

## 선체보강판의 해석영역에 따른 최종강도거동에 관한 연구

### A Study on the Ultimate Strength Behavior according to Analysis Boundary at Stiffened Plate

박 주 신\*  
Park, Joo-Shin

고 재 용\*\*  
Ko, Jae-Yong

---

#### ABSTRACT

Ship structures are basically an assembly of plate elements and the load-carrying capacity or the ultimate strength is one of the most important criteria for safety assessment and economic design. Also, Structural elements making up ship plated structures do not work separately, resulting in high degree of redundancy and complexity, in contrast to those of steel framed structures. To enable the behavior of such structures to be analyzed, simplifications or idealizations must essentially be made considering the accuracy needed and the degree of complexity of the analysis to be used. On this study, to investigate effect of analysis range, the finite element method are used and their results are compared varying the analysis ranges. The model has been selected from bottom panels of large merchant ship structures. For FEA, three types of structural modeling are adopted in terms of the extent of the analysis.

The purpose of the present study is to numerically calculate the characteristics of ultimate strength behavior according to the analysis ranges of stiffened panels subject to uniaxial compressive loads.

---

#### 1. 서 론

선체구조, 교량은 대표적인 상자형 박판구조물로 구성되어 있으며 구성요소로서는 판, 보강판, 거더등의 세부구조로 조합된 구조형태로 구성되어 있다. 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 이루고 있는 각 구성부재에는 좌굴 및 소성 붕괴를 하게 된다. 해양구조물을 비롯한 골조구조물에 비해 판구조물은 고차의 부정정구조물로서 구성부재가 국부적으로 좌굴 붕괴하더라도 구조전체적인 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.

---

\* 학생회원 목포해양대학교 해양시스템공학부 박사과정 (Email : scv2434@mmu.ac.kr)

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

또한 최근에 널리 사용되고 있는 고장력강 박판부재로 구성된 판구조물의 경우 연강에 비해 높은 인장강도 특성치만 고려하고, 좌굴 붕괴의 가능성을 소홀히 하여 설계를 수행하면 구성부재의 좌굴 붕괴에 의해 구조 전체적으로 붕괴할 가능성을 인지하여야 한다. 본 논문에서는 대표적인 선체 구조부재인 보강판부재의 좌굴 및 최종강도 문제를 다루고 있다. 이와 관련된 방대한 연구결과들이 알려져 있으며, 단순히 유효폭만을 가정한 보강판의 탄소성대변형 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. 만약 이러한 결함을 해결하기 위해서는 단순 보강판 구조모델이 아닌 two-bay 이상의 모델을 사용하여 다양한 붕괴모드를 고려해줌으로서 좀 더 정도 있는 결과를 얻을 수가 있다. 그러나, 유한요소의 분할에 있어서 요소비를 이상적인 1.0으로 만들어 주다보면 요소수가 엄청나게 많아지게 되며, 이에 따른 해석시간의 제약으로 인하여 실제 설계자들이 원하는 결과값을 얻기 위해서는 상당한 해석시간이 필요하게 되는 결점을 지니고 있다. 이론적으로 압축력을 받는 선체 보강판의 붕괴모드는 다음의 5가지로 분류할 수가 있다.

- 1) 전체좌굴 후 전체붕괴
- 2) 보강재간의 국부좌굴 후 판재의 항복에 의한 전체붕괴
- 3) 보강재간의 국부좌굴 후 보강재의 항복에 의한 전체붕괴
- 4) 보강재의 비틀림좌굴 (트리핑)
- 5) 전단면 항복

이러한 붕괴모드의 결정은 모델의 기하학적, 재료적특성 과 작용외력, 경계조건 및 해석영역에 따라서 분류된다. 본 연구의 목적은 선체보강판 중 중,횡으로 조합된 다수의 보강재로 이루어진 보강패널 구조인 Grillage의 압축하중이 작용할 경우에 대해서 해석경계영역에 따른 최종강도 거동을 비교하여 보다 신뢰적이고 안정된 결과 값을 제시하는 것이다.

## 2. 수치해석이론

### 2.1 해석모델과 재료의 물성치

Fig.1에서는 본 연구에 사용된 산적화물선(Cap size class)의 이중선저구조에 사용된 판넬을 형상화 하였다.  $L=7920\text{mm}$ ,  $a=2640\text{mm}$ ,  $B=3600\text{mm}$ ,  $b=900\text{mm}$ ,  $t_p=21\text{mm}$ ,  $t_b=12\text{mm}$ ,  $b_f=100\text{mm}$ ,  $t_f=15\text{mm}$  이다. 종방향 스틱프너는 T형 단면을 갖고 있으며 웹 높이는 60mm, 150mm, 210mm, 250mm 의 네가지를 변화하여 해석을 실시하였다. 모델은 AH36 고장력강의 물성치를 적용하였다. 탄성계수( $E$ )=205.8GPa, 항복응력( $\sigma_y$ )=352.8MPa, 포아송비( $\nu$ )=0.3을 사용하였다. 보강재 사이의 판 부분의 초기처짐량( $W_{opl}$ )은 일반적으로 국부 처짐량 으로서 Smith's 의 초기처짐 low level값인  $0.05 \times \beta^2 \times t$ 를 적용하였다. 보강재의 부가 횡처짐량( $W_{osx}$ )은 주로 전체적인 처짐(Global deflection)이며 판재의 길이 함수로 표현하여  $0.0025 \times a$ 으로 정의하였고, 마지막으로 종보강재의 쓰러지는 방향(Y+Z 방향) 의 처짐량( $W_{sw}$ )은  $0.0025 \times a$  만큼 적용하였으며 보강재의 부가처짐량과 같은 모드수가 되도록 가정하였다. 따라서 전체처짐모드는  $W_{opl} + W_{osx} + W_{sw}$  인 세 개 모드를 중첩한 합을 나타내고 있다.

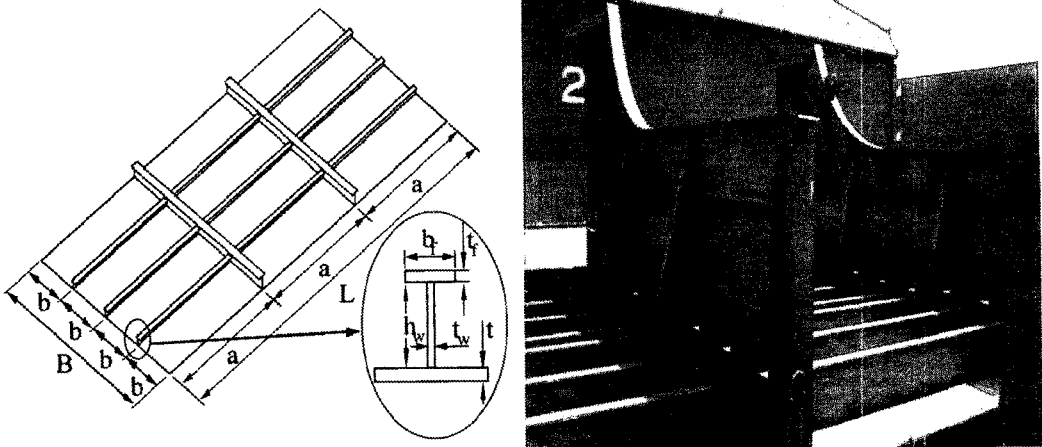


Fig. 1 A continuous stiffened plate structure under axial compression

one-bay PSC 모델의 판 전체 처짐 방정식은 다음 식(1)에 나타내고 있다.

$$W = 6.6 \times \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} + 6.612 \times \sin \left( \frac{3\pi x}{a} \right) \sin \frac{\pi y}{b} \quad \text{-----(1)}$$

본 논문에서 사용된 여러 가지 해석모델의 경계조건은 네변 단순지지조건을 구현하였으며, 면내 압축하중 작용 시 주변부재와의 연속조건을 만족시키기 위해서 네변 모두 직선을 유지하도록 하였다. Fig.2에서는 PIF (Plate induced failure) 와 SIF (Steel induced failure) 일 경우에 보강재의 처짐형상을 나타내고 있다. 이 두가지 형상의 분류기준은 Fig.3에서 나타내듯이 판재와 보강재에 적용된 초기처짐성분의 영향으로 모드형상이 나뉘어 진다.

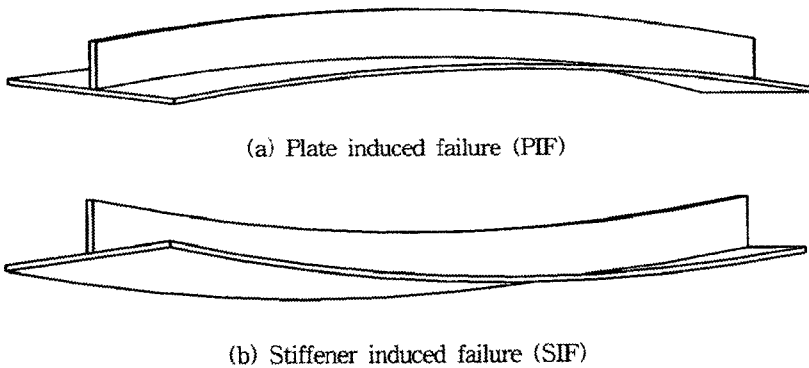


Fig. 2 Collapse modes of a plate induced combination

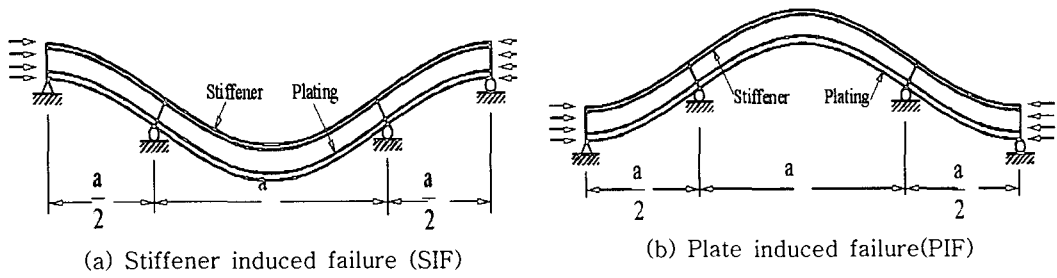


Fig. 3 A Schematic representation of PIF failure and SIF patterns in the two bay model

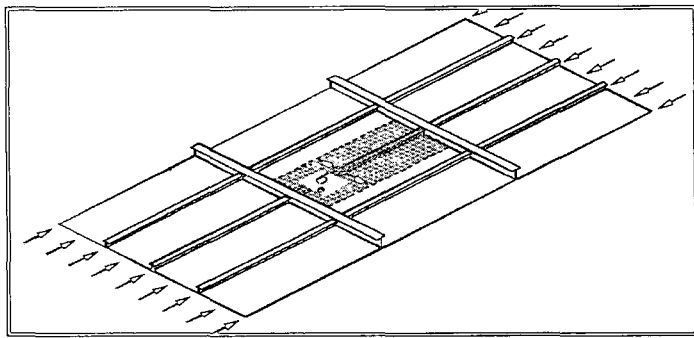


Fig. 4 Theoretical model - One bay PSC (Plate-Stiffener Combination with  $b_e=b$ )

Fig.4에서는 보강재의 유효폭만을 고려한 one-bay PSC 모델을 나타내고 있다. 이 모델은 하중변에서 종방향 보강재를 단순히 단순지지로 밖에 적용할 수가 없는 단점을 지니고 있으며 이는 해석모델 자체가 압축하중이 작용할 경우 예상되는 보강판 붕괴모드를 구현할 수가 없기 때문에 다른 영역의 모델에 비해서 최종강도를 높게 평가하는 경향을 지니고 있다.

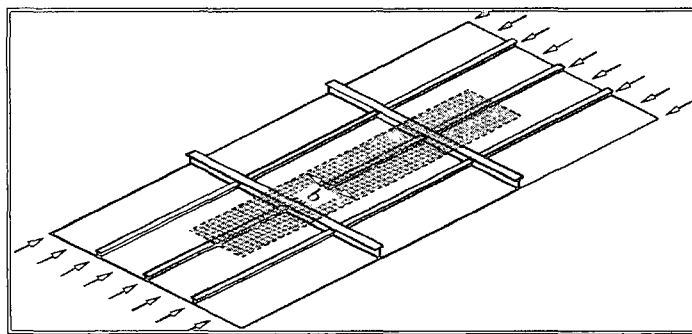


Fig. 5 FEA model - Two bay PSC (Plate-Stiffener Combination)

본 연구논문에서 해석대상으로 선정한 3가지 모델을 Fig.3-5에서 나타내고 있다. Fig.4 해석모델은 two-bay PSC 모델이며 종보강재와 판재가 만나는 접합선에서 회전구속의 영향을 고려하고 종보강재가

횡프레임과의 교차점에서 붕괴 거동을 상호 연속적으로 묘사하기 위하여 Trans.frame 2개를 포함한 형태이며 이는 보강판의 최종강도 해석 시에 연속된 보강판의 상호작용 효과를 동시에 고려할 수가 있다. 주변 경계조건으로는 주변부재와의 연속조건을 만족하기 위하여 대칭경계조건(Symmetric B.C)을 주었다.

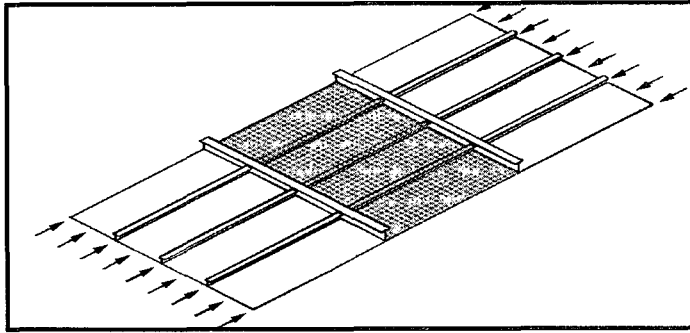


Fig. 6 FEA model - One bay SPM (Stiffener Panel Combination)

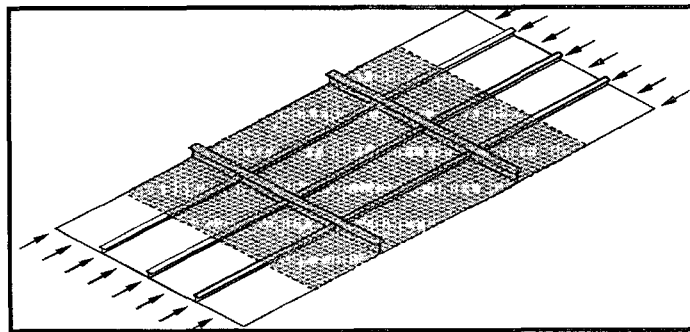


Fig. 7 FEA model - Two bay SPM (Stiffener Panel Combination)

Fig.6에서는 one-bay SPM 모델을 나타내고 있다. SPM 모델은 PSC모델에 비해서 판재부분에서의 모델링 범위가 넓고 종보강재의 개수의 증가로 다양한 붕괴모드가 발생할 수가 있는 특성을 내포하고 있으며 주변지지조건은 네변 단순지지조건을 구현하였다. Fig.7에서는  $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  형식인 two-bay SPM 모델을 나타내고 있다.

### 3. 수치해석 결과 고찰

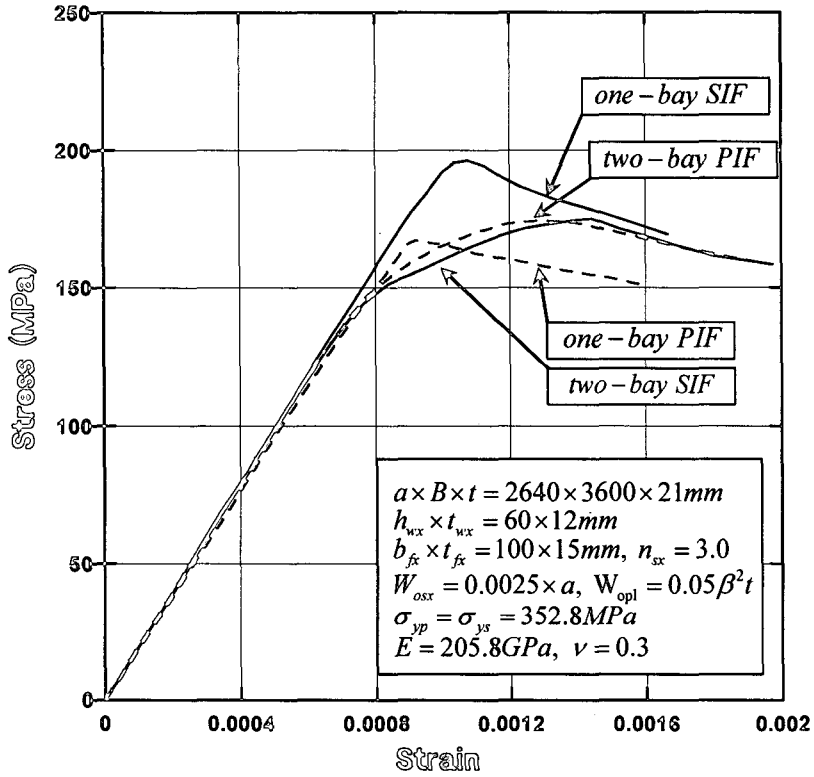


Fig. 8 A comparison stress with strain curves of the stiffened plate under axial compression according to the analysis range

Fig.8에서는 웹높이 60mm일 경우의 해석영역에 따른 두가지 붕괴형태에 따른 탄소성대변형 거동을 응력과 변형률 관계로 나타내고 있다. 여기에서 SIF(Stiffener induced failure)는 보강재 쪽이 먼저 압축하중을 받는 형태의 모드이고, PIF(Plate induced failure)는 판재 쪽이 먼저 압축을 받게 되었을 경우의 모드를 나타내고 있다. one-bay 보강판에서는 판재의 모서리부분에서 발생한 항복으로 인하여 PIF가 상대적으로 보강판의 끝단에서 항복이 발생한 SIF보다 최종강도를 낮게 평가하고 있으며, 초기항복이 발생된 부위에 따라 거동 차이는 크게 나타나고 있다. 그러나, two-bay 보강판에서는 먼저 압축을 받게 되는 부위에 관계없이 최종강도 거동은 거의 유사하게 발생하고 있다.

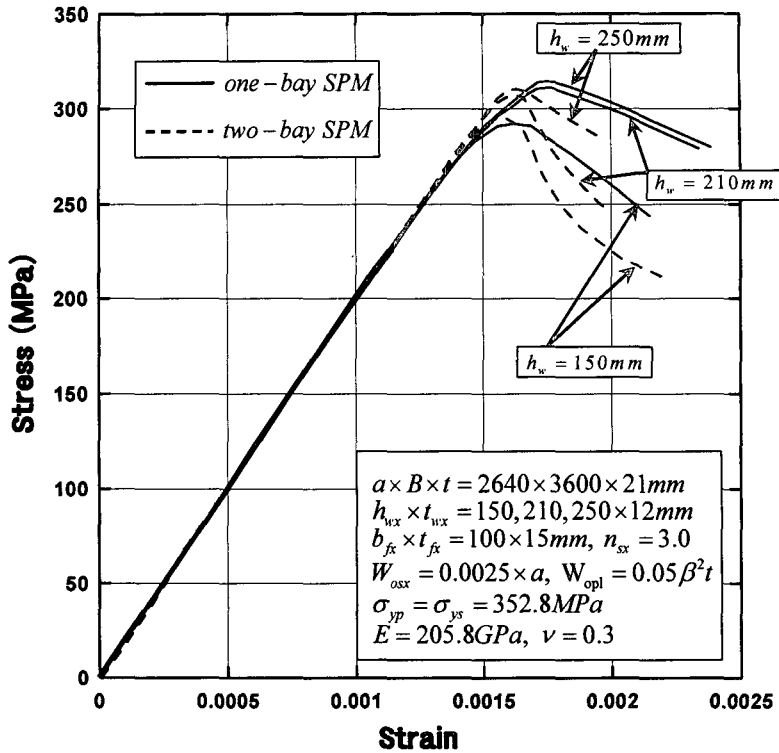


Fig. 9 A comparison stress with strain curves of the stiffened plate under axial compression according to the web height and analysis range

Fig.9에서는 종보강재 3개를 포함하고 두 개의 횡프레임을 포함하고 있는 SPM 모델에서 웹높이가 150, 210, 250mm에서의 탄소성대변형 거동을 응력과 변형을 관계로 나타내고 있다. 웹높이가 210mm에서는 상대적으로 150mm보다 최종강도를 높게 평가하고 있으며, one-bay SPM에서 좀더 높은 최종강도 분포를 나타내고 있으며 최종강도 이후의 면내강성 감소는 two-bay SPM에서 더욱더 크게 나타나고 있다. 그러나, 웹높이가 150mm에서는 해석영역에 따른 최종강도의 차이는 거의 없으며, 전자와 동일하게 two-bay SPM에서 최종강도 이후 면내강성 감소가 크게 나타나고 있다. 또한 웹 높이를 250mm로 증가하였을 경우에는 기존의 210mm일 경우의 최종강도 거동과 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 보강재의 높이 즉 보강재의 단면이 증가하였음에도 불구하고 강도차이가 크게 발생하지 않는 것은 웹 높이가 증가함으로써 예상붕괴모드 중 5번째인 트리핑거동이 발생하여 강도가 감소하여 이러한 현상이 나타나게 된다.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

선체보강판 구조의 붕괴모드를 모두 고려하여 최종강도를 계산하는 것은 쉬운 일이 아니다. 왜냐하면 판부재와 마찬가지로 보강판의 붕괴는 기하학적 및 재료적인 특성치, 초기변형에 의한 결함요인,

경계조건, 하중조건 및 이들의 상관 효과의 영향을 받기 때문이다. 본 연구에서는 탄소성대변형 유한요소법을 근간으로 하는 수치적 접근을 근간으로 하여 보강판구조에서의 해석영역에 따른 최종강도 거동의 차이와 가장 합리적인 모델링 기법에 대해서 기술하고 있다. 본 연구는 앞으로도 면내압축성분과 전단 그리고 횡하중과의 조합하중에 따른 최종강도 거동의 파악할 필요가 있다.

- (1) 종보강재의 회전구속을 명확하게 규명하기 위해서는 two-bay이상의 모델링이 필요시 된다.
- (2) 예상 좌굴붕괴모드가 적절히 표현되는 가장 현실적인 모델링 기법은 two-bay SPM 이다.
- (3) 종보강재의 단면적이 계속적으로 증가하여도 Tripping거동의 영향으로 강도가 감소하게 된다.

#### 후기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

#### 참고문헌

- [1]. J.K. Paik and et all., : Ultimate limit state design of ship stiffened panels and grillages, Trans. SNAME, Vol.109, 2001
- [2]. 백점기, 김도형 : 보강판의 압축최종강도 설계식에 관한 비교연구, 부산대학교 생산기술연구소논문집, 제53집, pp.373-405, 1997년 12월.
- [3]. Tanaka, Y. and Endo, H., : 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, 1988.
- [4]. Smith, C. S., : Compressive Strength of Welded Steel Ship Grillage, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 117, pp. 325-359, 1975.
- [5]. Yao, T., : Ultimate compressive strength of ship platingd, PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Osaka University, Japan, May, 1980.