

Underwater Flight Vehicle의 퍼지-PID 심도 제어에 관한 연구

A Study on the Fuzzy-PID Depth Control of Underwater Flight Vehicle

김 현 식*
Kim, Hyun-Sik*

ABSTRACT

In Underwater Flight Vehicle depth control system, the followings must be required. Firstly, It need robust depth control performance which can get over parameter variation, modeling error and disturbance. Secondly, It need no overshoot phenomenon to avoid colliding with ground surface and obstables. Thirdly, It need continuous control input to reduce the acoustic noise and propulsion energy consumption. Finally, It need effective interpolation method which can reduce the dependency of control parameters on speed. To solve these problems, we propose the Fuzzy-PID depth controller with the control parameter interpolators. Simulation results show the proposed control scheme has robust and accurate performance with continuous control input.

주요기술용어 : Fuzzy-PID Controller(퍼지-PID 제어기), Control Parameter Interpolators(제어파라미터 보간기), Robust and Accurate Performance(강인하고 정밀한 성능)

1. 서 론

수중운동체에 관한 연구는 1960년대 초 부터 시작된 후 계속적으로 발전해 왔다. 유인 수중운동체는 내구성에서 한계가 있었고 위험한 환경에서는 임무 수행이 어려웠다. 반면에, ROV(Remotely Operated Vehicle)는 내구성이 개선되고 위험한 환경에서도 임무수행이 가능하도록 개발되었으나 모선 또는 육상에서의 테더 케이블을 통한 원격조작에 의해 작동하므로 테더 케이블로 인한 운동체의 기동성 및 운용 심도에 제약이 뒤따른다. 따라서, 테더 케이블 없이

제어가 가능하며 장애물과 같이 계획되지 않은 상황에도 대처 가능한 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 개발이 요구되었고⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾, AUV의 임무수행 및 안전 운항영역 확보 측면에서 우수한 제어 성능을 갖는 AUV 심도 제어기의 설계 또한 요구되었다.

본 논문에서는 여러 가지 AUV 가운데에서 잠수함, 어뢰 등과 같은 수중무기의 일반적인 형상으로서 제어판을 기본 구조로 갖는 UFV(Underwater Flight Vehicle)를 심도 제어 대상으로 고려하였으며, UFV 심도 제어기 설계를 위해 다음의 요구사항을 고려하였다. 첫째, 제어판이 몸체에 비하여 작으며 운동체 외부형상의 상하 비대칭으로 인한 유체역학적인 특성 때문에 연직면 운동은 복잡한 연성 효과와 강한

* 국방과학연구소 연구원

비선형 특성을 가지므로 파라미터 변동, 모델링 오차 및 외란에 대해 강인한 심도제어기가 요구된다⁽⁶⁾. 둘째, 지면 및 장애물과의 충돌을 피하기 위하여 오버슈트 현상이 없어야 한다. 셋째, 제어입력의 변화량이 적은 연속적인 제어입력을 사용함으로써 음향소음 및 추진에너지 소모량을 줄여서 운용시의 은닉성을 증대할 필요가 있다. 마지막으로, UFV의 고유 특성인 제어파라미터의 속도에 대한 의존성 문제를 최소화할 필요가 있다.

본 논문에서는 이러한 요구사항을 해결하기 위한 방법의 하나로서 퍼지 이론⁽⁷⁻⁹⁾에 기초한 퍼지-PID 심도 제어기(Fuzzy-PID Depth Controller)를 제안하였다. 제안된 퍼지-PID 심도 제어기는 퍼지 제어 입력항 및 PID 보상 제어 입력항으로 구성된 제어입력을 사용하여 제어 시스템이 플랜트 파라미터의 변동, 모델링 오차나 외란 등에 대하여 강인한 제어성능 및 오버슈트 현상이 거의 없는 정밀한 제어성능을 가질 수 있도록 설계되었다. 또한, UFV의 운용속도 구간 내의 일부 속도값들에 대해서 주요 제어기 파라미터들을 도출한 후, 이들을 커브피팅하여 운용속도 전구간에 대해 보간능력을 갖는 제어 파라미터 보간기를 파라미터별로 설계하여 제어 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하였다.

그리고, 제안된 퍼지-PID 제어기의 성능을 검증하기 위해 수중운동체의 운동특성을 나타내는 6자유도 비선형 운동방정식에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

본 논문의 2장에서는 UFV의 개요 및 수학적 모델을, 3장에서는 퍼지-PID 심도 제어기 설계를, 4장에서는 시뮬레이션 및 고찰을, 5장에서는 결론을 밝힌다.

2. UFV의 개요 및 수학적 모델

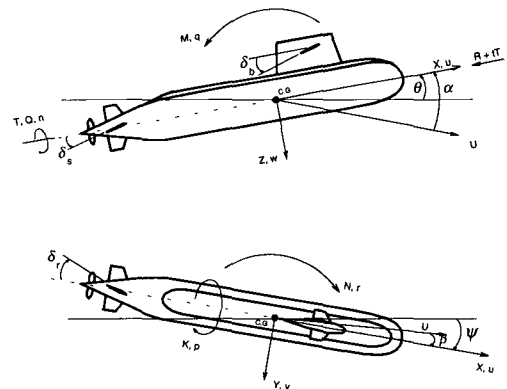
본 논문에서 심도 제어 대상으로 고려한 UFV는

저자가 개발에 참여한 수중운동체 모형으로서 주요 장비는 원격제어 콘솔 및 UFV 본체로 구성된다. UFV 본체는 자율제어와 원격제어 방식을 가지며 추진장치, 주제어 컴퓨터, 감시/데이터저장 컴퓨터, 안전회로, IMU(Inertia Measurement Unit), 경사계, Magnetic Compass, 속도계, 심도계, 안전회로, 회피소나, 무선/수중통신, 근거리추적장치, 발라스트장치 등을 탑재하고 수조 또는 호수에서 자유운항 모형시험을 수행하는 기능을 가진다. 자유운항 모형시험에서는 PMM(Planar Motion Mechanism)이나 RA(Rotating Arm)와 같은 구속모형시험에서는 얻을 수 없는 연성/비선형 유체력계수를 획득하기 위한 파라미터 식별, 실제 시험과 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 시뮬레이션 프로그램의 정밀도를 향상시키기 위한 시뮬레이션 검증, 선형의 변화에 따른 기동특성 및 성능 연구를 위한 선형연구 등을 그 목적으로 한다⁽¹⁰⁾.

따라서 이러한 시험을 성공적으로 수행하기 위해서는 우수한 성능을 갖는 심도 제어기의 개발이 필수적임을 알 수가 있다.

개발된 UFV의 대략적인 형상은 그림 1과 같고 좌표계는 그림 1과 같이 오른손 좌표계를 사용하였다.

UFV의 운동방정식은 미국 NSRDC 에서 M.Gertler⁽¹¹⁾가 유도한 식을 근간으로 자체 정립한 6자유도 운동



(그림 1) UFV에 적용된 좌표계

방정식을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

UFV의 운동은 3축의 병진운동과 3축의 회전운동인 6자유도 운동으로 표현되는데 가속도에 비례하는 항들을 좌변에 놓고 관성력 $X_1, Y_1, Z_1, K_1, M_1, N_1$, 정지된 유체중을 물체가 진행하면서 운동할 때 받는 Hull Force $X_2, Y_2, Z_2, K_2, M_2, N_2$, 무게와 부력에 의해서 발생하는 정력학적인 힘 $X_3, Y_3, Z_3, K_3, M_3, N_3$, 추진 및 제어관에 의해 나타나는 힘 $X_4, Y_4, Z_4, K_4, M_4, N_4$ 을 우변에 놓으면 식(1)과 같이 표현된다⁽¹⁰⁾.

$$[M + MA] \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\ -Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \\ -Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \\ -K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \\ -M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \\ -N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, M은 질량행렬, MA는 부가질량행렬이다. UFV의 Hull Force는 선형, 비선형, 편향(Biased)된 힘과 같은 항들로 구성되는데, 이들 가운데에서 수직축에 작용하는 힘인 Z_2 를 발생시키는 Hull 파라미터들 중의 하나인 Z_\star 를 구하는 경험식은 식(2)와 같다.

$$Z_\star = 0.004 \cdot \nabla / (0.5 \rho L^3) \quad (2)$$

단, ∇ 는 배수량, ρ 는 물의 밀도, L은 무인 수중운 동체의 길이이다.

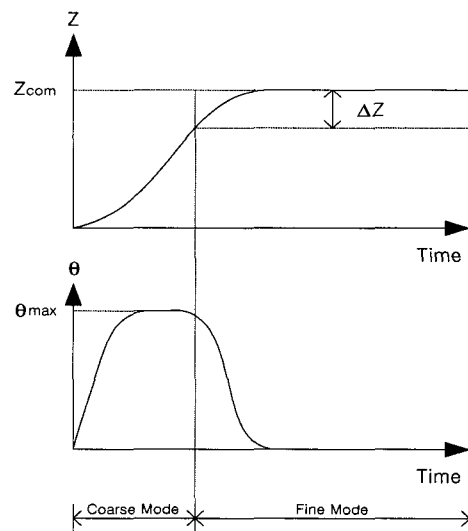
UFV의 실제 운용에서는 Z_\star 에 의한 부력의 영향으로 발생하는 심도제어 오차를 보상하여 level flight을 이루기 위한 제어관 바이어스 입력항 δ_{level} 이 필요하다. 일반적으로 바이어스 입력항 δ_{level} 는 실험을 통하여 구해지는데 UFV의 속도 u 에 의존한다. 그러나 운용속도 전구간에 대해서 바이어스 입력항을 구하기는 현실적으로 불가능하므로 커브피팅을 이용한

보간법이 요구된다. 이는 선체의 안정성 확보 및 필요시의 심도유지 수동제어를 위해서 반드시 필요하다.

3. 피치-PID 심도 제어기 설계

피치-PID 심도 제어기 설계를 위한 과정은 다음과 같다. 먼저, 복잡한 비선형 특성을 갖는 UFV 심도 제어 시스템을 시스템 특성분석 및 전문가의 경험 및 지식을 바탕으로 그림 2와 같이 피치 제어 구간인 Coarse Mode와 심도 및 피치 제어 구간인 Fine Mode로 분리하였다. 그리고, 최종적으로 다변수 시스템인 UFV 심도 제어 시스템을 피치 제어부와 심도 제어부로 나누어서 단일 입력력 시스템으로 비연성화 하였다.

다음 단계로서, 심도 명령값이 $z_{com,old}$ 에서 z_{com} 으로 변화할 경우에, UFV의 기동 성능 지표로서 단위 심도변경에 소요되는 시간 $T_{sec/m}$ 를 일정하게 유지하였고, 이에 따른 심도 명령값 z_{com} 에 따른 피치 명령값 θ_{max} 를 구하기 위한 식은 다음과 같다.



(그림 2) Coarse 및 Fine Mode의 구분

$$z_{dist} = |z_{com} - z_{com,u}| \quad (3)$$

$$t_{req} = T_{sec/m} \cdot z_{dist} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= \sin^{-1}(z_{dist}/(u \cdot t_{req})) \\ &= \sin^{-1}(1/(u \cdot T_{sec/m})) \end{aligned} \quad (5)$$

단, u 는 함진행 방향의 속도이다. 식(5)에서 θ_{max} 는 u 의 함수임을 알 수가 있다. 즉, 운용 속도가 빠를수록 피치 명령값은 줄어든다. 그리고, 피치 및 심도 제어부 설계를 위해 식(6)과 같이 오차를 정의하였다.

$$\begin{aligned} e_{\theta} &= \theta_{max} - \theta \\ e_z &= z_{com} - z \end{aligned} \quad (6)$$

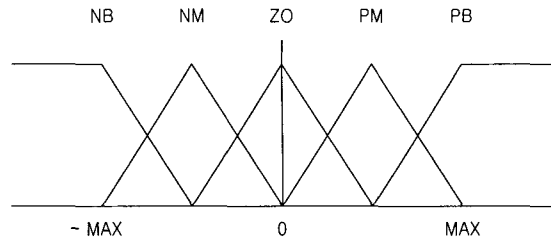
피치 및 심도 제어부의 퍼지제어 입력항의 구성에 사용된 퍼지 추론 방법은 식(7)과 같이 결론부가 상수의 형태를 갖는 Simplified 방법이며, 오차가 영으로 수렴하는 퍼지제어 알고리즘을 유도하기 위해 구성된 피치 및 심도 제어 퍼지룰은 표 1과 같다.

$$R_i : \text{If } K_e e \text{ is } A_i \text{ and } K_e \cdot \dot{e} \text{ is } B_i \text{ then } Y = c_i \quad (7)$$

(표 2) 피치 및 심도 제어 퍼지룰

e \ de	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	1.0	1.0	1.0	0.8	0.0
PM	1.0	1.0	0.8	0.0	-0.8
ZO	1.0	0.8	0.0	-0.8	-1.0
NM	0.8	0.0	-0.8	-1.0	-1.0
NB	0.0	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0

입력부 멤버십 함수는 그림 3과 같은 삼각형 형태이다.



(그림 3) 멤버십 함수 형태

비퍼지화는 식(8)과 같이 무게중심법을 사용하였으며 W_i 는 Min 값을 사용한다.

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^N W_i c_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (8)$$

앞에서 소개된 퍼지 추론 방법을 적용하여 피치 및 심도 각각에 대하여 e 와 \dot{e} 를 입력변수로 하여 강인성을 증대하기 위한 퍼지 제어 입력항은 식(9)과 같고, 정상상태 오차를 줄이고 δ_{level} 를 보상하기 위한 PID 보상 제어 입력항은 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_{\theta_{fuzzy}} &= K_{y_{\theta}} Y_{\theta} \\ \delta_{z_{fuzzy}} &= K_{y_z} Y_z \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta_{\theta_{pid}} &= K_{p_{\theta}} e_{\theta} + K_{i_{\theta}} \int e_{\theta} + K_{d_{\theta}} \dot{e}_{\theta} \\ \delta_{z_{pid}} &= K_{p_z} e_z + K_{i_z} \int e_z + K_{d_z} \dot{e}_z \end{aligned} \quad (10)$$

위식들을 바탕으로 설계된 피치 제어부 δ_{θ} 와 심도 제어부 δ_z 는 식(11)과 같으며, ratio를 이용하여 조합하여 퍼지-PID 제어입력 δ 를 식(12)와 같이 구하였다.

$$\delta_{\theta} = \delta_{\theta_{fuzzy}} + \delta_{\theta_{pid}} \quad (11)$$

$$\delta_z = \delta_{z_{fuzzy}} + \delta_{z_{pid}} \quad (11)$$

$$\delta = ratio \cdot \delta_z + (1 - ratio) \cdot \delta_{\theta} \quad (12)$$

$$\text{단, } ratio = \begin{cases} 0.0 & \text{if } e_z > const \\ 0.7 & \text{if } e_z < const \end{cases}$$

최종적으로 설계된 선미수평타 명령각 δ_s 및 선수 수평타 명령값 δ_b 는 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_s &= u \cdot R2D + \delta_{level} \\ \delta_b &= -1.5 u \cdot R2D \end{aligned} \quad (13)$$

단, R2D는 radian 값을 degree값으로 변환하는 상수이다. δ_b 에서 -1.5는 개발된 UFV의 경우에 선미 수평타의 면적이 선수 수평타의 면적에 비해 1.5배 크므로 제어판이 동일한 외력을 받도록 한다는 가정과 제어판의 발생력 측면에서 선수 수평타의 방향이 선미 수평타의 방향과 반대라는 사실을 고려한 값이다. 또한, 개발된 UFV는 선체무게중심에서 선미 수평타까지의 거리가 선수 수평타까지의 거리에 비해 멀리 떨어져 있어서 선미 수평타가 선체에 미치는 힘이 선수 수평타의 힘에 비해 상대적으로 크므로 δ_{level} 은 구현 및 효과도 측면에서 선미 수평타 명령각 δ_s 에만 첨가하였다.

제안된 제어를 적용한 시뮬레이션을 통해 심도 제어부 퍼지출력게인, 심도 제어부 및 피치 제어부 적분게인이 제어성능 결정의 지배적인 요소로 드러났는데 이들 게인값도 실험을 통하여 구해지며 UFV 진행방향의 속도 u 에 의존한다. 따라서 δ_{level} 와 마찬가지로 운용속도 전구간에서 이들 게인값을 구하기는 현실적으로 불가능하므로 커브피팅을 이용한 보간법이 요구된다.

보간법이 요구되는 δ_{level} , 심도 제어부 퍼지출력게인 스케일 값, 심도 제어부 및 피치 제어부 적분게인 스케일 값의 4가지 파라미터를 운용속도 전구간에 대해서 획득하기 위해 사용된 보간기는 끝점과 접선벡터를 이용한 매개변수 3차 곡선의 형태를 가

지며 우수한 보간능력을 갖는 헤르미트 보간 함수이다. 그 형태는 식(14)와 같다⁽¹²⁾.

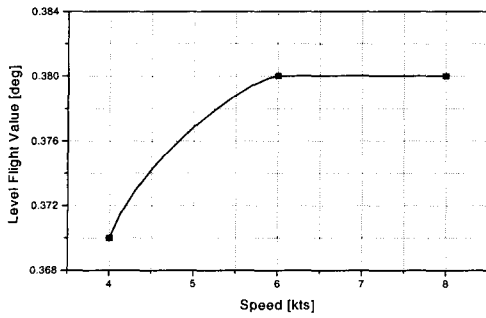
$$P(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(0) \\ P(1) \\ P'(0) \\ P'(1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

단, $0 \leq t \leq 1$ 이고, $P(0)$ 는 시작점의 좌표, $P(1)$ 은 종료점의 좌표, $P'(0)$ 는 시작점의 접선벡터, $P'(1)$ 은 종료점의 접선벡터이다. 보간하고자 하는 점들 중에서 이웃한 두점들로 이루어진 여러개의 세그먼트를 나누고 각 세그먼트별로 식(14)를 이용하여 $P(t)$ 를 구성하며, 이때 각 세그먼트들의 연속성을 고려하여 접선벡터가 설정되어야 한다. 이후에 각 세그먼트별로 구성된 $P(t)$ 를 연결하면 모든 점에 대한 보간 함수를 구할 수 있다. 본 논문의 경우, x 좌표값은 속도 u 이고, y 좌표값은 보간하고자 하는 제어기 파라미터값으로 볼 수 있다. 따라서 보간하고자 하는 점이 정해지면 그 점이 속한 세그먼트와 x 좌표값을 결정할 수 있으므로 매개변수 t 값을 구할수 있고, 구해진 t 값을 이용해 보간하고자 하는 대상값을 구할 수 있다.

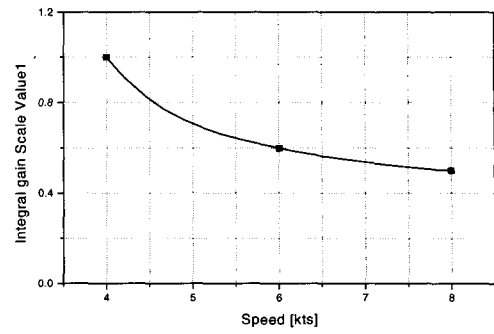
4. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 심도 제어기의 성능 예측을 위해서는 UFV의 거동을 모사할 수 있는 유체력 계수들이 필요한데, 본 논문에서는 설계된 UFV의 선형에 대해 유체력 계수를 추정할 수 있는 자체개발 프로그램을 이용하여 구한 이론적인 계수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 추후 시스템 식별 실험에 의한 유체력 계수를 사용하면 더욱 정밀한 시뮬레이션이 가능하다.

시뮬레이션의 첫단계로서, UFV의 level flight를 위



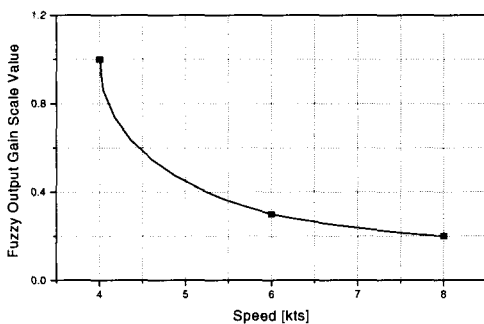
(그림 4) level flight를 위한 속도별 δ_{level}



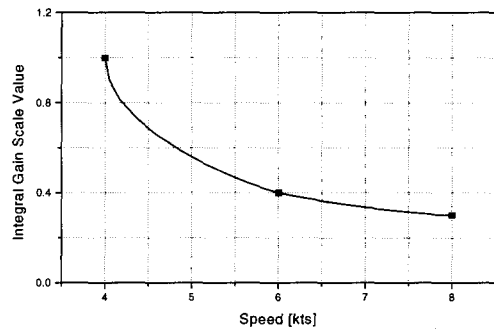
(그림 6) 피치부 적분게인의 스케일요소

한 바이어스 항인 δ_{level} 를 구하였다. 그림 4는 운용 속도 구간내의 일부 속도값인 4, 6, 8 knots에 대해서 level flight를 위한 바이어스 항인 δ_{level} 를 속도별로 구한후 이들을 커브피팅하여 운용 속도 전구간에서 보간능력을 갖는 보간함수에 의해 생성된 그래프이다. 이 그래프를 살펴보면 속도가 증가 할수록 δ_{level} 값은 점차로 포화되는 특성을 가지게 되는데 이는 속도의 증가로 인하여 Z_{\star} 에 의한 부력이 급격히 증가함과 동시에 제어판의 타력도 증가하게 되는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

그림 5, 6, 7은 각각 운용속도 구간내의 일부 속도값인 4, 6, 8 knots에 대해서 심도 제어부 퍼지출력계인 스케일 값, 피치 제어부 적분계인 스케일 값, 심도 제어부 적분계인 스케일 값을 속도별로 구한후 이들을 커브피팅하여 운용 속도 전구간에서 보간능



(그림 5) 심도부 퍼지출력계인의 스케일요소



(그림 7) 심도부 적분계인의 스케일 요소

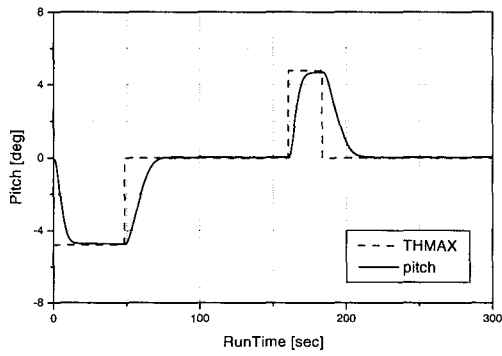
력을 갖는 보간함수들에 의해 생성된 그래프들이다. 이들 그래프를 살펴보면 속도가 증가 할수록 스케일 값들이 지수함수적으로 감소하는 값을 가지게 되는데 이는 속도의 증가로 인하여 제어판의 타력이 증가하게 되는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

그림 8~19는 설계된 퍼지-PID 심도 제어 기에 의한 UFV 심도제어 시뮬레이션 결과들인데 UFV 시스템에 요구되는 사양들을 모두 만족시키고 있음을 보여준다. 즉, 심도 및 피치제어 오차가 거의 없으며 파라미터 오차에 대한 강인성 또한 우수함을 보인다. 선미 수평타의 동작범위는 $\pm 30^\circ$ 인데 제어 명령각은 그 크기 및 변화량이 적은 연속적인 형태를 가짐을 알 수가 있다.

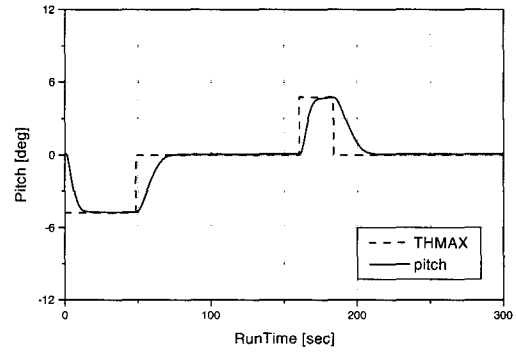
그림 20~25는 설계된 퍼지-PID 심도 제어기 및 보간함수를 사용한 UFV 심도제어 시뮬레이션 결과

인데, 역시 요구사항들을 모두 만족시키고 있음을 보여준다.

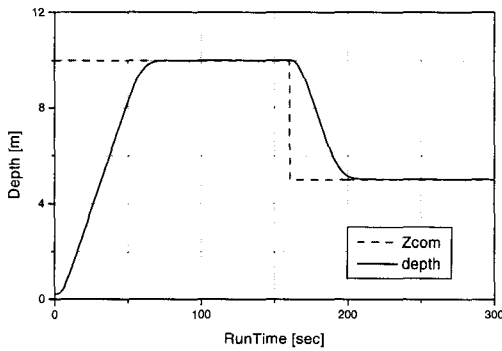
그림 10, 13, 16, 19, 22, 25에서 정상상태에서의 선미 수평타 명령각의 바이어스 성분은 δ_{level} 값이다.



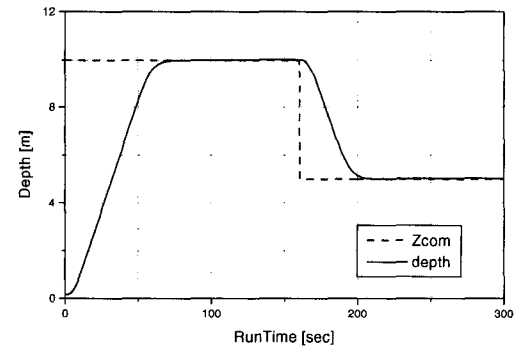
[그림 8] 피치 제어 성능 (4kts)



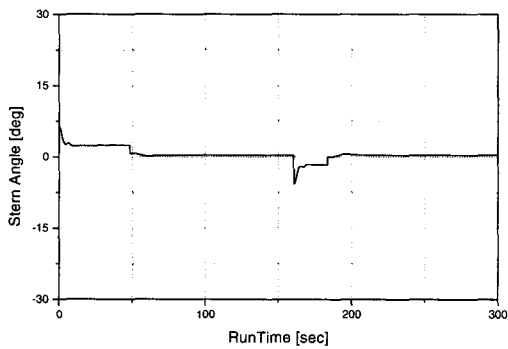
[그림 11] 피치 제어 성능 (4kts, $Z_{\dot{\star}}$ 50%변화)



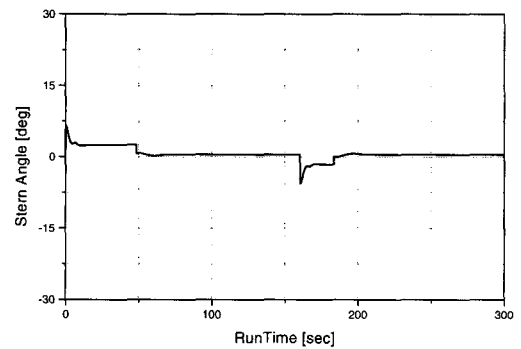
[그림 9] 심도 제어 성능 (4kts)



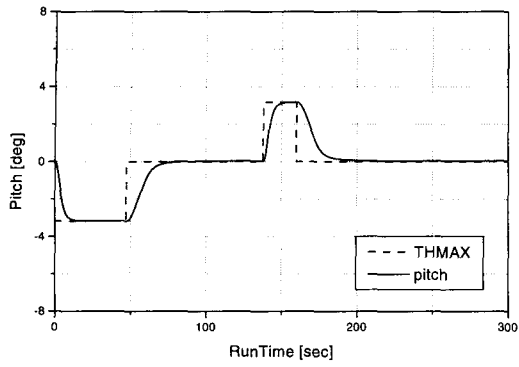
[그림 12] 심도 제어 성능 (4kts, $Z_{\dot{\star}}$ 50%변화)



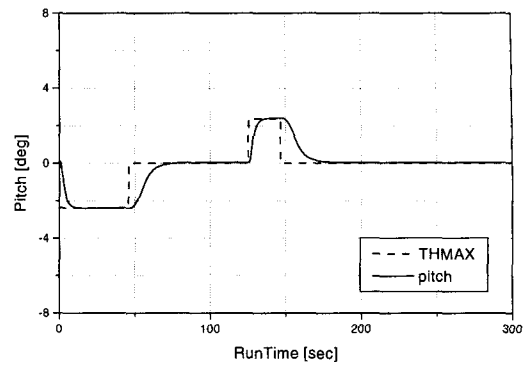
[그림 10] 선미 수평타 명령각 (4kts)



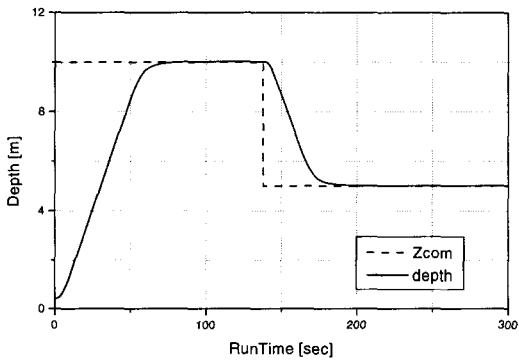
[그림 13] 선미 수평타 명령각 (4kts, $Z_{\dot{\star}}$ 50%변화)



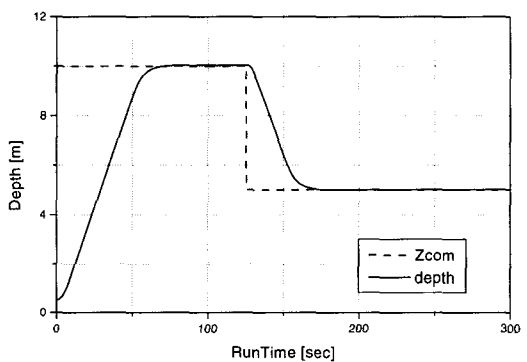
(그림 14) 피치 제어 성능 (6kts)



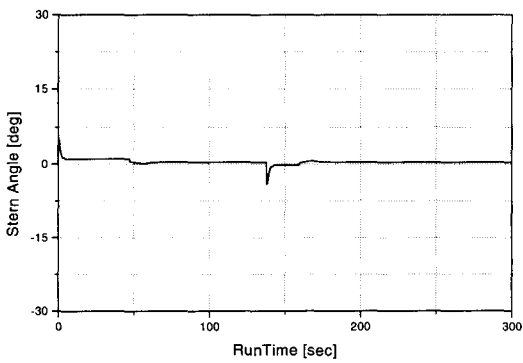
(그림 17) 피치 제어 성능 (8kts)



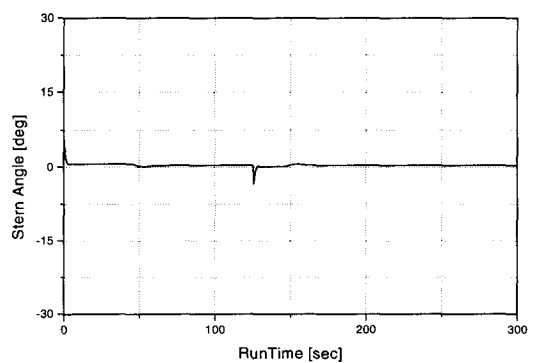
(그림 15) 심도 제어 성능 (6kts)



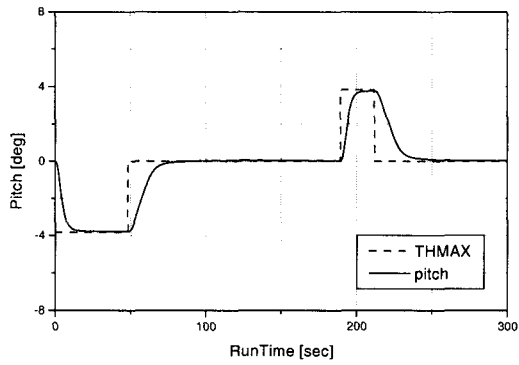
(그림 18) 심도 제어 성능 (8kts)



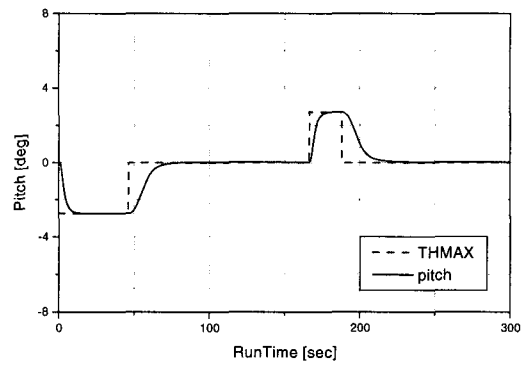
(그림 16) 선미 수평타 명령각 (6kts)



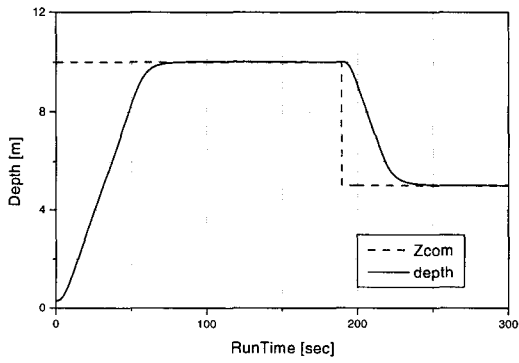
(그림 19) 선미 수평타 명령각 (8kts)



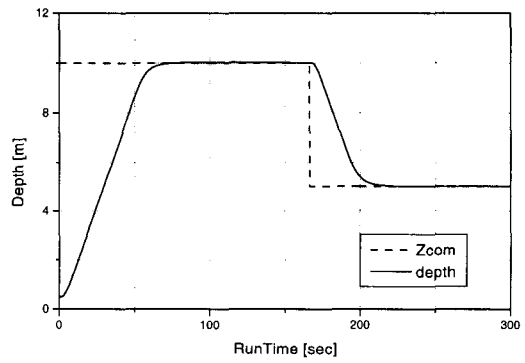
(그림 20) 피치 제어 성능 (5kts, 보간법 사용)



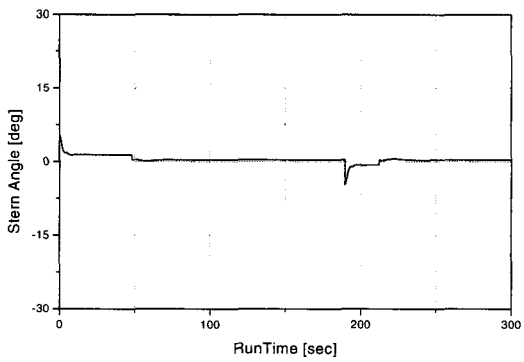
(그림 23) 피치 제어 성능 (7kts, 보간법 사용)



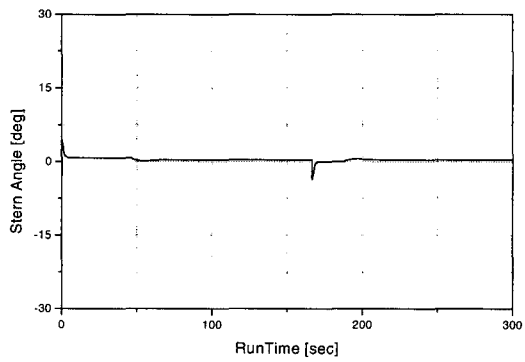
(그림 21) 심도 제어 성능 (5kts, 보간법 사용)



(그림 24) 심도 제어 성능 (7kts, 보간법 사용)



(그림 22) 선미 수평타 명령각 (5kts, 보간법 사용)



(그림 25) 선미 수평타 명령각 (7kts, 보간법 사용)

5. 결론

본 논문에서는 UFV의 심도 제어에 퍼지-PID 심도 제어기를 적용하여 연속적인 퍼지 제어 입력항 및 PID 보상 제어 입력항을 동시에 가지는 형태의 제어 입력으로 인하여 제어 시스템이 플랜트 파라미터의 변동이나 외란 등에 대하여 강인한 제어성능 및 정밀한 제어성능을 획득하였다. 그리고 일부 운용속도 구간에서 제어 성능을 결정하는 중요한 파라미터들을 도출한후, 운용속도 전구간에서 파라미터 보간능력을 갖는 보간함수를 설계 적용하여 UFV의 고유특성인 제어제인의 속도 의존성 문제를 해결하였다.

이를 통하여 제안된 퍼지-PID 제어기가 모델과 계측의 부정확성의 존재하에서도 시스템의 안정성과 성능을 유지시켜주는 효과적이고 현실적인 방법을 제공한다는 사실을 알 수가 있다.

나아가 제안된 UFV 심도 제어 기술은 강인한 제어 특성을 가지면서도 제어판 구동장치에 소음을 감소시켜 정숙성을 높일 수 있으므로 UFV 형태를 가지는 잠수함, 어뢰 등과 같은 수중무기의 유도 조종 장치의 설계에 적용하여 장시간의 수중항해시 반복 작업에 의한 승조원의 피로를 줄임과 동시에 피탐능력 줄여서 전투력의 증가 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. G. L. Bane and J. Ferguson, "The Evolutionary Development of the Military Autonomous Underwater Vehicle," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, pp. 60-88, June, 1987.
2. F. Busby and J. R. Vadus, "Autonomous Underwater Vehicle R&D Trends," *Sea Technology*, pp.66-73, May, 1990.
3. D. Bildberg, "Autonomous Underwater Vehicles: Current Activities and Research Opportunities," *Intelligent Autonomous System*, pp. 51-64, 1989.
4. D. Foxwell, "Autonomous Underwater Vehicles - the naval force multiplier," *Inter. Defense Review*, pp. 145-150, Feb., 1992.
5. R. C. Robinson, "National Defense Applications of Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-11, no, 4, Oct. 1986.
6. E. Eugene Allmendinger, "Submersible Vehicle System Design," *Published by The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, pp. 250-254, 1990.
7. Cornelius T.Leondes, *FUZZY THEORY SYSTEMS*, Academic Press, 1999.
8. F. Y. Hsu and L. C. Fu, "Adaptive robust fuzzy control for robot manipulators," *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 1994, Vol. 1, pp. 649-654.
9. Y. C. Hsu and G. Chen, "Design of a fuzzy PD-sliding mode adaptive controller," *Proceedings of the Joint Conference on Comput. & Intel. Sys., Durham, NC, March 2-5, 1997*, pp. 255-258.
10. H. S. Kim, Y. K. Shin, J. R. Choi, *The study of the Free Running Model test techniques*, ADD, NSDC-513-991281, 1999. 12.
11. Morton Gertler, Grant R. Hagen, *Standard Equation fo Motion for Submarine Simulation*, TASK, June 1967.
12. 이현찬, 채수원, 최영, "컴퓨터 그래픽스 및 형상 모델링," 시그마 프레스, 1996. pp. 261-266.