



판구조물의 절단에서 발생하는 잔류변형을 적용한 용접해석

윤희찬^a, 노홍준^a, 한영환^a, 임헌봉^b, 양현익^{c*}

Welding Analysis using Residual Stress and Deformation Generated During Cutting of Plate Structure

Hee-Chan Yoon^a, Hong-Jun Noh^a, Young-Hwan Han^a, Hun-Bong Lim^b, Hyun-Ik Yang^{c*}^a Department of Mechanical Design Engineering, Hanyang University^b Department of Mechanical Design Engineering, Myongji College^c Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	7	May	2021
Revised	10	June	2021
Accepted	19	July	2021

Keywords:

Laser cutting
Heat conduction analysis
Thermal-elastic-plastic analysis
Inherent strain
Welding distortion
Simplified method

ABSTRACT

Cutting and welding are essential processes in constructing complex steel structures. In these processes, local heating and cooling generate strains and stresses in the cut and welded areas, resulting in deformation of the entire structure. To accurately predict the welding deformation of the model, it is necessary to consider the effects of previous cutting. In this study, thermal conduction analysis was used to derive the temperature history via cutting and bead-on-plate welding. Additionally, temperature history was applied to thermal-elastic-plastic analysis of welds while cutting. When applied to large structures, a simplified analysis was performed. Thus, the thermal-elastic-plastic analysis results were applied in a shell structure as equivalent shrinkage and moment, and elastic analysis was performed. Through this study, it was confirmed that cutting influenced the final welding deformation. Further, the suitability of the simplified method for analyses of large structures was verified.

1. 서론

용접 공정은 주조, 금형, 소성가공과 같이 제품 생산의 필수 과정인 가공 및 조립에 이용되는 핵심 생산 공정이며, 기능성과 생산적인 측면에서 산업에 필수적인 분야이다. 그러나 용접 공정은 국부적으로 급열 및 급랭 과정을 동반하기 때문에 불균일한 팽창과 수축으로 인하여 작업 후 완전히 식을 때까지 소성 영역이 넓게 분포하며 잔류 응력 및 변형의 발생은 불가피하다. 잔류 응력과 변형은 피로 강도 및 외관, 품질의 저하를 초래하고 구조물의 손상을 유발하며 수명을 단축시킨다. 이러한 과정에 있어 용접 공정 시 작업

환경과 공정 순서에 따른 영향 또한 고려되어야 한다. 작업 환경과 공정 순서에 따라 상이하겠지만 일반적으로 판재에 대한 절단 공정은 선박과 해양 구조물 등과 같은 대형 구조물의 반제품을 위한 소조립, 대조립 이전에 수행되는 선행공정이다. 절단 공정은 파이프, 프로 파일, 판재 등의 반제품 생산을 위한 가장 오래되고 중요한 가공 공정이다. 이러한 절단 공정에는 레이저를 이용하는 절단 방식과 플라즈마 아크를 이용하는 절단 방식 등이 있다. 그러나 절단 과정에서 열 변형을 수반하게 되며, 절단부에는 잔류 응력과 변형이 발생한다. 열 변형은 재료의 특성과 절단 방식에 따라 크게 차이가 발생하고, 재료의 특성을 변화시켜 영구적으로 잔류하는

* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-5285

E-mail address: skynet@hanyang.ac.kr (Hyun-Ik Yang).

응력과 변형을 만든다. 이는 판금의 성형 공정 이후 진행되는 생산 설계 공정에서 용접의 최종 변형을 증가시킨다. 따라서 절단에 대한 잔류응력과 변형을 고려한 용접의 분석이 필요하다.

절단과 용접 시 발생하는 열 변형에 대하여 실험 및 유한 요소법을 이용한 많은 연구가 진행되어왔다.

Arif, A. F. M. et al.^[1]은 두꺼운 판금 절단면의 잔류응력을 X선 회절법(XRD)과 주사전자현미경법(SEM)을 사용하여 잔류응력을 측정하고 유한요소법(finite element method, FEM)을 사용하여 측정 결과와 비교하였다. 두 방법에 의한 잔류응력은 8%의 오차가 있으며, 이는 시뮬레이션에서 만들어진 균질 특성으로 발생한다고 결론지었다. Yilbas, B. S. et al.^[2]은 판금의 절단 조건과 기관 재료 특성에 따라 응력과 온도를 X선 회절법을 사용하여 측정하고 유한 요소법을 사용하여 측정 결과와 비교하였다. 최대 온도의 시간적 변화는 레이저 열원의 중심을 따르며, 응력의 경우 레이저 주사속도가 증가함에 따라 응력이 증가한다고 결론지었다. Wang, Jiangchao et al.^[3]은 비드와 필렛 용접 접합부가 있는 박판 구조의 용접 좌굴을 실험과 고유 변형 이론에 기초한 탄성 해석을 비교 분석하였다. 제안한 방법을 이용한 탄성 해석은 면외 왜곡을 높은 정확도로 예측하여 용접 좌굴 해석 모델의 적합성을 검증하였다. Kartal, M. E. et al.^[4]은 두꺼운 페라이트계 강 용접에서 다중 및 단일 용접에 의해 생성된 잔류 응력 프로파일을 비교 분석하여 잔류 응력 분포가 용접 공정의 세부 사항에 민감한 것을 확인하였다. 또한, 용접된 시편의 깊이에 따른 잔류 응력 변화를 예측하기 위해 역 고유변형 방법을 확장하였다. 역 고유변형 방법을 사용하면 짧은 시편을 사용하더라도 전체 길이에 대한 정확한 잔류 응력 크기를 예측할 수 있다고 결론지었다. Ha, Yunsok.^[5]는 대형 셸 구조에서 용접 왜곡을 평가하기 위해 탄성 해석에 의한 고유 변형 대신 용접물의 경계조건으로 탄소성 해석을 진행하였고, 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

절단과 용접 시 발생하는 열 변형은 실험 및 유한 요소법을 이용하여 여러 연구자들에 의해 연구되었으나^[6-11], 절단 공정으로 발생하는 잔류응력을 고려한 용접 변형 예측에 대한 연구는 미미하고, 대형 부재의 용접 변형 분석을 위한 간이해석법에 절단 공정을 고려한 변형을 분석하는 연구 또한 미미하다.

본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 절단의 영향에 따른 용접 후 부재의 변형을 비교 분석하였다. 이를 분석하기 위해 열전도 해석과 열탄소성 해석을 수행하였다. 그리고 대형 부재의 절단에 대한 용접 영향을 분석하기 위해 열탄소성 해석으로 계산된 고유 변형률을 이용하여 절단 및 용접에 의한 수축과 굽힘을 온도 경계조건으로 탄성 해석에 적용하여 표현하였다. 이러한 과정을 통해 절단 공정에 의한 잔류응력과 변형이 용접공정에 미치는 영향에 대하여 파악하였다.

2. 열전도 해석과 열탄소성 해석을 이용한 절단 및 용접 변형 분석

2.1 해석 모델 구성

절단과 용접 공정에 의한 변형을 분석하기 위해 bead-on-plate를 이용하였으며, 평판의 크기는 200 mm × 100 mm × 6 mm로 구성된다. 그리고 절단과 용접 공정의 열원에 의해 발생하는 온도에 따라 재료의 특성은 다른 값을 나타낸다. 따라서 절단과 용접 공정에 의한 온도이력을 도출하기 위한 해석을 위해 온도에 따라 변화하는 물성치를 적용하였다. 기계적 및 열 특성은 온도에 대한 의존성을 상대적으로 비교하기 위해 푸아송비와 밀도를 기준으로 정규화하여 표현하였으며 Fig. 1과 같다^[3]. Bead-on-plate는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 해석시간의 단축을 위해 대칭 모델을 구성하였으며, 이를 3차원 솔리드 요소로 구성하였다. Fig. 3은 해석 흐름도를 설명한다.

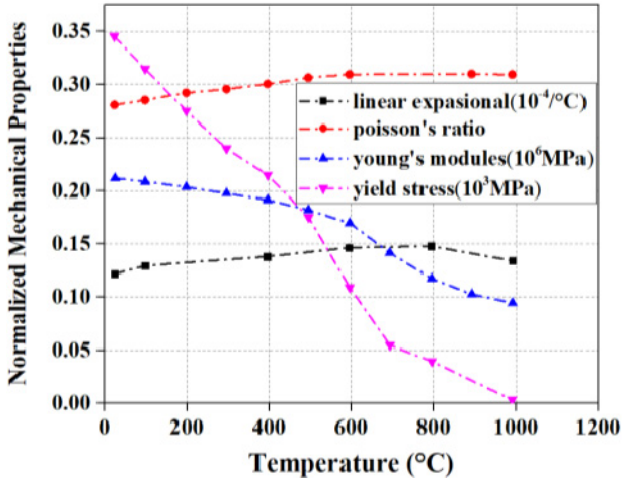
열전도 해석은 실제 상황과 동일하게 구성하기 위해 해석의 경계조건으로 전도, 복사 및 대류를 고려하였으며, 절단 공정과 용접 공정 후 상온으로 식을 때까지의 시간에 따른 온도 이력을 구하였다. 이를 열탄소성 해석에 적용하여 절단과 용접에 대한 변형을 도출하였다. 용접의 경우 실험 결과와 비교를 통해 검증된 해석 기법을 활용하였으며, 절단의 경우 문헌에서 이용 가능한 실험 및 시뮬레이션 결과와 비교를 통해 검증된 방법을 활용하였다.

2.2 열전도 해석을 이용한 절단과 용접의 온도이력

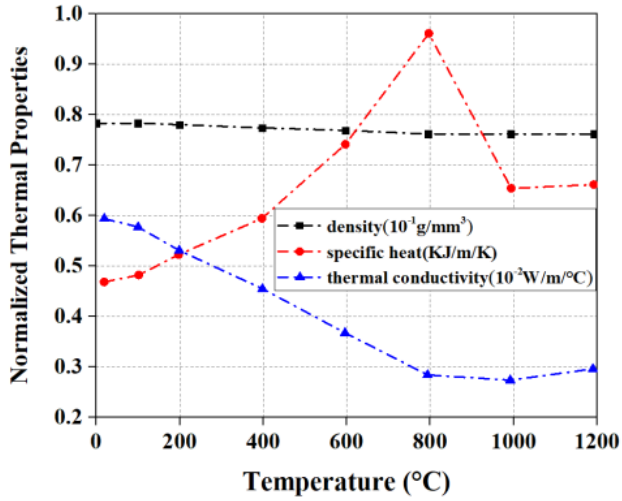
열은 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 전달되어 열의 흐름을 구성한다. 이러한 열 전달은 전도, 복사 및 대류로 구분되며, 열 전달의 경계조건과 내부에너지를 고려한 가열에 대한 Fourier 열 전달 방정식은 식 (1)과 같다. 일정한 속도 U 로 판의 x 축을 따라 움직이는 열원의 경우 에너지 이득의 발생은 식 (2)로 표현될 수 있다. 대류 및 복사 경계 조건은 판 구조물의 자유 표면에서 고려되며, 해당 경계 조건의 대류와 복사는 식 (3)과 식 (4)의 형태로 표현된다^[11]. 여기서 x, y 그리고 z 는 축, ρ 는 밀도, C_p 는 비열 용량, k 는 열 전도율, U 는 주사 속도를 나타낸다. 그리고 h 는 대류에 의한 열 전달 계수($h=15 \text{ W/m}^2\text{C}^{-1}$), T_s 와 T_0 는 각각 표면과 주변 온도, ε 은 복사율($\varepsilon=0.9$), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다($\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^{-4}$).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = (\nabla \cdot (k \nabla T)) \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + U \rho C_p \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2)$$



(a) Mechanical properties



(b) Thermal properties

Fig. 1 Temperature-dependent material properties

$$\frac{h}{k}(T_s - T_0) \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon\sigma}{k}(T_s^4 - T_0^4) \quad (4)$$

절단과 용접의 입력 열원은 원통형 가우스 빔과 Goldak의 이중 타원형을 고려하였으며 식 (5)와 (6)과 같다^[1,13]. 여기서 가우스 빔의 Q_L 은 레이저 빔의 파워, r 과 r_0 는 실제 반경과 빔의 반경이고 h 는 침투 깊이이다. 이중타원형의 Q 는 에너지 투입율, a_j 와 a_r 는 이중타원형 원점 기준 앞면과 후면 길이에 대한 x 방향의 플럭스 분포, b 와 c 는 y, z 방향 길이에 대한 플럭스 분포이다.

$$Q_v(r, z) = \frac{Q_L}{\pi r_0^2 h} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (5)$$

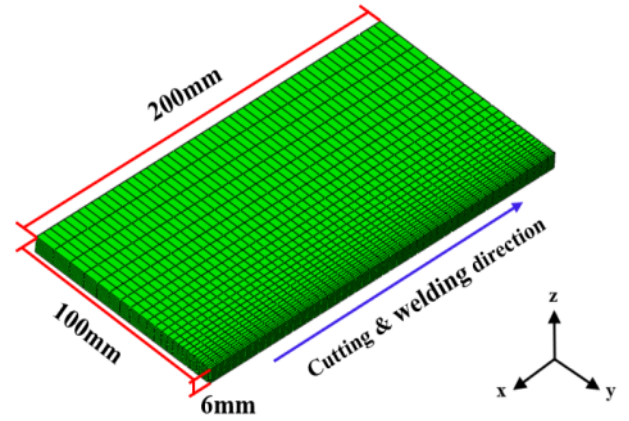


Fig. 2 Finite element simulation model

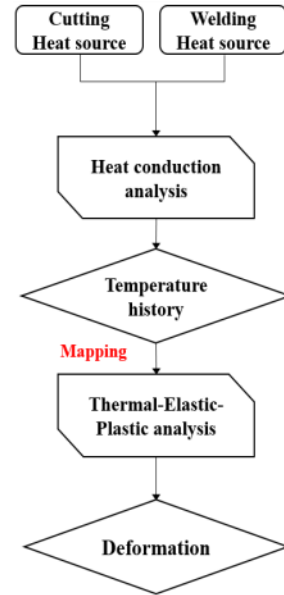


Fig. 3 Flow chart of simulation

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a_r^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c^2} \quad (6)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a_r^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c^2}$$

열전도 해석에 사용되는 각 열원에 대한 파라미터는 Table 1과 같다. 각 열원은 절단 면과 용접 면에서 지정된 속도에 따라 이동하고 각 면에서 기관의 용융온도보다 높은 온도가 발생한다. 절단과 용접의 열전도 해석을 위해 지정된 속도로 이동하는 열원의 증분 시간에 따른 온도 이력을 도출하였다. 절단과 용접공정에 대한 열전도 해석의 온도 이력과 열원 형상은 Fig. 4와 같다. 절단의 최대 온도는 3,600°C이며, 용접의 최대 온도는 2,050°C이다.

Table 1 Heat source parameters

Cylindrical		Double ellipsoidal	
Parameter	Value	Parameter	Value
Speed	35 mm/s	Speed	16.7 mm/s
Power	4000 W	Voltage	25.0 V
Beam diameter	1 mm	Current	288.0 A

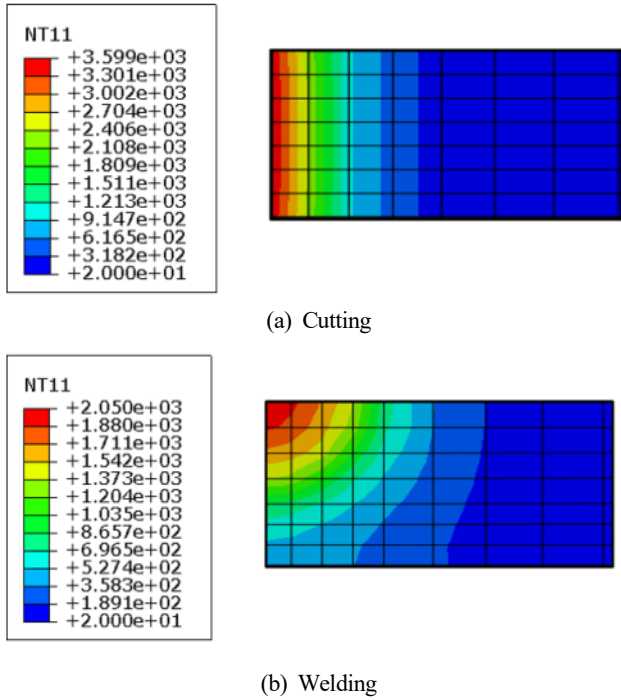


Fig. 4 Temperature history of the cutting and welding heat conduction analysis

2.3 열탄소성 해석을 이용한 용접 및 절단 후 용접의 변형

일반적으로 물질은 온도가 변화함에 따라 팽창과 수축을 동반한다. 이러한 구조적 반응에 대한 유한 요소 공식은 가상 일의 원리를 기반으로 한다. 가상 일의 원리에서 내부 변형 에너지 변화는 외부 하중에 의한 동일한 변화로 상쇄된다. 온도 변화 중 구조물의 구속으로 인해 발생하는 열 응력으로 인한 변형 에너지를 고려한 가상 일의 원리는 식 (7)와 같다. $\{\delta u\}^T$ 벡터는 임의의 가상 변위라는 점에 유의하면 위의 방정식을 충족하는데 필요한 조건은 식 (8)로 표기될 수 있다. Von mises stress는 식 (9)로 정의된 응력 텐서에서 계산할 수 있으며, 주응력($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)은 식 (10)과 같다 [14].

$$\{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] dv \{u\} = \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} dv \quad (7)$$

$$[K] \{u\} = \{F^{th}\} \quad (8)$$

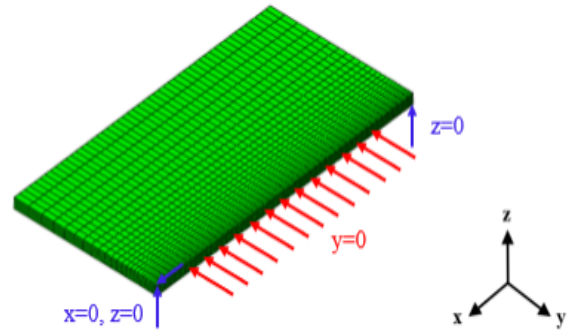


Fig. 5 Boundary condition of thermal-elastic-plastic

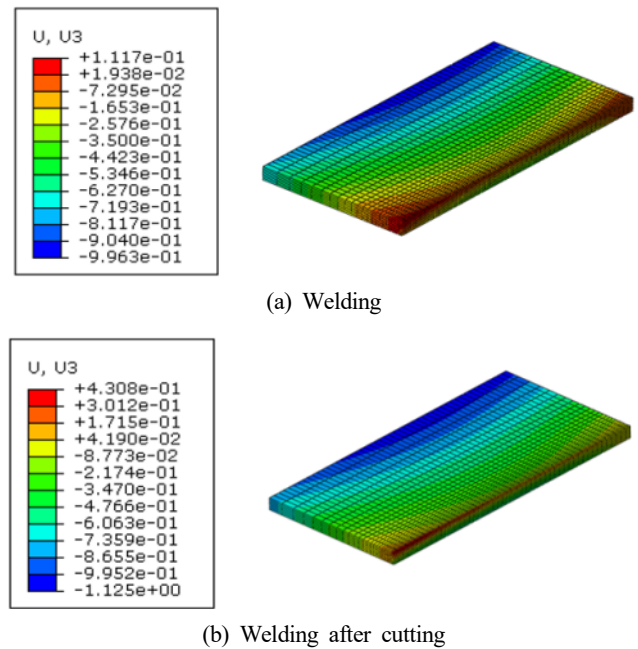


Fig. 6 Simulation results of welding and welding after cutting using thermal-elastic-plastic

$$\rho = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2}}{2} \quad (10)$$

여기서

$$[K] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] dv = \text{element stiffness matrix}$$

$$\{F^{th}\} = \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} dv = \text{element thermal load vector}$$

$$\{\epsilon^{th}\} = \{\alpha\} \Delta T = \text{thermal strain vector}$$

$$\{\alpha\} = \text{vector of coefficients of thermal expansion}$$

열전도 해석의 절단과 용접 공정의 시간에 따른 온도 이력을 하

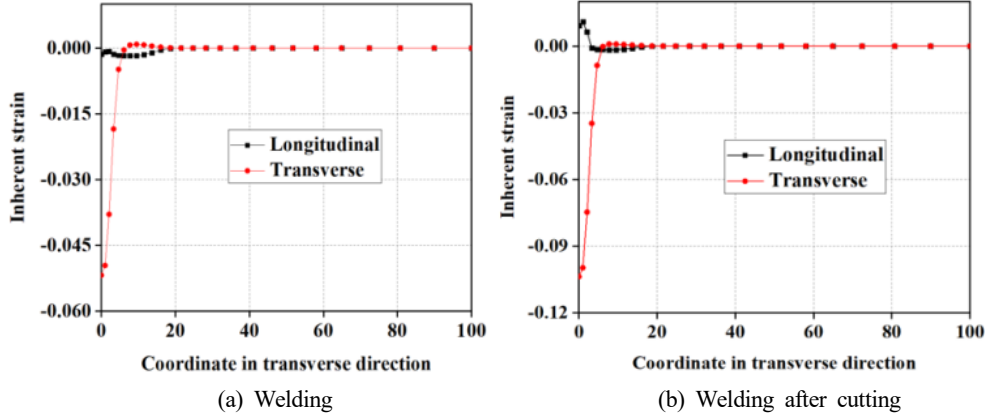


Fig. 7 Inherent strain distribution of welding and welding after cutting for transverse length

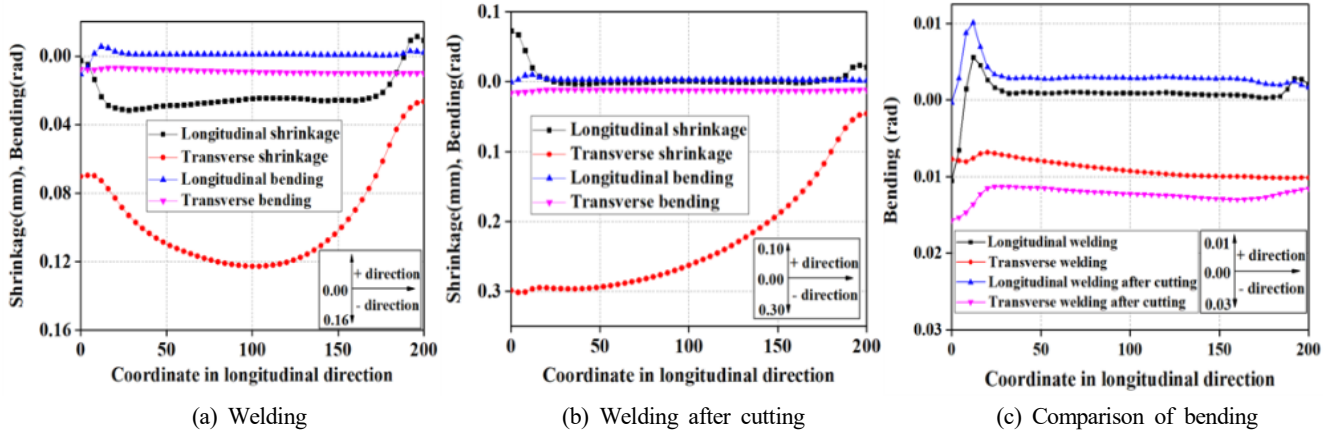


Fig. 8 Inherent deformation of welding and welding after cutting for longitudinal length and comparison of bending

중으로 적용하였고, 구속 조건은 Fig. 5와 같다. 그리고 단일 용접의 판재 변형 결과와 절단을 고려한 용접의 판재 변형 결과는 Fig. 6과 같다. 열탄소성 해석을 이용한 용접 공정 및 절단을 고려한 용접 공정의 판재 최대 면의 변형량은 각각 -0.9963 mm와 -1.125 mm이고 0.1287 mm 차이로 12.9%의 절단에 따른 차이를 확인하였다.

2.4 고유 변형을 이용한 용접 및 절단 후 용접의 변형 분석

열탄소성 해석의 변형을 분석하기 위해 종 방향(용접 방향)과 횡 방향에 대한 고유변형률을 도출하였으며 Fig. 7과 같다. 용접과 절단 후 용접 공정의 고유변형률 범위는 종 방향이 횡 방향보다 넓으며, 크기는 횡 방향이 종 방향보다 큰 것을 확인하였다. 절단 후 용접 공정의 종 방향 최대값은 용접 공정의 최대값보다 양의 방향으로 증가하였고, 횡 방향 최대값은 2배 증가하였다. 고유변형률을 식 (11)을 통해 횡 단면으로 적분하여 수축과 굽힘에 대한 고유변형을 도출하고, 이를 용접 방향으로 표현하였다^[3].

$$\delta_{longitudinal}^{inherent} = \frac{1}{h} \iint \epsilon_{longitudinal}^{inherent} dydz$$

$$\delta_{transverse}^{inherent} = \frac{1}{h} \iint \epsilon_{transverse}^{inherent} dydz$$

$$\theta_{longitudinal}^{inherent} = \frac{12}{h^3} \iint \left(z - \frac{h}{2} \right) \epsilon_{longitudinal}^{inherent} dydz$$

$$\theta_{transverse}^{inherent} = \frac{12}{h^3} \iint \left(z - \frac{h}{2} \right) \epsilon_{transverse}^{inherent} dydz$$

용접 공정은 용접의 시작과 끝 부분을 제외한 구간에서 일정한 수축과 굽힘이 발생하였다. 그리고 절단을 고려한 용접은 단일 용접과 비교하여 횡 방향 수축의 최대값이 2배 이상 증가하였으며, 시작 부분에서 최대값을 갖고 끝 부분으로 갈수록 점차 감소하였다. 구조물의 왜곡은 수축에 비해 굽힘에 지배적이므로 따라서 두 공정의 종 방향 및 횡 방향의 굽힘을 비교하였으며 Fig. 8과 같다. 절단 후 용접의 횡 방향 굽힘은 용접 공정과 비교하여 32.2% 증가하였고, 종 방향 굽힘은 175% 증가함을 확인하였다.

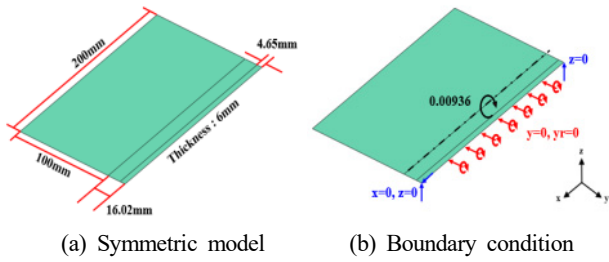


Fig. 9 Finite element symmetric model and boundary condition for elastic analysis

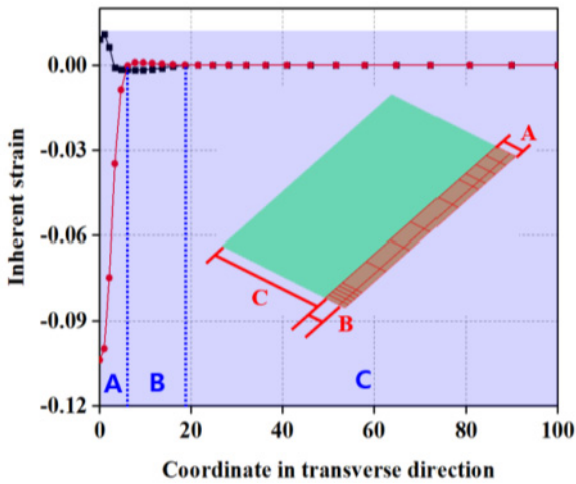


Fig. 10 Application range setting according to the inherent strain distribution

3. 간이해석 모델을 이용한 절단 및 용접 변형 분석

3.1 간이해석 모델 구성

기존에 수행한 열 변형 예측 기법은 해석에 많은 시간이 소요된다. 이는 대형 조립 부재 단위에서는 기하급수적으로 커지므로, 대형 부재의 적용에는 한계가 있다. 따라서 쉘 모델을 이용한 탄성 해석인 등가하중법^[15]으로 이를 개선하고자 한다. 이 방법은 열원의 온도 이력이 가해진 부재에 내재한 고유변형률을 열 영향부에 대하여 등가의 하중을 적분해내는 것이다.

본 연구에서는 열탄소성 해석의 고유변형률을 탄성 해석에 적용하여 수축과 굽힘을 표현하고, 이를 쉘 모델에 적용하였다. 해석 모델과 경계조건은 Fig. 9와 같다^[5].

절단을 고려한 용접과 단일 용접의 수축은 스칼라 하중 경계조건인 온도를 등가의 하중으로 적용하고 식 (12)를 이용하여 열팽창계수로 표현하였으며, 굽힘의 경우 고유변형률을 식 (13)을 이용하여 굽힘 모멘트로 표현하였다. 수축을 열팽창계수로 표현하기 위해 최대 고유변형률의 90% 영역을 고려하여 고유 변형을 구하고, 고유 변형을 이용하여 열팽창계수를 구하였다. 열팽창계수는 용접

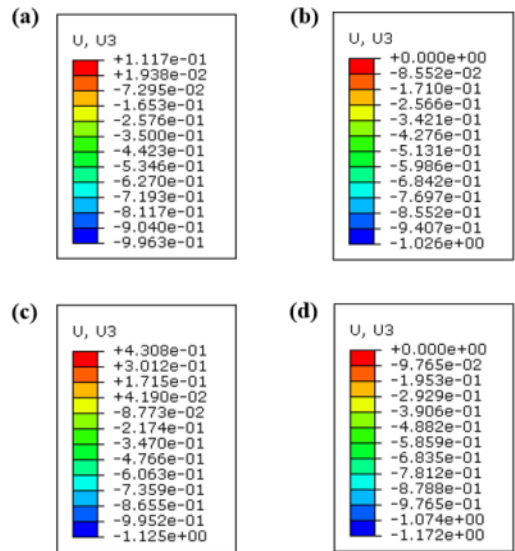
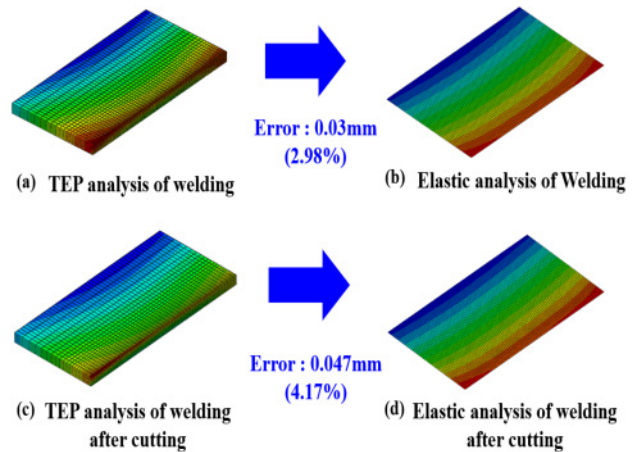


Fig. 11 Comparison of thermal-elastic-plastic and elastic analysis

방향에 대하여 고유 변형의 평균값을 적용하여 구간을 나누었으며, 평균값을 구하기 힘든 경우 모든 구간을 나누어 적용하였다. 그리고 고유변형률 분포를 이용하여 종 방향과 횡 방향에 대한 수축과 굽힘의 적용 구역을 설정하였다. 횡 방향과 종 방향을 모두 포함하는 구역 A, 횡 방향만 포함하는 구역 B, 모두 포함하지 않는 구역 C로 나누어 적용하였으며 Fig. 10과 같다.

$$\delta^{inherent} = \frac{1}{h} \iint \epsilon^{inherent} dydz = \frac{1}{h} \epsilon^{thermal} yz \quad (12)$$

$$M_{longitudinal} = E \iint z \epsilon_{longitudinal}^{inherent} dydz = EI \theta_{longitudinal}^{inherent} \quad (13)$$

$$M_{transverse} = E \iint z \epsilon_{transverse}^{inherent} dydz = EI \theta_{transverse}^{inherent}$$

3.2 간이 해석과 열탄소성 해석의 비교

이전 열탄소성 해석의 고유변형률을 수축과 굽힘으로 적용한 탄성 해석에 따른 변형 결과를 열전도와 열탄소성 해석을 이용한 결과와 비교하여 간이 해석 방법을 검증하였다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 열탄소성 해석과 탄성 해석을 통한 용접공정의 판재 최대 변형량은 각각 -0.9963 mm와 -1.026 mm로 오차는 2.98%로 확인되었다. 또한, 절단 후 용접 공정은 -1.125 mm와 -1.172 mm로 4.17%의 오차가 발생하였다. 간이해석법과 열탄소성 해석의 오차는 4.17%를 보이며 실질적으로 활용 가능한 값을 도출하였다. 또한, 이전 bead-on-plate에 대한 열 변형 예측보다 해석 시간을 절약할 수 있다. 따라서 간이해석법을 절단을 고려한 용접공정에 활용할 수 있으며, 이를 통해 대형 부재에 적용할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 절단 공정으로 발생하는 잔류 응력과 변형을 용접 공정에 고려하여 절단 공정이 용접 공정에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 bead-on-plate 모델을 활용하였으며, 열전도 해석을 이용하여 절단 공정과 용접 공정의 열원에 대한 시간에 따른 온도 이력을 도출하고, 이를 열탄소성 해석에 적용하여 용접 공정과 절단 후 용접 공정의 변형을 예측하였다. 절단 후 용접 공정은 용접 공정과 비교하여 12.9%의 차이가 발생하였다. 따라서, 용접 공정에 절단 공정을 고려한다면 더 정확한 변형을 예측할 수 있다. 또한, 대형 부재에 적용하기 위해 열탄소성 해석의 고유변형률을 이용하여 수축과 굽힘을 표현하고, 고유변형률의 분포에 따라 적용 구역을 설정하여 탄성 해석을 진행하였다. 열탄소성 해석의 최대 고유변형률의 90% 영역을 횡 단면으로 적분하여 고유변형을 도출하였고, 스칼라 하중 경계조건인 온도를 등가의 하중으로 적용하여 열팽창계수로 수축을 표현하였으며, 굽힘의 경우 고유변형률을 이용하여 굽힘 모멘트로 표현하였다. 또한, 제안한 간이해석법을 검증하기 위해서 열탄소성 해석과 비교하였다. 간이해석법의 절단 후 용접 공정의 변형과 열탄소성 해석의 변형은 4.17%의 오차를 보이며 실질적으로 대형 부재의 적용에 대한 적합성을 확인하였다. 따라서 결론적으로 용접 공정에 절단 공정을 고려하면 정확한 변형을 예측할 수 있으며, 이를 설계단계에 적용하면 생산성을 향상할 수 있다.

References

- [1] Arif, A. F. M., Yilbas, B. S., Aleem, B. J. A., 2009, Laser Cutting of Thick Sheet Metals: Residual Stress Analysis, *Opt. Laser Technol.*, 41:3 224-232, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.07.006>.
- [2] Yilbas, B. S., Arif, A. F. M., 2011, Laser Cutting of Steel and Thermal Stress Development, *Opt. Laser Technol.*, 43:4 830-837, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.11.002>.
- [3] Wang, J., Rashed, S., Murakawa, H., 2014, Mechanism Investigation of Welding Induced Buckling using Inherent Deformation Method, *Thin-Walled Struct.*, 80 103-119, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.003>.
- [4] Kartal, M. E., Kang, Y.-H., Korsunsky, A. M., Cocks, A. C. F., Bouchard, J. P., 2016, The Influence of Welding Procedure and Plate Geometry on Residual Stresses in Thick Components, *Int. J. Solids Struct.*, 80 420-429, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.10.001>.
- [5] Ha, Y., 2011, A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures, *J. Welding and Joining*, 29:4 48-53, <https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.4.410>.
- [6] Maeda, A., Jin, Y., Kuboki, T., 2015, Light Press of Sheet Metal Edge for Reducing Residual Stress Generated by Laser Cutting Considering Mechanical Properties and Intensity of Residual Stress, *J. Mater. Process. Technol.*, 225 178-184, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.019>.
- [7] Yilbas, B. S., Akhtar, S. S., 2014, Laser Bending of Metal Sheet and Thermal Stress Analysis, *Opt. Laser Technol.*, 61 34-44, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.023>.
- [8] Yilbas, B. S., Akhtar, S., Keles, O., 2014, Laser Cutting of Triangular Blanks from Thick Aluminum Foam Plate: Thermal Stress Analysis and Morphology, *Appl. Therm. Eng.*, 62:1 28-36, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.026>.
- [9] Murakawa, H., Deng, D., Ma, N., Wang, J., 2012, Applications of Inherent Strain and Interface Element to Simulation of Welding Deformation in Thin Plate Structures, *Comput. Mater. Sci.*, 51:1 43-52, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.040>.
- [10] Deng, D., Zhou, Y., Bi, T., Liu, X., 2013, Experimental and Numerical Investigations of Welding Distortion Induced by CO₂ Gas Arc Welding in Thin-plate Bead-on joints, *Mater. Des.* (1980-2015), 52 720-729, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.013>.
- [11] Kim, J. S., Kim, I. J., 2012, A Study on Characteristic of Residual Stresses in a wind Tower Using the Tandem Circumferential Welding Process, *J. Korean Soc. Manuf.*

- Technol. Eng., 21:6 938-945, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.6.938>.
- [12] Yilbas, B. S., Akhtar, S. S., 2011, Laser Cutting of Alloy Steel: Three-Dimensional Modeling of Temperature and Stress Fields, Mater. Manuf. Process., 26:1 104-112, <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.501092>.
- [13] Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M., 1984, A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metall. Mater. Trans. B, 15 299-305, <https://doi.org/10.1007/BF02667333>.
- [14] Yilbas, B. S., Arif, A. F. M., 2008, Modelling of Residual Stresses during Laser Cutting of Small-diameter Holes, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf., 222:12 1577-1587, <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1233>.
- [15] Ko, D. E., Jang, C. D., Seo, S. I., Lee, H. W., 1999, Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System, J. Soc. Nav. Archit. Korea, 36:4 116-127.
- [16] Jin, B. J., Park, M. H., Tun, T. J., Kim, I. S., Park, K. Y., Kim, Y., Yang, H. J., 2018, A Study on Performance Prediction of Purging Device using CFD in Laser Welding of Titanium Sheet, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 27:1 70-75, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.1.70>.
- [17] Bang, Y., Kang, Y., Song, M., Jeon, Y., 2020, Analysis of Welding Conditions and Weld Joints of Advanced High-strength Steel Through Cold-metal Transfer Welding, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:2 141-146, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.2.141>.



Hee-Chan Yoon

Ph. D. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Welding. E-mail: korea79chan@naver.com



Hong-Jun Noh

Ph. D. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Welding. E-mail: nohoju86@hanyang.ac.kr



Young-Hwan Han

Ph. D. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Welding. E-mail: hyh1994@gmail.com



Hun-Bong Lim

Professor in the Department of Mechanical Engineering at Myongji College. His research interests are Mechanical Design E-mail: lhb1019@mjc.ac.kr



Hyun-Ik Yang

Professor in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interests are Mechanical Design, Offshore Structure Design, Welding Process Optimization E-mail: skynet@hanyang.ac.kr