

시험 및 유한요소법을 이용한 마그네슘 합금 마찰교반용접부 온도 특성 평가

선승주¹, 김정석^{2*}, 이우근¹

¹과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과, ²한국철도기술연구원

Evaluation on Temperature of FSW Zone of Magnesium Alloy using Experiment and FE Analysis

Seung-Ju Sun¹, Jung-Seok Kim^{2*}, Woo-Geun Lee¹

¹Dept. of Railway System Engineering, University of Science and Technology

²Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 마찰교반용접은 소재와 용접 툴 간의 마찰열에 의해 접합되는 고상접합 공정이다. 용접 시 발생하는 입열량에 따라 용접부의 건전성이 결정된다. 과도한 입열량은 산화물 및 기공결함의 원인이 되며, 불충분한 입열량은 터널결합 등의 문제점이 발생한다. 따라서 마찰교반용접부 중심에서의 온도 이력을 파악하는 것은 건전성을 판단하는 데 있어 매우 중요한 연구이다. 본 연구에서는 마그네슘 합금소재에 대한 마찰교반용접부의 온도분포 특성을 평가하였다. 이를 위해 유한요소해석을 통한 마찰교반용접부의 유동장 및 온도분포를 예측하였다. 유한요소해석을 위해 용접 툴 형상 간소화, 마찰 조건 선정 등 선행 해석을 수행하고 최적조건을 도출하였다. 또한, 해석모델의 검증에 위해 마그네슘 합금의 맞대기 마찰교반용접 시 용접부 중앙에서의 온도를 측정하였다. 유한요소해석 결과 마찰교반용접부의 온도에 영향을 미치는 주요변수의 기여도는 회전속도가 이송속도보다 더 높은 것으로 판단된다. 또한, 용접부 중심에서의 실측 온도와 유한요소해석 결과 사이에 5.4% - 7.7% 수준의 오차 내에서 잘 일치하였다.

Abstract Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining process involving the frictional heat between the materials and tools. The amount of heat conducted into the workpiece determines the quality of the welded zone. Excessive heat input is the cause of oxides and porosity defects, and insufficient heat input can cause problems, such as tunnel defects. Therefore, analyzing the temperature history and distribution at the center of the Friction Stir Welded zone is very important. In this study, the temperature distribution of the friction stir welding region of an AZ61 magnesium alloy was investigated. To achieve this goal, the temperature and metal flow was predicted using the finite element method. In FE analysis, the welding tool was simplified and the friction condition was optimized. Moreover, the temperature measuring test at the center of the welding region was performed to verify the FE results. In this study, the tool rotation speed was a more dominant factor than the welding speed. In addition, the predicted temperature at the center of the welding region showed good agreement with the measurement results within the error range of 5.4% - 7.7%.

Keywords : Finite Element Method, Friction Stir Welding, Magnesium Alloy, Temperature, Weld Zone

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

본 논문은 한국철도기술연구원 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Seok Kim(Korea Railroad Research Institute, KRRI)

Tel: +82-31-460-5663 email: jskim@krri.re.kr

Received June 22, 2016

Revised July 5, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

1. 서론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해서 개발되어 특허 출원된 이래로 1990년대 중반부터 산업 적용이 시작되었다. 마찰교반용접 기술은 해양, 항공 자동차 등의 분야에 적용되고 있으며 특히 철도산업에서는 히타치(Hitachi)사에서 신칸센과 경전철 차량에 적용하여 제작하고 있다[1].

마찰교반용접은 기존의 용융용접에 비해서 용접 공정이 간단하고 아크 및 가스발생이 없어 친환경적인 기술로 평가받고 있다[2]. 특히 고상접합으로 용접 시 소재의 용융점 이하에서 접합이 이루어지기 때문에 용융용접에 비해 소재의 변형이 적고 용접부 내에 기공, 응고균열 등과 같은 결함을 해결할 수 있다. 마찰교반용접 수행 시 용접 톨의 솔더(Welding tool shoulder)부와 소재간의 마찰로 인해 발생하는 입열량에 따라 용접부의 건전성이 결정된다. 과도한 입열량(Heat input)은 용접부 내에 조성적 액화로 금속간 화합물이 발생하여 산화물 및 기공 결함과 같은 문제점이 발생한다. 반면에 불충분한 입열량의 경우 용접부내에서 적절한 교반이 이루어지지 않아 터널결함(Tunnel defect) 등의 문제점이 발생한다. 이와 같이 마찰교반용접 시 발생하는 온도는 용접부의 기계적 물성에 영향을 미치는 주요 원인이다.

수송 분야의 산업에서는 마찰교반용접 시 발생하는 입열량의 정량화를 위해서 알루미늄 합금을 기반으로 수치해석 연구를 활발히 진행하고 있다. Chen과 Kovacevic[3]은 온도에 따른 Strain-Stress를 고려하여 유한차분법으로 온도거동을 평가하였고, Hamilton et al.[4]은 온도에 따른 전도-비열용량(Thermal conductivity-Specific heat capacity)의 변화와 용접 톨과 알루미늄 판 사이의 마찰거동이 달라짐을 고려하여 해석하였다. 또한 Buffa et al.[5]은 DEFORM과 ABAQUS를 사용하여 탄소성(Elastoplastic) 모델과 점소성(Viscoplastic) 모델의 실험을 통해 얻은 잔류응력을 비교하였다. 반면에 Kang et al.[6]은 Buffa et al.[5]의 소성해석 접근과 달리 Fluent를 사용하여 유동해석 측면으로 접근하여 마찰교반용접부 온도 및 잔류응력을 평가하였다.

기존에 발표된 연구의 경우 알루미늄 합금에 관련된 연구가 대다수이다. 하지만 에너지효율 강조와 환경적 문제의 대두에 의해 경량화가 강조되고 있는 시점에서

알루미늄 합금 대비 2/3의 밀도를 갖는 경량소재인 마그네슘 합금이 주목받고 있다. 그럼에도 불구하고 마그네슘 합금에 관한 연구는 알루미늄 합금에 비하여 현재 미흡한 실정이다. 이에 마그네슘 합금에 마찰교반용접을 적용한 수치해석 연구도 필히 고려되어야 한다고 판단된다.

따라서 본 연구는 마찰교반용접 공정의 수치적 정량화를 구현하기 위해 앞서 기초적인 연구로 AZ61 마그네슘 합금소재를 이용하여 마찰교반용접부의 실측 온도와 수치해석 온도데이터 비교를 통해 수치적 접근 가능성과 전산모사가 가능한 수치해석 모델링 구축을 목표로 연구하였고 공정 변수에 의한 용접부의 특성을 살펴보았다.

2. 마찰교반용접 조건

용접부 중심의 온도 측정을 위한 마찰교반용접 시험은 2개의 압출 판재를 맞대기 용접방식으로 수행하였다.

Table 1. Chemical compositions of AZ61

Al	Cu	Fe	Ni
6.75	0.97	0.0049	0.0008
Mn	Zn	Si	Mg
0.23	0.97	0.018	remains

Table 2. workpiece dimensions for the experiments

Extruded magnesium alloy plate	
Width [mm]	55
Length [mm]	145
Thickness [mm]	5

Table 3. FSW conditions

Case	Welding speed, Ws [mm/min]	Rotation speed, Rs [rpm]
A	300	800
B	300	400
C	100	400

Table 4. The details of FSW tool

Material	SKD61
Shoulder diameter	18mm
Pin shape	Taper
Pin upper diameter	6mm
Pin lower diameter	1.8mm
Pin length	4.5mm

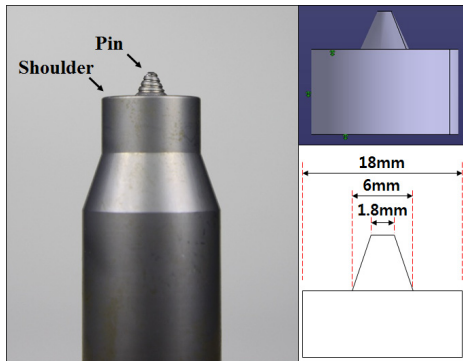


Fig. 1. Tool shape of FSW

용접에 사용된 압출 판재는 AZ61 마그네슘 합금으로 합금을 구성하는 화학적 구성성분과 압출 판재 시편의 치수는 Table 1, Table 2 에 각각 나타내었다. 전반적으로 마찰교반용접에 영향을 미치는 2가지 변수는 용접 틀의 형상과 용접조건이다. 이 중에서 용접 조건에 따른 온도 분포의 거동을 확인하기 위하여 용접 틀 형상 변수는 고정하고 용접조건을 변수로 세 가지 용접조건을 도출하여 온도측정을 수행하였다. 용접조건 및 용접 틀 정보는 Table 3, Table 4, Fig. 1 에 각각 나타내었다.

마찰교반용접 장비는 Gantry type의 장비로 용접 틀의 수직 방향의 변위를 제어하여 용접 틀이 직접 이송하는 방식으로 마찰교반용접을 수행하였다. 마찰교반용접을 수행하며 온도데이터를 수집하는 공정 및 시편의 온도 측정 위치는 Fig. 2 와 같다.

측정된 온도 데이터의 신뢰성을 위해서 동일 위치에서 2회 온도측정을 시도하였으며 온도측정을 위해 사용된 열전대는 K-type으로 가공된 시편의 용접 위치 중심에 고정하였다.

온도측정 장비로는 National Instrument사의 모델명 NI 9213을 사용하였고, Labview 2010 software를 통해서 100Hz 주파수로 데이터를 수집하였다.

3. 마찰교반용접 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

마찰교반용접 유한요소해석에 사용된 상용 소프트웨어는 DEFORM-3D로 소성 공정을 3차원적으로 분석하는 공정해석 프로그램이다.

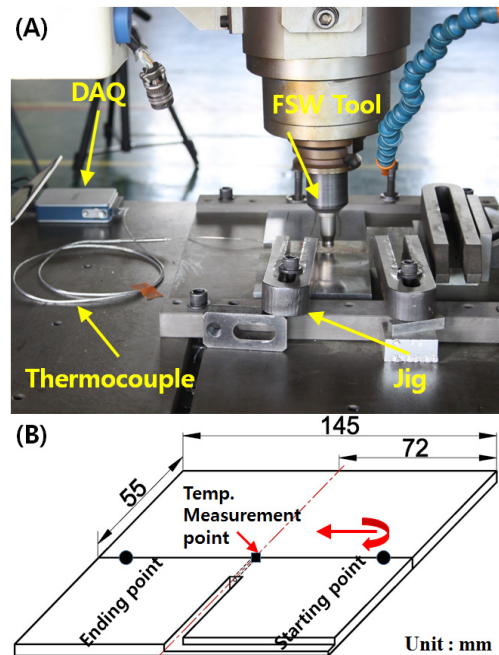


Fig. 2. Friction stir welding experiment
: (A) Friction stir welding device
(B) Details of specimen

해석 중 자동으로 최적화된 격자(Mesh)가 생성되기 때문에 대변형 해석에 매우 유리하여 단조, 압연, 압출, 인발 등을 해석하기에 적합한 소프트웨어이다. 해석 모델은 실제 실험에 사용되는 시편의 가공부분을 생략하여 Fig. 2 (B) 와 동일하게 모델링 하였고, 전체 모델과 연결성을 확보하기 위하여 해석 모델의 가장자리에 대칭 경계조건을 적용하였다. 또한 용접 틀의 경우 형상 단순화를 위해 실제 모델에서의 나사산을 생략하여 해석을 진행하였다. 마그네슘 합금인 용접부 모재는 1차 선형 사면체요소를 사용하였으며, 모델링의 요소 수는 85,000 개 이고, 절점 수는 19,431개 이다. 용접 틀은 강체로 가정하여 해석모델을 구성하였다.

3.2 마찰 조건 선정

마찰교반용접에서는 용접 틀과 소재 간의 접촉에 의해서 입열량이 결정되기 때문에 유한요소해석과정에서 용접 틀과 소재 간의 접촉 수준이 매우 중요하다. 따라서 마찰열과 변형열의 영향이 모두 고려되어야 한다.

하지만 용접 틀이 소재에 삽입되고 나서 이송이 시작되면 마찰열 보다는 변형열이 더 지배적인 것으로 판단

된다. 이에 유한요소해석에서 변형열을 주요 열원으로 하여도 실제와 발열패턴이 유사 할 것으로 예상되어 변형열을 주 열원으로 유한요소해석을 진행하였다. 또한 마찰교반용접 공정을 잘 모사할 수 있는 마찰 공정 조건을 선정하기 위하여 전단마찰조건과 고착조건을 사용하여 선행 유한요소 해석을 수행하였다. 마찰조건은 전단마찰 조건과 접촉 분리 억제 기능을 사용하였다.

이론상 최대 전단마찰은 ‘1’이지만, 해석상 큰 값을 사용하여 미끄러짐을 최대한 막고, 접촉 분리 억제 기능을 사용하여 접촉을 유지 하도록 하였다. 이때 접촉 분리 억제 기능은 유동응력의 1,000%가 되면 접촉이 떨어지도록 하였다. 고착조건은 용접 툴과 소재가 붙어서 미끄러짐이 없고 접촉 분리가 없는 조건이다.

전단마찰 조건에서 마찰력은 식 (1)에 의해서 도출된다.

$$|\tau_s| = mk = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

식 (1)에서 m 은 전단마찰계수, σ 는 유동응력(Flow stress), k 는 전단항복 응력이다. 조건 선정을 위한 수치해석 모델로 회전속도와 이송속도는 임의의 값으로 일정하게 적용하였고, 해석모델 구성방법과 마찰조건의 조합으로 2개의 해석 Case를 만들어 해석에 적용할 마찰 조건을 선정하였다. 마찰 조건 선정을 위한 해석 Case는 Table 5와 같다. Fig. 3 (A) 는 Case No. 1의 수치해석 결과이다. Fig. 3 에서 녹색 영역은 용접 시편이 용접 툴과 접촉하고 있는 영역을 보여준다. 용접 초기에는 툴과 시편 사이에서 원형의 완전한 접촉을 유지하지만 용접 툴이 회전과 병진 운동을 하면서 용접 시편에 변형이 일어나고, 변형량이 많은 영역인 용접 툴 솔더 부분에서 접촉이 유지되지 못 하는 것을 확인하였다. 반면에 용접 편 부분은 접촉을 유지하였다. 실제 마찰교반용접을 수행 시 관찰할 수 있는 변형양상이 수치해석에서도 관찰 가능하였다. 용접 툴 솔더 가장자리에서 Burr로 판단되는 변형을 확인할 수 있었다. Fig. 3 (B) 는 Case No. 2 의 수치해석 결과이다. Case No. 1 과는 다르게 용접 툴의 이송이 시작되어도 용접 시편과 용접 툴과의 접촉 상태가 상대적으로 잘 유지되고 있는 것을 확인하였다. 변형양상은 Case No. 1 과 큰 차이를 보이지 않았으나 Burr의 양이 더 많이 발생하였다.

위의 선행 유한요소 해석 결과 용접 툴 솔더와 소재 사이 간섭량 (Plunge depths)이 0.1mm이고, 접촉 분리

억제 옵션을 사용한 마찰 조건인 Case No. 2 가 접촉점을 가장 잘 유지하고 있는 것으로 판단되어 마찰교반용접 공정 해석 수행에 적용하였다.

Table 5. Contact conditions of the FSW analysis

Case No.	Shoulder plunge depths	Friction conditions
1	0.1mm	Sticking
2	0.1mm	Shear friction

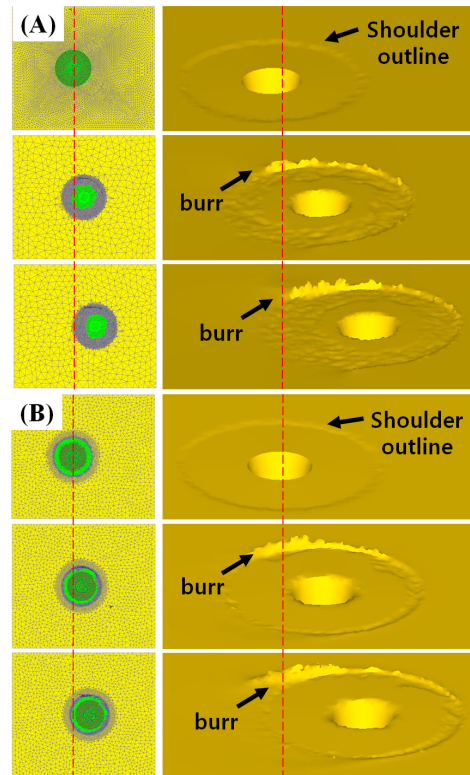


Fig. 3. Analysis results to choose the contact condition of the FSW simulation
(A : Case No. 1, B : Case No. 2)

3.3 마찰교반용접 공정 조건별 해석

본 연구에서 수치해석을 수행한 마찰교반용접 조건은 앞서 실제 마찰교반용접 수행을 했던 3가지 용접조건 (Table 3 참조) 과 동일하게 선정하였다. 회전속도에 의한 영향을 비교하기 위해서 동일 이송속도에서 회전속도만 변화시킨 용접조건(Case A, B)과 이송속도에 의한 영향을 알아보기 위해서 동일 회전속도에서 이송속도를

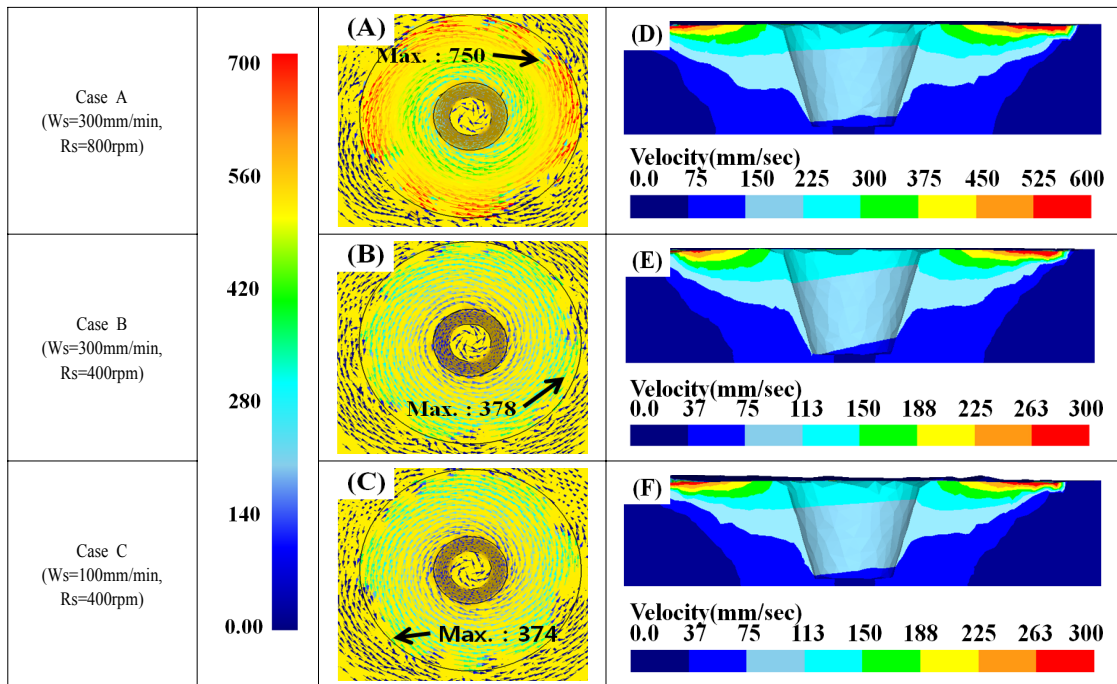


Fig. 4. Metal flows in the friction stir welding process

변화시킨 용접조건(Case B, C)의 결과를 살펴보았다. 수치해석 결과 용접부 내에서의 속도장을 Fig. 4에 나타내었다. 용접 툴과 접촉하고 있는 영역에서 속도장이 나타나며, 용접 툴 솔더 가장자리와 접촉하고 있는 부분에서 속도장이 가장 크게 나타났다. 용접 툴의 회전속도가 증가함에 따라 소재의 속도장도 비례하여 증가하고 있으며 용접 툴의 이송속도에 따른 속도장 변화는 미미한 것으로 확인되었다.

Chen et al.[7] 은 마찰교반용접 수행 시 교반부(Stir Zone, SZ)내부에 발생된 결함은 소성유동 증가에 의해 해결될 수 있다고 문헌 보고하였다. 이를 수치해석을 통한 속도장 결과와 연관하여 살펴보면, 더 많은 소성유동을 발생시키는데 있어 이송속도를 줄이는 것 보다 회전속도를 높이는 것이 결함을 극복하는데 더 효과적일 것으로 사료된다.

용접부 단면에서의 속도장의 차이는 Fig. 4 (D), (E), (F) 에서 관찰되는바와 같이 큰 차이가 없었다.

이는 실제 마찰교반용접 시 용접부에서 발생하는 소성유동의 형태와 유사할 것으로 예상된다. 하지만 수치해석 모델의 간소화로 용접 툴 핀 모델링 형상에서 나사산이 생략되었다. 이는 실제 거동과는 차이가 있을 것으

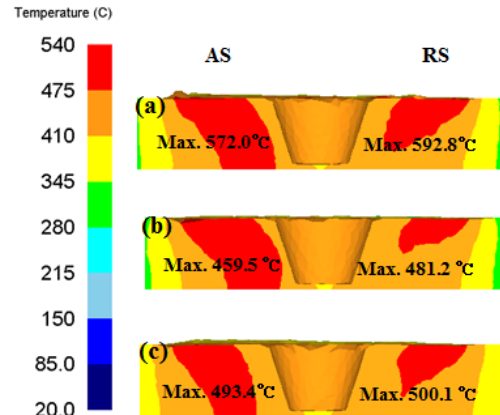


Fig. 5. Temperature distribution of AS and RS regions
(a) Case A, (b) Case B, (c) Case C

로 판단되며, 추후 연구에서 소성유동에 초점을 맞춰 수치해석을 수행할 경우 매우 중요한 변수로 고려해야 할 사항으로 사료된다.

Y. H. Yau et al.[8] 은 마찰교반용접 과정 중 용접 툴의 이송방향과 회전방향이 일치하는 Advancing side(AS)가 용접 툴의 이송방향과 회전방향이 반대인 Retreating

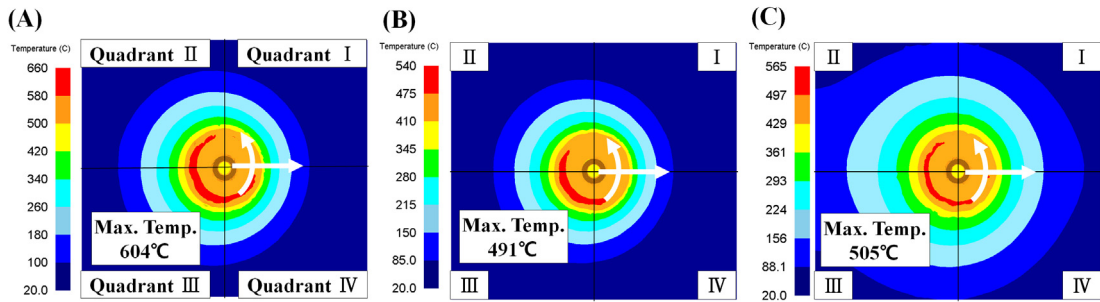


Fig. 6. Maximum temperatures under different welding conditions

(A) : Ws=300mm/min, Rs=800rpm, (B) : Ws=300mm/min, Rs=400rpm, (C) : Ws=100mm/min, Rs=400rpm

side(RS)에 비해서 발열이 더 많은 것을 실험을 통해서 문헌 보고 하였다. 본 연구에서도 Fig. 5 와 같이 용접부 단면에서의 온도분포를 확인한 결과 모든 Case에서 AS 영역이 RS영역보다 평균 약 16.3°C 수준으로 높게 나타났다.

3.4 해석결과 비교 및 검토

Fig. 6 은 수치해석을 통한 마찰교반용접 조건별 온도 분포 결과이다. 온도의 최대값은 솔더의 외곽선부분 이었고 이는 Fig. 4 에서 가장 높은 속도를 보인 위치와 일치한다. 원인은 용접 톨 솔더의 오목한 형상으로 인하여 바깥 위치에서 온도가 높게 나타난 것으로 판단되며 발생한 열은 소재의 대변형(Large deformation) 거동 때문에 발생하는 변형열로 판단된다. 용접 시편에 일어나는 변형열은 식 (2)에 기인한다.

$$q^* = C \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

식 (2)에서 C는 변형열 계수로 변형열에 의한 발열을 고려하려 실험치를 기반으로 한 데이터를 사용하였다. 본 수치해석에서는 실험치 기반의 값인 0.8을 적용하였다. 용접 톨과 접촉하고 있는 영역에서 약 500 - 600°C 로 분포하고 있으며 각 Case 별로 최대 온도 값은 Case A, C, B 순으로 604°C, 506°C, 491°C 로 각각 나타났다. 용접 톨의 회전속도가 높을수록 최대 온도 값이 증가하는 경향을 확인하였고, 용접 톨의 이송속도에 의한 온도 변화는 미미하게 나타났다. 또한 용접 톨 주위를 4개의 영역(4 사분면)으로 나누었을 때 3 사분면에 위치하는 영역에서 공통적으로 온도가 가장 높게 분포했다. 이는

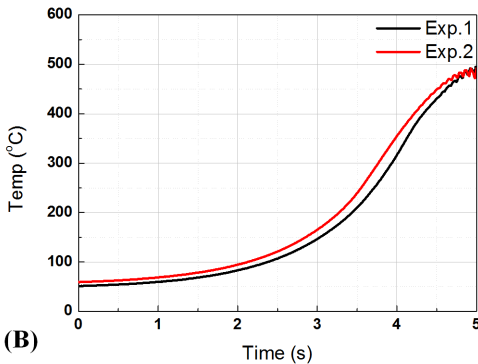
AS 영역 중에서도 용접 톨의 전진 방향의 영역(4 사분면)은 계속하여 상온의 소재가 인접되는 영역이고 3 사분면의 영역은 가열된 소재 뒤를 따라가며 가열되는 영역이기 때문에 3 사분면의 온도가 가장 높게 분포하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 실제 마찰교반용접 시 중앙부위에서 얻은 용접 조건별 온도데이터의 이력이다. 온도측정을 수행한 위치에서의 최대 온도의 평균값과 동일 위치에서 수치해석을 통해 얻은 온도 데이터는 Table 6 와 같다. 온도 데이터를 얻은 위치는 용접 톨 핀(Pin)의 주변으로 용접부 중심부의 인근이다. 해당 위치에서 온도는 용접 톨 솔더 부위의 온도보다 낮게 나타났다. 또한 실측을 통해 측정된 온도와 수치해석을 통해 얻은 온도 데이터 모두 일정한 수준의 온도에 이르면 그 이상으로 온도가 오르지 않고 유지하였다.

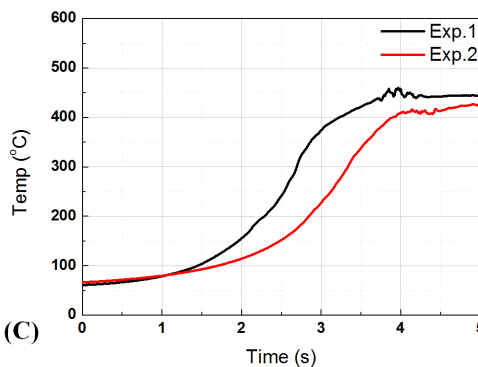
실제 실험에서 측정된 데이터와 수치해석 결과상의 온도데이터의 오차는 약 22-34°C 수준으로 용접부 온도가 약 450°C 수준인 것을 감안했을 때 약 5.4 - 7.7% 의 오차가 나타났다. 이러한 차이는 실제 마찰교반용접과 해석 사이에 경계조건의 차이 그리고 용접 톨 형상의 모델링이 실제 용접 톨과 정확하게 일치하지 않기 때문으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 용접 조건에 따른 온도 변화와 공정 변수인 회전속도 및 이송속도의 변화가 온도에 기여하는 수준 등을 파악하기에는 충분한 해석결과로 판단된다. 또한 Burr와 같은 변형양상과 소재내의 속도장 구현 등으로 보아 DEFORM-3D software을 이용한 전산모사가 적합함을 확인하였다.

(A)



(B)



(C)

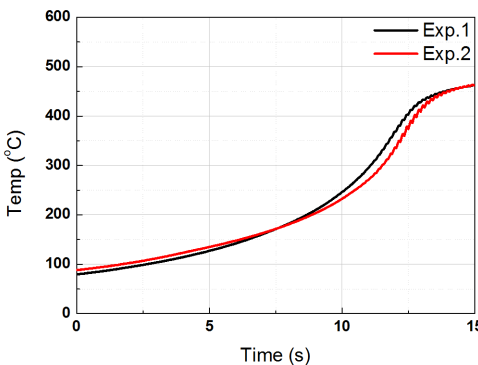


Fig. 7. Temperature history measured in the experiment

Table. 6. Peak temperature comparison between FE analysis and test

Welding conditions	Peak Temp. (Exp.)	Peak Temp. (FEM)	Abs. Error (%)
Case A	493.4°C	515.7°C	5.4
Case B	448.4°C	413.8°C	7.7
Case C	474.0°C	443.5°C	6.4

4. 결론

본 연구에서는 AZ61 마그네슘 합금을 바탕으로 전산 모사를 위한 모델링을 구축 하였으며, 공정 변수의 기여도와 용접부에서의 온도거동을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰교반용접 공정에서 관찰 가능한 Burr와 같은 변형양상과 기존 문헌에서 보고되었던 AS와 RS 영역의 온도 차이를 전산모사를 통해 구현 가능했다.
- (2) 공정 변수인 회전속도를 변화시킬 경우 용접부에서의 최대온도가 비례 변화하였고, 반면에 이송속도의 영향은 미미하였다. 따라서 마찰열에 있어 공정변수의 기여도는 회전속도가 더 높은 것으로 나타났다.
- (3) 마찰교반용접 공정 중 용접 톨 솔더의 바깥 위치에서 가장 높은 온도가 측정되었으며, 용접부 중심의 실측온도와 수치해석을 통한 온도데이터의 비교 결과 비교적 잘 일치하였다.

References

- [1] H. Ohba, C. Ueda, K. Agatsuma, "Innovative Vehicle—the A-train," Hitachi Review, Vol. 50, No. 4, pp. 130-133, 2001.
- [2] H. I. Dawood, K. S. Mohammed, M. Y. Rajab, "Advantages of the Green Solid State FSW over the Conventional GMAW Process" Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014, pp. 1-10, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/105713>
- [3] C. M. Chen, R. Kovacevic, "Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 13, pp. 1319-1326, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00158-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00158-5)
- [4] C. Hamilton, S. Dymek, A. Sommers, "A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys," International journal of machine tools and manufacture, Vol. 48, No. 10, pp. 1120-1130, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.02.001>
- [5] G. Buffa, A. Ducato, L. Fratini, "Numerical procedure for residual stresses prediction in friction stir welding," Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 47, No. 4, pp. 470-476, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2010.12.018>
- [6] S. W. Kang, B. S. Jang, H. C. Song, "Residual stresses analysis of friction stir welding using one-way FSI simulation," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 29, No. 3, pp. 1111-1121, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-015-0223-x>

- [7] Z. W. Chen, T. Pasang, Y. Qi, "Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O," Materials Science and Engineering: A, Vol.474, No.1, pp. 312-316, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.074>
- [8] Y. H. Yau, A. Hussain, R. K. Lalwani, H. K. Chan, N. Hakimi, "Temperature distribution study during the friction stir welding process of Al2024-T3 aluminum alloy," International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 20, No. 8, pp. 779-787, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12613-013-0796-2>

이 우 근(Woo Geun Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 2016년 6월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 박사과정

선 승 주(Seung-Ju Sun)

[준회원]



- 2015년 3월 ~ 2016년 6월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 석사 과정

<관심분야>

경량소재, 기계

<관심분야>

구조해석, 경량소재

김 정 석(Jung-Seok Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (항공공학석사)
- 1999년 8월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (항공공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2003년 3월 : LG전선 연구소 선임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

신소재, 철도차량 경량화