

# 초기 처짐 영향을 고려한 알루미늄 합금 사각형 판의 좌굴 후 거동

오영철\* · 강병모\*\* · 고재용\*\*\*†

\*, \*\* 목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과, \*\*\* 목포해양대학교 해양공과대학 조선해양공학과

## Post-buckling Behaviour of Aluminium Alloys Rectangular Plate Considering the Initial Deflection Effect

Young-Cheol Oh\* · Byoung-Mo Kang\*\* · 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 논문에서는 탄소성 영역 내 패치 로딩 크기에 따른 알루미늄 합금 사각형 판의 초기 처짐 영향을 수치해석방법으로 이용한 탄성 및 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하였다. 주변 지지조건은 단순지지로 가정하고 초기 처짐 크기( $w/t$ ), 종횡비( $a/b$ ), 세장비( $b/t$ )를 고려하여 알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 판의 임계 탄성 좌굴하중과 좌굴 후 거동을 검토하였다. 탄성 및 탄소성 대변형 시리즈 해석은 상용프로그램을 사용하였다. 초기 처짐 크기가 작을 경우 하중증가와 함께 면내 강성이 처음부터 감소하며 크기가 커질수록 훨씬 두드러지게 발생한다. 종횡비가 커질수록 초기항복강도는 점차 감소하며 판 두께가 두꺼울수록 패치 로딩 크기( $l/b$ ) 0.5 이후 초기 항복강도 감소비율은 얇은 두께보다 더 크게 발생한다.

**핵심용어 :** 패치 로딩, 탄소성 대변형 시리즈 해석, 초기 처짐, 종횡비, 면내강성

**Abstract :** In this paper, It is performing to the elastic and elasto-plastic large deformation series analysis using a numerical method for the initial deflection effect of the aluminum alloy rectangular plate in the elasto-plastic loading area patch loading size. It is assumed a boundary condition to be a simply supported condition and consider the initial deflection amplitude, aspect ratio. It examined the critical elastic buckling load and post-buckling behaviour of aluminium alloy A6082-T6 rectangular plate. It used a commercial program for the elastic and elasto-plastic deformation series analysis. If the initial deflection amplitude is smaller, the in-plane rigidity with increasing to load is reduced from the start and occurs significantly more increasing the amplitude. More higher the aspect ratio, the initial yield strength is gradually decreased, and the plate thickness thicker and occurs larger than the thin walled plate a reduction ratio of the initial yield strength of the patch loading size as 0.5.

**Key Words :** Patch loading, Elasto-plasticity large deformation series analysis, Initial deflection, Aspect ratio, In-plane rigidity

### 1. 서 론

해양구조물에서 알루미늄 합금 사용은 최근 들어 증가하는 추세이며 사용영역은 선박, 해양플랜트 등 다양한 분야에 채택되어 이용하고 있다. 구조용 강(鋼) 대신 알루미늄 합금을 채택한 이유는 중량을 낮추어 속도와 적재화물 증가, 연료절감 등을 할 수 있어 채택하고 있다. 중량 낮추는 다른

방법으로는 박판 부재를 이용하여 구조물을 설계하는 것이다. 박판 부재는 다양한 구조물에 폭넓게 사용되면서 중량을 낮추기 위한 필요성 등에 의해 점차 박판 부재 사용이 확대되고 있으며 이에 따른 초기 구조설계 단계에서 좌굴은 중요한 설계기준이 되고 있다. 따라서 박판 부재의 초기좌굴, 좌굴 발생 후 면내 강성, 처짐 등을 수반하게 하는 초기 처짐 영향을 정확하게 파악하는 것은 구조 안정성을 확보하는 데 있어서 중요한 문제이다. 판(板) 부재는 절단, 용접 등 열 가공으로 초기 처짐이 처음부터 잔류응력 등으로 존재하게 된다. 초기 처짐 형태에 따라 판의 비선형 거동에 상당한

\* First Author : yochoh@mmu.ac.kr, 061-240-7476

† Corresponding Author : kojy@mmu.ac.kr, 061-240-7305

영향력을 미치게 되며 거동형태도 복잡하게 나타난다. 박판 부재는 다수 공학구조요소이며 구조물 제조에 판(plate)과 셸(shell)을 사용하는 것은 불가피하다. 이 구조요소는 불안정해지고 최종 좌굴하중보다 큰 압축하중을 받을 시 좌굴이 발생하며 수명주기 동안 축 압축하중을 경험하게 되어 좌굴하게 된다. 구조 안정성은 주변 지지조건과 하중조건에 의존되며 유한요소 솔루션을 이용하여 탄소성 좌굴 후 거동 및 좌굴을 검토하고 있다. 박판 구조의 안정성 해석은 이전부터 많은 연구자에 의해 수행됐으며 최근, 재료특성, 해석방법 등 다양한 연구방법을 적용하여 수행되고 있다.

Kristensen(2001)은 알루미늄 합금 판의 붕괴 거동에 관한 시스템 연구를 기반을 두어 수행하고 알루미늄 합금의 최종 강도에 관한 설계 식을 제안하였다. 알루미늄 합금은 해양 구조물에 이용되고 있는 A6082-T6, A5083-F, A5083-O를 적용하여 주변 지지조건, 용접형태, 초기 처짐 등 관련 변수를 고려하여 다중하중(이하 종 방향 압축하중, 횡 방향 압축하중, 조합하중 등)에 대한 영향을 검토하였다.

Shariati and Darasi(2012)는 하중영역이 변화하는 축 압축하중을 받는 유공과 비(非)유공 사각형 판에 대한 좌굴 거동에 대해 수치 및 실험검토를 수행하였으며 실험은 INSTRON 8802를 이용하여 수행하여 수치결과와 비교하여 양호한 결과를 도출하였으며 패치 로딩을 받는 단순지지와 고정지지 조건인 판 부재의 대한 각각 단면속성을 고려한 탄성 좌굴 응력 설계 식을 제안하였다.

Dadrasi(2013)는 탄소성 영역 내 다양한 하중으로써 면내 축 압축하중을 받는 유공과 비(非)유공 사각형 판의 좌굴 거동에 관한 수치 및 실험검토를 수행하였다. 판은 하중 변에 단순지지와 고정지지 조건을 적용하고 비(非)하중 변은 자유지지 조건을 적용하여 기동 좌굴 형태로 가정하고 초기 처짐 크기(initial deflection amplitude)를 0.1 mm와 0.48 mm를 반영하여 초기 처짐 영향을 고려하여 패치 로딩을 받는 유공과 비(非)유공 판의 좌굴 거동에 대한 영향을 검토하였다.

Paik and Kim(1998)은 초기처짐과 잔류응력 등의 초기결함 중 초기 처짐만을 대상으로 하여 초기 처짐 크기에 따른 판의 탄성대변형 거동을 증분 Galekin법에 의한 연구를 수행하여 판의 면내강성과 초기 항복강도에 대한 초기 처짐의 영향을 고찰하였다.

본 논문에서 탄소성 영역 내 하중길이 변화에 따른 면내 압축하중(또는 패치 로딩)을 받는 알루미늄 합금 사각형 판의 좌굴파손모드에 대해 초기 처짐 영향을 고려하여 검토하였다. 해석 간 주변 지지조건은 단순지지조건을 적용하고 초기 처짐은 정사각형 판의 종횡비(a/b) 1.0 일 경우 고유치 1차 좌굴모드, 직사각형 판(a/b) 2.0-4.0 일 경우 1반파성분이 지배적인 처짐 형태를 보이고 양 끝단은 정현파곡선 중앙

부분은 직선으로 구성된 형태로 가정하여 종횡비(a/b), 초기 처짐량 비(w/t), 세장비(b/t)에 대해 상용프로그램(ANSYS, Inc., 2000)을 이용하여 탄성 및 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경과 해석이론

### 2.1 좌굴하중과 좌굴거동

Fig. 1에 나타낸 정사각형 판은 면내 압축하중을 받았을 때 판은 평형상태로 존재하게 된다. 면내 압축하중 크기가 증가함에 따라 판 상태는 편평하지 않고 불안정한 상태로 변화하며 중앙 부분 모서리의 면내 변형률은 인장 변형률로 변화한다.

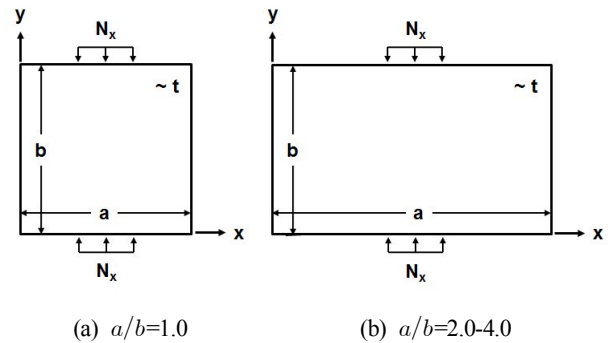


Fig. 1. A rectangular and square plate subjected to in-plane load.

불안정한 상태에 있는 판의 압축하중 크기는 임계 탄성 좌굴하중 또는 임계 좌굴하중이라 명명하며 식(1)과 같이 지배 미분방정식으로 나타낼 수 있다(Supasak and Singhatanadgid, 2004).

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (1)$$

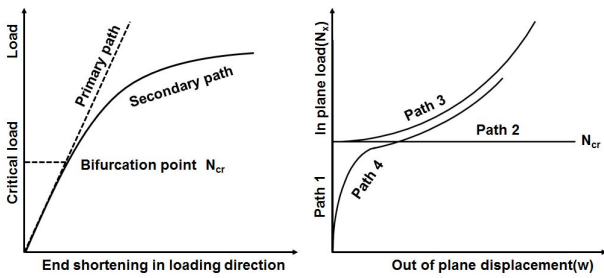
여기서,  $D = Et^3/12(1-\nu^2)$ 이며 면내 강성을 의미한다.

주변 지지조건이 단순지지일 경우 임계 탄성좌굴하중은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Supasak and Singhatanadgid, 2004).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{a^2 m^2} \left[ m^4 + 2 \left( m m \frac{b}{a} \right)^2 + \left( n \frac{b}{a} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서,  $m$  과  $n$  은 좌굴모드를 나타내는 양의 정수이다.

좌굴 현상은 Fig. 2에 나타난 면내 하중  $N_x$ 에 대해 판의 중앙 부분의 면외 변위  $w$ 선도로 나타낼 수 있다. 고전 선형 좌굴이론에서 면내 하중이 영(零, zero)일 경우 면외 변위는 초기 처짐이 없는 상태를 유지하며 하중-변위 선도는 좌굴 하중에 도달할 때까지 경로 1(path 1)을 따르고 있다. 분기점(bifurcation point)은 선형좌굴 경로인 경로 2(path 2)로 정의되며 식(2)에 나타난 것처럼 고전 선형좌굴이론으로 얻을 수 있다. 경로 3(path 3)은 후 좌굴(post-buckling)을 나타낸다. 이 경로는 좌굴하중 이후 판 거동 연구에서 중요한 의미가 있지만 초기 처짐을 가진 실제 판은 경로 1을 따르지 않고 면내 하중  $N_x$ 을 받는 순간 면외 변위가 발생되어 경로 4(path 4)를 따르게 된다(Supasak and Singhatanadgid, 2004).



(a) End shortening (b) Out of plane displacement  
Fig. 2. Description of buckling phenomenon.

## 2.2 해석이론

선형분기해석은 완전 기하학, 선형 재료거동과 미소변형 등에 기반을 두고 있다. 좌굴은 기하학 참조설정과 극소 변형(또는 미소변형)을 의미하는 분기(分岐, bifurcation)에 의해 발생하며 이 두 설정은 같은 하중 수준으로 가능하다. 대응되는 고유치와 고유치 모드를 결정하는 것은 선형해석으로 수행하기에 충분하며 참조 하중  $\{R\}_{ref}$ 으로 하중을 적용할 수 있으며 관련 응력 강성매트릭스  $[K]$ 는 하중수준에 영향을 받지 않는다.  $\lambda_{cr}$ 는 하중수준이 아니라 응력분포가 변화로 적용할 수 있으며 식(3)으로 나타낼 수 있다. 좌굴 변위  $\{\delta D\}$ 로 적용한다면 식(4)로 정의할 수 있다. 이 두 식을 차감하면 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$([K] + \lambda_{cr} [K_{\sigma}]_{ref}) \{D\}_{ref} = \lambda_{ref} \{R\}_{ref} \quad (3)$$

$$([K] + \lambda_{cr} [K_{\sigma}]_{ref}) \{D_{ref} + \delta D\}_{ref} = \lambda_{cr} \{R\}_{cr} \quad (4)$$

$$([K] + \lambda_{cr} [K_{\sigma}]_{ref}) \{\delta D\} = \{0\} \quad (5)$$

따라서 임계 탄성 좌굴하중  $\{R\}_{cr}$ 은 가장 작은 해  $\lambda_{cr}$ 을 기반으로 결정한다. 고유벡터  $\{\delta D\}$ 는 기하학적 초기 처짐 형태로써 사용되는 고유치 모드  $\lambda_{cr}$ 에 관련되어 있다.

고유치와 고유치 모드 추출법으로써 블록 란초스(block lanczos)법과 부분 공간 반복(subspace iteration)법을 선택할 수 있다. 블록 란초스법은 대형 대칭 고유치 문제를 해결하는데 매우 적합하며 통상 부분 공간 반복법을 사용하는 것처럼 같은 정확성을 가지고 있다. 부분 공간 반복법에 대한 블록 란초스는 훨씬 많은 메모리를 요구하지만 해석시간이 짧다. 블록 란초스법은 다수 모드를 추출할 때 적합하며 셀과 보 요소 같은 다른 요소를 포함하고 있다면 더 효율적 계산을 수행하여 결과를 도출할 수 있다.

비선형 좌굴해석은 초기 처짐 기하학, 비선형 재료 거동과 대변형에 기반을 두고 있다. 좌굴 문제의 비선형 특성은 솔루션 전략으로써 증분(incremental)과 반복(iterative)법이 필요하다. 기하 비선형성은 평형 방정식이 변형 형상에 대해 쓰인 좌굴에 기인하기 때문에 대변형이 발생한다. 재료 비선형성은 응력과 변형률 함수인 재료 물성치에 기인한다.

일반적으로 비선형 문제로서 선형문제와 같지 않다면 미지변위  $\{D\}$ 를 구하여 하중  $\{R\}$ 를 산출하여야 한다. 중첩(superposition)원리가 성립되지 않는다면 변위를 구하여 강성 매트릭스와 미지 변위를 곱(乘, product) 형태로 나타내어 평형상태에 있는 하중  $\{R\}$ 로 나타낼 수 있다. 강성방정식 (6)로 정의할 수 있다.

$$[K] \{D\} = \{R\} \quad (6)$$

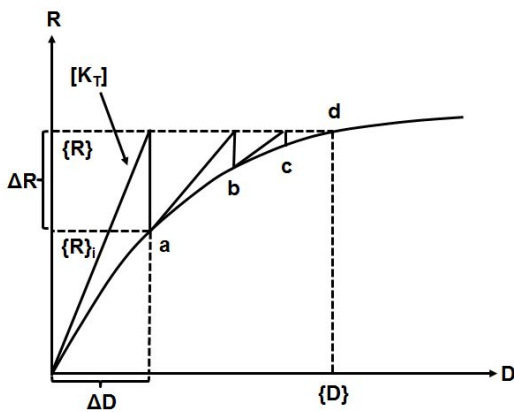
비선형 지배방정식의 솔루션은 증분법으로 달성시킬 수 있다. 증분법은 단순증분법(SI법), Newton-Rapshon법(NR법), 수정 Newton-Rapshon(mNR법)으로서 이론이 확립되어 있다. Paik et al.(1989)에 의해 대변형이 발생하는 판에 대해서는 불평형력에 대한 수정계산을 수행하여야 하며 이 경우 NR법과 mNR법은 같은 정도를 유지하면서도 계산시간은 mNR법이 NR법에 비해 약 1/2정도 절감되며 큰 초기 처짐이 존재하거나 후관일 경우 불평형력이 상대적으로 크지 않기 때문에 SI법을 사용하는 것이 훨씬 유용하다는 것을 확인하였다. Fig. 3은 하중과 변위의 상관관계를 2차원 형태로 나타내어 NR법을 설명하고 있다. NR법은 매 평형 반복경로 상에서 접선강성(tangent stiffness)을 수정하여 사용하며 하중은 구간별로 적용한다. 이 방법은 초기 접선강성  $[K_T]$ 에 기반을 두어 반복계산을 수행하며 이로부터 하중 불평형 벡터  $\{R\}_i$ 을 적용 하중과 가정 솔루션에 기초한 평가 하중의 차로 결정한다. 새로운 평형 반복은 수정기준에 의존되도록 하중 불평형 벡터를 영(零, zero)에 근사하도록 수행한다. 지배방정

식의 증분 형태로 정의하면 식(7)으로 나타낼 수 있다.

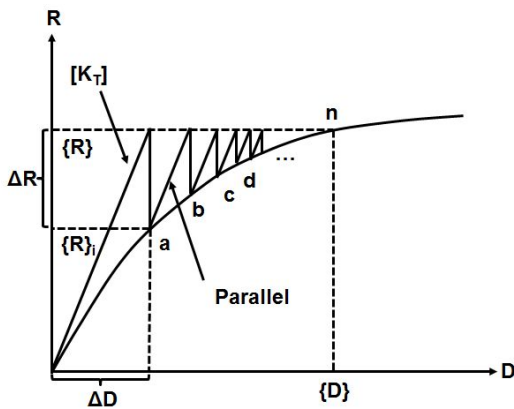
$$[K_T]\{\Delta D\} = \{\Delta R\} \quad (7)$$

여기서,  $\{D\}$ 와  $\{\Delta R\}$ 은 미지 증분 변위와 하중벡터이다.

mNR법은 NR과 같게 매 하중증분단계에서 발생한 불평형력  $\{Q\}$ 을 반복계산으로 소거시키되 매 반복계산 시 필요한 접선 강성은 첫 번째 반복계산 시 것을 그대로 적용한다 (Paik et al., 1989).



(a) NR method



(b) mNR method

Fig. 3. The description of solution technology.

면내 압축하중을 받는 판의 좌굴 후 거동에서 통상의 변위제어법과 하중제어법으로 거동을 추적할 수 없으므로 호장 증분법을 적용한다. 호장 증분법(arc-length method) 또는 리스크법(Risk's method)에서는 증분 매개변수로서 하중-곡선의 호장을 증분시킨다. Fig. 4에 나타내는 것과 같이 각 증분 단계의 반복·수렴의 제1단계에서는 전 단계의 결과와 같은 방향으로 하중증분 및 처짐 증분을 가정한다. 이후 반복·수

렴과정에서는 수렴계산의 전(前) 단계의 호장 방향과 직각 방향으로 해를 탐색한다. 이 같은 수렴계산을 불평형력  $\{Q\}$ 가 충분히 적을 때까지 반복한다(Ko et al., 2003).

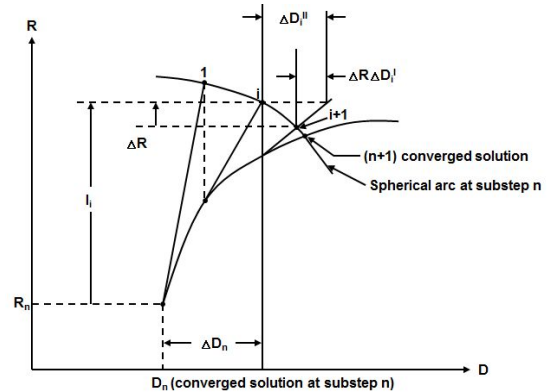


Fig. 4. Arc-length method with NR method.

수렴기준은 수학적으로 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며 반복구간에서 하중과 모멘트 오차의 SRSS(Square Root Sum of the Squares)가 작용하중의 SRSS의 0.01%가 되었을 때 수렴한 것으로 설정하였다(Oh et al., 2014)

$$\text{Convergence criteria : } \|\{R\}\| < (\epsilon_R R_{ref}) \quad (8)$$

여기서,  $\|\{R\}\|$ 은 잔차(Residual)의 vector norm이며  $(\epsilon_R R_{ref})$ 은 하중 수렴 기준이다.

### 3. 해석모형과 방법

탄성과 탄소성 대변형 이론을 적용하여 알루미늄 합금 사각형 판 부재의 거동을 해석하였다.

해석모형에 적용한 재료는 Table 1에 나타낸 A6082-T6를 적용하고 모형 제원은 다음과 같다. 사각형 판 형태이며 길이×폭×두께= $a \times b \times t$ 이며 면내 강성은  $D = Et^3/12(1-\nu^2)$ 이며 항복응력은  $\sigma_0$ 이다.

Table 1. Analysis model and material property as A6082-T6

$a$ [mm]	$b$ [mm]	$t$ [mm]	$\sigma_0$ [MPa]	$E$ [MPa]
1,000	1,000	4	270	70,000
2,000				
3,000		16		
4,000				

Note:  $a$ =Length of plate,  $b$ =Width of plate,  $t$ =Thickness of plate,  $\sigma_0$ =Yield stress,  $E$ =Young's modulus

Table 1에서 나타난 것처럼 종횡비( $a/b$ ) 1.0-4.0, 세장비( $b/t$ ) 250, 62.5, 초기 처짐량 비( $w/t$ ) 0.1, 0.2, 0.4, 패치 로딩( $l/b$ ) 0.2-1.0에 대해 총 합계 120 경우의 시리즈 해석을 수행하였다. 또한, 초기 처짐 형태는 종횡비( $a/b$ ) 1.0일 경우 다음 전체 초기 처짐 식(9)과 같이 가정하여 구현하였다(Paik and Kim, 1998).

$$w_0 = \sum A_{0m} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y \quad (9)$$

종횡비( $a/b$ ) 2.0-4.0일 경우 Fig. 5에 나타난 각형 판의 초기 처짐은 1반파성분이 지배적인 처짐 형태로 가정하였으며 길이 방향에 있어서 양단으로부터 길이  $b$  구간은 정현파 곡선으로 중앙 부분  $a-2b$  구간은 직선 형태로 구성된 것으로 가정하였다. 처짐 형태는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다(Paik and Kim, 1998).

$$w_0 = \sum_{m=1}^3 A_{0m} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y \quad (10)$$

또한, 주변 지지조건은 단순지지 조건으로써 변형 발생 후에도 직선을 유지하며 하중조건은 횡 방향으로 균일 압축 하중과 패치 로딩을 적용하였다.

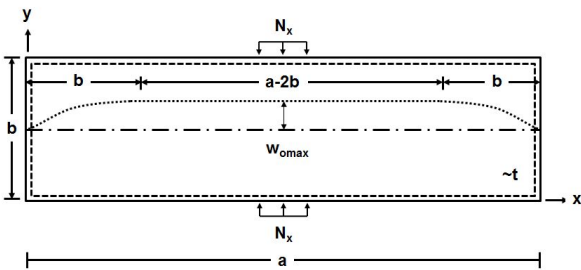


Fig. 5. Rectangular plate with initial deflection.

본 논문에서 수행결과의 신뢰성을 확보하기 위해 Ko(1999)의 수치해석 결과와 유한요소 해석의 결과를 Fig. 6처럼 비교하여 매우 양호한 결과를 도출하였다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

일반적으로 판 부재는 절단 또는 용접 등 같은 열 가공으로 조립된 것이므로 초기 처짐이 필연적으로 존재한다. 그러므로 면내 하중이 증가하면 초기 단계부터 굽힘 변형이 발생하며 그 후 하중이 계속 증가하면 이윽고 초기항복이

발생하여 항복이 퍼짐과 함께 면내 강성이 급격히 저하하여 최종강도에 도달한다. 이것은 타(他)부재에 하중 분담률을 증가시켜 구조부재가 연쇄적으로 붕괴하여 전체 구조물이 붕괴한다(Ko, 1999). 최근, 구조물의 대형화, 고속화, 경량화 등에 따른 구조설계 시 재료 사용을 고장력강, 알루미늄 합금 등을 적용하고 있다. 이 재료들은 판의 좌굴강도와 좌굴 후 거동뿐만 아니라 특히 박판을 사용할 경우 2차 좌굴을 포함하는 판의 대변형 거동을 발생시키므로 반드시 파악하여 구조 안정성 평가를 수행하여야 한다.

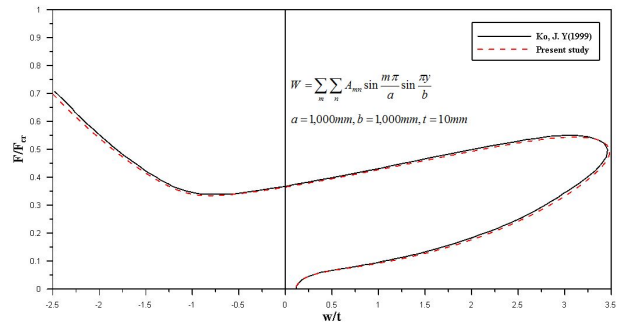


Fig. 6. Elastic large deflection of rectangular plate under transverse uniform compression.

#### 4.1 정사각형 판의 탄성대변형

알루미늄 합금 정사각형 판 즉, 종횡비( $a/b$ ) 1.0에 대한 거동에 대해 탄성 대변형 시리즈 해석을 수행하여 Fig. 7처럼 평균압축하중과 판의 중앙 횡 처짐의 관계를 나타낸다. 이와 같이 초기 처짐을 가진 판이 면내 압축하중( $l/b=1.0$ )을 받으면 초기 면내 강성이 점차적 감소하여 횡 처짐이 발생하여 1차좌굴이 발생하지 않고 횡 처짐이 크게 성장하여 A점에 도달한 후 급작스럽게 B점으로 진행한 후 상단으로 진행한다. 그 후 거동은 하중을 감소시키면 B점에서 C점으로 진행되면서 불안정현상이 발생하여 D점으로 진행되는 거동을 보이고 있다. A점에서 B점으로 C점에서 D점으로 진행되는 현상을 천이거동(snap through)이라고 하며 또한, A점에서 B점으로 진행되는 구간에서 처짐 모드는 1모드에서 3모드로 급작스럽게 변화하며 이런 현상을 2차 좌굴이라고 불린다. 점C에서의 응력을 2차 좌굴응력이라고 부른다. 이와 같은 2차 좌굴이 발생하게 하는 원인으로서는 횡 처짐이 발생하였을 때 면의 변위에 대해서 직선을 유지해야하기 때문에 비(非)제하변의 중앙부에 인장응력이 작용하고 양단부에 압축응력이 작용하게 되어 처짐과형을 1차 모드로부터 3차 모드로 변하게 되기 때문이다(Ko, 1999). 또한, 패치 로딩( $l/b=0.2-0.8$ )도 면내압축하중( $l/b=1.0$ )과 동일하게 면내 강성이 점차적으로 감소하고 횡 처짐이 발생한다.

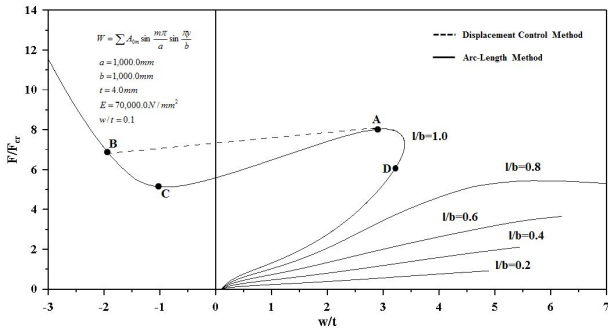


Fig. 7. Plot of applied load vs out of plane displacement for aluminium alloy square plate ( $a/b=1.0, l/b=1.0$ ).

Fig. 8은 종횡비( $a/b$ ) 1.0인 알루미늄 합금 사각형 판의 탄성거동을 나타내고 있으며 초기 좌굴지점 ①에서는 고유치 좌굴모드 1모드를 유지하고 ②-③지점 구간에서 천이거동이 발생하면서 3모드로 처짐 모드가 변하고 ④지점에서 3모드를 나타내며 처짐이 급격하게 나타내고 있다. 이러한 거동은 처짐 모드 변화를 동반하면서 구조강성에 치명적인 손상을 발생시킨다.

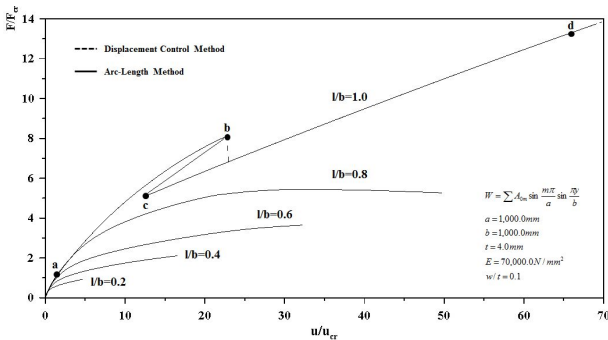


Fig. 8. Plot of applied load vs end shortening for aluminium alloy square plate ( $a/b=1.0, l/b=1.0$ ).

Fig. 9는 Fig. 8에 각 지점의 처짐 모드 변화를  $l/b=1.0$ 과  $l/b=0.8$ 상태를 나타내고 있다.  $l/b=1.0$ 은 전술한 바와 같이 초기 처짐 모드 변화가 2차 좌굴에 의한 천이거동이 발생하면서 불안정한 1모드에서 안정된 3모드로 급작스런 변화가 발생함을 알 수 있다.  $l/b=0.8$ , 즉 패치 로딩이 작용할 경우 초기 좌굴모드 ①지점에서는 고유치 좌굴모드 1모드를 유지하며 점차 하중이 증가함에 따라 처짐 모드가 불안정한 1모드 처짐 모드로 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 하중변에 작용하는 하중길이가 국부 작용함에 따라 하중변 양단에서 굽힘 모멘트로 인해 인장응력이 발생하여 이와 같은 처짐 모드가 나타낸 것으로 생각한다.

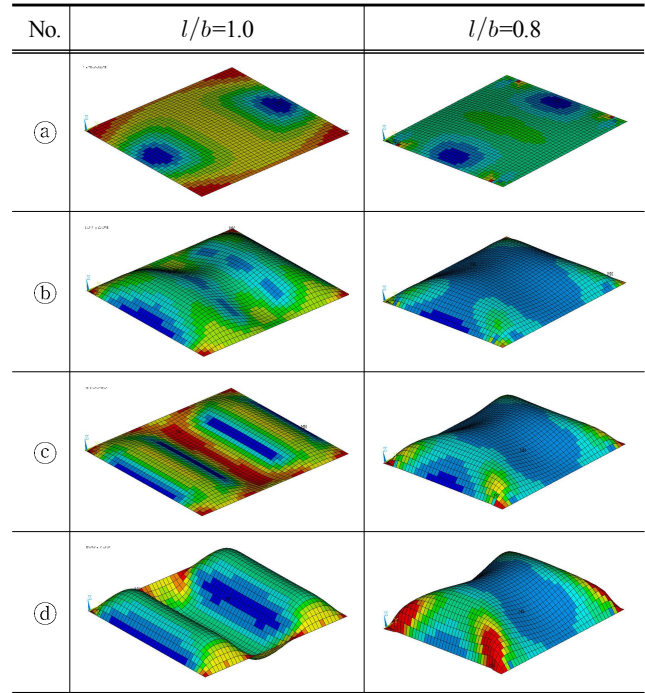


Fig. 9. A change of deformation mode under patch loading ( $l/b=1.0$  and  $l/b=0.8$ ).

#### 4.2 직사각형 판의 탄소성대변형

알루미늄 합금 사각형 판 즉, 종횡비( $a/b$ ) 2.0-4.0인 판 부재에 대해 세장비( $b/t$ ), 초기 처짐량 비( $w/t$ ) 등을 변화시켜 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하였다. Fig. 7과 8에서 나타난 바와 같이 변위제어법과 호장 증분법을 비교 시 변위 제어법 같은 경우 변위가 증분되는 다음 구간을 초월하여 재 경로를 추적하고 있지만, 이것은 실제적 경로가 아니다. 하지만 호장 증분법은 이 구간에서 하중과 처짐 곡선의 호의 반지름을 적용하여 수렴 전(前) 단계 호의 반지름 방향과 직각 방향의 해를 탐색하여 경로를 추적하고 있다. 따라서 탄소성 대변형 시리즈 해석 간 모든 해석은 호장 증분법을 적용하여 수행하였다.

패치 로딩 크기와 초기 처짐량 증가에 따른 판의 면내 강성 변화를 관찰하여 Fig. 10와 Fig. 11에 평균압축하중과 면내 변위 관계를 나타내고 있다. 초기 처짐이 작은 경우 즉  $w/t=1.0$ 에서 하중증가에 따른 초기 좌굴이 발생한 후 면내 강성이 감소하고 있으며 초기 처짐량이 증가할수록 면내 강성이 점차 감소한다. 특히, 박판에서 후판보다 면내 강성 감소는 초기 처짐량이 클수록 현저하게 나타내고 있다. 따라서 구조설계 또는 판(板) 부재 가공 시 면내 강성이나 변위 제한을 두는 부분에 절단, 열 가공 등으로 인해 큰 초기 처짐이 발생하지 않도록 관심을 가져야 한다.

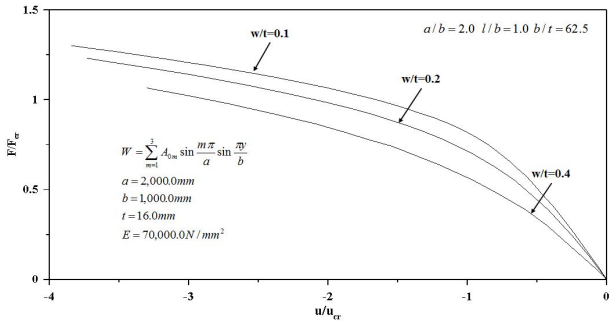


Fig. 10. Plot of applied load vs end shortening for aluminium alloy square plate( $a/b=2.0$ ,  $b/t=62.5$ ).

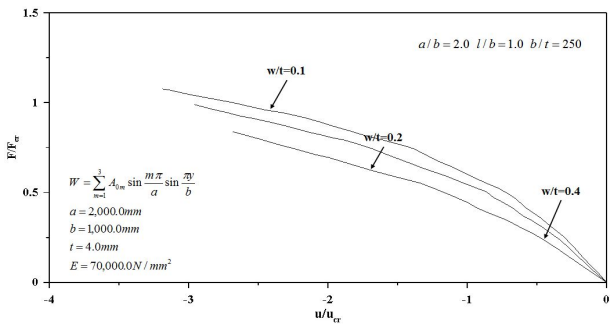


Fig. 11. Plot of applied load vs end shortening for aluminium alloy square plate( $a/b=2.0$ ,  $b/t=250$ ).

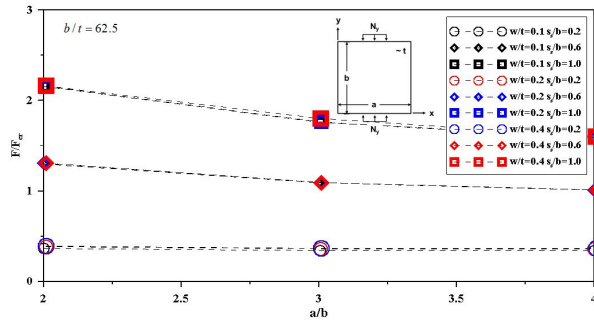


Fig. 12. Plot of  $F/F_{cr}$  and  $a/b$  for aluminium alloy square plate( $b/t=62.5$ ).

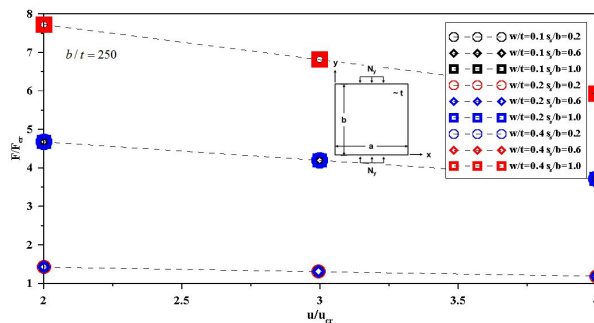


Fig. 13. Plot of  $F/F_{cr}$  and  $a/b$  for aluminium alloy square plate( $b/t=250$ ).

Fig. 12과 Fig. 13는 종횡비( $a/b$ ) 변화에 따른 초기 처짐 크기와 패치 로딩의 항복강도 영향을 나타내고 있다. 초기 처짐 크기가 같고 종횡비가 커질수록 항복강도는 감소하고 있다. 세장비( $b/t$ ) 250일 경우 패치 로딩 크기에 따라 항복강도는 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 세장비( $b/t$ ) 62.5일 경우 패치 로딩 크기( $l/b$ ) 0.5 이후 종횡비( $a/b$ ) 3.0까지는 급격히 감소하다가 그 이후는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 전술한 바와 같이 판이 박판일수록 초기 처짐 크기에 영향을 받지 않고 후판일수록 훨씬 많은 영향을 받고 있다. 따라서 Paik et al.(1998)이 나타낸 바와 같이 면내 압축하중을 받는 판 부재와 같게 패치 로딩을 받았을 때도 유사한 거동을 나타내고 있는 것을 살펴볼 수 있다. 패치 로딩도 종횡비를 가능한 한 작게 하는 것이 항복강도 면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 초기 처짐 크기를 고려하여 패치 로딩 크기에 따른 알루미늄 합금 A6082-T6 사각형 판의 좌굴 후 거동에 대해 탄성 및 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하여 종횡비( $a/b$ ), 세장비( $b/t$ ) 등의 영향을 검토하였다.

판(板)은 절단, 용접 등 열 가공으로 인한 초기부터 잔류 응력이나 초기 처짐 등이 존재하게 된다. 초기 처짐 형태에 따라 판의 비선형 거동에 상당한 영향력을 미치게 되며 거동형태 또한, 복잡하게 나타난다. 따라서 패치 로딩을 받았을 때 종횡비, 세장비 등을 고려하여 거동에 대한 초기 처짐 영향을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 정사각형 판에서 박판일 경우 패치 로딩 크기( $l/b$ )가 면내 압축하중과 같아질 때 천이거동 현상으로 인해 2차 좌굴이 발생하며 그 이하 크기에서는 발생하지 않았다. 그 이유는 횡 처짐이 발생하였을 때 면의 변위에 대해서 직선을 유지해야 하기 때문에 비(非)재하변 중앙부에서 인장응력, 양단부에서 압축응력이 발생하여 급작스런 처짐 모드가 발생하기 때문이다.

(2) 초기 처짐 크기( $w/t$ )가 작을 경우 하중증가와 함께 면내 강성이 처음부터 감소하며 초기 처짐 크기가 커질수록 면내 강성 감소하는 경향은 훨씬 두드러지게 발생한다.

(3) 종횡비( $a/b$ )가 커질수록 항복강도는 감소하며 판(板) 두께가 두꺼울수록 패치 로딩 크기( $l/b$ ) 0.5 이후 항복강도의 감소비가 박판보다 감소비가 더 크게 발생한다.

차후 다양한 주변 지지조건 영향에 따른 알루미늄 합금 사각형 판의 좌굴 후 거동에 대한 연구를 추가 수행하고 또한, 종횡비, 세장비, 초기 처짐, 잔류응력 등의 변수에 대한 구체적으로 반영하여 실질적인 연구를 진행하고자 한다.

### 감사의 글

이 연구는 전남과학연구단지 기초·원천연구개발지원사업 「FEM을 고려한 카페리선의 최종한계상태 구조설계 기술개발」 연구과제 지원으로 수행되었으며 연구 지원비 지원에 감사드립니다.

Perforated Rectangular Steel Plates, Research of Journal of Recent Sciences, Vol. 1, No. 10, pp. 63-71.

- [10] Supasak, C. and P. Singhatanadgid(2004), A Comparison of Experimental Buckling Load of Rectangular Plates Determined from Various Measurement Methods, Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, pp. 18-23.

---

Received : 2014. 09. 22.

Revised : 2014. 10. 27. (1st)

: 2014. 11. 19. (2nd)

Accepted : 2014. 12. 26.

### References

- [1] ANSYS Inc.(2000), ANSYS theory manual, Nonlinear buckling problem, Chapter 3, Part4, pp. 120-132.
- [2] Dadrasi, A.(2013), On the Effect of Imperfection on Buckling load of Perforated Rectangular Steel Plates, Research Journal of Recent Sciences, Vol. 2, No. 3, pp. 36-43.
- [3] Kristensen, O. H. H.(2001), Ultimate Capacity of Aluminium of Plates under Multiple Loads Considering HAZ properties, Norwegian University of Science and Technology Ph.D thesis, pp. 127-132.
- [4] Ko, J. Y.(1999), A Study on the Large Deflection Behaviour of Ship Plate with Secondary Buckling, The Korean Society of Marine Engineering Vol. 23, No. 4, pp. 565-573.
- [5] Ko, J. Y., J. S. Park and J. G. Joo(2003), A Study on Ultimate Strength of Ship's Plate Accompanied Secondary Buckling in used Arc-Length Method, The Korean Society of Marine Environment & Safety Conference(Spring), pp. 159-165.
- [6] 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.
- [7] Paik, J. K., C. Y. Kim. and J. G. Lee(1989), A Study on the Iterative Solution Procedures for the Elasto-Plastic Large Deflection Analysis of Plates by Finite Element Method, Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 2, No. 3, pp. 97-103.
- [8] Paik, J. K. and C. Y. Kim(1998), Influence of Initial Deflection on Plate Behaviours, The Korean Welding Society Special Lecture and Conference, pp. 213-217.
- [9] Shariati, M. and A. Dadrasi(2012), Numerical and Experimental Investigation of Loading Band on Buckling of