

研究論文
------

大韓熔接學會誌  
第9卷第2號 1991年6月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 9, No. 2, Jun., 1991

## HAZ 軟化部를 가진 TMCP型 高張力鋼板의 壓縮最終強度에 관한 研究(第2報)

— 直四角形板 —

白 点 基\* · 高 在 用\*\*

### Ultimate Compressive Strength Analysis of TMCP High Tensile Steel Plates with HAZ Softening(2nd Report)

— Rectangular Plate —

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

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

#### Abstract

The use of high tensile steel plates is increasing in the fabrication of ship and offshore structures. The softening region which has lower yield stress than base metal is located to prevent crackings in the conventional high tensile steel. Also, thermo mechanical control process (TMCP) steel with low carbon equivalent has the softening region which occurs in the heat affected zone when high heat input weld is carried out. The softening region in the high tensile steel gives rise to serious effect on structural strength such as tensile strength, fatigue strength and ultimate strength. In order to make a reliable structural design using high tensile steel plates, the influence of the softening on plate strength should be evaluated in advance.

In the previous paper<sup>6)</sup>, the authors discussed the ultimate compressive strength of 50HT steel square plates with softening region. In this paper, the ultimate compressive strength with varying the yield stress of softening region and the aspect ratio of the plate is investigated by using the elasto-plastic large deformation finite element method.

\* 正會員, 釜山大學校 工科大學 造船工學科

\*\* 學生會員, 釜山大學校 工科大學 造船工學科 博士過程

## 1. 序 言

현재 船舶 海洋構造물을 비롯한 鋼構造物의 設計 및 建造에 있어서는 대형화 및 경량화추세와 함께 구조재료로서 高張力鋼이 널리 사용되고 있다. 종래의 높은 탄소당량을 가진 高張力鋼의 경우에는 熔接接合部에서의 龜裂發生을 억제하기 위하여 母材보다도 降伏應力이 낮은 軟化部를 배치하고 있으며, 최근에 널리 사용되기 시작한 TMCP型 高張力鋼의 경우에도 탄소당량은 낮으나 大入熱熔接을 수행하면 熔接熱影響部가 軟化되는 현상이 생기고 있다<sup>1,2)</sup>.

지금까지 高張力鋼의 引張強度, 破壞靱性值, 疲勞強度 등에 미치는 軟化部의 영향을 다룬 연구는 다수 보고되고 있으나<sup>1-5)</sup>, 軟化部를 가진 高張力鋼板의 壓縮強度에 관한 검토는 거의 행해지지 않고 있다<sup>6,7)</sup>. 이것은 얇은 판의 경우, 좌굴문제를 수반하게되어 壓縮強度를 해석하기 위하여는 복잡한 기하학적, 재료적 비선형성을 파악하지 않으면 안되기 때문이다. 그러나, 高張力鋼의 사용량이 급속하게 증가하고 있는 현실점에서 高張力鋼의 실용화를 위해서는 이 문제를 규명하지 않으면 안된다.

저자들은 앞선 연구<sup>8)</sup>에서 단순지지된 正四角形高張力鋼板을 대상으로 軟化部의 위치 및 크기등이 壓縮最終強度에 미치는 영향을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 軟化部를 가진 直四角形板을 대상으로 壓縮最終強度에 대한 軟化部의 降伏應力의 변화효과 및 縱橫比의 영향을 파악하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 저자들이 정식화한 바 있는 彈塑性大變形 有限要素解析法<sup>9)</sup>을 적용하여 軟化部를 가진 판의 最終強度에 도달하기까지의 비선형 거동을 상세히 해석하였다. 한편, 본 연구에서 대상으로 하는 판의 재료는 50HT 高張力鋼(降伏應力  $\sigma_0 = 36 \text{ kg/mm}^2$ )을 설정하였다.

## 2. 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<sup>9)</sup>을 적용하여 軟化部를 가진 高張力鋼板의 壓縮最終強度를 해석한다. 본 해석이론의 정식화는 參考文獻<sup>9)</sup>에 상세하게 설명하고 있으므로 여기서는 그 概要만을 간단히 要約한다.

본 해석법에서는 Fig. 1에 나타내는 바와 같은 四節

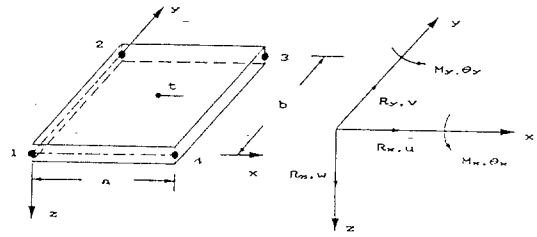


Fig. 1 The local coordinate of the rectangular plate element and its nodal force and displacement used in the present analysis

點 四角形要素를 사용하고 변위함수로서 면내변위  $u$ ,  $v$ 에 대해서는 1차식을, 면외변위  $w$ 에 대해서는 Bazeley등이 제안한 非適合(Non-Conforming)함수를 채용하여 국부좌표계부터 전체좌표계로의 좌표변환행렬을 매화주증분단계마다 다시계산하는 Updated Lagrangian기법을 바탕으로 幾何學的 非線形성을 정식화하였다. 요소의 彈性 剛性方程式은 다음과 같다.

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

여기서,

$[K]^e = [K_p] + [K_b] + [K_o]$ : 요소의 接線彈性剛性行列

$\{L\} = \{R\} - \{r\}$ : 총 외력  $\{R\}$ 과 총 내력  $\{r\}$  사이에 발생한 불명형력

$[K_p]$ : 면내 미소변형에 관한 강성행렬

$[K_b]$ : 면외 미소변형에 관한 강성행렬

$[K_o]$ : 初期應力 강성행렬

요소의 소성발생은 각모서리의 두께방향 중앙부에 설정된 절점에서 판단한다. 또한 면내 및 면외조합중의 작용하에서 요소의 全斷面塑性條件을 降伏條件으로 채용하여 막응력성분과 굽힘응력성분의 함수로 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성은 Ueda등이 제안한 塑性節點法<sup>10)</sup>을 적용하여 다루고 있다. 따라서, 요소의 彈素性 剛性方程式은 다음과 같이 된다.

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

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 彈塑性 接線剛性行列

$$\{\Phi_i\} = \left\{ \frac{\partial \Gamma_p}{\partial R} \right\}, m = 1-4; \text{ 塑性節點數}$$

또한, 不平衡力에 대한 收斂計算은 매하중증분단계 시 발생한 不平衡力을 반복계산에 의해 소거시키되 이때 반복계산에 필요한 強性行列은 첫번째의 것을 그대로 사용하는 수정Newton-Rapson법을 적용하여 수행하며<sup>11)</sup>, 실제해석시에는 초기처짐과 熔接殘留應力의 영향도 고려할 수 있도록 하였다. 한편, 이상과 같이 정식화된 해석이론을 바탕으로 컴퓨터프로그램 EPLDA<sup>12)</sup>를 개발하였으며, 본 연구에서는 EPLDA 프로그램을 적용하여 軟化部를 가진 高張力鋼板의 彈塑性大變形舉動을 해석한다.

### 3. 數值計算例 및 考察

#### 3. 1. 軟化部를 가진 高張力鋼板의 解析모델링

本 研究에서는 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 폭이 h 인 軟化部를 가진 길이×폭×두께 = a×b×t인 50HT 高張力鋼板이 길이방향으로 壓縮力을 받는 경우의 彈塑性大變形舉動을 해석한다.

本 研究에서는 a/b = 1, 2, 3, 4 및 5인 板을 대상으로 하며, 細張比(b/t√σ<sub>0</sub>/E)는 2.07인 판만을 대상으로 하였다. 또한 軟化部는 판의 중앙부에 위치하며, 외하중 작용방향과 용접부 길이방향은 서로 직각방향이 다. 軟化部의 幅은 판두께의 4배, 즉 h/t = 4를 설정하였으며, 軟化部의 降伏應力은 母材에 비해 10%, 20% 및 30%로 저하되는 경우를 생각하여 시리즈 해석을 수행하였다.

판의 주변은 單純支持되고 있고 非荷重邊의 면내거동은 자유이며, 하중은 변위제어방식으로 증분적으로 증가시켰다. 변형거동의 대칭성을 고려하여 판의 1/4만을 四節點 四角形板要素로 모델링하였으며, 요소수는 판의 중횡비에 따라 Fig. 3에 나타내는 바와 같이 길이방향으로 m개, 폭방향으로 n개를 채용하였다. 이때 軟化部에 대해서는 Fig. 3에 나타내는 바와 같이 모

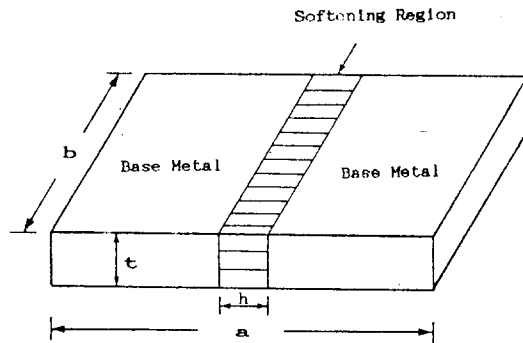


Fig. 2 Schematic diagrams of the high tensile steel plate with softening region

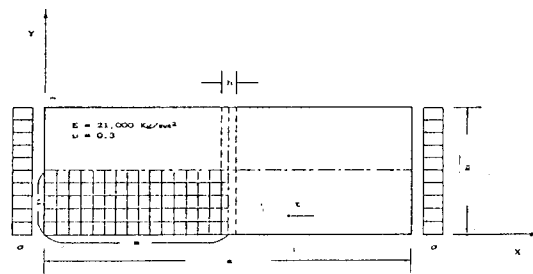


Fig. 3 The finite element modeling of high tensile steel plate with softening region subjected to uniaxial compression

재부분보다 작은 별도의 4각형요소로 모델링하였다. 縱橫比의 변화에 따른 요소수는 구체적으로 Table 1에 나타나고 있다. 본 해석에서는 彈塑性舉動을 塑性節點法을 적용하여 해석하므로 판두께방향의 층요소분할은 행하지 않고 절점은 판두께방향의 중앙 위치에 설정하였다.

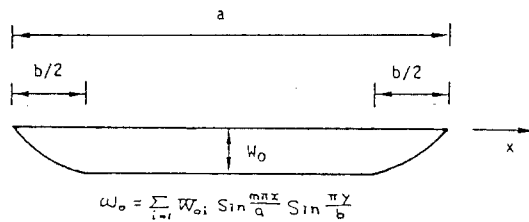
한편, 실제 판부재에는 초기처짐이 필연적으로 존재하고 있으며, 그 분포현상은 일반적으로 매우 복잡하나 전반적으로 1半波가 지배적이며 “야원말 잔등”모양을 하고 있다는 것이 알려져 있다<sup>13)</sup>. 本 研究에서는 이 모양을 좀 더 간이화 시켜서 Fig. 4와 같이 표시하기로 한다. 즉, 판 길이방향의 양편에서 폭의 절반길이에 해당하는 부분에서는 sine곡선으로 표시하고, 내부는 평탄면으로 나타낸다. 또한, 판의 폭방향으로는 1半波의 sine곡선으로 표시한다. 이 분포현상은 3角級數로서 나타낼 수 있는데, a/b가 3정도인 판에서는 초기처짐성분항을 11개 정도까지 채용하여 壓縮最終強度를 해석하면 실용적으로 충분한 精度의 결과를 얻을

**Table 1. Description of the high tensile steel plates with softening region subjected to uniaxial compression**

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	t (mm)	$\sigma_{oBM}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{oOR}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	h/t	$W_o/t$	Mesh size (mxn)	$\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\frac{\sigma_u}{\sigma_{oBM}} \times 100$ (%)	CPU Time(Min.) By CYBER 932/31 computer
P1	500	500	10	36.0	36.0	0	0.1	5×5	27.48	76.33	23.00
P2	500	500	10	36.0	32.4	4	0.1	6×5	26.99	74.97	21.11
P3	500	500	10	36.0	28.8	4	0.1	6×5	25.76	71.55	19.19
P4	500	500	10	36.0	25.2	4	0.1	6×5	23.73	65.92	17.29
P5	1000	500	10	36.0	36.0	0	0.1	10×5	30.90	85.83	45.30
P6	1000	500	10	36.0	28.8	4	0.1	11×5	27.30	75.83	37.80
P7	1500	500	10	36.0	36.0	0	0.1	15×5	28.80	80.00	72.32
P8	1500	500	10	36.0	28.8	4	0.1	16×5	26.62	73.94	62.47
P9	2000	500	10	36.0	36.0	0	0.1	20×5	30.12	83.67	103.45
P10	2000	500	10	36.0	28.8	4	0.1	21×5	28.11	78.08	95.50
P11	2500	500	10	36.0	36.0	0	0.1	25×5	29.06	80.72	141.10
P12	2500	500	10	36.0	28.8	4	0.1	26×5	27.77	77.15	128.80

Note: 1)  $\sigma_{oBM}$  denotes the yield stress of base metal

2)  $\sigma_{oSR}$  denotes the yield stress of softening region



**Fig. 4** Simplified shape of the initial deflection existing in the plate element

수 있다는 것이 알려져 있다<sup>14)</sup>. 이 같은 측면에서 본 연구에서는 Fig. 4에 나타내는 3角級數의  $i$ 를 縱橫比가 3이하인 판에 대해서는 11개, 縱橫比가 4이상인 판에 대해서는 15개를 채용하였다. 본 해석에서는 Fig. 4의  $W_o/t = 0.1$ 인 경우만을 대상으로 하였으며, 縱橫比의 변화에 따라 각 초기치점성분항을 계산한 결과를 Table 2에 나타내고 있다.

**Table 2** Magnitude of the initial deflection components when  $W_o/t=0.1$ 

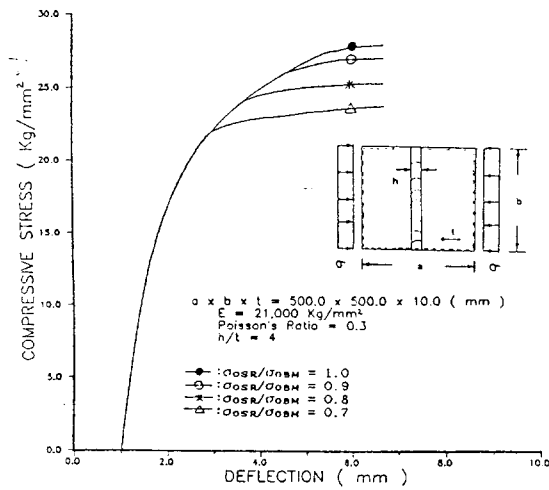
$a \times b$ $A_{oi}$	500×500 (mm)	1000×500 (mm)	1500×500 (mm)	2000×500 (mm)	2500×500 (mm)
$A_{o1}$	1.0000	1.2017	1.2416	1.2558	1.2623
$A_{o2}$	—	0.0000	-0.002	0.0000	-0.0001
$A_{o3}$	—	0.2390	0.3333	0.3717	0.3910
$A_{o4}$	—	0.0000	-0.0002	0.0000	0.0000
$A_{o5}$	—	0.0281	0.1237	0.1735	0.2014
$A_{o6}$	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$A_{o7}$	—	-0.0226	0.0337	0.0806	0.1114
$A_{o8}$	—	0.0000	0.0002	0.0000	0.0001
$A_{o9}$	—	-0.0166	-0.0001	0.0306	0.0584
$A_{o10}$	—	0.0000	0.0002	0.0000	0.0001
$A_{o11}$	—	-0.0042	-0.0031	0.0057	0.0259
$A_{o12}$	—	—	—	0.0000	0.0000
$A_{o13}$	—	—	—	-0.0028	0.0083
$A_{o14}$	—	—	—	0.0000	-0.0001
$A_{o15}$	—	—	—	-0.0019	0.0010

Note: Plate thickness  $t$  is set to be 10mm

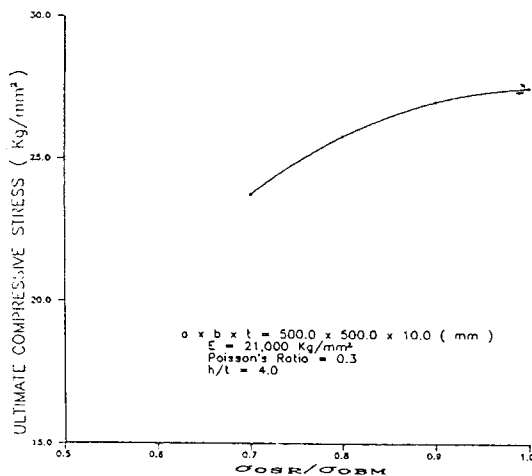
3.2. 計算結果 및 考察

(1) 軟化部の 降伏應力低下量の 影響

보통 高張力剛에 大入熱熔接을 수행하게되면 軟化部の 降伏應力을 母材보다 約 10-30%정도 低下하며, 平均적으로 約 20%정도라는 것이 알려져 있다<sup>4)</sup>. 여기서는 軟化部の 降伏應力 低下量이 판의 壓縮最終強度에 미치는 영향을 파악하기 위하여 軟化部를 가진 정사각형판에 대해 軟化部の 降伏應力이 모재에 비해 10%, 20% 및 30%로 低下하는 경우의 시리즈 해석을 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 The influence of the yield stress of softening region on the the ultimate compressive strength of a high tensile steel square plate

Fig. 5에는 軟化部降伏應力의 변화에 따른 壓縮最終強度를 해석한 결과를 나타내고 있다. 이 그림으로 알 수 있는 바와 같이 軟化部の 降伏應力이 低下함에 따라 壓縮最終強度도 크게 低下하고 있음을 알 수 있다. 또한, Table 1에 나타낸 바와 같이 軟化部の 降伏應力이 母材보다 20%저하한 경우의 壓縮最終強度는 軟化部가 없는 경우에 비해 약 5%정도 低下하고 있다.

(2) 縱橫比의 影響

여기서는 軟化部를 가진 高張力鋼板의 壓縮最終強度에 대한 縱橫比의 영향을 시리즈해석하는 경우, 軟化部の 降伏應力을 母材보다 20%저하된 것으로 설정하기로 한다.

Fig. 6에서 Fig. 10에는 縱橫比의 변화에 따른 판의 破損舉動解析結果를 나타내고 있다.

먼저, Fig. 6 및 8에는 縱橫比가 3인 高張力鋼板 (a×b = 1500×500)의 壓縮最終強度를 해석한 것으로 하중의 증가에 따른 처짐형상의 변화를 상세하게 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중의 증가와 함께 판은 고유의 彈性挫屈모드인 3半波의 처

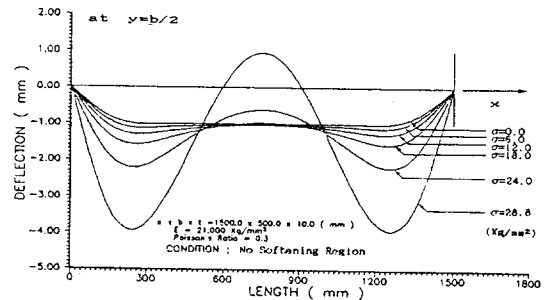


Fig. 6 Deflected shape of a high tensile steel plate without softening region with increasing of uniaxial compression(a/b = 3)

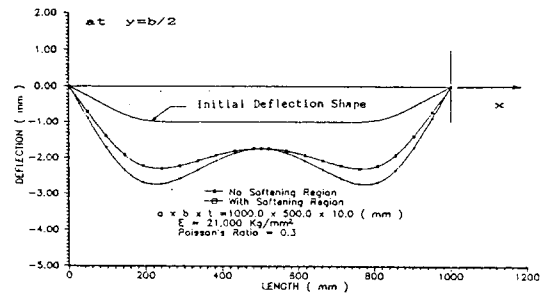


Fig. 7 Initial deflection shape and failure mode of high tensile steel plates subjected to uniaxial compression(a/b = 2)

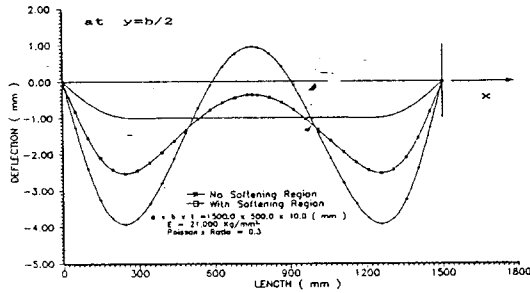


Fig. 8 Initial deflection shape and failure mode of high tensile steel plate subjected to uniaxial compression(a/b = 3)

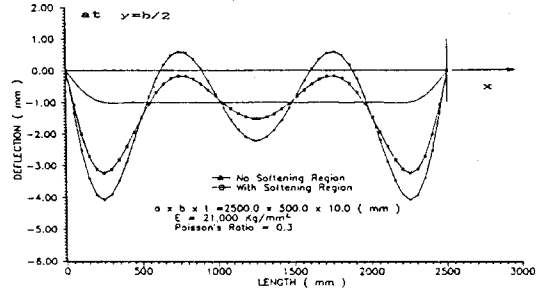


Fig. 10 Initial deflection shape and failure mode of high tensile steel plate subjected to uniaxial compression(a/b = 5)

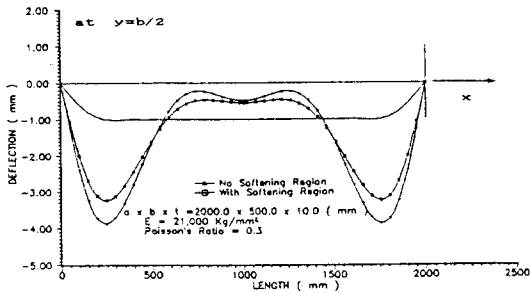


Fig. 9 Initial deflection shape and failure mode of high tensile steel plate subjected to uniaxial compression(a/b = 4)

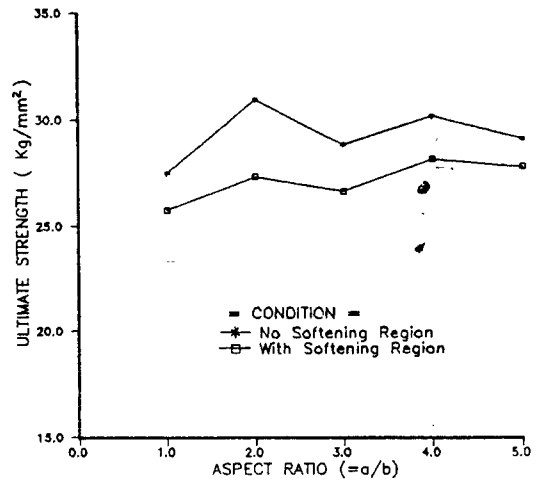


Fig. 11 The influence of the aspect ratio on the ultimate compressive strength of high tensile steel plates with softening region subjected to uniaxial compression

침형상으로 破損하고 있다.

Fig. 7과 9에서는 각각 縱橫비가 2 및 4인 高張力鋼板에 대한 破損形狀을 비교하고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 縱橫비가 짝수인 판의 破損모드는 고유의 彈性挫屈모드로 처짐형상이 일어나지 않고 1개의 高次모드를 쫓아 가고 있음을 보여주고 있으며, 이것은 가정한 초기처짐분포형상이 1半波가 지배적인데 그 원인이 있다고 생각된다<sup>14)</sup>. 또한, 軟化部를 가진 高張力鋼板은 軟化部가 없는 경우보다 塑性化의 진전이 早期에 일어나 壓縮最終強度를 저하시키고 있다.

Fig. 6, 8 및 10에서는 縱橫비가 홀수인 경우의 결과이며, 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 縱橫비가 홀수인 경우의 破損모드는 고유의 彈性挫屈모드의 처짐형상으로 나타내고 있다. 이 경우도 물론 軟化部가 존재하면 소성화가 早期에 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 이상의 결과를 바탕으로 縱橫비의 변

화에 따른 高張力鋼板의 壓縮最終強度의 변화를 나타내고 있다. 縱橫비가 짝수인 경우가 홀수인 경우보다 壓縮最終強度가 상대적으로 높게 나타나고 있는데, 이것은 초기처짐 분포형상을 Fig. 4와 같이 설정한 데 기인된 것으로 그 결과, 縱橫비가 짝수인 경우는 고유의 彈性挫屈모드의 초기처짐성분이 Table 2에 나타난 것처럼 거의 0으로 마치 초기처짐이 없는 正四角形板의 最終強度値와 비슷한 값을 주고 있다<sup>14)</sup>. 또한, 軟化部の 존재에 따른 壓縮最終強度의 저하량은 軟化部の 폭과 降伏應力値가 일정하면 縱橫비의 변화에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다.

#### 4. 結 言

본 연구에서는 軟化部를 가진 50HT 高張力鋼板을 대상으로 彈塑性大變形 有限要素解析을 수행하여 軟化部の 降伏應力低下量과 縱橫比가 판의 壓縮最終強度에 미치는 영향을 고찰하였다. 熔接部는 판의 중앙에서 壓縮力의 작용방향과 직각방향으로 위치하고 있으며, 軟化部の 전체폭은 판두께의 4배를 설정하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 軟化部 降伏應力의 저하량이 클수록 판의 壓縮最終強度는 저하한다. 軟化部の 降伏應力이 母材보다 약 20%저하한 경우의 판의 壓縮最終強度는 軟化部가 없는 경우에 비해 약 5%정도 저하하고 있다.

2) 軟化部를 가진 鋼板의 壓縮最終強度值는 軟化部の 幅과 降伏應力의 저하량이 동일하면 縱橫比의 변화에 관계없이 거의 동일량만큼 저하한다.

#### 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キ口級高張力鋼の有効利用に関する研究, (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鋼板熔接繼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) 佐藤邦彦, 豊田政男, 藤井英輔: 軟質熔接繼手の靜的引張強度に關する研究, 日本造船學會論文集, 第132號, (1972), pp. 381-393.
- 4) 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キ口級高張力鋼熔接繼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.
- 5) 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キ口級高張力鋼熔接繼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.
- 6) 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: TMC-P型HT50鋼板熔接繼手の曲げおよび壓縮強度に關する檢討, 西部造船會會報, 第70號, (1985), pp. 187-198.
- 7) Y. Ueda, H. Murakawa and H. Kimura: Compressive Strength of Structural Members with Soft Weld Joints, Transactions of JWRI, Osaka University, Vol. 16, No. 1, (1987), pp. 177-187.
- 8) 白点基, 高在用: 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—, 大韓熔接學會誌, 第8卷, 第4號, (1990), pp. 69-75.
- 9) J.K. Paik and C.Y. Kim: A Simplified Finite Element Method for the Ultimate Strength Analysis of Plates with Intial Imperfections, J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 26, No. 1, (1989), pp. 24-38.
- 10) 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.
- 11) 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誌, 제2권, 제3호, (1989), pp. 97-103.
- 12) 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).
- 13) C.A. Carlsen, J. Czujko: The Specification of Post-Welding Distortion Tolerances for Stiffened Plates in Compression, The Structural Engineer, Vol. 56A, No. 5, (1978), pp. 133-141.
- 14) 白点基, 金建: 複雜한 형상의 초기처짐을 가진 實船 Panel의 壓壞強度簡易 推定法, 大韓造船學會誌, 제25권 제1호, (1983), pp. 33-46.