



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

부배열을 이용한 수중 음원 위치 추정
오차의 최소화에 관한 연구

A study on the error minimization of underwater source
localization using sub-array



指導教授 金基萬

2018年 8月

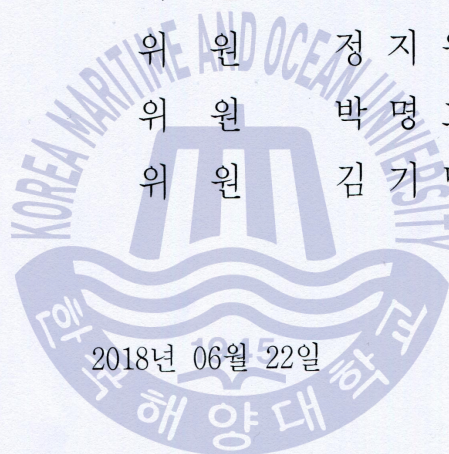
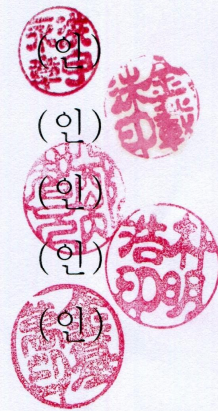
韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

梁寅植

본 논문을 양인식의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 홍 우 영
위 원 김 재 수
위 원 정 지 원
위 원 박 명 호
위 원 김 기 만



2018년 06월 22일

한국해양대학교 대학원

목 차

표 차례	iii
그림 차례	iv
Abbreviations	vi
요 약 문	vii
Abatract	ix

제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 논문 구성	13

제 2 장 수중 표적의 위치 추정 기법	14
-----------------------------	----

제 3 장 표적 위치 추정 오차 성능 분석	28
3.1 센서 고장에 따른 오차 성능 분석	28
3.2 센서 위치 오차에 따른 오차 성능 분석	36
3.3 음속 오차에 따른 오차 성능 분석	40
3.4 복합 오차에 따른 오차 성능 분석	46

제 4 장 비선형 최소자승법 기반의 거리 추정 오차 최소화	52
4.1 기존의 기법	52
4.2 비선형 최소자승법 기반의 거리 추정 방법	59
제 5 장 시뮬레이션 결과 및 고찰	63
5.1 모의실험 환경	65
5.2 개별 오차에 따른 TDOA 추정 성능 분석	67
5.3 복합 오차에 따른 TDOA 추정 성능 분석	73
5.4 시뮬레이션 결과 종합	80
제 6 장 결론	81
참 고 문 헌	83



표 차례

표 5.1 시뮬레이션 조건(종합)	63
표 5.2 복합 오차 시뮬레이션 조건(1)	73
표 5.3 복합 오차 시뮬레이션 조건(2)	76
표 5.4 복합 오차 시뮬레이션 조건(3)	78



그림 차례

그림 1.1 도래 시간차를 이용한 거리 추정	4
그림 1.2 음속 부정합에 따른 방위오차	6
그림 1.3 센서 고장에 의한 빔패턴	8
그림 1.4 채널 상태에 따른 모호 영역	9
그림 1.5 수중 환경에서의 도래 시간차를 이용한 거리 추정 개념	12
그림 2.1 초점 빔 형성기를 이용한 음원 위치 추정 기법	14
그림 2.2 방위 영역에서의 초점빔 형성기법과 MVDR 출력	16
그림 2.3 거리 영역에서의 초점빔 형성기법과 MVDR 출력	17
그림 2.4 삼각 측량법을 이용한 거리 추정 기법	20
그림 2.5 부배열 도래각에 의한 거리-방위 오차 영역	22
그림 2.6 일반적인 수동 거리 추정 흐름도	24
그림 3.1 센서 고장에 따른 오차 발생 모식도	29
그림 3.2 센서 고장에 따른 빔패턴 분석	31
그림 3.3 센서 고장에 따른 도래시간차 오차 분석	33
그림 3.4 부배열 센서 고장 수에 따른 도래시간차 오차 분석	35
그림 3.5 센서 부배열 위치 오차에 따른 오차 발생 모식도	37
그림 3.6 부배열과 신호원과의 기하학적 배치	37
그림 3.7 센서 위치 오차에 따른 상호상관	39
그림 3.8 센서 위치 오차에 따른 도래시간차 추정 오차	39
그림 3.9 음속 부정합 발생 모식도	41
그림 3.10 음속 오차에 따른 빔패턴 비교	43

그림 3.11	음속 오차에 따른 상호상관	44
그림 3.12	음속 부정합에 따른 도래시간차 추정 오차	45
그림 3.13	복합 오차에 따른 빔패턴 비교	47
그림 3.14	복합 오차에 따른 상호상관	48
그림 3.15	복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(센서 고장)	49
그림 3.16	복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(배열위치 오차)	50
그림 3.17	복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(음속 오차)	51
그림 5.1	모의실험 환경	65
그림 5.2	채널 고장에 따른 표적 위치 추정 성능	68
그림 5.3	채널 고장에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과	68
그림 5.4	부배열 위치 오차에 따른 위치 추정 성능	70
그림 5.5	부배열 위치 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과	70
그림 5.6	음속 오차에 따른 위치 추정 성능	72
그림 5.7	음속 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과	72
그림 5.8	복합 오차에 따른 위치 추정 성능(1)	75
그림 5.9	복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(1)	75
그림 5.10	복합 오차에 따른 위치 추정 성능(2)	77
그림 5.11	복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(2)	77
그림 5.12	복합 오차에 따른 위치 추정 성능(3)	79
그림 5.13	복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(3)	79

Abbreviations

DI	: Directivity Index
DOA	: Direction Of Arrival
LM	: Levenberg-Marquardt
LS	: Least Square
MVDR	: Minimum Variance Distortionless Response
RMSE	: Root Mean Squared Errors
SLBM	: Submarine Launched Ballistic Missile
SONAR	: SOund Navigation And Ranging
TDOA	: Time Difference Of Arrival



부배열을 이용한 수중 음원 위치 추정 오차의 최소화에 관한 연구

양 인 식

한국해양대학교 전파공학과



요 약 문

수동 소나는 수중의 소음원이 방사하는 음파를 탐지하여 소음원의 방위, 거리를 추정하는 시스템이다. 음파의 효과적인 탐지를 위하여 음파 탐지 센서를 여러 개의 부배열로 구성하여 각 센서에 입사되는 신호의 도래 시간차를 이용하여 도래각과 거리를 추정한다.

본 연구는 신호원의 도래각 및 도래 시간차 산출에 오차를 유발시키는 변수들을 도출하고 오차를 포함한 변수들로 인해 발생하는 거리 추정 오차를 분석하였다. 오차를 유발하는 변수들은 부배열의 위치 오차, 해양환경의 음파 전달 속도와 시스템에 적용하는 음파전달속도의 부정합, 수신 센서의 작동 유무를 표현하는 센서의 고장 상태를 고려하였다. 이를 기반으로 분산된 부배열로 입사되는 신호원의 도래 시간차를 이용하여 위치 추정 성능을 향상시키기 위한 방안을 연구하였다. 수중 소음원의 위치 추정 최적화 기법에

는 오차를 포함한 측정 데이터를 기반으로 이론적으로 예측한 기대값과의 편차를 줄임으로서 오차를 최소화하는 기법으로 선형 최소자승법(Least Square)이 있다. 선형 최소자승법은 관측 데이터의 특성에 따라 발산 또는 국소 위치(Local Minimum)를 추정하는 Forward Closed Form으로 알려져 있다. 선형 최소자승법과는 달리 비선형 최소자승법은 Backward Recursive Form 으로 매 시간 수신한 데이터를 기반으로 반복 연산을 통하여 목적 함수 내에 포함된 변수의 오차를 최소화하는 과정이다. 비선형 최소자승법은 오차를 최소화하기 위한 감폭 계수(Damping Coefficient)를 어떻게 정의하느냐에 따라 Gauss Newton, Gradient Descent 방법으로 구분한다. 본 논문에서는 이러한 두 개의 비선형 최적화 기법을 결합한 형태인 LM(Levenberg-Marquardt) 알고리즘을 적용하여 수중 소음원의 위치 추정 오차를 최소화하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 선형 최소자승법에 비하여 안정적인 해를 가지는 장점이 있다.

수중 소음원의 방위, 거리 추정 오차를 유발하는 3개의 주요 변수(음파전달속도의 부정합, 부배열 간의 위치 오차, 센서의 고장 상태)에 오차를 포함한 모의한 데이터를 비선형 최소자승법인 LM 알고리즘에 적용하여 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 통계적인 특성을 도출하기 위하여 시뮬레이션 입력 조건에 따라 500회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 통상적인 오차 분석 기법 가운데 하나인 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Squared Errors) 값을 구하여 분석하였다. 시뮬레이션 결과로부터 비선형 최소자승 알고리즘 기반의 제안 기법이 선형 최소자승법에 비해 대부분의 조건에서 5~50% 범위로 성능이 향상되는 것을 확인하였으며, 부배열의 위치 오차와 같은 일부 변수의 성능 제안 범위도 확인하였다.

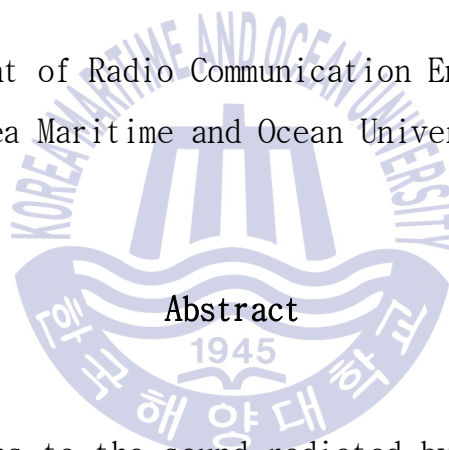
KEY WORDS :

TDOA(Time Difference Of Arrival) 도래 시간차 ; DOA(Direction Of Arrival) 도래각;
LS(Least Square) 최소자승법; Focused Beam-former 초점빔형성기;
LM(Levenberg-Marquardt); Source Localization 음원 위치추정;

A study on the error minimization of underwater source localization using sub-array

Insik Yang

Department of Radio Communication Engineering
Korea Maritime and Ocean University



Abstract

Passive sonar listens to the sound radiated by any underwater target using a sensor system, and detects its signals against a background noise of the sea and the self noise of the sonar platform. The system can be made directional with time difference of arrival, therefore the horizontal bearing of a signal is known. In addition to measure the bearings with direction of arrival of a signal from sub-array well separated, the direct passive range is known.

Underwater source localization based on time difference of arrival measurements has some problems due to the sub-array location uncertainty, partial sensor failures and sound speed mismatch from real underwater environments and system. Therefore the source

localization error using TDOA measurements with these problems is investigated.

Many algorithms for robust underwater source localization have been developed using TDOA measurements in recent years. One classic algorithm is the linear least squares method. Through pre-processing of TDOA measurements, a set of linear forward closed-form equations can be obtained without considering the relationship between the measurements and references by equations. To incorporate the constraint on the relationship, the localization problem by linear least squares formula can not be convex in accordance with the measurements.

In this dissertation, research shows the robust method to minimize the underwater source localization errors with non-linear method, Levenberg-Marquardt. This algorithm is an iterative operation that locates the minimum of a multi-variates function that is expressed as the sum of squares of non-linear real-value. The real critical values for the research of robust underwater source localization are considered the sub-array location uncertainty, partial sensor failures and sound speed mismatch.

The proposed algorithm is evaluated as root mean squared errors in terms of the each and mixed value error ranges through the Monte-Carlo simulation. It significantly shows that root mean squared errors of the proposed method based on time difference of arrival are lower than the result of the previous linear least squares method in many cases.

KEY WORDS :

Time Difference Of Arrival(TDOA); Direction Of Arrival(DOA);

Least Square(LS); Focused Beam-Former(FBF); Levenberg-Marquardt(LM);

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

미래 자원 확보와 유사시 안전한 해상교통로를 보호하기 위해 해양 주권 확보의 중요성이 지속적으로 증대되고 있으며, 한반도 주변의 선진국을 중심으로 대양의 우위를 확보하기 위하여 노력을 기울이고 있다. 최근 북한 잠수함의 SLBM(Submarine Launched Ballistic Missile) 발사와 같은 대륙간 탄도미사일의 시험 발사는 주변국들을 위협하고 있다. 특히, 잠수함은 은밀성, 기동성, 타격 능력이 우월하여 매우 위협적인 전력으로 발전하고 있어 수중 위협 세력을 조기에 탐지하고 주변의 공격 세력에게 위협 정보를 제공하기 위한 수중 조기 경보시스템의 역할에 대한 중요성이 대두되었다.

수중/수상 물표를 탐지하기 위한 수단은 탐지 대상 표적의 특성에 따라 음향, 자기, 전자파, 광학 등이 있으며, 수중 표적으로부터 방사되는 음파를 효과적으로 탐지하는 수중음파탐지기(SONAR : SOund Navigation And Ranging)가 가장 효과적인 수중 조기 경보 시스템으로 운용되고 있다. 수중음파탐지기는 제 1, 2차 세계대전에서 군사적인 목적으로 영국, 독일, 프랑스, 미국 등의 선진국에서 개발되기 시작하였다. 세계대전 이후, 냉전시대에는 원자력 잠수함이 비교적 조용한 심해 환경에서 주로 활동하였다. 냉전시대의 원자력 잠수함은 주로 대양에서 활동하였으며, 당시 잠수함 설계 기술의 한계로 비교적 시끄러운 소음을 발생하여 수동소나(Passive sonar)로 원거리의 수중 표적 탐지가 가능하였다. 냉전시대 이후 제3국들의 잠수함 설계기술 발전과 잠수함의 주 활동무대가 천해로 이동하면서 비교적 크기가 작고 조용한 재래식 디젤잠수함이 주요 세력으로 등장하였다. 재래식 디젤잠수함은 원자력 잠수함에 비해 은밀성이 뛰어나 해상교통량이 과밀한 천해 환경에서는 수중 배경소음이 비교적 높아 수동소나의 탐지성능이 제한적이다. 이를 극복하기 위하여 능동 소나(Active sonar)의 역할이 점차 증대되는 추세로 발전하였다. 최근 2000년대 이후 해양의 대잠수함전 환경은 잠수함 설계 기술의 발전으로 조용한 SLBM 탑재 원자력 잠수함

이 비대칭 위협 세력으로 등장하였다. 원자력 잠수함은 무한 잠항시간으로 은밀성이 보장되고, 함속 30 kts이상의 기동성 및 첨단 무기체계를 탑재하여 시간, 공간을 초월하여 주변국 및 전 세계적인 위협 세력으로 등장하였다. 수중 위협 세력의 발전과 더불어 효과적인 대잠 작전을 수행하기 위하여 소나 개발이 활발히 진행되고 있다[1-2].

수동소나는 수중 또는 수상 플랫폼으로부터 방사되는 신호를 효과적으로 탐지하기 위하여 탑재 플랫폼의 형상을 최대한 활용하여 배열 형태로 구성한다. 배열을 구성하는 센서로 유입된 신호는 센서간의 지연합(Delay & Sum)을 통하여 시간영역의 신호를 방위영역으로 변환한다. 지연합은 센서별 수신된 신호를 동일위상으로 보정하여 코히어런트 합성을 하는 과정으로서 방향성을 갖는 표적 신호의 준위를 높이고, 수중 배경소음(Ambient Noise)과 같이 방향성이 없는 잡음은 백색화(Whitening) 된다. 지연합 연산은 센서 개수에 따라 로그 함수로 비례하여 지향 성능(Directivity Index)을 증가하고, 정확한 표적의 방위와 거리를 추정한다. 그러나 지연합 과정에서 센서로 유입된 방향성을 갖는 표적신호의 지연 시간차가 배경소음 또는 음파의 전달경로 등에 의하여 신호 준위가 불안정하거나 센서간의 상호상관성이 떨어질 경우에는 표적의 방위, 거리 추정 성능이 감소하게 된다[3-5].

상대적으로 작은 개구면을 갖는 부배열로 구성된 소나는 각각의 부배열 빔출력을 이용하여 인접한 부배열간 동일한 방위에서의 상호상관계수를 산출한다. 이는 짧은 부배열의 제한된 성능을 보완하기 위한 방법으로 방위별 출력과 상호상관을 통해 산출한 시간차를 이용하여 정확도를 향상시킬 수 있다[6-8].

본 연구는 부배열로 구성된 소나를 기반으로 수중 소음원의 위치 추정 성능에 영향을 미치는 변수들을 도출하였다. 또한 각 변수들이 포함한 오차량에 따른 방위, 거리 추정 성능을 분석하고, 오차를 최소화하기 위한 연구를 수행하였다.

1.2 연구 목적

수동소나는 탑재 플랫폼의 목적에 따라 다양한 형태로 운용되며, 효과적인 수중 물표 탐지를 위하여 배열 구조를 기반으로 신호원으로부터 방사되어 다수의 센서에 입사되는 신호의 도래 시간차(TDOA, Time Difference of Arrival)를 이용하여 도래각 및 신호원의 거리를 추출하는 것이 대표적인 기능이다.

그림 1.1은 수동 소나 가운데 대표적으로 도래 시간차를 이용한 신호원의 도래각과 거리를 추출하는 과정이다. 소나에 의한 거리 정보 추출은 두 개 이상의 부배열로부터 산출한 방위각의 교차점으로부터 추출하며, 최소한 3개 이상의 부배열이 필요하다. 주요 변수는 각 부배열의 센서간의 거리(d), 수중음파전달속도(c), 수신센서의 작동상태(w)가 고려되며, 이러한 변수들의 정확도에 따라 정확한 신호원의 도래각, 즉 표적의 방위각 산출이 가능하며, 나아가서는 신호원의 정확한 위치추정이 가능하다. 신호원의 위치 추정은 단일 배열구조를 이용하는 경우에 비해 부배열 사이에 일정 거리가 확보된 분산배열을 이용하여 거리 정확도를 높이는 것이 일반적이며[6-7, 9-11], 부배열의 개구면 크기를 확보하여 음원의 신호대 잡음비를 증대시켜 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 수중 신호원의 도래각과 거리 추정을 위한 변수($\hat{x} = [\hat{d} \hat{c} \hat{w}]$)는 시스템에 적용되는 값의 정확도에 따라 소나의 성능을 좌우한다.

첫째, 센서간 거리오차(e_d)를 반영한 센서간의 거리($\hat{d} = d + e_d$)가 포함된 소나 시스템은 방위, 거리별로 측정된 데이터를 기반으로 센서간 거리오차(e_d)를 최소화하여 실제 센서간의 거리 오차가 최소화($\hat{d} \approx d$)되도록 자체보정(self-calibration)하는 기법들이 활발히 연구되고 있다[12-13]. 이러한 방법은 시간, 공간영역에서 방위, 거리 오차를 최소화하는 배열 간격을 적용(Correction Table)하여 시불변(Time invariant) 변수로 적용 가능하다. 이는 계절별, 해역별 소나 탑재 플랫폼의 심도별로 다양한 환경에서는 적용값이 제한될 수 있으나, 본 논문에서는 매 시간 측정 데이터를 기반으로 모델과의 오차를 최소화하여 시간, 공간영역에서 시변(Time Variant) 변수로 오차를 최소화하는 방법을 제안한다.

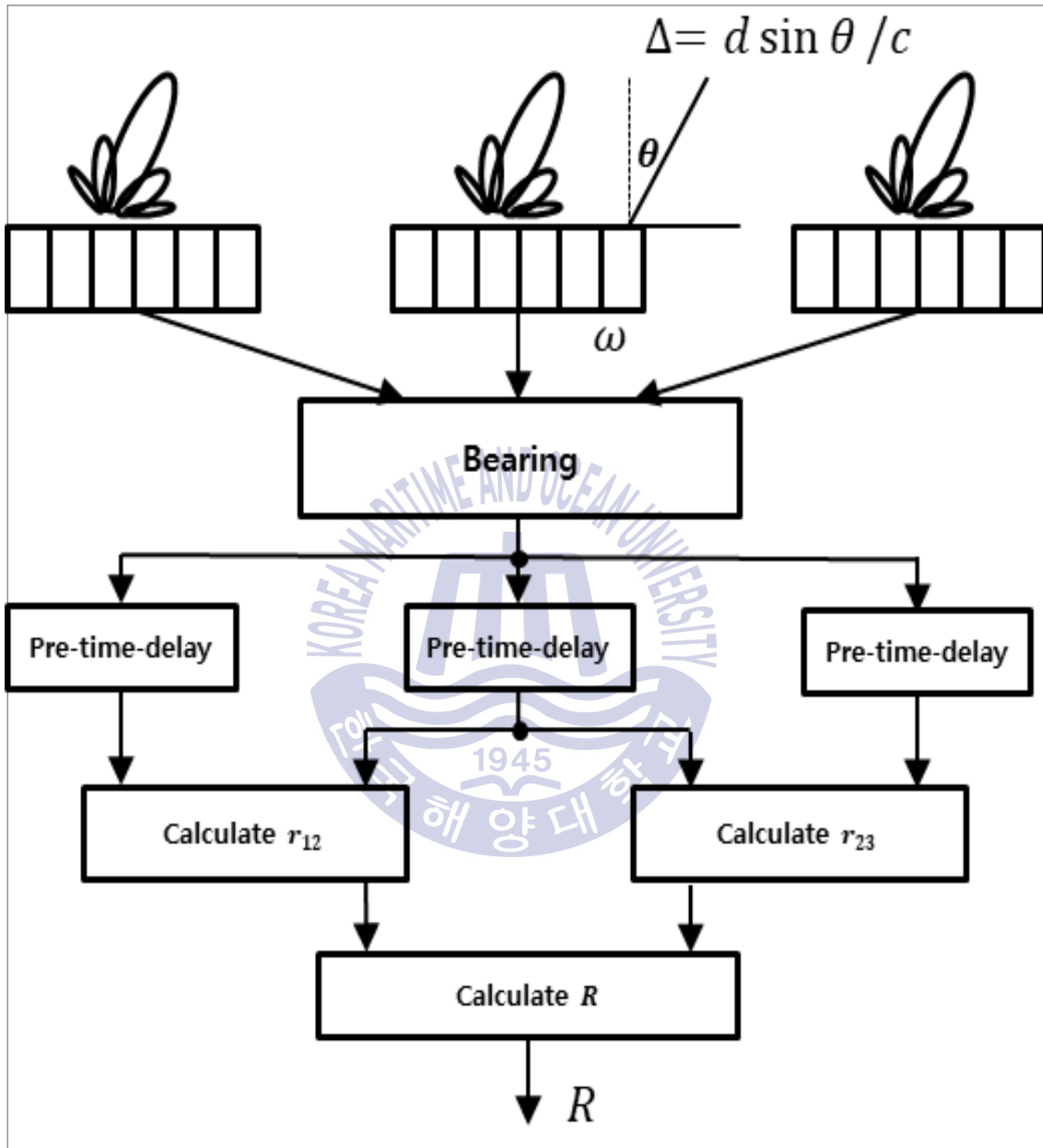


그림 1.1 도래 시간차를 이용한 거리 추정

Fig. 1.1 Passive Ranging Estimation by TDOA method

둘째, 센서 사이의 도래 시간차를 산출하기 위해 사용하는 수중에서의 음파 전달속도(c)는 측정된 수온, 밀도, 압력으로부터 통상 1450 ~ 1550 m/s 범위로 산출되고 시스템에 적용된다. 그러나 음속의 오차에 따른 도래 시간 오차는 측정 음속의 오차비와 관심 방위에 따라 도래 시간의 오차(\hat{t})를 갖는다. 도래 방위가 0° 에서는 도래 시간의 오차(\hat{t})가 발생하지 않으나, 도래 방위가 -90° 또는 90° (End-fire) 영역으로 갈수록 측정된 음속의 오차 비($\hat{c} = c/c_0$)에 비례하여 도래 시간의 오차(\hat{t})가 증가한다.

$$\frac{\sin\theta_0}{c_0} = \frac{\sin\theta}{c} \quad (1-1)$$

여기서, θ_0 : 신호원의 도래 방위, c_0 : 신호원의 음속[m/s]

θ : 신호원의 추정 방위, c : 시스템 적용 음속[m/s]

그림 1.2는 음속 부정합에 따른 음원의 방위오차를 나타낸다. 가로축은 신호원의 실제 방위이며, 세로축은 음속에 따라 추정된 신호원의 방위를 나타낸다. 해양환경을 통하여 전달되는 정확한 음속(c_0)이 1500m/s로 소나에 수신될 경우, 소나에서 적용한 음속(c)이 1500m/s로 동일한 값으로 적용하면 식 (1-1)로부터 신호원의 도래 방위와 추정 방위가 일치한다. 그러나 소나에서 적용한 음속이 1500m/s가 아닌 다른 음속을 적용한 경우, 음속의 부정합 크기에 비례하여 방위오차가 발생한다. 신호원의 방위가 45° 인 경우, 소나에서 적용한 음속이 1450m/s에서 43° 로 신호원의 방위를 추정하여 약 2° 의 방위 오차가 발생하며 거리로 환산하면 5000m에서 약 180m의 거리오차가 발생한다.

소나가 운용되는 환경이 고정된 위치 또는 매설된 형태로 운용되는 경우, 통계적으로 측정된 신호원의 도래 방위에 따른 사후 오차 분석을 통하여 음파 전달속도(c)를 역산하여 시스템에 적용하지만, 그렇지 않은 경우 다수의 변수들을 이용하여 다양한 비선형 특성을 기반으로 측정 오차를 최소화하는 기법에 대해서도 연구가 진행 중이다.

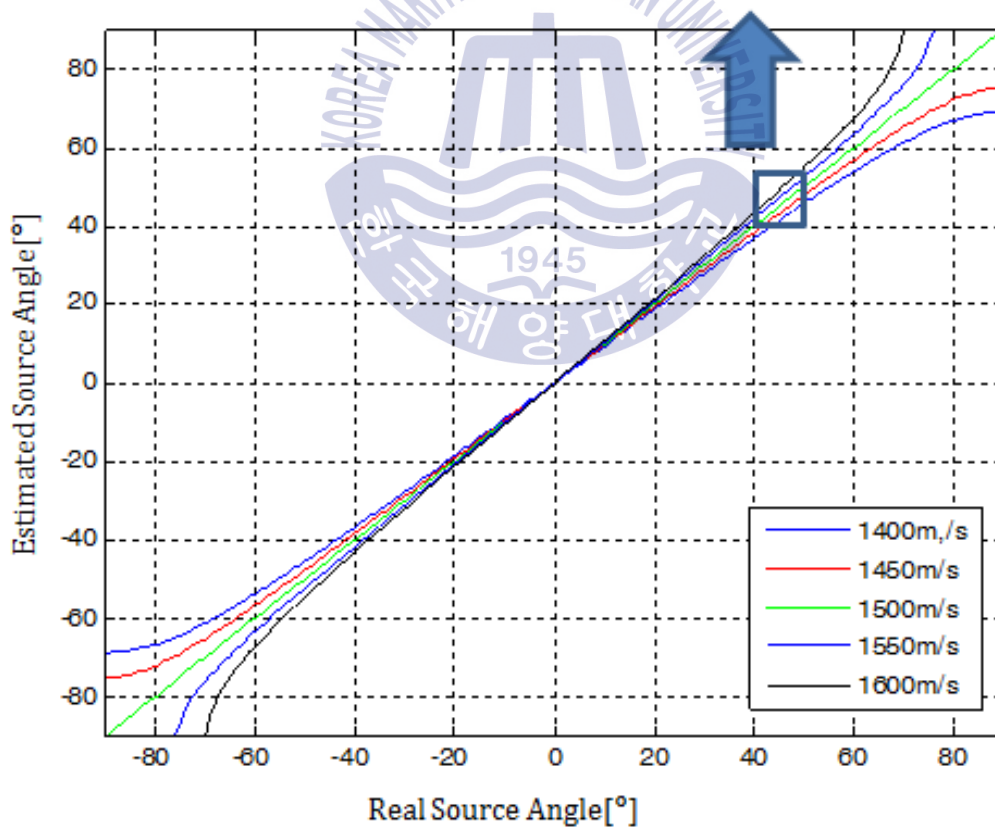
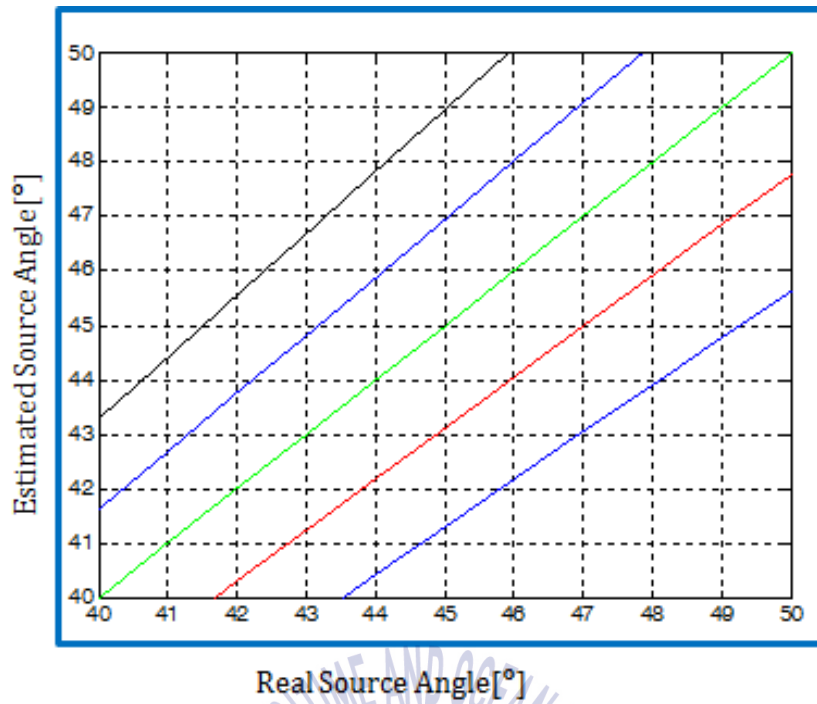


그림 1.2 음속 부정합에 따른 방위오차

Fig. 1.2 Source bearing bias in accordance with the sound speed mismatch

마지막으로 소나 성능에 영향을 미치는 변수로 소나의 수신 채널의 고장 상태이다. 소나의 수신 센서는 소나 운용에 가장 중요한 요소로서 센서를 구성하는 부품의 노후화와 방수기능의 열화로 인한 누수 등으로 정상 작동이 불가능한 경우가 발생한다. 통상 수신채널의 고장으로 인한 소나 성능 열화를 최소화하기 위하여 채널의 연속 고장을 줄이기 위하여 채널의 전송 라인을 설계하지만 소나 성능 열화의 최소화를 위한 노력이며, 고장에 따른 성능 열화는 불가피하다. 채널의 고장은 소나의 지향 성능(DI, Directivity Index)과 빔폭(BW, Beam Width) 등에 영향을 미쳐 신호원의 탐지 및 거리 추정 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다[3].

그림 1.3은 지향특성을 나타내기 위하여 N개의 센서로 구성된 부배열의 빔패턴을 나타내었으며, 표적의 방위는 60° 이다. 센서의 고장이 없는 정상상태(Normality)에 비하여 N개의 50% 채널이 비정상 상태인 경우 부엽(Side lobe) 준위가 주빔(Main Beam)의 준위에 비해 $-5\sim-8\text{dB}$ 로 정상상태의 부엽 준위에 비해 $10\sim15\text{dB}$ 이상 증가하여 지향 성능이 떨어진다. 지향 성능은 $10\log_{10}N$ 으로 표현 가능하며, 센서 개수에 따라 증가한다. 채널 상태가 고장인 경우, 유효한 센서의 수는 정상인 경우(N)에 비해 고장 채널 수 만큼 감소하여 지향성능을 떨어뜨리게 된다[4-5].

그림 1.4는 빔폭 특성을 나타내기 위하여 N개의 센서로 구성된 부배열의 빔패턴을 이용하여 수평(x-range), 수직(y-range)영역에 최대값의 $-3[\text{dB}]$ 지점의 빔폭을 거리 단위로 환산하여 나타내었다. 그림 1.4(a)와 같이 채널상태가 정상인 경우, 빔폭은 거리와 방위(End-fier)에 따라 넓어진다. 거리 $500\sim5000\text{m}$ 로 증가함에 따라 빔폭이 $50\sim500\text{m}$ 이내로 10%의 오차를 갖는 모호 영역으로 해석할 수 있으며, 측면 방위로 갈수록 약 1100m , 20%의 오차 범위를 나타낸다. 그림 1.4(b)와 같이 채널 상태가 고장인 경우, 거리 $500\sim5000\text{m}$ 로 증가함에 따라 빔폭이 $50\sim1000\text{m}$ 를 초과하여 20% 이상의 오차 범위를 갖는 모호영역으로 해석할 수 있다. 거리 2000m 이상의 구간에서 1000m 를 초과하여 넓은 범위에 형성되므로 채널 고장 시 지향성능이 떨어지고 빔폭이 넓어짐으로 인하여 신호원의 방위 추정 성능에 영향을 미치게 된다.

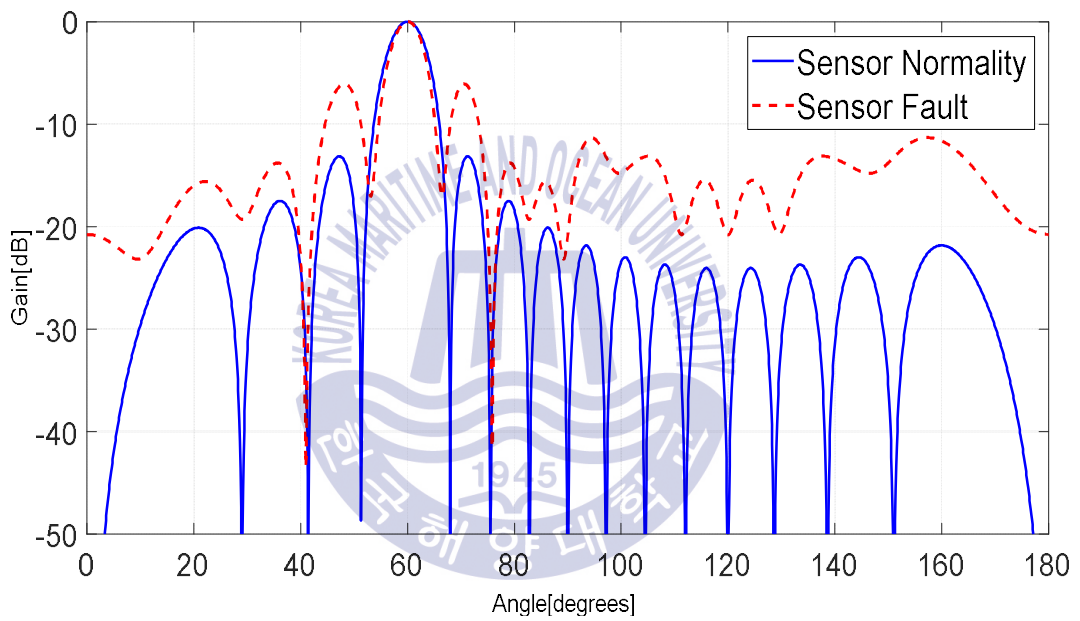
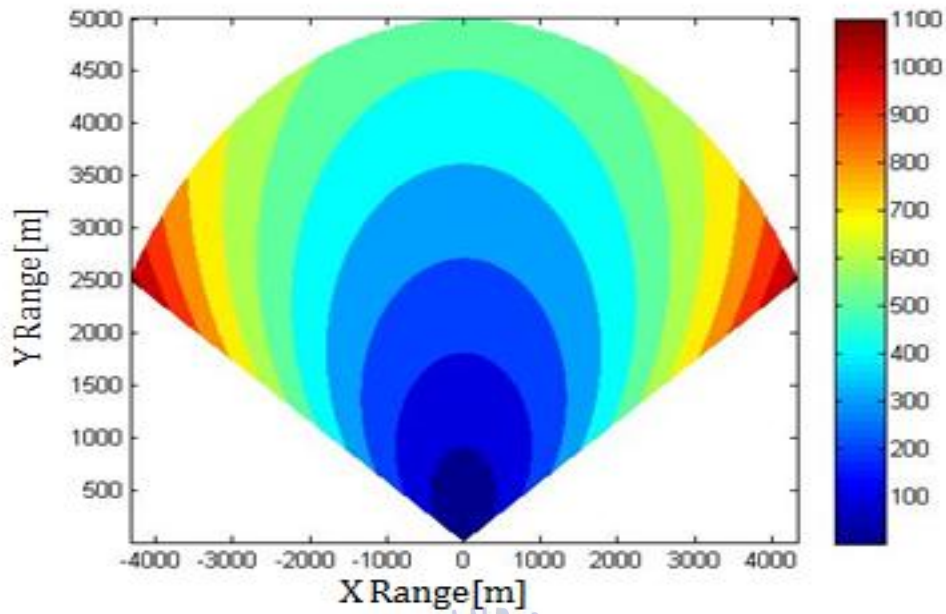
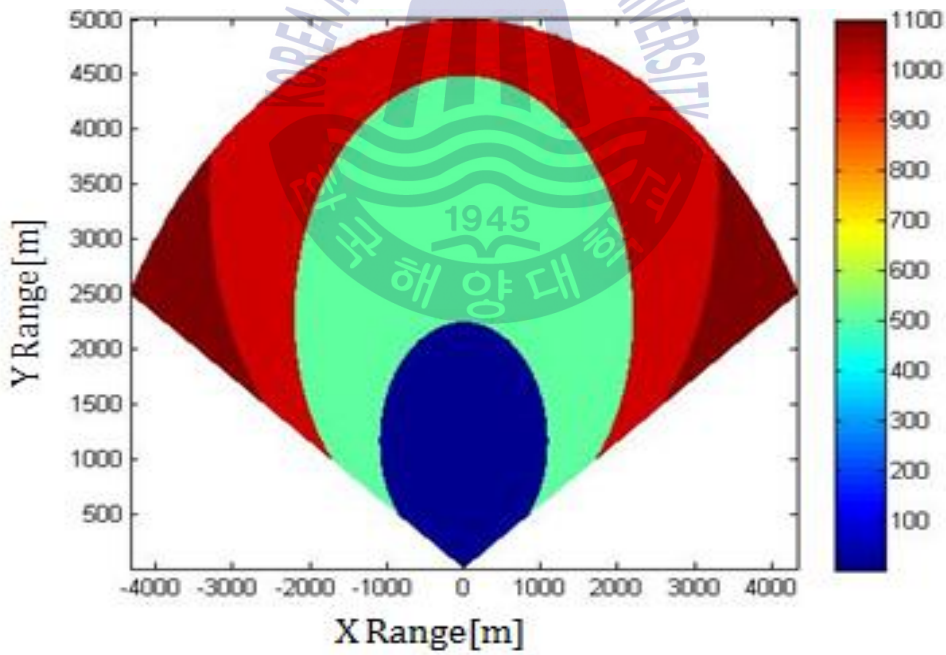


그림 1.3 센서 고장에 의한 빔패턴

Fig. 1.3 Beam pattern with Sensor Faults



(a) 정상



(b) 고장

그림 1.4 채널 상태에 따른 모호 영역, (a) 정상, (b) 고장

Fig. 1.4 Ambiguity area with Sensor Faults,

(a) normality, (b) faults

본 연구는 소나성능에 영향을 미치는 요소들의 오차가 거리 추정 성능에 미치는 영향을 분석하고, 오차를 줄이기 위한 방안을 도출하려고 한다. 신호원의 거리 추정은 각 센서가 수신한 신호의 위상을 고려한 도래 시간차(TDOA, Time Difference Of Arrival)를 이용하였다[8-24].

육상 환경에서 신호원의 위치 추정을 위하여 사용하는 TDOA 기법은 고정된 위치에 다수의 안테나를 분산 배치하여 수신 안테나간의 조합, 기하학적 배치 특성 및 전파속도 등의 다양한 변수를 고려하여 신호원의 도래각 및 위치를 추정한다. 육상 환경의 경우, 안정적인 전파 속도와 정확한 안테나 위치 파악이 가능하여 비교적 전파의 전달특성이 안정적인 형태로 수신 배열센서에 도달하지만 수중환경은 수중에서 전달되는 음파의 특성이 수심에 따라 다른 특성을 보이며 센서의 상태 및 플랫폼에 부착한 배열의 정확한 간격이 고려되어야 한다. 즉, 수중 신호원의 위치 추정은 육상 환경과는 달리 수신센서의 기하학적 배치/조합이 제한되며, 플랫폼 간의 운용성 및 신호의 동기화 등 추가로 고려해야 할 요소들이 많아진다. 이러한 요소들에 오차가 포함되면 개별 센서에 도래하는 신호원의 시간차 산출에 오차를 발생시키게 된다. TDOA 위치 오차를 줄이기 위하여 시간(t)에 따라 측정된 데이터를 기반으로 이론적으로 예측한 기대값과의 편차를 줄이는 기법으로 선형 최소자승법(LS, Least Square)이 있다. 선형 최소자승법은 관측 데이터의 특성에 따라 발산 또는 국소 위치(Local Minimum)를 추정하는 Forward Closed Form으로 알려져 있다[27-28].

선형 최소자승법과 달리 비선형 최적화 방법은 recursive form 으로 매 시간 수신한 데이터를 기반으로 반복 연산을 통하여 목적함수 내에 포함된 시변(Time variant) 변수의 오차를 최소화하는 과정이다. 비선형 최적화 방법은 주로 오차를 추정하기 위한 감폭 계수(Damping coefficient)를 어떻게 정의하느냐에 따라 Gauss Newton, Gradient Descent 방법이 주로 사용되고 있다[29-30].

Gauss Newton 방법은 기울기의 크기가 반복 루프에 따라 선형적으로 증가하며, 이에 따라 감폭 계수(Damping coefficient)의 기울기에 반비례함으로써 함수의 기울기와 곡률에 따라 반복 루프를 수행하며 안정적으로 해를 찾을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 수렴 속도가 느린 단점이 있다[30-36].

Gradient Descent 방법은 Gauss Newton 방법과 반대로 기울기의 크기가 반복 루프에 따라 선형적으로 감소하며, 이에 따라 감폭 계수가 기울기에 비례함으로써 반복 루프를 수행할수록 선형적으로 증가하게 된다. 이는 빠르게 해에 수렴하지만 발산의 위험이 있어 안정적으로 해를 찾지 못하거나 해로부터 멀리 떨어져 연산을 빠져나오게 된다. 이러한 두 개의 비선형 기법의 단점을 보완한 형태가 LM(Levenberg-Marquardt) 방법이다. LM 방법은 위 두 개의 비선형 기법이 결합한 형태로서 해에 수렴하는 과정에 있어 안정적인 해를 가지는 장점이 있다. 결과적으로 LS 기법은 선형 최소자승법으로서 목적 함수(A)와 추정하고자 하는 값(x)의 선형 특성을 기반으로 산출된 값(b)과의 일차 선형함수($Ax=b$)로 표현할 수 있으며, 이를 만족하는 x 를 찾는 과정으로 볼 수 있다. 비선형 최적화 기법은 다수의 수신기로 수신된 신호를 이용하여 모델과의 차이를 최소화하는 변수를 반복/갱신하여 찾는 과정으로서 선형에 비해 연산량은 많으나, 선형 최적화 기법에서 주로 나타나는 국소 위치(local minimum) 추정과 발산(divergence)을 줄이는 장점이 있다[30,37]. 또한, 적용한 비선형 최소자승법(LM)의 연산량은 루프 종료 조건에 따라 루프 반복 연산 회수가 결정되며 최소자승법의 연산량에 비하여 루프 반복 회수에 비례하여 근사화 할 수 있다.

본 연구는 신호원의 도래각 및 시간차 산출에 오차를 유발시키는 부배열간의 거리(L), 음파전달속도(c), 수신센서의 작동상태(w)를 고려하여 그림 1.5와 같이 단일 플랫폼에 분산된 부배열(sub-array)로 입사되는 신호원의 도래 시간차를 이용하여 위치 추정 성능을 향상시키기 위한 방안을 제안한다[38-40]. 또한, 비선형 최소자승 기법인 LM 기법을 기반으로 수중환경에서 발생하는 소나변수의 오차를 최소화하는 최적 방안을 제안하고, 기존의 선형 최소자승법과 상호 비교하여 수중 환경에서의 적용 가능성을 확인하였다.

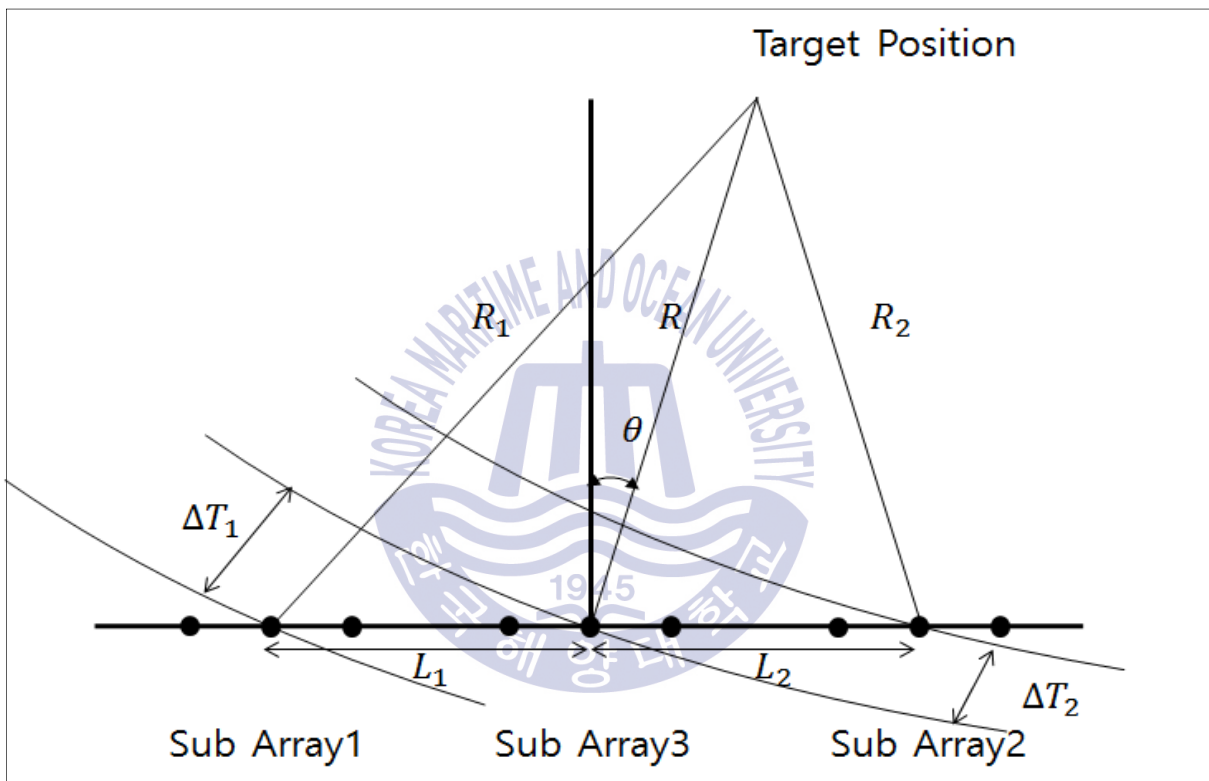


그림 1.5 수중 환경에서의 도래 시간차를 이용한 거리 추정 개념
 Fig. 1.5 Configuration of passive ranging estimation in underwater

1.3 논문 구성

1장의 서론은 연구 배경과 목적을 기술하였고, 2장에서는 분산된 부배열로부터 수신된 신호의 시간차를 이용한 도래각 및 도래 시간차를 이용한 거리 추정 (Generalized Time Difference Of Arrival) 기법을 소개하고, 3장에서는 수중 환경에서 도래각, 도래시간차에 영향을 미치는 변수의 오차에 따른 거리 추정 성능을 시뮬레이션을 통하여 정상 상태와의 차이를 비교, 분석하였다.

4장에서는 신호원 위치 추정 방법의 성능을 향상시키기 위하여 비선형 최소자승(Levenberg-Marquardt) 알고리즘 기반의 수중 환경에서 발생하는 소나 변수의 최적화 방안을 기술하고, 5장에서는 모의 신호를 이용하여 제안 방법과 기존 선형 최소자승 기법과의 성능을 비교, 분석하였다. 마지막으로 6장에서 연구 결과를 요약하고, 향후 연구 계획을 기술한다.



제 2 장 수중 표적의 위치 추정 기법

수중음파탐지기, 소나는 수중 음원으로부터 방사되는 음파의 도래 시간차를 기반으로 음원의 위치를 산출하는 시스템이다. 특히, 수신 신호만으로 정보를 추출하는 수동 소나는 도래 시간차를 추정하여 파면의 곡률을 이용한 위치 추정 기법과 도래 방향을 기반으로 거리별 초점 빔 형성 기법, 교차점을 이용한 삼각 기법 등의 다양한 방법들이 연구되고 있는 추세이다[38-40].

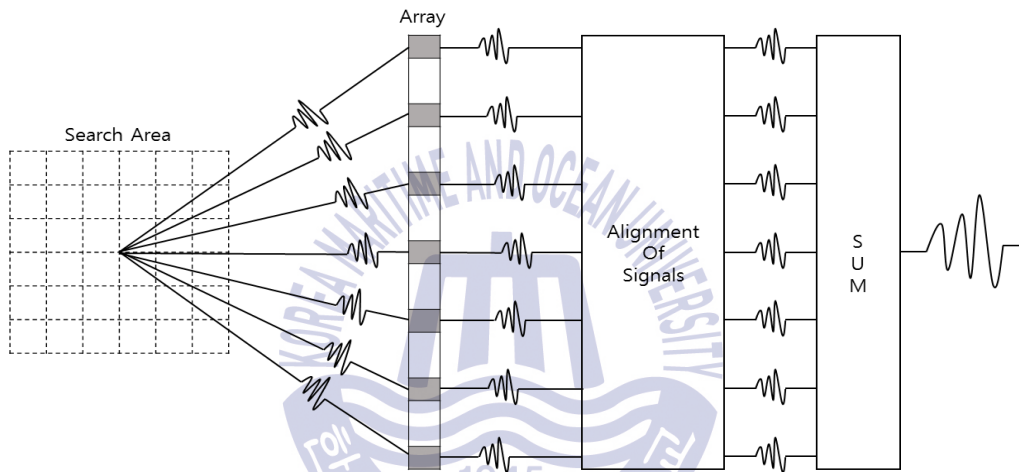


그림 2.1 초점 빔 형성기를 이용한 음원 위치 추정 기법

Fig. 2.1 Source Localization method by Focused Beamformer

초점 빔 형성 기법을 이용하여 표적의 위치를 찾기 위해서 그림 2.1과 같이 관심 영역을 설정한다. 관심 영역 내에서 일정 간격으로 셀을 나누어 각각 빔을 형성하게 된다. 이때 각 셀의 시간 지연 τ_s 는 식 (2-1)로 구할 수 있다.

$$\tau_s(R_s, \theta_s) = (\sqrt{d_i^2 + 2d_i R_s \cos(\theta_s) + R_s^2} - R_s) / c \quad (2-1)$$

여기서, d_i : i -th channel distance, R_s, θ_s : 각 셀의 방위, 거리

$$P_{FB}^2(t) = \left\{ \sum_i w_i x_i(t + \tau_i - \tau_s) \right\}^2 \quad (2-2)$$

초점 빔 형성기의 출력 파워는 식 (2-2)와 같이 나타낼 수 있다. w_i 는 i 번째 센서 출력에 적용되는 가중치이며, x_i 은 i 번째 채널 신호이다. 관심 영역의 모든 셀에 대해 초점 빔 형성기의 출력으로부터 표적이 위치하는 R 과 θ 로 추정한다. 이러한 초점 빔 형성 기법의 경우 다수 표적의 위치를 추정할 수 있지만 관심 영역의 크기와 셀의 크기에 따라서 분해능이 정해지며, 관심 영역이 넓거나 분해능이 좋을수록 많은 계산량을 요구한다.

초점 빔 형성 기반의 수동 거리 추정 기법은 최근 부배열을 이용하여 계산량을 감소시키는 연구가 진행 중이나 표적을 구분하기 위한 해상도를 높이기 위해서는 수신 채널의 확보가 불가피하며, 처리대역에 따라 배열의 길이가 길어지므로 운용성이 떨어지게 된다. 또한 빔폭에 따라 표적 위치의 모호 영역이 발생하며 표적의 위치가 센서 배열과 멀어지면 원거리 신호로 수렴하여 거리에 대한 모호 영역이 증가한다. 이를 보완하기 위하여 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 기법을 사용한다. MVDR 기법은 간섭 신호를 배제하고 원하는 신호를 얻는 방법으로 빔 패턴에서 간섭 신호 방위의 출력을 최소화하며, 공간 스펙트럼에서는 표적 신호 방위에서의 폭을 줄이는 효과로 나타난다. 그림 2.2, 2.3은 MVDR 기법과 초점 빔 형성기의 공간 스펙트럼 출력 예시이며, 표적의 방위는 90° 이다. 초점 빔 형성기의 방위, 거리영역의 폭에 비하여 MVDR 출력의 폭이 줄어든다. MVDR 기법의 경우 초점 빔 형성 기법과 같이 관심 영역과 분해능에 따라 계산량이 달라지며, 계산과정 중에 공분산 행렬의 역행렬을 산출하여야 한다. 이는 채널 개수가 늘어남에 따라 연산량 증가로 실시간 시스템에 적용이 제한된다. 시간 영역에서의 MVDR 빔 형성기 출력 ($B(t)$)은 식 (2-3)과 같다.

$$B(t) = \sum_i w_i x(t - \tau_s) = W(t)^H X(t) \quad (2-3)$$

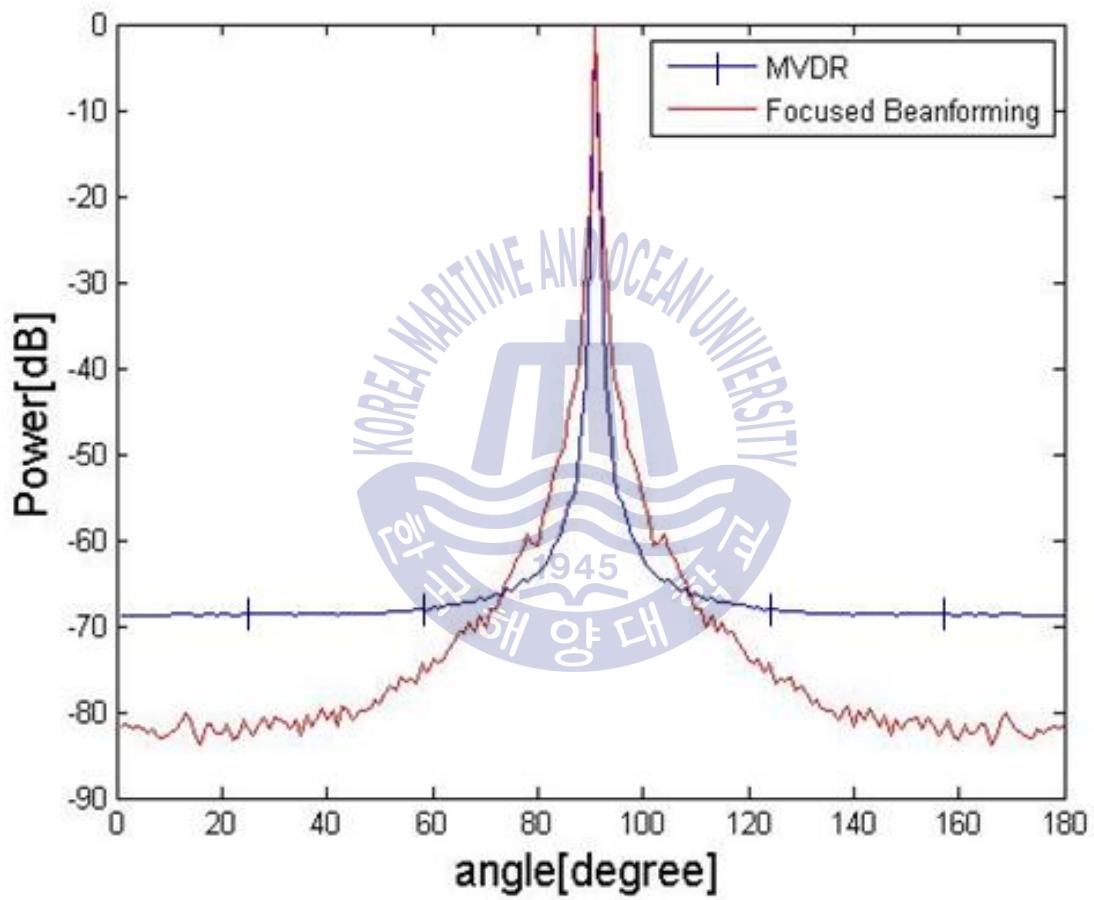


그림 2.2 방위 영역에서의 초점빔 형성기법과 MVDR 출력

Fig. 2.2 Spatial spectrum(Bearing) output power of focused beamformer and MVDR

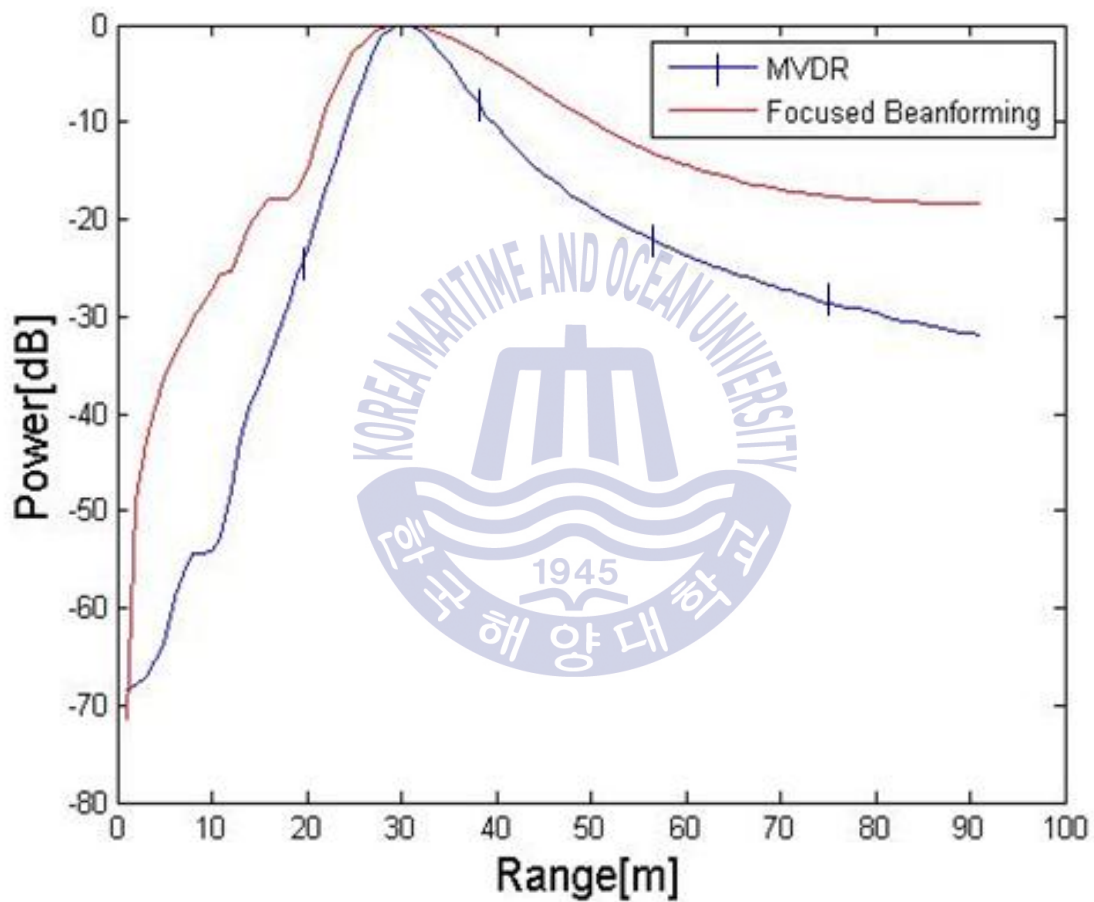


그림 2.3 거리 영역에서의 초점빔 형성기법과 MVDR 출력
 Fig. 2.3 Spatial spectrum(Range) output power of focused beamformer and MVDR

MVDR 빔 형성기의 출력 파워 $P_{MVDR}(t)$ 는 식(2-4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{MVDR}(t) &= E\{|B(t)|^2\} \\
 &= E\{|W(t)^H X(t)|^2\} \\
 &= E\{|W(t)^H X(t) X(t)^H W(t)|\} \\
 &= W(t)^H S(t) W(t)
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

$S(t)$ 는 센서에 수신된 신호의 공분산 행렬로 식 (2-5)와 같다.

$$S(t) = E\{X(t)X(t)^H\} \tag{2-5}$$

식 (2-6)은 MVDR 빔 형성기 $B(t)$ 의 지향 방향의 응답을 유지하면서 분산을 최소화하는 $W(t)$ 를 찾기 위한 식이다. 여기서 e 는 단위행렬이며, 지향벡터이다.

$$\min W^H S W, \text{ subject to } W^H e = 1 \tag{2-6}$$

식 (2-6)을 이용하여 MVDR 빔 형성기의 계수(W)를 구하는 식 (2-7)로 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{S^{-1}e}{e^H S^{-1}e} \tag{2-7}$$

초점 빔 형성 기법은 관심 영역 내 모든 셀 위치에 빔 형성 출력을 산출하여 표적의 위치를 찾는 방법으로서 관심 영역의 크기와 셀 크기에 따라서 계산량이 많아지게 된다. 이에 반해 삼각 측량법(Triangulation method)은 그림 2.4와 같이 센서 배열을 두 그룹으로 나눈 후, 원거리 빔 형성 기법을 사용한다. 신호원이 센서 배열의 길이에 비해 충분히 근거리에서 있다면, 각 부배열에서 목표 신호의 도래각을 추정할 경우, 서로 다른 θ_1 과 θ_2 를 추정한다. 삼각측량법은 다수의 표적이 존재할 때 원거리 빔 패턴 상에 여러 개의 최대값이 존재하며, 최대 측정치들을 융합하여 위치를 추정하여야 한다. 이 때, 원거리 빔 형성기의 분해능에 따라 위치 추정 오차가 결정된다. 추정된 θ_1 과 θ_2 로부터 삼각기법을 이용하여 신호원의 R 과 θ 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

그림 2.4는 두 개의 부배열 중심 사이의 거리를 L 로 정의하고, 표적 신호원과 배열의 기준선과 이루는 높이를 H 로 두어 식 (2-8), (2-9)로 나타낸다.

$$L = H \tan(\theta_1) + H \tan(\theta_2) \quad (2-8)$$

$$H = \frac{L}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)} \quad (2-9)$$

δ 는 센서 배열의 중심에서의 수직선과 목표 신호원의 거리이며, 식 (2-10)으로 나타낼 수 있다. 식 (2-9)와 (2-10)을 이용하여 H 와 δ 을 구한 후 식 (2-11)과 (2-12)을 이용하여 R 과 θ 을 구할 수 있다 [14].

$$\delta = H \tan(\theta_1) - \frac{L}{2} \quad (2-10)$$

$$R = \sqrt{H^2 + \delta^2} \quad (2-11)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{H}{R}\right) \quad (2-12)$$

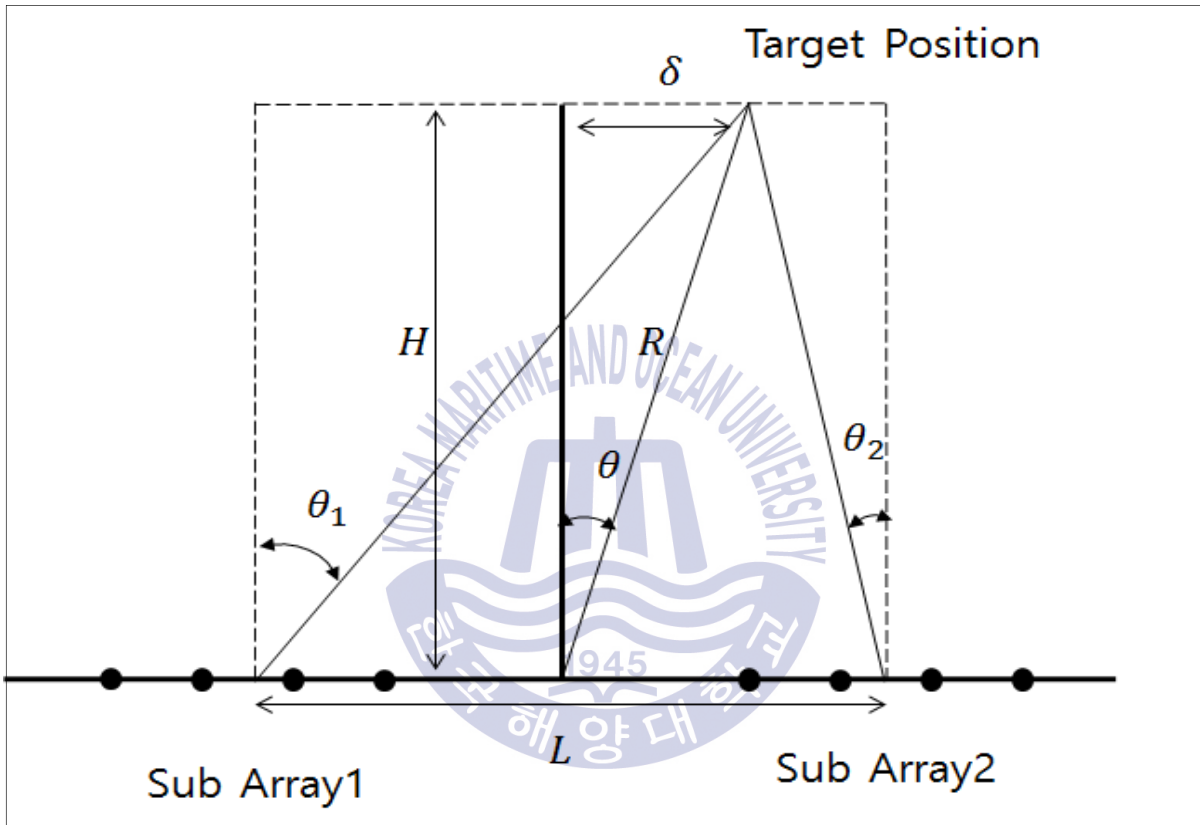


그림 2.4 삼각 측량법을 이용한 거리 추정 기법

Fig. 2.4 Source Localization by Triangulation method

도래각(DOA, Direction Of Arrival)을 이용한 거리 추정기법은 그림 2.4와 같이 각 부배열에서 산출한 방위각의 교차 지점으로부터 표적의 위치를 추정하므로 계산이 간단하며, 비교적 신호의 전달 특성이 안정적인 육상의 고정 안테나 또는 레이더에서 널리 사용되고 있다. 수중에서는 플랫폼 선체를 활용하여 선체의 길이 방향으로의 이득을 극대화하기 위하여 선배열(Line-Array) 형태의 부배열로 구성하여 각 부배열의 방위선의 교차점으로 표적의 위치를 산출한다.

부배열의 도래각 기반 거리 추정 기법은 부배열의 길이에 따라 빔폭이 결정되며, 부배열의 도래각 교차 시, 표적의 통계적인 위치 오차 범위를 고려한 모호 영역(Ambiguity area)으로 표현할 수 있다.

그림 2.5는 거리-방위 영역에서의 표적의 위치에 따른 모호 영역을 도시한 그림이다. 부배열의 길이는 약 1m이며, 관심 영역은 거리 9km 영역까지 분석한 결과이다. 부배열의 빔폭(Beam Width)은 부배열의 수직 방향(Broad side)에서 배열 끝단(End-fire)으로 갈수록 빔폭이 넓어지고, 빔폭의 호(l)는 거리(r), 방위(θ)의 관계식($l = r\theta$)으로 표현할 수 있다. 거리 4km에서 수직(0°)방향의 표적은 약 200m의 통계적 오차를 포함하며, 거리 9km에서 60° 방향의 표적은 약 1000m의 통계적 오차를 포함한다. 이는 도래각 오차가 없는 경우, 빔폭에 의해 발생하는 모호 영역으로 분석된다. 그러나, 수중 환경과 같이 전달 특성이 불안정한 환경에서 도래각 오차가 발생할 경우, 표적의 위치 추정 성능은 도래각 오차와 빔폭에 의한 모호 영역 오차로 가중된다.

수중 환경에서는 도래각(DOA) 기반의 거리 추정 성능의 문제점을 개선하기 위하여 도래각 뿐만 아니라, 도래 시간차를 기반으로 표적의 방위와 거리를 추정하는 수동거리추정(Passive Ranging Estimation) 기법을 적용하고 있다[6-9, 14].

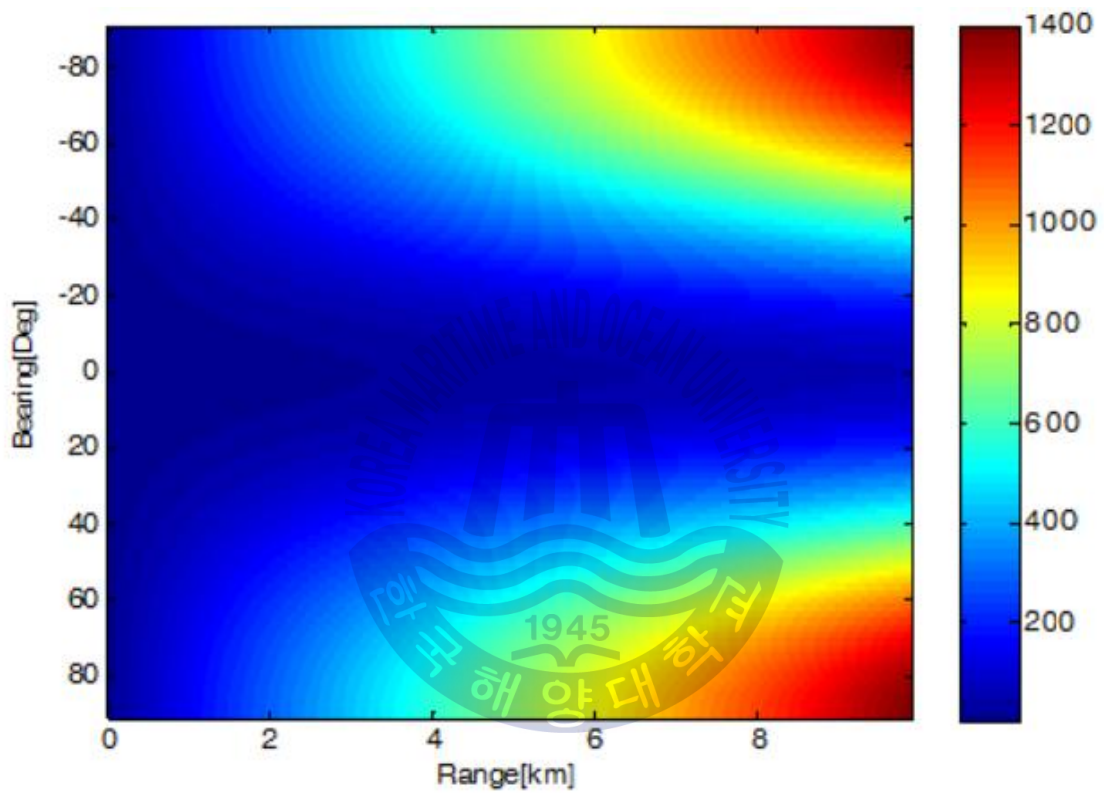


그림 2.5 부배열 도래각에 의한 거리-방위 오차 영역

Fig. 2.5 Bearing-Range Ambiguity from Direction of Arrival on sub-array

그림 2.6은 수동형 음파탐지기의 일반적인 수동 거리 추정 블록도이다. 도래각 기반 거리 추정을 위해서는 최소 2개 이상의 채널 또는 부배열이 필요하지만 도래 시간차를 이용한 거리 추정을 위해서 3개 이상의 부배열로 구성한다. 각 부배열은 배열의 지향성능(DI)을 확보하기 위하여 배열로 구성한다. 각 부배열로부터 수신한 신호는 부배열 각각의 개별 빔형성을 통하여 센서별 시간 영역 데이터를 방위별 시간 영역 데이터로 변환한다. 각 부배열로부터 산출한 방위별 시간 데이터를 이용하여 인접한 부배열간 동일 방위의 시간 데이터의 상호상관 계수(Cross Correlation coefficient)를 산출한다. 이러한 도래 시간차(TDOA) 기반의 시간 지연(Time delay) 방위 추정은 정확한 방위각 산출이 가능하다. 부배열 #1, #2로부터 산출한 방위각과 부배열 #2, #3으로부터 산출한 방위각은 도래각(DOA) 기반의 거리 추정을 수행하게 된다[6-7].

일반적인 수동 거리 추정은 도래 시간차와 도래각을 산출하여 음원의 위치를 추정하는 방법으로 추정 성능에 영향을 미치는 몇 가지 요소를 도출할 수 있다.

각 부배열의 길이는 수신 신호의 신호 대 잡음비(SNR), 즉 신호의 유무를 판단하기 위한 탐지 성능에 영향을 주는 요소이다. 높은 SNR의 확보는 부배열간의 상호상관 연산 시, 정확한 시간 지연을 추정하는 기반이 되지만, 부배열을 구성하는 센서의 고장은 탐지 성능, 즉 SNR을 떨어뜨리게 된다.

부배열간의 거리(L)는 도래각의 교차점 산출 시 정확도에 영향을 주는 요소로서 부배열간의 거리가 멀어질수록 원거리 음원의 위치 정확도를 향상시킬 수 있다. 그러나 부배열간의 거리(L)에 오차가 발생할 경우, 위치 추정 성능에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 위에서 언급한 시스템 요소를 고려하여 위치 추정 성능을 분석하였다.

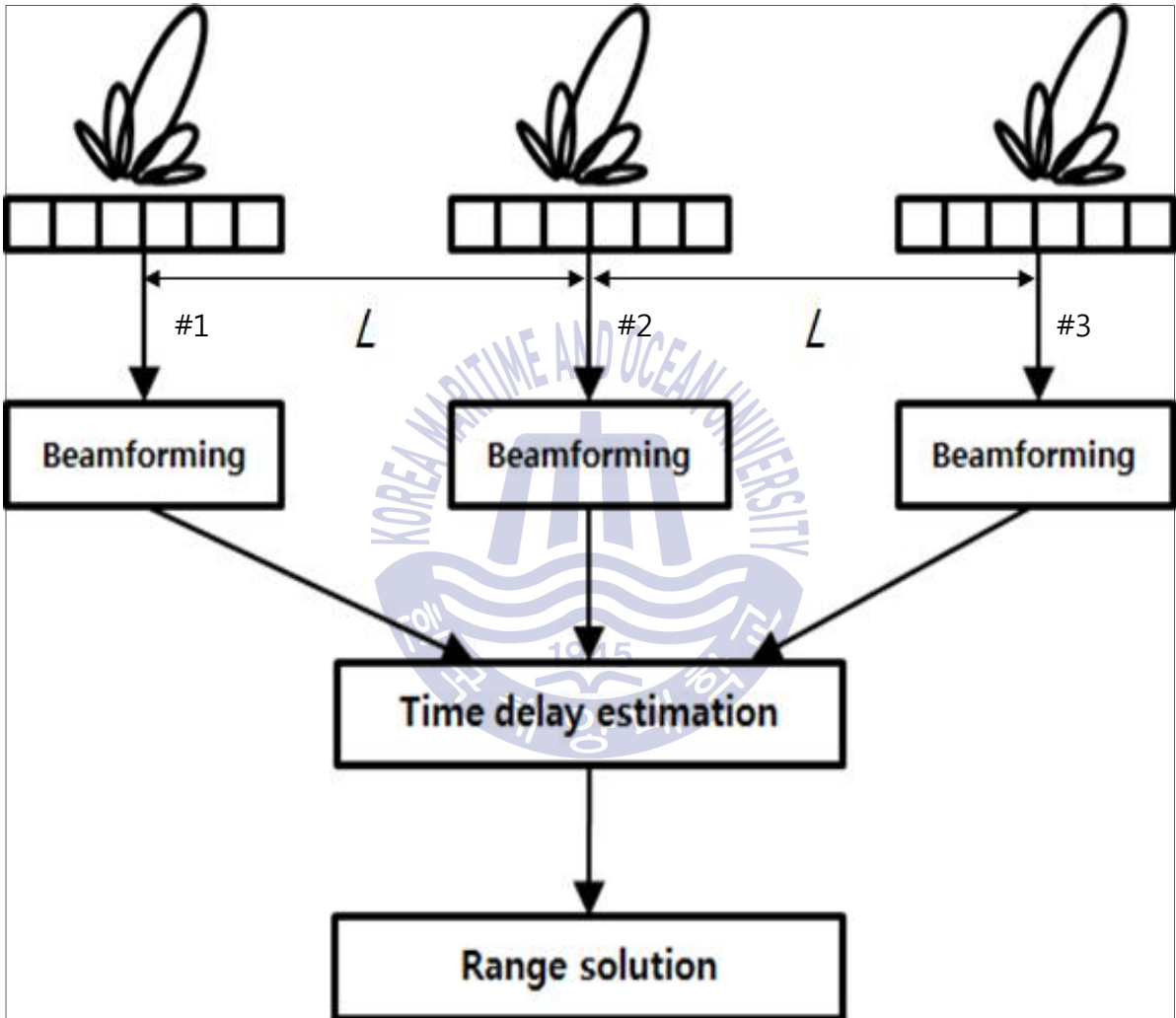


그림 2.6 일반적인 수동 거리 추정 흐름도

Fig. 2.6 General passive ranging estimation block diagram

본 논문에서 수동 거리 추정을 기법을 구체화하기 위하여 수치적으로 다음과 같이 표현이 가능하다. 그림 2.6은 부배열 각각의 빔 형성기를 이용한 도래 시간차와 도래 방향을 추정하는 일반적인 수동 소나의 거리 추정 흐름도로서 이를 위해 수신 센서들이 선형으로 일정한 간격(d)으로 배치되어 있는 3개의 부배열로 구성하였으며, 부배열 사이의 거리는 L 로 설정하였다. 표적에서 방사되는 신호를 $s(t)$ 로 정의하고, 각각의 k 번째 부배열의 i 번째 채널신호를 $A_{k,i}(t)$ 로 정의하며, 시간 샘플 t 에서의 수신된 신호는 다음과 같이 정의한다. 부배열의 채널수는 M 개로 정의하며, 식 (2-13)과 같다.

$$A_{k,i}(t) = s(t + \tau_{k,i}) + n_{k,i}(t) \quad (2-13)$$

여기서, $i = 0, 1, 2, \dots, M-1$,

$$k = 1, 2, 3$$

$n_{k,i}(t)$ 는 부배열 내의 개별 센서에 더해지는 첨가 잡음이며, 공간적으로 상관성이 없다고 가정하였다. $\tau_{k,i}(t)$ 는 표적의 위치로부터 각 센서까지의 거리, 방위에 따른 시간 지연 성분이며, 아래의 식 (2-14)와 같이 산출 가능하다.

$$\tau_{k,i} = \frac{\tau_{k,0} - \tau_{k,i}}{c} \quad (2-14)$$

$$\tau_{k,i} = \sqrt{(d \cdot m_{k,i} - x_s)^2 + y_s^2}$$

d 는 각 부배열을 구성하는 센서 사이의 간격이며, $m_{k,i}$ 는 k -번째 부배열의 i -번째 센서 인덱스(index)이며, x_s 와 y_s 는 직교 좌표계상의 표적의 위치 좌표이다.

$\tau_{k,0}$ 는 k -번째 부배열의 기준 센서와 표적 사이의 도래 시간이며, $\tau_{k,i}$ 는 k -번째 부배열의 각 센서와 표적 사이의 도래 시간이다. c 는 음파의 전달 속도이며, 일반적인 값으로 1500 m/s 를 사용하였다. 본 연구에서는 표적의 도래 방향 정보와 도래 시간차 정보를 모두 사용하여 조합하며, 이 때 도래 시간차는 각 부배열의 빔 형성기 출력 $B_k(t)$ 사이의 상호상관도를 구하여 최대값을 갖는 빔 출력(Max. $B_k(t)$)을 이용하여 상호 시간 지연으로 계산한다. 부배열 사이의 도래 시간차와 도래각은 식 (2-15), (2-16)과 같이 표현된다[15-26]. $TDOA_{32}$, DOA_{32} 도 산출 방법은 아래의 수식과 동일하다.

$$TDOA_{12} = \frac{B_1(t) - B_2(t)}{c} \quad (2-15)$$

$$DOA_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{y_s}{d \cdot m_{k,i}} - x_s \right) \quad (2-16)$$

부배열의 상호 도래 시간차와 도래각 성분을 이용하여 표적의 위치를 산출하며, 실제 수중음파탐지기가 운용되는 수중환경과 플랫폼을 고려해 볼 때, 추정 거리의 정확도는 몇 가지 변수에 따라 좌우된다.

위에서 산출한 거리 추정 성능을 분석하면, 통상 부배열을 중심으로 동일한 거리에서 배열의 수직 방향(broadside)에 비하여 수평 방향(end-fire)으로 표적이 위치할수록 빔폭이 넓어짐에 따라 방위, 거리 오차의 모호 영역이 넓어지게 되며, 표적의 거리가 증가할수록 부배열 간의 상호 시간 지연 시간차가 줄어 오차가 늘어나게 된다. 특히, 표적의 방위가 배열의 수평 방향(end-fire)으로 접근할수록 실제 음파가 전달되는 속도(c)와 신호처리 시 적용하는 값과의 불일치로 인하여 방위 오차 및 오차 바이어스가 증가하게 된다.

또한, 수신 센서의 기하학적인 위치 오차인 부배열 사이의 거리(L), 부배열

내 채널 위치 오차(d)는 소나를 탑재하는 함정에 설치 시 발생 가능하며, 운용 중 다양한 원인으로 초기 설치와 다르게 변할 수 있다. 이는 각 센서 및 부배열로 수신되는 신호의 도래시간차 및 도래각 산출 시 오차의 원인이 된다.

센서의 성능 열화로 인한 수신 감도 불량은 부배열의 빔 출력을 저하시켜, 표적의 방위 및 거리 추정 오차에 큰 영향을 미치게 된다. 위에서 언급한 오차를 고려하여, 산출한 도래 시간차와 도래 방위는 다음 수식과 같이 재정리할 수 있다.

$$T_{12}(t) = TDOA_{12} + \epsilon_t(t) \quad (2-17)$$

$$\theta_{12}(t) = DOA_{12}(t) + \epsilon_d(t) \quad (2-18)$$

식 (2-17), (2-18)로부터 산출한 도래 시간차($T_{12}(t)$)와 도래각($\theta_{12}(t)$)은 앞서 언급한 여러 가지 이유로 인한 오차가 포함된 추정 값으로 정리할 수 있다. 이와 같은 오차를 줄이기 위하여 시간(t)에 따라 측정된 데이터를 기반으로 이론적으로 예측한 기대값과의 편차를 줄이는 선형 최소자승(Linear Least Square) 법이 있다. 선형 최소자승법은 비선형 기법에 비해 연산이 간단하며 연산 소요 시간이 짧으나, 관측 데이터의 특성에 따라 발산(divergence) 또는 국소 위치를 추정하는 불안정한 특성을 나타낸다 [27-28].

3 장에서는 일반적인 수중 표적의 위치 추정 기법을 기반으로 주요 변수에 오차를 발생시켜 정상적인 경우와의 성능을 비교하였다. 오차 발생은 위치 추정 시스템과 수중 환경 특성을 고려하여, 3가지 측면에서 접근하였다. 첫째 수신 센서의 고장, 둘째 부배열의 위치 오차, 마지막으로 음속이 불일치한 경우에 대하여 독립적으로 오차가 발생한 경우 거리 추정 성능과 세 가지 변수에 복합적으로 오차가 발생한 경우 거리 추정에 미치는 영향을 분석하였다.

제 3 장 표적 위치 추정 오차 성능 분석

2 장에서는 도래각 기반의 수동 거리 추정 알고리즘에 관하여 기술하고 거리 추정 성능을 저하시키는 변수를 도출하였다. 3 장에서는 도출한 변수들의 오차가 시스템에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 특히, 도출된 변수 각각의 오차에 따라 도래 시간차(TDOA)를 오차가 포함되지 않은 정상인 경우와 비교하고, 복합적인 오차가 발생한 경우 도래시간차를 고찰한다.

3.1 센서 고장에 따른 오차 성능 분석

음원의 위치 추정을 위하여 분산 센서들간의 도래시간차를 이용하여 위치를 추정한다. 그러나, 수중 환경에서는 신호의 탐지 성능을 높이기 위하여 그림 3.1과 같이 3개 이상의 부배열을 구성하여 수동 거리 추정을 수행한다. 각 부배열은 배열의 채널수(N)에 비례하여 지향 성능(DI, Directivity Index)을 갖는다. 그러나, 특정 부배열에서 노후화된 센서의 성능 열화, 누수 등으로 비정상적으로 동작하는 센서가 발생한 경우, 고장 센서 수만큼 지향 성능이 떨어진다.

그림 3.1은 부배열을 이용하여 신호원으로부터 음향 신호를 수신하는 환경에서 부배열 #2의 일부 센서에 고장이 발생한 모식도이다.

기존의 수동 거리 추정 시스템은 특정 부배열에서 센서의 고장이 발생할 경우, 정상 동작하는 다른 부배열에서 같은 위치에 있는 센서들에 강제로 고장을 발생시킴으로써, 전체 부배열의 지향성능은 떨어뜨리지만 빔 특성을 부배열마다 동일하게 적용하여 부배열간의 상호상관 특성을 유지하여, 거리 추정을 수행한다. 본 논문에서는 정상적인 부배열 성능을 유지시키고, 특정 부배열의 오차만을 이용하여 거리 추정에 미치는 영향을 분석하였다.

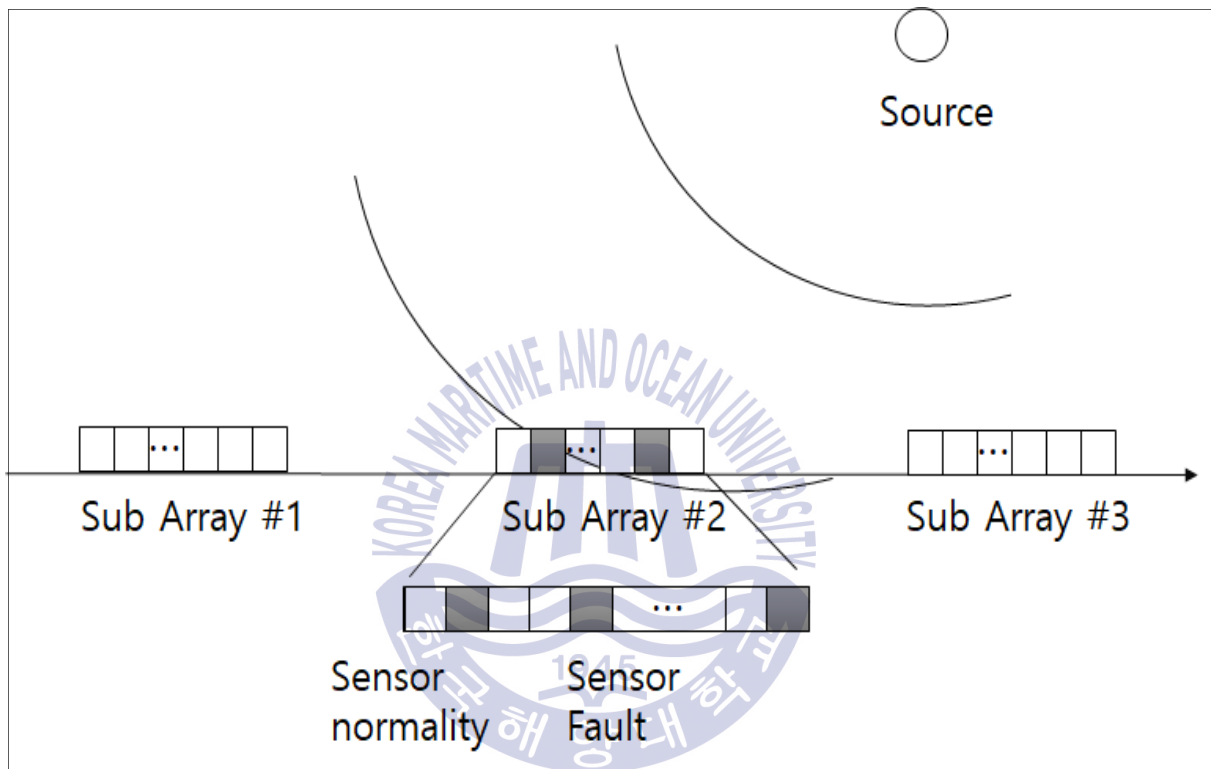
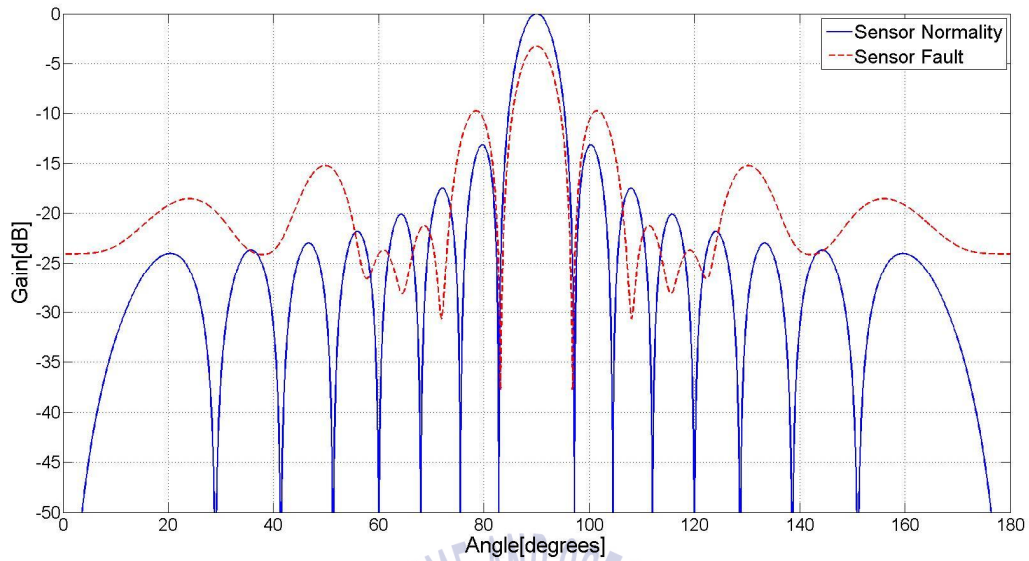


그림 3.1 센서 고장에 따른 오차 발생 모식도
 Fig. 3.1 Sensor faults configuration on sub-array

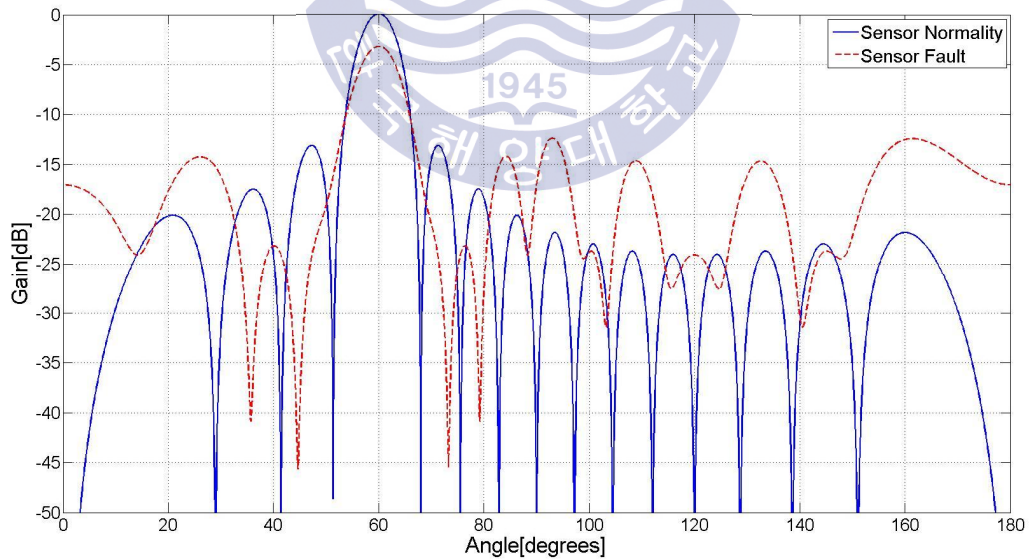
설계 주파수와 채널수를 기반으로 구성된 부배열(Sub-array)은 그림 3.2와 같이 방위별 이득으로 배열 성능을 분석한다. 성능은 보통 두 가지 측면에서 정의할 수 있다. 첫 번째 성능 지수는 주엽(Main beam)에 대한 부엽(Side lobe)의 크기를 나타내는 지향 성능(Directivity Index)이며, 두 번째 성능 지수는 주엽의 -3dB 빔폭(Beam Width)이다. 빔폭은 지향 방위의 방위 영역의 오차 범위를 표현하는 지수로서 빔폭이 작을수록 오차를 형성하는 모호 영역(Ambiguity area)이 줄어들어 방위 추정 정확도를 향상시킬 수 있다.

그림 3.2는 수동 거리 추정 시스템의 3개 부배열 중 두 번째 부배열의 일부 센서에 고장을 발생시킨 경우 빔패턴과 정상인 경우 빔패턴을 비교하여 나타내었다. 각각의 부배열 채널수는 16개로 구성하였다. 그림 3.2(a)는 신호원의 방위가 90° , 배열의 정면 방향(broadside)이며, 그림 3.2(b)는 60° 에 신호원이 위치한 경우이다. 음원 방향이 정면 90° 에서 0° , 180° 로 이동할수록 배열의 유효 길이(Effective Length)가 감소하여 빔폭이 늘어나며, 0° , 180° (End-fire) 영역에서는 배열의 효과가 배제되어 단일 센서의 빔폭 효과를 갖는다. 따라서 적용한 선배열은 정확한 음원의 방위 추정을 위하여 정면 방향을 기준으로 $\pm 45^\circ \sim \pm 60^\circ$ 영역으로 제한된다.

고장 채널 수는 정상에 비해 절반으로 설정하였다. 정상인 경우에 비하여 처리하고자 하는 채널이 줄어 지향 성능(DI, Directivity Index)이 -3dB 감소하여 부엽 준위가 주빔의 성능에 영향을 미치게 된다. 고장 센서를 포함한 부배열을 이용하여 부배열 사이 방위별 상호상관을 통하여 얻어진 TDOA로부터 표적의 거리를 추정하게 된다. 빔폭은 배열의 크기와 파장으로 정의할 수 있으며, 채널 고장 개수 및 위치에 따라 부엽의 크기가 주빔의 크기 이상(Grating lobe)으로 나타난다. 이러한 빔패턴의 성능 열화는 음원의 방위 및 거리 추정 성능에 영향을 미치게 될 것으로 분석된다.



(a) Source Bearing : 90°



(b) Source Bearing : 60°

그림 3.2 센서 고장에 따른 빔패턴 분석, (a) 90° , (b) 60°

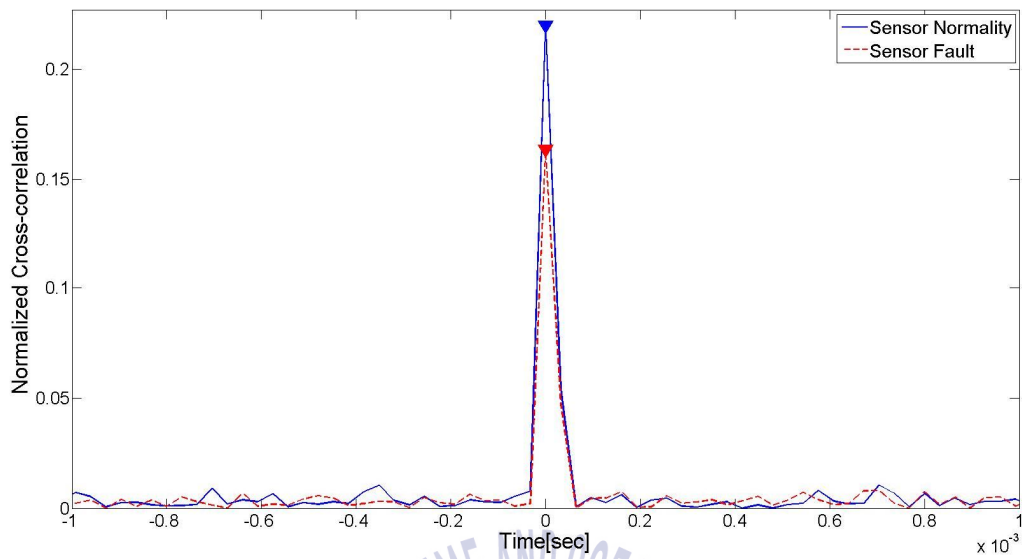
Fig. 3.2 Comparison of beam pattern gain with sensor faults

그림 3.3은 그림 3.2의 부배열의 센서 고장 상태에서의 도래시간차 성능을 분석한 결과이다. 신호원의 방위가 (a)90°, (b)60°의 빔 특성을 기반으로 센서 고장이 없는 경우의 상호상관 크기는 각각 실선으로 나타내었고, 센서 고장이 있는 경우는 점선으로 도시하였다. 그림의 가로축은 도래시간 오차를 나타내며, 세로축은 상호상관의 크기이다.

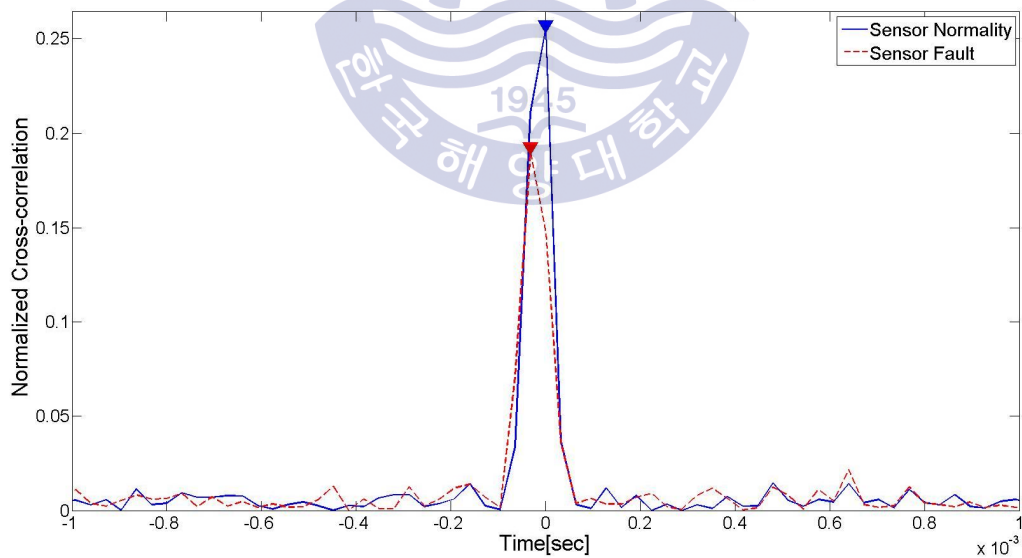
그림 3.3(a)는 음원의 방위가 90°에서 도래시간 오차에 따른 상호상관 크기를 나타낸 그림으로 센서의 정상 상태(실선)와 고장 상태(점선)에서 도래시간 오차는 발생하지 않으며, 상호상관의 크기 차만 발생한다. 단일 음원으로 인해 도래시간 오차가 발생하지 않는 것으로 분석되며, 다중 음원 환경에서는 영향을 받을 것이다. 그러나, 부배열의 일부 센서의 고장으로 인한 지향 성능(DI, Directivity Index)이 떨어짐으로 인해 정상 상태에 비해 상호상관의 크기가 낮게 나타난다.

그림 3.3(b)는 음원의 방위가 60° 방위의 도래 시간차에 따른 상호상관 크기를 나타낸 그림이다. 그림 3.3(a)와는 달리, 센서 고장 시, 정상 상태에 비해 도래시간 오차가 발생하며 이는 센서 고장에 의한 거리 추정 성능에 영향을 미치는 요소가 될 것이다. 상호상관의 크기는 그림 3.3(a)와 유사하게 정상 상태에 비해 지향 성능만큼 낮게 나타난다. 또한, 그림 3.3(a), (b)의 상호상관의 폭은 빔폭 특성상 90°에 비해 60°에서 넓게 형성되어 60° 방위에서 통계적 오차 범위가 넓게 형성됨을 분석할 수 있다.

센서 고장 상태에서의 도래시간차를 이용한 거리 추정 시, 발생하는 오차는 지향 성능, 빔폭에 의한 상호상관 폭으로 분석되며, 추가적으로 수신 신호의 샘플링 또는 상호상관 데이터의 보간율에 따라 샘플링에 의한 양자화 오차를 최소화할 수 있다.



(a) Source Bearing : 90°



(b) Source Bearing : 60°

그림 3.3 센서 고장에 따른 도래시간차 오차 분석 (a) 90° , (b) 60°

Fig. 3.3 TDOA error analysis in case of Sensor Faults

수중음파탐지기의 센서는 상시 수중 환경에서 운용되며, 장시간 운용 시 센서의 노후화, 각 구성품들의 재질 변화 또는 누수 등으로 인하여 채널의 수신 감도가 떨어지며 고장이 발생한다.

그림 3.4는 부배열에 고장 센서 수에 따른 TDOA 추정 오차 경향이다. 배열을 구성하는 센서별 수신 신호는 케이블 두께, 가닥수를 최소화하여 신호 및 전원을 연동한다. 만약 1개 채널에 고장이 발생할 경우, 부배열의 다른 채널에 영향을 미칠 수 있다. 센서 고장으로 인해 발생한 고장 패턴은 빔 출력 특성에 영향을 미치는 변수로서, 부배열의 성능 열화를 최소화하는 패턴이 발생하도록 시스템을 설계, 구현한다. 본 연구에서는 고장 패턴과는 무관하게 연속 채널의 고장을 고려하여, 그림 3.4와 같이 부배열의 고장 센서의 개수를 50%까지 늘여 가며 TDOA의 성능을 분석하였다. 신호음의 위치는 3 km, 적용한 음속은 1500 m/s 이다.

그림 3.4로부터 채널의 고장에 의해 발생한 TDOA 오차는 고장 채널 수에 따라 오차는 증가하는 추세이지만, TDOA 오차는 다른 변수들의 오차에 비해 미약하게 나타난다. TDOA는 지향하는 방위에서 발생하는 오차가 거리 추정에 큰 영향을 미치게 되지만, 채널의 고장은 탐지 신호의 신호 대 잡음비 측면에서 줄어들어 방위각 측면에서 통계적인 변화량은 미약하다. 이는 단일 음원을 이용한 시뮬레이션 결과로 분석된다. 그림 3.4에서 발생하는 거리 추정 오차는 정상으로 동작하는 부배열과 오차가 발생한 부배열의 빔 특성이 불균일하여 발생하는 오차로 분석된다. 일반적으로 특정 부배열에 고장이 발생한 경우 나머지 부배열에 동일한 위치에 고장을 발생한 경우, 탐지성능은 떨어지나, TDOA는 이론적으로 정상에 가까운 성능을 보여준다. 단일 음원 환경에서 타 변수와 복합 오차를 발생한 경우, 센서 고장이 TDOA에 미치는 영향이 미약함을 확인할 수 있다.

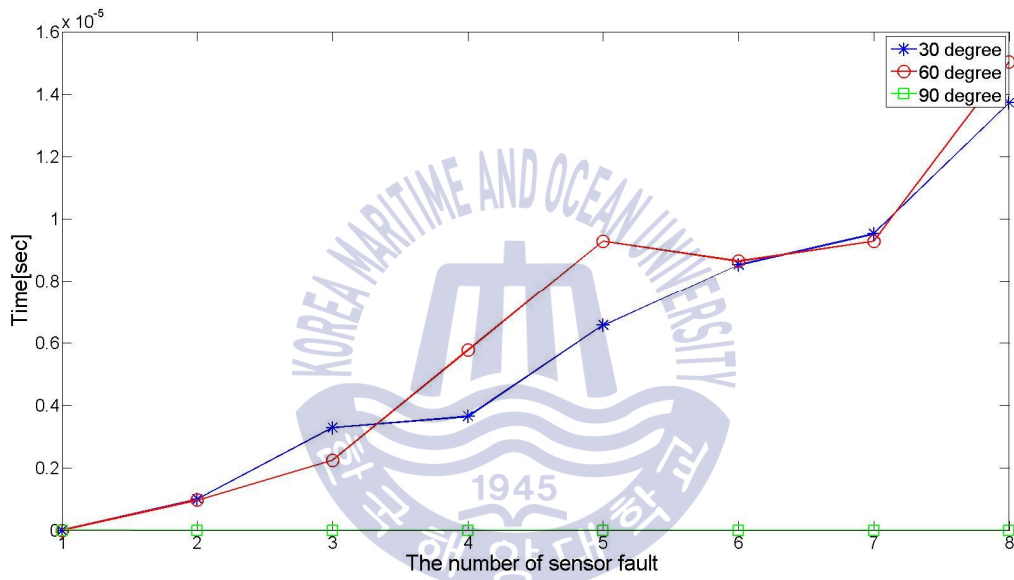


그림 3.4 부배열 센서 고장 수에 따른 도래시간차 오차 분석

Fig. 3.4 TDOA error analysis of number of Sensor Faults

3.2 센서 위치 오차에 따른 오차 성능 분석

수중음파탐지기는 그 목적에 따라 다양한 형태로 수중에서 운용된다. 특히, 함정의 크기, 대상 표적의 소음원 등을 고려하여 통상 원통형, 선배열 등의 형태를 갖는다. 이러한 형태의 배열은 고정된 구조물 또는 튜브(호스) 내에 비교적 정확한 위치에 센서를 설치하므로 상대적인 센서 사이의 거리로 센서의 위치가 정해진다.

그림 3.5는 수동 거리 추정을 위해 구성한 특정 부배열의 위치 오차 발생을 위한 모식도를 나타낸다. 부배열의 위치는 3차원의 직교좌표계(x, y, z)에 위치하며, 신호원과 부배열간 broadside 영역에 오차를 최대화 위하여 표적과 부배열이 동일 평면상에 놓이는 축에 위치 오차 Δy 를 적용하였다. 신호음의 방위에 따른 도래시간 오차는 ϵ_t 로 표현하였다.

신호원의 거리 추정을 위하여 3개 이상의 분산된 부배열로 구성할 경우, 각각의 부배열 내의 개별 센서 위치는 한 개의 구조물(원통형, 선배열 등)로 제작하여 비교적 정확하게 개별 센서를 설치할 수 있으나, 함정 선체에 부배열을 부착하여 운용할 경우, 그림 3.6과 같이 각 부배열간 3차원(x, y, z) 정렬(alignment)이 반드시 필요하며, 부배열 간의 상대적인 위치 오차 발생은 표적의 거리 추정 정확도에 영향을 미치게 된다.

그림 3.6은 신호원과 소나의 부배열간의 기하학적 배치를 도식화하였다. 신호원이 부배열로부터 $x-y$ 평면상에 위치한 경우 부배열 사이의 정상적인 상호상관 출력이 가능하다. 그러나 y -axis 방향의 부배열의 위치 오차가 발생할 경우 그림 3.5와 같이 $\max. \Delta y$ 의 효과로 인한 오차 영향을 최대화할 수 있다. Δz 는 $x-y$ 의 수직으로 해상에서는 오차의 영향이 거의 나타나지 않으며, Δx 에 대한 ϵ_t 는 $\Delta x \cos(\theta)$ 대한 영향성 분석이 가능하지만 본 절에서는 생략하였다.

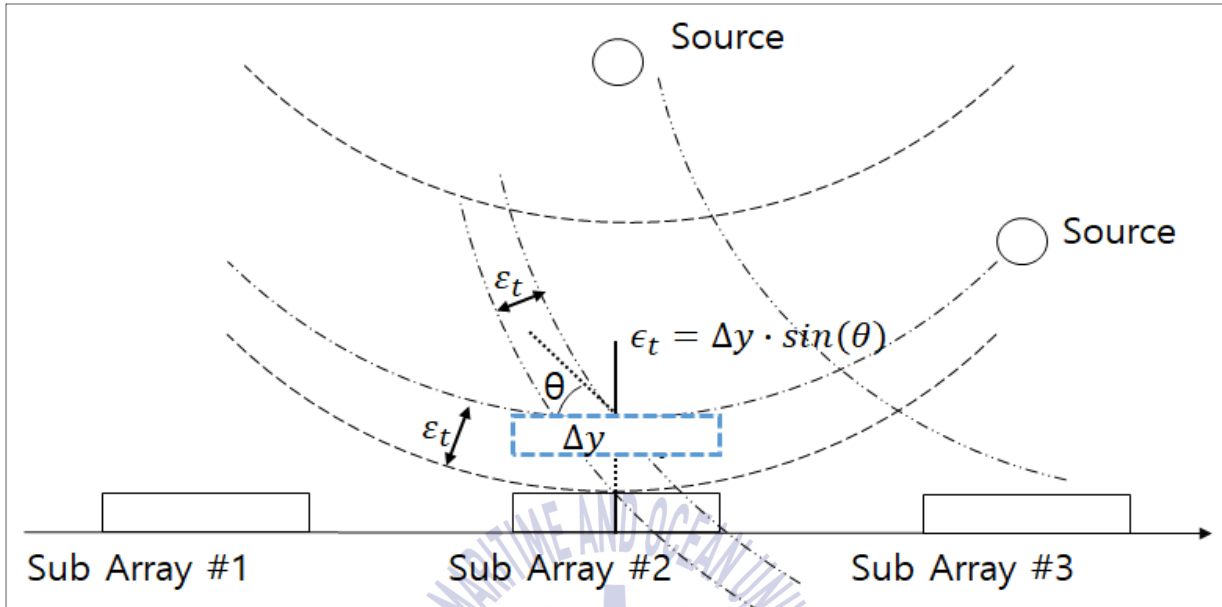


그림 3.5 센서 부배열 위치 오차에 따른 오차 발생 모식도

Fig. 3.5 Sub-array location error configuration

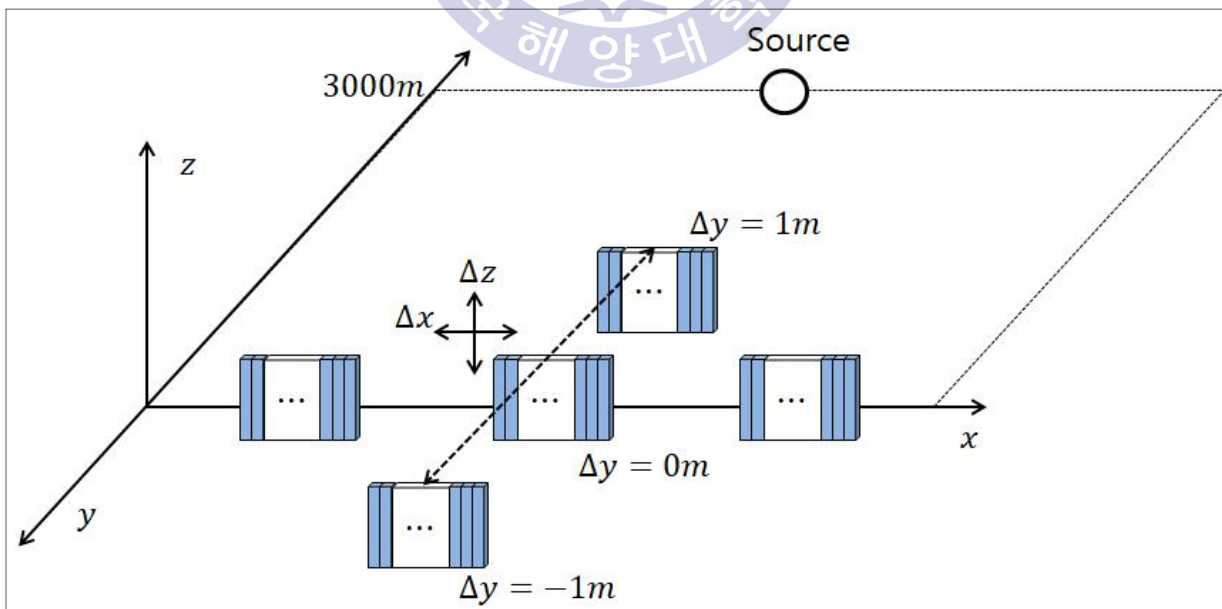


그림 3.6 부배열과 신호원과의 기하학적 배치

Fig. 3.6 Sub-array geometry from the source

그림 3.7은 부배열의 위치 오차에 따른 상호상관 특성을 나타낸다. 부배열의 오차는 선체와 수직 방향(y)을 고려하여, $\Delta y = 0$ 인 부배열의 위치 오차가 없는 정상 처리 결과를 실선으로 표현하였고, 점선은 부배열의 위치 오차 $\Delta y = 0.02$ m에서 상호상관 오차가 발생함을 보여준다. 부배열의 위치 오차가 없는 경우, 상호상관 오차가 0 sec 로 관측되며, 부배열 오차가 발생할 경우, 정상적인 결과에 비해 시간 지연 오차가 발생한다.

그림 3.8은 3개의 부배열 중, 가운데 부배열(#2)의 Δy 를 $-0.03 \sim +0.03$ m로 변경하면서 거리 3000 m, 방향(θ)을 30° , 60° , 90° 에서의 신호원에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 TDOA 상호상관 오차를 분석한 결과이다. $\Delta y = 0$ 인 경우, 신호원의 방위별 상호상관 오차는 0 sec 로 수렴하고 있으며, Δy 가 -0.03 m 또는 $+0.03$ m로 증감할수록 TDOA 오차가 증가되며, 방위별 오차가 각도에 비례함을 확인하였다. 신호원의 방위가 30° 방위일 때 시뮬레이션 오차 구간($-0.03 \sim +0.03$ m) 동안 TDOA 오차가 발생하지 않으며, 60° 방위에서는 ± 0.02 m 이상의 오차 구간에서 TDOA 오차가 발생하고, 90° 방위에서는 ± 0.015 m 이상의 오차 구간에서 TDOA 오차가 발생하기 시작한다. 이는 Δy 방향으로 발생한 부배열의 위치 오차로 인해 배열의 broadside 방향인 90° 에서 상대적으로 오차가 높게 형성되고 있으며, Δx 방향으로 동일한 조건의 부배열 위치 오차를 발생할 경우, end-fire 영역으로 오차가 높게 형성됨을 예상할 수 있다.

신호원과 부배열 사이의 기하학적인 위치 오차는 특정 부배열의 고장 상태에 비해 TDOA의 상호상관 오차가 높게 발생한다. 이는 상호상관으로 인한 도래각 추정기법은 신호원의 크기보다 위상의 변화량에 의존함을 알 수 있다.

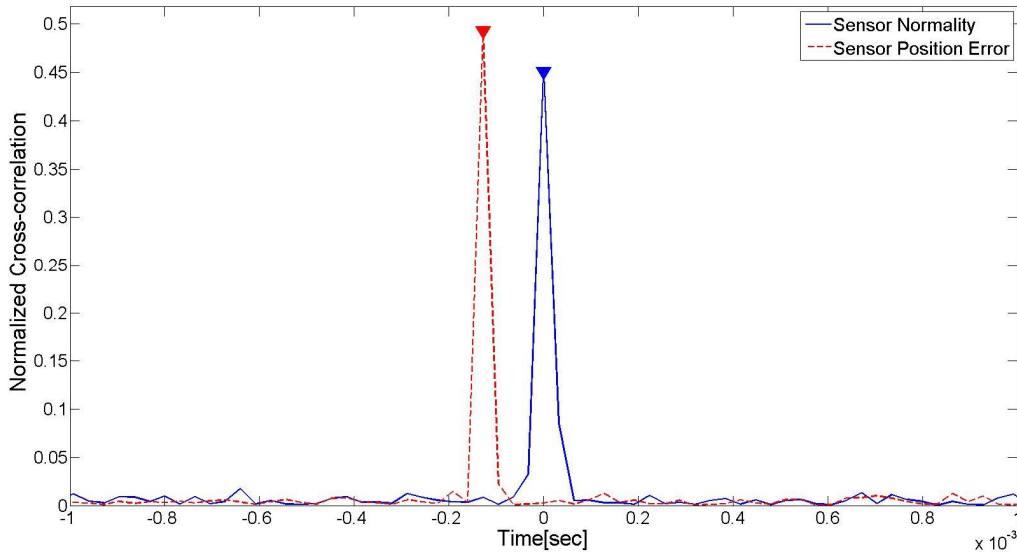


그림 3.7 센서 위치 오차에 따른 상호상관

Fig. 3.7 Comparison of cross correlation with the sub-array location error

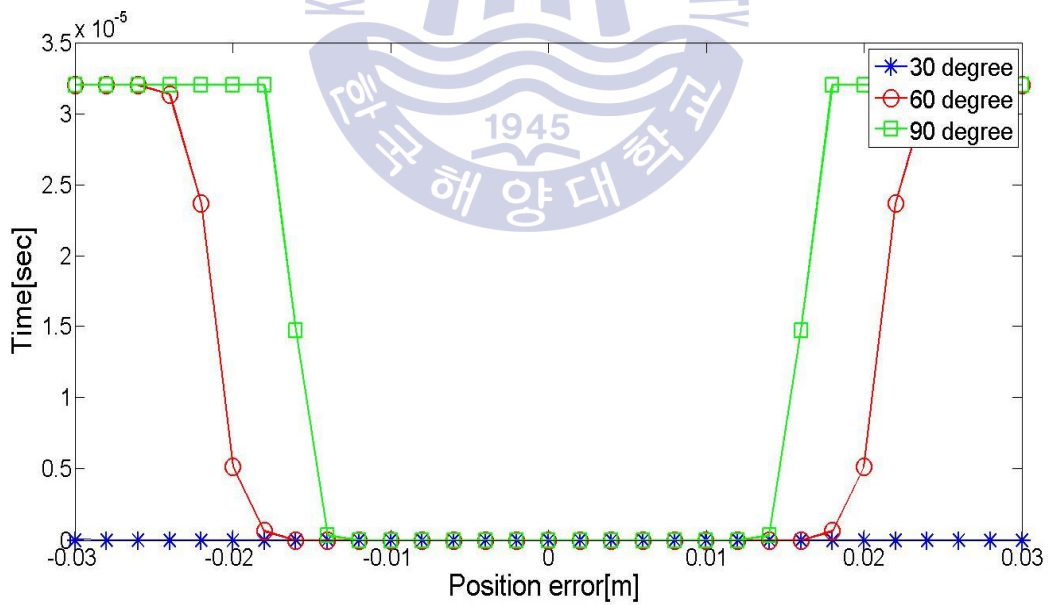


그림 3.8 센서 위치 오차에 따른 도래시간차 추정 오차

Fig. 3.8 Comparison of TDOA with the sub-array location error

3.3 음속 오차에 따른 오차 성능 분석

지금까지 부배열을 구성하는 센서의 고장 상태와 특정 부배열의 위치 오차가 TDOA에 미치는 영향을 분석하였다. 위치 추정 오차의 원인들 가운데 마지막으로 수중 음속 부정합에 의한 TDOA 추정 성능을 분석하고자 한다.

그림 3.9는 음파 전달속도(c)의 불일치에 의한 TDOA 상호상관 오차 영향을 분석하기 위한 모식도이다. 수중에서의 음파 전달속도는 그림 3.9의 우측의 특징과 같이 수심에 따라 다르게 분포한다. 수중에서의 음파 전달속도는 수심에 따른 압력, 수온 등의 변화에 따라 계산되기 때문이다. 이는 그림의 좌측에 수중 표적이 방사 소음을 발생할 경우, 다양한 경로를 통하여 수심별 음파전달속도에 의존하여 수중음파탐지기의 배열(Array)로 수신된다. 일반적으로 수중에서의 음파 전달속도는 1450~1550 m/s 의 분포를 가지며, 배열의 위치가 해저면 바닥에 위치할 경우, 수중에 비해 음속이 증가한다.

수중에서의 다양한 전달경로로 인하여 기여되는 수심별 음파전달속도와는 달리, 수중음파탐지기는 배열(Array)의 운용 심도에 따라 측정된 단일 음속값(System 적용 음속)을 기반으로 방위, 거리 추정을 위한 변수로 적용하며, 실제 수중에서 수신하는 신호원의 소음은 운용 해역의 수심별 음속 분포로 구성되는 음속이 합성되어 수신되므로 정확한 음속 추정이 불가능하다. 부배열 또는 개별 센서로부터 수신된 신호와 인접한 신호들 사이의 상호상관을 통하여 산출한 시간차(Time Delay Estimation)와 음파 전달속도와의 연산을 통하여 거리 또는 방위로 환산하므로 정확한 음파 전달속도의 적용은 거리, 방위 오차를 줄이는 역할을 한다.

그림 3.9와 같이 신호원으로부터 발생한 소음은 음파 전달속도(c)를 가지고 부배열의 n 번째 채널에 수신된다. 음파 전달속도가 채널별 수신 신호($x_n(t)$)에 미치는 영향은 아래 수식과 같이 정리된다[3-5].

$$x_n(t) = \exp^{(2\pi ft + d_n \cos \theta / c)} \quad (3-1)$$

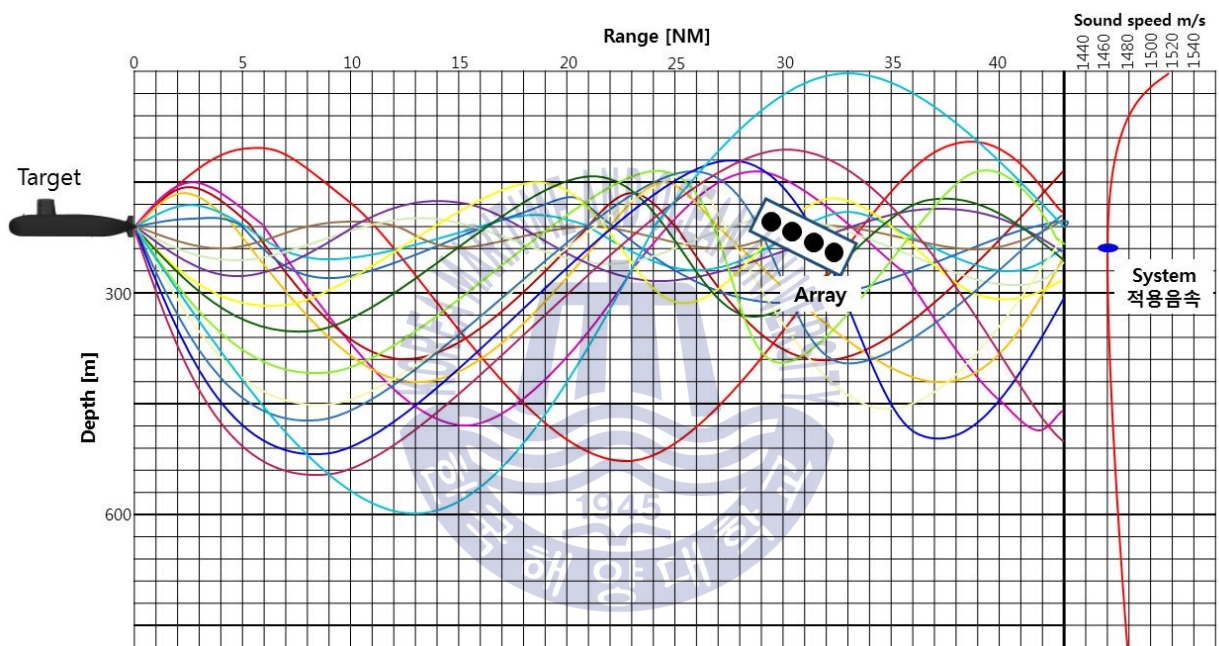


그림 3.9 음속 부정합 발생 모식도

Fig. 3.9 Configuration of sound speed mismatch

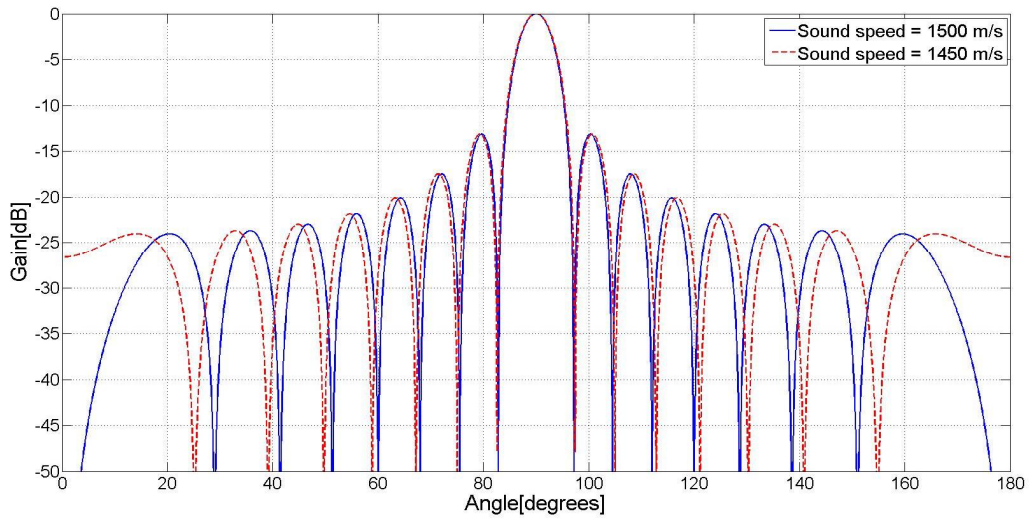
신호원이 $\theta = 90^\circ$ 방향에서 음파 전달속도 1500 m/s로 부배열에 전달될 경우, 도래각 성분의 공간 필터를 위한 부배열의 빔 형성 출력 시, 전달된 음속과 동일한 1500 m/s 를 시스템에 적용한 경우, 그림 3.10(a)의 실선과 같으며, 전달된 음속과 상이한 1450 m/s 를 시스템에 적용한 경우, 그림 3.10(a)의 점선과 같다. 음속이 일치한 경우와 상이한 결과로부터, $\theta = 90^\circ$ 방향에서는 음속과 무관하게 식 (3-1)의 지수 뒷항이 모두 0 이므로, 90° 방위는 음속의 오차와 상관없이 지향가능하다. 다른 변수의 오차가 없다고 가능하면, 음속 불일치에 따른 위상 성분의 오차는 발생하지 않는다.

신호원이 $\theta = 60^\circ$ 방향에서 음파 전달속도 1500 m/s 로 부배열에 전달될 경우, 도래각 성분의 공간 필터를 위한 부배열의 빔 형성 출력 시, 전달된 음속과 동일한 1500 m/s 를 시스템에 적용한 경우, 그림 3.10(b)의 실선과 같다. 그림 3.10(b)의 점선은 음속의 불일치에 따른 빔 출력 결과이며, 이 때 시스템에 적용한 음속 값은 1450 m/s 이다. $\theta = 60^\circ$ 방향에서는 음속의 불일치에 따른 오차는 식 (3-1)의 지수의 뒷항으로부터 $\cos\theta$ 에 비례하여 발생하게 된다. 이 때 발생하는 위상 오차는 식 (3-2)와 같이 음속 오차의 크기에 비례하여 입사 방위별 오차로 표현할 수 있다[3-4].

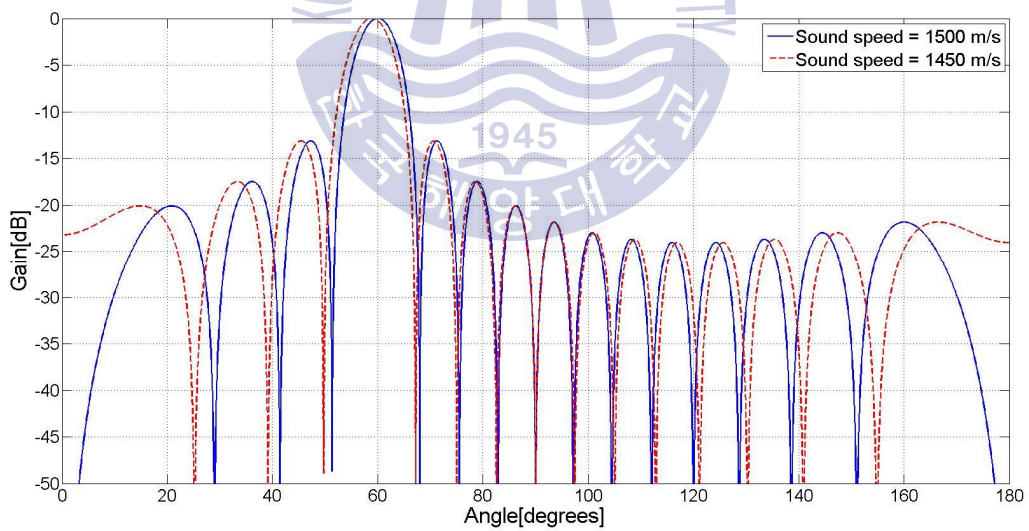
$$\epsilon_{phase} = \frac{c}{\hat{c}} \cos\theta \quad (3-2)$$

여기서, c : 신호원의 음파전달속도, \hat{c} : 시스템 적용 음파전달속도

θ : 신호원의 도래 방위각



(a) Source Bearing : 90°



(b) Source Bearing : 60°

그림 3.10 음속 오차에 따른 빔패턴 비교, (a) 90° , (b) 60°

Fig. 3.10 Beam pattern analysis on sound speed mismatch

그림 3.11은 신호원이 $\theta = 60^\circ$ 방향에서 음파 전달속도 1500 m/s 로 부배열에 전달될 경우, 시스템에 적용한 음속 값과 일치한 경우(실선)와 불일치(점선)에 따른 상호상관 오차를 비교하여 나타내었다. 실선과 같이 음속이 일치한 경우 상호상관 오차가 없으며, 음속이 50 m/s의 오차를 가진 경우 점선과 같이 상호상관 오차가 다른 변수들에 비해 높게 형성된다.

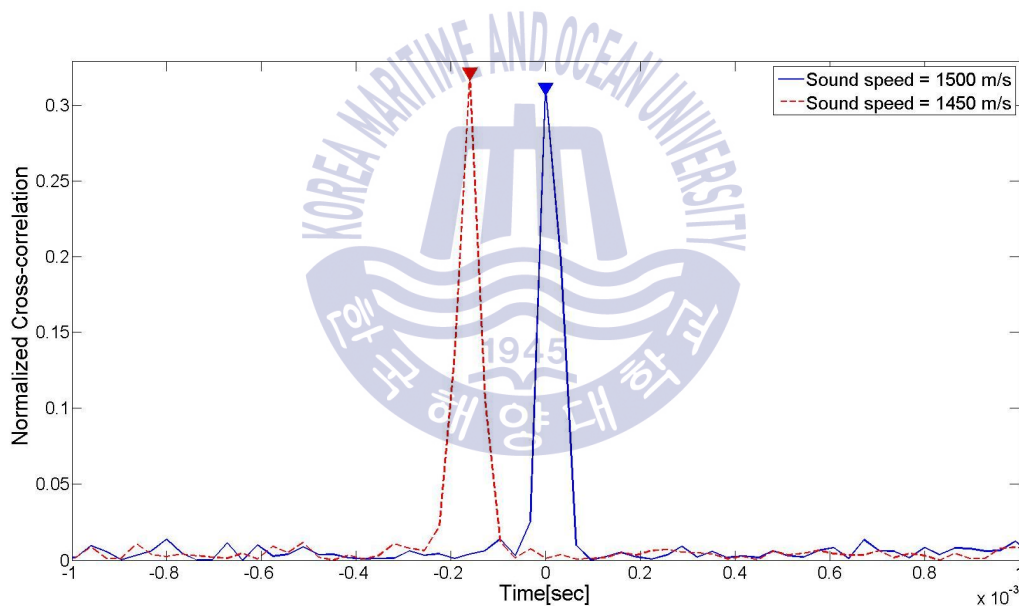


그림 3.11 음속 오차에 따른 상호상관

Fig. 3.11 Cross correlation difference on sound speed mismatch

그림 3.12는 음속의 부정합에 따른 신호원의 방위별 $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 방향에서 상호상관 오차를 비교하여 나타내었다. 신호원의 방위가 90° 인 경우, 식 (3-1)에서 언급한 바와 같이 음파 전달속도의 불일치에 따른 오차는 발생하지 않는다. 신호원의 방위가 $30^\circ, 60^\circ$ 인 경우, 일치하는 지점(1500 m/s)을 제외하고 나머지 음속에서는 식 (3-2)의 변화량(ϵ_{phase})에 따라 TDOA 오차를 발생시킨다. 이는 그림 1.2에서 분석한 음속 부정합에 따른 음원의 방위 추정 오차가 TDOA의 성능에 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다.

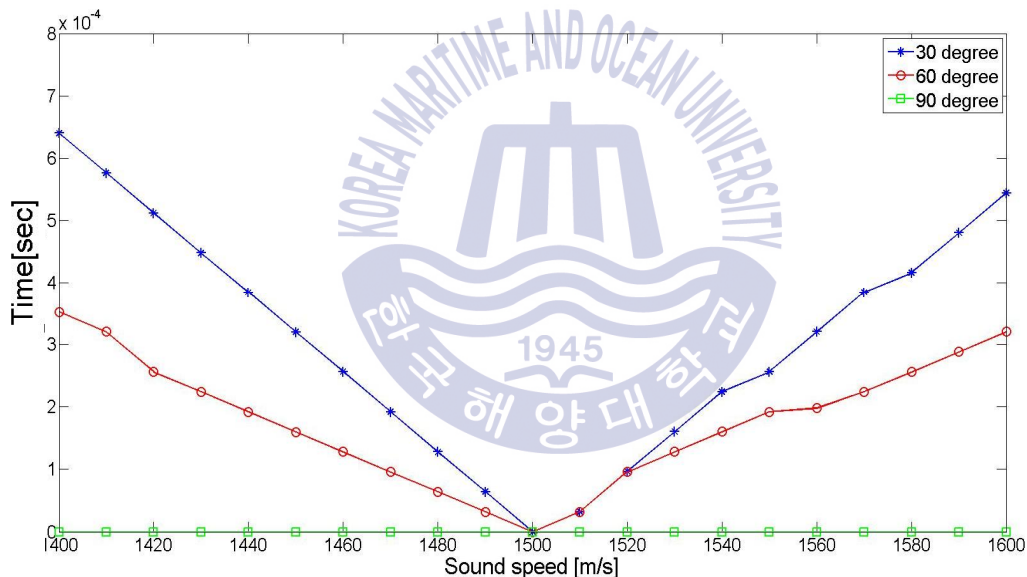


그림 3.12 음속 부정합에 따른 도래시간차 추정 오차
 Fig. 3.12 TDOA analysis on the sound speed mismatch

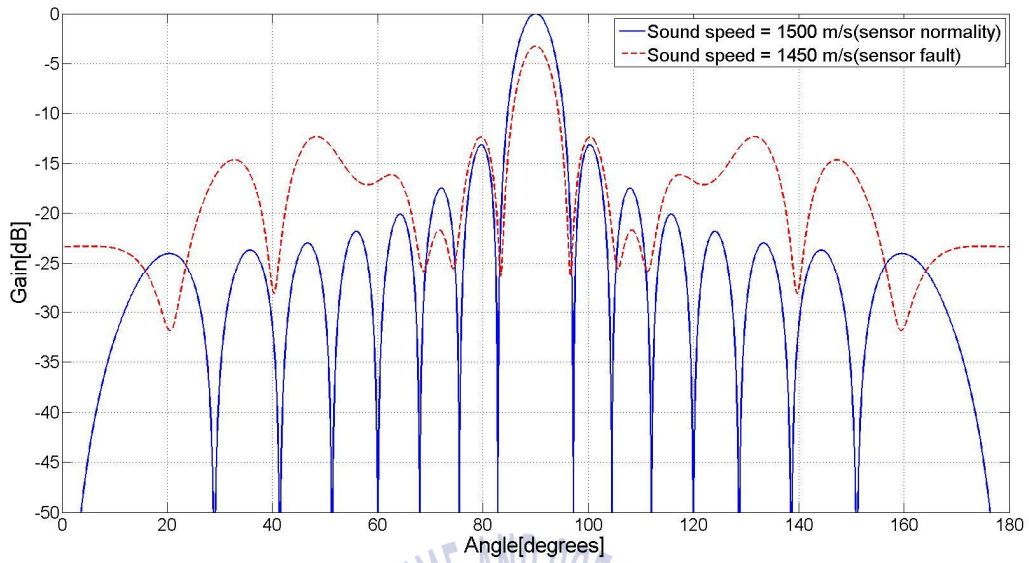
3.4 복합 오차에 따른 오차 성능 분석

지금까지 기술한 내용은 2장에서 도출한 수중 표적의 위치 추정 오차를 발생하는 요소들에 대하여 3가지 단일 변수에서 발생하는 오차가 거리 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 본 절은 3가지 오차를 복합적으로 적용하여 TDOA에 미치는 영향을 분석하였다.

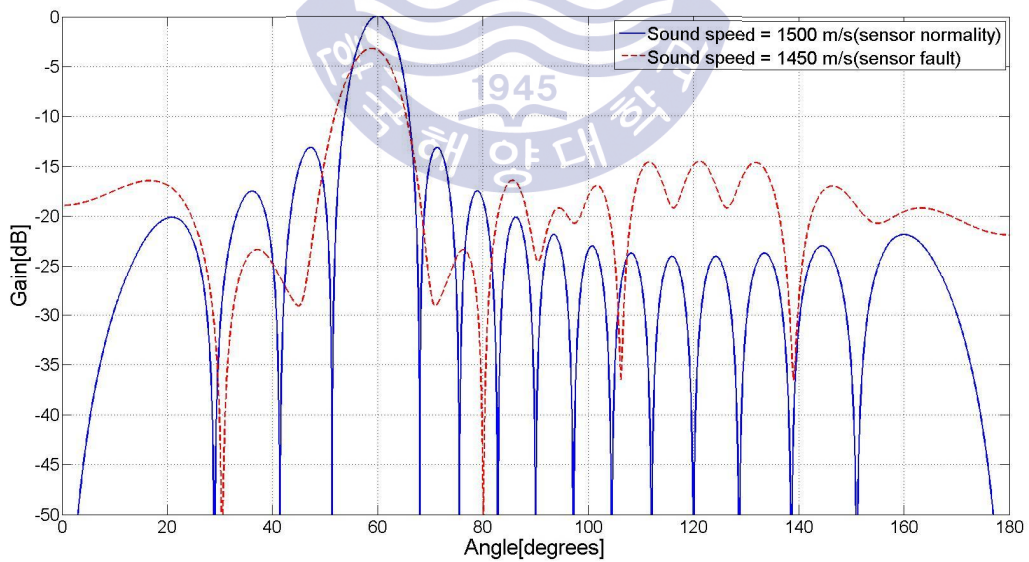
그림 3.13은 특정 부배열의 센서 고장과 음속 불일치에 따른 도래각 추정 오차를 분석하였다. 부배열 센서의 고장 수는 5개이며, 음속은 앞서 분석한 1500 m/s 의 신호원의 음속과 시스템에 적용한 음속(1450 m/s)의 불일치에 따른 도래각 분석 결과이다.

그림 3.13(a)는 도래각 90° 에서의 센서의 고장이 없고, 음속이 일치한 경우(청색)와 음속이 불일치한 경우(적색)를 비교하였다. 도래각 90° 에서는 음속 불일치에 따른 도래각 오차는 없다. 다만, 센서 고장에 따른 DI가 떨어져 빔 출력이 정상 신호에 비하여 떨어짐을 알 수 있다.

그림 3.13(b)는 도래각 60° 에서의 센서의 고장이 없고, 음속이 일치한 경우(청색)와 음속이 불일치한 경우(적색)를 비교하였다. 도래각 60° 에서는 음속 불일치에 따른 도래각 오차가 음속 차와 도래각의 $\cos\theta$ 에 비례하여 발생하며, 센서 고장에 따른 DI가 떨어져 빔 출력이 정상 신호에 비하여 떨어짐을 알 수 있다. 이는 향후 부배열 사이의 상호상관 산출 시, TDOA의 오차 발생에 기여할 것이다.



(a) Source bearing : 90°



(b) Source bearing : 60°

그림 3.13 복합 오차에 따른 빔패턴 비교, (a) 90° , (b) 60°

Fig. 3.13 Beam pattern analysis on the mixed errors

그림 3.14는 복합 원인에 따른 상호상관 오차를 정상인 경우와 비교하여 나타내었다. 그림 3.13(b)의 도래각 60° 에서의 빔패턴을 기반으로 상호상관 결과를 분석하였다. 그림 3.14의 실선은 센서의 고장이 없고, 부배열 사이의 위치 오차가 없으며, 음속이 일치한 경우이며, 점선은 센서의 고장이 5개이고, 부배열 사이의 위치 오차가 0.01 m, 음속이 불일치한 경우이다. 도래각 60° 에서는 음속 불일치에 따른 도래각 오차가 음속 오차와 도래각($\cos\theta$)에 비례하여 발생하며, 센서 고장에 따른 지향 성능이 감소하여 상호상관의 출력이 정상 신호에 비하여 떨어짐을 알 수 있다.

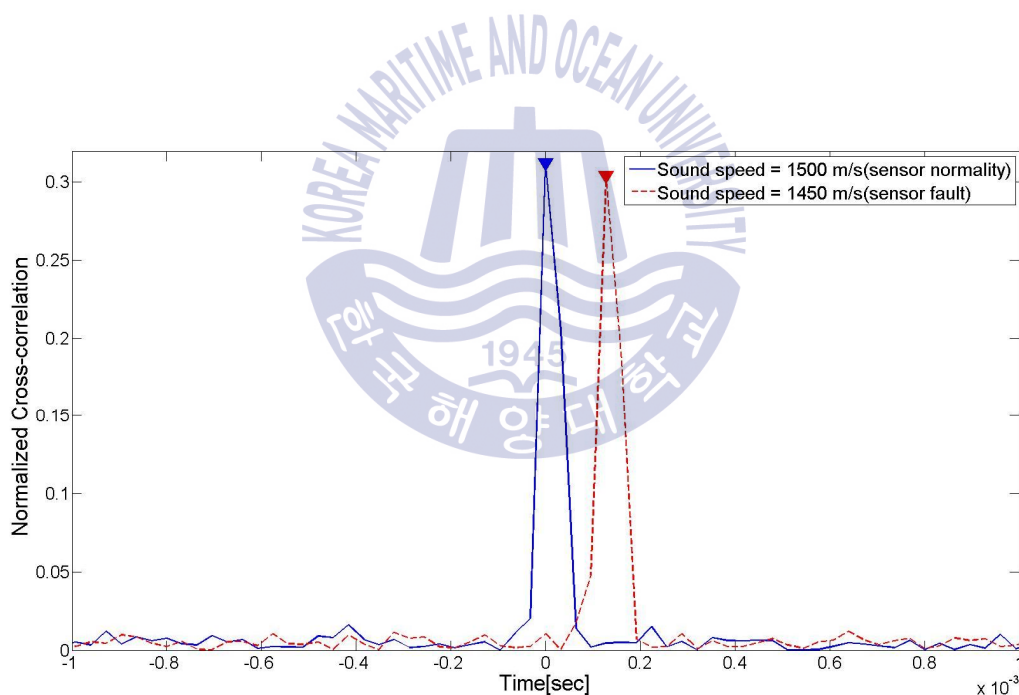


그림 3.14 복합 오차에 따른 상호상관

Fig. 3.14 Cross correlation difference on the mixed errors

그림 3.15는 복합 원인에 따른 상호상관 오차를 정상인 경우와 비교하여 나타내었다. 도래각 60° 에서의 센서의 고장 개수와 부배열 사이의 위치 오차에 따라 발생하는 상호상관 오차를 분석한 결과이다. 신호원의 음속은 1450 m/s로 시스템 적용 음속(1500 m/s)과 불일치한 경우이다. 부배열의 위치 오차는 0 m(*), -0.01 m(o), -0.02 m(□)에서 고장 센서 개수별(1~8개)로 상호상관 TDOA 추정 오차는 나타내었다. 결과로부터 고장 센서의 개수에 따른 성능 차이는 다른 원인들에 비해 미약함을 확인할 수 있다. 이는 단일 표적 환경에 따른 결과로 분석되며, 이 때 고장 개수는 신호의 지향 이득(DI)에 미치는 요소이며, 상호상관을 산출하는 위상에 영향을 미치는 성분이 아니므로, 다음 그림에서는 위상에 영향을 미치는 부배열의 위치, 음속에 대해 더 구체적으로 분석하려고 한다.

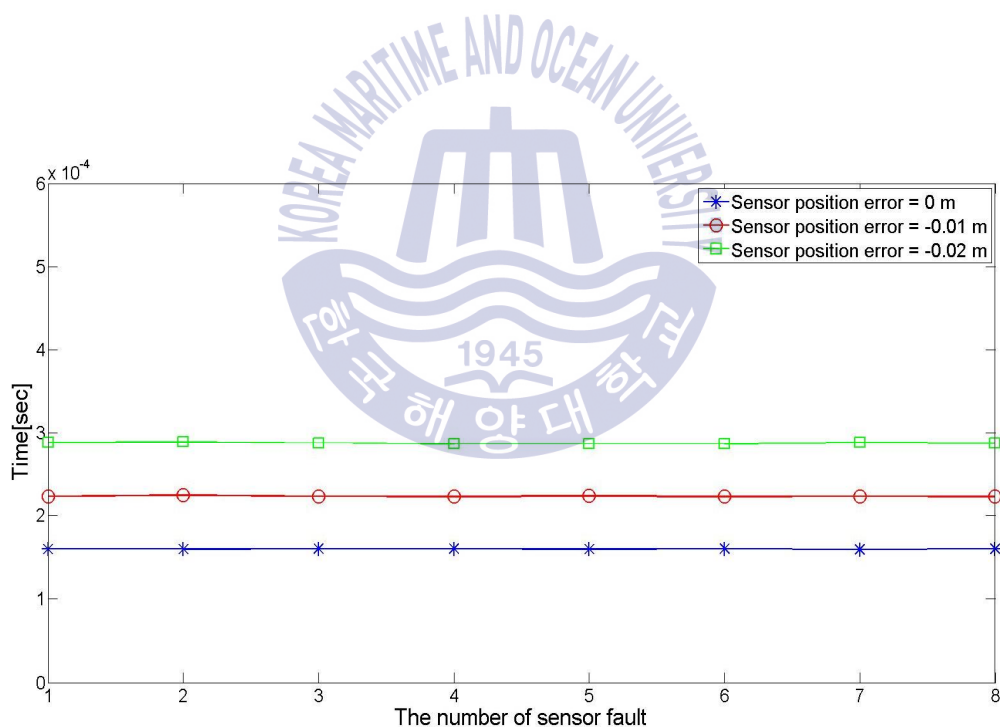


그림 3.15 복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(센서 고장)

Fig. 3.15 TDOA analysis on the mixed errors(Sensor faults)

그림 3.16은 복합 원인에 따른 상호상관 오차 분석을 위하여 고장 센서의 개수를 4개로 고정하고, 부배열간의 위치 및 음속 불일치에 따른 오차 영향 분석 결과를 정상인 경우와 비교하여 나타내었다. 음속은 1400 m/s, 1450 m/s, 1500 m/s 에서 부배열의 위치 오차(-0.03 ~+0.03 m)에 따른 상호상관 TDOA 추정 오차를 나타내었다. 마커 ‘□’ 은 음속이 1500 m/s 로서 전달 특성과 시스템에 적용한 음속이 일치한 경우이며, ‘○’, ‘*’ 각각 1450 m/s, 1400 m/s 로 시스템에 적용한 경우로서, 부배열의 위치 오차에 따른 상호상관 오차를 나타낸다. 부배열의 위치 오차는 음속의 불일치 성분과 연계되어 센서의 위치 오차에 따라 음속 불일치에 의한 오차의 최저점이 감소함을 확인하였다.

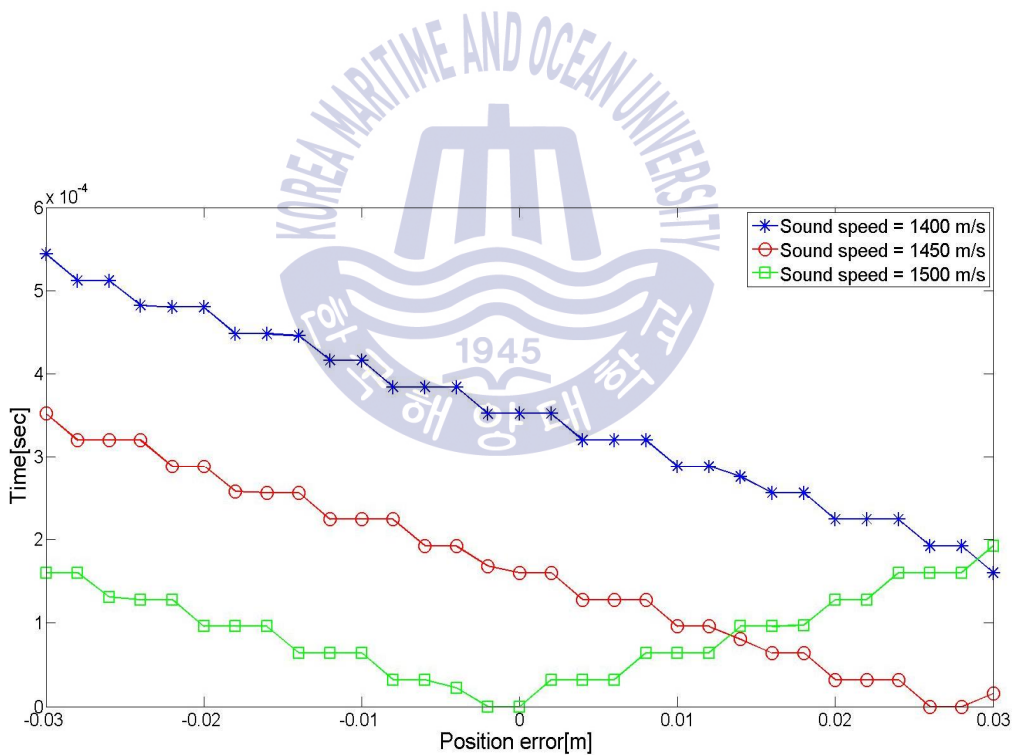


그림 3.16 복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(배열위치 오차)

Fig. 3.16 TDOA analysis on the mixed errors(sub-array location error)

그림 3.17은 복합 원인에 따른 상호상관 오차 분석을 위하여 부배열간의 위치 오차를 -0.01 m로 고정하고, 센서의 고장 및 음속 불일치에 따른 오차 영향 분석 결과를 정상인 경우와 비교하여 나타내었다. 센서의 고장은 0개(*), 4개(○), 8개(□)에서 음속의 불일치 오차(1400 ~ 1600 m/s)에 따른 상호상관 TDOA 추정 오차는 나타내었다. 그림 3.17은 그림 3.15와 그림 3.16의 결과와 연계하여 분석할 수 있다. 센서 고장 수에 따른 상호상관 오차량은 거의 동일하게 나타난다. 이는 그림 3.15에서의 결과와 같은 경향을 보이며, 부배열 센서의 위치 오차를 -0.01 m로 고정시키고, 음속의 불일치에 따른 상호상관 분석 결과는 그림 그림 3.16의 마커 '○' 와 같이 부배열의 위치 오차와 음속 간 연계성을 확인할 수 있다.

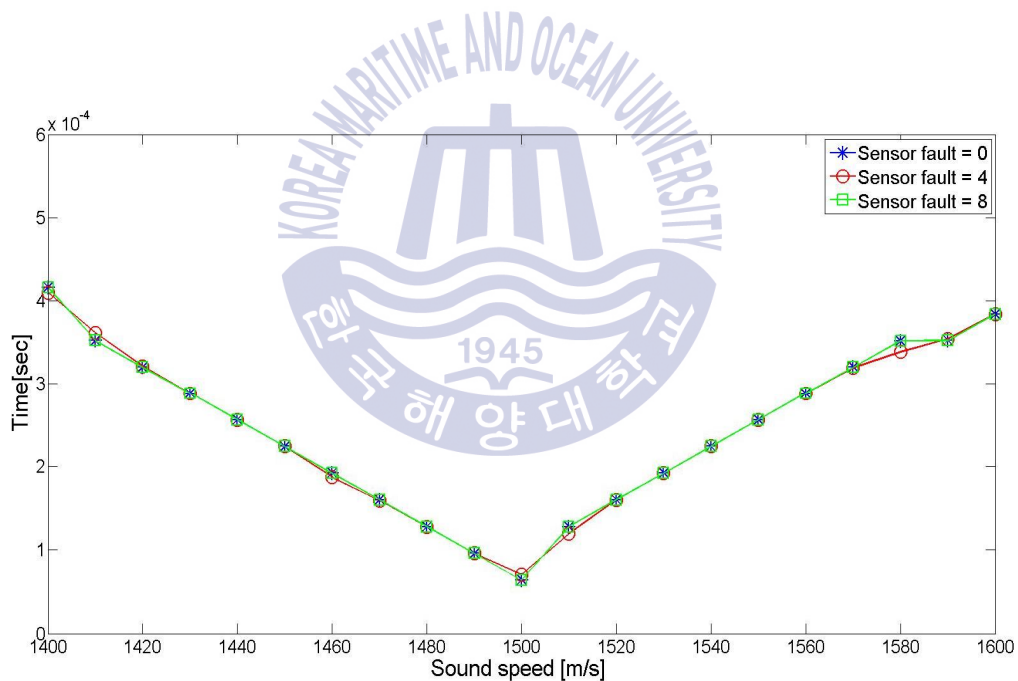


그림 3.17 복합 오차에 따른 도래시간차 추정 오차(음속 오차)

Fig. 3.17 TDOA analysis on the mixed errors(Sound speed mismatch)

제 4 장 비선형 최소자승법 기반의 거리 추정 오차 최소화

소나의 성능을 좌우하는 요소들은 크게 시스템에 적용되는 변수와 시스템을 둘러싼 해양 환경의 영향으로 구분할 수 있다. 소나를 이용한 표적의 방위, 거리를 추정할 경우 앞서 언급한 채널 고장, 배열 위치 오차, 음속 오차와 같은 변수들은 오차를 거리 추정 오차를 유발시키는 요소들이다. 소나 시스템은 시간 t 에서 연속적으로 측정된 채널 신호를 이용하여 원하는 정보를 산출한다. 그러나 획득한 신호는 수신 센서의 배치, 음속 등의 오차를 포함한 신호이므로 원하는 정보에 오차를 포함하고 있다. 예를 들어, 수신기들이 직선 배열 형태를 갖고 도래 시간차를 이용하여 표적의 위치를 추정하는 경우 위치 추정 과정에서 풀어야 하는 쌍곡선 함수의 기울기가 서로 완만한 상태에서 교차하므로 오차가 발생할 확률이 크게 증가할 수 있다. 그러나 수신 센서의 위치가 이미 정해진 환경에서 다수의 표적 정보를 추출할 수 있다면 이들 정보를 독립적으로 활용하기 보다는 상호 조합을 통해 오차를 줄일 수 있다. 매 시간 샘플 t 에서 연속적으로 측정된 채널 신호와 모델간의 차를 최소화하는 변수를 추출하는 과정은 모델의 추출 변수 특성에 따라 선형 또는 비선형 과정으로 접근할 수 있다.

4.1 기존의 기법

일반적인 선형 최적화 방법으로 알려진 최소자승법(Least Square)은 i -th sample의 측정값($y_i, i = 1, \dots, n$)과 모델 변수 $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n)$ 을 고려한 모델 ($f(x, \zeta)$)의 오차(r_i) 제곱합이 최소화되도록 모델 변수(ζ)를 정하는 방법이다 [27-28,41].

$$E(\zeta) = \arg \min \sum_{i=1}^n r_i^2 = \arg \min \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \zeta))^2 \quad (4-1)$$

식 (4-1)의 오차 합을 행렬로 표현하면,

$$E(\zeta) = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{r} = \|\mathbf{r}\|^2 \quad \text{여기서, } \mathbf{r} = [r_1, \dots, r_n]^T \quad (4-2)$$

여기서, r_i : 측정값과 모델의 오차

선형 최소자승법은 식 (4-1), (4-2)에 의한 오차를 최소화하는 ζ 를 구하는 문제로 요약되며, 이는 $E'(\zeta) = 0$ 인 ζ 를 구함으로써 얻어진다. 최소자승의 해를 구함에 있어 $f(a, \zeta)$ 가 모델 파라미터에 대해 선형인 경우 선형 최소자승이라 하며, 그렇지 않은 경우 비선형 최소자승이라 부른다. 예를 들어, 식 (4-3)과 같이 함수 $f(a, \zeta)$ 가 변수 ζ 에 대해 선형인 경우, $f(a, \zeta)$ 에 대한 최소자승의 해는 선형 해를 갖는다[31,42-43].

$$f(a, \zeta) = \zeta_1 * \sin a + \zeta_2 * \cos a \quad (4-3)$$

선형 최소자승 문제는 Pseudo inverse, Singular value decomposition 기법으로 해를 구하는 것이 일반적으로 잘 알려져 있으나, 특정한 경우에 만족하는 해를 갖는 Closed Form Solution이 존재하는 한계를 드러낸다. 그러나 비선형 최소자승 문제는 선형 최소자승에서 나타나는 Closed Form Solution이 없기 때문에 점진적으로 반복 수행(Iterative minimization)을 통한 해를 구한다. 이러한 비선형 최소자승의 해를 구하는 기법은 Gradient Descent, Newton, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt 방법으로 대표할 수 있다[33,44].

Gradient Descent 방법은 식 (4-2)에 정의한 함수 $E(\zeta)$ 의 기울기(gradient)로 정의하며, gradient의 크기는 기울기의 증감 방향을 나타낸다.

$$\nabla E = \left(\frac{\partial E}{\partial \zeta_1}, \frac{\partial E}{\partial \zeta_2}, \dots, \frac{\partial E}{\partial \zeta_m} \right) \quad (4-4)$$

Gradient Descent 방법은 임의의 초기값 $\zeta_0 = [\zeta_1(0), \zeta_2(0), \dots, \zeta_m(0)]$ 부터 시작하여 식 (4-5)와 같이 gradient 반대 방향으로 ζ 를 조금씩 이동하면서 함수 $E(\zeta_k)$ 가 극소가 되는 ζ 를 찾는 과정을 반복한다. λ_k 는 알고리즘의 수렴 속도를 조절하는 변수로서 감폭 계수(Damping coefficient)이다. 이와 같은 연산 과정으로 인하여 Gradient Descent 방법은 앞서 최소자승법(LS)과 같이 국소 위치(local minimum)에 빠질 수 있는 단점이 있으며, 해에 가까워질수록 $|\nabla E|$ 가 zero에 가까워지므로 수렴 속도가 느려진다. 그러나 감폭 계수(λ_k)를 증가시키면 해에 근접하는 과정에서 발산하게 되어 본 방법은 제안 기법(LM)의 국소 위치연산 과정으로 포함된다[34].

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \lambda_k \nabla E(\zeta_k), \quad k \geq 0 \quad (4-5)$$

식 (4-5)를 재정의 하기 위하여, 식 (4-2)를 식 (4-4)에 정의한 Gradient 함수에 적용하면, 식 (4-6)과 같이 $\nabla E(\zeta)$ 함수는 Jacobian 행렬, $J_r(r)$ 로 표현하여 식 (4-5)를 식 (4-7)로 정리할 수 있다.

$$\nabla E(\zeta) = \left[\frac{\partial E(\zeta)}{\partial \zeta_1} \dots \frac{\partial E(\zeta)}{\partial \zeta_m} \right]^T = \left[\frac{\partial r^T r}{\partial \zeta_1} \dots \frac{\partial r^T r}{\partial \zeta_m} \right]^T \quad (4-6)$$

$$= 2 \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_m} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_1(\zeta) \\ \vdots \\ r_n(\zeta) \end{bmatrix}$$

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - 2\lambda_k J_r^T(\zeta_k) r(\zeta_k), \quad k \geq 0 \quad (4-7)$$

Newton 기법은 목적 함수 $E(\zeta)=0$ 을 만족하는 해를 찾기 위하여 임의의 초기값 $\zeta_0 = [\zeta_1(0), \zeta_2(0), \dots, \zeta_m(0)]$ 으로부터 시작하여 반복, 갱신하여 ζ 를 이동하면서 해를 구하는 방법으로 식 (4-8)과 같이 정의하며, $\zeta \approx \zeta_{k+1}$ 또는 $|\zeta_{k+1} - \zeta_k|$ 이 매우 작은 값이면 Newton 기법의 반복 연산은 종료한다.

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{E(\zeta_k)}{E'(\zeta_k)}, \quad k \geq 0 \quad (4-8)$$

Newton 기법은 분모항의 미분값이 곡선의 특정 지점에서의 기울기임을 이용하여 현재의 ζ 에서 $E(\zeta)$ 의 크기와 $E'(\zeta)$ 의 크기에 따라 ζ 의 증/감 양을 결정하는 방식으로, 최적화하기 위한 접근식으로 $E'(\zeta)=0$ 의 해를 찾는 수식으로 변형하여 적용할 수 있으며, Newton 기법의 최종 수식은 식 (4-10)으로 정리된다. 그러나 $E(\zeta)=0$ 인 해가 여러 개가 존재할 경우 그 중에 하나의 해를 찾는 국소 위치(local minimum)에 빠질 수 있으며 최적의 해는 초기값 설정에 따라 결정될 수 있다. 만약 초기값이 최적의 해가 아닌 로컬 해에 가까운 경우 최적의 해는 찾지 못하게 된다[34].

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{E'(\zeta_k)}{E''(\zeta_k)}, \quad k \geq 0 \quad (4-9)$$

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \nu H_E(\zeta_k)^{-1} \nabla E(\zeta_k), \quad k \geq 0 \quad (4-10)$$

$\nabla E(\zeta)$ 는 Gradient Descent 기법에서 정의한 ζ_k 에서의 함수 E 의 Gradient이며, $H_E(\zeta_k)$ 는 ζ_k 에서의 함수 E 의 Hessian 값을 나타낸다. 변수 $\nu(\nu > 0)$ 는 수렴 속도를 조절하기 위한 값이며, Gradient Descent 기법의 λ_k 와 같은 역할을 수행하는 감폭 계수(Damping coefficient)이다. Newton 기법은 최소자승의 문제를 해결하기 위하여 2차 미분을 계산해야 하는 부담이 존재하므로 비선형 최소자승의 문제를 해결하기 위하여 Newton 기법 대신 1차 미분으로 해를 추출할 수 있는 Gauss-Newton법이 사용된다[35-36,45].

Gauss-Newton법은 Newton 기법의 변형된 형태로서 비선형 최소자승 문제를 해결하는 최적화 방법 중 하나이다. Newton 기법의 2차 미분을 1차 미분으로 최적화 해를 찾을 수 있다. 식 (4-2)로부터 $E(\zeta)$ 를 최소화시키는 1차 미분을 $E'(\zeta) = 0$ 으로 만드는 해는 초기 추정값 $\zeta_0 = [\zeta_1(0), \zeta_2(0), \dots, \zeta_m(0)]$ 에서 시작하여 반복 갱신한다. J_r 은 $J_r(\zeta_k)$ 을 간략히 표현하였고, ζ_k 에서의 r 의 Jacobian 행렬이다.

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - (J_r^T J_r)^{-1} J_r^T r(\zeta_k), \quad k \geq 0 \quad (4-11)$$

$$J_r(\zeta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_m} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

식 (4-11)의 $(J_r^T J_r)^{-1} J_r^T$ 는 식 (4-12) J_r 의 Pseudo inverse이며, 식 (4-11)은 식 (4-13)과 같이 Gauss-Newton법으로 최소자승 해를 최적화하는 수식으로 정리된다.

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \text{pinv}(J_r) r(\zeta_k), \quad k \geq 0 \quad (4-13)$$

Gauss-Newton법은 m 개로 구성된 $\zeta_k = [\zeta_1(k), \zeta_2(k), \dots, \zeta_m(k)]$ 의 시각(k)에서 비선형 함수를 선형함수로 근사하여 해를 구하는 방법으로 오차 $r(\zeta)$ 를 Taylor 급수와 같은 전개 수식을 이용하여 ζ_k 에서 선형 함수로 근사하면 $r(\zeta) \sim r(\zeta_k) + J_r(\zeta_k)(\zeta - \zeta_k)$ 로 근사된다.

선형 근사화된 오차 제곱합($\| r(\zeta_k) + J_r(\zeta_k)(\zeta - \zeta_k) \|^2$)을 최소화하는 ζ 를 구하면 식 (4-13)으로 수렴된다. Gauss-Newton법은 현재의 변수 추정값 ζ_k 근처에서 오차 함수를 선형 근사하여 최소자승 해(ζ_{k+1})를 구하고, 새롭게 구한 해 근처에서 다시 오차 함수를 선형 근사하여 반복 최소자승 해를 구하는 방식이다.

선형/비선형 최소 자승법에 대한 일반적인 내용을 다음과 같이 요약한다. 오차를 줄이기 위하여 시간(t)에 따라 측정된 데이터를 기반으로 이론적으로 예측한 기대값과의 편차를 줄임으로서 선형 최적화하는 기법으로 Least Square(LS) 기법이 있다. LS 기법의 경우, 관측 데이터의 특성에 따라 발산 또는 국소 위치(local minimum)를 추정하는 Forward Closed Form으로 알려져 있다[27,41].

선형 최적화 방법과는 달리 비선형 최적화 방법은 Recursive Form 형태로 매 시간 수신한 데이터를 기반으로 반복 연산을 통하여 목적 함수 내에 포함된 변수의 오차를 최소화하는 과정이다. 비선형 최소화 방법은 주로 오차를 추정하기 위한 감폭 계수(Damping coefficient)를 어떻게 정의하느냐에 따라 Gauss Newton, Gradient Descent 방법이 주로 사용되고 있다.

Gauss Newton 방법은 기울기의 크기가 반복 루프에 따라 선형적으로 증가하며, 이에 따라 감폭 계수(Damping coefficient)가 기울기에 반비례함으로서 함수의 기울기와 곡률에 따라 반복 루프를 수행하며 안정적으로 해를 찾을 수 있는 장점을 가지고 있으나, 수렴 속도가 느린 단점이 있다.

Gradient Descent 방법은 Gauss Newton 방법과 반대로 기울기의 크기가 반복 루프에 따라 선형적으로 감소하며, 이에 따라 감폭 계수(Damping coefficient)가 기울기에 비례함으로서 반복 루프를 수행할수록 감폭 계수(Damping coefficient)가 선형적으로 증가하게 된다. 이는 빠르게 해에 수렴하지만 발산의 위험이 있어 안정적으로 해를 찾지 못하거나 해로부터 멀리 떨어져 연산을 빠져나오게 된다. 이러한 두 개의 비선형 기법의 단점을 보완한 형태가 LM 방법이다[32-36,45]. LM 방법은 위 두 개의 비선형 기법이 결합한 형태로서 해에 수렴하는 과정에 있어 안정적인 해를 가지는 장점이 있으며, 4.2절에서 상세히 기술한다.



4.2 비선형 최소자승법 기반의 거리 추정 방법

본 연구에서 적용한 비선형 최소자승법인 LM 기법은 1944년 Levenberg 에 의해 개발된 알고리즘을 1963년 Marquardt 가 보완한 기법이다[31,36,44].

Levenberg-Marquardt법은 선형 최소자승법의 문제를 줄이기 위한 반복(Loop iteration) 연산 기법으로서, 측정값과 모델간의 오차를 최소화하는 변수를 찾는 과정이다. 오차의 최소화를 위해서는 초기 입력값에 따라 오차 최소화 및 수렴 시간 등의 알고리즘 성능이 좌우된다. 기존의 Gauss-Newton법과 Gradient descent법을 통합하여 각각의 알고리즘 제한 사항을 극복하고, 선형 최소화기법에서 나타난 국소 위치(local minimum)로의 수렴을 줄임으로서 가장 효과적인 비선형 최소화 기법으로 컴퓨터 네트워크, 레이다, 신경망 회로 등에 널리 활용되고 있다[46-47].

본 논문은 3장에서 제시한 수중 표적의 위치 오차를 발생시키는 변수들을 시뮬레이션을 통하여 분석하고 그 결과를 기반으로 오차를 최소화하기 위한 비선형 오차 최소화 방안을 제시한다. 수중 표적의 위치 정보 측정은 각 부배열에 수신된 신호의 상관관계를 통하여 도래 방위 및 도래 시간차를 추정하며, 추정된 값은 수중 환경 및 소나 특성에 따라 오차를 포함하게 된다. 이러한 측정치는 모델과의 상관관계를 통하여 발생한 오차를 최소화하는 비선형 오차 최소화 알고리즘(Levenberg-Marquardt)에 적용된다. 오차를 줄이기 위한 최적화 변수(ζ)는 표적의 위치(x, y)와 수중음파전달 속도(c)이며, 센서간의 시간지연을 이용한 표적의 방위(DOA) 및 시간(TDOA) 추정 모델로 최적화 변수의 오차를 최소화한다.

Levenberg-Marquardt 방법은 Gauss-Newton법을 개선하여 식 (4-14)와 같이 분모의 $J_r^T J_r$ 에 diagonal loading($\mu_k \times \text{diag}(J_r^T J_r)$)을 수행하여 Gauss-Newton법에서 나타난 발산의 위험성을 최소화하고 안정적인 해를 찾는다. μ_k ($\mu > 0$)는 반복 수행 시 해에 근접하기 위한 감폭 계수(Damping coefficient)로서, 분모항을 구성하는 μ_k 가 클수록($\mu \rightarrow \infty$) 해에 수렴하는 속도가 느리며 Gradient descent법과 유사하다.

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{J_r^T r(\zeta_k)}{(J_r^T J_r + \mu_k \text{diag}(J_r^T J_r))}, \quad k \geq 0 \quad (4-14)$$

$$\text{여기서, } J_r(\zeta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_1(\zeta)}{\partial \zeta_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial r_n(\zeta)}{\partial \zeta_m} \end{bmatrix}, \quad r(\zeta) = \begin{bmatrix} r_1(\zeta) \\ r_2(\zeta) \\ \vdots \\ r_n(\zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - f(x_1, \zeta) \\ y_2 - f(x_2, \zeta) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n, \zeta) \end{bmatrix}$$

식 (4-14)를 기반으로 표적의 위치(\hat{x}, \hat{y}), 음속(\hat{c})를 최적화하기 위한 변수 벡터 $\zeta = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{c}]$ 를 정의하고, Levenberg-Marquardt 최적화를 위한 비용함수 $f(\zeta)$ 를 다음과 같이 정리할 수 있다[30,31,37].

$$f(\zeta) = r(\zeta) - q, \quad (4-15)$$

$$\text{여기서, } r(\zeta) = \begin{bmatrix} r_1(\zeta) \\ r_2(\zeta) \\ r_3(\zeta) \\ r_4(\zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TDOA_{12} \\ TDOA_{32} \\ DOA_{12} \\ DOA_{32} \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{32} \\ \theta_{12} \\ \theta_{32} \end{bmatrix}$$

$$J(\zeta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial r_1}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial r_1}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial r_2}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial r_2}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial r_2}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial r_3}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial r_3}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial r_3}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial r_4}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial r_4}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial r_4}{\partial \hat{c}} \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$r(\zeta)$ 는 최적화 대상 변수로 정의한 표적의 위치(\hat{x}, \hat{y}), 음속(\hat{c})과 상관되는 $TDOA_{12}$, $TDOA_{32}$, DOA_{12} , DOA_{32} 항목으로 구성하여 2절에서 언급한 식 (2-3), (2-4)로부터 산출하는 모델을 정의하였다. q 는 오차가 포함된 측정값으로서 식 (2-5), (2-6)에서 산출된다. 비용함수 $f(\zeta)$ 의 자코비안 행렬은 $r(\zeta)$, $\zeta = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{c}]$ 로부터 식 (4-16)과 같이 정의한다.

LM 최적화를 위한 $f(\zeta)$ 를 최적화하는 과정은 그림 4.1에 구체화하였다. 초기 정의한 변수 k 는 Loop index, k_{\max} 는 Loop의 최대 반복 회수이며, $[v \tau]$ 는 반복 수행 시, 수렴 속도를 설정하기 위한 감폭 계수(Damping coefficient)이다. $\epsilon([\epsilon_1 \epsilon_2])$ 은 각각의 sub-loop를 종료하기 위한 종료 조건이며, 두 개의 조건을 만족하여야만 전체 loop가 종료된다.

그림 4.1의 loop는 두 개의 반복 loop로 구성된다. 첫 번째 상위의 loop는 감폭 계수(Damping coefficient, μ)가 초기에 선언한 v 에 따라 선형적으로 크기가 증가하는 경우이며 식 (4-13)의 분모항이 증가하여 Gradient Descent법으로 수렴하는 구간이 된다. 정상적으로 오차를 줄이면서 해로 수렴하는 과정에서 ρ 의 부호가 반대로 전환하면서 하위 loop로 계산한다. 하위 루프는 step size(μ)가 ρ 값에 의존하며, μ_{k+1} 은 $0.3\mu_k$ 값으로 step size의 크기가 loop 반복에 따라 값이 줄어들어 Gauss-Newton법으로 수렴하게 된다. 초기에 선언한 v 는 다시 초기값으로 선언한다. 이러한 그림 4.1의 순서도의 특성으로부터 분석한 Levenberg-Marquardt법은 비선형 오차 최소화 기법인 Gradient Descent법과 Gauss-Newton법의 통합된 형태로 이해할 수 있다. 마지막으로 최종 산출한 해(ζ)가 종료 조건 $\epsilon([\epsilon_1 \epsilon_2])$ 을 만족하면 반복 연산을 종료한다[44].

4장은 연속적으로 획득한 오차가 포함된 측정 데이터와 표적의 거리를 산출하는 모델간의 오차를 최소화하는 변수(ζ)를 추출하는 과정으로 선형 또는 비선형 기반의 목적 함수(f) 최소화하는 변수를 반복 루프 연산으로 찾는 과정을 기술하였다. 이를 통하여 비선형 최소자승법 기반의 수중 음원의 위치 추정 오차를 최소화하는 방법을 제안하였고, 모의 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법을 검증하였다.

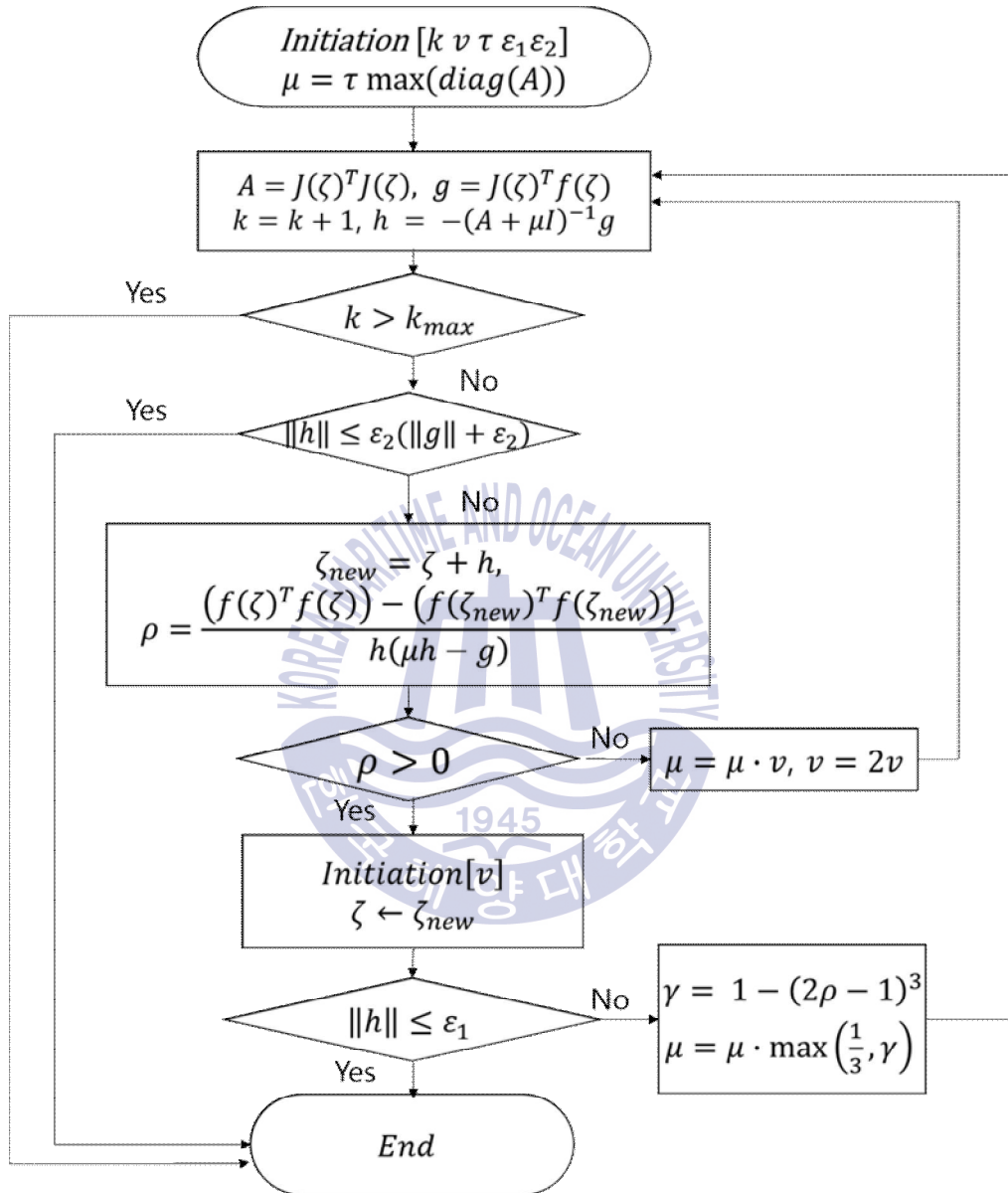


그림 4.1 비선형 최소자승법(LM) 기반의 제안 기법 흐름도

Fig. 4.1 Flow diagram of proposed method based on non-linear least square method(Levenberg-Marquardt)

제 5 장 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 장은 3장에서 분석한 표적 위치 추정에 영향을 미치는 변수들(음속, 부배열 위치 오차, 채널 고장)의 오차에 따라 발생한 표적 위치 추정 오차를 비선형 최소자승법(Levenberg-Marquardt)에 기반을 두는 제안 기법의 성능을 고찰하였다. 제안한 기법은 선형 최소 자승법과 비교하여 제안 기법의 성능을 비교하였다. 또한 기법의 통계적인 특성을 도출하기 위하여 시뮬레이션 입력 조건에 따라 500회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 통상적인 오차 분석 기법(RMSE)으로 결과를 산출하여 분석하였다[44,50-53].

표 5.1 시뮬레이션 조건(종합)

분류	변수	값	비고
표적	신호 대 잡음비	-10[dB]	-
	방위	30°/60°/90°	자함 진행방향 기준
	거리	3,000[m]	-
해양환경	음속	1400~1600[m/s]	수심별 등음속
소나	부배열 수	3	-
	부배열 간격	15[m]	-
	부배열 위치 오차	-3~3[cm]@Y축	Error
	채널 수	15개	-
	고장 채널	1~8[EA]	Error
	적용 음속	1500[m/s]	Error

실제 표적의 위치(x, y)와 추정된 표적(\hat{x}, \hat{y})과의 위치 오차는 식 (5-1)과 같이 N 번의 통계적 분석 결과인 $RMSE(\epsilon_R)$ 로 시뮬레이션 결과를 분석하였다[28, 48-49].

$$\epsilon_R[\%] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{x}_i - x)^2 + (\hat{y}_i - y)^2}{x^2 + y^2}} \times 100 \quad (5-1)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, N$



5.1 모의실험 환경

제안한 표적 위치 추정 기법의 성능을 분석하기 위하여 그림 5.1과 같은 모의실험 환경을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수동 소나 특성을 고려하여 시뮬레이션 입력 조건을 크게 세 가지로 표적, 해양환경, 표적을 탐지하는 함정의 소나로 분류하였다.

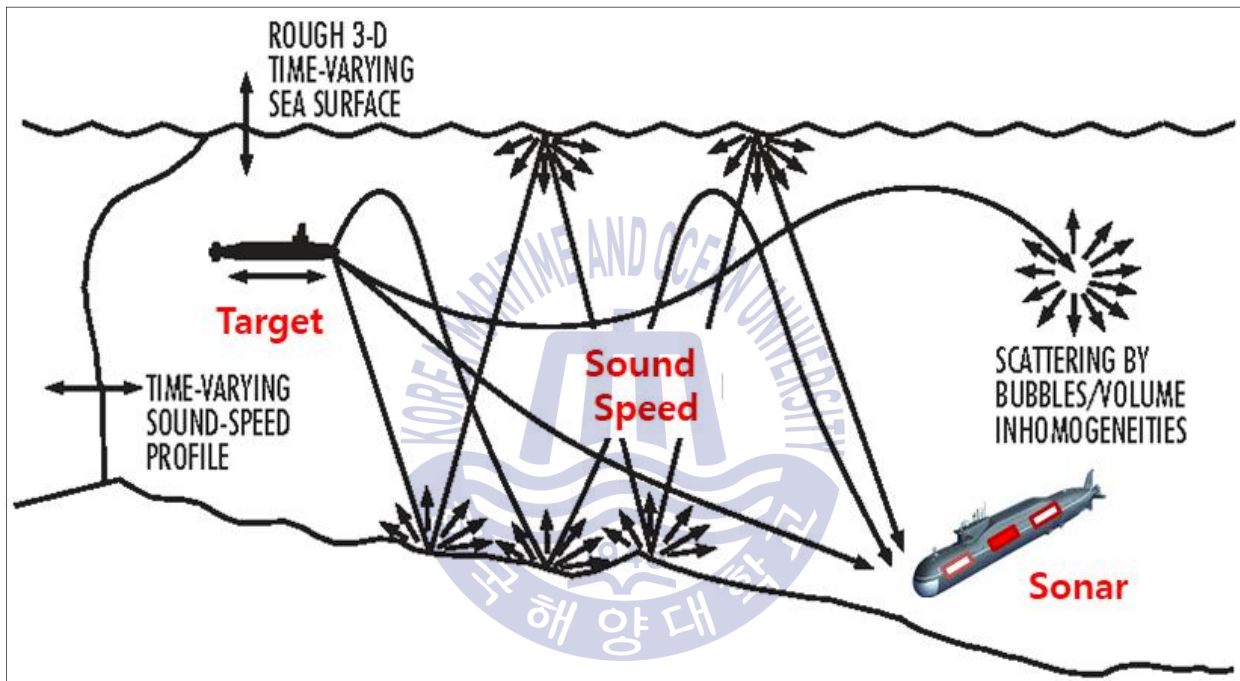


그림 5.1 모의실험 환경

Fig. 5.1 Simulation environments

표 5.1의 시뮬레이션 조건으로부터 표적은 소나로부터 떨어진 거리, 방위 및 방사 소음 준위를 변수로 설정하였다. 복잡한 해양환경 특성은 심도별 수온 분포에 따른 음속 변화량, 해저면 및 해수면 특성이 고려되어야 하나, 본 논문의 목적을 고려하여 소나 시스템과의 부정합을 반영하기 위하여 단일 음속(Sound Speed)으로 고려하였다. 표적을 탐지하는 함정의 소나 변수는 앞서 언급한 부배열의 개수, 부배열 사이의 간격, 부배열을 구성하는 채널 개수를 기반으로 오차 변수를 적용하였다.

그림 5.1과 같이 부배열의 위치 오차는 통상적인 함정의 설치 오차를 고려하여 가운데 위치한 부배열의 Y-축 방향으로 $-3 \sim +3$ cm 오차를 고려하였다. Y-축 방향은 함정의 현측 방향으로부터 수직 방향으로서 함정 내부 방향은 ‘-’, 함정 외부는 ‘+’ 이다. 두 번째 오차를 유발하는 변수는 부배열을 구성하는 채널이 고장이 난 경우로서 고장 채널의 위치에 따라 부배열의 성능이 상이하며, 본 논문에서는 1~8개의 연속 채널의 고장을 시뮬레이션 환경에 적용하였다. 마지막으로 채널 및 부배열간의 간격으로부터 수신 신호의 시간 지연을 산출하기 위해 소나에 적용하는 음속은 초기 음속(1500[m/s])을 적용하고 해양환경을 통해 수신되는 신호의 음속은 1400~1600 [m/s]로 입력하여 부정합에 따른 제안 기법의 성능을 분석하였다.

시뮬레이션은 위 3가지 종류의 개별 변수들 각각에 오차를 삽입한 경우와 3가지 변수에 복합 오차를 삽입한 조건으로 수행하였고 비선형 최소자승법(LM) 기반의 제안한 기법의 위치 추정 오차 성능을 선형 최소자승법(LS)과 비교, 분석하였다.



5.2 개별 오차에 따른 TDOA 추정 성능 분석

그림 5.2는 채널 고장 개수에 따른 표적 위치 추정 성능을 기존의 선형 최적화기법(LS)과 비선형 최적화기법(LM) 결과를 비교한 결과이다. 음속과 부배열의 위치는 오차가 없다고 가정하였다. LS 기법은 기법 특성상 단일 고정값이 적용되어 비교적 배열의 정면 방향인 broadside 영역(90° , 60°)에서도 5% 이내의 양호한 성능을 보이지만, 30° 방위에서는 거리의 50% 오차가 발생하였다. 제안한 LM 기법은 $RMSE(\epsilon_R[\%])$ 가 거의 없이 나타나고 있으며, 이는 그림 5.3의 방위별로 산출한 음속과 연계될 수 있다. Broadside 영역(90° , 60°)에서는 음속이 실제값(1500 m/s)과 동일하게 유지하면서 RMSE 오차가 수렴되고 있으며, 30° 방위는 채널의 고장에 따라 음속이 1500 m/s 에서 1490 m/s 로 수렴하고 있다. 이는 LM 기법의 반복 루프를 수행하는 과정에서 표적의 위치와 음속의 최적화 과정으로 분석된다.



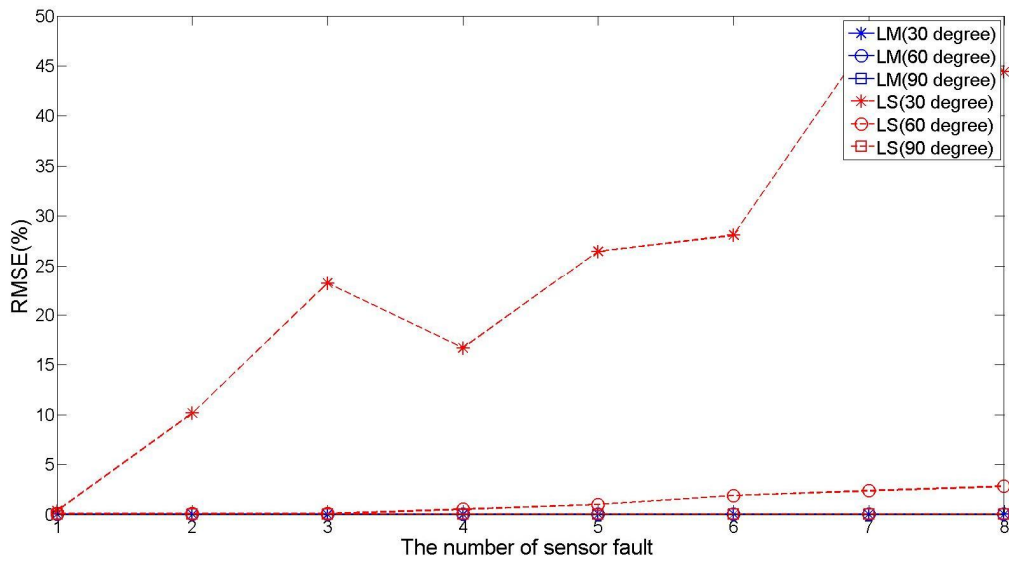


그림 5.2 채널 고장에 따른 표적 위치 추정 성능 : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.2 RMSE analysis of source localization according to the sensor faults

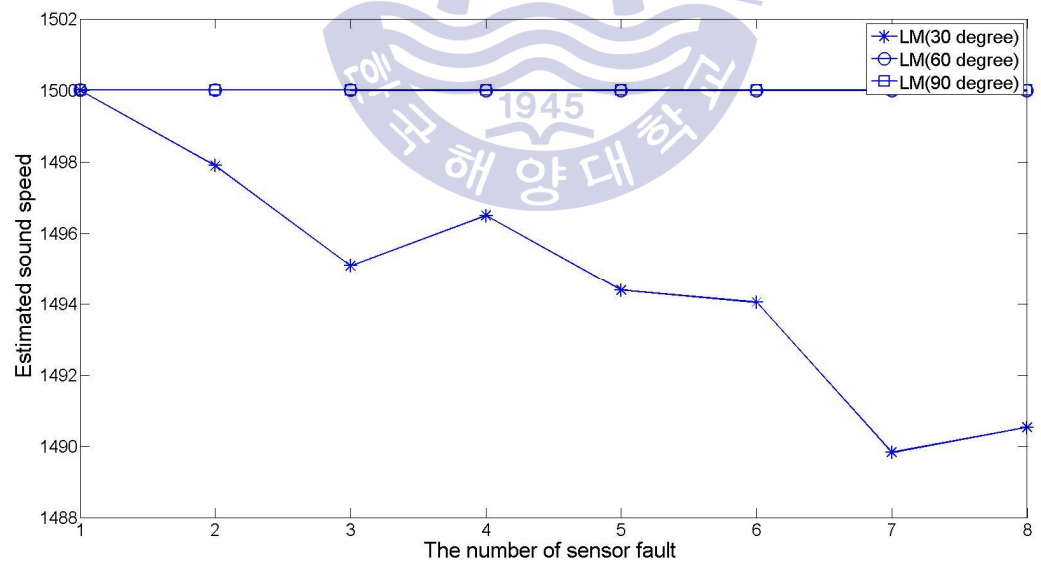


그림 5.3 채널 고장에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과

Fig. 5.3 Sound speed estimation according to the sensor faults

그림 5.4는 부배열의 위치 오차에 따른 표적 위치 추정 성능을 선형 최적화 기법(LS)과 제안한 비선형 최적화 기법(LM)을 비교한 결과이다. 음속 오차와 채널의 고장은 없는 경우이다. 가로축은 부배열의 그림 3.6과 같이 Y-축 방향의 위치 오차(Δy)로서 -3~+3 cm의 오차에서 위치 추정 성능을 표현하였다. 배열의 수직 방향인 Y-축 방향으로 오차가 발생함으로써 90° 방향에서 RMSE가 높게 나타나며, 만약 배열의 오차를 배열과 수평 방향으로 발생시킬 경우, 90° 방향에서 RMSE가 낮게 나타남을 예상할 수 있다. 위치 오차가 ± 1.4 cm 이내에서는 양호한 성능을 나타내지만, 그 이외 구간에서 60°, 90° 방위는 30% 이상의 추정 오차 성능을 나타낸다. 제안한 LM 기법 기반의 방법의 경우 LS 기법보다 비교적 양호한 결과를 보이며, 위치 오차가 ± 1.6 cm 을 벗어난 오차 구간에서 최대 25%의 오차를 보여준다. 이 때, 그림 5.5의 방위별로 산출한 음속으로부터 60° 방위는 소량의 음속 변화를 보이면서 위치 추정 최적화를 수행하며, 90° 는 고정된 음속으로 위치 추정을 수행하고 하면서 위치 오차가 ± 1.6 cm 를 벗어난 구간에서는 위치 추정 성능 최적화에 한계를 보여준다. 이는 소나의 탐지 주파수 대역 및 설치 플랫폼에 따라 부배열의 설치 오차 범위로 고려되어야 할 요소로 분석할 수 있다.

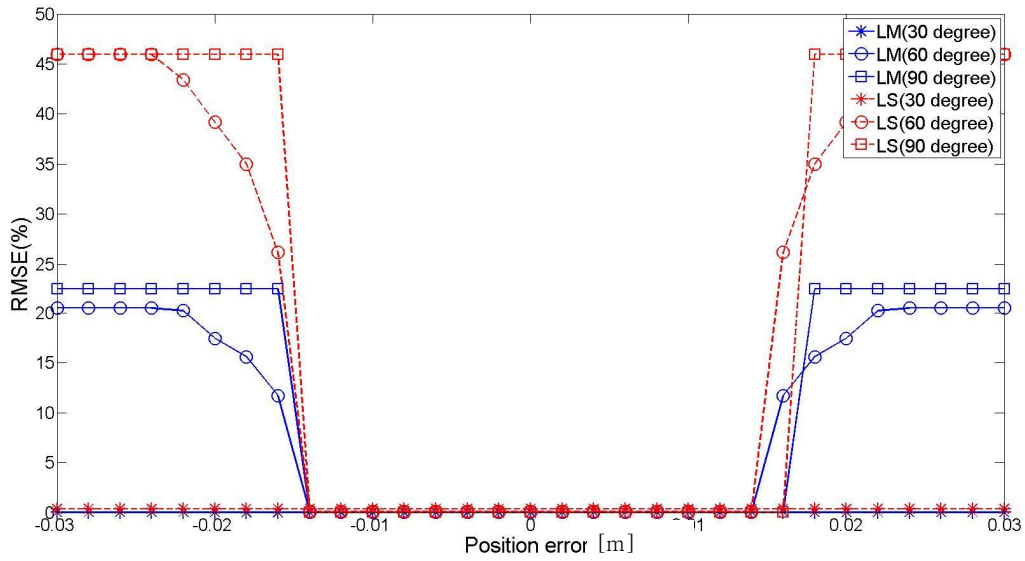


그림 5.4 부배열 위치 오차에 따른 위치 추정 성능 : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.4 RMSE analysis of source localization according to the sub-array location error

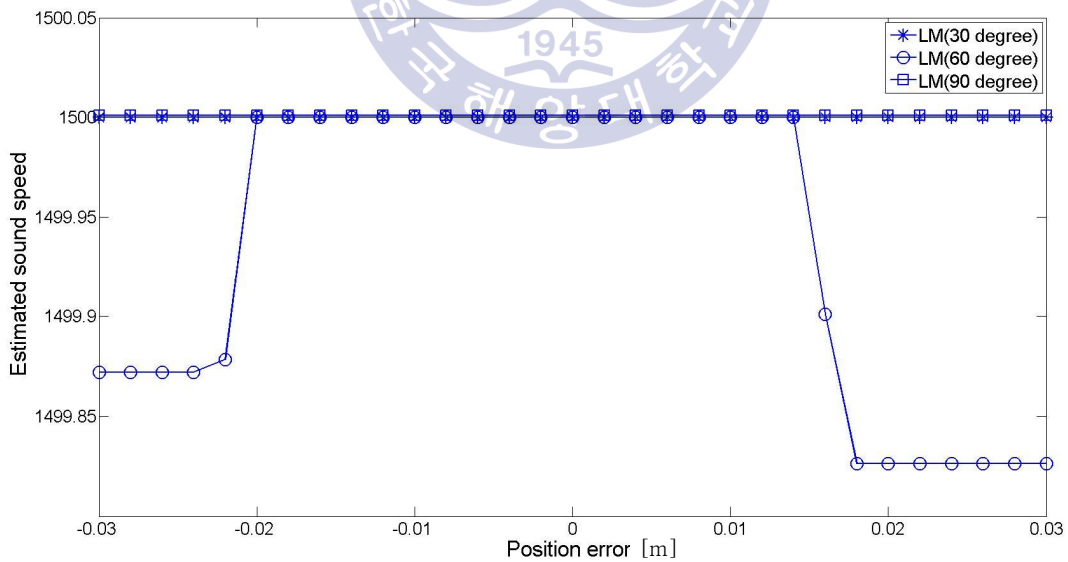


그림 5.5 부배열 위치 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과

Fig. 5.5 Sound speed estimation according to the sub-array location error

그림 5.6은 음속 오차에 따른 표적 위치 추정 성능을 선형 최적화 기법(LS)과 제안한 비선형 최적화 기법(LM)에 기반을 둔 방법을 비교한 결과이다. 부배열의 위치 오차와 채널의 고장은 없는 경우이다. 가로축의 음속은 1400 ~ 1600 m/s 범위로 입력하였고, 소나 시스템에 적용한 초기 음속은 1500 m/s 로 설정하여 위치 추정 성능을 표현하였다. 소나 시스템에서 적용한 1500 m/s 인 경우는 해양 환경의 음속과 일치하는 오차가 없는 경우이므로 모든 방위에서 LS, LM의 위치 추정 성능 오차가 없다. 그러나 1500 m/s 로부터 멀어질수록 LS는 위치 추정 오차가 증가하며, 1400, 1600 m/s 에서 최대 180% 의 오차를 나타낸다. LM의 경우 방위별 전 구간 음속에서 오차가 거의 0% 에 가까운 오차를 보인다. 이는 그림 5.7의 방위별로 LM 반복 루프를 통하여 산출한 음속이 입력한 음속으로 최적화됨으로서 위치 추정 오차를 최소화하고 있음을 보여 준다.

본 절은 소나의 성능에 영향을 미치는 각각의 변수들의 오차에 따른 위치 추정 성능 최적화 과정을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 선형 최적화 기법은 변수들에 삽입한 오차의 크기에 따라 위치 추정 성능 오차가 선형적으로 증가하는 추세이며, 비선형 최적화 기법 기반의 제안한 방법은 부배열의 위치 오차를 제외한 경우에 대해서 표적의 위치 추정 성능이 향상됨을 보여준다. 다음 절은 개별 오차에 따른 TDOA 성능 분석 결과를 기반으로 3가지 변수에 동시 오차를 삽입하여 표적의 위치 추정 성능 결과를 분석, 고찰하였다.

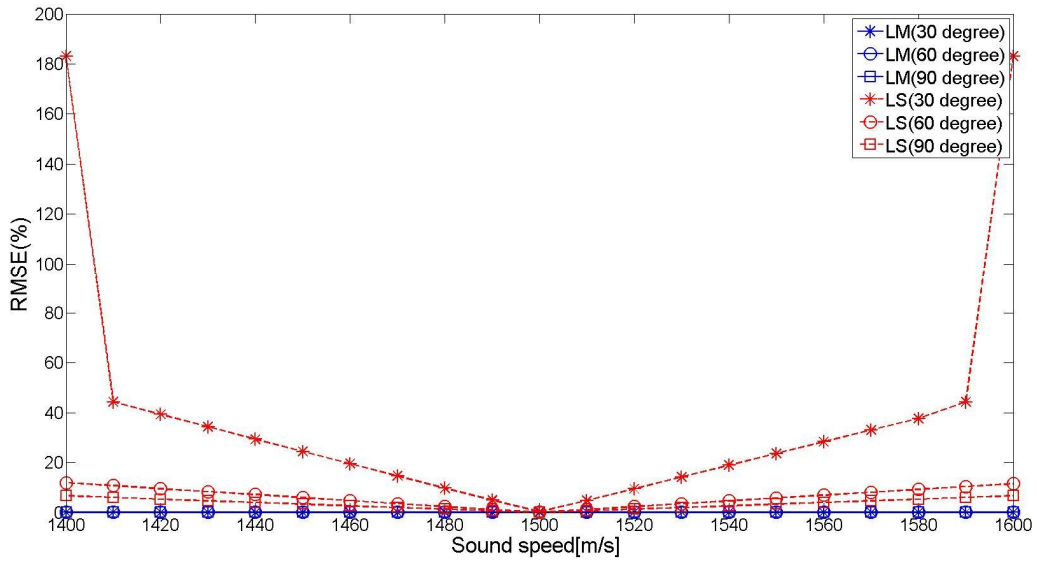


그림 5.6 음속 오차에 따른 위치 추정 성능 : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.6 RMSE analysis of source localization according to the sound speed mismatch

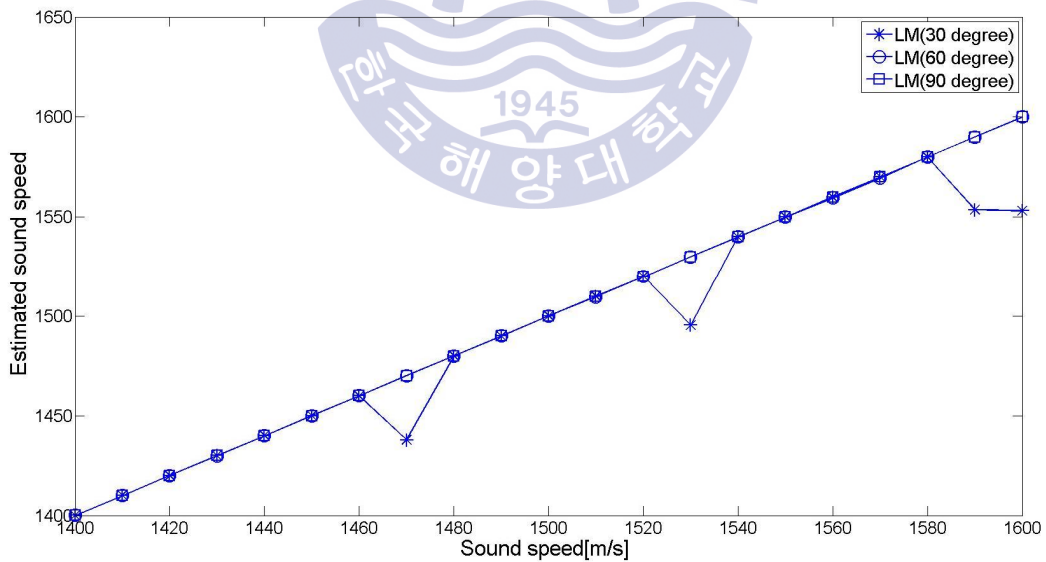


그림 5.7 음속 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과

Fig. 5.7 Sound speed estimation according to the sound speed mismatch

5.3 복합 오차에 따른 TDOA 추정 성능 분석

개별 오차에 따른 TDOA 성능 분석 결과를 기반으로 본 절에서는 고려한 채널 고장, 부배열 위치 오차, 음속에 동시 오차를 삽입하여 표적의 위치 추정 성능 결과를 분석, 고찰하였다. 복합 오차 조건에서 위치 추정 성능은 조건별로 3가지로 나누어 위치 추정 성능 비교하였다. 표 5.2는 복합 오차의 조건(1)로서 음속 부정합, 부배열의 위치 오차, 채널 고장 수로 정의하였다. 표적의 방위는 60° , 3000 m 에 위치하여 복합 오차 발생 시 영향성을 분석하였다.

표 5.2 복합 오차 시뮬레이션 조건(1)

분류	변수	값	비고
표적	방위	60°	
해양환경	음속	1450[m/s]	수심별 등음속
소나	부배열 위치 오차	0,-1,-2[cm]@Y축	Error
	고장 채널	1~8[EA]	Error
	적용 음속 (초기값)	1500[m/s]	Error

그림 5.8은 음속이 부정합한 경우, 고장 채널수와 부배열의 위치 오차에 따른 표적 위치 추정 성능을 나타낸다. 전반적인 결과는 동일한 조건에서 LS에 비해 제안한 LM 기반의 위치 추정 성능이 약 5% 정도 향상됨을 보이며, 단일 오차 발생에 비해 추정 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 예로 부배열의 오차가 -1 cm 인 경우, 단일 오차 발생 시, RMSE가 거의 0% 에 근접하였으나 복합 오차 시, 20% 정도 높게 나타나고 있다. 초기 1500 m/s 로 적용한 음속은 LM의 반복 최적화를 통하여 그림 5.9와 같이 해양 환경으로 입력한 음속에 유사한

값으로 접근하여 LM 위치 추정 성능을 LS 대비 향상시키고 있다. 음속이 고정된 상태에서 거리 추정 성능에 영향을 미치는 요소는 채널의 고장에 비해 부배열의 위치 오차가 표적의 위치 추정 성능에 큰 원인으로 작용하며, 이는 부배열의 설치 시 고려되어야 할 요소로 분석된다.



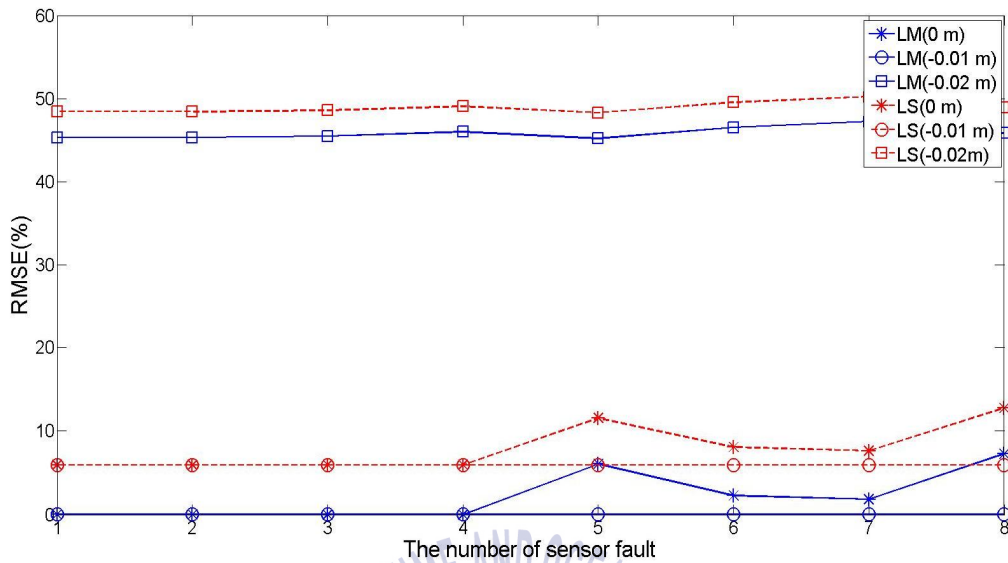


그림 5.8 복합 오차에 따른 위치 추정 성능(1) : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.8 RMSE analysis of source localization according to the mixed errors(1)

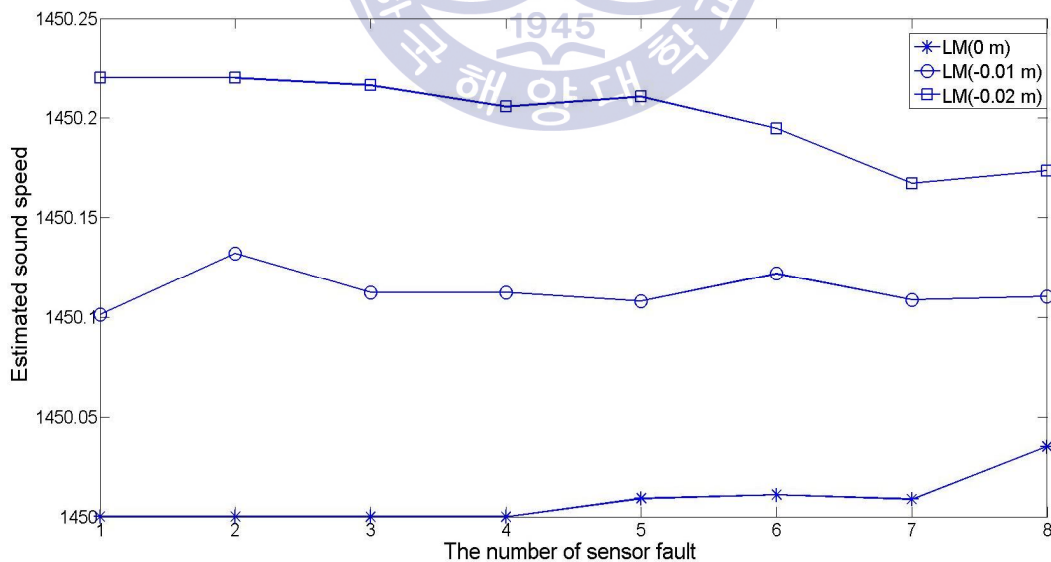


그림 5.9 복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(1)

Fig. 5.9 Sound speed estimation according to the mixed errors(1)

표 5.3은 복합 오차의 조건(2)로서 음속 부정합, 부배열의 위치 오차, 채널 고장 수로 정의하였다. 표적의 방위는 60° , 3000 m에 위치하여 복합 오차 발생 시 영향성을 분석하였다.

표 5.3 복합 오차 시뮬레이션 조건(2)

분류	변수	값	비고
표적	방위	60°	
해양환경	음속	1400,1450,1500 [m/s]	수심별 등음속
소나	부배열 위치 오차	-3~+3[cm]@Y축	Error
	고장 채널	4[EA]	Error
	적용 음속 (초기값)	1500[m/s]	Error

그림 5.10은 채널 고장을 4개로 고정하고, 음속 부정합과 부배열의 위치 오차에 따른 표적 위치 추정 성능을 나타낸다. 동일한 조건에서 그림 5.8과 유사한 결과를 보이며, 부배열 오차가 -2cm 이하의 경우, 1400 m/s의 음속 조건이 1450 m/s에 비해 위치 추정 성능이 높게 나타난다. 그림 5.11에 LM의 반복 연산을 통한 음속 추정 과정에서 산출한 값이 거리 추정에 영향을 주는 것으로 판단되며, 추정한 값의 유효성은 추가적인 검증 과정이 필요할 것으로 보인다. 그림 5.10의 그 외 부배열의 위치 오차 구간에서는 선형 최소자승법의 경우, 음속의 부정합이 높을수록 위치 추정 성능이 떨어지며, 비선형 최소자승법(LM)의 경우에는 대부분의 부배열 위치 오차 구간에서 음속 부정합 조건에서 0%에 가까운 위치 추정 성능을 보인다. 채널 고장을 좌우 비대칭으로 적용하여 부배열의 좌, 우 오차량에 따라 위치 추정 성능이 다르게 나타나는 이유이다.

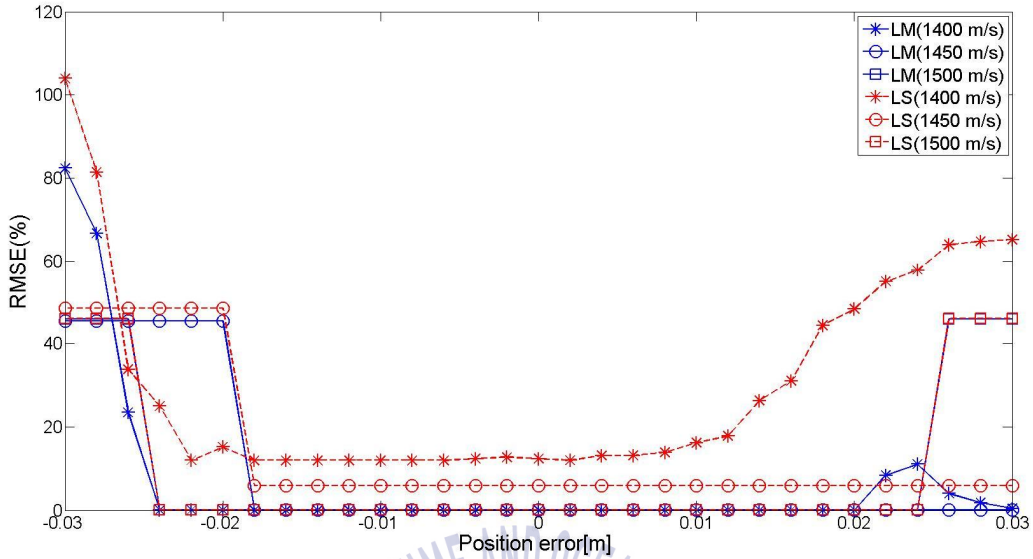


그림 5.10 복합 오차에 따른 위치 추정 성능(2) : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.10 RMSE analysis of source localization according to the mixed errors(2)

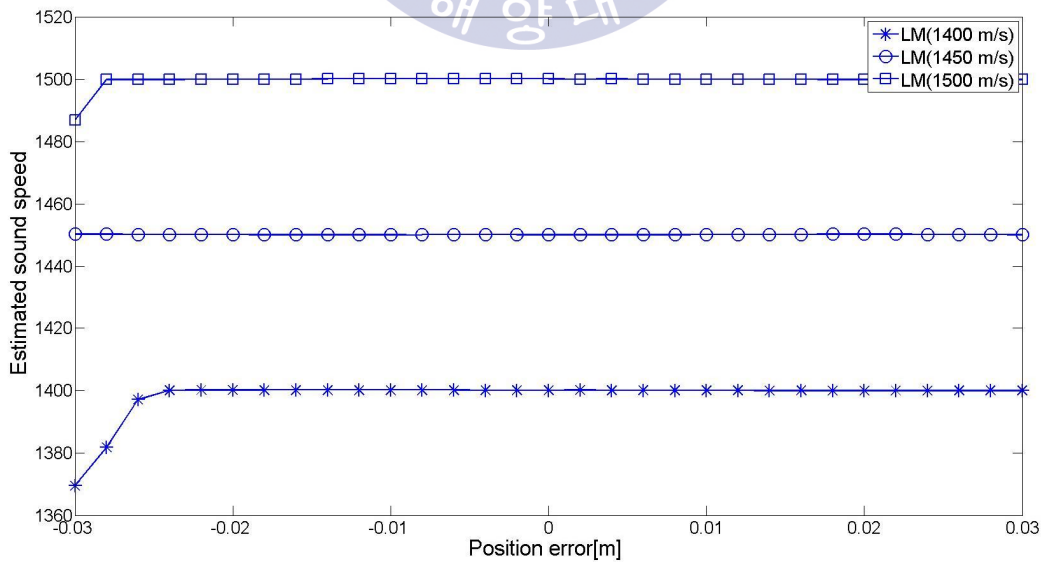


그림 5.11 복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(2)

Fig. 5.11 Sound speed estimation according to the mixed errors(2)

표 5.4는 복합 오차의 조건(3)로서 음속 부정합, 부배열의 위치 오차, 채널 고장 수로 정의하였다. 표적의 방위는 60° , 3000 m에 위치하여 복합 오차 발생 시 영향성을 분석하였다.

표 5.4 복합 오차 시뮬레이션 조건(3)

분류	변수	값	비고
표적	방위	60°	-
해양환경	음속	1400~1600[m/s]	수심별 등음속
소나	부배열 위치 오차	1[cm]@Y축	Error
	고장 채널	0, 4, 8[EA]	Error
	적용 음속 (초기값)	1500[m/s]	Error

그림 5.12는 부배열의 위치 오차를 고정하고, 음속 부정합과 채널 고장에 따른 위치 오차에 따른 표적 위치 추정 성능을 나타낸다. 동일한 조건에서 그림 5.8, 5.10과 유사한 결과를 보인다. 부배열 오차가 1 cm에서는 음속 및 일부 채널 고장 환경에 대해서 LM 적용 기법 결과는 초기 적용한 음속값 1500[m/s]가 해양환경 변수로 입력한 음속으로 수렴하여 그림 5.13과 같이 산출한 음속값이 해양 환경 변수로 입력한 값과 동일하다. 이와 같이 추정한 음속값은 그림 5.12의 LM 추정 성능에 반영되어 0%에 가까운 위치 추정 성능을 보인다. 그러나 선형 최적화 기법의 경우, 해양환경과 적용음속이 일치하는 1500 m/s 기준으로 좌, 우 구간에서 음속 부정합량에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 나타낸다.

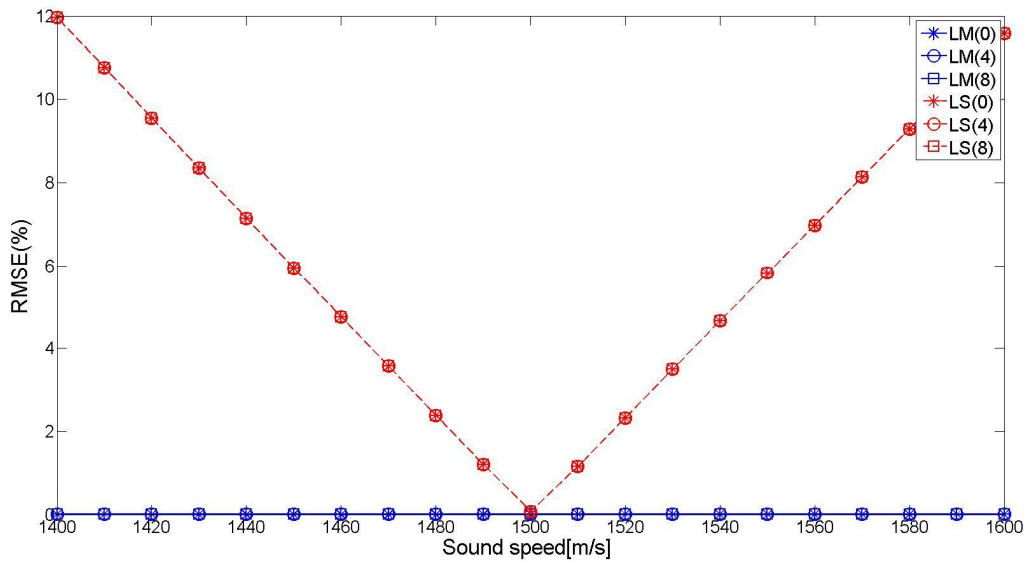


그림 5.12 복합 오차에 따른 위치 추정 성능(3) : $RMSE(\epsilon_R[\%])$

Fig. 5.12 RMSE analysis of source localization according to the mixed errors(3)

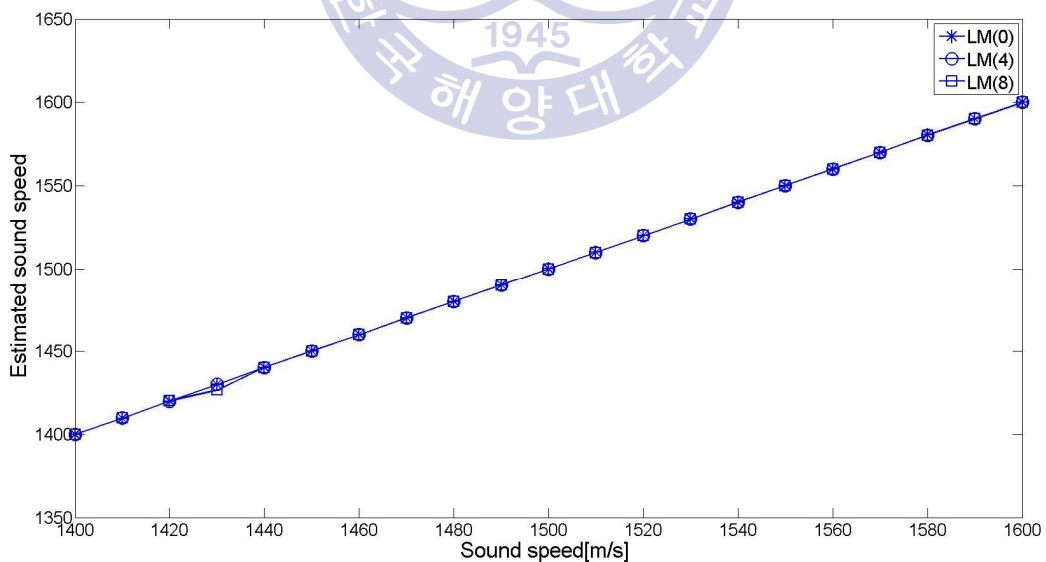


그림 5.13 복합 오차에 따른 LM 기법의 음속 산출 결과(3)

Fig. 5.13 Sound speed estimation according to the mixed errors(3)

5.4 시뮬레이션 결과 종합

본 장은 3장에서 분석한 표적 위치 추정에 영향을 미치는 변수들(음속, 부배열 위치 오차, 채널 고장)의 오차에 따라 발생한 표적 위치 추정 오차를 비선형 최소자승법인 LM 기법 기반 제안 기법의 성능을 모의 시뮬레이션을 수행하여 분석하고 제안한 기법은 선형 최소 자승법과 비교하여 제안 기법의 성능을 비교하였다. 또한 기법의 통계적인 특성을 도출하기 위하여 시뮬레이션 입력 조건에 따라 500회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 통상적인 오차 분석 기법(RMSE : Root Mean Squared Errors)으로 결과를 산출하여 분석하였다.

비선형 최소자승법 기반의 기법이 선형 최소자승법에 비해 대부분의 조건에서 5 ~ 50% 이상의 성능 향상을 확인할 수 있으며, 다른 변수의 오차에 따라 부배열의 위치 오차와 같은 일부 변수의 성능 제안 범위도 확인 가능하였다.

제안한 비선형 최소자승법 기반 기법은 음속, 부배열 위치 오차, 채널 고장 등의 세 가지 변수에 대해서 시뮬레이션을 수행하였으며, 보다 다양한 시뮬레이션 환경과 오차량 및 변수를 두어 추가적인 성능 검증이 필요할 것이다.

제 6 장 결 론

본 연구는 신호원의 도래각 및 도래 시간차 산출에 오차를 유발시키는 변수들을 도출하고 오차를 포함한 변수들로 인한 거리 추정 오차를 분석하였다. 오차를 유발하는 변수들은 부배열의 위치 오차, 해양환경의 음파전달속도와 시스템에 적용하는 음파전달속도의 부정합, 수신 센서의 작동 유무를 표현하는 센서의 고장 상태를 고려하였다. 이를 기반으로 분산된 부배열로 입사되는 신호원의 도래시간차를 이용하여 위치 추정 성능을 향상시키기 위한 방안을 제안하였다. 기존의 선형 최소자승법과 비선형 최소자승법(Levenberg-Marquardt) 기반의 제안한 기법을 비교하여 수중 환경에 제안 기법의 적용 가능성을 확인하였다.

수중 소음원의 위치 추정 최적화기법에는 오차를 포함한 측정 데이터를 기반으로 이론적으로 예측한 기대값과의 편차를 줄임으로서 선형 최적화하는 기법으로 LS 기법이 있다. LS 기법의 경우, 관측 데이터의 특성에 따라 발산 또는 국소 위치를 추정하는 Forward Closed Form으로 알려져 있다.

선형 최적화 방법과는 달리 비선형 최적화 방법은 반복적인 형태로 매 시간 수신한 데이터를 기반으로 반복 연산을 통하여 목적 함수 내에 포함된 변수의 오차를 최소화하는 과정이다. 비선형 최소화 방법은 주로 오차를 추정하기 위한 감폭 계수(Damping coefficient)를 어떻게 정의하느냐에 따라 Gauss Newton, Gradient Descent 방법이 주로 사용되고 있다.

제안한 기법은 이러한 두 개의 비선형 최적화 기법을 결합한 형태인 LM 알고리즘 기반의 수중 소음원의 위치 추정 오차를 최소화 하는 기법이다. LM 방법은 위 두 개의 비선형 기법이 결합한 형태로서 해에 수렴하는 과정에 있어 안정적인 해를 가지는 장점이 있다.

본 논문에서는 수중음파탐지기에서 표적의 방위, 거리 추정 오차를 유발하는 3개의 변수(음속, 부배열 간의 위치 오차, 센서의 고장 상태)로 인해 획득한 데

이터를 기반으로 비선형 최소자승법인 LM 방법에 적용하여 제안 기법의 성능을 모의 시뮬레이션을 수행하여 분석하였다. 제안한 기법은 선형 최소자승법과 비교, 고찰하였다. 또한 기법의 통계적인 특성을 도출하기 위하여 시뮬레이션 입력 조건에 따라 500회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 통상적인 오차 분석 기법 가운데 하나인 RMSE 값을 구하여 분석하였다.

수중 환경에서 운용하는 소나 시스템의 입력 변수는 소나 방정식을 기반으로 소음원의 특징, 해양환경, 소나 시스템 입력 변수 등 다양하고 복잡한 변수들로 구성된다. 다양한 변수들을 포함한 모의 환경 구축을 위해서는 고려되어야 할 요소들이 많으며, 현재 다양한 분야에서 목적에 맞게 구현하기 위하여 연구 중이다. 본 연구에서 복잡한 변수들 가운데 소나 시스템의 거리 추정 성능에 주로 영향을 미치는 변수들을 도출하여 도출한 변수를 기반으로 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 각 변수들에 오차를 포함하여 모델과의 오차를 최소화하는 과정을 선형, 비선형 최소자승법으로 접근하였다. 비선형 최소자승법 기반의 제안한 기법은 선형 최소자승법에 비해 대부분의 조건에서 5~50% 이상의 성능 향상을 확인하였으며, 다른 변수의 오차에 따라 부배열의 위치 오차와 같은 일부 변수의 성능 제안 범위도 확인 가능하였다.

향후, 본 연구 내용을 기반으로 다양한 모의 환경을 통한 기법 검증이 수행되어야 할 것이다. 수중 소음원은 다양한 특성(낮은 신호 대 잡음비, 주파수 대역 특성)과 소음원의 위치, 기동 등에 따른 다양한 환경 모의가 고려되어야 하며, 해양 환경은 현재 단일 등음속(Iso-velocity)에서 수중환경에 적합한 음파전달모델 기반의 전달특성과 배경 소음 특성이 고려되어야 할 것이다. 마지막으로 소나를 구성하는 입력 변수들에 대해서도 현재 적용한 음속값에서 다양한 변수들로 확장하고 변수들이 갖는 오차 범위를 고려한 모의 환경에서의 성능을 입증해야 할 것이며, 해상 데이터를 통한 성능 검증이 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] 오원천, “수중 탐지 기술 발전 추세,” 국방과학기술플러스, ISSN 1738-897X, Vol. 28, 2007.
- [2] Gordon D. Tyler, Jr., “The Emergency of Low-Frequency Active Acoustics as a Critical Antisubmarine Warfare Technology,” *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 13, pp.145-159, 1992.
- [3] A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineers, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, 2004.
- [4] R. J. Urick., *Principles of underwater sound*, McGraw-Hill, 1983.
- [5] P. E. Etter, *Underwater Acoustic Modeling and Simulation. 3rd Edition*, Spon Press, 2003.
- [6] G. C. Carter, “Time delay estimation for passive sonar signal processing,” *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 24, pp.320-327, 1976.
- [7] Hinich and Melvin J., “Passive range estimation using subarray parallax,” *J. Acoust. Soc. America*, vol. 65, pp.1229-1230, 1979.
- [8] Stergiopoulos S. and Ashley A. T., “An experimental evaluation of split-beam processing as a broadband bearing estimator for line array sonar system,” *J. Acoustical Soc. America*, vol. 102, pp.3556-3563, 1997.
- [9] Yudong W., Weifeng L. and Yimei C., “Passive localization based on multi-sensor GLMB filter using a TDOA Approach,” *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Dalian, China, July 26-28, 2017.
- [10] Benjian Hao, Zan Li, Jiangbo Si, Weiyi Yin and Yunmei Ren., “Passive Multiple Disjoint Sources Localization Using TDOAs and GROAs in the presence of Sensor Localization Uncertainties,” In *IEEE International Conference on communications (ICC)*, pp.47-52, 2012.
- [11] G. C. Carter, “Time delay estimation for passive sonar signal processing,” *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. ASSP-29, pp.263-470, 1981.

- [12] A. L. Van Buren, "Steered Planar Near-field Calibration Array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, no. 4, pp.1052-1059, Apr. 1978.
- [13] Brian P. Flangan and Kristine L. Bell "Array self-calibration with large sensor errors," *Signal Processing*, vol. 81, pp.2201-2214, 2001.
- [14] Liao, Bin, and S. C. Chan, "A simple method for DOA estimation in the presence of unknown nonuniform noise," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing IEEE*, pp.2789-2793, 2015.
- [15] Yue Z., Zan Li, Benjian H., JiangBo S. and Pengwu W., "Bias Reduced Method for TDOA and AOA Localization in the Presence of Sensor Errors," *IEEE ICC 2017 Signal Processing for Communications Symposium, 2017*.
- [16] K. C. Ho and Wenwei X., "An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location Using TDOA and FDOA Measurements," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol 59(7), pp.3434-3440, 2011.
- [17] Yaser Dalveren and Ali Kara, "Comparative Analysis of TDOA-based Localization Method in the Presence of Sensor Position Errors," *Proceedings of 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'17)*, Barcelona, Spain, April 5-7, 2017.
- [18] R. Poisel, "Electronic Warfare Target Location Methods, Artech House Intelligence and Information Operations," Norwood, MA, 2012.
- [19] Y. Liu, F. Guo, L. Yang and W. Jiang, "An improved algebraic solution for tdoa localization using tdoa and fdoa measurements," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 62, no. 2, pp.853-862, 2013.
- [20] J. Chen, J. Benesty and Y. Huang, "Time delay estimation in room acoustic environments: An overview," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2006, no. 1, 2006.
- [21] F. Beaubois, S. Reboul, I. Selmi, J. B. Choquel and J. C. Noyer, "A probabilistic underwater hyperbolic location system in low depth environment," in *OCEANS 2016-Shanghai*, pp.1-4, April 2016.

- [22] Yanbin Zou, Huaping Liu, Wei Xie and Qun Wan, "Semidefinite Programming Methods for Alleviating Sensor Position Error in TDOA Localization," *IEEE Access*, vol. 5, pp.23111-23120, 2017.
- [23] G. Wang, Y. Li and N. Ansari, "A Semidefinite relaxation method for source localization using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 62, no. 2, pp.853-862, 2013.
- [24] Stefanos D. Kouteas, "Time delay estimation for underwater signals and application to localization," Naval Postgraduate school Monterey, California, USA.
- [25] G. C. Carter, "Coherence and Time Delay Estimation," IEEE PRESS, New York, 1996.
- [26] G. C. Carter, "*The smoothed coherence transform SCOT*," Technical Report TM TC-159-72, Naval Undersea Warfare Center, Newport Laboratory, Newport, Rhode Island, 1972.
- [27] H. Yu, G. Huang and J. Gao, "Constrained total least-squares localisation algorithm using time difference of arrival and frequency difference of arrival measurements with sensor location uncertainties," *IET Radar, Sonar Navigation*, vol. 6, no. 9, pp.891-899, 2012.
- [28] G. H. Golub and C. F. Van Loan. *Matrix Computations*. Johns Hopkins University Press, 3rd edition, 1996.
- [29] C. T. Kelley. *Iterative Methods for Optimization*. SIAM Press, Philadelphia, 1999.
- [30] M. Lampton. "Damping-Undamping Strategies for the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Method," *Computers in Physics Journal*, vol. 11(1), pp.110-115, Jan./Feb. 1997.
- [31] K. Madsen, H. B. Nielsen and O. Tingleff. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*, Technical University of Denmark, 2004. Lecture notes, available at <http://www.imm.dtu.dk/courses/02611/nllsq.pdf>. (Search : Jan. 30, 2018)

- [32] D. W. Marquardt. "An Algorithm for the Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 11(2), pp.431-441, Jun. 1963.
- [33] C. Yan, J. Dong, G. Lu, D. Zhang and Y. Qi, "An Adaptive Algorithm Based on Levenberg-Marquardt Method and Two-Factor for Iterative Extended Kalman Filter," 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications, pp.1559-1563, 2017.
- [34] G. B. Chang, J. N. Xu, A. Li and B. Q. Hu, "Modified iterated extended Kalman filter based on Gauss-Newton iteration and its application in UNGM," *J. of Naval University of Engineering*, vol. 24(1), pp.15-19, 2012.
- [35] P. Bragard, G. Jourdain, "A fast self-optimized LMS algorithm for non-stationary identification application to underwater equalization," *IEEE ICASSP-90*, NM, USA, 1990.
- [36] Kai Ma, Weiming XU and Jian XU, "The application of Levenberg-Marquardt Algorithm in Multi-beam Sounding Data," *2017 IEEE 2nd ITNEC*, pp.1710-1714, 2017.
- [37] K. Levenberg, "A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 2(2), pp.164-168, Jul. 1944.
- [38] D. F. Groutage, J. D. Gary and D. K. Owen, "Near-field plane wave generation using a minimum mean square error approach," *IEEE 6th Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing*, pp.516-521, 1992.
- [39] F. M. Gardner, *Phase lock Techniques*, Wiley, New York, 1979.
- [40] A. L. Van Buren, "Theoretical Design of near-field Calibration Array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 53. no. 1, pp.192-199, 1973.
- [41] A. Benallal, A. Gilloire, "Improvement of convergence speed and tracking capability of the numerically stable FLS algorithm for adaptive filtering," *ICASSP-89*, Glasgow, UK.

- [42] R. J. Vaccaro, T. Manickam, C. S. Ramalingam, R. Kumaresan, D. W. Tufts, "Least-Squares Time-of-Arrival Estimation for Transient Signals in a Multipath Environment," *IEEE Conferences*, vol. 2, pp.1092-1102, 1991.
- [43] J. A. Cadzow, "Signal processing via least-squares error modeling," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 7, pp.12-32, Oct. 1990.
- [44] Manolis I. A. Lourakis. A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar, Feb. 11, 2005. Available at <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar>. (Search : Jan. 30, 2018)
- [45] Guohui Zhun, Dazheng Feng, Hu Xie and Yang Zhou, "An approximately efficient bi-iterative method for source position and velocity estimation using TDOA and FDOA measurements," *Signal Processing*, vol. 125, pp.110-121, 2016.
- [46] Y. Zou, H. Liu, Q. Wan, "An Iterative Method for Moving Target Localization Using TDOA and FDOA Measurements," *IEEE Journals and Magazines*, vol. 6, pp.2746-2754, 2018.
- [47] Benjian Hao, Zan Li, Weiyi Yin and Yunmei Ren., "On the Cramer-Rao bound of multiple sources localization using RDOAs and GROAs in the presence of sensor location uncertainties," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC)*, Paris, France, pp.3117-3122, Apr. 2012.
- [48] Radhey S. Gupta, *Elements of Numerical Analysis 2nd Edition*, Cambridge University Press, 2015.
- [49] Kinsler, L., Frey, A. and Coppens, A. & Sanders, J., 1982, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley and Sons.
- [50] N. Bershad, O. Macchi, "Comparison of RLS and LMS algorithms for tracking a chirped signal," *ICASSP-89*, Glasgow, UK.
- [51] Renbiao Wu, Jian Li, "Time-Delay Estimation via Optimizing Highly Oscillatory Cost Functions," *Journal of Oceanic Engineering*, vol. 23, no. 3, pp.235-243, 1998.

- [52] Y. T. Chan, J. M. Riley, J. B. Plant “A parameter estimation approach to time-delay estimation and signal detection,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-28, pp.8-16, 1980.
- [53] I. P. Kirsteins, “High Resolution Time Delay Estimation,” in *IEEE Proc. ICASSP-87*, (Dallas, TX), pp.451-454, Apr. 1987.



감사의 글

영광스러운 박사 학위를 마치면서 그 동안 도움을 주신 분들께 감사의 인사를 드리고자 합니다.

연구원으로의 길을 열어 주시고, 평생의 가르침을 주시는 김기만 교수님 감사드립니다. 부족한 논문을 완성시키는데 지도해 주신 홍우영 교수님, 김재수 교수님, 정지원 교수님께 깊은 감사를 드리며, 바쁜 업무에도 논문을 완성할 수 있도록 독려해 주신 박명호 박사님께 진심으로 감사드립니다.

학업에 기회를 주시고 충실히 학문에 매진할 수 있도록 배려해 주신 오원천 박사님과 황수복 소나체계 단장님께 머리 숙여 감사드립니다. 업무와 학업을 병행할 수 있도록 격려와 배려를 주신 김광태 팀장님과 소나 1팀 모든 팀원들께 깊이 감사드립니다. 항상 고맙습니다.

학업을 수행함에 어려운 부탁에도 끝까지 도움을 준 DSP 실험실의 후배님들께 고마운 마음을 전하며, 특히 논문을 완성할 수 있도록 도와준 권택익 후배에게 감사한 마음을 전합니다.

오늘의 나를 있게 해주시고 부족한 부분을 채워 당당한 사회의 일원이 될 수 있도록 키워주신 우리 부모님, 인생의 지표를 주시고 격려해 주시는 장인어른, 장모님께 이 영광스러운 학위를 바칩니다. 사랑합니다.

끝으로, 항상 사랑과 격려로 믿고 따라 주는 인생의 동반자인 아내 이나래와 타국에서 묵묵히 격려해 주는 듬직한 처남, 그리고 동생 내외와 사랑스런 조카하음, 서준이와 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

2018년 8월

양 인 식 드림