

선체판의 항복응력 변화에 따른 최종강도거동에 관한 연구

고재용* · 이준교** · 박주신** · 배동균***

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수, **목포해양대학교 대학원(조선공학), ***(주)한국종합설계 기술이사

Ultimate Strength varying the Yield Stress of a Ship's Plate

Jae-Yong Ko* · Jun-Kyo Lee** · Joo-Shin Park** · Dong-Kyun Bae***

* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mopo, 530-729, Korea.

** Graduate school of Mokpo National Maritime University, Mopo, 530-729, Korea.

*** The Korea Consolidation Design Corporation, Technology director, Mokpo, Korea.

요 약 : 최근 박판부재인 고장력강이 구조물에 폭넓게 사용됨으로서 좌굴이 발생하기 쉽다. 특히 고장력강을 사용하는 선체구조물에서는 좌굴은 중요한 설계기준이 되고 있다. 따라서 좌굴발생 후 거동을 정확하게 파악하는 것은 선체구조의 안정성에 중요하다.

본 연구에서는 선체의 대표적인 구조물인 판을 대상으로 각 선급 룰에서 좌굴강도식의 기준으로 삼고 있는 단순지지조건에서의 여러 가지 항복강도에 따라 압축하중을 받는 박판구조물의 초기좌굴 후 거동과 2차좌굴 후 거동에 대해서 규명하였다. 해석방법으로는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고 2차좌굴과 같은 복잡한 비선형거동을 해석하기 위하여 호장증분법(Arc-length method)을 사용하였다.

핵심용어 : 호장증분법, 2차좌굴, 초기처짐, 최종강도, 천이거동, 항복응력

Abstract : The High-tensile steel has been recognized as a promising concept for structural design of light weight transportation systems such as aircraft, high speed trains and fast ships. Especially high-tensile steel has been widely used in ship structures, and this enables to reduce the plate thickness. Using the high-tensile steel effectively for a ship hull, the plate thickness becomes thin so that plate buckling may take place. Therefore, precise assessment of the behavior of plate above primary buckling load is important.

In this study, examined closely secondary buckling behavior after initial buckling of thin plate structure which operated compressive load according to the various kinds of yield stress with simply supported boundary condition. Analysis method is F.E.M by commercial program(ANSYS V7.1) and complicated nonlinear behaviour can analyze using arc-length method about secondary buckling.

Keywords : Arc-length method, Secondary buckling, Initial deflection, Ultimate strength, Snap-through, Yield stress

1. 서 론

선체구조물은 대표적인 상자형 박판구조물로서 기본적으로 판, 보강판 그리고 거더 등의 구조부재로 구성되어 있다. 이 중에서 선체판 요소는 선박의 구조에서 중요한 부분 중의 일부분이다. 일반적인 판에서는 절단, 용접등의 열 가공에 의해 초기결함이 처음부터 잔류응력이나 초기처짐과 같이 존재하게 된다. 초기결함의 존재여부와 초기결함의 파형에 따라 판의 비선형거동에 상당한 영향력을 미치게 된다. 선체와 같은 판구조물을 경제적이고 신뢰성 있게 해석하고 설계하기 위해서는 구조물을 구성하는 판부재에 대한 비선형거동을 상세하게 해석할 필요가 있다. 지금까지 이에 관한 연구로서는 선체 판부재의 좌굴강도 및 최종강도에 관하여 수많

은 연구(고재용 외. 1996)가 수행되어 왔지만 아직까지도 정확하게 밝혀져 있지 않다고 사료된다. 특히, 면내 압축하중을 받는 박판이 초기좌굴을 지난 후 갑작스런 Snap-through 현상들이 좋은 예라고 할 수가 있다. 그 중에 하나로서는 면내 압축하중을 받는 박판이 초기좌굴을 하면 하중의 증가와 함께 초기좌굴모드의 처짐파형이 성장한다. 이 처짐파형이 하중증가와 함께 언제까지나 성장하는 것은 아니고 이윽고 Snap-through가 발생하여 초기좌굴파형으로부터 다른 안정 파형으로 변한다. 즉, 이것을 2차좌굴이라고 부른다(Nakamura et al. 1978). 그러나, 지금까지 2차좌굴을 동반하는 선체판부재의 탄소성대변형 거동에 관한 연구는 아직까지는 미흡한 실정이다(고재용 외 1995). 이상과 같은 관점에서 본 논문은 고장력강을 선체구조에 효율성 있게 사용하기 위하여 선체구조설계 단계에서 항복강도에 따른 선체판부재의 2차좌굴거동을 정확히 파악함으로써 선체구조설계 단계에서 아주 중요한 자료를 제공하고 선박에 있어서 고장력강을 좀

* 정희원, kojy@mmu.ac.kr 016)655-7129

** 정희원, jkleee96@mmu.ac.kr 061)240-7217

*** 정희원, scv2434@mmu.ac.kr 010)4662-9326

정희원, kcdcbae@hanmail.net 011)634-3317

더 효율적으로 사용할 수 있도록 하기 위함이다.

2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

선체판의 비선형 탄소성거동을 해석하기 위해서 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS의 탄소성대변형 유한요소법을 적용하였다. 본 연구에 사용된 유한요소인 4절점을 가진 사각형 요소를 Fig.1에 나타내고 있다. 또한, 2차좌굴을 나타내는 Snap-through와 같은 경로를 추적하기 위하여 호장증분법(Arc-length method)를 이용하여 해석하였다.

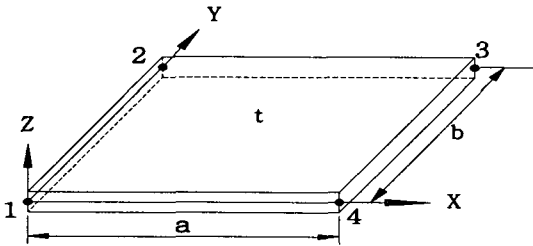


Fig.1 Four-noded rectangular plate element

2.2 해석 모델링

본 연구에서는 비선형 유한요소법(ANSYS)을 적용하여 판 종횡비(a/b)가 1.4, 2.4, 3.6, 4.4, 5.5 인 사각형 판의 해석에서 전체판을 모델링에 적용하였고 아래 Fig.2에 나타내고 있다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 판 폭(b)=1,000 mm, 판 두께(t)=10 mm, 탄성계수(E)= 205,800 MPa, 포아송비(ν)=0.3, 항복강도=196, 235.2, 274.4, 352.8, 392, 588, 784 MPa 이다. 본 연구에 사용된 경계조건은 네변 단순지지조건이며 하중작용은 종방향 압축하중만을 면내방향으로 작용하였으며 주변부재와의 연속성을 만족시키기 위해서 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였다.

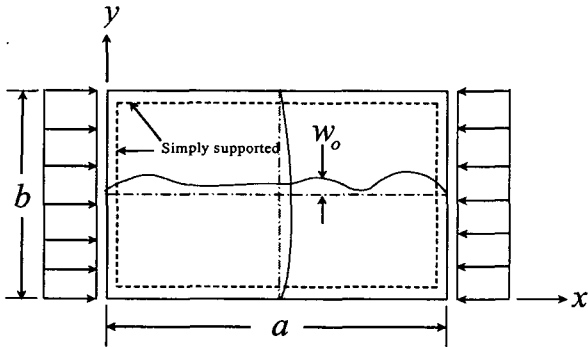


Fig.2 Rectangular plate with initial deflection under compressive load

해석에 사용된 초기처짐은 참고문헌(Yao et al. 1992)에서 인용하였으며 실제 계측된 처짐파형을 중앙부가 평평하게,

단부가 Sin의 1/4파로 되는 전후대칭파형으로 이상화 할 수 있으며 이 처짐형상은 우수파성분이 조금 존재하는 것으로 하중방향으로 비대칭의 초기처짐형상을 갖는다. 본 해석에서는 최대초기처짐량을 판두께의 10%를 적용시켰다. 이 이상 파형을 초기처짐식에 대입하고 최소자승법을 적용하여 이상 파형성분을 구하고 초기처짐을 다음 식 (1)으로 나타낸다.

$$w_o = \sum A_{0m} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

Table 1. Modified components of idealized initial deflection

A_{0m}/t	α_m^+	β_m^+	γ_m^+
A_{011}/t	1.0713	0.0477	-0.0073
A_{021}/t	0.0076	-0.0340	0.0037
A_{031}/t	-0.0386	0.1703	-0.0187
A_{041}/t	-0.0157	0.0146	-0.0007
A_{051}/t	-0.1361	0.1089	-0.0091
A_{061}/t	0.0017	-0.0008	-0.0007
A_{071}/t	-0.0284	0.0092	0.0035
A_{081}/t	0.0052	-0.0050	0.0012
A_{091}/t	0.0254	-0.0276	0.0067
A_{101}/t	-0.0019	0.0017	-0.0005
A_{111}/t	0.0210	-0.0213	0.0044

식(1)에 우수파성분을 더한 이상파형을 적용하였다. 이 계수에 최소자승법을 적용하여 초기처짐성분을 판의 종횡비 함수로서 다음 식(2)으로 근사하였다.

$$A_{0m} = \alpha_m + \beta_m(a/b) + \gamma_m(a/b)^2 \quad (2)$$

윗 식(2)의 계수값을 Table.1에 나타내고 종횡비(a/b)3.6인 경우에 대해서 윗식으로 계산된 A_{0m} 의 값을 Fig.3에 나타내고 있다.

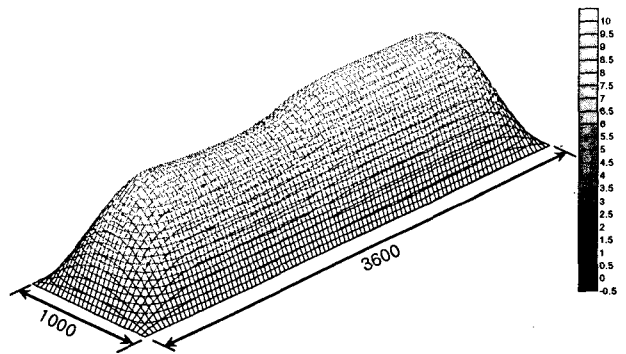


Fig.3 Coefficient of idealized initial deflection based on measured results

3. 수치해석 및 고찰

본 해석에 앞서서 본 연구와 유사한 결과를 갖고 있는

Ko,J-Y and Yao,T(1996)의 연구결과와 본 연구에서 사용하고 있는 전산수치해석 프로그램인 ANSYS와의 결과를 비교 분석함으로써 정도검증을 하였다. 판종횡비(a/b)1.4이고 재료는 고장력강인 AH36의 물성치를 적용하였다. 초기처짐모드는 실제 계측한 자료인 비대칭형 강제모드 형상과 일반적인 고유모드인 좌굴모드를 비교하고 있으며 해석에 있어서는 변위형 증분법과 호장증분법 두가지를 적용하여 비교하고 있다. 그래프에서 보는 것과 같이 참고문헌(고재용 외, 1996)에서의 결과치와 ANSYS계산값의 오차는 거의 없으며 비선형 좌굴해석 제어방법을 변위제어법이나 호장증분법으로 달리하여도 결과 값은 일치함을 보이고 있으며 해석기법에 따라서 거동추적에 상당한 차이를 보여주고 있다.

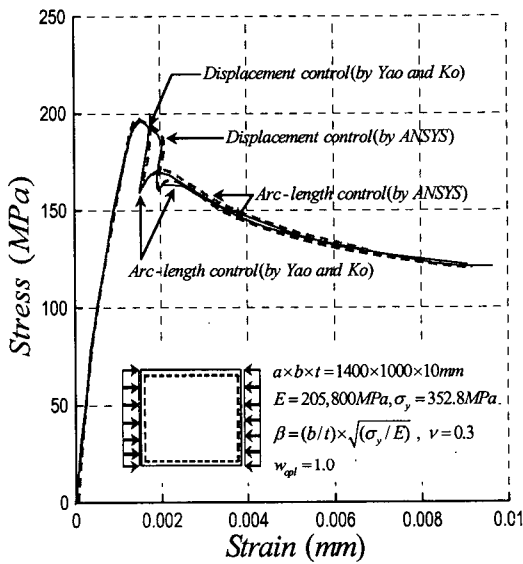


Fig.4 A comparison Ko,J-Y & Yao,T with ANSYS results according to nonlinear analysis method (a/b=1.4)

종횡비(a/b)1.4에 대한 거동을 Fig.5에 나타내고 있다. Fig. 5-9까지의 그래프는 응력과 변형을 관계이며 그래프에 나타낸 ㉑-㉙점은 각 항복응력에 따른 탄소성대변형 거동을 나타내고 있으며 ㉚는 탄성대변형 거동을 나타내고 있다. Fig.5로부터 알 수 있는 바와 같이 하중을 증가시키면 초기좌굴을 지나 초기항복점 그리고 최종강도에 이르게 되는 거동을 보이게 된다.

이와 같은 종횡비(a/b)에서는 연강의 항복응력인 274.4MPa 이하에서는 Snap-through현상이 발생하지 않는다. 그러나, 고장력강이 되면서 2차좌굴에 의한 Snap-through현상이 나타나며 이때 처짐모드 또한 1모드에서 3모드로 동적변화를 하고 압축강도도 급격히 감소하게 됨을 알 수 있다. 일반적인 각 선급 좌굴강도 평가에서는 탄성 상태에서 좌굴이 발생한다는 가정 아래 좌굴설계식을 도출하고 있지만 이와 같이 최종강도 이후에서의 거동에서도 2차좌굴이 발생하는 것을 확인할 수가 있다.

종횡비(a/b)2.4에 대한 거동을 Fig.6에 나타내고 있다. 항

복응력 196MPa이상에서부터 2차좌굴이 발생하고 있으며 항복응력 274.4MPa 이상에서부터는 동일한 거동의 경로를 유지하고 있다. 이러한 종횡비에서는 항복응력이 274.4MPa

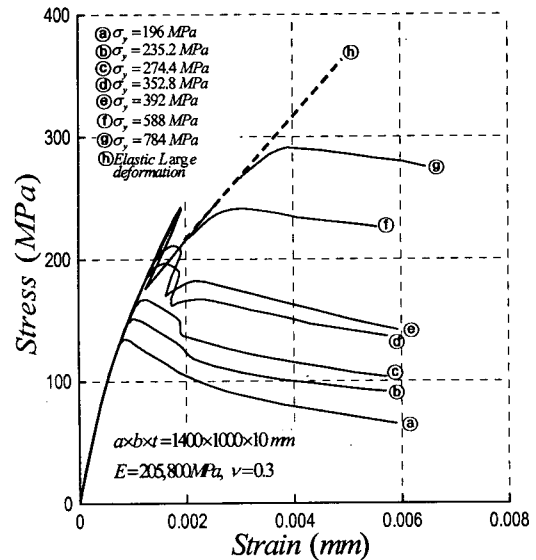


Fig.5 The axial compressive stress versus strain curves for ship plating with varying yield stress of material, for a/b=1.4

이상일 경우에는 고장력강의 거동과 Snap-through 경로추적의 차이는 발생하지 않음을 알 수가 있다. 마찬가지로 2차좌굴이 발생하면서 2모드에서 4모드로 급격한 처짐모드 변화를 나타내게 되는데 이때 2차좌굴의 경로는 에너지가 큰 쪽에서 작은 쪽으로 거동을 나타나게 된다. 일반적인 하중형, 변위형 증분법에서는 수치적으로 이러한 동적거동을 정확하게 추적할 수 없는 맹점을 지니고 있지만 Arc-length method의 경우에는 가능하게 된다.

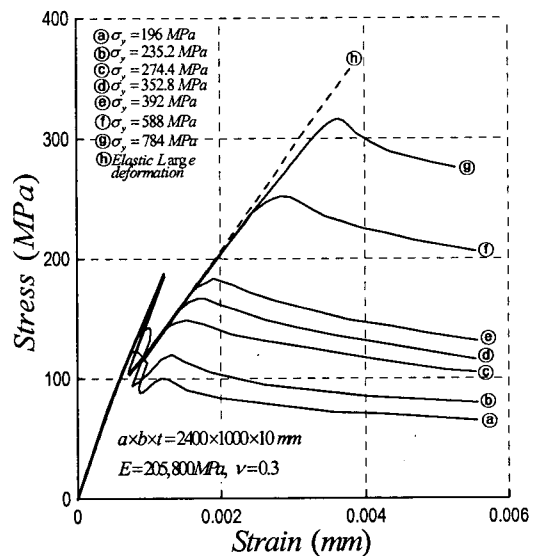


Fig.6 The axial compressive stress versus strain curves for ship plating with varying yield stress of material, for a/b=2.4

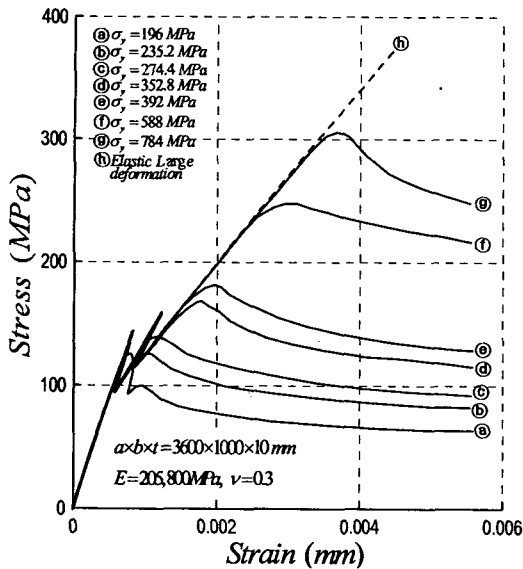


Fig.7 The axial compressive stress versus strain curves for ship plating with varying yield stress of material, for a/b=3.6

판 종횡비(a/b)3.6인 부재에 대한 항복응력에 따른 탄소성 대변형 거동을 나타내고 있는 Fig.7를 살펴보면 고장력강인 ①에서부터 Snap-through가 2번 발생하게 됨을 알 수가 있다. 이는 복잡한 비선형 거동을 나타낼 뿐만 아니라 면내강성의 복잡한 거동을 나타내고 있으므로 안정되고 정확한 설계를 하기 위해서는 이러한 거동의 특성을 정확히 설계에 반영하여야 한다.

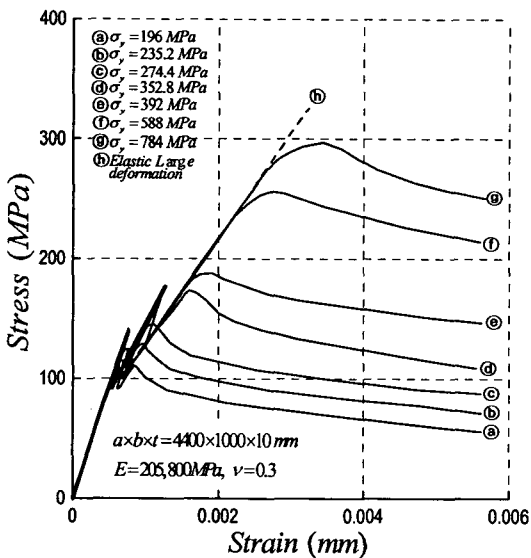


Fig.8 The axial compressive stress versus strain curves for ship plating with varying yield stress of material, for a/b=4.4

종횡비(a/b)4.4에 대한 거동을 Fig.8에 나타내고 있다. 판 종횡비(a/b)가 4.4인 선체판의 탄소성대변형 거동을 살펴보면 연강의 거동인 ①, ②, ③에서는 처짐모드의 변화가 초기 처짐모드인 1모드에서 3모드로 변하는 1차 Snap-through현상

이 발생하지만 고장력강 거동의 시작인 ④에서는 또다시 3모드에서 최종 처짐모드인 5모드로 변하는 Snap-through현상의 처짐변화가 발생하면서 면내강성 또한 급격하게 감소하게 됨을 알 수가 있다. 판종횡비(a/b)가 5.5에 대한 거동을 Fig.9에 나타내고 있다.

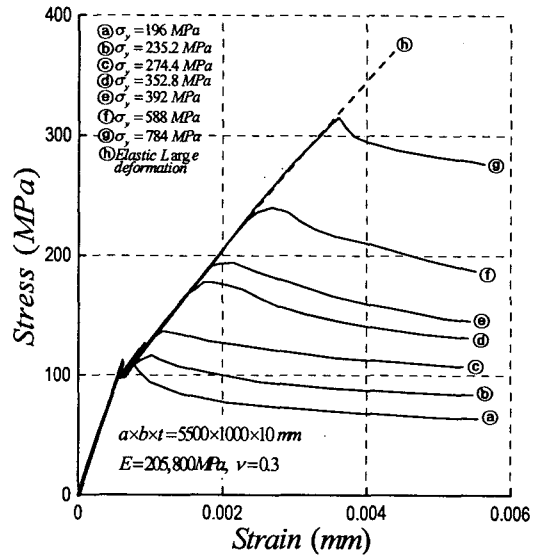


Fig.9 The axial compressive stress versus strain curves for ship plating with varying yield stress of material, for a/b=5.5

Fig.9로부터 알 수 있는 바와 같이 종횡비(a/b) 5.5인 판에 있어서는 초기처짐모드를 나타내는 1모드에서 3모드나 5모드를 거치지 않고 곧바로 최종강도의 처짐모드를 나타내는 7모드로 변화하는 Snap-through현상이 발생함을 알 수 있다.

연강이나 고장력강을 나타내는 선체판에서 최종강도 이후의 처짐모드는 동일하게 7모드를 나타냄을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 들어 폭 넓게 사용되어지고 있는 고장력강의 효율성을 높여서 설계에 반영하게 하기 위하여 실제 계측된 초기처짐파형을 적용시키고 일축 압축하중을 받는 선체판에 대하여 ANSYS를 이용한 탄소성대변형 유한요소해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2차좌굴과 같은 경로에서는 하중형증분법과 변위형증분법의 강성매트릭스[K]가 특이(Singular)로 됨으로서 그 근처의 경로를 추적하기 위해서는 호장증분법(Arc-length method)을 적용시켜야 한다.

2) 2차좌굴이 발생하면 초기좌굴모드는 완전히 사라지고 2차좌굴모드가 처짐파형을 지배하게 된다,

3) 필연적으로 존재하게 되는 비대칭형 초기처짐을 지닌 판에서는 2차좌굴이 발생하게 된다.

4) 고차종횡비로 갈수록 2차좌굴 발생시점이 빠르고, 최종강도 또한 낮게 평가한다.

참 고 문 헌

- [1] 고재용, T. Yao, 백점기 : “면내압축하중을 받는 판의 2차좌굴에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제33권 제3호, pp.66-80, 1996.
- [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] 고재용 : “에너지법에 의한 선체판의 기하학적 비선형거동에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 선박해양구조연구회, 하계학술발표대회, 1998.
- [4] 박영일, 백점기 : “선체 판부재의 좌굴 및 최종강도에 관한 주변지지 조건의 영향”, 대한조선학회논문집, pp.411, 1999.
- [5] 고재용, 박주신 : “초기처짐형상에 따른 판부재의 2차좌굴에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, pp.543-548, 2003. 2003년도 추계학술대회 논문집, 2003. 10.
- [6] 권용우, 박영일, 이제명, 백점기, 고재용 : “선체 곡판구조의 좌굴 및 최종강도 특성에 관한 연구”, 대한조선학회, 2003년도 추계학술대회 논문집, 2003. 10.