

수중운동체 자동심도제어 시스템 설계연구

이 동익, 윤 형식, 최 중락, 양 승윤

국 방 과 학 연 구 소

Design of Auto-Depth Control System for Submerged Body

Dong-Ik Lee, Hyoung-Sig Youn, Joong-Lak Choi, Seung-Yun Yang

Agency for Defense Development

ABSTRACT

Normal operation when deeply submerged is a relatively easy task, and human operator control can often provide adequate performance. Near surface depthkeeping, on the other hand, is difficult to both man and machine. Because of the inherent limitation of the human operator, manual control may prove inadequate for near surface depthkeeping in some sea state.

This paper describe the contrl algorithm of an automatic depth control system for submerged body that can be used for both near surface and deeply submerged depthkeeping operations. The computer simulations demonstrate the excellant depthkeeping performance of the controller under seaway effects.

수중운동체는 그림 1과 같은 6자유도 운동방정식으로 모델링 되나 [2], 제어 시스템 설계를 용이하게 하기 위하여 비선형 2자유도 운동방정식을 식 (2.1) 및 식 (2.2)와 같이 선형화 하였다. 수평 상관 관성 (Cross Products of Inertia)이 적고 롤각 (Roll Angle)이 작을 경우 피치, 히브, 서지 방정식으로 단순화 된다. 여기서 전진속도 변위 (Forward Speed Variation)가 작으면 피치 및 히브의 2자유도 운동 방정식으로 간략화 된다.

히브:

$$\ddot{m}(\dot{\omega} - uq) = Z_{\dot{\omega}}\dot{\omega} + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\delta}^{\omega}\delta_b + Z_{\delta}^w\delta_m + Z_{\dot{w}w} + Z_{SF} \quad (2.1)$$

피치:

$$I_y\dot{q} = M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{\theta}}\dot{\theta} + M_{\delta}^{\theta}\delta_b + M_{\delta}^w\delta_m + M_{\dot{w}w} \quad (2.2)$$

여기서,

- m : 운동체 질량
- I_y : 관성 모멘트
- u : x축 방향 속도성분
- w : z축 방향 속도성분
- q : y축 각속도 성분
- δ_m : 선미타각 변위
- δ_b : 선수타각 변위
- Z_{wave} : 해파력
- Z_{SF} : 해파흡인력
- M_{wave} : 해파모멘트

수중운동체의 심도 및 피치 변화율은 다음과 같은 운동 역학적 관계를 가지며,

$$\dot{z} = \omega - u\theta \quad (2.3)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (2.4)$$

상태 공간 운동방정식은 식 (2.5)와 같다.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}-u_0 & a_{11}u_0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & a_{34}+a_{31}u_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4} X + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2} u + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ 0 \\ \xi_3 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (2.5)$$

1. 서 론

수중운동체의 심해 항해시 (Deep Submerged Operation) 심도조종은 비교적 쉽게 이루어질 수 있으나, 해파(Seaway)의 영향을 받는 자유표면 (Near Surface)에서는 정확한 심도유지가 매우 어렵다. 해파는 수중운동체의 운동에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 압전 소자로 구성돼 있는 심도 센서에 압력 변화를 유발함으로써 심도 정보의 정확도를 떨어뜨린다. [1]

따라서, 자유표면에서는 수중운동체의 안전도 및 조종 정확도 확보를 위하여 신속, 정확한 심도제어가 필요하다. 그러나 운동조종자 (Human Operator)의 제한성으로 인하여 특정 해상상태 (Sea State)에서는 수동조종에 의한 심도 제어가 불가능 하다.

따라서 본 연구에서는 해파로 오염된 심도센서의 정보로부터 적절한 심도제어를 위하여, LQ 제어기와 제어 불가능한 해상 잡음을 제거하기 위한 적응노치 필터를 이용하여 자동심도 제어 시스템을 설계하고, 마이크로 프로세서로 구현하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어 성능을 예측하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 운동방정식

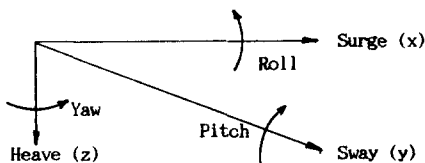


그림1. 6자유도 운동 방정식 개념도

여기서,

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_b \end{bmatrix}$$

2.2 구동부 모델 (Actuator Model)

수중운동체는 선수 및 선미타를 구동할 수 있는 구동부로 구성되어 있으며, 구동부는 식 (2.6) 및 식 (2.7)과 같이 응답 특성이 매우 느린 1차계 필터 (First Order Filter)로 모델링 된다.

$$\dot{\delta}_a = (u\delta_a - \delta_a)/\tau_a \quad (2.6)$$

$$\dot{\delta}_b = (u\delta_b - \delta_b)/\tau_b \quad (2.7)$$

여기서,

$$\tau_a = 1 [\text{sec}^{-1}], \quad |\delta_a| \leq 20 [\text{deg}]$$

$$\tau_b = 1 [\text{sec}^{-1}], \quad |\delta_b| \leq 50 [\text{deg}]$$

$$|\dot{\delta}_a|_{\text{max}} = 5.0 [\text{deg/sec}]$$

$$|\dot{\delta}_b|_{\text{max}} = 11.4 [\text{deg/sec}]$$

2.3 해파 외란 모델 (Seaway Model)

수중운동체가 자유 표면에서 운동을 할 경우, 해파는 수중운동체의 운동 및 심도센서에 외란으로 작용하므로 자동심도 제어 시스템 설계시, 해파의 영향에 따른 제어기 성능을 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 식 (2.8)과 같이 ITTC (International Towing Tank Conference) 해파 스펙트럼을 사용하여 해파를 해상상태별로 정량화 하였으며,

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} \exp(-B/\omega_w^4) \quad (2.8)$$

여기서,

$$A = 8.385 [\text{ft}^2 \text{ sec}]$$

$$B = 33.56/(H_{1/3})^2$$

ω_w : 풍속

수중운동체와 해파는 수중운동체의 심도에 따라 식 (2.9)와 같이 지수적으로 감쇄된다.

$$V(t) = \exp(-\omega_w^2 Z(t)/g) * Y_w(t) \quad (2.9)$$

여기서,

$V(t)$: 감쇄파
 $Y_w(t)$: 표면파
 $Z(t)$: 심도
 ω_w : 조우 주파수

3. 제어알고리즘

3.1 LQ 조절기

제어 대상이 다변수 제어시스템이므로 제어기 설계가 용이한 최적제어 이론을 사용하였으며, 디지털 제어를 구현하기 위하여 식(2.5)의 상태 공간 운동 방정식을 식 (3.1)과 같이 이산화 (Discretize) 하였다.

$$X(k+1) = A^*X(k) + B^*u(k) \quad (3.1)$$

수중운동체의 심도유지시 부력의 영향에 의한 정상 상태 오차를 제거하기 위하여 적분항 (Integral Action) Q_θ, Q_z 를 추가 하였고, 선수 및 선미타의 속도제한에 따른 비선형 영향을 감소시키기 위하여 제어 입력 속도 및 가속도 가중치를 고려하여 식 (3.2)와 같이 증가된 상태 방정식을 구성하였다.

$$X_a(k+1) = A_a X_a(k) + B_a \mu(k) \quad (3.2)$$

여기서,

$$X_a(k) = [\dot{Z}_D(k) \quad Z(k) \quad \dot{\theta}_D(k) \quad \theta(k) \quad q_z(k) \quad q_\theta(k) \quad \delta_a(k) \quad \delta_b(k) \quad \dot{\delta}_a(k) \quad \dot{\delta}_b(k)]^T$$

$$\mu(k) = [\ddot{\delta}_a(k) \quad \ddot{\delta}_b(k)]^T$$

$$A_a = \begin{bmatrix} \boxed{A^*_{4 \times 4}} & 0 & 0 & \boxed{B^*_{4 \times 2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

LQ 제어 이론을 이용하여 식 (3.3)과 같은 제어 입력을 구하기 위하여 평가 지표 (Performance Index)를 식 (3.4)와 같이 두었다. [4]

$$\mu(k) = -FX_a(k) \quad (3.3)$$

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [X_a(k)^T \quad \mu(k)^T] \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & \rho R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(k) \\ \mu(k) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

여기서, 상태이득행렬 F는

$$F = (\rho R + B_a^T P B_a)^{-1} (B_a^T P A_a + S^T) \quad (3.5)$$

으로 주어지며, P는 리카지 방정식 (Riccati Equation)으로부터 구한다.

선수 및 선미타가 포화 (Saturation) 되었을 경우 편향 오차 (Bias Error)를 제거하기 위하여 포화 보상 논리를 고려하였고, 수중운동체의 속도 변화에 적용하여 제어할 수 있도록 이득배정 기법 (Gain Scheduling Technique)을 적용하였다.

3.2 적응노치 필터 (Adaptive Notch Filter)

해파는 고주파 성분인 우세 주파수 (Dominant Frequency)와 저주파 성분인 해파 흡인력 (Suction Force)으로 구성되어 있으며, 이들은 자유표면에서 수중운동체의 운동에 영향을 미칠 뿐만 아니라 심도 센서를 오염시키기도 한다. 특히 우세 주파수는 제어가 불가능하므로 이 성분을 제거하고, 제어 가능한 해파 흡인력만을 통과시키기 위하여 식(3.6)과 같은 노치필터를 사용하였다.

$$G(S) = \frac{(S^2 + 2\xi\omega S + \omega^2)}{S^2 + (2\xi + g)\omega S + \omega^2} \quad (3.6)$$

여기서,

- ω : 해파의 우세주파수
- ξ : 감쇄지수
- g : 필터이득

해파의 우세 주파수는 해상상태 및 수중운동체의 속도에 따라 시변 (Time Varying)하므로, 이에 적응하여 필터링 할 수 있도록 조우 주파수를 고려한 적응노치 필터를 설계하고, 마이크로 프로세서로 구현하기 위하여 이산화 하였다. 적응 노치 필터가 포함된 제어시스템 구성도는 그림 2와 같다.

4. 하드웨어 설계

상기 디지털 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 인텔 8086, 8087 마이크로 프로세서를 이용하였고, 수중운동체 센서 및 구동장치의 입출력 인터페이스를 위한 하드웨어를 설계하였다. 특히 신뢰도 및 안전도 향상을 위하여 주 프로세서의 오동작을 방지할 수 있도록 감시 마이크로 프로세서를 추가 적용하였다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

설계된 수중운동체 제어 시스템의 성능을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 시뮬레이션에 적용된 해상상태이며, 적응노치 필터를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 자유표면 하에서의 심도 유지 성능을 그림 5에서 비교하였다.

6. 결 론

수중운동체의 자동심도 제어를 위한 알고리즘 및 하드웨어를 설계하였다. 자유표면 하에서는 해파의 영향에 의한 심도센서 오입 때문에 적절한 제어가 어렵게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적응 노치 필터를 설계 적용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어시스템의 성능을 분석한 결과, 적응 노치 필터를 사용한 경우 자유표면 하에서의 심도유지 능력이 향상되었으며, 선수 및 선미타의 과도한 움직임이 크게 개선됨을 확인하였다.

REFERENCE

- [1] T. B. Booth, "Optimal Depth Control of an Underwater Vehicle Under a Seaway", Symposium on NAVAL SUBMARINE, 1983.
- [2] Morton Gertler, Grant R. Hagen, "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation (AD 653-861), June 1967.
- [3] Bhattachayya, "Dynamics of Marine Vehicle", John Wiley & Sons, 1978
- [4] Kirk, "Optimal Control Theory an Introductions", Prentice-Hall, 1970
- [5] P.S.Maybeck, "Stochastic Models, Estimation and Control", Vol.3, Academic Press, 1983

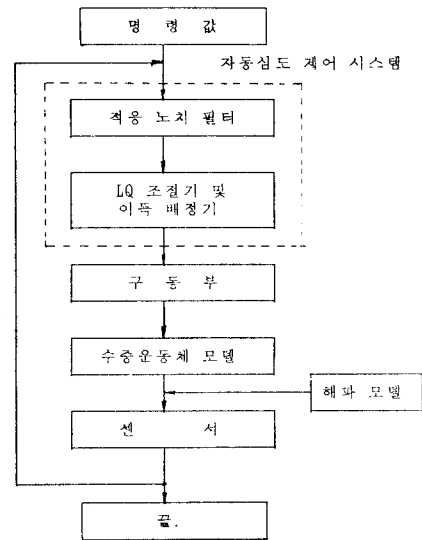


그림3. 컴퓨터 시뮬레이션 흐름도

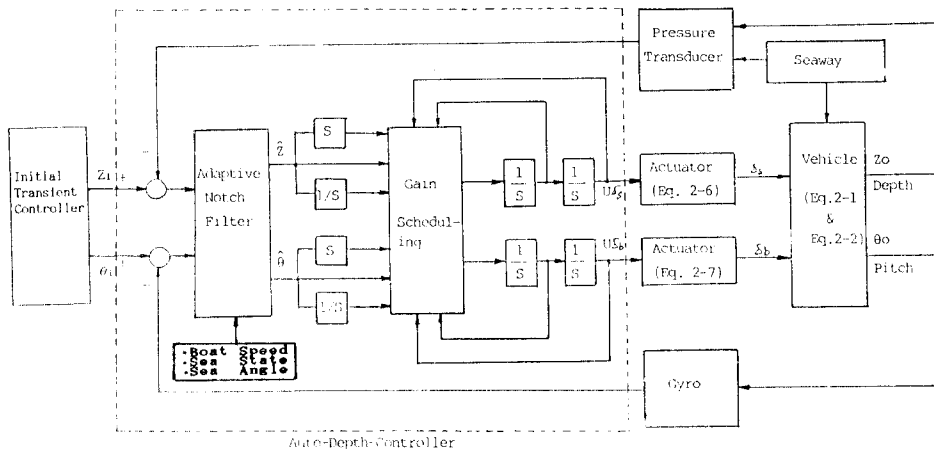
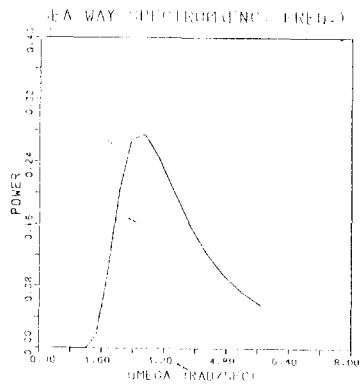
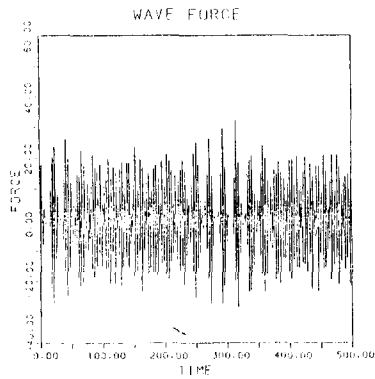


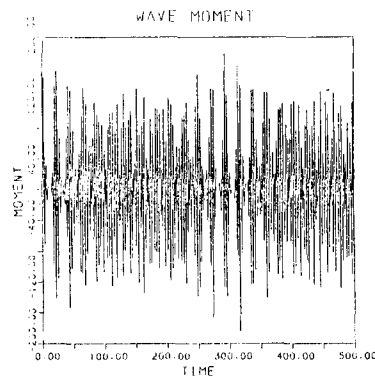
그림2. 자동 심도 제어 시스템 구성도



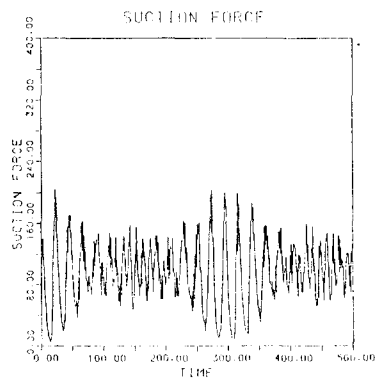
(a) 전력 스펙트럼



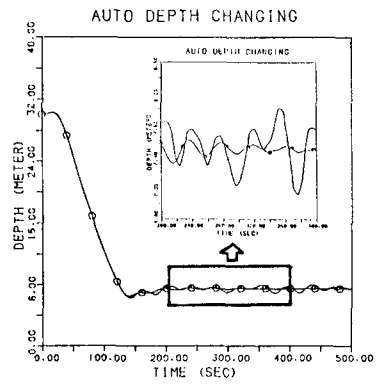
(b) 해파력



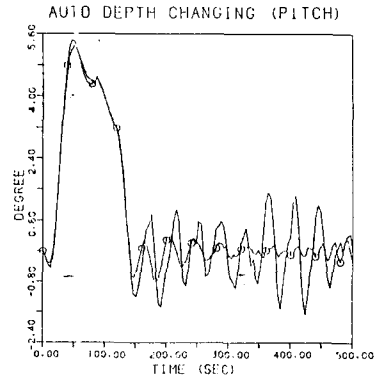
(c) 해파 모멘트



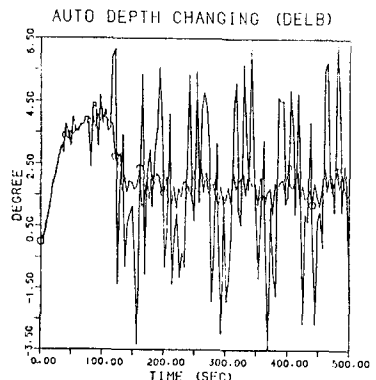
(d) 해파 흡인력



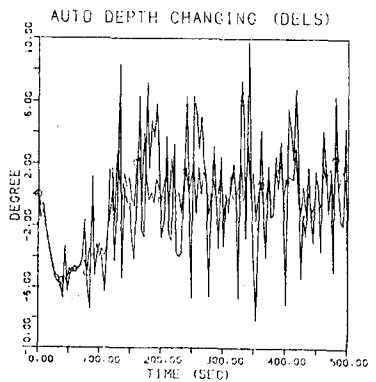
(a) 심도



(b) 피치



(c) 선수타



(d) 선미타

그림4. 해파 모델의 재현 모습
(Head Sea, Sea State-3, 속도 6kts 경우)

그림5. 심도 제어 응답도
○ : 적용노치필터 있을 경우
— : 적용노치필터 없을 경우