

왜곡된 형태의 견인 음향 배열 기법을 적용한 수중환경하에서의 FFTSA 기법 성능분석

Performance Analysis of FFTSA Method in the Water Environment Using Conformal Towed Acoustic Array

최 주 평*, 이 원 철*
(Joo-Pyoung Choi*, Won-Cheol Lee*)

* 숭실대학교 정보통신전자공학과

(접수일자: 2000년 9월 6일; 수정일자: 2001년 7월 19일; 채택일자: 2001년 10월 9일)

본 논문은 수동형 선형 견인 배열 센서를 이용한 합성 어퍼처의 일종인 FFTSA (Fast Fourier Transform Synthetic Aperture)를 이용하여 탐지하려는 목표물에 대한 입사각 추정에 있어 코히어런스 효과 및 견인 배열 경로 변화에 따른 추정 성능을 고찰하였다. 또한 선형 견인 센서 배열 방법의 환경적 요인에 의한 입사각 추정의 취약성으로 인해 비선형 견인 센서 배열 방법인 왜곡된 구조의 배열 기법을 FFTSA 기법에 적용하여 새로운 형태의 수동형 견인 센서 배열 방법을 제안하였으며, FFTSA 기법과 왜곡된 구조의 배열 기법에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 탐지하려는 목표물에 대한 센서 입사 신호의 추정 성능을 비교하여 보았다.

핵심용어: FFTSA, 견인 센서 배열, 왜곡된 어레이, 수중 환경의 영향

투고분야: 수중음향 분야 (5,6)

This paper analyses the performance of FFTSA (Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) in the effects of temporal coherence and oscillatory towed course, which is one of the techniques for passive synthetic aperture SONAR process using linearly distributed towed array. Also this paper proposes the FFTSA technique using towed array having conformal shape to alleviate the performance degradation for estimating the incident angle under inconsistent under water environments. And this paper analyses the performance of the proposed FFTSA technique making use of conformal structure throughout exhaustive computer simulations.

Keywords: FFTSA, Conformal array, Towed sensor array, Coherence effect, Towed path fluctuation effect

ASK subject classification: Underwater acoustics (5,6)

I. 서론

최근 들어 부 배열 센서를 이용하여 여러 번의 신호 취득 과정을 반복적으로 수행하고 각각의 부 배열 센서들

에서 처리된 개별적인 결과들을 합성하여 전체적으로 우수한 해상도를 가지는 합성 배열 소나 기법들이 소개되었다. 본 논문에서 사용되어지는 새로운 합성 센서 배열 방법은 FFT 변환을 통한 빔 영역에서 연속적인 시간 간격에서의 부배열 신호를 코히어런트한 과정을 통하여 수행되어지며 FFT 합성 배열기법 (FFTSA)이라 불리어진다[3-6]. 이 방법은 사전인지에 의한 위상 파라미터의 선

책임저자: 최주평 (pyoung424@weppy.com)
156-743 서울특별시 동작구 상도 5동
숭실대학교 전서관 402호
(전화: 02-826-7980; 팩스: 02-821-7653)

백과 소스와 수신단의 상대속도에 대한 속도필터 개념을 이용한 과거 사용되었던 기법과 유사하다[1].

FFT 합성 배열 기법은 견인함에 의해 견인되는 선형 배열 센서 시스템에 대한 신호 이득의 증가 및 입사각 분석 능력의 개선에 목적을 두고 있다. 이를 위해 센서 배열을 빔 영역에서 합성을 수행하며, 연속적인 부배열 빔 패턴에서 코히어런트한 조합을 수행한다. 그리고 연속적인 추정치의 이용에 의해 선형 배열의 물리적 길이를 확장한다. 이동 부배열을 사용함으로써 수신과정을 반복해서 얻은 응답 결과를 전체적으로 조합함으로써 물리적으로 긴 센서 배열을 쓰는 효과를 얻을 수 있다. 이로 인해 신호 취득과 더불어 계산되는 센서 배열 응답들의 적절한 위상 보상과정을 통한 고해상도의 합성 빔 패턴을 얻을 수 있다. 이를 위해 수신된 신호가 추정된 간격 하에서 코히어런트하며 센서 부배열이 직선 방향으로 견인되어진다고 가정한다. 본 논문에서 소개한 FFTSA 기법에서는 선형 센서 배열을 수중 환경 하에서 견인함에 있어 주위의 여러 가지 환경적 요인으로 인해 많은 영향을 받는다. 즉, 수중이라는 특성으로 인해 각 센서의 위치변화라든지 긴 배열의 길이에 대한 구조적 문제 등이 발생한다[1, 6]. 특히, 견인시에 발생하는 배열 센서의 위치 오류는 입사각 등 주요 파라미터 추정시 심각한 성능저하를 나타낸다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 견인함 측면에 비선형의 센서 배열을 설치하는 방법인 왜곡된 구조의 배열 기법을 고안하였다. 비선형 특성을 지니는 견인 센서 배열인 왜곡된 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 센서에 대한 입사 신호의 지연시간에 대해 기준 센서에서 특정한 n번째 센서까지의 거리를 고려하여 기존의 출력 신호에 대해 수정을 가해 줄 필요가 있다. 즉, 가상의 선형 센서 배열을 기준으로 하여 왜곡된 배열의 구조적인 특성으로 인한 지연시간 및 지연거리를 산출한다. 이 새로운 기법은 기존의 FFTSA 기법과 마찬가지로 센서 배열을 빔 영역에서 합성을 수행하며, 연속적인 부배열 빔 패턴에서 코히어런트한 조합을 수행한다. 본 논문의 2장에서는 견인 센서 배열 합성 방법 중 하나인 FFTSA 기법에서의 센서 출력 신호에 대한 모델링을, 3장에서는 수중환경 하에서 목표물에 대한 방사 신호의 입사각 추정 성능에 영향을 줄 수 있는 신호의 코히어런스 효과 및 견인 속도 변화에 따른 센서 배열의 위치 에러와 같은 환경적 요인에 대해 고찰하였다. 4장에서는 왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 센서 출력 신호에 대한 신호 모델링을 5장에서는 왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 3장에서 언급한 두가지의 환경적 요인에 의해

수정된 신호 모델링을 하였다. 6장에서는 왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 부배열의 합성횟수에 따른 성능 변화 및 기존의 FFTSA 기법과 왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 각각에 대한 두 가지 환경적 요인의 영향에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교 검토하여 보았다. 마지막으로 7장에서는 결론을 맺고자 한다.

II. FFTSA기법에서의 센서 출력 신호에 대한 모델링

그림 1은 견인함이 견인 선형 배열을 견인한다고 가정했을 경우 기준 센서와 n번째 센서간 공간상의 거리로 인하여 생기는 신호의 입사 시간 지연을 표현하고 있다.

그림 1을 토대로 견인 센서 배열은 N개의 등간격으로 구성된 하이드로폰을 지니고 있으며 이 등간격을 δ 라 한다. 목표물로부터의 신호는 θ 의 각으로 센서에 입사되며, 각 θ 는 수평선형 배열의 전 부분에 걸쳐서 측정되어진다. 센서에 입사되는 신호는 각 센서 출력을 표본화하는 시점인 $t_i = i \cdot \Delta t$ 에서 표본화되어지며 여기서 Δt 는 표본화 간격이며, i 는 각각의 배열 센서 출력에 대해 K의 개수를 가지는 총 데이터 표본수이다. 단일 방사 물체에 의해 생성된 협대역 신호가 입사되는 경우 견인함이 이동한다고 가정하면 배열의 이동과 목표물 방사 신호의 조합에 기인하여 도플러 주파수가 발생한다. 식 (1)은 이와 같은 과정을 거친 센서 출력 신호를 나타내고 있다[1].

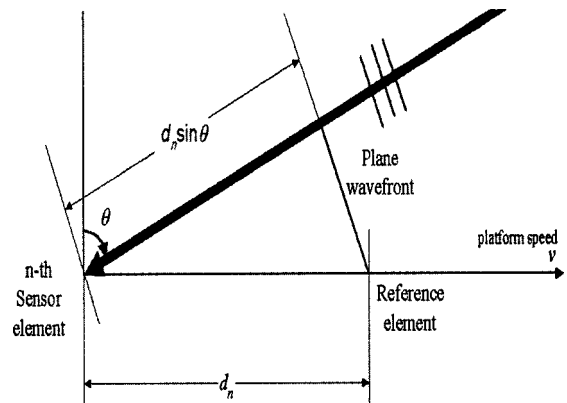


그림 1. 기준 센서와 n번째 센서간의 공간상의 거리 차로 인하여 생기는 신호의 입사·시간 지연
Fig. 1. Input time delay of signal between reference sensor and n'th sensor created by distance interval.

$$x_n(t_i) \cong A \cdot \exp \left[j2\pi f_o \left(t_i - \frac{vt_i + \delta(n-1)}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i)$$

$n=1, 2, 3, \dots, N$
 $i=1, 2, 3, \dots, K$

(1)

식 (1)에서 $\varepsilon_n(t_i)$ 는 영 평균의 통계적 특성을 가지는 가우시안 잡음 랜덤 변수를 나타내며, A 는 입사 신호의 감쇄와 위상 지연을 나타내는 복소값을 의미한다. 또한 n 은 센서의 개수를 나타낸다. τ 초 후 배열은 $v\tau$ 만큼 이동되어지며, 파라미터 v 와 τ 의 적합한 선택에 의해 $v\tau = q\delta$ 의 관계를 얻을 수 있다. 여기서 q 는 전인 배열 이동시 발생하는 부배열 센서 위치의 수를 나타내며 v 는 전인합의 이동속도, δ 는 등간격의 센서 간격을 의미한다. τ 만큼 지연된 후의 센서에 수신된 신호 $x_n(t_i + \tau)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_n(t_i + \tau) = A \cdot \exp(j2\pi f_o \tau) \cdot \exp \left[j2\pi f_o \left(t_i - \frac{vt_i + \delta(q+n-1)}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i + \tau)$$

$n=1, 2, 3, \dots, N$

(2)

효과적인 합성 전인 센서 배열의 성능을 증가시키기 위해 코히어런트하게 합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$B(f_o, \theta_s)_{M\tau} = b(f_o, \theta_s)_{i_s} \sum_{m=1}^M \exp \left[\left(j2\pi f_o \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta \right) m\tau \right) - j\phi_m \right]$$

$m=1, 2, 3, \dots, M$

(3)

여기서 $\phi_m = 2\pi f_o (1 \pm v \cdot \sin \theta_s / c)$ 는 합성 어페처를 생성하는데 필요로 되어지는 m 번째 빔 패턴 출력에 대한 위상 보상 요소이다. θ_s 는 배열 센서 입사 신호의 입사각 θ 에 대한 보정을 위해 사용되는 조절각을 의미한다. 그리고 M 은 모든 τ 초마다 생성되어지는 물리적 배열의 연속적인 빔 패턴 출력의 합성 횟수이다. 실험적인 측정을 위하여 식 (3)은 다음과 같이 분할하여 변형되어질 수 있다.

$$B(f_o, \theta_s)_{M\tau} = \sum_{m=1}^M b(f_o, \theta_s)_{m\tau} \cdot \exp(-j\phi_m)$$

$$= \sum_{m=1}^M b(f_o, \theta_s)_{m\tau} \cdot \exp \left[-j2\pi f_o \left(1 \pm \frac{v}{c} \sin \theta_s \right) m\tau \right]$$

$$= \sum_{m=1}^M b(f_s, \theta_s)_{m\tau} \cdot \exp(-j2\pi f_m \tau)$$

(4)

각각의 물리적인 N 개의 부배열 센서들로부터 총 합성

횟수 M 번의 연속적인 측정들은 다음과 같이 푸리에 변환 되어진다.

$$B(f_s, \theta_s) = \sum_{m=1}^M b(f_s, \theta_s)_{m\tau} \cdot \exp(-j2\pi f_s m\tau) \quad (5)$$

여기서 $f_s = f_{os} (1 \pm v_s \cdot \sin \theta_s / c)$ 이며, (θ, f_o, v) 는 실제 파라미터, (θ_s, f_{os}, v_s) 는 변수 또는 조절값들이다. 푸리에 변환은 시간 의존 빔 패턴에 대해 주파수 스펙트럼을 제공하며, 기본적으로 선형 배열의 공간 빔 패턴 정보의 시간 의존 특성을 지니는 시간-주파수 FFT (fast fourier transform)이다. 위의 관계는 다음과 같이 변형 되어질 수 있다.

$$B(f_o, \theta_s)_{M\tau} = b(f_o, \theta_s)_{i_s} \sum_{m=1}^M \exp \left[\left(j2\pi f_o \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta \right) m\tau \right) \right] \cdot \exp(-j2\pi f_s m\tau)$$

(6)

식 (6)의 빔 패턴에 대한 출력은 $P(f_o, \theta_s)_{M\tau} = B(f_o, \theta_s)_{M\tau} \cdot B(f_o, \theta_s)_{M\tau}^+$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 $+$ 는 켈레 복소수를 의미한다.

그림 2는 전인 센서 배열을 이용한 합성 어페처 방식의 일종인 FFTSA 기법에 대해 나타내고 있다. 즉, 부배열을 전인하는 과정에서 일정한 시간 간격을 주고 개별적으로 빔 형성을 하는 과정을 보여주고 있다. 각각의 부배열을 주파수상에서 빔패턴을 b 라고 표시하였으며, 위상 보상 과정을 거쳐 최종적으로 합성된 빔 패턴을 얻게 된다. 이 그림에서 빔 패턴은 부배열 빔 패턴을 FFT한 걸로 생각할 수 있기 때문에 FFTSA라고 한다.

III. 환경적 요인에 의한 FFTSA 신호 모델링

본 논문에서는 전인 센서 배열이 탐지하려는 목표물을 추정함에 있어 주된 영향을 미치는 여러 가지 환경적 요인 중 코히어런스 특성 및 전인합의 이동경로 변화에 따른 추정 성능의 변화에 대해 다루었다. 이러한 수중 환경의 두가지 특성을 분석하여 모의 실험을 통해 목표물 입사각 추정에 대한 정확성을 파악하여 보았다.

합성 어페처 응용은 수신된 신호의 시간적 코히어런스가 합성 어페처 총 처리 시간 $m\tau$ 보다 더 커야 하며, 이러한 점은 광대역의 선택 잡음에 대한 수동 합성 어페처 기술

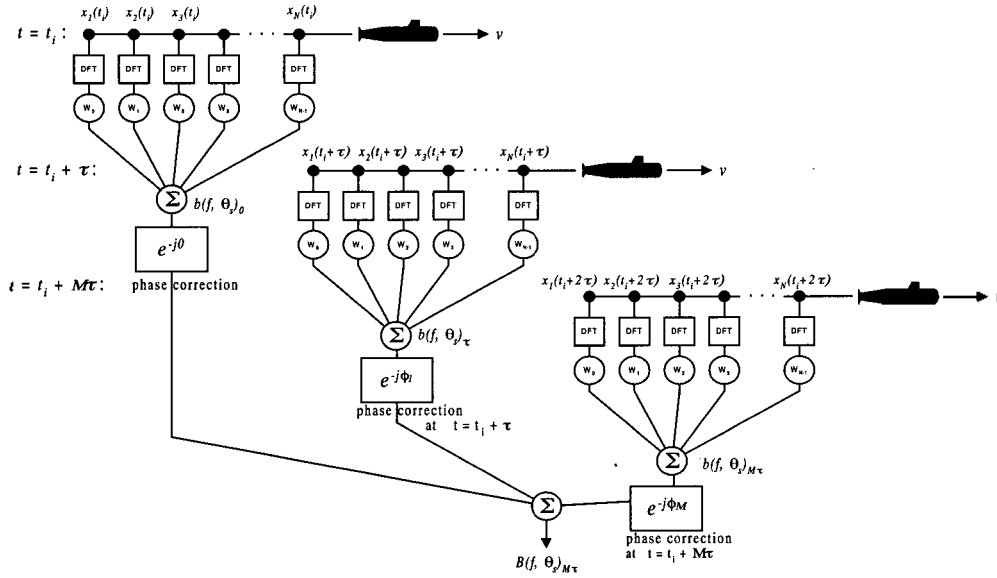


그림 2. FFTSA 방법에 의한 빔 합성처리 과정도
Fig. 2. Beamforming processing block diagram by FFTSA method.

의 응용에 대해 중대한 제한을 가한다[1]. 입사되는 신호사이의 코히어런스 효과는 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\rho_{mi}[(m-q)\tau] = \frac{E[X_n(f, m\tau)X_l^+(f, q\tau)]}{\sqrt{E[X_n^2(f, m\tau)]E[X_l^2(f, q\tau)]}} \quad (7)$$

식 (7)은 시간적 측면에서 부배열의 합성 시점인 m 번째 획득기점에서 n 번째 센서 및 q 번째 획득기점에서의 l 번째 센서간의 코히어런스 효과를 나타내고 있다. 또한, 동일한 센서에서 $m\tau$ 만큼의 시간 차이를 두고 획득한 센서 출력간의 획득된 시간적 코히어런스는 다음과 같은 가우시안 모델링으로 나타낼 수 있다.

$$\rho(f_o, m\tau) = \exp\left(-\frac{(m\tau/T_c)^2}{2}\right) \quad (8)$$

여기서 T_c 는 신호의 시간적 코히어런스 주기이다. 수신된 신호의 시간적 코히어런스 손실이 합성 어페처의 공간적 코히어런스 길이의 손실을 유발하는 관계로 가우시안 모델에 대해 식 (8)은 다음과 같이 수정되어질 수 있다.

$$\rho_{mi}(f, m\tau) = \exp\left[-\frac{(m\tau + (n-l)\delta)^2}{vT_c}\right] \quad (9)$$

여기서 개별적인 부배열의 합성에 대한 시간 간격인 $m\tau$ 는 견인 배열의 n 번째 센서와 첫 번째 센서 사이의 거리 및 견인함이 이동함으로써 발생하는 추가적인 거리 mvr 와의 합성인 $m\tau + (n-1)\delta$ 와 같이 나타낼 수 있다. 단, 식 (9)는 부가적인 환경적 요인을 고려하지 않은 것이다.

각각의 부배열 빔패턴 출력을 합성한 최종적인 빔패턴 출력 $B(f_o, \theta_s)_{M\tau}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다[2,3,8,9].

$$B(f_o, \theta_s)_{M\tau} = \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N X_n(f_o)_{m\tau} \cdot \exp\left(j2\pi f_o \frac{\delta(n-l)\sin\theta_s}{c}\right) \right] \cdot \exp\left(-j2\pi f_o \frac{mvr\sin\theta_s}{c}\right) \quad (10)$$

FFTSA기법에서의 합성 전력 빔 패턴 출력을 참조하여 부배열의 각 센서에 대한 합성된 전력 빔 패턴 출력은 다음과 같이 수정되어질 수 있다.

$$P(f_o, \theta_s)_{M\tau} = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^M \left[\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N X_n(f_o)_{m\tau} X_l^+(f_o)_{q\tau} \cdot \exp\left(j2\pi f_o \frac{\delta(n-l)\sin\theta_s}{c}\right) \right] \cdot \exp\left(-j2\pi f_o \frac{(m-q)v\tau\sin\theta_s}{c}\right) \quad (11)$$

또한 신호의 시간적 코히어런스를 고려했을 경우 식 (9)를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$X_n(f_o)_{m\tau} X_l^+(f_o)_{q\tau} = X_o^2(f_o) \cdot \exp\left[-\frac{(m-q)v\tau + (n-l)\delta}{vT_c}\right] \quad (12)$$

그러므로 식 (11)의 전력 빔 패턴은 최종적으로 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(f_o, \theta_s)_{Mr} = & \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^M \left[\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L X_n^2(f_o) \cdot \exp \left[- \left(\frac{(m-q)v\tau + (n-d)\delta}{vT_c} \right)^2 / 2 \right] \right] \\
 & \cdot \exp \left[j2\pi f_o \frac{\delta(n-d)\sin\theta_s}{c} \right] \\
 & \cdot \exp \left[-j2\pi f_o \frac{(m-q)v\tau \sin\theta_s}{c} \right]
 \end{aligned} \tag{13}$$

코히어런스 효과와 더불어 입사각 추정 성능에 영향을 미치는 주된 환경적 요인 중 하나로 전인 센서 배열이 가져야 하는 직선 경로에서 해류의 영향 등으로 인해 이상적인 직선 방향에서 이탈된 발진 경로, 또는 진동경로가 발생하는 위치 에러를 가질 수 있다. 이러한 위치 에러에 대해 다음과 같이 적용되는 새로운 식을 얻을 수 있다[1].

$$\begin{aligned}
 v(m\tau) &= \sqrt{v_o^2 - v_{\perp}(m\tau)^2} \\
 v_{\perp}(m\tau) &= v_o \sin \gamma \cos(2\pi m\tau / T_o)
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 $v(m\tau)$ 는 직선 방향의 전인 센서 배열 경로를 가정했을 때의 전인 속도 요소이며, $v_{\perp}(m\tau)$ 는 속도 $v(m\tau)$ 를 기준으로 γ 크기만큼의 이탈각을 가지는 속도 성분이다. 또한 T_o 는 진동 경로에 대한 주기이다. 그림 2는 위의 위치 에러에 대해 도식적으로 표현하고 있다. 즉, 그림 3과 같이 해수 흐름의 영향에 따라 전인 배열이 선형을 유지하지 못하고 왜곡된 배열 형태를 취함으로써 인해 주요 파라미터 추정시 성능이 저하되는 문제점이 발생하는 것이다. 식 (6)에 위의 식 (14)에 표현되어 있는 속도 성분을 대입해 주면 다음과 같이 변형된 빔 패턴 출력을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 B(f, \theta_s)_{Mr} = & b(f, \theta_s)_i \sum_{m=1}^M \cdot \exp \left[\left(j2\pi f_o \left(1 - \frac{v(m\tau)}{c} \sin\theta \right) m\tau \right) \right] \\
 & \cdot \exp(-j2\pi f_s m\tau)
 \end{aligned} \tag{15}$$

IV. 부착 전인 왜곡된 구조의 배열을 이용한 FFTSA기법 성능 고찰

전인 센서 배열이 비선형이라고 가정했을 경우 각 센서에 입사되는 신호 $x(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_n(t_i) = & A \cdot \exp \left[j2\pi f \left(t_i - \frac{D_{n-1} \cdot \sin(\theta - \phi_{1n})}{c} \right) \right] + \epsilon_n(t_i) \\
 & n=1, 2, 3, \dots, N \\
 & i=1, 2, 3, \dots, K
 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 D_{n-1} 은 기준 센서로부터 임의의 n 번째 센서까지의 거리를 의미하며 ϕ_{1n} 은 가상의 선형 배열 선상에서 n 번째 센서까지의 직선 거리에 대한 사이각을 의미한다. 여기서 센서 개수는 $n=1, 2, 3, \dots, N$ 이고, f 는 도플러 주파수, c 는 수중환경 하에서의 음파 전달 속도이다. 이때 c 의 값은 1498 m/s 이다. 그림 3은 부착 전인 왜곡된 구조의 배열을 지니는 FFTSA 기법에 대한 입사 신호 모델링을 나타내고 있다. 센서 사이의 위치 불균형으로 인해 발생하는 비선형 전인 센서 배열에서의 입사신호에 대한 지연거리 X 와 지연시간 Y 는 식 (17) 및 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$X = D_{n-1} \sin(\theta - \phi_{1n}) \tag{17}$$

$$Y = \frac{D_{n-1} \sin(\theta - \phi_{1n})}{c} \tag{18}$$

식 (17) 및 식 (18)은 그림 4에서 나타내고 있는 각각의 파라미터들을 이용하여 기하학적 방법에 의해 산출되었다. 만약 전인함 이동 후 일정한 시간 지연 값 τ 를 갖는 각 센서에 대한 출력들로 구성된 백터 및 행렬을 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

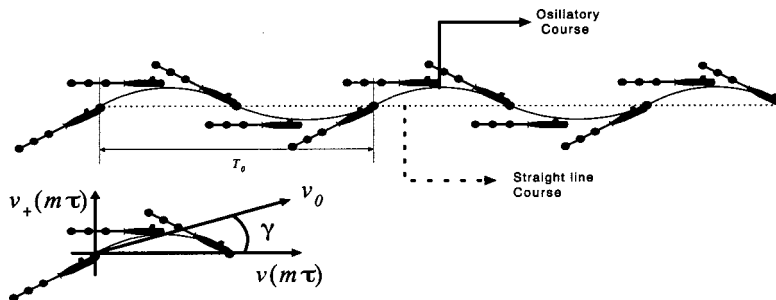


그림 3. 전인 센서 배열에서의 위치 에러
Fig. 3. Position error with towed sensor array.

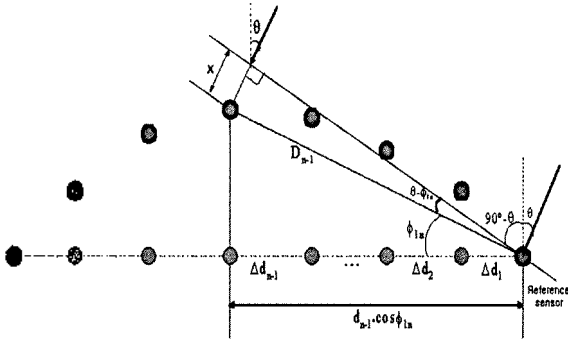


그림 4. 비선형 견인 센서 배열에서의 입사신호에 대한 지연거리 및 지연시간 표현
Fig. 4. Delay for distant and time with non-linear towed sensor array by input signal.

$$x(t_i + \tau) = \Phi(t_i)S(t_i) + E \quad (19)$$

여기서

$$x(t_i + \tau) = [x_1(t_i + \tau) \ x_2(t_i + \tau) \ x_n(t_i + \tau)]^T$$

$$\Phi(t_i) = \text{diag} \left[e^{j2\pi f_o \frac{D_1 \sin(\theta_s - \phi_{ln})}{c}}, e^{j2\pi f_o \frac{D_2 \sin(\theta_s - \phi_{ln})}{c}}, \dots, e^{j2\pi f_o \frac{D_{n-1} \sin(\theta_s - \phi_{ln})}{c}} \right]$$

$$E = [\varepsilon_1(t_i + \tau) \ \varepsilon_2(t_i + \tau) \ \dots \ \varepsilon_n(t_i + \tau)]^T \quad (20)$$

$$S_n(t_i) = A \cdot e^{j2\pi f_o \left(\tau - \frac{v\tau}{c} \right)} e^{j2\pi (f_o - f_d) t_i} \quad (21)$$

$$f_d = f_o \cdot \frac{v}{c} \sin \theta \quad (22)$$

식 (20)은 τ 만큼 시간 지연이 적용된 백색 잡음이며 식 (21) 및 식 (22)에서 f_d 는 도플러 천이값을 의미한다. 기준 시간 t_o 에서 견인 배열이 τ 시간만큼 이동한 후 목표물의 방사 신호에 대한 부배열에서의 빔 패턴은 왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(f, \theta_s)_\tau = \sum_{n=1}^M \left(\sum_{i=1}^K x_n(t_i + \tau) \exp(-j2\pi f_o t_i) \right) \cdot \exp \left[j2\pi f_o \frac{D_{n-1} \sin(\theta_s - \phi_{ln})}{c} \right] \quad (23)$$

여기서 θ_s 는 앞에서 언급했듯이 센서에 대해 입사각 θ 를 갖는 목표물 방사 신호에 대한 조절각을 의미한다. 식 (23)은 다음과 같은 식 (24)로 나타낼 수 있다.

$$b(f_o, \theta_s)_\tau = b(f_o, \theta_s)_{t_o} \cdot \exp \left[j2\pi f_o \left(\tau - \frac{v\tau}{c} \sin \theta \right) \right] \quad (24)$$

식 (24)는 각각의 연속적인 부배열 빔 패턴 출력 위상이 보상 과정을 거친 후 최종적인 합성 빔 패턴 출력을 형성하는데 이용된다. 즉, 효과적인 합성 견인 센서 배열의 성능을 증가시키기 위해 코히어런트하게 합하면 다음과 같다.

$$B(f_o, \theta_s)_{Mr} = b(f_o, \theta_s)_{t_o} \sum_{m=1}^M \exp \left[\left(j2\pi f_o \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta \right) m\tau \right) - j\phi_m \right] \quad (25)$$

$$\text{단, } -j2\pi\phi_m = -j2\pi \int_s m\tau$$

여기서 $\phi_m = 2\pi f_o (1 + v \cdot \sin \theta_s / c)$ 는 합성 어패처를 생성하는데 필요로 되어지는 m 번째 빔 패턴 출력에 대한 위상 보상 요소이며, M 은 모든 τ 초마다 생성되어지는 물리적 배열의 연속적인 빔 패턴 출력의 수이다. 식 (25)는 다음과 같이 분할하여 변형될 수 있다.

$$\begin{aligned} B(f_o, \theta_s)_{Mr} &= \sum_{m=1}^M b(f_o, \theta_s)_{mr} \cdot \exp(-j\phi_m) \\ &= \sum_{m=1}^M b(f_o, \theta_s)_{mr} \cdot \exp \left[-j2\pi f_o \left(1 \pm \frac{v}{c} \sin \theta_s \right) m\tau \right] \\ &= \sum_{m=1}^M b(f_s, \theta_s)_{mr} \cdot \exp(-j2\pi f_m \tau) \end{aligned} \quad (26)$$

물리적인 N 개의 견인 센서 배열로부터 M 번의 연속적인 측정들은 다음과 같이 푸리에 변환되어진다.

$$B(f_s, \theta_s) = \sum_{m=1}^M b(f_s, \theta_s)_{mr} \cdot \exp(-j2\pi f_s m\tau) \quad (27)$$

식 (24)를 고려하여 식 (27)은 다음과 같이 수정되어질 수 있다.

$$B(f_o, \theta_s)_{Mr} = b(f_o, \theta_s)_{t_o} \sum_{m=1}^M \exp \left[j2\pi f_o \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta \right) m\tau \right] \cdot \exp(-j2\pi f_s m\tau) \quad (28)$$

V. 환경적 요인에 의한 왜곡된 구조의 FFTSA 신호 모델링

코히어런스 효과 및 견인함의 변동 경로 주기를 고려한 부착 견인 왜곡된 구조의 비선형 견인 센서 배열의 출력 신호를 모델링함에 있어 선형 배열을 사용한 FFTSA 기법과의 차이점은 각 센서 사이의 거리 및 센서 입사 신호에

대한 모델링을 비선형 배열이라는 점을 고려하여 센서 출력신호를 수정해야 한다는 점이다. 신호의 시간적 코히어런스는 식 (8)에서 표현한 바와 같이 가우시안 모델을 따른다고 가정하며, 수신된 신호의 코히어런스 손실이 합성 어페처의 공간적 코히어런스 길이의 손실을 유발하는 관계로 식 (8)은 다음과 같이 수정되어질 수 있다.

$$\rho_{ni}(f, m\tau) = \exp\left[-\left(\frac{mv\tau + D_{n-i}}{vT_c}\right)^2 / 2\right] \quad (29)$$

여기서 왜곡된 구조의 비선형 배열이라는 점을 고려하여 n 번째와 l 번째 센서 사이의 거리 표현에 있어서 식 (29)에 D_{n-i} 를 적용하였다. 합성 처리 주기 $m\tau$ 는 견인 배열의 개별적인 합성 시점에서의 n 번째와 l 번째 센서 사이의 거리 및 견인함이 이동함으로써 발생하는 추가적인 거리 $mv\tau$ 의 합성으로 $mv\tau + D_{n-i}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 단, 식 (29)는 부가적인 환경적 요인을 고려하지 않은 것이며, 위 모델은 신호의 시간적 코히어런스 길이 $v \cdot T_c$ 가 매체의 공간적 코히어런스 길이 L_c 보다 작다는 가정 아래 가능하다. 주파수 영역에서 최종적인 빔 패턴 출력 $B(f_o, \theta_s)_{mr}$ 는 비선형 왜곡된 구조의 배열이라는 점을 고려하여 각 센서에 대한 입사각 및 센서 사이의 거리를 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(f_o, \theta_s)_{mr} = \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N X_n(f_o)_{mr} \cdot \exp\left(j2\pi f_o \frac{D_{n-i} \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right) \right] \cdot \exp\left(-j2\pi f_o \frac{mv\tau \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right) \quad (30)$$

식 (30)을 토대로 각각의 부배열 빔 패턴 출력을 합성한 최종적인 전력 빔 패턴 출력은 왜곡된 구조의 비선형 센서 배열에 대하여 다음과 같이 수정되어질 수 있다.

$$P(f_o, \theta_s)_{mr} = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^M \left[\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N X_n(f_o)_{mr} X_l^+(f_o)_{qr} \cdot \exp\left[j2\pi f_o \frac{D_{n-i} \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_o \frac{(m-q)v\tau \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right] \right] \quad (31)$$

또한 신호의 코히어런스 효과를 고려했을 경우 식 (29)를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$X_n(f_o)_{mr} X_l^+(f_o)_{qr} = X_o^2(f_o) \cdot \exp\left[-\left(\frac{(m-q)v\tau + D_{n-i}}{vT_c}\right)^2 / 2\right] \quad (32)$$

그러므로 비선형 배열에 대한 식 (31)의 전력 빔 패턴은 식 (32)를 적용하여 다음과 같은 최종적인 전력 빔 패턴으로 나타낼 수 있다.

$$P(f_o, \theta_s)_{mr} = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^M \left[\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N X_o^2(f_o) \cdot \exp\left[-\left(\frac{(m-q)v\tau + D_{n-i}}{vT_c}\right)^2 / 2\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_o \frac{D_{n-i} \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_o \frac{(m-q)v\tau \sin(\theta_s - \phi_{1n})}{c}\right] \right] \quad (33)$$

VI. 시뮬레이션 및 결과 고찰

견인 선형 배열을 이용한 FFTSA 기법에 대해 시간적 코히어런스 효과에 대한 모의 실험 결과를 그림 5에 보였다. 신호대 잡음비 (SNR: Signal to Noise)를 -30 dB로 고정했을 때 세로축은 dB로 표현된 최종적인 빔 패턴 출력에 대한 신호대 잡음비값을 의미하며, 가로축은 -90°에서 90°사이의 범위를 가지는 조절각의 값을 의미한다. 즉, 조절각은 총 721개의 원소를 가지는 벡터로 이루어져 있음을 그림 5를 통해 파악할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 환경조건으로는 센서의 개수를 32개로 하였으며, 선형 견인 배열의 센서간 간격은 취득 신호의 표본화 주파수를 신호원의 중심 주파수 330 Hz 의 4배로 하였기에 그 주파수에 대한 반파장 간격으로 센서간 거리를 정규화하였으므로 약 1 m, 부배열에서 연속적인 빔 패턴 출력의 합성횟수를 40번으로 지정하였다. 또한 센서에 입사되는 신호의 입사각을 1개의 신호가 입사된다고 가정하였을 경우 20°로 지정하였다.

그림 5의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 총 합성 처리 시간에 따른 코히어런스 주기 변화에 대한 입사각 추정 성능의 변화를 파악하기가 쉽지 않다. 그림 6은 이러한 추정 성능 변화 파악의 불확실성을 해결하기 위해 그림 5에 나타난 4가지 결과에 대해 주어진 부엽 레벨 이하로 떨어지는 부엽들의 발생 빈도 축적율 (%)을 나타내고 있다. 그림 6에서 부엽의 축적율 그림 5의 빔 패턴 출력에서 각각의 신호대 잡음비값에 대한 샘플의 발생 확률을

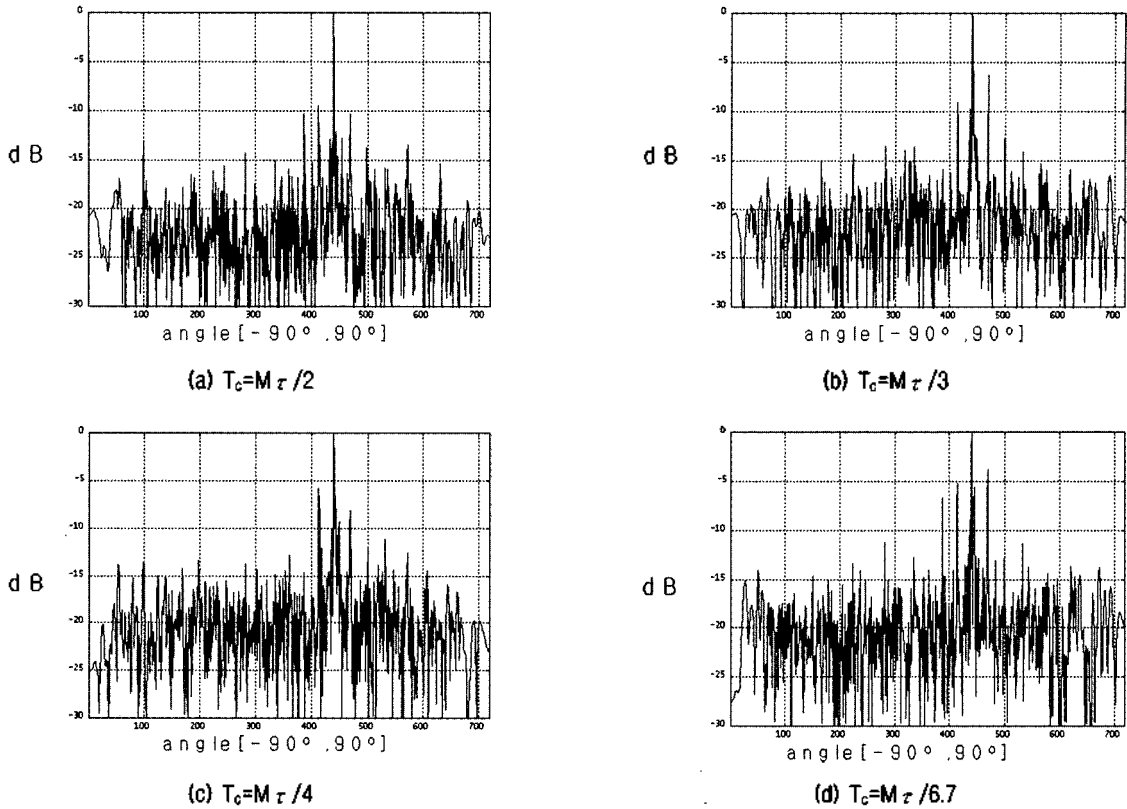


그림 5. FFTSA에서의 시간적 코히어런스 효과
Fig. 5. Temporal coherence effect of FFTSA.

나타내고 있으며, $M \cdot \tau$ 는 견인 센서 배열의 총 적분 시간을 나타낸다. 또한 T_c 는 신호의 시간적 코히어런스에 대한 주기를 의미한다. 즉, 그림 6에서 $T_c = M \cdot \tau/2$ 일 때 부엽 레벨이 -10 dB이하로 떨어지게 되는 부엽 빈도 축적율이 공간적 스펙트럼의 총 샘플수의 70%가 됨을 알 수 있다. 시간적 코히어런스 주기가 낮아질수록 신호대 잡음비에 대한 평균 레벨 축적율이 저조하여 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다. 즉, 견인 선형 배열은 코히어런스 주기에 상당히 민감함을 파악할 수 있다.

그림 7은 견인함의 변동 경로 주기에 따른 효과에 대한 빔패턴 출력을 나타내고 있다. 그림 7에 대한 환경조건 또한 시간적 코히어런스 경우와 마찬가지로 센서의 개수를 32개로 했으며, 연속적인 빔패턴 출력의 합성횟수를 40번, 추정하려는 목표물에 대한 고유 주파수를 330 Hz로 지정하였다. 또한 센서에 입사되는 신호의 입사각을 1개의 신호가 입사된다고 가정하였을 경우에서 20° 로 지정하였다. 시간적 코히어런스 주기는 공통적으로 $T_c = M \cdot \tau/2$ 로 고정하였으며, 견인함이 직선 경로에서 벗어난 정도를 의미하는 이탈각 $\gamma = 2^\circ$ 로 하였다. 그림 7의 4가지 빔패턴 출력 결과를 주어진 부엽 레벨 이하로 떨어지는 부엽

들의 발생 빈도 축적율로 표현하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

그림 8에서 발생 빈도 축적율은 변동 경로 주기 T_c 가 주어진 빔패턴 출력에 대해 신호대 잡음비 변화에 따른 샘플의 발생 확률을 나타내고 있다. 그림 8에서 부엽 레벨이 $T_c = M \cdot \tau/0.5$ 일 때 -10 dB이하로 떨어지게 되는 빈도 축적율은 공간적 스펙트럼의 총 샘플수가 65%가

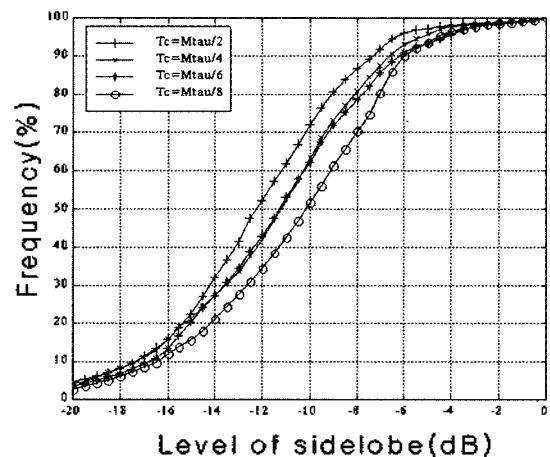


그림 6. 코히어런스 주기에 따른 성능변화
Fig. 6. Performance variation by coherence period.

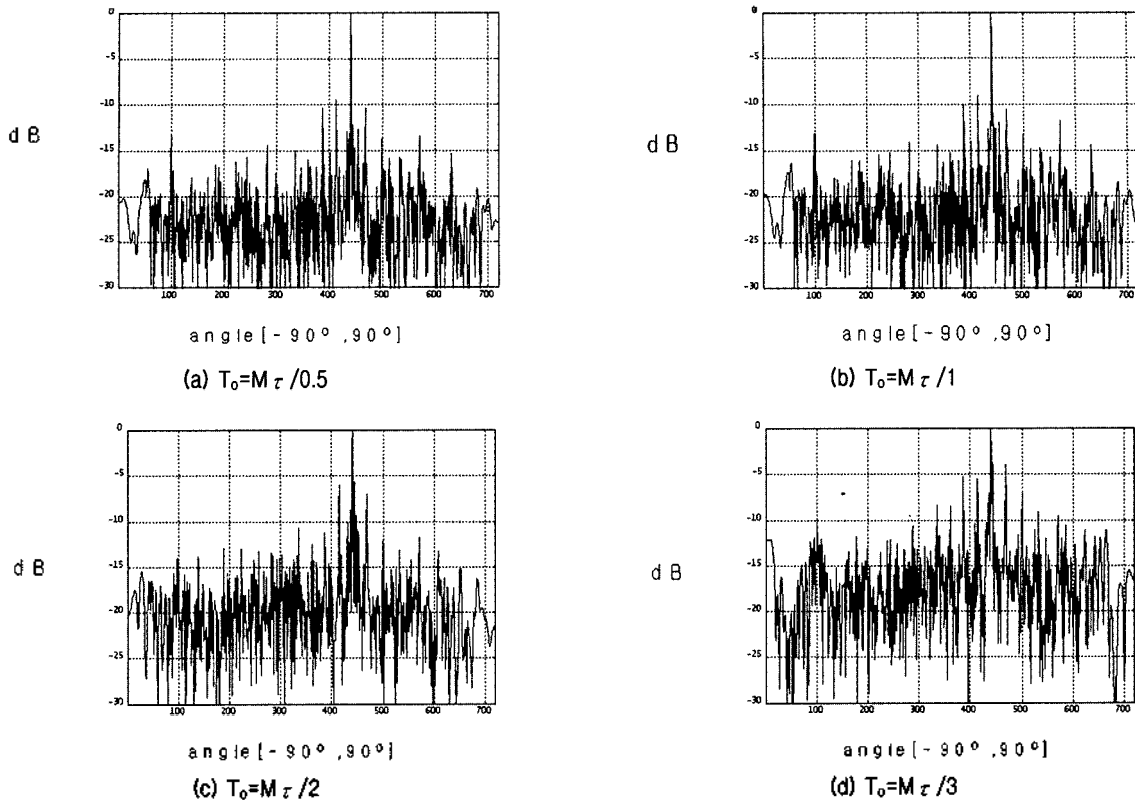


그림 7. FFTSA에서의 위치 에러($\gamma=2^\circ$)
 Fig. 7. Position error of FFTSA ($\gamma=2^\circ$).

됨을 알 수 있다. 또한, 견인 센서 배열에 대한 변동 경로 주기가 짧아질수록 신호대 잡음비에 대한 평균 레벨 축적율이 저조하여 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다.

편이각 γ 의 변화에 따른 견인 센서 배열 성능 차이에 대한 비교를 위하여 모든 환경 조건을 $\gamma=2^\circ$ 인 경우와 동일하게 하여 $\gamma=8^\circ$ 인 경우에 대한 모의 실험을 수행해 보면 그림 9와 같은 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 나타난다. 그림 9의 결과에서 알 수 있듯이 편이각 γ 가 커지면 1개의 입사 신호 추정에 있어서 $\gamma=2^\circ$ 일 때와 비교하여 크나큰 차이가 없음을 파악할 수 있다. 그림 10은 그림 9의 4가지 빔 패턴 출력에 대한 신호대 잡음비 및 부엽 평균 레벨의 수치를 나타내고 있다. 즉, $\gamma=2^\circ$ 인 경우와 마찬가지로 견인 센서 배열에 대한 변동 경로 주기가 짧아질수록 부엽 평균 레벨이 증가하여 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다. 그림 10에서 보면 부엽 레벨이 $T_0 = M \cdot \tau/0.5$ 일 때 -10 dB이하로 떨어지게 되는 빈도 축적율이 공간적 스펙트럼의 총 샘플수가 약 68%가 됨을 알 수 있다. 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 견인 선형 배열은 코히어런스 효과와 더불어 변동 경로 주기 변화에도 민감한 반응을 나타냄을 파악할 수 있다.

왜곡된 구조의 배열을 FFTSA 기법에 적용했을 경우

부배열 합성횟수에 따른 입사각 추정 성능의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그림 11에 도시하고 있다. 센서의 개수를 32개로 하였으며, 신호대 잡음비=-30 dB, 왜곡된 구조의 배열에 대한 연속적인 빔 패턴 출력의 합성 횟수를 각각 10번, 20번 25 및 40번으로 지정하였다. 또한 비선형 배열에서 기준센서로부터의 거리 D_n 은 가상의 선형 센서 배열의 거리를 고려하여 식 (34)와 같이 주어질 수 있으며, 목표물 방사 신호에 대한 센서 입사각은

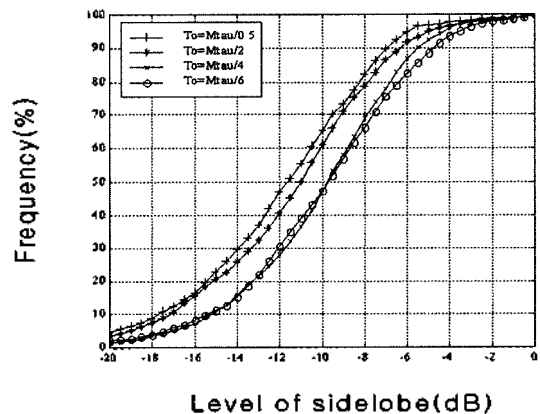


그림 8. 위치 에러에 대한 성능 변화($\gamma=2^\circ$)
 Fig. 8. Performance variation by position error.

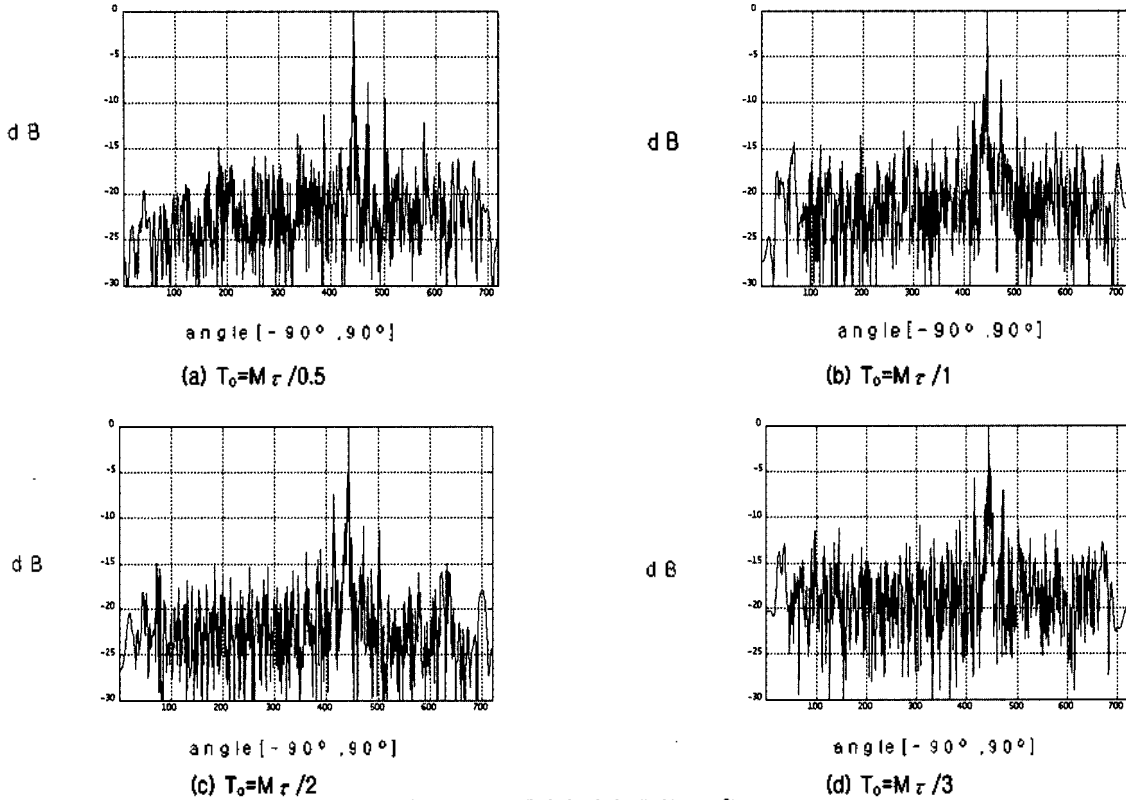


그림 9. FFTSA에서의 위치 에러($\gamma = 8^\circ$)
 Fig. 9. Position error of FFTSA ($\gamma = 8^\circ$).

20°로 하였다.

$$D_n = \frac{(\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \dots + \Delta d_n)}{\cos \phi_n} \quad (34)$$

가상의 견인 센서 배열에서 근접하는 센서 사이의 거리 $\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \dots + \Delta d_n$ 은 반파장 간격으로 정규화된 값이다. 또한 기준센서에서 왜곡된 구조의 비선형 배열의 n 번째 센서까지의 사이각 ϕ_n 은 [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0]의 각도로 각각 지정하였다.

그림 12는 부착 견인 왜곡된 구조의 배열을 이용한 FFTSA기법에서 코히어런스 효과에 대한 모의 실험 결과를 나타내고 있다.

그림 12의 모의 실험 결과를 통해서 코히어런스 주기 변화에 따른 입사각 추정 성능 변화에 대해 명확한 구분을 하기 어렵다. 그러므로 그림 13은 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 12에 대한 4가지 빔패턴 결과에 대해 신호 대 잡음비 및 부엽의 평균 레벨 수치를 나타내고 있다. 그림 13의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 부엽 레벨이 -10 dB이하로 떨어지게 되는 샘플 빈도 축적율이 공간 스펙트럼 총 샘플수의 90%가 됨을 파악할 수 있다. 즉,

견인 선형 배열을 사용했을 경우와는 달리 총 처리 시간에 비해서 코히어런스 주기가 짧아짐에 따라 부엽의 평균 레벨이 크나큰 변화가 없음을 파악할 수 있다.

그림 14는 견인함의 이동경로 변화에 따른 왜곡된 구조의 비선형 배열에서의 합성 어패처 빔 패턴 출력을 나타내고 있다. 모의 실험 환경 조건은 시간적 코히어런스 모의 실험 경우와 동등하게 하였으며, 시간적 코히어런스 주기는 공통적으로 $T_c = M \cdot \tau / 2$ 로 고정하였다. 또한

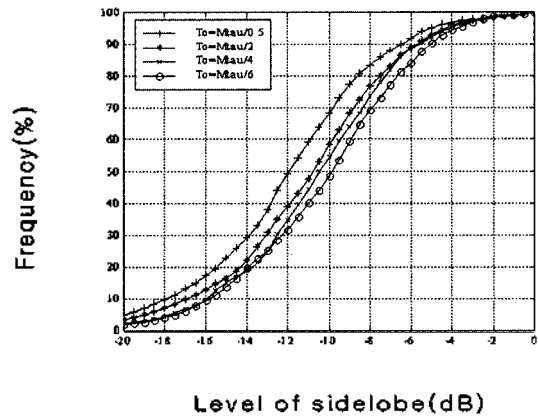


그림 10. 위치 에러에 대한 성능변화($\gamma = 8^\circ$)
 Fig. 10. Performance variation by position error.

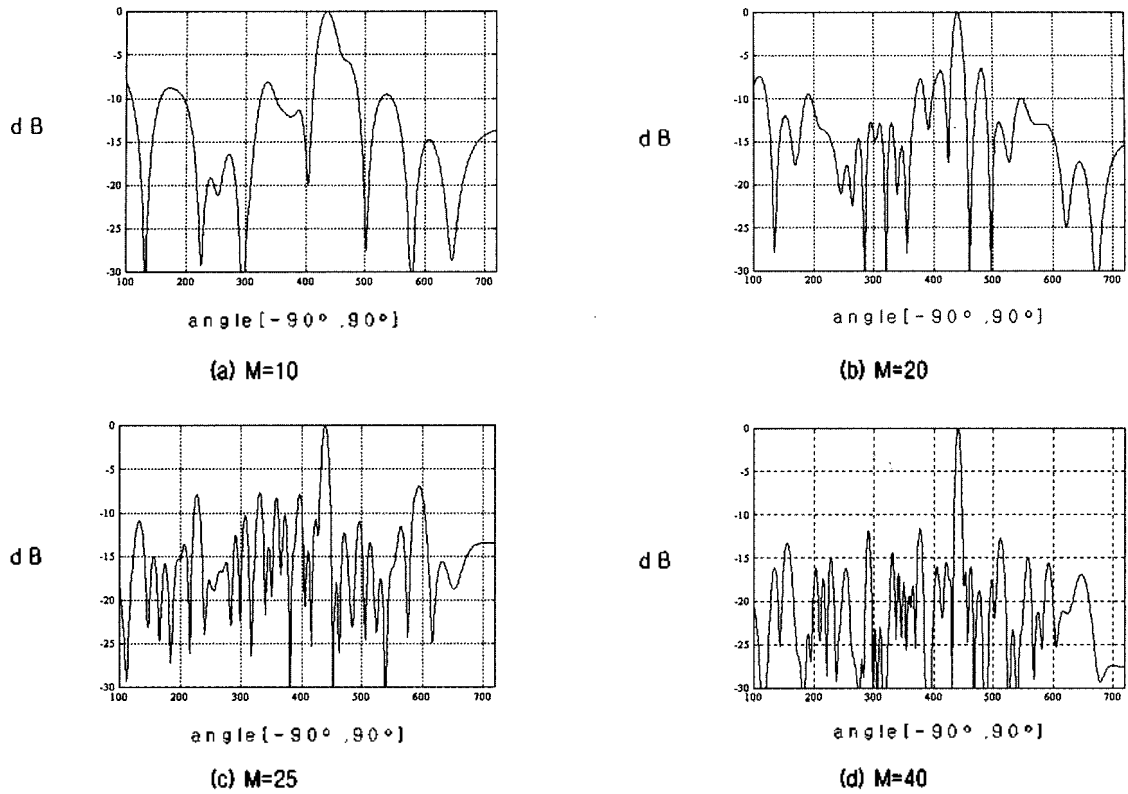


그림 11. FFTSA기법을 적용한 왜곡된 배열에서의 합성 횟수에 따른 추정 성능 변화
 Fig. 11. Estimation performance variation of conformal array using FFTSA by change of measurement.

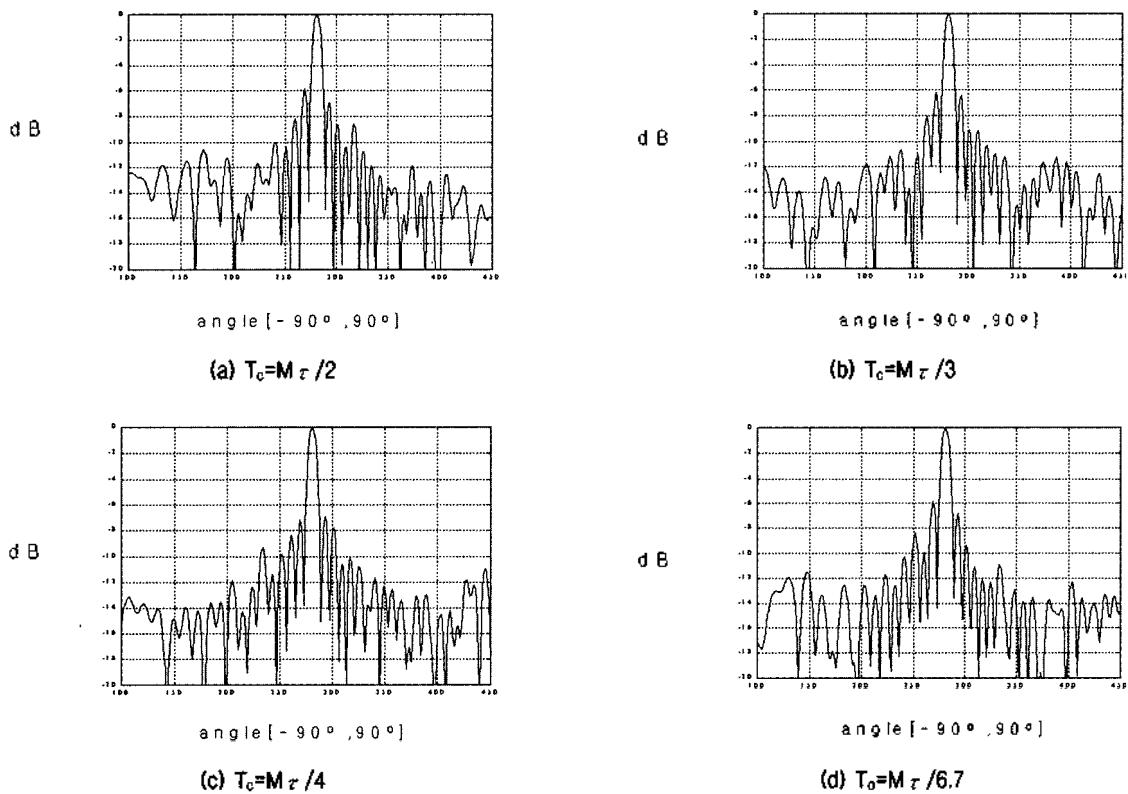


그림 12. 비선형 견인 센서 배열에서의 시간적 코히어런스 효과
 Fig. 12. Temporal coherence effect of non-linear towed sensor array.

편이각 $\gamma=2^\circ$ 로 하였다.

그림 14를 통해서 는 변동 경로 주기 T_0 에 따른 빔패턴 출력의 부엽 값들의 변화를 파악하기 어렵다. 그러므로 그림 15에서는 그림 14의 4가지 빔패턴 출력 값들을 이용하여 신호대 잡음비의 변화에 따른 부엽의 평균레벨 수치를 표현하였다. 그림 14에서 $T_0 = M \cdot \tau / 0.5$ 일 때 부엽 레벨이 -10 dB이하로 떨어지게 되는 샘플 빈도 축적율이 공간적 스펙트럼의 총 샘플수가 90%임을 파악할 수 있다. 그림 15에서 보면 변동 경로 주기가 짧아져도 부엽 평균 레벨이 증가 정도가 기존의 견인 선형 배열에 비해 왜곡된 구조의 비선형 배열을 적용했을 경우 성능이 저하 정도가 거의 없음을 알 수 있다. 편이각 γ 의 변화에 따른 견인 센서 배열 성능 차이에 대한 비교를 위하여 모의 실험 환경 조건을 $\gamma=2^\circ$ 인 경우와 동일하게 하여 $\gamma=8^\circ$ 인 경우에 모의 실험을 수행해 보면 그림 16과 같은 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 나타난다.

그림 16의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 편이각 γ 가 커질수록 $\gamma=2^\circ$ 일 때와 비교하여 크나큰 차이는 없음을 파악할 수 있다. 그림 17은 그림 16의 4가지 결과에 대한 신호대 잡음비 변화에 따른 부엽 평균 레벨의 수치

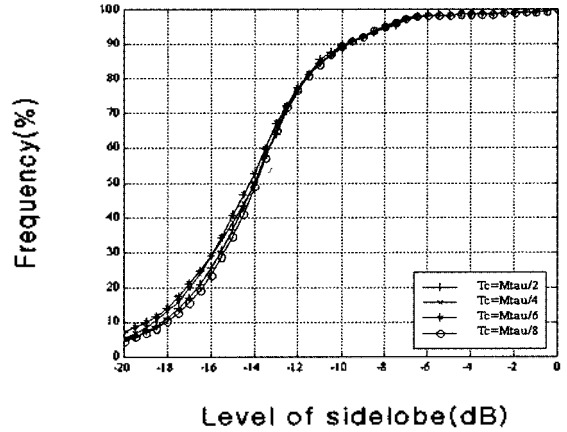


그림 13. 비선형 견인 배열에서의 코히어런스 주기에 따른 성능 변화

Fig. 13. Performance variation of non-linear towed array by coherence period.

를 나타내고 있다. 그림 17에서 보면 변동 경로 주기가 짧아져도 부엽 평균 레벨의 증가 정도가 기존의 견인 선형 배열에 비해 왜곡된 구조의 비선형 배열을 적용했을 경우 성능 저하 정도가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 $\gamma=2^\circ$ 인 경우에 비해서 부엽 평균레벨이 약간의 증가가 있음을 파악할 수 있다. 그림 16에서 보면 $T_0 = M \cdot \tau / 0.5$

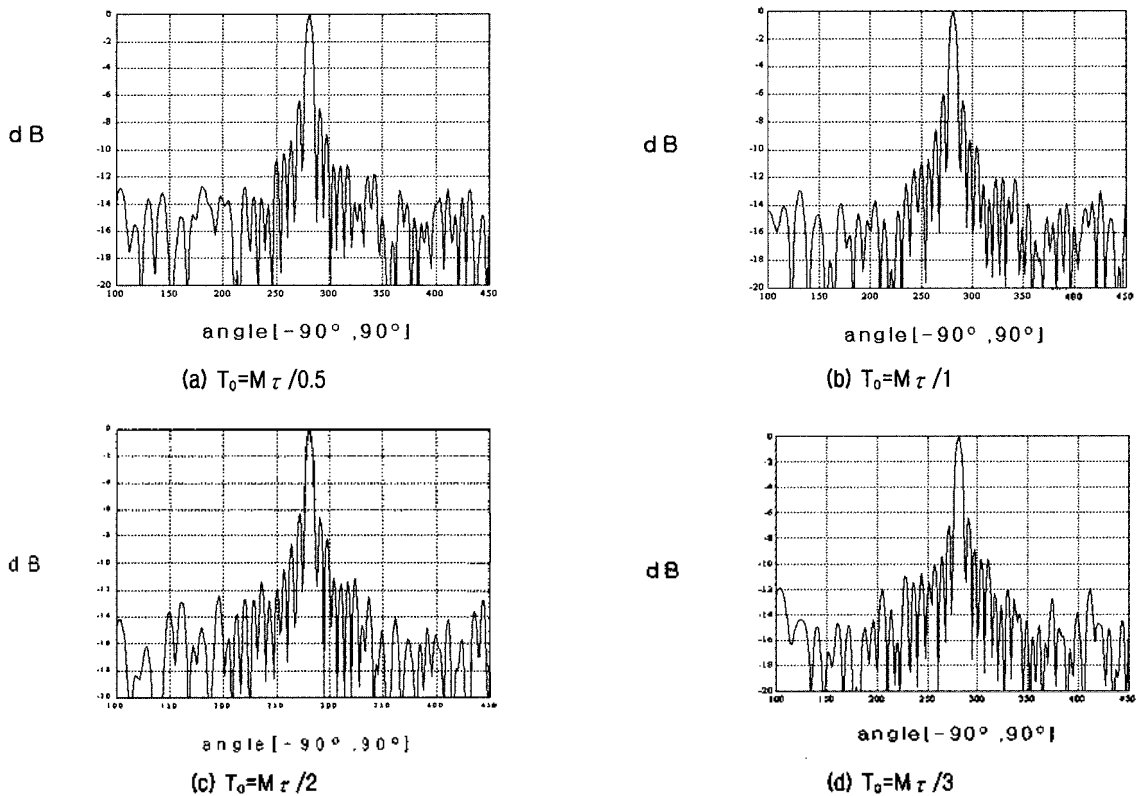


그림 14. 비선형 견인 센서 배열에서의 위치 에러 ($\gamma=2^\circ$)
Fig. 14. Position error of non-linear towed sensor array ($\gamma=2^\circ$).

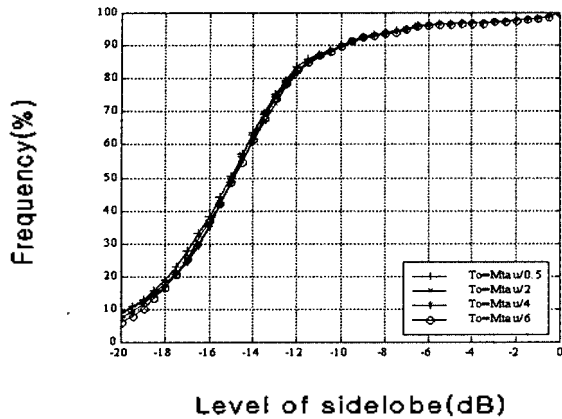


그림 15. 비선형 견인 센서 배열에서의 위치 에러에 대한 성능 변화 ($\gamma = 2^\circ$)
 Fig. 15. Performance variation of non-linear towed sensor array by position error ($\gamma = 2^\circ$).

일때 부엽 레벨이 -10 dB이하로 떨어지게 되는 샘플 빈도 축적율이 공간적 스펙트럼의 총 샘플수가 약 75%가 됨을 알 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 견인 배열을 이용한 합성 어퍼처 방식의

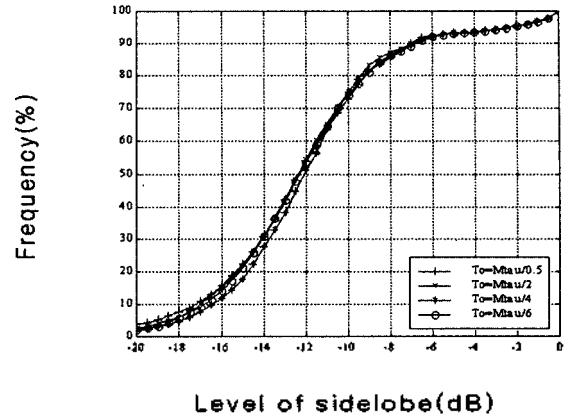
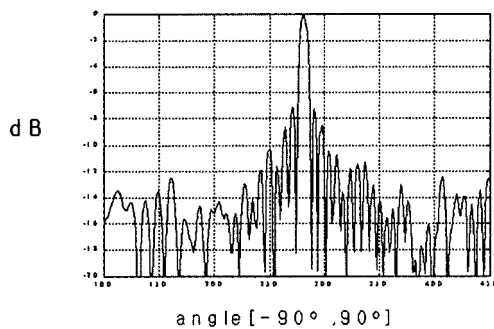
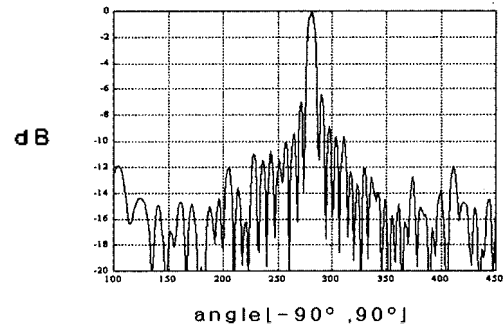


그림 17. 비선형 견인 센서 배열에서의 위치 에러에 대한 성능 변화 ($\gamma = 8^\circ$)
 Fig. 17. Performance variation of non-linear towed sensor array by position error ($\gamma = 8^\circ$).

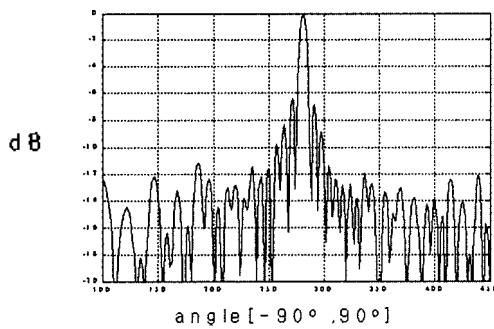
일종인 FFTSA의 총 처리 시간에 대한 시간적 코히어런스 주기의 변화 및 신호의 발진 또는 변동 경로 주기에 따른 입사각 추정 성능의 변화 발생 추이를 고찰하였다. 왜곡된 구조의 비선형 배열을 이용한 FFTSA 처리 기법을 수용하여 수중환경으로 인해 발생하는 코히어런스 영향 및 견인함의 이동 경로 변화와 같은 환경적 요인에 의한 입사신호의 입사각 추정 성능의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 파악하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해



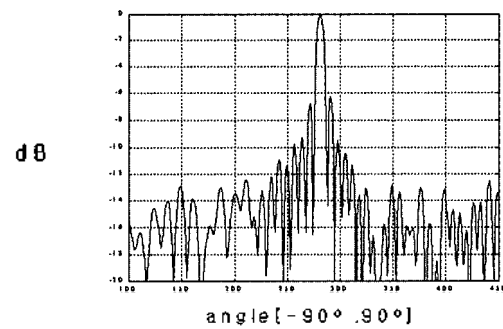
(a) $T_0 = M\tau / 0.5$



(b) $T_0 = M\tau / 1$



(c) $T_0 = M\tau / 2$



(d) $T_0 = M\tau / 3$

그림 16. 비선형 견인 센서 배열에서의 위치 에러 ($\gamma = 8^\circ$)
 Fig. 16. Position error of non-linear towed sensor array ($\gamma = 8^\circ$).

기존의 견인 선형 배열을 이용했을 때보다 외국된 구조의 비선형 배열을 이용한 FFTSA 처리 기법을 사용했을 경우 환경적 요인에 더욱 강인한 특성을 지님을 파악할 수 있었다. 외국된 구조의 FFTSA 처리 기법은 센서 배열을 견인함 측면에 부착함이 가능함으로 인해 견인 선형 배열의 센서 위치 지정에 대한 문제점을 극복할 수 있으며, 견인함에 배열 설치시 구조적 제한을 극복할 수 있다. 단, 탐지하려는 신호의 신호대 잡음비가 낮을 경우 추정 효율성이 낮아지는 단점이 발생한다.

감사의 글

본 연구는 수중 음향 특화 센터에서 지원한 Synthetic Aperture Array 소나 신호처리 기술연구의 일환으로 수행된 것입니다.

참고 문헌

1. S. Stergiopoulos and H. Urban, "A new passive synthetic aperture technique for towed arrays," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 17 no. 1, pp. 16-20, Jan. 1992.
2. S. Stergiopoulos and H. Urban, "An experimental study in forming a long synthetic aperture at sea," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 65-72, Jan. 1992.
3. N. C. Yen and Carey, "Application of synthetic-aperture processing towed-array data," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, pp. 754-765, 1989.
4. S. W. Autrey, "Passive synthetic array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, pp. 593-598, 1988.

5. S. Stergiopoulos and E. J. Sullivan, "Extended towed array processing by an overlap correlator," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, pp. 158-171, 1989.
6. S. Stergiopoulos, "Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, pp. 2128-2140, 1990.
7. P. Wille and R. Thiele, "Transverse horizontal coherence of explosive signals in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 50, pp. 248-353, 1971.
8. G. S. Edlson and E. J. Sullivan "Limitation on the overlap-correlator method imposed by noise and signal characteristics," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 30-39, Jan. 1992.
9. 이원철, 강정원, "수동형 선형 견인 배열 센서를 이용한 입사각 및 도플러 동시 추정 기법," *한국음향학회지*, 제17권 제2호, pp. 32-41, 4, 1998.

저자 약력

● 이 원 철 (Wong-Cheol Lee)

1986년: 서강대학교 이공대학 전자공학과 학사
 1988년: 연세대학교 대학원 전자공학과 석사
 1994년: New York Polytechnic University 박사
 1994년 7월~1995년 7월: Postdoctoral Fellow (Polytechnic University)
 1994년 1월~1994년 12월: IEEE Trans. on Signal Processing 논문 심사위원
 1995년 9월~현재: 숭실대학교 공과대학 정보통신공학과 조교수
 1995년 9월~현재: 연세대학교 신호처리 연구센터 연구원
 1995년 9월~현재: 대한음향학회 편집위원
 1998년 1월~현재: 대한음향학회 이사
 1995년 1월~현재: 한국통신학회, 편집위원
 * 주관심분야: 디지털 시스템 인지, 이동통신 시스템, 음성신호 부호화 및 레이다 신호처리

● 최 주 평 (Joo-Pyoung Choi)



1999년 2월: 안양대학교 정보통신공학과 공학사
 1999년 3월: 숭실대학교 전자공학과 공학석사
 2001년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정
 * 주관심분야: 소나, 레이다 신호 처리, 이동통신 시스템