

만타형 UUV의 제어기 설계에 관한 연구

김형동* · 김준영** · 김시홍*** · †이승건

*,*** 부산대학교 대학원
** 한국해양대학교 조선기자재공학부 교수
† 부산대학교 조선해양공학과 교수

A Study of the Control System on the Manta-type UUV

Hyeong-Dong Kim* · Joon-Young Kim** · Si-Hong Kim*** · † Seung-Keon Lee

*,***Graduate school, Department of naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 627-706, Korea
**Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea
† Department of naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 627-706, Korea

요 약 : 본 연구에서는 만타 형상을 가진 무인잠수정(Manta-type unmanned underwater test vehicle)의 제어 성능 평가를 수행 하였다. 제어 방법으로서 PID제어, Fuzzy 제어가 적용되었으며, 6자유도 운동 수학적모델과 Matlab Simulink을 이용하여 조종 운동 시뮬레이션을 수행 하였다. 또한, 설계된 제어기로 수심제어 및 방위제어에 적용하여, 조류의 외란 하에서 제어 성능을 평가하였다.

핵심용어 : 만타형 UUV, PID 제어, Fuzzy 제어, 심도제어, 방위제어

Abstract : In this paper, automatic control system for the Manta UUV are constructed for the diving and steering maneuver. PID controller and Fuzzy controller are adopted in this system. Based on the 6DOF dynamic equation, simulation program has been developed using the Matlab. Using this program, depth control system and heading control system with tidal current are evaluated.

Key words : Manta-type Unmanned Underwater Test Vehicle, PID Controller, Fuzzy Controller, Depth Control, Heading Control

1. 서 론

무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle : UUV)은 심해 자원 채취 또는 지형 조사 등의 민간작업 및 기뢰제거와 정찰 같은 군사적 목적 등으로 사용되며, 수중과 같이 인간의 활동이 제한된 환경 속에서 특수 임무를 수행할 수 있는 매우 중요한 수단이다. 전통적으로 기뢰제거는 돌고래를 이용하거나, 특수 잠수부원이 폭발물을 설치하여 제거해왔으나, 이 방법은 매우 위험할 뿐 아니라 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 획기적인 대안으로서 UUV가 개발되었으며, 앞으로 위험해역 정찰과 기뢰 제거 등의 임무를 위해 UUV가 대체될 것이다. UUV는 해수에 의한 부품의 부식과 위치 파악 및 통신이 힘들며, 해류에 의하여 예정된 코스를 유지하기가 힘들다는 단점이 있다. 그러나 해저에서 임무를 수행하며 음향 및 자기 신호를 거의 발산하지 않으므로, 적에게 발견될 가능성이 매우 적어 앞으로 군사부분에서 큰 역할을 할 것이라 기대되며 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서 사용된 무인잠수정은 평소 모함에 부착되어

있다 유사시에 분리되어 기뢰제거와 정찰 같은 독자적인 임무를 수행하는 목적으로 설계 된 만타형상의 UUV이다. 따라서 심해에서 임무 수행 및 안전운항영역 확보를 위해서, 우수한 제어 성능을 갖는 제어기 설계와 정확한 조종성능 추정이 필요하다. 2장에서는 만타형 UUV의 형상과 제원, 그리고 6자유도 수학적모델을 구성하였고 이를 이용하여 3장에서는 심도와 방위제어 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 만타형상 및 무인잠수정의 수학적모델

2.1 Manta형 UUV의 제원

UUV의 정확한 조종성능 추정을 위해 비선형 수학적모델을 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션이 많이 쓰이고 있다. 이 수학적모델은 많은 유체력 미계수를 포함하고 있으므로 더욱 정밀한 예측을 위해서 실험을 통한 유체력 미계수들의 측정이 필요하다. 본 논문에서는 구속모형시험과 손경호[5] 등에 의해서 얻어진 결과 값을 이용하였으며 만타의 형상과 좌표계는 Fig.1과 같다.

* 연회원, khd7111@pusan.ac.kr 051)510-2755
** 연회원, jykim@hhu.ac.kr 051)410-4351
*** 연회원, kimsh@pusan.ac.kr 051)510-2755
† 교신저자 : 종신회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

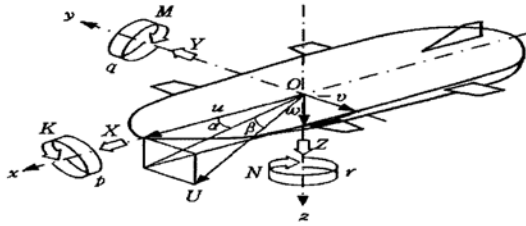


Fig. 1 Perspective view of Manta type

Table 1 Principal Dimensions of Manta-type UUV

| Parameter | | Dimensions | |
|----------------------|------------|---------------------|--------------------------|
| Fuselage | Length | 12.0m | |
| | Breadth | 4.4m | |
| | Height | 1.2m | |
| | Disp. vol. | 31.88m ³ | From nose |
| | centroid | 6.33m | |
| Upper Vertical Plate | Root Chord | 2.0m | |
| | Tip Chord | 0.45m | |
| | Span | 1.0m | |
| Lower Vertical plate | Root Chord | 0m | Contains Vertical Rudder |
| | Tip Chord | 3.5m | |
| | Span | 0.97m | |
| Horizontal Rudder | Root Chord | 1.0m | NACA0008 Section FORM |
| | Tip Chord | 0.8m | |
| | Span | 1.0m | |
| Vertical Rudder | Chord | 0.5m | |
| | Span | 0.6m | |

UUV의 6자유도 운동을 표현하기 위해서 위의 그림과 같이 지구 고정 좌표계와 선체 고정 좌표계, 2개의 좌표계를 사용하였다. UUV의 동체 측면에는 4개의 수평 타가 설치되어 있으며 수평면 내의 동안정성 향상을 위해 동체 선미 상부와 하부에 각각 수직판을 설치하였고, 하단부에는 방향 제어를 위해 방향 타가 설치 되어있다. 제시된 수중 운동체의 실험모델은 1/10의 축적으로 제작되었으며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

2.2 운동 조종 방정식

수중 운동체의 비선형 6자유도 운동방정식은 1967년 Gertler와 Hagen[11]에 의해 정리된 식과 Feldman[12]이 1979년에 보완한 식이 많이 사용되어지며, 기본 식은 다음과 같이 정리된다.

$$X = m \{ \dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q}) \} \quad (1)$$

$$Y = m \{ \dot{v} + ru - pw + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r}) \} \quad (2)$$

$$Z = m \{ \dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) \} \quad (3)$$

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m \{ z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(pq + \dot{r}) \} \quad (4)$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m \{ z_G(\dot{u} + qw - rv) + x_G(\dot{w} + pv - qu) + x_G z_G(p^2 - r^2) \} \quad (5)$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - m \{ x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G x_G(rq - \dot{p}) \} \quad (6)$$

여기서 X, Y, Z 와 K, M, N은 각각 x, y, z방향의 힘과 모멘트이며, u,v,w는 각 방향의 병진 속도, p,q,r은 각속도로, 다음과 같이 세분화된 각각의 힘과 모멘트의 합으로 표시할 수 있다.

$$F = F_{Gr} + F_B + F_H + F_C \quad (7)$$

$$M = M_{Gr} + M_B + M_H + M_C \quad (8)$$

여기서 침자 Gr, B, H, C는 각각 중력, 부력, Hull 유체력 및 제어 유체력을 의미하며, 이들은 순차적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

① 중력

$$F_{Gr} = [E]mgk' \quad (9)$$

$$M_{Gr} = r_G \times [E]mgk' \quad (10)$$

여기서 g는 중력가속도, k'는 지표고정좌표계에서 연직 하 방향의 단위벡터이고, [E]는 지표고정좌표계를 선체고정좌표계로 바꾸어 주는 변환매트릭스이다.

② 부력

$$F_B = -[E]\rho g \nabla k' \quad (11)$$

$$M_B = r_B \times ([E]\rho g \nabla k') \quad (12)$$

여기서 ρ는 유체의 밀도, ∇는 UUV의 배수용적, r_B는 중심의 위치벡터로서(x_B, 0, z_B)이다.

③ Hull유체력

점성감쇠유체력과 관성유체력을 포함하는 Hull 유체력은 실험을 통해 구한 값을 사용하였다.[5]

④ 제어 유체력

제어판의 작동에 기인하는 유체력과 추진력은 조종성 분야에서의 관례에 따라서 다음과 같이 표시한다.

$$F_C = \begin{pmatrix} X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{\delta\delta b} (\delta b)^2 + (1-t)(T_1 + T_2) \\ Y_{\delta} \delta \\ Z_{\delta b} \delta b + Z_{\delta s} \delta s + Z(HT) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$M_C = \begin{pmatrix} K_{\delta} \delta \\ M_{\delta b} \delta b + M_{\delta s} \delta s + M(HT) \\ N_{\delta} \delta + (1-t)(T_2 - T_1)y_p \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서 δ 는 방향타각 δ_b , δ_s 는 각각 선수, 선미 승강타각으로 본 시뮬레이션에서는 선미의 승강타만을 이용하였다. $X_\delta, Y_\delta, Z_\delta, K_\delta, M_\delta, N_\delta$ 는 승강타와 방향타에 의한 각방향의 힘과 모멘트를 의미한다. T_1, T_2 는 우현 및 좌현 프로펠러 추력을 나타내고, t 는 추력감소계수, y_p 는 우현 프로펠러 위치의 y 좌표이다. $Z(HT)$ 와 $M(HT)$ 는 Hovering thruster에 의한 추력과 모멘트를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 Hovering thruster에 의한 영향은 없다고 가정하였다.[5]

위의 수학적모델을 이용하여 Matlab/Simulink로 시뮬레이션 프로그램을 구성하였으며, Fig. 2와 3은 구성된 프로그램을 이용하여 조류의 유무에 따른 Turning과 Zig-Zag 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 조류의 속도는 만타의 형상으로 인해 ψ 의 경우 조류에 의해 영향을 비교적 덜 받는 것으로 나타나, 조류의 속도를 다르게 적용하였다.

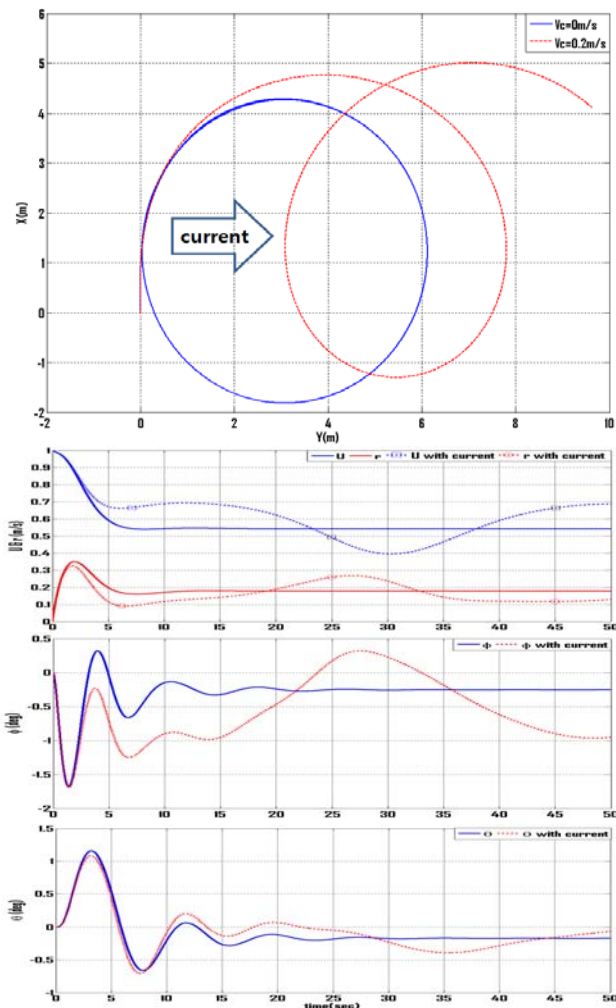


Fig. 2 Turning Test of the Manta-type UUV

조류는 선회각에 따라 대수속도를 계산하여 조류를 반영하였[10], Turning 시험의 경우 0.2m/s를 주었고 조류가 없는 경우, Advance는 4.28(m) Tactical diameter는 6.12(m)이며

조류가 있는경우 Advance의 경우 5.45(m) Tactical diameter의 경우 9.98(m)로 나타났다.

Zig-Zag 시험의 경우 1m/s로 조류가 흐른다는 것을 가정하였으며, 조류가 없는 경우 첫 번째 오버슈트는 13.03 두 번째 오버슈트는 10.94로 나타났으며, 조류가 있는 경우 첫 번째 오버슈트는 9.30 두 번째 오버슈트는 15로 나타났다. 선속은 1m/s로 Turning의 경우 조류에 의하여 UUV의 궤적이 밀리는 것을 볼 수 있다.

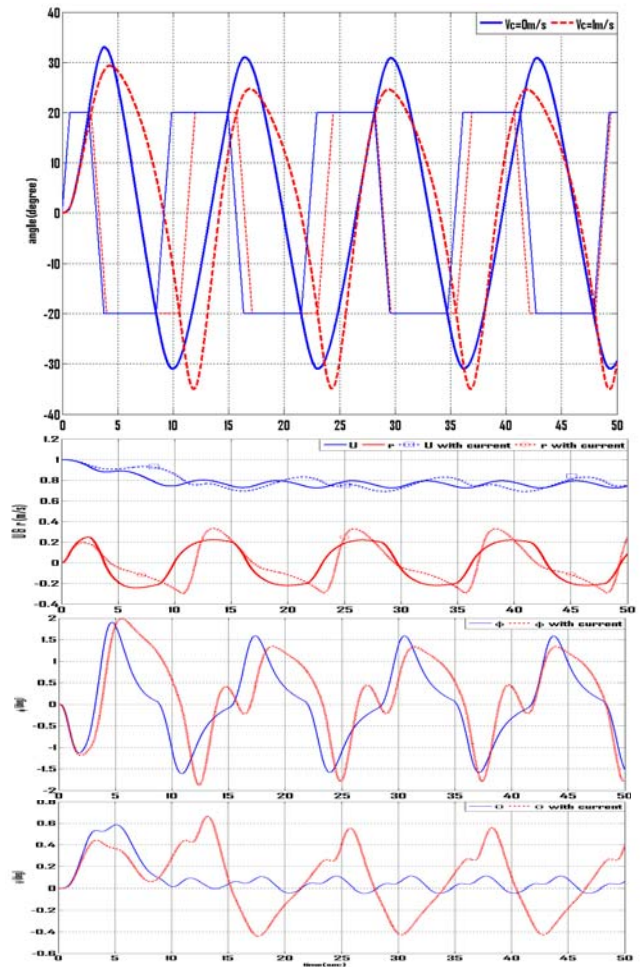


Fig. 3 Zigzag Test of the Manta-type UUV

3. 제어기 설계

본 논문에서 사용되어진 제어기는 고전 제어인 PID제어와 Fuzzy제어를 사용하였다. PID 제어는 비례·미분·적분 제어의 결합으로 P제어를 통해 목표 값에 빠르게 도달할 수 있으며, I제어에 의해서 정상상태 오차 보정, D제어에 의하여 외란에 대한 빠른 응답을 갖도록 할 수 있다. Fuzzy제어는 불확실한 동력학 모델이나 시스템의 대한 정보가 부족한 비선형 시스템의 제어에 적합하여[7], PID제어와 함께 시뮬레이션에 사용하였다. 승강타와 방향타의 최대 각은 $\pm 30^\circ$ 로 제한하였다.

3.1 심도 제어

심도제어에 사용된 PID제어기인 경우 적분기 와인드업을 피하기 위하여 식(15)을 이용하였으며, 수심 오차에 대한 P제어와 중동요에 대한 PD제어가 사용되었으며 사용되어진 계수는 과도응답법을 사용하여 반복과정을 통해 설계하였다.

$$\delta_s = K_{zp}(Z_d - Z(t)) + K_{\theta p}\theta(t) + K_{\theta d}\dot{\theta}(t) \quad (15)$$

Table 2 Fuzzy Rule for the Depth Control

| e \ \dot{e} | PB | PM | ZO | NM | NB |
|-----------------|-----|-----|------|------|------|
| PB | 1.0 | 1.0 | 0.4 | -0.8 | -1.0 |
| PM | 1.0 | 1.0 | 0 | -0.8 | -1.0 |
| ZO | 1.0 | 1.0 | 0 | -1.0 | -1.0 |
| NM | 1.0 | 0.8 | 0 | -1.0 | -1.0 |
| NB | 1.0 | 0.8 | -0.4 | -1.0 | -1.0 |

$$\delta^* = \frac{\sum_{i=1}^n CR_i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (16)$$

Fuzzy제어는 수심에 대한 오차와 오차의 미분 값을 입력항으로 하였으며, 오차가 0으로 수렴하는 Fuzzy제어 알고리즘을 유도하기 위한 Fuzzy 룰은 Table 2와 같다. 비퍼지화는 식(16)와 같이 무게 중심법을 사용하였으며, CR_i 는 추론 규칙 표에서 결론부의 충돌 위험도이며 α_i 는 n개의 추론 규칙 중 I번째 추론 규칙의 조건부에 의해 결정된 적합도이다.

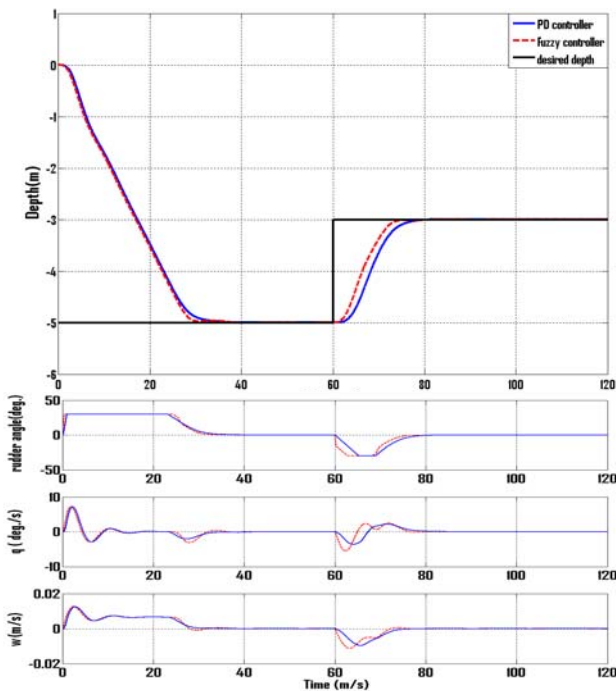


Fig. 4 Depth control for the Manta-type UUV

시뮬레이션 조건은 수심 5m로 60초 동안 유지한 후, 3m로 상승·유지하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 수심 제어의 결과 Fuzzy제어가 목표 수심에 조금 더 빠르게 추종하나 거의 유사한 성능을 보여주고 있으며, PD제어와 Fuzzy 제어 모두 오버슈트(Overshoot) 없이 목표 값을 추종하고 있는 것을 볼 수 있다.

3.2 방위 제어

방향제어에 사용된 PID제어기 또한 적분기 와인드업을 피하기 위하여 식(17)을 이용한 PD제어가 사용되었으며 계수는 과도응답법을 사용하여 반복과정을 통해 설계하였다.

$$\delta_R = K_P(\psi_d - \psi(t)) + K_D\dot{\psi}(t) \quad (17)$$

Fuzzy제어의 입력 항은 heading angle의 오차와 오차의 미분 값이며, 오차가 0으로 수렴하는 퍼지제어 알고리즘을 유도하기 위한 Fuzzy 룰은 Table 3과 같다.

Table 3 Fuzzy Rule for the Heading Control

| e \ \dot{e} | PB | PM | PS | ZO | NS | NM | NB |
|-----------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| PB | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.2 | -0.2 | -0.4 | -1.0 |
| PM | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0 | -0.4 | -0.4 | -1.0 |
| ZO | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 0 | -0.4 | -0.8 | -1.0 |
| NM | 1.0 | 0.4 | 0.4 | 0 | -0.8 | -0.8 | -1.0 |
| NB | 1.0 | 0.4 | 0.2 | -0.2 | -0.8 | -0.8 | -1.0 |

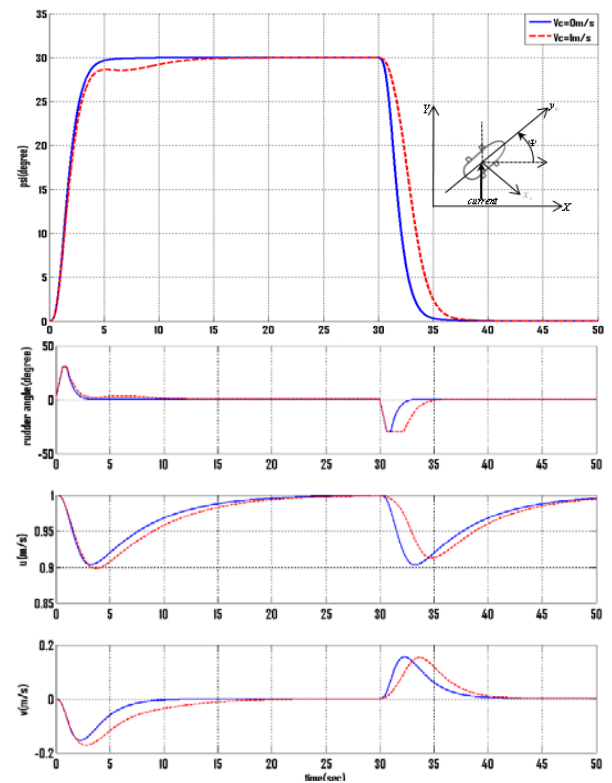


Fig. 5 Heading control using PD controller

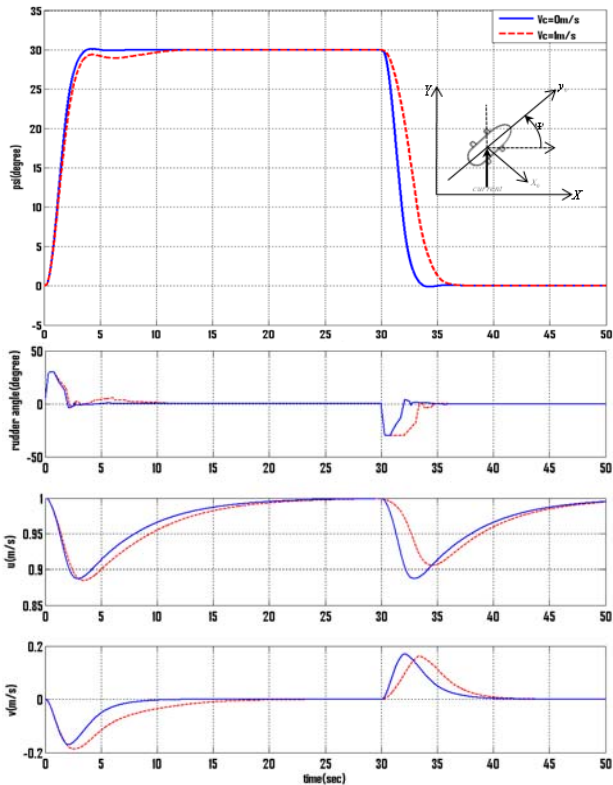


Fig. 6 Heading control using Fuzzy controller

심도제어와 마찬가지로 비퍼지화는 무게중심법을 사용하였다. 시뮬레이션 조건은 전속은 1m/s 방위각은 진행방향에서 30° 만큼 변화 시키고 다시 초기 각도로 돌아오도록 시뮬레이션 하였다. 조류는 Fig. 5와 6에 표시된 방향으로 1m/s로 흐른다는 것을 가정하였다

방위 제어 시뮬레이션 결과로부터 PD 제어기와 Fuzzy제어기 모두 조류로 인해 목표 값에 도달함에 있어 지연되는 것을 볼 수 있었다. Fuzzy제어의 경우 1.6°의 오버슈트(Overshoot)가 발생하나, 안정화 시간이 11초로 14초의 PD제어보다 빠르게 목표 값을 추종하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 만타형상 무인잠수정의 6자유도 운동 시뮬레이션 프로그램을 구성하였으며, 선미 방향타와 승강타의 PD제어와 Fuzzy제어를 통하여 심도 및 방위 제어를 하였다. 두 개의 제어기를 적용하여 조류에 대한 방위 제어성을 평가하였으며, 목표 값으로부터 이탈이 있었으나 목표 값에 원활히 도달하는 것을 확인하였다. 추후, 실험을 통하여 수직면의 조류 외란에 대한 제어 성능 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대

학교에 설치된 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김주한, 이승건, 이상의, 배철환(2008), 만타형 UUV의 심도 제어와 충돌회피에 관한 연구, 한국해양학회지 제 32권 6호, pp.407~452
- [2] 김현식(2000), Underwater Flight Vehicle의 퍼지-PID 심도제어에 관한 연구, 한국군사과학기술학회지 제3권 제2호
- [3] 변승우, 김준영(2010), 만타형상 무인잠수정의 운동성능 해석 및 제어기 설계를 위한 비선형 수학모델 개발, 한국과학기술학회논문지 Vol. 11, No.1 pp.21~28
- [4] 손경호, 이승건, 하승필(2006), Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 및 조종응답 특성, 대한조선학회 논문집 제 43권 4호 pp.33~413
- [5] 이승건, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호(2005), 만타형 수중운동체의 사항시험에 관한 연구, 한국해양학회지 제 29권 제8호 pp.679~684.
- [6] 이승건(2010), 선박의 내항성과 조종성, 부산대학교 출판부
- [7] 이원창, 강근택(1998), 무인잠수정의 퍼지제어, 한국동력기계학회지 제2권 제2호 pp. 47~54.
- [8] Fossen. T. I(1995), Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Willkey & Son.
- [9] Fossen. T. I(2002), Marine Control Systems, Norwegian University of Science and Technology Trondheim.
- [10] Feldman, J.(1979), "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equation of Motion", Report No. DtnSrDC/SPD-0393-09, Washington, D.C
- [11] Gertler, M., and Hagen, G.R(1967), Standard Equation of Motion for submarine Simulations, NSRDC Report No.2510
- [12] Ohtsu, K., Shoji, K., Okazaki, T.(1996), MINIMUM-TIME MANEUVERING OF A SHIP, WITH WIND DISTURBANCES, Control Eng. Practice. Vol4, No.3 pp. 385~392

원고접수일 : 2010년 10월 27일

심사완료일 : 2011년 5월 13일

원고채택일 : 2011년 6월 13일