

操縱性 指数에 依한 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 Jumdong

Abstract	目 次
記號說明	1. “Z試驗”試驗 要目 及 條件
I. 緒 論	2. 試驗의 方法 及 結果
II. 理論的인 考察	3. 旋回性指數 K 及 追從性指數 T 의 數值計算
1. 運動方程式에 對한 考察	4. 依한 理論的인 計算
2. 船舶의 操舵角周波數에 對한 檢討	5. 衝突回避動作의 數值計算
3. 衝突回避動作에 對한 操縱性指數의 適用	VI. 試驗結果에 對한 考察
III. 實船에 의한 Z試驗 및 操縱性指數算出	V. 結 論
	附錄 數式에 對한 註文 及 考證

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 order of make. 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.

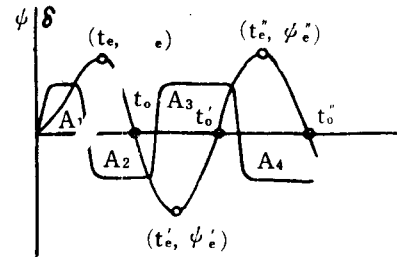
The author worked out mathematic formulas calculating forward and transverse ship's motions within the above mentioned situation for the quantitative analysis of the collision avoiding action to certify whether they are in collision status or not.

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
 ϕ : 角變位置
 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_r : 舵角誤差
 D : Depth Moulded



$A_1, \sim A_4$: δ 曲線과 time軸에 만드는 各 梯形

船相互間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의 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 船舶이 서로 마주보며 航走中 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 “한바다”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

Ⅱ. 理論的인 考察

1. 運動方程式에 對한 考察

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

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.

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

$$\frac{\dot{\Psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \dots\dots\dots (3) \quad \text{단, 初期値는 모두 零}$$

(3) 式을 $|\omega|$ 가 적은 範圍에서 近似化하면 $\frac{\dot{\Psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{1+T_1s}$ 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

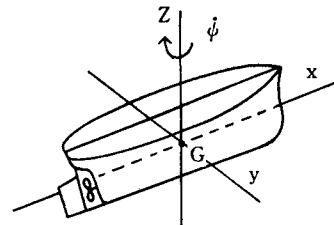


그림 1

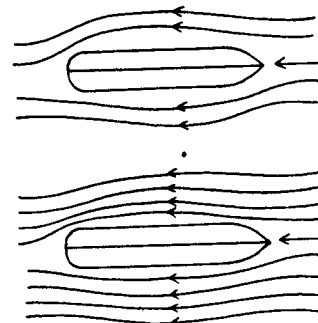


그림 2

에 旋回角速度의 크기를 決定하는 要素로 旋回性指數라 부르므로 T 는 一定船角을 旋後 船體가 轉 回한 時間을 가 量하는 要素로 旋回性指數라 부른다.

$$\left. \begin{array}{l} 1. 0 \leq t \leq T, \quad \delta(t) = \frac{\delta_0}{T} t \\ 2. t_1 < t \quad \delta(t) = \delta_0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5) \text{의 形式이다.}$$

(6) 式의 各場合에 對하여 (5)式에서 $\phi(t)$ 를 求하여 보면,

$0 \leq t \leq T$ 時에 是

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

$t < T$ 時에 是

$$\phi'(t) = K \cdot \delta_0 \left[t - \left(T + \frac{t}{2} \right) - \frac{T}{t} (e^{-\frac{t}{T}} - 1) e^{-\frac{t}{T}} \right] \dots \dots \dots (8) \text{式}$$

가 成立한다.

2. 船舶의 操舵角周波數에 對한 檢討

正弦波에 對한 理論을 採用하여 一般船舶의 實際操舵時의 操舵角의 形에 對한 近似運動方程式의 精度를 檢討하여 보도록 한다.

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

$$\phi(t) = A \omega \delta_0 \sin(\omega t + \phi_0) \dots \dots \dots (9) \text{式}$$

이 때 $\phi(t)$ 가 時間의 經過한 後의 $\phi(t)$ 가

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

$$\phi_0 = \angle 1^\circ \angle \frac{K(1-j\omega T)}{(1+j\omega T)(1-j\omega T)} = -\tan^{-1} \frac{T_1(T_1 - T_2)\omega + T_1 T_2 \omega^3}{1 - (T_1^2 - T_2^2)\omega^2 - T_1 T_2 \omega^4}$$

(9) 式의 $\log A$ 와 ϕ_0 는 $\log \omega$ 에 對하여 示한 時 Bode 曲線에 示 實線은 近似化하여 示한 運動方程式의 實際의 近似化한 運動方程式에 對한 結果를 示한다.

一般에 對한 船舶의 操舵速度는 船舶의 大小에 依하여 Hard over에서 Hard over로 操舵하는 時 28秒 以内의 時間에서 終了을 要求한다.

一般的으로 船舶에서 示하는 操舵口名詞는 Port or Starboard easy, Port or Starboard 및 Hard to starboard, starboard의 中에 30, 45, 60, 90의 角을 示하는 時의 操舵角을 口名詞에 對하여 分類하고 10°, 20°, 35° 試分할 수 있다. 35° 時의 操舵口 船首波高現像 0.001 第1章 操舵設備現像의 示 示하는 時의 28秒 以内에서 Hard over에서 Hard over까지 轉하고 假定하고 10° 時 20° 操舵에 對한 時間을 比較하여 示하여 對한 ω 및 $\log \omega$ 는 數值로 表示하면 表1과 같다.

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

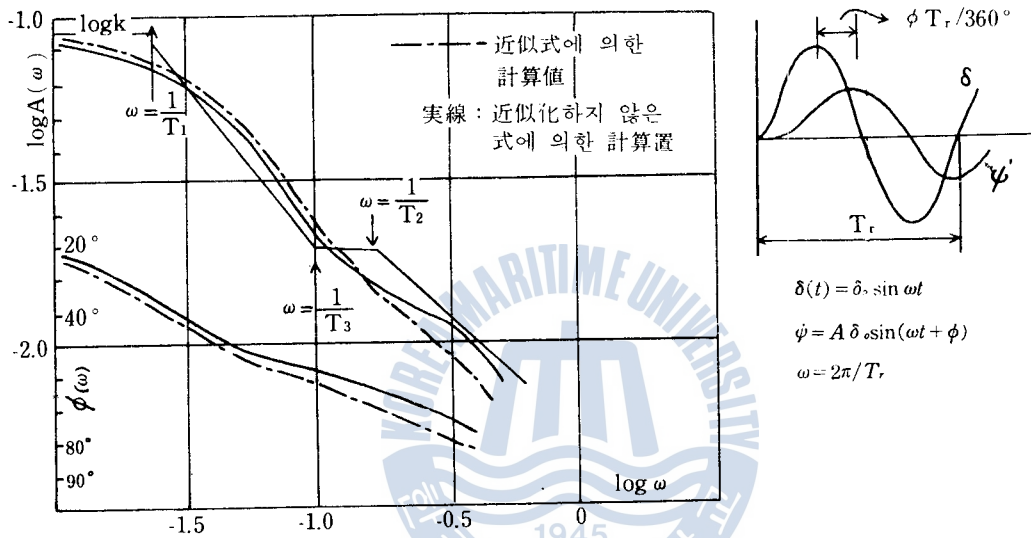
그림 3 正弦操舵에 對한 船體의 應答²⁾

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¹²⁾

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

은 各 船의 船 交を 決定한 結果, 그 結果의 內容을 各 船 隊에 對하 規則에 依하여서 動作의 第 一 次 的인 距離에 依한 船隊의 設置에 對한 指示에 依하여서 必要하는 回避動作을 船隊가 同 時에 行爲하게 高速度로 行爲하게 船隊의 總動作에 對한 距離과 船 隊의 指示를 指示하여야 한다.

이 次에 各 船을 避讓할 時의 行爲을 決定한 結果 船 交는 規則 第19條에 依하여서, 이것을 Meets end on Port에 兩船이 同의 取法이 行을 回避動作을 同 一하게 規定하고 있다.

2) 各 船의 行爲에 對한 指數通則

이 次를 簡單히 說明하고 回避動作을 明法하게 說明하기 위하여 最近의 各 船隊의 行爲, 行爲의 條件을 假定한다

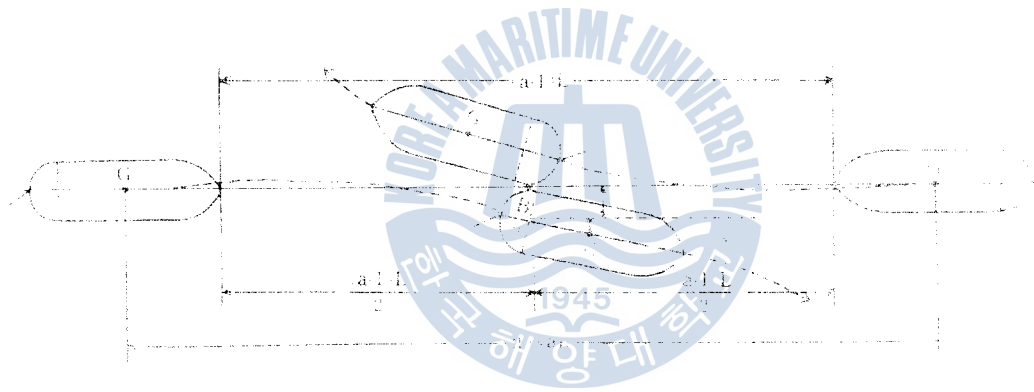


그림 4

바로 前面으로는 兩船이 衝突點이 L의 a만큼 右는 地點에 右轉方을 初認하고, 그 時에 右轉方의 starboard 一한이 右轉方이었다고 假定한다. 이 後 兩船의 衝突點을 避讓할 爲한 距離 aL의 半인 aL/2가 되는 點에 衝突地點이 된 것이다. t을 轉舵後 衝突點이 變해갈 때까지 必要한 時間이라고 하면 이 時의 境況에는 다음式이 成立한다.

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

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

phi는 작은 角이므로 $\cos \phi \approx 1$, $\sin \phi \approx \phi$ 이 爲한 式을 整理하면 다음과 같다

$$\int_0^t V dt = \left[\frac{a+1}{2} L/2 - B/2 \right] t$$

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

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

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

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

(13)式에 代入하면 다음과 같다.

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

위의 積分項만을 處理하여 보면,

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

$$= VK\delta_0 \left[t^2/2 - (T + t_1/2)t - T^3/t_1 e^{-\frac{t}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) \right]_0^{t_c}$$

$$= VK\delta_0 \left\{ t_c^2/2 - (T + t_1/2)t_c - T^3/t_1 e^{-\frac{t_c}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) + T^3/t_1 (e^{-\frac{t_1}{T}} - 1) \right\} \text{가 된다.}$$

$$C_1 = V \cdot K \cdot \delta_0 \left[t_c^2/2 - (T + t_1/2)t_c - T^3/t_1 e^{-\frac{t_c}{T}} (e^{\frac{t_1}{T}} - 1) + T^3/t_1 (e^{-\frac{t_1}{T}} - 1) \right]$$

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

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 $V(T + t_1/2) \div 7 \times 13 = 91m$, 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하면 衝突은 避할 수 없게된다.

衝突로 생긴 海難에 對한 審判關係의 記錄¹³⁾을 調査한 資料를 보면 兩船間의 接近距離가 $3L$

反試中 指數에 依한 衝突回避 動作의 量의 把握에 關한 研究에 接近한 研究 資料의 位置을 取하여 本 試驗의 船舶間의 衝突事故에 關한 量을 算出하였다. 또한, 本 論文에 關한 船舶間의 限界接近距離는 $3L$ 로 하여 數值計算을 하여 보았다.

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 울진 앞바다에서 行하였으며 地形的인 限制과 附近 海域의 漁船 및 漁網分布狀態等의 限制을 受하여 不得히 右舷方向橫風을 受으며 試驗路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. (T)	G/T	C.	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 氣候條件(表3과 같음)

(表 3)

Ed	Ad	Disp	操 縱	風 向	風 力	海面狀態
3-05m	5-60	3450톤	良好	240~250°	4 (m/sec)	4

2. 試驗方法 및 結果

(1) 試驗方法¹¹⁾

本試驗을 위하여 “한바다”號에서 2名의 教育教官과 4名의 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 비디 카메라된 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을 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¹²⁾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)

(表 4)

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

(表 5)

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

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

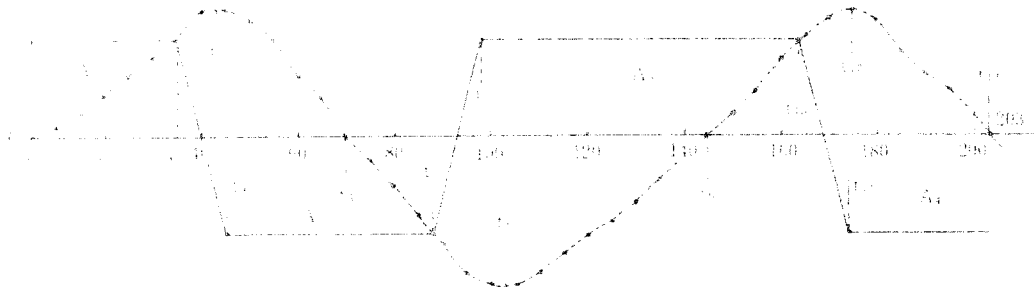


그림 5 10 Z 시험

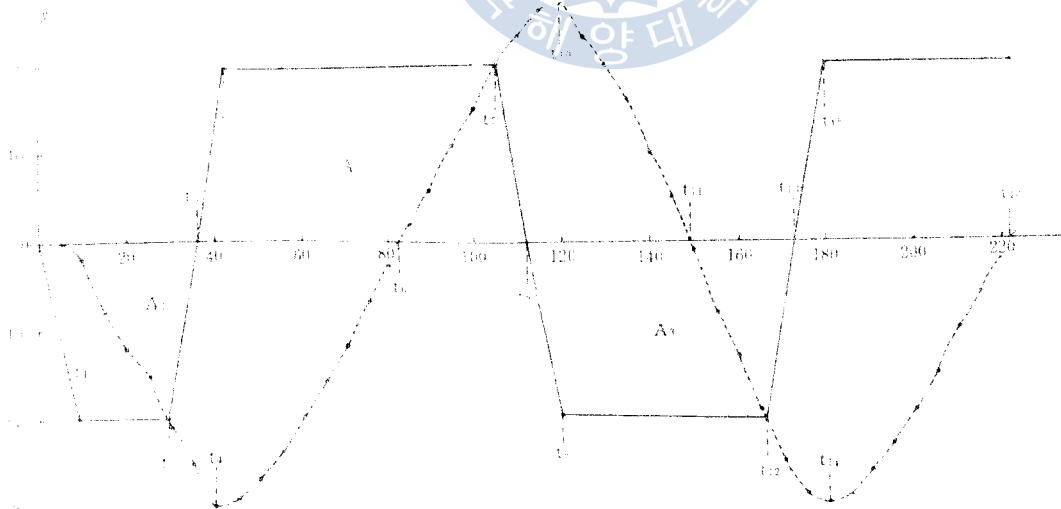


그림 6 20 Z 시험

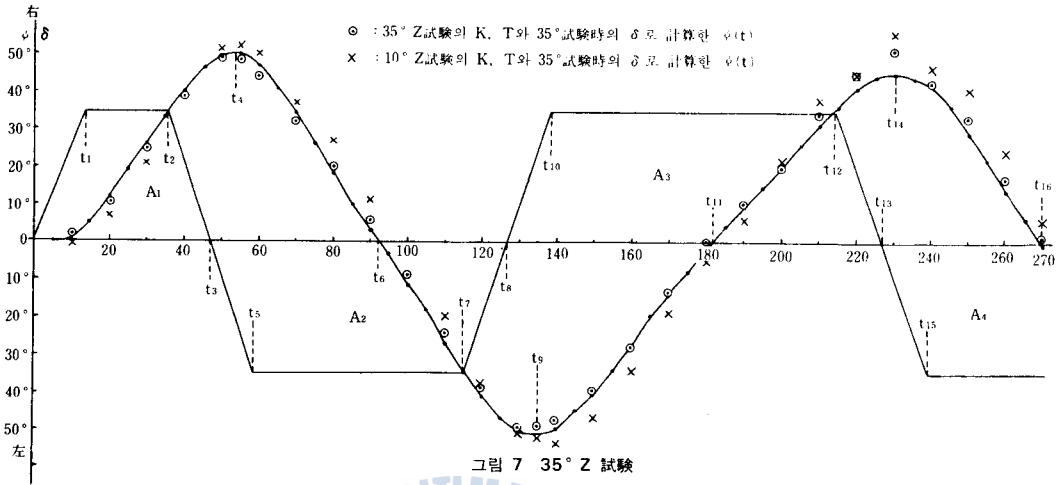


그림 7 35° Z 試驗

3. 旋回性指數 K 및 追從性指數 T 의 數值計算

(1) 10° Z test ($A_1 \sim A_3$, $A'_1 \sim A''_1$ 等의 面積은 梯形的 面積計算 方法에 의하여 算出함)

$$A_1 = \frac{40+30}{2} \times 10 - \frac{5 \times 5}{2} = 337.5$$

$$A'_1 = A_1 - \frac{53+43}{2} \times 10 + \frac{9.5+4.5}{2} \times 10 = -60$$

$$A''_1 = A_1 - A_2 + \frac{76+66}{2} \times 10 - \frac{6+1}{2} \times 10 = 545$$

$$A_2 = A_1 - \frac{30+25}{2} \times 10 = 75$$

$$A'_2 = A_1 - A_2 + \frac{52+47}{2} \times 10 = 365$$

$$A''_2 = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{34+29}{2} \times 10 = 265$$

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

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

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

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

$\therefore K \approx 0.045$, $\delta_r \approx -1.9$

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

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

$$T\left(-\frac{4}{10}\right) = K \cdot \delta_r \times 203 + 265K \dots\dots\dots (1)$$

①, ⑤, ⑥에서 $T=10$

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

$$T=10\text{sec}$$

(2) 20° Z test

$$A_1 = -A_1 + \frac{36+20}{2} = -20 + \frac{4 \times 13}{2} = -534$$

$$A'_1 = -A_1 + \frac{76+62}{2} \times 20 - \frac{8+1}{2} \times 20 = 730$$

$$A''_1 = -A_1 + A_1 - \frac{61+47}{2} \times 20 + \frac{7 \times 20}{2} = -190$$

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

$$A'_1 = -A_1 + A_1 - \frac{49+42}{2} \times 20 = 140$$

$$A''_1 = -A_1 - A_1 - A_1 + \frac{49+42}{2} \times 20 = 650$$

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

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

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

10° 때와 같은 방법으로 $K=0.055$, $\delta_r=-2$

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

$$-T_1\left(\frac{10}{8}\right) = K \cdot \delta_r \times 149.5 + 140K \dots\dots\dots (5)$$

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

④, ⑤, ⑥에서 $T=9$

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

$$T=9\text{sec}$$

(3) 35° Z test

$$A_1 = -\frac{48+23}{2} \times 35 - \frac{7 \times 23}{2} = 1162$$

$$A'_1 = A_1 - \frac{79+56}{2} \times 35 + \frac{8 \times 15}{2} = -1060$$

$$A''_1 = A_1 - A_1 + \frac{99+76}{2} \times 35 - \frac{4 \times 9}{2} = 1924.5$$

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

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

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

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

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

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

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 $T \doteq 6$

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

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

(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	

表 8 式(14)의 계수값을 얻기 위하여 계산된 좌회전 각도의 변화

表 9

10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1.65	1.80	1.95	2.10	2.25	2.40	2.55	2.70	2.85	3.00
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

이 때 δ 가 10° 이하에서는 거의 0이 된다.

5. 衝突回避動作의 數値計算

船의 追及回避動作에 對하여 避讓可能 距離에 對한 角度 關係를 求하고 追及回避 指數 表(12)에 對한 15°이하 追及 距離에 對한 避讓動作의 量을 把握할 爲의 數值計算을 行한다. 船長 $L=150m$, 船速 $V=15knot$, 避讓 距離 $R=0.5L=75m$ 로 假定한다.

表 10 各要素의 數值

船長 L	150	船速 V	15	避讓 距離 R	75
追及 距離 D	100	追及 距離 D	100	追及 距離 D	100
追及 距離 D	100	追及 距離 D	100	追及 距離 D	100

式(12)에 의하여 $m=3.0666$

式(14)에 의하여 $\delta=3.01^\circ$ $\delta'=2.21^\circ$

式(15)에 의하여 $\theta=8.6^\circ$

상변의 轉舵角이 $L/2$ 의 0.6倍이므로 船舶의 轉舵를 取하면 7.2도의 距離가 2개 되는데 이 距離 $m \times 換算距離 = 3 \times 7.5 = 54m$ 가 된다. 轉舵角 45도의 轉舵 反對方向으로 轉기는 船體重心의 直交路離脫 橫移動距離는 大略 $L/100$ 程度이므로 換算할 爲의 距離 補償은 減하여 算되다. 即ち $54 - 15 = 39m$ 가 된다. 即 兩船의 船尾 quarter 間의 通過距離는 39m가 된다. 兩船碰撞에 對한 것은 兩船間에 對한는 流體力學的인 相互力을 考慮하여야 하므로 以上 같은 計算距離가 1/2보다 大작하므로 兩船間의 接近距離가 4.1가 되면 兩船이 碰撞한 것으로 判斷하여 避重선 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의 追及 避讓試驗(追及 避讓試驗)에 對한 追及 避讓試驗의 結果에 對한 影響을 생각하여야 한다. 大略의 K 및 T 값을 計算하는데는 2분계 정도가 充分할 爲의 計算을 行할 때에 는 氣象條件의 影響이 試驗結果에 크게 作用하여 들어오는 追及 避讓試驗의 結果를 가지고 $\phi(t)$ 의 理

論的인 計算을 하면서 새로히 알았다. 35° 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 값에 影響을 주어 δ 를 變化시키고 이것을 不確實하게 하는 原因이 있다고 判斷하였다. 이러한 點에서는 海潮流의 影響도 마찬가지라고 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 K값이 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¹⁶⁾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¹⁵⁾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 $\log w_1 \doteq -1.2$, $\log w_2 \doteq -1.77$, $\log w_3 \doteq -2.12$ 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

K값이 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 K값의 變化는 크지 아니하나 追從性指 T값의 變化는 크다.

따라서 緊急時大舵角의 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 算출하여 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. 船船의 相當한 速度으로 航走하면서 船首方向 橫風을 받을 때에는 恒常 船首가 風上側으로 向하여 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 研究論討되어야 할 것으로 생각 된다.

附 錄

數式에 對한 注

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

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

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

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

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

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

參 考 文 獻

1. 藤田 齊：“船의 方向安定性에 對한 研究”, 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한 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：“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. 1~42.
6. 日本海難防止協會：“超大型船의 操船의 手引書”(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.

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：（197171），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.

