

초기처짐형상에 따른 판부재의 천이거동에 관한 연구

A Study on the Snap-through Behaviour According to the Initial Deflection Shape of Plate Members

고재용*
Ko, Jae-Yong

이계희**
Lee, Kye-Hee

박주신***
Park, Joo-Shin

ABSTRACT

Recently, the buckling is easy to happen a thin plate and High Tensile Steel is used at the steel structure and marine structure so that it is wide. Especially, the post-buckling is becoming important design criteria in the ship structure to use especially the High Tensile Steel. Consequently, it is important that we grasp the conduct post-buckling behaviour accurately at the stability of the ship structure or marine structure.

In this study, examined closely about conduct and snap-through behaviour after initial buckling of thin plate structure which apply compressive load according to various kinds initial deflection shape under all edges simply supported condition that make by buckling formula in each payment in advance rule to place which is representative construction of hull. Analysis method is F.E.M in used ANSYS program and complicated nonlinear behaviour to analyze such as secondary buckling with snap-through behaviour. Nonlinear buckling control is applied between newton-raphson method and arc-length method in this study

1. 서론

최근 박판부재인 고장력강이 구조물에 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 초기처짐의 영향을 정확하게 파악하는 것은 선체구조의 안정성을 확보하는데 있어서 중요한 문제이다.

본 연구에서는 실제 상선(17만톤 이상)의 상갑판 구조에서 사용되고 있는 주요 종횡비에 대해서 주변지지 조건은 단순지지조건이고 용접이나 절단에 따라서 필연적으로 존재하게 되는 여러 가지 초기처짐의 유형을 분석하여 압축하중을 받는 박판구조물의 초기좌굴후 거동과 2차좌굴후 천이거동에 있어서 초기처짐의 영향을 규명하였다.

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

** 정회원 목포해양대학교 해양시스템공학부 전임강사 (Email : lghlsk@mmu.ac.kr)

*** 목포해양대학교 해양시스템공학부 대학원 (Email : scv2434@mmu.ac.kr)

해석방법으로는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고 2차좌굴과 같은 복잡한 천이거동을 해석하기 위하여 호장증분법(Arc-length method)을 사용하였다.

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. 지금까지 이에 관한 연구로서는 Ueda & Yao 1985, Paik & Pederson 1996, Cui & Mansour 1998등에 의해서 이루어졌었다. 이들은 일축압축 하중조건에서의 초기처짐영향에 의한 선체판의 최종강도 거동을 연구하였는데 초기처짐의 영향을 규명하는데 있어서 좀더 많은 매개변수를 고려하지 못한 점이 있으며 박판부재의 해석에서 발생하게 되는 천이거동에 대해서 아직도 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 초기처짐의 형상에 따른 선체판부재의 2차좌굴로 인한 천이거동과 이때의 면내강성 변화 및 세장비 그리고 처짐모드 변화를 종합적으로 분석하여 보다 신뢰성있는 분석을 하였다.

2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

선체판의 비선형 탄소성거동을 해석하기 위해서 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS V7.1의 탄소성대변형 비선형유한요소법을 적용하였다. 본 연구에 사용된 유한요소는 4절점을 가진 사각형 쉘요소이고 비선형 해석제어 기법으로는 2차좌굴에 의한 Snap-through와 같은 경로를 정확하게 추적하기 위하여 Newton-Raphson Method와 Arc-length method를 병용하여 해석하였다.

2.2 해석 모델링

본 연구에서는 비선형 유한요소법(ANSYS)을 적용하였고 해석에 사용된 판 종횡비(a/b)가 3.6, 3.8, 4.4, 5.4, 6.0 인 사각형판의 해석에 있어서 실제 17만톤 이상의 상선 상갑판구조에 사용되고 있는 보강재와 보강재 사이의 평판을 모델링에 적용하였다. 판 주변 경계조건은 네변 단순지지조건을 적용하였고 종방향 압축 하중만을 면내방향으로 작용하였으며 이때 면외 변형에 대해서 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였고 잔류응력은 고려하지 않았다. Fig.1에서는 하중조건과 지지조건 및 F.E.A 모델을 나타내고 있다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 판 폭(b)=840 mm, 판 두께(t)=10 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).

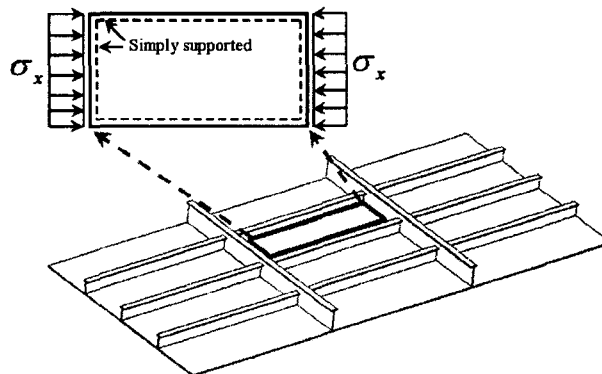


Fig.1 A simply supported plate under uniaxial compression

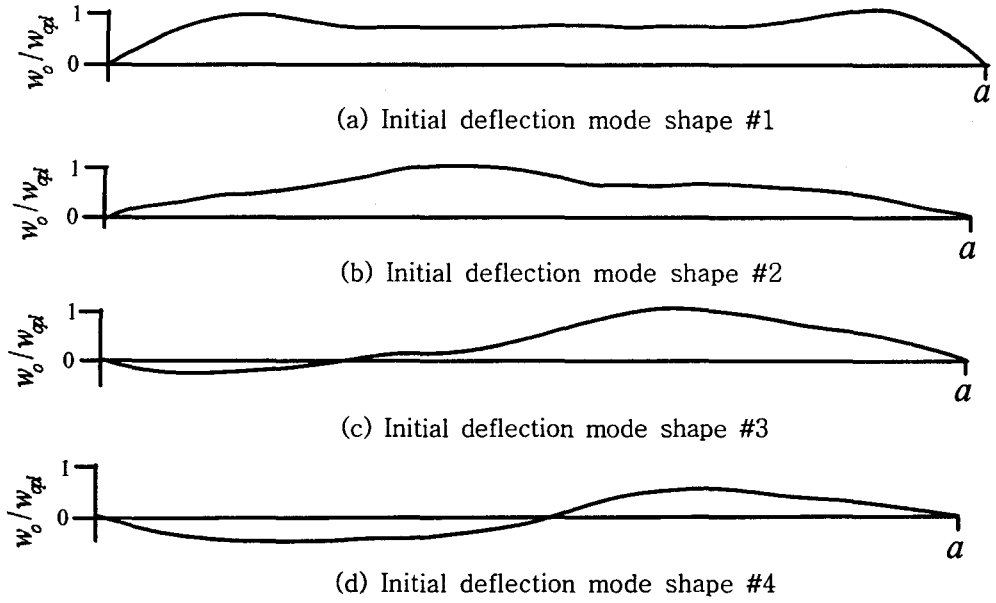


Fig.2 A variety of initial deflection shape in steel plating between stiffeners in the longitudinal direction

실제로 여러 학자들에 의해서 실제 판부재의 용접이나 절단 후 초기처짐의 예측된 결과들은 많지만 이 중에서도 가장 일반적인 초기처짐파형을 선별하였다. 본 연구에 사용된 초기처짐파형은 총 5가지이며 실제 상선의 상갑판부에서 조사한 초기처짐파형인 Fig.2의 (a)-(d)는 초기처짐과 판 고유의 좌굴모드이다. (a)-(d)의 초기처짐파형은 식(1)에서와 같이 종방향(M)으로는 11개모드를 횡방향(N)으로는 1모드만을 가정하였다. 아래 Table.1에서는 열가공 후 발생한 초기처짐형상을 수치로 나타내주고 있으며 이러한 값들을 식(1)에 적용을 시키고 Fofran code를 이용하여 4가지 강제 초기처짐모드를 구현하였다.

$$\frac{w_0}{w_{opl}} = \sum_{i=1}^M B_{oi} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \text{-----(1)}$$

Table.1 Initial deflection amplitudes for various initial deflection shapes indicated in Fig.2

Initial deflection shape No.1	B_{o1}	B_{o2}	B_{o3}	B_{o4}	B_{o5}	B_{o6}	B_{o7}	B_{o8}	B_{o9}	B_{o10}	B_{o11}
#1	1.0	0.3837	-0.0259	0.2127	-0.0371	0.0478	-0.0201	0.0010	0.0010	-0.0090	0.0005
#2	0.8807	0.0643	0.0344	-0.1056	0.0183	0.0480	0.0150	-0.0101	0.0082	0.0001	-0.0103
#3	0.5500	-0.4966	0.0021	0.0213	-0.0600	-0.0403	0.0228	-0.0089	-0.0010	-0.0057	-0.0007
#4	0.0	-0.4966	0.0021	0.0213	-0.0600	-0.0403	0.0228	-0.0089	-0.0010	-0.0057	-0.0007

3. 수치해석 및 고찰

본 연구에서 나타내는 그래프는 응력과 변형을 관계이며 Fig.3에 나타낸 ㉠-㉨점은 각 세장비에 따른 탄소성대변형 거동을 나타내고 있으며 종횡비가(a/b)3.8일때 양단 단부가 sin의 1/4파형이고 중앙부는 평평하게 이상화한 처짐모드 #1의 초기처짐모드를 적용하였다. 세장비가 2.9 이상에서는 2차좌굴의 영향에 의한 천이거동이 나타나게 된다. 선박판부재의 좌굴은 판두께 즉 세장비에 함수인데 박판부재로 강에 따라 초기좌굴 시점이 빨라지고 이에 따라 면내강성 변화가 복잡하게 변화하면서 불안정한 파형을 유지하던 판이 안정된 파형을 유지하기 위해서 이러한 2차좌굴이 발생하게 되면서 세장비가 2.9이상에서는 하중변의 소성화의 전개로 인하여 다른 세장비보다 붕괴가 먼저 진행되며 거동 또한 복잡한 천이거동을 수반하고 있다.

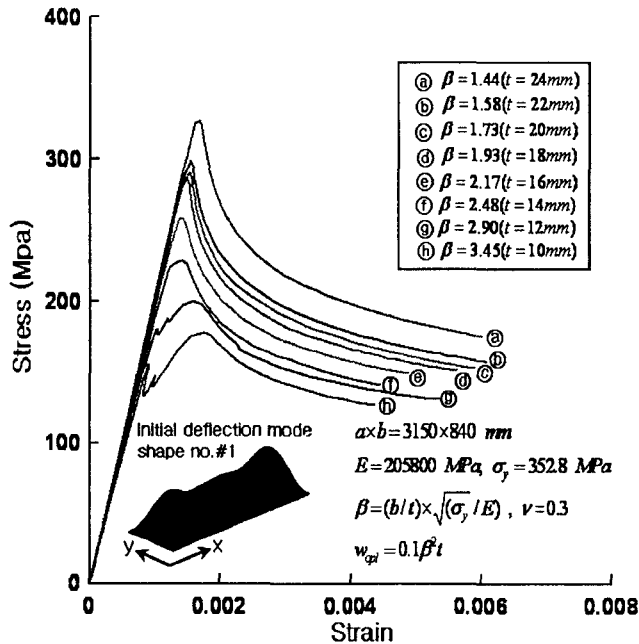


Fig.3 A comparison stress with strain according to slenderness ratio on the initial deflection mode #1 (a/b=3.8)

Fig.4에서는 세장비의 영향에 따른 최종강도 거동을 알아보기 위하여 종축은 응력을 항복강도로 무차원 하였고 횡축은 세장비를 나타내고 있다. 세장비가 1.44~1.93까지의 최종강도는 거의 차이가 발생하지 않으나 세장비가 2.17이상부터는 최종강도 분포가 뚜렷하게 구분되어지는 것을 알 수가 있다.

일반적으로 선박은 황천 항해시 호강, 새강조건이 반복적으로 발생하게 되고 선박구조물에 불균일한 소성화의 진전으로 인하여 2차좌굴이 발생하게 되면 판구조물 자체의 면내강성은 급격히 감소하게 된다. 이는 곧 선박구조의 붕괴를 발생시키면서 전체구조물에게까지 악영향을 미치게 된다. 특히, 가장 일반적인 초기처짐형태인 #1같은 경우에는 2차좌굴을 고려한 최종한계상태 설계법을 적용할 경우에는 세장비가 2.9이하의 영역에서 설계를 수행하여야 한다.

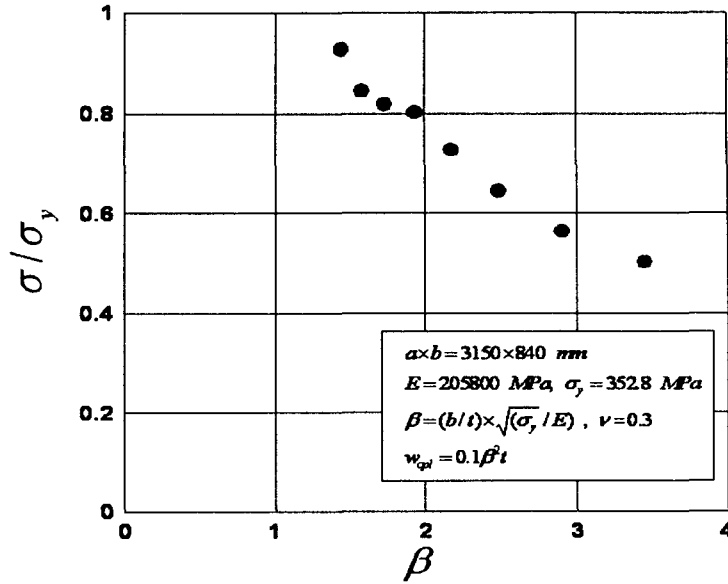


Fig.4 A comparison average stress with slenderness ratio according to initial deflection mode #1 (a/b=3.8)

Fig.5의 그래프는 응력-변형을 관계이며 매개변수로는 5가지 초기처짐모드 형태이다. 지지조건 및 중형비 등 여러 가지 제반조건들은 일정하게 유지하였다. 가장 복잡한 비선형 거동을 보이는 처짐모드 형태는 #1, 4이며 좌굴모드와 같은 경우에는 초기에 smith's formula에 의한 중앙처짐값이 존재하면서 압축하중이 가해지는 순간부터 처짐이 발생하는 거동을 나타내면서 강성 또한 낮게 평가하고 있다. 그러나, 처짐모드가 #3, 5에서는 좌우 대칭인 초기처짐이 종방향 길이에 비례하여 존재하므로 2차좌굴에 의한 천이거동이 발생하지 않는 일반적인 거동을 나타낸다. 이와는 반대로 처짐모드 #1,2,4을 지닌 판에서는 2차좌굴을 동반한 복잡한 천이거동을 나타내고 있다. 특히 처짐모드 #1 거동에서는 2차좌굴에 의한 면내강성의 감소로 가장 낮은 최종강도 값을 나타내고 있다. 이는 초기좌굴 이후 비하중변의 모서리에서부터 발생한 소성화의 급진전 때문이다.

Fig.6에서는 처짐모드 #1일 경우의 처짐모드 변화를 나타내고 있다. 첫번째 천이거동 구간에서는 한쪽 파형이 급격히 성장한 불완전한 3모드에서 두번째 천이거동에서는 완전한 5모드형태로 처짐모드가 급격하게 변화하면서 새로운 처짐파형의 성장이 있는 부분으로 급속하게 소성화가 전개되었다는 것을 알 수가 있다. 이는 곧 선체 판부재에 2차좌굴에 의한 천이거동이 발생하게 되면 선체구조의 고유의 면내강성의 감소가 진행되어 서서히 구조 전체적으로 붕괴에 도달하게 되는 것을 알 수가 있다. 이 두가지 처짐모드의 거동의 특징은 2차좌굴에 의한 천이거동의 주기가 길다는 것이다. 불완전한 2모드 처짐모드에서 안정된 모드로 변하지 못하고 불완전한 4모드로 거동을 마치게 된다. 이는 복잡한 비대칭형 초기처짐모드의 형태에 기인한 문제이기도 하지만 선체판의 탄소성거동에 있어서 초기처짐모드의 형상에 따라 아주 특이한 거동을 나타내는 재료의 비선형성이 크게 좌우된다.

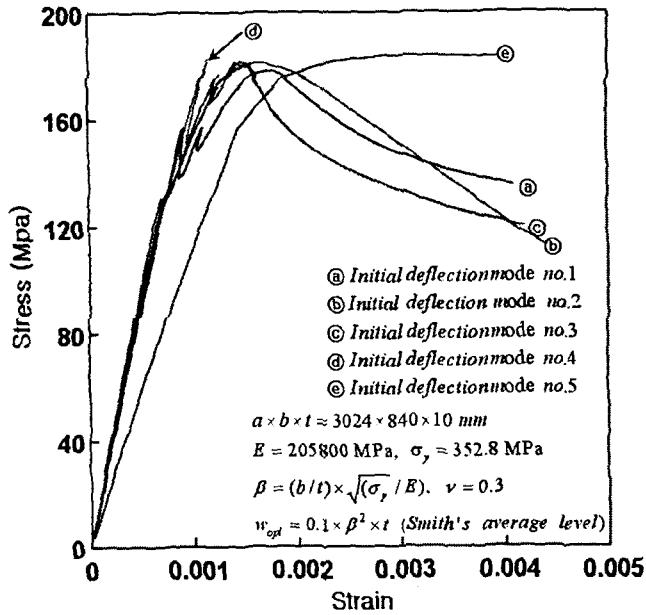


Fig.5 A comparison stress with strain according to initial deflection mode (a/b=3.6)

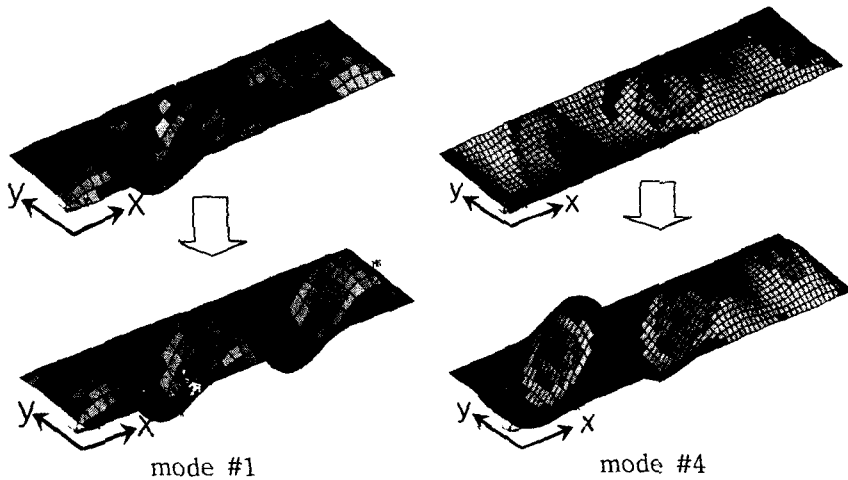


Fig.6 A change of deflection mode on the initial deflection mode #1 and #4 (a/b=3.6)

Fig.7에서는 종횡비(a/b)가 4.4에서 5가지 초기처짐모드에 따른 판의 탄소성 거동을 나타내고 있다. 이 종횡비에서도 초기처짐모드가 #1, 4에서 2차좌굴을 동반한 천이거동현상이 나타난다. 판재의 고유 좌굴모드인 (a)에서는 면내강성 변화가 완만하며 가장 높은 최종강도를 나타내고 있다. 초기처짐모드 #3과 #1같은 경우에는 초기처짐모드에 의한 천이거동을 동반하지 않는 공통점이 있다.

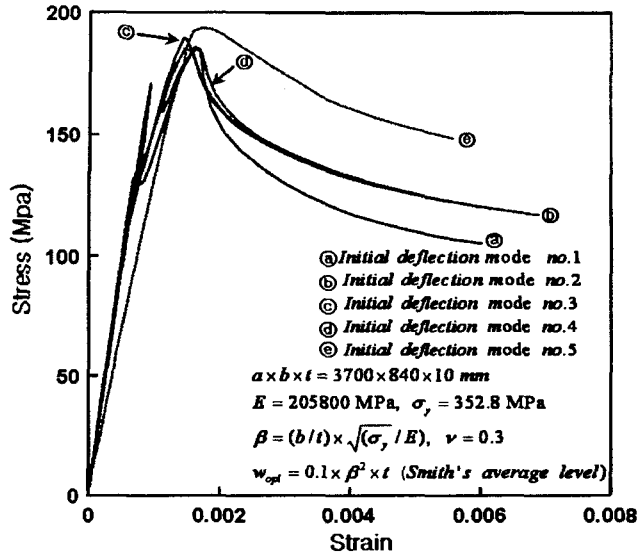


Fig.7 A comparison stress with strain according to initial deflection mode (a/b=4.4)

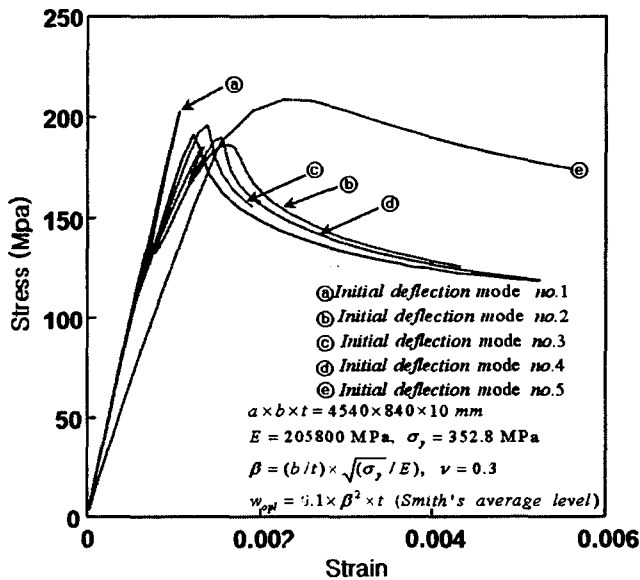


Fig.8 A comparison stress with strain according to initial deflection mode (a/b=5.4)

Fig.8에서는 종전까지 안정적인 거동을 보이던 #2의 초기처짐 형태의 거동에서 천이거동에 따른 면내강성 변화가 나타나고 있다. 초기처짐모드 #1 같은 경우에는 종횡비의 증가에 따라 2차좌굴에 의한 천이거동의 주기가 점점 길어지고 있으며 급격한 면내강성을 수반하면서 처짐모드 또한 5모드에서 7모드로 변하게 되어 종횡비가 커짐에 따라서 #1 초기처짐모드를 제외한 나머지 초기처짐모드들은 안정적인 거동을 나타내고 있는 특징이 있다.

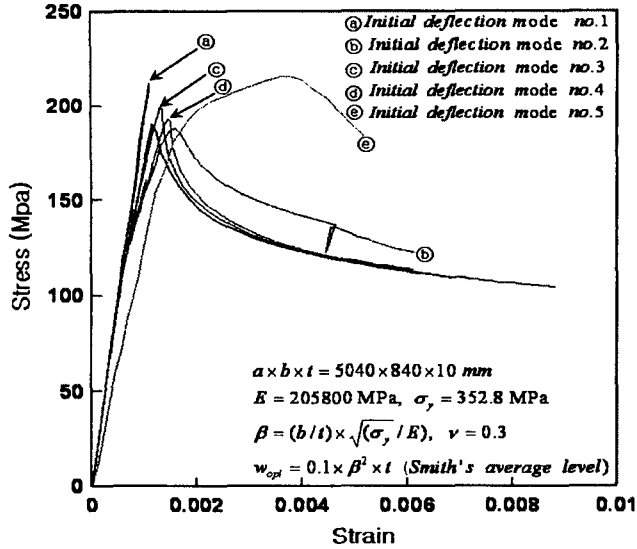


Fig.9 A comparison stress with strain according to initial deflection mode (a/b=6.0)

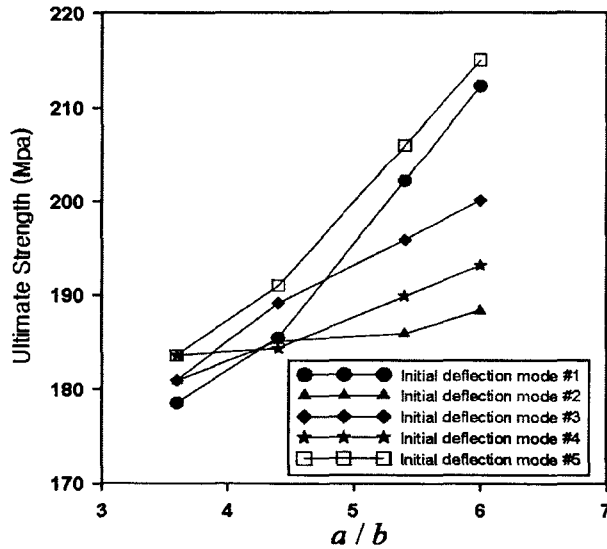


Fig.10 A comparison stress with aspect ratio according to the variety initial deflection mode

Fig.9에서는 초기처짐 형태가 #1을 제외하고는 천이거동을 하지 않는 안정적인 거동을 나타낸다. 천이거동의 발생 유무에 따라 최종강도 분포의 차이가 많이 발생하며 그 양상 또한 복잡하게 나타나고 있다.

Fig.10에서는 횡축은 종횡비를 종축은 응력을 나타내고 있다. 종횡비가 커질수록 최종강도는 높게 평가되며 초기처짐 형태가 #1일 경우 판의 탄소성거동에 있어서 종횡비의 영향을 크게 받고 있다. 판의 고유처짐 모드해석을 기준으로 잡았을 경우에 가장 유사한 거동을 나타내고 있으며 #2일 경우에서 가장 낮은 최종강도를 나타내고 있다. 실제 용접조건이나 여러 가지 조건 등에 따라 존재하게 되는 초기처짐 형태는 무수히 많다. 본 연구에서는 대표적인 용접 후 존재하는 초기처짐의 형태를 선별하고 이에 따른 천이거동 해석을

수행하여 가장 복잡한 천이거동을 보이는 초기처짐인 #1과 가장 낮은 최종강도 값을 나타내는 #2같은 경우에는 초기처짐의 영향을 고려한 초기구조설계에서 설계의 기준으로 채택해야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 들어 폭 넓게 사용되어지고 있는 고장력강의 효율성을 높여서 설계에 반영하게 하기 위하여 실제 170만톤 이상의 상선의 선체 삼각판구조에서 사용중인 주요 중횡비에 대하여 일축 압축하중을 받는 하중조건에 대하여 초기처짐형상을 달리한 유한요소해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기처짐모드 #1과 같은 형태는 2차좌굴을 포함한 가장 복잡한 비선형 거동을 나타낸다.
- 2) 초기처짐모드는 중횡비와 세장비의 영향도 존재하며 #1과 같은 초기처짐 분포형태 에서는 세장비를 2.9이하에서 설계하도록 해야하며 중횡비가 커질수록 안정적 거동을 유지한다.
- 3) 선체판부재의 천이거동에 있어서 가장 큰 원인은 열변형에 의한 초기처짐의 형상이며 본 논문에서 제시한 #2의 초기처짐 형상을 적용한 해석을 보수적인 설계의 기준으로 채택할 수 있다.
- 4) 중횡비(a/b)에 영향을 받는 고유의 처짐모드와 강제초기처짐모드의 붕괴모드는 아주 상이하며 이는 강제초기처짐모드같은 경우 하중작용 방향으로 분포된 비대칭형 초기처짐성분이 붕괴를 방해하기 때문이다.

후기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

1. 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.
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, L., Limdgren, L.-E. and Jonsson, M., Springer Verlag, pp.261-268, 1992.
3. "Nonlinear analysis Buckling", swanson. inc
4. Nakamura, T. and Uetani, K. : "Secondary Buckling and Post-Secondary Buckling Behaviour of Rectangular Plates", Int. J. Mech. SCI., Vol.21. pp.256-286, 1978.
5. J.K. Paik and A.K. Thayamballi, "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons, 2003.
5. 고재용, T. Yao, 백점기 : "연내압축하중을 받는 판의 2차좌굴에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제 33권 제3호, pp.66-80, 1996.
6. 고재용: " 에너지법에 의한 선체판의 기하학적 비선형거동에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp.94-104, 1999.
7. 고재용, 최익창 : "호장증분법에 의한 판구조물의 2차좌굴거동에 관한 연구", 한국전산공학회지, Vol. 42. No.4, 1998.
8. 고재용, 박주신 : "항복강도에 따른 선체판의 최종강도에 관한 연구", 대한조선공학회지, April, pp 605-609, 2003.