

입열량 변화에 따른 용접부 충격강도에 관한 기초 수치해석 연구 Basic Study on Impact Strength of Weld Zone According to Heat Input Change Using Numerical Analysis

김영천* · 김학민** · 염정국** · 신상문*†

Young-Cheon Kim*, Hak-Min Kim**, Jeong-Kuk Yeom** and Sangmun Shin*†

(Received 25 August 2022, Revision received 11 October 2022, Accepted 11 October 2022)

Abstract : The welding of thick steel plates is an important process in the manufacture of pressure vessels, and submerged arc welding (SAW) is mainly used as the welding method. In this study, the impact strength according to welding conditions of SAW was confirmed through numerical analysis. Numerical analysis was performed using the ANSYS mechanical. Thermal analysis was carried out by applying heat input for each welding condition, and the impact strength was confirmed by applying residual stress to the numerical analysis of the impact test. As a result of the numerical analysis, it is considered that it can be used as basic data for analyzing the impact strength of welded steel.

Key Words : Charpy impact test, Heat input, Impact strength, Numerical analysis, Submerged arc welding

1. 서 론

소재의 접합방법으로 사용되고 있는 용접은 각종 기계, 대형 구조물 및 조선기자재 등 여러 산업에서 사용되고 있으며, 플랜트 및 조선 등에 사용되는 압력용기의 제작에는 후판의 용접이 필요하다.¹⁾ 두꺼운 후판의 용접은 그 특성상 다층용접

으로 진행된다. 이는 전체 제조공정에 사용되는 시간 및 비용 중 후판의 용접작업이 상당한 비중을 차지하는 것을 의미하며, 현장에서 용접 프로세스의 선택과 최적조건의 확보는 제조원가 차원에서 매우 주요하게 작용한다. 후판의 용접 프로세스는 SMAW²⁾(Shielded Metal Arc Welding, 피복 금속아크용접), FCAW³⁾(Flux Cored Arc Welding,

*† 신상문(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5048-6438) : 교수, 동아대학교 산업경영공학과
E-mail : sshin@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7688
*김영천(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4321-1778) : 대학원생, 동아대학교 산업경영공학과
**김학민(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0001-7411) : 대학원생, 동아대학교 기계공학과
**염정국(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9854-8319) : 교수, 동아대학교 기계공학과

*† Sangmun Shin(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5048-6438) : Professor, Department of Industrial & Management Systems Engineering, Dong-A University.
E-mail : sshin@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7688
*Young-Cheon Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4321-1778) : Graduate student, Department of Industrial & Management Systems Engineering, Dong-A University.
**Hak-Min Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0001-7411) : Graduate student, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.
**Jeong-Kuk Yeom(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9854-8319) : Professor, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.

이산화탄소아크용접), SAW⁴⁾(Submerged Arc Welding, 잠호아크용접) 등 여러 용접 프로세스들이 있다. 그 중 선박 및 압력용기의 용접에 많이 사용되는 자동용접인 SAW는 용접부를 플럭스로 덮고 전극 와이어를 공급하여 용접하는 방식이며, 용접에서 발생하는 아크가 플럭스로 인해 감춰져 있어 다른 명칭으로 잠호용접으로 불린다. SAW는 1,500 A~3,000 A의 고전류 용접이 가능하며, 용접부가 플럭스로 감춰져 있어 용접 흠의 발생이 적고 아크가 노출되지 않아 청정한 작업 환경이 가능하다는 장점이 있다. 또한 탄소강, 합금강 및 스테인리스강 등의 후판을 최대 5 m/min의 속도로 용접할 수 있고 효율이 95% 이상이며, 용입이 깊고 용접 이음부의 신뢰도가 높다. 흠 용접 및 맞대기 용접에 주로 사용되며 피복 아크용접에 비해 4~10배에 이르는 금속을 용접할 수 있다. 그러나 용접선이 플럭스에 의해 보이지 않아 반자동 용접이 곤란하며 용접상태를 확인하기 어려운 단점이 있다.^{5,6)} 특히 SAW를 통해 제작되는 저온의 액화가스를 저장 및 수송하는 압력용기 등은 재료인 철강재의 특성상 저온 환경에서 인성 및 내충격성이 급격히 열악해지므로 용접부에 대해 설계(CODE)에서 요구된 충격강도와 같은 기계적 성질 등 용접품질을 만족하여야 한다. 그러므로 저온에서 내충격성을 유지하기 위한 연구가 필요하다. 용접에서 입열량이 증가하게 되면 용접소재의 충격강도가 감소하며, 용접조건의 변경에 따라 입열량이 변화하면 용접으로 인해 발생하는 잔류응력이 달라지게 된다. 이에 용접에서 발생하는 잔류응력이 용접소재의 충격강도에 미치는 영향을 수치해석을 통해 확인하였다. 용접 진행 시 용접부에 국부적인 가열과 냉각이 진행되며, 온도의 변화에 의해 용접을 진행한 재료의 변형 및 잔류응력이 발생한다. 이와 같이 용접 시 발생하는 다양한 현상을 분석하기 위해 열탄소성 해석을 통해 여러 연구가 진행되었다. 용접 잔류응력에 대한 수치해석 연구로 Park⁷⁾ 등은 FSW(Friction Stir Welding)와 SAW에 대한 열탄소성 해석을 진행하여 용접 시 발생하는 용접 변형 및 잔류응력에 대해 분석하였으며, Kim⁸⁾ 등은 이중금속 용접부를

가진 노즐의 피로해석을 위해 용접 잔류응력을 유한요소해석을 통해 확인하여 피로해석 시 용접 잔류응력의 영향을 고려하여야 함을 확인하였다. 그 외에도 용접 아크의 거동에 대한 해석⁹⁾, 용접부의 온도 분포 대한 분석¹⁰⁾ 등 수치해석을 이용한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 용접 입열량에 따른 충격강도를 예측하기 위한 기초연구로써 입열량에 따른 잔류응력이 용접부의 충격강도에 미치는 영향을 확인하였다. SAW의 용접조건에 따라 달라지는 입열량을 적용하여 열탄소성 해석을 진행하였으며, 용접 후 잔류응력을 확인하였다. 그 후 잔류응력을 충격시험의 수치해석에 적용하여 입열량에 따른 잔류응력의 영향을 분석하였으며, 충격강도의 수치해석 결과와 실측값을 비교 분석하여 SAW 용접부위의 충격강도 수치해석 결과가 실측값에 유사하게 도출되는 것을 확인하였다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험 방법

저온 충격강도의 분석을 위해 SAW를 통해 소

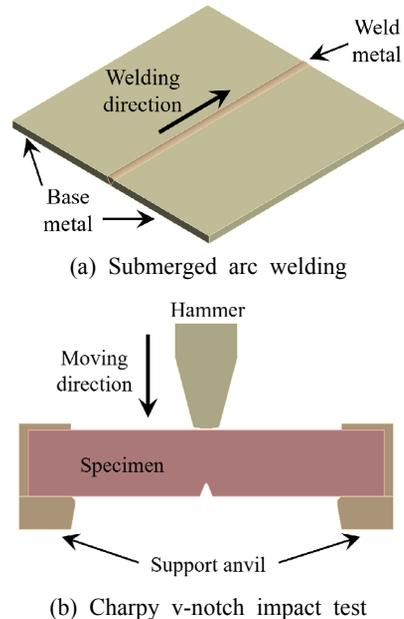


Fig. 1 Schematic of welding and impact test

제의 용접을 진행한 후, 충격시험 시편을 제작하여 샤르피 V-notch 충격시험을 실시하였다.¹¹⁾ Fig. 1에 시험의 개략도를 나타내었다. Fig. 1 (a)는 두 모재를 맞대기 용접을 통해 SAW를 실시하는 방법을 나타내었다. 또한 용접 후 용접부의 충격시편을 제작하여 Fig. 1 (b)와 같이 샤르피 V-notch 충격시험을 실시하여 충격강도의 값을 측정하였다. 용접은 Submerged Arc Welder(Idealarc DC1000, LT-7 Tractor/LINCOLN ELECTRIC)를 사용하였으며, 용접에 사용한 모재는 SA516 Gr.70N이다. 용가재는 AWS A5.17/ASME SFA5.17 F7A(P)6-EM12K를 사용하였고, 국제 용접기준인 ASME SA-370¹²⁾과 ASME Sec. VIII UG84¹³⁾에 따라 샤르피 V-notch 충격시험을 진행하였다. 실험을 위해 여러 용접조건에 따라 용접을 진행하였으며, ASME-SA370¹²⁾ 시험편 가공 표준에 따라 용접 시험편 1개당 용접부 충격시편 3개를 제작하였다. Table 1은 SAW에 사용한 용접조건을 나

타낸 표이다. 입열량을 결정하는 3개의 변수인 전압, 전류, 용접속도를 변경하여 용접실험을 진행하였다. Table 2는 용접에 사용한 재료의 물성치를 나타내었다.

2.2 수치해석 방법

수치해석은 실험과 같은 Fig. 1의 형태로 모델링을 진행하여 용접 및 충격강도 시험을 진행하였다. Fig. 1 (a)은 용접 모재 2개를 맞대기 용접을 이용하여 용접을 진행한 이미지이며, 용접 모재의 크기는 가로 300 mm, 세로 300 mm에 두께 10 mm를 모델링한 후, 아크용접에 많이 사용하는 이중 타원 열원 모델(Double ellipsoidal heat source model)을 적용하여 입열량에 따른 열탄소성 해석을 진행하였다. 용접 관련 국제 규격인 ASME Sec. IX QW-409¹⁴⁾에서 제시하는 바와 같이 용접 입열량은 아래 식 (1)과 같이 계산된다.

Table 1 Experimental conditions

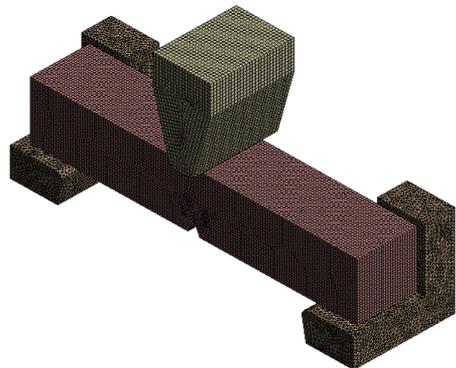
Properties [Unit]	Values
Amperage [A]	450, 600, 750
Voltage [V]	26, 33, 40
Speed [mm/min]	390, 500, 610

Table 2 Material properties

Properties [Unit]	Base metal	Weld metal
Density [kg/m ³]	7,800	7,800
Young's modulus [GPa]	200	200
Poisson's ratio	0.29	0.3
Yield strength [MPa]	333	518
Tensile strength [MPa]	519	606
Elongation [%]	33	29.6
Thermal expansion coefficient [1/°C]	1.2×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵
Specific heat capacity [J/kg°C]	470	470
Thermal conductivity [W/m°C]	52	52



(a) Submerged arc welding



(b) Charpy v-notch impact test

Fig. 2 FEM mesh for numerical analysis

$$\text{Heat input [J/mm]} = \frac{\text{Voltage} \times \text{Amperage} \times 60}{\text{Travel speed [mm/min]}} \quad (1)$$

Fig. 1 (b)는 샤르피 충격시험의 방식을 나타낸 이미지이며, 시편에 충격을 주고 시편에서 발생하는 에너지를 측정하였다. 샤르피 V-notch 충격시험의 시편 크기인 가로 55 mm, 세로 10 mm에 두께 10 mm로 모델링을 진행하였으며, 충격 직전의 상황을 모델링하여 수치해석을 진행하였다. Fig. 2는 수치해석에 사용한 격자를 나타낸 이미지이다. 격자생성은 Hex dominant method를 이용하여 생성하였다. 용접 수치해석의 요소는 약 153,000개를 사용하였고, 충격시험 수치해석의 요소는 약 264,000개를 사용하였다. 수치해석 프로그램은 ANSYS Mechanical을 사용하였다.

2.3 열원 모델

아크 용접에서 가장 많이 사용되고 있는 열원 모델은 이중 타원 열원 모델이다. 타원 열원 모델 (Ellipsoidal heat source model)은 열원 앞의 온도 구배는 예상만큼 가파르지 않고 용융 풀의 후단에서 완만한 구배는 실험적 경험보다 가파르게 나타난다. 이러한 한계를 극복하기 위해 두 개의 타원체를 Fig. 3과 같이 결합하였다. 열원의 앞쪽 절반은 하나의 타원체의 사분면이고 뒤쪽 절반은 다른 타원체의 사분면이다. 이중 타원 열원 모델은 전면 및 후면의 입열비 f_f 및 f_r 이 필요하다. 여기서 $f_f + f_r = 2$ 이다. 전면 및 후면의 열원 분포식은 다음과 같다.¹⁵⁾

Front ellipsoid heat source equation

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z-v(\tau-t))^2}{c_1^2}} \quad (2)$$

Rear ellipsoid heat source equation

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z-v(\tau-t))^2}{c_2^2}} \quad (3)$$

여기서, a, b, c_1, c_2 는 이중 타원 열원 모델의

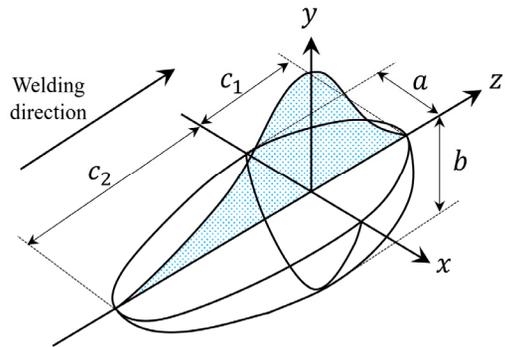


Fig. 3 Double ellipsoid heat source model

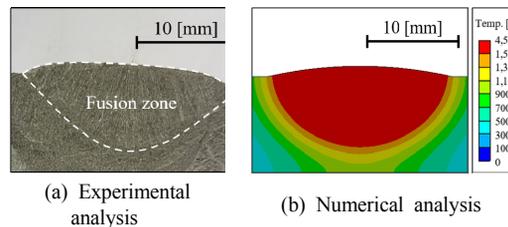


Fig. 4 Comparison of weld cross section in experimental and numerical analysis

형상변수, x, y, z 는 열원 모델의 국부 좌표, v 는 용접 속도, t 는 용접 시간, τ 는 시간 $t = 0$ 에서의 위치를 정의하기 위한 지연시간, Q 는 열원의 입열량이다. 이중 타원 열원 모델의 형상변수는 Fig. 4와 같이 실험 이미지에서 확인한 용융영역의 크기를 이용하여 결정하였다. 수치해석의 열원 이동시 변화하는 온도분포를 중첩하여 소재의 용융온도인 1,500°C 이상의 온도영역을 확인하였으며, 본 연구에 사용한 형상변수는 $a = 10 \text{ mm}, b = 8 \text{ mm}, c_1 = 8 \text{ mm}, c_2 = 18 \text{ mm}$ 를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과 및 고찰

용접 조건에 따른 저온에서의 충격강도를 확인하기 위해 서로 다른 5개의 조건에서 용접을 실시하였으며, 용접한 5개의 평판에서 용접부의 시편을 3개씩 제작하여 샤르피 V-notch 충격시험을 실시하였다. Table 3은 SAW의 용접조건, 충격시험

Table 3 Experimental results of impact test

Case	Amperage [A]	Voltage [V]	Speed [mm/min]	Impact strength [J]	Heat input [kJ/mm]
1	450	26	610	90	1.15
2	450	26	390	79	1.80
3	750	26	610	77	1.92
4	600	33	610	77	1.95
5	450	40	500	78	2.16

의 결과 및 입열량을 나타낸 표이다. 충격강도의 값은 3개의 시편으로 확인한 충격강도 결과의 평균값을 나타내었으며, 입열량은 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 5개의 케이스를 통해 입열량이 낮을수록 충격강도의 값이 높은 것을 확인할 수 있으며, 입열량의 값이 비슷한 Case 2~5의 경우 충격강도의 값이 비슷한 값을 나타내는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과를 통해 용접 입열량의 증가는 충격강도에 부정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3.2 수치해석 결과 및 고찰

용접 시 발생하는 잔류응력이 충격강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 수치해석을 진행하였다. 이중 타원 열원 모델을 이용하여 용접의 열원을 모델링하였으며, 용접조건 5개에 대한 열탄소성 해석을 진행하여, 용접조건에 따라 발생하는 온도와 잔류응력을 확인하였다. 그 후 잔류응력을 충격시험 수치해석의 시편에 적용하여 충격강도를 확인하였다. Fig. 5는 용접 수치해석 시 발생하는 최대온도를 나타낸 그래프이다. x축의 시간은 용접시작 후 경과한 시간이며, y축은 온도를 나타내었다. 각 Case에서 최대온도가 유지되는 구간은 모재의 용접이 진행되는 구간이며, 입열량이 증가할수록 용접 온도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. Case 2의 경우, Case 3~5와 비교 시 발생하는 온도가 낮게 발생하지만 용접속도가 느려 용접시간이 길기 때문에 Case 3~5와 비슷한 입열량을 가지게 된다. Fig. 6은 잔류응력 및 온도 데이터를 측정할 위치와 좌표계를 나타내었다. Fig. 6(a)는 잔류응력 및 온도를 측정할 위치의 이미지

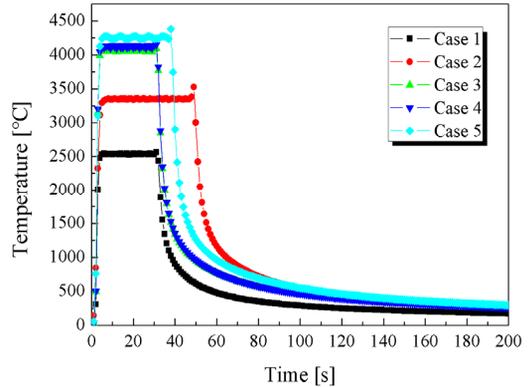


Fig. 5 Temporal change of maximum temperature according to welding conditions

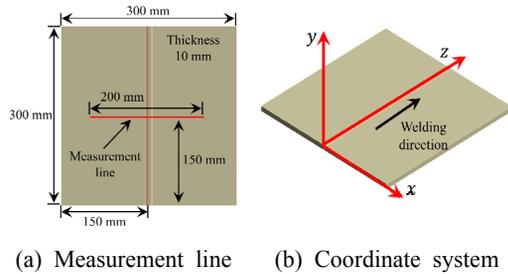


Fig. 6 Measuring line and coordinate system

이며, 측정선(Measurement line)을 따라 잔류응력 및 온도를 확인하였다. 잔류응력 및 온도는 용접이 진행한 선을 중심으로 좌우로 100 mm의 영역에 대해 확인하였다. Fig. 6 (b)는 수치해석의 좌표계를 나타내었으며, 용접 진행방향을 z축으로 설정하였다. Fig. 7은 Fig. 6의 측정영역에서 확인한 Case 1의 온도를 나타낸 그래프이다. 온도는 시간경과에 따라 6개의 데이터를 나타내었고, 시간은 용접열원이 측정영역을 지나간 후의 시간을 나타내었다. 용접열원이 지나가는 0 mm의 온도를 비교하였을 때 100 s에서의 온도가 1 s에서의 온도보다 온도가 2,000°C 이상 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 500 s부터는 열전도에 의해 측정영역 전체의 온도가 일정하게 분포되며, 시간경과에 따라 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 시간경과에 따른 온도를 확인한 결과 빠른 속도로 냉각이 진행되는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 용접 잔

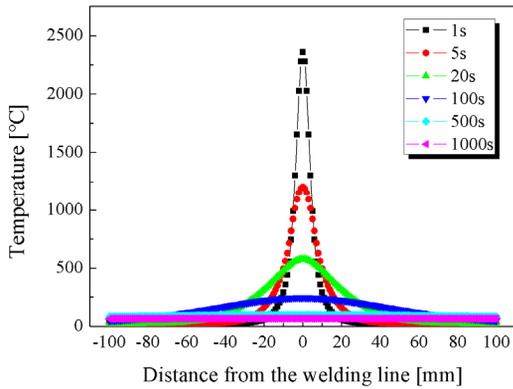


Fig. 7 Results of the numerical analysis on temperature changes over time (Case 1)

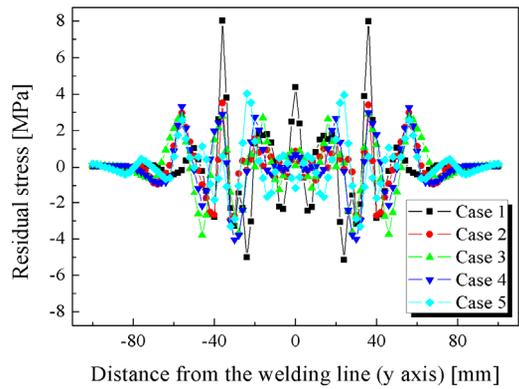


Fig. 9 Residual stress distribution in measuring line (y-axis)

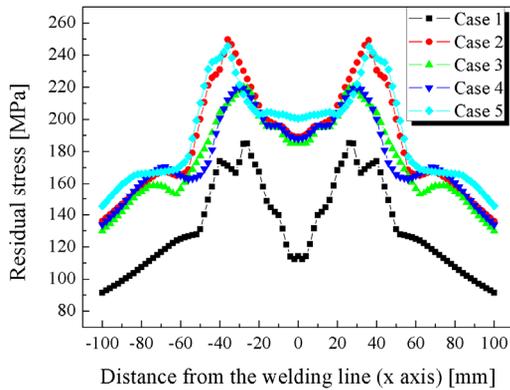


Fig. 8 Residual stress distribution in measuring line (x-axis)

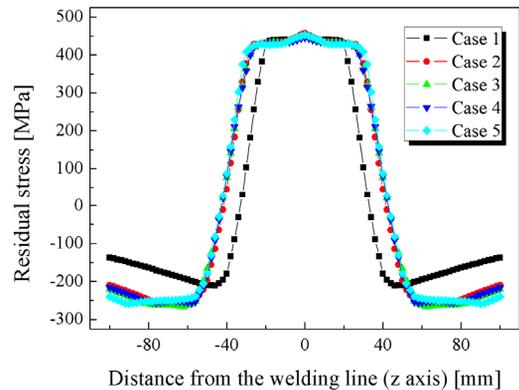


Fig. 10 Residual stress distribution in measuring line (z-axis)

류응력이 발생할 것으로 생각된다. Fig. 8~10은 Fig. 6의 측정영역에서 확인한 잔류응력의 값을 나타낸 그래프이며, 5개의 Case에 대해 x, y, z축 방향의 잔류응력을 확인하였다. Fig. 8은 x축 방향의 잔류응력 그래프이다. 가장 낮은 온도가 발생하는 Case 1이 가장 높은 온도가 발생하는 Case 5보다 0 mm에서 약 90 MPa 낮은 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 0 mm에서 40 mm까지 잔류응력이 증가하다가 이후부터는 외각으로 갈수록 감소하며, 모든 Case에서 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. Fig. 9는 y축 방향의 잔류응력 그래프이다. 모든 영역에서 약 10 MPa의 차이를 보이며, 80 mm 이후 잔류응력이 거의 발

생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 z축 방향의 잔류응력 그래프이다. 용접 진행방향인 z축에서 가장 높은 잔류응력을 나타내고 있으며, 중심부에서 약 450 MPa의 잔류응력을 확인할 수 있다. 0 mm에서 40 mm까지는 인장응력이 발생하며, 40 mm 이후부터는 압축응력이 발생한다. 또한 외각으로 갈수록 응력의 발생이 감소하는 것을 볼 수 있다. 용접조건에 따른 잔류응력을 확인한 결과, 낮은 입열량인 Case 1의 경우 Case 2~5와 비교하여 낮은 잔류응력이 발생하고 범위가 좁은 것을 확인할 수 있다. 이는 입열량이 높을수록 용융되는 범위가 넓어져 발생하는 현상으로 판단된다. 또한 입열량이 낮은 Case 1이 낮은 잔

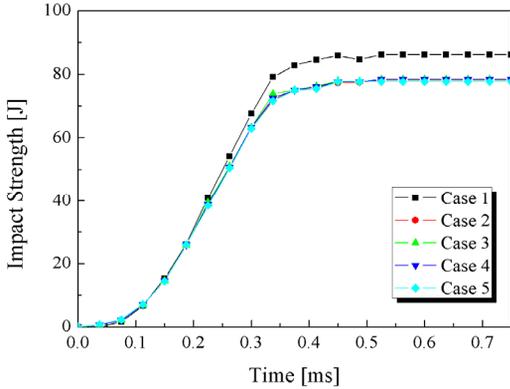


Fig. 11 Numerical analysis result of impact test

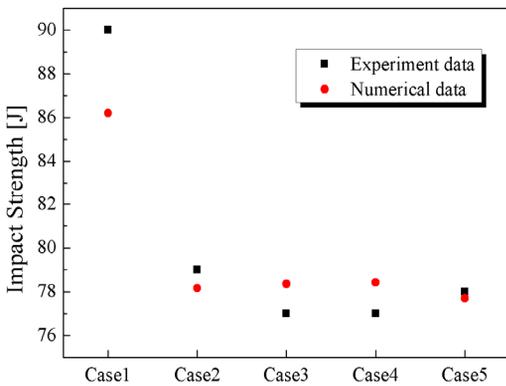


Fig. 12 Comparison of experimental and numerical analysis data for impact strength

류응력을 보이는 것은 입열량이 높은 경우와 비교하여 낮은 열팽창에 의한 영향으로 판단된다. 잔류응력이 충격강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 잔류응력을 시편에 적용하여 충격시험에 대한 수치해석을 진행하였다. Fig. 11은 충격시험 수치해석을 통해 확인한 충격강도를 나타낸 그래프이다. x축은 수치해석의 경과시간을 나타내며, y축은 충격강도를 나타낸다. 해머와 시편의 충돌이 발생하게 되면 충격강도의 값이 증가하며, 시간이 0.5 ms 지난 후 충격강도의 값이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 충돌 후 0.5 ms 부근에서 시편의 파단이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 잔류응력을 적용하여 진행한 충격시험 수치해석의 결과, 잔류응력이 낮은 Case 1의 충격강도

값이 Case 2~5와 비교하여 높은 것을 확인할 수 있으며, 잔류응력의 값이 비슷한 결과를 가지는 Case 2~5의 충격강도 값은 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 이를 통해 잔류응력이 높을수록 충격강도에 부정적인 영향을 미친다고 판단된다. Fig. 12는 실험과 수치해석에서 확인한 충격강도의 값을 나타내었다. 실험과 수치해석의 충격강도를 비교한 결과, Case 1을 제외한 나머지 Case들에서 2 J 이내의 차이를 나타내는 것을 확인하였다. Case 1의 경우에도 수치해석 값이 3회 실시한 충격강도 실험결과의 범위에 포함되어 있어 수치해석의 결과가 타당하다고 판단하였다. 실험 데이터와 수치해석 데이터를 통해 용접 입열량의 증가는 충격강도에 부정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 구한 수치해석의 결과들은 용접 충격강도의 수치해석 연구를 위한 기초 데이터로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 5개의 SAW 용접조건을 적용하여 열탄소성 해석을 통해 온도 및 잔류응력을 확인하였으며, 잔류응력을 충격시험 시편에 적용하여 충격해석을 진행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접부에 대해 샤프리 V-notch 충격시험을 실시하여 충격강도를 확인한 결과, 용접 입열량의 증가는 충격강도에 부정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- 2) 잔류응력을 확인한 결과, 모든 Case가 용접 진행방향인 z축 방향에서 가장 높은 잔류응력을 나타내고 있으며, 중심부에서 가장 높은 약 450 MPa의 잔류응력을 확인하였다.
- 3) 용접 조건에 따른 잔류응력을 충격시험에 적용하여 충격시험의 수치해석을 진행하였다. 실험과 수치해석의 충격강도 비교를 통해 수치해석 결과의 타당성을 확인하였다.
- 4) 실험 데이터와 수치해석 데이터는 유사한 경향을 보이며, 용접조건에 따라 달라지는 충격강도에측을 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 본 연구의 수치해석과 실측값의 비교 결과를 통하여 볼 때, 입열량과 잔류응력, 잔류응력과 충격강도 및 입열량과 충격강도 등의 함수관계를 파악할 수 있었으며, 향후 입열량의 변화에 따른 충격강도를 수치해석을 통하여 사전 예측 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 다양한 용접조건에 따른 수치해석 모형의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

6) 향후 연구로 1 Pole의 SAW 용접뿐만 아니라, 생산성 향상을 위한 3 Pole 혹은 Multiple pole의 용접에 대한 수치해석 연구와 온도 변화에 따른 충격강도의 변화 예측과 관련된 연구도 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [S3132405].

Author contributions

Y. C. Kim; Investigation, Data curation. H. M. Kim; Writing-original draft, Numerical analysis. J. K. Yeom; Supervision, Writing-review & editing, Project administration. S. M. Shin; Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. J. S. Lee, 2010, "Welding Deformation Analysis of Plates Using the Inherent Strain-Based Equivalent Load Method", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 28, No. 2, pp. 39-46. (<https://doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.2.039>)
2. A. Saxena, A. Kumaraswamy, G. M. Reddy and V. Madhu, 2018, "Influence of Welding Consumables on Tensile and Impact Properties of Multi-Pass SMAW Armax 500T Steel Joints Vis-A-Vis Base Metal", *Defence Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 188-195. (<https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.005>)
3. S. A. Mohamat, I. A. Ibrahim, A. Amir and A. Ghalib, 2012, "The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) Processes On Different Parameters", *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1497-1501. (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.341>)
4. A. Ghosh, S. Chattopadhyaya, R. K. Das and P. K. Sarkar, 2011, "Prediction of Submerged Arc Welding Yield Parameters through Graphical Technique", *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 2797-2802. (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.465>)
5. N. S. Kim and D. S. Jung, 2003, "Evaluation of Residual Stresses on Welded Steel Bridges Using Numerical Analysis", *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 15, No. 3, pp. 93-104.
6. S. J. Lee, 2021, "A Study on Mechanical Properties of SM490-TMC Back Plate(40 mm) Steel by SAW Welding", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 22, No. 3, pp. 88-93. (<https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.3.88>)
7. J. U. Park, G. B. An and D. S. Kim, 2022, "Residual Stress and Deformation Characteristics by FSW and SAW of Wear Resistant Steel", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 40, No. 2, pp. 133-140. (<https://doi.org/10.5781/JWJ.2022.40.2.4>)
8. S. C. Kim and M. W. Kim, 2014, "Effect of Weld Residual Stress on Fatigue Analysis of Nozzle", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 32, No. 1, pp. 71-78. (<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.1.71>)
9. M. Schnick, U. Fuessel, M. Hertel, A. Spille-Kohoff and A. B. Murphy, 2011, "Numerical Investigations of Arc Behaviour in Gas Metal Arc Welding Using ANSYS CFX", *Frontiers of Materials Science*, Vol. 5, No. 2,

- pp. 98-108.
(<https://doi.org/10.1007/s11706-011-0134-4>)
10. M. R. Nezamdost, M. R. Nekouie Esfahani, S. H. Hashemi and S. A. Mirbozorgi, 2016, "Investigation of Temperature and Residual Stresses Field of Submerged Arc Welding by Finite Element Method and Experiments", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, pp. 615-624.
(<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8509-4>)
 11. J. H. Lee, Y. C. Kim and S. M. Shin, 2020, "Optimal Parameter Design for a Cryogenic Submerged Arc Welding(SAW) Process by Utilizing Stepwise Experimental Design and Multi-Dimensional Design Space Analysis", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol. 48, No. 1, pp. 51-68.
(<https://doi.org/10.7469/JKSQM.2020.48.1.51>)
 12. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels, 2017, BPVC Section II-Materials-Part A-Ferrous Materials Specification, American Society of Mechanical Engineers, New York.
 13. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels, 2017, BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1, American Society of Mechanical Engineers, New York.
 14. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels, 2017, BPVC Section IX-Welding, Brazing, and Fusing Qualifications, American Society of Mechanical Engineers, New York.
 15. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby, 1984, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources", *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299-305.
(<https://doi.org/10.1007/BF02667333>)