

# 만타형 UUV의 심도제어와 충돌회피에 관한 연구

김주한† · 이승건\* · 이상의\*\* · 배철한\*\*\*

†, \*\*, \*\*\*부산대학교 대학원, \*부산대학교 조선해양공학과 교수

## A Study of the Depth Control System and the Collision Avoidance System for the Manta-type UUV

Ju-Han Kim† · Seung-Keon Lee\* · Sang-Eui Lee\*\* · Cheol-Han Bae\*\*\*

†, \*\*, \*\*\* Graduate school of Pusan National University, Pusan 627-706, Korea

\* Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 627-706, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 만타형 수중운동체의 수평 및 수직 방향에 대한 자동제어 및 충돌회피 시스템을 확립하였다. PID 제어이론, 퍼지 추론 등이 적용되었으며, 시뮬레이션에 사용된 6자유도 운동 방정식은 이론계산과 구속모형 시험에 의하여 확립하였다. PID제어에 의한 심도제어 결과가 제시되었으며, UUV의 충돌 위험도는 가상 소나 시스템을 이용한 퍼지 추론으로 추정하였다. 이를 이용하여 만타형 수중운동체의 심도제어 시스템 및 충돌회피 시뮬레이션 시스템이 개발되었다.

**핵심용어 :** 충돌회피, 만타형 UUV, 퍼지이론, 위험도, 6자유도, 장애물

**Abstract :** In this paper, the automatic depth control system and the collision avoidance system of the Manta UUV have been established in vertical and horizontal plane. The PID control theory and the Fuzzy theory are adopted in this system. The 6-DOF MMG model had been established by theoretical calculations and captive model test results. The depth control simulation results have been fully presented. The collision risks of the UUV had calculated by the fuzzy theory with the virtual sonar system. Finally, the automatic depth control system and the collision avoidance simulation system of Manta UUV have been fully developed and simulated.

**Key words :** Collision avoidance, Manta-type UUV, Fuzzy theory, Collision risk, 6DOF, Obstacles

### 1. 서 론

본 연구에 사용된 만타형 UUV는 가오리 형태의 선체를 가진 소형 무인잠수정이다. UUV의 선형은 잠수함(모함)의 일부로 전체 모함의 body 형상과 일치하며, 평상시에는 모함에 부착되어 있다가 필요시에 분리되어 임무를 수행하는 모델로 설계되었다. 만타형 UUV에 대한 선행 연구인 구속모형시험(이, 2005)과 운동수학모델 연구(손, 2006) 그리고 제어기 설계 연구(김, 2007)를 통하여 만타형 UUV의 6자유도 운동방정식이 정립되었다. 본 연구는 이러한 정립된 수학모델을 통해 심도·방위제어, 충돌회피 등의 시뮬레이션을 수행하여 UUV의 동적 특성을 확인하였다.

충돌회피 시스템은 거리계측 소나(sonar)에 의한 정보를 바탕으로 퍼지추론에 의해 충돌위험도(collision risk)를 추정하고, 장애물에 대해 방향별로 위험도를 고려하여 수평타 및 수직타의 제어를 통해 수직·수평면 회피를 판단하게 된다.

### 2. Manta-type UUV의 모델

#### 2.1 Manta-type UUV 모델

본 연구에서 채택한 무인잠수정은 구속모형시험을 통해 구해진 유체력 미계수를 사용한다. 따라서 설계 모델의 1/6 축척인 구속모형시험 모델과 같은 제원을 사용하였다. 설계 모델의 만타형 UUV의 형상은 Fig. 1과 같고 주요 제원은 Table 1과 같다.

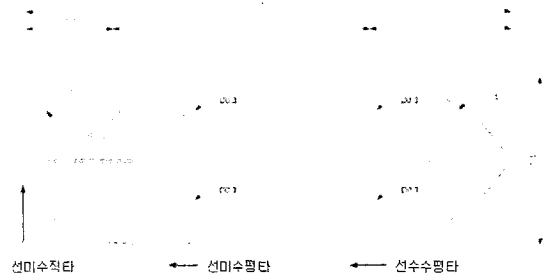


Fig. 1 Plane figure of Manta-type UUV

† 교신저자 : 김주한(정회원), kjh9461@pusan.ac.kr 051)510-2755  
\* 종신회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441  
\*\* 정회원, euui2000@pusan.ac.kr 051)510-2755  
\*\*\* 정회원, foch1130@pusan.ac.kr 051)510-2755

Table 1 Principal dimensions of Manta-type UUV

Parameter		Dimensions	
Fuselage	length	12.0 m	
	breadth	4.4 m	
	height	1.2 m	
	disp. vol.	31.88 m <sup>3</sup>	
	centroid	6.333 m	from nose
Upper vertical plate	root chord	2.0 m	
	tip chord	0.45 m	
	span	1.0 m	
Lower vertical plate	root chord	0 m	contains vertical rudder
	tip chord	3.5 m	
	span	0.97 m	
Horizontal rudder	root chord	1.0 m	NACA0008 section form
	tip chord	0.8 m	
	span	1.0 m	
Vertical rudder	chord	0.5 m	
	span	0.6 m	

2.2 좌표계 및 좌표변환

UUV에 사용된 좌표계는 Fig. 2와 같이 UUV를 강체(rigid body)로 가정하고 동체에 고정된 좌표계(동좌표계)를 O-xyz라 한다. 이러한 동좌표계는 지구고정좌표계로 변환할 필요가 있다. 일반적으로 Euler angle에 의한 좌표 변환은  $\theta = \pm 90^\circ$ 에서 특이점(singular point)이 존재하므로 대각도 경사시의 문제점을 사전에 방지하기 위해 쿼터니언으로 식 (1)과 (2)에 의해 좌표변환을 수행하였다.

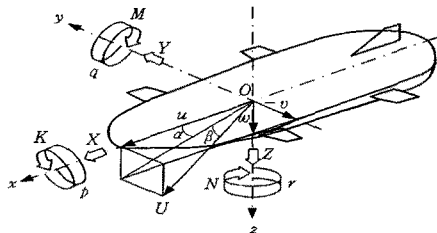


Fig. 2 Coordinate system

Linear velocity transformation (1)

$$\dot{\eta}_1 = E_1(e) v_1$$

$$E_1(e) = \begin{bmatrix} 1-2(\epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) & 2(\epsilon_1\epsilon_2 - \epsilon_3\eta) & 2(\epsilon_1\epsilon_3 - \epsilon_2\eta) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_3\eta) & 1-2(\epsilon_1^2 + \epsilon_3^2) & 2(\epsilon_2\epsilon_3 - \epsilon_1\eta) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_3 - \epsilon_2\eta) & 2(\epsilon_2\epsilon_3 + \epsilon_1\eta) & 1-2(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2) \end{bmatrix}$$

Angular velocity transformation (2)

$$\dot{e} = E_2(e) v_2$$

$$E_2(e) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\eta & -\frac{1}{2}\epsilon_3 & \frac{1}{2}\epsilon_2 \\ \frac{1}{2}\epsilon_3 & \frac{1}{2}\eta & -\frac{1}{2}\epsilon_1 \\ -\frac{1}{2}\epsilon_1 & -\frac{1}{2}\epsilon_2 & -\frac{1}{2}\epsilon_3 \end{bmatrix}$$

여기서,  $\eta_1 = [x, y, z]^T$ ,  $e = [\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3]^T$ ,  $v_1 = [u, v, w]^T$ ,  $v_2 = [p, q, r]^T$ ,  $E_1(e) \cdot E_2(e)$ 는 좌표변환행렬이다.

2.3 소나(Sonar)의 배치와 탐지영역

UUV의 nose 부분에 거리계측 소나를 장착하여 거리 정보와 방위각을 획득하는 것으로 가정하였으며, 소나의 탐지영역은 시뮬레이션 상의 모든 지역으로 설정하였다.

3. 제어 이론

제어 방법은 단순하면서 UUV의 운동 변화를 알아보기 쉬운 고전 제어인 PID 제어를 이용하였고, 적분기의 와인드업(wind-up) 현상을 방지하고자 적분 제어는 포함시키지 않았다. 방위 제어는 선미수직타로 행해지며, 심도 제어는 선미·선수수평타 중에서 선미수평타만을 이용하여 제어된다.

3.1 방위 제어

방위 제어는 수평면 제어로 다음 식(3)에 의해 선미수직타의 명령타각( $\delta_r$ )을 계산하게 된다.

$$\delta_r(t) = K_p(\psi_d - \psi(t)) - K_d r(t) \quad (3)$$

3.2 심도 제어

심도 제어는 수심 깊이(z)에 대한 P 제어와 종동요의 PD제어가 결합된 형태로서, 수직면 제어는 다음의 식(4)에 의해 선미수평타의 명령타각( $\delta_s$ )을 계산하게 된다.

$$\delta_s(t) = K_p(z_d - z(t)) - K_\theta \theta(t) - K_q q(t) \quad (4)$$

3.3 오토파일럿(Auto-pilot)

조종운동방정식에서 비선형항을 고려한  $r-\delta_r$ 과  $z, q-\delta_s$ 의 응답 모델을 이용하여 Fig. 3과 같이 오토파일럿(auto-pilot)에 의해 UUV의 방위 및 심도제어를 수행하게 된다.

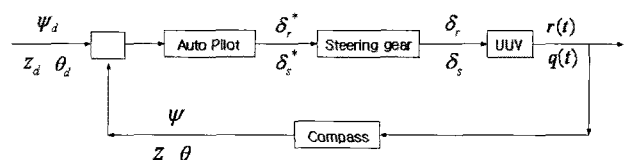


Fig. 3 Block diagram(auto-pilot)

$\psi_d, z_d, \theta_d$  : 목적지의 방위각, 심도, 종동요각  
 $\delta_r^*, \delta_s^*$  : 오토파일럿에 의한 명령타각(선미수직타, 선미수평타)  
 $\delta_r, \delta_s$  : 실제 UUV에 작동된 타각(선미수직타, 선미수평타)  
 $r(t), q(t), z$  : 선회각속도, 종동요각속도, 수심 깊이  
*compass* : 각속도에 반응해 적분값을 출력하는 일종의 적분기

Fig. 4는 만타형 UUV가 초기목적지를 거쳐 최종목적지로 이동하는 경우의 방위·심도제어 시뮬레이션 결과이다. 본 연구에서는 제어대상 시스템의 모델이 주어진 경우로 PID 제어기 계수는 과도응답법을 사용하여 반복과정을 통해 설계하였다.

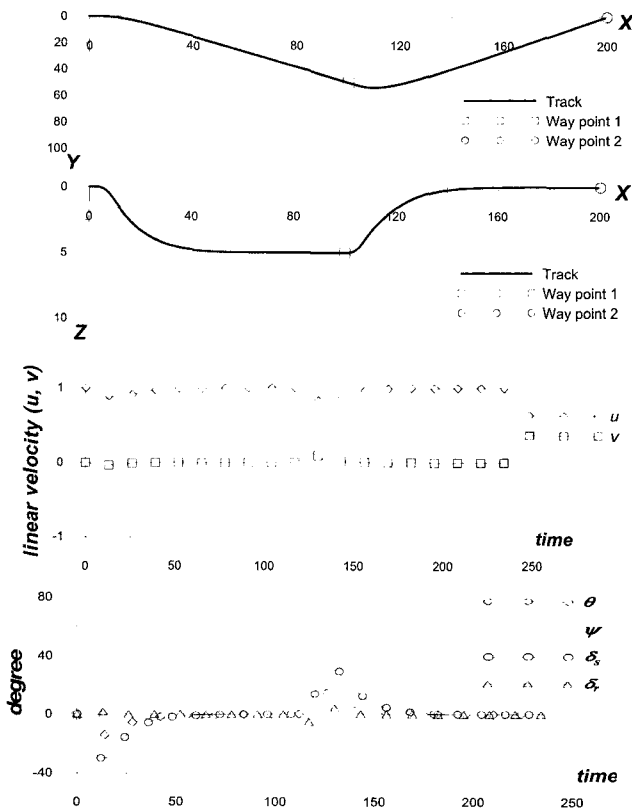


Fig. 4 Heading angle and Depth control

## 4. 충돌위험도 추론

### 4.1 충돌위험도(Collision Risk)

충돌위험도는 충돌회피 동작의 기준 값으로 -1부터 1사이의 값을 가지며, 퍼지추론에 의한 출력값에 해당한다. 위험도는 그 크기가 클수록 위험도가 높아짐을 의미하고, 음수 값의 위험도는 UUV가 장애물과의 거리가 가장 가까운 순간을 지나 현재 멀어지고 있는 상황을 가리킨다. 즉 UUV는 위험도의 크기에 따라 장애물과의 충돌 위험을 판단하게 되고, 그 위험도에 대해 조타각을 결정하여 피항 동작을 수행한다. 그리고 위험도가 음수가 되면 피항 동작을 종료하고 원래의 목적지를 향하여 이동한다.

### 4.2 입력변수

퍼지 추론을 통한 충돌위험도 추론에 사용되는 입력변수는 선박의 충돌회피 연구에 많이 사용되는 DCPA와 TCPA로 Fig. 5에서 그 개념을 설명하고 있다.

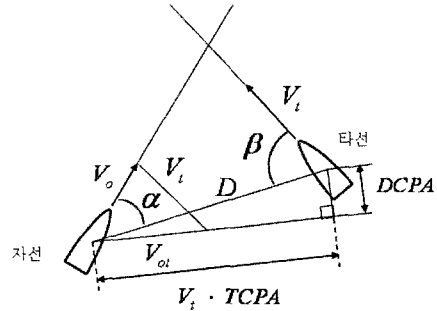


Fig. 5 DCPA and TCPA

DCPA(Distance of Closest Point of Approach)는 자선과 타선이 현재 상황(선수각, 항로)을 그대로 유지할 경우 두 선박이 가장 가까워 질 때의 거리를 말하고, TCPA(Time of Closest Point of Approach)는 가장 가까운 거리가 될 때 까지 걸리는 시간을 의미하며 식 (5)와 (6)으로 표현된다.

$$DCPA = \frac{D|V_o \sin \alpha - V_t \sin \beta|}{\sqrt{V_o^2 + V_t^2 + 2 V_o V_t \cos(\alpha + \beta)}} [m] \quad (5)$$

$$TCPA = \frac{D|V_o \cos \alpha + V_t \cos \beta|}{V_o^2 + V_t^2 + 2 V_o V_t \cos(\alpha + \beta)} [sec] \quad (6)$$

이는 정지해 있는 물체(장애물)에 대해서도 적용이 가능하며, 수평·수직면에 대해 운동하는 UUV의 경우도 Fig.6과 같이 적용이 가능하다.

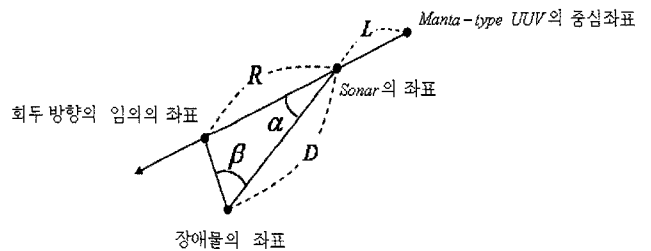


Fig. 6 Relative angles

여기서, R은 소나에서 회두 진행방향으로의 임의의 거리이고, L은 UUV의 선체중심과 소나 사이의 거리이며, D는 소나에 의해 측정된 UUV와 장애물 사이의 거리이다. 소나에서 측정된 거리와 방위 정보를 바탕으로 좌표변환을 통해 장애물의 좌표와 상대각을 알 수 있게 되고 입력변수 DCPA와 TCPA를 구할 수 있다.

4.3 퍼지 추론

퍼지 이론은 “안전하다” 혹은 “위험하다” 등과 같은 애매한 표현들을 수학적으로 엄밀하게 다루기 위하여 제시된 것으로 본 연구에서는 Kazuhiko Hasegawa(1987)의 퍼지추론을 이용한다.

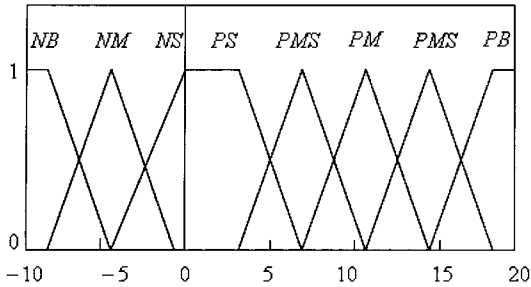


Fig. 7 Membership function of TCPA / ( L / U )

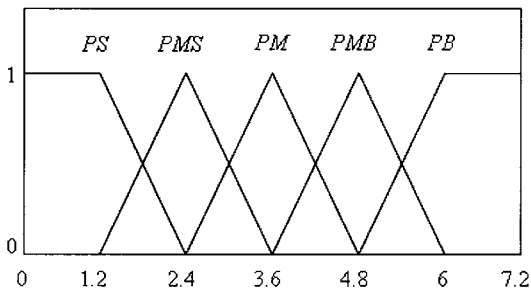


Fig. 8 Membership function of DCPA / L

Table 2 Fuzzy label

S	small
M	medium
B	big
P	positive
N	negative

즉, 앞서 구한 DCPA와 TCPA를 선박의 길이와 속도로 무차원화하여 fig.7과 fig.8을 통해 각각의 소속도(degree of membership)를 구하고, 퍼지 추론을 통해 -1부터 1까지의 값을 가지는 충돌위험도를 추정하게 된다.

4.4 위험도 추론

입력변수 DCPA와 TCPA의 소속도는 Table.3의 추론 규칙을 사용하여 충돌위험도가 추정된다. 보통 결론부의 추론 규칙도 삼각형의 형태로 주어 추론을 수행하지만, 충돌위험도 추론 및 개념의 단순화를 위하여 Table. 3과 같이 하나의 정확한 값(singleton)만을 사용하여 충돌위험도를 추정하였다.

Table 3 Reasoning rules of degree of collision risk

		T C P A							
		NB	NM	NS	PS	PMS	PM	PMB	PB
D C P A	PS	-0.2	-0.6	-1.0	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
	PMS	-0.2	-0.2	-0.6	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2
	PM	-0.2	-0.2	-0.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2
	PMB	-0.2	-0.2	-0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
	PB	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

즉, 최종적으로 추정되는 충돌위험도는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\text{Collision Risk} = \frac{\sum_{i=1}^n CR_i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (7)$$

$CR_i$  : 추론 규칙표에서 결론부의 충돌 위험도

$\alpha_i$  : n 개의 추론 규칙 중 i 번째 추론 규칙의 조건부에 의해 결정된 적합도

4.5 최대 충돌위험도

UUV는 여러 장애물에 대해 다수의 위험도를 가지게 되므로 충돌회피를 위한 기준이 되는 단일 값이 필요하다. 따라서 다수의 위험도 중에서 가장 큰 값을 최대 충돌위험도라 정의하고 적용하였다.

5. 회피 동작

5.1 회피 과정 및 타각

UUV의 충돌 위험도가 0.6 이상이면 회피 동작을 시작한다. 그리고 장애물과의 위험도가 감소하여 음수 값이 되면 피항을 종료하고 원래의 목적지로 향하도록 하였다.

UUV가 이동할 때 선미수평타각( $\delta_s$ )과 선미수직타각( $\delta_r$ )의 범위는  $\pm 30^\circ$  이며, 회피시는 최소  $1^\circ$  에서 최대  $20^\circ$  로, 충돌 위험도에 비례하도록 다음의 식(8)을 사용하였다.

$$\delta^* = \delta_{\min} + (\delta_{\max} - \delta_{\min}) \times \frac{CR - CR_{\min}}{CR_{\max}} \quad (8)$$

$\delta^*$  : 명령타각( $\delta_s$ 와  $\delta_r$ 에 대해 각각 (8)식을 적용)

$\delta_{\min}$  : 최소 타각

$\delta_{\max}$  : 최대 타각

$CR$  : 현재의 위험도

$CR_{\min}$  : 최소 위험도

5.2 장애물 형상에 대한 충돌위험도

소나에 의한 장애물의 방위와 거리정보를 바탕으로 장애물 평면을 등간격으로 나누면 각각의 점에 대한 충돌위험도와 최대충돌위험도를 계산할 수 있다. 우선 수평·수직면 회피를 위한 4가지 방향을 고려하여 Fig.9와 같이 최대 충돌위험도를 가지는 지점을 기준으로 상하좌우 4가지 방향으로 위험도의 합을 구할 수 있다.

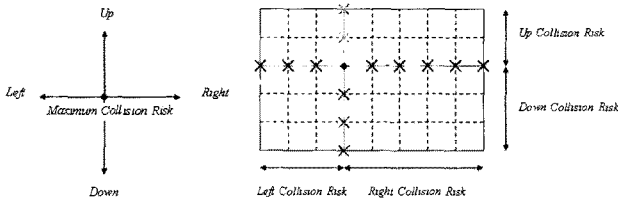


Fig. 9 Maximum collision risk point

5.3 방향별 충돌위험도에 따른 피항률

UUV의 회피 방향은 방향별로 충돌위험도의 합이 가장 작은 방향이 효율적이므로 Table 4와 같은 피항률을 확립하였다.

Table 4 Avoidance rules

Direction	Minimum value	Order angle
Right	Right Collision Risk	$+\delta_r$
Left	Left Collision Risk	$-\delta_r$
Up	Up Collision Risk	$+\delta_s$
Down	Down Collision Risk	$-\delta_s$

6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시나리오는 크게 2가지로, 만타형 UUV가 간단한 평판 형태의 장애물에 대하여 진행할 때, 방향별로 적절한 회피 동작을 수행하는지를 검증하였다. 시뮬레이션에서는 Table 5와 같이 실선 제원의 1/6 축척인 UUV모델을 사용하고, 추진력은 정상 직진시의 저항력과 동일하게 가정하였다.

Table 5 Principal dimensions of Manta type UUV

(Simulation)

Parameter	Dimension
Speed	1.0 m/s
Length	2.0 m
Breadth	0.73 m
Height	0.2 m
disp. vol.	0.14760 m <sup>3</sup>
centroid	1.0555 m

Fig. 10과 같이 장애물은 가로·세로 3.8m×3.6m 직사각형 평판 형태를 가지며, UUV는 PTP(point to point)제어로 초기 위치에서 목적지까지 이동하는 과정에서 장애물과 조우하도록 처음에 일정한 수심까지 심도 제어로 하강한 후 직선 경로로 장애물의 오른쪽과 아래쪽 지점을 향하도록 하였다.

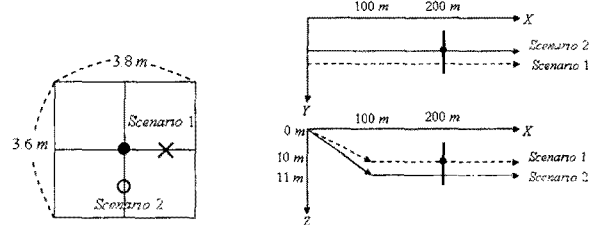


Fig. 10 Simulation scenario

6.1 시나리오 1

시나리오 1에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig.11과 같다. UUV가 수심 10m로 하강한 후 직선 경로로 이동한다. 이때 장애물에 가까워짐에 따라 충돌위험도가 증가하며, 위험도가 0.6 이상이 되면 방향별 피항률에 따라 위험도의 합이 작은 오른쪽 방향으로 선미수직타에 명령타각을 ( $+\delta_r$ ) 주어 회피 동작을 한다.

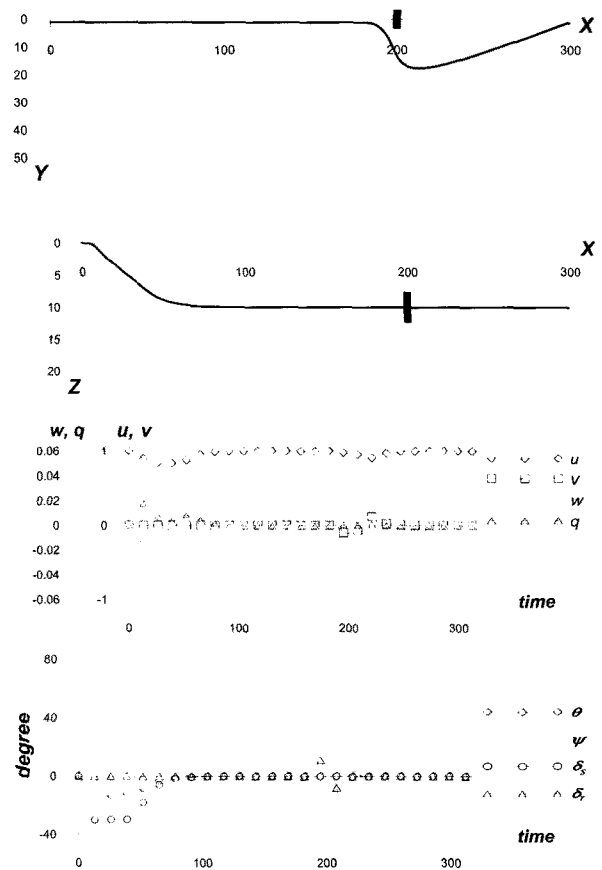


Fig. 11 Scenario 1

6.2 시나리오 2

시나리오 2에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig.12와 같다. UUV가 수심 11m로 하강한 후 직선 경로로 이동한다. UUV는 장애물이 가까워짐에 따라 위험도가 증가하며, 충돌 위험도가 0.6 이상이 되면 방향별 피항률에 따라 위험도의 합이 작은 아래쪽 방향으로 선미수평타에 명령타각을 ( $-\delta_s$ ) 주어 회피 동작을 한다.

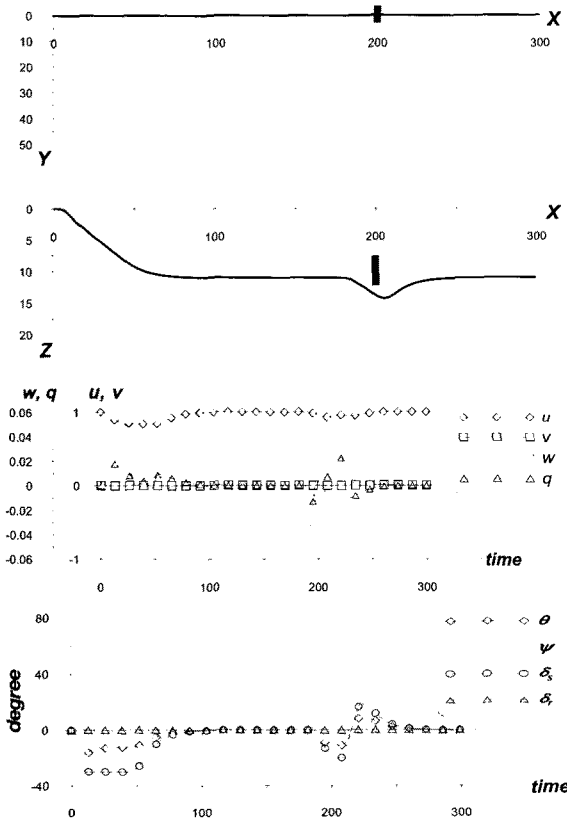


Fig. 12 Scenario 2

7. 결 론

본 연구는 만타형 UUV의 2차원 평판 장애물에 대한 충돌 회피 시스템을 적용하고 검증하였다. 시뮬레이션의 결과로 UUV가 장애물에 대해 방향별로 효율적인 회피가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 연구 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선미수평타 및 선미수직타의 PD제어를 통해 만타형 UUV의 방위 및 심도제어가 원활히 이루어졌다.
- (2) 퍼지이론을 통한 최대 충돌위험도 추론으로 만타형 UUV의 충돌회피가 성공적으로 수행되었다.
- (3) 만타형 UUV의 수평·수직면에 대한 방향별 피항률을 확립하였다.

추후, 다수 방향의 회피률을 추가하여 복잡한 형상에 대한 충돌 회피와 최대 충돌위험도를 통한 3차원 형상의 장애물에 대한 충돌 회피도 가능할 것으로 보여진다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대학교에 설치된 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 변승우, 김준영, 손경호, 이승건(2007), "만타형 UUV의 모델링 및 제어기 설계에 관한 연구", 수중로봇기술연구회 2007년 추계워크샵, pp. 24~28.
- [2] 손경호, 이승건, 하승필(2006), "Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 및 조종응답 특성", 대한조선학회 논문집 제 43권 제 4호, pp. 399~413.
- [3] 손남선, 이기표, 이상무, 여동진(2001), "수중운동체의 충돌회피시스템에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 제 38권 제 4호, pp. 23~29
- [4] 이승건, 권배준(2000), "선박의 충돌회피를 위한 자동제어에 관한 기초적 연구", 한국항해항만학회지 제 26권 제 1호, pp. 8~14.
- [5] 이승건(2004), "선박운동·조종론", 부산대학교 출판부
- [6] 이승건, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호(2005), "만타형 수중운동체의 사항시험에 관한 연구", 한국항해항만학회지 제 29권 제 8호, pp. 679~684.
- [7] 이승건, 이상의, 손경호(2007), "Manta형 UUV의 유체력 미계수 추정 및 수학모델 정립에 관한 연구", 수중로봇기술연구회 2007년 추계워크샵, pp. 18~23.
- [8] 이판목, 전봉환, 이종무(2003), "자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 비주얼 서보 제어 알고리즘", 한국해양공학회지, 제 17권 제1호, pp. 1~7.
- [9] 임남균(2003), "선박충돌회피지원 시스템을 위한 자동제어", 한국항해항만학회지, 제 28권 제1호, pp. 375~381.
- [10] 윤지현, 이승건, 임남균(2005), "다수선박의 충돌회피를 위한 자동제어에 관한 연구", 한국항해항만학회지, 제 29권 제1호, pp. 29~34.
- [11] Lee, H. J. and Rhee, K. P. (2001), "Development of Collision Avoidance System by Using Expert System and Search Algorithm, Int.Shipbuild.Progr.", no. 3, pp. 197~212.
- [12] Hasegawa, K. and Kouzuki, A.(1987), "Automatic Collision Avoidance System for Ships using Fuzzy Control," The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
- [13] T. I. Fossen(1995), "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons.

원고접수일 : 2008년 7월 1일  
 심사완료일 : 2008년 8월 26일  
 원고채택일 : 2008년 8월 28일