

2차원과 3차원 FEM 해석에 의한 절단응력의 해석 및 정도

Prediction of Cutting Stress by 2D and 3D-FEM Analysis and Its Accuracy

장 경 호† 이 상 형* 이 진 형* 강 재 훈**
Chang, Kyong-Ho Lee, Sang-Hyong Lee, Chin-Hyung Kang, Jae-Hoon
(논문접수일 : 2003년 3월 10일 ; 심사종료일 : 2003년 8월 28일)

요 지

최근 강교량이나 선박과 같은 강구조물에 있어서 여러 가지 환경요인에 의해 균열 및 부식 등의 문제가 다수 발생되어지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 보수용접을 사용할 수 있다. 이러한 보수용접은 절단이라는 과정을 필연적으로 수반하고 있다. 따라서 이러한 절단 중 얻어지는 잔류응력의 예측은 구조물의 안전이라는 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한요소 해석을 수행하여 가스절단에 의해 얻어진 절단잔류응력을 구하였으며, 2차원 및 3차원 해석기법의 정도를 명확히 하였다. 2차원 및 3차원 해석을 수행하여 얻은 절단잔류응력의 분포 및 그 절대치는 유사한 값을 나타내었다.

핵심용어 : 절단, 보수, 절단응력, 3차원 유한요소해석, 탄소성해석

Abstract

Steel bridges, which have been damaged by load and corrosion, need repair or strengthening. In general, before the repair welding procedure, cutting procedure carry out. Therefore, the investigating of the behavior of stress generated by cutting is so important for safety of structure. Residual stress produced by gas cutting was 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 program at the start and end edge of flange. And the magnitude and distribution of residual stress of perpendicular to the cutting line was analyzed by the 2D FEM program was similar to that was analyzed by the 3D FEM program. Therefore, it is possible to predict of cutting stress by 2D and 3D FEM.

Keywords : cutting, repair, cutting stress, 3d fe analysis, elasto plastic-analysis

1. 서 론

최근 강교량이나 선박과 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 규모가 비교적 작아 구조물 전체에 심박한 영향을 주지 않는 경우, 손상부를 용접에 의해 재용융하거나, 스톱홀을 설치하여 균열의 진

전을 막는다. 또, 그 손상 규모가 비교적 커서 구조물의 안전 및 내하력에 심각한 영향을 줄 여지가 있을 경우, 손상부를 절단하고 신판으로 용접이나 볼팅에 의해 교체한다. 그러나 이와 같은 용접에 의한 보수·보강 방법중 신판으로의 교체는 절단 및 용접 공정중 입열에 의한 구조물의 일시적인 강성저하 및 작업후 새로운 잔류응력의 발생으로 구조물의 안전성 및 내하력 측면에서 그 신뢰성이 확립되어 있지 않았으며, 적절한 보수·보강 가능 규모나 방법 등에 대한 규정이 확립되어 있지 않은 것이 현실이다. 이와

† 책임저자, 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 조교수
전화: 02-820-5337 ; Fax: 02-823-5337
E-mail: changkor@cau.ac.kr

* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원 · 중앙대학교 건축학과 조교수

· 이 논문에 대한 토론을 2003년 12월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

같이 강구조물의 보수·보강에 있어 용접 및 절단에 의해 발생하는 응력 및 변형의 예측은 구조물의 안전 및 다양한 상황에 대한 시기 적절한 조치를 위해 중요하다 할 수 있다. 이러한 강구조물의 보수·보강중 발생하는 응력 및 변형의 예측·제어·방지를 위한 방법으로서 경제적 및 시간적인 이점에 의해 수치해석이 사용되어지고 있다. 그리고 최근 강재의 고강도화, 부재의 경량화 경향 등 다양한 제조조건들이 변화하고 있다. 따라서 기존의 강구조물 이외에 이와 같은 새로운 제조조건들이 적용된 강구조물의 보수·보강에 있어 응력 및 변형의 적절한 예측이 요구^{1)~7)}되어지고 있다. 근래 구조물의 해석에 있어서 계산기의 발달로 입체요소를 이용한 3D-FEM 해석이 가능해졌다. 그러나 아직은 그 크기의 한계 등이 있어 상황에 따라 2차원 및 3차원 해석을 선택적으로 사용하여야 한다. 즉, 부재 정도의 해석 또는 두께 방향을 고려한 해석이 필요한 경우에는 3차원 해석을 사용하고, 구조물 전체해석에는 2차원 해석을 사용하는 것이 경제적이다. 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 변형을 평판요소를 이용한 2차원 및 입체요소를 이용한 3차원 열탄소성 유한요소해석을 통해 명확히 하였다.

2. 해석조건

2.1 해석이론

2.1.1 변위-변형률 관계식

요소의 전변형률

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\}^T$$

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

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

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

$\{\epsilon\}$ 을 증분형으로 나타내면,

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

$[B]$: 변위-변형률 매트릭스

2.1.2 응력-변형률 관계식

응력-변형률 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

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

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

여기서,

$[D_d]$: 탄성의 경우 $[D_e^d]$ 와,

소성의 경우 $[D_p^d]$ 로 분리된다.

$\{c\}$: 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력 증분에서의 영향

2.1.3 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-변형률 관계식으로부터 요소의 변형이 계산되고, 그리고 구성 방정식으로부터 응력을 계산할 수 있게 된다.

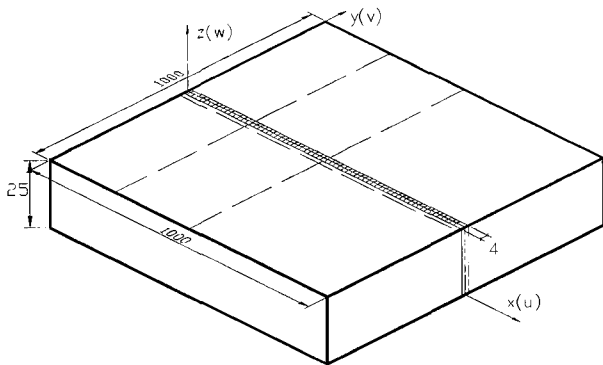


그림 1 Cutting Model

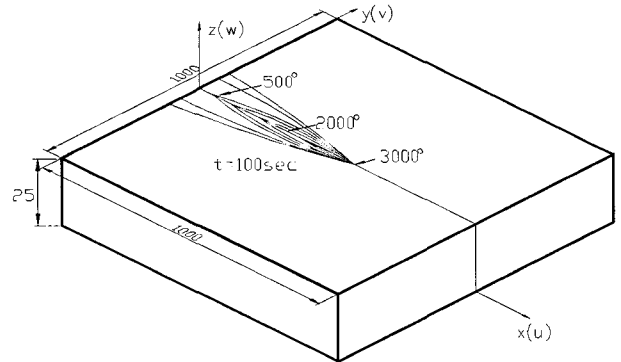


그림 2 Cutting Temperature Contour

2.2 해석모델

해석 모델은 그림 1과 같이 1000×1000×25mm 크기의 연강(SM400)판을 사용하였으며, 이 평판에 2mm 크기의 절단폭을 상정하여 1Pass에 절단을 수행하는 것으로 하였다. 그림 1의 해석 모델상에서 점선은 절단 잔류응력의 주목점을 나타내고 있다. 절단은 850~900℃ 정도의 온도로 10초간 단부(x=0, y=0)를 예열한 후 v=300(mm/min)의 절단속도로 절단하는 것으로 상정하여 해석을 수행하였다. 또한 그림 3에 나타낸 것과 같은 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도 의존성⁸⁾을 고려하여 2차원 및 3차원 탄소성 해석을 수행하였다.

2.3 온도분포

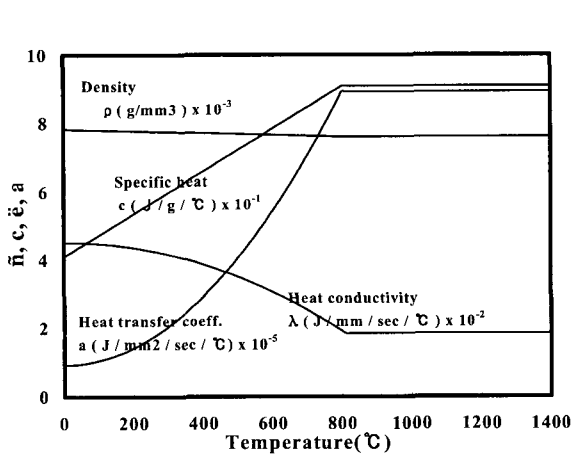
절단 구조물의 열탄소성 해석에 있어서 가장 중요한 것은 열이 실제 구조물에서의 하중과 동일한 역할로서 작용하기 때문에 열탄소성 해석에 앞서 해석에 사용될 온도 이력을 구하는 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2

차원 및 3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 온도 이력을 구했으며, 그 결과의 한 예를 그림 2에 나타내었다. 결과를 보면 열원이 시단부에서 절단선방향(x방향)으로 이동하기 때문에 등온선 형상이 시간이 경과함에 따라 변함을 알 수 있다.

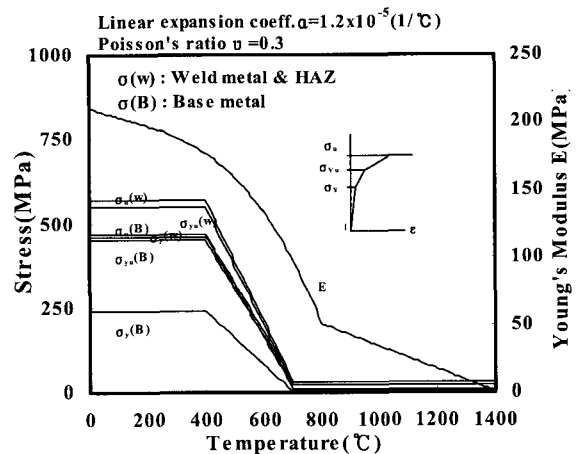
2.4 해석 방법

4절점 및 8절점 등방입체요소를 사용한 2차원 및 3차원 탄소성 해석에 의해 절단 잔류응력을 예측하는 경우 2차원 및 3차원 해석수법에 따른 정도차를 검토하기 위하여 3차원 탄소성 해석을 아래와 같이 4가지 해석 수법으로 해석을 수행하여 2차원 결과와 비교하였다.

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



(a) Physical Constants



(b) Mechanical Properties

그림 3 Material Constants

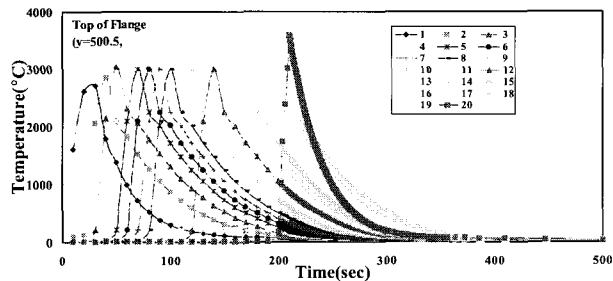
프로그램

- ④ 면의 전단성분만 요소내에서 일정한 것으로 평가한 선 택적 저감적분법에 의해 ②을 개량(LARGE+RIM)한 프로그램

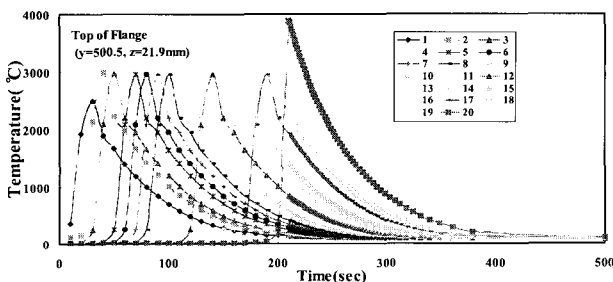
3. 결과 및 고찰

3.1 온도분포

2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($y=500$, $z=21.9mm$)의 절단선 방향의 온도분포에 주목하여 그



(a) 2-D Analysis



(b) 3-D Analysis

그림 4 Cutting Temperature

림 4(a), (b)에 나타내었다. 그림안의 1~20까지의 숫자 는 그림 1의 절단모델을 절단선 방향으로 균일하게 20개 의 매쉬로 분할하여 그 요소의 절점번호를 순서대로 나타 낸 것이다. 즉, 1번이 시단부이고 20번이 종단부이다.

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

3.2 절단 잔류응력

2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($x=225$, $z=21.9mm$ 및 $x=500$, $z=21.9mm$)의 절단선 직각방향 (y)의 잔류응력 성분에 주목하였다. 그림 5에는 2차원 절 단 잔류응력, 그림 6(a)~(d)에는 3차원 각 해석방법별 절단 잔류응력을 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 나타 내고 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 2차원 및 3차원 유한요 소해석에 의한 잔류응력 결과를 비교해보면, 절단선 직각 방향 잔류응력의 분포는 크기와 분포가 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

또한, 2차원 및 3차원 절단에 대해서 평판 상단($y=495.5$, $z=21.9mm$)의 절단선 방향(x)의 잔류응력 성분에 주목 하였다. 그림 7에는 2차원 절단 잔류응력, 그림 8(a)~ (d)에는 3차원 각 해석방법별 절단 잔류응력을 나타내 었다.

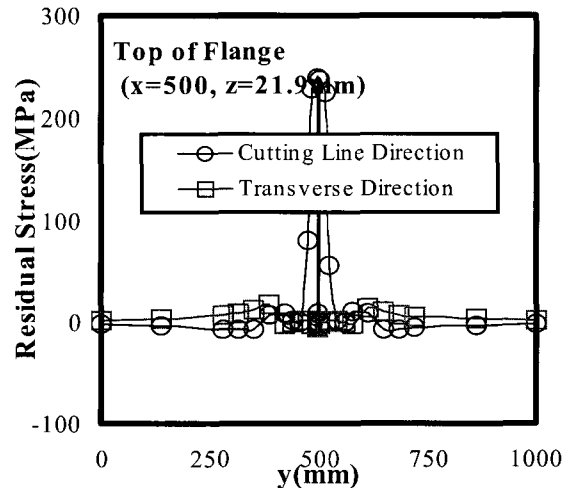
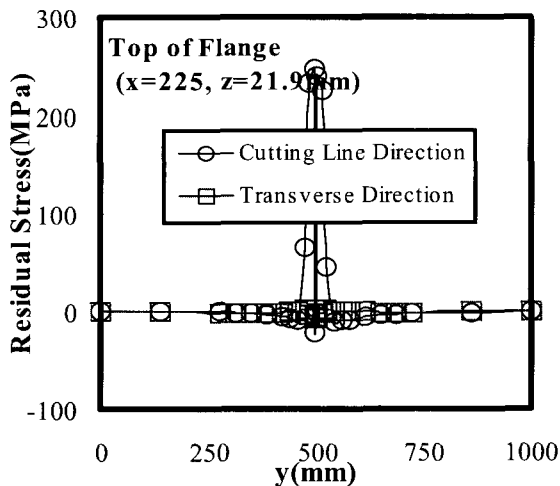
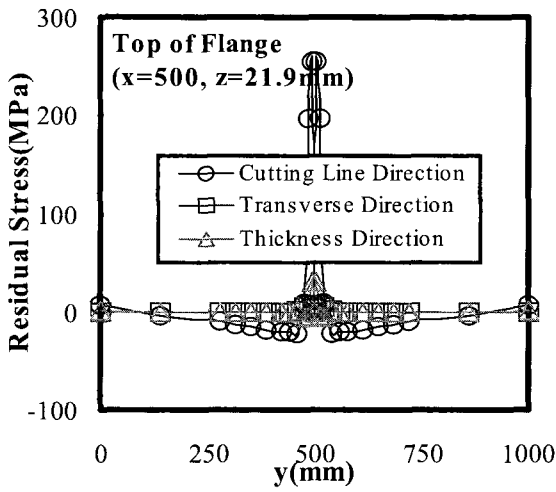
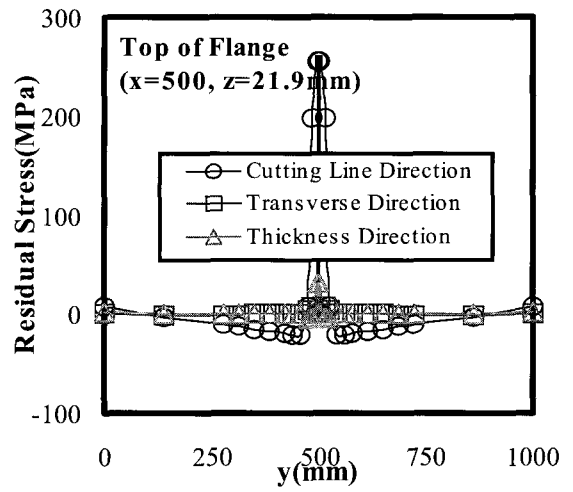


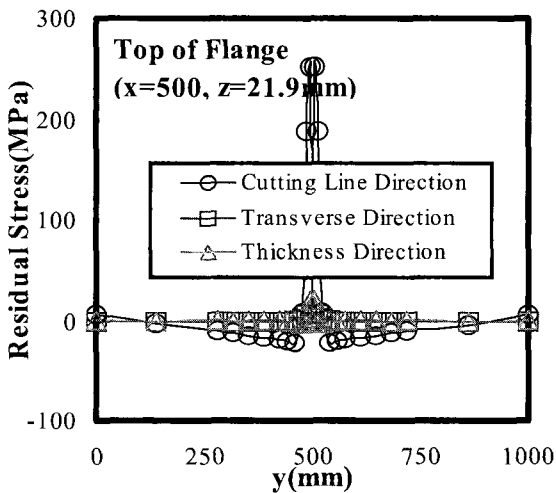
그림 5. Residual Stress of Perpendicular of Direction of Cutting Line (2Dimensional)



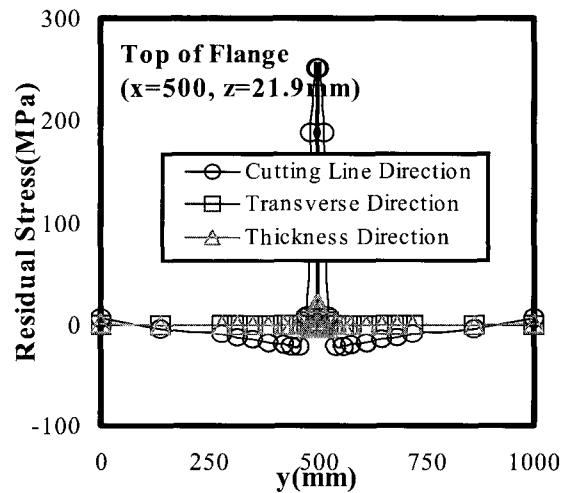
(a) Large Deformation



(b) Small Deformation



(c) Large Deform. & Reduced Integration



(d) Small Deform. & Reduced Integration

그림 6. Residual Stress of Perpendicular of Direction of Cutting Line (3Dimensional)

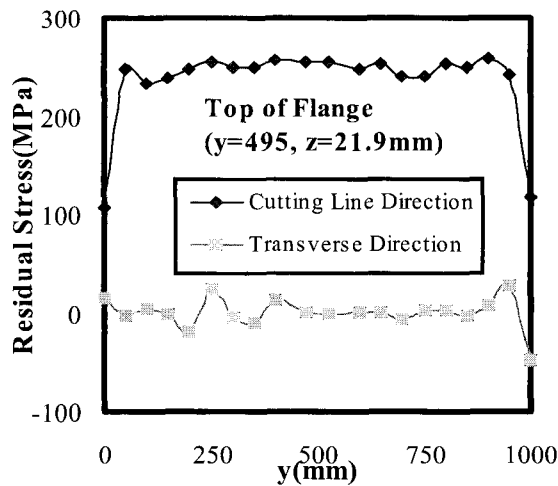
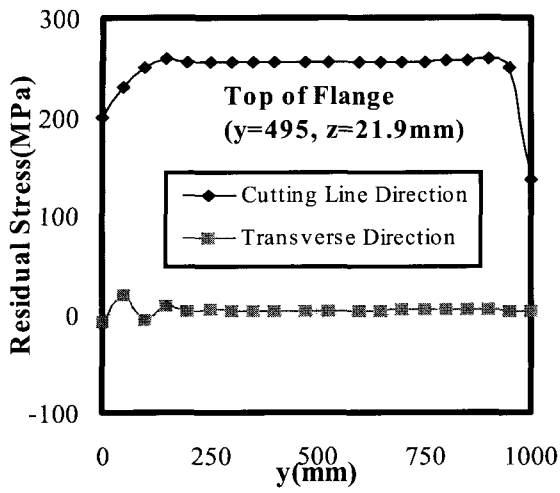
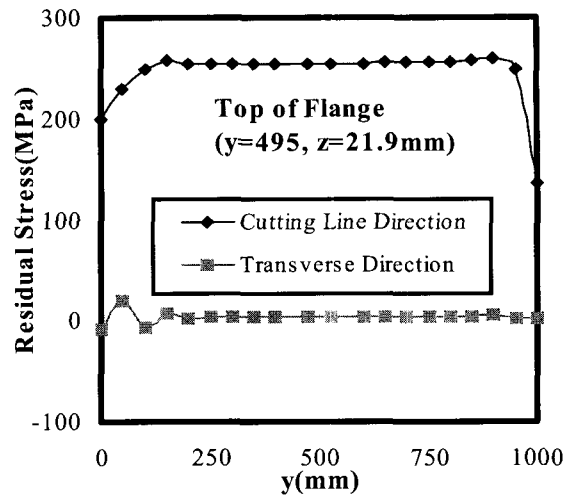


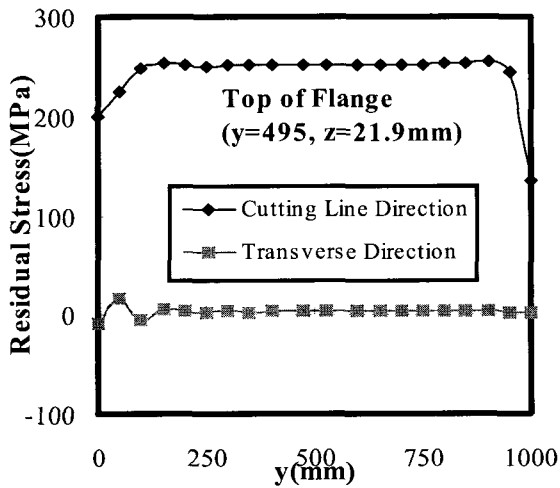
그림 7 Residual Stress of Direction of Cutting Line(2Dimensional)



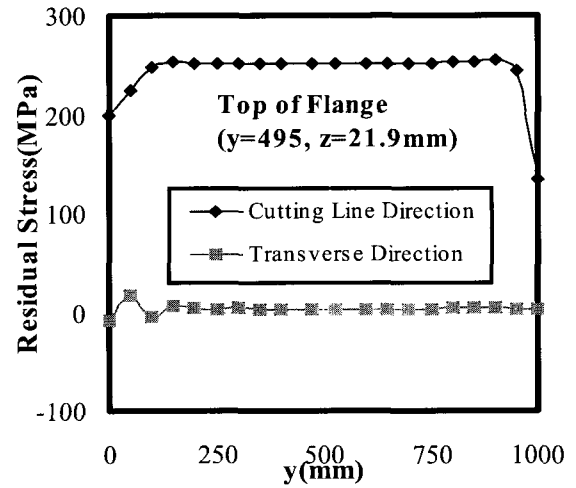
(a) Large Deformation



(b) Small Deformation

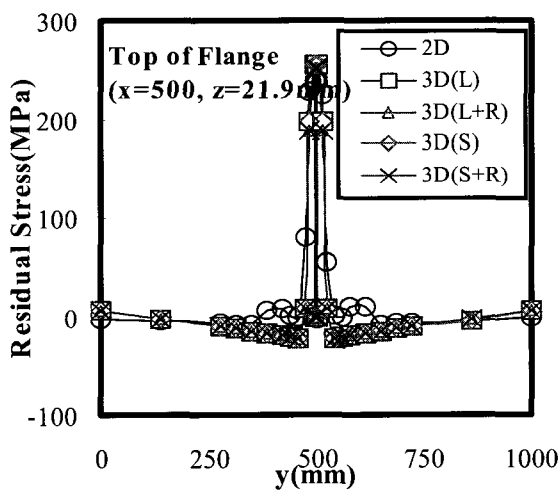


(c) Large Deform. & Reduced Integration

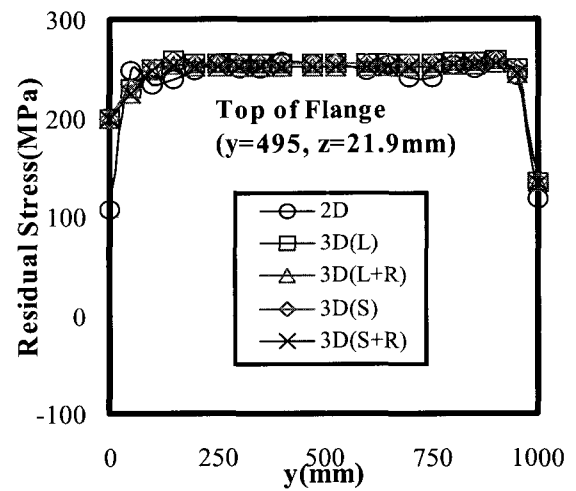


(d) Small Deform. & Reduced Integration

그림 8 Residual Stress of Direction of Cutting Line (3Dimensional)



(a) Perpendicular Direction



(b) Direction of Cutting Line

그림 9 Residual Stress (σ_x) with respect to Analysis Condition

표 1 Cutting Residual Stress with Respect to Analysis Condition

Unit : MPa

	2Dimension	3Dimension			
		Small	Large	Small + RIM	Large + RIM
σ_x	238.56	254.97	254.92	251.44	251.39
$\bar{\sigma}$	241.45	239.06	239.05	239.95	239.96

잔류응력은 절단선 근방 ($x = 495.5, z = 21.9mm$)에서는 절단선 직각방향의 잔류응력과 동일하게 입열에 의해 열팽창 했던 부재가 식으면서 열수축함으로 인해 인장응력을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 절단선 직각방향의 잔류응력 결과와 마찬가지로 절단선 방향의 잔류응력의 분포도 크기와 분포형상이 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

위의 결과를 보다 엄밀하게 비교하기 위하여 가장 큰 영향을 나타내는 절단 잔류응력성분 (σ_x)에 주목하여 그림 9(a), (b)에 나타내었다. 그림 9(a)는 절단선 직각방향의 절단잔류응력성분 (σ_x), 그림 9(b)는 절단선 방향의 절단 잔류응력성분 (σ_x)을 나타낸 것이다. 또한 정량적인 비교를 위하여 각각의 경우의 최대절단잔류응력 (σ_x) 값 및 상당응력 ($\bar{\sigma}$)을 표 1에 나타내었다.

그 결과 전체적으로 2차원의 해석에 의해 얻어진 잔류응력과 3차원 4가지 해석 이론에 의해 얻어진 잔류응력의 분포는 유사함을 알 수 있었으며, 2차원 해석에 의해 얻어진 잔류응력성분 (σ_x)과 3차원 4가지 해석 이론에 의해 얻어진 잔류응력의 절대치는 약 10MPa정도의 적은 차이를 나타내었다. 또한, 3차원 4가지 해석 이론에 의해 얻어진 잔류응력의 절대치 역시 저감적분을 고려한 Case III, IV의 경우가 저감적분을 고려하지 않은 Case I, II의 그것과 약 3MPa정도의 적은 차이를 나타내었다. 이로서, 미소변형 이론을 적용한 경우나 변형률의 2차항까지 고려한 대변형 이론을 적용한 경우는 거의 차가 없음을 알 수 있었으며, 전체적으로 잔류응력의 경우 저감적분을 고려한 경우 보다 높은 정도를 나타냄을 알 수 있었다.

3.3 해석프로그램의 검증

본 연구에 사용된 프로그램의 검증은 수차례 기 발표 논문을 통해 이루어졌으며 추가로 절단 실험과 해석을 수행하여 그 결과를 바탕으로 프로그램의 타당성을 다시 한번 검증하였다.

3.3.1 실험 및 해석 조건

그림 10에 절단실험 모델의 치수 및 형상을 나타내었다.

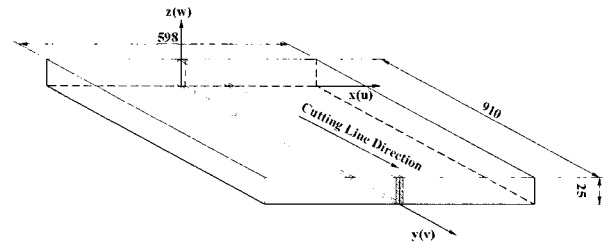


그림 10 Cutting Model

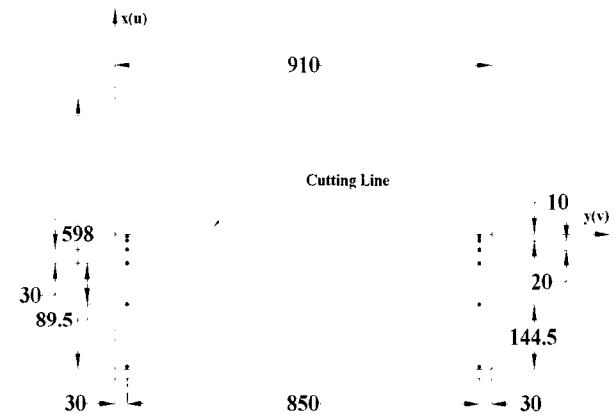
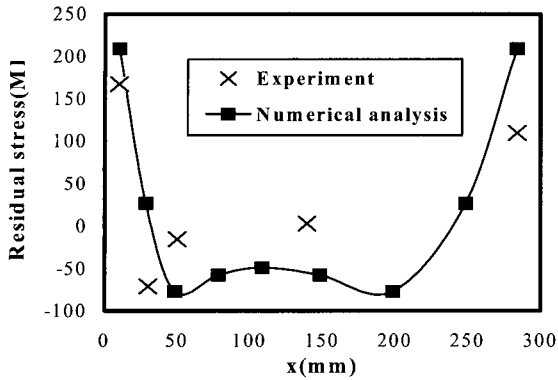


그림 11 Position of Strain Gage

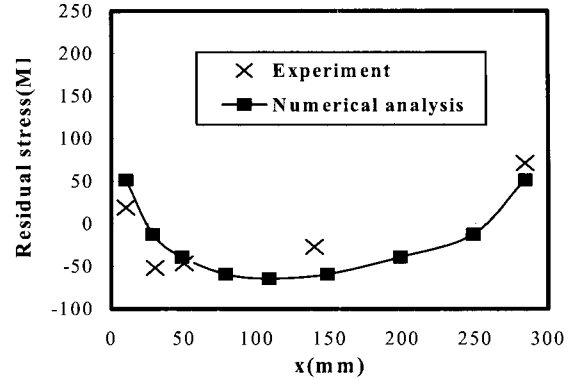
실험 재료는 SM400 강재를 사용하였으며, 910×598×25mm 크기의 평판을 그림 10에서와 같이 y방향으로 절단하였다. 절단시 사용되어진 노즐은 TW'103 30bar 3번이며, 절단 시작부에 10초간 예열을 행한 후 360mm/min의 절단속도로 1pass 절단하였다. 절단이 완료되어진 판에 그림 11과 같이 절단 시작부 ($x = 30mm$) 및 절단 종료부 ($x = 880mm$)에 각각 2축 strain gage를 부착하여 절단선 방향 및 절단선 직각방향의 잔류응력을 측정하였다. 실험에 사용되어진 조건과 동일한 조건으로 해석을 수행하여 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다.

3.3.2 실험 및 해석 결과

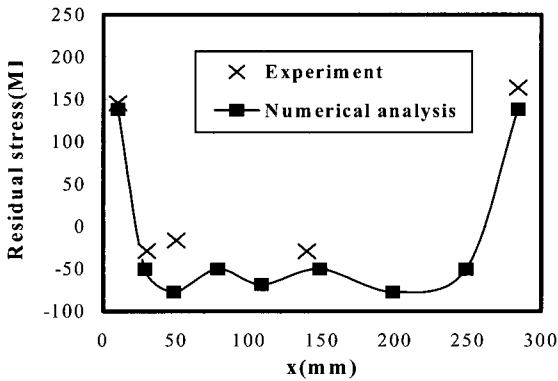
그림 12에 절단실험 및 해석을 수행하여 얻어진 잔류응력을 나타내었다. 그림 12(a), (b)는 절단 시작부 ($y = 30mm$)의 잔류응력을 그림 12(c), (d)는 절단 종료부 ($y = 880mm$)의 잔류응력을 나타낸 것이다. 결과가 잘 일치하는 것을 알



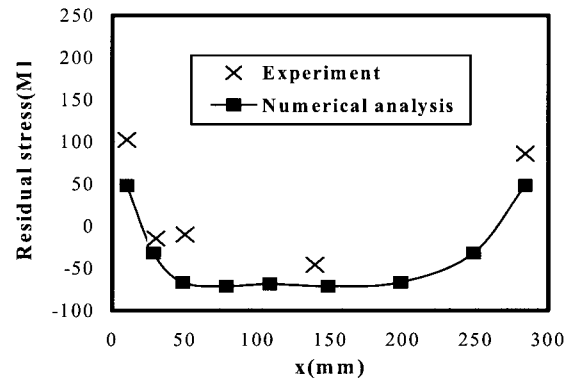
(a) Cutting Line Direction σ_y ($y=30\text{mm}$)



(b) Perpendicular Direction σ_x ($y=30\text{mm}$)



(c) Cutting Line Direction σ_y ($y=880\text{mm}$)



(b) Perpendicular Direction σ_x ($y=880\text{mm}$)

그림 12 The Comparison of Experiment and Analysis Results

수 있다.

4. 결 론

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

- 1) 절단시 시작부 및 종료부의 즉, 단부에서의 온도분포는 약간의 차이는 있으나 절단시 전체적으로 일치한 온도 분포를 나타내었다.
- 2) 절단시 발생한 절단 직각방향 및 절단방향의 잔류응력 크기 및 분포는 2차원 및 3차원 4가지 해석 이론에 의한 해석 결과 모두 유사한 분포 및 절대치를 나타내었다.
- 3) 해석 결과를 실험을 통하여 검증하였다.
- 4) 절단시 절단부 근방에는 입열후 냉각에 따른 열수축으로 인해 인장응력이 발생하였으며, 다소 멀리 떨어진 곳에서는 응력평형을 이루기 위해 압축응력이 발생하였다. 또한 절단면의 잔류응력은 "0"을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. You Chul KIM, Kyong Ho CHANG, Kohsuke HORIKAWA, "Production Mechanism of Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding", *TRANSACTION OF JWRI* Vol.27 No.2, 1998, pp.107 ~113
2. You Chul KIM, Kyong Ho CHANG, "Prediction of Welding Out-of-plane Deformation by 3D-FEM Analysis and Its Accuracy", *The 76th JSME Fall Annual Meeting* Vol.I, 1998, pp. 295 ~296
3. 장경호, 이상형, 전준태, "공용중 보수용접에 의한 용접부의 응력 및 변형의 거동", 한국강구조학회 논문집 제12권 3호, 2000, pp.269~279
4. 장경호, 이상형, 이진형 "3차원 유한요소해석에 의한 용접응력과 변형의 해석 및 정도", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집 제13권 제2집, 2000, pp.11~17
5. 장경호, 김재민, 이상형, "절단시 발생하는 강판의 잔류

- 응력 특징”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000, pp.177~180
6. 장경호, 김재민, 이상형, 박정웅, “절단시 발생하는 강판의 잔류응력 특징에 관한 연구”, 대한용접학회 학술발표회 논문집, 2000, pp.106~109
7. 일본강구조협회 기술위원회 안전성 분과회 내화소위원회 고온강도반 : 구조용강재의 고온시 및 가열후의 기계적 성질 목차