

수중주행장치(UWV)를 이용한 TRIGA-III 연구로 수조 검사
TRIGA-III Research Reactor Pool Inspection Using
an Underwater Vehicle

송태길, 이종렬, 김성현, 윤지섭, 이병직

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

원자로 및 사용후핵연료 저장조 등의 방사능 오염도를 검사하기 위한 수중주행장치를 개발하였다. 이 수중주행장치는 전용제어기에 의해 제어되는 5개의 추진기에 의해 수중에서 자유롭게 주행가능하며, 바닥에 부착된 방사선계측기를 이용하여 벽면 및 특정지점의 방사선 오염도를 측정할 수 있다. 본 논문에서는 수중주행장치의 개발 내용과 TRIGA-III 연구로 수조에서 수행한 실험결과에 대해 기술하였다.

Abstract

For the inspection of radioactivity at the nuclear reactor and spent fuel storage pool, an underwater vehicle system has been developed. This underwater vehicle is navigated freely by five thruster which are controlled by developed control system and has a faculty of radiation detection at the inner wall and special point in pool using the radiation detector which is attached to the bottom of the vehicle. In this paper, the developed underwater vehicle and its components are described in detail. Also, the field test result in TRIGA-III research reactor pool is described.

1. 서론

우리나라의 원자력 발전은 1962년 연구용 원자로인 TRIGA MARK II의 가동을 시작으로, 1977년에는 국내 최초의 상업용 원자력 발전소인 고리 1호기가 가동되었으며, 지금은 국내 전력 공급의 40% 이상을 담당하는 위치에 있다. 그러나, 원자력 시설이 점점 노후화 되어 감에 따라 이러한 시설의 해체가 본격적으로 수행될 예정이다. TRIGA의 경우에는 1997년부터 그 해체 프로젝트가 진행되고 있으며[1], 시설 수명기간이 종료된 원자력 시설이 늘어감에 따라 이러한 해체 작업은 앞으로도 계속 늘어날 전망이다.

이러한 시설에는 방사능 오염물질이 상당부분을 차지하므로 해체 시 막대한 처리비용이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 처리비용은 잔류 방사능 준위가 높아짐에 따라 기하급수적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 대부분의 시설물이 거대한 콘크리트 구조물로 구성되어 있어, 해체해야 할 분량이 대단히 많고 막대한 비용이 요구된다. 따라서, 해체하기 전에 방사능 오염정도를 부위별로 정확하게 측정하여, 효과적이고 경제적인 해체방안을 수립하여 제거 가능한 오염물질은 미리 제거하여 그 처리비용을 감소시킬 필요성이 있다.

또한 이러한 시설에는 방사능이 외부로 누출되는 것을 막기 위해 물로 채워져 있으므로 수중에서 주행하면서 검사를 수행할 수 있는 수중주행장치가 요구된다. 본 연구에서는 노화된 원자력 시설 중 원자로나 사용후핵연료 저장조 등에 대한 수중 구조물의 해체를 효율적이고 안전하게 수행하기 위해서 방사능의 오염상태를 검사하는데 사용할 수 있도록 프로펠러 추진방식의 ROV (Remotely Operated Vehicle)형인[2,3] 수중주행장치를 개발하였다. 그리고 개발된 수중주행장치를 잠수플에서 주행 및 방수 실험 등 사전 모의실험을 수행하였으며, TRIGA-III 연구로 수조에 실제로 적용하여 수조 벽면과 원자로 및 조사봉 주위에 대한 오염도 측정 등 검사작업을 수행하였다.

I. 수중주행장치의 개발

수중주행장치는 크게 수중주행장치 몸체, 추진기, 몸체 내부에 설치된 제어기 및 수중용 방사선 계측기 모듈로 구성되며, 추진기를 이용하여 연구용 원자로 내부를 자유롭게 주행하면서 방사선계측기를 이용하여 오염을 측정하고, 제어 PC를 가지고 운전자가 몸체와 연결된 테더(tether)를 통해 신호를 주고받으며 수중주행장치의 작업을 감독하고 이 장치로부터 전달된 각종 센서 신호를 분석하며, 필요에 따라서는 직접 수중주행장치를 수동으로 운전할 수 있다.

그림 1은 수중주행장치의 구조에 대한 설계도이며 그림 2는 실제 제작된 수중주행장치이다. 이 수중주행장치는 전진 및 후진을 위한 주 추진기가 몸체 뒤에 부착되어 있고, 수중에서 상승 및 하

강을 위한 두 개의 수직 추진기가 몸체 양쪽 옆에 달려 있다. 또한 방향 전환 및 횡 방향 이동을 위하여 몸체 전, 후로 두 개의 추진기가 몸체와 병행하여 부착되어 있다. 수중주행장치 몸체 전방에 카메라 및 조명장치가 부착되어 있어 이를 통하여 전 방향의 작업환경을 운전자에 직접 전달하며, 몸체 바닥에 수중용 방사선 계측기를 가지고 있어서 원자로 수조내부 벽면의 방사능 오염준위를 측정한다. 제어 PC와의 통신을 위한 케이블인 테더가 수중주행장치 몸체 상단에 연결되어 있다. 수중주행장치의 자세한 재원은 표 1에 나타나 있다.

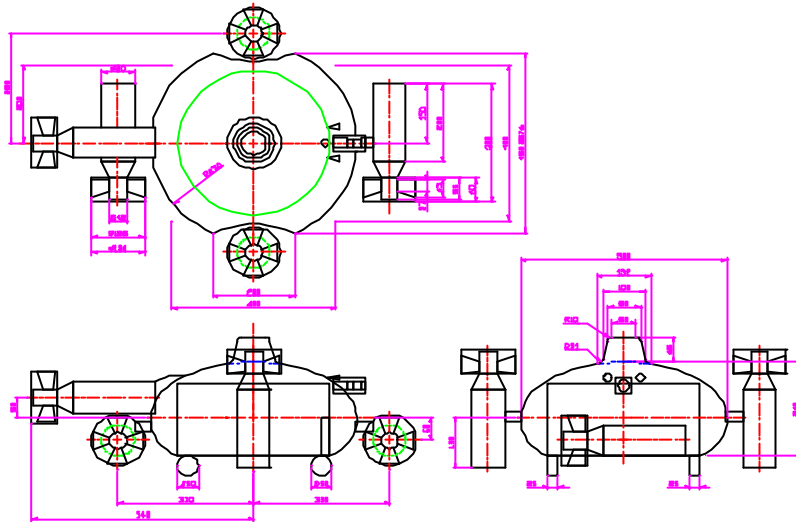


그림 1 수중주행장치 설계도



그림 2 제작된 수중주행장치

표 1 수중주행장치 사양

구 분	사 양
크 기	836(L) x 548(W) x 388(H) mm
무 게	41.7kg in air
작업 깊이	Max. 20 m
최대 속도	0.4m/sec
추진기	Torque controlled servo motors Horizontal 60W x 3 Vertical 60W x 2
CPU	Supervisory : Intel 80C196KC Low-level : Intel 80C196KC x 3
Sensors	Radiation Detector
	Depth Sensor (resolution 5cm)
	CCD Camera (f 7mm)
Communication	RS-232C

1. 수중주행장치의 몸체

수중주행장치의 몸체는 외부의 충격 및 방사선에 의한 재질 변화에 견딜 수 있도록 알루미늄을 재질로 하며 내부부품의 배치 변경이 용이하도록 상단과 하단으로 분리가 가능하도록 하였다. 알루미늄 두께는 상단이 7mm이고 하단은 15mm이다. 상단과 하단이 접하는 부위에는 O-ring 형태의 고무로 1차 방수처리하고 부위 안쪽에 고무 링으로 2차 방수 처리하였다. 로봇의 바닥은 황동판으로 만들어 졌으며 아래쪽에 방사선계측기 모듈이 부착되어 있다. 수중 로봇 전면에는 카메라와 조명 장치가 설치되어 있으며 투명한 아크릴로 외부 벽을 설치하여 방수하였고 이들 부품은 아크릴판 안에 부착하였다. 몸체 후미에는 주 추진기를 설치하였으며 몸체 안으로 10mm관통시켜 고정하였다. 로봇 몸체 상단에는 테더의 접속부를 두었으며 방수 커넥터로 연결하였다.

2. 추진기

추진기는 추진을 위한 프로펠러와 이를 구동하기 위한 모터 및 감속기로 이루어져 있다. 연구로 내에서 수중주행장치는 다른 수중탐사 로봇의 속도(정격 60cm/s)에 비하여 비교적 저속(최대 30cm/s)으로 주행하기 때문에 고속에 적합한 프로토타입에 쓰였던 프로펠러를 가지고는 목적을 달성할 수가 없다. 따라서 저속에 적합한 프로펠러를 선정하여야 하는데 수중탐사 로봇 제작[4]에 직접 쓰인 프로펠러들을 분석하여 그 중에서 본 수중주행장치의 구동에 가장 적합한 프로펠러를 선택하여 추진기로 선정하였다. 본 연구에서 정

한 추진 프로펠러는 직경이 128mm이고 피치가 10cm이다. 이에 대한 자세한 사양은 표 2에 나타나 있다.

표 2 프로펠러의 사양

구 분	사 양
Propeller Diameter	128 mm
Hub Diameter	42 mm
Pitch	100 mm
Pitch Ratio ($P/7R/D$)	0.8
Section Type	Kaplan Type Constant Pitch Propeller
Skew Rate	0
Material	Plastic
No. of Blade	4

그림 3은 추진기에 대한 설계도이며 그림 4는 실제 제작된 추진기를 보여주고 있다. 프로펠러 주위에는 프로펠러를 보호하기 위하여 덕트를 씌웠으며 프로펠러와 감속기 사이에는 방수를 위해서 Mechanical Seal로 방수처리를 하였다. 감속기 뒤에는 선정된 모터가 부착되고 모터 뒤에는 측정을 위한 엔코더 센서가 달려있다.

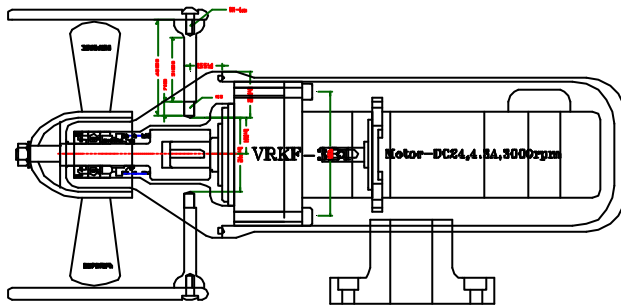


그림 3 추진기 설계도



그림 4 제작된 추진기

3. 제어기

수중주행장치가 연구로 수조 내에서 원활하게 움직일 수 있게 하려면 되도록 소형으로 만들어야 한다. 또한, 수중에서 동작하는 로봇은 방수처리와 중력/부력 밸런싱을 위하여 2중 격벽 구조로 하는 것이 일반적이다. 그러므로, 수중주행장치의 제어기 치수를 줄이는

것이 매우 중요하다. 제어기의 크기를 줄이기 위해서는 범용 제어기를 이용하는 것 보다 수중주행장치에 필요한 기능만을 갖춘 전용 제어기를 설계/제작하는 것이 훨씬 유리하다.

제어기는 수중주행장치의 5개 추진기를 제어하고 수심을 측정하기 위한 압력계 등 센서 출력 전압을 읽을 수 있어야 하며, 방사선 계측기와 RS-232C를 이용하여 통신할 수 있어야 한다. 또한, 지상의 컴퓨터로부터 직렬통신을 이용하여 수중주행장치 운행의 지령을 전달받고 주행장치의 운행상태를 지상으로 전달할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 이러한 요구조건과 기능을 고려하여 전용 제어기의 구조를 그림 5와 같이 구성하였다. 제어기는 4개의 CPU 보드가 계층구조(hierarchical structure)로 이루어진 구성을 갖고 있다. 최상위에는 관리제어기(supervisory controller) 보드가 있고 그 아래 계층에 3개의 하위제어기(lower-level controller)가 연결되어 있다.

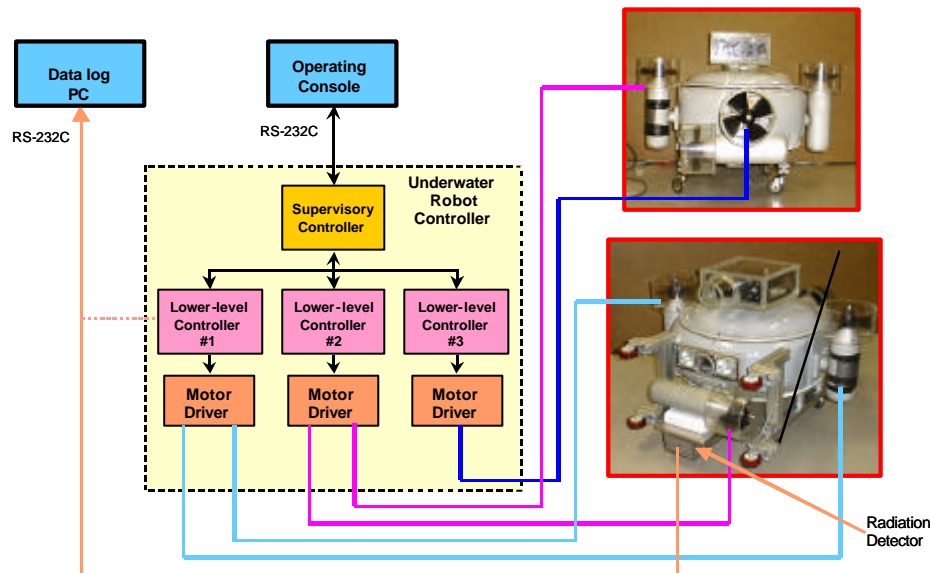


그림 5 제어기의 계층 구조

관리제어기는 지상의 컴퓨터와 통신하고 수중주행장치의 위치와 자세제어, 모터제어 지령 생성, 하위제어기의 관리작업을 수행한다. 하위제어기는 모터의 위치와 속도를 제어하고 센서의 신호를 읽어서 상위의 관리제어기로 전달하는 작업을 수행한다. 첫번째 하위제어기는 2개의 수직부착 추진기 모터를 제어하고, 방사능 계측기와 RS-232C로 통신하는 작업을 담당하고 있다. 두번째 하위제어기는 2개의 방향제어 추진기 모터를 제어하며, 수심측정용 압력계의 신호를 읽는 작업을 담당한다. 세번째 하위제어기는 주 추진기 모터의 속도를 제어한다.

이러한 각 제어기는 모두 Intel의 80C196KC CPU를 이용한다. 이 CPU는 16bit 연산구조를 갖고있으며, 256단계의 PWM port와 10bit A/D converter를 내장하는 등 모터 제어

에 매우 적합한 구조를 갖고 있어서, 소형 원격장치 제어에 많이 활용되고 있다[12, 13]. 본 연구에 사용한 제어기의 사양은 표 3과 같다.

표 3 전용 제어기의 사양

구분		사양
관리제어보드	CPU	Intel 80C196KC (Clock freq.: 20MHz)
	Memory	32k8 EEPROM (ATMEL 29C256)
	Communication	RS-232C DPRAM (IDT 7130) x 3
	Power	5V 0.3A
하위제어보드	CPU	Intel 80C196KC (Clock freq.: 20MHz)
	Memory	32k8 EEPROM (ATMEL 29C256)
	Features	24-bit Encoder Counter (LS7166) x 2 10-bit A/D Conversion (80196) 256 step PWM output (80196)
	Communication	RS-232C and DPRAM (IDT 7130)
	Power	5V 0.3A
모터 드라이버보드	N-MOSFET	HARRIS-IRFP150
	Photo-coupler	TOSHIBA-TLP250
	DC-DC converter	LAMDA-PPD1R5 48-1515

4 수중 방사선 측정 모듈

연구용 원자로 수조 내부의 방사선 준위를 측정하는 방사선계측기는 연구용 원자로 수조 내부의 방사선 준위가 낮은 상태이기 때문에 중, 저준위 방사선 측정에 사용되는 EBERLINE사의 FH 40G를 선정하였다.[5] 선정된 계측기의 특성은 다음 표 4에서 보는 바와 같으며, 방사선 계측기는 RS-232C 통신 기능을 보유하고 있어 측정된 방사선 준위 데이터를 수조 밖의 컴퓨터로 전달한다.

연구용 원자로 수조내부는 물이 차 있으므로 방사선계측기를 방수처리 하여야 한다. 또한 벽면상의 한 지점의 방사선 준위를 정확히 파악하기 위하여 방사선계측기의 방사선 감지부에 콜리메이터를 부착하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 방사선 계측기의 앞단에 두께 5 mm의 콜리메이터로 씌웠다. 콜리메이터는 납을 재질로 하며 크기는 55(W)×83(L)×55(D) mm이며 옆면과 밑면의 두께는 각각 5 mm이다. 콜리메이터 앞면에는 직경 10 mm의 구멍이 있어 벽면상의 한 지점의 방사선 준위를 정확히 측정할 수 있도록 하였다.

표 4 방사선 계측기 사양

구분	사양
Model	FH40G (ESM Eberline)
Detector Type	Proportional counter type
Size	195 mm x 73 mm x 42 mm
Detector Dimension	25 mm
Measuring Range	100 nSv ~ 10 Sv
Energy Range	33 KeV ~ 3 MeV
Battery	2 lithium cells 1.5 V

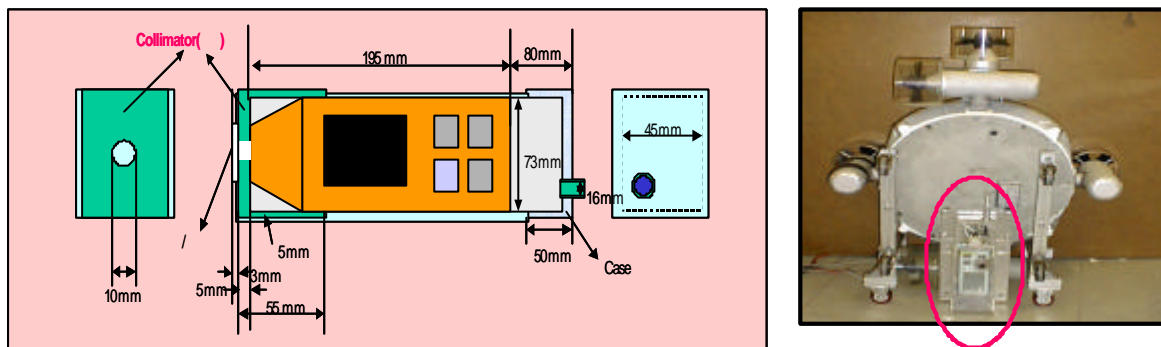


그림 6 수중 방사선 측정 모듈

III. TRIGA-III 연구로 수조 적용실험

1. 연구로 적용실험 내용

본 연구에서 개발된 수중주행장치를 TRIGA-III 연구로에 적용하는 실험을 수행하기 위해서는 사전에 철저한 준비가 필요했다. 일단 TRIGA-III 연구로에 수중주행장치를 투입하면 방사선에 의한 오염이 있을 수 있으므로 사전에 발생 가능한 문제점을 도출하여 해결하기 위해 일반 풀에서 여러 차례의 모의실험을 수행하였다. 깊이 5 m의 잠수풀에서 실제 적용 상황을 가정하여 주행실험 및 방수실험을 수행하였으며, 방사선계측기 방수모듈을 부착하여 계측기와 바깥쪽의 PC를 RS-232C로 연결하여 통신 상황을 점검하고 방사선 데이터의 기록상황 등을 검증하였다.

TRIGA-III 연구로에 대한 적용실험 내용은 연구로 수조 내에서 수중주행장치가 상하,

좌우 및 횡 방향으로 주행하면서 주행장치의 아래쪽에 부착된 수증 방사선 측정모듈을 이용하여 벽면 및 특정지점의 방사선 오염도를 측정하는 것이다. 본 실험에서는 그림 7에서와 같이 A1, A2, B1, B2 등 4곳의 원자로 수조 벽면에 대해 수심 1 m부터 6 m까지 50 cm의 간격으로 벽면의 오염도를 측정하였으며, 또한 동위원소 조사봉, rack/duct 주변 및 원자로 주변 등 13곳의 특정지점에 대한 방사선량을 측정하였으며, 측정을 위한 절차는 다음과 같다.

- ① 수증주행장치를 측정하고자 하는 지점으로 이동시킨다.
- ② 방사선 측정모듈과 벽면사이의 거리(25 cm)를 일정하게 유지시키기 위하여 주추진기를 작동시켜 벽면에 수증주행장치를 밀착시킨다.
- ③ 방사선 측정모듈과 벽면사이의 거리를 일정하게 유지하고, 수증주행장치가 좌우 또는 상하방향으로 움직이지 않도록 높이 및 상하방향 추진기를 자동제어 한다.
- ④ 벽면의 방사선 준위를 측정한다. 이때 방사선 계측기의 측정값이 일정하게 유지될 때까지(대략 20초~60초) 수증주행장치를 고정시킨다.
- ⑤ 측정이 완료되면 다음 측정지점으로 이동한다.

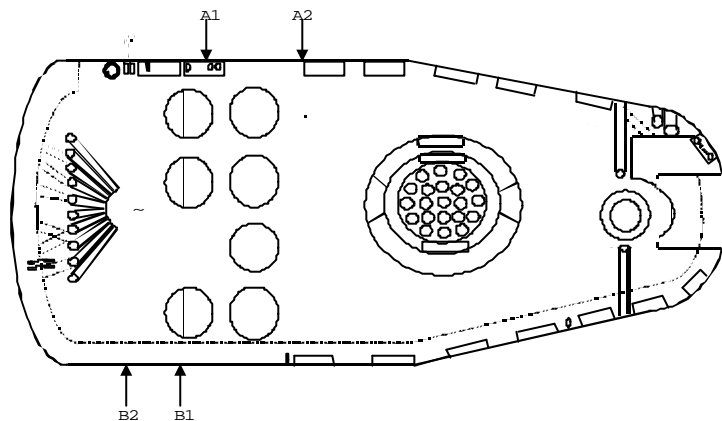


그림 7 TRIGA-III 원자로 수조 평면도 및 측정 위치

2 연구로 적용실험 결과

TRIGA-III 연구로 적용실험에서는 총 52개의 지점에 대해 방사선량을 측정하였다. 연구로 수조 벽면(A1, A2, B1, B2 벽면)에 대한 수심별 방사선 측정값을 그래프로 나타내면 그림 8에서 보는 바와 같다. 그림 8에서 A2 벽면이 다른 벽면에 비하여 상대적으로 높은 선량을 나타내는데, 이는 A2 벽면의 약 45 m 지점에 실험용 방사선원이 있어 이의 영향에 의한 것으로 사료된다.

전체적으로 원자로 바닥에 가까운 깊은 수심에서 높은 선량을 나타냈는데, 이는 바닥면에 각종 방사성 물질(핵연료 부스러기 등)이 산재되어 있기 때문이다. 그림 8에서 A1~

B2 벽면 외에 13곳의 특정지점 중 ⑤~⑩ 지점의 방사선 측정값이 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 수심이 깊어짐에 따라 방사선량 값이 증가한 원인도 있으나, 노심에서 방출된 방사선에 의하여 노심 근처의 주변 벽면이 방사화된 원인도 무시할 수 없다.

그림 9부터 12까지는 벽면주행장치가 TRIGA-III 원자로 수조 내에서 측정코자 하는 지점의 벽면에 부착하여 방사선량을 측정하는 모습이다.

TRIGA-III 연구로에 대한 적용실험 결과 수중주행장치는 수중에서 5개의 추진기를 이용하여 상하, 좌우 및 횡 방향으로 자유롭게 주행하면서 정해진 목표지점에서 일정기간 정지함으로써, 측정지점에서의 방사선량을 성공적으로 측정함을 확인할 수 있었다. 또한 수중주행장치는 연구로 수조 내에서 대략 3시간 정도 작업을 수행하였으며, 실험 완료 후 간단한 세염작업만으로도 수중주행장치의 오염을 제거할 수 있었다.

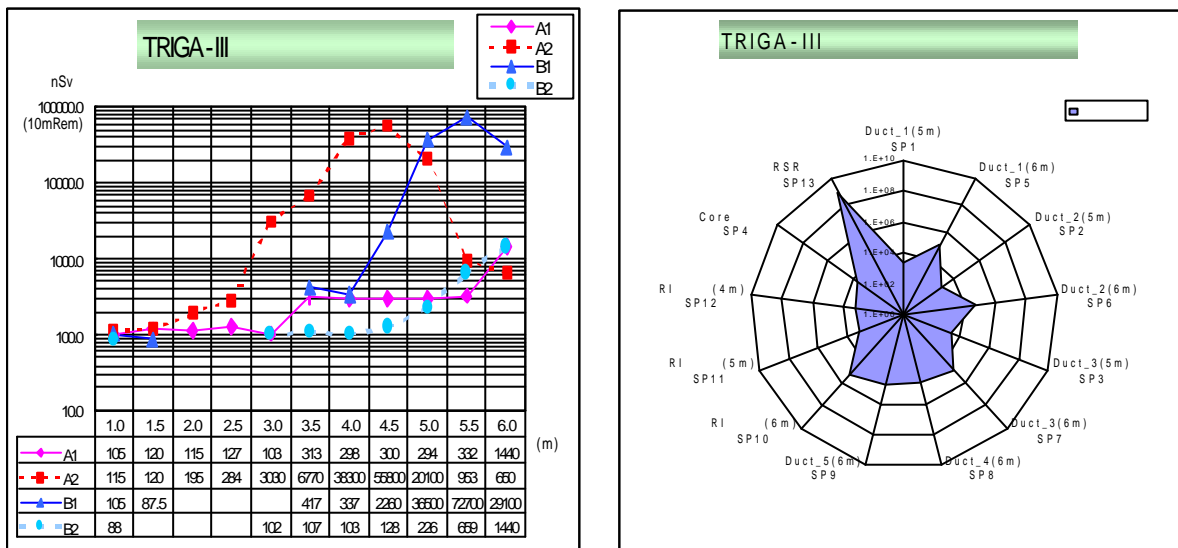


그림 8 TRIGA-III 연구로 벽면 및 특정위치의 방사선량 측정값

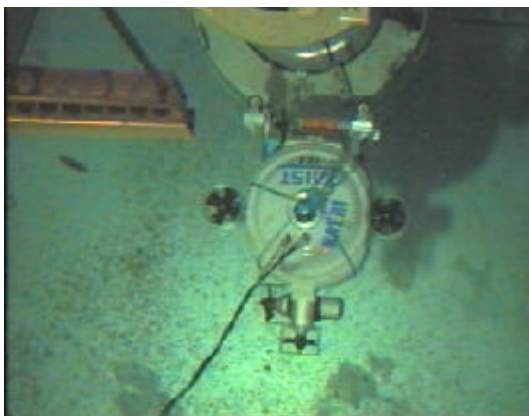


그림 9 연구로 측벽의 검사 모습

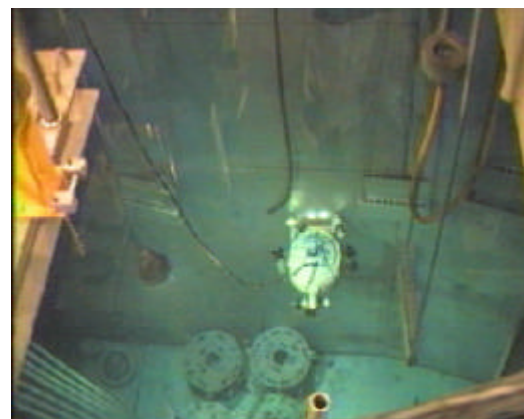


그림 10 연구로 수조 벽면의 검사 모습

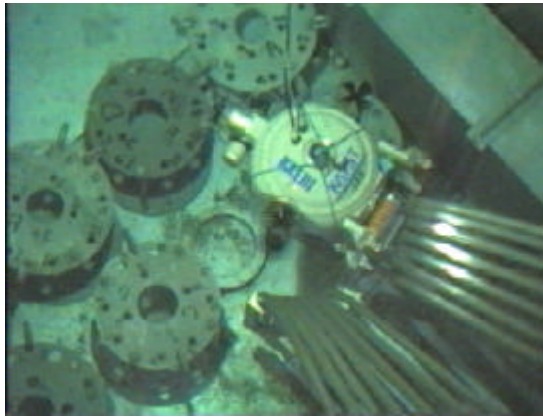


그림 11 동위원소 조사봉의 검사 모습



그림 12 연구로 덕트 밑의 검사 모습

IV. 결 론

본 연구에서는 TRIGA 연구용 원자로뿐만 아니라 원자력 발전 시설의 노심 수조, 사용후핵연료 저장조 등 수중 구조물의 검사작업을 수행할 수 있는 수중주행장치를 개발하였다. 그리고 개발된 수중주행장치를 해체 작업이 수행될 예정인 TRIGA-III 연구로 수조에 투입하여 수조 벽면과 연구로 및 동위원소 조사봉 주위 등에 대한 방사선 오염도를 측정하였다.

이러한 연구 수행을 통해 당초의 연구 목표인 수중주행장치의 자율주행, 방사선 측정 등 개발 목표를 성공적으로 달성할 수 있었다. 이러한 연구성과는 국내에서 연구사례가 드문 수중 로봇 분야의 발전에 기여했다고 생각되며, 향후 원자력산업에서의 활용뿐만 아니라 지속적인 수중 로봇의 개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

- [1] 정기경 외, 연구용 원자로 폐로사업, KAERI/RR-1878/98, 한국원자력연구소, 1999.
- [2] D.C. Vickerman, Nuclear Energy and ROVs, Proc. ANS 5th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Apr. 1993, 715-723.
- [3] M. Kimura, H. Okano, O. Ozaki and H. Shimada, Compact Visual Inspection Submersible for NPPs, Proc. ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Feb. 1995, 25-31.
- [4] 연구보고서 UDC 629.182, 해양 작업 시스템 개발(II), 한국기계연구소 부설 해사기술연구소, 1991.
- [5] Operation Manual(FH40G/FH40G-10/FH40G-L), ESM Eberline Instruments, 1996.