

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 32 卷 第 1 號 1995 年 2 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 32, No. 1, February 1995

## 선박구조설계 합리화를 위한 선체 종강도의 신뢰성 해석

김외현\*, 김병주\*

### Reliability Analysis of Ship's Longitudinal Strength for the Rational Ship Structural Design

by

Oi H. Kim\* and Byung J. Kim\*

#### 요 약

확률적인 접근법으로서의 신뢰성 해석법의 소개와 이의 선체 구조 강도 평가 방법의 적용에 관해 고찰하였다. 당사에서 건조한 유조선 및 살물선 34척을 대상으로 인장 항복강도, 보강판의 압축 최종강도, 그리고 선각 거어더의 최종강도 등 몇몇 대표적인 종강도 파괴양식에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 해석결과로서 각 선박에 대한 신뢰도 지수를 보이고 종강도에 대한 신뢰성 해석시의 목표 신뢰도 지수를 제시하였다. 배길이와 건조연도에 따른 신뢰도 지수의 변화를 검토하였으며 결과로서 각 선박의 안전도가 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

각 선박에 대해 균일한 수준의 신뢰도를 제공하기 위하여 부분 안전계수를 이용한 새로운 강도 평가 기준을 마련하였다. AFOSM 방법 및 신뢰성 조건(RC) 방법에 따라 부분 안전계수를 계산하고 이를 비교하였으며 원하는 신뢰도를 줄 수 있는 설계식을 RC 방법으로 구하였다. 부분 안전계수로부터 구한 새로운 설계식을 사용하여 신뢰성 해석을 수행한 선박에 대해 재해석을 실시하였다. 그 결과 처음보다 많이 개선된 균일한 수준의 신뢰도를 얻을 수 있었고 이로부터 신뢰성 해석의 적용 가능성과 유용성을 확인하였다.

#### Abstract

The application of the reliability analysis is investigated as a probabilistic approach to the assessment of ship's structural strength and to the establishment of design format for longitudinal strength. Reliability analyses are carried out for 34 ships of

---

발 표 : 1994년도 대한조선학회 추계연구발표회('94.11.12)

접수일자 : 1994년 11월 14일, 재접수일자: 1995년 2월 2일

\* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

tankers and bulk carriers built in HHI for some failure modes such as tensile yielding, compressive buckling and ultimate strength of hull girder. The safety assessment of each ship, the calculation of sensitivity factors and the derivation of target reliability index are performed. As results, the difference of reliability indices among ships is great for all modes.

To provide more uniform levels of safety the establishment of new strength criteria using partial safety factors is performed. The partial safety factors for the design format are obtained according to the AFOSM method and the reliability-conditioned(RC) method. Finally, a design format using partial safety factors has been proposed. We could find out that new strength criteria can produce consistent reliability indices which are close to the target value.

## 1. 서 언

신뢰성 해석법은 구조설계에 포함되는 강도와 하중 변수들에 필연적으로 존재하는 불확실성을 변수들이 갖는 확률분포 특성을 이용하여 수치적으로 고려하며 안전성을 평가하는 방법이다. 이는 파괴확률(probability of failure) 또는 신뢰도 지수(reliability index)로서 안전도를 나타내는 정량적인 방법으로서 이러한 결과를 설계과정에서 고려할 수 있으므로 보다 논리적이고 합리적이라 하겠다.

본 연구에서는 신뢰성 해석에 사용되는 각 변수의 통계적 특성과 최종강도의 표현식을 문헌과 국내 건조선에 대해서 조사하였고 이를 근거로 보다 현실적인 신뢰성 해석의 수행을 시도하였다. 선박의 종강도에 대한 신뢰성 해석을 인장 항복강도, 보강판의 압축 최종강도, 그리고 선각 거어더의 최종강도에 대해 수행하였다. 해석결과로서 각 선박에 대한 신뢰도 지수를 보이고 종강도에 대한 신뢰성 해석시의 목표 신뢰도 지수를 제시하였다. 또한 AFOSM 방법 및 신뢰성 조건(RC) 방법에 따라 부분 안전계수를 계산하고 이를 비교하였으며 원하는 신뢰도를 줄 수 있는 설계식을 RC 방법으로 구하여 부분 안전계수 사용의 유용성을 살펴 보았다.

## 2. 최종강도

### 2.1 보강판의 최종강도

판의 강도를 평가하는데 있어서 중요한 변수인 평판의 세장비  $\beta_1$ 와 보강판의 세장비  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\beta_1 = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2.2)$$

여기서, a : 판의 길이

b : 판의 폭

r : 선회반경(radius of gyration)

본 연구에서는 보강판의 최종강도를 추정하는 식으로 실험치와 추정치의 비율의 평균이 1.0에 가깝고 COV가 가장 작은 [1] Lin[2]이 제시한 식을 사용하였다.

$$\phi = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = (C_1 + C_2 \lambda^2 + C_3 \beta_1^2 + C_4 \lambda^2 \beta_1^2 + C_5 \lambda^4)^{-0.5} \quad (2.3)$$

여기서,  $C_1=0.960$   $C_2=0.765$   $C_3=0.176$   
 $C_4=0.131$   $C_5=1.046$

강판의 검사증명서로부터 항복응력  $\sigma_y$ 의 통계적 특성을 조사한 결과 이의 평균치는 선급에서 제시하는 최소치보다 훨씬 크고 분포는 Gumbel 분포에 가장 가까운 것으로 나타났다[3].

### 2.2 선각 거어더의 최종강도

선박의 종굽힘 모멘트에 대한 선각 거어더의 최종강도는 선각 거어더를 구성하고 있는 평판 및 보강판의 강도와 밀접한 관계가 있다. 실제적으로는 잔류응력, 초기처짐 등의 영향을 고려한 수치 해석적인 접근이 필요하지만 본 절에서는 신뢰성 해석에 손쉽게 적용할 수 있는 Frieze[4]에 의한 간이 추정식을 사용하였다. 식에서  $\phi$ 는 압축상태에 놓인 가장 취약한 보강판의 최

종강도로서  $M_u$ 가 제안한 식(2.3)으로부터 구한다.

$$M_u = (d_1 + d_2 \phi + d_3 \phi^2) M_p \quad (2.4)$$

여기서,

$$d_1 = -0.172, d_2 = 1.548, d_3 = -0.368 : \text{sagging}$$

$$d_1 = 0.003, d_2 = 1.459, d_3 = -0.461 : \text{hogging}$$

### 3. 실선에 대한 신뢰성 해석

#### 3.1 해석 대상 선박

해석 대상으로 선택한 선박은 유조선 17척과 살물선 17척(광석 운반선 1척 포함)으로 전부 34척이며 건조연도와 크기별로 다양하게 선택하였다. 이들의 주요치수는 Table 3.1, 3.2와 같다.

Table 3.1 Principal particulars of tankers (in MT, m)

Ship	Design Date	DWT	LBP	B	D	Z <sub>D</sub>	Z <sub>S</sub>	Ref.*
T1	83.7	40,000	184.0	30.4	17.8	18.994	19.517	PC
T2	83.11	65,000	220.8	32.2	18.2	19.581	21.169	PC
T3	84.2	88,900	236.0	42.0	19.2	27.597	30.154	
T4	85.1	84,000	234.0	42.67	19.8	28.785	31.000	PC
T5	85.10	38,500	169.0	32.2	17.45	16.239	20.394	DB, PC
T6	86.3	125,000	238.0	45.0	23.35	31.622	38.289	
T7	86.9	114,200	234.0	42.67	21.5	29.242	32.316	
T8	87.2	239,800	305.0	58.0	28.8	69.173	79.728	
T9	86.12	254,000	310.0	56.0	29.5	67.474	77.079	
T10	87.4	39,720	177.0	27.43	17.0	15.203	16.315	PC
T11	87.12	148,000	258.0	43.2	24.9	38.022	42.755	
T12	89.9	281,000	310.0	56.0	31.4	64.222	72.407	
T13	90.3	153,000	264.0	43.9	24.4	38.198	49.274	DB
T14	92.4	280,000	317.0	59.0	31.5	89.979	122.971	DB, DS
T15	92.8	300,000	318.0	58.0	31.5	73.683	80.166	
T16	93.5	29,990	170.0	30.0	14.4	12.485	12.387	PC
T17	93.5	18,130	152.0	25.8	10.8	8.408	8.280	PC

\* PC : Product Carrier  
 DB : Double Bottom  
 DS : Double Side

Table 3.2 Principal particulars of bulk carriers (in MT, m)

Ship	Design Date	DWT	LBP	B	D	Z <sub>D</sub>	Z <sub>S</sub>	Ref.
B1	83.7	45,000	185.0	32.24	16.5	15.775	20.536	
B2	84.5	168,500	282.4	45.0	23.8	42.358	48.350	
B3	84.8	144,600	260.2	42.97	23.77	33.087	42.952	
B4	85.7	127,000	267.3	42.5	22.2	33.588	37.481	Coal
B5	85.7	365,000	328.0	63.5	30.2	79.472	93.999	Pure Ore
B6	85.7	200,000	298.0	50.0	24.0	51.898	56.625	Ore/Coal
B7	85.11	36,500	175.0	28.0	16.1	8.580	14.120	Cont. Load
B8	86.2	186,000	280.0	48.0	24.5	43.599	49.711	
B9	87.11	64,000	215.6	32.2	18.0	17.531	25.119	
B10	88.6	122,000	256.0	40.42	21.2	30.428	37.978	
B11	88.6	69,000	219.7	32.2	18.3	17.017	23.520	
B12	88.7	148,100	259.0	43.0	23.8	32.952	44.338	
B13	88.12	37,000	178.0	28.4	17.2	9.946	18.344	
B14	89.5	41,400	176.0	30.5	15.95	10.222	15.680	
B15	91.7	150,000	270.0	45.0	23.8	37.652	48.788	
B16	91.7	207,000	300.0	50.0	25.7	53.082	59.405	Ore/Coal
B17	93.6	72,000	219.8	32.25	19.0	17.086	24.178	

#### 3.2 신뢰성 해석의 정식화

구조물의 기능 상실(파괴)은 인장항복, 압축좌굴, 피로파괴, 비틀붕괴 등의 여러 양식 또는 이들의 조합된 형태로 나타나겠으나 본 해석에서는 상갑판에서의 부재의 인장항복, 보강판의 압축좌굴 그리고 좌굴을 고려한 선각 거어더의 최종강도에 대해 요소 신뢰성 해석을 수행하였다. 극한 상태 방정식은 다음과 같이 구성하였다.

$$g = M_u - M_{we} - M_s \quad (3.1)$$

$M_u$ 는 선박의 최종강도 굽힘모멘트로서 구조물의 저항을 나타내고  $M_{we}$ 는 파랑 굽힘모멘트  $M_w$ 의 극한치이다.  $M_{we}$ 의 확률 특성은 다음과 같으며 이는 지수분포 함수를 모분포로 하는 극한 분포인 Gumbel 분포를 따른다.

$$(\text{평균}) = VWBM(1 + 0.577216 / (8 \ln 10)) \quad (3.2.a)$$

$$(\text{표준편차}) = VWBM \cdot \pi / (8\sqrt{6} \ln 10) \quad (3.2.b)$$

여기서, VWBM은 DNV 선급규칙(1994년)에 따른 파랑 굽힘모멘트이다.

정수중 굽힘모멘트  $M_s$ 는 정규분포를 따른다고 가정하였으며 Table 3.3으로부터 평균은 0.6 표준편차는 0.2로 가정하였다.

**Table 3.3 Stillwater bending moment**

Reference	Ship Type	Loading	$\mu^*$	$\sigma^*$
Mano(5)	Containership	departure	69.8	21.6
Mano(5)	Containership		67.4	20.2
Soares(6)	Containership		71.5	20.1
Mano(5)	Tanker	loaded	-74.0	22.1
Mano(5)	Tanker	loaded(dep.)	-64.8	21.0
Soares(6)	Tanker	full load	-26.3	38.3
Hart(7)	Tanker	loaded(dep.)	-67.0	15.0
Mano(5)	Tanker	ballast	51.4	58.8
Mano(5)	Tanker	ballast(dep.)	62.7	58.6
Soares(6)	Tanker	part load	33.0	30.4
Hart(7)	Tanker	ballast(dep.)	67.0	15.0
Soares(6)	Dry Cargo Ship	(L≈170 m)	50.0	29.9
Soares(6)	Bulk Carrier	part load	13.5	42.1
Soares(6)	Bulk Carrier	full load	-7.90	34.1

\* normalized by the design value(=100)

상갑판의 인장항복 붕괴양식 (I)

상갑판의 인장항복을 고려한 강도는 부재의 항복응력과 갑판에서의 탄성 단면계수로부터 결정된다. 단면계수는 확정론적인 양으로 취급하였다.

$$M_u = Z_D \sigma_y \tag{3.3}$$

상갑판 보강판의 압축좌굴 붕괴양식 (II)

보강판의 압축좌굴 강도는 COV=0.06이고 정규분포를 따르는 압축 최종강도  $\phi$ 로부터 결정된다.

$$M_u = Z_D \sigma_y = Z_D \phi \sigma_y \tag{3.4}$$

선각 거어더의 최종강도 붕괴양식 (III, IV)

$\beta_1, \lambda, \phi$ 를 가장 취약한 보강판에 대해 계산하고 소성 굽힘 모멘트  $M_p$ 로부터 최종 굽힘 모멘트  $M_u$ 를 구한다. 취약한 보강판의 위치는 새깅의 경우(붕괴양식 III) 압축상태에 놓이게 되는 갑판이 되고 호깅의 경우(붕괴양식 IV)는 반대로 선저가 된다. 강도 모델링 매개변수  $X_R$ 을 도입하면 최종 강도식은 다음과 같이 표

현된다.  $X_R$ 의 확률특성은 Table 3.4와 같다[8].

$$M_u = X_R (d_1 + d_2 \phi + d_3 \phi^2) M_p \tag{3.5}$$

**Table 3.4 Probabilistic characteristics of parameter  $X_R$**

	Mean	COV(%)	Distribution Type
Sagging	1.032	8.14	Normal
Hogging	1.085	5.99	Normal

**3.3 신뢰성 해석 결과**

전술한 붕괴양식에 대한 해석 결과로서의 신뢰도 지수와 그것의 통계적 특성을 Table 3.5에 정리하였다.

**Table 3.5 Calculated reliability indices**

Mode Ship No.	Tanker				Bulk Carrier			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	7.56	4.21	4.89	7.37	5.71	3.20	5.27	6.81
2	5.54	2.30	3.59	5.90	5.33	2.83	4.37	6.00
3	5.36	1.49	2.89	5.79	5.33	2.01	3.99	6.09
4	5.79	1.88	3.04	5.88	5.26	2.67	5.07	6.53
5	6.51	3.45	6.26	8.13	5.02	2.77	4.38	6.02
6	5.47	0.19	2.51	6.46	5.58	3.42	4.65	5.97
7	5.33	2.10	3.21	5.53	5.75	0.76	3.22	6.93
8	5.37	2.17	3.69	6.17	5.08	3.01	4.54	5.44
9	5.32	0.84	2.76	6.27	4.82	1.70	3.36	5.69
10	7.31	4.24	5.15	7.31	5.24	2.95	4.07	5.41
11	5.57	2.05	3.44	6.05	5.48	1.18	2.94	5.66
12	5.46	1.95	3.45	6.01	5.23	2.08	4.18	6.27
13	5.66	0.35	2.13	6.21	5.52	1.77	4.23	6.83
14	5.10	2.76	5.43	7.55	5.22	1.89	4.16	6.33
15	5.11	2.35	3.53	5.68	5.27	2.20	3.81	5.94
16	5.82	2.64	2.98	5.05	5.70	3.72	4.57	5.70
17	6.48	3.50	3.19	5.30	5.22	1.21	3.48	5.87
Mean	5.81	2.26	3.66	6.27	5.34	2.32	4.14	6.09
COV(%)	12.5	51.7	30.6	13.5	4.79	36.5	15.2	7.72

결과로서의 신뢰도 지수에 해당하는 파괴확률이 경우에 따라서 상당히 크기도 한데 이를 실제 상태 즉, 운항중 선박이 특정 붕괴양식에 대해 파괴될 확률이 그만큼 크다고 해석하기보다는 선박간의 상대적인 강도 저하로 해석해야 할 것이다. 이는 계산된 위험도 또는 파괴확률이 안전한 정도의 상대적인 평가로서 의미가 있다는 것이고 이러한 이유로는 구조강도 및 설계

에 영향을 미치는 여러 중요한 인자들의 불확실성을 신뢰성 해석에서 고려하지만 그림에도 불구하고 여전히 존재하는 불확실성을 들 수 있다.

신뢰도 지수  $\beta$ 의 분포를 Fig. 1~8에 나타내었으며 이로부터 다음의 사실을 알 수 있었다. 각 선박에 대한 신뢰도 지수의 차가 크고 특히 양식 II에서는 분산도가 가장 큰데 이는 각 선박이 가지는 특징적인 현상(설계시의 요구)이기보다는 신뢰성 해석의 정식화에서 사용한 강도의 기준이 강도가 가장 취약한 하나의 보강판에 기준을 두고 있기 때문이다.

양식 III도 신뢰도 지수의 분산 정도가 상당히 큰데 이는 현재의 설계가 비슷한 강도수준을 요구하는 각 선급 규칙을 따라 최소 요구치를 만족하는 상태에서 이루어지며 최종강도를 고려하고 있지 않기 때문이다. 또한 선각 거어더의 최종강도를 표현하는 식(3.5)가 단면의 특성도 고려하지만 여전히 좌굴강도가 가장 취약한 하나의 보강판에 크게 영향을 받기 때문에 이러한 현상이 가속화 되었으리라 생각한다.

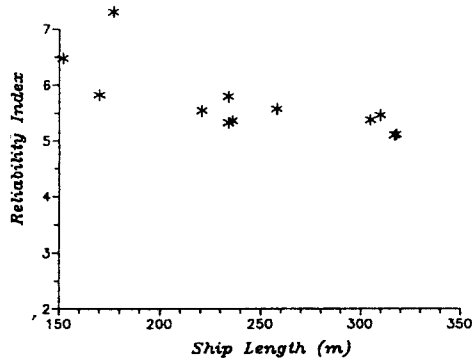


Fig. 1 Reliability index of tanker for mode I

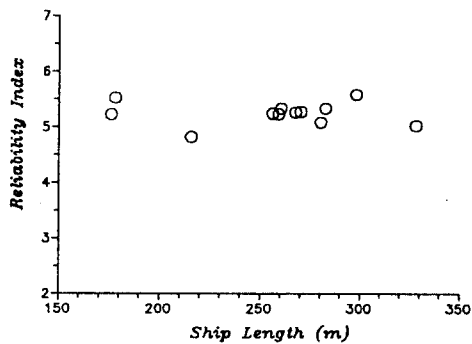


Fig. 2 Reliability index of bulk carrier for mode I

유조선과 살물선의 신뢰도 지수 비교에서는 살물선이 갑판 창구의 존재 때문에 부재의 크기를 키우므로 좌굴을 기준으로 한 강도가 크리라 예상했으나 결과가 그렇게 뚜렷이 나타나지는 않았다. 그러나, Fig. 3~6에서 특히 벗어난 값을 가지는 선박 한 두척의 결과를 제외하면 평균적으로 살물선에 대한 강도가 더 크다고 말할 수도 있다. 전체적으로 유조선의 분산도가 살물선보다 크게 나타났다.

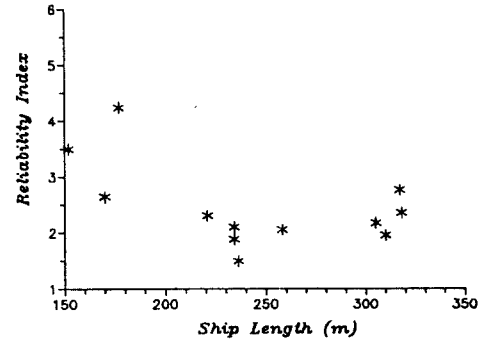


Fig. 3 Reliability index of tanker for mode II

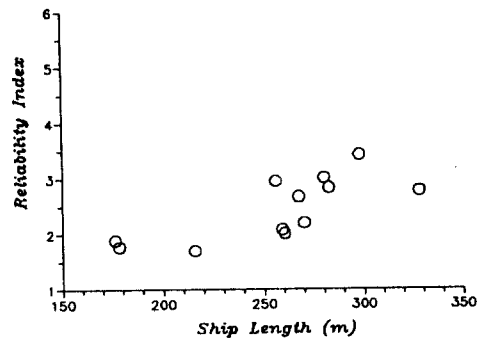


Fig. 4 Reliability index of bulk carrier for mode II

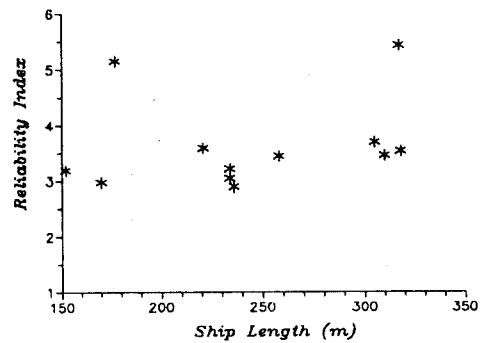


Fig. 5 Reliability index of tanker for mode III

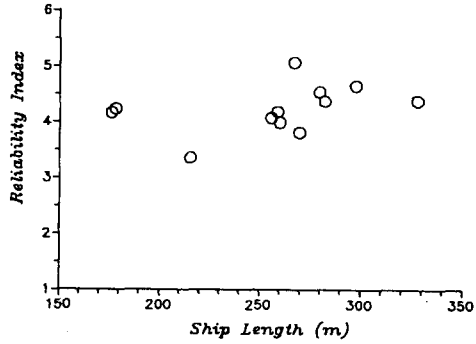


Fig. 6 Reliability index of bulk carrier for mode II

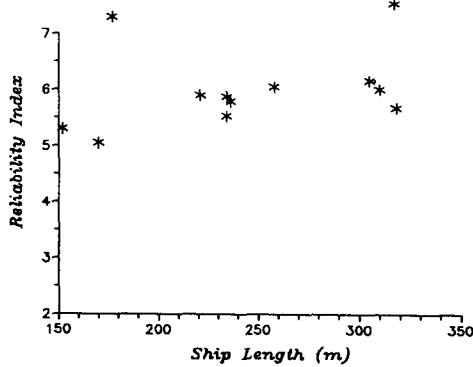


Fig. 7 Reliability index of tanker for mode I

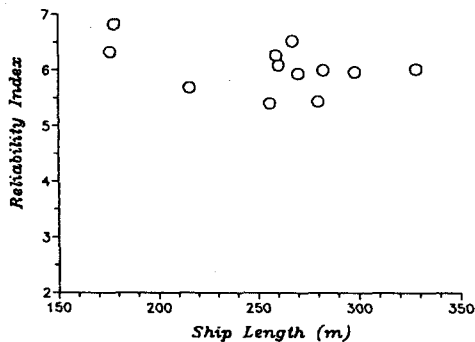


Fig. 8 Reliability index of bulk carrier for mode IV

3.4 목표 신뢰도 지수와 변수의 민감도

건조후 운항중인 여러 선박을 대상으로 어떤 타당한 방법을 사용하여 구조강도 기준을 설정하고 이로부터 선박의 강도평가 및 새로운 설계식을 제정하는 것이 신뢰성 해석이라 할 수 있는데 이때 기준으로 삼는 것이 목표 신뢰도 지수  $\beta_T$ 이다.

계산을 수행한 대상선박이 모두 안전한 항해상태를 유지하므로 이로부터 직접 목표 신뢰도 지수를 구할

수 있는데 통상 평균값을 사용한다. 본 연구에서는 Table 3.5의 신뢰도 지수값에 대응하는 파괴확률로부터 평균 파괴확률과 신뢰도 지수를 구하고(Table 3.6) 이를 목표 신뢰도 지수로 사용하였다.

Table 3.6 Target reliability index  $\beta_T$

Ship Mode	Tanker		Bulk Carrier	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$
I	$4.326 \times 10^{-8}$	5.353	$1.406 \times 10^{-7}$	5.136
II	$1.702 \times 10^{-2}$	2.120	$1.494 \times 10^{-2}$	2.172
III	$5.818 \times 10^{-4}$	3.248	$4.789 \times 10^{-5}$	3.901
IV	$2.591 \times 10^{-5}$	5.445	$5.823 \times 10^{-9}$	5.705

민감도 계수는 각 확률변수가 파괴확률에 미치는 영향의 상대적 중요성을 나타내는 인자로서 변수의 분산 정도가 클수록 이 값이 커지게 된다. 원래 좌표계에 대해 수학적으로는 (3.6)식과 같이 표현되고 각 붕괴양식에 대해 계산한 결과 Table 3.7의 값을 얻었다.

$$\alpha_i = \frac{-\sigma_{x_i} \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_*}{\sqrt{\sum_i \left\{ \sigma_{x_i} \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_* \right\}^2}} \quad (3.6)$$

여기서, \* : Most Probable Failure Point (MPFP) 에 대한 값

Table 3.7 Sensitivity factors

Ship Mode	Factor	Tanker			Bulk Carrier		
		$\alpha_R$	$\alpha_{We}$	$\alpha_s$	$\alpha_R$	$\alpha_{We}$	$\alpha_s$
I	Mean	-0.330	0.824	0.444	-0.361	0.819	0.440
	COV(%)	15.9	8.58	19.4	7.69	4.69	13.1
II	Mean	-0.561	0.508	0.643	-0.565	0.543	0.610
	COV(%)	3.08	17.7	12.4	2.61	15.6	13.2
III	Mean	-0.735	0.460	0.493	-0.727	0.523	0.435
	COV(%)	3.34	12.0	10.1	1.68	12.3	15.4
IV	Mean	-0.538	0.732	0.409	-0.523	0.757	0.388
	COV(%)	5.92	7.78	15.1	2.65	4.51	12.5

4. 신뢰성 이론을 기초로한 설계식 제정

4.1 부분 안전계수

설계의 주목적이 계(구조물)의 목적된 바 능력을 보장하는 것이고 이는 불확실성의 조건하에서 수행되므로 확률 개념이 필연적으로 포함되었다. 그러나 이러한 신뢰도를 만족시키는 설계를 완전한 확률적 해석을 수행하지 않고 적절한 확정적 설계 기준(deterministic design criteria, 예로서는 고전적 안전계수)을 도입함으로써 실시 가능한데 확률적 기초위에서 이러한 형식이 사용되면 가장 유효한 방법이 될 것임은 분명하다. 이는 일정치의 확률적 요구로부터 결정된 안전계수들을 사용하여 이를 수 있다. 설계식의 일반적인 형태는 다음과 같으며 다수의 하중(S)과 저항(R) 계수를 사용하여 각각의 하중효과를 고려한다.

$$\gamma_R R \geq \sum_i \gamma_{Si} S_i \quad (4.1)$$

$\gamma_R$ 과  $\gamma_{Si}$ 는 부분 안전계수이며 하중 또는 저항 계수를 나타낸다. 이는 하중과 저항의 비로 나타나는 고전적 개념의 안전계수와 비슷하나 개개의 변수에 대해 존재하며 각각의 확률특성에 따라 결정된다. 부분 안전계수  $\gamma_i$ 는 MPFP 즉, 파괴치와 특성치의 비율로 표시되며 특성치는 통상 공칭값 또는 변수의 평균값을 사용한다.

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{x_{ic}} = \frac{x_i^*}{\mu_{xi}} \quad (4.2)$$

여기서,  $x_{ic}$  : 변수의 특성치

$\gamma_i$ 는 근사 신뢰성 해석법인 Level II의 AFOSM 방법과 신뢰성 조건(reliability-conditioned, RC) 방법을 사용하여 구할 수 있는데 AFOSM 방법을 사용하면 다음과 같다.

$$\gamma_i = 1 + \beta \alpha_i \text{COV}_i \quad (4.3)$$

$$\gamma_i = x_i^* / \mu_{xi} \quad (4.4)$$

식 (4.3)으로부터 구한 부분 안전계수를 사용하여 설계를 하면 처음에 설정한 원하는 정도의 신뢰도를 얻을 수 없는 문제가 발생하는데[9] 이는 AFOSM 방

법이 비정규분포를 따르는 확률변수가 있으면 이를 등가 정규분포로 치환하고 방향여현을 사용하여 근사적으로 MPFP를 찾기 때문이다. 식 (4.4)를 사용하여 부분 안전계수를 구하면 원래의 원하는 신뢰도를 얻을 수는 있으나 신뢰도 지수 계산을 위해 사용하는 이 방법으로 구한 부분 안전계수는 정확하지 않다고 지적되었다[10].

AFOSM 방법이 가지는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 RC 방법이 사용되는데 이는 등가 정규분포 개념과 방향여현을 사용하지 않고 설계변수의 신뢰성 조건으로부터 직접 파괴점을 구하여 식 (4.4)로부터 부분 안전계수를 구하는 방법이다. 하중 변수가 서로 통계적으로 독립이고 극한상태 방정식이 선형식으로 표현되면 다음의 조건으로부터 MPFP를 구할 수 있다 [10].

$$f_R(r^*) - f_{S_1}(s_1^*)f_{S_2}(s_2^*) \cdots f_{S_n}(s_n^*) = 0 \quad (4.5)$$

$$r^* - s_1^* - s_2^* - \cdots - s_n^* = 0 \quad (4.6)$$

$$\{F_{Si}(s_i^*)\}^{w_i} - \{F_{Sj}(s_j^*)\}^{w_j} = 0, i \neq j \quad (4.7)$$

여기서,  $f( )$  : 확률밀도함수

$F( )$  : 확률분포함수

$w_i$  : 가중계수(weighting factor)

4.2 새로운 설계식의 제정

식 (3.1)과 같은 극한상태 방정식에 대해 부분 안전계수를 구하면 다음과 같다. 선박 설계시의 파랑중 굽힘모멘트와 정수중 굽힘모멘트의 비율은 일정하지 않는데 부분 안전계수는 두 하중비의 변화에 대해서도 크게 변하지 않는 특성을 유지해야 한다. 그렇지 않으면 하중비에 따라서 다른 부분 안전계수를 사용하여 요구되는 저항(강도)치를 계산하여야 하기 때문이다. 신뢰성 해석을 수행한 Table 3.1과 3.2의 선박에 대해 각 파괴양식에 따른 하중의 비율은 Table 4.1과 같다.

유조선에 대해 설정한 목표 신뢰도 지수와 3절에서 사용한 변수의 확률특성으로부터 하중비의 변화에 따른 부분 안전계수의 변화를 AFOSM 방법(식 4.4)과 RC 방법에 따라 구하고 이를 파괴양식 I과 III에 대하여 Fig. 9~12에 나타내었다. 이로부터 RC 방법을 사용하여 부분 안전계수를 구하는 것이 보다 유용함을 알 수 있다.

Table 4.1 Ratio of mean wave and stillwater moment

Ship	Mode	I	II	III	IV
		Range	1.61~3.20	1.86~3.43	1.86~3.43
Tanker	Mean	2.44	2.81	2.81	2.44
	COV(%)	16.3	14.6	14.6	16.3
	Range	2.20~3.07	2.36~4.19	2.36~4.19	2.20~3.07
Bulk Carrier	Mean	2.61	3.05	3.05	2.61
	COV(%)	10.1	15.5	15.5	10.1
	Range	2.20~3.07	2.36~4.19	2.36~4.19	2.20~3.07

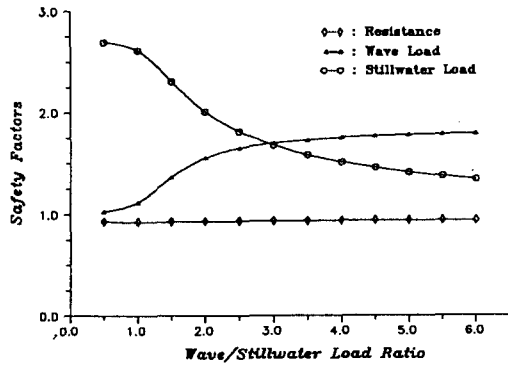


Fig. 9 Variations of PSF for mode I by AFOSM

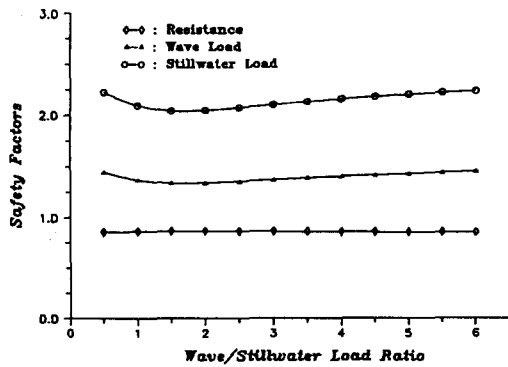


Fig. 10 Variations of PSF for mode I by RC

유조선에 대한 목표 신뢰도 지수와 신뢰성 해석을 수행한 선박의 확률특성을 사용하여 선박의 길이에 대해 AFOSM(식 4.4)과 RC 방법에 따른 부분 안전계수를 구하고 그중 파괴양식 I 과 III에 대하여 Fig. 13~16에 보였다. AFOSM 방법으로 구한 안전계수는 각 선박에 대해 다소 분산되어 나타났지만 RC 방법으로 구한 값은 거의 일정하였다. RC 방법으로 구한 부분 안전계수는 Table 4.2와 같이 분산정도가 아

주 작으므로 설계에 필요한 계수를 추가의 해석없이 평균값으로부터 바로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 새로운 설계식 제정때 RC 방법으로 구한 부분 안전계수를 사용하였다.

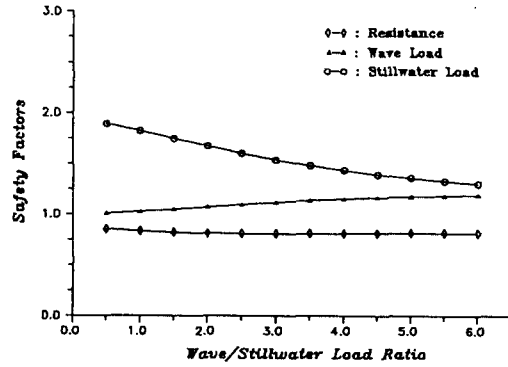


Fig. 11 Variations of PSF for mode III by AFOSM

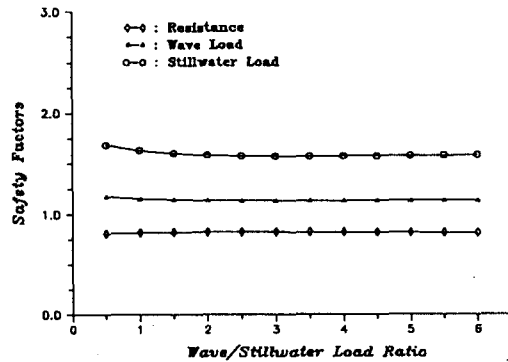


Fig. 12 Variations of PSF for mode III by RC

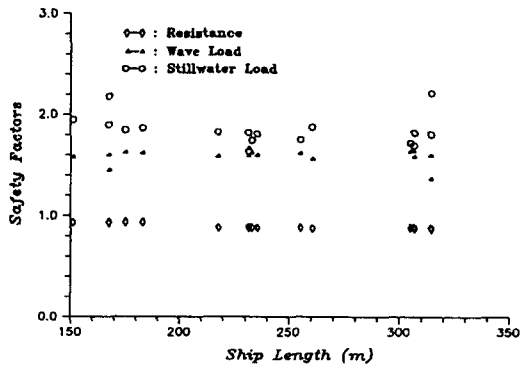


Fig. 13 PSF of tankers for mode I by AFOSM



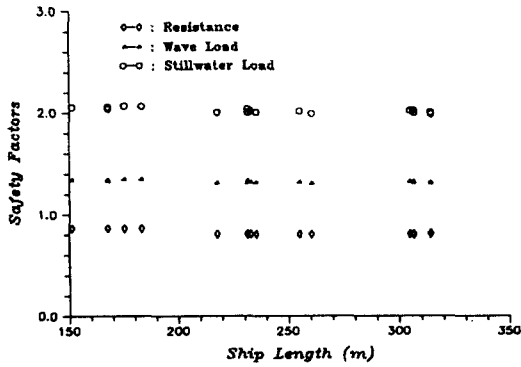


Fig. 14 PSF of tankers for mode I by RC

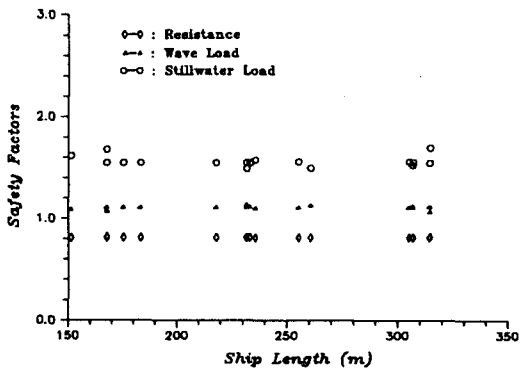


Fig. 15 PSF of tankers for mode II by AFOSM

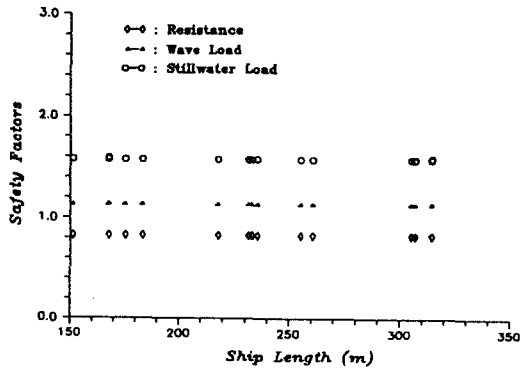


Fig. 16 PSF of tankers for mode III by RC

식 (4.1)은 부분 안전계수의 비율을 사용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mu_R = \bar{M}_u = \gamma_{s_1} \mu_{s_1} + \gamma_{s_2} \mu_{s_2} = \gamma_{We} \mu_{Mwe} + \gamma_S \mu_{Ms} \quad (4.8)$$

식 (4.8)의  $\gamma_{We}$ 와  $\gamma_S$ 의 분포를 파괴양식 I과 III에 대해 Fig. 17과 18에 나타내었고 Table 4.3에 파괴양식 I ~ IV에 대한 대표치(평균)를 정리하였다.

Table 4.2 Partial safety factors with RC method

Mode		Ship			Bulk Carrier		
Mode I	Mean	0.820	1.327	2.019	0.808	1.296	1.957
	COV(%)	3.40	1.07	1.33	1.82	0.65	0.86
Mode II	Mean	0.915	1.075	1.381	0.912	1.076	1.386
	COV(%)	0.03	0.20	0.56	0.06	0.11	0.29
Mode III	Mean	0.822	1.134	1.572	0.782	1.171	1.675
	COV(%)	0.05	0.16	0.33	0.21	0.05	0.10
Mode IV	Mean	0.765	1.284	1.934	0.752	1.309	1.983
	COV(%)	0.34	0.26	0.35	0.33	0.30	0.39

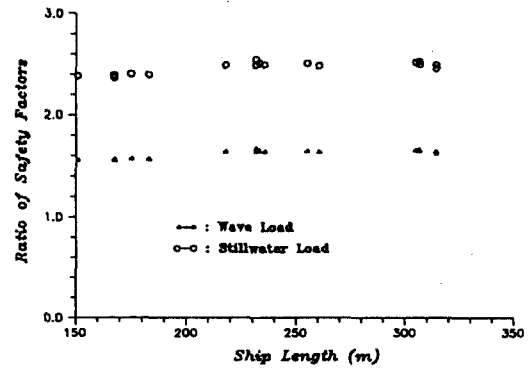


Fig. 17 PSF ratio of tankers for mode I by RC

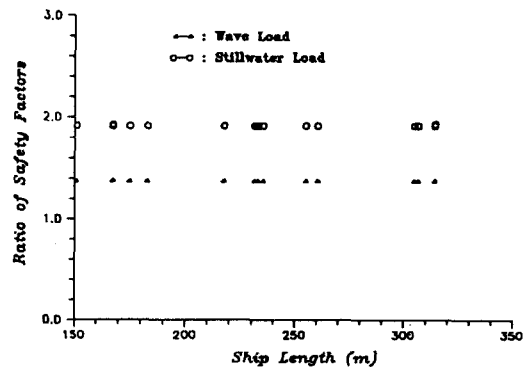


Fig. 18 PSF ratio of tankers for mode III by RC

Table 4.3 Partial safety factors for the design format

Ship Mode	Tanker		Bulk Carrier	
	$\gamma_{we}$	$\gamma_s$	$\gamma_{we}$	$\gamma_s$
Mode I	1.620	2.463	1.603	2.422
Mode II	1.175	1.510	1.180	1.520
Mode III	1.379	1.912	1.498	2.142
Mode IV	1.678	2.527	1.739	2.636

최종적으로 종강도에 대한 설계식으로 새강상태에서 선각 거어더의 최종강도 붕괴양식을 나타내는 양식 III에 대한 결과를 제안한다.

$$M_u = 1.379 M_{we} + 1.912 M_s : \text{유조선} \quad (4.9)$$

$$M_u = 1.498 M_{we} + 2.142 M_s : \text{살물선} \quad (4.10)$$

여기서,  $M_{we}$  :  $M_w$ 의 극한치(식 3.2.a)

$M_s$  : design value의 60%

4.3 재해석을 통한 결과 검토

설계변수의 확률특성을 고려하여 부분 안전계수를 구하고 이로부터 일관된 안전정도를 줄 수 있는 설계식을 만드는 일련의 방법의 유용성을 증명하기 위하여 Table 4.3의 결과를 이용하여 앞서 신뢰성 해석을 수행한 선박에 대해 다시 신뢰성 해석을 수행하였다. 식 (4.8)로부터 구한 저항의 평균값을 사용하여 재해석한 결과 Table 4.4와 같이 각 선박에 대해 거의 일정한 값을 얻었고 각 파괴양식에 대해 유조선의 신뢰도 지수를 Fig. 19~22에 나타내었다.

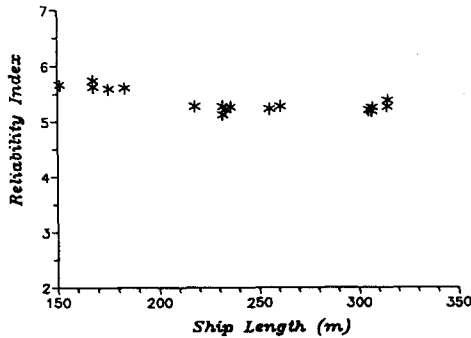


Fig. 19 Reliability index of tanker for mode I

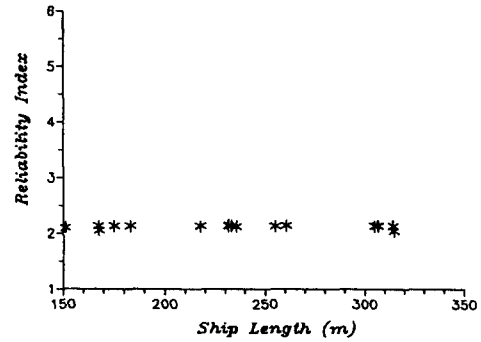


Fig. 20 Reliability index of tanker for mode II

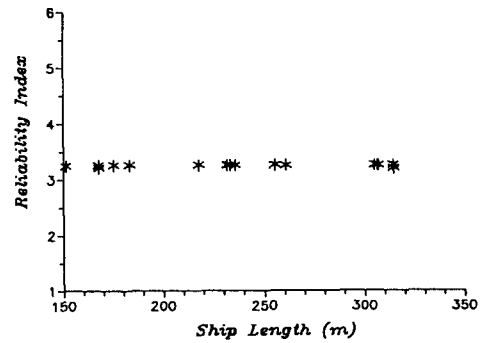


Fig. 21 Reliability index of tanker for mode III

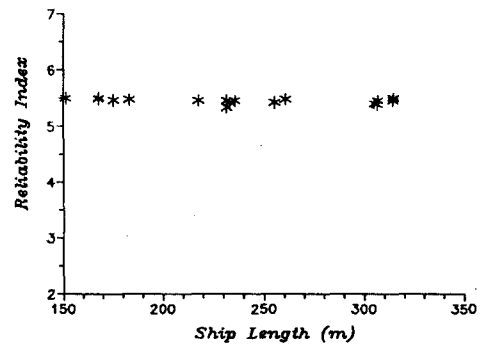


Fig. 22 Reliability index of tanker for mode IV

Table 4.4 Reliability indices with new design format

Mode Ship No.	Tanker				Bulk Carrier			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	5.61	2.13	3.25	5.47	5.51	2.17	3.91	5.76
2	5.28	2.13	3.25	5.46	5.12	2.17	3.91	5.72
3	5.22	2.13	3.25	5.41	5.12	2.16	3.91	5.71
4	5.12	2.14	3.25	5.33	5.15	2.17	3.91	5.75
5	5.75	2.05	3.21	5.50	5.17	2.16	3.91	5.77
6	5.26	2.12	3.25	5.45	5.05	2.17	3.91	5.64
7	5.27	2.13	3.25	5.46	5.07	2.18	3.91	5.67
8	5.20	2.13	3.25	5.40	5.16	2.18	3.90	5.75
9	5.18	2.14	3.25	5.38	5.22	2.14	3.91	5.78
10	5.60	2.13	3.25	5.46	5.12	2.17	3.91	5.71
11	5.23	2.13	3.25	5.42	5.07	2.18	3.91	5.66
12	5.24	2.13	3.25	5.46	5.13	2.17	3.91	5.72
13	5.27	2.14	3.25	5.48	5.06	2.18	3.86	5.63
14	5.37	2.04	3.20	5.49	5.13	2.18	3.85	5.69
15	5.26	2.13	3.25	5.45	5.13	2.17	3.91	5.73
16	5.63	2.13	3.25	5.48	5.03	2.19	3.89	5.62
17	5.66	2.10	3.24	5.50	5.12	2.17	3.91	5.72
Mean	5.36	2.12	3.25	5.45	5.14	2.17	3.90	5.71
COV(%)	3.75	1.40	0.05	0.08	2.09	0.05	0.05	0.08

## 5. 평가 및 결론

본 연구에서는 확률 개념을 도입한 신뢰성 해석법의 선박에 대한 적용 가능성에 대해 고찰하였으며 최종 결과로서는 신뢰성 해석 결과를 이용할 수 있는 간단한 형태의 설계식 제정에 목표를 두고 있다. 즉, 설계자 또는 해석자가 신뢰성에 관계된 여러 확률 이론을 모르고 또한 신뢰성 해석 자체를 하지 않고서도 이용할 수 있는 합리적인 또 하나의 설계 및 강도평가 기준을 제공하고자 하는 것이다. 이상의 연구 결과로부터 다음의 사실들을 알 수 있었다.

- 1) 선급규칙에 따라 같은 안전도를 가정하고 설계 건조된 기존의 선박간에는 상당히 큰 차이의 신뢰도가 존재함을 알 수 있었다.
- 2) AFOSM과 RC 방법은 똑같이 원하는 신뢰도를 제공하는 부분 안전계수를 줄 수 있지만 설계조건의 변화(하중비의 변화)에 따른 부분 안전계수의 변화 정도를 고려할 때 사용의 편의성과 정

확성에서 RC 방법이 보다 우수함을 알 수 있었다.

- 3) 부분 안전계수로부터 구한 새로운 강도 평가 기준을 사용하여 신뢰성 해석을 수행한 선박에 대해 재해석을 실시하였다. 그 결과 처음보다 많이 개선된 균일한 수준의 신뢰도를 얻을 수 있었고 이로부터 신뢰성 해석의 적용 가능성과 유용성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Kim, O.H., Ham, J.H., and Kim, E.N., "Residual Strength Estimation for the Damaged Hull Girder", The 7th Technical Exchange and Advisory Meeting, Ulsan, Korea, Jul. 1993.
- [2] Lin, Y.T., "Ship Longitudinal Strength Modelling", Ph.D. Thesis, Dept. of Naval Arch. & Ocean Engg., University of Glasgow, Mar. 1985.
- [3] 김희현, 김병주, "선체구조의 신뢰성해석을 위한 설계변수의 통계적 특성에 관한 조사", 대한조선학회 춘계연구발표회, 1993년 4월, pp. 183~187.
- [4] Frieze, P.A and Lin, Y-T., "Ship Longitudinal Strength Modeling for Reliability Analysis", Proc. of Marine Structural Inspection, Maintenance, and Monitoring Symposium, SNAME, Mar. 1991, pp. III-C-1~19.
- [5] Mano, H. et al., "Statistical Character of the Demand on Logitudinal Strength (2nd Report) - Long Term Distribution of Stillwater Bending Moment", JSNAJ, Vol. 142, Dec. 1977, pp. 255~263.
- [6] Soares, C.G. and Moan, T., "Statistical Analysis of Stillwater Load Effects in Ship Structures", Trans. SNAME, Vol. 96, 1988, pp. 129~156.
- [7] Hart, D.K. et al., "Structural Reliability Analysis of Stiffened Panels", Trans. RINA, 1985, pp. 293~310.
- [8] 함주혁, 김을년, 김희현, "선각 거어더의 최종 및 잔류 종강도 추정 시스템 개발", 대한

- 조선학회 추계연구발표회, 1994년 11월.
- [9] 서용석, "선체 구조물의 신뢰성 해석", 서울대학교 조선공학과, 공학석사 학위논문, 1989년 1월.
- [10] Ayyub, B.M. and White, G.J., "Reliability-Conditioned Partial Safety Factors", *Jnl. of Structural Engineering Division, ASCE, Vol. 113, No. 2, Feb. 1987*, pp. 279~294.