

工學碩士 學位論文

수중 음향 도파관에서 광대역 음원의
거리추정에 관한 연구

A study on broadband source localization
in ocean acoustic waveguide

指導教授 金 基 萬

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

金 世 榮

本 論 文 을 金 世 榮 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 鄭 智 元 (印)

委 員 : 工 學 碩 士 千 承 容 (印)

委 員 : 工 學 博 士 金 基 萬 (印)

2007年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

金 世 榮

목 차

그림차례.....	ii
표차례.....	iv
Abstract.....	v
제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 수중 음파 전달 모델링.....	4
2.1 수중 음파 전달 특성.....	4
2.2 채널 전달 함수 추정.....	9
제 3 장 배열 불변성 이론에 기반한 음원 거리 추정 기법.....	14
3.1 배열 불변성 이론.....	14
3.2 모의 시뮬레이션 및 결과 분석.....	20
제 4 장 스펙트로그램의 간섭패턴을 이용한 거리추정 기법.....	29
4.1 모드 간섭과 음향 도파관 불변 이론.....	29
4.2 음원의 거리에 따른 간섭 패턴.....	34
4.3 제안된 거리 추정 알고리즘.....	37
4.4 거리 추정 결과 분석.....	40
제 5 장 결 론.....	45
참 고 문 헌.....	47

그림 차례

그림 1-1. 소나 환경	1
그림 2-1. Pekeris 음향 도파관	6
그림 2-2. 전달손실	8
그림 2-3. 광대역 신호의 모델링에 대한 접근법	10
그림 2-4. Pekeris 음향 도파관	11
그림 2-5. (a) 펄스 음원 신호 (b) 30km 거리에서 수신된 신호	13
그림 3-1. 수중음파 전달 환경	14
그림 3-2. 모드의 수신고각과 방위에 대한 좌표	15
그림 3-3. 음원과 수신단 사이의 신호전달 경로	18
그림 3-4. 시뮬레이션 환경	20
그림 3-5. (a) 빔 출력 최대값(b) 빔-시간 강도 패턴에 나타나는 기울기	22
그림 3-6. 음원의 거리 추정치	23
그림 3-7. 거리 추정 오차율	23
그림 3-8. SNR 10dB의 빔-시간 이동선	25
그림 3-9. SNR -10dB의 빔-시간 이동선	25
그림 3-10. 700Hz 신호의 빔-시간 이동선	26
그림 3-11. 부분배열 공간 스무딩 연산	28
그림 3-12. 공간 스무딩 기법을 적용시킨 700Hz 신호의 빔-시간 이동선	28
그림 4-1. 모드 강도 스펙트럼	33
그림 4-2. 센서1 스펙트로그램	35
그림 4-3. 센서2 스펙트로그램	35
그림 4-4. 주파수 변화의 비율 추정	38
그림 4-5. 아폴로니오스의 원	39
그림 4-6. 음원과 센서간의 거리	40
그림 4-7. 음원의 이동 경로	40

그림 4-8. (a) 센서1 스펙트로그램 (b)센서2 스펙트로그램 (c)센서3 스펙트로그램	42
그림 4-9. 음원의 이동경로 추정 결과	43
그림 4-10. 음원과 센서간의 거리 추정 결과	43

표 차례

표 4-1. 거리 추정 오차율	44
------------------------	----

ABSTRACT

In SONAR(Sound Navigation and Ranging), passive localization of sound sources in range and depth are important issues. It has long been known that multi-modal dispersion in a shallow water waveguide degrades the performance of localization by conventional plane-wave beamforming. This is due to the advent of spurious effects unique to the waveguide environment, such as multiple peaks and beam spreading in the beam output. Attempts, on the other hand, have been made to localize sources in ocean waveguides by exploiting multi-modal interference using methods such as matched field processing(MFP). Apart from being computationally expensive, MFP techniques require accurate knowledge of the wave propagation environment. They are susceptible to large systematic errors from mismatch when adequate environmental information is not available.

The range of a source in a ocean waveguide can sometimes also be estimated by the simpler waveguide invariant method, which employs only incoherent processing of acoustic intensity data as a function of range and bandwidth. It is convenient to apply the concept of waveguide invariant β . This has earlier been shown to be useful for explaining interference patterns of broadband signals.

In this thesis we proposed that instantaneous and computationally inexpensive source range estimation method. The proposed method requires neither a priori knowledge of environmental parameters nor multiple modes in the received field. In the proposed method we introduced a concept of the slope of modal interference patterns show that the information of source range. So, we analyzed the single sensor spectrogram

then compare the ratio of between source range and positioned sensors. Then we estimated the trajectory of moving source and demonstrated the results of computer simulation.

This thesis is organized as follows : Section 2 overviews the underwater acoustic propagation model. In Section 3, array invariant source range estimating method is described. In Section 4, the proposed method is described, and simulation results are discussed. Finally Section 5 gives conclusions and future works.

제 1 장 서 론

3면이 바다인 한반도의 특수한 지정학적 위치로 인해 수중 환경에서 표적에서 방사되는 음원의 위치를 탐지하고 환경정보를 얻기 위한 그림 1-1과 같은 음향 탐지 시스템(SONAR)은 매우 중요한 분야이며 오랜 연구가 진행되어 왔다. 모든 음향 탐지 시스템은 수동형 소나(Passive Sonar)와 능동형 소나(Active Sonar)로 나눌 수 있으며 일반적으로 원거리에 위치해 있는 음원을 추정하기 위해서는 수동형 소나가 쓰이고 있다. 수동형 소나는 외부에서 생성된 소리를 단순히 수신하기만 하는 것으로, 이때 음향 신호는 하이드로폰이라 불리는 수중 수신기를 통하여 수신하게 되며, 음원으로부터 단방향 주행 시간만을 다루게 된다.

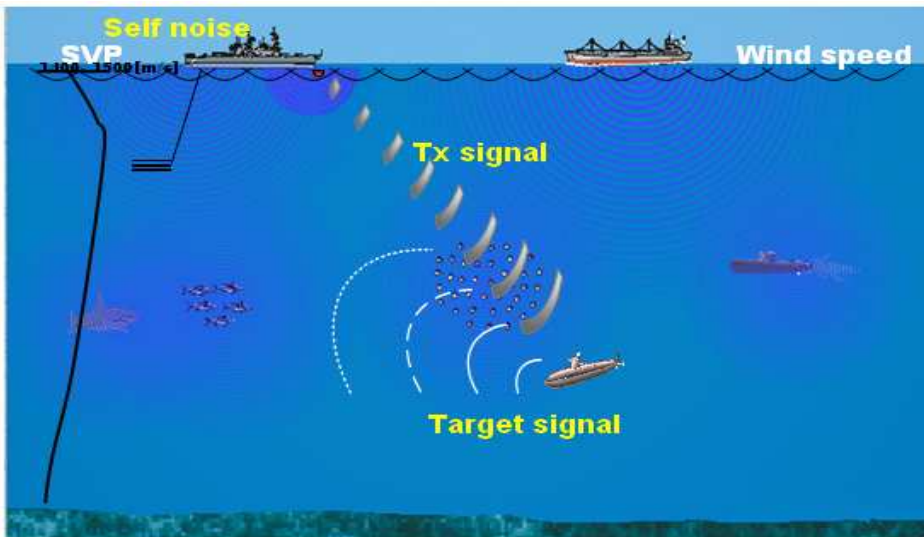


그림 1-1. 소나 환경

Fig. 1-1. SONAR environment

공기 중과는 달리 환경영향이 지배적인 수중에서 수동형 소나 운용시 시공간적으로 변하는 수온 및 해류 등 환경변수의 영향을 감소시키고 정확히 음원의 위치를 추정하는 것이 가장 중요한 문제이다. 특히 한반도 인근은 수심 200m이하의 천해환경으로 음파가 원거리에 전파할 때, 다중경로 현상으로 인한 신호의 감쇠가 일어나고, 속도가 빠르고 강한 간섭표적으로 인하여 신호단편 수가 제한되어 표적을 탐지하기가 더욱 어려운 환경이다. 이렇게 복잡한 환경하에서 효율적인 소나의 운용을 위한 새로운 개념과 소나 신호처리 기법에 대한 연구가 가속화 되고 있으며 특히, 수중에서 전달되는 음파전달 특성을 이해하고 직접 신호처리에 적용하여 탐지 성능을 높이고자 하는 시도들이 이루어 지고 있다[2].

음원의 위치 추정 기법 중 가장 잘 알려진 정합장 처리(Matched Field Processing)기법은 음파 전달 모델로부터 계산된 replica와 실제 수신된 신호 사이의 상관 관계를 구하여 음원을 탐지하는 기법이다. 천해 음향 도파관 환경에서는 다중 모드간의 분산 현상으로 인해서 일반적인 평면파 빔형성 기법에 의한 음원의 방위각 추정성능은 저하된다. 이에 비해서 정합장 처리 기법은 음파 전달 모델을 이용하여 다중 모드의 분산을 고려하기 때문에 적절한 방위각을 추정한다. 그러나 정합장 처리기법은 많은 계산량이 요구되며, 음파 전달 환경에 대한 정확한 정보가 추정되어야 한다. 수중 환경에 대한 사전정보가 정확하지 않을 경우 오정합(Mismatch) 문제가 발생하여 성능에 큰 저하가 생기는 단점이 있다.

서로 다른 모드간의 간섭패턴이 거리-주파수 영역에서 일정한 기울기로 나타나며 이러한 기울기가 모드간의 군속도의 차와 위상속도의 차의 비로 설명되는 음향 도파관 불변이론(Waveguide-Invariant theory)을 적용시키면 더욱 간단하게 천해 음향 도파관 환경에서 음원의 위치를 추정 할 수 있다. 하지만, 해양환경의 변화에 따라 현저하게 달라지는 음향 도파관 불변 파라메타에 대한 정확한 추정이 요구되며 다중 모드간의 간섭패턴을 나타내기 위해서는 많은 수의 도파관 모드에 대한 정보가 필요하다.

본 논문에서는 적은 계산량으로 환경 변수와 수신 음장의 다중 모드에 대한 사전정보 없이 간단하고 즉각적인 수중 광대역 음원의 거리 추정기법에 대한 연구를 수행하였다. 주파수에 따른 배열 불변성(Array Invariant) 이론에 기반한 거리추정 성능을 모의 시뮬레이션을 통하여 분석하였고, 고주파 신호의 다중경로 현상을 억제하고자 공간 스무딩 기법을 적용하였다. 또한, 음향 스펙트로그램에 나타나는 모드의 간섭 패턴을 분석하고 세개의 센서를 사용하여 음향 도파관 불변 파라메타의 영향을 상쇄시키는 개념을 도입하여 기하학적으로 음원의 궤적을 추정 할 수 있는 방법을 제안하였고, 모의 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. [3-7].

본 논문의 제 2 장에서는 수중에서 음파 전달 모델에 관하여 설명하였다. 제 3 장에서는 배열 불변성 이론에 기반한 거리 추정 성능을 분석하였고, 제 4 장에서는 제안된 스펙트로그램의 간섭패턴을 이용한 거리추정 방법에 대하여 설명하였다. 제 5 장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장 수중 음파 전달 모델링

2.1 수중 음파 전달 특성

수중에서 음파의 탐지 및 추적을 위해서는 음파에 대한 물리적인 이해와 이를 바탕으로 컴퓨터 등을 통한 수치적 해석이 필수적이다. 특히 음파의 전달 모델은 임의의 환경변수를 가지는 수중내의 음장을 추정 할 수 있는 중요한 요소로써 수치이론 및 연산속도의 발달과 더불어 복잡한 수중 환경을 보다 정확히 고려할 수 있는 수치 모델이 지속적으로 연구되어 왔다[15].

일반적으로 천해환경은 수심에 따라 임의의 음속구조를 가지는 해수면과 해저면 두개의 유체면으로 이루어진 음향 도파관(Acoustic Waveguide)으로 모델화 시킬 수 있다. 이러한 수중 음향 도파관에서 음파가 전달할 경우 음속 구조를 비롯한 수심, 밀도, 해저면 특성 등의 여러 환경변수에 따라 음압 및 전달손실이 달라지므로 주어진 환경에 적합한 음향 모델의 선택과 환경변수에 대한 자료가 필요하다. 원거리 음파 전달 특성을 나타낼 경우 정상 모드(Normal mode) 이론은 효율적인 방법으로 잘 알려져 있다. 정상 모드 이론은 수평 음향 도파관내의 점음원에서 발생하는 거리와 수심에 따른 파동 방정식의 해를 수심 방향으로 고유한 진동 특성을 나타내는 정상 모드 방정식들의 선형 결합으로 나타내는 방법이다[17].

음원으로부터 전방향으로 음파가 방사될 경우 임의의 깊이와 거리를

가지는 수신센서에서의 음장은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$p(r, z) \approx \frac{e^{-j\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} \sum_{m=1}^M Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{jk_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (2-1)$$

$p(r, z)$ 는 수신센서의 깊이 z 와 거리 r 의 함수로 표현되는 음압을 나타내고 $\rho(z_s)$ 는 밀도를 의미한다. $Z_m(z_s)$ 는 음원의 깊이 z_s 에서의 m 번째 모드 함수를 나타내고 $Z_m(z)$ 는 수신센서의 깊이 z 에서의 m 번째 모드 함수를 나타낸다. k_m 은 m 번째 모드의 파수이다. 거리와 깊이에 따른 전달 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TL(r, z) = -20 \log \left| \frac{p(r, z)}{p_0(r=1)} \right|, \quad p_0(r) = \frac{e^{ik_0 r}}{4\pi r} \quad (2-2)$$

모드 함수의 해에 해당하는 각각의 정상 모드에는 음향 도파관의 성질에 의해 결정되는 모드 차단 주파수(Cutoff-frequency)가 존재하는데 차수가 높은 모드일수록 보다 높은 주파수에서 차단되고 차수가 낮은 모드일수록 낮은 주파수에서 차단되는 성질이 있다. 음향 도파관 내에서 차단되지 않고 전달되는 모드의 수는 음원의 주파수와 밀접한 관련이 있는데 음원의 주파수가 높을수록 음장에 기여하는 모드 수는 많아지고 음원의 주파수가 낮을수록 모드수는

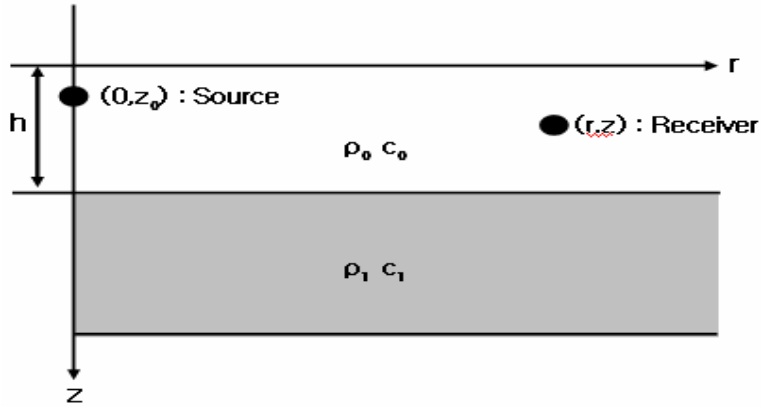


그림 2-1 Pekeris 음향 도파관

Fig. 2-1. Pekeris acoustic waveguide

감소한다. 따라서 저주파 대역을 가지는 음파의 전달 특성을 정상 모드 이론으로 설명하면 차수가 낮은 몇 개의 모드만으로도 음장을 설명 할 수 있는 장점이 있다[10].

해양을 수중의 밀도와 음속은 균일하고 해수면에서는 압력이 소멸하고 해저면은 음속 밀도가 균일하면서 수중보다 큰 반 무한 유체면으로 가정하는 그림 2-1과 같은 Pekeris 도파관이라 할 때, 음향 도파관 즉, 음파 전달환경의 특성에 의해 결정되는 모드 차단 주파수 f_n 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{(n-1/2)c_0}{2h\sqrt{1-(c_0/c_1)^2}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2-3)$$

여기서 h 는 수심, c_0 는 수중 음속, c_1 은 해저면 음속을 나타낸다. 수심과 수중

음속을 알고 있는 경우에 모드 차단 주파수는 해저면 음속 c_1 에 의해 결정된다. 또한, 차단 주파수는 해저면의 밀도 ρ_1 및 감쇠계수와는 관계가 없는 요소임을 알 수 있다. 결국, 임의의 주파수를 가지는 음파가 전파할 경우 모드 차단 주파수에 의해서 기여하는 모드의 수가 정해지게 되고 이를 이용해 전달 손실을 나타내게 되면 다중 모드간의 간섭으로 인하여 피크와 골이 반복되는 형태를 가지게 된다. 음파의 주파수에 기여하는 모드의 수가 증가할수록 피크와 골이 세밀한 전달손실의 형태가 나타내며 이는 그림 2-2에 나와있다. 그림 2-2는 수심은 100m이고 음원의 깊이와 수신 센서의 깊이를 각각 25m, 50m로 하였고, 음원의 주파수가 100Hz일 때, 음원과 센서간의 거리에 따른 전달 손실을 보여주고 있다. 앞에서 언급한 것처럼 기여하는 모드의 수가 증가 할수록 피크와 골의 형태가 세밀해지는 결과를 볼 수 있으며 이러한 모드간의 간섭 패턴은 수중 음파 전달 특성을 이해하는데 있어 매우 중요한 요소이다.

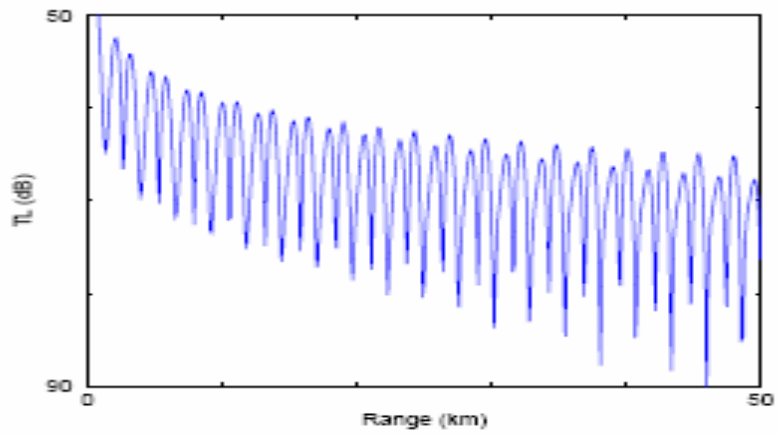
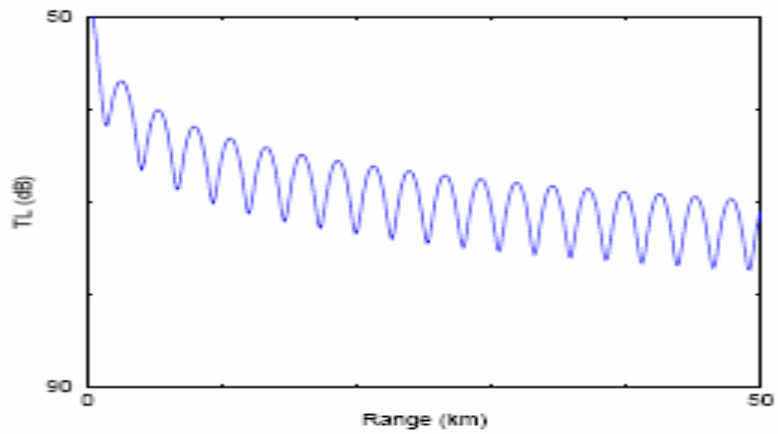
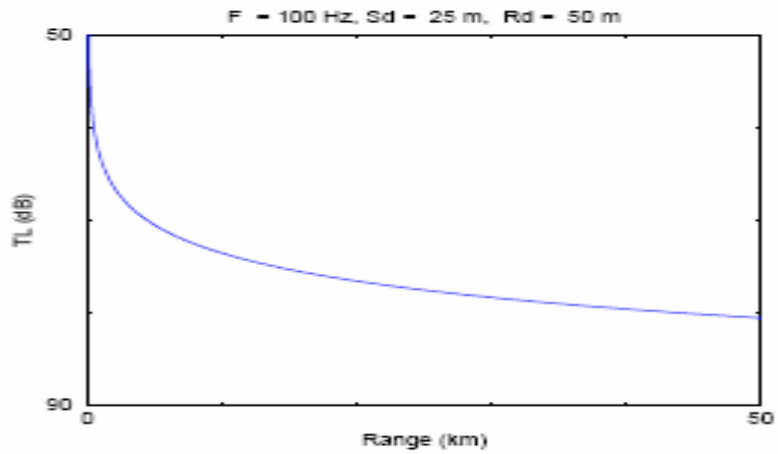


그림 2-2. 전달손실 (a) 1 mode (b) 2 mode (c) 3 mode

Fig. 2-2. Transmission loss (a) 1 mode (b) 2 mode (c) 3 mode

2.2 채널 전달 함수 추정

수중에서 음원이 방사될 경우 센서에 수신되는 신호는 원래의 음원에 비해 시간축에서 그 퍼짐이 큰 잔향음 형태이다. 간단히 보면 음원이 도파관이라는 필터를 통과 할 때 나타나는 선형 응답 특성이라 볼 수 있으며, 음원과 수신 센서 사이의 채널 전달 특성을 추정 하면 임의의 음원과 컨볼루션을 연산을 통해 수신 신호를 모의할 수 있다. 앞장에서 언급한 수중 음향 도파관 내의 음파 전달 특성을 바탕으로 광대역 신호가 전파할 경우 음원과 임의의 위치에 존재 하는 센서 사이의 전달 함수를 추정하고 음원의 거리 추정 시뮬레이션에 적용 하고자 한다. 특히, 음원이 수심에 비해 충분히 먼 거리에 있는 센서로 전달될 경우, 해수면 및 해저면에 의한 다중경로 현상과 광대역 신호의 도파관내 분산 특성을 정확히 반영 할 수 있는 전달 함수의 추정이 필요하다.

일반적으로 수중 채널 전달 함수를 추정하는 방법에는 크게 두가지로 나뉘는데 첫 번째는 주파수 영역에서 음파전달 모델을 통해 구한 주파수별 응답 특성과 음원 신호의 스펙트럼을 곱한 후 이를 역푸리에 변환해서 시간영역의 잔향음으로 나타내는 방법으로 계산상의 수고를 절감할 수 있으며 자주 쓰이는 방법이다. 다른 하나는 시간영역에서 바로 채널 특성을 추정하는 방법이 있는데 이 방법은 음파 전달 모델 자체에 대한 재해석이 필요 하므로 잘 사용되지 않는다. 그림 2-3은 광대역 음원의 채널 추정 기법에 대한 개요도를 나타낸 것이다.

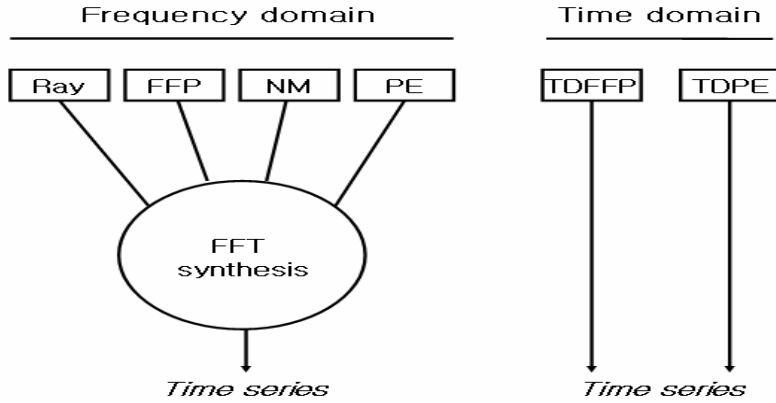


그림 2-3. 광대역 신호의 모델링에 대한 접근법

Fig. 2-3. Schematic of approaches to broadband modeling

본 논문에서는 앞장에서 언급한 정상모드 음파 전달 모델을 이용하여 먼저 모의하고자 하는 음원의 관심 주파수 대역에 대하여 주파수 영역에서 음압 레벨을 구한 후 이를 푸리에 역변환을 통해 시간영역의 임펄스 응답으로 나타내는 방법을 사용하였다. 이를 간단히 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$p(r, z, t) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{\pi} \int_0^{w_{\max}} S(w) p(r, z, w) e^{-jw t} dw \right\} \quad (2-4)$$

w_{\max} 는 음원의 최대 관심 주파수를 의미하고 $S(w)$ 는 음원 신호의 스펙트럼을 나타낸다. 위의 방법을 이용한 채널 전달 함수 추정의 결과를 분석하기 위해 그림 2-4와 같은 이상적인 Pekeris 음향 도파관 환경에서 간단한 음원 수신 신호를 모의 하였다. 50Hz의 대역을 가지는 펄스 신호가 음원으로 사용되었으며 이 음원이 주어진 환경에서 전파할 경우 수신 센서의 위치에 따른 채널

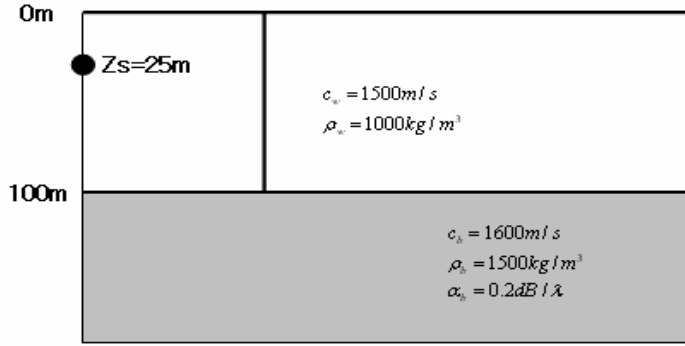


그림 2-4. Pekeris 음향 도파관

Fig. 2-4. Schematic of Pekeris waveguide

전달 함수를 추정하고 도파관 내의 분산 특성에 대하여 분석하였다.

펄스 음원의 중심 주파수 f_c 는 50Hz이며, 다음과 같이 표현한다.

$$S(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin w_c t (1 - \cos \frac{1}{4} w_c t) & \text{for } 0 < t < 4 / f_c \\ 0 & \end{cases} \quad (2-5)$$

음원의 중심주파수와 대역폭을 고려하면 전달 함수의 최대 관심 주파수는 75Hz이고, 식 (2-3)을 이용해 모드의 개수와 차단 주파수를 구하면 75Hz이내에 전파하는 모드의 개수는 3개이다. 10.8Hz의 차단주파수에서 1번 모드가 발생하고 32.3Hz, 53.9Hz의 차단 주파수에서 각각 2번 모드와 3번 모드가 발생하였다. KRAKEN 정상 모드 프로그램을 이용해서 모드의 파수 및 시간에 따른 전파 속도인 군속도를 구한 결과 저차모드인 1번 모드의 군속도가 1495.5m/s로 가장 빨랐고, 상대적으로 고차모드인 3번 모드의 군속도가 1446.5m/s로 가장 느리게 나왔다. 수신 센서가 음원으로부터 30km의 거리에

위치해 있다고 가정 할 때, 신호 전달 시간을 구해보면 약 20.06s~20.74s구간에 걸쳐 수신 신호가 나타나게 되며 이는 모드 분산 특성에 의해 원래 음원과는 다른 잔향음 형태로 표현된다. 그림 2-5의 (a)는 식 (2-5)의 펄스 음원 신호를 나타내며, (b)는 30km의 거리에서 수신된 신호모의에 대한 결과를 보여주고 있다. 즉, 원래 음원 신호와 추정된 채널 임펄스 응답을 시간영역에서 컨볼루션 연산한 결과이다. (b)를 살펴보면 모드의 군속도부터 전달시간을 구한 결과와 일치하는 전달 특성을 보여주고 있으며 약 0.08초인 음원의 신호길이가 0.7초의 길이로 분산된 것을 알 수 있다. 0.15초 부근에 가장 큰 에너지를 가지는 1번 모드가 영향을 끼쳤고, 0.45초와 0.75초 부근에서 2번 모드와 3번 모드의 영향이 시작된 것을 확인 할 수 있다. 고차 모드로 갈수록 해수면과 해저면의 다중 경로 영향을 많이 받아 전달 속도가 느려지고 음원의 에너지도 많이 손실되는 결과를 가져온다.

음파 전달 모델을 기반으로 푸리에 역변환을 통한 채널 추정 기법은 위에서와 같이 도파관의 모드 분산 특성을 정확히 표현함을 확인 할 수 있었고, 다음장의 광대역 음원 위치 추정 시뮬레이션에 적용하고 위치 추적 성능을 분석하였다.

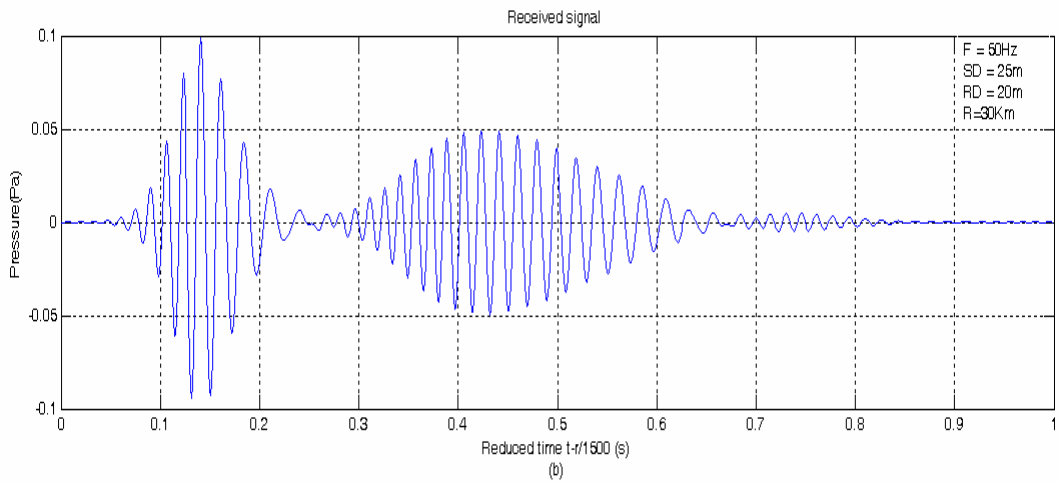
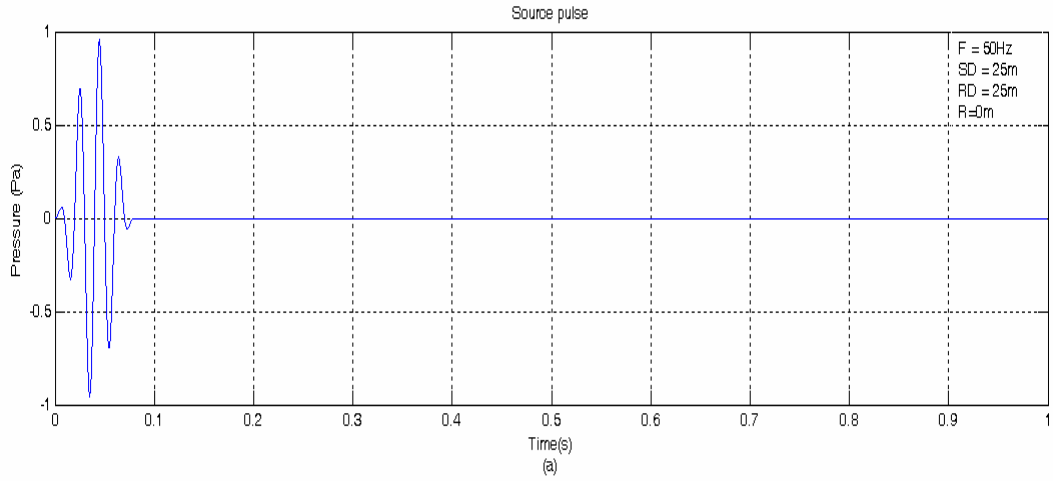


그림 2-5. (a) 펄스 음원 신호 (b) 30km 거리에서 수신된 신호

Fig. 2-5. (a) Source pulse signal (b) The received signal at a distance of 30km

제 3 장 배열 불변성 이론에 기반한 음원 거리 추정 기법

3.1 배열 불변성 이론

그림 3-1과 같은 수중환경에서 수평 선배열 센서에 신호가 수신된다고 가정할 때, n번째 모드가 수신되는 시간 t에서 빔 형성기 출력의 최대값에 대한 방위 $\tilde{s}_n(t)$ 는 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\tilde{s}_n(t) = \sin \tilde{\phi}_n(t) \sin \theta_0 \tag{3-1}$$

여기서 $\tilde{\phi}_n(t)$ 는 임의의 시간 t에서 센서에 수신되는 n번째 모드의 수신 고각을 의미하고, θ_0 는 선배열 센서 중심과 음원사이의 방위각을 의미하며 이는 그림 3-2에 나와 있다. n번째 모드가 수신되는 시간 t는 모드의 군속도(Group-velocity)와 음원과의 거리의 비로써 다음과 같이 표현 할 수 있다.

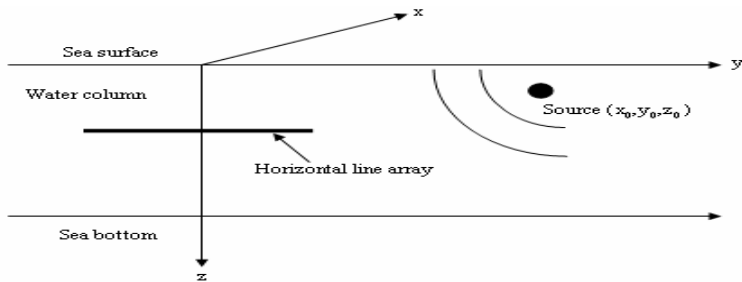


그림 3-1. 수중음파 전달 환경

Fig. 3-1. Underwater acoustic propagation environment.

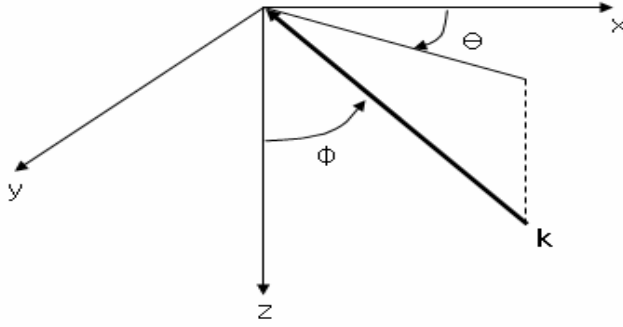


그림 3-2. 모드의 수신고각과 방위에 대한 좌표

Fig. 3-2. The coordinate of modal elevation angle and bearing.

$$t = \frac{r_0}{v_{gn}(\tilde{f})} \quad (3-2)$$

r_0 는 음원과 배열센서 중심간의 거리를 나타내며, $v_{gn}(\tilde{f})$ 는 임의의 주파수 \tilde{f} 에서 n번째 모드의 군속도를 의미한다. 식 (3-1)에서 주어진 빔형성기 출력의 최대값의 방위 $\tilde{s}_n(t)$ 로부터 음원의 거리 정보를 추정 할 수 있는데 다음과 같이 표현되는 모드의 군속도와 수신 고각의 관계를 이용한다.

$$[v_{gn}]^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \sqrt{k^2 - k_{zn}^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{dk}{df} \frac{k}{k_m} = [c \sin \phi_n]^{-1} \quad (3-3)$$

k_{zn} 과 k_m 은 각각 n번째 모드의 수직파수와 수평파수를 의미한다. c 는 수중 음파 전달 속도이다. 식 (3-2)와 식 (3-3)을 이용하여 식 (3-1)에 대입하게 되면 아래와 같다.

$$\tilde{s}_n(t) = \frac{r_0}{ct} \sin \theta_0 \quad (3-4)$$

식 (3-4)를 통해서 방위각과 시간의 2차원 평면으로 나타나는 빔형성기 출력의 최대값을 구하게 되면 음원의 거리를 추정 할 수 있음을 알 수 있다. 만약 음원의 주파수 대역이 충분히 크다면 빔형성기 출력의 시간에 따른 강도 패턴은 연속적인 선을 이루게 되고 일정한 기울기를 가지게 되는데 이 기울기를 수평 선배열의 불변 파라메타라 정의하며 식 (3-4)의 양변을 시간 t에 대해 미분함으로써 나타낼 수 있다.

$$\chi_h \equiv \frac{d \tilde{s}^{-1}(t)}{dt} = \frac{c}{r_0 \sin \theta_0} \quad (3-5)$$

식 (3-5)를 살펴보면 이동하지 않고 방위가 고정된 음원에 대해서 배열 불변 파라메타 χ_h 는 음원의 주파수, 모드 번호, 음원 및 수신 선배열의 깊이, 음향 도파관의 수심 등 여러 가지 환경 정보들에 대해 독립적임을 알 수 있다. 즉, 수중환경에 대한 정확한 사전정보가 없이도 적은 계산량으로 음원의 거리추정이 가능한 것이다. 음원의 거리는 다음과 같이 간단히 추정 할 수 있다.

$$\tilde{r}_0 = \frac{c}{\tilde{\chi}_h \sin \tilde{\theta}_0} \quad (3-6)$$

\tilde{r}_0 는 음원의 거리 추정치를 의미하고, $\tilde{\chi}_h$ 와 $\tilde{\theta}_0$ 는 각각 배열 불변 파라메타 및 음원의 방위각의 추정치를 나타낸다. 빔형성기 출력에 나타나는 시간에 따른 빔-시간 강도 패턴으로부터 식 (3-6)의 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_h$ 와 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 을 직접 추출해 낼 수 있고, 이는 기존의 정합장 처리 기법이나 음향도파관 불변 파라메타를 이용한 위치 추정법에 비해 불확실성이 떨어지는 효과를 가진다. 식 (3-6)은 음향 도파관의 깊이에 따라 음속구조가 일정한 이상적인 경우의 거리 추정식을 나타내며, 만약 음속구조가 깊이에 따라 변한다면 음원의 거리 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{r}_0 \cong \frac{c(z)}{\tilde{\chi}_h \sin \tilde{\theta}_0} \quad (3-7)$$

식 (3-7) 에 나타나는 깊이에 따른 음속구조의 변화는 음원의 거리 추정시 심각한 성능 저하를 야기하지는 않는다. 전형적인 천해환경에서 음속구조의 변화의 범위는 1440~1540m/s이며 만약, 음속구조를 정확히 측정하지 못한 경우 일반적으로 =1490m/s로 가정하여 거리를 추정하게 된다. 이때의 거리 추정 오차는 3% 이내이다. 식 (3-6)을 이용하여 정확한 음원의 위치를 추정하기 위해서는 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 와 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_h$ 를 정확히 구하는 것이 중요하다. 첫 번째 실제 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 을 추정하는 방법은 빔-시간 강도

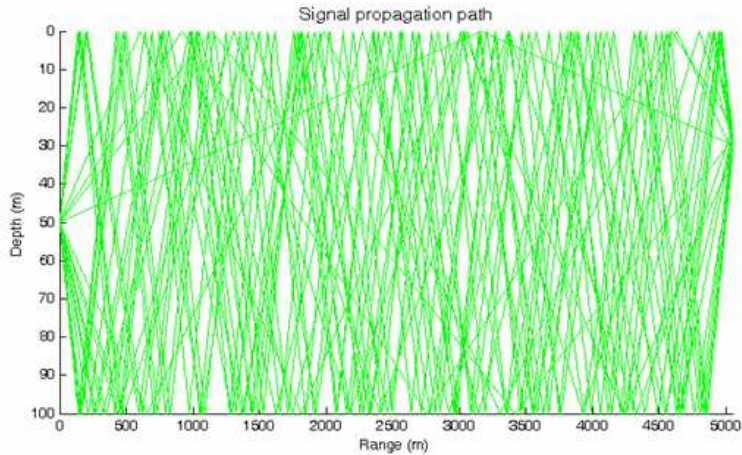


그림 3-3. 음원과 수신단 사이의 신호전달 경로

Fig. 3-3. Signal propagation path between source and receiver

패턴상에서 시간에 따라 나타나는 피크치중 최대값을 가지는 각을 음원의 방위 각이라 추정하는 것이다. 즉, 모드의 차수가 고차 모드로 갈수록 수신 고각은 음원의 방위각으로부터 점점 증가하고 늦게 수신되며 신호의 감쇠가 많이 일어난다. 반면에 가장 빨리 수신되는 저차모드의 신호성분에서 감쇠가 가장 작게 되어 빔-시간 강도 패턴에서 최대값을 가지게 된다. 천해 환경에서 음원과 수신단간의 신호전달 경로를 그림 3-3에 나타내었다. 저차 모드의 경우 감쇠가 적게 일어나고 전파 시간이 빠르며 고차 모드의 경우 감쇠 및 반사가 많이 일어나고 전파 시간이 느림을 확인 할 수 있다.

두 번째 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_h$ 를 구하는 방법은 빔-시간 강도 데이터에 최소자승 추정법을 적용시켜 1차 함수의 기울기를 구하는 것이다. 임의의 시간 t 에서의 빔 최대치와 구간 T 에 걸쳐 나타나는 일차 함수는 다음과 같이 표현

된다.

$$s_{\max}(t) = \arg \max_s I_{bt}(s, t) \quad (3-8)$$

$$\hat{s}_l(t) = \hat{\chi}_l t + d_l \quad (3-9)$$

$I_{bt}(s, t)$ 는 시간 t 와 방위각 s 에 대한 2차원 빔-시간 강도 패턴을 나타내
고, $\hat{s}_l(t)$ 는 배열 불변 파라메타 $\hat{\chi}_l$ 를 기울기로 가지는 1차 함수이다. 최소자
승 추정법을 통해 기울기를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\hat{\chi}_l \ d_l]^T &= (T^T T)^{-1} T^T S_1 \\ S_1 &= [s_{\max}(t_1), s_{\max}(t_2), \dots, s_{\max}(t_N)]^T \\ T &= [(t_1, t_2, \dots, t_N)^T \ \overset{\Rightarrow}{\mathbf{1}}]^T, \quad t_j = t_1 + (j-1)\Delta t_s \\ t_s &= \text{sampling interval} \\ \overset{\Rightarrow}{\mathbf{1}} &= [1, 1, \dots, 1] \end{aligned} \quad (3-10)$$

3.2 모의 시뮬레이션 및 결과 분석

수중음원의 위치를 간단히 추정할 수 있는 배열 불변 파라메타를 이용한 방법의 성능을 분석하기 위해 그림 3-4와 같은 변수를 가지는 환경에서 모의 시뮬레이션이 수행되었다. 실험환경은 이상적인 천해 환경인 Pekeris 음향 도파관 내의 수평 선배열 센서를 통해 신호를 수신하고 음향 도파관 내의 깊이에 따른 음속의 변화는 1500m/s로 일정하다고 가정한다. 음원과 수신 선배열 센서의 깊이는 각각 50m, 30m로 정했고, 선배열 중심에서 음원까지의 거리는 5km, 방위각은 60°로 하였다.

음원은 50Hz의 대역폭을 가지는 중심 주파수 100Hz~700Hz의 충격성 신호가 사용되었다. 선배열 센서의 길이는 96m로 각 센서들은 등 간격으로 배치되고 Hanning-window로 taper 되었다. 모의 수신 음장은 Kraken normal-mode 모델을 사용하여 합성하였다.

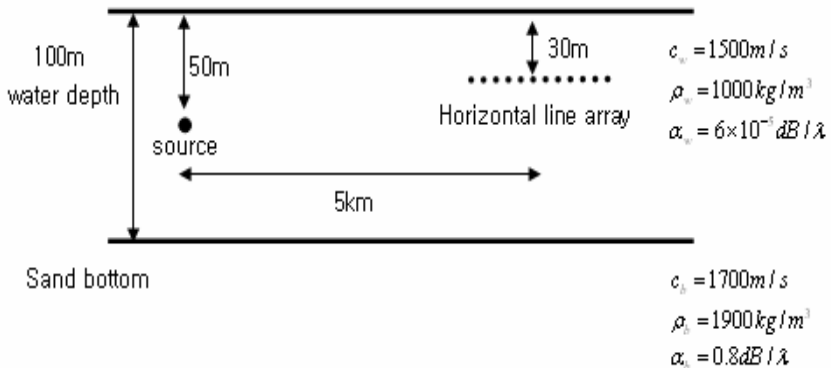
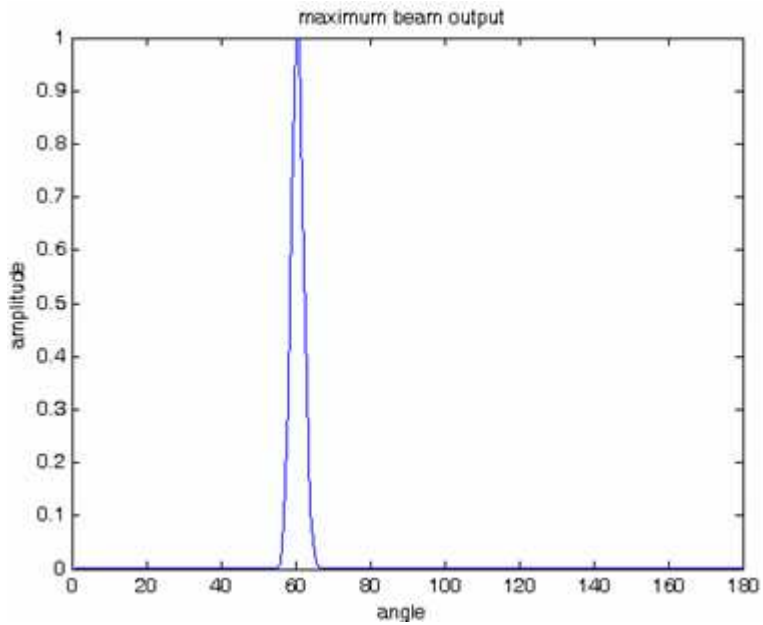


그림 3-4. 시뮬레이션 환경

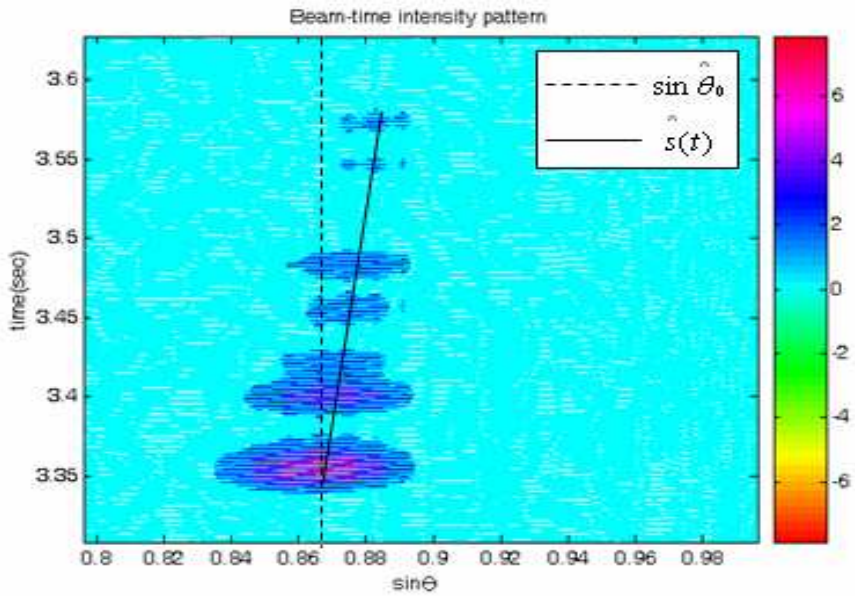
Fig. 3-4. Simulation environment

식 (3-6)으로부터 음원의 거리를 추정하기 위해 먼저 빔-시간 강도 패턴을 구하고 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 와 배열불변 파라메타 $\tilde{\chi}_h$ 를 추출해야 하는데 이는 그림 3-5에서 보여진다. 그림 3-5는 중심주파수 400Hz의 음원에 대한 빔형성기 출력의 최대값과 빔-시간 강도 패턴에 나타나는 기울기에 대한 한 예를 나타낸다. 그림 3-5(a)에서 알 수 있듯이 음원의 방위각을 60°로 정확히 추정하고 있으며 그림 3-5(b)와 같이 beam-time 패턴상에 기울기로 나타나는 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_h$ 를 확인할 수 있다. 이때의 기울기 $\tilde{\chi}_h$ 는 약 -0.1387의 값을 가지며 식 (3-6)을 이용하여 거리를 추정해보면 약 5244m, 오차율은 4.86%의 결과를 가진다.

음원의 중심주파수 및 SNR에 따른 거리 추정 성능을 분석하기 위해 50Hz의 대역폭을 가지는 100Hz~700Hz의 충격성 음원에 대해서 고리 추정 시뮬레이션을 수행하였다. SNR은 -10dB~30dB로 가정하였고 결과는 거리 추정치와 오차율로 나타내었다. 그림 3-6과 3-7은 각각 SNR 및 신호 주파수에 따른 거리 추정치와 오차율을 보여준다. 음원의 실제 거리는 5km이며, 그림 3-6의 거리 추정치 결과를 살펴보면 부가잡음이 현저하게 존재하는 SNR -10dB~0dB의 환경에서는 거리 추정을 정확히 못하고 있다. 이에 따라 추정 오차율도 그림 3-7의 결과와 같이 커지게 된다. 신호성분이 부가잡음에 비해 많이 존재하는 SNR이 10dB 이상인 경우의 결과를 살펴보면 100Hz~400Hz의 음원에 대해서는 오차율 20% 이내의 정확한 거리 추정 성능을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 3-5. (a) 빔 출력 최대값

(b) 빔-시간 강도 패턴에 나타나는 기울기

Fig. 3-5. (a) maximum beamforming output.

(b) beam-time intensity migration line.

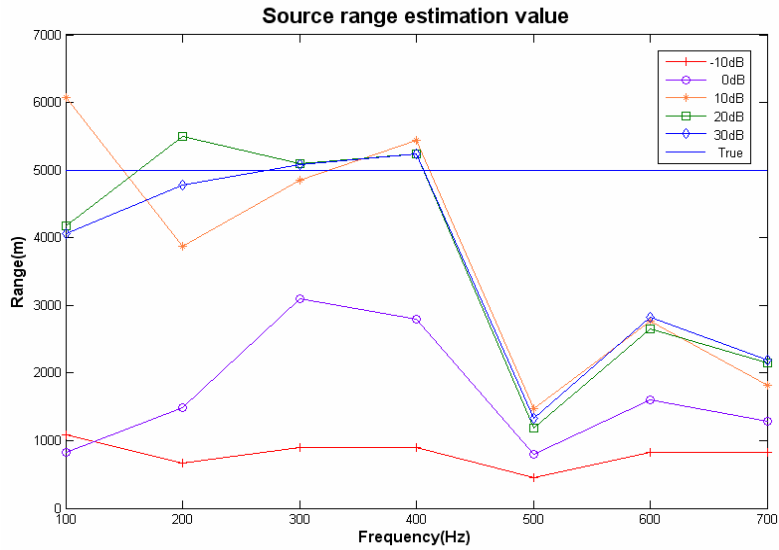


그림 3-6. 음원의 거리 추정치
 Fig. 3-6. Source range estimation value

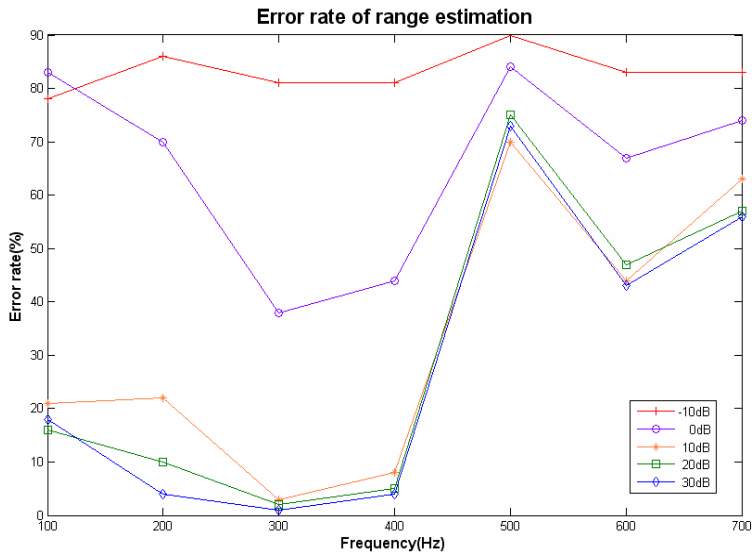


그림 3-7. 거리 추정 오차율
 Fig. 3-7. Error rate of range estimation

특히 300Hz와 400Hz의 주파수 신호에서는 오차율 10%이내의 비교적 정확한 거리 추정을 하고 있음을 알 수 있다. 100Hz~200Hz의 저주파 신호의 경우에는 선배열 센서의 제한된 길이에 의해 상대적으로 성능이 떨어지는 결과를 볼 수 있다. 이는 선배열 센서의 길이를 충분히 길게 할 경우 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만, 500Hz 이상의 고주파 영역의 신호에 대해서는 SNR이 낮을 때와 마찬가지로 오차율이 50%이상되는 결과를 나타내고 있다. 이는 주파수가 높아질수록 고차 모드의 영향과 음파 전달 다중 경로에 의한 스푸어리스 효과로 인해 빔-시간 강도 패턴에서 배열 불변 파라메타 즉, 기울기를 정확히 추정하지 못하였기 때문이다. SNR이 낮을 때 거리 추정 성능이 떨어지는 이유도 부가 잡음의 영향으로 인해 빔-시간 강도 패턴에서 정확한 기울기를 구하지 못하였기 때문이다. 시뮬레이션 수행시 빔 출력 최대 값을 통한 음원의 방위각을 추정하는 과정에서는 높은 SNR 환경뿐만 아니라 낮은 SNR 환경에서도 오차 $\pm 2\%$ 내의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 3-8과 그림 3-9은 400Hz의 중심주파수를 가지는 신호에 대하여 SNR이 10dB인 경우와 -10dB인 경우에서 빔-시간 강도패턴을 최소자승법에 의해 fitting한 결과를 나타내고 있다. 그림 6과 같이 높은 SNR의 경우에는 신호성분의 시간에 따른 강도 패턴이 일정하게 잘 나오는 것을 볼 수 있고 스푸어리스 효과가 일어나지 않기 때문에 정확한 배열 불변 파라메타를 구할 수 있지만 그림 3-9와 같이 낮은 SNR의 환경에서는 신호성분에 의한 빔-시간 강도 패턴뿐만 아니라 잡음 성분으로 인해 정확한 배열 불변 파라메타를 추정 할

수 없게 된다. 이는 그림 3-10의 고주파 700Hz 신호에 대한 빔-시간 강도 패턴에서도 같은 결과를 보여주고 있다.

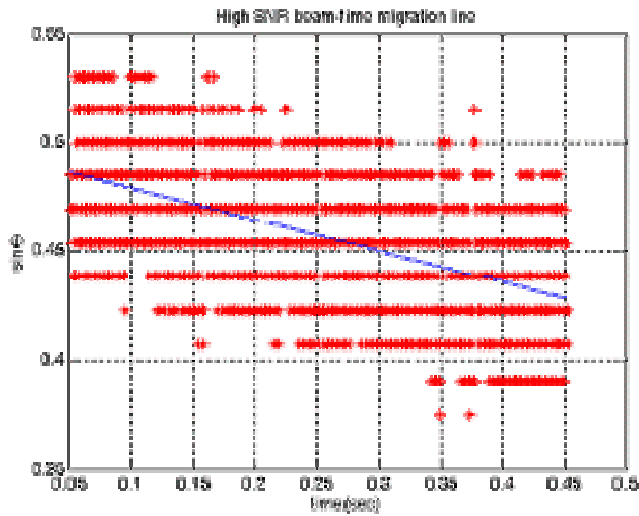


그림 3-8. SNR 10dB의 빔-시간 이동선

Fig. 3-8. SNR 10dB beam-time migration line.

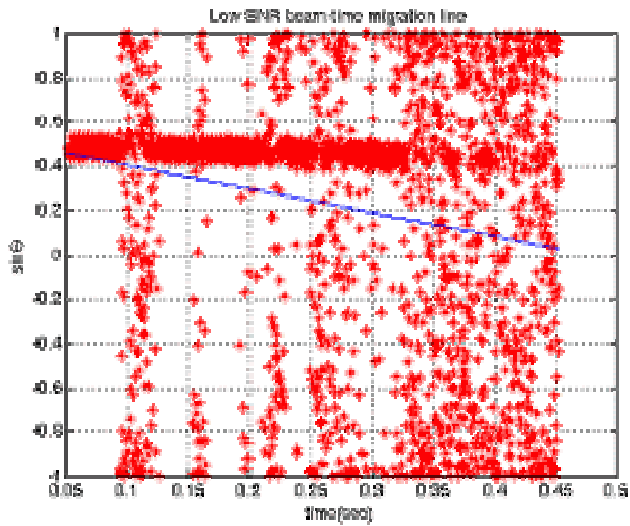


그림 3-9. SNR -10dB의 빔-시간 이동선

Fig. 3-9. SNR -10dB beam-time migration line.

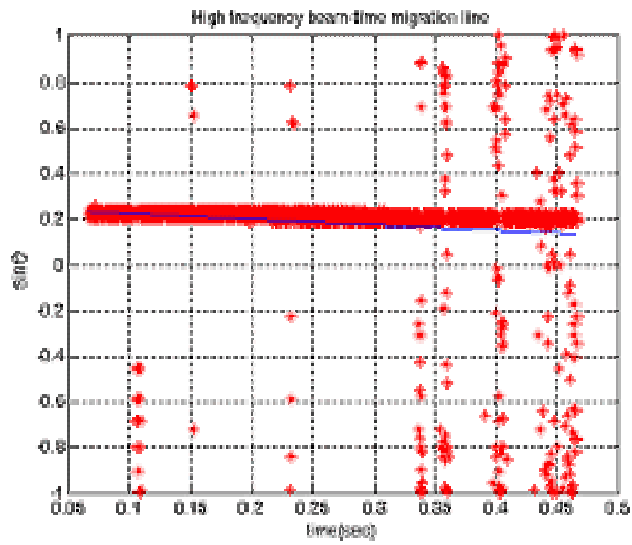


그림 3-10. 700Hz 신호의 빔-시간 이동선

Fig. 3-10. 700Hz Signal beam-time migration line.

다중 경로에 의한 스푸어리스 효과로 인해 주 신호성분의 방향이 아닌 다른 방향에서도 피크치가 검출되므로 최소 자승법을 적용 시켜 배열 불변 파라메타를 구했을때 오차가 나게 되고 결국 거리 추정 성능이 저하되었다. 이를 개선하기 위해 고주파 500Hz~700Hz의 신호에 대해서는 선배열 센서에 부분배열 공간 스무딩 기법을 적용시켜 빔-시간 강도 패턴을 구하였다. 부분배열 공간 스무딩 기법은 그림 3-11과 같이 전체 선배열 센서중 임의의 개수만큼의 센서들에 수신된 신호에 평균을 취하는 방법으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r(1) &= [r_1, r_2, \dots, r_M]^T \\
 n &= M - M_s + 1 \\
 R(k) &= \frac{1}{M_s} \sum_{k=1}^n r(k)
 \end{aligned} \tag{3-11}$$

여기서 M 은 전체 선배열 센서의 개수, M_s 는 부분배열의 개수를 의미하며 본 논문에서는 부분배열의 개수를 8개로 하였다. $R(k)$ 는 k번째 부분배열 센서의 신호에 평균을 취한 값이다. 그림 3-12는 700Hz의 신호에 대하여 공간 스무딩 기법을 적용시킨 빔-시간 강도 패턴의 결과이다. 그림 3-10과 비교해서 스푸어리스 효과가 많이 줄어든 것을 확인 할 수가 있고 거리 추정 결과 오차율을 20%까지 향상 시킬 수 있었다.

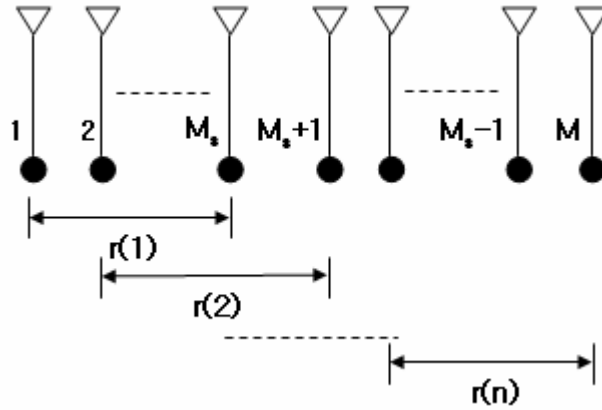


그림 3-11. 부분배열 공간 스무딩 연산

Fig. 3-11. Subarray spatial smoothing operation.

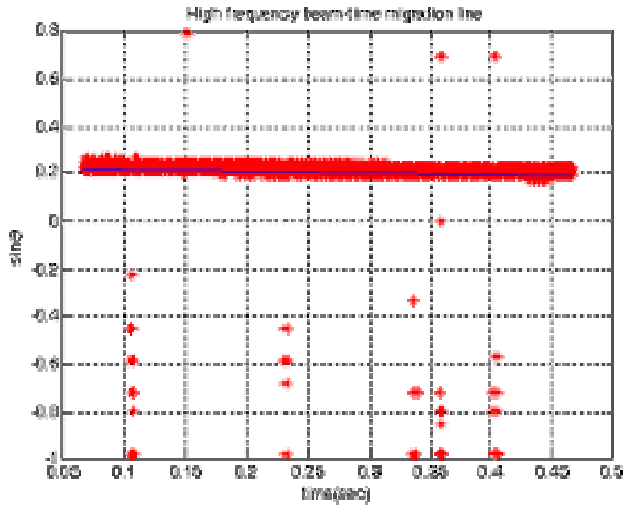


그림 3-12. 공간 스무딩 기법을 적용시킨 700Hz 신호의 빔-시간 이동선

Fig. 3-12. Spatial smoothing method is applied to 700Hz
signal beam-time migration line

제 4 장 스펙트로그램의 간섭패턴을 이용한

거리 추정 기법

4.1 모드 간섭과 음향 도파관 불변 이론

모드의 상호 간섭은 음파가 거리에 따라 전달한다는 것을 의미한다. 예를 들면, 조립모드(constructive mode)와 파괴모드(destructive mode)의 간섭 때문에 거리에 따라 전달 손실이 피크와 골의 형태를 보인다. 일관성 광대역 신호의 경우 에너지가 모드의 군속도별로 전달된다. 심해에서는 저속 군속도를 갖는 저차 모드만으로 구성된 단일 모드군이 형성된다. 반면에, 천해 음향 도파관에서는 반대의 현상이 나타나며 저차 모드가 빠르게 전달되어 고차 모드보다 일찍 도달한다. 모드의 도달과 분산 구조는 시간과 주파수 분석으로부터 볼 수 있다. 시간과 주파수의 함수에서 모드의 강도의 기울기는 음원의 거리에 비례한다.

일반적으로 개별적인 모드의 도달구조는 연속적인 광대역 신호의 도달구조로부터 구분하기 어렵다. 주파수 성분들이 각각 비상관 결합이라 해도 거리의 함수로 나타낸 광대역의 강도 스펙트럼에서는 모드의 간섭구조를 볼 수 있다. 따라서 단일 센서에서 관측한 거리의 함수로 나타낸 스펙트로그램으로부터 강도의 최대와 최소의 줄무늬의 밴드를 볼 수 있다. 단일 센서에 나타나는 줄무

니 형태의 기울기는 빔형성 결과에서도 동일하고, 정상모드의 조립과 파괴모드 간섭과 일치한다. 줄무늬의 기울기는 도파관에서 불변하다고 밝혀져 왔으며, 스칼라 변수인 β 로써 기술하며, 도파관 불변 파라미터라 정의한다. 일정한 음속 구조를 보이는 음향 도파관에서는 줄무늬 형태의 기울기가 모드의 수, 주파수, 음원의 수심과 무관하다.

음향 도파관 불변 파라미터 β 의 유도는 Brekhovskikh 와 Lysanovd의 기술방법을 따랐다. 거리 r 과 수심 h 에 있는 수신센서에 수신되는 음장을 주파수의 함수로써 정상 모드로 나타내기 위하여 식 (2-1)을 간단히 음압으로 표현하면 다음과 같다.

$$P(w) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(-jk_m r) \quad (4-1)$$

여기서 모드 진폭 A_m 와 모드파수 k_m 은 주파수 w 의 함수이다. 음압의 강도는 다음과 같다.

$$I(w) = |P(w)|^2 = \sum_{m=1}^M |A_m|^2 + \sum_{m \neq n}^M A_m^* A_n \exp(j(k_m(w) - k_n(w))r) \quad (4-2)$$

주파수와 거리에 따른 A_m 의 느린 변화를 무시하면 최대 음압의 강도는 다음과 같이 결정된다.

$$\delta I(w) \approx j \sum_{m \neq n}^M A_m^* A_n \exp(j(k_m(w) - k_n(w))r) \delta((k_m(w) - k_n(w))r) = 0 \quad (4-3)$$

식 (4-3)에서 동일 위상(stationary phase) 조건은 다음과 같다.

$$\delta((k_m(w) - k_n(w))r) = \left(\frac{dk_m(w)}{dw} - \frac{dk_n(w)}{dw} \right) r dw + (k_m(w) - k_n(w))r = 0 \quad (4-4)$$

식 (4-4)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dw/w}{dr/r} &= \left(\frac{k_m(w) - k_n(w)}{w} \right) / \left(\frac{dk_m(w)}{dw} - \frac{dk_n(w)}{dw} \right) \\ &= - \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_n} \right) / \left(\frac{1}{u_m} - \frac{1}{u_n} \right) \equiv \beta_{mn} \end{aligned} \quad (4-5)$$

여기서 $v_m = w/k_m(w)$ 은 위상 속도이고 $u_m = dw/dk_m(w)$ 는 m번째 모드의 군 속도이다. 평탄한 해저면 위에 일정한 음속구조를 가지는 Pekeris 도파관에서 음향 도파관 불변 파라미터 β 는 모든 모드에서 같다.

$$\beta_{mn} = \beta = 1 \quad (4-6)$$

만약 음속이 수심에 따라 선형적으로 증가함으로써 굴절 계수의 제곱 특성을 보이는 음향 도파관에서는 다음과 같다.

$$\beta_{mn} = \beta = 3 \quad (4-7)$$

이러한 음향 도파관에서 간섭패턴의 기울기가 식 (4-5)의 왼쪽 항과 같이 표현되기 때문에 β 는 불변하며 모든 주파수와 모든 음원과 수신기의 수심에 대하여 불변이다. 그림 4-1은 수심이 100m이고, 음속 구조가 1500m/s로 일정한 Pekeris 도파관에서 수신기의 수심이 50m일 때, 거리에 따른 음압 강도의 스펙트럼이다. 강도의 줄무늬가 일정한 기울기를 보이고 있음을 볼 수 있으며, 일정한 주파수 폭에서는 인접 기울기가 거의 일치한다고 볼 수 있다. 인접한 두 무늬 사이의 거리는 모드의 순환 거리를 나타낸다.

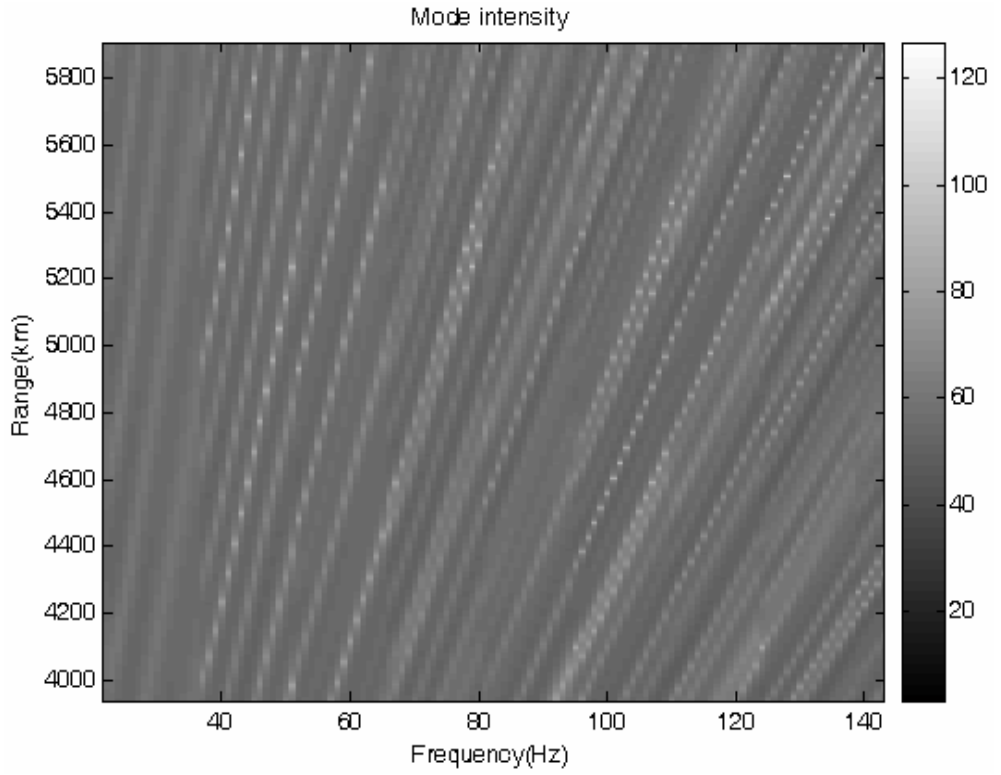


그림 4-1. 모드 강도 스펙트럼

Fig. 4-1. Mode intensity spectrum

4.2 음원의 거리에 따른 간섭 패턴

주파수와 거리의 2차원 평면으로 표현되는 음향 스펙트로그램은 수중 운동체의 이동 정보에 대한 중요한 단서를 제공한다. 식 (4-5)를 간단히 나타내면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$w(t) = w_0(r(t)/r_0)^\beta \quad (4-8)$$

스펙트로그램의 시간에 따라 나타나는 주파수의 기울기가 음원의 거리에 대한 정보와 관련되어 있는 것을 알 수 있고, 거리에 대한 향으로 나타내면 다음과 같다.

$$r(t) = r_0(f(t)/f_0)^{-\beta} \quad (4-9)$$

식 (4-8)과 (4-9)를 통해 주파수의 증가분과 최초 음원의 거리 및 음향 도파관 불변 파라미터를 이용하여 임의의 시간 t 에서 음원의 거리를 추정 할 수 있음을 알 수 있다. 스펙트로그램에 나타나는 주파수의 기울기에 비례하여 기울기가 클수록 거리의 증가분도 커지고 기울기가 작을수록 거리의 증가분도 작아지게 된다. 그림 4-2와 4-3은 각각 시간에 따라 음원과 거리의 비가 서로

다른 2개의 센서에서의 스펙트로그램을 나타낸 것이다.

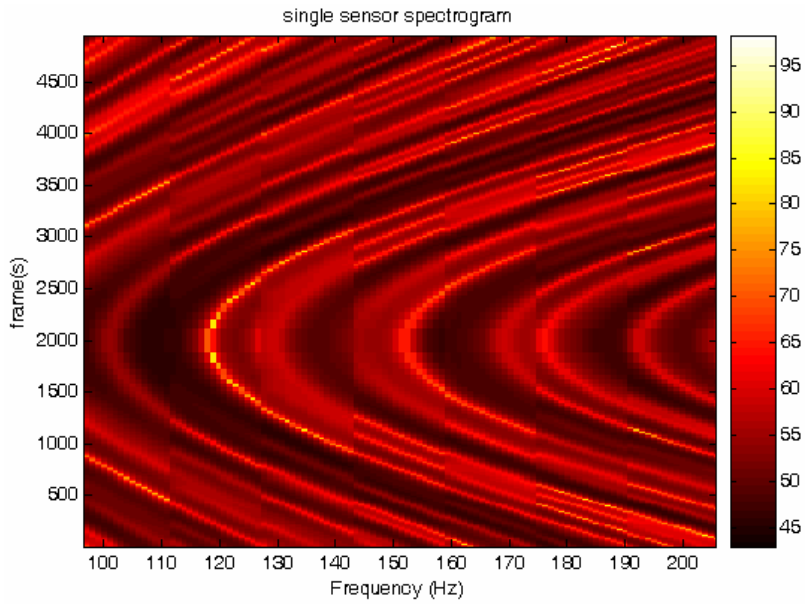


그림 4-2. 센서1 스펙트로그램

Fig. 4-2. Sensor1 spectrogram

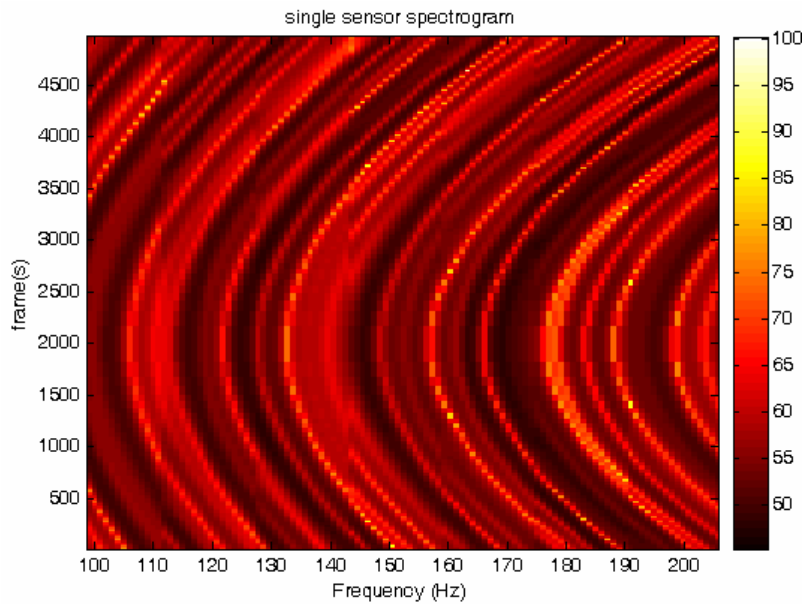


그림 4-3. 센서2 스펙트로그램

Fig. 4-3. Sensor2 Spectrogram

센서 1의 경우 음원과 센서간의 거리의 변화는 최초 2500m부터 점점 1500m까지 가장 가까워졌다가 다시 3300m로 시간에 따라 멀어지는 상황이며, 센서 2의 경우에는 최초 4000m에서 3500m까지 가장 가까워졌다가 다시 4500m로 멀어지고 있는 상황이다. 두경우 모두 시간에 따라 주파수축에서 간섭 패턴이 점점 감소하는 방향으로 기울다가 CPA(Closet Point of Approach)를 기점으로 해서 기울기의 부호가 반대가 되며 주파수축에서 점점 증가하는 방향으로 간섭패턴의 기울기가 변하는 것을 볼 수 있다. 단, 두 그림의 차이는 간섭 패턴 변화의 증가분이 다른 것인데 센서1은 거리의 변화율이 센서2보다 훨씬 크며 식 (4-9)에서도 언급했듯이 거리의 변화율에 비례하여 간섭패턴의 변화도 큰 결과를 나타내고 있다. 결론적으로 센서 스펙트로그램상에 나타나는 간섭 패턴 변화의 정도에 따른 음원이 이동하는 거리의 변화율을 예측 할 수 있으며 이를 통해 음원의 이동 궤적을 추정 하고자 한다.

4.3 제안된 거리 추정 알고리즘

음원의 위치 추정 기법으로 가장 잘 알려진 방법 중 한 가지가 2개의 센서에 수신된 신호간의 TDOA(Time Difference Of Arrival)를 구해서 거리차가 일정한 쌍곡선 함수로 나타낸 후 같은 방법으로 제3의 센서와 TDOA를 구하여 쌍곡선 함수가 서로 만나는 교점을 음원의 위치로 간주하는 TDOA에 기반한 위치 추정법을 들 수 있다. 이와 같은 개념을 앞절에 설명한 스펙트로그램에 적용시켜 마찬가지로 2개 혹은 그 이상의 센서를 이용하여 스펙트로그램에 나타나는 거리의 변화율의 차이를 분석하여 광대역 음원의 거리를 추정 하는 방법을 제안하고자 한다.

일반적으로 선배열 센서를 사용하여 음원의 거리 추정을 할 경우 배열 이득을 충분히 활용 할 수 있다는 장점이 있으나 많은 수의 센서가 필요하며 소나의 규모가 커짐에 따른 운용상의 비용도 많이 드는 단점이 있다. 그래서 본 논문에서는 단 3개만의 센서를 사용하여 비용을 절감 할 수 있는 효과를 가지며 이전의 추정 기법들에 비해 계산상으로도 간단히 나타낼 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 그리고, 이상적인 음향 도파관에서는 불변한 성질을 가지는 음향 도파관 불변 파라미터는 실제로 해양환경에서는 환경 변수에 따라 조금씩 변한다. 각 센서에서 나타나는 β 의 값은 같다고 가정하면 식 (4-9)에 표현되는 β 의 영향은 2개 또는 3개의 센서간에 서로 상쇄되며 오직 거리의 변화율은 스펙트로그램에서 주파수의 변화에 의해서만 결정된다고 볼 수 있다.

즉, β 에 비례한 시간에 따른 거리의 변화율을 고려하지 않아도 되는 것이다. 제안된 거리 추정 알고리즘의 순서는 첫번째 두 센서의 스펙트로그램에 나타나는 시간에 따른 주파수 증가분의 비를 구하는 것이다. 결국, 두 센서간의 시간에 따른 주파수 축상의 변화비율을 구하면 음원과의 거리의 비를 알 수 있는 것이다. 두번째는 두 센서와 거리의 비가 일정한 음원의 궤적을 추정하고 나머지 세번째 센서와 같은 방법을 통해 음원의 궤적을 추정하여 교차시키면 두 궤적의 교차점이 임의의 시점 t 에서의 음원의 위치가 되는 것이다.

두 센서간의 거리 변화율의 비를 구하는 방법은 그림 4-4와 같이 각 프레임 t 에서 간섭 강도의 최대 줄무늬가 나타나는 지점의 주파수를 각각의 센서 스펙트로그램을 통해 구한 후 이를 비로 환산하면 된다.

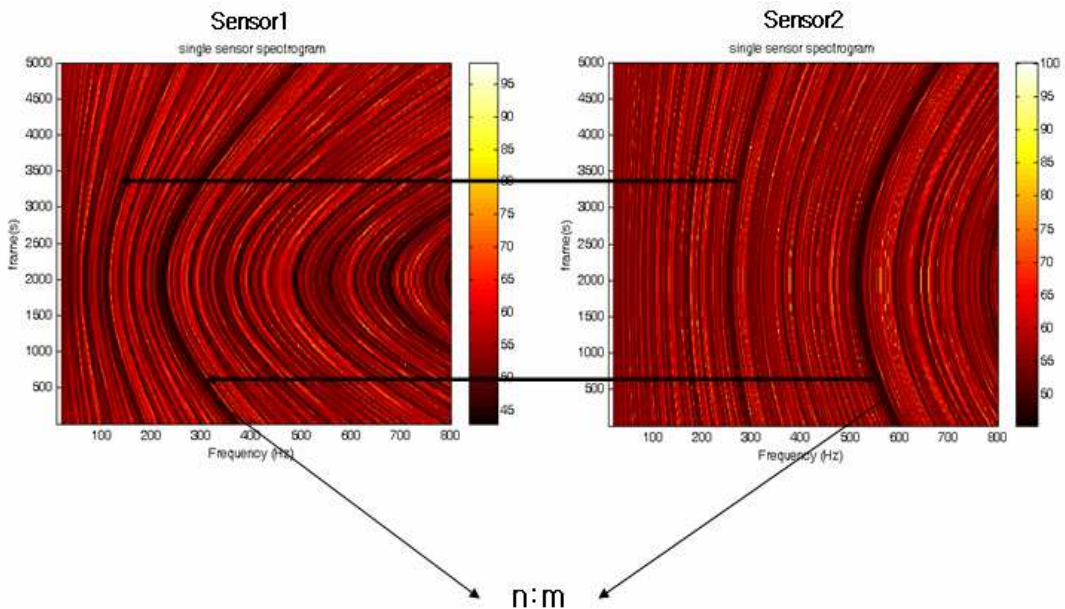


그림 4-4. 주파수 변화의 비율 추정

Fig.4-4. Estimation of the ratio of frequency variation

결국 두 개의 고정된 센서와 거리의 비가 일정한 음원의 자취를 구해야 하는데, 본 논문에서는 그림 4-5와 같은 아폴로니오스의 원을 이용하여 임의의 시간 t에서의 음원의 자취를 구하였다.

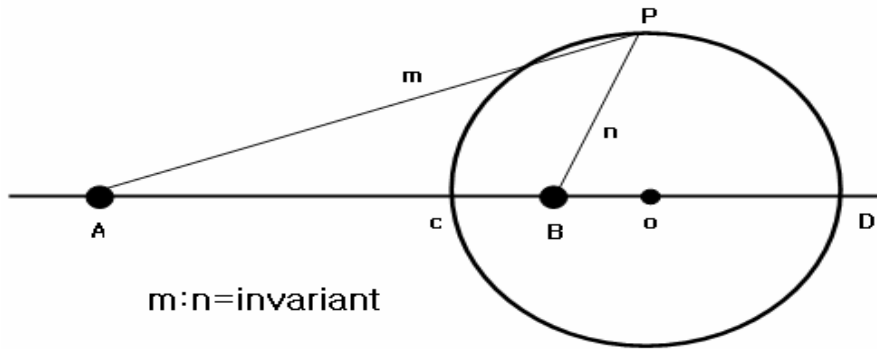


그림 4-5. 아폴로니오스의 원
Fig. 4-5. Circle of Apollonios

그림 4-5를 통해 음원에서 각 센서까지의 거리의 비 $m:n$ 은 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$m:n = AP:BP = AC:BC = AD:BD \quad (4-10)$$

여기서 A와 B의 위치는 각각 센서 2와 센서 1에 대응한다. 위의 방법을 통해 3번째 센서와 센서 1 또는 센서 2와의 시간t에 따른 음원의 자취를 구하게 된다면 두개의 음원의 자취원이 교차하는 지점을 찾을 수 있고 그 교점이 바로 구하고자 하는 음원의 위치가 되며 각 센서와의 거리를 추정 할 수 있다.

4.4 거리 추정 결과 분석

제안된 거리 추정기법의 성능을 분석하기 위해 3개의 센서를 사용하여 각 센서와의 거리가 그림 4-6과 같은 음원을 가정하고 거리 추정 시뮬레이션을 수행하였다. 음원의 이동경로는 그림 4-7과 같다.

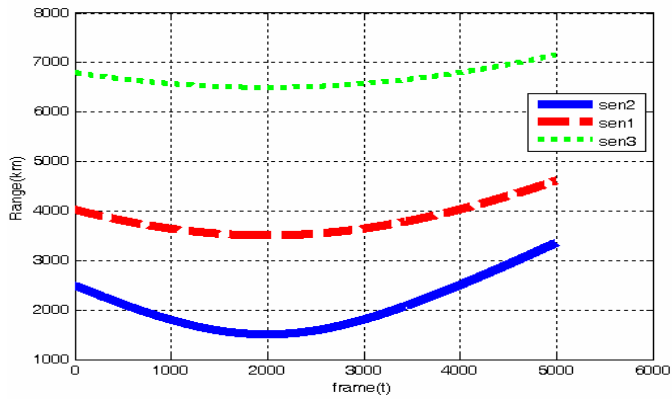


그림 4-6. 음원과 센서간의 거리

Fig. 4-6. Distance between source and sensor

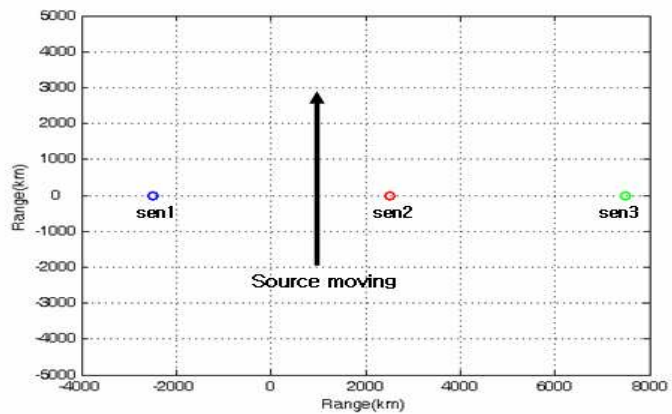
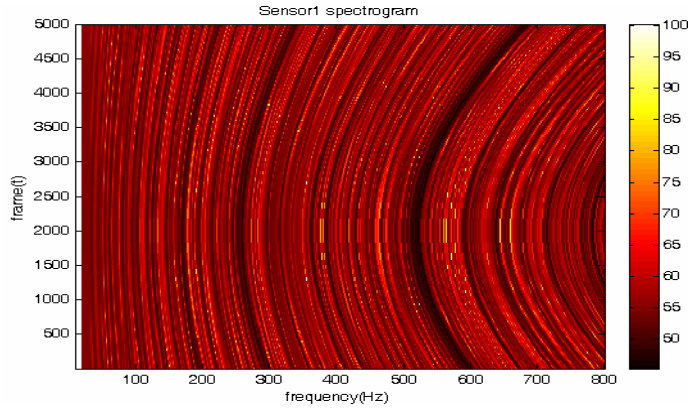


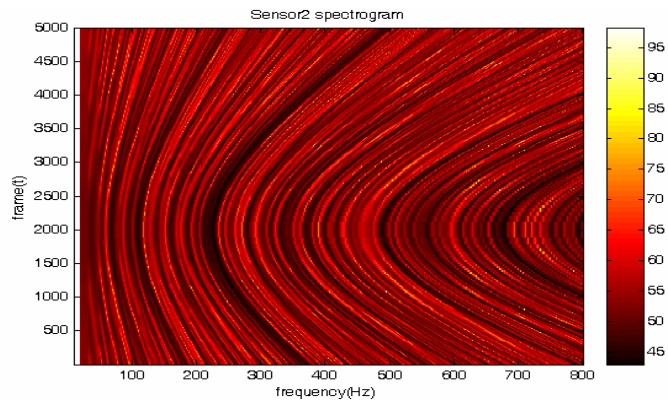
그림 4-7. 음원의 이동 경로

Fig. 4-7. The moving trajectory of source

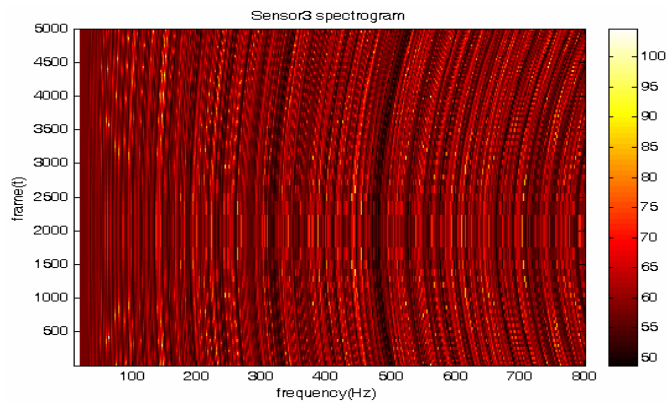
먼저 KRAKEN 정상이론 프로그램을 이용하여 주어진 환경에서 스펙트로그램의 모드 간섭 패턴을 나타내면 그림 4-8과 같다. 줄무늬 간섭패턴의 시간에 따른 기울기 변화가 그림 4-6의 음원과 센서간의 거리 변화율을 정확히 반영하고 있으며 거리의 변화가 클수록 간섭 패턴의 기울기 변화도 커지고 거리의 변화가 작을수록 간섭 패턴의 기울기 변화도 작은 것을 확인 할 수 있다. 음원과 센서간의 거리가 멀수록 주파수 축에서 고주파 방향으로 천이된 현상을 볼 수 있으며 각 센서 스펙트로그램에서 천이된 만큼의 비가 바로 음원과 각 센서간의 거리의 비가 된다. 4.3절의 거리 추정 알고리즘을 적용한 거리 추정 결과가 그림 4-9와 4-10에 나와 있다. 그림 4-9는 음원의 이동경로를 100 frame마다 제안된 알고리즘을 통해 추적한 결과로 그림 4-7의 실제 이동경로와 유사한 패턴을 보여주고 있다. 그림 4-10은 100 frame마다 음원과 세개의 센서들간의 거리를 추정한 결과로 실제 거리와 비교해서 유사한 것을 볼 수 있다. 표 4-1은 음원과 센서들간의 거리 추정 오차를 나타낸 것으로 제곱 평균 오차와 최대 오차 및 평균 오차 3개의 항목으로 분석하였다. 평균 5%이내의 정확한 거리 추정 결과를 나타내고 있으며 음원과 센서간의 시간에 따른 거리 변화율이 큰 2번째 센서의 경우 오차가 가장 크게 나타났고 상대적으로 거리 변화율이 작은 1번째 센서와 3번째 센서의 경우 오차가 작게 나타남을 확인 할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 4-8. (a) 센서1 스펙트로그램 (b)센서2 스펙트로그램 (c)센서3 스펙트로그램

Fig. 4-8. (a) sensor1 spctrogram (b) sensor2 spectrogram

(c) sensor3 spectrogram

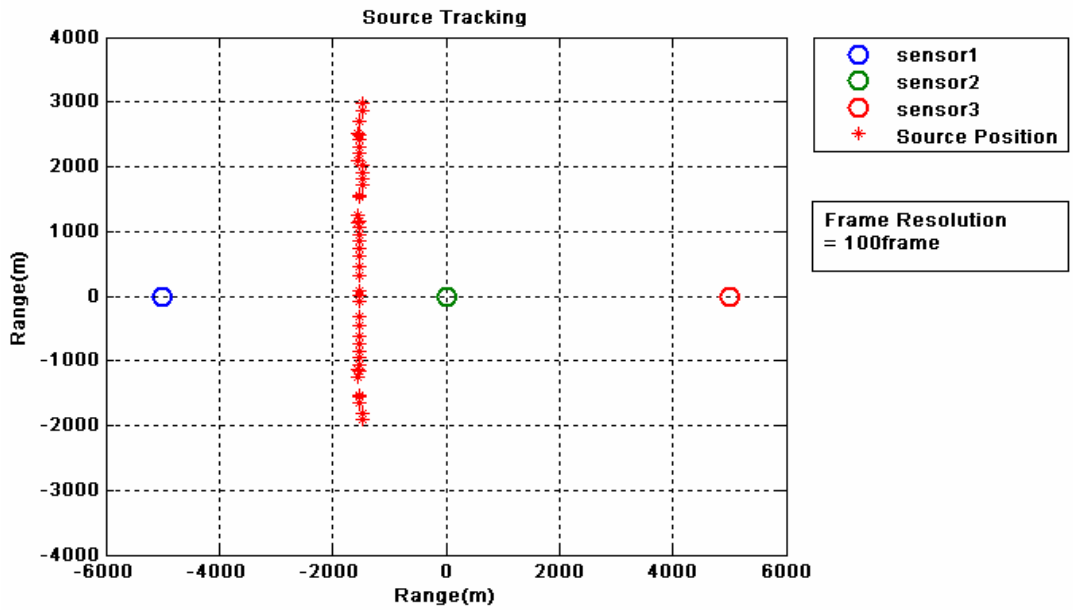


그림 4-9. 음원의 이동경로 추정결과
 Fig.4-9. Result of source moving trajectory

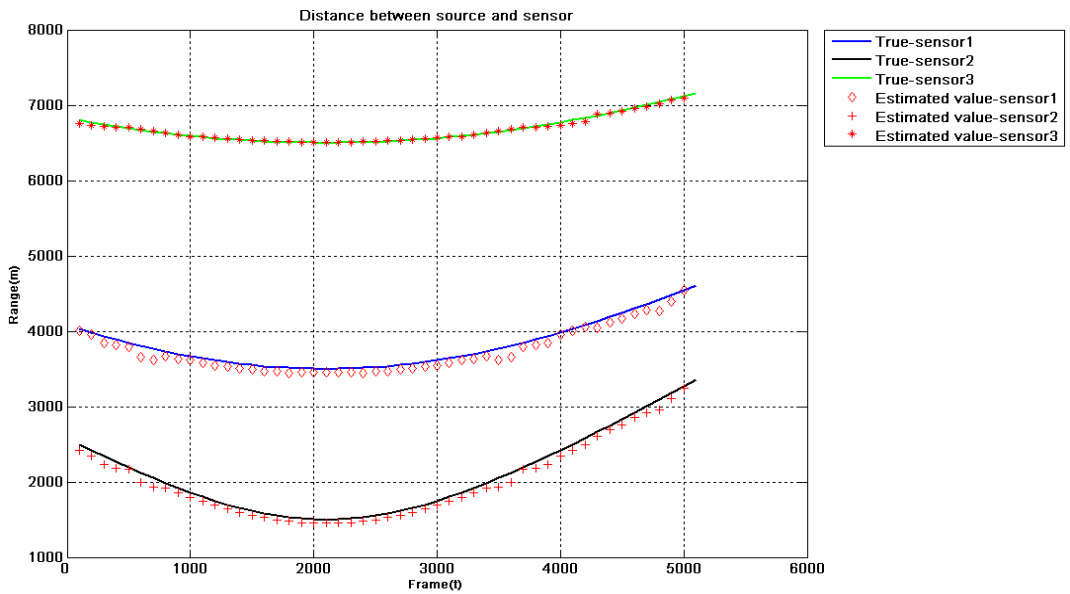


그림 4-10. 음원과 센서간의 거리 추정결과
 Fig. 4-10. Result of distance between source and sensors

표 4-1. 거리 추정 오차율

Table 4-1. Error rate of range estimation

Sensor \ Error	RMS error(m)	Maximum error rates(%)	Mean error rates(%)
Sensor1	71.50	4.01	1.73
Sensor2	72.41	6.10	3.34
Sensor3	16.3	0.95	0.17

제 5 장 결 론

본 논문에서는 음향 도파관에서 광대역 음원의 거리 추정 기법에 대한 연구가 수행되었다. 기존의 음원 거리 추정법들에 비해 계산상의 수고를 절감하고 환경적인 요인 영향을 적게 받을 수 있는 알고리즘을 제안하였고 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 추정 결과를 나타내고 분석하였다.

3장의 배열 불변성 이론에 기반한 거리 추정법의 경우 획득한 데이터로부터 음원의 거리 정보에 대한 파라메터를 바로 추출할 수 있는 장점을 가지고 간단히 음원의 거리를 추정 할 수 있었다. 시뮬레이션을 수행한 결과 SNR이 낮은 환경에서는 큰 성능 저하를 보이는 단점이 있었고 SNR이 10dB 이상되는 환경에서는 거리 추정 오차율 20% 내의 비교적 정확한 결과를 보임을 알 수 있었다. 특히 300Hz~400Hz의 주파수의 신호에 대해서는 오차율 10%내외의 정확한 거리 추정 성능을 나타내었고, 주파수 500Hz 이상의 신호에 대해서는 스푸어리스 효과로 인하여 오차율이 50%이상으로 성능이 떨어지는 결과를 볼 수 있었다. 고주파 영역에서 스푸어리스 효과를 억제하고자 공간 스무딩 기법을 적용하였고 오차율을 20%~30%까지 향상 시킬 수 있었다. 또한, 성능저하의 주요인이 되는 고차모드의 영향을 차단 할 수 있는 효과적인 방법이 적용된다면 더욱 성능을 향상 시킬 수 있을 것이다. SNR이 낮은 환경에서 큰 성능 저하를 나타내는 것으로 보아 잡음이 많이 존재하는 실제 수중 환경에 적합하게 적용시키기 위해서는 모의실험과 실제 음원에 대한 추정을 통하여 개선된 불변 파

라메타 추정 방법을 고안해야 할 것이다.

4장의 스펙트로그램에 나타나는 모드 간섭 패턴의 기울기 변화를 이용한 거리 추정 기법은 TDOA에 기반한 음원 위치 추적기법의 개념을 적용하여 적은 센서의 개수로도 음원의 거리를 추정 할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 거리와 주파수의 함수로 나타나는 스펙트로그램상의 모드 간섭패턴이 음원의 거리에 대한 정보를 가지고 있으며, 3개의 센서를 사용하여 음원과의 거리 변화율을 이용하여 기하학적으로 음원의 거리를 추정하는 알고리즘을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 거리를 추정한 결과 음원의 이동경로에 대하여 평균 오차율 5% 이내의 정확한 결과를 보여주었다. 수행된 결과를 통해 수중 광대역 음원의 거리 추정에 적용 할 수 있는 가능성을 볼 수 있었다.

향후 연구 과제로는 실제 실험을 통해 획득한 데이터에 적용시켜 추정 성능을 분석해야 할 것이고, 다양한 환경 속에서 음원의 종류 및 외부 잡음들에 대한 영향을 살펴봐야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 오철민, 오선택, 나정열, 이성욱 “해저면 경사가 일정한 천해에서의 광대역 간섭 유형” 한국음향학회지, vol., 21, no.5, pp.485-493, 2002.
- [2] 나영남 “천해 내부파에 의한 음파의 모드 간섭,” 한국음향학회 학술대회지 vol., 17, no.2, pp.125-128, 1998.
- [3] S. Lee and N. C. Makis, “The array invariant,” J. Acoust. Soc. Am. 119(1), pp. 336~351, Jan. 2006.
- [4] S. Lee and N. C. Makis, “A new invariant method for instantaneous source range estimation in an ocean waveguide from passive beam-time intensity data,” J. Acoust. Soc. Am. 116(4), 2646 (2004)
- [5] L. M. Brekhovskikh and Y. Lysanov, Fundamentals of Ocean Acoustics, 3rd ed. (springer, New York, 2003)
- [6] T. C. Yang, “Beam intensity striations and applications,” J. Acoust. Soc. Am. 113(3), 1342-1352 (2003)
- [7] G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, “Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow environments that vary in range and azimuth,” J. Acoust. Soc. Am. 106(5), 2454-2468 (1999)
- [8] M.B. Porter, The KRAKEN Normal Mode program, SACLANT Undersea Research Centre, 1994
- [9] T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, “On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals,” IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-33, 806-811 (1985)
- [10] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics, (AIP, New York, 1994)
- [11] Nielsen, R. O., Sonar Signal Processing. Boston. MA: Artech House, pp.51-94, 1991.

- [12] Aaron M. Thode, “Source ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory.” *J. Acoust. Soc. Am.* 108, 1582 (2000)
- [13] T. C. Yang, “Dispersion and ranging of transient signals in the Arctic Ocean.” *J. Acoust. Soc. Am.* 76, 262 (1984)
- [14] T. C. Yang, “Motion compensation for adaptive horizontal line array processing.” *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 245 (2003)
- [15] Ocean Acoustics Library, <http://www.hlsresearch.com/oalib/>
- [16] Michael J. Buckingham and Eric M. Giddens, “Theory of sound propagation from a moving source in a three-layer Pekeris waveguide.” *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 1825 (2006)
- [17] Ivan Tolstoy, “The Pekeris waveguide revisited.” *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 1183 (2006)
- [18] Jason D. Holmes, William M. Carey, and James F. Lynch, “Shallow-water waveguide characterization using an autonomous underwater vehicle-towed hydrophone array.” *J. Acoust. Soc. Am.* 119, 3346 (2006)
- [19] B. Edward McDonald and William A. Kuperman, “Modeling nonlinear acoustics in shallow water.” *J. Acoust. Soc. Am.* 119, 3274 (2006)
- [20] Kaëlig Castor, Peter Gerstoft, Philippe Roux, W. A. Kuperman, and B. E. McDonald, “Long-range propagation of finite-amplitude acoustic waves in an ocean waveguide.” *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 2004 (2004)