

# 노후선박의 Condition Assessment Scheme의 개발

박영일\*, 백점기\*\*, 이제명\*\*\*, 고재용\*\*\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과 대학원, \*\*부산대학교 조선해양공학과 교수, \*\*\*부산대학교 조선해양공학과 조교수,  
\*\*\*\*목포해양대학교 해양시스템 공학부

## Development of the Condition Assessment Scheme of Aged Ships

Young-Il Park\* · Jeom-Kee Paik\*\* · Jae-Myung Lee\*\*\* · Jae-Yong Ko\*\*\*\*

\*Graduate school of Pusan National University

\*\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University

\*\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University

\*\*\*\*Dept. of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University

**요 약** : 노후선박의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 부식이나 피로균열 및 기계적인 손상에 의하여 선체 구조 강도가 어떠한 영향을 받는지 충분히 검토하여 적절한 수리 보수 등 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 부식, 피로균열, 기계적인 손상과 같은 노후 선박에 발생할 수 있는 여러 가지 손상이 선체강도에 미치는 영향을 이론적, 수치적, 실험적인 방법을 통하여 조사하고, 이를 통하여 선각거더의 소성붕괴강도 저하를 고려한 신뢰성 평가법 및 보수, 수리를 통한 일정수준 이상의 선각강도를 유지하게 하는 지침도 연구하였다.

**핵심용어** : 부식손상, 피로균열, 기계적 손상, 선각거더 최종강도, 신뢰성해석

**ABSTRACT** : This study presents reliability assessment of merchant ships with focus on hull girder ultimate limit state, taking into account the time-dependent effects of corrosion, fatigue cracking and local denting. Some considerations for establishing a reliability-based repair and maintenance scheme are also made so as to keep a ship's hull girder strength reliability at an acceptable level even later in life.

**KEY WORDS** : corrosion damage, fatigue cracking, mechanical damage, ultimate strength of hull girder, reliability analysis

### 1. 서 론

선박의 안전성 및 신뢰성 향상을 위한 국제적인 관심과 관련 규정의 강화 등의 결과로 1990년대 후반 이후 상선의 해난사고 비율은 점차 줄어드는 추세에 있으나 노후선박의 해난사고는 여전히 계속되고 있으며, 이로 인한 막대한 인적 및 물적 손실이 발생하고 있다[1, 2].

이들 해난사고의 주요 원인 중에서 구조 강도적인 측면에서는 노후된 선박이 부식이나 피로 균열 손상을 가지고 항천에서 운항 중에 큰 외력을 받아 구조 안전성의 약화로 인하여 구조 전체적

으로 붕괴함으로써 침몰한 것으로 분석되어 지고 있다. 또한, 선박의 좌초, 충돌, 화물의 적재 및 하역 중에 발생할 수 있는 기계적인 손상 또한 원인으로 생각되어진다.

선체구조의 안전성을 확보하기 위해서는 부식이나 피로균열과 같은 손상에 의해 선체 구조 강도가 어떠한 영향을 받는지 충분히 검토하여 적절한 수리 보수 등 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다. 또한, 선체구조의 안전성 신뢰성 평가 시에는 각종 불확실성이 내포되기 때문에 이들을 합리적으로 고려할 수 있는 확률론적 수법에 의한 평가가 이루어져야만 된다[3].

\* parkyi@pusan.ac.kr, 051)510-3281

\*\* 정희원, jecmpaik@pusna.ac.kr, 051)510-2429

\*\*\* 정희원, jaemlee@pusan.ac.kr, 051)510-2342

\*\*\*\* 정희원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129

따라서, 선체 노후화에 따라 발생하는 구조 손상이 선체구조의 붕괴 및 침몰사고에 미치는 영향을 규명하고, 이에 대한 대책의 수립이 필요하며, 특히 침몰사고를 미연에 방지하기 위한 적절한 보수 수리를 위한 조기 경보 시스템의 구축이 요구된다.

본 논문에서는 노후화에 의한 대형 상선 구조의 부식 및 피로 균열 손상과 기계적인 구조 손상 (Local dent)의 효과를 고려하여 선각 붕괴를 기준으로 한 구조 안전성 평가 시스템을 개발하고, 구조 붕괴에 의한 침몰사고를 미연에 방지하기 위한 수리 보수 조기 경보 시스템을 구축하고 있으며[4], 연구 과정 및 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 선박의 최종 붕괴 강도 신뢰성 및 위험성 평가 기법

선박을 비롯한 각종 강구조물의 신뢰성 평가를 위한 수학적인 알고리즘은 이미 구축되어 있으며, 구조물의 파손확률은 일반적으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\text{위험성(Risk)} = P_f = \text{Prob}(C \leq D) \quad (1)$$

여기서,  $P_f$  = 파손확률,  $C$  = 대상구조물의 강도,  $D$  = 대상구조물에 작용하는 하중

구조물의 안전성, 신뢰성의 확보는 구조물이 파손되지 않을 확률로 표현할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Reliability} = \text{Prob}(C > D) = 1 - P_f \quad (2)$$

일반적으로 구조물의 신뢰성을 기준으로 한 구조설계는 다음의 과정을 거치게 된다.

- (a) 목표 신뢰성 지수를 설정한다.
- (b) 대상 구조물에 대해 발생 가능한 파손 모드를 결정한다.
- (c) (b)에서 정의한 각 파손 모드별로 한계상태 방정식을 정식화한다.
- (d) 각 한계상태 방정식을 구성하고 있는 랜덤변수들에 관한 확률 특성값(평균, 분산, 표준편차)을 결정한다.
- (e) 각 파손 모드별로 신뢰성 지수를 계산한다.
- (f) 계산되어진 신뢰성 지수 값이 목표신뢰성 지수 보다 큰 값을 가지는지를 확인한다.
- (g) 목표신뢰성 지수보다 작은 값을 가지는 경우, 재설계를 수행한 후에 설계조건을 만족할 때까지 위의 과정을 다시 반복한다.

노후 선박의 신뢰성 또는 위험성 평가 시에도 이와 유사한 과정을 거치게 된다.

## 3. 선각붕괴강도에 관한 목표 신뢰성 지수의 목표 값 설정

안전성 혹은 충분한 크기의 신뢰성 지수는 해석대상 구조물의 종류, 특성 및 파손 시나리오별로 다양할 것이다. 즉, 해석대상 구조물의 목표 신뢰성 지수는 고정된 값이 정해져 있는 것이 아니라 때로는 실험, 통계자료 등에 의해서 그 적절한 수준의 크기를 조사, 결정해야만 한다.

목표 신뢰성 지수를 결정하는 방법은 다음과 같이 3종류의 그룹으로 크게 분류될 수 있다[4].

- 예측(Guesstimation): 이 방법은 기존의 파손, 붕괴에 관한 통계 데이터가 없는 경우의 새로운 형태의 구조물에 관하여 적용을 시킬 수 있다.
- 현재 사용 중인 설계기준에 따르는 해석(Analysis of existing design rules): 최근까지 실용적으로 널리 사용되어지고 있는 설계기준을 따라 계산한 값에 의하여 신뢰도를 평가하는 방법이다.
- 경제성 해석(Economic value analysis): 해석대상 구조물의 사용기간 동안에 소요될 비용의 합을 최소로 하는 값을 목표 신뢰도로 설정하는 방법이며, 이 방법이 실용적으로 얻기가 어렵지만 가장 바람직한 방법이 될 것이다.

Fig.1은 여러 선종에 관하여 각기 다른 계산방법으로 조사된 신뢰성 지수들을 선령의 함수로 나타내고 있다[5]. 각 선종별로 파손모드 및 신뢰성 지수를 연도별로 도식화하였다.

Fig.1을 통하여 신뢰성 지수의 계산 값이 연도가 증가할수록 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 이는 선박들의 신뢰도가 점점 감소한다는 것을 의미하는 것이 아니라, 구조물의 강도 평가법의 발달로 인하여 해당 구조물의 발생 가능한 붕괴모드를 더욱 현실적으로 고려하게 되어 신뢰성 지수가 감소하고 있다고 판단된다. 즉, 최근의 기술 진보 등으로 인하여 선박구조강도 해석기법의 신뢰도는 점점 증가했지만, 과거의 계산들에는 이러한 신뢰성 있는 해석기법이 적용되지 못한 당시 해석기법의 한계 등으로 인해 발생한 다양한 불확실성 때문에 다소 비현실적인 계산도 있었을 것이며, 1991년에는 신뢰성 지수 값이 약 3.5에서 2000년에는 2.5정도로 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

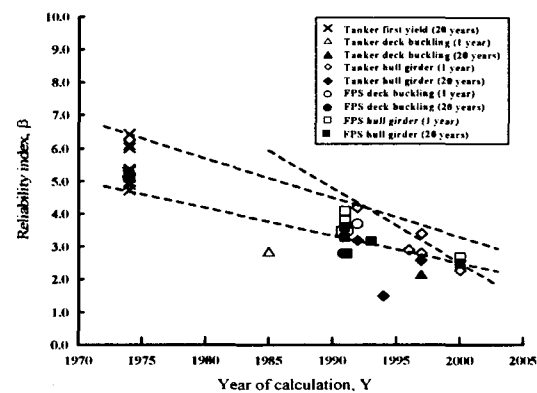


Fig.1 Variation of the calculated notional reliability indices over the passage of the years for ships during 1974 to 2000 (FPS = floating, production and storage unit)[5]

이러한 다양한 결과 및 최신의 선각 최종강도 연구동향을 근거로, 선박의 신뢰성 지수의 목표값은 본 연구에서 적용하는 바와 같은 상세한 강도 및 하중 계산모델을 적용하는 경우, 약 2.0~2.5로 결정할 수 있으리라 사료된다.

#### 4. 최종한계상태 방정식

선각의 최종강도 신뢰성 평가에서 1~4차 붕괴모드로 정의되는 4종류의 붕괴모드를 고려할 수 있다[3].

제 1차 붕괴모드는 압축플랜지(새김모멘트가 작용하는 경우 갑판부, 호킹모멘트가 작용하는 경우는 선저외판)는 좌굴을 일으키고, 반대로 인장플랜지(새김모멘트가 작용하는 경우 선저외판, 호킹모멘트가 작용하는 경우는 갑판부)는 인장하중에 의하여 항복되어 선각이 붕괴되는 것으로 정의할 수 있다. 제 2차 붕괴모드는 압축하중에 의해서 플랜지가 붕괴하여 최종강도에 이르는 것으로 정의되며, 제 3차 붕괴모드는 압축하중에 의하여 발생한 비틀림 좌굴 혹은 트리핑 현상으로 지지부재가 붕괴하여 최종강도에 이르는 것으로 정의된다. 제 4차 붕괴는 지지부재 사이의 판이 압축하중에 의하여 전체 구조물의 최종강도에 이르는 것으로 정의할 수 있다.

상기 4종류의 붕괴모드에 관한 최종한계상태 방정식은 각각 아래와 같다.

○ 1차 붕괴모드:

$$F_{I} = x_{1u}M_{1u} - (x_{sw}k_{sw}M_{sw} + x_wk_wM_w) \leq 0 \quad (3.1)$$

○ 2차 붕괴모드:

$$F_{II} = x_{2u}M_{2u} - (x_{sw}k_{sw}M_{sw} + x_wk_wM_w) \leq 0 \quad (3.2)$$

○ 3차 붕괴모드:

$$F_{III} = x_{3u}M_{3u} - (x_{sw}k_{sw}M_{sw} + x_wk_wM_w) \leq 0 \quad (3.3)$$

○ 4차 붕괴모드:

$$F_{IV} = x_{4u}M_{4u} - (x_{sw}k_{sw}M_{sw} + x_wk_wM_w) \leq 0 \quad (3.4)$$

여기서,  $M_{iu} = i$  번째 붕괴모드에 관한 선각강도,  $M_{sw} =$  정수중 굽힘모멘트,  $M_w =$  파랑중 굽힘모멘트,  $k_{sw}, k_w =$  정수중 굽힘모멘트와 파랑중 굽힘모멘트가 동시에 작용할 때 각각의 보정 계수,  $x_{iu}, x_{sw}, x_w =$  선각강도, 정수중 굽힘모멘트, 파랑중 굽힘모멘트에 관련된 각각의 모델링 불확실성을 나타낸다.

#### 5. 선각 최종강도 계산모델

선각의 최종강도를 예측하기 위한 모델링 방법으로는, 판-보강재 조합모델(plate-stiffener combination model), 판-보강재 분리모델(plate-stiffener separation model)로 정의한 2종류의 구조 모델링 기법을 생각할 수 있으며, 각각의 모델링 기법을 이용하여 전술한 4종류의 붕괴모드에 관한 선각 최종강도 간이식을 도출하였다[6].

#### 5.1 1차 붕괴모드

선각의 최종 굽힘모멘트는 다음의 식으로 계산할 수 있다[6].

$$M_{1u} = \sum_i \sigma_i A_{ei}(z_i - g_u) + \sum_j \sigma_j A_j(z_j - g_u) \quad (4)$$

#### 5.2 2차 붕괴모드

2차 붕괴모드에 관한 선각의 강도식은 다음과 같다.

$$M_{2u} = \sigma_{2u} Z_e \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_{2u}, Z_e =$  선각부재 중 압축플랜지에서의 최종압축응력 및 탄성단면계수

#### 5.3 3차 붕괴모드

3차 붕괴모드에 관한 선각의 강도식은 다음과 같다.

$$M_{3u} = \sigma_{3u} Z_e \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{3u} =$  압축플랜지 중 보강재의 압축최종강도(지지부재)

3차 붕괴모드 간이식 중  $\sigma_{3u}$  즉, 지지부재의 압축최종강도는 보강재의 탄소성 트리핑 강도로 나타낼 수 있으며, 각 보강재 형태(평활 보강재, 앵글 보강재 및 T 형 보강재)에 대한 관련 간이식은 참고문헌 [6]을 참조하기 바란다.

#### 5.4 4차 붕괴모드

4차 붕괴모드에 관한 선각의 강도식은 다음과 같다.

$$M_{4u} = \sigma_{4u} Z_e \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_{4u} =$  압축플랜지 중 지지부재 사이 판 부재의 압축최종강도

#### 5.5 부식, 피로균열 및 기계적 손상의 영향

본 연구에서 선각강도에 영향을 미치는 손상을 부식, 피로균열 및 기계적인 손상으로 분류하고, 이에 관한 영향을 식 (3)~(10) 같이 개발하였다. 각각의 자세한 내용은 참고문헌 [4]를 참조하기 바란다.

○ 부식의 영향

$$R_r = \frac{\sigma_u}{\sigma_{uo}} = \left( \frac{A_0 - A_r}{A_0} \right)^{0.73} \quad (8)$$

○ 피로균열의 영향

$$R_c = \frac{\sigma_u}{\sigma_{wo}} = \frac{A_0 - A_c}{A_0} \quad (9)$$

○ 기계적인 손상의 영향

$$R_d = \frac{\sigma_u}{\sigma_{wo}} = C_3 \left[ C_1 \ln \left( \frac{D_d}{t} \right) + C_2 \right] \quad (10)$$

따라서, 식 (8)~(10)을 통해서 부식, 피로균열 및 기계적인 손상을 가진 부재의 강도저하량을 추정할 수 있으며, 이러한 손상들이 동시에 존재하는 경우의 최종강도평가는 아래식의 방법을 사용할 수 있다.

$$\sigma_u = R_r R_c R_d \sigma_{wo} \quad (11)$$

여기서,  $R_r, R_c, R_d$  = 식 (8), (9), (10)

## 6. 종굽힘모멘트의 계산 모델

본 연구에서는 운항중인 선박에 작용하는 종굽힘하중인 정수중 굽힘모멘트는 아래 식 (12)의 간이식을 [7], 파랑중 굽힘모멘트는 Loukakis & Chryssostomidis[8]에 의해서 개발된 MIT sea-keeping table을 사용하였다.

$$M_{sw} = \begin{cases} 0.015CL^2B(8.167 - C_b) \text{ (kNm) for hogging} \\ -0.065CL^2B(C_b + 0.7) \text{ (kNm) for sagging} \end{cases} \quad (12)$$

## 7. 선령의 증가에 따른 선박 구조손상 예측모델의 개발

선령의 증가와 관련하여, 선박의 안전성 및 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자는 부식 및 피로균열 손상이 된다. 따라서, 정밀한 신뢰성 평가를 수행하기 위하여, 선령의 증가에 따른 부식 및 피로균열 진전 예측 모델을 정식화해야만 한다.

### 7.1 선령의 증가에 따른 부식손상 모델의 개발

선박구조에서의 부식손상 특징은 방식 방법의 형태 및 종류, 적재화물의 종류, 화물창의 온도 및 습기 등에 의해서 결정된다. 따라서, 선박 내부의 부재종류 및 위치별로 부식손상 모델을 개발해야 된다는 것을 알 수 있다.

Fig.2는 해양구조물의 부식진전에 대한 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이, 시간의 증가에 따른 부식모델은 방식시스템(코팅)이 유효한 기간, 방식시스템이 벗겨진 이후부터 부식이 일어나기 직전까지 기간, 그리고 부식이 실제로 진행되는 기간의 3부분으로 나누어 생각할 수 있다.

부식의 효과로 감소된 판 두께는 선령의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_r = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2} \quad (13)$$

여기서,  $t_r$  = 부식의 효과로 감소된 판 두께(mm),  $T$  = 선령(year),  $T_c$  = 방식 시스템(코팅)의 수명(year),  $T_t$  = 부식 천이기(year),  $C_1, C_2$  = 계수

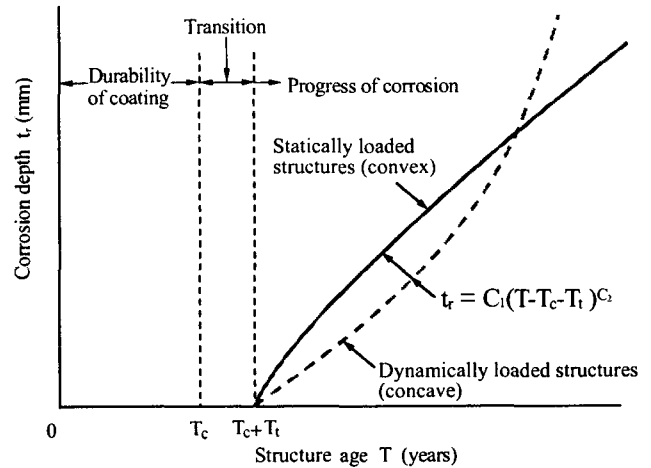


Fig.2 A schematic of a proposed corrosion process model for marine structures[6]

식 (17)식의 각 변수들에 관한 자세한 내용은 참고문헌 [4]을 참조하기 바란다.

### 7.2 선령의 증가에 따른 피로균열 모델의 개발

선박구조에서 볼 수 있는 피로균열 손상은, 노후선박의 수리시 가장 비용이 많이 드는 구조손상의 한 종류이다. 피로균열 손상은 일반적으로 용접부나 응력집중부에서 쉽게 발견되며, 파랑하중과 같은 반복하중의 작용으로 균열이 발생하고 시간이 지남에 따라 진전 혹은 성장하게 된다.

일반적으로 시간에 따른 균열 성장 과정을 초기균열 발생, 균열 진전, 및 파괴의 3단계로 분류할 수 있다. 이러한 관점에서, 시간에 따른 균열 손상이 구조강도에 미치는 영향 역시 다음과 같이 3 단계로 구성되는 모델로 구성할 수 있다.

- 초기균열 평가에 관한 모델
- 균열진전 평가에 관한 모델
- 구조파괴 평가에 관한 모델

균열 성장은 파괴역학적인 접근법을 통해 평가되는 것이 일반적이다. 이 방법은 물리적인 모델, 경험적인 모델로 구분되며, 전자의 경우가 균열성장속도를 균열선단에서 응력확대계수의 함수로 표현한 Paris-Erdogan식이다. 본 연구에서는 (14)식으로 표현되는 Paris-Erdogan식을 이용하여 균열진전 평가를 수행하였다[4].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (14)$$

## 8. GUI기법 응용 TRAAS 시스템 개발

전술한 각종 해석이론들을 바탕으로, 노후선박의 구조붕괴강도 신뢰성 및 위험도를 평가하고, 자동적인 수리 보수 조기 경보를 가능하게 해주는 시스템인 TRAAS (Time-dependent Risk Assessment of Aging Ships)를 개발 중에 있다. Fig.3는 TRAAS 시스템의 초기화면을, Fig.4은 임의 노후 선박의 최종 종강도 계산 결과를 보여주는 화면이다.

TRAAS는 선체 노후화에 따른 구조손상 시나리오와 관계된 특정 운항조건 및 항해조건에 관한 위험성 수준 혹은, 신뢰성 지수를 자동으로 계산해 주며, 적절한 수리 보수 시기와 방법을 제시해 준다. TRAAS에서 해석대상으로 삼는 노후선박에 관한 기하학적 및 재료적인 입력자료 처리는, 범용 유한요소해석용 전처리 프로그램 MSC/PATRAN을 사용하고 있으며, 사용자의 편의를 위하여 입력과정 전반부에 걸쳐 MS-EXCEL을 통한 입력도 가능하도록 고려하고 있다.

## 9. 노후 선각거더의 최종강도 신뢰성 평가를 위한 TRAAS 시스템의 적용 예

### 9.1 대상 선박

본 연구에서 개발하고 있는 TRAAS 시스템을, 105k dwt 이중 선체 유조선, 170k dwt 산적 화물선, 113k dwt FPSO(이중 선체 구조) 등 3척의 선박에 적용하여 그 유용성을 평가하였다.

Fig.5에는 170k dwt 산적화물선을 대상으로 선령의 증가에 따라 발생가능한 구조손상 시나리오별 최종강도 저하특성을 예로 보여주고 있다. 자세한 계산 결과 및 내용은 참고문헌 [4]을 참조하기 바란다.

## 10. 결론

본 연구에서는 선박의 노후화에 관련된 각종 구조 손상 (일반/국부부식, 피로균열, 기계적 손상)을 고려한 최종붕괴강도 신뢰성 해석기법을 개발하였다. 또한, 본 이론을 바탕으로 노후선박의 구조 붕괴강도 신뢰성 및 위험도를 평가하고, 자동으로 수리 보수, 조기 경보를 가능하게 해주는 GUI 프로그램인 TRAAS를 개발 중에 있다.

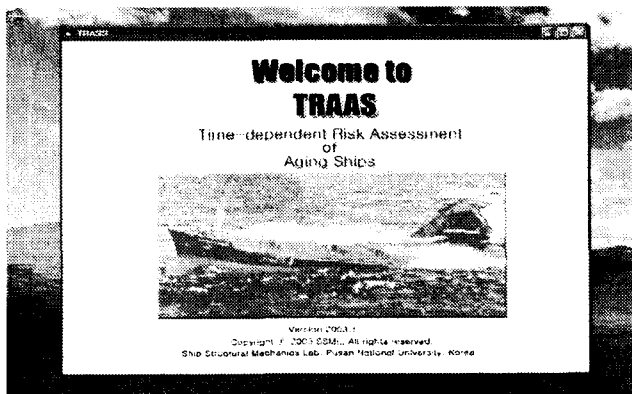


Fig.3 The front page of the TRAAS system

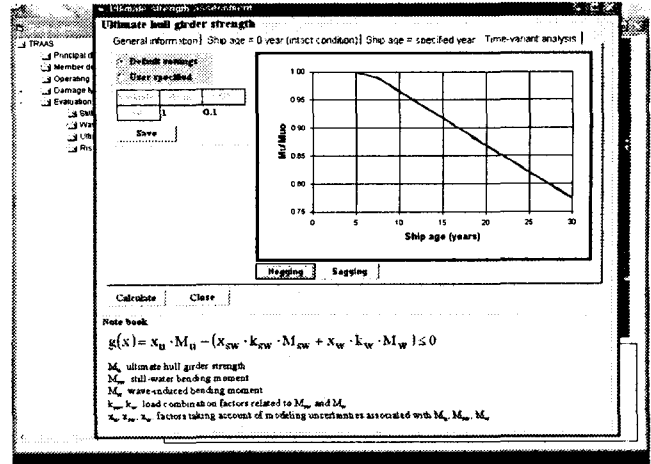


Fig.4 A sample page for the ultimate hull girder strength calculation of an aging ship

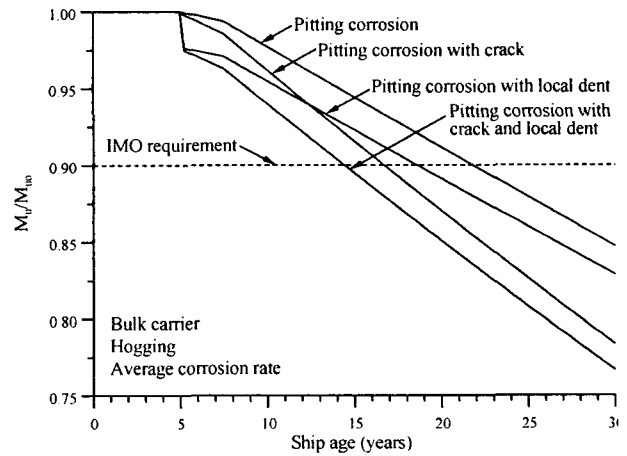


Fig.5 Time-dependent ultimate hull girder strength of the 170k dwt bulk carrier against hull girder collapse in hogging

본 연구에서 개발된 시스템을 실제 운항중인 선박에 적용하는 경우, 대형 상선의 침몰사고를 방지할 수 있게 되어 막대한 경제적 손실과 인명피해를 줄일 수 있다고 판단되며, 부식, 피로균열, 기계적 손상을 가진 선박의 수리 보수 시기를 예보할 수 있게 됨으로써, 불요불급한 수리보수를 위한 선박 운항 정지 또는 입거(Docking)에 따른 선박 운항상 경제적인 손실도 크게 줄일 수 있으리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.K. Paik and A.K. Thayamballi(1998), "The strength and reliability of bulk carrier structures subjected to age and accidental flooding", SNAME Transactions, Vol.106, pp.1-40.
- [2] LR(2000), Lloyd's register of shipping world casualty statistics 1996-1999.
- [3] J.K. Paik and A.K. Thayamballi(2003), "Reliability assessment of ships", CRC Reliability Engineering Handbook, CRC Press (in press).
- [4] J.K. Paik, G. Wang, A.K. Thayamballi, J.M. Lee and Y.I. Park(2003), "Time-dependent risk assessment of aging ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local denting damage", SNAME Transactions, Vol.111.
- [5] J.K. Paik and P.A. Frieze(2001), "Ship structural safety and reliability", Progress in Structural Engineering and Materials, John Wiley & Sons, Vol.3, No.2, pp.198-210.
- [6] J.K. Paik and A.K. Thayamballi(2003), "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons.
- [7] A. Nitta, H. Arai and A. Magaino(1992), "Basis of IACS unified longitudinal strength standard", Marine Structures, Vol.5, pp.1-21.
- [8] T.A. Loukakis and C. Chryssostomidis(1975), "Seakeeping series for cruiser stern ships", SNAME Transactions, Vol.83, pp.67-127.