

# 船舶自動操舵系の最適調整에 關하여

李 哲 榮

## On the Optimum Adjustment of the Automatic Steering System of the Ship

By

Cheol-Yeong Lee

### <目 次>

- |                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| 1. 序 論           | 4. Simulator에 의한 過渡應答波形的 檢討 |
| 2. 船舶自動操舵系の 傳達函數 | 5. 結 論                      |
| 3. 最適値의 計算       |                             |

### Abstract

This paper deals with the optimum adjustment of the automatic steering system to make the system stable and get the maximum efficiency in the auto-piloting of ships.

Consequently, the problem refers to the selection of the values of the auto-pilot parameters, and the values vary with the conditions of ships concerned, that is, the maneuvering indicies.

In general, ships' officers have tried to set these parameters by their subjective judgements based on the track pattern of the course recorder.

Since it is rude and vague to obtain the optimum values by such a method, it is necessary to determine these by a more theoretical method.

In this paper, by means of making the use of the frequency response method, the author obtained the optimum values for several typical values of the maneuvering indicies of the ships in service, and discriminated the propriety of the system stability by adopting a simulator.

The use and method of computer for the calculation process is also suggested here to make the tedious calculation of this method practical on board for the introduction of electronic computer on merchant ships in the future.

Since this paper treated the ships under still water and air, the nonlinear factors of the auto-pilot system are not covered.

### 1. 序 論

이 論文의 題目은 「船舶自動操舵系の最適調整에 關하여」라 한다.

自動操舵機는 1920年代에 Sperry社에 의해 最初로 製品化된 後로 改良을 거듭하여 現在는 大部分의 船舶에 普及되어 있다. 따라서 自動操舵機를 要素로 하는 船舶自動操舵系를 「가장 安定한 狀態로 維持하여 最大의 効率을 얻고자 하는 問題」에 對하여는 많은 研究가 있어 왔다.

1922년에 minorsky<sup>(1)</sup>는 船이나 航空機의 自動操縱에 關한 研究를 行하고 當時에 使用되든 角速度制御方式의 代身에 微分·比例制御方式의 必要性을 밝혔다.

1949년에 Schiff<sup>(2)</sup>는 船體運動의 解析에 있어서 比例制御方式만의 境遇와 比例·微分制御方式에 對한 比較를 行했으며 그 後, 野本<sup>(3)</sup>, Rydill<sup>(4)</sup>은 制御理論을 導入하여 自動操舵에 依한 船體運動을 理論的으로 解析했다.

이러한 研究들은 主로 造船工學的인 側面에서 船體의 運動, 抵抗, Yawing, 安定性 等에 關한 問

題를 取扱, 檢討하고 있다.

1968년에 英國의 船長 Welpter<sup>(6)</sup>는 實船舶의 運航에 있어서 自動操舵機의 調整係數를 理論的으로 調整할 必要가 있음을 力說한 바가 있으나 이 問題에 對한 實質的인 研究가 거의 없었으므로 이 論文에서는 이러한 問題를 取扱하여 自動操舵機의 比例·微分調整係數를 理論的으로 調整하는 方法을 研究하고 그 結果를 實船에 應用하고자 한다.

船舶自動操舵系의 安定性은 船舶의 積貨狀態 및 自動操舵機의 比例·微分調整係數에 密接한 聯關性을 갖고 있다. 그러므로 주어진 積貨狀態下에서 船舶自動操舵系를 가장 安定한 狀態로 維持하게 하는 調整係數 即 最適值을 求해서 調整을 行할 必要가 있고, 同時에 効果的인 調整을 行하기 위해서는 現用自動操舵機의 設定된 調整係數의 可變範圍에 對해서 檢討를 行할 必要가 있다.

本論文에서는, 船舶의 주어진 操縱性能指數에 對해 周波數應答法을 使用하여 Nichols 線圖 또는 計算機로 最適值을 理論的으로 求하고 最適值가 存在하는 範圍는 各 船舶의 特性에 따라 다르다는 事實을 調査함으로써 現用自動操舵機의 調整係數의 調整範圍에 對한 檢討를 行했으며 또한 船舶自動操舵機의 最適值에 對한 系의 安定性與否를 Simulator로써 調査하였다.

自動操舵機에는 比例·微分調整 等の 線形要素와 天候調整, 舵角制限 等の 非線形要素가 包含되어 있으나 外亂이 없는 海上狀態下에서 小角度變針(10°以內)한다는 條件下에 船舶自動操舵系의 變針性을 取扱하므로 非線形要素는 다루지 않는다.

## 2. 船舶自動操舵系의 傳達函數

### <序 言>

船舶이 自動操舵로 航海할 境遇에 船舶自動操舵系를 構成하는 要素로서는 自動操舵機, 操舵機, 舵 및 船舶, Compass 등이 있다.

이러한 各要素에 人力이 加해지면 要素들이 動作하여 出力이 나오게되므로 傳達函數方式을 使用하여 船舶自動操舵系를 表示하기로 한다.

### <2·1> 船舶의 傳達函數

操舵에 依한 船舶의 運動方程式은 다음의 線形微分方程式으로 表示할 수 있다. <sup>(1) (2) (4) (8) (11)</sup>

$$T_1 \cdot T_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\theta}{dt} + \theta = T_3 \cdot \delta + T_3 \cdot T_3 \frac{d\delta}{dt} \dots \dots \dots (2-1)$$

(2-1)式을 Laplace 變換하면 船舶의 傳達函數, G<sub>3</sub>(S)는

$$G_3(S) = \frac{\theta(S)}{\delta(S)} = \frac{T_3(1+T_3S)}{(1+T_1S)(1+T_2S)} \dots \dots \dots (2-2)$$

로 表示된다.

### <2·2> 操舵機 및 Compass의 傳達函數

現在 使用되고 있는 操舵機는 大部分이 油壓式이며 自動操舵機 또는 Telemotor의 出力인 機械的 變位를 入力으로 하고 舵軸의 回轉角度를 出力으로 하는 位置 Servo 機構이다. 이 境遇에 있어서 操舵角速度와 이를 驅動하는 有效流量 사이에는 다음의 關係가 成立한다. <sup>(1) (4) (11)</sup>

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{T_4} (\delta_a - \delta) \dots \dots \dots (2-3)$$

따라서 傳達函數, G<sub>2</sub>(S)는

$$G_2(S) = \frac{\delta(S)}{\delta_a(S)} = \frac{1}{1+T_4S} \dots \dots \dots (2-4)$$

로 된다.

또 Compass에 나타나는 角,  $\theta_0$ 은 旋回角速度  $\dot{\theta}$ 의 積分된 值,  $\theta_0 = \int_{0+}^{\infty} \dot{\theta} dt$ 로써 表示되므로 Compass의 傳達函數,  $G_4(S)$ 는

$$G_4(S) = \frac{\theta_0(S)}{\dot{\theta}(S)} = \frac{1}{S} \dots\dots\dots(2-5)$$

이다.

<2·3> 自動操舵機의 傳達函數 (1) (2) (3) (11)

最近의 自動操舵機에 採用되고 있는 比例·微分制御方式에 있어서 rate generator를 使用한 方式에서는 命令舵角,  $\delta_a$ 는

$$\delta_a = T_p(\dot{\theta} + T_d \cdot \dot{\theta}) \dots\dots\dots(2-6)$$

로 주어지고 Trolley motor를 使用한 方式에서는

$$\delta_a = T_p \dot{\theta} + T_d \theta \dots\dots\dots(2-7)$$

로 주어지며, (2-7)式은 變形하면

$$\delta_a = T_p \cdot (\dot{\theta} + T_d/T_p \cdot \dot{\theta}) \dots\dots\dots(2-8)$$

로 되어 (2-6)式과 그 形態가 같아지므로 (2-6)式을 그 代表되는 式으로 두어 傳達函數,  $G_1(S)$ 를 求하면

$$G_1(S) = \frac{\delta_a(S)}{\dot{\theta}(S)} = T_p(1 + T_d \cdot S) \dots\dots\dots(2-9)$$

로 된다.

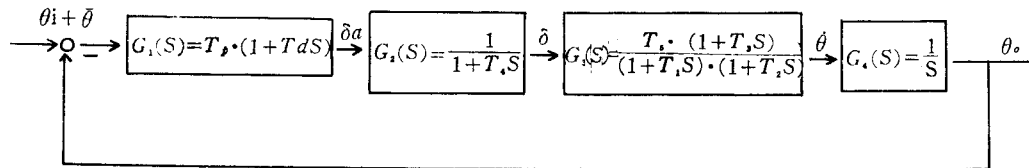
<2·4> 船舶自動操舵系の block 線圖 및 傳達函數

船舶自動操舵系는 以上の 各要素들이 cascade結合을 하고 있으므로 式 (2-2), (2-4), (2-5), (2-9)를 綜合하여 船舶自動操舵系를 block 線圖로 4圖示하면 第1圖와 같고 船舶自動操舵系의 Open loop transfer function,  $G(S)$ 는 式 (2-10)으로 되며

$$G(S) = \frac{T_3 \cdot T_p \cdot (1 + T_3 S) \cdot (1 + T_d S)}{S \cdot (1 + T_1 S) \cdot (1 + T_2 S) \cdot (1 + T_4 S)} \dots\dots\dots(2-10)$$

Closed loop transfer function,  $C(S)$ 는 式(2-11)로 된다.

$$C(S) = \frac{G(S)}{1 + G(S)} = \frac{T_3 \cdot T_p \cdot (1 + T_3 S) \cdot (1 + T_d S)}{S \cdot (1 + T_1 S) \cdot (1 + T_2 S) \cdot (1 + T_4 S) + T_3 \cdot T_p \cdot (1 + T_3 S) \cdot (1 + T_d S)} \dots\dots\dots(2-11)$$



第 1 圖  
船舶自動操舵系の block 線圖

3. 最適値의 計算

<序 言>

船舶自動操舵系에 入力(希望針路)을 주었을 때의 그 動作狀態의 安定度는 船舶에서 Course record

cr의 航跡을 調査함으로써 大略은 判別할 수 있으나 모든 比例·微分調整係數에 對해서 Course recorder의 航跡으로 일일이 그 安定度를 調査한다는 것은 容易한 일이 아니다. 따라서 理論적으로 安定度를 判別할 必要가 있으며 制御理論을 導入하면 所期의 成果를 거둘 수가 있다.

Hurwitz Stability Criterion을 使用하여 船舶自動操舵系의 安定度를 調査하고 周波數應答法의 一種인  $M_p$  值法을 利用하여 Nichols 線圖와 計算機에 依해 가장 安定度를 좋게 하는 比例·微分調整係數值 卽 最適值를 求하고자 한다.

<3·1> 安定度の 判別

制御理論에서는 制御系의 安定度를 判別하는 方法이 여러가지가 있으나 船舶自動操舵系의 境遇에 있어서는 Hurwitz Stability Criterion을 使用하면 安定度를 좋게 하는 比例·微分調整係數의 範圍를 直觀적으로 檢討할 수 있어서 便利하다.

各種船舶의 代表的인 例로서 第1表<sup>(1)</sup>와 같은 操縱性能指數들을 가진 船舶들에 對하여 安定度를 判別하고자 한다.

第1表

船舶	積貨狀態	操縱性能指數			
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_5$
$T_f$	滿載油槽船	90	10	25	0.07
$C_f$	滿載貨物船	45	6	10	0.08
$C_s$	空船貨物船	12	2	5	0.06

多數의 實例에 依해서 調査한 結果, 電動油壓操舵機의 時定數  $T_1$ 는 1.6~1.8程度이고 이 論文의 計算에는 모두 1.6을 使用했으며 比例調整係數,  $T_p$ 는 그 調整範圍가 0.8~4이다<sup>(1)</sup>.

(2-11)式에서 船舶自動操舵系의 特性方程式은  $T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot S^4 + (T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot T_4 + T_1 \cdot T_4) \cdot S^3 + (T_1 + T_2 + T_4 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 \cdot T_d) \cdot S^2 + (1 + T_5 \cdot T$

$$\cdot T_3 + T_5 \cdot T_p \cdot T_d)S + T_5 \cdot T_p = 0 \dots\dots\dots(3-1)$$

로 되고 (3-1)式은  $S$ 에 關한 4次方程式이므로 船舶自動操舵系의 安定度를 滿足하는 條件은 Hurwitz Stability Criterion에 依해 式(3-2), (3-3), (3-4), (3-5)로 된다.

$$A_4 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ h_3 & h_4 & h_5 & 0 \\ 0 & h_1 & h_2 & 0 \\ 0 & h_3 & h_4 & h_5 \end{vmatrix} > 0 \dots\dots\dots(3-2)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 & 0 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ 0 & h_1 & h_2 \end{vmatrix} > 0 \dots\dots\dots(3-3)$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{vmatrix} > 0 \dots\dots\dots(3-4)$$

$$A_1 = |h_1| > 0 \dots\dots\dots(3-5)$$

위의 式에서  $h_1 = (T_1 \cdot T_2 + T_1 \cdot T_3 + T_1 \cdot T_4)$   
 $h_2 = (1 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 + T_5 \cdot T_p \cdot T_d)$   
 $h_3 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_4$   
 $h_4 = (T_1 + T_2 + T_4 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 \cdot T_d)$   
 $h_5 = T_5 \cdot T_p$

이다.

式(3-2), (3-3), (3-4), (3-5)를 使用하여 第1表의 各船舶들에 對해서 安定度를 滿足하는

條件을 求하면,  $T_f$ 船은 式 (3-6)으로 되고,

$$A_1 = 1060 > 0$$

$$A_2 = 1784.2 \cdot T_p \cdot T_d - 2520T_p + 106256 > 0$$

$$A_3 = 1060(101.6 + 103.6T_p + 19.53T_p \cdot T_d + 3.0625T_p^2 \cdot T_d + 0.1225T_p^2 \cdot T_d^2) > 0 \quad \dots\dots\dots(3-6)$$

$$A_4 = A_3 + 78652 \cdot T_p > 0$$

$C_f$ 船은 式(3-7)로 되며

$$A_1 = 351.6 > 0$$

$$A_2 = 216.72T_p \cdot T_d - 345.16T_p + 18062.16 > 0$$

$$A_3 = 351.6(52.6 + 5.008T_p \cdot T_d + 0.64T_p^2 \cdot T_d + 0.064T_p^2 \cdot T_d^2 + 13.952T_p) > 0 \quad \dots\dots\dots(3-7)$$

$$A_4 = A_3 + 351.6 \times 28.488 \cdot T_p > 0$$

$C_b$ 船은 式(3-8)로 된다.

$$A_1 = 46.4 > 0$$

$$A_2 = 11.616T_p \cdot T_d - 11.52T_p + 685.44 > 0$$

$$A_3 = 46.4(15.6 + 1.896T_p + 1.236T_p \cdot T_d + 0.09T_p^2 \cdot T_d + 0.018T_p^2 \cdot T_d^2) > 0 \quad \dots\dots\dots(3-8)$$

$$A_4 = A_3 + 46.4 \times 2.784 \cdot T_p > 0$$

式 (3-6), (3-7), (3-8)로 주어진 條件들에서  $T_p, T_d$ 가 未知數로 包含되어 있어서  $T_f, C_f, C_b$ 船들의 安定度를 滿足하는 範圍를 求하는 것은  $T_p, T_d$ 의 範圍를 調査함으로써 可能해진다.

自動操舵機에서는  $T_p = 0.8 \sim 4$ ,  $T_d \geq 0$ 이므로  $T_p, T_d$ 는 同符號이고, 特히  $T_d \geq 0$ 인 條件에 對하여는  $T_f, C_f, C_b$ 船 全部가 安定한 系를 形成하고 있음을 알 수 있다. 따라서 如何한 調整係數值로 調整하더라도 위의 세 船舶들은 安定한 系를 形成하기는 하지마는 船舶에서 自動操舵로 變針時에 가장 바람직한 것은 安定한 狀態를 維持하면서 短時間內에 希望針路로 찾아 들어갈 수 있을 程度의 充分한 安定度를 가지도록 調整係數를 定하는 일이므로 이러한 條件을 滿足하는 調整係數值 即 最適值를 求할 必要가 있다.

### 〈3·2〉 $M_p$ 值에 依한 最適值의 計算

#### 〈3·2·1〉 Nichols 線圖에 依한 最適值의 計算

船舶이 自動操舵로 航海中 一定角度로 變針時에 充分한 安定度를 가진 때에는 그 過渡應答은 어느 程度의 Overshoot를 가진 後에 良好한 減衰性을 가져서 短時間內에 希望針路로 찾아 들어가는 波形을 나타낸다. 따라서 恒常 充分한 安定度를 가지고 빠른 時間內에 希望針路로 찾아 들어가게 하기 위해서는 이러한 條件을 滿足시키는 調整係數들을 求해서 調整을 해야 한다.

船舶自動操舵系를 充分히 安定한 狀態로 維持하도록 하는 調整係數值 即 最適值를 求하기 위해서는 周波數應答法을 使用하여 船舶自動操舵系의 Open loop transfer function,  $G(s)$ 의 周波數應答,  $G(j\omega)$ 의 軌跡을 Bode 線圖에 그리고  $G(j\omega)$ 의 Phase margin과 Gain margin에 着眼하여 最適值를 求할 수도 있으나 이 方法에 依하려면 모든 調整係數들에 對해 일일이 Phase margin과 Gain margin을 求하고 그 中에서도 가장 適合한 值들을 決定해서 最適值를 選擇해야 하는 難點이 있으므로 船舶自動操舵系의 境遇에는 이 方法 代身에  $M_p$ 值에 着眼해서 最適值를 求하는 것이 매우 便利하다.

$M_p$  值란 系의 Closed loop transfer function,  $C(s)$ 의 周波數應答  $C(j\omega)$ 의 各周波數  $\omega$ 에 對한 絕

對值中 最大值를 db로 表示한 것으로 特히 變針時의 船舶自動操舵系의 境遇처럼 系가 Unity feedback system인 때에는 Open loop transfer function의 周波數應答  $G(j\omega)$ 의 Vector軌跡을 Nichols線圖에 圖示함으로써 直接  $M_p$  值를 얻을 수 있는 利點이 있다.

一般的으로  $M_p$ 值는 1.1~1.6(db) 程度이면 系는 安定하다고 할 수 있으나 充分한 安定度를 가지기 위해서는  $M_p=1.3(db)$ 이 가장 바람직한 值이다. 따라서 船舶自動操舵系의 各 調整係數에 對한  $G(j\omega)$ 의 Vector 軌跡을 Nichols線圖에 그려서  $M_p=1.3$ 曲線에 接하는 軌跡의 調整係數值를 읽으면 이것이 바로 最適值가 될 것이나 이렇게 하면 모든 調整係數들에 對해서 일일이 Vector 軌跡을 그려야 하므로 매우 複雜하다. 그러므로 調整係數  $T_p, T_d$ 項이  $G(j\omega)$ 에 미치는 影響을 調査하고 基準이 되는 Vector軌跡에서 그 影響을 考慮하여  $M_p=1.3$  曲線에 接하는 調整係數를 찾는다면 容易하게 最適值를 求할 수 있을 것이다.

$T_p$ 와  $T_d$ 項이  $G(j\omega)$ 에 미치는 影響을 考察해 보면  $T_p$ 는 Phase angle에는 關係없이 Gain에만 影響을 미치고  $T_d$ 項은 主로 Phase angle에만 關係하여 Gain에 미치는 影響은 無視할 程度이다. (即 周波數,  $\omega$ 를 0.01~0.1,  $T_d$ 를 1~5까지 變化시킬 때에  $T_d$ 項,  $1+j\omega \cdot T_d$ 의 Gain은 0.043~0.97(db) 程度이다)

이러한 關係를 利用하여  $T_p$ 가 1~4로 變할 때에 그 各各에 對하여  $T_d$ 를 0~5까지 變化시켜서  $T_d$ 項의 變化가  $G(j\omega)$ 의 Phase margin에 미치는 變化量을 Templotor와 Bode線圖에 依해 求하고  $T_d$ 의 變化量으로 나누어서  $T_d$ 의 單位變化量에 對한  $G(j\omega)$ 의 Phase margin의 平均(位相角) 變化量을 求하면 第2表와 같다.

第2表

比例 調整 係數 $T_p$	$T_f$	$C_f$	$C_b$
	$T_d$ 의 單位變化量이 phase margin에 미치는 平均位相角의 變化量		
1	1.7°	2.3°	3.0°
2	2.5°	3.5°	4.4°
3	2.9°	4.3°	5.3°
4	3.2°	5.2°	5.6°

따라서  $T_p=1, 2, 3, 4, T_d=0$ 인 境遇의  $G(j\omega)$ 의 Vector軌跡을 Nichols線圖에 그리고 이 軌跡들을 基準으로 하여 基準 Vector 軌跡들을  $M_p=1.3$  曲線에 接하도록 平行移動한 後 그에 相應하는 位相角變化量을 調査하고, 第2表를 使用하면 最適值의 組合을 簡單하게 求할 수 있다.

$T_f, C_f, C_b$ 船에 있어서 第1表에 例示한 積貨狀態 下의  $T_p=1, 2, 3, 4, T_d=0$ 인 境遇의 Vector軌跡은 第2圖와 같다

一 例로,  $C_f$ 船의  $T_p=1, T_d=0$ 인 境遇에,  $M_p=1.3$ 인 曲線에 接하도록 하는 데에 必要한 位相角의 變化量은 12.5°이고 第2表에 依하면 그 變化量에 該當하는  $T_d$ 의 值는 大略 5로서  $T_p=1, T_d=5$ 가 最適值이다.

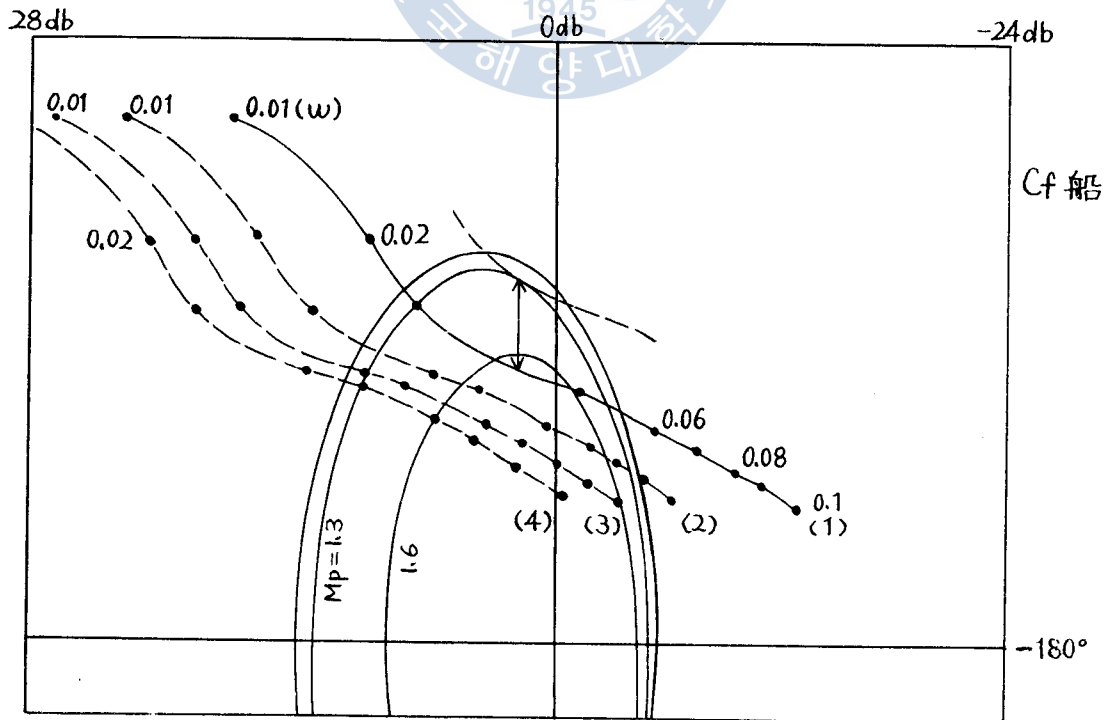
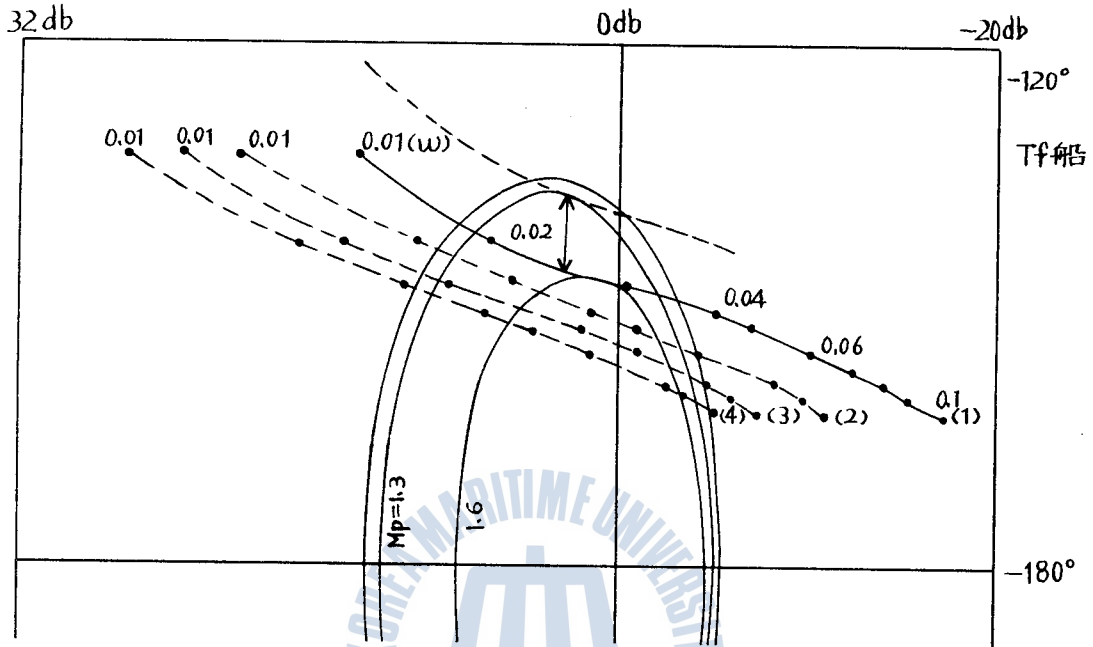
第3表

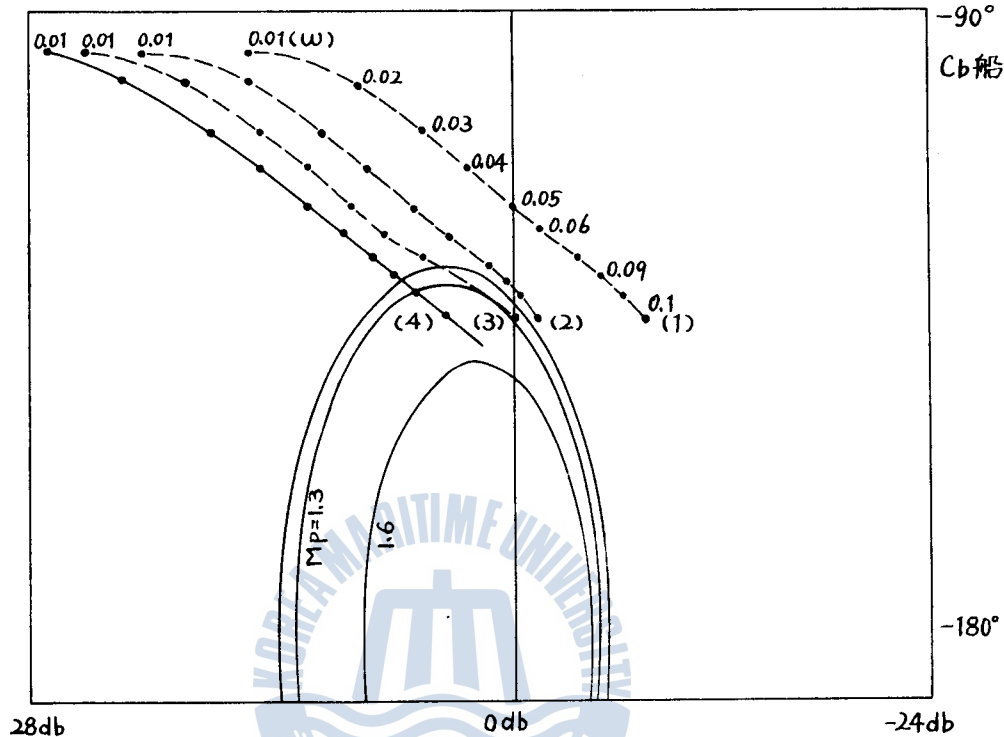
$T_p$	$T_d$		
	$T_f$	$C_f$	$C_b$
1	6	5	—
2	6	5	—
3	6	5	0
4	6	5	1

同一한 方法으로 各船舶의 最適值를 求하면 第3表와 같다. 各船舶은 第1表의 積貨狀態 下에서는 第3表의 最適值中에서 適當한 것을 選擇함으로써 充分히 安定한 狀態의 變針을 할 수가 있다.

### 〈3.3.2〉 Digital Computer에 依한 最適值의 計算

〈3.3.1〉에서는 第1表에 주어진 積貨狀態에 對한 最適值를 Nichols線圖에서 求했으나 船舶의 積貨狀態는 恒常一定하다고 할 수 없으며 積貨狀態가 變함에 따라 操縱性能指數들도 이에 相應해서 變하게 된다. 그러므로 積貨狀態의 變化에 따라 주어지는 새로운 操縱性能指數들을 使用하여 每 境遇





第 2 圖

$T_b=1(1)^+, 2(2), 3(3), 4(4), T_d=0$ 인 境遇의 各船舶의 Vector 軌跡

에 對한 最適值를 Nichols 線圖에서 求해야 할 것이나 이러한 計算에는 많은 時間과 努力이 必要하므로 計算機를 使用하여  $M_p$ 值의 定義에서 直接 每 境遇에 對한  $M_p$ 值를 求해서 等  $M_p=1.3$  曲線을 그리면 쉽게 最適值의 組合을 얻을 수 있다.

船舶自動操舵系의 Closed loop transfer function의 周波數應答은  $C(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)}$  이므로, db 로 표시하면

$$20 \log |C(j\omega)| = 20 \log |G(j\omega)| - 20 \log |1+G(j\omega)| \dots\dots\dots(3-9)$$

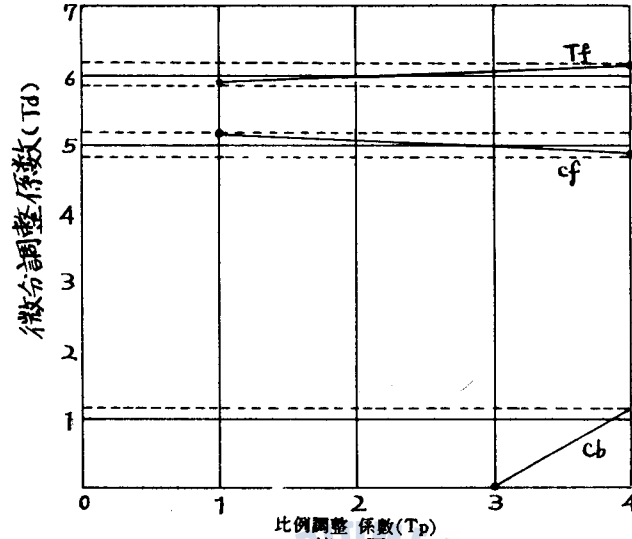
로 되고 이것을  $T_b=1\sim 4(0.1)$ 의 間격으로 變化시킴)의 各各에 對해  $T_d=1\sim 30(0.1)$ 의 間격으로 變化시킴),  $\omega=0.01\sim 0.4(0.0001)$ 의 間격으로 變化시킴)로 變化시켜서 每調整係數의 組合에 對한  $M_p$ 值를 求하도록 Programming을 하고 第1表를 data로 하여 求한  $M_p$ 值들을 整理하여 等  $M_p=1.3$  曲線을 그리면 第3圖와 같다.

Nichols 線圖에 依해서 最適值를 求할 때에는  $T_d$ 項이 gain에 미치는 영향이 너무 작아서 이를 無視했고 또한  $T_d$ 의 變化에 對한 位相角의 變化量을 平均해서 使用했기 때문에 第3圖의 結果와는 若干의 差異가 있으나 實際로 最適調整을 行하는 데에 있어서는  $T_d$ 值를 0.1單位로 區分해서 調整을 한다는 것이 거의 不可能하므로 現用自動操舵機에 實用하는 데에는 전혀 支障이 없을 것이다.

第3圖는  $M_p=1.3$ 이 되는 모든 調整係數의 組合을 表示한 것이므로 簡單하게 最適值를 求할 수 있고  $M_p=1.3$ 을 滿足하는  $T_d$ 의 範圍(點線으로 表示)를 明確히 求할 수 있다.

+ ( )속의 數字는 第2圖中の ( )속의 數字를 表示한다.



比例調整 係數( $T_p$ )

第 3 圖

等  $M_p=1.3$  曲線

따라서豫想할 수 있는 全積貨狀態에 對해서 等  $M_p=1.3$  曲線을 그리면 各 船舶에서 使用해야 할  $T_d$ 의 變化範圍를 알 수 있어서 自動操舵機의 製作時에 參照하면 各船舶의 特性에 맞는  $T_d$ 의 範圍를 가진 自動操舵機를 製作할 수 있다.

機械的인 改良이 可能하다면  $T_p$ 에 對해서도 同一한 理論을 適用할 수 있을 것이다.

$T_f$ ,  $C_f$ ,  $C_b$ 船에 있어서, 주어진 積貨狀態下에서의 等  $M_p=1.3$  曲線을 滿足하는 微分調整係數의 範圍는 대략  $T_p=1\sim 4$ 에 對하여  $T_f$ 船은 5.5~6.5,  $C_f$ 船은 4.5~5.5이고,  $C_b$ 船은  $4 \geq T_p \geq 3$ 에서 0~1.5이다.

#### 4. Simulator에 依한 過渡應答波形的 檢討

##### <序 言>

船舶이 航海中 船舶自動操舵系에 變針入力(希望針路:  $\theta_i$ )을 加했을 때에 나타내는 過渡應答의 波형을 檢討함으로써 系の 安定度를 調査할 수 있다.

外亂을 考慮하지 않을 때의 船舶自動操舵系의 基本方程式은

$$\begin{aligned} \theta_o(s) &= \frac{G(s)}{1+G(s)} \cdot \theta_i(s) \\ &= \frac{T_1 \cdot T_p \cdot (1+T_2 S) \cdot (1+T_d \cdot S)}{S \cdot (1+T_1 S) \cdot (1+T_2 S) \cdot (1+T_3 S) + T_1 \cdot T_p \cdot (1+T_2 S) \cdot (1+T_d \cdot S)} \cdot \theta_i(s) \end{aligned}$$

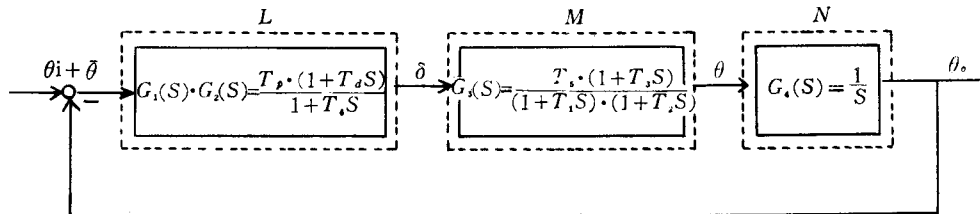
로 表示된다.

變針入力は Step function이므로  $\theta_i(s)=1/S$ 이고, (4-1)식의 特性方程式의 根을 求함으로써 過渡應答의 波형을 解析할 수 있으나, 이러한 計算은 筆算으로는 거의 不可能하므로 analog computer를 使用하여 船舶自動操舵系의 Simulator를 만들고 이 Simulator에 依해 過渡應答波형을 檢討한다면 容易하게 安定度를 調査할 수 있어서 便利하다.

##### <4.1> 船舶自動操舵系의 Simulator

船舶自動操舵系의 Simulator를 便利하게 作成하기 위해서 第1圖를 若干 變形하면 第4圖와 같이 表

示할 수 있다



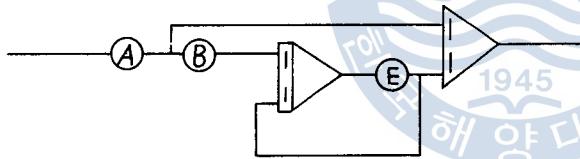
第 4 圖

船舶自動操舵系의 傳達要素들을 自動操舵機와 操舵機, 船舶, Compass의 세 部分으로 區分하여 各 各 L, M, N이라 代稱하고 各 部分에 對하여 Simulation을 行하면,

L部分에서의 傳達函數는

$$G_1(S) \cdot G_2(S) = \frac{T_p(1+T_a \cdot S)}{1+T_1 S} = \frac{T_p \cdot T_a}{T_1} \cdot \left(1 + \frac{T_1/T_a - 1}{1+T_1 S}\right) \dots\dots\dots(4-2)$$

로 變形할 수 있고,  $\frac{T_p \cdot T_a}{T_1} = A, (T_1/T_a - 1) = B, 1/T_1 = E$  라 두면 L部分의 Simulation은 第5圖로 된다.



係數 B는  $T_a$ 의 値에 따라서 負의 값을 取할 수도 있으므로 이 點을 勘案하여 符號 變換器를 使用해야 할 것이다.

특히  $T_a=0$ 이 되는 境遇에는 L部分의 傳達函數는

第 5 圖

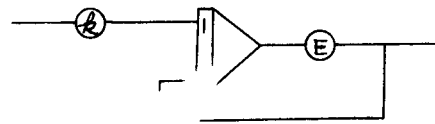
$$G_1(S) \cdot G_2(S) = \frac{T_p}{1+T_1 S} \dots\dots\dots(4-3)$$

로 되어  $T_p = K$ 라 두면

Simulation은 第6圖로 된다.

M部分에서의 傳達函數는

$$G_3(S) = \frac{T_3 \cdot (1+T_2 S)}{(1+T_1 S)(1+T_2 S)} = \frac{T_3 \cdot T_2}{T_1} \cdot \left(1 + \frac{T_1/T_3 - 1}{1+T_1 S}\right) \cdot \left(\frac{1}{1+T_2 S}\right) \dots\dots\dots(4-4)$$

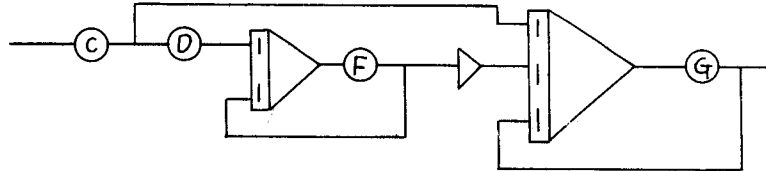


第 6 圖

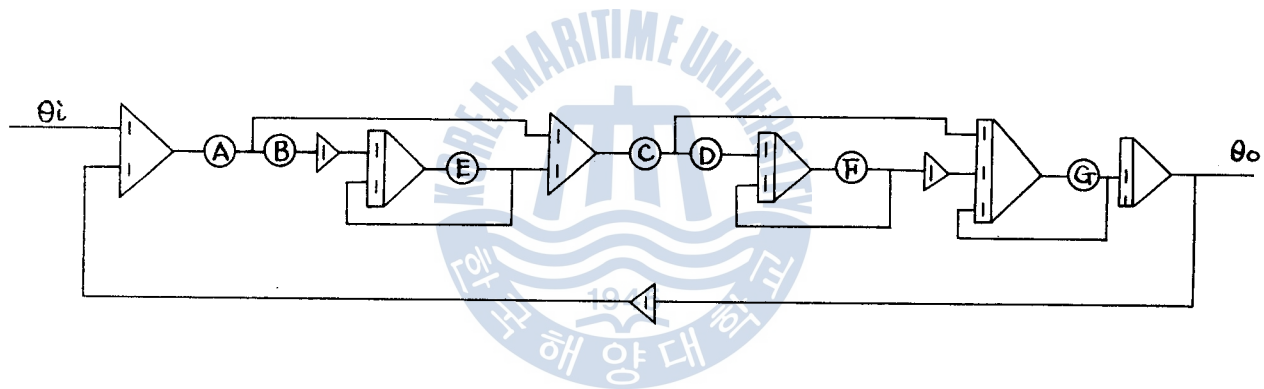
로 變形할 수 있고,  $\frac{T_3 \cdot T_2}{T_1} = C, (T_1/T_3 - 1) = D, 1/T_1 = F, 1/T_2 = G$  라 두면 M部分의 Simulation은 第7圖로 된다.

그리고 N部分은 單純한 積分이므로 積分器를 하나 使用하면 될 것이다.

위의 Simulation을 綜合하여  $T_f, C_f, C_b$  船의 境遇의 係數值, A, B, C, D, E, F, G 를 計算하고 이 值들에 依해서 符號變換器와 倍數值를 適當히 使用하여 一般的인 境遇의 船舶自動操舵系의 Simulator 를 作成하면 第8圖와 같다.



第 7 圖



第 8 圖

船舶自動操舵系의 Simulator 結線圖

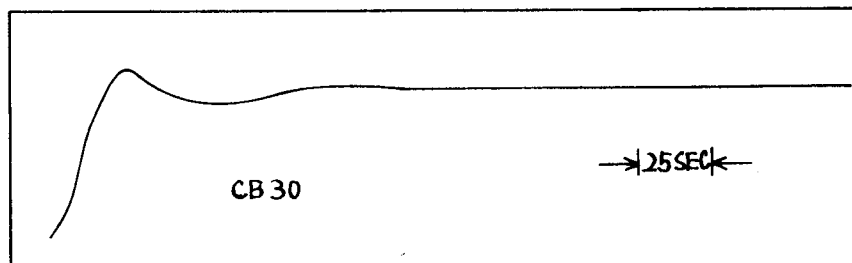
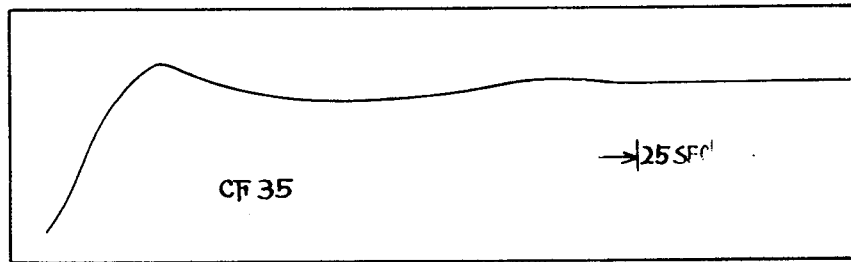
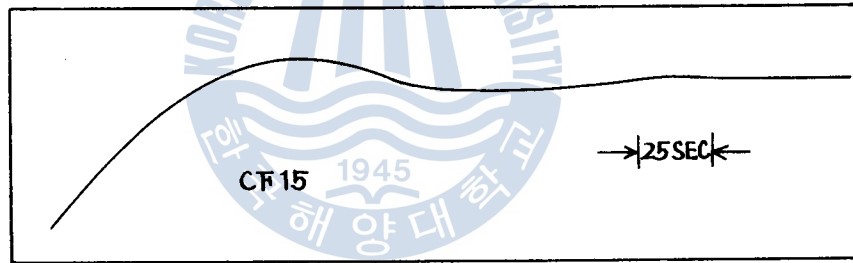
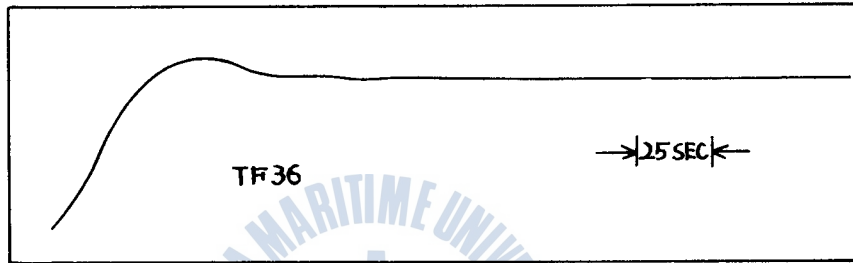
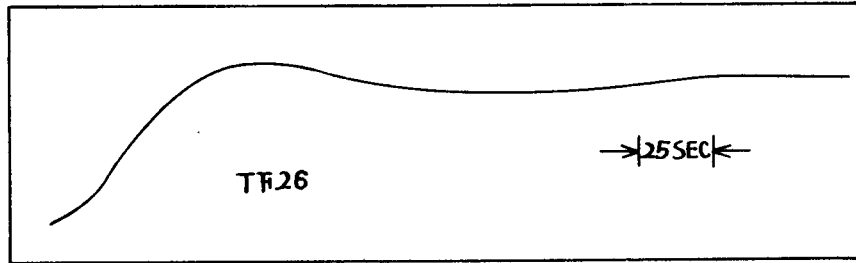
#### 〈4·2〉 最適值에 對한 過渡應答波形的 檢討

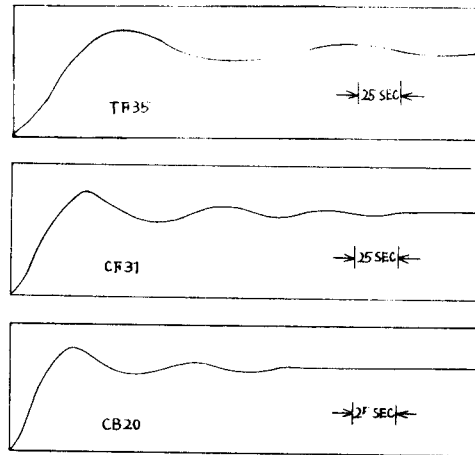
第8圖에 圖示한 船舶自動操舵系의 Simulator를 使用하여 各 船舶의 最適值에 對한 過渡應答波形과 最適值이 아닌 調整係數에 對한 過渡應答波形을 求하여 第9圖에 보였다.

$T_f$ 船에 있어서, 最適值  $T_p=2, 3$ ,  $T_d=6$ 과 任意的 值  $T_d=3$ ,  $T_d=5$ 인 境遇의 過渡應答波形을 比較하면  $T_p=3$ ,  $T_d=5$ 인 境遇가 最適值의 境遇보다 最大 Overshoot의 量이 크고, 希望針路로 正確히 찾아 들어가는 데에 所要되는 時間이 많음을 알 수 있고,  $C_f$ 船의 最適值  $T_p=1, 3$ ,  $T_d=5$ , 와 任意的 值  $T_p=3$ ,  $T_d=1$ 인 境遇에 있어서도  $T_f$ 船과 同一한 結論을 내릴 수 있다.

$C_b$ 船에 있어서는 最適值  $T_p=3$ ,  $T_d=0$ 인 境遇는 任意的 值  $T_p=2$ ,  $T_d=0$ 인 境遇와 最大 Overshoot의 量은 비슷하나 減衰性이 굉장히 좋아서 훨씬 短時間內에 希望針路로 찾아 들어감을 알 수 있다.

따라서 第9圖의 全波形은 모두 最大 Overshoot의 量이 入力值의 22% 以內이고 모두 安定한 波형을 보이고 있으며, 特히 最適值의 境遇에는 다른 境遇보다 短時間內에 希望針路로 固定되므로 變針時의 振動으로 基因되는 不必要한 航路의 延長을 最小限度로 줄이고 있다.





第 9 圖 各調整値에 對한 過渡應答波形

## 5. 結 論

以上에서 船舶自動操舵系の最適値를  $M_p$  值法을 使用하여 Nichols線圖 또는 計算機에 依해 理論的으로 求하고 그 航跡의 過渡應答波形을 Simulator로 檢討한 結果 이最適値에 依한 調整이 充分히 安定한 波形을 보여서 短時間內에 希望針路로 固定된을 確認하였다. 따라서 自動操舵機를 設置하고 있거나 設置하려고 하는 船舶들에 當該船舶의 各種積貨狀態에 對한最適値를 求하여 圖表로 備置한 다면, 船舶實務者들은 이 圖表에 依해 適當한 調整을 行함으로써 船舶自動操舵系를 充分히 安定한 狀態로 維持하여 短時間內에 希望針路로 變針할 수 있어서, 變針時의 振動으로 因한 航路의 延長을 避할 수 있게 될 것이다.

그리고 現用되고 있는 自動操舵機는 그 調整係數의 範圍가 一律的으로 되어 있으나, 各 船舶의 特性에 따라서 等  $M_p=1.3$  曲線이 通過하는 範圍는 相異하므로 自動操舵機의 設計時에 이러한 要件을 參酌하여 特定船舶에 適合하도록 그 範圍를 定하거나, 또는, 調整係數의 調整段數를 細分하여 各船舶의 特性에 맞는 調整을 行할 수 있도록 해야 할 것이다.

## 記 號 說 明

本論文에서 使用된 記號는 다음과 같다.

$\delta$  : 實舵角(操舵에 依해서 舵에 주어지는 舵角)

$\delta_0$  : 命令舵角(操舵機의 入力舵角)

$\frac{d\delta}{dt}$  : 操舵角速度

$\theta$  : 船의 旋回角速度

$t$  : 時間

$T_1, T_2$  : 船의 進路安定性을 表示하는 時定數(time constant)

$T_r$  : 操舵角速度에 關한 時定數

$\frac{1}{T_r}$  : 操舵機의 時定數로서  $(\delta_0 \rightarrow \delta)$ 에 對한 有效流量의 比例常數와 操舵角速度,  $\frac{d\delta}{dt}$ 의 流量에 對한 比例常數의 積

$T_s$  : 舵에 依한 船舶의 旋回力을 表示하는 利得(gain)

$\theta_o$  : 實針路

$\theta_i$  : 希望針路(入力針路)

$T_p$  : 自動操舵機의 比例調整係數

$T_d$  : 自動操舵機의 微分調整係數

$\theta(S) = L[\theta(t)]$

$\Delta(S) = L[\delta(t)]$

$\theta_o(S) = L[\theta_o(t)]$

$\bar{\theta}(S) = L[\bar{\theta}(t)]$

$\Delta_o(S) = L[\delta_o(t)]$

$\bar{\theta} = \theta_i - \theta_o$

$G_1(S)$  : 自動操舵機의 傳達函數

$G_2(S)$  : 操舵機의 傳達函數

$G_3(S)$  : 船舶의 傳達函數

$G_4(S)$  : Compass의 傳達函數

$G(S)$  : 船舶自動操舵系의 Open loop transfer function

$C(S)$  : 船舶自動操舵系의 Closed loop transfer function

$G(j\omega)$  :  $G(S)$ 의 周波數應答

$C(j\omega)$  :  $C(S)$ 의 周波數應答

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$  : Hurwitz stability criterion에서 定義되는 行列式의 記號

$$A = \frac{T_2 \cdot T_d}{T_1}$$

$$B = (T_d/T_1 - 1)$$

$$E = 1/T_1$$

$$K = T_p$$

$$C = \frac{T_3 \cdot T_d}{T_1}$$

$$D = (T_1/T_3 - 1)$$

$$F = 1/T_1$$

$$G = 1/T_1$$

### 參 考 文 獻

1. 野本謙作：“自動操舵の安定性に就いて”，日本造船協會論文集 第104號，1958.
2. 野本謙作，田口賢士，本田啓之輔，平野 進：“船の操縦性に就いて”，日本造船協會論文集 99號，1957.
3. 前畑幸彌，米澤弓雄：“自動操舵の調整に關する理論的研究”，日本海技大學研究報告 第7號，1962.
4. L. J. RYDILL: “A Linear theory for the steered motion of ships in waves”, T. I. N. A., 1950.
5. I. SCHIFF and M. GIMPRICH: “Automatic steering of ships by proportional control”. Trans. S. N. A. M. E., 1949.
6. A. WELPTER: “Future requirements for autopilots at sea”. Inst. of Nav., 1968.
7. THALER and BROWN: Analysis and Design of Feedback Control Systems, Mcgraw Hill Book Co., Ltd. 1960. pp. 209-229.
8. 前畑幸彌：“自動操舵の研究に關する最近の動向”，航海(特別號)，1968.
9. 元良誠三：船體運動力學，共立出版株式會社，1967, pp. 55—56.
10. 若山伊三雄：アナログ計算入門，ゴロナ社，1966, pp. 91—99.
11. 磯部孝：サボおよび自動操縦操作，共立出版株式會社，1961, pp. 153—164.