

수중에서 운동하는 물체의 수심제어

李 萬 炯

釜山大學校 制御機械工學科

I. 서론

특수한 목적을 위해 해저에 어떠한 물체를 일정 수심에 유지 시키기 위해서는 물체에 작용하는 부력을 조절함으로써 가능할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 수중운동체의 수심제어를 위해 부력을 발생 시킬 수 있는 풍선을 부착하고, 풍선에 유입되는 압축공기의 유량을 제어하기 위해서 솔레노이드 밸브, 안전밸브 등을 사용하였다. 풍선의 압력 및 부피, 물체의 상승속도, 압력용기의 압력강하, 수심의 압력변화율 등을 유도하였으며, 간단한 제어기를 구성하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 부력을 이용해서, 어떠한 물체의 수심을 제어했을 때 발생하는 문제점을 발견하고 발생하는 문제점을 개선하기 위한 해결 방법 등을 제시하였다.

II. 수중운동체의 심도 제어를 위한 모델

심도제어를 위한 개념도는 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 외부 센서에 의해 수심을 알 수 있으며, 제어기에서 기준입력과의 오차에 대해 유입밸브와 유출밸브에 신호가 주어지게 된다. 풍선이 일정 부피가 되어 수중운동체가 상승하여 심도가 바뀌면 주변 수압이 작아져 풍선이 커지고 상승속도가 빨라지므로 풍선의 부피를 일정하게 유지시키기 위해 일정 압력차에서 작동하는 안전밸브(relief valve)를 사용하여 공기를 배출 시킨다.

풍선의 부피가 중성부력 이상이면 수중운동체는 상승하려고 하게 되며 풍선이 하강하기 위해서는 부피

가 중성부력보다는 작아야 한다. 따라서 인장력을 받기 시작하는 풍선의 체적을 중성부력보다 약간 작은 크기로 하여야 하므로 수중운동체의 중성부력은 다음과 같이 계산하여 풍선의 크기를 결정한다.

$$mg = \rho g(V_b + V_d)$$

$$V_b = \frac{m}{\rho} - V_d$$

ρ : 해수의 밀도 (1050 Kg/m³)

III. 미분방정식 유도

수중운동체의 거동을 시뮬레이션하기 위해 풍선의 부피변화에 따른 추가 부력을 알아야 하며, 풍선의 부피변화, 압력 변화 및 각 수심에서의 압력, 그리고 수중운동체의 운동방정식은 다음의 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

1. 풍선의 부피 변화

풍선을 구라고 가정하고 부피변화율을 고려할 때, 다음의 두 가지 경우로 구분할 수 있다.

1) 풍선 자체의 장력을 고려하지 않은 경우

이때, 수중에서 풍선의 크기는 풍선이 인장력을 받기 시작할 때 보다 작을 것이며, 풍선의 내압은 외부 수심의 압력과 같을 것이다. 풍선내부의 압력(P_b)과 풍선의 부피(V_b), 그리고 풍선내의 공기의 질량(m_b)사이에는 $P_b(t)V_b(t) = m_b(t)RT$ 가 성립하며, $P_b(t)$, $V_b(t)$ 는 공기의 질량 유량에 따라 동시에 변하므로, 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dV_b(t)}{dt} = -\frac{V_b(t)}{P_b(t)} \frac{dP_b(t)}{dt} + \frac{RT}{P_b(t)} \frac{dm_b(t)}{dt}$$

2) 풍선 자체 장력을 고려한 경우

이 경우 풍선의 부피는 풍선의 원래의 부피보다 커지게 될 것이며, 풍선의 부피는 인장력을 받지 않을 때의 풍선의 부피(V_b)와 풍선내부와 외부의 압력차 (ΔP), 인장강도(E), 프와송 비(ν), 그리고 고무의 두께(t_{br})로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V'_b = V_b \left(1 + \frac{\Delta P R_{br}}{2Et_{br}} (1-\nu)^3 \right), \quad (\Delta P = P_b - P_d)$$

이때, E 는 고무의 인장강도, t_{br} 은 고무의 두께이다. 따라서, 풍선의 부피변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_b(t)}{dt} = 3V_b \left(1 + \frac{\Delta P R_{br}}{2Et_{br}} (1-\nu)^3 \right)^2 \frac{R_{br}(1-\nu)}{2Et_{br}} \left(\frac{dP_b}{dt} - \frac{dP_d}{dt} \right)$$

2. 수심에 따른 압력의 변화

수심 h 일 때의 압력은 $P_h(t) = P_a - \rho gh(t)$ 이며, 양변을 미분하면, 수심의 변화에 따른 압력의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dP_h(t)}{dt} = -\rho g \frac{dh(t)}{dt}$$

여기서 P_h 는 대기압, ρ 는 해수 밀도이다.

3. 공기압 밸브의 질량 유량

공기유량의 표시방법은 밀도가 온도나 압력에 의해서 변화하므로 체적유량 표시보다도 질량유량 표시가 취급이 용이하다. 공기는 압축성이므로 압력차를 크게 해도 유속이 음속을 초과할 수 없으며, 유량은 음속일 때 최대가 된다. 따라서 축류부의 유속이 음속을 초과하지 않을 때 질량 유량은 다음과 같다.

$$W = A \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \frac{P_H}{\sqrt{T_H}} \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^{(k-1)/k}}$$

여기서, P_H 는 상류 측의 압력, P_L 는 하류 측의 압력이다. 스토틀을 통과하는 공기의 유속은 스토틀의 압력차의 증가에 따라 커지며 하류와 상류의 압력비가 0.528일 때 음속이 된다. 이때 질량유량은 최대가 되며 다음과 같다.

$P_L / P_H = 0.528$ 일 때,

$$W_{max} = \sqrt{\frac{k}{R \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} A \frac{P_H}{\sqrt{T_H}}}$$

4. 수중운동체의 운동 방정식

수중운동체의 운동을 수직 방향으로만 고려할 때에 항력과 풍선의 부피에 의한 부력에 대하여 수중운동체의 운동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2h(t)}{dt^2} = -\frac{C_d \rho A_d}{2m} \left(\frac{dh(t)}{dt} \right)^2 - mg + \rho g (V_d + V_b)$$

여기서, C_d 는 항력계수로서 실험을 통하여 구할 수 있었고, A_d 는 수중운동체의 운동방향에서 해수와 만나는 부분의 면적, V_d 는 수중운동체의 부피, V_b 는 풍선의 부피이다.

IV. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 개요

초기치는 수중운동체의 수심으로 주어지며 풍선의 초기부피는 풍선이 접힌 상태로 0으로 한다. 슬레노이

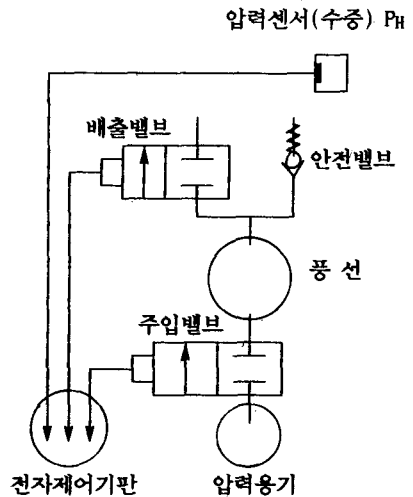


그림 1. 수중운동체의 모델

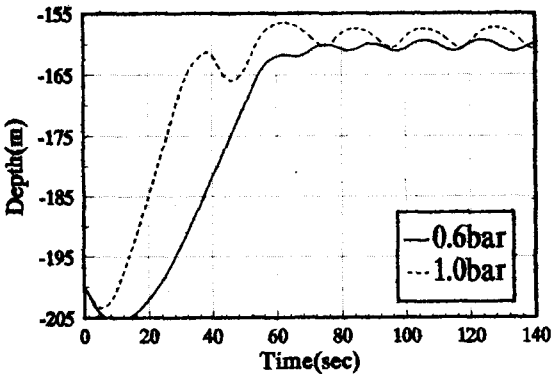
드 밸브의 작동은 PWM(Pulse Width Modulation)방식에 의해 제어되며 PWM신호는 제어기의 출력으로 결정된다. 안전밸브는 풍선의 내부와 외부의 압력차에 의해 작동하게 되고 유입밸브는 하강할 때만 작동하도록 하였으며, 상승할 때는 안전밸브의 작동으로 일정량의 공기가 배출되면서 상승 속도와 풍선의 부피는 일정하게 유지된다.

제어기는 PD제어기를 사용하였으며, 수중운동체의 동특성에 대한 검토가 충분히 이루어진 후 좀더 바람직한 설계를 하도록 한다.

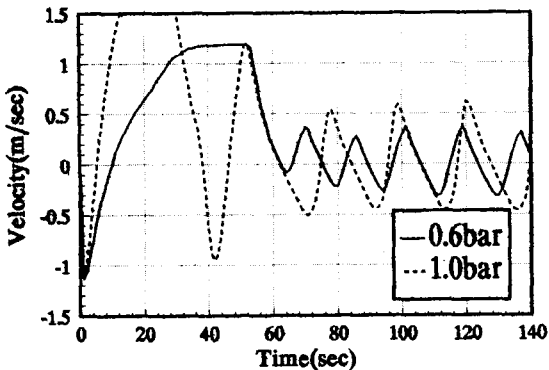
2. 시뮬레이션 결과

1) 풍선의 최대 부피를 고정하지 않을 때

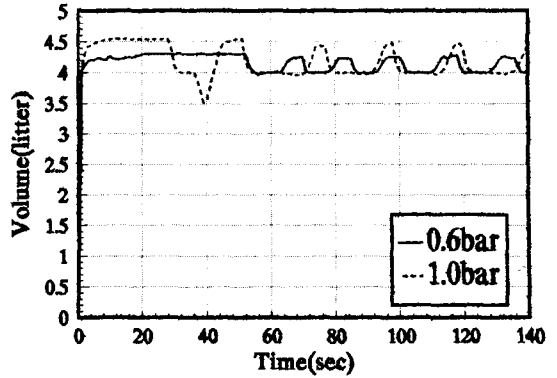
초기위치를 수심 200m로 하고 수심 160m를 기준 입력으로 하였을 때, 수중운동체의 운동은 Fig. 2와 같다. 그림에서와 같이 수중운동체는 약 60초 후에



(a)수중운동체의 위치



(b)수중운동체의 속도



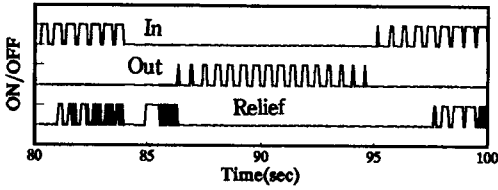
(c)풍선의 부피

그림 2. 풍선의 최대팽창크기를 제한하지 않았을 때

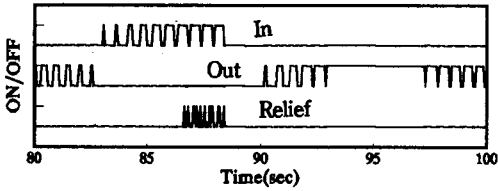
정상상태에 도달해서 제어가 되고 있는 것을 알 수 있다. 이때 풍선의 인장강도를 500Kgf/cm²으로 고정하고 안전밸브의 작동압력은 0.6bar와 10bar 두가지 경우에 대해서 시뮬레이션 하였다. 수중운동체의 상승속도는 안전밸브의 작동압력이 1.0bar일 때 최대 1.5m/sec정도로 0.6bar의 1.2m/sec인 경우보다 더 빠른 것을 알 수 있는데 이것은 안전밸브의 작동압력이 커지면 풍선의 최대 팽창크기가 더 커지므로 속도가 빨라지는 것이다.

안전밸브의 작동압력이 너무 크면 풍선이 필요이상으로 크게 팽창해서 속도가 빨라져 정상상태에서 진폭이 커지게 된다. 따라서 안전밸브의 작동압력은 풍선의 인장강도에 따라 중성부력 이상의 부력을 얻을 수 있을 만큼은 풍선을 팽창 시키되 풍선의 안정성을 고려하여 결정 하여야 할 것이다.

Fig. 3은 정상상태에서 밸브의 작동상태이며 안전밸브의 경우 작동압력이 낮을 때 더 많이 작동하고 있는 것을 볼 수 있는데, 특히 두가지 경우 모두 유입밸브가 작동하고 있을 때 안전밸브가 열리는 것을 볼 수 있다. 유입밸브가 열릴 때는 수중운동체가 하강하고 있을 때이며 이때는 풍선의 크기가 중성부력보다 작아서 풍선자체의 인장력은 받지 않는다. 그러나 수중운동체가 하강할 때는 외부 압력이 증가하고 있을 때이며, 따라서 수중운동체가 다시 상승하기 위해서는 풍선내의 압력증가가 외부의 압력증가보다 커져야 하므로 Fig. 4와 같이 풍선 내부와 외부의 압력차가 급격히 커지는 것을 알 수 있다.



(a) 안전밸브의 작동압력 0.6bar



(b) 안전밸브의 작동압력 1.0bar

그림 3. 정상상태에서의 밸브의 작동상태

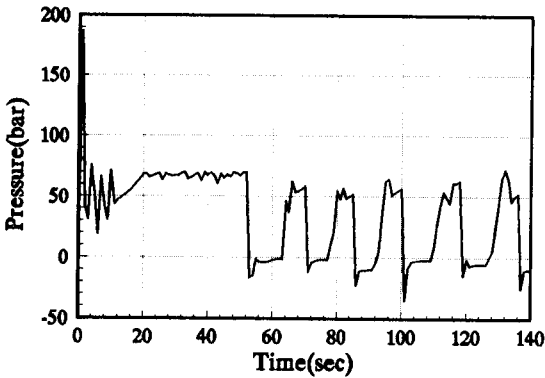


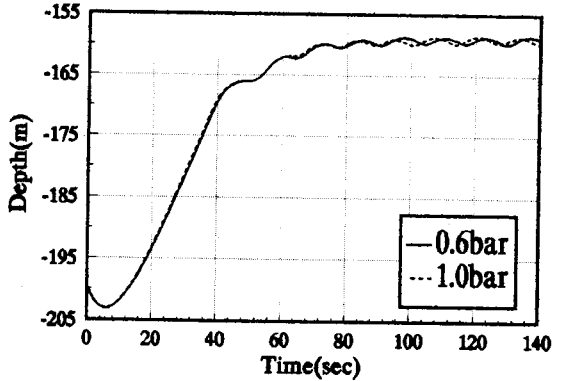
그림 4. 풍선 내부와 수심의 압력차

이때 안전밸브의 작동압력이 작을수록 이러한 압력 차를 견디지 못하고 더 많이 작동하게 되는 것이다. 하지만 유입밸브가 작동할 때 안전밸브가 작동하게 되면 풍선을 팽창시키는데 시간이 걸리게 되고 필요 없이 압축공기를 낭비하는 결과를 가져와 좋지 않는 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 보완하기 위해 풍선의 최대 팽창 크기를 제한하여 보았다.

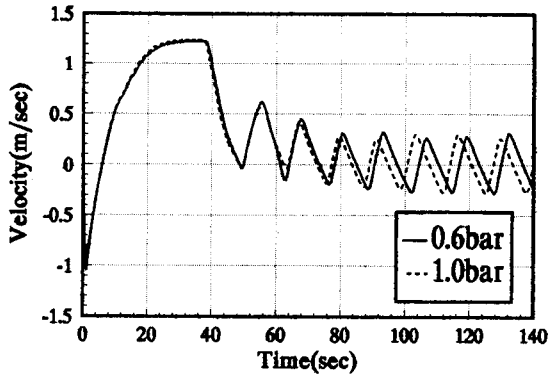
2) 풍선의 최대 부피를 고정할 때

풍선주위에 일정용량의 피복을 입히는 방법 등을 이용하여 풍선의 최대 팽창크기를 고정하였을 때 안전밸브는 풍선내부의 압력을 일정하게 유지시켜주는 역할을 하게 된다.

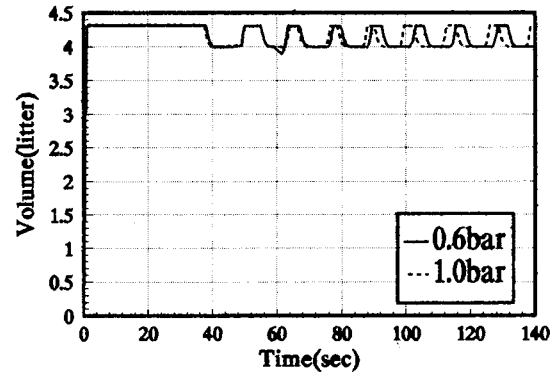
Fig. 5는 풍선의 인장강도를 200Kgf/cm²정도로 훨씬 작게 하고 안전밸브의 작동압력은 0.6bar와 10bar로 하여 시뮬레이션한 것이다. 그림과 같이 풍선의 부피는 4.3이상 증가하지 않으며 수중운동체의



(a) 수중운동체의 위치



(b) 안전밸브의 작동압력

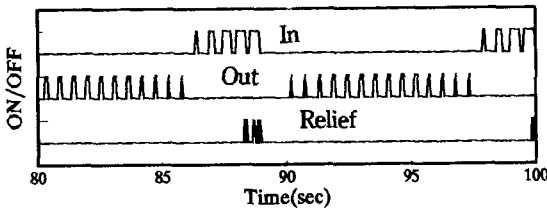


(c) 안전밸브의 작동압력

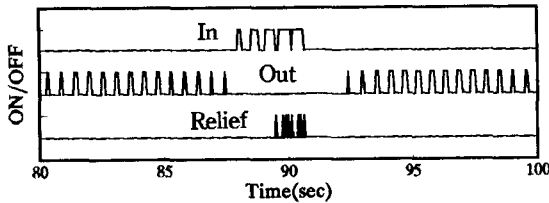
그림 5. 풍선의 최대팽창크기를 제한할 때

운동은 두가지 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

이 경우 풍선의 최대 팽창크기를 고정하지 않으면 풍선의 인장강도에 비해 안전밸브의 작동압력이 너무 커서 풍선이 매우 크게 팽창하며, 따라서 수중운동체의 상승속도가 빨라져 제어가 거의 불가능하게 된다. 하지만 풍선의 최대 팽창크기를 제한하면 바람직하게 제어가 되는 것을 알 수 있으며, Fig. 6의 밸브작동 상태에서 알 수 있듯이 유입밸브의 작동시에 안전밸브가 작동하여 압축공기를 낭비하는 현상 또한 나타나지 않게 되는데, 이것은 풍선의 인장강도가 작아 하강시에 풍선 내부와 외부의 압력차가 안전밸브의 작동압력보다는 커지지 않기 때문이다.



(a) 안전밸브의 작동압력 0.6bar



(b) 안전밸브의 작동압력 0.6bar

그림 6. 정상상태에서의 밸브의 작동상태
(풍선의 최대팽창크기를 제한한할 때)

V. 결론

풍선의 최대 팽창크기를 제한하는 방법은 안전밸브의 작동압력에 관계없이 안정된 속도를 얻을 수 있어

서 제어가 용이하고, 유입밸브 작동시 안전밸브가 작동하지 않을 정도로 안전밸브의 작동압력을 높일 수 있다. 또한 풍선의 크기를 제한하지 않았을 때에는 제어가 거의 불가능한 경우인 인장강도가 낮고 안전밸브의 작동압력은 높은 경우에도 오히려 우수한 성능을 보이게 된다. 그리고 안전밸브의 작동압력을 결정하는데 있어서 풍선의 크기를 제한 하지 않았을 경우에는 풍선의 인장강도에 따른 최대 팽창크기를 고려하여 적절한 값을 결정하여야 하지만 풍선의 크기를 제한하게 되면 큰 어려움 없이 인장강도와 안전밸브의 작동압력을 설정할 수 있다는 장점이 있다.

또한 풍선의 최대 팽창크기를 제한하지 않았을 경우, 인장강도와 안전밸브의 작동압력이 바뀌면 제어기의 이득값을 알맞게 바꾸어 주어야 하겠지만, 풍선의 최대 팽창크기를 제한할 경우에는 파라미터의 변동에 대해서 비교적 강한 제어를 보여 주었다.

따라서, 풍선은 최대 팽창크기를 제한하는 것이 기만기의 수심제어를 위해서는 훨씬 용이함을 알 수 있었다.

參考文獻

- [1] Franklin D. Yeaple 1966 "Hydraulic and pneumatic power and control," McGraw-Hill, New York, pp. 34~40, pp.89~111.
- [2] A. C. Ugural, 1981 "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 205
- [3] 黃世後, 1989, "油空壓의 디지털制御와 應用," 機電研究社.
- [4] 이창돈, 1991, "고속 전자밸브를 이용한 차동 PWM에 의한 유압실린더의 위치제어에 관한 연구," pp. 4~15.
- [5] 이만형, 손권, 박대원, 권순홍, 1992, "화학 가스식에 의한 기만기 동특성 해석 기법연구."

筆者紹介



李 萬 炯

1946年 10月 18日生

1969年 2月 부산대학교 전기공학과

1971年 2月 부산대학교 대학원 전기공학과(석사)

1983年 2月 Oregon State University 전기 컴퓨터 공학과(Ph.D.)

1971年 9月 ~ 1974年 9月 육군사관학교 교수부 전자공학과 전임강사

1974年 10月 ~ 1978年 8月 부산대학교 공과대학 기계설계과 조교수

1983年 3月 ~ 1983年 7月 Oregon State University Postdoctoral Fellow

1983年 9月 ~ 1992年 2月 부산대학교 정밀기계공학과 교수

1992年 3月 ~ 현재 부산대학교 제어기계공학과 교수

주관심분야 : Stochastic Control, System Identification, Robotics, Mechatronics, C³I