

3차원 유한요소해석에 의한 용접응력과 변형의 해석 및 정도 Prediction of Welding Stress and Deformation by 3D-FEM Analysis and Its Accuracy

장경호* 이상형** 이진형***
Chang, Kyong-Ho Lee, Sang-Hyong Lee, Chin-Hyung

ABSTRACT

An residual stress and out-of-plane deformation produced by butt welding was analyzed by four kinds of 3D-FEM programs(Thermal El-Pl Analysis) developed by authors. The magnitude of deformation of perpendicular to the welding line generated by butt welding was large when the reduced integration method was used. This was because of removal of the locking phenomenon, which it was generally known that the stiffness of the shear component of out-of-plane was largely evaluated. And the magnitude of residual stress was analyzed by using the FEM program based on a large and small deformation theory was similar to that was analyzed by the reduced integration method.

1. 서 론

용접 및 하중작용하 강구조물에서 발생하는 응력 및 변형의 예측은 구조물의 안전 및 다양한 상황에 대한 시기 적절한 조치를 위해 중요하다 할 수 있다. 이러한 구조물에 발생하는 응력 및 변형의 예측·제어·방지를 위한 방법으로서 수치해석이 사용될 수 있다. 최근 강재의 고강도화, 부재의 경량화 경향 등 다양한 제조 기술의 변화에 의해 새로운 구조물에 대한 응력 및 변형의 예측이 요구⁽¹⁾되어지고 있다. 또한, 이러한 구조물의 해석에 있어서 계산기의 발달로 3D-FEM 해석이 가능해졌다. 그러므로, 3차원 입체요소를 이용한 유한요소 해석으로 얻을 수 있는 부재 응력 및 변형의 해석 정도에 대해 명확히 할 필요가 있다.

여기서는, 맞대기용접에 의해 발생하는 잔류응력 및 변형을 입체요소를 이용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 그리고, 미소변형 이론, 대변형 이론, 및 저감적분을 고려한 경우에 대한 잔류응력 및 변형의 해석정도를 명확히 하였다.

* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 전임강사

** 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과 박사수료

*** 중앙대학교 토목공학과 석사과정

2. 해석조건

2.1 해석이론

- 1) 변위-변형률 관계식
요소의 전변형률

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\}^T$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_o\} + \{\varepsilon_L\} \quad (1)$$

여기서 $\{\varepsilon_o\}$ 와 $\{\varepsilon_L\}$ 는

$$\{\varepsilon_o\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ (\frac{\partial w}{\partial y}) + (\frac{\partial v}{\partial z}) \\ (\frac{\partial u}{\partial z}) + (\frac{\partial w}{\partial x}) \\ (\frac{\partial v}{\partial x}) + (\frac{\partial u}{\partial y}) \end{Bmatrix}$$

$$\{\varepsilon_L\} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{Bmatrix}$$

$\{\varepsilon\}$ 을 증분형으로 나타내면,

$$\{d\varepsilon\} = [B] \{dw\} \quad (2)$$

$[B]$: 변위-변형률 매트릭스

- 2) 응력-변형률 관계식

응력-변형률 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$[d\sigma] = [D_\sigma][d\varepsilon] - \{c\}dT \quad (3)$$

여기서,

$[D_\sigma]$: 탄성의 경우 $[D'_\sigma]$ 와

소성의 경우 $[D^d]$ 로 분리된다.

{c} : 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력증분에서의 영향

3) 평형방정식

유한요소의 절점력과 절점변위 {dw}와의 평형방정식을 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\{dF\} + \{L\} - \{dR\} = [K]\{dw\} \quad (4)$$

여기서,

[K] : 요소의 구성 매트릭스

{dF} : 외력에 의한 요소의 등가절점력 증분

{L} : 하중 수정항

{dR} : 온도변화에 의한 요소의 등가절점력 증분

식 (4)는 요소에 대하여 구하는 것이다. 따라서, 이것을 계 전체에 대하여 구성해서, 경계조건을 고려해 연립 일차 방정식을 풀면, 절점 변위 증분 {dw}이 구해진다.

절점 변위 증분이 구해지면, 변위-변형을 관계식으로부터 요소의 변형이 계산되고, 그리고, 구성 방정식으로부터 응력을 계산할 수 있게 된다.

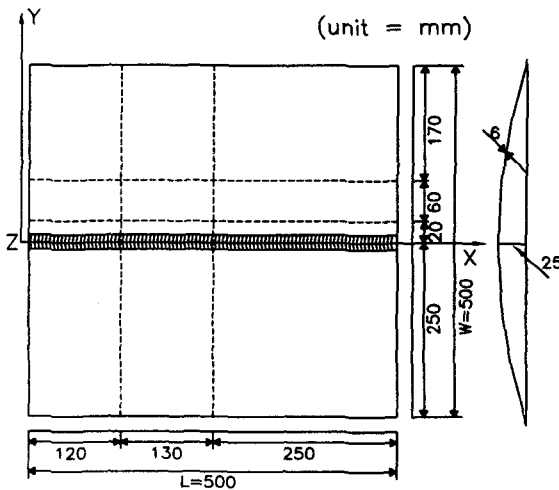


Fig 1. Welding Model

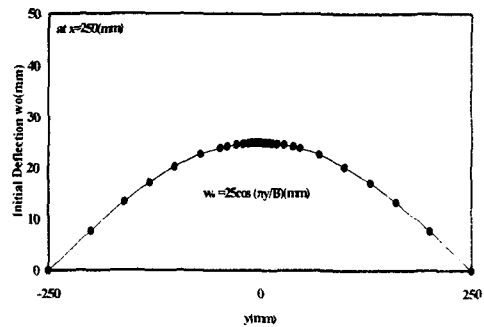
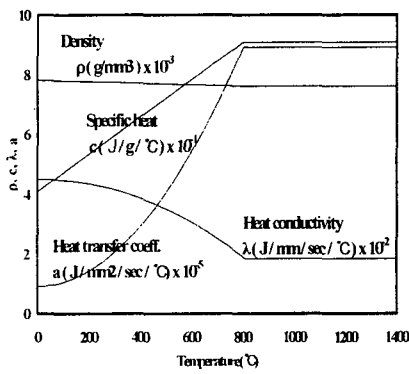


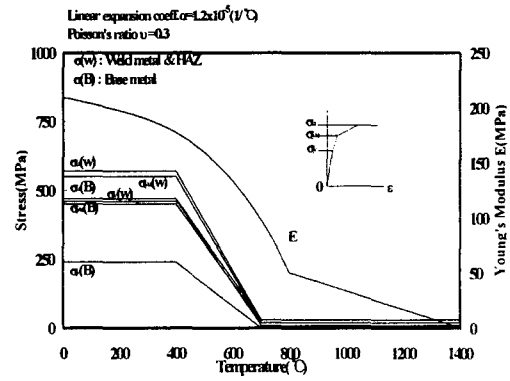
Fig 2. Initial Deflection

2.2 해석모델과 용접조건

해석 모델은 Fig 1.과 같이 $500 \times 500 \times 6 \text{mm}$ 크기의 연강(SS400)판에 Fig 2.에 나타낸 것과 같이 최대 25mm 크기의 초기변형을 준 것으로 설정하였다. Fig 1. 해석 모델상에서 점선은 잔류응력 및 변형의 주목점을 나타내고 있다. 용접은 $Q = 1300 \text{ (J/mm)}$ 의 입열량과 $v = 2 \text{ (mm/sec)}$ 의 용접속도로 진행되는 것으로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한 Fig 3.에 나타낸 것과 같은 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도의 존성¹⁾을 고려하여 3차원 탄소성해석을 수행하였다.



(a) Physical Constants



(b) Mechanical Properties

Fig 3. Material Constants

2.3 온도분포

용접구조물의 열탄소성해석에 있어서 가장 중요한 것은 열이 실제 구조물에서의 하중과 동일한 역할로서 작용하기 때문에 해석에 사용될 온도이력을 구하는 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 온도이력을 구하였으며, 그 결과의 한 예를 Fig 4.에 나타내었다.

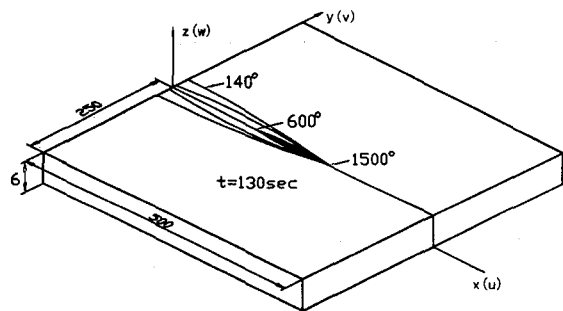
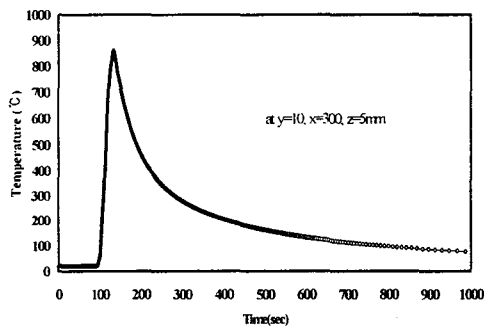
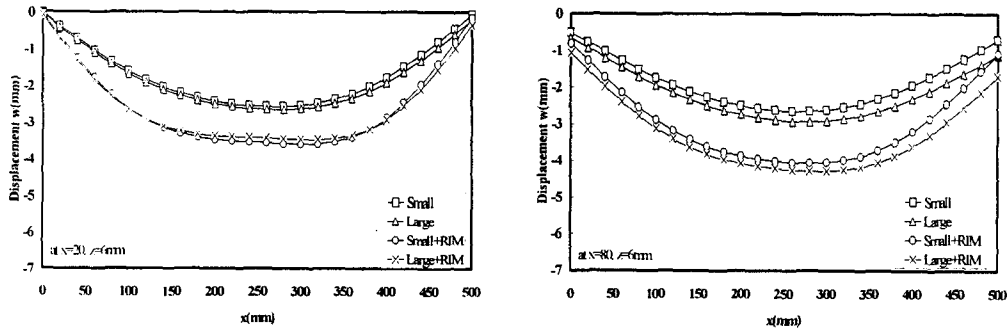


Fig 4. Temperature Contour

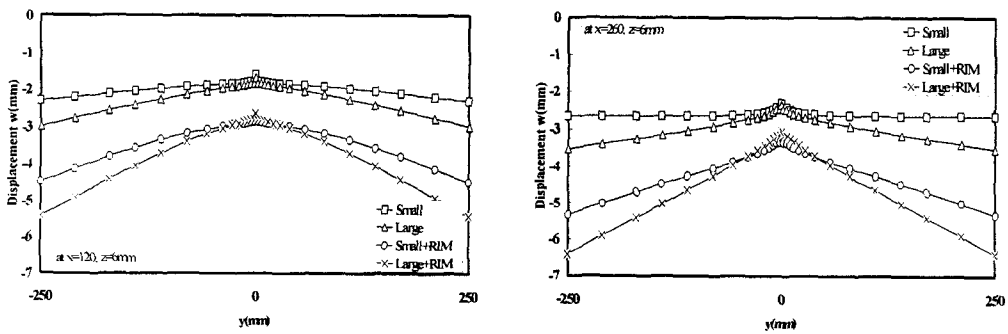
2.4 해석방법

8절점 등방입체요소를 사용한 3차원 탄소성해석에 의해 용접잔류응력 및 변형을 예측하는 경우 해석수법의 정도차를 검토하기 위하여 아래와 같이 4가지 해석 수법으로 해석을 수행하였다.

- ① 미소변형이론(SMALL)에 기초한 해석프로그램
- ② 변형율의 2차항까지 고려한 대변형이론(LARGE)에 기초한 해석프로그램
- ③ 면의 전단성분만 요소내에서 일정한 것으로 평가한 선택적 저감적분법에 의해 ①을 개량(SMALL+RIM)한 프로그램
- ④ 면의 전단성분만 요소내에서 일정한 것으로 평가한 선택적 저감적분법에 의해 ②을 개량(LARGE+RIM)한 프로그램



(a) Distribution along the welding line



(b) Distribution of perpendicular to the welding line

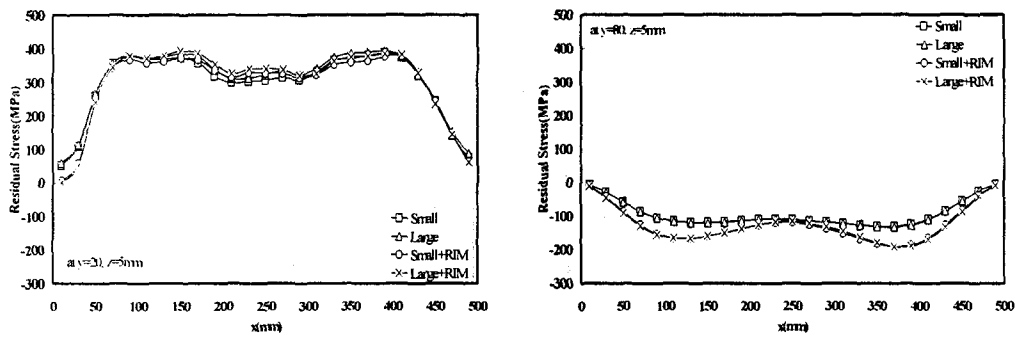
Fig 5. Out-of-plane deformation generated by butt welding with initial deflection(w)

3. 결과 및 고찰

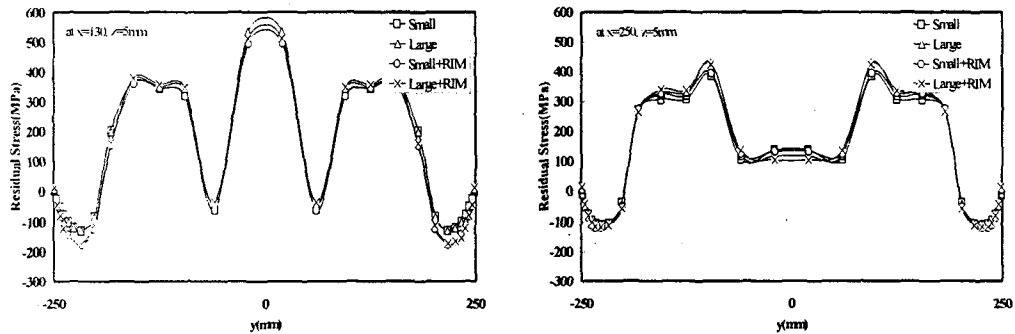
3.1 용접변형 (면외변형)

초기변형을 가진 판의 맞대기 용접에 의해 발생하는 평판 상단($y=20, z=6mm$) 및 ($y=80, z=6mm$)의 용접선 방향 면외변형(w)을 Fig 5. (a)에 나타내었고, 평판 상단($y=120, z=6mm$) 및 ($y=260, z=6mm$)의 용접선 직각방향 면외변형(w)을 Fig 5. (b)에 나타내었다.

미소변형 이론(①) 및 대변형 이론(②)을 적용하여 해석한 경우, 용접선방향의 면외변형(w)은 변형량의 절대치의 차가 거의 나타나지 않았다. 그러나, 용접선 직각방향의 면외변형(w)은 미소변형 이론(①)을 적용한 경우에 비해 대변형 이론(②)을 적용한 경우가 용접선에서 먼($y=250mm$) 방향으로 갈수록 변형량의 절대치가 다소 커지는 현상을 나타내고 있다. 그리고, 선택적 저감적분법을 사용하여 프로그램 ①과 ②를 개량한 경우(③, ④), 프로그램 ①, ②에 의한 해석 결과와 유사한 현상을 나타내고 있으나 전체적으로 그 변형



(a) Distribution along the welding line



(b) Distribution of perpendicular to the welding line

Fig 6. Residual stress produced by butt welding with initial imperfection (σ_x)

량의 크기가 커지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 면외전단성분에 대한 강성이 과대평가되어져 판의 휨을 구속하는 Locking현상을 면외전단성분을 요소내에서 일정하게 하는 선택적 저감적분법을 사용하여 개량함으로써 제거하였기 때문으로 판단된다.

그리고, 용접면외변형은 그 정도의 차이는 있으나 용접 완료후 냉각과정에 따라 면외변형(w)은 수축변위를 나타내고 있다.

3.2 용접잔류응력

초기변형을 가진 판의 맞대기 용접에 의해 발생하는 평판 상단($y=20, z=5mm$) 및 ($y=80, z=5mm$)의 용접선 방향 잔류응력(σ_x)을 Fig 6. (a)에 나타내었고, 평판 상단($y=130, z=5mm$) 및 ($y=250, z=5mm$)의 용접선 직각방향 잔류응력(σ_x)을 Fig 6. (b)에 나타내었다.

미소변형 이론(①), 대변형 이론(②) 및 선택적 저감적분법을 사용하여 프로그램 ①과 ②를 개량한 경우(③, ④) 모두 해석상 잔류응력값의 절대치의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

이러한 이유는 용접잔류응력의 발생기구⁽³⁾가 요소간 온도차에 의존하기 때문이며, 본 해석에서는 입열량 및 해석 제조조건을 동일시 했기 때문으로 판단된다.

4. 결론

용접잔류응력 및 면외변형의 해석시 각각의 해석수법에 의해 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선택적 저감적분법을 사용하여 해석을 수행한 경우 면외변형(w)량의 절대치가 커졌다.
- 2) 용접잔류응력(σ_x)의 경우 미소변형 이론, 대변형 이론 및 선택적 저감적분법에 의한 해석 모두 유사한 결과를 얻었다.

참고 문헌

1. 장경호, 이상형, 전준태, "공용중 보수용접에 의한 용접부의 응력 및 변형의 거동", 한국강구조학회 논문집 제 12권 3호, 2000, pp.269-279
2. 일본강구조협회 기술위원회 안전성 분과회 내화소위원회 고온강도반 : 구조용강재의 고온시 및 가열후의 기계적 성질 목차
3. 장경호, "적층용접에서 발생하는 변형 및 잔류응력의 특징", 한국강구조학회 학술발표회 논문집, 1999, pp. 194-198