

수중운동체의 자동 수심조절 장치 설계

정연태, 이영섭
국방과학연구소

A Design of Auto-Depth Controller for Underwater Vehicle

Yeoun-Tae Jung, Young-Sub Lee
Agency for Defence Development

Abstract

Generally the method of depth controlling is classified into buoyancy control and thrust control. In this study, we employed thrust control system. And mathematical modeling and computer simulation are performed in order to design auto depth control system for underwater vehicle. Consequently, the specifications of components are determined, and the performance of system is analyzed.

I. 서론

일반적으로 수중운동체의 수심조절 방법에는 부력조절형과 추력조절형이 있다. 부력조절형은 운동체가 대형인 경우 해수를 이용하여 중량을 조절하는 방법과 소형인 경우 부유백 등을 이용하여 부피를 조절하는 방법이 있고, 추력조절형은 주로 추진 프로펠러의 회전수 조절을 통하여 수심을 조절한다.

본 연구에서는 수심조절부를 프로펠러 추진방식으로 채택하였고, 수심조절부의 구성을 위하여 시스템을 이루고 있는 각 구성부품들의 사양도출 작업과 도출된 사양을 이용하여 각종성능을 미리 예측하였고, 수심조절을 위한 제어기를 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 개발될 시스템의 성능을 검증하였다. 그리고 제한된 체적을 가지고 있는 본 시스템이 원하는 성능을 내기 위하여 내부의 구성품들은 시스템 구동시 소요되는 전기적인 에너지의 소모를 최소화시킬 수 있도록 최적의 구성부품 선정에도 주안점을 두었다.

II. 시스템 모델링

추진부 시스템은 내장되어 있는 전지로 부터 전기적인 에너지를 공급받아 모터에 의해 기계적인 회전에너지로 변환되고, 감속기를 포함한 축계와 메커니컬 씰을 거친 동력에 의해 프로펠러가 회전함으로써 수중운동체가 기계적인 운동에너지로 변환되는 장치이다.

1. 추진부 모델링

모터의 전기적인 관계와 기계적인 관계는 모터의 전기적인 시정수($\tau_e = L_a / R_a$)가 기계적인 시정수($\tau_m = J_T / B_T$)에 비하여 작은 값이므로 L_a 를 무시하고 정리하면 식 1과 같다[1,2].

$$I_a = \frac{1}{R_a}(U_e - N K_e \dot{\theta}) \quad (1.a)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{N J_T}(K_t I_a - N B_T \dot{\theta} - F_T - Q) \quad (1.b)$$

여기서 I_a : 아마류어 전류, U_e : 인가전압
 R_a : 아마류어 저항, L_a : 아마류어 인덕턴스
 K_t : 토오크 상수, K_e : 역기전력 상수
 J_T : 동가 관성모멘트, B_T : 동가 점성마찰
 F_T : 동가 쿨롱마찰, Q : 외란 토오크
 N : 기어비, $\dot{\theta}$: 부하속 각속도

또한 부하속의 비틀림 효과를 무시할 수 있으면 모터와 부하의 관계는 식 2와 같이 표현된다.

$$J_T = J_M + J_L / N^2, \quad B_T = B_M + B_L / N^2, \quad F_T = F_M + F_L / N^2 \quad (2)$$

2. 수중운동 모델링

일반적으로 공간상에서 운동하는 물체를 완전히 묘사하기 위하여 지구고정좌표계에 대한 이동좌표계의 x, y, z 방향의 직선성분과 회전성분을 포함한 6자유도(6 degree of freedom) 운동으로 표현한다.

그러나 본연구의 경우에는 무게중심과 부력중심이 대칭축선상에 충분한 거리를 두고 위치한다고 가정을하고, 연직면상의 운동만을 고려하여 식 3 과 같이 1자유도 만으로 운동을 모델링하였다.

$$\ddot{z} = \frac{1}{M + M_a}(-F_d - M g + B + T) \quad (3)$$

여기서 \ddot{z} : 수중운동체 가속도, M : 수중운동체 질량
 M_a : 부가질량, F_d : 항력
 B : 수중운동체 부력, T : 추력

3. 부하 모델링

각 구성부품들은 부하 질량관성모멘트 (moment of inertia of mass), 부하 점성마찰(viscous damping friction), 부하 쿨롱 마찰토크(coulomb friction torque), 부하 토오크(torque)의 형태로서 표현된다. 본 시스템에서는 프로펠러와 몸체가 유체와의 상호작용에 의하여 발생된 유체저항력을 부하에 포함시켰고, 부하에 의한 점성마찰과 관련한 항은 무시하였다.

3.1 부하 질량관성모멘트(J_L)

모터의 축에 부하축, 메커니컬 씰, 프로펠러가 조립되어 있고 이들의 질량관성모멘트는 축계를 원통형 축, 프로펠러를 디스크로 가정하면 식 4와 같이 표현된다.

$$J_L = J_{shaft} + J_{pro.} = \frac{1}{2} m_a r_a^2 + \frac{1}{2} m_p r_p^2 \quad (4)$$

3.2 부하 토크마찰(FL)

본 시스템에서는 면접촉으로서 수밀을 보장하는 부품인 메커니컬 씰 (mechanical seal)에 콜롬 마찰토크가 존재하고, 마찰토크는 특성상 모터 공급토크가 씰의 최대정지마찰 토크(Fs)보다 클 때 비로소 운동마찰 토크(Fd)로서 회전을 하게된다[3].

추진부 개발을 위해 사용될 동적수밀 씰의 타입은 싱글 메커니컬 씰로서 한쪽 접촉면은 스프링으로 지지되어 있고, 다른쪽면은 수압을 받으면서 축회전시 면접촉으로서 수밀을 보장하게되는 구조로서 정지/운동마찰토크는 식 5로 표현된다.

$$F_s = \mu_s (W_s + P A_o) \frac{d_m}{2} \quad (5.a)$$

$$F_d = \mu_d (W_s + P A_o - K P A) \frac{d_m}{2} \quad (5.b)$$

여기서 μ_s : 정지마찰 계수, μ_d : 운동마찰 계수
 W_s : 스프링 하중, P : 수압
 A_o : 수압면적, A : 씰동면적
 d_m : 씰동면 평균경, K : 유체상수

3.3. 프로펠러

프로펠러의 날개요소이론에 의하면 날개의 단면이 입사류에 대하여 어떠한 각도를 이루도록 놓여있는 경우, 그 단면에 작용하는 힘을 입사류에 수직인 성분과 평행한 성분, 즉 양력(lift force)과 항력(drag force)으로 분해할 수 있다[4]. 한편 프로펠러 회전시 발생된 양력은 물체를 끌어올리려는 힘, 추력(thrust force:T)으로 작용하고, 항력은 메커니컬 씰을 통해 몸체에 전달되어 대칭축 방향의 회전모멘트를 발생시킴과 동시에 모터 회전시 부하토크(load torque:Q)로서 작용을 한다.

추력 및 항력은 식 6-8로 나타낼 수 있다[4].

$$T = K_T \rho \dot{\theta}^2 d^4 \quad (6.a)$$

$$Q = K_Q \rho \dot{\theta}^2 d^5 \quad (6.b)$$

$$K_T = T_a + T_b J + T_c J^2 \quad (7.a)$$

$$K_Q = Q_a + Q_b J + Q_c J^2 \quad (7.b)$$

$$J = \frac{\dot{z}}{\dot{\theta} d} \quad (8)$$

여기서 K_T : 추력계수, K_Q : 토크계수
 ρ : 해수밀도, J : 전진비
 d : 프로펠러 직경, $T_a, b, c/Q_a, b, c$: 계수

3.4. 물체 저항

수중에서 운동하는 물체에 작용하는 힘은 부가질량, 항력, 양력이 존재한다. 본 연구에서는 1 자유도 연직면 운동만을 고려하였으므로 양력은 고려하지 않는다.

0 부가질량(Ma)

수중운동체를 장축, 단축의 비가 10인 타원체라 가정하면 부가질량은 식 9 로서 표현된다[5].

$$M_a = m_a \frac{4}{3} \pi \rho \frac{L}{2} \frac{D}{2} \quad (9)$$

여기서 m_a 는 L/D가 10인 0.02로 하였다.

0 항력(Fd)

수중에서 운동하는 물체에 작용하는 항력(drag force:Fd)은 압력항력(pressure drag force:Fp), 마찰항력(friction drag force:Ff), 기저항력(base drag force:Fb)등의 합으로 구성된다.

$$F_d = F_p + F_f + F_b \quad (10)$$

- 압력항력(Fp)

압력에 의한 항력은 식 11로 표현된다[4].

$$F_p = 0.5 C_p \rho \dot{z}^2 D L \quad (11)$$

여기서 압력항력계수 C_p 는 식 12를 이용한다[4].

$$C_p = 0.25 C_{p0} \pi D/L \quad (12)$$

여기서 C_{p0} 는 대칭축방향 압력계수로서 레이놀즈 수 $R_n = \dot{z}D/\nu$ 의 함수이고, Sabersky 등[6]에 주어진 그래프를 이용하여 유도한 식 13을 사용한다[7].

$$C_{p0} = 2.64 \quad (R_n < 10) \quad (13.a)$$

$$C_{p0} = -1.32 \text{Log}_{10} R_n + 3.96 \quad (10 \leq R_n < 100) \quad (13.b)$$

$$C_{p0} = -0.32 \text{Log}_{10} R_n + 1.96 \quad (100 \leq R_n < 2000) \quad (13.c)$$

$$C_{p0} = 0.37 \text{Log}_{10} R_n - 0.32 \quad (2000 \leq R_n < 20000) \quad (13.d)$$

$$C_{p0} = 1.27 \quad (20000 \leq R_n < 200000) \quad (13.e)$$

$$C_{p0} = -2.35 \text{Log}_{10} R_n + 13.73 \quad (200000 \leq R_n < 500000) \quad (13.f)$$

$$C_{p0} = 0.45 \text{Log}_{10} R_n - 2.24 \quad (500000 \leq R_n < 5000000) \quad (13.g)$$

$$C_{p0} = 0.78 \quad (R_n \geq 5000000) \quad (13.h)$$

- 마찰항력(Ff)

마찰에 의한 항력은 식 14로 표현된다[4].

$$F_f = 0.5 C_f \rho \dot{z}^2 \pi D L \quad (14)$$

여기서 마찰항력계수 C_f 는 식 15와 같다.

$$C_f = 1.327 R_n^{-1/2} \quad (R_n \leq 500000) \quad (15.a)$$

$$C_f = (3.46 \text{Log}_{10} R_n - 5.6)^{-2} - 1700/R_n \quad (R_n > 500000) \quad (15.b)$$

- 기저항력(Fb)

끝단에 의한 항력은 식 16으로 표현된다[8].

$$F_b = 0.5 C_b \rho \dot{z}^2 S_{base} \quad (16)$$

여기서 S_{base} 는 끝단의 면적으로 $\pi D^2/4$ 이고, 기저항력계수 C_b 는 식 17과 같다.

$$C_b = 0.029 (C_f S_{wet}/S_{base})^{-1/2} \quad (17)$$

여기서 S_{wet} 는 물에 잠긴 면적으로 πDL 이다.

III. 구성품 기본사양 도출

사양도출을 위한 절차는 먼저 수중증량을 가지는 운동체가 요구속도를 가지고 운동할때의 유효마력 (efficiency horse power:EHP)을 계산한 후 프로펠러를 설계하고, 각 구성부품에 대한 에너지 손실분과 효율이 고려된 축마력 (shaft horse power:SHP)을 검토한 후 추진모터를 선정한다.

1. 유효마력(EHP)

본 시스템에서 유효마력은 물체의 수중증량과 운동시의 유체저항의 합과 전진속도의 곱으로서 표현된다.

$$EHP = (\text{수중증량} + \text{저항}) \times \text{전진속도} \quad (18)$$

2. 프로펠러

프로펠러 설계점에서의 기본적인 요구사양을 정리하면 표 1.과 같다.

이상의 설계사양에 대한 초기설계 단계에서의 K_T , K_Q 곡선은 그림 1.과 같다. 설계점에서의 프로펠러 효율 η_p 는 식 19로 계산되고 효율을 고려한 전달마력 (delivered horse power:DHP)은 식 20으로 구해진다[4].

표 1. 프로펠러 설계 요구사항

프로펠러 직경	9 cm
날개수	3개
프로펠러 회전수	2000 rpm
입사류의 속도	
유효마력	

$$\eta_p = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (19)$$

$$DHP = EHP \times \eta_p \quad (20)$$

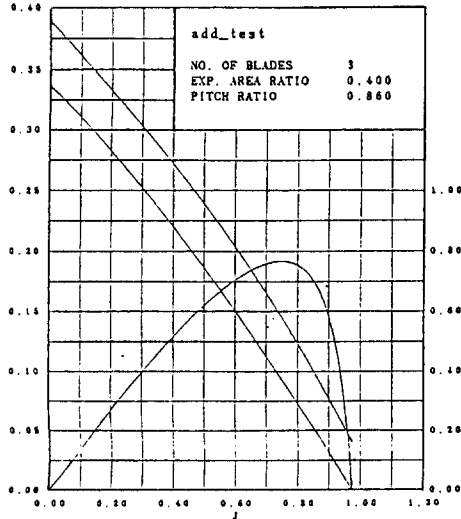


그림 1. K_T , K_Q 곡선

3. 메커니컬 실

메커니컬 실은 에너지를 소모시키는 요소로서, 정상 상태 운동시 실에 의한 소모 동력(P_{loss})은 식 21 으로 표현되고, 최대 정지마찰토크에 의한 소모동력은 모터의 초기 구동특성과 관계가 있으므로 V장의 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있다.

$$P_{loss} = Fd \times \dot{\theta} \quad (21)$$

4. 추진모터

본 연구에 사용된 BLDC(brushless direct current) 모터는 제어기 구성시 회로의 복잡성을 제외하고는 부피, 중량대비 출력성능은 여타의 종류들보다 우수한 것으로 판단되며[9,10], 특히 구조적으로 BLDC는 브러쉬가 존재하지 않아 모터 회전시 브러쉬로 인한 동기노이즈의 영향을 배제시킬 수 있다는 것이 커다란 장점으로 부각된다. 모터의 개략적인 사양은 식 20,21 로부터 프로펠러의 효율을 고려한 전달마력(DHP) 및 수밀 실의 소모동력을 합한 축마력(SHP)을 고려하여 선정할 수 있다.

IV. 제어기 구성

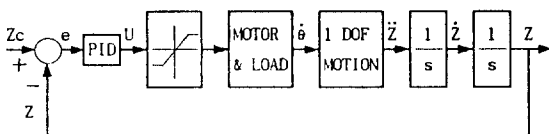


그림 2. 제어시스템 구성도

본 연구에 사용된 제어대상은 운용 요구특성상 명령수심으로의 이동모드와 수심조절모드의 두가지 상황에서 기능을 수행하므로 빠른 응답특성을 요구하지 않는다.

따라서 본 시스템에는 전류제한 및 속도제한은 설계하지 않고, 명령수심에 대한 정확한 추적을 위하여 PID를 이용한 위치제어기만을 설계한다. 측정된 수심 Z가 명령수심 Zc를 추적하게 하려면 식 22로 표현되는 오차 e를 최소로 하기위하여 식 23로 표현되는 제어입력 U를 선정하면 되고, 본 연구에 사용한 이득값은 표 2. 와 같다.

$$e = Zc - Z \quad (22)$$

$$U(t) = Ki \int_0^t e(t)dt + Kp e(t) + Kd \dot{e}(t) \quad (23)$$

표2. PID 이득표

Kp	Ki	Kd
-500	-1.26	-10

V. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

1 모터 제품별 성능비교

모터의 선정은 전류소모가 가능한 한 적고, 정상상태의 속회전수가 프로펠러의 설계점인 2000 rpm에 가장 근접한 결과를 나타내는 제품을 선택하기로 한다.

검토한 모델은 PMI사, ASTROMAC사, PITTMAN사의 제품을 비교하였으며, 그 결과 각 제품별 성능비교를 표 3. 에 나타내었다. 그림 3.에 PITTMAN사 제품에 대하여 공급전압 15VDC, 수압 30Kg/cm² 조건하에서 운동을 구축시켜서 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다.

표 3. 제품별 성능 비교표

항목 \ 제품	PMI	ASTROMECC	PITTMAN
Excitation Voltage(VDC)	15	18	15
Gear Ratio	1/1.7	1/1	1/1
Steady Current(Amp.)	6.3	3.1	4.8
Peak Current(Amp.)	66	30	25
Shaft Velocity(RPM)	2240	1800	1930

2. 수심제어 성능

수중운동체의 자동 수심조절 성능을 평가하기 위하여 발사수심 300m 에서 명령수심 270m 에서 호버링하도록 작동 시나리오를 세우고 시뮬레이션 하였다.

- 계단입력에 대한 명령추적 성능을 분석하기 위하여 P제어기와 PID제어기를 비교하여 시뮬레이션 한 결과를 그림 4.에 보였고, 각 동작모드별 특성을 표 4. 에 나타내었다.

표 4. 각 모드별 특성비교표

	제어기	상승속도 (m/sec.)	수심오차 (m)	오버슈트 (m)	속회전수 (RPM)	소모전류 (Amp.)	제어입력 (VDC)
추진모드	P	0.86	--	--	1998	4.24	15.0
	PID	0.86	--	--	1998	4.24	15.0
수심조절 모드	P	0.0	1.0	0.4	1529	3.28	11.5
	PID	0.0	0.0	0.0	1529	3.28	11.5

- 파라메타 변화에 대한 시스템의 특성을 분석하기 위하여 수중운동체의 수중중량이 1.5 Kg, 2.0 Kg 인 경우에 대하여 시뮬레이션 한 결과를 표5. 와 그림 5.에 보였다.

표 5. 수중중량 증가(33%)에 대한 특성비교표

	수중중량 (Kgf)	상승속도 (m/sec.)	수심오차 (m)	축회전수 (RPM)	소모전류 (Amp.)	제어입력 (VDC)
추진모드	1.5	0.86	--	1998	4.24	15.0
	2.0	0.5	--	1970	4.5	15.0
수심조절 모드	1.5	0.0	0.0	1529	3.28	11.5
	2.0	0.0	0.7	1765	4.13	13.5

- 외란에 대한 시스템 특성분석하기 위하여 발사 초속도가 0.0m/sec., 5.0 m/sec.인 경우에 대하여 시뮬레이션 한 결과를 표 6. 와 그림 6.에 보였다. 특히 발사속도를 증가시킬 경우 프로펠러를 가로 지르는 입사류의 영향에 의해 초기 구동토크를 이기고 모터축의 회전을 유발하는 특성을 보임으로서 기동시 전류를 공급하지 않더라도 모터를 시동시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 6. 발사속도 증가(5m/s)에 대한 특성비교표

	발사속도 (m/sec.)	상승속도 (m/sec.)	수심오차 (m)	축회전수 (RPM)	소모전류 (Amp.)	제어입력 (VDC)
초기상태	0.0	--	--	--	25.0	15.0
Peak특성	5.0	--	--	2634	15.0	15.0
추진모드	0.0	0.86	--	1998	4.24	15.0
	5.0	0.5	--	1970	4.5	15.0
수심조절 모드	0.0	0.0	0.0	1529	3.28	11.5
	5.0	0.0	0.7	1765	4.13	13.5

VI. 결 론

본 연구에서는 수중운동체의 수심조절부를 개념설계 하기 위하여 추진부를 구성하는 각종부품 즉 추진모터, 축계, 메커니컬 실, 프로펠러와 물체운동을 연동하여 해석하였다. 또한 기본요구사항에 적합한 각 구성품의 사양을 결정하였고, 수심조절을 위한 제어기를 구성하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수중운동 및 수심조절부의 특성을 비교분석하였다.

참고 문헌

- [1] Electro-craft corporation, "DC motors speed controls servo systems" pergamon press, 1977.
- [2] 김재환, "마이크로 프로세서를 이용한 포서어보 시스템의 속도제어기설계," SENP-719-87063, 국방과학연구소, 1987
- [3] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., "Mechanics for engineers statics and dynamics," McGraw-Hill, Inc., 3rd Edition, 1976, pp274-278.
- [4] E. V. Lewis(ed.), PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, Vol.II, 2nd revision, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [5] Kochin, N. E., Kibel, I. A., and Roze, N. V., "Theoretical Hydromechanics", English translation of 5th russian ed. New York, wiley

- [6] R.H.Sabersky et al, FLUID FLOW, 2nd ed., Macmillan, 1971.
- [7] 이만형, 손 권, 박대원, "화학가스식에 의한 부력발생기법 연구", 국방과학연구소, 기술보고서, NSRD-413-91593, 1991.
- [8] Sighard F. Hoerner, FLUID-DYNAMIC DRAG, 1965.
- [9] Moog missile systems division, "Electro-magnetic weapon/turret drive control system capabilities"
- [10] Jerry W. Brown and Richard F. Dugan, " A Comparision Study of Induction Motor vs. Synchronous Motor Servo Systems", PCIM, April 1987, pp.43-49.

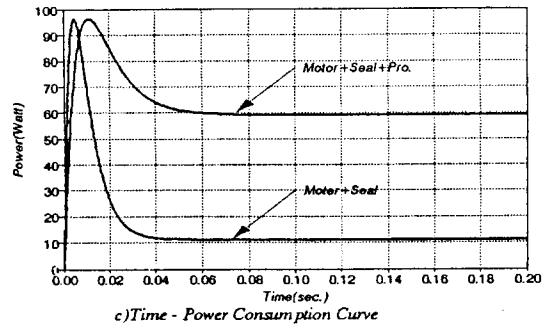
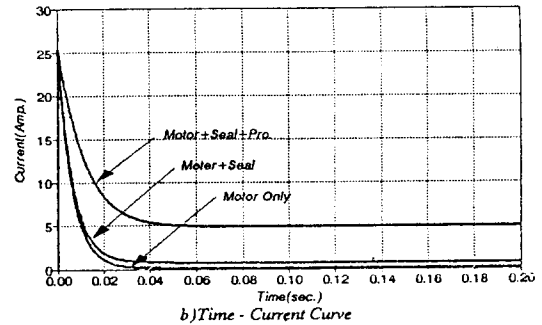
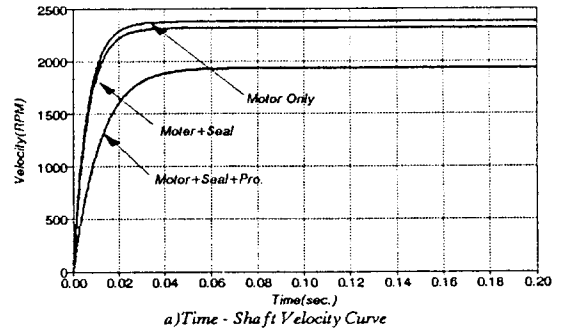
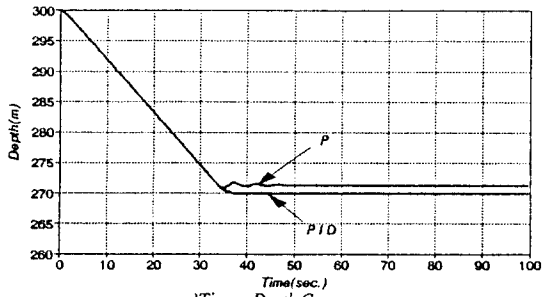
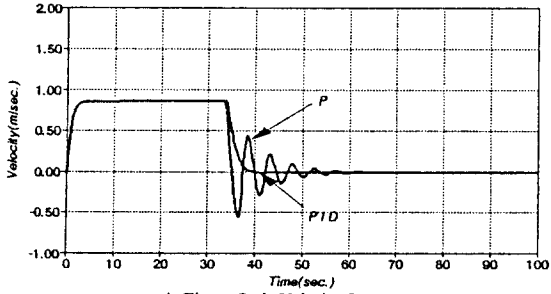


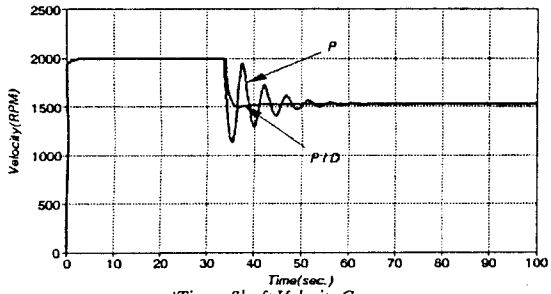
그림 3. PITTMAN사 제품 특성 (Ue=15 VDC, 운동:구속)



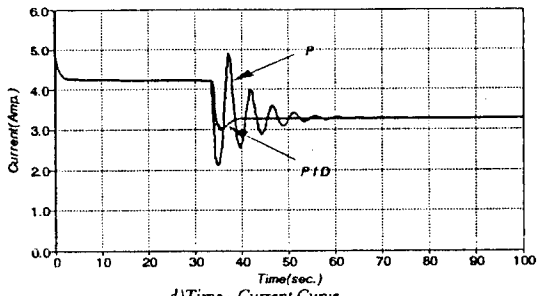
a) Time - Depth Curve



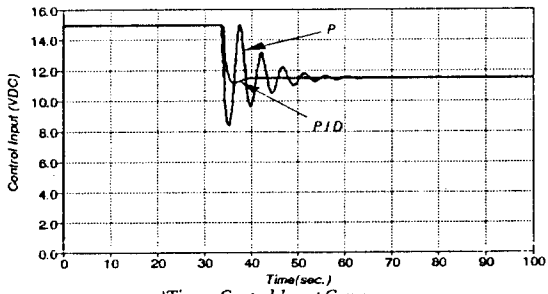
b) Time - Body Velocity Curve



c) Time - Shaft Velocity Curve

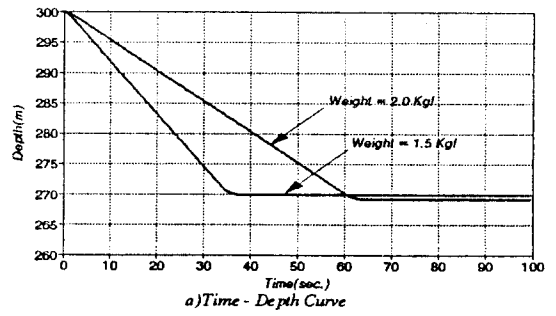


d) Time - Current Curve

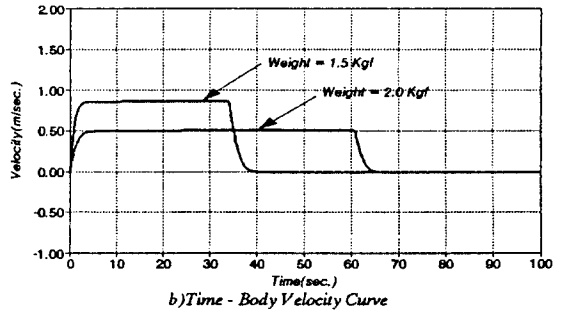


e) Time - Control Input Curve

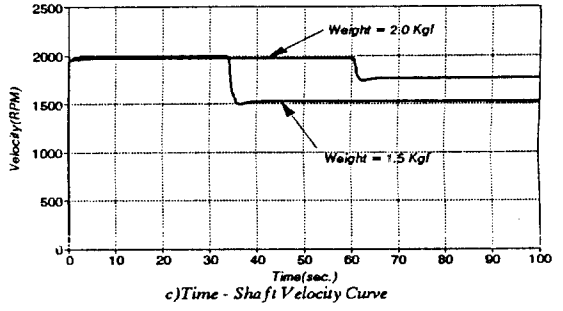
그림 4. P/PID 제어 특성
($U_{max}=15VDC$, $I_{max}=15Amp.$, $V_i=0.0m/s$, $W=1.5Kgf$)



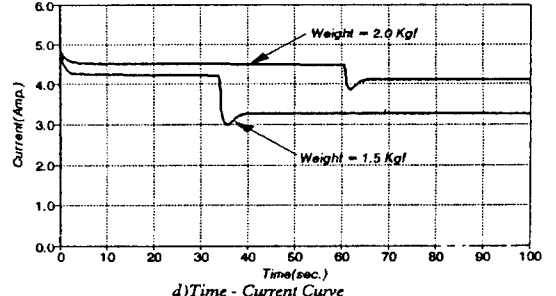
a) Time - Depth Curve



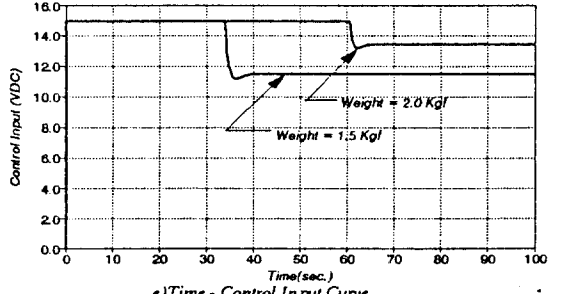
b) Time - Body Velocity Curve



c) Time - Shaft Velocity Curve



d) Time - Current Curve



e) Time - Control Input Curve

그림 5. 수중증량별 특성
($U_{max}=15VDC$, $I_{max}=15Amp.$, $V_i=0.0m/s$)

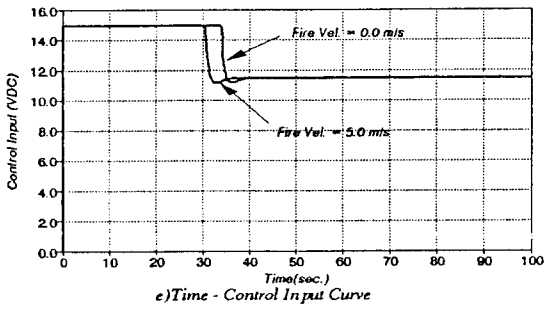
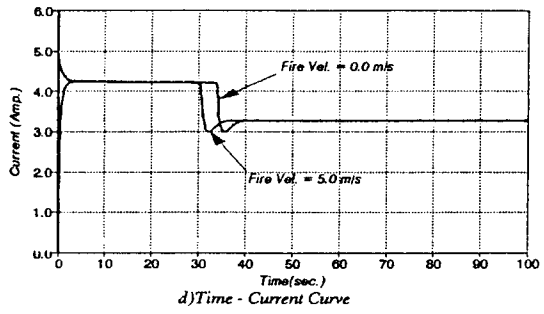
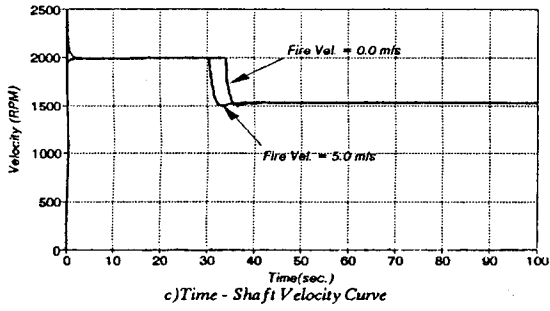
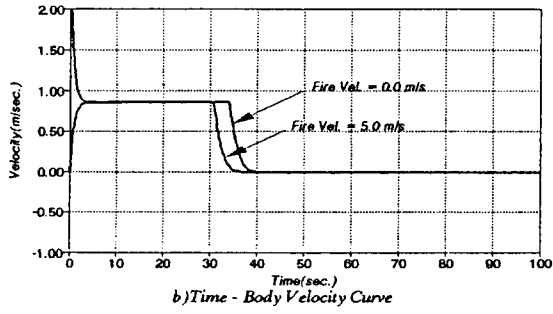
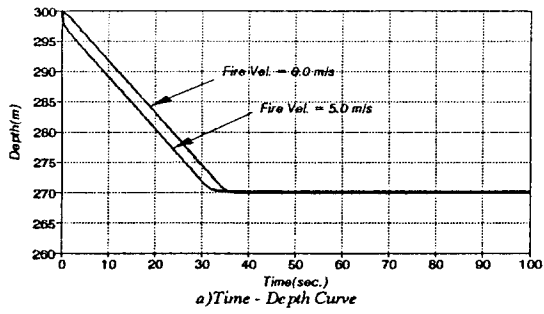


그림 6. 발사속도별 특성
($U_{max}=15V$, $I_{max}=15Amp.$, $W=1.5Kg$)