

원자로 압력용기 육안검사 및 이물질 제거용 수중로봇 시스템의 설계

조병학, 변승현, 김진석, *오정목
한전 전력연구원, *한국수력원자력(주)
전화 : (042) 865-5565 / 팩스 : (042) 865-5304

Design of Remotely Operated, Underwater Robotic Vehicle System for Reactor Vessel Inspection and Foreign Objects Removal

B.H.Cho, S.H.Byun, J.S.Kim, *J.M.Oh
KEPCO, *KHNP
chobh@kepri.re.kr

Abstract

The remotely operated underwater robotic vehicle system has been required to inspect some objects such as baffle former bolts and remove foreign objects in reactor vessel of nuclear power plant. In this paper, we have designed the remotely operated underwater robotic vehicle system that includes a long reach arm that is composed of 4 joints to remove foreign objects in a narrow space, a camera for visual test, instrument sensors for vehicle positioning, 4 thrusters for underwater navigation of vehicle, and supervisory control system implemented with industrial PC that includes robot simulator that has the functions of real time visualization, robot work planning and etc.

I. 서론

원자로 발전소 중 가동년수가 오래된 발전소에서는 원자로 압력용기의 상부구조물과 하부구조물 등에서 일부 부품이 이탈되어 주 냉각재 순환계통의 주요기기를 손상시키는 사례가 발생하고 있는 추세이고, 부품의 미소결함(볼트의 풀립 등)의 정밀검사는 육안으로는 불가능하므로 원전설비의 안정성과 신뢰성 확보 측면에서 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 쏘임량 규제강화로 향후 전문인력의 확보가 어려울 것으로 예상되므로 로봇의 적용이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 전력연구원은 원자로 압력용기 육안검사와 이물질 제거를 위한 수중로봇 시스템을 Deep Ocean Engineering사의 Phantom 150 수중로봇 본체를 이용하여 설계 제작하였다[1].

본 논문에서는 원자로 내 육안검사를 위한 감시 카메라와 이물질 제거를 위한 Long Reach Arm, 수중로봇의 수직위치 검출을 위한 Depth 센서, 수중로봇의 평면위치 검출을 위한 비전 시스템, 수중로봇의 위치조정을 위한 구동장치인 4개의 추진장치, 수중로봇과 Long Reach Arm제어를 위한 서보 제어 시스템, 서보 제어 시스템을 원격 제어하며, 로봇 시뮬레이터를 탑재한 마스터 제어 시스템 등으로 구성되어지는 수중 로봇 시스템을 설계 제작하고, 그 내용을 기술한다.

II. 수중로봇 시스템 설계 배경 및 선정

본 절에서는 수중로봇 시스템의 설계 배경과 수중로봇 시스템의 본체로 활용한 Deep Ocean Engineering사의 Phantom 150 선정배경에 대해서 기술한다.

2.1 수중로봇 시스템의 설계 배경

원자로에 취부되어 있는 포머(Former)볼트는 약 1000개에 달하기 때문에 육안 검사를 위해서는 자동화된 방법이 필요하다. 현재 사용되고 있는 자동화 방법으로는 웨스팅 하우스사의 Supreme과 같이 대형 구조물을 원자로 상부에 설치하고 수직 축에 6축 매니퓰레이터를 연결하여 검사하는 방법이 있으나 격납용기 내부로의 반입을 위해 Equipment Hatch를 열어야 하고, 설치에 많은 인력이 소요되어 바람직하지 않은 방법이다. 더욱이 포머 볼트에 이상이 발생할 가능성은 높지 않고 한 두개에 결함이 발생하더라도 정상 운전이 가능한 경우가 많으므로 검사를 목적으로 하는 경우에는 이동이 간편하고 사용하기에 용이한 소형 수중로봇을 사용하는 것이 바람직하다. 수중에서 로봇의 카메라를 이용해서 볼트를 검사할 때 로봇의 위치제어에는 어려움이 있다. 이러한 어려움은 수중에는 로봇의 위치제어에 악영향을 주는 물의 흐름이 존재하고, 또한 수중로봇 자체의 위치와 자세를 검출하는 것이 용이치 않은데서 기인한다. 수중로봇의 위치와 자세 측정을 위해 카메라와 depth 센서를 채용한다. 카메라에 비친 영상을 처리하여 수중로봇의 위치와 자세를

추정하는 방법은 카메라 이외에는 별도의 장치를 필요로 하지 않으므로 Tilt/Gyro/Range 센서를 장착하는 방법에서 발생할 수 있는 여러 가지 문제점을 해소할 수 있고 고정된 카메라에서 찍은 이미지 데이터를 이용하므로 센서의 Drift 또는 오차의 누적현상이 없이 위치와 자세 신호 검출이 가능하다. 상부구조물 CRDM(Control Rod Drive Mechanism) 가이드 튜브 편의 육안검사와 하부구조물의 검사와 이물질 제거를 위해 Long Reach Arm을 채용한다[1].

2.2 수중로봇 본체의 선정

수중로봇 본체의 선정에는 원자력 산업에서 많이 사용되고 있는 Benthos사의 E-ROV와 Deep Ocean사의 Phantom 150이 고려되었고, 검토결과 Open Frame 구조를 취하고 있으며, Long Reach Arm 등의 부착이 용이한 Phantom 150을 선정하였다[1]. 수동조작만 가능한 Phantom 150에서 수동제어기와 Rear B/W CCD 카메라, Rear Lamp, 방위센서 등을 제거하고, 제어를 자체 구현하고, 위치와 자세 추정용 비전을 위한 자체제어용 LED 패턴과 Front 카메라 가이드, 받침대, 방사선 센서, 진동센서, Long Reach Arm, 자세 보정용 부력재 등을 추가하여 수중로봇을 설계 제작하였다.

III. 수중로봇 시스템의 구성

원자로 압력용기 육안검사 및 이물질 제거를 위한 수중로봇 시스템은 크게 수중로봇과 제어/감시 소프트웨어, 하드웨어, Long Reach Arm 등으로 구성되어진다.

3.1 수중로봇

수중로봇 본체의 외관은 그림 1과 같으며, 수중로봇 본체의 사양은 표 1과 같다[1].

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.

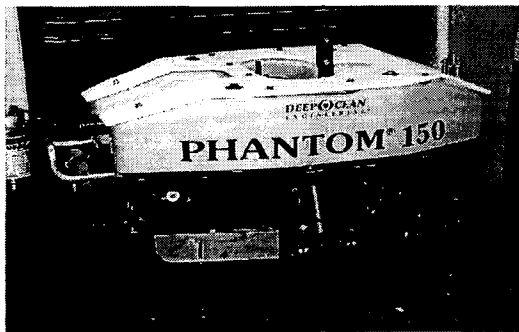


그림 3. 수중로봇 본체의 외관

표 2. 수중로봇의 본체 사양

선체	구조	Open Frame Type(부력재 탑재)
	제원	660×356×305(L×W×H)[mm]
	재질	anodized Al. 6061-T6/폴리우레탄 폼
	중량(수중)	14.1Kg(중성부력)
	직업수심	46m
	운항속도	2.3Knots(전진추력:5.4Kg)
	Payload	3.2Kg
	직동온도	0~40℃
추진장치	트림조정	부력재 이용
	Service time	100시간
	수량, 배치, 자유도	수평:2, 사선(vertane):2, 4자유도
테더 케이블	모터	1/10hp DC brush motor(4.5:1감속기)
	프로펠러	4 blade, D=4.5", fiberglass-filled nylon
	방수구조	이중 O링 방수구조
수중시각	길이	53.3m
	카메라	DOE high-resol, color CCD
	조명장치	150W × 2EA, adjustable
계속센서	깊이	depth

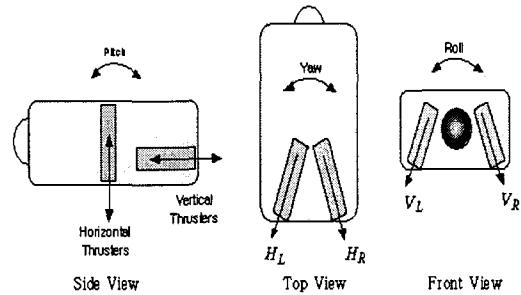


그림 2. Thruster 명칭과 수중로봇의 모션

3.2 수중로봇 제어/감시 시스템의 소프트웨어
수중로봇 제어/감시 시스템의 소프트웨어는 크게 사용자 인터페이스, 실시간 원격제어/감시를 수행하는 Kepro TeleOp와 로봇의 거동을 온라인으로 시각화하거나 오프라인으로 시뮬레이션하는 KeproSim 및 로봇을 제어하는 KeproRobot로 구성된다. KeproTeleOp, KeproSim, KeproRobot는 전력연구원이 등록한 로봇 원격제어/감시 소프트웨어의 명칭이다. 그림 3은 제어/감시 소프트웨어의 구성을 보여주고 있다.

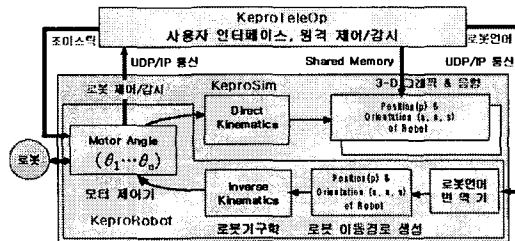


그림 5. 수중로봇 제어/감시 소프트웨어의 구성

동작원리를 살펴보면, 우선 자동운전의 경우 사용자가 KeproTeleOp로부터 컴퓨터 통신을 통해 Kepro Robot에 명령(로봇언어)을 내리면 로봇언어 번역기에서 로봇 End-effector(수중로봇, Arm 등)의 최종위치와 자세를 생성하고 이것의 역기구학을 취하면 각 모터의 회전각도가 얻어진다. 다관절 로봇의 경우 역기구학의 해가 유일하지 않으므로 로봇이 취해야하는 Configuration을 미리 정하여야 한다. 모터제어기는 이 회전각도를 목표로 주어진 속도와 가속도로 회전하게 된다. 모터가 회전하게 되면 현재의 회전상태가 KeproTeleOp에 전달되고, KeproSim의 Visualization 프로그램은 로봇순기구학 수식을 풀어 현재의 로봇위치와 자세를 계산하고 이것을 3차원으로 그래픽 처리를 한다. Kepro Robot과 KeproTeleOp사이의 정보교환은 UDP/IP 통신으로 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].

(1) 수중로봇 제어기의 구조

카메라와 depth 센서를 이용하여 취득한 수중로봇의 위치와 자세가 목표 값을 추종하기 위한 제어기의 구조를 도시하면 그림 4와 같다[1].

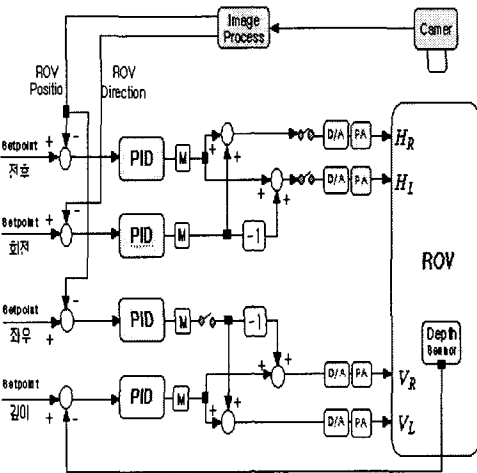


그림 6. 수중로봇 제어기의 구조

(2) 수중로봇의 위치와 자세 추정

본 논문에서는 카메라와 영상획득보드를 통해 얻은 수중로봇의 영상을 이용해서 수중로봇의 자세와 위치를 추정한다. 수중로봇은 그림 5와 같이 설치되어진 카메라를 통해 수중로봇의 평면위치를 추정하게 된다. 카메라에 의해 추정되어지는 수중로봇의 위치와 방향은 (x, y, θ) 로 기준은 그림 6과 같다. 로봇의 위치 추정을 위해 로봇 뒷면에 부착된 녹색 LED 패턴의 각 LED 번호와 위치를 찾으면 로봇의 방향과 위치를 계산할 수 있는데, 로봇의 중심위치 $C(x, y)$ 는 LED2와 LED7의 중점으로 정의되고, 로봇의 방향 θ 는 점 C에서 점 D로 향하는 벡터와 x축이 시계방향으로 이루는

각도로 정의된다. θ 를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다[2].

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

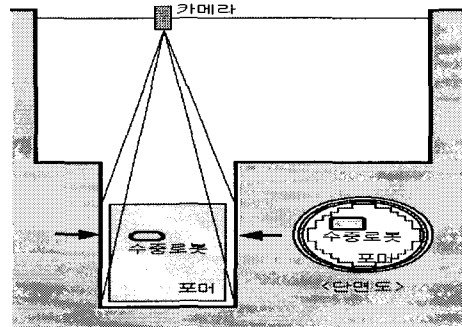


그림 7. 원자로내 수중로봇과 위치추정 카메라 위치

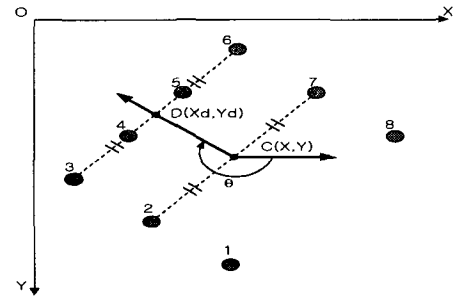


그림 8. 수중로봇의 LED 패턴과 위치 추정

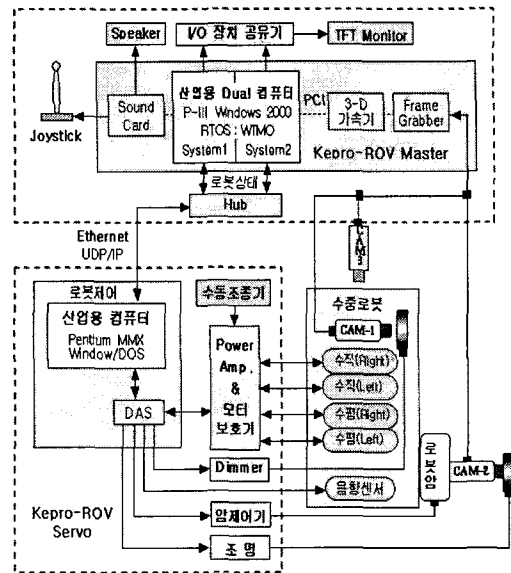


그림 7. 수중로봇 감시/제어 시스템의 하드웨어 구성

3.3 수중로봇 제어/감시 시스템의 하드웨어

수중로봇 제어/감시 시스템의 하드웨어는 그림 7과 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. 이 시스템의 구축에는 단지 각종 Electronics를 통합하는 하드웨어적인 작업이외에 이를 운용하기 위한 소프트웨어적인 면에서의 작업이 포함되어 있고, 로봇을 필요한 목적에 효율적으로 적용하기 위한 사용자 인터페이스를 구성하기 위한 게임패드, 3D 가속기, Frame Grabber 등의 하드웨어가 활용되었다(1).

[2] 김진석, 김홍수, 조병학, 김준홍, 신장훈, 김석근, "비전시스템을 이용한 수중로봇의 위치추정", 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동추계학술대회, 2001
 [3] Deep Ocean Engineering Inc, Phantom 150 User Manual

3.4 Long Reach Arm

Long Reach Arm은 원자로 상부구조물의 CRDM 가이드 튜브 고정핀과 하부구조물의 육안검사 및 이물질 제거 목적으로 사용된다. 본 논문에서는 모터로 동작하는 4개의 조인트를 갖는 구조를 갖는 암을 설계하였다. 일반적으로 6개의 조인트를 갖는 로봇암이 임의의 위치에서 임의의 자세를 취할 수 있지만 구조적으로 복잡하며, 수중로봇 본체에 부착하는데 어려움이 따르므로 본 논문에서는 로봇암의 목적에 맞게 4개의 조인트를 갖도록 로봇암을 설계하였다. Long Reach Arm의 구조는 그림 8과 같으며, 끝단에 카메라와 이물질 제거용 집게가 부착되어 있어서 튜브 고정핀과 하부구조물의 육안검사 및 이물질 제거가 가능하도록 설계되었다.

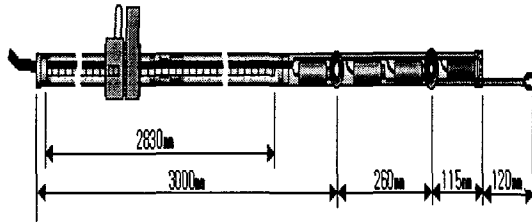


그림 8. Long Reach Arm의 구조

IV. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 원자로 압력용기 육안검사와 이물질 제거를 위한 수중 로봇 시스템을 설계 제작하였다. 본 논문에서 설계 제작한 수중 로봇 시스템은 조만간에 현장에 실증 적용될 예정이며, 향후 국내의 수중로봇 연구와 구현에 많은 도움을 주며, 기초 자료로 활용될 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

[1] 한전 전력연구원, "원자로 압력용기 육안검사 및 이물질 제거용 수중로봇시스템 개발", 중간 보고서, 2001