

---

# ATW 기법을 이용한 수중 기동함정의 소음 특성 분석

윤병우\*

Analysys of the characteristics of maneuvering underwater vessels

Byung-woo Yoon\*

## 요 약

기동하는 잠수함이나 함정 등의 방사 소음 특성은 토날 신호와 광대역 배경잡음으로 구분될 수 있다. 토날 신호는 함정의 모터나 엔진 등의 회전으로 인해 발생하는 것이고, 광대역 배경잡음은 프로펠러에 의해 방사된 기포와 선체의 주위 물의 흐름 등으로 인해 발생하는 것이다. 이와 같은 기동함정의 방사 소음의 토날 신호와 배경 잡음을 분석하면 함정의 종류나 속도 등에 대한 정보를 분석할 수가 있다. 이 때 배경잡음의 세기가 토날 신호에 비하여 큰 경우는 토날 신호를 배경잡음으로부터 분리하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 ATW(Automatic Tracking Window) 전처리 알고리즘을 이용하여 방사 소음의 방향을 탐지하고, 표적 방향으로 배열 센서의 빔을 형성하여 신호를 채취한다. 또한 ATW 알고리즘을 이용하여 이 신호에서 광대역 잡음에 섞여 있는 미약한 토날 신호를 분리할 수 있는 방법을 제시한다.

## ABSTRACT

The noise of maneuvering submarines or vessels can be divided into the tonal signals and broadband ambient noise. Tonal signals are from the revolution of motors and engines of vessels, and broadband ambient noise is from the bubbles which are generated by the propellers and the flow of water around vessels. We can analyze the kinds and the speed of vessels if we analyze the tonal signals and ambient noise. But, it is difficult to divide the tonal signals from the ambient noise when the power of tonal signal is much weaker than the power of ambient noise. In this paper, we detect the direction of arrival(DOA) of the noises generated by vessels with the automatic tracking window(ATW) preprocessing algorithm, and make a beam to the direction of the targets. We suggest a method which can separate weak tonal signals from broadband ambient noise with the ATW algorithm.

## 키워드

Sonar, DOA, Ambient noise, ATW algorithm

## 1. 서 론

공간이나 수중에 존재하는 신호원의 위치, 거리, 이동방향, 속도 등을 추정하는 것은 레이더나 소나 시스템 등에서 매우 중요하다. 수중에서는 음파만이 신호 전달의 유일한 수단이므로 주로 소나를 이용하여 통신을 하거나 표적에 대한 정보를

알아낸다. 소나란 수중 음향을 이용하여 바다에서 표적의 위치, 성질 등을 측정하는 방법이나 장비를 말하는데 능동소나와 수동소나로 구분할 수가 있다. 능동소나는 음향신호를 송신하고 표적으로부터 반사된 신호를 수신하여 표적을 탐색하고 추정하는 것을 말하고, 수동소나는 표적 자체에서 방사되는 소음을 이용하여 표적을 탐색하고 추정

---

\* 경성대학교 전기전자공학과  
접수일자 : 2003. 7. 31

하는 방법을 말한다. 따라서 수동소나는 주로 방어적 목적으로 많이 이용되고 능동소나는 공격적 목적이나 물체의 탐지 등에 많이 이용된다[1,2].

함정이나 잠수함 등이 기동을 하면 불가피하게 여러 가지 요인에 의한 음향 에너지를 방사하게 된다. 이러한 음향 신호는 엔진이나 모터의 회전에 의한 토날 신호들과 프로펠러의 회전이나 함정의 주변으로 밀려나는 물보라 등에 의한 배경잡음으로 크게 분류할 수 있다. 이러한 토날 신호와 배경 잡음 등은 함정의 종류, 함정의 속도 등에 따라 특성이 달라지는데 이러한 음향을 감지하여 분석하면 표적에 대한 여러 가지 정보를 알아낼 수 있다[3]. 본 연구에서는 자동추적 윈도우 알고리즘을 이용하여 함정의 방사 소음을 분석하여 광대역 잡음과 토날 성분으로 분리함으로써 표적의 특성이나 함정의 종류를 분석하기 위한 자료를 추출하고자 한다.

## II. 기동함정의 방사소음 분석

### 2.1 ATW 전처리 알고리즘

스펙트럼 분석 알고리즘은 페리오도그램, 코렐로그래프 등과 같은 고전적인 방법과 AR모델, MA 모델, ARMA 모델 등과 같은 파라메트릭(parametric) 방법, 그리고 최소분산알고리즘, 고유치분해방법 등과 같은 고해상도 알고리즘으로 대별할 수가 있다. 고전적인 방법은 푸리에변환을 이용하는 방법으로 알고리즘이 비교적 간단한 반면 주파수 추정 해상도가 낮고 사이드로브가 많다. 또한 파라메트릭 방법은 스토캐스틱 신호를 입력하여 원하는 신호를 발생시킬 수 있는 필터의 가중벡터를 구함으로써 고전적 방법보다 해상도가 뛰어난 방법으로서, 최대엔트로피 방법과 선형 예측방법 등이 있다. 이 방법들은 해상도를 높이기 위해 예측차수를 늘리면 이에 비례해서 의사첨두치들이 발생한다는 단점이 있다. 고해상도방법인 최소분산알고리즘과 MUSIC 방법 등에서는 해상도는 좋으나 고유치의 취사선택과정에서 신호에 포함된 정현파의 개수에 대한 사전 지식이 필요하다[4].

주파수가  $w_0$ 이고 진폭이  $A_0$ 인 하나의 복소 정현파에 전력이  $\rho_n$ 인 백색 가우시안 잡음  $M[n]$ 이 첨가된 다음과 같은 신호를 가정하면

$$x[n] = A_0 e^{jw_0 n} + M[n], -\infty \leq n \leq \infty \quad (1)$$

이 신호의 자기 상관함수는 다음과 같다.

$$r[m] = A_0^2 e^{jw_0 m} + \rho_n \delta[m], -\infty \leq m \leq \infty \quad (2)$$

이 때  $\delta[m]$ 은  $m$ 이 0일 때만 값을 가지는 델타 함수를 나타낸다. 그리고 자기상관함수  $r[m]$ 의 푸리에 변환은 전력 밀도함수로서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} R(w) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} r[m] e^{jwm} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \{ A_0^2 e^{-j(w-w_0)m} \\ &\quad + \rho_n \delta[m] e^{-jwm} \} \\ &= A_0^2 \delta(w-w_0) + \rho_n \end{aligned} \quad (3)$$

그런데 식(2)에  $m \leq |N-1|$ 의 구간에 걸친 임의의 창함수  $h[m]$ 을 곱한 후 푸리에변환을 하면 이것은 창함수의 푸리에변환을  $w_0$ 만큼 평행이동시킨 것과 같은 결과가 된다.

$$\begin{aligned} R(w) &= \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} r[m] h[m] e^{jwm} \\ &= \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \{ A_0^2 e^{-jw_0 m} + \rho_n \delta[m] \} h[m] e^{-jwm} \\ &= \sum_{m=1}^{N-1} A_0^2 e^{-jw_0 m} h[m] e^{-jwm} \\ &\quad + \sum_{m=-(N-1)}^{-1} A_0^2 e^{-jw_0 m} h[m] e^{-jwm} \\ &\quad + \{ A_0^2 + \rho_n \} h[0] \\ &= \{ A_0^2 + \rho_n \} h[0] \\ &\quad + 2A_0^2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{m=1}^{N-1} h[m] e^{-j(w-w_0)m} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 백색잡음 성분은  $h[0]$ 에만 존재함으로 마지막 항은 잡음의 영향을 받지 않는다. 식(4)

에서 다음과 같은 함수를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 Q(w) &= Q_r(w) + jQ_i(w) \\
 &= A_o^2 \sum_{m=1}^{N-1} h[m] e^{-j(w-w_o)m} \\
 &= A_o^2 \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} h[m] e^{-j(w-w_o)m} - h[0] \right\} \\
 &= A_o^2 \{ H(w-w_o) - h[0] \}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $H(w)$ 는  $h[m]$ 의 DFT,  $Q_r(w)$ 와  $Q_i(w)$ 는 각각  $Q(w)$ 의 실수성분과 허수성분을 나타낸다.

그림1 (a)는 신호처리에서 많이 이용하는 창함수들이다. 이 함수를 그림 (b)와 같이 수정하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$h_m[m] = \begin{cases} h[m], & 1 \leq m \leq N-1 \\ 0, & m \leq 0 \end{cases} \tag{6}$$

식(2)에 수정된 창함수인  $h_m[m]$ 을 곱한 후 푸리에 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 R_m(w) &= \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} r[m] h_m[m] e^{-jwm} \\
 &= A_o^2 \sum_{m=0}^{N-1} h_m[m] e^{-j(w-w_o)m} \\
 &= A_o^2 H_m(w-w_o)
 \end{aligned} \tag{7}$$

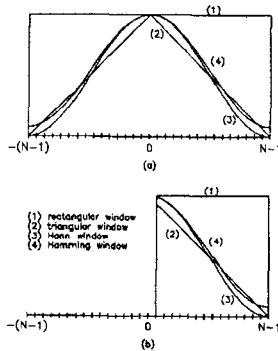


그림 1. 여러 가지 창함수.  
 (a) 원래의 창함수들, (b) 수정된 창함수들.  
 Fig. 1 Several window functions.  
 (a) original window functions,  
 (b) modified window functions.

여기서  $H_m(w)$ 는  $h_m[m]$ 의 DFT를 의미한다. 식(5)와 식(7)에서  $1 \leq m \leq N-1$ 의 구간에서는  $h[m]$ 과  $h_m[m]$ 이 같고  $h_m[0]$ 은 0이므로 두 식은 등가이다. 따라서  $Q(w)$ 를 실수부와 허수부로 나누면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Q_r(w) &= A_o^2 \operatorname{Re} \{ H_m(w-w_o) \} \\
 &= A_o^2 \sum_{m=0}^{N-1} h_m[m] \cos \{ (w-w_o)m \}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 Q_i(w) &= A_o^2 \operatorname{Imag} \{ H_m(w-w_o) \} \\
 &= -A_o^2 \sum_{m=0}^{N-1} h_m[m] \sin \{ (w-w_o)m \}
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서  $Q(w)$ 는  $H_m(w)$ 를 양의 방향으로  $w_o$ 만큼 평행이동시킨 것과 같고,  $Q_r(w)$ 는 우함수 형태이고  $Q_i(w)$ 는 기함수 형태이다. 그림 (b)의 창함수들을 푸리에 변환하면 그 특성이 그림 2와 같은 형태로 나타난다. 그림 2는 수정된 Hamming 창함수에 대한 주파수 특성을 도시한 것이다.

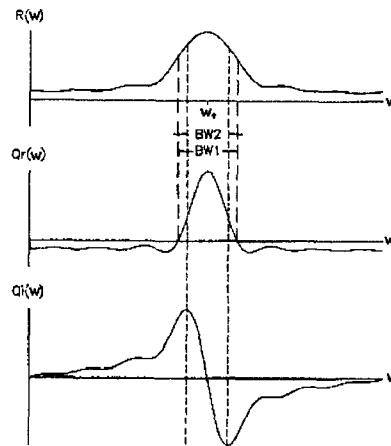


그림 2. 단일 정현파에 수정된 Hamming 창함수를 곱했을 때의 주파수 특성.

Fig. 2 The frequency characteristic of a sinusoidal signal multiplied by the modified Hamming window.

그림 2를 살펴보면 구하고자하는 주파수  $w_o$

근처에서는  $w_0$ 에 가까워질수록  $Q_r(w)$ 의 값은 증가하고,  $Q_i(w)$  값은 0에 가까워진다는 것을 알 수가 있다. 따라서 이들의 성질을 이용하면 구하고자 하는 주파수 근처에서 다음과 같은 스펙트럼 창함수  $SW(w)$ 를 구할 수 있다.

$$SW(w) = \begin{cases} 1, & \text{if } Q_r(w) \geq \alpha \\ & \text{and } |Q_i(w)/Q_r(w)| < \gamma \\ 0, & \text{if } Q_r(w) < \alpha \\ & \text{or } |Q_i(w)/Q_r(w)| \geq \gamma \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\gamma$ 는 임의의 문턱값을 나타낸다. 식 (10)과 같이 창함수를 택하면 잡음에 섞인 미지 신호 중심 주파수를 중심으로한  $SW(w)$ 를 자동으로 형성시킬 수 있는데 이것을 자동추적창함수(ATW)라고 한다. 일반적으로 배열안테나 등을 이용한 신호의 공간주파수를 추정할 때 배열 안테나 개수의 제한으로 인해 많은 사이드로브가 생기고 잡음에 묻혀있는 신호를 찾아내기가 쉽지 않다. 이 때 ATW 알고리즘을 이용하여 중심 주파수 근처에 창함수를 곱한 후 역변환을 한 후 이 신호를 방위각 추정 알고리즘에 적용하면 보다 향상된 방위각 추정을 할 수 있다. 또한 이러한 알고리즘을 이용하면 잡음에 섞인 신호들에 대한 일반적인 스펙트럼 분석에서도 스펙트럼 추정 특성을 향상시킬 수 있다.

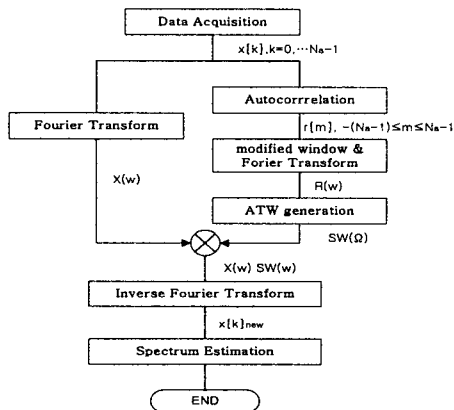


그림 3. ATW 알고리즘의 흐름도.  
Fig. 3 Flow diagram of ATW algorithm.

## 2.2 기동함정의 방사소음 분석

수중기동함정의 방사소음을 채취하기 위해서는 먼저 그림 4와 같이 배열안테나(하이드로폰 센서)를 이용하여 함정의 위치에 대한 방위각을 추정한 후, 그 방향으로 안테나의 빔을 형성한 후 데이터를 채취한다.

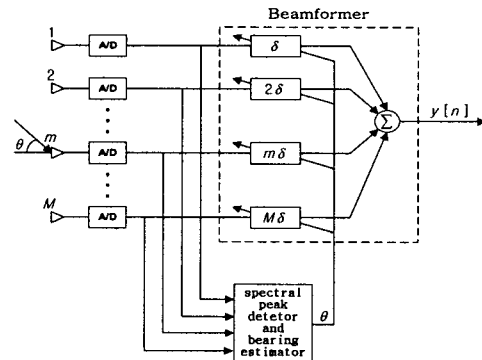


그림 4. 방위각 추정기와 빔형성기의 구조.  
Fig. 4 The structure of bearing estimator and beamformer.

함정이나 잠수함이 기동할 때 방사되는 잡음은 주추진기관에 의한 소음, 보조기계 소음, 캐비테이션 소음, 유체역학적 소음 등으로 대별할 수 있다. 주추진기관과 보조기계 소음은 불연속주파수 성분들로 이루어진 토날 성분으로 나타나고, 캐비테이션 소음은 프로펠러가 회전할 때 기포의 생성과 소멸로 인한 광대역 잡음으로 나타난다. 이 때 표적의 방위각을 추정하기 위해서 방사소음의 토날 신호 중 세력이 가장 강한 신호를 찾고 이것을 이용하여, ATW 전처리 알고리즘을 이용하여 각 안테나의 위상지연에 대한 공간주파수를 찾아내면 표적의 방위각을 추정할 수 있다[5]. 이와 같이 방위각을 추정하고 그림 4와 같이 각 센서에 입력된 신호에 지연(delay)  $\delta$ 를 적절히 조정하면 방위각  $\theta$ 에 대하여 모든 센서에서 유기된 신호의 위상을 일치(in-phase)시킬 수 있다. 따라서 신호  $y[m]$ 의 신호 성분의 세기는 센서의 개수 N에 비례하여 증가하며, 상대적으로 불규칙한 위상관계를 가지는 각 센서의 잡음 성분은 감소되며

로 신호대 잡음비를 개선할 수 있다. 이 때 각 센서에 대한 지연  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (11)$$

여기서  $c$ 는 수중에서의 음속을 나타내고  $d$ 는 센서간의 거리를 나타낸다.

빔형성기의 출력  $y[n]$ 은 다수의 토날성분과 광대역 배경잡음으로 이루어진 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y[n] = \sum_{i=1}^p A_i \cos(w_i n + \phi_i) + M[n] \quad (12)$$

여기서  $A_i, w_i, \phi_i$ 는 각각  $i$ 번째 토날신호의 진폭, 디지털 주파수, 위상을 나타내고  $M[n]$ 은 광대역 잡음을 나타낸다. 수중기동표적에서 발생하는 방사잡음은 저주파 대역에서는 비교적 균일한 분포를 갖는 반면 고주파 대역에서는 감소하는 경향이 있다. 이 경우 잡음의 전력이 토날 신호의 전력에 비해 클 경우 방사잡음으로부터 협대역의 토날 성분을 추출하기는 어렵다. 또한 많은 토날신호가 조밀하게 분포되어 있으면 인접한 성분에 편의가 생긴다. 그래서 본 연구에서는 주파수대역을 몇 개의 채널로 분리하고 각 채널에 대해 독립적인 ATW를 형성하는 방법을 사용하였다.

그림 5는 방사소음 분석의 흐름도이다. 먼저 A/D변환기로 신호를 채취하고 FFT를 함으로써 방사소음의 주파수특성을 구하는데, 여러 번의 시행으로 평균을 취함으로써 보다 정확한 방사소음의 주파수특성을 얻는다. 그리고 방사소음의 스펙트럼을 몇 개의 채널로 분리하여 각 채널에 대하여 독립적으로 ATW를 취하여 토날성분과 배경잡음을 분리한다. 배경잡음의 스펙트럼은 포락선이 중요하므로 토날 성분과 분리된 배경잡음을 부분선형화 함으로써 배경잡음의 포락선을 구한다.

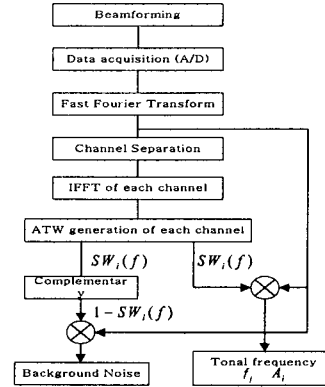


그림 5. 방사소음과 토날 신호의 분석 흐름도  
Fig. 5 The flow diagram of the analysis of the ambient noises and tonal signals

### III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 A/D 변환기를 이용하여 실제 함정의 방사 소음을 4 kHz의 샘플링 주파수로 채취하여 실험데이터로 사용하였다. 이 때 1024 포인트씩을 한 프레임으로 하여 신호의 스펙트럼을 분석하였으며, 10 프레임의 스펙트럼을 평균하여 표적 방사 소음의 스펙트럼을 구하였다. 또한 배경잡음과 토날 성분을 분리하기 위하여 전체 주파수대역을 여러 개의 채널로 분리하고, 분리된 각 채널에 대하여 독립적으로 ATW를 형성한 후 이들을 종합하여 전체 ATW를 형성하였다. 그리고 형성된 ATW를 이용하여 토날성분과 배경 잡음을 분리하고, 분리된 배경 잡음에 대해 부분 선형화를 함으로써 광대역 배경 잡음의 포락선을 구하였다.

그림 6은 토날신호가 강한 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과로, 전체 스펙트럼을 16개의 채널로 분리하고 4포인트로 부분선형화를 하였고 수정된 Hann 창함수를 이용하고  $\alpha$ 와  $\gamma$ 를 모두 0.5로 하였을 경우이다. 또한 그림 7은 토날신호와 배경 잡음의 전력이 비슷한 경우로, 전체 스펙트럼을 8개의 채널로 분리하고 부분 선형화는 6포인트씩으로 하였으며 Hann 창함수를 이용하여  $\alpha$ 는 0.5,  $\gamma$ 는 0.3으로 한 경우이다.

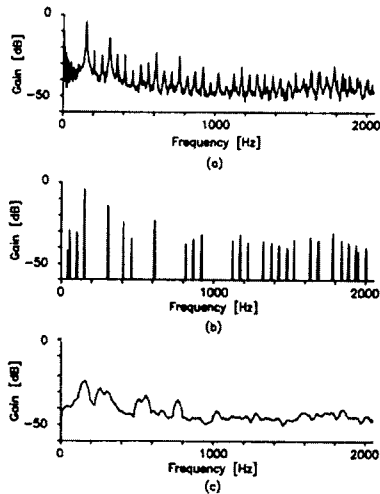


그림 6. 토날신호가 배경잡음보다 훨씬 강한 경우.  
(a) 방사소음의 스펙트럼, (b)분리된 토날신호,  
(c)배경잡음의 포락선 스펙트럼.

Fig. 6 When the strength of tonal signal is superior than background noise.  
(a) the spectrum of ambient noise, (b) tonal signal, (c) the envelope of background spectrum.

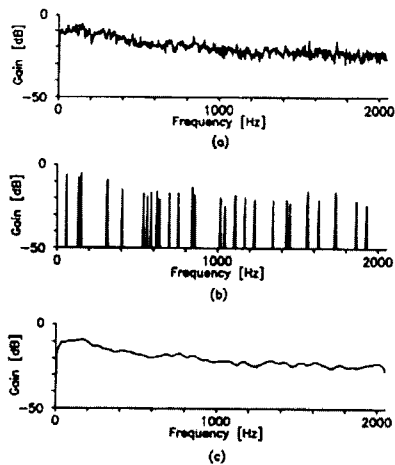


그림 7. 토날신호와 배경잡음의 전력이 비슷한 경우.  
(a) 방사소음의 스펙트럼, (b)분리된 토날신호,  
(c)배경잡음의 포락선 스펙트럼.

Fig. 7 When the strength of the tonal signal is similar with the background noise.  
(a) the spectrum of ambient noise, (b) tonal signal, (c) the envelope of background spectrum.

위의 두 시뮬레이션 결과를 볼 때 ATW 전처리 알고리즘을 이용하면 스펙트럼의 실수성분과 허수 성분의 위상 특성을 이용함으로써 강한 잡음에 묻혀 있는 토날 신호를 배경잡음으로부터 효과적으로 분리할 수 있음을 알 수 있다.

## V. 결론

물속에서는 음파가 유일한 신호 전달 수단이다. 따라서 기동하는 적의 함정이나 잠수함의 정보를 획득하기 위해서는 그들이 방사하는 소음을 분석하여야 한다. 기동 함정의 소음은 함정의 종류나 속도에 대한 기본적인 자료가 될 수 있는 토날 신호와 프로펠러의 회전으로 발생하는 기포 등으로 인한 광대역 배경잡음을 구성되어 있다. 본 연구에서는 표적의 방향으로 빔을 형성한 후 데이터를 샘플링하고, ATW 알고리즘을 이용하여 잠수함이나 함정의 기동 소음을 분석하였다. 시뮬레이션을 통하여 ATW 알고리즘을 이용하면 토날 신호의 전력에 비해 광대역 배경 잡음의 전력이 강한 경우에도 토날 신호를 분리해 낼 수 있음을 보였다.

## 참고 문헌

- [1] W. C. Knight, R. G. Pridham, and S. M. Kay, "Digital Signal Processing for Sonar, " Proc. IEEE, vol. 69, no.11, November 1981
- [2] W. S. Burdick, Underwater Acoustic System Analysis, Prentice-Hall, Inc., 1984.
- [3] M. A. Deaett, Signature Modeling for Acoustic Trainer Synthesis, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. OE-12, no.1, January 1987.
- [4] S. Lawrence Marple Jr, Digital Spectral Analysis with Applications, Prentice-Hall, Inc, 1987.
- [5] 윤병우, 신윤기, "자동추적원도우를 이용한 방위각 추정 알고리즘의 개선에 관하여," 대한전자공학회 논문집, 제 27권 12호, 1990년 12월
- [6] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, Di-

- gital Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., 1975.
- [7] W. R. Wu and P. P. Cheng, "A nonlinear IMM algorithm for maneuvering target tracking," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-30, No. 3, pp. 875-886, 1994.
- [8] W. R. Wu and D. C. Chang, "Maneuvering target tracking with colored noise," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-31, No. 4, pp. 1311-1320, 1996.

### 저자 소개



#### **윤병우(Byung-Woo Yoon)**

1987년 부산대학교 전자공학과 공학사

1989년 부산대학교 전자공학과 공학석사

1992년 부산대학교 전자공학과 공학박사

1993년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원

1995년~현재 경성대학교 전기전자·컴퓨터공학부 부교수

※ 관심분야 : 배열안테나, 적응신호처리, 음성신호처리, VLSI 설계 등