

사역대를 갖는 수중운동체의 PDA/FLC 심도제어

김종식*, 정재호*, 최중락**

* 부산대학교 기계설계공학과, ** 국방과학연구소

PDA/FLC Depth Control of Underwater Vehicles with Deadzone

Jong Shik Kim*, Jae Ho Chung*, Jung Rak Choi*

* Pusan National University, ** Agency for Defence Department

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 scheme is a suitable one to maintain the desirable depth of underwater vehicles with deadzone.

1. 서론

수중운동체에 관한 제어 문제는 일반적으로 임계속도 (약 2 노트) 이하에서 수직 상승 및 심도유지를, 그리고 임계속도 이상에서 조타 및 잠수를 위한 제어로 구분한다.^[1] 본 연구에서는 수중운동체의 전진방향의 속도가 거의 없는 상태 (1노트)에서 심도유지 및 심도변화가 요구되는 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 부력과의 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-가속(proportional-derivative-acceleration; PDA) 제어알고리즘^[3]을 적용한다. 그리고 설계된 PDA 제어기를 유량 제어밸브의 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 제어기를 설계하고, PDA/FLC 제어시스템의 명령추종 및 외란제거 성능을 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 Q 를 조절함으로써 수중운동체의 중량이 변하게 되고 이에 따른 부력과의 차에 의해 요구되는 심도를 제어할 수 있게 해준다. 따라서 수중운동체의 심도 제어시스템을 모델링하기 위해서는 우선 수중운동체와 수중운동체의 구동부인 유량 제어밸브 및 탱크의 동역학에 대하여 생각해야 한다.

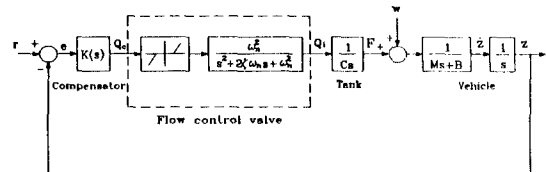


Fig. 1 Block diagram of the depth control system for underwater vehicles

수중운동체의 완전한 운동특성을 묘사하기 위해서는 6 자유도 모델식^[7,8]이 요구되지만, 본 논문에서는 수중운동체의 전진속도가 충분히 작은 경우에 대한 심도 제어시스템 설계

$$s = \frac{s}{\tau s + 1} \quad (7)$$

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

$$K_P = 0.02, K_D = 0.2, K_A = 5, \tau = 0.1$$

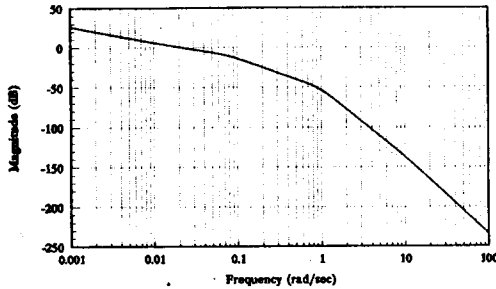


Fig. 3 Bode plot of the PDA depth control system

이제 설계된 PDA 제어시스템의 성능을 평가하기 위하여, 주어진 최대유량을 고려하면서 제어입력이 포화되지 않는 범위내에서 최대가속-최대속도-최대감속으로 원하는 위치로 움직일 수 있도록 다음과 같은 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 A는 원하는 심도 변화량, ω 는 명령입력 주파수 그리고 T는 정현파입력이 가해지는 시간이다. 명령입력 주파수 ω 와 시간 T는 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 심도 변화량 A와 시스템의 하드웨어적 특성에 서 주어지는 심도 변화율의 최대값 $|z|_{\max}$ 이 주어지면 바람직한 명령입력을 구할 수 있다. 본 논문에서는 $A = 10$ m 그리고 $|z|_{\max} = 0.224$ m/sec인 경우를 명령입력으로 가정한다. 또한 여기서 고려된 외란 입력수는 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.

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

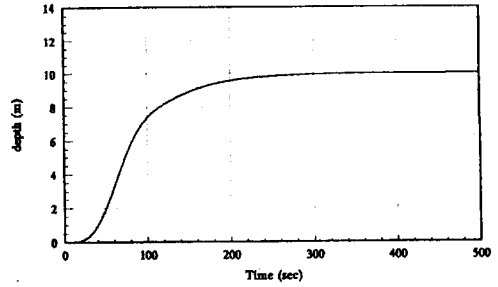


Fig. 4 Time response of the PDA control system for command input

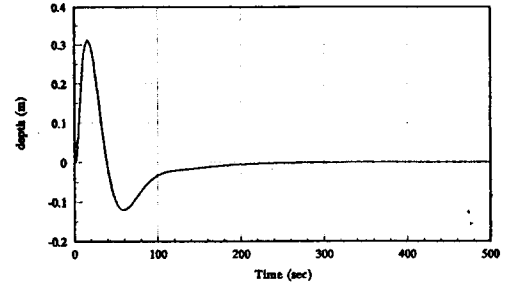


Fig. 5 Time response of the PDA control system for disturbance input

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 안정성에도 영향을 미치게 되므로, 바람직한 심도 제어시스템 설계를 위해서는 비선형의 효과를 고려할 수 있는 비선형 제어기의 설계가 절실히 요구된다.

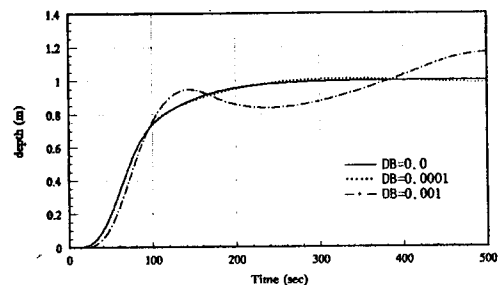


Fig. 6 Time response of the PDA control system according to deadzone magnitude

4. PDA/FLC 제어기 설계

퍼지논리 제어기(FLC)는 숙련된 조작자의 경험이나 제어 대상의 특성에 근거하여 적절한 퍼지집합과 추론규칙을 만들어 주어진 입력에 대하여 퍼지추론하여 조작량을 결정하는 것이다. 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 아직 학문적으로 잘 체계화되어 있지는 않지만 일반적으로 사용되고 있는 FLC 제어기 설계절차를 요약하면 다음과 같다.

- 퍼지변수를 정의한다.
- 멤버십함수(membership function) 및 제어규칙을 설계한다.
- 추론방법을 정한다.
- 비퍼지화(defuzzification) 방법을 선정한다.

우선 FLC만을 이용하여 사역대의 크기가 10^{-3} 인 사역대 비선형 효과를 고려할 수 있는 제어기 설계를 시도하였으나, 풀덴트가 3중 적분 시스템이므로 이에 대한 피드백 제어시스템은 매우 불안정한 시스템이라 FLC만으로는 안정한 제어를 쉽게 설계할 수 없었다. 그래서 시스템의 안정화를 위하여 PDA 제어기와 병합하여 Fig. 7과 같은 PDA/FLC 제어시스템을 구축하였다. PDA 제어기는 시스템의 안정화를 위한 기본적인 제어입력을 만들고, FLC 제어기는 바람직한 시스템 응답인 사역대의 비선형성을 무시하고 설계된 PDA 제어시스템의 응답과 실제 비선형 시스템의 응답과의 차를 보정해 주는 역할을 해주도록 PDA/FLC 제어시스템이 구축되었다.

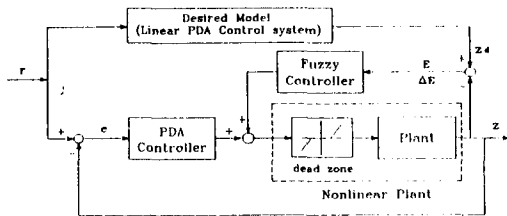


Fig. 7 Structure of the PDA/FLC control system

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.

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

여기서 심도오차와 심도변화율은 크리스프(crisp)한 값으로 측정된다. 그리고 R과 RR은 각각 심도와 심도변화율에 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.

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

멤버십함수 및 퍼지 제어규칙 설계

멤버십함수는 설계자의 경험과 지식에 의해서 주관적으로 정의되며, 선정된 멤버십함수는 Fig. 8과 같이 삼각형태로 선정하였고 입/출력변수에 대한 전체집합(universe of discourse) U를 13 개의 종류로 양자화 하였다.

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

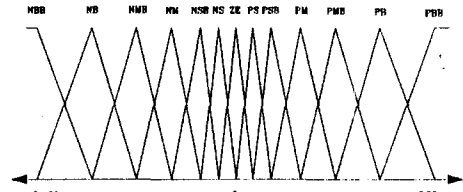


Fig. 8 Membership function of fuzzy sets

일반적으로 사용되는 Mamdani 형의 제어규칙은 다음과 같다.⁹⁾

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

$i=1$

여기서 A_i , B_i 와 C_i 는 멤버십함수에 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 직곱형의 $A_i \times B_i \times C_i$ 트리플 (triple)을 선정하고, 선정된 규칙번호를 갖는 지배규칙만을 발화시키는 퍼지제어셀을 이용한 단순화된 퍼지추론 방법¹⁰⁾을 사용하기로 한다. 작동 영역의 멤버십함수를 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 4 개의 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.

$$4 \text{ ALSO } \{ \text{IF } \text{AND } (e_m \text{ is } A_m^i) \text{ THEN } U^i \text{ is } C^i \} \quad (17)$$

$m=1$

여기서 상첨자 i 는 지배규칙을 이루는 4 개의 국부 규칙번호 이고 e_m 은 m 개의 입력, U 는 출력변수이고 A 와 C 는 퍼지 집합이다. 발화된 조건문의 적합도를 정하는 AND 결합은 대수곱(algebraic product)으로 연산하고 규칙문장간의 연결 어 ALSO는 대수평균을 이용한다.^[11] 이러한 방법으로 전체 인 크리스프한 입력 $e(k)$ 와 $ec(k)$ 에 대한 제어규칙들을 추론 합성하여 무게중심법으로 비퍼지화하면 단순화된 퍼지추론의 결과적인 형태는 다음과 같다.

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

여기서 C_{id} 는 멤버십함수 C_i 가 비퍼지화된 언어변수를 가장 잘 나타내는 확정값이며 Table 1에 사용된 제어규칙과 함께 나타내었다. 조건문의 적합도 $w_i(k)$ 는 퍼지제어 행동에 대한 i 번째 규칙의 공헌도를 나타낸다.

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

Table 1 Operational set of control rules used

$e \times ec$	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		

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 뿐만 아니라 명령입력에 대한 정착시간이 190초 정도로서 만족스러운 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그렇지만 외란제거성능은 PDA 제어시스템보다 크게 개선되지는 않았다. 이것은 크기가 작은 입력에 대하여 반응하지 않는 사역대의 비선형 특성과 퍼지추론 방법에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 새로운 제어변수의 선정, 향상된 퍼지 규칙 그리고 추론에 대한 연구가 더 수행되어야 할 것으로 사료된다.

6. 결론

제어타의 기능이 미약하게 되는 임계속도 이하에서, 수중

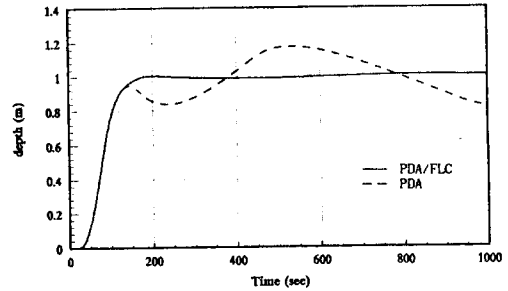


Fig. 9 Time responses of PDA and PDA/FLC control systems for command input

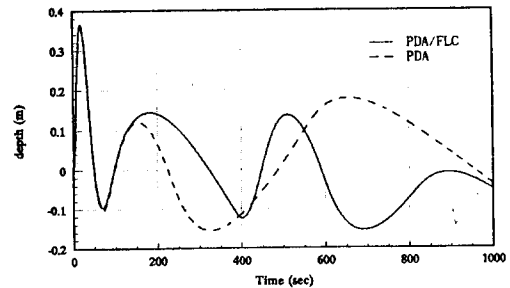


Fig. 10 Time responses of PDA and PDA/FLC control systems for disturbance input

운동체의 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 10^{-4} 보다 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 제어 방법은 3중 적분기 특성을 가지며 사역대 뿐만 아니라 롤링 마찰, 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.

참고 문헌

- (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, 김홍열, "미속 수중함의 자동 심도 제어 장치 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.
- (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 설계방법", 대한기계학회 논문집, 제 16권 7호, pp. 1234-1243, 1992.
- (11) Hirota, "ファシイ制御", JSME 90. 3, pp. 24-30, 1990.