해양환경안전학회 제10권 제1호, pp. 29~33, 2004. 06. 30 (ISSN 1229-3431)
Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety

압축력을 받는 선체판의 경계조건에 따른 탄소성거동에 관한 연구

고재용* · 박주신** · 박성현***

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수, ** 목포해양대학교 대학원 박사과정, *** 목포해양대학교 운송시스템학부 교수

A Study on the Elasto-Plasticity Behaviour of a Ship's Plate under Thrust According to Boundary Condition

Jae-Yong Ko* · Joo-Shin Park** · Sung-Hyun Park***

* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, 530-729, Korea
** Graduate school of Mokpo National Maritime University, 530-729, Korea
*** Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, 530-729, Korea

요 약 : 지금까지의 강구조설계에서는 일반적인 탄성좌굴개념을 적용하고 있다. 왜냐하면 현재까지의 실적선의 데이터와 경험적인 방법에 의해 도출된 여러 가지 룰에 의한 데이터가 상당히 신뢰할만한 정도를 갖고 있기 때문이라고 판단하기 때문이다. 그러나, 최근들어 판두께가 박판인 고장력강재가 선체에 폭넓게 사용되어지면서 탄성좌굴발생 시점이 빨라졌으며 이에따른 탄소성거동을 정확히 예측할 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 선체의 이중저 판넬구조에서 압축하중을 받을때의 실제판부재의 주변지지조건을 네가지로 이상화하여 해석하였으며, 이때 실제 필연적으로 존재하게 되는 열가공에 의한 비대칭형 초기처짐을 적용하였고, 비선형해석기법으로서는 Arc-length method를 적용하였고 해석코드는 범용유한요소법 소프트웨어로 잘 알려진 ANSYS를 사용하였다.

핵심용어 : 좌굴, 탄소성대변형, 호장증분법, 초기처짐

Abstract : *Design of general steel structure had applied to achieve elastic designing concept so far. Because elastic design supposes that whole structure complies with elasticity formula so that achieve via allowable stress of material. It is concept that calculate stress distribution of construction about action external load and estimate load when the maximum stress reaches equally with allowable stress that is established by maximum safety load of the structure. But, absence that compose actuality structure by deal with external load increase small success surrender and structure hardness falls and structure in limited state finally on the whole as showing complicated process by interference between collapse and buckling under compression.*

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 : Buckling, Elasto-plasticity large deformation, Arc-length method, Initial deflection

1. 서 론

선박의 구조설계는 기본적으로 좌굴 또는 최종강도를 기준으로 수행되고 있으므로 선박구조의 기본 구성부재인 판부재에 대한 좌굴 및 최종강도를 정확하게 계산하는 방법을 확립하는 것이 중요하다. 판부재의 강도는 작용외력의 종류나 특성 뿐만 아니라 초기결함, 주변지지조건 등의 영향을 크게 받으며, 지금까지 이 문제에 대해 방대한 연구가 국내외적으로 수행되어 왔다. 이러한 문제에 대해 각국 선급은 좌굴 및 최종강도 설계지침을 제안해 오고 있으나 선체 판부재의 주변 지지조건에 기인한 많은 문제점이 여전히 규명되지 않고 남아 있다. 각국 선급협회에서 제시하고 있는 선체 판부재의 좌굴설계공식은 보통 좌굴계수를 이론적인 방법을 적용하여 명시적인 형태로 표현하고 있으며, 이때 판의 주변은 단순지지 또는 고정의 이상적인 조건을 가정하여 도출하고 있다. 그러나, 실제 판부재의 주변은 지지부재의 비틀림강성 때문에 회전이 완전히 자유롭지도, 회전구속이 무한하지도 않으며, 그 결과 단순지지나, 고정의 이상적인 주변지지 조건과는 다르다. 본 연구에서는 실제 선박의 상갑판부와 선저외판부 구조에 존재하게 되는 초기처짐을 계측한 인용자료를 바탕으로 하여 초기처짐형상을 이상화하였으며 이러한 초기처짐형상을 갖는 사각형 판부재에 대하여 여러 가지 주변지지조건에 따른 탄소성대변형거동의 양상을 규명하였다. 비선형좌굴해석기법으로서는 2차좌굴에 기인한 갑작스런 Snap-through거동추적을 위하여

* 대표저자 : 정회원 kojy@mmu.ac.kr (061)240-7129
** 정회원 scv2434@mmu.ac.kr (061)240-7246
*** 정회원 shpark@mmu.ac.kr (061)240-7127

호장증분법을 적용하였다. 여기서 2차좌굴은 압축력을 받는 고장력강판이 초기좌굴이후에 계속적으로 압축력에 대하여 면내강성을 갖고 있으면서 최종강도에 도달하기도 전에 또 다른 좌굴이 발생함으로서 면내강성이 급격하게 감소하여 최종강도에 도달하는 것을 의미한다. 2차좌굴은 복잡한 비선형 거동을 나타내고 있으므로 기존의 하중형 증분법이나 변위형 증분법에서는 구조물의 거동을 구할 수 없었다. 그러므로 2차좌굴과 같은 복잡한 비선형 거동을 구할 수 있는 호장증분법(Arc-lenght method)을 이용하여 압축력을 받는 선체판의 경계조건에 따른 탄소성거동에 대하여 연구하였다.

2. 수치해석이론

2.1 해석방법

Fig.1에 나타내는 바와 같이 4변이 직선을 유지하면서 x방향에 면내압축하중을 받는 판을 대상으로 한다. 이때 면외변형에 대해서 네변 모두 직선을 유지하고 있으며 본 논문에서는 네가지 경계조건을 적용하여 실제 주변지지조건으로 적용하였으며, 경계조건에 따른 판부재의 거동을 살펴보았다.

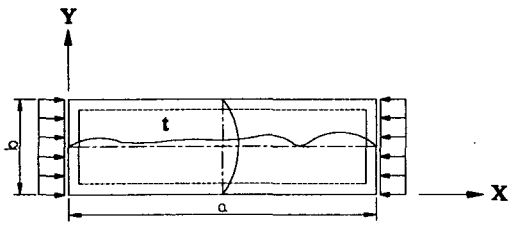

Fig.1 Analysis model under axial compression

일반적인 판의 거동은 비하중변의 경계조건에 따라서 많은 영향을 받게 된다. 본 연구에서 밝힌 네가지 경계조건을 Fig.2에 나타내고 있다. 네변 단순지지로 되어 있는 S.S와 하중변은 단순지지이고 비하중변은 고정지지인 S.C, 하중변은 고정지지이고 비하중변은 단순지지인 C.S, 마지막으로 네변 고정지지인 C.C로 구성되어 있다.

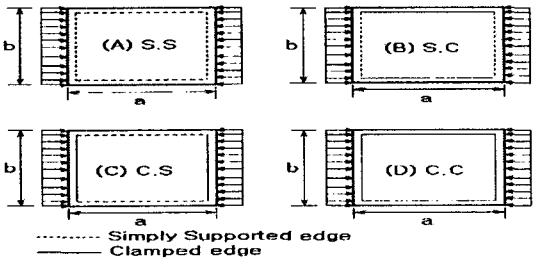

Fig.2 Ideal plate edge conditions considered in the present study

2.2 평형방정식의 해법

면내압축하중을 받는 판이 나타내는 2차좌굴 거동은 극한점과 분기점 근방을 포함하는 복잡한 하중과 처짐경로를 거친다. 그러므로 하중과 변위를 단순히 증가시키는 통상의 하중증분형해석과 변위증분형 해석에서는 평형경로를 구할 수 없는 경우가 생긴다. 따라서, 본 연구에서는 통상의 하중제어형 및 변위제어형의 증분해석법 외에 호장증분법과 Newton-Raphson법을 병용한 증분형해법을 적용하였다.

2.3 호장증분법(Arc-length method)

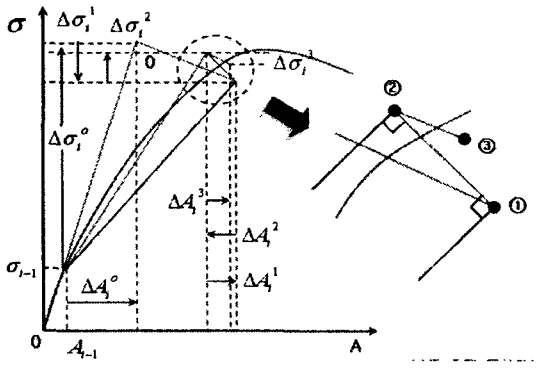

Fig.3 Arc-length approach with full newton-raphson method

전술의 하중형증분법이나 변위형증분법에서는 특이(Singular)가 발생하는 좌굴점에서는 평형경로를 구하는 것이 어렵다. 그러므로 본 연구의 해석에서는 호장증분법을 사용하였다. 호장증분법에서는 증분파라메타로서 하중-처짐곡선의 호장을 증분시킨다. 그러므로 Fig.3에 나타낸 바와 같이 각 증분단계의 반복, 수렴의 제 1단계에서는 전 단계의 결과와 같은 방향으로 하중증분 및 처짐증분을 가정한다. 이후의 반복, 수렴과정에서는 수렴계산의 전단계의 호장방향과 직각방향으로 해를 탐색한다. 이 같은 수렴계산을 불평형력(Q)이 제로("0")에 가깝게 되는 최소값까지 반복하게 된다. 본 계산에 의하면 극한점에서도 연속적인 경로에 있는 한 수렴조작이 가능하다.

2.4 해석 모델링

실제의 구조물은 용접이나 절단으로 인하여 이상적인 완전한 평판이 아니다. 용접에 의해 조립된 구조물의 패널에 생기고 있는 초기처짐파형은 일반적으로 복잡한 파형이다. 본 논문에서는 실제 선박에서 계측한 야윈 말모양의 처짐파형을 적용하여 해석하였다. 해석대상 종횡비는 1.4, 2.4, 3.6, 4.4, 5.5이며 사용된 재료의 물성치는 현재 선체구조물에 주로 사용되는 고장력강판인 AH36의 물성치를 적용하였다. 판폭(b)은 1000 mm, 판두께(t) 10mm, 탄성계수(E)= $21,000 kgf/mm^2$, 포아송비(ν)=0.3, 항복강도 (σ_y)= $36 kgf/mm^2$, 세장비 (β) = 4.14, 최대초기처짐은 판폭의 10%를 유지하였다.

본 연구에서는 실제 계측한 초기처짐값이 중앙부는 평평하게 그리고 단부는 sin의 1/4파형을 유지하도록 이상화하였고,

그 처짐파형은 종방향으로 비대칭형을 유지하고 있다. 해석에 사용된 모델링은 판부재 전체를 이용하였고 mesh study를 통해서 최적의 메쉬를 구현하였다. 각 경계조건마다의 특성상 갑작스런 2차좌굴에 의한 Snap-through현상을 규명하기 위해서 탄소성대변형 유한요소법(ANSYS)을 적용하였고, 해석적인 방법에 있어서는 호장증분법(Arc-length method)을 이용하여 분기점에서의 2차좌굴을 추정하였다.

3. 수치해석 및 고찰

Fig.4에서는 본 논문에서 가정한 네가지 판주변 지지조건에 대한 판종횡비(a/b)가 1.4인 부재의 탄소성거동을 나타내고 있다. 하중변이 고정지지조건(ⓒ,ⓓ)이면 초기좌굴 이후 면내강성 감소가 완만한 거동을 보인다. 그러나, 하중변이 단순지지조건(ⓐ,ⓑ)에서는 최종강도 이후 2차좌굴에 의한 Snap-through가 발생하는 공통된 거동을 나타낸다.

이러한 주된 원인은 초기좌굴 이후의 판의 처짐파형을 보면 알 수가 있는데 ⓐ,ⓑ거동에서는 초기좌굴 이후 거동에

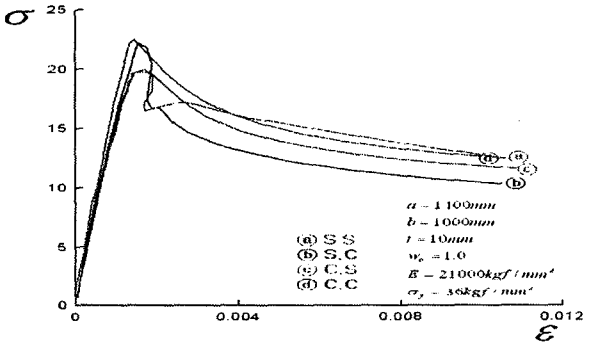

Fig.4 A comparison stress with strain according to oundary condition (a/b=1.4)

서 1모드도 3모드도 아닌 혼합형 처짐파형을 보이게 된다. 기존의 초기파형에서 안정된 파형인 3모드를 유지하기 위해서는 2차좌굴이 발생한다는 메카니즘이 성립되는 것이다. 종횡비 1.4 같은 경우에는 모드분기점이 되는 종횡비이므로 이런 현상이 발생하기 쉬우며 이러한 종횡비에서는 하중변을 단순지지로 구성할 경우에 구조설계 단계에서 2차좌굴을 고려한 설계가 반드시 이루어져야 한다.

기존의 탄성설계법에서는 이러한 최종강도 이후의 거동에서 2차좌굴이 발생하는 현상이 무의미하지만, 연강에 비해 박판인 고장력강판 재료의 효율성을 제고하고, 충분한 구조성능을 보유한 구조물을 설계하기 위해서는 부재의 탄소성거동까지를 생각하는 최종한계상태 설계법이 되어야 할 것이다. 현재 일부분이지만 선체구조물에서도 최종강도를 기준으로 한 최종한계상태설계법이 점차 채택되어지고 있다.

종횡비가 2.4인 판부재의 거동을 각각 Fig.6에 나타내고 있다. 종횡비가 2.4에서는 비하중변의 경계조건에 따라 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 가 있다. 먼저 비하중변이 단순지지조건인 ⓐ,ⓒ거동에서는 동일하게 2차좌굴에 의한 Snap-through가 발생하며, 이때 탄성좌굴강도 지점에서는 1모드를 유지하던 판이 2차좌굴이 발생하면서 3모드를 유지하며, 이후 거동에 있어서도 안정된 파형인 3모드를 유지하는 공통점을 갖게 된다. 이와 같이 처짐파형 변화가 유사한 지점에서 발생하면서 2차좌굴 이후 최종강도거동까지 유사한 거동을 보인다. 실제 선체 구조물의 선저외판이나, 상갑판부에 사용되는 판종횡비는 선종에 따라 약간씩 차이가 있지만 3.6이상이다. 종횡비가 2.0~3.0사이의 종횡비는 주로 곡가공이 필요한 부분에 절단하여 사용되고 있다.

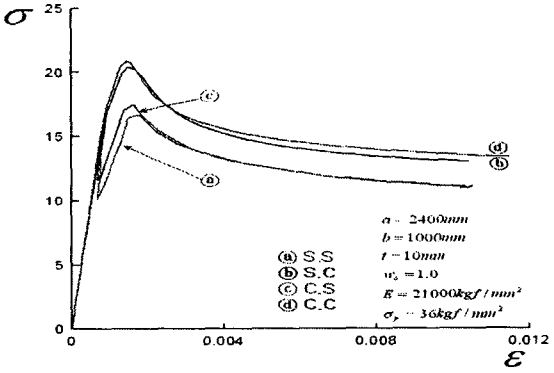

Fig.6 A comparison stress with strain according to boundary condition (a/b=2.4)

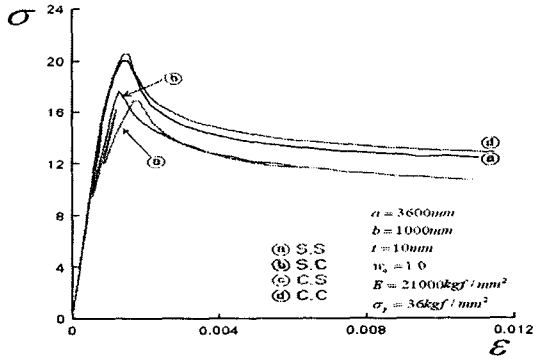

Fig.7 A comparison stress with strain according to boundary condition (a/b=3.6)

이에 반해 비하중변의 지지조건이 고정으로 같은 ⓑ,ⓓ는 초기좌굴 이후 완만한 면내강성 변화를 보이고 있으며, 2차좌굴의 영향이 없음을 알 수가 있다. 이는 처짐파형에 있어서도 탄성좌굴강도 값에서는 1모드를 유지하던 판이 초기좌굴이 발생하면서 3모드를 유지하며, 최종강도에서도 3모드를 유지하는 일반적인 거동을 보이며, 비하중변이 같은 지지조건이면서 최종강도 이전, 이후 거동에 있어서 같게 평가되고 있다. 이러한 종횡비에서는 네변 단순지지조건인 ⓐ를 설계의 기준으로 잡을 경우, 2차좌굴에 의한 면내강성 감소율이 정확하게 반영한 설계가 이루어져야 선체구조의 안정성을 도모할 수가 있다.

판종횡비(a/b)가 3.6인 판부재의 네가지 경계조건에 따른 탄소성거동을 Fig.7에 나타내고 있다. 이 종횡비에서도 비하중변의 특성에 따라 ⓐ-ⓒ거동과 ⓐ,ⓒ거동이 각각 유사하게 진행됨을 알 수 있다. 그러나, ⓑ-ⓓ거동에서는 약간의 특이점이 발견된다. 네변 단순지지인 S.S조건에서는 초기좌굴 이후의 거동에서 첫 번째 2차좌굴 동안 3모드를 유지하고, 두 번째 2차좌굴에서는 5모드의 급격한 처짐모드 변화와 함께 급격한 면내강성 변화까지 동반한 불안정한 거동을 나타내게 된다. 이와같은 종횡비에서는 경계조건에 상관없이 최종강도에서의 처짐모드는 5모드로 동일하지만 2차좌굴이 발생하고 있는 경계조건에서는 Snap-through를 거치면서 급격한 처짐모드 변화를 동반한 면내강성의 감소로 인하여 전체적인 선체구조물에 치명적인 영향을 미치게 된다.

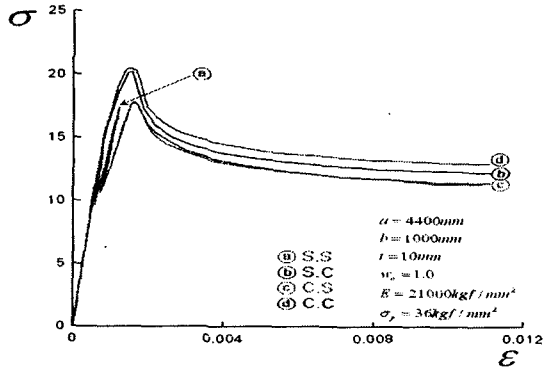

Fig.8 A comparison stress with strain according to boundary condition (a/b=4.4)

판종횡비(a/b)가 4.4인 판부재의 네가지 경계조건에 따른 탄소성거동을 Fig.8에 나타내고 있다. 이 종횡비에서도 비하중변의 지지조건에 따라서 거동이 두 분류로 구분이 되고 있으며, ⓐ,ⓒ거동은 2차좌굴이 두 번 발생하게 되는 복잡한 비선형거동과 같은 경로를 유지하고 있으며, 처짐모드변화 또한 1→3→5모드로서 종횡비 3.6과 유사한 거동을 나타내고 있다. 그러나, ⓑ,ⓓ거동은 최종강도 이전까지 아주 유사한 거동을 보이고 있으며, 최종강도때의 처짐모드는 7모드를 유지하고 있다. 최종강도 이후에 있어서는 ⓑ의 조건에서 강성 감소율이 ⓓ조건의 경우보다 크다는 것을 알 수가 있다.

판종횡비(a/b)가 5.5인 판부재의 네가지 경계조건에 따른 탄소성거동을 Fig.9에 나타내고 있다. 이 종횡비에서도 비하중변의 특성에 따라 유사한 거동을 나타내고 있으며, 하중변이 단순지지인 ⓐ,ⓒ거동에서는 두 번의 2차좌굴을 거치게 된다. 그러나. 2차좌굴의 발생시점의 주기가 상대적으로 다른 종횡비보다 짧게 나타나면서 처짐모드 또한 1→3→5→7모드로 변화하게 된다. 비하중변의 경계조건이 고정지지인 ⓑ,ⓓ에서의 최종강도 처짐모드는 9모드로 동일하다. 2차좌굴 이후의 거동에 있어서는 ⓒ의 거동이 ⓐ의 거동에 비해서 최종강도가 높게 평가됨을 알 수가 있다. 이 종횡비에서 타 종횡비의 거동과 대비되는 특징 중 한가지이다. 이러한 원인은 2차좌굴에 의해서 발생한 Snap-through주기가 짧게

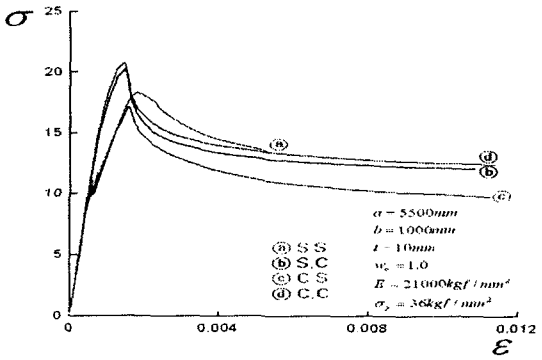

Fig.9 A comparison stress with strain according to boundary condition (a/b=5.5)

나타나면서, 처짐모드 또한 안정된 파형이 아닌 불안정한 파형으로 남게 되는 것이다. 두 번의 2차좌굴을 거치면서 ⓐ조건과 같은 경우에는 하중변 중앙부위에서부터 시작된 소성영역이 판 전체적으로 확대되어 ⓒ조건의 최종강도 지점까지 가지 못하게 되는 것이다. Fig.5.5에서 알 수 있는 바와 같이 비하중변이 단순지지인 조건에서는 2차좌굴이 발생하지 않으므로서 면내강성과 최종강도가 상대적으로 높게 평가된다.

4. 결 론

최근들어 선체구조물에 폭넓게 사용되고 있는 재료인 AH36 고장력강판의 네가지 주변지지조건에 대해서 종방향 압축하중만을 받을 경우에 대해서 탄소성대변형 유한요소 시리즈해석을 수행하였다.

(1) 비하중변의 경계조건의 변화에 따라 탄소성거동이 유사하게 진행되어 간다.

(2) 구조붕괴특이점이 발생하는 경우에는 호장증분법을 사용해야만 Snap-through거동을 정확하게 추적할 수 있다.

(3) 선체판의 종횡비(a/b)가 1.4이고 네변단순지지 조건(S.S)에서는 최종강도 이후의 2차좌굴이 발생한다.

(4) 비하중변이 고정지지조건이면 2차좌굴의 영향을 받지 않으며 면내강성과 최종강도가 높게 평가된다.

(5) 좌굴강도 설계 시 2차좌굴을 고려한 탄소성좌굴해석을 수행하여 초기구조설계에 보다 안정성 있고 신뢰할 만한 결과를 도출해야한다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

[1] 고재용, T. Yao, 백점기(1996), "면내압축하중을 받는

판의 2차 좌굴에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제33권 제3호, pp.66~80.

[2] 고재용, 최익창(1998), "호장증분법에 의한 판구조물의 2차좌굴 거동에 관한 연구", 한국전산공학회지, Vol. 42, No. 4.

[3] 고재용(1999), "에너지법에 의한 선체판의 기하학적 비선형거동에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp.94~104.

[4] 함주혁, 백점기, 김을년(1992), "판부재의 신 좌굴설계공식", 대한조선학회 춘계 발표회.

[5] J.K. Paik, J.H. Ham and E.N. Kim(1992), "A new plate buckling design formula", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 171, pp.559~556.

[6] J.K. Paik, J.H. Ham and Jae H. Ko(1992), "A new plate buckling design formula(2nd Report) - On the plasticity correction" - J. of the society of naval architects of Japan, Vol. 172.

[7] J.H. Ham and Oi Hyun Kim(1991). "Buckling Strength Evaluation System ", Meeting of Korea Ship Structure Congress, Sep.

[8] J.K. Paik and A.K. Thayamballi(2003), "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons.

[9] J.K. Paik and P.T. Pederson(1996), "A simplified method for predicting ultimate compressive strength of ship panels" International Shipbuilding Progress, Vol. 43, pp.139~157.

[10] Nakamula, T. and Uetani, K.(1978), "Secondary Buckling and Post-Secondary Buckling Behaviour of Rectangular Plates", Int. J. Mech. SCI. Vol. 21, pp.256~286.

[11] Thomas J. R. Hughes(1983), "Finite element analysis of the secondary buckling of a flat plate under uniaxial compression", International Journal of a Non-linear Mechanics, Vol. 18, I ssue 2, pp.167~175.

[12] Nakamura T. and Uetani K.(1983), "The secondary buckling and post-secondary buckling behaviours of rectangular plates, International Journal of a Techanical Sciences, Vol. 21, Issue 5, pp.265~286.

[13] Ueda Y. and Yao T.(1985), "The Influence of Complex Initia Deflection Modes on the Behaviour and Ultimate Strength Plates in Compression", J. of Construction Steel Research, Vol. 5.

원고접수일 : 2004년 03월 05일
원고채택일 : 2004년 06월 18일