

# 수중 매니퓰레이터 조작을 위한 텐던 기반 햅틱 마스터 장치 기구 설계

## Tendon-based Haptic Master Device Mechanism Design for Underwater Manipulation

이 기 현, 김 진 현\*  
(Gihyeon Lee<sup>1</sup> and Jinhyun Kim<sup>2,\*</sup>)

<sup>1</sup>Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National University of Science & Technology

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology

**Abstract:** Underwater manipulation is difficult to completely automate the manipulator movement due to the nature of the work environment, and it is essential to operate the manipulator through a planar view through the camera, so that a master device capable of intuitive manipulation is essential. In this paper, we propose a tendon-based haptic master device for intuitive manipulation of commercial underwater manipulators and perform instrument design. We have optimized the master arm and button layout for the manipulation of 7 degrees of freedom underwater manipulator and proposed a small tendon drive module which can measure force to apply haptic feedback to all joints and can easily change the stiffness and output. The prototype was fabricated and the simulator and actual manipulator manipulation test were performed to verify the design.

**Keywords:** underwater manipulator, master device, tendon driven, haptic mechanism, force feedback

### I. 서론

수중 매니퓰레이터는 유선으로 제어되는 원격조정잠수정 (ROV, Remotely Operated Vehicle)에 설치되어 다이버의 작업을 보조하거나, 다이버가 접근하기 힘든 환경에서 정밀한 작업을 수행하기 위하여 사용된다[1]. 하지만 수중에서 ROV의 선체를 완전히 고정시키기 어렵고, 사용 가능한 센서가 제한되며, 작업의 특성상 조작자의 개입 없는 완전 자동화가 힘들다.

일반적으로 수중 매니퓰레이터의 조작은 ROV에 설치된 카메라의 좁고 평면적인 2차원 영상에 의존하여 수행되기 때문에 조작자의 숙련도에 크게 의존한다.

상용 수중 매니퓰레이터 시스템에서 제공하는 마스터 장

치는 크게 각 관절의 속도를 제어하는 rate 방식과 매니퓰레이터의 모양과 동일한 동작 구현이 가능한 replica 방식의 2가지 형태가 있고, replica 방식의 마스터 장치는 제조사에 따라 힘 반영(force-feedback)이 가능한 제품이 있다. 대표적인 수중 매니퓰레이터 제조사인 Schilling Robotics에서는 매니퓰레이터의 종류와 사용 목적에 따라 rate 방식, replica 방식의 마스터 장치를 제공한다[2]. Rate 방식 마스터 장치는 일반적인 다축 조이스틱 형태로 조이스틱의 각 축은 매니퓰레이터 조인트에 일대일로 연결되어 있고, 매니퓰레이터의 조인트를 하나씩 직접 조작하도록 설계되어 있다. 위치



그림 1. 수중 매니퓰레이터 작업 환경.

Fig. 1. Operation environment of underwater manipulator[2].



그림 2. Schilling Robotics ROV 제어 콘솔.

Fig. 2. Schilling Robotics ROV Control Console[2].

\*Corresponding Author

Manuscript received March 10, 2018; revised March 30, 2018; accepted April 18, 2018

이기현: 서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원(leegihyeon@gmail.com)

김진현: 서울과학기술대학교 기계자동차공학부(jinhyun@seoultech.ac.kr, ORCID 0000-0003-1313-6938)

※ 본 논문은 산업통상자원부(산업핵심기술개발사업, No. 10060065)와 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원(유체 저항이 작은 생체모사 수중 이동로봇, No. 20150022)의 지원을 받아 수행되었습니다.

제어가 아닌 속도 제어를 수행하므로 안정적이고 단순한 제어가 가능하지만 각 조인트를 직접 조작하여 매니플레이터를 원하는 지점까지 제어해야 하므로 작업자의 숙련도가 크게 요구되고 매니플레이터의 자유도가 높을 경우 직관적인 사용이 힘들다. Replica 방식의 마스터 장치는 조작하고자 하는 매니플레이터와 같은 링크 구조와 자유도를 가지는 마스터 매니플레이터 형태로 설계되어 마스터 매니플레이터의 각 조인트가 매니플레이터의 조인트와 일대일로 매칭되어 있다. 따라서 조작자는 복잡한 매니플레이터를 직접 잡고 움직이는 느낌으로 직관적으로 움직일 수 있다. 반면 조작자가 마스터 매니플레이터의 자중을 손으로 버티면서 조작해야 하기 때문에 장시간 조작 시 조작자의 피로도가 높아지는 단점이 있다. 또한, Kraft TeleRobotics의 replica 방식의 마스터 장치는 마스터 매니플레이터의 조인트에 소형 액츄에이터를 삽입하여 힘 반응이 가능하다[3]. 힘 반응 기능은 조작 중 매니플레이터에 가해지는 외력을 마스터 장치를 통해 사용자가 느낄 수 있도록 하여 더 복잡하고 섬세한 작업이 가능하게 하는 장점이 있는 반면, 마스터 장치에 설치된 액츄에이터와 감속기 등으로 인해 무게와 부피가 증가하여[4,5] 조작에 따른 피로도가 일반적인 replica 방식 마스터 장치보다 커지게 된다.

힘 반응이 가능한 상용 햅틱 장치는 링크의 구조에 따라 직렬 구조, 병렬 구조로 나뉜다. 대표적인 직렬 구조의 햅틱 장치는 3D SYSTEMS의 Phantom Omni[6], Haption의 Virtuoso 6D[7], Microsoft의 Force Feedback Pro[8] 등이 있다. 직렬 구조 햅틱 장치는 말단 장치까지 연결된 링크가 직렬로 배치되어 작업 공간이 크지만 표현할 수 있는 힘의 크기가 병렬 구조에 비해 작고, 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 한편, 모바일 로봇 제어 등 6자유도의 힘 반응이 필요 없는 경우 Force Feedback Pro와 같이 일반적인 1축 조이스틱에 2~3자유도의 힘 반응을 구현한다[9,10]. 병렬 구조 햅틱 장치로는 Force Dimension[11]의 sigma.7, omega.7 등이 있다. 병렬 구조 햅틱 장치는 말단 장치를 다수의 링크로 연결하여 작업 공간이 직렬 구조에 비해 작지만 큰 힘을 표현할 수 있고, 정밀 제어가 가능한 장점이 있다. 일반적으로 상용 햅틱 장치는 정밀한 위치 제어와 햅틱 피드백을 위해 구조가 복잡하고 부피가 크며, 말단 장치를 기준으로 3~6자유도의 햅틱 피드백을 제공한다[12-14].

상용 햅틱 장치는 말단 장치의 한 점을 기준으로 6자유도 입력과 햅틱 피드백을 생성하기 때문에 매니플레이터의 각 조인트에 대한 세세한 움직임을 직관적으로 조작하기 힘들다[13]. 또한 수중 매니플레이터 조작은 말단 장치의 정밀한 조작보다는 카메라를 통한 대략적인 조작이 주가 되기 때문에 비교적 낮은 수준의 위치 정밀도와 힘 반응으로 조작자에게 충분한 햅틱 피드백을 제공할 수 있다.

본 논문에서는 수중 매니플레이터의 직관적인 조작을 위한 replica 방식의 햅틱 마스터 장치를 제안한다. 제안하는 마스터 장치는 replica 방식의 마스터 장치에 햅틱 기능을 적용하여 상용 햅틱 장치에 비해 매니플레이터의 각 조인트를 세세하게 조작이 가능하고, 텐던 드라이브 구조로 마스터 매니플레이터의 위치를 제어 가능해 replica 방식의 단점

인 조작 피로도를 낮출 수 있다. 일반적으로 수중에서 복잡한 작업을 위해 사용되는 7자유도 수중 매니플레이터의 조작을 위해 마스터 매니플레이터의 링크와 버튼 배치를 최적화하고, 텐던 와이어 배치를 위한 내부 구조를 설계하였다. 또한 햅틱 피드백 기능을 적용하기 위하여 텐던 기반의 소형 텐던 구동 모듈을 개발하였다. 제안하는 텐던 구동 모듈은 탄성체의 변형률을 이용하여 힘을 측정하는 방식으로 힘 센서에 비하여 정밀도는 낮지만, 저가이며 단순한 구조로 압축, 인장 방향의 하중을 측정할 수 있다. 따라서 기존 햅틱 장치의 텐던 드라이브 방식에 비해 작고, 강성과 출력 변경이 용이하여 모든 조인트에 동일한 모듈의 적용이 가능하다.

## II. 텐던 기반 햅틱 마스터 장치 기구 설계

### 1. Master arm

#### 1.1. 개념 설계

본 연구에서는 수중 작업용으로 사용되는 7자유도 수중 매니플레이터를 조작하기 위한 마스터 매니플레이터를 설계하였다. 대표적인 7자유도 수중 매니플레이터인 Schilling robotics의 Titan 4의 구조는 그림 3, 표 1과 같다. 1~5번은 pivot 조인트, 6번 조인트는 7번 gripper를 회전시키기 위한 액츄에이터이며, 매니플레이터의 운동은 1~5번 조인트에 설치된 액츄에이터에 의해 제어된다. 실제 조작 테스트를 수행한 KNR system의 7자유도 수중 매니플레이터인 HYDRA-UW3의 구조는 그림 4와 표 2와 같고, Titan 4와 유사한 구조로 설계되어 있다[15].

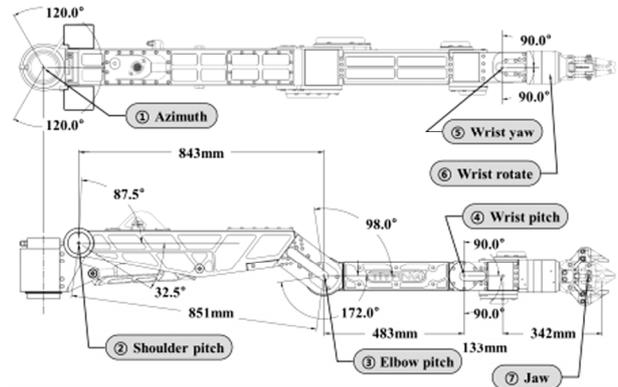


그림 3. Titan 4 매니플레이터 구조.

Fig. 3. Titan 4 manipulator structure[2].

표 1. Titan 4 매니플레이터 기능.

Table 1. Titan 4 manipulator function[2].

No.	Function	Actuator	Nominal Range
1	Azimuth	Rotary	240°
2	Shoulder pitch	Linear	120°
3	Elbow pitch	Rotary	270°
4	Wrist pitch	Rotary	180°
5	Wrist yaw	Rotary	180°
6	Wrist rotation	Gerotor	360° continuous
7	Jaw	Linear	99mm

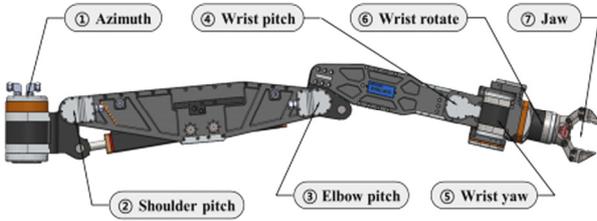


그림 4. HYDRA-UW3 구조.  
Fig. 4. HYDRA-UW3 structure.

표 2. HYDRA-UW3 매니플레이터 기능.  
Table 2. HYDRA-UW3 manipulator function.

No.	Function	Actuator	Nominal Range
1	Azimuth	Rotary	240°
2	Shoulder pitch	Linear	120°
3	Elbow pitch	Linear	136°
4	Wrist pitch	Rotary	200°
5	Wrist yaw	Rotary	200°
6	Wrist rotation	Gerotor	360° continuous
7	Jaw	Linear	-

제한하는 마스터 장치는 매니플레이터의 운동을 제어하는 1~5번 조인트에 대해 햅틱 피드백을 구현하도록 설계하였다. 그리퍼의 경우 on/off로 동작이 제어되고, 손목 회전(wrist rotation)은 일반적으로 무한 회전하는 액츄에이터가 적용되기 때문에 햅틱 피드백 없이 제어하도록 설계하였다.

1.2. Master arm 설계

마스터 매니플레이터는 텐던 와이어가 연결되어 햅틱 피드백이 적용되는 5개의 조인트와 손목 회전, 그리퍼를 제어하기 위한 버튼으로 구성되어 있다. 각 조인트는 텐던 구동 모듈에 와이어를 통해 연결되며 힘, 각도 측정은 텐던 구동 모듈에서 수행한다. 마스터 매니플레이터 끝단에는 그림 5와 같이 손목 회전을 제어하기 위한 링형 엔코더와 마스터 장치를 제어하기 위한 터치 센서와 촉각(tact) 스위치를 배치하였다. 마스터 매니플레이터 링크의 길이 변경을 용이하도록 설계하여 링크의 비율이 다른 다양한 매니플레이터에서 범용적으로 사용 가능하도록 하였다. 설계한 마스터 매니플레이터의 관절 좌표계와 D-H 매개변수는 그림 6(b), 표 3과 같다.

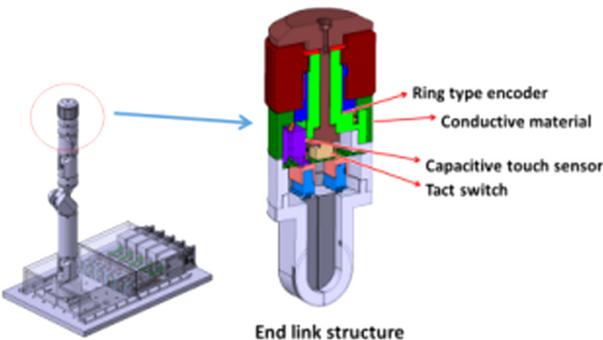


그림 5. 말단 장치 구조.  
Fig. 5. End effector structural design.

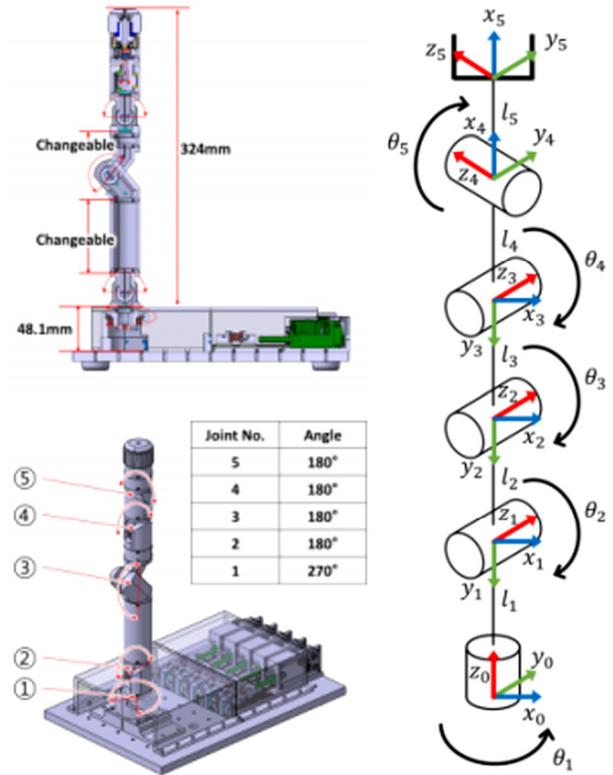


그림 6. 마스터 매니플레이터 조인트 가동 범위 및 구조 설계.  
Fig. 6. Master arm joint range of motion, and structural design.

표 3. 마스터 매니플레이터의 D-H 매개변수.  
Table 3. D-H parameters of the master manipulator.

Link	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$\theta_i$
1	0	$l_1$	$-\pi/2$	$\theta_1$
2	$l_2$	0	0	$\theta_2$
3	$l_3$	0	0	$\theta_3$
4	$l_4$	0	$\pi/2$	$\theta_4$
5	$l_5$	0	0	$\theta_5$

마스터 매니플레이터의 내부에는 다음 조인트에 연결된 텐던 와이어와 마스터 매니플레이터 끝단에 설치된 버튼을 위한 배선이 통과해야 한다. 텐던 와이어의 경우 조인트를 통과할 때 링크의 중심을 통과하지 않으면 통과하는 조인트의 각도에 따라 경로의 길이가 변하게 되어 각 조인트를 독립적으로 조작할 수 없게 된다. 따라서 그림 7과 같이 텐던 와이어가 링크의 중앙을 통과할 수 있는 경로를 설계했고, 각 조인트의 꺾임에 의해 조인트와 텐던 와이어 사이에 발생할 수 있는 마찰력을 최소화하기 위해 텐던 와이어 경로 상에 연마봉을 배치하였다. 마스터 매니플레이터 끝단에 설치된 버튼 등을 위한 배선은 텐던 와이어와의 간섭을 피하기 위하여 조인트에 중공 축을 설계하여 폴리 축 안으로 배치하였다.

Replica 방식의 마스터 장치와 조작 대상인 매니플레이터의 각 조인트 각도를 일대일로 매칭시킬 경우 조작 스케일을 변경할 수 없어 정밀한 조작이 힘들고 조작자가 마스터

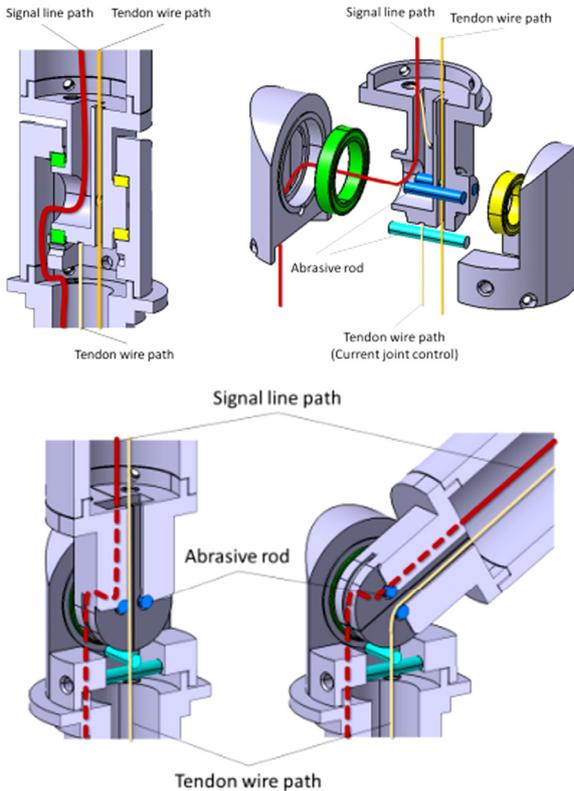


그림 7. 조인트 내부 텐던 와이어 및 배선 통로 설계.  
Fig. 7. Tendon wire and wiring path design inside joint.

매니플레이터를 정확히 원하는 형상으로 만들기 힘들기 때문에 상대적인 변위를 측정하여 제어 입력을 생성해야 한다. 이러한 방식을 사용할 경우 마스터 매니플레이터 가동 범위 한계에 있을 경우 더 이상 제어 입력을 생성할 수 없고, 가동 범위에 여유가 있는 위치로 복귀시킨 후 다시 조작해야 한다. 따라서 아래와 같이 3개의 제어 모드를 필요로 한다.

- ① 사용자 입력에 따라 마스터 장치 링크 제어 / 제어 입력 생성
- ② 사용자 입력에 따라 마스터 장치 링크 제어 / 제어 입력 미생성
- ③ 링크에 가해지는 힘을 무시하고 링크 위치 고정

그림 8과 같이 3개의 제어 모드를 선택적으로 사용하도록 버튼 입력에 따른 알고리즘을 구성하였다. 이러한 방법으로 사용자가 핸들을 파지했을 경우에만 마스터 장치에 가해지는 외력을 측정해 사용자 입력으로 사용하고, 제어 입력 생성 시점을 조작자가 원하는 대로 조절할 수 있다. 특히 3번 모드는 사용자가 마스터 장치에서 손을 떼고 잠시 쉬거나 다른 작업을 할 때 이전 조작 위치를 그대로 유지하여 조작자의 피로도를 낮출 수 있다.

2. 텐던 구동 모듈

2.1. 개념 설계

제안하는 텐던 구동 모듈은 그림 9와 같이 리니어 액츄에이터와 2개의 블록을 가지는 리니어 가이드, 선형 변위 센서, 탄성체로 구성되어 있다. 블록1과 리니어 액츄에이터를 연결하고, 블록2와 마스터 매니플레이터의 각 조인트와

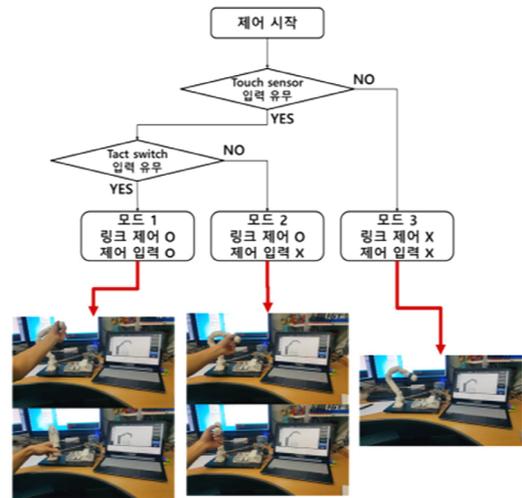


그림 8. 제어 모드 선택 알고리즘.  
Fig. 8. Control mode selection algorithm.

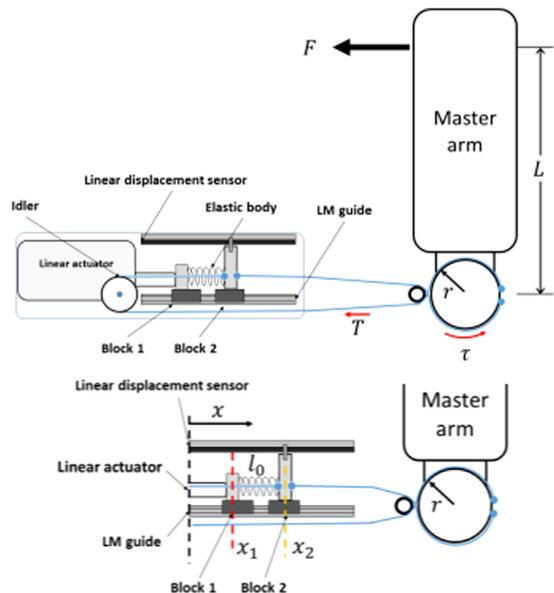


그림 9. 텐던 구동 모듈 개략도.  
Fig. 9. Tendon Drive Module Schematic.

연결된 텐던 와이어를 고정 한 후 두 블록을 탄성체를 이용하여 연결하였다. 블록1의 위치  $x_1$ 는 리니어 액츄에이터의 위치 센서로 측정이 가능하고, 블록2의 위치  $x_2$ 는 선형 변위 센서를 사용하여 측정한다.

그림 10, 11, 12, 13과 같이 블록1과 블록2의 상대위치가 변하면 탄성체에  $\delta$ 의 변형이 생기고, 마스터 매니플레이터에 별도의 외력이 작용하지 않는 경우 텐던 와이어에 발생하는 장력  $T$ 와 마스터 매니플레이터에 작용하는 토크  $\tau$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta = (x_2 - x_1) - l_0 \tag{1}$$

$$T = k\delta \tag{2}$$

$$\tau = T \times r \tag{3}$$

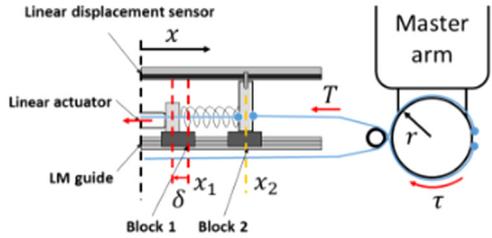


그림 10. 리니어 액추에이터에 의한 입력(인장).  
Fig. 10. Input by Linear Actuator (Tension).

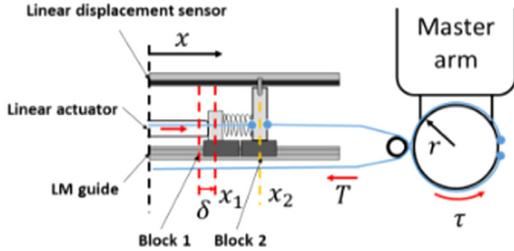


그림 11. 리니어 액추에이터에 의한 입력(압축).  
Fig. 11. Input by Linear Actuator (Compression).

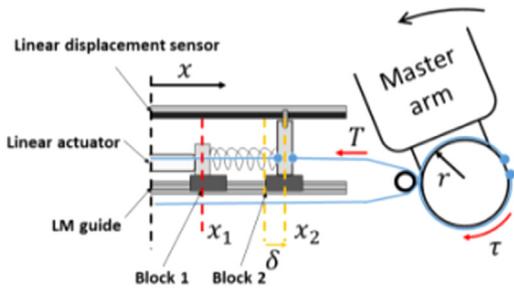


그림 12. 외력에 의한 입력(인장).  
Fig. 12. Input by external force (tension).

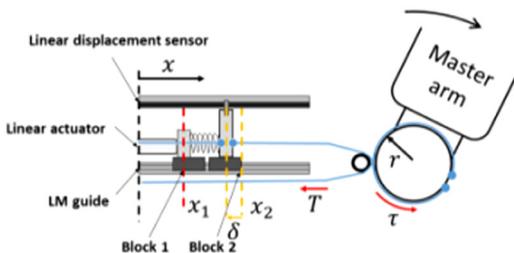


그림 13. 외력에 의한 입력(압축).  
Fig. 13. Input by external force (compression).

텐던 구동 모듈이 마스터 매니퓰레이터 끝단에 전달할 수 있는  $F$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau = T \times r = F \times L \quad (4)$$

$$F = \frac{T \times r}{L} = \frac{k\delta \times r}{L} \quad (5)$$

스프링상수  $k$ 가 높을수록 전달할 수 있는  $F$ 가 커지게 되고, 작은 변형으로 큰 힘을 측정하고 전달할 수 있다. 반면, 선형 변위 센서의 해상도가 고정되어 있기 때문에  $k$ 가

낮을수록 같은 힘에 대해 큰 변위가 생기므로 힘 측정의 해상도가 높아지는 효과가 있다.

이상의 방식으로 간단한 구조로 압축, 인장 방향의 하중을 측정할 수 있는 텐던 구동 모듈을 구현할 수 있다.

또한 규격화되어있는 탄성체와 리니어 액추에이터 모듈을 사용하여 스프링 상수  $k$ 와 액추에이터 용량 변경이 용이하고, 마스터 매니퓰레이터의 각 조인트에서 요구하는 적절한 강성을 같은 텐던 구동 모듈 설계로 충족시킬 수 있다.

### 2.2. 텐던 구동 모듈 설계

본 연구에서는 위치 센서와 기어박스를 내장한 리니어 액추에이터 모듈을 사용하여 마스터 매니퓰레이터의 운동을 제어하였다. 적용한 리니어 액추에이터는 30 mm의 스트로크와 기어비에 따라 20~100 N의 정격 출력을 가진다. 내장된 위치 센서는 선형 저장 방식으로 12bit AD converter로 측정되어 위치 측정 해상도는 약 0.007 mm이다. 리니어 액추에이터의 전면에 리니어 가이드를 배치하고, 리니어 가이드와 평행하게 선형 변위 센서를 배치하였다. 선형 변위 센서의 스트로크는 47 mm이고, 마찬가지로 12 bit AD converter로 측정되어 위치 측정 해상도는 약 0.01 mm이다.

탄성체는 직경 10 mm, 자유 길이 15 mm 규격의 압축 스프링의 양단을 블록1, 블록2에 고정하여 설치하였다.

제한하는 텐던 구동 모듈은 탄성체의 변형량으로 힘을 측정하기 때문에 조작 시 제어 위치와 실제 위치의 차이가 발생하게 된다. 이러한 차이는 탄성체의 강성에 클수록 작아지지만, 2.1장에서 상술한 대로 선형 변위 센서의 해상도는 고정되어 있으므로 힘 측정 해상도가 커지게 되는 단점이 있다. 따라서 각 조인트의 위치에 따라 적절한 스프링 상수를 선정할 필요가 있다.

본 연구에서는 마스터 매니퓰레이터의 말단 장치에 0.5 N 이상의 햅틱 피드백을 구현하면서 탄성체의 변형이 1 mm 이하로 일어나도록 탄성체의 스프링상수를 선정하였다. 각 조인트에서 말단 장치까지의 거리  $L$ 과 식 (3)에 따라 각 조인트에서 필요한 최소한의 스프링 상수  $k$ 와 와이어에 가해지는 장력  $T$ 는 표 4와 같다.

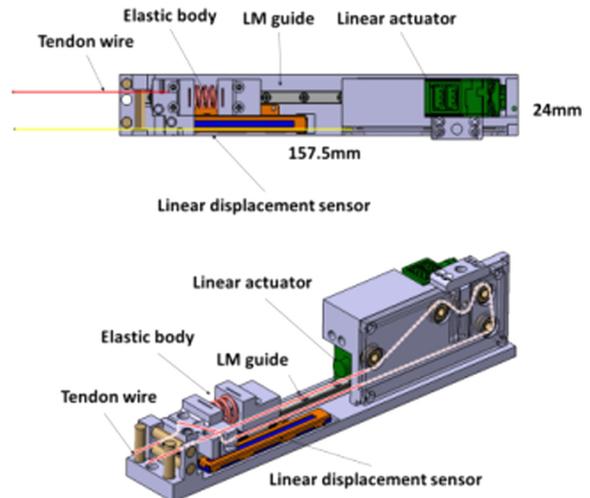


그림 14. 텐던 구동 모듈 설계.  
Fig. 14. Tendon drive module design.

표 4. 최소스프링 상수 및 리니어 액츄에이터 용량.

Table 4. Minimum spring constant and linear actuator capacity.

Joint	1	2	3	4	5
L (mm)	308.5	308.5	180.5	117.5	78.5
k (N/mm)	15.43	15.43	9.03	5.86	3.93
T (N)	15.43	15.43	9.03	5.86	3.93

표 5. 적용한 스프링 상수.

Table 5. Apply spring constant.

Joint	1	2	3	4	5
k (N/mm)	22.9	22.9	9.8	5.9	5.9
Force measuring resolution (N)	0.26	0.26	0.11	0.07	0.07

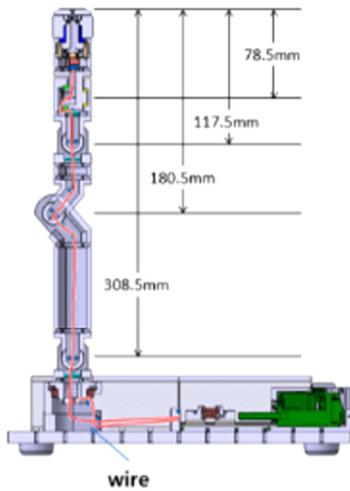


그림 15. 각 조인트 별 말단 장치까지의 거리.

Fig. 15. Distance to end effector for each joint.

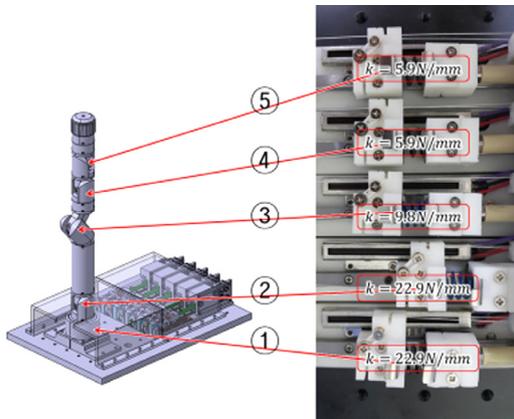


그림 16. 조인트 별 스프링 상수 적용.

Fig. 16. Apply spring constant to each joint.

최소한의 스프링상수 값을 만족하는 규격 스프링을 위의 표 5와 같이 선정하였다.

전체 마스터 장치는 3D 프린터를 이용하여 ABS수지 재질로 마스터 매니플레이터를 제작하였다. 마스터 매니플레이터와 텐던 구동 모듈은 세로 200 mm, 가로 300 mm의 알루미늄 브레드 보드를 사용하여 견고하게 고정하였다.

### III. 시뮬레이터 및 매니플레이터 조작 테스트

#### 1. 조작 테스트

제작된 마스터 장치의 기본적인 성능 검증을 위하여 매니플레이터의 상태 피드백 없이 각 조인트의 최대 속도만 제한하여 테스트를 진행하였다. 조작자가 마스터 매니플레이터의 끝단을 파지하여 터치 센서의 입력이 인가되면 마스터 매니플레이터가 조작자의 움직임에 따라 움직이되 각 조인트의 최대 속도를 제한하였고, 끝단을 파지한 상태에서 촉각 스위치를 누를 경우 각 조인트의 속도 정보를 제어 입력으로 매니플레이터에 전달하도록 하였다.

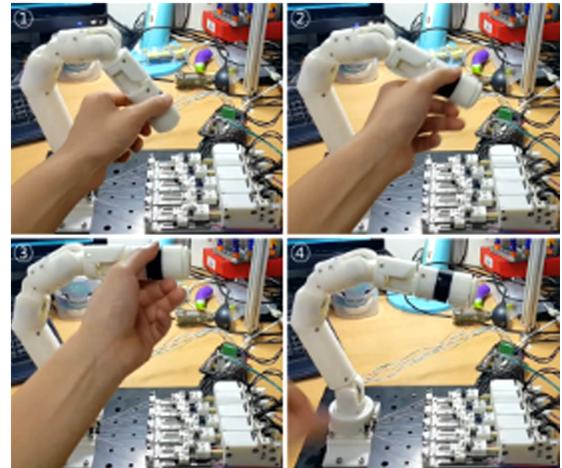
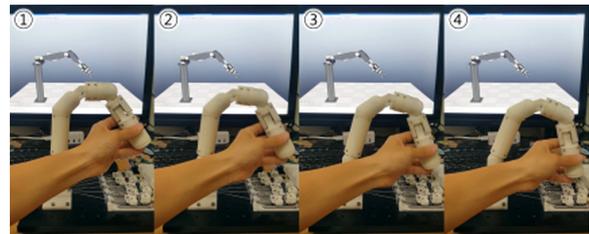


그림 17. 터치 센서 입력에 따른 마스터 매니플레이터 제어.

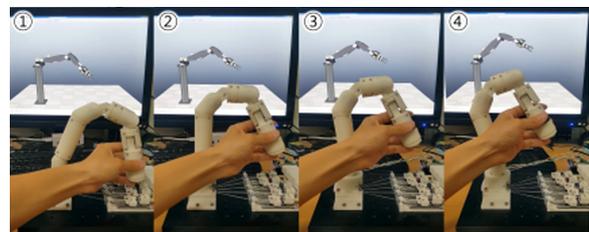
Fig. 17. Master manipulator control based on touch sensor input.

#### 1.1. 시뮬레이터

먼저 V-REP 시뮬레이터 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 7자유도 매니플레이터를 모델링하고 UDP 통신 방식으로 명령을 전달하여 조작자의 의도대로 매니플레이터 조작이 가능한 것을 확인하였다.



(a) Disable manipulator control (Without tact switch input)



(b) Enable Manipulator Control (With tact switch input)

그림 18. V-REP 시뮬레이터 테스트.

Fig. 18. V-REP simulator test.

### 1.2. 유압 매니플레이터

또한 실제 환경에서의 사용 가능성 및 기능 검증을 위해 KNR system의 HYDRA-UW3 7자유도 수중 유압 매니플레이터를 사용하여 조작 테스트를 수행하였다. 마스터 장치에서 생성한 제어 입력을 USB를 통하여 매니플레이터를 제어하는 패널 PC로 전달하는 방식으로 매니플레이터와 연동하였다. 시뮬레이터와 마찬가지로 조작자의 의도대로 매니플레이터의 조작이 가능하고, 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다.



그림 19. HYDRA-UW3 조작 테스트1.

Fig. 19. HYDRA-UW3 Operation Test 1.



그림 20. HYDRA-UW3 조작 테스트2.

Fig. 20. HYDRA-UW3 Operation Test 2.

## IV. 결론

본 논문에서는 수중 매니플레이터 조작을 직관적으로 하면서 조작자의 편의성을 향상시키기 위해 텐던 기반의 햅틱 마스터 장치와 텐던 구동 모듈을 제안하고 기구 설계를 진행하였다. 탄성체를 리니어 액츄에이터에 직결하는 구조로 텐던 구동 모듈을 소형화하여 replica 방식의 마스터 장치에 힘 반영이 가능한 햅틱 기능을 추가하였다. 제작한 텐던 구동 모듈은 탄성체와 액츄에이터의 용량 변경이 용이해 다양한 조인트 강성을 구현할 수 있었다.

사용자 입력과 마스터 매니플레이터의 자중에 의한 외란을 구분하기 힘든 텐던 구동 모듈의 특성에 맞춰 사용자 입력 구분을 위한 터치 센서 운용 방법에 대해서 연구하였

고, 프로토타입 제작을 통해 기구부의 동작을 검증하였으며, 시뮬레이터와 실제 유압 매니플레이터를 이용해 간단한 조작 테스트를 수행하였다.

이러한 테스트 결과로 마스터 매니플레이터의 위치, 힘 제어 가능성을 확인하였고, 추후 센서 정보의 피드백과 알고리즘의 연구를 통해 가상벽, 마스터 장치 조작 속도 제한, 매니플레이터 구동 한계 알림 등과 같은 햅틱 피드백 기능의 적용이 가능하다는 결론을 도출하였다.

## REFERENCES

- [1] R. D. Christ and R. L. Wemli, Sr., *The ROV Manual: a User Guide for Remotely Operated Vehicles*, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [2] Schilling Robotics, <http://www.fmctechnologies.com>
- [3] Kraft TeleRobotics., [www.krafttelerobotics.com](http://www.krafttelerobotics.com)
- [4] T. Y. Choi, D. H. Kim, H. M. Do, C. H. Park, and D. G. Park, "Development of a Redundant Shoulder Complex Actuated by Metal Wire Tendons," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 10, pp. 853-858, Oct. 2016.
- [5] S. J. Lee and J. H. Ryu, "Twisted String-based Upper Limb Exoskeleton," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 11, pp. 960-966, Nov. 2016.
- [6] 3D Systems, [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)
- [7] HAPTION, [www.haption.com](http://www.haption.com)
- [8] Microsoft, [www.microsoft.com](http://www.microsoft.com)
- [9] A. K. Ko, J. Y. Choi, H. C. Kim, and J. M. Lee, "A haptic interface using a force-feedback joystick," *Journal of control, Automation and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 13, no. 12, pp.1207-1212, Dec. 2007.
- [10] S. W. Suh, B. S. Yoo, and J. S. Joh, "Development of force feedback joystick for remote control of a mobile robot," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 13, no. 1, pp. 51-56, 2003.
- [11] Force Dimension, [www.forcedimension.com](http://www.forcedimension.com)
- [12] P. Garrec, J. P. Friconeau, Y. Measson, and Y. Perrot, "ABLE, an innovative transparent exoskeleton for the upper-limb," *Proc. of IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France. pp. 1483-1488, Sep. 2008.
- [13] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability," *Proc. of the 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, Cuernavaca, Morelos, Mexico. pp. 193-198, Sep. 2009.
- [14] J. H. Lee, H. W. Kim, B. J. Yi, and I. H. Suh, "A new 6-DOF parallel haptic device: Optimum design and analysis," *Journal of control, Automation and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 9, no. 1, pp. 63-72, Jan. 2003.
- [15] KNR systems, [www.knrsys.com](http://www.knrsys.com)



### 이 기 현

2012년 서울과학기술대 기계공학과 졸업. 2014년 동 대학원 석사. 2014년~현재 서울과학기술대학교 박사과정. 관심 분야는 수중 로봇, 햅틱 장치.



### 김 진 현

1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계자동차

공학과 교수. 관심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.