

대형구조물의 효율적 3차원 용접잔류응력해석을 위한 새로운 이동 온도 프로파일 방법

김철호* · 김재민** · 김윤재*†

Moving Temperature Profile Method for Efficient Three-Dimensional Finite Element Welding Residual Stress Analysis for Large Structures

Cheol Ho Kim*, Jae Min Gim**, and Yun Jae Kim*†

(Received 19 October 2023, Revised 22 November 2023, Accepted 12 December 2023)

ABSTRACT

For three-dimensional finite element welding residual stress simulation, several methods are available. Two widely used methods are the moving heat source model using heat flux and the temperature boundary condition model using the temperature profile of the welded beads. However, each model has pros and cons in terms of calculation times and difficulties in determining welding parameters. In this paper, a new method using the moving temperature profile model is proposed to perform efficiently 3-D FE welding residual stress analysis for large structures. Comparison with existing experimental residual stress measurement data of two-pass welding pipe and SNL(Sandia National Laboratories) mock-up canister shows the accuracy and efficiency of the proposed method.

Key Words : Finite element analysis(유한요소해석), Welding residual stress(용접잔류응력), Dry Storage Canister (건식저장용기)

기호설명

q = heat flux density
 Q_f, Q_r = welding power
 V_f, V_r = front, rear quadrant volume of weld
 a_f, a_r = characteristic lengths of heat source
 b, c = characteristic lengths of heat source
 v = travel speed of heat source
 t = time
 t_0 = reference time
 T = temperature
 c = heat capacity
 k = heat conductivity

1. 서론

원자력 발전 후 생성되는 사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel)는 스테인리스강으로 제작된 건식저장 캐니스터(Canister)에 장기적으로 보관된다.⁽¹⁾ 캐니스터 제작에는 용접과정이 포함되며 용접 수행 시 구속 조건, 국부적 가열 및 냉각 등으로 인해 용접부에는 잔류응력이 생성된다.⁽²⁾ 용접잔류응력은 입열 및 냉각 조건, 캐니스터의 소재 및 형상에 따라 다양하게 나타나며 특히 균열부에 발생하는 인장 잔류응력이 문제가 된다. 캐니스터 특성상 사용후핵연료를 자연대류 방식으로 냉각하기 때문에 염분과 같은 부식 환경에 직접적으로 노출되므로 캐니스터 균열부에 발생한 인장 잔류응력으로 인해 응력부식균열 (Stress Corrosion Cracking; SCC)이 발생할 위험이 있다.⁽³⁾

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학부(소속)

E-mail: kimy0308@korea.ac.kr

TEL: (02)3290-3372, FAX: (02)928-4569

* 고려대학교 기계공학부

** 삼성SDI(주)

캐니스터는 사용후핵연료를 포함하므로 응력부식 균열의 생성 및 진전을 정확히 평가하는 것이 캐니스터 구조안전성 평가에서 중요한 부분이다.⁽⁴⁾ 따라서 응력부식균열의 주요한 원인인 용접잔류응력을 정확하게 예측하는 것이 중요하지만 실제 실험을 통한 측정은 시간 및 비용적인 측면에서 다소 어려움이 있다. 이에 유한요소해석을 통한 용접잔류응력 예측이 많이 수행되었으며,^(5,6) 용접 공정을 해석적으로 모사하기 위한 기법들도 개발되어 왔다.^(7,8) 하지만 캐니스터와 같은 대형구조물의 경우 용접해석 기법에 따라 시간 및 정확도 측면에서 효율적인 해석에 한계가 있다. 또한 대형구조물의 경우 용접잔류응력이 용접순서에 따라 달라질 수 있기에 이를 확인하기 위해서는 3차원 용접해석이 필요하다.

본 논문에서는 용접 공정을 모사하는 열 해석 기법 중 가장 널리 사용되며 높은 정확도를 가지는 이동 열원 모델을 기반으로 해석 시간을 효과적으로 단축시키는 온도 경계조건 모델의 변수를 결정하는 새로운 용접해석 기법을 제시한다. 이는 긴 해석 시간을 요구하는 대형구조물의 3차원 용접해석에 대해 효율적인 해석을 가능하게 한다. 새롭게 제시한 모델의 검증은 위해 용접잔류응력 측정 실험과의 검증을 진행하였고, 개발 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 기존 3차원 용접해석 모델

2.1 이동 열원 모델

유한요소해석으로 용접 모사 시 열 해석과 응력 해석을 순차적으로 진행하며, 용접비드에 의한 열전달을 비선형 과도(transient) 열 이력 계산을 통해 모사한다. 열 해석 방법 중 하나인 이동 열원 모델은 열원의 움직임에 의한 입열량의 변화를 이용하며, 열원과의 거리에 따라 입열량을 조절하여 용접을 모사한다. 이 모델은 시간에 따른 열원의 움직임을 모사하기 때문에 실제 용접 공정과 유사한 방식으로 열전달을 모사할 수 있다. 이동 열원 모델 중 가장 널리 사용되는 모델은 Goldak⁽⁷⁾ 등이 제안한 이중 타원(double-ellipsoid) 모델이며, 열원 앞뒤의 변수 결정을 통해 열속(heat flux)을 구현한다. 이중 타원 모델의 열속은 식 (1)을 통해 계산된다. 식 (1)에서 q 는 열속 밀도(heat flux density)를 의미하며, Q 및 V 는 각각 용접 시 열용량과 용접 열원의 체적을 의미한다. a , b , c 는 모두 용접 열원 형상에 대한 길이

상수로서 각 축에서의 열원 형상 길이를 결정한다.

$$q(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{Q_f}{V_f} \exp \left[-3 \left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right] & \text{front part} \\ \frac{Q_r}{V_r} \exp \left[-3 \left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right] & \text{rear part} \end{cases} \quad (1)$$

$$c\dot{T} + kT = \dot{q} \quad (2)$$

이렇게 계산된 q 는 식 (2)에 적용되어 열전달을 모사한다. 이때 T , c 및 k 는 각각 온도변수, 열용량 및 열전도율을 의미한다. 이중 타원 이동 열원 모델을 통한 열 해석은 실제 용접과 유사한 방식으로 열전달 모사에서 높은 정확도를 보이지만 해석 시간이 매우 길다는 단점이 있어 대형 구조물 용접해석에 적용할 경우 해석에 어려움이 있다.

2.2 온도 경계조건 모델

온도 경계조건을 이용한 용접해석 모델은 Karlo⁽⁸⁾에 의해 제안되었으며, 열원 별 열속을 계산하지 않고, 용접비드의 온도 경계조건만을 이용해 열전달 해석을 수행한다. 이는 식 (2)의 우변항이 0으로 되어 해석 시간이 대폭 감소되며 대형 구조물에 대해 효율적인 3차원 용접해석이 가능하다. 온도 경계조건 모델은 용접비드 생성 후 특정 시간 동안 해당 비드의 온도를 용융온도로 유지 및 냉각시키면서 용접을 모사한다. 따라서 용접비드의 크기, 용접 및 냉각 시간, 용접 온도에 따라 열전달 결과가 달라진다. 온도 경계조건 모델은 용접해석 시간을 효과적으로 단축시키지만, 해석자에 따라 용접 변수가 다르게 결정될 경우 해석 결과가 달라질 수 있어 재현성이 떨어진다.

3. 이동 온도 프로파일 모델

3.1 해석 모델

본 논문에서는 효율적인 3차원 용접해석 기법으로 이동 온도 프로파일(moving temperature profile; MTP) 방법을 제시한다. 이 방법은 온도 경계조건 모델과 같이 해석 모델의 용접비드에 온도 조건을 부여하여 열전달을 모사하지만 기존 방법과의 차이점은 각 용접비드 절점에서의 온도를 시간의 함수 및 좌표로 표현하여 결정한다는 것이다. 먼저 3차원

해석 모델을 2차원 형상으로 모델링하고, 이동 열원 모델을 이용하여 열전달 해석을 진행한다. 2차원 열전달 해석에서 도출된 온도 프로파일을 이용하여 용접비드 절점에서의 온도를 시간의 함수 및 좌표로서 결정한다. 이렇게 결정된 용접비드 절점에서의 온도는 최종적으로 3차원 모델에 적용되어 열전달 해석을 모사하게 된다.

3.2 해석 절차

3.1에서 설명한 것과 같이 MTP 모델은 2차원 열해석이 선행된다. 식 (3)의 이중 타원 이동 열원 모델을 통해 열속을 결정하며, 이를 기반으로 열전달 해석을 진행하여 2차원에서의 온도 프로파일을 도출한다. 용접비드가 생성되면 가열 및 냉각과정을 거치며, Fig. 1과 같이 온도가 시간에 따라 변화하게 된다. 이렇게 해석으로 측정된 용접비드의 온도 그래프를 이용하여 식 (4)의 예측식을 결정하게 된다. 식(4)의 T_{max} , T_0 는 각각 열전달 해석을 통해 도출된 용접비드의 최대 온도와 중간 온도를 의미하고, m 은 T_{max} 일때의 시간상수, n 은 기울기 상수를 의미한다. 이때 중간온도 T_0 는 상온인 25°C로 가정하여 결정하였다. 예측식을 이용하면 용접비드의 온도 경계조건을 시간에 따른 함수로서 표현할 수 있기 때문에 2.2절에서 설명한 기존의 온도 경계조건 모델보다 더 정확한 열전달 해석이 가능하다. 도출된 예측식을 이용하여 용접비드에 온도 경계조건을 부여하기 위해 ABAQUS의 DISP user-subroutine을 사용하였으며 용접해석 모델 내 열원과 각 절점의 거리를 기반으로 계산된 온도를 해석 모델의 온도 경계조건으로서 부여할 수 있다. 자세한 절차는 다음과 같다.

$$q(x,y,z,t) = \begin{cases} \frac{Q_f}{V_f} \exp\left[-3\left(\frac{(v(t-t_o))^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] & \text{front part} \\ \frac{Q_r}{V_r} \exp\left[-3\left(\frac{(v(t-t_o))^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] & \text{rear part} \end{cases} \quad (3)$$

$$T = T_{max} \times \exp\left(-\left(\frac{t-m}{n}\right)^2\right) + T_0 \quad (4)$$

시간의 함수로 표현된 열원을 이용하여 각 절점의 좌표로부터 열원의 거리에 따른 온도를 계산한다. Fig. 2(a)와 같은 실린더의 맞대기 용접을 예로 들면

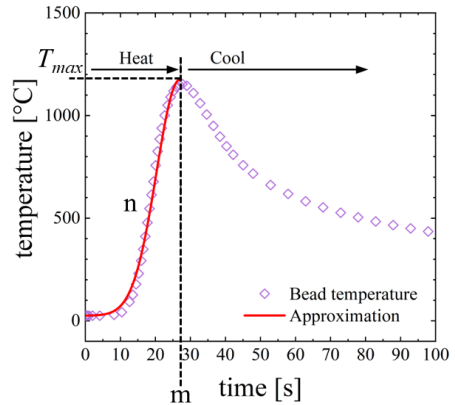


Fig. 1. FE welding bead temperature history and proposed approximation method of simple two-pass welding pipe

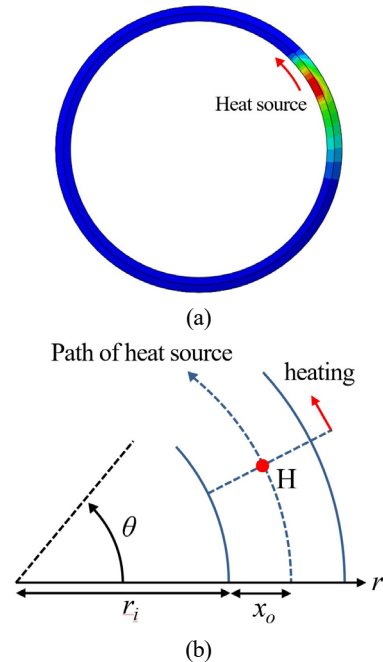


Fig. 2 Calculation example of input temperature profile for butt weld case: (a) butt weld for cylinder and (b) schematic of moving heat source

계산 과정은 다음과 같다. 먼저 열원의 이동을 Fig 2(b)의 원통형 좌표계를 이용하여 식 (5)와 같이 시간의 함수로서 표현하며, 이때 v_0 및 t 는 각각 용접 속도와 시간을 의미한다. 이후 식 (6)의 절점의 좌표를 이용하여 식 (7)의 d 와 같이 열원으로부터 절점의 거리를 계산한다. 이렇게 계산된 거리 d 는 절점

에서의 속도 v_θ 로 나누어 0식 4의 시간상수 항을 식 (8)과 같이 치환한다. 최종적으로 식 (9)와 같이 온도 프로파일 예측식을 수정할 수 있으며, 이 같은 과정을 통해 각 절점과 열원의 거리 차를 이용한 3차원 모델의 온도분포를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} H(x, y) &= (r_H, \theta_H) \\ &= (r_i + x_0, v_\theta t) \\ &= \left(r_i + x_0, \frac{v_\theta t}{r_H} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$X(r_x, \theta_x) = \left(\sqrt{x^2 + y^2}, \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right) \quad (6)$$

$$d = r_H (\theta_x - \theta_H) \quad (7)$$

$$t - m = \frac{r_H}{v_\theta} (\theta_x - \theta_H) \quad (8)$$

$$T = T_{\max} \times \exp \left(- \left(\frac{r_H (\theta_x - \theta_H)}{v_\theta n} \right)^2 \right) + T_0 \quad (9)$$

4. 배관 2-pass 용접잔류응력 측정 실험

4.1 모델 형상 및 재료

본 논문에서 제시한 MTP 모델의 검증을 위해 Dean⁽⁹⁾등이 사용한 배관의 용접잔류응력 측정 실험을 이용하였다. 배관의 재료는 304 SS이며, 외경 114.3mm, 두께 6mm, 길이 400mm의 배관을 2-pass Gas tungsten arc(GTA) 공법을 통해 용접되었다. 3차원 해석 모델의 형상은 Fig. 3과 같으며 42,000개의 노드 및 38,000개의 요소가 사용되었다.

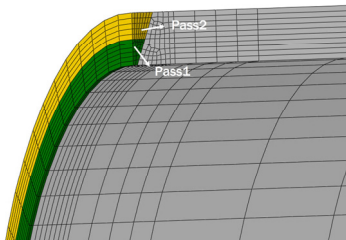


Fig. 3. 3D model mesh for simple two-pass welding pipe

4.2 열전달 해석

용접해석은 열전달 해석과 응력 해석으로 나누어

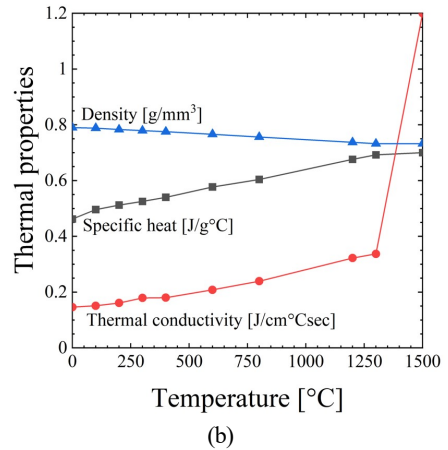
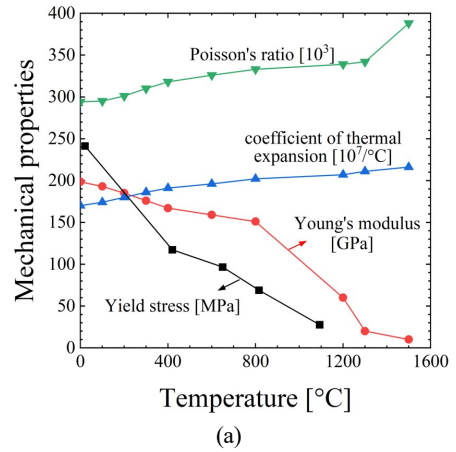


Fig. 4. Temperature dependent material properties: (a) thermal properties, (b) mechanical properties

지며, 열전달 해석을 통해 도출된 온도 이력을 응력 해석에 사용한다. 열전달 해석을 위해서는 각 온도별 물성이 필요하며, 열적 물성인 밀도, 비열, 열전도율은 문헌⁽⁹⁾을 참고하여 Fig. 4(a)에 나타내었다. ABAQUS에서는 일반적으로 용접과 같은 잠열을 포함하는 열 해석 시 1차 요소가 2차 요소에 비해 높은 정확도의 해석 결과를 보인다고 알려져 있으며, 이전 연구에서도 열전달 해석 시 1차 요소가 주로 사용되었다.^(11,12) 이에 따라 열전달 해석은 3차원 조건에서의 1차 열전달 요소인 DC3D8을 사용하였다. 유한요소해석을 이용하여 실제 용접 공정을 모사하기 위해서는 용접비드를 순차적으로 생성하는 기법이 필요하다. 이는 ABAQUS에서 제공하는 MODEL CHANGE 옵션⁽¹¹⁾을 사용하여 구현하였으며, 용접 초기에 모든 비드가 비활성화된 상태에서 실제 용접

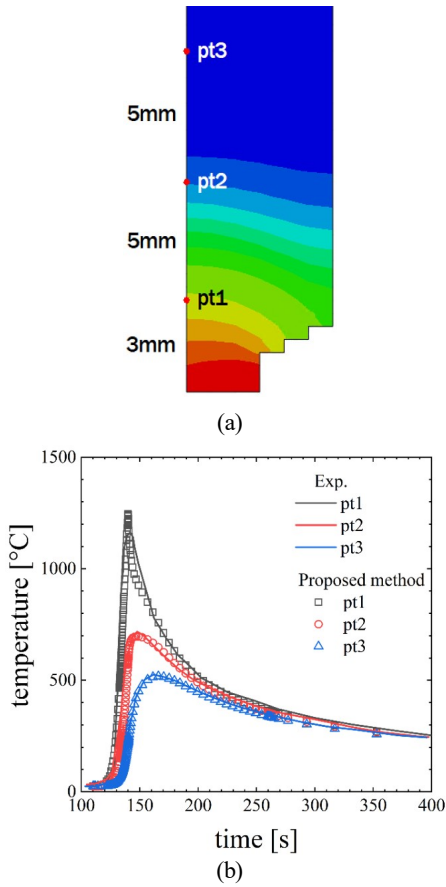


Fig. 5. Temperature distribution results of MTP model for simple two-pass welding pipe: (a) finite element 2D model, (b) comparison of the experimental results and MTP model results

과 동일한 pass로 비드가 추가되어 용접 공정을 묘사하였다. MTP 모델의 적용을 위해 Fig. 5(a)의 2차원 모델의 열전달 해석을 수행하여 Fig. 1과 같은 용접비드의 온도 프로파일을 추출하였다. 그리고 식 (4)의 온도 예측식 상수를 결정하면 T_{max} : 1150°C, $m=27$ sec, $n=9.5$ sec, T_0 : 25°C와 같다. 열전달 해석 결과의 검증에 대해 실제 실험⁽⁹⁾에서 측정된 온도분포를 이용하였으며, Fig. 5(a)와 같이 용접부 중앙에서 각각 3mm, 8mm, 13mm 떨어진 세 지점의 시간에 따른 온도분포를 비교하였다. 그 결과 Fig. 5(b)와 같이 해석에서의 온도 프로파일이 실제 측정 값과 잘 일치하는 것을 확인하였으며 이를 통해 2차원 열전달 해석의 타당성을 검증하였다.

4.3 응력 해석

응력 해석은 열전달 해석을 통해 도출된 각 요소들의 온도 이력을 이용하여 수행한다. 응력 해석 시엔 기계적 물성인 탄성 계수, 열팽창 계수, 푸아송비 및 항복 강도가 필요하며, 304 SS 재료에 대해 문헌⁽⁹⁾ 및 US-NRC 보고서⁽¹⁰⁾를 참고하여 Fig. 4(b)에 나타내었다. 특히 용접공정 중 발생하는 열팽창에 의한 반복하중을 고려하기 위해서는 재료경화모델이 필요하며, 이에 대해 Leggatt 및 Dennis 등^(13,14)은 등방성 경화(isotropic hardening) 모델이 이동성 경화(kinematic hardening) 모델에 비해 보다 높은 보수성을 보인다고 제시하였다. 이에 본 연구에서는 잔류응력 결과의 좀 더 높은 보수성을 위해 등방성 경화모델을 사용하였다. 해석을 위한 요소는 1차 요소인 C3D8을 사용하였다. 앞서 결정된 온도 예측식을 이용하여 3차원 모델의 온도 경계조건에 대입하고 응력 해석을 수행하였다. 응력 해석은 효율적인 해석을 위해 배관 용접부 중앙을 기준으로 대칭 경계조건을 사용하였으며, 용접비드의 추가, 입열 및 냉각의 반복으로 인한 변형을 통해 최종적인 잔류응력이 생성된다. 실험에서의 용접잔류응력 측정에는 배관 내측 표면에서 수행되었으며, 스트레인게이지를 부착하여 용접 후의 변형을 변화를 이용한 잔류응력 측정방법이 사용되었다. 해석과 실험에서 측정한 잔류응력을 비교한 결과는 Fig. 6과 같으며, 배관 내측 표면에서의 용접잔류응력을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 또한, 해석시간 측면에서 Fig. 7과 같이 3차원

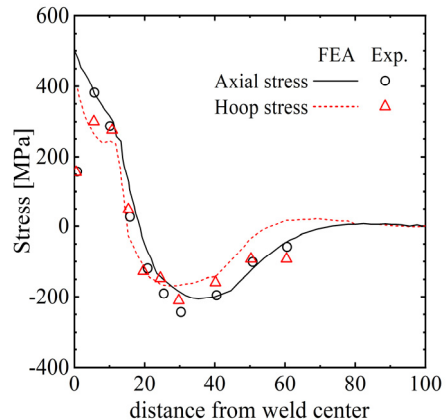


Fig. 6. Comparison of residual stress of the experimental results and MTP model for simple two-pass welding pipe

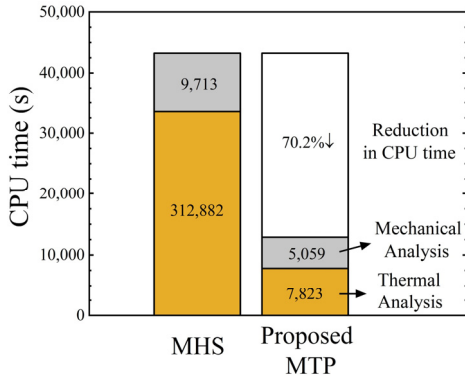


Fig. 7. Comparison of CPU time of moving heat source and MTP model for simple two-pass welding pipe

이동 열원 모델과 비교한 결과 전체 해석 시간이 MTP 모델 사용 시 약 70.2% 감소한 것을 확인하였다.

5. SNL Mock-up 캐니스터 용접잔류응력 측정 실험

5.1 모델 형상 및 재료

검증에 사용한 두 번째 용접잔류응력 측정 실험 모델은 SNL(Sandia National Laboratories)의 Mock-up 캐니스터이다.⁽¹⁵⁾ 재료로는 모재부가 304/304L SS, 용접부는 308L SS로 제작되었으며, 두께 15.875 mm에 형상 및 용접 위치는 Fig. 9와 같다. SAW (Submerged Arc Welding) 용접을 이용하였으며, 내경에 3-pass 용접 후 외경 부분은 아크열로 재료를 녹여 홈(groove)을 생성하는 Arc-gouging을 거쳐 5-pass 용접을 수행하였다.⁽¹⁵⁾ 해석 모델의 용접비드 형상은 Fig. 10과 같으며, 470,000개의 노드 및 443,000개의 요소가 사용되었다.

5.2 열전달 해석

SNL Mock-up 캐니스터 모델의 열전달 해석을 위한 열적 물성은 Fig. 4(a)와 동일하며, 4.2절에 설명한 것과 같이 해석에서는 3차원 조건에서의 1차 열전달 요소인 DC3D8을 사용하였다. MTP 모델 적용을 위해 Fig. 10의 형상과 동일한 2차원 모델의 열전달 해석을 수행하였으며, Fig. 8과 같은 용접비드의 온도 프로파일을 추출하였다. 이후 식 (4)의 온도 예

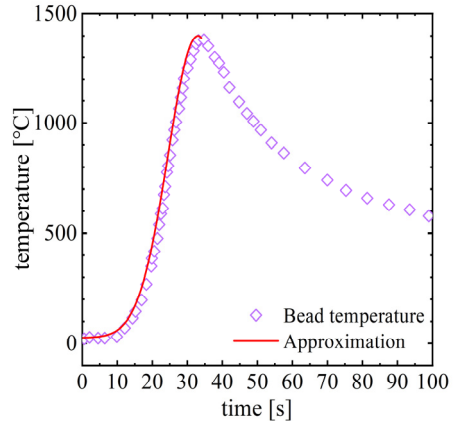


Fig. 8. FE welding bead temperature history with proposed approximation method for mock-up canister model

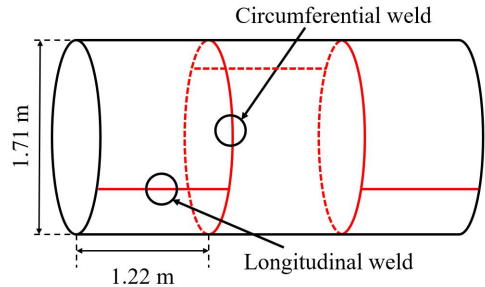


Fig. 9. Schematic representation of the full scale mock-up canister⁽¹⁵⁾

측식 상수를 결정하면 T_{max} : 1375°C, $m=33$ sec, $n=12$ sec, T_0 : 25°C와 같다.

5.3 응력 해석

응력 해석을 위한 기계적 물성은 Fig. 4(b)와 같으며, 등방성 경화 모델을 사용하여 용접공정 중 발생하는 반복하중을 고려하였다. 해석을 위한 요소는 1차 요소인 C3D8을 사용하였다. 앞서 결정된 온도 예측식을 이용하여 온도 경계조건으로 3차원 모델에 대입, 응력 해석을 진행하였다. 응력 해석은 원주방향(Circumferential) 용접에 대해서 진행하였으며, 실제 용접 시 적용된 구속효과를 고려하기 위해 캐니스터 양 끝에 축방향 경계조건을 두어 해석하였다. SNL Mock-up 캐니스터의 경우 DHD(Deep Hole Drilling) 공법⁽¹⁵⁾을 이용해 두께방향의 잔류응력이 측정되었으며, 외측 표면($x/r=0$)을 기준으로 용접부 중앙(Fusion Line)과 HAZ부의 잔류응력 측정 데이

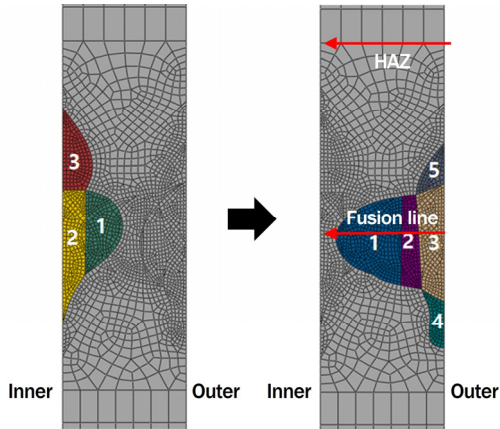
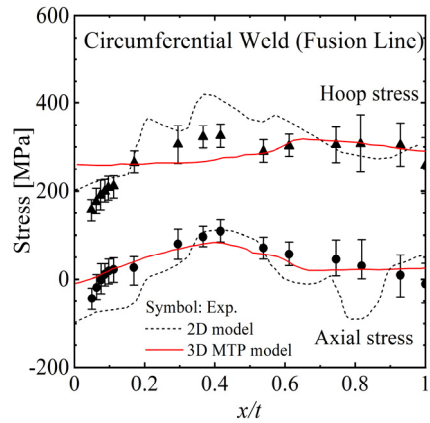


Fig. 10. Welding pass with arc-gouging in finite element analysis for mock-up canister model

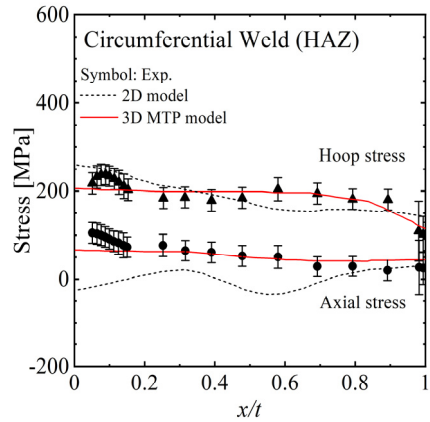
터를 이용하였다. HAZ부의 경우 용접비드 끝단으로부터 약 4mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 본 논문에서 제시한 3차원 용접해석 모델의 타당성 및 정확도를 검증하기 위해 2차원 모델의 응력 해석 결과와 비교하였다. 2차원 모델은 Fig. 10의 형상과 동일하며, 평면 변형률 조건에서 3차원적인 구속효과를 위해 평면 양 끝에 모두 경계조건을 부여하였다. 실험과 3차원 모델 및 2차원 모델의 응력 해석 결과는 Fig. 11과 같으며 캐니스터 기준 축방향(axial) 및 원주방향(hoop) 잔류응력을 비교하였다. 그 결과 용접부 중앙에서 축방향과 원주방향 모두 3차원 모델의 해석 결과가 2차원 모델보다 실제 실험을 잘 예측하는 것을 확인하였다. 또한 HAZ에서는 원주방향 잔류응력이 3차원 및 2차원 모델의 예측 결과가 실험과 유사하지만, 축방향 잔류응력은 2차원 모델이 실험보다 낮은 값으로 예측하는 것을 확인할 수 있다. 2차원 모델의 경우 캐니스터와 같은 실린더 형상을 용접해석 시 경계조건을 통해 3차원적인 구속효과를 부여하게 된다. 이 경우 많은 경계조건 분석이 필요하며 앞서 비교한 것과 같이 3차원 모델보다 낮은 정확도를 보이게 된다.

6. 결론

본 논문에서는 대형구조물의 효율적인 3차원 용접잔류응력해석을 위한 새로운 이동 온도 프로파일 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 기존 용접잔류응



(a)



(b)

Fig. 11. Comparison of experimental welding residual stresses with 3D MTP model and 2D model for mock-up canister model: (a) fusion line, (b) HAZ

력 해석 시 사용되던 이동 열원 및 온도 경계조건 방법의 긴 해석 시간과 용접 변수 결정의 어려움 등 단점을 보완한 방법이다. 제한한 이동 온도 프로파일 방법은 위 단점들을 모두 보완하는 방법이며, 이동 열원 모델을 이용한 2차원 열전달 해석을 기반으로 3차원 온도 경계조건 모델의 온도분포 결정 및 응력 해석을 진행한다. 검증에 위해 두 가지의 실제 용접잔류응력 측정 실험과 비교하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- two-pass로 용접된 배관의 표면에서 잔류응력 측정 결과와 비교한 결과 MTP 모델을 이용하면 실험과 비슷한 경향으로 용접잔류응력을 예측할 뿐만 아니라 기존 이동 열원 모델 대비

70.2%의 해석 시간이 단축되었다.

- SNL에서 수행한 Mock-up 캐니스터 실험의 두께방향 용접잔류응력 측정 결과와 비교 시 MTP 모델을 이용하여 용접부 중앙 및 HAZ부의 용접잔류응력 분포를 실제 실험과 유사하게 예측하는 것을 검증하였다.

따라서 제시한 모델을 이용하면 향후 대형구조물의 3차원 유한요소 잔류응력 해석 시 효율적인 해석이 가능할것이라 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019M2D2A2048296)

참고문헌

- (1) Bunn, M. G., Weeks, J., Holdren, J. P., MacFarlane, A. M., Pickett, S. E., Suzuki, A., and Suzuki, T., 2001, "Interim Storage of Spent Nuclear Fuel: A Safe, Flexible, and Cost-Effective Approach to Spent Fuel Management", Harvard University and University of Tokyo.
- (2) Feng, Z. (Ed.), 2005, *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*, Elsevier, Cambridge.
- (3) Xie, Y., and Zhang, J., 2015, "Chloride-induced stress corrosion cracking of used nuclear fuel welded stainless steel canisters: A review", *J. Nucl Mater*, Vol. 466, pp. 85-93. doi:https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.043
- (4) Tani, J. I., Mayuzumi, M., Arai, T., and Hara, N., 2007, "Stress corrosion cracking growth rates of candidate canister materials for spent nuclear fuel storage in chloride-containing atmosphere", *Mater Trans*, Vol. 48, No. 6, pp. 1431-1437. doi:https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA20063 67
- (5) Park, S. J., Kim, H. T., and Kim, Y. J., 2022, "Sensitivity Analysis of Heat Source Parameter for Predicting Residual Stress Induced by Electron Beam Welding", *Trans. of the KPVP*, Vol. 18, No. 2, pp. 61-68. doi:https://doi.org/10.20466/KPVP.202.18.2.061
- (6) Soh, N. H., Oh, G. J., Huh, N. S., Lee, S. H., Park, H. B., Lee, S. G., Kim, J. S., Kim, Y. J., 2012, "Effect of Finite Element Analysis Parameters on Weld Residual Stress of Dissimilar Metal Weld in Nuclear Reactor Piping Nozzles", *Trans. of the KPVP*, Vol. 8, No. 1, pp. 8-18. https://doi.org/10.20466/KPVP.2012.8.1.008
- (7) Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M., 1984, "A new finite element model for welding heat sources", *Metall trans B*, Vol. 15, pp. 299-305. doi:https://doi.org/10.1007/BF02667333
- (8) Seleš, K., Perić, M., and Tonković, Z., 2018, "Numerical simulation of a welding process using a prescribed temperature approach", *J. Constr Steel Res*, Vol. 145, pp. 49-57. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.012
- (9) Deng, D., and Murakawa, H., 2006, "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements", *Comp Mater Sci*, Vol. 37, No. 3, pp. 269-277. doi:https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.07.007
- (10) NRC, 2013, "Finite Element Analysis of Weld Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Dry Cask Storage System Canisters", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- (11) ABAQUS, 2018, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson and Sorensen, Inc.
- (12) Song, T. K., Bae, H. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S., and Park, C. Y., 2008, "Sensitivity analyses of finite element method for estimating residual stress of dissimilar metal multi-pass weldment in Nuclear power plant", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 9, pp.770-781. doi:https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.9.770
- (13) Leggatt, N. A., Dennis, R. and Hurrell, P. R., 2007, "Modeling the Fabrication of a Pressure Vessel Toroidal Seal," *ASME 2007 PVP Conference*, San Antonio, Texas, July 22-26, Vol. 42843, pp. 839-849. PVP2007-26145.
- (14) Dennis, R. J., Leggatt, N. A. and Gregg, A., 2006, "Optimisation of Weld Modeling Techniques : Bead on Plate Analysis," *ASME*

2006 PVP Conference, Vancouver, BC, July 23-27, Vol. 47578, pp. 967-978, PVP2006-ICPVT-11-93907.

(15) Enos, D., and Bryan, C. R., 2016, "Charac-

terization of Canister Mockup Weld Residual Stresses," Sandia National Lab, Albuquerque, NM, SAND2016-12375R.