

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
第8卷第4號 1990年 12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 8, No. 4, Dec., 1990

HAZ 軟化部를 가진 TMCP型 高張力鋼板의 壓縮最終強度에 관한 研究 — 正四角形板 —

白点基* · 高在用**

Ultimate Compressive Strength of TMCP High Tensile Steel Plates with HAZ Softening

J.K. Paik*, J.Y. Ko**

Key Words : TMCP, Ultimate Compressive Strength(壓縮最終強度),
HAZ Softening(熱影響部 軟化), Elasto-Plastic Behaviour(彈塑性舉動)

Abstract

In this paper, ultimate compressive strength of TMCP 50HT steel plates(yield stress $\sigma_0 = 36\text{kg/mm}^2$) with HAZ softening is studied. Finite element method formulated by the author is applied to analyze the elasto-plastic large deflection behaviour of the plates. The influence of HAZ softening breadth, welding direction and slenderness ratio on the ultimate compressive strength is investigated.

The results obtained are summarized as

- 1) With the increasing of the HAZ softening breadth, early plasticity on the plates is formed and then the ultimate compressive strength is decreased, in which about 8% of the ultimate strength for the plate with $h/t = 4$ (h : HAZ softening breadth, t : plate thickness) was reduced comparing with no HAZ softening.
- 2) The larger decrease of the ultimate strength for the case that the welding direction is normal to the loading direction is occurred than the case that the welding direction is parallel to the loading direction.
- 3) The influence of HAZ softening on the ultimate compressive strength is serious for thick plates, while it may be negligible for thin plates.

* 正會員, 釜山大學校 工科學大學

** 學生會員, 釜山大學校 工科學大學 大學院 碩士課程

1. 序 言

최근, 船舶과 海洋構造物을 비롯한 각종 鋼構造物의 건조시에는 구조경량화의 요구에 따라 高張力鋼의 사용이 급속히 증가하고 있다. 그런데, 종래의 高張力鋼은 강도를 향상시키기 위해 軟鋼에 비해 炭素當量을 크게 함으로써 熔接部靱性저하등의 문제를 가지고 있었으나, 최근의 TMCP型 高張力鋼은 기존의 制御壓延 公程에 加速冷却過程을 통하여 製造함으로써 炭素當量을 낮추고 熔接性도 크게 향상시킬 수 있게 되어 船舶 및 海洋構造物등의 構造材料로서 각광을 받고 있다.

그러나, TMCP型 高張力鋼의 경우도 熔接施工能率을 향상시키기 위해 大入熱熔接을 수행하게 되면 熔接熱影響部(HAZ)에 軟化現象이 발생하여 熔接이음부의 強度를 저하시키는등의 문제점이 제기됨으로써 TMCP型 鋼材를 실제구조물에 본격적으로 채용하고자 하는 측면에서 해결하여야 할 중요한 과제로 다루어져 왔다¹⁻⁵⁾. 造船現場에서는 大入熱熔接이 불가결한 것이며 TMCP型 鋼板을 널리 사용하기위해서는 大入熱熔接으로 인한 TMCP型 鋼板의 HAZ軟化部가 引張強度, 疲勞強度 및 挫屈強度등에 미치는 영향을 파악하여 둘 필요가 있다. 특히, 板部材는 面內荷重에 견디는 構造部材로서 構造設計時에는 彈塑性挫屈強度 또는 最終強度가 基本的인 設計 基準이 되고 있는데, 板部材에 軟化領域이 존재하면 最終強度值의 저하가 예상된다.

지금까지 引張強度와 疲勞強度에 대한 軟化部의 影響에 관하여는 많은 연구가 수행되어 왔다¹⁻⁴⁾. 그러나, 最終強度에 대한 研究⁵⁾는 거의 없어 이들 문제점들이 明確하게 규명되어 있다고 말하기 어려운 실정이며, 더욱이 Fig. 1에 나타내는 바와 같이 熔接方向 및 位置와 荷重方向이 달라지면 部材強度에 미치는 軟化部의 影響도 달라지리라 예상되지만 이에 관한 연구는 全無하다.

TMCP鋼板을 實際構造物의 건조시에 유용하게 적용하기위하여는 이같은 문제점을 사전에 충분히 검토하여 合理的인 設計指針을 확립해 둘 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 大入熱熔接結果 HAZ軟化部를 가진 TMCP型 50HT鋼板(降伏應力 $\sigma_0 = 36 \text{ kg/mm}^2$)을 대상으로 面內壓縮力을 받는 경우의 壓縮最終強度에 대한 HAZ軟化部의 影響을 彈塑性大變形 有限要素解析을 수행하여 定量的으로 考察하고자 한다.

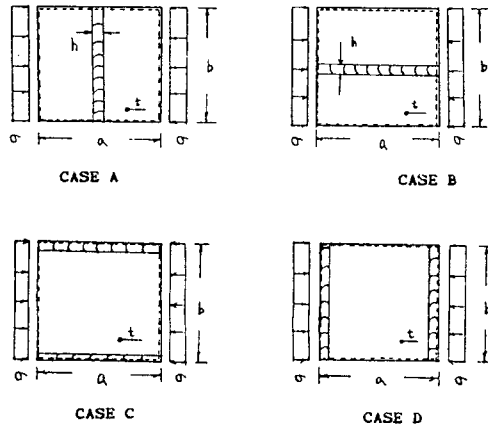


Fig. 1 Configuration of weld zone position and loading direction

2. 大入熱熔接에 의한 TMCP型 50HT의 HAZ軟化

대표적인 TMCP型 50HT 鋼板의 大入熱 熔接時 熔接이음부의 引張試驗結果를 Table 1에 보이고 있다⁵⁾. 이 Table 에서 알 수 있는 바와 같이 熔接部의 降伏應力은 母材의 降伏應力의 크기와 비슷하거나 다소 높은 값을 주고 있다. 그러나, HAZ部의 降伏應力은 母材의 降伏應力에 비해 약 20%정도 저하함을 알 수 있다.

TMCP型 鋼板에 大入熱熔接을 했을때 HAZ部가 軟化하는 것은 TMCP型鋼板이 大入熱熔接時의 熱 cycle중 加速冷却에 의한 強度上昇效果가 일부 소실하여 HAZ부에 母材보다도 軟화된 領域이 생기는데 그 원인이 있다고 알려져 있다¹⁾.

川野등⁵⁾의 실험결과에 의하면 TMCP型 50HT鋼板에 大入熱熔接을 수행했을때 HAZ軟化領域은 炭素當量이 낮을수록 크며, HAZ部의 降伏應力은 母材의 降

Table 1 Tensile test results for the welded joint of TMCP type 50HT steel plate⁵⁾

(unit : kg/mm²)

Region	Yield stress		Tensile strength
	σ_{y0}	$\sigma_{y0}/36$	
Base metal	37.5-41.0	1.04-1.14	50.1-54.0
Weld metal	36.1-53.4	1.00-1.48	51.3-62.4
HAZ	28.9-32.7	0.80-0.91	45.6-55.0

Note: σ_{y0} is measured at 0.2% strain

伏應力の 약 80%정도로까지 저하하고 軟化部の 폭은 熔接金屬의 양편에 관두께 정도가 생기고 있다(h/t=2, h:軟化部幅 t:板두께).

따라서, 본 연구에서도 연구대상의 TMCP형 高張力鋼板은 기본적으로 HAZ부의 降伏應力을 母材에 비해 약 20%정도 저하시켜 $\sigma_0=28.8\text{kg/mm}^2$ 이라고 가정한다. 또한, 軟化部の 幅은 壓縮最終強度에 대한 영향을 비교검토하기위해 h/t=0~4를 설정하기로 한다.

3. 彈塑性大變形 有限要素法の 概要

본 연구에서는 著者중의 한사람이 개발한 彈塑性大變形 有限要素法⁶⁾을 적용하여 HAZ軟化部를 가진 TMCP型 鋼板의 壓縮最終強度를 해석한다. 본 해석 이론의 정식화는 參考文獻⁶⁾에 상세하게 설명하고 있으므로 여기서는 그 概要만을 간단히 要約한다.

본 해석법에서는 Fig. 2에 나타내는 바와 같은 四角形要素를 이용하여 Updated Lagrangian기법을 바탕으로 幾何學의 非線形性을 정식화하였다. 따라서, 요소의 탄성 강성 방정식은 다음과 같다.

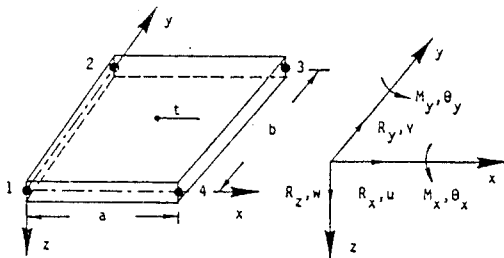


Fig. 2 The local coordinate of rectangular plate element and its nodal force and displacement used in the present analysis

$$\{L\} + \{\Delta R\} = [K]^e \{\Delta U\} \quad (1)$$

여기서,

$[K]^e = [K_p] + [K_b] + [K_o]$: 요소의 접선탄성강성행렬
 $\{L\} = \{R\} - \{r\}$: 총 외력 $\{R\}$ 과 총 내력 $\{r\}$ 사이에 발생한 불평형력

$[K_p]$: 면내 미소변형에 관한 강성행렬
 $[K_b]$: 면외 미소변형에 관한 강성행렬
 $[K_o]$: 면의 대변형으로 인한 초기응력 강성행렬

요소의 소성조건은 막응력성분과 굽힘응력성분의 합수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_p = f(\{\sigma_m\}, \{\sigma_b\}) \quad (2)$$

여기서,

$\{\sigma_m\}$: 막응력 성분
 $\{\sigma_b\}$: 굽힘응력 성분

본 研究에서는 塑性등의 材料的 非線形性은 塑性節點法⁷⁾을 적용하여 다루고 있다. 따라서, 요소의 탄소성 강성방정식은 다음과 같다.

$$\{\Delta R\} = [K]^p \{\Delta U\} \quad (3)$$

여기서,

$$[K]^p = [K]^e - \sum_{i=1}^m [K]^e \{\Phi_i\} \{\Phi_i\}^T [K]^e \{\Phi_i\}^T [K]^e$$

$\{\Phi_i\}^{-1}$: 요소의 탄소성 접선강성행렬

$$\{\Phi_i\} = \left\{ \frac{\partial \Gamma_p}{\partial R} \right\}, m=1-4; \text{소성절점번호}$$

또한, 不平衡力에 대한 收斂計算은 매하중중분단계시 발생한 不平衡力을 반복계산에 의해 소거시키되 이때 반복계산에 필요한 剛性行列은 첫번째의 것을 그대로 사용하는 수정Newton-Rapson법을 적용하여 수행하며⁸⁾, 실제해석시에는 초기치점과 熔接殘留應力의 영향도 고려할 수 있도록 하였다. 한편, 이상과 같이 정식화된 해석이론을 바탕으로 컴퓨터프로그램 EPLDA⁹⁾를 개발하였으며, 본 연구에서는 EPLDA 프로그램을 적용하여 TMCP型 鋼板의 彈塑性大變形舉動을 해석한다.

4. 最終強度解析結果 및 考察

4.1. HAZ軟化部를 가진 TMCP型 高張力鋼板의 解析모델링

본 研究에서는 Fig. 3에 나타내는 바와 같이 大入熱 熔接에 의한 HAZ軟化部가 존재하고 길이×폭×두께 = a×b×t인 임의의 TMCP型 50HT鋼板이 한방향으로 壓縮力을 받는 경우의 彈塑性大變形舉動을 해석한다. 전술한 바와 같이 大入熱 熔接후의 熔着金屬部 降伏應力은 母材의 降伏應力의 크기와 비슷하거나 다소 높은 값을 주고 있다¹⁾. 그러나, 본 해석에서는 모델링의 편의상, 熱影響部 및 熔接部를 모두 軟化領域으로 가정하였으며 이때의 폭을 h로 정의하였다. 이렇게 하면 板의 壓縮最終強度를 다소 安全側에서 평가하게 되므로 設計指針設定의 측면에서 유리하다.

Fig. 4에 나타내는 바와 같이 임의폭의 軟化部를 가

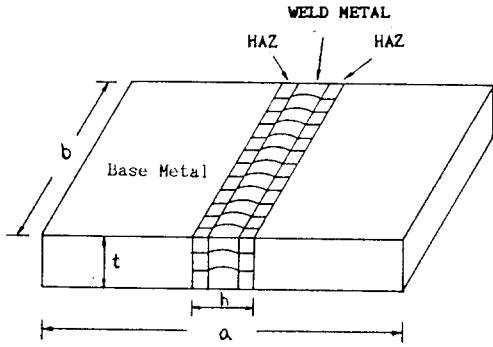


Fig. 3 Schematic diagram of welded joint with HAZ softening

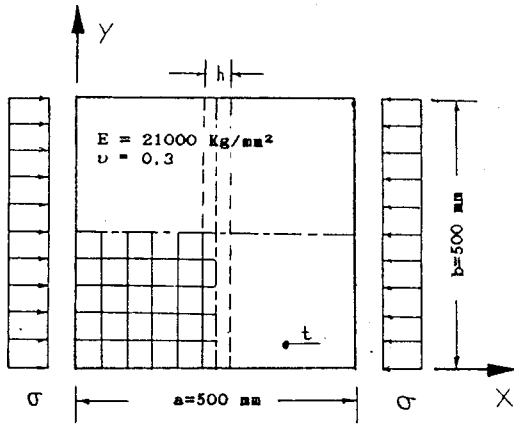


Fig. 4 A simply supported square TMCP steel plate with HAZ softening subjected to uniaxial compression and its finite element modeling

진 單純支持된 正四角形의 TMCP鋼板($a \times b = 500 \times 500 \text{mm}$)을 대상으로 모델링하였고(횡방향의 면내거동은 자유), 하중은 하중제어방식으로 증가시켰다. 변형거동의 대칭성을 고려하여 판의 1/4만을 四角形要素로 모델링하였으며, 彈塑性舉動은 塑性節點法을 적용하여 해석하므로 판두께방향의 중요소분할은 행하지 않고 節點은 판두께방향의 중앙위치에 설정하였다. 要素數는 參考文獻⁸⁾의 결과를 바탕으로 기본적으로 5×5 를 채용하고, HAZ軟化部에 대하여 별도의 四角形要素로 모델링하였다(Fig. 5 참조). 또한, 판에는 일반적으로 초기처짐이 필연적으로 존재하고 있으므로 본 연구에서는 판중간의 10%정도의 초기처짐($W_0/t = 0.1$, W_0 : 판중앙에서의 최대초기처짐량)이 존재한다고 생각하여 해석하였다.

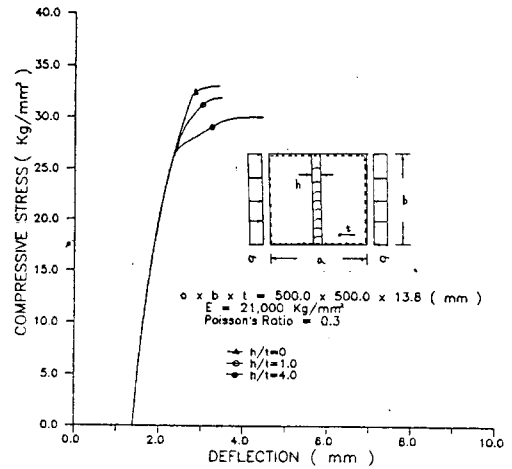
軟化部の 폭은 $h/t = 0 \sim 4$ 의 범위에서 변화시켰으며, 母材와 軟化部の 降伏應力은 각각 $\sigma_0 = 36.0 \text{kg/}$

mm^2 및 $\sigma_0 = 28.8 \text{kg/mm}^2$ 이다. 또한 彈性係數는 $E = 21000 \text{kg/mm}^2$, 포아손比 = 0.3이라고 가정하였다. 한편, 본 연구에서는 熔接部位置와 荷重方向으로서 Fig. 1의 Case A 및 Case B만을 대상으로 하였다.

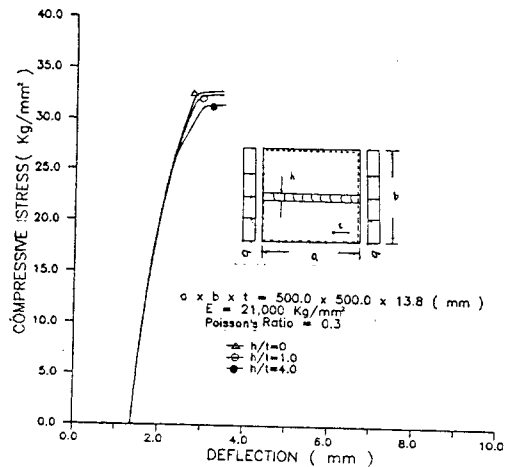
4.2. 解析結果 및 考察

4.2.1. 軟化部幅의 影響

Fig. 5a)에서는 Fig. 1의 Case A와 같이 熔接部는 판의 중앙에 위치하고 荷重은 熔接部와 平行的인 방향으



a) Case A



b) Case B

Fig. 5 The load-deflection relation of a TMCP steel plate with HAZ softening subjected to uniaxial compression

로 작용하는 경우, 細長比($b/t\sqrt{\sigma_o/E}$)=1.5인 비교적 두꺼운 TMCP型50HT鋼板을 대상으로 軟化部幅을 변화시켜 수행한 彈塑性大變形解析結果를 나타내고 있다. 이들 결과에 의하면 판에 軟化領域이 존재하면 하중의 증가와 함께 塑性化의 생성이 早期에 일어나고 이 경향은 軟化部幅이 클수록 크다. Table 2에 의하면 HAZ軟化部の 폭이 $h/t=4$ 인 경우는 HAZ軟化部가 없는 경우보다 약 8% 정도의 최종강도가 저하하였다.

Table 2 The influence of HAZ softening breadth on the ultimate compressive strength of a TMCP 50HT steel plate for Case A

h/t	σ_u (kg/mm ²)	σ_u/σ_o	ratio(%)
0	32.63	0.91	100.0
1	31.80	0.88	97.5
4	30.07	0.83	92.1

다음으로, Fig. 5b)에는 Fig. 1의 Case B에 대한 해석결과를 나타내고 있으며, 이 경우도 Fig. 5a)와 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 이 경우에는 Table 3에 나타난 바와 같이 HAZ 軟化部로 인해 최대 약 4% 정도의 최종강도가 저하하였다.

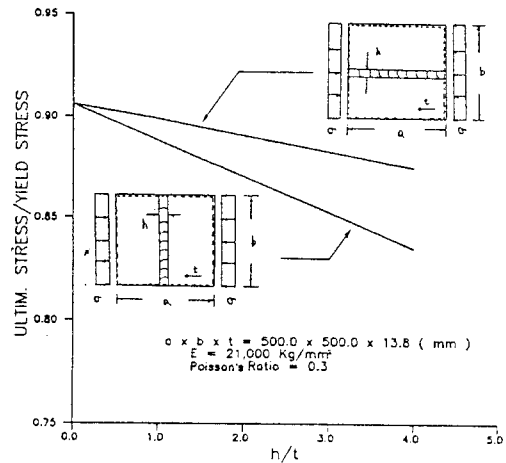
Table 3 The influence of HAZ softening breadth on the ultimate compressive strength of a TMCP 50HT steel plate for Case B

h/t	σ_u (kg/mm ²)	σ_u/σ_o	ratio(%)
0	32.63	0.91	100.0
1	32.35	0.90	99.1
4	31.50	0.87	96.5

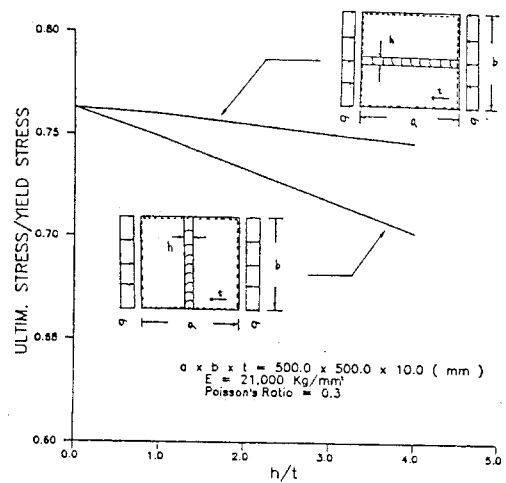
4. 2. 2. 熔接部位置의 影響

Fig. 6a)에는 軟化部幅의 증가에 따른 最終強度值의 변화를 熔接部의 위치를 바꾸어 해석한 결과를 비교하고 있다. Fig. 6a)에는 細長比($b/t\sqrt{\sigma_o/E}$)=1.5인 TMCP型 鋼板을 해석한 것으로 最終強度值의 저하량은 Case A가 8%이고 Case B가 4%로서 熔接部의 위치가 하중방향과 직각일때가 평행일때보다 그저하량이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

Fig. 6b)에서는 細長比($b/t\sqrt{\sigma_o/E}$)=2.07인 TMC-P型 鋼板을 해석한 것으로 Fig. 6a)에서와 같이 이 경우도 熔接部의 위치가 壓縮最終強度에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



a) $t=13.8\text{mm}$, $b/t\sqrt{\sigma_o/E}=1$.



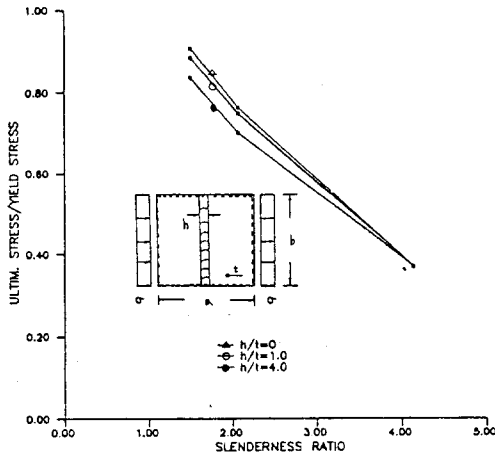
b) $t=10.0\text{mm}$, $b/t\sqrt{\sigma_o/E}=2.07$

Fig. 6 Influence of the compressive loading direction on the ultimate compressive strength of a TMCP steel plate with HAZ softening(

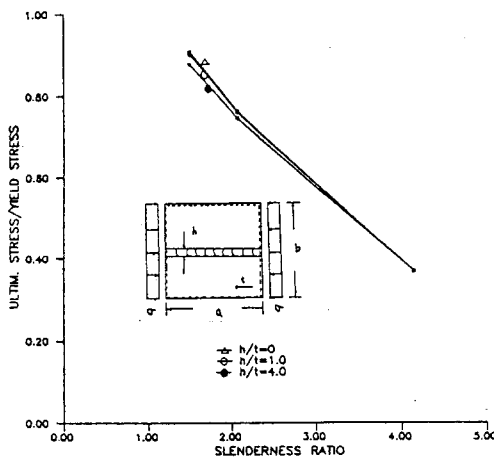
4. 2. 3. 細長比의 影響

壓縮最終強度值의 저하에 대한 판두께의 영향을 파악하기 위해 3종류의 細長比($b/t\sqrt{\sigma_o/E}=1.52, 2.07, 4.14$)를 가진 판에 대한 壓縮最終強度해석결과를 Case A의 경우 Fig. 7a)에 나타내고, Case B의 경우 Fig. 7b)에 나타내고 있다.

이들 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 細長比가 작아질수록(판두께가 두꺼워질수록) 軟化領域의 존재



a) Case A



b) Case B

Fig. 7 Influence of the slenderness ratio on the ultimate compressive strength of a TMCP steel plate with HAZ softening

에 따른 最終強度值의 降低경향은 증가하고 있으며, 薄板의 경우는 軟化領域의 영향이 거의 없다.

5. 結 言

본 연구에서는 周邊單純支持된 正四角形의 TMCP 型 50HT 鋼板을 대상으로 有限要素法에 의한 彈塑性 大變形解析을 수행하여 HAZ軟化部가 板의 壓縮最終強度에 미치는 영향을 定量的으로 考察하였다. 熔接部

는 판의 중앙에 위치하고 壓縮力이 熔接部와 平行 또는 직각방향으로 작용하는 경우를 대상으로 하였으며, 軟化部의 降伏應力은 母材에 비해 20%정도 低下하고, 전체적인 軟化部厚은 판두께의 4배정도의 범위를 대상으로 하였다. 이상의 해석결과, 다음의 結論을 얻었다.

1) 軟化領域의 증가와 함께 塑性化의 進전이 早期에 일어나고 그 결과 壓縮最終強度도 低下하며, 본 해석에의 경우 최대 8%정도까지 最終強度值가 低下하였다.

2) 壓縮最終強度는 熔接部の 위치가 下중방향과 直각일때가 平行일때 보다 크게 低下한다.

3) 壓縮最終強度에 대한 軟化領域의 영향은 厚板의 경우에는 크게 나타나지만 薄板의 경우는 거의 무시할 수 있다고 생각된다.

끝으로 본 연구에서는 正四角形板만을 대상으로 하였으나 실제구조물에서는 縱橫비가 큰 판부재가 사용되고 있으므로 이에 대한 연구가 필요하며, 熔接部가 판의 周邊에 위치하는 경우에 대해서도 더 많은 연구가 필요하다고 사료된다. 또한, 본 연구에서는 軟化部의 降伏應力低下를 20%로 설정하였으나 이의 低下량이 변화하는데 따른 효과에 대해서도 규명할 필요가 있다고 생각된다.

參考文獻

- 1) 日本造船研究協會, 第193研究部會報告書: 新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に關する研究, (1985).
- 2) 仁藤 弘, 井上好章, 矢島 浩, 阪井大輔, 十河泰雄, 佐藤邦彦, 豊田政男: TMCP型HT50鋼板熔接継手の引張強さに關する評價, 日本造船學會論文集, 第157號, (1985), pp. 304-311.
- 3) 井上克明, 多田益男, 平田隆明, 矢島 浩, 勝田順一, 仁藤 弘, 阪井大輔: 新制御壓延(TMCP)型50キロ級高張力鋼熔接継手部の疲勞強度とその評價, 西部造船會會報, 第67號, (1983), pp. 49-57.
- 4) 井上克明, 井上好章, 矢島 浩, 仁藤 弘, 川村昭宣, 十河泰雄: 新制御壓延(TMCP)型50キロ級高張力鋼熔接継手部の疲勞強度とその評價(その2), 西部造船會會報, 第69號, (1984), pp. 251-260.
- 5) 川野 始, 井上好章, 矢島 浩, 仁藤 弘, 阪井大輔,

- 十河泰雄, 佐藤邦彦, 豊田政男: TMCP型HT50 鋼板熔接継手の曲げおよび壓縮強度に関する検討, 西部造船會會報, 第70號, (1985), pp. 187-198.
- 6) J.K. Paik and C.Y. Kim: A Simplified Finite Element Method for the Ultimate Strength Analysis of Plates with Initial Imperfections, J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.26, No.1, (1989), pp. 24-38.
- 7) Y. Ueda and T. Yao: The Plastic Node Method: A New Method of Plastic Analysis, J. of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineers, Vol.34, No.1-3, (1982), pp. 1089-1104.
- 8) 白点基 외: 板部材의 彈塑性大變形 有限要素解析 문제에서의 收斂技法에 관한 고찰, 韓國電算構造工學會, 제2권, 제3호, (1989), pp. 97-103.
- 9) 白点基, EPLDA使用說明書, A Computer Program for Elastic-Plastic Large Deflection Analysis of Imperfect Plates, 釜山大學校 造船工學科 研究報告書, Report No. PNUNA-SE-89-01, (1989).