

원자로 압력용기 육안검사용 수중 로봇 시스템의 제어

변승현, 조병학, 신창훈, 김진석, 김준홍, 양장범
한전 전력연구원

Control of Remotely Operated, Underwater Robotic Vehicle System for Reactor Ves
(글씨 크기 11Point, 글씨체 신명 디나루, 진하게)

S.H.Byun, B.H.Cho, C.H.Shin, J.S.Kim, J.H.Kim, J.B.Yang
KEPRI, KEPSCO

Abstract - 원자력 발전소 중 가동년수가 오래된 발전소에서는 원자로 압력용기의 상부와 하부구조물 등에서 일부 부품이 이탈되어 주 냉각재 순환계통의 주요기기를 손상시키는 사례가 있으며, 부품의 미소 결함의 정밀검사는 육안으로는 판단이 불가능하므로 원전 설비의 안정성과 신뢰성 확보 측면에서 로봇을 응용한 정밀검사가 요구되어진다. 본 논문에서는 원자로 압력용기 육안검사용 수중로봇 시스템을 설계 제작하고, 제어시스템을 구현하고, 실험을 통해 제작 구현한 수중로봇 시스템의 효용성을 보인다.

1. 서 론

원자력 발전소 중 가동년수가 오래된 발전소에서는 원자로 압력용기의 상부와 하부구조물 등에서 일부 부품이 이탈되어 주 냉각재 순환계통의 주요기기를 손상시키는 사례가 발생하고 있는 추세이고, 부품의 미소결함(볼트의 풀림 등)의 정밀검사는 육안으로는 불가능하므로 원전설비의 안정성과 신뢰성 확보측면에서 로봇을 응용한 정밀검사가 필요한 실정이다. 현재는 일종의 내시경 장비를 이용한 육안검사에 의존하여 부품의 결함을 검사하는데 카메라의 자세를 정확하게 유지하기 어려운 관계로 검사의 신뢰도가 낮고, 격납용기 내부와 이물질 제거작업이 별도로 수행되고 있어 작업능률이 낮다. 또한 방사선 조임량 규제강화로 향후 전문인력의 확보가 어려운 것으로 예상되므로 로봇의 적용이 요구되고 있는 실정이다[1]. 이러한 상황에서 전력연구원은 원자로 압력용기 육안검사를 위한 수중로봇 시스템을 Deep Ocean Engineering사의 Phantom 150 수중로봇 본체를 이용하여 설계 제작하였다.

본 논문에서는 원자로 내 육안검사를 위한 감시카메라와 수중로봇의 수직위치 조절을 위한 depth 센서, 수중로봇의 평면위치 조절을 위한 비전 시스템, 수중로봇의 위치 조절을 위한 구동장치인 4개의 추진장치, 수중로봇 제어를 위한 서버 제어 시스템, 서버 제어시스템을 원격 제어하며, 로봇 시뮬레이터를 탑재한 마스터 제어 시스템 등으로 구성되어지는 수중로봇 시스템을 제작 구현하고, 수중로봇 시스템의 제어 시험결과를 통해 제작 구현한 수중로봇 시스템의 효용성을 보인다.

2. 본 론

2.1 수중로봇 시스템의 구성

원자로 압력용기 육안검사용 수중로봇 시스템은 크게 수중로봇 본체와 제어/감시를 위한 소프트웨어 그리고 제어/감시를 위한 하드웨어로 구성되어진다.

2.1.1 수중로봇 본체

수중로봇 본체의 외관은 그림 1과 같으며, 수중 로봇 본체의 사양은 표 1과 같다. 수중로봇 본체는 수동조작만 가능한 Deep Ocean Engineering사의 Phantom 150에서 수동제어기와 Rear B/W CCD 카메라, Rear

램프, 방위 센서 등을 제거하고, 자동제어기를 자체 구현하고, 수중로봇의 위치와 자세추정용 비전을 위한 자세제어용 LED 패턴과 Front 카메라 가이드, 받침대, 방사선 센서, 진동센서 등을 추가부착하여 제작하였다. 수중로봇의 자세는 크게 Pitch와 Yaw 및 Roll로 정의되며, 이들 모션은 각각 2개씩의 수직, 수평 Thruster에 의해 결정될 수 있다. 그림 2는 수중로봇 본체의 Thruster 명칭과 이들에 의해 취할 수 있는 모션을 보여주고 있다.

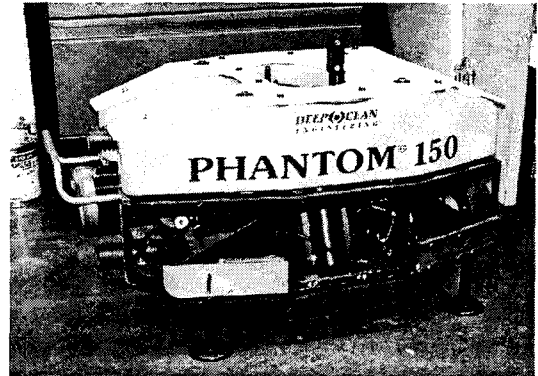


그림 1. 수중로봇 본체의 외관

표 1. 수중로봇의 본체 사양

선체	구조	Open Frame Type(부력재 탑재)
	재원	660×356×305(L×W×H){mm}
	재질	anodized Al. 6061-T6/폴리우레탄 폼
	중량(수중)	14.1Kg(중성부력)
	작업수심	46m
	운항속도	2.3Knots(전진추력:5.4Kg)
	Payload	3.2Kg
	작동온도	0~40℃
	트립조정	부력재 이용
	Service time	100시간
추진 장치	수량,배치,자유도	수량:2, 사선(vertane):2, 4자유도
	모터	1/10hp DC brush motor(4.5:1감속기)
	프로펠러	4blade,D=4.5",fiberglass-filled nylon
테더 케이블	방수구조	이중 O링 방수구조
	길이	53.3m
	재질/강도	폴리에틸렌(외피)-열경화,elsatomer(내피) Kevlar 보강, 파단강도:90.7Kg
	직경, pin수	18.3mm, 24 conductors(2coaxes)
수중 시각	중량(수중)	14.0Kg(중성부력)
	카메라	DOE high-resol, color CCD tilt: ±90°, zoom, focus
센서	조명장치	150W × 2EA, adjustable
		depth

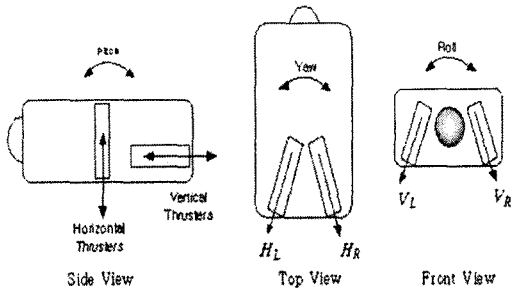


그림 2. Thruster 명칭과 수중로봇의 모션

2.1.2 수중로봇 제어/감시 시스템의 소프트웨어

수중로봇 제어/감시 시스템의 소프트웨어는 크게 사용자 인터페이스, 실시간 원격제어/감시를 수행하는 KeproTeleOp와 로봇의 거동을 온라인으로 시각화하거나 오프라인으로 시뮬레이션하는 KeproSim, 로봇을 제어하는 KeproRobot로 구성된다. KeproTeleOp, KeproSim, KeproRobot는 전력연구원이 등록한 로봇 원격제어/감시 소프트웨어의 명칭이다. 동작원리를 살펴보면, 우선 자동운전의 경우 사용자가 KeproTeleOp에서 컴퓨터 통신을 통해 KeproRobot에 명령을 내리면 로봇은 어번역기에서 수중로봇의 최종위치와 자세를 생성하고 목표 위치와 자세에 도달하도록 모터 제어를 구동하게 된다. 모터가 회전하게 되면 현재의 회전상태가 KeproTeleOp에 알려지고, KeproSim의 Visualization 프로그램은 현재의 로봇위치와 자세를 계산하고 이것을 3차원으로 그래픽처리를 하여 보여준다. KeproRobot와 KeproTeleOp사이의 정보교환은 UDP/IP 통신으로 이루어지고 KeproTeleOp와 KeproSim간의 정보교환은 공유메모리 방식으로 이루어진다. 로봇의 위치와 자세 정보는 공유메모리를 통해 KeproTeleOp에서 KeproSim으로 전달되고, 사용자는 KeproSim을 통해 로봇의 움직임을 3차원 그래픽과 스테레오 음향으로 다양한 각도에서 보고 들을 수 있다[1].

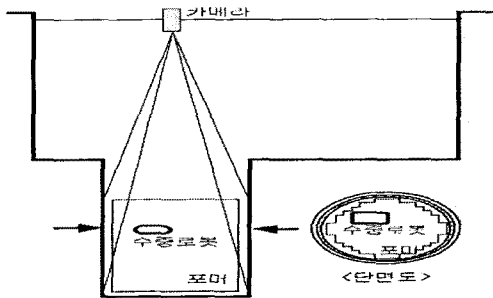


그림 3. 원자로내 수중로봇과 위치추정 카메라 위치

2.1.2.1 수중 로봇의 위치와 자세 추정

경수로 원자로의 압력용기는 탄소강으로 되어 있어 지구장치의 영향이 미치지 못하므로 수중로봇에서 일반적으로 응용되고 있는 자이로스코프를 이용할 수 없다. 특히, 원자로 내부에 존재하는 수백 개의 포머블트를 수중로봇이 자동으로 이동하여 접근하기 위해서는 수중로봇의 위치와 자세추정이 요구되어진다. 본 논문에서는 카메라와 영상획득 보드를 통해 얻은 수중로봇의 영상을 이용하여 수중로봇의 위치와 자세를 추정한다. 그림 3에 원자로, 포머, 수중로봇, 그리고 카메라가 보여진다. 수중로봇의 윗면은 카메라의 Optical axis와 거의 수직인

것으로 가정한다[2].

추정해야할 파라미터는 로봇의 위치와 방향인 (x, y, θ) 이다. 로봇의 위치 추정을 위해서 그림 4와 같은 8개의 녹색 LED 패턴을 로봇 윗면에 부착한다. 각 LED의 번호와 위치를 찾아내면 로봇의 방향과 위치를 계산할 수 있다. 본 논문에서 로봇의 중심위치 $C(x, y, \theta)$ 는 LED2와 LED7의 중점으로 정의한다. 로봇의 방향 θ 는 점 C에서 점 D로 향하는 벡터와 x축이 시계방향으로 이루는 각도로 식 (1)로 정의한다[2].

$$\theta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{y_d - y}{x_d - x}\right), \quad (-\pi < \theta \leq \pi) \quad (1)$$

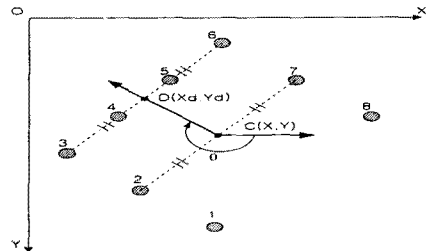


그림 4. 수중로봇의 LED 패턴과 위치 추정

수중로봇의 평면위치는 카메라에 의해서 측정하며, 수직위치는 수중로봇 본체에 부착되어 있는 depth 센서의 신호를 증폭시켜 측정한다.

2.1.2.2 수중 로봇 제어기의 구조

1) 상하 수직이동과 좌우 수평이동 제어

수중로봇의 수직이동과 수평이동은 수직 추력기에 의해 이루어지며, 그림 5와 같은 구조를 갖는다. 수평이동 시에는 제어기의 출력이 좌우 수직 추력기에 서로 반대 신호로 인가됨을 볼 수 있다.

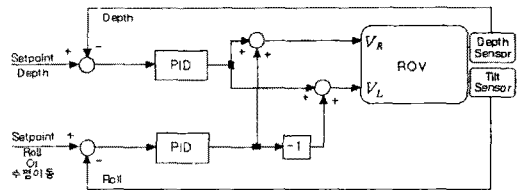


그림 5. 상하 수직이동과 좌우 수평이동 제어기 구조

2) 전후 수평이동과 좌우 회전 제어

수중로봇의 전후이동과 회전이동은 수평 추력기에 의해 이루어지며, 그림 6과 같은 구조를 갖는다. 회전이동 시에는 제어기의 출력이 좌우 수평 추력기에 서로 반대 신호로 인가됨을 볼 수 있다.

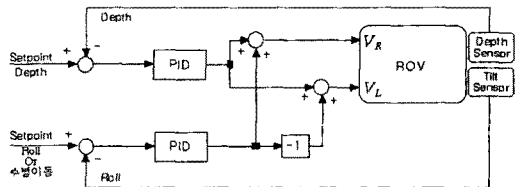


그림 6. 전후 수평이동과 회전운동 제어기 구조

3) 수중로봇 제어

카메라와 depth 센서를 이용하여 취득한 수중로봇의 위치와 자세가 목표 값을 추종하기 위한 제어기의 구조

를 도시하면 그림 7과 같다.

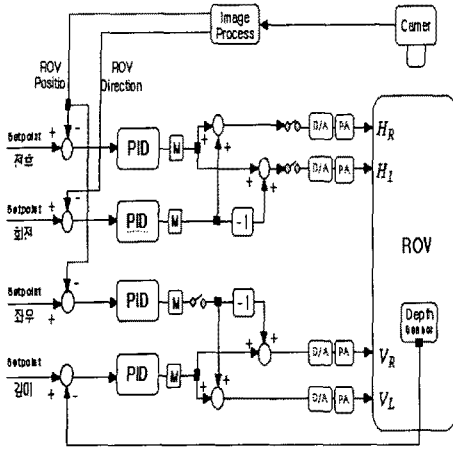


그림 7. 수중로봇 제어기의 구조

2.1.2.3 수중로봇의 이동모형

임의의 위치 (x_1, y_1) 에서 수중로봇이 θ_1 방향으로 자세를 취하고 있을 때 이 수중로봇을 위치 (x_2, y_2) 로 이동하여 θ_2 의 방향으로 자세를 취하게 하는 수중로봇의 이동 모형을 만들면 그림 8과 같으며, 위치와 자세에 대한 수중로봇의 이동 궤적은 식 (2)로부터 구할 수 있다. 수직 이동은 depth 센서로부터의 취득한 데이터와 목표치와의 차로부터 이동 궤적을 구할 수 있다.

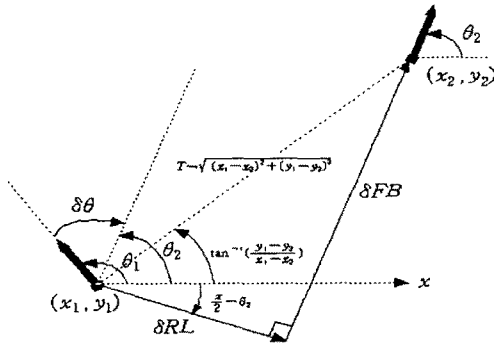


그림 8. 수중로봇의 자동제어를 위한 이동 모형

회 전 : $\delta\theta = \theta_2 - \theta_1$

좌우이동 : $\delta RL = T \cos(\theta_T)$

전후이동 : $\delta FB = T \sin(\theta_T)$ (2)

여기서, $\theta_T = \tan^{-1}\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) - \theta_2 + \frac{\pi}{2}$

2.1.3 수중로봇 제어/감시 시스템의 하드웨어

수중로봇 제어/감시 시스템의 하드웨어는 그림 9와 같이 크게 원자로 압력용기 검사용 수중로봇을 원격으로 제어 및 감시하는 Kepro-ROV 마스터와 로봇을 구동하는 Kepro-ROV 서보로 구성되어진다. Kepro-ROV 마스터는 격납용기 외부에 위치하고, 서보는 격납용기 내부에 위치하며, 이들은 컴퓨터 통신에 의해 정보를 교환한다. Kepro-ROV 마스터는 펜티엄 MMX급 산업용 컴퓨터와 입출력 카드로 구성되어 로봇제어와 감시환경을 제공하고, Kepro

-ROV 서보는 모터 구동장치인 Power Amplifier와 수중로봇에 장착된 카메라용 램프의 밝기 조절을 위한 Dimmer, 로봇암 제어기 그리고 로봇을 수동으로 조작할 수 있는 수동조종기로 구성되어진다.

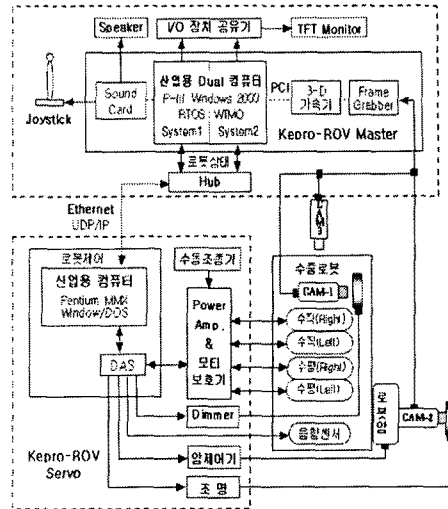


그림 9. 수중로봇 제어/감시 시스템의 하드웨어

2.2 수중로봇 시스템의 제어 실험

설계제작한 수중로봇을 구현한 제어 시스템을 이용하여 간이로 만든 2[m] 높이의 수조에서 실험한 수중로봇의 depth 제어결과는 그림 10과 같다. 제어기는 식 (3)의 속도형 PI 제어기를 채용하였다. 실험결과를 보면 제어결과가 설정치를 잘 추종함을 볼 수 있다.

$$\Delta u(k) = K_I [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_i} e(k) \quad (3)$$

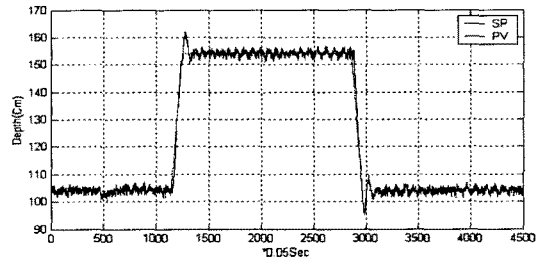


그림 10. 수중로봇의 depth 제어실험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 원자로 압력용기 육안검사용 수중로봇 시스템을 설계 제작하고, 제어시스템을 구현하고, 실험을 통해 제작 구현한 수중로봇 시스템의 효율성을 보였다. 본 논문에서 제작구현한 수중로봇시스템은 조만간에 원자력발전소에 실증적용될 예정이며 다른 분야에도 적용이 가능하리라 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한전 전력연구원, "원자로 압력용기 육안검사 및 이물질 제거용 수중로봇 시스템 개발", 중간보고서, 2001
- [2] 김진석, 김홍수, 조병학, 김준홍, 신창훈, 김석곤, "비전 시스템을 이용한 수중로봇의 위치추정", 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동추계학술대회, 2001