

操縱性指數에 의한 衝突回避動作의
量的 把握에 關한 研究

尹 点 東*

**A Study on the Quantative Analysis of a Ship's Collision Avoiding
Action by Using the Maneuvering Indices**

YUN Jum Dong

Abstract

The Maneuvering Indices of a ship are the values that decide the quantity of her motion in turning when her rudder is turned over to an angle to the starboard or the port.

They consist of two kinds of indices, one of which is called index K and the other, index T . Index K decides a ship's turning ability and index T does the length of time delay of a normal turning motion after her rudder has finished the turn of an ordered angle. Generally, the values of the indices are calculated through some mathematic formulas with figures of her heading degrees recorded at a fixed time intervals during her Z test.

The values of the same kind index of a ship appear differently according to the ship's speed, trim, rudder angle and loaded condition, etc.

In this paper, the author analyzed all the mathematic formulas required to calculate the values of the indices in their forming process and examined them from the point of mathematics and dynamics and also actually figured out the values of maneuvering indices of the M. S. "HANBADA", the training ship of Korea Merchant Marine College through her Z test.

The author supposed a case in which two same typed ships as the "HANBADA" in size, shape and conditions were approaching each other in meeting end on situation and each ship turned her rudder hard over to the starboard respectively when they approached to the distance of 3 times as long as the ship's length.

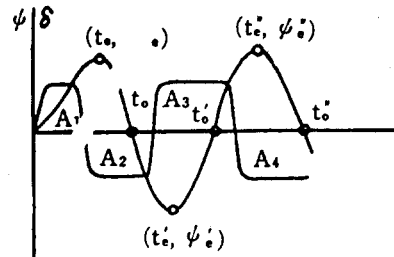
*正會員, 韓國海洋大學

The author worked out mathematic formulas calculating forward and transverse ship's motions within the above mentioned situation for the quantitative analysis of the collision avoiding action to certify whether they are in collision status or not.

Applying the calculated values of the maneuvering indices of the "HANBADA" to the motion calculating formulas, the author found out the two ships were passing over each other with the clearing distance of 39 m between their port quarters. With the above mentioned examinations and explanations, the author demonstrated that a ship's motion in any collision avoiding action can be shown with quantities of time and distance within reliable limit.

記 號 說 明

- M : 船體質量
- M_x, M_y : 附加質量
- u : x 軸方向速度
- v : y 軸方向速度
- I_z : Z 軸에 對한 慣性能率
- i_z : 附加慣性能率
- ψ : 角變位置量
- N : 旋回moment
- K : 旋回性指數
- T : 追從性指數
- δ : 舵角
- t_1 : 一定舵角을 잡는데 要하는 時間
- ω : 舵角周波數
- $A_{(\omega)}$: 振幅比
- $\phi_{(\omega)}$: 位相角
- L : 船體의 全長
- B : 全幅
- t_c : 轉舵後 衝突이 일어날때까지의 時間
- V : 船速
- t : 秒單位의 經過時間
- $S. h$: 船首方位
- δ : 舵角誤差
- D : Depth Moulded



$A_1, \sim A_4$: δ 曲線과 time軸이 만드는 各 梯形의 面積

$A_1, \sim A''_o$: $t=0$ 로 부터 시작하며 $t_e, t'_e, t''_e, t_o, t'_o, t''_o$ 의 各點까지 δ 曲線과 t 軸이 만드는 面積

단, δ 曲線과 t 軸이 만드는 面積은 完全한 梯形으로 可처서 近似積分을 한다.

I. 序 論

船體의 運動性能中 特히重要視되는 操縱性能이란 舵角을 주었을 때 船體가 어떠한 回頭運動을 하는가 하는 것으로, 從來에는 最大舵角을 주었을 때 船體가 이루는 航跡에만 注目하여 旋回圈(Turning circle)을 그리고 이것을 縱距(Advance), 旋回徑(Tactical diameter) 및 最終旋回徑(Final diameter) 등으로 分解하여 이들 數値를 圖面에 記入하는 方法으로 한 船體의 操縱性能을 表示하였다.

이렇게 操縱性能을 表示하는것은 오래된 習慣이며, 旋回徑과 縱距가 한船體의 操縱性能을 表示하는 尺度로써 大端히 重要性을 지닌 것은 옛날이나 지금이나 變함이 없다. 그러나 旋回圈만을 가지고 한船體의 操縱性能을 表示하는 時代는 지나버린것 같다. 외나하면 첫째로 1950年代以後에 經濟的인 側面에서 船體의 大型化가 要求되었고 船體의 大型化가 進行됨에 따라 船體의 強度 및 可航水域問題 때문에 L/B가 적어지고 B/D는 커지게 되었으며 이것들이 船體의 方向安定성과 旋回성에 雜多한 影響을 주게 되어 操船者는 旋回圈만을 가지고는 한 船體의 操縱性能을 推察할 수 없게 되었으며¹⁾, 둘째로, 大小雜多한 船舶의 往來가 甚할 오늘날의 狹水道, 航路, 港界 및 港內에서 船舶相互間의 衝突을 避하면서 올바른 進路로의 進入 또는 離脫을 效果的으로 遂行하기 위하여서는 操船者는 自己가 命令하여 일어나는 船體運動을 定量的으로 把握할 必要가 있고, 이러한 定量的인 船體運動의 推察은 旋回圈에서 얻을 수 있는 資料만을 가지고는 不可能하기 때문이다. 具體的인 例를들면 一定舵角을 주었을때 船體가 곧 回頭할 것인지 與否 및 所期의 針路에 進入할 때 까지에 要하는 時間과 空間的인 量等은 旋回圈에 의한 資料만으로는 잘 알 수 없다. 이러한 觀點에서 보면 오늘날에도 如前히 實施하고 있는 旋回圈만에 의한 操縱性能의 表示方法은 適切한 것이 되지 못하며, 이것에 追加하여 船體運動을 定量的으로 推察할 수 있는 資料를 提供하지 않으면 안될 것이다.

이렇게 하기위하여는 一定舵角을 주었을때 일어나는 船體의 運動過程을 舵角에 對한 어떤 傳達特性에 의하여 把握할 必要가 있다. 船體運動이 이러한 傳達特性으로 把握되기 위하여는 舵角에 對應하는 船體의 運動過程이 微分方程式 또는 이것을 Laplace 變換한 傳達函數의 形式으로 表現되어야 하고 船體의 操縱性能을 表示하는 量이 微分方程式이나 傳達函數의 係數 또는 이것과 密接한 關係가 있는 數値로 表示되는 것이 바람직 하다.⁵⁾¹¹⁾ 이러한 操縱性能의 表現方法이 日本, 美國, 英國等 先進造船國家의 學者들에 의하여 最近 15餘年동안 活潑하게 研究되어 왔고 오늘날은 그 表現方法의 基礎가 거의 完成段階에 이른것 같다. 그러나 이러한 研究結果를 船舶相互間의 衝突豫防에 適用하는 데 關한 研究는 거의 없는 狀態이며 있다고 하더라도 別로 實用性이 없는 數式的誘導뿐인 것 같다.

이 論文의 目的은 이들 研究結果를 確認하여 이것을 船舶相互間의 衝突豫防에 利用하는 方法을 提案하는데 있다.

本論文에서는 船體의 操縱性能을 表示하는 指數의 算出過程을 力學 및 數學的인 側面에서 考察하여 이들 指數의 算出式이 理論的인 妥當性을 가졌는지 確認하였고 이들 指數를 利用하여 2 船體의 서로 마주오며 航行中 規則에 따른 回避動作을 取하였을 때 생기는 船體의 前進方向 및 橫方向의 移動距離를 算出하는 數式을 만들었다. 韓國海洋大學 練習船 “단바다”호를 利用하여 實船試驗을 行하고 操縱性指數를 算出하였으며 위에서 얻은 操縱性指數를 移動距離를 算出하는 數式에 代入하고 衝突誘發與否를 判別하는 數值計算을 行하여 船體運動을 量的으로 把握할 수 있음을 表示하였다.

Ⅰ. 理論的인 考察

1. 運動方程式에 對한 考察

$$\left. \begin{aligned} (M+M_x)u &= (M+M_y)\dot{\psi}v + X \\ (M+M_y)\dot{v} &= -(M+M_x)\dot{\psi}u + Y \\ (I_z + i_z)\dot{\psi} &= N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

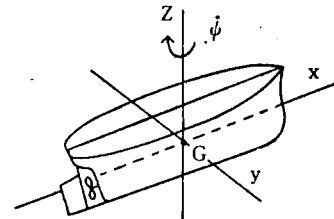


그림 1

操船에 隨伴하여 생기는 前進力의 變動은 通常의 操船에서는 적은 것은 아니지만 그림 2에서 볼수 있는바와 같이 u 의 變化는 正橫方向의 힘 및 回頭 Moment 를 誘發하지 아니하므로 操船運動에 關與하는 程度는 二次的²⁾⁵⁾인 것으로 볼수 있다고 생각된다.

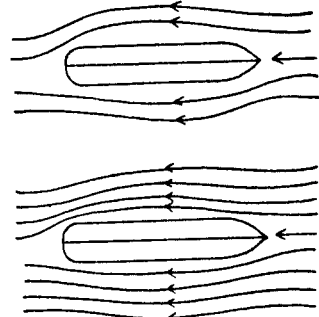


그림 2

따라서 둘째 및 셋째式을 無次元化하여 船體運動에 關한 微分方程式을 만들면 다음과 같다.

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\psi}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\psi}}{dt} + \dot{\psi} = K \cdot \delta + K T_3 \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式을 Laplace 變換하여 傳達函數를 求하면

$$\frac{\dot{\psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \dots\dots\dots (3) \quad \text{단, 初期値는 모두 零}$$

$$(3) 式을 |ω|가 작은 範圍에서 近似化하면 \frac{\dot{\psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{1 + T s} \dots\dots\dots (4)$$

로 되고 $T = T_1 + T_2 - T_3$ 가 된다. 따라서 運動方程式은

$$T \frac{d\dot{\psi}}{dt} + \dot{\psi} = K \delta \dots\dots\dots (5) \quad \text{로 表示할 수 있다.}$$

式(5)에서 보는바와 같이 K 와 T 는 船體運動을 決定짓는 要素로 된다. K 는 一定舵角을 줄

때 旋回角速도의 크기를 決定하는 要素로 旋回性指數라 부르고 T 는 一定舵角을 준後 船體가 곧 따라 回頭하는가 않는가를 決定하는 要素로 追從性指數라 부른다.²⁾⁶⁾

操舵運動을 大別하면

$$\left. \begin{array}{l} \textcircled{1} 0 \leq t \leq t_1, \quad \delta(t) = \frac{\delta_0}{t_1} t \\ \textcircled{2} t_1 < t \quad \delta(t) = \delta_0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(6) \text{와 같 } | \text{ 된다.}$$

(6) 式의 各境遇에 對하여 (5)式에서 $\psi(t)$ 를 求하여 보면,
 $0 \leq t \leq t_1$ 일 때에는

$$\psi(t) = \frac{K \cdot \delta_0}{t_1} \left[\frac{t^2}{2} - Tt + T^2(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right] \dots\dots\dots(7) \text{注}^{1)}$$

$t_1 < t$ 일 때에는

$$\psi(t) = K \cdot \delta_0 \left[t - \left(T + \frac{t_1}{2} \right) + \frac{T^2}{t_1} (e^{-\frac{t_1}{T}} - 1) e^{-\frac{t}{T}} \right] \dots\dots\dots(8) \text{注}^{2)}$$

와 같이 된다.

2. 船舶의 操舵角周波數에 對한 檢討

正弦入力에 對한 理論을 援用하여 一般船舶의 實際操船時의 操舵角周波數에 對한 近似運動方程式의 精度를 檢討하여 보면 다음과 같다.²⁾⁷⁾

正弦操舵는 $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ 로 表示되고 이것을 (3)式에 代入하면 다음과 같다.

$$\psi_s(t) = A_{(\omega)} \delta_0 \sin(\omega t + \phi_{(\omega)}) \dots\dots\dots(9)$$

단, $\psi_s(t)$: 時間이 經過한 後의 $\psi(t)$

$$A_{(\omega)} = \left| \frac{K(1+j\omega T_3)}{(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_2)} \right| = K \sqrt{\frac{1+\omega^2 T_3^2}{1+(T_1^2+T_2^2)\omega^2+T_1^2 T_2^2 \omega^4}}$$

$$\phi_{(\omega)} = \text{Arg} \frac{K(1+j\omega T_3)}{(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_2)} = -\tan^{-1} \frac{(T_1+T_2-T_3)\omega+T_1 T_2 T_3 \omega^3}{1-(T_1 T_2 - T_2 T_3 - T_3 T_1)\omega^2}$$

그림 3은 $\log A_{(\omega)}$, $\phi_{(\omega)}$ 를 $\log \omega$ 에 對하여 表示한 Bode 曲線으로 實線은 近似化하지 않은 運動方程式, 鎖線은 近似化한 運動方程式에 對한 값을 表示한다.

法規에서 要求하는 操舵速度는 船舶의 大小를 莫論하고 Hard over에서 Hard over로 操舵하는 데 28¹⁾⁸⁾秒 以內의 時間에서 하도록 要求하고 있다.

一般的으로 船舶에서 내리는 操舵口令詞는 Port or Starboard easy, Port or Starboard 및 Hard port or Hard starboard의 3種으로 區分되고 약간의 度數差는 있지만 操舵角을 口令詞에 準하여 分類하면 10°, 20°, 35°로 區分할 수 있다. 35°배의 操舵를 船舶設備規程 第3編 第2章 操舵設備規則에서 要求하는 時間인 28秒걸러서 Hard over에서 Hard over까지 한다고 假定하고 10° 및 20° 操舵에 對한 時間을 比例計算하여 이에 對한 ω 및 $\log \omega$ 를 數值로 表示하면 表1과 같다.

操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的把握에 關한 研究

表 1 操舵角 및 角周波數

操舵角	時 間	ω	$\log \omega$
35°	28초	0.11	-2.21
20°	16"	0.20	-1.61
10°	8"	0.39	-0.94

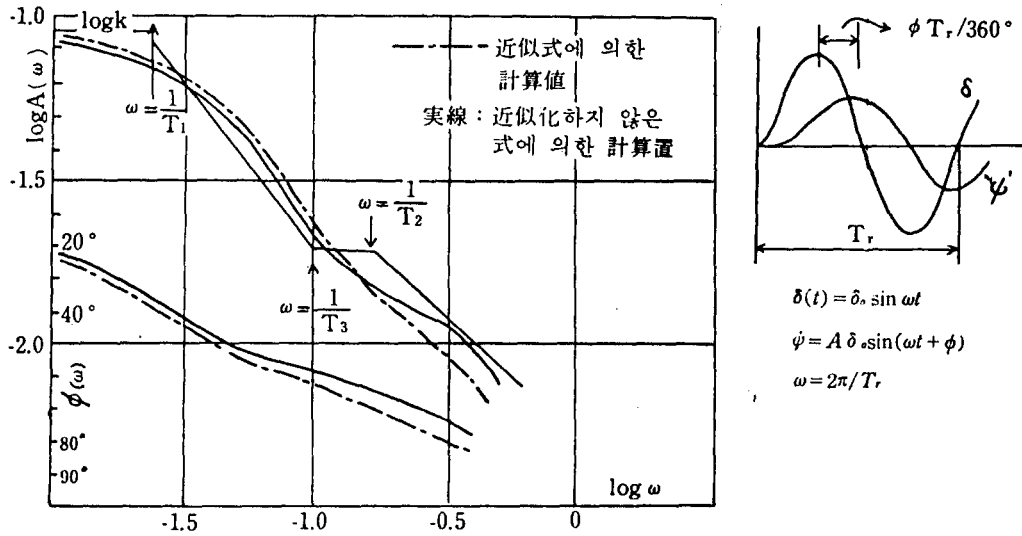


그림 3 正弦操舵에 對한 船體의 應答²⁾

表1의 값은 그림 3의 實線과 鎖線이 完全히 一致하는 範圍內에 있고 實際操船에 있어서 操縱 運動方程式의 近似式을 使用하여도 전혀 支障이 없을것으로 判斷된다.

3. 衝突回避動作에 對한 操縱性指數의 適用

(1) 國際海上衝突豫防規則上의 避航動作檢討¹⁾

相互 衝突의 危險을 안고 接近하는 船舶들이 取하여야 할 避航動作에 對하여는 現行國際海上 衝突豫防規則 第17條부터 第24條사이에 規定되어 있지만 規則條文의 精神은 各船이 充分한 時間과 距離를 두고 避航動作에 들어가는 것을 原則으로 하고 있으며 極限狀態에 있어서의 衝突 回避動作은 例外로 取扱하고 있다. 또 이들 各條文에서는 避航船이 取하여야 할 具體的인 動作에 對하여는 明白한 言及이 없다.

船體의 動作이 차지하는 時間과 距離를 量的으로 分析하려는 本論文에서는 衝突危險을 갖는 兩船이 共히 明白한 一定動作을 取하여 줄것을 規則에서 要求하고 또한 操船者의 常識으로 當然히 그렇게 回避動作을 取할수 밖에 다른 道理가 없는것으로 期待되는 解釋을 내릴수 있는 規

定內容을 담은 條文을 찾아야 한다. 그러한 內容을 갖인 條文에서 規則이 要求하는 動作을 取할 수 있는 距離를 매우 嚴하게 設定하고, 그러한 條件下에서 要求하는 回避動作을 滿足하게 取할 수 있는지 確認하기 위하여 船體의 運動을 時間 및 距離로써 表示하여야 한다.

前述한 條件을 滿足할만한 內容을 담은 條文은 規則 第19條이고, 이것은 Meeting end on 時에 兩船이 共히 取하여야 할 回避動作을 同一하게 規定하고 있다.

(2) 數式案出 및 指數適用

數式을 簡單히 處理하고 問題解決을 明快하게 보여주기 위하여 接近하는 兩船舶은 同型, 同條件이라고 假定한다.

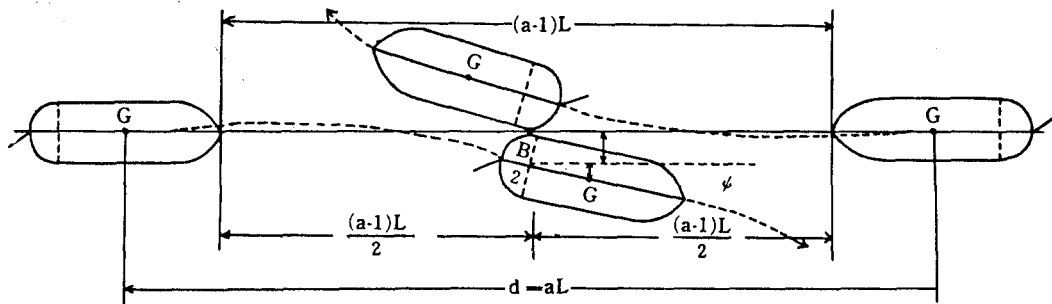


그림 4

서로 마주보는 兩船이 船體길이 L의 a배가 되는 地點에서 相對方을 初認하고 各己¹²⁾ Hard starboard하여 右回頭하였다고 假定하자. 이때 만약에 衝突을 避할 수 없었다고 하면 aL의 中央 aL/2가 되는 곳이 衝突地點이 될 것이다. t_c를 轉舵後 衝突이 일어날때까지 要하는 時間이라고 하면 이러한 境遇에는 다음식이 成立한다.

$$\int_0^{t_c} V \cos \phi dt = aL/2 + (L/2 - B/2) \cos \phi \dots\dots\dots (10)$$

$$\int_0^{t_c} V \sin \phi dt \leq B/2 + (L/2 - B/2) \sin \phi \dots\dots\dots (11)$$

φ는 작은 角이므로 cos φ ≃ 1 sin φ ≃ φ라 놓고 式을 處理하면 다음과 같다.

(10)式에서 $\left[Vt \right]_0^{t_c} = (a+1)L/2 - B/2$

$$\therefore t_c = \frac{(a+1)L - B}{2V} \dots\dots\dots (12)$$

(11)式에서

操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的把握에 關한 研究

$$\int_0^{t_c} V\psi dt \leq B/2 + (L/2 - B/2)\phi \text{ 이것을 고쳐서 쓰면,}$$

$$\int_0^{t_c} V\psi dt - (L/2 - B/2)\phi = B/2x \dots\dots\dots(13)$$

(13)式에서 $x \leq 1$ 이면 衝突이 있고 $x > 1$ 이면 衝突은 일어나지 아니한다.

$$\phi(t) = K\delta_0 \left\{ t - (T + t_1/2) + e^{-\frac{t}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) T^2/t_1 \right\} \text{이므로 이것을}$$

(13)式에 代入하면 다음과 같다.

$$\int_0^{t_c} VK\delta_0 \left\{ t - (T + t_1/2) + e^{-\frac{t}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) T^2/t_1 \right\} dt - (L/2 - B/2) \phi = B/2x$$

위의 積分項만을 處理하여 보면,

$$VK\delta_0 \int_0^{t_c} \left\{ t - (T + t_1/2) + e^{-\frac{t}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) T^2/t_1 \right\} dt$$

$$= VK\delta_0 \left[t^2/2 - (T + t_1/2)t - T^2/t_1 e^{-\frac{t}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) \right]_0^{t_c}$$

$$= VK\delta_0 \left\{ t_c^2/2 - (T + t_1/2)t_c - T^2/t_1 e^{-\frac{t_c}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) + T^2/t_1 (e^{-\frac{t_1}{T}} - 1) \right\} \text{가 된다.}$$

$$C_1 = V \cdot K \cdot \delta_0 \left\{ t_c^2/2 - (T + t_1/2)t_c - T^2/t_1 e^{-\frac{t_c}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) + T^2/t_1 (e^{-\frac{t_1}{T}} - 1) \right\}$$

$$C_2 = \frac{L - B}{2} \cdot \phi \left. \dots\dots\dots(14) \right\}$$

라고 하면

$$\frac{2(C_1 - C_2)}{B} = x \dots\dots\dots(15)$$

(15)式에서 $x > 1$ 이면 衝突은 일어나지 아니한다.

(3) 限界接近距離의 設定

船舶이 正常旋回로 들어갈때까지 必要로 하는 時間은 追從性指數 T 와 操舵에 要하는 時間의 半인 $t_1/2$ 을 合한 $T + t_1/2$ 의 時間이어야 하므로, 이 동안 船舶이 前進하는 距離는 $V(T + t_1/2)$ 미터가 된다.

兩船이 正常旋回로 들어갈때까지의 前方進出距離는 서로 마주보며 衝突의 危險을 안고 接近하는 船舶에 있어서는 매우 重要的 意味를 가지며 "한바다"號의 境遇를 例로 들어 前方進出距離를 計算하여 보면 $V(T + t_1/2) \approx 7 \times 13 = 91m$, 約 $1L$ 의 距離가 된다. 따라서 이러한 境遇에 兩船이 $2L$ 의 距離를 두고 衝突回避動作을 取하며 衝突은 避할 수 없게된다.

衝突로 생긴 海難에 對한 審判關係의 記錄¹⁴⁾을 調査한 資料를 보면 兩船間의 接近距離가 $3L$

에 接近될때까지 避航措置를 取하지 아니한 船舶間의 衝突事故가 第一 많은 것으로 나타나 있다. 따라서 本 論文에서도 兩船間의 限界接近距離를 3L로 하여 數值計算을 하여보고자 한다.

IV. 實船에 의한 Z試驗 및 操縱性指數算出

“한바다”號에 의한 實船試驗은 1976年 1月 21日 울산 앞바다에서 行하였으며 地形的인 條件과 부근 海域의 漁船 및 漁網分布狀態等의 制約을 받아 不得已 右舷方向橫風을 받으며 試驗針路를 잡았다.

1. “한바다”號의 要目 및 條件

(1) 要目(表 2와 같음)

(表 2)

L. O. A	B. Md	D. Md	F. L. d	Disp. (F)	G/T	C _b	M. E.	Speed	R. P. M (4/4)	A/Lxd
98m	14.5	9.5	5.1	4,230톤	3492	0.576	3,800H. P.	16.6	230	1/49.3

(2) 本船狀態 및 氣象條件(表3과 같음)

(表 3)

Fd	Ad	Disp	視 程	風 向	風 力	海面狀態
3-05m	5-60	3450톤	良好	240~250°	4 (6m/sec)	4

2. 試驗方法 및 結果

(1) 試驗方法^{9) 16)}

本試驗을 위하여 “한바다”號에서 2名の 教育教官과 4名の 實習生을 動員하였다. 實習生4名中, 1名은 Stop Watch를 가지고 Zero time으로 부터 5秒간격으로 時間을 읽도록 하였으며, 2名은 各 time에 맞추어 미리 마련된 用紙에 船首方位를 記錄토록 하였으며 1名은 Course recorder에 配置하였다. 教官 2名中 1名은 船首方位와 操舵角을 比較하여 δ_0 와 ϕ 角이 같아질때 信號를 하면서 主要時點의 ϕ, δ_0 및 time을 記錄토록 하였으며, 1名은 信號에 따라서 操舵命令을 하도록 하였다. 各組의 team work가 잘 되는지 事前練習을 實施한 後에 指揮者인 筆者의 總體的인 監視下에 最大操舵¹⁶⁾角速度로 本格的인 試驗을 實施하였다.

(2) 試驗結果

(a) 10° Z test(Speed: 13kt 相對風向: 右舷 40~50° Co. :200° 右舷처음)

操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的把握에 關한 研究

(表 4)

t:	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
S.h:		201	202	204	206	208	210	213	213	212	210	206	204	200
t:	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
S.h:	197.5	195	192	189	186	185	185	186	188	190	191	193	195	198
t:	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	203	完了
S.h:	200	202	204	208	210.5	212	213	212	208	206	205	202	200	
主要時點 時 量	t ₁ 5	t ₂ 35	t ₃ 42.5	t ₄ 45	t ₅ 70	t ₆ 88	t ₇ 98	t ₈ 102.5	t ₉ 145	t ₁₀ 164	t ₁₁ 174	t ₁₂ 175	t ₁₃ 203	

(위의 數值에 對하여는 그림 10參照)

(b) 20° Z test(諸般條件 10° test 때와 같음 Co. 180° 좌현처음)

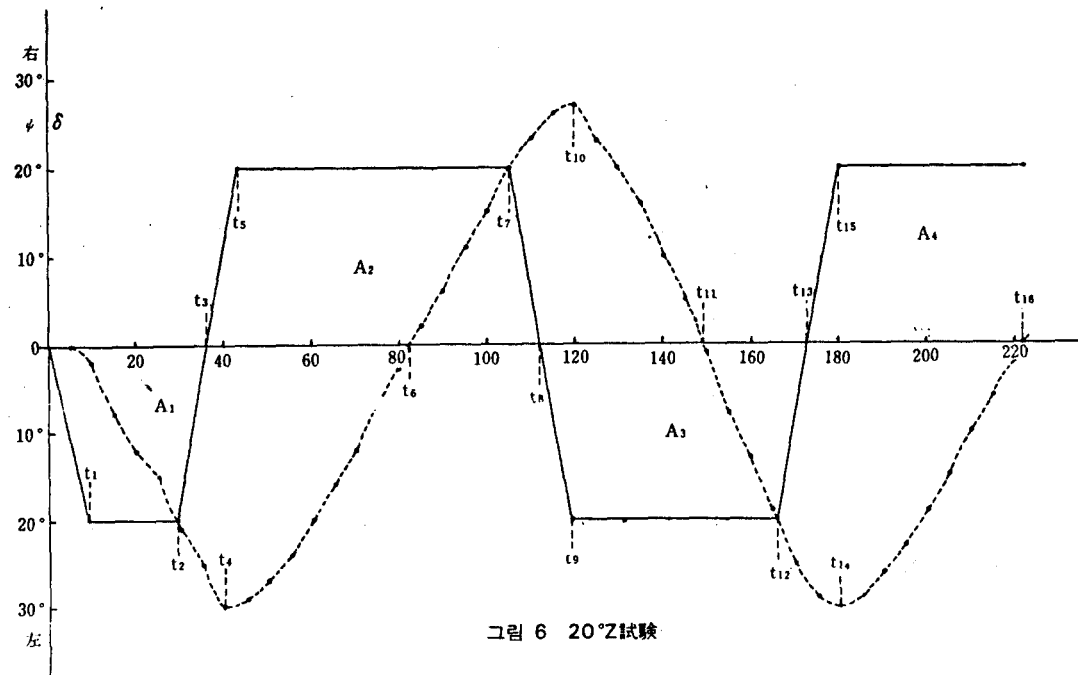
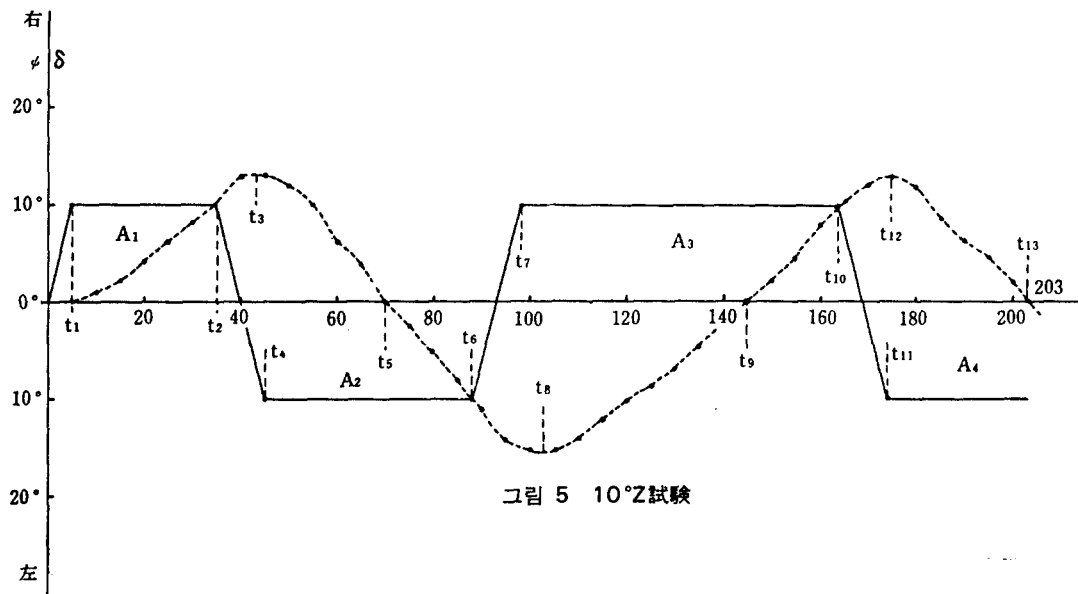
(表 5)

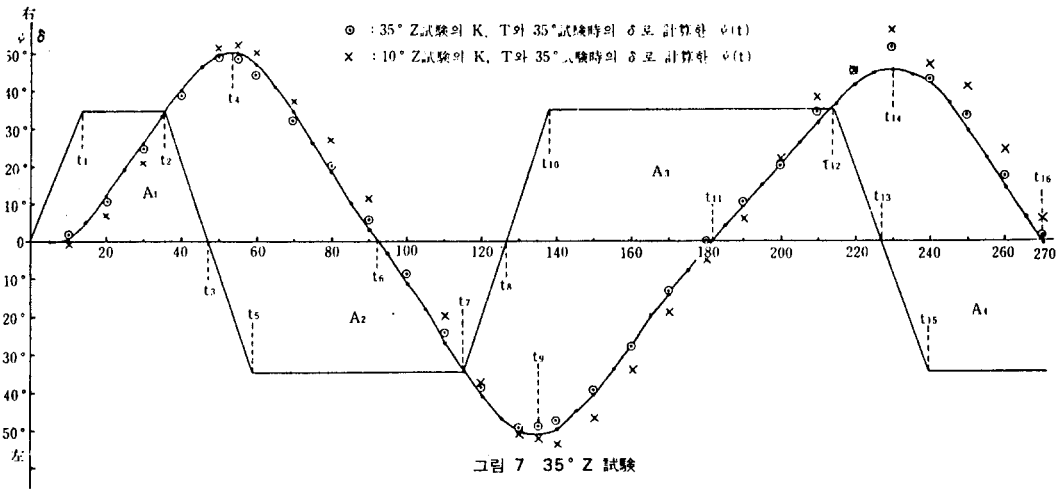
t:	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
S.h:	180	178	172	168	165	159	155	150	151	153	156	160	164	168
t:	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
S.h:	173	177	182	186	191	195	200	203	206	207	203	200	196	190
t:	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
S.h:	185	179	172	167	161	155	151	150	151	154	157	161	165	170
t:	215	220	222	完了	主要時點	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	
S.h:	174	178	200		時 量	9	29	36	40	43	82.5	105	112	
	t ₉	t ₁₀	t ₁₁	t ₁₂	t ₁₃	t ₁₄	t ₁₅	t ₁₆						
	119	120	149.5	166	173	180	180	222						

(c). 35° Z test(諸般條件 10° 때와 같음 Co. 180° 右舷처음)

(表 6)

t:	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
S.h:	180	181	185	192	199	206	213	220	226	229	230	227	221	215		
t:	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140		
S.h:	206	199	190	183	177	167	162	153	146	139	133	130	129	130		
t:	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210		
S.h:	135	139	146	152	160	165	172	177	184	189	195	200	206	211		
t:	215	220	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	完了			
S.h:	216	221	226	230	226	222	216	209	202	194	186	179				
主要時點 時 量	t ₁ 13	t ₂ 36	t ₃ 48	t ₄ 55	t ₅ 59	t ₆ 92	t ₇ 115	t ₈ 127	t ₉ 135	t ₁₀ 138	t ₁₁ 181	t ₁₂ 214	t ₁₃ 226	t ₁₄ 230	t ₁₅ 239	t ₁₆ 269





3. 旋回性指數 K 및 追從性指數 T 의 數值計算

(1) $10^\circ Z$ test ($A_1 \sim A^1, A_2 \sim A''$ 等의 面積은 梯形의 面積計算 方法에 의하여 算出함)

$$A_2 = \frac{40+30}{2} \times 10 - \frac{5 \times 5}{2} = 337.5$$

$$A_2' = A_1 - \frac{53+43}{2} \times 10 + \frac{9.5+4.5}{2} \times 10 = -60$$

$$A_2'' = A_1 - A_2 + \frac{76+66}{2} \times 10 - \frac{6+1}{2} \times 10 = 545$$

$$A_3 = A_1 - \frac{30+25}{2} \times 10 = 75$$

$$A_3' = A_1 - A_2 + \frac{52+47}{2} \times 10 = 365$$

$$A_3'' = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{34+29}{2} \times 10 = 265$$

$$13 = K \cdot \delta_r \times 42.5 + 337.5K \dots\dots\dots ①$$

$$-15 = K \cdot \delta_r \times 102.5 - 60K \dots\dots\dots ②$$

$$13 = K \cdot \delta_r \times 175 + 545K \dots\dots\dots ③$$

② 및 ③式에서 $K_1 \doteq 0.06$ $\delta_r \doteq -1.9$ ①式에서 $K_2 \doteq 0.03$

$\therefore K \doteq 0.045$ $\delta_r \doteq -1.9$

$$T_1 \left(-\frac{5}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 70 + 75K \dots\dots\dots ④$$

$$T_2 \left(\frac{4.5}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 145 + 365K \dots\dots\dots ⑤$$

$$T_1 \left(-\frac{4}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 203 + 265K \dots\dots\dots ⑥$$

④, ⑤, ⑥式에서 $T \doteq 10$

$\therefore K \doteq 0.045/\text{sec}$

$T \doteq 10\text{sec}$

(2) 20° Ztest

$$A_r = \frac{-(36+20)}{2} \times 20 + \frac{4 \times 13}{2} = -534$$

$$A'_r = -A_1 + \frac{76+62}{2} \times 20 - \frac{8+1}{2} \times 20 = 730$$

$$A''_r = -A_1 + A_2 - \frac{61+47}{2} \times 20 + \frac{7 \times 20}{2} = -190$$

$$A_o = -A_1 + \frac{46.5+39.5}{2} \times 20 = 300$$

$$A'_o = -A_1 + A_2 - \frac{49+42}{2} \times 20 = 140$$

$$A''_o = -A_1 + A_2 - A_3 + \frac{49+42}{2} \times 20 = 650$$

$$-30 = K \cdot \delta_r \times 40 - 534K \dots\dots\dots ①$$

$$27 = K \cdot \delta_r \times 120 + 730K \dots\dots\dots ②$$

$$-30 = K \cdot \delta_r \times 180 - 190K \dots\dots\dots ③$$

10° 때와 같은 方法으로 $K_1 \doteq 0.055$ $\delta_r \doteq -2$

$$T_1 \left(\frac{8}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 82.5 + 300K \dots\dots\dots ④$$

$$-T_2 \left(\frac{10}{8} \right) = K \cdot \delta_r \times 149.5 + 140K \dots\dots\dots ⑤$$

$$T(1) = K \cdot \delta_r \times 222 + 650K \dots\dots\dots ⑥$$

④, ⑤, ⑥에서 $T \doteq 9$

$\therefore K \doteq 0.055/\text{sec}$

$T \doteq 9\text{sec}$

(3) 35° Z test

$$A_r = \frac{48+23}{2} \times 35 + \frac{7 \times 23}{2} = 1162$$

$$A'_r = A_1 - \frac{79+56}{2} \times 35 + \frac{8 \times 15}{2} = -1060$$

$$A''_r = A_1 - A_2 + \frac{99+76}{2} \times 35 - \frac{4 \times 9}{2} = 1924.5$$

$$A_o = A_1 - \frac{44+33}{2} \times 35 = -105$$

操縱性指數에 의한 衡突回避動作의 量的把握에 관한 研究

$$A'_0 = A_1 - A_2 + \frac{54+43}{2} \times 35 = 577.5$$

$$A''_0 = A_1 - A_2 + A_3 + \frac{44+31}{2} \times 35 = 630$$

$$50 = K \cdot \delta_r \times 55 + 1162K \dots\dots\dots ①$$

$$-51 = K \cdot \delta_r \times 135 - 1060K \dots\dots\dots ②$$

$$45 = K \cdot \delta_r \times 230 + 1924.5K \dots\dots\dots ③$$

①, ②, ③式에서 $K=0.042$

$$\delta_r = -2.8$$

$$T_1 \left(-\frac{16}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 92 - 105K \dots\dots\dots ④$$

$$T_2 \left(\frac{25}{20} \right) = K \cdot \delta_r \times 181 + 578K \dots\dots\dots ⑤$$

$$T^3 \left(-\frac{14}{10} \right) = K \cdot \delta_r \times 269 + 630K \dots\dots\dots ⑥$$

④, ⑤, ⑥式에서 $T \doteq 6$

$$K \doteq 0.042/\text{sec}$$

$$T \doteq 6\text{sec}$$

(4) 旋回性指數 K 와 追從性指數 T 의 無次元化表示^{2) 14)} K 및 T 를 各各 $K' = K \times L/V$, $T' = T \times V/L$ 로 하여 無次元化하면 表7과 같다.

表 7

10° Z test				20° Ztest				35° Ztest			
K	T	K'	T'	K	T	K'	T'	K	T	K'	T'
0.045	10	0.66	0.68	0.055	9	0.80	0.61	0.042	6	0.61	0.41

4. $\psi(t)$ 值의 理論的인 計算

試驗에서 얻은 K 및 T 와 實際使用한 舵角 δ 를 가지고 $T \cdot \frac{d\psi}{dt} + \psi = K \cdot \delta$ 式에 의하여 $\psi(t)$ 의 理論的인 計算을 하면 表 8 및 9와 같이 된다.

(1) 35° Z test에서 얻은 K 및 T 와 35° Z試驗의 $\delta(t)$ 에 의한 計算值

表 8

$t(\text{초}):$	10	20	30	40	50	55	60	70	80	90	100	110	120	130	135
$\psi(t)$ 度:	1.5	11	25	38.4	48.7	48	44	32	20	5.7	-9	-24.2	-39	-49.8	-49
$t:$	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	
$\psi(t):$	-48	-39.8	-28	-13.3	0	10	20	34	45	51.7	42.1	32.9	17	1.5	

(2) 10° Z test에서 얻은 K 및 T와 35° Z試驗의 $\delta(t)$ 에 의한 計算值

表 9

$t(\text{초}):$	10	20	30	40	50	55	60	70	80	90	100	110	120	130	135
$\phi(t)$ 度:	-0.5	7	21	38	50.5	52	50	36.6	27	11	-4	-20	-30	-51	-52
$t:$	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	
$\phi(t):$	-54	-47	-34	-19	-5	6	21	38	45	56	46.5	41	24	6	

위의 計算值는 風壓影響을 修正한 값임.

5. 衝突回避動作의 數值計算

一般的으로 緊急時 衝突回避動作을 取할때에는 最大舵¹¹⁾角을 使用하므로 35°에서의 K, T指數를 式(12), (14) (15)에 代入하여 마주보는 境遇의 避航動作의 量을 把握할 수 있을 것이다.

“한바다”號의 境遇를 例로 들어 數值計算을 하여 보면 다음과 같다.

表 19 各要素의 값

要素	a	B	δ_0	K	T	t_1	ϕ	L	V
크 기	4	15	0.6	0.042	6	13	0.58	98	6.7

式(12)에 의하여 $t_c \doteq 35\text{sec}$

式(14)에 의하여 $C_1 \doteq 51\text{m}$ $C_2 \doteq 24\text{m}$

式(15)에 의하여 $x \doteq 3.6$

한隻이 轉舵하여 B/2의 3.6배이므로 兩船이 共히 動作을 取하면 7.2배의 距離가 있게 되는데 이것을 m로 換算하면 $7.2 \times 7.5 = 54\text{m}$ 가 된다. 轉舵로 因하여 轉舵 反對方向으로 생기는 船體重心의 原針路離脫 橫移動距離는 大略 L/100 程度이므로 無視할 수 있으나 船幅은 減하여 주어 야 한다. 따라서 $54 - 15 = 39\text{m}$ 가 된다. 即 兩船의 船尾 quarter 間의 航過距離는 39m가 된다. 實際操船에 있어서는 兩船間에 생기는 流體力學的인 相互作用을 考慮하여야 하므로 위와 같은 計算距離가 나온다고 할지라도 船首間의 接近距離가 4L가 되면 衝突이 急迫한것으로 判斷하여 嚴重한 警戒을 하여야 할 것이다.

IV. 試驗結課에 對한 考察

1. 氣象條件이 試驗에 미치는 影響

一般的으로 風力3 및 海面狀態3까지는 Z試驗에 큰 影響을 주지 아니하는 것으로 생각¹²⁾하고 있다. 大略의 K 및 T값을 計算하는데는 그렇게 생각할 수 있으나, 正確을 期하려고 할때에는 氣象條件의 影響이 試驗結果에 크게 介入하여 들어옴을 금번 試驗의 結果를 가지고 $\phi(t)$ 의 理

操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的把握에 關한 研究

論的인 計算을 하면서 새로히 알았다. $35^\circ Z$ 試驗에서 比較的 바람의 影響을 적게 받았던 前半部分에서는 試驗에서 얻은 $\psi(t)$ 값과 試驗結果를 가지고 理論的으로 計算한 $\psi(t)$ 의 값이 잘 一致하고 있으나, 바람의 影響을 많이 받았던 後半部分은 이것들이 잘 一致하지 아니하고 있다.

그 原因은 試驗中에는 계속하여 船首方位가 變化하므로 風向 및 風速이 一定하더라도 相對風向 및 風速이 계속 하여 바뀌고, 이것들이 δ_r 값에 影響을 주어 δ_r 를 變化시키고 이것을 不確實하게 하는데 原因이 있다고 判斷하였다. 이러한 點에서는 海潮流의 影響도 마찬가지로 생각된다.

따라서 이러한 影響을 最小로 줄이기 위하여는 正船首에서 바람 또는 海潮流를 받도록 試驗 針路를 잡아서 이들의 影響이 서로 相殺되도록 試圖하여야 할 것이다. 금번의 試驗에서도 이것을 事前에 豫想하였으나 前述한 여러가지 制約 때문에 그렇게 하지 못하였다. 可能하면 風力2以下인 平穩한 날씨에 海潮流의 影響이 적은 조용한 海面을 擇하여 試驗을 實施하는 것이 좋을 것이다.

2. 試驗船의 狀態

금번 實船試驗에서 “한바다”號의 K 값이 筆者가 豫想하였던 것보다는 약간 적게 나왔는데 그것은 1.5m 定度の Trim by the stern에 原因이 있는 것으로 判斷된다. 길이 100m 程度의 船舶에서 1.5m 程度의 Trim by the stern은 우리 航海者들이 別로 꺼리지 않는 狀態이나 이런 種類의 試驗을 行할 때에는 可能하면 Even keel 狀態로 하는 것이 좋을 것 같다.

3. 實船操舵角周波數

前進全速으로 航走하면서 操舵手에게 最大舵角速度¹⁰⁾로 操舵를 하도록 命令하고 그에 要하는 時間을 調査하여 본 結果 10° 舵角을 잡는데 5秒, 20° 는 9秒, 35° 는 13秒가 걸렸다. 이들의 操舵速度는 大略 規則¹¹⁾에 合致되고 있으며 操舵角周波數는 大略 $w_1 \doteq 0.3$, $w_2 \doteq 0.17$, $w_3 \doteq 0.12$ 이므로 $\log w \doteq -1.2$, $\log w_2 \doteq -1.77$, $\log w_3 \doteq -2.12$ 로써 그림 3의 實線과 鎖線이 完全히 一致하는 範圍內에 있음을 알 수 있다.

4. 舵角에 對한 舵效率

K 값이 일단 올라갔다가 내려가는 現象은 舵角에 對한 舵效率問題로 舵壓係數¹⁰⁾와 比較檢討하면 合當한 解釋이 可能하다.

V. 結 論

以上과 같이 操縱性指數를 船舶間의 衝突回避動作에 適用시키는 方法을 研究檢討한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 同一船이 같은條件下에서 小舵角과 大舵角에 對하여 Z 試驗을 行하고 操縱性指數를 算出한 값을 比較하여 보면 旋回性指數 K 값의 變化는 크지 아니하나 追從性指 T 값의 變化는 크다.

따라서 緊急時大舵¹²⁾ 角으로 回頭할때의 回避動作의 數值計算은 大舵角에 對한 操縱性 試驗을 實施하여 거기서 算出되는 操縱性 指數를 利用하는 것이 正確하다.

2. 本方法에 의하여 正確한 操縱性指數가 算出되면 船體의 여러가지 動作에 對하여 이들을 適用시킬 수 있는 數式을 만들어서 船體運動에 對한 數值計算을 行할 수 있고 感覺에 의한 操船을 排除하여 갈 수 있다.

3. 船舶이 相當한 速力으로 航走하면서 船首方向 橫風을 받을 때에는 恒常 船首가 風上側으로 向하리 한다는 一般操船原則은, 금번 試驗을 通하여 그렇지 않을 수도 있다는 것을 알았다. 이것은 水面上에 露出된 船體의 受風面積과 크게 關係가 있는 問題로 앞으로 더욱 研究檢討되어야 할 것으로 생각 된다.

附 錄

數式에 對한 注

注1) $T \frac{d\dot{\psi}}{dt} + \dot{\psi} = K \cdot \frac{\delta_o}{t_1} \cdot t$

$$\dot{\psi}(t) = \frac{K \cdot \delta_o}{t_1 T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \left\{ \frac{1}{1/T + s} \right\} = \frac{K \cdot \delta_o}{t_1 T} (T^2 e^{-\frac{t}{T}} - T^2 + Tt) = \frac{K \cdot \delta_o}{t_1} (T e^{-\frac{t}{T}} - T + t)$$

$$\therefore \psi(t) = \frac{K \cdot \delta_o}{t_1} \left\{ \frac{t^2}{2} - Tt + T^2(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right\}$$

注2) $e_i(t) = \frac{\delta_o}{t_1} \cdot t \cdot U(t) - \frac{\delta_o}{t_1} \cdot t \cdot u(t-t_1)$

$$\therefore \phi(t) = \frac{K \cdot \delta_o}{t_1} \left\{ \frac{t^2}{2} - Tt + T^2(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right\} - \frac{K \cdot \delta_o}{t_1} \left\{ \frac{(t-t_1)^2}{2} - T(t-t_1) + T^2(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T}}) \right\}$$

$$= K \cdot \delta_o \left\{ t - (T + \frac{t_1}{2}) + \frac{T^2}{t_1} (e^{\frac{t}{T}} - 1) e^{-\frac{t}{T}} \right\}$$

參 考 文 獻

1. 藤田 齊: "船의 方向安定性에 對하여", 日本造船學會誌, 514號 (1972. 4), p. 26~27.
2. 野本謙作: "船의 操縱性", 日本造船協會 操縱性シンポジウム(1964. 6), p. 8~22.
3. 山內保文: "操縱性에 關する 模型試驗과 最近의 成果" 日本造船協會操縱性シンポジウム(1964. 6), p. 40.
4. 藤井 齊, 野本謙作: "操縱性試驗法" 日本造船協會操縱性シンポジウム(1970. 11), p. 1~39.
5. 三光汽船 海務部: "巨大船의 操船上의 問題點"(1970. 6), p. 1~43.
6. 日本海難 防止協會: "超大型船의 操船의 手引き"(1970), p. 25~35.
7. 元良誠三, 藤野正隆: "針路不安定な 船의 特質", 日本造船協會操縱性シンポジウム(1970. 11), p. 50.
8. 元良誠三: "船體運動力學", 共立出版株式會社, 東京 (1956. 1), p1~19.
9. 岩井 聰: "操船論", 海文堂 東京 (1966. 4), p. 33~36.
10. 大串雅信: "理論船舶工學", 海文堂 東京 (1971. 3), p. 238.

操縦性指數에 의한 衝突回避動作의 量的把握에 관한 研究

11. 河田伸一：「サーボおよび自動操縦操作」共立出版株式會社，東京（1966.5），p.153~163.
川元春夫
12. 高塚裕：「海上衝突豫防法の實務的解説」，成山堂 東京（1971.7），p.41.
13. 長澤彰三：「衝突の實態」，日本航海學會誌，41號（1969），p.7.
14. 杉原意義：「理論運用學（船體運動編）」海文堂，東京，（1966.4）p.86~4)p.86~116.
15. 日本海事六法：「海事六法」（船舶安全法，船舶設備規程 第三編 第二算 百三十七條五）海文堂 東京
編纂委員會（1971.7），p.124.
16. Philip Mandel：Ship Maneuvering and Control(P. N. A)The Society of Naval Architects and Marine
Engineers, New York(1976),p.463~485.