

미속 수중함의 자동심도 제어장치 설계 연구

조현진 · 최중락 · 이동권 · 김홍열
국방과학연구소

Design of Auto-Depth Control System for Low Speed Submersible Vehicle

Hyeon-Jin Cho Joong-Lak Choi Dong-Kwon Lee Heung-Youl Kim
Agency for Defense Development

Abstract

This paper describes the auto-depth control system with depth control tank for low speed submersible vehicle that can be used for both near surface and deeply submerged keeping operations.

The PDA control algorithm is used to design controller and adaptive notch filter is designed to eliminate the dominant frequency of seaway.

The computer simulations demonstrate the excellent depth keeping performance of the controller under seaway effects.

1. 서론

수중함이 어떤 특정한 임무를 수행하고자 할때, 일정한 심도와 피치각을 유지하며 운항하는 심도유지항해는 매우 중요하고 필수적인 기능이다. 그런데 큰 외란이 없는 심해에서는 수동조종에 의해서도 비교적 쉽게 심도유지항해가 이루어질 수 있지만, 현대 수중함의 중요한 임무인 잠망경항해, 스노클항해등을 수행하는 자유표면(Near Surface)하에서는 해파의 영향으로 인한 심한 센서오염, 조타수가 느낄 수 없는 흡인력(Suction Force)을 포함한 파력(Wave Force) 때문에 정확한 심도유지가 어려웠으나, 최근에는 컴퓨터기술과 자동제어기술의 발달로 점차 자동화되면서 심도유지의 정확도가 크게 향상되었다[1]. 그러나 함속도가 임계속도(Critical Speed) 근처가 되면 제어판에 의한 제어타력이 미약함으로 인해 심도제어탱크(Depth Control Tank)나 추력기(Thruster) 등에 의한 심도 제어 시스템이 필수적으로 요구된다.

ROV(Remote Operated Vehicle)나 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 같은 탐사정에서는 빠른 제어 응답을 얻기 위하여 추력기를 주로 사용하나 소음이 큰 단점이 있으므로 수중함의 경우는 소음을 줄일 수 있는 심도제어 탱크를 사용한 시스템이 주로 사용된다.

따라서 본 논문에서는 자유표면(Near Surface) 및 임계속도(Critical Speed) 근처에서 기동하는 수중함의 자동심도제어 시스템을 고려하여 시스템 모델링 및 제어 알고리즘과 해파의 우세주파수(Dominant Frequency)에 오염된 심도측정센

서를 위한 적응노치필터(Adaptive Notch Filter)를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어알고리즘과 적응노치필터의 제어성능 및 설계 타당성을 제시하였다.

II. 적용 모델

1. 피제어 시스템 모델링

수중함의 심도유지를 위해 설계된 하드웨어 요소는 크게 탱크와 펌프 그리고 유량 제어 밸브(Flow Control Valve)로 구성되어 있다. 따라서 수중함의 심도를 제어하기 위해서는 유량 제어 밸브를 적절하게 조작하여 해수가 탱크로 유입/유출되게 함으로써 수중함이 받는 부력을 변화시켜야 한다.

수중함의 완전한 운동특성을 묘사하기 위해서는 6자유도 운동방정식이 필요하다[2]. 그러나 연직면(Vertical Plane)에서 수중함 운동방정식은 수직운동 및 피치운동에 대한 2자유도 운동방정식으로 표현할 수 있으며 피치운동은 심도제어탱크로 제어 불가능하나 트림탱크로 보상할 수 있다.

따라서 수직 운동만을 고려하고 효과적인 제어기설계를 위하여 제어판의 타력이 극히 미약하고 질량에 지배적이라고 가정하면 탱크로 유입/유출되는 물의 양에 대한 순수 부력이 수중함의 수직 가속도에 비례하는 것으로 간주함으로써 다음과 같이 간단한 모델식으로 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{Z}(t) = \frac{1}{C} \int Q dt = F(t) \dots\dots\dots(1)$$

- 단, M : 부가 질량(Added Mass)
- \ddot{Z} : 수중함의 수직 가속도
- Q : 유량 변화율
- F(t) : 부력
- C : 탱크의 커패시턴스

2. 파도 외란 모델

수중함이 자유표면하에서 운동할 경우 해파는 선체 및 선체에 외란으로 작용한다. 본 논문에서는 해파에 대한 제어시스템의 성능을 분석하기 위하여 식(2)와 같이 ITTC 해파스펙트럼[3]을 사용하였으며 해파의 파워 스펙트럼은 그림1과 같다.

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp[-B/\omega^4] \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

- A = 8.2 x 10g
- g = 9.8 [m/sec²]
- B = 3.11 x 10/(H_{1/3})²
- H_{1/3} = Significant Wave Height [cm]
- ω = Frequency [rad/sec]

이때 수중함에 미치는 파도의 영향은 심도에 따라 아래식 (3)과 같이 지수적으로 감소한다.

$$V(t) = \exp[-\omega_e t^2 \cdot Z(t)/g] \dots\dots\dots (3)$$

여기서, Z(t)는 함의 심도이며, ω_ei는 조우주파수(Encounter Frequency)로써 식(4)와 같다.

$$\omega_{ei} = \omega_i \left(1 + \frac{\omega_i}{g} U \cos\mu\right) \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

- ω_i = 표준해파주파수
- U = 함속도
- μ = Head Angle

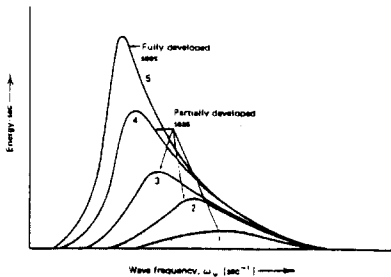


그림 1 해파 파워 스펙트럼

III. 제어 알고리즘

심도제어탱크와 수중함으로 구성된 피제어 시스템은 3중 적분기 시스템으로 표현된다. 따라서 보상기는 P-D-A(Proportional-Derivative-Acceleration) 형태로 선정하였다. 수중함에 압력심도 센서만 적용할 경우 속도 및가속도 측정이 불가능하므로 의사-미분기(Pseudo-Differentiator)를 사용하였다.

보상기의 설계 파라미터들은 속도 루프에서 미분 및 가속도 이득을 해석적으로 구하고 위치 루프에서 비례 이득을 선정할 다음 게인 및 위상 여유를 조사하여 시스템의 안정도 및 성능을 검토하였다.

이 외에 심도변경시 함의 최대 수직 속도를 제한할 수 있도록 1차계 필터를 통해서 속도명령을 재생하도록 하였으며, 해파의 우세주파수(Dominant Frequency)에 오염된 심도 측정 센서를 위해 적응노치필터(Adaptive Notch Filter)를 설계하였으며 그림2는 적응노치필터의 주파수 특성을 나타낸다[4].

이와 같이 설계된 수중함의 심도 제어시스템에 대한 전체 구성도는 그림3과 같다.

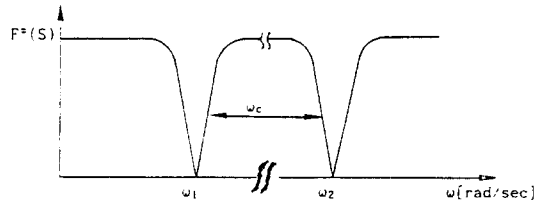


그림 2 적응노치필터의 주파수 특성

IV. 시뮬레이션 결과

수중함의 심도제어장치에 P-D-A 제어기를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 P-D-A 제어기의 이득값은 K_p=0.06, K_d=172.6, K_a=4425.3이며 필터의 시정수 T₁=T₂=1.0, T₃=0.5이고 탱크의 커패시턴스 C는 중력가속도 g를 이용하여 1/9,800로 선정하였다.

해파에 의한 외란은 그림4와 같이 주어진다. 그림3에서 디지털 제어기는 샘플링 시간을 0.1초로, 플랜트 모델의 시뮬레이션은 4th Runge-Kutta 방법으로 충분 시간을 0.1초로 하였으며 적용언어는 Fortran 77, 사용한 컴퓨터는 PC-386이다. 그림5은 시뮬레이션 흐름도를 나타낸다. 그림6은 전형적인 시뮬레이션 결과를 나타낸 것인데 해파 외란에 대하여 적응노치필터(Adaptive Notch Filter)가 있는 것이 성능 및 제어 입력면에서 다소 유리함을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 임계속도(Critical Speed) 근처에서 기동하는 수중함의 심도제어를 위하여 적절한 제어알고리즘을 개발하였다.

자유표면 근처에서 심도유지 제어시 파랑영향으로 인한 심도 센서 오염에 대처할 수 있는 적응노치필터적용, 3중 적분기 형태의 시스템에 대한 P-D-A 제어알고리즘 적용시 의사 미분기의 적절한 시정수 선정과 파워스펙트럼의 파랑 재현등으로 수중함의 심도제어성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 해파 외란에 대해서도 적절한 심도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

앞으로 수중함의 심도제어탱크, 펌프/밸브에 대한 좀 더 정확한 모델에 대한 분석과 펌프/밸브의 불감대(Deadzone) 및 포화화 같은 전형적인 비선형 특성 영향에 대한 연구가 계속되어야 한다.

참고 문헌

- [1] Lennart Bystrom, "Adaptive Control of a Submarine in Shorting Condition in Waves", WARSHIP 88 Inter.Sympo.on Conventional Naval Submarine, Paper No.9 pp.1-9, May 1988.
- [2] J.Feldman, "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equation of Motion", DTNSRDC/spp-0393-09, 1979.

[3] Bhattachayya, "Dynamics of Marine Vehicle",
John Wily & Sons, 1978.

[4] 최종락, 양승운, 이동익, 조현진, "수중합 자동심도 제어
시스템 설계연구(1)",
ADD Report, No.NSRD-513-90472, 1990.

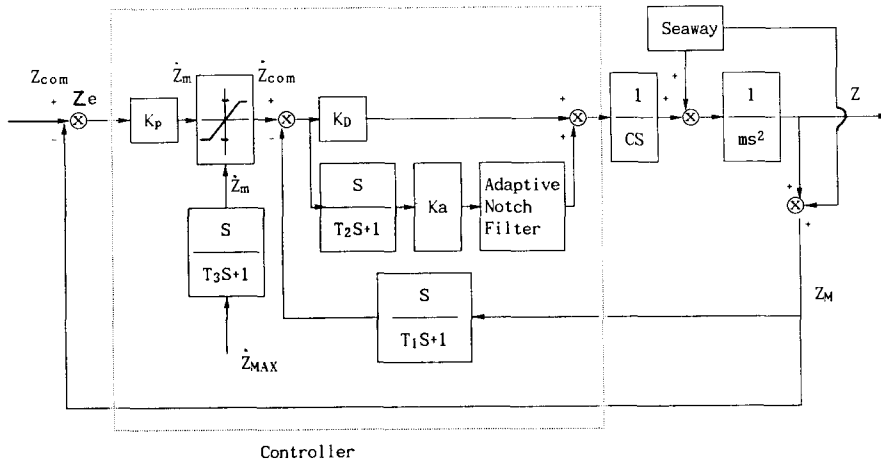
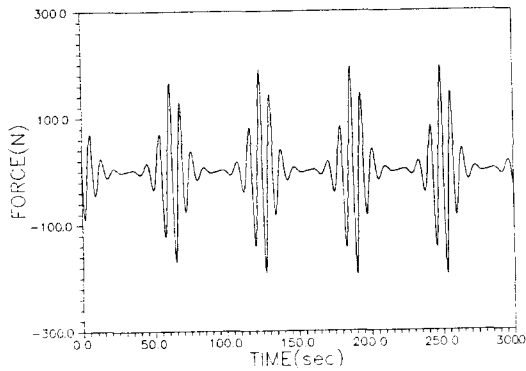
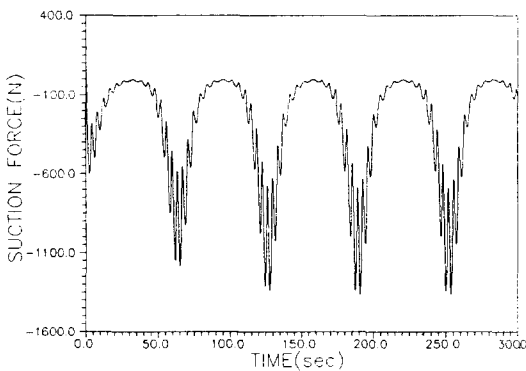


그림 3 자동심도 제어시스템의 전체 구성도



(a) 해파력



(b) 흡인력

그림 4 해파 외란 재생

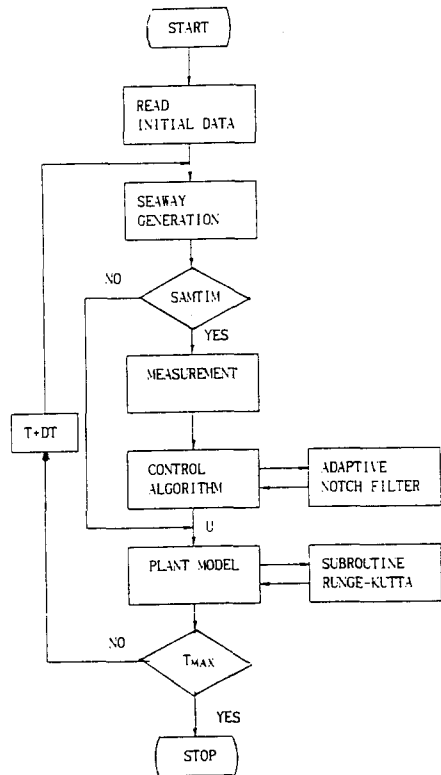
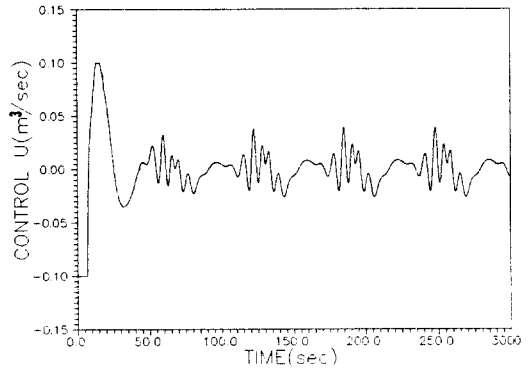
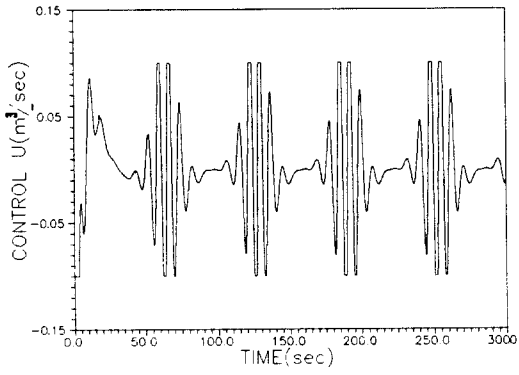
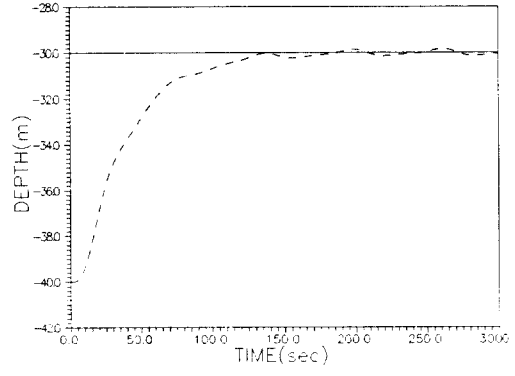
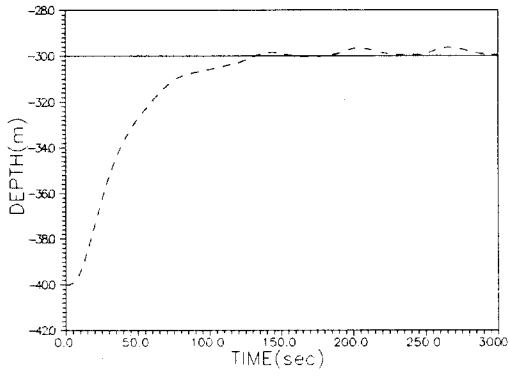


그림 5 시뮬레이션 흐름도



(a) 적응노치필터 없는 경우

(b) 적응노치필터 있는 경우

그림 6 시뮬레이션 결과