

船舶의 風波中 航海能力 및 推進性能 評價에 관한 研究

金 順 甲*

The Evaluation of Ship's Cruising Ability and Propulsive Performance in a Seaway

Soon-Kap Kim

目 次	
1. 序 論	4.2 主機의 燃燒系
2. 船舶의 航海能力 評價	4.3 回轉運動系
2.1 船速低下	5. 主機의 負荷 變動과 運動方程式
2.2 操船 可能性	5.1 主機의 負荷 變動과 傳達函數
3. 프로펠러의 負荷 變動	5.2 運動方程式
3.1 流入速度의 變動과 토오크의 變動	6. 負荷 變動의 主機 特性平面上에서의 評價
3.2 有效直徑의 變化와 토오크의 變動	7. 結論
4. 主機의 動特性과 負荷 變動	參考文獻
4.1 調速機系	附錄

Abstract

Recently, there is a tendency to design the large full ships with lower-powered engine as the means for energy saving in ship's navigation at seas.

Such a lower-powered ship is anticipated to show the different propulsive performance in rough seas, because the fluctuation of main engine load of lower-powered ship is relatively large as compared with higher-powered ship.

The fluctuation of propeller load is nonlinear at racing condition in waves.

It is due to the variation of inflow velocity into propeller, the propeller immersion and the characteristics of engine governor.

In this paper, the theoretical calculation of the nominal speed loss and the numerical simulation for the nonlinear load fluctuation of a model ship in rough seas are carried out.

From the results of calculation, the followings are discussed.

* 正會員, 韓國海洋大學

- (1) The ratio of nominal speed loss to the speed in still water.
- (2) The manoeuvring ability of ship and the operational ability of main engine in a seaway.
- (3) A method of the evaluation for the fluctuation of propeller torque and revolution on the engine characteristics plane.
- (4) The effect of engine governor characteristics on the propeller load fluctuation.

1. 序 論

最近, 船舶 運航上의 省에네르기 對策으로서 大型船이나 肥大船에 低馬力의 主機를 搭載한 船舶이 많이 出現되어 就航하고 있으나, 荒天中에서의 運航性能이 현격하게 나빠진다는 것이 實務 運航者들의 指摘이다.

靜水中의 船體抵抗에 比하여 風波中에서 抵抗增加率이 船型과 推進性能에 따라 一定하지 않음에도 불구하고, 主機의 馬力余裕은 通常 같은 比率로 設定되어 오고 있다. 低速船은 高速船에 比하여 船速低下率이 커지게 되고, 波浪中에서의 프로펠러 負荷 變動이 심해지게 되므로 비교적 高出力의 主機를 搭載한 경우와는 다른 推進性能을 가지게 될 것이 豫想된다. 특히, 荒天中에서 船舶의 耐航性能을 確保하기 위하여 船速을 意識적으로 減速시켜서 航行할 경우에는, 프로펠러의 回轉數가 낮은 領域에서 主機의 作動이 不安定狀態에 이를 危險이 있다. 船舶이 심한 風波中을 航行할 때에는 프로펠러가 水面에 露出되어지므로 프로펠러의 負荷 變動은 非線型的으로 變化한다. 또한, 主機의 回轉數 變動을 적게하도록 制御하는 調速機에도 不感帶의 非線型 要素와 時間遲延 要素等이 포함되어 있다. 따라서, 荒天中을 航行하는 船舶은 耐航性能의 觀點¹⁾에서 船體運動의 激化에 의한 危險性 못지않게 프로펠러 레이싱 등의 負荷 變動에 의한 主機의 運轉上 危險性도 함께 考慮하여야 할 것이다.

本 研究에서는, 對象船舶에 數值 시뮬레이션을 實行하여, 風波中에서 船舶이 船速低下되어 航行할 경우의 操船可能性과 主機의 運轉性能을 檢討하였다. 그리고 船舶의 航海能力을 評價하여, 通常 適用되어지는 Sea margin과는 다른 立場에서 필요한 主機의 馬力余裕에 關하여 考察하였다.

또한, 風波中에서의 負荷變動을 主機의 特性平面上에 評價하는 方法을 提示함으로써, 프로펠러의 水面上 露出에 限界値를 정하여 프로펠러 레이싱 發生을 評價하는 種래의 方法을 比較함과 아울러 調速機의 特性이 負荷 變動에 미치는 影響等 推進性能의 評價에 關하여 考察하였다.

本 研究의 數值 시뮬레이션에 사용한 對象船型의 主要目과 主機의 特性은 Table 1, Table 2에 표시하는 것과 같고, 主機의 燃料消耗量은 附錄에 표시한 값을 사용하였다.

Table 1. Principal particulars of a model ship

Items		Demensions
Length P. P.	L _{pp} (m)	200.000
Breadth	B (m)	36.366
Depth	D (m)	16.637
Mean draft	d _M (m)	11.883
Length-breadth ratio	L/d _M	5.5
Breadth-draft ratio	B/D	3.06
Block coefficient	C _B	0.8
Center of buoyancy from midship	l _{cb} (% L _{pp})	2.5fore
Propeller diameter	D _p (m)	5.6
Propeller pitch ratio	p	0.722
Projected lateral area above water line	A _S (m ²)	1534.1
Rudder area	A _R (m ²)	39.6

Table 2. Characteristics of a model main engine

	Norm.	M.C.R. (15% sea margin)	M.C.R. (51.3% sea margin)
BHP(ps)	3757.5	4321.0	5683.4
Revolution(rpm)	86.4	89.0	89.0
Torque(ton-m)	31.1	34.8	45.7
Speed(knt)	11.2	11.6	12.7

2. 船舶의 航海能力 評價

風波中을 航行하는 船舶은 操船에 필요한 最少限의 船速과 主機가 正지하지 않고 운전될 수 있는 最少限의 出力을 필요로 한다. 이러한 最少限의 航海能力을 가지지 않고는 船舶은 運轉不可能 狀態로 되어, 단지 하나의 漂流物에 지나지 않게 된다.

風波中에서 船速低下하였을 경우, 船舶의 操船 可能性과 主機의 運轉 可能性에 關하여 다음과 같이 評價할 수 있다.

2.1 船速低下

規則波中에서의 抵抗增加量은, Gerritsma의 方法²⁾에 의한 船體運動에 基因한 抵抗增加에 船首部의 波反射에 基因한 抵抗增加로서 藤井·高橋의 修正³⁾을 행함과 아울러 風壓抵抗을 考慮하여 (1)式으로 구하였다. 이것에 따른 船速低下量은 文獻 4)에 의하여 반복 計算으로 구하였다.

$$R_{AW} = R_{AW(0)} + R_{AW(1)} + R_{WIND} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $R_{AW(0)}$: 船體運動에 基因한 抵抗增加量

$R_{AW(1)}$: 船首部의 波反射에 基因한 抵抗增加量

$$R_{WIND} = \frac{1}{2} \rho_a k(\mu) C_{XLO} \cdot A_S \cdot V_R^2$$

ρ_a : 空氣密度

A_S : 水面上의 船體側面 投影面積

C_{XLO} : A_S 를 使用하여 無次元化한 正面 風壓抵抗係數

$k(\mu)$: 風向影響係數

V_R : 相對風速

A_S 의 값은 Table 1에 표시한 것과 같고, 數值計算을 함에 있어서는 $C_{XLO} \approx 0.3$, $k(\mu) \approx 0.8$ 의 값을 使用하였다.⁵⁾

計算結果로서, 3種類의 海象狀態에서의 船速低下와 靜水中의 速度에 대한 船速低下率 $((V_s - V) / V_s = \Delta V / V_s)$ 을 나타낸 것이 Fig. 1이다. 海象狀態의 [2], [3], [4]는 Beaufort scale 6, 7, 8에 해당

하는 海面狀態이며, 不規則 海洋波 스펙트럼은 ISSC스펙트럼을 適用하여 計算하였다. 이 結果를 考察하여 보면 海象이 거칠어질수록, 또한 靜水中에서의 船速이 느릴수록 船速低下率이 커짐을 알 수 있다.

그리고, 船速低下量중에서 波浪의 影響에 의한 速度低下量과 바람의 影響에 의한 速度低下量을 風波中에서의 船速低下量에 대한 比率로 표시한 것이 Fig. 2이다. 이러한 結果를 比較하여 보면, 船速이 느릴 수록 波浪에 의한 影響이 바람에 의한 影響보다도 커지게 된다는 것을 알 수 있다.⁶⁾

- [1]: Still water
- [2]: $T_0 = 7.6 \text{ sec}, H_{1/3} = 3.9 \text{ m}, V_w = 28.0 \text{ knt}$
- [3]: $T_0 = 8.9 \text{ sec}, H_{1/3} = 5.3 \text{ m}, V_w = 34.0 \text{ knt}$
- [4]: $T_0 = 10.3 \text{ sec}, H_{1/3} = 7.1 \text{ m}, V_w = 41.0 \text{ knt}$

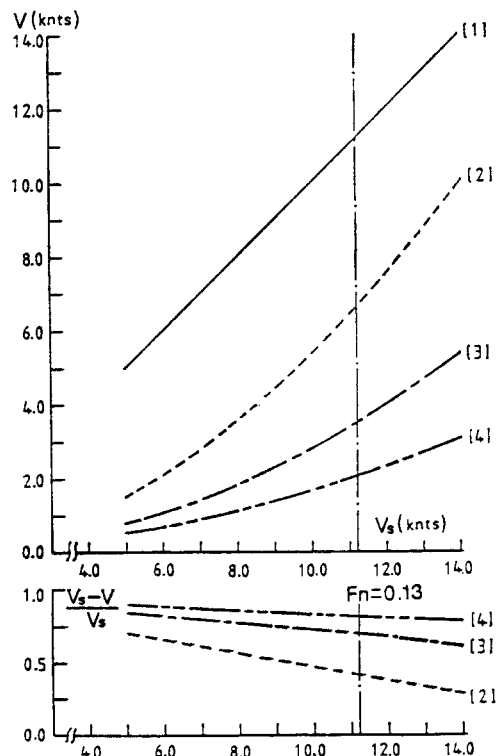


Fig. 1 Ratio of the nominal speed loss to the speed in still water

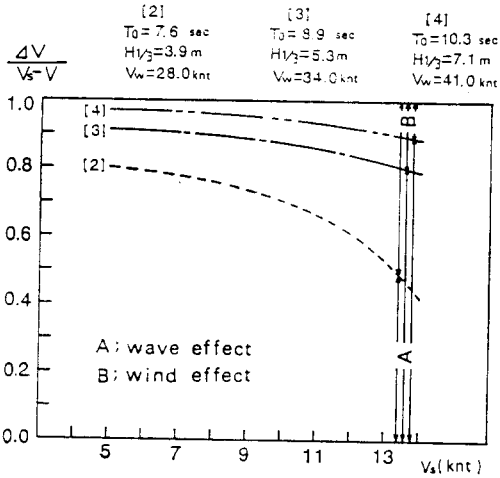


Fig.2 Effect of waves and wind on nominal speed loss of model ship in a seaway

2.2 操船 可能性

風波中을 航行할 때, 針路를 維持하거나 危險狀態로 부터 벗어나기 위하여 船舶은 最少限의 操船能力을 가지고 있어야 한다.

風波中에서의 操船 可能性을 評價하는 方法으로서, 風速이 船速에 대하여 어느 程度 이상의 크기로 되면 舵를 最大舵角까지 취하여도 船舶을 自由自在로 操船할 수 없게 되는가를 파악하는 判定法⁷⁾을 適用한다.

上記의 船速低下된 狀態에서 對象船舶의 操船 可能性에 關하여 檢討한 結果를 Fig.3에 표시한다. 縱軸은 $K = (\text{絶對風速}) / (\text{船速})$, 橫軸은 $(\text{水面上 船體側面 投影面積}) / (\text{舵의 側面 投影面積}) = (\text{計算例에서는 約}39)$ 로 하여 操船 가능한 限界線을 표시한 그림이다. Fig.1에서 適用한 [2], [3], [4] 海象狀態에서의 操船 可能性을 比較한 結果이며, 出力 BHP=3578(PS)의 主機를 搭載한 船舶이 靜水中에서의 船速 $F_n = 0.13$ (11.2 knt)의 速度로써 風波中을 航走하여 船速低下할 경우의 操船 可能性을 나타낸 것이 白印이다. [2]의 海象中에서는 操船 可能한 狀態로 되는 것이 判斷되지만, [3], [4]와 같이 海象이 거칠어짐에 따라 操船 不可能한 狀態로 되는 것을 알 수 있다. 이것은 正面向波 狀態의 計算 結果이지만, 船首正面 30°

정도의 범위에서는 이 값은 거의 같을 것으로 推測되어진다.

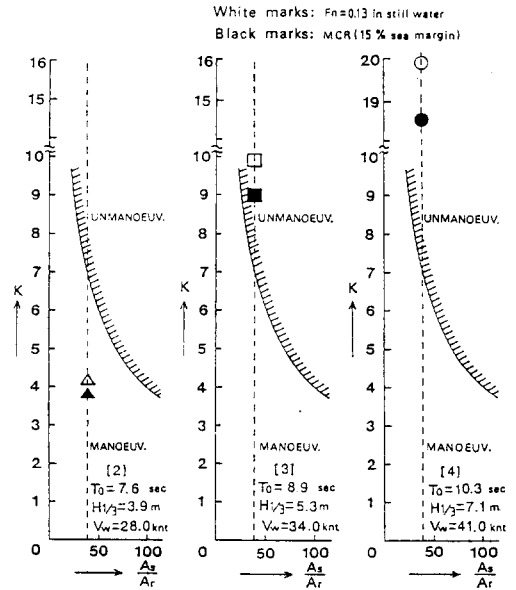


Fig.3 Manoeuvring ability at a model ship in a seaway.

이러한 狀況에 遭遇하여 操船 不可能하게 되었을 경우, 그 狀況으로부터 脱出하기 위해서는 燃料投入量을 증가시켜 主機의 回轉數를 높여 船速을 增大시켜서 操船이 可能하도록 하여야 한다. 이를 위해서는 主機의 馬力余裕가 必要하다. Fig.3의 黑印은, 같은 船舶에 Sea margin을 15%로 하여 主機를 連續最大出力(MCR)까지 작동시켜 航行한 경우의 操船 可能性을 표시한다.

海象 [3], [4]中에서는 Sea Margin 15%를 가지는 主機의 連續最大出力으로 航走하여도 操船 不可能한 狀況을 脱出할 수 없음을 알 수 있다. 이 船舶의 경우 到 操船 不可能한 狀況으로부터 脱出하기 위해서 [3]의 海象에서는 約50%의 Sea margin, [4]의 海象에서는 約200%의 Sea margin을 필요로 하는 것을 알 수 있다.

2.3 主機의 運轉 可能性

風波中을 航行하는 船舶에서 主機의 平均回轉

數와 平均토포크를 구하고, 主機 特性平面上에서 그 作動點이 어떠한 運轉領域에 位置하는가를 調査함으로써 主機의 運轉可能性을 評價할 수 있다.⁸⁾

主機의 特性平面은 橫軸에 回轉數, 縱軸에 토포크를 취하여 그 값을 서로 곱함으로써 馬力을 알 수 있게 표시한 것이며, Fig.4는 對象船舶의 主機 特性平面을 나타낸 그림이다.

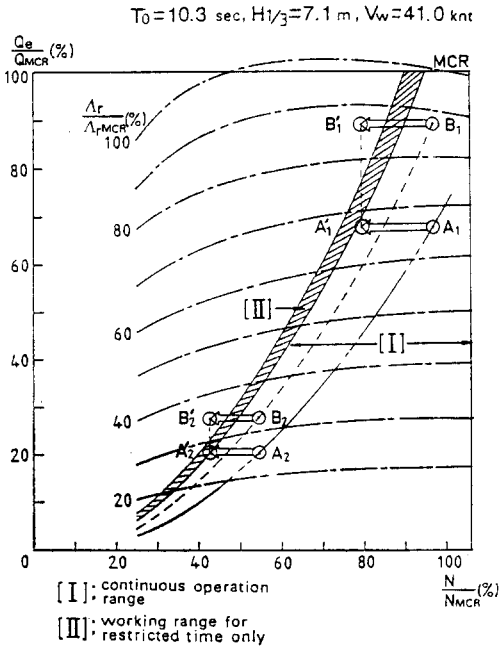


Fig. 4 Operational ability of a model main engine in a seaway.

Fig. 4에서의 一點鎖線은 1回轉당 消耗하는 燃料量에 대한 主機토포크를 나타낸 것으로 柴油기관을 適用하였다.

그림의 B₁點은 Sea margin 15%의 馬力余裕를 가지는 主機로써 靜水中을 F_n=0.13의 速度로 航行할 경우의 作動點이고, B'₁點의 海上 [4]인 狀態에서 船速低下한 경우의 主機 平均 作動點이다. B₂와 B'₂點은 같은 狀態의 海象속을 靜水中의 速度 F_n=0.07로 意識의 減速하여 航行하였을 때의 靜水中과 風波中에서의 平均 作動點이다. 이 경우, B₁ B₂의 破線은 MCR을 통하는 理論特性曲

線이다.

Fig. 4에서 [I]이라고 표시된 부분은 主機를 連續하여 運轉할 수 있는 領域으로서 平均有效壓力을 一定하게 하여 回轉數를 95%까지 내릴 수 있다. 一定의 平均有效壓力 狀態에서 回轉數를 90%까지 내린 領域을 [II]로 記入한다. 이 領域內에서의 主機 運轉은 制限된 時間內에서만 허용된 다.

以上の 內容으로 考察해 볼 때, Sea margin 15%인 경우의 風波中 作動點이 B'₁, B'₂로 되므로, 이 船舶의 主機의 平均 作動點은 短時間 制限運轉 領域 [II]의 限界를 넘는 領域에 位置하게 된다. 이것은 Sea margin 15%의 馬力余裕로써 主機를 連續 運轉하기가 不可能한 것을 意味한 다.

前述한 Fig. 3의 海象 [3]에서 對象船舶이 操船 不可能한 狀態로 부터 脱出할 수 있게 하기 위하여, Sea margin을 增加시켜 Sea margin 51.3%의 馬力余裕를 주게 되면, 靜水中에서의 主機 平均 作動點 A₁은 風波中에서의 作動點 A'₁로 移動하게 되어 連續 運轉 可能 領域 [I]에 位置하게 된다.

A₂, A'₂點은 靜水中의 速度 F_n=0.07로 意識의 減速시켜 航行할 경우의 靜水中과 風波中에서의 主機 作動點이다.

Sea margin 51.3%로 하여 MCR을 設定한 경우의 主機 特性은 Table 2에 나타내고 있는 것과 같다. 이하에서 主機의 負荷變動 등의 計算에는 Sea margin 51.3%의 馬力余裕를 가진 主機를 適用하였다.

3. 프로펠러의 負荷 變動

波浪中에 있어서의 프로펠러 變動은, 波의 粒子速度와 船體運動에 의한 프로펠러面내로의 流入速度가 변화하기 때문에 變動함과 아울러 프로펠러가 水面上에 露出됨에 따라 非線型的으로 變化한다. 沒水深度의 變化에 의하여 프로펠러가 水面上에 露出하는 것은, 프로펠러의 實効面積이 變化하여 有效直徑이 非線型的으로 變化한다고

생각할 수 있다.

이러한 관계로 부터, 프로펠러面내로의 流入速度 變動과 프러펠러의 有效直徑 變化에 의한 프로펠러의 토오크 變動을 다음과 같이 表現할 수 있다.

3.1 流入速度의 變動과 토오크의 變動

프로펠러面내로의 流入速度 變動의 船體길이 方向 成分은, 波의 粒子運動과 船體運動에 의한 것의 합으로 생각하여 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = u_0 \cos(\omega_e t + \beta) \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, 振幅 u_0 는 船尾 프로펠러 位置에서의 入射波高의 減少를 考慮한 波, 前後動搖 및 縱動搖 振幅 등으로 주어진다.⁹⁾

프로펠러의 토오크係數는 前進常數 J 의 2次式으로 近似하면¹⁰⁾, 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$K_Q = C_1 + C_2 J + C_3 J^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_0 = C_1 \rho N^2 D^5 + C_2 \rho N D^4 U + C_3 \rho D^3 U^2 \dots (4)$$

여기서, D : 프로펠러의 直徑

N : 回轉數

U : 流入速度

$$C_1 = 0.038510, C_2 = -0.022267$$

$$C_3 = -0.023904$$

(4)式으로 부터, 回轉數와 流入速度의 變動에 의한 프로펠러 토오크 變化의 微係數는 다음 式과 같이 된다.

$$P_{QN} \equiv \partial Q_0 / \partial N = \rho D^4 (2C_1 N D + C_2 U) \dots\dots (5)$$

$$P_{QU} \equiv \partial Q_0 / \partial U = \rho D^3 (C_2 N D + 2C_3 U) \dots\dots (6)$$

따라서, 프로펠러面내로의 流入速度에 의한 프로펠러 토오크의 變動은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u(t) = P_{QU} \cdot u(t) \dots\dots\dots (7)$$

3.2 有效直徑의 變化와 토오크의 變動

波浪中에서 沒水深度의 變化에 의하여 프로펠

러가 水面上에 露出한 부분 만큼의 面積을 빼어서 프로펠러의 直徑이 變하였다고 한다면, 沒水深度의 變化에 의한 프로펠러의 有效直徑은 다음과 같이 變化한다고 생각할 수 있다.

$$D_e(t) = \begin{cases} \gamma \cdot D \{ I/R(t) - A \} & ; I/R(t) \leq A \\ 0 & ; I/R(t) > A \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

$$I/R(t) = \frac{1}{R} (r_s(t) + I_0)$$

$r_s(t)$: 船尾部的 波面에 대한 相對變位

I_0 : 水位上昇을 考慮한 靜水中에서의 沒水深度

R : 프로펠러 半徑

D : 프로펠러 直徑

γ : 比例係數

(8)式의 比例係數 γ 는 文獻 15)를 참고하여 근사적으로 0.25로 하였다.

또한, A 는 프로펠러 날개 끝이 水面上으로 露出하게 되면 프로펠러의 面積이 非線型的으로 變化한다고 생각하여 그 값을 1.0으로 하였다.

프로펠러 直徑 D 의 變化에 의한 프로펠러 토오크 變化의 微係數는 (4)式으로 부터 다음 式과 같이 된다.

$$P_{QD} \equiv \partial Q_0 / \partial D = \rho D^2 (5C_1 D^2 N^2 + 4C_2 D N U + 3C_3 U^2) \dots\dots\dots (9)$$

따라서, (8), (9)式으로 부터 沒水深度에 의한 프로펠러 토오크의 變動은 다음 式과 같이 표시할 수 있다.

$$q_D(t) = \begin{cases} P_{QD} \cdot D_e(t) & ; I/R(t) \leq A \\ 0 & ; I/R(t) > A \end{cases} \dots\dots (10)$$

4. 主機의 動特性과 負荷 變動

船舶의 主機關 特性을 생각할 경우, 主機 燃燒系, 回轉運動系 및 調速機系의 3系로 나누어 取扱할 수 있다.

4.1 調速機系

프로펠러面내로의 流入速度 變動과 프로펠러 沒水深度의 變化 등에 의하여 프로펠러 토크와 回轉數가 變動하였을 때, 실린더에 공급되는 燃料을 調節하여 回轉數 變動이 적어지도록 制御하는 油壓式 調速機를 생각한다. 入力이 回轉數 變動, 出力이 燃料펌프 랙의 눈금일 경우, 그 傳達函數는 다음과 같이 된다.

$$G(s) = \frac{-K_G(1+T_I s)e^{-\delta_G s}}{\{s(1+T_I s)+K_3 T_I \xi s\}(1+T_A s)} \dots (11)$$

여기서, K_G ; 不感帶를 포함하는 比例 Gain
 T_I ; 積分時間, T_A ; 調速機의 時定數
 δ_G ; Dead time, ξ, K_3 ; 比例常數

調速機械는 (11)식에서 알 수 있는 것처럼 高次系이고 過度應答을 理論的으로 取扱하기에 難點이 있으므로, 스텝應答으로 부터 應答曲線의 反曲點에서 接線을 그어 等價時定數(T_G), 等價 Dead time(δ_G)를 구하여, 系의 傳達函數를 다음과 같이 표현하여 취급할 수 있다.

$$G(s) = \frac{-K_G e^{-\delta_G s}}{1+T_G s} \dots (12)$$

이 경우, 不感帶를 포함하는 調速機의 比例 gain은 Fig. 5에 표시하는 것과 같이 생각하였다.

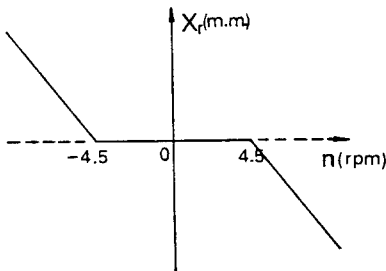


Fig. 5 Gain and dead band of engine governor

4.2 主機의 燃燒系

主機 燃燒系는 調速機의 出力인 燃料펌프 랙의 눈금을 機關의 驅動토크로 變換하는 要素로 看做할 수 있다. 이 要素는 Dead time 要素와 一次

遲延要素로써 이루어진다고 하면, 그 傳達函數는 다음과 같이 표현되어진다.

$$C(s) = \frac{K_C e^{-\delta_C s}}{1+T_C s} \dots (13)$$

여기서, K_C ; 主機 燃燒系의 gain
 T_C ; 主機 燃燒系의 時定數
 δ_C ; 主機 燃燒系의 Dead time

4.3 回轉運動系

主機의 驅動토크와 負荷토크의 差에 回轉數 變動이 일어나기 때문에, 主機의 回轉運動 方程式은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{2\pi I_M}{g} \frac{dn}{dt} = Q_e - Q_p \dots (14)$$

이 回轉運動系의 傳達函數는 다음과 같이 된다.

$$I(s) = \frac{1}{I_M s} \dots (15)$$

여기서,
 $I_M = 2\pi I_M / g$: 回轉慣性모우먼트

이 경우, 對象船舶에 裝備되어 있는 프로펠러의 回轉慣性모우먼트는 約 3.0 ton·m·sec²이다. 이것은 프로펠러만의 回轉慣性모우먼트이고, 25% 정도의 附加水, 또는 中間軸, 主機 등의 回轉慣性모우먼트를 考慮하여 프로펠러 回轉慣性모우먼트를 2배의 6.0 ton·m·sec²을 回轉運動系의 慣性모우먼트의 값으로 하였다.

5. 主機의 負荷 變動과 運動方程式

5.1 主機의 負荷 變動과 傳達函數

波浪中에 있어서 主機의 回轉數 및 토크 變動과 프로펠러 토크 變動에 관한 計算모델의 블록線圖는 上記한 主機의 動特性으로 부터 생각하면 Fig. 6과 같이 표현할 수 있다. 이 경우, 프로펠러面내로의 流入速度 變動과 프로펠러의 沒水深度 變化에 의한 主機의 回轉數 變動, 토크 變動과 프로펠러 토크 變動의 傳達函數는 다음

식과 같이 된다.

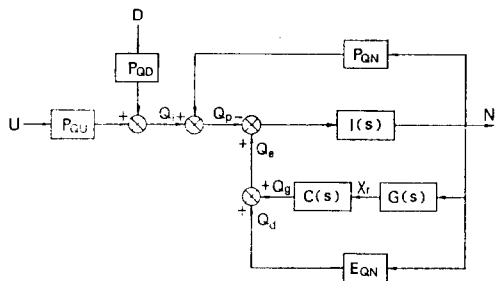


Fig. 6 Block diagram for a simulating model of the main engine and propeller load fluctuation

$$\frac{N(s)}{Q(s)} = \frac{-I(s)}{1 - I(s)G(s)C(s) - E_{QN}I(s) + P_{QN}I(s)} \dots\dots(16)$$

$$\frac{Q_e(s)}{Q(s)} = \frac{-I(s)G(s)C(s) - E_{QN}I(s)}{1 - I(s)G(s)C(s) - E_{QN}I(s) + P_{QN}I(s)} \dots\dots(17)$$

$$\frac{Q_p(s)}{Q(s)} = \frac{I(s)}{1 - I(s)G(s)C(s) - E_{QN}I(s) + P_{QN}I(s)} \dots\dots(18)$$

여기서,

$$Q(s) = P_{QU}U(s) + P_{QD}D(s)$$

E_{QN} : 回轉數 變化에 의한 主機 토오크 變化의 微係數

5.2 運動方程式

上記 (16)~(18)식에서의 調速機와 燃燒系를 포함하는 主機系 $G(s)C(s)$ 는, Fig.6의 블록線圖에서 나타내는 것과 같이 하나의 系로 생각하여 취급할 수 있다. 이 경우, 調速機와 燃燒系를 포함하는 傳達函數는 (12), (13)식으로 부터 다음과 같이 된다.

$$L(s) = G(s)C(s) = \frac{-K_e K_c e^{-(\delta_G + \delta_C)s}}{1 + (T_C + T_D)s + T_C T_C s^2} \dots\dots(19)$$

(19)식의 $T_C T_C s^2$ 項을 무시하고 傳達函數 $L(s)$ 를 等價的으로 다음 식과 같이 표현한다.

$$L(s) = \frac{-K_e e^{-\delta s}}{1 + T_e s} \dots\dots(20)$$

여기서,

$$K_e = K_C K_C, T_e = T_G + T_C, \delta = \delta_G + \delta_C$$

數值計算에는, 等價時定數 $T_e = 2.0\text{sec}$, 等價 Dead time $\delta = 0.04\text{sec}$ 인 값을 사용하였다. 主機 燃燒系의 Gain은 燃料펌프 랙의 한 눈금當 토오크로서 $K_C = 4.0(\text{ton-m})/\text{m.m.}$ 로 하였다. 調速機는 負荷 變動이 작을 때는 作動하지 않고 負荷 變動이 클 때에만 作動하도록 하여, 不感帶는 프로펠러 날개 끝이 露出할 경우의 回轉數 變動을 考慮하여 回轉數 變動 $\pm 4.5\text{rpm}$ 을, 調速機 Gain K_C 는 1.0 m.m./rpm 을 基準으로 하였다.

實船에 搭載되어 있는 主機는 토오크 一定에 가까운 性能의 디젤 機關으로 하고, 減速化와 傳達效率를 1.0으로 한다. 이 경우, (16), (17), (18)식의 傳達函數를 만족하는 主機의 回轉數 變動(m) 및 토오크 變動(q_e)와 프로펠러 토오크 變動(q_p)는 다음과 같은 非線型 微分方程式을 사용하여 數值計算으로 구할 수 있다. 이 때, 等價 Dead time(δ)의 項은 Taylor 級數展開하여, 3次 以上の 項은 微小量으로서 無視하고, 2次項까지 考慮하였다.

$$\left(I_M T_e + \frac{K_e \delta^2}{2} \right) \ddot{n}(t) + (I_M + P_{QN} T_e - K_e \delta) \dot{n}(t) + (P_{QN} + K_e) n(t) = -P_{QU} \{ T_e \dot{u}(t) + u(t) \} - P_{QD} \cdot \gamma \cdot D \begin{cases} \frac{T_e \dot{r}_a(t)}{R} + \frac{r_a(t) + I_0}{R} - A & ; L/R(t) \leq A \\ 0 & ; L/R(t) > A \end{cases} \dots\dots(21)$$

$$\left(I_M T_e + \frac{K_e \delta^2}{2} \right) \ddot{q}_e(t) + (I_M + P_{QN} T_e - K_e \delta) \dot{q}_e(t) + (P_{QN} + K_e) q_e(t) = P_{QU} \left\{ \frac{K_e \delta^2}{2} \ddot{u}(t) - K_e \delta \dot{u}(t) + K_e u(t) \right\} + P_{QD} \cdot \gamma \cdot D \begin{cases} \frac{K_e \delta^2}{2} \frac{\dot{r}_a(t)}{R} - K_e \delta \frac{\dot{r}_a(t)}{R} + K_e \left\{ \frac{r_a(t) + I_0}{R} - A \right\} & ; L/R(t) \leq A \\ 0 & ; L/R(t) > A \end{cases} \dots\dots(22)$$

$$\begin{aligned}
 & (I_M T_e + \frac{K_c \delta^2}{2}) \dot{q}_p(t) + (I_M + P_{QN} T_e - K_c \delta) \dot{q}_p(t) \\
 & + (P_{QN} + K_c) q_p(t) = -P_{QD} \left(I_M T_e + \frac{K_c \delta^2}{2} \right) \dot{u}(t) \\
 & + (I_M - K_c \delta) \dot{u}(t) + K_c u(t) \\
 & - P_{QD} \cdot \gamma \cdot D \begin{cases} \left(I_M T_e + \frac{K_c \delta^2}{2} \right) \frac{r_a(t)}{R} + (I_M - K_c \delta) \\ \times \frac{\dot{r}_a(t)}{R} + K_c \left\{ \frac{r_a(t) + I_0}{R} - A \right\} \\ \qquad \qquad \qquad ; L/R(t) \leq A \\ 0 \qquad \qquad \qquad ; L/R(t) > A \end{cases} \\
 & \dots\dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

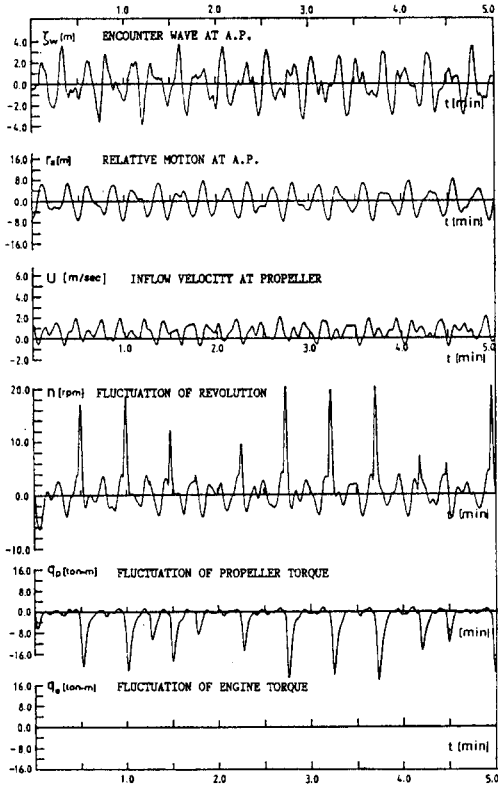
이 (21), (22), (23)식의 非線型 微分方程式을 Runge-Kutta-Gill法으로 數值計算한 結果를 5分間의 Time history로 나타낸 것이 Fig.7이다. Time history의 내용은 船尾 프로펠러 位置에서의 出會波(ξ_w)와 相對變位(r_a), 프로펠러의 流入速度 變動(u), 回轉數 變動(n), 프로펠러의 토오크 變動(q_p) 및 主機의 토오크 變動(q_e)이다.

$F_n=0.13$ in still water
 $T_0=10.3$ sec, $H_{1/3}=7.1$ m, $V_w=41.0$ knt

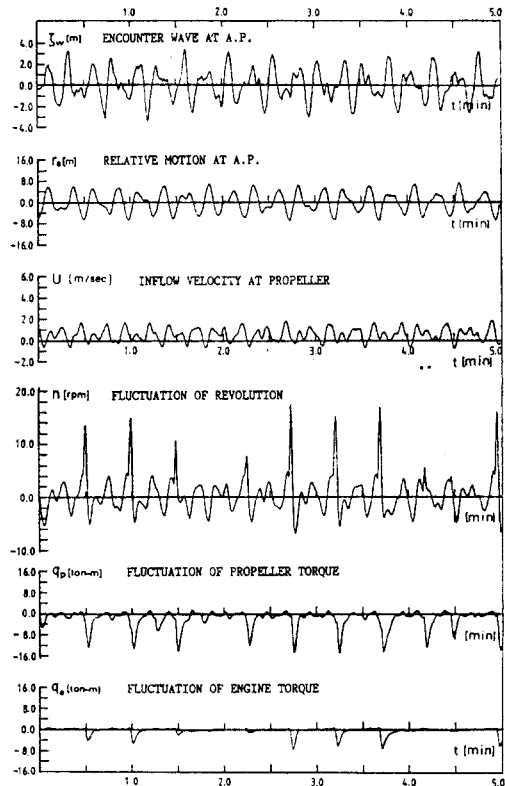
$F_n=0.13$ in still water
 $T_0=10.3$ sec, $H_{1/3}=7.1$ m, $V_w=41.0$ knt

$K_G=0.0$
 $T_e=2.0$ sec, $\delta=0.04$ sec,
 $K_C=4.0$ (ton-m)/m.m.

$K_G=1.0$ (Dead band ± 4.5 rpm)
 $T_e=2.0$ sec, $\delta=0.04$ sec,
 $K_C=4.0$ (ton-m)/m.m.



(a)



(b)

Fig.7 Time histories of the encounter wave, the relative motion at stern, the fluctuation of inflow velocity into propeller and the load fluctuation.

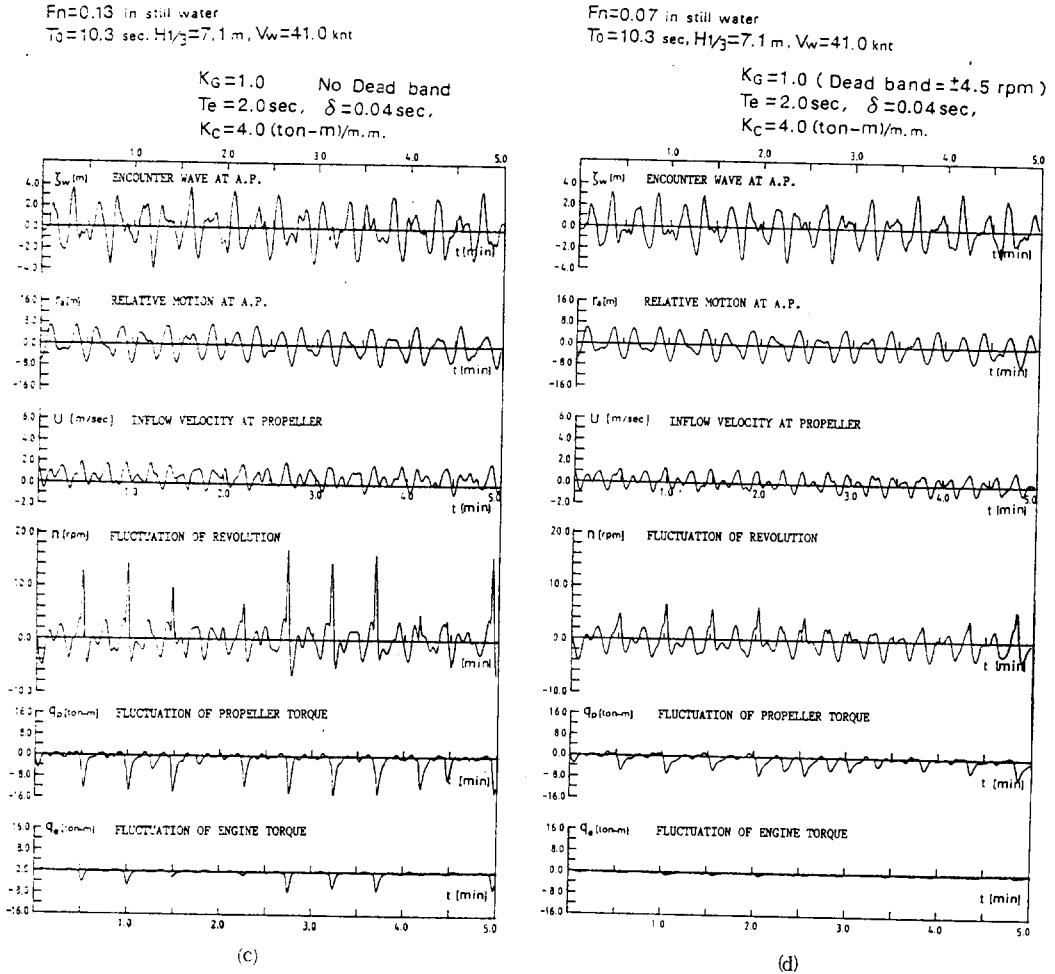


Fig. 8 Time histories of the encounter wave, the relative motion at stern, the fluctuation of inflow velocity into propeller and load fluctuation.

Fig. (a)는, 靜水中에서 船速 $F_n=0.13$ 으로, Fig. 1에서 표시한 [4]의 海象을 航走할 때의 $K_G=0.0$ 의 경우이다. 이 船速과 海象狀態에서는 프로펠러가 露出함에 따라 回轉數와 프로펠러 토오크가 크게 변하지만, 調速機 Gain이 0이기 때문에 主機의 토오크는 變動하지 않는다.

Fig. 7(b)는, Fig. (a)와 같은 船速과 海象狀態로써 調速機 Gain $K_C=1.0$, 不感帶를 ± 4.5 rpm으로 하였을 경우의 Time history이다.

Fig. 7(c)는, Fig. 7(b)와 같은 狀態에서 調速機의 不感帶가 없이 航走한 경우이다. 不感帶가 있는

경우에 비하여 回轉數 變動을 약간 더 억제하는 傾向이 있으나, 不感帶가 없으므로 해서 미치는 影響은 적다는 것을 알 수 있다. 이 結果로부터 생각하면, 不感帶가 없는 All speed governor는, 波浪中에서 主機의 非線型的인 負荷 變動을 制御하는 調速機로서 큰 效果를 얻을 수 없다는 것이 推測된다.

Fig. 7(d)는, Fig. (a)와 같은 海象中을 靜水中의 船速 $F_n=0.07$ 로써 航走할 경우이다. 船速이 느리게 되면 프로펠러面內로의 流入速度가 負로 되는 것이 頻繁해짐을 알 수 있다. 이것은 風波中에

서 船速低下한 後의 프로펠러面내로의 流入速度의 平均値보다도, 流入速度 變動의 振幅이 커지게 됨을 의미한다. 이와 같이 프로펠러에 逆流가 存在한다는 것은 船速이 낮은 狀態에서 船舶이 가지는 注目해야 할 特徵이고, 推進器系에 惡影響을 미치게 될 것이 豫想된다.

6. 負荷 變動의 主機 特性平面上에서의 評價

프로펠러 토오크와 主機 토오크가 平衡이 이루어지지 않을 때에 回轉數의 變動이 생기게 되므로, 主機의 特性平面은 프로펠러의 特性平面과 겹쳐져 표시되어진다. 따라서, 프로펠러의 回轉數와 토오크 變動을 主機의 特性平面上에 표현하면, propeller racing과 같은 非線型 現象에 대하여 主機 特性을 考慮하여 檢討할 수 있다.

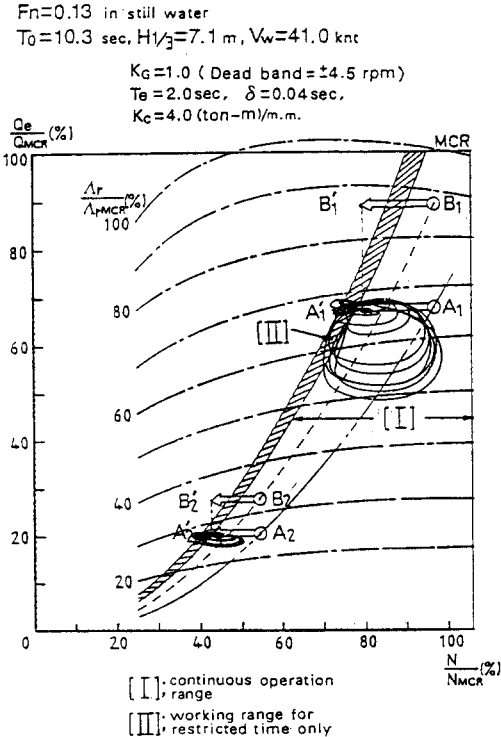


Fig. 8(a) Variation of the main engine driven point on the engine characteristics plane.

Fig. 8(a)는 Fig. 7(b)와 Fig. 7(d)의 Time history 중에서 回轉數 變動(n)과 主機의 토오크 變動(q_e)을 主機의 特性平面上에 나타낸 그림이다. 靜水中에서는 A₁, A₂點에서 作動하는 主機가, 風波中을 航走하게 되면 A'₁, A'₂點을 平均 作動點으로 하여 回轉數와 토오크가 變動하는 것을 나타낸다.

이 경우에 프로펠러의 토오크 變動(q_p)과 回轉數 變動(n)을 主機의 特性平面上에 나타낸 그림이 Fig. 8(b)이다. 靜水中의 速度 $F_n=0.13$ 으로 風波中을 航走하게 되면, 回轉數와 프로펠러 토오크는 A'₁가 平均 作動點이다. 이 때, 平均 作動點이 主機의 連續 運轉 領域에 位置하여도, 프로펠러 토오크와 回轉數가 심하게 變動하게 되면 主機의 運轉을 그대로 維持할 수 없는 狀態로 될 것이 豫測된다.

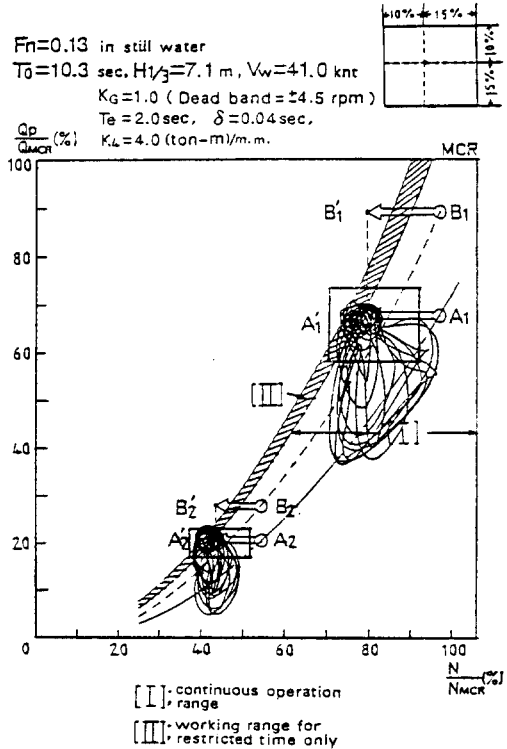


Fig. 8(b) Variation of the propeller operational point on the engine characteristics plane.

波浪中에서 프로펠러 레이싱의 發生에 대한 判斷에는 몇 가지의 見解가 있다. 즉, 프로펠러 直徑의 1/3이 水面上에 露出하는 것을 限界值로 하여 그 發生 確率로써 評價하는 方法¹³⁾, 프로펠러 날개 끝이 露出하는 것을 限界值로 하여 그 發生 確率로써 評價하는 方法¹⁴⁾, 平均 프로펠러 토오크의 25% 變動을 船速低下의 限界值로 하는 方法¹⁵⁾ 등이 있다.

프로펠러 露出에 限界를 정하여 프로펠러 레이싱 發生을 評價하는 方法은, 프로펠러의 非線型 負荷 變動을 間接的으로 評價하는 方法인데, 본래는 主機 特性을 考慮한 負荷 變動을 直接的으로 評價해야 한다. 프로펠러 露出로써 프로펠러 레이싱 發生을 評價하는 方法은 프로펠러의 平均 回轉數가 낮은 경우의 負荷 變動을 評價하는 데에는 不充分한 점이 있다. 負荷 變動은 어디까지나 프로펠러 露出, 流入速度 및 調速機를 포함한 主機 特性을 考慮하여 評價하는 것이 妥當하다.

主機의 特性을 考慮하여 구한 負荷 變動의 Time history를 조사하여 보면, 回轉數는 減少할 때 보다도 增加할 때가 크게 變動하고, 프로펠러 토오크는 增加할 때 보다도 減少할 때에 크게 變動한다.

이러한 內容을 考慮하여 本 論文에서는, 平均 回轉數의 15%를 上限值로, 平均 回轉數의 10%를 下限值로 하여, 回轉數 變動의 極值가 上限 또는 下限值를 넘는 確率을 구하여 評價하기로 한다. 또한, 프로펠러 토오크에 대해서는, 平均 토오크의 10%를 上限值로, 平均 토오크의 15%를 下限值로 하였다. 이렇게 생각하면, 프로펠러 토오크 變動과 回轉數 變動의 主機 特性平面上에서의 限界領域은, Fig. 8(b)에서 平均 作動點 주위를 實線으로 둘러싼 四角의 領域으로 된다.

回轉數 變動(n)과 프로펠러 토오크 變動(q_p)은 非線型的으로 變化하기 때문에 그 瞬時值는 正規 分布로 되지 않을 것이 豫想된다. 이것을 확인하기 위하여, Fig. 7(b)의 Time history로 부터 標準 偏差를 구하고 正規 分布 確率密度를 計算하여, Histogram과 비교한 것을 Fig. 9에 나타낸다.

Fig. 9에서 實線으로 표시한 것이 n 과 q_p 의 正規 分布 確率密度函數이나, Histogram이 正規 分布

에 맞이지 않음을 알 수 있다.

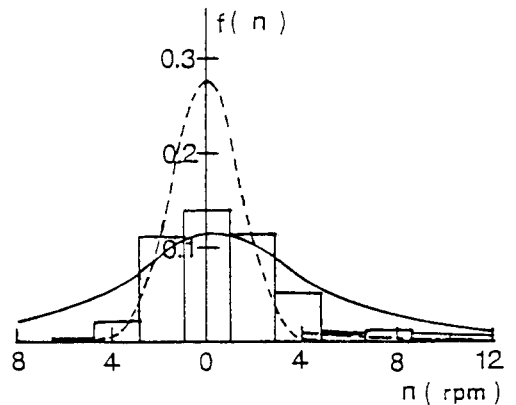


Fig. 9(a) Comparison between the approximated probability density function and the histogram of revolution fluctuation.

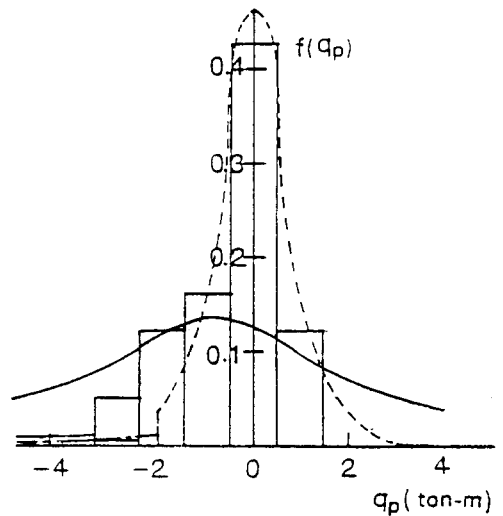


Fig. 9(b) Comparison between the approximated probability density function and the histogram of propeller torque fluctuation.

Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이, 프로펠러 토오크 變動과 回轉數 變動의 原因은 프로펠러面내로의 流入速度의 變動과 沒水深度의 變化이므로,

回轉數 變動(n)과 프로펠러 토오크 變動(q_p)에 대하여 流入速度(u)만이 관계하는 경우와 船尾의 相對變位(r_a)만이 관계하는 경우로 나누어 그 相關關係를 調査하기로 한다.

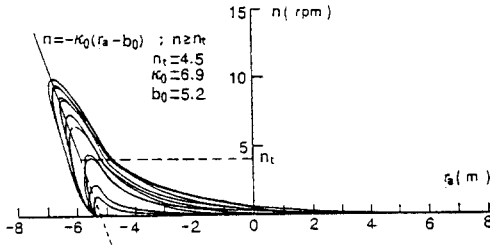


Fig. 10(a) Approximated relation between the relative motion at stern and fluctuation of revolution.

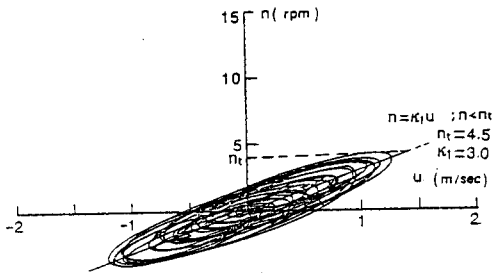


Fig. 10(b) Approximated relation between the fluctuation of inflow velocity into propeller and the fluctuation of revolution.

Fig. 10은 Time history로 부터 프로펠러의 날개 끝이 露出할 때($r_a = -5.21m$)의 回轉數 變動 n_t 는 4.0 rpm을 기준으로 하여, 回轉數 變動(n), 流入速度 變動(u)과 船尾 프로펠러 位置에서의 相對變位(r_a)와의 相關을 나누어 표시한 그림이다. 이 경우, 變動이 狹帶域인 것이라고 하면, 各 變動의 標準偏差와 相關係數로 부터 그림에서 直線으로 近似的으로 관계지을 수 있다.¹⁶⁾ 이때, 確率過程 $u(t)$ 와 $r_a(t)$ 는 正規分布를 하고, 그 平均値가 0이라고 하면, 變數 變換에 의한 確率密度函數

變換 定理^{17),18)}를 이용하면, 다음과 같이 回轉數 變動의 確率密度函數를 近似的으로 表現할 수 있다.

(i) $n \geq n_t$

$$n = -\kappa_0(r_a - b_0) \equiv g(r_a)$$

$$f_N(n) = \frac{f_{r_a}(r_a)}{|g'(r_a)|} = \frac{1}{|\kappa_0|} \cdot \frac{1}{\sigma_{r_a}\sqrt{2\pi}}$$

$$\times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{r_a}^2}\left(-\frac{n}{\kappa_0} + b_0\right)^2\right\}$$

..... (24)

(ii) $n < n_t$

$$n = \kappa_1 u = g(u)$$

$$f_N(n) = \frac{f_u(u)}{|g'(u)|} = \frac{1}{|\kappa_1|} \cdot \frac{1}{\sigma_u\sqrt{2\pi}}$$

$$\times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_u^2}\left(\frac{n}{\kappa_1}\right)^2\right\}$$

..... (25)

이렇게 하여, 回轉數 變動과 프로펠러 토오크 變動의 瞬時値에 관한 確率密度函數를 近似的으로 구하여 나타낸 것이 Fig. 9의 破線이고, 變動이 큰 범위에서는 Histogram과 잘 맞아진다. 이것은 프로펠러 토오크 變動에도 같은 생각 방법을 적용할 수 있다.

이상과 같은 방법으로 부터, 回轉數 變動(n)과 프로펠러 토오크 變動(q_p)의 極値가 Fig. 8(b)의 4 각으로 둘러싸인 變動値의 限界領域을 넘을 確率을 구하여, 船速의 變化에 의한 確率의 變化를 나타낸 것이 Fig. 11(a)이다. 이 경우, 프로펠러 直徑의 1/3이 露出할 確率[7]과 프로펠러 날개 끝이 露出할 確率[8]을 구하여 비교하여 보았다. 이 計算 結果를 考察하여 보면, 回轉數 變動이 上限値를 넘을 確率[2]은 船速이 變化하여도 그다지 變化하지 않지만, 低速域에서의 確率が 조금 높아진다. 回轉數 變動이 下限値보다 작아질 確率은 船速이 빠를 때는 거의 0이지만, 低速으로 되면 조금 높아지는 傾向이 있다. 프로펠러 토오크 變動이 下限値보다 작아질 確率[4]은 低速이 되면

약간 높아진다. 토오크 變動이 上限値를 넘을 確率[5]은 船速이 빠를 때의 거의 0이지만, 低速으로 되면 상당히 높아짐을 알 수 있다.

回轉數 變動(n)과 프로펠러 토오크 變動(q_p)이 上限 또는 下限値를 초과하는 確率이 [3], [6]이고, 低速으로 됨에 따라 프로펠러 토오크 變動이 上限 또 下限値를 초과하는 [6]쪽이 크게 변화하는 것이 注目된다.

Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)보다 海象이 조용해졌을 경우이며, 船速이 빠를 때의 確率이 거의 0이나, 船速이 낮은 부분에서 프로펠러 토오크 變動이 上限 또는 下限値를 넘는 確率은 커지게 된다.

調速機의 特性이 프로펠러의 負荷 變動에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 調速機의 不感帶, Gain(K_G), 等價時定數(T_e)와 等價 Dead time(δ)의 값을 變化시켜서 프로펠러 토오크 變動과 回轉數 變動이 限界値를 넘는 確率을 計算하여 比較한 그림이 Fig. 12~15이다.

전반적으로, 船速이 느린 경우 보다도 船速이 빠른 경우에 調速機 特性이 커지게 되는 傾向을 보이고 있다. 不感帶가 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 보면, 不感帶가 없는 경우가 토오크 變動보다도 回轉數 變動을 작게하는 것을 알 수 있다. 調速機의 Gain, 等價時定數와 Dead time 중에서 負荷 變動에 비교적 크게 영향을 주는 것은 Gain과 時定數인 것이 指摘되어진다. 이 計算 結果로 부터, 靜水中에서의 速度 $F_n=0.13(11.2\text{knt})$ 로써 航走할 경우를 基準할 경우, Gain $K_G=1.00 \text{ m. m./rpm}$ 인 쪽이 0.5 m.m./rpm 에 비하여 7% 정도, 調速機가 없을 때($K_G=0.0$)에 비하여 11% 정도 回轉數 變動을 적게하는 효과가 있음을 알 수 있다.

時定數의 경우는, $T_e=2.0 \text{ sec}$ 를 그 반인 $T_e=1.0 \text{ sec}$ 로 하면 8% 정도 回轉數 變動을 작게하는 효과가 있음을 알 수 있다.

$T_0=10.3 \text{ sec}, H_{1/3}=7.1 \text{ m}, V_w=41.0 \text{ knt}$
 $K_G=1.0$ (Dead band= $\pm 4.5 \text{ rpm}$)
 $T_e=2.0 \text{ sec}, \delta=0.04 \text{ sec},$
 $K_L=4.0 \text{ (ton-m)/m.m.}$

$T_0=8.9 \text{ sec}, H_{1/3}=5.3 \text{ m}, V_w=34.0 \text{ knt}$

$K_G=1.0$ (Dead band= $\pm 4.5 \text{ rpm}$)
 $T_e=2.0 \text{ sec}, \delta=0.04 \text{ sec},$
 $K_L=4.0 \text{ (ton-m)/m.m.}$

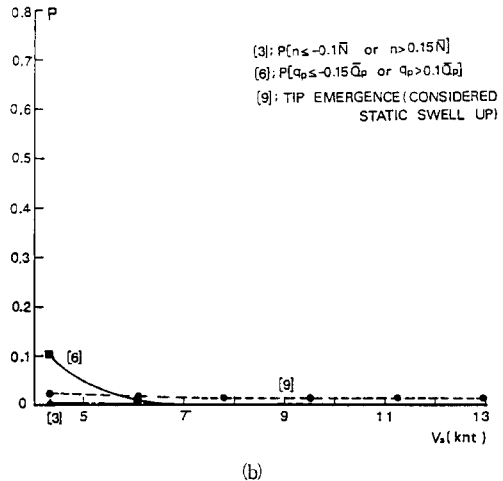
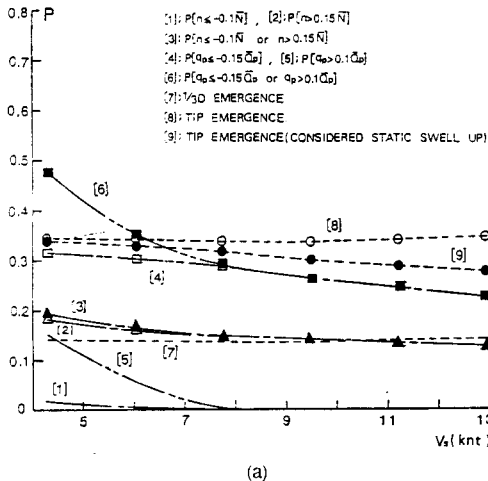


Fig. 11 Comparison between the probability of propeller emergence and the probability to exceed the critical values of the propeller load fluctuation.

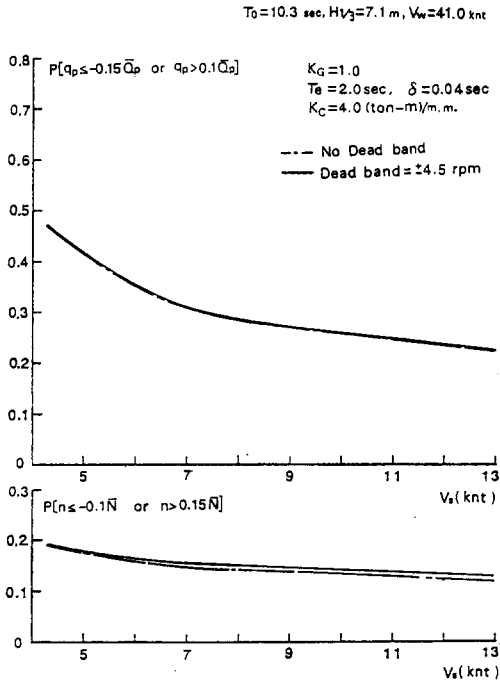


Fig. 12 Effect of dead band on the propeller load fluctuation.

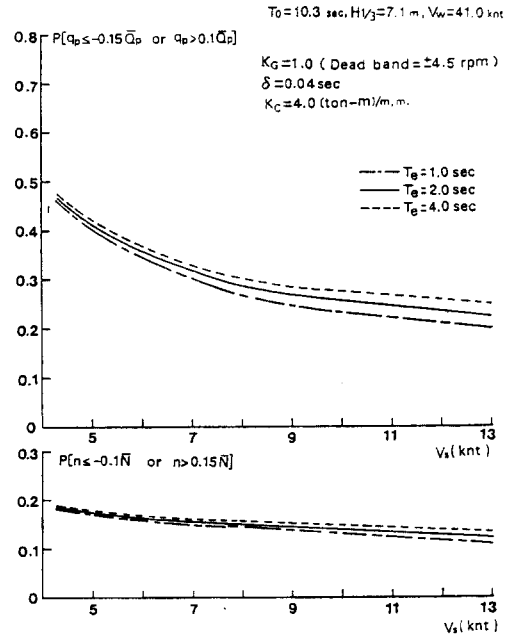


Fig. 14 Effect of the equivalent time constant on the propeller load fluctuation.

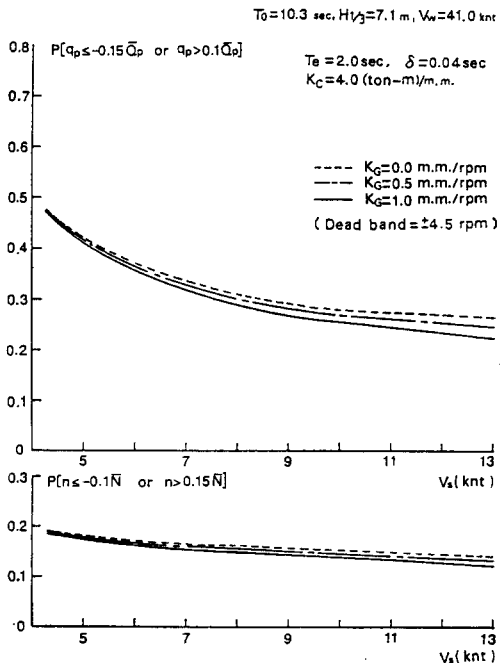


Fig. 13 Effect of governor gain on the propeller load fluctuation.

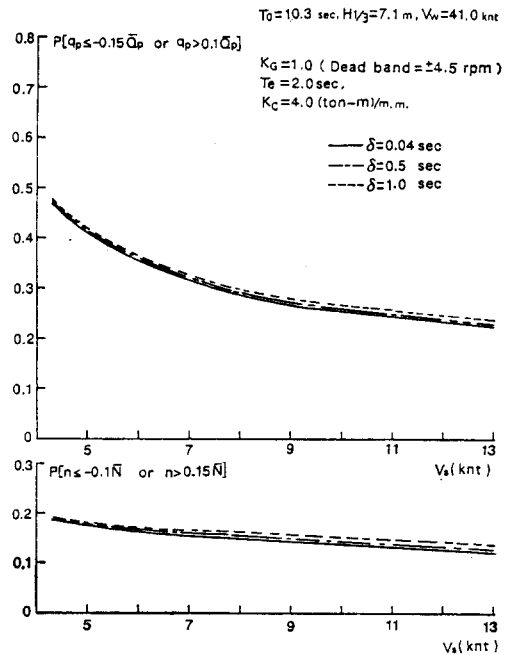


Fig. 15 Effect of the equivalent time delay on the propeller load fluctuation.

7. 結論

風波中에서의 航海能力 및 推進性能의 評價에 關하여 遂行한 本 研究의 結論을 다음과 같이 要約할 수 있다.

(1) 低速狀態의 船舶은 風波中에서 船速低下率이 高速時보다 커지게 되므로 荒天의 海象에서 操船 不可能狀態에 이르게 된다. 이 경우 Sea margin 15% 程度의 馬力余裕으로써는 最大出力으로 航走하여도 操船 不能인 狀況의 危險으로 부터 離脫하는 것이 不可能해진다. 그러므로, 船型과 海象狀態를 考慮한 Sea margin設定과 馬力余裕의 確保가 必要함을 알 수 있다.

(2) 非線型的인 特性을 考慮한 프로펠러의 負荷變動을 구하여 主機의 特性平面上에서 檢討 分析 하므로써, 프로펠러의 回轉數와 토오크 變動의 極值가 限界値를 超過하는 確率으로써 負荷變動을 評價하는 方法을 提示하였고, 從來의 方法에 의한 프로펠러 發生 確率을 比較 評價할 수 있게 하였다.

(3) 調速機 特性이 負荷變動에 미치는 影響에 대하여 評價한 結果, 負荷變動을 抑制하기 위해 서는 各 要素중에서 Gain과 等價時定數가 비교적 크게 作用함을 파악할 수 있다.

參考文獻

- 1) 金順甲：船舶의 波浪中 耐航性能評價에 關한 研究, 韓國航海會誌, 第11卷, 第1號, 1987. 3, p. 67.
- 2) J. Gerritsma & W. Beukelman : Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, I. S. P., Vol. 19, No. 217, Sept, 1972, p. 285.
- 3) 藤井 齊, 高橋 雄：肥大船의 波浪中抵抗增加 推定法에 關する 實驗的 研究, 日本造船學會論文集, 第137號, 昭50. 6, p. 132.
- 4) 內藤 林, 中村彰一, 原 正一：波浪中における 船速低下의 推定法에 關する 研究, 日本造船學會論文集, 第146號, 昭54. 12, p. 147.
- 5) 中村彰一：風, 波浪及び操舵による馬力增加, 肥大船의 推進性能에 關するシンポジウム, 日本造船學會, 昭50. 5, p. X-1.
- 6) R. Tassaki : Discussion on the Seakeeping Committee Report, Proc. 12th ITTC, 1969, p. 738.
- 7) 井上正祐, 石橋賢論：操縱性에 對する風의 影響(III), 西部造船會々報, 第46號, 昭48, p. 1.
- 8) A. シッフ：船舶主機의 開發動向-出力率의 増大-, 日本船舶機關學會誌, 第11卷, 第6號, 昭51. 6, p. 47.
- 9) 中村彰一, 內藤 林, 井上隆一：波浪中におけるプロペラ單獨特性と負荷變動について, 關西造船協會誌, 第159號, 昭50. 12, p. 41.
- 10) 中村彰一, 內藤 林：波浪中における船速低下及び推進性能について, 關西造船協會誌, 第166號, 昭52. 9, p. 25.
- 11) 高橋利衛：内燃機關의 調速について (その1), 日本機械學會誌, 第62卷, 第483號, 昭34. 4, p. 73.
- 12) 關西造船協會編：造船設計便覽 (第4版), 昭58, p. 398.
- 13) 福田淳一：バルクキャリアー의 脚荷吃水設定法, 西部造船會々報, 第33號, 昭42. 2, p. 197.
- 14) 北澤考宗, 黑井昌明, 高木又男：コンテナ船의 波浪中での限界速度, 日本造船學會論文集, 第138號, 昭50. 12, p. 269.
- 15) G. Aertssen : Service Performance and Seakeeping Trials on M. V. Jordaens, Trans. R. I. N. A., Vol. 18, 1966, 10, p. 305.
- 16) 中村彰一, 內藤 林：コンテナ船의 輕荷狀態における波浪中推進性能について, 關西造船協會誌, 第173號, 昭54. 6, p. 67.
- 17) 中村彰一, 內藤 林, 古金谷圭三：不規則波中における吸收波浪パワーについて, 關西造船協會誌, 第185號, 昭57. 6, p. 79.
- 18) アタナシス・パポリス：工學のための應用確率論(基礎編), 東海大學出版會 (平岡憲二他譯), p. 122.

附 錄

本 論文의 數值시뮬레이션에 사용한 對象船舶

에 적용한 主機의 馬力(BHP)에 대한 單位時間 · 單位馬力당 燃料消耗量을 Fig. 16(a)에, 單位時間 當 燃料消耗量을 Fig. 16(b)에 나타낸다.

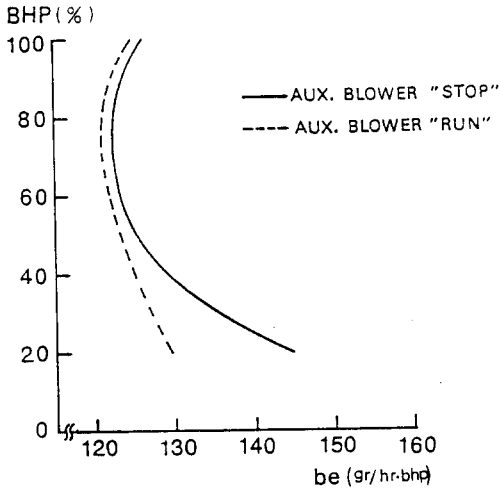


Fig. 16(a) Fuel oil consumption (g/hr · PS) of the engine.

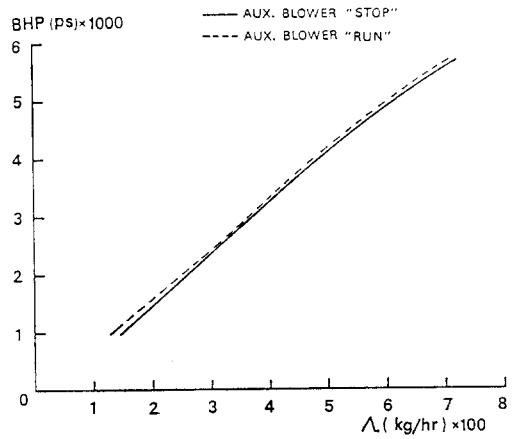


Fig. 16(b) Fuel oil consumption (kg/hr) of the engine.