공학석사 학위논문

거리독립 해양 환경에서 CTA를 이용한 이동음원의 위치추정에 관한 연구

A Study on the Moving Source Tracking Used CTA in a Range Independent Environment

지도교수 김 재 수

2000년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 공 학 과

변 양 헌

本 論文을 卞亮憲의 工學碩士 學位論文으로 認准함

주심 : 공학박사 김 재 수 (인)

위원 : 공학박사 성 우 제 (인)

위원 : 이학박사 강 효 진 (인)

2000년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 공 학 과

변 양 헌

A Study on the Moving Source Tracking Used CTA in a Range Independant Environment

by

Yang Hun Byun

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The objectives of Matched Field Processing(MFP) include source detection and localization or the estimation of parameters in the ocean waveguide. It is generalized beamforming method which uses the spatial complexities of acoustic fields in the ocean waveguide.

In this thesis, MFP for locating an acoustic point source in the ocean using vertical array is extended to moving source tracking problem. For this purpose, The simulation experiments were attended by using a shallow water environment. The replica field were calculated by KRAKEN acoustic propagation model. For simulation of moving source, the following assumptions are made. (1) Source trajectories distributed in fixed region, (2) source depth is fixed and move in straight lines, (3) source speed and source level is constant. In these assumption, moving sources are modeled as sequential point sources on rectangular grid. This study used Bartlett, MV, RMV

methods for matching processor and applied conventional tracking algorithm(CTA).

Based on simulation experiment, the CTA results show that all of matching processor accurately estimated to moving source tracking. Consequently, this thesis have showed that MFP can be applied to moving source tracking problem.

목차

그림목차

표목차

1. 서론

수중에서 발생하는 음파를 탐지하기 위해 사용하는 소나(SOund NAvigation and Ranging, SONAR)는 기술의 발달과 함께 기존의 사용목적을 넘어서 수중 환경추정, 수중 음원의 위치추정과 음원추적, 음원의 분류 및 상태추정 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 이러한 용도로 이용되는 여러 가지 방법중에서 정합장처리(Matched Field Processing, MFP)기법의 수중음향에의 적용은 수직선배열센서(vertical line array)를 사용하여 처음으로 음원의 위치 추정 실험을 한 *Hinich*(1973)에서 시작되어 *Bucker*(1976)에 이르러 현재에 이르게 되었다.[1] 정합장처리는 해양 도파관(ocean waveguide)에서 음장(acoustic field)의 공간적인 복잡성을 이용하여 거리, 수심 그리고 방위각에서 음원의 위치를 추정하거나 도파관의 매개변수(parameter) 추정을 포함하는 일반적인 빔형성(beamforming) 방법이다.

수중음향에서 정합장처리를 이용한 연구는 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 알고있는 환경의 정보를 가지고 음원의 위치추정(source localization)에 관한 연구이다. 해양에서 알려지지 않은 거리와 수심에서 음원이 방사하는 신호를 고려하면, 그 때 음원의 위치는 다음에 따라서 결정될 수 있다. 먼저 하나 이상의($N \geq 1$) 하이드로폰(hydrophone)에서 음장의 정보를 수집한다. 다음으로 알려진 입력 변수들, 즉 음속들과 관련된 전달손실모델을 선택하고, 이것을 이용하여 선정된 거리와 수심에서 음원에 대한 음장을 계산하며 측정된 음장과 계산된(modeled)/ 예측된(predict)/ 복제(replica) 음장을 효과적으로 상호상관(cross-correlate) 시키는 것으로 정합장처리를 사용한다.으로 최대상관을 보이는 추정 거리와 수심은 음원의 실제 거리와 수심을 나타낸다. 이런 과정은 Ambiguity Surface(AMS)로 표현되며 기본구성도는 그림 1.1에서 요약되어 나타냈다.

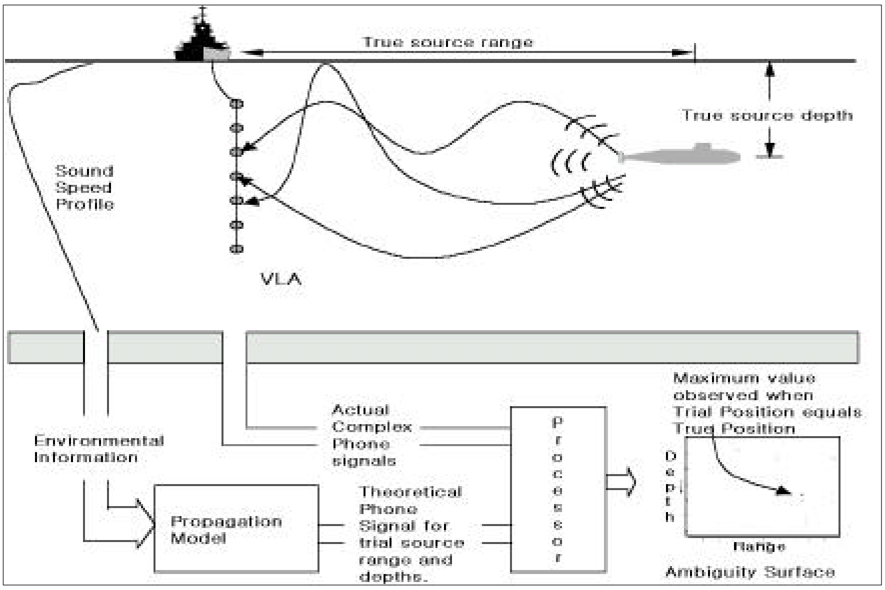


그림 1.1 정합장처리의 기본구성도

두 번째는 알고있는 음원의 위치를 통하여 해양환경의 매개변수를 추정하는 연구이다. 앞의 과정과는 반대로 여기에서는 음원의 위치를 이미 알고 있고 환경에 대한 모든 정보는 일부만 알려져 있다. 그 때, 추정된 환경 매개변수 값들에 대한 음원 위치 부근에서 예측된 음장을 계산한다. 따라서 정확한 환경 매개변수들에 대하여 알려진 음원 거리와 수심에서 결과로 최대 상관을 갖는다.

본 논문에서는 두 가지 중에서 환경을 알고 있을 경우의 음원의 위치 추정에 목적을 두고 다음과 같이 6개의 장으로 구성하였다. 1장에서는 논문의 전반적인 내용과 연구방법에 대하여 설명하였고, 2장에서는 음장모델링에 사용된 기본이론과 전달손실모델의 해석기법에 따른 특징, 그리고 본 연구에 사용된 KRAKEN 전달손실모델에 관하여 기술하였다[2,3]. 3장에서는 정합장처리기법에 관한 전반적인 개념과 연구동향, 그리고 오정합(mismatch)에 대하여 고찰하고[1,4]-[16], 4장에서는 이동음원(moving source)의 매개변수와 음원의 이동에 따른 음장에 대하여

알아보았다[6,17,18]. 그리고 5장에서는 이동음원의 추적에 관한 내용으로 이를 위하여 수치실험을 실시하여 수중내의 음원이 움직임을 갖는 경우, 추적성능을 평가하였다[9,10,12][19]- [22]. 결론적으로 6장에서는 본 논문에 대한 요약과 결과에 대하여 논하고, 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

1.1 연구의 목적 및 필요성

수동 소나에서 관심의 대상인 음원들은 고정되어 있는 것이 아니라 계속적으로 이동한다. 그러나 이전에는 복제음장과 많은 계산량으로 인하여 이러한 이동하는 음원을 추적한다는 것은 힘들었지만 현재는 컴퓨터의 발달로 인하여 계산시간이 현저히 줄어들어서 이동음원의 추적이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 일반적으로 고정음원(stationary source)의 위치추정에 뛰어난 성능을 갖는 정합장처리를 거리독립 천해 해양 환경의 이동하는 음원(이하 이동음원)에 적용하여 음원추적의 효용성을 평가하고자 하였다.

음원의 위치추정과 이동음원 추적에 있어서 실험과 이론적인 연구는 상호보완적인 관계를 갖게 된다. 일반적으로 음원의 위치추정에 관한 연구와 이론연구는 두 분야로 나누어진다. 즉, 모의 실험을 통한 연구와 실제 해양환경실험을 통한 연구인데 이러한 분야들은 이론적인 연구와 병행하여 이루어진다.

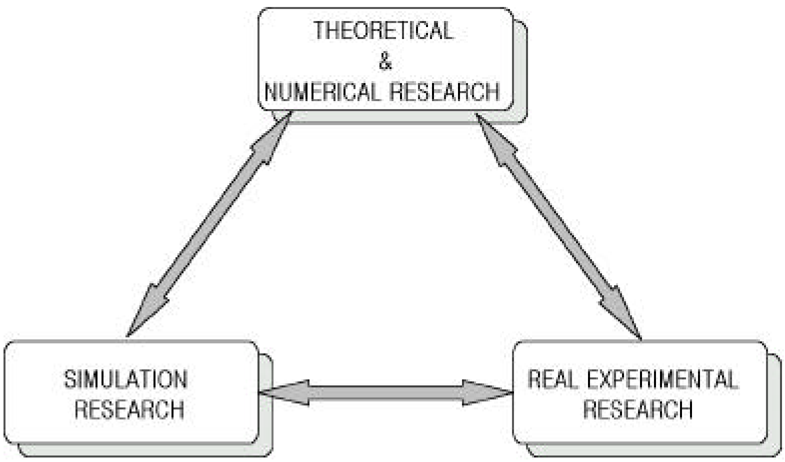


그림 1.2 이론연구와 실험의 관계

이러한 이론연구와 실험을 통하여 위치추정 및 음원추적에 사용된 프로세서의 성능을 분석하고 평가할 수 있으며, 결과적으로 최적 프로세서 및 성능증대를 위한 알고리즘 개발을 가능하게 한다.

정합장처리를 이용한 고정음원 위치추정에서는 환경에 대한 정확한 정보가 요구되며, 이런 정보를 가지고 전달손실모델을 이용하여 음원이 존재하는 환경의 복제음장을 정확히 계산한다. 만일 잘못된 환경정보를 가지고 복제음장을 계산하면 결과적으로 실제음원이 존재하는 위치와 다른 위치를 추정하는 오정합(mismatch)이 발생한다. 이러한 정보를 가지고 수치실험을 통하여 음원추적을 수행, 프로세서별 성능 비교와 방법론의 타당성을 검증하였다.

1.2 연구방법

이동음원 추적에 관한 연구내용은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 환경에 대한 정보의 획득이다. 음원이 존재하는 환경의 음속, 수심, 매질에 관련된 밀도, 감쇠계수 등의 매개변수들의 정확한 값을 측정하는 것이고, 두 번째는 측정된 매개변수들 전달손실모델에 입력하여 복제음장을 계산하고, 세 번째는 정합장처리기법을 이용하여 복제음장과 측정된 또는 시뮬레이션된 신호를 매칭(matching)하여 음원위치를 추정하며, 네 번째는 매칭결과를 추적알고리즘에 적용하는 것이다. 이런 일련의 연구내용에 입각하여 수치실험을 수행하였다.

2. 음장모델링

정합장처리 기법을 이용한 음원탐지와 위치추정에 있어서 환경에 대한 정확한 음장의 계산이 요구된다. 본 장에서는 음장모델링에 이용되는 배경이론 및 전달손실모델에 관하여 알아보고자 한다.

2.1 기본이론

해양에서 적용되는 이론은 운동방정식, 연속방정식 및 상태방정식에 의해 유도되는 선형파동방정식(linear wave equation)이다. 파동방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \tag{2.1}$$

여기서 ∇^2은 Laplacian operator, Φ는 potential 함수, c는 음속(sound velocity), t는 시간이다. 이 식에 대한 조화해는 다음과 같이 가정한다.

$$\Phi = \phi e^{-i\omega t} \tag{2.2}$$

여기서 ϕ는 시간 독립인 potential 함수, ω는 음원의 주파수($2\pi f$)이다. 따라서 식(2.2)를 식(2.1)에 대입하여 정리하면

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \tag{2.3}$$

여기서 k는 파수(wave number)이다.[2]

식(2.3)을 원통좌표계로 변환하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(z)\phi = 0 \qquad (2.4)$$

식(2.4)는 Helmholtz(elliptic reduced) 파동방정식이라고 부른다. 이 방정식은 편미분 방정식으로 간단한 경우에만 해석적인 방법에 의해 풀이가 가능하며 실제 적용시에는 수치적인 방법에 의해 접근해야 한다. 그러나 식(2.1)을 직접 푸는 경우 매우 많은 계산이 필요하기 때문에 대부분의 수치적 기법은 2차원 문제로 가정하여 계산한다.

수중에서 음파의 전달현상을 다루는데 있어서 일반적으로 사용되는 좌표계는 원통좌표계이다. 그림 2.1은 원통형좌표계를 직각좌표계와 비교하여 정의한 것이다. 여기에서 r은 거리, z는 수심 그리고 θ는 방위각을 나타낸다.

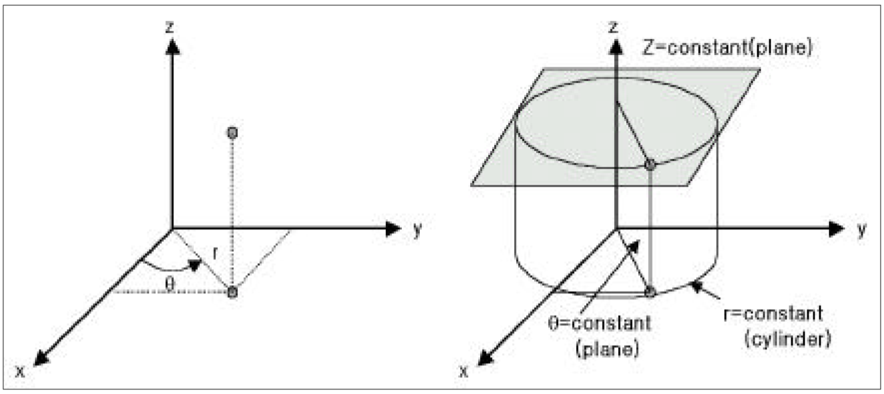


그림 2.1 원통좌표계의 정의

2.2 수치해석 기법

수중음향에서 매질과 경계들은 시·공간적으로 다양하게 변화한다. 음의 전파는 음압 불안정 또는 해양을 따라 이동하는 음장에 의하여 나타나고, 이것은 음속이 광학에서 굴절의 지수와 같은 역할을 할 때 파동방정식(시간종속) 또는 Helmholtz 방정식(시간독립) 만족한다. 음속은 매일 그리고 계절적 변화에 의해 작용을 받고, 온도, 압력, 온도가 증가함에 따른 염분의 함수로써 변화하고 압력이 증가함에 의해 음속이 빨라진다. 더하여 수심, 거리, 수평각, 그리고 시간의 함수로써 변화한다. 음파 전달의 보다 복잡함은 음원의 주파수에서 감쇠, 해저로의 전달 그리고 해저에서의 반사, 표면과 해저면의 분산 등 많은 환경의 효과에 따른다.

해양환경에서 파동방정식을 수치적으로 풀기 위한 기법은 여러 가지가 있으며 각각의 기법들은 기하학적인 가정, 이론적인 배경 및 해법, 그 적용범위가 다르다. 적용범위를 정확히 구분하는 것은 다소 어렵지만 대표적으로는 다섯 가지가 있다. 이는 각각 사용된 이론에 따라 음선이론(Ray theory)과 파동이론(Wave theory)으로 나눌 수 있으며 해양환경에 따라 거리독립(Range independent, RI) 및 거리종속(Range dependent, RD)이론으로 나눌 수 있다. 파동 방정식에서 유도된 Helmholtz 방정식에 대한 수치적 방법으로는 음선이론(Ray theory), 정상모드(Normal mode), 다중경로확장(Multipath expansion), 파수적분법(Wavenumber integration), 포물선 방정식(Parabolic equation)이 있다.

음선이론은 음파전달 메카니즘을 시각적으로 쉽게 이해할 수 있고 경계조건을 적용하기 쉬우며 고주파영역에서 계산 결과를 빠르게 구할 수 있는 반면 음파의 산란이나 회절문제를 다루기 어려워 저주파수에서 사용은 제한되고 있다.

정상모드법은 형태상으로 완전한 해를 구할 수 있으며 모든 음속구조상에서 계산이 가능함으로서 어떤 형태의 음원도 사용이 가능한 반면

수학적인 해가 어렵고 실제적인 경계조건을 다루기 위해서 모델링이 필요하며 고주파수 대역의 계산에 많은 시간이 요구된다는 제한점을 가지고 있다.

다중경로확장법은 고주파 음원, 심해역에서 계산시 모드수를 제한함으로써 정상모드법에 비해 빠르고 계산이 정확하며, 수렴구역이나 해저면 반사에 대한 모드를 분리하는 것이 가능한 장점이 있다. 그러나 인위적인 모드제한으로 도파관에서의 누출을 다룰 수 없으며 해저면 이하층에서의 음파전달이 존재하는 경우 정확하지 않다는 단점도 있다.

파수적분법은 음원에서 근접한 지역까지 포함하여 완전 해를 구할 수 있으며 경계면과의 상호작용이 많은 환경에서 정확한 계산이 가능하여 다른 모델의 검증용으로 사용된다. 그러나 거리 독립 환경에서만 적용 가능하다는 단점을 갖는데 최근에는 두가지 이상의 수치모델을 혼합하는 hybrid 개념을 도입하여 거리종속 환경에 적용 가능한 모델도 개발되었다.

포물선방정식법은 복잡한 해양환경에 대해 수치적 적용이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 고주파수 영역에서 많은 계산시간과 근거리에서 near field의 부정확성, 그리고 위상오차(phase error)의 누적, 강한 거리종속문제 적용이 어려운 한계를 갖는다.[2]

이상과 같이 각각의 음장모델링 방법은 사용하고자 하는 주파수와 환경에 따라 장단점이 비교적 명확히 구분된다. 표 2.1은 이를 간략히 비교한 결과이다.

수치해석 기법	장 점	단 점
음선이론 (Ray theory)	· 음파전달 메카니즘의 시각적인 이해가 용이 · 경계조건을 적용하기 용이 · 고주파영역에서 빠른 계산 수행	· 음파의 산란이나 회절 문제를 다루기 곤란
정상모드 (Normal mode)	· 형태상으로 완전한 해를 계산 가능 · 모든 음속구조상에서 계산 가능 · 어떤 형태의 음원 적용 가능	· 수학적인 해의 이해가 곤란 · 실제적인 경계조건을 다루기 위해서 모델링이 필요 · 고주파영역의 계산에 많은 시간 요구
다중경로확장 (Multipath expansion)	· 고주파영역, 심해역에서 정상모드법에 비해 계산이 빠르고 정확 · 수렴구역이나 해저면 반사에 대한 모드를 분리 가능	· 인위적인 모드제한으로 도파관에서의 누출 취급 불가 · 해저면 이하층에서의 음파전달이 존재하는 경우 계산의 부정확성
파수적분법 (Wavenumber Integration)	· 음원에서 근접한 지역까지 완전 해를 계산 · 경계면과의 상호작용이 많은 환경에서 정확한 계산이 가능, 타 모델의 검증용으로 사용	· 거리독립 환경에서만 적용 가능 · 최근 두가지 이상의 수치 모델을 혼합하는 hybrid 개념을 도입, 거리 종속 환경에 적용 가능.
포물선 방정식 (Parabolic Equation)	· 복잡한 해양환경에 대해 수치적 적용이 용이	· 고주파수 영역에서 많은 계산 시간을 가짐 · 근거리에 near field의 부정확성 · 위상오차의 누적 · 강한 거리종속문제에 대한 적용 곤란

표 2.1 전달손실모델의 특성

2.3 KRAKEN 전달손실모델

2.3.1 발전배경

수중음파전달모델은 컴퓨터의 발달과 더불어 거리독립 문제뿐 아니라 거리종속 문제에 있어서도 급속도로 발달하였으며, 특히 새로운 해석기법이 도입되고 여러 효율적인 해석기법들을 혼용하여 그 발달 속도를 가속화시키고 있다. 거리독립 문제에 대해서는 대부분의 모델들이 그 결과가 잘 일치하고 있지만 거리종속 문제에 대해서는 이론적인 접근방식에 따라 그 결과가 다소 다르게 나타난다.

정상모드 모델들은 1970년대 후반에 해양에서의 수중음파 전달 현상을 예측하는데 광범위하게 이용되었던 모델이다. 그러나 모델들마다 문제점들을 포함할 수밖에 없었는데 그 이유는 몇몇 수중음속분포에 대한 수치적 불안정성 문제, 해양 내에서의 전체 모드들의 계산 문제 등이었다. 이러한 요구조건을 해결하기 위해서 거리 의존문제를 포함하는 연성 정상모드 모델(coupled normal mode model)이 개발되었다.

2.3.2 수치모델

앞에서 기술된 식(2.1)의 파동방정식에 대해 변수분리법을 사용하여 분리상수를 k^2이라고 놓으면 다음과 같은 모드 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho(z)\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{\rho(z)}\frac{dZ(z)}{dz}\right)+\left(\frac{\omega^2}{c^2(z)}-k^2\right)Z(z)=0$$

$$Z(0)=0 \tag{2.5}$$

$$\frac{dZ}{dz}(D)=0$$

위의 모드 방정식은 고전적인 Sturm-Liouville 고유치 문제이다. 이 문제의 특성을 간략히 요약하면 다음과 같다. 이 모드 방정식은 무한대의 해의 갯수를 갖고 있고 그 모드들은 모드의 형태함수인 $Z_m(z)$과 수평 방향 전달에 대한 파수인 k_m으로 특정 지워지게 된다. 이 때 함수 $Z_m(z)$는 고유함수이며 파수 k_m 또는 k_m^2는 고유치이다. 또한 모든 모드들은 직교하는 특징을 갖는다. 이제 압력을 다음과 같이 놓는다.

$$p(r,z)=\sum_{m=1}^{\infty}R_m(r)Z_m(z) \tag{2.6}$$

위의 식을 Helmholtz 방정식에 대입하고 계산의 편의를 위해 모드의 단위화 과정의 식을 적용하면 아래와 같은 식이 유도된다.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial R_l(r)}{\partial r}\right)+k_l^2R_l(r)=\frac{-\delta(r)Z_l(z_s)}{2\pi r\rho(z_s)} \tag{2.7}$$

위의 식은 해가 다음과 같은 Hankel 함수로 주어지는 방정식이다.

$$R_l(r)=\frac{i}{4\rho(z_s)}Z_l(z_s)H_o^{(1,2)}(k,r) \tag{2.8}$$

여기에 방사조건(radiation condition)을 적용하여 음압을 구한 후, Hankel 함수에 점근근사법을 이용하면,

$$p(r,z) \simeq \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{k_m}} \tag{2.9}$$

일반적으로 복잡한 음압 계산 결과에 나타내기보다는 전달손실을 나타내므로 전달손실의 정의에 따라 다음과 같은 식을 이용한다.

$$TL(r,z) \simeq -20 \log \left| \frac{i}{\rho(z_s)} \frac{\sqrt{2\pi}}{r} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{k_m}} \right| \tag{2.10}$$

정상모드 모델은 전통적으로 거리 독립문제에 있어서 매우 정확한 해를 제공해 준다. 그러나 거리 종속 문제를 다룰 수 없는 것이 큰 단점이었다. 1980년대 초에 이러한 단점을 극복하기 위해 거리 종속 모델로의 확장이 이루어 졌는데 이것이 바로 연성 정상모드 모델이다. 이 모델은 거리 종속 문제를 여러 개의 거리 독립 문제로 나누어 각각의 문제에 대한 정상모드를 계산하여 그로부터 얻은 모드들을 연성시켜 최종으로 거리종속 해를 구한다. 연성 정상모드 모델은 전진파와 후방산란파를 모두 구할 수 있는 양방향 연성 정상모드 모델과 전진파만 구할 수 있는 한 방향 연성 정상모드 모델이 있다. 양방향 연성 정상모드 모델은 매우 정확한데 비해 계산시간이 너무 많이 소요되어 다른 모델의 정확도를 알아보는 척도로만 쓰이고 실제에 있어서는 한 방향 연성 정상모드 모델을 사용한다. 이는 한 방향 연성 정상모드 모델이 후방 산란파를 무시하고 거리 방향으로 전진하면서 계산을 수행하기 때문에 양방향 연성 정상모드 모델에 비해 계산 시간면에서 크게 유리하기 때문이다.[3]

3. 정합장처리

음원의 위치추정 알고리즘의 핵심은 정합장처리이다. 본 장에서는 정합장처리에 대한 전반적인 내용과 정합장처리 알고리즘, 그리고 오정합에 관하여 알아보고자 한다.

3.1 연구동향

정합장처리에 관한 연구는 기존의 협대역에서 시작하여 근래에는 광대역, 이동음원으로 점차 옮겨가는 추세이다. 주요 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

Hinich(1973년)는 수직선배열센서를 가지고 처음으로 음원의 위치추정 실험을 하고, 모드 진폭계수와 음원 수심에 대한 Cramer-Rao 경계와 Maximum likelihood equation을 유도하였다[1].

Bucker(1976년)는 현재 사용되는 정합장처리를 최초로 공식화하고, 선형프로세서의 민감성을 감소시킨 2차의 검출기(detector)를 공식화하였다. 또 실제의 환경모델을 사용하여 AMS의 개념을 설명하고, 역추정에서 허용되는 음장의 다양하고 복잡한 변수들의 영향을 보이고 음원의 위치를 추정하였다. 여기에서의 검출요소는 Conventional 정합장처리에서의 필수적 요소가 되었다[1].

Klemn(1981년)은 Approximate Orthogonal Projection에서 적응 처리기법(adaptive processing)의 형태를 처음으로 정합장처리를 도입하였으나 낮은 신호대 잡음비에서 복잡한 부엽(sidelobe) 문제에 직면하였다[4].

Heitmeyer 와 *Moseley* 그리고 *Fizell*(1983년)은 Conventional 정합

장처리를 이용하여 몇 가지의 시뮬레이션을 소개하였다. 어레이에서 협대역 신호에 대한 데이터 벡터사이의 상호상관(cross correlation)의 제곱된 크기를 가지고 snapshot을 시뮬레이션하였고, Pekeris 도파관에 대한 표준화된 Green's 함수의 변형, 또는 복제음장 벡터를 가지고 음원 위치의 함수에 따라 AMS를 도식화하였다[4].

Burov(1984년)등은 다른 가정에 의존하는 공분산(covariance)에 있는 잡음(noise)에서 불규칙신호의 탐지 문제에서 *Mal'tsev*에 의해 표현된 정상모드 공식에서 최소자승법(LMS)을 적응프로세서로 사용하여 공간상의 평형을 공식화하였다. 이것은 정합장처리 알고리듬에서 유도되어지고, 신호의 공분산행렬은 하나의 계수(rank)를 가짐을 보였다[4].

*Fizell*와 *Wales*(1985년)는 실험에서 획득한 실제 데이터를 이용하여 처음으로 정합장처리를 증명하였다. 사용된 데이터는 1982년 FRAM Ⅳ 극지얼음층에서 매달려진 수직선배열센서에서 녹음된 47Hz 저주파수 데이터이고, Capon's Minimum Variance와 Distortionless Filter (MVDF) 알고리즘을 도입하였다. *Tappert*(1985년)는 거리종속 환경에 대해 인식하고, Conventional 프로세서에 대한 Green's 함수 계산에 포물선방정식을 사용하였고, AMS 계산에서 후방산란의 개념을 도입하였다. *Shang*(1985년)은 수심 추정에 대하여 고유함수(eigen-function)의 이동(shifting)하는 특성과 수직 어레이를 이용하는 것을 제안하였다. 이것은 모드법에 기초를 둔 정합장처리 알고리즘에서 응용에 이점을 가짐을 보였고, 1986년에는 거리 추정에 대하여 modal 간섭경향에 이용되는 phase unwrapping 알고리즘을 제안했다[4].

Kravstov(1988년)등은 도파관에서 음선들(Rays)과 모드들(Modes)을 계산하는 수직선배열센서의 처리 문제를 공식화하였다[4].

Borodin(1992년)은 역추정 문제에서 공식화된 음원의 위치추정에 대하여 연구하였다[4]. 또한 Westwood(1992년)는 주파수영역에서의 광대역 정합장처리기법을 개발하였고[5], Zala(1992년)등은 이동하는 음원에 대해 푸리에 변환된 선배열센서 데이터를 사용하여 표준 정합장처리 기법을 제안하였다[6].

Lim(1994년)등은 일정한 속도를 갖는 음원의 추적에 관하여 연구하였다. *Michalopoulou*(1996년,1998년)는 광대역 신호에서 연속된 음원의 스펙트럼 대신에 Multi-tone 개념을 적용한 정합장처리를 제안하였고, 수신기와 주파수를 연계한 Coherent 방법을 제안하였다[7].

Krolik(1997년)은 광대역 불규칙 음원에 대하여 MV-EPC 프로세서를 적용하였고[8], *Tantum*(1998년)은 이동음원의 추적 알고리즘으로 OUFTA를 제안하였다[9].

3.2 정합장처리 알고리즘

3.2.1 협대역 정합장처리

정합장처리에 사용되는 프로세서는 크게 선형과 비선형으로 구분되며, 비선형 프로세서로는 MV 프로세서와 Optimum Uncertain Field 프로세서 등이 있다. 이러한 비선형 프로세서들은 선형프로세서의 단점을 보완한 것이다.

1. 선형프로세서

정합장처리에서 가장 널리 일반적으로 사용되는 프로세서이다. 다른 말로 Bartlett 그리고 Conventional 프로세서라고도 한다. 선형 프로세서는 선배열센서에서 측정된 데이터와 전달손실에서 계산된 데이터를 직접적으로 상관하는 것으로 환경요인의 오정합에 대하여 가장 견고한 특성을 갖는 프로세서이다. 그러나 상대적으로 부엽이 커서 낮은 신호대 잡음비를 갖는 경우 위치추정이 곤란한 단점도 갖는다.

n 번째 선배열센서에서 측정된 데이터를 x_n 이라고 하면, x_n 은 다음의 식으로 표현된다.

$$\mathbf{x}_n = a_n \, \boldsymbol{U}\mathbf{s}(r_s, z_s) + \eta_n \tag{3.1}$$

여기에서 a_n 은 음원의 진폭, $\boldsymbol{U}$ 는 행렬, $\mathbf{s}(r_s, z_s)$ 는 모드의 진폭벡터, 그리고 η_n 은 배경소음을 나타낸다. 이 식을 가지고 표준화된 선형프로세서의 출력 즉, AMS는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{Bart}(r, z) = \frac{\mathbf{d}(r, z)^{+} \ \mathbf{R}_x \ \mathbf{d}(r, z)}{\mathbf{d}(r, z)^{+} \ \mathbf{d}(r, z)} \tag{3.2}$$

여기에서 $\mathbf{d}(r, z) = \mathbf{U}s(r, z)$는 전달손실에서 계산된 복제음장 벡터이고, +는 공액전치(hermitian)이다. $\mathbf{R}_x = E\{ \mathbf{x}_n \ \mathbf{x}_n^{+} \}$은 단일 주파수에 의해 선배열센서에서 수신된 복소 데이터 벡터로 구성된 상호 스펙트럼 밀도 행렬(cross spectrum density matrix, CSDM)이다. 이것은 배열에 간섭 작용하는 위상변화를 최소화하고, 수신된 데이터의 평균화를 통해 예상되는 분산을 감소시키며, 상관도가 약한 소음의 감소에 의해 상대적으로 신호가 존재하는 부분을 효과적으로 증가시킨다.

2. 비선형프로세서

선형 프로세서가 가지는 단점의 향상을 목적으로 제안된 것으로 대표적인 것으로 MV, RMV, MV-NLC(MCM), OUFP 프로세서 등이 있다.

(1) MV 프로세서

정합장처리 알고리즘에서 선형 프로세서와 함께 가장 널리 이용되며 부엽 성분을 제한하는 특성을 갖는 프로세서이다. 1969년 *Capon*에 의해 제안된 것으로서 Capon 프로세서라고도 한다. 이 프로세서는 필터에 의해 왜곡이 되지 않는 신호로 출력단의 소음 출력을 최소화 한다. 정의된 순수 신호와 신호와 소음이 포함된 음의 공분산을 알고 있는 것으로 가정하여 전체 음장에서 프로세서의 응답의 분산(σ^2)을 최소화하는 가중치 $\{ \mathbf{w}_n \}$를 계산하여 신호에서의 응답을 보강한 것이다. 단일 억제 MV 프로세서의 가중치는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{w}(r, z) = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \ \mathbf{d}(r, z)}{\left[\mathbf{d}(r, z)^{+} \ \mathbf{R}_x^{-1} \ \mathbf{d}(r, z) \right]} \tag{3.3}$$

가중치를 선형 프로세서 출력에 적용하여 평균 소음 '0'에서 최소화되는 분산의 표준화된 MV 프로세서 AMS는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{MV}(r, z) = \frac{\boldsymbol{d}(r, z)^{+} \boldsymbol{d}(r, z)}{\boldsymbol{d}(r, z)^{+} \boldsymbol{R}_x^{-1} \boldsymbol{d}(r, z)} \tag{3.4}$$

이 프로세서를 적용한 정합장처리 출력은 공간상으로 잡음과 상관되지 않아서 음원의 위치에서 최고의 상관을 갖게 되는데 선형 프로세서와 비교해 높은 해상도를 갖는다. 그러나 오정합이 존재하거나 복제음장의 값에 오차가 존재할 경우에는 성능이 급격히 저하됨으로 환경 매개변수에 대한 정확하고 상세한 지식의 요구와 함께 전달손실모델의 높은 정확도가 필요하다.

MV 프로세서와 같이 상호 스펙트럼 행렬의 역변환을 사용하는 프로세서들의 경우, 실제에서는 행렬의 안전성을 높이기 위하여 상호 스펙트럼의 행렬에 일정한 값을 더하여 안정화 시키는 방법을 사용한다. 즉.

$$\boldsymbol{R}_I = \boldsymbol{R} + \varepsilon \boldsymbol{I} \tag{3.5}$$

이며, 여기에서 $\boldsymbol{I}$는 단위행렬이고, ε은 대각성분의 첨가 요소이다.

(2) RMV 프로세서

MV 프로세서 단점을 보완하기 위하여 고안된 RMV 프로세서는 의미 없는 신호가 존재하는 곳과 같은 낮은 차원의 부분공간에서 방사하는 어레이 출력벡터들에 의한 환경적인 오정합에 대한 견고함 향상을 목적으로 접근되어졌다. 예측된 데이터 처리과정에서 결과로 발생하는 추정은 작은 소음 또는 신호를 가진 방향에 의존하는 $\boldsymbol{R}_x$의 작은 고

유값의 요동에 대하여 민감하지 않다는 것이 확실하다. U의 Column 공간에 존재하는 데이터의 예측은 $\boldsymbol{y}_n = \boldsymbol{M}^+ \boldsymbol{x}_n$을 취함으로써 이룰 수 있다. 적응 자유도(Adaptive degree of freedom) 프로세서에서 감쇠는 신호 파면에서 작은 요동에 대하여 견고함을 RMV 프로세서에 제공한다. 정상모드법 전파모델은 자연적으로 U의 에 의해 정의된 감쇠된 차원 부분공간을 제안하고, 결론적으로 RMV 프로세서의 AMS는 백색 소음(White noise)에 의해 표준화되어지고 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{RMV}(r, z) = \frac{\boldsymbol{d}(r, z)^+ \boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^+ \boldsymbol{d}(r, z)}{\boldsymbol{d}(r, z)^+ \boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{M}^+ \boldsymbol{R}_x \boldsymbol{M}\right)^{-1} \boldsymbol{M}^+ \boldsymbol{d}(r, z)} \quad (3.6)$$

여기에서 직교 행렬 $\boldsymbol{M}$의 column은 $\boldsymbol{U}$의 column 공간에서 결정. 감쇠된 프로세서의 자유도는 파면 요동에 대한 견고함을 제공하고, 환경적인 오정합에서 ambiguity에 대하여 억제하는 특성을 가진다.

(3) MV-NLC 프로세서

환경이 완벽하게 정합되었을때, 선형 프로세서의 주엽을 다중 Neighborhood location constraints로 사용하여 위치추정에 이용하는 방법이다. 다른 말로는 MCM 이라고도 한다. 이 프로세서는 선형 프로세서가 갖는 견고함과 MV 프로세서가 갖는 부엽을 제한하는 특성을 모두 만족하고자 한 것으로 MV 프로세서와 비교하면 constraint 조건을 제외하고는 유사하다고 할 수 있다.

감소된 MV-NLC constraints는 $\boldsymbol{D}^+ \boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}$로 표현할 수 있고, Neighborhood location constraint matrix $\boldsymbol{D}$는 다음과 같이 주어진다.

$$\boldsymbol{D} = [\ \boldsymbol{d}(r, z),\ \boldsymbol{d}(r + \Delta r/2, z), \cdots \boldsymbol{d}(r + \Delta r/2, z + \Delta z/2)] \quad (3.7)$$

여기에서 Δr과 Δz 는 거리와 수심에서의 선형 프로세서 주엽의 빔폭

이다. 요구되는 응답 벡터는 선형 프로세서의 복소 응답, 즉 $\boldsymbol{f} = \boldsymbol{D}^{+} \boldsymbol{d}(r, z)$에 따른다. 공간상으로 상관되지 않는 소음에 따르는 프로세서의 응답에 의해 다시 표준화하면, MV-NLC에 대한 AMS의 결과는 다음과 같다.

$$Z_{NLC}(r, z) = \frac{\boldsymbol{f}^{+} (\boldsymbol{D}^{+} \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{D})^{-1} \boldsymbol{f}}{\boldsymbol{f}^{+} (\boldsymbol{D}^{+} \boldsymbol{D})^{-1} \boldsymbol{f}} \tag{3.8}$$

이런 접근법의 유효성은 가정된 음원 위치에서 변화하는 환경에서 혼동의 유사성에 따른다. 예를 들어 δ에 대하여 만일 $\Delta k_n \cong \delta \cdot k_n$에서 n에 지배되지 않을 때 효과는 $r(1-\delta)$에 의해 변화된 음원의 위치가 이동되는 것과 같다. 비록 등속 도파관(isovelocity waveguide)에서 종종 이런 오정합의 결과로 수심 오차를 가지나, 환경적인 오정합의 다른 종류는 나타나지 않는다.

(4) Optimum Uncertain Field 프로세서

정합장 음원 위치추정은 복제음장의 계산과 실제 음원 매개변수들, 그리고 관측지점에 존재하는 가정된 음원 매개변수들과 전달환경에서 종종 오정합에 대하여 매우 민감하다. *Richardson*과 *Nolte*[11]에 의하여 개발된 Optimum Uncertain Field 프로세서(OUFP)는 매개변수추정과 음원 위치추정을 통합하고, 음파 전달환경과 음원 매개변수들에서 부정확성에 대하여 견고한 정합장처리 방법을 제공한다. 어레이와 음원 위치는 물론 음파 전달 매개변수들에 대하여 사전 확률 밀도함수(a priori probability density function)를 사용하여 OUFP는 수신된 신호 r이 주어진 경우 음원 위치 S의 사후 확률 밀도함수(a posteriori probability density function) $p_{S|r}(S|r)$을 계산한다. OUFP는 특정 음파 전달 환경을 가정하지 않으므로 환경적인 변화에 대하여 견고하다. 반면에 가능한 전달 환경의 거리를 가정하고, 그 때 사후 확률 밀도함

수 계산에 서 환경적인 불확실성을 적분한다.

$$p_{S|r}(S|r) = \frac{\int_{\Psi} p_{r|S,\Psi}(r|S,\Psi)p_{S|\Psi}(S|\Psi)p_{\Psi}(\Psi)\,d\Psi}{p_r(r)} \quad (3.9)$$

여기에서 Ψ는 음향 환경, 음속분포, 그리고 경계조건 등으로 표현되는 환경적인 변화를 포함하는 벡터이다.

OUFP는 해양이 정의된 계산에 대한 복제음장을 허용하는 선형 시스템에 따라 구성된다고 가정하고, 신호는 알려진 주파수 f[Hz], $s(t) = \mathrm{Re}\{A\sqrt{2}e^{i2\pi ft}\}$을 갖는 협대역 사인곡선(sinusoid) 음원에 의하여 만들어진다고 가정한다. 신호는 수신단은 선배열센서에서 관측되고, 불확실한 복소 진폭을 갖는 음원 신호에 소음이 더해져서 구성된다.

$$r(t) = A s(\hat{S}, \hat{\Psi}, t) + n(t) \quad (3.10)$$

여기에서 $\hat{S}$는 실제 음원의 위치이고, $\hat{\Psi}$는 실제 환경이다. 수신된 신호의 주파수변환은 다음의 식으로 표현된다.

$$P(r) = A H(\hat{S}. \hat{\Psi}) + N \quad (3.11)$$

$H(\hat{S}. \hat{\Psi})$는 해양 $\hat{\Psi}$의 위치 $\hat{S}$에 위치된 협대역 음원에 대한 음향 전달함수, 또는 복제음장 이다. $P(r)$의 구성요소들은 하이드로폰 z, $r_z[l]$에서 수신된 이산된 시간영역 신호로부터 다음 식에 의하여 계산되어 진다.

$$P_z = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} r_z[l]\,e^{-i2\pi fTl} \quad (3.12)$$

여기에서 L은 시간에서 snapshot의 갯수이고, T는 샘플링 주기이다. 관측 $P(r)$은 알려진 공간상의 공분산행렬 Q를 갖는 영 평균 Gaussian 소음 N을 포함하는 것으로 가정된다. 이 과정에서 소음은 균일한 것, 결론적으로 $\mathbf{Q} = \sigma_N^2 \mathbf{I}$으로 가정한다. 가정한 협대역 음원의 불확실한 진폭 A는 분산 σ^2, 조건적 확률 밀도 $p_{S|r}(S|r)$, 또는 AMS를 갖는 영-평균 복소 Gaussian 불규칙 함수이고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_{S|r}(S|r) = C(r)\,p_S(S)\int_{\Psi}\frac{1}{E(S,\Psi)+1} \times \exp\left(\frac{\frac{1}{2}|R1(r,S,\Psi)|^2}{E(S,\Psi)+1}\right) \times p_{\Psi|S}(\Psi|S)\,d\Psi\,, \tag{3.13}$$

S는 거리와 수심의 불확신한 음원 위치 매개변수들을 포함하고, $C(r)$은 표준화 계수이다. 음원의 사전지식 $p_S(S)$는 음원 위치의 모든 가능성에 대하여 일정한 것으로 가정한다. E와 R은 다음 식에 의하여 정의된다.

$$\begin{aligned} E(S,\Psi) &= \sigma_A^2 H^+(S,\Psi)Q^{-1}H(S,\Psi) \\ &= \frac{\sigma_A^2}{\sigma_N^2}H^+(S,\Psi)H(S,\Psi) \end{aligned} \tag{3.14}$$

이고

$$R(r,S,\Psi) = \sigma_A^2 H^+(S,\Psi)Q^{-1}P(r) = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_N^2}H^+(S,\Psi)P(r) \tag{3.15}$$

3.2.2 광대역 정합장처리

근래에 오면서 관심이 심해에서 천해로 변화하게 되고, 천해에서 해수면, 해저면 등에 의한 상호작용이 도파관내에 미치는 영향으로 인하여 주파수적으로 정확하게 알지 못하는 현상이 발생함에 따라서 다중주파수 정보에 의한 견고함이 요구하게 되었다. 이러한 배경에서 광대역 정합장처리가 요구되었다.

광대역 정합장처리가 협대역 정합장처리와 크게 대별되는 부분은 협대역의 경우 대부분 시간영역에서 음원 위치추정 문제를 다루었다면, 광대역의 경우는 주파수 영역에서 다루게 된다. *Clay*는 수신단의 쌍으로부터 상호 상관하는 정합장 출력에 의해 다중 수신단들에 대한 방법을 제시하였다. 주파수 영역에서 다루는 방법은 다중 수신단 방법과 유사하다.

1. Incoherent 광대역 정합장처리

Incoherent 광대역 정합장처리는 다른 주파수에서 계산된 평균 협대역 정합장 AMS 처리에 따른다. 각 주파수에서 가정된 음원거리 r과 수심 z에서 AMS는 가중치 벡터 $\boldsymbol{w}(r, z)$를 갖는 프로세서의 출력 파워에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$Z(r, z) = E\{|\boldsymbol{w}(r, z)^{+}\boldsymbol{x}|^{2}\} = \boldsymbol{w}(r, z)^{+}\boldsymbol{R}\,\boldsymbol{w}(r, z) \quad (3.16)$$

여기에서 $\boldsymbol{w}_{l}(r, z)$의 결정은 특정 정합장처리 방법에 따른다. 선형 프로세서와 MV 프로세서에 대한 가중치 벡터들을 주파수 ω에서 다음과 같이 주어진다.

Bartlett : $\boldsymbol{w}(r, z) = \boldsymbol{d}(r, z)$ (3.17)

MV : $\boldsymbol{w}(r, z) = \dfrac{\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{d}(r, z)}{[\boldsymbol{d}(r, z)^{+}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{d}(r, z)]}$ (3.18)

여기에서 $\boldsymbol{d}(r, z) = \boldsymbol{U}\boldsymbol{s}(r, z)$이고 $\boldsymbol{d}(r, z) = \boldsymbol{d}(r, z)/\|\boldsymbol{d}(r, z)\|$이다.

Incoherent 광대역 정합장처리는 주파수에 따른 협대역 프로세서 출력 파워들 합계에 따른다.

$$Z_{inc}(r, z) = E\left\{\sum_{l=1}^{L}|\boldsymbol{w}(r, z)^{+}\boldsymbol{x}|^{2}\right\}$$
$$= \sum_{l=1}^{L}\boldsymbol{w}(r, z)^{+}\boldsymbol{R}\,\boldsymbol{w}(r, z) \quad (3.19)$$

음원 위치 추정은 $Z_{inc}(r, z)$ 최대값에 의한 거리와 수심들을 찾음에 의해 획득할 수 있다. 이러한 incoherent 광대역 정합장처리는 *Baggeroer* 등에 의해 처음으로 제안되었고, 부엽 성분들은 실제 음원 위치에서의 에너지는 보강되는 반면에 에너지의 합에 의해서는 보강되지 않아서 결국은 incoherent한 간섭에 의하여 억제되는 특성을 갖는다.

2. Coherent 광대역 정합장처리

Coherent 광대역 정합장처리는 신호가 변화하는 영역에서 상호주파수(cross-frequency)의 연관성을 이용하는 것으로 incoherent 방법과는 달리 음장의 위상까지 고려한 방법이다. 그러므로 coherent 광대역 정합장처리는 주파수에 따른 협대역 프로세서 출력 파워들 벡터 합에 따른다.

$$Z_{coh}(\vec{r}, \vec{z}) = E\left\{\left|\sum_{l=1}^{L} trace\left(\boldsymbol{W_l}^{+}\ \boldsymbol{x_l}\boldsymbol{x_l}^{+}\right)\right|^2\right\}$$
$$= E\left\{\left|\sum_{l=1}^{L} vec\,(W_l)^{+}\ vec(x_l x_l^{+})\right|^2\right\} \qquad (3.20)$$

이것은 정해지지 않은 환경에서 상호 주파수 관계를 통합하여 가중치 벡터 계산을 쉽게 한다. 식(3.20)은 데이터의 4차 모멘트를 포함하고 있다. $W = [\ \boldsymbol{W_1}\ \boldsymbol{W_2}\ \cdots\ \boldsymbol{W_L}]$, 그리고 $\boldsymbol{X} = [\ \boldsymbol{x_1}\boldsymbol{x_1^{+}}\ \ \boldsymbol{x_2}\boldsymbol{x_2^{+}}\ \cdots\ \boldsymbol{x_L}\boldsymbol{x_L^{+}}]$ 이라고 하면 식(3.20)은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{coh}(r, z) = E\{|trace(\boldsymbol{W}^{+}\boldsymbol{X}^{+})|^2\} = E\{|\ \boldsymbol{w}^{+}\ \boldsymbol{x}\,|^2\} = \boldsymbol{w}^{+}\ \boldsymbol{R}\ \boldsymbol{w} \qquad (3.21)$$

여기에서 $\boldsymbol{w} = vec(W)$ 일반적인 가중치 벡터이고, $\boldsymbol{x} = vec(X)$ 그리고 $\boldsymbol{R} = E\{\boldsymbol{x}\ \boldsymbol{x}^{+}\}$ 이다.

3.3 오정합(Mismatch)

오정합은 해양환경에서 측정된 매개변수의 영향으로 인하여 잘못된 결과를 도출하게 되는 현상이다. 많은 계산량과 더불어 정합장처리가 갖는 제한성으로써 계산량의 경우, 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 어느 정도의 해결이 가능하지만, 오정합은 환경에 지배적인 영향을 받으므로 완전한 해결이 불가능하다. 정합장처리에서 오정합을 유발하는 요인으로는 음속분포, 수심, 해저면의 음향특성, 수직선배열센서의 tilt 등으로 크게 구분된다.

오정합을 극복하기 위하여 정합장처리 성능에 영향을 줄 수 있는 환경인자를 개별적으로 실험하고 결과를 얻어 추론하는 방법이 이용된다. 그러나 각각의 환경인자에 대한 오정합을 이상적으로 가정하여 구성함으로 경향은 볼 수 있으나 표준화된 결과를 볼 수는 없다.

(1) 음속분포 오정합이 정합장처리 성능에 미치는 영향

Bucker(1976년)는 음속분포의 오차가 선형프로세서 성능을 저하시킴을 보였고, *Porter*(1987년)는 음속분포의 오차가 MV 프로세서에 미치는 영향을 분석하여 음원이 원거리에 위치할수록 음속 오정합의 영향이 큼을 보였다[12]. *Tolstoy*(1989년)는 음속분포 오정합에 따른 위상오차와 진폭 오차를 거리-수심별로 나타내고 이것에 근거한 선배열센서 배치방법에 대하여 연구하여, 위상과 진폭 오차가 큰 지역에 선배열센서를 배치할 경우 정합장처리 성능이 저하됨을 보였고, *Feuillade*(1991년)는 계절에 따른 음속분포의 오정합에 의해 음속의 불연속성(discontinuity)이 정합장처리에 미치는 영향을 분석하여 여름의 음속분포 오정합이 겨울보다 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

(2) 수심 오정합이 정합장처리 성능에 미치는 영향

DelBalzo(1989년)는 부정확한 수심 추정이 MV에 미치는 영향을 분석하여 수심의 오차가 규칙적인 정합장처리의 오정합을 가짐, 즉 수심이 실제보다 깊이 가정되었을 경우 음원은 실제보다 더 멀리 있는 것으로 나타남을 확인하였다. 수심의 오정합은 정확하지 않은 모드를 포함할 수 있으며 이것은 불규칙한 음원 위치추정 오차를 가져오게 됨을 보였고[13], *Shang*과 *Wang*(1991년)은 수심, 매질의 음속, 매질의 감쇠계수와 밀도의 변화가 정합장처리에 미치는 영향을 연구하여 인자들의 정확도가 매우 중요하다는 사실을 확인하였고, 음원의 위치를 알고 환경인자를 역으로 구하는 방법을 처음으로 시도하였다[14].

(3) 해저면 매개변수 오정합이 정합장처리에 미치는 영향

Porter(1987년)는 바닥의 매개변수 오차가 선형, MV 프로세서에 미치는 영향을 분석하여 선배열센서가 음영지역에 있을 때 바닥 특성 오정합의 영향이 가장 크고 천해 음원일수록 위치추정이 어려움을 보였다.

(4) 선배열센서 매개변수 오정합이 정합장처리에 미치는 영향

Gingras(1989년)는 센서의 위치 오정합(tilt)이 미치는 영향을 분석하여 0.1λ보다 작은 범위의 오차에서는 좋은 정합장처리 결과를 가지나 0.5λ에 수렴함에 따라 급속하게 나빠짐을 보였다[15].

(5) 불규칙(random) 효과가 정합장처리에 미치는 영향

McDonough(1972년)는 불규칙 진폭과 불규칙 위상으로 교란된 평면파에 대하여 연구하여 선형 프로세서가 MV에 비해 불규칙 교란에 덜 민감함을 보였고, *Klemn*(1981년)은 불규칙 위상 교란이 존재할 때의 정합장처리의 성능에 관하여 연구하여 수직 어레이가 수평 어레이보다 위상요동에 덜 민감하고, 복제음장에는 적은 요동을 가정하는 것이 유리함을 보였다. 또한 *Daugherty*와 *Lynch*(1990년)는 해수면의 거칠기에

대하여 연구하여 해수면의 거칠기가 정합장처리의 성능에 큰 제약을 가져옴을 보이고 해수면 반사계수를 복제음장에 적용하면 많은 신호가 복원됨을 확인하였다[16].

다음의 그림 3.1에서 그림 3.4까지는 각각의 오정합이 음원 위치추정에 미치는 영향을 보인 것이다. 실제음원의 위치는 ☆로 나타내었고, 음원의 위치추정 결과는 ○로 표현하였다.

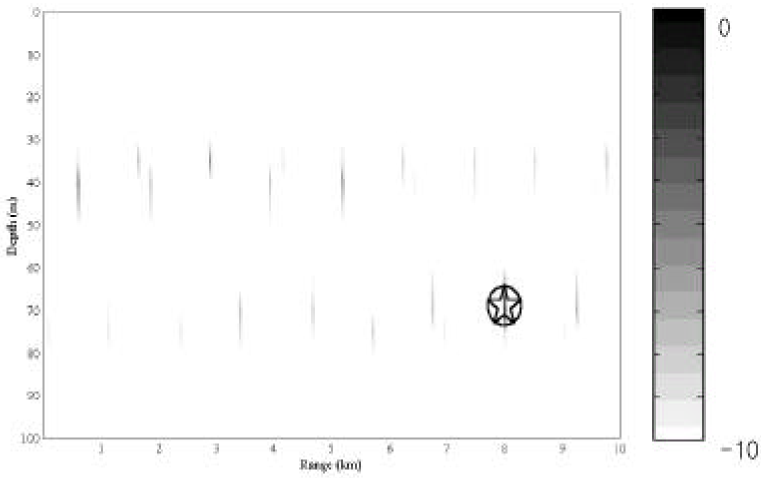


그림 3.1 **오정합이 없을 때의 음원 위치추정 결과**
(ESD=70m, ESR=8km)

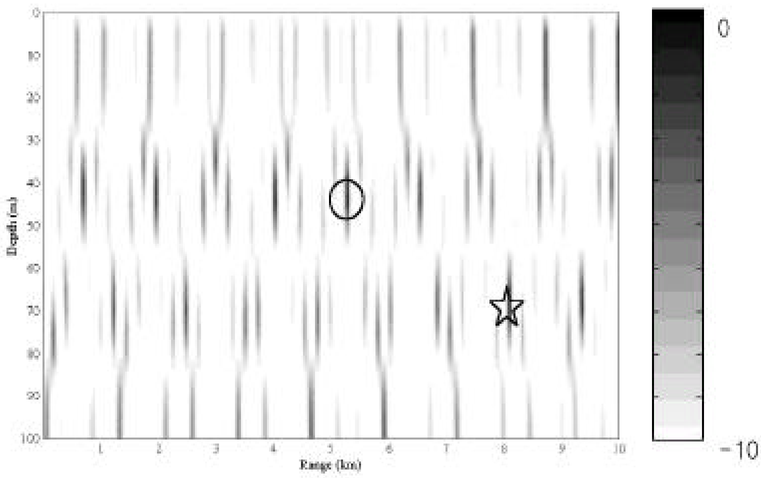


그림 3.5 **음속분포 오정합이 존재할 때의 음원 위치추정 결과**
(ESD=45m, ESR=5.28km)

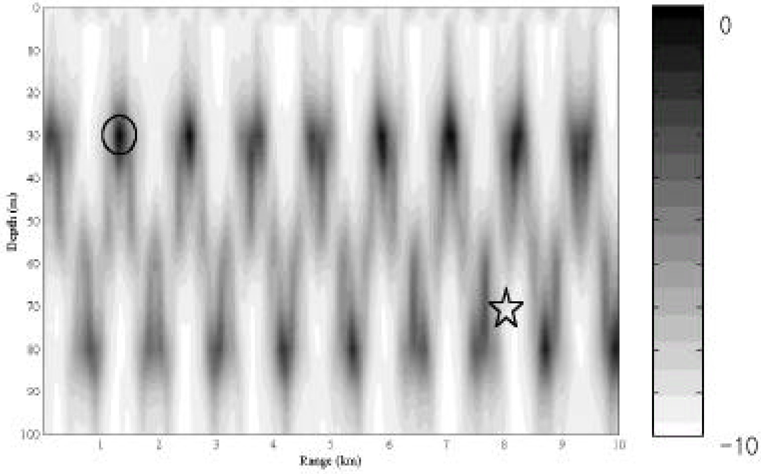


그림 3.6 **수심 오정합이 존재할 때의 음원 위치추정 결과**
(ESD=30m, ESR=1.32km)

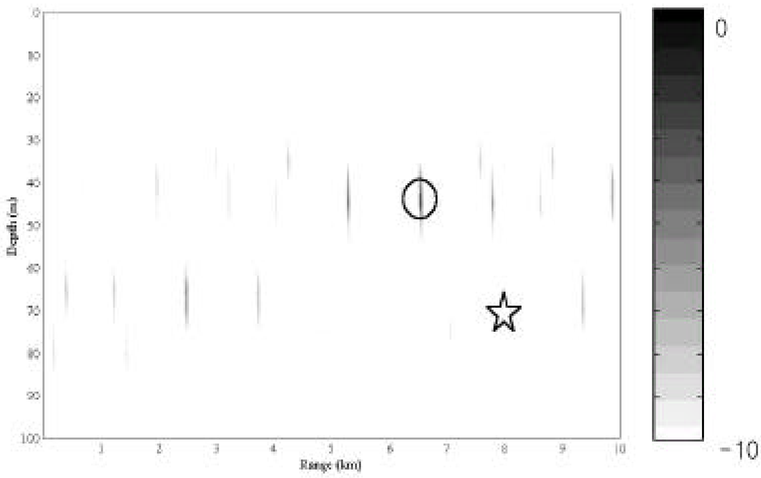


그림 3.7 **해저면 매개변수 오정합이 존재할 때의**
음원 위치추정 결과
(ESD=45m, ESR=6.54km)

4.이동음원(Moving Source)

대부분의 정합장처리들은 고정음원에 대하여 연구되어졌으나 근래에 들어서 컴퓨터의 발달로 인한 급격한 계산시간의 단축으로 인해 이동하는 음원에 대하여 정합장처리기법을 적용하여 음원 위치추정에서 한 단계 더 나아가 이동하는 음원을 추적(tracking)하는 것에 대하여 여러 연구가 진행되고 있다. 본 장에서는 다루어질 내용은 이동음원에 대한 전반적인 것에 관해서 이다.

4.1 이동음원에 대한 매개변수 정의

음원의 움직임은 위치추정결과에서 고려할만한 영향을 가진다. 특히 이러한 움직임은 도플러지연(doppler shift), 신호의 주파수영역에서의 스펙트럼의 벌어짐 등을 유발한다. 이러한 영향은 음원속도에 따라 신호의 위상에 영향을 미치고 시간에 의존하는 신호에 대한계산에서 복제음장의 향상에 의하여 정합장처리에서 설명될 수 있다. 움직임의 결과에서 정합장처리에 대한 다른 어려움은 음원이 더 이상 고정되어 있지 않다는 것이다.

그림 4.1에서 보여지는 것은 수중음향채널에서 이동음원에 대한 것이다. 직각좌표계(cartesian coordinate) 시스템에서 (x, y, z)는 채널 수면에 놓여있고, z축은 해저면을 향하는 방향이다. 여기에서 고정된 수신단을 R 이라고 재정의하고, S는 이동음원이라고 한다. 매질은 수평적으로 층(stratified)을 이루고 시간에 독립적, 매질에서 음원 움직임의 어떠한 영향도 작용하지 않는 것으로 가정한다. 점음원 S는 CW 신호를 방사하고, 고정된 속도 V를 갖고 일정수심 z_0에서 선형적인 경로로

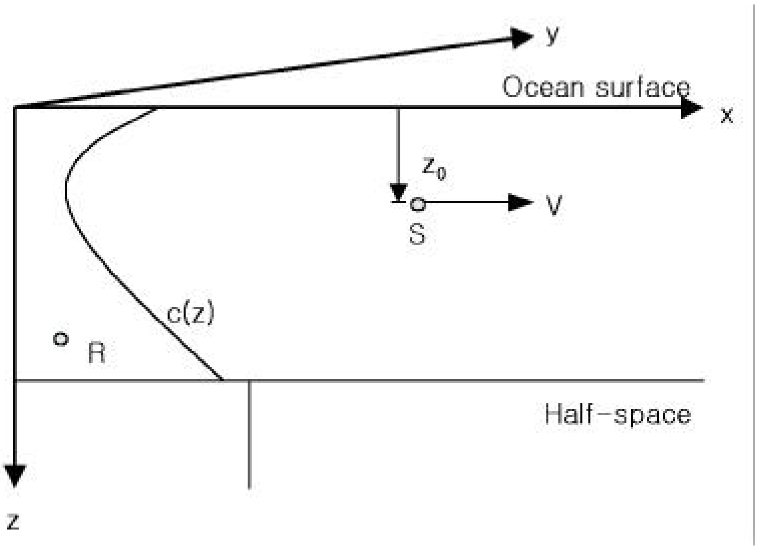


그림 4.1 **음원과 수신단의 배치와 해양 환경모델**

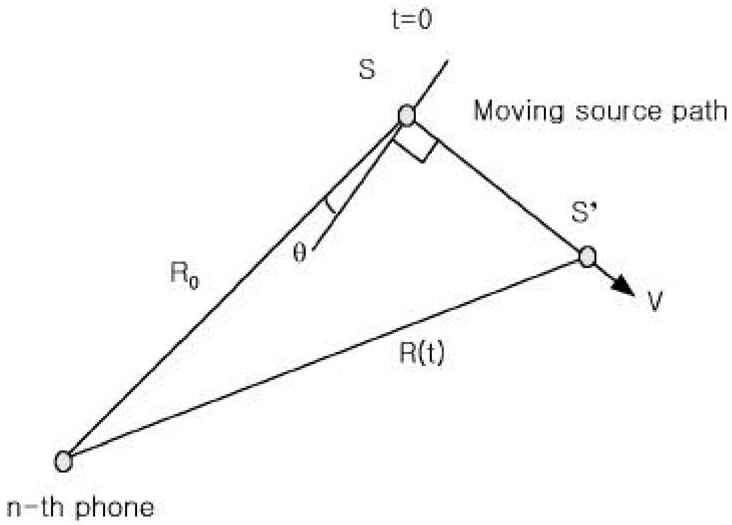


그림 4.9 **음원과 수신단의 위치에 따른 음원의 경로**

이동한다. 이때 무지향성(omnidirectional) 수신단 R은 수심 z에 위치되어 있다.

그림 4.2는 $(x, y, 0)$ 평면에서 음원과 수신단 위치에 따른 음원의 경로를 나타낸 것이다. 이 평면에서 투영된 수신단 위치는 (x, y)이고, $R(t)$는 수신단 R에서 음원 S까지 시간 t 에서의 투영된 음원경로 수평거리로 정의한다. 특히 R_0 시간 $t=0$에서의 음원과 수신단 거리(관측간격의 중심)라고 정의하고, θ는 그림에서 정의된 각이다.

4.2 이동음원에 따른 음장

4.1절에서 정의한 매개변수들에 의해 음원/수신단 거리 $R(t)$ 의 순간값은 다음의 식으로 표현되어진다.

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + V^2t^2 + 2VtR_0\sin\theta}, \quad t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \qquad (4.1)$$

p는 시간 조화, 이동하는 점 음원에 대한 압력이라고 가정하고, 이것은 비균질(inhomogeneous) 파동방정식을 만족한다. 그리고 단위 평준화된 음원세기를 취하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left[\nabla^2 - c^{-2}(z)\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]p(r,t) = -4\pi\delta[\vec{r} - \vec{r}_s(t)]\exp(-i\omega_0 t) \quad (4.2)$$

여기에서 음원은 $r_s(t)$에 위치하고, $\omega_0 = 2\pi f_0$이다. 수평적인 층리(stratification)와 일정한 음원수심을 갖는 파동방정식은 거리와 수심에 관한 식으로 표현된다.

파동방정식 식(4.2)는 정상 모드의 영역에서 계산하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$p(z,t) = Q\sqrt{\frac{2\pi}{R}}\exp\left[-i\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{4}\right)\right]\sum_n S_n \qquad (4.3)$$

여기에서 $$S_n = \frac{\psi_n(z)\psi_n(z_s)}{\sqrt{k_n}}e^{-\delta_n R}e^{ik_n' R(t)} \qquad (4.4)$$

$$k_n' = f_n(\theta)k_n \qquad (4.5)$$

$$f_n(\theta) = 1 - \eta_n \sin\theta + \frac{1}{2}\eta_n^2[1 - (1 - D_n)\sin^2\theta] + \cdots \quad (4.6)$$

$$\eta_n = \frac{V}{v_n^G} \quad (4.7)$$

$$D_n = k_n \frac{\partial v_n^G}{\partial \omega} \quad (4.8)$$

방정식에서 나타나는 함수들은 식(4.5)**에서 보여지는** $f_n(\theta)$**에 따른 위상에서** k_n**의 변화와 음원의 움직임에 대한** $R(t)$**의 시간적인 변화를 제외하고는 일반모드이론에서 보편적으로 나타나는 것들이다**. **특히** ψ_n**은** n**번째 모드함수이고**, k_n**은** n**번째 모드와 연관된 수평적인 파수**, δ_n**는** n**번째 모드의 감쇠계수**, v_n^G**는** n**번째 모드의 군속도**(group velocity), **그리고** Q**는 음원세기이다**. **유도된 식은 다음의** 4**가지의 가정을 포함하고 있다**. (1) **환경은 수평적으로 층을 이루고**, (2) **음원은 고정된 수심에서 일정한 속도를 갖고 선형적으로 이동하며**, (3) $k_nR \gg 1$, $\eta_n \ll 1$ (4) **방정식은 개별적 또는 선택된**(trapped) **모드만을 취급한다**. **즉 매우 짧은 거리를 제외하고는 중요하지 않은 연속을 무시한다**. **거리독립 환경에서 고정된 음원에 의한 음장에 대한 식은 위의 방정식에** $f(\theta) = 1$ **즉**, $V = 0$**을 취함으로써 간단히 구할 수 있다**.

연관된 힘에 의하여 일어나는 시간적인 위상 변조에 대하여 알아보면 식(4.1)**에서** $R(t)$**는 일반적으로 다음과 같이** Taylor series**로 나타낼 수 있다**.

$$R(t) = R_0 + (V\sin\theta)t - \frac{V^2\cos^2\theta}{R_0}\cdot\frac{t^2}{2!} + \cdots \quad (4.9)$$

짧은 관측시간은 T 라고 가정하면 위의 식은 선형적인 영역에서 분리될 수 있다 : 관측자가 음원 하단 거리 요소(down range component) $V_r = V \sin\theta$, 2차 구가속도(radial acceleration)을 무시하고 측정한다. 이러한 파동이론에서 일반적인 far-field 가정에 대하여 평행을 이룬다 ; $\chi << 1$, 여기에서 χ는 기하학적 매개변수로써 다음과 같이 정의된다.

$$\chi = VT / 2R_0 \tag{4.10}$$

보다 정확하게, 만일 다음의 조건을 만족할 경우 위상에 대한 2차항은 무시할 수 있다.

$$k_n' \frac{V^2 \cos^2\theta}{R_0} \cdot \frac{t^2_{\max}}{2!} < \frac{\pi}{8} \tag{4.11}$$

$t^2_{\max} = T/2$, $k_n' \cong 2\pi/\lambda$ 을 대입하여 다시 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T < \sqrt{\frac{\lambda R_0}{2V^2 \cos^2\theta}} \tag{4.12}$$

k_n'에 의해 증가하는 선형 영역은 도플러 또는 주파수 지연을 유발한다. 그러므로 각 모드들은 다른 도플러지연을 갖고, 이것은 하이드로폰에 대하여 협대역이지만 이산스펙트럼 선들의 하나로 구성되는 유한 대역신호로 구성되는 모드의 도플러지연, $\beta_n = k_n' V_r$ 에 따른다. 그래서 일정한 주파수지연은 수신단을 고려하지 않고 이동하며 방사하는 음원에 따르고 음원 거리와 어레이 음원의 변화가 매우 작은 관측시간을 포함한다. 예를 들어 음원의 속도가 수십 knots 또는 그 이하라고 하면, 그 때 η는 일반적인 심해문제에서 10^{-2} 또는 그 이하가 될 것이다.

5. 수치실험

4장까지 다루었던 내용은 음장의 모델링과 관련된 전달손실모델, 정합장처리의 연구동향과 알고리즘과 이동음원에 관한 것이었다. 본 장에서는 이러한 내용을 기반으로 수치실험을 통하여 정합장처리를 이용한 이동음원에 대한 위치추정 및 추적의 신뢰성을 검증하고, 각 프로세서별 성능을 분석하고자 하였다.

5.1 추적 알고리즘

본 논문에서 추적 알고리즘으로 사용한 것은 CTA(Conventional Tracking Algorithm)이다. 이것은 음원추적문제에 대하여 일반적으로 사용되는 방법으로 개별적인 위치추정의 연속으로 음원을 추적하게 된다. 이 때 음원 움직임의 사전지식은 무시하고, 관측시간동안 음원환경은 일정하다고 가정한다. 각 관측위치에 대한 AMS는 선정된 위치추정 프로세서에 의해 계산되고, 관측에 의해 추정된 위치(S_i)는 AMS의 최대값(S)에 의해 결정된다. k번째 관측에 대한 음원추적을 $\Im_k$라고 정의하면, 이것은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Im_k = S_1,\ S_2,\ \cdots,\ S_k \tag{5.1}$$

5.2 수치실험

5.2.1 실험환경

수치실험을 위하여서는 환경 결정이 우선 되어야 하는데 본 논문에서는 다음과 같이 결정하였다. 총 3개의 층으로 구성되어 있는 실험환경은 water-column의 수심이 127m, 그 아래 2.5m 두께의 퇴적층이 존재하고 다음으로 음향학적 반무한영역(acoustic half-space)으로 처리된 해저면이 존재하는 거리 독립적인 환경이다. 퇴적층과 해저면의 밀도는 1.75g/㎤로 동일하며, 퇴적층의 감쇠계수는 0.13㏈/λ, 해저면의 감쇠계수는 0.15㏈/λ이고, 퇴적층의 음속은 1520㎧에서 1580㎧로 선형적으로 증가하며 해저면은 1600㎧ 로 일정하다. 사용한 어레이의 센서는 48개로 수심 18.7m에서 2m 간격으로 112.7m까지 배치하였다.

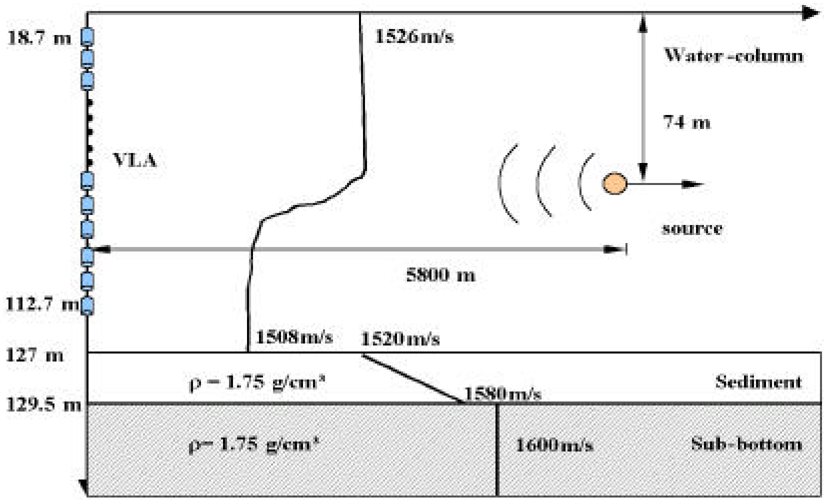


그림 5.10 수치실험 환경

5.2.2 이동음원 시뮬레이션

수치실험을 위하여 이동음원 데이터를 시뮬레이션 하였다. 음원은 170㎐의 중심주파수를 가지고 어레이로부터 3.5knot의 일정한 속도로 멀어져간다고 가정하였다. 신호대 잡음비(SNR)은 20㏈이고 전체 데이터 샘플은 18개, 첫 번째 데이터는 5.8km에서 수신하고 마지막 데이터는 7.5km에서 수신하는 것으로 하였다.

다음은 이동음원의 시뮬레이션을 위해 필요한 가정을 정리한 것이다. 이러한 가정을 가지고 전달손실 모델에서 계산된 음장의 격자(grid)에서 연속하는 점음원을 이동음원 데이터로 구성하였다.

· 음원의 궤적은 고정된 지역(fixed region)에 분포한다. · 음원의 수심은 고정되고, 음원은 일직선상으로 이동한다. · 음원의 속도와 음원준위(Source Level)는 변화하지 않고 일정하다.

이동음원의 시뮬레이션에 요구되는 가정

그림 5.2와 그림 5.3은 고정음원과 이동음원의 공분산행렬 구조를 나타내는 것이다. 고정음원의 경우 공분산행렬은 음원이 존재하는 부분에서 하나의 최대값만을 갖는데 비해 이동음원의 경우는 음원이 움직임으로 고정음원과는 다른 양상을 확인할 수 있다.

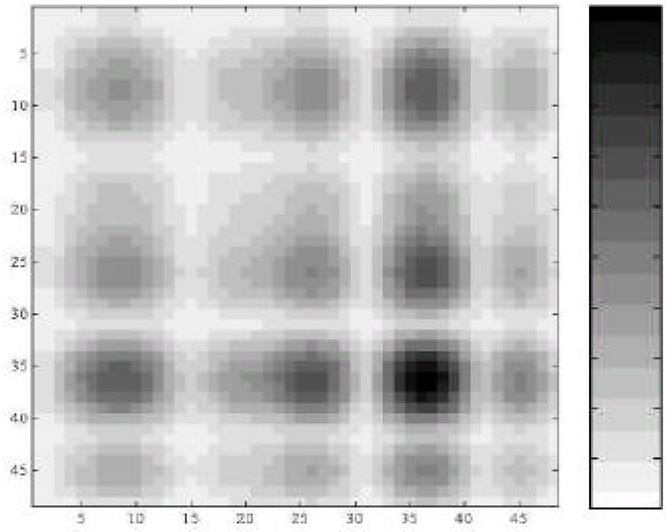


그림 5.11 **고정음원의 공분산행렬 구조**

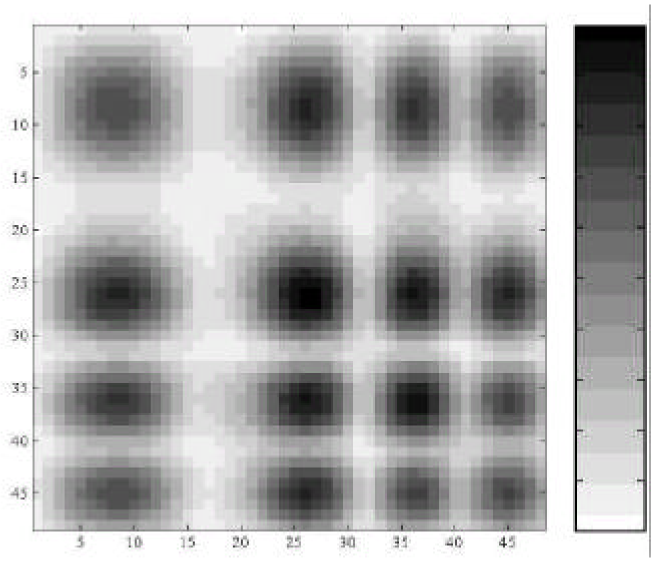


그림 5.3 **이동음원의 공분산행렬 구조**

5.2.3 실험결과

1. Bartlett 프로세서 적용 결과

그림 5.4는 음원이 존재하는 수심에서의 전달손실을 나타낸 것이며, 그림 5.5와 그림 5.6은 수치실험을 통하여 획득한 첫 번째 데이터 샘플과 마지막 데이터 샘플의 Bartlett 프로세서 적용 AMS 결과이다. 음원은 수심 72.5714m지점에, 수직선배열센서로부터 각각 5.82km, 7.5km 떨어진곳에 위치하는 것으로 추정하였다. 수심추정에서 발생하는 오차는 수심방향의 격자를 나눌 때 발생하는 것이므로 이것을 고려하면 74m를 정확히 추정함을 확인할 수 있다.

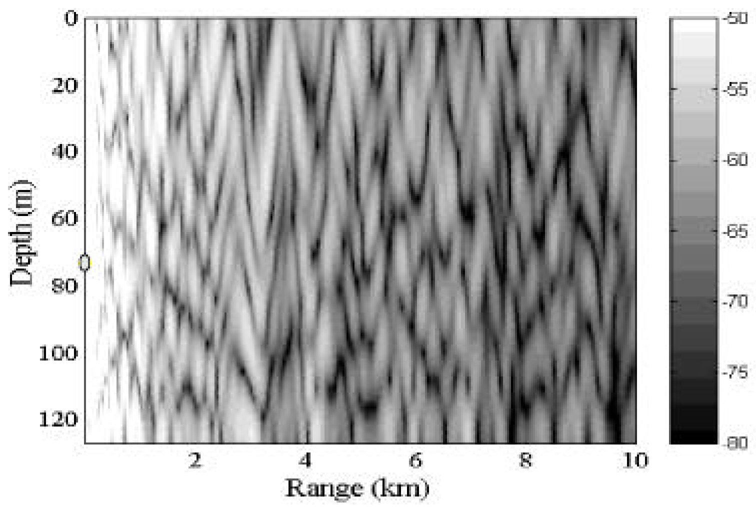
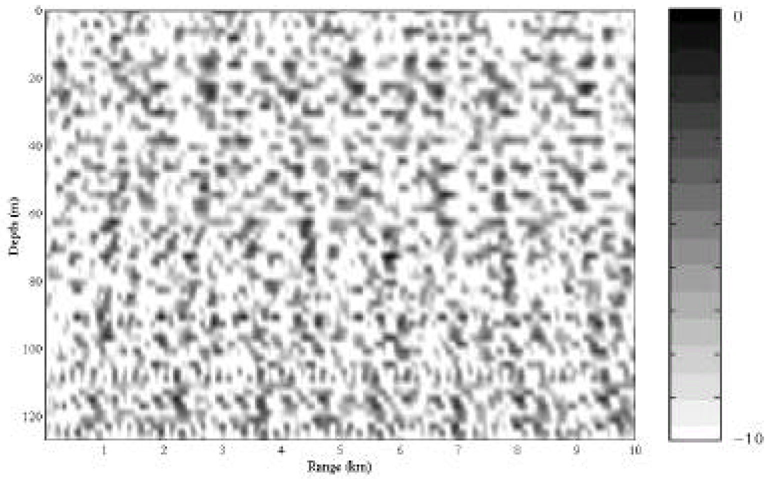


그림 5.13 음원수심에서의 전달손실



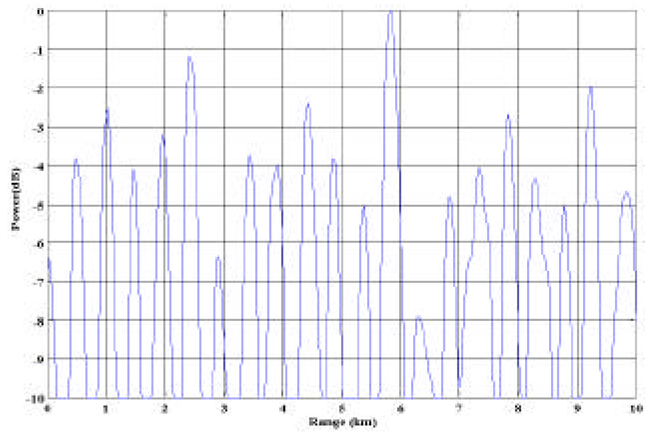


그림 5.5 Bartlett **프로세서 적용 위치추정결과**(**첫 번째 데이터 샘플**)

추정수심=72.5714m, **추정거리**=5.82km

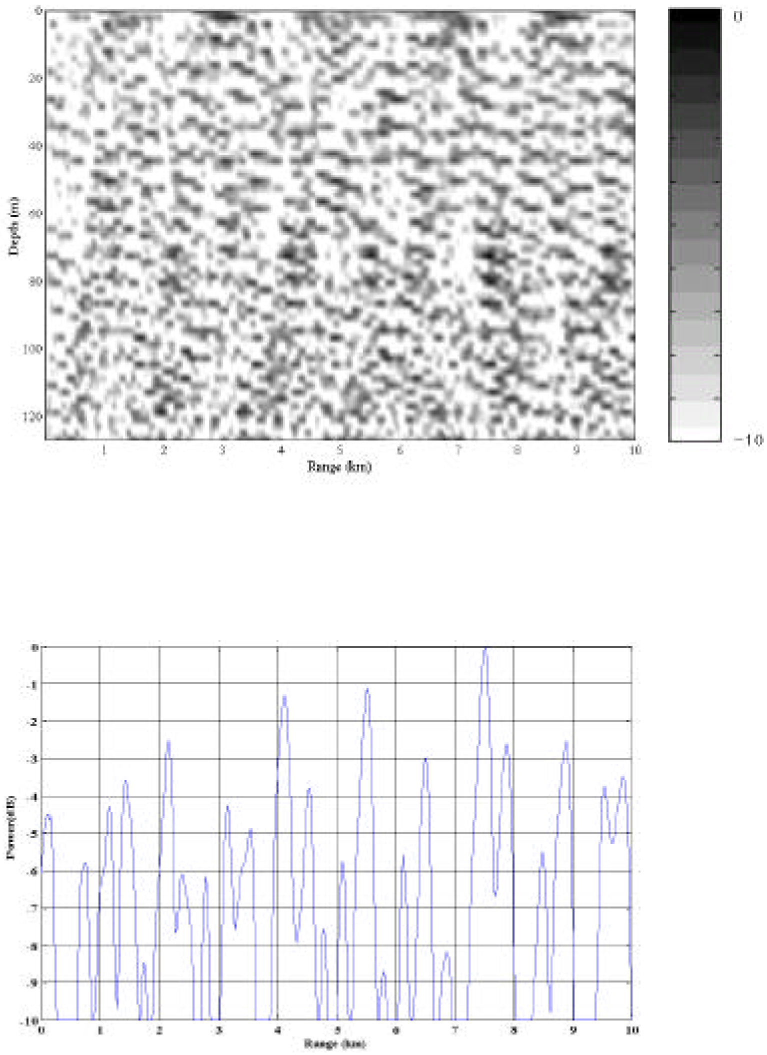
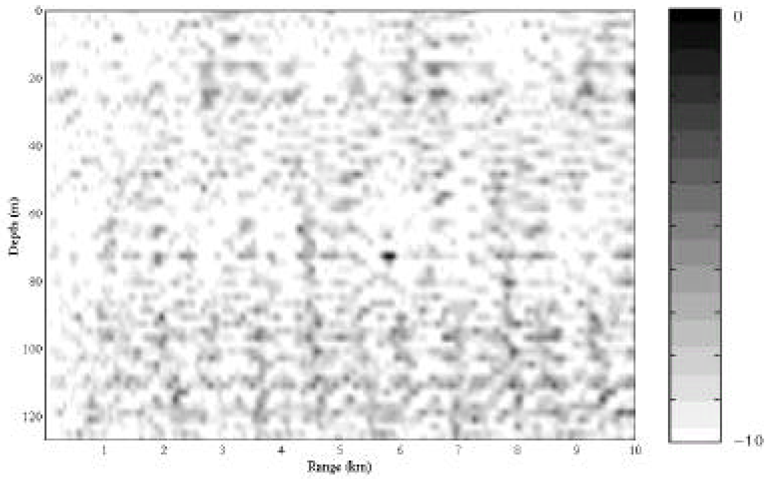


그림 5.6 Bartlett **프로세서 적용 위치추정결과**(**마지막 데이터 샘플**)

추정수심=72.5714m, **추정거리**=7.5km

2. MV 프로세서 적용 결과

그림 5.7과 그림 5.8은 MV 프로세서 적용 AMS 결과이다. 음원의 위치는 정확히 추정하지만, Bartlett 프로세서 적용 AMS 결과와 비교하면 부엽성분을 억제하는 특성에 의해서 해상도가 향상됨을 확인할 수 있다.



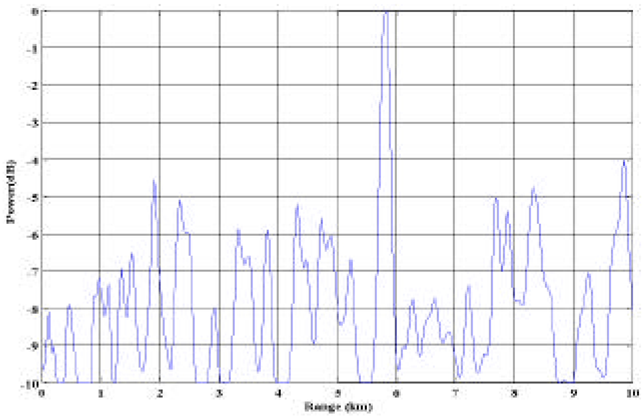
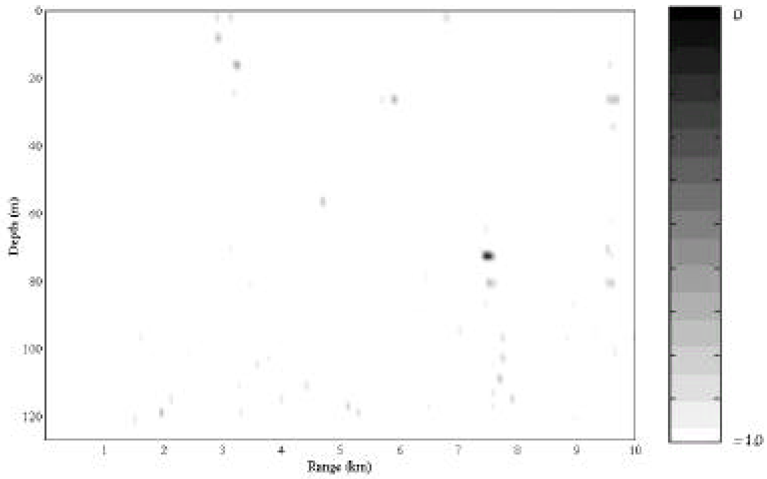


그림 5.7 MV 프로세서 적용 위치추정결과(첫 번째 데이터 샘플)
추정수심=72.5714m, 추정거리=5.82km



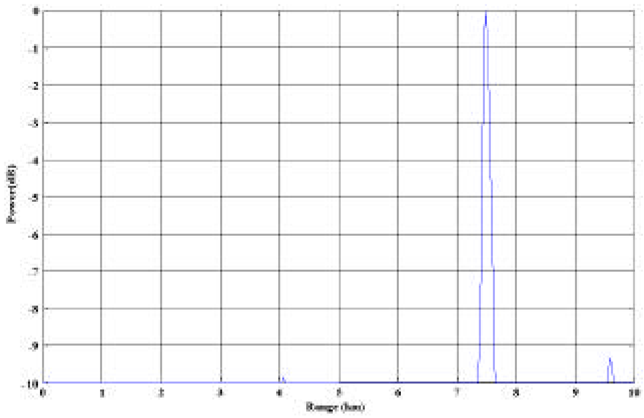
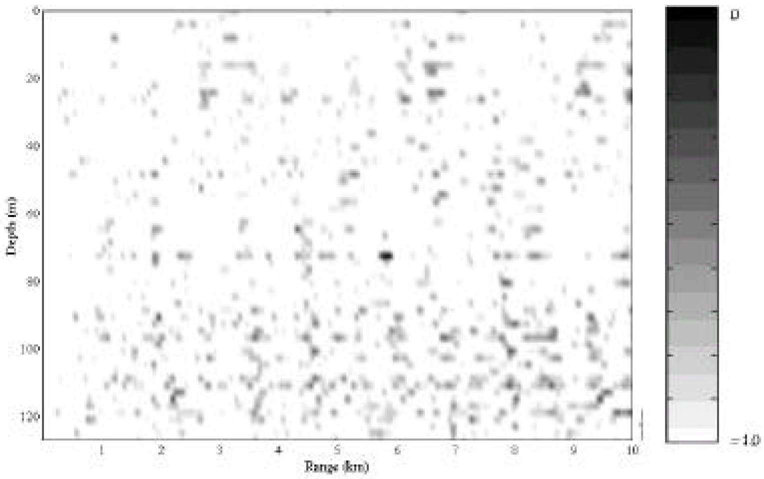


그림 5.8 MV **프로세서 적용 위치추정결과**(**마지막 데이터 샘플**)
추정수심=72.5714m, **추정거리**=7.48km

3. RMV 프로세서 적용 결과

그림 5.9과 5.10은 RMV 프로세서 적용 AMS 결과이다. 환경에 대한 오정합이 존재하지 않으므로 음원의 위치추정 결과는 MV 프로세서와 유사하고 해상도는 MV와 비교하여 조금 향상됨을 확인할 수 있었다.



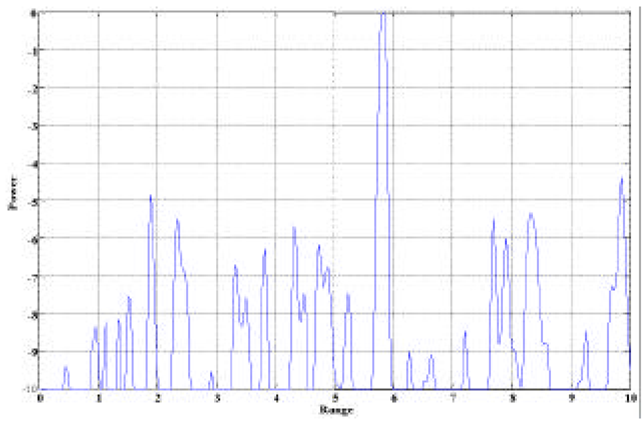
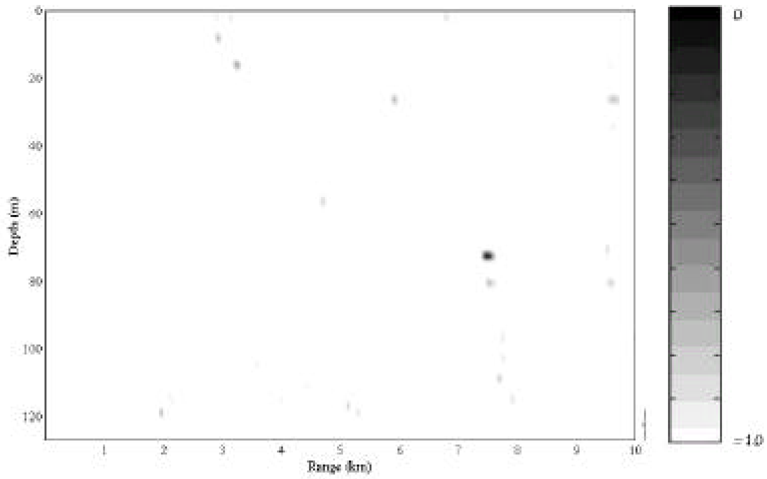


그림 5.9 RMV 프로세서 적용 위치추정결과(첫 번째 데이터 샘플)
추정수심=72.5714m, 추정거리=5.82km



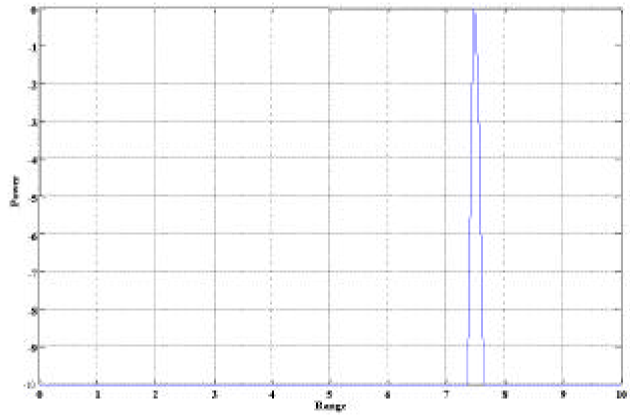
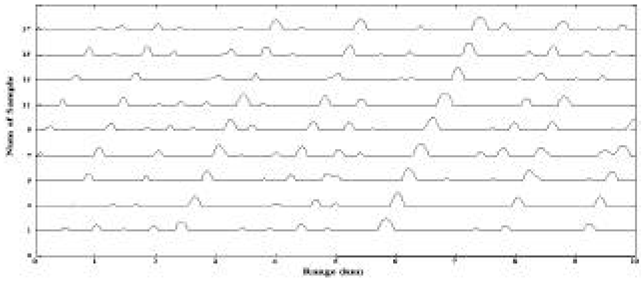


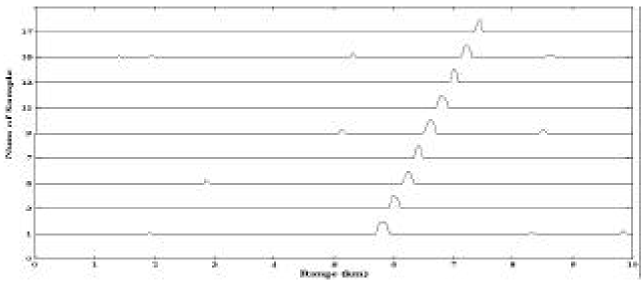
그림 5.10 RMV **프로세서 적용 위치추정결과**(**마지막 데이터 샘플**)
추정수심=72.5714m, **추정거리**=7.48km

4. CTA 적용 결과

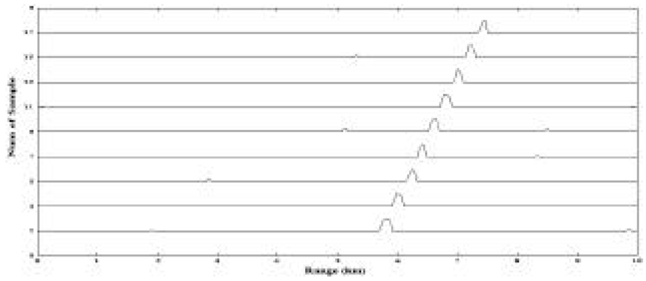
그림 5.11은 음원 수심 74m에서 데이터 샘플 중, 9개의 샘플을 평준화(normalized)하여 하나의 창에 나타낸 것이다. 음원이 점차적으로 이동하는 경향을 확인할 수 있다. Bartlett의 경우는 부엽성분들이 MV, RMV 에 비하여 큼을 볼수 있다.



(1) Bartlett



(2) MV



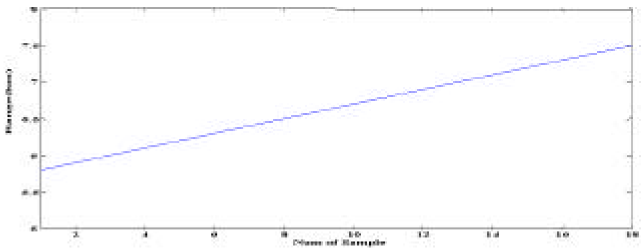
(3) RMV

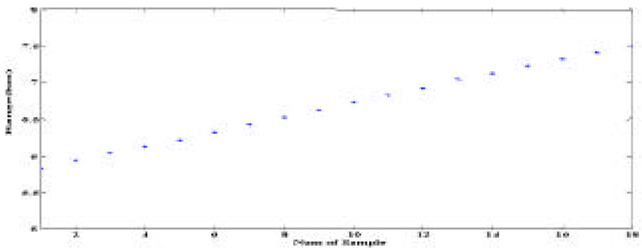
그림 5.11 프로세서에 따른 CTA 적용결과

5. 음원추적 결과

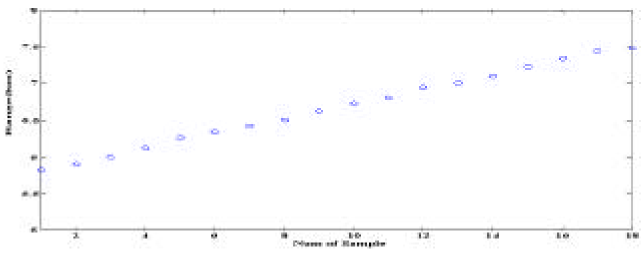
그림 5.12는 데이터 샘플별 이동음원의 추적결과이다. (1)은 실제 음원이 5.8km에서 7.5km까지 이동한 경로를 나타내고, (2)는 Bartlett 프로세서를 적용한 CTA 음원추적, (3)은 MV 프로세서를 적용한 CTA 음원추적, 그리고 (4)는 RMV 프로세서를 적용한 CTA 음원추적 결과이다. 3개의 프로세서 모두 이동음원 추적에 대하여 좋은 성능을 가짐을 확인하였다. 18개의 샘플에 대한 각각의 위치추정은 표 5.1에서 정리하였다. 표에서 MV, RMV의 위치추정 결과가 동일함을 볼 수 있는데 이것은 수치실험의 경우 해양환경에 대한 오정합이 존재하지 않으며, 공분산행렬이 전계수(full rank)를 가짐으로서 나타나는 현상이다. 실제 해양환경에서는 신호의 공분산행렬이 전계수를 갖는 경우는 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.

(1) 음원의 이동경로

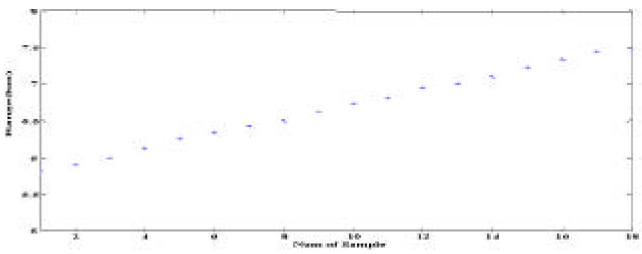




(2) Bartlett **프로세서 적용**



(3) MV **프로세서 적용**



(4) RMV **프로세서 적용**

그림 5.12 **이동음원 추적결과**

Num of Sample	추정거리(km)		
	Bartlett	MV	RMV
1st	5.82	5.82	5.82
2nd	5.94	5.9	5.9
3rd	6.04	6.0	6.0
4th	6.12	6.12	6.12
5th	6.22	6.26	6.26
6th	6.32	6.34	6.34
7th	6.42	6.42	6.42
8th	6.52	6.5	6.5
9th	6.62	6.62	6.62
10th	6.72	6.72	6.72
11th	6.82	6.8	6.8
12th	6.92	6.94	6.94
13th	7.04	7.0	7.0
14th	7.12	7.1	7.1
15th	7.22	7.22	7.22
16th	7.32	7.34	7.34
17th	7.42	7.44	7.44
18th	7.5	7.48	7.48

표 5.1 **전체샘플에 대한 프로세서별 음원 위치추정**(**수심**:74m)

6. 결론 및 연구방향

6.1 결론

정합장처리는 일반적인 신호처리 기법을 수중음향에 적용한 것으로 음원탐지, 위치추정, 매개변수추정 등 다양한 목적으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 정합장처리의 기본개념과 핵심을 이루는 복제음장의 계산에 이용되는 전달손실모델을 수치해석 기법에 따라 간략히 정리하였다. 정합장처리에서 우선적으로 고려되어야 할 부분은 환경 매개변수에 관한 정밀한 측정이다. 잘못된 환경 매개변수를 갖고 음원의 정확한 위치를 추정하는 것은 불가능하기 때문이다. 이런 잘못된 매개변수 측정은 오정합이라는 형태로 나타나게 되고, 오정합이 위치추정에 미치는 영향은 그림을 통하여 설명하였다. 또한 일반적으로 고정음원의 위치추정에 뛰어난 성능을 갖는 정합장처리 알고리즘에 대하여 정리하고 몇가지의 프로세서를 이동음원에 적용하여 음원추적의 효용성을 평가하고자 수치실험을 실시하였다. 수치실험에 사용된 이동음원 데이터는 가정을 통해 구성하였고, Bartlett, MV, RMV 프로세서를 매칭프로세서로 사용하여 여기서 나온 결과를 일반적인 추적알고리즘인 CTA를 이용하여 이동음원의 경로를 추적하였다. 수치실험 결과 연구에 사용된 프로세서는 모두 이동음원에 대해서 성공적인 성능을 보였다. 따라서 환경 매개변수가 정밀하게 측정된 경우, 이동음원에 대한 매우 정확한 추적이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 다만 Bartlett의 경우는 실험결과에서 확인할 수 있듯이 부엽의 영향이 강하게 작용하므로 신호대 잡음비가 낮은 곳에서의 제약이 있고, MV와 RMV의 경우, 부엽을 억제하는 특성에 의해 해상도는 향상되지만 오정합에 민감하므로 사용목적에 따른 주의가 요구된다.

6.2 연구방향

정합장처리가 이동음원의 추적에 성공적인 성능을 보임을 수치실험을 통하여 확인하였다. 그러나 서론에서도 언급하였듯이 이론연구와 수치실험, 그리고 해양환경실험은 상호보완적으로 이루어져야 한다. 그러한 점에서 해양환경실험을 통한 연구가 필수적으로 이루어져야 하겠고, 지속적인 이론연구와 수치실험의 병행이 필요하다. 또한 환경 매개변수를 보다 정밀하게 측정할 수 있는 장비의 개발로 오정합을 최소화하려는 노력이 요구된다.

본 논문에서 정합장처리 이동음원의 추적 수치실험은 거리독립적인 천해 환경에 국한하였으나 보다 다양한 환경에 대한 수치실험과 거리종속 환경 등 다양한 방향으로의 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] A.Tolstoy, ***Matched field processing for underwater acoustics***, World Scientific, 1993.

[2] Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter and Henrik Schmidt, ***Computational Ocean Acoustics***, AIP, New York, 1994.

[3] M. B. Porter, ***The KRAKEN Normal Mode Program***, (SACLANT Undersea Research Center, 1994)

[4] Arthur B. Baggeroer, William Kuperman and Peter N. Mikhalevsky, “An Overview of Matched Fiels Methods in Ocean Acoustics”, IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 18, No.4, pp410-424, 1993.

[5] E. K. Westwood, “Broadband matched-field source localization", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, No.5., pp 2777-2789, 1992.

[6] C. A. Zala and J. M. Ozard. “Matched field processing for a moving source", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 92, No.1., pp 403-417, 1992.

[7] Z-H. Michalopoulou, “Robust multi-tonal matched-field inversion : A coherent approach", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 104, No.1., pp 163-170, 1998.

[8] S. P. Czenszak and J. L. Krolik, “Robust wideband matched-field processing with a short vertical array", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 101, No.2., pp 749-759, 1997.

[9] S. L. Tantum and L. W. Nolte, “Tracking and localizing a moving source in an uncertain shallow water environment", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 103, No.1., pp 362-373, 1998.

[10] G. B. Smith, C. Feuillade, D. R. DelBalzo and C. L. Byrne. “A nonlinear matched-field processor for detection and localization of quite source in a noisy shallow-water environm1ent", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 85, No.3., pp 1158-1166, 1989.

[11] A. M. Richardson and L. W. Nolte, “A *posteriori* probability source localization with array tilt uncertainty", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 92, No.3., pp 1578-1582, 1992.

[12] M. B. Porter, R. L. Dicus, and R. G. Fizell, “Simulations of Matched-Field Processing in a Deep-Water Pacific Environment", IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 12, No.1., pp 173-181, 1987.

[13] Feuillade, C., D.R. DelBalzo, and M.M.Rowe, “Environmental mismatch in shallow water matchedd field processing : Geoacoustic parameter variability", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 85, No.6., pp 2354-2364, 1989.

[14] E. C. Shang and Y. Y. Wang, “Environmental mismatching effects on source localization processing in mode space", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 89, No.5., pp 2285-2290, 1991.

[15] D. F. Gingras, “Methods for predicting the sensitivity of matched-field processors to mismatch", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 85, No.5., pp 1940-1949, 1989.

[16] J. R. Daugherty and J. F. Lynch, “Surface wave, internal wave, and source motion effects on matched field processing in shallow water waveguide", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 87, No.6., pp 2503-2526, 1989.

[17] Hee Chun Song, “Performance bounds for passively locating a moving source of a known frequency in oceanic waveguide using a vertical array", IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 18, No.3., pp 189-198, 1993.

[18] Hee Chun Song and A.B. Baggeroer, “The resolution of modal doppler shifts in a dispersive oceanic waveguide", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 88, No.1, pp 268-282, 1990.

[19] Gingras, D.F, and Gerstoft, P. “Inversion for geometric and geoacoustic parameters in shallow water : Experimental results", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 97, No.6., pp 3589-3598, 1995.

[20] Jose Unpingco, W. A. Kuperman and W. S. Hodgkiss, Robert Hecht-Nielsen, “Single sensor source tracking and environmental inversion", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 106, No.3, pp 1316-1329, 1999.

[21] Michael D. Collins, Laurie T. Fialkowski, W.A. Kuperman and John S. Perkins, “The multivalued Bartlett processor and source tracking", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, No.1., pp 235-241, 1995.

[22] Cedric A. Zala, John M. Ozard. Michael J. Wilmut, “Efficient estimation of the probability that a source track is examined in a matched-field processing tracking algorithm" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 103, No.1, pp 374-379, 1998.