

## 2차좌굴을 포함하는 선체판의 탄소성거동에 관한 연구

고재용\* · 이돈출\*\* · 유영훈\*\* · 조영태\*\*\* · 박성현\*\*\*\*

\*목포해양대학교 해양시스템공학부, \*\*목포해양대학교 기관시스템공학부  
\*\*\*전주대학교 공학기술연구소  
\*\*\*\*목포해양대학교 해상운송시스템학부

### A Study of the Buckling/Plastic Collapse Behaviour of Ship Plates with Secondary Buckling

Jae-Yong Ko\* · Don-Chul Lee\*\* · Young-Hun Yu\*\* · Young-Tae Cho\*\*\* · Sung-Hyeon Park\*\*\*\*

\*Mokpo Maritime University, Faculty of Ocean System Engineering  
\*\*Mokpo Maritime University, Faculty of Marine Engineering  
\*\*\*Jeonju University, Institute of Engineering Technology  
\*\*\*\*Mokpo Maritime University, Faculty of Transportation System

**요 약 :** 선박은 박판으로 이루어진 상자형구조물이기 때문에 선박이 황천항해를 하게 되면 선체의 상갑판과 선저판에는 호깅이나 새깅이 반복적으로 일어나므로 선체판에는 인장력과 압축력이 반복적으로 작용하게 된다. 이 중에서도 압축력이 작용하는 경우가 선박의 종강도상에 치명적인 결과를 가져올 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 선체판중에서 종횡비가 1.4인 판을 대상으로 하여 탄소성유한요소해석을 통하여 압축하중을 계속적으로 증가시켜 좌굴과 함께 탄소성대변형거동을 밝힘과 동시에 2차좌굴과 탄소성거동과의 메카니즘을 규명하여 압축하중을 받는 선체판의 탄소성대변형거동을 규명하였다.

**핵심용어 :** 2차좌굴, 선체판, 붕괴거동, 탄소성대변형, 유한요소법, 고장력강

**Abstract :** The plate buckling is very important design criteria when the ship is composed of high tensile steel plates. The structures under the action of excessive loading exhibit local failure associated with buckling until they reach the ultimate limit state as a whole. Precise assessment of the behaviour of plate above primary buckling load is important. In this connection, series of elastic plastic large deflection analyses are performed on rectangular plates with aspect ratio 1.4 applying the finite element method. In this paper, the buckling/plastic collapse behaviour of ship plates with secondary buckling is investigated. It has found that the other deflection components also increase with the increase of compressive load above the primary buckling load.

**Key words :** Secondary Buckling, Ship Plate, Collapse Behaviour, Elastic Plastic Large Deflection Finite Element Method, High Tensile Steel

### 1. 서 언

선박을 박스형거더라고 가정하여 단순한 선박계산을 하는 경우가 대부분이다. 박스형거더는 판과 보강재로 이루어진 구조물이라 할 수 있다. 따라서 판에 관련한 연구가 수도 없이 이루어지고 있다. 이것은 판이 모든 구조물의 기본 구조물이기 때문에 더욱 더 그렇다. 특히, 선박인 경우는 판구조물이 주종을 이루고 있다고 해도 과언이 아니다. 선박은 박판으로 이루어진 상자형구조물이기 때문에 선박이 황천항해를 하게 되면

선체의 상갑판과 선저판에는 호깅이나 새깅이 반복적으로 일어나므로 선체판에는 인장력과 압축력이 반복적으로 작용하게 된다. 이 중에서도 압축력이 작용하는 경우가 선박의 종강도상에 치명적인 결과를 가져올 수 있다.

따라서, 압축력이 작용하는 선체판의 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 한편, 선체판을 설계할시에 좌굴을 허용하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 요즘 고장력강의 유용성을 높이기 위해서는 좌굴을 허용하는 설계를 해야 한다. 이와 같이 좌굴을 허용하는 설계를 한다면 좌굴후의 선체판의 탄소성대변형거동을 밝히는 것은 아주 중요하다고 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 선체판중에서 종횡비가 1.4인 판을 대상으로 하여 탄소성유한요소해석을 통하여 압축하중을 계속적으로 증가시켜 좌굴과 함께 탄소성대변형거동을 밝힘과 동시

\* 정희원, kojy@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7129  
\*\* 정희원, ldcvib@mail.mmu.ac.kr, yuyh@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7089  
\*\*\* 정희원, dgycho@www.jeonju.ac.kr, 063)220-2114  
\*\*\*\* 정희원, shpark@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7127

에 2차좌굴과 탄소성거동과의 메카니즘을 규명하여 압축하중을 받는 선체판의 모든 거동을 규명하고자 한다.

### 2. 해석이론

본 연구의 탄소성대변형해석에서는 都井 등[5]에 의해 정식화가 이루어진 次數低減積分法에 기초를 둔 雙1次4節点 Iso-parametric Shell요소를 이용한다. 都井 등의 요소를 이용한 본 연구의 해석은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 즉, 재료비선형에 관해서는 Von Mises의 항복조건이 소성포텐셜이라고 하는 소성흐름이론을 적용한다. 재료의 이동경화 및 등방경화의 兩者를 고려한 복합경화의 거동이 취급되도록 프로그램되어 있지만, 본 연구의 해석에서는 재료는 완전탄소성체라고 가정한다. 또, 기하학적비선형성에 관해서는 Updated Lagrangian Approach에 의한 증분법을 적용하고 각 스텝에 있어서 Updated Kirchhoff 응력증분을 Euler응력의 Jaumann비변형으로 변환한다. 이 응력변환에 있어서는 판두께 방향의 직응력이 0으로 되는 조건으로부터 판두께의 직변형률을 결정한다. 더욱이, 면내회전변형에 저항하는 가상강성 및 Hourglass Mode의 발생에 대처하는 가상강성을 도입한다.

각 요소의 좌표계를 Fig. 1에 나타낸다. 요소좌표계 (x', y', z')의 원점은 절점1상에 정한다. 요소의 대각선 1-3, 및 2-4의 쌍방에 직교하도록 z' 축을, 또, 요소의 변 1-2를 포함하는 면의 면내에 있고, 동시에 z' 축에 직교하도록 x' 축을, 더

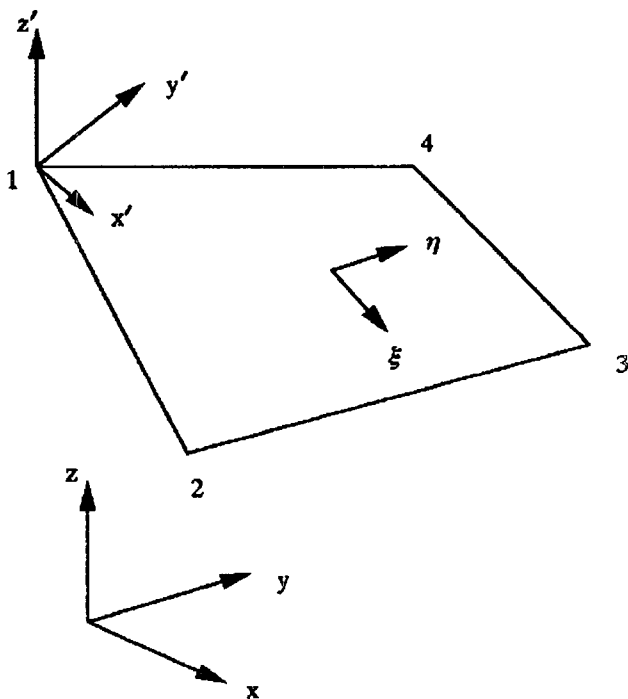


Fig. 1 Bilinear quadrilateral shell element

욱이, z' 축, x' 축의 양자에 직교하도록 y' 축을 정한다.

다음으로, 都井[5]에 의해 행해진 정식화를 나타낸다. 이 정식화에서는 제 n 스텝까지의 상태량을 기지로서, 제 (n+1) 스텝의 상태량을 구한다. 또, 증분기호 Δ를 붙인 변수는 제 n 스텝으로부터 제 (n+1) 스텝으로의 증분을 의미한다.

우선, 절점 i(i=1~4)의 변위벡터 {δ<sub>i</sub>}를 다음과 같이 정의한다.

$$\{\delta_i\}^T = [u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}]$$

즉, 각 절점은 전체좌표계의 좌표축방향의 병진변위 3 자유도, 및 각 좌표축주위의 회전변위 3 자유도를 가진다. 회전변위는 오른손나사의 회전방향을 (+)로 한다.

통상의 미소변형의 해석에 있어서는 요소의 면내회전강성을 평가하지 않는 것에 의한 문제는 생기지 않는다. 그러나, 대변형해석에 있어서는 어떤 절점을 둘러싼 요소가 극히 동일평면에서 가까운 상태로 되면, 이 회전자유도에 대하여 강성매트릭스가 특이로 된다. 또, 一點積分法에 의해 요소의 강성매트릭스를 평가하는 경우에 Hourglass 모드가 발생하고 계산의 실시에 곤란을 초래하는 경우가 생긴다. 이 2점에 대하여 都井[5] 등은 다음과 같은 가상강성을 도입하였다. 즉, 우선, 면내회전강성의 대처에 관하여 다음과 같이 가상변형률 r<sub>θ</sub>와 가상응력 R<sub>θ</sub>를 정의한다.

$$r_\theta = \theta_z - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = T_\theta^T \{\delta\}$$

$$R_\theta = 2x_T G r_\theta$$

여기서, x<sub>T</sub>는 처벌에너지의 크기를 결정하는 파라메타로 본 연구의 해석에서는 都井[5]등과 같은 0.1로 했다.

한편, Hourglass모드 벡터 {r}를 다음과 같이 정의한다.

$$r_i = h_i - \left[ (x_1 - x_2 + x_3 - x_4) \frac{\partial N_i}{\partial y} + (y_1 - y_2 + y_3 - y_4) \frac{\partial N_i}{\partial x} \right] \quad (i=1\sim 4)$$

여기서,

$$\{h\}^T = [1, -1, 1, -1]$$

다음에 Hourglass모드에 대응하는 가상변형률은 다음과 같이 정의한다.

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \sum_i r_i u_i, \quad q_2 = \sum_i r_i v_i, \quad q_3 = \sum_i r_i w_i \\ q_4 &= \sum_i r_i \theta_{xi}, \quad q_5 = \sum_i r_i \theta_{yi}, \quad q_6 = \sum_i r_i \theta_{zi} \end{aligned} \right\}$$

위식을 매트릭스로 표시하면 다음식과 같이 된다.

$$\{q\} = [B_H]\{\delta\}$$

여기서,

$$\{q\}^T = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]$$

앞의 가상강성을 고려하면 updated Lagrangian approach에 의한 증분형의 요소강성방정식은 다음식으로 된다.

$$[L_0]^T \{ [K_0] + [K_G] + [K_H] + [K_T] \} [L_0] \{\Delta\delta\} = \{\Delta f\} + \{f_r\}$$

여기서,  $[K_0]$ 은 선형의 변형률증분과 응력을 발생시키는 가상일의 항에 대응하는 강성매트릭스이고 다음식으로 표현된다.

$$[K_0] = S^{(n)} \int [B]^T [A]^T [D] [A] [B] dz'$$

$[K_G]$ 는 초기응력이 변형률증분의 2차의 항에 의해 발생하는 가상일의 항에 대응하는 가상매트릭스이고 다음식으로 표현된다.

$$[K_G] = S^{(n)} \int [G]^T [\sigma_0] [G] dz'$$

여기서,

$$[\sigma_0] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}$$

또,  $[G]$ 는 다음식에 의해 정의되는 매트릭스이다.

$$\begin{Bmatrix} \partial(\Delta w')/\partial x' \\ \partial(\Delta w')/\partial y' \end{Bmatrix} = [G] \{\Delta\delta\}$$

$[K_H]$ 는 Hourglass에 저항하는 가상강성으로 다음식으로 주어진다.

$$[K_H] = [B_H]^T [C] [B_H]$$

$[K_T]$ 는 면내회전변위자유도에 저항하는 가상강성매트릭스이고 다음과 같이 된다.

$$[K_T] = (T_\theta) \alpha (T_\theta)^T$$

$$\alpha = 2k_T G t S$$

$\{\Delta f\}$ 는 외력증분벡터이고,  $\{f_r\}$ 은 불평형력수정벡터로 다음식으로 나타내진다.

$$\begin{aligned} \{f_r\} &= \{f\} - S^{(n)} \int [L_0]^T [B]^T \{q\}^{(n)} dz' \\ &\quad - [L_0]^T [B_H]^T \{q\}^{(n)} - [L_0]^T [T_\theta] R_\theta^{(n)} \end{aligned}$$

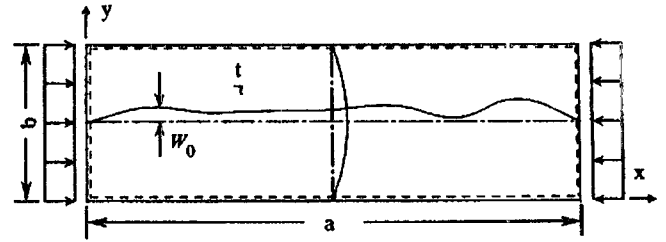


Fig. 2 Rectangular plate under thrust

### 3. 수치해석 및 고찰

#### 3.1 수치해석 모델링

본 연구에서는 선체상갑판의 일부분인 패널이 선박이 새김인 경우에 압축력이 작용하게 되므로 길이×폭×두께 = a×b×t 인 상갑판의 일부 패널이 Fig.2와 같이 1방향으로 면내압축력을 받고 있는 경우를 상정하여 탄소성대변형거동을 해석한다. 판의 주변은 단순지지되어 있고 비하중변의 면내거동은 자유이며 하중은 하중제어방식으로 증분적으로 증가시켰다. 변형거동의 대칭성을 고려하여 판의 1/2만을 대상으로 모델링하였다. 종횡비는 a/b=1.4인 판을 대상으로 하였으며 이것은 초기좌굴모드가 1과 2사이이기 때문에 좌굴모드와 처짐모드와의 변화의 추이를 알아보기 위하여 채택하였다.

#### 3.2 수치계산 및 고찰

먼저, a/b=1.4인 판에 단순증가하중을 가한 경우의 탄소성거동해석의 결과를 Fig.3에 응력과 변형률의 관계로 나타내고 있다. 이 그래프는 응력과 변형률을 항복응력과 항복변형률로 무차원화하여 나타내고 있다. 이 그림으로 부터 알 수 있는 바와 같이 하중을 증가하면 초기좌굴(Primary Buckling)이 발생할 때까지 횡치짐이 없다가 초기좌굴이 발생하면 그 때부터 압축하중이 증가함에 따라 횡치짐이 증가하게 되지만 여기서는 초기처짐을 가지고 있는 평판이기 때문에 압축하중이 가해지는 그 순간부터 횡치짐이 증가하게 된다. 초기좌굴이 발생한 후에는 A지점에서 초기항복이 발생하며 더욱 더 하중을 증가시키면 이때부터 판에 소성이 진행되어 압축하중에 대하여 더 이상 버티기가 어렵게 되는 B지점의 최종강도에 다다른다. 최종강도가 도달한 후의 거동은 하중의 증가없이도 변형률이 증가하는 현상이 일어난다. 따라서 이 판이 압축하중에 대하여 최대한 견딜 수 있는 지점은 최종강도를 나타내는 B지점이다. 이 후 하중을 증가시키지 않아도 계속적으로 변형률이 증가하다가 C 지점에서 Snap through 현상이 발생하여 D지점으로 점프를 하게 되는데 이것은 2차좌굴(2ndary Buckling)로 인하여 발생한 것이다[6-7].

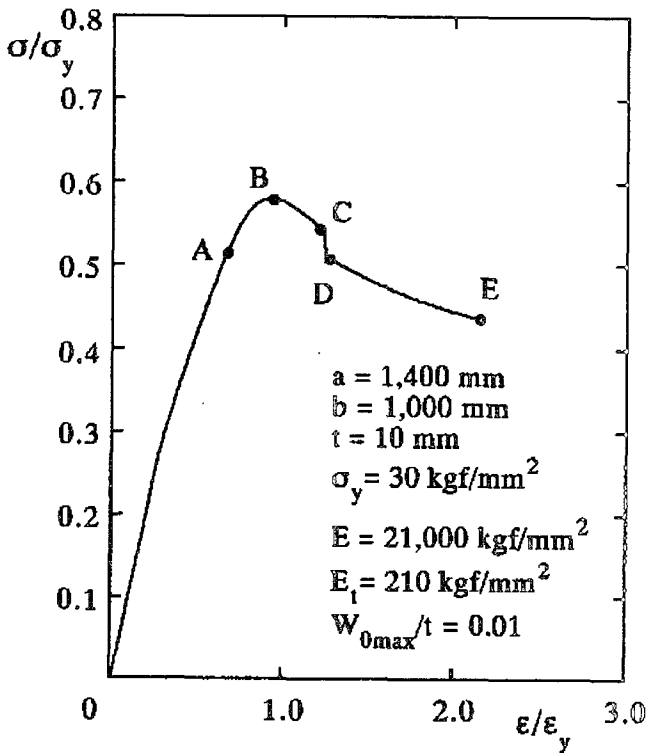


Fig. 3 Average stress - average strain relationship of simply supported rectangular plate under thrust

C지점에서 D지점으로 점프하는 Snap through 현상이 발생할 때 이것은 동적인 거동이 되겠지만 정적인 해석거동에서도 충분히 거동을 추적할 수 있기 때문에 여기서는 정적인 유한요소 해석을 실시하였다. C지점에서 D지점으로 점프할 때 처짐모드가 1모드에서 3모드로 변화를 하고 또한 압축강도도 급격히 저하한다는 것을 알 수 있다. 처짐모드의 변화는 2차좌굴로 인하여 나타난 것이기 때문에 즉, 2차좌굴은 판의 처짐의 메카니즘이 완전히 바뀌는 것을 의미하므로 판의 거동에 상당한 부담을 주고 있다. 이것은 곧 선박이 호강일 경우에 선저판에, 새강일 경우에 상갑판의 구조강도상의 강도저하를 초래할 수 있기 때문에 선박구조설계시에 이를 고려하여 설계해야 한다.

Fig. 4는 하중의 증가에 따른 처짐모드의 변화와 소성의 진행상태를 나타내고 있다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 최종강도지점인 B지점에서 벌써 처짐의 3모드가 나타나고 있음을 알 수 있고 C지점에서 D지점으로 점프한 이후에는 판의 처짐모드가 1모드는 완전히 사라지고 3모드가 처짐거동을 지배하고 있음을 알 수 있다. 즉, a/b=1.4인 판인 경우에는 초기좌굴모드가 1모드이나 2차좌굴이 발생하면 처짐모드가 완전히 3모드로 변화하는 것을 나타내고 있다. 이와 같이 처짐모드의 변화가 발생하는 것은 평판의 경계조건이 단순지지에다가 판의 경계부분에서 직선을 유지한다는 조건에 의하여 판의 경계부분에서 판 경계의 중앙부위에서는 인장력이 발생하고 모서리 부분에서는 압축력이 작용하고 있기 때문으로 판단된다. 이 판에서는 최종

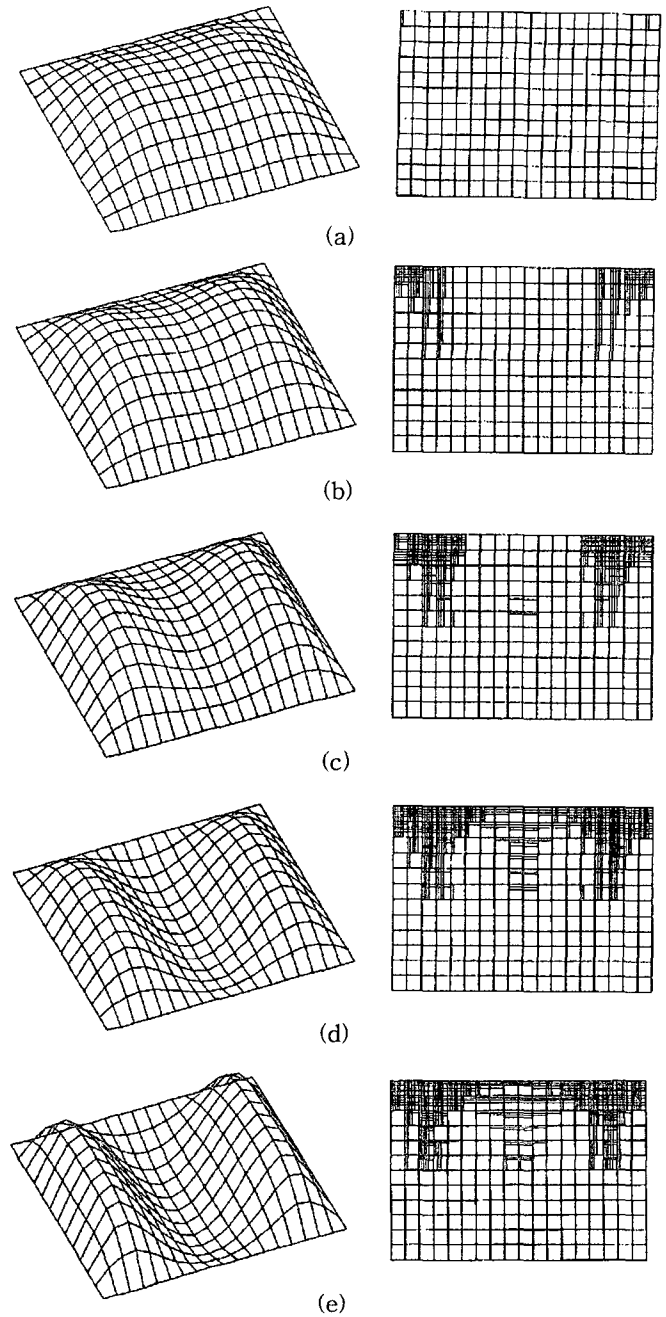


Fig. 4 Change in deflection mode of simply supported rectangular plate under thrust

강도이후에 2차좌굴이 발생하고 있으며 2차좌굴은 탄성상태 뿐만아니라 소성상태에서도 같이 동반적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 지금까지 학계나 일선 조선소에서도 좌굴은 탄성상태에서만 일어난다고 인식하고 있었으나 이 결과를 통해서 보면 소성이 일어난 이후 뿐만 아니라 극단적으로 최종강도가 발생한 이후에도 2차좌굴이 일어남을 알 수 있다. 따라서, 탄성상태에서의 좌굴뿐만 아니라 소성상태에서의 좌굴도 같이 일어남을 인식하고 선박의 설계를 해야 할 것이다.

Fig. 4는 또한 압축하중을 받고 있는  $a/b=1.4$ 인 판의 처짐거동에 따른 소성진행상태를 나타내고 있으며 여기서는 판의 대칭성을 고려하여 판의 윗부분만 소성의 진행상태를 나타내고 있다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 초기항복이 주변지지에서 발생하여 판 중앙내부로 소성이 진전됨을 알 수 있고 판 중앙에서는 최종강도지점인 B지점에서도 중앙에서 소성이 전혀 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 이것은 주변지지에서 막음력이 작용하므로 인장력이 작용하는 주변지지의 중앙보다는 압축력이 작용하는 주변지지의 모서리 부분이 먼저 소성이 진행됨을 알 수 있다. 이것으로부터 최종강도이후에도 소성의 진전과 막음력의 발생변화에 따라 2차좌굴이 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결 언

본 논문에서는 1방향에 면내압축하중을 받는  $a/b=1.4$ 인 선체판부재를 대상으로서 都井등[5]에 의해 정식화가 이루어진 次數低減積分法에 기초를 둔 雙1次4節点 Iso-parametric Shell 요소를 적용하여 탄소성대변형 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 판에 소성이 진행되어 최종강도가 도달한 이후에도 좌굴이 발생한다. 즉, Snap-through가 동반하는 2차좌굴은 최종강도이후에도 발생한다.
- (2) 2차좌굴이 발생하면 초기좌굴모드는 완전히 사라지고 2차좌굴모드가 처짐파형을 지배한다.
- (3) 최종강도이후에 발생한 2차좌굴은 판의 소성의 진전과 막음력의 발생변화에 따라 발생한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Ueda and T. Yao, The Influence of Complex Initial Deflection Modes on the Behaviour and Ultimate Strength of Rectangular Plates in Compression, J. of Construction Steel Research, Vol. 5, 1985.
- [2] 백점기, 김 건 : “복잡한 형상의 초기처짐을 가진 실선 Panel의 압괴강도 간이 추정법”, 대한조선학회지, 제25권 제1호, pp.33-46, 1988.
- [3] 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, pp.24-38, 1989.
- [4] 백점기 외, “판부재의 탄소성대변형 유한요소해석 문제에서의 수렴기법에 관한 고찰”, 한국전산구조공학회논문집, 제2권, 제3호, pp.97-103, 1989.
- [5] 都井裕, 弓削康平, 川井忠彦: “構造要素の衝突壓壊強度に関する基礎的研究(その1)-有限要素法による超大變形解析-”, 日本造船學會論文集, 第159號, pp.248-257, 1986.
- [6] 고재용, T. Yao, 백점기: “면내압축하중을 받는 판의 2차좌굴거동에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제33권 제3호, pp.66-80, 1996.
- [7] 고재용: “에너지법에 의한 선체판의 기하학적 비선형거동에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp.94-104, 1999.

원고접수일 : 2002년 01월 31일

원고채택일 : 2002년 03월 18일