

大韓造船學會誌
第21卷 第4號 1984年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 21, No. 4, December 1984

直接解析法에 의한 船體의 縱강도 해석

신중계* · 노인식* · 신병천* · 이호섭*

Longitudinal Strength Analysis of Hull Girder by Direct Analysis Procedure

by

J.G. Shin* · I.S. Nho* · B.C. Shin* · H.S. Lee*

Abstract

The computer program DASH (Direct Analysis of Ship's Hull), based on the direct calculating procedure as proposed at the 4th ISSC (1970), was developed.

The DASH program is designed by the following calculation procedure:

- 1) Derivation of the design wave loads through the ship motion analysis based on the strip theory.
- 2) Stress analysis of the hull girder based on the 7-degree of freedom beam theory including the warping torsion effect.
- 3) Long-term prediction of the stresses based on the statistical approach using sea-spectrums and ocean wave data in the ship's route.

An example calculation was performed for the purpose of a demonstration of the present approach on the 16,200 DWT Oil Tanker.

The results are discussed and compared with the conventional method.

1. 緒 論

본 연구에서는 流體力學的인 波浪荷重의 계산으로 부터 일련의 構造解析 過程을 연구하여, 實用的이런 서 合理的인 船體 構造 直接解析 電算프로그램 DASH (direct analysis of ship's hull)을 개발, 例題 計算을 통하여 이의 검증을 도모하였다.

먼저 strip 이론을 利用한 波浪荷重의 계산 結果[2]를 船體構造解析을 위한 집중하중으로 변환하고 船體를 Warping-Torsion을 고려한 7 자유도 보로 치환하여 有限要素法으로 해석하였다. 單位波高의 規則波 中에

서 계산된 應력 전달 함수와 北太平洋 항로의 長期 해상관측 자료[3]을 利用하여 應력의 長期分布를 예측하였으며, 얻어진 結果와 선급규칙에 의한 표준應력 계산결과를 비교하였다.

본 프로그램은 船舶의 特性(선형, 縱梁분포, 등)과 항로가 주어지면 비교적 쉽고 精確하게 Hull Girder의 縱강도를 계산할 수 있으므로 새로운 船舶이나 實績船과는 다소 변경된 船舶의 구조설계 및 해석에 직접 적용 可能하다.

단, 본 연구와 類似한 內容으로 일본 NK의 Total System, 미국 ABS의 DAISY System, 노르웨이 DNV의 HULDA 및 SESAM 69, 80 등의 프로그램들이 개발

接受日字: 1984年 6月 18日, 再接受日字: 1984年 11月 24日

* 正會員, 韓國機械研究所 大德船舶分所

되어 있으나 자세한 Source는 발표되지 않고 있으므로 이들과의 비교·검토는 할 수 없었다.

2. 프로그램 DASH

프로그램 DASH는 준직접해석(Semi-Direct Analysis) 절차에 따라 구성 되었으며 전체적인 구성은 그림 2-1과 같다. 본 절에서는 프로그램 DASH를 구성하고 있는 각 部分의 理論的인 배경을 記述하고자 한다.

2-1. 荷重計算

船體에 작용하는 荷重은 크게 靜水中荷重과 波浪荷重으로 나누어 계산하였다.

靜水中荷重은 선체의 형상(부력)과 화물적재상태(중량)에 따라 결정된다. 船級에 따라 略算式을 이용하기도 하지만, Loading Manual에서 계산된 최대 荷重을 이용하는 것이 보편적이며 본 연구에서도 이 方法에 따라 船體 길이 方向의 荷重分布를 計算하였다.

波浪荷重은 해상상태, 선형 등에 따라 변화하며 특히 해상상태는 항해하는 시간과 장소에 따라 변화하므로 정확한 예측이 힘들다. 船級規則에 있는 波浪전단력과 波浪모멘트의 略算式이 모든 船舶에 적용되어왔던 것은 이와 같은 어려움 때문이었다.

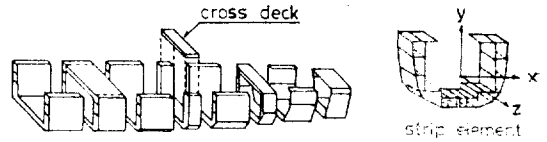


Fig. 2-2 Structural Idealization of Ship

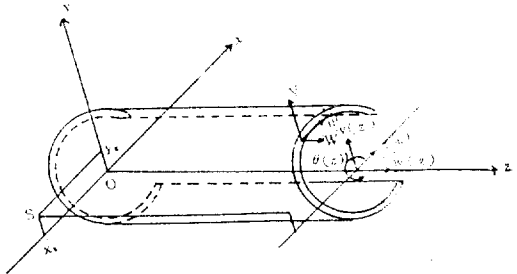


Fig. 2-3 Coordinates of a Thin-Walled Beam

1957년 Korvin-Krowkovsky가 strip理論을 船舶에 도입하면서 부터 많은 유체역학 연구자들에 의해 波浪荷重의 추정에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 본 연구에서는 現在 널리 사용되고 있는 strip理論중 STF(Salvesen-Tuck-Faltinsen)理論을 기본으로 하여 韓國機械研究所에서 개발된 6-자유도 船體運動 應答 解析 프로그램(2)을 이용하여 船體에 작용하는 波浪荷重을 계산하였다.

波浪荷重 계산에 관계되는 인자는 波週期, 波高, 조우각(Heading Angle), 선형, 선속 및 중량분포 등이 된다.

이렇게 유체역학적으로 계산된 荷重은 구조해석을 위한 등가 하중으로 변환된 후 과표변환을 통하여 최종적으로 Structural Station에서의 요소절점에 작용하는 절점하중으로 변환된다.

2-2. 구조 해석

現在 선체구조해석을 위해 凡用 또는 선체 專用 유한요소법프로그램이 많이 사용되고 있다. 그러나 일반 유한요소법의 이용은 많은 양의 입·출력자료 처리와 computer사용 시간등 여러제약조건때문에 특히 초기 설계 단계에서 쉽게 이용되기 어렵다. 또한 직접계산법인 경우, 船速·조우각·조우주파수등의 변수에 따라 荷重이 달라지므로, 각 하중상태마다 상세한 해석을 한다는 것은 거의 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 박판보(thin-walled beam)의 일반이론에 따른 7자유도 보 유한요소법을 정식화하였다. 선체를 그림 2-2와 같이 여러개의 균일한 단면 형

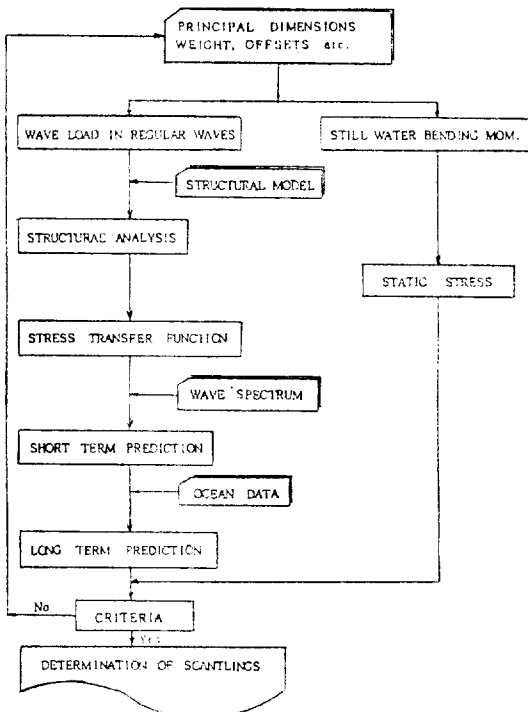


Fig. 2-1 Overall View of Program DASH

상의 보요소로 理想化한 다음 보의 수직·수평굽힘 문제 뿐만 아니라, St. Venant의 비틀림과 warping을 고려하여 구조 해석을 수행하였다. 이 방법은 자유도를 많이 줄일 수 있어 computer 사용시간이 절감되며, container선과 같이 넓은 창구를 갖는 선체의 정확한 비틀림 강도해석에도 매우 유용하다.

2.2.1. 기본가정 및 좌표계

우선 x, y 를 단면의 主軸(Principal Axis) 방향, z 를 보의 길이 방향 중심선으로 하는 좌표계를 그림 2-3과 같이 설정한다.

보의 단면 형상이 변형 후에도 변형 전의 형상을 그대로 유지하고 평면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 Bernoulli-Euler 가정과 St. Venant의 비틀림이론에 의거하여, 단면내의 임의 점에서의 변위는 식 (2-1)로 표시된다.

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= u(x) - y \cdot \theta(z) \\ V(x, y, z) &= v(z) + x \cdot \theta(z) \\ W(x, y, z) &= w(z) - x \cdot u'(z) - y \cdot v'(z) \\ &\quad + \theta'(z) \cdot \Omega_n(x, y) \end{aligned} \tag{2-1}$$

여기에서 $n(z), v(z), w(z)$ 는 단면 중심에서의 x, y, z 방향 변위이고, $\theta(z)$ 는 비틀림각, Ω_n 은 정규화(normalized)된 warping함수이다.

2.2.2. 유한요소법

보 要素의 변위함수를 식 (2-2)와 같이 보의 길이 방향 z 에 관한 3차 다항식으로 취한다.

$$\begin{aligned} u(z) &= a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 \\ v(z) &= b_0 + b_1z + b_2z^2 + b_3z^3 \\ \theta(z) &= c_0 + c_1z + c_2z^2 + c_3z^3 \\ w(z) &= d_0 + d_1z \end{aligned} \tag{2-2}$$

이 변위 함수와 제단면특성치들을 이용해서, 가상일의 원리에서 시작되는 통상의 유한요소법 定式化 과정을 수행하면 보 요소의 강성행렬 $[K]$ 가 얻어진다.

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_u] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [K_v] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [K_w] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [K_\theta] \end{bmatrix} \tag{2-3}$$

여기서 각 변위에 따른 강성 $[K_u], [K_v], [K_w], [K_\theta]$ 의 값은 부록 [I]에 자세히 기술하였다.

식 (2-3)에 의한 보의 해석은 단면형상이 일정한 보에 대해 적용될 수 있으나, 선체와 같은 변단면 보에서는 인접한 보요소들의 전단중심(Shear Center)이 일치하지 않으므로 사용될 수 없다. 따라서 이 강성행렬을 단면상 임의의 점으로 변환하면 최종적인 선체 요소의 강성행렬 $[K]^*$ 가 얻어진다.

$$[K]^* = [T]^T [K] [T] \tag{2-4}$$

여기에서 $[T]$ 는 단면상 임의의 위치에 있는 절점에 관한 변위를 전단중심에 관한 변위로 변환시켜 주는 좌표변환 행렬이다.

2-3. 응력 전달 함수

여러가지 파주기 및 heading angle 상태에서 단위 파고에 의한 파랑 단면력을 구하고 이 파랑 단면력으로 인하여 선체 각부분에 발생하는 응력을 파주기를 축으로 하여 표시한 것이 응력 전달 함수이다.

이때 단위 파고에 의한 파랑 단면력은 선체 각 지점에서 서로 다른 위상으로 작용하므로 이에 따른 변위도 이 위상차를 고려하여 표시해야만 정확한 응력 전달 함수를 구할 수 있다.

힘과 변위를 각각 크기와 위상각으로 나타내고 K 를 배 전체의 강성 matrix라고 하면

$$f = K \cdot d \tag{2-5}$$

여기서 $d = d_i \cos(\omega t - \varepsilon_{di})$

$$f = f_i \cos(\omega t - \varepsilon_{fi})$$

따라서

$$d_k \cos(\omega t - \varepsilon_{dk}) = \sum_{j=1}^n a_{kj} f_j \cos(\omega t - \varepsilon_{fj}) \tag{2-6}$$

a_{kj} 는 K^{-1} 의 성분을 나타낸다. 이때 각 변위 성분과 위상각은

$$d_k = \sqrt{(\sum a_{kj} f_j \cos \varepsilon_{fj})^2 + (\sum a_{kj} f_j \sin \varepsilon_{fj})^2} \tag{2-7}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{dk} &= \arctan \left(\frac{\sum a_{kj} f_j \sin \varepsilon_{fj}}{\sum a_{kj} f_j \cos \varepsilon_{fj}} \right); \sum a_{kj} f_j \cos \varepsilon_{fj} \geq 0 \\ &= \arctan \left(\frac{\sum a_{kj} f_j \sin \varepsilon_{fj}}{\sum a_{kj} f_j \cos \varepsilon_{fj}} \right) + \pi; \sum a_{kj} f_j \cos \varepsilon_{fj} < 0 \end{aligned} \tag{2-8}$$

로 구해진다.

위와 같이 구해진 변위에 의해 각 응력 성분도 그 크기와 위상각이 계산된다.

2-4. 통계 응력 해석

해양파는 무수한 성분파가 서로 random한 위상으로 조합되어 불규칙한 진동을 하는 것으로 볼 수 있다. 해양파를 구성하는 각 성분파의 에너지가 주파수에 따라 변화하는 모양을 나타낸 것이 해양파 spectrum이며 바로 이 해양파 spectrum으로써 해면 상태를 표시하는 것이 일반화 되어있다. 통상 해면의 높이는 정규 분포를 따르며 길보기 진폭 즉 파고의 빈도 분포가 거의 Rayleigh분포에 가깝다는 사실이 잘 알려져 있으므로 해양파의 이러한 통계적 특성을 이용하여 통계응력 해석을 수행한다.

2.4.1. 단기 예측(Short term prediction)

파랑응력 추정에 결정적인 영향을 미치는 해상상태

는 보통 20~30분 이상 지속되지 않는다고 알려져 있으며, 이런 어떤 일정한 조건 하의 해상상태에서 추정된 선체의 파랑응답을 단기 분포라고 한다. 단기분포의 통계치는 R 의 함수로 주어지게 되며, 여기서 R 은 파고와 선체응답의 관계가 선형이라는 가정하에 단기간(20~30분)의 해상상태를 나타낸 해양파 spectrum과 규칙파 중에서 계산된 응력 전달 함수를 서로 중첩하여 구한 파랑응답의 누적 에너지 밀도(Cumulative Energy Density)가 된다.

선체응답이 해양파를 구성하는 각 성분파에 대한 응답의 합으로 표시 가능하다는 St. Denis의 선형중첩의 원리에서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$[f(w)]^2 = [S(w)] \cdot [A(w)]^2 \quad (2-9)$$

여기서

$[f(w)]^2$: 파랑응력 spectrum

$[S(w)]$: 해양파 spectrum

$[A(w)]$: 응력 전달 함수

따라서 波浪應力의 누적 에너지 밀도 R 은 다음과 같이 구해진다.

$$R = \int_0^\infty [f(w)]^2 dw = \int_0^\infty [S(w)] [A(w)]^2 dw \quad (2-10)$$

Mean Zero Process인 경우 R 은 진폭의 제곱평균값 즉 분산과 동일하다. 응력이 $\sigma \sim d\sigma$ 사이값일 확률이 $p(\sigma)d\sigma$ 로 표시된다면 이때 $p(\sigma)$ 를 확률 밀도 함수(Probability Density Function)라고 하며 Rayleigh 分布의 통계적 특성을 이용하면 $p(\sigma)$ 는 다음식으로 주어진다.

$$p(\sigma) = \frac{2\sigma}{R} \text{Exp} \left[-\frac{\sigma^2}{R} \right] \quad (2-11)$$

따라서

응력이 σ_1 을 넘을 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$q(\sigma > \sigma_1) = 1 - \int_0^{\sigma_1} p(\sigma) d\sigma = \text{Exp} \left[-\frac{\sigma_1^2}{R} \right] \quad (2-12)$$

2.4.2. 長期豫測(Long Term Prediction)

일반적인 해상 관측 자료는 유의파고와 평균파 주기를 몇 단계로 분류하고, 이에 대한 각각의 발현 확률을 주고 있다. 따라서 선박의 운항 항로에서의 해상 관측 자료로부터 구한 각 해상상태의 발현 확률을 $p(H, T)$ 라 하면, 단기분포로부터 응력이 어떤 주어진 값 σ_1 을 넘을 확률 $q(\sigma > \sigma_1)$ 을 구하고 波에 대한 선박의 조우 확률 $p_s(\theta)$ 를 고려하여 확률의 장기분포를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q(\sigma > \sigma_1) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty q(\sigma > \sigma_1) \cdot p(H, T), p_s(\theta) dHdTd\theta \quad (2-13)$$

보통의 경우 heading 각은 일의각에서 동일한 확률을 갖는다고 가정하고 다음과 같은 식으로 표시하고 있다.

$$Q(\sigma > \sigma_1) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty q(\sigma > \sigma_1) p(H, T) dHdTd\theta \quad (2-14)$$

만일 어떤 발현 확률 level이 criteria로 주어지고 이에 대한 응력을 계산해야 할 경우 (2-14)식을 iteration하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 船齡을 20년으로 가정하고 배가 일생동안 만날 파도의 횟수를 대략 10^8 회로 잡아서, 10^{-8} 발현 확률 level의 응력을 계산하였다.

3. 계 산 예

프로그램 DASH의 검증을 위하여 16,200 DWT 유조선을 계산 대상선으로 채택하여 전 과정의 계산을 수행하였다. 대상선의 주요 요목은 다음과 같다.

- LOA : 135.5m
- LBB : 127.0m
- Breadth : 23.0m
- Depth : 12.1m
- Draft : 9.14m
- Speed : 14.0Knots
- Class : KR, ABS

3.1. 선체 구조 Modelling

그림 3-1과 같이 선체를 13개의 요소소로 분할하였으며, 양단의 경계조건은 선·수미 부분에 강성이 매우 작은 가상요소를 추가하고 고정단으로 취하였다.

절점은 구조적 관심의 대상이 되는 횡격벽부, 선체 중앙부, 선체 길이의 $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ 되는 곳등을 포함하여 가능한 등간격이 되도록 선택하였다. 단면은 7개를 선택하여 단면특성치들을 계산하였으며 그 결과는 표 3-1과 같다.

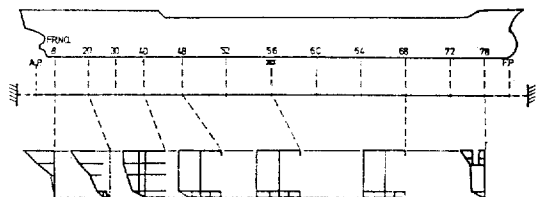


Fig. 3-1 Finite Element Modelling of Ship Hall Girder

Table 3-1 Section Properties of Each Cross Section

Property	Section	1	2	3	4	5	6	7
$A_{res}(mm^2) \times 10^6$		1.01	1.07	2.45	2.20	2.24	2.30	1.32
$I_{xx}(mm^4) \times 10^{13}$		1.645	2.068	4.498	5.135	5.272	5.321	2.121
$I_{yy}(mm^4) \times 10^{14}$		0.12	0.34	1.17	1.22	1.28	1.30	0.11
$I_o(mm^6) \times 10^{20}$		0.37	6.91	45.4	60.5	63.2	62.3	2.28
$K(mm^4) \times 10^{12}$		3.47	0.20	15.27	23.14	23.58	23.96	4.26
$y_s(mm)$		7,340	1,660	4,847	1,039	1,048	8,610	7,920

3.2. 파랑하중 및 응력전달합수

만재상태에서 Full Speed(14노트)로 항해할 때 선수파(180°), 선수경시파(135°), 횡파(90°)의 세 경우에 대한 파랑하중을 계산하였다. 波長과 船長의 比 $K(= \lambda/L)$ 는 6.283~0.413 범위에 있는 30개의 값을 취하였다. 계산 결과는 합력(Resultant Forces)으로 표시되며 그 일부를 그림 3-2에 나타내었다. 물론 각 성분과 배의 길이 방향으로 위상차가 있으나 그 크기(Amplitude)만 나타내었고, 단위는 전단력인 경우 Ton, 모멘트는 Ton-m이다.

이 荷重을 이용하여 앞의 2절에서 설명한 구조해석

을 통한 응력 전달합수 계산을 수행하였으며 그림 3-3에 그 계산예를 나타내었다.

3.3. 해양파 분석 및 통계응력 계산

일반적으로 海洋波 관측 자료는 한 해상 상태를 어떤 대표되는 波高 및 波週기로 나타내며, 이 파고 및 파주기를 몇단계로 분류한 다음, 해상을 여러개의 소구역으로 분할하여 각 소구역에서 파고 및 파주기의 동시 발현 빈도수를 도표로 정리하여 나타내고 있다. 북태평양 지역의 소구역 분할과 E11N 구역에서의 통계 자료를 그림 3-4에 나타내었다[3].

본 연구에서는 식 (3-1)로 주어지는 M. Ochi의 6-

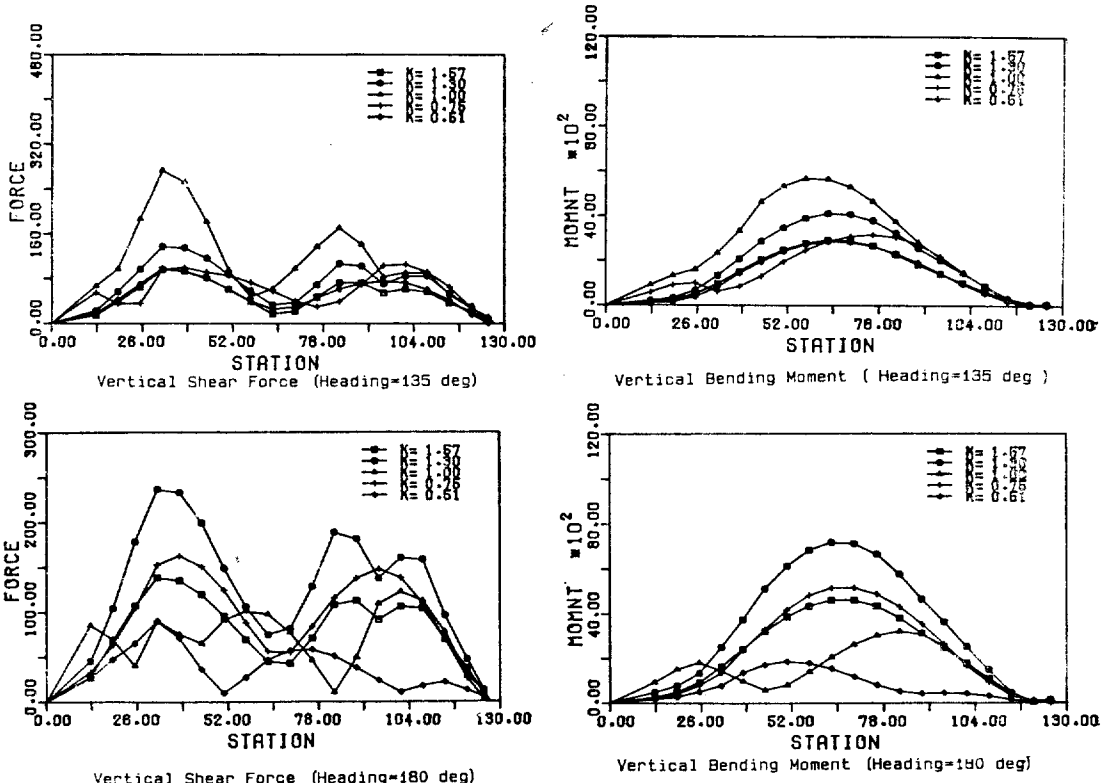


Fig. 3-2 Wave Loads along Ship's Length

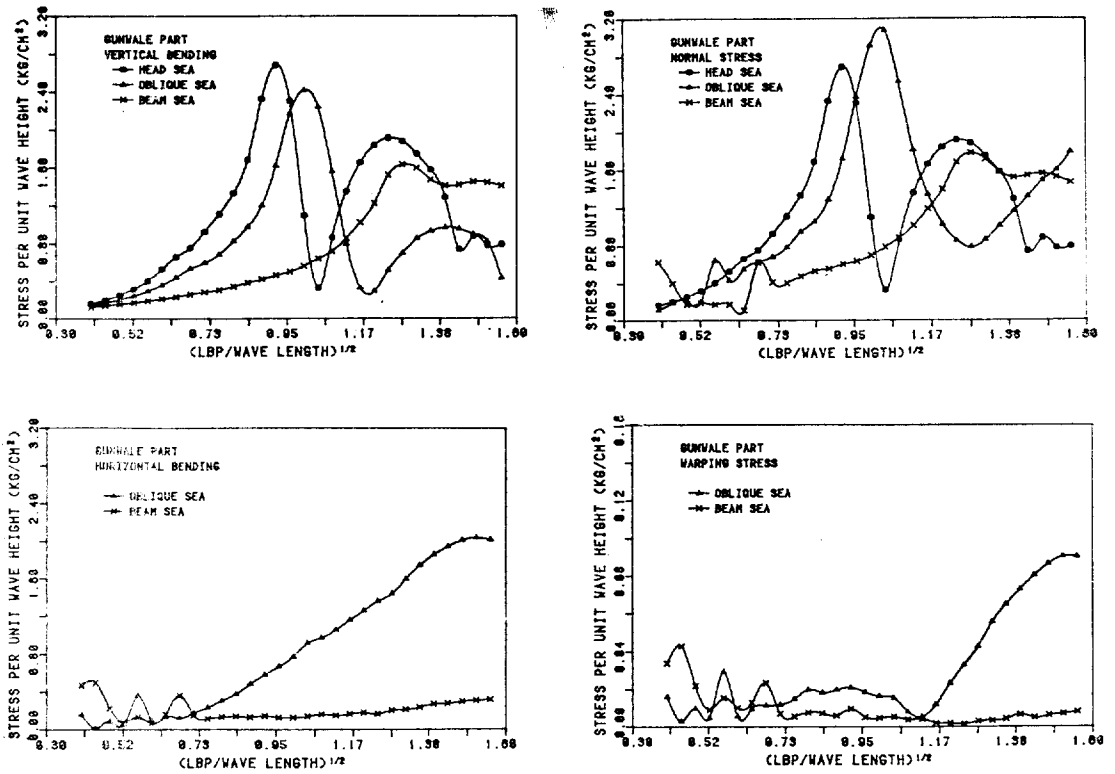


Fig. 3-3 Stress Transfer Function at Gunwale Part

Table 3-2 Probabilities to Pass Each Sea Sub-Zone

Sea Area	E07	E08	E09S	E14	M15	M16	M17W	W17	W18	W19	W16
Probability	0.046	0.043	0.041	0.083	0.083	0.083	0.170	0.168	0.170	0.051	0.062

parameter Spectrum을 사용하였으며 그림 3-5에 各 有義波高에 대한 Spectrum을 나타내었다.

$$S(w) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{((4\lambda_j + 1) w_{mj}^4)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \times \frac{H_{s,j}^2}{w^{\lambda_j + 1}} e^{-(4\lambda_j + 1/4)(w_{mj}/w)^4} \quad (3-1)$$

여기에서 $\Gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} \mu^{\lambda-1} \cdot e^{-\mu} d\mu$ ($\lambda > 0$)로 정의되는 Gamma 함수
 w_m = modal frequency
 $H_{s,j}$ = 유의파고
 $j=1$: 파도의 저주파 성분
 $j=2$: 파도의 고주파 성분

6-parameter ($H_{s1}, H_{s2}, w_{m1}, w_{m2}, \lambda_1, \lambda_2$) 값은 有義波高

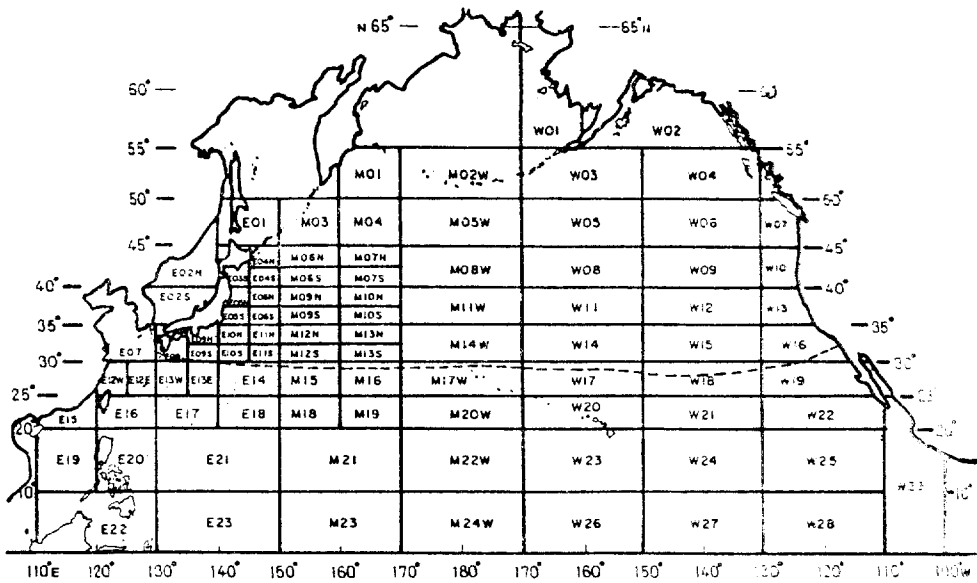
의 함수로 주어진다[4].

대상선의 항로는 부산·Los Angeles이며 그림 3-4에 점선으로 나타내었다. 항로에 포함되는 각 소구역을 통과할 확률은 표 3-2와 같다.

위의 자료들을 이용하여, 배의 수명을 20년으로 하고 주어진 항로를 항해할 때 발생하는 응력의 최대 기대값 즉 10^{-8} 발현 확률 level의 장기예측 응력을 계산하였다. 이상의 계산 결과를 종래의 계산방법(ABS 선

Table 3-3 Comparison of Still Water Bending Stress (kg/mm²)

Calculation Point	DASH	ABS Rule
Deck	3.64	5.02
Bottom	2.42	3.35



AREA E11N
(32.5N-35N, 145E-150E)

HEIGHT (M)	PERIOD (SEC)						CALM	TOTAL
	5-6	6-7	8-9	10-11	12-13	14-		
0.00 -	147	1	2	10			4	164
0.75 -	1061	277	121	29	15	5		1508
1.75 -	999	623	530	119	43	36		2350
2.75 -	456	544	521	143	96	31		1751
3.75 -	148	226	363	86	70	31		624
4.75 -	17	82	133	37	29	10		308
5.75 -	20	24	80	29	33	14		200
6.75 -	8	56	37	11	19	12		143
7.75 -	6	13	24	14	11	4		72
8.75 -	4	4	8	3	15	5		59
9.75 -	1	4	5	1	3	4		28
10.75 -			1		2			3
11.75 -		1		3				4
12.75 -				1				1
13.75 -								
14.75 -								
CALM							1	1
TOTAL	2867	1855	1825	486	338	152	5	7528
MAX	10.00	12.00	11.00	13.00	11.00	10.00	0.0	13.00

Fig. 3-4 Ship's Routing, Sea Area and Statistics

Table 3-4 Comparison of Wave Bending Stresses (kg/mm²)

Calculation Point	Long-term Value	Conventional Value (ABS Rule)
Deck Center Line	7.66	11.74
Gunwale Part	8.57	11.74
Bilge Strake	6.39	7.83
Bottom at Center Line	5.51	7.83

등급칙에 따른 계산)에 의한 결과와 함께 표 3-3, 3-4에 정리하였다.

3.4. 考 察

계산 결과에 의하면, 주어진 선박에서도 船速, 波長 조우각 등 여러 항해 상태에 따라 荷重상태가 달라짐을 알 수 있다. 선수파의 경우, $\lambda/L=1.3$ 에서 최대 중을 주며, 경사파의 경우 수직 전단력과 굽힘 moment는 $\lambda/L=1.0$ 에서, 수평 전단력과 굽힘 moment, 비틀

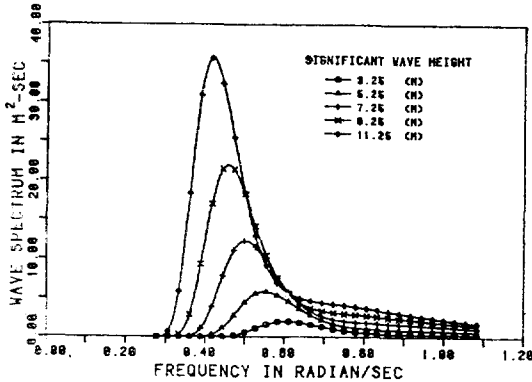


Fig. 3-5 Six-Parameter Spectrum

後 記

본 연구는 과학기술처에서 시행한 3개년에 걸친 일
반출연연구사업 결과의 일부로써 韓國機械研究所 大德
船舶分所에서 수행한 것이다. 이러한 연구를 수행할
수 있도록 지원하여 주신 과학기술처 및 연구소 당국
에 심심한 사의를 표하며, 아울러 본 연구가 있기까지
달마칠이 되어 주신 많은 관련 연구원들께도 깊은 감
사의 마음을 드린다.

參 考 文 獻

- [1] 李吳燮 外, “船體 構造 強度의 直接解析 프로그램 (I)” 한국기계연구소, 연구보고서 UCJ 005-193·D, 1982. 2.
- [2] 梁承一外, “선체가 받는 波浪荷重 計算을 위한 計算 프로그램 開發에 관한 연구” 한국선박연구소, 연구보고서 UCE 56-69·80, 1980. 2.
- [3] The 163rd Research Panel, “Winds and Waves of the North Pacific Ocean 1964~1973 (Statistical Diagrams and Tables),” The Shipbuilding Research Association of Japan, March 1980.
- [4] Report of Committee I.1 on “Environmental Conditions”, Proceedings of 7th ISSC, Vol. 1, Paris, Aug. 1979.
- [5] N. Nordenström, E.M.Q. Rören, “Some Recent Advances in the Fields of Wave Loads and Structural Design of Ships”, SEASCAPE '67, Sept. 1967.
- [6] 第90研究部會, “波浪曲げモーメント計算” 研究資料 No. 68, 海象氣象と船體構造との關係に關する 調査研究 報告書, 日本造船研究部協會, 1968. 3.
- [7] 金載東, 申鍾桂, 盧仁植, “Box Girder의 Torsional Rigidity에 관한 연구” 한국기계연구소, 연구보고서 UCN 110-191·D, 1982. 2.

moment는 $\lambda/L=0.5$ 에서 최대값을 준다. 한편, 횡파의 경우 하중은 $\lambda/L=0.5$ 에서 최대값을 갖는다. 이 결과는 항해중 배의 속도와 방향을 조절하여 최대 응력을 발생시키지 않도록 하는데 이용될 수 있다.

응력전달함수 계산에 의하면 수직 Bending 응력이 Normal 응력의 주된 값이며, 횡파중에서 수평굽힘 응력은 일정한 값을 갖고, 경사파중에서 수평굽힘응력과 warping 응력은 $\lambda/L=2$ 에서 최대값을 갖는다. 수직굽힘 응력이 $\lambda/L=2$ 이상에서 다소 크게 나타나는 것은 파랑하중 추정시 부가질량과 감쇄계수의 계산에 관련된 것으로 일반적으로 수정하여 사용하는 경우가 많으나, 본 논문에서는 수정되지 않은 값을 그대로 사용하였다. 이의 수정 방법에 관해서는 참고문헌 [6]에서 자세히 다루고 있다.

장기 예측의 계산 결과는 종래의 선급규칙에 따로 계산값보다 작은 값이 얻어졌는데, 이것은 선급규칙이 안전율을 크게 감안한 근사계산치이기 때문인 것으로 생각된다.

4. 結 論

본 연구로부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

(1) 프로그램 DASH는 直接解析法에 의한 船體縱강도 계산 프로그램으로써, 경제적으로 신뢰성있는 계산 결과를 보여 주므로 實用性이 높다.

(2) 프로그램 DASH는 Warping-Torsion 해석을 포함하고 있으므로, 콘테이너船등 넓은 창구를 갖는 선체의 縱강도 해석에 유용하다.

부록 [I] 강성 행렬(식(2-3))

$$[K_u] = \frac{EI_{xx}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & & & & \text{Sym.} \\ -12 & 12 & & & \\ 6l & -6l & 4l^2 & & \\ 6l & -6l & 2l^2 & 4l^2 & \end{bmatrix}$$

$$[K_v] = \frac{EI_{yy}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & & & & & \\ -12 & 12 & & & & \\ 6l & -6l & 4l^2 & & & \\ 6l & -6l & 2l^2 & 4l^2 & & \\ & & & & & \text{Sym.} \end{bmatrix}$$

$$[K_w] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & -1 & & & & \\ -1 & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$[K_\theta] = [K_{WT}] + [K_{ST}]$$

$$[K_{WT}] = \frac{EI_\theta}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & & & & & \\ -12 & 12 & & & & \\ 6l & -6l & 4l^2 & & & \\ 6l & -6l & 2l^2 & 4l^2 & & \\ & & & & & \text{Sym.} \end{bmatrix}$$

$$[K_{ST}] = \frac{GK}{30l} \begin{bmatrix} 36 & & & & & \\ -36 & 36 & & & & \\ 3l & 3l & 4l^2 & & & \\ 3l & -3l & -3l^2 & 4l^2 & & \\ & & & & & \text{Sym.} \end{bmatrix}$$

부록 [II] 좌표변환 행렬 (식 (2-4))

$$[T] = \begin{bmatrix} [I] & 0 & 0 & y_{ps} [I] \\ 0 & [I] & 0 & -x_{ps} [I] \\ [t_x] & [t_y] & [I] & [t_w] \\ 0 & 0 & 0 & [I] \end{bmatrix}$$

여기서 [I] : 단위 행렬

$$[t_x] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & x_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_p \end{bmatrix}$$

$$[t_y] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & y_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_p \end{bmatrix}$$

$$[t_w] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Omega_{np} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_{np} \end{bmatrix}$$

(x_s, y_s) : 전단 중심의 좌표

(x_p, y_p) : 절점의 좌표

Ω_n : normalized warping function

x_{ps} = x_p - x_s, y_{ps} = y_p - y_s, Ω_{np} = Ω_n(x_p, y_p)

부록 [III] 단면 특성치 (표 3-1)

단면적 $A = \int_A dA$

단면 2차 모멘트

$$I_{xx} = \int_A x^2 dA$$

$$I_{yy} = \int_A y^2 dA$$

warping 상수 $I_\omega = \int_A \Omega^2 dA$

비틀 상수 $K_T = \int_A \left(x \frac{\partial \Omega}{\partial y} - y \frac{\partial \Omega}{\partial x} + x^2 + y^2 \right) dA$

전단 중심 $y_s = I_{x\Omega_n} / I_{xx}$

$$I_{x\Omega_n} = \int_A x \Omega_n dA$$