

선체판부재의 최종강도에 대한 횡압력의 영향에 관한 연구

A Study on the Lateral Pressure Effect for Ultimate Strength of Ship Platings

박 주 신* 고 재 용** 이 준 교*** 이 경 환***
Park, Joo-Shin Ko, Jae-Yong Lee, Jun-Kyo Lee, Kyung-Hwan

ABSTRACT

The ship plating is generally subjected to combined in-plane load and lateral pressure loads. In-plane loads include axial load and edge shear, which are mainly induced by overall hull girder bending and torsion of the vessel. Lateral pressure is due to water pressure and cargo. These load components are not always applied simultaneously, but more than one can normally exist and interact. Hence, for more rational and safe design of ship structures, it is of crucial importance to better understand the interaction relationship of the buckling and ultimate strength for ship plating under combined loads. Actual ship plates are subjected to relatively small water pressure except for the impact load due to slamming and panting etc. The present paper describes an accurate and fast procedure for analyzing the elastic-plastic large deflection behavior up to the ultimate limit state of ship plates under combined loads. In this paper, the ultimate strength characteristics of plates under axial compressive loads and lateral pressure loads are investigated through ANSYS elastic-plastic large deflection finite element analysis with varying lateral pressure load level.

1. 서 론

선체가 파랑하중을 받게되면 선체구조를 구성하는 판부재에는 일반적으로 면내하중과 횡하중이 작용하게 된다. 특히, 선체가 호강모우멘트를 받는 조건일 경우에는 선체에는 수압과 동시에 압축력이 작용하게 된다. 지금까지의 이에 관한 연구로서는 Paik, J.K(1998), Yamamoto(1970), Yao.T(1999)등에 의해서 연구되었으며, 선체 주요 종횡비에 대해서 횡하중의 크기를 변수로 하여 압축최종강도에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나, 선체에는 정수압 뿐만 아니라 Slamming이나 Panting 처럼 순간적인 동적충격압을 받게 되면 정수압보다 적은 압력을 받더라도 구조부재에 손상을 줄 수가 있다.

* 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 박사과정 (Email : scv2434@mmu.ac.kr)

** 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 (Email : kojy@mmu.ac.kr)

*** 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 석사과정 (Email : jklee96@mmu.ac.kr)

*** 목포해양대학교 해양시스템공학부 석사과정 (Email : lkh7908@mmu.ac.kr)

본 연구에서는 횡하중이 적은 경우에 대해서도 고려를 하고 있으며, 박판 부재에서 주로 발생하게 되는 2차좌굴거동을 고려한 최종강도 해석을 다루고 있다. 선체판의 탄소성대변형 거동에서 수압의 영향은 일반적으로 종횡비에 따라서 다르게 나타나게 된다.⁽¹⁾ 판종횡비가 1.0인 경우 수압이 작용하여 발생한 처짐과형과 압축하중이 단독으로 작용하였을 때의 처짐은 거의 일치하고 있으며, 수압과 동시에 압축력이 작용하게 되면 압축력의 증가와 함께 처음부터 처짐이 서서히 증가하여 명확한 좌굴현상은 나타나지 않고 압축력이 작용하는 처음부터 서서히 면내강성이 감소하게 된다. 또한 선체구조는 용접 및 절단등의 열가공에 의해 건조하게 되면서 필연적으로 비대칭적 초기결함이 발생하게 된다. 본 연구에서는 발생 가능한 초기결함 형태 중 실제 계측된 데이터를 적용하여 실제 판부재의 조건을 최대한 이상화 하였다.

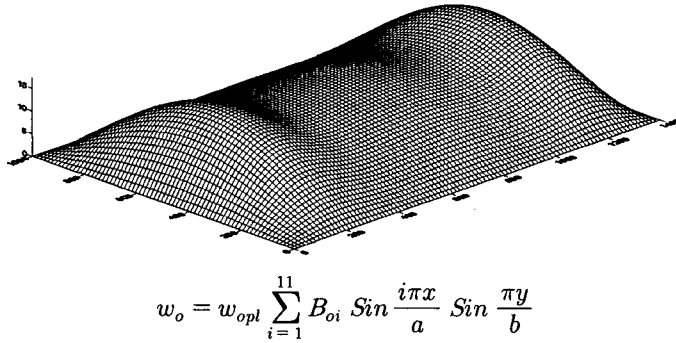


Fig.1 Typical pattern of welding-induced initial deflection in ship plating

Fig.1에서는 판종횡비(a/b)가 1.4인 경우에 본 연구에서 적용한 초기처짐이 적용된 상태의 형상을 나타내고 있다. 판의 전체초기처짐식에 처짐계수 B_{oi} 는 다음과 같이 종방향으로는 11개의 처짐계수를 사용하여 최소 포텐셜에너지원리를 이용하여 이상화 하였다. 이러한 비대칭적인 초기처짐 형상을 본 해석 시스템(ANSYS)에 적용하기 위하여 모델데이터의 좌표정보를 FOTRAN 코딩을 통하여 변환하여 초기처짐이 적용된 상태의 모델데이터를 해석에 적용하였다.

$$B_{o1} = -1.346, B_{o2} = -0.090, B_{o3} = -0.224, B_{o4} = -0.036,$$

$$B_{o5} = -0.087, B_{o6} = -0.082, B_{o7} = 0.102, B_{o8} = -0.036,$$

$$B_{o9} = -0.014, B_{o10} = 0.026, B_{o11} = -0.028$$

일반적인 판에서는 절단, 용접 등의 열 가공에 의해 초기결함이 처음부터 잔류응력이나 초기처짐과 같이 존재하게 된다. 초기결함의 존재여부와 초기결함의 분포 형태에 따라 판의 비선형거동에 상당한 영향력을 미치게 되며 거동형태 또한 복잡하게 나타난다. Ueda, Y & Yao, T(1985)는 실제 6만톤급 벌크캐리어와 5,500대 규모의 카 캐리어의 상갑판 판넬 총 33가지 모델에서 용접 후 발생한 판재의 초기처짐형상을 실제 계측하였다. 계측된 판넬의 종횡비는 1.0-5.0이며, 세장비(b/t)는 20-100이고 최대 초기처짐은 판재 두께의 50%이내에서 차등 적용하여 탄소성대변형 유한요소 시리즈 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 열가공 후 발생하는 초기결함 조건을 이상화 하기 위해서 Ueda & Yao(1985)⁽²⁾의 실제 계측 초기처짐형상 중 대표적인 초기처짐형상을 해석에 적용하였고, 횡하중의 크기에 따라 발생하게 되는 2차좌굴거동을 고려한 압축최종강도 거동에 대해서 분석하였다.

2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

선체판의 비선형 탄소성대변형거동을 해석하기 위해서 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS V9.0 사용하였다. 본 연구에 사용된 유한요소는 4절점을 가진 사각형 쉘(shell) 요소이고 비선형 해석제어 기법으로는 박판 부재의 탄소성좌굴 거동에 나타나게 되는 2차좌굴에 의한 Snap-through와 같은 천이거동을 정확하게 해석하기 위하여 Full Newton-Raphson Method와 Arc-length method를 병용하여 해석하였다. 이때 Arc-length method는 하중제어와 변위제어를 동시에 제어하게 되며 하중-변위응답 거동이 불안정점을 지나는 경우, 접선 강성 행렬의 값이 음인 경우 수치적으로 안정된 해를 찾을 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 분기점(Bifurcation Point)이 존재하지 않는 경우 가장 적합한 방법이다. 비선형 좌굴해석을 수행할 때 사용한 해석 기법은 Sparse direct solver를 이용하였다. 수렴기준에 있어서는 반복구간에서의 하중과 모멘트의 오차의 SRSS(Square root sum of the squares)값이 적용된 하중의 SRSS값의 0.03%가 되었을 때 수렴한 것으로 설정하였으며, 조합하중이 작용하는 해석이므로 하중응답 계산 시 각 해석구간마다 부구간으로 300step을 설정하였다. 초기 Arc radius의 값은 min 0.0001에서 max 15까지의 범위를 설정하여 해의 수렴도가 실제 하중-변위 응답에 가깝도록 설정하였다.

2.2 해석 모델링

본 연구에서는 조합하중(횡하중+압축하중)이 작용하는 선체판을 대상으로 탄소성대변형 비선형 좌굴해석을 실시하였고, 해석에 사용된 판 종횡비(a/b)는 1.0, 1.4, 2.5, 3.6, 4.4인 사각형판의 해석에 있어서 실제 DWT 172K 산적화물선 이중저 구조에서 사용되고 있는 보강재와 보강재 사이의 평판을 모델링에 적용하였다. 판 주변 경계조건은 네변 단순지지조건으로 이상화 하였고 면외하중인 횡하중과 면내하중 성분인 종방향 압축하중이 작용하는 조합하중조건을 가정하였다. 이때 면외 변형에 대해서 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였고 용접이나 절단등의 열가공에 의한 판의 부가 처짐량을 초기처짐모드로 가정하여 적용하였다.

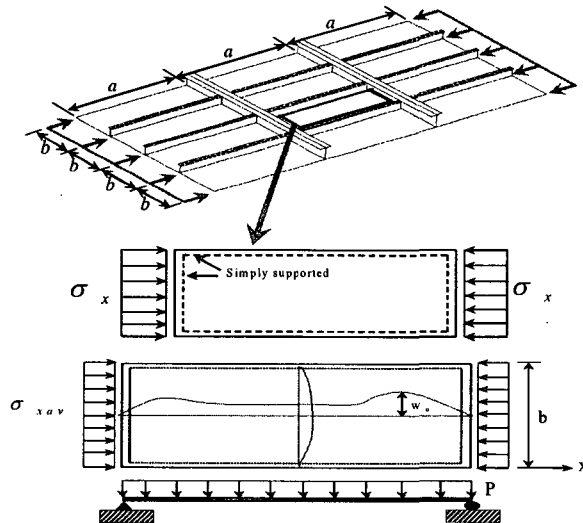


Fig.2 A simply supported plate with non-symmetric initial deflection under uniaxial compression and lateral pressure load

Fig.2에서는 하중조건과 지지조건 및 F.E.A 모델을 나타내고 있다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 AH36 고장력강이고 판 폭(b)=1000 mm, 판 두께(t)=10 mm, 탄성계수(E)= 205,8GPa, 포아송비(ν)=0.3, 항복강도=352.8 MPa, $W_{opt} = 0.1 \times \beta^2 \times t$ 를 적용하였다(Smith's average level).

3. 수치해석 및 고찰

Fig.3에서는 유한요소해석에 앞서 조합하중(횡하중+압축하중)이 작용하는 경우에 대해서 종축은 응력을 항복응력으로 무차원 하였고, 횡축은 작용된 횡하중을 나타내고 있으며, 선행연구 자료와의 비교를 나타내고 있다. 비교 대상은 Yamamoto et al, 1970의 실험결과와 ALPS/ULSAP의 FEM 결과 그리고 본 연구에서 사용한 ANSYS결과치이다. Yamamoto의 실험에서는 횡하중의 크기가 증가함에 따라 최종강도 변화가 불규칙적으로 나타나고 있으며 ALPS/ULSAP의 계산 결과치는 횡하중이 증가함에 따라 압축최종강도는 규칙적으로 감소하고 있다. 본 연구의 유한요소해석 결과치에서도 횡하중의 작용 크기에 따라 압축최종강도는 상대적으로 낮게 평가되는 경향을 나타내고 있으며 ALPS/ULSAP의 결과치와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig.4에서는 판중횡비가 1.0인 정사각형판에 대해서 고유치좌굴모드를 적용하고 판내 최대초기처짐이 0.01mm인 미소 초기처짐 상태에서의 조합하중에 대한 탄소성대변형 거동 결과를 나타내고 있다.

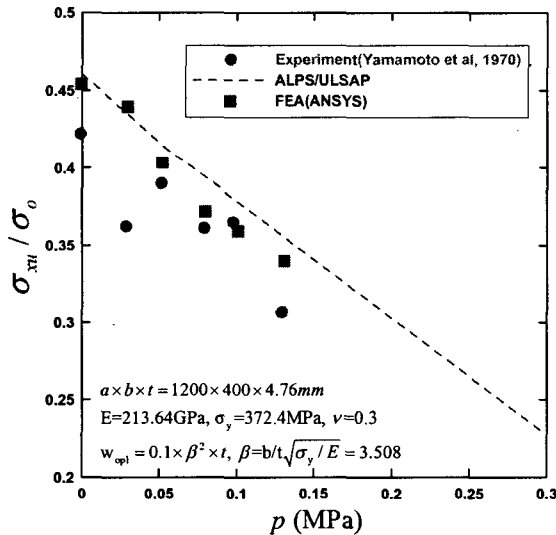


Fig.3 Comparison of the FEA(ANSYS) and ALPS/ULSAP method with the Yamamoto collapse test results for plating under combined longitudinal axial compression and lateral pressure loads

정사각형판에서는 횡하중의 크기가 압축최종강도에 미치는 영향이 적게 나타나고 있으며, 횡하중의 크기가 크게 작용한 경우인 water head(5m)에서의 압축최종강도가 횡하중이 적게 작용한 water head(2.5m)의 경우보다 높게 평가되었다. 이러한 현상은 판중횡비가 1.0인 정사각형판에서는 횡하중의 크기가 비교적 적은 경우에는 초기항복 이후에도 상대적으로 큰 인장막응력이 작용하여 최종적인 판의 붕괴거동에 저항요소로 작용함으로써 최종강도를 상당히 높게 평가하는 것으로 사료된다.

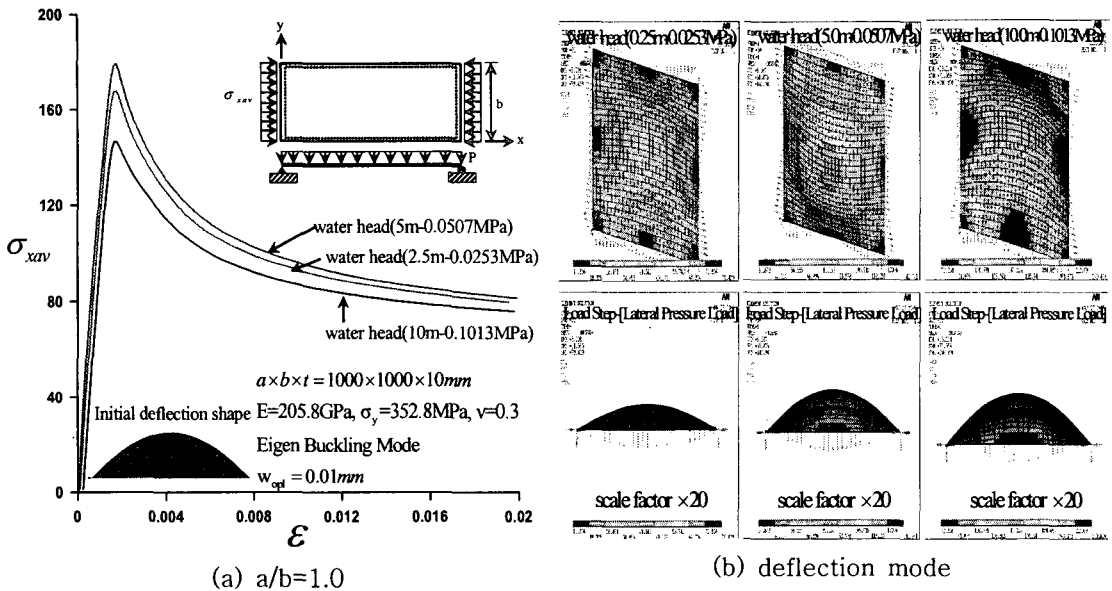


Fig.4 Comparison of compressive stress-strain curves with small initial deflection for aspect ratio 1.0

Fig.4의 응력-변형을 관계의 그래프에서의 거동의 원인을 규명하기 위하여 Fig.5에서는 횡하중의 크기에 따라서 횡하중이 적용된 상태에서의 처짐모드와 응력분포도를 나타내고 있다. 네변단순지지조건에서는 네변모서리 부분에서 압축응력에 의해서 응력집중이 발생하고 있으며, 횡하중의 크기가 0.1013MPa이 작용하면 횡하중에 의해 네변 모서리에서 소성항복을 하게 되며 횡하중에 의한 처짐량은 횡하중의 크기에 비례하고 있다.

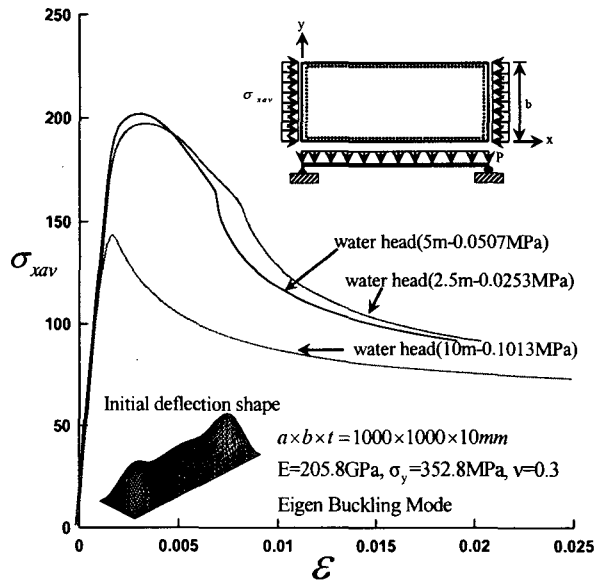


Fig.5 Comparison of compressive stress-strain curves for with eigen buckling mode for aspect ratio 1.0

Fig.5에서는 Fig.4의 제원을 동일 시 하고 판의 최대초기처짐값을 Smith's average level을 적용하였을 경

우의 탄소성대변형 거동을 나타내고 있다. 상선구조에서 발생할 수 있는 중간크기의 최대초기치짐값을 적용한 상태에서의 거동을 살펴보면 횡하중의 크기가 0.1013MPa에서는 횡하중에 의한 소성항복이 압축하중이 작용하기도 전에 판내 모서리와 중앙부분에서 발생하였다. 이에 따라 압축최종강도는 현저히 낮게 평가되고 있다. 그러나, 횡하중의 크기가 0.0507MPa와 0.0253MPa에서는 횡하중의 작용크기는 2배이지만 압축최종강도는 오히려 0.0507MPa의 횡하중이 작용한 상태에서 최종강도는 더 높게 평가되었다. 그러나, 최종강도 이후의 거동에 있어서 면내강성 감소율은 더 크게 저하하고 있다. Fig.5에서도 알 수 있듯이 횡하중의 크기가 0.0253MPa 혹은 0.0507MPa은 상대적으로 적은 횡하중의 크기에 따라 횡하중과 압축하중이 동시에 작용하는 매커니즘에서는 횡하중의 작용 크기가 압축최종강도를 결정하는 요소가 되지 못하고 있다. 그러나, 횡하중의 크기가 위 경우보다 크게 작용된 0.1013MPa에서는 횡하중이 작용한 순간부터 면내소성항복이 발생하여 압축하중이 작용하게 되면 최종강도는 현저히 낮게 나타나고 있다.

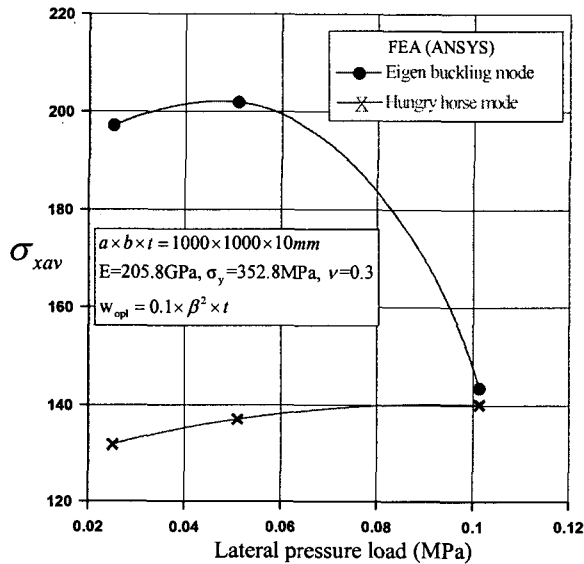


Fig.6 Comparison of compressive stress versus lateral pressure load according to the initial deflection type for aspect ratio 1.0

정사각형판(판종횡비 1.0)에서의 고유치좌굴모드와 열가공에 의한 초기치짐형상을 적용한 경우에 대해서 종축은 압축최종강도를 횡축은 작용된 횡하중의 크기로 Fig.6에 나타내고 있다. 고유치좌굴모드를 적용한 경우에는 비대칭 초기치짐모드를 적용한 경우에 비해서 최종강도를 상당히 높게 평가하고 있으며, 횡하중의 크기가 0.1MPa 이상인 경우에 대해서는 초기치짐의 형태의 영향을 거의 받지 않고 있다. 이는 상대적으로 횡하중의 크기가 증가하게 되면 횡하중에 의해서 압축최종강도는 어느 정도 결정되어진다고 말할 수 있다.

Fig.7-a에서는 정사각형판에서 실제 열가공후 발생할 수 있는 초기치짐형상을 적용한 상태에서 횡하중의 크기를 변수로 하여 응력-변형률 관계로 나타내고 있다. 적용된 초기치짐의 형상이 hungry-horse mode라고 지칭하는데 이 초기치짐의 형상으로 인하여 횡하중이 작용하게 되면, 면외방향으로 치짐이 발생하게 된 상태에서 종방향 압축하중이 작용하면 횡하중이 작용된 크기에 반비례하는 최종강도 분포를 나타나게 된다. 그러나, 횡하중이 작용된 크기가 클수록 최종강도 이후의 면내강성 감소는 크게 나타나고 있다.

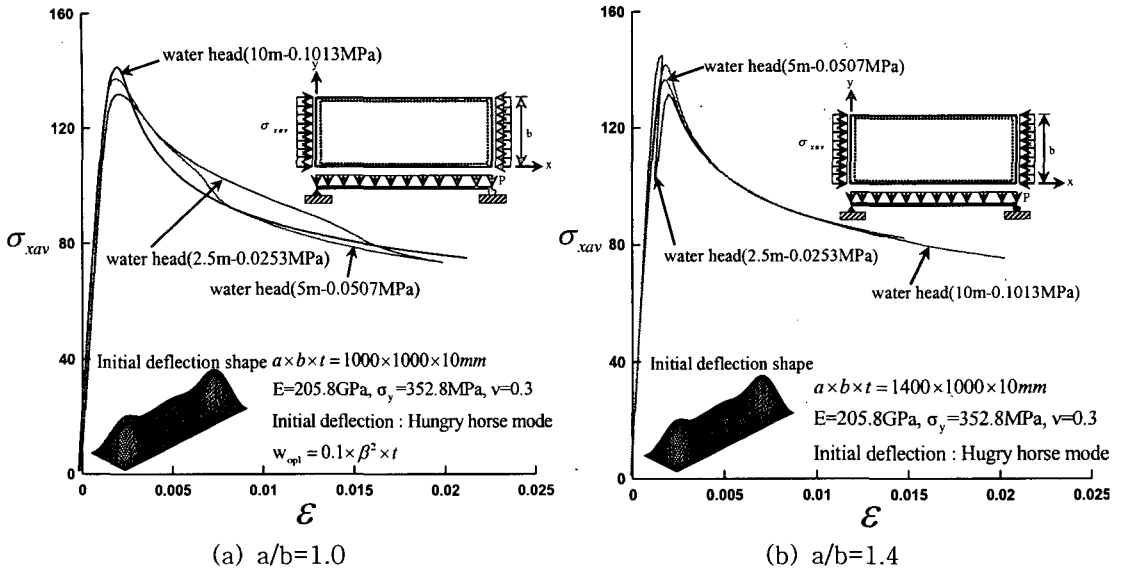


Fig.7 Comparison of compressive stress-strain curves with hungry-horse mode for aspect ratio 1.0 and 1.4

Fig.7-b에서는 좌굴모드 분기형 종횡비인 1.4에서의 횡하중의 크기를 변수로 한 탄소성대변형 거동을 응력-변형을 관계로 나타내고 있다. 횡하중이 작용된 크기가 작을수록 압축최종강도는 높게 평가하고 있으며, 수압이 가장 적게 작용된 0.025325MPa에서는 secondary buckling이 발생하면서 급격한 좌굴모드 변화를 수반하고 있다.

Fig.8-a에서는 판종횡비 3.6인 경우에 대해서 횡하중의 크기를 변화시켜가면서 탄소성대변형 거동의 결과를 응력-변형을 관계로 나타내고 있다. 고차 종횡비가 되면서, 횡하중의 크기가 증가하면 할수록 압축최종강도는 상대적으로 낮게 평가하고 있다. 그러나, 횡하중의 크기가 작은 0.025325MPa의 경우에는 secondary buckling이 발생하면서 급격한 처짐모드의 변화와 함께 면내강성 감소로 인하여 최종강도를 낮게 나타내고 있다.

Fig.8-b에서는 횡하중이 0.025325MPa이 작용하고 압축하중이 작용한 하중조건에 대한 secondary buckling 거동을 나타내고 있다. 횡하중이 작용하였을 때 내변 모서리에서 발생한 응력집중이 압축하중이 작용하면서 처짐모드 방향으로 급격히 전개되는 현상을 보이고 있다. A점에서는 비대칭적 3모드를 나타내던 판이 B점에서는 3모드와 4모드의 중간적인 모드를 그리고 C점에서는 비대칭 5모드로 급격하게 변하면서 판내 강성 또한 급격하게 감소하게 된다. secondary buckling의 영향을 받지 않았으면 최종강도는 횡하중이 0.05065MPa이 작용된 경우보다 높게 형성되었을 것이지만 secondary buckling이 발생하면서 압축 최종강도 거동은 아주 상이하게 나타나고 있다. 최근 선박설계 기술의 발달로 인하여 선체판두께는 점점 감소하고 있으며, 박판부재의 좌굴 및 최종강도 해석 시에는 secondary buckling 거동을 고려한 해석을 해야만 이와 같은 결점을 보완할 수가 있게 된다.

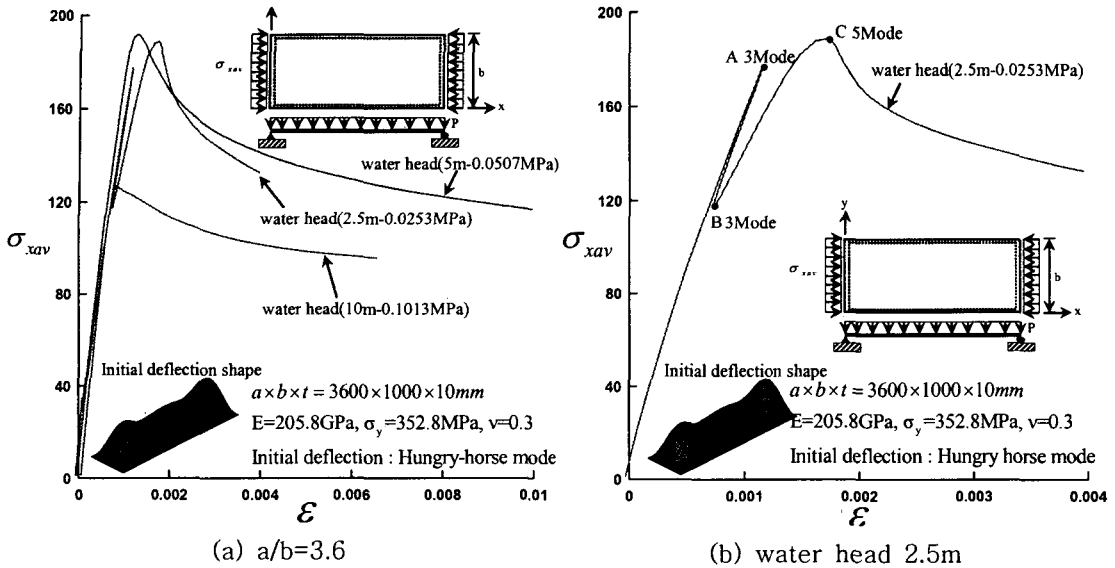


Fig.8 Comparison of compressive stress-strain curves with hungry-horse mode for aspect ratio 3.6

5. 결론

본 논문에서는 횡하중과 압축하중하중을 받는 네변 단순지지된 선체판의 secondary buckling 거동을 고려하여 횡하중의 크기에 따른 압축최종강도에 미치는 영향을 분석하였다. 사용된 유한요소해석 코드는 ANSYS와 FOTRAN이며 비교에 사용된 FEM 코드는 ALPS ULSAP이다. 조합하중이 작용 할 때 열가공 후 발생하게 되는 초기처짐 데이터를 이용하여 초기처짐의 영향까지도 고려한 상태에서 유한요소 시리즈해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 차후 이 부분에 관한 실험이 병행되어 횡하중의 영향을 세밀히 분석할 필요성이 있다.

- 1) 열가공 후 발생하게 되는 초기처짐 데이터를 적용하고 횡하중의 크기가 비교적 작은 0.025325MPa이 작용하게 되면 압축최종강도 거동 시 secondary buckling이 발생하게 되며 이때 처짐모드변화를 수반하면서 최종강도를 상대적으로 낮게 평가한다.
- 2) 고차 중횡비로 가면 횡하중의 크기가 증가하면 할수록 압축최종강도는 낮게 평가된다.
- 3) ALPS/ULSAP과 ANSYS의 결과는 횡하중의 크기가 0.1MPa이상에서는 잘 일치하나 횡하중의 크기가 적으면 ALPS/ULSAP의 결과가 상당히 높게 평가하고 있다.
- 4) Eigen buckling mode를 적용하였을 경우에는 실제 판에 존재하게 되는 초기처짐 파형을 적용한 결과보다 최종강도를 높게 평가하는 결점을 보이고 있다.
- 5) secondary buckling 거동을 고려한 비선형 좌굴해석 시에는 Arc-length method를 적용하여야 하며, 초기 arc radius와 각 substep의 분할에 따라서 해석의 정도가 좌우된다.
- 6) 작용된 횡하중의 크기가 증가하여도 압축최종강도를 높게 평가하는 원인은 초기항복 이후 큰 인장막응력이 판의 붕괴에 저항요소로 작용하기 때문이다.

후 기

이 연구는 산업기술재단의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

- [1]. Jeom Kee Paik, Anil K. Thayamballi and Bong Ju Kim : "Advanced Ultimate Strength Formulations for Ship Plating Under Combined Biaxial Compression/Tension, Edge Shear, and Lateral Pressure Loads", Marine Technology, Vol.38, No.1 January 2001, pp. 97-112.
- [2]. 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,
- [3]. 백점기, Anil K. Thayamballi, 이상곤 : " 조합하중을 받는 선체 판부재의 최종강도 상관관계 특성" 부산대학교 생산기술연구소논문집, 제55집, pp.285-295, 1998년 12월,
- [4]. Supple, W.J. : "Change of Wave-Form of Plates in the Post-Buckling Range", Int. J.Solids Structures, Vol.6, pp.737-745, 1970.
- [5]. Uemura, M. and Byon, O. : "Secondary Buckling of a Flat Plate under Uniaxial Compression ; Part I : Theoretical Analysis of Simply Supported Flat Plate", Int. J Non-Linear Mech., Vol.12, No.6, pp.355-370, 1976.
- [6]. Uemura, M. and Byon, O. : "Secondary Buckling of a Flat Plate under Uniaxial Compression ; Part II : Analysis of Clamped Plate by F.E.M and Comparison with Experiments", Int. J Non-Linear Mech., Vol.13, No.1, pp.1-4, 1978.
- [7]. Nakamura, T. and Uetani, K. : "Secondary Buckling and Post-Secondary Buckling Behavior of Rect-angular Plates", Inct. J. Mech. Sci., Vol.21, pp.265-286, 1978.