

# 船舶의 퍼지 制御에 관한 研究

林 峯 澤\* · 李 哲 榮\*\*

## On the Applicaiton of Fuzzy Control to Ship's Stering System

*Bong-Taek Lim. · Cheol-Young Lee*

### 〈 目 次 〉

- |                     |               |
|---------------------|---------------|
| Abstract            | 4. 시뮬레이션 및 考察 |
| 1. 序 論              | 5. 結 論        |
| 2. 퍼지 制御를 위한 수학적 概念 | 參考文獻          |
| 3. 操舵系에 대한 퍼지制御의 適用 |               |

### Abstract

Since L. A. Zadeh introduced the theory of fuzzy sets in 1965, E. H. Mamdani applied the theory to the steam engine control in 1974. Since then, scientists have shown a great deal of interests in its application to practical problems, and the possibility of the application of the theory to a more complicate system has been increasing greatly.

In the fuzzy control, the qualitative knowledge and intuition that the operators of a system has acquired through their experience can be logically described by the Linguistic Control Rule(LCR). The algorithm of the control is made of the LCR, and the control of an object is performed by processing this algorithm implementing a computer.

In this thesis, the fuzzy controller of the ship's steering system is divided into two systems, namely FC1 and FC2, according to their control function. FC1 is for the course keeping steering, wheress FC2 : is for the altering of a ship's course.

The characteristics of the control system were investigated through the digital computer simulation and the results were compared with those of the conventional steering system. It was found that the fuzzy control was more efficient than the conventional auto pilot system.

\* 한국해양대학 대학원

\*\* 정희원, 한국해양대학

## 1. 序 論

船舶에 있어서의 自動操舵裝置는 船舶의 操舵器를 자동으로 制御하여 針路를 일정하게 유지하거나 자동으로 變針시키는 장치로서, 1920년대에 Sperry Company에 의해 최초로 만들어 졌다. 그 후 自動操舵器는 계속 발전하였는데, 1922년 Minorsky는 船舶이나 航空機의 自動操縱에 관해서 당시에 사용되던 角加速度制御方式 대신 微分比例制御方式의 필요성을 밝혔고,<sup>1)</sup> 1949년 Schiff에 의해서 比例制御方式과 比例微分制御方式에 대한 연구가 행해진 후, 船舶이 針路를 안정하게 유지할 수 있도록 補償器를 도입한 制御系의 구성방식 즉, PD 또는 PID 制御器를 채택한 自動操舵裝置가 널리 이용하게 되었다.<sup>2)</sup>

최근에는 最適制御理論에 의한 파라메타 最適化 또는 動的最適化가 연구되고 있으며, 여러가지 評價函數에 대해서 模型 또는 實船實驗을 통한 最適設計에 대한 연구와 AR(Auto Regressive)形의 自動操舵裝置 및 適應制御方式을 도입한 연구 등도 많이 보고되고 있다.<sup>2, 13, 16)</sup>

그러나 船舶의 操舵系는 非線形的인 성질을 지니며 制御 파라메타는 船舶의 상황에 따라 변하여, 制御系의 制御方式 및 파라메타를 그 때마다 바꾸어 주어야 하는 등의 問題點이 있다. 따라서 본 논문에서는 이상과 같은 研究結果에 人間의 經驗과 知識을 附加한 새로운 制御方式인 퍼지 制御方式을 船舶操舵系에 적용해 보고자 한다.

퍼지 制御는 퍼지 理論(퍼지 集合)에 기초한 것으로서 L. A. Zadeh에 의해 1965년에 提唱되었고,<sup>17)</sup> 1974년 E. H. Mamdani에 의해서 Steem Engine의 制御에 응용되면서 부터 이에 대한 관심이 고조되기 시작하여,<sup>18)</sup> 1980년대에 접어들어 일본에서 퍼지 Boom을 일으키면서 세계적으로 많은 脚光을 받게 되었고,<sup>9)</sup> 최근에는 한국에서도 학계 및 산업계에서 많은 關心을 불러 일으키고 있다.

퍼지 制御는 人間의 直觀, 六感, 經驗 및 知識에 의해 인식된 시스템의 學動과 그 물리적 성질을 종합하고, 이들을 Linguistic Control Rule(이하 LCR로 표기함)로 理論化하여 알고리즘을 구성하

고, 이것을 계산기로 처리함으로써 對象을 制御하는 방법이다. 특히, 對象의 非線形的인 부분이라든가 環境의 變化 등과 같은 曖昧한 情報를 LCR로 표현함으로써 비교적 쉽게 對象을 다룰 수 있는데, 지금까지 이러한 연구들로서 船舶의 自動操舵裝置에 적용된 예는 별로 많지 않은 설정이지만,<sup>3, 4)</sup> 1990년 石塚正則 등에 의해서 實船의 自動操舵系에 적용된 간단한 퍼지 制御器에 대한 연구 등도 보고되고 있다.<sup>5)</sup>

본 논문에서는, 最適制御理論의 研究結果와 評價函數를 고려하여 保針(Course Keeping)操舵方式 및 變針(Course Altering)操舵方式의 2가지 퍼지 制御 알고리즘을 각각 작성하고, 이들을 하나의 選擇形自動操舵 시스템(Converting Autopilot System)으로 구성한 뒤, PD 制御와 퍼지 制御, 線形操舵系와 非線形操舵系에 대한 시뮬레이션을 각각 행하여, 각 制御結果와 評價函數를 통해 본 논문에서 제시한 퍼지 制御를 이용한 選擇形自動操舵 시스템의 유효성을 검토하고자 한다.

본 논문은 다섯 개의 장으로 구성되어 있으며 제 2장에서는 퍼지 制御의 배경이 되는 퍼지 理論이 수학적 개념에 대하여 설명하고, 제 3장에서는 船舶操舵系에 퍼지 制御를 적용하는 구체적인 방법으로서, 保針操舵方式에 대한 경우와 變針操舵方式에 대한 경우에 대하여 최적 LCR의 구성을 기술하며, 제 4장에서는 시뮬레이션을 통해서 船舶의 選擇形自動操舵系에 대한 퍼지 制御의 유효성을 확인하고, 그 결과에 대한 검토를 행하였다.

## 2. 퍼지 制御를 위한 수학적 概念

일반적으로 人間이 지니고 있는 情報에는 각 개인의 主觀性이 많이 기재되어 있기 때문에 曖昧한 점이 매우 많아서, 종래의 定量化 방법으로는 처리하기 어려운 性質의 것이 대부분이다. 따라서 이러한 問題를 처리할 수 있는 새로운 수학적 방법 즉, 퍼지 理論이 對象의 制御에 응용되기 시작하면서 오늘날에는 많은 分野에서 연구 및 응용되고 있다.

실제적으로 퍼지 制御를 행하기 위해서는, 먼저

理論的으로 표현된 情報를 계산기가 다룰 수 있도록 定量化하지 않으면 안된다. 즉, 人間の 經驗으로 부터 制御實現을 위한 言語的規則을 만들고 이 법칙을 言語的命題(Linguistic Proposition)로 표현한 뒤, 각 言語的命題의 言語的變數(Linguistic Variable)를 퍼지 量으로 표현한다. 그리고 각 言語的命題에 대한 퍼지 關係를 구한 뒤, 이들의 結合으로 전체 LCR에 대한 퍼지 關係를 얻는다. 이것으로 制御入力에 대해 퍼지 推論을 행해서, 그 결과를 制御出力인 操舵量으로 하여 對象을 制御하게 되는 것이다.

### 2.1 퍼지 集合과 關係

퍼지 集合은 언어의 의미가 갖는 曖昧함을 集合概念을 이용하여 표현한다. 즉, 기존 Crisp 集合의 正義函數를 擴張한 개념이라 할 수 있겠다.

全體集合 X에서 안팎의 경계가 曖昧한 부분 영역을 갖는 部分集合 A'를 X의 퍼지 部分集合 A'라고 하는데, A'는 보통의 Crisp 集合과는 다르다. 여기서 X의 요소가 x가 A'에 속하는 정도를 Grade 또는 Membership Value라고 하며, 集合의 요소와 Grade와의 關係를 Membership 函數로 표현한다. 이상을 數學的으로 표현하면 식(2.1)과 같다.<sup>12)</sup>

$$A' = \{ \mu_{A'}(x)/x \}, \mu_{A'} : x \Rightarrow [0, 1], \forall x \in X$$

..... (2.1)

Membership 函數의 표현에 관해서는, 離散的인 방법과 規格化한 函數形態로 표현하는 連續的方法이 있고, 連續的인 방법으로서는 三角型, 鐘型, 台形型, 複合型的 表現方法이 있다.

다음으로 아주 중요한 문제로서 Membership 函數의 결정이 있는데, 이것은 函數를 定義한 사람의 主觀에 따라 서로 달라지게 된다. Membership 函數의 결정은 상식적인 범위에서 벗어나지 않게 主觀的으로 결정할 수가 있으나, 주로 專門家의 意見を 이용하는 경우가 많다. 그러나 퍼지 制御에서는 LCR을 調整하는 것이 容易하다는 長點이 있기 때문에, Membership 函數를 對象의 制御目的에 맞게 定義할 수 있다.

퍼지 關係라고 하는 것은 對象과 對象간의 曖昧한 關係를 퍼지 集合概念을 이용하여 표시하는 것

이다. 특히 X와 Y의 直積集合을  $X \times Y$ 로 두면, 이것의 部分集合 R'를 식 (2.2)와 같이 표시하고,  $X \times Y$  상의 퍼지 關係라 부른다.<sup>12)</sup>

$$R' \subset X \times Y \dots\dots\dots (2.2)$$

일반적으로  $y=f(x)$ 라고 하는 函數는  $x=x_1$ 일 때,  $y_1=f(x_1)$ 과 같이 y의 値를 函數演算에 의해 구하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러나 퍼지 演算에 있어서는 x치나 y치가 曖昧하게 표현되므로, Crisp 演算의 擴張概念인 퍼지 關係의 合成이라는 演算이 필요하게 된다. 즉  $X \times Y$  상의 퍼지 關係를 R',  $Y \times Z$  상의 퍼지 關係를 S'라 하면 R' x S'의 合成( $S \cdot R$ )이라는 것은, 식 (2.3)으로 定義되는  $X \times Z$  상의 Membership 關係인 것이다.

$$\mu(S \cdot R)'(x, z) = \text{MAX} [\mu R'(X, Y) \wedge \mu S'(Y, Z)]$$

$$y \in x$$

..... (2.3)

단,  $\wedge = \text{Min}$  표시

특히, 台集合이 有限할 때 퍼지 集合과 關係를 벡터 및 행렬을 이용하여 표시하면 合成演算에 편리한 경우가 많다. 즉,

$$A' = \{ a_i \}, a_i = \mu_{A'}(x_i)$$

$$R' = \{ r_{ij} \}, r_{ij} = \mu R'(x_i, y_j)$$

$$A' \cdot R' = \{ b_j \}, b_j = \mu(A \cdot R)'(y_j)$$

로 두면, 合成演算의 Membership Value는 식 (2.4)와 같이 표현된다.

$$b_j = \vee_i (a_i \wedge r_{ij}) \dots\dots\dots (2.4)$$

단,  $\vee = \text{Max}$ 를 표시

### 2.2 퍼지 推論

퍼지 制御器는 복수개로 구성된 퍼지 制御規則들과 推論部로 구성된다. 여기서 制御規則이라는 것은 If(前件部)-then(後件部)으로 표현되는데 對象의 制御에 필요한 對象의 狀態에 관한 情報를  $x_1, x_2$ 로 하고, 對象으로의 入力을 y로 하면, 식 (2.5) 또는 식 (2.6)과 같이 표현되는 制御 알고리즘인 것이다.<sup>7,8)</sup> 식 (2.5)는 變數들이 갖는 値가 언어 Level로 부여되어 퍼지 集合으로 표현되는 言語的

制御規則임을 나타내고 있고, 식(2.6)에서 A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub> 등은 실제로 變數 x, y가 갖는 퍼지 值이다.

If x<sub>1</sub> is Small and x<sub>2</sub> is Big then y is Medium ..... (2.5)

R<sub>i</sub>: If x<sub>1</sub> is A<sub>i1</sub> and x<sub>2</sub> is A<sub>i2</sub> then y is B<sub>i</sub>  
(i=1, 2, ..., n) ..... (2.6)

단, R<sub>i</sub>: 제어규칙 번호 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>: 전건부 변수  
y: 후건부 변수 A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>: 퍼지 변수

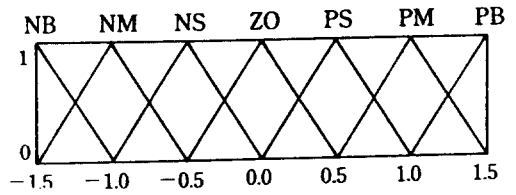
퍼지 推論部에서는 실제 入力이 주어진 경우, 適用 가능한 制御規則을 이용해서 퍼지 推論을 행하는 것에 의해 出力을 계산한다. 퍼지 推論은 퍼지 論理에 기초한 것이지만, 퍼지 制御에서는 퍼지 關係概念을 이용하지 않는 간단한 計算法이 고안되어 있다. 이것은 일반적인 퍼지 論理와 다른데, 推論의 前提인 퍼지 制御器에로의 入力이 퍼지 值가 아닌 보통의 수치인 것으로, 推論結果도 수치로 부여된 것이다.

이러한 퍼지 推論法으로는 많은 것이 이용되고 있는데, 여기서는 일반적으로 가장 많이 이용되고 또, 본 논문에서도 사용된 퍼지 關係의 Min-max 合成則에 기초한 推論法에 대하여서만 설명하고자 한다. 이 방법에서는 퍼지 變數의 Membership 函數式으로서 식 (2.7)과 같은 鐘形과 식 (2.8)과 같은 三角形의 것을 주로 이용하고 있는데, 三角形의 경우가 계산이 간단하고 시스템 性能에 큰 차이가 없기 때문에 주로 많이 사용되고 있다.

$$A(x) = e^{(-1/a^2)(x-b)^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$A(x) = [\{(1/a)(-|x-b|+a)\} \vee 0], a > 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

위식에서 變數 b는 Membership 函數의 Grade가 1이 되는 台集合의 值이고, a는 Membership 函數의 台集合 上의 幅을 나타내고 있다. 그림 2.5는 식 (2.8)을 圖式化한 것인데, 식 (2.7)은 三角形 대신 曲線形態의 鐘形으로 표현된다.



단, NB: Negative Big      PS: Positive Small  
NM: Negative Medium    PM: Positive Medium  
NS: Negative Small      PB: Positive Big  
ZO: Zero

Fig. 2.5 The graphic representation of triangle membership function of fuzzy variable.

그림 2.5를 살펴보면, 台集合이 [-1.5; 1.5]일 때 a는 0.5, b는 NB부터 PB까지 순서대로 -1.5, -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5의 값을 갖는다. 각 퍼지 Level의 函數式을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{NB} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{NM} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{NS} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{ZO} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{PS} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{PM} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \\ \mu_{PB} &= \{(1/0.5)(-|x+1.5|+0.5)\} \vee 0 \end{aligned}$$

여기서 퍼지 關係의 合成則에 기초한 推論을 실시해보면, 우선 식(2.5) 또는 식 (2.6)과 같은 制御規則에 복수개 있고, 前件部變數 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>의 값을 퍼지 值가 아닌 確定된 수치로 부여한 값을 x<sub>1</sub>\*, x<sub>2</sub>\*로 가정하면, Min-max 合成則에 따라 다음의 식들이 定義된다.<sup>12)</sup>

$$\omega_i = A_{i1}(x_{1*}) \wedge A_{i2}(x_{2*}) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$B_{i*}(y) = \omega_i \wedge B_i(y) \dots\dots\dots (2.10)$$

$$B_* = \bigvee_{i=1}^n B_{i*} \dots\dots\dots (2.11)$$

식 (2.9)의 ω<sub>i</sub>는 i번째 規則의 適合度라고 불리는데, 퍼지 集合의 Grade로서 취급되며 의미상으

로는 2개의 前件部變數가 갖는 퍼지 值의 Min 값을 나타내고 있다. 식 (2.10)은 i번째 規則의 推論 結果로서 適合度와 後件部變數와의 Min 값을 나타낸다. 식 (2.11)은 全體規則의 推論 結果로서 각 推論 結果를 Max 合成한 값이 된다. 이상의 값들은 모두 확정된 수치로 나타난다.

퍼지 推論은 B\*를 구함으로서 完了되는데, 이렇게 出力된 結果는 퍼지 集合形態로 표현되므로 비 퍼지화라 불리는 推論 結果의 解釋 課程을 거쳐 하나의 확정된 수치로 出力된다. 推論 結果의 解釋 方法에는 最大值 또는 中央值를 취하는 방법 重心法에 의한 방법 등 여러가지가 있지만 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 重心法을 사용하였다. 重心法은 식 (2.12)와 같이 定義된다.<sup>7,8)</sup> 식 (2.12)는 퍼지 集合 B\*(y)의 重心座標 y\*를 취하는 것으로 台集合의 요소에 y의 加重值 B\*(y)가 加重된 平均을 나타낸다. 그림 2.3은 이상의 推論 節次를 보여주고 있다.

$$y_* = \frac{\int B_*(y)ydy}{\int B_*(y)dy} \dots\dots\dots (2.12)$$

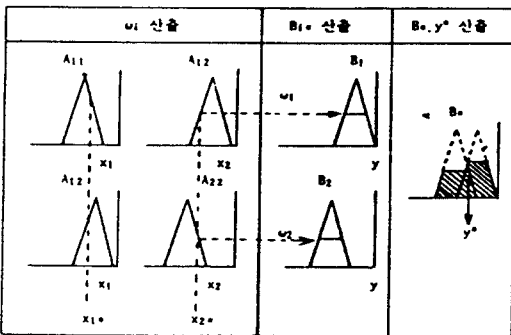


Fig. 2.3 Fuzzy reasoning process

### 3. 操舵系에 대한 Fuzzy 制御의 適用

船舶이 自動操舵로 항해할 경우 操舵系를 구성하는 요소로서는 自動操舵器, 舵器 엔진, 舵 및 Compass 등이 있다. 自動操舵가 아니고 人間에 의한 操舵의 경우에는 自動操舵器 대신 Quarter Master(Q/M)가 또, 본 논문에서 다루고자 하는 퍼지 制御에 의한 경우에 Fuzzy Controller(FC)가 들

어 가게 된다. 본 논문에서는, 지금까지 대부분의 自動操舵裝置가 주로 保針(Course Keeping)操舵方式에 대해서만 연구되었던 점을 보완하기 위하여 變針(Course Altering)操舵方式에 의한 Controller를 별도로 설계하고 이들을 Converting Sweech로 연결시켜 하나의 시스템으로 구성하였다. 이상의 퍼지 制御器들을 Fuzzy Controller 1(FC1), Fuzzy Controller 2(FC2)로 각각 두었는데, FC1의 경우에는 船舶의 大洋航海와 같이 안정된 상태에서 航海할 때 주로 保針操舵를 하므로 航費節約이라는 관점에서 操舵抵抗과 針路偏差를 航路의 연장으로 취급하여, 식 (3.1)과 같이 에너지 損失에 대한 것을 評價函數로 두었다. FC2의 경우는 沿岸 혹은 狹數路航海 등과 같이 船舶의 安全性이 상당히 우선될 때 주로 變針操舵를 하므로 偏角을 빨리 제거하여 精밀한 航路를 유지할 수 있도록, 식 (3.2)와 같이 偏角量만을 評價函數로 정하였다. 식 (3.1)의 경우 n의 값은 4로 두었다.<sup>2)</sup>

$$J = \int (\theta^2 + n\delta^2) dt \dots\dots\dots (3.1)$$

$$J = \int \theta^2 dt \dots\dots\dots (3.2)$$

이상에서 설명한 퍼지 制御를 이용한 船舶自動 操舵系를 Block 선도로 나타내면 그림 3.1과 같다. 그림 3.1의 Block 선도에서 CS는 Converting Sweech로서, FC1 또는 FC2중 하나를 船舶狀況에 맞게 선택하는 기능을 갖는다. 그림의 각 요소를 살펴보면, 선박의 運動方程式은 일반적으로 다음과 같은 2階線形微分方程式으로 표현할 수 있다.<sup>2)</sup>

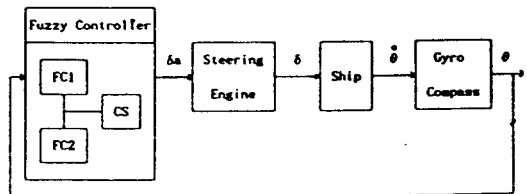


Fig. 3.1 Block diagram of ship's steering system

$$T_1 T_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\theta}{dt} + \theta + (K(\theta)^3) = T_3\delta + T_3 T_5 \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots (3.3)$$

단,  $T_1, T_2, T_3$ : 조종성능지수     $T_5$ : 조종이동 정수  
 $\theta$ : 편각                             $\dot{\theta}$ : 편각속도  
 $\delta$ : 타각                             $d\delta/dt$ : 타각속도  
 $K(\theta)^3$ : 비선형 요소

Auto Pilot에 의한 針路維持의 경우, 操作量인 舵角은 PD 制御에서는  $\delta_a = -k_p\theta - k_d\dot{\theta}$ 로 주어지며, 이 舵角이 Steering Engine을 통하여 舵에 가해지면 舵에 압력이 발생하여 船舶을 회두시키고자 하는 偏角速度  $\dot{\theta}$ 가 발생하고, 이 偏角速度를 積分하면 출력인 偏角  $\theta$ 을 얻게 되는데, 이 출력을 Feed Back시켜 船舶의 針路를 自動으로 制御하게 된다.

Q/M의 경우에는 舵角  $\delta_a$ 을 經驗에 의해 적절하게 줌으로서 船舶의 針路를 안전하게 制御하게 되며, 이 때 Q/M는 지금까지의 축적된 經驗에 의해서 偏角의 크기, 偏角의 變化速度, 外亂 등을 적절히 考慮해 가면서 操舵하게 된다. 즉, 偏角에 대강 비례하게 반대편으로 舵角을 주며, 偏角 및 偏角速度의 변화에 따라 舵角을 적절히 변화시켜 주는 것이다. 퍼지 制御의 경우에는, 이와 같은 Q/M의 축적된 經驗과 이론적인 연구 결과들로부터 LCR을 작성한 후, 이 LCR에 대한 퍼지 關係를 구하고, 前述의 퍼지 推論에 의해 制御入力인 舵角  $\delta_a$ 를 결정하여 船舶을 制御하게 된다.

이하에서는 퍼지 制御를 실현하는 방법으로서, 保針操舵方式에 대한 경우와 變針操舵方式에 대한 경우의 퍼지 制御에 대하여 각각 살펴보기로 한다.

### 3.1 保針操舵方式에 대한 퍼지 制御

本節에서는 保針操舵方式에 대한 퍼지 制御에 있어서, 偏角에 의한 경우와 偏角 및 偏角速度에 의한 경우에 대하여 각각의 퍼지 制御 알고리즘을 구성해 보기로 한다.

#### 3.1.1 偏角에 의한 퍼지 制御

여기서는 舵角을 Q/M의 經驗에 비추어, 偏角의 크기에 대강 비례하게 반대편으로 줌으로서 船舶을 制御할 수 있다고 생각을 기초로 LCR을 작성하고, 이를 이용하여 퍼지 制御를 실행하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

먼저, 퍼지 變數를 결정해야 하는데, 이것은 經

驗에 의해 결정하거나 일반적으로 商船에서 사용하는 Steering Order를 이용할 수도 있다. 여기서는 制御量인 偏角에 대해서는 PB, PM, PS, PV, ZO, SV, SS, SM, SB의 9개로, 操作量인 舵角에 대해서는 制御量의 反對概念인 SB, SK, SM, SJ, SS, SI, SV, SU, ZO, PU, PV, PL, PS, PJ, PM, PK, PB의 17개로 정하여 다양한 舵角을 사용할 수 있도록 하였다.

다음은 퍼지 變數의 台集合을 구간  $[-15.0, 15.0]$ 으로 정하고, 퍼지 變數를 확정하기 위한 Membership 函數를 결정한다. Membership 函數는 台集合에 대하여 離散化할 수도 있으나, 본 논문에서는 規格化하여 三角形의 函數形態로 定義하였다. 그림 3.2는 偏角(設定針路-現在針路)에 대한 規格化函數式을 도식화한 것으로, 函數式은 식 (2.8)에 의한 것이다. 즉, 그림 3.2의 SM과 PM에 대한 Membership 函數式은 각각 식 (3.4), 식 (3.5)로 표현된다. 식 (3.4)를 台集合에 대해, 集合要素의 간격을 1로 하여 식 (2.1)과 같이 퍼지 集合形態로 나타내면 식 (3.6)과 같이 표현된다.

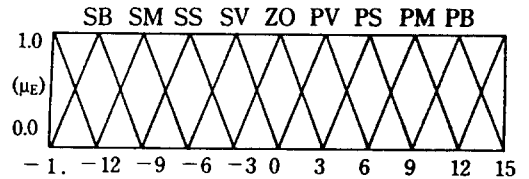


Fig. 3.2 The graphic representation of triangle membership function of the deviation angle.

$$\mu_{SM} = [\{1/3.0(-|x+9.0|+3.0)\} \vee 0] \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\mu_{PM} = [\{1/3.0(-|x+9.0|+3.0)\} \vee 0] \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\mu_{SM} = \{0.00/-15., 0.00/-14., 0.00/-13., 0.00/-12., 0.33/-11., 0.67/-10., 1.00/-9., 0.67/-8., 0.33/-7., 0.00/-6., 0.00/-5., \dots\dots, 0.00/15.\} \dots\dots\dots (3.6)$$

식 (3.6)에서 斜線의 좌변은 Membership 値를, 우변은 台集合의 値를 나타내고 있다.

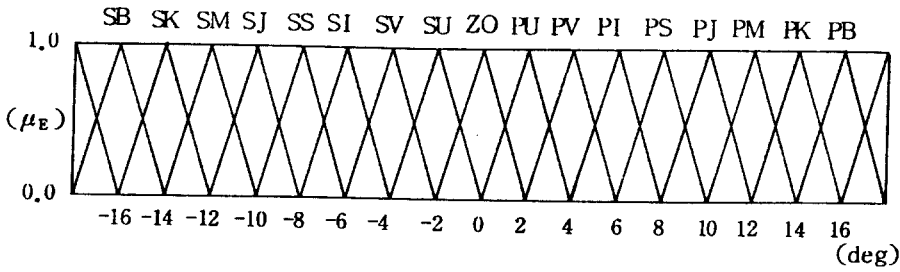


Fig. 3.2 The graphic representation of triangle membership function of the deviation angle.

그림 3.3은 操作量인 舵角에 대한 規格化函數式을 圖式化한 것으로 그림 3.2와 마찬가지로 설명되며, 舵角에 대해서는 右舷舵가 플러스(+)로 左舷舵가 마이너스(-)로 표현되어 있다. 이 때, 後件部變數인 舵角의 函數式에서 퍼지 變數가 갖는 台集合 上의 變數幅에 따라 전체 시스템의 성능이 변하기 때문에, 後件部變數幅의 결정은 매우 重要하다.<sup>12)</sup>

현재 그림 3.3은 幅이 4로 되어 있는데, 이것은 台集合의 幅을 각기 달리하는 경우에 대한 시뮬레이션 結果에 의해 결정된 것이다.

制御規則인 LCR은, Q/M의 經驗과 操舵로 인한 抵抗增加 및 船舶速度減少 등의 에너지 損失을 고려하여 표 3.1과 같이 구성하였다.

Table 3.1 The LCR considering the deviation angle for FC1

- R<sup>1</sup> : If DE=SB then RU=PM or
- R<sup>2</sup> : If DE=SM then RU=PJ or
- R<sup>3</sup> : If DE=SS then RU=PI or
- R<sup>4</sup> : If DE=SV then RU=PU or
- R<sup>5</sup> : If DE=ZO then RU=ZO or
- R<sup>6</sup> : If DE=PV then RU=SU or
- R<sup>7</sup> : If DE=PS then RU=SI or
- R<sup>8</sup> : If DE=PM then RU=SJ or
- R<sup>9</sup> : If DE=PB then RU=SM

단, DE : Deviation Angle  
 SB : Starboard Big      SM : Starboard Medium  
 SS : Starboard Small    SV : Starboard Very Small  
 ZO : ZERO

- PV : Port Very Small      PS : Port Small
- PM : Port Medium      Port Big
- RU : Rudder Angle
- SB : Starboard Big      SK : Mean of SB and SM
- SM : Starboard Medium    SJ : Mean of SM and SS
- SS : Starboard Small      SI : Mean of SS and SV
- SV : Starboard Very Small    SJ : Mean of SV and ZO
- ZO : ZERO
- PU : Mean of ZO and PV    PV : Port Very Small
- PI : Mean of PV and PS    PS : Port Small
- PJ : Mean of PS and PM    PM : Port Medium
- PK : Mean of PM and PB    Pp : Port Big

다음은 퍼지 關係의 Min-max 合成則에 따른 推論課程으로서, 식 (2.9)에 의하여 適合度(ω)가 구해지게 되는데, 여기서는 前件部變數가 1개(偏角)이므로 Min 過程을 거치지 않고 직접 구해진다. 각 規則에 대한 推論結果는 식 (2.10)에 의해 구해지며, 전체적인 推論結果는 식 (2.11)에 의해서 구해진다. 마지막으로 비 퍼지化 과정인 解析方法을 거치면서 하나의 확정된 수치로 出力되는데, 식 (2.12)의 重心法이 이용된다. 이상의 推論節次를 도식하면 그림 3.5와 같고, 여기서 사용된 前件部變數 x<sub>1</sub> 4.0°로 가정하였다.

그림 3.5를 살펴보면 前件部變數가 4.0°로 입력된 경우 制御規則 7, 6번을 제외하고는 制御規則의 適合度가 모두 0.0으로 되고, R<sup>7</sup>, R<sup>6</sup>의 適合度는 각각 0.67, 0.33이 된다.

최종적으로, 종합적인 推論結果의 解析值 y\*는 2.56°로서, 이것이 制御操作量인 퍼지 制御器의 出力值가 된다. 그림 3.5에서 A, B, C, D는 3.0, 6.0, 9.0, 12.0을 각각 나타내고 있다.

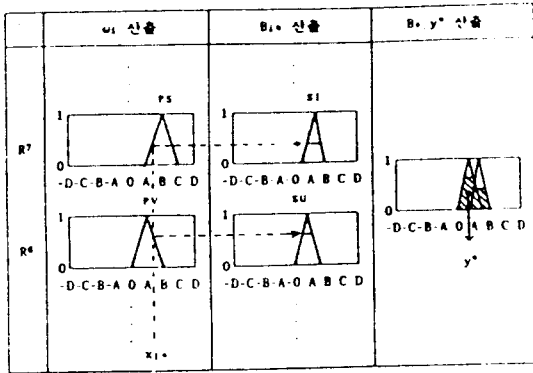


Fig. 3.5. Fuzzy reasoning process considering the deviation angle(DA=4.0°)

여기에서 문제가 되는 Sampling 간격  $\tau$ 는 다음과 같이 결정한다.<sup>6)</sup> 그런데, 船舶의 경우  $f_{max}$ 가 약 0.5(c/s)이므로  $\tau$ 는 0.1(sec) 정도이다. 그러나 船舶의 時定數는 매우 크므로 실용상 0.2(sec) 정도로도 충분하다.

$$\tau = \frac{1}{20 f_{max}} \quad (f_{max} = \text{Spectrum의 최고 주파수}) \quad (3.7)$$

3.1.2 偏角 및 偏角速度에 의한 퍼지 制御

일반적으로 Q/M는 偏角의 크기뿐만 아니라 偏角의 變化量도 동시에 고려하여 操舵한다. 즉, PD 制御에 상응되는 역할을 하는 것이다. 본 項에서는 이러한 점을 고려하여 LCR을 구성하고, 이를 船舶의 自動制御에 적용하는 방법에 대하여 알아보기로 한다.

먼저 偏角과 舵角에 대한 퍼지 變數로는 3.1.1 項에서 사용한 것과 동일한 것을 사용하고, 偏角의 變化量에 대해서는 BD, SD, ZO, SI, BI의 5개를 퍼지 變數로 사용하기로 한다.

다음으로, 퍼지 變數의 台集合은 3.1.1 項에서와 같은 것을 사용하고 偏角의 變化量( $\theta_{r+i} - \theta^r$ )에 대해서는, 實船舶에서 偏角의 變化量은 아주 큰 경우에는 약 1.5(deg/sec) 정도 된다는 점을 감안하여, 規格化 구간을 [-1.5, 1.5]으로 두었다.

Membership 函數에 대해서는 偏角과 舵角의 경우는 각각 3.1.1 項의 그림 3.2, 그림 3.3과 같

고, 偏角의 變化量에 대해서만 그림 3.6과 같이 정하였다. 그리고 LCR은 Q/M의 經驗과 船舶操舵系의 最適制御에 대한 연구 결과와 에너지 損失에 대한 評價函數를 고려한 研究結果를 감안하여 표 3.2와 같이 구성하였는데,<sup>1,3)</sup> 표 3.1과 같은 If-then 형식 대신 45개의 LCR을 간단히 축약한 형태로 표현한 것이다. 制御規則의 번호는 행렬로 표시하여  $R^1(1, 1), R^2(1, 2), R^3(1, 3), \dots, R^4(9, 4), R^4(9, 5)$  순으로 되어 있다. 물론, 여기에서도 偏角의 變化量에 대한 퍼지 變數는 식 (3.4), 식 (3.6)과 같이 Membership 函數나 集合形態로 표현된다. 推論過程도 偏角을 고려했을 때와 동일하나, 여기서는 前件部變數가 2개(偏角, 偏角速度)인 점이 다른데, Min 合成에 의해 適合度를 구하면 된다. 그림 3.7은 이상의 推論過程을 나타내 보이고 있다.

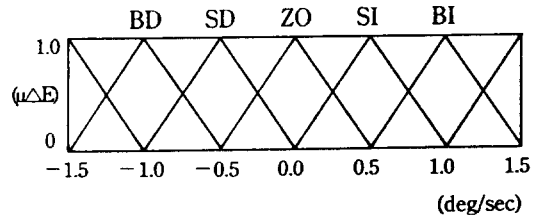


Fig. 2.5 The graphic representation of triangle membership function of the deviation angle velocity.

- 단, BI : Big Increase    BD : Big Decrease
- SI : Small Increase    SD : Small Decrease
- ZO : Zero

Table 3.2 The LCR considering the deviation angle and deviation angle velocity for FCI

DA \ DAV		선 수 편 각 (E)								
		SB	SM	SS	SV	ZO	PV	PS	PM	PB
편 각 속 도 (ΔE)	BD	PV	PU	ZO	SV	SV	SJ	SK	SB	SB
	SD	PI	PV	PU	ZO	SU	SI	SM	SK	SB
	ZO	PM	PJ	PI	PU	ZO	SU	SI	SJ	SM
	SI	PB	PK	PM	PI	PU	ZO	SU	SV	SI
	BI	PB	PB	PK	PJ	PV	PV	ZO	SU	SV



한편, Samping 간격은 偏角에 주목한 경우와 동일한 값을 사용한다.

그림 3.7을 살펴보면, 前件部變數  $x_1, x_2$ 가 각각 4.0, 0.1로 入力된 경우, Min 合成에 의해 適合度( $\omega$ )를 구하면,  $R^{28}, R^{29}, R^{33}, R^{34}$ 에서 유효한 값을 갖는데, 각각 0.38, 0.63, 0.2, 0.2가 된다.

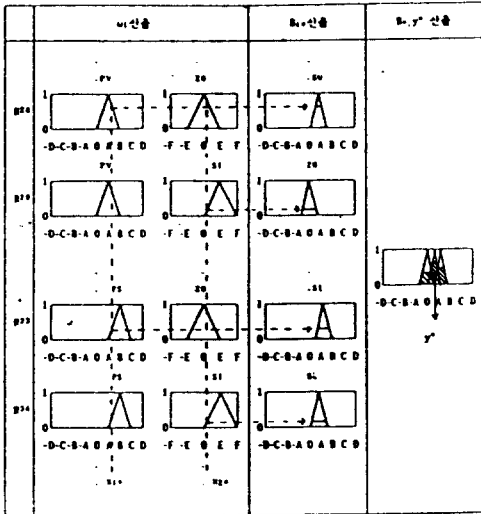


Fig 3.7 Fuzzy reasoning process considering the deviation angle and deviation angle velocity (DA=4.0°, DAV=0.1(deg/sec))

이것에 의해 각 制御規則의 推論結果( $B^*$ ) 및 각 推論結果의 合成值( $B^*$ )는 그림에서와 같은데, 制御規則  $R^{28}, R^{34}$ 의 後件部變數가 SU로서 같은 퍼지 變數를 가지므로 Max 合成에 의해 適合도가 높은  $R^{28}$ 이  $R^{34}$ 를 포함하여 3개의 制御規則이 Max 合成된 형태로 되어 있다. 마지막 단계로서, 出力값인 해석치( $y^*$ )는 식 (2.12)에 의해 2.91°가 된다.

이상의 推論結果值들을 음미해보면, 入力偏角이 4.0°로서 船首가 針路線 왼편으로 향하고 있고, 偏角의 變化率이 0.1(deg/sec)로서 계속 왼편으로 회주하는 상황에서 出力值은 2.91°로서 3.1.1 項의 2.56°와는 달리 偏角의 變化量을 고려하여 보다 많은 舵角을 취한 것을 알 수 있다.

### 3.2 變針操舵方式에 대한 퍼지 制御

본 절에서는 變針操舵方式에 대한 퍼지 制御

에 있어서, 前節과 마찬가지로 偏角에 의한 경우와 偏角 및 偏角速度에 의한 경우에 대하여, 각각의 퍼지 制御 알고리즘을 다음과 같이 구성하였다.

#### 3.2.1 偏角에 의한 퍼지 制御

前件部變數와 後件部變數에 대한 모든 條件이 3.1.1 項에서 사용된 것과 동일하며 推論過程도 같은데, 다만 LCR에 대해서만 표 3.3과 같이 작성하였다. 표 3.3을 살펴보면 保針操舵方式과는 달리, 偏角을 빨리 제거하기 위해 보다 큰 舵角을 사용하고 있음을 알 수 있다.

Table 3.3 The LCR considering the deviation angle for FC2

- $R^1$  : If DE=SB then RU=PB or
- $R^2$  : If DE=SM then RU=PB or
- $R^3$  : If DE=SS then RU=PI or
- $R^4$  : If DE=SV then RU=PM or
- $R^5$  : If DE=ZO then RU=ZO or
- $R^6$  : If DE=PV then RU=SI or
- $R^7$  : If DE=PS then RU=SM or
- $R^8$  : If DE=PM then RU=SB or
- $R^9$  : If DE=PB then RU=SB

#### 3.2.2 偏角 및 偏角速度에 의한 퍼지 制御

모든 變數와 주어진 條件이 3.1.2 項과 동일하며, 다만 制御規則인 LCR에 대해서만 표 3.4와 같이 구성하였는데, 前項에서와 마찬가지로 偏角에 대하여 보다 많은 舵角을 취하도록 구성되어 있다.

Table 3.4 The LCR considering the deviation angle and deviation angle velocity for FC2

DA \ DAV		선 수 편 각 (E)								
		SB	SM	SS	SV	ZO	PV	PS	PM	PB
편	BD	PM	PJ	PV	SU	SJ	SK	SB	SB	SB
	SD	PB	PK	PS	PU	SI	SJ	SK	SB	SB
	ZO	PB	PB	PM	PI	ZO	SI	SM	SB	SB
도	SI	PB	PB	PK	PJ	PI	SU	SS	SK	SB
	(△E)	BI	PB	PB	PK	PJ	PU	SV	SJ	SM

### 4. 시뮬레이션 및 考察

3장에서 考察한 自動操舵系에 대한 퍼지 制御器를 실험해 보기 위해서는 實船舶에 퍼지 制御器를 장치하여 實驗해보는 방법이 바람직하겠으나, 그러한 直接的인 방법은 費用 및 船舶에 새로운 計測機器의 설치 등과 같은 副次的인 문제가 따르기 때문에, 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 制御結果를 검토해 보고자 한다.

시뮬레이션은 (1) 偏角에 의한 퍼지 制御, (2) 偏角 및 偏角速度에 의한 퍼지 制御, (3) 종래의 PD 制御로 구분하여 실시하였으며, 그 過程과 結果는 다음과 같다.

操舵에 의한 船舶의 運動方程式을 前述한 식 (3.1)과 같이 나타내고 시뮬레이션은 船舶의 運動方程式을 Runge-Kutta법을 導入하여 실시하였는데, 이를 위해 식 (3.3)을 狀態方程式으로 표현하여 식 (4.1)과 같이 定義할 수 있다.<sup>2,3)</sup>

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

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -(T_1+T_2)/T_1T_2 & 1 \\ 0 & -1/T_1T_2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ T_3T_2/T_1T_2 \\ T_5T_1T_2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

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

주 Program은 그림 4와 같으며, 시뮬레이션 時間은 300초로 하고 初期條件과 外亂의 크기를 각기 달리하는 경우와 線形, 非線形의 경우, 그리고 操舵方式 등에 따라 표 4.1과 같이 8가지 경우에 대하여 각각 실시하였다.

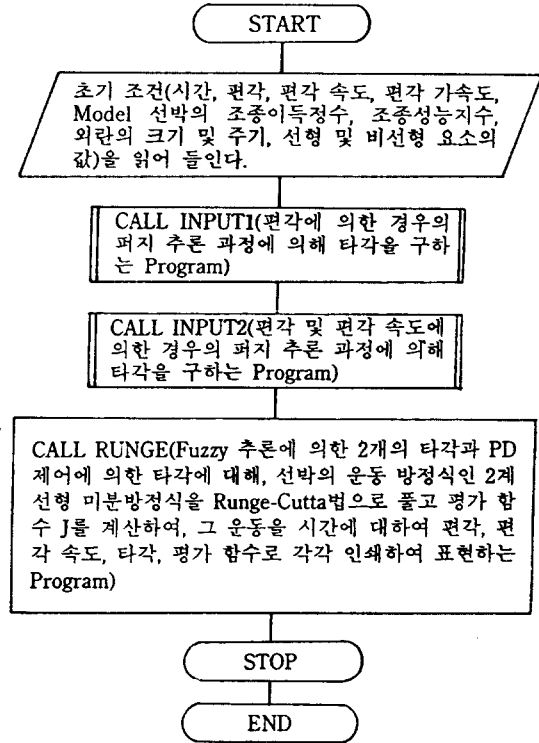


Fig. 4 Flow chart of the main program

Table 4.1 Simulated condition for the case study

Case No.	Condition	구분	조타방식
Case 1.	ID : 4.0 IV : 0.0 NF : 100,200 NV : 0.0, 0.0	linear	course Keeping method
Case 2.	ID : 4.0 IV : 0.5 NF : 100,200 NV : 0.0, -0.3		
Case 3.	ID : 4.0 IV : 0.0 NF : 100,200 NV : 0.0, 0.0	non-linear	method
Case 4.	ID : 4.0 IV : 0.5 NF : 100,200 NV : 0.0, -0.3		
Case 5.	ID : 4.0 IV : 0.0 NF : 100,200 NV : 0.0, 0.0	linear	course altering method
Case 6.	ID : 4.0 IV : 0.5 NF : 100,200 NV : 0.0, -0.3		
Case 7.	ID : 4.0 IV : 0.0 NF : 100,200 NV : 0.0, 0.0	non-linear	method
Case 8.	ID : 4.0 IV : 0.5 NF : 100,200 NV : 0.0, -0.3		

단, ID : 초기 편각(deg) IV : 초기 편각 속도(deg/sec)  
 NF : 외란 주기(sec) NV : 외란 크기(deg/sec)

시물레이션에 사용한 船舶은 全長 125(M), 排水 屯數 6000(K/T)의 滿載貨物船이고, 船舶의 操縱性能指數  $T_1, T_2, T_3$ 는 각각 45, 6, 10이며, 操縱利得定數  $T_5$ 는 0.08로 주어졌다.

PD 制御의 경우 入力舵角은  $\delta a = -K_p\theta - K_d\dot{\theta}$ 로 표현되고, 이 경우의  $K_p, K_d$ 는 상기 Model 船舶이 Auto Pilot로 航海할 경우에 대한 最適調整值를 사용하였으며, 그 값은 각각 1.0, 5.0이다. 또한 非線形要素의 係數  $K$ 는 1.0으로 하였다.<sup>2)</sup>

각 操舵方式에 따른 시물레이션 結果는 다음과 같다.

#### 4.1 保針操舵方式에 대한 경우

##### i) 線形自動制御系의 경우

Case 1.에 있어서 시간에 대한 偏角, 偏角速度, 舵角, 評價函數의 關係는 그림 4.1과 같고, 그림에서 DA는 偏角을, DAV는 偏角速度를 각각 나타낸다. 퍼지 제어(이하 偏角 및 偏角速度에 의한 경우를 稱함)는 PD 제어에 비해 原針路로 收斂(좌우 0.3°이내 範圍)하는 時間面에서 각각 66, 58초로서 다소 느리지만, 舵를 淸潔하게 사용하기 때문에 評價值인 에너지 損失面에서는 PD 제어에 비해 61%정도로 현격히 良好한 結果를 나타낸다. 이것은 그림에서 偏角, 偏角速度, 舵角의 Over-shoot 크기가 PD 제어에 비해 상당히 抑制되어 나타나는 것을 보면 알 수 있다. 또한 偏角에 주목한 퍼지 제어에 비해 偏角 및 偏角速度에 주목한 경우가 더욱 良好한 結果를 보이고 있음을 알 수 있다.

##### ii) 非線形自動制御系의 경우

非線形制御系의 경우는 Case 3.에 대해서 그림 4.2과 같다. 전반적으로 線形制御系와 비슷한데, 原針路回歸時間은 PD 제어 및 퍼지 제어에서 각각 34초, 44초이고, 에너지 損失面에서 퍼지 제어가 PD 제어에 비해 69%정도로서 良好한 結果를 나타내고 있다.

전체적으로 考察해 보면, 非線形制御系와 線形制御系보다 原針路回歸時間 및 評價函數面에서 良好한 結果를 보이고 있다. 즉 原針路回歸時間面에서는 線形, 非線形制御系에 대하여 PD 제어가 각각 58초, 34초이고, 퍼지 제어가 각각 66초, 44초로서 非線形制御系가 빠르게 나타난다. 에너지 損

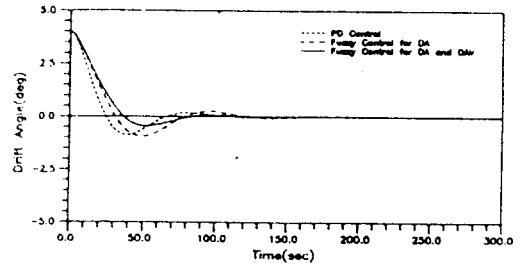


Fig. 4.1(a) Result of drift angle in the Case 1(ID = 4.0, IV = 0.0, NF = 100, 200, NV = 0.0, 0.0)

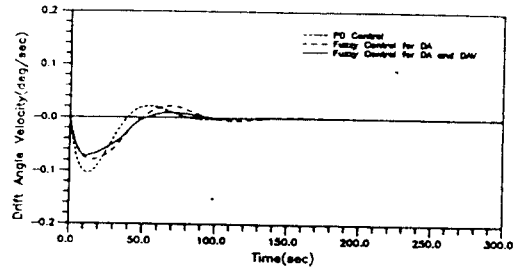


Fig. 4.1(b) Result of drift angle velocity in the Case 1(ID = 4.0, IV = 0.0, NF = 100, 200, NV = 0.0, 0.0)

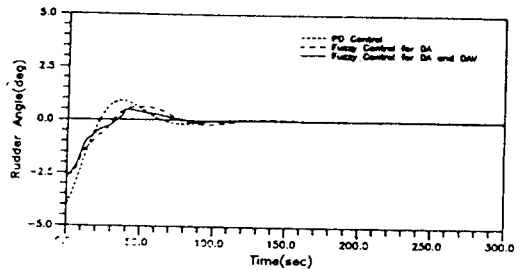


Fig. 4.1(c) Result of rudder angle in the Case 1 (ID = 4.0, IV = 0.0, NF = 100, 200, NV = 0.0, -0.0)

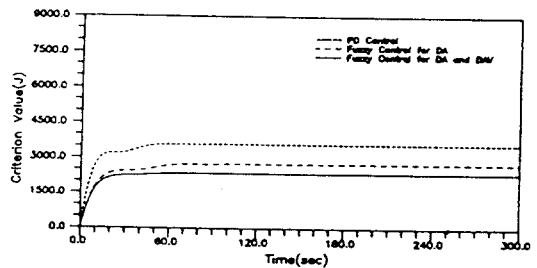


Fig. 4.1(d) Result of criterion value in the Case 1 (ID = 4.0, IV = 0.0, NF = 100, 200, NV = 0.0, 0.0)

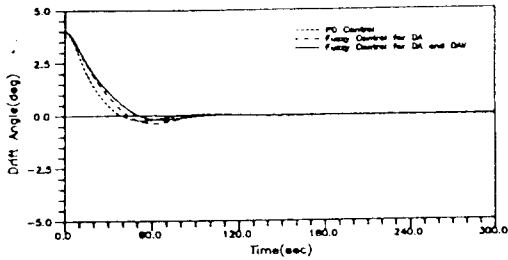


Fig. 4.2(a) Result of drift angle in the Case 3( $ID=4.0$ ,  $IV=0.0$ ,  $NF=100, 200$ ,  $NV=0.0, 0.0$ )

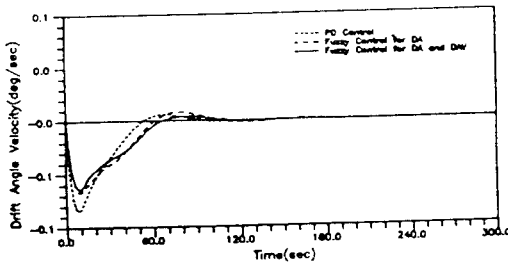


Fig. 4.2(b) Result of drift angle velocity in the Case 3( $ID=4.0$ ,  $IV=0.0$ ,  $NF=100, 200$ ,  $NV=0.0, 0.0$ )

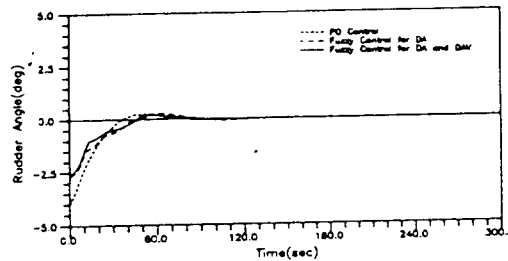


Fig. 4.2(c) Result of rudder angle in the Case 3 ( $ID=4.0$ ,  $IV=0.0$ ,  $NF=100, 200$ ,  $NV=0.0, -0.0$ )

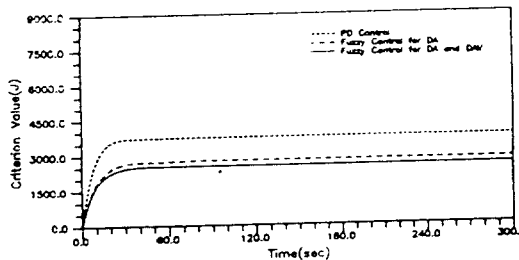


Fig. 4.2(d) Result of criterion value in the Case 1( $ID=4.0$ ,  $IV=0.0$ ,  $NF=100, 200$ ,  $NV=0.0, 0.0$ )

失面에서는 非線形制御系가 線形制御系에 비해 PD 制御 및 퍼지 制御에서 각각 77%, 88% 정도로서 非線形制御系가 優秀하다는 것을 알 수 있다. 사실, 이러한 原因은 식 (4.1)에서 나타나는 바와 같이, 非線形要素가 舵를 抑制하는 역할을 하기 때문이다. 時間面에서 線形制御系가 최초 原針路 도달시간은 빠르지만, 대각도 舵角의 결과로서 큰 Over-shoot를 갖기 때문에 安定收斂되는 시간이 느리게 된다. 그리고 評價面에서는, 비록 線形制御系가 偏角을 급격하게 감소시키지만, 식 (3.1)에서 알 수 있듯이 舵角의 중요도가 보다 크기 때문에 非線形制御系가 낮은 評價値를 나타내며, 線形制御系의 경우는 대각도 舵角에 대한 당연한 결과로서 생각된다.

#### 4.2 變針操舵方式에 대한 경우

##### i) 線形自動制御系의 경우

그림 4.3(a)를 살펴보면 直觀의으로도 퍼지 制御가 原針路回歸時間과 評價函數面에서 월등히 優秀하다는 것을 알 수 있는데, 자세한 것은 다음과 같다. 우선, 原針路回歸時間面에서 PD 및 퍼지 制御가 각각 58초, 42초로 나타나고, 評價函數面에서는 퍼지 制御가 PD 制御의 70% 정도로 나타나고 있다.

##### ii) 非線形自動制御系의 경우

線形制御系와 거의 유사한데, 時間面에서 PD 制御 및 퍼지 制御가 각각 33초, 30초이고, 評價函數面에서는 퍼지 制御가 PD 制御에 비해 79% 정도로서 양호한 結果를 나타내고 있다.

전체적으로 살펴보면, 非線形制御系가 우수하게 나타난다. 즉, PD 制御에서 原針路回歸時間面은 線形, 非線形制御系가 각각 58초, 33초이고, 評價函數面은 非線形制御系가 線形制御系의 77% 정도로 나타나고 있다. 또한, 퍼지 制御에서 原針路回歸時間은 線形, 非線形系가 각각 42초, 30초이고, 評價函數面은 非線形制御系가 線形制御系의 88% 정도로 나타난다.

이상에서 살펴본 바와 같은 퍼지 制御의 優秀한 점은 그림 4.3(c)에서 퍼지 制御의 경우가 사용한 舵角을 살펴보면 잘 알 수 있는데, 마치 熟練된 Q/M가 操舵하는 것과 유사하다고 할 수 있겠다.

5. 結 論

본 논문에서는 퍼지 제어에 의한 船舶의 自動操舵系를 구성하여 적용하는 方法에 대하여 다루고, 시뮬레이션을 행하였다. 그 結果는 다음과 같이 要約된다.

i) 각 評價函數에 있어서, PD 제어에 대한 퍼지 제어의 結果가 保針操舵方式에 의한 경우는 65%, 變針操舵方式의 경우는 75%로서 퍼지 제어方式이 월등히 양호한 結果를 나타내고 있다.

ii) 原針路回歸時間面에서, 保針操舵方式의 경우는 PD 제어, 變針操舵方式에 의한 경우에는 퍼지 제어가 약간씩 우수하게 나타난다. 그러나 이 경우에 있어서도 評價函數를 原針路回歸時間으로 두고, 적절한 LCR을 구성한다면 더욱 양호한 結果를 얻을 수 있을 것이다.

iii) 전반적으로 非線形自動制御系가 線形自動制御系에 비해 原針路回歸時間 및 評價函數面에서 더욱 우수한 結果를 나타내고 있다.

이상에서와 같이 船舶自動操舵系에 대한 퍼지 제어의 적용이 충분히 有用하다는 結果를 얻을 수 있었으며, 본 논문에서 살펴본 바와 같이 퍼지 제어의 장점인 LCR변경을 통한 對象의 制御目的을 실현할 수 있다는 점 즉, 여러가지 Soft ware를 장치하여 船舶의 상황에 맞게 轉換制御하는 방법을 감안하면, 船舶自動操舵裝置에 대한 퍼지 제어의 실현이 크게 기대된다.

본 논문에서 다루어지지 않은 Lee way에 관한 사항과 適應制御 및 學習制御(Learning Control) 등이 추가된다면, 더욱 양호한 船舶自動操舵裝置의 설계가 예상되며, 이는 차후의 研究課題로 남겨두기로 한다.

參 考 文 獻

1. 李哲榮 : 船舶自動操舵系의 最適調整에 關하여, J. of KMGS, Vol. 1, No. 7, pp. 2-6, (1970)
2. 李哲榮 : Optimal Design of Automatic Steering System of Ship's at Sea, J. of Institute of Navigation, Vol. 2, pp. 35-47, (1978)

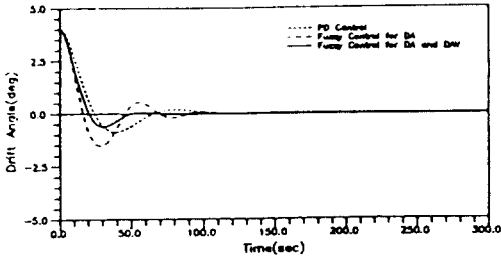


Fig. 4.6(a) Result of drift angle in the Case 5(ID=4.0, IV=0.0, NF=100, 200, NV=0.0, 0.0)

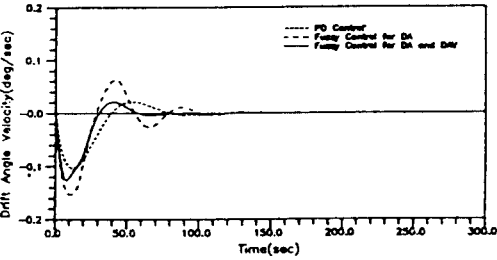


Fig. 4.6(b) Result of drift angle velocity in the Case 5(ID=4.0, IV=0.0, NF=100, 200, NV=0.0, 0.0)

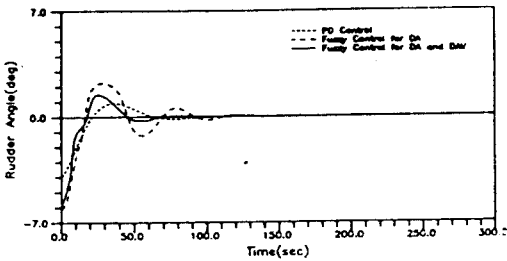


Fig. 4.6(c) Result of rudder angle in the Case 5 (ID=4.0, IV=0.0, NF=100, 200, NV=0.0, -0.0)

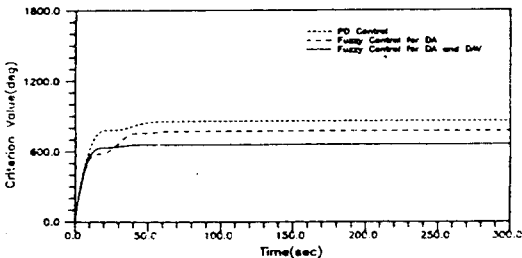


Fig. 4.6(d) Result of criterion value in the Case 5(ID=4.0, IV=0.0, NF=100, 200, NV=0.0, 0.0)

3. 李哲榮・金換秀：Fuzzy Logic Controller에 의한 船舶의 制御, pp. 59-88, J. of Institute of Navigation, Vol. 5, No. 2, (1984)
4. 李哲榮・蔡良範：새로운 Fuzzy Logic을 이용한 船舶操舵系의 制御, pp. 15-28, J. of Institute fo Navigation, Vol. 8, No. 2, (1984)
5. 石塚正則 外：ファジィ制御オートパイロットの設計と實船實驗—その1, 日本航海學會論文集, 第82號, pp. 13-24, (平成2年)
6. 前畑幸彌 外：不規則波浪中における自動操舵のシミュレーションと統計的解析, 日本航海學會紙, pp. 11-12, (1979)
7. 水本雅晴：ファジィ制御向きの推論法, 計測と制御, Vol. 28, No. 11, pp. 17-21, (1989)
8. 塚本・彌八郎：ファジィ推論法, 計測と制御, Vol. 28, No. 11, pp. 4-10, (1989)
9. 廣田薫・管野道夫：ファジィ理論の産業への應用, 日本ファジィ學會紙, Vol. 1, pp. 63-68, (1989)
10. 山崎束：ファジィ制御用汎用システムの動向, 計測と制御, Vol. 28, No. 11, pp. 22-27, (1989)
11. 村上周太・前田幹夫：ファジィ制御の方法論, 計測と制御, Vol. 28, No. 11, pp. 11-16, (1989)
12. 管野道夫：ファジィ制御, pp. 5-25, 日本工業新聞社, (1988)
13. 千原國宏 外：最適操舵装置と海上實驗, システム制御, Vol. 18, No. 1, pp. 45-57, (1974)
14. 廣田實：保針操舵の評価關數(その 1), 日本造船學會論文集, Vol. 135, pp. 129-138, (1974)
15. N. Minorsky：Directional Stability of Automatically Steered Bodies, J. of ASNE, Vol. 34, (1922)
16. M Horigome 외：Micro Processor based AR Autopilot System for Ship's Steering SHIP OPERATION AUTOMATION ISSOA 79, (1979)
17. L. A. Zadeh：Fuzzy Logic and Approximate Reasoning, Synthese, pp. 407-4238, (1975)
18. E. H. Mamdani：Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Proposition, Proc. IEEL. Conf. on Design and Control, New Orleans, (1977)
19. F. V. DER RHEE：Knowledge Based Fuzzy Control of Systems, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMETIC CONTROL, Vol. 35, No. 2, pp. 148-155, (1990)