

## 수중 벽면 주행 기구의 설계 The design of wall-climbing underwater robot system

\* 김병만\*, 김경훈\*, 조형식\*, 박영수\*\*, 윤지섭\*\*, 박기용\*\*

\*한국과학기술원 기계공학과 (Tel : +82-42-869-3253; E-mail : kbm@lca.kaist.ac.kr)

\*\*한국원자력연구소 (Tel : +82-42-862-8259; E-mail : nyspark@nanum.kaeri.re.kr)

**Abstracts :** The design of underwater inspection robot system is presented. This robot system is designed for wall inspection in the nuclear plant facility. This paper describes the major components of the robot and its structures. This robot system is consisted of three parts : mechanical , electrical and sensing part. The main problem of designing mechanical part is to selecte the mechanism of driving. In this system the propeller driving mechanism is selected which can be move the robot continuously. For reducing the size of robot, we designed the CPU and motor controller board. The sensor system is consisted of two parts. One is enviroment monitoring part and the other is robot localization system.

**Keywords :** Underwater robot, Wall inspection, AUV(autonomous underwater vehicle), Localization, Thruster

### 1. 서론

우리나라 원자력 발전은 1962년 연구용 원자로인 TRIGA MARK II의 가동을 시작으로, 1977년에는 국내 최초의 상업적 원자력 발전소인 고리 1호기가 가동되었으며, 현재는 국내 전력 수급의 40% 이상을 담당하는 위치에 놓여있다. 그러나, 원자력 발전 시설이 노후화 되어감에 따라 이러한 시설의 해체가 본격적으로 수행될 전망이다. TRIGA의 경우 1998년 해체작업이 예정되어있고 앞으로도 계속 늘어날 추세이다[1]. 이러한 처리 비용은 방사선 준위가 아짐에 따라 기하급수적으로 증가하는 경향을 보인다. 게다가 대부분의 시설물이 거대한 콘크리트 구조물이므로 해체해야할 분량이 대단히 많고 막대한 비용이 요구된다. 따라서 해체하기 전에 방사능 오염 정도를 부위별로 정확하게 측정하여, 경제적인 해체 방안을 수립하고 제거가능한 오염물질은 미리 제거하여, 그 처리비용을 감소시킬 필요성이 절실하게 요구된다. 본 연구는 노후화된 원자력 발전 시설중 원자로나 원전 연료 저장시설등 수직 벽면 구조물의 해체를 효율적이고 안전하게 수행하기위해서 방사능의 오염상태를 검사하고 오염물질을 제거하는데 사용할 수 있는 로봇 시스템을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 시설에는 방사능이 외부로 누출되는 것을 막기위해 물로 채워져있기 때문에 수중에서 작업할 수 있는 로봇이 요구된다.

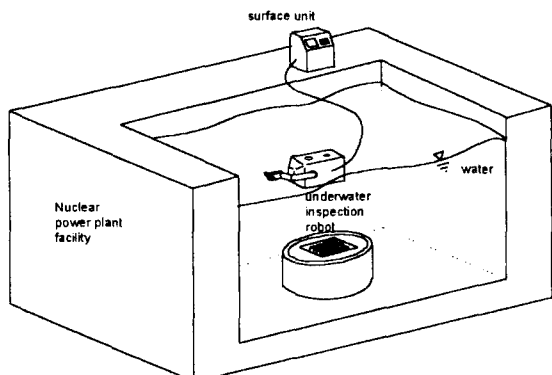


그림 1. 로봇의 작업 개념도

수중로봇은 수중 탐사, 지리제거, 검사, 해저 케이블 작업 그리고 발전소의 관내 검사등 다양한 용도로 사용하기위해 개발되어왔다. 수중로봇은 보통 제어방법에 따라 원격 조작 로봇(ROV, remotely operated vehicle)과 자율적으로 이동하는 로봇(AUV, autonomous underwater vehicle)로 나뉜다. 현재 이 수중로봇은 많은 분야에서 응용되어 사용되고 있으며 연구 경향은 로봇의

자율성을 극대화 시키고 대신 사람의 작업을 최소화 시키는 데에 있다. 물속에서 작동하는 로봇에는 여러 외부힘과 토크가 유체에 의한 힘과 추력, 부력, 중력이 복합적으로 작용하여 복합적인 힘의 관계로 나타난다. 따라서 물속에서의 로봇의 운동은 비선형성이 강하게 나타나 제어에 많은 어려움이 있다. 지금까지 개발된 로봇으로는 6000m 이하의 수심에서 탐사할 수 있는 Dolphin과 ROBY, 과학적 탐사 목적으로 개발된 TROV와 FAU AUV 등이 있다. 이러한 로봇들은 작업 환경에 따라 로봇의 구조에 많은 차이를 보인다[2].

### 2. 벽면 주행 로봇의 설계

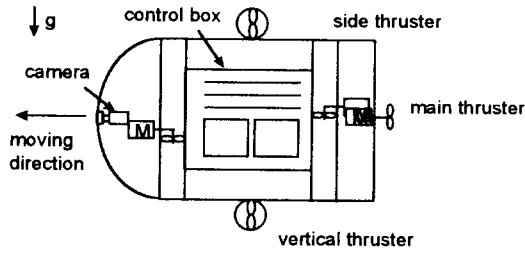
#### 2.1 로봇의 설계 조건

본 연구에서 개발된 로봇이 수행해야할 작업을 크게 두 가지로 나뉜다. 첫번째로는 앞 부분의 로봇 팔에 방사능 준위 측정 센서를 부착하여 원전 시설 벽면의 오염도를 측정하는 작업(검사작업)이고, 두 번째는 로봇 팔에 세척용 브러시를 부착하여 오염도가 온 곳의 오염 물질을 제거하는 작업(제염작업)이다. 로봇의 설계 조건을 요약하면 다음과 같다[3].

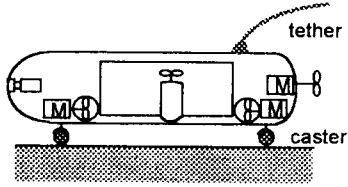
- (1) 물이 채워진 원자력 발전 시설의 내부에서 작업이 가능해야 한다. (최대 수심 15m)
- (2) 로봇은 수직 벽면을 따라 앞 뒤 방향의 직선 주행과 방향 전환이 가능해야 한다.
- (3) AI, 콘크리트 벽면에서 작업이 가능해야 하고 로봇은 벽면으로부터 항상 일정한 거리를 유지해야한다.
- (4) 로봇은 오염도 측정과 제염작업에 이용될 매니플레이터를 부착하기 쉬운 형태를 가지고 있어야 한다.
- (5) 로봇은 연속적으로 이동하는 것이 방사능 측정작업에 유리하고 이때 속도는 30cm/sec 이상이 요구된다.

#### 2.2 로봇의 전체 구조

본 연구에서 개발하고자 하는 로봇은 수중에서 작업이 가능한 자율 로봇이다. 따라서 사람의 도움없이 주어진 환경을 스스로 인식하고 정해진 작업을 수행할 수 있도록 설계되어야 한다. 먼저 로봇의 구동 메카니즘으로는 물속에서 연속적인 운동이 가능한 프로펠러 추진기를 사용하였다. 전체 로봇의 질량은 로봇의 부피에 비례하므로 전체 부피를 작게 설계해야 하며 물속에서의 항력의 영향을 적게 하기위해 전체 모양이 저항을 적게 받는 유선형으로 설계되어야 한다. 로봇이 자율적으로 운동하기위해서는 주위의 환경을 스스로 인식할 수 있도록 환경을 인식하는 센서와 로봇의 위치를 인식할 수 있는 자기 위치 인식 시스템이 필수적이다. 그리고 센서 시스템으로부터 얻어진 정보를 이용하여 주어진 작업을 하기위해 로봇을 적절하게 제어하는 제어기를 설계하였다.



(a) 로봇의 정면도



(b) 로봇의 측면도

그림 2. 로봇의 전체 개념도

### 3. 로봇의 구성 요소

로봇의 구성은 크게 기계부, 제어부 그리고 센서부로 나눌 수 있다. 기계부는 크게 구동 메카니즘과 로봇의 몸체에 해당하고 제어부는 로봇을 제어하는 전체 시스템을 구성한다. 센서부는 주위의 환경을 인식하는 센서와 얻어진 환경 가운데 로봇의 위치를 인식하는 자기위치 인식 센서로 나눌 수 있다. 세부적인 내용은 아래와 같다.

#### 3.1 기계부 설계

##### 3.1.1 몸체(body)

몸체는 유체의 저항을 적게 받기 위해서 유선형으로 구성하는 것이 좋다. 로봇의 몸체는 물속에서 작업하므로 완전한 방수가 이루어져있어야 하며, 몸체는 중력과 부력을 동일하게 맞추는 것이 좋다. 몸체의 크기는 로봇 내부에 들어가는 내부 장치들 크기에 비례하므로 제어와 센싱을 위해 내부의 로봇의 몸체는 FRP(fiber reinforced plastic)로 제작하였고 내부의 회로를 보호하기 위해 벽을 2중으로 만들어 누수에 대비하였다. 로봇의 뒷부분에는 전원을 공급하거나 얻어진 데이터를 외부로 전송하기 위해 전원선과 데이터선이 지상과 연결되어있다. 이러한 선을 외부 연결선(tether)이라고 한다.

##### 3.1.2 로봇의 구동 메카니즘

이러한 설계조건을 바탕으로 여러가지 로봇의 설계안을 검토하였다. 로봇의 구동 메카니즘을 결정하기 위해 중요한 요소는 2가지인데 로봇을 이동할 수록 구동하는 기구이고 다른 하나는 로봇을 벽면에 흡착하는 기구이다. 먼저, 로봇을 이동하는 구동 메카니즘으로는 다절몸체 방식과 보행로봇 방식 그리고 휠구동방식, 프로펠라 구동방식이 있다. 각각의 장단점을 비교한 결과 정속주행이 가능하고 비교적 그 구조가 간단한 휠 구동방식과 프로펠라 구동방식이 유리할 것으로 판단된다. 벽면을 안정적으로 주행하려면 벽면에 충분한 부착력을 가해주는 기구가 필요한데 이러한 방법으로는 흡반과 프로펠라가 있다. 흡반의 경우 부착과 탈착을 기저야하므로 연속적으로 주행 할 수 있는 프로펠라를 이용한 흡착방법이 더 유리하다고 판단된다.

앞의 휠 구동 방식의 경우 벽면의 부착력은 프로펠라를 이용하여 발생시키고 로봇의 이동은 일반 이동로봇과 마찬가지로 휠을 이용하여 구동하여 이동하는 방식이다. 이 방법은 구동방법과 제어는 간단하나, 벽면과의 마찰이 충분치 않은 경우 미끄러짐이 발생할 수 있는 단점이 생긴다. 특히 TRIGA의 내부

에는 물이 오랫동안 채워져 있고 수중 벽면은 AI로 되어있어 충분한 마찰력을 얻기가 어렵다. 프로펠라에 의한 추진 방식은 추진기의 비선형적인 동역학 특성에 의해 제어가 다소 어려워 지지만 수중에서 연속적인 운동이 가능하고 비교적 다른 방법과 비교해 빠른 이동속도를 기대할 수 있다. 따라서 여기에서는 프로펠라의 구동 방식을 선택하였다.

##### 3.1.3 추진기의 배치

로봇을 원하는 방향으로 적절하게 움직이게 하기 위해서는 프로펠라 추진기의 위치선택이 중요하다. 이 로봇에 필요한 추진력은 크게 4가지로 요약할 수 있는데, 전후 방향의 추진력, 방향전환의 추진력, 중력/부력 보상 추진력 그리고 벽면방향의 흡착을 위한 추진력이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 벽면 주행기구에는 모두 5개의 추진기가 부착되어있다. 주추진기(main thruster)는 전후 방향 추진력을 발생시키기 위해 횡 방향추진기(side thruster)는 로봇의 방향전환과 중력/부력 보상 추진력을 위해 그리고 수직추진기(vertical thruster)는 로봇의 벽면 흡착을 위해 배치하였다. 이 경우에 추진기에 의해 작용하는 힘은 한 축으로만 작용하기 때문에 각축이 다른 축과 독립적이 되어 제어에 용이한 장점을 갖는다. 그리고 흡착력을 얻는 수직 추진기는 고정된 속도로 일정한 추진력을 발생시키면 되므로 서보 제어가 필요한 추진기의 수는 모두 3개이다.

##### 3.1.4 추진기의 선정

로봇의 운동을 위해 적절한 크기의 추진기의 선정이 요구된다. 이를 위해서는 모터의 회전수와 토크 그리고 추진력과 관계를 정확하게 알고 있어야 한다. 프로펠라의 성능은 프로펠라의 diameter와 pitch로 나타내어지며 여기에서는 간단한 모델을 이용하여 프로펠라의 추진력을 해석하여 추진기의 선정에 반영하였다. 여기에서 사용할 프로펠라는 직경이 120mm이고 프로펠라의 블레이드의 수가 2개인 것을 사용하였다. 재질은 플라스틱으로 되어있고 직경에 비해 피치가 큰 값을 가지고 있어 고속으로 회전하는 경우 큰 힘을 낼 수 있다. 또한 프로펠라에 있어서 덕트가 부착된 경우에 추진 효율을 크게 증가시킬 수 있으므로 덕트를 부착시킨 추진기를 사용하였고 이 덕트는 추진기의 효율뿐 아니라 프로펠라를 보호하는 목적으로도 사용된다.

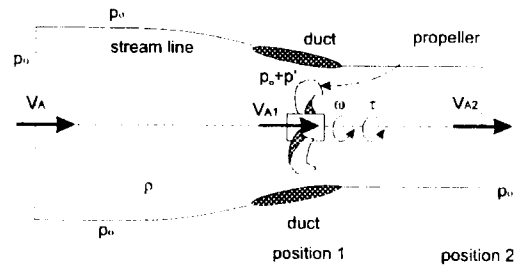


그림 3 추진기의 schematic diagram

프로펠라의 선정을 위해 프로펠라의 추진력을 해석적인 방법을 통해 구하였다. 그림 3에 일반적인 프로펠라에 대한 schematic diagram을 나타냈다. 프로펠라의 주위에 프로펠라의 효율을 이기 위해서 덕트를 설치하였다. 프로펠라의 단면적은  $A$ 이고 유체의 밀도는  $\rho$ . 프로펠라에 물이 들어가는 속도는  $V_{A1}$ 이고 (1)-지점에서의 속도는  $V_{A1}$ 이고 (2)-지점에서의 속도는  $V_{A2}$ 라고 하였다. 먼저 프로펠라의 해석을 위한 가정은 다음과 같다. 에너지는 유체의 운동에너지로부터 적잖이 되고 외부의 주변 유체의 운동은 무시하였다. 그리고 마찰에 의한 에너지 손실은 고려하지 않았으며 유체는 비압축성이라고 가정하였다. 그리고 중력의 영향을 무시하였다.

그림과 3.2와 같이 프로펠러에 유체가  $V_A$ 의 속도로 들어가고, 유체가 프로펠러를 거쳐 나오는 (2)-지점의 속도를  $V_{A2}$ 라고 하면, 베르누이 방정식에 의해 (1)-지점과 프로펠러 사이의 관계식은 아래와 같다[4, 5].

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_A^2 = p + \frac{1}{2}\rho(V_{A1}^2 + v^2) \quad (1)$$

이때  $v$ 는 유체의 각속도 성분이다.

동일하게 프로펠러와 (2)-지점사이에서 베르누이 방정식에 적용하여 보면

$$p_0 + p' + \frac{1}{2}\rho(V_{A1}^2 + v^2) = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_{A2}^2 \quad (2)$$

압력의 증가량으로부터 넓이  $A$ 에 작용하는 전체 추력을 구해 보면

$$F_T = Ap' - \frac{1}{2}\rho A \Delta V_2^2 (2 + \Delta V_1^2) V_A \quad (4)$$

반작용의 법칙에 의해 mass flow rate에 의해 얻어지는 thrust는

$$F_T = (\text{mass flow rate}) \{ (V_A + \Delta V_2) - V_A \} = \rho A (V_A + \Delta V_2) \Delta V_2 \quad (5)$$

따라서 프로펠러에 의해 얻어지는 추진력은

$$T = 2\rho A V_A (1 + \Delta V_2) V_A \quad (6)$$

프로펠러로 들어가는 물의 속도가 거의 0에 가깝다고 가정할 수 있으므로  $V_A = 0$ 으로 놓을 수 있다.

따라서 얻고자 하는 추력과 power의 관계식은

$$\text{Power} = \frac{F_T^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (7)$$

따라서 얻고자하는 추력이 결정되면 필요한 Power를 구할 수 있다. 추력은 프로펠러가 내는 힘을 나타내고 여기에 필요한 power는 모터에 의해 작용되는 값이므로 이 식으로부터 적절한 모터의 용량을 결정할 수 있다[6].

### 3.2 내부 제어 시스템

본 로봇은 여러개의 모터와 여러개의 센서의 값을 읽어야 하므로 하나의 제어기가 모든 연산과 제어를 하는 중앙집중식 제어구조가 아닌 여러개의 제어기를 사용하는 분산 제어구조로 제어기를 구성하였다. 본 연구에서는 하나의 상위 레벨 제어기와 3개의 하위 레벨 제어기를 사용하는 분산구조를 택하였는데 각각의 하위 레벨 제어기에서는 주로 모터를 제어하고 각각의 센서 값을 읽고 상위 제어기에서는 얻어진 센서값을 바탕으로 각각의 모터에 적절한 입력값을 계산하고 하위 레벨 제어기에 전달하는 역할을 한다. 제어기의 구조는 그림 4와 같다.

#### 3.2.1 상위 레벨 제어기

상위레벨 제어기의 프로세서로는 intel 80C196을 사용하였다. 80C196은 연산이 비교적 빠르고 프로그램의 개발이 쉬운 잇점이 있다 그리고 주로 모터를 제어하는 하위레벨 제어기에 사용하는 프로세서와 같으므로 개발하기 편리한 잇점이 있다. 이 상위레벨 제어기에서는 센서로부터 얻어진 값을 바탕으로 각각의 모터의 출력값을 로봇의 동역학 모델을 가지고 계산하여 하위레벨 제어기에 전달하는 역할을 한다. 이때 하위레벨 제어기와 통신은 DPROM을 이용하여 이루어진다.

#### 3.2.2 하위레벨 제어기

하나의 하위레벨 제어기는 2개의 모터를 제어한다. 실제로 하위레벨 제어기의 주목적은 상위레벨 제어기의 명령에 따라 모

터를 제어하고 각각의 센서로부터 얻어진 값을 읽어 상위레벨 제어기에 전달하는 역할을 한다. 여기에서는 모터 제어에 용이한 80C196 프로세서를 사용하였다. 이 80C196은 내부에 3개의 PWM(pulse width modulation) 신호를 만들 수 있기 때문에 제어를 간단하게 제작할 수 있고 내부의 카운터로 제어할 때 필요한 일정한 시간간격을 쉽게 얻을 수 있다.

#### 3.2.3 제어기 사이의 통신

여러개의 제어기를 사용하는 경우 제어기 사이에는 통신이 이루어져야 한다. 통신하는 방법에는 크게 직렬 통신과 병렬 통신이 있는데 여기에서는 비동기 통신 방식인 DPROM을 사용한 통신 방법을 사용하였다. 이 DPROM의 구조는 같은 RAM을 서로 다른 제어 단자를 사용하여 두개의 프로세서가 읽고 쓸 수 있는 구조이다.

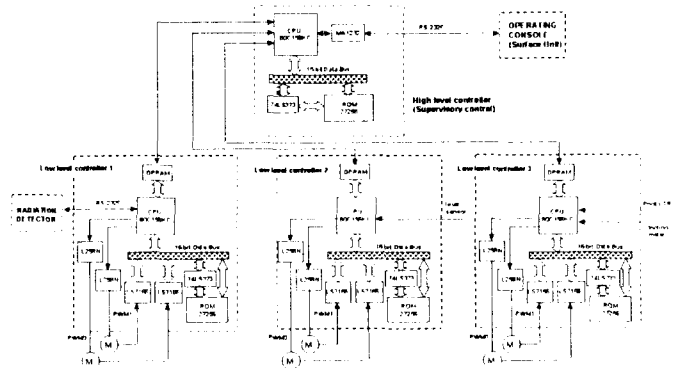


그림 4. 전체 제어 시스템의 구조

### 3.3 센서 시스템

로봇이 주위 환경에 능동적으로 반응하기 위해서 이용하는 센서로는 다음과 같은 센서들이 있다.

#### 3.3.1 카메라

로봇의 주위 환경을 인식하기 위해서 로봇의 앞부분에 카메라를 설치하였다. 이 카메라에서 얻어진 영상정보는 지상에서 로봇의 주위 환경을 인식하고 로봇의 동작을 모니터링 하는데 쓰인다.

#### 3.3.2 수심측정

수중벽면 로봇은 벽면에 부착된 상태에서 평면을 움직이기 때문에 이동 로봇과 동일한 구성을 가진다. 따라서 로봇의 위치와 자세를 결정짓는 것은 X-Z 평면상의 좌표와 바닥으로부터 기울어진 각도 등 3가지의 위치/자세 정보이다. 이 중에서 수면으로부터의 깊이 정보는 압력센서를 이용하여 측정할 수 있다.

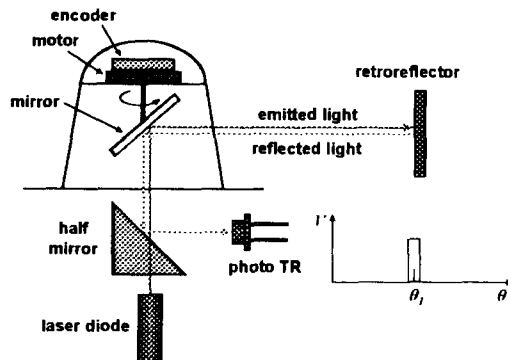
#### 3.3.3 위치인식 센서(localization sensor)

로봇이 자율적으로 작업하기 위해서는 로봇 스스로의 위치를 인식하는 위치인식 시스템이 필요하다. 본 로봇에 사용되는 위치인식 센서는 그림과 같이 구성하였다. 그림에서와 같이 레이저를 모터와 광학시스템을 이용하여 로봇 주위에 회전시키고 거리를 미리 알고있는 벽면에 부딪시켜 놓은 재귀반사체에 반사되어 다시 로봇으로 돌아오는 빛의 각도를 측정하여 로봇의 벽면에서의 위치를 측정한다. 이때, 로봇이 중력에 대하여 기울어진 각을 측정하기 위해서 경사도 센서(inclinometer)를 사용한다. 이때 로봇이 기울어진 각도를  $\phi$ 라고 하고 두 벽면에 붙여놓은 재귀반사체의 측정 각을 각각  $\theta_1, \theta_2$ 라고 하면 수심 h와 벽면에서의 거리 d는 각각

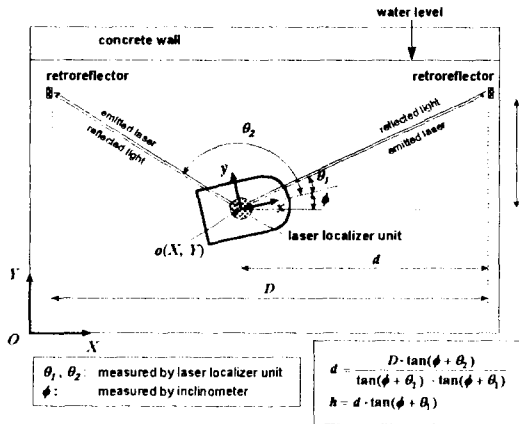
$$h = d \cdot \tan(\phi + \theta)$$

$$d = \frac{D \cdot \tan(\phi + \theta_2)}{\tan(\phi + \theta_2) - \tan(\phi + \theta_1)} \quad (8)$$

로봇은 벽면을 이동하는 2차원 운동을 하므로 2값을 측정하면 자기의 위치를 정확하게 알 수 있다.



(a) 위치 인식 센서의 원리



(b) 위치 인식 센서의 측정 원리

그림 5. 위치 인식 센서의 구성

#### 4. 프로토타입의 제작

앞에서 설명한 과정을 거쳐 설계된 로봇의 타당성을 검증하고 어떠한 문제점이 있는지 알아보기 위해 프로토타입을 제작하였다. 선정된 모터와 제어를 설계하고 제작하는데 오랜 시간이 걸리기 때문에 이 프로토타입에서는 일반적으로 R/C 모형 비행기나 모형배에서 사용하는 무선조종기로 조종이 가능하도록 제작하였고 후에 서어보 모터로 교체가능하도록 제작했다. 로봇의 몸체는 FRP 재질로 제작하였다. 그러나, FRP는 내부의 섬유질이 방사능에 오래 쬐일 경우에 부스러지기 쉬운 재질로 변화되기 때문에 원자력 시설에 적용할 수 없다. 그러므로, 향후에는 로봇의 몸체를 AI 합금 등 방사능을 견딜 수 있는 재질로 변경하여야 한다. 프로토타입에는 모형 자동차와 선박에서 이용하는 소형이면서 고속, 고효율인 브러쉬리스 방식의 직류모터를 이용한다.

앞에서 선정한 직류시보 모터는 프로토타입에서 사용하는 모터보다 치수가 크므로, 향후에 교체될 것을 고려하여 몸체에는 충분한 공간을 확보할 수 있도록 제작하였다. 프로토타입은 모형 비행기에 이용되는 R/C 무선조종기로 제어할 수 있도록 제작되었다. 즉, 무선조종기의 각 레버를 밀고당김에 따라 개개의 모터의 속도를 제어할 수 있다. 그런데, 수중에서는 전파가 전달되지 않으므로 로봇 내부의 수신기는 안테나선을 외부로

연결하여 로봇을 수동으로 제어하고자 한다. 이 무선 조정 장치를 사용함으로써 로봇의 성능 테스트와 기본적인 실험을 수행할 수 있으므로, 로봇의 개발에 큰 도움이 되리라 생각한다.

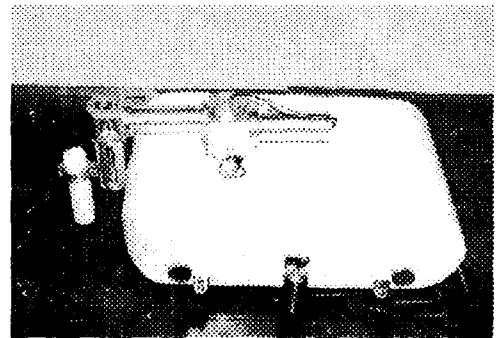


그림 5. 제작된 프로토타입

#### 5. 결론

벽면을 주행하면서 검사하기 위한 수중 벽면 주행 로봇을 설계하였다. 원자력 발전소의 내부의 검사에 필요한 설계조건을 선정하여 사용 목적에 맞도록 로봇의 구동방식을 프로펠라 구동방식으로 선정하였고 로봇은 크게 세부분으로 나뉘어지는데 먼저 기계부는 몸체와 로봇의 구동 메카니즘의 설계가 중요한 요소이다. 몸체는 FRP를 이용하여 항력이 작게 작용하는 구조로 설계하였고 구동 메카니즘은 여러가지 사항을 고려하여 프로펠라 구동방식으로 결정하였다. 로봇의 자율성을 최대한으로 하기 위해서는 로봇이 자기의 위치를 인식해야하며 이를 바탕으로 정해진 작업을 할 수 있도록 제어할 수 있어야 한다. 이를 위해 자기위치 인식 시스템을 개발하였으며 제어를 위해 전용 제어 보드를 설계하였다. 그리고 이를 바탕으로 프로토타입을 제작하여 실제 적용에서의 문제점을 파악할 수 있도록 하였다.

#### 후기

본 연구는 원자력 연구소의 제염해체 및 환경복원기술 개발과제의 진행결과와 일부입니다. 본 연구를 지원해주신 원자력 연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 아주대학교 에너지문제연구소, 2000년대 원자력 전망 및 대처 방안 수립에 관한 연구, 한국전력공사 기술개발처, 1989
- [2] J. Yuh, Development in underwater robotics, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Auto., pp.1862-1867, 1995
- [3] 원자력 연구소 원자력 환경관리센터, 벽면주행 기구 설계 제작 1차년도 보고서, 1996
- [4] 한국기계연구원, 해사기술연구소, 해양 작업 시스템 개발 (II), 1991
- [5] Barnes W. McCormick, Aerodynamics, aeronautics and flight mechanics, Wiley and sons, 1979
- [6] J. Yuh, Learning control for underwater robotic vehicles, IEEE Control Systems, pp. 39-46, April, 1994