



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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.

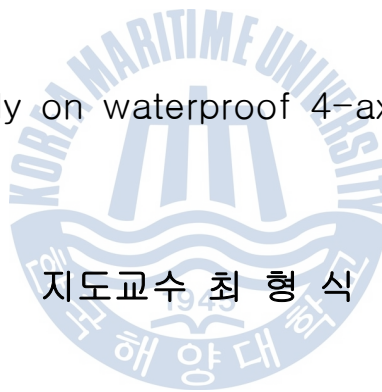
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

방수형 4축 소형 매니플레이터의 설계 연구

A design study on waterproof 4-axis manipulator



지도교수 최 형 식

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

우 명 만

本 論文을 禹明萬의 工學碩士 學位論文으로
認准함.

위 원 장 조 종 래 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 김 준 영 (인)

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

그림목차

표목차

제 1 장 서론.....	2
제 2 장 4축 매니플레이터의 설계.....	3
2.1 4축 매니플레이터의 개념설계 시 고려사항.....	3
2.2 각 관절의 관성 모멘트 가정 및 해석.....	4
2.3 각 관절의 각속도 및 각가속도 해석.....	6
2.4 각 관절의 관성력에 의한 토크 해석.....	8
2.5 무게에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석.....	11
2.6 각 관절의 구동 토크 해석.....	13
제 3 장 관절구동기 설계.....	14
3.1 관절구동기의 수밀구조.....	16
3.2 매니플레이터 기구부 설계.....	15
3.3 매니플레이터 관절구동기 구성.....	20
제 4 장 4축 매니플레이터의 기구학 및 동역학 해석.....	26
4.1 매니플레이터의 순기구학 해석.....	26
4.2 매니플레이터의 역기구학 해석.....	30
4.3 매니플레이터의 속도 기구학 해석.....	33
4.4 매니플레이터의 동역학 해석.....	35
제 5 장 매니플레이터의 기구부 구조해석	38
5.1 유한요소 모델.....	38
5.2 유한요소 해석.....	40
제 6 장 결론	47
참 고 문 헌.....	48

A design study on waterproof 4-axis manipulator

WOO MYUNG MAN

Department of Mechanical Engineering

*Graduate School of
Korea Maritime University*

Abstract

This paper is about the development of waterproofed 4-axis small manipulator. 4-axis manipulator is designed according to payload 2kg, total weight around 10kg of small light weight and modularization. Each link is designed the modularization to assemble and replace the parts easily. Also it is waterproof designed by adapting o-ring and oil seal which facilitate assembly space and are light weight for working in 10m depth of water. This manipulator features that patrol and observation is possible to equip camera or gripper on the end of the axis in case by case. I calculated the ideal motor capacity by interpreting inertia torque where is on the each joint actuator and figured out the feature of 4-axis manipulator motion through the interpretation of dynamics.

그 림 목 차

Fig. 1 time-angular velocity graph.....	6
Fig. 2.1 time - torque for Z_1 axis of joint - 1.....	9
Fig. 2.2 torque for Z_2 axis of joint - 2.....	9
Fig. 2.3 torque for Z_3 axis of joint - 3.....	10
Fig. 2.4 torque for Z_4 axis of joint - 4.....	10
Fig. 2.5 angle-torque and time-torque for Z_1 aixe of joint - 1.....	12
Fig. 2.6 angle-torque and time-torque for Z_2 aixe of joint - 2.....	12
Fig. 2.7 angle-torque and time-torque for Z_3 aixe of joint - 3.....	12
Fig. 3.1 3D design of cross section of motor housing.....	13
Fig. 3.2 design of cross section of motor housing's waterproof...14	
Fig. 3.3 design of connector.....	4
Fig. 3.4 degree of freedom of the manipulator.....	15
Fig. 3.5 picture of manipulator.....	16
Fig. 3.6 3D modeling of 1,2,3 axis housing.....	17
Fig. 3.7 connector & clamping.....	18
Fig. 3.8 3D modeling of 4-axis motor housing.....	8
Fig. 3.9 3D model of the joint actuator.....	19
Fig. 3.10 3D model of the joint -1.....	20
Fig. 3.11 rotation range of the pitch joint -1.....	20
Fig. 3.12 3D model of the joint -2.....	21
Fig. 3.13 rotation range of the pitch joint -2.....	21
Fig. 3.14 3D model of the joint -3.....	22
Fig. 3.15 rotation range of the pitch joint -3.....	22
Fig. 3.16 3D model of joint -4 and Rotation range of Yaw joint -4.....	23
Fig. 4.1 D-H coordinate of 4-axis manipulator.....	25
Fig. 5.1 finite element model of the manipulator.....	37
Fig. 5.2 FEM stress result of the manipulator.....	39
Fig. 5.3 FEM displacement result of the manipulator.....	40
Fig. 5.4 FEM stress result of the manipulator - 1.....	40
Fig. 5.5 FEM displacement result of the manipulator - 1.....	41
Fig. 5.6 FEM stress result of the manipulator - 2.....	41

Fig. 5.7 FEM displacement result of the manipulator - 2.....	42
Fig. 5.8 FEM stress result of the manipulator - 3.....	42
Fig. 5.9 FEM displacement result of the manipulator - 3.....	43



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 joints.....	10
Table. 2.6 rps and max torque of the driving joints.....	12
Table. 3.1 specification of the joint actuators.....	23
Table. 4.1 parameter of D-H coordinate of 4-axis manipulator..	24
Table. 5.1 material property.....	38



제 1장 서론

1.1 연구의 필요성

로봇은 강제 노동자란 뜻으로 노동, 노예라는 뜻을 가진 체코어 robota에서 a가 빠진 형태로 쓰인 말이다. 로봇이란 말이 체코슬로바키아의 극작가 카렐 차페크의 희곡 “로섬의 인조인간”에서 최초로 사용되었다.

카렐 차페크는 이 희곡에서 기술의 발달과 인간사회와의 관계에 대하여 아주 비관적인 견해를 상징적으로 표현하였다. 이 희곡의 줄거리는 인간의 노동을 대신해 주기 위해 개발된 로봇타(robota)가 인간을 위해 많은 일을 하다가 결국은 인간에게 대항한다는 것이다. 이 작품 이후로 많은 영화와 소설에 로봇(robot)이라는 말이 등장하게 되었다.

로봇의 개발이 본격화된 것은 1960년대 부터이다. 1961년 개발된 자동차 공장용 로봇팔 유니메이트(Unimate)는 현대 로봇의 탄생을 알리는 역사적 사건이 되었다.

그 후 유럽의 정밀 기계 기술의 발달은 거의 완숙의 경지에 이르렀다. 초기의 로봇은 모두 복잡한 톱니바퀴와 지레로 움직였지만 전자 제어 로봇을 컴퓨터로 이용한 제어 계측 기술의 개발과 마이크로 프로세서를 이용한 정교한 작업을 할 수 있는 로봇이 생산되기 시작했다. 특히 정교한 작업을 요구하는 수술이나 인간이 하기 위험한 작업등이 제어 계측 로봇의 역할이 됨에 따라 인간이 로봇에 의존하는 정도는 더욱 증가하고 있다.

산업용 로봇은 1970년대에 급격히 보급되기 시작했으며 1980년대에 기술적 안정화시기를 거치며 전성기를 맞이했다. 지금도 우리나라의 주력 산업인 자동차 반도체 공장에는 수백 대의 산업용 로봇들이 24시간 쉬지 않고 제품을 생산하고 있다. 이제 제조업에서 로봇을 제외하고는 산업 그 자체를 생각할 수 없다고 해도 과언이 아니다.

1.2 연구 목표

본 연구에서는 산업용 4축 매니퓰레이터와 특수 지역 탐사 및 작업의 임무를 수행할 수 있는 방수형 소형 4축 매니퓰레이터에 설계 및 개발을 하였다. 다양한

임무와 좁은 공간, 극한 지역을 탐사를 하기 위한 문제를 해결하기 위하여 4축 관절구동기에 그리퍼 및 카메라등을 장착할 수 있는 구조로 설계하고 소형 경량화 설계를 통해 10kg내외의 무게를 갖는 매니퓰레이터를 설계하였고, 수심 10m의 방수를 위해 O-ring과 Oil-seal을 적용한 방수구조의 관절구동기를 설계 제작하였다. 이를 이용한 모듈화 된 관절구동기를 바탕으로 공장의 작업대 및 이동식 플랫폼에 부착하여 사용할 수 있는 구조로 설계하여 상대적으로 경량, 소형화한 매니퓰레이터에 대한 내용을 기술한다.

본 논문에서는 방수형 4축 소형 매니퓰레이터의 성능을 개선하기 위해 관절 구동기 구조를 연구 및 설계하고 각 관절구동기의 관성모멘트, 각속도 및 각가속도, 관성력에 의한 토크, 무게에 의해 발생하는 각 관절의 토크, 구동토크해석과 매니퓰레이터의 기구부 구조해석을 통해 검증하고자 한다.



제 2 장 4축 매니플레이터의 설계

2.1 4축 매니플레이터의 개념설계 시 고려사항

본 논문에서 설계 및 제작하는 4축 매니플레이터의 설계 조건은 다음과 같다.

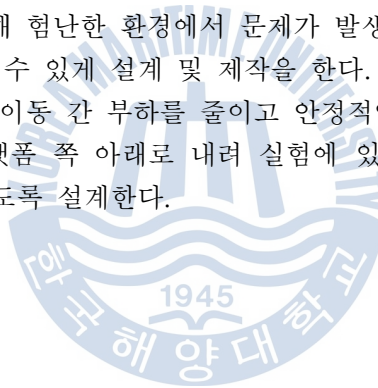
하나, 가반 하중 10kg, 총 무게 10kg 내외의 소형 경량 4자유도의 매커니즘을 갖는 매니플레이터로써 설계 및 제작하도록 한다.

둘, 수심 10m에서의 탐사 및 작업을 할 수 있는 방수 설계와 장애물을 넘어 시야를 확보할 수 있는 최저의 높이 350mm를 갖추도록 설계 한다.

셋, 4축의 각 축 움직임에 방해가 되지 않고 자유롭게 움직임을 줄 수 있는 와이어링 설계와 방수가 가능하도록 커넥터를 선정한다.

넷, 단위모듈 설계를 통해 험난한 환경에서 문제가 발생하여도 그 모듈만 교체하여 빠른 작업 복구를 할 수 있게 설계 및 제작을 한다.

다섯, 플랫폼과 결합 시 이동 간 부하를 줄이고 안정적인 능력을 발휘할 수 있게 무게 중심을 최대한 플랫폼 쪽 아래로 내려 실험에 있어 보다 안정적이고 효율적인 효과를 가질 수 있도록 설계한다.



2.2 각 관절의 관성 모멘트 가정 및 해석

이 장에서는 4축 매니퓰레이터의 관절 구동기 해석을 한다. 방수형 4축 소형 매니퓰레이터는 가만하중 10kg을 제약조건으로 설계된다. 4축 끝에 2kg의 외부부하가 작용할 때 각 축에 가해지는 부하토크를 계산하였다.

Table 2.1 은 각 관절의 링크 해당 파라미터(parameter) 값을 나타낸 것이다. a_i 는 링크의 직경, b_i 는 링크의 길이, d_i 는 회전중심과 질량중심의 거리, θ_i 는 회전축을 중심으로 동작하는 각 변위를 나타낸다. m_i 는 각 회전하는 링크의 질량이다.

Table 2.1 parameters of the driving Joint

i	$a_i[mm]$	$b_i[mm]$	$d_i[mm]$	$\theta_i[^\circ]$	$m_i[kg]$
1	60	600	330	140	3
2	60	350	250	140	3
3	60	160	160	140	3
4	75	60	85	360	3

각 링크의 관성모멘트를 구하기 앞서 다음과 같은 가정을 한다.

1. 구동축은 회전중심에 위치 함
2. 최대 변위 θ_i 만큼 회전하는데 걸리는 회전시간은 0.5 s
3. 가감속 시간은 0.15 s
4. 회전축 마찰저항토크(T_f)는 0.5 N·m

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

$$I_z = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2) \quad (2.1)$$

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

$$I_e = I_z + md^2 \quad (2.2)$$

Table 2.2는 식 (2.1.1)과 (2.1.2)를 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	Pitch	0.1	0.46
2	Pitch	0.32	0.22
3	Pitch	0.0073	0.0841
4	Yaw	0.00231	0.024

2.3 각 관절의 각속도 및 각가속도 해석

Fig.1 의 그래프 내부 면적은 각 관절의 총 회전각도 $K(rad)$ 와 같다. 각 관절 구동기의 가감속 시간을 $t_a(s)$ 로, 총 구동시간을 $t_t(s)$ 라고 한다면 다음과 같은 식이 성립 한다. ω_c 는 각속도, α 는 각가속도다.

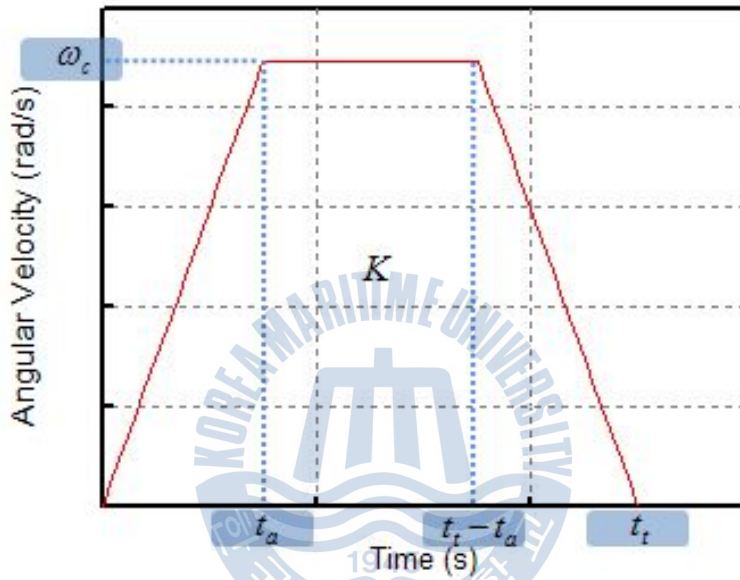


Fig. 1 time-angular velocity graph

$$K = \frac{t_a \omega_c}{2} + (t_t - 2t_a) \omega_c + \frac{t_a \omega_c}{2} [rad] \quad (2.3)$$

$$\omega_c = \frac{K}{t_t - t_a} [rad/s] \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{\omega_c}{t_a} [rad/s^2] \quad (2.5)$$

Table 2.3은 식 (2.4)와 (2.5)를 통해 얻어진 각 관절의 각속도, 각가속도 값을 나타낸 것이다.

Table 2.3 angular velocity, acceleration of the driving joints

i	$K_i[rad]$	$t_t[s]$	$t_a[s]$	$\omega_{ci}[rad/s]$	$\alpha_i[rad/s^2]$
1	2.44346	4	0.1	0.62653	3
2	2.44346	4	0.1	0.62653	3
3	2.44364	4	0.1	0.62653	3
4	6.28318	4	0.1	1.61107	3



2.4 각 관절의 관성력에 의한 토크 해석

각 관절 구동기에 작용하는 토크는 크게 가속운동, 등속운동, 감속운동에 대한 토크로 나눌 수 있다.

관성력에 의한 토크(T_i), 가속에 필요한 토크(T_{a+}), 등속에 필요한 토크(T_c), 감속에 필요한 토크(T_{a-})로 다음과 같다.

$$T_i = I_e \cdot \alpha_i \quad (2.6)$$

$$T_{a+} = T_i + T_f \quad (2.7)$$

$$T_c = T_f = 0.5N \cdot m \quad (2.8)$$

$$T_{a-} = T_f - T_i \quad (2.9)$$

Table 2.4는 식 (2.7), (2.8), (2.9)를 통해 얻어진 각 관절 구동기의 토크값을 나타낸 것이다.

Table 2.4 torque of the driving joints

i	$T_i [N \cdot m]$	$T_{a+} [N \cdot m]$	$T_c [N \cdot m]$	$T_{a-} [N \cdot m]$
1	2.9	3.4	0.5	-2.4
2	1.4	1.9	0.5	-0.9
3	0.53	1.03	0.5	-0.03
4	0.4	0.9	0.5	-0.1

Fig 2.1 ~2.4 은 각 회전중심 Z_i 축에 대한 Time-Torque 그래프를 나타낸 것이다.

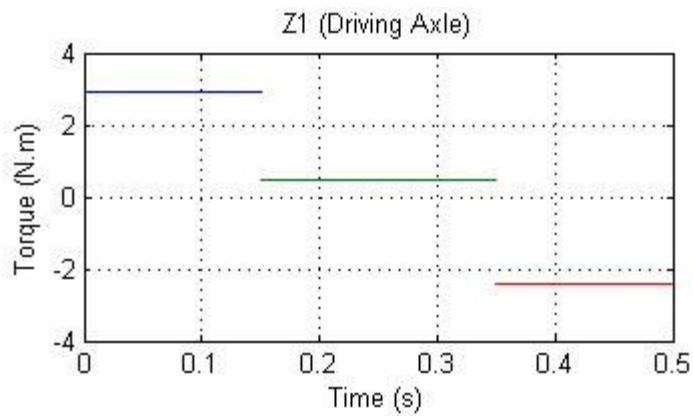


Fig.2.1 time - torque for Z_1 axis of joint - 1

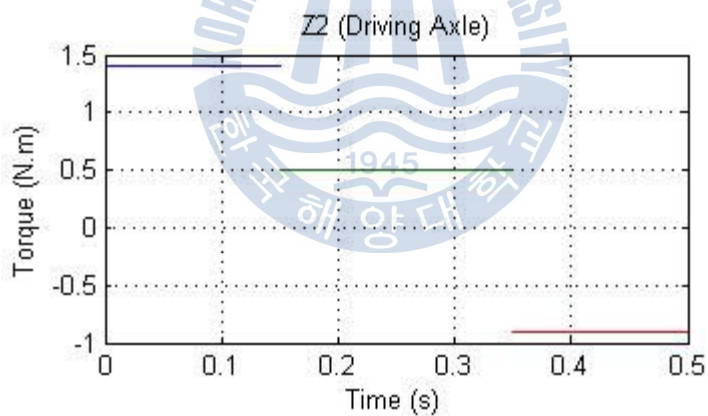


Fig.2.2 torque for Z_2 axis of joint - 2

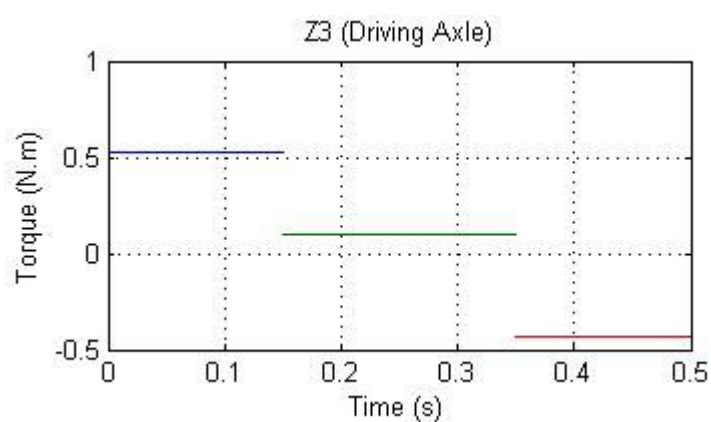


Fig.2.3 torque for Z_3 axis of joint - 3

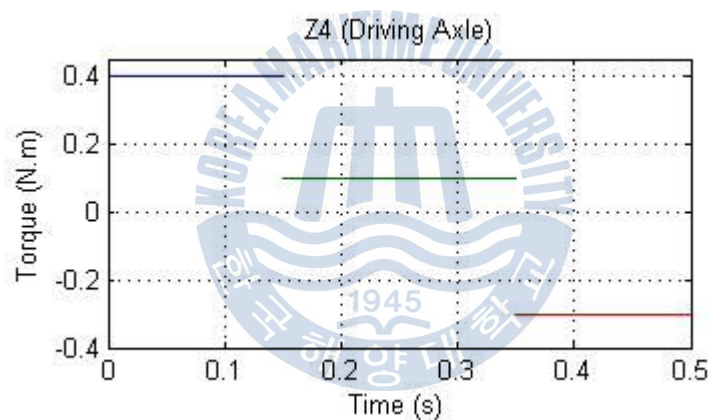


Fig.2.4 torque for Z_4 axis of joint - 4

2.5 무게에 의해 발생하는 각 관절의 토크 해석

매니퓰레이터의 구조의 무게로 발행하는 각 축에 가해지는 부하 토크 T_w 를 해석하였다.

$$T_w = W_i \times d_i \times \sin \theta_i = m_i g \times d_i \times \sin \theta_i \quad (2.10)$$

$$\theta = \frac{\omega_c \times t_a}{2} [rad] \quad (2.11)$$

Table 2.5는 식 (2.10), (2.11)을 통해 링크중량 및 부하에 따른 각 관절 구동기에 걸리는 부하 토크값을 나타낸 것이다.

Table 2.5 A weight torque of the driving joints

i	$\theta_i [^\circ]$	$d_i [mm]$	$m_i [kg]$	$T_{w \max} [N \cdot m]$
1	0~140	350	3	10.311
2	0~140	250	3	7.4
3	0~140	160	3	4.714
4	0~360	85	3	2.5041

Fig 2.5 ~ 2.7 은 각 회전중심 Z_i 축에 대한 구조의 무게에 의해 발생하는 Rotation Angle-Torque 그래프를 나타낸 것이고 다음 Time-Torque 그래프는 앞 절에서 관성모멘트와 각가속도의 관계에서 도출한 토크 값과 가감을 하기 위해 가로축을 시간 값으로 환산한 그래프이다.

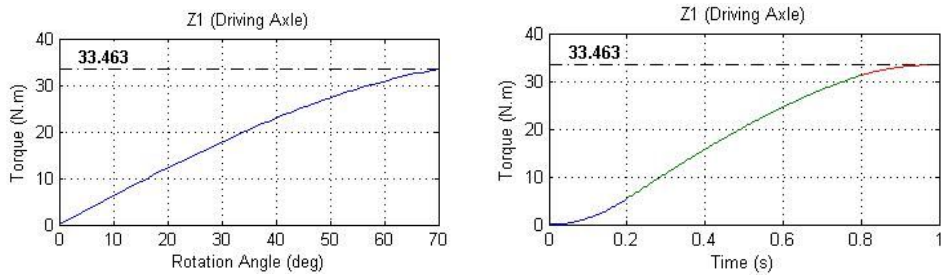


Fig.2.5 angle-torque and time-torque for Z_1 aixs of joint - 1

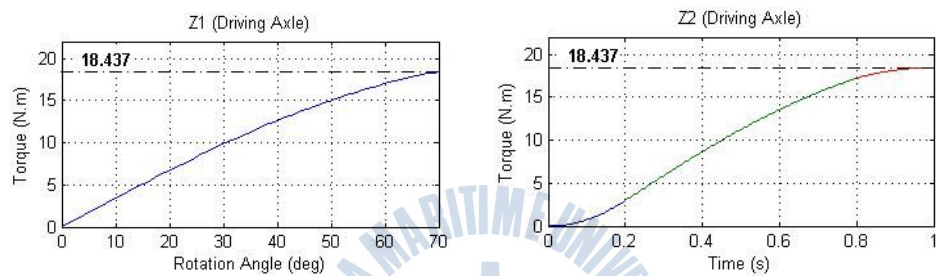


Fig.2.6 angle-torque and time-torque for Z_2 aixs of joint - 2

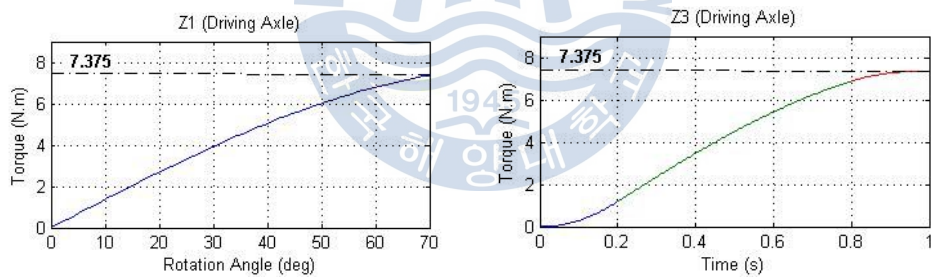


Fig.2.7 angle-torque and time-torque for Z_3 aixs of joint - 3

2.6 각 관절의 구동 토크 해석

각 관절 구동기에 요구되는 구동모터의 용량은 다음의 식들에 의해 결정된다.

$$T_{\max} = T_a + T_f \quad (2.12)$$

$$\eta_{\max} = \frac{60 \times \theta}{360 \times t_t} \quad (2.13)$$

$$P_{\max} = T_{\max} \times \eta_{\max} \times \frac{\pi}{30} \quad (2.14)$$

Table 2.6은 각 축의 최대 토크와 ($T_{\max}$) 와 최대 회전수 ($\eta_{\max}$) 및 그에 따른 모터용량 ($P_{\max}$)를 도출하여 나타낸 것이다.

Table 2.6 rps and max torque of the driving joints

i	Move direction	$\eta_{\max} [rpm]$	$T_{\max} [N \cdot m]$	$P_{\max} [W]$
1	Pitch	5.833	14.18301	8.7
2	Pitch	5.833	9.737254	6
3	Pitch	5.833	6.24051	4
4	Yaw	15	3.890455	6.11

제 3 장 관절구동기 설계

3.1 관절구동기의 수밀구조

매니퓰레이터의 설계에 있어서 큰 어려움이 있는데, 그 중 하나는 모터의 회전축에 대한 방수이다. 현재 모터의 회전축 방수구조로 쓰이는 방식은 O-ring 과 미케니컬셀을 이용한 방식과 마그네틱 커플러를 이용한 방법이 있다. 미케니컬셀은 조립을 하기 위한 공간과 마찰에 의한 부하 및 그에 따른 수명이 있다는 단점이 있고, 마그네틱 커플러는 자석의 크기와 그에 결합되어야 하는 부분의 무게, 그리고 고 토크에는 적당하지 않은 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 소형-경량화 매니퓰레이터용으로 직결타입의 관절구동기로 설계하였다. Fig 3.1 는 실린더의 3D 모델링이고 Fig 3.2은 방수 설계 제작한 것이다. 소형-경량화와 수심 10m 방수의 제약조건을 위하여 필요 공간과 조립 및 분해가 쉽고 무게가 가벼운 O-ring 과 리테나를 이용한 모터의 회전축 방수구조를 설계하여 관절 구동기에 적용 하였다. 커넥터의 경우, 상용 제품은 설치 필요 자리와 크기, 길이가 커 소형 매니퓰레이터에 맞지 않아 자동차의 엔진 노즐 연결 부위를 적용하여 설계 제작하였다. 가는 나사와 오링을 이용하여 방수 설계 및 구동시 작업에 영향을 주지 않는 배선 설계를 하였다.

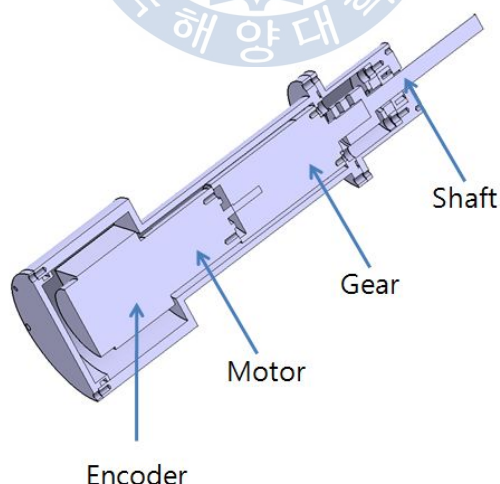


Fig 3.1 3D design of cross section of motor housing

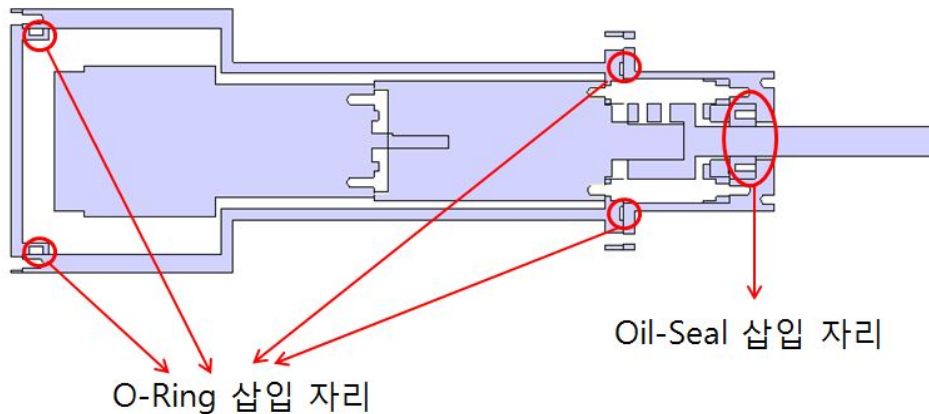


Fig 3.2 design of cross section of motor housing's waterproof

Fig 3.3은 설계-제작한 커넥터와 관절구동기의 결합 사진이다. 각 관절 구동기를 모듈화하여 유지 보수가 용이하고 필요한 부분만 교체 및 수리를 할 수 있는 편리함이 활용될 수 있게 설계하였다. 축 부분의 부하에 의해 리테나에 영향을 주어 누수의 위험을 방지하기 위해 리테나 밑 부분 베어링 홀더를 삽입하여 축의 흔들림을 방지 및 리테나가 조립부분에서 탈락하는것을 방지하도록 설계하였다. 모터와 모터하우징 또한 직경이 작고 길이가 긴 모터와 모터와의 조립 여유 공간을 제외한 최소한의 직경을 갖는 하우징 직경에 맞추어 설계하여 소형-경량화 제약조건에 맞는 설계를 하였다.

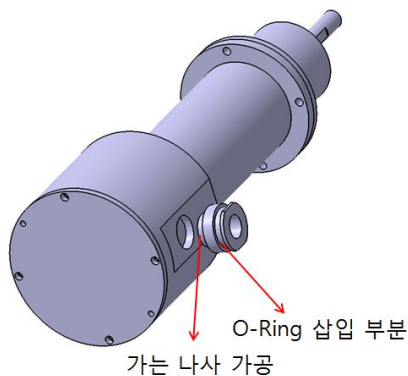


Fig 3.3 design of connector

3.2 매니플레이터 기구부 설계

본 연구에서 설계한 매니플레이터의 구조는 플랫폼과 결합하여 이동 시, 각 축에 걸리는 부하는 최소로 하고 장애물을 넘어 탐사 및 정찰을 하기 위해 Pitch-Pitch-Pitch-Yaw의 메커니즘을 선택하였다. 제약조건인 가반하중 2kg와 총 무게 10kg를 부합하기 위해 모터 하우징을 링크로 이용하고, 최소의 직경을 갖는 모터와 하우징을 설계하여 소형-경량화된 설계를 하였다. 방수형 4축 소형 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 모터 하우징을 이용하여 Fig 3.4의 형태의 방수형 4축 소형 매니플레이터를 개발하였다. 각 모터 하우징의 무게는 Pitch-Pitch-Pitch-Yaw 2.5kg, 2.5kg, 2.5kg, 2kg의 무게를 가진다. Pitch-Pitch-Pitch의 모터 하우징은 모듈타입으로 설계 되어 Yaw 축의 모터 하우징과 함께 매니플레이터의 링크부를 구성한다. 매니플레이터 총 무게는 9.5kg이고, 수심 10m 방수와 가반 하중 2kg의 조건으로 설계 되었다.

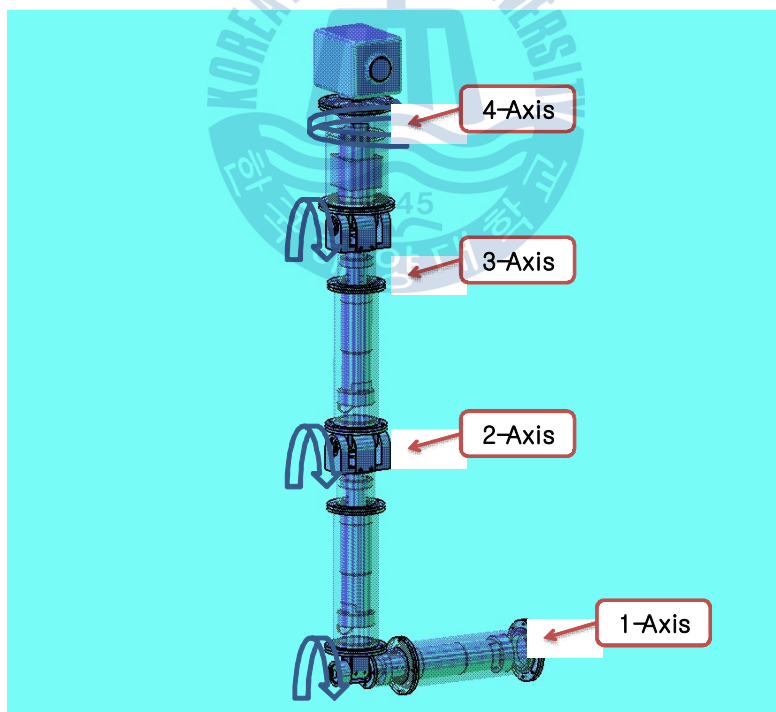


Fig 3.4 degree of freedom of the manipulator



Fig 3.5 picture of manipulator



1,2,3 축 모터 하우징은 모듈타입으로 설계하여 필요 시, 각 파트만 교체 및 분해가 용이하게 설계를 하였다. 모터의 경우 최소의 직경을 갖는 모터의 선정과 최소한의 조립공간을 제외한 하우징의 직경 설계를 통하여 소형-경량화 조건에 부합하였고, 커넥터의 경우, Pitch-Pitch-Pitch-Yaw 의 구동 시 커넥터의 방해를 받지 않게 와이어링 설계를 하였으며, 기존의 방수 커넥터는 길이가 길고 소형-경량화에 맞지 않아 가는 나사와 클램핑 체결방식을 이용하여 방수 커넥터를 설계하였다. 또한, Pitch 운동을 하기 위하여 기어박스를 설계하여 각 축 하우징을 동일선 상으로 놓게 하였고, 각 축과 하우징이 결합되어 링크를 구성하였다.

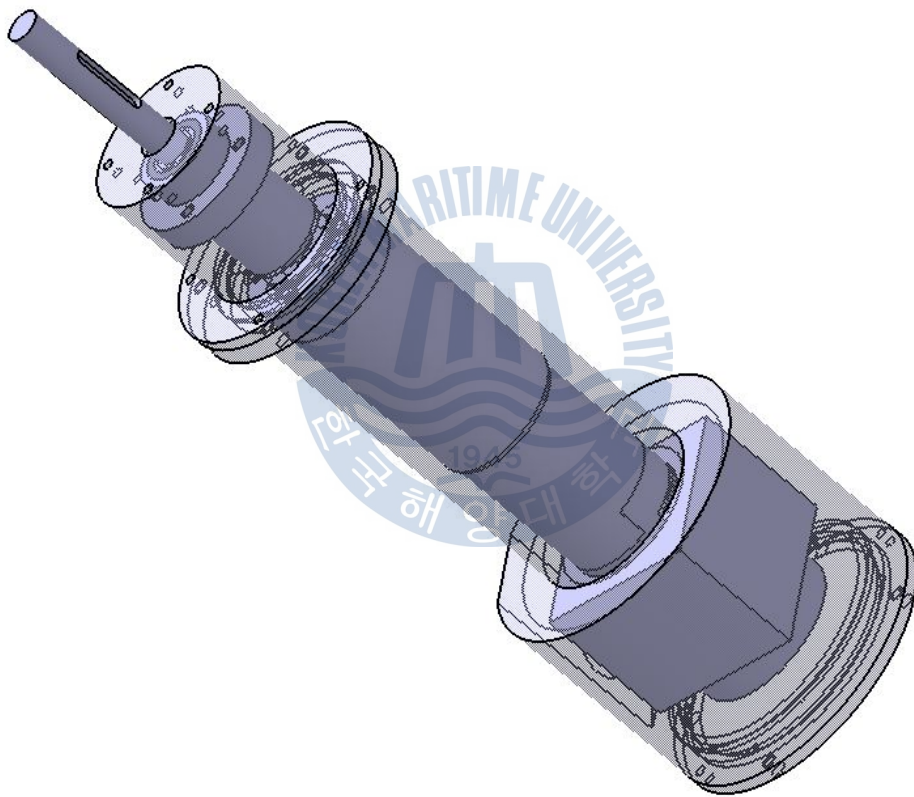


Fig 3.6 3D modeling of 1,2,3 axis housing

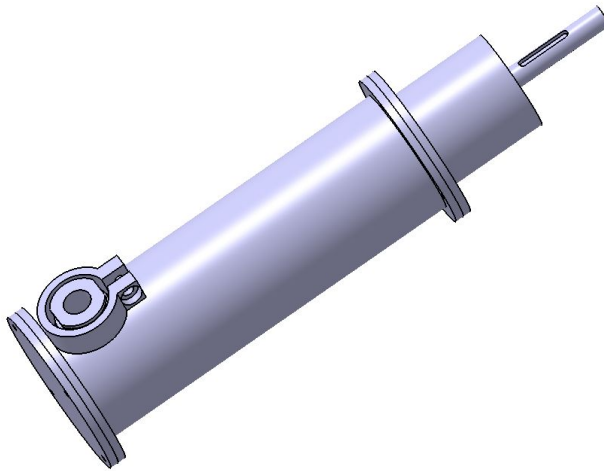


Fig 3.7 connector & clamping

4축 모터 하우징은 약 2kg의 탐사 및 정찰용 카메라나 그리퍼가 결합되는 부분으로 Yaw 운동을 가진다. 현재는 카메라를 장착하여 360도 탐사 및 정찰을 하도록 하였고, 카메라나 그리퍼와 4축이 결합되는 부분의 교체만으로 4축 매니플레이터의 용도를 다양하게 바꿀 수 있게 설계하였다.

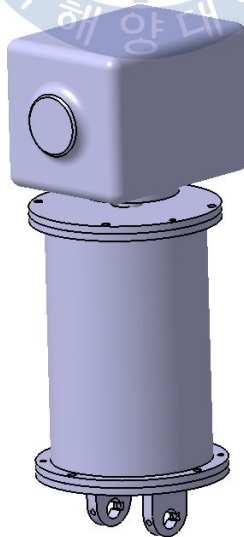


Fig 3.8 3D modeling of 4-axis motor housing

3.3 매니플레이터 관절구동기 구성

관절구동부는 구동 시 매니플레이터의 무게 중심이동과 방향전환에 영향을 미치는 중요한 관절이다. 관절구동기는 Fig 3.9 와 같이 1축의 Pitch 운동, 2축의 Pitch 운동, 3축의 Pitch 운동, 4축의 Yaw 운동으로 각 4자유도로 구성되며 Fig에 서처럼 Pitch 운동은 매니플레이터의 회전을 담당하고 운동범위는 양방향으로 각각 120° 씩 갖고, Yaw 운동은 360° 의 운동범위를 갖는다.

관절구동기의 배치는 Fig 3.9 와 같다.

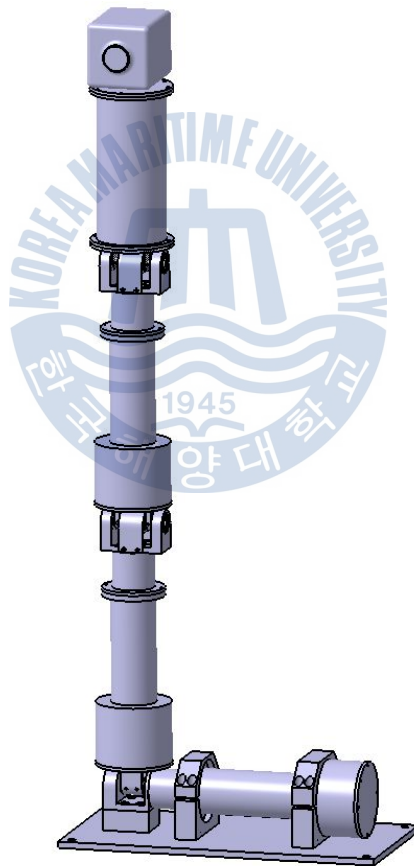


Fig 3.9 3D model of the joint actuator

1축 관절구동기는 Fig 3.10 와 같고, Pitch 운동으로 구동 시 매니플레이터의 전

체 균형을 담당하는 역할을 한다. Fig 3.11 은 앞으로 70° , 뒤로 70° 의 운동범위를 나타내고 있다.

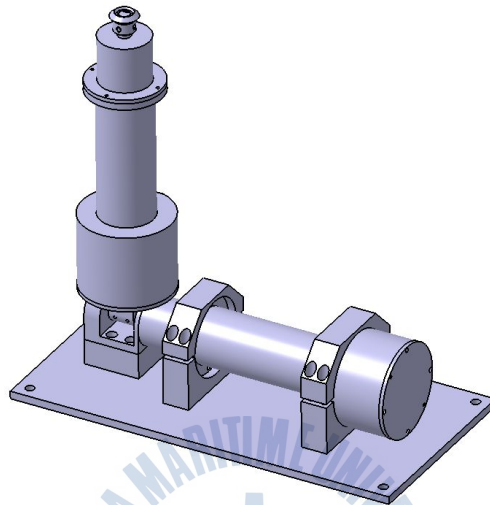


Fig 3.10 3D model of the joint -1

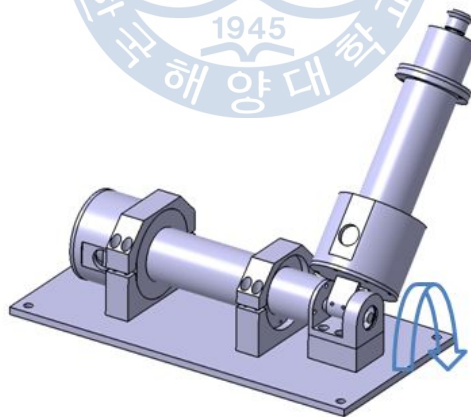


Fig 3.11 rotation range of the pitch joint -1

2축 관절구동기는 Fig 3.12 와 같고, Pitch 운동으로 구동 시 매니퓰레이터의 회전운동을 담당하는 역할을 한다. Fig 3.13은 앞으로 70°, 뒤로 70° 의 운동범위를 나타내고 있다.

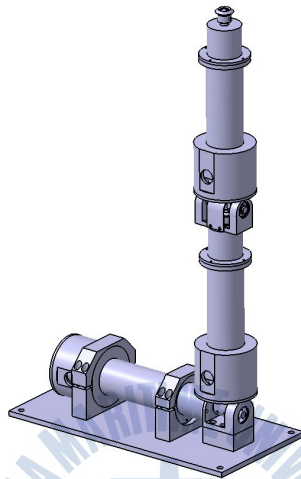


Fig 3.12 3D model of the joint -2

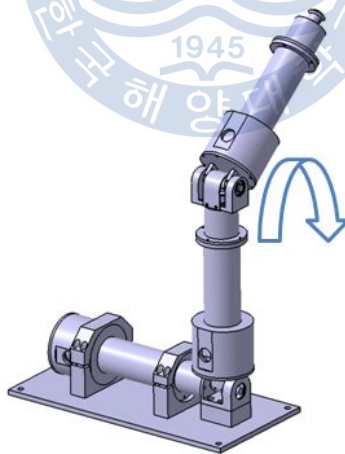


Fig 3.13 rotation range of the pitch joint -2

3축 관절구동기는 Fig 3.14와 같고, Pitch 운동으로 구동 시 매니퓰레이터의 회전운동을 담당하는 역할을 한다. Fig 3.15은 앞으로 70° , 뒤로 70° 의 운동범위를 나타내고 있다.

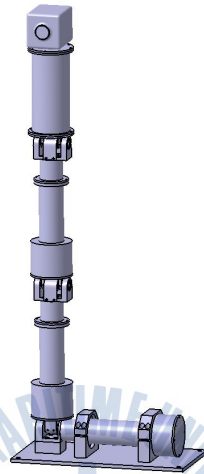


Fig 3.14 3D model of the joint -3

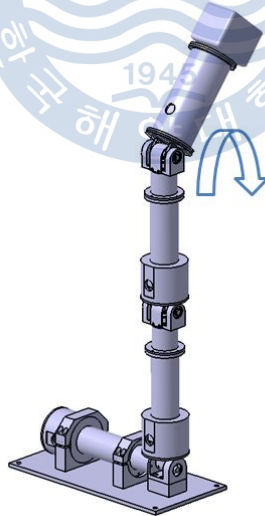


Fig 3.15 rotation range of the pitch joint -3

4축 관절구동기는 Fig 3.16와 같고, Yaw 운동으로 구동 시 카메라의 회전운동을 담당하는 역할을 한다. Fig 3.16은 360°의 운동범위를 나타내고 있다.

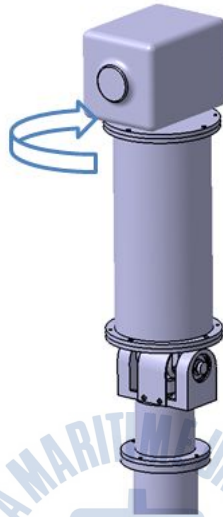


Fig 3.16 3D model of the joint -4 and Rotation range of the Yaw joint -4

Table 3.1은 매니퓰레이터의 관절 구동기의 사양을 나타낸다.

Table 3.1 specification of the joint actuators

i	motion	Motor [W]	Gear ratio
1	Pitch	40	1:531
2	Pitch	40	1:318
3	Pitch	40	1:318
4	Yaw	15	200

소형 경량화의 제약 조건을 맞추기 위해 상대적으로 큰 조립공간을 필요로 하고 무게가 많이 나가는 하모닉 드라이브의 구성을 피하고 단순화하기 위해 평기어와 유성기어를 적용하였다.

관절구동기 1축의 경우 Pitch 운동을 담당하는 관절로 관절구동기 중 가장 많은 부하토크를 받는 관절이다. 따라서 기어비는 1:531 으로 구성하여 안전율을 두어 설계하였다. 기어의 경우 적용관절 중 가장 작은 모델로 선정 하였다.

관절구동기 4축의 경우 Yaw 운동을 담당하는 관절로 가장 작은 부하토크를 받는 관절이다. 따라서 기본적인 운동을 하기 위해 모터의 rpm 조절을 위하여 1:200의 기어 비를 갖는 평기어를 적용하여 구성하였다.



제 4장 4축 매니퓰레이터의 기구학 및 동역학 해석

4.1 매니퓰레이터의 순기구학 해석

관절 구동기의 안정적인 구동을 위해서는 관절구동기의 관절에 대해 기구학 (kinematics) 해석이 필요하다. 본 논문에서는 4축 매니퓰레이터를 바탕으로 관절 구동기 링크에 대하여 기구학적 해석을 수행하였다. 로봇이 지면에 고정되는 1축을 기준으로 설정하여 D-H 규약 (Denavit-Hartenberg 규약)을 이용하여 Fig 4.1 과 같은 좌표계를 설정하였다.

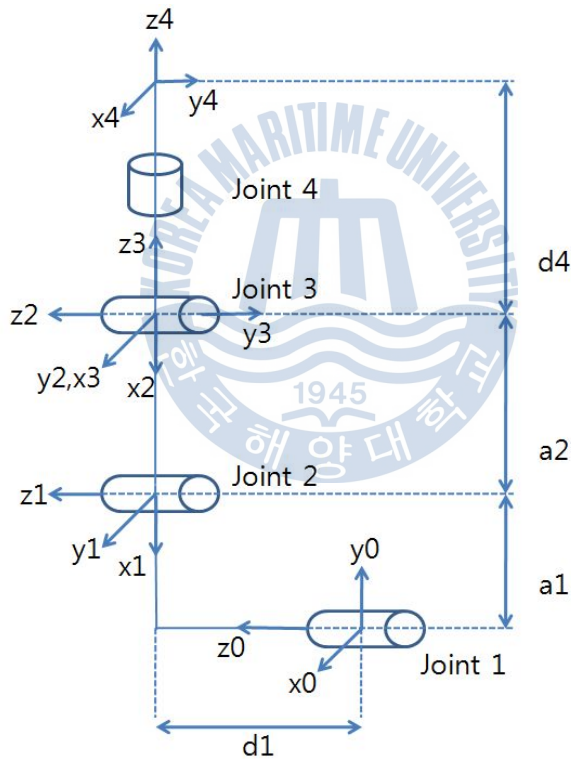


Fig 4.1 D-H coordinate of 4-axis manipulator

Table 4.1 parameter of D-H coordinate of 4-axis manipulator

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0°	d_1	θ_1^*
2	a_2	0°	0	θ_2^*
3	0	-90°	0	θ_3^*
4	0	0°	d_4	θ_4^*

D-H 규약을 이용하여 좌표를 설정하게 되면 Fig 4.1와 같이 a_i , α_i , d_i , θ_i 에 해당하는 각각의 관절링크의 파라미터를 바탕으로 순 기구학 해석을 행하게 된다. 각각의 파라미터를 Table 4.1 에서 정리하였다.

여기서 a_i , α_i , d_i , θ_i 는 링크 I와 관절 I의 4개의 파라미터(parameter)이다. 이 파라미터들은 일반적으로 a_i 는 길이(length), α_i 는 비틀림(twist), d_i 는 오프셋(offset), θ_i 는 각도(angle)로 불린다.

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

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

각각의 파라미터에 대한 전체 변환 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$A_0^4 = A_1 A_2 A_3 A_4$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_4(c_3(c_1c_2 - s_1s_2) - s_3(c_1s_2 + c_2s_1)) \\ r_{21} &= c_4(c_3c_1s_2 + c_2s_1) + s_3(c_1c_2 - s_1s_2) \\ r_{31} &= -s_4 \\ r_{12} &= -s_4(c_3(c_1c_2 - s_1s_2) - s_3(c_1s_2 + c_2s_1)) \\ r_{22} &= -s_4(c_3(c_1s_2 + c_2s_1) + s_3(c_1c_2 - s_1s_2)) \\ r_{32} &= -c_4 \\ r_{13} &= -c_3(c_1s_2 + c_2s_1) - s_3(c_1c_2 - s_1s_2) \\ r_{23} &= c_3(c_1c_2 - s_1s_2) - s_3(c_1s_2 + c_2s_1) \\ r_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} d_x &= a_1c_1 - d_4(c_3(c_1s_2 + c_2s_1) + s_3(c_1c_2 - s_1s_2)) \\ &\quad + a_2c_1x_2 - a_2s_1s_2 \\ d_y &= a_1s_1 + d_4(c_3(c_1c_2 - s_1s_2) - s_3(c_1s_2 + c_2s_1)) \\ &\quad + a_2c_1s_2 + a_2c_2s_1 \\ d_z &= d_1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

전체 동차 변환식을 다른 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$A_0^4 = \begin{bmatrix} c_{123}c_4 & -c_{123}s_4 & -s_{123} & a_2c_{12} + a_1c_1 - d_4s_{123} \\ s_{123}c_4 & -s_{123}s_4 & c_{123} & a_2s_{12} + a_1s_1 + d_4c_{123} \\ -s_4 & -c_4 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_{123}c_4 \\ r_{21} &= s_{123}c_4 \\ r_{31} &= -s_4 \\ r_{12} &= -c_{123}s_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_{22} &= -s_{123}s_4 \\
r_{32} &= -c_4 \\
r_{13} &= -s_{123} \\
r_{23} &= c_{123} \\
r_{33} &= 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
d_x &= a_2c_{12} + a_1c_1 - d_4s_{123} \\
d_y &= a_2s_{12} + a_1s_1 + d_4c_{123} \\
d_z &= d_1
\end{aligned} \tag{4.7}$$



4.2 매니플레이터의 역기구학 해석

매니플레이터에서 마지막 좌표계의 위치와 방향은 $H = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 와 같다.

관절변수 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 을 구하기 위해 연립 비선형 삼각함수 방정식을 이용한다.

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4 \quad A_0^4 = H \quad (4.8)$$

$$c_{123} c_4 = r_{11} \quad (4.9)$$

$$s_{123} c_4 = r_{21} \quad (4.10)$$

$$-s_4 = r_{31} \quad (4.11)$$

$$-c_{123} s_4 = r_{12} \quad (4.12)$$

$$-s_{123} s_4 = r_{22} \quad (4.13)$$

$$-c_4 = r_{32} \quad (4.14)$$

$$-s_{123} = r_{13} \quad (4.15)$$

$$c_{123} = r_{23} \quad (4.16)$$

$$0 = r_{33}' \quad (4.17)$$

$$a_2 c_{12} + a_1 c_1 - d_4 s_{123} = d_x \quad (4.18)$$

$$a_2 s_{12} + a_1 s_1 + d_4 c_{123} = d_y \quad (4.19)$$

$$d_1 = d_z \quad (4.20)$$

$$(4.10), (4.13) \text{식으로부터, } r_{31}^2 + r_{32}^2 = 1$$

$$(4.14), (4.15) \text{식으로부터, } r_{13}^2 + r_{23}^2 = 1$$

$$\frac{-r_{13}}{r_{23}} = \frac{r_{22}}{r_{12}} = \frac{r_{21}}{r_{11}} \quad \text{if } r_{23}, r_{12}, r_{11} \neq 0, (4.8), (4.9), (4.11), (4.12), (4.14), (4.15) \text{의}$$

식에 따라

$r_{33} = 0$, 식 (4.17), (4.18)을 유추하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$d_x \leq a_2 + a_1 + d_4,$$

$$d_y \leq a_2 + a_1 + d_4$$

$$d_z = d_1 \text{ 가 된다.}$$

식 (4.10)과 (4.13)으로부터 $s\theta_4 = r_{31}$, $c\theta_4 = r_{32}$ 식을 얻고, 이 식을 다시 쓰면 $\theta_4 = \arccos(-r_{31})$, $\theta_4 = \arcsin(-r_{32})$ 을 얻는다.

식 (4.14)과 (4.15)으로부터 $s\theta_{123} = -r_{13}$, $\cos\theta_{123} = r_{23}$ 식을 얻고, 이 식을 다시 쓰면 $\theta_{123} = \arcsin(-r_{13})$, $\theta_{123} = \arccos(r_{23})$ 을 얻는다.

$$\begin{aligned} \text{식 (4.17)으로부터, } a_2c\theta_{12} + a_1c\theta_1 &= d_x + d_4s\theta_{123} \\ &= d_x - d_4r_{13} \\ m &= d_x - d_4r_{13} \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\text{이 식을 다시 쓰면, } a_2c\theta_{12} + a_1c\theta_1 = m \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \text{식 (4.18)으로부터, } a_2s\theta_{12} + a_1s\theta_1 &= d_y - d_4c\theta_{123} \\ &= d_y - d_4r_{23} \end{aligned} \quad (4.23)$$

(4.23)을 다음과 같이 정의하고 $n = d_y - d_4r_{23}$

$$\text{이 식을 다시 쓰면 } a_2s\theta_{12} + a_1s\theta_1 = n \quad (4.24)$$

$$\text{식 (4.22)로부터 이 식을 다시 쓰면 } a_2^2c^2\theta_{12} = (m - a_1c\theta_1)^2 \quad (4.25)$$

$$\text{식 (4.24)로부터 이 식을 다시 쓰면 } a_2^2s^2\theta_{12} = (n - a_1s\theta_1)^2 \quad (4.26)$$

$$\text{식(4.25)과 (4.26)을 더하여 } a_2^2 = m^2 + n^2 + a_1^2 - 2a_1(mc\theta_1 + ns\theta_1)$$

$$\text{이 식을 다시 쓰면, } mc\theta_1 + ns\theta_1 = \frac{m^2 + n^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1}$$

$$\frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2}}s\theta_1 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}}c\theta_1 = \frac{m^2 + n^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1\sqrt{m^2 + n^2}}$$

여기서, 다음의 관계식을 이용하여

$$\sin\beta = \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}}$$

$$\cos\beta = \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2}}$$

이 식을 다시 쓰면, $\beta = \arctan(\frac{m}{n})$

$$c\beta s\theta_1 + s\beta c\theta_1 = s(\theta_1 + \beta) = \frac{m^2 + n^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1\sqrt{m^2 + n^2}}$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{m^2 + n^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1\sqrt{m^2 + n^2}}\right) - \beta$$

식 (4.24)으로부터, $s\theta_{12} = \frac{n - a_1 s\theta_1}{a_2}$

위의 식을 다시 쓰면, $\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n - a_1 s\theta_1}{a_2}\right) - \theta_1$ 식 (4.22)에 만족한다.

그리고 $\theta_3 = \theta_{123} - \theta_1 - \theta_2$

$\theta_4 = \arcsin(-r_{31})$ 식 (4.13)에 만족하고,

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{m^2 + n^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1\sqrt{m^2 + n^2}}\right) - \beta$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n - a_1 s\theta_1}{a_2}\right) - \theta_1 \text{ 식 (4.22)과 (4.24)에 만족한다.}$$

$$\theta_{123} = \arcsin(-r_{13})$$

4.3 매니플레이터의 속도 기구학 해석

매니플레이터의 속도 기구학은 순기구학 해석을 이용한 자코비안(Jacobian)에 의해 결정된다. 이 자코비안은 매니플레이터운동의 해석과 제어에 가장 중요한 양 중의 하나로, 자코비안은 매니플레이터의 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.

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

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

4축 매니플레이터의 경우 회전관절만을 이용하여 구성하였으므로, 그에 대한 i 번째 열에 대한 자코비안을 구하기 위한 공식은 식 (4.26)와 같다.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1}(o_n - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

위의 식을 이용하여 4축 매니플레이터의 자코비안 식을 표현하면 식 (4.27)과 같다.

$$\begin{aligned} J_0^4 &= \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4] \\ J_1 &= \begin{bmatrix} z_0(o_4 - o_0) \\ z_0 \end{bmatrix} \\ J_2 &= \begin{bmatrix} z_1(o_4 - o_1) \\ z_1 \end{bmatrix} \\ J_3 &= \begin{bmatrix} z_2(o_4 - o_2) \\ z_2 \end{bmatrix} \\ J_4 &= \begin{bmatrix} z_3(o_4 - o_3) \\ z_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.27)$$

자코비안 식을 계산하기 위한 파라미터 $o_0 \sim o_4$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 o_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 o_1 &= \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ d_1 \end{bmatrix} \\
 o_2 &= \begin{bmatrix} a_2 c_{12} + a_1 c_1 \\ a_2 s_{12} + a_1 s_1 \\ d_1 \end{bmatrix} \\
 o_3 &= \begin{bmatrix} a_2 c_{12} + a_1 c_1 \\ a_2 s_{12} + a_1 s_1 \\ d_1 \end{bmatrix} \\
 o_4 &= \begin{bmatrix} a_2 c_{12} + a_1 c_1 - d_4 s_{123} \\ a_2 s_{12} + a_1 s_1 + d_4 c_{123} \\ d_1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

파라미터 $z_0 \sim z_3$ 는 다음과 같다.

여기서 k 는 기준 좌표계의 방향으로 표시된 좌표계 $i-1$ 의 단위벡터를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 z_0 &= R_0^0 k = k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \\
 z_1 &= R_0^1 k = k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \\
 z_2 &= R_0^2 k = k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \\
 z_3 &= R_0^3 k = k = \begin{bmatrix} -s_{123} \\ c_{123} \\ 0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

4.4 매니플레이터의 동역학 해석

이 절에서는 매니플레이터의 4절 링크 부분의 동역학을 해석하였다. 매니플레이터의 각 링크를 차례로 다루어, 직선운동과 회전운동을 나타내는 방정식을 써내려간다.

1. 모든 작용은 크기가 같고 방향이 반대인 반작용을 가진다. 따라서 물체 1이 힘 f 와 토크 τ 를 물체 2에 가하면, 물체 2는 힘 $-f$ 와 토크 $-\tau$ 를 물체 1에 가한다.
2. 선형운동량의 변화율은 물체에 가해진 총 힘과 같다.
3. 각운동량의 변화율은 물체에 가해진 총 토크와 같다.

초기조건 $\omega_0 = \alpha_0 = a_{c,0} = a_{e,0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ 으로 시작하여, 1를 1에서 n 으로 증가시켜 가며 풀다.

끝 조건 $f_{n+1} = 0, \tau_{n+1} = 0$ 으로 시작하여, 1에서 n 으로 1로 감소시켜 f_i 와 τ_i 를 계산한다.

ω_i 는 좌표계 0에 대한 좌표계 i 의 각속도

$$\begin{aligned}\omega_i &= (R_{i-1}^i)^T \omega_{i-1} + b_i \dot{q}_i, \\ b_i &= (R_0^i)^T z_{i-1}, z_{i-1} \\ &= R_0^{i-1} k,\end{aligned}$$

여기서 $k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

$$\begin{aligned}\omega_i &= (R_{i-1}^i)^T + (R_{i-1}^i)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{q}_i \\ &= (R_{i-1}^i)^T (\omega_{i-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}) \\ &= (R_{i-1}^i)^T (\omega_{i-1} + k \dot{q}_i)\end{aligned}$$

(4.30)

α_i = 좌표계 0에 대한 좌표계 i 의 각속도

$$\begin{aligned}\alpha_i &= (R_{i-1}^i)^T \alpha_{i-1} + b_i \ddot{q}_i + [(R_{i-1}^i)^T]_{\omega_{i-1}} b_i \dot{q}_i \\ &= (R_{i-1}^i)^T [\alpha_{i-1} + k \ddot{q}_i + \omega_{i-1} (k \dot{q}_i)]\end{aligned}\quad (4.31)$$

$a_{c,i}$ 는 링크 i 의 질량중심의 가속도

α_i 는 좌표계 i 로 나타낸, 좌표계 i 의 각속도의 미분이다.

$$\begin{aligned}a_{c,i} &\stackrel{\text{---}}{=} (R_{i-1}^i)^T a_{e,i-1} + \dot{\omega} r_{i,ci} + \omega_i (\omega_i r_{i,ci}) \\ a_{e,i} &\stackrel{\text{---}}{=} (R_{i-1}^i)^T a_{e,i-1} + \dot{\omega}_i r_{i,i+1} + \omega_i (\omega_i r_{i,i+1})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{여기서 } \omega_1 &= (R_0^1)^T (\omega_0 + k \dot{q}_1), (R_0^1)^T = \begin{vmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 \\ -s\theta_1 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \omega_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \\ \omega_2 &= (R_1^2)^T (\omega_1 + k \dot{q}_2), (R_1^2)^T = \begin{vmatrix} c\theta_2 & s\theta_2 & 0 \\ -s\theta_2 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \dot{q}_2 = \dot{\theta}_2 \\ \omega_3 &= (R_2^3)^T (\omega_2 + k \dot{q}_3), (R_2^3)^T = \begin{vmatrix} c\theta_3 & s\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -s\theta_3 & c\theta_3 & 1 \end{vmatrix}, \dot{q}_3 = \dot{\theta}_3 \\ \omega_4 &= (R_3^4)^T (\omega_3 + k \dot{q}_4), (R_3^4)^T = \begin{vmatrix} c\theta_4 & s\theta_4 & 0 \\ -s\theta_4 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \dot{q}_4 = \dot{\theta}_4\end{aligned}\quad (4.32)$$

같은 식을 좌표계 i 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= (R_0^1)^T [\alpha_0 + k \ddot{q}_1 + \omega_0 (k \dot{q}_1)], \\ \alpha_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \ddot{q}_1 = \ddot{\theta}_1 \\ \alpha_2 &= (R_1^2)^T [\alpha_1 + k \ddot{q}_2 + \omega_1 (k \dot{q}_2)], \\ \ddot{q}_2 &= \ddot{\theta}_2 \\ \alpha_3 &= (R_2^3)^T [\alpha_2 + k \ddot{q}_3 + \omega_2 (k \dot{q}_3)], \\ \ddot{q}_3 &= \ddot{\theta}_3 \\ \alpha_4 &= (R_3^4)^T [\alpha_3 + k \ddot{q}_4 + \omega_3 (k \dot{q}_4)], \\ \ddot{q}_4 &= \ddot{\theta}_4\end{aligned}\quad (4.33)$$

$a_{c,i-1}$ 은 좌표계 $i-1$ 로 나타내고, 좌표계 i 로 변환한다. 링크의 i 의 끝부분의 가속도를 구하기 위해 $r_{i,i+1}$ 을 $r_{i,ci}$ 로 바꾸어 이용한다.

R_i^{i+1} 는 좌표계 $i+1$ 에서 좌표계 i 로의 회전행렬

$$\begin{aligned}
 a_{c,1} &= (R_0^1)^T a_{e,0} + \dot{\omega}_1 r_{1,c1} + \omega_1 (\omega_1 r_{1,c1}), \text{ 여기서 } a_{e,0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \\
 a_{e,1} &= (R_0^1)^T a_{e,0} + \dot{\omega}_1 r_{1,2} + \omega_1 (\omega_1 r_{1,2}) \\
 a_{c,2} &= (R_1^2)^T a_{e,1} + \dot{\omega}_2 r_{2,c2} + \omega_2 (\omega_2 r_{2,c2}) \\
 a_{e,2} &= (R_1^2)^T a_{e,1} + \dot{\omega}_2 r_{2,3} + \omega_2 r_{2,3} + \omega_2 (\omega_2 r_{2,3}) \\
 a_{c,3} &= (R_2^3)^T a_{e,2} + \dot{\omega}_3 r_{3,c3} + \omega_3 (\omega_3 r_{3,c3}) \\
 a_{e,3} &= (R_2^3)^T a_{e,2} + \dot{\omega}_3 r_{3,4} + \omega_3 (\omega_3 r_{3,4}) \\
 a_{c,4} &= (R_3^4)^T a_{e,3} + \dot{\omega}_4 r_{4,c4} + \omega_4 (\omega_4 r_{4,c4})
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

*Terminal conditions $f_5 = \tau_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$

g_i 는 중력에 의한 가속도(좌표계 i 로 나타냄)

f_i 는 링크 $i-1$ 에 의해 링크 i 에 가해지는 힘

τ_i 는 링크 $i-1$ 에 의해 링크 i 에 가해지는 모멘트

I_i 는 원점이 링크 i 의 질량중심에 있는 좌표계에 나란한 좌표계에 대한 링크 i 의 관성행렬

$$f_i = R_i^{i+1} f_{i+1} + m_i a_{c,i} - m_i g_i$$

$i=1$ 에서 4까지 대입하여 풀어쓰면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_4 &= m_4 a_{c,4} - m_4 g_4 \\
 f_3 &= R_3^4 f_4 + m_3 a_{c,3} - m_3 g_3 \\
 f_2 &= R_2^3 f_3 + m_2 a_{c,2} - m_2 g_2 \\
 f_1 &= R_1^2 f_2 + m_1 a_{c,1} - m_1 g_1
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

$$\tau_i = R_i^{i+1} \tau_{i+1} - \tau_i r_{i,ci} + (R_i^{i+1} f_{i+1}) r_{i+1,ci} + I_i \alpha_i + \omega_i (I_i \omega_i)$$

i=1에서 4까지 대입하여 풀어쓰면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_4 &= -f_4 r_{4,c4} + I_4 \alpha_4 + \omega_4 (I_4 \omega_4) \\ \tau_3 &= R_3^4 \tau_4 - f_3 r_{3,c3} + (R_3^4 f_4) r_{4,c4} + I_3 \alpha_3 + \omega_3 (I_3 \omega_3) \\ \tau_2 &= R_2^3 \tau_3 - f_2 r_{2,c2} + (R_2^3 f_3) r_{3,c2} + I_2 \alpha_2 + \omega_2 (I_2 \omega_2) \\ \tau_1 &= R_1^2 \tau_2 - f_1 r_{1,c1} + (R_1^2 f_2) r_{2,c2} + I_1 \alpha_1 + \omega_1 (I_1 \omega_1) \end{aligned} \quad (4.36)$$



제 5 장 매니퓰레이터의 기구부 구조해석

이 장에서는 방수형 4축 소형 매니퓰레이터의 기구부 변형을 해석하기 위하여 ANSYS ver. 12.1 프로그램을 사용하여 매니퓰레이터의 프레임을 간소화한 모델링에 적용하여 해석하였다. 매니퓰레이터의 축은 모든 하중에 대한 변위와 응력 분포를 유한요소 해석함으로써 실제 매니퓰레이터 구동 시 미치는 변수를 사전에 파악할 수 있다.

5.1 유한요소 모델

유한요소 모델에서 매니퓰레이터의 기구부 부분은 부품재질에 따라 각각의 특성을 다르게 적용하였다. 매니퓰레이터 부품들의 연결은 모든 부품을 조립하여 표현화 하기에는 너무 복잡하여 동일 경계에서 생성된 동일 위치의 노드들을 하나의 노드로 단순화하여 단일 부품으로 모델링 해석하였다. Fig 5.1은 매니퓰레이터가 0° 에서 지탱하고 있을 때의 해석을 위한 모델이다.



Fig 5.1 finite element model of the manipulator

매니플레이터의 기구부 및 구성 부품의 재질은 Aluminum, Stainless를 사용하였다. 재료에 적용한 물성치는 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 material property

	Young Modulus(GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m^3)	Yield Strength(MPa)
Aluminium	70	0.346	2710	95
Stainless	200	0.266	7860	250



5.2 유한요소 해석

설계된 매니퓰레이터가 0° 에서 지탱하고 있을 때의 응력분포에 대한 해석 결과는 Fig 5.2이고 변위에 대한 해석 결과는 Fig 5.3 이다.

매니퓰레이터의 해석은 매니퓰레이터의 4축에 걸리는 가반하중 2kg과 중력가속도, 각 관절구동기 무게에 상응하는 외부하중을 고려하여 각 축에 걸리는 응력분포를 해석하였다. 설계 재질은 알루미늄(AL60)과 스테인레스(SUS)로 선정하여 설계하였다.

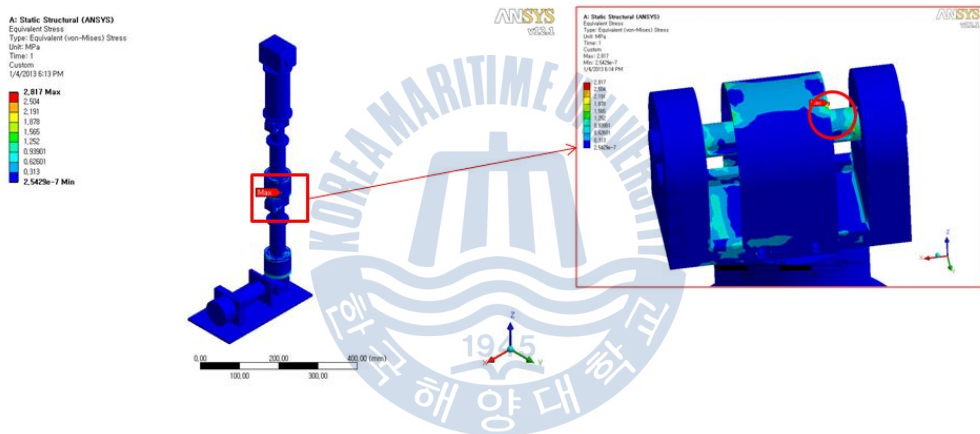


Fig 5.2 FEM stress result of the manipulator

설계된 매니퓰레이터가 0° 에서의 응력분포 해석 결과는 Fig 5.2이고, 변위에 대한 해석 결과는 Fig 5.3이다. 해석 결과 0.008mm의 변위가 생기는 것으로 나왔다.

A: Static Structural (ANSYS)
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
1/4/2013 5:13 PM

ANSYS
v12.1

0.0084217 Max
0.0074859
0.0065502
0.0056145
0.0046787
0.003743
0.0028072
0.0018715
0.00093574
0 Min

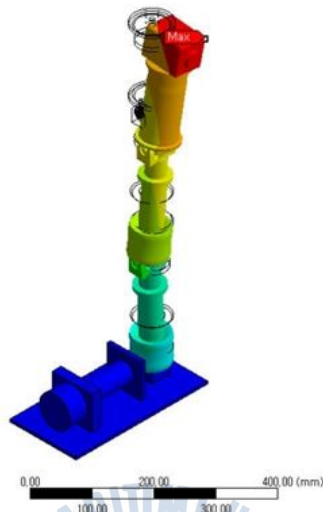


Fig 5.3 FEM displacement result of the manipulator

설계된 매니퓰레이터가 1축 구동 시(30°)에서의 응력분포 해석 결과는 Fig 5.4 이고, 변위에 대한 해석 결과는 Fig 5.5이다. 해석 결과 1.5mm의 변위가 생기는 것으로 나왔다.

A: Static Structural (ANSYS)
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
Custom
Max: 185.76
Min: 2.4427e-7
1/4/2013 5:53 PM

A: Static Structural (ANSYS)
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
Custom
Max: 185.76
Min: 2.4427e-7
1/4/2013 5:53 PM

185.76
185.14
144.49
123.85
103.21
82.568
61.926
41.284
20.542
2.4427e-7

185.76
185.14
144.49
123.85
103.21
82.568
61.926
41.284
20.542
2.4427e-7

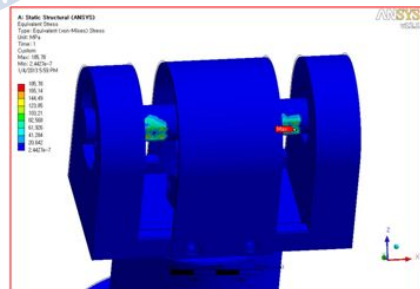
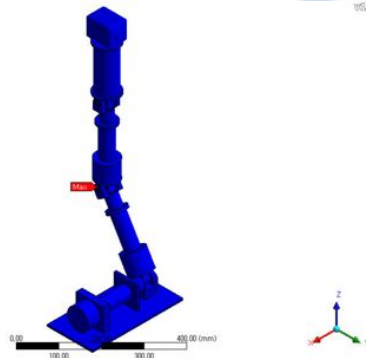


Fig 5.4 FEM stress result of the manipulator - 1

A: Static Structural (ANSYS)

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

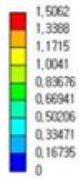
Time: 1

Custom

Max: 1,5062

Min: 0

1/4/2013 5:54 PM



ANSYS
v12.1

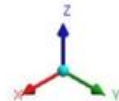


Fig 5.5 FEM displacement result of the manipulator – 1

설계된 매니플레이터가 2축 구동 시(30°)에서의 응력분포 해석 결과는 Fig 5.6 이고, 변위에 대한 해석 결과는 Fig 5.7이다. 해석 결과 3mm의 변위가 생기는 것으로 나왔다.

A: Static Structural (ANSYS)

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

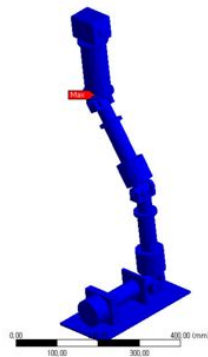
Time: 1

Custom

Max: 394,34

Min: 2,716e-7

1/4/2013 7:21 PM



ANSYS
v12.1

A: Static Structural (ANSYS)

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

Custom

Max: 394,34

Min: 2,716e-7

1/4/2013 7:21 PM

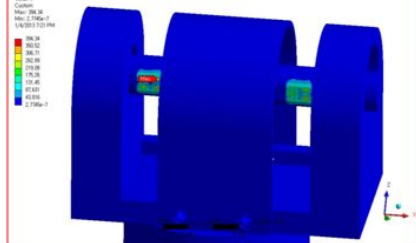


Fig 5.6 FEM stress result of the manipulator – 2

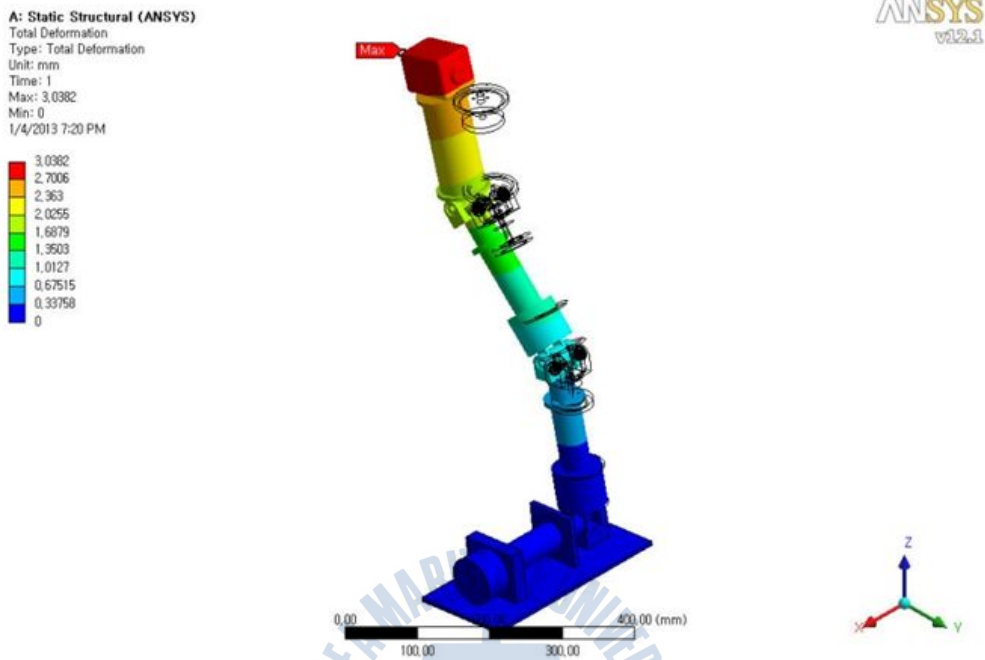


Fig 5.7 FEM displacement result of the manipulator – 2

설계된 매니퓰레이터가 3축 구동 시(30°)에서의 응력분포 해석 결과는 Fig 5.8 이고, 변위에 대한 해석 결과는 Fig 5.9이다. 해석 결과 1.63mm의 변위가 생기는 것으로 나왔다.

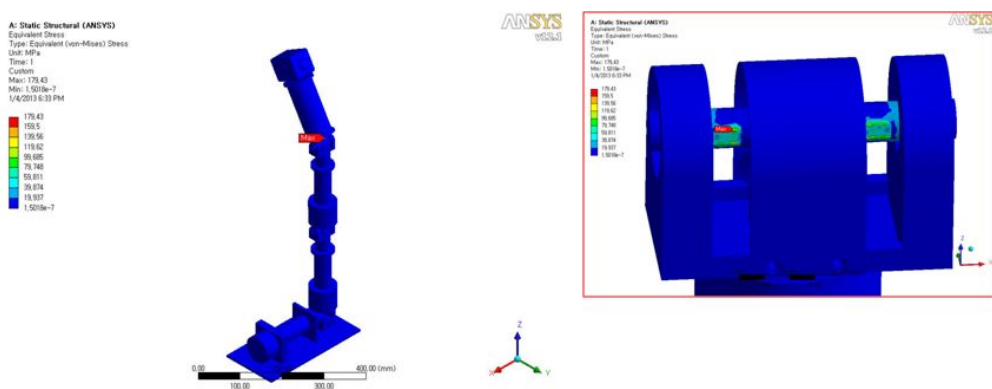


Fig 5.8 FEM stress result of the manipulator – 3

A: Static Structural (ANSYS)
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 1/4/2013 6:32 PM

ANSYS
 v12.1

1.6259 Max
 1.4452
 1.2646
 1.0839
 0.90326
 0.72261
 0.54195
 0.3613
 0.18065
 0 Min



Fig 5.9 FEM displacement result of the manipulator – 3

구조해석 결과 관절구동기와 관절구동기를 연결하는 기어 축에 응력 집중이 발생하였으나 그 크기가 선정된 재료의 여유 있는 허용 강도 범위에 있고 강도와 강성 및 목표 백래쉬 3mm에 맞추어 안정된 설계가 되었음을 시뮬레이션으로 확인 및 검증을 하였다.

제 6 장 결론

본 연구에서는 특수 지역 탐사 및 산업용 로봇의 용도를 위해 방수 및 소형-경량화 개발을 하였다.

각 모터 축에 걸리는 부하토크에 대한 해석을 하였고, 2kg의 가반 하중과 수심 10m 방수설계를 고려하며 이동 간 각 축의 부하를 최대한 줄이기 위해 각 링크의 구동 시 부하로 인하여 각 축에 걸리는 관성모멘트, 각속도 및 각가속도, 관성력에 의한 토크, 무게에 의해 발생하는 토크, 구동 토크 해석을 하여 방수형 4축 소형 매니퓰레이터를 설계하였다.

작업 시 원활한 구동을 위하여 소형 모듈화 설계와 수심 10m 에서의 작업을 위해 O-ring 과 Oil-seal을 이용하여 방수 설계를 하였고, 구동 시 작업에 방해 및 걸림을 방지하기 위해 방수형 소형 커넥터를 설계 및 배선 설계를 하였다.

매니퓰레이터의 기구부의 FEM해석을 통해 2kg의 가반하중과 각 관절구동기 무게에 상응하는 외부하중을 고려하여 각 축에 걸리는 응력분포를 해석하여 강도와 강성에서 안정된 설계가 되었음을 시뮬레이션으로 확인 및 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Craig, j.j., 1985., Introduction to Robotis: Mechanic & Control, Addison-Wesley, Reading, MA,.
- [2] Stewart, D., 1965., "A platform with Six Degree of Freedom", Proc.Instrn.Mech.Engrs,london,Vol.180 no 15, pp.371-386
- [3] Mohamed, M. G. and Duffy, J., 1985,. "A Direct Determination of Instantaneous of Fuuly Parallel Robotic Manipulations", ASME J. Mech. Trans. Autom. Des., Vol. 107,99.226-229
- [4] McLain, T. W., Rock, S. M., and Lee,M. J., "Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System," Journal of Autonomous Robots3, pp. 213-222, 1996.
- [5] Shih, C., Analysis of the dynamics of a biped robot with seven degrees of freedom., Proc. IEEE InternationalConf. on Robotics and Automation, (1996),3008-3013.
- [6] Ulrich, N. and Kumar, V., 1991, "assive mechanical gravity compensation for robot manipulator,"Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1536~1541.
- [7] Min, B.R., D.W. Lee, H.T. Kim, W. Kim, D.W. Kim, W.S. Kim and K.W. S대]. 2002. Development of the manipulator of a cucumber haverster. Proceedings of the KSAM 2002 7(1):210-216.