

수중로봇 시스템의 개발과 원자로 압력용기 육안검사에의 적용

조병학*(한전전력연구원), 변승현(한전전력연구원), 신창훈(한전전력연구원), 양장범(한전전력연구원)

The Development of Underwater Robotic System and Its application to Visual Inspection of Nuclear Reactor Internals

Byung-Hak Cho* (KEPRI), Seung-Hyun Byun(KEPRI), Chang-Hoon Shin(KEPRI), Jang-Bum Yang(KEPRI)

ABSTRACT

An underwater robotic system has been developed and applied to visual inspection of reactor vessel internals. The Korea Electric Power Robot for Visual Test (KeproVt) consists of an underwater robot, a vision processor-based measuring unit, a master control station and a servo control station. The robot guided by the control station with the measuring unit can be controlled to have any motion at any position in the reactor vessel with ± 1 cm positioning and ± 2 degrees heading accuracies with enough precision to inspect reactor internals. A simple and fast installation process is emphasized in the developed system. The developed robotic system was successfully deployed at the Younggwang Nuclear Unit 1 for the visual inspection of reactor internals.

Key Words : Underwater robot (수중로봇), Visual inspection (육안검사), Reactor vessel internal (원자로 압력용기), Nuclear power plant (원자력발전소), KeproVt

1. 서론

수중로봇은 다양한 분야에 적용되고 있으며, 이 중에서도 특히 적용이 절실히 요구되는 분야가 바로 극한 작업인 원자로 육안검사 작업이다. 경수로 원자로는 압력용기와 상부 및 하부구조물로 구성되어 있다. 핵연료를 교환하는 동안에는 원자로 압력용기 전체가 물로 채워지며 핵연료 집합체가 모두 사용후 저장조로 옮겨지면 핵연료 집합체가 놓이는 하부 노심판(Lower Core Plate) 상부와 핵연료집합체를 감싸는 배플판(Baffle Plate)이 드러나게 된다. 본 논문의 적용 대상인 원자로 내부구조물의 육안검사는 이와 같이 핵연료가 모두 인출된 직후에 하부 노심판과 배플판에 대해 수행된다. 하부 노심판은 수심 약 15m 깊이에 위치하므로 종래의 긴 봉 끝에 카메라를 설치하고 수작업으로 15m 깊이의 물속에서 카메라의 위치와 자세를 바꾸면서 검사하는 방법은 카메라를 원하는 위치에 정확하게 유지할 수 없어 원하는 부분의 정확한 영상을 얻기가 어렵고 또한 많은 인력과 시간이 소요되는 등 효율성과 작업자의 방사선 쯤임 및 경제적인 측면에서 바람

직하지 않다. 특히, 배플판은 격자판에 천여 개의 볼트에 의해 체결되어 있는데 이들 천여 개의 볼트를 신속 정확하게 검사하기 위해서는 자동화된 방법이 절실히 요구된다. 본 연구를 통해 개발된 KeproVt(Korea Electric Power RObot for Visual Test) 시

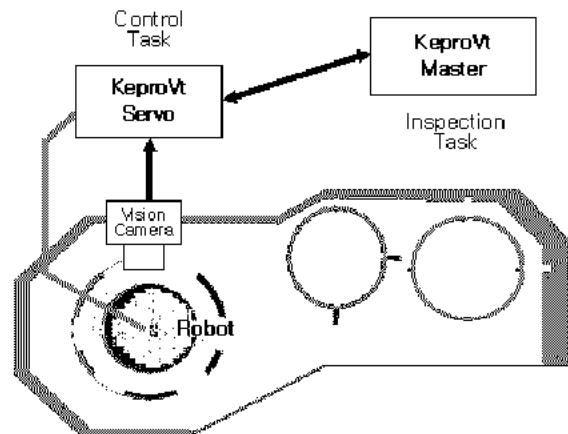


Fig. 1 Arrangement of KeproVt system for lower internal inspection

시스템은 하부구조물이 압력용기에 설치되어 있는 상태에서 원자로 내부구조물 전체를 자동으로 육안검사하는 소형 수중로봇 시스템으로 이 시스템의 특징은 장치가 소형·경량으로 운반과 설치시간이 크게 단축되며 영상처리기(Vision Processor)와 고성능 위치 및 자세 제어 알고리즘을 채용하여 제어기의 성능이 크게 향상된 데에 있다. 이 시스템은 작업자 4명이 30 분 이내에 설치할 수 있고 종래에는 5명의 필수요원이 10 시간 동안 수행하던 하부 노심판과 배플판 검사작업을 2명이 5 시간 이내에 마칠 수 있다. 그림 1은 배플판 검사와 하부 노심판 검사를 위해 현장에 배치되는 KeproVt 시스템의 구성을 보이고 있다.

2. 수중로봇 시스템의 구성

KeproVt 시스템은 크게 수중로봇과 제어기 및 부속장치로 나뉘어 진다. 제어기는 로봇을 제어하는 서보제어기와 검사작업을 수행하는 마스터제어기로 구성된다. 이 외에 수중로봇의 위치를 측정하는 영상카메라(Vision Camera)와 영상카메라를 핵연료교환기의 난간에 설치하는 장치가 있다.

2.1 수중로봇

수중로봇의 본체는 Deep Ocean Engineering사에서 제작한 Phantom-150을 본 시스템의 목적에 맞게 개조하여 사용하였다. 수중로봇의 상부에는 영상카메라가 수중로봇의 위치와 자세를 쉽게 인식할 수 있도록 8개의 LED(Light Emitting Diode)를 설치하였다. 또한, 수중로봇이 연료 집합체(assembly)의 안내 핀을 피하여 하부 노심판에 안착할 수 있도록 착륙(landing) 장치를 부착하였다. 육안검사용 카메라는 CID Tech사에서 제작한 내방사선 카메라와 Non-browning Zoom Lens가 사용되었다. 수중로봇은 작업 중 최대 50 kRad/Hr 정도의 방사선에 노출되므로 방사선에 취약한 전자소자들은 수중로봇에 사용되지 못한다. 이러한 이유로 수중로봇에는 수중로봇의 위치와 자세를 측정하기 위한 LED, 수중로봇의 깊이를 측정하는 깊이 센서와 음향 센서만이 설치되어 있다. 음향 센서는 모터가 회전하는 소리를 사용자에게 제공하여 시스템의 안전한 운전은 물론 정비의 목적으로도 활용된다. 수중로봇에 사용된 전자소자와 센서 들은 집적선량 10^6 (Rad)까지 방사선을 조사하여 이상이 없는 것을 사용하였고, 고장이 발생하면 교체가 용이하도록 모듈화 하였다. 그림 2는 수중로봇의 구조를 보이고 있고, 수중로봇의 주요제원은 표 1에 나타내었다.

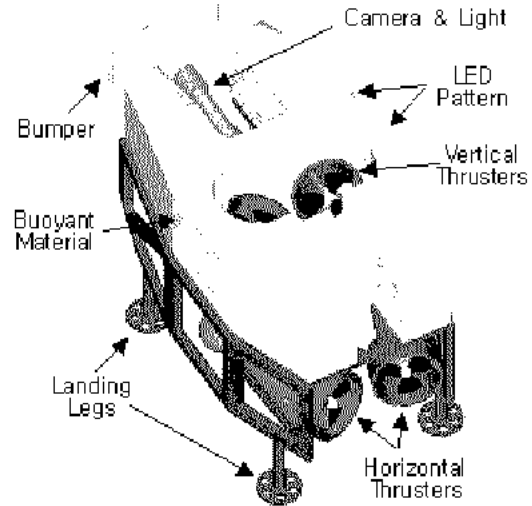


Fig. 2 3D graphic of underwater robot

Table 1. Specification of underwater robot

		Specification
Vehicle	Dimension	700x356x455mm (LxWxH)
	Material	anodized aluminum, polyurethane foam
	Weight(air)	14.5kg
Thruster	Installation	two vertical and two horizontal thrusters
	Motor	1/10 hp DC 48 volt brush motor(4.5:1 gear)
Sight	Camera	CID camera with non-browning lens
	Light	two halogen 250W lamps, adjustable
Sensors		depth and acoustic sensors

2.2 제어장치

제어장치는 마스터제어기와 서보제어기로 구성되는데, 서보제어기는 수중로봇의 위치 및 자세제어를 담당하며, 마스터제어기는 육안검사작업을 수행하는 목적으로 사용된다. 서보제어기와 마스터제어기는 컴퓨터통신으로 정보를 교환하기 때문에 마스터제어기를 격납 용기 외부의 제어실에 설치하여 운전할 수도 있다.

A. Master Control Station

마스터 제어기는 산업용 PC, 비디오 스위치, VTR 및 비디오 모니터와 컴퓨터 모니터 및 스피커 등의 주변장치로 구성되어 있다. 육안검사 화면은 PC에 설치되어 있는 프레임 그래버 카드로 입력되어 작업 명, 작업 일시, 검사 위치 및 방향 등의 정보가 함께 겹쳐진(overlay) 상태로 수중로봇의 센서 박스에 설치되어 있는 진동센서에 감지된 음향신호와 함께 비디오 테잎에 녹화된다.

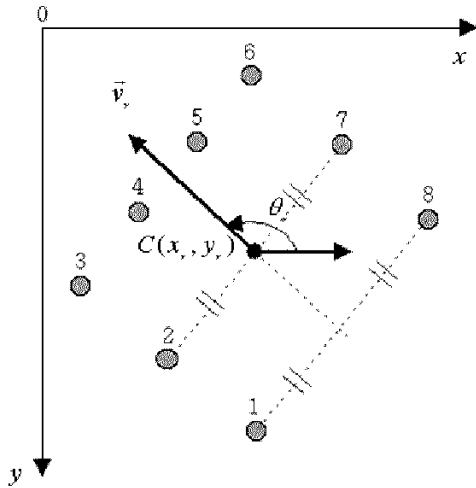


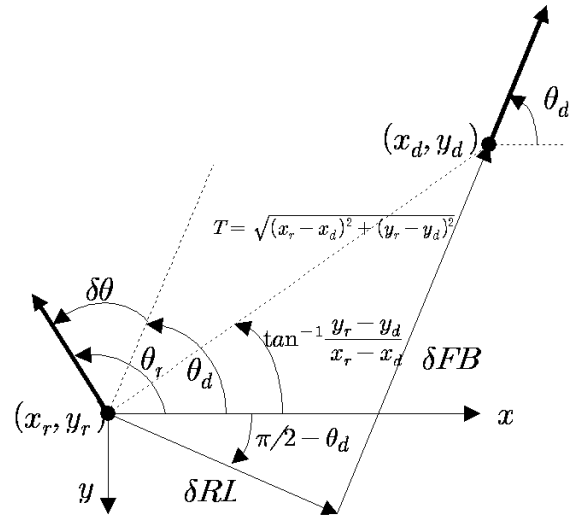
Fig. 3 LED pattern for robot position and orientation estimation

B. Servo Control Station

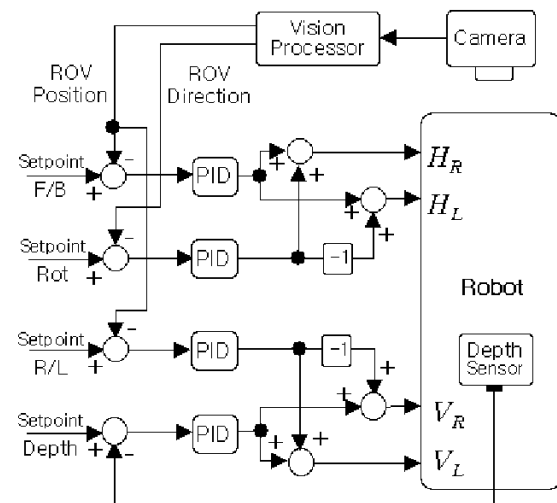
서보제어기에는 산업용 PC, 입출력장치, 모터를 구동하기 위한 파워 증폭기(Power Amplifier), 카메라 조명의 밝기를 조절하는 조광기(Dimmer)와 컴퓨터 통신카드 등이 내장되어 있다. 서보제어기에는 게임패드와 같은 형태의 소형 수동 조종기를 접속할 수 있어서 마스터 제어가 없는 상태에서 수동으로 수중로봇의 제어가 가능하다.

3. 3 차원 위치와 방향의 측정

수중로봇의 (x,y) 평면에서의 2차원 위치와 방향은 원자로 중심선 상부에 설치되어 있는 카메라에 비친 수중로봇에 장착된 8개의 LED(그림 3 참조)를 영상처리가 처리하여 계산한다. 영상처리는 화면에서 각 LED의 위치를 찾아 로봇의 방향과 위치를 계산하며, 로봇의 중심위치 $C(x, y)$ 은 LED2와 LED7의 중간이고 로봇의 방향 θ 은 점 C에서 점 D로 향하는 벡터 \hat{v} 과 x축이 시계방향으로 이루는 각도이다. 영상처리에서는 LED들의 움직임을 선형시스템으로 근사화한 칼만 필터를 채용하여 잡음(noise)의 영향을 최소화하였고, LED가 테더 케이블(tether cable)에 가려지거나 꺼졌을 때도 정상적으로 동작하도록 트래킹 윈도우를 설정하여 개별 LED의 움직임을 감시한다[1]. 실험 결과 영상처리의 위치 및 자세의 측정오차는 각각 ± 5 mm와 ± 1 deg. 이내로 매우 정확하고, LED는 임의의 4개가 가려지더라도 측정값에 영향을 미치지 않음이 확인되었다. 수중로봇의 깊이 신호는 영상처리기로부터 구할 수도 있지만 화면 해상도의 한계 때문에 정확한 값을 얻기가 어려워 수중로봇에 설치되어 있는 압력센서로부터 측정된다.



(a) Algorithm of robot motion control



(b) Motion control block diagram

Fig. 4 Control of underwater robot

4. 수중로봇의 제어와 운전

4.1 제어 알고리즘

Kepron 시스템에서 채용한 Phantom-150 수중로봇은 수직 및 수평 추력기가 각각 2개씩 일정한 각을 갖고 배치되어 있어서 수직추력기는 상하 및 좌우이동에 기여하고 수평추력기는 전후 및 회전운동에 기여한다. 따라서 그림 4.b에 보인 제어기에서와 같이 로봇의 동특성을 상하·좌우운동과 전후·회전운동으로 나누어서 각각 수직추력기(V_R, V_H)와 수평추력기(H_R, H_L)를 분리하여 제어할 수 있다. 수중로봇이 임의의 현재위치(x, y), 방향 θ 의 자세를 취하고 있을 때 목표위치(x_d, y_d)와 원하는 방향 θ_d 로 이동 및 회전하도록 하는 제어 알고리즘

은 그림 4.a와 같다. 전후 오차 δ_{FB} 와 좌우 오차 δ_{RL} 및 깊이 오차 δ_z 와 회전 오차 $\delta\theta$ 는 각각 그림 4.b에 보인 해당 PID 제어기에 입력된다. 수중로봇의 위치 및 자세제어를 위한 오차신호를 요약하면 아래의 식(1)과 같다[2].

$$\begin{aligned} \text{깊이} & : \delta_z = z_e - z_r \\ \text{회전} & : \delta\theta = \theta_e - \theta_r \\ \text{좌우이동} & : \delta_{RL} = T \cos(\theta_e) \\ \text{전후이동} & : \delta_{FB} = T \sin(\theta_e) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\theta_e = \tan^{-1}((y_e - y_r)/(x_e - x_r)) - \theta_r + \pi/2$.

서보 제어기는 초당 20회 제어 알고리즘을 수행하여 추력기 모터의 전압을 조정하는 방법으로 수중로봇을 제어한다. 로봇작업을 위해 (X_1, Y_1, Z_1) 의 위치에서 θ_1 의 자세를 취하고 있는 수중로봇을 (X_2, Y_2, Z_2) 의 위치로 이동하여 θ_2 의 자세를 취하게 하고자 할 경우에는 초당 20회 이동경로를 갱신하여 제어기의 목표값에 입력한다. 이동경로는 이동경로 생성기에서 주어진 최대이동속도와 가속도로부터 계산되는데 사다리꼴 형태의 속도변화를 취하게 된다.

4.2 로봇의 운전

로봇의 운전은 대화상자를 통해 키보드, 자동 또는 수동운전을 선택할 수 있다. 자동운전 모드를 선택하면 대화상자를 통해 적용발전소와 작업이 입력되어 선택된 작업의 모든 과정을 자동으로 수행할 수 있다. 수동운전 모드를 선택하면 제어 패널에서 마우스를 이용하여 제어가 가능하다.

4.3 로봇 시뮬레이터

KeproVt의 마스터 제어기에는 전체의 작업공정을 3차원 그래픽으로 시뮬레이션할 수 있는 프로그램 KeproSim이 내장되어 있다. 이 프로그램은 Off-Line 모드에서는 작업계획을 수립하고 이를 확인하는 목적 또는 작업자의 훈련 목적으로 활용된다. On-Line 모드에서는 실제 작업 중인 로봇의 움직임을 가상 카메라를 이용하여 가시화할 수 있어 실제 카메라에 나타나지 않는 부분까지 보여줌으로써 작업을 안전하고 능률적으로 수행할 수 있는 정보를 제공한다.

5. 적용

KeproVt 시스템은 2003년 5월 영광원자력발전소 1호기에서 핵연료 교환을 위해 핵연료가 모두 사용된 후 연료 보관조로 이송된 직후에 원자로 하부 노심판 상부와 배플판의 육안검사에 성공적으로

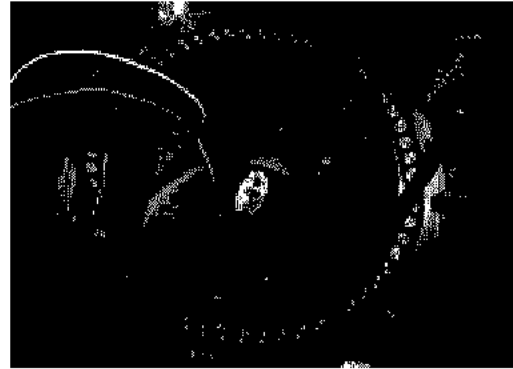


Fig. 5 Application of KeproVt System at YGN Unit 1

적용되었다. 그림 5는 배플판 검사를 위해 수중로봇이 자동으로 유영하는 장면이다. 하부 노심판 검사에서는 수중로봇이 하부 노심판 상부 40cm 깊이를 일정하게 유지하면서 연료배치 세그먼트 열을 따라 이동하며 작업영역 전체를 검사하였다. 배플판 검사에서는 각진 부분에서도 일정한 거리와 자세를 유지하며 작업경로를 이동하여 흔들림이 없는 선명한 영상 이미지를 제공하였다. 이들 2개의 육안검사 작업시간은 5시간 소요되었다.

6. 결론

무게가 14kg에 불과한 소형 수중로봇을 이용하여 자동으로 원자로 내부구조물을 육안검사할 수 있는 시스템이 개발되어 영광 1호기에 성공적으로 적용되었다. 이 시스템은 소형·경량이고 구조적으로 간단하여서 시스템을 30분 이내에 설치할 수 있고, 5명이 10시간 수행하던 작업을 2명이 5시간에 수행하여 작업자의 방사선 조임을 저감하고 발전소의 이용률을 향상시키는 장점을 가지고 있다. 실험 결과 수중로봇의 위치와 자세를 ± 1 cm와 ± 2 도 이내의 오차로 유지할 수 있음이 확인되었고, 전력연구원에서는 육안검사는 물론 초음파탐상 검사에도 응용하는 연구를 진행하고 있다.

참고문헌

1. 김진석, 김홍수, 조병학, 김준홍, 신창훈, 김석곤, "Pose Estimation of Robot using Vision System," 대한전기학회/대한전자공학회 시스템 및 제어분야 합동 추계학술대회 논문집, 2001.
2. 조병학, 신창훈, 변승훈, 김석곤, "원자로압력용기 내부구조물 육안검사 및 이물질제거용 수중로봇시스템개발," 최종보고서, 전력연구원, 2002.
3. CID Tech, <http://www.cidtec.com>
4. Deep Ocean Engineering, <http://www.deepocean.com>