

칼만필터 선배열 형상 추정에 의한 견실한 빔형성 기법 연구

한 정 우, 오 원 천
국방과학연구소

Robust Beamforming Method by Linear Array Shape Estimation using Kalman Filter

Jeongwoo Han, Wontcheon Oh
Agency for Defence Development

요 약

예인형 선배열 소나에서 기존의 선배열 빔형성 기법을 적용하면 예인함 기동시 선배열 형상 변형에 의해 심각한 성능 저하 현상이 나타난다. 이러한 문제 해결을 위해 센서배열 변형을 고려한 견실한 빔형성 기법에 대해 연구하였다. 센서배열 변형을 고려한 빔형성 기법은 선배열 형상 추정과 변형보상 빔형성으로 이루어 진다. 선배열 형상 추정을 위해 칼만필터를 이용한 형상 추정기법을 이용하고, 변형보상 빔형성을 위해 선배열 세그먼트 기울기 추정값을 이용하는 변형보상 빔형성 알고리즘을 제안하였다. 제안된 기법을 기존의 빔형성 기법에 적용하여 시뮬레이션에 의해 제안된 기법의 보상성능을 입증 하였다.

1. 서 론

예인형 선배열 소나에서 빔형성 기술은 장거리 표적당지 및 위치추적을 위해 필수적으로 요구되는 기술이다. 그러나 기존의 선배열 빔형성 기법들은 예인함 기동으로 인한 선배열 형상 변형으로 심각한 성능 저하 현상이 나타날 수 있다. 그러므로 예인형 선배열 소나 운용시 가능한 선배열의 선형성이 유지될 수 있도록 예인함 기동에 제한을 두어야 하며, 전방위 탐색, 표적위치 좌우구분, TMA 기동, 회피기동과 같이 불가피 하게 예인함 기동이 요구되는 상황에서는 선배열의 선형성이 유지되는 안정된 시간의 신호만이 이용된다. 결국 예인함 기동 상황에서는 센서배열 성능저하로 연속된 표적당지 및 추적이 불가능 하다. 이와같은 문제를 해결하기 위해 선배열의 선형성에 의존하지 않는 빔형성 기법 연구가 이루어져 왔다[1]-[3]. 이러한 방법들은 함기동에 의한 변형된 선배열의 형상을 추정하고, 변형에 의한 인접 센서간의 시간 지연 오차를 보상해 줌으로써 빔형성 이득 손실을 최소화 시키는 것이다.

본 연구에서는 여러가지 선배열 형상 추정기법 가운데 칼만필터를 이용한 선배열 형상 추정기법을 이용한다 [4][5]. 칼만필터 추정기법은 기존 음원이 필요없고, 적은 수의 측정센서로 정확성이 높은 선배열 형상 추정이 가능하며, 실시간 빔형성기를 위한 처리가 가능하다. 칼만필터 설계를 위해 예인점 유기운동에 따른 선배열 센서부의 저주파 운동에 대한 유체역학 모델결과를 유도 하였으며, 선배열 형상 추정 칼만필터를 설계 하였다. 그리고 선배열 변형보상 빔형성을 위해 기존 기울기와 선배열 세그먼트 기울기 추정값을 이용하여 인접센서간의 시간 지연 오차를 보상해 주는 변형보상 빔형성 알고리즘을 제안 하였다. 제안된 기법을 기존의 전형적 빔형성 기법

(conventional beamforming)에 적용하여 시뮬레이션에 의해 제안된 기법의 보상성능을 입증하였다.

II. 칼만필터 예인 선배열 형상 추정

예인 선배열 형상 추정을 위한 칼만필터 설계를 위해 선배열 센서 예인시 나타나는 선배열 운동에 대한 모델링이 필요하다. 예인 선배열은 예인 케이בל, 선배열 센서부, 포리로프로 구성된다. 빔형성의 관점에서 관심있는 부분은 선배열 센서부이므로 본 연구에서는 선배열 센서부에 대한 운동 모델링을 한다. 그리고 예인함 기동에 의해 나타나는 선배열 운동형태에 관심이 있으므로 예인함 기동으로 발생하는 예인점 유기(Tow Point Induced) 운동에 의한 선배열 센서부 운동 모델링을 한다.

선배열 센서부는 음향센서와 방위 및 심도센서를 내포하고 있는 중성부력 원뿔형 배열이다. 중성부력 원뿔형 배열이 일정 속도로 예인됨때 TPI 운동에 의한 배열 운동 형태는 paidoussis 방정식으로 나타낼 수 있다[4][6]. 모델링에 이용된 기준좌표계는 그림 2.1 에 나타나 있다.

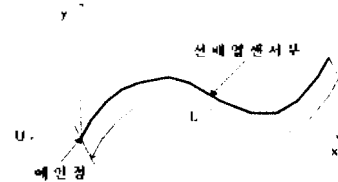


그림 2.1 선배열 운동 모델 기준좌표계

이와같은 기준좌표계에 대해 paidoussis 방정식은 다음 식 (2.1)과 같다.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + M \left[\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right] y - \frac{\partial}{\partial x} \left[\left[\frac{1}{2} c_1 \left(\frac{L-x}{d} \right) + \frac{1}{2} c_2 \right] MU \frac{\partial y}{\partial x} \right] + \frac{1}{2\rho} c_n \frac{MU}{d} \left[\frac{\partial y}{\partial t} + U \frac{\partial y}{\partial x} \right] = 0 \quad (2.1)$$

식(2.1)에 대해 무차원 변수를 다음과 같이 정의한다면 식 (2.1)을 간략화 할 수 있다.

$$\tau = t \frac{U}{L}, \quad \beta = \frac{M}{M+m}, \quad \xi = \frac{x}{L}, \quad \zeta = \frac{L}{d}, \quad \eta = \eta(\tau, \xi) = \frac{y(1, x)}{L} \quad (2.2)$$

정의된 무차원 변수를 식(2.1)에 대입하고, 선배열 길이 L 과 선배열 직경 d는 $L \gg d$ 인 관계를 이용하면 다음과

같이 식(2.1)을 간략화 할 수 있다.

$$c_1(\xi-1)\frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} + \left(c_1 + \frac{c_n}{\pi}\right)\frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{c_n}{\pi} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0 \quad (2.3)$$

이 방정식을 SDP(Small Diameter Paidoussis) 방정식이라 한다.

예인함 기동 형태에는 의도적 변침이 있을 수 있고, 반면에 조류나 바람의 영향으로 일어나는 자연적인 변침이 있을 수 있다. 의도적 변침 상황에서는 TPI 운동 주파수가 저주파에 해당되며, 자연적으로 일어나는 변침상황에서는 TPI 운동 주파수가 고주파에 해당된다. 빙형성 성능의 관점에서 볼 때 자연적인 변침 상황에서의 고주파 TPI 운동에 의한 선배열 변형은 빙형성 성능에 큰 영향을 미치지 못하고, 의도적 변침 상황에서의 저주파 TPI 운동에 의한 선배열 변형이 빙형성 성능 저하의 주요 요인이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 의도적 변침으로 일어나는 저주파 TPI 운동에 의한 선배열 변형만을 고려한다. 식 (2.3)의 SDP 방정식은 저주파 TPI 운동인 경우 더욱 더 간략화 될 수 있다. TPI 운동 주파수를 $\bar{\tau}$ 라고 하고, 정규화된 무차원 주파수를 $\bar{\tau}$ 라고 했을 때

$$\bar{\tau} = \bar{\tau} \frac{L}{U} = \bar{\tau} T = \frac{T}{T_r} = \frac{L}{\lambda} \quad (2.4)$$

여기서 $U = \Omega L$ 이다. 식 (2.4)에서 예인속도 U 와 TPI 운동 전달속도가 같다고 가정하였다. 실제로 TPI 운동 주파수에 관계없이 TPI 운동 전달속도가 예인속도에 근사함이 실험을 통해 입증되었다[5]. 식 (2.4)로부터 $\bar{\tau}$ 는 어떤 한 순간에 배열길이에서의 TPI 운동 파수(wave number)를 나타낼 수 있다. 저주파 TPI 운동은 $\bar{\tau} \leq 1$ 인 경우에 해당하며, 이때 식 (2.3)의 관성력 성분인 2차 도함수 성분이 무시될 수 있어서 다음과 같이 근사화 된다

$$\left(c_1 + \frac{c_n}{\pi}\right)\frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{c_n}{\pi} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0 \quad (2.5)$$

식 (2.5)는 water-pulley 방정식이라 한다.

주파수 ω 인 정현파 형태의 TPI 운동인 경우, 즉 식 (2.6)과 같은 경계조건이 주어졌을 때 water-pulley 모델의 정상상태해는 식 (2.7)과 같다.

$$\eta(\tau, 0) = \cos(\omega\tau), \quad \eta(0, \xi) = 0 \quad (2.6)$$

$$\eta(\tau, \xi) = \cos[m(\tau - \rho\xi)], \quad \rho = \frac{c_n}{c_n + \pi c_1} \quad (2.7)$$

이 결과를 부터 water-pulley 모델의 정상상태해의 일반형을 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기서 함수 $f(x)$ 는 1차 도함수가 연속성을 갖는 임의의 함수를 나타낸다

$$\eta(\tau, \xi) = f(\xi - \bar{\rho}\tau), \quad \bar{\rho} = \frac{c_n + \pi c_1}{c_n} \quad (2.8)$$

water-pulley 모델의 정상상태해를 이용한 저주파 TPI 운동에 의한 선배열 센서부 운동 모델 결과는 다음과 같다. 예인함 속도 16knot, 선배열 센서부 길이 120m, 예인함의 진폭 5m와 주기 15sec의 정현운동을 하여 선배열 센서부 예인점에 동일한 크기와 주기의 정현운동이 인가된다고 가정한다. 이 경우 무차원 주파수 $\bar{\tau} = 1$ 이므로 water-pulley 모델 적용범위에 해당한다. 선배열 센서부는 24 개 구간(segment)으로 나누었으며, 운동전달속도

$\bar{\rho} = 0.95$ 로서 길이방향 운동전달에서 약간의 감쇄가 있는 것으로 가정하였다. 이러한 조건하에서의 선배열 센서부 수평방향 변위에 대한 모델결과는 그림 2.2와 같다.

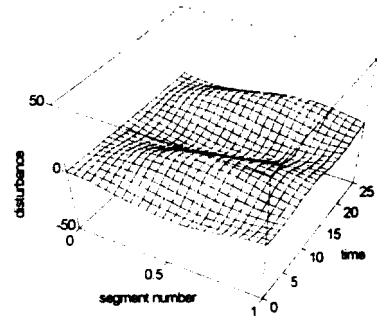


그림 2.2 선배열센서부 water-pulley 모델 결과

그림 2.2에서 x 축은 선배열 센서부의 정규화된 길이, y 축은 시간, z 축은 선배열 센서부 세그먼트의 수평방향 변위의 예인점에 대한 상대적 크기를 나타낸다.

이제 앞서 유도된 water-pulley 모델로부터 선배열 형상 추정을 위한 칼만필터 방정식을 구한다. 칼만필터 방정식을 구하기 위해 선배열 운동 모델에 대한 이산시간 상태공간 모델링을 해야 한다. 시스템 상태는 선배열 센서부를 일정 갯수의 선형화된 구간으로 나누었을 때 한 순간에서 이 구간들의 변위 혹은 기울기가 된다. 상태공간 모델링은 상태 방정식과 측정 방정식으로 이루어진다. 상태 방정식은 시스템 상태의 시간적 변화를 나타내는 것으로서 TPI 운동이 선배열 하단방향으로 전달되는 현상을 나타내고, 측정 방정식은 심도센서나 방위센서의 출력값과 시스템 상태와의 관계를 나타낸다.

선배열 수평변위 추정을 위해 방위센서 출력을 이용하여 하므로 시스템 상태는 선배열 구간의 기울기가 되어야 한다. 따라서 선배열을 공간 및 시간적으로 이산화 했을 때 상태벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$(\eta_\xi(k))_j = \left. \frac{\partial \eta(\tau, \xi)}{\partial \xi} \right|_{\xi = jh_\xi, \tau = kh_\tau}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2.9)$$

여기서 h_ξ 와 h_τ 는 각각 공간과 시간 이산화 간격이고, M 은 선배열 구간수이다. 식(2.5)의 횡단변위에 대한 water-pulley 방정식을 ξ 에 대해 미분하면 식(2.5)와 동일한 형식의 기울기에 대한 water-pulley 방정식이 되고, 미분항에 대한 오일러 근사화를 하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다

$$\eta_\xi(k+1) = F \eta_\xi(k) + u_\xi(k) + w(k)$$

$$F = (1-\rho)I + \rho L$$

$$u_\xi^T(k) = \rho[\eta_{\xi_0}(k), 0, 0, \dots, 0], \quad \rho = \bar{\rho} \frac{h_\tau}{h_\xi} \quad (2.10)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

식 (2.10)에서 F 는 상태전이 행렬, I 는 단위행렬이고, $u_c(k)$ 는 강제함수로서 초단 방위센서 출력으로 부터 구한다. $w(k)$ 는 모델오차를 나타낸다.

다음으로 측정 방정식을 구한다. j 번째 센서 출력을 $z_j(k)$ 라 하면 시스템 상태와의 관계는 다음과 같다

$$z(k) = H^T \eta_c(k) + v(k) \quad (2.11)$$

식 (2.11)에서 H 는 측정행렬 이고, $v(k)$ 는 센서오차를 나타낸다. 만약 K 개의 센서가 $p_1 h_c, p_2 h_c, \dots, p_K h_c$ 에 위치한다면 측정행렬 H 는 다음과 같다.

$$H_{mj} = \delta_{mp}, \quad m=1,2,\dots,M \quad j=1,2,\dots,K \quad (2.12)$$

이와 같은 이산시간 상태공간 모델에 대해 선형 칼만 필터 방정식을 구할 수 있다. 본 연구에서는 실시간 빙형성 출력을 얻을 수 있다는 가정하에 필터링 형태의 선형 칼만필터를 설계하였다[7][8]. 다음은 실제된 선배열 형상 추정 칼만필터의 모의시험 결과이다. 예인함 속도 4knot, 선배열 센서부 길이 155m, 예인함이 진폭 30m, 주기 160sec의 정현운동을 하여 센서부 예인점에 동일한 크기와 주기의 정현운동이 얻어진다고 가정한다. 이러한 조건에서 시간 $t=80\text{sec}$ 일때 선배열 형상 실제값과 추정결과를 그림 2.3과 같다

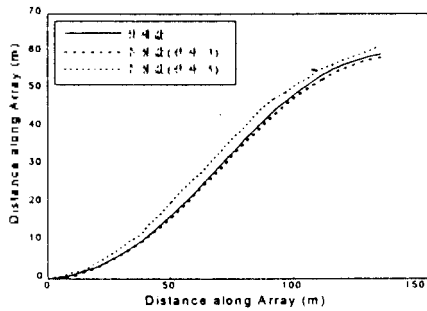


그림 2.3 선배열 형상 실제값과 추정값 비교

그림 2.3에서 실제값은 water-pulley 모델 결과 이고, 추정값은 센서오차가 평균 0°, 표준편차 3°와 5°의 정규분포를 갖는 경우에 대한 칼만필터 추정 결과 이다. 센서오차가 표준편차 3° 이내인 경우 추정결과가 우수함을 알 수 있다.

III. 선배열 변형보상 빙형성

선배열 형상 추정 결과를 이용하여 선배열 변형으로 인한 빙형성 저하를 보상할 수 있는 빙형성 알고리즘에 대해 논하고자 한다. 선배열 변형으로 인한 빙형성 저하의 주요 요인은 빙형성시 적용되는 인접 센서간의 시간 지연값과 실제 시간지연값간에 오차가 발생하기 때문이다. 그러므로 선배열 변형보상 빙형성 알고리즘은 형상 추정값으로부터 인접센서간의 실제 시간지연값을 추정하여 기존 빙형성 기법에 적용하는 것이다. 이 연구에서는 형상 추정값이 선배열 구간의 기울기이므로 기울기 정보를 이용하여 인접센서간의 시간지연값을 구하고, 빙형성에 적용하는 알고리즘을 제안하였다. 선배열 구간 기울기 값을 이용한 선배열 변형보상 빙형성 알고리즘은 다음과 같다. 인접센서간의 길이 L , 센서수 N 인 선배열이

그림 3.1 과 같이 변형되었다고 가정하자.

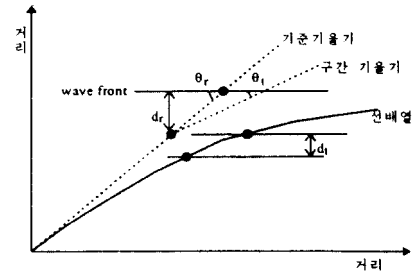


그림 3.1 기울기 정보를 이용한 시간지연 계산

편의상 기준기울기는 선배열 초단 구간 기울기 a 라고 할 때 이 기울기와 같은 가상직선을 가정한다. 가상직선상에 센서가 있다면 θ_r 의 입사각을 갖는 신호인 경우에 인접 센서간의 전달거리는 d_r 이 된다. 그러나 구간 기울기 b 인 변형된 선배열에서의 실제 전달거리는 d_l 가 된다. 여기서 전달거리와 입사각의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_r = L \sin \theta_r, \quad d_l = L \sin \theta_l \quad (3.1)$$

$$\theta_l = \theta_r - \alpha, \quad \alpha = a \tan(a) - a \tan(b)$$

이러한 관계식을 이용하여 선배열 구간 기울기 정보를 이용한 변형보상 빙형성을 할 수 있다. 변형보상 빙형성은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta(0, kT) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i r_i(kT - \tau_i) \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 r_i 은 변형된 선배열 센서에 수신된 신호이며, w_i 는 가중함수를 나타낸다. r_i 는 지향각 θ 에 대한 i 번째 센서의 실제 시간지연값 이다. 실제 시간지연값은 식 (3.1)의 관계식으로 부터 다음과 같이 구할 수 있다

$$\tau_i = \tau_{i-1} + \frac{L \sin \theta_i}{c} \quad (3.3)$$

$$\theta_i = \theta - \alpha_i, \quad \alpha_i = a \tan(a) - a \tan(b)$$

다음은 제안된 변형보상 빙형성 알고리즘에 대한 모의 시험 결과이다. 그림 2.3에 적용된 예인함 기동 조건과 선배열 길이가 동일하다고 가정했을때 water-pulley 모델 결과에 의해 $t=80\text{sec}$ 와 $t=200\text{sec}$ 일때 그림 3.2와 같은 선배열 변형이 생긴다.

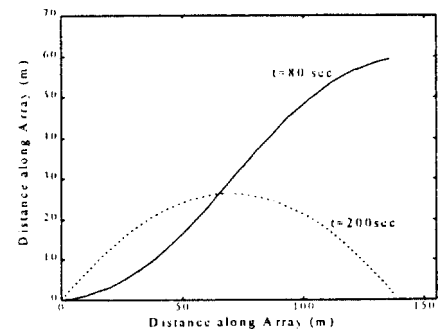


그림 3.2 예인함 기동에 따른 선배열 형상 비교

이 두가지 선배열 형상에 대해 변형보상 빔형성 알고리즘의 모의시험을 하였다. 전형적 빔형성 기법 (conventional beamforming method)은 작은 선배열 변형에 강한 특성을 갖고 있으므로 변형보상 빔형성 알고리즘을 전형적 빔형성 기법에 적용 하였으며, 보상 알고리즘에서 이용되는 기준기울기는 선배열 전구간에 대한 평균 구간 기울기로 설정하였다. 평균 구간 기울기를 기준으로 했을 때 그림 3.2의 두가지 선배열 형상 중에서 $t=80\text{sec}$ 인 경우는 비교적 변형이 작은 경우이고, $t=200\text{sec}$ 인 경우는 변형이 큰 경우에 해당한다. 빔형성에서 선배열 센서수는 32개, 빔수는 33개, Dolph-Chebyshev 가중함수를 썼으며, 샘플들은 동기적 빔형성을 위해 배열 상한 주파수의 센서수배로 하고, 형상 변형에 따른 시간지연 오차를 최소화 하기 위해 다시 16배 하였다. 각각 다른 방향에서 입사되는 3개의 신호를 고려하였고, 신호크기는 0dB, -6dB, -14dB 이다.

다음 그림 3.3은 변형이 작은 $t=80\text{sec}$ 일때 그리고 그림 3.4는 변형이 큰 $t=200\text{sec}$ 일때 선배열 변형에 대한 모의시험 결과이다. 이 결과는 모델오차와 측정센서 오차가 각각 평균 0°, 표준편차 3°의 정규분포를 갖는 경우에 대한 선배열 형상 추정 결과들을 이용하였다. 그림에서 점선은 원래의 변형이 들어왔을 때 기존의 전형적 빔형성 결과이고, 실선은 보상된 빔형성 결과이다. 그리고 * 표시는 신호 입사각을 나타내고 있다. 그림 3.3과 3.4에서 기준 기법을 썼을 때에 비해 변형보상 빔형성은 신호 입사각과 그기를 정확히 찾아낼 수 있음을 볼 수 있다.

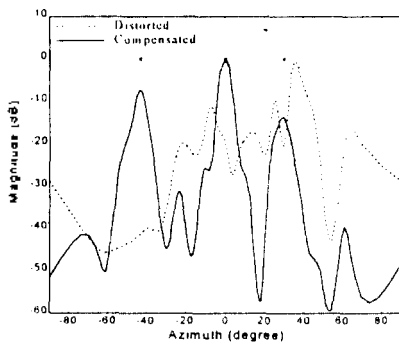


그림 3.3 변형이 작은 경우 변형보상 빔형성 결과

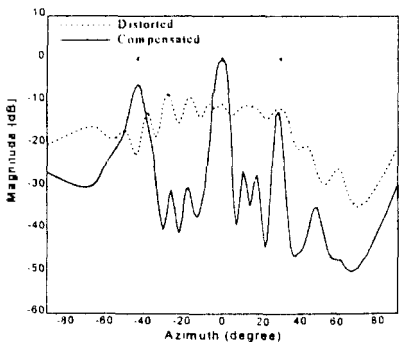


그림 3.4 변형이 큰 경우 변형보상 빔형성 결과

그림 3.4와 같이 변형이 큰 경우에는 무언위위가 다소 상승함을 볼 수 있다. 이러한 현상이 나타나는것은 선배

열 변형으로 인해 인접 센서간의 시간지연값이 비선형적이 되었지만 선형 선배열에 적용되는 가중함수를 그대로 적용했기 때문에 발생하는 문제로 생각된다. 그리고 변형보상 빔형성 알고리즘에서 구한 실제 시간지연값과 빔형성 과정에서 제공되는 시간지연값간의 오차도 한 요인으로 생각된다. 이러한 문제를 해결하여 빔성능을 보다 높이기 위해서는 빔형성 과정에서 변형 선배열에 적합한 가중함수를 적용할 수 있는 방법과 보다 정확한 시간지연값을 적용할 수 있는 방법이 보완되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 선배열 형상 추정을 통해 선배열이 예인할 기동으로 인해 변형 되더라도 빔성능을 유지할 수 있는 빔형성 기법에 관해 연구 하였다. 선배열 형상 추정을 위해 칼만필터에 의한 형상 추정 기법을 적용하였으며, 선배열 기울기 정보를 이용한 변형보상 빔형성 알고리즘을 제안하였다. 모의시험을 통해 칼만필터 형상 추정에 의한 변형보상 빔형성 알고리즘의 보상 성능이 우수함을 볼 수 있었다. 제안된 변형보상 빔형성 기법의 시간지연 보상만으로는 빔성능 유지에 제한이 있으므로 변형 선배열에 적합한 가중함수 적용 방법에 대한 추가적인 연구가 뒤따라야 할것이다. 그리고 실제 데이터에 대한 알고리즘 성능 분석이 이루어져야 할 것이다

참고문헌

- [1] J.L. Riley, D.A. Gray, and B.G. Ferguson, "Estimating the shape of a Towed Array of Hydrophones using both Acoustic and Non-acoustic Techniques," Proceedings of the NATO ASI on Acoustic Signal Processing, July 26-August 7 1992.
- [2] N.L. Owsley, "Shape Estimation for a Flexible Underwater Cable," IEEE EASCON, Nov. 16-19, Washington DC, 1981.
- [3] B.G. Ferguson, "Remedying the Effects of Array Shape Distortion on the Spatial Filtering of Acoustic Data from a Line Array of Hydrophones" IEEE J. Oceanic Eng., Vol 18, No. 4, Oct. 1993.
- [4] D.A. Gray, B.D. Anderson, and R.R. Bitmead, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-Theoretical Models," IEEE J. Oceanic Eng., Vol 18, No. 4, pp 543-556, Oct. 1993.
- [5] J.L. Riley, D.A. Gray, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters - Experimental Investigations," IEEE J. Oceanic Eng., Vol.18, No.4, pp.572-581, Oct. 1993.
- [6] R.M. Kennedy, "Crosstrack Dynamics of a Long Cable Towed in the Ocean," Oceans, PP.966-970, 1981.
- [7] M.S. Grewal and A.P. Andrews, Kalman Filtering : Theory and Practice, Prentice Hall, 1993.
- [8] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 2nd Ed., Prentice Hall, 1991.
- [9] H. Fan, X. Hu, "Tracking of Conventional Beamforming with Hydrophone Array of Varing Geometry," IEEE Aerospace and Electronic Systems, Vol 28, No.2, Apr. 1992.