

극후판 Box Column 코너이음부의 용접잔류응력 및 Groove형상 특성에 관한 연구

방한서*, 안규백**, 김종명***, 석한길****, 장용성*****

A Study on the Characteristics of Welding Residual Stresses and Groove Shape of Corner Joint in Box Column with Ultra Thick Plate

H.S. Bang* , G.B. An** , J.M. Kim***, H.G. Suk**** and W.S. Chang*****

Key Words : Box Column(박스형 기둥), Thermal Elasto-Plastic Analysis(열탄소성해석), Heat Conduction(열전도), Welding Residual Stresses(용접잔류응력), Optimum Design(최적설계), Ultra Thick Plate(극후판)

Abstract

Ships, structures on the ocean, bridges, and other structures tend to be large by the development of industry. These ultra thick plate were welded with large heat input, which causes welding stresses, deformation, and buckling, so it has to be considered the weld design, safety, reliability.

The welded residual stresses were produced and redistributed due to the effect of large heat input. The mechanical phenomenon has not been surely identified yet. In spite of the lack of the study on the box column, there are various types of steel frame such as I type, H type, + type and O type, used in high story building.

In this study, we performed computer simulation with two dimensional heat conduction and plane deformation thermal elasto-plastic finite element computer program as changing the plate thickness to 100mm, 150mm and groove angle to 60°, 45°, 30° of corner joint in box column. And then, to identify mechanical phenomenon such as the phenomenon of thermal distribution, welding residual stresses and deformation and to decide optimum groove angle and welding condition.

The main conclusion can be summarized as follows:

- 1) Since the groove angle has become cooling down rapidly due to its smaller value, the temperature slope was steeped somewhat.
- 2) The tensile stress within the weldline direction stresses was somewhat decreased at the weld metal and HAZ, increasing of the groove angle.
- 3) The local stress concentration of the groove angle 60° was appeared smaller than groove angle 30°.

※ 1998년 8월 11일 접수

* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과

** 학생회원, 조선대학교 대학원

*** 정회원, 담양대학 기계·자동차공학부

**** 정회원, 삼성중공업(연구수행시)

***** 정회원, RIST(포항산업과학연구원)

• 방한서 : hsbang@ic21a.chosun.ac.kr

2. 해석모델 및 방법

1. 서 론

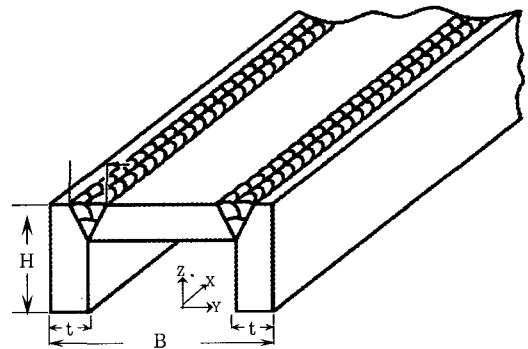
최근 선박, 해양구조물, 교량 및 각종 구조물은 산업의 발달로 인하여 점차 대형화되고 있으며 특히, 대도시에서는 건물의 초고층화가 빠른 속도로 진전되고 있다. 이에 따라 사용강재의 두께도 극후판화 되어가고 있는 실정이다. 또한, 이들 극후판의 연결시 수행되는 용접으로 인하여 발생하는 용접응력, 변형 및 좌굴등이 용접설계, 안전성 측면에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러나, 최근 철강산업의 발달로 초고층 건물들의 구조설계에 있어서 이와 같은 극후판을 이용하는 추이가 날로 증가되고 있으며, 그 대표적인 예로 좌굴강도와 비틀림 강도에 우수한 성능을 지닌 box column의 수요가 증가하고 있다.

이와 같은 box column의 제작법에는 2개의 U형 형강을 길이 방향으로 조립한 box형태의 column과 4개의 평판을 box형으로 조립한 형태의 2가지의 방법이 있는데, 후자의 방법이 현재의 box column의 주류를 이루고 있다.²⁾ 특히 이의 제작 과정에서는 skin plate의 접합시 코너 용접이 수행되는데, 이때 대입열 효과로 인하여 용접잔류응력이 생성 및 재분포 되며, 이러한 잔류응력은 용접부의 강도에 커다란 영향(lamella tearing등)을 미치게 된다. 그러나, box column 용접부의 역학적 특성 규명은 아직 미흡한 단계로 현재 각종 구조물에 사용되는 철골재(I형, H형, +형, 원형 등)와 비교해서 특히, 좌굴강도와 비틀림강도에서 우수한 성능이 입증된 box column 용접부의 역학적 특성에 대해서는 좌굴강도가 요구되는 초고층건물의 건축추세등 그 급증하는 수요와 더불어 이에 관한 체계적 연구가 시급한 실정이다.

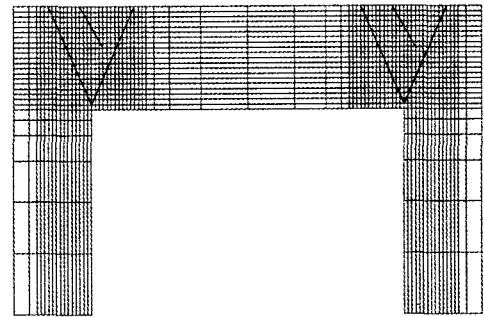
따라서, 본 연구에서는 box column 코너이음부에 대한 skin plate의 두께 및 groove 형상을 변화시키면서 groove 각도 및 패스 순서등에 따른 각종 역학적 현상을 해석하기 위하여, 열원의 이동효과를 고려한 유한요소법에^{4,5)} 의한 비정상 2차원 열전도 해석용 프로그램을 이용 수치해석을 수행하여 용접시 발생하는 온도분포특성을 파악 하고자 하였다. 또한, 각 시험편의 용접잔류응력을 해석하기 위해 열전도해석 결과에 의한 온도분포를 입력 데이터로하여 평면변형 열탄소성 프로그램을 이용하여 극후판 box column 코너이음부에 대한 용접조건, groove 각도변화에 따른 용접잔류응력등의 역학적 특성을 수치해석을 통하여 예측하고자 하였다.

2.1 해석모델

해석 모델은 현재 제조현장에서 실제 제작중인 모델을 근거로 하여 선정하였으며 해석 모델 및 요소분할은 Fig. 1(a),(b)에 나타내었고, 모델의 제원은 Table 1에 나타내었다.



(a) Model for analysis



(b) Mesh division

Fig. 1 Model for analysis

본 연구에서 사용된 모델은 skin plate 두께 100mm, 150mm에 대하여 각각 groove각도를 30°, 45° 및 60°로 변화 시켰는데, 이것은 현재 제조현장에서 일반적으로 사용중인 groove각도를 기준으로 하여 최소각 30°와 최대각 60°를 선정하여 해석후 최적의 groove형상을 찾기 위한 것이다.

또한, 각 모델에 대한 패스수는 groove각도 30°인 경우는 2패스, groove각도 45°와 60°인 경우에 대해서는 3패스를 수행하였다. Fig. 1에서 x는 용접선 방향, y는 폭 방향, z는 두께방향을 각각 나타내고 있다.

해석 모델의 재료는 현재 가장 일반적으로 사용되는 재료인 용접구조용 압연강재(SWS490B)를 사용하였으며, 용접은 효율면에서 우수한 서브머지드 자동아크 용접(submerged arc welding)^{10,11)}을 이용하였으며, 용접에 사용된 모재와 용접봉의 화학조성 및 용접

조건은 Table 2 와 Table 3 에 나타내었다.

각 모델에 대한 용접 입열량(Q)은 (1)식에 의거하여 사용 하였으며, 용접효율 $\eta=80\%$ 로 하였다.

$$Q = \eta \cdot V \cdot I \quad (\text{Joule}) \quad (1)$$

용접금속의 각 요소에 대한 입열 q는 칼로리로 환산한 아래식을 사용하였다.

$$q = \frac{Q \cdot l}{4.19 \cdot A \cdot l \cdot t} \quad (\text{cal}) \quad (2)$$

여기서, $t = (l/\nu)$: 용접시간(sec), V : 전압(V),
 I : 전류(A), Q : 입열량(joule),
 A : 단면적(mm²), ν : 용접속도(mm/sec),
 l : 용접길이(mm), η : 용접효율 이다.

Table 1. Dimensions of analysis model (unit : mm)

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

Table 2. Chemical compositions of welding electrode and base metal(SWS490B)

Chemical-Composition	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al
Electrode	0.20	1.96	0.03	0.02	0.01	0.19	-
Base Metal	0.13	1.36	0.35	0.24	0.11	-	0.31

Table 3. Welding condition

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

해석방법은 유한요소법에¹²⁾ 의해 자체개발한 열전도 해석용 프로그램을 이용하여 열분포특성을 해석하였으며, 평면변형 열탄소성 유한요소 프로그램을 이용하여 용접잔류 응력을 해석하였다. 요소분할은 아이소-파라메트릭 요소¹²⁾를 이용하였으며, 각 모델의 요소수와 절점수는 두께100mm인 경우는 1,644요소, 1,794절점, 두께150mm인 경우는 2,310요소, 2,430절점으로 하였다.

3. 고 찰

3.1 열분포특성

각 시간별 온도분포 특성은 최종패스 용접시에 대해서 두께 100mm인 경우는 상표면에서 15mm인 지점에서 두께 150mm인 경우는 24mm되는 지점을 주목점으로 하였다. Fig. 2(a),(b),(c)는 skin plate 두께 100mm에 대한 groove각도의 변화에 따른 온도분포를 시간에 따라 도시한 것이다. 가열이 시작되어 2초 후에 해석위치가 최고온도에 도달함을 볼 수 있고, 최고온도는 groove각도가 30°, 45°, 60°인 경우 모두 거의 동일한 온도를 나타냈으나 냉각이 시작되면서 groove각도가 작을수록 온도구배가 심하게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 groove각도가 작을수록 용착금속 부분이 작으므로 온도상승과 냉각이 급격이 이루어지게 되어, 큰 groove각도에 비해 온도구배가 심하게 나타나는 것으로 판단된다. 두께 150mm인 경우에 대한 해석 결과도 두께 100mm인 경우와 동일한 해석 결과를 얻었다.

3.2 용접잔류응력 분포 특성

용접잔류응력 해석시 주목점의 위치는 응력이 가장 크게 걸리면서 변화가 심한 위치를 선정하였는데, skin plate 두께 100mm인 경우는 상표면으로부터 12.5mm지점, 두께 150mm인 경우는 상표면으로부터 27.0mm 지점이다. 이것은 각 패스별 용접시에 용착금속 및 열영향부 냉각 과정의 수축에 대한 주위구속은 패스수와 함께 증가하지만 상표면 근처가 되면 그 구속은 작아지게 되어서 두께방향으로 수십mm 위치에서 최대응력이 발생되었기 때문이다¹³⁾.

수치해석에 있어서 고려된 경계조건은 Fig. 3에서와

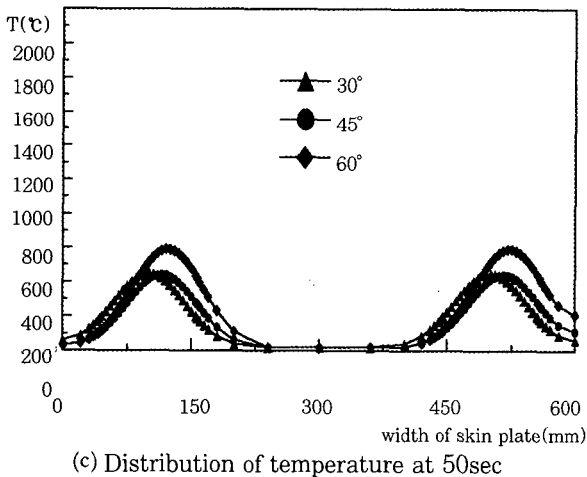
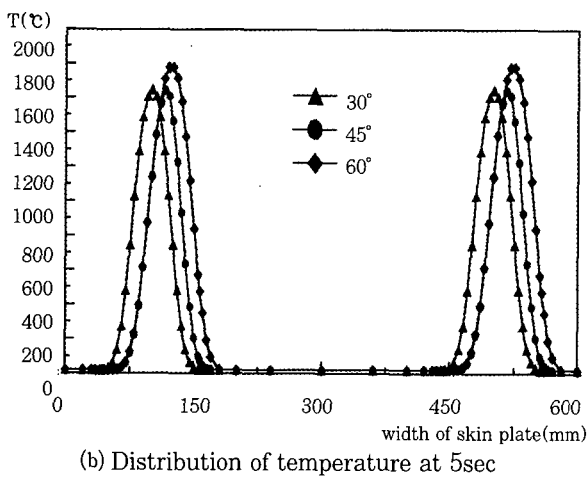
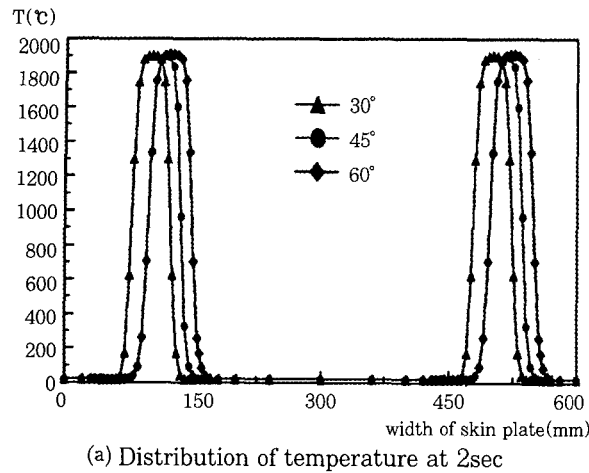


Fig. 2 Comparison of nodal temperatures at the locations of skin plate($t=100\text{mm}$) with variable groove angles and time

같이 box column의 대칭성을 고려하여 위쪽 skin plate의 상단을 좌우로 구속하고, 아래쪽 skin plate의 하표면을 상하로 구속하였다.

1) 좌·우 교대로 용접한 경우

두께 100mm에 대한 σ_x , σ_y , σ_z 각 성분의 groove각

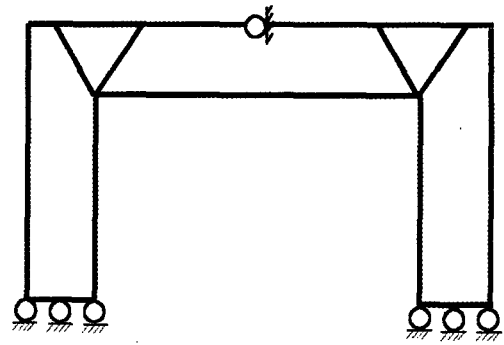


Fig. 3 Boundary condition for analysis of welding residual stress

도 변화에 따른 최종패스 용접후의 해석결과이다. Fig. 4(a),(b),(c)는 좌우교대로 용접한 경우의 용접잔류응력 분포도이다. 그림에서 고찰해 보면, σ_x 는 groove각도가 증가하면서 용착금속과 열영향부에서 발생된 인장응력은 다소 감소하고 있으며, 중앙부에서의 압축응력은 다소 증가함을 볼 수 있는데, 이것은 열영향부와 용착금속에서는 냉각시 수축력이 발생하게 되어 인장응력이 발생되는데 groove각도가 증가하면서 용착면적의 증가로 열영향이 모재의 더욱 많은 부분까지 미치게 되어 작은 groove각도에 비하여 냉각시 서냉이 이루어지므로 용착부와 열영향부에서는 다소 인장응력이 감소하고, 모재의 중앙부에서는 groove각도가 증가하면서 용착부의 면적이 넓어지게 되어 상대적으로 양쪽 groove 사이의 모재부분이 좁아지므로 용착부의 수축의 영향을 더욱 크게 받게 되므로 중심부에서 압축응력이 groove이 커지면서 다소 증가되는 것이라 판단된다.

σ_y 의 경우는 groove각도가 증가하면서 미소하지만 모재에서 인장응력이 다소 증가하지만 주목할만하게 증가폭이 크지는 않는 것으로 판단되며, σ_z 는 groove각도가 변화되어도 용접잔류응력분포는 거의 일정한 분포를 하고 있다.

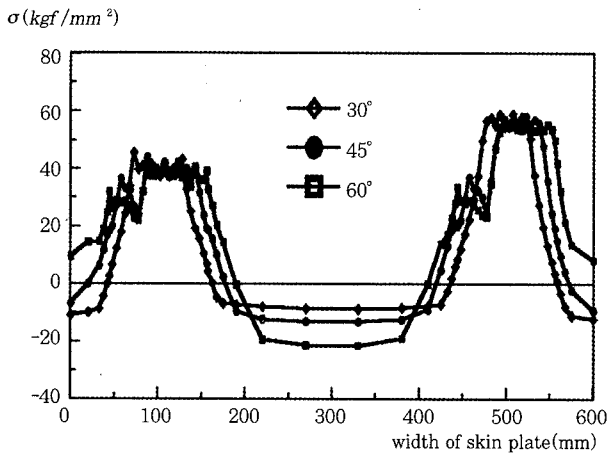
두께 150mm에 대한 해석결과 또한 100mm 해석결과와 거의 동일한 응력분포를 얻었다.

2) 좌·우 동시에 용접한 경우

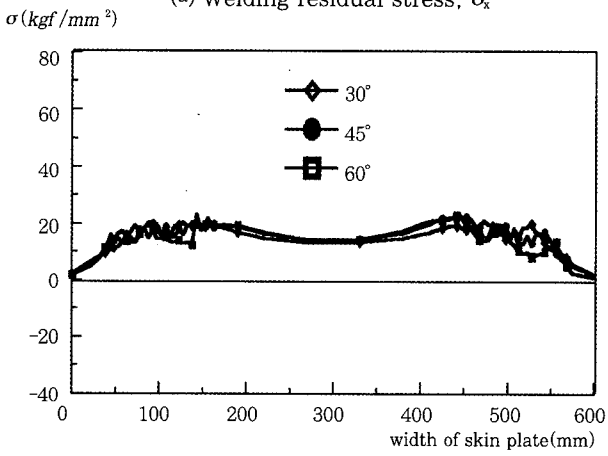
Fig. 5(a),(b),(c)는 각각의 groove각도에 대한 최종패스의 용접이 끝난후 모델단면 전체에 대해 각 응력성분을 주도하는 용접선 방향의 응력(σ_x)성분을 도시한 것이다.

주목해 보면, 상표면에서 12.5mm되는 지점에서 용착금속과 열영향부에서 최대 인장응력이 분포함을 알 수 있으며 좌우가 완전 대칭분포를 나타내었다.

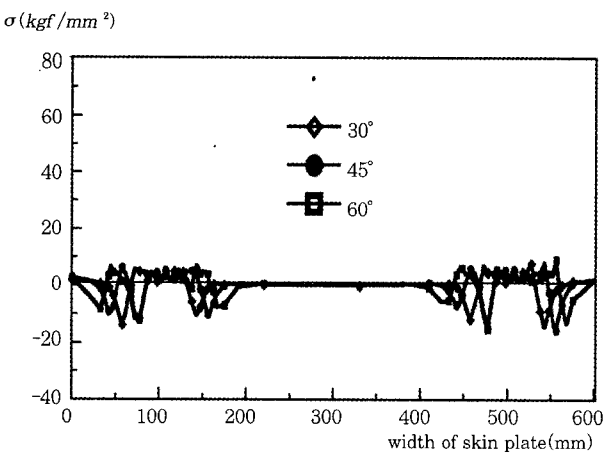
Fig. 6은 groove각도 30°에 대한 최종패스(2패스) 후의 해석결과를 나타낸 것인데, 중앙을 기준으로 좌우 대칭분포를 이루고 있으며, α_x 는 1패스때 보다는 다소 증가된 압축응력이 모재 중앙부에 분포하며, 용착부와 열영향부 영역에서는 인장응력이 분포함을 보이고 있다



(a) Welding residual stress, α_x



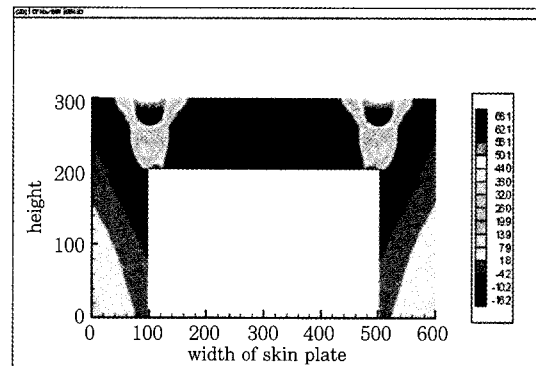
(b) Welding residual stress, α_y



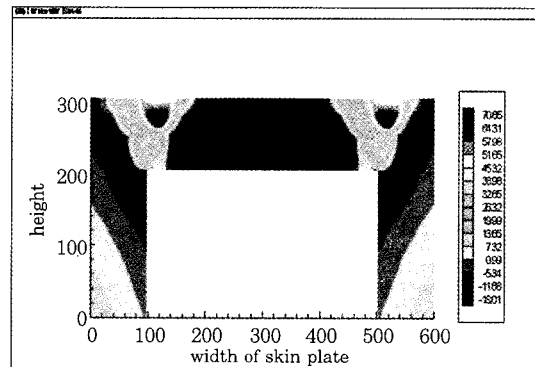
(c) Welding residual stress, α_z

Fig. 4 Comparison of welding residual stresses on the groove angle 30°, 45° and 60° with thickness 100mm

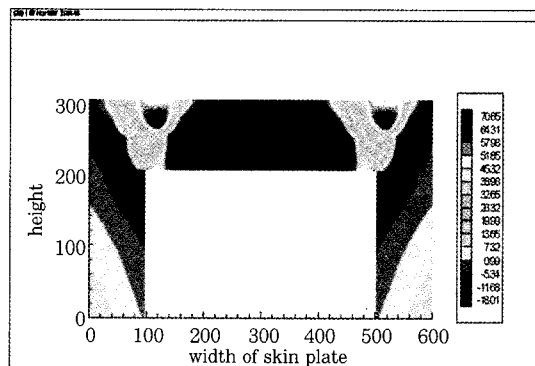
α_y 는 모재의 중앙부에서 다소 증가된 인장응력이 분포하고 있는데, 이것은 skin plate 폭방향에 걸쳐서 발생된 응력은 좌우에서 동시에 용접이 이루어지므로 수축력이 크게 작용하기 때문이라고 생각된다. groove각도 45°, 60°인 경우도 동일한 양상을 나타내었다.



(a) Groove angle 30°



(b) Groove angle 45°



(c) Groove angle 60°

Fig. 5 Distribution of welding residual stress on the groove angle 30°, 45°, 60° with thickness 100mm

3.3 최적 형상 및 용접조건 선정

입열량을 변화시켜 최적 groove형상과 최적의 용접 조건을 선정하고자 한다. 여기에서는 skin plate 두께 100mm에 대하여 좌·우 동시에 용접한 경우에 대해서 나타내었다.

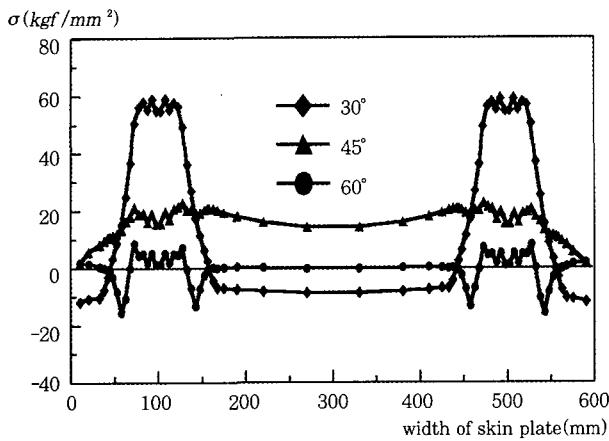
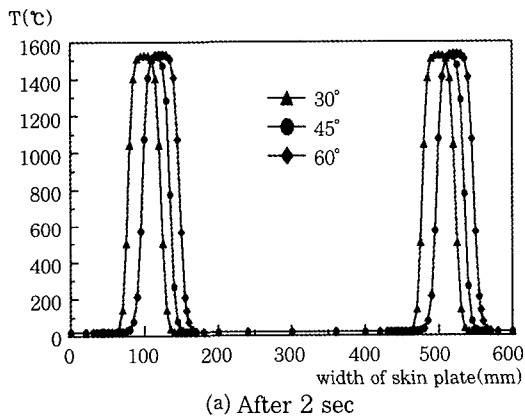


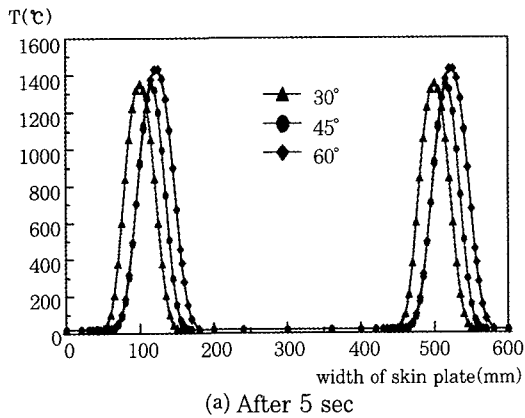
Fig. 6 Distribution of welding residual stresses along width of skin plate on the groove angle 30° with thickness 100mm

앞서 해석한 결과와 같이 groove각도가 증가하면 온도구배가 다소 완만해져 감을 볼 수 있다. 이러한 결과는 입열량이 증가함에 따라서도 동일한 해석 결과를 얻었다. Fig. 7(a),(b)는 입열량이 앞서 해석한 결과보다 작은 경우이다.

여기서 보면 (a)는 2초 후의 온도 분포인데 모두 동일



(a) After 2 sec



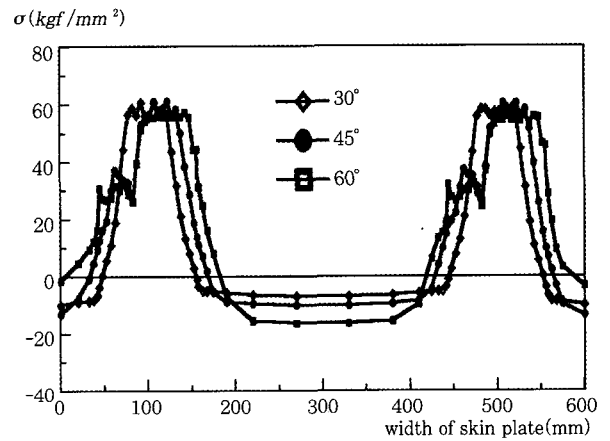
(a) After 5 sec

Fig. 7 Comparison of nodal temperature on the groove angle 30°, 45° and 60° with skin plate thickness 100mm

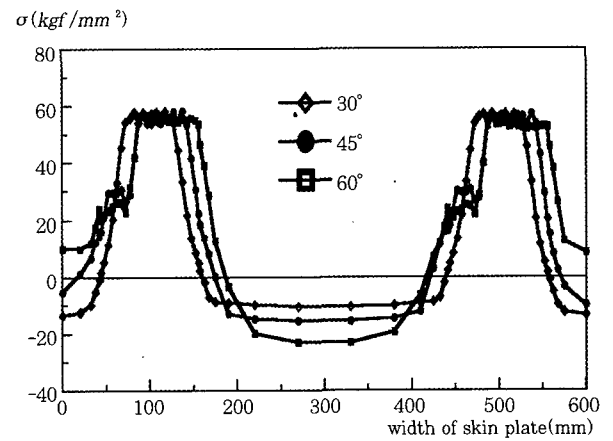
한 최고 온도에 도달하고 있으며, (b)는 5초 후의 온도 분포인데 groove각도가 증가할수록 온도구배가 다소 완만함을 볼 수 있는데, 이는 앞서 해석한 결과와 동일한 해석 결과이다.

Fig. 8(a),(b)는 입열량의 변화에 따른 용접선방향 응력 (σ_x)의 해석 결과이다. Fig. 8(a)는 입열량이 가장 작은 경우이고, (b)는 입열량이 가장 큰 경우이다. 여기서 보면 groove각도가 증가할수록 용착부와 열영향부의 인장응력은 다소 감소하며, 모재 부분의 압축응력은 다소 증가함을 입열량의 변화에 관계없이 나타내었다.

또한, 입열량의 크기에 관계없이 groove각도가 증가할수록 용착부와 열영향부에서의 인장응력은 다소 감소하였으며, 중심부에서의 압축응력은 다소 증가함을 나타냈다. 그러므로, 용접잔류응력 분포 측면에서 보면 groove각도가 큰 경우가 box column 코너 이음부 용접시 다소 유리할 것으로 판단된다.



(a) Small heat input ($q=1.16$ cal)



(b) Large heat input ($q=1.74$ cal)

Fig. 8 Distribution of welding residual stresses according to change of heat input with thickness 100mm

4. 결 론

이상의 결과를 종합하면 다음과 같다.

- groove 각도가 작을수록 급냉이 이루어지게 되므로, 온도구배가 다소 심하게 나타났다.
 - 용접잔류응력 분포는 groove각도가 증가하면서 용접선 방향응력(σ_x)은 용착부와 열영향부에서 인장응력이 다소 감소하였다.
 - groove각도가 커지면 최대 인장응력의 분포형태는 동일하였으나 skin plate 쪽 방향으로 수평이동 되었다.
- 결과를 통해, groove각도 30°인 경우가 용착금속부의 급냉으로 인한 국부적인 응력의 발생 측면에서 groove각도 60°인 경우보다 불리할 것으로 사료되어지며, 추후 극후판 box column 코너이음부에 대한 용접잔류응력의 측정 실험을 실시하여 수치해석 결과를 검증 하고자 한다.

후 기

『본 연구는 삼성중공업(주), RIST의 연구과제에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사드립니다.』

참 고 문 헌

1. 上田幸雄 外 : “多層かど継手部の溶接割れに関する研究” : 일본용접학회지, 第50卷, 第4, 1981
2. 日本溶接協會建設部會編 : “鐵骨溶接施工 エマユアル”, 産報出版, 平成3年
3. 失川元基 外1人 : “有限要素法による熱應力・リープ 熱傳導解析”. (株)サイエンス, 1985.
4. Yukio UEDA, Tetsuya YAO, Keiji NAKACHO and M.G.Yuan : “Prediction of Welding Stress, Deformation and Ultimate Strength of Plate Panels”. Trans. JWRI Vol. 21, No. 2, pp.276~283, 1992.
5. Yukio UEDA and Min Gang YUAN : “A Prediction Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual stress (Report Ⅲ)”. Trans. JWRI Vol. 22, No.1, pp.157~168, 1993.
6. 房漢瑞 : “有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解析”, 大韓造船學會誌, 第27卷第4號, pp.44~50, 1990.
7. k. Nakacho : “極厚板多層溶接と應力除去焼なましによる過度及び殘留應力に關する理論的研究”
8. 房漢瑞, 金裕哲 : “有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元非定常熱傳導解析”, 大韓熔接學會誌, 9-2, 37-43, 1991.
9. 房漢瑞 : “厚板熔接部の力學的 特性”. 大韓熔接學會誌, Vol.10, No.4, pp.250~258, 1992.
10. 佐藤, 向井, 豊田 : “溶接工學”, 理工學社(第1版), 1979
11. 渡邊, 佐藤 : “溶接力學とその應用”, 朝倉書店(第3版), 1971
12. 三好後郎外1人 : “演習有限要素法”, サイエンス社, 昭和56年
13. 日本溶接學會 : “溶接・接合便覽”, 丸善株式會社, pp.13~40, 1990.