

복잡한 형상의 초기처짐을 가진 선체판의 압축최종강도에 관한 연구

고재용* · 박주신** · 이계희*** · 박성현****

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수, ** 목포해양대학교 대학원, *** 목포해양대학교 해양시스템공학부 전임강사
**** 목포해양대학교 운송시스템학부 조교수

A Study on the Compressive Ultimate Strength of Ship Plating with Complicated Shape of the Initial Deflection

Jae-Yong Ko* · Joo-Shin Park** · Kye-Hee Lee*** · Sung-Hyeon Park****

* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University
** Graduate school of Mokpo National Maritime University
*** Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University
**** Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University

요약 : 최근 강구조물과 해양구조물에 있어서 박판 부재인 고장력강이 널리 사용되면서 좌굴이 발생할 가능성이 커지고 있다. 특히 선박구조는 상자형 박판 구조물로서 용접이나 절단등의 열 가공에 의하여 필연적으로 판부재에 초기처짐이 발생하게 된다. 이러한 초기처짐은 박판부재가 좌굴을 동반한 복잡한 비선형 거동을 나타낼 때 악영향을 미치는 요소이다. 결과적으로 선체구조물이나 해양구조물에 안정성과 정확성을 부여하기 위해서는 발생 가능한 초기처짐을 이상화 하여 2차좌굴을 고려한 초기구조설계에 반영하여야 한다. 본 연구에서는 종방향 압축하중이 작용하고 네변 단순지지조건인 판에 실제 계측된 여러 가지 초기처짐형상을 적용한 유한요소 시리즈 해석을 하였다. 해석방법으로는 범용유한요소프로그램인 ANSYS의 탄소성대변형 유한요소법을 적용하였고 해석제어는 Newton-Raphson method와 Arc-length method를 병용하였다.

핵심용어 : 고장력강, 초기처짐, 좌굴, 비선형 거동, 유한요소법

ABSTRACT : Recently, High Tension Steel is adapt to thin plate on the steel structure and marine structure is used widely, t is possible for buckling happens great. Specially, Initial deflection of ship structure happens in place absence necessarily by heat processing of welding or cutting etc. This Initial Deflection is exerted negative impact when thin plate absence complicated nonlinear behaviour accompanied secondary buckling. As a result, must idealize initial deflection that occurrence is possible to endow stability and accuracy in the hull structure or marine structure and reflect in early structure design considering secondary buckling. Longi direction of compressive load interacts and analyzed finite element series analysis that apply various kinds initial deflection shape measured actually on occasion that is arranged simply supported condition in this research. Applied ANSYS (elasto-plasticity large deformation finite element method) to be mediocrity finite element program for analysis method and analysis control used in Newton-Raphson method & Arc-length method.

KEY WORDS : High Tension Steel, Initial Deflection, Buckling, Nonlinear Behaviour, Finite Element Method

1. 서론

최근 박판부재인 고장력강이 강구조물에 폭넓게 사용되면서 초고속 컨테이너선과 대형화물선에 경하중량을 감소하기 위한 필요성에 의해 점차적으로 선박구조에서도 박판부재의 사용이

확대되고 있으며 이로 인하여 초기구조설계 단계에서 좌굴은 중요한 설계기준이 되고 있다. 따라서 박판부재의 초기좌굴 및 좌굴발생 후 면내강성 변화와 처짐모드 변화를 수반하게 하는 초

* 정희원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129

** 정희원, scv2434@mmu.ac.kr, 061)240-7217

*** lghlsk@mmu.ac.kr, 061)240-7237

**** 정희원, shpark@mmu.ac.kr, 061)240-7127

기침짐의 영향을 정확하게 파악하는 것은 선체구조의 안정성을 확보하는데 있어서 중요한 문제이다.

본 연구에서는 실제 컨테이너선(2150TEU)의 이중저 구조에서 사용되고 있는 판넬 모델을 해석에 사용하였다. 여러 주변 부재와 결속되어 있는 판부재에 대해서 주변지지조건은 단순지지조건으로 이상화 하였고 용접이나 절단에 따라서 필연적으로 존재하게 되는 여러 가지 초기치짐의 유형을 분석하여 압축하중을 받는 박판구조물의 초기좌굴후 거동과 2차좌굴(Secondary Buckling)후 천이거동(Snap-through)에 있어서 초기치짐의 영향을 규명하였다. 해석방법으로는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS V7.1을 이용하였고 2차좌굴과 같은 복잡한 천이거동을 해석하기 위하여 Arc-length method를 적용하였다.

일반적인 판에서는 절단, 용접 등의 열 가공에 의해 초기결함이 처음부터 잔류응력이나 초기치짐과 같이 존재하게 된다. 초기결함의 존재여부와 초기결함의 분포 형태에 따라 판의 비선형 거동에 상당한 영향력을 미치게 되며 거동형태 또한 복잡하게 나타난다. 지금까지 이에 관한 연구로서는 Supple[1-3]은 판재 치짐을 두성분의 합으로 나타내어 탄성대변형해석을 수행하고 좌굴모드간 연성과 2차좌굴강도에 미치는 초기치짐의 영향에 대하여 고찰하고 있다.

Uemura[4-5]는 판재 치짐을 두 개의 치짐성분으로 나타내어 탄성대변형 해석을 수행하고 초기치짐이 2차좌굴거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그러나 이런 연구의 해석에서는 고려되는 치짐성분이 충분치 않으므로 2차좌굴강도 및 2차좌굴 후의 평형경로가 수치적으로 정확하게 구하지 못하고 있다.

Nakamura & Uetani[6]는 보다 많은 판재 치짐성분을 고려하여 최소포텐셜에너지 원리를 적용하여 폭넓은 종횡비에 걸쳐서 초기치짐이 없는 주변단순지지 조건의 판에 2차좌굴강도와 2차좌굴강도 후 평형경로를 수치적으로 정확하게 추적하였다. 그러나 이 논문에서도 고려되는 치짐성분이 부족하여 정확하게 2차좌굴거동에 대하여 밝혀지지 않을 뿐만 아니라 초기치짐의 영향에 대해서는 언급이 없다. Ueda & Yao 1985, Paik & Pederson 1996, Cui & Mansour 1998등에 의해서 이루어졌었다. Ueda, Y & Yao, T(1985)는 실제 6만톤급 벌크캐리어와 5,500대 규모의 카 캐리어의 상갑판 판넬 총 33가지 모델에서 용접 후 발생한 판재의 초기치짐형상을 실제 계측하였다. 계측된 판넬의 종횡비는 1.0~5.0이며, 세장비(b/t)는 20~100이고 최대초기치짐은 판재 두께의 50%이내에서 차등 적용하여 탄소성대변형 유한요소 시리즈 해석을 수행하였다. 판재의 전체 초기치짐식에 종방향으로는 11개 모드를 횡방향으로는 1모드만을 가정하였고 용접잔류응력은 고려하지 않았다. 그리고 후판부재에서는 최종치짐모드는 1모드였지만 박판으로 갈수록 대변형에 기인한 소성 막응력에 영향으로 붕괴거동 과정 중에 치짐모드가 증가하는 경향을 발견하였다. 이 연구에서는 후판부재의 최종강도는 항복강도보다 높게 평가하는 경향이 있었는데 이러한 결과는 수치해석 방법에서 변형을 경화 효과를 무시하였기 때문이다. 본 연구에서는 열가공 후 발생하는 초기결함에 의한 영향을

중점적으로 파악하기 위하여 Ueda & Yao(1985)의 실제 계측 초기치짐형상 중 대표적인 초기치짐형상을 이상화하여 해석에 적용하였다.

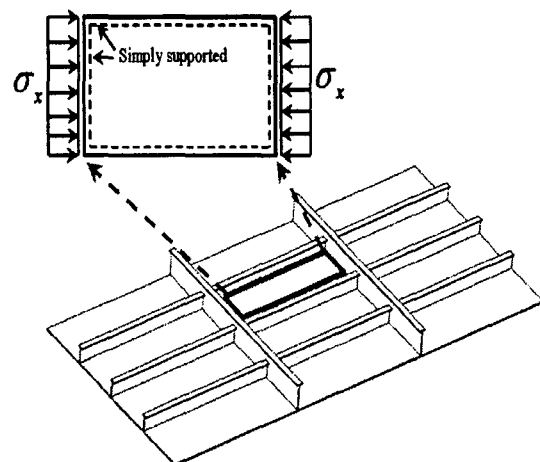
2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

선체판의 비선형 탄소성거동을 해석하기 위해서 범용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS V7.1의 탄소성대변형 비선형유한요소법을 적용하였다. 본 연구에 사용된 유한요소는 4절점을 가진 사각형 쉘 요소이고 비선형 해석제어 기법으로는 박판부재에 나타나게 되는 2차좌굴에 의한 Snap-through와 같은 경로를 정확하게 추적하기 위하여 Full Newton-Raphson Method와 Arc-length method를 병용하여 해석하였다. 이때 Arc-length method는 하중제어와 변위제어를 동시에 제어하게 되며 비선형 해석을 수행할 때 사용한 해석기법은 Sparse direct solver를 이용하였다. 수렴기준에 있어서는 반복구간에서의 하중과 모멘트의 오차의 SRSS(Square root sum of the squares)값이 적용된 하중의 SRSS값의 0.5%가 되었을 때 수렴한 것으로 설정하였다. 초기 Arc radius의 값은 최소 0.0001에서 최대 10까지의 범위를 설정하여 해의 수렴도가 실제 하중-변위 응답에 가깝도록 설정하였다.

2.2 해석 모델링

본 연구에서는 탄소성대변형 유한요소법을 적용하였고 해석에 사용된 판 종횡비(a/b)는 3.5, 4.41인 사각형판의 해석에 있어서 실제 2.150TEU 컨테이너 이중저 구조에서 사용되고 있는 보강재와 보강재 사이의 평판을 모델링에 적용하였다. 판 주변 경계 조건은 네변 단순지지조건으로 이상화 하였고 이와같은 이상화는 적용하였고 종방향 압축하중만을 면내방향으로 작용하였으며 이때 면의 변형에 대해서 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였고 잔류응력은 고려하지 않았다.



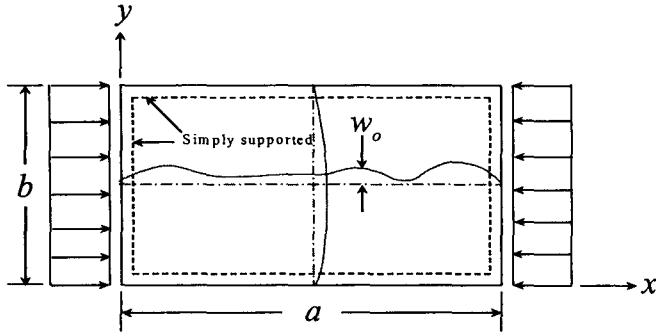


Fig.1 A simply supported plate under uniaxial compression

Fig.1에서는 하중조건과 지지조건 및 F.E.A 모델을 나타내고 있다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 AH36 고장력강이고 판 폭 (b)=780 mm, 판 두께(t)=11 mm, 탄성계수(E)= 205,800 MPa, 포아송비(ν)=0.3, 항복강도=352.8 MPa, $W_{opl}=0.1 \times \beta^2 \times t$ 를 적용하였다(Smith's average level).

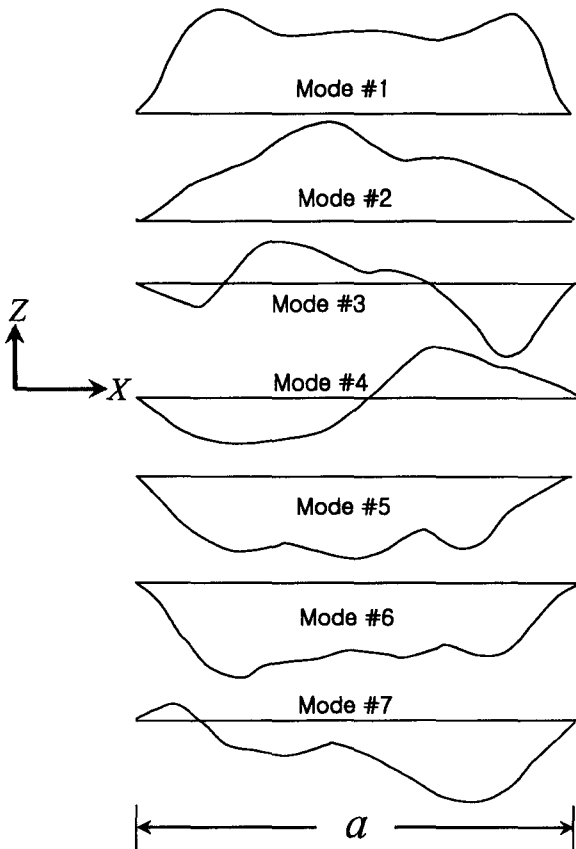


Fig.2 A variety of initial deflection shape in steel plating between stiffeners in the longitudinal direction

Fig.2에서는 본 연구에서 사용한 강제초기처짐과형 7가지 형태를 나타내고 있으며 나머지 한가지는 판의 고유좌굴모드를 적용

하였다. 열 가공 특히 용접 같은 경우에는 수작업으로 이루어지는 부분이 존재하므로 수치적으로 정형화 하기에는 여러 가지 주변 제약조건들이 따르게 된다. 초기처짐형상 #1-#7의 초기 처짐과형은 종방향(M)으로는 11개모드를 횡방향(N)으로는 1모드만을 가정하였고 이 이상과형을 식(1)에 대입하여 최소자승법을 적용하여 이상과형성분을 구하고 판내 초기처짐을 다음 식 (2)으로 나타내었다.

$$w = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

$$w_o = \sum A_{om} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

3. 수치해석 및 고찰

Fig.3에서는 Ueda & Yao(1985)에 의해서 조사된 열 가공 후 선체 판넬 구조에 발생한 각 초기처짐의 형상을 나타내고 있다. 용접이나 절단의 여러 가지 외부환경 조건에 의해서 아주 상이한 형상을 나타내고 있다.

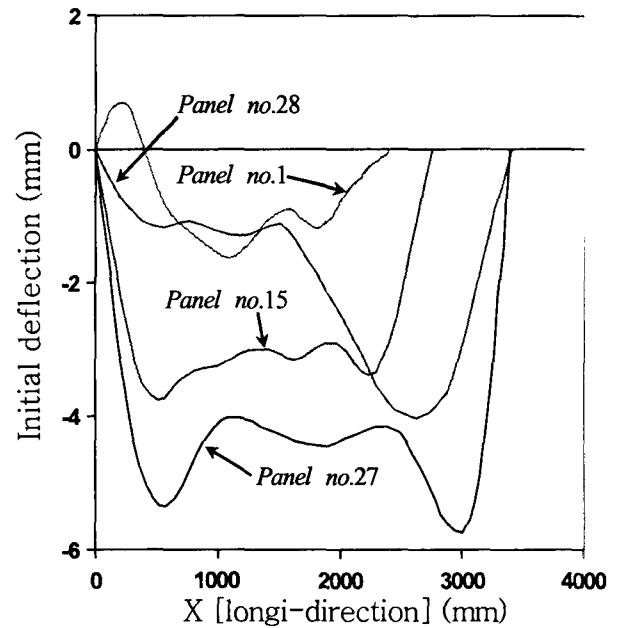


Fig.3 A variety of initial deflection shape in steel plating between stiffeners in the longitudinal direction (ref. Ueda & Yao 1985)

Fig.4 에서의 종횡비(a/b)는 2.150TEU 컨테이션의 이중저 구조에 사용되고 있는 종횡비 3.5에 대해서 탄소성대변형 유한요소 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 그래프는 응력-변형률 관계를 나타내고 있으며 매개변수로는 7가지 강제초기처짐모드와

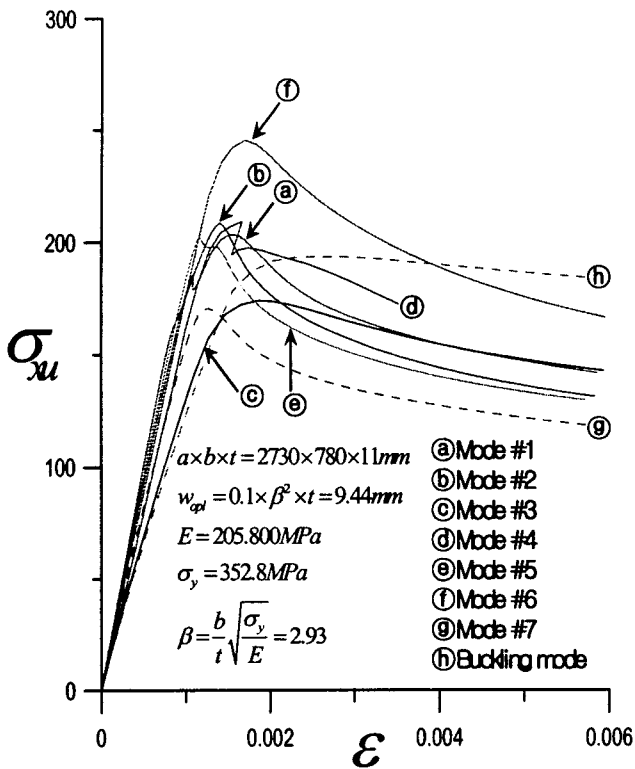


Fig.4 A comparison stress with strain according to variety of initial deflection shape at aspect ratio 3.5

고유좌굴모드를 적용하였다. Mode #6에서는 가장 높은 압축최종 강도를 나타내고 있으며 Mode #7에서 가장 낮은 값을 나타내고 있으며 초기처짐에 따른 최종강도의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. Mode #1과 #4에서는 가장 복잡한 비선형 거동을 나타내고 있다. 이는 불안정한 파형으로 시작한 거동이 2차좌굴이라는 매커니즘을 통해서 안정된 파형으로 바뀌는 동적거동의 일종이다. 특히, Mode #4에서는 최종강도 이후에 2차좌굴에 의한 Snap-through 거동이 발생하면서 최종강도 이후 면내강성 감소가 급격해짐을 알 수가 있다. 이는 좌굴 매커니즘은 탄성영역 뿐만 아니라 탄소성영역에서도 나타나고 있으며 이러한 붕괴특성을 반영한 좌굴강도평가를 해야 한다는 것을 나타내고 있다. Fig.6에서는 관중횡비 4.41에서의 탄소성대변형 거동 결과를 나타내고 있다. 이 중횡비에서도 초기처짐모드 #6에서 가장 높은 최종강도 값을 나타내고 있으며 고차중횡비로 감에 따라 2차좌굴거동이 발생하는 초기처짐모드는 #1, #3모드이다.

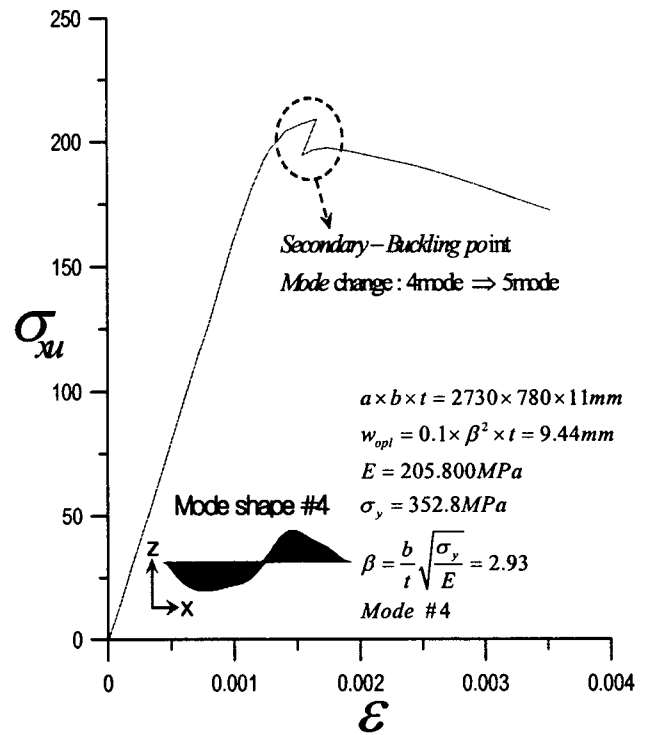


Fig.5 A comparison stress with strain according to variety of initial deflection shape at aspect ratio 4.41

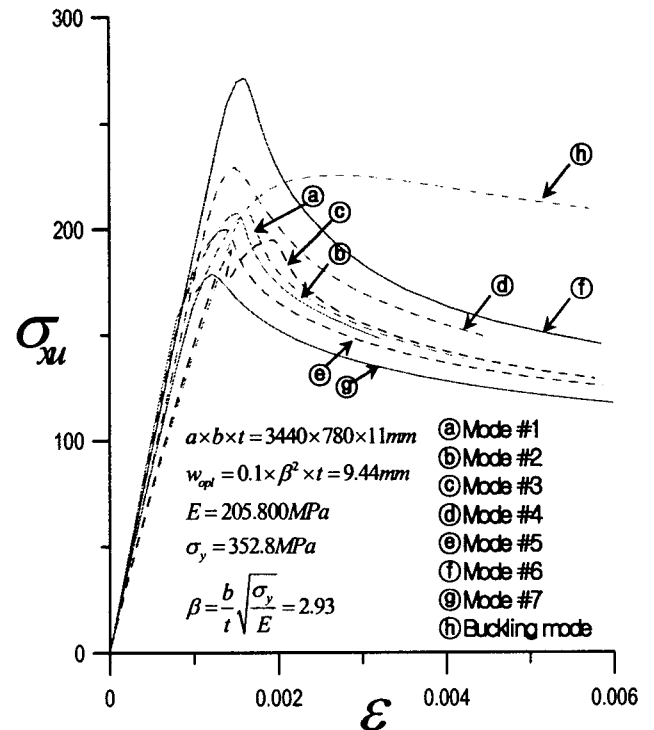


Fig.6 A comparison stress with strain according to variety of initial deflection shape at aspect ratio 4.41

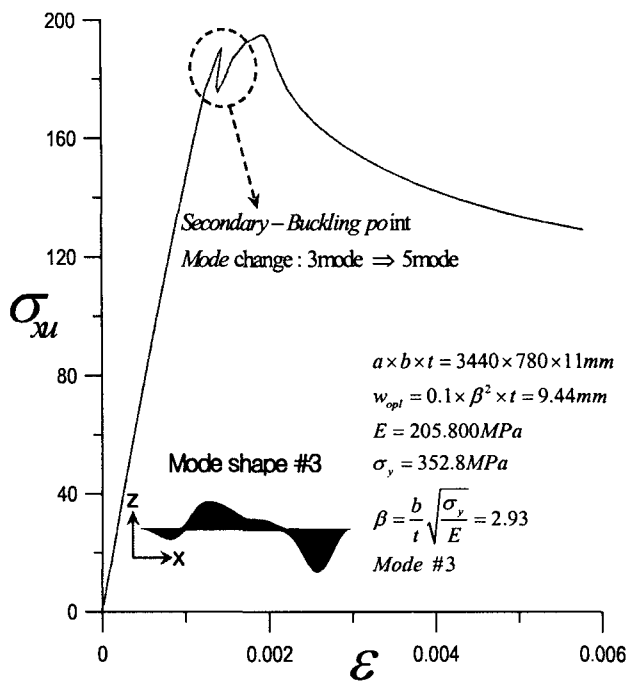


Fig.7 A comparison stress with strain according to variety of initial deflection shape at aspect ratio 4.41

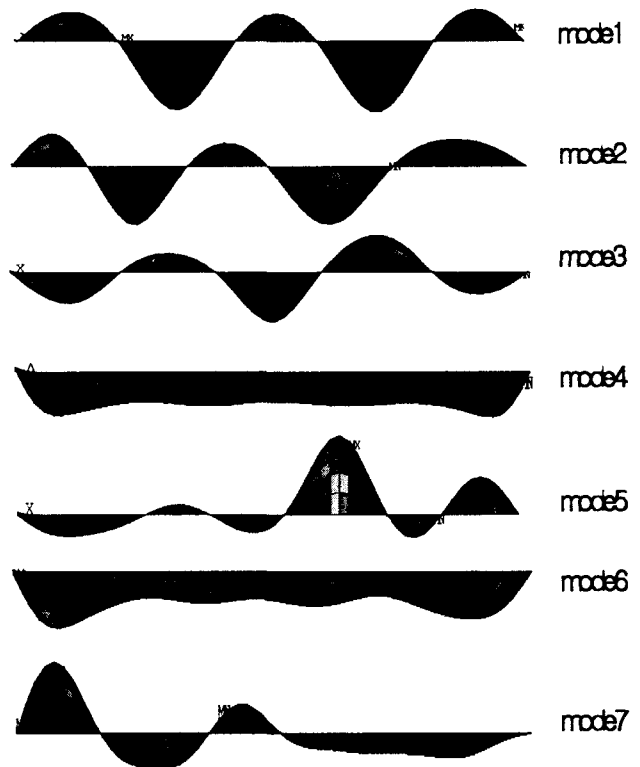


Fig.9 Deflection mode on the ultimate strength at each initial deflection mode

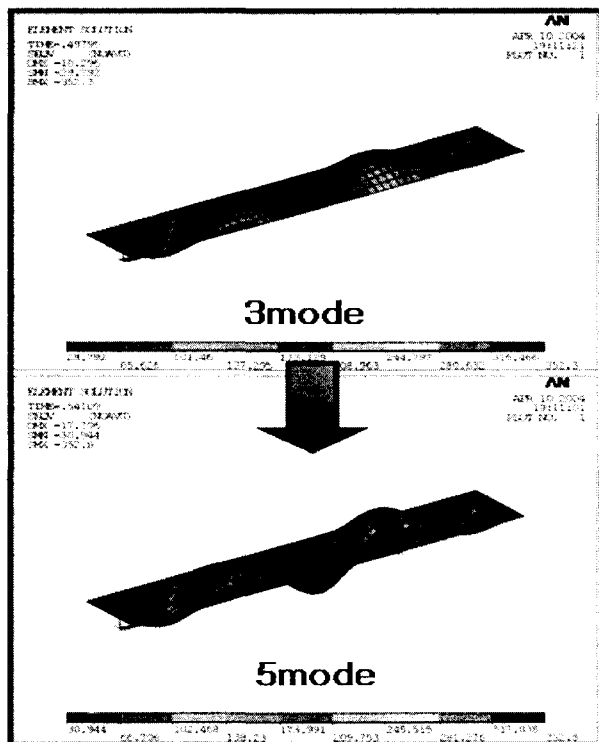


Fig.8 A change deflection mode on the mode#3 (a/b=4.41)

Fig.7에서는 종횡비 4.41인 판부재의 탄소성대변형 거동을 나타내고 있다. 초기처짐형상은 #3을 적용하였으며 길이방향으로 3모드의 비대칭형 초기처짐형상을 유지하고 있다. 이 초기처짐을 적용한 해석에서는 2차좌굴의 영향에 의해서 판내 처짐모드가 3모드에서 5모드로 급격하게 변화하면서 면내소성화가 급진전하게 되어 최종강도를 낮게 평가하고 있다. Fig.8에서는 이러한 2차좌굴에 의한 처짐모드 변화와 소성화 변화를 나타내고 있다. 처음부터 기존의 초기처짐형상을 유지하던 판이 면내압축이 작용함에 따라서 초기결함이 존재하는 부분에서 먼저 소성이 전개되며 갑자기 2차좌굴이 발생하면서 고유의 형상에서 새로운 처짐모드로 패턴이 바뀌게 된다.

Fig.9에서는 판종횡비 4.41일 경우 최종강도에서의 처짐모드를 각 모드별로 나타내고 있다. 고유의 처짐패턴을 지속적으로 유지하는 판에서는 판내에 작용하고 있는 막응력 효과로 인하여 처짐을 방해하여 최종강도를 상대적으로 높게 평가하고 있음을 알 수가 있다. 또한 판내 소성화 전개도 처짐방향으로만 국부적으로 전개되고 나머지 부분에는 소성화전개가 되지 않고 있다. 종횡비의 영향에 준하는 처짐모드는 #1,2,3,5이며 처짐모드 #7에서는 좌수과성분이 급격하게 성장한 4모드를 나타내고 있다.

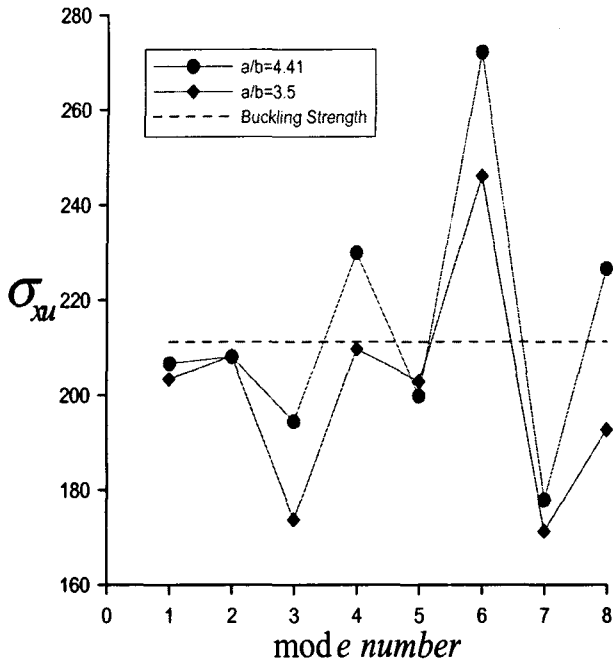


Fig.10 A comparison stress with various initial deflection mode

Fig.10에서는 두가지 실제 종횡비를 초기처짐별로 최종강도 분포를 나타내고 있으며 정수형 종횡비에서의 좌굴강도 값도 비교하고 있다. 초기처짐의 형상에 따라서 최종강도 분포는 뚜렷하게 구분되어지며 모드별로 종횡비의 영향도 불균일하게 분포하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 들어 폭 넓게 사용되어지고 있는 고장력강의 효율성을 높여서 초기구조설계에 반영하게 하기 위하여 실제 2.150TEU 컨테이너선의 이중저 구조에서 사용 중인 종횡비에 대하여 일축 압축하중을 받는 하중조건에 대하여 열 가공 후 존재하게 되는 처짐형상을 매개변수로 한 시리즈해석을 통해서 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 초기처짐모드 #6과 같은 형태는 압축최종강도 값이 가장 높게 나타나고 있다.
- 2) 초기처짐모드 #3은 압축하중이 작용할 때부터 3모드의 처짐모드로 출발하여 가장 빨리 최종강도 붕괴거동을 하고 있다.
- 3) 초기처짐모드 #1,2,5,7에서는 종횡비에 상관없이 최종강도 분포가 거의 같게 평가되고 있다.
- 4) 종횡비(a/b)에 영향을 받는 고유의 처짐모드와 강제초기처짐모드의 붕괴모드는 아주 상이하며 이는 강제초기처짐모드같은

경우 하중작용 방향으로 분포된 비대칭형 초기처짐성분이 붕괴를 방해하기 때문이다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

- [1]. Supple, W.J. : "Coupled Branching Configurations in the Elastic Buckling of Symmetric Structural Systems", Int. J. Mech. Sci., Vol.9, pp. 97-112, 1967.
- [2]. Supple, W.J. : "On the Change in Buckle Pattern in Elastic Structures", Int. J. Mech. Sci., Vol.10, pp. 737-745, 1968.
- [3]. Supple, W.J. : "Change of Wave-Form of Plates in the Post-Buckling Range", Int. J. Solids Structures, Vol.6, pp.737-745, 1970.
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. J.W.Lee, K.T. Chung and Y.T Yang : "Geometrically Nonlinear Analysis of Eccentrically Stiffened Plates", Selected Papers of The Society of Naval Architects of Korea, Vol.1, 1993, pp.91-100.
- [8]. 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.
- [9]. 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, pp.261-268, 1992.
- [10]. Nakamura, T. and Uetani, K. : "Secondary Buckling and Post-Secondary Buckling Behaviour of Rectangular Plates", Int. J. Mech. SCI., Vol.21, pp.265 ~ 286, 1978.
- [11]. 백점기, 선체구조의 좌굴, 최종강도에 관한 연구동향, 한국전산구조공학회지, 제 10권, 제2장, 1997.6
- [12]. ANSYS User's manual (7.1 version) : "Non-linear buckling analysis" SAP. Inc. 2003.