

공학석사 학위논문

새로운 Convertible ROV의 설계 연구

Study of Design for Convertible ROV



2011년 6월
한국해양대학교 대학원
기계공학과
전지광

本 論 文 을 田智廣의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 조 종 래 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 정 재 현 (인)



2011년 6월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

기호설명

그림목차

표 목차

제 1 장. 서론

제 2 장. 수중 로봇의 운동방정식

2.1 수중 로봇의 기구학

2.2 수중 로봇의 운동방정식

2.2.1 오일러 각도

2.2.2 선형 속도 변환

2.2.3 각속도 변환

2.2.4 수중 로봇의 동역학

제 3 장. CROV 기구부 구성

3.1 CROV의 기구부 설계

3.2 매니플레이터의 설계

3.3 추진체 설계

3.4 내압 하우징 설계

제 4 장. CAUV 기구부 구성

3.1 CAUV의 기구부 설계

3.1.1 추력계산

제 5 장. CROV 제어부 설계

4.1 CROV 제어시스템의 구성

4.2 모터 제어 알고리즘

4.2.1 위치 제어 알고리즘

4.2.2 정속 제어 알고리즘

4.3 센서 구성 및 잠수정 위치 제어 알고리즘

4.3.1 CROV의 센서 구성

4.3.2 실시간 복합 PID 제어 알고리즘

제 6 장. 전용 조종기의 개발

5.1 조종기의 구성

5.2 6자유도 조종 알고리즘

제 7 장. 실험 및 고찰

제 8 장. 결론

참고문헌

Study of Design for Convertible ROV

Kwang Ji Jeon

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

This paper present the development of the six d.o.f. Convertible Remotely Operated Vehicle(CROV). In mechanical system, the design specification of the structure of propulsion actuators and vehicle frame is presented. We have designed seven independent thruster and the control housing and manipulator of the controller for underwater operation. We present a control system including motion control of motors and main controller and a communication based on optical Communications method for interrelated control between the controllers and actuators. control algorithm and control system under the water.

기호 설명

η	위치와 자세 벡터
ν	병진과 회전속도 벡터
τ	수중 로봇의 전체 힘과 모멘트 벡터
$M_{\eta}(\eta)$	강체의 관성행렬
$C_{\eta}(\nu, \eta)$	코리올리 및 원심력 항
$D_{\eta}(\nu, \eta)$	댐핑행렬
$g_{\nu}(\eta)$	중력 힘과 모멘트 벡터
τ_{η}	제어 입력 벡터
D	잠수정에 가해지는 항력
C_D	항력계수
ρ	평균 바다 밀도
A	잠수정의 투영 면적
P_m	모터의 출력
P_p	프로펠러의 추진력
$K_m(S)$	모터 엔코더 센서의 회전 속도 값
$K_s(S)$	잠수정의 위치 및 자세 데이터 값

그림 목 차

Fig. 2.1 Earth-fixed and Body-fixed coordinate system	4
Fig. 3.1 3D modeling of the KMU-ROV	13
Fig. 3.2 Outward form of the KMU-ROV	13
Fig. 3.3 Actuator configuration for the 6 D.O.F	15
Fig. 3.4 Waterproof design of cylinder cover and motor rotor	19
Fig. 3.5 Motor cylinder cover and rotor	19
Fig. 4.1 Total control system of the KMU-ROV	20
Fig. 4.2 Motor controller	22
Fig. 4.3 Sensor DSP board	23
Fig. 4.4 Motor driver	24
Fig. 4.5 Message frame of CAN 2.0A	26
Fig. 4.6 Reference profile for motors	28
Fig. 4.7 Velocity change in acceleration profile	29
Fig. 4.8 Program of the velocity profile	30
Fig. 4.9 Program of interrupt routine	31
Fig. 4.10 PID controller with feedforward term	31
Fig. 4.11 System of the concurrent control	32
Fig. 4.12 PID controller for the concurrent control	34
Fig. 4.13 Program of the concurrent control	34
Fig. 4.14 Interface board of 2 axis tilt sensor	36
Fig. 4.15 Magnetic compass	36
Fig. 4.16 Pressure sensor ECO-1	37
Fig. 4.17 Waterproof CCD camera	37
Fig. 4.18 Realtime hybrid PID controller	38

Fig. 4.19 Flow diagram of the realtime hybrid PID control	40
Fig. 4.20 Program of the realtime hybrid PID control	41
Fig. 5.1 Operating joystick of the KMU-ROV	42
Fig. 5.2 View of the text LCD	43
Fig. 5.3 The coordinate system of the KMU-ROV	44
Fig. 5.4 Definition trust and distance of the KMU-ROV	45
Fig. 6.1 Concurrent control with result (Input data 100)	47
Fig. 6.2 Concurrent control with result (Input data 300)	48
Fig. 6.3 Concurrent control with result (Input data 400)	48
Fig. 6.4 Concurrent control with result (Input data 500)	49
Fig. 6.5 Sailing test in the sea	50
Fig. 6.6 Hovering control test in the sea	51
Fig. 6.7 Hovering control with result	52
Fig. 6.8 Depth control test in the sea	53
Fig. 6.9 Depth control with result (Input data 2m)	54
Fig. 6.10 Depth control with result (Input data 4m)	54
Fig. 6.11 Yawing control test in the sea	55
Fig. 6.12 Yawing control with result	56
Fig. 6.13 Underwater investigation in a wharf	57

표 목 차

Table 2.1	6 D.O.F motion of the underwater robot	5
Table 3.1	Mechanism specification of the KMU-ROV	14
Table 3.2	Total and modular resistance force for KMU-ROV	17
Table 4.1	Specification of the motor controller	22
Table 4.2	Sensor of the KMU-ROV	35
Table 4.3	Gain of PID control	39



제 1 장 서 론

과학이 발달함에 따라 인간은 지구뿐 만 아니라 우주까지 탐사를 하게 되었다. 그러나 아직 지구상에서 해양은 탐사되지 않은 곳이 많은 미지의 영역으로 남아 있다. 그 중에서도 심해저는 높은 가치를 지니는 해양 광물의 보고로서 자원 고갈 문제가 심각해지는 현 세계에 많은 관심을 받고 있다. 이러한 해양에 대한 관심과 해양으로부터의 각종 자원개발이 활발해 지면서 해저에서 각종 조사, 탐사 및 작업을 수행하는 수중 작업 기술은 지난 20여 년간 해양 활동을 지원하고 해양자원의 개발 및 관리를 지원하는 중요한 수단으로 발전해 왔다. 최근에는 작업의 요구 수심이 깊어지고 원격제어 및 통신 기술이 눈부시게 발전함에 따라 수중 작업 기술이 다양하게 이루어지고 있다[1].

수중 로봇은 해양의 개발이 활발하게 진행되면서 각종 수중작업의 수요가 늘어남으로 인해 그 중요성이 높아지고 있다. 수중 로봇 기술은 해양 기술 자립에 필수적으로 요구 되어 지는 핵심 기술이다. 이들의 기술개발은 주로 심해 생물·생태계 조사, 심해 생명과학 연구, 해저 지질학 연구, 해양 자원 조사 등의 해양 과학조사와 해양 구조물 설치, 해저 모니터링, 해양 에너지 개발, 해저 구난, 해저 지진 감시, 해저 석유 산업분야와 해저 광통신 선로공사 등 민수 부분과 유실물회수, 기뢰 제거 등 특수 군사적인 수요가 주도하고 있다[12].

이 연구의 중심에는 무인잠수정이 있으며, 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 유선 원격제어 무인 잠수정 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 자율 무인 잠수정 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 나눌 수 있다.

ROV는 모선에 연결된 케이블을 통한 수동적인 제어로 구동되고 보통의 경우에는 작업을 위한 매니플레이터가 달려있어 정적 혹은 저속의 운동에서 작업을 수행한다. AUV는 원격조종과 동력전달을 하기 위한 별다른 장치 없이 동력원과 스스로 움직이기 위한 제어장치를 갖추고 수중에서 항해를 하며 작업을 할 수 있다.

70년대 초부터 현재에 이르기까지 주로 해양 석유산업의 수요에 의해 발전해 온 유인잠수정과 유선 무인잠수정(ROV)을 제 2세대 잠수정이라고 한다면 AUV는 그보다 발달한 제 3세대 잠수정으로 그 활용도가 크게 증가할 것으로 주목을 받고 있다.[1]

이미 세계 각국에서 많은 연구가 이루어지며 일본의 경우 해양과학연구센터(JAMSTEC)에서 10,000m급의 중 작업 ROV인 '카이코우'가 개발에 성공하였고 3,500m급 AUV '우라시마'가 개발 완료된 상태이다. 우리나라에서는 선진해양국에 비하여 무인잠수정의 개발이 늦었으나, 대우중공업에서 1996년 러시아로부터 6,000m급 AUV의 기술을 도입하여 요소기술을 확보 '옥포 6000'을 개발하였으며, 2001년부터 해양수산부의 6,000m급 무인잠수정 개발 사업을 진행 2006년 해미래를 개발하여 현재 실 해역에서 실험 중이다[10]. 또한 한국 원자력 연구소에서도 원전의 주요 시설에 대한 감시와 점검을 위한 잠수정이 개발되어 운용되고 있다. 방사능에 대한 위험에 노출되어 있어 방사능에 내구성이 강한 잠수정을 개발하여 사용하고 있다[16]. 현재 잠수정의 개발뿐 만 아니라 해저 로봇 팔 기술, 수중 초음파·관성 항법, 도킹 기술 그리고 자세 제어 등 국내의 기업과 대학에서 활발히 연구 중이다.

본 논문에서는 근해에 정박해 있는 선박과 해양 환경을 조사하기 위한 CROV(Convertible ROV)라는 무인 잠수정 개발하려고 한다. 그리고 단독으로는 넓은 지역 탐사와 자유로운 항해가 어려운 ROV와 제작비가 비싼 AUV의 장단점을 보완하여 복합적인 시스템의 무인잠수정을 개발하려고 한다. 수심 200m급의 잠수정을 목표로 하여 설계하였다

본 논문에서는 해양 환경을 조사하기 위한 무인 잠수정 개발하려고 한다. 그리고 단독으로는 넓은 지역 탐사와 자유로운 항해가 어려운 ROV와 제작비가 비싼 AUV의 장단점을 통합하여 복합적인 시스템의 무인잠수정을 개발하려고 한다.

제 2 장 수중 로봇의 운동방정식

2.1 수중 로봇의 기구학

6자유도를 지닌 수중 로봇의 운동을 해석하기 위해서 Fig. 2.1에서 표현되는 동체 고정 좌표계(Body-fixed coordinate system)인 $X_0 Y_0 Z_0$ 와 지구 고정 좌표계(Earth-fixed coordinate system) XYZ 를 정의하여야 한다. 일반적으로 동체 고정 좌표계에서 원점 O 는 무게 중심과 일치시킨다. 수중로봇을 위한 동체 축에서 X_0 은 길이방향의 축, Y_0 은 횡 방향 축 그리고 Z_0 은 수직방향의 축으로 정의한다. 동체 고정 좌표계에서의 운동은 지구 고정 좌표계에 관하여 표현한다[2].

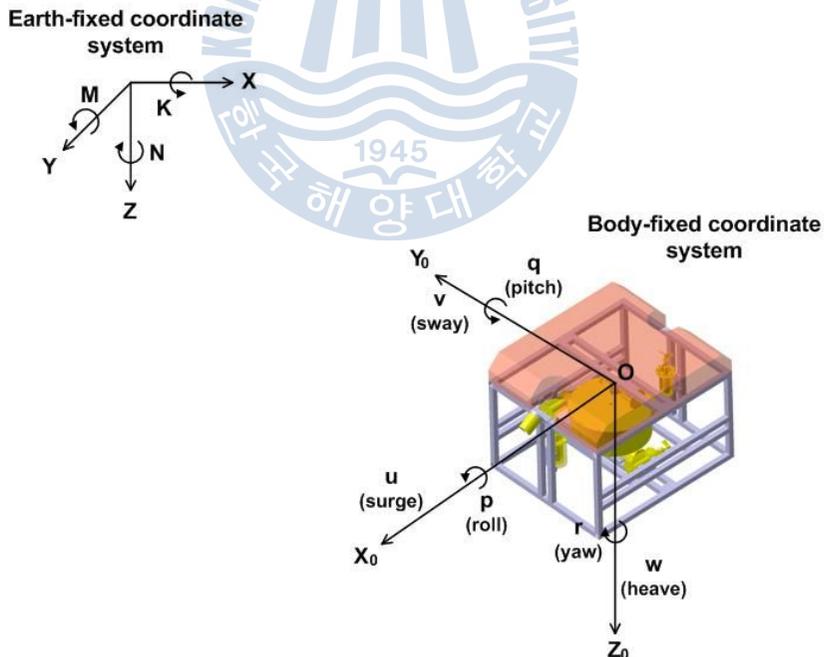


Fig. 2.1 Earth-fixed and body-fixed coordinate system

지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 수중 로봇의 속도에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정 좌표계는 관성 고정 좌표계(Inertial-fixed coordinate system)이라고도 한다. 따라서 수중 로봇의 위치와 자세는 관성 고정 좌표계를 통해 표현하며, 수중 로봇의 선형 속도와 각 속도는 동체 고정 좌표계에 의해 표현된다.

수중 로봇의 6자유도 운동은 Table 2.1과 같이 정의할 수 있다.

Table 2.1 6 D.O.F motion of the underwater robot

6 자유도 운동	힘, 모멘트	선형 속도와 각속도	위치와 오일러 각도
x축 직선 운동(surge)	X	u	x
y축 직선 운동(sway)	Y	v	y
z축 직선 운동(heavy)	Z	w	z
x축 회전 운동(roll)	K	p	Φ
y축 회전 운동(pitch)	M	q	θ
z축 회전 운동(yaw)	N	r	ψ

지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 기준 좌표계 즉, 본 논문에서는 지구 고정 좌표계를 각 축에 대하여 3번 회전시켜 동체 고정 좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로 회전은 요(ψ), 피치(θ), 롤(Φ)의 순으로 정한다. 오일러 각의 경우 동체의 자세가 수직에 가까워지면 자세를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있으나 수중 로봇의 경우 자세가 수직에 가까운 운동이 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다고 판단되어 채택하였다[3].

2.2 수중 로봇의 운동방정식

2.2.1 오일러 각도

6자유도 수중 로봇의 운동은 식 (2.1)의 벡터들로 묘사할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T & \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\Phi \ \theta \ \psi]^T \\
 \nu &= [\nu_1^T \ \nu_2^T]^T & \nu_1 &= [u \ v \ w]^T & \nu_2 &= [p \ q \ r]^T \\
 \tau &= [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T & \tau_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \tau_2 &= [K \ M \ N]^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

η 는 지구 고정 좌표계로 표현하는 위치와 자세이고, ν 는 동체 고정 좌표계로 표현하는 병진과 회전 속도이다. 그리고 τ 는 동체 고정 좌표계로 표현하는 수중 로봇의 전체 힘과 모멘트이다.

동체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계 사이의 병진 속도의 좌표 변환은 식 (2.2)와 같은 행렬로 표현된다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1 \tag{2.2}$$

식 (2.2)를 행렬로 표현하면 식 (2.3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

여기서 $J_1(\eta_2)$ 는 오일러 각도 롤(Φ), 피치(θ), 요(ψ)의 함수를 통해 구성된 변환 행렬이다.

각 축에 대한 기본적인 회전형렬은 식 (2.4)와 같은 일반적인 각 축에 대한 회전 각도로 나타낸다.

$$C_{x,\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix}, C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.2 선형 속도 변환

직교 좌표 공간상에서 자세는 기준 좌표계의 축에 대한 연속적인 회전으로 일반화시켜서 생각할 수 있다.

3회의 회전을 통해 $J_1(\eta_2)$ 을 변환행렬이라 하며, 수중 로봇은 오일러 각도의 항들로 회전을 표현한다. 오일러 각도를 이용한 좌표 변환은 z 축을 중심으로 Φ 만큼 회전한 후, y 축을 중심으로 θ 만큼 회전시키고 마지막으로 x 축을 중심으로 ψ 만큼 회전하여 식 (2.5)의 행렬로 표현할 수 있다.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\Phi + \cos\psi\sin\theta\sin\Phi & \sin\psi\sin\Phi + \cos\psi\cos\Phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\Phi + \sin\psi\sin\theta\sin\Phi & -\cos\psi\sin\Phi + \sin\psi\sin\theta\cos\Phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\Phi & \cos\theta\cos\Phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.3 각 속도 변환

동체 고정 좌표계로 표현되는 각속도 벡터 $\nu_2 = [p \ q \ r]^T$ 와 오일러 속도 벡터 $\dot{\eta}_2 = [\dot{\Phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ 와의 관계는 변환 행렬 $J_2(\eta_2)$ 에 의해 식 (2.6) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) \nu_2 \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 행렬로 표현하면 식 (2.7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 자세는 식 (2.8)과 같다.

$$\nu_2 = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\Phi} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\Phi} \cdot C_{y,\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 \quad (2.8)$$

식 (2.8)로부터 변환행렬 $J_2(\eta_2)$ 을 행렬로 나타내면 식 (2.9)와 같다.

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \frac{\sin\Phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2개의 오일러 각도 $J_1(\eta_2)$ 와 $J_2(\eta_2)$ 의 표현으로 기구학적 방정식을 표현하면 식 (2.10)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

지구 고정 좌표계에 대한 수중 로봇의 속도와 각속도는 오일러 각을 이용하여 다음의 식 (2.11)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos\psi \cos\theta + v [\cos\psi \sin\theta \sin\Phi - \sin\psi \cos\Phi] + w [\cos\psi \sin\theta \sin\Phi + \sin\psi \sin\Phi] \\ \dot{y} &= u \sin\psi \cos\theta + v [\sin\psi \sin\theta \sin\Phi + \cos\psi \cos\Phi] + w [\sin\psi \sin\theta \sin\Phi - \cos\psi \sin\Phi] \\ \dot{z} &= -\sin\theta + v \cos\theta \sin\psi + w \cos\theta \sin\Phi \\ \dot{\Phi} &= p + q \sin\Phi \tan\theta + r \cos\Phi \tan\theta \\ \dot{\theta} &= q \cos\Phi - r \sin\Phi \\ \dot{\psi} &= \frac{(q \sin\Phi + r \cos\Phi)}{\cos\theta} \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2.4 수중 로봇의 동역학

수중 로봇의 6자유도 비선형 운동방정식은 식 (2.12)와 같다.

$$M_\eta(\eta)\dot{\nu} + C_\eta(\eta)\nu + D_\eta(\eta)\nu + g_\nu(\eta) = \tau_\eta \quad (2.12)$$

이 식에서 $M_\eta(\eta)$ 는 강체의 관성행렬, $C_\eta(\nu, \eta)$ 는 코리올리 및 원심력 항, $D_\eta(\nu, \eta)$ 는 댐핑행렬, $g_\nu(\eta)$ 는 부력을 포함한 중력 힘과 모멘트 벡터, τ_η 는 제어 입력 벡터이다. $\eta = [x, y, z, \Phi, \theta, \psi]^T$ 는 지구 고정 좌표계에서의 위치와 오일러 각이며, $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$ 는 동체 고정 좌표계에서의 속도와 회전 각속도이다[4].

강체의 관성 행렬 M_η 은 식 (2.13)과 같다.

$$M_\eta = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yz} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

여기서 I 행렬은 단위행렬이며, $S(r_G)$ 는 지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 원점의 벡터 $r_G = (x_G, y_G, z_G)^T$ 의 왜대칭행렬이다.

그리고 x_G, y_G, z_G 은 지구 고정 좌표계에 대한 동체 고정 좌표계의 원점이다.

지구 고정 좌표계에 대한 코리올리 및 원심력 항 $C_\eta(\nu)\nu$ 은 식 (2.14)의 6×6 관성행렬로부터 식(2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$C_\eta(\nu)\nu = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) \\ -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) & -S(M_{21}\nu_1 + M_{22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G p - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & -m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{y_z} q - I_{x_z} p + I_z r & I_{y_z} r + I_{x_y} p - I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) & I_{y_z} q + I_{x_z} p - I_z r & 0 & -I_{x_z} r - I_{x_y} q + I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G p - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{y_z} r - I_{x_y} p + I_y q & I_{x_z} r + I_{x_y} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

수중로봇의 댐핑 행렬 $D_\eta(\nu)$ 은 식 (2.16)처럼 대각행렬로 나타낼 수 있다.

$$D_\eta(\nu) = -diag[X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r] \quad (2.16)$$

$$-diag[X_{|u|}, Y_{|v|}, Z_{|w|}, K_{|p|}, M_{|q|}, N_{|r|}]$$

운동 방정식의 단순화를 위해 동체 고정 좌표계의 원점이 부력 중심과 일치한다는 가정을 하고 부력을 포함한 중력 힘과 모멘트 벡터 $g_\nu(\eta)$ 을 무시한 수중 로봇의 6자유도 운동은 식 (2.17)과 같다[4].

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \Sigma X$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp - \dot{r})] = \Sigma Y$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = \Sigma Z$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - up + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = \Sigma K$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma M$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \Sigma N \quad (2.17)$$

수중 로봇의 운동에 영향을 미치는 유체 정역학, 유체 동역학 댐핑, 프로펠러 추진과 토크 등을 포함한 힘과 모멘트의 운동방정식에서 제어 입력 값인 가속도 항을 분리한 6자유도 운동방정식을 행렬 형태로 단순화하면 식 (2.18)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2}L^3X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m - \frac{\rho}{2}L^3Y_{\dot{v}} & 0 & -mz_G - \frac{\rho}{2}L^4Y_{\dot{p}} & 0 & mx_G - \frac{\rho}{2}L^4Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m - \frac{\rho}{2}L^3z_{\dot{w}} & my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2}L^4z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -mz_G + \frac{\rho}{2}L^3K_b & -I_{xy}\dot{q} + my_G & I_x - \frac{\rho}{2}L^6k_p & -I_{xy} & I_{xy} - \frac{\rho}{2}L^6K_r \\ mz_G & 0 & -mx_G + \frac{\rho}{2}L^4M_{\dot{u}} & -I_{xy} & I_y - \frac{\rho}{2}L^6M_{\dot{q}} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G - \frac{\rho}{2}L^4N_b & 0 & I_{xy} + \frac{\rho}{2}L^6N_{\dot{p}} & -I_{yz} & I_z - \frac{\rho}{2}L^6N_{\dot{r}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

제 3 장 CROV 기구부 구성

3.1 CROV 기구부 설계

무인 잠수정의 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 항해 형으로 비교적 넓은 영역을 조사하기 위해 빠른 속도를 요구하는 잠수정의 형태이다. 이러한 형태는 선체의 유체저항을 최소화하기 위해 유선형의 선체로 제작되며, 종축 방향의 주 추진기를 이용하여 운동을 제어한다. 두 번째는 항해 영역보다는 해저나 수중 구조물 등의 정밀 조사를 목적으로 하여 자기 위치 유지 및 자세제어에 용이하도록 여러 대의 추진기를 6 자유도 운동제어에 적합하도록 각도를 가지고 배치한 형태이다[5].

본 연구에서의 ROV는 수심 200m급을 목표로 Fig. 1과 같이 ROV와 AUV의 특성을 동시에 만족할 수 있는 컨버터블 AUV를 설계 하였다. 전체 기구부 구성은 선체, 제어하우징, 테더케이블, 매니플레이터, 추진기, DVL, USBL로 이루어져있다.

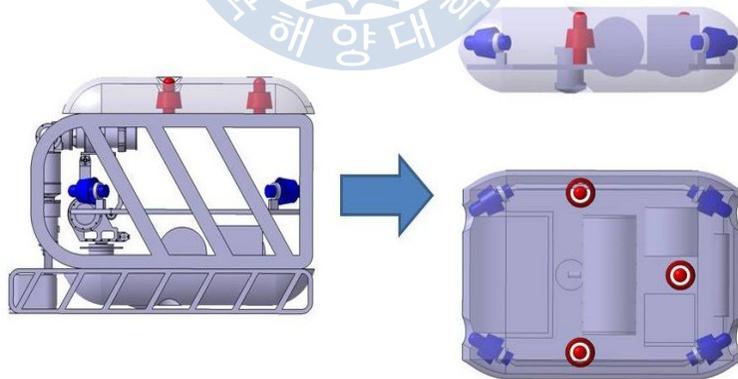


Fig. 3.1 3D modeling of the KMU-ROV

이러한 KMU-ROV의 사용 목적을 이루기 위한 기구적 사양은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Mechanism specification of the KMU-ROV

구 분	ROV	AUV
부 피	800×1000×900 mm	800×1000×300 mm
무 게	150kgf	100kgf
최대 작업수심	200m	200m
추진기	300W BLDC motor×7	300W BLDC motor× 7
제어자유도	6 D.O.F	6 D.O.F
배터리하우징	없음	1EA
전원하우징	1EA	1EA
제어하우징	1EA	1EA

수중 작업 시 발생하는 외란에 효과적으로 대응하기 위해서는 잠수정이 가지고 있는 추진기를 통해 전 방향으로 균일하게 힘이나 모멘트를 발생시킬 수 있어야 한다[5].

6자유도 운동을 위해 7개의 추진기를 사용하는 경우 각 자유도에 대해 같은 크기의 출력을 내는 것이 가장 이상적이다. 이러한 추진기 배치는 각 자유도에 대해 일정한 출력을 얻을 수 있으며 제어가 용이한 장점이 있다.

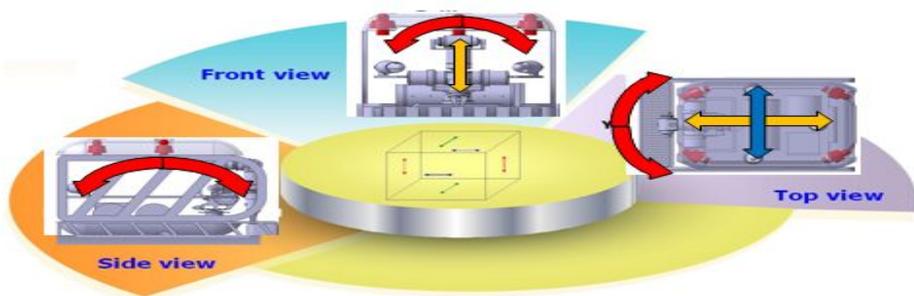


Fig. 3.2 Actuator configuration for the 6 D.O.F

3.2 매니플레이터 기구부 설계

본 연구에서 제안한 매니플레이터의 구조는 작업공간을 크게하고 어깨관절의 부하를 줄이기 위해 하부 관절 3개가 최하부로부터 요-피치-피치 구조이다. 따라서 관절구동기의 용량을 적게 설계하여 경량이고 소형화된 설계를 하였다. 해중에서의 매니플레이터의 구조는 Fig. 2.9와 같다. 전체적인 매니플레이터의 구조는 요-피치-피치-롤-피치-롤 구조로 설계하였다. 전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 관절구동기를 이용하여 Figure 2.12의 새로운 형태의 해중 매니플레이터를 1차적으로 개발하였다. 각 관절구동기의 무게는 하부 3축 요-피치-피치는 각각 3.3kg의 무게를 가지며 상부 롤-피치-롤-그리퍼는 각각 1.8kg, 1.8kg, 1.5kg, 2.8kg의 무게를 가진다. 모든 관절 구동기는 모듈타입으로 해중 매니플레이터의 링크부를 구성한다. 제어 시스템은 조이스틱과 DC전원공급기로 구성되어 있다. 매니플레이터의 총 무게는 23.8kg이고, 대기 중에서 가반하중 20kg으로 설계 되어 있다. Figure 2.13은 수중에서 하중 10kg의 물체를 들고 모션을 성공적으로 테스트 하는 모습이다.

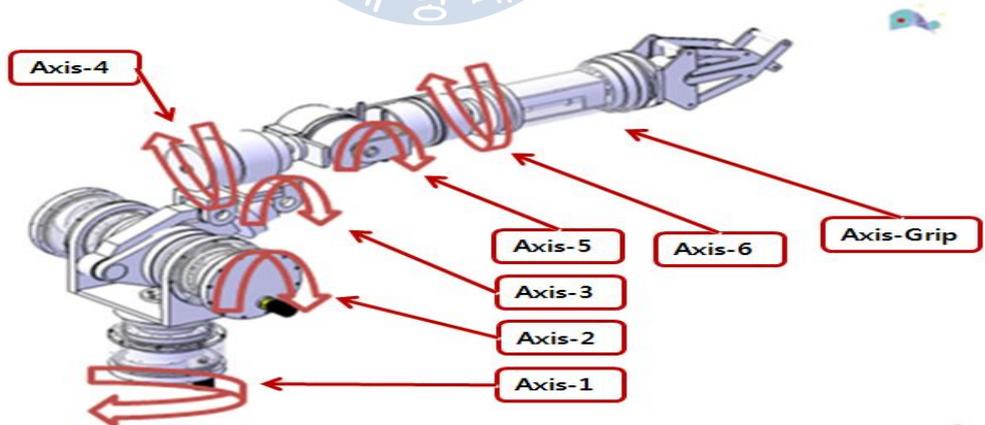


Fig. 3.3 Degree of freedom of the manipulator

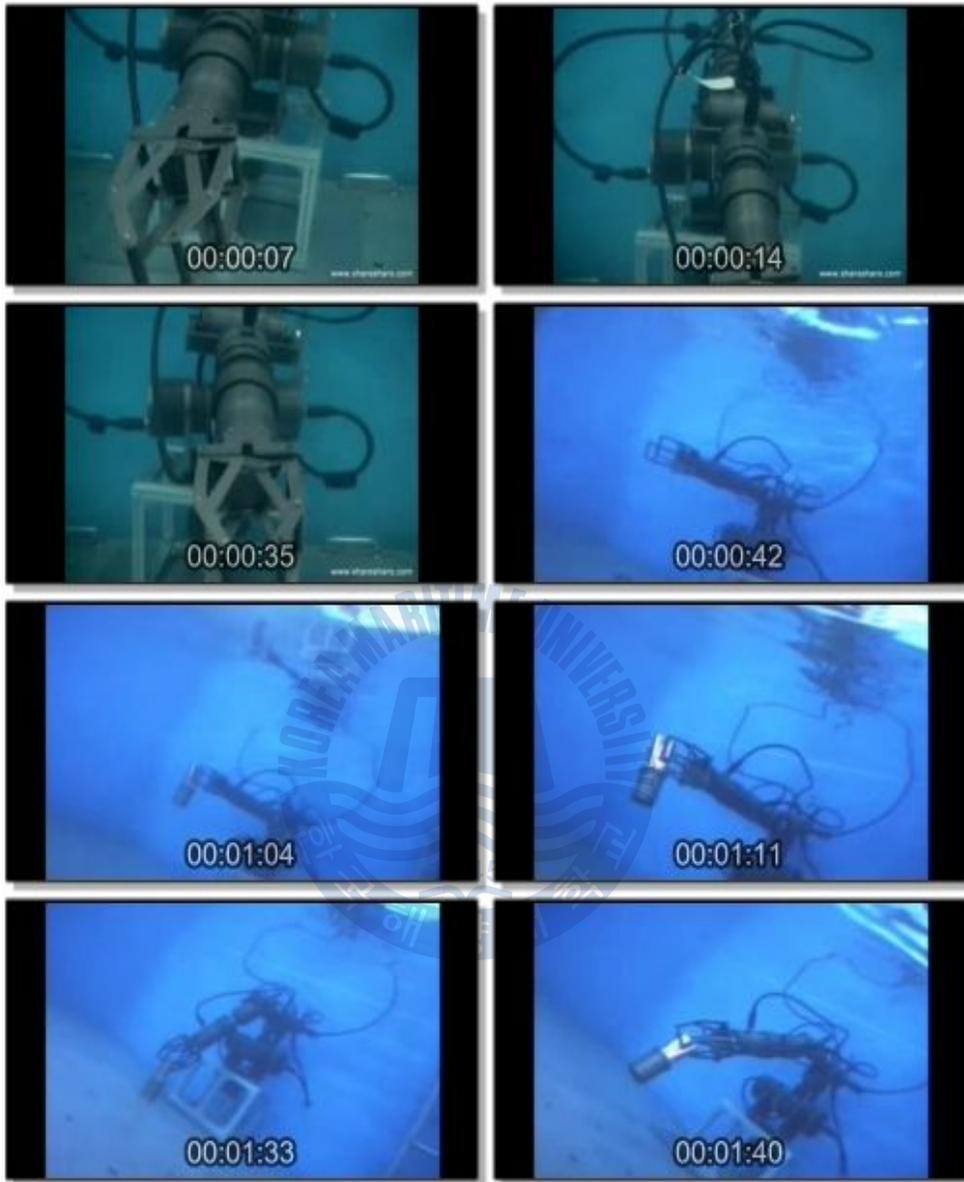


Fig. 3. 4 Underwater manipulator

3.2.1 매니플레이터 순기구학 해석

구조물의 안정적인 구동을 위해서는 링크의 관절 변수에 대한 기구학 (kinematics) 해석이 필요하다. 본 연구에서는 설계된 6축 로봇을 바탕으로 관절 링크에 대한 기구학적 해석을 수행하였다. 로봇이 지면에 고정되는 0 축을 기준으로 하여 Denavit-Hartenberg 규약을 이용하여 Fig 3.5와 같은 좌표계를 설정하였다.

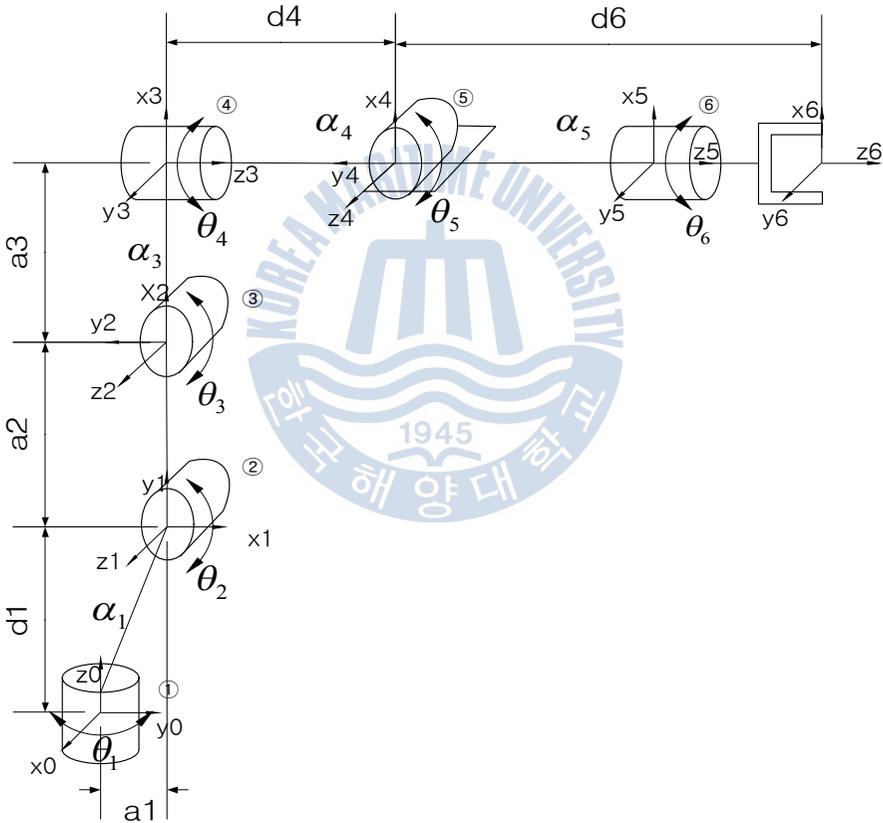


Fig. 3. 5 D-H coordinate of 6-axis robot

Table. 3. 1 Parameter of D-H coordinate of 6-axis robot

	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	90°	0	$90^\circ + \theta_1$	d_1
2	0°	a_2	$90^\circ + \theta_2$	0
3	90°	a_3	θ_3	0
4	-90°	0	θ_4	d_4
5	90°	0	θ_5	0
6	0°	0	θ_6	d_6

D-H 규약을 이용하여 좌표를 설정하게 되면 Fig. 3.1에서와 같이 $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ 에 해당하는 각각의 관절링크의 패러미터를 바탕으로 순 기구학 해석을 행하게 된다. 각각의 패러미터를 Table 3.1에서 정리하였다.

θ_3 의 경우 4절 링크 구조에서 θ_2 의 각 변위에 영향을 받으므로 실제로 제어에 사용해야 할 회전각 θ_{3r} 은 다음과 같다.

$$\theta_3 = \theta_{3r} - \theta_2$$

다음은 각각의 관절 링크를 4개의 기본 변환 행렬의 곱을 이용한 동차변환 행렬 A_i 로 표현하고, 전체 변환 행렬 T 를 구한 결과를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_{z, \theta_i} \times Trans_{z, d_i} \times Trans_{x, a_i} \times Rot_{x, \alpha_i} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \times \cos \alpha_i & \sin \theta_i \times \sin \alpha_i & a_i \times \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \times \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \times \sin \alpha_i & a_i \times \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.1)
 \end{aligned}$$

각각의 패러미터에 대한 전체 변환 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$A_0^6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_6 \{s_1 s_5 c_{23} + c_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23})\} + s_6 (c_1 c_4 - s_1 s_4 s_{23}) \\ r_{21} &= -c_6 \{c_1 s_5 c_{23} - c_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23})\} + s_6 (s_1 c_4 + c_1 s_4 s_{23}) \\ r_{31} &= -c_6 (s_5 s_{23} - c_4 c_5 c_{23}) - s_4 s_6 c_{23} \\ r_{12} &= -s_6 \{s_1 s_5 c_{23} + c_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23})\} + c_6 (c_1 c_4 - s_1 s_4 s_{23}) \\ r_{22} &= s_6 \{c_1 s_5 c_{23} - c_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23})\} + c_6 (s_1 c_4 + c_1 s_4 s_{23}) \\ r_{32} &= s_6 (s_5 s_{23} - c_4 c_5 c_{23}) - s_4 c_6 c_{23} \\ r_{13} &= s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23} \\ r_{23} &= s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23} \\ r_{33} &= c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23} \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

$$\begin{aligned} d_x &= d_6 \{s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23}\} - d_4 s c_{23} + a_3 s s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_y &= d_6 \{s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23}\} + d_4 c c_{23} - a_3 c s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_z &= d_6 (c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23}) + d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

전체 동차 변환식을 다른 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$A_0^6 = T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & d_x \\ n_y & s_y & a_y & d_y \\ n_z & s_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.5)$$

여기서 n, s, a 는 각각 $o_0 x_0 y_0 z_0$ 좌표계에 대한 $o_6 x_6, o_6 y_6, o_6 z_6$ 축의 방

향을 나타내는 벡터이고, d 는 원점 o_0 에서 o_6 까지의 벡터를 $o_0x_0y_0z_0$ 좌표계로 표현한 것이다.

3.2.2 매니플레이터 역기구학 해석

본 연구에 적용한 6축 로봇의 경우 구형 손목의 형태를 가진 형태로 일반적으로 이러한 구조의 역기구학 해를 구하기 위하여 역위치 기구학 문제와 역방향 기구학 문제로 디커플 시키는 방법을 사용한다. 즉 기구의 손목 축들의 만남의 위치인 손목 중심을 찾고 손목의 방향을 구하는 2개의 간단한 문제로 나눌 수 있다.

로봇의 말단장치의 위치가 d 점에서 주어진 방향 $R=(r_j)$ 를 가질 필요충분조건은 다음과 같다.

$$p_c = d - d_6 Rk \quad (3.2.1)$$

여기서 Rk 는 순기구학 해의 동차변환에서 z 축 방향의 회전변환 행렬을 의미한다.

말단 장치의 위치 벡터 d 의 성분이 d_x, d_y, d_z 이고, 손목 중심 p_c 의 성분이 p_x, p_y, p_z 이면, 각각의 손목중심의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x - d_6 r_{13} \\ d_y - d_6 r_{23} \\ d_z - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

여기서, r_{13}, r_{23}, r_{33} 와 d_x, d_y, d_z 는 말단 위치에 의해 주어진 좌표의 값이

다.

주어진 손목 중심의 좌표를 이용하여 우선 기하학적인 방법을 이용하여 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 Fig 3.6을 통하여 θ_1 의 해를 구하고, Fig 3.7의 관계와 제2 코사인 법칙을 응용하여 $\theta_2 \sim \theta_3$ 의 기하학적 해를 구하였다.

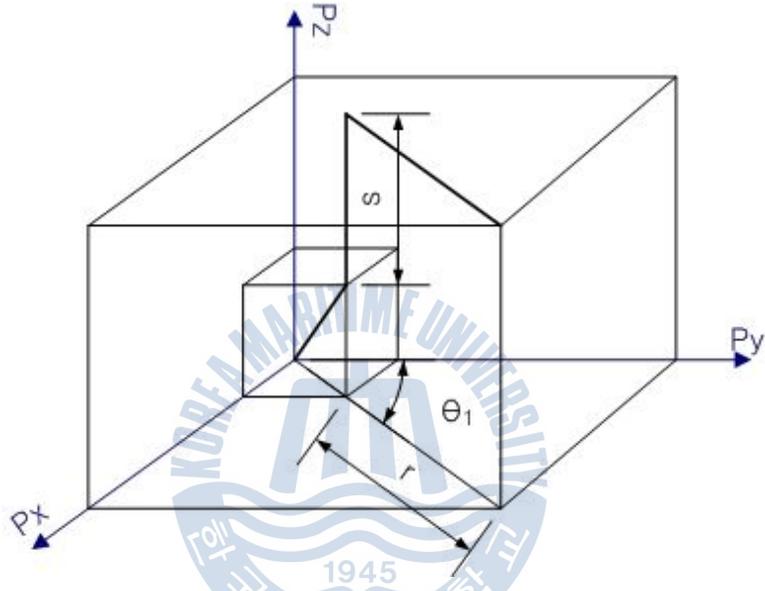


Fig. 3. 6 Diagram of robot about θ_1

$$\theta_1 = \text{Atan}(p_x, p_y) \quad (3.2.3)$$

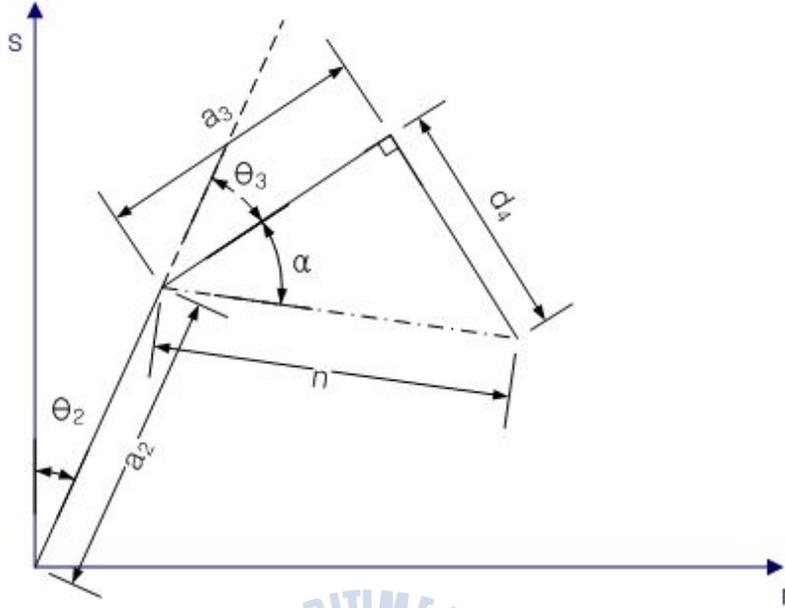


Fig. 3. 7 Diagram of robot about $\theta_2 \sim \theta_3$

$$\theta_2 = A \tan(s, r) - A \tan(a_2 + n \cos(\theta_3 - \alpha), n \sin(\theta_3 - \alpha)) \quad (3.2.4)$$

$$\cos(\theta_3 - \alpha) = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - n^2}{2a_2 n} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + (p_z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2 \sqrt{a_3^2 + d_4^2}} = D \quad (3.2.5)$$

$$(\theta_3 - \alpha) = A \tan(D, \pm \sqrt{1^2 - D^2}) \quad (3.2.6)$$

$$\theta_3 = A \tan(D, \pm \sqrt{1^2 - D^2}) + \alpha \quad (3.2.7)$$

여기서,

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad s = p_z - d_1 \quad (3.2.8)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{a_3}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{d_4}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}\right), \quad n = \sqrt{a_3^2 + d_4^2} \quad (3.2.9)$$

나머지 관절 링크의 회전 변수는 z 축이 일치하는 구형 손목의 형태이며, 다음의 Euler 각도와 같은 형태를 가진다.

$$\begin{aligned} R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix} \quad (3.2.10) \end{aligned}$$

각각의 $\phi = \theta_4, \theta = \theta_5, \psi = \theta_6$ 를 구해보면 다음과 같다.

i) 각각의 행렬요소 u_{13}, u_{23} 가 모두 0이 아니라고 가정하면 구해보면 다음과 같다. 그러면 위 방정식에서 $s_\theta \neq 0$ 이고, 따라서 u_{31}, u_{32} 도 모두 0은 아니다.

또한 $u_{33} \neq \pm 1$ 이고, $c_\theta = u_{33}, s_\theta = \pm \sqrt{1 - u_{33}^2}$ 이므로

$$\theta = \theta_5 = A \tan(u_{33}, +\sqrt{1 - u_{33}^2}) \quad (3.2.11)$$

이거나

$$\theta = \theta_5 = A \tan(u_{33}, -\sqrt{1 - u_{33}^2}) \quad (3.2.12)$$

가 된다. θ 가 식 (3.2.10)이면 $s_\theta > 0$ 이므로

$$\frac{s_\phi s_\theta}{c_\phi s_\theta} = \tan \phi = \frac{u_{23}}{u_{13}}, \quad \frac{s_\psi s_\theta}{-c_\psi s_\theta} = \tan \psi = \frac{u_{32}}{-u_{31}}$$

$$\phi = \theta_4 = A \tan(u_{13}, u_{23}) \quad (3.2.13)$$

$$\psi = \theta_6 = A \tan(-u_{31}, u_{32}) \quad (3.2.14)$$

이고 θ 가 식 (3.2.11)이면 $s_\theta < 0$ 이므로

$$\phi = \theta_4 = A \tan(-u_{13}, -u_{23}) \quad (3.2.15)$$

$$\psi = \theta_6 = A \tan(u_{31}, -u_{32}) \quad (3.2.16)$$

가 된다. 따라서 θ 의 부호에 따라 2개의 답이 있게 된다.

ii) 각각의 행렬요소 u_{13}, u_{23} 가 모두 0이라면, U가 직교행렬이라는 것은

$u_{33} = \pm 1$ 이고, $u_{31} = u_{32} = 0$ 이라는 뜻이다. 따라서 U를 구해보면

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.17)$$

만약 $u_{33} = 1$ 이면 $c_\theta = 1$ 이고, $s_\theta = 0$ 이므로 $\theta = 0$ 이다. 이때 식 (3.2.9)은

$$= \begin{bmatrix} c_\phi c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi s_\psi - s_\phi c_\psi & 0 \\ s_\phi c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{46} & -s_{46} & 0 \\ s_{46} & c_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.18)$$

따라서 $\phi + \psi$ 는 다음

$$\begin{aligned} \phi + \psi &= A \tan(u_{11}, u_{21}) \\ &= A \tan(u_{11}, -u_{12}) \end{aligned} \quad (3.2.19)$$

에서 정해질 수 있다. 이때 단지 $\phi + \psi$ 의 합만이 결정되므로, 무한히 많

은 답이 있게 된다. 통상적으로 $\phi=0$ 을 택할 수 있고, ψ 를 식 (3.2.16)로 정의한다.

만약 $u_{33}=-1$ 이면 $c_\theta=-1$ 이고, $s_\theta=0$ 이므로 $\theta=\pi$ 이다. 이때 식 (3.2.9)은

$$= \begin{bmatrix} -c_\phi c_\psi - s_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi - s_\phi c_\psi & 0 \\ -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{4-6} & -s_{4-6} & 0 \\ s_{4-6} & c_{4-6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & 0 \\ u_{21} & u_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이 된다. 따라서 답은

$$\begin{aligned} \phi - \psi &= A \tan(-u_{11}, -u_{21}) \\ &= A \tan(-u_{11}, -u_{12}) \end{aligned} \quad (3.2.20)$$

이고, 전처럼 무한히 많은 답이 있게 된다.

Euler 각도를 이용하기 위하여 다음의 관계를 이용한다.

$$R = R_0^6 = R_0^3 \cdot R_3^6 \quad (3.2.21)$$

$$R_3^6 = (R_0^3)^T \cdot R \quad (3.2.22)$$

식 (3.1.3)의 순 기구학 해석에서 R_0^3 에 해당하는 행렬식을 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} s_1 s_{23} & c_1 & -s_1 c_{23} \\ -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 c_{23} \\ c_{23} & 0 & s_{23} \end{bmatrix}, \quad (R_0^3)^T = \begin{bmatrix} s_1 s_{23} & -c_1 s_{23} & c_{23} \\ c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 c_{23} & c_1 c_{23} & s_{23} \end{bmatrix} \quad (3.2.23)$$

따라서 R_3^6 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_3^6 &= \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & c_4 s_5 \\ s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6 & -s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6 & s_4 s_5 \\ -s_5 c_6 & s_5 s_6 & c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 s_{23} & -c_1 s_{23} & c_{23} \\ c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 c_{23} & c_1 c_{23} & s_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} s_1 s_{23} - r_{21} c_1 s_{23} + r_{31} c_{23} & r_{12} s_1 s_{23} - r_{22} c_1 s_{23} + r_{32} c_{23} & r_{13} s_1 s_{23} - r_{23} c_1 s_{23} + r_{33} c_{23} \\ r_{11} c_1 + r_{21} s_1 & r_{12} c_1 + r_{22} s_1 & r_{13} c_1 + r_{23} s_1 \\ -r_{11} s_1 c_{23} + r_{21} c_1 c_{23} + r_{31} s_{23} & -r_{12} s_1 c_{23} + r_{22} c_1 c_{23} + r_{32} s_{23} & -r_{13} s_1 c_{23} + r_{23} c_1 c_{23} + r_{33} s_{23} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2.24)$$

이를 Euler의 경우와 동일하게 적용하면 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 다음과 같다.

$$\theta_4 = A \tan(r_{13}s_1s_{23} - r_{23}c_1s_{23} + r_{33}c_{23}, r_{13}c_1 + r_{23}s_1) \quad (3.2.25)$$

$$\theta_5 = A \tan(-r_{13}s_1c_{23} + r_{23}c_1c_{23} + r_{33}s_{23}, \pm \sqrt{1 - \{-r_{13}s_1c_{23} + r_{23}c_1c_{23} + r_{33}s_{23}\}^2}) \quad (3.2.26)$$

$$\theta_6 = A \tan(-\{-r_{11}s_1c_{23} + r_{21}c_1c_{23} + r_{31}s_{23}\}, -r_{12}s_1c_{23} + r_{22}c_1c_{23} + r_{32}s_{23}) \quad (3.2.27)$$

3.2.3 매니플레이터 속도 기구학 해석

로봇의 속도 기구학은 순기구학 해석을 이용한 자코비안(Jacobian)에 의해 결정된다. 이 자코비안은 로봇운동의 해석과 제어에 가장 중요한 양 중의 하나로, 자코비안은 로봇의 제어에 있어서 부드러운 궤적을 생성하고, 특히 형상을 결정하고, 사람 같은 운동의 실행에 있어서 필수적인 인자라 할 수 있고, 동역학 운동 방정식을 유도하고 말단장치에서 관절로의 힘과 토크를 변환하는데 사용된다.

자코비안은 장치의 각속도 및 선속도 벡터를 나타내는 $6 \times n$ (n =축의 개수) 행렬로 표현할 수 있다.

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

(3.3.1) 에서 J_v 와 J_ω 는 각각 $3 \times n$ 의 선속도와 각속도를 나타내는 행렬이다.

6축 로봇의 경우 회전관절만을 이용하여 구성하였으므로, 그에 대한 i 번째 열에 대한 자코비안을 구하기 위한 공식은 식 (3.3.2)와 같다.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

위의 식을 이용하여 6축 다관절 로봇의 자코비안 식을 표현하면 식 (3.3.3)과 같다.

$$\begin{aligned} J_1(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_1 - o_0) \\ z_0 \end{bmatrix} \\ J_2(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_2 - o_0) & z_1 \times (o_2 - o_1) \\ z_0 & z_1 \end{bmatrix} \\ J_3(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_3 - o_0) & z_1 \times (o_3 - o_1) & z_2 \times (o_3 - o_2) \\ z_0 & z_1 & z_2 \end{bmatrix} \\ J_4(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_4 - o_0) & z_1 \times (o_4 - o_1) & z_2 \times (o_4 - o_2) & z_3 \times (o_4 - o_3) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \\ J_5(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_5 - o_0) & z_1 \times (o_5 - o_1) & z_2 \times (o_5 - o_2) & z_3 \times (o_5 - o_3) & z_4 \times (o_5 - o_4) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \\ J_6(q) &= \begin{bmatrix} z_0 \times (o_6 - o_0) & z_1 \times (o_6 - o_1) & z_2 \times (o_6 - o_2) & z_3 \times (o_6 - o_3) & z_4 \times (o_6 - o_4) & z_5 \times (o_6 - o_5) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix} \\ &= [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5 \ J_6] \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

자코비안 식을 계산하기 위한 패러미터 $o_0 \sim o_6$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} o_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & o_1 &= \begin{bmatrix} -a_1 s_1 \\ a_1 c_1 \\ d_1 \end{bmatrix}, & o_2 &= \begin{bmatrix} a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ -a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}, \\ o_3 &= \begin{bmatrix} a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ -a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
o_4 &= \begin{bmatrix} -d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}, & o_5 &= \begin{bmatrix} -d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}, \\
o_6 &= \begin{bmatrix} d_6 \{s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23}\} - d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_6 \{s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23}\} + d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_6 (c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23}) + d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.3.4}$$

그리고, 패러미터 $z_0 \sim z_5$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
z_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, & z_1 &= \begin{bmatrix} c_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix}, & z_2 &= \begin{bmatrix} c_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix}, & z_3 &= \begin{bmatrix} -s_1 c_{23} \\ c_1 c_{23} \\ s_{23} \end{bmatrix}, \\
z_4 &= \begin{bmatrix} -s_1 s_4 s_{23} + c_1 c_4 \\ c_1 s_4 s_{23} + s_1 c_4 \\ -s_4 c_{23} \end{bmatrix}, & z_5 &= \begin{bmatrix} s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23} \\ s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23} \\ c_4 c_5 c_{23} + c_5 s_{23} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.3.5}$$

식 (3.3.3)에 (3.3.4)와 (3.3.5)를 적용하여 계산한 결과를 A.2에 수록하였다.

3.2.4 매니플레이터 동역학 해석

본 절에서는 수중 매니플레이터의 관절2,3 즉, 4절링크 부분의 동역학을 해석하였다.

먼저 Fig 3.4의 매니플레이터를 생각하자. 매니플레이터의 파라미터들이 간단한 관계를 만족하면, 매니플레이터의 방정식이 디커플되고, $q_2 \sim q_3$ 는 각각 독립적으로 제어될 수 있다. Fig 3.4의 기구를 5절 링크기구(five-bar linkage)라 한다. 그림에서 단지 4개의 링크만 있으나, 관용적으로 고정부를

추가 링크로 세면, 5절 링크란 용어의 서령이 된다.

Figure 3. 8 에서 l_1, l_3 의 길이는 같고, l_2 로 표시된 길이는 같다. 따라서 그림의 닫힌 경로(closed path)는 평행사변형이 되고, 이는 계산을 매우 간단하게 한다. 그러나 링크5와 링크6의 길이는 같지만, 질량분포가 같을 필요는 없다.

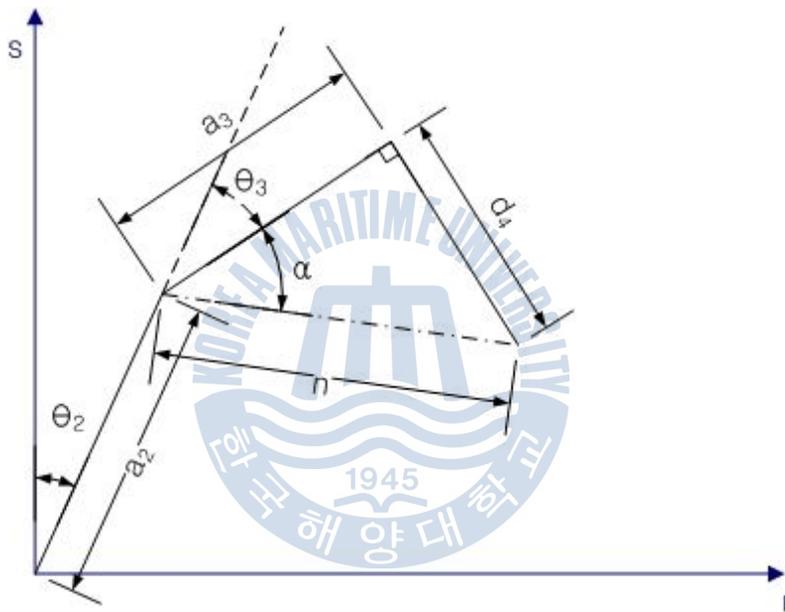


Fig. 3. 8 Four bar linkage

그림에서 분명한 것은 4절링크가 움직이지만, 사실 $q_1 \sim q_2$ 로 표시되는 2 자유도만 있는 기구로서 이것을 닫힌 기구연쇄(kinematic chain)이다. 따라서 운동방정식 유도에 이전의 자코비안에 대한 결과를 쓸 수 없고 처음부터 다시 시작해야 한다. 첫단계로 여러 링크의 질량중심($l_{c1} l_{c2} l_{c3} l_{c4}$)의 좌표

를 일반화 좌표의 함수로 쓸 수 있다. 즉

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1} \cos q_1 \\ l_{c1} \sin q_2 \end{bmatrix} \quad (3.4.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c2} \cos q_2 \\ l_{c2} \sin q_2 \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c3} \\ y_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos q_1 \\ l_2 \sin q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{c3} \cos q_1 \\ l_{c3} \sin q_1 \end{bmatrix} \quad (3.4.3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c4} \\ y_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 \\ l_1 \sin q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{c4} \cos(q_2 - \pi) \\ l_{c4} \sin(q_2 - \pi) \end{bmatrix} \quad (3.4.4)$$

$$= \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 \\ l_1 \sin q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{c4} \cos q_2 \\ l_{c4} \sin q_2 \end{bmatrix} \quad (3.4.5)$$

다음으로, 이 식들의 도움을 받아 여러 질량중심의 속도를 \dot{q}_1, \dot{q}_2 의 함수를 쓸 수 있다. 편리성을 위해 다음 각 자코비안 행렬의 세번째 행은 항상 0이므로 무시한다. 결과는

$$v_{c1} = \begin{bmatrix} -l_{c1} \sin q_1 & 0 \\ l_{c1} \cos q_1 & 0 \end{bmatrix} \dot{q} \quad (3.4.6)$$

$$v_{c2} = \begin{bmatrix} 0 & -l_{c2} \sin q_2 \\ 0 & l_{c2} \cos q_2 \end{bmatrix} \dot{q} \quad (3.4.7)$$

$$v_{c3} = \begin{bmatrix} -l_{c3} \sin q_1 & -l_2 \sin q_2 \\ l_{c3} \cos q_1 & l_2 \cos q_2 \end{bmatrix} \dot{q} \quad (3.4.8)$$

$$v_{c4} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 & -l_{c4} \sin q_2 \\ l_1 \cos q_1 & -l_{c4} \cos q_2 \end{bmatrix} \dot{q} \quad (3.4.9)$$

이 된다. 속도 자코비안 $J_{v_{ci}}$, $i=1, \dots, 4$ 를 윗 식으로 나타나는 4개의 행렬로 정의하자. 다음으로 네 링크의 각속도는 단순히

$$\omega_1 = \omega_3 = \dot{q}_1 k, \quad \omega_2 = \omega_4 = \dot{q}_2 k$$

로 주어짐을 쉽게 알 수 있다. 따라서 관성행렬은

$$D(q) = \sum_{i=1}^4 m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + \begin{bmatrix} I_1 + I_3 & 0 \\ 0 & I_2 + I_4 \end{bmatrix} \quad (3.4.10)$$

로 주어진다. 식(3.5.2)을 윗 식에 넣고 표준삼각항등식을 써서 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} d_{11}(q) &= m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + I_1 + I_3 \\ d_{12}(q) &= d_{21}(q) = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1) \\ d_{22}(q) &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + I_2 + I_4 \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

주의할 것은

$$m_3 l_2 l_{c3} = m_4 l_1 l_{c4} \quad (3.4.12)$$

이면 관성행렬이 대각행렬이고 상수행렬이라는 것이다. 결과로 동역학 방정식은 Coriolis 항도 구심항도 지니지 않는다.

위치에너지는

$$V = g \sum_{i=1}^4 y_{ci} = g \sin q_1 (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) + g \sin q_2 (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \quad (3.4.13)$$

이 되고 따라서

$$\begin{aligned}\phi_1 &= g \cos q_1 (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \\ \phi_2 &= g \cos q_2 (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4})\end{aligned}\quad (3.4.14)$$

가 된다. ϕ_1 는 단지 q_1 에만 달려 있고 q_2 에는 좌우되지 않는다. 마찬가지로 ϕ_2 는 단지 q_2 에만 달려 있고 q_1 에는 좌우되지 않는다. 따라서 관계식 (3.5.5)이 만족하면 그림 3.5.1의 좀 복잡하게 보이는 매니플레이터는 다음과 같이 디커플된 방정식 집합으로 기술된다.

$$d_{11} \ddot{q}_1 + \phi_1(q_1) = \tau_1, \quad d_{22} \ddot{q}_2 + \phi_2(q_2) = \tau_2 \quad (3.4.15)$$

이는 산업용 로봇 형상 중 평행사변형 형상의 늘어나는 인기도를 설명한다. 관계식 (3.4.12)이 만족되면 두 각도 사이의 상호작용(interaction)을 겁낼 필요없이 두 각도 q_1, q_2 를 독립적으로 조정할 수 있다.

3.3 수중추진체의 설계

3.3.1 수중추진체 관계식

본 연구에서는 추진기의 저항에 따른 추진동력을 설계하였다. 추진체의 추진동력식은 다음과 같다.[4]

$$T = 2\rho D^4 K_T |n|n \quad (1)$$

여기서 ρ 는 해수밀도, D 는 추진체의 직경, K_T 는 추진계수이고 n 은 회전수이다.

추진기의 설계를 위하여 다음의 관계식들을 정리하였다. 우선 추진기의 토오크 계산식은 다음과 같은데, 여기서 K_T 는 추진계수이고 C 값은 static merit coefficient로 추진기의 토오크 계산을 위하여 필요한 추진계수(KT) 및 이 값은 유사추진기의 특성차트를 이용하여 구할 수 있다.[5]

$$C = \frac{K_T^{3/2}}{\pi^{3/2} K_Q} \quad (2)$$

C 는 선박용 추진기의 경우에 효율에 대응하는 값으로 선박의 bow thruster나 예인선, ROV 등과 같이 전진속도가 거의 없는 상태에서 고출력을 사용하여 물체를 순간적으로 이동, 회전시키는 경우에 이용되는 계수이다. 본 연구에서와 같은 경우 대략 $C=1$ 로 알려져 있다. 회전수 n 및 토오크 Q 는

$$n = \sqrt{\frac{T}{2\rho D^4 K_T}} \quad (3)$$

$$Q = \rho n^2 D^5 K_Q \quad (4)$$

로 구할 수 있다. 여기서

$$K_Q = \frac{K_T^{2/3}}{\pi^{2/3} C} \quad (5)$$

이다.

식(3), (4), (5)에 개발된 추진체의 실험데이터를 및 해석값을 대입하여 정리하면 Table 3.2와 같다

Table 3.2 Experiment and numerical analysis results

Items	units	experimental value	analysis value
rotation velocity	rpm	1900	2109
torque	kg.cm	15	9.073
thrusting force	kg	5.2	4.605
density of sea water	kg/m ³	1029	1029
diameter	m	0.11	0.11
K_T		0.331	0.238
K_Q		0.0864	0.042

3.3.2 추진시스템 구조 설계

현재 개발된 다양한 수중 추진체의 구조 및 특징은 Table 3.3과 같이 크게 4가지 특징으로 구분할 수 있다.

Table 3.3 Comparance with present products

division	power transmission structure	characteristics
present products	motor+ gear+ magnetic coupling	complex,good sealing, light, small
	motor+ magnetic coupling	complex
	motor+ gear+ sealer	complex,bad sealing
	motor+ sealer	simple, bad sealing
developd system	magnetic outer rotor+ can	simple, good, sealing, heavy

이 중 기름으로 수밀구조를 구성한 추진체는 제작 방식은 간단하나 유지 보수비가 높고, 일정 시간 경과 후 기름을 바꾸어야 하므로 환경오염의 단점이 있다. 그리고 모터와 감속기, 자석커플링 등으로 구성된 제품은 구조가 복잡하고 조립/제조가 어려우나, 방수 측면에서는 유리하다.

본 연구에서는 Fig. 3.9와 같이 외부회전자/CAN/고정자로 이루어진 기어리스 모터타입으로 개발하였다. 이는 모터에서 바로 프로펠러로 동력전달이 가능한 구조이다. 또한 감속기와 마그네틱 커플링을 제거하여 간편한 구조인 outer rotor 방식을 채택하였다. 구조가 간단하여 동력전달체계가 단순하고 방수가 좋고, 환경오염이 없으며, 조립/제조가 용이한 장점이 있다.

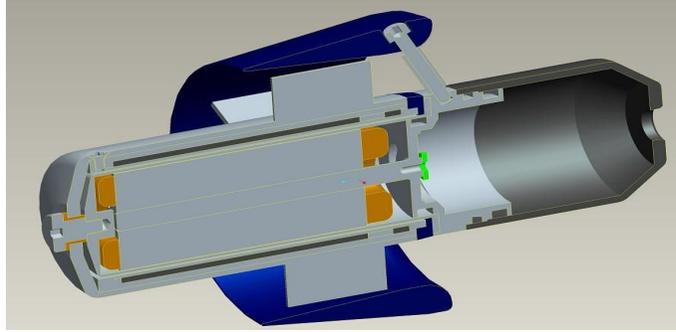


Fig 3.9 개발 수중추진체의 단면도

본 연구를 통하여 개발한 수중추진체 사양은 다음과 같다.

Table 3.4 Specification of developed thrusting system

	units	Motor Data
input power	W	300
maxium speed	rpm	2000
weight	kg	1.3
pressure resistance	atm	50
forward thrusting force	kg	5
backward thrusting force	kg	2.5
torque	kg.cm	15
efficiency	%	60
Reduction		gearless
rotor type		outer rotor

3.3.3 유한요소법(FEM) 해석

추진시스템의 내압 대한 FEM 해석을 위해 길이 153mm, 직경 50mm의 원통으로 조건을 설정하여 해석을 실시하였다. Fig 10에서 나타나 있듯이 단순지지 경계조건으로 해석을 수행하였으며, Table 3.5와 같은 재질 특성치로 설정하여 해석을 실시하였다. 고유치 해석 시 기준외압 1MPa를 사용하였다.

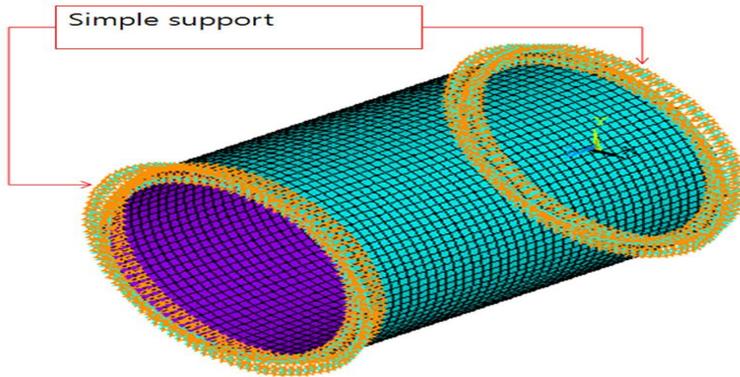


Fig 3.10 Boundary Conditions

Table 3.5 Analysis cases and material properties

Analysis Case	$t=t_c=5\text{mm}$
Elastic Modulus (GPa)	68.9
Allowable stress (MPa)	59.3
Tensile Strength (MPa)	124
Poisson's Ration	0.33

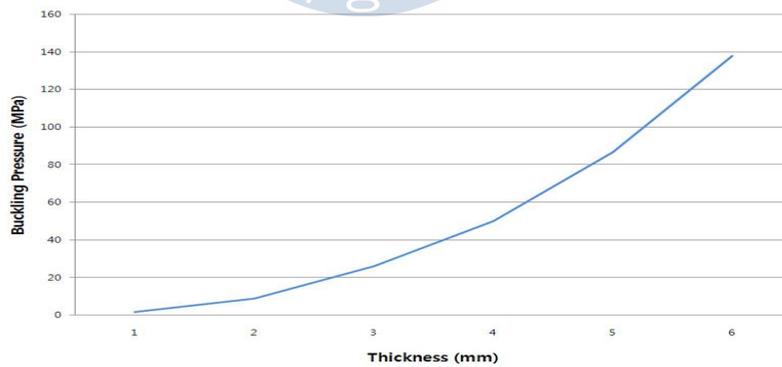


Fig. 3.11 Test results

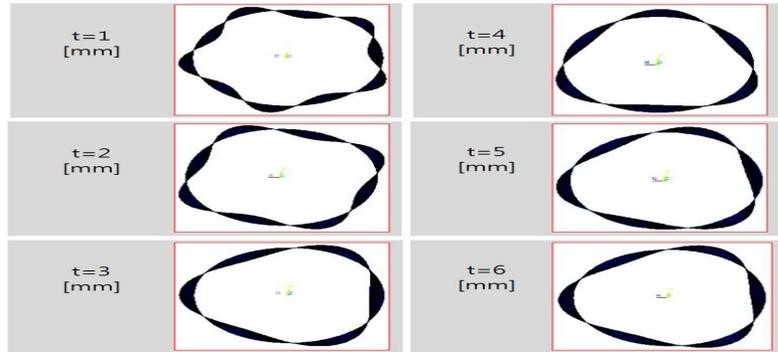


Fig. 3.12 Buckling modes

Fig 3.11은 셸 두께 5mm, cover 두께를 5mm로 하였을 때의 좌굴 압력을 구한 것이다. 이 때의 좌굴압력은 84기압 (8.4 MPa)이다. 안전계수를 4로 하면 좌굴압력은 20기압으로 200m 까지 사용이 가능한 것으로 해석된다. Fig 3.12는 좌굴 모드를 나타내고 있다.

3.3.4 유동전산해석을 통한 추진 프로펠러설계

3개와 7개의 블레이드를 가진 프로펠러를 대상으로 2차원/3차원 유동 해석을 실시하여 도출된 데이터를 바탕으로 최적의 프로펠러와 덕트를 제작하였다. 7EA 추진기 3차원 유동해석을 위한 격자생성은 전체 추진기를 비정렬 격자를 이용하여 격자를 생성하였다. 속도 및 압력구배가 큰 날개끝단, root, 날개의 끝단에 격자 집중하여 생성하였으며, 추진기 전체의 표면에 프리즘 메쉬를 이용하여 경계층을 생성하였다. 격자수는 비정렬 격자 543562개로 구성하였다.

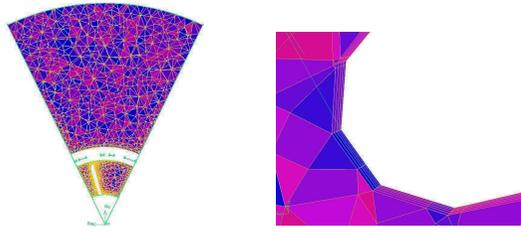


Fig. 3.13 X-Y 단면 및 프로펠러주위의 프리즘 메쉬

입구의 속도 조건은 3 knots(1.5432 m/s)로 설정하였고, 프로펠러의 회전속도는 1000~2400 rpm, 출구는 압력으로 설정, $p=p_{\infty}$ 로 계산하였다. 3EA 추진기와 마찬가지로 계산시간을 단축시키기 위해 주기(Periodic)경계 조건을 사용하였으며, 난류모델은 고레이놀즈수에 대한 Standard $k-\epsilon$ Model의 변형인 RNG $k-\epsilon$ Model을 사용하였다.[6]



Fig. 3.14 추진기의 압력분포 및 프로펠러 주위 유선(정면)

다음 Fig. 3.14은 유동전산해석을 통해 개발된 프로펠러와 덕트이다.

Table 3.6 Experimental result

I[A]	Ω [rpm]	Thrust[kg]
1	372.70	0.74
3	884.65	2.22
6	1442.54	4.30
10	2043.47	5.48

Table 3.7 Numerical result

Ω [rpm]	Thrust[kg]
400	0.736
900	2.08
1400	3.867
2000	4.971

개발된 추진체로 수중 추력 테스트를 하였다.

Table 3.6은 추진체의 수중 추력 실험결과이고, Table 3.7은 해석결과이다. 두 값을 비교해보면 오차가 약 7% 정도로 해석결과가 적합하다고 판단된다.

3.3.5 개발 결과 및 성능시험

다음 그림들은 본 연구를 통하여 개발한 직접구동방식의 300w급 수중 추진체의 사진들이다. Fig. 15는 각종 이물질 및 추력을 향상시키기 위한 가드 및 방수커넥터를 장착한 사진이며, Fig 3.16은 수중추진체에 내장 되도록 개발한 소형 BLDC 모터와 설계 블록 다이어그램이다. 개발한 수중추진체를 대상으로 실제적으로 육상/수중 성능시험을 실시하였다.

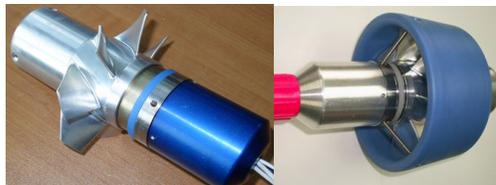


Fig. 3.15 Thrusting system with propeller and duct

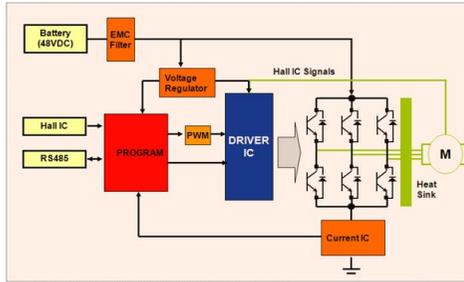


Fig 3.16 Block diagram of the driver

개발 시제품의 효율을 높이기 위해 자석의 두께와 형상 변경, 무쇠링의 두께 변경, 권선 방식 수정, 극수 변경(8극 -> 4극), 에어갭 크기 변경 권선의 굵기와 턴수를 다양하게 조정하여 실험하였다. Fig. 3.17은 다이 나모 시험결과이다. 붉은 선이 효율, 녹색이 회전속도, 푸른색이 토크, 갈색이 전체 전류고, 분홍색은 모터전류, x축은 회전속도이다. 시험 결과를 살펴보면 입력 400W, 회전수 2400rpm이며 이때의 토크는 15Kg.cm이고 최대 효율은 55%임을 알 수 있다.



Fig. 3.17 test result using dynamometer

수중추진체의 수중 추력 성능테스트를 위해 추력 성능 시험장치를 설계/제작 하였다(Fig. 3.18). 수중추진체의 추력은 대차에 끈으로 연결된 로드셀을 통해 측정된다. Fig. 3.19는 시험장치를 이용하여 수중추진체의

추력을 수중에서 시험하는 사진이다.

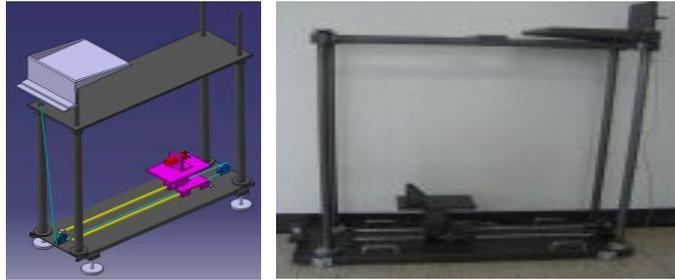


Fig. 3.18 underwater thrusting force test equipment



Fig. 3.19 underwater thrust test

수중시험 장치를 이용하여 수십번 반복적인 환경에서 추진체의 추력을 측정하였다. 수중추진체 성능시험 결과는 Fig. 3.20에 나타내었다. 붉은 선은 추력, 녹색은 출력, 푸른색은 회전속도, 그리고 x축은 전류(A)를 나타낸다. 시험결과 CW방향일 경우 회전속도 1900rpm일때 5.2kg의 추력이 측정되었고 CCW방향일 때는 회전속도 2000rpm일때 2.58kg의 추력이 측정되었다. 이는 Table 3.8에서 나타난 바와 같이 세계최고의 제품인 Tecndadyne사의 300w급 추진체의 성능인 전방추력 4.2kg, 후방추력 2.3kg를 전방 및 후방 추력성능에서 각각 16%, 및 12%를 개선한 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

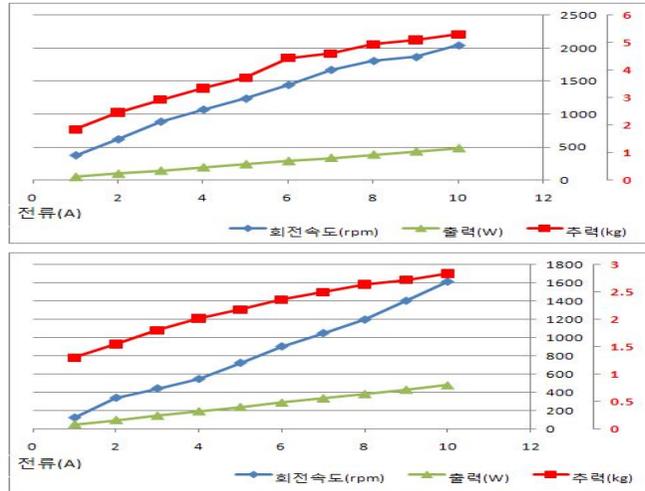


Fig. 3.20 test results of forward and backward thrusting force

Table 3.8 comparison of performance with Tecnydyne thruster

	Tecnydyne社	Motor Data
input power [W]	300W	300W
maxium speed [rpm]	2000rpm	2000rpm
weight [kg]	1.0kg	1.3kg
length [mm]	226mm	179.2mm
Housing O/D [mm]	95mm	132mm
nozzle O/D [mm]	43mm	54mm
forward thrusting force [kg]	4.2kg	5kg
backward thrusting force [kg]	2.3kg	2.5kg

3.4 내압 하우징 설계

원통형 하우징의 설계는 원통 몸체, 양 끝단의 플렌지, 방수를 위한 O-Ring처리 등이 설계의 중요한 요소이며 하우징 내부에 장착되는 보드 및 장비를 위한 브래킷의 설계가 많은 노하우 및 경험을 요구하는 분야이다.

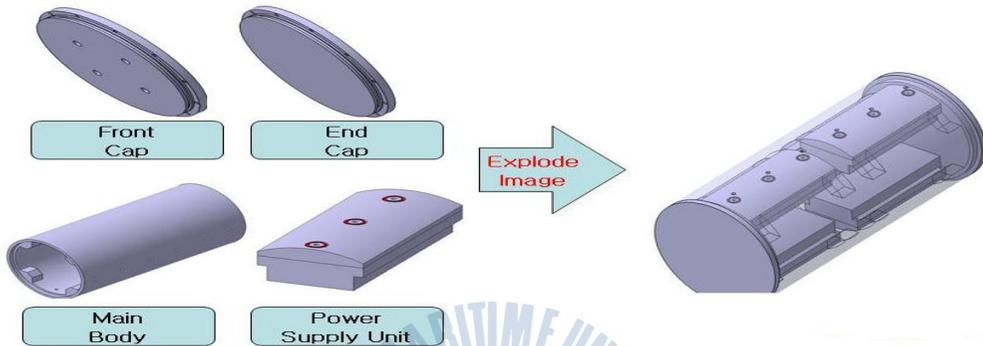


Fig. 3.21 3D modeling of the housing

수밀하우징은 Fig. 3과 같이 설계 되었다. Front cap 과 End cap, 그리고 Main body로 이루어진 주구성품과 전원공급부로 구성되어진다. 전원 공급부의 방열 처리 문제를 해결하기 위해 하우징 내부에 방열판이 완전 밀착이 가능하도록 설계 되었으며 유지 보수및 작업이 쉽도록 설계 되어있다.

제 4 장 AUV 기구부 구성

4.1 AUV 기구부 구조

변경된 AUV는 ROV일때와 마찬가지로 4개의 수평 추진기와 3의 수직 추진기로 총 7개의 추진기를 가지며 6자유도 운동을 제어할 수 있는 구조로 설계하였다. AUV의 크기는 공기중에서 사람이 조작하기에 편리하면서 여러 가지 장비를 탑재 할 수 있는 크기로 정하였으며 설계된 AUV의 개략적인 재원은 Table 1과 같다.

Table 3.9 Mechanism specification of the AUV

구 분	ROV	AUV
부 피	800×1000×900 mm	800×1000×300 mm
무 게	150kgf	100kgf
최대 작업수심	200m	200m
추진기	300W BLDC motor×7	300W BLDC motor× 7
제어자유도	6 D.O.F	6 D.O.F
배터리하우징	없음	1EA
전원하우징	1EA	1EA
제어하우징	1EA	1EA

4.2 AUV의 추력계산

무인 잠수정은 수중에서 받는 항력보다 큰 출력을 낼 수 있어야 한다. 외란을 무시하였을 때 수중에서 수평 추진기의 사용이 가능한지를 판단하기 위해 선체 형상을 입방체 형태로 가정, 수평 추진기가 최대 추력을 낸다고 가정하여 계산하였다.

$$V = \sqrt{\frac{F \times g}{0.5 \times \rho \times C_d \times A}} \quad (1)$$

여기서 F 는 추진기의 추력 $17.3kgf$ 이며, C_d 는 항력계수로 0.8 , ρ 평균 바다 밀도인 $1.025kg/m^3$, A 는 AUV 전면 투영 면적이다. 식 (1)을 계산하면 AUV의 최대 속도는 $1.57m/s$ 이고 대략 $3Knot$ 의 수평 추진속도를 가진다.



제 5 장 CROV 제어시스템 설계

5.1 제어시스템의 구성

convertible R.O.V의 전체 시스템 구성은 크게 두 가지로, R.O.V의 제어 시스템과 A.U.V의 제어 시스템으로 나누어진다.

R.O.V와 A.U.V는 해저를 둘다 해저를 탐사하는 장비이지만, 서로 상이한 제어 알고리즘을 채택하고 있다. 가장 큰 특징으로 오퍼레이터의 유무가 그것이다.

R.O.V는 주행 시 오퍼레이터의 제어에 따라 선체의 움직임이 제어 되는 알고리즘을 채택하고, A.U.V는 오퍼레이터가 필요 없는 자율 구동 알고리즘이 필요하다. 서로 상이한 특질을 가진 장비를 한 운전체에 적용하기위해 기구부에서의 변화와 같이 제어 알고리즘의 변화 또한 필요하다. 먼저 R.O.V 모드에 필요한 제어 시스템은 Fig. 5.1과 같다.



Fig. 5.1 The control system of R.O.V

R.O.V 는 선상에서 VDC 300V를 인가 받아 전원하우징에서 추진체 및 각 카메라, 조명, 각종센서와 제어 회로에 필요한 전압을 얻기 위해 전압 강하와 전압 안정화 회로로 구성 하였다. VDC 300V를 48Vfh 변환하여 제어 하우징에 전압을 인가하여 다시 24V, 12V, 5V 로 각각 전압을 강하 하여 전원을 공급하였다.

R.O.V 의 제어시 가장 중요한 부분은 현재 수중에서 선체의 상태를 실시간으로 오퍼레이터가 알 수 있는 것이 중요하다. 현재 선체의 상태를 알기위해 3대의 저조도 수중 카메라를 장착하였으며

제어하우징의 IMU, DGPS, DVL, Depth 센서를 이용하여 Host PC와 선체와의 데이터 통신으로 오퍼레이터는 선상에서 R.O.V의 진행방향, 현 위치, 선체의 상태 등을 체크 할 수 있다. R.O.V는 오퍼레이터와의 정보교환에 중점을 두고 제어 시스템을 구성하였다.

A.U.V의 제어 시스템은 R.O.V와 제어 회로를 공유 한다.A.U.V는 오퍼레이터의 필요없이 자율 주행을 지향하는 로봇으로 선상과의 통신은 A.U.V 가 수면으로 부상시 무선을 통한 통신이 통신에서 가장 중요한 주안점이 된다. A.U.V 모드 의 제어 시스템은 Fig. 5.2와 같다.

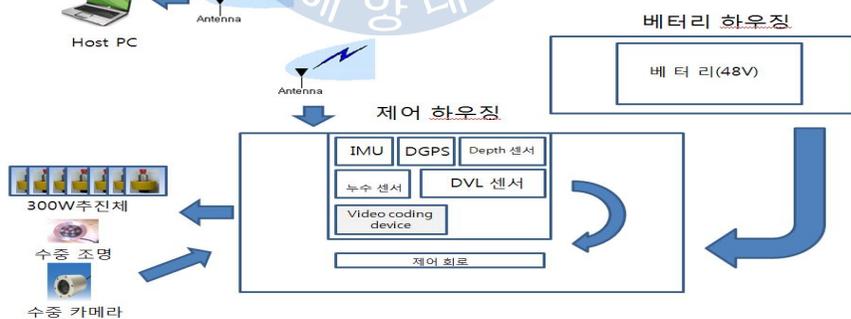


Fig. 5.2 The control system of A.U.V

A.U.V 제어시스템은 앞에서 언급한 것과 같이 R.O.V의 제어 회로를 공유한다. A.U.V 모드에서는 선상으로 전송되는 센서의 데이터가 직접 제어 회로에 전송 되어 센서 데이터의 연산을 통해 현재 위치를 추정, 선체의 상태와 경로를 제어하게 된다. R.O.V의 제어 회로에 DSP 28335를 사용한 데이터 receive 회로를 결합 하게 된다.

A.U.V는 주행중 선상과의 데이터 교환이 이루어 지기 않기 때문에 카메라 영상 저장장치를 따로 제어 하우징에 장착하였다.

주행 중 수집된 영상을 메모리에 저장하여 회수 후 영상 데이터를 육상에서 분석하는 형태이다.

추진체의 제어를 위한 데이터는 확장 칼만 필터를 사용하여 각각의 센서 데이터를 융합하였다. A.U.V에서 가장 중요한 부분인 자율 주행 알고리즘은 A.U.V의 핵심기술 중 하나이다.



5.2 센서시스템의 구성

convertible R.O.V의 센서 시스템은 선체의 현 상태, 경로, 위치등의 데이터를 정확하게 처리 하여 동작이 가장 중요한 부분이다.

정확한 위치 값과 경로 등을 파악하기위해서 여러 가지 센서를 Fig. 9 와 같이 센서 시스템을 구성하였다.

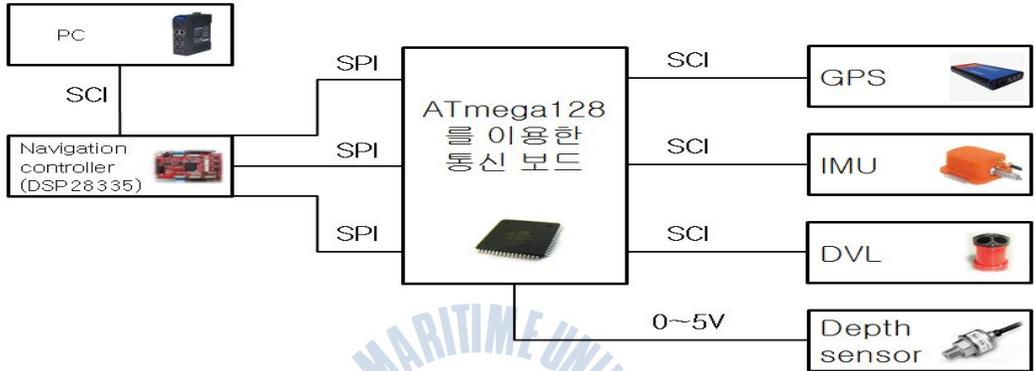


Fig. 8 The Sensors system of R.O.V

센서의 퓨전을 위해 확장 칼만 필터의 알고리즘을 사용하였다. 확장 칼만 필터의 알고리즘은 Fig. 10과 같다.

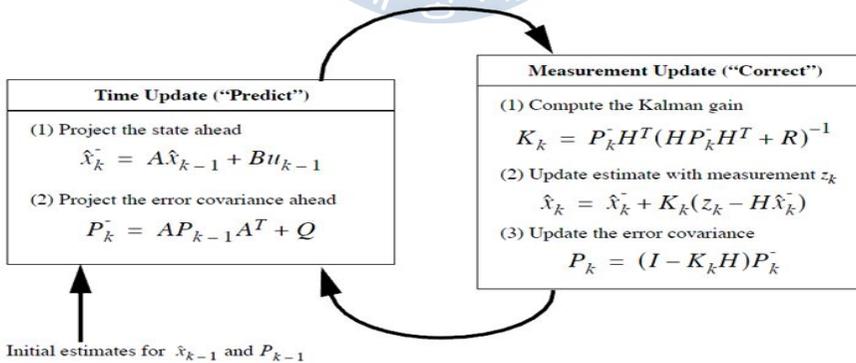


Fig. 10 Extended Kalman filter

제 6 장 결 론

본 논문에서는 수심 50m급의 근해 조사를 목적으로 하는 무인잠수정 KMU-ROV의 설계 및 제작과정에 대해 기술하였다.

수중에서 6자유도 운동이 가능하도록 6개의 추진기를 새로운 형태로 배치하여 설계하였으며, 일반 DC모터를 수중에 적용하기 위해 미케니컬 썰을 이용한 방수추진기를 설계하여 경제적인 무인잠수정을 제작하였다.

KMU-ROV의 항해를 위한 제어시스템은 Master DSP 보드와 센서 DSP 보드 및 모터 제어기로 구성되며 CAN 통신을 이용한 네트워크를 구성하였다. 이 시스템은 6개의 모터를 동시제어 함에 있어 보다 빠르고 신뢰성 있는 환경을 제공하였다.

운항 시 직진 성능 및 조종 성능을 향상시키기 위해 새로운 소프트웨어적 모터 정속제어 기법을 설계하고 검증하였다. 이는 별다른 하드웨어적인 장치 없이 구현할 수 있는 장점이 있으며, 가변적인 입력에 대해 여러 대의 모터를 동시에 정속제어 할 수 있다는 것을 확인하였다.

그리고 KMU-ROV는 외부의 원격 조종 없이 실시간으로 자세 유지 제어를 할 수 있도록 센서와 모터 엔코더의 신호 데이터를 기반으로 실시간 복합 PID 제어기를 설계하였으며, 선착장에서 위치 유지 및 자세 제어 실험을 시행하여 보다 효율적인 운용성능을 가진 것을 확인할 수 있었다.

KMU-ROV의 비선형 6자유도 운동 방정식 해석을 통해 속도 및 가속도식을 정립하였고 조이스틱으로 조종되는 추진기와 로봇의 운동에 대한 관계식을 정립하였다. 이를 바탕으로 전용 조종기를 이용하여 6자유도 원격 조종이 가능하며, 잠수정의 잠항 깊이, 각도 정보를 확인할 수 있고 카메라를 이용하여 영상을 확인함으로써 근해의 해양환경 조사 및 선박의 선저 면을 조사할 수 있도록 하였다.

향 후 외란을 포함한 소프트웨어적 정속 제어 알고리즘을 검증할 필요가 있으며, KMU-ROV의 개별적으로 제어되는 호버링 제어, 깊이 제어 그리고 방향각 제어를 통합하여 성능 개선 및 실용성을 위해 보다 안정적인 제어 알고리즘을 연구해야하며 카메라로부터 획득한 영상 및 해양환경의 정보를 저장하고 실시간성을 향상시키기 위한 리얼타임 운영체제의 사용이 필요하다.

그리고 본 논문은 다소 외란이 적은 선착장에서 실험을 행하였다. 향 후 외란이 강한 실 해역에서의 실험과 수정을 해야 하는 과제를 남겨두고 있다.



참 고 문 헌

[1] 이관목, "Development an Advanced Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle", 한국해양연구원, pp. 349, 2003.

[2] 권경엽, " MVFF를 이용한 자율 수중 로봇의 제어에 관한 연구", 창원대학교, pp. 10~11, 2005.

[3] 김기훈, "무인잠수정 SNUUV I의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석", 서울대학교, pp. 5, 2005.

[4] Thor I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons, 1994.

[5] 한중희, "수중 작업을 위한 소형 무인 잠수정/매니플레이터 시스템의 개발", 국방로봇 기술 시범 및 워크샵, pp. 44~45, 2006.

[6] 현범수, "저항추진론", 한국해양대학교 해양시스템 공학부, pp.35~40, 2004.

[7] TMS320LF2407A User Guide, Texas Instrument. Inc.

[8] Hiroshi Sakai et al., "Autonomous Towed Vehicle for Underwater Inspection in a Port Area", IEEE ICRA05, Vol 1, 2005

[9] 서주노, 최중락, “자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 제어기 설계”, 국방수중로봇 워크샵, 2005.

[10] 이관목 외, “심해무인잠수정 해미래와 해누비의 개발”, 국방수중로봇 워크샵 2005, pp. 30~32, 2005.10.

[11] D. A. Smallwood, L. L. Whitcomb, "Adaptive Identification of Dynamically Positions Underwater Robotic Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, pp. 505~515, 2003.

[12] J. Yuh, "Development in Underwater Robotics" Robotics and Automation, 1995 Proceedings, 1995 IEEE International Conference, Vol 2, pp. 1862~1867, May 1996

[13] T. I. Fossen, "Underwater Robotics Vehicle Dynamics", Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994

[14] 홍도천, 이관목 외 7명, “무인잠수정(ROV)의 설계 및 개발”, 한국해양공학회지 제 7권 제1호, pp. 62~72, 1993.

[15] 이관목 외 2명, “자율무인잠수정(AUV)의 모의 실험을 위한 테스트 베드의 개발 하드웨어와 소프트웨어”, 한국해양공학회지 제11권 제 1호, pp. 106~112, 1997.

[15] 전봉환, 이관목 외 3명, “네 대의 주 추진기를 이용한 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 시뮬레이션 및 실험”, 한국해양공학회지 제19권 제2호, pp. 67~73, 2005

[16] 최영수 외 3명, “원전 감시 점검을 위한 수중로봇 기술”, 수중로봇기술연구회 2006 추계 워크샵, pp. 23~27, 2006

[17] “드라이브 회로와 제어회로를 이해하는 모터제어의 하드웨어 기술”, 월간전자기술, 1995



감사의 글

