

심해무인잠수정 “해미래”의 로봇팔 시스템

■ 전봉환, 이판목 / 해양(연) 해양탐사장비연구사업단
 ■ 조민익, 구범모, 한상철 / 대양전기공업(주) 기술연구소

1. 서 언

로봇팔 기술은 1980년대 자동차와 전자산업의 발전과 함께 생산 자동화 분야에서 눈부신 성장을 이룩하였으며 2000년대에 들어서는 산업현장에서의 단순반복 작업을 벗어나 생활 속의 지능형 서비스 로봇에 접목되는 추세로 발전해 나가고 있다. 산업용 생산자동화 분야, 그리고 생활 속의 지능형 로봇분야와 함께 로봇팔의 또 다른 응용분야로 극한환경에서의 원격 제어 분야가 있으며 그 대표적인 예로 원자로 청소용 로봇이나 군용 로봇에 탑재되는 로봇팔 등을 들 수 있다. 인간이 견딜 수 없는 고압이 작용하는 심해에서 작업하기 위한 원격제어무인잠수정(ROV; Remotely operated vehicle)에 탑재되는 로봇팔도 극한 환경에서의 응용되는 한 예이며 원격조종 로봇팔은 해양 과학조사나 해양공학 분야에서 이미 중요한 도구가 된지 오래다.

현재까지 무인잠수정에 탑재된 로봇팔 시스템은 마스터/슬레이브 방식의 원격조종 수중 로봇팔 시스템이 주류를 이루고 있다. 이러한 시스템은 원격지에서 수중의 비디오 영상을 바탕으로 작업이 이루어지므로 작업의 성공여부가 작업자의 숙련도에 전적으로 의존하는 단점이 있지만, 체계화되기 힘든 수중 작업의 특성으로 인해 여전히 널리 이용되고 있다. 한국해양연구원에서 2001년부터 과학조사를 목적으로 개발되고 있

는 6,000m급 ROV인 ‘해미래’에는 두 대의 원격조종 로봇팔이 장착되어 있다. 해미래에 장착된 로봇팔은 ALSTOM Schilling Robotics (ASR)사에서 제작되었으며 유압구동 방식의 전형적인 마스터/슬레이브 수중 로봇팔 시스템인 ‘오리온’이다. 오리온이 해미래에서 잘 동작하도록 하기 위해서는 전기에너지를 유압에너지로 변환해 주는 유압시스템이 필요하고, 앞서 언급된 작업자의 의존성을 조금이라도 줄이기 위해서는 보조적인 장치가 필요하다. 이 두 가지 문제를 다시 정리해 보자.

첫째, 오리온 로봇팔을 구동하기 위한 유압시스템은 6,000m 심해에서 작동하여야 하기 때문에 육상에서 사용하는 일반적인 유압시스템과는 다른 점이 몇 가지 있다. 우선, 수심의 변화에 따라 작용하는 외압을 효과적으로 보상하여 유압회로 내로 전달하여야 한다는 것, 다음으로 레저버의 크기에 제약이 따르며 레저버 내의 공기를 완전히 제거하여야 하는 폐회로 유압 시스템이 되어야 한다는 것, 케이블에 의해 전송되는 전력의 제약으로 인해 유압펌프 구동용 모터의 용량이 제한된다는 것, 그리고 해수에 의한 부식의 영향을 최소화하기 위해 재질에 제약을 받는다는 것 등이 공기중에서 사용되는 유압시스템과의 주된 차이점이며 해미래에서 해결해야 될 한 가지 문제가 되겠다.

둘째, 작업자의 숙련도 의존성 문제이다. 오리온 시스템은 관절공간구동형 마스터시스템으로 조종된다.

여기서 관절공간구동형이란 로봇팔의 각 관절을 조작자가 하나씩 구동해서 로봇팔을 조종한다는 것으로 이해하면 된다. 반면, 작업공간구동형이란 조작자가 관절 하나 하나에 대한 조작은 신경 쓰지 않으면서 로봇팔 끝의 위치와 자세를 조종하는 방식을 말한다. 관절공간구동형 마스터시스템은 주로 슬라이브 로봇팔과 기구학적 구조가 같은 마스터 로봇팔을 조작자가 움직여서 슬라이브 로봇팔을 제어하게 되

어 있으나 팔 끝의 위치와 자세를 유지하면서 작업하기란 쉽지 않다. 작업공간구동형 마스터시스템은 조작자가 팔 끝의 위치와 자세만을 명령하면 되지만 명령을 추종하기 위해서는 컴퓨터가 기구학과 역기구학을 풀어서 각 관절을 제어해 주어야만 한다. 오리온은 관절공간구동형 마스터 로봇팔만을 제공하므로 해미래를 위해서 작업공간구동형 마스터 시스템을 개발하여 추가하였다.

그러면 해미래는 이 두가지 문제를 어떻게 해결하였는지 지금부터 살펴보도록 하자. 2장에서는 해미래 로봇팔 시스템의 구성과 배치에 대하여, 3장에서는 오리온 로봇팔의 기본기능과 사양에 대하여, 4장에서는 작업공간 구동형 마스터 시스템에 대하여 소개할 것이며, 5장에서는 로봇팔 구동을 위한 유압시스템 그리고 6장에서는 결언을 언급하도록 하겠다.

2. 해미래 로봇팔 시스템 구성과 배치

서언에서 언급하였듯이 해미래의 로봇팔 시스템은 ASR사에서 도입된 오리온 로봇팔 시스템과 자체 개발하여 탑재된 작업공간구동형 마스터시스템, 그리고 로봇팔을 구동하기 위한 유압시스템으로 구성된다. 두 가지 형식의 마스터 시스템은 조작자가 작업의 종류에

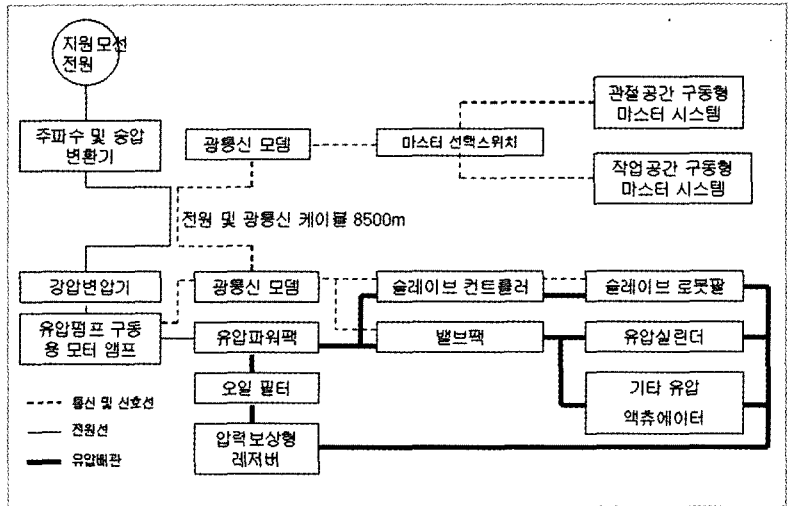


그림 1 해미래의 로봇팔 및 유압시스템 구성

따라 선택하여 사용할 수 있다. 해미래의 로봇팔 시스템을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다. 마스터 시스템과 슬라이브 시스템은 RS485 시리얼 통신방식을 이용하여 통신하는데 이때의 문제점은 선상 제어실에 위치한 마스터 시스템과 잠수정에 위치한 슬라이브 시스템 간에는 8,500m의 케이블로 연결되어 있다는 것이다. 이 물리적인 거리의 제약을 극복하기 위하여 해미래의 광통신 시스템을 이용한다.

해미래는 과학조사를 목적으로 하기 때문에 심해환경의 교란을 줄이기 위해 전동형으로 설계되었다. 여기서 전동이란 잠수정의 주된 동력을 사용하는 액츄에이터가 전동식이라는 의미인데 잠수정에서는 추진모터가 된다. 1990년대 초반에 개발된 미국 우즈홀 연구소의 과학조사용 ROV인 JASON은 로봇팔까지 전동형으로 제작된 완전한 전동형 잠수정이었다. 그러나 전동형 로봇팔은 크기에 비해 낼 수 있는 힘이 적어 작업에 많은 제약이 따르게 되었고 2002년에 업그레이드된 JASOM2에서는 유압 로봇팔을 다시 채택하였다. 이러한 이유로 해미래도 유압로봇팔을 채택하였는데, 이에 따라 필연적으로 유압장비가 필요하게 되었다. 유압동력을 발생시키는 것이 바로 유압파워팩인데 전기모터로 유압펌프를 회전시켜 토출압을 얻어낸다. 이때 가장 큰 제약조건은 제한된 전력이다. 해미래의 전력은

8,500m의 케이블을 통해 전송되기 때문에 케이블의 직경이 전체 전력전송량을 지배하게 되지만, 케이블의 직경은 전체 시스템의 규모에 가장 큰 영향을 미치므로 함부로 키울 수도 없는 문제이다. 그림 1에서와 같이 해미래는 케이블 저항손실과 변압기의 크기를 줄이기 위하여 선상에서 2,800V, 400Hz로 전원 변환을 거쳐서 전력을 전송한다. 잠수정 측에서는 이를 다시 220V, 400Hz로 변환해서 유압펌프용 전기모터를 구동하여 유압동력을 얻어낸다. 유량을 제어하여 유압 액추에이터를 제어하는 것이 슬라이브 컨트롤러와 밸브 팩이다. 슬라이브 컨트롤러는 로봇팔을, 밸브 팩은 기타 유압장비들을 제어한다.

로봇팔시스템과 유압시스템은 그림 2와 같이 해미래 시스템에 배치된다. 마스터 시스템은 당연히 선상에 위치한 제어실 내에 배치된다. 슬라이브 로봇팔

은 해미래의 앞쪽에 슬라이브 컨트롤러는 로봇팔의 바로 뒤쪽에 위치시켜 유압배관라인을 줄였다. 유압펌프 구동용 모터의 앰프는 전기장치이므로 내압용기 내에

장착된다. 각 유압라인의 압력을 확인하기 위하여 유압게이지가 해미래의 앞쪽에 설치되며 해미래의 카메라를 이용하여 조작자가 확인할 수 있다. 로봇팔이 채

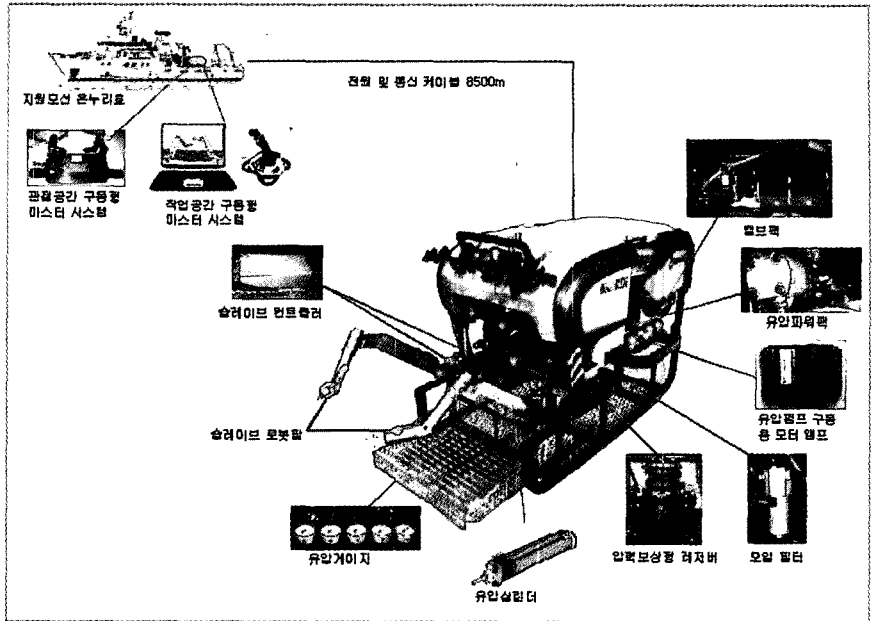


그림 2 해미래 로봇팔 시스템의 배치

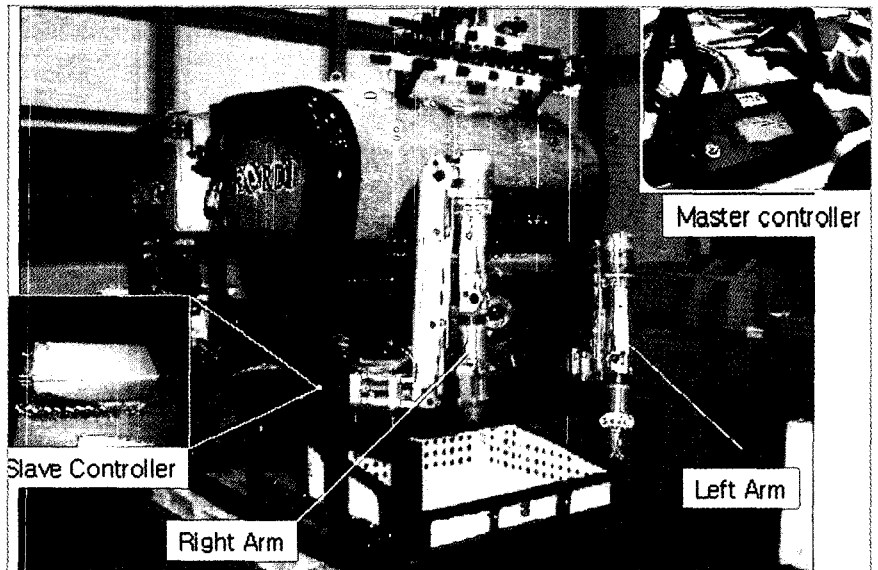


그림 3 관절공간 구동형 오리온 로봇팔 시스템

취한 시료를 담기 위한 바구니는 서랍처럼 밀려 나오도록 되어 있으며 유압실린더가 액추에이터로 사용된다. 유압실린더를 제어하기 위한 밸브팩은 해미래의 뒤쪽에 설치된다.

3. 관절공간 구동형 오리온 로봇팔 시스템

지금부터는 ASR사에서 도입된 오리온 로봇팔의 기본기능과 사양에 대해 살펴본다. 추가로 개발 제작된 마스터 시스템과 유압시스템은 계속되는 다음 장에서 소개한다. 해미래에 기본으로 탑재된 오리온 로봇팔은

표 1 양수형 오리온 로봇팔의 기본사양

Model	ORION7P	ORION7PE
Manufacturer	ALSTOM Schilling Robotics	
Power type	Hydraulic power	
Input Device	master arm	
DOF	6+grip	6+grip
Jaw	7.8 in., 4-finger	6 in., parallel acting
Max. reach(mm)	1,530	1,850
Nominal lift(max.)(kg)	68(250)	61(227)
Weight in air(sea)(kg)	54(38)	61(43)
Wrist torq.([Nm])(rpm)	170(8~35)	170(8~35)
Materials	AL, SUS	AL, SUS
Depth rating(m)	6,500	6,500
master/slaver I/F	RS485(half du)	

양수형 오리온 로봇팔(Dual ORION manipulator)로서 왼팔은 표준형으로 오른팔은 확장리치형이다. 확장리치형은 표준형에 비해 어깨(shoulder)에서 팔꿈치(elbow)까지의 링크가 30cm정도 더 길다. 슬래ιβ 로봇팔의 재질은 알루미늄이며 팔 끝의 그리퍼는 티타늄이다. 그림 3에 양수형 오리온 로봇팔 시스템의 기본 구성을 나타내었고, 표 1에 그 사양을 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 마스터 시스템에도 두 대의 관절공간 구동형 로봇팔이 설치되어 있다. 조작자가 마스터 로봇팔을 움직이면 각 관절에 설치된 가변저항 값을 마스터제어기가 A/D 변환하고 광통신 케이블을 통하여 RS485 시리얼통신 규약으로 슬래ιβ 컨트롤러에 전달한다. 슬래ιβ 컨트롤러는 전송되어 온 관절 명령값과 슬래ιβ 로봇팔의 현재 관절 위치와의 오차값에 비례하여 유압밸브를 제어함으로써 슬래ιβ 로봇팔을 제어한다.

슬래ιβ 로봇팔은 관절에 6자유도, 그리퍼에 1자유도를 가지며 팔을 완전히 뻗은 상태에서 61kg(표준형은 68kg)의 무게를 들어 올릴 수 있고, 최대 227kg(표준형은 250kg)을 들어 올릴 수 있다. 그림 4는 양수형 슬래ιβ 로봇팔의 기본제원을 나타내며 그림 5는 팔을 뻗어서 도달할 수 있는 공간을 나타낸다. 슬래ιβ 로봇팔을 이용해 해미래가 수중에서 작업을 할 경우, 주로 로봇팔

작업이 이루어지는 영역은 카메라 이미지를 가장 선명하게 얻을 수 있는 해미래의 전방영역이 될 것이며 여기서 로봇팔의 팔 끝의 조작성이 좋으면 좋을 수록 작업이 용이해진다. 그래서 슬래ιβ 로봇팔의 조작성을 고려하여 슬래ιβ 로봇팔의 기저를 해미래 중중심선 방향으로 30도씩 돌려 배치하였다.

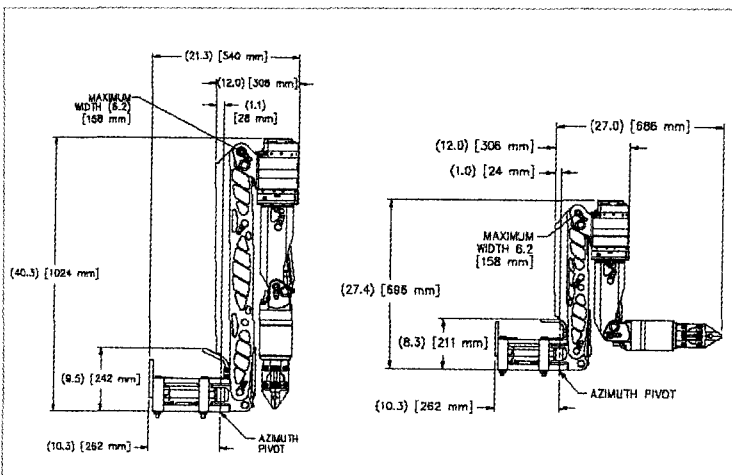


그림 4 양수형 오리온 로봇팔의 기본제원

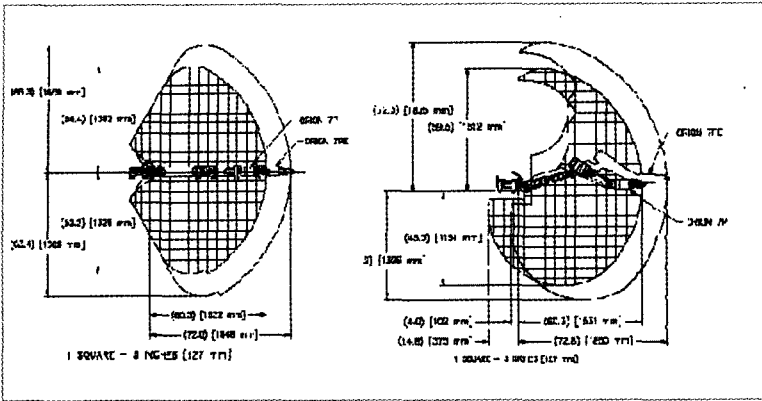


그림 5 양수형 오리온 로봇팔의 작업공간

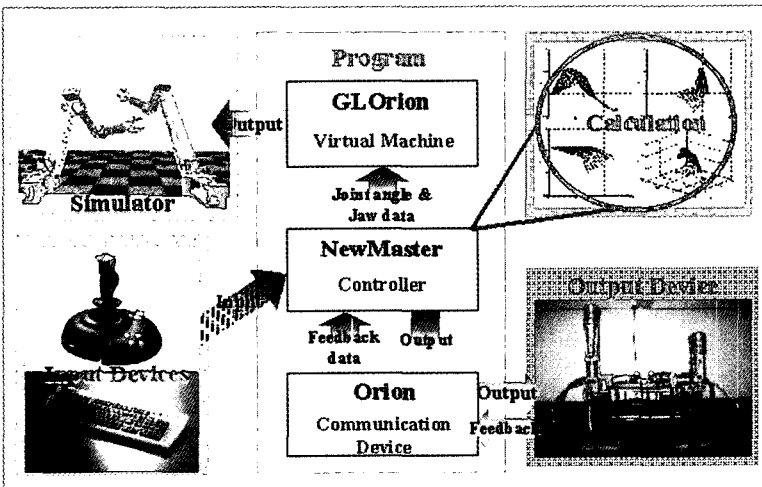


그림 6 작업공간 구동형 마스터 시스템 구성

4. 작업공간 구동형 마스터 시스템

ASR사로부터 도입된 양수형 오리온 로봇팔 시스템에 대하여 앞에서 살펴보았다. 이제 작업자의 편의를 위해 추가로 개발된 작업공간구동형 마스터시스템에 대하여 살펴보자. 작업공간구동형 마스터시스템은 조이스틱과 마스터 컴퓨터로 구성된다. 조이스틱은 작업공간에서 팔 끝의 위치와 자세를 입력하기 위한 장치이며, 마스터 컴퓨터는 슬래브 로봇팔의 기구학과 역기구학을 풀고 프로토콜에 따라 슬래브 컨트롤러

와 통신하며, 슬래브 로봇팔의 자세를 그래픽으로 화면에 디스플레이 해주는 역할을 수행한다. 그림 6에 작업공간구동형 마스터시스템의 구성을 나타내었다. 관절공간구동형 마스터시스템과 달리 작업공간구동형 마스터시스템에서는 슬래브 로봇팔의 각 관절 명령값을 계산하기 위하여 슬래브 로봇팔의 현재 자세 정보를 마스터 시스템에서 실시간으로 피드백 받아야 한다. 따라서 마스터 시스템은 매 샘플링 시간마다 슬래브 컨트롤러에 현재의 자세에 대한 값을 요청한다. 조이스틱으로 입력된 팔 끝의 위치와 자세의 변화량으로부터 로봇팔의 자코비안에 의해 각 관절의 속도를 구해내고 이를 적분하여 피드백된 현재의 관절 각도에 더함으로써 슬래브 로봇팔이 움직여야 할 각도를 계산한다. 계산된 각도가 슬래브 컨트롤러에 전달되면 슬래브 컨트롤러는 로봇팔의 현재 위치와의 차이를 이용하여 슬래브 로봇팔을 제어한다. 이와 동시에 마스터 컴퓨터는 현재의 슬래브

로봇팔의 자세를 화면에 그래픽으로 표시하여 줌으로써 조작자의 판단을 도와준다. 이때 주의하여야 할 것은 슬래브 로봇팔의 특이점과 관절한계를 고려하여야 한다는 것이다.

한편, 작업공간구동형 마스터시스템의 이러한 기본 기능 이외에 작업자의 편의를 위한 추가적인 기능들이 구현되었다. 추가적인 기능은 관절공간 구동형 오리온 시스템에서 사용되는 여러 가지 제어모드 예를 들면, 팔목관절의 제어모드(위치 또는 속도), 그리퍼의 제어모드(위치제어, 클램프, 고정) 등과 슬래브 로봇팔의

이상진단모드, 관절 한계설정 모드 등을 지원한다. 그림 7에 작업공간구동형 마스터시스템의 입력장치인 조이스틱의 기능과 마스터 시스템에 추가된 부가적인 기능들을 나타내었다. 그림 8은 작업공간구동형 마스터시스템의 그래픽 사용자 인터페이스 화면이다. 슬라이브 로봇팔의 현재 자세와 각 관절의 각도가 화면에 표시되고 제어를 위한 여러 가지 버튼과 툴바가 있다. 작업공간 좌표계와 공구좌표계 중 편리한 좌표계를 선

택해서 로봇팔의 팔 끝을 조종할 수 있고 툴바를 이용하여 각 관절을 따로 제어할 수도 있다. 필요에 따라 조이스틱 대신 키보드를 이용한 제어도 가능하다.

마스터 시스템은 슬라이브 로봇팔을 직접 제어하는 외에 조작자의 훈련을 위한 시뮬레이터로 사용할 수도 있다. 그래픽화면으로 실제 잠수정의 카메라 화면을 대신하고 조이스틱을 이용하여 그래픽 상의 슬라이브 로봇팔을 제어해 봄으로써 로봇팔 제어에 대한 실제감

과 각종 조작 버튼의 기능을 익힐 수 있다. 뿐만 아니라 그래픽 표시 화면을 오린 로봇팔의 관절공간 구동형 마스터시스템과 연결한다면 이에 대한 적응 훈련에도 적용될 수 있다. 작업공간구동형 마스터시스템의 또 다른 장점은 마스터 컴퓨터가 잠수정 제어용 컴퓨터와 네트워크로 연결되어 있으므로 잠수정의 운동을 보상하는 목적의 연구에 직접 응용될 수 있다는 것이다. 즉 잠수정 제어컴퓨터에서 전동추진기를 제어하고 잠수정의 자세와 운동정보를 얻을 수 있으며 이들을 로봇팔 컴퓨터로 전송하고 로봇팔 제어에 이용함으로써 잠수정 로봇팔 연동제어가 가능하게 된다.

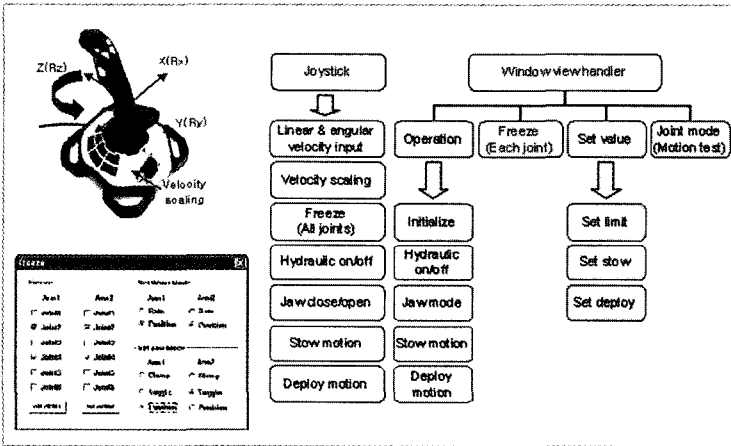


그림 7 조이스틱 기능 및 관절공간구동형 마스터시스템의 추가기능

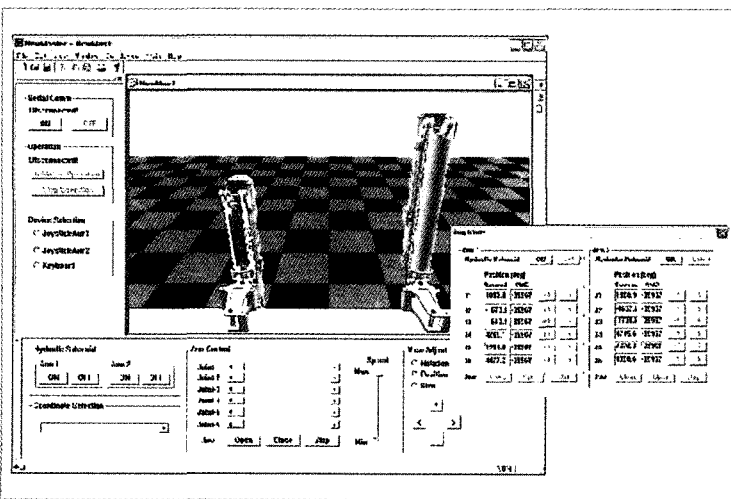


그림 8 작업공간구동형 마스터시스템의 그래픽 인터페이스 화면

5. 로봇팔을 위한 수중 유압시스템

서언에서 언급한 것처럼 작은 액츄에이터로 큰 힘을 발휘하기 위해 로봇팔을 비롯한 몇 가지 장비들은 유압을 사용한다. 해미래의 수중 유압시스템은 서언에서 언급된 문제를 해결하기 위하여 공기중과 다른 다음과 같은 특징

을 갖도록 설계되었다.

- ① 대기압에서부터 600기압까지 변하는 환경에서 작동하도록 하기 위하여 압력보상형 레저버를 사용한다. 압력보상형 레저버는 내부 용적이 신축적으로 변화함으로써 외압에 의한 오일의 체적 변화분을 보상하여 외부압력을 내부로 전달한다. 즉, 유압펌프의 출력측이 210기압인 유압시스템이 6,000m 수심으로 내려가면 펌프출력측은 810기압이 되고 펌프입력측은 600기압이 되는 원리이다.
- ② 잠수정에 탑재할 수 있는 공간제약을 극복하기 위하여 레저버의 용량을 줄이고 레저버로 리턴된 오일이 다시 펌프로 입력되는 형태의 페루프 유압회로를 이용한다. 레저버 내의 공기를 완전히 제거하여야 하고, 공기중에서 사용할 경우 오일의 발열에 주의하여야 한다. 수중에서는 해수에 의해 냉각이 용이하므로 문제가 없다.
- ③ 제한된 전력과 제한된 공간으로 인하여 충분한 펌프구동 모터의 용량을 확보하기 어려우며 이로 인해 펌프 초기기동시 모터에 과부하 문제가 발생하게 된다. 리모트 릴리프 밸브를 사용하여 펌프의 초기기동 토크를 줄이며 더블펌프를 사

용하여 토출압력변화에 따라 유량공급을 조절하여 모터의 사용 효율을 높인다.

- ④ 해수에 의한 부식에 강인하도록 모든 금속재질을 스테인레스 316으로 사용하며 불가한 경우에는 도색에 의해 해수에 노출을 막는다.

6. 결 언

이제까지 한국해양연구원에서 개발 중이며 실험역 시험을 눈앞에 두고 있는 6,000m급 과학조사용 심해 무인잠수정의 로봇팔과 유압시스템에 대해 살펴보았다. 아직 실험역 시험이 진행되지 않은 시점인 만큼 본고에서는 설계와 구현을 위주로 살펴보았지만 2006년 4월 동해시험과 동년 10월에 예정된 태평양 시험이 진행된 이후에는 실험역 시험 결과를 반영하여 다시 한번 소개할 수 있는 기회를 가질 수 있을 것으로 기대한다. 해미래에 사용된 기술들이 세계에서 처음으로 시도된 기술은 아니지만 국내 관련 산업분야에서 유사경험이 없는 관계로 많은 시행착오를 겪었다. 이러한 경험들이 또 다른 무인잠수정의 개발이나 유사분야에 과급되어 우리나라의 기술 경쟁력 향상과 관련분야의 발전에 도움이 되기를 희망해 본다.