

荒天航海中の大型船의 縱強度와 操船에 關한 研究

尹 点 東* · 朴 錫 柱**

A Study on Ship's Longitudinal Strength and Ship Handling in Heavy Weather

Jeom-Dong, Yoon · Park, Sok-Ju

〈目 次〉	
I. 序 文	2. 오늘날의 船體縱強度 計算方法
II. 大型船의 船體破損, 遭難의 實例	3. 船體가 받는 應力에 對한 考察
1. 油槽船 World Concord 號 沈沒 事故	4. 船體라는 構造物의 實際의인 安全率
2. Volivia 丸 沈沒 沈沒 事故	5. 船體強度에 對한 評價
3. California 丸 沈沒 沈沒 事故	IV. 大型船 安全運航의 解決方法
4. H 號의 失蹤 事故	1. 大型船의 縱強度를 強化하는 問題의 難點
5. Derbyshire 號 失蹤 事故	2. 安全運航을 期하는 問題의 難點 및 適正 操船法
6. 尾道丸 파카 沈沒 事故	V. 結 論
III. 外力과 船體強度	1. 參考 文獻
1. 過去에 있어서의 船體縱強度 基準	

Abstract

A vessel encountered heavy weather is face to two kinds of danger ; the danger of upset due to the lack of stability and the lack of the longitudinal strength.

Generally a small vessel is face to the former and the large vessel to the latter. Most of people do not consider the danger of upset by the latter but the former. But many ships missed at sea, the exact causes being not known.

This paper investigated and analyzed the causes of accidents. The result was that the longitudinal strength of the hull is not enough to cope with heavy weather, and the particular cautions are needed to handle a ship in heavy weather.

I. 序 文

船舶이 荒天에 遭偶하면 두가지 危險에 直面하게 된다. 첫째는 外力이 갖는 에너지의 크기에 比하여 自體의 復原力 不足에서 오는 船舶 顛覆의 危險이고, 둘째는 縱強度 不足 때문에 생기는 船舶

*正會員, 韓國海洋大學

**正會員, 韓國海洋大學

의 파괴 沈沒 危險이다. 荒天을 만나면 小艇은 前者의 危險에 直面하게 되나 大型船은 後者의 危險에 直面하게 된다. 顛覆危險에 對하여는 一般의인 사람들도 常識線에서 잘 알고 있지만 大型船體의 파괴 沈沒의 危險에 對하여는 船舶에 對한 相當한 專門知識을 가지고 있는 사람들도 잘 感知하고 있는 것 같지 않다.

그러나 1980年 한 해만 해도 北太平洋 西岸에서 D/W 10萬톤 以上の 專用船 2척이 태풍을 만나 실종되었고 同年 12月에는 1주일 동안 대형선 3척이 동계 특유의 荒天속에서 파괴 침몰되었다. 이런 것을⁸⁾ 보면 큰 배의 強度에 對한 믿음직스러운 생각이 얼마나 虛無한 것인가를 알 수 있다.

이 글에서 筆者는 大型船體의 縱強度와 關聯이 있는 큰 事故들을 몇 가지 열거하고 그 原因을 檢討 分析하였다. 그 結果 大型船의 船體 縱強度는 평소에 우리가 생각하고 있는 그것보다 훨씬 弱하다는 結論을 내릴 수 있었으며 이와 關聯하여 船體의 運動을 分析하고 荒天運航에 對하 몇가지 指針을 마련하였다.

Ⅰ. 大型船 船體破損, 遭難의 實例

1. 油槽船 World Concord 號 沈沒 事故¹⁾

(1) 船舶의 概要(당시로서는 世界에서 제일 큰 船舶)

L : 198m, B : 26m, D : 13.9m, G/T : 20,628톤, 선급 : LR

(2) 日時 및 場所

1954年 11月 27日 새벽 Scilly Isles 부근

(3) 遭難의 概要(船長 진술)

이 船舶은 1954年 11月 26日 英國서 Winter Ballast Condition의 空船狀態로 出航하여 中東의 原油積地로 向하였다. 同日 19時 30분에 船長은 南西方向에서 오는 暴風注意報를 받고 Ballast를 더 실었으며 Engine의 R.P.M을 내렸고 船首의 吃水는 7.3m, 船尾吃水는 8.8m였다. 그리고 그는 27日 0000時에 더욱 船速을 떨어뜨렸다. 이때의 風力은 Beaufort Scale로 8~9였고, 海面狀態는 혼미하였고 波浪은 250° 方向에서 오면서 右舷船首를 쳤고 波高는 9~11m 程度였다. 船體는 때때로 15° 角度로 Rolling하였고, 27日 0125時에 Engine의 RPM을 75로 내렸다. 이때 산더미 같은 大波가 右舷船首에 나타났고 船底가 크게 흔들리면서 船體는 Slamming하였다. 이와 同時에 第2의 大波가 右舷船首의 後部와 甲板에 덮쳐 올라왔다. 이들 2個 大波間의 時間差는 15秒를 넘지 아니하였다. 이렇게 第1大波는 船首船底를 치고 第2大波는 前部甲板을 덮쳤을때 船長은 大砲를 쏘는 것과 같은 큰 소리를 들었으며 2等航海士는 배가 두동강이 되었다고 외쳤다. 잠시 後에 아직 機關作動으로 움직이고 있던 後部가 船橋를 스치고 船首를 지나서 어둠속으로 사라졌다. 이 沈沒 사고는 선체의 中間部位에서 船體가 칼로 자른락이 깨끗하게 두동강이로 되었다. 이들 두조각을 後에 dock에서 다시 接合시켜 수리하였다.

(4) 應 力

(a) $\sigma_s = 4.5 \sim 6.4 \text{ kg/mm}^2$ (Still Water Bending Stress)

(b) Wave Bending Stress

大波問의 周期 15 秒로부터 遭遇波長을 推定하면 $\lambda_e = 351\text{m}$ 이상이 되지만 그 당시 주위에 있던 다른 船舶들의 기록에 의하면 波長은 40~80m 程度였다.

그러나 이러한 波가 各各 있을 수 있다는 것은 理論的으로도 可能的인 일로 생각된다. 하지만 波長을 船體의 길이(198m) 程度로 보고 波高를 그것의 1/20인 9.9m 로 하여 計算한 굽힘 應力은 動的인 衝擊作用을 加算하지 않으면 $\sigma_w = 7.2 \sim 10.4 \text{ kg/mm}^2$ 이다.

그러므로 $\sigma_s + \sigma_w = 11.7 \sim 16.8 \text{ kg/mm}^2$ 으로서 이러한 理論으로는 파괴의 說明이 안된다.

파괴 原因은 動的인 衝擊力이 原因일 것이다.

2. Volivia 丸 沈沒事故

(1) 船舶의 概要

L : 223m, B : 31.7m, D : 17.3m, d : 11.5m, G/T : 33,768 톤, D/W : 54,271 톤
1,3,5 번창 만재, 2,4 번창 공창

(2) 日時 및 場所

1969年 1月 5日 1000시 노지마사끼 동방 270mile 海上.

(3) 事故의 概要

이 船舶은 南美的 Peru 니코라스에서 鐵鑛石을 만재하고 日本으로 向하는 도중 1969年 1月 5日 1000시 갑자기 船首 2番艙 부근이 절단되어 沈沒하였다. 선원은 2名 救助되었다.

風力은 Beaufort scale 로 8程度이고 風向은 西南西였다. 事故의 原因은 波浪의 動的인 衝擊力이 있을 것이나 이점 모두 闕구하였다.

3. California 丸의 沈沒事故

(1) 船舶의 概要

L : 210m, B : 32.2m, D : 17.8m, d : 13.1m, G/T : 34,001 톤, D/T : 62,147 톤
Alternate 로 Full Loading 하였다.

(2) 日時 및 場所

1970年 2月 9日 2200時 노지마사끼 동방 153mile 海上.

(3) 事故의 概要

C마루는 Los Angeles 에서 鑛石 billet 59,206L/T 을 적재하고 선수흘수 12.97m, 선미흘수 13.09m 로 1970년 1월 24일 12時 同港을 出港 日本을 向하였다. 日本을 向하는 航海에서 同港路 特有的인 強한 季節風을 세번 겪었고 세번째의 荒天에서 C마루는 船首部가 파손 浸水되어 沈沒하였다. 當時의 風向은 240°(左舷船首 約 30°의 方向), 風速은 43knot 였고 波浪 内습 方向은 風向과 大略같고 波高는 約 10m 였다.

事故의 原因은 波浪에 의한 衝擊力이 原因이었을 것이나 모두 闕구하였다.

4. H號 失蹤 事故

(1) 船舶概要

L : 259m, B : 39.6m, D : 19.7m, d : 14.5m, G/T : 55,861 톤, D/W : 102,805 톤

(2) 日時 및 場所

1980年 7月 23時 午後로 推定, 필리핀 민다나오 東岸 60mile 海上

(3) 事故의 概要

同船舶은 1980年 7月 Australia에서 鐵鑛石 98,802L/T를 적재하고 한국의 포항항을 向하여 北上하던 도중 필리핀 東岸에서 第9號 颶風 Kim에 遭偶하여 7月 23日 Noon Report를 最後 소식으로 남기고 沈沒되었다. 이때 Kim은 中心尔度 980mb에서 965mb로 發達되고 있었으며 이 배와의 距離는 100mile 以內에 있었다. 따라서 風力 및 海面狀態는 9~10 程度 以上이었으리라 推定되고 이러한 속에서 이 船舶은 파괴 沈沒되었을 것으로 추정된다.

5. Derbyshire號 失蹤 事故

(1) 船舶 : D/W 91,654 톤

(2) 日時 및 場所

1980年 9月 10日 午後로 推定, Okinawa 東岸 부근으로 推定

(3) 事故의 概要

이 船舶은 Canada의 Seven Island에서 鐵鑛石을 滿載하고 Cape Town을 돌아서 日本의 東京을 向하였다. 이 船舶은 1980年 9月 10日 “복저지로부터 650 mile 海에서 극심한 태풍때문에 Heave to함. 현재 태풍 Orchid 속에 있음”이라는 電文을 남기고 沈沒되었다. 極甚한 荒天속에서 波浪의 衝擊때문에 파괴 沈沒되었을 것으로 推定된다.

6. 尾道丸 파괴 沈沒事故^{*)}

(1) 船舶의 概要

L : 218 m, B : 31.7 m, D : 17.3 m, d : 11.6 m, v : 15 knot, D/W : 56,341 ton,

M/E : 12,750 ps

(2) 日時 및 場所

1980年 12月 30日 1400時 “노지마사끼”동방 900mile 海上

(3) 事故의 概要

“오노미찌”마루는 石炭을 滿載하고 1980年 11月 27日 美國의 東岸을 出港 日本을 向하였다. 1980年 12月 30日 日本 “노지마사끼”에서 方位 106°, 距離 900 mile 海에서 荒天에 遭偶하여 左舷船首 20°方向에서 8~9m 波高의 波浪을 만으면서 約 5knot의 速力으로 Heave to하였다. 同日 14000時경 突然 正船首로부터 波高 十數 m의 大波가 왔고 Slamming과 동시에 Green Water Flooding이 크게 일어났고 船首는 물에 깊이 잠겼으며 數秒後에 船首가 浮上하였을 때는 船首部가 上方으로 5°

Buckling 되었었다. 約 2時間後에 船首는 떨어져 나갔으며 船員들은 1981年 1月 1日 全員 救助되었고, 船體는 Ocean Tug에 의하여 曳引途中 沈沒되었었다.

Ⅲ. 外力과 船體強度

船殼設計의 基本은 船體에 加하여지는 外力이 船體의 強度를 넘을 때는 船體는 파괴된다는 冷敏한 事實에 두어야 할 것이다. 그리고 檢討의 順序는 다음과 같다.

船體構造에 加하여지는 外力, 그 外力에 對한 船體의 運動應答, 船體運動應答때문에 船體構造에 發生하는 應力의 順序로서 安全性의 判斷은 許容應力值가 基準이 될 것이다. 船體에 加하여지는 外力으로서는 重力과 浮力差에 의한 靜荷重, 波浪에 의한 動荷重 및 衝擊荷重이 있다.

靜荷重은 比較的 容易하게 잡을 수 있지만 波浪에 의한 變動力은 充分한 精度로 計算이 안되는 것이 現在의 狀態이다. 船體의 應答計算은 最近에는 有限 要素法을 이용하여 電算機에 의하여 精度 있는 計算이 可能하게는 되었다. 그러나 이런 計算을 위하여 精確하게 필요한 海面의 正確한 狀態는 아직도 數學 model로 잡을 수 없고, 따라서 문제는 아직도 完全히 解決되지 않는 段階에 있다. 船體가 받는 總應力을 σ_t 로 表示하면 그 應力은 크게 나누어서 靜水中에서의 應力 σ_s (Stress in Still Water)와 波浪때문에 生기는 應力 σ_w (Wave-Induced Stress)로 區分되고 여기에 波浪中에서 船體와 波面이 擊突함으로써 生기는 衝擊應力 σ_i 와 물이 船體의 甲板에 올라 덮침으로 인하여 生기는 또 하나의 應力 σ_f 가 追加될 것이다.

따라서 다음 式으로 表示되는 σ_t 가 파괴應力을 초과하지 말아야 한다.

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w + (\sigma_i + \sigma_f) \quad (1)$$

1. 過去에 있어서의 船體 縱強度 基準

(1) 標準 Hogging 狀態^{1), 12)}

船體와 길이와 같은 波長으로, 波高가 波長의 1/20인 Trochoid 波의 波頂이 船體中央에 걸친 경우를 計算 基準으로 하였고 靜水力學的으로 浮力과 重力이 均衡을 잡고 있는 것으로 하여 船體應力을 計算하였다. 이때 貨物을 滿載하고, Ballast, F.O., F.W. 등은 船體의 前後部에 실려 있는 것으로 한 것이다.

(2) 標準 Sagging 狀態^{1), 12)}

波頂이 船首, 船尾에 걸쳐 있고 貨物은 滿載되어 있으며 Ballast, F.O., F.W. 등을 船體의 中央部에 있게 하였다.

이렇게 하여 總剪斷力(F_t) 및 總 彎矩 Moment(M_t)가 計算되었고 그것들은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} F_t &= F_s + F_w \\ M_t &= M_s + M_w \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

따라서 總 彎矩 應力 σ_t 및 剪斷應力 τ_t 는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= \frac{M_t}{Z} \\ \tau_t &= \frac{F_t m}{bI} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

단, I: 構成材斷面의 中立軸에 對한 2次 Moment

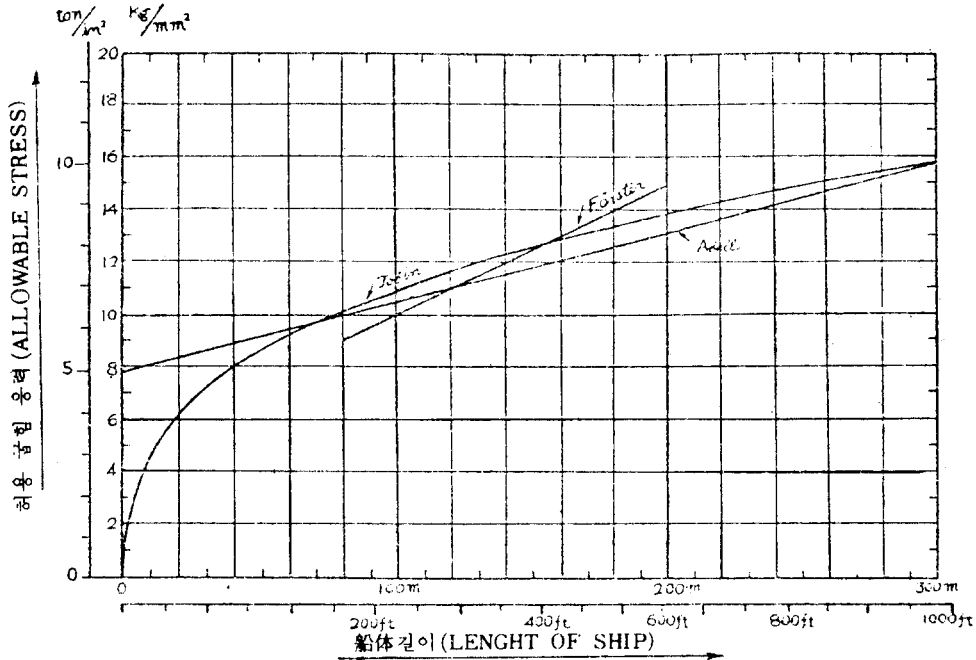
y: 中立軸으로 부터 應力을 求하는 點까지의 垂直 距離

Z: I/y Section Modulus

m: 應力을 求하는 點을 通하는 水平線上部의 斷面積이 中立軸에 對하여 갖는 Moment.

b: 應力을 求하는 點을 通하는 水平線에서의 板厚께의 合計

이러한 觀點에서 본 適當하다고 생각되는 許容應力值(σ_t)는 大略 그림 1에 表示한 값이 된다. 許容 τ_t 는 σ_t 의 0.8倍 程度로 보는 것이 普通이다.



〈그림 1〉 허용 굽힘 응력도⁴⁾

2. 오늘날의 船體 縱強度 計算方法^{3), 9), 10), 11), 13)}

十年前까지만 하더라도 위와 같은 어떤 標準狀態를 設定하고 거기서 許容應力值을 決定하는 方法을 모든 有名 船級協會가 채택하고 있었다. 그러나 最近에 와서는 統計的인 方法으로 海面 狀態를 實際의 그것에 相當히 近似하게 處理할 수 있게 되었다고 사람들은 믿고 있으며 또한 船體運動도 Strip Method로서 實船의 그것에 相當히 近似하게 計算할 수 있게 되었다. 그리하여 最近 世界의 有名 船級協會는 縱強度 計算에 새로운 方法을 取하게 되었다.

(1) 不規則 海面의 數學的인 處理¹³⁾

英國의 Rayleigh 경은 波浪에 關한 오랜 研究 끝에 “海面狀態야 말로 어떻게 잡을 수 없다”라고 탄식을 하였다. 그러나 2次大戰 때 美國은 Neuman 등과 같은 有名한 學者들을 動員하여 海波를 研

完케 하였고 그 結果 오늘날과 같은 波浪에 關한 統計的인 處理가 可能하게 되었다.

① Wave Spectrum 에 의한 海面狀態의 豫測^{14),15)}

海上의 波浪을 無限히 많은 Sine wave 가 중첩되어 이루어진 것으로 생각하고 Wave Spectrum 을 만든다.

$$m_o = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_w) d\omega_w \quad (4)$$

$$(H)_m : 2.50\sqrt{m_o}$$

$$(H)_{1/3} : 4.00\sqrt{m_o}$$

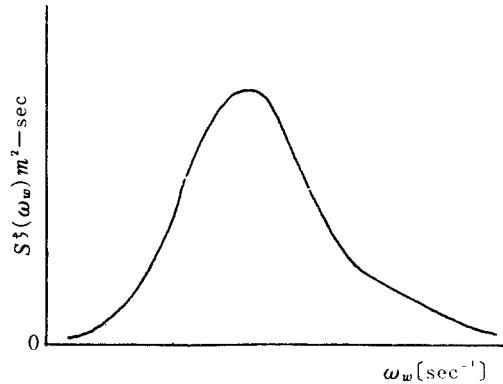
$$(H)_{1/10} : 5.09\sqrt{m_o}$$

$$(H)_{1/100} : 6.67\sqrt{m_o}$$

예를 들면 ITTC 가 추천하는 Wave Spectrum 은

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} e^{-B/\omega_w^4} \dots \dots \dots (5) \text{이다.}$$

단, $A = 8.10 \times 10^{-3} \text{ g}^2$, $B = 33.56/H_{1/10}^2$



<그림 2> Wave Spectrum

風力 31 knot 때에 생기는 波浪 (5)式에 따라서 計算하면 다음과 같다.

$$m_o = 21.564 \text{ ft}^2$$

$$(H)_{1/3} : 4.0\sqrt{m_o} = 18.50\text{ft} = 5.6\text{m}$$

$$(H)_m : 2.506\sqrt{m_o} = 11.67\text{ft} = 3.5\text{m}$$

$$(H)_{1/10} : 5.09\sqrt{m_o} = 23.65\text{ft} = 7.2\text{m}$$

$$(H)_{1/100} : 6.67\sqrt{m_o} = 31.00\text{ft} = 9.4\text{m}$$

$$\text{平均 周期} \tau : 8.83\text{sec}$$

② 豫想 最大 波高¹⁴⁾

通過한 波浪의 數(n) 中에서 가장 큰 波高에 關한 式은 다음과 같다.

$$(H)_{\frac{1}{n}} = 2\sqrt{2 \log_e n} \times \sqrt{m_o} \times C.F. \quad (6)$$

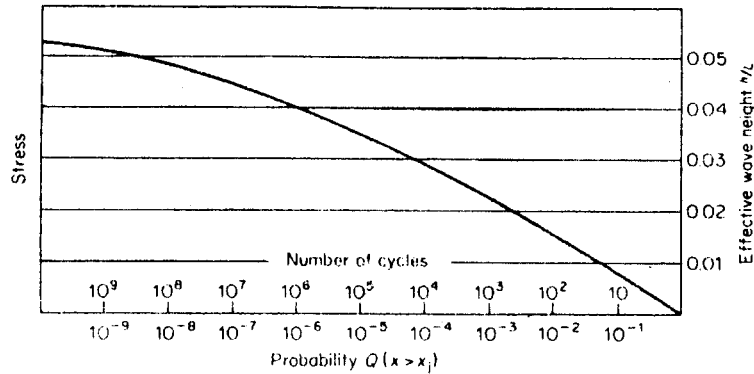
C.F. (Correction Factor)를 1로 보고 10^5 의 波, 즉 100,000個의 波가 지나갔다면 第一 큰 波浪의 높이는 $(H)_{1/10^5} = 2 \times 4.8 \times 4.64 = 44.6\text{ft} = 13.5\text{m}$

즉, 이것은 Average Wave Period 가 8.83sec 이므로 $(10^5 \times 8.83) \div (3600 \times 24) = 10.2$ 日을 같은 條件의 荒天 中에서 航海하는 船舶이 한번 만날 수 있는 波高가 된다. 그러나 같은 상태가 계속 10日 정도 지속하지 않을 것이다.

③ Moment Spectrum 에 의한 應力值의 豫想

Wave Spectrum 에 RAO(Response Amplitude Operator)를 適用시켜서 Motion Spectrum 을 만들 수 있고 Motion Spectrum 에서 Moment Spectrum 을 작도할 수 있다. 勿論 이러한 計算은 電算機를 動員하여서만 可能하다.

이러한 Moment Spectrum 을 기초로 하여 船舶이 모든 氣象狀態下에서 一生동안에 받을 수 있는 Stress 에 關한 確率圖表를 作成할 수 있다.



〈그림 3〉 應力 確率 圖表

그림 3은 이곳에서 例를 들어서 說明하는 船舶에 對한 圖表가 아니기 때문에 正確性을 保障할 수 없지만 그것을 利用하는 方法은 다음과 같다.

길이 250m의 船舶이 波를 船首에서 받으면서 8knot 程度의 速力으로 航海한다고 假定하자.

이 船舶이 波高 $0.035 \times 250m = 8.8m$ 程度의 波(또는 그 波가 飪쳤을때 받는 Stress)를 받으면서 航海하는 確率은 어느 程度인가?

大略의 波周期를 計算하면 $T_e = 12$ 秒 程度된다. 이 船舶의 一生을 25 年으로 잡고 1 年의 航海日 數를 300日로 잡으면 이 船舶의 航海一生은, All Sea Life Time = $10^{10.6}$ 秒이다.

그림 3에서 보면 $0.035L$ 의 波高에 對한 遭遇回數는 10^5 秒 時間經過에 1回 있으므로 그 遭遇 빈도는 一生 동안에 다음과 같다.

$$\text{一生동안 빈도} = 10^{0.6} / (10^5 \times 12) = 526 \text{ 回}$$

船舶의 수명을 現實에 맞추어 20 年으로 보면 $10^{8.2} / (10^5 \times 12) = 418$ 回이다. 이 回數는 14.4日 航海하면 한번 만날 수 있는 確率의 波이다.

다시 이 船舶이 船體길이의 0.05 倍 즉 $(1/20)L$ 의 波高를 받을 수 있는 確率을 보면 25 年의 수명으로 하여 $10^{0.2} / (10^{0.6} \times 12) = 0.13$ 回이고 189 年만에 한번 만날 수 있는 確率이 된다.

이러한 計算 數值上에서 보면 標準 條件을 $(1/20)L_w$ 의 波高에 두고 縱強度를 計算한 過去의 方法은 航海中에 조우할 수 있는 應力을 過大評價한 것이 된다. 一生동안 한번도 만날 수 없는 波를 基準으로 한다는 것은 말이 아니된다. 따라서 全體적으로 볼때 새로운 方法에 의하여 計算된 船體의 縱強度는 過去의 基準보다 強化할 必要가 없다는 것이다. 그러나 새로운 方法의 弱점은 σ_i 와 σ_r 를 크게 考慮하지 않는데 있다.

NK의 Rule을 보면 不規則 海面에서 長期 累積 確率 Q 의 값이 10이 되는 M_w 를 取하여³⁾ 縱強度 計算의 基準으로 하고 있으며, 實際로는 이렇게 하여 計算한 값보다 약간 낮은 값인 $15kg/mm^2$ 을 韌性 應力 許容限界值로 잡고 있으며 剪斷應力(τ_i)은 그것의 0.8 倍인 $12kg/mm^2$ 以內로 하고 있는 것 같다.

(3) 各國 有名 船級協會의 縱強度 許容基準值^{3), 9), 10), 11)}

① IACS의 縱強度 最底基準에 關한 統一 規則(Unified Requirement of IACS about Minimum Longitudinal Strength Standard)

S7.1 : 90m ≤ L < 500m 인 鋼船 中央部의 甲板 및 용골의 最底斷面係數는 다음과 같다.

$$Z_{\min} = CL^2B(C_b + 0.7)K(\text{cm}^3)$$

단, L = 길이 (m)

B = 幅 (m)

C_b = 방형 비적 계수, 단 C_b ≥ 0.60

C = C_n (新造船)

C = C_s (就航中인 船舶) = 0.9C_n

$$C_n = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{1.5}, \quad 90\text{m} \leq L < 300\text{m}$$

$$= 10.75, \quad 300\text{m} \leq L < 350\text{m}$$

$$= 10.75 - \left(\frac{L - 350}{100} \right)^{1.5}, \quad 350\text{m} \leq L < 500\text{m}$$

K = 1.0 (通常의 造船鋼材)

3. 船體가 받는 應力에 對한 考察^{13), 14)}

前述한 바와 같이 船體가 받는 實際 總應力(σ_t)은 다음과 같다.

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w + (\sigma_l + \sigma_f)$$

(1) 靜水中에서의 應力(σ_s)

이것은 荷重曲線만 正確히 作成되면 新빙할만한 精度까지 正確히 計算될 수 있다.

(2) 波浪에 依한 應力(σ_w)

이것은 海面狀態를 어느 程度까지 正確히 잡을 수 있느냐에 따라서 計算의 精度가 決定되는 것이지만 前述한 바와 같이 現在로서는 海面 狀態를 正確하게 數學的인 Model로 處理할 수 없는 段階이고 Wave Spectrum에 의하여 概略的인 海面狀態를 파악할 수 있을 뿐이다.

따라서 이것을 基礎로 한 波浪에 의한 船體應力도 概略的인 것으로 밖에 볼 수 없다. 그리하더라도 믿을 만한 것으로 받아들일 수 있는 段階라고 볼 수는 있다.

(3) 衝擊力(σ_l)의 크기

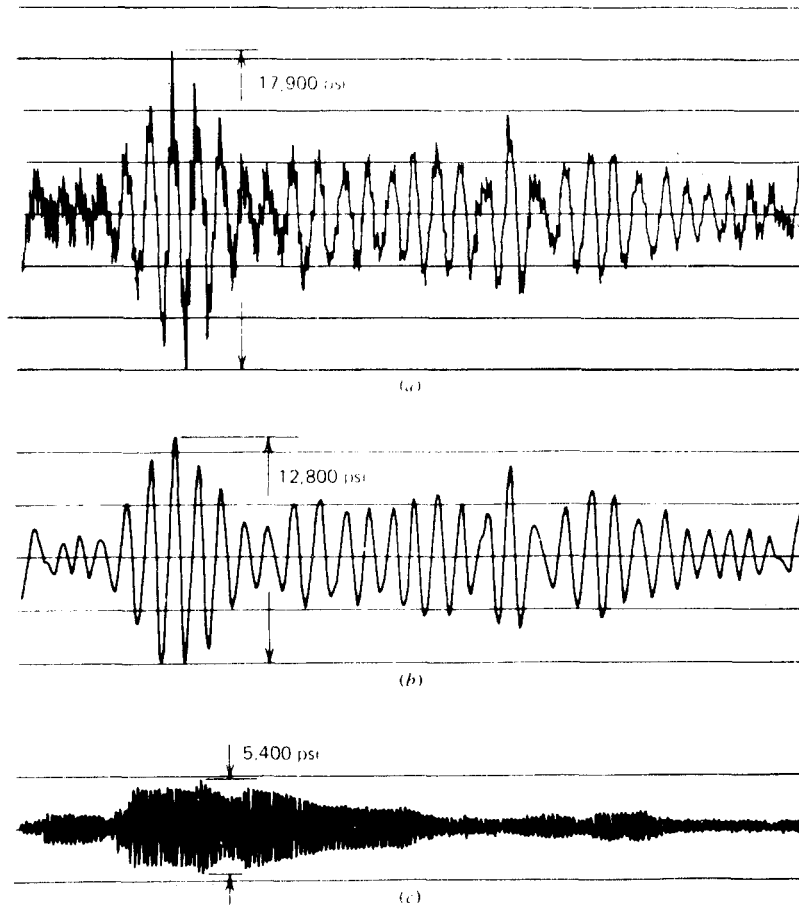
波에 의한 通常의 流體力이나 船體動搖 때문에 생기는 通常의 慣性力의 變動周期는 船體 振動의 自然周期에 비하여 매우 낮기 때문에 船體 自體의 動的인 應力 誘發에 크게 影響을 줄 수 없다. 그러므로 單純한 海面에서는 船體 Girder의 應力은 靜力學的인 法則에 의하여 支配된다. 그러므로 이렇게 서서히 變하는 荷重을 準靜力學的인 荷重 또는 波浪荷重이라고 부른다. 그러나 때때로 船舶은 매우 急激하게 展開되는 2種類의 動荷重을 받게 된다.

① 持續狀態의 動荷重

航海中에 推進器와 船體의 相互간섭 작용, 機關에서 船體에 傳達되는 運動, 그리고 海面狀態가 주는 船體에 對한 起動力 등이 船體를 지속적으로 振動시킴으로 因하여 생기는 動荷重으로 이러한 振動을 Springing 이라 부른다.

Springing은 船體가 비교적 짧은 波를 짜르면서 航海할때 波의 運動이 船體의 自然周期와 共振을 일으킬때 생긴다.

그림 4는 이러한 狀態를 보여 주는 그림이다.



Typical record of midship stress variation (a) Total stress variations, including both wave-induced and first mode stress components. (b) Wave-induced stress variations (frequency approximately 0.1 Hz). (c) First-mode (springing) stress variations (frequency approximately 0.70 Hz).

〈그림 4〉 持續的인 動荷重

② 순간적인 動荷重

순간적인 動荷重은 Slamming 또는 V字型的 船首에서는 船首의 上下動搖로 因하여 생기며 波浪과 船體運動慣性의 갑작스러운 變化때문에 생기는 荷重이다. 이러한 荷重은 船體의 振動을 通하여 傳達되어 가는 것이고 이러한 振動現象을 Whipping 이라고 한다. Slamming 과 Whipping 에 의한 應力은 波浪應力의 크기에 까지 達할 수 있다. 船首形態로 볼때 大型船은 다음에 說明하는 Green Water 의 Flooding 이 있을 때를 제외하고는 Slamming 이 있을 때만 순간적인 動荷重이 걸린다고 생각된다.

(4) Green Water Flooding 에 의한 應力(σ_f)

滿載를 한 大型船이 Slamming 을 일으키고 동시에 Green Water Flooding 을 일으킬 때는 “오노미찌”마루에서 보는 바와 같이 船體에 치명타를 주는 應力을 誘發할 수 있다.

이때의 應力의 크기는 $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w + \sigma_i(100\% \sigma_w) + \sigma_f(70\% \sigma_w)$ 가 된다.

“오노미찌”마루가 이러한 一發의 衝擊作用 때문에 파괴 침몰되기 前까지는 大部分의 造船學者들은 D/W50,000 톤 程度의 大型船이 Slamming 을 일으키고 Green Water 를 덮어 쓴다는 것을 믿지 아니하였다.

그러면 이러한 Green Water 가 일으키는 衝擊應力이 얼마나 되겠는지 概略的인 計算을 한번 하여 보자.

(例題)

滿載한 한 船舶의 例

길이 250m, 폭 39.6m, C_b 0.825, 水面에서 船首까지의 垂直距離 7.4m, d 15m 인 D/W 100,000 톤의 船舶이 波長 250m, 波高 8m(船級 規則上의 設計 波高)인 波를 船首에서 받으면서 船速 8knot 로 航海할 때와 船速 14knot 로 航海할때 船首에서 덮어쓰는 Green Water 의 Flooding 때문에 생기는 Moment 를 각각 計算하고 이것이 Wave Bending Moment 의 몇 % 정도가 되는지 計算하여 보라. 그리고 波高가 波長의 1/20이 될때도 같은 計算을 하라.

(解) (a) 8knot 로 航走하는 境遇(波高 8m)

$$T_p = 0.5 \sqrt{250} = 8 \text{ sec}$$

$$T_w = 12.7 \text{ sec}$$

$$F_n = 0.08$$

$$\phi = \sin^{-1} \pi (H_w / \lambda) = \sin^{-1} 3.14 \times (8/250) = 5.8^\circ$$

$$h_o = 8/2 = 4\text{m}$$

$$Z_G / h_o = 0.4$$

$$\phi / \phi = 0.4$$

$$Z_G = 0.4 \times 4 = 1.6\text{m}$$

$$\psi = 0.4 \times 5.8^\circ = 2.3^\circ$$

$$Z_\theta = 125 \times \sin 2.3^\circ = 5.1\text{m}$$

$$Z_t = Z_G + Z_\theta = 1.6 + 5.1 = 6.7\text{m}$$

故로 8 knot 로 航海하는 경우는 Green Water Flooding 은 없다.

(b) 14 knot 로 航走하는 境遇(波高 8m)

$$F_n = 0.145$$

$$Z_G / h_o = 0.5$$

$$\phi / \phi = 0.5$$

$$Z_G = 0.5 \times 4 = 2\text{m}$$

$$\psi = 0.5 \times 5.8 = 2.9^\circ$$

$$Z_{\theta} = 125 \times \sin 2.9^{\circ} = 6.3\text{m}$$

$$Z_t = Z_G + Z_{\theta} = 8.3\text{m}$$

$$\text{船速} = 7.2\text{m/sec}$$

$$\text{Green Water Flooding Speed} = 2\pi r / 12.7$$

$$= (2 \times 3.14 \times 4) / 12.7 = 1.98 \approx 2\text{m/sec}$$

Flooding Time Interval 을 $T_p/4$ 로 보아서 2秒 동안 海水가 들어 온다고 假定한다.

$$V_w = 2[39.6 \times (8.3 - 7.4) \times (7.2 + 2)] = 655.8\text{m}^3$$

動搖로 인한 加速度를 1g 로 보면

$$Q_w = 2 \times 655.8 \times 1.025 = 1344.4 \text{ ton 이 된다.}$$

$$M_f = 125 \times 1344.4 = 168,050 \text{ ton-m}$$

船級規則에 의하여 計算한 M_w 는 다음과 같다.

$$M_w = C_s L^3 B H_c K_b$$

$$= [2.34 \times 0.825 + 0.2] \times 10^{-7} \times 250^3 \times 39.6 \times 8 \times 1 = 421,839 \text{ ton-m.}$$

故로 M_f 는 M_w 의 39.8% 이다.

(c) 8 knot 로 航走하는 경우(波高 12.5m)

$$F_n = 0.08$$

$$\Phi = 9^{\circ}$$

$$h_G = 6.25\text{m}$$

$$Z_G/h_G = 0.4$$

$$\psi/\Phi = 0.4$$

$$Z_G = 2.5\text{m}$$

$$\phi = 3.6^{\circ}$$

$$Z_{\theta} = 125 \times \sin 3.6^{\circ} = 7.8\text{m}$$

$$Z_t = 10.3\text{m}$$

$$\text{船速} = 4\text{m/sec}$$

$$\text{Green Water Flooding Speed} = 2\pi r / 12.7$$

$$= (2 \times 3.14 \times 6.25) / 12.7$$

$$= 3.1\text{m/sec}$$

$$V_w = 2[39.6 \times (10.3 - 7.4) \times (4 + 3.1)] = 1,631\text{m}^3$$

$$Q_w = 2 \times 1,631 \times 1.025 = 3,343.6 \text{ ton}$$

$$M_f = 125 \times 3,343.6 = 417,950 \text{ ton-m}$$

이것은 設計波에 의한 M_w 의 99%가 된다.

(d) 15 knot 로 航走하는 境遇(波高 12.5m)

計算 省略함. 그러나 計算上으로 波高 14.5 以上の 波高에서는 Slamming 이 시작된다.

滿船한 大型船에서는 Slamming 이 일어나기 前에 반드시 Green Water Flooding 이 일어난다. 왜냐

하면 Draft 가 Freeboard 보다 훨씬 크기 때문이다. 그러나 空船 또는 半載 狀態에서는 Slamming 이 일어나야만 Green Water Flooding 이 생긴다.

위의 計算에서 보면 滿載한 大型船에서는 Slamming 이 없더라도 Green Water Flooding 에 의한 Bending Moment 만도 Rule 計算 Wave Bending Moment 의 70%의 範圍를 넘을 수 있음을 알 수 있다.

(5) 各 應力間의 比率 및 荒天率

船級 Rule 에 따라서 計算된 통상 Ocean Going Vessel 의 計算 總應力($\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w$)은 σ_t 를 100으로 할때 σ_s 는 40%, σ_w 는 60%의 比率이다. 그러므로 滿載한 大型船이 Green Water Flooding 을 시작하면 船體가 받는 實際의 總應力은 다음과 같다.

$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w + (\sigma_s + \sigma_w)$ 의 42% (σ_f 에 해당하는 應力이고 σ_f 는 σ_w 의 70%로 보기 때문이다.) Slamming 이 시작되면 實際의 總應力은 다음과 같다.

$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_w + (\sigma_s + \sigma_w)$ 의 42% + $(\sigma_s + \sigma_w)$ 의 60% (σ_t 에 해당) 따라서 應力間의 比率은 表 1과 같다.

〈表 1〉 應力比率 Rule 計算 $\sigma_t = (\sigma_s + \sigma_w)$ 를 100으로 할때

σ_s	σ_w	σ_f	σ_t
40	60	42	60

그러므로 σ_r (rough sea stress) = $\sigma_f + \sigma_t$ 라고 하면 σ_r 는 Rule σ_t 의 100%가 된다.

따라서 突風率에 對가 되는 用語로서 荒天率을 생각하면 應力計算에서 荒天處理係數(C_r = Rough Sea Coefficient) 즉 荒天率은 다음과 같다.

C_{r1} (Green Water Flooding 만 일어날때) = 1.4

C_{r2} (Slamming 만 일어날때) = 1.6

C_{r3} (Green Water Flooding + Slamming) = 2.0

4. 船體라는 構造物의 實際的인 安全率

(1) 安全率(Safety Factor)

① 許容應力의 意義

기계라든가 구조물이 外力을 받으면서 파괴되지 않고 安全하게 使用되려면 이것을 구성하고 있는 各部材料의 内部에 생기는 應력을 적당한 한도 이내의 값이 되도록 하여야 한다. 이러한 일정한도의 應력을 허용應력 또는 使用應力(Permissible Stress)이라고 한다.

허용應력을 정하는 것은 기계 구조물의 설계제작에 對하여 매우 중요한 일로, 예를 들면 材料의 치수를 크게 하면 단위재료 内部에 생기는 應력이 감소하여 안전하지만, 필요이상으로 重量이 증가하고 비 경제적이 될 뿐만 아니라, 기계 자신의 성능을 떨어지게 할 수도 있다.

一般的으로 許容應力은 다음 事項을 고려하여 결정하여야 한다.

(a) 材料의 性質

예를 들면 鋼材에서는 탄소 함유량 또는 열처리에 따라서 탄성, 여물기에 차이가 있고 또한 주강

은 인장응력보다 압축응력에 견디기 쉬운 性質이 있다.

(b) 하중 또는 外力의 性質

안전한 靜荷重下에서는 발생하는 응력이 적지만 항상 변동하는 外力, 例를 들면 풍력, 파랑 또는 진동等的 活荷重이 作用할 때에는 응력은 크고 또한 충격과 같은 급격한 荷重을 받을 때에는 더욱 응력이 크게 發生한다.

(c) 사용환경

구조물이 기관실과 같은 고온다습한 곳에 놓인다든가, Brake 또는 Bearing 과 같은 마찰이 격심한 경우라든가 또는 水面 부근의 外板과 같이 전습 및 온도차가 심한 곳에 놓인다든 가를 고려하여야 한다.

② 安全率

위와 같이 허용응력은 여러가지 조건을 종합 고려하여 결정하여야 하지만 이러한 조건들이 주는 영향의 정도를 정확히 알아내는 것은 곤란한 경우가 많다.

따라서 실용상은 材料의 극한강도 또는 破斷力을 基本으로 하여 이 값을 실제 하중의 값으로 나누어서 허용응력을 정하는 것이 보통이다.

이렇게 除한 계수를 안전계수 또는 안전율이라고 한다.

즉, 다음과 같다.

$$\text{安全率 } S = \frac{\text{재료의 극한강도}}{\text{허용응력}}$$

주요한 재료의 안전율은 표 2와 같다.

<表 2> 주요한 재료의 안전율

材 料	靜 荷 重	動 荷 重	충 격 하 중
주철 등의 금속	4	6~10	10~15
鍊鐵 軟鐵	3	5~8	9~12
주 강	3.5	5~8	10~15
木 材	6	8~12	12~20
石材, 벽돌	10	15~20	--

(2) 大型船 船體의 安全率

造船用 鋼材의 強度에 關한 IACS의 強度 基準은 항복점이 23kg/mm², 極限強度가 41 kg/mm² 으로 되어 있다. 따라서 항복점 應力은 極限強度 應力의 0.5배를 약간 상회하고 比例限度는 20kg/mm² 정도로 보면 된다.

構造物의 許容應力은 比例 限度內에 있어야 하므로 船體의 許容應力은 當然히 20 kg/mm² 이내가 되어야 한다. 現在 世界 有名 船級協會의 船體 許容應力의 平均値는 16 kg/mm² 程度이다. 이 값을 基準으로 한 安全率은 表 3과 같다.

〈表 3〉 船體安全率 極限強度 43kg/mm², 항복점 23kg/mm², 比例限度 20kg/mm²

標 準	荒天率非適用	Cr ₁ 適 用	Cr ₂ 適 用	Cr ₃ 適 用	平 均
極 限 強 度	2.6	1.9	1.7	1.3	1.9
항 복 強 度	1.4	1.0	0.9 (위	0.7 0.6	1.0
比 例 限 度	1.3	0.9	0.8 (구		

表 3을 보면 滿載狀態를 基準으로 하여 생각할 때 Green Water Flooding 이 시작되면 大型船은 安全率在 1로 떨어지고 Slamming 이 시작되면 船體는 거의 틀림없이 파괴된다는 것을 알 수 있다.

5. 船體強度에 對한 評價

表 3을 보면 極限強度에 對한 安全率は 平均 1.9이고 항복強度에 對한 安全率 平均은 1이다. 荒天率을 적용하고 比例限度를 基準으로 할 때의 安全率は 0.9이하이고 이것은 避航없이 航海하면 틀림없는 程度로 船體파괴가 일어날 수 있음을 말하는 것이다.

이러한 값에 비추어 볼 때 意外로 大型船 船體파손 海難事故가 적은데 놀라움을 禁할 수 없다. 이것은 一線의 船長들이 맹렬한 태풍권을 잘 避하여 航海하고 있기 때문이다.

그러면 어느 程度의 海面까지 船體는 견디어 낼 수 있을 까 하는 疑問이 제기된다. 風力階級 8의 中段階의 風力이 주는 海面 狀態로부터 絶실한 危險이 있을 것으로 判斷된다. 왜냐하면 現行 ABS¹⁰ Rule 上에서 길이 250m가 되는 船舶에 對한 設計波高를 計算하여 보면,

$$H_s = [4.50L - 0.0071L^2 + 103]10^{-3} = 7.84\text{m}$$

이고 船體길이의 1/32에 해당하는 波高이다.

實際海面에서 比較的 正確하게 波高와 波長關係를 나타내는 式¹¹⁾으로 생각되는 $H = 0.607\sqrt{L_w}$ 의 式을 利用하여 L_w 250m에 對한 波高를 計算하면 $H = 9.6\text{m}$ 이고 이것은 0.038L에 해당된다. 이 波高에 對한 出現確率¹²⁾은 10^{-5.7} 程度이고 波의 周期 12.7 sec 를 기준으로 船舶의 一生동안 이러한 波의 出現빈도를 計算하면 約 81回程度가 된다. 이것은 每 航海年中 4回程度의 빈도이고 實際로 우리가 航海하면서 安全을 위하여 最善을 다하여 避航하지 않으면 큰 危險이 수반되는 經驗回數와 비슷하다.

따라서 航海者의 感覺의인 基準으로 判斷할 때 滿船을 基準하여 大型船의 強度를 다음과 같이 評價할 수 있다.

- (1) Green Water Flooding 이 시작되면 船體 손상의 危險이 시작된다.
- (2) Slamming 이 일어나면 船體는 파괴될 수 있다.
- (3) 大洋上에서 風力 7程度가 되면 危險이 始作되는 段階이고 8以上이 되면 危險이 크다.

IV. 大型船 安全運航의 解決方法

취약한 縱強度를 가진 大型船을 安全하게 運航하는 데는 다음 두가지 方法밖에 없다.

첫째, 縱強度部材의 치수를 늘려서 許容應力값을 내린다.

둘째, 船體強度를 現在의 狀態에 두고 철저히 避航하여 安全航海를 期한다.

1. 大型船의 縱強度를 強化하는 問題의 難點

오노미찌 마루 事故에 對한 技術檢討委員會는 造船學者, 造船實務者, 運航學者, 運航實務者, 官廳專門家 等으로 構成되어 있었고 結論은 다음과 같은 것인것 같다.

“異常氣象에 의하여 생긴 大端히 큰 波浪에 의하여 船體가 破損 沈沒되었으며 應力 計算結果 그 것이 確認되었다. 이러한 計算이 可能케 되었다는 것은 큰 成果이다. 그러나 船體의 縱強度를 現在의 그것보다 더 強化할 必要는 없다.”⁴⁾

이러한 結論은 主로 造船學者側에서 誘導한것 같고 같은 檢討委員이라도 運航實務者는 여기에 크게 異論을 提起한 것으로 여겨진다. 그러나 그들은 어마어마하게 복잡한 數值計算이 그들의 能力範圍 밖에 있었기 때문에 參與하였을 것이다.

그러면 왜 이러한 結論이 誘導되었을까?

그것은 철저히 數值計算을 한 結果 異常海象 狀態에서 특별히 생기는 結果라는 것이고 通常있는 일이 아니므로 異常氣象 狀態下에서는 運航者가 信賴性工學을 기초로 한 適正한 操船法을 구사하여 安全運航을 하라는 意見이었다.⁴⁾

그건 타당치 않다. 왜냐하면 그러한 大型船이 Slamming 을 일으키고 Green Water Flooding 이 일어난 줄은 꿈에도 생각해 보지 못했던 船上의 사람들이 살아서 돌아온 船員들이 十數m 波高가 닥치고 Slamming 이 일어났으며 Green water Faloding 이 생기고 한참 후에 船首가 떠올라 왔는데 V 字型으로 Buckling 이 생겨서 선체가 파손되었다고 구체적인 경위를 말하고 난 후 그러한 外力 Data 를 計算機에 넣고 겨우 可能하다는 結論을 얻은 것이다. 그러한 結論은 大端히 새롭게 開發된 어려운 數式에 의하여 計算된 結果라고만 자부하고 있었던 것 같다.

實務船長들에게는 그러한 事實은 直觀的으로 이미 알고 있는 常識에 屬하는 內容이다. 다만 그들이 工學的인 方法으로 計算을 할 能力이 없었던 것 뿐이다.

信賴性工學에 基礎를 둔 適正한 操船을 한다는 말은 바로 外力을 評價하고 船體의 應答을 알아서 船體應力이 許容應力值 範圍內에 있도록 操船이 可能하다는 말도 된다.

만약 波浪의 來流方向이 一定하다고 假定하면 이러한 일은 어느 程度 可能한 일이다. 그러나 暴風이 몰아치는 大洋上에서 波浪이 오는 方向은 大略 90°程度 以內의 범위에서 제멋대로 方向分布가 되어 있다. 순간 순간에 船體의 應力이 測定되고 應力이 最小가 되는 時刻를 알았을 電子計算機 裝置가 裝備되어 있는 船舶은 가상하더라도 船體는 이러한 計器의 命수를 추종할 能力이 없다.

이것은 神의 오묘한 섭리에 20世紀의 科學的인 知識으로 人間의 도전이 可能하다는 말과도 같다.

그러면 왜 그들은 이러한 結論을 내렸을까?

現在의 여건이 船體의 縱強度를 強化할 수 없게 되어 있는 것이다. 그러한 理由는 다음과 같다.

(1) 強度部材의 치수를 늘인다는 것은 造船原價를 너무 비싸게 만들고 世界의 다른 나라와 造船 및 海運경쟁을 할 수 없게 된다.

(2) 現在 建造되어 就航中인 船舶의 대체 및 處置가 困難하여진다.

(3) 이미 海難을 當하여 침몰된 船舶의 死亡者에 對한 法的 보상문제가 복잡하게 된다.

이러한 일들은 實로 어마어마하게 큰 問題들이다. 따라서 現在の 段階에서는 縱強度를 強化할 수 없다고 생각될 수 밖에 없다.

2. 安全運航을 期하는 問題의 難點 및 適正操船法

(1) 颶風(熱帶性 低氣壓)에 對한 避航

熱帶性 低氣壓은 그 範圍가 比較的 좁고 進路가 예측될 수 있으며 境界面이 比較的 뚜렷하므로 科學的인 方法으로 確實한 避航이 거의 可能하다.

(2) 冬季의 季節風 및 溫帶性 低氣壓에 對한 避航

冬季의 季節風이나 또는 季節風을 동반한 溫帶性 低氣壓의 荒天範圍는 半徑이 1,000km를 넘는 수가 많고 進路도 뚜렷하지 않고 大洋上에 막막하게 막힌 채 버져 있으며 長期間 暴風이 계속된다.

이러한 荒天을 避하여 航海한다는 것은 目的地를 反對로 두고 航走하는 針路를 잡더라도 困難한 때가 많다.

이러한 때는 現在 一線船長들이 實施하고 있는 方法보다 더 確實하고 適正한 操船法이란 거의 있을 수 없으며 安全만 생각하면 豫定에 맞추어 目的地에 到着할 수 없다. 이것은 航海實務者들의 常識에 屬하는 問題이다.

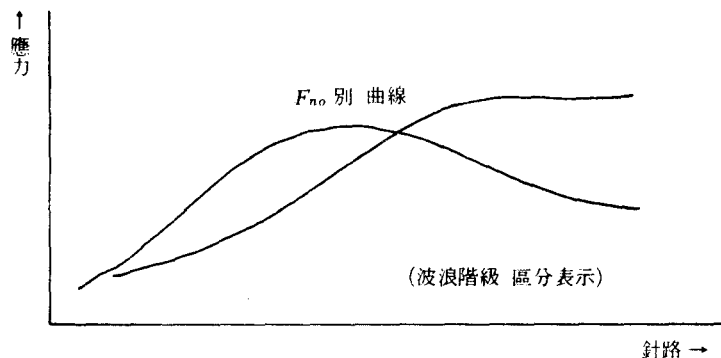
(3) 信賴性工學에 基礎한 適正한 操船法

오늘날의 科學的인 知識을 總動員하면 보다 次元 높은 安全運航을 爲한 適正操船法은 있을 수 있고 그것을 위하여는 正確한 氣象情報에 追加하여 最小限 다음 條件이 先行되어야 한다.

① 正確하게 波浪外力을 評價할 수 있어야 한다. 이러한 爲 위하여는 船舶에 波浪觀測計器가 裝備되어 있어야 한다.

② 外力에 對한 正確한 船體應答을 알아야 한다. 이것을 위하여는 船舶建造時에 Ship Yard에서 해당 船舶에 對한 正確한 利用圖表를 作成하여 本船에 提供하여야 한다. 이러한 圖表는 空船, 半載, 滿載別로 詳細하게 作成되어야 하고 Stress 計算은 荒天率을 考慮한 것이어야 意味가 있다.

例를 들면 다음 圖表와 같다.



<그림 5> 操船時利用한 應力曲線

③ 船體의 正確한 強度限界를 알아야 한다. 造船所에서는 그 船體가 正確하게 어떤 海面狀態를 基準(正確한 設計波高)으로 設計되었으며 載貨狀態에 따라서 어떤 海面狀態까지 安全할 것인가를 正確하게 計算한 情報를 本船에 提供하여야 한다.

④ 위의 資料에서 얻은 情報를 基礎로 하여 本船에서는 適正操船을 위한 針路, 速力 等を 手시로 決定할 수 있을 것이다.

V. 結 論

1. 오늘날의 大型船 船體強度는 Beaufort Scale 로 8 以上の 바람이 지속적으로 불어오는 海面에서는 堪航性을 갖지 못하는 弱體이다.
世界的으로 統一性있게 船體縱強度는 強化되어야 한다.
2. Beaufort Scale 로 7 以上の 強風이 持續적으로 불어오는 大洋上에서는 大型船이라 하더라도 Heave to 操船을 하여야 한다.
3. Beaufort Scale 로 8 以上の 強風이 持續적으로 불어오는 海面에서는 大型船이라 할지라도 Scudding 操船을 하여야 하되 波浪을 받는 方向은 正船首로부터 150°程度의 方向이 安全을 위하여 가장 좋다.⁵⁾
4. Green Water Flooding 이 始作되는 때가 큰 危險이 따르기 始作하는 때이며 Slamming 이 있으면 最惡의 狀態가 된다.
5. Cargo Loading 에 있어서는 荷重이 均一하게 分布되도록 最善을 다하여야 安全航海를 期할 수 있다.⁶⁾
6. 商船에도 波浪觀測을 위한 裝備가 設置되어야 하고 造船所는 船長이 適正操船을 할 수 있도록 外力에 對한 船體의 應答情報를 詳細한 基礎說明書가 첨부된 圖表로써 提供하여야 한다.

參 考 文 獻

1. 野原威男：“船の強度と安定性”，天然社，東京(1966)，p. 41.
2. 杉原喜義：“理論運用學 基礎力學編”，海文堂，東京(1969)，p. 108.
3. 日本海事協會：“第十四編 縱強度”，會誌 No. 142(1973. 1)，pp1003~1013.
4. 大串雅信：“理論船舶工學 中卷”，海文堂，東京(1971)，p. 47.
5. 谷初藏：“VLCC에關する十章”，成山堂，東京(1977)，pp. 99~100.
6. 川上益男：“船の海難と過渡應答について”，日本造船學會誌 第638號(1982. 8)，pp. 401~404.
7. 寺澤一雄：“船體構造力學”，海文堂，東京(1976)，pp. 410~441.
8. 日本海事新聞(1981年 12月 9日字)：“尾道丸事故に關する技術檢討會の報告”.
9. Korean Register of Shipping：“Rules and Regulations for the Construction and Classification”，Mun Wha Sa, Seoul(1982)，pp. 289~294.
10. American Bureau of Shipping：“Rules for Building and Classing Steel Vessels(1982)”，Section 6, cc. 6. 1~6. 4.
11. Lloyd's Register of Shipping：“Rules and Regulations for the Classification of ships” Part 3, Chapter

- 4, pp. 1~6.
12. J. McCallum, B. : "A Case History—The World Concord". International Journal of the Royal Institute of Naval Architects, November, 1981 No. 6, London, pp. 473~477.
13. W. Muckle : "Naval Architecture for Marine Engineers", Newness—Butterworths, London(1975), pp. 171~176.
14. Rameswar Battercharyya : "Dynamics of Marine Vehicles", Jhon Willey & Sons, New York(1978), pp. 249~277.
15. B. V. Korvin—Kroukousky : "The theory of Seakeeping", SNAME, New York(1961), pp. 284~290.
16. Austin M. Knight : "Modern Seamanship", Von Noster and Reinhold Co., Ltd., New York(1977), pp. 456~457.
17. Donald F. MacNaught : "Principles of Naval Architecture", SNAME, New York(1967), pp. 172~191.