

새로운 Fuzzy Logic을 이용한  
 船舶操舵系の制御  
 蔡 良 範

Design of Ship's Steering System by Introducing  
 the Improved Fuzzy Logic

*Yang-bum Chae*

〈目 次〉

- Abstract
1. 序 論
  2. Fuzzy Logic Control을 위한 數學的 準備
    - 2·1 Fuzzy 集合論
    - 2·2 새로운 合成規則 下에서의 Fuzzy Reasoning
  3. Fuzzy Logic Control에 依한 操舵系の 制御
    - 3·1 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control
    - 3·2 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Control
  4. 計算機 시뮬레이션 및 考察
  5. 結 論
- 參 考 文 獻
- 附 錄

## Abstract

Many studies have been done in the field of fuzzy logic theory, but it's application to the ship's steering system is few until this date.

This paper is to survey the effect of application of fuzzy logic control by new compositional rule of Inference to the ship's steering system. The controller is made up of a set of Linguistic Control Rules which are conditional linguistic statements connecting the inputs and output, and take the inputs derived from deviation angle and its angular velocity.

The Linguistic Control Rules are implemented on the digital computer to verify the performance of the fuzzy logic controller and simulations have been done in six cases of initial condition and disturbance type.

Consequently, it was proved that the ship's steering system by introducing the F.L.C. is performed efficiently and less energy loss system compared with the conventional autopilot.

## i . 序 論

船舶의 自動操舵裝置는 船舶의 針路를 自動으로 維持하도록 하는 裝置이며, 지금까지 이러한 裝置를 設計하기 爲하여 많은 研究가 行해져 왔다. (1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 15, 17)

自動操舵裝置는 1920年代 Sperry社에 依해 最初로 製品으로 만들어졌으며, 그 後 1922年 Minorsky는 船舶이나 航空機의 自動操縱에 關한 研究를 行하고 當時에 使用되던 角加速度制御方式 代身에 微分比例制御方式의 必要性을 밝혔다. <sup>1)</sup>

1949年 Schiff는 船體運動의 解析에 있어서 比例制御方式의 境遇와 比例·微分制御方式의 境遇에 對한 評價를 行했으며, 그 뒤 船舶이 針路를 安定하게 維持할 수 있도록 通常的인 補償器를 導入하여 制御系를 構成하는 方式, 즉 PD 또는 PID制御器를 導入한 自動操舵裝置가 廣範圍하게 採擇되기에 이르렀다. <sup>2)</sup>

最近에는 最適制御理論이 發展함에 따라 파라메타 最適化 (Parameter Optimization) 또는 2次形式의 評價函數에 依한 動的인 最適化가 研究되기 始作하여, 模型 또는 實船實驗에 依해 「船體運動과 抵抗」이라던가 「經濟的인 觀點」에서 評價函數를 決定하여 自動操舵裝置를 最適으로 設計하고자 하는 研究結果가 多數 報告되어 있으며, <sup>3,4,5,6,10,11)</sup> AR (Auto Regressive) 形의 Auto Pilot 및 適應制御方式을 導入한 研究 等도 많이 報告되고 있다. <sup>15)</sup>

그러나, 이러한 研究들은 너무 理論的이고 論理的인 點을 重視하

여 人間의 오랜 經驗과 知識을 輕視하고 있는 境遇가 많다. 그리고, 船舶操舵系는 非線形的인 特性을 가지고 있고 또한 制御파라메타는 船舶의 積貨狀態에 따라 變하는 等, 制御系의 制御方式을 狀況에 따라 바꾸어 주어야 제 機能을 發揮할 수 있는 性質을 지니고 있으며, 船舶은 船舶運航에 從事하는 人間一例를 들어 航海士 또는 Quarter Master 一에 依해 制御가 可能하다. 따라서, 本論文에서는 이러한 점을 勘案하여 現在까지 進行되어온 以上과 같은 研究結果에 人間の 經驗 및 知識을 附加한 새로운 制御方式—Fuzzy Logic Control 方式—을 船舶操舵系에 導入하고자 한다.

Fuzzy Logic Control 은, 境界가 確實하지 않은 애매한 일이나 現象을 量的으로 說明하기 爲해 Membership 函數의 概念을 導入한 Fuzzy 集合論이 L. A. Zadeh<sup>12)</sup>에 依해 提唱된 以來, Mamdani<sup>13, 14)</sup>에 依해 最初로 Steam Engine의 制御問題에 應用되었으며, 그 後 오늘날까지 여러가지 分野에 應用되어 刮目할 만한 研究結果들이 報告되고 있다.<sup>7)</sup>

특히, Auto Pilot 에 適用되어, 線形인 境遇에 있어서 從來의 PD Controller 와 類似하게 그 制御가 實現됨이 確認되었다.<sup>17)</sup>

Fuzzy Logic Control 은, 人間の 直觀, 六感, 經驗 및 知識에 依해 認識된 시스템의 舉動과 그 物理的 性質을 綜合하고, 이들을 Linguistic Control Rule (以下에서는 LCR이라 表記함)로 論理化하여 Algorithm을 構成하고, 이 Algorithm을 計算機로 處理함으로써 對象을 制御하고자 하는 方法이다. 특히 非線形的 對象이라던

가 環境의 變化 等を LCR로 表現함으로써 比較的 쉽게 對象을 다룰 수 있다.

따라서, 本 論文에서는 最適制御理論의 研究結果와 새로운 Fuzzy Logic을 導入하고, 操舵系の Energy 損失을 考慮하여, 操舵系에 對한 Algorithm을 構成한 뒤, 線形과 非線形的 境遇에 對해 各各 시뮬레이션을 行하여, 그 制御結果와 Energy 損失에 對한 評價를 通해 이의 有效性을 檢證하고자 한다.

本 論文은 다섯개의 章으로 構成되며, 第2章에서는 먼저 Fuzzy Logic Control을 爲한 準備段階로 Fuzzy 集合論과 새로운 合成規制 下에서의 Fuzzy Reasoning에 對하여 說明하고, 第3章에서는 Fuzzy Logic Control을 船舶의 操舵系에 導入하는 具體的인 方法으로서 偏角에 注目한 境遇와 偏角 및 偏角速度에 注目한 境遇에 對해 各各 記述하며, 第4章에서는 計算機 시뮬레이션을 通해 本 論文에서 導入한 Fuzzy Logic Controller의 有效性을 確認하여 그 結果에 對한 檢討를 行한다.

## 2. Fuzzy Logic Control을 爲한 数学的 準備

Fuzzy Logic Control을 行하기 爲해서는, 먼저 論理的으로 表現된 情報을 機械 즉 計算機가 다룰 수 있도록 定量化하지 않으면 안된다. 즉, 人間의 經驗으로 부터 制御實現을 爲한 法則을 만들고 이 法則을 Linguistic Proposition으로 表現한 뒤, 各 Linguistic Proposition의 Linguistic Variable을 Fuzzy 量으로 表現한다.

그리고, 各 Linguistic Proposition 에 對한 Fuzzy 關係를 求한 뒤, 이들의 結合으로 全體 LCR 에 對한 Fuzzy 關係를 求하고, 이에 對해 Fuzzy Reasoning 을 行하여 制御人力에 對한 出力을 求하며, 이 制御出力인 操作量으로 시스템을 制御하게 된다. 그런데 人間이 지니고 있는 情報에는 人間の 主觀性이 많이 內包되어 있기 때문에 매우 애매한 點이 많아서 從來의 定量化 方法으로는 處理하기 힘든 性질의 것이 大部分이다. 따라서, 이러한 問題를 處理할 수 있는 새로운 數學的 方法 - Fuzzy 代數理論 - 이 必要하게 된다.

### 2.1 Fuzzy 集合論

$X$ 를 空間 (Space),  $x$ 를 要素라 하자. 즉,  $X = \{ x \}$ . 이 때 空間  $X$ 에 있어서의 Fuzzy 集合  $A$ 란 다음과 같은 membership function  $\mu_A$ 에 의해 定義되는 集合이다.

$$\mu_A : X \rightarrow M \quad (2.1)$$

$$\text{단, } M = [0, 1]$$

便宜上  $A$ 는 다음과 같이 表現한다.

$X$ 가 有限集合  $\{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$  일 때

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.2)$$

$X$ 가 無限集合일 때

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad (2.3)$$

集合  $X$ 는 Fuzzy 集合  $A$ 의 台集合이라 불린다.  $/$ 의 오른쪽은 台集合의 要素이고 왼쪽은 그 要素의 Membership 值이다.

$X$ 가 無限集合일 때 Fuzzy 集合의 合, 積, 補는 各各 다음과 같이 定義된다.

$$A \cup B = \int \mu_A(x) \vee \mu_B(x) / x \quad (2.4)$$

$$A \cap B = \int \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) / x \quad (2.5)$$

$$A^c = (1 - \int \mu_A(x)) / x \quad (2.6)$$

bounded sum  $\oplus$ 와 bounded difference  $\ominus$ 는 各各 다음과 같다.

$$A \oplus B = \int 1 \wedge (\mu_A(x) + \mu_B(x)) / x \quad (2.7)$$

$$A \ominus B = \int 0 \vee (\mu_A(x) - \mu_B(x)) / x \quad (2.8)$$

集合  $X$ 와  $Y$ 의 直積  $X \times Y$ 의 Fuzzy 部分集合

$$R = \int_{X \times Y} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (2.9)$$

는 特히 Fuzzy 關係라 불린다.

2 個의 Fuzzy 集合  $A \subset X$ ,  $B \subset Y$ 의 直積

$$A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \quad (2.10)$$

은 Fuzzy 關係의 代表的인 例이다.

$A \subset X$ 와  $R \subset X \times Y$ 의 다음의 演算을 合成 -maxmin 合成 "o" 이라 하고  $Y$ 의 Fuzzy 部分集合을 構成한다.

$$A \circ R = \int_Y \text{SUP}_{x \in X} [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \quad (2.11)$$

集合이 有限할 때 Fuzzy 集合과 關係를 벡터 및 行列을 使用하

여 表示하면 合成演算에 便利한 境遇가 많다. 즉  $A = \{a_i\}$ ,

$a_i = \mu_A(x_i)$ ,  $R = \{\gamma_{ij}\}$ ,  $\gamma_{ij} = \mu_R(x_i, y_j)$ ,  $A \circ R = \{b_j\}$ ,

$b_j = \mu_{A \circ R}(y_j)$  라고 하면,

$$b_j = \bigvee_i (a_i \wedge \gamma_{ij}) \quad (2.12)$$

( 단,  $\vee$ 는 Maximum,  $\wedge$ 는 Minimum )

다음에 Linguistic Proposition 에 대하여 說明하기로 한다. F를 Fuzzy 部分集合形의 命題, P를 Linguistic Proposition이라 하고,  $x \in X$ 이라 하면, P는  $P = x$  is F로 나타낼 수 있다. 예를 들어  $P = x$  is small integer를  $X = \{ 1, 2, 3, \dots, 10 \}$ 에 對해 表現하면,

$$\begin{aligned} \text{small integer} = & 1./1 + 1./2 + .8/3 + .6/4 \\ & + .4/5 + .2/6 + .1/7 + .0/8 \\ & + .0/9 + .0/10 \end{aligned} \quad (2 \cdot 13)$$

으로 나타낼 수 있다.

두 個의 Linguistic Proposition  $P = x$  is F,  $Q = y$  is G,  $F \subset X$ ,  $G \subset Y$ 가 주어졌을 때, 그 合成命題는 一般的으로  $(P, Q) = (x, y)$  is R,  $P \subset X \times Y$ 라고 表示된다.

## 2.2 새로운 合成規則 下에서의 Fuzzy reasoning<sup>16)</sup>

Fuzzy reasoning 이란

$$\left. \begin{array}{l} \text{前題 1 : If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \\ \text{前題 2 : } x \text{ is } A' \\ \text{結 論 : } y \text{ is } B' \end{array} \right\} \quad (2 \cdot 14)$$

前題 1·2로 부터 結論을 推論하는 것으로 Compositional Rule of Inference라 불린다. 以下에서는 前述한 바와 같은 前題 1을 簡單히 “ If A then B”,  $A \rightarrow B$  등으로 表現하고, 또 R을  $R_{A \rightarrow B}$ ,



$R_{AB}$  等으로 表現하기로 한다.  $A, B$  等은 勿論 Fuzzy 集合이다.

다음에 새로운 合成法을 定義하기 前에 必要한 演算 즉, 限界積 ( bounded - product ) 은

$$x \odot y = 0 \vee (x + y - 1) \quad (2 \cdot 15)$$

이다. 이 演算을 使用함으로써 새로운 合成 - Max -  $\odot$  合成 " $\square$ " - 은 다음과 같이 定義된다.

$$A \square B \leftrightarrow \mu_{A \square B}(y) = \bigvee_x \{ \mu_A(x) \odot \mu_B(x, y) \} \quad (2 \cdot 16)$$

따라서,

$$B' = A' \square (A \times B) \quad (2 \cdot 17)$$

$$\therefore \mu_{B'}(y) = \bigvee_x [ \mu_{A'}(x) \odot \{ \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \} ]$$

여기서,  $u = \mu_A(x)$ ,  $v = \mu_B(y)$ ,  $v' = \mu_{B'}(y)$  라 하면  $A' \approx A$  일 때

$$v' = \bigvee_u \{ u \odot (u \wedge v) \}$$

$f(u) = u \odot (u \wedge v)$  라 두면 (2·15) 式으로 부터

$$\begin{aligned} f(u) &= 0 \vee \{ u + (u \wedge v) - 1 \} \\ &= \{ 0 \vee (2u - 1) \} \wedge \{ 0 \vee (u - 1 + v) \} \quad (2 \cdot 18) \end{aligned}$$

따라서,  $f(u)$  를  $v$  를 Parameter 로써 나타내면 Fig. 1 과 같다.

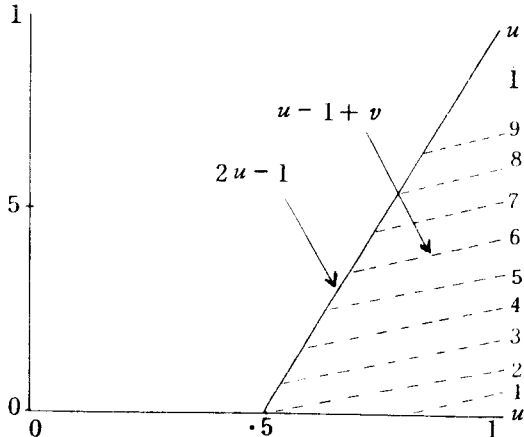


Fig. 1  $f(u)$  of Eq. (2·18)

Fig. 1 에서  $v = 0.2$  일 때  $f(u)$  는 占線部와 같이 되어  $v' = \bigvee_u f(u) = 0.2$  로 되며, 一般的으로 任意의  $v$  에 對해서도  $v' = v$  로 되는 것을 確認할 수 있다.

그러므로,  $A' = A$  일 때  $B' = B$  가 얻어진다.

Compositional Rule of Inference 에서 期待하는 바는  $A' \approx A$  일 때  $B' \approx B$  로 되는 점이다. 勿論, 그 以上の 것이  $A \rightarrow B$  로 부터 期待될 可能性이 있다면 그것으로 足하다.

條件이 하나 더 增加하여 “If A then If B then C” =  $A \rightarrow B \rightarrow C$  의 境遇에는,  $R = A \times B \times C$  로 되어  $A', B'$  가 주어지면 Fuzzy reasoning 의 結果  $C'$  는 다음과 같이 된다.

$$C' = B' \square (A' \square R_{A \rightarrow B \rightarrow C}) \quad (2 \cdot 19)$$

또한, 2 個의 implication  $A_1 \rightarrow B_1$  또는  $A_2 \rightarrow B_2$  의 or, and 結合은

$$\begin{aligned} A_1 \rightarrow B_1 \text{ or } A_2 \rightarrow B_2 &\Rightarrow R = R_{A_1 \rightarrow B_1}, \cup R_{A_2 \rightarrow B_2} \\ A_1 \rightarrow B_1 \text{ and } A_2 \rightarrow B_2 &\Rightarrow R = R_{A_1 \rightarrow B_1}, \cap R_{A_2 \rightarrow B_2} \end{aligned} \quad (2 \cdot 20)$$

이 된다.

### 3. Fuzzy Logic Control에 依한 操舵系의 制御

船舶이 自動操舵로 航海할 境遇, 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. 自動操舵가 아니고 人間에 依한 操舵의 境遇에는 自動操舵機 代身 Quarter Master 가, 本 論文에서 다루고자 하는 Fuzzy Logic Controller 에 依한 操舵의 境遇에는 Fuzzy Logic Controller 가 들어 가게 된다. 이들 操舵系를 Block 線圖로 나타내면 Fig. 2 와 같다.

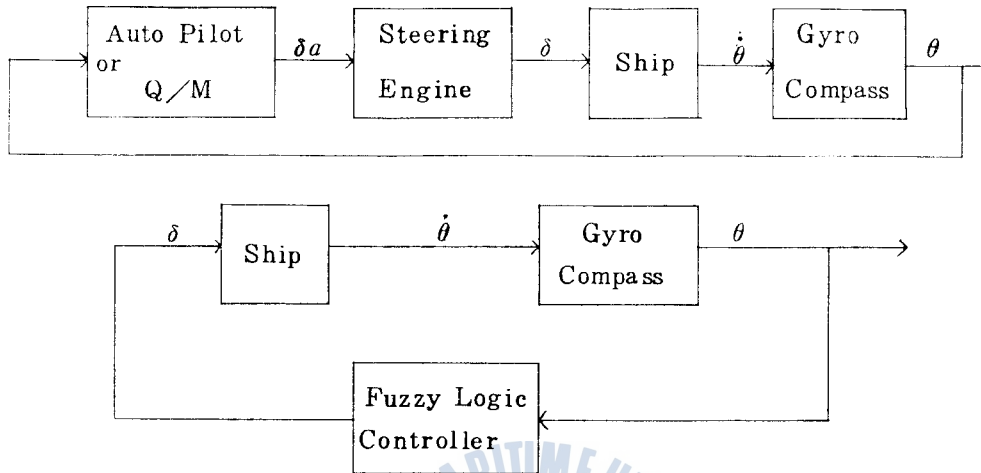


Fig. 2 Block diagram of ship's steering system

Fig. 2의 Block 線圖에 있어서 各各의 要素에 對하여 살펴보기로 한다.

船舶의 運動方程式은 一般的으로 다음의 2階線形微分方程式으로 表現할 수 있다.

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\theta}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \theta + (K(\dot{\theta})^3) = T_s \delta + T_3 T_s \frac{d\delta}{dt} \quad (3.1)$$

단,  $T_1, T_2, T_3$  : 操縱性能指數  $T_s$  : 操縱利得定數,  $\theta$  : 偏角,

$\dot{\theta}$  : 偏角速度,  $\delta$  : 舵角,  $\frac{d\delta}{dt}$  : 舵角速度,  $K(\dot{\theta})^3$  : 非線形 要素

Auto Pilot 에 依한 針路維持의 境遇, 操作量인 舵角은 PD 制御의 境遇에는  $\delta_a = -k_p \theta - k_d \dot{\theta}$  로 주어지며, 이 舵角이 Steering Engine 을 通하여 舵에 加해지면, 舵機 舵壓이 發生하여 船舶을 廻頭

시키고자 하는 偏角速度  $\dot{\theta}$ 가 發生하고, 이  $\dot{\theta}$ 를 積分하면 出力인 偏角을 얻게 되며, 이 出力을 Feed Back시켜 船舶의 針路를 自動으로 制御하게 된다.

Q/M의 境遇에는 舵角  $\delta_0$ 를 經驗에 依해 適切하게 줌으로써 船舶의 針路를 安定하게 制御하게 되며, 이 때 Q/M는 지금까지의 蓄積된 經驗에 依해서 偏角의 크기, 偏角의 變化速度, 外亂에 依한 Lee Way 등을 考慮해 가면서 操船하게 된다. 즉, 偏角에 대강 比例하여 반대편으로 舵角을 주며, 偏角의 增減에 따라 舵角을 變化시켜 준다.

Fuzzy Logic Controller의 境遇에는 이와 같은 Q/M의 經驗과 理論的인 研究結果들로부터 LCR을 作成하여 이 LCR에 對한 Fuzzy 關係를 求하고, 前述의 Fuzzy reasoning에 依해 制御人力인 舵角  $\delta$ 를 決定하여 船舶을 制御하게 된다.

以下에서는 制御 實現方法을, 偏角에 注目한 境遇와 偏角 및 偏角速度에 注目한 境遇에 對해 各各 살펴보기로 한다.

### 3.1 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control

本 節에서는 Q/M의 經驗에 비추어 偏角의 크기에 대강 比例하여 舵角을 줌으로써 船舶을 制御할 수 있다는 생각을 基礎로 LCR을 作成하고, 이를 利用하여 Fuzzy Logic Control을 實行하는 方法에 對해 說明하고자 한다.

먼저, Fuzzy Variable을 決定한다. 이는 經驗에 依해 決定하면

되고 船舶操舵口令詞를 利用할 수 있다. 여기에서는 制御量인 偏角에 對해서는 SB, SM, SS, SV, SO, PV, PS, PM, PB 의 9 個로, 操作量인 舵角에 對해서는 P17.5, P10, EP, P2.5, ZE, S2.5, ES, S10, S17.5 의 9 個로 各各 定한다.

다음에는, Fuzzy Variable 의 台集合은 區間 [ -27.5, 27.5 ]로 定하고, Fuzzy Variable 을 確定하기 爲해 Membership Function 을 決定한다. Membership Function 은 台集合을 離散化하여 決定할 수도 있고, 規格化하여 適當한 函數形態로 表現할 수도 있으나, 여기서는 台集合을 離散化하여 다음 Table 1 과 같이 賦與하기로 한다.

Table 1. Membership Function of fuzzy variables in the case of considering on deviation angle.

	-27.5	-25	-22.5	-20	-17.5	-15	-12.5	-10	-7.5	-5	-2.5
SB	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
SM	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
SS	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	0.1	0.3
SV	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	0.3
SO	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.2	.3	.7
PV	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.8	1.0
PS	.0	.0	.0	.1	.3	.5	.7	.8	1.0	.8	.7
PM	.0	.1	.2	.3	.7	1.0	.7	.3	.2	.1	.0
PB	1.0	.8	.6	.4	.2	.1	.0	.0	.0	.0	.0

	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5
SB	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.2	.4	.6	.8	1.0
SM	.0	.0	.1	.2	.3	.7	1.0	.7	.3	.2	.1	.0
SS	.5	.7	.8	1.0	.8	.7	.5	.3	.1	.0	.0	.0
SV	.8	1.0	.8	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
SO	1.0	.7	.3	.2	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
PV	.8	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
PS	.5	.3	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
PM	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
PB	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

다음은 制御法則인 LCR의 構成인데 Q/M의 經驗과 操舵로 인한 抵抗增加 및 船舶速度減小 等の 推進馬力の 損失을 考慮하여 다음 Table 2와 같이 構成한다.

Table 2의 LCR에서의 制御量과 操作量은 勿論 Fuzzy量이다.

Table 2. Linguistic Control Rule in the case of considering on deviation angle.

or	if DE = SB	then	RU = P 17.5
or	if DE = SM	then	RU = P 10
or	if DE = SS	then	RU = EP
or	if DE = SV	then	RU = P 2.5
or	if DE = SO	then	RU = ZE
or	if DE = PV	then	RU = S 2.5
or	if DE = PS	then	RU = ES
or	if DE = PM	then	RU = S 10
or	if DE = PB	then	RU = S 17.5

단, DE ; Deviation Angle	RU ; Rudder Angle
SB ; Starboard BIG	P17.5; Port 17.5
SM ; Starboard MEDIUM	P10 ; Port 10
SS ; Starboard SMALL	EP ; Port Easy
SV ; Starboard Very SMALL	P2.5 ; Port 2.5
SO ; Starboard ZERO	ZE ; Zero Rudder
PV ; Port Very SMALL	S2.5 ; Starboard 2.5
PS ; Port SMALL	ES ; Starboard Easy
PM ; Port MEDIUM	S10 ; Starboard 10
PB ; Port BIG	S17.5; Starboard 17.5

다음에는 Fuzzy Logic Controller의 入出力關係를 記述하는 Fuzzy Relation을 決定하는 方法에 對해 說明하기로 한다. 먼저 各 Linguistic Proposition에 對한 Fuzzy Variable을 Fuzzy 量으로 나타내고 이들에 對한 Fuzzy 關係를 (2·10)式에 依해 求한다.

예를 들어, Fuzzy Variable SB를 Fuzzy 量으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 SB = & .0/-27.5 + .0/-25 + .0/-22.5 + .0/-20 + .0/-17.5 + .0/-15 \\
 & + .0/-12.5 + .0/-10 + .0/-7.5 + .0/-5 + .0/-2.5 + .0/.0 \\
 & + .0/2.5 + .0/5 + .0/7.5 + .0/10 + .0/12.5 + .1/15 \\
 & + .2/17.5 + .4/20 + .6/22.5 + .8/25 + 1.0/27.5
 \end{aligned}$$

Fuzzy 關係  $R_{SB \rightarrow P17.5}$ 를 求해 보면 Table 3과 같다.

Table 3. Fuzzy Relation  $R_{SB \rightarrow P17.5}$ 

	.0							.0										
.0	.0	.1	.1	.1	.1	.1	.1											
.0	.0	.2	.2	.2	.2	.2	.2											
.0	.0	.3	.4	.4	.4	.4	.3											
.0	.0	.3	.6	.6	.6	.6	.3							.0				
.0	.0	.3	.8	.8	.8	.8	.3											
.0	.0	.3	.8	1.0	.8	.8	.3											

그리고,全體 LCR에 對한 Fuzzy 關係 R을 (2·20)式에 依해 求한다. 즉,

$$R = R_{SB \rightarrow P17.5} \cup R_{SM \rightarrow P10} \cup R_{SS \rightarrow EP} \cup R_{SV \rightarrow P2.5} \cup R_{SO \rightarrow ZE} \\ \cup R_{PV \rightarrow S2.5} \cup R_{PS \rightarrow ES} \cup R_{PM \rightarrow S10} \cup R_{PB \rightarrow S17.5}$$

다음에, Fuzzy Logic Controller의 舵角은 上記 R로 부터 推論하여 다음과 같이 求한다.

어떤 時刻에 있어서의 入力 (Rudder Angle)을  $\hat{RU}$ 라 하면 (2·16)式으로 부터

$$\hat{RU} = A(DE) \square R \quad (3 \cdot 2)$$

이 때  $\hat{RU}$ 의 台集合을  $\hat{RU} = \{\Delta ru\}$ 라 하면, 時刻  $n$ 에 있어서의 具體的인 舵角  $\delta_n$ 은

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta ru^*, \quad \mu_{\hat{RU}}(\Delta ru^*) = \max \mu_{\hat{RU}}(\Delta ru) \quad (3 \cdot 3)$$



이다. 여기에서 問題가 되는 Sampling 間隔  $\tau$ 는 다음과 같이 決定한다. 8)

$$\tau = \frac{1}{20 f_{max}} \quad (f_{max} = \text{Spectrum의 最高周波數})$$

그런데, 船舶의 境遇  $f_{max}$ 는 약 0.5 c/s 이므로  $\tau = 0.1 \text{ sec}$  程度이다. 그러나, 船舶의 時定數는 매우 크므로 實用上 0.2 sec 程度로도 充分하다.

(3.2) 式에 있어서의  $A(DE)$ 는 偏角을 Fuzzyfication 한 것이다. 例를 들어  $DE = \text{Starboard } 10^\circ$  라 하면

$$A(DE) = \begin{pmatrix} -27.5 & -25 & \dots & 7.5 & 10 & 12.5 & \dots & 25 & 27.5 \\ .0 & .0 & .0 & 1.0 & .0 & .0 & .0 & .0 \end{pmatrix}$$

와 같이 Non Fuzzy 量으로 나타낼 수도 있다. 그러나, 計測上  $DE = 10^\circ$  라고 하는 明確한 形態로 決定되는 境遇는 거의 없으며, 또한 台集合의 要素數를 줄인다고 하는 觀點에서도 이 값을 Modifier Nearly 形態로 Fuzzyfication 하여 處理하는 것<sup>註)</sup>이 매우 便利하다.

註) 어떤 命題를 “if A is m  $10^\circ$ ” 라 表現할 때 m을 modifier 라 하고, 이 때의 값의 變化에 對해서는 適當히 使用할 必要가 있다. 즉, Fig. 3 과 같이 주변  $10^\circ$  以外에서도 값을 갖는 Vector 로 表現할 수 있다.

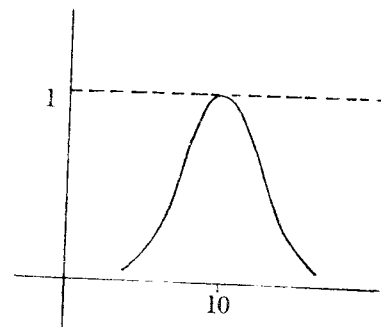


Fig. 3 Fuzzyfication of nearly 10

### 3.2 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Control

一般的으로 Q/M는 偏角의 크기뿐만 아니라 偏角의 變化量도 同時에 考慮하여 操舵한다. 다시 말해 PD Controller에 對應되는 役割을 한다. 本節에서는 이러한 點을 考慮하여 LCR을 構成하고 이를 船舶制御에 應用하는 過程에 對해 說明하고자 한다.

먼저 偏角에 對한 Fuzzy Variable로는 偏角만을 考慮한 Fuzzy Logic Control의 境遇와 同一한 것을 使用하고, 偏角의 變化量에 對해서는 BI, SI, ZI, SD, BD의 다섯個, 操作量인 舵角에 對해서는 HP, P17.5, PP, P10, P7.5, EP, P2.5, ZE, S2.5, ES, S7.5, S10, SS, S17.5, HS의 15個를 各各 使用하기로 한다.

다음, Fuzzy Variable의 台集合은, 偏角과 舵角에 對해서는 區間  $[-27.5, 27.5]$ 로, 偏角의 變化量( $\theta(T+1) - \theta(T)$ , 時間單位: 秒)에 對해서는, 實船舶의 境遇 偏角의 變化量은 아주 큰 境遇라야 約  $1.5^\circ/\text{sec}$  程度 된다는 點을 勘案하여 區間  $[-1.5, 1.5]$ 로 한다.

Membership Function은, 偏角에 對해서는 Table 1, 偏角의 變化量에 對해서는 Table 4, 舵角에 對해서는 Table 5와 같은 값을 가진다.

그리고, LCR은 Q/M의 經驗과 船舶操舵系의 最適制御<sup>2)</sup>에 對한 研究結果 및 Energy 損失에 對한 評價函數를 考慮하여 만들어졌으며, Table 6과 같이 構成하였다.

이다. 여기에서 問題가 되는 Sampling 間隔  $\tau$ 는 다음과 같이 決定한다. 8)

$$\tau = \frac{1}{20 f_{max}} \quad (f_{max} = \text{Spectrum의 最高周波數})$$

그런데, 船舶의 境遇  $f_{max}$ 는 약 0.5 c/s 이므로  $\tau = 0.1 \text{ sec}$  程度이다. 그러나, 船舶의 時定數는 매우 크므로 實用上 0.2 sec 程度로도 充分하다.

(3.2) 式에 있어서의 A (DE)는 偏角을 Fuzzyfication 한 것이다. 예를 들어 DE = Starboard 10° 라 하면

$$A (DE) = \begin{pmatrix} -27.5 & -25 & \dots & 7.5 & 10 & 12.5 & \dots & 25 & 27.5 \\ .0 & .0 & & .0 & 1.0 & .0 & & .0 & .0 \end{pmatrix}$$

와 같이 Non Fuzzy 量으로 나타낼 수도 있다. 그러나, 計測上 DE = 10° 라고 하는 明確한 形態로 決定되는 境遇는 거의 없으며, 또한 台集合의 要素數를 줄인다고 하는 觀點에서도 이 값을 Modifier Nearly 形態로 Fuzzyfication 하여 處理하는 것<sup>註)</sup>이 매우 便利하다.

註) 어떤 命題를 “if A is m 10°” 라 表現할 때 m을 modifier 라 하고, 이 때의 값의 變化에 對해서는 適當히 使用할 必要가 있다. 즉, Fig. 3 과 같이 주면 10° 以外에서도 값을 갖는 Vector 로 表現할 수 있다.

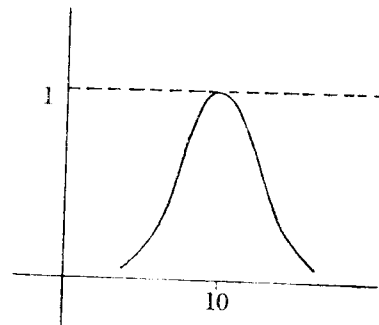


Fig. 3 Fuzzyfication of nearly 10

### 3·2 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Control

一般的으로 Q/M는 偏角의 크기뿐만 아니라 偏角의 變化量도 同時에 考慮하여 操舵한다. 다시 말해 PD Controller에 對應되는 役割을 한다. 本節에서는 이러한 點을 考慮하여 LCR을 構成하고 이를 船舶制御에 應用하는 過程에 對해 說明하고자 한다.

먼저 偏角에 對한 Fuzzy Variable로는 偏角만을 考慮한 Fuzzy Logic Control의 境遇와 同一한 것을 使用하고, 偏角의 變化量에 對해서는 BI, SI, ZI, SD, BD의 다섯個, 操作量인 舵角에 對해서는 HP, P17.5, PP, P10, P7.5, EP, P2.5, ZE, S2.5, ES, S7.5, S10, SS, S17.5, HS의 15個를 各各 使用하기로 한다.

다음, Fuzzy Variable의 台集合은, 偏角과 舵角에 對해서는 區間  $[-27.5, 27.5]$ 로, 偏角의 變化量 ( $\theta(T+1) - \theta(T)$ , 時間單位: 秒)에 對해서는, 實船舶의 境遇 偏角의 變化量은 아주 큰 境遇라야 約  $1.5^\circ/\text{sec}$  程度 된다는 點을 勘案하여 區間  $[-1.5, 1.5]$ 로 한다.

Membership Function은, 偏角에 對해서는 Table 1, 偏角의 變化量에 對해서는 Table 4, 舵角에 對해서는 Table 5와 같은 값을 가진다.

그리고, LCR은 Q/M의 經驗과 船舶操舵系의 最適制御<sup>2)</sup>에 對한 研究結果 및 Energy 損失에 對한 評價函數를 考慮하여 만들어 졌으며, Table 6과 같이 構成하였다.

Table 4. Membership Function of angular velocity of deviation angle in the case of considering on deviation angle and it's angular velocity.

	-1.5	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
B.I.	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.4	.8	1.0	.8
S.I.	.0	.0	.0	.0	.2	.4	.7	1.0	.7	.4	.2
Z.I.	.0	.2	.4	.7	.8	1.0	.8	.7	.4	.2	.0
S.D.	.2	.4	.7	1.0	.7	.4	.2	.0	.0	.0	.0
E.D.	.8	1.0	.8	.4	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0

Table 5. Membership Function of rudder angle in the case of considering on deviation angle and it's angular velocity.

	-27.5	-25	-22.5	-20	-17.5	-15	-12.5	-10	-7.5	-5	-2.5
HP	.0	.3	.8	1.0	.8	.3	.0	.0	.0	.0	.0
P 17.5	.0	.9	.3	.8	1.0	.8	.3	.0	.0	.0	.0
PP	.0	.0	.0	.0	.3	.8	1.0	.8	.3	.0	.0
P10	.0	.0	.0	.0	.0	.2	.7	1.0	.7	.2	.0
P7.5	.0	.0	.0	.1	.3	.5	.7	.8	1.0	.8	.7
EP	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.2	.7	1.0	.7
P2.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.8	1.0
ZE	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.3	.5	.7	.8
S2.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3
ES	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
S7.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.3
S 10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
SS	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
S17.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
HS	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5
HP	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
P 17.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
PP	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
P 10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
P7.5	.5	.3	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
EP	.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
P2.5	.8	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
ZE	1.0	.8	.7	.5	.3	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
S2.5	.8	1.0	.8	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
ES	.2	.7	1.0	.7	.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
S7.5	.5	.7	.8	1.0	.8	.7	.5	.3	.1	.0	.0	.0
S 10	.0	.0	.2	.7	1.0	.7	.2	.0	.0	.0	.0	.0
SS	.0	.0	.0	.3	.3	1.0	.8	.3	.0	.0	.0	.0
S17.5	.0	.0	.0	.0	.1	.3	.8	1.0	.8	.3	.1	.0
HS	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.8	1.0	.8	.3	.0

Table 6. Linguistic Control Rule in the case of considering on deviation angle and it's angular velocity.

if DE=SB then if CDE=BI then RU=HARD PORT  
 if DE=SB then if CDE=SI then RU=HARD PORT  
 if DE=SB then if CDE=ZI then RU=PORT 17.5  
 if DE=SB then if CDE=SD then RU=PORT RUDDER  
 if DE=SB then if CDE=BD then RU=PORT RUDDER  
 if DE=SM then if CDE=BI then RU=PORT RUDDER  
 if DE=SM then if CDE=SI then RU=PORT RUDDER  
 if DE=SM then if CDE=ZI then RU=PORT 10  
 if DE=SM then if CDE=SD then RU=PORT EASY  
 if DE=SM then if CDE=BD then RU=PORT EASY  
 if DE=SS then if CDE=BI then RU=PORT 10  
 if DE=SS then if CDE=SI then RU=PORT 7.5

```
if DE = SS then if CDE = ZI then RU = PORT EASY
if DE = SS then if CDE = SD then RU = PORT 2.5
if DE = SS then if CDE = BD then RU = ZERO RUDDER
if DE = SV then if CDE = BI then RU = PORT EASY
if DE = SV then if CDE = SI then RU = PORT EASY
if DE = SV then if CDE = ZI then RU = PORT 2.5
if DE = SV then if CDE = SD then RU = STARBOARD 2.5
if DE = SV then if CDE = BD then RU = STARBOARD 2.5
if DE = SO then if CDE = BI then RU = PORT EASY
if DE = SO then if CDE = SI then RU = PORT 2.5
if DE = SO then if CDE = ZI then RU = ZERO RUDDER
if DE = SO then if CDE = SD then RU = STARBOARD 2.5
if DE = SO then if CDE = BD then RU = STARBOARD EASY
if DE = PV then if CDE = BI then RU = PORT 2.5
if DE = PV then if CDE = SI then RU = PORT 2.5
if DE = PV then if CDE = ZI then RU = STARBOARD 2.5
if DE = PV then if CDE = SD then RU = STARBOARD EASY
if DE = PV then if CDE = BD then RU = STARBOARD EASY
if DE = PS then if CDE = BI then RU = ZERO RUDDER
if DE = PS then if CDE = SI then RU = STARBOARD 2.5
if DE = PS then if CDE = ZI then RU = STARBOARD EASY
if DE = PS then if CDE = SD then RU = STARBOARD 7.5
if DE = PS then if CDE = BD then RU = STARBOARD 10
if DE = PM then if CDE = BI then RU = STARBOARD EASY
if DE = PM then if CDE = SI then RU = STARBOARD EASY
if DE = PM then if CDE = ZI then RU = STARBOARD 10
if DE = PM then if CDE = SD then RU = STARBOARD RUDDER
if DE = PM then if CDE = BD then RU = STARBOARD RUDDER
if DE = PB then if CDE = BI then RU = STARBOARD RUDDER
if DE = PB then if CDE = SI then RU = STARBOARD RUDDER
if DE = PB then if CDE = ZI then RU = STARBOARD 17.5
if DE = PB then if CDE = SD then RU = HARD STARBOARD
if DE = PB then if CDE = BD then RU = HARD STARBOARD
```

단, CDE : Change in Deviation Angle

BI : Big Increase

SI : Small Increase

ZI : Zero

SD : Small Decrease

BD : Big Decrease

따라서, Fuzzy Logic Controller의 入力은 다음과 같이 決定된다. 어떤 時刻에 있어서의 入力 (Rudder Angle)을  $\hat{RU}$ 라 하면 (2·19) 式으로 부터

$$\hat{RU} = B(CDE) \square (A(DE) \square R) \quad (3 \cdot 4)$$

이다. 이 때 時刻  $n$ 에 있어서의 具體的인 舵角  $\delta_n$ 은 (3·3) 式과 같다.

Sampling 間隔  $\tau$ 는 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control의 境遇와 同一한 값을 使用하며, 또한 (3·4) 式에서  $A(DE)$  및  $B(CDE)$ 는 各各 偏角 및 偏角速度의 Fuzzy 量이다. 이 境遇에도  $DE$ 와  $CDE$ 는 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control의 境遇와 마찬가지로 Modifier Nearly를 使用하여 處理한다.

#### 4. 計算機 시뮬레이션 및 考察

3章에서 考察한 船舶操舵系에 對한 Fuzzy Logic Control을 實用化하기 爲해서는, 船舶에 Micro Processor를 設置하여 實驗해 보는 方法이 바람직하겠으나, 實船舶에 計算機를 裝置하는 問題는 經費



및 새로운 計測機器 設置 等の 副次的인 問題가 따르기 때문에,  
본 研究에서는 計算機시뮬레이션을 通해 制御結果를 檢討해 보기로  
한다.

線形 및 非線形인 境遇에 對하여 前述의 두가지 Fuzzy Logic  
Control 의 境遇와 從來의 PD Control 의 境遇를 比較해 볼 수 있  
도록 시뮬레이션을 各各 實施하였으며, 그 過程과 結果를 紹介하면  
다음과 같다.

操舵에 依한 船舶의 運動方程式은 (3·1)과 같이 表現된다. 시  
뮬레이션은 船舶의 運動方程式을 Runge - Kutta 法을 導入하여 實施  
하였으며, 이를 爲해 (3·1)式을 狀態方程式으로 表現하면 (4·1)  
式과 같이 된다.

$$\dot{X} = AX + B\delta + (D(\dot{\theta})^2) \quad (4 \cdot 1)$$

$$Y = CX$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -(T_1 + T_2)/T_1 T_2 & 1 \\ 0 & -1/T_1 T_2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ T_3 T_5 / T_1 T_2 \\ T_5 / T_1 T_2 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

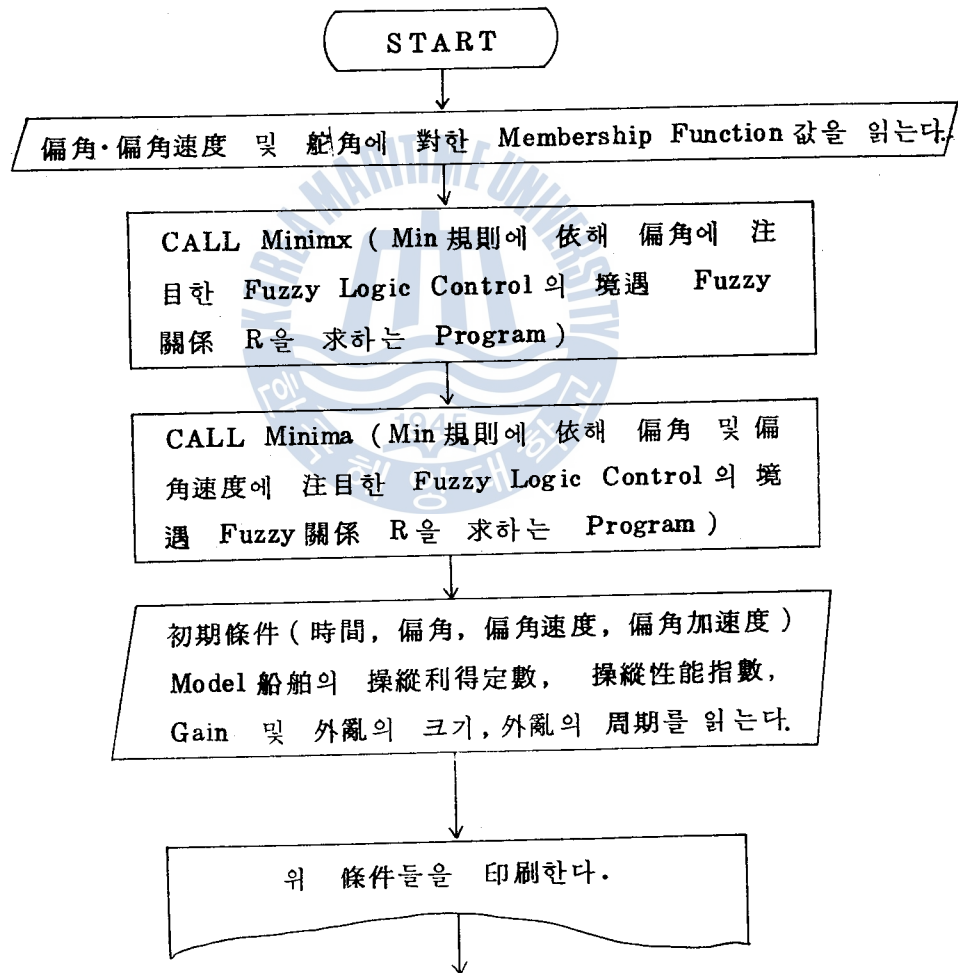
$$X' = (\theta, \dot{\theta}, x_3) \quad ( ' = \text{transpose} ), \quad C = (1, 0, 0)$$

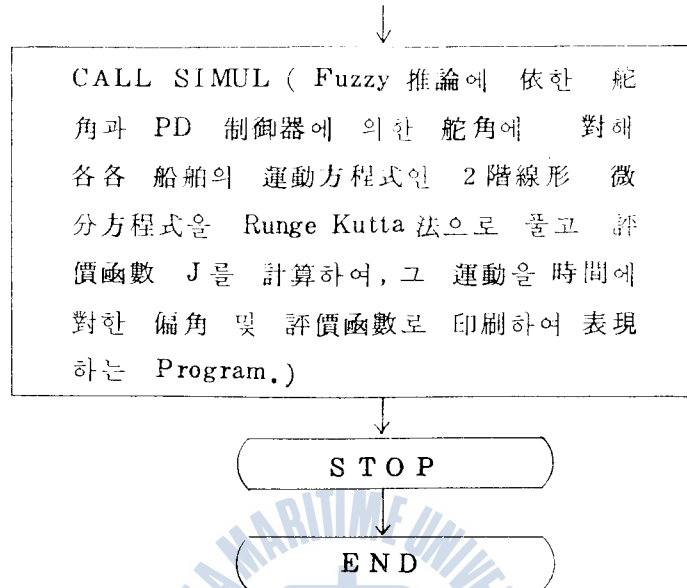
그리고, 船舶操縱의 制御系가 充分히 安定하다는 假定下에서 操舵  
抵抗과 針路偏差를 航路의 延長으로 取扱하여 Energy 損失에 對한  
評價函數를 다음과 같이 計算하였다. 이 때 係數  $n = 4^3$ 로 하  
였다.

$$J = \int (\theta^2 + n\delta^2) dt$$

Main Program 은 아래의 Flow Chart 와 같으며, 計算時間은 300 秒로 하고, 初期條件과 外亂의 크기를 各各 달리하는 여섯가지 境遇에 對한 計數을 하였다. ( Program List 는 附錄을 參照 )

### Main Program 의 Flow Chart





시뮬레이션에 使用한 船舶은 滿載貨物船이며, 그 船舶의 操縱性能 指數  $T_1, T_2, T_3$  와 操縱利得定數  $T_s$  는 各各 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$T_1 = 45, T_2 = 6, T_3 = 10, T_s = 0.08$$

PD Controller 의 境遇 入力舵角은  $\delta = -K_p\theta - K_d\dot{\theta}$  로 表現되며, 이 境遇의  $K_p, K_d$  는 上記 Model 船舶이 Auto Pilot 로 航海할 境遇에 對한 最適調整値를 使用하였으며, 그 값은 各各 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$K_p = 1.0, K_d = 5.0$  또한 非線形要素의 係數  $K=1$  로 하였다.

各 境遇에 對한 시뮬레이션 結果는 다음과 같다.

아울러 Fuzzy Logic Control 은 狀況에 따라 LCR을 變更시킬 수 있다는 長點을 利用하여 舵角을 偏角에 對해 0.1 ~ 1.0 倍까지 變化시켜 評價函數를 求한 結果, 偏角의 0.6 倍일 때 最少가 됨을 알았다. 따라서, 다음의 各 境遇에 있어서의 Fuzzy Logic Control 의

結果는 舵角을 偏角에 對해 0.6 倍로 하여 求한 것임을 밝혀둔다.

i) 線形制御系の 境遇

初期條件과 外亂의 크기를 各各 달리하는 여섯가지 Case 에 있어서의 結果는 Fig. 4·1 ~ Fig 4·6 과 같다.

全般的으로 Fuzzy Logic Control 은 PD Control 에 비해 希望針路로 찾아 들어가는 時間에 있어서는 다소 느리지만, 舵를 적게 使用함으로써 發生하는 Energy 損失面에 있어서는 相當히 良好한 結果를 나타내고 있다.

또한, 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control 보다 偏角 및 偏角速度에 注目한 境遇가 原針路로 부터의 離說量 및 Energy 損失面에 있어서 더 良好한 結果를 보이고 있음을 알 수 있다.

ii) 非線形制御系の 境遇

線形制御系와 마찬가지로 여섯가지 Case 에 對한 結果는 Fig 4·7 ~ Fig 4·12 와 같으며, 全體的으로 Fuzzy Logic Control 은 PD Control 에 비해 Energy 損失에 對한 評價函數 J가 線形인 境遇보다 훨씬 적게 나타남을 보이고 있다.

「Case 1」 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 없는 境遇

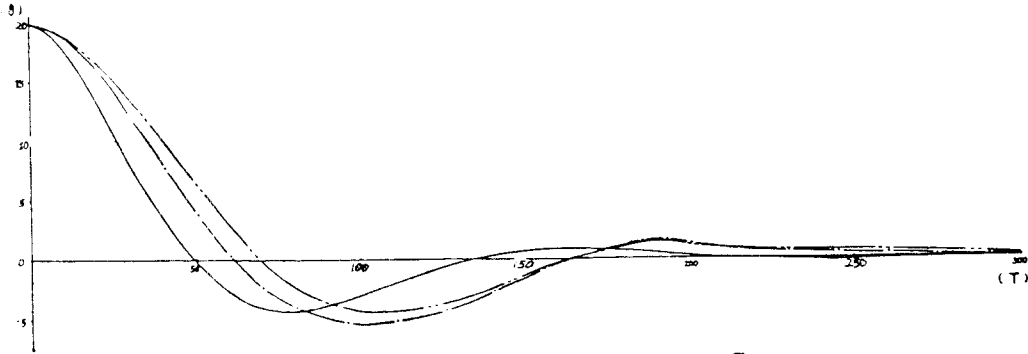


Fig. 4·1 (a) Result of Control in the Case 1.

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 1」 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 없는 境遇

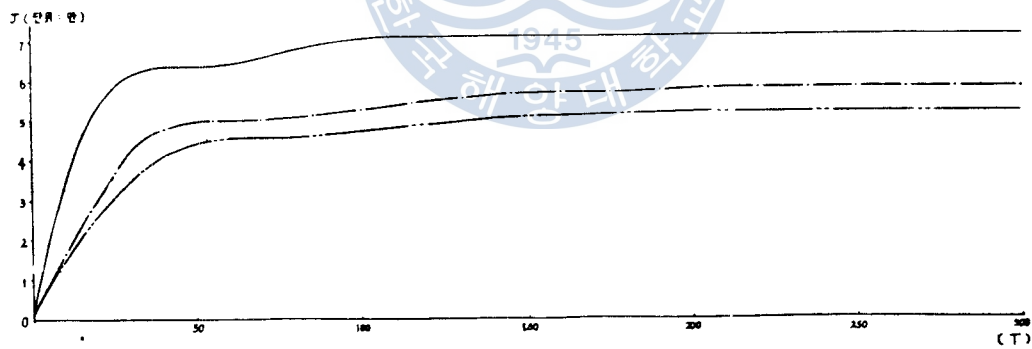


Fig. 4·1(b) Criterion Funtion in the Case 1.

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 2」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 없는 境遇

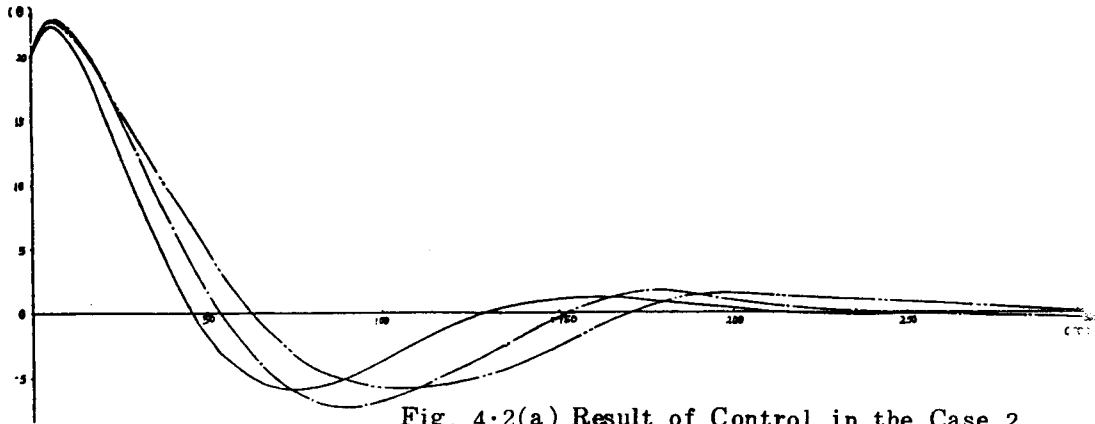


Fig. 4-2(a) Result of Control in the Case 2.

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 2」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 없는 境遇

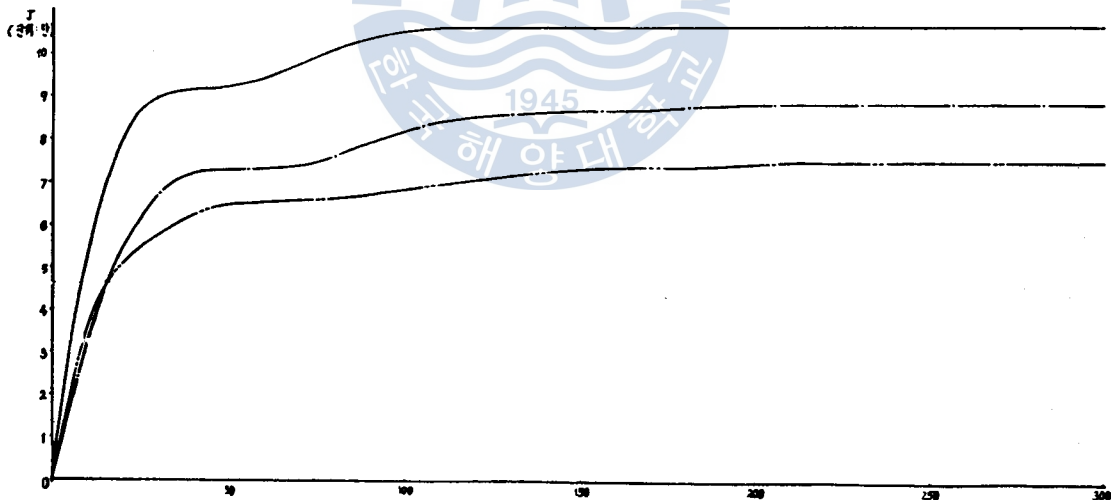


Fig. 4-2(b) Criterion Function(J) in the Case 2.

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 3」 初期의 偏角이  $20^\circ$ ; 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

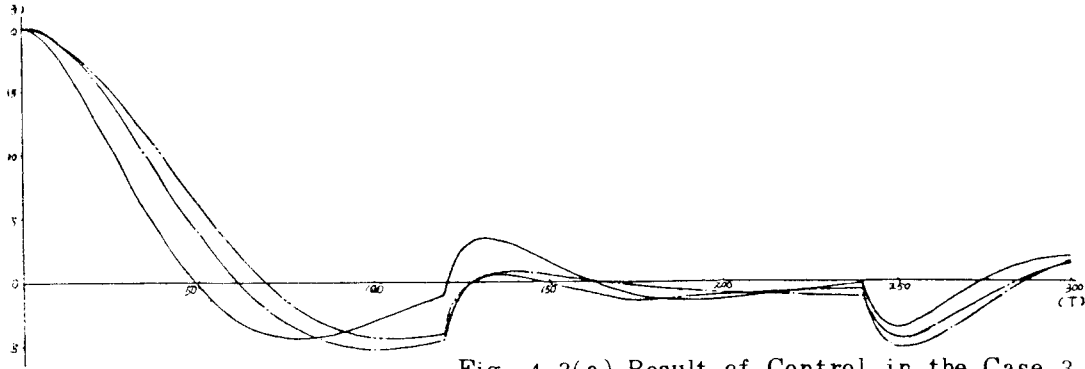


Fig. 4.3(a) Result of Control in the Case 3.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 3」 初期의 偏角이  $20^\circ$ ; 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

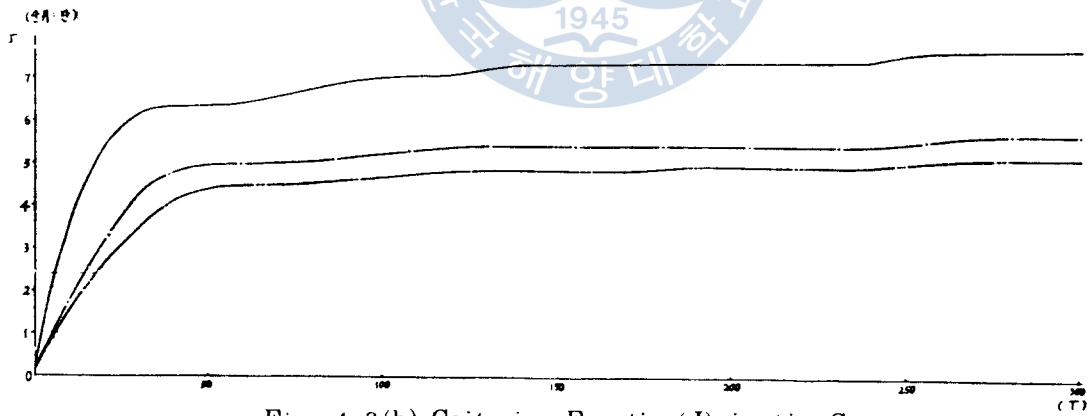


Fig. 4.3(b) Criterion Function (J) in the Case 3.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 4」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

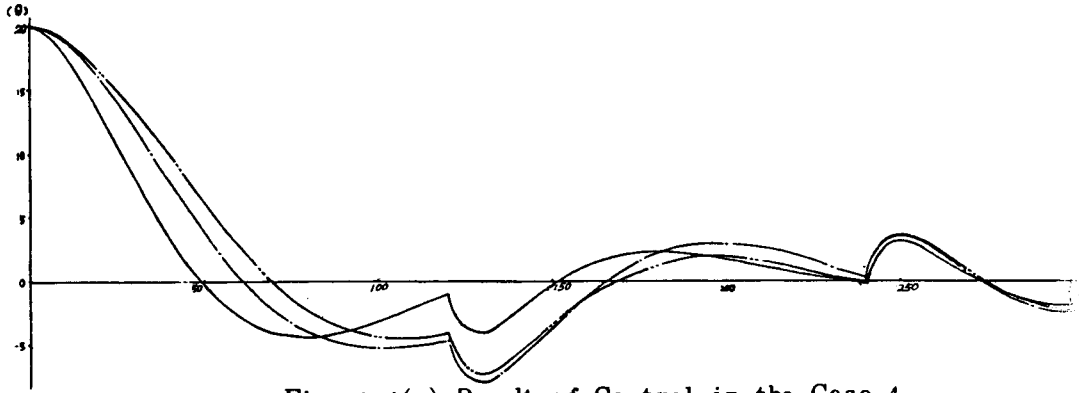


Fig. 4.4(a) Result of Control in the Case 4.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 4」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

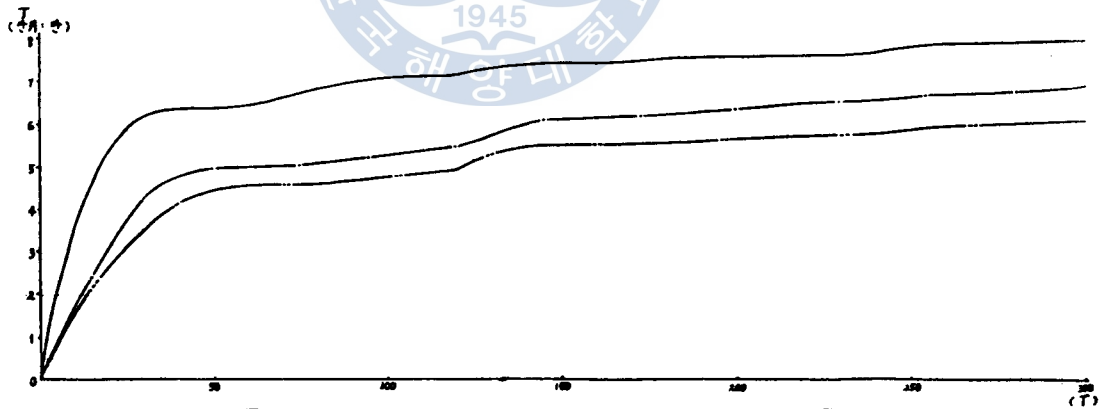


Fig. 4.4(b) Criterion Function(J) in the Case 4.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller



「Case 5」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

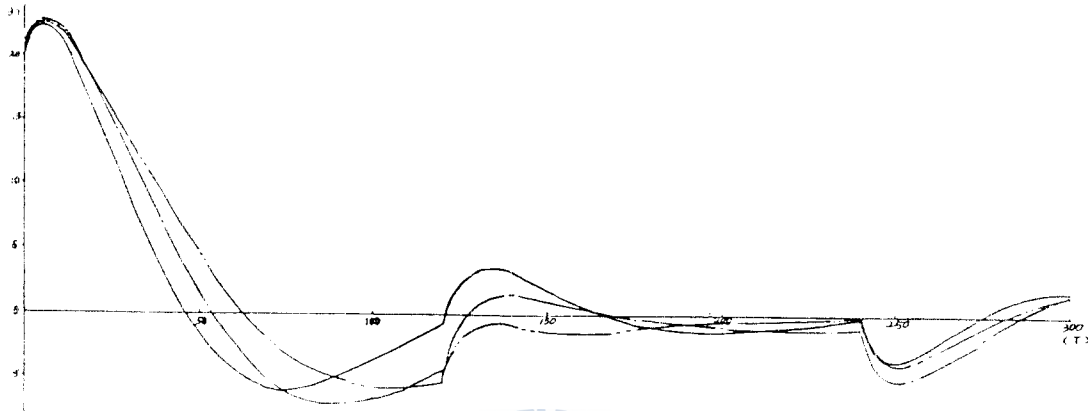


Fig. 4.5(a) Result of Control in the Case 5.

단, — PD Controller  
 - · - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 5」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

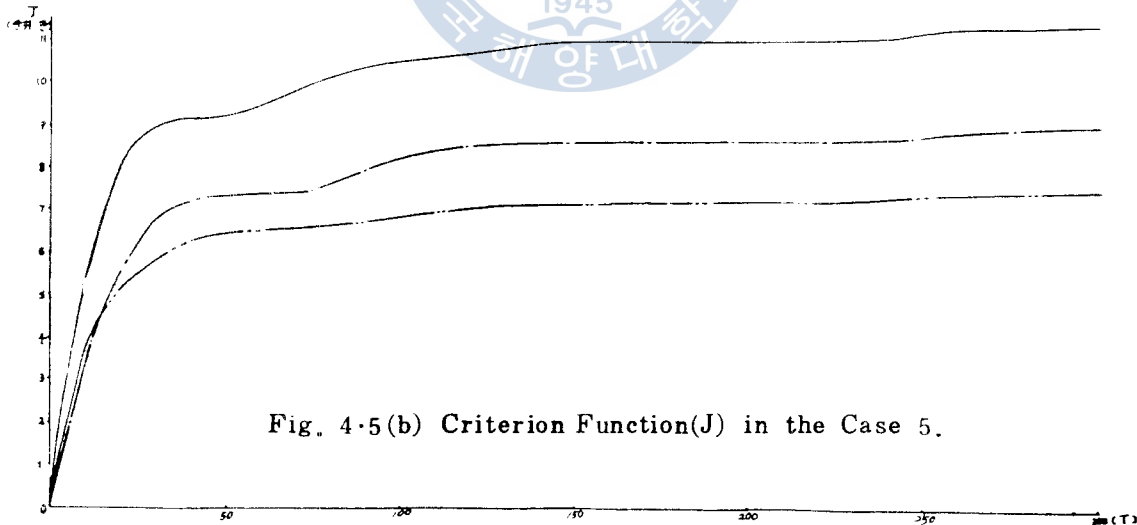


Fig. 4.5(b) Criterion Function(J) in the Case 5.

단, — PD Controller  
 - · - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 6」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $-1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

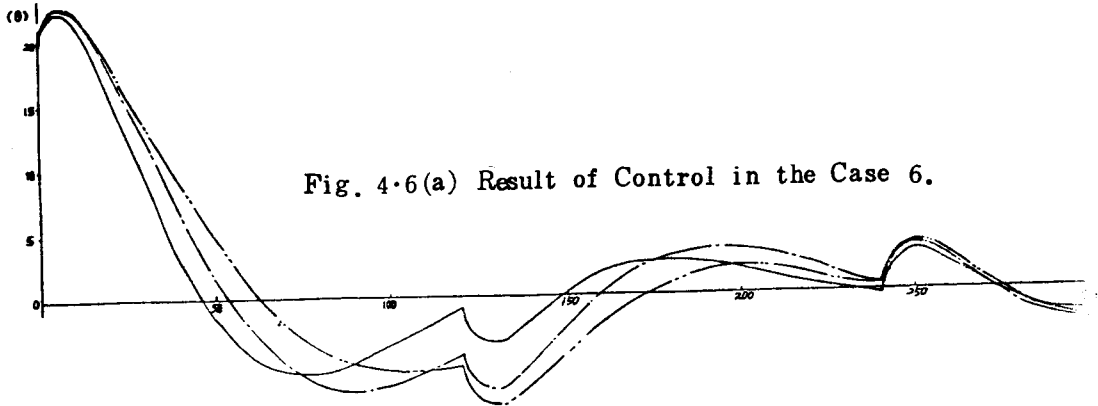


Fig. 4-6(a) Result of Control in the Case 6.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 6」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $-1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

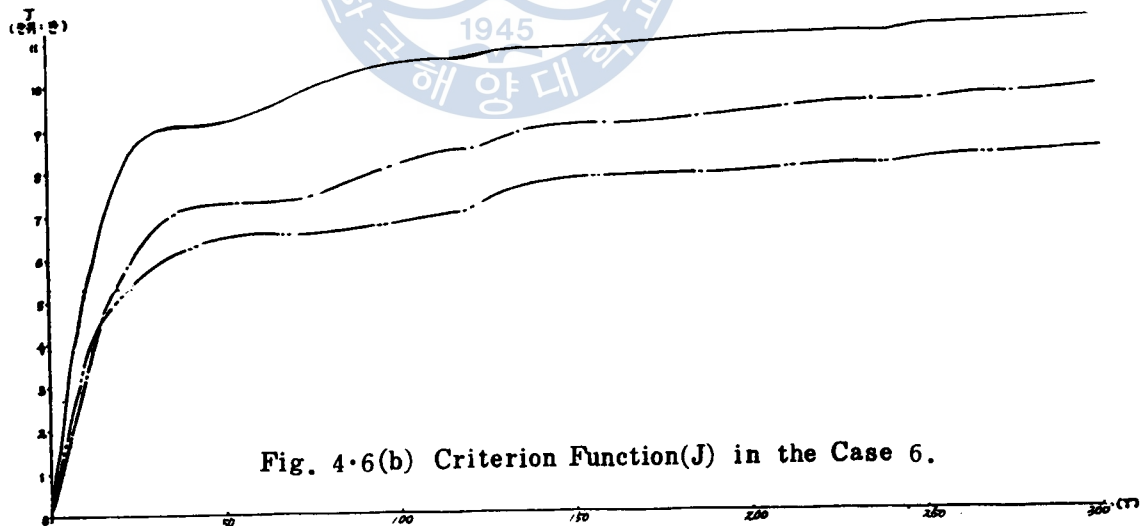


Fig. 4-6(b) Criterion Function(J) in the Case 6.

단, — PD Controller  
 - · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - - - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 1」 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 없는 境遇

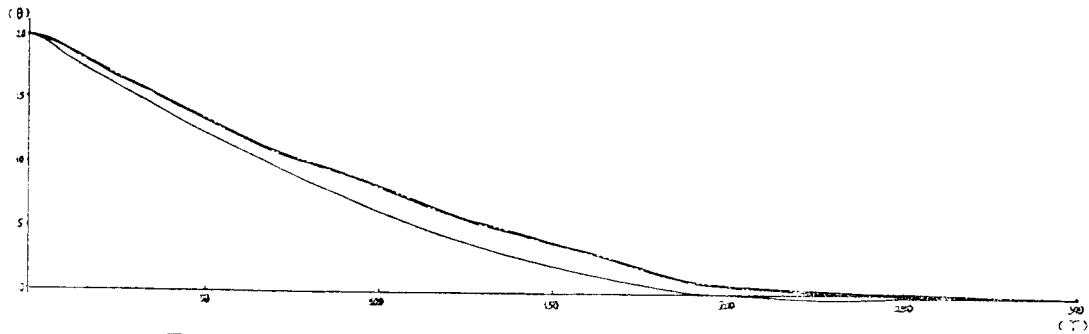


Fig. 4.7(a) Result of Control in the Case 1. (Non-linear)

단, — PD Controller

--- 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

· · · 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 1」 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 없는 境遇

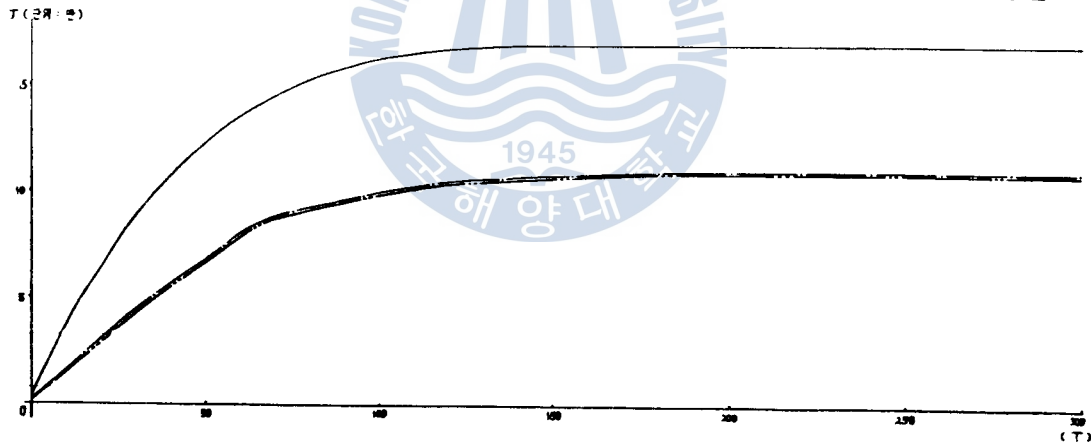


Fig. 4.7(b) Criterion Function(J) in the Case 1. (Non-linear)

단, — PD Controller

--- 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

· · · 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

[Case 2] 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 없는 境遇

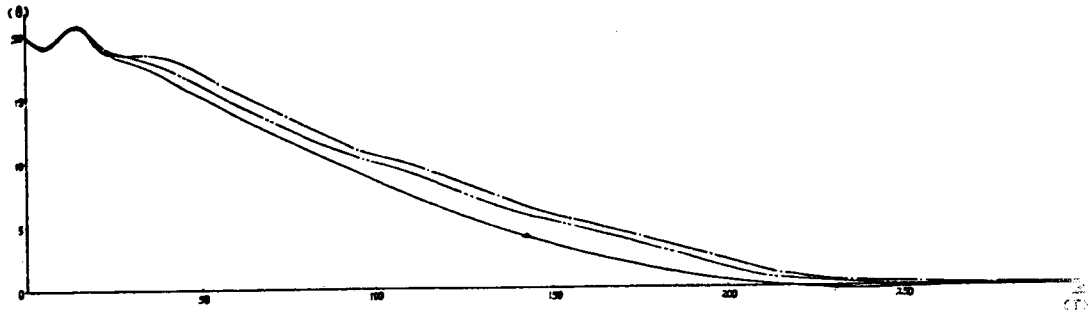


Fig. 4-8(a) Result of Control in the Case 2. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— · — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

[Case 2] 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 없는 境遇

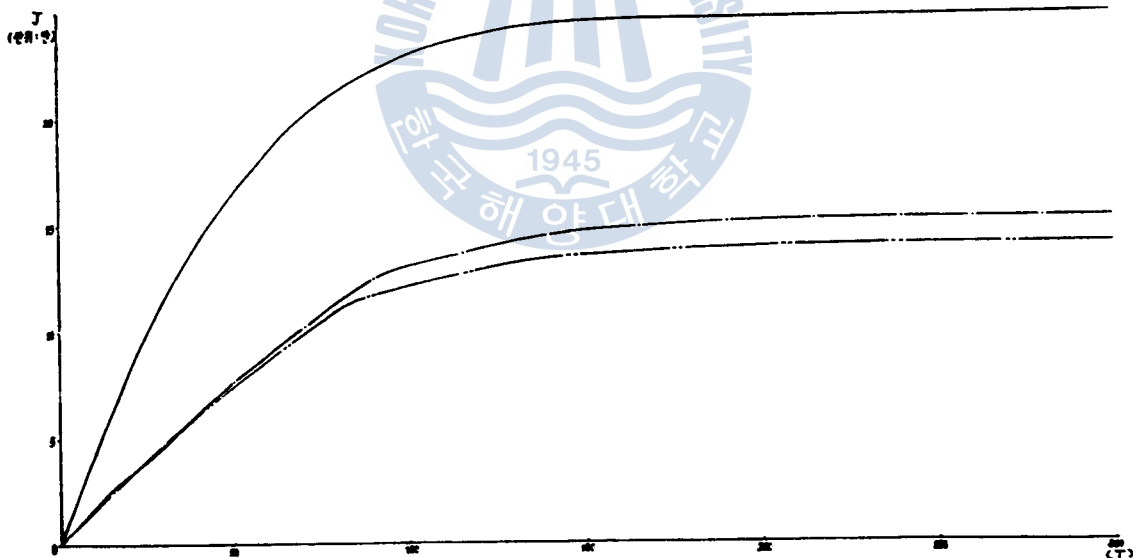


Fig. 4-8(b) Criterion Function(J) in the Case 2. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— · — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

[ Case 3 ] 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各 1.0%/sec, -1.0%/sec 로 存在하는 境遇

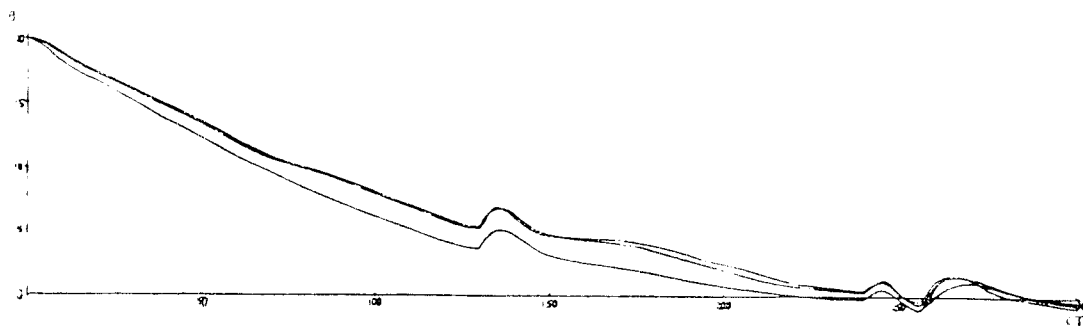


Fig. 4.9(a) Result of Control in the Case 3. (Non-linear)

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

[ Case 3 ] 初期의 偏角이 20°, 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各 1.0%/sec, -1.0%/sec 로 存在하는 境遇

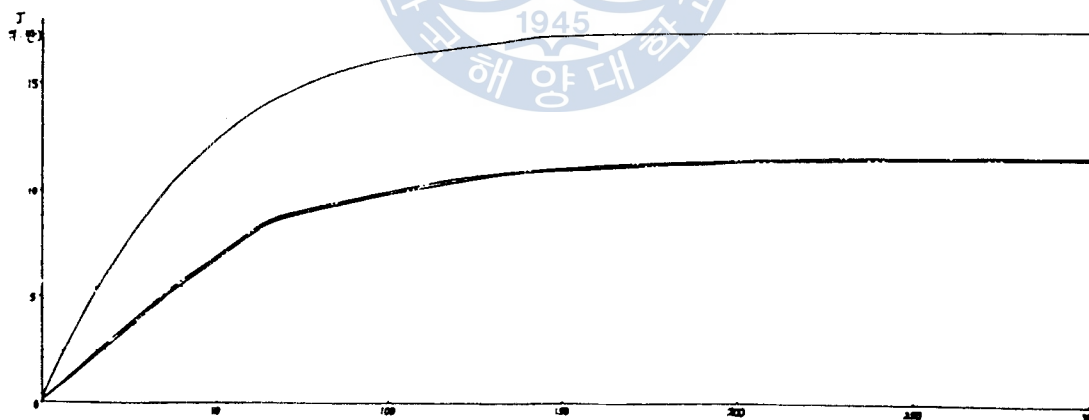


Fig. 4.9(b) Criterion Function(J) in the Case 3. (Non-linear)

단, — PD Controller  
 - - - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller  
 - · - 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 4」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

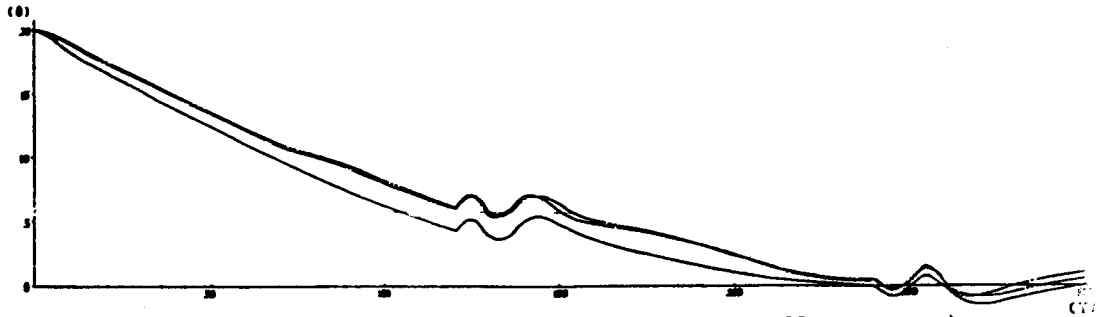


Fig. 4-10(a) Result of Control in the Case 4. (Non-linear)

단, — PD Controller

- · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

--- 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 4」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가 0 이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

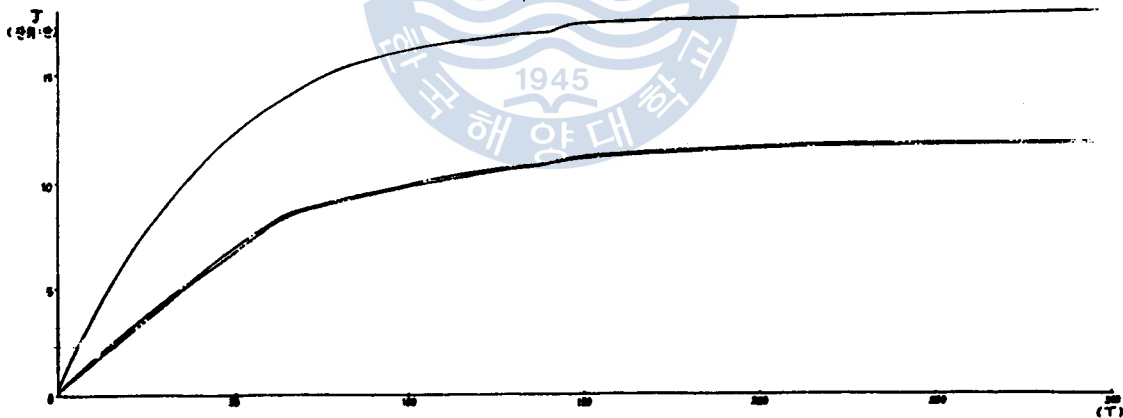


Fig. 4-10(b) Criterion Function(J) in the Case 4. (Non-linear)

단, — PD Controller

- · - 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

--- 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 5」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

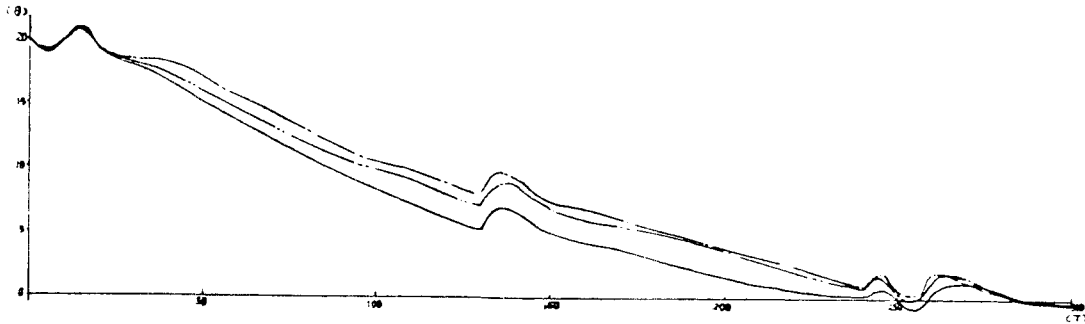


Fig. 4-11(a) Result of Control in the Case 5. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— · — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 5」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $-1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

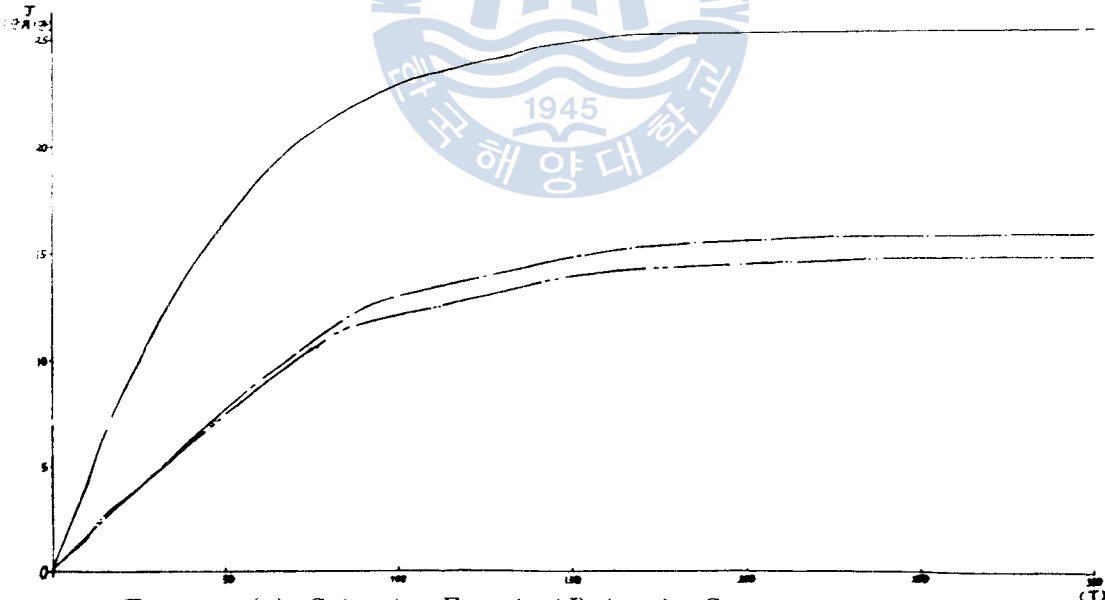


Fig. 4-11(b) Criterion Function(J) in the Case 5. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— · — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 6」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $-1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

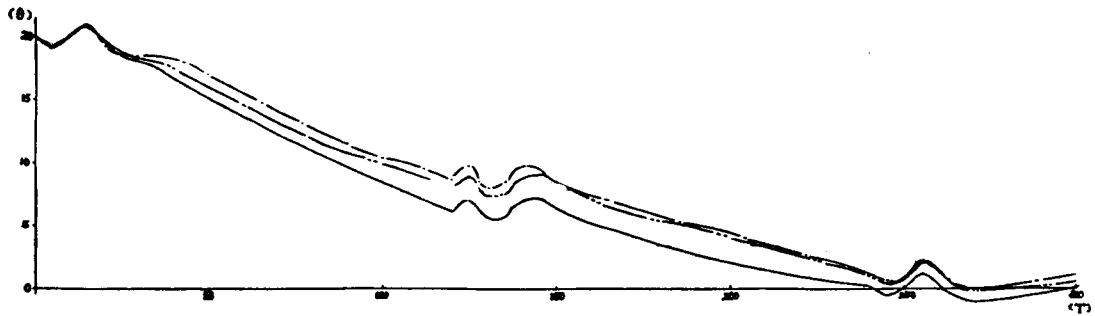


Fig. 4-12(a) Result of Control in the Case 6. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— — — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller

「Case 6」 初期의 偏角이  $20^\circ$ , 偏角速度가  $1.0^\circ/\text{sec}$  이고, 外亂이 120 秒 및 240 秒에 各各  $-1.0^\circ/\text{sec}$ ,  $1.0^\circ/\text{sec}$  로 存在하는 境遇

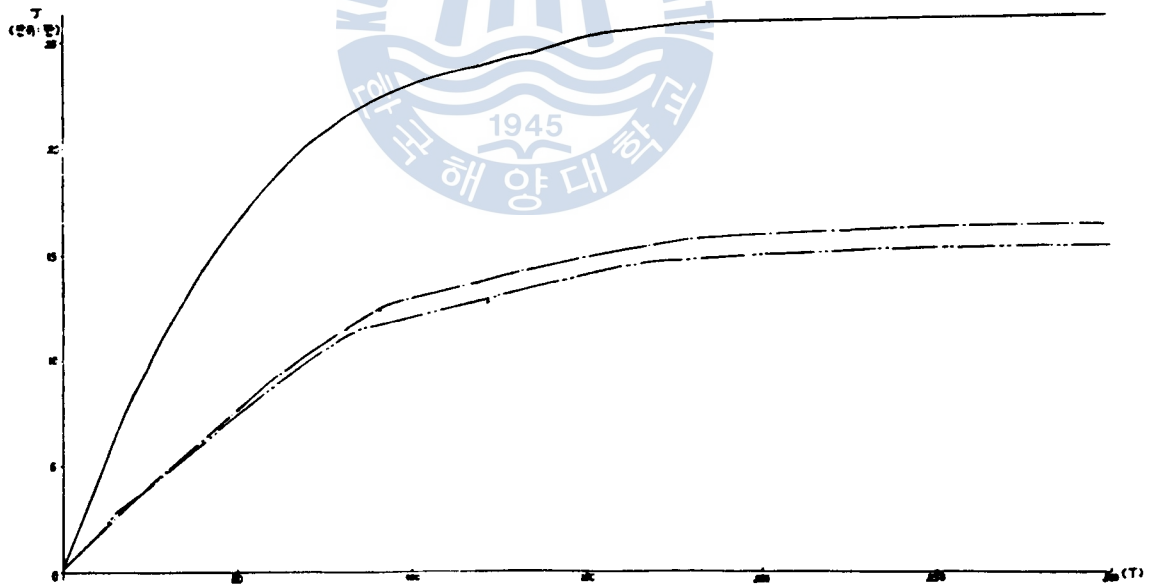


Fig. 4-12(b) Criterion Function(J) in the Case 6. (Non-linear)

단, — PD Controller

— · — 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Controller

— — — 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Controller



## 5 . 結 論

以上에서 船舶操舵系를 Fuzzy Logic Control方式을 導入하여 制御하는 方法에 對해 說明하였으며 計算機시뮬레이션을 통해 制御結果를 最適 PD Controller 와 比較하였다.

그 結果, 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Control의 境遇 評價函數 J는 PD Control에 比해 훨씬 적게 나타났으며, 實用的 으로 充分한 制御가 實現됨을 確認하였다. 아울러 Fuzzy Logic Control의 長點인 Soft Ware의 交換으로 손쉽게 制御設計를 修正하여 가면서 對象을 制御할 수 있는 點을 考慮할 때, 이의 實用化가 크게 期待된다.

本 論文에서는 Q/M의 經驗에다 比較的 簡單한 研究結果만을 導入해서 LCR을 構成하는 段階에 그쳤으나, System Behavior에 對한 物理的 性質을 繼續觀測, 把握하고 여기에다 現在 進行되고 있는 適應制御方式 등의 理論的인 研究結果를 導入함과 同時에 學習을 통해 LCR을 修正해 나간다면, 더욱 良好한 Controller의 設計가 可能하리라 豫想되며, 또한 船舶操舵系에 包含되는 非線形要素에 對해 서는 繼續的인 研究가 必要하리라 생각된다. 또, 偏角에 對한 積分 量도 同時에 考慮하는 Fuzzy Logic Control에 對한 研究가 並行된 다면 刮目할 만한 研究成果가 나오리라 豫想된다.

또한, 本 論文에서는 評價函數에 있어서  $n$ 의 값을 4로 하여 시뮬레이션한 結果를 나타냈으나,  $n$ 의 값이 變化하면 그 結果도 다소 差異가 생기리라 豫想된다. 따라서, 이는 앞으로 더욱 研究해야 할 課題라고 생각된다.

## 参 考 文 献

1. N.Minorsky : Directional stability of automatically steered bodies, J. of ASNE, Vol. 34, 1922.
2. 李哲榮 : 船舶自動操舵系の最適調整에 關하여, Journal of Korea Maritime Graduate School, Vol 1, No 7, pp. 2 ~ 6, 1970.
3. 李哲榮 : Optimal Design of Automatic Steering System of Ships at Sea, Journal of Institute of Navigation, Vol 2, No, pp. 35 ~ 47, 1978.
4. Ibid : 船の閉ループ最適操舵系の設計法, 計測自動制御學會論文集 Vol 8, No. 3, pp. 369 ~ 377, 1972
5. 千原國宏外 : 最適操舵装置と海上實驗, システムと制御 Vol 18, No. 1, pp. 45 ~ 53, 1974.
6. 廣田實 : 保針操舵の評價關數 ( その 1 ), 日本造船協會論文集 135, pp. 129 ~ 138, 1974.
7. 管野導夫 : あいまい集合と論理の制御への應用, 計測と制御 Vol 18, No. 2, 1979.
8. 前畑幸弥外 : 不規則波中における自動操舵のシミコレーションと統計的解析, 日本航海學會誌, pp. 11 ~ 12, 1979.
9. Wiberg : State Space and Linear Systems, McGraw-Hill Book Company, 1971.
10. H.F. Millers : Modern Control Theory Applied to Ship Steering ,

Proc. IFAC/IFIP Symp. on Ship Operation and  
Automation (Abbr.p.IFAC/IFIP Symp.),  
Paper 9-2,1973.

11. D.L.Brook : The Design of a New Automatic Pilot for the  
Commercial Ship,P.IFAC/IFIP Symp. Paper  
9 - 4, 1973.
12. L.A.Zadeh : Fuzzy Logic and Approximate Reasoning,Synthese,  
30,pp.407 ~ 428,1975.
13. E.H.Mamdani : Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy  
Proposition,Proc.IEEE Conf. on Design and  
Control,New Orleans,1977.
14. T.J.Procyk and E.H.Mamdani : A Self Organizing Controller  
For Single-input Single-output Process,Internal  
Report,Dept.of Electrical & Electric Eng.,  
Queen Mary College,1972.
15. M.Horigome et al. : Micro Processor based AR Autopilot System  
for Ship's Steering,SHIP OPERATION AUTOMATION  
ISSOA 79,1979.
16. 正員水本雅晴 : 新しい推論の合成規則の下でのファジイ推論, 日本電子通  
信學會論文誌 Vol.J65-D,No.11,pp.1319 ~ 1322,  
1982.11.
17. 李哲榮・金換秀 : Fuzzy Logic Controller 에 依한 船舶의 制御.  
Journal of Institute of Navigation,Vol 5, No.2,  
pp.59 ~ 88,1981.12.

## 附 錄 : Programing

```

C      SIMULATION COMPAIRING FUZZY CONTROLLER WITH PD CON-
C      TROLLER OF SHIP'S STEERING SYSTEM THROUGH SOLVING
C      THE THIRD ORDER DIFFERENTIAL EQUATION
      REAL M1,M2,M4,M5,LW,LWT
      COMMON N,DT,T,TP,TD,T1,T2,T3,T5,LW,LWT,W(3)
      COMMON FUZZ(23,23),FUZZ1(23,23),FUZZ2(23),FUZZY(23,
      11,23),FUZZY1(23,11,23),FUZZY2(11,23),FUZZY3(11,23),
      FUZZY4(23)
      COMMON W1,W2,W3,YK1,YK2
      COMMON NN
      COMMON A(23,23),B(11,11),C(23,23)
      READ(7,703)((A(I,J),I=1,23),J=1,23)
703   FORMAT(16F5.1/7F5.1)
      READ(7,707)((B(I,J),I=1,11),J=1,11)
707   FORMAT(11F5.1)
      READ(7,711)((C(I,J),I=1,23),J=1,23)
711   FORMAT(16F5.1/7F5.1)
      CALL MINIMX
      CALL MINIMA
      NN=1
      9   RETURN=0.0
260   CONTINUE
      READ(7,261) N,DT,T,W(1),W(2),W(3),TP,TD,T1,T2,T3,T5,
      LW,LWT
261   FORMAT(15,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,F5.2,
      F5.2,1F5.2,F6.2)

```

```

WRITE(8,2) T1,T2,T3,T5
2  FORMAT(1H1,20X,'MANEUVRABILITY INDICIES OF THE MODEL
SHIP'/20X,T1=1',F5.2,3X,'T3= ',F4.1,3X,'T5= ',F5.2//)
WRITE(8,3) TP,TD
3  FORMAT(20X,'GAIN'/20X,'TP= ',F4.1,3X,'TD= ',F4.1//)
WRITE(8,4) T,W(1),W(2),W(3),LW,LWT
4  FORMAT(20X,'INITIAL CONDITIONS'/20X,'T= ',1X,F4.1,3X,
'X(1)= ',1X,F4.1,3X,'X(2)= ',1X,F4.1,3X,'X(3)= ',1X,
F4.1,3X,'LEE WAY= ',1X,F5.2,23X,'LEE WAY TIME INTERV-
AL= ',1X,F6.2////)
WRITE(8,8)
8  FORMAT(50X,'PRINT COMPUTER SOLUTIONS EVERY 5 SECONDS '
//)
WRITE(8,7)
7  FORMAT(18X,'PD CONTROLLER',15X,'FUZZY P CONTROLLER',
12X,1'FUZZY PD CONTROLLER',//)
WRITE(8,6)
6  FORMAT(5X,'T',9X,'X(1)',6X,'X(2)',5X,'DA',7X,'AJ',9X,
1'Y(1)',5X,'Y(2)',5X,'YK1',7X,'BJ',9X,'Z(1)',5X,'Z(2)',
25X,'YK2',7X,'CJ'//)
CALL SIMUL
RETURN=RETURN+1,0
IF(RETURN,GE,6,0) GO TO 263
GO TO 260
263 NN=NN+1
IF(NN,EQ,3) GO TO 264
GO TO 9
264 CONTINUE
STOP
END

```

```

SUBROUTINE SUBPROGRAM
SUBROUTINE MINIMX
REAL M1 ,M2 ,LW,LWT
COMMON N,DT,T,TP,TD, T1 ,T2 ,T3 ,T5 ,LW,LWT,W( 3 )
COMMON FUZZ( 23,23),FUZZ1( 23,23),FUZZ2( 23),FUZZY( 23,11,
23),1FUZZY1( 23,11,23),FUZZY2( 11,23),FUZZY3( 11,23),FUZZY
4( 23)
COMMON W1 ,W2 ,W3 ,YK1 ,YK2
COMMON A( 23,23),B( 11,11),C( 23,23)
DO 1 I = 1 , 23
DO 1 J = 1 , 23
M1 = A( 1 , I )
IF( A( 1 , I ) .GT. C( 5 , J ) ) M1 = C( 5 , J )
M2 = A( 6 , I )
IF( M2 .GT. C( 8 , J ) ) M2 = C( 8 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 9 , I )
IF( M2 .GT. C( 10 , J ) ) M2 = C( 10 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 11 , I )
IF( M2 .GT. C( 11 , J ) ) M2 = C( 11 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 12 , I )
IF( M2 .GT. C( 12 , J ) ) M2 = C( 12 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 13 , I )
IF( M2 .GT. C( 13 , J ) ) M2 = C( 13 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 15 , I )
IF( M2 .GT. C( 14 , J ) ) M2 = C( 14 , J )
IF( M1 .LT. M2 ) M1 = M2
M2 = A( 18 , I )

```

```

IF(M2 .GT. C(16, J))M2 = C(16, J)
IF(M1 .LT. M2)M1=M2
M2 = A(23, I)
IF(M2 .GT. C(19, J))M2 = C(19, J)
IF(M1 .LT. M2) M1 = M2
FUZZ(I, J) = M1
] CONTINUE
RETURN
END)

```

C

```

SUBROUTINE SUBPROGRAM
SUBROUTINE MINIMA
COMMON N,DT, T, TP, TD, T1, T2, T3, T5, LW, LWT, W(3)
COMMON FUZZ(23,23),FUZZ1(23,23),FUZZ2(23),FUZZY(23,11,
23),IFUZZY1(23,11,23),FUZZY2(11,23),FUZZY3(11,23),FUZZY4
(23)
COMMON W1, W2, W3, YK1, YK2
COMMON A(23,23),B(11,11),C(23,23)
DO 1 I = 1, 23
DO 1 J = 1, 11
DO 1 K = 1, 23
M4 = A(I, I)
IF(M4 .GT. B(2, J))M4 = B(2, J)
IF(M4 .GT. C(4, K))M4 = C(4, K)
M5 = A(I, I)
IF(M5 .GT. B(4, J))M5 = B(4, J)
IF(M5 .GT. C(4, K))M5 = C(4, K)
IF(M4 .LT. M5)M4=M5
M5 = A(I, I)
IF(M5 .GT. B(6, J))M5 = B(6, J)
IF(M5 .GT. C(5, K))M5 = C(5, K)
IF(M4 .LT. M5)M4=M5

```

$M5 = A(1, I)$   
 $IF(M5.GT.B(8, J))M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5.GT.C(7, K))M5 = C(7, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(1, I)$   
 $IF(M5.GT.B(10, J))M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5.GT.C(7, K))M5 = C(7, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(6, I)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5 = B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(7, K))M5 = C(7, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(6, 1)$   
 $IF(M5.GT.B(4, J))M5 = B(4, J)$   
 $IF(M5.GT.C(7, K))M5 = C(7, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(6, I)$   
 $IF(M5.GT.B(6, J))M5 = B(6, J)$   
 $IF(M5.GT.C(8, K))M5 = C(8, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(6, I)$   
 $IF(M5.GT.B(8, J))M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5.GT.C(10, K))M5 = C(10, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(6, 1)$   
 $IF(M5.GT.B(10, J))M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5.GT.C(10, K))M5 = C(10, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(9, 1)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5 = B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(8, K))M5 = C(8, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$



$M5 = A(9, I)$

$IF(M5.GT.B(4, J))M5 = B(4, J)$

$IF(M5.GT.C(9, K))M5 = C(9, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(9, I)$

$IF(M5.GT.B(6, J))M5 = B(6, J)$

$IF(M5.GT.C(10, K))M5 = C(10, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(9, I)$

$IF(M5.GT.B(8, J))M5 = B(8, J)$

$IF(M5.GT.C(11, K))M5 = C(11, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(9, I)$

$IF(M5.GT.B(10, J))M5 = B(10, J)$

$IF(M5.GT.C(12, K))M5 = C(12, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(11, I)$

$IF(M5.GT.B(2, J))M5 = B(2, J)$

$IF(M5.GT.C(10, K))M5 = C(10, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(11, I)$

$IF(M5.GT.B(4, J))M5 = B(4, J)$

$IF(M5.GT.C(10, K))M5 = C(10, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(11, I)$

$IF(M5.GT.B(6, J))M5 = B(6, J)$

$IF(M5.GT.C(11, K))M5 = C(11, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(11, I)$

$IF(M5.GT.B(8, J))M5 = B(8, J)$

$IF(M5.GT.C(13, K))M5 = C(13, K)$

$IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(11, I)$   
 $IF(M5.GT.B(10, J))M5=B(10, J)$   
 $IF(M5.GT.C(13, K))M5=C(13, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(12, I)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5=B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(10, K))M5=C(10, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(12, I)$   
 $IF(M5.GT.B(4, J))M5=B(4, J)$   
 $IF(M5.GT.C(11, K))M5=C(11, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(12, I)$   
 $IF(M5.GT.B(6, J))M5=B(6, J)$   
 $IF(M5.GT.C(12, K))M5=C(12, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(12, I)$   
 $IF(M5.GT.B(8, J))M5=B(8, J)$   
 $IF(M5.GT.C(13, K))M5=C(13, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(12, I)$   
 $IF(M5.GT.B(10, J))M5=B(10, J)$   
 $IF(M5.GT.C(14, K))M5=C(14, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5=B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(11, K))M5=C(11, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5.GT.B(4, J))M5=B(4, J)$   
 $IF(M5.GT.C(11, K))M5=C(11, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4 = M5$

$M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5, GT, B(6, J)) M5 = B(6, J)$   
 $IF(M5, GT, C(13, K)) M5 = C(13, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5, GT, B(8, J)) M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5, GT, C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5, GT, B(10, J)) M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5, GT, C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5, GT, B(2, J)) M5 = B(2, J)$   
 $IF(M5, GT, C(12, K)) M5 = C(12, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5, GT, B(4, J)) M5 = B(4, J)$   
 $IF(M5, GT, C(13, K)) M5 = C(13, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5, GT, B(6, J)) M5 = B(6, J)$   
 $IF(M5, GT, C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5, GT, B(8, J)) M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5, GT, C(15, K)) M5 = C(15, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5, GT, B(10, J)) M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5, GT, C(16, K)) M5 = C(16, K)$   
 $IF(M4, LT, M5) M4 = M5$

$M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(6, J)) M5 = B(6, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(13, K)) M5 = C(13, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(8, J)) M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(13, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(10, J)) M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(2, J)) M5 = B(2, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(12, K)) M5 = C(12, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(4, J)) M5 = B(4, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(13, K)) M5 = C(13, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(6, J)) M5 = B(6, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(14, K)) M5 = C(14, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(8, J)) M5 = B(8, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(15, K)) M5 = C(15, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$   
 $M5 = A(15, I)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } B(10, J)) M5 = B(10, J)$   
 $IF(M5 \text{ .GT. } C(16, K)) M5 = C(16, K)$   
 $IF(M4 \text{ .LT. } M5) M4 = M5$

$M5=A(18, I)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5=B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(14, K))M5=C(14, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4= M5$   
 $M5= A(18, I)$   
 $IF(M5.GT.B(4, J))M5=B(4, J)$   
 $IF(M5.GT.C(14, K))M5=C(14, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4= M5$   
 $M5=A(18, I)$   
 $IF(M5.GT.B(6, J))M5=B(6, J)$   
 $IF(M5.GT.C(16, K))M5=C(16, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4= M5$   
 $M5=A(18, I)$   
 $IF(M5.GT.B(8, J))M5=B(8, J)$   
 $IF(M5.GT.C(17, K))M5=C(17, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4= M5$   
 $M5= A(18, I)$   
 $IF(M5.GT.B(10, J))M5=B(10, J)$   
 $IF(M5.GT.C(17, K))M5=C(17, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4= M5$   
 $M5=A(23, I)$   
 $IF(M5.GT.B(2, J))M5=B(2, J)$   
 $IF(M5.GT.C(17, K))M5=C(17, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4=M5$   
 $M5=A(23, I)$   
 $IF(M5.GT.B(4, J))M5=B(4, J)$   
 $IF(M5.GT.C(17, K))M5=C(17, K)$   
 $IF(M4.LT.M5)M4=M5$

```
M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 6 , J ))M5=B( 6 , J )
IF(M5 .GT. C( 19 , K ))M5=C( 19 , K )
IF(M4 .LT. M5 )M4= M5
```

```
M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 8 , J ))M5=B( 8 , J )
IF(M5 .GT. C( 20 , K ))M5=C( 20 , K )
IF(M4 .LT. M5 )M4= M5
```

```
M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 10 , J ))M5=B( 10 , J )
IF(M5 .GT. C( 20 , K ))M5=C( 20 , K )
IF(M4 .LT. M5 )M4= M5
```

```
FUZZY( I , J , K )= M4
```

1 CONTINUE

RETURN

END

C

SUBROUTINE SUBPROGRAM

SUBROUTINE SIMUL

REAL LW,LWT

DIMENSION FAA( 21 ),FA( 21 ),FAAA( 21 ),DX( 3 ),X( 3 ),DY( 3 ),

Y( 3 ),DZ( 3 ),Z( 3 )

COMMON N,DT, T, TP, TD, T1, T2, T3, T5, LW, LWT, W( 3 )

COMMON NN

COMMON A( 23 , 23 ), B( 11 , 11 )

T6=T

T7=T

T8=T

$N1=N$  $N2=N$  $N3=N$  $DT1=DT$  $DT2=DT$  $DT3=DT$  $DO \ 34 \ I= 1,3$  $X(I)= W(1)$  $Y(I)=X(I)$ 

```

M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 6 , J ))M5=B( 6 , J )
IF(M5 .GT. C( 19 , K ))M5=C( 19 , K )
IF(M4 .LT. M5)M4= M5
M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 8 , J ))M5=B( 8 , J )
IF(M5 .GT. C( 20 , K ))M5=C( 20 , K )
IF(M4 .LT. M5)M4= M5
M5=A( 23 , I )
IF(M5 .GT. B( 10 , J ))M5=B( 10 , J )
IF(M5 .GT. C( 20 , K ))M5=C( 20 , K )
IF(M4 .LT. M5)M4= M5
FUZZY( I , J , K )= M4
1 CONTINUE
RETURN
END

C SUBROUTINE SUBPROGRAM
SUBROUTINE SIMUL
REAL LW,LWT
DIMENSION FAA( 21 ) ,FA( 21 ) ,FAAA( 21 ) ,DX( 3 ) ,X( 3 ) ,DY( 3 ) ,
Y( 3 ) ,DZ( 3 ) ,Z( 3 )
COMMON N,DT,T,TP,TD,T1,T2,T3,T5,LW,LWT,W( 3 )
COMMON NN
COMMON A( 23 , 23 ) ,B( 11 , 11 )
T6=T
T7=T
T8=T

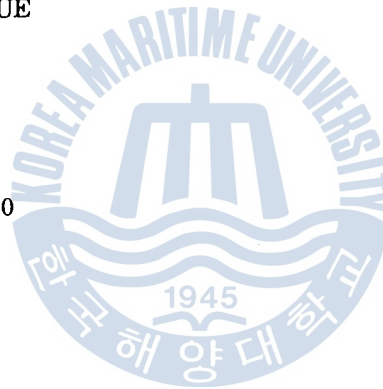
```



```

N1=N
N2=N
N3=N
DT1=DT
DT2=DT
DT3=DT
DO 34 I= 1,3
X(I)= W (1)
Y(I)=X(I)
Z(I)=X(I)
34 CONTINUE
KA1=0
KA 3=0
KA 4=0
AA4=1.0
AJ=0
BJ=0
CJ=0
10 L=3
M = 0
L1=3
M6=0
L2=3
M7=0
50 CONTINUE
IF(T8.EQ.(LWT*AA4)) GO TO 111
GO TO 222
111 KA4=KA4 + 1

```



```

IF(KA4.NE.2) GO TO 222
X(2)=X(2) + LW
Y(2)=Y(2) + LW
Z(2)=Z(2) + LW
AA4 = AA4 + 1.0
KA4 = 0
LW=-LW
222 CONTINUE
CALL RUNGE(T6,DT1,N1,X,DX,FAA,L1,M6,JA,IJA)
CALL RUNGE(T7,DT2,N2,Z,DZ,FAAA,L2,M7,JB,IGB)
CALL RUNGE(T8,DT3,N3,Y,DY,FA,L,M,JC,IG)
IF(M.EQ.1) GO TO 10
GO TO (100,200,210),L
100 W1=Y(1)
W2=Z(1)
W3=Z(2)
CALL INPUT
DY(1)=Y(2)
DZ(1)=Z(2)
DX(1) =X(2)
DX(2) =-(T1+T2)*X(2)/T1/T2+X(3)+T3*T5*DA/T1/T2
DY(2) =-(T1+T2)*Y(2)/T1/T2+Y(3)+T3*T5*YK1/T1/T2
DZ(2) =-(T1+T2)*Z(2)/T1/T2+Z(3)+T3*T5*YK2/T1/T2
GO TO(98,99),NN
98 DX(3)=-X(2)/T1/T2+T5*DA/T1/T2
DY(3)=-Y(2)/T1/T2+T5*YK1/T1/T2
DZ(3)=-Z(2)/T1/T2+T5*YK2/T1/T2
GO TO 50

```

```

99  DX(3)=-X(2)/T1/T2 + T5*DA/T1/T2-X(2)**3
    DY(3)=-Y(2)/T1/T2 + T5*YK1/T1/T2-Y(2)**3
    DZ(3)=-Z(2)/T1/T2 + T5*YK2/T1/T2-Z(2)**3
    GO TO 50
    PRINT RESULTS
200  CONTINUE
    CALL ESFU(X(1),DA,AJ)
    CALL ESFU(Y(1),YK1,BJ)
    CALL ESFU(Z(1),YK2,CJ)
    KA1=KA1+1
    IF(KA1.NE.(10*KA3+1)) GO TO 268
    WRITE(8,209) T8,X(1),X(2),DA,AJ,Y(1)Y(2),YK1,BJ,
    Z(1),Z(2),YK2,CJ
209  FORMAT(1X,F5.1,7X,F7.3,2X,F7.3,2X,F7.3,2X,F8.1,4X,
    F7.3,2X,F7.3,12X,F7.3,2X,F8.1,4X,F7.3,2X,F7.3,2X,
    F7.3,2X,F8.1)
C    TEST FOR TERMINATION
    KA3=KA3+1
268  IF(T8.GE.300.0) GO TO 210
    GO TO 50
210  CONTINUE
    RETURN
    END

    SUBROUTINE ESFU(A,AY, CCJ)
    R=4.0
    CJ=A**2+R*AY**2
    CCJ=CCJ+CJ
    RETURN
    END

```

```

C      SUBROUTINE SUBPROGRAM
      SUBROUTINE INPUT
      REAL LW,LWT,MAX,MA
      COMMON N,DT,T,TP,TD,T1,T2,T3,T5,LW,LWT,W(3)
      COMMON FUZZ(23,23),FUZZ1(23,23),FUZZ2(23),FUZZY(23,11,
        23),1FUZZY2(23,11,23),FUZZY2(11,23),FUZZY3(11,23),FUZZY
        4(23)
      COMMON W1,W2,W3,YK1,YK2
      COMMON A(23,23),B(11,11)
      CALL MAMA(W1,K1)
      CALL MAMA(W2,K2)
      DO 2 J=1,23
      DO 2 I=1,23
      FUZZ1(I,J)=A(K1,I)+FUZZ(I,J)-1
      IF(FUZZ1(I,J).LT.0.0)FUZZ1(I,J)=0.0
2     CONTINUE
      DO 4 J=1,23
      AMAX=FUZZ1(1,J)
      DO 3 I=1,23
      IF(AMAX.LE.FUZZ1(I,J))AMAX=FUZZ1(I,J)
3     CONTINUE
      FUZZ2(J)=AMAX
4     CONTINUE
      CALL FAFA(FUZZ2,M6)
      DO 5 I=1,23
      DO 5 J=1,11
      DO 5 K=1,23
      FUZZY1(I,J,K)=A(K2,I)+FUZZY(I,J,K)-1
      IF(FUZZY1(I,J,K).LT.0.0)FUZZY1(I,J,K)=0.0
5     CONTINUE

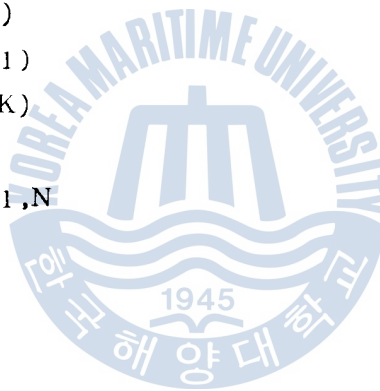
```

```
DO 7 K=1,23
DO 7 J=1,11
MAX=FUZZY1(1,J,K)
DO 6 I=1,23
IF(MAX.LE.FUZZY1(I,J,K))MAX=FUZZY1(I,J,K)
6 CONTINUE
FUZZY2(J,K)=MAX
7 CONTINUE
CALL PAPA(W3,J1)
DO 8 K=1,23
DO 8 J=1,11
FUZZY3(J,K)=B(J1,J)+FUZZY2(J,K)-1
IF(FUZZY3(J,K).LT.O.O)FUZZY3(J,K)=0.0
8 CONTINUE
DO 10 K=1,23
MA=FUZZY3(1,K)
DO 9 J=1,11
IF(MA.LE.FUZZY3(J,K))MA=FUZZY3(J,K)
9 CONTINUE
FUZZY4(K)=MA
10 CONTINUE
CALL FAFA(FUZZY4,M7)
AK3=FLOAT(M6)
AK4=FLOAT(M7)
YK1=(AK3-12.0)*2.5
YK2=(AK4-12.0)*2.5
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE RUNGE(T,DT,N,Y,DY,F,L,M,J,IG)
DIMENSION DY(3),Y(3),F(21)
GO TO (100,110,300),L
100 GO TO (101,110),IG
101 J=1
    L=2
    DO 106 K=1,N
        K1=K+3*N
        K2=K1+N
        K3=N+K
        F(K1)=Y(K)
        F(K3)=F(K1)
106 F(K2)=DY(K)
        GO TO 406
110 DO 140 K=1,N
        K1=K
        K2=K+5*N
        K3=K2+N
        K4=K+N
        GO TO (111,112,113,114),J
111 F(K1)=DY(K)*DT
        Y(K)=F(K4)+0.5*F(K1)
        GO TO 140
112 F(K2)=DY(K)*DT
        GO TO 124
113 F(K3)=DY(K)*DT
        GO TO 134
114 Y(K)=F(K4)+(F(K1)+2.0*(F(K2)+F(K3))+DY(K)*DT)/6.0
        GO TO 140
124 Y(K)=0.5*F(K2)

```



```

      Y(K)=Y(K)+F(K4)
      GO TO 140
134  Y(K)=F(K4)+F(K3)
140  CONTINUE
      GO TO (170,180,170,180),J
170  T=T+0.5*DT
180  J=J+1
      IF(J-4)404,404,299
299  M=1
      GO TO 406
300  IG=1
      GO TO 405
404  IG=2
405  L=1
406  RETURN
      END

      SUBROUTINE MAMA(C,K)
      Q=-28.75
      DQ=2.5
      DO 50 I=1,23
      ZQ=Q+DQ
      IF((C.GE.Q).AND.(C.LT.ZQ)) K=I
50  Q=Q+DQ
      K=24-K
      RETURN
      END

      SUBROUTINE PAPA(D,J)
      Q=-1.65

```



```

DQ=0.3
DO 50 I=1,11
ZQ=Q+DQ
IF((D.GE.Q).AND.(D.LT.ZQ)) J=I
50 Q=Q+DQ
J=12-J
RETURN
END

```

```

C SUBROUTINE SUBPROGRAM
SUBROUTINE FAFA(A,K)
DIMENSION A(30),B(30)
AMAX = A(1)
DO 55 I= 1,23
IF(AMAX.LE.A(I)) AMAX=A(I)
55 CONTINUE
DO 77 I=1,23
K=24-I
B(I)=A(K)
77 CONTINUE
K=24
DO 9 I=1,23
K=K-1
IF(AMAX.EQ.B(I)) GO TO 66
9 CONTINUE
66 CONTINUE
KK=0
DO 88 J=1,23
IF(A(J).EQ.AMAX) KK=KK+1

```



38 CONTINUE

KK=KK/2

K=K-KK

RETURN

END

