

# 압축 센싱 기법을 자기상관 필터뱅크 방식에 적용한 광대역 프로펠러 소음 추정 기법 연구

임준석\*, 편용국°, 홍우영\*

## Study on Hidden Period Estimation in Propeller Noise by Applying Compressed Sensing to Auto-Correlation and Filter-Bank Structure

Jun-Seok Lim\*, Yong-Guk Pyeon°, Woo-Young Hong\*

### 요약

배의 방사 소음을 이용하여 배를 탐지하는 데는 협대역 톤을 추정하는 방법과 광대역 신호에 내포된 주기성 신호를 추정하는 방법이 있다. 그 중에서 광대역 신호에 내포된 주기성 신호를 추정하는 방법을 데몬 신호 처리법이라고 한다. 본 논문에서는 데몬 처리를 위해서 압축 센싱 기법을 자기 상관기 필터뱅크에 적용한 기법을 제안한다. 그리고 합성된 신호와 실제 신호를 바탕으로 기존 방법들과 비교하여 기본 주파수 신호를 우수하게 추정할 뿐만 아니라 기존 방법에 비해서 짧은 신호 길이를 사용해도 우수한 성분 추정 성능을 할 수 있음을 보인다.

**Key Words** : Sonar Signal Processing, DEMON, Filter Bank

### ABSTRACT

Narrow band signal estimation and broad band signal estimation can be used to detect the ship-radiated noise. The broad band signal estimation method to detect the ship-radiated noise is called DEMON (Detection of Envelop Modulation On Noise). This paper proposes a new DEMON algorithm applying compressed sensing algorithm to filter bank and autocorrelation. We show the proposed algorithm estimates the hidden period in the wide band signal better than the conventional DEMON algorithm and the recently proposed filter-bank based DEMON algorithm. Especially we show that the proposed algorithm needs shorter data length than the conventional DEMON algorithm.

### I. 서론

최근 국내에서도 많은 연구자들에 의해서 수중 소나 관련 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1-5]</sup>. 소나 시스템에서의 주요 관심사들 중 하나는 다른 배의 존재를 미리 파악하는 것이다. 이런 목적을 위해 여러 배로부터 나오는 소음을 탐지하는 수동 소나 기술이 개발되

어 왔다. 이런 탐지 기술은 함에서 나오는 신호가 잡음에 묻히는 경우에 크게 성능 저하가 된다. 이런 경우는 해상 잡음이 심할 때나 목표물이 소나로부터 멀리 있는 경우에 자주 발생한다. 데몬처리법(Detection of Envelope Modulation On Noise (DEMON))은 많은 수동 소나 시스템에서 프로펠러 추진기를 탐지하기 위해 주로 사용하는 기술이다. 그러나 이 방법은

\* 본 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (UD130015DD)

• First Author : Sejong University Department of Electronic Engineering, jslim@sejong.ac.kr, 종신회원

° Corresponding Author : Gangwon Provincial University Department of Information and Communication, pyk12@naver.com, 정희원

\* Sejong University Department of Defense System Engineering, wyhong@sejong.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2015-08-259, Received August 17, 2015; Revised November 16, 2015; Accepted November 16, 2015

상당 부분이 경험적인 것을 바탕으로 하고 있어 기술 문헌으로 접할 수 있는 사항이 제한적이지만, Nielson 에 의해 체계적으로 정리된 후 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>6)</sup>. Kummert는 데몬 처리를 통해 추출된 주파수를 퍼지(fuzzy) 기술을 도입하여 식별하는 연구를 수행하였고<sup>7)</sup>, Sichun과 Desen은 3/2-D 스펙트럼(spectrum)을 이용하여 데몬 처리 기법의 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다<sup>8)</sup>. 그리고 Badri와 Amindavar는 Nivanlinna-pick 보간법(inter- ploation)을 이용하여 다중 경로(multipath) 환경에서 프로펠러의 회전 수, 날개 수 등을 분석하는 기법을 제안하였다<sup>9)</sup>. 그 외 EMD(Empirical Mode Decomposition)와 cyclostationary를 사용한 기법도 소개되었다<sup>10,11)</sup>. 참고문헌<sup>12)</sup>에서는 대역 분할 처리를 통해 데몬 처리 기법의 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제안하였다. 뿐만 아니라 참고문헌<sup>13)</sup>에는 자기 상관을 적용하여 기존 대역 분할 처리 데몬의 성능을 더욱 향상시키기도 하였다.

위에서 언급한 데몬 처리 방법은 근본적으로 FT(fourier transform)에 근간을 두고 있어서 주파수 해상도와 필요한 데이터의 길이가 반비례한다. 즉 주파수 해상도를 높이면 더 긴 데이터가 필요하게 된다. 본 논문은 참고문헌<sup>13)</sup>과 같은 자기 상관 신호와 대역 분할 처리에 기반을 두고, 압축 센싱 기반 알고리즘을 적용하여 데몬 처리 성능의 향상을 기대할 수 있는 기법을 제안한다. 특히 같은 주파수 해상도를 위해서 필요한 신호 길이를 기존 데몬 방식보다 짧아도 좋은 성능을 얻을 수 있는 기법을 제안한다. 압축 센싱 기반 알고리즘을 사용하려고 하는 이유는 데몬 처리의 근간인 주파수 추정에서, 주파수를 추정하고자 하는 대상이 되는 전 밴드 중에서 극히 일부 주파수들만이 프로펠러의 회전과 관련이 있는 주파수이고 나머지는 거의 '0'이거나 노이즈에 의한 유사 신호이기 때문이다.

본 논문은 일반적인 데몬 처리와 참고문헌<sup>13)</sup>에서 제안한 데몬 처리 방법을 3장 1절과 3장 2절에 정리하고, 새로운 데몬 처리 기법을 제안한다. 또 모의실험에서 제안한 방법의 유용성을 보인다.

## II. 데몬 신호의 모델

일반적으로 데몬 처리의 대상이 되는 수중 프로펠러 소음 신호는 프로펠러가 회전하면서 생기는 공기 방울이 터지는 광대역 소음이 다시 프로펠러의 회전에 의해서 영향을 받아 생성되는 것으로 여기고 있다.

이를 수학적으로 모델링하면 프로펠러의 회전으로 발생하는 주기성 신호와 광대역공기방울 소음 신호와의 곱으로 모델되며, 그 식은 (1)과 같이 표현된다<sup>7)</sup>.

$$x(n) = \left[ 1 + m \cos \left( \frac{2\pi f_m n}{f_s} + \theta \right) \right] s(n) + w(n), n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

여기서, N은 수신된 음향 신호 샘플 개수이고, m은 하모닉 성분의 크기,  $f_m$ 은 하모닉 성분의 주파수,  $f_s$ 는 샘플링주파수이다.  $s(n)$ 은 광대역캐비테이션 소음 신호이다.  $w(n)$ 은 광대역주변소음이며  $s(n)$ 과  $w(n)$ 은 통계적으로 서로 독립인 특성을 가진다. 이 모델을 보면 마치 진폭 변조와 유사한 형태를 가지고 있어서 m을 변조 지수라고 하고  $f_m$ 을 변조 주파수라고 부르기도 한다. 일반적으로 변조 지수 m은 0.1~0.5의 값을 가지며, 변조 주파수  $f_m$ 은 10 Hz ~ 100 Hz의 값을 가진다. 광대역캐비테이션 소음 신호  $s(n)$ 과 광대역 소음  $w(n)$ 의 주파수 대역폭(bandwidth)은 수 kHz 이상이며, 따라서 샘플링 주파수  $f_s$ 도 수 kHz 이상의 값을 가진다<sup>12)</sup>.

## III. 기존의 데몬 처리 방법

### 3.1 전통적인 데몬 신호 처리법

데몬 처리는 프로펠러로 추진되는 배를 찾는 기술들 중 하나로 인식되고 있다. 전통적으로 사용되는 데몬 처리 방법은 수신 신호를 대역 통과 필터에 통과시킨 후 마치 진폭 변조된 신호를 복조하듯이 대역 통과된 신호의 포락선을 추출한다. 그리고 그 결과를 FFT를 사용하여 주파수 성분 분석을 한다. 그림1에는 위 과정을 도식하였다. 이 같은 전통적인 방법 외에 서론에 언급한 여러가지 개선된 데몬 신호 처리법들이 연구되어 왔다. 그 중에 본 논문에서 관심을 갖는 필터 뱅크를 사용한 데몬 신호 처리법도 있다.

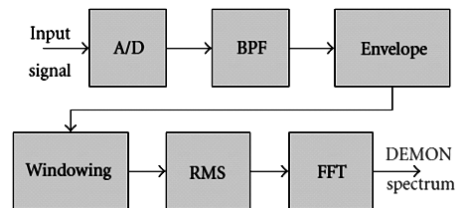


그림 1. 전통적인 데몬 처리법  
Fig. 1. DEMON traditional treatment

### 3.2 대역통과 필터 뱅크를 사용하는 데몬 신호 처리법

II장에서 설명한 바와 같이 데몬 신호 처리 대상이 되는 프로펠러 소음 신호는 날개의 회전으로 발생하는 협대역 피변조 신호를 광대역공기방울 소음 신호가 캐리어(carrier)의 역할을 수행하여 발생한다. 이는 매우 넓은 주파수 범위에 캐리어가 존재함을 의미한다. 그리고 그림1에서와 같이 일부 주파수 밴드를 선택하여 데몬 처리를 하는 전통적인 방식을 볼 때, 캐리어의 전체 대역 중 일부 대역 성분만으로도 데몬 신호 처리를 할 수 있음을 의미한다. 따라서 사용하지 않은 다른 대역 신호를 이용해서도 데몬 신호 처리를 할 수 있음을 의미한다. 이런 생각에 근거하여 참고문헌<sup>[12]</sup>에서는 그림과 같은 대역 분할에 의한 데몬 성능 향상 기법을 제안하였다.

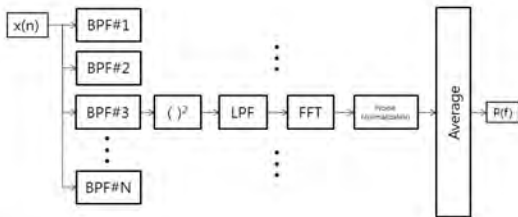


그림 2. 참고문헌 [12]의 신호처리 다이어그램  
Fig. 2. Reference [12] diagram of the signal processing

### IV. 압축 센싱 기법 적용한 자기 상관형 필터뱅크 데몬 처리 방법

참고문헌<sup>[13]</sup>에서는 주기성을 갖는 불규칙 신호에 자기 상관을 적용하였을 경우 주기성을 유지하고 부가 잡음의 영향을 줄이는 성질을 필터 뱅크 기법 데몬 처리에 적용한 기법을 제안하였다. 자기 상관을 도입하는 부분은 각 필터 뱅크의 포락선 신호가 추출된 후에 적용하여 포락선이 갖는 주기성을 부각시킨다. 자기 상관을 적용한 필터 뱅크 데몬은 그림 3과 같다. 아래 그림에서 N:1은 N:1 데시메이션이고 Auto-Correlation은 자기 상관을 하는 부분이다. 그림 4에서는 포락선 검출을 위해서 N:1 데시메이션부에 포함된 저역통과 필터와 절대 값 성분 추출기를 이용하였다.

SLIM (Sparse Learning via Iterative Minimization)은  $l_q$ -norm( $0 < q \leq 1$ )을 제한 조건으로 한 최소화 방법이다. 본 방법은 신호의 형태보다는 신호 내

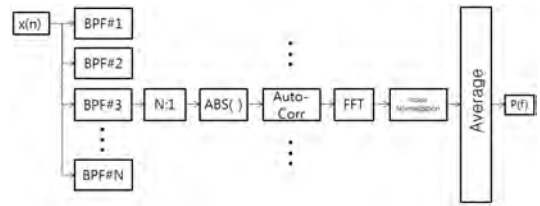


그림 3. 자기상관형 필터 뱅크 데몬 처리 기법<sup>[13]</sup>  
Fig. 3. Autocorrelation based filter bank DEMON process<sup>[13]</sup>.

의 주요 정보만을 골라 추정하는 압축 센싱 신호 처리에서, 대상 신호는 대부분의 성질 매개변수가 의미 없는 값이고 일부 소수만이 의미가 있는 희박 신호의 성질을 띤다. 이런 희박 신호의 성질 매개변수를 추정하기 위해서 사용하는 많은 알고리즘 중에 하나이다. 참고문헌<sup>[14]</sup>에는 SLIM을 유사한 알고리즘은 IAA(Iterative Adaptive Approach)<sup>[15]</sup>와 비교하였다. 그 결과 CGLS(Conjugate Gradient Least Squares)와 결합하여 사용하면 매우 적은 계산량으로도 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 그리고 참고문헌<sup>[14]</sup>에서는 SLIM이 희박 신호 처리에 쓰이는 많은  $l_1$ -norm 기반 알고리즘에 비해 더 정확한 결과를 낸다는 결과를 내놓았다. 본 논문에서도  $l_1$ -norm기반 알고리즘으로 SLIM을 사용하기로 한다.

앞서 언급한 것처럼 SLIM은 다음과 같은 신호 모델에서 해인  $x$ 가 대부분 '0'이고 일부만 '0'이 아닌 값을 갖는 모델에서 적용된다.

$$y = Ax + e, \tag{2}$$

여기서  $A$ 는 다음과 같은 역DFT 행렬이다.

$$A = \frac{1}{\sqrt{M}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{j2\pi/M} & \dots & e^{j2\pi(M-1)/M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & e^{j2\pi(N-1)/M} & \dots & e^{j2\pi(N-1)(M-1)/M} \end{bmatrix}.$$

그리고  $x \in C^{M \times 1}$ ,  $e$ 는 잡음 벡터이고 그 분포는  $e \sim N(0, \eta I)$ 이다. SLIM 알고리즘은 베이저안 모델에 기반을 두고 개발되었다<sup>[16]</sup>. 즉 측정 벡터의 확률분포가 식(3)과 같고 참값 벡터의 확률분포가 식(4)와 같다면,

$$y|x, \eta \sim N(Ax, \eta I). \tag{3}$$

$$f(\mathbf{x}) \propto \prod_{k=1}^M \exp(-2|x_k|). \quad (4)$$

여기서  $x_k$ 는 추정 벡터  $\mathbf{X}$ 가 길이  $M$ 인 벡터일 때  $k$ 번째 요소 값이다.  $f(\mathbf{x})$ 는 '0' 주변에서 첨두치를 갖는 Laplacian 분포의 일종이다. 이는  $\mathbf{x}$ 가 희박성을 갖음을 의미하기도 한다. 이런 확률 분포를 기반으로 측정 벡터  $\mathbf{y}$ 가 주어졌을 경우 추정 벡터  $\mathbf{X}$ 와 식(3)의 분산  $\eta$ 를 위한 결합 조건 확률 분포는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$f(\mathbf{x}, \eta | \mathbf{y}) \propto f(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \eta) f(\mathbf{x}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{\eta} \|\mathbf{y} - \mathbf{Ax}\| \right)}{\pi^N \eta^N} \prod_{k=1}^M \exp(-2|x_k|). \quad (5)$$

위 식을  $\mathbf{X}$ 와  $\eta$ 에 대해서 최대화 하는 것은 다음 식과 같이 (5)에 음의 로그를 취한 후 최소화 하는 것과 같다.

$$\min_{\mathbf{x}, \eta} \left( N \log \eta + \frac{1}{\eta} \|\mathbf{y} - \mathbf{Ax}\|^2 + 2 \sum_{k=1}^M |x_k| \right). \quad (6)$$

여기서  $\eta$ 는 잡음의 분산값을 나타낸다. 위 식의 첫째와 둘째 항은 최소화 대상이고 셋째 항은 일종의  $l_1$ -norm 정규화 항으로 생각할 수 있다.

SLIM을 사용하여 식(6)을 실제로 푸는 방법은 일종의 반복법을 사용한다고 할 수 있다. 먼저  $\mathbf{X}$ 나  $\eta$  중 하나를 고정하고, 고정 안된 것에 대해서 값을 갱신하고 그 다음에 역할을 바꿔서 값을 갱신하는 과정을 반복하는 것이다<sup>16)</sup>. 이 과정을 참고문헌에 나온 대로 좀 더 자세히 정리하면 다음과 같다.

$i$ 번째 갱신이라고 할 때,

(1) 이전 단계에서 얻은  $\mathbf{x}^{(i-1)}$ 과  $\eta^{(i-1)}$ 를 사용하여  $\mathbf{X}$ 를 갱신한다.

$$\mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{P}^{(i-1)} \mathbf{A}^H \left[ \eta^{(i-1)} \mathbf{I} + \mathbf{AP}^{(i-1)} \mathbf{A}^H \right]^{-1} \mathbf{y}, \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{P}^{(i)} \square \text{diag}\{\mathbf{p}^{(i)}\}$ 이고  $\mathbf{p}^{(i)} \square [x_1^{(i)}, \dots, x_M^{(i)}]^T$ 이다.

(2) 위에서 얻은  $\mathbf{X}$ 를 사용하여  $\eta$ 를 갱신한다.

$$\eta^{(i)} = \frac{1}{N} \|\mathbf{y} - \mathbf{Ax}^{(i)}\|^2. \quad (8)$$

위 (1)과 (2)의 과정의 반복 횟수는 정확하게 한 값으로 정할 수 없고, (2)의 잔차가 미리 정한 기준 값에 맞을 때 까지 반복 하지만, 본 논문에서는 실험을 통해서 5회를 최대 반복 횟수로 정하였다.

위의 SLIM은 희박성 신호 추정에 잘 쓰고 있는 방법이지만, 실제로 사용하다 보면 유사 첨두치도 많이 얻게 된다. 이런 유사 첨두치를 줄이고 안정적인 데몬 신호 추정을 위해서 본 논문에서는 SLIM 방법에 문턱값을 적용하고자 한다. 문턱값을 사용하여 희박 신호를 추정하는 것은 참고문헌<sup>17-19)</sup>에 IHT (Iterative Hard Thresholding) 알고리즘으로 나와 있는 방법이다. IHT를 적용하기 위해서는 아래 식(9)과 같이 추정 벡터에 문턱 함수를 적용해 주어야 한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(i-1)} &\rightarrow \tilde{\mathbf{x}} \\ H_K(\tilde{\mathbf{x}}) &\rightarrow \mathbf{x}^{(i)}. \end{aligned} \quad (9)$$

위 방법에 의하면  $\mathbf{x}^{(i-1)}$ 를 바로  $\mathbf{x}^{(i)}$ 로 갱신하지 않고 중간 단계에서  $H_K(\cdot)$  함수를 사용한 후 그 결과를 최종 갱신된  $\mathbf{x}^{(i)}$ 으로 삼는다. 여기서  $H_K(\cdot)$  함수를 문턱값 함수라고 한다. 특히  $K$ 라는 첨자의 의미는 괄호 안의 값들 중에서 큰 순으로  $K$ 개만 취하고 나머지는 '0'으로 만들겠다는 것을 뜻한다. 위의 SLIM에 문턱값을 더하면 계산 순서는 다음과 같아진다.

$i$ 번째 갱신이라고 할 때,

(1) 이전 단계에서 얻은  $\mathbf{x}^{(i-1)}$ 과  $\eta^{(i-1)}$ 를 사용하여  $\mathbf{X}$ 를 갱신한다.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P}^{(i-1)} \mathbf{A}^H \left[ \eta^{(i-1)} \mathbf{I} + \mathbf{AP}^{(i-1)} \mathbf{A}^H \right]^{-1} \mathbf{y}, \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{P}^{(i)} \square \text{diag}\{\mathbf{p}^{(i)}\}$ 이고  $\mathbf{p}^{(i)} \square [x_1^{(i)}, \dots, x_M^{(i)}]^T$ 이다.

(2)

$$\mathbf{x}^{(i)} = H_K(\tilde{\mathbf{x}}). \quad (11)$$

(3) 위에서 얻은  $\mathbf{X}$ 를 사용하여  $\eta$ 를 갱신한다.

$$\eta^{(i)} = \frac{1}{N} \|\mathbf{y} - \mathbf{Ax}^{(i)}\|^2. \quad (12)$$

본 논문에서는 무조건 제일 큰 값  $K$ 개를 골라내는  $H_K(\cdot)$  함수를 변형하여 사용한다. 즉, 벡터의 대부분이 '0'이고 일부만 큰 값을 갖는 특징이 있는 벡터  $\mathbf{x}$ 의 요소값 각각의 절대값을 큰 것부터 작은 것까지 나열했을 때, 첫 번째 요소부터 절대값의 누적 합이 전체합의 80%가 되는 값까지를 골라낸다. 이는 희망 침투치의 개수  $K$  값을 외부에서 일방적으로 정하는 것보다 유연하게 의미가 있는 벡터의 요소 값을 골라낼 수 있다. 이 방법을 SLIM-SIHT (Sparse Learning via Iterative Minimization-Soft Iterative Hard Thresholding)라고 한다. SLIM-SIHT를 참고문헌<sup>[13]</sup>에 적용할 때에 그림 3과 같이 각 필터 बैं크 마다 적용하지 않고, 필터 बैं크 별 자기 상관 값의 평균값에 한번만 적용한 구조를 제안한다. 그 이유는 SLIM 방법이 FFT에 비해서 많은 계산량이 필요로 되기 때문이다. 그 구조를 그림 4에 제시 하였다.

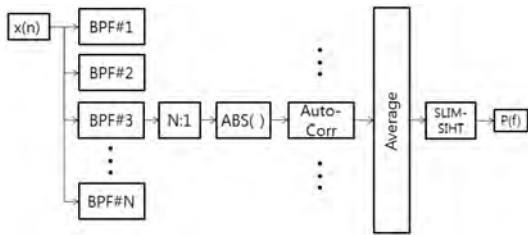


그림 4. 제안한 SLIM-SIHT 기반 데몬 처리 기법.  
Fig. 4. The proposed DEMON process structure.

## V. 실험 결과

### 5.1 모의 신호를 사용한 비교 실험

제안된 데몬 처리 방법의 성능을 알아보기 위해서 그림 3과 같은 처리방법을 사용하여 데몬 신호 처리하는 경우와 함께 제안된 방법으로 처리한 결과를 서로 비교한다.

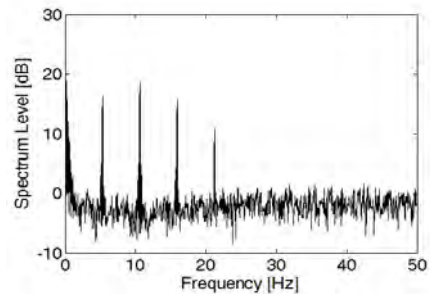
본 비교 실험에서 사용할 신호를 만들기 위해서 식 (1)의 신호 모델을 사용하였다. 본 실험에서는 5.3Hz와 10.6Hz의 주파수를 갖고, 크기는 각각 1[V]인 두 신호가 백색잡음에 의해서 곱해지는 경우로 가정하여 신호를 합성하였다. 샘플링 주파수는 8kHz<sup>1)</sup>로 하고 10초분의 신호를 합성하였다. 그리고 신호대 잡음비가 5dB가 되도록 부가 잡음을 더하였다.

위 신호를 위에서 언급한 참고문헌<sup>[13]</sup>에서 제안한 방법과 제안한 SLIM-SIHT 방법 각각에 적용하여 그

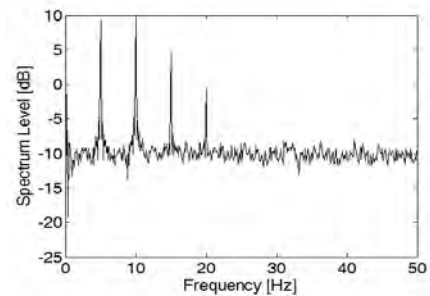
1) 본 주파수는 본 연구가 속한 시스템에 맞춘 주파수임을 밝힙니다.)

결과를 그림 5에 도시하였다. 성능을 비교하기 위해서 주파수 분해능 0.1Hz로 데몬 처리를 한 경우와 주파수 분해능 1Hz로 데몬 처리 한 경우를 각각 실험하였다. 이를 통해서 제안한 방법이 전통적인 FT을 기반으로 한 방법에 비해서 짧은 데이터 길이를 사용하고 긴 데이터 길이를 사용하는 FT 기반 방법의 데몬 추정 성능과 유사한 성능을 유지할 수 있음을 보인다.

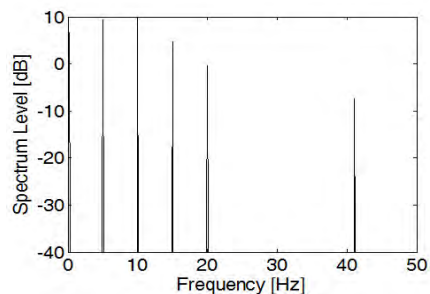
그림 5에는 0.1Hz 주파수 정밀도를 사용하여 데몬



(a)



(b)



(c)

그림 5. 합성된 신호를 대상으로 한 데몬 처리 결과 비교 (a) 0.1Hz 주파수 정밀도로 참고문헌<sup>[13]</sup> 방법에 의한 데몬 처리 결과, (b) (a)와 같은 데이터에 대해 SLIM 방법으로 데몬 처리한 결과, (c) (a)와 같은 데이터에 대해 제안한 SLIM-SIHT 방법으로 데몬 처리 결과.

Fig. 5. The synthesized signal to a DEMON process result of comparison target.. (a) DEMON results in 0.1 Hz resolution by the reference [13] (b) DEMON results with the same data length by SLIM (c) DEMON results with the same data length by the proposed method.

처리를 한 결과를 보였다. 그림 5(a)는 참고문헌<sup>[13]</sup>의 방법에 의해서 얻은 결과이다. 그림 5(b)는 같은 신호를 SLIM방법으로 데몬 처리한 결과이다. 두 그림을 보면 주요한 피크가 모두 잘 추정되고 있다. 그리고 그림5(c)는 제안한 SLIM-SIHT방법으로 데몬 처리한 결과이다. 이 결과에서도 주요한 피크를 잘 추정하고 있다. 그러나 그림5(c)에서 보는 바와 같이 유사 피크도 같이 추정되었다. 이는 식(9)에 있는 문턱값 함수,  $H_k(\cdot)$ ,에서 추정 주파수 최대 개수  $K$ 가 필요 이상으로 크게 설정된 때문으로 생각할 수 있다. 이런 유사 피

크 처리는 데몬이 회전체의 움직임을 추정하는 것임으로 유사 피크를 주요 피크와의 배수 여부를 사용하여 배제할 수 있다.

아래 그림 6에는 그림 5에서 사용한 데이터를 1Hz의 주파수 정밀도를 사용하여 데몬 처리한 결과이다. 즉 데이터 길이를 그림 5에 비해서 1/10만 사용하여 데몬 처리를 한 결과이다. 그림 6(a)를 보면 그림 5(a)의 그림과 유사해 보인다. 그러나 그림 6(b)와 같이 주파수축을 확대해 보면 정확한 주파수 위치가 모호함을 알 수 있다. 그 이유는 데이터 창이 줄어들어

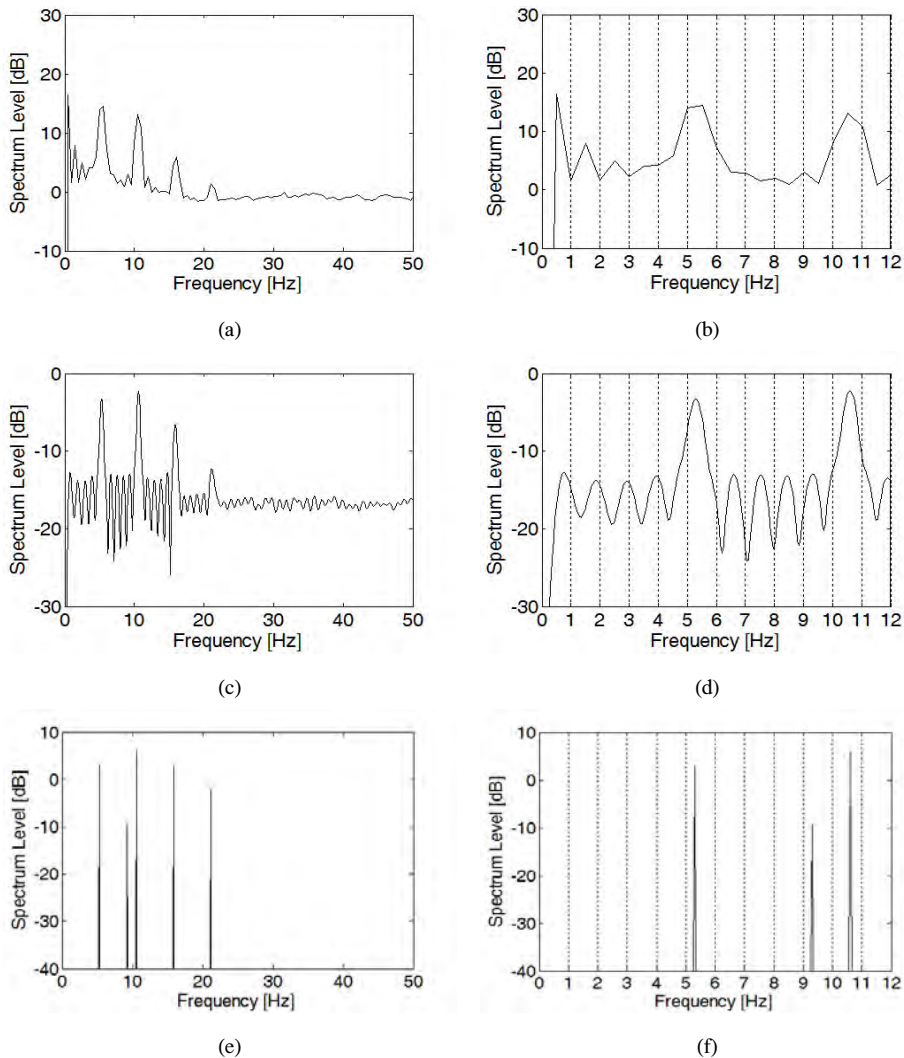


그림 6. 합성된 신호를 대상으로 한 데몬 처리 결과 비교. (a) 1Hz 주파수 정밀도로 참고문헌[13] 방법에 의한 데몬 처리 결과, (b) (a)를 확대한 결과, (c) (a)와 같은 데이터에 대해 SLIM 방법으로 데몬 처리한 결과, (d) (c)를 확대한 결과, (e) (a)와 같은 데이터에 대해 제안한 SLIM-SIHT 방법으로 데몬 처리 결과, (f) (e)를 확대한 결과.

Fig. 6. The synthesized signal to a DEMON process result of comparison target.. (a) DEMON results in 1 Hz resolution by the reference [13] (b) magnifying (a) in x-axis (c) DEMON results with the same data length in (a) by SLIM (d) magnifying (c) in x-axis (e) DEMON results with the same data length in (a) by the proposed method (f) magnifying (e) in x-axis.

생기는 현상이다. 그림 6(c)는 SLIM방법으로 데몬 처리한 결과이다. 그리고 그림 6(d)와 같이 주파수축을 확대해 본 결과에도 주파수 위치가 정확함을 보인다. 그림 6(e)는 제안한 SLIM-SIHT를 사용하여 데몬 처리한 결과이다. 여기서도 유사 피크가 발생하였으나 이 또한 주요 피크와의 배수 여부를 사용하여 배제할 수 있다. 또 그림 6(f)에서 보는 바와 같이 주파수축을 확대해 본 결과에도 주파수 위치가 정확함을 보인다.

### 5.2 측정 신호를 통한 비교 실험

비교실험을 위해서 [www.dosits.org](http://www.dosits.org)에 게시된 상선 신호 데이터를 5장1절에 모의 신호와 같은 8kHz로 리샘플링 한 후 10초 분량의 측정 신호에 대해서 5.1절과 같이 참고문헌<sup>[13]</sup>에서 제안한 방법과 본 논문에서 제안한 SLIM-SIHT 방법을 각각 적용하여 그 결과를 서로 비교하였다. 또 신호 길이를 기본 FT을 기반으로 한 참고문헌<sup>[13]</sup>의 방법에 비해 1/4를 사용하였을 때도 데몬 추정 성능이 유지되는 결과를 보인다.

그림 7에는 0.1Hz 주파수 정밀도를 사용하여 데몬 처리한 결과를 보였다. 그림 7(a)는 참고문헌<sup>[13]</sup>의 방법에 의해서 얻은 결과이다. 그림 7(b)는 같은 신호를 SLIM방법으로 데몬 처리한 결과이다. 두 그림을 보면 주요한 피크가 모두 잘 추정되고 있다. 그리고 그림 7(c)는 제안한 SLIM-SIHT방법으로 데몬 처리한 결과이다. 이 결과에서도 주요한 피크를 잘 추정하고 있다.

아래 그림 8에는 그림 7에서 사용한 데이터를 0.4Hz의 주파수 정밀도를 사용하여 데몬 처리한 결과이다. 즉 데이터 길이를 그림7에 비해서 1/4만 사용하여 데몬 처리한 결과이다. 그림8(a)는 참고문헌<sup>[13]</sup>의 방법을 사용한 결과이다. 이를 보면 그림7(a)의 그림과 비교하여 피크 추정 성능이 많이 떨어진 것을 알 수 있다. 그러나 그림8(b)는 SLIM방법으로 데몬 처리한 결과이다. 그리고 이것도 그림8(a)보다는 주요한 피크를 상당히 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림8(c)는 제안한 SLIM-SIHT를 사용하여 데몬 처리한 결과이다. 그림7(c)와 비교할 때 주요한 주파수 피크를 잘 유지하고 있다. 물론 유사 피크가 발생하였으나, 주요 피크와의 배수 여부를 사용하여 배제할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문은 프로펠러 추진 함선을 탐지하기 위해 사용하는 방법 중 하나인 데몬 신호 처리를 위한 방법을

제안하였다. 수신 신호에 자기 상관관을 적용한 필터 뱅크 기법에 압축 센싱 기반 주파수 추정 기법을 적용하였다. 제안한 방법을 측정된 데이터에 적용해 보았을 때 순수 푸리에 변환만을 이용하는 기존 데몬 처리법에 비해서 1/4 정도로 짧은 측정 길이의 수신 데이터에 대해서도 원래 길이 전체를 사용하였을 때와 같은 주파수 정밀도를 유지하였다. 반면에 기존 데몬 처리법은 푸리에 변환의 특성상 주파수 정밀도가 1/4로 감

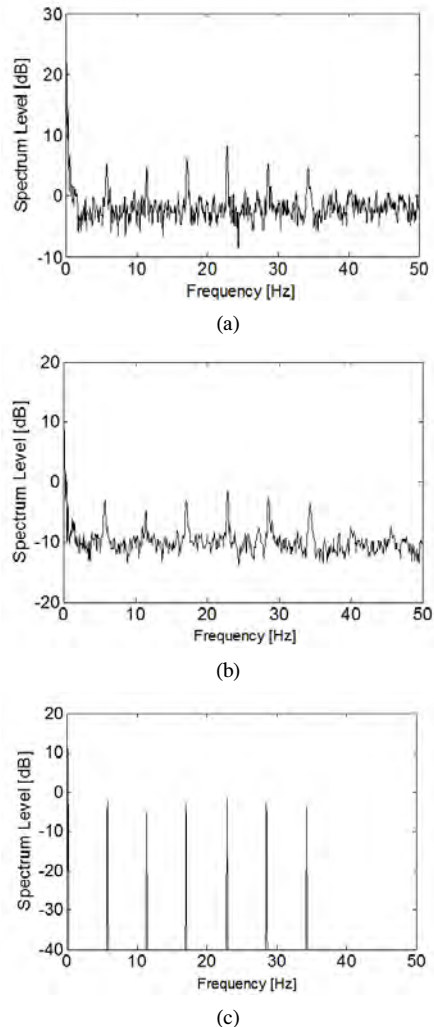


그림 7. 실측된 데이터를 사용한 데몬 처리 결과 비교. (a) 0.1Hz 주파수 정밀도로 참고문헌<sup>[13]</sup> 방법에 의한 데몬 처리 결과, (b) (a)와 같은 데이터에 대해 SLIM 방법으로 데몬 처리한 결과, (c) (a)와 같은 데이터에 대해 제안한 SLIM-SIHT 방법으로 데몬 처리 결과.

Fig. 7. DEMON process using actual data comparing the results (a) DEMON results in 0.1 Hz resolution by the reference [13] (b) DEMON results with the same data length by SLIM (c) DEMON results with the same data length by the proposed method.

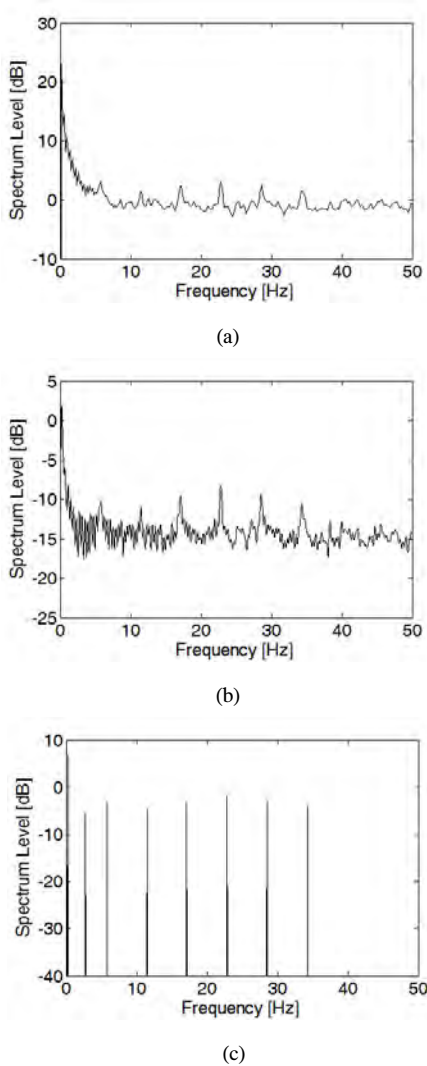


그림 8. 실측된 데이터를 사용한 데몬 처리 결과 비교. (a) 0.4Hz 주파수 정밀도로 참고문헌[13] 방법에 의한 데몬 처리 결과, (b) (a)와 같은 데이터에 대해 SLIM 방법으로 데몬 처리한 결과, (c) (a)와 같은 데이터에 대해 제안한 SLIM-SIHT 방법으로 데몬 처리 결과.

Fig. 8. Daemon process using actual data comparing the results (a) DEMON results in 0.4 Hz resolution by the reference [13] (b) DEMON results with the same data length by SLIM (c) DEMON results with the same data length by the proposed method.

소한 결과를 보였다. 뿐만 아니라 주변 잡음 수준과 톤 피크 사이의 구별성을 보았을 때 기존 방법은 주변 잡음 수준에 비해서 5~10dB 정도로 높은 톤 피크를 만들어 내지만, 제안한 방법은 신호 중 톤 성분만을 찾아내므로 주변 잡음과 상관없이 구별된 형태의 톤 성분을 추정할 수 있었다.

## References

- [1] J. Cho, S. Lee, J. Shin, T. J. Lee, and H. S. Cho, "Underwater experiment on CSMA/CA protocol using commercial modems," *J. KICS*, vol. 39c, no. 6, pp. 457-465, Jul. 2014.
- [2] D. Lee, S. Lee, and S. J. Park, "DSP-based micro-modem for underwater acoustic communications," *J. KICS*, vol. 39c, no. 3, pp. 275-281, Mar. 2014.
- [3] B. M. Seo, K. Son, and H. S. Cho, "Performance evaluation of underwater code division multiple access scheme on forward-link through water-tank and lake experiment," *J. KICS*, vol. 39c, no. 2, pp. 199-208, Feb. 2014.
- [4] Y. Jung, B. Kim, S. An, W. Seong, K. Lee, and J. Hahn, "An algorithm for submarine passive sonar simulator," *The J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 6, pp. 472-483, Nov. 2013.
- [5] C. Seo, J. Park, K. Park, and J. Yoon, "Performance of COFDM in underwater acoustic channel with frequency selective fading," *The J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 5, pp. 377-384, Sept. 2013.
- [6] R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1990.
- [7] A. Kummert, "Fuzzy technology implemented in sonar systems," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 483-490, Oct. 1993.
- [8] L. Sichum and Y. Desen, "DEMON feature extraction of acoustic vector signal based on 3/2-d spectrum," in *Proc. ICIEA'07*, pp. 2239-2243, Melbourne, Australia, May 2007.
- [9] S. Badri and H. Amindavar, "Estimation of propeller shaft rate in multipath environment using nevanlinna-pick interpolation," in *Proc. ISSPA'07*, pp. 1-4, Sharjah, U.A.E, Feb. 2007.
- [10] J. Lim and W. Hong, "A study on the hidden period estimation in the propeller radiation using EMD and auto-correlation," in *Proc. KSCSP 2013*, vol. 30, no. 1, pp. 57-60, Seoul, Korea, Aug. 2013.
- [11] J. Lim and W. Hong, "A study on the hidden period estimation in the propeller radiation using cyclostationary spectral estimation and auto-



- correlation,” in *Proc. KSCSP 2013*, vol. 30, no. 1, pp. 61-64, Seoul, Korea, Aug. 2013.
- [12] M. Cheong, S. Hwang, S. Lee, and J. Kim, “Multiband enhancement for demon processing algorithms,” *The J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 2, pp. 138-146, Mar. 2013.
- [13] J. Lim, W. Hong, and Y. Pyeon, “Hidden period estimation in propeller noise using auto-correlation and filter-bank structure,” *J. KICS*, vol. 39B, no. 8, pp. 538-543, Aug. 2014.
- [14] X. Tan, W. Roberts, J. Li, and P. Stoica, “Sparse learning via iterative minimization with application to MIMO radar imaging,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 1088-1101, 2011.
- [15] W. Roberts, P. Stoica, J. Li, T. Yardibi, and F. A. Sadjadi, “Iterative adaptive approaches to MIMO radar imaging,” *IEEE J. Sel. Topics in Signal Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 5-20, 2010.
- [16] X. Tan, W. Roberts, J. Li, and P. Stoica, “A new sparse sensing approach for MIMO radar imaging,” in *Proc. the 8th Eur. Conf. Synthetic Aperture Radar*, pp. 378-381 Aachen, Germany, Jun. 2010.
- [17] T. Blumensath and M. E. Davies, “Iterative thresholding for sparse approximations,” *J. Fourier Anal. and Appl.*, vol. 14, no. 5, pp. 629-654, May 2008.
- [18] T. Blumensath and M. Davies, “Iterative hard thresholding for compressed sensing,” *Applied and Computational Harmonic Anal.*, vol. 27, no. 3, pp. 265-274, Mar. 2009.
- [19] T. Blumensath and M. E. Davies, “Normalized iterative hard thresholding; guaranteed stability and performance,” *IEEE J. Sel. Topics in Signal Process.*, vol. 4, no. 2, pp. 298-309, Feb. 2010.

**임 준 석 (Jun-Seok Lim)**



1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사 졸업  
 1988년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사 졸업  
 1996년 8월 : 서울대학교 전자공학과 박사 졸업  
 1996년 7월~1997년 10월 : LG 종합기술원

1998년 3월~현재 : 세종대학교 전자정보통신공학과 교수

<관심분야> 신호처리

**편 용 국 (Yong-Guk Pyeon)**



1993년 2월 : 강원대학교 전자공학과 학사 졸업  
 1996년 2월 : 관동대학교 전자공학과 석사 졸업  
 2004년 2월 : 세종대학교 전자공학과 박사 졸업  
 2004년 9월~현재 : 강원도립대학 정보통신과 조교수

<관심분야> 신호처리

**홍 우 용 (Woo-Young Hong)**



1978년 2월 : 해군사관학교 전자공학과 학사 졸업  
 1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사 졸업  
 1991년 10월 : Univ. of Minnesota 전기공학과 박사 졸업  
 1985년 3월~2013년 2월 해군사관학교 교수

2013년 3월~현재 : 세종대학교 국방시스템공학과 교수  
 <관심분야> 신호처리