

◎ 論 文

外力의 效果를 고려한 熔接部의 最終強度에 대한 評價

방 한 서* · 차 용 훈** · 오 우 석***
(95년 8월 30일 접수)

An Assessment on the Ultimate Strength of Welding Joint
by the Effect of External Force

H. S. Bang* · Y. H. Cha** · W. S. Oh***

Key Words: Welding residual stress(용접잔류응력), Initial deflection(초기처짐), Heat conduction(열전도), Thermal elastic-plastic(열탄소성), Ultimate strength(최종강도)

Abstract

When structures are constructed by welding, structural elements are always accompanied by welding residual stress and deformation. Therefore, when the rigidity and strength of the welded structures is considered, it is very important to have sufficient information about the effect of initial deflection and welding residual stress on them.

In this paper, the square plates with welding residual stress under compression are dealt with; First, heat conduction and thermal elastic-plastic problems are analyzed by finite element method using 4-node isoparametric elements for assessment on the ultimate strength of welding joint. Later, the ultimate strength of welding joint is assessed by examining the effect of changed type of loading.

The specimens are $500 \times 500\text{mm}$ ($a/b=1$) and $750 \times 500\text{mm}$ ($a/b=1.5$) rectangular plates of which thicknesses is 9.0mm and simply supported plates getting axial load in each direction.

* 조선대학교 선박해양공학과

** 조선대학교 기계공학과

*** 조선대학교 대학원 기계공학과

**** 본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(ME 94-E-12)에 의하여 연구되었음.

1. 서 론

선박, 크레인, 산업설비 및 차량등 각종 강구조물은 일반적으로 용접에 의하여 제작되어지며, 용접에 의하여 결합된 용접부의 주변은 용접열에 의한 팽창·수축으로 인하여 용접잔류응력과 같은 초기부정이 펼연적으로 발생한다. 이와같이 발생한 초기부정 즉, 용접잔류응력은 구조물의 강성과 강도에 악영향(취성파괴, 좌굴강도등)을 미치므로 안전한 용접구조물을 설계하기 위해서는, 잔류응력이 구조요소의 최종강도에 미치는 각종 역학적 영향을 명백히 밝히는 것이 매우 중요한 문제이다.

그러나 지금까지 용접구조에 대한 최종강도 평가는 용접잔류응력에 대하여 일차원적(축방향)인 분포 및 크기에 대해서만 고려하여 왔으며, 더욱기 잔류응력의 분포 및 크기에 대하여서도 실제현상이 아니라 단순화시켜 연구하였다.^(1,2,3,4)

따라서, 본 연구에서는 지금까지 용접잔류응력 해석을 위한 열탄소성 이론^(5,6,7,8,9,10)에다 외력을 고려하였다. 그러므로 용접체의 축방향은 물론 폭 및 두께방향의 용접잔류응력이 최종강도에 미치는 영향을 고려하였다. 또한 시험편에다 용접중 및 용접후의 상태에서 외력을 가하여 수치해석을 수행하였으며, 해석결과에 의하여 용접구조체의 최종강도에 대한 역학적 현상을 규명하였다.

2. 유한요소법에 의한 열전도 및 열탄소성 해석 이론

2.1 2次元 非定常熱傳導

박판의 용접열원에 대한 열 해석은 판의 두께가 폭 및 길이에 비하여 매우 작으므로 2차원 비정상이론을 도입하여도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있다.^(5,6) 이동 열원을 고려한 2次元非定常 热傳導를支配하는 方程式은 아래와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad (1)$$

여기서, T : 温度($^{\circ}\text{C}$), ρ : 密度(g/cm^3),
 c : 比熱($\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

α : x 및 y 方向의 热傳導率

($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$),

t : 시간 (sec), Q : 單位時間당

入熱量(cal/sec)이다.

(1)식을 matrix화 시키면 아래와 같다.

$$[K] \{ \theta \} + [C] \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \{ F \} \quad (2)$$

[K], [C] 및 {F}는 각각 热傳導 matrix, 热容量 matrix 및 热流束 vector를 나타낸다. 본 연구에서의 박판 용접 열원에 대한 온도해석은 (2)식에 근거한 수치해석용 program을 이용하였다.

2.2 2次元 热彈塑性

시간의 변화와 함께 구하여진 온도분포를 열하증으로 취급하는 열응력 문제는, 각요소를 구성하는 재료의 물리적 성질이 온도에 따라 변화하므로 이들의 영향을 고려한 節点力과 절점 변위의 관계식을 작성하였다. 더욱기 박판에서는 용접체의 두께방향의 온도차가 미소하며 또한 역학적 구속이 폭 및 길이방향에 비하여 자유에 가까우므로 두께방향의 용접잔류응력은 폭 및 길이 방향의 응력성분의 절대 크기보다 매우 미소하다.⁽⁶⁾ 따라서 2차원 탄소성 이론을 도입하였으며, 2차원 열탄소성의 기본식은 아래와 같다.

$$\{ \epsilon \} = [D^e]^{-1} \{ \sigma \} - \{ \epsilon^T \} \quad (3)$$

여기서, $[D^e]$: 탄성 Matrix

$\{ \alpha \}^T = \epsilon^T$: 열변형률

α, T : 각각 순간 선행창계수 및 온도이다.

식(3)을 增分形으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{ d\sigma \} = [D^e] \{ d\epsilon - d\epsilon^T \} \quad (4)$$

만약 재료의 물리적 성질의 온도의존성을 고려하고, 응력증분에서의 영향을 일괄하여 $[C]dT$ 라고 하면, 식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{ d\sigma \} = [D] \{ d\epsilon \} - [C] dT \quad (5)$$

또한 절점력과 절점변위와의 관계는 물체력을 무시하고假想일의定理에 따라要素의等價절점력의 증분 $\{dF\}$ 는 다음과 같다.

$$\{dF\} = [K] \{dU\} - \{dL\} \quad (6)$$

지금까지의 용접체에 대한 용접잔류응력을 해석하는 기본이론은 식(6)에서 외력항인 $\{dF\}=0$ 으로 하였으나 본 연구에서는 외력의 존재에 대하여 고려하였으므로 초기 잔류응력 해석은

$$\{dF\} = [K] \{dU\} - \{dL\} = 0$$

$$\text{즉, } \{dL\} = [K] \{dU\} \quad (7)$$

로 하여 식(7)에 의하여 용접체의 용접잔류응력을 해석하였으며, 외력에 의한 응력해석은

$$\{dF\} = [K] \{dU\} \quad (8)$$

에 의하여 수행하였다.

따라서, 식(7)와 식(8)을 종합하여 용접체의 최종강도 평가 수치해석용 program을 개발하였다.

3. 열전도 및 용접잔류응력 특성

3.1 해석체 개요

본 연구에서 사용한 시험편은 Fig. 1 및 Table 1에 나타낸것과 같이 용접잔류응력 발생에 충분한 역학적 조건을 고려하였으며, submerged-arc 자동 용접을 1 pass 수행하는 것으로 하였다.

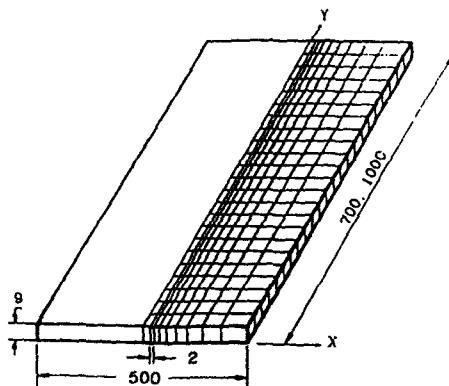


Fig. 1 Mesh of test specimen for numerical analysis

사용재료는 일반적으로 강구조물에서 가장 많이 사용되는 기계구조용 재료인 SM41 강으로 선정하였으며, 수치해석용 요소분할은 Fig. 1에 나타난 것처럼 요소의 크기는 최소 2mm로 하였다. 또한 구속경계조건은 Fig. 2에 보인 것처럼 x 및 y방향으로 자유로이 수축 및 팽창할 수 있도록 하였고, 온도의존성에 따른 재료정수는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. Welding condition

시편	크기 (mm)	두께 (mm)	용접속도 (cm/min)	전류 (amp)	전압 (v)
Model 1	500 x 700	9	20	200	25
Model 2	500 x 1000				

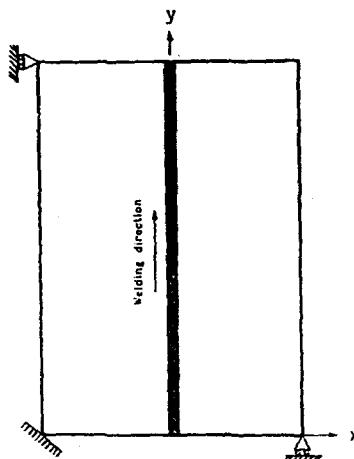


Fig. 2 Boundary condition of test specimen

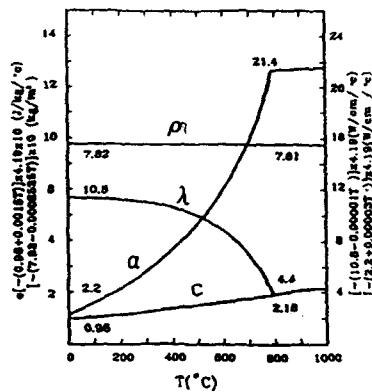


Fig. 3 Thermal coefficients of steel

3.2 열전도 분포 특성

각 시험편에 대한 2차원 비정상 열전도 해석을 수행하였으며 수행한 결과, Model 1과 Model 2의 해석에서 나타난 열특성은 정성적으로 같은 결과를 보였다. 따라서, 본 논문에서는 해석모델 1에 대해서만 기술하며, 수치해석 결과는 다음과 같다.

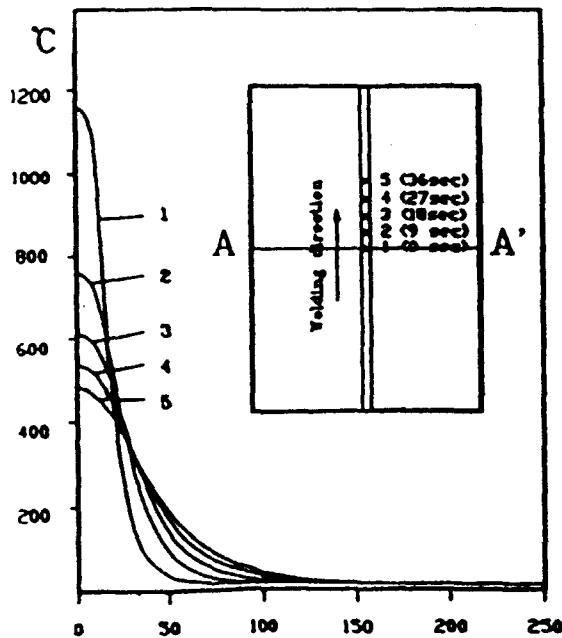


Fig. 4 Temperature distribution of middle transverse section (A-A')

Fig. 4는 시험편의 횡단면 즉, 중앙단면 (A-A')에서의 폭방향에 대한 온도상승 및 냉각분포를 나타내었다. 용접 아크가 단면 A-A'에 도달할 때 까지는 단면 A-A' 위의 점 1의 온도는 거의 상승하지 않았으며, 용접아크가 1점(중앙부, L=350mm)에 도달하고 이 부분에 용융금속이 용착하면 이 부분의 온도는 순간적으로 상승하고, 이때의 온도분포는 곡선 1과 같이 되었다. 아크가 2점(L=380mm)에 도달하면(t=6.3초후) 단면 A-A'의 온도분포는 곡선 2에 표시한것과 같이 용접선 부근에서는 급격히 냉각하는 반면, HAZ범위 밖에서는 온도가 상승하였다. 또한, 계속해서 3점(L=410mm)과 4점(L=440

mm)으로 용접이 진행되는데 따라서 온도분포는 곡선 3, 4와 같이 점차로 완만한 경사를 이루며 변화되었는데, 이것은 용접아크가 지난 후 시간이 경과됨에 따라 열이 모재쪽으로 급속히 전도되고 있음을 보여주고 있다.

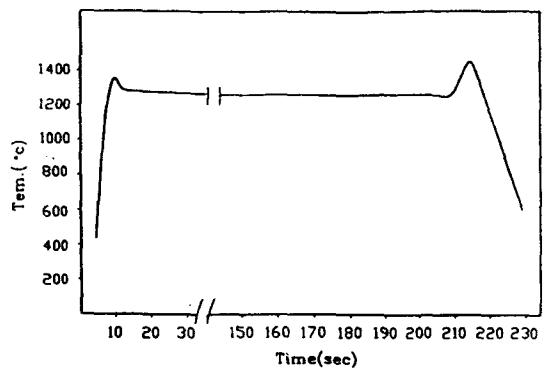


Fig. 5 History of temperature along weld line in HAZ

Fig. 5는 용접열원이 시편의 용접선을 일정한 시간에 따라 이동하여 분포되는 용착금속의 온도를 나타내고 있다. 두께 9mm의 경우 용접개시 약 10초 후 순간적인 용접입열로 인하여 폭방향 x=10mm, 길이방향 y=15mm에 위치한 절점에서 1350°C까지 온도가 상승하였으며, 약 3초 후에는 폭방향 x=10mm, 길이방향 y=30mm에 위치한 절점에서 1310°C의 일정한 온도를 나타내다가 용접종료 약 8초전에 폭방향 x=10mm, 길이방향 y=680mm에 위치한 절점에서 최고온도인 1390°C를 나타내었다. 따라서 그림에서 알 수 있듯이 용접시단과 종단부에서는 비정상역이 존재하며 그 외의 전 영역에서는 준정상역으로 존재하였다.

3.3 열탄소성 해석에 의한 용접 잔류응력의 특성

각 시험편에 대한 2차원 비정상 열전도를 해석한 결과들을 열하중으로 하여 2차원 열탄소성 해석을 수행하였다.

해석 결과를 고찰하여 보면, Fig. 6에서는 각 시험편의 중앙단면 A-A'에서 용접잔류응력(σ_x , σ_y ,

σ_{zz})의 값을 도시 하였다. 여기서 용접선방향의 응력 σ_x 는 용접금속부 중앙에서 각각 56kgf/mm^2 과 64kgf/mm^2 정도의 최대 인장잔류응력이 발생하였으며, 용접선에 직각방향의 응력 σ_y 는 52kgf/mm^2 과 50kgf/mm^2 정도의 인장잔류응력이 발생하였다. 또한, 중심선으로부터 약 60mm 밖의 모재부에서 압축의 잔류응력이 발생하였고, 두께방향의 응력 σ_z 는 각각의 해석모델에서 σ_x 나 σ_y 에 비하여 미소한 크기인 3kgf/mm^2 정도가 발생하였다. 이상에서 폭방향의 용접잔류응력(σ_x) 및 길이방향의 용접잔류응력(σ_y)의 크기는 Model 1과 Model 2에서 각각 비례적으로 발생함을 알 수 있으며, 이것은 $x-y$ 양방향의 강성의 크기 즉, 역학적 구속이 동일하여, 길이방향의 용접잔류응력이 크게 발생하였다.

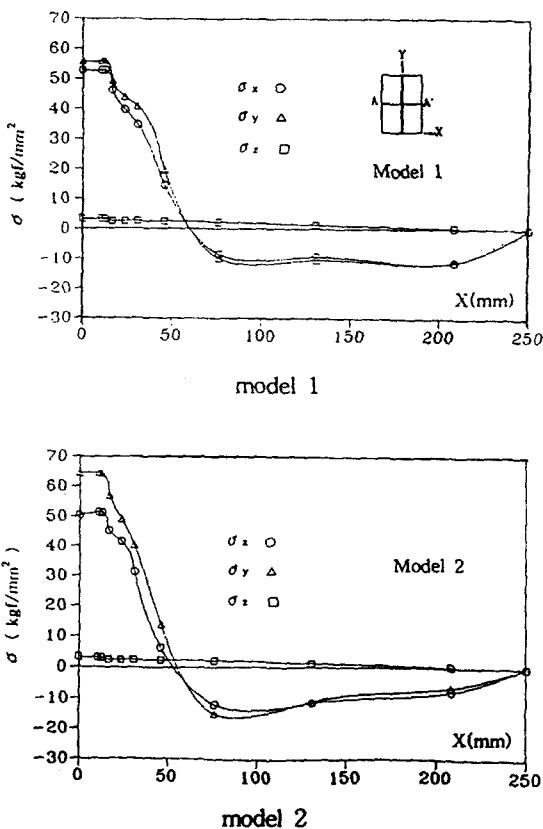


Fig. 6 Distribution of welding residual stresses on the middle-section(A-A')

Fig. 7에서는 용접에 의하여 발생되는 용접잔류응력이 가장 크게 나타나며, 또한 응력의 변화가 심한 용접선으로부터 가장 가까운 요소($x=2\text{mm}$)들인 단면 B-B'에서의 용접잔류응력 분포를 나타내었다. 이들을 고찰하여 보면 용접 시종단부로부터 100mm 이후에서의 용접잔류응력분포의 각 성분은 비교적 일정하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 시종단부를 제외한 영역은 열적뿐만 아니라 역학적 구속도가 거의 일정한 것으로 사료되어 진다. 또한 용접잔류응력 크기는 $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z$ 순으로 나타났으며 이것은 용접체의 각방향의 구속도에 기인한 것으로 간주되어 진다.

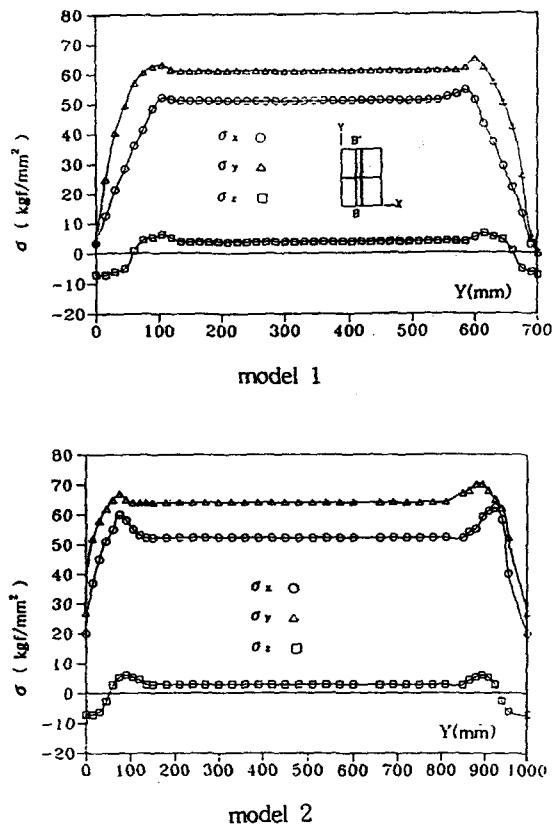


Fig. 7 Distribution of welding residual stresses along weld line in HAZ (B-B')

4. 외력에 의한 용접잔류응력의 재분포 및 그 특성

2차원 비정상 열전도 및 열탄소성해석 결과 용접구조체의 시중단부에서는 비정상역(열 및 역학적 구속)이 존재하며, 기타영역에서는 준정상역(열 및 역학적 구속이 동일)이 함께 존재함을 알 수 있었다.

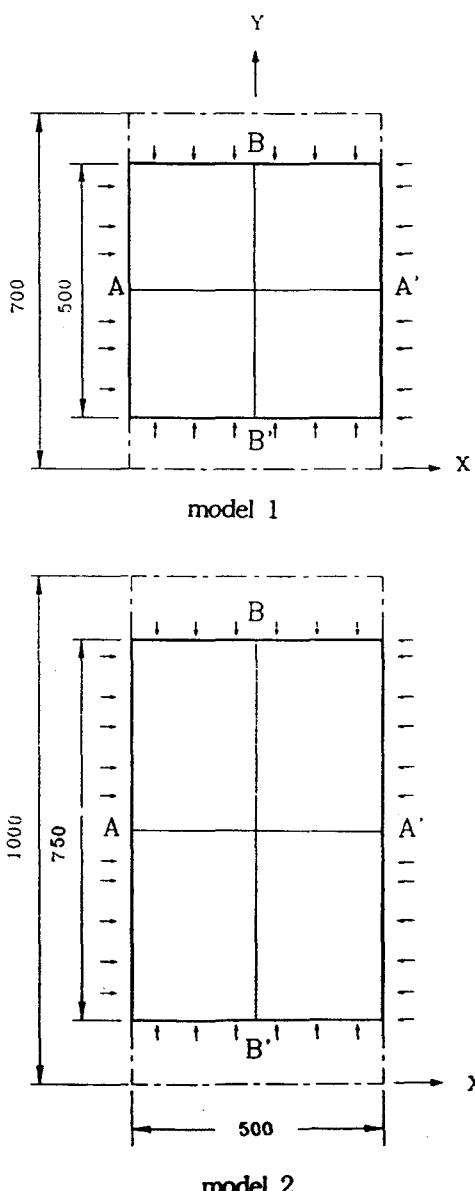


Fig. 8 Model for numerical analysis

따라서, 본 연구에서는 Fig. 8에 도시한 것과 같이 모델 1(길이/폭=1)에서는 비정상역(길이방향으로 시중단 100mm를 제외한 영역 즉, 준정상영역의 정방형판을 떼어내어 x방향, y방향 및 x,y양방향에서 일정한 외력을 가하였으며, 이때의 역학적 현상을 고찰하였다.

또한 용접잔류응력이 존재하지 않는 강판에 대해서도 같은 조건에서 해석을 수행하였으며, 용접잔류응력이 존재하는 용접체의 결과와 비교하였다.

또한, 모델 2(길이/폭=1.5)에서는 모델 1과 같은 조건으로 비정상역(길이방향으로 시중단 125mm)를 제외한 영역 750mm의 시험체만을 떼어내어 해석하였다.

4.1 용접체의 최종강도 평가

4.1.1 x방향 외력작용시의 용접잔류응력

Fig. 8에서 나타낸 것과 같은 용접체의 해석은 용접시중단부에서 각각 100mm를 제외한 model 1 및 125mm를 제외한 model 2와 같이 용접시험체의 준정상역에 해당되는 부분에서 x방향으로 일정한 외력을 가하였으며, 이때의 A-A'단면 즉, 횡단면의 응력분포 상태를 Fig. 9에 나타내었다. x축 하중의 작용에 따라 폭방향의 σ_x 는 두 해석모델에서 용착금속 및 HAZ에서 인장성분이 약 9kgf/mm²정도 감소하였으며 반대로 모재의 압축성분은 약 8kgf/mm²이 증가하였다. 이때 감소 및 증가의 절대크기는 열영향부에서는 약간 커으나, 모재부에서는 일치하였다. 또한 용접선방향의 응력 σ_y 의 변화는 열영향부에서 인장성분이 크게 감소하였는데, 이때 해석모델 2가 해석모델 1에 비하여 약 25%정도 더 큰 응력이 발생하였다. 또한, 모재부에서는 생지강판의 경우와 마찬가지로 압축의 성분이 미소하게 감소되어 대체적으로 완만한 응력의 재분포를 이루었다.

Fig. 10은 길이방향의 단면 B-B'에서의 각 응력의 분포를 나타내었다. 여기서 σ_x 의 경우 시편의 중앙부 ($y=250\text{mm}$ 및 375mm)에서 시중단부 ($y=0\text{mm}$, $y=500\text{mm}$ 및 750mm)에 비하여 약간 큰 압축성분이 발생하였다. 또한 σ_y 의 변화도 시험체의 중앙부에서 약간 큰 응력의 변화가 발생하였는데, 이것의 결과는 생지강판의 해석결과와 차이를 보여주고

있으며, 이는 열영향부와 부근의 금속이 모재부에 비하여 상대적으로 외력에 의해 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

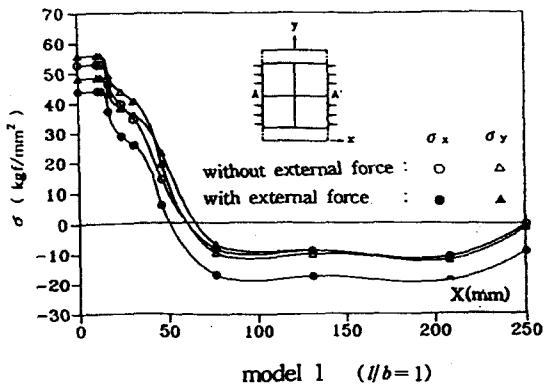
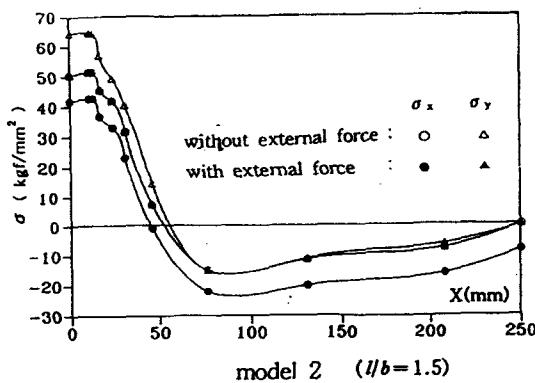
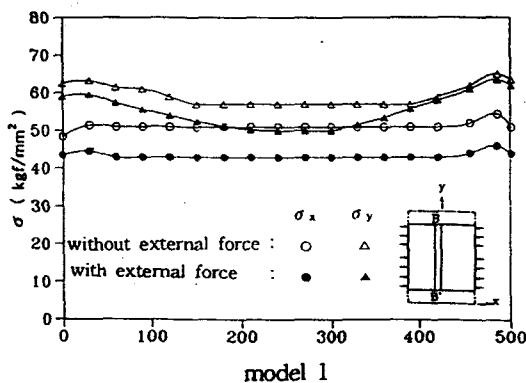
model 1 ($l/b = 1$)

Fig. 9 Distribution of welding residual stresses by the axial force of X-direction



model 1

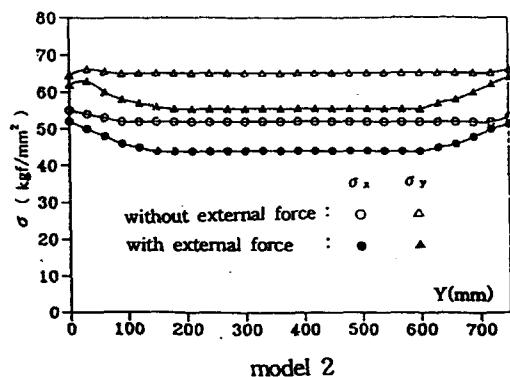
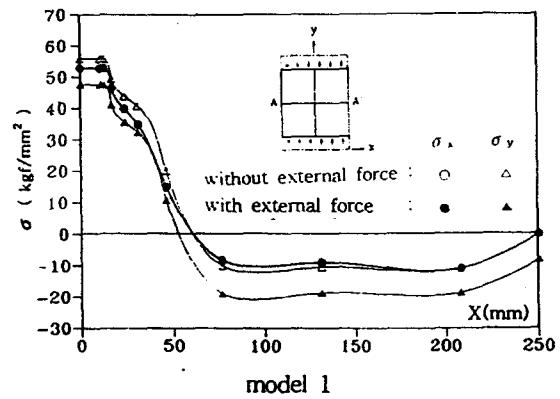


Fig. 10 Distribution of welding residual stresses along the weld line by the axial force of Y-direction

4.1.2 y방향 외력작용시의 용접잔류응력

본 해석은 용접시험체의 시단 및 종단부에서 길이 방향으로 각각 100mm 및 125mm 떨어진 지점의 길이방향의 양단에서 일정한 축하중을 가하였다. 이때의 A-A'면 즉, 횡단면의 응력분포 상태를 Fig. 11에 나타내었다. 축하중의 작용에 따라 용접선 방향의 σ_y 는 용착금속 및 HAZ에서 인장성분이 큰폭으로 감소하였으며 반대로 모재의 압축성분은 큰폭으로 증가하였다. 이때 감소 및 증가의 절대 크기는 동일하였으며, 또한 폭 및 두께방향의 잔류응력의 변화는 σ_y 에 비하여 미소함을 알 수 있다.



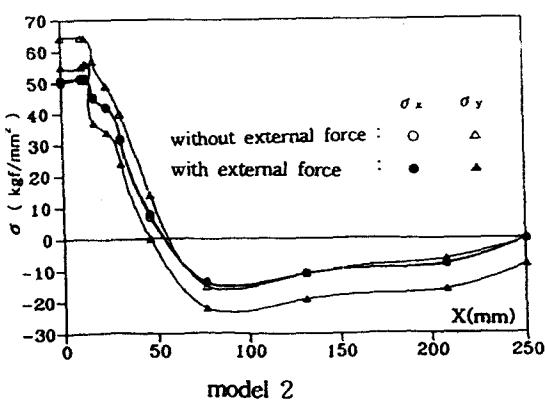


Fig. 11 Distribution of welding residual stresses along the weld line by the axial force of X-direction

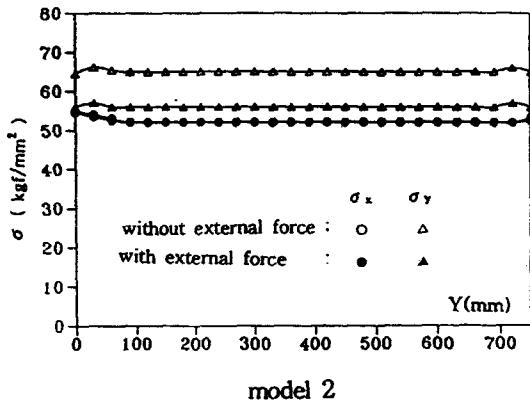
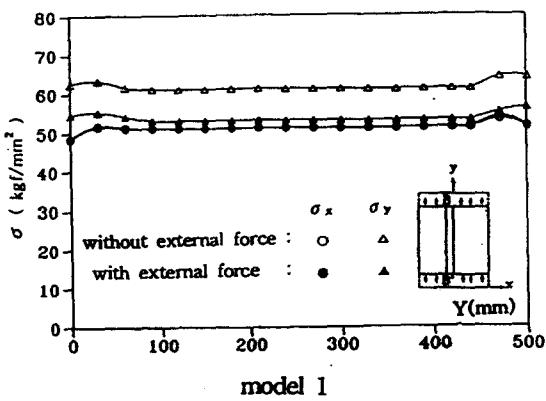


Fig. 12 Distribution of welding residual stresses by the external axial force

Fig. 12는 길이방향의 단면 B-B'에서의 각 응력의 분포를 나타내었다. 전길이에 걸쳐 각 응력성분이 동일하게 변화하고 있음을 알 수 있으며, 특히 σ_y 의 변화가 두드러졌다. 이상의 결과를 바탕으로 고찰하여 보면 y축 하중이 작용할 때 용접잔류응력의 각성분은 σ_y 즉, 용접선방향의 응력성분이 가장 두드러지게 변화됨을 알 수 있고, 그외의 응력성분은 그다지 변화하지 않았다.

4.1.3 x,y 양방향 외력작용시의 용접잔류응력

Fig. 13은 x 및 y 양방향에서 동시에 외력이 작용할 때 중앙횡단면의 응력분포상태를 나타내고 있다. 용접선에 수직방향의 응력 σ_x 의 경우 중첩된 응력값이 나타났으나, σ_y 의 경우는 각각 x방향과 y방향의 외력작용시 용착금속부 주변에서 모두

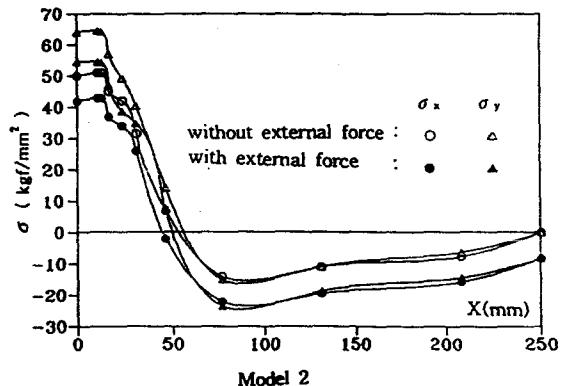
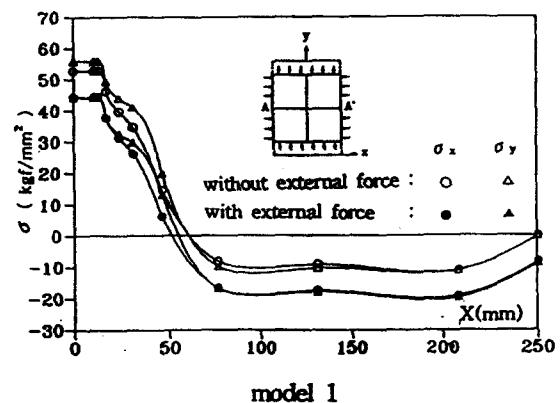


Fig. 13 Distribution of welding residual stresses by the external transverse axial force

압축성분이 발생하였으므로 이들의 영향에 의해 용착금속부 주변에 분포하고 있던 인장의 성분이 가장 큰 폭으로 감소하였다.

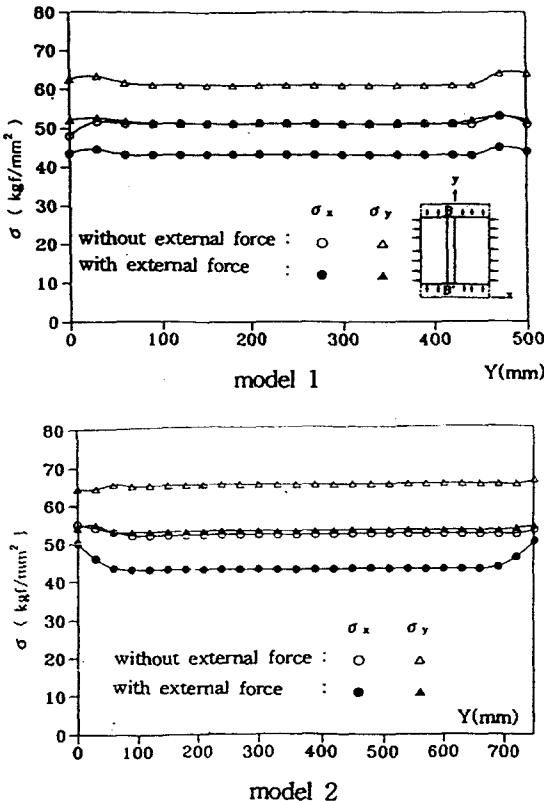


Fig. 14 Distribution of welding residual stresses by the external transverse axial force

Fig. 14는 길이방향의 단면 B-B'에서의 각 응력의 분포를 나타내었는데, 그림에서 알 수 있듯이 x방향의 하중작용시 구속의 영향을 받고있던 σ_x 의 분포성분은 y방향의 하중작용으로 인하여 구속의 영향이 적어짐을 알 수 있다. 또한 σ_y 의 크기는 단지 y방향에서 하중이 작용하였을 경우보다 약 25%의 압축성분이 증가하였다.

5. 결 론

판재의 용접시 용접체의 잔류응력 분포특성 및 각 방향의 축하중 작용시 역학적 현상을 2차원 문

제로 수치해석할 수 있도록 하였으며, 수치해석한 결과는 아래와 같이 도출되었다.

- 1) 용접체에서 발생되는 용접잔류응력은 열 및 역학적 구속에 의하여 발생하며, 열적구속 보다는 역학적구속에 보다 큰 지배를 받는다.
- 2) x축방향 하중 작용시 용접선에 수직방향의 용접잔류응력 σ_x 가 가장 크게 변화하며, 용착금속 및 HAZ부에서는 인장성분이 감소하고, 모재에서는 압축이 증가하였으며 그 절대크기는 동일하며 분포형태도 변하지 않았다. 또한 용접선 방향의 용접잔류응력 σ_y 는 용착금속 및 HAZ부에서는 인장성분이 감소한 반면, 모재에서는 오히려 압축성분이 감소하는 특성이 발생하였으며, 이는 열영향부가 모재부에 비하여 상대적으로 외력의 영향을 크게 받음을 보여준다.
- 3) y축방향 하중 작용시 용접선 방향의 용접잔류응력 σ_y 가 가장 크게 변화하고, 이때 변화되는 절대 크기는 동일하며 분포형태도 변하지 않았다. 또한, 용접선에 수직방향의 용접잔류응력 σ_x 와 두께방향의 응력 σ_z 의 분포 형태 및 크기의 변화는 축하중에 그다지 영향을 받지 않았다.
- 4) x, y 양방향의 외력작용시 각 응력의 분포는 양방향에서 동시에 작용하는 외력의 영향에 의하여 용접선 방향의 응력성분 σ_y 및 이에 직각방향의 응력성분 σ_x 가 서로 중첩되어 나타났다. 따라서 용접잔류응력의 분포형태 및 크기가 가장 복잡하게 나타났다.

이상의 결과에서 잔류응력이 존재하는 용접체는 용착금속부 및 열영향부에서 모재에 비하여 외력의 영향을 크게 받음을 알 수 있었다. 특히 이러한 영향은 길이방향의 외력작용시보다 폭방향의 외력작용시에 더욱 커는데, 이는 용접잔류응력의 성분의 크기가 길이방향보다 폭방향이 작기 때문이라고 사료되어진다.

길이방향의 외력작용시 σ_y , 폭방향의 외력작용시 σ_x , 양방향 동시외력작용시 σ_x , σ_y 의 분포에서 가장 크게 변화된 경우는 x, y 양방향 동시외력작용시의 σ_y 의 변화였으며, 이때의 크기는 약 25% 이내였다. 따라서, 잔류응력이 존재하는 용접구조

물의 강도해석시에는 이러한 영향을 고려해야 한다고 사료된다.

参考文献

1. Yukio Ueda外 2人, “矩形板および防撓板の理想化構造要素の開発 -面内荷重を受ける-”, 日本造船學會論文集, 第156號, pp. 336~377, 1984.
2. Yukio Ueda, S.Rashed, “理想化構造要素法に関する二重底構造の最終強度 解析”, 日本造船學會論文集, 第138號, pp. 322~329, 1975.
3. Yukio Ueda, S.Rashed, “組合せ荷重を受ける矩形板および防撓板の座屈および最終強度の相関關係”, 第156號, pp. 355~365, 1984.
4. Yukio Ueda, S.Rashed, “船體の最終横強度解析に関する基礎的研究”, 日本造船學會論文集, 第136號, pp. 309~324, 1974.
5. 房漢瑞, “有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元 非正常 热傳導 解析”, 大韓造船學會誌, Vol. 27, No. 2, pp. 43~50, 1990.
6. 房漢瑞, “平板熔接에 關한 平面變形 热炭素性 解析”
7. 房漢瑞, “厚板熔接部의 力學的 特性”, 大韓 熔接學會誌, Vol. 10, No. 4, pp. 250~258, 1992.
8. 野本敏治, “熱炭素性問題に關する研究”, 日本造船學會論文集, 第130號, pp. 183~191, 1971.
9. 失川元基 外1人, “有限要素法による熱應力クリープ熱傳導解析”, (株)サイエソス, 1985.
10. A.Kumar, “Stability Theory of Structures”, GRAW-HILL PUBLISHING COMPANY LIMITED, 1985.