

운항조건 및 해상상태가 대형 화물선의 파랑 중 굽힘모멘트에 미치는 영향

김동문*, 백점기**

㈜필스*, 부산대학교 조선해양공학과**

Effects of Operational Condition and Sea States on Wave-Induced Bending Moments of Large Merchant Vessels

Dong Mun Kim* and Jeom Kee Paik**

PILS Co. Ltd.*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University**

Abstract

For risk or reliability assessment of ship structures against particular hazardous situations such as total loss or sinking due to hull girder collapse, the short-term based response analysis rather than the long-term response analysis is required to determine wave-induced bending moments when the ship encounters a storm of specific duration and with a specified small encounter probability. In the present study, the effects of operational condition and sea states on wave-induced bending moments of large merchant vessels are investigated. A series of the short-term response analyses for a hypothetical VLCC and a Capesize bulk carrier (CSBC) are carried out with varying operational condition and sea states which include ship speed, significant wave height and wave persistence time, using the linear-strip theory based program ABS/SHIPMOTION and the MIT sea-keeping tables. The computed results are also compared with the IACS design formula predictions. The results and insights developed from the present study are summarized.

※Keywords : Risk assessment of ships (선박의 위험성 평가), Long-term response(장기응답), Short-term response (단기응답), Wave-induced bending moment (파랑굽힘모멘트), operational condition (운항조건), Sea states (해상상태)

접수일: 2003년 5월 12일, 승인일: 2003년 9월 19일

†주저자, E-mail : dmkim@pusan.ac.kr,

Tel : 051-970-0713

1. 서언

초기 구조 설계 시 선체의 종강도는 IACS Rule

을 기준으로 평가되어진다. 선체 종강도의 평가 시에 가장 중요한 하중 성분은 파랑굽힘 모멘트이다(Soares 1996). 그러나, 파랑하중의 효과를 합리적으로 예측하기에는 운항조건 및 해상상태는 너무나 많은 수의 변수를 가지고 있으며 불확실성 및 다양한 변화성을 포함하고 있다.

특히 최근 들어 노후 된 산적화물선의 빈번한 침몰사고를 계기로 노후 선박의 안전성 평가 문제가 더욱더 관심의 대상이 되고 있다.

이들 문제의 규명을 위해서는 실제 선박의 운항조건 및 해상상태 하에서 하중을 정확히 분석하는 것이 필요하게 되어진다. 선급협회에서는 North Atlantic 의 Wave Climate (장기응답해석)를 적용하여 규정하고 있다. 그러나, 특별한 경우의 선체의 안전성 및 신뢰성 평가를 위해서는 단기응답해석의 적용이 요구되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 대형 화물선을 대상으로 하여 다양한 운항 및 파랑조건 하에서의 단기응답 해석을 통하여 선각에 작용하는 파랑하중을 분석하고자 한다. 이러한 문제는 지금까지 다수의 이론적, 수치적 및 실험적으로 연구가 이루어졌으며 그 연구성과에 대해 간략하게 고찰하고자 한다.

Loukakis & Chryssostomidis (1975)가 개발한 MIT sea-keeping tables 은 단기응답을 바탕으로 하여 파랑굽힘모멘트를 예측하기 위해 유용하게 사용되어지고 있다. 본 해석을 위해 사용된 USAS-L 프로그램은 MIT sea-keeping table 로 개발되었다.

DMI Report (1995)에서는 m.v. Derbyshire 의 침몰에 대해 1989년 공식적인 조사에서 언급했다. 26m 의 파고에 직면한 1/50 모델테스트에서 측정된 굽힘모멘트가 IACS 기준으로 계산한 값보다 약 20%크게 나타나는 것으로 발표했다. 또한 이 Report 에서는 아주 큰 폭풍에 대한 현재의 설계의 부족함을 강조했다.

Paik & Faulkner (2003) 논문에서 보면 1955 (Murray 1955)로부터 1992(IACS UR S11)까지 허락하는 응력값 약 0.75 Yield 보다 현재의 응

력값이 약 10% 상승되어졌다고 제시하고 이는 또한 품질관리의 향상으로 인하여 상승되어진 것으로 언급한다. 또한, 이 논문에서는 Derbyshire 를 대상으로 수직파랑굽힘모멘트를 계산한 후 그 결과를 비교하였다. USAS-L 프로그램으로 계산한 값이 IACS 기준으로 계산한 값보다 호킹때는 1.32 배, 새킹때는 1.25 배 크게 나오는 것을 언급하고 있다. 그 이유는 IACS 식은 특별한 운항 및 해상조건을 반영하고 있지 않기 때문이라고 설명한다.

1975년 Prof. Lewis 는 US Naval Academy 안에서 열린 Sea-keeping Workshop 에서 이미 선박중앙단면의 설계를 위한 선급협회규칙의 충분함에 대해 문제를 언급했다. 그 후 Lewis & Zubaly (1981)의 논문에서는 겨울 North Atlantic 을 항해하는 Sealand container ship 에 작용하는 굽힘모멘트가 선급협회의 요구값보다 약 20%이상 크게 나오는 것을 보여주고 있다.

그러나, 선급협회는 아직도 장기응답해석을 기초로 개발되어진 IACS 식을 선호하고 있다. 이런 여러가지 원인으로부터 보면 굽힘모멘트의 불완전한 조사는 거친 해상조건에 의해 Hull girder 의 붕괴 및 선체의 결함으로 인한 선박의 침몰을 만들어내고 있다. 최근 12년동안 8척의 선박이 그런 Hull girder 의 붕괴로 인하여 침몰되어졌다고 기록하고 있다(Paik & Faulkner 2003). 최근 선박의 안전성 평가 문제가 계속적으로 관심의 대상이 되고 있는 상황에, 초대형 유조선 및 대형산적화물선 등은 선령 25년 이상에 걸쳐 사용하는 경향이 많으며, 선체 노후화에 따른 각종 문제점이 제기되고 있다.

이들 문제를 규명하기 위해서는 선체구조의 좌굴 / 붕괴 및 피로파괴역학에 대한 해석과 함께 실질적이고 정확한 운항 및 파랑조건 하에서 선각에 작용하는 하중의 특성을 명확히 분석하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 초대형 유조선(VLCC) 및 대형산적화물선(CSBC)을 대상으로 다양한 운항조건 및 해상조건 하에서의 장기응답(IACS 식)과 단기응답(ABS/SHIPMOTION & USAS-L 프로그램)

에 의한 수직파랑굽힘모멘트 계산을 수행, 그 결과를 바탕으로 운항조건 및 해상상태가 항해 중인 대형화물선에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 적용 프로그램

파랑 중에 운항하는 선박에 작용하는 하중의 특성을 명확히 분석하고, 그 하중이 선박에 미치는 영향을 정성적 및 정량적으로 보여주기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 검증된 프로그램 및 식을 사용하여 수직파랑굽힘모멘트를 계산하였다.

- ABS/SHIPMOTION 프로그램(단기응답해석)
- USAS-L 프로그램(단기응답해석)
- IACS 식(장기응답해석)

ABS/SHIPMOTION 프로그램은 선형스트림이론과 ISSC 파랑스펙트럼을 사용한 단기응답해석 프로그램이며, SCORE(Kaplan et al. 1972) 프로그램을 바탕으로 개발되어졌으며 선체형상과 무게 자료 및 해상조건의 입력으로 계산되어진다. MIT sea-keeping table 로 개발된 USAS-L 프로그램은 Paik & Thayamballi (2003)에서 설명하는 방법으로 인터넷을 통하여 다운로드 받을 수 있다. 이 프로그램은 유의파고, B/T 비, L/B 비, 선속, 방형계수 및 해상상태 진행시간을 바탕으로 하여 굽힘모멘트의 RMS 값을 효과적으로 결정하기 위해 개발되어진 단기응답해석 프로그램이다.

3. 파랑 자료 및 주위조건

본 연구에서 대형화물선의 파랑 중 굽힘모멘트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 1 과 같이 파랑 자료 및 주위조건을 변화시켜가며 계산을 수행하였으며, Storm duration 은 3 시간을 적용하였고, 파장은 선박의 길이와 동일한 크기로, 유의파고주기는 $T_z = \sqrt{13 \times H_v}$ (Paik & Faulkner 2003)로 가정하였다.

Table 1 Variables for wave data & the operation Condition – full load condition

Ship speed (knots)	2, 5, 9.5, 10.5, 14, 14.5
Wave height (m)	3.2, 7.8, 12.2, 14, 18
Heading angle (deg.)	0
Wave length (m)	265, 282, 320
Storm duration (hour)	3, 36
Wave period (sec.)	6.45, 10.07, 12.59, 13.5, 15.3

그리고, 침몰 당시의 Derbyshire 의 굽힘모멘트의 계산은 정확한 분석을 위하여 침몰 당시의 운항조건 및 해상상태를 고려하여 속도는 2 knot, 파고는 14 m, Storm duration 은 36 시간, 파 주기는 13.5 sec.로 적용하여 비교하였다.

ABS/SHIPMOTION 프로그램 계산시 비교되어진 1/3 최대파고와 1/10 최대파고는 원 파형에서 파고를 높은 순서로 되돌려서 늘어놓은 다음 높은쪽으로부터 전체의 1/3 이 되는 파고들을 택해서 그들의 평균값을 취한 것을 1/3 최대 파고라 하며, 1/10 최대파고는 높은쪽으로부터 전체의 1/10 이 되는 파고들을 택해서 그들의 평균값을 취한것을 1/10 최대파고라 한다. 즉, 계산 결과는 1/10 최대파고가 1/3 최대파고보다 약 20%정도 높게 나오는 것이 일반적이다.

4. 해석 대상선박

본 연구에서는 최근 대형화물선의 잦은 침몰 사고에 대한 원인 분석 및 그 결과를 검증하기 위하여 초대형 유조선(VLCC), 대형 산적화물선(CSBC) 및 침몰된 대형산적화물선, m.v. Debyshire, 를 대상선박으로 선정하여 계산하였으며 그 선박들의 주요치수는 Table 2, 3 & 4 에 나타낸 바와 같다.

Table 2 Principal particulars of the object VLCC

L. B. P. (m)	320
Breadth (m)	58
Depth (m)	31
Draft (m)	22.2
Cb	0.734
Displacement (ton)	320,900

Table 3 Principal particulars of the object CSBC

L. B. P. (m)	265
Breadth (m)	43.5
Depth (m)	24
Draft (m)	17.59
Cb	0.8253
Displacement (ton)	171,661

Table 4 Principal particulars of the m.v. Derbyshire

L. B. P. (m)	281.94
Breadth (m)	44.196
Depth (m)	24.994
Draft (m)	17.035
Cb	0.84
Displacement (ton)	173.218

5. 계산결과 및 고찰

본 논문에서는 MIT sea-keeping table (Loukakis & Chryssostomidis 1975)를 바탕으로 하는 USAS-L 프로그램과 선형스트립이론을 바탕으로 하는 ABS/SHIPMOTION 프로그램을 적용하여 수직파랑굽힘모멘트의 기대 최대값을 계산하였고, 그 결과를 IACS 식을 적용하여 계산한 수직파랑굽힘모멘트 값과 비교하였다.

본 계산에서는 운항속도 및 파고의 변화에 대한 파랑하중의 특성을 분석하기 위하여 대상선

박의 파장을 배의 길이와 동일하게 하고 선속과 파고를 변화시키면서 선속 및 파고가 선박의 파랑 중 굽힘모멘트에 미치는 영향을 분석하였다.

5.1 선속 및 파고의 변화에 따른 파랑 굽힘모멘트의 변화 - VLCC

Fig. 1 은 파랑 중 항해하는 초대형유조선 (VLCC)에 대해 선속을 5.0, 10.5, 14.5 knots, 파고를 3.2, 7.8, 12.2, 18m 로 변화시켰을 때 각각의 프로그램 및 IACS 식으로 계산한 값들의 변화를 보여주고 있다.

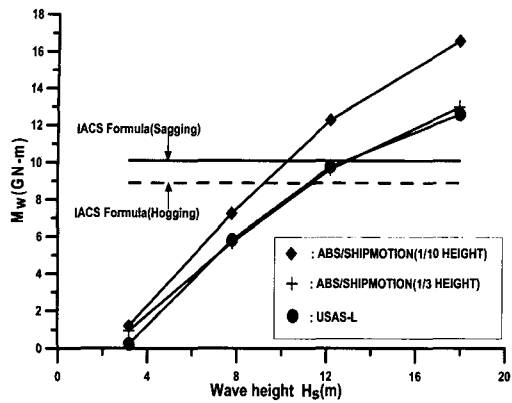
먼저 그림 a)에서는 파고의 변화에 대한 굽힘모멘트의 변화를 보여주고 있는데, 그 결과 단기 응답 방법을 기초하는 ABS/SHIPMOTION 프로그램(1/3 HEIGHT)과 USAS-L 프로그램으로 계산한 결과는 거의 동일하게 보여주고 있으며, IACS 식으로 계산한 값과의 비교는 비교적 낮은 파고 IACS 계산값이 월등히 크게 나오나 파고가 점점 높아진 후 일정한 높이, 약 10m, 부터는 두 프로그램으로 계산한 값이 IACS 식으로 계산한 값보다 커지는 것을 알 수 있다. 이는, 두 프로그램의 계산값이 파고의 변화에 따라 파랑 굽힘모멘트의 값이 계속적으로 커지는 것을 알 수 있었다.

그림 b)에서는 보여주는 것과 같이 두 프로그램으로 계산한 값은 선속의 변화에 대해서는 파랑굽힘모멘트 값의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

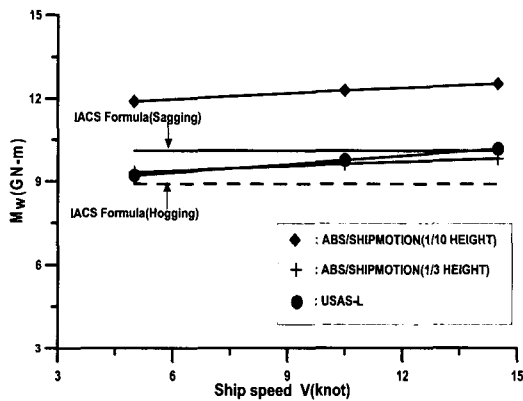
5.2 선속 및 파고의 변화에 따른 파랑 굽힘모멘트의 변화 - CSBC

Fig. 2 은 파랑 중 항해하는 대형산적화물선 (CSBC)에 대해 선속을 5.0, 9.5, 14.0 knots, 파고를 3.2, 7.8, 12.2, 18m 로 변화시켰을 때 각각의 프로그램 및 IACS 식으로 계산되어진 값들의 변화를 보여주고 있다.

그림에서 보는 것과 같이 앞에서 계산되어진 VLCC 의 결과와 파랑굽힘모멘트의 경향이 유사하게 나타내고 있다는 것을 알 수 있었고, 선속의 변화에 대해서도 앞선 결과에서 보여주듯이



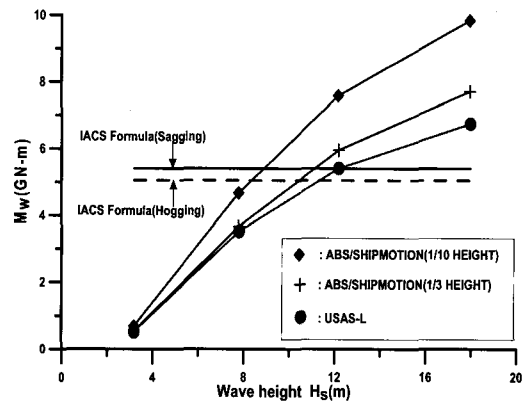
a) Ship speed: 10.5 knots



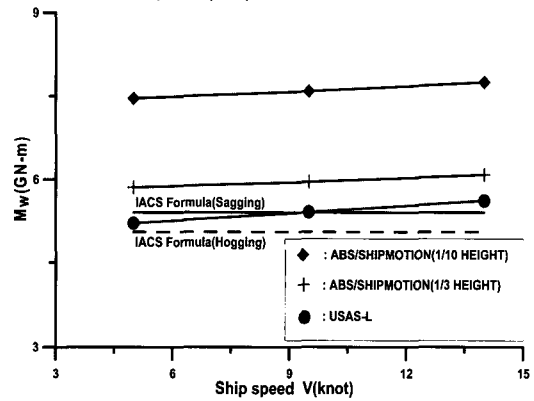
b) Wave height: 12.2 m

Fig. 1 Variation of the wave-induced bending moments for a VLCC with increase in the wave height & speed.

모멘트 값의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나, 파고가 점점 높아질수록 VLCC 와는 조금의 차이를 가지며 ABS/SHIPMOTION(1/3 HEIGHT) 프로그램으로 계산한 값이 USAS-L 프로그램으로 계산값보다 점점 높게 나오는 것을 알 수 있었으며 이는 선형의 변화에 대한 적용 파랑굽힘모멘트의 경향은 두 프로그램으로 계산한 값이 서로 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다 이론의 상이함에서 오는 차이라 생각되어지나, 파랑굽힘모멘트의 경향은 두 프로그램으로 계산한 값이 서로 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.



a) Ship speed: 9.5 knots

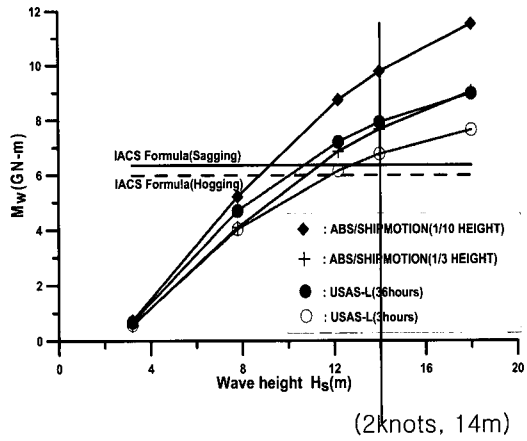


b) Wave height: 12.2 m

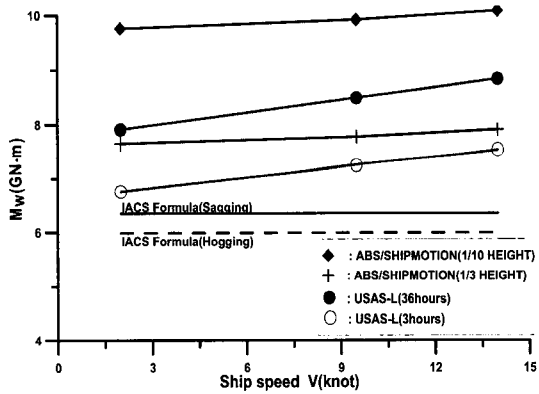
Fig. 2 Variation of the wave-induced bending moments for a CSBC with increase in the wave height & speed

5.3 선속 및 파고의 변화에 따른 파랑 굽힘 모멘트의 변화 - DERBYSHIRE

본 계산에서는 1969년 Wallsend Yard에서 제작되어 1980년 침몰된 선박, m.v. *Derbyshire*,의 침몰직전의 운항속도, 2 knots, 와 해상조건, 14 m, 를 적용하여 계산되어진 굽힘모멘트 값의 경향에 대해 Fig. 3에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 파고 및 선속의 변화에 따른 파랑굽힘 모멘트의 경향이 앞서 보여준 VLCC 및 CSBC의 굽힘모멘트에 대한 계산과 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 본 선박의 계산 시 적용된 Storm



a) Ship speed: 2.0 knots



b) Wave height: 14 m

Fig. 3 Variation of the wave-induced bending moments for the m.v. Derbyshire with increase in the wave height & speed.

duration 은 통상적으로 적용되어지는 3 시간과 본 선박의 침몰 당시의 항해조건을 충분히 고려하기 위하여 침몰 당시의 Storm duration 36 시간을 적용 계산하여 서로 비교하였다. (Paik & Faulkner (2003))

그 계산 결과 그림(Fig.3 a) & b))에서 선박의 침몰 당시 상황인, 2 knots & 14 m 인 경우를 보면, Storm duration 을 36 시간으로 적용하여 USAS-L 프로그램으로 계산된 값이, Storm

duration 을 3 시간으로 적용 계산한 값보다 약 15% 높게 나왔으며, 또한 IACS 식으로 계산한 값에 보다는 약 20% 이상 크게 나오는 것 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 운항조건 및 해상상태가 대형 화물선의 파랑 중 굽힘모멘트에 미치는 영향을 해석하기 위해 검증된 프로그램들인 ABS/SHIPMOTION 프로그램과 USAS-L 프로그램을 사용하여 계산하였고, 그 결과를 IACS 식으로 계산되어진 값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 파랑 굽힘모멘트의 계산한 결과값이 ABS/SHIPMOTION 프로그램(선형스트립이론 적용)과 USAS-L 프로그램으로 계산한 값들이 서로가 거의 유사한 경향을 가지고 파고의 변화에 따라 변화하는 것을 알 수 있었으며 이 계산값은 파고가 점점 높아질수록 계속적으로 파랑 굽힘모멘트 값이 높아지는 것을 알 수 있었다.

둘째, 초기 낮은 파고에서는 IACS 식으로 계산한 값이 월등히 높게 형성되어지나, 일정 파고(약 10m) 이상부터는 단기응답을 기초로 하여 계산되어지는 두 프로그램으로 계산한 값이 해상상태와 운항조건에 관계없이 일정한 값을 가지는 IACS 식으로 계산한 값보다 약 10%~20% 정도 커지는 것을 알 수 있었다. 즉, 이는 두 프로그램으로 계산한 값은 파고의 변화에 대하여 굽힘모멘트의 값이 계속적으로 증가하나, IACS 식으로 계산한 값은 파고의 변화에 대해서는 모멘트의 변화를 가지지 않기 때문이다. 또한 Storm duration 의 변화에 따라 파랑 굽힘모멘트의 변화가 많이 일어나는 것을 알 수 있었으며 이는 파랑 굽힘모멘트를 계산 시에 정확한 해상상태를 적용하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

셋째, 대형화물선의 선속의 변화에 대한 파랑 굽힘모멘트의 값의 변화는 파고의 변화에 대한 값의 변화에 비하면 아주 미비하므로 전체적인

굽힘모멘트의 변화를 고려하면 선속의 변화에 대한 파랑굽힘모멘트의 값의 변화는 고려되지 않아도 무방하리라 생각되어진다.

이상의 본 연구로부터 분석한 결과 유의파고가 계속적으로 커진다면 비교적 높은 파도에서는 단기응답해석으로 계산한 값이 초기 선박설계 시 고려되어지는 IACS 식으로 계산한 값보다 월등히 커지게 되므로, 이는 항해 중 선박의 구조 안전성 평가 시 큰 불합리성을 줄 수가 있으므로 초기 설계단계로부터 실질적인 운항조건 및 해상상태를 적용하여 계산되어지는 단기응답해석을 다소 적용하여 수직 파랑굽힘모멘트를 추측 적용하는 것이 최근 발생되어지고 있는 선박의 침몰 사고를 최대한 줄일 수 있는 합리적인 방법이라 사료되어진다.

이후 계속적으로 운항조건과 해상상태의 변화에 따른 시리즈계산을 수행하여 그 결과를 여러가지 확률적이고 결정적인 방법으로 조합하여 선박의 초기 설계 시 편리하고 유용하게 사용할 수 있는 선박구조의 극한강도 설계를 위한 하중산정법을 개발할 예정으로 있다.

참 고 문 헌

- 김동문, 백점기 1999 "초대형 유조선에 대한 구조강도 측면에서의 운항 중 하중 특성 해석", 부산대학교 생산기술연구소, 제 56 집, pp.305-315
- 김동문, 백점기 1999 "대형 산적화물선에 대한 구조강도 측면에서의 운항 중 하중 특성 해석", 선박해양구조연구회, 제 13 권 제 2 호, pp.87-98
- 백점기, 양수홍, 김성규 1996 "부식을 고려한 선각거더의 최종강도 신뢰성", 대한조선학회 논문집, 제 3 권 제 2 호, pp.96-110
- DMI, (1995). "Bulk carrier sea-keeping tests", Report DMI 85226, SH9, Vols. I to X.
- Faulkner, D. (2001). "An analytical assessment of the sinking of the m.v. Derbyshire", Trans. RINA, Vol.143, pp.15-72
- IACS 1993. Requirement S11 on longitudinal strength standard, Revision 1.
- Loukakis, T.A. and Chryssostomidis, C. (1975). "Seakeeping standard series for cruiser-stern ships", Trans. SNAME, Vol. 83, pp.67-127.
- Larrabee, R.D. & Cornell, C.A. (1981). "Combination of various load processes", J.Struct. Div., ASCE, 107, pp.223-238.
- Lewis, E.V. and Zubaly, R.B. (1981). "Predicting hull bending moments for design", Extreme Loads Response Symposium, SNAME, October..
- Mansour, A.E. (1996). "Extreme loads and load combinations", Journal of Ship Research, Vol. 39, No. 1, pp.53-61.
- Paik, J.K. and Faulkner, D. (2003). "Reassessment of the m.v. Derbyshire Sinking with the Focus on Hull Girder Collapse", Marine Technology, Vol.40, No.4.
- Paik, J.K. and Thayamballi, A.K. (2003). "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & sons, January.
- Soding, H. (1976). "The prediction of still-water wave bending moments in containerships", Schiffstechnik, 26, pp.24-41.
- Soares, C.G. (1996). "On the definition of rule requirements for wave induced vertical bending moments", Marine Structures 9, pp.409-425.
- Soares, C.G. (1999). "On the uncertainty in long-term predictions of wave induced loads on ships", Marine Structures 12, pp.171-182.
- Wang, X. and Moan, T. (1996). "Stochastic and deterministic combinations of still

water and wave bending moments in ships", Marine Structures 9, pp.787-810.



< 김 동 문 >



< 백 점 기 >