

# 새로운 Fuzzy Logic 을 利用한 船舶操舵系의 制御

李 哲 榮\* · 蔡 良 範\*\*

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

*Cheol-Yeong Lee · Yang-Beom Chae*

### < 目 次 >

Abstract	御
1. 序 論	3·1 偏角에 注目한 Fuzzy Logic Control
2. Fuzzy Logic Control 을 爲한 數學的 準備	3·2 偏角 및 偏角速度에 注目한 Fuzzy Logic Control
2·1 Fuzzy 集合論	4. 計算機 시뮬레이션 및 考察
2·2 새로운 合成規則 下에서의 Fuzzy Reasoning	5. 結 論
3. Fuzzy Logic Control 에 依한 操舵系의 制	參考文獻

### 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 it's 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.

### 1. 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, 13, 17)

\* 正會員, 韓國海洋大學

\*\* 正會員, 韓國海洋大學

自動操舵裝置는 1920年代 Sperry 社에 의해 最初로 製品으로 만들어졌으며, 그 後 1922年 Minorsky 는 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>11)</sup>

1949年 Schiff 는 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의인 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>12)</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, 3,4,5,6,10,11) 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>13)</sup>

그러나, 이러한 研究들은 너무 理論的이고 論理的인 點을 重視하여 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——例를 들어 航海士 또는 Quarter Master——에 依해 制御가 可能하다. 따라서, 本論文에서는 이러한 點을 勘案하여 現在 까지 進行되어온 以上과 같은 研究結果에 人間의 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>14)</sup>에 依해 提唱된 以來, Mamdani<sup>15,16)</sup>에 依해 最初로 Steam Engine 의 制御問題에 應用되었으며, 그 後 오늘날까지 여러가지 分野에 應用되어 刮目할만한 研究結果들이 報告되고 있다.<sup>17)</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의 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 LCR 이라 表記함)로 論理化하여 Algorithm 을 構成하고, 이 Algorithm 을 計算機로 處理함으로써 對象을 制御하고자 하는 方法이다. 특히 非線形的의 對象이라던가 環境의 變化 等を LCR 로 表現함으로써 比較的 쉽게 對身을 다룰 수 있다.

따라서 本論文에서는 最適制御理論의 研究結果와 새로운 Fuzzy Logic 을 導入하고, 操舵系의 Energy 損失을 考慮하여, 操舵系에 對한 Algorithm 을 構成한 뒤, 線形과 非線形的의 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 Control 을 爲한 準備段階로 Fuzzy 集合論과 새로운 合成規制下에서의 Fuzzy Reasoning 에 對하여 說明하고, 第3章에서는 Fuzzy Logic Control 을 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 통해 本論文中에서 導入한 Fuzzy Logic Controller 의 有效性을 確認하여 그 結果에 對한 檢討를 行한다.

## 2. Fuzzy Logic Control 을 爲한 數學的 準備

Fuzzy Logic Control 을 行하기 爲해서는, 먼저 論理的으로 表現된 情報를 機械 즉 計算機가 다룰 수 있도록 定量化하지 않으면 안된다. 즉, 人間의 經驗으로부터 制御實現을 爲한 法則을 만들고 이 法則을 Linguistic Proposition 으로 表現한 뒤, 各 Linguistic Proposition의 Linguistic Variable 을 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의 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 성질의 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 依해 定義되는 集合이다.

$$\mu_A : X \rightarrow M \tag{2.1}$$

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

$$A = \sum_{j=1}^n \mu_A(x_j) / x_j \tag{2.2}$$

$X$ 가 無限集合일 때

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \tag{2.3}$$

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.

$$A \cup B = \int \mu_A(x) \vee \mu_B(x) / x \tag{2.4}$$

$$A \cap B = \int \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) / x \tag{2.5}$$

$$A^c = (1 - \int \mu_A(x)) / x \tag{2.6}$$

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.

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

台集合이 有限할 때 Fuzzy 集合과 關係를 벡터 및 行列을 使用하여 表示하면 合成演算에 便利한 境遇가 많다. 즉  $A = \{a_i\}, a_i = \mu_A(x_i), R = \{r_{ij}\}, r_{ij} = \mu_R(x_i, y_j), A \circ R = \{b_j\}, b_j = \mu_{A \circ R}(y_j)$  라고 하면,

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

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

다음에 Linguistic Proposition 에 對하여 說明하기로 한다.  $F$  를 Fuzzy 部分集合形의 命題,  $P$  를 Linguistic Proposition 이라 하고,  $x \in X$  이라 하면,  $P$  는  $P = x$  is  $F$  로 나타낼 수 있다. 例를 들어  $P = x$  is small integer 를  $X = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$  에 對해 表現하면,

$$\begin{aligned} \text{small integer} = & 1./1 + 1./2 + .8/3 + .6/4 + .4/5 + .2/6 + .1/7 + .0/8 \\ & + .0/9 + .0/10 \end{aligned} \quad (2.13)$$

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

$$\left. \begin{array}{l} \text{前題 1 : If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \\ \text{前題 2 : } x \text{ is } A' \\ \text{結 論 : } y \text{ is } B' \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

前題 1·2로부터 結論을 推論하는 것으로 Compositional Rule of Inference 라 불린다. 以下에서는 前述한 바와 같은 前題 1 을 簡單히 “If  $A$  then  $B$ ”,  $A \rightarrow B$  등으로 表現하고, 또  $R$  을  $R_{A \rightarrow B}, R_{AB}$  등으로 表現하기로 한다.  $A, B$  등은 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

$$x \odot y = 0 \vee (x + y - 1) \quad (2.15)$$

이다. 이 演算을 使用함으로써 새로운 合成—Max— $\odot$ 合成“ $\square$ ”—은 다음과 같이 定義된다.

$$A \square R \leftrightarrow \mu_{A \circ R}(y) = \bigvee_x \{ \mu_A(x) \odot \mu_R(x, y) \} \quad (2.16)$$

따라서,

$$B' = A' \square (A \times B) \quad (2.17)$$

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

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

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

$f(u) = u \odot (u \wedge v)$ 라 두면 (2.15)式으로 부터

$$\begin{aligned} f(u) &= O \bigvee \{ u + (u \wedge v) - 1 \} \\ &= \{ O \bigvee (2u - 1) \} \wedge \{ O \bigvee (u - 1 + v) \} \end{aligned} \quad (2.18)$$

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

Fig.1에서  $v=0.2$ 일 때  $f(u)$ 는 占線部와 같이 되어  $v' = \bigvee_x f(u) = 0.2$ 로 되며, 一般的으로 任意的  $v$ 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의 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 reasoning의 結果  $C'$ 는 다음과 같이 된다.

$$C' = B' \square (A' \square R_{A \rightarrow B \rightarrow C}) \quad (2.19)$$

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

$$\left. \begin{aligned} A_1 \rightarrow B_1 \text{ or } A_2 \rightarrow B_2 &\Rightarrow R = R_{A_1 \rightarrow B_1} \cup R_{A_2 \rightarrow B_2} \\ A_1 \rightarrow B_1 \text{ and } A_2 \rightarrow B_2 &\Rightarrow R = R_{A_1 \rightarrow B_1} \cap R_{A_2 \rightarrow B_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

이 된다.

### 3. Fuzzy Logic Control 에 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 들어가게 된다. 이들 操舵系를 Block 線圖로 나타내면 Fig.2 와 같다.

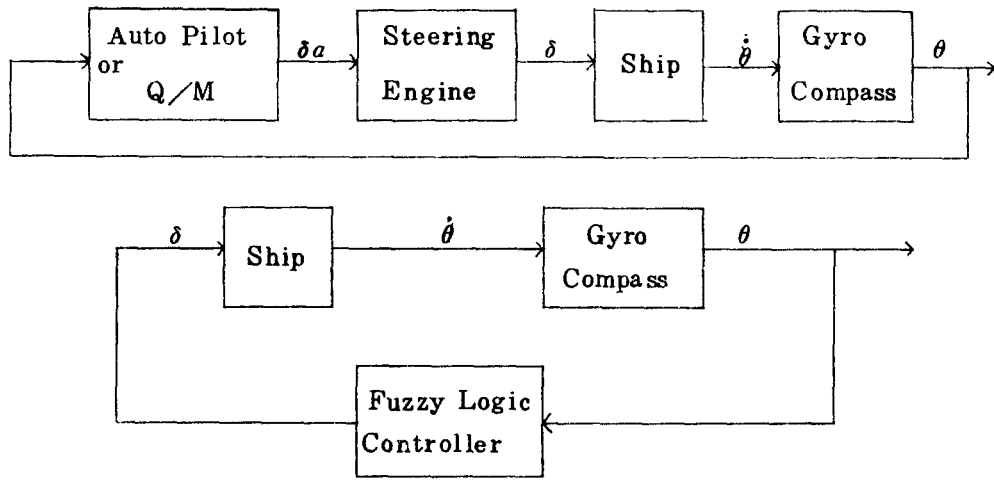


Fig. 2. Block diagram of ship's steering system

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.

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

단,  $T_1, T_2, T_3$ : 操縱性能指數,  $T_1$ : 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,  $K(\theta)^3$ : 非線形要素

Auto Pilot에 의한 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 Engine을 通하여 舵에 加해지면, 舵에 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  $\delta_a$ 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 LCR 을 作成하고, 이를 利用하여 Fuzzy Logic Control 을 實行하는 方法에 對해 說明하고자 한다.

먼저, Fuzzy Variable 을 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 LCR 의 構成인데 Q/M 의 經驗과 操舵로 因한 抵抗增加 및 船舶速力減小 等の 推進馬力의 損失을 考慮하여 다음 Table 2 와 같이 構成한다.

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





그리고, 全體 LCR 에 對한 Fuzzy 關係 R 을 (2.20)式에 依해 求한다. 즉,

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

다음에, Fuzzy Logic Controller 의 舵角은 上記 R 로부터 推論하여 다음과 같이 求한다.

어떤 時刻에 있어서의 入力(Rudder Angle)을  $\widehat{RU}$  라 하면 (2.16)式으로부터

$$\widehat{RU} = A(DE) \square R \tag{3.2}$$

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

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta ru^*, \mu_{\widehat{RU}}(\Delta ru^*) = \max \mu_{\widehat{RU}}(\Delta ru) \tag{3.3}$$

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

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

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\*이 매우 便利하다.

\* 어떤 命題를 "if A ia m 10°"라 表現할 때 m 을 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.

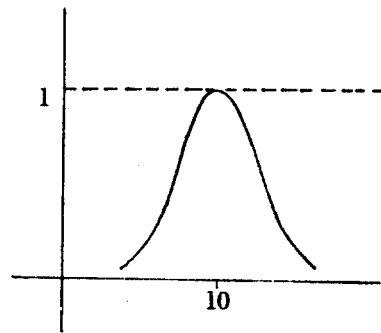


Fig. 3. Fuzzyfication of nearly 10

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

一般的으로 Q/M 는 偏角의 크기 뿐만 아니라 偏角의 變化量도 同時에 考慮하여 操舵한다. 다시 말해 PD Controller 에 對應되는 役割을 한다. 本節에서는 이러한 點을 考慮하여 LCR 을 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 Variable 로는 偏角만을 考慮한 Fuzzy Logic Control 의 境遇와 同一한 것을 使用하고, 偏角의 變化量에 對해서는 BI, SI, ZI, SD, BD 의 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, HS 의 15個를 各 使用하기로 한다.

다음, Fuzzy Variable 의 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 Function 은, 偏角에 對해서는 Table 1, 偏角의 變化量에 對해서는 Table 4, 舵角에 對해서는 Table 5 와 같은 값을 가진다.

그리고, LCR 은 Q/M 의 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 6 과 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
B.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
P17.5	.0	.0	.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
S10	.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
P17.5	.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
P10	.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
S10	.0	.0	.2	.7	1.0	.7	.2	.0	.0	.0	.0	.0
SS	.0	.0	.0	.3	.8	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 = S B then if CDE = B I then RU = HARD PORT  
 if DE = S B then if CDE = S I then RU = HARD PORT  
 if DE = S B then if CDE = Z I then RU = PORT 17.5  
 if DE = S B then if CDE = S D then RU = PORT RUDDER  
 if DE = S B then if CDE = B D then RU = PORT RUDDER  
 if DE = S M then if CDE = B I then RU = PORT RUDDER  
 if DE = S M then if CDE = S I then RU = PORT RUDDER  
 if DE = S M then if CDE = Z I then RU = PORT 10  
 if DE = S M then if CDE = S D then RU = PORT EASY  
 if DE = S M then if CDE = B D then RU = PORT EASY  
 if DE = S S then if CDE = B I then RU = PORT 10  
 if DE = S S then if CDE = S I then RU = PORT 7.5  
 if DE = S S then if CDE = Z I then RU = PORT EASY  
 if DE = S S then if CDE = S D then RU = PORT 2.5  
 if DE = S S then if CDE = E D then RU = ZERO RUDDER  
 if DE = S V then if CDE = B I then RU = PORT EASY  
 if DE = S V then if CDE = S I then RU = PORT EASY  
 if DE = S V then if CDE = Z I then RU = PORT 2.5  
 if DE = S V then if CDE = S D then RU = STARBOARD 2.5  
 if DE = S V then if CDE = B D then RU = STARBOARD 2.5  
 if DE = S O then if CDE = B I then RU = FORT EASY  
 if DE = S O then if CDE = S I then RU = FORT 2.5  
 if DE = S O then if CDE = Z I 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  $\widehat{RU}$ 라 하면 (2·19)式으로 부터

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

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, 本 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 있도록 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. 시뮬레이션은 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.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B\delta + (D(\theta))^3 & (4.1) \\ Y &= CX \end{aligned}$$

단,

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

$$X^T = (\theta, \dot{\theta}, x_1) \quad (' = \text{transpose}), \quad C = (1, 0, 0)$$

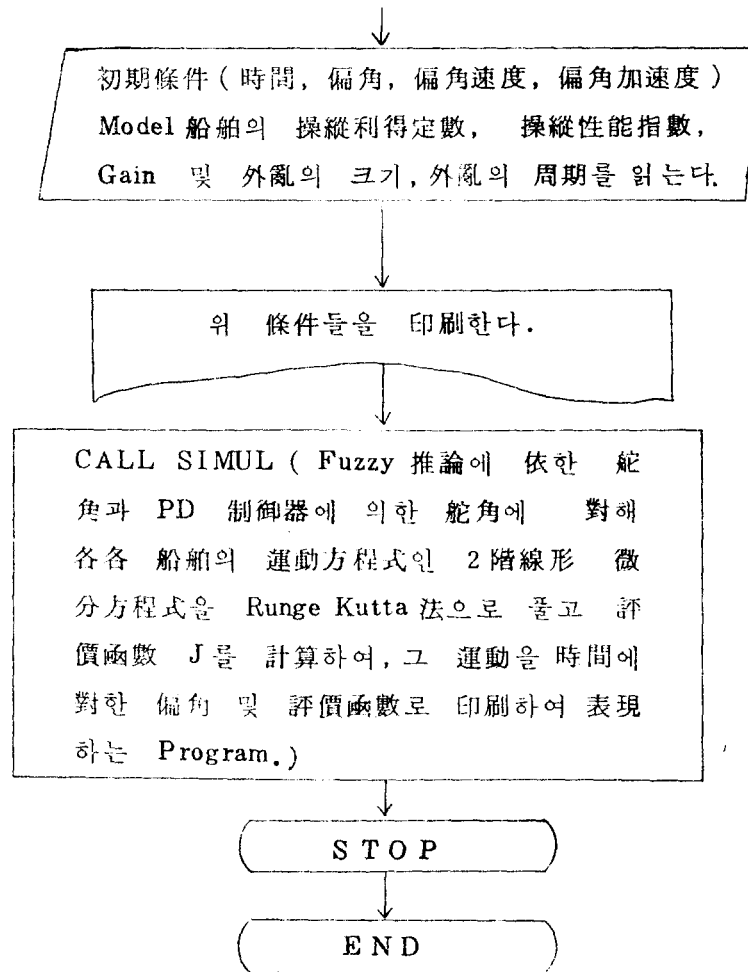
그리고, 船舶操縱의 制御系가 充分히 安定하다는 假定下에서 操舵抵抗과 針路偏差를 航路의 延長으로 取扱하여 Energy 損失에 對한 評價函數를 다음과 같이 計算하였다. 이 때 係數  $n=4^3$ 로 하였다.

$$J = \int (\theta^2 + n\dot{\theta}^2) dt$$

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 計算을 하였다.

**Main Program 의 Flow Chart**





시뮬레이션에 사용한 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  $T_5$  는 各各 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$T_1=45, T_2=6, T_3=10, T_5=0.08$$

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 最適調整值를 使用하였으며, 그 값은 各各 다음과 같다.<sup>1)</sup>  $K_p=1.0, K_d=5.0$  또는 非線形要素의 係數  $K=1$  로 하였다.

各 境遇에 대한 시뮬레이션 結果는 다음과 같다.

아울러 Fuzzy Logic Control 은 狀況에 따라 LCR 을 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의 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의 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  $J$  가 線形인 境遇보다 훨씬 적게 나타남을 보이고 있다.

## 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 Control 의 境遇 評價函數  $J$  는 PD Control 에 비해 훨씬 적게 나타났으며, 實用的으로 充分한 制御가 實現됨을 確認하였다. 아울러 Fuzzy Logic Control 의 長點인 Soft Ware 의 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화가 크게 期待된다.

本 論文에서는 Q/M 의 經驗에다 比較的 簡單한 研究結果만을 導入해서 LCR 을 構成하는 段階에 그쳤으나, System Behavior 에 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 等の 理論的인 研究結果를 導入함과 同時에 學習을 통해 LCR 을 修正해 나간다면, 더욱 良好한 Controller 의 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 관해서는 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 Control 에 對한 研究가 並行된다면 刮目할만한 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.

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

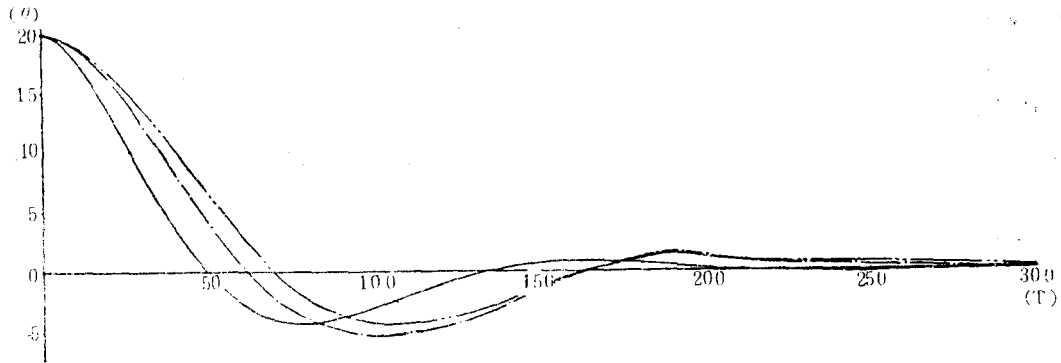


Fig. 4-1(a) Result of Control in the Case 1.

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 0이고, 外亂이 없는 境遇

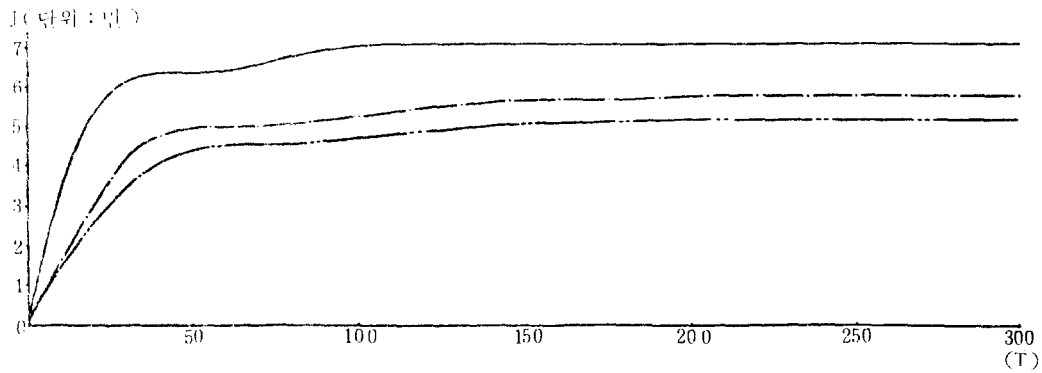


Fig. 4-1(b) Criterion Funtion in the Case 1.

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°, 偏角速度가 1.0°/sec 이고, 外亂이 없는 境遇

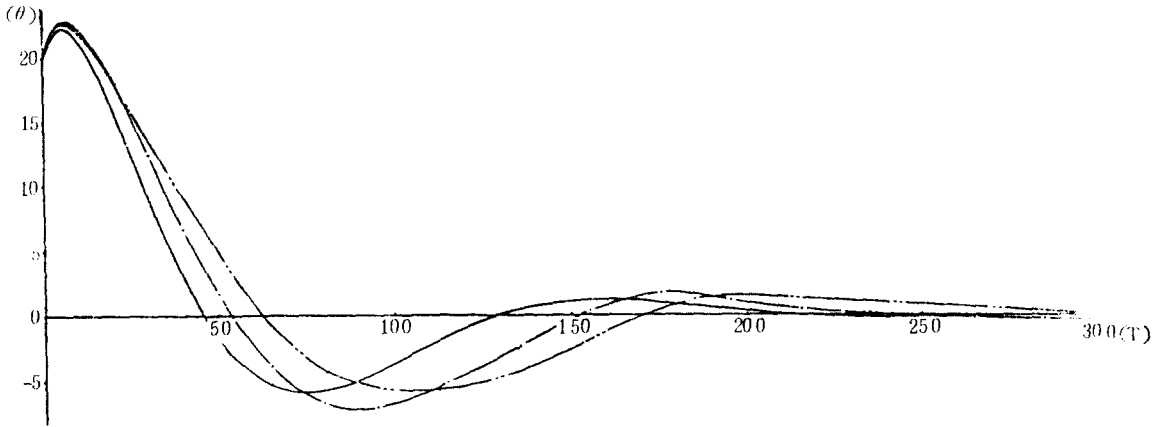


Fig. 4·2(a) Result of Control in the Case 2.

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°, 偏角速度가 1.0°/sec 이고, 外亂이 없는 境遇

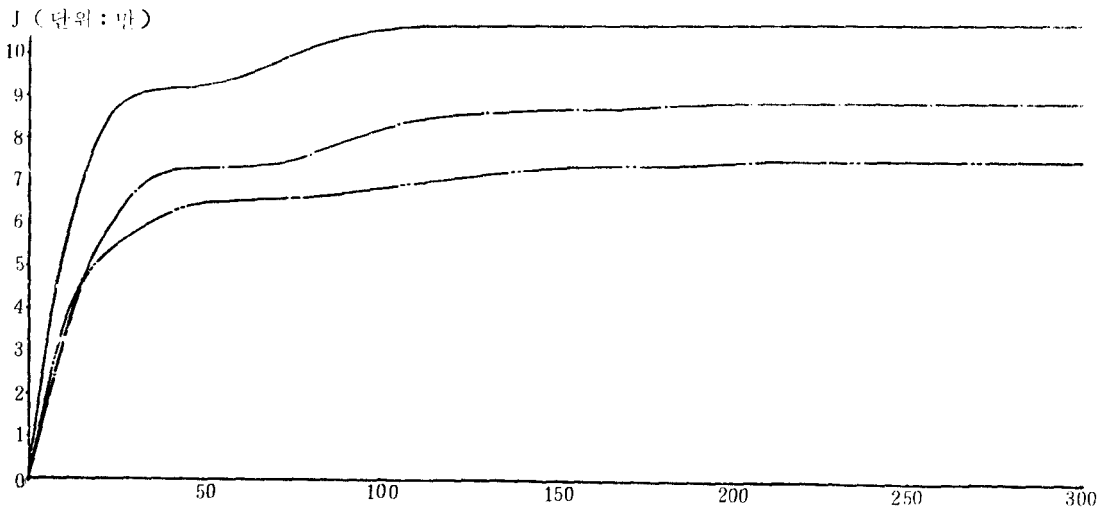


Fig. 4·2(b) Criterion Funtion(J) in the Case 2.

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 0이고, 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

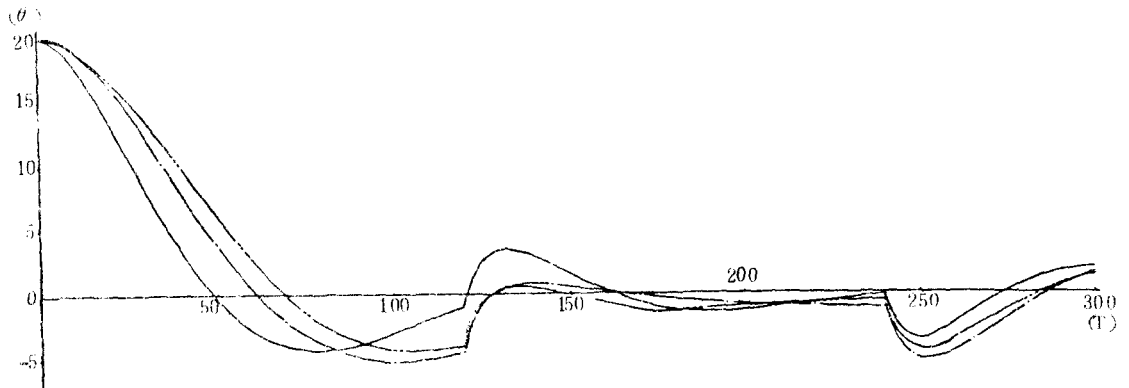


Fig. 4-3(a) Result of Control in the Case 3.

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 0이고, 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

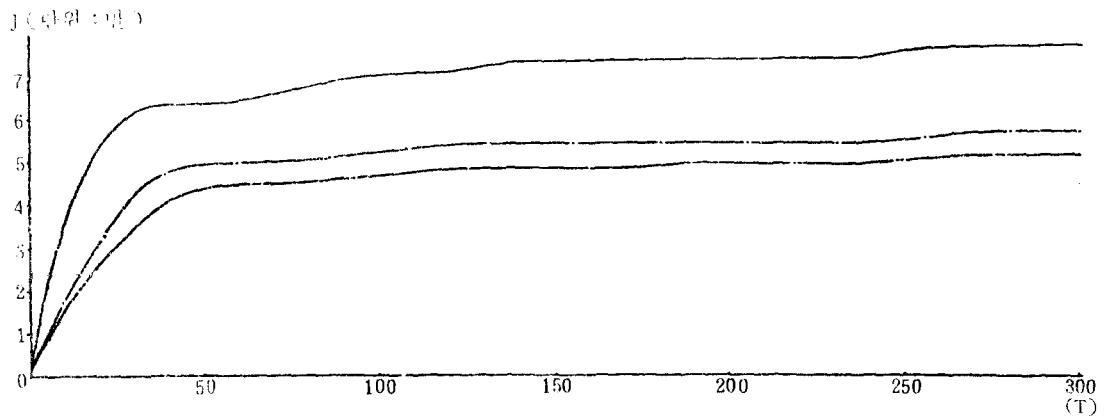


Fig. 4-3(b) Criterion Function(J) in the Case 3.

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

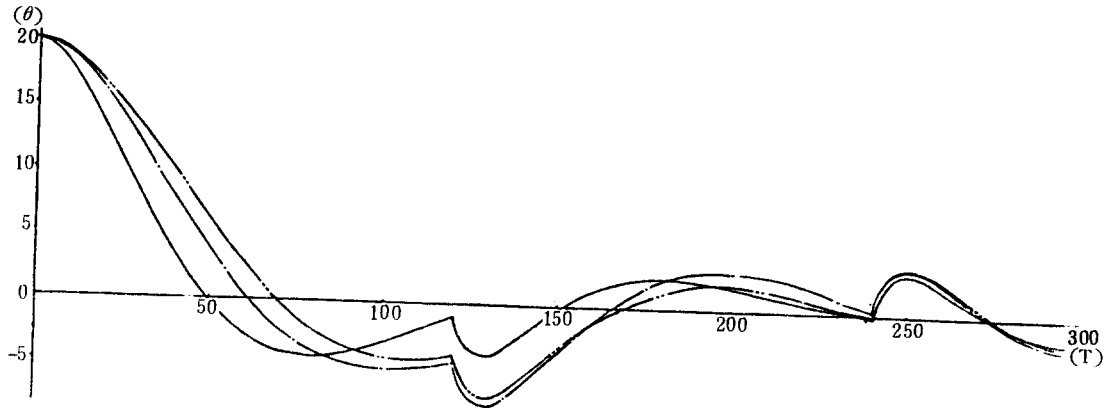


Fig. 4-4(a) Result of Control in the Case 4.

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

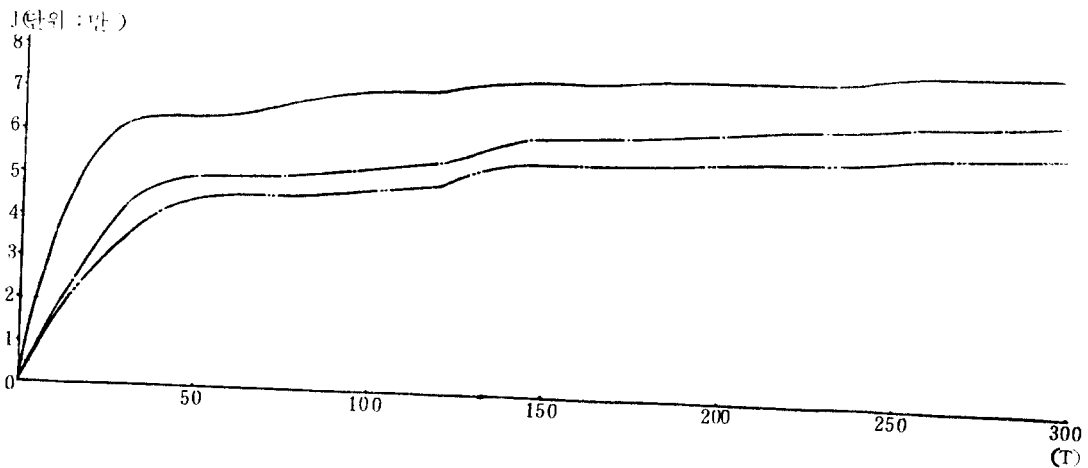


Fig. 4-4(b) Criterion Function(J) in the Case 4.

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

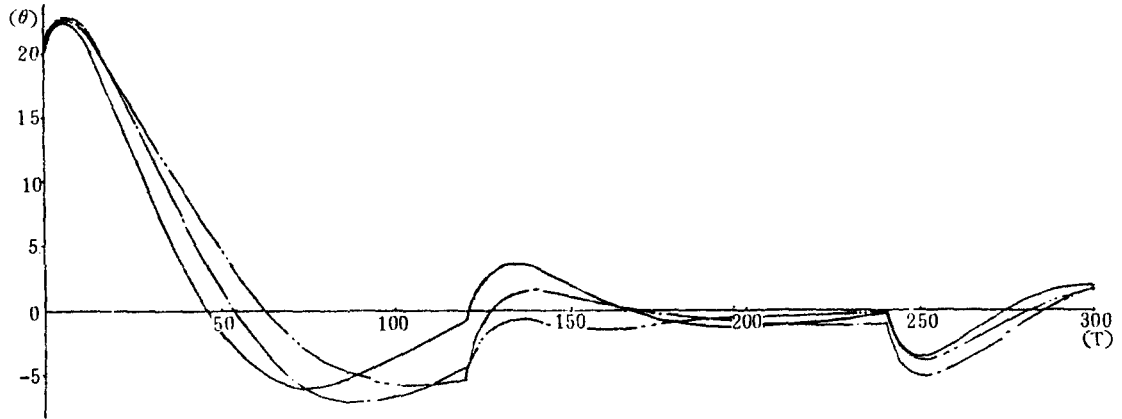


Fig. 4-5(a) Result of Control in the Case 5.

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

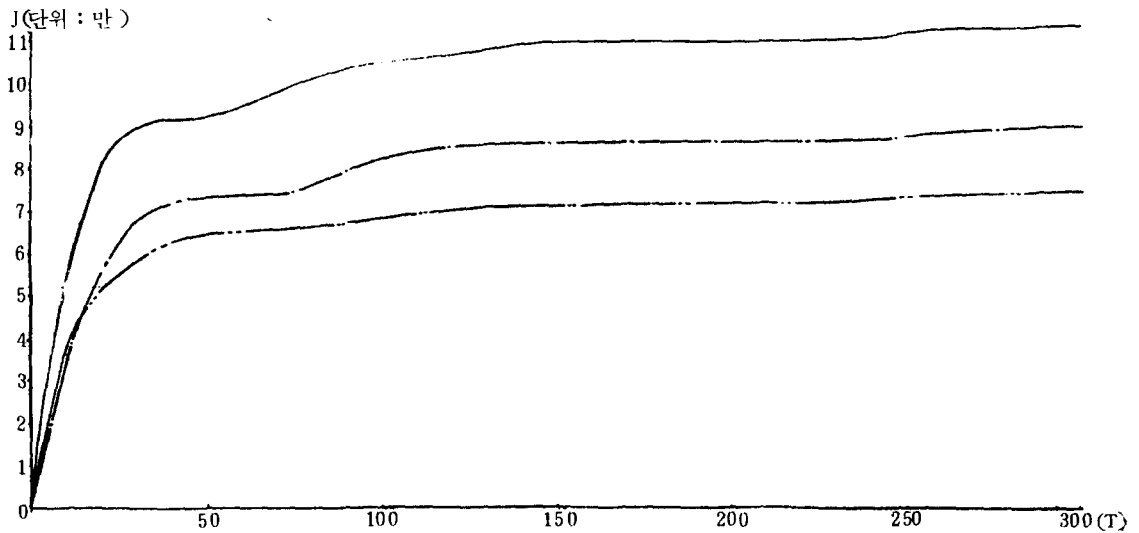


Fig. 4-5(b) Criterion Function(J) in the Case 5.

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

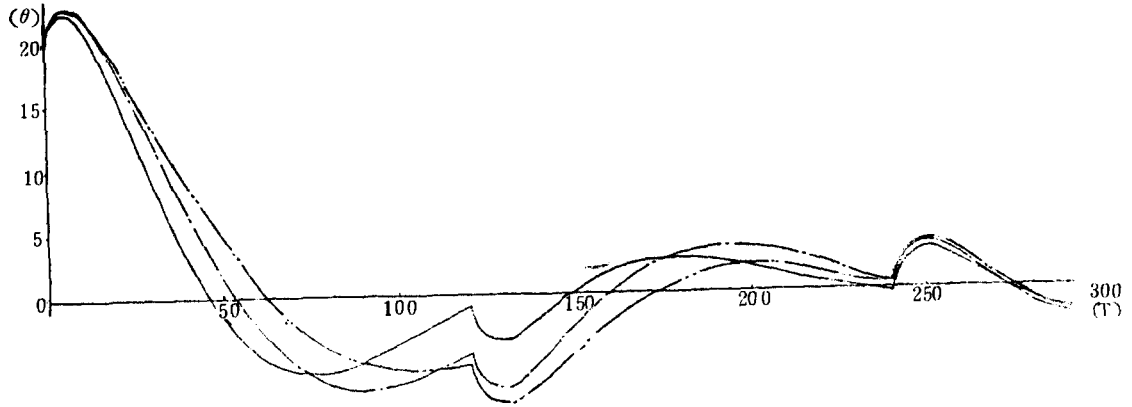


Fig. 4-6(a) Result of Control in the Case 6.

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

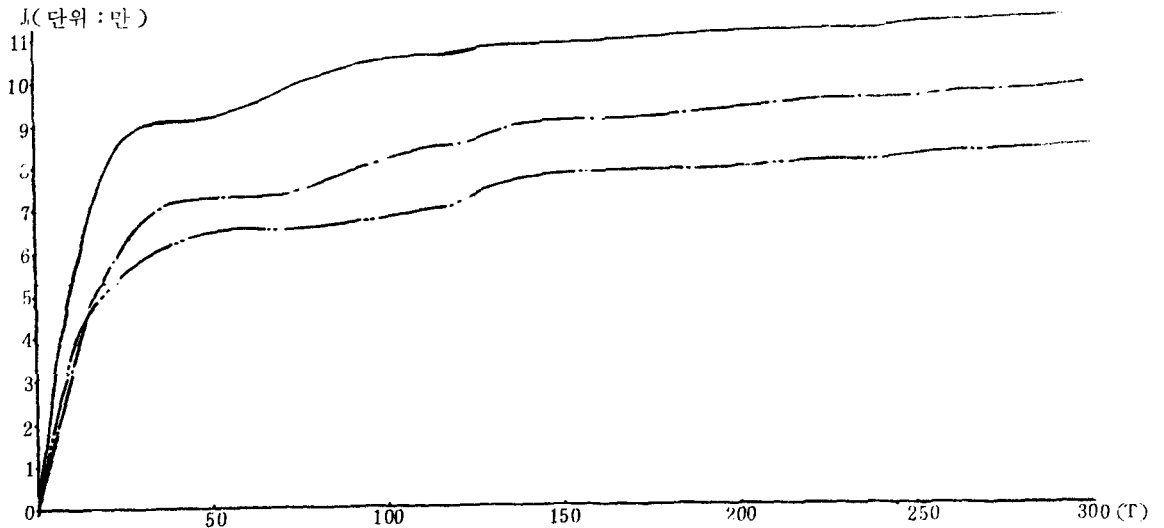


Fig. 4-6(b) Criterion Function(J) in the Case 6.

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  $20^\circ$ , 偏角速度가 0이고, 外亂이 없는 境遇

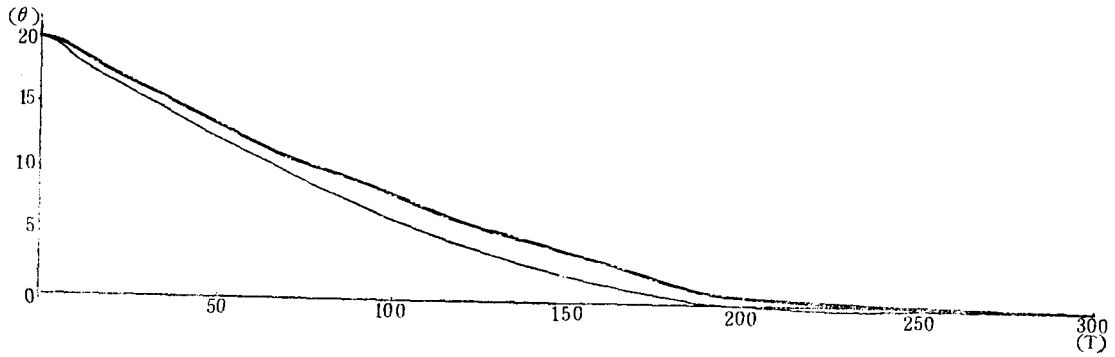


Fig. 4.7(a) Result of Control in the Case 1. (Non-linear)

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  $20^\circ$ , 偏角速度가 0이고, 外亂이 없는 境遇

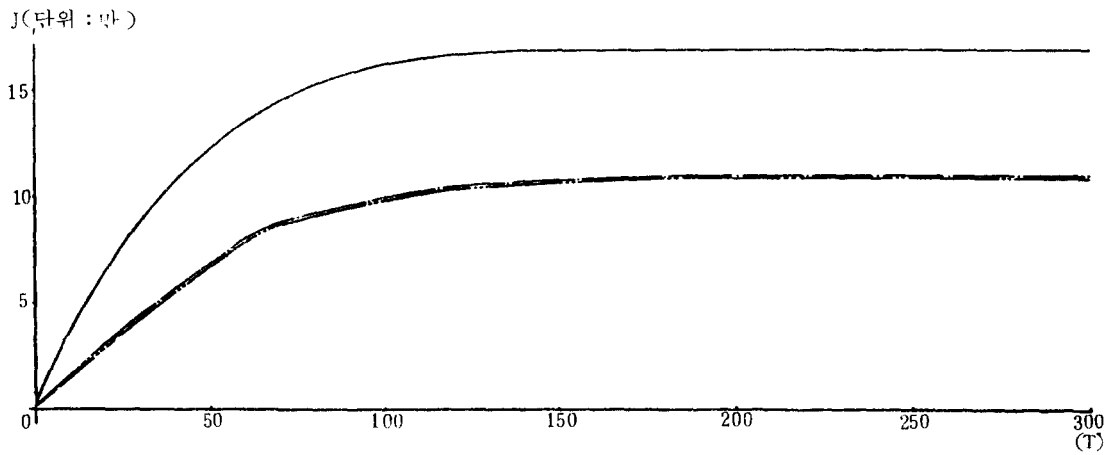


Fig. 4.7(b) Criterion Function(J) in the Case 1. (Non-linear)

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

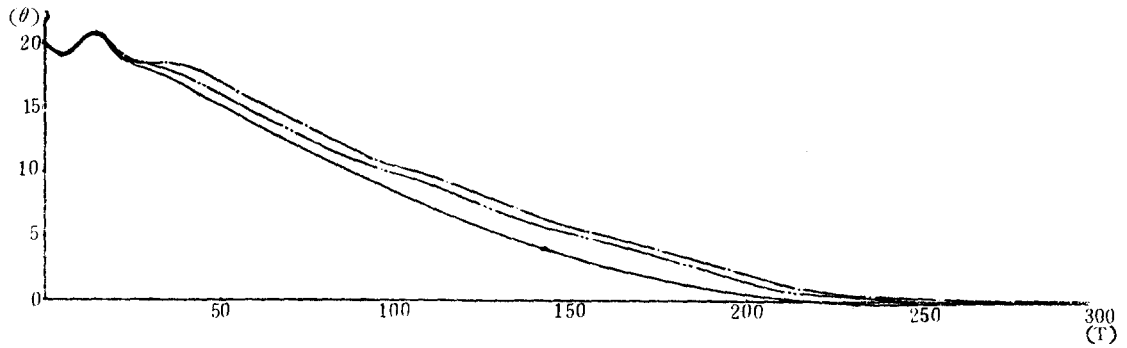


Fig. 4·8(a) Result of Control in the Case 2. (Non-linear)

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

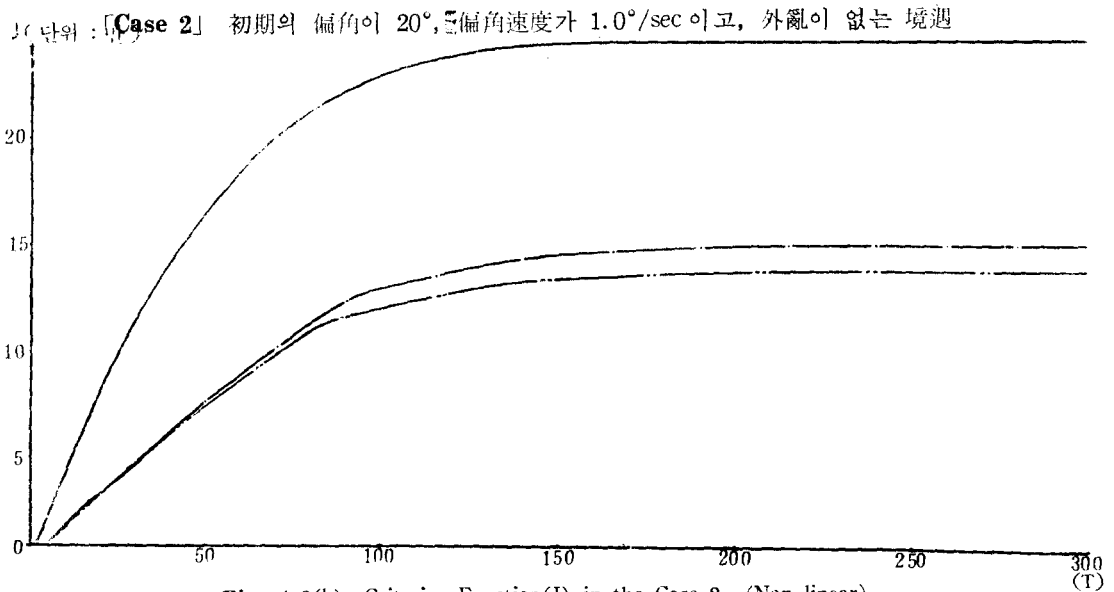


Fig. 4·8(b) Criterion Function(J) in the Case 2. (Non-linear)

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  $20^\circ$ , 偏角速度가 0이고, 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

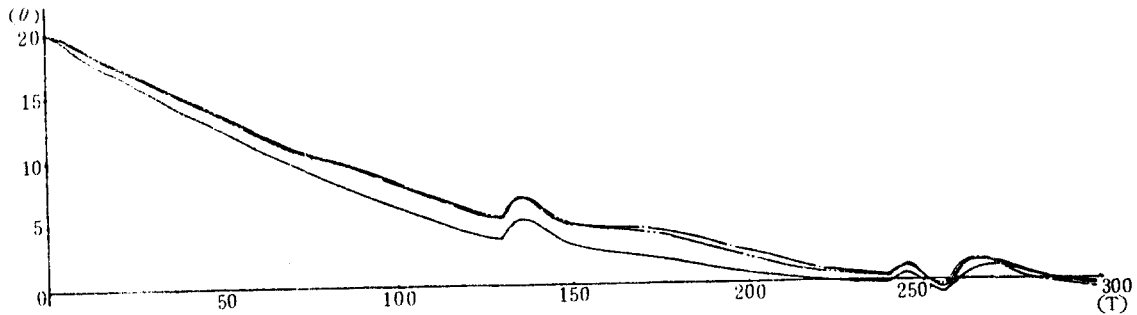


Fig. 4.9(a) Result of Control in the Case 3. (Non-linear)

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  $20^\circ$ , 偏角速度가 0이고, 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

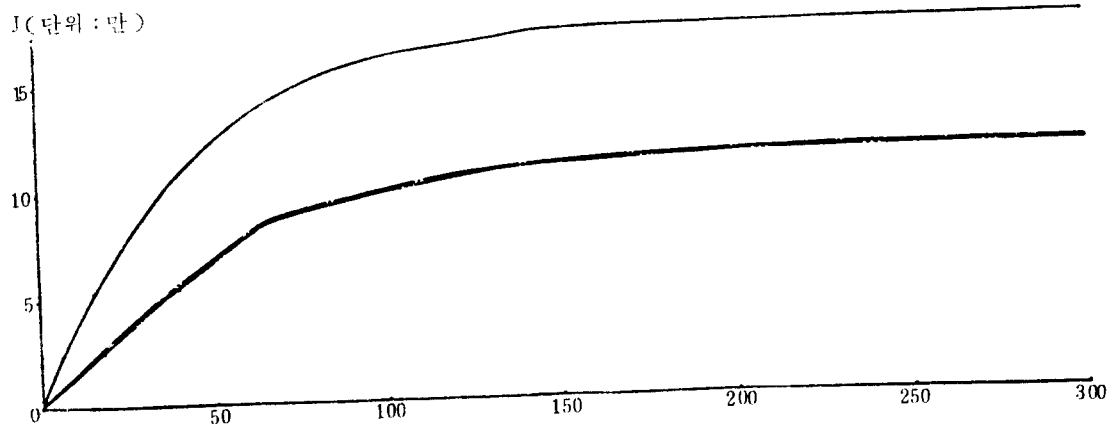


Fig. 4.9(b) Criterion Function(J) in the Case 3. (Non-linear)

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

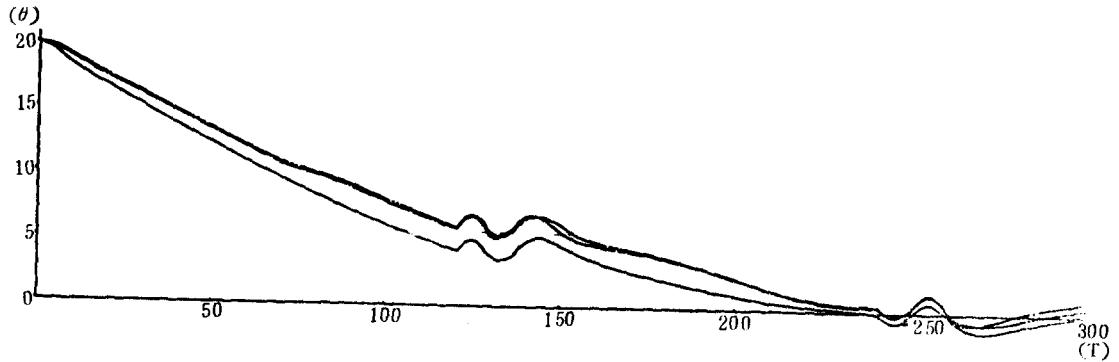


Fig. 4-10(a) Result of Control in the Case 4. (Non-linear)

단, ——— FD 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

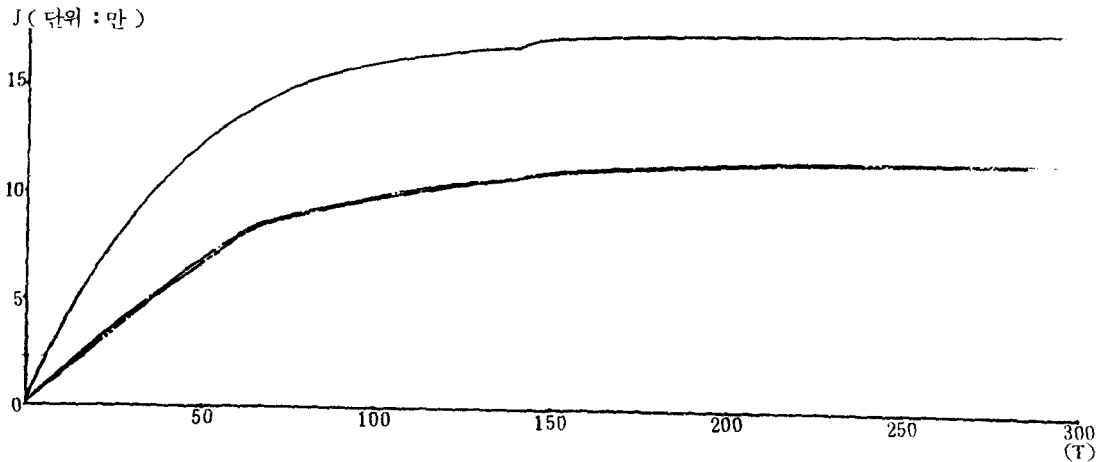


Fig. 4-10(b) Criterion Function(J) in the Case 4. (Non-linear)

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

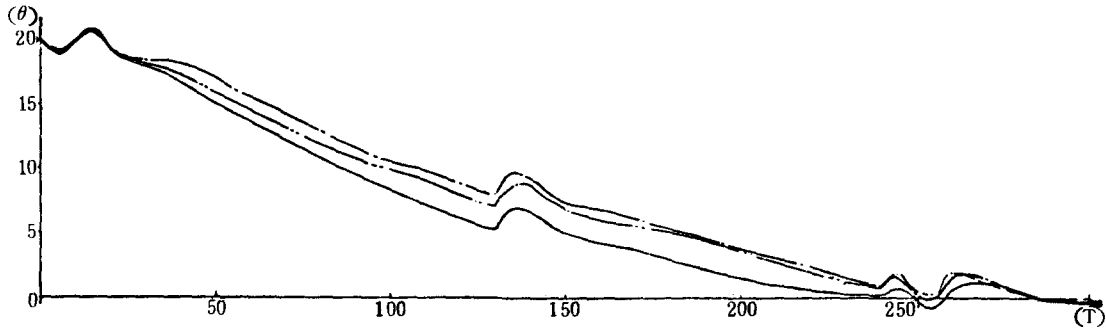


Fig. 4-11(a) Result of Control in the Case 5. (Non-linear)

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

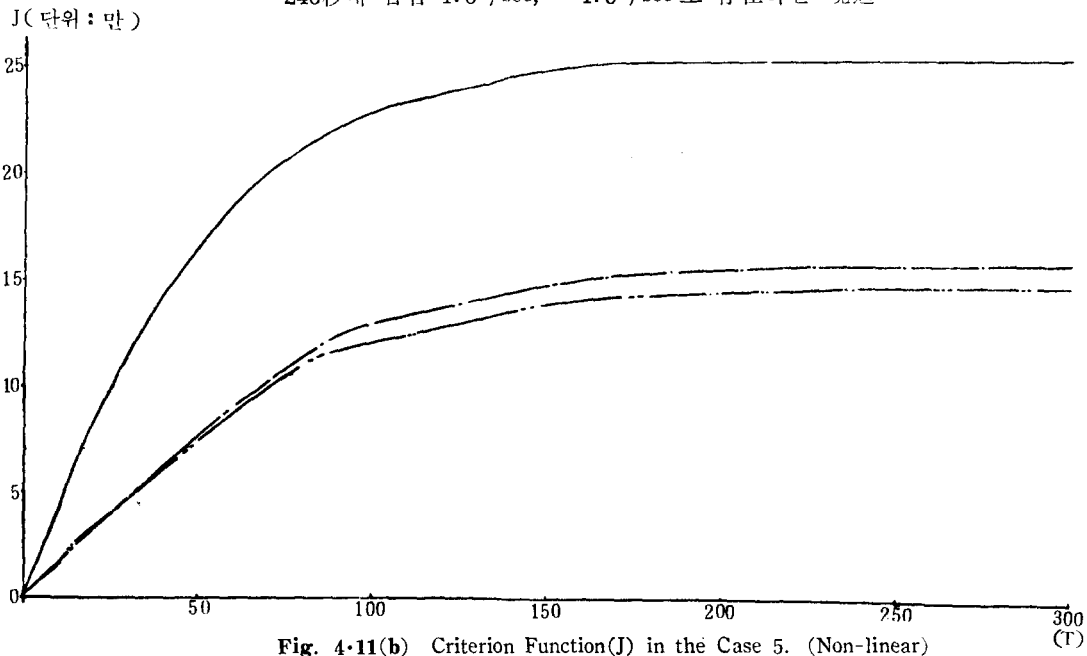


Fig. 4-11(b) Criterion Function(J) in the Case 5. (Non-linear)

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

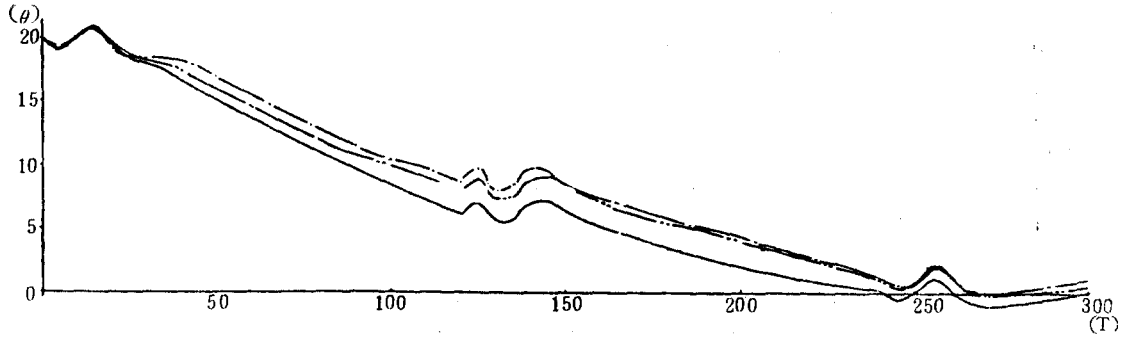


Fig. 4-12(a) Result of Control in the Case 6. (Non-linear)

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

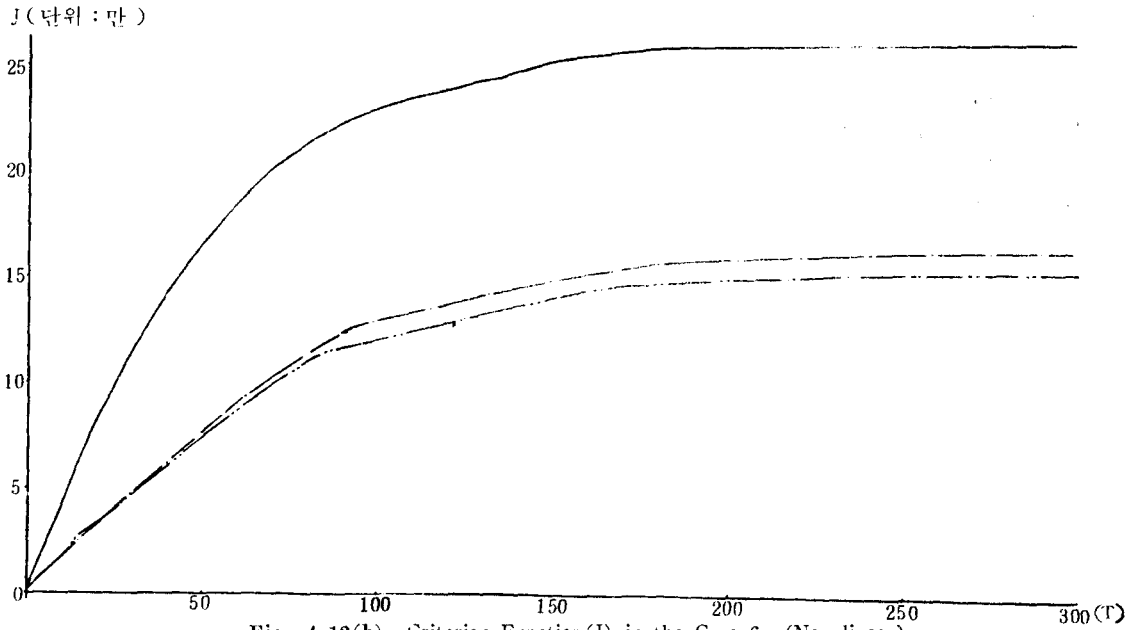


Fig. 4-12(b) Criterion Function(J) in the Case 6. (Non-linear)

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

### 參 考 文 獻

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. Ibid : 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. 菅野導夫 : 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. 前畑幸爾外 : 不規則波中における自動操舵のシミュ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・金煥秀 : Fuzzy Logic Controller에 의한 船舶의 制御, Journal of Institute of Navigation, Vol. 5, No. 2.