



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 전기모터 기반의 6자유도 수중 매니플레이터 연구

A study on the 6-axis underwater manipulator Driven by  
Electric Motor

지도교수 최형식



2010년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

홍성윤

本 論 文 을 洪 性 栗 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위 원 장 왕 지 석 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 정 재 현 (인)

2011 년 2 월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abstract

기호설명

그림목차

표목차

제 1 장 서론.....	1
제 2 장 6축 매니퓰레이터의 설계 .....	3
2.1 역학계산을 통한 액츄에이터 선정 .....	3
2.1.1 각 관절의 관성모멘트 가정 및 해석.....	3
2.1.2 각 관절의 각속도 및 각가속도 해석.....	5
2.1.3 각 관절의 관성력에 의한 토크 해석.....	6
2.1.4 무게에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석.....	7
2.1.5 항력에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석.....	8
2.1.6 각 관절의 관성력, 무게, 항력에 의해 발생하는 토크 해석.....	9
2.2 관절구동기 설계 .....	11
2.2.1 관절구동기의 수밀구조.....	11
2.2.2 관절구동기 육상시험.....	13
2.2.3 관절구동기의 구조해석.....	15
2.2.4 관절구동기 내압시험.....	17
2.3 매니퓰레이터 기구부 설계 .....	20
제 3 장 6축 매니퓰레이터의 기구학 및 동역학 해석.....	23
3.1 매니퓰레이터 순기구학 해석.....	23
3.2 매니퓰레이터 역기구학 해석.....	26
3.3 매니퓰레이터 속도 기구학 해석.....	32
3.4 매니퓰레이터 동역학 해석 .....	34
제 4 장 제어 시스템의 구성 .....	38
제 5 장 6축 매니퓰레이터 2차모델 설계.....	41
5.1 관절구동기 구조.....	41

5.2 매니플레이터 2차모델 기구부 구성 .....43  
5.3 매니플레이터 2차모델 성능시험 .....45  
제 6 장 결론.....47  
참 고 문 헌.....48



# A study on the 6-axis underwater manipulator Driven by Electric Motor

HONG SUNGYUL

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University



## Abstract

In this research, a development of a new 6 d.o.f. underwater manipulator which is actuated by electric motors capable of carrying over 20kg payload and of various operation under the water has been studied. The 25kg manipulator for applying to midium-sized AUV or ROV has been designed small and light but to handle a heavy 20kg payload. The kinematics of the manipulator has been analyzed. The joint actuator for the manipulator is designed and builtd as a new modular typed double oil jacket for waterproofness. Also, superior joint torque performance of the developed joint actuator has been varified through tests in the air and in the water. To improve the design and performance of the manipulator, a new designed manipulator is introduced.

# 그림 목 차

Fig. 2. 1 Time – Angular Velocity Graph .....	5
Fig. 2. 2 3D design of cross section of joint actuator .....	12
Fig. 2. 3 Overall picture of joint actuator.....	12
Fig. 2. 4 composition of the joint actuator.....	13
Fig. 2. 5 results of Dynamo test(CW).....	14
Fig. 2. 6 results of Dynamo test(CCW) .....	14
Fig. 2. 7 Boundary condition.....	15
Fig. 2. 8 von Mises stress distribution in static analysis of case 1 .....	16
Fig. 2. 9 von Mises stress distribution in static analysis of case 2 .....	17
Fig. 2. 10 Pressure vessel.....	18
Fig. 2. 11 Pressure test result.....	19
Fig. 2. 12 Degree of freedom of the manipulator.....	21
Fig. 2. 13 Underwater manipulator.....	22
Fig. 3. 1 D-H coordinates of 6-axis Robot.....	23
Fig. 3. 2 Diagram of robot about $\theta_1$ .....	27
Fig. 3. 3 Diagram of robot about $\theta_2 \sim \theta_3$ .....	27
Fig. 3. 4 Four bar linkage.....	34
Fig. 4. 1 Total control system of the Manipulator.....	38
Fig. 4. 2 Picture of developed driver .....	39
Fig. 4. 3 Block diagram of motor driver.....	40
Fig. 5. 1 3D design of cross section of joint actuator .....	41
Fig. 5. 2 3D design of joint actuator.....	42
Fig. 5. 3 3D design of manipulator .....	43
Fig. 5. 4 Underwater manipulator.....	44
Fig. 5. 5 Motion test .....	45
Fig. 5. 6 Results of motion test.....	46

# 표 목 차

Table 2. 1 Parameters of the driving Joint .....	3
Table 2. 2 Moment of Inertia of the driving Joint.....	4
Table 2. 3 Angular Velocity, Acceleration of the Driving Joints.....	6
Table 2. 4 Torque of the Driving Joints.....	7
Table 2. 5 A weight torque of the driving Joint.....	8
Table 2. 6 Drag torque of the manipulator joints .....	9
Table 2. 7 rps and max Torque of the Driving Joint - 1.....	10
Table 2. 8 Analysis cases and material properties .....	15
Table 3. 1 Parameter of D-H coordinate of 6-axis robot .....	24





# 제 1 장 서론

각종 해양자원의 이용 및 개발은 21세기 고도 산업사회 건설과 지속적인 경제 발전에 필수적이며, 다양한 해양공간 이용 및 개발관련 산업으로 발전할 수 있는 무한한 성장 가능성을 보유하고 있다. 이와 같은 해양 산업을 활성화 할 수 있는 핵심적인 분야중의 하나가 해중 작업장비이다. 수중 로봇 기술은 해양 기술 자립에 필수적으로 요구되어 지는 핵심 기술이다. 이들의 기술개발은 주로 심해 생물·생태계 조사, 심해 생명 과학 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[6]. 수중로봇을 포함하는 다양한 수중 작업장비의 핵심 장비로는 모터 기반의 수중추진체와 작업용 매니플레이터가 있다.

세계적으로 수중로봇의 개발에 관한 연구는 별로 많지 않다. 초기의 실험적 연구 중의 하나는 1966년에 McLain이 그리고 Leabourne 가 1998년에 수중에서 매니플레이터를 실험하였다[1,2]. 2002년에 매니플레이터가 달린 AUV(Autonomous underwater vehicle)의 동작이 컴퓨터 시뮬레이션과 유사한 결과를 보여주는 실험연구가 있었다 [3]. 또한, 방수를 위해 마그네틱 커플링을 이용한 관절구동기를 제작하여 2자유도 수중 매니플레이터를 연구한 논문도 있었다[4]. 이 매니플레이터를 ROV(Remotely operated underwater vehicle)에 적용하여 텔레오퍼레이션을 적용한 연구인 작업지향 조작성에 대한 연구를 하였다[5]. 최근에는 수중 작업장비의 중요한 도구인 수중 매니플레이터는 그 수요가 2010년경부터 400억대로 매우 큰 시장을 형성하고 있으나 국내 제품에는 없다. 국외에는 매니플레이터의 전문화된 기업들인 미국의 Schilling Robotics, Seabotix 사, Cybernetics 사, Roper Resources 사 등이 있으나 대부분이 고심해용 유압기반의 제품으로 전기모터를 기반으로 하는 해중 매니플레이터는 거의 찾아 볼 수 없다.

본 연구에서는 용량이 크나 무거운 유압기반의 매니플레이터 보다 상대적으로 용량은 적으나 경량이고 정밀한 작업을 할 수 있는 전기 모터 기반의 매니플레이터에 대한 개발내용을 발표한다. 전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 핵심 문제인 방수를 해결하기 위하여 새로운 구조의 이중 오일 자켓을 적용한 방수구조의 모터 실린더를 설계 제작하였다. 이를 이용한 모듈화 된 관절구동기를 바탕으로 수중의 AUV나 ROV에 부착하여 사용할 수 있는 다관절 로봇과 같은 구조로 설계하여 상대적으로 경량, 소형화

한 매니플레이터에 대한 세부적인 내용을 기술한다.



## 제 2 장 6축 매니플레이터의 설계

### 2.1 역학 계산을 통한 액추에이터 선정

#### 2.1.1 각 관절의 관성모멘트 가정 및 해석

본 매니플레이터의 가반하중은 20kg으로 설계된다. 매니플레이터에 20kg의 외부부하가 말단장치에 작용할 때 관절에 가해지는 부하토크를 계산하였다.

Table 2.1 은 각 관절의 링크 해당 파라미터 값을 나타낸 것이다.  $r_i$ 는 링크의 직경,  $b_i$ 는 링크의 길이,  $d_i$ 는 회전중심과 질량중심의 거리,  $\theta_i$ 는 회전축을 중심으로 동작하는 각 변위를 나타낸다.  $m_i$ 는 각 회전하는 링크의 질량이다.

Table 2. 1 Parameters of the driving Joint

$i$	$r_i$ [mm]	$b_i$ [mm]	$d_i$ [mm]	$\theta_i$ [rad]	$m_i$ [kg]
1	45	800	583	3.14	30.67
2	45	665	499	1.57	28.00
3	45	530	411	1.57	25.33
4	45	400	324	6.28	22.67
5	45	270	229	3.14	20.00
6	45	140	0	6.28	17.33

각 링크의 관성모멘트를 구하기 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

- 구동축은 회전중심에 위치 함
- 최대 변위  $\theta_i$  만큼 회전하는데 걸리는 회전시간은  $t_i$  s
- 가감속 시간은 0.4 s
- 회전축 마찰저항토크( $T_f$ )는 1 N·m

회전축( $Z$ )이 질량중심과 일치 할 때  $Z$  축에 대한 관성모멘트( $I_z$ )

$$I_z = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2.1.1)$$

회전축이 질량중심에서 거리가  $d$  만큼 떨어져 있을 때  $Z$  축에 대한 관성모멘트( $I_e$ )

$$I_e = I_z + md^2 + I_a \quad (2.1.2)$$

Table 2.2 는 식 (2.1.1)과 (2.1.2) 을 통해 얻어진 각 링크의 관성모멘트( $I_e$ ) 값을 나타낸 것이다.

Table 2. 2 Moment of Inertia of the driving Joint

$i$	motion	$I_{zi} [kg \cdot m^2]$	$I_{ei} [kg \cdot m^2]$
1	yaw	1.651	12.886
2	pitch	1.046	8.534
3	pitch	0.606	5.197
4	roll	0.314	2.843
5	pitch	0.132	1.251
6	roll	0.037	0.056

## 2.1.2 각 관절의 각속도 및 각가속도 해석

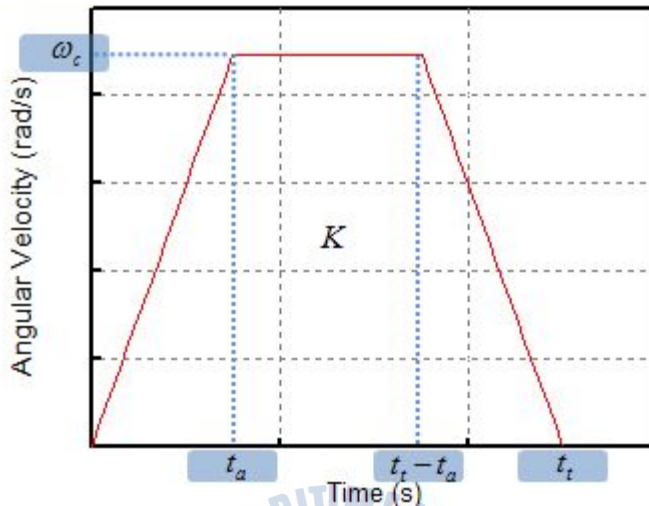


Fig. 2. 1 Time - Angular Velocity Graph

매니플레이터 관절의 각속도 및 각가속도를 다음과 같이 해석하였다. 경로함수는 Figure 3와 같은 함수를 적용하였다. Fig 2.1 의 그래프 내부 면적은 각 관절의 총 회전각도  $K(rad)$ 와 같다. 각 관절구동기의 가감속 시간을  $t_a(s)$ 로, 총 구동시간을  $t_t(s)$ 라고 한다면 다음과 같은 식이 성립 한다.  $\omega_c$ 는 각속도,  $\alpha$ 는 각가속도다..

$$K = \frac{t_a \omega_c}{2} + (t_t - 2t_a) \omega_c + \frac{t_a \omega_c}{2} [rad] \quad (2.1.3)$$

$$\omega_c = \frac{K}{t_t - t_a} [rad/s] \quad (2.1.4)$$

$$\alpha = \frac{\omega_c}{t_a} [rad/s^2] \quad (2.1.5)$$

Table 2.3 는 식 (2.1.4)과 (2.1.5) 을 통해 얻어진 각 관절의 각속도, 각가속도 값을 나타낸 것이다.

Table 2. 3 Angular Velocity, Acceleration of the Driving Joints

$i$	$K_i$ [rad]	$t_i$ [s]	$t_a$ [s]	$\omega_{ci}$ [rad/s]	$\alpha_i$ [rad/s <sup>2</sup> ]
1	3.14	4	0.4	0.872	2.181
2	1.57	2	0.4	0.981	2.453
3	1.57	2	0.4	0.981	2.453
4	6.28	6	0.4	1.121	2.804
5	3.14	4	0.4	0.872	2.181
6	6.28	6	0.4	1.121	2.804

### 2.1.3 각 관절의 관성력에 의한 토크 해석

경로를 따르는 관절의 관성모멘트로 인하여 매니퓰레이터의 관절에 걸리는 부하 토크를 해석하였다.

각 관절 구동기에 작용하는 토크는 크게 가속운동, 등속운동, 감속운동에 대한 토크로 3단계로 구분된다.

이를 살펴보면 관성모멘트에 의한 토크( $T_i$ ), 가속에 필요한 토크( $T_{\alpha+}$ ), 등속에 필요한 토크( $T_c$ ), 감속에 필요한 토크( $T_{\alpha-}$ )로 다음과 같다.

$$T_i = I_e \cdot \alpha_i \quad (2.1.6)$$

$$T_{\alpha+} = T_i + T_f \quad (2.1.7)$$

$$T_c = T_f = 0.5N \cdot m \quad (2.1.8)$$

$$T_{\alpha-} = T_f - T_i \quad (2.1.9)$$

Table 2.4 는 식 (2.1.7), (2.1.8), (2.1.9) 를 통해 얻어진 각 관절 구동기의 토크 값을 나타낸 것이다.

Table 2. 4 Torque of the Driving Joints

$i$	$T_i$ [N·m]	$T_{\alpha+}$ [N·m]	$T_c$ [N·m]	$T_{\alpha-}$ [N·m]
1	50.796	51.796	1	-49.796
2	38.021	39.021	1	-37.021
3	23.270	24.270	1	-22.271
4	14.622	15.622	1	-13.622
5	5.025	6.025	1	-4.025
6	0.156	1.156	1	0.844

#### 2.1.4 무게에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석

매니퓰레이터의 자체중량 및 부하로 인하여 각 관절에 가해지는 부하 토크  $T_w$  를 해석하였다.

$$T_w = W_i \times d_i \times \sin\theta_i = m_i g \times d_i \times \sin\theta_i \quad (2.1.10)$$

$$\theta = \frac{\omega_c \times t_a}{2} [\text{rad}] \quad (2.1.11)$$

Table 2.5 은 식 (2.1.10), (2.1.11)을 통해 링크중량 및 부하에 따른 각 관절 구동기에 걸리는 부하 토크값을 나타낸 것이다.

Table 2. 5 A weight torque of the driving Joint

$i$	$d_i$ [mm]	$m_i$ [kg]	$\theta_i$ [rad]	$T_w$ [Nm]
1	583	31	0	0
2	499	28	0.195	26.686
3	411	25	0.195	19.918
4	324	23	0.222	15.984
5	229	20	0.174	7.807
6	0	17	0.222	0

### 2.1.5 항력에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석

항력에 따른 각 관절 구동기에 걸리는 부하 토크값( $T_{D_i}$ )을 구하였다. 항력의 식은 아래의 식 (2.1.12)과 같다.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (2.1.12)$$

여기서  $D$  는 항력[N],  $\rho$  : 평균바다밀도,  $A$  : 단면적,  $v$  :정지해있는 유체에 대한 매니플레이터의 속도,  $C_D$  :항력계수 이다.

Table 2.6 은 식 (2.1.12)를 통해 각 링크의 항력에 의해 발생하는 토크를 나타낸 것이다.



Table 2. 6 Drag torque of the manipulator joints

i	$\omega_{c_i}$ [rad/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_D$	$D_i$ [N]	$T_{D_i}$ [Nm]
1	0.872	1029	0.38	2.285	1.371
2	0.981	1029	0.38	1.661	0.828
3	0.981	1029	0.38	0.841	0.334
4	1.121	1029	0.38	0.472	0.142
5	0.872	1029	0.38	0.088	0.018
6	1.121	1029	0.38	0.0084	0.0006

### 2.1.6 각 관절의 관성력, 무게, 항력에 의해 발생하는 토크 해석

각 관절 구동기에 요구되는 구동모터의 용량은 다음의 식들에 의해 결정된다.

$$T_{\max} = T_{\alpha_+} + T_f + T_D \quad (2.1.13)$$

$$\eta_{\max} = \frac{60 \times \theta}{360 \times (t_t - t_a)} \quad (2.1.14)$$

$$P_{\max} = T_{\max} \times \eta_{\max} \times \frac{\pi}{30} \quad (2.1.15)$$

Table 2.7 은 각 관절의 최대 토크( $T_{\max}$ ) 와 최대 회전수( $n_{\max}$ ) 및 그에 따른 모터 용량( $P_{\max}$ )을 도출하여 나타낸 것이다.

Table 2. 7 rps and max Torque of the Driving Joint - 1

$i$	Move Direction	$n_{\max}$ [ $N \cdot m$ ]	$T_{\max}$ [ $N \cdot m$ ]	$P_{\max}$ [W]
1	yaw	8.333	53.167	46.374
2	pitch	9.375	66.536	65.288
3	pitch	9.375	44.523	43.688
4	roll	10.714	31.748	35.603
5	pitch	8.333	13.849	12.080
6	roll	10.714	1.158	1.299



## 2.2 관절구동기 설계

### 2.2.1 관절구동기의 수밀구조

전기모터 기반의 매니플레이터 제작에 있어서 가장 큰 어려움은 모터의 회전축에 대한 방수이다. 현재 모터의 회전축계 수밀구조로 쓰이고 있는 방식은 크게 두 가지로 볼 수 있는데 기계키를 이용한 방식과 마그네틱 커플러를 이용한 방법이다. 하지만 기계키 방식은 마찰에 의한 부하 및 그에 따른 수명이 있다는 단점이 있고, 마그네틱 커플러는 고토크에 적용하기 힘든 단점이 있다.

본 연구에서는 매니플레이터용으로 직결타입의 관절구동기로 설계하였다. Fig 2.2 는 구동기용 실린더의 3D 모델링이고 Fig 2.3 는 이를 바탕으로 실제 설계 제작한 것이다. 고토크 저회전의 특성을 가지며 회전축 수밀구조를 위해서 2 중 오일자켓을 이용한 모터의 수밀구조를 고안하여 관절구동기에 적용 하였다. 관절 구동기를 모듈화하여 유지보수가 용이하고 폭넓게 활용될 수 있도록 제작하였다. 오일자켓에 오일을 채우기 용이하게 볼팅처리하여 오일 주입구가 설계되어 있어 물이 침범하여 부식이 되었을 경우 부식된 부분만 교체하기 쉽도록 설계되어 있다. 또한, 두 모터 및 감속기의 특징은 직경이 작고 길이가 긴 모터와 직경은 크지만 길이는 매우 짧은 모터를 사용하여 전체면적과 부피를 최소화하는 구조로 설계 및 제작하였다.

2.1 절에서 선정된 모터를 기반으로 20 기압의 수압에 대한 수밀을 위해 오링 및 2 중 오일자켓을 적용하여 관절-1, 관절-2 의 구동기를 설계하였다. 구동기의 사양은 용량 90W, 토크 49.4Nm, 정지토크 453Nm, 회전수 16.4rpm, 중량 3.4kg, 내압 20 기압, 효율 65% 이다.

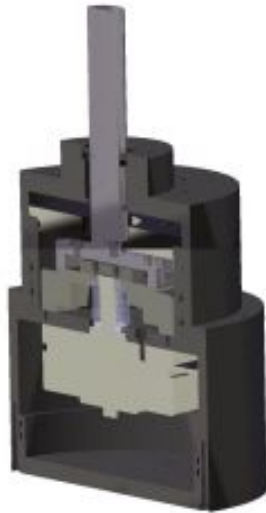


Fig. 2. 2 3D design of cross section of joint actuator.



Fig. 2. 3 Overall picture of joint actuator



Fig. 2. 4 composition of the joint actuator

## 2.2.2 관절구동기 육상시험

개발한 관절구동기의 육상성능시험을 하였다. 시험 조건은 입력 48V 최대전류 2.5A 최대부하 40N.m 로 시험하였고 그 결과는 Fig 2.5 및 Fig 2.6 와 같다. 여기서 x 축은 토크성분이다.

효율은 토크가 0 일 때부터 증가하다가 30Nm 부분에서 최대효율이 약 60%정도가 되고 최대효율을 지나면서부터 점차적으로 감소하며 최대토크는 35Nm 이다. 회전속도는 무부하 상태일 때 19rpm 정도이고 토크가 커지면 커질수록 감소한다. 전류 및 출력은 토크에 비례해서 증가한다. 정지 토크가 정격 토크의 약 9.17 배인 것을 감안할 때 제작된 관절구동기는 목표 최대 토크인 65.288Nm 의 약 4.9 배정도를 낼 수 있다.

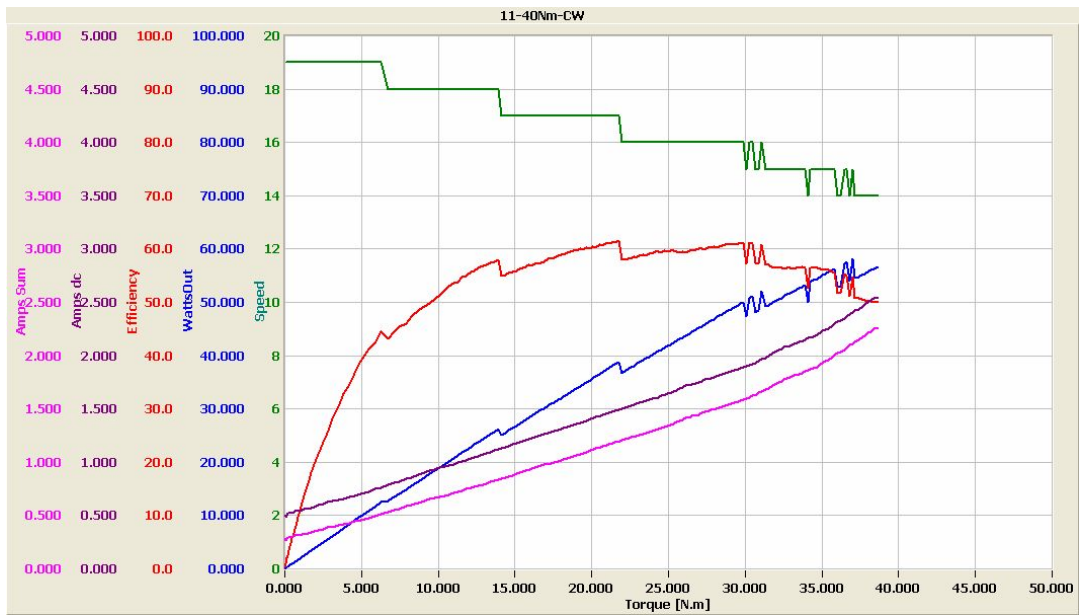


Fig. 2. 5 results of Dynamo test(CW)

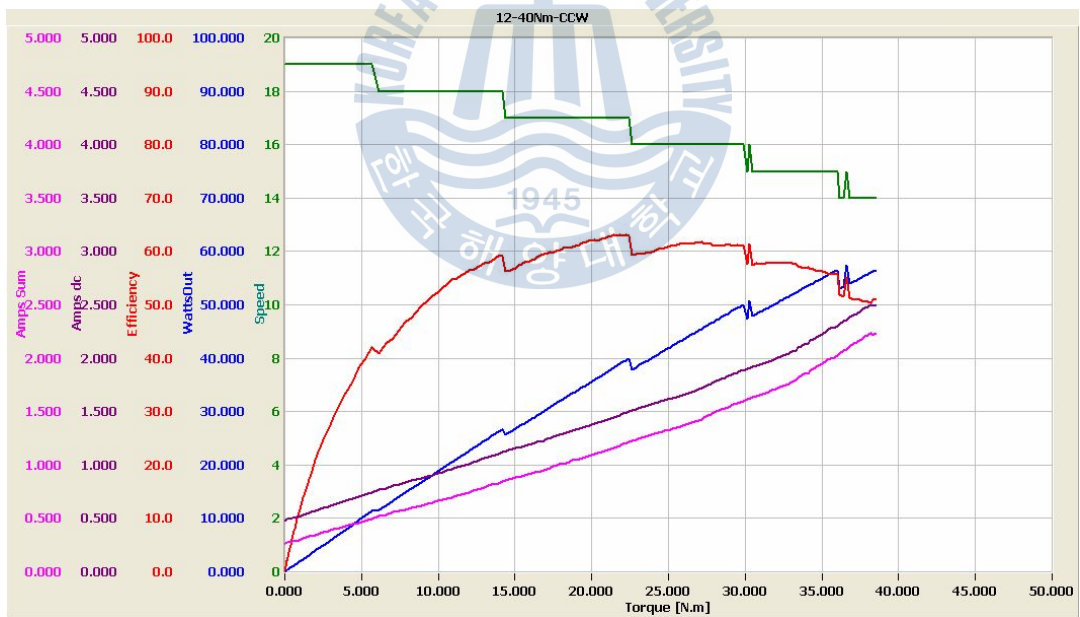


Fig. 2. 6 results of Dynamo test(CCW)

## 2.2.3 관절구동기 구조해석

본 연구에서는 관절구동기의 두께를 선정하기 위해 정적해석(static analysis)과 좌굴 해석을 수행하였다. Fig 2.7 에서 나타나 있듯이 단순지지 경계조건으로 해석을 수행하였으며 Table 2.8은 해석의 두 종류와 물성치를 나타내고 관절구동기의 재질은 알루미늄 6061이다. 고유치 해석시 기준외압 1MPa 를 사용하였다.

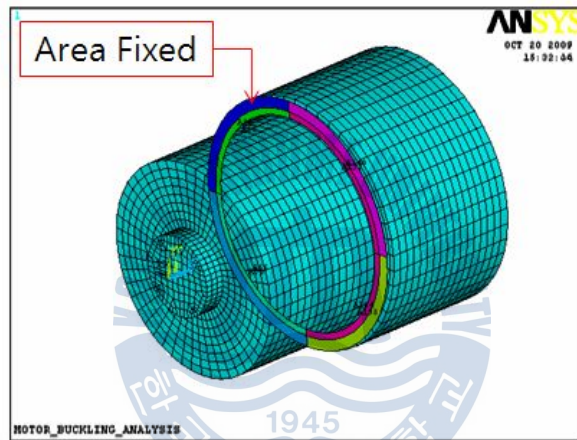


Fig. 2. 7 Boundary condition

Table 2. 8 Analysis cases and material properties

Analysis Case 1	$t=1\text{mm}$ , $t_c=3\text{mm}$
Analysis Case 2	$t=t_c=6\text{mm}$
Elastic Modulus (GPa)	68.9
Allowable stress (MPa)	59.3
Tensile Strength (MPa)	124
Poisson's Ration	0.33

Case 1의 경우 셸 두께 1mm, cover 두께를 3mm로 하였을 때의 좌굴 압력을 구한 것이다. 이 때의 좌굴압력은 3.1 MPa이다. Fig. 2.8는 이 압력이 작용할 때 정적해석으로 등가응력(von Mises stress)을 구한 것으로 최대응력이 65.1 MPa로 허용응력과 비슷하게 나타났다. Case 2의 경우 셸 두께 6mm, cover 두께를 6mm로 하였을 때의 좌굴 압력을 구한 것이다. 이 때의 좌굴압력은 95.8 MPa이다. 안전계수를 5로 하여도 19.2MPa로 1900m까지 내려가야 좌굴이 일어 난다. Fig. 2.9는 이 압력이 작용할 때 정적해석으로 등가응력(von Mises stress)을 구한 것으로 최대응력이 7.2 MPa로 허용응력과 훨씬 작게 나타났다.

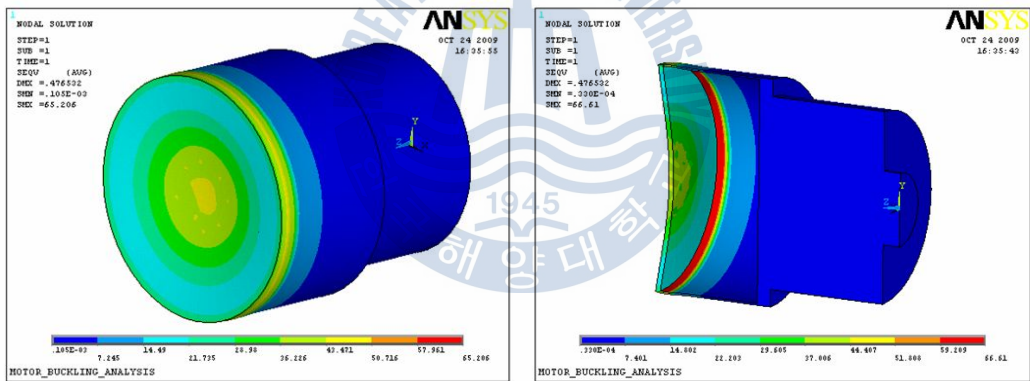


Fig. 2. 8 von Mises stress distribution in static analysis of case 1



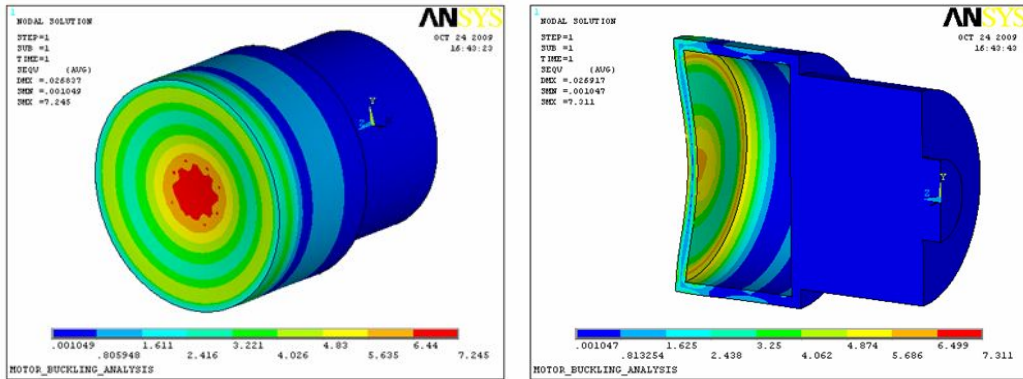


Fig. 2. 9 von Mises stress distribution in static analysis of case 2

## 2.2.4 관절구동기 내압시험

개발한 관절구동기에 대한 수압 좌굴 시험은 Fig 2.10 에 보인 압력용기를 사용하였다. 이 압력용기는 울산대학교가 보유하고 있는 것으로 1500M 수심에 해당하는 압력 (150기압)까지 가할 수 있고 수용할 수 있는 시험모델의 크기는 600mm(D)×1500mm(L)이다. 주로 원통형 외압 구조물의 붕괴 강도 시험에 사용되며 이미 강 강 구조의 보강원통이나 보강 원추통의 시험에 사용된 바 있다.

대부분의 다른 기관에서 보유하고 있는 압력용기는 밀폐식이므로 구조물의 붕괴나 파괴거동을 탐지하기가 쉽지 않으나 울산대학교에서 보유한 장비는 한 쪽 끝이 열린 형태의 것이기 때문에 수압의 증가에 따른 구조물의 변형을 육안으로 관찰할 수 있고 관절구동기를 구동시키며 내압시험을 할 수 있는 장점이 있다. 수압 시험 중의 압력과 변형 정보는 관절구동기의 내벽에 2축 스트레인게이지 2개를 사용하여 측정하였다.



Fig. 2. 10 Pressure vessel

아래의 Fig 2.11 은 내압시험의 결과 그래프이다.

그래프에서 가로축은 시간, 세로축은 압력데이터 및 스트레인게이지의 데이터 이다.

수압시험에 있어서 물을 충전한 다음 잔류공기를 제거하고 가압으로 20기압까지 승압 시킨다음 일정시간동안 압력을 유지한 후 감압하여 스트레인 게이지의 변화량을 측정한 결과 4축의 스트레인 게이지의 변화량은 없었으며 관절구동기의 회전축 및 각 연결 부분의 누수도 없었다.

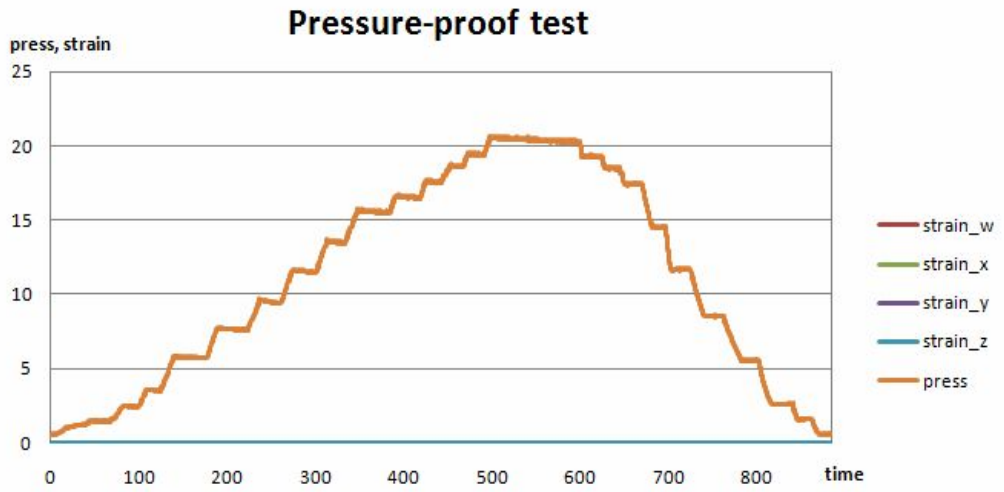


Fig. 2. 11 Pressure test result



## 2.3 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.

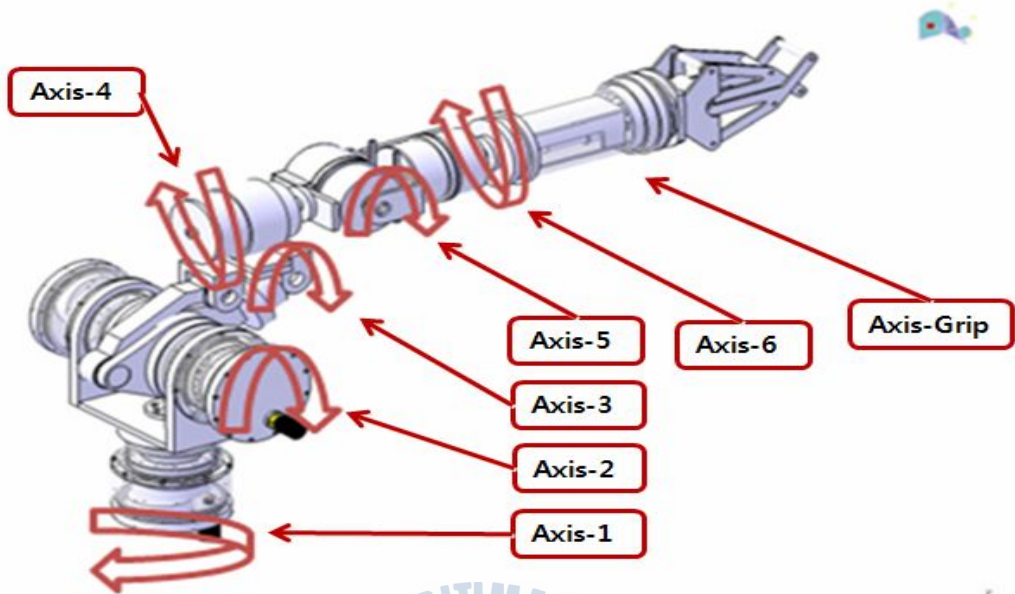
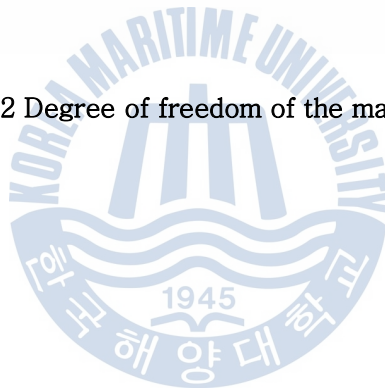


Fig. 2. 12 Degree of freedom of the manipulator



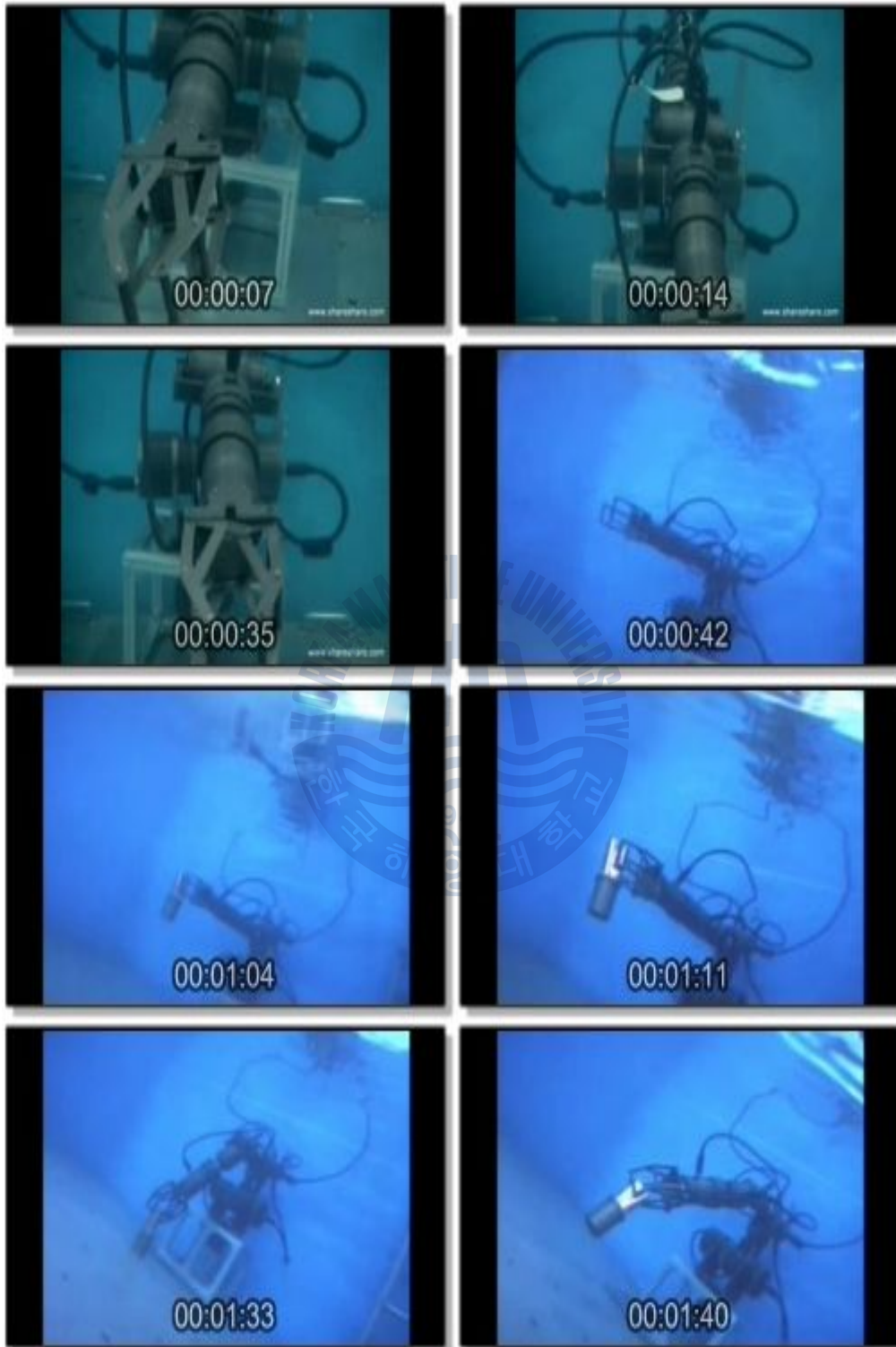


Fig. 2. 13 Underwater manipulator



# 제 3 장 6축 매니플레이터의 기구학 및 동역학 해석

## 3.1 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 0축을 기준으로 하여 Denavit-Hartenberg 규약을 이용하여 Fig 3.1과 같은 좌표계를 설정하였다.

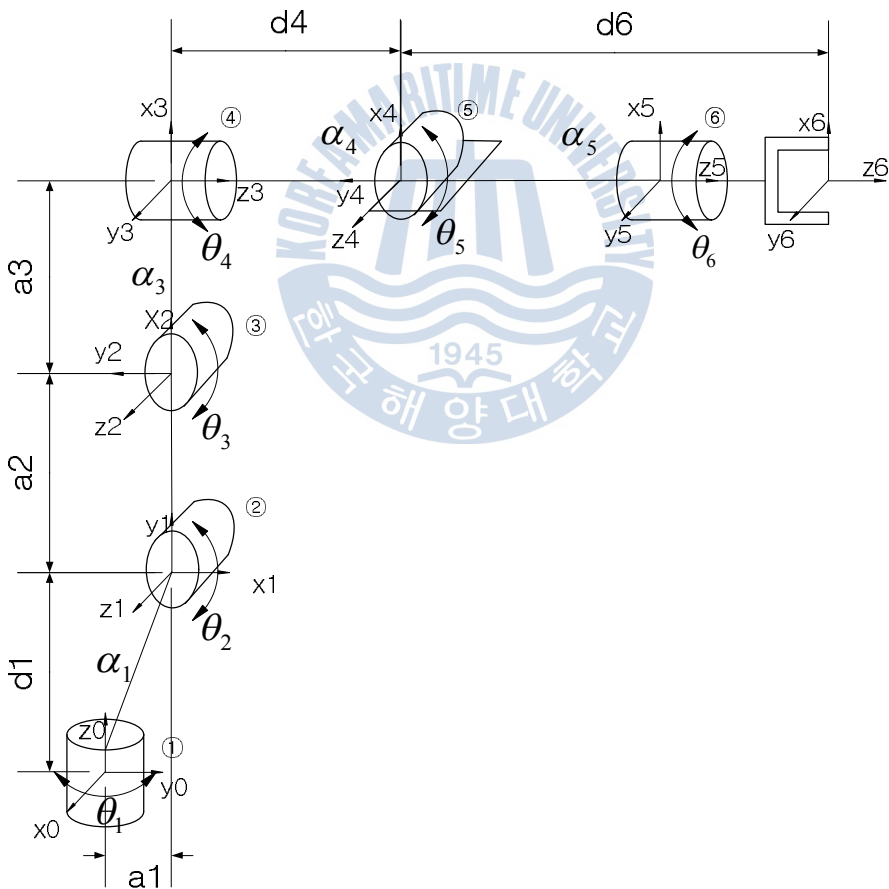


Fig. 3. 1 D-H coordinate of 6-axis robot

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

	$\alpha_i$	$a_i$	$\theta_i$	$d_i$
1	$90^\circ$	0	$90^\circ + \theta_1$	$d_1$
2	$0^\circ$	$a_2$	$90^\circ + \theta_2$	0
3	$90^\circ$	$a_3$	$\theta_3$	0
4	$-90^\circ$	0	$\theta_4$	$d_4$
5	$90^\circ$	0	$\theta_5$	0
6	$0^\circ$	0	$\theta_6$	$d_6$

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.

$\theta_3$ 의 경우 4절 링크 구조에서  $\theta_2$ 의 각 변위에 영향을 받으므로 실제로 제어에 사용해야 할 회전각  $\theta_{3r}$ 은 다음과 같다.

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

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.

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



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

$$\begin{aligned}
d_x &= d_6 \{s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23}\} - d_4 s c_{23} + a_3 s s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_4 s_1 \\
d_y &= d_6 \{s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23}\} + d_4 c_1 c_{23} - a_5 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_4 c_1 \\
d_z &= d_6 (c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23}) + d_4 s_{23} + a_5 c_{23} + a_2 c_2 + d_1
\end{aligned} \tag{3.1.4}$$

전체 동차 변환식을 다른 형태로 표현하면 다음과 같다.

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

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 방향을 나타내는 벡터 이고,  $d$  는 원점  $o_0$  에서  $o_6$  까지의 벡터를  $o_0 x_0 y_0 z_0$  좌표계로 표현한 것이다.

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

먼저 Fig 3.2를 통하여  $\theta_1$ 의 해를 구하고, Fig 3.3의 관계와 제2 코사인 법칙을 응용하여  $\theta_2 \sim \theta_3$ 의 기하학적 해를 구하였다.

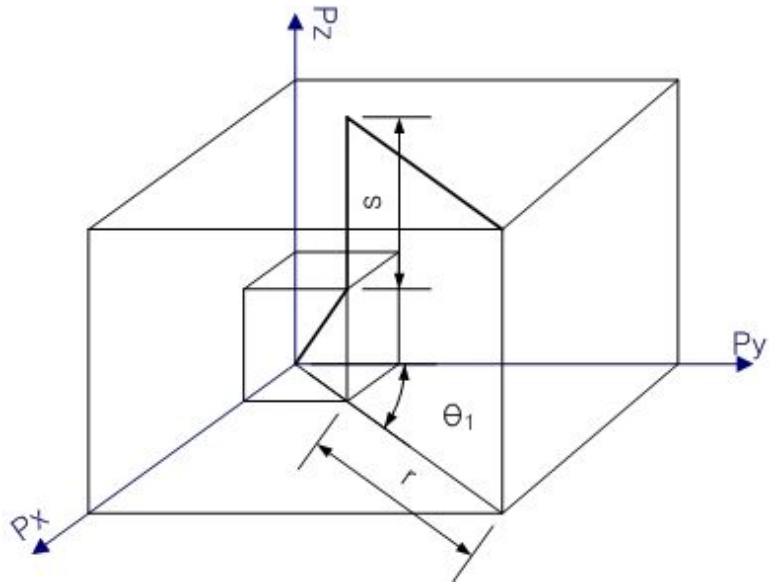


Fig. 3.1 Diagram of robot about  $\theta_1$

$$\theta_1 = A \tan(p_x, p_y)$$

(3.2.3)

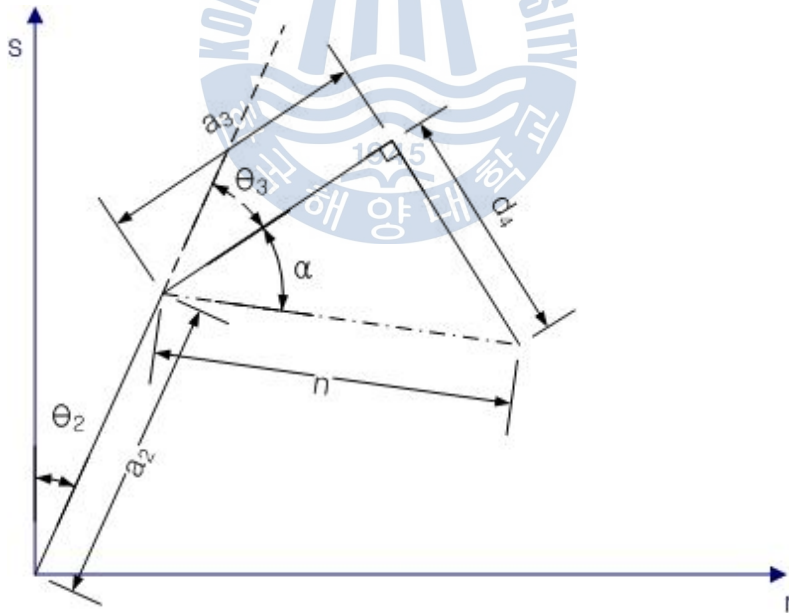


Fig. 3.2 Diagram of robot about  $\theta_2 \sim \theta_3$

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

(3.2.4)

$$\cos(\theta_3 - \alpha) = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - n^2}{2a_2n} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + (p_z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2\sqrt{a_3^2 + d_4^2}} = D \quad (3.2.5)$$

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

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

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.

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

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. 그

러면 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.  $\theta$  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  $\theta$  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  $\theta$  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 함만이 결정되므로, 무한히 많은 답이 있게 된다. 통상적으로  $\phi = 0$  을 택할 수 있고,  $\psi$  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.

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

$$\theta_5 = A \tan(-r_{13} s_1 c_{23} + r_{23} c_1 c_{23} + r_{33} s_{23}, \pm \sqrt{1 - \{-r_{13} s_1 c_{23} + r_{23} c_1 c_{23} + r_{33} s_{23}\}^2}) \quad (3.2.26)$$

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



### 3.3 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, 특이 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  $J_\omega$  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.

$$J_1(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_1 - o_0) \\ z_0 \end{bmatrix}$$

$$J_2(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_2 - o_0) & z_1 \times (o_2 - o_1) \\ z_0 & z_1 \end{bmatrix}$$

$$J_3(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_3 - o_0) & z_1 \times (o_3 - o_1) & z_2 \times (o_3 - o_2) \\ z_0 & z_1 & z_2 \end{bmatrix}$$

$$J_4(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_4 - o_0) & z_1 \times (o_4 - o_1) & z_2 \times (o_4 - o_2) & z_3 \times (o_4 - o_3) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}$$

$$J_5(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_5 - o_0) & z_1 \times (o_5 - o_1) & z_2 \times (o_5 - o_2) & z_3 \times (o_5 - o_3) & z_4 \times (o_5 - o_4) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix}$$



$$J_6(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_6 - o_0) & z_1 \times (o_6 - o_1) & z_2 \times (o_6 - o_2) & z_3 \times (o_6 - o_3) & z_4 \times (o_6 - o_4) & z_5 \times (o_6 - o_5) \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix} \quad (3.3.3)$$

$$= [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5 \ J_6]$$

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

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

$$o_4 = \begin{bmatrix} -d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix}, \quad o_5 = \begin{bmatrix} -d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\ d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\ d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1 \end{bmatrix},$$

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

그리고, 패러미터  $z_0 \sim z_5$  는 다음과 같다.

$$z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad z_1 = \begin{bmatrix} c_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad z_2 = \begin{bmatrix} c_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad z_3 = \begin{bmatrix} -s_1 c_{23} \\ c_1 c_{23} \\ s_{23} \end{bmatrix},$$

$$z_4 = \begin{bmatrix} -s_1 s_4 s_{23} + c_1 c_4 \\ c_1 s_4 s_{23} + s_1 c_4 \\ -s_4 c_{23} \end{bmatrix}, \quad z_5 = \begin{bmatrix} s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23} \\ s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23} \\ c_4 c_5 c_{23} + c_5 s_{23} \end{bmatrix} \quad (3.3.5)$$

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

### 3.4 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 3.4 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.

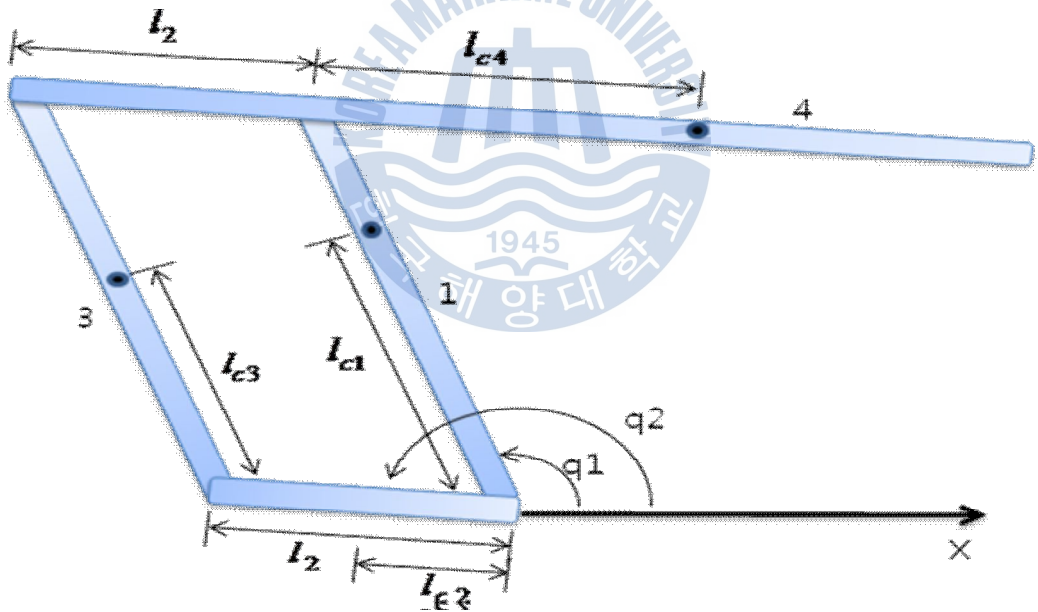


Fig. 3. 4 Four bar linkage

그림에서 분명한 것은 4절링크가 움직이지만, 사실  $q_1 \sim q_2$  로 표시되는 2자유도만 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 좌표를 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 위 식으로 나타나는 4개의 행렬로 정의하자.

다음으로 네 링크의 각속도는 단순히

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

로 주어짐을 쉽게 알 수 있다. 따라서 관성행렬은

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

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

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

주의할 것은

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

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.

$\phi_1$ 는 단지  $q_1$ 에만 달려 있고  $q_2$ 에는 좌우되지 않는다. 마찬가지로  $\phi_2$ 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.

$$d_{11}^{\square} q_1 + \phi_1(q_1) = \tau_1, \quad d_{22}^{\square} q_2 + \phi_2(q_2) = \tau_2 \quad (3.4.15)$$

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.



## 제 4 장 제어 시스템의 구성

수중 매니플레이터를 제어하기 위한 전체 시스템 구성도는 Fig. 4.1 과 같다. 제어시스템은 크게 전용 조종기, 주 제어기, 모터제어기, 서보모터 드라이버 및 센서부로 구성된다.



Fig. 4. 1 Total control system of the Manipulator

본 논문의 수중 매니플레이터는 7 개의 관절 구동용 모터 와 7 개의 드라이버 및 각 관절의 한계각 이상의 구동을 막기 위한 센서들이 있다. 모터 제어와 센서데이터 처리를 위한 컨트롤러로써 DSP 를 사용하며 Master DSP, 모터 제어기 그리고 모터드라이버로 구성된다.

전용조종기는 제어시스템의 최상위 제어기가 되어 매니플레이터에 작업 명령을 송신하거나 매니플레이터의 현재 상황을 모니터링하고 카메라로부터 영상을 받아 자료를 수집한다.

Master DSP 는 전용 조종기로부터 전압값으로 조이스틱의 구동 데이터를 받아서 각 모터의 속도 데이터로 값을 변환하여 출력한다. 얻어진 모터의 속도 데이터는 RS232 통신으로 모터 제어기로 송신한다.

모터 제어기는 Master DSP 로부터 수신한 모터의 속도 데이터는 매니플레이터의 각각의 드라이버의 프로토콜로 변환하여 RS485 통신으로 드라이버로 모터의 구동데이터를 송신한다.

모터 드라이버는 모터제어기로부터 속도데이터를 수신하여 모터를 구동하면서 전류센서, 홀센서 및 관절구동기 내부에 장착한 포토센서로부터 센서데이터를 받아 매니플레이터의 한계각 이상의 구동을 강제적으로 정지시키는 안전장치 기능을 한다.

아래의 Fig. 4.2 는 드라이버의 사진이고, Fig. 4.3 은 드라이버의 블록 다이어그램이다.



Fig. 4. 2 Picture of developed driver

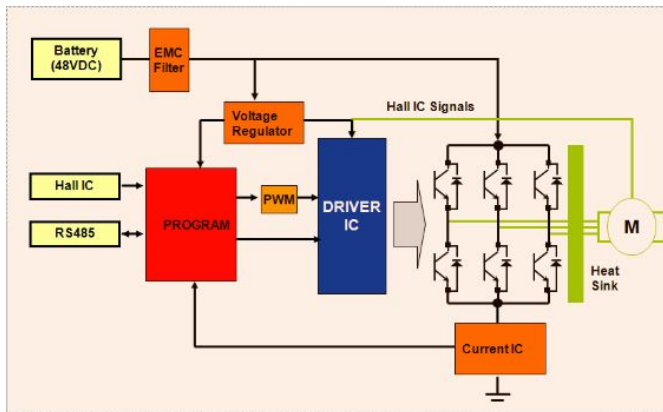


Fig. 4. 3 Block diagram of motor driver





## 제 5 장 6축 매니플레이터 2차모델 설계

### 5.1 관절구동기 구조

기존 매니플레이터의 기구부적 문제를 개선하여 제작된 2차모델은 관절 구동기는 Fig 5.1과 같이 외부에 연결된 케이블을 구동기와 링크 내부로 배선하여 설계하였다. 기존의 모델보다 회전축의 직경을 크게 하되 중공으로 설계하여 무게는 동일하게 설계되었으며 외부에 연결된 케이블의 영향으로 제한되었던 움직임을 내부로의 배선 설계로 보다 안정적인 움직임을 가능하게 하였다.

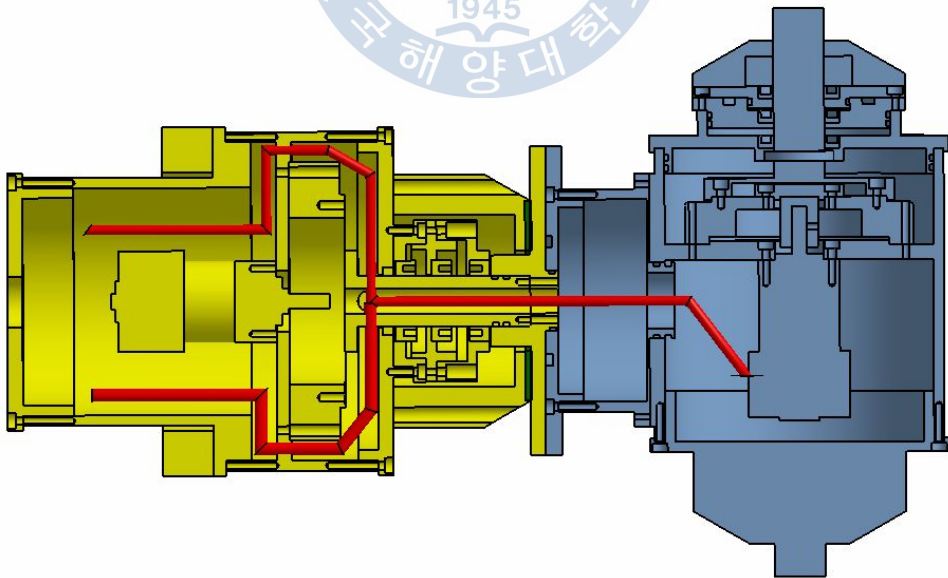


Fig. 5. 1 3D design of cross section of joint actuator.

Fig 5.2는 내부 배선의 형태로 새롭게 제작된 매니플레이터의 관절 구동기로서 각각의 관절구동기의 수밀 구조는 기존의 매니플레이터와 같은 2중오일 구조로 설계 되었으며 감속비를 증가시켜 토크 성능도 개선하였다. 각 관절 구동기의 내부에 자체 안전 장치를 위해 근접센서를 적용하여 강제적인 구동정지를 설치하여 새롭게 제작된 관절 구동기의 안정성을 높였다.

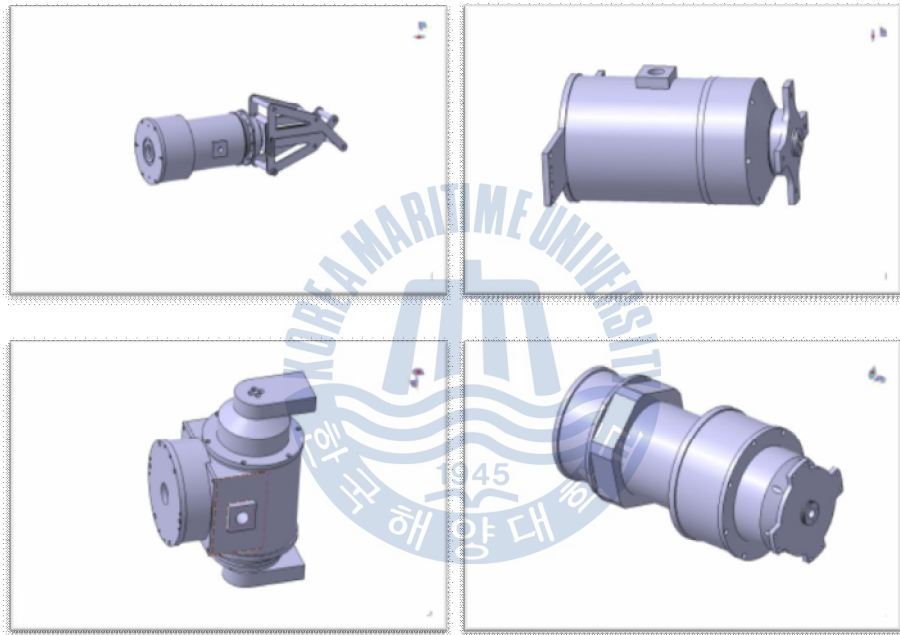


Fig. 5. 2 3D design of joint actuator.

## 5.2 매니플레이터 2차모델 기구부 구성

앞에서 개발된 관절 구동기를 기반으로 개선된 해중 매니플레이터를 설계하였다. 전체적인 기구부는 Figure 5.3과 같이 요-피치-피치-롤-피치-롤 구조로 이전의 모델과 같이 설계하였다. 그림을 제외한 각 관절구동기의 감속비를 최적설계하여 이전의 모델

보다 약 5~6배 높은 토크를 낼수 있도록 설계하였다. 또한 관절구동기 내부에 센서를 적용하여 좀더 안정적으로 매니플레이터의 작업을 수행할수 있도록 설계하였다. 개선 모델의 각 관절구동기의 공기중 무게는 하부 3축 요-피치-피치는 각각 3.3kg, 4.8kg, 4.8kg의 무게를 가지며 상부 롤-피치-롤-그리퍼는 각각 3.9kg, 3.8kg, 2.5kg, 2.8kg의 무게를, 매니플레이터의 총 무게는 30kg 이다.

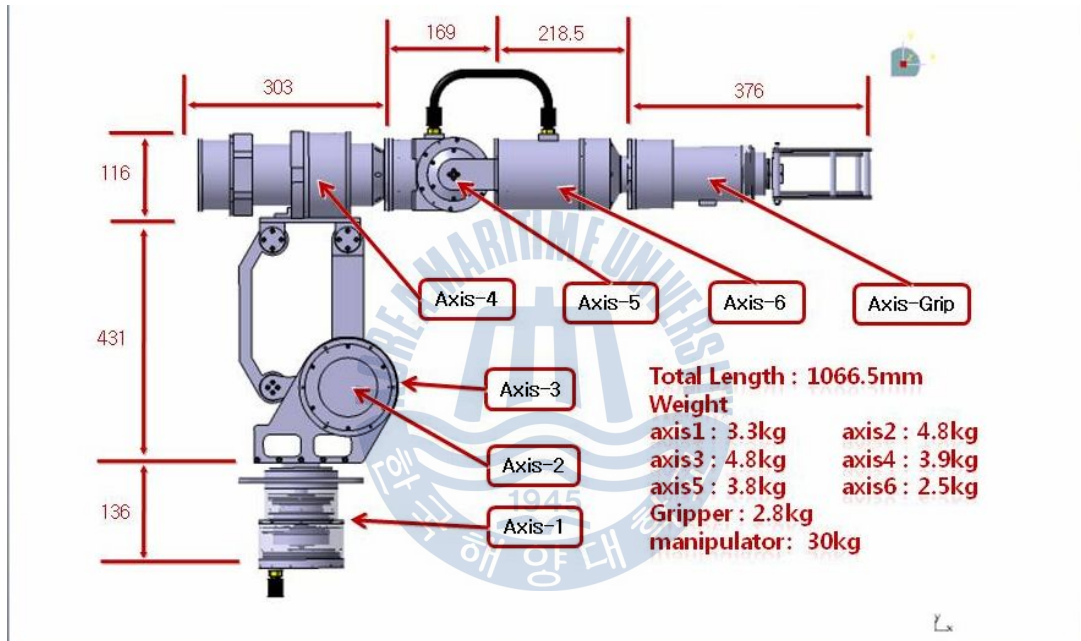


Fig. 5. 3 3D design of manipulator.

초기 매니플레이터 모델의 배선, 외형, 센서 등을 보완하고 감속비를 최적화를 통해 개선된 매니플레이터를 설계하였다. Figure 5.4는 개선된 모델로서 완성도 높은 디자인과 작업의 안전성 및 고가반하중을 갖는 매니플레이터를 개발하였다.

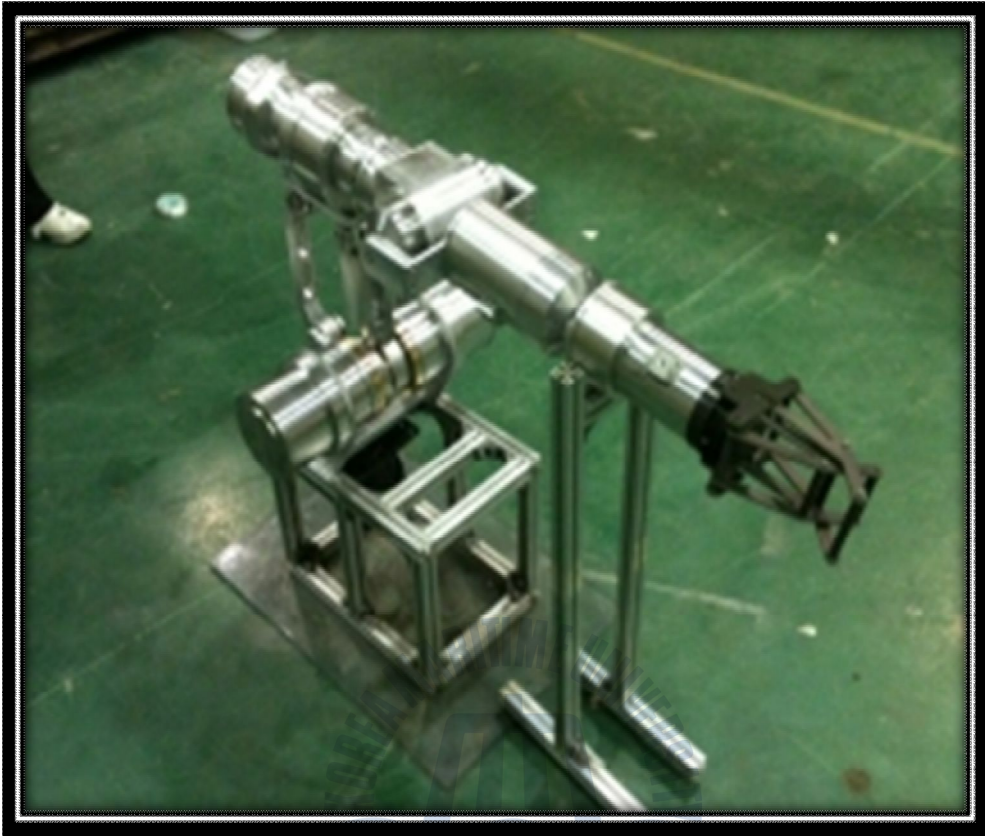


Fig. 5. 4 Underwater manipulator

### 5.3 매니플레이터 2차모델 성능시험

새롭게 제작된 매니플레이터의 관절구동기의 성능을 알아보기 위한 실험을 하였다.

Fig 5.5과 같이 10kg의 하중을 적용하여 개선된 토크성능을 확인



Fig. 5. 5 Motion test

2차모델의 성능시험을 위하여 파워 입력단에 후크메타(전류측정기)를 장착하여 매니플레이터 구동시의 전류를 측정하였다. 1차모델에서는 전류가 부하에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 즉, 관절의 각도나 말단장치의 부하에 의해 전류가 비례하였으나 2차모델에서는 드라이버의 업그레이드를 통해 구속전류를 증가시키면서 초기 구동시의 입력전류가 높아졌다. 또한 부하에 따른 전류차는 거의 줄어들었고 모터의 속도에 따른 전류차이만 일정하게 나타나게 되었다. Figure 5.6의 결과 그래프에서 가로축은 모터의 속도를 퍼센트로 환산한 값이고 세로축은 전류(A)값이다. 또한 붉은 선은 말단장치에 15kg의 부하를 가하고 구동시켰을 때의 전류값이고 푸른선은 외부부하 없이 자체부하만이 작용할때의 전류값이다. 그래프를 보면 부하에 따른 전류값의 차이는 미미하나 속도에 따라 전류가 증가하는것을 확인할 수 있다.

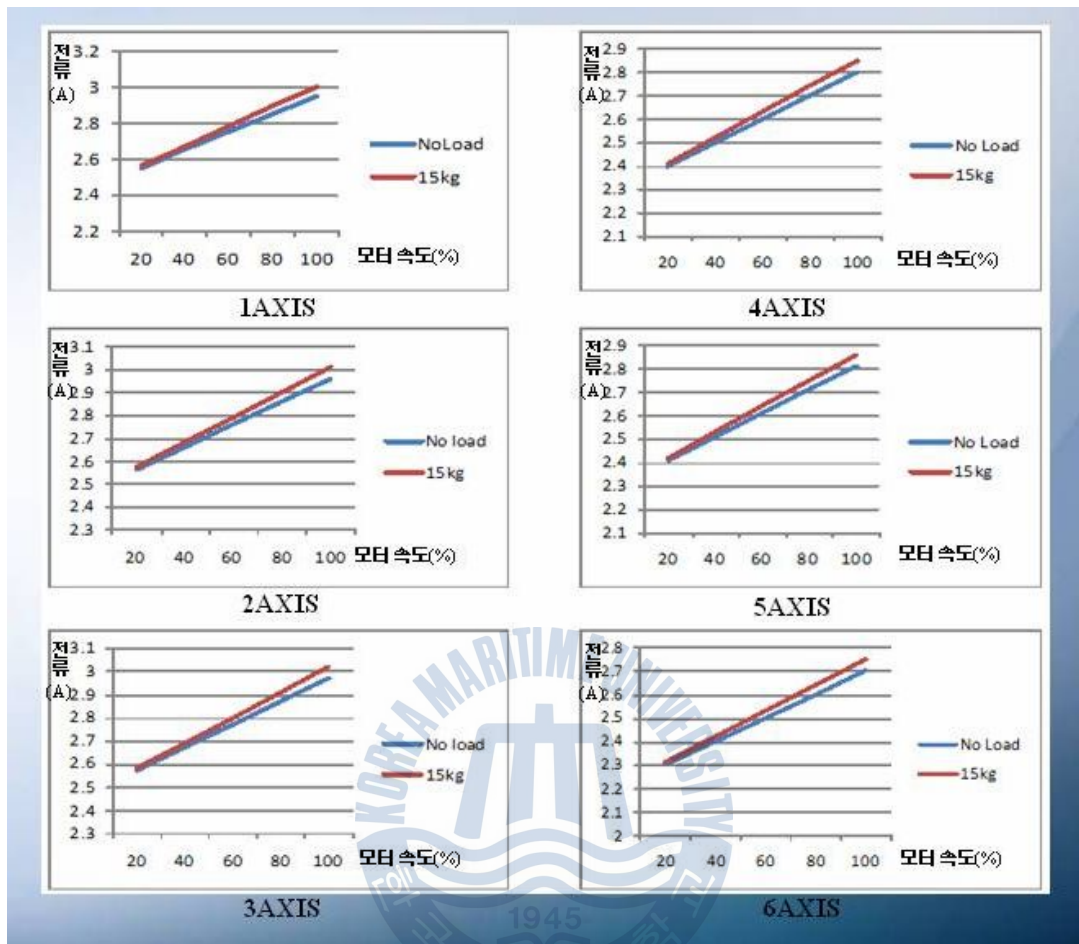


Fig. 5. 6 Results of motion test



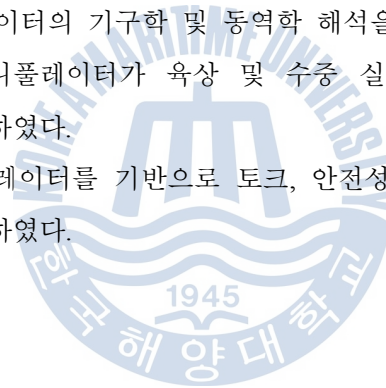
## 제 6 장 결론

본 연구에서는 현재 수중매니플레이터의 대부분을 차지하고 있는 유압기반의 구동방식을 대체하기 위한 전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 하부 관절구동기를 개발하였다.

수중에서의 부하로 인하여 관절에 걸리는 부하토크에 대한 해석을 하였다. 2 중 오일 구조를 적용한 새로운 회전축계 방수구조인 관절구동기의 방수테스트 및 내압테스트를 실시하여 성공적으로 마쳤고, 육상 시험에서 관절구동기의 토크 시험을 통하여 20kg의 외부 부하를 이송할 수 있는 성능을 검증하였다.

실험을 통하여 제작된 관절구동기는 목표 최대 토크의 약 4 배정도를 낼 수 있음을 확인하였다. 또한 매니플레이터의 기구학 및 동역학 해석을 수행하였고, 이를 바탕으로 개발한 25kg의 수중 매니플레이터가 육상 및 수중 실험을 통해 고중량의 물체를 성공적으로 이송함을 확인하였다.

개발된 1 차모델 매니플레이터를 기반으로 토크, 안전성, 디자인이 개선된 2 차모델 수중 매니플레이터를 개발하였다.



## 참 고 문 헌

- [1] McLain, T. W., Rock, S. M., Lee, and M. J. , “Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System,” Journal of Autonomous Robots 3, pp. 213-222, 1996.
- [2] Leabourne, K. N. and Rock, S. M. , “Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control,” Proc. of the OCEANS 98 Conference, Nice, France, September, pp. 941-946 1998.
- [3] Yamada, S. and Sagara, S. , “Resolved Acceleration Control of an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator”, Proc.of 7th Int. Symp .on Artificial Life and Robotics, pp.230--233, 2002.
- [4] Ishitsuka, M., Sagara, S, and Ishii, K. “Dynamics Analysis and RAC of an AUV Equipped with a Manipulator”, Proc .of UnderwaterTechnology,pp.213--232,2004.
- [5] Ishitsuka, M., and Ishii, K. “Development of an underwater manipulator mounted for an AUV”, Proc.of Oceans, 2005.
- [6] J. Yuh, "Development in Underwater Robotics" Robotics and Automation, 1995 Proceedings, 1995 IEEE International Conference, Vol 2, pp. 1862~1867, May 1996.



## 감사의 글

2년 6개월의 실험실 생활은 동료들에 비하면 짧은 시간일수 있지만 저에게 많은 것을 배우고 느낄수 있었던 시간이었습니다. 이런 기회를 주신 최형식 교수님 항상 감사합니다.

어쩌다 보니 집보다 실험실이 더 편해져서 실험실에서 먹고 자는 시간이 많다보니 여러 선배님들 및 후배님들에게 피해도 많이 준 것 같아 죄송하게 생각합니다.

이 짧디 짧은 2년 5개월의 실험실 생활을 버티지 못하고 포기하고 싶은 순간도 여러 번 있었지만 그때마다 그만의 특출난 캐릭터와 오오라로 저를 지켜주고 먹여살린 살지광이에게 이 영광을 돌리고 취업을 위해 졸업하기 전까지 살을 꼭 빼기를 바라고 있지만 취업과 동시에 다시 살을 찌워서 그만의 캐릭터를 지키기를 간절히 바랍니다.

언제나 돌봐주시던 실험실 선배님들 동완행님, 원현행님, 진일행님, 형석행님, 재관행님, 우현행님, 동호 정말 감사드립니다.

그리고 진짜 미쳐서 자신이 말인줄 아는 말통이와 늘 저를 도와주는 호성행님, 그리고 밑에것들 절대권력 옹이 좀 놀렸다고 태웅이한테 일러바친 개장수 무조건 살돼지 편만 드는 명마이 정말 진심으로 맘에안든다 썰기는 머 본인 말대로 잘 될거라 믿어 의심치 않고 동준이도 잘할거라 믿는다.

마지막으로 저를 낳아주시고 힘들게 키워주신 부모님과 하느님께 감사드립니다.