講 座

耐 航 性

金 貞 勳*

二次大戰後 主로 發達된 造船學의 分野를 들자면 그것은 耐航性에 關한 것이라 할 수 있다. 耐航性은 英語로 Seakeeping 또는 Seaworthiness 라 하고 좀더 具體的인 術語로서는 Behavior of ships in seaway를 흔히 쓰고있다.

배가 다니는 길은 언제나 어디서나 조용하지않고 항상 작건 크건 波濤가 있다. 따라서 造船技術者는 이에 대해서 모두들 큰 관심을 가지고 研究해 왔으나 워낙 바닷길 (또는 大洋의 波濤)의 本質은 人間이 쉽게 알아낼 수 없는 複雜한 것이어서 規則波만을 가정하고 그런 波中을 航海하는 배의 單純한 運動만을 생각하고 研究해 왔다. Froude 는 橫搖 (Roll)를 다루었으며 Kryloff 는 縱搖(Pitch)를 研究하여 發表하였다(1861, INA, 1898, INA).

Kreitner 는 純粹한 科學者의 立場에서가 아닌 造船技術者의 見地에서 이 方向의 研究를 積極的으로 檢討하기 시작하였다 (1939, INA). 大戰中 軍事的 目的으로 發達된 統計數學에 依한 波浪豫報技術은 大戰後 큰 成果를 거두어 不規則한 大洋波를 具體的으로 容易하게 다룰 수 있게 만들어 주어 이 方向의 造船學者들에게 크게 發展할 수 있는 터전을 마련해 주었으며 한편 電子計算器의 發明은 이 方面의 研究에서 過去였으면 거의 不可能했다고 볼 수 있는 數値計算을 可能케 해 줌으로써 열심히 研究하는 造船科學者에게 까다롭고 複雜한 問題를다룰 수 있는 勇氣를 주고 研究를 促進시켰다 할것이다.

耐航性을 最初로 定義한 이는 Kreitner 였다. 波浪中에서도 動搖가 적고 安定하며 速度의 損失이 적으며 充分한 强度를 가지며 危險振動을 갖지 않는 船舶을 耐航性이 높은 船舶이라 한다. 이런 船舶을 建造하기 위하여 알아야할 일은 (1) 不規則한 大洋波의 物理的 (또는 力學的)量을 定量的으로 얻을 일, (2) 이런 波中에서 航海하는 船舶의 運動을 計算하는 일, (3) 그러기 위하여 波浪中에서 運動하는 船體에 作用하는 動流體力學的 힘(Hydrodynamic force)를 求하는 일, (4) 그리고 나아가 이런 運動을 하는 船體의 彈性的 量(應力等)을 求하는 일이다.

以上의 基本的인 研究를 위하여 剛體, 流體 및 彈性體의 動力學을 動員하여야 하는 한편 模型및 實船實驗을 하여야 한다.

§1. 波浪스펙트럼 (Sea spectrum)

海上의 어느 한 場所에서 記錄한 波高를 보면 完全히 非週期的인 것을 알 수 있다(그림 1). 任意의 經過時間을 週期 T(초)로 잡고 Fourier 級數로 表示하면

$$Z(t)=\sum_{n=1}^{N} C_n \cos\,(\omega_n\, t+\sigma_n) \qquad (1)$$

測定한 點에서 水柱를 생각하고 面積素 dA 에 세운 水柱의 時刻 t 에서의 位置에너지를 求하고 또 그 平均値를 求하면 各各

*正會員, 서울大學校 工科大學

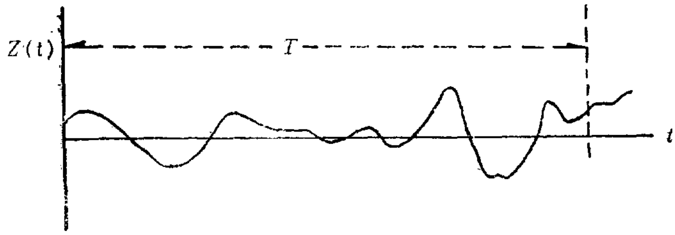

그림 1

$$E_{\text{pot}}=\frac{\rho g}{2}\left[\sum_{n=1}^{N}C_n\cos(\omega_n t+\sigma_n)\right]^2\cdot dA,$$

$$E_{\text{pot mean}}=\frac{\rho g}{2}\cdot\frac{1}{T}\int_0^T Z^2(t)\cdot dt\cdot dA.$$

單位面積에 對한 平均에너지는

$$\frac{E_{\text{pot mean}}}{\text{unit area}}=\frac{\rho g}{2}\cdot\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T Z^2(t)\ dt.$$

但 $T\to\infty$ 는 約 30分 以上이면 된다.

윗 式을 積分하면

$$\frac{\rho g}{2}\cdot\sum_{n=1}^{N}\frac{C_n^2}{2}=\frac{\rho g}{4}\cdot\sum_{n=1}^{N}C_n^2.$$

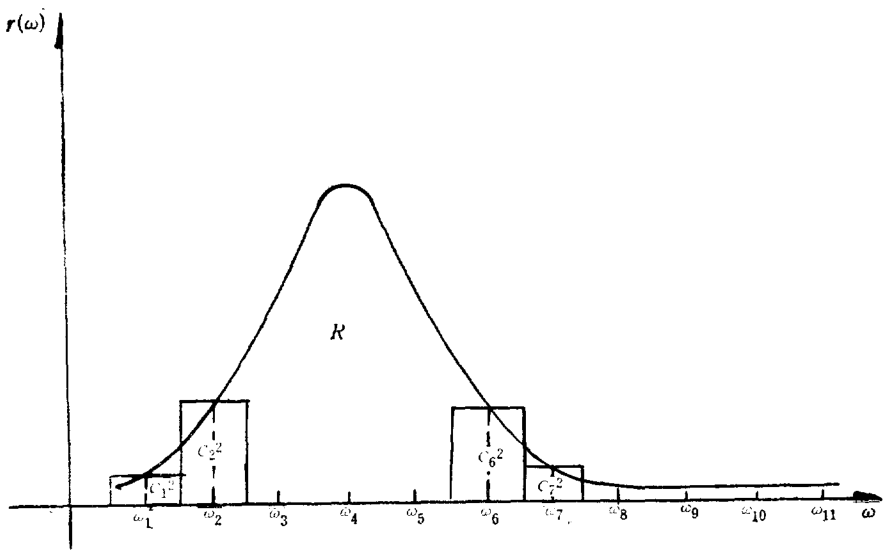

그림 2

지금 C_n^2을 그림 2에서와 같이 圓振動數 ω_n에 세운 面積素片 $r(\omega_n)\cdot\Delta\omega_n$로 간주한다면 C_n^2의 總合은 全面積 R와 같고 $r(\omega)$의 次元은 $\mathrm{m^2\cdot sec}$가 된다.

即

$$\frac{\text{Epot mean}}{\text{unit area}}=\frac{\rho g}{4}R \quad 및 \quad Z(t)=\sum_{n=1}^{N}\sqrt{r(\omega)\cdot\Delta\omega_n\cdot\cos(\omega_n+\sigma_n)} \tag{2}$$

그림 2를 波浪스펙트럼이라 한다. 이 스펙트럼의 面積은 波浪의 平均에너지를 나타낸다고 볼 수 있으므로 波浪에너지 스펙트럼이라고 한다. 이것은 또 各個의 ω_n에 對應하는 古典正弦波의 에너지의 重疊이라고 볼 수 있다. 이같은 不規則 波中에서의 船舶의 運動도 또한 不規則하며 그 記錄으로부터 위에서 한 바와 꼭같이 하여 運動에너지 스펙트럼을 얻을 수 있다. 어느 주어진 波浪스펙트럼을 갖는 波浪中에서의 船舶의 運動스펙트럼을 應答 스페크트럼(response spectrum)이라한다. 이것은 模型船水槽에서 各規則成分波를 再生하고 이에 對應하는 船舶運動으로부터 容易하게 얻을 수 있다.

이같은 spectrum이 갖는 統計學的 意義를 한 例를 들어 表示하면 다음과 같다.

매우 좁고 뾰족한 스펙트럼일 경우, 測定値 $Z(t)$의 第一 큰 것으로부터 番號를 붙혀 順位로 1부터 M까지 놓았다고 하고, 第一 큰 것으로부터 M/P個를 잡아 算術平均한것을 表示하면 아래와 같다. 이로부터 統計的 波高 $Z_M^{(1/P)}$를 그 스펙트럼의 R値에 依하여 얻을 수 있다.

表 1

$1/P$	$Z_M^{(1/P)}/\sqrt{R}$
0.1	1.800
0.2	1.591
0.33	1.416
1.0	0.886

實際로 스펙트럼을 얻는 方法은 記錄한 波高 $Z(t)$를 다음과 같은 autocorelation function에 代入;

$$Q(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{2}{T}\int_0^{T}Z(t)\cdot Z(t+\tau)\cdot dt. \tag{3}$$

(τ는 時間變位)

上式을 演算하면

$$Q(\tau)=\int_0^{\infty}r(\omega)\cdot\cos(\omega\tau)\cdot d\tau.$$

Fourier變換에 依하여 $r(\omega)$를 求하면

$$r(\omega)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}Q(\tau)\cdot\cos(\omega\tau)\cdot d\tau. \tag{4}$$

式 (3)과 式 (4)로부터 容易하게 數値計算을 하여 願하는 精度의 스펙트럼을 얻을 수 있다.

§2. 運動方程式

§2.1. 單純한 運動方程式

그림 3과 같이 坐標軸을 잡고 船體를 機械裝置에 依하여 조용한 물에서 週期的 往復運動을 하게 하는 길은 6가지가 있다. 그리고 이 때에 作用하는 힘을 調査하면 機械裝置에 依한 攪亂力, 船體의 慣性力, 靜

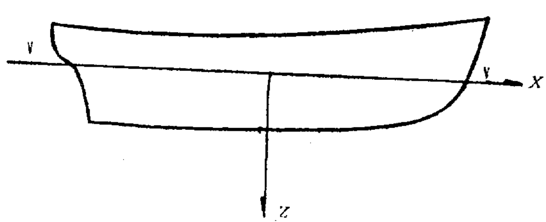

그림 3

流體力學的인 힘(復原力), 動流體力學的인 힘(動流體力學的 慣性力과 動流體力學的 減衰力) 및 粘性에 依한 摩擦力이다. 運動 即 振動이 적고 各各 獨立한 運動을 한다고 假定하고 摩擦을 無視하면 (實際로 無視할 수 있음) 運動方程式은 다음과 같이 된다.

(船體慣性力＋動流體力學的 慣性力)＋動流體力學的 減衰力＋靜流體力學的 復原力 ＝ 攪亂力 (5)

靜止水上 (그림 3)에 固定한 坐標軸에 關한 6가지 運動에 關하여 表示하면 表2와 같다. m 는 船體質量, I 는 慣性能率, ρ 는 密度, g 는 重力加速度, ∇ 는 船體排水體積, GM 는 橫미터센터 高, GM_L 는 縱미터센터高, A_{WL}는 水線面積.

表 2

坐標軸	x	y	z
軸에 平行한 並進 軸의 周圍의 回轉	surge (x_0) roll (ϕ)	sway (y_0) pitch (ψ)	heave (z_0) yaw (χ)

	x	y	z	ϕ	ψ	χ
船體慣性力	$m\ddot{x}_0$	$m\ddot{y}_0$	$m\ddot{z}_0$	$I_{xx}\ddot{\phi}$	$I_{yy}\ddot{\psi}$	$I_{zz}\ddot{\chi}$
復 原 力	—	—	$\rho g A_{WL} Z_0$	$\rho g \nabla \cdot \overline{GM} \cdot \phi$	$\rho g \nabla \cdot \overline{GM_L} \cdot \psi$	—
動流體力學的힘	?	?	?	?	?	?

§2.2. 動流體力學的힘

알기 쉽게 說明하기 위하여 heave의 경우만을 생각한다. 조용한 無限이 넓은 理想水面上에서 二次元 船體를 機械로 强制 heave를 시켰다고 하고 그 때의 水流의 速度포텐셜을 求한다. 動搖速度를 $Ue^{i\omega t}$ 라 하고 速度퍼텐셜을 $Ue^{i\omega t}\Phi(y,z)$라 하면 $\Phi(y,z)$가 滿足하여야 할 條件은 다음과 같다(그림 4).

1. 라플라스式 $\Phi_{yy}+\Phi_{zz}=0$
2. 表面條件 $\Phi_n=\cos(u,n)|_S$
3. 無限領域 $\Phi\to 0,\ \ \begin{matrix} z\to\infty \\ y\to\pm\infty \end{matrix}$
4. 自由表面 $\Phi_{tt}-g\Phi_z=0,\ z=0$

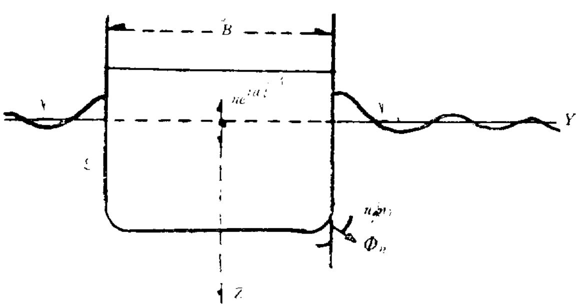

그림 4

이를 滿足하는 퍼텐셜을 求하고 이로부터 船體表面上의 各點의 動流體力學的 壓力을 求하여 積分하면 heave의 加速度와 速度에 比例하는 動流體力學的 慣性力 $m''\ddot{z}_0$ 및 動流體力學的 減衰力 $N_z\dot{z}_0$를 얻는다. m''_z를 附加質量이라고 하고 N_z를 減衰係數라 한다. Heave 運動은 船體에서 距離가 增加함에 따라 그 振幅이 急激히 減少하는 standing wave와 進行波(progressive wave) 두 가지를 일으키며 前者는 附加質量의 原因이

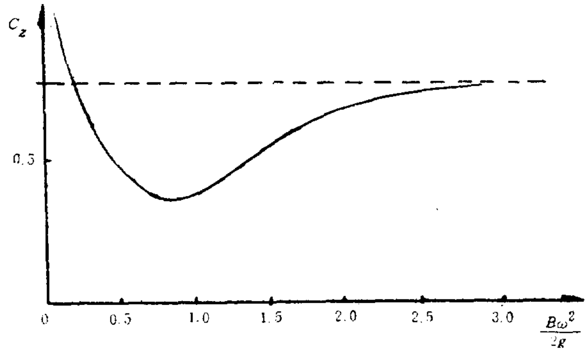

그림 5

되고 後者는 減衰力의 原因이 된다. m''_z 와 N_z 는 無次元振動數 $\frac{B\omega^2}{2g}$, 附加質量係數 $C_z = \frac{m''_z}{\rho \cdot \frac{B^2}{8} \cdot \pi}$, 振幅比 $\bar{A} = \frac{\bar{h}}{\bar{z}_0}$ 및 進行波는 船體가 보낸 에너지를 멀리 運搬해 버린다는 것으로부터 얻어지는 關係式 $N_z = \frac{\rho g^2}{\omega^3}\left(\frac{\bar{h}}{\bar{z}_0}\right)^2$ 등에 依하여 求한다. $\bar{h}$ 는 멀리 進行해나간 進行波의 波高이고 $\bar{z}_0$ 는 heave 振幅이다. 이제 式 (5)와 같이 運動方程式을 쓰면

$$(m+m_z'')\ddot{z}_0 + N_z\dot{z}_0 + \rho g B z_0 = \text{攪亂力}$$

Grim, Tasai, Porter 는 理論的으로 위와 같이 求하였으며 Golovato, Gerritsma 는 實驗的으로 求하였다.

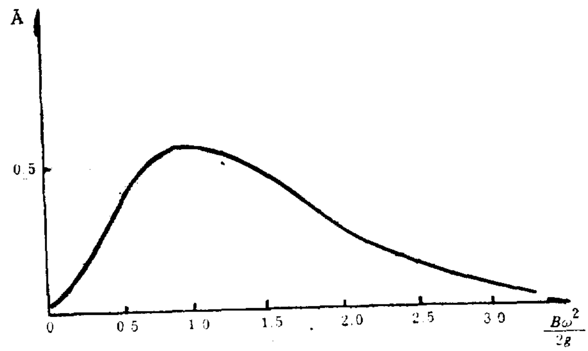

그림 6

§2.3. 波에 依한 힘과 Froude-Kryloff 의 假定

規則正弦波는 船體에 作用하는 攪亂力이다. Froude 와 Kryloff 는 波中에 있는 船體에 作用하는 壓力이 船體가 그 자리에 있지 않을 때의 波의 壓力과 같다고 假定하였다. 많은 사람들이 이 假定에 따라 計算해 왔다. 그러나 Korvin-Kroukovsky (1955, SNAME)는 波中에서의 流體의 흐름에 기여하는 船殼의 간섭을 고려에 넣는데 成功하였다. 이것에 依하여 많은 믿을 만한 理論的 計算值를 얻을 수 있게 되었다(Gerritsma).

§2.4. Strip method

船體를 縱軸上에서 Δx 간격으로 잘랐다고 假想하고 船體로 말미암아 교란되는 흐름은 x 軸에 垂直한 두

面 사이에서 二次元流라고 假定하고 至今까지 求한 二次元의 경우에 對한 假想質量 또는 減衰係數를 "심프손"法則으로 全長에 따라 積分하고 船首와 船尾에서의 三次元流의 경향을 修正하는 方法을 strip method 라 한다. 이 方法은 實用에 適合한것으로써 Engineering method 라고도 한다. 이에 對하여 처음부터 三次元으로서 船體의 運動을 다루는 길도 있으나 船體가 다만 數學으로 容易하게 表現되는 것이라야만 하므로 實用段階에는 이르지 못하고 있다. 三次元으로서 다루는 數學的 方法은 船體에 週期的인 特異點을 分布시키는 것으로서 Havelock, Hanaoka, Neuman, Grim 等이 이에 기여하고 있다.

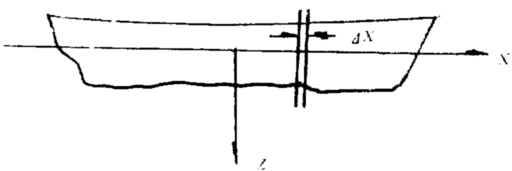

그림 7

§ 2.5. 히이부—피치의 聯成式

Korvin-Kroukovsky (1957, SNAME)는 strip method 에 依하여 規則波中을 head sea 로 航海하는 模型船의 히이부 및 피치를 計算하였으며 Gerritsma (Int. Shipb, 1958)는 實驗을 하고 이와 比較하였다. 그것을보면 聯成式에 依한 計算은 實驗値와 大體로 一致하지만 非聯成式에 依한 計算値는 잘 一致하지 않음을 알 수 있다. 그 聯成式은 다음과 같다.

$$a\ddot{z}_0+b\dot{z}_0+cz_0+d\ddot{\phi}+e\dot{\phi}+g\phi=F$$

$$A\ddot{\phi}+B\dot{\phi}+C\phi+D\ddot{z}_0+E\dot{z}_0+Gz_0=M$$

左邊의 係數는 慣性質量, 減衰係數等이고 右邊은 波에 依한 攪亂力과 能率이다.

§ 3. 波中에서의 抵抗과 速度損失

Havelock, Maruo 는 理論的으로 波로 말미암아 增加되는 抵抗增加를 求하는 것을 試圖하였으며 Gerritsma 는 波浪스펙트럼을 利用하여 統計的 抵抗增加를 實驗으로 求하였다. 波中模型實驗에 適合한 模型水槽에는 두가지가 있으며 그 하나는 Delft, Stevens, California 大學水槽와 같이, 模型을 一定한 힘으로 끌되 그것이 主運搬車의 平均速度近傍에서 自由롭게 Surge 하게 하는 것이고, 다른 하나는 *M.I.T.*, *S.N.U.* 와 같이 一定한

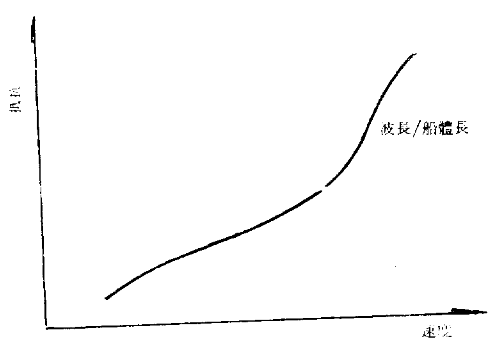

그림 8

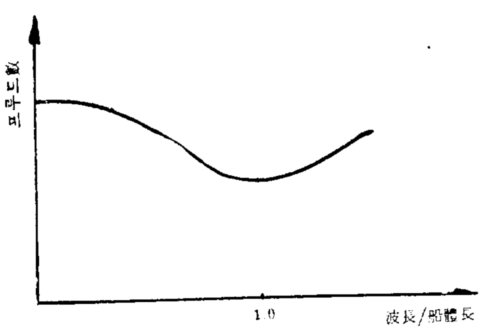

그림 9

힘으로 模型을 끄는 것이다. 그리고 實驗結果는 各各 그림 8 및 그림 9와 같이 表示한다.

또한 E. V. Lewis 는 波浪中에서의 速度損失을 船型에 關하여 調査하였으며 Möckel 은 主로 北大西洋에서의 實驗觀測으로부터 여러 가지 重要한 資料를 얻었다.

§4 波中에서의 荷重

§4.1. 彎曲能率

從來의 彎曲能率計算에서는 波高一波長比가 1/20 일 경우, Hogging 과 Sagging 狀態에 對한 荷重曲線을 使用하였고, 좀더 엄밀한 方法으로는 Smith 의 修正을 使用하여 왔다. 그러나 이에 依하면 Bending Moment 計算이 너무 거칠다. 엄밀한 方法은 正確한 外力計算에 있으며 이것은 波中에서의 船體運動에 關한 엄밀한 資料에 基礎를 두어야 한다. Korvin-Kroukowsky, Lewis 等은 規則波中을 航海하는 模型船의 彎曲能率을 理論的으로 計算하고 한편 同模型에 對하야 實驗하고 比較하여 大體로 잘 一致함을 보여 주었다.

§4.2. 슬래밍 (Slamming)

波浪中 또는 規則波中을 航海하는 船舶에 있어 船首가 空中에 나왔다가 그다음 水表面에 떨어질 때 局部的으로 큰 衝擊力을 받게 되어 船底가 破損되는 수가 있다. 또한 局部的壓力은 比較的 적으나 全體的으로 큰 荷重이 걸려 이것이 船體振動을 일으켜 그 다음 段階에 생기는 彎曲能率에 영향을 준다. 이런 現象을 "슬래밍"이라 하며 이에 對한 순수한 基礎理論은 Wagner (1932, ZAMM)가 세웠다. 이에 뒻 따라 Todd (1954, DTMB), Szebehely (1959, Applied Mech. Rev.)가 研究하였고, 또한 Ochi, Akita 等 諸氏가 크게 寄與하였다(그림 10 參照).

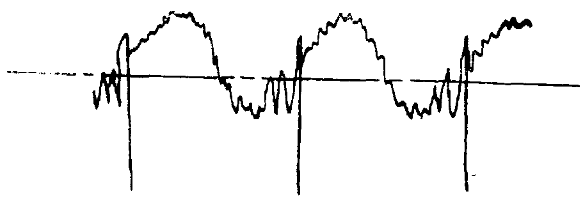

그림 10 測定된 甲板의 應力의 例

參 考 文 獻

單 行 本

1. Korvin—Kroukovsky, Theory of Seakeeping, SNAME, 1961.
2. Blagoveshchensky, Theory of Ship Motion (Translation), Dover Print.

論 文 集

3. Transaction of SNAME, 1950 thru. 1960.
4. Journal of Ship Research, SNAME, 1957 thru. 1963.
5. International Shipbuilding Progerss, 1955 thru. 1963.
6. J. S. T. G., 1950 thru. 1963.
7. DTMB Reports.