Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 20, No. 4, pp. 451-460, August 31, 2014, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2014.20.4.451

패치 로딩을 받는 알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중 검토

오영철* · 고재용**†
* 목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과, ** 목포해양대학교 해양공과대학 조선해양공학과

Critical Elastic Buckling Load Investigation of Aluminium Alloy A6082-T6 Square plate Subjected to Patch Loading

Young-Cheol Oh* · Jae-Yong Ko**†
* Dep. of Ocean System Engineering, Graduate School, MMU, Mokpo 530-729, Korea
** Dep. of Naval Architecture & Ocean Engineering, College of Marine Technology, MMU, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 연구에서 해양플랜트 구조물에 주로 사용하고 있는 알루미늄 합금 A6082-T6의 재료특성을 반영한 사각형 판에 대한 패치 로딩의 구조 안정성 문제를 검토하였다. 구조 안정성 문제를 검토 시 네 가지 패치 로딩 형태와 종횡비 효과, 주변지지조건을 적용하여 임계 탄성 좌굴하중을 산출하였다. 고유치 좌굴해석 간 사용한 요소는 4절점 쉘요소 shell181을 적용하였다. 패치 로딩을 받는 판은 균일 축 압축하중과 비교 시 상이한 탄성 좌굴거동이 발생되는 것을 관찰할 수 있었으며 하중형태와 위치, 종횡비 효과 등과 같은 변수에 대해 상당히 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 종횡비(a/b) 1.0, 하중길이(γb) 200 mm 단순지지 사각형 판에서 패치 로딩 형태에 따른 임계 탄성좌굴하중은 67 %(하중 I), 119 %(하중 II), 76 %(하중 III), 160 %(하중 IV)이 각각 산출되었으며 하중 I과 III은 하중 II와 IV보다 훨씬 더 탄성 좌굴거동에 강한 것으로 판단할 수 있다.

핵심용어 : 구조 안정성, 임계 탄성 좌굴하중, 패치 로딩, 종횡비 효과, 주변지지조건

Abstract : *In this paper, we examined the problem of the structural stability according to the patch load of a rectangular plate that reflects the material properties of A6082-T6 is used primarily for marine plant structure. it applied to the four patch loading shapes, the effect of aspect ratio, a boundary condition and calculated the critical elastic buckling load. Calculating the critical elastic buckling load, During the eigenvalue buckling analysis it is applied to the shell181 as 4 node shell element. when the plate subjected to patch loading compare to the plate under a uniform axial compression load, it is possible observed to occur the different elastic buckling behaviour and it could be confirmed that it is affected significantly on a variable position and type of loadings, such as the effect of the aspect ratio. Also, Critical elastic buckling load according to th patch loading type in simply supported rectangular plate* $a/b=1.0$, $\gamma b=200mm$ *are calculated 67%(Loading type I), 119 %(Loading type II), 76 %(Loading type III), 160 %(Loading type IV), respectively. Loading type I and III could be determined with the strong elastic buckling behavior much more than Loading type II and IV.*

Key Words : *Structural stability, The critical elastic buckling load, Patch loading, The effect of aspect ratio, Boundary condition*

1. 서 론

박판부재는 수많은 공학구조요소이다. 이 부재는 자체 최종강도보다 큰 압축하중을 받았을 때 불안정해지며 좌굴이 발생하는 문제를 지니고 있다. 더욱이, 항공우주, 기계 및 토목, 해양플랜트 등에 주로 사용되고 있어 구조 안정성에 대한 영향을 반드시 파악해야 한다(Shariati and Dadrasi, 2012). 이 문제는 박판 및 후판 등에 대하여 전단변형이론과 수치방법을 이용하여 다음과 같은 몇몇의 연구자에 의해 최근까지 수행되고 있다.

* First Author : yochoh@mmu.ac.kr, 061-240-7476
† Corresponding Author : kojy@mmu.ac.kr, 061-240-7305

Sundaresan et al.(1998)은 복합재료 적층 판의 임계 탄성 좌굴하중에서 국부 모서리 압축하중의 영향을 검토하기 위해 8절점 등가변수 판 요소를 개발하여 단순지지와 고정지지 조건의 다른 하중형태와 하중길이 효과에 대한 연구를 수행하였다. 개발 요소는 절점 당 다섯 개 자유도를 가지고 있으며 중앙 대칭조건을 사용하여 임계 탄성좌굴하중계수를 산출하였다.

Lee et al.(2001)은 국부 모서리 하중을 받는 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수를 결정하고 비교하였으며 임계 탄성 임계 탄성좌굴하중계수를 산출 시 자체 개발한 유한요소 해석코드를 사용하여 산출하였다. 해석에 고려한 변수는 Kinney(1957)의 고정계수와 패치 로딩의 폭 계수를 반영하여 수행하였다. 임계 탄성 좌굴하중 계수는 고정계수와 폭 계수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 알려져 왔으나 다른 경향은 판의 모서리 양단 가장자리에서 패치 로딩을 적용한 판은 가장자리 중앙에 집중하중을 적용한 판보다 더 보다 훨씬 안전 한다는 것을 증명하였으며 임계 탄성좌굴하중계수의 대수학적 재평가에 사용하였다.

Patel and Sahu(2006)는 다양한 국부 모서리 하중과 집중 면내하중을 포함한 불균일 하중을 받는 곡판의 정적 안정성을 횡 전단변형와 회전관성 효과를 고려하여 유한요소법으로 수행하였으며 해석 시 8절점 등방성 사각형 요소를 채택하였다. 평판과 곡판의 안정성 거동은 모델형태, 주변지지조건, 하중 위치와 형태 등에 상당한 영향을 받고 있다는 것을 나타내었다.

Singh et al.(2012)는 균일 축 국부 모서리 압축하중을 받는 중앙 유공판 단순지지와 고정지지 박판 사각형 등방성 판의 탄성 좌굴거동을 나타내었으며 네 가지 형태의 국부 모서리 압축하중을 수행하였으며 탄성 임계 탄성 좌굴하중에 관한 판의 종횡비 효과에 대한 연구로 확장시켜 수행하였다.

Oh et al.(2014)는 알루미늄 합금 플레이트 거더에 대한 관련 문헌검토 및 분석을 통한 패치 로딩을 받았을 때 플레이트 거더의 파손모드와 최종하중을 예측하기 위해 유한요소 해석을 통한 탄소성대변형 시리즈 해석을 수행하고 기 실험 모형과 비교하여 만족한 결과를 도출하였다.

본 연구에서 해양플랜트 구조, 선체 상부구조 등에 주로 사용하고 있는 알루미늄 합금 A6082-T6의 재료특성을 반영한 사각형 판에 대한 패치 로딩의 구조 안정성 문제를 검토하였다. 구조 안정성 문제를 검토 시 네 가지 패치 로딩 형태와 종횡비 효과, 주변지지조건을 적용하여 각각의 임계 탄성좌굴하중을 산출하였다. 또한 상기 참고문헌과 달리 알루미늄 합금 박판(thin plate)를 고려하기 위해 Reissner-Mindlin 판이론에 근거한 4절점 쉘요소를 사용하였으며 이에 해당하는 ANSYS 요소는 shell181을 선택하였다.

2. 판의 좌굴방정식 및 유한요소 정식화

2.1 판의 좌굴방정식

판의 좌굴에 관한 미분방정식은 작용하는 면내하중에 의해 판이 좌굴하기 시작할 때 좌굴변형으로 인한 수직하중 분력의 굽힘을 이용하여 나타낼 수 있다. 판에 작용하는 면내하중은 x, y방향 면내하중 N_x, N_y와 전단하중 N_{xy}으로 작용한다. 이 면내하중은 단위 폭에 대하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_x = \int_{l/2}^{l/2} \sigma_x dz,\ N_y = \int_{l/2}^{l/2} \sigma_x dz,\ N_{xy} = \int_{l/2}^{l/2} \sigma_x dz \tag{1}$$

면내하중이 작용하는 미소요소에서 x와 y방향 하중 평형조건으로부터 식(2)와 같은 평형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} = 0,\ \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

z방향에 대한 하중 평형조건을 만족하기 위해서는 x, y방향 면내하중과 전단하중 N_{xy}에 의해서 생기는 판 좌굴로 인해 발생하는 곡률에 의한 분력을 고려하여 평형조건을 만족시켜야 한다. 따라서 N_x와 N_y에 의한 z방향 수직하중의 분력은 식(3)과 같다.

$$N_x dy\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \left(N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx\right)\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx\right) dy,$$
$$N_y dy\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \left(N_y + \frac{\partial N_y}{\partial y} dy\right)\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dy\right) dx \tag{3}$$

식(3)에서 고차항은 미소하므로 이를 소거하면 x, y방향 면내하중에 의한 수직하중의 분력은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_x dy \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dxdy + \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dxdy$$
$$N_y dy \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dxdy + \frac{\partial N_y}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} dxdy \tag{4}$$

전단하중 N_{xy}에 의한 수직하중의 분력은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}dxdy+\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}dxdy \tag{5}$$

전단하중 $N_{yx}=N_{xy}$을 고려하면 전단하중에 의한 모든 수직하중의 분력은 식(6)과 같다.

$$2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}dxdy+\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}dxdy+\frac{\partial N_{xy}}{\partial y}\frac{\partial w}{\partial x}dxdy \tag{6}$$

면내하중과 전단하중에 의한 수직하중의 분력을 요소면적 dx, dy에 대한 평형방정식에 대입하면 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+2N_{xy}\frac{\partial^4 w}{\partial x\partial y} \tag{7}$$

식(7)의 수직하중의 분력은 판이 좌굴변형을 시작할 때 수직 하중항이 추가되어 판의 좌굴방정식은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial Q_y}{\partial x}+q+N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}=0 \tag{8}$$

2.2 유한요소 정식화

요소 내 임의의 점에서 보간 함수(interpolation function)를 이용하여 독립변수 x, y, z을 식(9)과 같은 절점좌표로 근사시킬 수 있다.

$$x=\sum_{i=1}^{NN}N_i x_i,\ y=\sum_{i=1}^{NN}N_i y_i,\ z=\sum_{i=1}^{NN}N_i z_i \tag{9}$$

여기서, NN는 요소의 절점 수를 나타낸다.

절점좌표에 대한 장변수(field variables)는 변위 u_0, v_0, w_0와 회전 θ_x, θ_y, θ_z을 식(10)-식(11)와 같은 절점변수로 나타낼 수 있다.

$$u_0=\sum_{i=1}^{NN}N_i u_i,\ v_0=\sum_{i=1}^{NN}N_i v_i,\ w_0=\sum_{i=1}^{NN}N_i w_i \tag{10}$$

$$\theta_x=\sum_{i=1}^{NN}N_i\theta_{xi},\ \theta_y=\sum_{i=1}^{NN}N_i\theta_{yi},\ \theta_z=\sum_{i=1}^{NN}N_i\theta_{zi} \tag{11}$$

여기서, N_i는 4절점요소에 대한 표준 형상함수이다. x_i, y_i, z_i는 절점좌표이며 u_i, v_i, w_i와 θ_{xi}, θ_{yi}, θ_{zi}는 절점변위와 회전을 의미한다.

비선형과 선형 변형률성분은 보간 함수와 요소 절점변수로 정의할 수 있으며 식(12)으로 나타낼 수 있다(Singh et al., 2012). 본 연구에서는 고유치 좌굴해석을 수행하여 임계 탄성 좌굴하중 계수를 구하므로 선형 변형률 성분을 적용한다.

$$\{\epsilon_L\}=[B_L]\{\delta\},\ \{\epsilon_{NL}\}=[B_{NL}]\{\delta\} \tag{12}$$

여기서, $[B_L]$과 $[B_{NL}]$은 $\{\delta\}=[u_i v_i w_i \theta_\xi \theta_{yi} \theta_{zi}]$을 가진 절점변수에 대한 비선형과 선형 변형률성분에 관한 행렬형태이며 보간 함수의 도함수를 포함하고 있다. 따라서 요소강성행렬 $[K_E]$와 기하강성행렬 $[K_G]$, 연속하중벡터 $\{F\}$을 식(13)-식(15)로 나타낼 수 있다.

$$[K_E]=k^e=\int_A [B_L]^T[D][B_L]dA \tag{13}$$

$$[K_G]=k^e\delta=\int_A [B_{NL}]^T\{\sigma\}dA \tag{14}$$

$$\{F\}=f^e=\int_A [N]^T p \tag{15}$$

여기서, $[D]$는 응력합력(stress resultants)과 변형률(couples with strain), 변형된 판에서 곡률(curvatures) 등에 대한 재료물성치 상수이며 $[K_E]$와 $[K_G]$는 요소강성행렬과 기하강성행렬이며 $\{\sigma\}$는 응력합력을 포함한 벡터이다. p는 적용한 선하중이며 이 요소행렬은 표준적분을 이용하여 식(16)와 같은 면내하중 전좌굴(in-plane loading pre-buckling) 또는 정적선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[K_E]\{\delta\}=\{F\} \tag{16}$$

식(16)으로 평가하여 응력상태를 산출할 수 있으며 기하강성행렬 $[K_G]$은 전좌굴 응력상태와 고유치 문제로 구성되며 최소 고유치와 임계 탄성 좌굴하중을 추출 해석하며 강성행렬을 고려한 극점 “영(零)”을 만족하는 식(17)으로 나타낼 수 있다.

$$\{[K_E]-\lambda[K_G]\}\{\delta\}=0 \tag{17}$$

본 연구에서는 유한요소해석 코드를 이용하여 Fig. 1과 같은 방법으로 적용한다. Fig. 1은 유한요소법을 이용한 선형좌굴해석 절차를 나타내고 있는 흐름도(flow chart)를 유한요소 정식화를 반영하여 표현하고 있다.

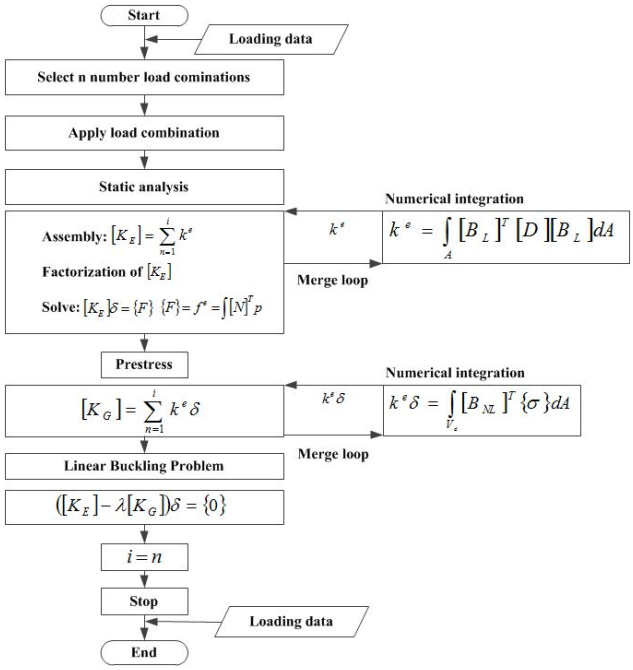


Fig. 1. Flow chart of a standard procedure for linear buckling analysis when using the finite element method.

3. 해석모델과 방법

박판구조는 선박의 갑판, 교량의 상자형 거더, 해양구조물의 플랫폼, 항공 산업 등에서 사용하고 있는 것처럼 다양한 구조에서 적용하고 있다. 이런 구조는 균일 축 압축하중을 받는 판 부재는 불안정성 또는 좌굴이 발생하기가 쉬우며 비균일 축 압축하중 또는 패치 로딩(또는 국부 모서리 하중) 등을 경험을 하게 된다. 따라서 패치 로딩을 받는 판은 흥미있는 연구가 될 것으로 생각한다. 본 연구에서 종 방향 패치 로딩을 받는 알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 등방성 판의 탄성좌굴거동을 검토하였다. 해석솔루션은 유한요소법을 이용하여 고유치 좌굴해석을 수행한 후 도출하였다. Fig. 2에서 나타낸 것처럼 패치 로딩을 네 가지 형태로 확대하여 검토하였다. 패치 로딩은 네 가지 하중형태에서 동일하게 유지하도록 하중을 적용하였으며 N_x는 판 모서리에서 단위 길이 당 균일하게 적용되는 하중강도이며 모서리 길이 20 % 패치 로딩의 하중강도는 $5N_x$크기로 증가시켰다. 패치 로딩을 받는 판의 탄성 좌굴하중에 관한 판의 종횡비 영향은 본 연구에서 나타내었다. 사각형 판의 고유치 좌굴해석은 다음과 같이 여섯 가지 가정으로 나타내어 수행하였다.

(1) 하중을 받기 전 편평하며 모서리는 직선을 유지한다.

(2) 재료는 등방성이며 균질하고 선형적으로 거동한다.

(3) 면내하중은 중앙평면에 작용한다.

(4) 변위는 두께와 비교하여 미소 변위이다.

(5) 고정지지 모서리는 강체고정이다.

(6) 질량에 의한 하중은 매우 미소하므로 무시한다.

균일 축 압축하중을 받는 단순지지 사각형 판의 좌굴문제는 Timoshenko and Gere(1961)에 의해 처음으로 연구되었으며 Gerstle(1967)에 의해 수정 보완되었다. 지배방정식에서 일차항을 고려한다면 임계 탄성 좌굴응력은 식(18)과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{cr} = k\frac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{18}$$

여기서, k는 판의 무차원 임계 탄성좌굴하중계수이며 하중형태, 모서리 지지조건, 판 종횡비, 탄성계수, 프와송 비에 각각 의존된다. 균일 축 압축하중을 받는 단순지지 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수는 식(19)로 적용하여 구할 수 있다.

$$k = \left(\frac{a}{mb} + \frac{mb}{a}\right)^2,\ m = 1, 2, 3, \ldots \tag{19}$$

여기서, m은 좌굴에서 판의 종 방향에 발생하는 반파 수로 대응되며, 즉, 판의 좌굴모드를 정의한다.

식(19)에서 재료상수로 도입한다면 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{cr} = kC_m\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{20}$$

여기서, t와 b은 각각 판 두께와 폭이다. k는 임계 탄성좌굴하중계수이며 하중형태, 주변지지조건, 판의 종횡비에 의존된다. 재료상수 C_m은 $C_m = \dfrac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)}$으로 정의할 수 있다.

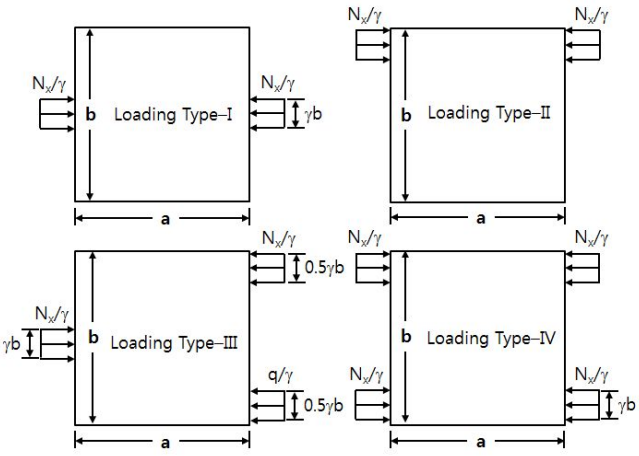


Fig. 2. Square plates under different kinds of patch loading.

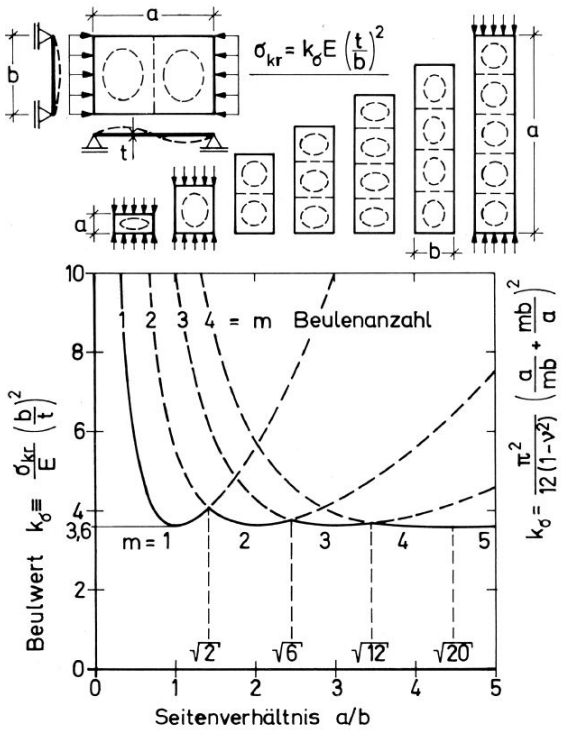


Fig. 3. Buckling coefficient under uniform compression according to analytical approach.

Pflger(1975)에 따른 단순지지 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수는 Fig. 3에서 나타낸 것처럼 종횡비 $a/b > 1.0$일 경우 최소값 3.6에서 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 해석적 탄성 좌굴하중 간이식은 식(21)으로 정의할 수 있다.

$$N_x = \sigma_{cr} \cdot t = kE\left(\frac{t}{b}\right)^2 t \tag{21}$$

사용 임계 탄성좌굴하중은 식(20)에서 도출할 수 있는 임계 탄성좌굴하중계수 $N_x b^2/Et^3$로 무차원(無次元)하여 적용하였다.

면내 xy평면에서 사각형 판의 길이 a는 x축으로 나타냈으며 폭 b는 y축으로 두께 t는 z축으로 정의하였다. 판의 중앙 평면은 xy평면에 일치한 것으로 가정하였다. 사각형 판의 치수는 1,000×1,000 mm를 기반으로 길이를 100-400 mm까지 변화시켜 종횡비를 다르게 선정하였다. 판두께(t)는 4 mm이다. 재료물성치는 A6082-T6의 탄성계수(E) 70GPa와 프와송비(υ) 0.3을 적용하였다. 판은 Reissner-Mindlin 판이론에 근거한 4절점 쉘요소를 사용하여 모델링하였다. 요소크기는 폭을 기준으로 하여 $b/40$을 선택하여 고유치 좌굴해석을 수행하였다(ANSYS, 2000). 주변지지조건은 아래와 같이 적용했으며 적용형태는 네 변 단순지지(SSSS), 네 변 고정지지(CCCC), 하중변 단순지지와 비하중변 고정지지(SCSC), 하중변 고정지지와 비하중변 단순지지(CSCS) 조건인 네 가지 형태로 적용하였다. 또한, 직선을 유지하고 동일한 변위가 발생하도록 탄성커플링 조건을 적용하였다.

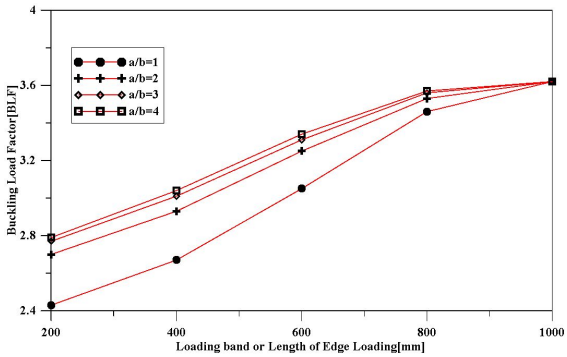
(1) 단순지지(simply supported edge)
- w=0 at x=0, a, w=0 at x=0, b
- θ_x=0 at x=0, a, θ_y=0 at x=0, b

(2) 고정지지(clamped edges)
- w=0 at x=0, a, w=0 at x=0, b
- θ_x=θ_y=0 at x=0, a, =θ_y=0 at x=0, b

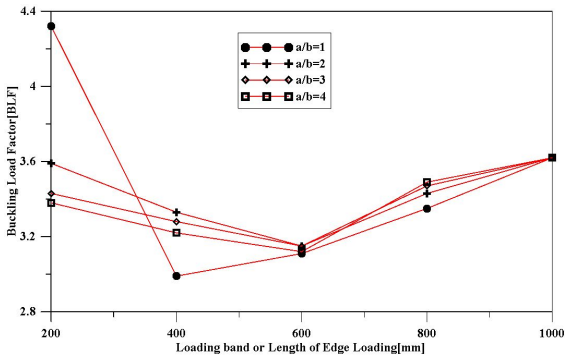
(3) 강체운동(rigid body motion)
- u=0 at node ($a/2$, 0) and ($a/2$, b)
- v=0 at node (0, $b/2$) and (a, $b/2$)

4. 해석고찰 및 토의

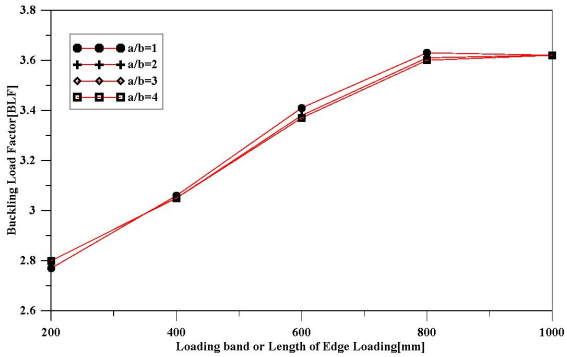
유한요소해석으로부터 얻은 해석결과는 1차 고유치 좌굴모드를 반영하여 도출하였다. 3절에서 설명한 것처럼 임계 탄성좌굴하중계수를 무차원 형태인 $N_x b^2/Et^3$로 나타내었다. Table 1은 하중 IV(Loading type IV)를 적용한 단순지지와 고정지지 사각형 판의 탄성 임계좌굴계수를 Sundaresan et al. (1998)와 Singh et al.(2012)의 결과와 탄소성 대변형 시리즈 해석 결과를 비교 검토하였으며 약 96% 정도 만족하는 결과를 나타내었다. Fig. 4~7은 네 가지 형태의 패치 로딩을 받는 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수를 종횡비 효과와 주변



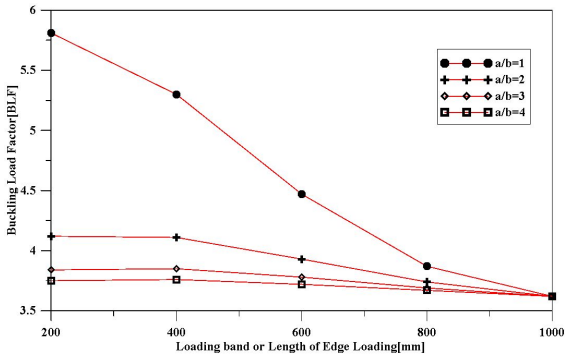
(a) Loading type I



(b) Loading type II

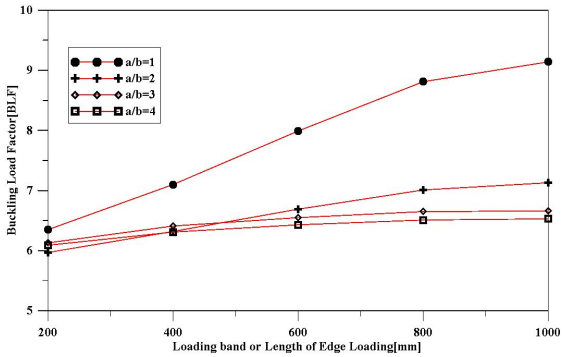


(c) Loading type III

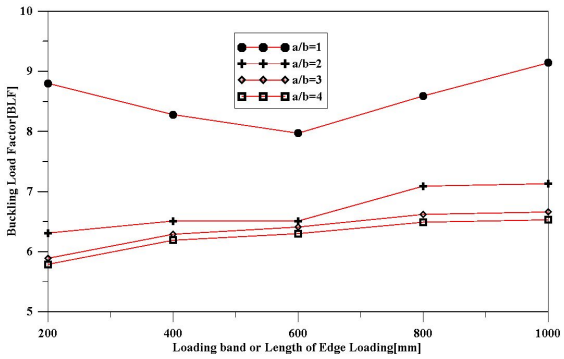


(d) Loading type IV

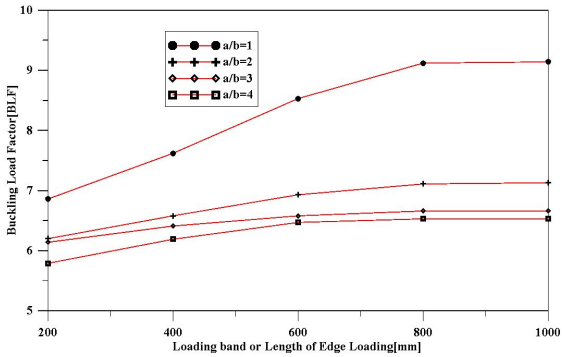
Fig. 4. Variation of buckling load factor for SSSS plate.



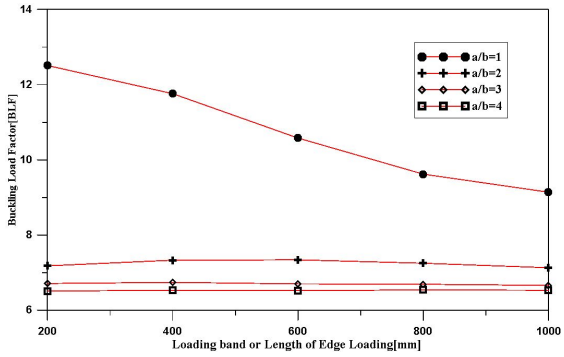
(a) Loading type I



(b) Loading type II

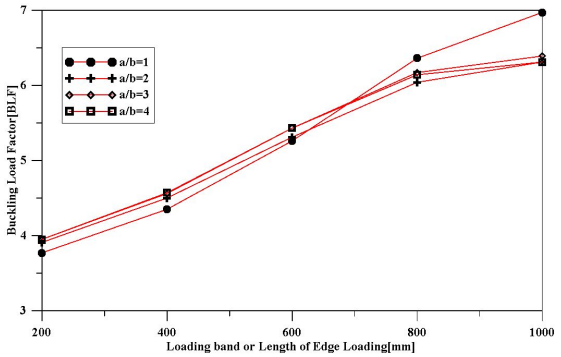


(c) Loading type III

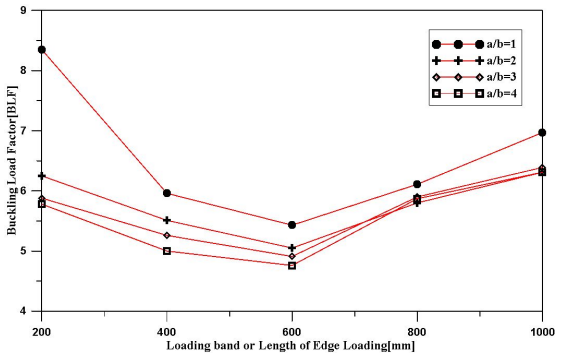


(d) Loading type IV

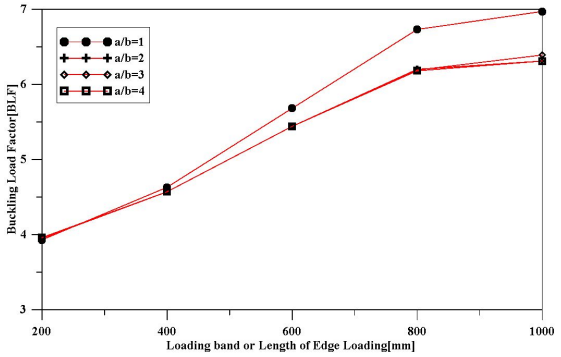
Fig. 5. Variation of buckling load factor for CCCC plate.



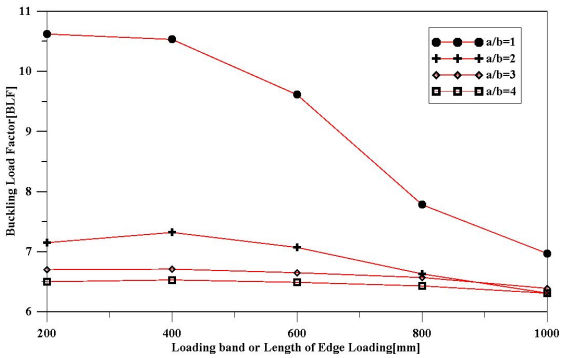
(a) Loading type I



(b) Loading type II

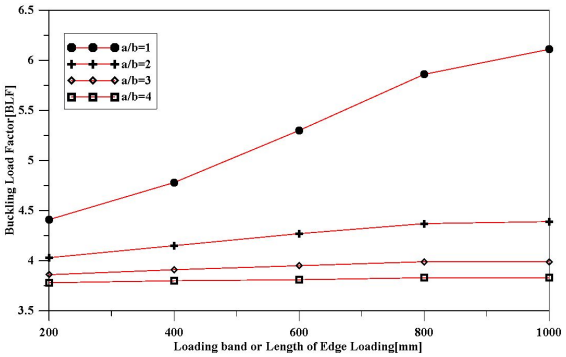


(c) Loading type III

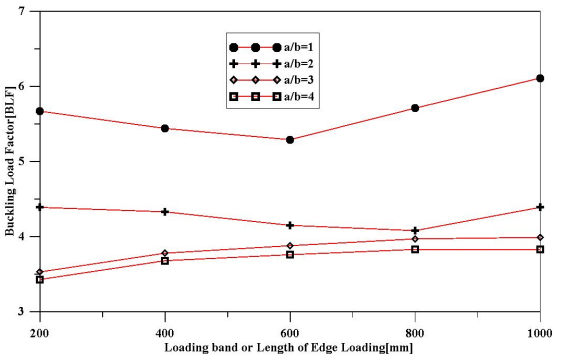


(d) Loading type IV

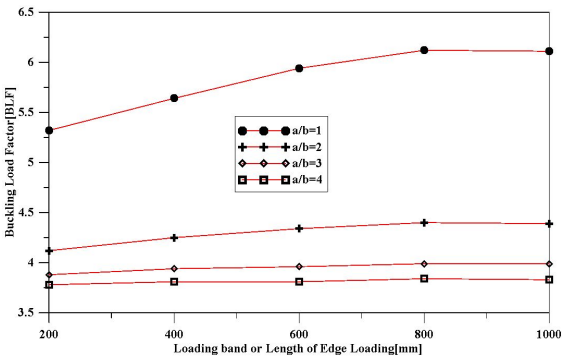
Fig. 6. Variation of buckling load factor for SCSC plate.



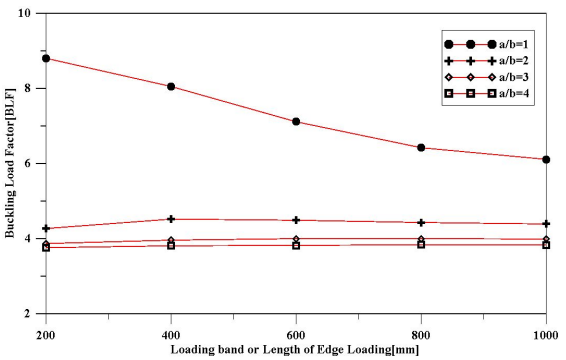
(a) Loading type I



(b) Loading type II



(c) Loading type III



(d) Loading type IV

Fig. 7. Variation of buckling load factor for CSCS plate.

Table 1. Result of analysis of variance depending on Loading type IV

Initial applied load [N/mm]	Length of loaded edge [mm]	Buckling load factor for plate($N_x b^2/Et^3$)					
		Simply supported(SSSS)			Clamped edge(CCCC)		
		Present	Singh et al.(2012)	Sundersen et al. (1998)	Present	Singh et al.(2012)	Sundersen et al. (1998)
1	1000	3.62	3.57	3.61	9.14	9.085	9.106
1.25	800	3.87	4.04	3.97	9.60	9.960	10.01
1.66	600	4.47	4.71	4.69	10.58	11.06	10.92
2.5	400	5.30	5.35	5.41	11.76	11.96	11.83
5	200	5.81	5.74	5.77	12.51	12.48	12.35

Table 2. Buckling coefficients for loading type I

γ/b	SSSS				CCCC				SCSC				CSCS			
	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4
0.2	2.43	2.70	2.77	2.79	6.35	5.97	6.13	6.09	3.77	3.91	3.95	3.95	4.41	4.41	3.86	3.78
0.4	2.67	2.93	3.01	3.04	7.10	6.32	6.41	6.31	4.35	4.50	4.56	4.57	4.78	4.78	3.91	3.80
0.6	3.05	3.25	3.31	3.34	7.99	6.69	6.55	6.43	5.26	5.31	5.43	5.43	5.30	5.30	3.95	3.81
0.8	3.46	3.53	3.56	3.57	8.81	7.01	6.55	6.51	6.36	6.04	6.17	6.14	5.86	5.86	3.99	3.83
1.0	3.62	3.62	3.62	3.62	9.14	7.13	6.66	6.53	6.97	6.31	6.39	6.31	6.11	4.39	3.99	3.83

Table 3. Buckling coefficients for loading type II

γ/b	SSSS				CCCC				SCSC				CSCS			
	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4
0.2	4.32	3.59	3.43	3.38	8.80	6.31	5.89	5.79	8.35	6.25	5.88	5.78	5.67	4.39	3.53	3.43
0.4	2.99	3.33	3.28	3.22	8.28	6.51	6.29	6.19	5.96	5.51	5.26	5.00	5.44	4.33	3.78	3.68
0.6	3.11	3.15	3.15	3.12	7.97	6.51	6.41	6.30	5.43	5.05	4.91	4.76	5.29	4.15	3.88	3.76
0.8	3.35	3.43	3.43	3.49	8.59	7.09	6.62	6.49	6.11	5.80	5.90	5.87	5.71	4.08	3.97	3.83
1.0	3.62	3.62	3.62	3.62	9.14	7.13	6.66	6.53	6.97	6.31	6.39	6.31	6.11	4.39	3.99	3.83

Table 4. Buckling coefficients for loading type III

γ/b	SSSS				CCCC				SCSC				CSCS			
	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4
0.2	2.77	2.80	2.80	2.80	6.86	6.20	6.14	5.79	3.93	3.95	3.96	3.96	5.32	4.12	3.88	3.78
0.4	3.06	3.05	3.05	3.05	7.62	6.58	6.41	6.19	4.63	4.57	4.57	4.57	5.64	4.25	3.94	3.81
0.6	3.41	3.38	3.37	3.37	8.53	6.93	6.58	6.47	5.68	5.44	5.44	5.44	5.94	4.34	3.96	3.81
0.8	3.63	3.61	3.6	3.60	9.12	7.11	6.66	6.53	6.73	6.20	6.19	6.18	6.12	4.40	3.99	3.84
1.0	3.62	3.62	3.62	3.62	9.14	7.13	6.66	6.53	6.97	6.31	6.39	6.31	6.11	4.39	3.99	3.83

Table 5. Buckling coefficients for loading type IV

γ/b	SSSS				CCCC				SCSC				CSCS			
	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4	a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b=4
0.2	5.81	4.12	3.84	3.75	12.51	7.18	6.71	6.51	10.62	7.15	6.70	6.50	8.80	4.27	3.87	3.76
0.4	5.30	4.11	3.85	3.76	11.17	7.33	6.74	6.53	10.53	7.32	6.71	6.53	8.05	4.52	3.96	3.81
0.6	4.47	3.93	3.78	3.72	10.58	7.34	6.70	6.52	9.61	7.07	6.65	6.49	7.11	4.49	4.00	3.82
0.8	3.87	3.74	3.69	3.67	9.62	7.25	6.69	6.54	7.78	6.53	6.57	6.43	6.42	4.43	4.00	3.84
1.0	3.62	3.62	3.62	3.62	9.14	7.13	6.66	6.53	6.97	6.31	6.39	6.31	6.11	4.39	3.99	3.83

지지조건을 변화하여 나타내었다. 이 결과로부터 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중은 패치 로딩뿐만 아니라 증가하는 종횡비 효과에서도 상당히 영향을 받고 있는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4는 하중길이와 종횡비 효과를 변화시켜 네 가지 패치 로딩을 받는 단순지지 사각형 판에 대한 임계 탄성좌굴하중계수로 나타내고 있다. 균일 축 압축하중을 받는 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중과 비교 시 하중길이가 증가하면서 하중 II와 하중 IV는 상대적으로 임계 탄성좌굴하중계수를 감소시키며 하중 I과 하중 III은 증가시키고 있다. 균일 축 압축하중의 임계 탄성좌굴하중계수와 비교 시 하중 II와 하중 IV의 하중길이가 200 mm 경우 임계 탄성좌굴하중계수는 19.3 %와 60.5 % 증가하였다. 반면에 하중 I과 하중 III의 임계 탄성좌굴하중계수는 32.8 %와 23.5 % 감소하였다. 이는 하중 위치에 따라 임계 탄성좌굴하중계수 크기가 상이하게 발생하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 고정지지 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수는 Fig. 5에서 나타낸 것처럼 하중 IV의 200 mm 하중길이 임계 탄성좌굴하중계수는 균일 축 압축하중과 비교 시 36.9 % 증가하며 하중 I, 하중 II, 하중 III은 각각 30.5 %, 3.7 %, 24.9 %, 감소하지만 하중형태에 영향을 받는 종횡비 증가에 따라 감소하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6~7은 단순지지와 고정지지의 비하중변 주변지지조건의 특성에 따라 두 가지 형태로 주변지지조건을 분류하여 고유치 좌굴해석을 수행하여 사각형 판의 임계 탄성좌굴하중계수를 도출하여 하중길이에 따른 임계 탄성좌굴하중계수의 영향을 검토하였다. 균일 축 압축하중을 받는 사각형 판의 탄성좌굴 거동은 종횡비가 증가하면서 하중변이 고정이고 비하중변이 단순지지가 될 경우 비하중변의 주변지지조건에 비해 하중변이 회전구속이 고정에 가까움에 따라 임계 탄성좌굴하중을 높게 평가하는 경향을 보인다. 하중 II와 하중 IV은 하중이 가장자리에 위치해 있어 비하중변 주변지지조건에 구분 없이 임계 탄성좌굴하중을 높게 평가하며 하중길이가 증가하면서 비하중변의 주변지지조건 특성을 반영하는 것으로 관찰할 수 있다. 이는 앞에서 설명했듯이 하중변의 회전구속에 따라 상이하게 임계 탄성좌굴하중을 발생시킬 것으로 생각한다. 하중 I와 하중 III은 위치가 중앙에서 적용하므로 비하중변 특성을 균일 축 압축하중의 특성과 유사하게 반영한다. Table 2-5는 주변지지조건에 따른 종횡비 효과와 패치 로딩 효과를 고려한 임계 탄성좌굴하중계수를 나타내고 있다.

Fig. 8은 하중 IV의 200 mm 패치 로딩을 받는 주변지지조건 영향을 고려한 알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 판에 대한 고유치 좌굴모드를 나타내고 있다. Fig. 9는 하중 IV에 대한 임계 탄성좌굴하중계수와 종횡비 상관관계에 주변지지조건을 고려하여 나타내었다.

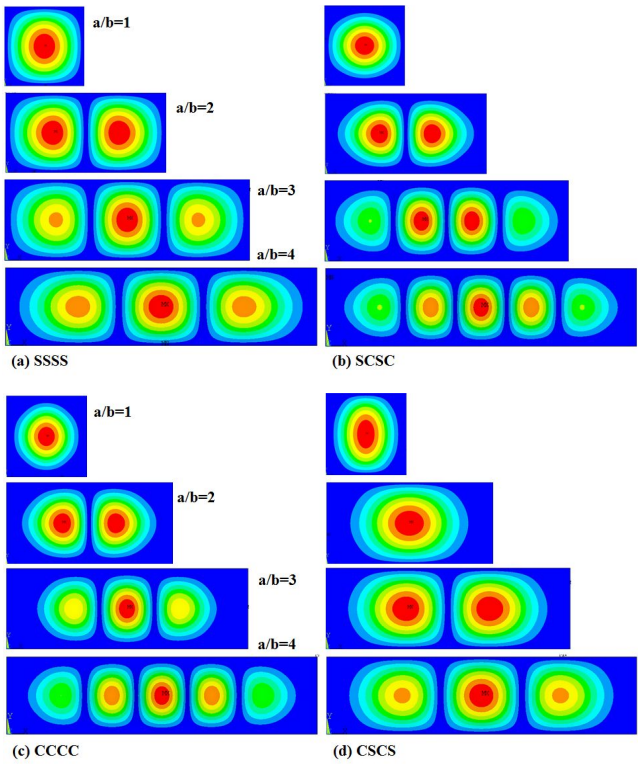


Fig. 8. First mode shape of buckled plate under loading type IV 20 % patch loading with different aspect ratio.

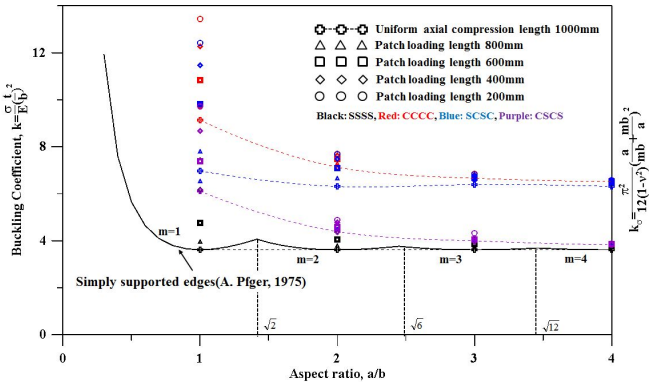


Fig. 9. Effect of boundary conditions on the buckling coefficient and aspect ratio subjected to loading type IV.

5. 결 론

알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 판의 탄성좌굴거동을 네 가지 주변지지조건과 다른 패치 로딩 형태, 종횡비 효과를 고려하여 검토하였다. 다양한 패치 로딩을 받는 판은 균일 축 압축하중과 비교 시 상이한 탄성 좌굴거동을 발생되는 것을 관찰할 수 있었다. 패치 로딩을 받는 판 부재는 하중형

태와 위치, 종횡비 효과 등에 상당히 영향을 받는 것으로 확인할 수 있었으며 본 연구에서 수행했던 하중 II와 하중 IV는 하중 I과 하중 III보다 훨씬 더 탄성 좌굴거동에 강한 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서 고려한 네 가지 주변지지조건에 대한 탄성 좌굴거동에 관한 영향은 비하중변 주변지지조건에 따라 상이한 거동을 나타내었다. 이것은 탄성설계개념을 도입한 좌굴강도설계를 하고자 할 때는 네 변 단순지지와 고정지지 조건을 좌굴강도 설계기준으로 평가하는 것이 타당할 것으로 생각한다. 앞으로 비선형 좌굴해석(또는 탄소성 대변형 시리즈 해석)을 수행하여 패치 로딩 형태, 종횡비 효과, 주변지지조건 등에 관한 영향을 검토하여 패치 로딩을 받는 알루미늄 합금 A6082-T6 판에 대한 기하학적, 재료적, 역학적 특성을 고려하여 초기 구조 설계 시 반영하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 중소기업진흥청의 산학연협력기술개발사업 중 「연안 및 갯벌에서 운용 가능한 관람용 에어보트 선체개발」 첫걸음 기술개발 과제의 지원으로 수행되었으며 연구지원비 지원에 감사드립니다.

References

[1] ANSYS. Inc.(2000), ANSYS theory manual, Nonlinear buckling problem, Chapter 3, Part4, pp. 120-132.

[2] Gerstle, K. H.(1967), Basic Structural Design, McGraw-Hill Book Company, pp. 88-90.

[3] Kinney, J. S.(1957), Indeterminate Structural Analysis, Addison Wesley Publishing Co., pp. 1-655.

[4] Lee, S. G., S. C. Kim and J. G. Song(2001), Critical Loads of Square Plates Under Different Inplane Load Configurations on Opposite Edges, International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 1, No. 2, pp. 283-291.

[5] Oh, Y. C., D. G. Bae. and J. Y. Ko(2014), Basic Research for Resistance Prediction of Aluminium Alloy Plate Girders Subjected to Patch Loading, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol 20, No 2, pp. 218-227.

[6] Patel, G. and S. K. Sahu(2006), Buckling of Curved Panels Subjected to Non-uniform Loading Using Finite Element Method, Presented in National Conference on "Emerging Trends in Nano Technology and innovations in design and manufacturing, Feb 18-19, 2006, NIT, Rourkela.

[7] Pflger, A.(1975), Stabilit¨atsprobleme der Elastostatik, Springer, Verlag Berlin Heidelberg New York, pp. 1-523.

[8] Shariati, M. and A. Dadrasi(2012), Numerical and Experimental Investigation of Loading Band on Buckling of Perforated Rectangular Steel Plates, Research of Journal of Recent Sciences, Vol. 1, No. 10, pp. 63-71.

[9] Singh, S., K. Kulkani, R. Pandey and H. Singh(2012), Buckling Analysis of Thin Rectangular Plates with Cutouts Subjected to Partial Eedge Compression Using FEM, Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 10, pp. 128-142.

[10] Sundaresan, P., G. Singh and V. Rao(1998), Buckling of Mooderately Thick Rectangular Composite Plates Subjected to Partial Edge Compression, Int. J. Mech. Sci. Vol. 40, No. 11, pp. 1105-1117.

[11] Timoshenko, S. P. and J. M. Gere(1961), Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Company, pp. 1-541.

원고접수일 : 2014년 06월 30일
원고수정일 : 2014년 08월 06일 (1차)
2014년 08월 21일 (2차)
게재확정일 : 2014년 08월 27일