

항복강도에 따른 선체판의 탄소성거동에 관한 연구

고재용* · 박주신**

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수, ** 목포해양대학교 대학원

A Study on the Elasto-Plasticity Behaviour According to the Yield Strength of a Ship's Plate

Jae-Yong Ko* · Joo-Shin Park**

* Faculty of ocean system engineering, Mokpo Maritime University

** Graduate school of Mokpo Maritime University

요약 : 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 : 좌굴, 비선형거동, 호장증분법, 박판부재, 최종강도

ABSTRACT : Recently, buckling is easy to happen as that High tensile steel that is the thin plate absence is used comprehensively for the structure. Specially, buckling is getting into important design standard in hull construction which use High tensile steel. Therefore, that grasp conduct exactly after buckling is important in stability of hull structure.

In this study, examined closely about conduct and secondary buckling after initial buckling of thin plate structure which receive compressive load according to various kinds yield strength under simply supported condition that make by buckling strength formula standard in each payment in advance rule to place that is representative construction of hull in this research. Analysis method is F.E.M by ANSYS and complicated nonlinear behaviour to analyze such as secondary buckling in used arc-length method

KEY WORDS : buckling, nonlinear behaviour, arc-length method, thin plate, ultimate strength

1. 서론

선체구조물은 대표적인 상자형 박판구조물로서 기본적으로 판, 보강판 그리고 거더 등의 구조부재로 구성되어 있다. 이 중에서 선체판 요소는 선박의 구조에서 중요한 부분 중의 일 부분이다. 일반적인 판에서는 절단, 용접등의 열 가공에 의해 초기결함이 처음부터 잔류응력이나 초기처짐과 같이 존재하

게 된다. 초기결함의 존재여부와 초기결함의 과형에 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 수많은 연구[1-3]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 초기

* 정희원, kojy@mmu.ac.kr 016)655-7129

** scv2434@mmu.ac.kr 019)617-9326

좌굴을 하면 하중의 증가와 함께 초기좌굴모드의 처짐파형이 성장한다. 이 처짐파형이 하중증가와 함께 언제까지나 성장하는 것은 아니고 이윽고 Snap-through 가 발생하여 초기좌굴파형으로부터 다른 안정파형으로 변한다. 즉, 이것을 2차좌굴이라고 부른다[4]. 그러나, 지금까지 2차좌굴을 동반하는 선체판부재의 탄소성대변형 거동에 관한 연구는 아직까지는 미흡한 실정이다[5-6]. 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 좀더 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[8].

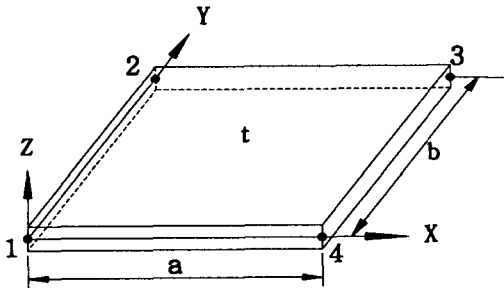


Fig.1 Four-noded rectangular plate element

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 해석에 있어서 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)= 21,000 kgf/mm², 포아송비(ν)=0.3, 항복강도=20, 24, 28, 36, 40, 60, 80 kgf/mm² 이다. 본 연구에 사용된 경계조건은 네변 단순지지조건이며 하중작용은 종방향 압축하중만을 면내방향으로 작용하였으며 네변 모두 직선을 유지한다는 조건을 적용하였

다.

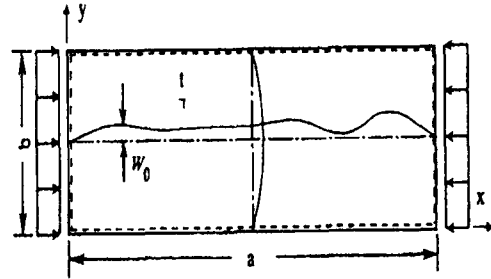


Fig.2 Rectangular plate with initial deflection under thrust

해석에 사용된 초기처짐은 참고문헌[2]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 이상파형을 전체초기처짐식에 대입하여 최소자승법을 적용하여 이상파형성분을 구하고 초기처짐을 다음 식으로 나타낸다.

$$w_0 = \sum A_{0m} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

3. 수치해석 및 고찰

본 연구에서 나타내는 그래프는 응력과 변형률 관계이며 그래프에 나타난 ㉑~㉒점은 각 항복강도에 따른 탄소성대변형 거동을 나타내고 있으며 ㉓는 탄성대변형 거동을 나타내고 있다.

종횡비(a/b)1.4에 대한 거동을 Fig.3에 나타내고 있다. Fig.3으로부터 알 수 있는 바와 같이 하중을 증가시키면 초기좌굴을 지나 초기항복점 그리고 최종강도에 이르게 되는 거동을 보이게 된다. 이와같은 종횡비에서는 연강의 항복강도인 28kgf/mm²이하에서는 Snap-through현상이 발생하지 않는다. 그러나, 고장력강이 되면서 2차좌굴이 발생하고 Snap-through현상이 나타나며 이때 처짐모드 또한 1모드에서 3모드로 변화를 하고 압축강도도 급격히 감소하게 됨을 알 수 있다. 일반적인 각 선급 좌굴강도 평가에서는 탄성상태에서 좌굴이 발생한다는 가정 아래 좌굴설계식을 도출하고 있지만 이와같이 최종강도 이후에서의 거동에서도 2차좌굴이 발생하는 것을 확인할 수가 있다.

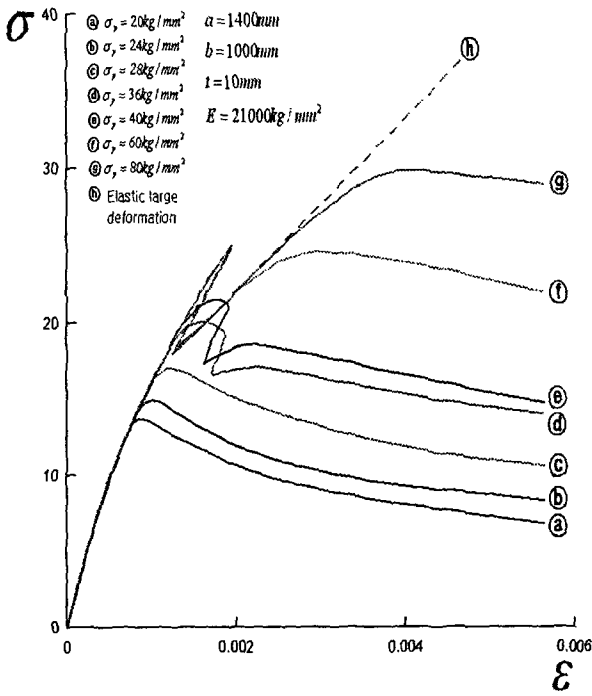


Fig.3 A comparison stress with strain according to yield strength (a/b=1.4)

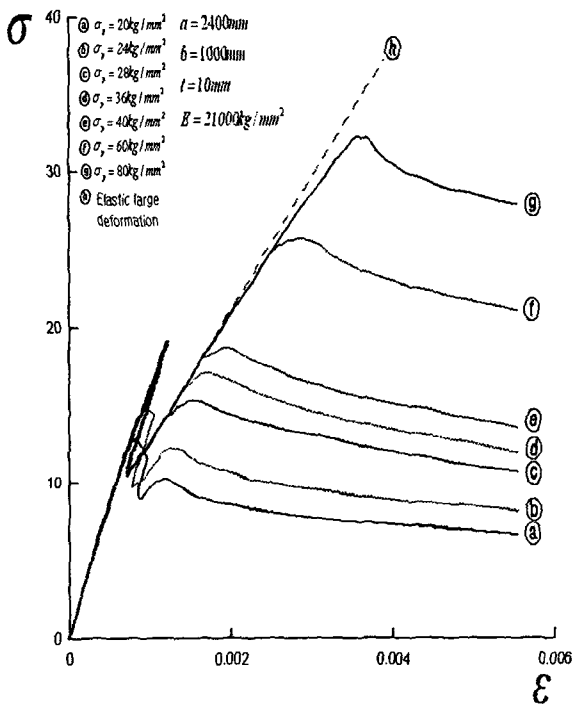


Fig.4 A comparison stress with strain according to yield strength (a/b=2.4)

도 20 kgf/mm^2 이상에서부터 2차좌굴이 발생하고 있으며 항복강도 28 kgf/mm^2 이상에서부터는 동일한 거동의 경로를 유지하고 있다. 이러한 중횡비에서는 항복강도가 28 kgf/mm^2 이상일 경우에는 고장력강의 거동과 Snap-through 경로추적의 차이는 발생하지 않음을 알 수가 있다. 마찬가지로 2차좌굴이 발생하면서 2모드에서 4모드로 급격한 처짐모드 변화를 나타내게 되는데 이때 면내강성 변화 또한 크다는 것을 알 수가 있다.

판 중횡비(a/b)=3.6인 부재에 대한 항복강도에 따른 탄소성 대변형 거동을 나타내고 있는 Fig.5를 살펴보면 고장력강인 ㉠에서부터 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.

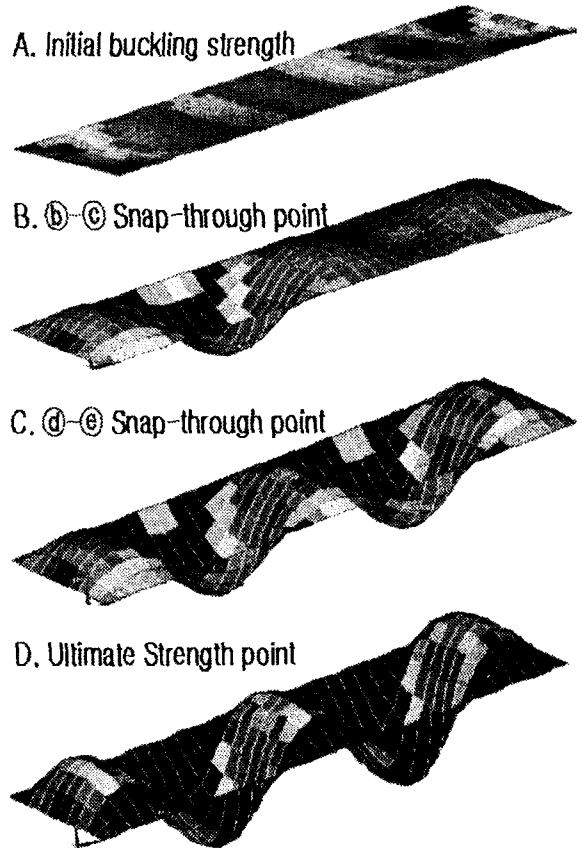


Fig.5 A change deflection mode at each point

중횡비(a/b) 2.4에 대한 거동을 Fig.4에 나타내고 있다. 항복강

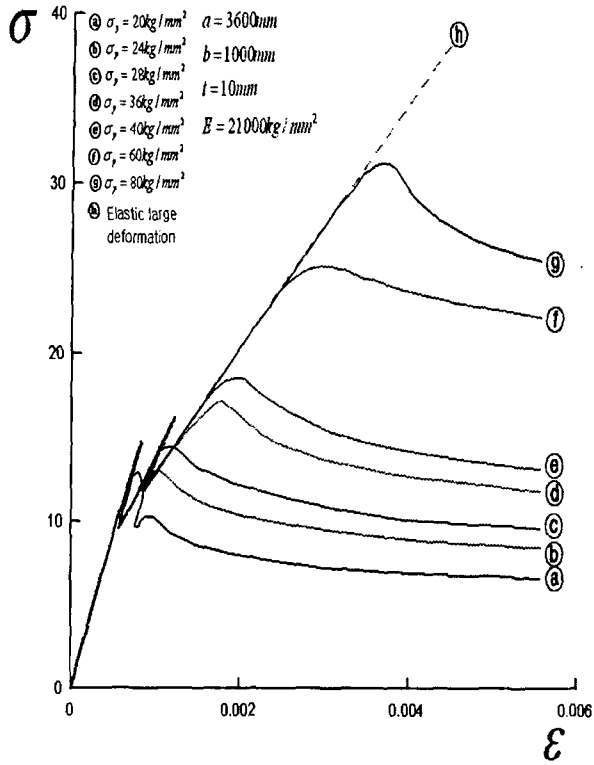


Fig.6 A comparison stress with strain according to yield strength (a/b=3.6)

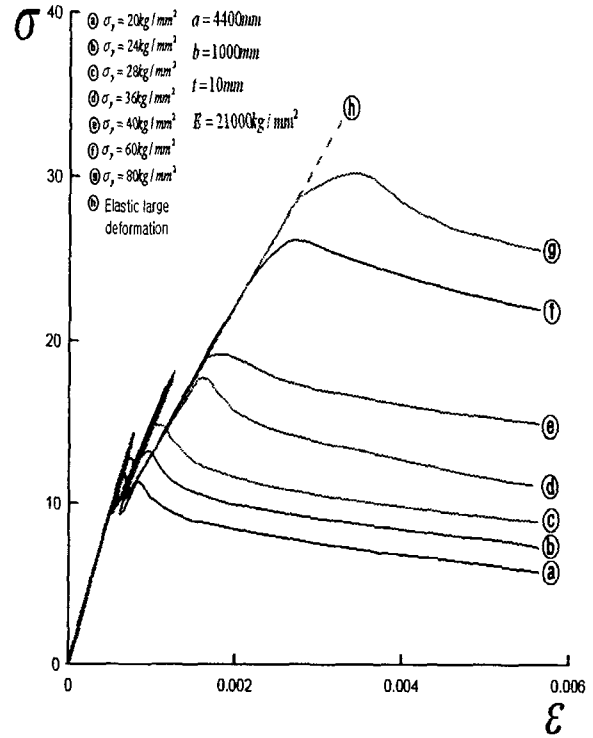


Fig.7 A comparison stress with strain according to yield strength (a/b=4.4)

Fig.5에서는 판종횡비(a/b)3.6에서 항복강도가 36인 고장력강판의 처짐변화를 나타내고 있다. 탄성좌굴강도 시점(A)에서는 1모드를 유지하고 첫 번째 2차좌굴에 의한 Snap-through로 인하여 3모드로 처짐변화를 보이게 된다. 이때 판내 면내강성 또한 급격히 감소하게 되며 초기처짐의 영향으로 우수파성분이 성장한 처짐파형을 보이게 된다. 불완전한 파형에서 다시 안정된 파형으로 가기위해서 다시한번 2차좌굴이 발생(C)하면서 안정된 파형인 5모드를 유지하면서 처짐파형 또한 좌우 대칭을 이루게 된다. 이후 최종강도(D)에서는 안정된 파형을 유지해가며 판내 소성분포는 판내 모서리부분을 기점으로 하중방향으로 길게 진행하며 판의 중앙부분에는 소성이 전개되지 않는다. 이는 비하중변에 작용하는 막력효과 때문이다.

판종횡비(a/b)4.4에 대한 거동을 Fig.7에 나타내고 있다. 판종횡비(a/b)가 4.4인 선체판의 탄소성대변형 거동을 살펴보자면 연강의 거동인 ①,②,③에서는 처짐모드의 변화가 초기처짐모드인 1모드에서 3모드로 변하는 1차 Snap-through현상이 발생하지만 고장력강 거동의 시작인 ④에서는 또다시 3모드에서 최종 처짐모드인 5모드로 변하는 Snap-through현상의 처짐변화가 발생하면서 면내강성 또한 급격하게 감소하게 됨을 알 수가 있다.

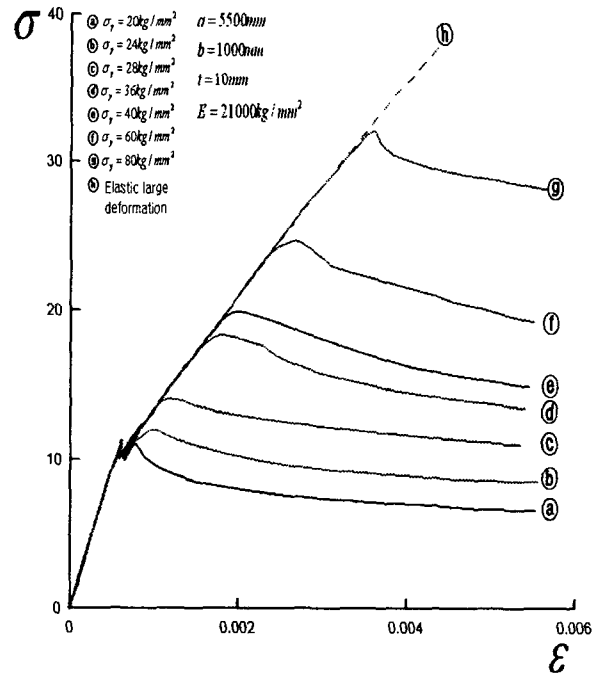


Fig.8 A comparison stress with strain according to yield strength (a/b=5.5)

판중횡비(a/b)가 5.5에 대한 거동을 Fig.8에 나타내고 있다. Fig.7로부터 알 수 있는 바와 같이 종횡비가 5.5인 판에 있어서는 초기치짐모드를 나타내는 1모드에서 3모드나 5모드를 거치지 않고 곧바로 최종강도의 치짐모드를 나타내는 7모드로 변화하는 Snap-through현상이 발생함을 알 수 있다. 연강이나 고장력강을 나타내는 선체판에서 똑같이 최종강도 이후의 치짐모드는 7모드를 나타냄을 알 수 있다.

후기

이 연구는 한국과학기술연구원 센터의 지원으로 수행되었다.

5. 결론

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

- 1) 2차좌굴과 같은 경로에서는 하중형중분법과 변위형중분법의 강성매트릭스[K]가 특이(Singular)로 됨으로서 그 근처의 경로를 추적하기 위해서는 호장중분법(Arc-length method)을 적용시켜야 한다.
- 3) 고장력강판의 종횡비(a/b)가 1.4인 경우 항복강도가 36-40에서는 최종강도 이후 2차좌굴에 의한 Snap-through가 발생한다.
- 4) 2차좌굴이 발생하면 초기좌굴모드는 완전히 사라지고 2차좌굴모드가 치짐파형을 지배하게 된다.
- 5) 고장력강판의 종횡비(a/b)가 3.6인 경우 탄성2차좌굴강도가 최종강도보다 낮기 때문에 초기좌굴 후 Snap-through현상과 같은 2차좌굴이 발생한 후 최종강도에 도달하는 거동을 보인다.
- 6) 고장력강판의 종횡비(a/b)가 5.5인 경우 가장 낮은 응력에서 2차좌굴에 의한 Snap-through가 발생하며 3모드에서 5모드의 전환주기가 짧고 바로 7모드의 안정파형으로 변한다.
- 7) 2차좌굴이 발생하게 되면 초기좌굴에서 발생한 면내강성이 0.5E보다 더 현저하게 감소한다.

참고문헌

1. 고재용: "에너지법에 의한 선체판의 기하학적 비선형거동에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp.94~104, 1999.
2. 고재용, 최익창: "호장중분법에 의한 판구조물의 2차좌굴 거동에 관한 연구", 한국전산공학회지, Vol. 42. No.4, 1998.

3. 고재용, T. Yao, 백점기: "면내압축하중을 받는 판의 2차좌굴에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제33권 제3호, pp.66~80, 1996.
4. 백점기, 선체구조의 좌굴, 최종강도에 관한 연구동향, 한국전산구조공학회지, 제 10권, 제2, 1997.6
5. ANSYS User's manual (5.7 version)
6. J.K. Paik, J.H. Ham and Jae H. Ko: A New Plate Buckling Design Formula, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, 1992, pp.559-566.
7. 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.
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.