

전기모터 기반의 해중 매니플레이터 개발

최형식[†] · 홍성율¹ · 전지광² · 박한일³

(원고접수일 : 2010년 6월 14일, 원고수정일 : 2010년 8월 17일, 심사완료일 : 2010년 10월 12일)

Development of Underwater Manipulator Driven by Electric Motor

Hyeung-Sik Choi[†] · Sung-Yul Hong¹ · Ji-Kwang Jeon² · Han-Il Park³

요 약 : 해저에서 20kg 이상 작업물의 이송을 포함하는 다양한 작업을 수행할 수 있는 전기 모터 기반의 새로운 5자유도 고성능 수중 매니플레이터의 개발에 관해 연구하였다. ROV나 AUV에 적용하여 이들의 이동을 원활하게 하고 소형경량임에도 고가반하중의 성능을 갖는 25kg의 경량 구조로 설계하였다. 매니플레이터의 관절구동기는 방수를 위한 새로운 2중 오일자켓 구조를 갖는 모듈로 설계하고 제작하였다. 또한, 개발한 관절구동시스템의 우수한 토크성능을 실험을 통하여 검증하였다. 그리고 이를 적용한 소형 5자유도 고성능 수중 매니플레이터를 제작하였다.

주제어 : 관절 구동기, 모터의 수밀구조, 수중 매니플레이터

Abstract: In this paper, a development of a new 5 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 manipulator for applying to midium-sized AUV or ROV has been designed small and light but to handle a heavy 25kg payload. 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, a 5 d.o.f. highly perfomable underwater manipulator has been builtd applying the developed underwater joint actuators.

Key words: joint actuator, Waterproof Structure of the motor, underwater manipulator

1. 서 론

각종 해양자원의 이용 및 개발은 21세기 고도 산업사회 건설과 지속적인 경제 발전에 필수적이며, 다양한 해양공간 이용 및 개발관련 산업으로 발전할 수 있는 무한한 성장가능성을 보유하고 있다. 이와 같은 해양 산업을 활성화 할 수 있는 핵심적인 분야중의 하나가 해중 작업장비이다. 수중 로봇을 포함하는 다양한 수중 작업장비의 핵심 장비로는 모터 기반의 수중추진체와 작업용 매니플

레이터가 있다.

세계적으로 수중로봇의 개발에 관한 연구는 별로 많지 않다. 초기의 실험적 연구 중의 하나는 1966년에 McLain이 그리고 Leabourne가 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

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계·정보공학부, hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4969)

1 한국해양대학교 기계공학과 대학원

2 한국해양대학교 기계공학과 대학원

3 한국해양대학교 해양개발공학부

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 700억대로 매우 큰 시장을 형성하고 있으나[5] 국내 제품에는 없고 국외에는 매니플레이터의 소형 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 논문에서는 용량이 크나 무거운 유압기반의 매니플레이터 보다 상대적으로 용량은 적으나 경량이고 정밀한 작업을 할 수 있는 새로운 전기 모터 기반의 매니플레이터에 대한 연구내용을 기술하였다.

전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 큰 문제인 방수 문제를 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 매니플레이터를 개발하였다.

2. 매니플레이터의 구조 설계

2.1 기구부 설계

대부분의 산업용 매니플레이터의 구조는 하부 관절 3개가 최하부로부터 요-피치-피치 구조이다. 그러나 하부가 피치관절이면 매니플레이터의 말단부에 가해지는 부하로 중력방향으로 힘을 받아서 큰 토크부하가 걸리게 된다. 따라서 본 연구에서는 하부 2개의 관절은 중력의 영향을 받지 않는 롤관절로 설계하였다. 따라서 관절구동기의 용량을 적게 설계하여 경량이고 소형화된 설계를 하였다. 수중에서의 작업은 주로 좌우로 동작이 많고 상하로는 큰 동작이 없기 때문에 매니플레이터의 구조를

Figure 1 및 Figure 2와 같이 하였다. 전체적인 매니플레이터의 구조는 요-요-롤-피치-롤 구조로 설계하였다.

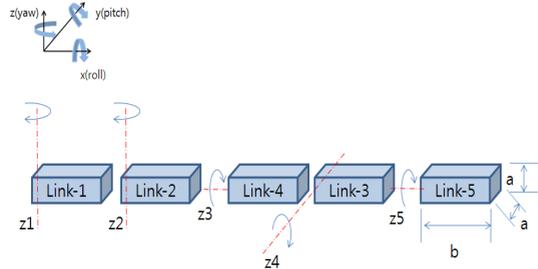


Figure 1: Degree of freedom of the manipulator

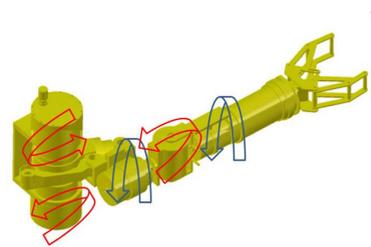


Figure 2: Joint structure of the manipulator

2.2 관절구동기의 부하해석

본 매니플레이터의 가반하중은 20kg으로 설계된다. Figure 1의 매니플레이터에 20kg의 외부부하가 말단장치에 작용할 때 관절에 가해지는 부하토크를 계산하였다. Z_i 는 각 축의 회전중심이다.

Table 1 은 각 관절의 링크 해당 파라미터 값을 나타낸 것이다. a_i , b_i 는 회전하는 링크의 해당 길이, d_i 는 회전중심과 질량중심의 거리, θ_i 는 회전축을 중심으로 동작하는 각 변위를 나타낸다. m_i 는 각 회전하는 링크의 질량이다.

Table 1: Parameters of the driving Joint

i	a_i [mm]	b_i [mm]	d_i [mm]	θ_i [rad]	m_i [kg]
1	150	800	565	1.57	34
2	150	660	484	1.57	30
3	150	410	342	6.28	21
4	150	340	283	1.57	21
5	150	200	0	1.57	18

각 링크의 관성모멘트를 구하기 앞서 다음과 같은 가정을 하였다.

- 구동축은 회전중심에 위치 함
- 최대 변위 θ_i 만큼 회전하는데 걸리는 회전시간은 t_i s
- 가감속 시간은 0.15 s
- 회전축 마찰저항토크(T_f)는 1 N·m

회전축(Z)이 질량중심과 일치 할 때 Z축에 대한 관성모멘트(I_z)는 다음과 같다.

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

회전축이 질량중심에서 거리가 d 만큼 떨어져 있을 때 Z축에 대한 관성모멘트는 다음과 같다.

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

Table 2 는 식 (1)과 식 (2)를 통해 구한 각 링크의 관성모멘트(I_e)값을 나타낸 것이다.

Table 2: Moment of Inertia of the driving Joint

i	motion	I_{zi} [kg · m ²]	I_{ei} [kg · m ²]
1	yaw	1.877	12.719
2	yaw	1.145	8.173
3	roll	0.334	2.785
4	pitch	0.242	1.928
5	roll	0.0675	0.675

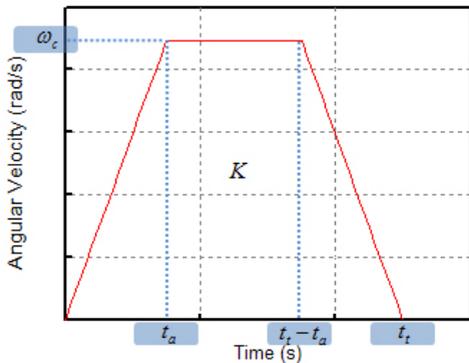


Figure 3: Time - angular velocity graph

매니퓰레이터 관절의 각속도 및 각가속도를 다음과 같이 해석하였다. 경로함수는 Figure 3와 같은 함수를 적용하였다. Figure 3 의 그래프 내부 면적은 각 관절의 총 회전각도 K와 같다. 각 관절 구동기의 가감속 시간을 t_a 로, 총 구동시간을 t_t 라고 한다면 다음과 같은 식이 성립 한다. ω_c 는 각속도, α 는 각가속도다.

$$K = \frac{t_a \omega_c}{2} + (t_t - 2t_a)\omega_c + \frac{t_a \omega_c}{2} \text{ [rad]} \quad (3)$$

$$\omega_c = \frac{K}{t_t - t_a} \text{ [rad/s]} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\omega_c}{t_a} \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad (5)$$

Table 3은 식 (4)와 식 (5)를 통해 얻어진 각 관절의 각속도, 각가속도 값을 나타낸 것이다.

Table 3: Angular velocity, acceleration of the manipulator joints

i	k_i [rad]	t_t [s]	t_a [s]	ω_{ci} [rad/s]	α_i [rad/s ²]
1	1.57	2	0.4	0.981	2.453
2	1.57	2	0.4	0.981	2.453
3	6.28	4	0.4	1.744	4.361
4	1.57	2	0.4	0.981	2.453
5	1.57	2	0.4	0.981	2.453

경로를 따르는 관절의 관성모멘트로 인하여 매니퓰레이터의 관절에 걸리는 부하 토크를 해석하였다. 경로에 따라 각 관절 구동기에 작용하는 토크는 크게 가속운동, 등속운동, 감속운동에 대한 3단계의 부하 토크로 구분된다. 이를 살펴보면, 관성모멘트에 의한 토크(T_i), 가속에 필요한 토크(T_{a+}), 등속에 필요한 토크(T_c), 감속에 필요한 토크(T_{a-})로 다음과 같다.

$$T_i = I_e \cdot \alpha_i \quad (6)$$

$$T_{a+} = T_i + T_f \quad (7)$$

$$T_c = T_f = 0.5Nm \quad (8)$$

$$T_{\alpha-} = T_f - T_i \tag{9}$$

Table 4 는 식 (7)-(9)를 통해 얻어진 각 관절 구동기의 토크값을 나타낸 것이다.

Table 4: Torque of the manipulator joints

i	T_i [N · m]	T_{a+} [N · m]	T_c [N · m]	T_{a-} [N · m]
1	31.202	32.202	1.00	-30.202
2	20.049	21.049	1.00	-19.049
3	12.146	13.145	1.00	-11.146
4	4.728	5.728	1.00	-3.728
5	0.166	1.166	1.00	-0.834

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

$$T_w = W_i \times d_i \times \sin\theta_i = m_i g \times d_i \times \sin\theta_i \tag{10}$$

$$\theta = \frac{\omega_c \times t_a}{2} [\text{rad}] \tag{11}$$

Table 5 는 식 (10) 및 (11)을 통해 링크중량 및 부하에 따른 각 관절 구동기에 걸리는 부하 토크값을 나타낸 것이다.

Table 5: A weight torque of the driving Joint

i	d_i [mm]	m_i [kg]	Θ_i [rad]	T_w [Nm]
1	565	34	0	0
2	484	30	0	0
3	342	21	0.349	24.037
4	283	21	0.196	11.370
5	0	18	0	0

항력에 따른 각 관절 구동기에 걸리는 부하 토크값(T_{Di})을 구하였다. 항력의 식은 식 (12)과 같다.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} v^2 A \tag{12}$$

여기서 D는 항력[N], ρ : 평균바다밀도, A:단면적, v :정지해있는 유체에 대한 매니퓰레이터의 속

도, C_D :항력계수 이다.

Table 6은 식 (12)를 통해 각 링크의 항력에 의해 발생하는 토크를 나타낸 것이다.

Table 6: Drag torque of the manipulator joints

i	ω_{ci} [rad/s]	ρ [kg/m ³]	C_D	D_i [N]	T_{Di} [Nm]
1	0.981	1029	0.38	4.819	2.891
2	0.981	1029	0.38	2.706	1.339
3	1.744	1029	0.38	2.050	0.630
4	0.981	1029	0.38	0.370	0.094
5	0.981	1029	0.38	0.042	0.005

각 관절 구동기에 요구되는 구동모터의 용량은 다음의 식들에 의해 결정된다.

$$T_{\max} = T_{a+} + T_f + T_D \tag{13}$$

$$\eta_{\max} = \frac{60 \times \theta}{360 \times (t_t - t_a)} \tag{14}$$

$$P_{\max} = T_{\max} \times \eta_{\max} \times \frac{\pi}{30} \tag{15}$$

Table 7 은 각 관절의 최대 토크와 최대 회전수 및 그에 따른 모터용량을 도출하여 나타낸 것이다

Table 7: Peak power of the driving joint

i	Move Direction	η_{\max} [rpm]	T_{\max} [Nm]	P_{\max} [W]
1	yaw	9.375	35.954	34.436
2	yaw	9.375	22.389	21.969
3	roll	16.667	37.814	65.964
4	pitch	9.375	17.193	16.870
5	roll	9.375	1.170	1.148

위의 모터의 용량선정에서 구동기의 최대 토크는 37.814Nm이다. 또한 직결타입의 관절구조와 구동기의 수밀구조를 고려해 허용 토크가 크고 길이가 짧은 모터 및 감속기를 선정하였다.

매니퓰레이터의 관절구동기는 가장 고토크를 필요로 하는 관절-1과 관절-3 부분을 기준으로 하여 수밀 구조 설계 및 제작하였다. 필요최대토크와

용량은 $P=17W$, $T=34Nm$ 이고 목표 회전수는 15rpm으로 한다. 이에 따라서 매니플레이터의 하위 두 관절구동시스템의 90W BLDC 모터와 하모닉드라이버로 구성하여 $P=90W$, $T=49.4Nm$ 이고 회전수는 16.4rpm의 출력 구동토크를 갖는 시스템으로 구성하였다.

3. 관절구동기 설계

3.1 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 기계니컬셀을 이용한 방식과 마그네틱 커플러를 이용한 방법이다. 하지만 기계니컬 셀은 마찰에 의한 부하 및 그에 따른 수명이 있다는 단점이 있고, 마그네틱 커플러는 고토크에 적용하기 힘든 단점이 있다.

본 연구에서는 매니플레이터용으로 직결타입의 관절구동기로 설계하였다. Figure 4는 구동기용 실린더의 3D 모델링이고 Figure 5는 이를 바탕으로 실제 설계 제작한 것이다. 고토크 저회전의 특성을 가지며 회전축 수밀구조를 위해서 2중 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 얇은 모터를 사용하여 전체 면적과 부피를 최소화하는 구조로 설계 및 제작하였다.

2절에서 선정된 모터 Figure 6을 기반으로 20기압의 수압에 대한 수밀을 위해 오링 및 2중 오일자켓을 적용하여 관절-1, 관절-3의 구동기를 설계하였다. 구동기의 사양은 용량 90W, 토크 49.4Nm, 정지토크 453Nm, 회전수 16.4rpm, 중량 3.4kg, 내압 20기압, 효율 65% 이다.

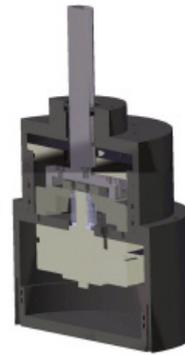


Figure 4: 3D design of cross section of joint actuator.



Figure 5: Overall picture of joint actuator



Figure 6: Motor in the joint actuator

관절구동기의 구동을 위하여 관절구동기 내부에 장착할 수 있는 소형BLDC모터 드라이버를 Figure 7과 같이 직접 제작하였다.

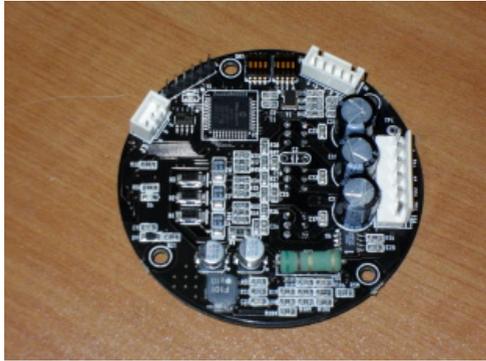


Figure 7: Picture of developed driver

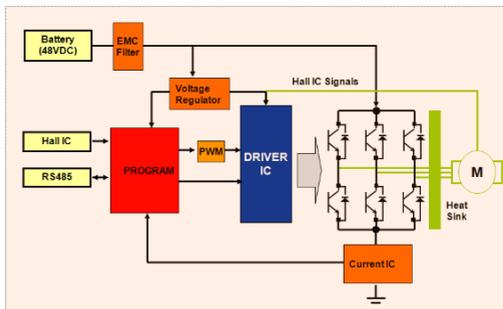


Figure 8: Block diagram of motor driver

3.2 관절구동기 육상시험

개발한 관절구동기의 육상성능시험을 하였다. 시험 조건은 입력 48V 최대전류 2.5A 최대부하 40N.m로 시험하였고 그 결과는 Figure 9(a) 및 (b)와 같다. 여기서 x축은 토크성분이다.

효율은 토크가 0일 때부터 증가하다가 23Nm부분에서 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 토크의 약 4배정도를 낼 수 있다.

4. 매니플레이터 개발

본 연구에서는 전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 관절구동기를 이용하여 Figure 10의 새로운 형태의 해중



Figure 9(a): Underwater manipulator



Figure 9(b): Underwater manipulator

매니플레이터를 개발하였다. 각 관절구동기의 무게는 하부 3축 요-요-피치는 각각 3.3kg 및 1.8kg,의 무게를 가지며 상부 피치-롤-그리퍼는 각각 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 최대 20kg으로 설계되어 있다. Figure 11은 수중에서 가반하중 20kg을 들고 모션을 성공적으로 테스트하는 모습이다.



Figure 10: Underwater manipulator



Figure 11: Underwater manipulator

4. 결 론

본 연구에서는 전기모터 기반의 해중 매니플레이터의 구조 설계와 이를 구동하기 위한 하부 관절 구동기를 개발하였다. 수중에서의 부하로 인하여 관절에 걸리는 부하토크에 대한 해석을 하였다. 2중 오일 구조를 적용한 새로운 회전축계 방수구조인 관절구동기의 방수테스트를 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 4배 정도를 낼 수 있음을 확인하였다. 또한 개발한 25kg의 수중 매니플레이터가 육상 및 수중 실험을 통해 고중량의 물체를 성공적으로 이송함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 소관 지역MT특성화사업의 연구비 지원(해양산업고도화를 위한 핵심 해양장비 개발 - 전기모터 기반의 해중 매니플레이터 및 추진시스템 개발)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] McLain, T. W., Rock, S. M., and Lee, M. J., "Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System," *Journal of Autonomous Robots* 3, pp. 213-222, 1996.
- [2] K. N. Leabourne, and S. M., Rock, "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] S. Yamada, and S., Sagara, "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] M., Ishitsuka, S. Sagara, and K. Ishii, "Dynamics analysis and RAC of an AUV equipped with a manipulator", *Proc .of Underwater Technology*, pp.213-232, 2004.
- [5] M., Ishitsuka, and K. Ishii, "Development of an underwater manipulator mounted for an AUV", *Proc.of Oceans*, 2005.

저 자 소 개



최형식(崔炯植)

1989년 5월 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, 1993년 2월 North Carolina State University 기계 및 항공 공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



홍성울(洪性栗)

1984년생, 2009년 한국해양대학교 기계시스템 공학과 졸업(학사), 현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 재학(석사)



전지광(田智廣)

1983년생, 2009년 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업(학사), 2008. 3~현재 동대학원 기계공학과 재학(석사)

**박한일(朴漢一)**

1957년생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(학사), 1988년 서울대학교 대학원 해양학과 졸업(석사), 1992년 런던대학 대학원 조선해양공학과 졸업(박사), 1987. 9~현재 한국해양대학교 해양공학과 교수