

보강판의 해석모델에 따른 좌굴 및 소성거동 평가

† 박주신* · 고재용** · 오영철***

* 오사카대학원 선박해양공학과 박사과정, ** 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수
*** 목포해양대학교 해양시스템공학부 대학원 석사과정

Estimation of Buckling and Plastic Behaviour according to the Analysis Model of the Stiffened Plate

† Joo-Shin Park* · Jae-Yong Ko** · Young-Cheol Oh***

* Graduate school of Engineering, Osaka University, Suita, 565-0834, Japan

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

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

요 약 : 선체구조는 기본적으로 판부재의 조합으로 이루어져 있으며, 이러한 판부재의 하중분담 능력 혹은 최종강도 평가는 선체구조의 합리적인 설계 및 구조의 안정성 평가에 있어서는 아주 중요하다. 또한, 선체구조를 구성하고 있는 구조요소들은 작용외력에 대하여 개별적으로 작용하지 않으며 전체적으로 연속거동을 하게 된다. 실제 선박에서의 붕괴형태 중 한가지는 종방향 굽힘에 의해서 갑판 혹은 선저부에 좌굴 및 소성붕괴이다. 그래서, 합리적인 설계에서는 이러한 급작스런 붕괴형태를 방지하기 위하여 좌굴 및 소성붕괴 거동을 파악하는것이 아주 중요하며, 실제 선박에서는 갑판부와 선저부에서는 하중분담 능력을 증가시키기 위하여 여러개의 종보강재를 가진 보강판 구조의 설계를 하게 된다. 본 연구에서는 선체 판넬구조의 모델링 방법에 따른 최종강도 거동의 차이를 분석하여, 합리적인 모델링영역을 규명하고자 한다. 사용된 해석 모델은 실제 상선의 이중저구조에서 사용되는 판넬에서 채택하였으며, 유한요소해석 모델링 시 3가지 단면형상에 대해 각각 6가지 서로 다른 해석모델을 적용하였으며, 이때 보강재의 단면형상을 변화하였다. 본 연구의 목적은 압축하중이 작용하는 선체 보강판구조에서 해석영역에 대한 좌굴 및 최종강도 거동의 특성을 분석하였다.

핵심용어 : 보강판, 유한요소해석, 유효폭, 최종강도, 모델링 방법

Abstract : Ship structures are basically an assembly of plate elements and estimation load-carrying capacity or the ultimate strength is one of the most important criterion for estimated safety assessment and rational design on the ship structure. Also, Structural elements making up ship plated structures do not work separately against external load. One of the critical collapse events of a ship structure is the occurrence of overall buckling and plastic collapse of deck or bottom structure subjected to longitudinal bending. So, the deck and the bottom plates are reinforced by a number of longitudinal stiffeners to increase their strength and load-carrying capacity. For a rational design avoiding such a sudden collapse, it is very important to know the buckling and plastic behaviour or collapse pattern of the stiffened plate under axial compression. In this present study, to investigate effect of modeling range, the finite element method are used and their results are compared varying the analysis ranges. When making the FEA model, six types of structural modeling are adopted varying the cross section of stiffener. In the present paper, a series of FEM elastoplastic large deflection analyses is performed on a stiffened plate with flat-bar, angle-bar and tee-bar stiffeners. When the applied axial loading, the influences of cross-sectional geometries on collapse behaviour are discussed.

The purpose of the present study is examined to numerically calculate the characteristics of buckling and ultimate strength behavior according to the analysis method of ship's stiffened plate subject to axial loading.

Key words : Stiffened plate, Finite element analysis, Effective breadth, Ultimate strength, Modeling method

1. 서 론

선체구조는 기본적으로 판 또는 보강판으로 구성된 전형적인 상자형 판구조물이며, 선체 구조설계시에 구조강도 측면에서 가장 기본적으로 검토해야 할 사항은 선체자중 및 적재하중 중량분포, 파랑외력분포 등에 의해 유발되는 중첩힘모멘트

에 선각 거더가 충분히 견딜 수 있는지의 여부를 확인하는 것이다. 이 경우 가장 중요한 것은 갑판 및 선저외판의 압축강도이다. 선박은 운항 중 각종 불확실한 상황에 놓일 가능성이 있으며, 그 결과 설계하중보다 큰 외력이 작용하거나 작용외력은 설계하중보다 작더라도 잔류강도가 설계기준치보다 작아질 가능성이 있게 된다. 이러한 상태에 놓이게 되면 선박을 이

† 교신저자 : 박주신(정회원), Joo_Shin_Park@naoe.eng.osaka-u.ac.jp 090)1153-9326

** 정회원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129

*** 정회원, yochoh@gmail.com, 061)240-7217

루고 있는 각 구성부재는 좌굴 및 소성붕괴를 하게 된다. 해양 구조물을 비롯한 골조구조물에 비해 판구조물은 고차의 부정정구조물로서 구성부재가 국부적으로 좌굴 붕괴하더라도 구조 전체적인 붕괴에 까지 곧바로 연결된 가능성은 일반적으로 많지 않다고 알려져 왔다. 그러나, 일단 구성부재가 좌굴 붕괴하고 나면 국부적으로 구조강성이 저하하고, 이로 인하여 주변의 연속부재가 담당해야하는 하중성분의 증가로 인하여 연쇄적으로 구성부재가 소성붕괴 하여 결국에는 구조 전체적으로 붕괴할 위험성이 있다(박, 2006).

본 논문에서는 대표적인 선체 구조부재인 보강판부재의 유한요소해석모델에 따른 좌굴 및 소성붕괴 거동에 대해서 서술하고 있으며, 이와 관련된 방대한 연구결과들이 알려져 있다.

Caridis(1988)는 압축력을 받는 보강판에 대하여 탄소성대변형 해석을 이용하여 시리즈해석을 수행하였다. 또한, 보강판의 붕괴거동 시 굽힘 및 비틀림 좌굴의 상관효과를 고려하였으며 판의 중횡비, 세장비 및 초기 처짐의 영향도 규명하였다.

Tanaka and Endo(1988)는 판과 보강재의 상관효과를 고려하여 압축을 받는 보강재의 국부좌굴에 대하여 해석적, 수치적 및 실험적으로 규명하였다. 이러한 결과를 바탕으로 2개의 뚜렷한 영역 즉, 보강재의 트리핑영역과 보강재간 패널의 국부좌굴영역으로 분리할 수 있는 flat-bar보강재의 임계세장비를 제시하였다.

Panagiotopoulos(1992)는 압축력을 받는 보강판에서 flat-bar 보강재의 굽힘 및 비틀림 붕괴 거동에 관한 상관효과를 규명하기 위하여 비선형유한요소해석을 수행하였고, 판과 보강재의 접합선에서 회전구속의 영향을 고려하여 보강판의 트리핑강도를 규명하였다.

T.Yao(1998)는 선체보강판 구조에서 여러 가지 하중조건(중방향 압축, 횡방향 압축, 횡하중)을 고려하고, 해석모델의 영역(PSC model)에 따른 좌굴 및 소성붕괴에 대해서 연구하였다.

백점기(2001)는 선체보강판의 해석모델을 PSC 모델과 SPM 모델로 구분하고, 붕괴패턴을 SIF(Stiffener Induced Failure)와 PIF(Plate Induced Failure)로 구분하여, 좌굴 및 소성거동을 서술하였다. 지금까지 많은 연구자에 의해서 선체보강판넬 구조의 붕괴거동을 유한요소 시뮬레이션 혹은 실험을 통하여 규명하려고 많은 시도를 하였다. 그러나, 해석모델링의 방법에 따른 좌굴 및 소성 붕괴거동을 동반한 붕괴패턴의 차이에 대해서는 좀 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구의 목적은 선체보강판 중 중,횡으로 조합된 다수의 보강재로 이루어진 보강패널 구조인 그릴리지(Grillage)의 압축하중이 작용할 경우에 대해서 유한요소해석 모델링 방법에 따른 좌굴 및 최종강도 거동에 미치는 영향에 대해서 분석하여, 선체보강판 구조의 비선형 좌굴 해석 시 사용할 수 있는 합리적인 모델을 제시하는 것이다.

2. 유한요소해석 방법

2.1 해석이론 및 요소모델링

본 논문의 비선형좌굴 유한요소 시리즈해석은 범용유한요소

해석 프로그램인 ANSYS V10.0을 사용하였으며, 기하학적 비선형과 재료의 비선형을 동시에 고려하며, 복잡한 비선형 거동의 한가지인 2차좌굴(secondary buckling)거동의 경로추적을 위하여, 수정된 뉴튼랩슨 방법과 아크렌스(arc-length) 방법을 혼용하여, 미리 설정된 부구간마다 하중과 모멘트 오차에 대한 수렴기준 평가를 하도록 설정 하였다(박, 2005). 해석모델의 재료의 특성은 완전탄소성 재료로 대변형 유한요소시리즈 해석을 수행하였으며, 소성에 대한 영향은 등방성경화(Isotropic Hardening Plastic)거동을 고려하였으며, 하중의 증분에 따른 요소의 항복평가는 본 미세스(von-Mises) 이론(ANSYS, 2000)을 적용하여 평가하였다. 또한, 구조물의 최종강도 평가는 응력-변형을 곡선의 최대치와 항복기준에 부합된 요소들이 중앙부위를 관통하였을 경우를 최종강도라고 정의하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 4절점을 가지고 있으며, 각 절점마다 6자유도를 지닌 shell 181을 적용하였으며, 이 요소는 기존의 43계열 요소에 비해 비선형 수렴속도가 향상되었다(ANSYS, 2000). 각 부재의 유한요소모델링 시 요소마다 만나는 접합지점의 노드를 일치시켜, 하중 작용 시 연속거동을 표현할 수 있도록 모델링 하였다.

2.2 재료의 물성치와 초기처짐

Fig. 1에서는 본 연구에 사용된 Cap size class 산적화물선의 이중선저구조에 사용된 보강판을 이상화 하였다. 해석모델의 총 길이(L)=9,450mm, 한 개의 횡프레임 간격(a)=3,150mm, 해석모델의 전체 폭(B)=5,040mm, 보강재와 보강재 사이의 폭(b)=840mm, 판재의 두께(t_p)=21mm, 웹의 두께(t_w)=12mm, 플랜지의 폭(b_f)=70, 100mm, 플랜지의 두께(t_f)=23mm 이다. 종방향 보강재는 플랫폼형(flat), 앵글형(angle) 그리고 티형(tee) 단면 형태를 갖고 있으며 웹 높이는 150mm, 200mm, 250mm, 300mm로 변화하여 해석을 실시하였다. 모델은 실선에서 사용하고 있는 AH32 고장력강의 물성치를 적용하였으며, 다음과 같다. 탄성계수(E)=205.8GPa, 항복응력(σ_y)=313.6MPa, 포아송비(ν)=0.3을 사용하였다.

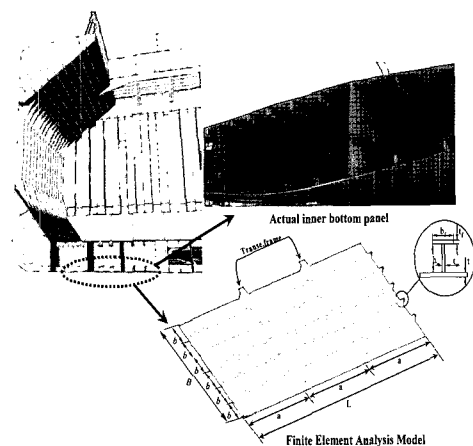


Fig. 1 A continuous stiffened plate structure under lateral pressure and axial compression.

최대 해석 모델영역은 5개의 종보강재와 2개의 횡프레임을 포함한 그릴리지구조이며, 유한요소 분할은 다음과 같다. 웹 높이가 150mm인 경우를 기준으로 19mm 간격으로, 플랜지 폭 70mm를 기준으로 17.5mm 간격, 판폭은 60mm 간격으로, 한개의 횡프레임 간격($a=3150\text{mm}$)는 52.5mm 간격으로 등분하였으며, 나머지 해석조건들은 비례적으로 전체 해석에 적용하였다. 보강재 사이의 판 부분의 초기처짐량(w_{opl})은 일반적으로 국부 처짐량으로서 Smith's의 실험에 의해서 계측된 초기처짐(Smith, C. S.,1975) low level값인 $0.025 \times \beta^2 \times t$ 를 적용하였다. 보강재의 부가 횡처짐량(w_{osx})은 주로 전체적인 처짐(Global deflection)이며, 판재의 길이 함수로 표현하여 $0.001 \times a$ 으로 정의하였고, 마지막으로 종보강재의 국부좌굴 모드($y+z$ 방향)의 처짐량(w_{sw})은 $0.001 \times a$ 만큼 사용하였으며 보강재의 부가처짐량과 같은 모드수가 되도록 가정하였다. 따라서 전체 처짐모드는 w_{opl}, w_{osx}, w_{sw} 인 세 개 모드를 중첩하였으며, 고유치해석 결과를 통하여 구해진 좌굴모드를 적용하였고, Fig. 2에서 각 초기처짐의 형상에 대해서 나타내고 있다. 용접이나 절단등에 의한 열 가공 작업으로 인한 초기 결함의 효과를 초기변형량(initial deflection)으로 가정하고, 잔류응력의 효과는 고려하지 않았다.

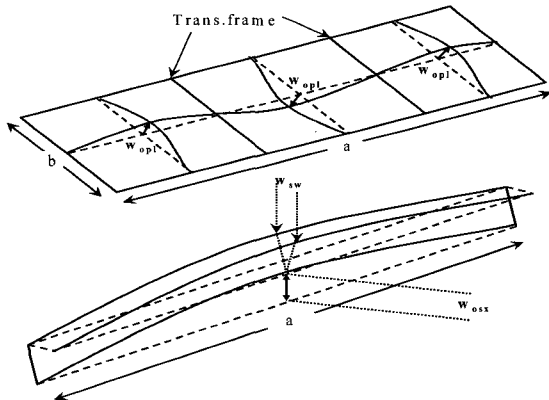


Fig. 2 Initial deflection shape on the stiffened plate

2.3 해석에 사용된 경계조건

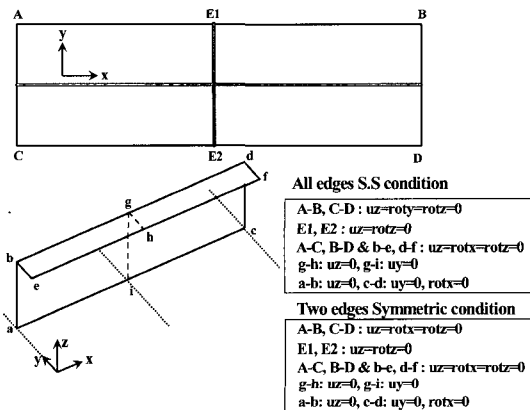


Fig. 3 Boundary condition on the stiffened plate

SPM모델에 사용된 경계조건은 회전구속이 없는 네변 단순 지지조건을 적용하였으며, PSC 모델은 비하중변은 대칭경계조건을 적용하였으며, 최종강도에 도달할 때까지 가장자리 네변 모두 직선을 유지하도록 하였으며, 세부적인 조건들은 Fig. 3에서 나타내고 있다. 특히, 횡프레임 부재는 직접 모델링하지 않고, 경계조건(E1-E2)으로 치환하여 적용하였다.

3. 유한요소해석 결과 고찰

3.1 PSC(Plate Stiffener Combination)해석모델 에서의 좌굴 및 최종강도 거동

One bay PSC(Plate Stiffener Combination) 해석모델은 보강재의 유효폭(Effective breadth) 개념을 고려한 모델로서 판과 보강재 하나만을 고려한다. 일반적으로 해석적인 수학적모델에서 주로 사용하였고 유한요소법의 적용 시 모델이 간단하여, 비선형 해석 시 계산시간을 상당히 단축할 수가 있는 장점이 있다. 그러나, 단순히 유효폭만을 가정한 보강판의 탄소성 대변형 해석에 있어서는 종방향 보강재의 회전구속을 명확하게 규명하지 못하며 보강판에서 발생할 수 있는 주요 붕괴모드를 적절하게 구현하지 못하는 단점을 지니고 있기 때문에 최종강도 값을 상대적으로 높게 평가하는 경향이 있다.

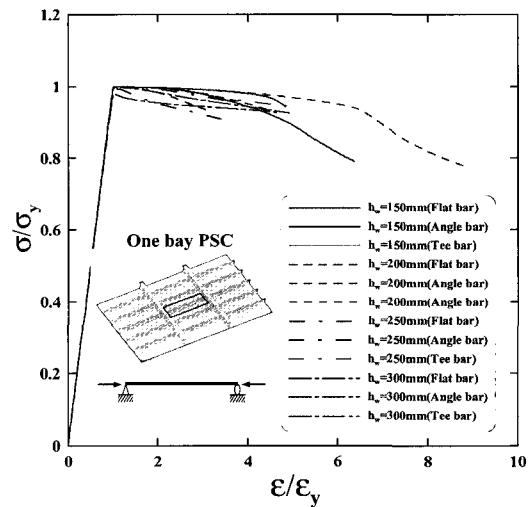


Fig. 4 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate considering one bay PSC(Plate Stiffener Combination) under axial compression.

Fig. 4 그래프는 압축하중을 받는 one bay PSC 해석모델에서 보강재의 단면속성과 보강재의 웹의 길이를 변수로 하여 시리즈 유한요소해석을 하고 그 결과를 평균응력과 평균변형률 관계로 나타내고 있다. 플랫폼형(flat) 보강재의 웹 높이가 150mm에서 250mm 까지는 거의 같은 최종강도 값을 나타내고 있으며, 300mm 에서는 단면계수가 증가함에도 불구하고, 오히려 최종강도는 감소하였다. 이러한 원인은 플랫폼 형태의 단면형상을 갖는 보강재는 압축하중이 작용 시 웹에서 발생하게

되는 비틀림(torsional)거동에 의하여, 판부재에서 강도분담을 하기 전에 웹에서 발생한 국부좌굴로 인하여 소성항복 되기 때문이다. 그러나, 앵글형(angle)과 티형(tee) 단면형상의 보강판에서는 웹 높이의 증가에 상관없이 거의 같은 최종강도 값을 나타내고 있다. 일반적으로 보강판 구조의 비선형 좌굴 및 최종강도해석 시 용접이나 절단 등의 열 가공에 의한 초기결함을 고려한 경우, 압축 최종강도 값이 항복응력에 이르지 않지만, 본 해석모델에서는 초기결함을 갖고 있음에도 불구하고 재료의 항복응력에 가까운 최종강도값을 나타내고 있다.

즉, 단순히 보강재의 유효폭 만을 고려한 모델링 방법은 보강판의 좌굴 및 최종강도를 평가함에 있어서 실제의 최종강도를 상당히 높게 평가하고 있으며, 최종강도 이후의 강도감소에 대한 영향을 제대로 반영하지 못하고 있다. 또한, 보강재의 단면속성에 따른 최종강도의 차이 또한 제대로 반영하지 못하고 있음을 나타낸다. 이는 실제 전체보강판 구조는 판과 종방향 보강재 뿐만 아니라 횡프레임이 교차되어 있는 그릴리지 구조로서, 본 해석모델은 단순히 판과 종방향 보강재의 조합으로 이와 같은 해석모델은 실제 구조물의 연속거동을 묘사하는데 한계가 있음을 나타내주고 있다.

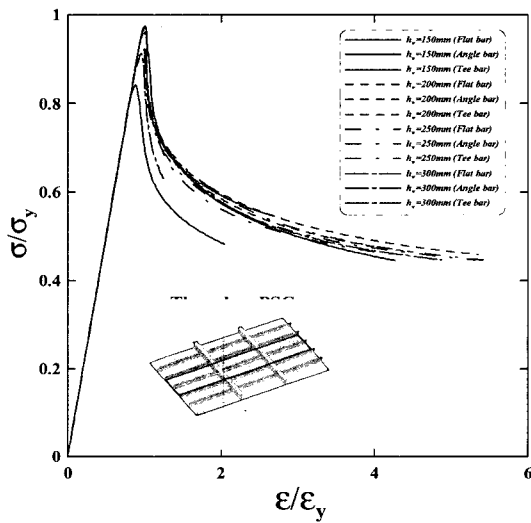


Fig. 5 A comparison of average stress and average strain curves of the stiffened plate considering three bay PSC(Plate Stiffener Combination) under axial compression.

두 개의 횡프레임을 고려한 three bay PSC 해석모델에서의 보강재의 단면속성 3가지와 웹 높이를 설계변수로 사용한 결과를 평균응력과 평균변형을 관계로 Fig. 5에 나타내고 있다. 횡프레임을 고려한 해석모델에서는 최종강도 이후의 거동에서 면내강성 감소를 적절히 표현하고 있으며, 플랫폼 보강재의 웹 길이가 150mm인 경우를 제외하고는 최종강도 분포가 거의 같은 지점에서 발생하고 있다. Fig. 4의 해석모델의 해석결과와 비교하였을 때, 횡프레임 영향을 고려하였을 경우, 보강재 단면속성의 차이에 따른 탄소성대변형 거동에 차이가 나타나며, 좌굴 및 항복의 영향을 결과에서 반영하여 주고 있다.

Fig. 7의 그래프는 종축은 응력을 항복응력으로 무차원하여 나타내고, 횡축은 웹 높이를 웹 두께로 무차원하여 나타내고 있다. 플랫폼형(flat) 단면형상 보강재를 지닌 보강판에서는 웹 높이의 증가에 따라서 세가지 형태의 붕괴패턴으로 구분되어진다. 즉, 웹의 길이가 150mm에서는 전체좌굴이 발생하면서 전체 붕괴(global collapse)하는 형태를 나타내며, 웹의 길이가 200mm와 250mm에서는 판재와 보강재에서 발생한 국부좌굴(local buckling)에 의해서 붕괴되어지며, 웹 길이가 300mm에서는 보강재에서 발생한 웹 좌굴로 인하여 국부좌굴인 경우보다 상대적으로 최종강도가 감소하게 된다. 플랫폼형 보강재 단면형상 같은 경우 압축하중이 작용하게 되면, 국부좌굴을 넘어서 단계에서는 판재보다 웹에서의 좌굴이 지배적으로 나타나면서, 최종강도가 오히려 감소하게 됨을 나타낸다. 특히, 플랫폼형 보강재인 경우 웹의 높이의 증가에 따라서, 3가지 다른 형태의 붕괴형상을 나타내는 특징을 갖고 있다. 즉, 초기 구조설계자들은 보강판의 치수 결정 시 이러한 붕괴패턴을 충분히 고려하여 구조적으로 충분한 안정성을 가진 설계를 하여야 한다.

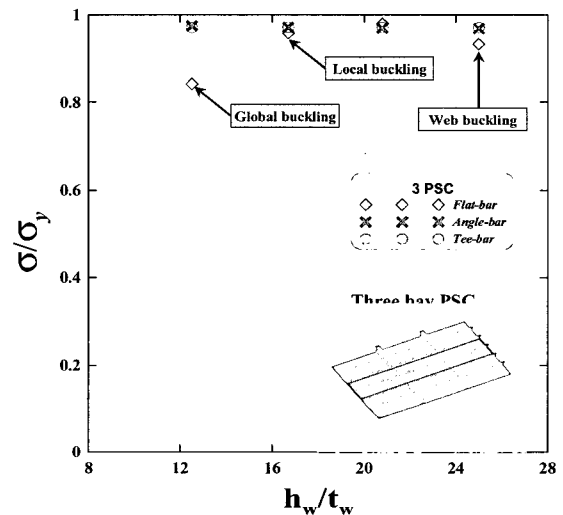


Fig. 7 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate considering three bay PSC(Plate Stiffener Combination) under axial compression.

Fig. 8에서는 PSC해석모델에서 플랫폼형 보강재 단면속성을 갖고 있는 경우에 대해서 웹 높이를 변수로 한 결과를 평균응력과 평균변형을 관계로 나타내고 있다. 보강판 해석모델 가운데서 횡프레임을 포함하고 있지 않는 one bay PSC와 한 개의 횡프레임을 고려하고 있는 two bay PSC 같은 경우 최종강도는 항복응력 수준에 이르며, 최종강도 이후의 거동에서도 강도 감소가 작게 나타나는 거동을 보인다. 그러나, three bay PSC 해석모델은 웹 높이의 증가에 따른 붕괴패턴의 다양화로 인하여, 최종강도의 감소와 함께 최종강도 이후의 거동에서도 면내강성 감소가 두드러지게 나타나고 있다. 이와 같은 시리즈해석 결과를 종합하여 보면, PSC 해석모델에서는 three bay PSC 모델이 보다 합리적인 보강판의 탄소성 좌굴

거동 및 최종강도 이후의 면내강성 변화를 적절히 나타내 주고 있다.

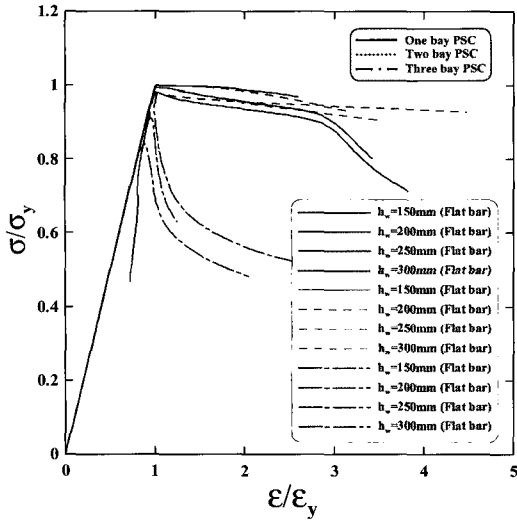


Fig. 8 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate with a flat bar stiffener considering PSC(Plate Stiffener Combination)model under axial compression.

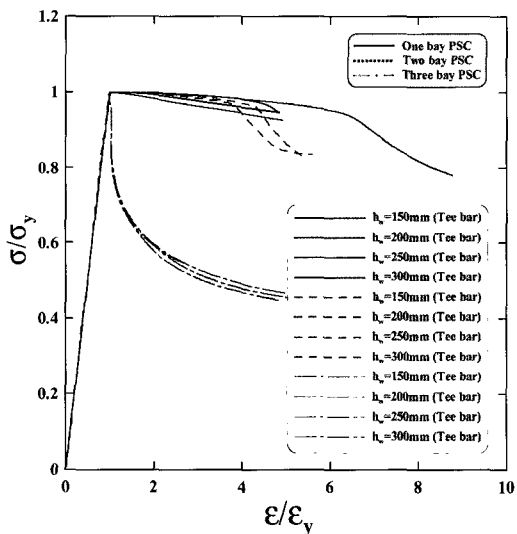


Fig. 9 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate with a tee bar stiffener considering PSC(Plate Stiffener Combination)model under axial compression.

Fig. 9에서는 3가지 PSC해석 모델에서의 보강재의 단면형상을 티형태로 고려한 경우에서의 웹 높이에 따른 평균응력과 평균 변형을 관계로 나타내고 있다. 해석모델에 관계없이 최종강도는 유사하게 평가되고 있으며, three bay PSC 해석모델에서만 최종강도 이후의 면내강성 감소가 크게 발생하고 있다. Fig. 10에서 나타내듯이 플랜지가 있는 앵글 및 티형 보강재에서는 웹 길이의 증가에 따라서 거의 같은 최종강도를 나타내지만, 플랫폼 단면형상을 고려한 보강재에서는 웹 길이가

150mm 에서는 해석모델 영역에 따라서 최종강도가 큰 차이를 나타내고 있으며, 모델영역이 커질수록 최종강도가 감소함을 알 수가 있다. 실제의 선체 보강판 구조의 좌굴 및 최종강도 거동을 표현하기 위해서는 중보강재 뿐만 아니라 횡프레임 또한 고려하여, 상호 연속적인 거동을 묘사해야만 한다. 따라서, 횡프레임의 효과를 고려하지 않는 one bay SPM의 최종강도 평가가 실제에 비해 과대평가를 하고 있음을 알 수가 있다.

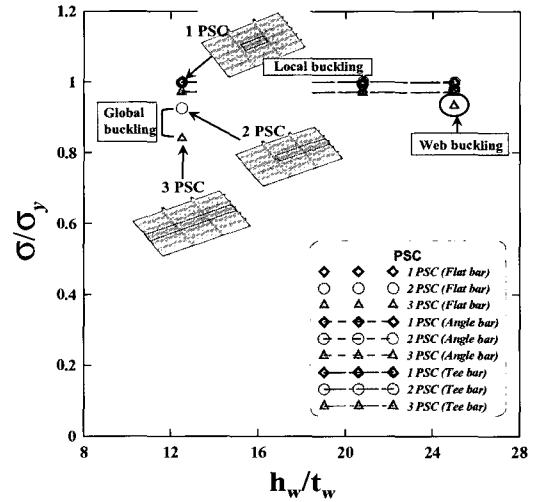


Fig. 10 A comparison of average stress and ratio of web height and web thickness of the stiffened plate considering PSC(Plate Stiffener Combination) under axial compression.

Fig. 10에서는 Fig. 9에서의 결과에서의 각 보강재의 단면형상과 웹 높이에 따른 붕괴패턴의 차이에 대해서 나타내고 있다. 각각 보강재의 치수비와 모델 영역에 따라서, 전체좌굴 후 전체붕괴, 웹 좌굴, 판재와 보강재의 국부좌굴형태를 나타내며, 이러한 붕괴패턴 특성에 대한 치침형상과 응력분포를 Fig. 11에서 나타내고 있다. two bay PSC모델과 three bay PSC 해석모델에서는 웹의 높이가 150mm에서는 전체좌굴 후 전체 붕괴하는 특성을 나타낸다.

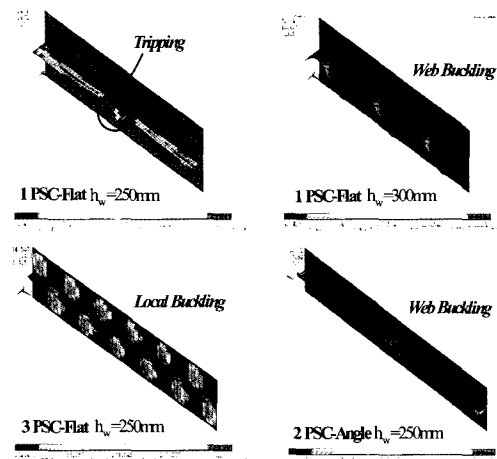


Fig. 11 Deflection shape and collapse pattern varying the analysis model

3.2 SPM(Stiffener Panel Model)해석모델 에서의 좌굴 및 최종강도 거동

SPM(Stiffener Panel Model)해석모델은 길이방향의 보강재 다수와 판과의 조합인 판넬 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 위 해석모델 구성 시 5개의 중보강재를 고려하고 있다.

Fig. 12 그래프는 압축하중을 받는 one bay SPM 해석모델에서 보강재의 단면속성과 보강재의 단면계수를 변수로 한 유한요소해석 결과를 평균응력과 평균변형률 관계로 나타내고 있다. 앵글형, 티형 단면형상을 고려한 보강재의 경우에서 최종강도와 최종강도 이후의 거동이 유사하게 나타나고 있으며, 플랫폼 보강재의 결과는 웹 높이가 150mm에서 가장 낮은 최종강도 값을 나타내고 있으며, 나머지 조건에서는 유사한 거동을 나타내고 있다. 특히, 플랫폼 단면형상의 웹 높이가 150mm인 경우 최종강도 이후 천이거동이 발생하면서 면내강성 감소가 크게 발생하고 있으며, 이러한 원인은 Fig. 13~Fig. 14에서 보다 자세하게 설명하고 있다.

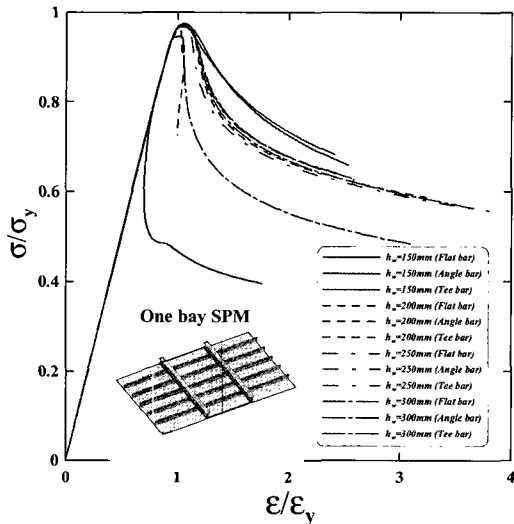


Fig. 12 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate considering one bay SPM(Stiffener Plate Model) under axial compression.

Fig. 13에서는 one bay SPM모델 영역에서 종방향 보강재의 단면은 플랫폼형(Flat)을 적용하고, 웹의 길이는 150mm를 고려한 해석 결과를 나타내고 있으며, 그래프에서 나타내는 A점은 초기항복 지점을, B점은 최종강도 그리고 C점은 최종강도 이후 발생하는 천이거동(snap-through) 이후의 지점을 나타내고 있으며, 체크한 점에서의 처짐 형상과 응력분포를 Fig. 14에서 나타내고 있다.

초기항복은 압축하중을 받는 웹과 판의 교차부분에서 발생하고 있으며, 붕괴패턴은 전체좌굴 후 전체붕괴(global collapse after global buckling)형태를 나타내고 있다. 압축하중이 점진적으로 증가하게 되면서 최종강도 상태인 B 지점에서는 압축하중을 받는 양쪽 모서리 부분에서 항복이 발생하였다.

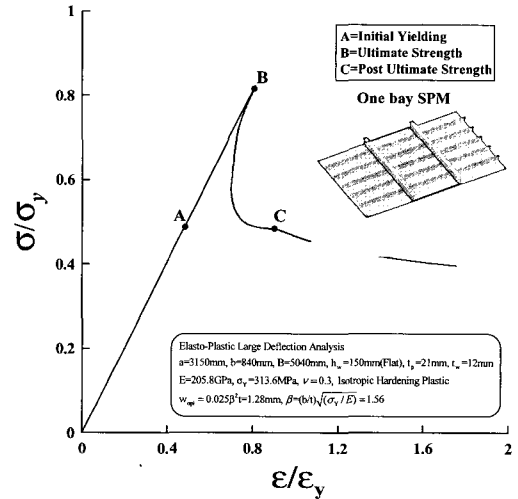


Fig. 13 A comparison of average stress and average strain of the stiffened plate considering one bay SPM(Stiffener Plate Model) with a flat bar stiffener under axial compression.

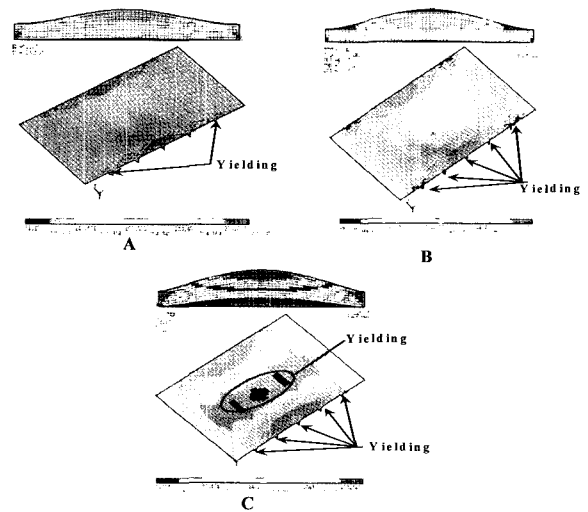


Fig. 14 A change of collapse pattern on the one bay SPM(Stiffener Panel Model) with a flat bar stiffener(web height 150mm) as increasing axial load

이때, 보강판의 중앙부분에는 항복이 진행되지 않지만, 최종강도 이후 발생하는 천이거동현상으로 인하여, C점에서는 양쪽 모서리 부분뿐만 아니라, 보강판의 중앙부분까지 항복이 진행되며, 이러한 원인으로 인하여, 최종강도 이후 면내강성이 크게 감소하게 됨을 알 수가 있다. Fig. 15의 그래프는 종축은 응력을 항복응력으로 무차원하여 나타내고, 횡축은 웹 길이를 웹 두께로 무차원하여 표기하고 있다. 각 보강재의 단면형상에 대한 웹 높이의 증가함에 따른 최종강도 분포를 나타내고 있으며, 플랫폼 단면형상을 고려한 해석에서 웹 길이가 150mm인 경우에 가장 낮은 최종강도를 나타내고 있으며, 웹

길이가 200mm인 경우와 비교하였을 때 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 원인은 보강재의 붕괴형태가 다르기 때문이다. 즉, 보강재의 치수가 작은 경우 보강판 전체에서 좌굴이 발생하는 전체좌굴 붕괴형태를 나타내고, 상대적으로 웹 높이가 증가한 경우인 200mm 이상에서는 판과 보강재에서 국부좌굴(local buckling)이 발생한다. 그러나, 플랜지가 있는 형태인 앵글형 및 티형 단면형상 조건에서는 웹 길이의 증가에 따른 최종강도는 거의 같게 나타나고 있으며, 플랜지가 비틀림 붕괴를 상당히 억제하는 역할을 하고 있음을 알 수가 있다.

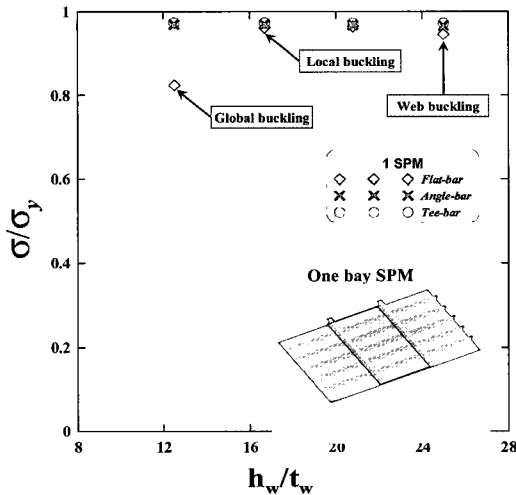


Fig. 15 A comparison of average stress and ratio of web height and web thickness of the stiffened plate considering one bay SPM(Stiffener Panel Combination) under axial compression.

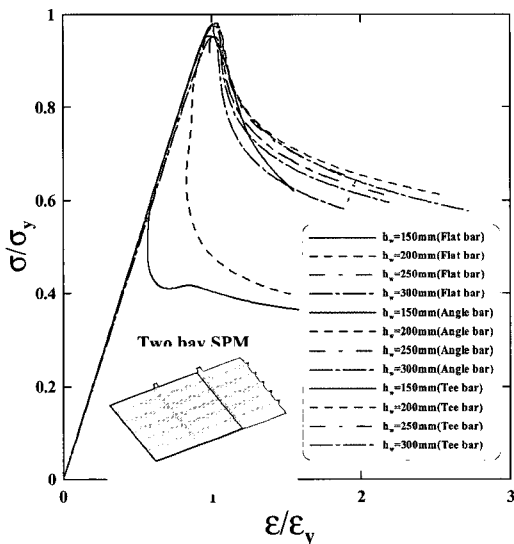


Fig. 16 A comparison of average stress and average strain curves of the stiffened plate considering two bay SPM (Stiffener Panel Combination) under axial compression.

Fig. 16의 그래프는 two bay SPM 해석모델의 결과를 평균

응력과 평균변형률의 관계로 나타내고 있다. 플랫폼 단면속성 보강재 중 웹 높이가 150mm와 200mm의 경우를 제외하고는 나머지 조건들은 거의 유사한 거동을 나타내고 있으며, 웹 높이가 150mm인 경우에서 최종강도가 가장 낮게 평가되고있다. 위 모델에서는 티형 단면형상의 보강재를 고려한 경우에서 가장 높은 최종강도를 나타내고 있으며, 플랜지가 있는 앵글형과 티형에서는 최종강도 이후의 면내강성 감소 거동이 상당히 유사함을 알 수가 있다. 이는 붕괴패턴이 판과 보강재에서 국부적으로 좌굴하는 형태를 보이기 때문이다.

Fig. 17에서는 two bay SPM 해석모델에서 플랫폼 단면형상을 고려한 해석의 경우 최종강도 상태에서의 붕괴패턴과 응력분포 상태를 웹 높이별로 나타내고 있다. 웹 높이가 150mm 조건에서는 압축하중이 작용하면, 초기항복은 횡프레임과 종보강재의 경계지점에서 발생하며, 압축하중이 점진적인 증가와 함께 최종강도 시점에서의 붕괴형태는 전체좌굴 후 전체붕괴하게 된다. 이러한 전체 좌굴 붕괴 형태는 최종강도 또한 낮게 평가되며, 최종강도 이후의 강성 또한 크게 감소하는 형태를 나타내며, 웹 높이가 200mm에서는 판과 보강재에서 발생한 국부좌굴에 의한 붕괴형태를 나타내고 있다. 특히, 웹 높이가 300mm에서는 판부재 보다는 보강재에서의 좌굴에 의한 처짐이 크게 발생하고 있다.

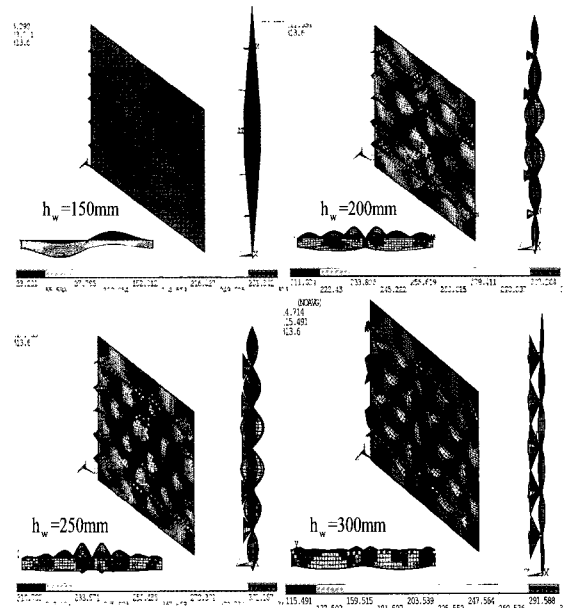


Fig. 17 Deflection shape and stress distribution varying increase the web height of the two bay SPM(Stiffener Panel Model) under axial compression.

Fig. 18에서는 3가지 SPM 해석모델에서의 보강재 치수비 증가에 대한 평균응력의 관계로 나타내고 있다. 플랜지가 있는 앵글 및 티형 단면형상을 가진 보강재에서는 웹 길이의 증가에 따라서 거의 같은 최종강도를 나타내지만, 플랫폼 보강재에서는 웹 길이가 150mm에서는 해석모델 영역에 따라서 최종강도가 큰 차이를 나타내고 있으며, 모델영역이 커질수록

최종강도가 감소함을 알 수가 있다. 실제의 선체 보강판 구조의 좌굴 및 최종강도 거동을 표현하기 위해서는 종보강재 뿐만 아니라 횡프레임 또한 고려하여, 상호 연속적인 거동을 묘사해야만 한다(Paik, 2001). 따라서, 횡프레임의 효과를 고려하지 않는 one bay SPM의 최종강도 평가가 과대평가를 하고 있음을 알 수가 있다.

즉, 보강재의 단면계수에 따라서 보강재의 붕괴패턴도 달라지고 있으며, 이러한 붕괴패턴은 전체적인 보강재의 구조강도를 결정짓는 중요한 설계인자이다.

4. 결 론

선체 보강판 구조물은 여러개의 종보강재와 횡프레임으로 구성된 복잡한 그릴리지 구조의 판넬로서, 가장 대표적인 구조인 보강판 구조의 좌굴 및 소성거동을 명확하게 규명하는 것은 선체구조의 안정적 구조강도 설계에 아주 중요한 요소이다. 본 연구에서는 비선형 좌굴해석에 사용될 수 있는 6가지 해석모델을 선정하고, 설계변수의 영향을 고려한 탄소성대변형 유한요소 시리즈해석을 통하여 각 해석모델에 따른 좌굴 및 소성붕괴 거동의 특성을 분석하였다.

(1) One bay PSC 해석모델은 압축최종강도 평가 시 최종강도를 상당히 높게 평가하며, 최종강도 이후의 거동 또한 제대로 표현하지 못하는 결점을 갖고 있다. 이러한 결점을 해결하기 위해서는 단순 보강판 구조모델이 아닌 2개 이상의 횡프레임(Transverse frame)을 포함한 three bay PSC 모델이 좀더 합리적이라고 판단된다.

(2) 플랫폼 단면속성 보강재를 고려한 SPM 모델은 웹의 높이가 150mm에서 최종강도 분포가 상이하게 나타나며, 해석영역이 커질수록 최종강도는 감소한다.

(3) 보강재의 단면계수가 작은 경우, 전체좌굴 후 전체붕괴 형태를 나타내며, 보강재의 치수비가 증가 할수록 판과 보강재에서 국부좌굴에 의한 붕괴형태를 나타낸다.

(4) SPM 모델링 방법을 고려할 경우, 횡프레임을 고려하지 않더라도, 합리적인 결과를 얻을 수가 있다. 이는, 해석시간의 제약을 회피할 수 있는 하나의 대안이라고 판단된다.

(5) PSC 해석모델의 적용 시 횡프레임 2개를 포함한 three bay 모델이 보다 합리적인 결과를 나타낸다.

후 기

이 논문은 2007년도 산업자원부 주관 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행되었고 위 기관에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

[1] 박주신, 고재용, 오경근(2006), "유공보강판의 좌굴 및 극한강도 특성에 관한 연구", 항해항만학회지, 제30권 6호, pp.439-446.
 [2] 박주신, 고재용, 이준교(2005), "중, 횡방향 압축하중을 받는 유공판의 좌굴을 고려한 최종강도 설계식개발", 항해항만학회지.
 [3] ANSYS Inc(2000), ANSYS theory manual - "Nonlinear buckling problem", Chapter 3, Part4, pp. 120-132.

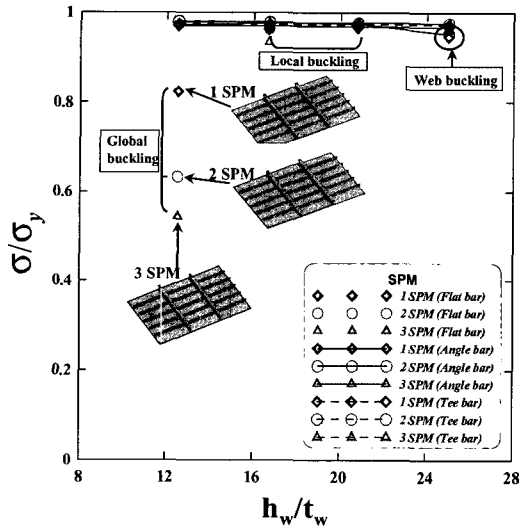


Fig. 18 A comparison of average stress and ratio of web height and web thickness of the stiffened plate considering SPM (Stiffener Panel Combination) under axial compression.

Fig. 19에서는 플랫폼 단면속성의 보강재에서의 웹 높이에 따른 붕괴형태에 대해서 고유좌굴모드와 최종강도 상태에서의 붕괴모드를 비교하여 나타내고 있다. 웹 높이가 150mm인 경우에는 전체좌굴 후 전체붕괴 형태를 나타내고 있으며, 웹 높이가 200mm인 경우에는 판재와 보강재에서 발생한 국부좌굴 붕괴패턴을 보이고 있다. 웹 높이가 300mm에서는 웹 좌굴에 의해서 붕괴하는 형태를 나타내고 있으며, 이러한 붕괴패턴의 특성으로 인하여, 최종강도는 상대적으로 감소하게 된다.

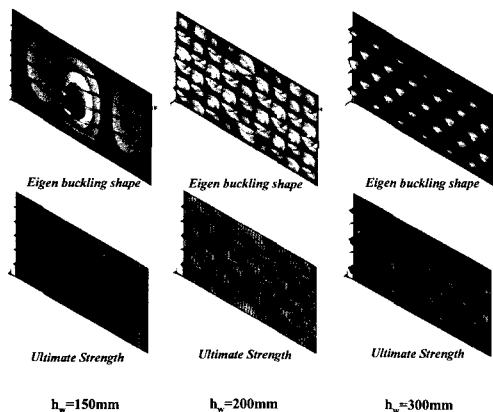


Fig. 19 Deflection shape and stress distribution varying increase the web height of the three bay SPM(Stiffener Panel Model) under axial compression.

- [4] Smith, C. S.(1975), "Compressive Strength of Welded Steel Ship Grillage", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 117, pp. 325-359.
- [5] Tanaka, Y. and Endo, H.(1988), "Ultimate strength of stiffened plates with their stiffeners locally buckled in compression", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 164, pp. 456-467.
- [6] Paik, J. K., Lee, M. S., and Kim, B. J. (2001), "Ultimate limit state design of ship stiffened panels and grillages", Trans. SNAME, Vol. 109.

원고접수일 : 2007년 1월 9일

원고채택일 : 2007년 3월 6일