

수중운동체를 위한 PDA/FLC 심도 제어시스템 설계

김종식*, 최중락**, 김성민***

PDA/FLC Depth Control System Design for Underwater Vehicles

Jong Shik Kim*, Joong Lak Choi**, Sung Min Kim***

Abstract

A nonlinear control algorithm for the depth control of underwater vehicles is presented. In order to consider the deadzone effect of the flow control valve, a nonlinear fuzzy logic controller (FLC) is synthesized and combined with a linear proportional-derivative-acceleration (PDA) controller, which is called the PDA/FLC controller. And to show the effectiveness of the PDA/FLC control system, it is compared with the linear PDA control system through computer simulation. It is found that the PDA/FLC control system is suitable one to maintain the desirable depth of underwater vehicles with deadzone.

Key words : PDA Controller(비례-미분-가속도 제어기), Fuzzy Logic Controller(퍼지논리 제어기), Depth Control(심도제어), Underwater Vehicles(수중운동체)

1. 서론

수중운동체에 관한 제어 문제는 일반적으로 임계속도(약 2노트) 이하에서 수직 상승 및 심도유지를, 그리고 임계속도 이상에서 조타 및 잠수를 위한 제어로 구분한다.¹⁾ 본 논문에서는 수중운동체의 전진방향의 속도가 거의 없는 상태(1노트)에서 심도유지 및 심도변화가 요

구되는 경우에 대하여 생각하기로 한다. 특히, 수중에서 요구되는 여러 가지 임무를 수행하기 위해서는 선체의 안정화 및 심도유지가 우선 수행되어야 한다. 수중운동체가 임계속도 이하에서는 제어타에 의한 제어입력이 미약하므로, 이 경우에는 전형적으로 수중운동체의 심도제어를 위하여 수중운동체 내에 있는 탱크의 물의 유/출입에 의한 수중운동체의 중량 변화에 따른 부력과

* 부산대학교 기계설계공학과
 ** 국방과학연구소
 *** 부산대학교 기계기술연구소

의 차에 의해 이루어진다.²⁾ 그리고 수중운동체의 심도 제어시스템 설계시 고려되어야 할 사항은 탱크 및 수중운동체 자체가 갖는 적분요소 효과 그리고 하드웨어적으로 유량 제어밸브에 존재하는 사역대(deadzone) 비선형 특성 등이 있다. 따라서 수중운동체의 심도 제어시스템은 시스템의 경감쇠 및 비선형 특성을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 해파나 수중무장발사 등에 의한 외란에 강인한 제어 알고리즘이 요구된다.

본 논문에서는 우선 수중운동체의 심도 제어시스템 설계를 위하여 유량 제어밸브의 비선형성을 무시한 수중운동체(3중 적분 시스템) 제어에 적합한 선형 제어방법인 비례-미분-가속도(proportional-derivative-acceleration;PDA) 제어알고리즘³⁾을 적용한다. 그리고 설계된 PDA 제어를 사역대 비선형성을 고려한 수중운동체와 결합하여, 비선형 효과에 대한 영향을 분석한다. 다음, 설계된 PDA 제어기에 사역대 비선형성을 고려할 수 있는 퍼지논리 제어기(fuzzy logic controller ; FLC),^{4), 5), 6)}를 결합한 PDA/FLC 제어를 설계하고, PDA/FLC 제어시스템의 성능 및 안정도-강인성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하기로 한다.

2. 수중운동체의 심도 제어시스템에 대한 모델링

Fig.1은 수중운동체의 심도 제어시스템에 대한 개략적인 블록선도이다. 탱크에 부착되어 있는 유량 제어밸브가 적절히 조작되어서 해수의 유입/유출되는 유량 Q를 조절함으로써 수중운동체의 중량이 변하게 되고 이에 따른 부력과의 차에 의해 요구되는 심도를 제어할 수 있게 된다. 따라서 수중운동체의 심도 제어시스템을 모델링하기 위해서는 우선 수중운동체와 수중운동체의 구동부인 유량 제어밸브 및 탱크의 동역학에 대하여 생각해야 한다.

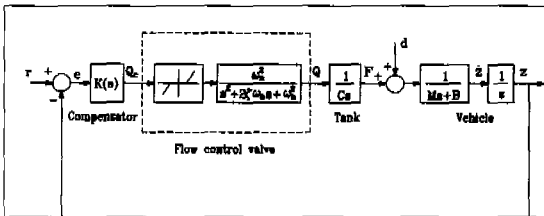


Fig.1 Block diagram of the depth control system for underwater vehicles

수중운동체의 완전한 운동특성을 묘사하기 위해서는 6 자유도 모델식^{7), 8)}이 요구되지만, 본 논문에서는 수중운동체의 전진속도가 충분히 작은 경우에 대한 심도 제어시스템 설계에 목표를 두고 있으므로 이 경우에는 히브(heave) 방정식만 고려하여 다음과 같이 선형화된 1 자유도 모델로 표현할 수 있다.²⁾

$$M\Delta \ddot{z}(t) = -B\Delta \dot{z}(t) + F(t) + d(t) \tag{1}$$

여기서

$$M = m - \frac{\rho}{2} l^3 z_w$$

$$B = -\frac{\rho}{2} l^3 z_w u_0$$

그리고 m , l , u_0 , z 는 각각 수중운동체의 질량, 길이, 공칭 전진속도, 심도를 의미하며, ρ 는 해수의 밀도이고, z_w 는 실험에 의해 정해지는 수중운동체의 수직방향의 수력학적 계수로서 무차원 수이다. 그리고 M 과 B 는 각각 수중운동체의 등가 질량과 등가 감쇠 계수이다. $F(t)$ 는 수중운동체의 중량변화에 의한 제어입력 그리고 $d(t)$ 는 외란입력을 의미한다.

이제 수중운동체의 심도 제어시스템의 구동부 동역학에 대하여 생각하기로 한다. 탱크동역학은 커패시턴스 $C = 1/\rho g$ 인 위치 에너지 저장요소로 모델링한다. 펌프 및 구동모터 그리고 유량 제어밸브의 동역학은 통합적으로 시스템의 대역폭보다 10배 빠르게 응답할 수 있는 2차 시스템으로 가정한다. 또한 유량 제어밸브를 통과하는 해수의 흐름으로 인한 하드웨어적으로 존재하는 사역대 비선형성을 고려하기로 한다. 따라서 탱크동역학과 사역대 효과를 무시한 구동부 동역학은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(t) = \frac{1}{C} \int Q(t) dt \tag{2}$$

$$\frac{1}{\omega_n^2} \ddot{Q}(t) + \frac{2\xi}{\omega_n} \dot{Q}(t) + Q(t) = Q_c(t) \tag{3}$$

여기서 ω_n 과 ξ 는 각각 구동부의 특성에 맞게 선정되어야 할 고유진동수와 감쇠비를 나타내고, $Q_c(t)$ 는 유량제어 밸브의 입력이다.

본 논문에서 선정된 시스템 파라미터 값들은 전진속도 u_0 가 1 노트인 경우로써 다음과 같다.²⁾

$\zeta = 0.5, \omega_n = 1(rad/sec),$

$C = 9.946 \times 10^{-5}(m^3/N),$

$M = 5.253 \times 10^5(kg), B = 6054(N/m /sec)$

3. PDA 제어기 설계

본 절에서는 유량 제어밸브의 비선형 특성이 사역대의 효과를 무시하고, 식 (1) (2) (3)으로 표현되는 선형 모델에 대하여 PDA 제어를 설계하기로 한다. 수중 운동체의 심도 제어시스템 설계를 위한 플랜트는 B/M(감쇠계수/가상질량)이 약 0.01로서 거의 3중 적분 시스템 구조를 갖는 시스템이다. 따라서 임계속도 이하에서 수중운동체의 심도를 제어하는 문제는 매우 어려운 문제이다. 이 경우에는 일반적으로 불안정한 시스템을 안정화하기 위하여 사용하는 비례-미분(PD) 제어기로는 수중운동체의 심도를 적절히 유지시킬 수 없다.

그래서 이와같은 3중 적분 시스템의 경우에는 심도오차(e), 심도변화율(\dot{z}) 그리고 심도가속도(\ddot{z})를 고려하여 제어할 수 있는 Fig.2에 표시된 PDA 제어를 사용하는 것이 바람직하다. 우선 내부루프로 심도변화율 피드백에 의한 PD 제어를 설계하고 외부루프로 심도 피드백에 의한 비례 제어를 설계한다. 따라서 기준 명령입력인 심도 측면에서 보면 이 제어기는 PDA 제어기의 구조를 갖는다. 여기서는 압력 심도 센서만 사용하는 경우로서 심도만 측정가능하다고 생각하고, 심도변화율을 피드백하는 대신 심도 피드백에 가-미분기(pseudo-differentiator)를 사용하여 대체하였다.

설계 목적상 구동부 동역학(식 (3))과 감쇠항 B를

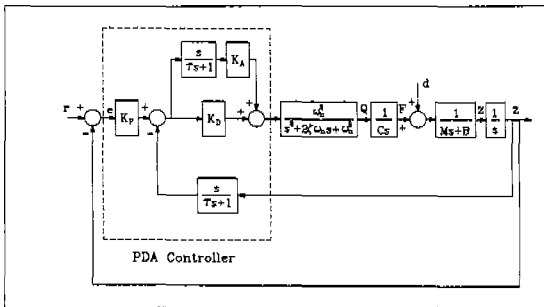


Fig. 2 Structure of the PDA control system

무시하고, 내부루프에 대한 상태 방정식과 상태 피드백에 의한 제어입력 $u(t)$ 를 각각 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u(t) \tag{4}$$

$$u(t) = -Kx(t) \tag{5}$$

여기서, 상태변수 x_1 과 x_2 는 각각 심도변화율과 심도 가속도이고, $b(=1/MC)$ 는 시스템 파라미터이다. 그리고 $u(t)$ 는 제어입력인 유량을 나타내며, 상태 피드백 게인 $K = (K_D \ K_A)$ 이다.

이때 내부루프에 대한 폐루프 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^2 + bK_A s + bK_D = 0 \tag{6}$$

그리고 내부루프 설계를 위하여 외부루프까지 고려된 심도 제어시스템의 교차주파수 ω_c 보다 3배 큰 고유진동수 $\omega_n (= 3 \omega_c)$ 과 내부루프 시스템의 감쇠비가 0.707 되도록 식 (6)에서 제어게인 K_D 와 K_A 를 선정한다. 그러면 심도 피드백을 고려한 비례제어에 의한 외부루프 설계에 의하여 Fig.3과 같이 심도 제어시스템은 교차주파수 근처에서 -20dB/dec로 롤-오프(roll-off)하고 교차주파수보다 1데케이드 이상 큰 주파수영역에서는 -60 dB/dec로 롤-오프하므로 바람직한 성능 및 안정도-강인성을 유지할 수 있게 된다.

본 논문에서 선정된 심도 제어시스템의 교차주파수는 하드웨어적으로 최대유량($Q_{max}=0.05m^3/sec$)을 고려하여 제어입력이 포화되지 않으면서 최대응답속도를 낼 수 있는 교차주파수 ω_c 가 0.019 rad/sec임을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 찾아냈고 이에 따른 비례게인 K_p 를 선정하였다. 그리고 미분기 s는 관심있는 주파수 범위 내에서 물리적 의미를 갖도록 근사화하여 사용할 수 있는 가-미분기로 대체하였다. 즉,

$$s = \frac{s}{\tau s + 1} \tag{7}$$

최종적으로 선정된 PDA 제어기의 게인값들과 가-미분기의 시정수 τ 는 각각 다음과 같다.

$$K_p = 0.02, K_D = 2.105, K_A = 14.88, \tau = 0.1$$

이제 설계된 PDA 제어시스템의 성능을 평가하기 위하여, 주어진 최대유량을 고려하면서 제어입력이 포화

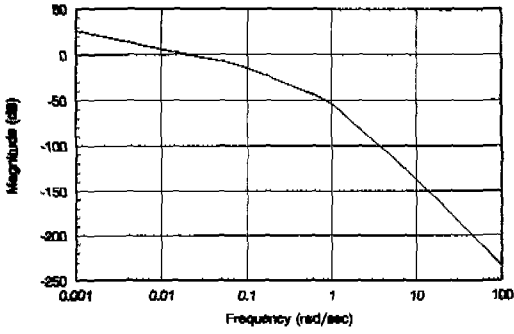


Fig. 3 Bode plot of the PDA depth control system

되지 않는 범위 내에서 최대가속-최대속도-최대감속으로 원하는 위치로 움직일 수 있도록 다음과 같이 실제 명령입력 $z_r(t)$ 를 제안한다.

$$z_r(t) = \begin{cases} \frac{A}{2}(1 - \cos \omega t) & 0 \leq t \leq T \\ A & t > T \end{cases} \quad (8)$$

여기서 A 는 원하는 심도 변화량, ω 는 명령입력 주파수 그리고 T 는 정현파입력이 가해지는 시간이다. 명령입력 주파수 ω 와 시간 T 는 다음 식을 이용하여 선정한다.

$$\omega = \frac{2}{A} |z|_{max} \quad (9)$$

$$T = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi A}{2|z|_{max}} \quad (10)$$

이와 같이 심도위치 A 와 시스템의 하드웨어적 특성에서 주어지는 심도 변화율의 최대값 $|z|_{max}$ 이 주어지면 바람직한 명령입력을 구할 수 있다. 본 논문에서는 $A = 10\text{m}$ 그리고 $|z|_{max} = 0.224 \text{ m/sec}$ 인 경우를 실제 명령입력으로 가정한다. 또한 여기서 고려된 외란 입력 함수는 다음과 같이 톱니형태의 충격함수이다.

$$d(t) = \begin{cases} 2000t & 0 < t < 5 \\ 0 & t \geq 5 \end{cases} \quad (11)$$

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 식(8)에 주어진 명령입력이 가해졌을 때와 식(11)에 주어진 외란입력이 가해졌을

때의 PDA 제어시스템의 명령추종 및 외란제거 성능을 나타내고 있다.

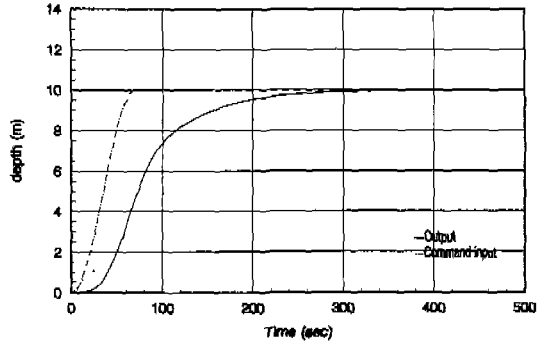


Fig. 4 Time response of the PDA control system for the command input

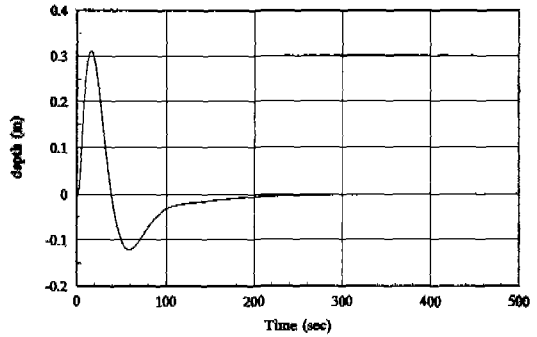


Fig. 5 Time response of the PDA control system for the disturbance input

10m의 심도변화가 발생하도록 식(8)에 주어진 명령입력이 가해졌을 때, PDA 제어시스템은 오버슈트가 발생하지 않고 정착시간 250초 정도로서 바람직한 명령추종 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 식(11)의 외란입력에 대해서는 정상상태오차가 없으며, 정착시간이 200초 정도로 역시 바람직한 외란제거 성능을 보여주고 있다.

이제 PDA 제어시스템 설계시 무시된 비선형 요소인 사역대를 포함하여 PDA 제어시스템에 대한 성능을 평가해 보기로 한다. Fig. 6은 사역대의 크기에 따른 PDA 제어시스템의 시간역 성능을 나타낸 것이다. 특히 사역대의 크기가 10^{-4} 보다 큰 경우에는 선형 PDA 제어기로는 만족스러운 성능을 얻을 수 없음을 알 수

있다. 이와 같이 사역대 효과가 큰 경우에는 시스템 성능뿐만 아니라 안정도에도 영향을 미치게 되므로, 바람직한 심도 제어시스템 설계를 위해서는 비선형의 효과를 고려할 수 있는 비선형 제어기의 설계가 절실히 요구된다.

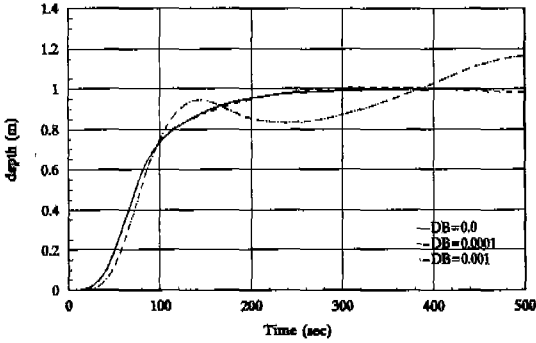


Fig.6 Time response of the PDA control system according to deadzone magnitudes

4. PDA/FLC 제어기 설계

퍼지논리 제어기(FLC)는 숙련된 조작자의 경험이나 제어대상의 특성에 근거하여 적절한 퍼지집합과 추론규칙을 만들어 주어진 입력에 대하여 퍼지추론하여 조작량을 결정하는 제어기이다. 이와 같은 FLC는 퍼지변수에 대하여 퍼지집합을 분할하여 각 분할영역에 대응하는 제어 규칙을 만들면 비선형 프로세스를 제어할 수 있고, 동특성이 시간에 따라 변하는 시변시스템에 대하여 제어기 자체가 응답에 대응하는 성질을 가지고 있기 때문에 비선형-시변 프로세스에 유리한 제어방법이다. 또한 시스템에 대한 수학적 모델링이 어렵고, 정량적 모델이 없어도 언어적인 표현으로 설계가 가능하지만 FLC의 성능에 가장 영향을 미치는 제어규칙의 선정에는 시행착오를 통하여 결정하는 경우가 많다.

FLC를 설계할 때 필요한 퍼지변수의 정의, 제어규칙의 구성과 제어장치의 조정방법에 대해서는 학문적으로 체계화되어 있지는 않지만 일반적으로 사용되고 있는 FLC 설계절차를 요약하면 다음과 같다.

- 퍼지변수를 정의한다.
- 멤버십함수(membership function) 및 제어규칙을 선정한다.
- 추론방법을 선정한다.

• 비퍼지화(defuzzification) 방법을 선정한다.

우선 FLC만을 이용하여 사역대의 크기가 10^{-3} 인 사역대 비선형 효과를 고려할 수 있는 제어기 설계를 시도하였으나, 플랜트가 3중 적분 시스템이므로 이에 대한 피드백 제어시스템은 매우 불안정한 시스템이라 FLC만으로는 안정한 제어기를 쉽게 설계할 수 없었다. 그래서 시스템의 안정화를 위하여 PDA 제어기와 병합하여 Fig.7과 같은 PDA/FLC 제어시스템을 제안한다.

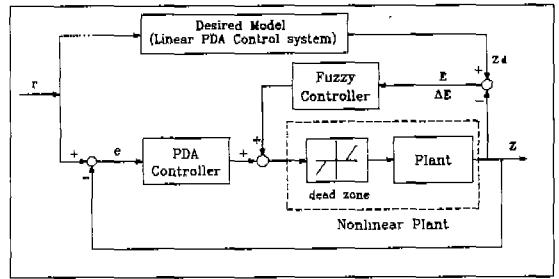


Fig.7 Structure of the PDA/FLC control system

PDA 제어기는 시스템의 안정화를 위한 기본적인 제어입력을 만들고, FLC는 바람직한 시스템 응답인 사역대의 비선형성을 무시하고 설계된 PDA 제어시스템의 응답과 실제 비선형 시스템의 응답과의 차를 보정해주는 역할을 해주도록 PDA/FLC 제어시스템이 구축되었다. PDA 제어기는 이미 3절에서 설계되었고, 여기서는 FLC 설계에 대해서만 설명하기로 한다.

퍼지 변수 정의

FLC의 입력변수로는 심도오차 $e(k)$ 와 심도변화율 $ec(k)$ 로 그리고 출력변수로는 $u(k)$ 를 선정하였다.

$$u(k) = FLC\{R(e(k)), PR(ec(k))\} \quad (12)$$

여기서 심도오차와 심도변화율은 크리스프(crisp)한 값으로 측정된다. 그리고 R과 RR은 각각 심도와 심도 변화율에 대한 언어변수(linguistic variable)이다. 또한 제어 입/출력변수 $e(k)$, $ec(k)$, $u(k)$ 에 대한 언어변수는 다음과 같이 13개의 용어집합(term set)으로 정의한다.

$$T = \{PBB, PB, PMB, PM, PSM, PS, ZE, NS, NSB, NM, NMB, NB, NBB\} \quad (13)$$

멤버십 함수 및 퍼지 제어규칙 선정

멤버십 함수는 일반적으로 설계자의 경험과 지식에 의해 선정되는데, 여기서는 Fig. 8과 같이 삼각형태로 선정하였다. 그리고 입/출력변수에 대한 전체집합(universe of discourse) U를 13개의 종류로 양자화하였다.

$$U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\} \quad (14)$$

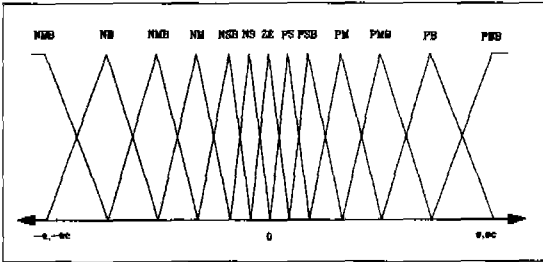


Fig. 8 Membership function of fuzzy sets

일반적으로 사용되는 Mamdani형의 제어규칙은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\text{ALSO } \{ \text{IF } (R \text{ is } A_i \text{ AND } PR \text{ is } B_i), \text{ THEN } (u \text{ is } C_i) \} \quad (15)$$

여기서 A_i, B_i 와 C_i 는 멤버십 함수에 의해 정의된 언어변수들이고, 첨자 i 는 규칙번호이다. 제어규칙은 만족스러운 성능을 얻기 위하여 설계자의 직관과 시행착오적인 방법을 통하여 구할 수 있다.

또한 주어진 상태에 가까운 카티시안 직교형의 $A_i \times B_i \times C_i$ 트리플(triple)을 선정하고, 선정된 규칙번호를 갖는 지배규칙만을 발화시키는 퍼지제어셀을 이용한 단순화된 퍼지추론방법⁽¹⁰⁾을 사용하기로 한다. 작동 영역의 멤버십 함수를 비작동 영역과 분리함으로써, 병렬계산 가능한 퍼지칩이 아닌 상용되는 마이크로 프로세서를 이용하여 구현하는 경우에 계산량을 크게 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 모든 규칙을 발화시키지 않고 지배규칙만 발화시켜도 일반성을 잃지 않는다. $[e(k), ec(k)]$ 에 대한 4개의 트리플의 작동구간 설정은 다음과 같다.

$$A_i(k) < e(k) < A_{i+1}(k), \text{ and } B_i(k) < ec(k) < B_{i+1}(k) \quad (16)$$

퍼지추론 및 비퍼지화

본 논문에서는 단순화된 추론방법인 퍼지제어셀의 지식기반을 다음과 같은 형태의 퍼지규칙으로 기술한다.

$$\text{ALSO } \{ \text{IF } \text{AND}_{m=1}^2 (e_m \text{ is } A_m^i) \text{ THEN } U^i \text{ is } C^i \} \quad (17)$$

여기서 상첨자 i 는 지배규칙을 이루는 4개의 국부 규칙번호이고 e_m 은 m 개의 입력, U 는 출력변수이고 A 와 C 는 퍼지집합이다. 발화된 조건문의 적합도를 정하는 AND 결합은 대수곱(algebraic product)으로 연산하고 규칙문장간의 연결어 ALSO는 대수평균을 이용한다.⁽¹¹⁾ 이러한 방법으로 전제인 크리스프한 입력 $e(k)$ 와 $ec(k)$ 에 대한 제어규칙들을 추론합성하여 무게중심법으로 비퍼지화하면 단순화된 퍼지추론의 결과적인 형태는 다음과 같다.

$$u(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i(k) \times C_{id}}{\sum_{i=1}^4 \omega_i(k)} \quad (18)$$

여기서 C_{id} 는 멤버십 함수 C 가 비퍼지화된 언어변수를 가장 잘 나타내는 확정값이며 Table 1에 사용된 제

$e \times ec$	C_{id}	$e \times ec$	C_{id}
NNB × NB	-0.5	NS × NSB	-0.6
NBB × NSB	-0.01	NS × ZO	-0.00095
NB × NM	-0.1	PS × PS	0.00095
NB × PSB	-0.5	PM × PMB	0.001
NB × PM	-0.1	PM × PB	0.005
NMB × ZO	0.00222	PBB × PMB	0.1
NM × PSB	0.00115		

Table 1 Operational set of control rules used

어규칙과 함께 나타내었다. 조건문의 적합도 $w_i(k)$ 는 퍼지제어 행동에 대한 i 번째 규칙의 공헌도를 나타낸다.

$$\omega_i(k) = A_i(e(k)) \times B_i(ec(k)) \quad (19)$$

5. 심도 제어시스템의 성능 분석

PDA 및 PDA/FLC 제어기의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Fig.9와 Fig.10은 각각 사역대의 크기가 10^{-3} 인 사역대를 포함하는 비선형 플랜트에 선형 PDA와 비선형 PDA/FLC 제어기를 결합한 경우에 대하여 식(8)로 표현된 명령입력에 대한 시간응답과 식(11)로 표현된 외란에 대한 시간응답을 나타낸 것이다. 선형 PDA 제어시스템의 경우에는 시스템이 불안정하지만, 비선형 PDA/FLC 제어시스템의 경우에는 시스템이 안정할 뿐 아니라 명령입력에 대한 정착시간이 190초 정도로서 만족스러운 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그렇지만 외란제거 성능은 PDA 제어시스템보다 크게 개선되지는 않았다. 이것은 크기가 작은 입력에 대하여 반응하지 않는 사역대의 비선형 특성과 퍼지론 방법에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 새로운 제어변수의 선정, 향상된 퍼지 규칙 그리고 추론에 대한 연구가 더 수행되어야 할 것으로

사료된다.

6. 결 론

제어타의 기능이 미약하게 되는 임계속도 이하에서 수중운동체의 심도유지 및 심도변화를 위한 PDA 및 PDA/FLC 심도 제어시스템을 설계하였고, 설계된 PDA 제어시스템과 PDA/FLC 제어시스템에 대하여 수중운동체의 유량 제어밸브가 갖는 비선형 요소인 사역대의 크기에 따른 비선형성의 효과와 성능을 분석하였다. 사역대의 크기가 비교적 큰 경우에는 선형 PDA 제어기로는 만족스러운 성능을 얻을 수 없었으며, 비선형 PDA/FLC 제어기는 사역대가 어느 정도 크더라도 만족스러운 성능 및 안정도를 유지한다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 PDA/FLC 제어방법은 3중 적분기 특성을 가지며 사역대뿐만 아니라 클롱마찰, 백래시, 포화 등과 같은 비선형 요소를 포함하는 비선형 시스템을 제어할 수 있는 실용적인 제어방법이라고 사료된다. 그리고 앞으로 더 수행되어야 할 연구는 전진속도 변화에 적용할 수 있는 PDA/FLC 심도 제어시스템 설계로 확대되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Koh, I., "Submarine Automatic Maneuvering Controller/Estimator", ASME Winter Annual Meeting, 88-WA/DSC-21, 1988.
2. 김종식, "수중운동체의 정적/동적 제어연구(I)", 국방과학연구소 위탁과제 연구보고서, 1992.
3. 조현진, 최중락, 이동권, 김홍렬, "미속 수중함의 자동 심도 제어장치 설계연구", '92 한국 자동제어 학술회의 논문집, pp.776~779, 1992.
4. Zadeh, L. A., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, No.1, pp.28~44, 1973.
5. King, P. J. and Mamdani, E.H., "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Application", Automatica, Vol.13, pp.235~242, 1977.

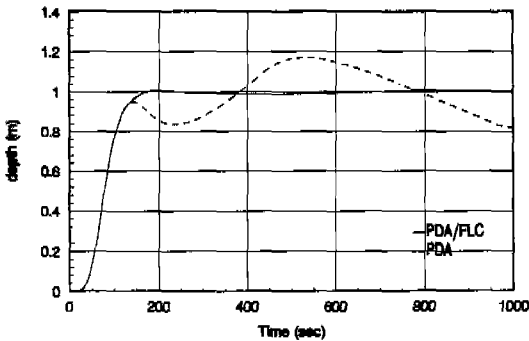


Fig.9 Time responses of PDA/FLC control systems for the command input

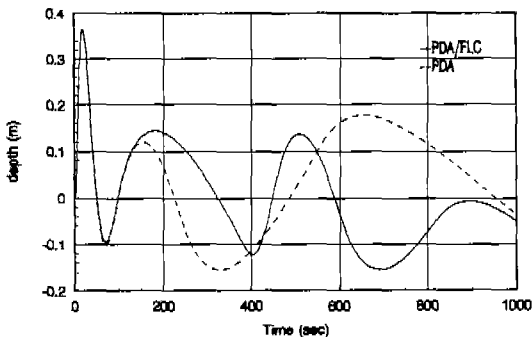


Fig.10 Time responses of PDA and PDA/FLC control systems for the disturbance input

6. Sugeno, M., "Industrial Application of Fuzzy Control", Elsevier Science Pub., NY, 1985.
7. Gerlter, M. and Hagan, B.R., "Standard Equation of Motion for Submarine Simulation", Naval Ship Research and Development Report 2520, 1967.
8. Feldman, J., "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equation of Motion", DTNSRDC/spp-0393-09, 1979.
9. Mamdani, E.H., "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585~1588, 1974.
10. 남세규, 김종식, 유완석, "퍼지셀을 이용한 퍼지논리 제어기의 조직적인 설계 방법", 대한기계학회 논문집, 제16권 7호, pp.1234~1243, 1992.
11. Hirota, "ファuzzy制御", JSME 90. 3, pp.24~30, 1990.