

## 외력을 고려한 양면 T-용접이음부의 응력해석

김성환\* · 방한서\*\* · 방희선\* · 송관형\*\*\*

\* 조선대학교 대학원 기계공학과

\*\* 조선대학교 선박해양공학과

\*\*\* 충남대학교 선박해양공학과

### Stress Analysis of Double T-Welded Joints Considering External Forces

Sung Hwan Kim\* , Han Sur Bang\*\* Hee Sun Bang\* and Kwan Hyung Song\*\*\*

\*Graduate School, Dept. of Mech. Eng., Chosun University, Kwangju 501-140, Korea

\*\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Kwangju 501-140, Korea

\*\*\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

#### Abstract

In the T-joint welding, the complete penetration joint which is obtained by groove welding with edge preparation is generally required for the safety and reliability of structures but this way have the some defects such as increase of working time, consumed welding electrode quantity and large welding deformation. If there is no problem, in the strength, T-joint welding without edge preparation will be profitably understood in the economical and welding deformation side. In this paper, we performed the finite element analysis to understand the characteristics of welding residual stresses on two models, **complete penetration** joint have the edge preparation and incomplete penetration joint without edge preparation, respectively. Especially, we observed the relation between welding residual stress distributed on the notch of gap in the root and external force in the incomplete penetration joint without edge preparation.

(Received October 26, 2000)

Key Words : T-joint welding, Complete penetration joint, Incomplete penetration joint, Welding residual stresses

#### 1. 서 론

T-이음부의 용접시 웨브의 홈가공은 구조물의 강도 측면에서의 일반적인 요구사항이다. 그러나 이와 같은 홈가공은 가공시간, 용착량의 증가로 인한 적층수 및 용접봉 소모량의 증가 등으로 인해 경제적으로 불리한 입장에 놓이게 될 뿐만아니라 용접 변형도 크게 수반하여 외관도 그다지 좋지 않게 된다. 그러므로, 강도상 큰 문제점이 없다면 홈가공을 하지 않는 것이 경제적으로나 용접변형 측면에서 유리하게 될 것으로 판단해 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 그동안 중점적으로 연구되어 왔던 용접구조물에 분포하는 잔류응력의 분포 특성<sup>1)</sup>이

나 홈각도 변화에 따른 응력의 변화에 대한 연구<sup>2)</sup>에 추가적으로 용접구조물에 외력이 가해졌을 경우, 구조물이 갖고 있는 잔류응력이 강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구<sup>3)</sup>를 수행하고자 하였다.

이를 위하여 우선적으로, 용접이음부 양면 T-이음부 용접시 홈가공한 완전용입부의 경우와 홈가공하지 않은 불완전 용입부-본 연구에서는 「루트부 갭」이라고 명명하였다-의 경우에 대한 잔류응력분포 특성을 비정상 열전도 및 평면변형 열탄소성 이론에 입각한 유한요소 해석을 통하여 분석하고, 이들 각각의 이음부에 대한 용접잔류응력의 특성을 비교하고자 하였으며, 또한 루트부 갭의 노치선단에 분포하는 용접잔류응력의 분포 특성을 분석하고, 나아가 이들 잔류응력을 초기 응력으로 하여 외력의 영향으로 인해 루트부 노치에

작용하게 될 응력의 특성을 파악하여 이들 구조물의 용접이음부의 강도 특성을 규명하고자 하였다.

## 2. 모델의 선정 및 해석 조건

해석을 위해서 용접시 용접부의 역학적 조건 즉, 시험편의 수축 및 팽창의 영향을 받지 않는 최소 크기를 고려하여 플레이트는 두께 30mm, 길이 600mm, 폭 300mm, 웨브는 두께 20mm, 높이 170mm로 선정하였으며 용접사이즈는 AWS규격에 입각하여, 필릿용접시 최소 크기인 웨브두께의 3/4이상의 크기로 하였으며, 외력을 고려한 응력해석에 있어서 홈각도가 존재하는 완전용입 용접과 홈이 없는 즉, 루트부 갭이 존재하는 불완전용입 용접의 경우를 비교하고, 다층용접과 단층용접을 비교하기 위해서 Fig. 1과같은 형상을 모델의 형상으로 하여 Table 1과 같이 3가지 모델을 선정하였다.

모델-1은 루트갭이 존재하지 않는 양면 K형 홈 3패스/2층 완전용입 모델이며, 모델-2는 루트부 갭이 존재하는 경우에 대한 해석을 위한 2패스/2층 필릿용접 이음부의 형상이며, 모델-3은 다층용접과 단층용접의 경우를 상호 비교하기 위한 루트갭이 존재하는 1패스/1층 모델이다. 그리고 시험편의 모재 및 용접봉은 철강 구조물 시공현장에서 가장 일반적으로 사용하고 있는

SWS490과 S-777MX×H-14을 사용하였고, 용접은 효율면에서 우수한 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding)을 수행하였다. 용접조건은 Table 2와 같다.

해석은 2차원 열전도 및 2차원 평면변형 열탄소성 이론을 정식화하여개발한 유한요소 프로그램(FORTRAN 문)을 이용하여 잔류응력 분포특성을 파악하였고, 그 후 이들 잔류응력값을 초기응력으로 하여 외력을 가했을 경우에 대해 응력을 해석하였다. 또한, 요소분할은 4절점 아이소 파라메트릭 요소를 도입하여 Fig. 2와 같이 4절점 사각형 요소와 4절점 삼각형 요소를 사용하여 총요소수 714개, 총절점수 774개로 분할하였다.

Table 1 Model for analysis

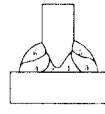
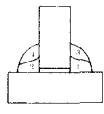
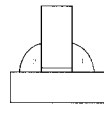
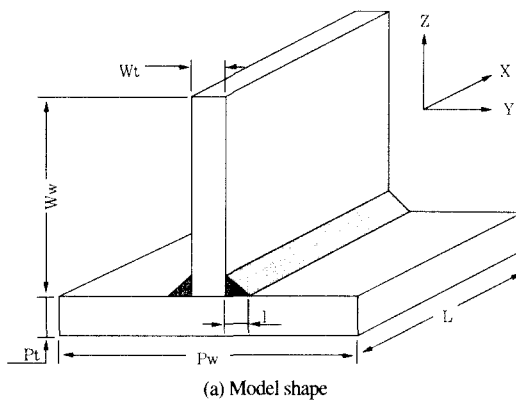
Model no.	Model - 1	Model - 2	Model - 3
Shape of model			
Root gap(mm)	0	0.5	0.5
Length of gap(mm)	-	19	19
Groove angle(°)	60	0	0
Pass/layer	3/2	2/2	1/1

Table 2 Welding Conditions

Model no.	Pass	Current(A)	Voltage(V)	Speed (cm/min)
Model-1	1, 2	650	28	27
	3, 4	720	30	29
	5, 6	700	29	28
Model-2	1, 2	700	30	24
	3, 4	680	26	25
Model-3	1, 2	850	41	25



Length of model (L)	600mm
Width of web (Ww)	170mm
Width of plate (Pw)	300mm
Thickness of web (Wt)	20mm
Thickness of plate (Pt)	30mm
Weld size (l)	16mm

(b) Model size

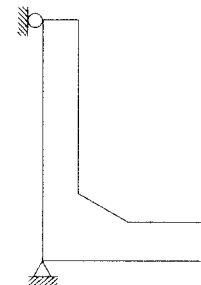


Fig. 1 Model shape and size for analysis

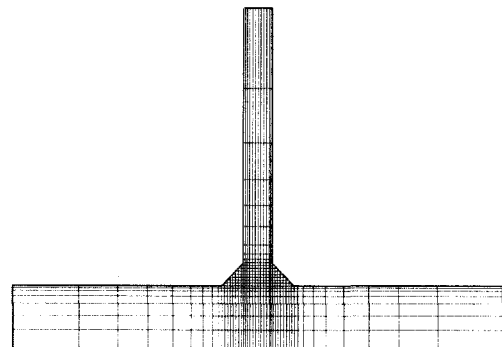


Fig. 2 Mesh division for analysis by FEM

### 3. 초기 용접잔류응력 해석

외력에 의한 응력의 해석에 앞서 해석에서 고려될 초기응력 즉, 용접이음부의 용접잔류응력 해석에서 사용한 경계조건은 Fig. 1(c)에 나타낸 것과 같이 웨브의 대칭성을 고려하여 웨브 상단의 중앙점은 y방향만 구속하고, 플레이트 하단의 중앙부분은 z 및 y방향으로 구속하였다(단, 경계조건은 모델형상의 1/2에 대해서만 표시하였다).

주요 해석위치는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 모델의 플레이트 상표면에서의 깊이 3mm인 지점과 웨브의 좌측 표면에서의 깊이 3mm인 지점 및 루트부의 양측 노치근방(Fig. 3의 A지점)으로 하였다.

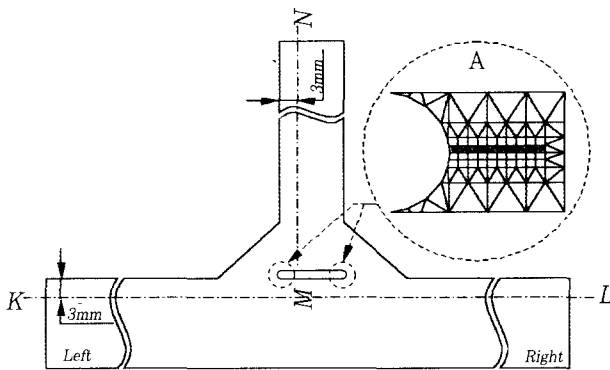


Fig. 3 Location of analysis

이상의 조건들을 이용하여 Table 1의 3가지 모델에 대한 유한 요소해석을 수행한 결과 Fig. 4~Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

먼저 Fig. 4~Fig. 6의 (a)그림은 최종 패스용접 후 각각의 모델의 플레이트 부분에 잔류하게 되는 용접응력을 해석한 결과를, (b)그림은 웨브 폭에 걸쳐 분포하는 응력을 해석한 결과이다.

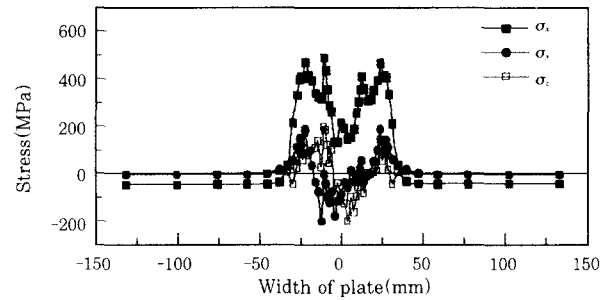
다음으로 Fig. 7과 8은 각 모델에 대한 루트갭의 노치근방(Fig. 3의 A부분)에서의 용접 잔류응력 성분,  $\sigma_x$ 와 상당 잔류응력을 해석, 비교하여 나타낸 것이다.

이상의 결과 중에서 Fig. 7(b)를 보면 모델-2와 모델-3의 용접 잔류응력,  $\sigma_x$ 가 우측 노치선단에서 압축쪽으로 크게 분포함을 알 수 있는데 이것은 용접에 의해 노치 선단에서 수축력이 증가하였음을 의미한다. 그리고 모델-1의 경우는 인장응력이 다소 작게 분포함을 볼 수 있는데 이것은 루트부 갭이 존재하지 않아서 수축력의 증가가 없기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 Fig. 8의 상당잔류응력,  $\bar{\sigma}$ 의 비교결과를 보면, 각 모델들의 응력값들이 그다지 차이를 보이고 있지 않음을

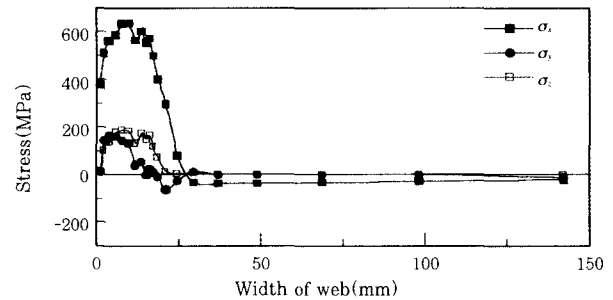
볼 수 있는데, 이를 통해 루트갭이 존재할지라도 이것이 용접잔류응력에는 그다지 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단해 볼 수 있다.

### 4. 외력을 고려한 응력의 해석

본 절에서는 전 절의 해석을 통해서 얻어진 용접잔류응력을 초기응력으로 하여 파괴의 일반적인 형식과 가장 밀접한 관련이 있는 웨브의 폭방향 즉, z방향으로의

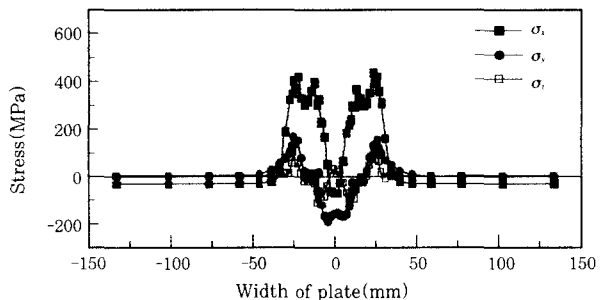


(a) Welding stress along thickness of plate

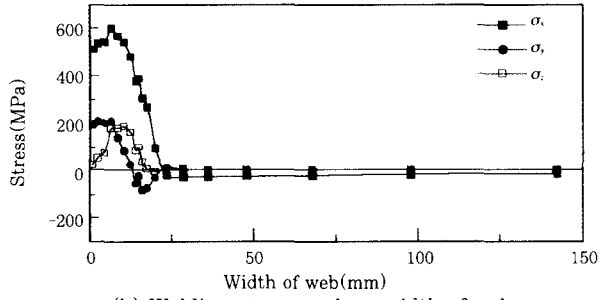


(b) Welding stresses along width of web

Fig. 4 Distribution of residual stresses for model-1



(a) Welding stresses along thickness of plate



(b) Welding stresses along width of web

Fig. 5 Distribution of residual stresses for model-2

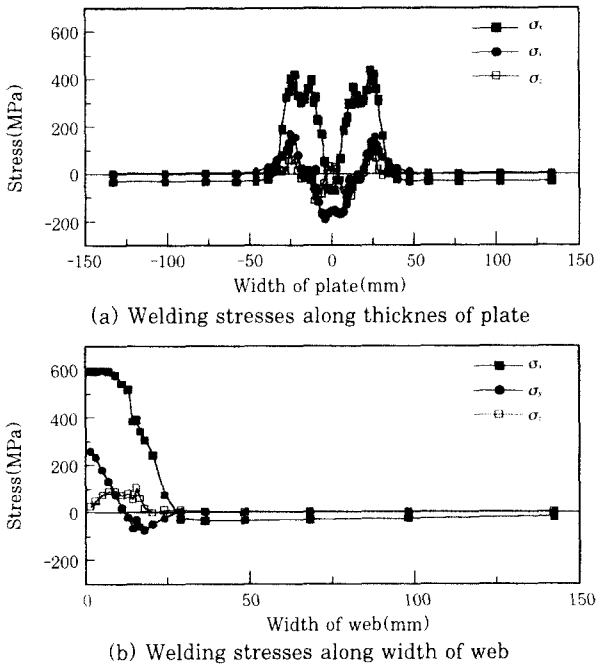


Fig. 6 Distribution of residual stresses for model-3

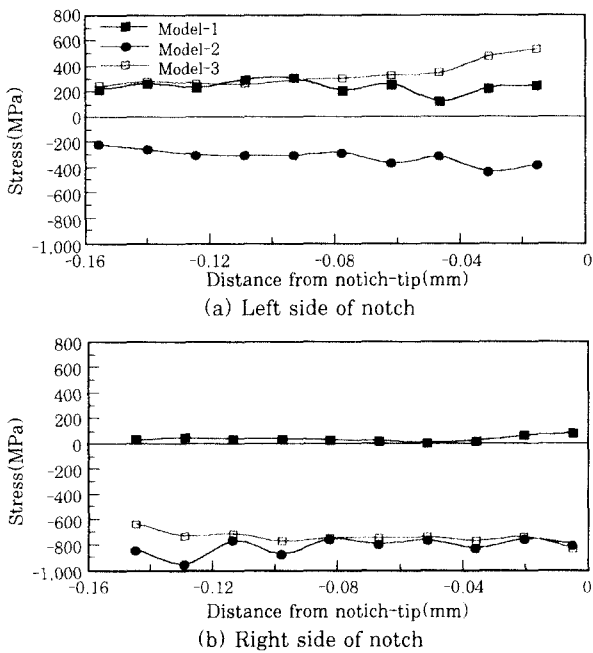


Fig. 7 Distribution of welding residual stress,  $\sigma_w$ , in the notch-tip

응력해석에 중점을 두고 해석하기 위해 50kg/mm의 축하중 및 수직하중을 가했을 경우, 모델-2와 3의 노치근방 (Fig. 3의 A부분)에 재분포하게 될 응력의 특성을 살펴보고자 하였다. 또한 모델-1의 경우는 전 절과 마찬가지로 루트부 갭이 존재하지 않는 경우이므로 단면 위치상 동일 위치에서 해석을 수행하였다. 이를 위해 구속조건은 플레이트 하단의 중앙부 절점은 상하·좌우 (y 및 z방향)로 구속하고, 나머지 절점은 상하 (z방향)로 구속하였다.

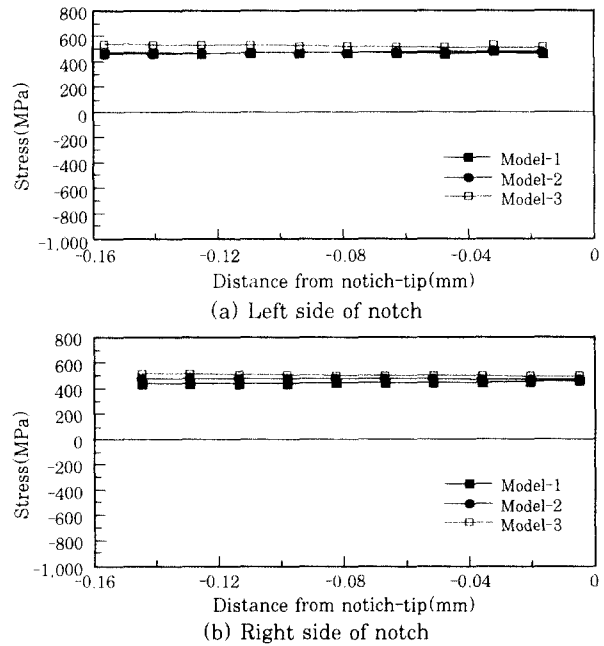


Fig. 8 Distribution of equivalent residual stress,  $\bar{\sigma}$  in the notch-tip

#### 4.1 웨브에 축하중(인장력)을 가했을 경우

여기에서는 용접잔류응력을 초기응력으로 갖고 있는 상태에서 축하중을 가했을 경우에 있어서 용접 이음부에 작용하는 응력의 양상을 파악하고자 하였다. 즉, 전 절에서의 해석을 통해 얻어진 루트부 양측 노치선단의 잔류응력을 초기응력으로 갖고 있는 이음부에 부가적으로 Fig. 9와 같은 축하중을 웨브에 가했을 경우 이음부에 재분포하게 될 응력의 양상을 알아보고자 하였다. 이상의 해석결과를 Fig. 10과 11에 나타내었다.

Fig. 10은 Fig. 7과 같은 용접잔류응력이 초기응력으로 존재할 경우, 웨브에 축하중을 가했을 때 구조물에 작용하는 응력상태를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 11은 동일한 상태에 대한 상당응력을 나타낸 것이다.

Fig. 10(b)에서 모델-2의 경우와 모델-3의 경우를

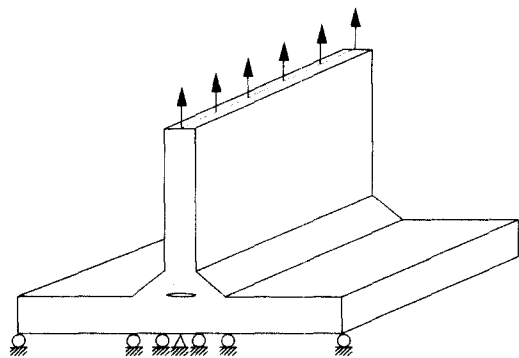


Fig. 9 Axial load(tension) and restraint condition

주목하여 보면, 노치선단에서 초기에 압축으로 분포하던 용접잔류응력이 축하중에 의한 인장응력의 작용으로 인하여 다소 감소함을 볼 수 있으나 모델-1은 그다지 큰 변화를 보이지 않고 있다. 그러나 Fig. 11의 상당응력을 보면 모델-2와 모델-3의 우측 노치선단에서의 값이 상당히 크게 감소함을 볼 수 있었다. 또한, 웨브에서의 응력과 플레이트의 폭에 걸쳐 분포하는 응력은 거의 변화가 없었다.

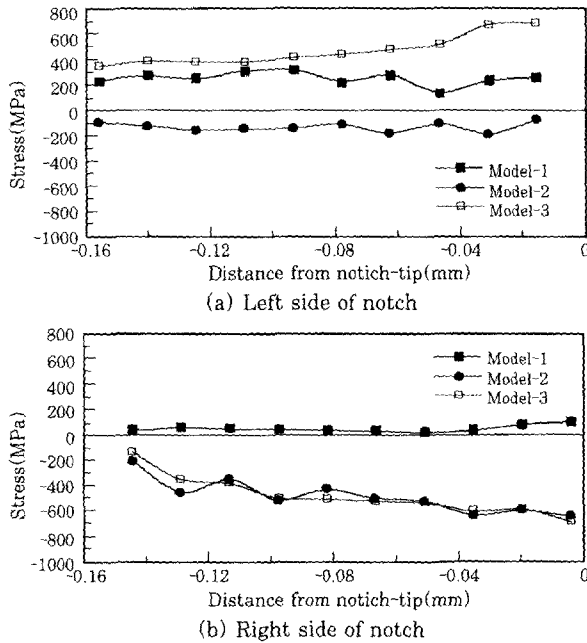


Fig. 10 Distribution of stress,  $\sigma$ , due to tension in the notch-tip

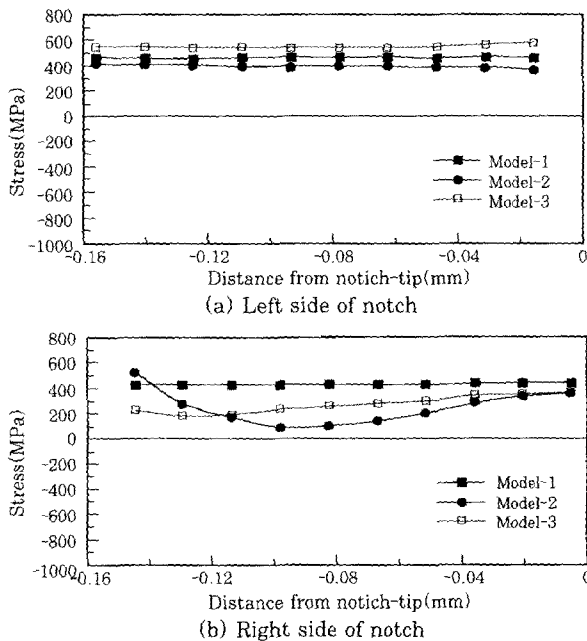


Fig. 11 Distribution of equivalent stress,  $\bar{\sigma}$ , due to tension in the notch-tip

4.2 수직하중(굽힘)을 가했을 경우에 대한 해석

본 절에서는 4.1에서와 동일 구축조건하에서 수직방향으로 하중을 가하여 웨브에 굽힘모멘트가 발생하는 경우에 대해서 해석을 수행(Fig. 12 참조)하였으며, 그 결과를 Fig. 13과 14에 도시하였다.

Fig. 13과 Fig. 7을 비교해 보면, 응력,  $\sigma_x$ 가 좌측의 노치선단에서는 인장쪽으로 증가하여 분포함을 볼 수 있고, 우측에서는 압축쪽으로 증가하여 분포함을 알 수 있는데 이것은 하중이 웨브의 좌측에서 우측방향으로 작용함에 따른 것이다. 또한, 좌측 노치선단에서는 모델-2의 경우가, 우측의 노치선단에서는 모델-2와 모델-3의 경우가 응력이 가장 크게 분포하고 있다. 상당응력에 대한 Fig. 14에서도 동일한 양상을 볼 수 있다.

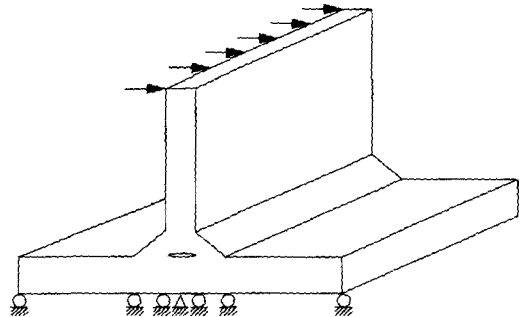


Fig. 12 Vertical load and restraint condition

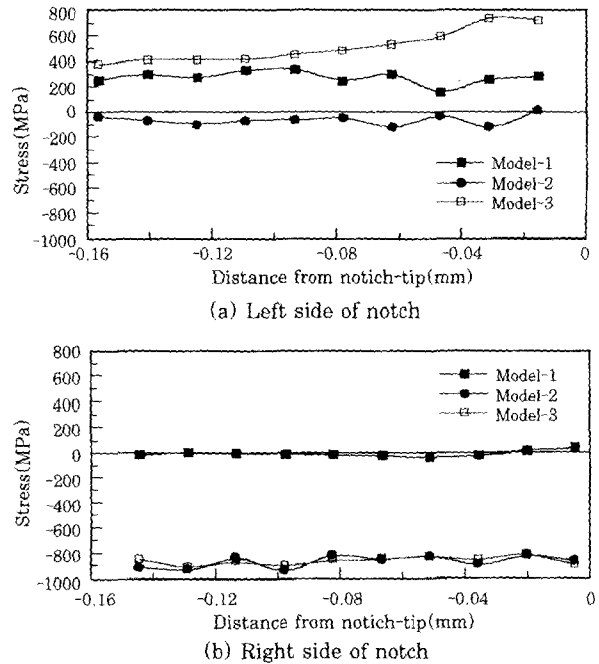


Fig. 13 Distribution of stress,  $\sigma$ , due to bending in the notch-tip

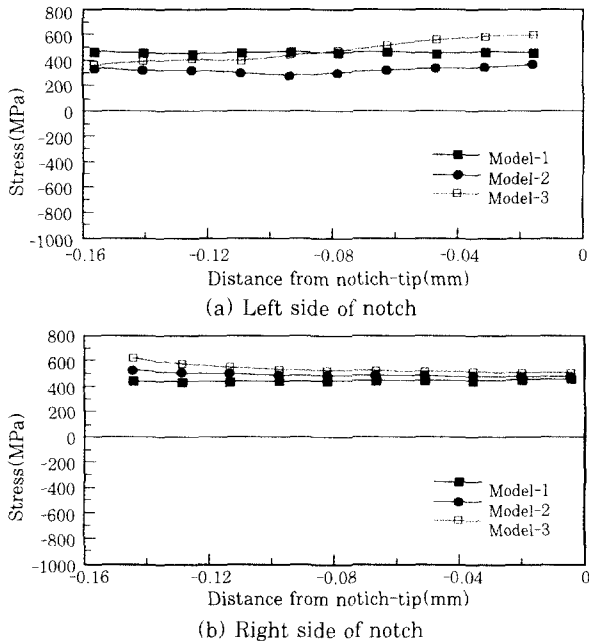


Fig. 14 Distribution of equivalent stress,  $\bar{\sigma}$  due to bending in the notch-tip

이와 같은 양상을 나타내는 이유는 축하중의 경우와 동일하게 수직하중에 의해 인장응력이 작용하는 좌측 노치선단에서는 초기응력이 압축인 모델-2의 경우가 가장 큰 영향을 받으며, 우측 노치선단에서는 압축력이 작용하기 때문에 초기의 압축응력이 보다 작은 모델-3의 경우가 압축응력이 더욱 크게 작용하는 것으로 판단된다. 또한, 플레이트의 폭에 걸쳐 분포하는 응력은 거의 변화가 없었으며, 웨브에서는 다소 응력변화가 있었으나 노치근방에 비해 아주 미소한 양의 변화였으므로 본 논문에서는 도시하지 않았다.

### 5. 결 론

이상의 해석결과치들을 정리하여 보면,

- 1) 플레이트 폭의 용접잔류응력,  $\sigma_r$ 는 루트부 갭이 있는 다층용접의 경우(모델-2)가 루트부 갭이 없는 완전용입 다층용접의 경우(모델-1)보다 다소 작게 나타났다.
- 2) 루트갭이 존재하는 다층용접(모델-2)의 경우와 단층용접(모델-3)의 플랜지 폭에 분포하는 용접잔류응력의 비교결과 모델-3의 응력이 더욱 크게 분포함을 알 수 있었다.
- 3) 용접잔류응력의 해석결과, 루트부 갭이 없는 완전용입 용접의 경우 인장응력이, 루트부 갭이 있는 다층용접의 경우 압축응력이 분포하였다.
- 4) 노치 선단의 상당잔류응력은, 모델-1의 경우가 가장 크게 나타났으며, 다음으로 모델-2, 모델-3 순으로 나

타났으나 모델-2와 3의 차이는 크지 않았다.

5) 용접구조물에 인장 및 굽힘 등의 외력을 가할 경우, 노치선단에서의 상당응력은 모델-2의 경우가 모델-1의 경우 보다 좀더 유리하게 나타났으며, 모델-3의 경우가 가장 불리하게 나타났다.

따라서 이상의 유한요소 해석결과를 통해 외력을 고려한 양면 필릿용접이음부 루트부 갭의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) 房漢瑞 : 厚板熔接部의 力學的 特性, 大韓熔接 學會誌, 10-4(1992), 250~258
- 2) Y. C. Kim, T. Yamakita, H. S. Bang, Y. Ueda : Mechanical characteristics of Repair Welding in Thick Plate. Trans. JWRI 17-2(1988), 137~145
- 3) Y. C. Kim, T. Yamakita, H. S. Bang : Mechanical Behavior during SR-Treatment of Welding Residual Stress Through the Thickness. Trans. JWRI 19-2(1990), 61~69
- 4) Yukio Ueda, Tetsuya Yao, Keiji Nakacho and M. G. Yuan : Prediction of Welding Stress, Deformation and Ultimate Strength of Plate Panels. Trans. JWRI 21-2(1992), 276~283
- 5) Yukio Ueda and Min Gang Yuan : A Prediction Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual stress(Report III). Trans. JWRI 22-1(1993), 157~168
- 6) Yukio Ueda, Min Gang Yuan, Masahito Mochizuki, Sadao Umezawa and Kunio Enomoto : A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress(Report IV). Trans. JWRI 22-1(1993), 168~176
- 7) 金鍾鳴 : 맞대기 용접이음부의 개선각 變化에 따른 力學的 特性에 關한 研究. 1994年度 朝鮮大學校 碩士學位 論文
- 8) 金晟煥 : 양면필릿용접 루트부의 갭이 강도에 미치는 영향. 1996年度 朝鮮大學校 碩士學位 論文.