

보수용접시 발생하는 변형 및 응력의 해석 및 정도

Analysis of Deformation and Stress Generated by Repair Welding and Its Accuracy

이상형†

장경호*

Lee, Sang-Hyong

Chang, Kyong-Ho

(논문접수일 : 2004년 5월 2일 ; 심사종료일 : 2004년 10월 29일)

요지

강구조물에 있어서 여러 가지 환경요인에 의해 균열 및 부식 등의 문제가 발생되고 있다. 이는 구조물의 내구성을 저하시키는 요인이 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 용접 보수·보강방법을 사용할 수 있다. 이러한 보수용접은 절단 및 용접과 같은 입열 과정을 필연적으로 수반하고 있다. 따라서 이러한 입열과정에 있어서 발생되는 잔류응력 및 변형의 예측·제어·방지는 구조물의 안전이라는 측면에서 볼 때 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한요소 해석을 수행하여 가스절단 및 아크용접에 의해 얻어진 절단 및 용접 잔류응력과 변형을 구하였으며, 2차원 및 3차원 해석기법에 따른 그 값의 정도를 명확히 하였다. 해석기법에 따라 2차원 및 3차원 해석을 수행하여 얻은 절단 및 용접 잔류응력의 분포 및 그 절대치는 유사한 값을 나타내었다.

핵심용어 : 보수, 용접, 잔류변형, 잔류응력, 2차원 유한요소해석, 3차원 유한요소해석

Abstract

Steel bridges, which have been damaged by load and corrosion, need repair or strengthening. That is a cause of decreasing the durability of structure. In order to solve these problems, welding repair and strengthening methods can be considered. In general, cutting and welding procedure is carried out during the repair welding. Therefore, the investigation of the behavior of residual stress and deformation generated by cutting and welding is very important for safety of structure. Residual stress and deformation produced by gas cutting and arc welding were analyzed using 2D and 3D thermal elasto-plastic FEM. According to the results, the magnitude of temperature was analyzed by 2D-FEM is smaller than that was analyzed using the 3D-FEM at the start and end edge of flange. And the magnitude and distribution of residual stress of perpendicular direction of the cutting line and welding line was analyzed by the 2D-FEM was similar to that was analyzed by 3D-FEM. Therefore, it is possible to predict cutting and welding residual stress by 2D and 3D FEM.

keywords : repair, welding, residual deformation, residual stress, 2D-FE analysis, 3D-FE Analysis

1. 서 론

최근 강교량, 선박, 강관, 철탑과 같은 용접구조물에 있어서 여러 가지 환경요인에 의해 균열 및 부식 등의 문제가 다수 발생하고 있다. 이들 문제들은 그 정도에 따라서 다양한 형태의 문제 해결 방법들이 적용되어질 수 있다. 즉, 이들 문제들을 해결하는 보수·보강 방법으로 손상 규

모가 비교적 작아 구조물 전체에 심각한 영향을 주지 않는 경우, 손상부를 용접에 의해 재융융하거나, 스톱홀을 설치하여 균열의 진전을 막을 수 있다. 또, 그 손상 규모가 비교적 커서 구조물의 안전 및 내하력에 심각한 영향을 줄여지가 있을 경우, 손상부에 덧판을 대거나, 손상부를 절단하고 신판으로 용접이나 볼팅에 의해 교체한다. 이와 같은 보수·보강 방법중 신판으로의 교체는 절단 및 용접

† 책임저자, 정회원·오사카대학 접합과학연구소 특임연구원
전화 : 81-6-6879-8667 ; Fax : 81-6-6879-8689

E-mail: scmtong@jwri.osaka-u.ac.jp

* 정회원·중앙대학교 건설환경공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

공정중 입열에 의한 구조물의 일시적인 강성저하 및 작업 후 새로운 잔류응력의 발생으로 구조물의 한전성 및 내하력 측면에서 그 신뢰성이 완전히 확립되어 있지 않으며, 적절한 보수·보강 가능 규모나 방법 등에 대한 규정이 확립되어 있지 않은 것이 현실이다. 그러나, 보수·보강 작업으로 인한 사하중의 증가가 없으며 힘의 전달효과가 좋고 보수형상이 좋다는 장점이 있어 이용 가능성성이 높다. 이와 같이 강구조물의 보수·보강에 있어 용접 및 절단에 의해 발생되는 응력 및 변형의 예측은 구조물의 안전 및 다양한 상황에 대한 시기 적절한 조치를 위해 중요하다 할 수 있다. 이러한 강구조물의 보수·보강 중 발생하는 응력 및 변형의 예측·제어·방지를 위해 경제적 및 시간적인 이점에 의해 수치해석을 통한 기법이 사용되고 있다. 그리고 최근 강재의 고강도화, 부재의 경량화 경향 등 다양한 제조건들이 변화하고 있다. 따라서 기존의 강구조물 이외에 이와 같은 새로운 제조건들이 적용된 강구조물의 보수·보강에 있어 응력 및 변형의 적절한 예측이 요구^{1)~5)} 되고 있다. 근래 구조물의 해석에 있어서 계산기의 발달로 입체요소를 이용한 3D-FEM해석이 가능해졌다. 그러나 아직은 그 크기의 한계 등이 있어 상황에 따라 2차원 및 3차원 해석을 선택적으로 사용하여야 한다. 즉, 부재 정도 규모의 해석 또는 두께 방향을 고려한 해석이 필요한 경우에는 3차원 해석을 사용하고, 구조물 전체해석에는 2차원 해석을 사용하는 것이 경제적이라 할 수 있다. 따라서 이러한 구조물의 해석에 있어, 2차원 및 3차원 유한요소 해석을 통해 얻을 수 있는 부재 응력 및 변형의 해석 정도에 대해 명확히 할 필요가 있다.

본 연구에서는 보수용접 즉, 가스 절단 및 용접에 의해 발생하는 잔류응력 및 변형의 정도를 평판요소를 이용한 2차원 및 입체요소를 이용한 3차원 열탄소성 유한요소해석을 통해 명확히 하였다.

2. 해석조건

2.1 해석이론

2.1.1 기학학적 비선형성

1) 변위-변형률 관계식

경계조건이 변화하여 경계조건을 미리 정할 수 없는 접촉문제 및 대변형 문제와 같은 경우 구조물의 거동을 하중 또는 시간의 경과에 대해서 정도 높은 해석을 위해 기하학적 비선형성을 고려할 필요가 있다.

이러한 변위-변형률 관계에 있어서, $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \gamma_{yz} \gamma_{zx} \gamma_{xy}\}^T$ 요소의 전변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_o\} + \{\epsilon_L\} \quad (1)$$

여기서, $\{\epsilon_o\}$ 와 $\{\epsilon_L\}$ 는

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

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

$\{\epsilon\}$ 을 증분형으로 나타내면,

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

여기서, $[B]$: 변위-변형률 매트릭스

2) 응력-변형률 관계식

열 응력장은 온도 분포에 따라 열변형이 변하는 것을 초기변형으로 취급하는데, 각 유한 요소를 구성하는 재료의 기계적 성질이 온도에 따라 변하기 때문에 이 영향을 고려하여 절점력과 절점변위의 관계식을 구하고, 재료의 기계적 성질이 온도에 의존함을 고려할 때 온도 변화 dT 에 의한 영향을 일괄적으로 $\{c\}dT$ 로 나타내면 응력-변형률 관계식은 다음 식처럼 쓸 수 있다.

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

여기서, $[D_d]$: 탄성의 경우 $[D_e^d]$ 와
소성의 경우 $[D_p^d]$ 로 분리된다.

$\{c\}$: 온도 변화에 의한 영향

3) 평형방정식

유한요소의 절점력 $\{F\}$ 과 절점변위 $\{w\}$ 와의 관계를 가상일의 원리를 적용하여 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

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

여기서, $[K]$: 요소의 강성 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 재구성하여, 경계조건을 고려해 연립 일차 방정식을 풀면, 절점변위 증분 $\{dw\}$ 가 구해진다.

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

2.1.2 재료학적 비선형성

1) 탄성역

재료가 탄성거동을 나타내는 경우 응력 $\{\sigma\}$ 와 탄성변형율 $\{\epsilon^e\}$ 는 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\epsilon^e\} \quad (5)$$

여기서, $[D^e]$ 는 탄성 매트릭스를 나타내며 온도가 dT 만큼 변화할 때 식(5)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\sigma + d\sigma\} = [D_d^e] \{\epsilon^e + d\epsilon^e\} \quad (6)$$

여기서, $[D_d^e]$: $[D^e] + \frac{d[D^e]}{dT} dT$

식 (6)에 식 (5)을 대입하여 $\{d\sigma\}$ 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D_d^e] \{d\epsilon^e\} + \frac{d[D^e]}{dT} dT \{d\epsilon^e\} \quad (7)$$

전변형율증분 $\{d\epsilon\}$ 은 탄성변형율증분 $\{d\epsilon^e\}$ 과 열변형율증분 $\{d\epsilon^T\}$ 의 합이고 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^T\} \quad (8)$$

열변형율증분 $\{d\epsilon^T\}$ 는 선팽창계수 $\{\alpha\}$ 와 온도증분 dT 의 곱이 된다.

$$\{d\epsilon^T\} = \{\alpha\} dT \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \{\alpha\} = \left\{ \alpha_o + \frac{d\alpha_o}{dT} T \right\}$$

이상으로부터, 탄성역에서 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D_d^e] \{d\epsilon\} = \{c\} dT \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \{c\} = [D_d^e] \{\alpha\} - \frac{d[D^e]}{dT} \{\epsilon^e\}$$

2) 소성역

항복응력 σ_y 를 온도 T 와 소성변형율 ϵ^p 의 함수라고 할 때

$$\sigma_y = \sigma_y(T, \epsilon^p) \quad (11)$$

발생하는 응력은 다음식의 조건을 만족할 때 재료는 항복한다.

$$f(\{\sigma\}, \sigma_y) = 0 \quad (12)$$

재료가 소성역에 있어서 부하상태에 있는 경우, 다음식의 조건을 만족한다.

$$df = 0 \quad (13)$$

따라서,

$$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \epsilon^p} \right\}^T \{d\epsilon^p\} + \frac{\partial f}{\partial T} dT = 0 \quad (14)$$

또는, 용접재료의 소성항복 관계는 $f=0$ 를 만족하는 것으로 표현하고 소성역에 있어서 비압축성을 나타내며, $f=0$ 를 소성포텐셜이라고 하면, 소성변형율증분 $\{d\epsilon^p\}$ 는 다음식으로 계산된다.

$$\{d\epsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (15)$$

소성역에 있어서 전변형율증분 $\{d\epsilon\}$ 는 다음식이 된다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^T\} \quad (16)$$

이와 같이 소성역에서 구성방정식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\{d\sigma\} = [D_d^p] \{d\epsilon\} - \{c\} dT \quad (17)$$

$$\text{여기서, } S = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_d^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \epsilon^p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$$

$$[D_d^p] = [D_d^e] - [D_d^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_d^e] / S$$

$$\{c\} = [D_d^p] \{\alpha\} + \frac{[D_d^p] d[D^e]}{[D_d^e] dT} \{d\epsilon^e\} + \frac{[D_d^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \frac{\partial f}{\partial T}}{S}$$

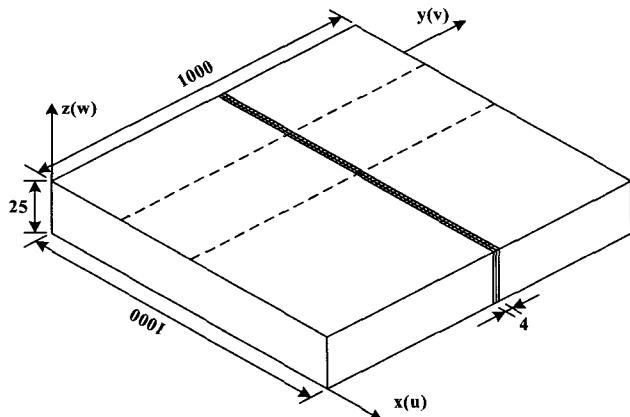


그림 1 Cutting Model

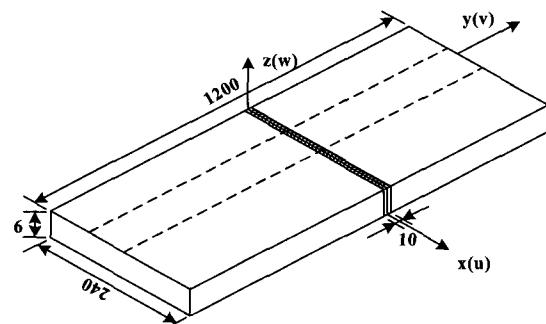


그림 2 Welding Model

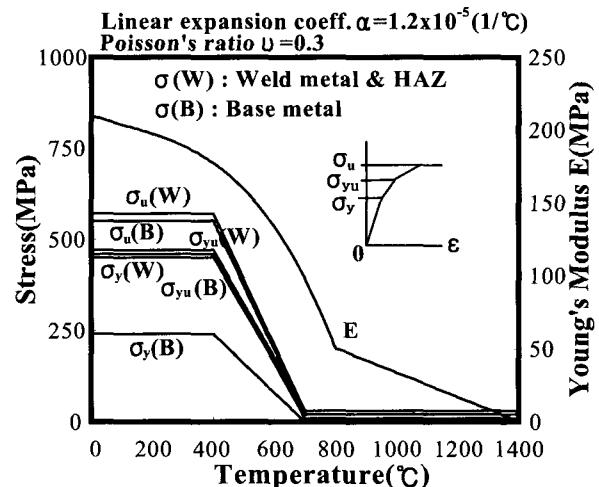
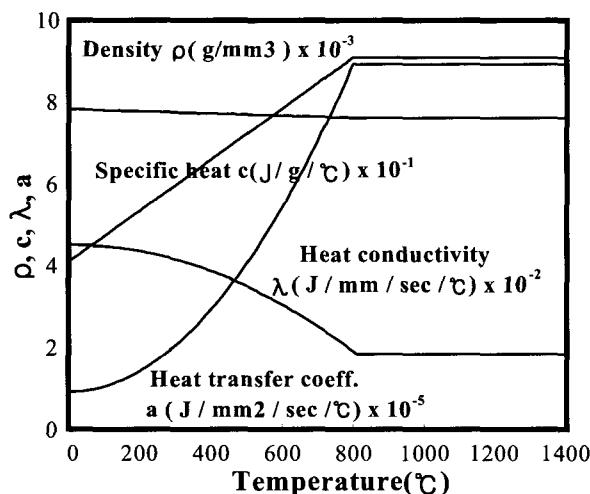


그림 3 Material Properties of Base metal used in Analysis

2.2 해석모델

해석 모델은 그림 1 및 그림 2와 같다. 절단모델은 그림 1과 같이 $1000 \times 1000 \times 25\text{mm}$ 크기의 연강(SS400)판을 사용하였으며, 이 평판에 2mm 크기의 절단폭을 상정하여 1Pass에 절단을 수행하는 것으로 하였다. 용접모델은 그림 2와 같이 $600 \times 240 \times 6\text{mm}$ 크기의 2장의 연강(SS400)판에 최대 6mm 크기의 초기변형을 준 것으로 설정하여 두 판의 용접을 수행하는 것으로 하였다. 그림 1 및 그림 2의 해석 모델상에서 점선은 절단 및 용접 잔류응력의 주목점을 나타내고 있다.

절단은 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ 정도의 온도로 10초간 단부($x=0, y=0$)를 예열한 후 $v=300(\text{mm/min})$ 의 절단속도로 절단하는 것으로 상정하였으며, 용접은 $Q=1300(\text{J/mm})$ 의 입열량과 $v=2(\text{mm/sec})$ 의 용접속도로 용접을 진행하는 것으로 상정하여 해석을 수행하였다. 또한 그림 3에 나타낸

것과 같은 재료의 물리정수 및 기계적 성질의 온도의존성을 고려하여 2차원 및 3차원 탄소성해석을 수행하였다.

2차원 및 3차원 탄소성해석 모두 실험 및 현장에서의 절단 및 용접과 동일한 상황을 제현하기 위하여 강체 변형이 발생하지 않도록 강체변형과 관련된 절점만 구속하는 것으로 구속조건을 설정하였다.

2.3 온도분포

절단 및 용접구조물의 열탄소성 해석에 있어서 가장 중요한 것은 열이 실제 구조물에서 하중과 동일한 역할로서 작용하기 때문에 열탄소성 해석에 앞서 해석에 사용될 온도이력을 구하는 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2차원 및 3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 온도이력을 구하였으며, 그 결과의 한 예를 그림 4 및 그림 5

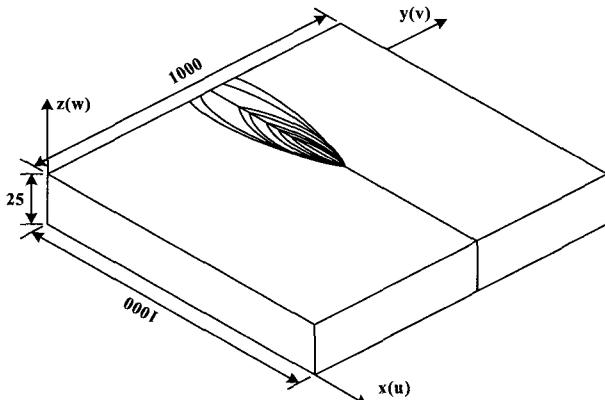


그림 4 Distribution of Temperature in Cutting Model

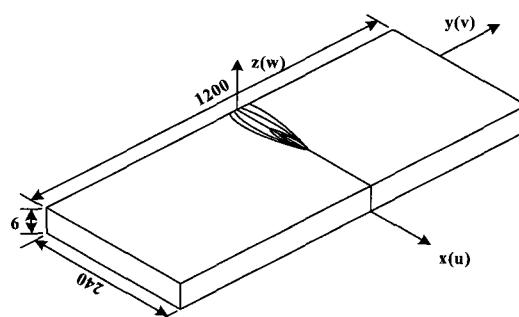


그림 5 Distribution of Temperature in Welding Model

에 나타내었다. 결과를 보면 열원이 시단부에서 절단 및 용접선방향(x 방향)으로 이동하기 때문에 등온선 형상이 시간이 경과함에 따라 변함을 알 수 있다.

2.4 해석 방법

4절점 및 8절점 등방입체요소를 사용한 2차원 및 3차원 탄소성해석에 의해 절단잔류응력을 예측하는 경우 2차원 및 3차원 해석수법에 따른 정도차를 검토하기 위하여 3차원 탄소성 해석을 아래와 같이 4가지 해석 수법으로 해석을 수행하여 2차원 결과와 비교하였다. 또한, 각변형은 두께방향 온도구배에 의해 발생되는 것으로 2차원 해석의 경우 두께방향 온도구배가 발생하지 않는 관계로 3차원 해석수법에 따른 결과만을 비교하였다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 온도

3.1.1 절단 온도분포

2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($y=500.5$, $z=21.9mm$)의 절단선 방향의 온도분포에 주목하여 그림

6(a), (b)에 나타내었다. 그림안의 1~20까지의 숫자는 그림 1의 절단모델을 절단선 방향으로 균일하게 20개의 매쉬로 분할하여 그 요소의 절점번호를 순서대로 나타낸 것이다. 즉, 1번이 시단부이고 20번이 종단부이다.

2차원 및 3차원 절단을 위한 비정상 열전도 해석결과를 보면, 단부에서 온도 크기의 차이는 약간 보이나, 전체적으로 온도분포의 크기 및 형상이 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

3.1.2 용접 온도분포

2차원 및 3차원 용접에 대해서 평판 상단($y=120$, $z=5mm$)용접선 방향의 온도분포에 주목하여 그림 7(a), (b)에 나타내었다.

2차원 및 3차원 용접을 위한 비정상 열전도 해석결과를 보면, 전체적으로 온도분포의 크기 및 형상이 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 잔류응력

3.2.1 절단 잔류응력

2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($x=500$, $z=21.9mm$)의 절단선 직각방향(y) 및 절단선 방향(x)의 잔류응력 성분에 주목하여 그림 8(a), (b)에 나타내었다.

잔류응력은 절단선 근방($y=490, 510mm$)에서는 입열에 의해 열팽창 했던 부재가 냉각되면서 열수축함으로 인해 인장응력을 나타내고 있다.

절단면에서는 절단되었으므로 응력의 크기가 "0"을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 2차원 및 3차원 유한요소해석에 의한 잔류응력 결과를 비교해보면, 절단선 직각방향 잔류응력의 분포는 크기와 분포가 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

절단선 직각방향의 잔류응력 결과와 마찬가지로 절단선 방향의 잔류응력의 분포는 크기와 분포형상이 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 용접 잔류응력

2차원 및 3차원 용접에 대해서 평판 상단($x=120$, $z=5mm$)의 용접선 직각방향(y) 및 절단선 방향(x)의 잔류응력 성분에 주목하여 그림 9(a), (b)에 나타내었다.

잔류응력은 용접선 근방($y=-10, 10mm$)에서는 입열에 의해 열팽창 했던 부재가 냉각되면서 열수축함으로 인해 인장응력을 나타내고 있으며, 응력평형을 이루기 위해 이외의 부위에서는 압축응력을 나타내고 있다. 또한, 2차원 및 3차원 유한요소해석에 의한 잔류응력 결과를 비교해 보면, 용접선 직각방향 잔류응력은 분포 및 크기가 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 해석 방법에 따른 잔류응력

절단 및 용접에 대해서 2차원 및 3차원 각각의 해석 기법에 따른 해석 결과를 평판 상단의 절단 및 용접선 직각방향(y 방향)의 잔류응력 성분에 주목하여 그림 10(a), (b)에 나타내었다.

이를 정량적으로 비교하기 위하여 각각의 경우에 대한 최대인장응력 값을 표 1에 나타내었다. 이상의 결과로부터 2차원 및 3차원 각각의 해석이론에 따른 잔류응력의 분포 및 그 최대값은 상당히 유사한 값을 나타낸을 알 수 있다.

3.3 잔류변형

3.3.1 절단 잔류변형

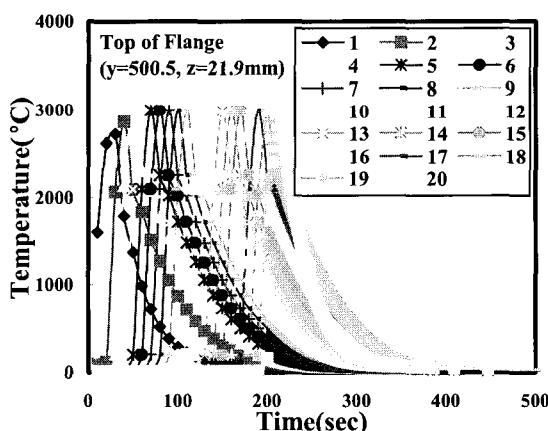
2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($x=500$, $z=25mm$)의 절단선 직각방향(y)의 각변형에 주목하여 그림 11(a)에 나타내었다.

각변형은 그 크기가 최대 약 $0.002mm$ 정도를 나타내었다. 각변형은 두께방향의 온도 구배에 의해 생성되는 것으로 절단은 용접의 경우와는 달리 각장에 따른 두께방향의 온도구배의 형성이 적으며, 입열후 열수축에 의해 인장응력이 발생되는 것이 일반적이나 절단후 요소강성이 없어지기 때문에 이와 같이 적은 변형값을 나타낸 것으로 사료된다. 3차원 해석수법별 잔류변형 결과를 비교해보면 분포 및 크기가 비슷한 것을 알 수 있다.

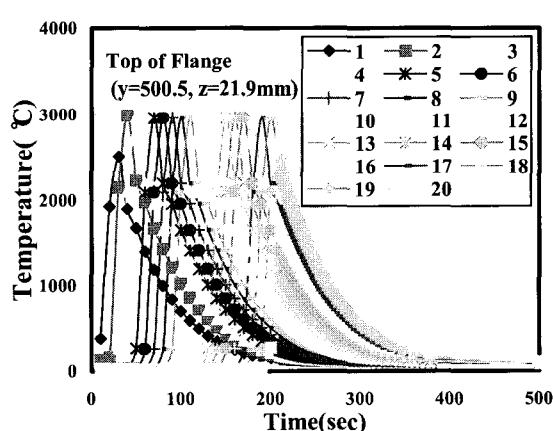
표 1 Residual Stress with Respect to Analysis Condition

Unit : MPa

		2Dimension	3Dimension			
			Small	Large	Small+RIM	Large+RIM
Cutting	σ_x	238.56	254.97	254.92	251.44	251.39
	$\bar{\sigma}$	241.45	239.06	239.05	239.95	239.96
Welding	σ_x	355.29	346.73	347.52	345.75	346.86
	$\bar{\sigma}$	238.36	237.73	237.52	237.66	237.61

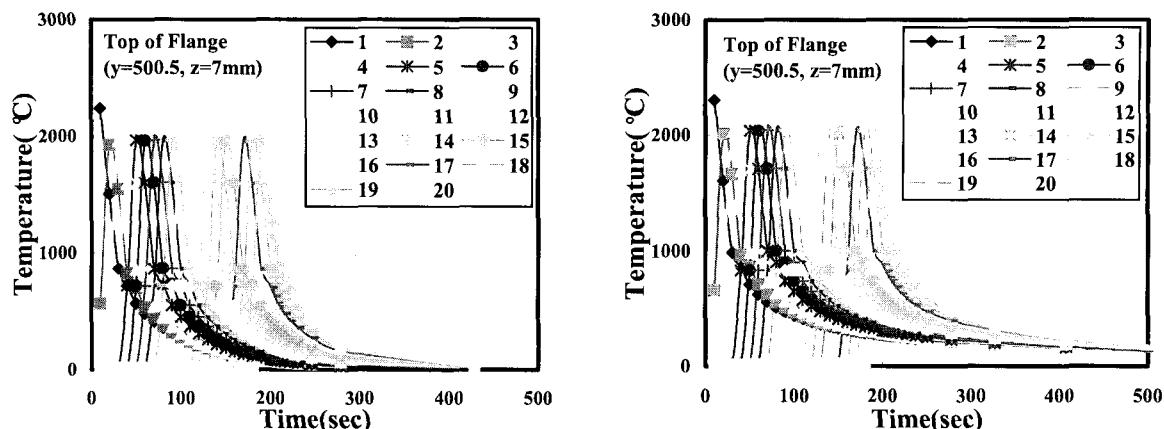


(a) 2-Dimensional FEA Analysis



(b) 3-Dimensional FEA Analysis

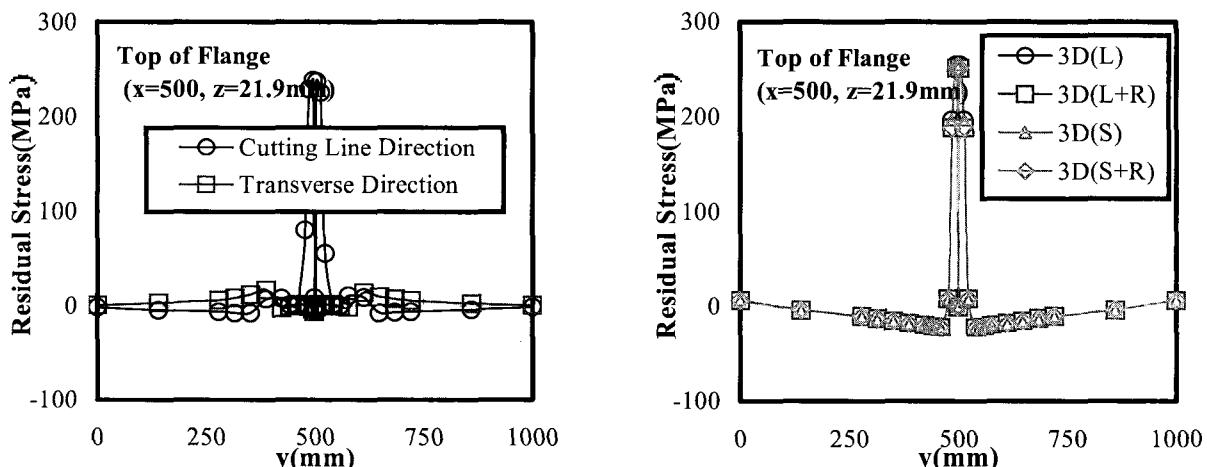
그림 6 Distribution of Temperature in Cutting Model



(a) 2-Dimensional FE Analysis

(b) 3-Dimensional FE Analysis

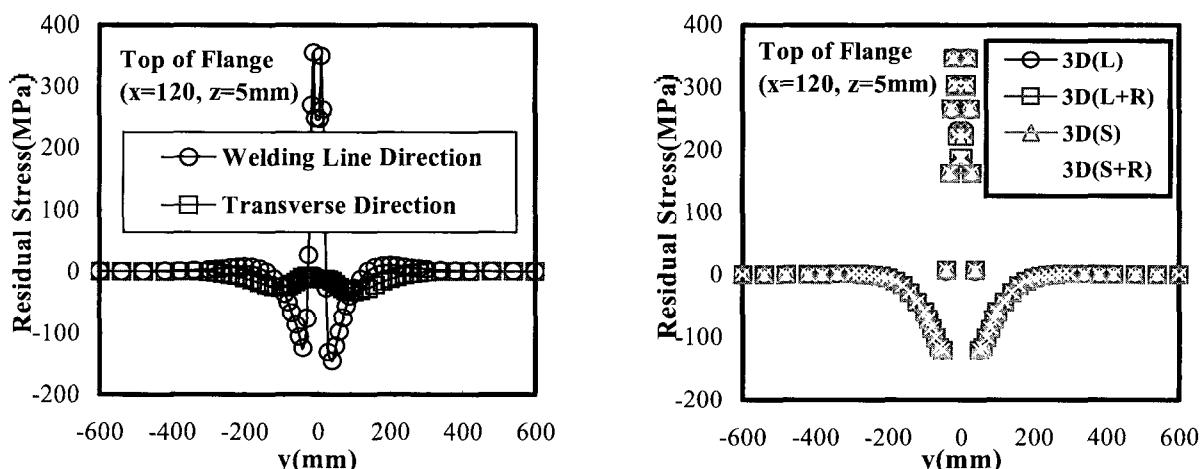
그림 7 Distribution of Temperature in Welding Model



(a) 2-Dimensional FE Analysis

(b) 3-Dimensional FE Analysis

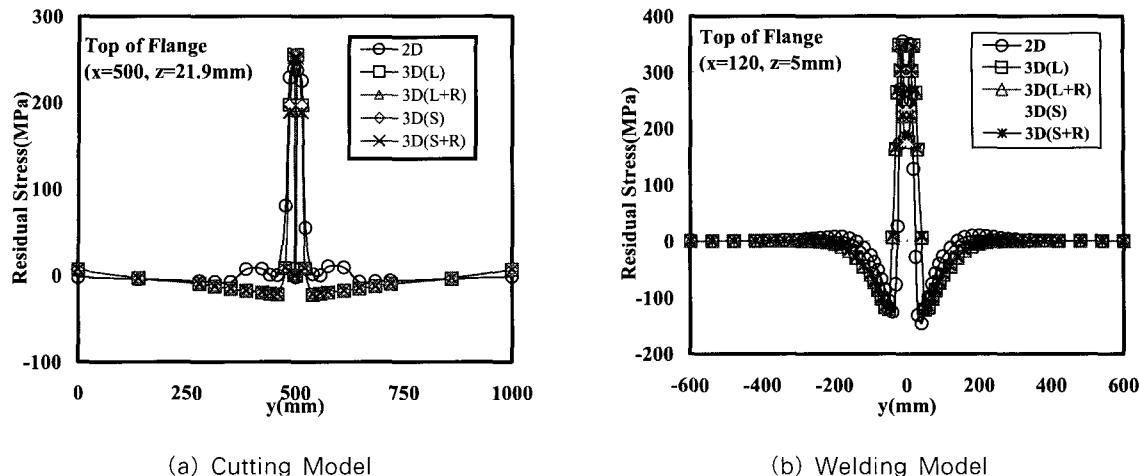
그림 8 Distribution of Residual Stress in Cutting Model



(a) 2-Dimensional FE Analysis

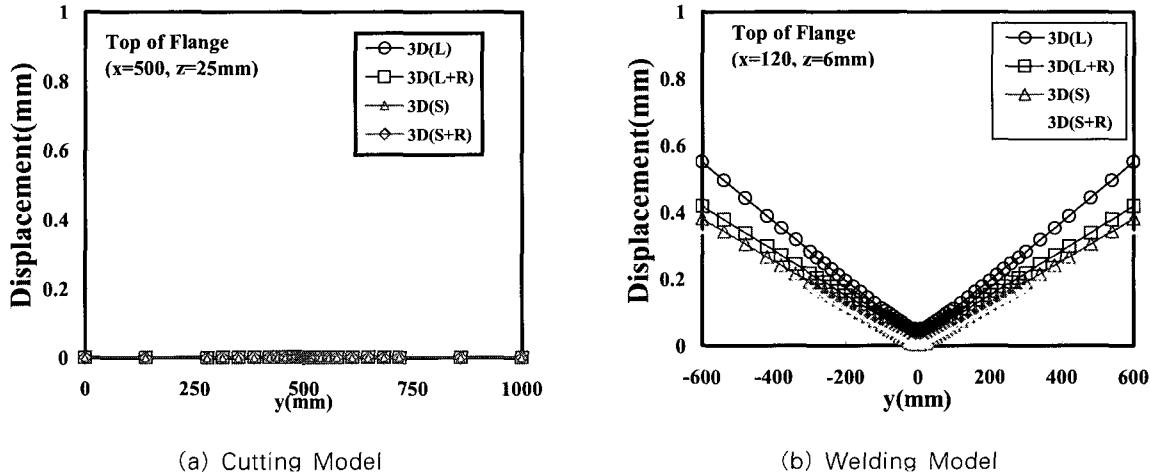
(b) 3-Dimensional FE Analysis

그림 9 Distribution of Residual Stress in Welding Model



(a) Cutting Model (b) Welding Model

그림 10 Distribution of Residual Stress with Respect to Analysis Method



(a) Cutting Model (b) Welding Model

그림 11 Angular Distortion with Respect to Analysis Method

3.3.2 용접 잔류변형

2차원 및 3차원 용접에 대해서 평판 상단($x=120$, $z=6mm$)의 용접선 직각방향(y)의 각변형에 주목하여 그림 11(b)에 나타내었다.

각변형은 그 크기가 최대 약 $0.5mm$ 정도를 나타내었다. 미소변형 이론(①)을 적용한 경우에 비해 대변형 이론(②)을 적용한 경우가 용접선으로부터 면 방향으로 갈수록 변형량의 절대치가 다소 커지는 현상을 나타내고 있다. 또한 선택적 저감적분법을 사용하여 프로그램 ①과 ②를 개량한 경우(③, ④), 프로그램 ①, ②에 의한 해석 결과와 그 절대값의 차이는 있으나 유사한 현상을 나타내고 있다.

3.4 해석프로그램의 검증

본 연구에 사용된 프로그램의 검증은 수차례 기 발표 논

문을 통해 이루어졌으며 추가로 절단 및 용접 실험을 수행하여 그 결과를 바탕으로 해석 프로그램의 타당성을 다시 한번 검증하였다.

3.4.1 실험 및 해석 조건

그림 12 및 그림 13에 절단실험 모델의 치수 및 형상을 나타내었다.

실험 재료는 SM400 강재를 사용하였으며, $910 \times 598 \times 25mm$ 크기의 평판을 그림 12에서와 같이 y 방향으로 절단하였다. 절단시 사용되어진 노즐은 TW'103 30bar 3번이며, 절단 시작부에 10초간 예열을 행한 후 $360mm/min$ 의 절단속도로 1pass 절단하였다. 절단이 완료된 판에 그림 13과 같이 절단 시작부($x=30mm$) 및 절단 종료부($x=880mm$)에 각각 2축 strain gage를 부착하여 절단 선 방향 및 절단선 직각방향의 잔류응력을 측정하였다. 실

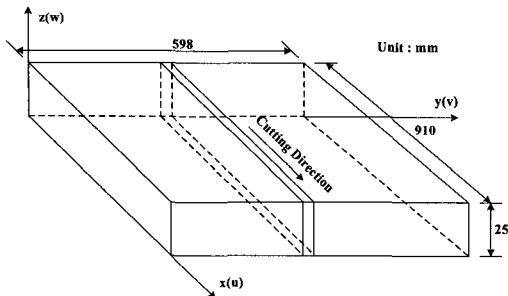


그림 12 Cutting Model

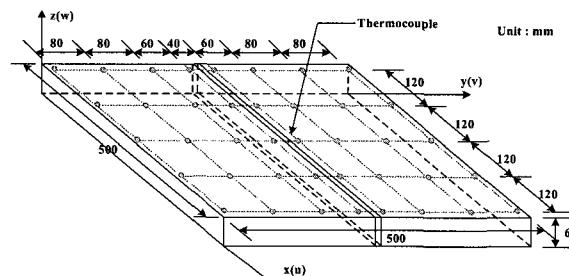


그림 13 Welding Model

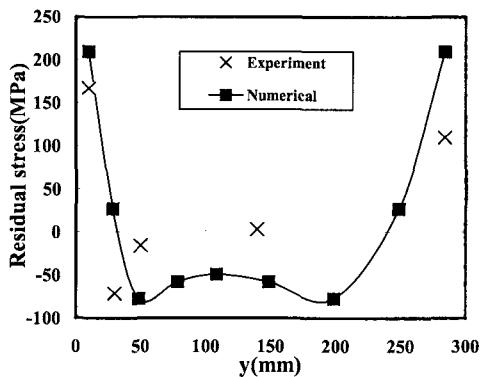
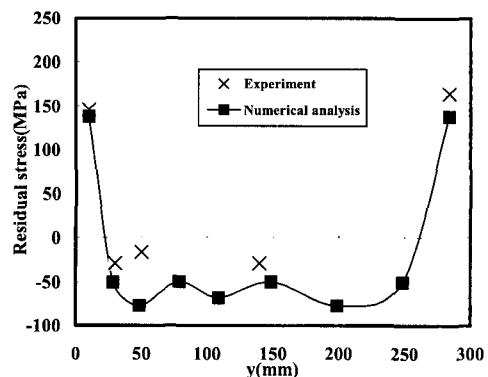
(a) At $y = 30\text{mm}$ (b) At $y = 880\text{mm}$

그림 14 The Comparison of Experiment and Analysis Results(Residual Stress)

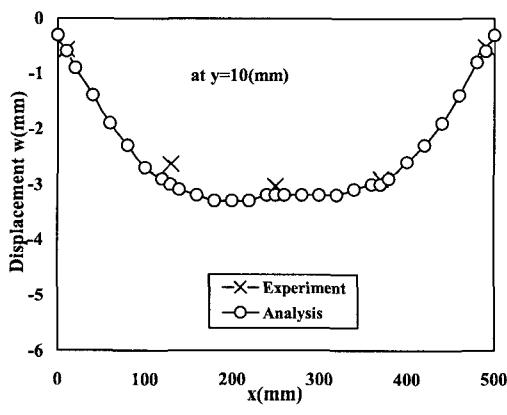
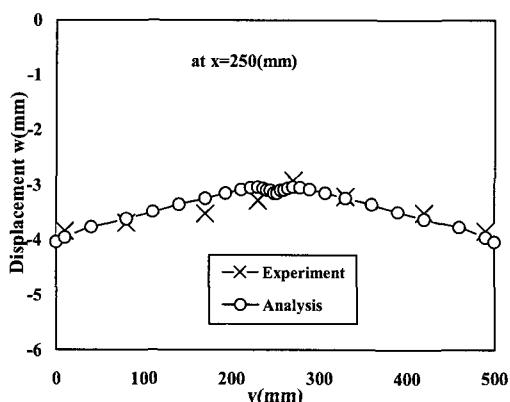
(a) At $y = 10\text{mm}$ (b) At $x = 250\text{mm}$

그림 15 The Comparison of Experiment and Analysis Results(Angular Distortion)

험에 사용된 조건과 동일한 조건으로 해석을 수행하여 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다.

그림 13에 용접실험 모델의 치수 및 형상을 나타내었다. 실험 재료는 SM400강재를 사용하였으며, $500 \times 500 \times 6\text{ mm}$ 크기의 평판을 그림 13에서와 같이 y 방향으로 1pass 용접하였다.

3.4.2 실험 및 해석 결과

그림 14에 절단실험 및 해석을 수행하여 얻어진 잔류응

력을 나타내었다. 그림 14(a)는 절단 시작부($y=30\text{mm}$)의 잔류응력을 그림 14(b)는 절단 종료부($y=880\text{mm}$)의 잔류응력을 나타낸 것이다. 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 15에 용접실험 및 해석을 수행하여 얻어진 잔류변형을 나타내었다. 그림 15(a)는 용접 시작부($y=10\text{mm}$)의 잔류변형을 그림 15(b)는 용접 중간부($y=250\text{mm}$)의 잔류변형을 나타낸 것이다. 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 평판의 절단에 의한 절단부의 온도 분포와 잔류응력 및 변형의 거동을 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하여 각각의 해석기법에 따른 해석 결과의 정도를 명확히 하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 절단 및 용접시 발생한 절단 및 용접직각방향과 절단 및 용접방향의 잔류응력 크기 및 분포는 2차원 및 3차원 4가지 해석 이론(미소변형이론, 대변형이론, 미소변형이론+선택적 저감적분법, 대변형이론+선택적 저감적분법)에 의한 해석 결과 본 해석 모델에서는 모두 유사한 분포 및 절대치를 나타내었다.
- 2) 해석 결과를 실험을 통하여 검증하였다.
- 3) 절단 및 용접시 절단 및 용접부 근방에는 입열후 냉각에 따른 열수축으로 인해 인장응력이 발생하였으며, 다소 멀리 떨어진 곳에서는 응력평형을 이루기 위해 압축응력이 발생하였다.
- 4) 절단시 발생한 잔류변형은 절단 후 요소의 강성상실로 인해 적은 변형량을 나타내었다.
- 5) 용접시 발생한 잔류변형은 미소변형 이론을 적용한 경우에 비해 대변형 이론을 적용한 경우가 용접선으로

부터 면 방향으로 갈수록 변형량의 절대치가 다소 커졌다.

참 고 문 헌

1. 장경호, 이상형, 전준태, “공용중 보수용접에 의한 용접부의 응력 및 변형의 거동”, 한국강구조학회 논문집 제12권 3호, 2000, pp.269~279
2. 장경호, 이상형, 이진형 “3차원 유한요소해석에 의한 용접응력과 변형의 해석 및 정도”, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집 제13권 제2집, 2000, pp.11~17
3. 장경호, 김재민, 이상형, “절단시 발생되는 강판의 잔류응력 특징”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000, pp.177~180
4. Chang K. H., Lee S. H., Jeon, J. T., “Behavior of Stress and Deformation Generated by Cutting under Loading”, 6th Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges(JSSB-JK6), 2001, pp. 559~564
5. Chang K. H., Lee S. H., “Characteristics of Stress and Deformation Generated by Cutting for the Repair Welding”, SEWC2002, 2002, pp.431