

大韓造船學會論文集
 第36卷第4號 1999年 11月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 36, No. 4, November 1999

극후판 Box Column의 Corner Joint 용접시 발생하는 Lamella Tearing에 관한 연구

방한서*, 김성주**, 김종명***, 장웅성****, 권영섭*

A Study of Lamella Tearing being Produced by Corner Joint Welding in Box Column of Ultra Thick Plate

by

Han-Sur Bang*, Seong-Joo Kim**, Jong-Myung Kim***,
 Woong-Sung Jang**** and Young-Seob Kwon*

요 약

강 구조물의 대형화에 기인하여 대형 해양구조물, 선박, 교량 및 고층 구조물에서의 극후판의 사용이 지속적으로 증가하고 있으며, 이런 경향은 앞으로도 계속될 것으로 생각된다. 그러나, 극후판을 사용하여 구조물을 시공할 때, 층상균열의 발생이 보고되고 있으며 이것은 극후판의 두께 방향 중심부를 따라 분포하는 황, 인등의 불순 개재물 및 용접에 기인하여 발생하는 구속 잔류응력에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다.

연속 주조공법에 의하여 제조되는 극후판의 제조공정의 특성상, 층상균열의 발생은 회피하기가 현실적으로 어려우며, 따라서, 본 논문에서는 강구조물의 층상균열 발생의 감소 방안으로서, 금속학적 측면보다는 용접강도 측면에서 유한요소법에 기초한 전산 프로그램을 사용하여 최적 개선부형상 및 용접순서를 선정하고자 한다.

Abstract

Use of the ultra thick plate is being continuously increased in large off-shore structures, ships, bridges and skyscraper construction, due to increasingly large-sized steel structures and it seems that this trend will be maintained. But, occurrence of the lamella tearing has been reported in ultra thick plate used for construction

발 표 : 1998년도 대한조선학회 추계연구발표회('98.11.13)

접수일자 : 1999년 6월 10일, 재접수일자 : 1999년 9월 13일

* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과

** 정회원, 한국선급

*** 정회원, 담양대학 기계·자동차 공학부

****포항산업과학연구원(RIST)

It is reportedly caused by impurities such S(sulfur), P(phosphorus) and others accumulated in the ultra thick plate's centerline in the thickness direction with strip shape or by restraint residual stress caused by the welding. In the ultra thick plate made by continuous casting method, occurrence of lamination is difficult to avoid because of the properties of production procedure. Therefore, with a view to reducing the lamella properties, this report tries tearing in the steel structure in the view of welding strength rather than metallic properties, this report tries to seek the optimum groove and welding procedure by using the computer simulation based on FEM (Finite Element Method).

1. 서 론

강 구조물의 대형화 추세에 따라 대형 해양구조물, 선박, 교량 및 고층빌딩의 설계 및 시공에 극후판(極厚板) Box-column이 지속적으로 증가하고 있으며, 이런 경향은 앞으로도 계속될 것으로 보여진다. 그러나, 후판 제조공정의 연속주조(Continuous casting)과정을 거치면서, 극후판 표면부와 중심부의 냉각속도 차이에 기인하여 최종적으로 응고되는 후판의 중심부에 황(S), 인(P), 망간(Mn)등의 비금속 불순 개재물¹⁾이 집적되게 되며, 추후 압연과정을 거치면서 강재 두께의 중심부에 길게 연신된 형태의 편석대를 형성하는 것으로 알려져 있다. 이는 결국 강재 두께방향의 연성저하를 초래하여 강구조물의 제조과정 및 사용중의 외력에 대하여 Lamella tearing을 발생시키는 사례로 보고^{2,3)}되고 있다.

주요 발생요인으로는 후판 제조과정중에 비금속 불순 개재물에 의한 편석대의 형성과 시공과정중의 용접에 의한 과도한 판 두께 방향의 용접잔류응력 및 구속응력으로 대별할 수 있으나, 제조과정중의 편석대의 형성은 연속주조(Continuous casting) 공법의 특성상 제조공정의 변화 없이는 현실적으로 기대하기 어려우며, 시공과정의 용접 잔류응력 및 구속응력의 경우 용접조건에 변화를 통해 다소의 감소방안⁴⁾을 도출할 수 있을 것으로 고려되어진다. 따라서, 본 연구에서는 용접강도 측면에서 용접에 의한 열전도, 열전달 해석 및 열탄소성 해석을 통해 용입조건, 개선부 형상, 용접순서⁵⁾에 따른 용접잔류응력 및 변형을 해석을 수

행하고자 하며, 최종적으로 Lamella tearing 감소를 위한 최적의 용접조건을 찾고자 한다.

2. 용접조건 및 해석방법

용접길이가 충분히 길 때, 용접시작 및 종료부를 제외하고는 시간의 변화에 따른 역학적 현상은 준정상역으로 가정^{6,7,8)}할 수 있으며, 일반적으로 준정상 상태는 열원이 이동하는 용접조건에서 온도분포가 정상상태로 간주되는 전체용접 사이클중 비정상역으로 구별되는 용접의 시·종단부의 작은 영역을 제외하고 전 영역에 걸쳐 나타난다.

따라서, 본 연구에서는 준정상 상태로 구별되는 용접부 중앙단면에 대하여 순간열원을 고려한 열전도 및 열탄소성 해석을 수행하였다.

해석에 사용한 열전도 프로그램에 대한 유한요소 정식화 과정에서는, 재료가 등방성(Isotropic)일 때, 연속체의 비정상 열전도문제의 지배방정식(Governing equation)은 아래와 같이 기술된 식을 사용하였다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (1)$$

(1)식을 2차원 비정상 열전도 방정식의 유한요소식으로의 정식화를 통해 구성한 (2)식을 유도하였다.

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

물체 표면의 열적 경계조건은 "프리어(Fourier) 법칙"을 사용하여 다음과 같이 구성하였으며,

$$q = -\alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -\frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

또한, 열전달의 경우에 q는 아래 식을 사용하였다.

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad (4)$$

여기서, T: 온도(°C), ρ: 밀도(cal/g°C)

c: 비열(g/cm³), λ: 열전도율(kcal/m · hr · °C)

Q: 단위시간당 입열량(cal/sec) 이다.

용접잔류응력 및 변형을 해석용 열탄소성 프로 그래프에서는 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 항복강도, 탄성계수 등의 재료정수의 온도의존성을 고려^{9,10)}하였고, 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow)이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정도를 높였다. 전 변형률(Total strain) 증분 {dε}은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형률의 합으로써 구성되었다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \quad (5)$$

또한, 선형등방경화 법칙을 고려한 폰-미세스(Von-Mises) 항복조건을 항복합수로 사용하였다.

각 모델에 대한 용접 입열(Q)의 계산은 (6)식에 의거하여 계산하였으며,

$$Q = \eta \frac{V \cdot I}{v} \text{ (Joule)} \quad (6)$$

용접금속의 각 요소에 대한 입열 q는 칼로리로 환산한 다음 (7)식을 사용하였다.

$$q = \frac{Q \cdot \ell}{4.19 \cdot A \cdot \ell \cdot t} \text{ (cal)} \quad (7)$$

여기서, t=(ℓ/v): 용접시간(sec), V: 전압(V),

I: 전류(A), Q: 입열량(Joule),

A: 단면적(mm²), v: 용접속도(mm/sec),

ℓ: 용접길이(mm), η: 용접효율 이다.

용접금속부 위치, 형상 및 순서의 변화에 따른 용접잔류응력 및 변형률을 고찰하기 위해, 완전용입 및 부분용입의 조건하에서 Fig. 3에 도시된 것과 같은 각각의 모델에 대하여 2층3패스(2layer-3pass)의 적층조건으로 해석을 수행하였으며, 용접방법은 잠호용접(Submerged-arc welding)을 사용하였다.

또한, 각 용접조건에 대한 개선형상 선정과 관련하여, 완전용입의 경우 실제모델을 참고로 했으며, 부분용입의 경우 완전용입 조건의 개선각 선정이유를 배경으로 하여 균열 발생이 예상되는 수평 및 수직방향 Skin plate의 두께방향 중심을 포함하는 개선 각도를 선정하였으며, 이것에 상당하는 용착면적을 고려하여 Single V형 groove의 개선각을 선택하였다.

3. 해석모델

해석을 위하여 사용한 모델의 형상 및 제원은 Fig.1 및 Table 1에 나타내었으며, 용접조건은 Table 2에 나타내었고, 요소분할은 Fig.2(a),(b)에 나타내었다.

요소의 총 절점수는 모든 조건에서 동일하게 2202개이며, 요소수는 2099개(완전용입), 2086개(부분용입)이다. 부분용입 모델에서는 열 전달을 고려하기 위해 수평 및 수직방향 Skin plate 사이의 갭(Gap)을 5mm, 깊이는 40mm로 유지하였다.

재료는 용접구조용 압연강재인 SM490A (KS 규격)를 사용하였으며, 모델은 Box-column의 상·하 및 좌·우방향의 기하학적 대칭을 고려하여, 1/4모델에 대하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Box-column의 구속도를 고려하여 해석하였다.

Table 1 Dimension of model

Thickness of skin plate (T)	80 mm	
Width of skin plate (W)	500 mm	
Height of skin plate (H)	500 mm	
Angle of the single V groove	Full penetration	50°
	Partial penetration	60°
Angle of the single bevel groove	Full penetration	43°
	Partial penetration	50°

Table 2 Welding conditions

Voltage	Current	Welding speed
42 (V)	1100 (A)	40 (cm/min)

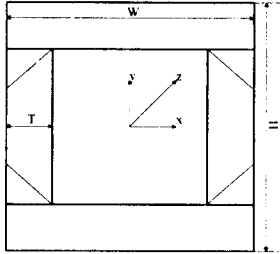
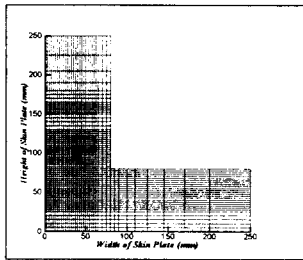
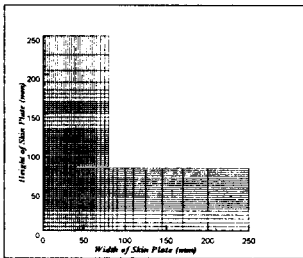


Fig. 1 Model for specimen



(a) Full penetration



(b) Partial penetration

Fig. 2 Description of model mesh for numerical analysis

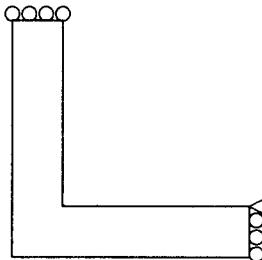
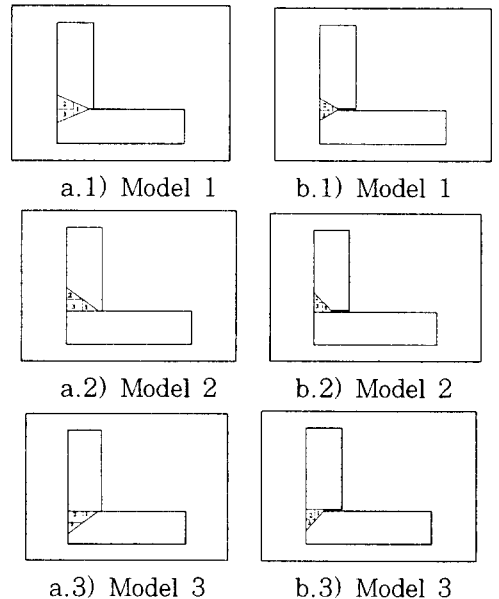


Fig. 3 Boundary condition

해석은 완전용입, 부분용입시 용착금속 위치 및 개선행상을 고려하여 2층3패스의 용접을 수행하는 것으로 하였다. 또한, 용접순서를 변화시킴으로써 용접순서가 용접잔류응력 및 변형율에 미치는 영향을 고려하였다. 용접순서는 편의상 각 모델에 대하여 초층 용착부를 기준으로 반시계 방향을 방법 ①, 시계방향을 방법 ②라 정의했으며, Fig. 4에 도시한 적층순서는 방법 ①에 의한 것이다.



(a) Full penetration (b) Partial penetration

Fig. 4 Welding procedure

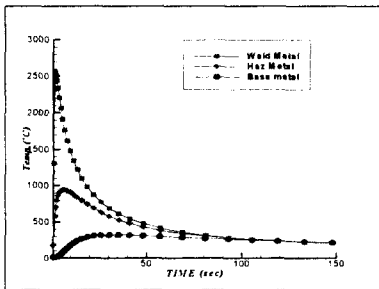
4. 결과 및 고찰

본 연구에서 고려한 Box-column 모델의 경우, 수직 및 수평방향 Skin plate 중심부의 열분포 및 용접잔류응력, 소성변형율의 분포양상 및 크기에 주안점을 두고 고찰하였다.

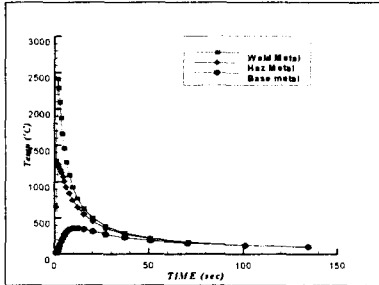
4.1 열

최종 용접후(2층3패스) 수직방향 Skin plate 에서 표면보다 응력의 변화가 심할 것으로 예상되

는 두께방향 $x=15\text{mm}$ 위치에서 완전용입의 경우는 용착금속($y=67.5\text{mm}$), 열영향부($y=47.5\text{mm}$), 모재부($y=27.5\text{mm}$)에 대하여, 부분용입의 경우는 용착금속($y=72.5\text{mm}$), 열영향부($y=57.5\text{mm}$), 모재부($y=42.5\text{mm}$)에 대하여, 각 모델에 대한 시간의 변화에 따른 온도분포를 Fig. 5(a)(완전용입)와 (b)(부분용입)에 각각 도시하였다. 도시한 예는 V형 groove (Model 1)의 경우이다.



(a) Full penetration : Model 1

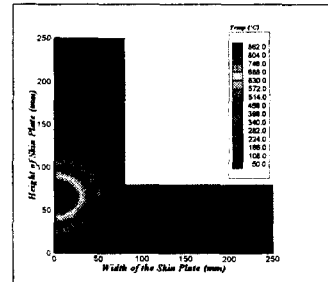


(b) Partial Penetration : Model 1

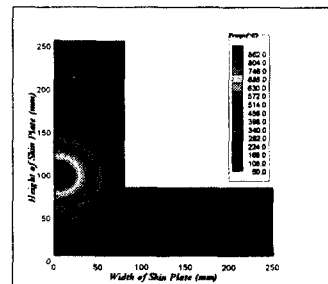
Fig. 5 History of temperature on the W·M, HAZ and B·M in full and partial penetration

그림에서 주목하여 보면, 모델별 용접에 의한 온도상승 및 냉각과정에서의 온도구배는 부분용입인 경우인 Fig. 5(b)에서 매우 가파르게 나타났다. 이는 용착금속부가 상대적으로 완전용입의 경우보다 적기 때문에 입열량 또한 적을 수밖에 없으며, 따라서 완전용입조건에 비하여 상대적으로 혹독한 냉각과정을 겪기 때문이라 사료된다. Fig. 6은 완전용입 조건에서 최종 pass 용착후 20초 후의 온

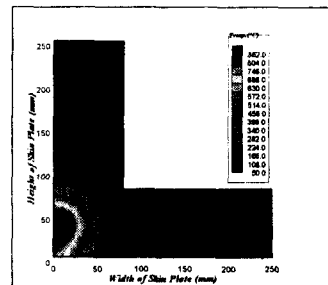
도분포를 각 모델에 대하여 나타낸 것으로서 반원형의 형태로 열이 후판 내부로 전도되고 있음을 알 수 있으며, 열전도가 후판내부에서 주요 열 이동 수단임을 보여주는 것이다. (c) Model 3에서 고온역이 Skin plate의 모서리부로 치우쳐 상하 방향으로 비대칭을 이루는 것은 열전달의 효과에 기인한 열의 집적에 다른 것으로 생각되며, 부분용입조건에서도 입열량의 차이에 기인한 고온역의 차이를 제외하고는 유사한 열분포 양상을 보이고 있다.



(a) Model 1



(b) Model 2



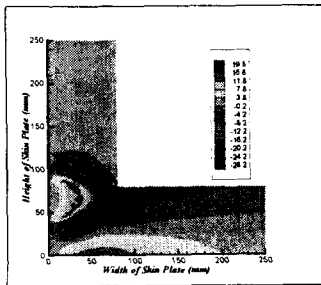
(c) Model 3

Fig. 6 Contour of the temperature at 20sec in full penetration

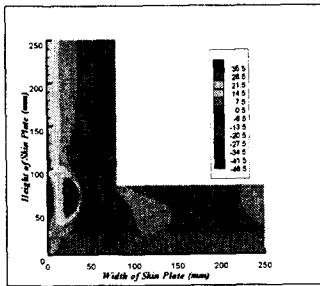
4.2 용접잔류응력 및 변형을

본 연구에서는 비금속 불순 재료물의 집적에 기인하여 용접 잔류응력 및 구속응력에 대하여 취약할 것으로 예상되는 완전용입 조건의 수평 방향 Skin plate와 부분용입 조건의 수평 및 수직방향 Skin plate의 두께방향 중심부에서의 용접잔류응력 및 잔류 변형을 해석을 완전용입과 부분용입 조건에서의 각각의 모델에 대하여 수행하였다.

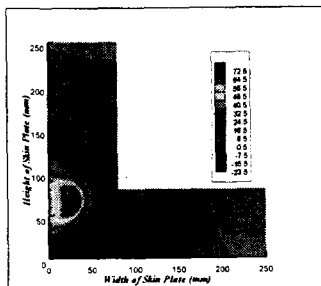
4.2.1 용입조건에 따른 고찰



(a) σ_x



(b) σ_y



(c) σ_z

Fig. 7 Welding residual stress after full penetration

Fig. 7은 완전용입 조건에 대한 모델 1의 방법 1에 대한 용접잔류응력의 분포를 최종 pass 용착 후 각 응력성분에 대하여 도시한 것으로서, 용착 후 냉각과정에서의 수축력이 주위 금속에 의하여 구속되므로서 용착부에서 인장응력이 크게 나타나고 있으며, 주위 금속에서는 이에 대응한 압축응력이 나타났다.

수평방향 응력성분인 σ_x 와 수직방향 응력성분인 σ_y 의 경우 Box column 자체의 구속력에 기인한 구속응력이 각 Skin plate의 표면을 따라 분포하면서 용착부에서 멀어질수록 분포 영역이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 용착부로부터의 거리에 비례하여 판 내부에서의 구속도가 증가하고 있음을 나타내는 것이다. 용접선방향 응력성분인 σ_z 의 경우 일반적으로 구속도에 기인한 응력발생은 미미하며, 다만 용접입열에 따른 잔류응력의 분포만이 크게 분포하고 있음을 보이고 있다.

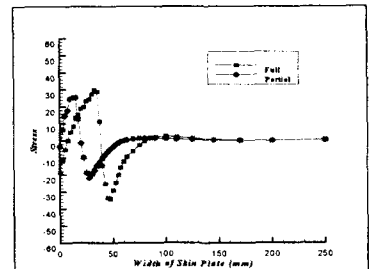
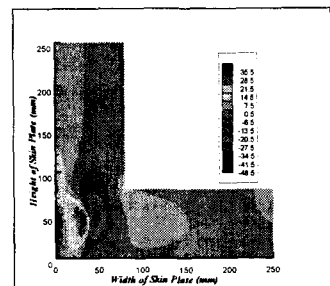
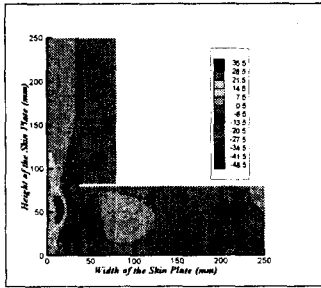


Fig. 8 Distribution of residual stress(σ_y) along width of skin plate for full and partial penetration condition



(a) Full penetration



(b) Partial penetration

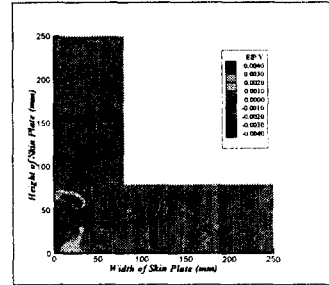
Fig. 9 Welding residual stress(σ_y) of full and partial penetration after 3 pass welding

Fig.8, 9에서는 본 연구에서 고려하는 주요 Lamella tearing의 예상 발생지점인 수평방향 Skin plate의 두께방향 중심부에서의 용접 잔류 응력 σ_y 의 분포를 Lamella tearing의 발생억제에 가장 우수한 것으로 해석된 모델 3의 경우에 대하여 살펴보았다.

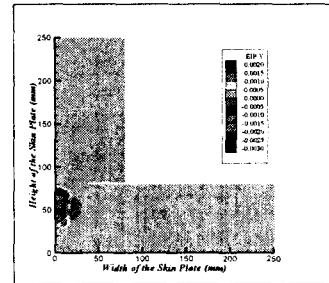
도시한 바와 같이 부분용입의 경우가 예상 균열 발생위치인 수평방향 Skin plate 좌측표면에서 완전용입 조건에 비하여 다소 낮은 압축응력을 나타내었다.

용접잔류 소성변형율의 경우도 Fig. 10에 도시한 바와같이 예상 균열 발생위치에서 다소의 인장성분을 나타내고 있다. 또한 Skin plate의 두께 중심부를 따라 관찰한 소성변형율의 분포도 Fig. 11에 나타난 것처럼 부분용입 조건이 전체적으로 인장 소성변형율을 보이고 있으며, 완전용입 조건에서는 용착금속에 의한 구속으로 균열이 억제될 것으로 사료되는 수직방향 Skin plate의 중심부에서도 부분용입 조건의 경우는 Lamella tearing의 발생에 불리할 것으로 사료된다. 따라서 부분용입 조건의 경우 완전용입 조건에 비하여 상대적으로 입열량의 감소에 기인한 국부적인 변형율의 감소측면 보다는, 전반적인 잔류응력 및 변형률 분포에서 고려되는 불리한 측면이 더 클 것으로 사료되며, 결과적으로 본 연구에서 고려하는 Box column의 Lamella tearing 발생억제에 대하여는 완전용입의 조건이 보다 유리한 조건으

로 사료된다.



(a) Full penetration



(b) Partial penetration

Fig. 10 Plastic strain ϵ_y^p of full and partial penetration after 3pass welding

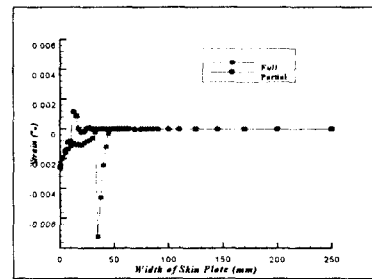
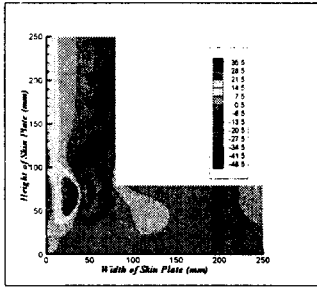


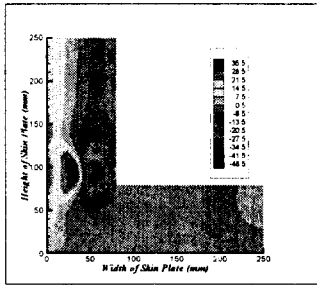
Fig. 11 Distribution of plastic strain(ϵ_y^p) along width of skin plate for full and partial penetration condition

4.2.2 개선각 및 위치변화에 따른 고찰

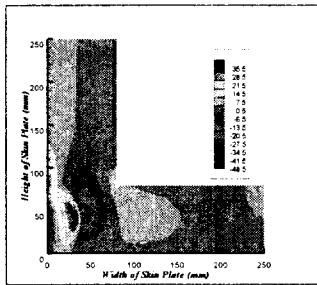
Fig. 12, 13은 수평방향 Skin plate 두께중심부에서 폭방향 (X축)을 따라 관찰한 각 모델의 용접방법 1(완전용입)에 대한 수직방향 응력 성분인 σ_y 를 그래프로 도시한 것으로서, 균열의 예상



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

Fig. 12 Welding residual stress(σ_y) after full penetration

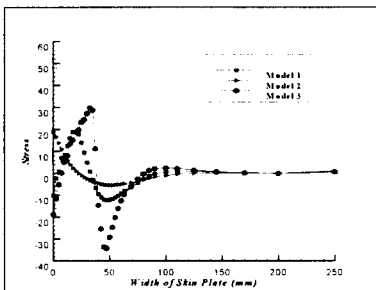


Fig. 13 Distribution of σ_y along width of skin plate in full penetration 3 pass welding

발생위치로부터 가장 먼 위치에서 용착이 행해짐으로써 Box column 자체의 구속이 가장 클 것으로 예상되는 모델 2가 수평방향 Skin plate의 좌측표면에서 인장응력을 나타내고 있으며 모델 2와 3은 각각 압축응력을 보이고 있다. 이 부분이 균열 예상 발생위치임을 고려할 때 모델 2의 경우가 다소 불리한 응력분포를 나타내고 있으며 모델 3의 경우가 가장 유리한 결과를 보이고 있다.

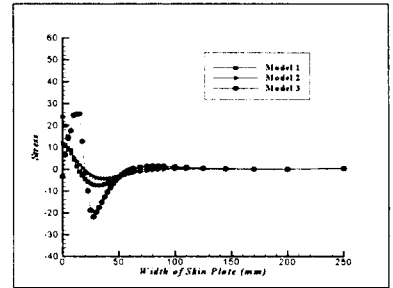


Fig. 14 Distribution of σ_y along width of skin plate in partial penetration 3 pass welding

Fig. 14는 부분용입 조건의 수직 방향의 응력 성분인 σ_y 분포를 나타낸 것으로서 두께방향의 중심부에서 관찰한 수평방향 Skin plate에서의 σ_y 의 경우, 모델 1과 2에서 모두 Skin plate 표면에서 인장응력을 보이고 있으며, 모델 3의 경우는 압축응력을 나타내고 있다. 따라서 모델 3이 완전용입 조건과 마찬가지로 가장 유리할 것으로 사료된다.

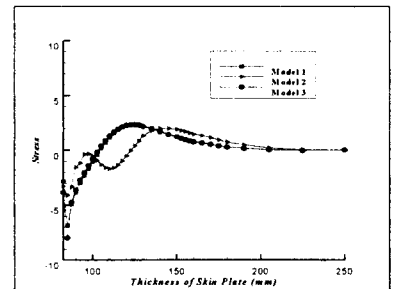


Fig. 15 Distribution of σ_x along height of skin plate in partial penetration 3 pass welding

Fig. 15의 부분용입 조건의 수직방향 Skin plate에 대한 σ_x 의 분포 역시 모델 3이 미소하지만 Lamella tearing의 예상 발생 위치에서 가장 큰 압축응력을 나타내고 있기에, 결과적으로 모델 3의 경우가 완전 및 부분용입 조건에서 모두 균열 발생 억제에 가장 유리할 것으로 해석된다.

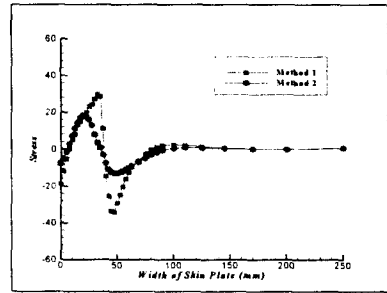
4.2.3 용접 순서에 따른 고찰

이상의 결과를 바탕으로 Lamella tearing의 억제에 가장 유리할 것으로 고려되어지는 완전용입 조건의 모델 3에 대한 용접순서 측면의 해석을 위하여 Fig. 16(a),(b)에 방법 1 및 방법 2에 대한 용접 잔류응력의 분포 및 소성변형을 분포를 도시하였다.

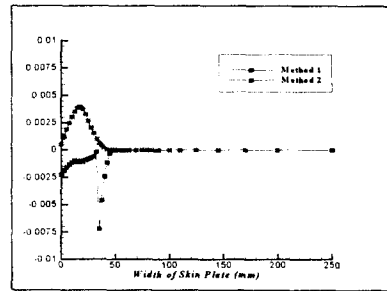
(a)의 수평방향 Skin plate의 두께 중심부에서의 응력 σ_y 의 분포를 보면, 방법 1이 방법 2에 비하여 Skin plate의 좌측표면에서 보다 큰 압축 응력을 발생시키고 있다.

(b)에 도시한 동일위치에서의 방법 1과 방법 2에 대한 소성변형율의 분포를 살펴보면, 전반적으로 용착이 행해진 부분에는 압축 소성변형율, 용착부 주위로 인장 소성변형율이 나타나고 있으며, 결과적으로 균열의 예상발생지점을 용착금속에 의하여 구속하는 용접방법 1의 경우가 Lamella tearing의 생성억제에 유리할 것으로 예상되어진다.

결과적으로, Lamella tearing의 발생에 가장 크게 영향을 줄 것으로 사료되는 완전용입 조건의 σ_y 와 부분용입 조건의 σ_x , σ_y 의 분포에 주안점을 두고 해석을 수행한 결과, 완전용입 및 부분용입 조건에서 모두 모델 3이 Lamella tearing의 발생억제에 가장 효과적인 것으로 판명되었으며, 용입조건 측면에서는 부분용입 조건보다는 완전용입 조건이 상대적으로 유리한 것으로 나타났다. 용접순서의 측면에서는 완전용입 조건의 모델 3에 대한 방법 1이 방법 2에 비하여 용접잔류응력 및 소성변형율의 분포에서 각각 더 유리한 결과를 보여주고 있으며, 전체적인 측면에서 모델 3, 모델 1, 모델 2의 순서대로 Lamella tearing의 발생 억제에 유리한 것으로 나타났다.



(a) Welding residual stress (σ_y)



(b) Plastic strain (ϵ_p)

Fig. 16 Distributions of welding residual stress (σ_y) and plastic strain (ϵ_p) along width of skin plate for method 1, 2

5. 결론

Lamella tearing의 발생이 예상되는 부분을 용착금속으로 채우는 개선부 형상이 발생억제에 가장 유리하다는 결론에 도달하였으며, 결과를 종합하여 보면 다음과 같다.

- 1) 부분용입 조건이 완전용입 조건에 비교하여 용착면적이 작음에 기인하여 상대적으로 냉각속도에 대한 온도구배가 가파르게 나타났다.
- 2) 부분용입 조건의 갭(gap)의 위치에서 역시 열전달의 효과에 따른 열의 집적 현상이 발생하였다.
- 3) 용접잔류응력 측면에서 각 용입조건의 모델 3이 다른 모델에 비하여 상대적으로 우수한 것으로 판명되었으며, 용입조건별 역학적 특성은 완전

용입 조건이 부분용입 조건에 비하여 유리한 결과를 나타내었다.

4) 예상 균열발생 지점을 용착금속에 의해 구속하는 것이 용접잔류응력 및 변형을 측면에서 유리한 것으로 판명되었다.

후 기

본 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원에 의해 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Bellen, M.J. Spanraft, J. h. van der Veen(Netherlands) "Some Steelmaker's Experience on he Improving the Resistance of Steel Plate to Lamella Tearing".
- [2] American Institute of Steel Construction "Commentary on Highly Restrained Welded Connections", The Engineering Journal, pp.61-73, Third Quater, 1973
- [3] E. Holby and J. F. Smith, "Lamella Tearing The Problem Nobody Seems to Want to Talk About", Welding Journal Vol.59 No.2, pp.37-44, 1980
- [4] E. J. Kaufmann, A. W. Pense, R. D. Stout "An Evaluation of Factors Significant to Lamella Tearing", AWS Welding Research Supplement, pp43-49, March 1981
- [5] 木原 博 外3名, "溶接順序가收縮及ひ残留應力に及ぼす影響".日本造船協會,秋季講演會, pp139-149 昭和 31年
- [6] 金鍾鳴 "厚鋼板 Butt 및 T-joint 溶接部の最適 溶 接 形 狀 에 關 한 研 究" 博 士 學 位 論 文, 1997
- [7] 房漢瑞 "有限要素法에 의한 薄板溶接의 2次元 非定常 熱傳導解析", 大韓造船學會誌, 제27권, 제4호, pp.43-50, 1990
- [8] 矢川元基 外 1人 "有限要素法による熱應力・クリップ・熱傳導解析, 사이エンス社, 1986
- [9] 房漢瑞, "厚板 溶接部の 力學的 特性", 大韓熔接學會, 제10권, 제4호, 1992
- [10] 房漢瑞 外 1人 "有限要素法에 의한 厚板溶接時 3 次元 非定常熱傳導 解析",大韓熔接學會, 9권, 제2호, pp.37-42, 1991