

# 광학식 유도장치를 이용한 자율 무인잠수정의 수중 도킹 종단 유도 제어

최동현\*† · 전봉환\*\* · 박진영\*\*\* · 이관목\*\* · 김상현\* · 오준호\*\*\*

\*인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공

\*\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양탐사장비연구사업단

\*\*\*한국과학기술원 휴머노이드 로봇 연구 센터

## Terminal Guidance Control for Underwater-Docking of an AUV Using Visual Guidance Device

DONG-HYUN CHOI\* · BONG-HUAN JUN\*\* · JIN-YEONG Park\*\*\* · PAN-MOOK LEE\*\* · SANG-HYUN KIM\* · JUN-HO Oh\*\*\*

\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, School of Mechanical Engineering, INHA Univ., Incheon, Korea

\*\*Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

\*\*\*Humanoid Robot Research Center, KAIST, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** 자율무인 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle), 광학식 유도장치, Underwater Docking System(수중도킹시스템), Visual Servoing, Terminal Guidance Control(종단유도제어), Simulation

**ABSTRACT:** The more deeply the researches make progress in ocean researches including the seabed resource investigation or the oceanic ecosystem investigation, the more important the role of UUV gets. In case of study on the deep sea, there are difficulties in telecommunications between AUV and ships, and in data communication and recharging. Therefore, docking is required. In AUV docking system, the AUV should identify the position of docking and make contact with a certain point of docking device. MOERI (Maritime & Ocean Engineering Research Institute), KORDI has conducted the docking testing on AUV ISIMI in KORDI Ocean Engineering Water Tank. As AUV ISIMI approaches the docking device, it is presented that attitude is unstable, because the lights Which is on Image Frame are disappeared. So we fix the rudder and stern, if the lights on Image Frame are reaching the specific area in the Image Frame. In this paper, we intend to solve the problems that were found in the testing, which, first, will be identified via simulation.

### 1. 서 론

해저 자원 개발이나 해양 생태계 조사 및 관측, 해저구조물 추적과 같은 해양 조사를 위한 무인 잠수정에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 해양 조사시 심해저일 경우엔 AUV나 ROV같은 무인잠수정은 데이터의 송수신과 전력공급과 같은 통신과 전력, 테더 결합과 해수면 지원 선박의 위험과 같은 상황에서 많은 어려움을 겪고 있다. 이 경우 무인잠수정의 분실로까지 이어질 수 있다. 이를 위해 해저 구조물이나 다른 무인 잠수정과 도킹으로 이러한 어려움을 해결하고 있다. 특정 상황이 발생하여도 무인잠수정을 인양할 필요가 없어, 비용과 시간에 있어서 경쟁력을 가질 수 있다. (이관목 외, 2003)

현재 세계 많은 무인잠수정 연구기관들이 도킹 시스템에 대한 연구를 수행 중이다. 해양에서는 내부와 외부 모두 예측 가능하지 못하는 상황이 많이 연출되고, 정확한 모델링이 불가능하기에 여러 환경을 만족하는 도킹 시스템이 요구 될 것이다.

한국해양연구원에서는 이심이 (ISIMI : Integrated Submersible for Intelligent Mission Implementation)라는 소형 자율 무인잠수정의 도킹 시스템에 대한 연구가 진행 중이다. 이 시스템은 소형 자율 무인잠수정의 CCD 카메라가 광학식 도킹 장치의 여러 개의 광원을 인식하여 소형 자율 무인잠수정이 유도되는 것이다. 올해 AUV 이심이의 도킹 시스템을 연구하여 수조 실험으로 검증을 하였다.

이번 논문에서는 수조 실험에서 이심이의 도킹 중 나타나는 자세 불안정을 개선시키는 방법을 제안하고자 한다. 실험 일정을 고려하여 이번 논문에서는 시뮬레이션으로 먼저 검증하고자 한다.

교신저자 최동현† : 인천광역시 남구 용현동 253 인하대학교  
Tel : 032-860-7344 E-mail : choidh99@hotmail.com

Table 1 Specification of ISIMI

길이(Length)	1200 mm
무게(Weight)	19.1 kg
직경(Diameter)	170 mm
부력(Buoyancy)	20.12 kg
배수량(Displacement)	0.0218 kg
최고속도(Max. Speed)	4 knots
최대깊이(Max. Depth)	20 m

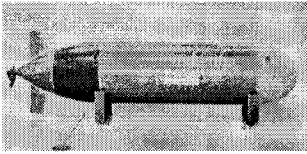


Fig. 1 이십이

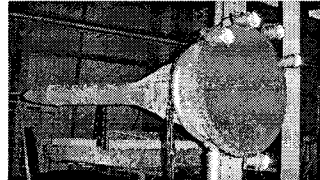


Fig. 2 The Docking device

## 2. 이십이의 도킹 시스템

### 2.1 이십이 및 도킹 장치의 제원

한국해양연구원의 이십이는 Fig. 1과 같이 전장이 1200mm, 직경이 170mm인 소형 자율 무인잠수정이다. 도킹 장치는 Fig. 2와 같은 모습으로 입구의 직경은 1,100mm이고, 안쪽 도킹 부분의 직경은 202mm 그리고 장치된 전등의 직경은 100mm이다. Table 1은 AUV 이십이의 자세한 제원을 나타내고 있다.

### 2.2 이십이의 도킹 시스템

이십이의 도킹 시스템은 먼저, 이십이가 도킹장치에서 15~25m 떨어진 곳에서 도킹을 위해 광원을 찾는다. Fig. 2에서 보듯이 도킹 장치의 바깥쪽에 장치된 광원 발생 장치에서 광원이 나오는데, 이십이 선수부 중앙에 위치한 CCD 카메라가 이 광원을 인식하여 이십이의 중앙 컴퓨터로 전송을 한다.

CCD 카메라가 인식하는 화면(이미지 화면)은 Fig. 3 (a)와 같이 지정된 웹 제어창으로 출력된다. 이십이는 CCD 카메라를 통해 들어오는 영상신호로부터 광원들을 인식하고 이 광원들이 이루는 원의 중심점을 추정한다. 이는 Fig. 3 (b)와 같이 중심점이 이미지 화면의 중앙에 오도록 하는 제어(광원들의 중심과 이미지 화면 사이의 거리(L)가 0이 되는 제어)를 통하여

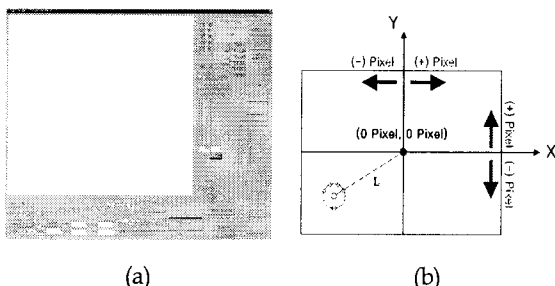


Fig. 3 Web Window which is received Visual Signal(a) and Visual Input Signal(b)

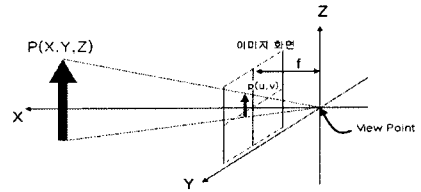


Fig. 4 Coordinate frame for the camera system

이십이가 도킹 장치 중앙에 성공적으로 도킹을 할 수 있게 하는 시스템이다.

### 2.3 이십이의 CCD 카메라 시스템

광학식 방법을 이용한 설계를 위해서는 입력되는 영상신호에 대한 수학 모델이 필요하다. 따라서 카메라 좌표계에서의 실제 물체의 좌표와 이미지 화면 내에서의 물체의 좌표를 알아야 할 것이다.

Fig. 4와 같이 먼저, CCD 카메라 렌즈를 원점으로 하는 CCD 카메라 고정좌표계를 두고, 도킹 장치의 광원을 나타내는 점의 좌표는 P(X,Y,Z)으로 이는 고정점이다. 이미지 화면으로 출력되는 광원의 점의 좌표 p(u,v)는 AUV 이십이의 운동에 따라 달라질 것이다. 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같이 (Hutchinson et. al. 1996) 나타낼 수 있다.

$$p(u,v) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{f}{X} \begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 u와 v는 이미지 화면 내에서의 CCD카메라 좌표에 대한 광원의 y와 z좌표이고, (X,Y,Z)는 CCD카메라 좌표에 대한 실제 광원의 x,y,z 좌표이다. 또한, f는 CCD 카메라의 초점거리로써 약 0.9mm이다.

### 2.4 이십이의 수조 도킹 실험

올해 5월에 한국해양연구원 해양공학 수조에서 이십이의 도킹 실험이 진행하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 이십이에 입력되는 이미지화면에서의 광원이 중심(0 Pixel, 0 Pixel)을 향해 제어가 되다가 도킹 장치에 가까이 가게 되면(실험 후 약 20초 이후), 이미지 화면 상에 나타나는 도킹 장치의 광원이 커지고, 광원들 사이의 거리가 멀어져 이미지 화면 밖으로 나가는 확률이 높아지고, 이로 인하여 추종하던 광원을 잃어 자세가 불안정해져서 급격한 자세 변화를 가져오는 것을 확인할 수 있었다.

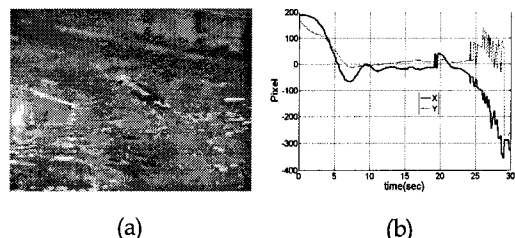


Fig. 5 Docking Experiment(a) and Result(pixel/s) (b)

### 3. 이십이 도킹 시스템의 성능 개선

#### 3.1 이십이 시스템 모델링

이십이의 제어를 설계하기 위하여 선형화된 모델링이 선행되어야 한다. 이를 위해서 실험을 통해 구한 여러 유체계수 및 유체력 중 2차 이상의 고차항과 교차유동항 그리고 입력할 수 없는 항은 무시하여 선형화 하였다.(마성진, 2006) 수평, 수직 운동시 연성운동은 없으며, 수평운동시 yaw를, 수직운동시 pitch를 고려하였고, 속도는 일정하다고 고려하였다. 이 때, 수평운동과 수직운동을 각각 나누어 고려하였다. 이십이의 제어를 바탕으로 하여 수학적 선형 모델을 만들고, 이를 상태방정식으로 나타내었다.

< Horizontal >

$$(I_z - \frac{\rho}{2} l^3 N_r) \dot{r} = \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \delta_R, \quad \psi = r \quad (2)$$

< Vertical >

$$(I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) \dot{q} = (\frac{\rho}{2} l^4 M_q) q - z_G W \theta + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_S} \delta_S$$

$$\dot{\theta} = q$$

#### 3.2 이십이 시스템 모델링의 제어기법 - PID와 LQR

현재까지 이십이는 수평제어, 수직제어시 PID 제어를 하고 있다. PID 제어시 전달함수 C와 입력 u는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

이번 시뮬레이션에서는 추가로 레귤레이터를 이용하였다. 그래서 PID제어와 LQR 제어와의 제어 성능 비교를 추가하였다. LQR 제어기법은 시스템의 상태방정식을 구축조건으로 하여 주어진 목적함수(cost function)를 최소화하는 기법으로 목적함수 J는 식(8)과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x' Q x + u' R u) dt \quad (8)$$

#### 3.3 성능 개선

Fig. 6에서 보듯이 현재 이십이의 도킹 시스템은 광원들의 중심이 이미지 화면의 중심 Pixel로 가는 제어(L이 '0'으로 가는 제어)가 이루어지고 있다. (a)~(d)는 광원을 찾아 이미지 화면에 나타나는 모습이다. (a)와 (b)는 실험에서 이미지 화면내의 광원 추정 알고리즘을, (c)와 (d)는 이번 논문의 시뮬레이션에서 고려한 이미지 화면내의 광원 추정 알고리즘이다. (b)와 같이 비히클과 도킹 장치의 거리가 가까워지면 이미지 화면상에서 나타나는

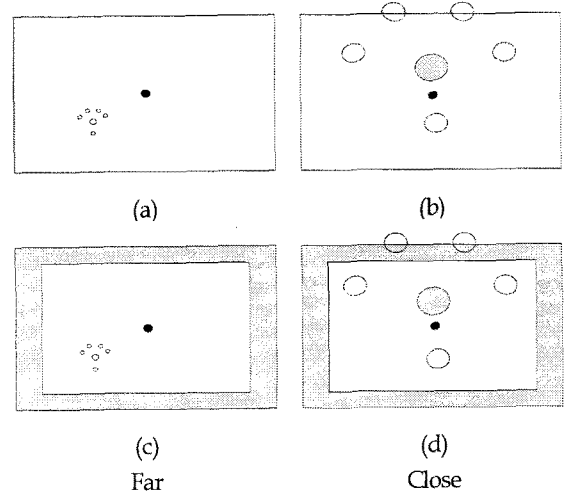


Fig. 6 Image Frame of Experiment(a),(b) and Proposed Image Frame(c),(d)

광원의 커지거나 광원들 사이가 멀어지거나 갑자기 이미지 화면에서 사라지는 것 때문에 이미지 화면에서 광원을 잃어 추종하던 광원을 잃었다. 따라서 본 연구에서는 광원 추정 알고리즘을 제안하고자 하는데, 이는 임의의 Pixel 영역을 두어((c),(d)) 이 영역안으로 추종하던 광원이 들어갈 시 리더와 스텐을 고정하는 것이다. 광원을 추종하던 비히클은 이와 같이 광원이 임의의 Pixel 영역에 들어가면 리더와 스텐을 고정한 채 추력만 사용하여 도킹을 하는 것이다. 이는 추종하던 광원을 잃지 않기 위함이다.

### 4. 이십이 도킹 시뮬레이션

#### 4.1 MATLAB 및 Simulink

이번 논문에서 언급한 성능 개선사항을 미리 검증하기 위한 시뮬레이션은 MATLAB Simulink를 통하여 수행하였다. 스텐과 리더의 타각을 제어 입력으로 하고, yaw와 pitch를 출력으로 하여 이미지 화면에서 L을 0으로 보내는 제어가 이루어진다.

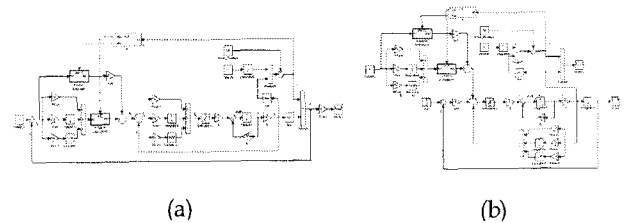


Fig. 7 Horizontal(a) and Vertical(b) Block Diagram(PID)

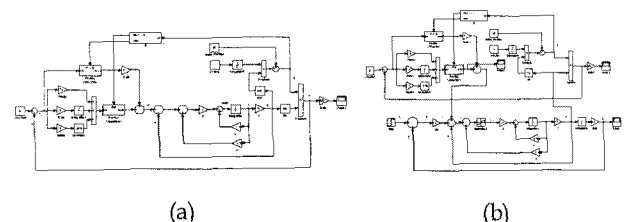


Fig. 8 Horizontal(a) and Vertical(b) Block Diagram(LQR)

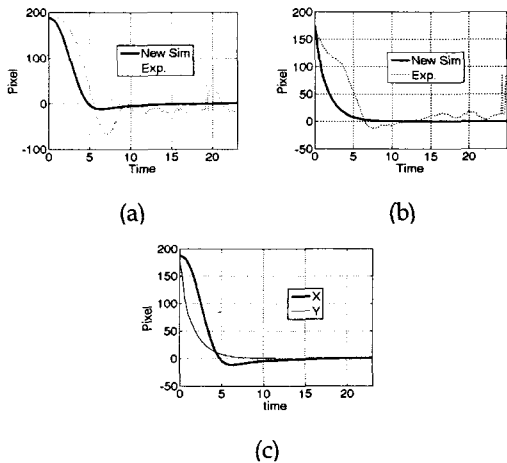


Fig. 9 Simulation Result (PID)

#### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

수평운동과, 수직운동에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 Fig. 9는 PID 제어기법을, Fig. 10은 LQR 제어기법을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. Fig. 9에서 (a)는 수평운동을 (b)는 수직운동을 나타낸 것이다. 수평운동의 결과인 (a)에서 비히클은 실험시에 나타났던 갑작스런 자세 불안정(19초 부근)없이 이미지 화면의 중심(0Pixel)으로 안정되게 수렴하는 것을 볼 수가 있다. 수직운동의 결과인 (b)에서도 (a)와 마찬가지로 이미지 화면의 중심(0Pixel)으로 안정되게 수렴하는 것을 볼 수가 있다. Fig. 10에서도 이전 PID제어기법을 이용했던 시뮬레이션과 마찬가지로 (a)는 수평운동을 (b)는 수직운동을 고려한 것이다. 수평운동의 결과인 (a), 수직운동의 결과인 (b)에서도 비히클이 이미지 화면의 중심(0Pixel)으로 안정되게 수렴하는 것을 볼 수가 있다.

PID제어기법과 LQR 제어기법에 따른 결과 Fig. 9와 10의 (c)를 보면, LQR 제어기법을 이용한 시뮬레이션의 과도성능이 더 좋지만 PID가 응답성능이 더 좋음을 알 수가 있다. 이는 PID의 게인값, LQR의 가중치에 따른 차이로 생각된다.

### 5. 결 론

한국해양연구원의 이심이는 미래 해양 개발 네트워크 선단을 구성하기 위해 필수적인 비히클인 AUV이다. AUV는 외부 시스템과 무선으로 통신을 하고 배터리로 전력을 얻기 때문에, 도킹하여 데이터 전송 및 재충전을 한다. 이번 논문에서는 광학식 방법을 이용한 도킹 시 나타나는 자세 불안정의 원인을 분석하고, 이를 개선할 수 있는 방법을 보였다.

MATLAB Simulink를 이용한 시뮬레이션으로 검증하였다. 시뮬레이션 결과 AUV 이심이와 도킹 장치의 거리가 가까워짐에 따라 이미지 화면 상에 나타나는 도킹 장치의 광원이 커지고, 광원들 사이의 거리가 멀어져 이미지 화면 밖으로 나가는 확률이 높아지고, 이로 인하여 추종하던 광원을 잃어 자

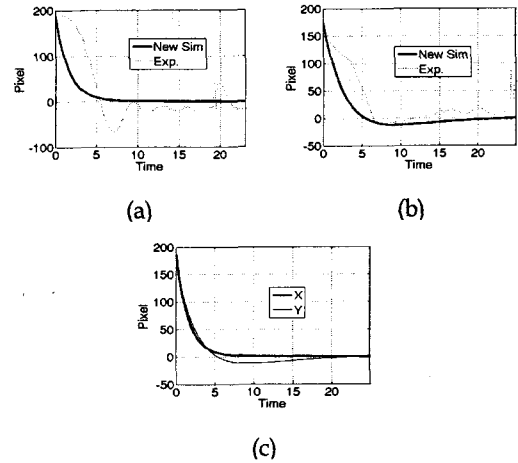


Fig. 10 Simulation Result(LQR)

세가 불안정해져서 급격한 자세 변화를 가져왔는데, 개선 방법을 이용하여 자세 불안정을 해결 할 수 있었다. 실험 일정을 고려하여, 추후에 이번 시뮬레이션을 바탕으로 수조 실험을 할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양수산연구개발사업인 "차세대 심해용 무인잠수정 개발(6)"과제, 중점연구사업인 "U-기반 탐사선단의 스마트 운용기술 개발" 과제, 인하대학교 교내연구사업인 "대형 수중 비히클의 운동제어시스템에 관한 연구" 연구결과의 일부임을 밝히며 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 박진영, 이필엽, 이판목, 전봉환, 김기훈, 오준호 (2006), "무인 잠수정의 자세 제어와 수중 도킹을 위한 비주얼 서보 제어에 관한 연구", 2006년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp. 1813-1818.
- 이판목, 전봉환, 이종무 (2003). "자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 비주얼 서보 제어 알고리즘", 한국해양공학회지, 제 17권 제 1호, pp 1-7.
- 이판목의 (2005). 차세대 심해용 무인잠수정 개발(4), 해양수산부보고서, UCM00790-05020
- 전봉환, 박진영, 이판목, 오준호 (2005), "소형 자율항주 수중로봇의 시스템 설계와 초기성능시험", 국방수중로봇 워크샵 2005, pp. 1-6.
- 전봉환, 이판목, 박진영, 이필엽, 김기훈, 이종무, 오준호(2006), "수중도킹을 위한 자율무인잠수정 이심이의 최종 유도제어", 국방로봇 기술시범 및 워크샵 논문집, 2006.6
- S. Hutchinson, G.D. Hager and P.I. Corke (1996). "A Tutorial on Visual Servo Control", IEEE Trans. on Robot. Automat., Vol 12, No 5, pp 651-670.

2006년 10월 16일 원고 접수

2006년 월 일 최종 수정본 채택