

# 적응노치필터를 이용한 심도제어시스템 외란처리

김 윤호 윤 형식 임 재환 이 석필 박 상희  
연세대학교 공과대학 전기공학과

## Disturbance Countermeasurement of Depth Control System using Adaptive Notch Filter

Youn-ho Kim, Hyong-Sig Youn, Jae-Whoan Lim, Suk-pil Lee, Sang-Hui Park  
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei Univ.

### Abstract

One of the most difficult problems in depth control for underwater vehicle is the effect of seaway disturbance. One component of the seaway forces is of large magnitude with a relatively narrow-band, first order component. The other component is generally of somewhat smaller magnitude, second order component. Since the magnitude of the first order component is generally much greater than the compensating force that can be generating by the planes, it is undesirable for the controller to generate a control command. In this paper, we designed adaptive notch filtering system using filter bank structure. Energies of each band-passed signal are obtained by MA(Moving Average) method and compared to produce center frequency. By adapting this parameter to notch filter, 1st order seaway disturbance can be removed, which lead to the improvement of automatic depth control system.

### 1. 서론

수중함의 자동제어 시스템을 설계할 때 가장 큰 어려운 중의 하나는 해파외란에 의한 영향을 줄이는 것이다. [1]

해파에 의한 스토캐스틱 외란(stochastic disturbance)은 비교적 좁은 주파수 영역을 가지며 파워스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectrum Density)가 큰 1차계 해파력과 다소 작은 PSD를 갖는 2차계 해파력으로 이루어져 있다. [2,3] 이 중 특히 1차계 해파력은 수중함의 선수 및 선미타에 의하여 발생하는 보상 제어력(compensating control force)보다 크기 때문에 이 성분을 궤환시키더라도 제어성능이 향상되지 않는다. [1] 또한, 1차계 해파력은 함 센서를 오염시켜 심도 정보의 정확도를 떨어뜨리므로 이 성분을 제거하고 제어가능한 신호만을 제거기에 입력시킴으로써 제어시스템

의 성능을 개선할 수 있다.

신호의 스펙트럼을 구하기 위한 일반적인 방법인 퓨리에 해석법은 직접계산에 의해 구하는 블록처리방식과 필터뱅크 구조로서 구현하는 연속처리 방식이 있으며, 후자의 방법은 주로 비정상 신호인 음성신호의 분석, 코딩 및 인식분야에서 많이 쓰인다. 특히 해파신호의 중심주파수를 최대한 빠른 시간내에 찾아내어 제거해야하는 적응노치필터의 설계에서 필터뱅크방법은 블록처리기법 및 적응알고리즘 기법에 비해 다음과 같은 장점이 있다. [4]

- o 반응시간이 짧아 실시간 구현이 용이하다.
- o FFT 방법에 비해 대역별 주파수 분해능(frequency resolution)의 조절이 자유롭다.
- o 계산과정이 매우 간단하다.

본 연구에서는 함속도 및 해상상태와 시간에 따라 변하는 해파신호의 스펙트럼을 정확히 추정하고 PSD가 큰 중심주파수 대역의 신호를 제거하기 위한 방안으로 필터뱅크구조를 통해 각 밴드의 에너지분포를 추정, 비교한 후 중심 주파수 대역을 제거하는 적응노치필터링 시스템을 고안하였으며, 이를 이용하여 제어시스템의 성능을 개선하였다.

### 2. 해파외란 모델

해파신호는 함속도와 해상상태에 따라 각각 변화하는 비정상 신호(nonstationary)이며 스펙트럼이 그림 2.1와같이 중심주파수  $\omega_c$ 에서 최고치를 갖는 레일레이(Rayleigh)분포를 가진다. 따라서 1차계 해파력을 제거하기 위해서는 먼저 변화하는 신호에 따른 중심주파수의 추적이 필요하다.

본 연구에서는 제어시스템의 검증용 위한 제어 외란으로서 식 (2-1)과 같이 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 공인된 해파스펙트럼식을 이용하였다. [5]

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp(-B/\omega^4) \quad (2-1)$$

여기서

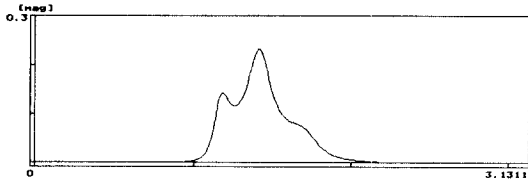
$$A : 8.1 \times 10^{-3} \times g^2 = 8.385 [ft^2/sec]$$

$$B : 33.56/(H/1/3)^2$$

$\omega$  : 순환 주파수(Circular Frequency)

g : 중력 가속도

H 1/3 : 파고



2	1	2
차	차	차
계	계	계

그림 2.1 해파신호의 스펙트럼분포와 해파력

### 3. 해파외란 처리

비정상적인(non-stationary) 해파신호를  $x(n)$ 이라 하고 창함수를  $w(n)$ 이라 할때 윈도우를 통해 바라본 신호  $x(n) \cdot w^*(n-m)$ 를 안정(stationary)한 구간이라고 가정하면 식 (3-1)과 같은 Discrete STFT (Short Time Fourier Transform)을 얻는다. [6]

$$X_n(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \cdot w(n-m) e^{-j\omega m} \quad (3-1)$$

이 식은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$X_n(e^{j\omega}) = e^{-j\omega n} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n-m) \cdot w(m) e^{j\omega m} \quad (3-2)$$

윗식에서  $w(n) \cdot e^{j\omega n}$ 을  $h(n)$ 으로 정의하면

$$X_n(e^{j\omega}) = e^{-j\omega n} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n-m) \cdot h(n) \quad (3-3)$$

창함수  $w(n)$ 은 저역통과필터(LPF)의 특성이 있으므로 주파수변조된  $h(n)$ 은 대역통과필터(BPF)의 주파수응답이 된다. 따라서 식(3-2)은 그림 3-1. (a)와 같이 입력신호가 주파수응답이  $h(n)$ 인 대역통과필터를 통과한 후  $e^{-j\omega n}$ 만큼 변조된 것으로 볼 수 있다.

한편 short-time 스펙트럼의 크기는 그림 3.1(b)와 같이 전파정류기와 저역통과필터를 이용하여 근사화할 수 있는데 이는 포락선검출기(envelope detector)의 원리와 같다. [6]

이때 단순히 대역통과된 신호  $y(n)$ 의 스펙트럼크기를 구하기보다는 에너지를 추출하기 위하여  $y(n)$ 을 자승한후 센서에서의 돌발적인 노이즈에 대비하기 위하여 이동평균(MA, Moving Average)을 취한다. [7] 최종적인 구조는 그림 3.1 (c)에 나타나 있다.

이러한 대역통과필터를 해파신호의 주파수대역 전체에 대해 다채널로 확장시켜 필터뱅크를 구현한 후 각 밴드를 통과한 신호의 스펙트럼의 에너지를 비교하여 가장 큰 부분을 선택하여 중심주파수를 구한다.

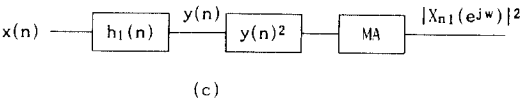
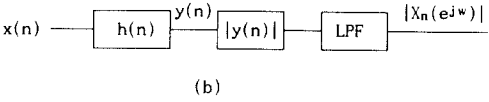
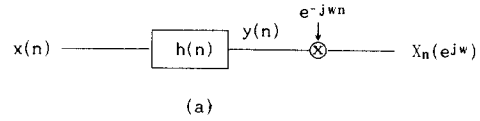


그림 3.1 단일채널에서의 외란신호의 정보추출 방법

한편 각 대역통과필터는 4차의 IIR 버터워드필터로 구성하였으며 전체 필터뱅크의 주파수 응답은 그림 3.2와 같다. 이때 저주파대역에서의 대역폭을 고주파대역에 비해 상대적으로 좁게 함으로써 해파스펙트럼의 레일레이분포에 따른 주파수분해능을 좋게 하였다.

추정된 중심주파수는 식(3-4)와 같은 주파수응답을 갖는 노치필터에 적용된다. 이러한 노치필터는 그림 3.3과 같은 특성에 의해 중심주파수 대역(1차계 해파력 대역)을 제거한다.

전체적인 적응 노치필터링 시스템은 그림 3.4와 같이 구성된다.

$$H(j\omega) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + (2\xi\omega_0 + g_2)s + \omega_0^2} \Big|_{s=j\omega} \quad (3-4)$$

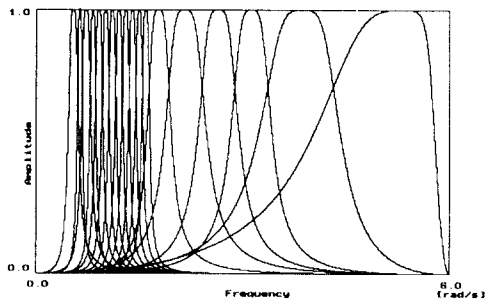


그림 3.2 필터뱅크의 주파수응답

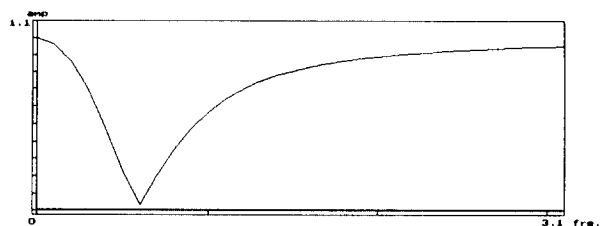
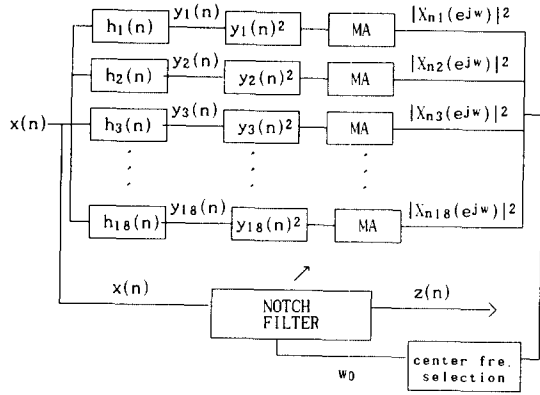


그림 3.4 노치필터의 주파수 특성



$x(n)$  : 해파입력신호  
 $y_n(n)$  : 각 밴드를 통과한 신호  
 $z(n)$  : 1차계 외란이 제거된 제어입력신호  
 $w_0$  : 중심 주파수

그림 3.3 적응 노치 필터링 시스템

그림 3.3에서와 같이 1차계 해파외란이 제거된 신호는 그림 3.5와 같은 수중함 자동제어시스템의 제어기입력신호로 들어간다. [8] 이때  $\delta_b$ 와  $\delta_s$ 는 각각 선수타각 및 선미타각을 나타내며 최종적인 제어력으로 작용한다. 센서로부터 측정된 심도 및 피치각은 다시 적응 노치필터로 궤환되어 전체적인 제어 시스템을 형성한다.

#### 4. 시뮬레이션

2절에서 제안된 ITTC 해파스펙트럼을 이용하여 VAX 6420 상에서 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 스펙트럼의 추정을 위하여 필터뱅크에 입력되는 해파신호는 0.5초 간격으로 샘플링 하였으며, 노치필터를 포함한 전체 제어시스템의 샘플 주기는 0.1초로 하였다.

그림 4.1과 4.2은 각각 수중함의 현재심도가 10 m 이고 명령값이 10 m 일때, 적응 노치필터링을 하지 않은 경우의 심도와 피치각의 변화를 나타낸다. 마찬가지로, 그림 4.3과 그림 4.4는 적응 노치필터링을 수행한 경우의 심도와 피치각의 변화를 나타낸다.

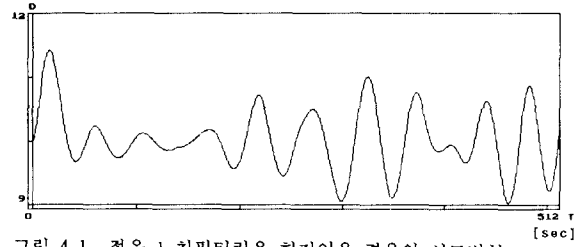


그림 4.1 적응 노치필터링을 하지않은 경우의 심도변화

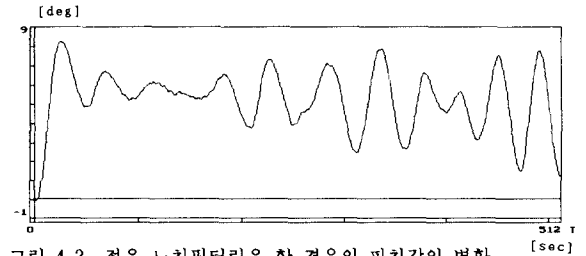


그림 4.2 적응 노치필터링을 한 경우의 피치각의 변화

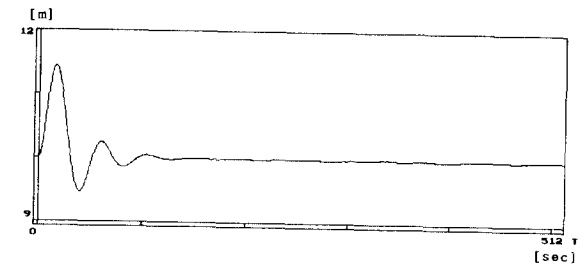


그림 4.3 적응 노치필터링을 한 경우의 심도변화

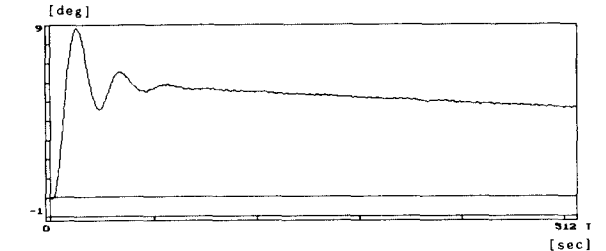


그림 4.4 적응 노치필터링을 한 경우의 피치각의 변화

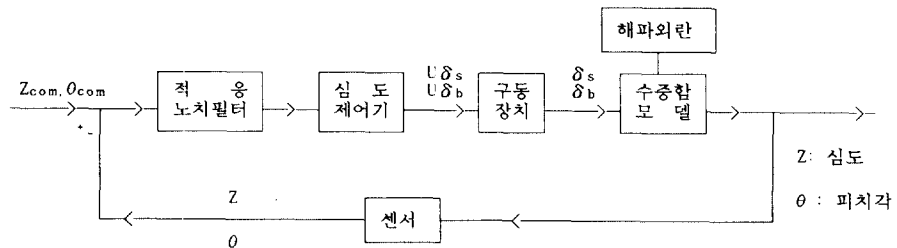


그림 3.5 자동 심도 제어 시스템 블록 선도

## 5. 결론

본 연구에서는 수중함의 자동 심도제어시스템에서 외란으로 작용하는 1차계 해파력을 제거하기위해서 필터뱅크구조를 이용한 적응 노치필터를 고안하였다.

실험결과, 적응 노치필터링을 함으로서 그렇지 않은 경우에 비해 훨씬 안정되고 빠른 수렴속도를 가짐을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. R.J.Daniel, "Submarine Today," warship 88  
International symposium paper No.1, 1988
2. Lennart Bystrom, "Adaptive Control of a Submarine  
in a Snorting Condition in Waves," warship 88  
International symposium paper No 1, 1988
3. A. J. Musker, "Prediction of Wave Force and Moments on  
a Near Surface Submarine," Int. Shipbuild progr.,  
Vol.31, pp 2-12, 1984
4. Douglas O'Shaughnessy, "Speech Communication,"  
Addison Wesley, p219-220, 1990
5. Bhattachayya, "Dynamics of Marine Vehicle,"  
JohnWilley & Sons, 1978
6. L. R. Rabiner, R. W. Schafer, "Digital Processing of  
Speech Signals," Prentice Hall, 1978
7. Athanasios Papoulis, "Probability, Random Variable,  
and Stochastic process," McGraw-Hill Book Company, 1984
8. 이석필, 윤형식, 박상희, "자유표면에서의 수중함 자동심  
도제어 시스템 성능개선," 한국 자동제어 학술회의, Vol.1,  
1991