

면내하중을 받는 판의 경계조건에 따른 최종강도거동에 관한 연구

A Study on the Ultimate Strength Behaviour According to the Boundary Condition of a Plate under Thrust

고재용*
Ko, Jae-Yong

박주신**
Park, Joo-Shin

최익창*
Choi, Ik-Chang

이계희*
Lee, Gye-Hee

ABSTRACT

One of the primary factors like plate structure in ship is redundancy structure that is comparable with ocean structure and frame structure. The more component material becomes buckling collapsed locally the less structure stiffness becomes accordingly. As a result, by increasing the load distribution of any other subsidiary structure continually component member collapses, therefore the structure could be in danger of collapse. So, in order to interpret this phenomenon precisely, the study on boundary condition of the ship's plate and post-buckling analysis must be considered. In this study, the rectangular plate is compressed by the in-plane load. Buckling & Ultimate strength characteristics are applied to be the elasto-plasticity large deformation by F.E.M. On this basis, elasto-plasticity of the plain plate are investigated. This study proved elasto-plasticity behaviour of the ship's plate in accordance with boundary condition based on the series analysis in case of the compressive load operation.

1. 서론

교량 및 선체구조물은 대표적인 상자형 박판구조물로서 기본적으로 판, 보강판 그리고 거더 등의 구조부재로 구성되어 있다. 이 중에서 선체판 요소는 선박의 구조에서 중요한 부분 중의 일부분이다. 지금까지 일반 강구조물의 설계는 주로 탄성영역만을 고려한 설계개념을 적용시켜 왔다. 특히, 선박은 항해중 발생하는 여러 가지 외력에 의하여 탄성설계상의 응력이 허용응력 이하일지라도 박판에서는 실제응력이 허용응력보다 클 가능성이 존재하게 된다. 그러므로 지금까지의 탄성설계 개념에서 진전하여 소성을 고려한 탄소성 설계 개념의 설계적용이 필요하다.^{(1),(2)} 일반적인 판의 거동은 초기결함의 존재여부에 따라 달라진다. 초기 처짐을 가진 판의 경우 압축력이 작용할 때 명확한 좌굴현상을 보이지 않고 하중의 초기단계에서부터 처짐이 서서히 증가하여 면내강성이 저하한다.^{(3),(4),(5)} 실제 판 부재는 주변의 부재와 연속되어 있으며 실제 주변의 판 부재와 연결되어 있다. 그 결과 판의 경계조건은 단순지나 고정과 같은 이상적인 조건이 아닌 주변부재에 의한 회전구속과 비틀림 효과에 의해 부재거동이 큰 영향을 받으며 이 효과를 고려하여 강도를 평가할 필요가 있다. 그러므로 구조물의 안정성을 합리적으로 확보하고 균일한 안정성을 얻기 위해서는 좌굴과 소성항복을 고려한 최종강도를 기준으로 설계를 수행할 필요성이 있다. 기본적으로 이 문제는 대변형에 기인된 기하학

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

** 목포해양대학교 해양시스템공학부 석사과정

적 비선형성과 재료 항복에 의한 재료적 비선형성을 모두 고려하여 다룰 필요가 있다.^{(7),(8)}

따라서, 본 연구에서는 선체의 대표적인 구조물인 판을 대상으로 지지조건과 종횡비(a/b)를 달리한 시리즈 해석으로 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 경계조건에 따른 판의 탄소성 거동과 최종강도에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

판의 최종강도를 평가하기 위해서 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS의 탄소성대변형 유한요소법을 적용하였다. Fig.1은 본 연구에 사용된 유한요소인 4절점을 가진 사각형 요소(Shell 181)이며 다음과 같은 특징을 가지고 있다.⁽⁹⁾

- 1) 사각형 셸 요소이고 4개의 절점과 각 절점에는 6자유도(X, Y, Z, Rotx, Roty, Rotz)를 가지고 있다.
- 2) 이 요소에서는 면외, 면내의 대변형 거동에 의한 기하학적, 재료적 비선형성의 효과도 포함한다.
- 3) 복잡한 비선형 문제에 있어서 Shell 43 대신에 주로 사용되고 있다.
- 4) 선형과 대회전, 비선형 대변형 문제의 적용에 있어서 뛰어나며 박판으로 구성된 복잡한 샌드위치 구조와 판에 있어서도 적용이 가능하다.

2.2 해석 모델링

본 연구에서는 비선형 유한요소법(ANSYS)을 적용하여 판 종횡비(a/b)가 1.0 ~ 6.0인 사각형 판의 해석에 있어서 사용된 모델링 기법은 판의 변형거동의 대칭성을 고려하여 판의 1/2만을 대상으로 모델링 하였다. 시리즈해석은 판 종횡비(a/b)에 따라 수행하였다. Fig.2에서는 해석에 사용된 판의 1/2모델링 단면을 나타내었다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 판 폭(b)=1,000 mm, 판 두께(t)=10 mm, 탄성계수(E)= 21,000 kgf/mm², 포아송비(ν)=0.3, 항복강도 (σ_y)=28 kgf/mm², 최대 초기처짐 (W_o)=0.1 mm, 세장비(β)=3.65 이다. 본 연구에 사용된 경계조건은 4가지이며 첫번째는 네변이 단순지지(SS), 두번째는 하중변은

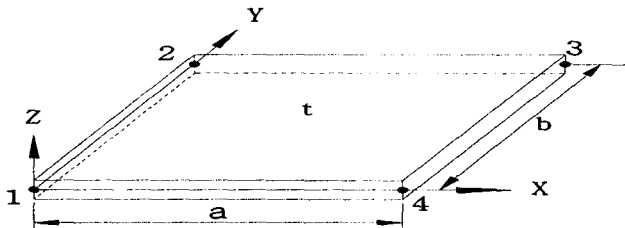


Fig.1 Four-noded rectangular plate element used in the present analysis

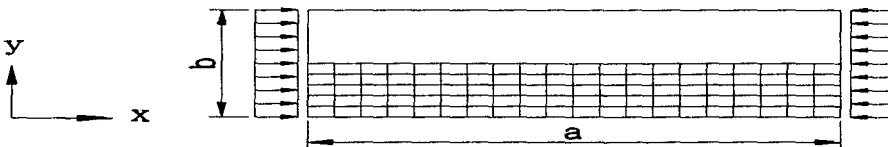


Fig.2 Dimension of 1/2 model of a rectangular plate under thrust

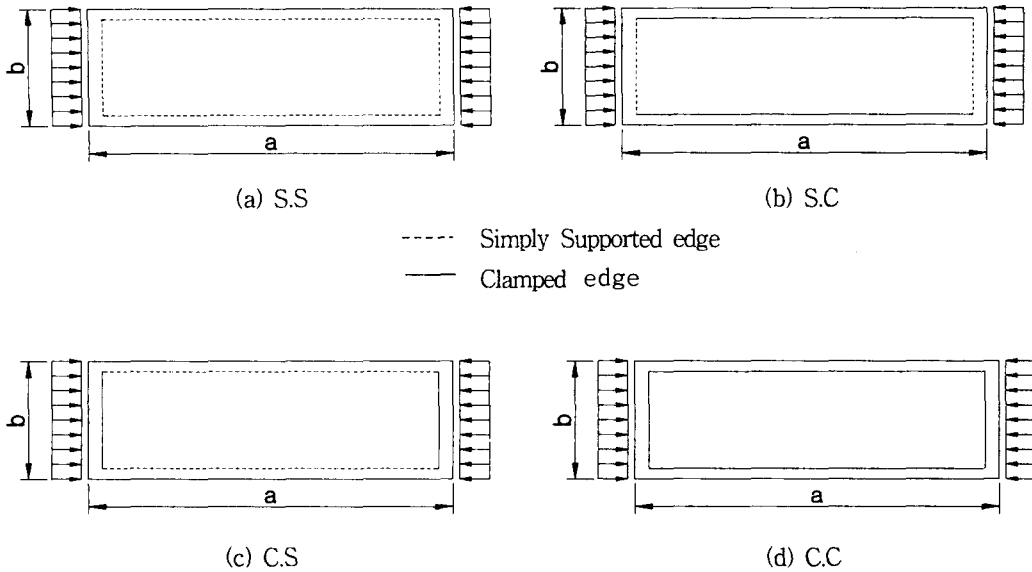


Fig.3 Ideal plate edge conditions considered in the present study

단순지지이고 비하중변은 고정지지(SC), 세변제는 비하중변은 고정지지이고 하중변은 단순지지(CS), 네변제는 네변 고정지지(CC)이다. Fig.3은 연구에 사용된 경계조건에 대해서 나타내고 있다. 하중작용은 종방향 압축하중만을 면내방향으로 작용하는 것으로 하였으며 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였다.

3. 수치계산 및 검토

3.1 정사각형판의 최종강도 해석

본 연구에서 가정한 경계조건 4가지를 적용하여 비선형 유한요소 시리즈 해석을 수행하여 초기항복점과 최종강도, 최종강도 이후의 거동을 각 경계조건에 따라서 검토하였다. 본 연구에서 나타내는 그래프는 응력과 변형률을 항복응력과 항복변형률로 무차원화하여 나타내고 있다. 그래프에 사용된 A점은 탄성좌굴강도 값을, B점은 초기항복점을 그리고, C점은 최종강도 값을 나타내고 있다. Fig.4는 압축하중이 작용하는 판 종횡비 (a/b)가 1.0인 정사각형 판부재에 대해서 경계조건에 따른 판의 거동을 응력-변형률로 나타낸 그래프이다. Fig.4로 부터 알 수 있는 바와 같이 경계조건에 관계없이 하중이 증가하면서 초기좌굴(A)이 발생할 때까지 횡처짐이 없다가 초기좌굴이 발생하면 그때부터 압축하중이 증가함에 따라 횡처짐이 증가하게 되지만 여기서는 초기처짐을 가지고 있는 평판이기 때문에 압축하중이 가해지는 그 순간부터 횡처짐이 증가하게 된다. 초기좌굴이 발생한 후에는 B점에서 초기항복이 발생하며 이때부터 판에 소성이 급진전되어 압축하중에 최대한 견딜 수 있는 C점인 최종강도에 이르게 된다. 이 후 하중을 증가시키지 않아도 계속적으로 변형률은 증가하게 되는데 이는 판의 특성중의 하나인 연성 때문이다. 부재가 국부적으로 항복하더라도 재료의 연성에 의하여 바로 파괴하지 않고 그 부분이 소성 변형하여 더 이상의 하중은 주변의 응력이 상대적으로 낮은 부재에 재분배되기 때문에 구조물이 이와 같이 최종강도 이후의 거동이 존재하게 되는 것이다.⁽¹⁰⁾ 4가지 경계조건에 대한 해석으로서 단순지지조건(SS)에서 가장 낮은 탄성좌굴강도 값을 나타내며 이에 따라 탄성좌굴점에서 면내강성이 다음 식과 같이 0.5E로 일차적으로 감소하게 된다.⁽¹¹⁾

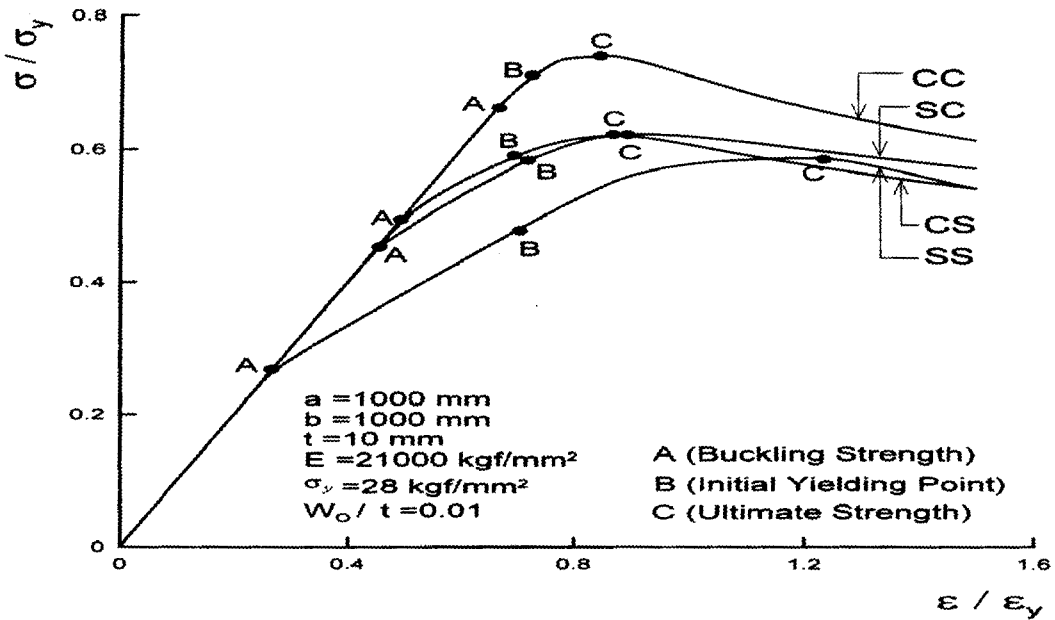


Fig.4 Average stress-average strain curves of a square plate (a/b=1.0)

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{1 + (a/b)^4}{3 + (a/b)^4} E \quad (1)$$

다음으로 고정지지(CC)의 거동을 살펴보면, 초기항복점(B)에서 얼마 지나지 않아 최종강도에 도달하게 된다. 그 만큼 요소의 소성 진행속도가 구속조건에 의하여 급작스럽게 진행되기 때문이다. 하중변이 단순지지이고 비하중변이 고정지지(SC)인 경우와 비하중변이 고정이고 하중변이 단순지지(CS)인 경우에 있어서는 Fig.4에 나타낸 바와 같이 좌굴강도(A), 초기항복점(B) 그리고 최종강도(C)가 거의 일치하면서 유사한 거동을 보이고 있으나 비하중변이 고정(SC)인 경우에 있어서 처짐모드가 1모드에서 2모드로 변하게 된다. 이렇게 처짐모드가 바뀌는 원인은 평판의 하중변의 경계조건은 단순지지이고 비하중변의 경계조건은 구속조건인 상태에서 판의 경계부분에서 직선을 유지한다는 조건에 의하여 판의 경계부분에서 판 경계의 중앙부위에서는 인장력이 발생하고 모서리 부분에서는 압축력이 작용하는 이른바 막응력(membrane stress)에 의한 효과라고 생각한다.⁽¹⁰⁾ 특히, 비하중변이 하중변에 비해 구속조건이 고정에 가까우면 이런 급격한 처짐모드가 발생하게 된다.

3.2 직사각형판의 최종강도 해석

Fig.4의 정사각형판의 거동과는 달리 직사각형판의 거동은 종횡비가 커짐에 따라 비하중변의 경계조건에 따라 거동의 형태가 유사하게 진행된다. 예를 들면, 비하중변이 고정조건인 CC와 SC의 거동을 보면 알 수가 있다. Fig.5의 그래프는 판 종횡비(a/b)가 2.0인 직사각형 판의 4가지 경계조건에 대한 거동을 보여주고 있다. 직사각형판의 거동은 정사각형판과는 다른 형태를 보여주고 있으며 하중변이 고정조건이면 최종강도이후 거동이 하중변이 단순지지인 경우보다 강성감소율이 크다는 것을 확인할 수가 있다. 네변이 고정지지(CC)인 경우에 있어서는 정사각형판에서의 거동은 초기항복이 일어나는 시점과 최종강도가 일어나는 시점의 간격은 매우 짧다. 그러나, 종횡비(a/b)가 클수록 이 간격은 점점 멀어지게 된다는 것을 알 수가 있다.

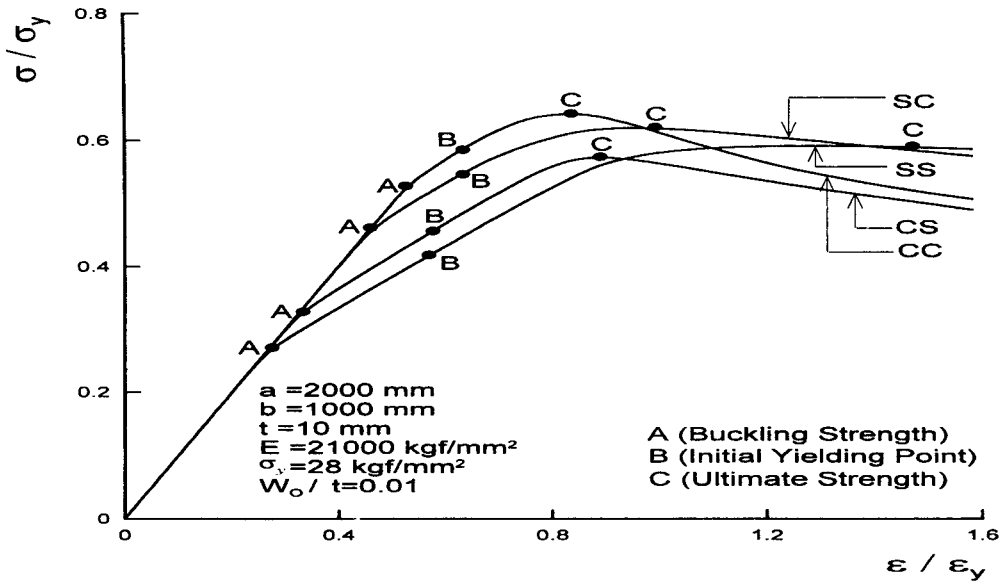


Fig.5 Average stress-average strain curves of a rectangular plate ($a/b=2.0$)

그리고, 하중변의 경계조건에 관계없이 비하중변이 고정인 경우와 단순지지인 경우에 있어서 서로 다른 거동 형태를 보이고 있다. 이것은 비하중변의 경계조건에 따라서 좌굴강도가 다르게 나타나기 때문이라고 판단된다.⁽¹²⁾ 정사각형 판의 거동에서는 단순+고정지지(SC)와 고정+단순지지(CS)조건이 유사한 거동을 보였지만 직사각형 판의 거동에서는 판 종횡비(a/b)가 커질수록 단순+고정지지(SC)와 고정지지(CC)의 처짐모드는 3모드로서 처짐 양은 다를지라도 처짐모드가 일치함으로서 응력-변형률 그래프에서 거동이 유사하게 나타난다. 물론, 여기서 말하는 유사한 거동이라는 것은 미리 밝혀둔 A, B, C점의 위치와 면내강성을 나타내며 최종강도까지를 나타내고 있다.

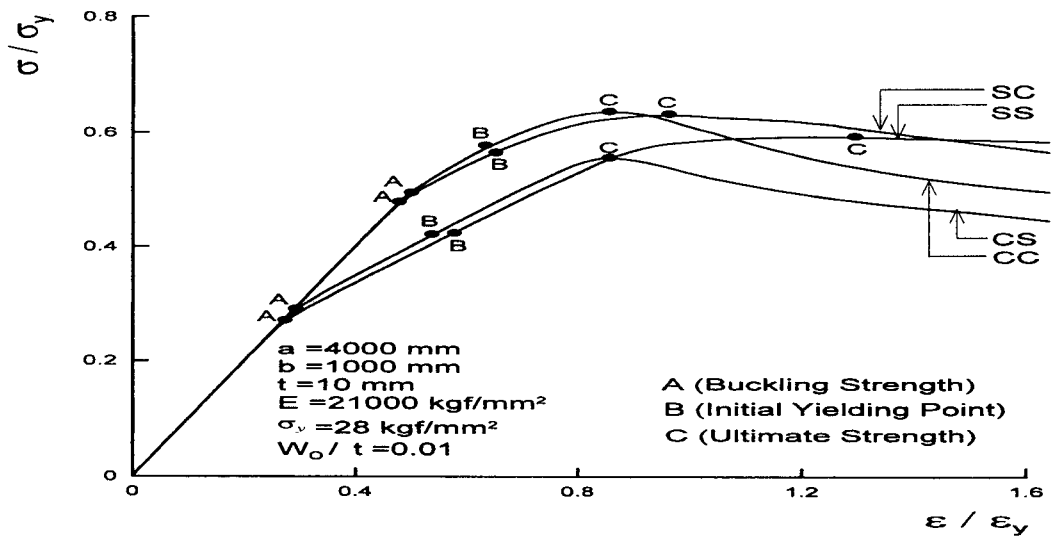


Fig.6 Average stress-average strain curves of a rectangular plate ($a/b=4.0$)

최종강도 이후의 거동은 또한 하중변의 경계조건에 따라 다르게 거동한다. 판 종횡비(a/b)=4.0인 부재에 대한 각 경계조건에 대한 판의 거동을 Fig.6에 나타내고 있다. Fig.5의 그래프와 마찬가지로 비하중변의 경계조건에 따라 최종강도 이전까지의 거동이 유사하다는 것을 알 수가 있다. 비하중변이 단순지지조건에서는 4모드이고 고정지지조건에서는 6모드로서 하중변의 경계조건에 관계없이 동일한 처짐모드를 나타낸다. 또한 하중변이 고정지지조건이면 최종강도 이후의 강성감소율이 더 급격해진다는 것도 알 수가 있다. 이 그래프에서는 고정지지조건(CC)과 단순+고정지지조건(SC)의 탄성좌굴강도(A), 초기항복점(B) 그리고 최종강도(C)는 비슷한 시점에서 발생하고 있다. 단순지지조건(SS)과 고정+단순지지조건(CS)에서는 탄성좌굴강도(A)는 거의 같은 지점에서 나타나며 초기항복점(B)은 유사한 지점에서 발생한다. 그러나, 최종강도에 있어서는 단순지지(SS) 조건이 CS조건보다 더 높게 평가됨을 알 수 있다. 이는 판 종횡비(a/b)가 커지면서 하중변이 고정인데다 비하중변이 단순지지가 될 경우 비하중변의 구속조건이 하중변의 구속조건보다 적기 때문이라고 판단된다.⁽¹³⁾

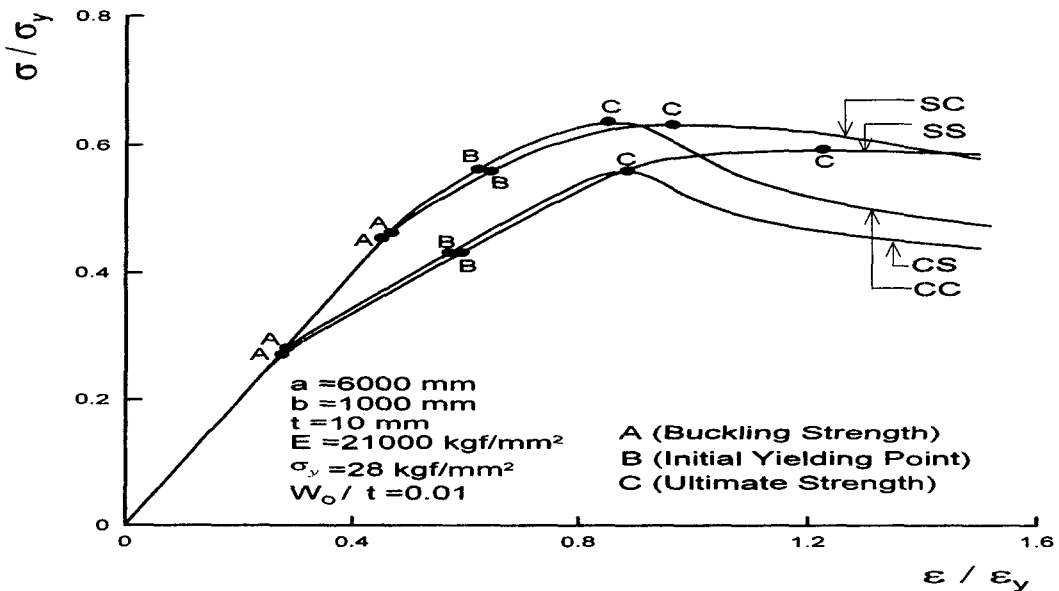


Fig.7 Average stress-average strain curves of a rectangular plate ($a/b=6.0$)

판 종횡비(a/b)=6.0인 부재에 대한 각 경계조건에 대한 판의 거동을 Fig.7에 나타내고 있다. 종횡비(a/b)가 커짐에 따라 비하중변의 특성에 따라 최종강도까지의 거동에 있어서 거의 유사하게 전개된다. 특히, 미리 지정하였던 A, B, C점의 발생시점이 유사하게 나타남으로서 최종강도거동까지 유사하게 됨을 알 수가 있다. 이러한 거동형태는 지지조건에 따른 좌굴계수를 보면 알 수가 있다. 비하중변의 경계조건이 단순지지일 경우에는 하중변의 경계조건에 관계없이 종횡비(a/b)가 증가하면 좌굴계수가 4.0으로 수렴해가고 비하중변의 경계조건이 고정지지인 경우에는 7.4로 수렴해간다.⁽¹²⁾ 따라서, 판의 종횡비(a/b)가 커질수록 비하중변의 경계조건이 같으면 같은 좌굴계수값으로 수렴해가는 거동을 보이게 되는 것이다. 또한 Fig.7로부터 알 수 있는 바와 같이 하중변이 고정인 경우에는 단순지지인 경우보다 최종강도 이후에 급격한 강성변화를 보이고 있음을 알 수가 있다. 이것은 하중변이 고정인 경우에 단순지지인 경우보다 구속에 의한 소성변형이 크게 확산되기 때문이라고 판단된다.

이와같은 시리즈해석 결과를 바탕으로 하여 경계조건과 판 종횡비(a/b)에 따른 좌굴강도 및 최종강도를

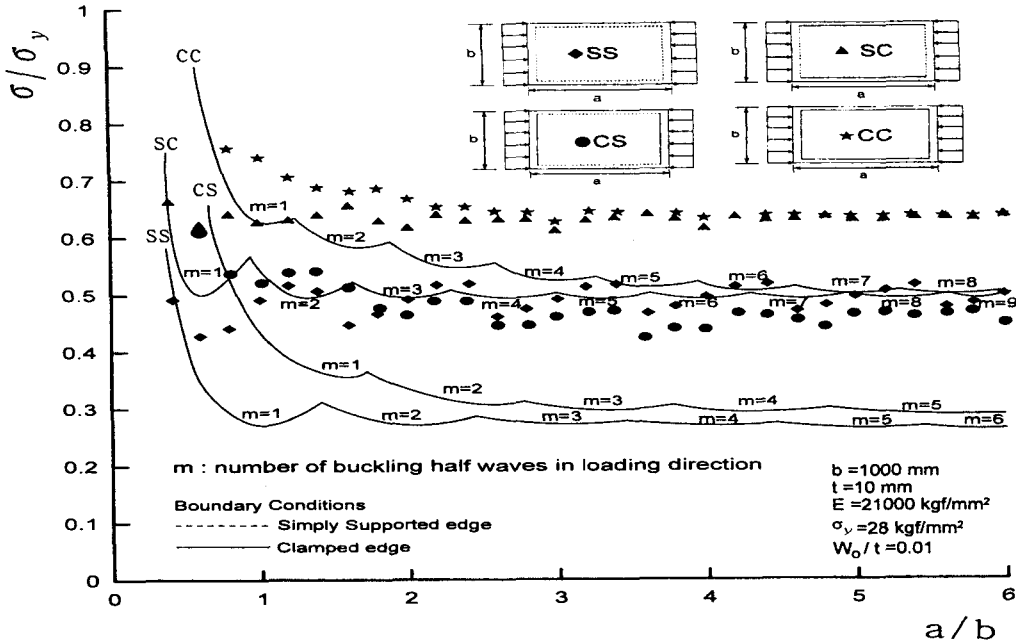


Fig.8 Effect of boundary conditions on the buckling & ultimate strength of a rectangular plate under thrust

Fig.8에 나타내고 있다. Fig.8에서 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 판의 좌굴모드와 최종강도의 처짐모드는 같게 나타나지만 하중변이 고정이고 비하중변이 단순지지(CS)조건에서는 천이현상(Snap-through)이 발생하면서 모드의 변화가 고유좌굴모드와 다른 2모드씩 증가하는 모드를 나타내고 있다. 비하중변의 특성에 따라서 좌굴모드와 최종강도모드는 같게 나타나고 있으며 비하중변이 고정인 SC와 CC조건에서는 판 종횡비(a/b)가 2.0 이상이면 최종강도 분포가 거의 같다는 것을 알 수가 있으며 판부재의 최종강도는 비하중변의 특성에 따라 거동이 지배됨을 확인할 수가 있다. 또한, 판종횡비(a/b)가 2.0이상이면 좌굴강도는 SS조건이 가장 낮게 평가되지만 최종강도는 CS조건이 가장 낮게 평가되고 있다. 따라서, 탄소성설계개념을 도입하고자 할 때는 CS조건을 가지고 평가하는 것이 타당하다고 판단된다.

5. 결론 및 향후연구과제

본 논문에서는 면내압축하중을 받는 판 부재에 대하여 종횡비(a/b)와 주변 경계조건을 변화시키면서 탄소성대변형 시리즈해석을 수행하여 경계조건에 따른 최종강도와 최종강도 이후의 평판의 거동에 미치는 영향을 규명하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 직사각형 판에서는 비하중변의 경계조건이 같으면 하중변의 경계조건에 관계없이 판 종횡비(a/b)가 커짐에 따라 최종강도까지의 거동이 거의 같게 나타난다.
- 2) 최종강도 이전의 거동까지는 비하중변의 경계조건에 따라 같은 거동을 보이고 최종강도 이후의 거동에 있어서는 하중변의 경계조건에 따라 같은 거동을 보인다.
- 3) 최종강도 이후에서는 하중변이 고정인 지지조건의 판의 거동은 강성이 급격히 감소되는 거동을 보인다. 즉, 하중변이 고정인 경우에는 초기항복점에서 발생한 소성화의 전개가 빠르게 진행되어 면내강성이 감소

한다.

- 4) 좌굴강도에서는 단순지지조건이 가장 낮게 평가되지만 최종강도에서는 하중변이 고정이고 비하중변이 단순지지(CS)인 경우가 가장 낮게 평가된다. 따라서, 탄소성설계를 실시할 경우에는 이러한 경계조건을 적용해야한다.

향후 연구과제로서는

- 판의 좌굴강도 및 최종강도에 대한 주변요소의 회전구속과 비틀림 효과의 규명
- 면내조합하중을 받는 판의 좌굴 및 최종강도에 대한 횡압력의 효과 규명 등이 필요하다.

후 기

본 연구를 수행하는데 지원을 아끼지 않은 과학재단의 첨단조선공학연구센터(ASERC)에 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 高在用, 初期たわみを有する薄板の2次座屈に関する研究, 日本造船學會論文集, 第 176號, pp.309-318, 1994.
2. 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 高在用, 面内壓縮荷重を受ける矩形板の大たわみ舉動に関する研究, 部造船會會報, 第 89 號, pp.179-190, 1995.
3. Yao, T. and Nikolov, P.I., Stiffness of Plates after Buckling, 關西造船協會誌, 第 215號, pp.137-146, 1991.
4. Yao, T., Nikolov, P.I. and Miyagawa, Y., Influence of Welding Imperfections on stiffness of Rectangular Plate Under Thrust, Mechanical Effects of Welding IUTAM Symp. (Eds.) Karlsson, L. Limdgren, L.-E. and Jonsson, M., Springer Verlag, pp261-268, 1992.
5. 고재용, 최익창, 호장증분법에 의한 판구조물의 2차좌굴거동에 관한 연구, 한국전산구조공학회지, 제42권 제4호, pp.209-218, 1998.
6. 백점기 외, 판부재의 탄소성대변형 유한요소해석 문제에서의 수렴기법에 관한 고찰, 한국전산구조공학회지, 제2권, 제3호, pp97-103, 1989.
7. 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.
8. ANSYS User's Manual Book (Version 5.6).
9. 백점기, 선체구조의 좌굴, 최종강도에 관한 연구동향, 한국전산구조공학회지, 제 10권, 제2호, 1997.6.
10. 고재용, 2차좌굴을 포함하는 선체판의 대변형거동에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제23권, 제4호, pp.147-155, 1999.
11. 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 高在用, 山本元道, 2次座屈が板の座屈・塑性崩壊舉動に及ぼす影響に関する研究, 日本造船學會論文集, 第 177 號, pp.347-355, 1995.
12. O.F.Huges, Ship Structural Design : A Rationally-Based,Computer-Aided : Optimization Approach, John Willey & Sons, 1983.
13. J.Y.Ko , T. Yao and J.K.Paik, Secondary Buckling Behavior of Plate under In-plane Compressive Loding, Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol.33, No.3, August 1996.