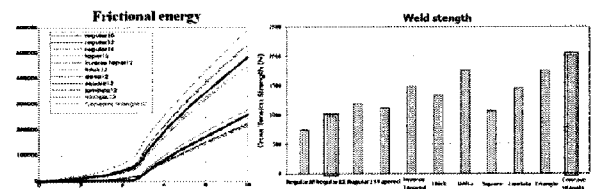


Fig. 4 Frictional energy and weld strength using various pin geometries

이러한 현상을 이해하기 위해서 FVM 해석이 수행되었다. AA5083-H18 판재를 이용하였으며, 용접시 핀 주변에서 일어나는 재료의 거동 해석에 대해서 집중하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 원통 형태의 회전 공구를 사용한 경우, 핀 주변에 있는 재료들이 반지름 방향으로 많은 움직임을 보이지 않는다. 반면에 Fig.6에서 볼 수 있듯이 삼각 기둥

형태의 회전 공구를 사용한 경우, 핀 주변에 있는 재료들이 반지름 방향으로 들어왔다 나갔다 하는 역동적인 움직임을 볼 수 있다. 이러한 거동은 마찰 교반 용접 시 핀 주변의 Hook 형성에 중요한 역할을 한다. Fig.7과 8에서 보여지는 Hook은 용접부 강도를 결정하는 중요한 요소이다. [12]

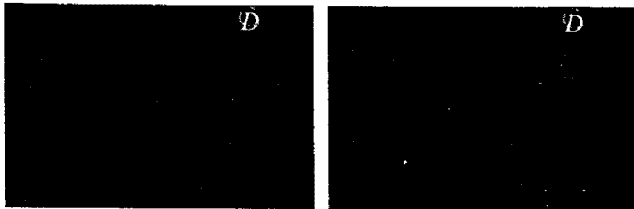


Fig. 5 Material flow direction at the cross section near the tool as time procedure for cylindrical pin, after 1.94 and 1.96 second

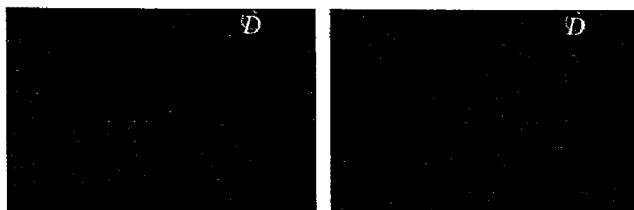


Fig. 6 Material flow direction at the cross section near the tool as time procedure for triangular pin, after 1.94 and 1.96 second

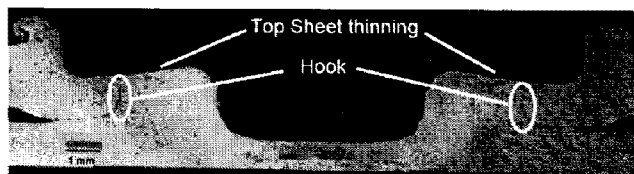


Fig. 7 Micro-cross section at the weld center [12]

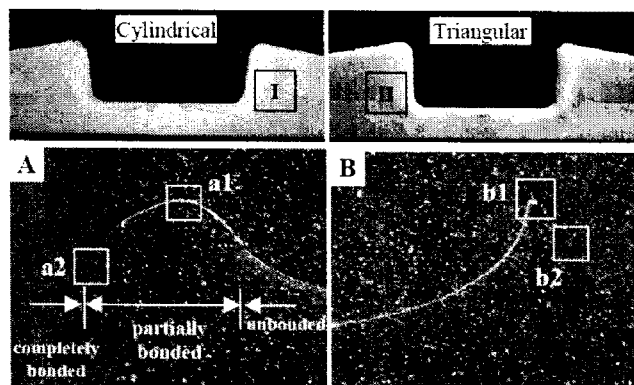


Fig. 8 Micro-cross section at the weld center for the cylindrical pin and the triangular pin [12]

6. 결론

마찰 교반 점 용접 공정에 대한 FEM 그리고 FVM 전산 해석이 수행되었다. FEM 모델을 이용하여 회전 공구에 의해 발생한 에너지를 모사하였지만 용접부 강도와 같은 용접 후 물성을 설명하기에는 부족하였다. 보다 정밀하게 미세 거동을 관찰하기 위해서 FVM 모델을 이용하였으며, 핀 주변에 있는 재료의 움직임이 Hook 형성에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

후기

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korea government(MEST) (R11-2005-065).

참고 문헌

- [1] D. Kim, H. Badarinarayan, J.H. Kim, C. Kim, K. Okamoto, R.H. Wagoner, K. Chung, 2008, Fall conference, KSTP, pp.267~270
- [2] PAM CRASH, 2008, ESI
- [3] STAR-CD, 2005, CD-Adapco, V3.26
- [4] Y. J. Chao, X. Qi and W. Tang, 2003, Vol. 125, ASME, p.138-145
- [5] Metals Handbook, Vol.1, 1961, Properties and Selection of Metals, ASM 8th Ed., p.944
- [6] Wang, J. F., Wagoner, R. H., Carden, W. D., Matlock, D. K. and Barlat, F, 2004, International Journal of Plasticity, 20, pp. 2209~2232
- [7] Modeling of Metal Forming and Machining Processes, 2008, Springer 1st Ed., p.414
- [8] T. Lyman, T. (editor), 1961, Properties and Selection of Metals, Metals Handbook, Vol. 1, ASM, p.944
- [9] X.K. Zhu and Y.J. Chao, 2002, Computers & Structures, pp. 967-976
- [10] Y. J. Chao, X. Qi and W. Tang, 2003, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, ASME, p.138-145
- [11] T. Hyoe, P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, 2003, Friction Stir Welding and Processing II, edited by Jata et al. TMS Symposium Proceedings, A Publication of TMS, 2003
- [12] Badarinarayan, H., Yang, Q. and Zhu, S., 2009, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 142~148