

수중 매니플레이터 개발 동향

최형식 (한국해양대학교)

I. 서론

각종 해양자원의 이용 및 개발은 21세기 고도 산업사회 건설과 지속적인 경제 발전에 필수적이며, 다양한 해양공간 이용 및 개발관련 산업으로 발전할 수 있는 무한한 성장가능성을 가지고 있다. 특히, 해양 플랜트 작업이나 심해 자원의 채취 작업은 세계 각국이 심혈을 기울이는 매우 중요한 해양산업이다. 이와 같은 수중 작업을 위해서 ROV(Remotely operated vehicle)와 같은 수중 작업 가능한 로봇의 역할은 매우 중요하다. 특히, ROV의 수중 작업을 위한 수중 매니플레이터는 핵심적인 작업장비이다. 수중작업의 최종수단인 매니플레이터는 해양환경에서 최소한의 동력을 사용하면서도 정확한 목표물 접촉유지기능을 가지며 가능한 무거운 물체를 다룰 수 있는 성능을 구비해야 한다.

수중 매니플레이터는 구동 방식에 따라 유압구동 방식과 전기모터 구동 방식으로 나눌 수 있다. 현재 대부분의 수중 매니플레이터는 유압구동 방식으로 구조적으로 용이한 방수 구조와 큰 구동력을 내는 특성으로 유압구동식이 사용되고 있다. 하지만, 최근 사용하기 간편하며 부피가 작고 중량이 가벼운 전기모터의 성능이 향상되어 로봇의 구동력이 상대적으로 매우 커지고 전기모터의 방수방법이 개발됨에 따라 전기모터 방식의 수중 매니플레이터의 연구개발이 급속히 진행되고 있다.

본 논문에서는 국외의 많은 업체들에서 개발한 4자유도에서 7자유도까지 다양한 유압방식의 수중 매니플레이터의 동향에 대해 설명과 최근 연구개발이 활발히 이루어지고 있는 전기모터 방식의 수중 매니플레이터의 동향 및 기술에 대한 분석 내용을 기술한다.

II. 유압구동 방식의 수중 매니플레이터

유압구동 방식의 수중 매니플레이터는 현재 많이 사용하고 있고 미국, 영국 및 프랑스를 비롯한 선진국에 전문기업들이 있다. 이들 기업들의 생산하는 다양한 수중 매니플레이터 제품 중에서 대부분이 고심해용 유압기반의 제품이다. 자유도가 낮은 4-DOF부터 7-DOF까지 다양한 제품들을 제공하고 있으며, 그 중에서 대표적인 미국 기업인 Schilling Robotics사(www.schilling.com)의 제품을 많은 ROV들에 사용하고 있다. 특히, 이 중에서 대표적인 Titan 4 manipulator (Fig. 1)은 두랄루민 혹은 티타늄 합금으로 재질로 구성되며 공기중에서 100kg이고 가반하중(팔을 펼쳤을 때 들 수 있는 물체의 중량)은 122kg이며 4000~7000m 깊이에서 작업 가능하며 6개의 로봇 관절과 1개의 능동 그립퍼로 구성된다. 이 회사의 수중 매니플레이터는 중대형의 6개 제품이 개발되어 있다.

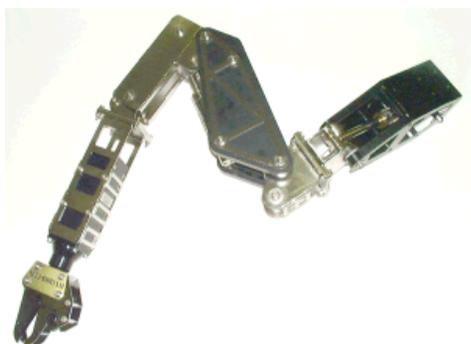


〈Fig. 1〉 Titan 4 manipulator

영국에서는 수중 매니플레이터의 대표적인 회사로 Hydrolek가 있다. 이 회사는 가장 다양한 종류의 수중 매니플레이터 제품군을 보유하고 있으며 4자유도에서부터 그립퍼를 포함한 7자유도의 수중 매니플레이터 제품을 생산하고 있다. 이들 중에서 대표적인 것으로는 <Fig. 2>와 같은 HLK-40500이 있다. 두랄루민 혹은 티타늄 합금으로 모체는 구성되며 매니플레이터 길이는 1500mm, 가반하중 150kg, 중량 59kg, 작업 깊이 2100m의 성능을 갖는다.

프랑스의 대표적인 수중 매니플레이터의 회사는 대형 방산 업체인 ECA로 다양한 군용 장비를 생산한다. 수중 매니플레이터의 종류는 많지 않으나 유압 기반 및 모터 구동 방식의 수중 매니플레이터를 생산하고 있다. 유압구동 방식의 수중 매니플레이터는 <Fig. 3>과 같은 유압 방식의 수중 로봇 매니플레이터로 두랄루민 혹은 티타늄으로 구성되며 길이 1.7m, 가반하중 70kg, 중량 47kg, 작업 깊이 7000m의 작업성을 갖는다.

한편, 유압구동 방식의 수중 매니플레이터 제품을 전문적으로 생산하지는 않지만, 연구개발 품으로 러시아의 수중 매니플레이터인 Aqua-Titanium(Fig. 4)이 있고 Titanium은 6개의 관절로 이루어졌고 유압 방식으로 구동되어지고 구동 범위는 1,750mm이고 허용 용량은 294N이며, 총 무게는 250kg이다. 또한, 독일에서 만든 수중 매니플레이터로 <Fig. 5>의 CManipulator가 있고 이는 협조 작업을 위한 협조 매니플레이터로 개발되었다. 이외에 캐나다의 ISE(International



<Fig. 2> Function Manipulator - HLK-40500



<Fig. 3> Arm 7H of ECA Electric manipulator



<Fig. 4> Function Manipulator Arm - Aqua-Titanium manipulator



<Fig. 5> CManipulator

Submarine Engineering)사는 현재까지 수백여 개의 원격 조정 ROV용 인공팔 로봇을 제작하였으며, SCARAB ROV는 해저의 파이프 보수나 케이블 보수 유지용으로 개발되어 수심 2,000~2,500m에서 운용되고 있다.

현재까지는 ROV와 이에 부착된 매니플레이터가 주종을 이루고 있으나, 앞으로는 AUV에 매니플레이터를 부착한 형태가 주종을 이루게 될 것으로 예측되고 있다.

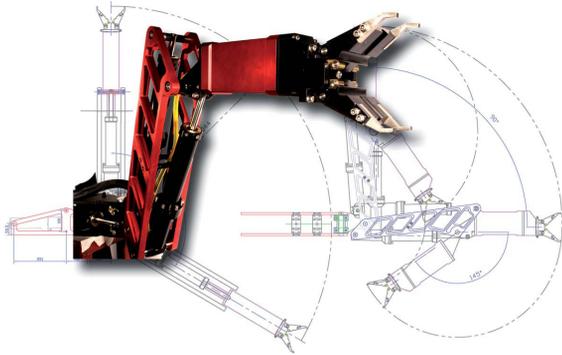
Ⅲ. 전기모터 방식의 수중 매니플레이터

전기 모터 기반의 수중 매니플레이터는 대학이나 미국 하와이 대학이나 일본 및 중국의 연구기관에서 개발하였거나 개발 중이지만, 모터 기반의 수중 매니플레이터는 자유도가 낮거나 6~7자유도를 갖는 매니플레이터는 중량 대비 가반하중이 매우 낮아서 실용적인 작업에 투입하기 어려운 문제점을 갖고있다. 세계 최초의 전기모터 방식의 수중 매니플레이터 상용 제품으로는 <Fig. 6>과 같은 프랑스 ECA사의 ARM 5E가 있다. 이는 기본적으로 4자유도의 관절축과 1축의 능동 그립퍼, 작업 깊이 3000m, 가반하중 25kg, 그리고 매니플레이터 중량은 27kg이다.

연구개발용으로 개발한 모터 기반의 수중 매니플레이터로는 미국 하와이 대학의 SAUVIM은 6,000m 급 AUV에 매니플레이터를 부착한 세계 최초의 시스템과 함께 개발한 Ansaldo (Fig. 7)는 7자유도 매니플레이터가 있으나 고중량이나 가반

하중은 매우 낮다. 일본 동경대학에서 Twin berger ROV에 부착하기 위해 개발한 3자유도 모터 기반의 수중 매니퓰레이터가 있다(Fig. 8). 이외에도 중국의 대학에서 연구단계에 있다.

우리나라에서는 아직 유압 기반의 수중 매니퓰레이터 기반 기술은 보유하지 있지 않은 것으로 알려져 있다. 모터 기반의 4자유도 수중 매니퓰레이터의 개발은 1999년부터 과학 기술부 민군과제의 일환으로 해군사관학교, KAIST, 서울대학교, 대양전기공업(주), 한국해양연구원이 참여하여 4자유도



〈Fig. 6〉 ARM 5E of ECA manipulator



〈Fig. 7〉 Ansaldo



〈Fig. 8〉 3 d.o.f underwater manipulator of Japan

전동식 해저 로봇 매니퓰레이터를 개발하였다. 또한, 포항공과대학교 등에서 수중에서 작업할 수 있는 4-DOF 전동형 수중 매니퓰레이터를 개발한 바 있다. 2010년에는 〈Fig. 9〉와 같은 한국해양대학교에서 전기 모터 기반의 6자유도 고성능 매니퓰레이터를 개발하였다. 한국해양대학교에서 개발한 수중 매니퓰레이터는 두랄루민 재질로 구성되고 관절은 6축이며 능동 그립퍼 1축을 더하여 총 7축의 수중 매니퓰레이터이다. 이의 구동축은 내구성이 높은 BLDC 모터를 기반으로 구동되고 총 길이는 960mm, 총 무게는 23.8kg이고 가반하중은 공기 중에서 20kg이다. 이를 프랑스 ECA사의 ARM 5E와 성능 비교하면 유사한 중량과 가반하중임에도 자유도는 더 높은 고성능의 기술을 확보하고 있음을 알 수 있다.



〈Fig. 9〉 Underwater manipulator of Korea Maritime University

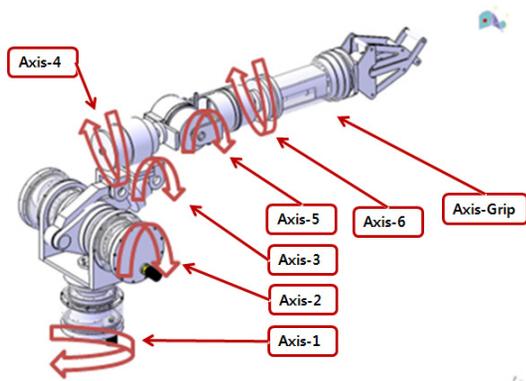
IV. 수중 매니퓰레이터의 기술

수중 매니퓰레이터의 구성 기술은 크게 구조설계기술, 관절동기 설계기술, 관절구동기 내압설계기술 및 제어시스템 기술로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 한국해양대학교에서 개발한 수중 매니퓰레이터의 기술개발 내용을 바탕으로 간략히 설명하고자 한다.

수중 매니퓰레이터의 구조는 그립퍼를 제외한 6자유도 일반 산업용 매니퓰레이터와 같은 구조로 〈Fig. 10〉과 같이 요-피치-피치-롤-피치-롤 구조로 구성하였다.

가반하중은 20kg으로 설계하는 매니퓰레이터의 관절구동기 설계를 위해 사다리꼴 속도 프로파일을 갖는 경로를 계획하는 시간에 추적하는 시뮬레이션을 행한다. 육상에서의 경우와 달리 수중에서는 부가관성모멘트, 부력 및 유체항력이 발생하므로 이들로 인한 부해해석을 하여야 한다. 이 결과에 따라 적합한 모터와 감속기의 용량을 계산한다.

전기모터 기반의 수중 매니퓰레이터 제작에 있어서 가장 큰 어려움은 모터의 회전축에 대한 방수이다. 현재 모터의 회전축계 수밀구조로 쓰이고 있는 방식은 크게 두 가지로 볼 수



〈Fig. 10〉 Operation structure of the manipulator

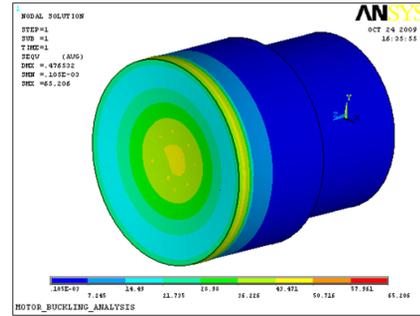
있는데 기계식실을 이용한 방식과 마그네틱 커플러를 이용한 방법이다. 하지만 기계식 실은 마찰에 의한 부하 및 그에 따른 수명이 있다는 단점이 있고, 마그네틱 커플러는 고토크에 적용하기 힘든 단점이 있다. 본 연구에서는 매니플레이터용으로 직결타입의 관절구동기로 설계하였다. 〈Fig. 11〉은 고토크 저회전의 특성을 가지며 회전축 수밀구조를 위해서 2중 오일자켓을 이용한 모터의 수밀구조를 고안하여 개발한 관절구동기이다. 관절구동기를 모듈화하여 유지보수가 용이하고 폭넓게 활용될 수 있도록 제작하였다. 또한, 관절구동기의 구동을 위하여 관절구동기 내부에 장착할 수 있는 소형 BLDC모터 드라이버가 필수적이며 연구에서 개발한 소형 드라이버는 〈Fig. 11〉과 같다. 그리고 본 연구에서는 관절구동기의 두께를 선정하기 위해 정적 내압해석(static analysis)과



〈Fig. 11〉 Joint actuator for underwater manipulator



〈Fig. 12〉 Picture of developed driver

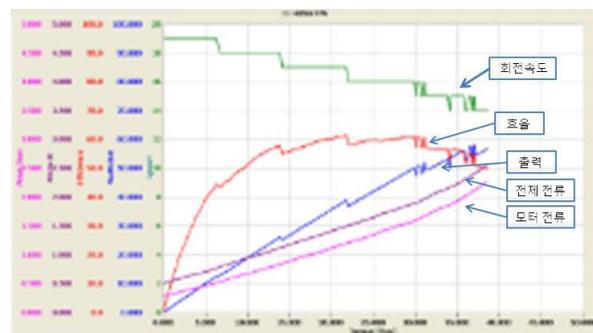


〈Fig. 13〉 von Mises stress distribution in static analysis

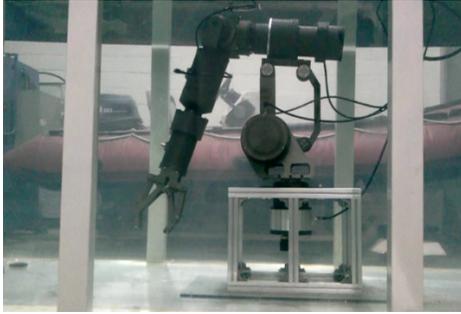
좌굴해석을 수행하였다. 〈Fig. 13〉은 ANSYS를 이용한 관절구동기의 내압해석 결과이다.

다이나모미터를 이용하여 개발한 관절구동기의 육상 성능 시험을 하였다. 조건은 입력 48V 최대전류 2.5A 최대부하 40N.m로 시험하였고 그 결과는 〈Fig. 8〉과 같다. 여기서 x축은 토크성분이다. 효율은 토크가 0일 때부터 증가하다가 23Nm부하에서 최대효율이 약 65%정도가 되고 최대효율을 지나면서부터 점차적으로 감소한다. 회전속도는 무부하 상태일 때 19rpm 정도이고 토크가 커지면 커질수록 감소한다. 전류 및 출력은 토크에 비례해서 증가한다. 정지 토크가 정격 토크의 약 9.17배인 것을 감안할 때 제작된 관절구동기는 목표 최대 토크인 66Nm의 약 3.2배정도를 낼 수 있다.

상기와 같은 설계방법에 따라 전기모터 기반의 수중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 관절구동기를 이용하여 〈Fig. 9〉의 새로운 형태의 수중 매니플레이터를 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 관절구동기는 모듈타입으로 해중 매니플레이터의 링크부를 구성한다. 제어 시스템은 조이스틱과 DC전원공급기로 구성되어 있다. 매니플레이터의 총 무게는 23.8kg이고, 대기 중에서 가반하중 20kg으로 설계 되어 있다. 〈Fig. 15〉는 수중에서 동작을 시험하는 모습으로 방수와 20Kg의 가반하중 성능을 만족하는 성공적인 결과를 얻었다.



〈Fig. 14〉 results of Dynamo test



〈Fig. 15〉 Underwater manipulator in water

V. 결론 및 향후계획

현재 대부분의 수중 매니플레이터는 유압구동 방식이지만, 머지않아 전기모터 기반으로 대체될 것이다. 이를 위해 한국해양대학교에서는 전기모터 기반의 소형 경량이지만 중량대비 가반하중의 비가 0.6인 고가반하중의 성능을 갖는 6자유도 수중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 하부 관절구동기를 개발하였다. 수중 매니플레이터의 기구학 해석과 수중에서의 부하로 인하여 관절에 걸리는 부하토크에 대한 해석을 하였다. 2중 오일 구조를 적용한 새로운 회전축계 방수구조인 관절구동기의 개발과 육상 시험에서 관절구동기의 토크 시험을 통하여 20kg의 외부 부하를 이송할 수 있는 성능을 검증하였다. 또한, 개발한 25kg의 수중 매니플레이터가 육상 및 수중 실험을 통해 고중량의 물체를 성공적으로 이송함을 확인하였다.

향후 완성도 높은 디자인과 작업의 안전성에 대한 연구와 본 연구결과를 바탕으로 유압실린더 기반의 매니플레이터 성능에 필적하는 중량 70kg 이상의 고가반하중을 갖는 매니플레이터를 개발하고자 한다.

후기: 본 연구는 국토해양부에서 지원하는 “다관절복합이동해저로봇개발” 과제로 수행된 연구결과중 일부와 국토해양부 지역MT특성화사업의 연구비 지원(해양산업고도화를 위한 핵심 해양장비 개발에 의해 수행되었습니다.



최형식

1983년 3월 고려대학교 기계공학과 학사
 1989년 8월 U. of south carolina 기계공학과 석사
 1993년 3월 North carolina state U. 기계공학과 박사
 1993년 3월~1993년 8월 한국기계연구원
 2006년 8월~2007년 8월 North carolina state U. 객원교수
 2010년 2월~2011년 7월 한국해양대 산업기술연구소 소장
 〈관심분야〉 수중로봇(AUV, ROV, Robot Arm, 항법), 휴머노이드 로봇, 로봇구동기 설계 및 제어