

극후판 Box-Column의 Lamellar 균열 감수성 평가

노찬승* · 박창수** · 김흥주* · 방한서*** · 이창우****

*조선대학교 선박해양공학과 대학원, ** (주) 미래 이엔씨,

조선대학교 선박해양공학과, *울산과학대학 기계학부

Sensitivity Appraisal for Lamellar Tearing of Box-Column of Ultra Thick Plate

CHAN-SEUNG RO*, CHANG-SOO PARK**, HEUNG-JU KIM*, HAN-SUR BANG*** AND CHANG-WOO LEE****

*Graduate School, Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Gwangju, Korea

**MIRAE E & C, Daejeon, Korea

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Gwangju, Korea

****Mechanical Department, Ulsan College, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Welded Joint Zone 용접부, Lamella Tearing, HAZ 열영향부, Welding Defect 용접결함, Crack 균열

ABSTRACT: In case of the thick rolling-steel for a multistory building, a large oil-drilling structure, a large vessel, a bridge and so on, Lamella Tearing around the welded joint zone is the one of the most serious problems. In order to prevent Lamella Tearing, not only is choice of material important, but also the comprehensive investigation for the structural design and the construction. The Lamella Tearing that is a staircase-shape occurs due to the contraction stress to the thickness direction of the plate and has the character that the cracks progress along the elongated inclusion by rolling. In general, because cracks occur at the heat affected zone and around HAZ, it is necessary to establish the safety and the confidence of the welded structure to restrain the welding defect such as Lamella Tearing. The mechanical approaches are the easier and more economical than the approaches of the material and the construction method. In addition, the appropriate welding profile and the optimum welding condition contribute toward the improvement of the productivity and influence on the standardization of the manufacturing technology.

1. 서 론

Lamellar Tearing은 용접 Joint부에서 두께방향으로 응력이 크게 작용하는 고층건축물, 대형 석유시추 장비, 대형선박, 교량등의 대형 구조물용 극후판 압연강재에서 발생하는 가장 큰 문제중의 하나로서 이것의 방지를 위해서는 소재선택 뿐만 아니라 구조물의 설계 및 시공에 대한 종합적인 대책이 필요하다. 발생 가능성이 큰 용접이음 형태로서는 관통판 이음부, Corner Joint, T-Joint가 있으며, 일반적으로 외적구속이 엄격한 이음부에 발생하는 것으로 알려져 있지만 판 두께가 두꺼울수록 판 표면을 가열하는 것만으로도 발생하는 경우가 있다. Lamellar Tearing의 주요 발생 및 진전 특성은 압연에 의해 길게 연신된 개재물을 따라서 균열이 진전하며 전반적으로 계단상의 형태로 존재하고, 용접시 판 두께방향의 수축 응력에 의하여 발생하며 균열은 일반적으로 열영향부(heat affected zone, HAZ) 또는 그것에 가까운 부분에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 발생형태는 관계되는 개재물의 종류, 분포 형태 및 위치에 따라 계단상의 것으로부터 비교적 직선상의 것 등 일정한 형태는 보이지 않고 있으며, 주요 발생 형태로서는 용접 구속응력에 의한 비금속 개재물과 금속입자와의 사이의

개구로 계단부가 형성되고 전단력에 의해 불연속부가 생겨 이들이 연결되는 형태, 용접금속에 의한 비금속 개재물과 금속요소 사이의 개구를 기원으로 하여 구속응력 및 수소에 의한 지연균열 (delayed cracking)의 형태로 진전하는 형태, 용접결함의 일종인 Root Crack등이 전파하는 과정에서 Lamellar Tearing으로 진전하는 형태로 크게 구분 할 수 있다. 본 연구에서는 2차원 열전도해석 및 열탄소성 해석을 통하여 Box-Column 코너 이음부에 대한 용접잔류응력 특성을 규명하고, 잔류응력 및 구속응력이 최대로 발생할 수 있는 조건을 제한하여 용접 강도측면에서 극후판 용접재의 Lamella 균열 감수성을 평가하였다.

2. 해석 방법

2.1 열전도 이론

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

해석에 사용한 열전도 해석 프로그램에 대한 유한요소 정식화 과정에서는, 재료가 등방성(Isotropic)일 때, 연속체의 비정상 열전도 문제의 지배방정식(Governing equation)은 아래와 같다.

제1저자 노찬승 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375
062-230-7883 cs715@daum.net

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

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. 식(1)에 형상함수[N]을 가중함수로 하여 Galerkin법을 적용하면 아래 식(2)가 얻어진다.

$$\int_V [M]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (2)$$

최종적으로 2차원 비정상 열전도식을 매트릭스로 표현하면 아래와 같다.

$$[K]\{\phi\} + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = \{F\} \quad (3)$$

여기서, [K]: 열전도 매트릭스, [C]: 열용량 매트릭스, {F}: 열유속 벡터이다.

2.2 열탄소성 이론

용접잔류응력 및 소성변형을 해석용 열탄소성 프로그램에서는 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 항복강도, 탄성계수 등의 재료정수의 온도의존성을 고려하였고, 소성역에서는 소성유동(Plastic flow)이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정확도를 높였다. 전 변형율(Total strain)증분 {dε}은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형율의 합으로써 구성되었다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \quad (4)$$

또한, 선형등방경화 법칙을 고려한 Von-Mises 항복조건을 항복함수로 사용하였으며, 물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따르면 요소의 등가절점력 증분 {dF}는 아래와 같다.

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\} \quad (5)$$

여기서, [K]: 요소의 강성 매트릭스, {dL}: 열에 의한 등가 절점력

3. 해석모델

해석모델은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 실제 현장에서 적용되고 있는 Box-Column의 Corner joint에 대하여 Lamella Tearing의 발생이 예상되는 Web 개선형상에서 완전용입조건에서는 35° 부분용입조건에서는 45°를 선정하였으며 Fig. 2에 도시하였고, Box-Column 시험체 단면형상의 상하 및 좌우방향의 대칭성을 고려하여 1/4 부분에 대하여 해석을 수행하였다.

완전용입조건은 대입열용접 3pass, 부분용입조건은 대입열용접 2pass로 구분하여 각각에 대하여 2차원 비정상 열전도 해석과 용접잔류응력해석을 수행하였다. 수치해석시 용접조건은 전 모델에 대하여 비교 데이터를 얻기 위하여 Table 1과 같이 동일하게 하였으며, 용접방법은 잠호용접(Submerged-arc welding)을 사용하였다. 그리고, 고려한 경계조건은 Fig. 3과 같이 Box-Column의 상하 및 좌우 방향의 대칭성을 고려하여 구속도를 결정하였다. 해석에 사용된 용접재료는 극후물 건축구조용 강재인 SM490TMCP (PILAC-BT33)로 Table 2에 재료에 대한 화학조성 및 물리적 성질을 나타내었다.

Table 1 Welding conditions

Partial penetration		1pass	2pass	
web 45°	Voltage(V)	40	40	
	Current(A)	1450	1450	
	Weld speed(cm/m)	30	30	
Full penetration		1pass	2pass	3pass
web 35°	Voltage(V)	40	40	40
	Current(A)	1450	1450	1450
	Weld speed(cm/m)	30	30	30

Table 2 Material properties

SM490 TMCP (PILAC- BT33)	Mechanical properties			Chemical composition (wt%)				
	YP	TS	EL	C	Si	Mn	P	S
	36.8(kg/mm²)	52.9(kg/mm²)	29%	0.137	0.274	1.37	0.018	0.002
	Al	Ti	Nb	N	Ceq			
	0.03	0.017	0.015	0.0045	0.38			

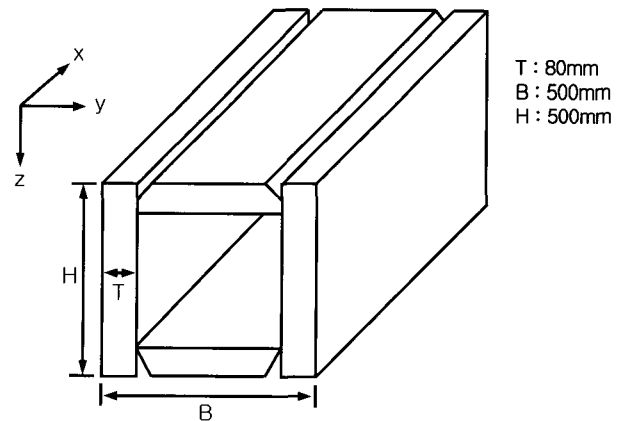


Fig. 1 Model specimen

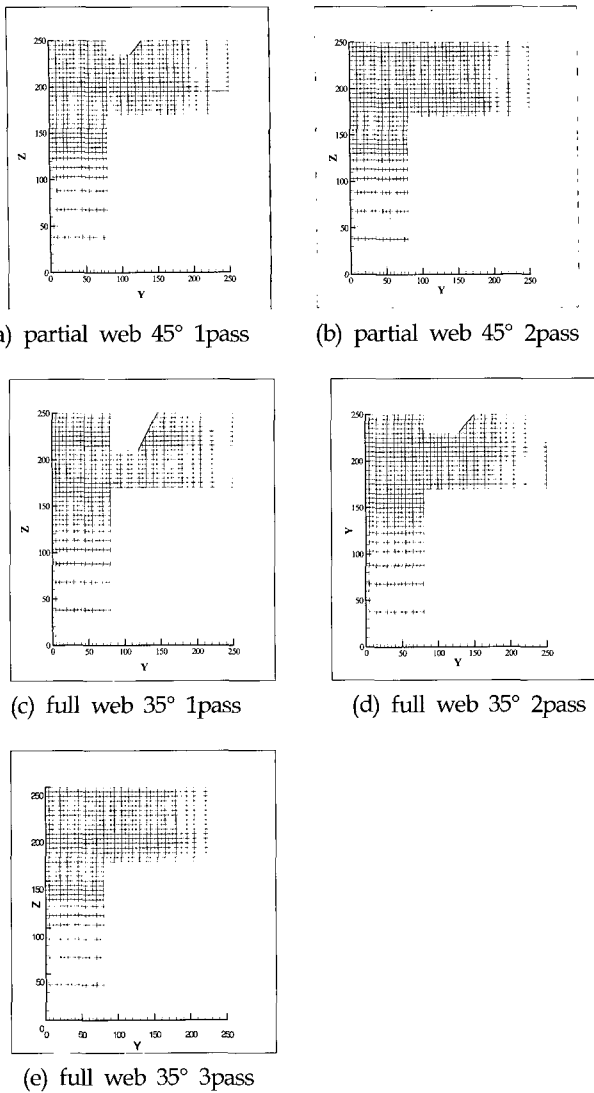


Fig. 2 Mesh division for numerical simulation (Unit: mm)

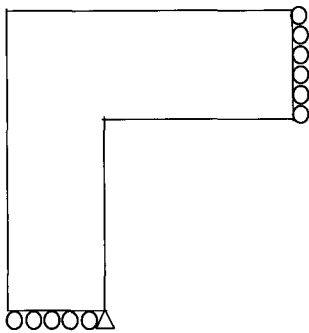


Fig. 3 Boundary condition for analysis of welding residual stress

4. 해석 결과

본 연구에서는 현장에서 실구조물 제작에 사용되는 조건을 기준으로 Table 3에 나타난 것처럼 개선각을 변화 시켰으며 수치해석에 사용된 용접조건은 시험편에 적용된 현장용접조건을 적용하였다.

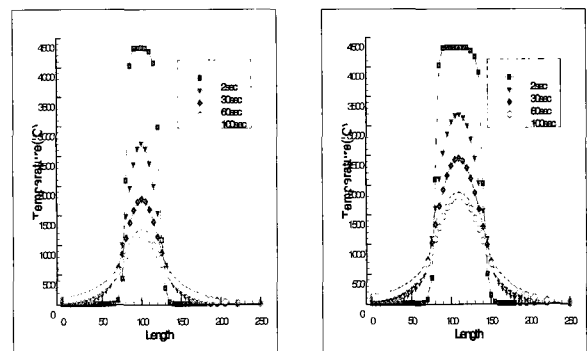
해석 결과 극후판 코너 용접부에 대하여 Lamella Tearing 발생이 용이하다고 판단되는 Web 개선 완전용입 35° 와 부분용입 45° 에 대하여 pass별 5가지 모델을 선정하여 열분포 특성과 잔류응력 분포 특성을 고찰하였다.

Table 3 Model size

Thickness of skin plate (T)		80 mm
Width of skin plate (B)		500 mm
Height of Skin Plate (H)		500 mm
Web	Full Penetration	15°
		35°
	Partial Penetration	39°
		45°
Flange	Full Penetration	20°
		35°
	Partial Penetration	32°
		41°
Center	Full Penetration	15°
		35°
	Partial Penetration	39°
		45°

4.1 대입열 용접에 의한 열 분포 해석결과

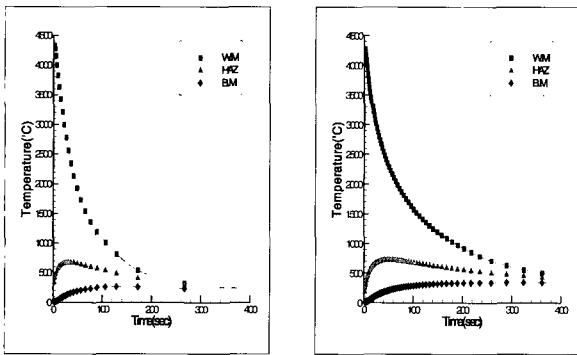
극후판 Box-Column 용접이음부에 대해서는 온도분포 특성을 다층-다패스(Multi Layer-Multi Pass)에 의한 경우로 고찰하여 완전용입 및 부분용입조건에서 흡형상 및 흡각도 변화에 따른 온도분포 특성에 대하여 해석하였다. 열분포 특성해석은 대입열 용접조건으로 완전용입은 Web 35° 개선에 대하여 3Pass, 부분용입은 Web 45° 개선에 대하여 2Pass 용접에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하여 각 모델에 대하여 열분포 특성을 고찰하였으며, 그에 대한 결과들은 full web, partial web의 마지막 pass인 2pass와 3pass의 결과들만 표시하였으며 각 형상에 대한 pass의 온도 분포형상은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 것과 동일한 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다.



(a) partial web 45° 2pass (b) full web 35° 3pass
Fig. 4 Distribution of temperature along width of skin plate according to changing time (Length:mm)

Fig. 4 는 용착부의 온도 특성 중 2초, 30초, 60초, 100초에
서의 냉각 특성을 2개의 모델에 대하여 나타낸 것으로서,
1pass보다는 2pass, 3pass로 갈수록 용착금속 면적이 늘어나므
로 고온 분포영역대가 보다 넓어지는 경향을 보이고 있으며,
완전용입 3pass에서 가장 완만한 냉각특성을 보이고 있다.

Fig. 5 는 Weld Metal, HAZ, Base Metal의 시간에 따른 온
도이력을 도시한 것으로써 열영향부는 용착금속 경계로부터
10mm 지점을 선정하고 모재는 이로부터 25mm 떨어진 지점을
선정하여 나타내었다. 그림에서 보면 용착부, 열영향부, 모재
모두 냉각특성은 부분용입 1pass가 가장 빠르게 냉각하는 특
성을 보이고 있으며, 열영향부의 온도는 1000℃로 나타나고 있
는데 용착부 인접요소s의 온도는 1500℃ 근처로 형성되고 있어
앞서 Fig. 4 와 동일한 특성을 보여주고 있다.

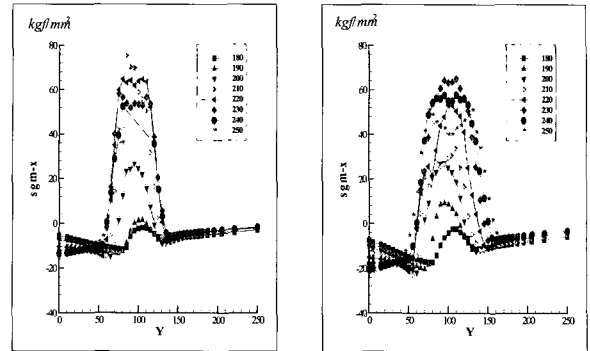


(a) partial web 45° 2pass (b) full web 35° 3pass

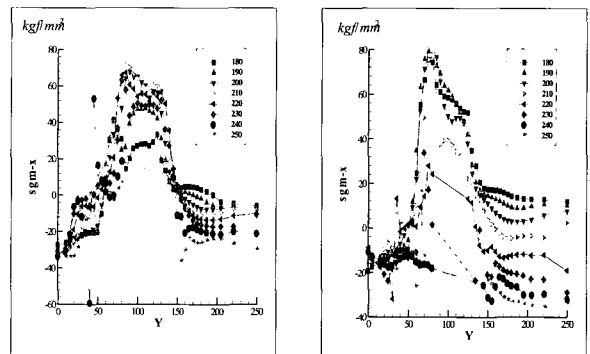
Fig. 5 History of temperature on the base metal, HAZ, weld metal

4.2 용접 잔류응력 해석결과

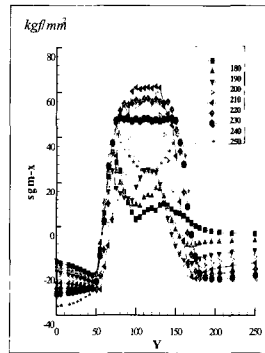
후판 Box-Column 코너 이음부 용접시 Web 개선 완전용입
35° 와 부분용입 45° 에 대하여 대입열용접조건을 적용하여 완
전용입 3Pass, 부분용입 2Pass에 대하여 균열 저항능력을 평가
하기 위하여 열탄소성 수치해석을 수행하였다. Fig. 6 은
Flange하부에서 시작하여 상부까지 250mm에 대하여 Web plate
두께 80mm를 기준하여 180mm부터 250mm까지 Y방향을 따라서
10mm간격으로 분포하는 응력성분을 나타낸 것이다. 이 그림은
 σ_x 성분으로 (a), (b)는 부분용입 Web 45° 1pass, 2pass, (c),
(d), (e)는 완전용입 Web 35° 1pass, 2pass, 3pass 에 관한 것
으로 그림 (a), (b)를 살펴보면 1pass에서는 고응력이 210mm부
근에서 나타나고 있는 반면 2pass에서는 230mm부근에서 나타
나고 있는데 이 차이는 용착부의 위치에 따라 결정됨을 알 수
있다. Flange 두께 방향 (Y좌표 0~80mm)의 응력(σ_x)은 1pass
때에는 180mm지점에서 압축응력만이 나타나고 위쪽으로 갈수
록 압축에서 인장으로 성분변화가 발생하는데 변화하는 지점
은 점차 Flange 중심부 쪽으로 접근하는 경향을 보이고 있으
며, 2pass에서는 역시 180mm지점에서 압축응력만이 나타나고
1pass와 유사하게 위쪽으로 갈수록 압축에서 인장으로 성분변
화가 발생하여 변화하는 지점이 Flange 중심부로 접근하는데
1pass보다 2pass에서 더 중심부 쪽으로 접근하고 있으며 응력
의 분포영역대도 전체적으로 2pass에서 1pass 보다 고응력이
넓게 분포하는 경향을 보이고 있다.



(a) partial web 45° 1pass (b) partial web 45° 2pass



(c) full web 35° 1pass (d) full web 35° 2pass

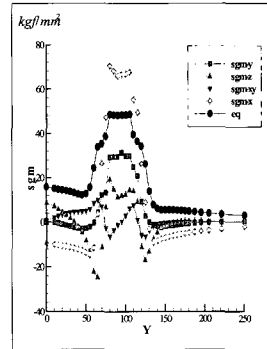


(e) full web 35° 3pass

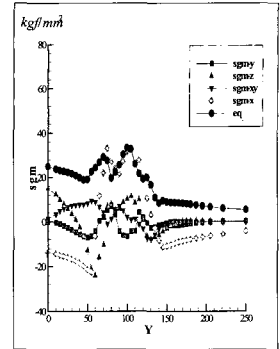
Fig. 6 Distribution of welding residual stresses (σ_x) along Y-direction of skin plate(Y:mm)

그림 (c), (d), (e)를 살펴보면 1pass에서는 Y방향 σ_x 는
Z=180mm~200mm까지는 전체적으로 압축성분이 그 이상은
Y=50mm까지는 압축, Y=50mm~250mm에서는 인장이 나타나고 있
다. 2pass에서는 용착금속부 부근에서는 인장응력이 나머지는
압축응력이 발생하고, 3pass에서는 Y=60mm 까지는 압축이 용
착금속 부근에서는 인장응력이 그리고 압축응력으로 바뀌는
경향을 보이고 있다. 전체적으로 비교하여 보면 Web 35°
1pass가 Web 두께에 따라서 응력성분이 인장과 압축성분으로
나타나고 있는 것이 특징적이다. Web 중심부와 용착부가 접하
는 부분을 중심으로 Fig. 7은 Web 두께 방향으로의 응력을
Fig. 8은 폭방향으로의 응력을 성분별로 도시한 것으로서 Web
에서 Lamellar Tearing의 초기 균열이 발생할 것으로 예상되는

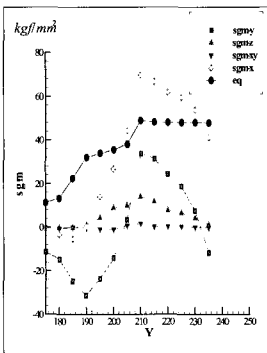
지점이다. 그림에서 (a), (b)는 부분용입 Web 45° 1pass, 2pass (c), (d), (e)는 완전용입 Web 35° 1pass, 2pass, 3pass에 대한 것으로써 (a)와 (b)를 비교하여 보면 초기 균열이 발생할 것으로 예상되는 지점(Y=80mm)에서 (a)의 경우(1pass)에서 응력이 크게 작용하고 있으며, (c), (d), (e)를 비교하면 (d)의 경우(2pass)에서 응력이 크게 작용하고 있는데 (a)와 (d)를 비교하면 상당응력은 거의 크기 차이가 발생하지 않는 반면 (a), (d) 모두 σ_x 가 σ_y 와 σ_z 에 비하여 크게 발생하고 있으며 (a)의 경우에는 σ_x 가 (b)의 경우에서 보다 크게 작용하는 양상을 보이는데, 가장 크게 작용하는 응력성분인 σ_x 가 보다 크게 작용하는 부분 용입 1pass인 (a)의 경우가 균열에 보다 민감할 것으로 판단된다. 전체적으로 보면 (a) > (d) > (e) > (c) > (b) 순으로 나타난다.



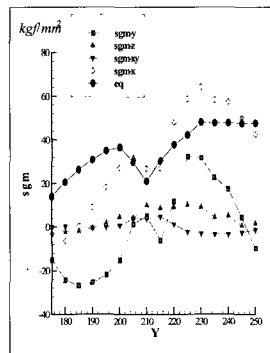
(a) partial web 45° 1pass



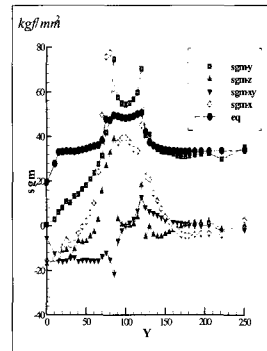
(b) partial web 45° 2pass



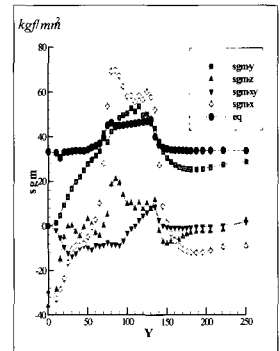
(a) partial web 45° 1pass



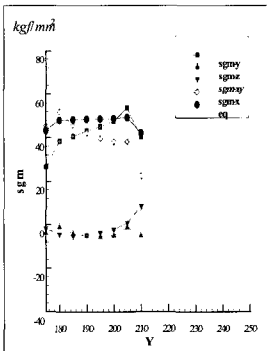
(b) partial web 45° 2pass



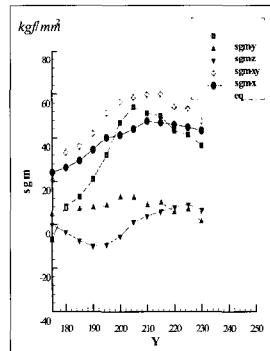
(c) full web 35° 1pass



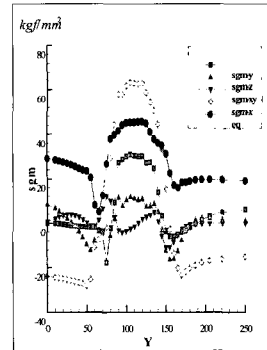
(d) full web 35° 2pass



(c) full web 35° 1pass

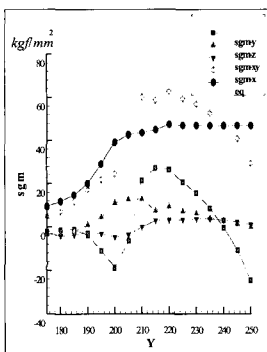


(d) full web 35° 2pass



(e) full web 35° 3pass

Fig. 8 Distribution of welding residual stresses along width of skin plate(Y:mm)



(e) full web 35° 3pass

Fig. 7 Distribution of welding residual stresses knees of skin plate(Y:mm)

5. 결론

Box-Column 코너 이음부의 부분용입 45° 1pass, 2pass, 완전용입 35° 1pass, 2pass, 3pass 시험편의 Lamella 균열 감수성 평가에 대한 수치해석 결과는 다음과 같다.

(1) 대입열 열적 특성은, 1pass보다는 2pass, 3pass로 갈수록 용착금속속면적이 늘어나므로 고온 분포영역대가 보다 넓어지는 경향을 보이고, 전체적으로 비교하면 부분용입 1pass에서 가장 빠르게 냉각하고 그 다음으로 완전용입 1pass순이고 반면 상대적으로 완전용입 3pass에서 가장 완만한 냉각특성을 보이고 있다.

(2) 용접응력 측면에서는 Web의 경우는 σ_y 를 고려하여 볼 때 중심부를 기준으로 상부는 인장응력이 작용하고 하부는 압축이 작용하는 경향의 정도가 부분 1pass와 부분 2pass의 경우에서 가장 뚜렷하게 대칭을 보이고 있으며 응력의 크기는 부분 2pass가 부분 1pass 보다 크게 나타나고 있으나 균열이 시작될 것으로 예상되는 지점(중심선에서 용착금속과 모재가 접합되는 지점)에서의 응력성분들이 부분 1pass인 경우가 부분 2pass인 경우보다 상대적으로 크게 나타나고 있어 균열발생이 보다 용이할 것으로 보인다.

(3) Web 중심부에 존재하는 편석대를 따라 예상되는 균열발생에 영향을 미치는 순서는 부분 1pass > 부분 2pass > 1pass > 완전 2pass > 완전 3pass로 판단되고, Flange의 경우는 균열이 처음 발생될 것으로 예상되는 표면부($Z=250\text{mm}$)에서의 응력 σ_x 가 부분용입 과 완전용입 모두 공통적으로 1pass보다는 최종pass에서 중심부로 접근하고 있으며 그 크기도 증가하고 있으므로 균열발생에 영향을 미치는 순서는 완전 3pass, 부분 2pass > 완전 2pass > 부분 1pass > 완전 1pass로 판단된다.

후 기

본 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김종명 (1997). "극후판 Butt 및 T-joint 용접부의 최적 홈 형상에 관한 연구", 박사학위 논문.
- 방한서, 김성주, 김종명, 장웅성, 권영섭 (1999). "극후판 Box Column의 Corner Joint 용접시 발생하는 Lamella Tearing에 관한 연구", 대한조선학회지, 제36권, 제4호, pp 95-104.
- 방한서, 김유철 (1991). "유한요소법에 의한 후판용접시 3차원 비정상열전도 해석", 대한용접학회지, 제9권, 제2호, pp 37-42.
- 방한서 (1990). "유한요소법에 의한 박판용접의 2차원 비정상 열전도해석", 대한조선학회지, 제27권, 제4호, pp 43-50.
- 방한서 (1992). "후판 용접부의 역학적 특성", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp 250-258.
- American Institute of Steel Construction (1973). "Commentary on Highly Restrained Welded Connections", The Engineering Journal, Third Quarter, pp 61-73.
- Holby, E., Smith, J.F (1980) "Lamella Tearing The Problem Nobody Seems to Want to Talk About", Welding Journal, Vol 59, No 2, pp 37-44.
- Kaufmann, E.J., Pense, A.W., and Stout, R.D (1981) "An Evaluation of Factors Significant to Lamella Tearing", AWS Welding Research Supplement, March, pp 43-49.

2002년 3월 18일 원고 접수

2003년 7월 23일 최종 수정본 채택