

〈論 文〉

수중작업 로봇의 동특성 및 제어에 관한 연구

강이석* · 송정섭* · 김재희** · 조형석***

(1990년 9월 5일 접수)

Dynamic Characteristics and Control of Submerged Working Robot Manipulator

E.S. Kang, J.S. Song, J. H. Kim and H.S. Cho

Key Words : Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), Dynamic Equation(운동방정식), Submerged Working(수중작업), Computed Torque Method(토크계산방법), Added Mass(부가질량), Drag Force(항력), Buoyant Force(부력)

Abstract

Dynamic characteristics and control of a submerged working robot manipulator have been investigated for articulated type robot manipulator with three revolute joints. A dynamic equation of the manipulator has been derived. The dynamic equation includes not only mass matrix, centrifugal and Coriolis terms and gravity terms but also added mass, buoyant force and drag force terms, which are important terms for underwater motion description. A series of simulations using computed torque method have been performed for the cases of straight and circular trajectory motion controls. The results of this study show that the dynamic characteristics of the submerged working robot manipulator are very different from that of the manipulator which works in air. The influences of added mass, buoyant force and drag force terms to the total required torques have been discussed as distribution ratios to the total required torques.

1. 서 론

생산 공정에서의 원가절감, 품질 향상, 생산성 향상, 다품종 소량생산을 위한 생산 시스템의 유연성 부여등의 목적과 사람이 접근하기 어려운 환경 내의 작업등의 목적으로 로봇 매니플레이터의 활용 범위가 급속히 넓어지고 있어 이를 뒷받침할 수 있는 성능 향상이 요구되고 있다.

최근에 컴퓨터 용량의 대형화와 연산시간의 단축에 따라 컴퓨터를 이용하여 로봇 매니플레이터의

구조 및 운동을 최적화 하려는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

로봇시스템이 가지는 비선형성은 로봇의 정확한 모델링 및 이를 이용한 적절한 제어 기법의 적용을 어렵게 하며 제어알고리즘의 수행시간 또한 길어져 실시간 제어의 문제점으로 대두되므로, 로봇 매니플레이터의 작동이 빨라지고 복잡하여짐에 따라 다관절 링크의 보다 정확한 동역학적 모델링에 대한 연구가 요구되고 있다.

로봇 매니플레이터의 운동 및 제어에 관한 연구로는 1987년에 Khosla⁽²⁾ 등이 토크계산방법(Computed Torque Method)를 적용한 실시간 제어제를 연구했으며, 로봇 매니플레이터의 운동에 관한 최적제어에 관한 연구로는 Kahn과 Roth⁽³⁾,

* 정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

Saridis⁽⁴⁾ 등이 비선형인 로봇 매니플레이터의 운동에서 작업시간 및 구동 토크를 최소화 하는 연구를 하였다.

국내에서는 1986년 조선휘등⁽⁵⁾이 최적 조인트 운동에 대한 해를 Rayleigh-Ritz의 방법으로 얻었으며, 1987년에 박영필등⁽⁶⁾은 유연한 로봇 매니플레이터에 대해 제어모우드와 잔류모우드로 나누어 제어모우드 부에 대한 최적 제어이론을 도입하여 귀환 제수를 구하는 연구를 하였으며, 1988년 조선휘등⁽⁷⁾은 로봇 매니플레이터 각 링크의 길이를 최적화하는 연구를 한 바 있다. 1988년 정완관과 조형석⁽⁸⁾은 강한 비선형성 및 각 관절 사이의 동적 간섭특성으로 대표되는 로봇의 복잡한 동특성을 완화하기 위하여 발란싱 기구를 도입하여 로봇의 동특성을 개선하여 단순하면서도 좋은 성능을 낼 수 있는 제어방법을 제시하였다.

수중작업 로봇 매니플레이터에 대해서는 원격무인잠수정 (remotely operated vehicle)의 한 부분으로써 연구가 되고있으나 수중작업 로봇 매니플레이터 동특성에 관한 연구는 미미한 실정이다^(15,16).

핵연료 수송 저장 처분 폐기작업이나 원자로 용기내에서의 유지 보수 작업 및 기타 유독성 액체내에서의 작업 등은 수중에서 로봇 매니플레이터를 사용하여야 하는 특수한 작업으로서 이러한 용도의 매니플레이터의 제어에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 로봇 매니플레이터가 수중에서 운동함에 따라 발생하는 부가질량(added mass)과 항력(drag force) 그리고 부력(buoyant force)을 고려하여 동특성해석을 하였으며, 부가된 각항들의 영향을 알아보기 위하여 로봇 매니플레이터 동역학식의 일부를 모델기준 부분에 사용한 제어알고리즘인 토크 계산 방법을 사용하여 시뮬레이션하여 고찰하였다.

2. 모델링

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 어깨부(shoulder), 상박부(upper arm), 하박부(lower arm)의 3개의 원통형 링크로 이루어진 3개의 회전 조인트를 갖는 하향관절형태(shoulder down articulated type) 로봇 매니플레이터의 수중운동에 관하여 기구학적 및 동력학적인 해석을 하여, 수중 작업 로봇 매니플레이터의 운동방정식을 유도하고자 한다.

동특성의 해석을 위하여, 각 링크는 강성체로 가

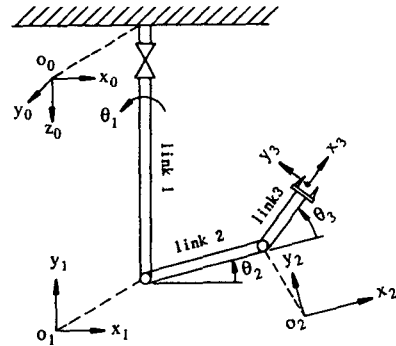


Fig. 1 Link coordinate systems for the robot manipulator

정하며, 각 링크의 질량 중심은 링크의 도심에 위치한다고 가정하였다.

2.1 기구학적 해석

기구학은 직교좌표 공간에서의 로봇 매니플레이터의 말단효과장치(end-effector)의 위치와 자세, 속도, 가속도 등과 관절공간에서의 변수들 사이의 관계를 다루는 분야로서 정기구학과 역기구학이 있다.

링크의 좌표계는 Fig. 1과 같으며, Denavit-Hartenberg 표시법에 의한 링크 상호간의 관계를 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 링크인자를 사용하여 좌표변환행렬 A_i^0 , A_2^1 , A_3^2 및 A_3^0 를 얻을 수 있다⁽¹⁰⁾.

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

Table 1 Link parameters using Denavit-Hartenberg notation

Link No.	α_i	a_i	δ_i	θ_i
1	-90°	0	ℓ_0	θ_1
2	0	ℓ_1	0	θ_2
3	0	ℓ_2	0	θ_3

$$A_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & -S_1 & l_1 C_1 C_2 + l_2 C_1 C_{23} \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & C_1 & l_1 S_1 C_2 + l_2 S_1 C_{23} \\ -S_{23} & -C_{23} & 0 & l_0 - l_1 S_2 + l_2 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & l \end{bmatrix} \quad (2)$$

관절공간에서의 속도를 직교좌표 공간의 속도로서 사상(mapping) 하여주는 자코비안 행렬, J 는 다음과 같다.

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 C_2 - l_2 S_1 C_{23} & -l_1 C_1 S_2 - l_2 C_1 S_{23} \\ l_1 C_1 C_2 - l_2 C_1 C_{23} & -l_1 S_1 S_2 - l_2 S_1 S_{23} \\ 0 & -l_1 C_2 - l_2 C_{23} \\ -l_2 C_1 S_{23} \\ -l_2 S_1 S_{23} \\ -l_2 C_{23} \end{bmatrix} \quad (3)$$

자코비안 행렬 J 와 경계조건 $\theta_1=0$, $\theta_2=0$ 일 때 $Z=l_0$ 에서 기구학 방정식(kinematic equatin)을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P = [P_x, P_y, P_z]^T$$

$$P_x = l_1 C_1 C_2 + l_2 C_1 C_{23}$$

$$P_y = l_1 S_1 C_2 + l_2 S_1 C_{23}$$

$$P_z = l_0 - l_1 S_2 - l_2 S_{23} \quad (4)$$

여기서 P 는 말단효과장치(end-effector)의 위치 벡터이다.

2.2 역기구학 해석

로봇 매니퓰레이터의 역기구학은 작업공간에서의 말단효과장치 또는 공구의 위치와 방향이 주어진 경우 이 목표를 이루기 위한 관절각의 조합을 해결하는 문제로서 해의 존재, 다수해를 고려하여야 하며 해법에 제시된 방법은 폐형식의 해(closed form solution)와 수치 해의 2개의 군으로 나뉜다⁽¹¹⁾.

수치해의 경우 반복 계산의 특성을 갖기 때문에 폐형식의 해에 비교해서 일반적으로 매우 느리며 해로서의 수렴을 보장하기 어려운 관계로 거의 사용하지 않고 있다.

폐형식의 해를 구하는 방법은 대수적인 방법과 기하학적 방법이 있는데 본 연구에서는 비교적 간단한 형태의 로봇 매니퓰레이터에 적합한 기하학적 접근 방법을 사용하였다.

Fig. 1에서 관절 1의 관절각 θ_1 은

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (5)$$

또한 관절 2 및 관절 3에 대한 각각의 관절각은

$$C = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (l_0 - P_z)^2} \quad (6)$$

라 하면,

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{l_0 - P_z}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{l_1^2 + C^2 - l_2^2}{2l_1 C} \right] \quad (7)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[\frac{l_1^2 + C^2 - l_2^2}{2l_1 C} \right] + \cos^{-1} \left[\frac{l_2^2 + C^2 - l_1^2}{2l_2 C} \right] \quad (8)$$

이다.

2.3 운동방정식

로봇 매니퓰레이터의 동력학적 문제는 두가지로 나눌 수 있는데, 첫번째는 말단효과장치의 제속과 속도를 알고 관절 토크 벡터 τ 를 계산해 내는 문제이고, 두번째 문제는 관절 토크를 부가한 상태에서 매니퓰레이터가 어떻게 운동하는가를 예측하는 것으로 토크벡터 τ 가 주어지면 이로 인하여 나타나는 매니퓰레이터의 운동 즉, θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ 을 계산하는 것이다^(10,11).

관절 운동으로부터 관절 토크를 계산하기 위해 사용한 Luh-Walker Paul 알고리즘은 링크 1에서 링크 3까지 하방향으로 반복적으로 속도와 가속도를 계산하는 기구학 계산 부분과 링크에 작용하는 힘과 토크, 그리고 관절 엑츄에이터에 필요한 토크가 링크 3에서 링크 1까지 상방향으로 계산되는 동력학적 계산 부분의 두부분으로 구성된다.

뉴턴의 운동방정식과 오일러방정식

$$F = m \dot{V}_c \quad (9)$$

$$N = {}^c I \dot{\omega} + \omega \times {}^c I \omega \quad (10)$$

을 이용하여, 각 링크의 관절토크를 계산한다.

$$f_{i-1,i} = f_{i,i} - m_i g + m_i \dot{V}_{ci} \quad (11)$$

$$N_{i-1,i} = N_{i,i+1} - \dot{r}_{i,ci} \times f_{i,i+1} + r_{i-1,ci} \times f_{i-1,i} + I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \quad (12)$$

여기서 $\omega_i \times (I_i \omega_i)$ 는 자이로 토크(gyroscopic torque)를 나타낸다. 위와 같이 구한 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식은 다음과 같은 형태로 나타내진다.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (13)$$

여기서 $M(\theta)$ 는 매니퓰레이터의 3×3 질량행렬, $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력과 코리올리항의 3×1 벡터, $G(\theta)$ 는 중력의 3×1 벡터이다.

2.4 수중작업 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식

로봇 매니퓰레이터가 밀도 ρ 인 유체내에서 Fig.

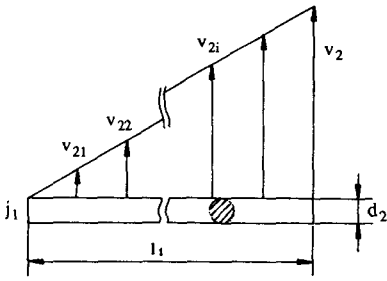


Fig. 2 Velocity distribution of link 2

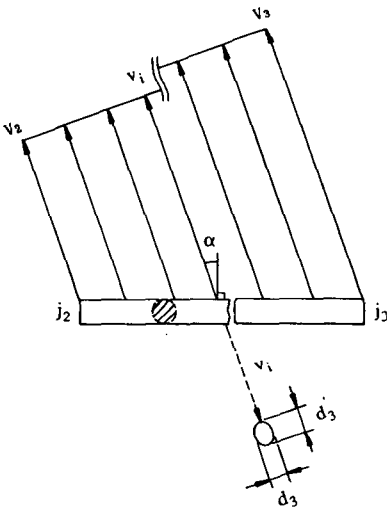


Fig. 3 Velocity distribution of link 3

2와 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 운동할 때 유체는 움직이는 각링크의 질량을 m_i 에서 $\bar{m}_i = m_i + m_i'$ 의 가상질량(virtual mass)으로 증가시키며, 이때 추가되는 부가질량(added mass) m_i' 은 각 링크의 운동방향을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$m_2' = (\pi/4) d_2^2 \rho l_2$$

$$m_3' = (\pi/4) d_3^2 \rho l_3 \cos \alpha \quad (14)$$

따라서 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식 식 (13)은

$$\tau = \bar{M}(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (15)$$

가 되며, $\bar{M}(\theta)$ 는 부가질량을 고려한 질량행렬이다.

또한 로봇 매니퓰레이터가 밀도 ρ 인 유체내에서 운동할 때 각 링크는 링크 체적에 해당하는 유체 무게 만큼의 부력, 즉 $\rho(\pi/4) d_i^2 l_i g$ 을 연직 상방향으로 받게되어 중력과 부력을 동시에 고려한 각 링

크가 받는 힘은,

$$m_i^* g = (m_i - \rho \frac{\pi}{4} d_i^2 l_i) g \quad (16)$$

이 된다.

따라서 부력이 고려된 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식은

$$\tau = \bar{M}(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G^*(\theta) \quad (17)$$

이 되며, 여기에서 $G^*(\theta)$ 는 식 (15)에서 중력항 $G(\theta)$ 의 $m_i g$ 를 $m_i^* g$ 로 대체한 부력이 고려된 중력항 벡터이다.

또한 수중작업에서 고려하여야 할 사항으로 항력(drag force)이 있다. 각각의 링크 운동에 의한 유체유동의 상호간섭은 없다고 가정하고 유체의 용기는 충분히 큰 것으로 하면 링크 2에서 항력 D_{f2} 는

$$D_{f2} = C_D (1/2) \rho V^2 d_2 l_2 \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서 항력계수 C_D 는 Tritton이 제안한⁽¹³⁾

$$C_D = 1 + 10 Re^{-2/3}, \quad 1 < Re < 2 \times 10^5 \quad (19)$$

을 사용하고, 여기서 레이놀즈수, Re 는

$$Re = \frac{|V| \cdot d_2}{\nu} \quad (20)$$

이다. 링크 2에서의 속도분포는 Fig. 2에 표시하였다. 링크 3에서의 항력 D_{f3} 는

$$D_{f3} = C_D (1/2) \rho V^2 d_3 l_2 \quad (21)$$

이다. 링크 3의 운동에 따른 속도분포는 Fig. 3과 같은데 그림에서와 같이 유체유동 방향에 대한 링크 3의 단면은 타원이 되어 항력계수 C_D 는 다음과 같은 타원에 대한 항력계수식을 사용한다⁽¹²⁾.

$$C_D = C_{fturb} (4 + 2(d_3'/d_3) + 120(d_3'/d_3)^2) \quad (22)$$

식 (22)에서 표면마찰항력계수(skin friction drag coefficient) C_{fturb} 는 Prandtl과 Karman에 의해 제안된⁽¹²⁾

$$C_{fturb} = 0.074/Re^{1/5} \quad (Re \leq 10^6)$$

$$C_{fturb} = 0.455/(\log Re)^{2.58} \quad (10^6 < Re < 10^9) \quad (23)$$

를 사용하고, 링크 3의 속도 방향 단면인 타원의 장축직경 d_3' 는 다음과 같다.

$$d_3' = d_3 / \cos \alpha \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left[\frac{V_i r_{2,3}}{|V_i| |r_{2,3}|} \right] \quad (25)$$

각 링크에서의 항력에 의한 모멘트 D_{m_i} 는

$$D_{m_i} = D_{m_{i+1}} - r_{i,i+1} \times D_{f_{i+1}} + r_{i-1,i} \times D_{f_i} \quad (26)$$

가 되며 D_{m_i} 는 θ 와 $\dot{\theta}$ 의 함수가 된다. 따라서 뉴턴-오일러 식에 의한 로봇 매니퓰레이터의 동력학 식 (13)을 부가질량과 부력, 항력이 고려된 수중작

업 로봇 매니플레이터에 대한 동력학식으로 표현하면,

$$\tau = \hat{M}(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G^*(\theta) + D(\theta, \dot{\theta}) \quad (27)$$

가 되며 추가된 $D(\theta, \dot{\theta})$ 는 항력항의 벡터이다.

3. 제어알고리즘

수중에서 부가질량과 부력 그리고 항력의 영향을 검토하기 위하여 토크계산방법(computed torque method)을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

식 (27)의 동특성을 갖는 로봇 매니플레이터 시스템을 제어하기위해 다음과 같이 분할제어방법을 사용하였다⁽¹¹⁾.

관절입력토크벡터 τ 는

$$\tau = \alpha r' + \beta \quad (28)$$

이며, α 와 β 는 부가질량, 부력, 항력이 고려된

$$\alpha = \hat{M}(\theta) \quad (29)$$

$$\beta = V(\theta, \dot{\theta}) + G^*(\theta) + D(\theta, \dot{\theta})$$

이다. 서보(servo) 법칙은

$$r' = \dot{\theta}_d + K_d \dot{E} + K_p E \quad (30)$$

이며, 오차신호 E 와 \dot{E} 는

$$E = \theta_d - \theta \quad (31)$$

$$\dot{E} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$$

이다. 이와같은 식 (27)의 동특성을 갖는 수중작업 로봇 매니플레이터의 토크계산방법의 제어시스템을 Fig. 4에 나타내었다.

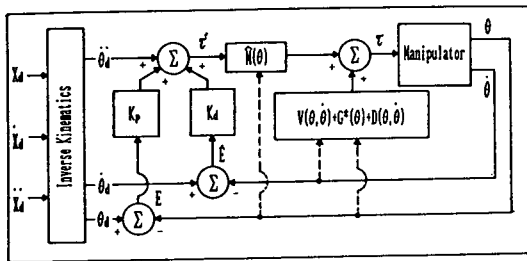


Fig. 4 Control system using the computed torque method

4. 시뮬레이션

4.1 개요

먼저 식 (27)의 로봇 매니플레이터의 동특성을 사용하여 공기중에서와 수중에서의 각각의 작업에

Table 2 Link parameters for simulation

Link No.	D_0 (m)	D_i (m)	Length (m)	Mass (kg)	Inertia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
1	0.200	0.153	2.0	70.365	0.558
2	0.150	0.115	1.0	19.668	6.644
3	0.100	0.077	0.5	4.316	0.728

대하여 요구되는 각관절의 구동토크를 구하였으며, 전체 구동토크에서 관성항, 속도항, 중력항이 차지하는 백분율을 구하여 각항이 전체 구동토크에 주는 영향에 대하여 검토하였다. 다음에 수중작업에 따라 발생하는 부가질량, 부력, 항력이 로봇 매니플레이터의 제어에 미치는 영향을 검토하기 위하여 토크계산 방법을 사용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션에 사용한 로봇 매니플레이터의 각각의 매개변수들(parameters)은 한국 원자력 연구소의 수동조작 동력 로봇 매니플레이터를 기본 모델로 하여 단순화하여 정하였고, 각 링크의 사양은 Table 2와 같다. 그리고 로봇이 잠겨있는 유체는 물로 가정하여 밀도 ρ 는 1000kg/m^3 , 동점성 계수(kinematic viscosity) ν 는 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 하였다.

4.2 시뮬레이션 방법

첫번째로는 초기위치(X_s, Y_s, Z_s)와 최종위치(X_f, Y_f, Z_f)를 주고 말단효과장치의 점선속도를 Fig. 5(a)와 같은 사다리꼴 속도 운동을 하도록 하고 작업 완료시간을 1초로 하면, 말단효과장치의 요구 최대 운동속도는 0.87m/sec가 되며, 이 경우는 PTP(point to point) 제어에 대해 시뮬레이션 하였다. 두번째로는 Fig. 5(a)의 사다리꼴 속도 분포를 갖도록 하면서 작업 완료시간을 2초로 하고, 점 C[0.8 0.3 1.2]을 원점으로하는 지름이 0.2m 인 X축에 수직인 원형 경로의 CP(continuous path)제어에 대하여, 수중작업 로봇 매니플레이터의 동특성에서 나타나는 부가질량, 부력, 항력을 식 (13)에서와 같이 고려되지 않은 경우와 식 (27)에서와 같이 고려한 경우의 각각에 대하여 토크계산방법의 제어 시뮬레이션을 통하여 비교하여 보았다. 토크계산방법의 제어입력 τ 에 대하여 식 (27)의 수중작업 로봇 매니플레이터의 동특성으로부터

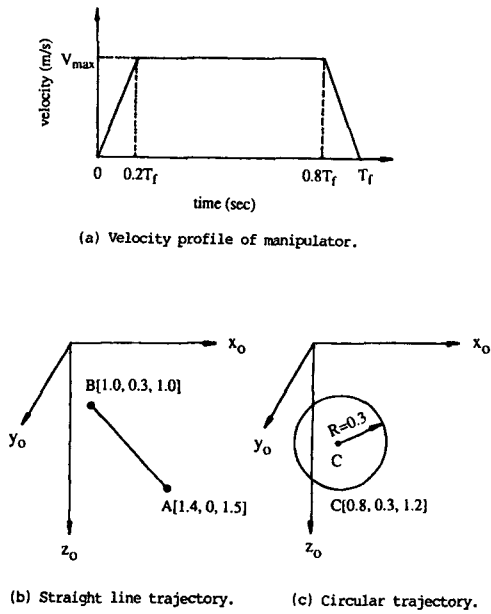


Fig. 5 Straight and circular trajectory planning

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta) [\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G^*(\theta) - D(\theta, \dot{\theta})] \quad (32)$$

을 Runge-Kutta 4차 방법을 사용하여 θ 와 $\dot{\theta}$ 의 수치해를 구하였다.

4.3 결과 및 고찰

수중에서 Fig. 5(a)와 같은 사다리꼴 속도선도로 Fig. 5(b)와 (c)의 직선경로와 원형경로를 운동할 때 각관절에 필요한 구동 토크와 각 항들의 크기를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 먼저 직선운동에서 전체 구동 토크에 대한 각항의 기여도는 Table 3에서 보인 바와 같이 관성항(inertia term)이 74.5%, 속도항(centrifugal and Coriolis term)이 3.5%를 차지하며, 중력항(gravity term)은 연직하방향의 중력과 연직상방향의 부력으로 나눌 수 있는데, 전자의 중력이 전체 구동토크의 192.4%이고, 후자의 부력이 173.6%로써 실제 중력항은 18.8%가 된다. 또한, 항력항이 전체 구동토크의 3.1%를 차지한다. 똑같은 조건으로 공기중에서 같은 직선경로를 운동할 때에는 관성항이 22.1%, 속도항이 1.4%, 그리고 중력항이 76.4%의 비율로 분포된다. 따라서 수중운동에서는 부력의 영향으로 중력항의 비율이 특히 감소하고, 관성항이 상대적으로 증가하며, 항력항이 속도항과 거의 같은 비중

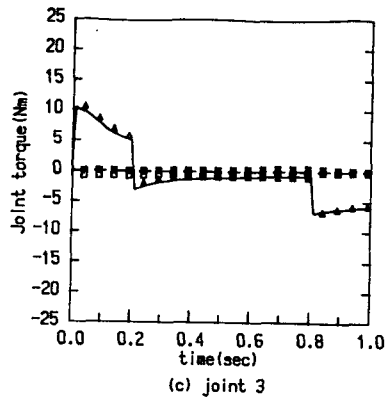
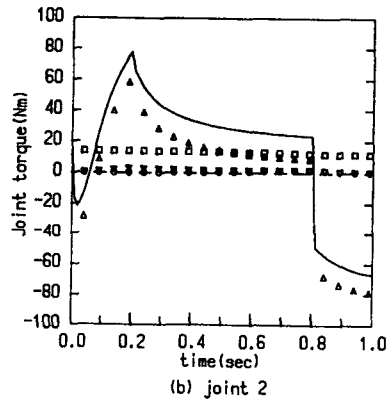
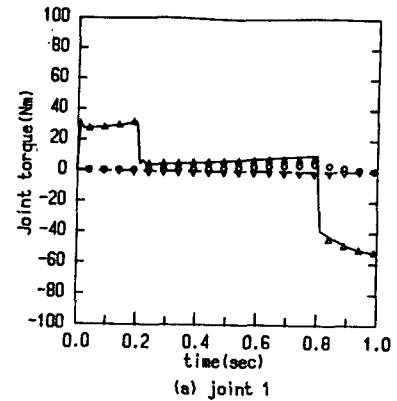


Fig. 6 Required joint torque of the submerged robot manipulator for the case of straight line trajectory

을 차지함을 알 수 있다.

원형경로의 운동에서 전체 구동토크의 분포는 Table 4에서와 같이 관성항이 80.9%, 속도항이

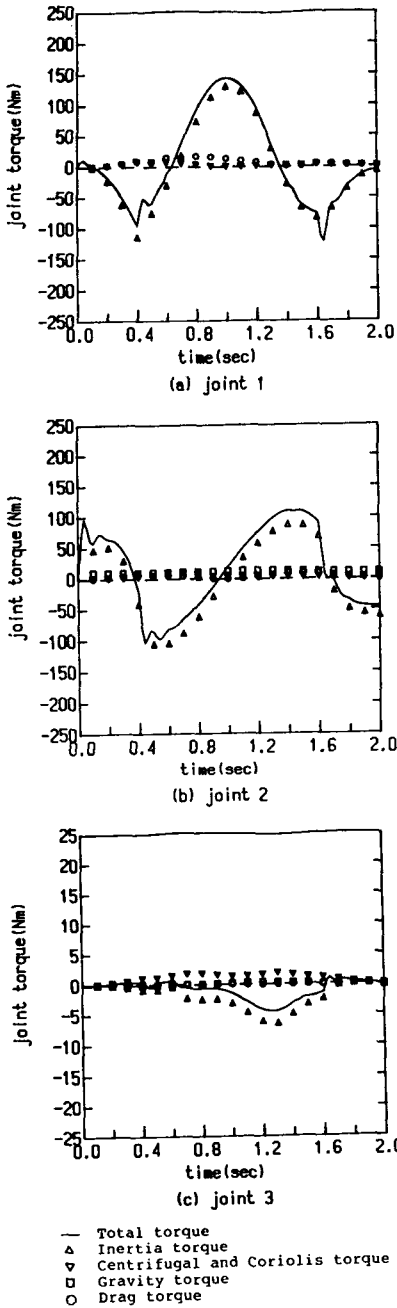


Fig. 7 Required joint torque of the submerged robot manipulator for the case of circular trajectory

4.4%를 차지하고, 중력항은 앞에서와 마찬가지로 중력이 전체 구동토크의 78.1%이며 부력이 전체 구동토크의 70.4%로써 실제 중력항은 7.7%를 차지한다. 그리고 항력항은 전체 구동토크의 7%로

Table 3 Distribution ratio of each term to total torque in straight trajectory

In air		Underwater	
<i>M</i>	22.2%	<i>M</i>	74.5%
<i>V</i>	1.4%	<i>V</i>	3.6%
<i>G</i>	76.4%	<i>G*</i>	18.8%
		<i>D</i>	3.1%
Total	100.0%	Total	100.0%

Table 4 Distribution ratio of each term to total torque in circular trajectory

In air		Underwater	
<i>M</i>	41.3%	<i>M</i>	80.9%
<i>V</i>	3.1%	<i>V</i>	4.4%
<i>G</i>	55.6%	<i>G*</i>	7.7%
		<i>D</i>	7.0%
Total	100.0%	Total	100.0%

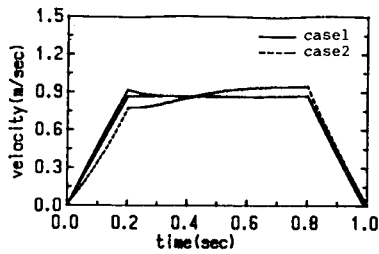
나타났다.

원형경로의 공기중 운동에서는 관성항이 41.2%, 속도항이 3.1%, 중력항이 55.6%를 차지하였다. 수중작업의 원형경로의 운동에서도 Table 3 및 Fig. 6에서 검토한 직선경로 운동과 마찬가지로 부력의 영향으로 중력항의 비율이 감소하며, 관성항의 비율이 상대적으로 커지고 항력항이 속도항과 거의 같은 비중을 차지함을 볼 수 있다.

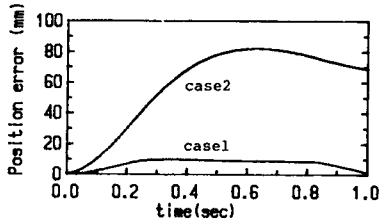
토크계산방법을 사용한 시뮬레이션에서 제어이득 값은 임계감쇠의 상태를 얻기위해 $K_p = \text{diag}[100 \ 81 \ 64]$, $K_d = \text{diag}[20 \ 18 \ 16]$ 으로 선정하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 토크계산 방법에 의해 제어되는 수중작업 로봇 매니플레이터의 직선과 원형경로의 운동에 대해 말단효과장치의 속도와 위치오차를 부가질량, 부력, 항력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)는 말단효과장치의 속도를 나타낸 것으로 부가질량, 부력, 항력이 고려된 시스템의 시뮬레이션 결과인 case 1은 요구속도의 불연속점 부근에서만 적은 오차를 보이나, 수중 작업환경이 고려되지 않은 시스템 즉 공기중에서의 동력학식을 사용하여 수중에서 운동시켰을 때의 시뮬레이션 결과



(a) Tangential velocity profile



(b) Tracking error

case 1: The result of simulation using derived dynamic equation which includes added mass, drag force and buoyant force terms.

case 2: The result of simulation using dynamic equation which is derived for motion in air and does not include added mass, drag force and buoyant force terms.

Fig. 8 Tangential velocity and position error for the case of straight line trajectory

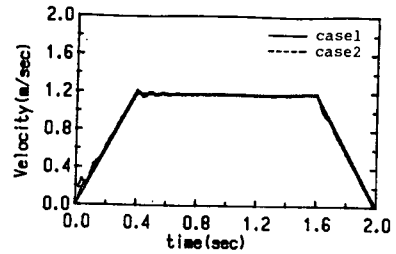
인 case 2에서는 모델기준부분의 오차로 인해 전체적으로 큰 속도오차를 갖는 운동을 하고 있음을 보이고 있다. 따라서 주어진 경로와 말단효과장치의 위치 오차를 나타낸 Fig. 8(b)에서 case 2은 case 1에 비해 약 8배 이상의 위치오차를 보이고 있어 원하는 경로를 크게 이탈함을 알 수 있다.

원형경로에 대한 말단효과장치의 속도 및 위치오차는 직선경로와 비슷한 경향을 보이고 있으며 이때의 case 2는 case 1에 비해 약 2.5배의 위치오차를 보이고 있다.

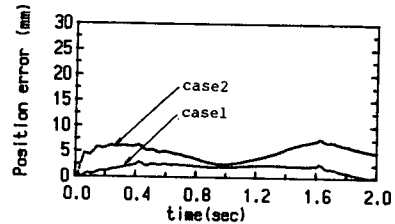
5. 결 론

수중작업 로봇 매니플레이터의 동특성을 로봇 매니플레이터의 수중운동에 의해 발생하는 부가질량, 부력, 항력을 고려하여 해석을 하였고, 얻어진 운동 방정식과 토크계산 방법의 제어알고리즘을 사용한 시뮬레이션을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 수중작업 로봇 매니플레이터에서는 부가질량의 영향이 크고, 부력의 영향으로 중력항이 크게 감소하며, 속도항에 비해 무시할 수 없는 크기의



(a) Tangential velocity profile



(b) Tracking error

case 1: The result of simulation using derived dynamic equation which includes added mass, drag force and buoyant force terms.

case 2: The result of simulation using dynamic equation which is derived for motion in air and does not include added mass, drag force and buoyant force terms.

Fig. 9 Tangential velocity and position error for the case of circular trajectory

항력을 받게되어, 수중운동에서는 부가질량, 부력, 항력을 필히 고려하여야 한다.

(2) 토크계산방법(computed torque method)을 수중작업용 로봇 매니플레이터에 적용할 경우 부가질량, 부력과 항력이 고려되지 않은 공기중에서의 운동방정식을 사용하여 수중에서 작업시키면, 모델기준 부분의 오차로 인해 큰 위치오차가 발생되며 원하는 경로를 따라가지 못한다.

따라서 수중작업 로봇 매니플레이터의 성능을 평가하거나 제어를 설계할 때에는 반드시 부가질량과 부력 그리고 항력을 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 1989년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Luh, J.Y.S., 1983, "Conventional Controller Design

- for Industrial Robots- a Tutorial", IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. SMC-13, No. 3, pp. 298~316.
- (2) Khosla, P.K. and Kanade, T., 1987, "Real-Time Implementation and Evaluation of Computed Torque Scheme", CMU Memo, CMU-RI-87-6.
- (3) Kahn, M.E. and Roth, B., 1971, "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains", ASME J. of Dyn., Sys., Meas., and Control, Vol. 93, pp. 164~172.
- (4) Saridis, G.N. and Lee, C.S.G., 1979, "An Approximation Theory of Optimal Control for Trainable Manipulators", IEEE Sys., Man, and Cyber., Vol. SMC-9, No. 3, pp. 152~159.
- (5) 조선취, 김영일, 임홍재, 임태홍, 1986, "로봇 팔의 운동해석에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제5호, pp. 611~617.
- (6) 하영균, 김승호, 이상조, 박영필, 1987, "유연한 단일링크 로봇 조작기의 최적귀환제어", 대한기계학회논문집, 제11권, 제6호, pp. 923~934.
- (7) 조선취, 문홍기, 1988, "로봇 매니플레이터의 치수 최적화", 대한기계학회논문집, 제12권, 제4호, pp. 730~737.
- (8) Chung, Wan Kyun, 1987, "On the Dynamic Characteristics and Control of Balanced Robotic Manipulators", Ph. D Dissertation, Dept. of Production Eng., KAIST.
- (9) Chung, W.K. and Cho, H.S., 1988, "Sensitivity Analysis of Balanced Robotic Manipulators", Robotica, Vol. 6, pp. 53~62.
- (10) Asada, H. and Slotines, J.J.E., 1986, Robot Analysis and Control, John Wiley and Sons.
- (11) John J. Craig, 1989, Introduction to Robotics, Mechanics & Control 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing Company.
- (12) Sighard F. Hoerner, 1964, Fluid-Dynamic Drag.
- (13) Frank M. White, 1974, Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill.
- (14) Gilbert, E.G. and Ha, I.J., 1984, "An Approach to Nonlinear Feedback Control with Applications to Robotics", IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. SMC-14, No. 6, pp. 879~884.
- (15) 이판목, 1989, 원격무인 잠수정의 자기동조 위치제어", 한국해양공학회지, 제3권 제2호, pp. 551~558.
- (16) Shirasaki, Yuichi Acakawa, K., Kojima, J., Ejiri, Y. and Yamamoto, S., 1988, "Deep Sea Remotely Operated Vehicle "MARCAS-2500" for Submarine Cable Maintenance and Repair Works", Techno-Ocean, Vol. 1.