

극후판 Box Column의 코너이음부의 잔류응력분포 및 최적설계에 관한 연구

A Study on the Distribution of Residual Stress and Optimum Design of Corner Joint in Box Column with Ultra Thick Plate

방한서*, 성진표**, 석한길**, 안규백***

* 조선대학교 선박해양공학과

** 삼성중공업

*** 조선대학교 선박해양공학과 대학원

1. 서론

최근 선박, 해양구조물, 초고층건물, 교량 및 각종 구조물은 산업의 발달로 인하여 점점 대형화하고 있으며, 특히 대도시에서는 건물의 초고층화가 빠른 속도로 진전되고 있어, 이들 용접 구조물에 사용되는 부재의 판 두께도 극후판화 되어 가고 있다. 뿐만아니라 고층건물 등에서는 좌굴강도를 필요로 하기 때문에 좌굴강도에 우수한 성능을 지닌 Box Column의 수요가 급증하고 있다. 또한 이들 극후판 Box Column에서 이루어지는 용접은 대입열용접이 행하여지는데, 이로 인하여 발생하는 용접응력(과도응력, 잔류응력), 변형 및 좌굴강도 등이 용접설계, 안전성, 신뢰성 측면에서 많은 문제점을 내포하고 있지만, 여기에 관한 연구가 국내외적으로 체계적이고 과학적이지 못하고 실험과 경험에 의존하고 있으며, 그 연구성과 또한 아주 미흡하므로 이에 관한 연구가 시급하다.

따라서 본 연구에서는 극후판 Box Column의 Corner이음부에 있어서 판 두께를 변화(100mm, 150mm)시켜 가면서 최적의 개선 형상을 결정하기 위하여 개선각을 30°, 45° 및 60°로 모델을 선정하였다. 이러한 각모델에 대한 용접열원의 이동 효과를 고려한 2차원 열전도 해석 및 평면변형 열탄소성이론에 따른 용접강도 수치해석용 컴퓨터 Program을 이용하여, 수치모의 실험을 수행하여 용접이음부의 각형상에 대한 열분포특성, 잔류응력, 용접변형 등 여러 역학적 특성을 규명하고 이들을 상호 비교하여 최적의 개선형상과 용접조건 등 역학적 특성을 밝히고자 한다.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1. 해석모델

본 연구에서 사용된 해석모델은 Skin Plate 두께 100mm, 150mm에 대하여 각각 개선각을 30°, 45°, 60°로 선정하였는데, 이것은 수치해석을 수행하여 최적의 형상을 결정하기 위한 것이다. 해석모델은 Fig.1.에 나타내었고, 모델의 크기는 TABLE.1에 나타내었다. 그리고 각 모델에 대한 패스수는 개선각 30°인 경우는 2패스를 개선각 45°와 60°인 경우에 대해서는 3패스를 수행하였는데, 이것은 실제의 용접조건을 해석하기 전에 역학적인 메카니즘은 동일하므로 수치해석을 수행하는데 간단한 조건으로 하여 여러 역학적인 현상을 파악하기 위함이다.

Fig.1.에서 X는 용접선방향, Y는 Skin Plate 폭방향, Z는 두께방향을 각각 나타내고 있다. 또한 시험편의 재료는 현재 가장 일반적으로 사용되는 재료인 연강(SWS490B)를 사용하였으며, 용접은 효율면에서 우수한 대입열에 의한 서브머지드 자동아크 용접(Submerged Arc welding)을 수행하였으며, 용접조건은 Table.2에 나타나 있다.

2.2. 해석방법

각 모델의 해석은 유한요소법에 의한 2차원 열전도 프로그램을 이용하여 열분포특성을 해석하였으며, 평면변형 유한요소 열탄소성 프로그램을 이용하여 용접잔류응력을 해석하였다. 요소분할은 4절점 아이소파라미터를 이용한 4절점사각형요소로 분할하였으며, 각 모델에 대한 분할된 요소수와 절점수는 두께100mm의 경우 요소수는 1,644개이고 절점은 1,749개, 두께150mm의 경우 요소수는 2,310개이고 절점수는 2,430개이다. 한편 모델의 경계조건은 Box Column의 대칭성을 고려하여

위쪽 Skin Plate의 상단을 좌우로 구속하고 아래쪽 Skin Plate 의 하표면을 상하로 구속 하였다.

Table 1. Model Size

Thickness of skin plate(t)		100 mm, 150 mm	
Width of skin plate (B)		600 mm	
High of Skin Plate (H)		300 mm	
Width of Bead (WB)	Groove angle 30 °	100 mm	50 mm
		150 mm	80 mm
	Groove angle 45 °	100 mm	80 mm
		150 mm	120 mm
	Groove angle 60 °	100 mm	110 mm
		150 mm	170 mm

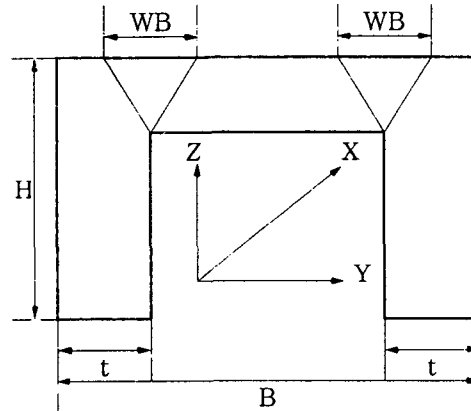


Fig.1. Model for analysis

TABLE 2. Welding condition

Thickness(mm)	Groove Angle	Current(A)	Voltage(v)	Speed(cm/min)
100 mm	30 °	1100	30	28
	45 °	1300	36	32
	60 °	1400	40	33
150 mm	30 °	1200	30	28
	45 °	1300	35	32
	60 °	1400	40	33

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 온도분포 해석결과

각모델에 관하여 좌우교대로 용접한 경우와 좌우동시에 용접한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석한 위치는 100mm 의 경우 상표면으로부터 15mm 되는 지점에서 해석을 수행하였고, 150mm 의 경우는 상표면으로 부터 24mm되는 지점에서 해석을 수행하였다.

좌우교대로 용접한 경우와 좌우동시에 용접한 경우에 대해서는 열분포특성에서 큰차이를 보이지 않았다. 이것은 단지 시간에 대한 온도의 이력(history)만 해석했으므로 용접순서에 관계없이 거의 일정한 이력을 갖기 때문이라고 생각된다.

Fig.2는 개선각의 변화에 따른 Weld Metal, HAZ, Base Metal 에서의 시간의 변화에 따른 온도 변화곡선을 100mm에 관하여 나타낸 것이다. Fig.2.(a)에서 보면 개선각의 크기가 증가할수록 Base Metal에서는 높은 온도분포를 타나내고 있으며, HAZ 와 Weld Metal에선 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 이것은 개선각이 크게되면 용착되는 부분이 커지므로 동일 크기의 시험면에서는 열영

항부에서 멀어지면서 작은 개선각에 비해 많은 영역에서 열전도가 이루어지기 때문이라고 생각된다. 150mm 에 대한 해석결과도 100mm 와 동일한 결과를 얻을수 있었다.

Fig.3. 에서는 동일시간에서의 두께 100mm 에 대한 개선각의 변화에 따른 온도분포를 도시한 것이다. Fig.3. (a)는 용접시작후2초후의 온도분포이고 (b), (c), (d) 는 각각 5초, 50초, 100초 후의 온도분포이다. 가열이 시작되어 2초후에 측정점의 위치가 최고온도에 도달하게 되는데, 최고온도는 개선각 30°, 45°, 60°인 경우 모두 거의 동일한 온도를 나타냈으나, 냉각이 시작되면서 개선각이 작을수록 온도구배가 심하게 나타남을 그림을 통해서 볼수 있다. 이것은 개선각이 작을수록 가열에서 냉각되는 과정에서 용착되는 부분이 작아지므로 가열이 빨리 이루어 졌다가, 냉각과정에서도 급하게 냉각 되어서 큰 개선각에 비하여 온도구배가 심하게 일어나는것으로 판단된다.

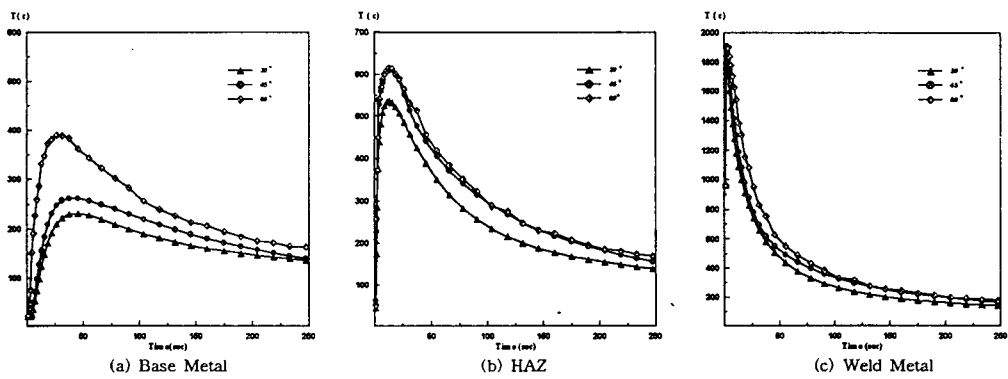


Fig.2. Comparison of nodal temperature on the groove angle 30°, 45° and 60° with skin plate thickness 100mm

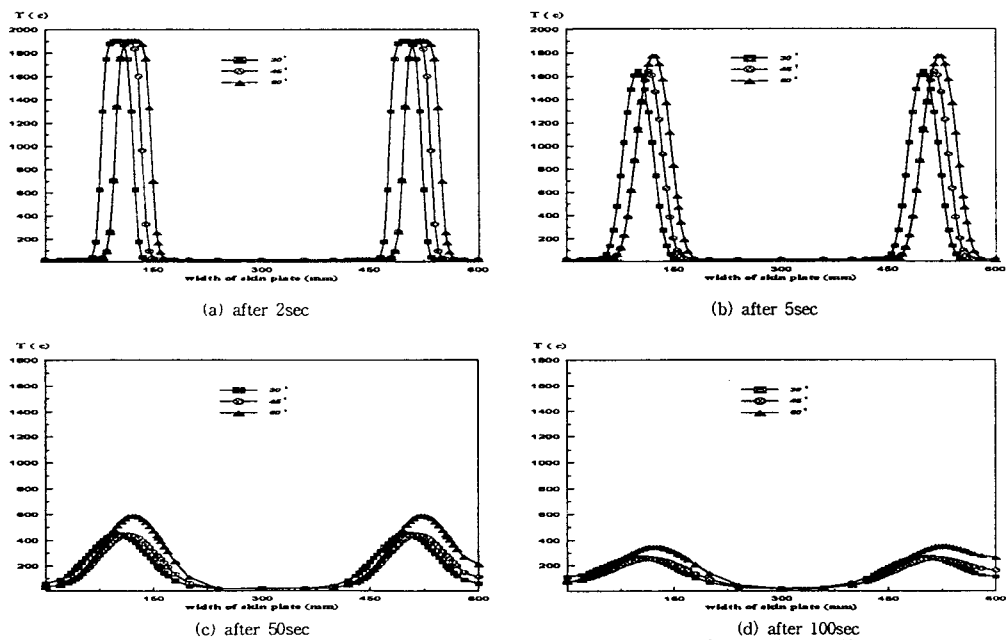
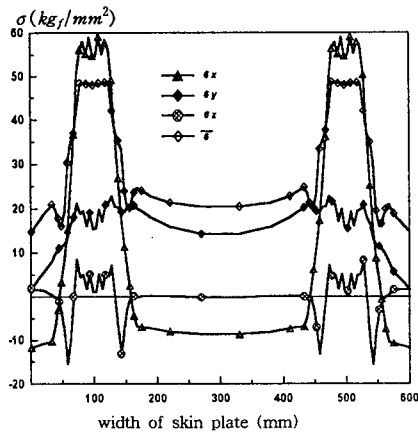


Fig.3. Comparison of temperature distribution on the 2sec, 5sec, 50sec and 100sec with skin plate thickness 100mm

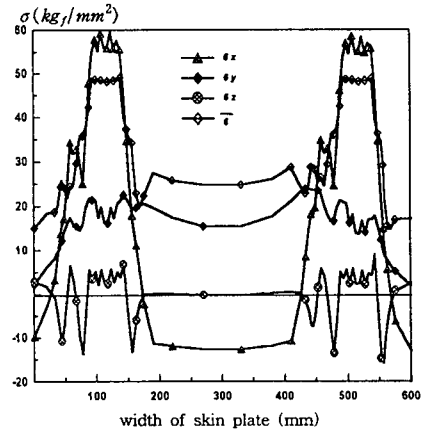
3.2 용접잔류응력 해석 결과

각 시험편의 용접응력(과도응력 및 잔류응력)을 해석하기 위하여 이동효과를 고려한 2차원 비정상 열전도해석에 의한 온도분포를 입력데이터로 하여, 평면변형 열탄소성해석을 수행하였다. 측정점의 위치는 두께 100mm의 경우 상표면으로 부터 12.5mm 지점이고 두께 150mm의 경우는 상표면에서 15.5mm 되는 지점에서 측정하였다. 이것은 각패스의 용접시 용착금속 및 열영향부 냉각시 수축에 대한 주위에서의 구속은 패스수와 함께 증가하지만 상표면근처가 되면 그 구속은 작아지게 되어서 상표면보다는 두께방향으로 수십mm 깊은곳에서 최대응력이 발생될것으로 판단 되기 때문이다.

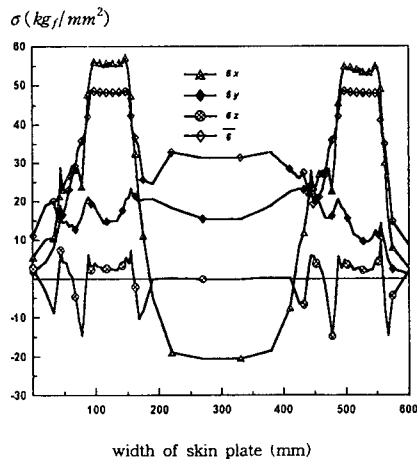
Fig.4는 개선각이 30°, 45°, 60° 인 경우에 대한 좌우동시에 용접했을시 해석한 결과이다. 여기서 σ_x 는 용접선방향, σ_y 는 폭방향, σ_z 는 두께방향의 응력성분을 각각 나타낸다. 각방향의 응력성분 중에서 σ_y 와 σ_z 는 σ_x 의 성분에 의하여 지배를 받게 된다. 그러므로 σ_x 의 응력성분을 살펴보면, Fig.4. (a)는 개선각 30°에 대한 최종패스후의 응력분포이다. σ_x 의 값은 용착부와



(a) Groove angle 30°



(b) Groove angle 45°



(c) Groove angle 60°

Fig.4. Welding residual stress with skin plate thickness 100mm

HAZ부근에서 인장응력상태를 나타내고, 중앙부에서는 압축응력상태를 나타내고 있다. Fig.4. (b)에서는 개선각45°에 대한 해석결과인데 개선각 30°인 경우와 비슷한 양상을 나타내고 있으며, σ_x 의 중앙부에서의 압축응력은 다소 증가함을 보여주고 있다. Fig.4. (c)는 개선각 60°에 대한 해석결과인데 개선각30°,45°와 비교하면 인장응력은 조금 감소 하였으나, 압축응력은 다소 증가 하였다. 이것은 온도분포에서 보았듯이 개선각이 증가할수록 용착면적이 늘어나게 되어 냉각과정에서 온도구배가 완만하므로 응력분포에서도 개선각이 클수록 인장응력분포는 다소 작게 나타났으며, 압축응력은 개선각이 클수록 입열면적이 증가하고, 구속력이 증가되어 중앙부분에서 크게 나타난 것으로 생각된다. 하지만 전체적으로 용접부 근처에서의 응력분포는 σ_x , σ_y , σ_z 모두 큰개선각에서 미소한 차이 이지만 응력이 작게 분포함을 알수 있다.

4. 결 론

이상에서 해석한 결과를 종합하면,

- (1) 두께가 일정하고 개선각이 변화하는 경우에 있어서 개선각이 적을수록 온도구배가 심하게 나타났으며, 응력분포에 있어서는 개선각30°, 45°인 경우는 큰 차이를 보이지 않았으나, 개선각 60°인 경우와 비교하면 개선각이 적을수록 응력이 크게 분포 하였다.
- (2) 좌우동시 3Pass용접한 경우와 좌우교대로 각각 3Pass 용접한 경우에 있어서 온도분포는 큰 차이는 보이지 않았으며, 동일 위치에 대해서는 거의 동일한 온도분포를 나타내었다.
- (3) 좌우 교대로 용접한 경우에 있어서는, 좌우 동시에 용접한 경우에 비하여 판 폭에 걸쳐 온도구배가 다소 심하기 때문에 변형이 심할 것으로 생각되며, 그러므로 좌우 동시에 용접한 경우가 더욱 유리할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 房漢瑞, “厚板熔接部の力學的 特性” 大韓熔接學會誌, Vol.10, No4, p250~258, 1992.
2. 上田辛雄 外, “極厚板多層突合 熔接殘應力分布とその生成機構特性に基づく理論解析及び實驗의簡略化” 日本溶接學會誌 第12卷 第1號, pp.75-81, 1984
3. 房漢瑞 外; 熔接이음부의 형상最適化에 관한 研究, 大韓熔接學會 發表, 10(1994)
4. Yukio Ueda, Keiji Nakacho, Yu Chul Kim, “溶接殘留應力の解析と測定の材料力學(數值解析入門)”, 日本溶接學會誌 第55卷 第6號, pp.336-348
5. Bryan ,J. J., “Analysis of two dimensional thermal stresses and metal movement during welding”, Thesis for ocean engineer' s degree, M.I.T., May 1973
6. 上田辛雄 外, “厚板補修熔接部の 力學的 特性” 日本溶接學會誌 第4卷 第3號, pp.533-539, 1986