

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

김돈건¹ · 바다리나라얀 하샤² · 김지훈³ · 김종민⁴ · 오카모토 카즈타카⁵ · 와고너 R. H.³ · 정관수[#]

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

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

Abstract

Thermo-mechanical simulation of the friction stir butt welding process was performed for AA5083-H18 sheets, utilizing commercial FVM code, STAR-CCM+, which is based on Eulerian formulation. Temperature and strain rate histories along the material flow were calculated under the steady state condition and simulated temperature distributions (profiles and peak values) were compared with experiments for verification. It was found that by including proper thermal properties of the backing plate (anvil) the accuracy of the simulation results increased significantly.

Key Words: Friction stir welding, Thermo-mechanical Simulation, FVM, AA5083-H18, CFD, STAR-CCM+

1. 서 론

최근 산업 전반에 있어서 환경문제의 대두와 함께 에너지절감에 대한 필요성이 부각되고 있다. 이와 함께 자동차, 기차, 항공기 그리고 선박 등과 같은 수송기기산업에 있어 부재경량화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 알루미늄이나 마그네슘 합금은 기존의 철강재료를 대체할 수 있는 경량합금으로서 각광을 받고 있다. 이러한 경량합금은 용접공정에 의해서 하나의 구조체로 완성이 되는데, 이를위해 비용용고상용접 공정인 마찰교반용접 공정이 널리 사용되고 있다.

마찰교반용접은 1991년 영국의 TWI사에 의해서 제안된 용접기술로서, 고속의 회전공구를 이용하여 금속을 고체상태에서 용접할 수 있게 해주는 특징을 가지고 있다. 마찰교반용접된 제품은 낮은 잔류응력과 뛰어난 연성을 가지며, 기존의

용접방법과 비교해서 적은 에너지를 필요로 한다.

이러한 마찰교반용접 공정을 해석하기 위해서 정상상태의 오일러리안기법을 이용한 유한부피법이 이용되었으며, 온도 및 변형 결과를 계산하기 위해 질량 및 운동량 그리고 에너지 보존 법칙을 이용하였다. 실험에서는 열전쌍을 이용하여 온도 히스토리를 측정하였으며 이를 해석결과와 서로 비교하였다. 정확한 열 경계조건과 회전공구 형상을 사용한 경우 더 낮은 결과를 얻을 있었다.

2. 배경 이론

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

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

$$S = 2\mu D$$

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

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.

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

알루미늄합금판과 모루 사이에는 Baffle 열전달 경계조건이 적용되었으며, 접촉면을 따라 흐르는 열량에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$q = kA \frac{dT}{dx} \approx \frac{\Delta T}{R} \quad R = \sum_i^n \frac{\Delta x_i}{k_i A} \quad (3)$$

k_i 와 Δx_i 는 접촉면을 구성하는 요소들의 열전도도와 두께이며, R 은 단위면적 당 열저항도이다. 위의 식 (1)~(3)들과 질량 및 운동량 그리고 에너지 보존법칙을 이용하여 미찰교반용접 공정 동안의 온도 및 변형형상에 대한 히스토리를 계산하였다.

3. 실험

컴퓨터수치제어 3-D 미찰교반용접 장비로서 11KW “Hitachi GR-3DM10T”를 이용하여 AA5083-H18 판재에 대한 맞대기용접 공정을 수행하였다.[1] 모루와 회전공구로는 저탄소강 1020과 공구강 H13이 사용되었다. 회전공구와 핀의 반경은 각각 10mm와 4mm이며, 핀의 길이는 1.34mm이다. 회전공구의 shoulder 부분은 10도의 요면형상을 가지며, 핀은 오른나사선 구조를 가진다. 1.64mm 두께의 판재를 사용하였으며, 서로 옆면을 맞대어서 클램프로 고정시켰다. 회전공구는 3도의 각도로 누운채로 두 판재 사이를 용접하였으며, 1000rpm-100mm/min, 1000rpm-300mm/min 그리고 1500rpm-150mm/min 세가지 용접 조건이 수행되었다.

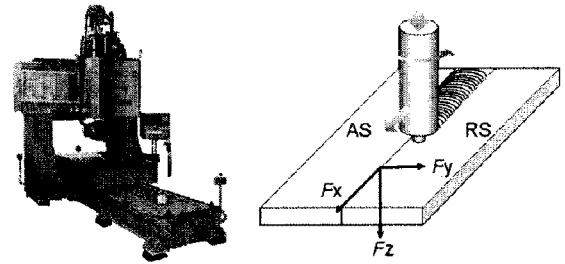


Fig. 1 CNC controlled 3-D FSW system “Hitachi GR-3DM10T” with 11 KW spindle servomotor and description for the welding process

판재에 심어진 열전쌍을 이용해 미찰교반용접 공정 동안의 온도가 측정되었으며, 각각의 열전쌍의 위치는 아래 그림과 같다. 열전쌍은 판재의 윗면으로부터 0.6mm 아래에 장착되었으며, 용접선으로부터 각각 advancing 면과 retreating 면에 대해서 2mm, 5mm 그리고 8mm 위치에 장착되었다.

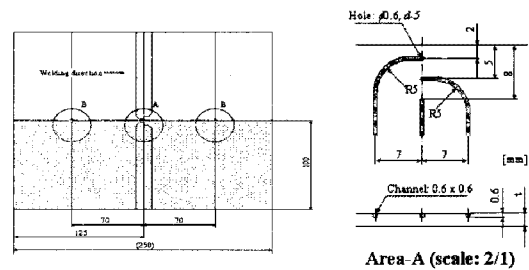


Fig. 2 Schematically illustration of thermocouple placement

4. 전산 해석

본 연구에서는 알루미늄 판재를 높은 점성을 가지며 회전공구 주변을 지나가는 유체로 가정하였다. 전산유체해석 프로그램인 STAR-CCM+를[2] 이용하였으며, 해석시간은 3GHz CPU 16개를 사용하여 10시간 정도가 소요되었다.

미찰교반용접 공정은 plunging, linear welding 그리고 retracting의 세가지 단계로 이루어지며, 특히 맞대기용접의 경우 짧은 시간 내에 회전공구의 온도가 평형상태에 도달하기 때문에 linear welding 공정을 정상상태라 가정할 수 있다. [3] 소성변형과 마찰에 의해 발생하는 열량의 합은 판재가 회전공구와 같은 속도로 움직인다는 가정하에 발생하는 소성변형의 열량과 같기 때문에 이 논문에서는 소성 변형에 의한 열량만을 고려하였다. [4]

너비 200mm, 길이 600mm 그리고 두께가 각각 1.64mm와 10mm인 판재와 모루를 사용하였으며, 회전공구와 형상과 열전쌍의 위치 등은 실험과

똑같이 사용하였다. 회전공구 shoulder의 모서리는 0.2mm 삽입되었으며, 해석을 위해서 800,204개의 mesh가 생성되었다.

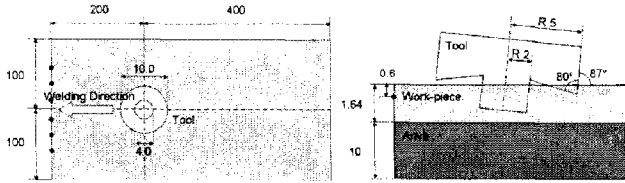


Fig. 3 Dimensions of the thermo-mechanical model: (a) top view (b) section view of the tool (in mm)

전산해석결과를 실험치와 비교하였으며, 정확한 열전달 경계조건과 회전공구 형상을 사용하는 것이 얼마나 중요한가를 알기 위해서 간단한 전산해석모델과도 비교하였다. 간단한 모델에서는 회전공구에 대해 평평한 형태의 shoulder를 사용하였으며, 판재와 모루 사이에 Baffle 열전달 경계조건을 없애고, 공기와 알루미늄을 적용하였다.

1st Approach는 위에서 말한 간단한 전산해석모델을 의미하며, 윗면과 옆면에서는 공기와 알루미늄간의 자연대류시스템에 의해 열이 전달되며 30W/m²°C의 열전달계수를 가진다.[5] 그리고 밑면에서는 200W/m²°C의 열전달계수를 가지며, 회전공구 바로 아래 부분은 용접시 강한 압력이 작용하므로 2,000W/m²°C의 열전달계수를 가진다.[6] 회전공구와 판재간의 열전달은 짧은 시간내에 회전공구의 온도가 고온에 도달한다는 점에서 판재와의 온도차이가 거의 없기 때문에 생략되었다.[7] 2nd Approach에서는 판재의 밑면에서 Baffle 열전달 경계 조건을 사용한 것을 제외하고는 1st Approach와 같은 열 경계 조건을 사용하였다. 그리고 공기와 철 사이의 자연대류시스템에 의해 모루의 옆면에서는 35W/m²°C의 열전달계수가 적용되었다. [8]

AA5083-H18 판재의 항복강도는 온도에 관한 함수이며, 이는 오하이주립대학에서 측정된 실험결과를 이용하였다. 하지만 측정결과가 400°C까지만 있기 때문에 이후에 대해서는 녹는점을[9] 향해서 감소하는 항복강도를 사용하였다.

점도는 식 (2)를 이용하였으며, STAR-CCM+ 내부함수를 사용하였다. 밀도, 비열 그리고 열전도도 역시 온도에 관한 함수이다. AA5083-H18 판재에 대한 물성치가 없기 때문에 AA5052-H32의[10] 물성을 수정하여 사용하였다. 두 종류의 판재에

대한 상온에서의 물성치 비를 이용하여 전체온도 영역에 대한 새로운 물성데이터를 계산하였다. 그리고 모루에는 저탄소강 1020이 사용되었다.[11]

Table 1 Temperature dependent yield stress

1 st Approach		2 nd Approach	
Temp.(°C)	Y.S.(MPa)	Temp.(°C)	Y.S.(MPa)
20	440	20	440
100	437	100	437
200	364	200	364
300	181	300	181
400	61	400	61
410	20	440	50
540	20	540	40
570	0	570	0

Table 2 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

Table 3 Material properties of Low Carbon Steel 1020 at room temperature

Material Property	Low Carbon Steel 1020
Density (Kg/m ³)	7,850.0
Conductivity (W/m°C)	51.9
Specific Heat (J/Kg°C)	486.0

5. 결과

전산해석모델을 검증하기 위해 열전쌍의 온도 결과를 실험치와 비교하였다. 열전쌍의 최고온도와 시간에 따른 온도 기록을 서로 비교하였는데, 정확한 형상과 열전달 경계조건을 사용한 2nd Approach의 결과가 실험치와 상당히 잘 맞았다. 이 전산해석모델을 이용하여 용접 공정시의 다양한 온도 및 변형결과를 계산하였다.

Table 4 Result summaries showing experimental and simulation result for each case.

		Advancing Side			Retreating Side		
		2mm	5mm	8mm	2mm	5mm	8mm
1000rpm 100mm/min	Experiment	525	420	300	480	400	300
	1 st Approach	535	462	302	534	438	288
	2 nd Approach	525	448	276	516	427	266
1000rpm 300mm/min	Experiment	460	400	205	.	.	.
	1 st Approach	496	426	253	491	399	240
	2 nd Approach	467	401	223	459	377	206
1500rpm 150mm/min	Experiment	530	450	267	.	.	.
	1 st Approach	569	506	320	568	474	303
	2 nd Approach	541	444	266	535	430	257

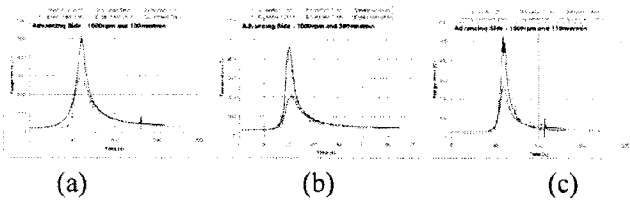


Fig. 4 Computed and experimental temperature history at locations away from the weld center along the width on the advancing side



Fig. 5 Temperature profile at the top surface with each welding conditions

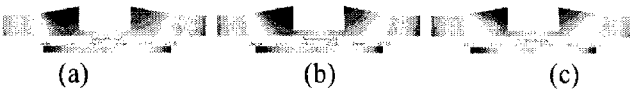


Fig. 6 Temperature cross section profile near the tool with each welding conditions

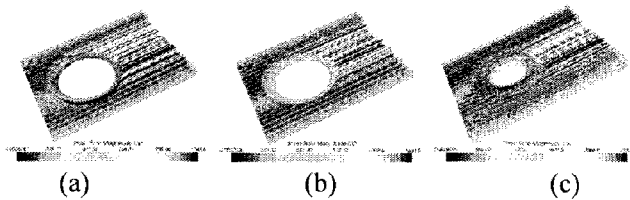


Fig. 7 Material flow with strain rate history with each welding conditions

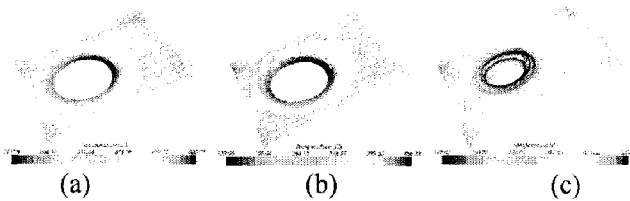


Fig. 8 Material flow with temperature history with each welding conditions, such as (a) 1000rpm and 100mm/min, (b) 1000rpm and 300mm/min and (c) 1500rpm and 150mm/min (in °C)

6. 결론

마찰교반맞대기용접 공정시 열역학적 물성치가 계산되었다. 정확한 회전공구 형상과 열전달 경계 조건을 사용하였을 때 더 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다. 열전쌍을 이용한 실험의 경우 측정 가능한 위치가 매우 제한적이다. 그리고 실험을 통해서 관재가 겪은 변형 결과를 예측하는 것은 매우 힘들다. 이 논문에서 검증한 해석 기술은 마찰교반용접시 재료의 온도 및 변형 히스토리를 계산하는 데 큰 도움을 줄 것이다. 따라서 앞으로

용접 후 물성을 예측하는데 전산해석기술이 다양하게 쓰일 수 있을 것이다.

후 기

The authors of this paper would like to thank the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) for sponsoring this research through the SRC/ERC Program of MOST/KOSEF (R11-2005-065).

참 고 문 헌

- [1] K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki and T. Odakura, 2004, Friction stir welding of automotive alloy sheets for tailor welded blank, Hitachi Private
- [2] CD-Adapco, STAR-CCM+ 2.10.017, 2007
- [3] H. Badarinarayan, F. Hunt and K. Okamoto, 2007, Effect of Tool Thermal Expansion and Durability in Friction Stir Spot Welding, 2007 SAE World Congress, Paper No. 2007-01-1699
- [4] Y. J. Chao, X. Qi and W. Tang, 2003, Heat Transfer in Friction Stir Welding - Experimental and Numerical Studies, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, ASME, p.138-145
- [5] H. B. Schmidt and J. Hattel, 2008, 7th International friction stir welding symposium, TWI
- [6] 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
- [7] H. Schmidt and J. Hattel, 2005, A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 13, pp. 77~93
- [8] G. E. Totten (editor), 2007, Steel Heat Treatment Handbook, 2nd Ed., p.567
- [9] T. Lyman, T. (editor), 1961, Properties and Selection of Metals, Metals Handbook, Vol. 1, ASM, p.944
- [10] X.K. Zhu and Y.J. Chao, 2002, Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation, Computers & Structures, pp. 967-976
- [11] W. D. Callister. Jr (editor), 2003, Materials Science and Engineering an Introduction 6th Ed., pp.737~758