

## Coupled Eulerian-Lagrangian 기법을 이용한 이종 마찰교반용접 해석모델 개발

임재용<sup>1\*</sup>, 이진호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 안전공학과, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 신교통혁신본부

### Development of a Coupled Eulerian-Lagrangian Finite Element Model for Dissimilar Friction Stir Welding

Jae-Yong Lim<sup>1\*</sup>, Jinho Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 연구에서는 이종경량재료의 마찰교반용접을 모사할 수 있는 유한요소 해석모델을 개발하고, 이를 통해 기초분석과 실용적 적용 가능성에 대해 고찰하였다. Coupled Eulerian Lagrangian 에 기반한 유한요소모델을 구성하였으며, 해석 모델은 외연적 시간적분을 이용하여 열-온도, 변위-응력 물리계로 이루어진 다중 물리계를 복합적으로 계산하며, 용접물 표면과 피용접 재료 간 마찰, 극심한 소성변형으로 인한 열에너지 발생, 그리고, 밀면을 통한 열에너지 소산 등 열발생원과 열전달 메카니즘이 모두 고려되었다. Al6061T6와 AZ61 판재의 맞대기용접을 고려하였으며, 주요 용접변수인 용접 속도와 용접물 회전속도를 변화시킨 세 가지 조건에 대해 해석을 실시하였다. 각 해석은 피용접물의 온도분포, 결합의 분포, 소성변형률 분포가 출력이 가능하였다. 구축한 모델을 이용한 해석 결과 알루미늄보다는 마그네슘부에서 더 높은 온도가 발생하였으며, 회전속도가 커질수록 최대 온도가 증가하기보다는 알루미늄쪽으로 높은 온도가 분산되어 가는 경향을 보였다. 또한, 회전속도가 커질수록 피용접물 재료가 위로 올라오는 플래시 결합의 경향 예측이 가능하였으나, 톨 주변 결합 형성예측은 메시가 세밀하지 못하여 정확한 결과를 산출하기에는 부족하다고 볼 수 있다. 본 모델은 마찰교반용접 중 발생 가능한 여러 물리계의 여러 물리적 현상을 실제로 가깝게 반영하고 있으며, 실험적으로 밝히기 어려운 기초 분석에 응용될 수 있으나, 1달이 넘는 해석소요시간을 감안하면 실용적으로 최적의 용접조건 도출에 응용되기는 어렵다고 판단된다.

**Abstract** This study aims to develop a FE Model to simulate dissimilar friction stir welding and to address its potential for fundamental analysis and practical applications. The FE model is based on Coupled Eulerian-Lagrangian approach. Multiphysics systems are calculated using explicit time integration algorithm, and heat generations by friction and inelastic heat conversion as well as heat transfer through the bottom surface are included. Using the developed model, friction stir welding between an Al6061T6 plate and an AZ61 plate were simulated. Three simulations are carried out varying the welding parameters. The model is capable of predicting the temperature and plastic strain fields and the distribution of void. The simulation results showed that temperature was generally greater in Mg plates and that, as a rotation speed increase, not the maximum temperature of Mg plate increased, but did the temperature of Al plate. In addition, the model could predict flash defects, however, the prediction of void near the welding tool was not satisfactory. Since the model includes the complex physics closely occurring during FSW, the model possibly analyze a lot of phenomena hard to discovered by experiments. However, practical applications may be limited due to huge simulation time.

**Keywords** : Dissimilar Friction Stir Welding, Coupled Eulerian-Lagrangian, Finite Element Method, Temperature distribution, Plastic Strain Distribution

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : NRF-2017R1C1B5017363)

\*Corresponding Author : Jae-Yong Lim(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6388 email: jaeyong.lim@gmail.com

Received October 12, 2018

Revised (1st November 5, 2018, 2nd December 12, 2018, 3rd January 8, 2019)

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

## 1. 서론

마찰교반용접 (Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국의 TWI사에서 특허를 보유한 기술로서 비철금속과 같은 경량재료의 신뢰성 있는 접합기술로서 많은 주목을 받고 있다. 마찰교반용접의 기본 원리는 Fig. 1의 개념도에서 설명하는 바와 같이 회전하는 비소모성 용접틀이 피접합물에 삽입되어 그 사이를 진행하며 마찰열을 발생시킴으로써 틀 근처에 존재하는 피접합재료의 온도 상승과 재료연화를 유발하여 재료를 혼합하는 원리이다. 또한, 기존의 용접법에서 자주 발생하는 기공, 응고균열, 액화균열 등의 결함을 보완하여 용접부의 기계적 성질이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한, 경량비철 금속재료에 적용할 수 있고, 부가적인 체결부품(fastener, butt strap, bonding, riveting 등)도 불필요하여 경량화를 이룰 수 있는 제조공법으로 평가받고 있다.

마찰교반용접부의 품질은 여러 가지 측면에서 정의될 수 있겠으나, 구조적인 관점에서는 접합으로 인해 불가피하게 발생하는 기계적 특성 저하를 최소화시키는 것으로 정의될 수 있다. 기존의 마찰교반용접의 연구에서는 양호한 용접접합부를 얻기 위해 마찰교반용접부의 기계적 특성에 영향을 미치는 인자를 탐색하였으며, 공정변수로서 틀의 회전속도, 진행방향속도, 틀의 재료 및 형상 등이 접합부의 강도, 강성, 연신율과 연관이 있는 것으로 알려져 있다 [1-3]. 언급된 공정변수들은 입열량, 연화된 피접합 재료의 유동 및 이들의 금속학적 측면에 영향을 미치기 때문에 마찰교반용접부의 기계적 성능과 관련이 깊다. 용접부의 기계적 특성을 이해하고 평가하기 위해서는 용접부 내외적으로 발생하는 결함의 형태와 원인에 대해서 충분히 인지하고 있어야 하며, 대표적인 마찰교반용접부의 결함형태인 터널결함(Tunnel Defect)이나 구멍결함(Void Defect)은 불충분한 입열량과 충분치 않은 재료의 교반에 의해 발생하는 결함으로 알려져 있다. 즉, 용접틀의 회전속도와 용접속도와 밀접한 관련이 있는 것으로 확인된다. 한편, 과도한 입열량은 산화물, 플래시 결함 또한 초래할 수 있다. 이렇듯 온도분포와 재료의 유동양상은 결함발생, 즉 접합부의 품질에 직접적인 영향을 주는 인자이다.

대다수의 기존 연구는 각 연구자들의 특정상황 (예를 들면, 피접합물의 재료, 두께, 배치, 장비성능 등)에 한정하여 경험에 기반한 시행오차식으로 최적화된 조건을 탐

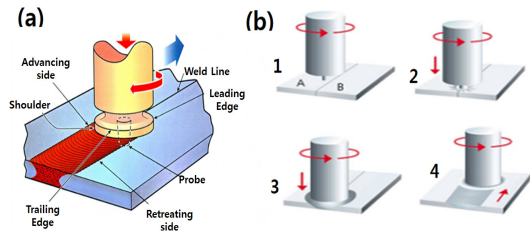


Fig. 1. Schematic Diagram of Friction Stir Welding

색하고, 기계적·금속학적 측면에서의 분석이 이루어졌다. 이를 보완하고 분석하기 위한 방법으로 최근 많은 연구자들에 의해 수치해석을 사용한 연구가 진행되어왔다. 결함이 없는 마찰교반용접부를 얻기 위한 시행오차방식 접근방법의 불가피성과 재료내부에서 고속변형이 일어나 실험적으로 유동양상을 분석하기 어렵다는 두 가지 단점에 대해 수치해석모델은 해결책이 될 수 있을 것이다.

마찰교반용접공정에 대한 해석은 고체 재료의 고속대변형 거동, 마찰에 기인한 열분포, 온도 상승으로 인한 재료의 연화, 재료의 유동이 복합적으로 연관되어 있어 다양한 물리계가 복합적으로 결합되어 있다. 다중물리계가 결합된 지배방정식을 풀기 위한 방법을 기준으로 분류하면, 라그랑지안 (Lagrangian) 수식화 기반의 유한요소모델[4, 5], 오일러리안 (Eulerian) 수식화 기반 모델[6, 7]로 나눌 수 있다. 현재까지 여러 연구자들의 각각의 유한요소모델들은 초기 메시로부터 과도한 찌그러짐으로 인한 과도한 계산시간의 소요, 재료거동에 대한 무리한 가정 등을 사용하여 각자의 고급해석기술 방법을 동원하여 해석모델을 개발해가고 있는 추세이다. 한편, 현재까지는 마찰교반용접공정 모사 및 분석을 위해 최적의 방법으로 알려진 접근법은 없는 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 Coupled Eulerian-Lagrangian 기반의 유한요소해석을 이용하여 이중마찰교반용접의 온도분포와 재료의 유동을 분석할 수 있는 모델을 개발하고 실용적으로 접근가능한, 즉, 시행오차식 최적공정 변수 도출을 대체 가능한 방법론인가에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 유한요소해석모델

### 2.1 용접해석의 개요

본 연구에서 고려하고 있는 마찰교반용접 상황은 알

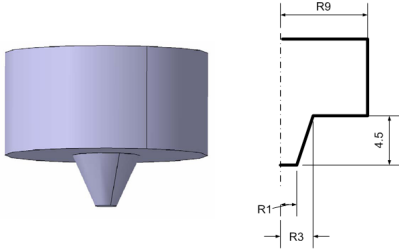


Fig. 2. Tool geometry and its dimension

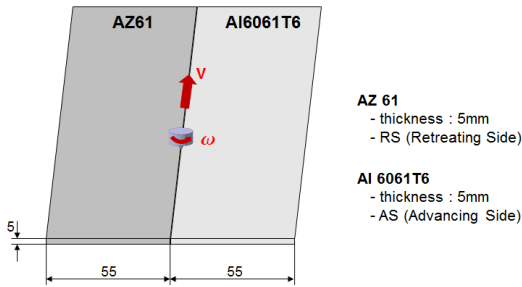


Fig. 3. FSW process for FE model construction

Table 1. FE model lists

Simulation No.	FSW process parameters			
	$\omega$ (rpm)	V (mm/min)	AS	RS
#1	500	30	Al	Mg
#2	500	60	Al	Mg
#3	1000	30	Al	Mg

루미늄합금(Al6061T6)과 마그네슘합금(AZ61) 판재의 맞대기 용접으로 두 판재의 두께와 폭은 각각 5mm와 폭 55mm, 길이는 충분한 것으로 가정하였다. 두 판재 사이를 Fig. 2의 모양과 같은 틀이 삽입되어 회전속도  $\omega$  (rpm)으로 회전하며 용접속도 V (mm/min)로 진행한다. 틀의 위치는 정확히 두 판재 사이의 중앙에 위치시켰으며, 회전 방향은 알루미늄 판재를 AS(Advancing Side), 마그네슘 판재를 RS (Retracting side)에 오도록 틀의 회전 방향을 정하였다. 이에 대한 개략적인 배치 상황을 Fig. 3에 도시하였다.

본 유한요소해석 모델 구성에 사용된 용접공정변수는 Table 1에 나타난 바와 같이 V와  $\omega$ 를 적절히 변화시켜 3가지 조건을 고려하였다.

## 2.2 해석모델구성

### 2.2.1 메시 및 사용요소

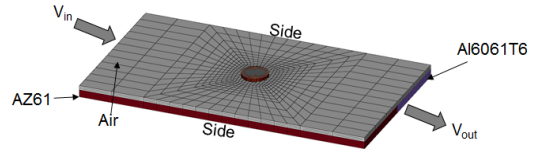


Fig. 4. FE model construction

전절에서 설명한 마찰교반용접 조건을 Fig. 4와 같이 해석모델을 구성하였다. 틀을 중심으로 변형이 과대하고, 속도가 크기 때문에 요소의 크기를 틀위치와 가깝게 위치할수록 메시의 크기를 작게 생성하였다. 외연적 시간적분 기반의 유한요소해석이므로, 해석시간은 요소의 크기에 매우 민감하다. 해석의 정밀도를 요할 경우 이 부위의 요소의 크기를 줄여야 하나, 이는 비현실적인 계산 시간을 요할 수 있으므로, 대략 1달 이내에 해석시간 10 초를 완료할 수 있는 요소의 크기를 결정하였다. 틀이 위치하고 있는 중앙부의 요소는 2.3(mm) × 2.3(mm) × 1.0(mm)이며, 피용접물의 요소개수는 4992개이다.

오일러리안 공간은 아바쿠스에서 제공하는 오일러리안 요소인 EC3D8RT를 사용하였으며, 각 위치에 알맞은 재료를 부여하였다. 또한, SKD61로 이루어진 용접틀은 라그랑지안 요소인 C3D8RT를 사용하였다. 그리고, 마찰교반용접으로 인해 발생할 수 있는 플래시결함 등을 예측하기 위해서 5mm 두께의 판재 위에 2mm가량을 오일러리안 요소를 추가로 사용하였으며, 그 부분에 대해 초기재료분포조건으로 공공(void)으로 설정하였다. 이는 마찰교반용접이 진행되면서, 발생할 수 있는 플래시 결함 등을 예측할 수 있도록 한다.

### 2.2.2 재료모델

마찰교반용접 과정 동안 틀주변의 피용접물 재료는 고속의 변형을 속도로 극심한 소성변형을 겪게되며, 이로 인한 열발생과 열전달을 모사할 수 있어야 한다. 따라서, 유한요소해석에 사용할 재료의 모델은 탄소성 경화 거동, 변형을 속도의존성, 온도에 따른 물성의 변화 등의 기계적 거동을 고려할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 Al6061T6와 AZ61의 탄소성거동을 식 (1)과 같이 표현되는 Johnson-Cook Model을 이용하여 모사하였다.

$$\sigma_0 = [A + Bp^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{p}}{p_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_0$ ,  $p$ ,  $\dot{p}$ ,  $T$  는 유동응력, 등가소성변형률, 등가소성변형률속도, 온도를 의미하며, A, B, C, n, m,  $T_{ref}$ ,  $T_m$  은 재료상수이다.

기계적 물성 뿐 아니라 소성거동과 마찰로 인한 열발생과 열전달을 모사하여야 하며, 열물성을 입력하여야 한다. Al6061T6 물성에 필요한 기계적, 열적 물성 데이터는 참고문헌[8]을 참조하였으며, 마그네슘 합금 AZ61 물성에 필요한 데이터는 참고문헌[9-11]에서 획득하였다. Johnson-Cook 모델에 재료상수는 표 2에 나타내었으며, 열전도도, 열용량 등 온도의존 열물성은 참고문헌 [8, 10, 11]을 참조하도록 한다.

### 2.2.3 경계조건

오일러리안 요소로 모사되는 피용접물의 변위 경계조건은 다음과 같이 부여하였다. 검사체적의 앞면은 피용접물 재료가  $V_{in}=V$  (mm/min)의 속도로 검사체적 내로 이동하고, 반대편 (뒷면)으로  $V_{out}=V$  (mm/min)의 속도로 빠져나가는 것으로 구현하였다. 한편, 검사체적의 옆면은 진행속도  $V$ 의 속도조건만 부여하였으며, 판재의 폭 방향으로의 자유도는 구속하였다. 마찬가지로 밑면은 수직 방향의 자유도를 구속하였다.

열적 경계조건과 관련하여서는 밑면을 통해 열전도가 되는 것으로 가정하였으며, 일정 대류열전달 계수  $h=350 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 사용하여 이를 모사하였다. 툴과 피용접물 사이에 마찰계수 0.7을 사용하였으며, 피용접물의 소성변형에너지의 90%가 열에너지로 전환함을 가정하였다. 마찰에너지와 소성에너지가 열에너지로 변환됨을 본 모델에서 가정하였다.

Table 2. Johnson-Cook material parameters for AZ61[11] and Al6061T6 [8].

Material	Al6061T6	AZ61
A (MPa)	324	100.52
B (MPa)	114	94.33
C	0.002	0.6312
n	0.42	0.3512
m	1.34	0.4367
$\dot{p}$ ( $s^{-1}$ )	1.0	0.001
$T_{ref}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	24	625
$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	583	250

### 2.2.4 해석코드 및 해석시스템

2.2.1절에서 언급한 3개의 해석모델은 상용유한요소 해석 코드인 ABAQUS Explicit v2016 4 cpu 병렬연산 (Intel XEON E5 2650 V3)을 통해 계산되었다. 해석타입은 동적 열구조 해석(Dynamic temperature-displacement), 시간 증분은 사용 요소의 크기에 따라 결정되며, mass scaling등의 해석단축기법은 사용하지 않았다. 10초의 용접과정을 계산하였으며, 각 해석케이스는 약 25-40일 가량이 소요되었다.

## 3. 해석결과 및 토의

### 3.1 해석결과

Figure 5 - 7에는 10초가 지났을 때 해석 #1-3에 대한 온도분포, 등가소성변형률, 재료의 분포를 나타낸다. 용접틀의 중심에서 절단하여 도시하였다.

온도분포를 비교하여 보면, 해석 #1과 #2에서는 모두 Al 보다는 Mg 쪽에서 온도가 높았으며, 해석 #3에서는 Mg뿐 아니라 Al에서도 모두 높은 온도가 계산되었다. 열물성과 마찰교반용접의 배치만 고려하였을 경우 Al쪽에서 더 높은 온도분포가 예상되었으나, 높은 온도분포는 Mg에서 관찰되었다. 이는 두 모재의 열물성, AS/RS 배치차이라기보다는 Mg쪽에서 더 많은 소성변형이 일어나 이 에너지가 열로 전환된 것으로 생각된다. 회전틀의 솔더부 모서리와 회전틀 핀 끝에서 최고 온도가 발생한다. 최고온도는 해석 #1과 해석 #2는 600도 가량, 해석 #3는 약 630도 가량이 계산되었다.

해석#1과 #2의 온도분포를 비교할 때, 뚜렷한 온도분포의 차이는 나지 않고, Mg에서 온도가 높고, Al부에서는 약 400도 정도이다. 미세한 차이로는 해석 #2의 알루미늄부가 해석 #1의 알루미늄부에 비해 상대적으로 약간 높은 온도분포를 갖는 것으로 나타난다.

한편, 해석 #1과 해석 #3에서는 Mg의 온도는 해석 #3에서 약간 높은 630도의 최고온도가 나타나며, 해석 #1에 비해 Al까지도 500도를 상회하는 높은 온도가 관찰된다. Fig. 5(b), 6(b), 7(b)에 나타난 등가소성변형률을 비교하여 보면, 모두 툴 핀 주변 피용접물 재료가 극심한 소성변형을 겪는 것으로 조사되었으며, 특히 툴핀과 툴핀의 아래 부분에서 큰 소성변형을 겪는다. 극심한 소성변형률을 겪는 부분은 용접부의 Stir Zone으로 예측

될 수 있다. 공공의 분포를 Fig. 5(c), 6(c), 7(c)과 같이 비교하였다. 공공이 생기는 부분이 빨간색, 공공이 없는 부분, 즉, 피용접물 재료나 틀이 채워져 있는 요소에는 파란색으로 나타낸 컨투어 그래프이다.

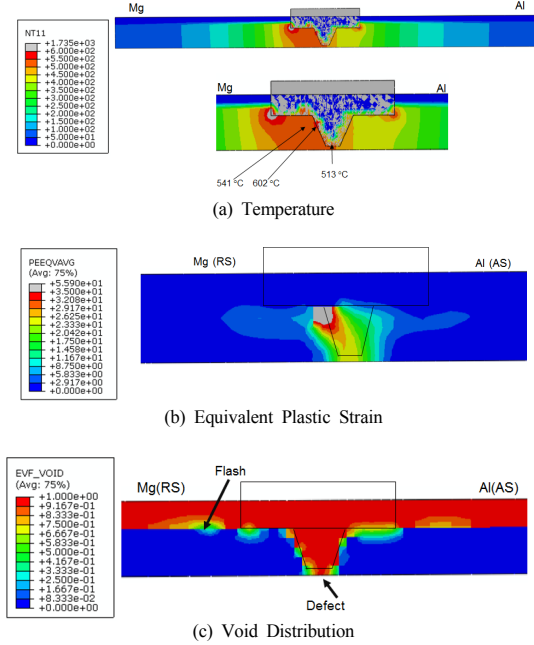


Fig. 5. Results of Simulation #1

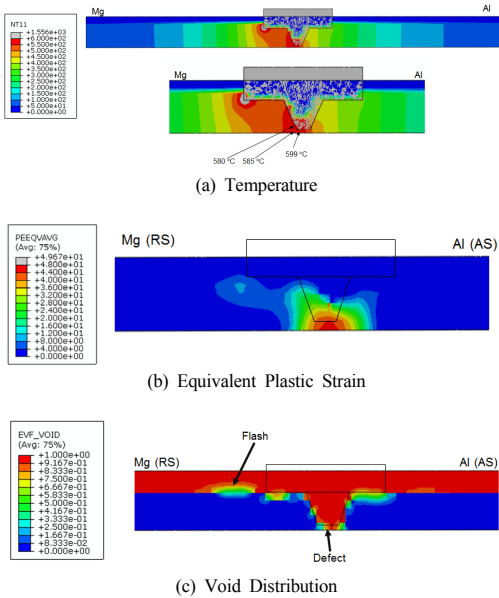


Fig. 6. Results of Simulation #2

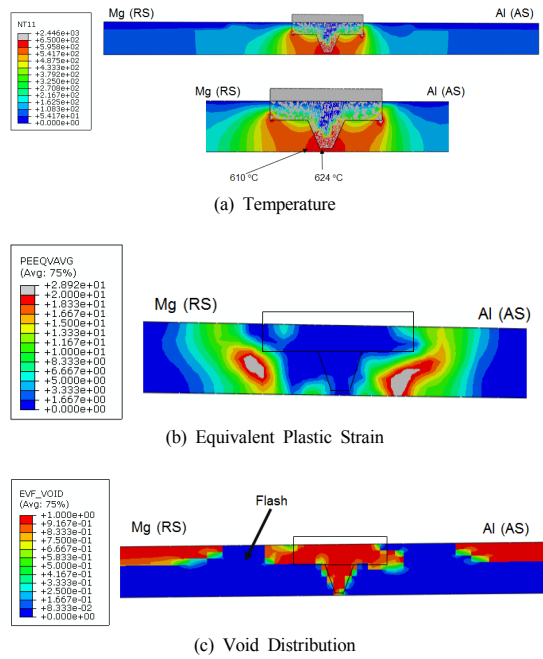


Fig. 7. Results of Simulation #3

솔더 밀부분의 공공의 존재는 용접틀의 회전과 재료의 교반으로 인해 피용접물 재료가 일정량 비어있음을 의미한다. 쇼울더 주변에 붉은색 이외의 영역은 플래시 결합 가능성이라 할 수 있으며, 틀핀 주변의 공공의 존재는 메시가 충분히 세밀하지 못해 오일러리안 요소에 라그랑지안 요소로 묘사된 틀이 같은 공간에 존재하고 있어 생긴 오차로 보인다.

### 3.2 결과분석 및 토의

마찰교반용접 중 발생하는 온도분포가 용접부의 건전성에 미치는 영향과 상관관계를 밝히려는 노력이 많이 시도되었다. 용접변수와 입열량과의 관계는 많은 연구자들에 의해 아래의 식과 같이 간단하게 표현되고 분석되어 왔다.

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\eta \mu p \omega R^3}{v} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ 는 마찰교반용접으로 인한 입열량,  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $p$ ,  $\omega$ ,  $v$ ,  $R$ 은 입열효율, 마찰계수, 수직하중, 틀의 회전속도와 이송속도, 솔더의 반지름을 각각 의미한다. 위 식에서 살펴보면 입열량은  $\omega/v$ 에 비례하게 된다.

구성한 해석모델을 이용한 결과를 기반으로 분석하여 보면, 해석 #1에 비해 해석 #2는  $\omega/v$ 가 1/2배 차이이지만, 온도분포는 매우 큰 차이를 보이지 않았으며, 공공의 존재나 소성변형률의 절대적인 크기에는 큰 차이를 보이지 않았다. 마찬가지로, 해석 #1에 비해 해석 #3은  $\omega/v$ 가 2배의 차이가 있지만, 온도분포, 소성변형률, 재료의 분포 등에 있어서 상당한 차이를 보이는 것으로 나타난다.

이에 대해 분석하면, 몇 가지 주목할 필요가 있다. 실험 분석을 통해 자주 사용되는 식 (2)는 열발생이 용접물과 피용접재료 표면에서 발생하는 마찰만으로 일어난다고 가정한 식이다. 마찰교반용접과정에서 피용접물 재료가 극심한 소성변형률을 겪고 이를 통한 열에너지로의 전환이 고려되지 않지만, 본 해석모델에서는 그에 대한 고려가 된 접근법이라 할 수 있으며, 기타 열발생원을 가정한 해석접근법 (CFD등)에서는 소성변형률이 극심할 경우 ( $\omega$ 가 높을 경우)에는 오차가 많이 발생할 가능성이 있다.

본 해석 모델 또한 많은 단점을 지니고 있다. 해석시간과 해석 정밀도 간 트레이드오프를 통해 요소 크기를 결정하였으며, 10초 해석을 위해 약 한 달 간의 계산을 수행하였다. 연구 초기 최종목표는 해석모델 접근법을 통해 공공의 분포를 세밀하게 분석하여 결함의 분포를 정확하게 예측하는 것이었으나, 요소의 크기를 더 작게 가져간다면 해석시간 소요는 한 용접조건 당 수개월 이상이 소요될 것으로 판단되어진다. 따라서, 본 해석법은 실용적인 측면에서 실험적으로 최적의 공정변수를 정하는 시행오차식 방법을 대체하기는 어려울 것이라 생각된다. 하지만, 현실적으로 실험적인 방법으로 피용접물의 온도 분포를 찾아내기는 쉽지 않기 때문에 본 연구에서 개발한 해석접근법은 분석적인 측면에서 시행오차식 실험적 방법과 상호보완적으로 사용될 수 있을 것으로 판단한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄합금과 마그네슘합금의 이중 경량재료 간 마찰교반용접을 모사할 수 있는 유한요소해석 모델을 구성하여, 세 가지 케이스에 대한 해석을 실시하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 결합된 오일러리안-라그랑지안 모델 방식의 유한요소해석 모델은 전산유체해석(CFD), SPH와 같은 무요소법 등 기타 다른 해석적 접근법에 비해 마찰교반용접의 물리적 현상을 가장 가깝게 반영하고 있으며, 온도분포, 소성변형률, 공공의 분포를 계산할 수 있다.
2. 구성된 유한요소해석모델은 10초의 용접 과정에 약 한 달 가량의 계산시간이 소요되었으며, 실용적으로 최적의 공정변수 도출에 응용하기에 시행오차식 실험적 방법을 완전히 대체하기에는 한계가 있다고 판단한다.
3. 마찰교반용접에서의 온도분포는  $\omega/v$ 에만 의존하는 것이 아니라 소성에너지를 열에너지전환도 고려되어야하며, 본 연구에서 구성된 해석모델에서는 이에 대한 효과가 반영되었다. 또한, 입열량의 크기는 최고 온도뿐만 아니라 열전달을 통한 피용접물의 온도분포의 변화도 가져올 수 있음을 확인하였다.
4. 본 모델은 실용적으로 최적의 용접변수 도출에 대한 적용은 어려울 수 있으나, 마찰에너지, 소성에너지를 열에너지 전환 공헌도, 톨 위치에 따른 온도분포에 대한 변화 등 기초분석에 적용될 수 있을 것이라 판단한다.

#### References

- [1] N. Nadammal, S. V. Kailas, S. Suwas, "A bottom-up approach for optimization of friction stir processing parameters : a study on aluminum 2024-T3 alloy", *Materials and Design* vol. 65, pp. 127-138, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.005>
- [2] H. Zhang, M. Wang, X. Zhang, G. Yang, "Microstructural characteristics and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 2A14-T6 aluminum alloy", *Materials and Design*, vol. 65, pp. 559-566, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.068>
- [3] Y. Javadi, S. Sadeghi, M. A. Najafabadi, "Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding," *Materials and Design*, vol. 55, pp. 27-34, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.021>
- [4] S. Tutunchilar, M. Haghpanahi, M.K. Besharati Givi, P. Asadi, P. Bagemmat, "Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al-Si alloy", *Materials and Design*, vol. 40, pp. 415-426, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.001>

- [5] M. Awang, V.H. Mucino, "Energy generation during friction stir spot welding (FSSW) of Al6061-T6 plates", *Materials and Manufacturing Process*, vol. 25, pp.167-174, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903206758>
- [6] D. Kim, H. Badarinarayan, J.H. Kim, C. Kim, K. Okamoto, R.H. Wagoner, K. Chung, "Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets", *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 29(2), pp. 204-215, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euomechsol.2009.10.006>
- [7] P.A. Colegrove, H.R. Shercliff, "3-dimensional CFD modelling of flow around a threaded FSW tool profile", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, p.320-327, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.015>
- [8] F. Al-Badour, N. Merah, A. Shuaib, A. Bazoune, "Coupled Eulerian-Lagrangian finite element modeling of friction stir welding process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1433-1439, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.02.014>
- [9] A. Abbasi-Bani, A. Zarei-Hanzaki, M.H. Pishbin, N. Haghdaei, "A comparative study on the capability of Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive equations to describe the flow behavior of Mg-6Al-1Zn alloy", *Mechanics of Materials*, vol. 71, p. 52-61, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.12.001>
- [10] S. Lee, H.J. Ham, S. Y. Kwon, S. W. Kim, C.M. Suh, "Thermal conductivity of Magnesium Alloys in the temperature range from -125 to 400C", *International Journal of Thermophysics*, vol. 34, No. 12, pp. 2343-2350, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1145-1>
- [11] A. Hadadzadeh and M.A. Wells, "Mathematical modeling of thermo-mechanical behavior of strip during twin roll casting of an AZ31 magnesium alloy", *Journal of Magnesium Alloys*, vol. 1, pp. 101-114, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.04.001>

이진호(Jinho Lee)

[정회원]



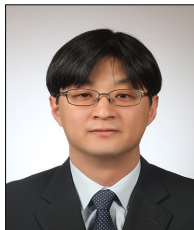
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학학사)
- 2000년 2월 : 광주과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 12월 : University of Florida 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 2009년 12월 : 삼성코닝정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

기계제어, 열차시스템

임재용(Jae-Yong Lim)

[종신회원]



- 1999년 2월 : KAIST 기계공학(공학사)
- 2001년 2월 : KAIST 기계공학(공학석사)
- 2012년 12월 : University of Virginia 기계항공공학 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 안전공학과 조교수

<관심분야>

기계안전, 구조경량화 및 경량재료, 피로 및 충격거동