

공학박사 학위논문

정합장처리에서 오정합에 의한
바이어스와 민감도

**Bias due to Mismatch and its Sensitivity
in Matched Field Processing**

지도교수 김 재 수

2002년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

박 재 은

本 論 文 을 朴 在 垠 의 工 學 博 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

심사 위원장 공학박사 박 한 일 (인)

심 사 위 원 공학박사 오 원 천 (인)

심 사 위 원 공학박사 나 영 남 (인)

심 사 위 원 공학박사 김 기 만 (인)

심 사 위 원 공학박사 김 재 수 (인)

2002년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과 박재은

Bias due to Mismatch and its Sensitivity in Matched Field Processing

by

Park , Jae - Eun

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Matched field processing(MFP) is a parameter estimation technique for localizing the range, depth, and bearing of a point source from the signal field propagating in an acoustic waveguide. MFP involves the correlation of the actual acoustic pressure field measured at a receiver array with a predicted field based on a postulated source position and an assumed ocean model.

A high degree of correlation between the measured field and the predicted field indicates a likely source location. Thus an increased complexity of the ocean's structure provides a greater variability of the acoustic fields, which aids the estimation procedure. When the environmental data are inaccurate or incomplete, a "mismatch" occurs between the measured data and the predicted pressure field, that causes a degradation in MFP correlation and an appreciable bias.

In this thesis, I was concerned with quantitative evaluation of the effects of mismatches arising from inaccuracies in a number of important system and ocean environmental parameters in a shallow water. The motivation for this study is to examine the biases in the source localization and the sensitivities of

the matching results from various mismatches.

Using a conventional estimator, I have investigated the bias of range and depth estimates caused by perturbations in array position, as well as ocean environmental parameters through the simulation. Replica fields are calculated using the normal mode methods with the exception of bathymetry case. Also this study examined the sensitivity of MFP to geometric, geoacoustic, and ocean sound speed parameters using the genetic algorithm. And this method is applied to measured data to overcome mismatch and accurately estimate source location with limited *a priori* environmental information by expanding the parameter search space of MFP to include environmental parameters.

As a result, significant biases can be introduced into the depth and range localization predictions of a MFP through erroneous estimates of environmental parameters. It can also be concluded that the impact of mismatch, both summer sound speed and sensor position in water layer, is more serious than the geoacoustic parameters. This implies that simulations of mismatch which consider only a few errors will provide very misleading results on source position. Water depth and bottom bathymetry errors can be offset significantly; it shifted progressively farther away and deeper from the actual source location as the true water depth became shallower. Errors in estimates of the sediment attenuation and density, and basement parameters appear to be of relatively minor importance.

From an experimental implementation viewpoint, these result should enable resources to be concentrated on obtaining reliable values for those parameters which are important to know accurately, avoiding unnecessary effort to overdetermine relatively unimportant ones. It is also necessary to understand the types of mismatches in MFP that may be introduced by inaccuracies in the various forward modeling parameters, so that specific types of information deficiencies may be identified and attempts can be made to compensate for them.

목 차

| | |
|-----------------------------------|------|
| Abstract | i |
| 목 차 | iii |
| List of Figures | vi |
| List of Tables | viii |
| List of Symbols | ix |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구 목적 | 2 |
| 1.3 연구 내용 및 구성 | 4 |
| | |
| II. 정합장처리 알고리즘 | 6 |
| 2.1 해양에서 음파 전달과 모델링 | 6 |
| 2.2 정합장처리의 구성 요소 | 8 |
| 2.3 정합장 프로세서 | 10 |
| 2.3.1 협대역 프로세서 | 10 |
| 2.3.2 광대역 프로세서 | 17 |
| 2.4 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 역산 | 24 |
| 2.4.1 목적함수 | 26 |
| 2.4.2 매개변수 초기화 | 27 |
| 2.4.3 유전 연산자 | 28 |
| 2.4.4 사후 통계 | 29 |
| | |
| III. 매개변수 오정합에 대한 수치실험 및 분석 | 32 |
| 3.1 오정합 연구 동향 | 32 |
| 3.2 수치실험 환경 | 34 |

| | |
|---------------------------|----|
| 3.3 개별 매개변수 오정합 | 36 |
| 3.3.1 시스템 매개변수 오정합 | 36 |
| 3.3.1.1 주파수 오정합 | 36 |
| 3.3.1.2 배열 수심 오정합 | 38 |
| 3.3.1.3 배열 경사 오정합 | 40 |
| 3.3.2 수층 매개변수 오정합 | 43 |
| 3.3.2.1 음속분포 오정합 | 43 |
| 3.3.2.2 수심 오정합 | 50 |
| 3.3.2.3 해저면 경사 오정합 | 53 |
| 3.3.3 해저퇴적층 매개변수 오정합 | 58 |
| 3.3.3.1 해저퇴적층 두께 오정합 | 58 |
| 3.3.3.2 해저퇴적층 상부음속 오정합 | 61 |
| 3.3.3.3 해저퇴적층 하부음속 오정합 | 61 |
| 3.3.3.4 해저퇴적층 밀도 오정합 | 63 |
| 3.3.3.5 해저퇴적층 감쇠계수 오정합 | 63 |
| 3.3.4 저층 매개변수 오정합 | 66 |
| 3.3.4.1 저층 음속 오정합 | 66 |
| 3.3.4.2 저층 밀도 오정합 | 67 |
| 3.3.4.3 저층 감쇠계수 오정합 | 68 |
| 3.4 결합된 매개변수 오정합 | 69 |
| 3.4.1 수층 수심과 배열 수심과의 오정합 | 70 |
| 3.4.2 수층 수심과 배열 경사와의 오정합 | 70 |
| 3.4.3 수층 수심과 해저층 음속과의 오정합 | 73 |
| 3.4.4 수층 수심과 해저층 밀도와의 오정합 | 73 |
| 3.5 종합된 매개변수 오정합 | 76 |
| | |
| IV. 오정합에 대한 매개변수의 민감도 분석 | 81 |
| 4.1 연구동향 | 81 |
| 4.2 매개변수의 민감도 분석 결과 | 82 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| V. 실측자료의 매개변수 최적화 및 오정합 영향 | 90 |
| 5.1 실험 해석의 환경 및 신호 분석 | 90 |
| 5.1.1 실험 해석과 음원의 경로 | 90 |
| 5.1.2 수직 선배열과 예인 음원 | 91 |
| 5.1.3 실험 환경 | 92 |
| 5.1.4 신호의 스펙트로그램 분석 | 94 |
| 5.2 매개변수 역산과 음원 위치 추적 | 95 |
| 5.3 역산된 실험 자료의 오정합 영향 분석 | 101 |
| VI. 결 론 | 106 |
| 참고 문헌 | 109 |

List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 Matched field processing procedure. | 8 |
| Fig. 2.2 Sample CSDM estimation for the narrowband signals. | 9 |
| Fig. 2.3 Incoherent broadband MFP algorithm. | 20 |
| Fig. 2.4 Coherent broadband MFP algorithm. | 22 |
| Fig. 2.5 Genetic algorithm flow chart. | 25 |
| Fig. 2.6 Crossover for two model parameters. | 29 |
| Fig. 2.7 Random change of one bit for mutation. | 29 |
| Fig. 3.1 A schematic of the shallow-water ocean environment. | 34 |
| Fig. 3.2 Results of MFP for the frequency mismatch. | 37 |
| Fig. 3.3 Results of MFP for the array depth mismatch. | 39 |
| Fig. 3.4 A Schematic of the tilted array. | 40 |
| Fig. 3.5 Results of MFP for the array tilt mismatch. | 41 |
| Fig. 3.6 Sound speed profile. | 44 |
| Fig. 3.7 EOF and MFP results of the SSP mismatch in February. | 45 |
| Fig. 3.8 EOF and MFP results of the SSP mismatch in August. | 46 |
| Fig. 3.9 Results of MFP for the SSP mismatch using the mean SSP in February. | 48 |
| Fig. 3.10 Results of MFP for the SSP mismatch using the mean SSP in August. | 49 |
| Fig. 3.11 Results of MFP for the water depth mismatch. | 51 |
| Fig. 3.12 Shallow water environment for the bathymetry case I. | 53 |
| Fig. 3.13 Results of MFP for the bathymetry mismatch case I. | 55 |
| Fig. 3.14 Shallow water environment for the bathymetry case II. | 56 |
| Fig. 3.15 Results of MFP for the bathymetry mismatch case II. | 57 |
| Fig. 3.16 Results of MFP for the sediment thickness mismatch. | 59 |
| Fig. 3.17 Results of MFP for the mismatch of the sediment sound speed at top. | 60 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.18 Results of MFP for the mismatch of the sediment sound speed at bottom. | 62 |
| Fig. 3.19 Results of MFP for the sediment density mismatch. | 64 |
| Fig. 3.20 Results of MFP for the sediment attenuation mismatch. | 65 |
| Fig. 3.21 Results of MFP for the basement sound speed mismatch. | 66 |
| Fig. 3.22 Results of MFP for the basement density mismatch. | 67 |
| Fig. 3.23 Results of MFP for the basement attenuation mismatch. | 68 |
| Fig. 3.24 A schematic of the Pekeris waveguide. | 69 |
| Fig. 3.25 Results of MFP as function of water depth and array depth mismatch. | 71 |
| Fig. 3.26 Results of MFP as function of water depth and array tilt mismatch. | 72 |
| Fig. 3.27 Results of MFP as function of water depth and bottom sound speed mismatch. | 74 |
| Fig. 3.28 Results of MFP as function of water depth and bottom density mismatch. | 75 |
| Fig. 3.29 <i>A posteriori</i> probability distribution based on the one observation for the general mismatch case using the mean SSP in February. ... | 78 |
| Fig. 3.30 <i>A posteriori</i> probability distribution based on the one observation for the general mismatch case using the mean SSP in August. | 79 |
| Fig. 4.1 Marginal <i>a posteriori</i> distribution based on the 50 observations using the mean SSP in February. | 83 |
| Fig. 4.2 Marginal <i>a posteriori</i> distribution based on the 50 observations using the mean SSP in August. | 84 |
| Fig. 4.3 Distribution of maximum correlation coefficient using the mean SSP in February. | 85 |
| Fig. 4.4 Distribution of maximum correlation coefficient using the mean SSP in August. | 86 |
| Fig. 5.1 Bathymetry and ship track of East Sea Experiment. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 5.2 The vertical array as deployed in a Bottom moored configuration. | 91 |
| Fig. 5.3 The depth of the sensor as a function of time. | 92 |
| Fig. 5.4 Measured sound speed profile as a function of depth. | 93 |
| Fig. 5.5 A schematic of the baseline ocean environment. | 93 |
| Fig. 5.6 Results of the spectrogram analysis. | 94 |
| Fig. 5.7 Ambiguity surfaces for East Sea Experiment. | 96 |
| Fig. 5.8 Marginal <i>a posteriori</i> probability for each of the 14 model parameters for East Sea Experiment. | 97 |
| Fig. 5.9 A schematic of source tracking. | 99 |
| Fig. 5.10 Results of the source tracking for the Track-I. | 100 |
| Fig. 5.11 Ambiguity surfaces of the system and water layer parameters for the 90Hz. | 102 |
| Fig. 5.12 Ambiguity surfaces of the sediment and basement layer parameters for the 90Hz. | 103 |

List of Tables

| | |
|---|-----|
| Table 3.1 Estimated source position and correlation coefficients for the SSP EOFs. | 47 |
| Table 3.2 GA parameter with search bounds and estimates. | 77 |
| Table 4.1 Sensitivity coefficient for the 12 parameters. | 88 |
| Table 5.1 GA parameter estimates based on the 50 observations for East Sea Experiment. | 98 |
| Table 5.2 GA parameter estimates based on the one observations for the 90Hz for East Sea Experiment. | 101 |
| Table 5.3 Results of estimation based on parameters mismatch for the 90Hz. | 104 |

List of Symbols

| | |
|------------------------|---|
| a | : Amplitude |
| A | : Complex independent Gaussian random variables |
| C | : Normalization constant at OUPF |
| \mathbf{C} | : MV-EPC constrain matrix |
| d_s | : True water depth |
| \mathbf{d} | : Replica vector |
| \mathbf{d}_{cal} | : Vector containing the observed data |
| \mathbf{d}_{obs} | : Vector containing the calculated data |
| D | : Estimated water depth |
| \mathbf{D} | : Neighborhood location constraint matrix |
| f | : Reproduction size |
| \mathbf{f} | : MV-NLC constraint vector |
| F | : Received acoustic field in frequency domain |
| G | : Acoustic transfer function at OUPF |
| H | : Hermitian (conjugate transpose) |
| \mathbf{H} | : Dominant Eigenvector of the MV-EPC CSDM |
| k | : Wavenumber |
| $\widehat{\mathbf{K}}$ | : Sample CSDM (or covariance matrix) |
| $\widehat{\mathbf{K}}$ | : Sample CSDM using a super-vector |
| l | : Frequency bin |
| m, M | : Number of sensors |
| \mathbf{m} | : Model vector |
| \mathbf{M} | : Column of orthogonal matrix |
| M_0 | : Number of Eigenvalues |
| M_{par} | : Number of parallel runs |
| n, N | : Number of snapshots |

| | |
|------------------|--|
| \widehat{N} | : Normalize factor for sensitivity coefficient |
| N_{dim} | : Number of dimensions/parameters |
| N_f | : Number of frequencies |
| N_m | : Number of modes |
| N_{obs} | : Number of observed model vectors |
| NL | : Noise level |
| p | : Pressure |
| p_m | : Mutation probability |
| p_x | : Crossover rate |
| \widehat{P} | : Processor power |
| q | : Population size |
| \mathbf{Q} | : Noise spatial covariance matrix |
| r | : Range |
| \widehat{r}_s | : Estimated source range |
| r_s | : Source range |
| s | : Standard deviation of inversion parameter |
| \mathbf{s} | : Modal amplitude vector |
| \widehat{S} | : Standard deviation for sensitivity coefficient |
| \mathbf{S} | : Set of source position parameters |
| SC | : Sensitivity coefficient |
| SL | : Source level |
| $Spdc$ | : Sensitivity (or spread) coefficient |
| T | : Temperature |
| T_s | : Snapshot for a time domain |
| U | : Transfer function |
| w | : Bound of search space |
| \mathbf{w} | : Weighting vector |
| \mathbf{W} | : Replica super-vector |

| | |
|---------------------------|---|
| \mathbf{x} | : Signal vector |
| X, Y | : Random variables |
| \mathbf{X} | : Signal super-vector |
| z | : Depth |
| z_s | : Source depth |
| \hat{z}_s | : Estimated source depth |
| z_η | : Noise source depth |
| a | : Attenuation |
| δ | : Diagonal loading value |
| Δr | : Bartlett mainlobe width in range |
| Δ_r | : Range resolution for the 3-dB beamwidth |
| Δz | : Bartlett mainlobe width in depth |
| Δ_z | : Depth resolution for the 3-dB beamwidth |
| γ | : Signal-to-noise ratio |
| Λ | : Dominant Eigenvalue of the MV-EPC CSDM |
| $\boldsymbol{\eta}$ | : Background noise vector |
| θ_j^{\max} | : Upper bound in a rectangular probability for j-th parameter |
| θ_j^{\min} | : Lower bound in a rectangular probability for j-th parameter |
| $\boldsymbol{\Xi}$ | : Set of uncertain environmental parameters |
| σ_A | : Rayleigh parameter of the PDF of the source amplitude |
| Φ | : phase |
| ϕ | : Modal depth eigenfunction |
| \emptyset | : Object function |
| $\boldsymbol{\Psi}, \psi$ | : Vector of random environmental parameters |
| ω | : Angular frequency |

I. 서론

1.1 연구 배경

수중에서 음원이 발생시키는 음파를 탐지하여 음원에 대한 정보를 획득하기 위해서 일반적으로 수동 소나체계를 사용한다. 최근에 운용되는 수동 소나체계는 신호처리 기법과 컴퓨터 계산 속도 등의 향상으로 음원 탐지와 위치 식별 및 징표(signature)에 대한 식별의 과정이 순차적 또는 병렬적으로 진행되어 원하고자 하는 음원에 대한 상세한 정보를 제공한다. 수동 소나를 이용한 음원 위치에 관련된 정보의 확보는 수중음향 분야에서 매우 기초적이며 중요한 목적이라 할 수 있다. 이를 위해 신호 대 잡음비의 향상을 가져올 수 있는 배열(array)을 이용한 정합장처리(Matched Field Processing : MFP) 기법에 관한 연구가 진행되고 있다.

기본적으로 정합장처리는 평면파 빔형성(plane wave beamforming) 기법의 일반화된 형태이다. 일반적으로 사용되어온 평면파 빔형성 기법은 균질한 매질내의 신호 전파를 가정하여 평면파 신호의 위상과 가중치(weights)를 상관시키는 방법으로 방위를 추정한다. 그러나 실제 해양 음향에서의 신호는 다중 경로를 통해 전달되므로 평면파를 가정한 빔형성 기법으로는 음원 위치에 대한 정보를 파악하기가 어렵다. 정합장처리 기법은 배열에서 측정된 음장과 예상되는 모든 음원의 위치에 대하여 신호전달 모델을 적용하여 예측된 음장을 상관시킴으로써 방위와 거리, 수심 등의 위치 정보를 획득하여 음원 위치에 대한 추정 성능을 크게 향상시킨다.

층상화된 해양 도파관(waveguide)에서의 복제(replica)음장은 평면파가 아니고 완전한 파동방정식의 해로 표현된다. 그러므로 해양 도파관의 환경을 모두 고려하는 정합장처리는 음원신호에 잡음이 포함되어 있을 경우 잡음의 전달까지 고려해야 됨으로 더욱 복잡해진다. 따라서 정합장처리에서 음원 위치 추정 문제는 상관되는 잡음으로부터 음원 정보가 포함되어 있는 신호를 추출하는 매개변수 역산(inversion) 문제라고 할 수 있으며, 예측된 해양 도파관 내에 수많은 정해(forward solution)를 만들어 어떤 해가 잡음이 포함되어 있는 관측 신호와 가장

상관되는가를 검색함으로써 역산 문제를 해결한다.

정합장처리는 신호가 전달되는 해양 도파관에서의 음장을 적용하여 음원의 방위, 거리, 수심의 3차원으로 일반화된 역산 문제를 풀기 위한 배열 신호처리 알고리즘이다. 정합장처리는 도파관내의 공간적 음장의 특징을 이용하여 3차원 위치를 추정하는 데 이용되고 있으며, 더 나아가 수층 및 퇴적물의 구성에 따른 음향특성 등의 환경 매개변수를 추정하기 위한 MFI(Matched Field Inversion)나 MFT(Matched Field Tomography)로의 응용이 활발하게 연구되고 있다.

정합장처리를 통해 얻어지는 결과는 신호 전달된 음장과 이를 모사한 복제음장과의 상관관계를 나타내는 것이며, 그 결과는 음원의 위치를 포함한 찾고자 하는 매개변수들을 추정한 값으로 나타난다. 따라서 신호가 전달된 음장을 정확하게 모사한 음장이 사용될 경우에는 매우 높은 상관관계를 가지며 추정된 값들의 정확성이 높아질 것이나, 그렇지 않은 경우에는 상관관계가 저하되어 추정된 값을 신뢰할 수 없을 것이다. 이와 같이 신호가 전달된 음장의 매개변수와 복제음장의 매개변수들이 서로 오차를 가지는 것을 정합장처리에서는 오정합(mismatch)이라고 정의한다[1][2]. 배열을 통해 수신된 음장과 복제음장 사이에서 매개변수들의 오정합은 이상적인 경우를 제외하면 반드시 존재하고, 이러한 매개변수들의 오정합은 개별 또는 결합되거나 종합된 형태로 나타난다. 그러므로 정합장처리에서 매개변수들의 오정합이 프로세서 출력 결과에 미치는 영향에 대해 추정된 음원 위치에 관한 바이어스를 고찰함과 함께 이를 정량화시키는 것이 중요하며, 더 나아가 오정합에 민감한 매개변수를 식별하기 위한 연구가 필요하다.

1.2 연구 목적

정합장처리는 관측된 신호와 모사된 음장(복제음장)을 상관시켜 미지의 음원 위치 또는 음장에 관한 매개변수를 추정하는 기법으로서 신호가 발생되어 전달된 음장과 정확하게 모사된 음장과의 정합장처리는 매우 높은 상관값이 출력되며, 추정된 매개변수의 오차가 없는 이상적인 결과를 보인다. 그러나 복잡하고 시공간적

으로 변동이 심한 해양환경을 정확하게 모사하여 정합장처리를 수행하는 것은 매우 어려운 문제이며, 현실적으로 불가능하다 할 수 있다. 따라서 이러한 제반 문제를 극복하기 위해 낮은 신호 대 잡음비에 강인하고, 각종 매개변수의 오차에 둔감한 기법에 대한 연구와 더불어 적응 프로세서를 이용하는 등 다양한 프로세서들의 개발 및 발전을 가져왔다.

정합장처리를 위한 프로세서의 발달과 함께 신호가 전달된 음장과 복제음장 사이의 매개변수 오차들, 즉 오정합의 영향에 대한 연구가 병행되어져 왔다.

정합장처리에서 고려해야 되는 오정합은 크게 세 가지 분야로 구분된다[2]. 첫 번째는 시스템 오정합으로 신호를 수신하는 배열에 관한 매개변수들이 해당되며, 이것은 실제로 설치된 배열이 해류 또는 조류 등의 영향으로 원래 배열의 기하학적 형상과 위치를 유지하지 못함으로 발생된다. 두 번째는 해양환경에 관한 매개변수의 오정합으로 복제음장을 계산하기 위해 사용되는 음향전파 모델의 입력 매개변수가 대부분 해당되며 그 예로서 수층의 음속분포 및 수심, 해저퇴적층의 층별 두께와 음속분포, 음향 감쇠계수, 밀도 등의 지음향(geoacoustic) 매개변수가 해당된다. 세 번째는 통계적인 오정합으로 추정된 공분산행렬을 사용한 적응 알고리즘에서 신호단편의 부족 또는 유한한 자유도로 인한 문제이다.

통계적인 오정합은 적응 정합장처리에서 배열의 센서 수보다 부족한 신호단편 수로 표본 공분산행렬을 구성할 경우에 행렬 계수의 부족으로 행렬의 역변환에 문제가 발생하는 것으로서, 이를 해결하기 위해 표본 공분산행렬의 대각성분에 일정한 값을 더하거나 고유분해와 같은 기법을 사용하나, 그 결과로 프로세서 출력에서는 바이어스가 발생된다. 고정음원을 대상으로 한 수치실험과 실측 자료를 사용하여 신호단편의 수에 따른 적응 프로세서 출력의 바이어스와 음원 위치 추정 결과를 고찰한 결과 센서 수보다 많은 신호단편을 사용하는 것이 바이어스가 적으며, 음원 위치 추정에서도 좋은 성능을 보임을 확인하였으며[3], 따라서 본 논문에서는 통계적인 오정합에 대해서는 별도로 다루지 않았다.

오정합으로 인한 영향으로는 수신된 신호와 복제음장과의 상관값인 정합장 프로세서의 출력이 낮아지며, 상관된 최대 출력값이 실제 음원 위치에서 이동되어 매개변수 추정 결과에 바이어스를 유발하는 것으로 잘 알려져 있다[4].

본 논문의 목적은 천해의 환경에서 다양한 종류의 시스템과 해양환경과 관련

된 매개변수들이 수신된 신호의 음장과 오차를 가지는 경우에 정합장치리 프로세서 출력에 미치는 영향에 대해 추정된 음원 위치의 바이어스와 상관계수 값들을 정량적으로 평가하고, 정합장치리에서 오정합으로 인한 각 매개변수들의 민감도를 분석함에 있다. 이는 실제 해양 음장에서 정합장치리를 수행할 경우에 중요도가 높은 매개변수들에 대한 식별의 근거를 제공함으로써, 사전 정보의 관리에 노력을 집중할 수 있도록 하며, 상대적으로 가치가 떨어지는 매개변수 자료를 추가적으로 확보하기 위한 불필요한 노력을 피하도록 한다. 또한 정합장치리 결과에서 오차가 발생될 경우에 이를 분석하여 오차의 원인을 규명하고 이를 제거할 수 있는 기초적인 자료로 활용될 수 있다.

1.3 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 정합장치리에서 필수적인 과정인 복제음장 계산에 있어 입력자료로 사용되는 매개변수들과 실제 신호 음장에 대한 매개변수들과의 오정합으로 인해 발생하는 추정된 음원 위치의 바이어스와 상관계수 값의 저하 등과 같은 정합장치리 출력에서의 영향을 수치실험과 실측 자료를 사용하여 고찰하고, 다양한 시스템 오정합과 해양 환경 매개변수들의 오정합이 정합장치리에 미치는 민감도를 유전자 알고리즘을 사용한 매개변수 역산 과정을 통해 분석하였다.

이를 위해 2장에서는 해양에서의 신호의 전파와 모델링, 정합장치리의 구성요소와 함께 협대역 및 광대역 프로세서와 매개변수 역산 기법 등의 기본적인 알고리즘을 소개하였다. 3장에서는 매개변수의 오정합이 정합장치리의 출력 결과에 미치는 영향에 대해 거리 독립 및 거리 종속의 천해 환경에서 오정합에 둔감한 선형 프로세서를 사용하여 개별적인 매개변수와 결합된 매개변수들의 경우에 대해 구체적인 수치실험 결과를 고찰하였고, 또한 종합된 매개변수 상황에 대해 유전자 알고리즘을 이용하여 수치실험으로 비교 분석하였다. 그리고 4장에서는 매개변수의 오정합의 범위에 따른 정합장치리의 출력에 미치는 민감도를 매개변수 역산 기법을 사용하여 분석하였다. 5장에서는 앞장에서 수행된 오정합에 관한 수치실험

결과를 토대로 실측자료를 사용하여 매개변수 최적화에 적용하였고, 최적화된 매개변수들의 오정합의 영향을 살펴보았으며, 최종적으로 6장에서 결론을 맺도록 하였다.

II. 정합장치리 알고리즘

2.1 해양에서 음파 전달과 모델링

해양 도파관에서 음원 신호를 수신할 경우를 가정하면, 음장의 신호단편 (snapshot) T_s 는 신호대역의 주파수 $\omega_l = 2\pi l / T_s$ (여기에서 l 은 주파수 bin)에서 푸리에 급수의 계수로 표현될 수 있다. 파동 방정식에서 단일정상모드의 해를 사용하여, 수신기로부터 거리 r_s , 수심 z_s 에 위치한 음원을 수심 z 에서 측정된 음장의 복소 푸리에 급수의 계수는 다음과 같이 표현된다[5].

$$p(z; r_s, z_s, \omega_l) = a(\omega_l) \sqrt{2\pi} \sum_{n=1}^{N_m} \frac{\phi_n^{(0)}(z) \phi_n(z_s)}{\sqrt{k_n r_s}} e^{-jk_n r_s} \quad (2.1)$$

여기에서 N_m 은 모드 수이고, $\phi_n(z_s)$ 와 $\phi_n^{(0)}(z)$ 는 각각 음원과 수신기에서의 모드 깊이 고유함수이며, $k_n = \frac{1}{r_s} \int_0^{r_s} k_n(r) dr$ 은 거리를 평균한 복소 모드 수평파수이다. 복소 스칼라 $a(\omega_l)$ 은 주파수 영역에서의 음원 진폭이다. 모드 수평파수와 고유함수는 주파수 영역에서 깊이에 종속적인 Helmholtz 방정식과 음원과 수신기 사이의 환경 매개변수에 종속적인 경계조건으로부터 구한다. 실제로 이러한 매개변수는 수층의 음속과 해저지형, 해저층의 지음향 매개변수 등으로 결정된다.

M 개의 센서로 구성된 수직배열은 주파수 ω_l 과 n 번째 신호단편에서 센서출력에 대한 $[M \times 1]$ 의 주파수 영역 벡터를 \mathbf{x}_n 이라 하면, 센서 수심 z_1, \dots, z_M 에서 식 (2.1)을 다음과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_n = a_n \mathbf{U} \mathbf{s}(r_s, z_s) + \boldsymbol{\eta}_n \quad (2.2)$$

여기에서, $[M \times N]$ 행렬인 전달함수 \mathbf{U} 의 mn 번째 요소는 $\phi_n^{(0)}(z_m)$ 이고, 모드

진폭벡터 $\mathbf{s}(r_s, z_s)$ 의 n 번째 요소는 $\sqrt{2\pi} \phi_n^{(0)}(z_s) e^{-jk_n r_s} / \sqrt{k_n r_s}$ 이다. 그리고 벡터 $\boldsymbol{\eta}_n$ 는 배경잡음으로서 실제 해양에서의 잡음은 센서 자체의 장비 잡음인 백색잡음과 주변잡음 및 이산된 음원 간섭 잡음인 유색잡음으로 구분된다.

배경잡음은 Box-Muller 공식을 사용할 경우 잡음벡터 $\boldsymbol{\eta}$ 은 식 (2.3)과 같이 평균이 '0'인 랜덤 복소 가우시안 분포를 가지는 변수들로 구성된다[6].

$$P(\eta_i) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\eta_i^2}{2\sigma_n^2}} \quad (2.3)$$

여기에서 $\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M\gamma}}$ 로서 γ 는 신호 대 잡음비이며, M 은 배열센서의 수, 그리고 i 는 센서 번호이다. 백색잡음인 경우 $\boldsymbol{\eta}_i$ 는 Box-Muller의 공식에서

$$\boldsymbol{\eta}_i = \sigma_n \sqrt{-\log X_i} e^{j2\pi Y_i} \quad (2.4)$$

이 된다. 여기에서 X_i 와 Y_i 는 각각 $[0, 1]$ 사이에서 균일분포(uniform distribution)를 갖는 랜덤 변수이다.

해수면에서 쇄파에 의해 발생하는 유색잡음의 잡음벡터는 모드의 랜덤한 합으로 표현된다[6].

$$\boldsymbol{\eta}_i = \sum_{n=1}^{N_m} A_n \frac{\phi_n(z_\eta) \phi_n(z_i)}{\sqrt{a_n k_n}} \quad (2.5)$$

여기에서 A_n 은 독립된 복소 가우시안 랜덤 변수로서 백색잡음의 경우인 식 (2.4)와 같다. z_η 는 잡음의 음원이 위치한 수심이고, z_i 는 i 번째 센서의 수심이며 a_n 는 감쇠계수, 그리고 k_n 은 고유함수 ϕ_n 에 의한 n 번째 모드의 파수이다. 잡음벡터는 신호벡터에 첨가된 특정한 신호 대 잡음비로 계산된다. 따라서 유색잡음은 모드 함수에 백색잡음이 곱하여진 형태로 표현된다.

이와 같은 잡음의 형태는 수치실험으로 정합장처리를 수행할 경우에 신호 음장을 모사하기 위해 사용된다. 그러나 본 논문에서는 정합장처리에서 복제음장을 생성하기 위한 매개변수들이 오정합을 갖는 경우 출력에 미치는 영향의 근본적인 현상을 다루기 위해 모사된 신호 음장에서 잡음의 영향은 배제하였다. 따라서 해양에서 잡음이 없는 것으로 한정하여 3장에서 수치실험을 수행하였다.

2.2 정합장처리의 구성요소

정합장처리는 배열센서를 이용한 평면파 빔형성 기법을 일반화한 기법으로서 해양 도파관에서 신호 전달의 전역 구조를 탐색하기 위한 배열 처리 알고리즘이다. 정합장처리를 수행함에 있어 요구되는 구성요소는 다음과 같다. 먼저 배열센서를 통해 수신된 신호이다. 수치 실험을 위해서는 음향전파 모델의 Green 함수를 계산하여 얻을 수 있다. 다음으로는 수신된 신호나 Green 함수를 사용하여 계산된 결과로부터 표본 공분산행렬을 구성하는 것이다. 그리고 복제음장을 위한 신호와 잡음의 음향전파 모델이 필요하며, 마지막으로 표본 공분산행렬과 음향전

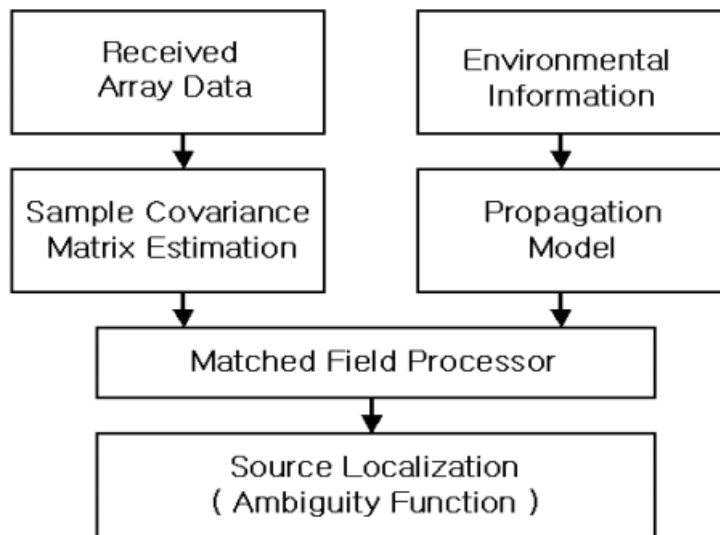


Fig. 2.1 Matched field processing procedure.

과 모델의 함수로서 음원의 위치나 환경과 시스템의 매개변수를 추정하기 위한 정합장처리 프로세서가 요구된다. 정합장처리 프로세서는 수신된 신호의 종류와 사용 목적에 따라 매우 다양하며, 세부적인 기법은 다음 절에서 다루기로 한다. 정합장처리의 구성요소들과 처리되는 흐름은 Fig. 2.1과 같다.

식 (2.2)의 모델을 기반으로 하는 정합장 처리는 빔형성기 출력이 최대가 되는 음원 위치를 추정하는 선형 평면파 빔형성기의 일반화된 형태로서 정합장 프로세서의 출력 $\hat{P}(r, z)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{P}(r, z) = \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{w} \quad (2.6)$$

여기에서 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ 로서 $|\mathbf{w}| = 1$ 인 가중벡터는 식 (2.2)의 모델에 의해 가정된 신호 파면의 복제 벡터인 $\mathbf{d}(\hat{r}_s, \hat{z}_s) = \mathbf{U} \mathbf{s}(\hat{r}_s, \hat{z}_s)$ 에서 유도

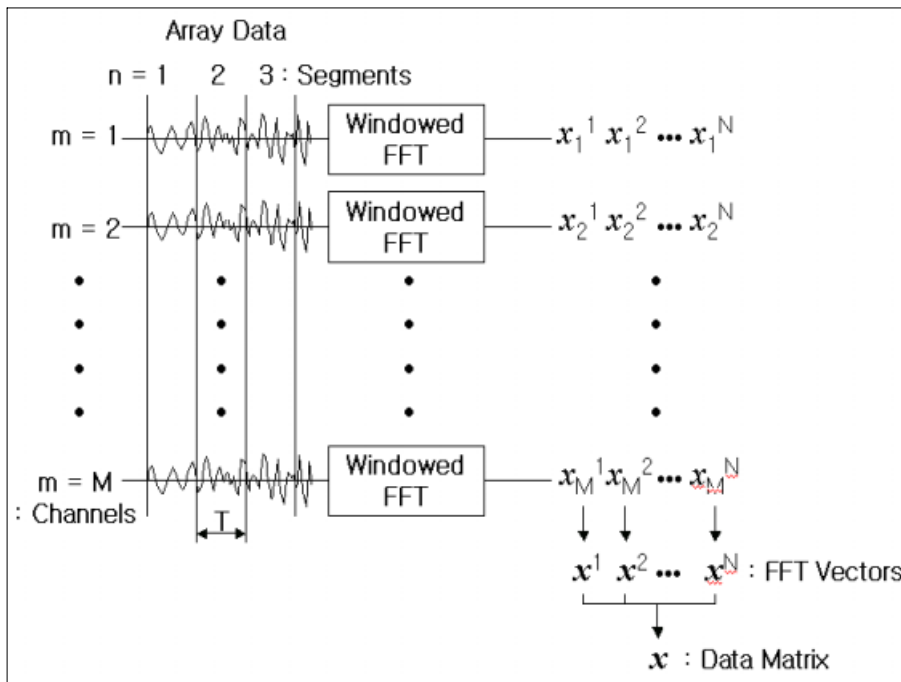


Fig. 2.2 Sample CSDM estimation for the narrowband signals.

된다. 위 첨자 H 는 공액 전치를 나타낸다. $\widehat{\mathbf{K}}$ 는 표본 공분산행렬 또는 상호스펙트럼 밀도행렬(Cross-Spectral Density Matrix, CSDM)로서 실측 신호를 사용하는 경우에는 Fig. 2.2와 같은 과정으로 계산되며 식 (2.7)로 표현된다.

$$\widehat{\mathbf{K}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^H \quad (2.7)$$

여기에서 N 은 신호단편(snapshot)의 수이고, \mathbf{x}_n 은 중심주파수에서의 신호벡터이다.

2.3 정합장 프로세서

2.3.1 협대역 프로세서

정합장처리에 관한 연구는 수중 음원에 대한 위치 추정 문제에서 출발되었다. 따라서 초기 연구의 방향은 자연스럽게 협대역 문제에 한정되었으며, 연구가 진행됨에 따라 신호 대 잡음비가 낮은 환경에서의 안정적인 음원 위치 추정과 해상도가 높은 정합장처리 기법의 개발, 매개변수 오정합에 강인한 프로세서 등의 발달을 가져왔다. 지금까지 수행된 협대역 프로세서와 관련된 주요 연구동향은 간략히 소개하면 다음과 같다.

1966년에 *Clay*가 음원의 수심을 추정하기 위해 수직배열을 사용하는 것을 제안하였으며, *Hinich*는 수신된 배열 신호에 정상모드 모델을 상관시켜 음원의 수심을 추정한 프로세서를 개발하였다[7]. *Bucker*는 현재 사용되는 정합장처리의 개념을 완성시켰으며 거리 및 수심의 영역으로 표현되는 정합출력장(Ambiguity Surface, AMS)의 개념을 처음으로 사용하였다[8]. *Klemn*은 적응 처리기법을 처음으로 정합장처리에 도입하였으며, 낮은 신호 대 잡음비에서 복잡한 부엽(sidelobe) 문제를 부각시켰다[9]. *Shang*은 모드 기법에 기반을 둔 정합장처리 알고리즘을 제안하였으며[10], *Fizell*과 *Baggeroer* 등은 최소분산 기법의 성능을 개선한 높은 해상도를

가진 빔형성기를 제안하였다[11][12]. 이 시기에 제안된 빔형성 기법의 주요 문제는 높은 부엽 준위와 가정된 환경 매개변수들의 오차로 인한 정합장치리 출력 결과의 민감도였다. 따라서 부엽 성분을 감소시키기 위한 최소분산 적응 빔형성 기법들이 연구되었으며[1][13-15], 환경 매개변수의 불확실성에 견고하며, 오정합 환경에 보다 좋은 성능이 발휘되는 각종 프로세서가 개발되었다[5][16-17].

협대역 프로세서는 정합장치리에서 광대역 프로세서 및 이동음원에 대한 프로세서 등의 기본적인 프로세서로서 신호벡터와 복제음장 벡터를 상관시키는 기법에 따라 크게 선형과 비선형 프로세서로 구분되며, 여기에서는 가장 대표적인 협대역 프로세서 몇 가지를 소개한다.

선형 프로세서는 정합장치리에서 가장 일반적으로 사용되는 프로세서로서 다른 용어로 Bartlett 또는 Conventional 프로세서라고도 한다. 선형 프로세서는 선배열센서에서 측정된 신호벡터와 음향전파 모델로 계산된 복제벡터를 직접 상관시키는 방법으로 환경 매개변수 오정합에 대하여 견고한 특성을 갖는 프로세서이다. 그러나 상대적으로 부엽의 준위가 크기 때문에 낮은 신호 대 잡음비에서 위치 추정 성능이 저하되는 단점을 갖는다[2].

음향전파 모델로 계산된 복제음장 벡터를 $\mathbf{d}(r, z)$ 라 하면, 선형 프로세서의 경우 $\mathbf{w} = \mathbf{d}(r, z)$ 이므로 정규화된 선형 프로세서의 출력은 다음과 같다.

$$\hat{P}_{Bart}(r, z) = \frac{\mathbf{d}(r, z)^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{d}(r, z)}{\mathbf{d}(r, z)^H \mathbf{d}(r, z)} \quad (2.8)$$

최소분산 프로세서는 정합장치리 알고리즘에서 선형 프로세서와 함께 널리 이용되며 부엽 성분을 억제하는 특성을 갖는 적응 프로세서로서 Capon 프로세서라고도 한다[1][2][18]. 최소분산 프로세서는 필터에 의한 신호의 왜곡이 없이 조향 방향을 제외한 빔 형성기의 출력이 최소화되도록 가중벡터 \mathbf{w}_{MV} 를 구하는 기법으로서, 조향 방향에서 신호와의 상관을 최적화하며 다른 방향에서 수신되는 신호

및 상관된 잡음을 최소화한다. 최소분산 프로세서의 가중벡터는

$$w_{MV} = \frac{\widehat{\mathbf{K}}^{-1} \mathbf{d}(r, z)}{\mathbf{d}(r, z)^H \widehat{\mathbf{K}}^{-1} \mathbf{d}(r, z)} \quad (2.9)$$

으로서 수신된 신호의 공분산행렬 $\widehat{\mathbf{K}}$ 에 종속되므로 최소분산 프로세서를 적응필터라고도 한다. 식 (2.9)의 가중벡터를 식 (2.6)에 대입하여 정리하면 최소분산 프로세서의 출력은 다음과 같다.

$$\widehat{P}_{MV}(r, z) = \frac{\mathbf{d}(r, z)^H \mathbf{d}(r, z)}{\mathbf{d}(r, z)^H \widehat{\mathbf{K}}^{-1} \mathbf{d}(r, z)} \quad (2.10)$$

이 프로세서를 적용한 정합장치리 출력은 공간상으로 잡음과 상관되지 않아서 음원의 위치에서 최고의 상관을 갖게 되며, 선형 프로세서와 비교해 높은 해상도를 갖는다. 그러나 오정합이 존재하거나 복제음장의 매개변수 값에 오차가 있을 경우에는 성능이 급격히 저하되는 특성을 갖기 때문에 음향전파 모델의 정확도가 요구된다.

최소분산 프로세서와 같이 공분산행렬의 역변환을 사용하는 적응 정합장치리에서 배열 센서 수보다 부족한 신호단편 수로 표본 공분산행렬을 구성할 경우 행렬 계수의 부족으로 행렬의 역변환에 문제가 발생된다. 이를 해결하기 위해 고유분해와 같은 기법을 사용하거나 식 (2.11)과 같이 표본 공분산행렬의 대각성분에 일정한 값을 더하는 방법이 사용된다[16]. 즉,

$$\widehat{\mathbf{K}}_{\delta} = \widehat{\mathbf{K}} + \delta \mathbf{I} \quad (2.11)$$

이며, 여기에서 \mathbf{I} 는 단위행렬이고, δ 은 대각행렬에 첨가되는 값이다. 표본 공분산행렬의 대각성분에 일정한 값이 첨가됨으로써 행렬의 안정성을 높일 수 있으나 이로 인해 프로세서 출력에서는 바이어스가 발생된다. 표본 공분산행렬을 구성하기 위한 신호단편 수의 영향을 고찰한 결과 배열 센서 수보다 많은 신호단편을

사용하는 것이 바이어스가 적으며, 음원 위치 추정에서도 좋은 성능을 보인다[3].

대각행렬에 더해지는 δ 값의 양에 따라 프로세서를 구분하면 δ 값이 무한대인 경우 선형 프로세서가 되며, δ 값이 일정한 값으로 고정된 경우 최소분산 프로세서가 된다. 그리고 δ 값을 적응적으로 변화시키면 백색잡음이득억제(White Noise gain Constraints : WNC) 프로세서가 된다[18][19].

MV-NLC(Neighborhood Location Constraints) 프로세서는 오정합에 견고한 선형 프로세서와 같은 주엽의 응답을 얻고자 다수의 주변위치 억제값을 가중치로 사용하는 방법으로 다른 용어로는 Multiple Constraint Method(MCM)이라고도 한다. MV-NLC 프로세서의 억제값은 $D^H w = f$ 로 표현되며, 주변위치억제행렬 (Neighborhood location constraint matrix) D 는 다음과 같다[1][5][15].

$$D = [M^H d(r, z), M^H d(r + \Delta r/2, z), \dots, M^H d(r + \Delta r/2, z + \Delta z/2)] \quad (2.12)$$

여기에서 Δr 과 Δz 는 거리와 수심에서의 선형 프로세서 주엽의 빔폭이며, M 은 U 를 QR 인수분해를 하여 얻어지는 열공간(column space)의 직교행렬이다. 따라서 MV-NLC에 대한 출력은 다음과 같다.

$$\hat{P}_{NLC}(r, z) = \frac{f^H (D^H \hat{K}_y^{-1} D)^{-1} f}{f^H (D^H D)^{-1} f} \quad (2.13)$$

여기에서 $f = D^H M^H d(r, z)$ 이며, $\hat{K}_y = M^H \hat{K}^{-1} M$ 이다. 한편 Schmidt 등은 D 행렬의 요소에 대해 고찰하여, 계산하고자 하는 격자의 최근접 값을 취하고, 요소의 개수는 $2N_{\text{dim}} + 1$ 로 제안하였다[15]. 여기에서 N_{dim} 은 탐색하고자 하는 차원 또는 매개변수의 수로 거리와 깊이 함수인 경우 5개의 인접값을 취하도록 제안하였다. MV-NLC 프로세서는 오정합에 상황에서 MV 프로세서보다 견고한 특성을 갖는다.

MV-EPC(Environmental Perturbation Constraint) 프로세서는 환경 매개변수들을 일정한 범위내에서 랜덤하게 변한다고 가정하고, 그 범위 내에서 임의의 억제 요소들을 추출하여 이를 가중치에 적용하여 빔형성기의 응답을 유지함으로써 랜덤한 환경에 대해 프로세서 출력의 견고성이 증대되도록 설계되었다. $\boldsymbol{\psi}$ 를 랜덤한 환경 매개변수들의 벡터라고 가정하면, MV-EPC의 억제 행렬 \mathbf{C} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{C}(r, z) = [\mathbf{M}^H \mathbf{d}(r, z; \psi_1), \mathbf{M}^H \mathbf{d}(r, z; \psi_2), \dots, \mathbf{M}^H \mathbf{d}(r, z; \psi_K)] \quad (2.14)$$

여기에서 \mathbf{M} 은 직교행렬의 계수이며, ψ_k 는 k 번째 랜덤한 환경에서의 복제음장 벡터로 가정된 복제음장의 수 K 는 M 보다 많아야 한다. 환경적인 불확실성에 대하여 \mathbf{C} 의 열공간은 낮은 계수를 갖고, 신호 상관행렬의 가장 큰 고유벡터에 의해 영향을 받는다.

$$\widehat{\mathbf{K}}_d(r, z) = E\{\mathbf{d}(r, z; \boldsymbol{\Psi}) \mathbf{d}(r, z; \boldsymbol{\Psi})^H\} \cong \mathbf{H} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{H}^H \quad (2.15)$$

여기에서 \mathbf{H} 와 대각행렬 $\boldsymbol{\Lambda}$ 는 $\widehat{\mathbf{K}}_d$ 의 지배적인 고유벡터와 고유값을 각각 포함하고 있다. 공간적인 백색잡음에서 기대되는 배열 이득을 최대화하기 위해 제한 공간에서 요구되는 응답을 선택하면, MV-EPC의 출력은 다음과 같다[15][17].

$$\widehat{P}_{EPC}(r, z) = e_1^H (\mathbf{H}^H \widehat{\mathbf{K}}_y^{-1} \mathbf{H})^{-1} e_1 \quad (2.16)$$

여기에서 $e_1 = [1, 0, \dots, 0]^T$ 이다.

따라서 MV-EPC 프로세서는 수신된 데이터와 특정한 환경에서의 매개변수로 결정된 복제음장과의 상관값이 아니며, 임의의 환경 매개변수들에 대한 몬테카를로 (Monte Carlo) 수행을 통해 K 개로 가정된 음원의 파면 벡터를 더한 값을 사용하여 상관 결과를 출력으로 구하는 기법이다. 이 프로세서는 환경 오정합에 둔감

하나, 많은 복제음장을 생성해야 하므로 계산시간이 다른 프로세서에 비해 많이 소요되는 단점을 갖는다.

고유벡터(Eigenvector) 프로세서는 표본 공분산행렬 $\widehat{\mathbf{K}}$ 를 신호 부공간(subspace)과 잡음 부공간으로 나누어 처리하는 기법으로서 $\widehat{\mathbf{K}}$ 을 고유치 분해를 하면 식 (2.17)과 같이 고유치 λ_i 와 고유벡터 \mathbf{v}_i 의 항으로 표현할 수 있다.

$$\widehat{\mathbf{K}} = \sum_{i=1}^{M_0} \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (2.17)$$

여기에서 M_0 는 고유치의 수이다.

$\widehat{\mathbf{K}}$ 의 역변환은 식 (2.18)과 같이 구할 수 있다. 신호들과 관련된 고유치의 수를 q 라 하면, 이 고유치들은 신호 부공간을 구성하며, 나머지 $M_0 - q$ 의 고유치들은 잡음 부공간을 구성하고 이에 대한 공분산행렬의 역변환은 식 (2.19)와 같이 구할 수 있다.

$$\widehat{\mathbf{K}}^{-1} = \sum_{i=1}^{M_0} \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (2.18)$$

$$\widehat{\mathbf{K}}_{EV}^{-1} = \sum_{i=1}^{M_0 - q} \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (2.19)$$

잡음 부공간에 대한 공분산행렬 $\widehat{\mathbf{K}}_{EV}$ 에 대한 최적의 가중벡터를 구하기 위해 식 (2.9)에 적용하면 식 (2.20)과 같다.

$$\mathbf{w}_{EV} = \frac{\widehat{\mathbf{K}}_{EV}^{-1} \mathbf{d}(r, z)}{\mathbf{d}^H(r, z) \widehat{\mathbf{K}}_{EV}^{-1} \mathbf{d}(r, z)} \quad (2.20)$$

따라서 구하고자 하는 고유벡터 프로세서의 출력은 다음과 같이 된다[20].

$$\begin{aligned}\widehat{P}_{EV} &= \frac{1}{\mathbf{d}^H(\mathbf{r}, \mathbf{z}) \widehat{\mathbf{K}}_{EV}^{-1} \mathbf{d}(\mathbf{r}, \mathbf{z})} \\ &= \left[\sum_{i=1}^{M_0-q} \frac{1}{\lambda_i} |\mathbf{d}(\mathbf{r}, \mathbf{z})^H \mathbf{v}_i|^2 \right]^{-1}\end{aligned}\quad (2.21)$$

고유벡터 프로세서는 출력의 해상도가 높은 반면에 신호 대 잡음비가 낮거나 위상 오차를 가지는 경우 성능이 급격히 저하되는 단점을 가진다.

Richardson 등에 의하여 제안된 **Optimum Uncertain Field Processor(OUFP)**는 사후 음원 위치 확률밀도함수 $p(\mathbf{S} | \mathbf{x})$ 를 계산하는 것이다[16][17][21]. 여기에서 \mathbf{S} 는 음원의 거리와 수심에 대한 위치 매개변수들이고, \mathbf{x} 는 수신된 배열 데이터이다. 이러한 방법은 낮은 신호 대 잡음비에서 하나 또는 적은 수의 신호단편을 처리하는데 적합하며, 또한 해양환경의 매개변수가 불확실할 경우에 견고한 출력 결과를 보인다. 음원의 위치를 추정하기 위한 프로세서의 출력은 다음과 같다[16].

$$p(\mathbf{S} | \mathbf{x}) = C(\mathbf{x})p(\mathbf{S}) \int_{\mathbf{E}} \frac{1}{E(\mathbf{S}, \mathbf{E}) + 1} \exp\left(-\frac{|R(\mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{E})|^2}{E(\mathbf{S}, \mathbf{E}) + 1}\right) p(\mathbf{E} | \mathbf{S}) d\mathbf{E} \quad (2.22)$$

여기에서 \mathbf{E} 는 불확실한 환경 매개변수들이고, $C(\mathbf{x})$ 는 정규화 상수이다. 협대역 음원 신호의 진폭은 Rayleigh 분포, 위상은 균일분포로 가정한다. 잡음은 가우시안과 시간에 비상관된 것으로 가정하며, 환경 매개변수 \mathbf{E} 는 음원 위치 \mathbf{S} 와 독립적인 것으로 가정한다. 그리고 식 (2.22)의 E 와 R 은 \mathbf{S} 와 \mathbf{E} 의 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}E(\mathbf{S}, \mathbf{E}) &= \mathbf{F} \mathbf{G}^H(\mathbf{S}, \mathbf{E}) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{S}, \mathbf{E}) \\ R(\mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{E}) &= \mathbf{F} \mathbf{G}^H(\mathbf{S}, \mathbf{E}) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P}(\mathbf{x})\end{aligned}\quad (2.23)$$

여기에서 $\mathbf{G}(\mathbf{S}, \mathbf{E})$ 는 음전달함수 즉 복제음장이고, \mathbf{Q} 는 잡음 공간의 공분산행렬이다. 그리고 \mathbf{P} 는

$$P_m = \frac{\sqrt{2}}{\sigma_A T} \int_0^T x_m(t) e^{-j\omega_0 t} dt \quad (2.24)$$

로 정의되며, 수신기 m 에서 수신된 신호 $x_m(t)$ 의 변환이다. 또한 σ_A 는 음원 진폭의 확률밀도함수의 Reyleigh 매개변수이다. F 는 음원에서의 평균 신호 대 잡음비로서

$$F = \frac{K}{2} \log^{-1} \frac{SL - NL}{10} \quad (2.25)$$

이며, SL 은 RMS(Root Mean Square) 음원준위(Source Level)이고, NL 은 배열 수신기에서 센서당 RMS 잡음준위(Noise Level)이다. K 는 수신된 신호 x 에서 각 어레이 센서별 시간 표본의 수이다.

OUPF는 가정된 음장과 음원 신호가 전달된 실제 음장과 매개변수 오정합에 강인하여 환경이 불확실한 경우 음원 위치를 추정하는 성능이 우수하다. 그러나 MV-EPC와 같이 가정된 복제음장을 다수 생성해야 됨으로써 계산 시간이 길어지는 단점을 갖는다.

2.3.2 광대역 프로세서

초기에 정합장처리는 심해에서 협대역 문제들에 응용되어 왔으나, 최근 천해와 같은 복잡한 음파의 상호작용과 경계조건이 부정확한 해양환경으로 그 관심 분야가 이동되고 있다. 천해 음향전파에 의해서 발생하는 간섭 및 다중경로 등의 어려움을 극복하기 위한 방법으로 다중 주파수에서 얻어지는 정보를 사용하여 강인성과 신뢰성을 증가시키는 광대역 정합장처리가 사용된다.

최근 연구결과에서 보면 광대역 정합장처리는 협대역 처리와 비교해 보다 강인하고 정확한 것으로 알려지고 있다. 몇 가지 형태의 광대역 정합장처리 기법이 문헌에 발표되었으나 대부분은 비일관성(incoherent) 광대역 정합장처리에 관한 것으로, 이는 협대역 정합장처리의 정합출력장들을 선형(linear) 또는 대수

(logarithmic) 형태로 비일관성 평균(incoherent averaging)하게 된다. 비일관성 광대역 정합장 프로세서들과 대조적인 일관성(coherent) 광대역처리 기법은 단일 주파수뿐만 아니라 다중 주파수에서의 음장의 공간 일관성을 이용한다.

광대역 정합장처리는 1988년에 *Baggeroer* 등에 의해서 비일관성 광대역 정합장 처리가 처음으로 제안되었으며, 천해 해양환경의 수치실험을 통해 선형과 최소분산 프로세서의 부엽을 억제하기 위해 각 주파수의 정합출력장에 대해 기하평균을 취하였다[12]. *Hodgkiss* 등은 심해 해양환경에서 광대역 선형 정합장 프로세서를 사용하였으며[22], *Tolstoy*는 광대역 정합장처리에 대한 일관성 방법을 처음으로 제안하였다[23]. *Smith* 등은 비일관성 광대역 정합장의 평균화의 성능과 평균화 매개변수들(즉, 대역폭과 평균화되는 정합출력장의 수) 사이의 관계를 조사하였고, 매개변수 선택에 대한 일반적인 지침을 제안하였다[24]. *Westwood*는 *Tolstoy*에 의해서 제안된 일관성 방법과 유사하나, 상호스펙트럼 밀도행렬의 일부분만을 사용하는 방법을 제안하였다[25]. *Jesus*는 완전 음장(full wave-field)에서 광대역의 거리-수심 추정을 위해 협대역 평면파 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘을 확장하여 사용하였으며, 광대역 프로세서를 음원신호의 광대역 주파수 대역에 대해 협대역 추정치들을 음원신호 스펙트럼 출력에 비례하여 가중 평균(weighted averaging)하는 방법으로 계산하였다[26]. *Brienzo* 등은 충격 음원의 음원 위치추정을 위해 시간영역의 선형 프로세서를 사용하였다[27].

시간영역 복제벡터는 신호대역에 존재하는 주파수에 대해 파동방정식의 협대역 해들을 푸리에 합성함으로써 구하였다. 그러나 채널 분산 특성들의 시간적인 혼성을 피하기 위하여 주파수 영역을 세밀하게 표본화해야 되므로, 시간영역 방법들의 계산 요구량은 많아진다. *Knobles* 등은 천해환경에서 수평적으로 해저에 배치된 센서에 의해 수신된 이동음원의 위치를 음선모델에 의한 복제음장으로 광대역 정합장처리를 이용하여 추정하였다[28]. *Booth* 등은 SWELL-EX 실험자료를 통해 협대역 선형프로세서 출력들의 비일관성 산술평균이 해저면 오정합이 있는 경우 강인한 광대역 음원 위치추정이 가능하다는 것을 보였다[29]. *Czenszak* 등은 광대역 랜덤 음원들에 대해 환경적인 섭동을 억제하는 MV-EPC의 일관성 처리 기법을 구현하였다[30]. 최근에 *Michalopoulou*는 다중 토널 주파수 성분을 가지는 음원에 대해서 주파수간 공간 일관성 방법을 제안하였다[31].

선배열 수신기에서 신호와 잡음의 합으로 표현되는 주파수영역 수신 음장을 $F_m(\omega) = S_m(\omega) + N_m(\omega)$ 로 표시한다면, 신호성분 $S_m(\omega)$ 는 음원과 특정 m 번째 수신기 사이의 전달경로에 상응하는 전달함수인 Green 함수 $G_m(\omega)$ 와 음원 자체의 특성 스펙트럼 $D(\omega)$ 로 분리할 수 있으며, 시간영역에서는 콘볼루션 관계가 된다.

$$S_m(\omega) = G_m(\omega) D(\omega) \Leftrightarrow s_m(t) = g_m(t) \otimes d(t) \quad (2.26)$$

정합장처리에서 전달함수 $G_m(\omega)$ 는 음향전파 모델에 의해서 추정된다. 신호 대역에서 수신 음장을 위상요소로 표현하면 식 (2.27)과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_{r, mkn} = \varphi_{0, k} + \varphi_{mk} + \varphi_{\eta, mkn} + 2\pi f_k t_n \quad (2.27)$$

여기에서 k 는 주파수 그리고 n 은 신호단편의 수이다 ($m = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, K$, $n = 1, \dots, N$). 위상요소 $\varphi_{0, k}$ 는 k 번째 주파수에서 음원의 초기 위상이고, φ_{mk} 와 $\varphi_{\eta, mkn}$ 은 각각 k 번째 주파수에서 음원과 m 번째 수신기 사이의 전달함수의 위상요소와 잡음에 의한 위상요소이다. 네 번째 위상요소 $2\pi f_k t_n$ 은 신호단편의 시점에 대한 위상이다.

정합장처리는 음향전파 모델에 의해 예측된 복제 음장과 실제 음장과의 상관 관계에 의해서 결정된다. 음향전파 모델은 전달함수의 위상요소 ϕ_{mk} 를 재현하는 것이므로, 실제 음장에서 잡음의 위상을 무시한다 하더라도 미지 음원의 위상 $\varphi_{0, k}$ 로 인해 수신 음장의 위상과 복제 음장의 위상 사이에서는 오정합이 발생한다. 협대역 음원의 경우 공분산행렬을 이용하면 수신 시간동안 상대적인 신호의 크기와 위상 정보를 사용할 수 있으나, 광대역 음원에서는 각 주파수간 음원의 초기 위상이 다르기 때문에 협대역과 같이 간단히 공분산행렬을 구할 수 없다.

협대역 선형 정합장 처리는 정규화된 신호벡터와 복제벡터간의 내적 (dot-product)을 계산하여, 그 결과를 정합출력장으로 표시한다. 광대역 음원의 주

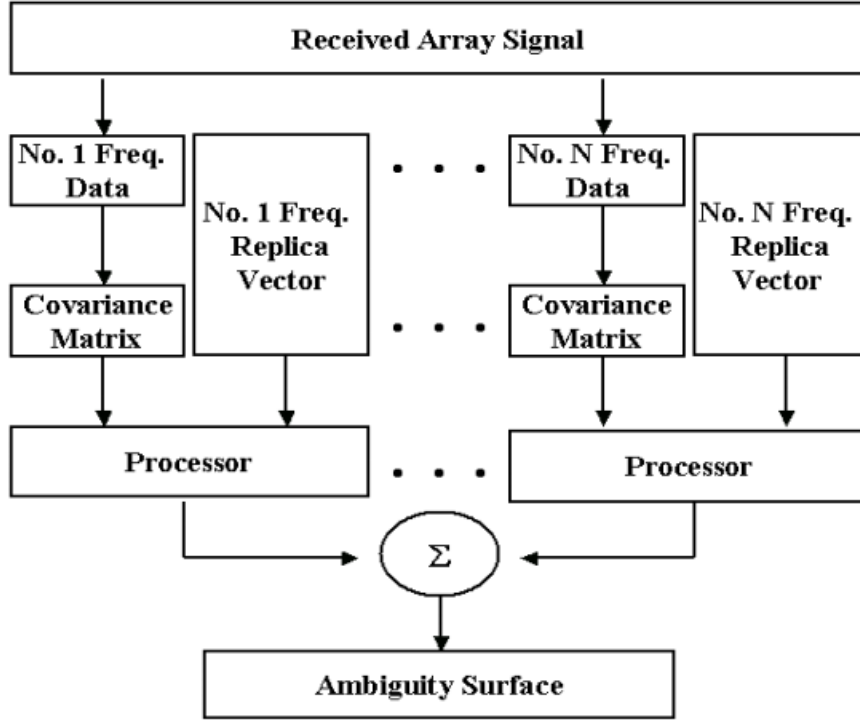


Fig. 2.3 Incoherent broadband MFP algorithm.

파수간 신호벡터가 상관관계가 없는 것으로 가정하면, Fig. 2.3과 같이 각 주파수에서 계산된 정합출력장들을 산술 또는 기하평균 함으로써 광대역 정합장치처리가 가능하며, 이러한 방법을 비일관성 광대역 정합장치처리라고 한다[1][2].

비일관성 선형 광대역 정합장 프로세서는 식 (2.28)의 형태로 쓸 수 있다.

$$\hat{P}_{inc}(\hat{\mathbf{a}}) = \frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} [\mathbf{w}^H(f_k; \hat{\mathbf{a}}) \hat{\mathbf{K}}(f_k) \mathbf{w}(f_k; \hat{\mathbf{a}})] \quad (2.28)$$

$$\hat{\mathbf{K}}(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}(f_k)_n \mathbf{x}(f_k)_n^H \quad (2.29)$$

여기에서 $\hat{\mathbf{a}}$ 은 추정할 매개변수를 나타내며, \mathbf{w} 는 가중벡터로 선형 프로세서의

경우 음향전파모델에서 예측된 복제벡터이다. \mathbf{x} 는 신호벡터, N 은 신호단편의 수, N_f 는 사용된 주파수의 개수이며, $\widehat{\mathbf{K}}(f_k)$ 는 특정 주파수에서의 표본 공분산행렬을 나타낸다.

비일관성 광대역 프로세서는 단일 주파수에서 공간의 일관성을 이용하지만, 주파수간의 일관성을 무시한다는 점에서 비일관성 공간 프로세서라 할 수 있다. 비일관성 프로세서들은 공간(수신기들)-주파수의 유용한 정보들을 사용하지 않는 제한점을 가진다.

일관성 광대역 프로세서는 서로 다른 주파수에서 음장들간의 상관관계를 이용하는 공간-주파수 프로세서이다. 일관성 광대역 프로세서는 Fig. 2.4와 같이 공분산행렬을 구성하기 위해 각 주파수의 신호벡터를 연결하여 super-vector를 구성하게 되며, n 번째 신호단편의 k 번째 주파수에 대한 신호벡터를 열벡터 $\mathbf{x}_n(f_k)$ 라 표시한다면 신호 super-vector는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}_n = [\mathbf{x}_n(f_1); \mathbf{x}_n(f_2); \cdots; \mathbf{x}_n(f_K)] \quad (2.30)$$

만약 M 개의 수신기와 K 개의 주파수를 사용한다면, 한 개의 신호단편에서의 super-vector는 $K \times M$ 개의 요소를 가지는 열벡터가 되며, 이러한 신호들의 super-vector를 통해 확장된 공분산행렬이 구해진다. 식 (2.31)은 일관성 선형 광대역 프로세서에 대한 일반식을 표현한 것이다.

$$P_{coh}(\widehat{\mathbf{a}}) = \mathbf{W}^H(\widehat{\mathbf{a}}) \widehat{\mathbf{K}} \mathbf{W}(\widehat{\mathbf{a}}) \quad (2.31)$$

$$\widehat{\mathbf{K}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \quad (2.32)$$

$$\mathbf{W}(\widehat{\mathbf{a}}) = [\mathbf{w}(f_1, \widehat{\mathbf{a}}); \mathbf{w}(f_2, \widehat{\mathbf{a}}); \cdots; \mathbf{w}(f_K, \widehat{\mathbf{a}})] \quad (2.33)$$

여기에서 $\widehat{\mathbf{K}}$ 는 m 개의 super-vector들에 의해 추정된 표본 공분산행렬이며, \mathbf{W} 는 각 주파수에서의 복제벡터를 연결한 복제 super-vector이다.

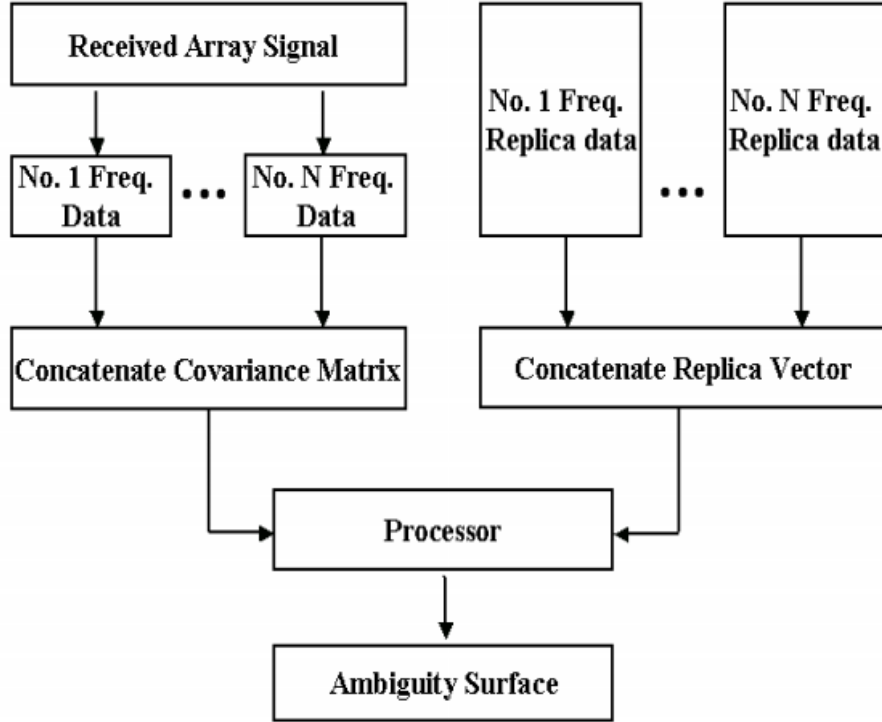


Fig. 2.4 Coherent broadband MFP algorithm.

음향전파모델에서 계산된 각 주파수에서의 복제벡터는 전달함수의 위상을 예측할 뿐 실제 신호에 포함된 음원의 초기 위상과 크기는 포함되어 있지 않다. 음원신호의 크기는 복제벡터와 신호벡터 모두를 정규화시킴으로써 보상해 줄 수 있으나, 위상은 복제벡터와 신호벡터의 상관관계를 유지시켜 주기 위해 보정해 주어야 한다.

첫 번째 방법은 신호벡터와 복제벡터의 위상을 정규화하는 것으로서 각 주파수의 신호벡터들을 사용하여 신호 super-vector를 구성하기 전에, 모든 신호벡터들을 첫 번째 수신기의 위상으로 정규화시키는 방법이다[32]. 식 (2.27)에서와 같이 음원의 초기 위상 $\varphi_{0,k}$ 와 신호단편의 시점에 대한 위상은 모든 수신기의 위상에 동일하게 포함된다. 각 신호단편에 대해 첫 번째 수신기에서의 위상 즉, $\theta_{r,mkn}$ 에 관하여 다른 수신기들의 위상을 정규화하면 위상요소 $\varphi_{0,k}$ 와 $2\pi f_k t_n$ 는 제거

된다. 이러한 처리에 의해 신호벡터의 위상은 전달함수간의 위상차와 잡음의 위상차만 남게 되어, 식 (2.34)와 같은 형태의 단일 주파수 신호벡터 $\hat{\mathbf{x}}_n(f_k)$ 와 새로운 super-vector $\hat{\mathbf{X}}_n$ 을 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{d}}_n(f_k) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j(\varphi_{2k} - \varphi_{1k} + \varphi_{\eta, 2kn} - \varphi_{\eta, 1kn})} \\ \vdots \\ e^{j(\varphi_{(M-1)k} - \varphi_{1k} + \varphi_{\eta, (M-1)kn} - \varphi_{\eta, 1kn})} \\ e^{j(\varphi_{Mk} - \varphi_{1k} + \varphi_{\eta, Mkn} - \varphi_{\eta, 1kn})} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_m = [\hat{\mathbf{x}}_m(f_1) ; \hat{\mathbf{x}}_m(f_2) ; \cdots ; \hat{\mathbf{x}}_m(f_K)] \quad (2.35)$$

식 (2.34)의 위상 정규화된 신호벡터들을 통해 super-vector를 구성하여 공분산 행렬을 구성하게 되며, 마찬가지로 각 주파수에서의 복제벡터도 상관관계를 유지시켜 주기 위해 첫 번째 수신기의 위상에 대해서 위상을 정규화하면 식 (2.36)의 새로운 복제벡터 $\hat{\mathbf{w}}(f_k; \hat{\mathbf{a}})$ 와 복제 super-vector $\hat{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{a}})$ 를 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{w}}(f_k; \hat{\mathbf{a}}) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j(\varphi_{2k} - \varphi_{1k})} \\ \vdots \\ e^{j(\varphi_{(M-1)k} - \varphi_{1k})} \\ e^{j(\varphi_{Mk} - \varphi_{1k})} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\hat{\mathbf{W}}(\hat{\mathbf{a}}) = [\hat{\mathbf{w}}(f_1, \hat{\mathbf{a}}) ; \hat{\mathbf{w}}(f_2, \hat{\mathbf{a}}) ; \cdots ; \hat{\mathbf{w}}(f_K, \hat{\mathbf{a}})] \quad (2.37)$$

이 방법은 첫 번째 수신기의 신호 위상으로 정규화하기 때문에 첫 수신기에서의 신호의 질에 따라 자료의 신뢰성이 결정된다. 첫 수신기의 잡음의 준위가 클 경우, 정규화 처리시 신호벡터는 잡음의 위상요소 $\varphi_{\eta, mkn}$ 향으로 인해 자료의 질이 저하될 수 있다.

두 번째는 신호벡터와 복제벡터의 비에 의해 복제벡터를 보정하는 방법이다 [32]. 음향전파모델에 의한 복제벡터는 전달함수의 위상 φ_{mk} 를 예측한다. 단일 신

호단편을 사용하여 공분산행렬을 구성한다면, 신호벡터의 위상은 보정하지 않고, 복제벡터의 위상을 식 (2.38)과 같이 신호벡터와 복제벡터의 복소수 비에 대한 평균을 곱해서 보정해 줌으로써 상관관계를 유지시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}\widehat{\boldsymbol{w}}(f_k; \widehat{\boldsymbol{a}}) &= \boldsymbol{w}(f_k; \widehat{\boldsymbol{a}}) \cdot \overline{\left(\frac{\boldsymbol{d}_n(f_k)}{\boldsymbol{w}(f_k; \widehat{\boldsymbol{a}})} \right)} \\ &= \boldsymbol{w}(f_k; \widehat{\boldsymbol{a}}) \cdot \overline{\begin{bmatrix} e^{j(\varphi_{0,k} + 2\pi f_k t_n + \varphi_{\eta,1kn})} \\ e^{j(\varphi_{0,k} + 2\pi f_k t_n + \varphi_{\eta,2kn})} \\ \vdots \\ e^{j(\varphi_{0,k} + 2\pi f_k t_n + \varphi_{\eta,(M-1)kn})} \\ e^{j(\varphi_{0,k} + 2\pi f_k t_n + \varphi_{\eta,Mkn})} \end{bmatrix}}\end{aligned}\quad (2.38)$$

이 방법은 공분산행렬을 한 개의 신호 super-vector를 사용하여 구성하여, 위상 보정된 복제 super-vector와의 상관성을 구하게 된다. 이동음원의 경우 음원의 움직임으로 인해 각 신호벡터의 위상과 크기가 연속적으로 변화하게 되므로 신호단편 부족의 문제가 발생하게 된다[3]. 따라서 신호벡터와 복제벡터의 비에 의해 복제벡터를 보정하는 방법은 단일 신호단편으로 정합출력장을 계산하게 되므로 이동음원에 대해서도 적합한 방법이라 할 수 있다[32].

2.4 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 역산

많은 수중음향 모델링 문제는 해양환경의 물리적인 매개변수를 찾는 것이 중요한 목적중의 하나이다. 그 동안 다중 매개변수의 역산을 위해 이론적 연구들이 진행되어져 왔으나 근래에 이르러 수치 모델의 개발과 함께 컴퓨터 성능의 증가로 다양한 방법의 접근이 가능하게 되었다. 일반적으로 측정된 음장 자료를 이용하여 해양이나 해저층의 매개변수에 대한 해를 직접적인 방법으로 계산하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 이러한 매개변수의 역산은 비선형 최적화 문제의 형태를 취하며, 효율적인 전역 최적화 방법으로 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)과 유전자 알고리즘이 가장 널리 사용된다[33-36].

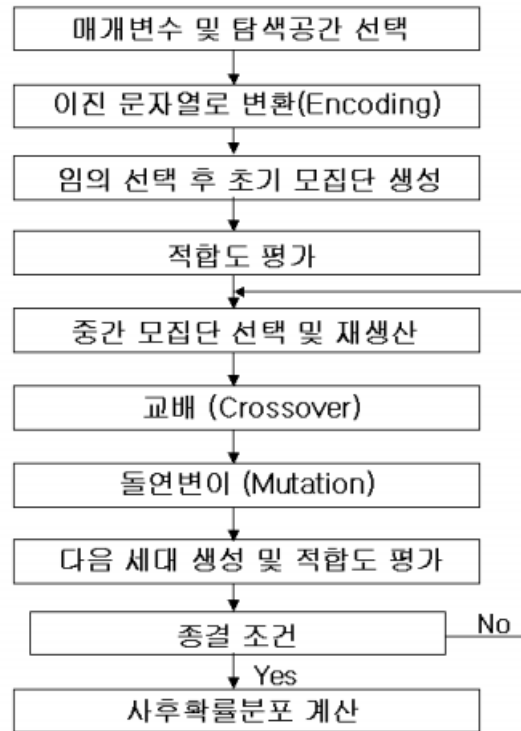


Fig. 2.5 Genetic algorithm flow chart.

유전자 알고리즘은 Goldberg와 Davis에 의해 소개되어 다양한 분야에서 활용되고 있으며, Gerstoft는 수중음향 분야와 지음향 매개변수 추정 문제로 확장하여 적용하였고, 생물학적 진화와 유사한 기법을 기반으로 가장 효율적인 최적화 시스템 중의 하나로 잘 알려져 있다[35].

유전자 알고리즘의 기본적인 원리는 비교적 단순하며 Fig. 2.5와 같은 과정으로 수행된다. 이를 간략히 설명하면 먼저 찾고자 하는 매개변수들을 선택하고 각각에 대한 탐색공간을 선택한 후에 가용한 모든 모델 벡터에서 최초의 모집단을 임의로 선택한다. 각각의 표본들의 최적화는 관측 데이터와 복제 데이터 사이의 차이를 기반으로 계산되는데, 진화의 단계는 개개인의 최적화를 기반으로 초기 모집단에서 선택된 부모세대로 구성된다. 각각의 부모세대는 쌍으로 결합하여 자손을 생산하며, 이때 교배와 돌연변이 등으로 표현되는 유전 연산자가 작용한다. 마

지막으로는 우수한 형질의 자손들이 부모세대 초기의 분포와 교체되는 과정을 반복적으로 수행됨으로써 최적의 모집단이 획득되는 개념이다.

2.4.1 목적함수

비선형 역산 문제는 최적화 문제로 해를 구할 수 있으며, 목적함수(object function)는

$$\Phi(\mathbf{m}) = \frac{\| |\mathbf{d}_{obs}| - r |\mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})| \|^2}{\| \mathbf{d}_{obs} \|^2} \quad (2.39)$$

으로 2차계의 편차를 최소로 하는 모델벡터 \mathbf{m} 을 찾는 것이다. 여기에서

$$r = \frac{\| \mathbf{d}_{obs} \|}{\| \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) \|} \quad (2.40)$$

이며, $\| \cdot \|$ 은 벡터의 L_2 노름(norm), $|\cdot|$ 은 벡터에 대한 절댓값이다. 이 목적함수를 최소로 하는 것은 상관계수(correlation coefficient)를 기초로 하는 정합장 처리에서는 모호함수(ambiguity function)를 최대로 하는 것과 유사하다. 여기에서 \mathbf{m} 은 물리적 매개변수들로 구성된 모델 벡터이고, \mathbf{d}_{obs} 과 \mathbf{d}_{cal} 은 각각 n 개의 관측된 자료와 계산 자료로 구성된 벡터들이다. 예를 들어 이들 관측된 값들이 n_1 개의 거리, n_2 개의 수심 그리고 n_3 개의 주파수로 구성된다면 이는 $n_1 \times n_2 \times n_3$ 개로 구성된다. 계산 자료는 입력 자료로서 모델 벡터들을 사용한 정모델링(forward modeling)에 의해서 얻어지는 복제음장을 일컫는다.

만약 위상 정보를 사용할 수 있다면 목적함수는 선형 프로세서의 수정된 형태로 식 (2.41)와 같이 사용되는 것이 성능이 우수하며 식 (2.39)에 비교해 목적함수의 동요(oscillating)를 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다[35].

$$\Phi(\mathbf{m}) = \sqrt{1 - \frac{\|\mathbf{d}_{obs} * \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2}{\|\mathbf{d}_{obs}\|^2 \|\mathbf{d}_{cal}\|^2}} \quad (2.41)$$

2.4.2 매개변수 초기화

해양환경은 모델벡터 \mathbf{m} 에 포함된 M 개의 환경 매개변수들로 나누어진다. 이들 매개변수들은 각각 직각(rectangular) 확률분포에 따라 2^{n_j} 개로 이산화된다. 여기에서 $j = 1, \dots, M$ 이고, n_j 는 j 번째 매개변수 문자열(string)에서의 비트(bit) 수이다. 각 매개변수의 사전분포는 가우시안 확률분포와 같이 다른 형태로 선택될 수 있다. 사전(a priori) 직각 분포는 일정 구간에서 최소값 θ_j^{\min} 와 최대값 θ_j^{\max} 로 주어진다. 즉, 2^{n_j} 개의 값들로 이산화된 매개변수는

$$\theta_{j,i_j} = \theta_j^{\min} + \Delta\theta_j i_j, \quad i_j = 0, \dots, 2^{n_j} - 1 \quad (2.42)$$

이며, 여기에서

$$\Delta\theta_j = \frac{\theta_j^{\max} - \theta_j^{\min}}{2^{n_j} - 1} \quad (2.43)$$

이다.

프로그램에서 모델링 순서가 호출되었을 때 모델벡터들이 사용된다. 각 매개변수에 대해 모델벡터의 정수값은 길이 n_j 의 이진수 문자열로 표현된다. 여기에서 n_j 는 j 번째 매개변수 문자열에서의 비트 수이다. 이러한 이진수 코딩은 교배와 돌연변이 유전 연산자가 이진수 문자열에서 수행되기 때문이며 이를 유전자라 한다.

모집단을 초기화하기 위해 탐색공간으로부터 무작위로 q 개의 표본 값들을 선택하고, $k = 1, \dots, q$ 의 각각에 대해 식 (2.39)의 목적함수가 계산된다. 각 세대에

서 표본 값들은 그들의 목적함수에 따라 $\Phi(\mathbf{m}_1) \leq \Phi(\mathbf{m}_k) \leq \Phi(\mathbf{m}_q)$ 와 같이 정렬된다. q 개의 표본 값들을 가지고 새로운 모집단을 구성하기 위해서는 $f q$ 개의 부모가 선택되어야 한다. 여기에서 $0 < f < 1$ 이다. 각각의 부모는 그들의 적합도를 기초로 q 개 모델들의 각각에 확률을 할당함으로써 선택된다.

SA(Simulated Annealing)에서 소개된 매개변수 선택을 제어하는 온도의 개념은 유전자 알고리즘에서 아주 좋은 결과를 주며, 선택의 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$P_k = \frac{\exp[-\Phi(\mathbf{m}_k)/T]}{\sum_{l=1}^q \exp[-\Phi(\mathbf{m}_l)/T]}, \quad k = 1, \dots, q \quad (2.44)$$

여기에서 T 는 SA에서 정의된 것과 같은 온도이다. 지수함수의 특성으로부터 높은 온도에서는 모든 모델벡터들이 거의 동등하게 선택되는 반면에 낮은 온도에서는 목적함수의 차이가 적은 값들에 대해서도 구분이 용이하다. 그러나 낮은 온도의 단점은 가장 좋은 표본값들을 선택함으로써 모델의 다양성을 상실하는 것이다. 따라서 이러한 두 가지 온도 범위에서 적절한 값을 선택하여 사용해야 되며 연구 결과 온도를 모집단의 목적함수와 같은 크기인 $T \approx \Phi(\mathbf{m}_k)$ 를 사용하는 것이 좋은 결과를 얻는 것으로 알려져 있다[35].

2.4.3 유전 연산자

매개변수를 이진 문자열로 변화시킨 다음 초기 모집단이 형성되면 적합도를 평가하여 상관계수가 높은 모집단을 선택한다. 이후 새로운 세대를 생성하기 위해서는 몇 가지 연산자가 적용된다. 일반적으로 이 과정은 이진수 형태로 부호화된 매개 변수들에 대해 교배 연산자와 돌연변이 연산자로 구성된다.

재생산의 첫 번째 부분은 교배이다. 유전자 교배는 Fig. 2.6과 같이 한 쌍의 부모로부터 복제된 두 개의 이진 문자열(또는 유전자)을 접목하는 것이다. 모델벡터에서 하나의 매개변수에 대한 부모의 이진 문자열이 (a_0, \dots, a_{N-1}) 과

$(\beta_0, \dots, \beta_{N-1})$ 이라 할 경우에 교배점 l 이 $[1, N-1]$ 로부터 무작위로 선택되면 두 자손은 $(\alpha_0, \dots, \alpha_{l-1}, \beta_l, \dots, \beta_{N-1})$ 과 $(\beta_0, \dots, \beta_{l-1}, \alpha_l, \dots, \alpha_{N-1})$ 이 된다. 이것은 각 매개변수에 대해 수행되기 때문에 이 방법은 복수점 교배라 한다.

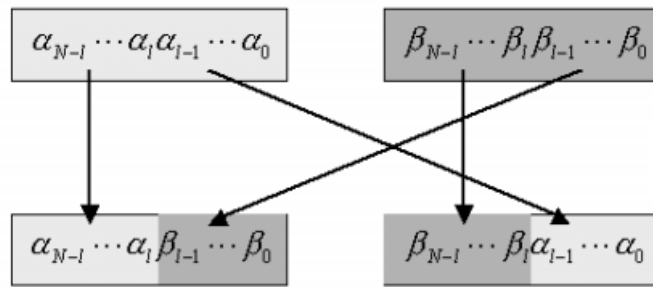


Fig. 2.6 Crossover for two model parameters.

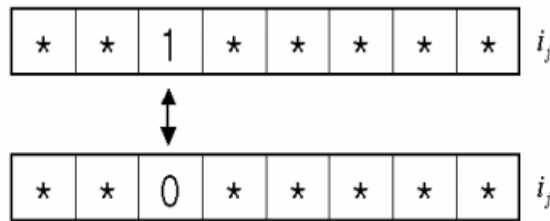


Fig. 2.7 Random change of one bit for mutation.

교배를 수행한 후에, 매개변수 벡터의 각 비트는 탐색공간에서 보다 나은 탐색을 위해 낮은 돌연변이 확률 p_m ($p_m \approx 0.05$)로 교란시킨다. 이 과정을 돌연변이 연산자라고 하며, 이는 국부적인 최소값에 빠지지 않도록 하는데 도움을 준다. 1 비트에 대한 돌연변이 연산자의 예는 Fig. 2.7과 같다.

2.4.4 사후 통계

역산을 수행하는 동안 탐색공간의 표본 값들을 저장하여 사후확률(*a posteriori*

probability)을 추정한다. *Frazer* 등은 각 매개변수에 대해 주변확률밀도(marginal probability density)를 표본으로 하기 위한 기법을 사용하였다[35]. 주변확률밀도 함수는 진화과정에서 모델벡터들의 표본 값에서 추정된다. 이러한 표본 값들은 목적함수의 값인 에너지의 크기에 따라 정렬되고 확률분포를 형성할 때 Boltzmann 분포에 따라 가중되며, 이는 식 (2.44)와 같이 계산되는 것과 유사하다. 표본에서 적합도가 큰 에너지와 같은 온도를 선택하는 것은 모집단에서 가장 적합도가 높은 부분을 선택하는 것과 같으며, 적합도가 적은 에너지와 같은 온도는 모집단에 더 많은 가중치를 주는 것과 상응한다. 경험상 적절한 온도는 가장 좋은 50개의 표본을 평균한 값이 사용된다[35]. 따라서 k 번째 모델벡터에 대한 확률은 다음과 같다.

$$\sigma(\mathbf{m}_k) = \frac{\exp[-\phi(\mathbf{m}_k)/T]}{\sum_{k=1}^{N_{obs}} \exp[-\phi(\mathbf{m}_k)/T]} \quad (2.45)$$

모델벡터에서 i 번째 매개변수에 대해서 특정한 값 χ 을 얻기 위한 주변확률 분포는 식 (2.45)를 합함으로써 얻을 수 있다.

$$\sigma(m^i = \chi) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{obs}} \exp[-\phi(\mathbf{m}_k)/T] \delta(m_k^i = \chi)}{\sum_{k=1}^{N_{obs}} \exp[-\phi(\mathbf{m}_k)/T]} \quad (2.46)$$

여기에서 N_{obs} 는 관측 모델벡터들의 수이고, T 는 온도이다. 병렬적인 수행이 몇 번 행해졌을 경우에 M_{par} 개의 모집단 각각에 대해 $(1-f)q$ 개의 모집단에서 얻어진 모델벡터의 가장 좋은 부분을 저장하는 것으로 충분하다.

또한 사후 평균값과 모델 매개변수들의 공분산은 다음과 같이 추정된다[35].

$$E(\mathbf{m}) = \sum_{k=1}^{N_{obs}} \mathbf{m}_k \sigma(\mathbf{m}_k) \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} C(\mathbf{m}) &= E[\mathbf{m} - E(\mathbf{m})] E[\mathbf{m} - E(\mathbf{m})]^T \quad (2.48) \\ &= \sum_{k=1}^{N_{obs}} \mathbf{m}_k (\mathbf{m}_k)^T \sigma(\mathbf{m}_k) - E(\mathbf{m}) E(\mathbf{m})^T \end{aligned}$$

공분산행렬의 대각항은 각 매개변수의 분산이며, 상관계수를 얻기 위해서는 공분산행렬을 정규화하는 것이 유용하다. 대각항 이외의 항들은 모델의 서로 다른 매개변수들의 상관관계가 어느 정도인가를 나타내는 것이다. '1'의 값은 매개변수들의 완전한 상관을 의미하고, '0'은 상관이 없음을, 그리고 '-1'은 음의(negative) 상관을 의미한다.

Ⅲ. 매개변수 오정합에 대한 수치실험 및 분석

복제된 해양환경을 이용하여 수신된 배열 신호와 상관시키는 정합장치리에서 시스템이나 환경의 매개변수들에 대한 오차에 의한 영향을 최소화하기 위한 프로세서들의 개발과 함께 매개변수 오정합이 미치는 영향을 해석하기 위한 노력이 병행되었다. 그러나 그 동안의 연구는 개별적이거나 특정한 경우의 오정합의 영향에 대한 연구로 진행되어져 왔다. 따라서 본 장에서는 다양한 매개변수들에 대한 오정합의 영향을 종합적으로 고찰하여 정량화하였다.

이를 위해 그 동안 발표된 오정합의 연구 동향을 살펴보고, 개별 매개변수와 결합된 매개변수, 그리고 종합된 매개변수 오정합이 정합장치리에 미치는 영향을 분석하였으며, 매개변수별 오정합에 따라 추정된 음원 위치의 바이어스가 일관성을 유지하는 범위를 고찰하였다.

3.1 오정합 연구 동향

오정합에 대한 연구 결과를 분야별로 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 음속분포 오정합이 정합장치리 성능에 미치는 영향으로 *Bucker*는 음속분포의 오차가 선형프로세서 성능을 저하시킴을 보였고[8], *Porter* 등은 음속분포의 오차가 최소분산 (Minimum Variance) 프로세서에 미치는 영향을 분석하여 음원이 원거리에 위치할수록 음속분포에 의한 오정합의 영향이 큼을 보였다[37]. *Tolstoy*는 음속분포 오정합에 의한 위상 오차 및 진폭 오차를 거리-수심별로 나타내고 이것에 근거한 선배열센서 배치방법에 대하여 연구하여, 위상과 진폭 오차가 큰 지역에 선배열센서를 배치할 경우 정합장치리 성능이 저하됨을 보였다[38]. *Feuillade* 등은 계절에 따른 수층의 음속분포 오정합에 대해 계절별 평균 음속분포에 대한 표준편차로 계산하여 여름의 음속분포 오정합이 겨울의 음속분포보다 음원 위치 추정 성능이 더욱 저하됨을 보였다[39].

수심의 오정합이 정합장치리 성능에 미치는 영향에 대한 연구로 *DelBalzo* 등은

최소분산 프로세서를 사용하여 천해에서 해수면의 장주기 파도를 모델로 수층 수심의 오정합이 미치는 영향을 연구하여 파고가 높아져 수심이 증가되면 음원을 실제 위치보다 근거리이며 깊게 추정함을 보였으며, 수심의 오차로 인한 추정된 음원 위치의 바이어스가 일관성을 가짐을 확인하였다[40]. *Shang* 등은 천해에서 수층 수심과 음속분포, 해저퇴적층의 매개변수들을 대상으로 모드 공간에서 수치적인 방법과 해석적인 방법으로 오정합의 영향을 분석하였으나, 오정합의 범위를 제한적으로 사용하여 넓은 범위에서의 정량화된 결과까지는 도달하지 못하였다[41]. 최근에 *D'Spain* 등은 거리 종속인 환경에서 오정합으로 인한 음원의 위치 바이어스에 대해 중점적으로 연구하였으며, 해저면 경사의 오정합은 추정된 음원의 거리와 수심에 일관성 있는 바이어스를 유발함을 보였고, 오정합에 따른 추정된 음원의 수심과 거리를 단일정상모드로 해석하여 근사적인 관계식을 제시하였고, 주파수 편이와 해수면 파도의 효과 등에 대한 해석적인 해를 제시하였다[4].

해저층의 매개변수 오정합이 정합장처리에 미치는 영향으로 *Porter*는 해저층의 음향 매개변수 오차가 선형 및 최소분산 프로세서에 미치는 영향을 분석하면서 배열이 음영구역(*shadow zone*)에 있을 때 해저층 매개변수의 오정합으로 인한 영향이 큼을 보였다[37]. *Feuillade* 등은 여름 환경의 음속분포에서 두꺼운 해저퇴적층이 존재하는 것으로 가정하여 수층과 해저퇴적층 사이의 음속과 해저퇴적층의 밀도, 감쇠계수에 대한 오정합의 영향을 PBR(Peak-to-Background Resolution)로 해석하여 수층과 해저퇴적층 사이의 음속 오정합은 프로세서 출력 저하의 원인이 되지만 음원 위치 추정에는 영향이 적다는 것을 보였으며, 해저퇴적층의 밀도와 감쇠계수는 수치실험한 오정합 범위에서 음원 위치 추정과 PBR에 영향이 없음을 확인하였다[39]. *Shang* 등은 해저퇴적층 조성의 오정합은 주파수에 종속적이며, 주파수가 증가될수록 오정합에 의한 영향은 감소됨을 보였다[41].

배열 매개변수의 오정합이 정합장처리에 미치는 영향에 대해 *Gingras*는 배열 경사(*tilt*) 오정합이 미치는 영향을 분석하여 0.1λ 보다 작은 범위의 오차에서는 음원 위치 추정 성능에 영향이 없으나, 0.5λ 값에 접근함에 따라 급속하게 나빠짐을 보였다[42].

위와 같이 정합장처리에서 오정합에 관한 연구는 연구자의 관심 분야에서 특

정한 매개변수로 연구가 제한되어 수행되었으며, 매개변수들의 범위도 제한되어 수행되었다. 본 논문에서는 음장을 모델링하기 위해 필요한 매개변수들을 전반적으로 다루었으며, 개별적인 오정합의 범위를 확장하고, 출력의 상관계수 값의 영향과 더불어 추정된 음원의 위치를 거리와 수심으로 구분하여 상세하게 고찰하였다. 그리고 개별적인 매개변수 오정합과 결합되거나 종합된 매개변수 오정합에서의 영향에 대해서도 고찰하였다.

3.2 수치실험 환경

정합장치리에서 기하 및 지음향 매개변수가 프로세서 출력 결과에 미치는 영향을 고찰하기 위해 Fig. 3.1과 같이 천해의 수치실험 환경을 대상으로 하였다. 주파수는 150Hz, 200Hz, 250Hz를 사용하여 비교하였으며, 음원은 거리 4km, 수심 60m에 위치한 것으로 하였다. 수직 선배열은 수심 20m부터 80m까지 3m 간격으로 21개 센서가 위치한 것으로 가정하였다.

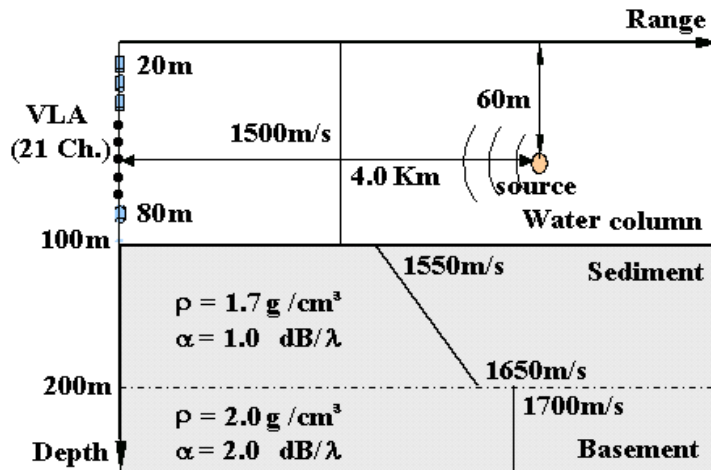


Fig. 3.1 A schematic of the shallow-water ocean environment.

해양환경은 수심이 100m이고, 음속은 1500m/sec로 일정하며, 수층과 저층 사

이에 두께 100m의 해저퇴적층이 존재하는 것으로 하였으며, 이것은 특정한 퇴적층을 모사하여 음향학적 계수를 고려한 것은 아니다. 해저퇴적층 상부의 음속은 1550m/sec, 하부의 음속은 1650m/sec로 깊이에 따라 선형적으로 증가하며, 해저퇴적층의 밀도는 1.7 g/cm^3 , 감쇠계수는 $1.0 \text{ dB}/\lambda$ 이다. 저층은 음향학적 반무한 영역(acoustic halfspace)으로 음속분포는 1700m/sec이며, 저층의 밀도는 2.0 g/cm^3 , 감쇠계수는 $2.0 \text{ dB}/\lambda$ 에서 갖는 것으로 하였다.

수층의 음속분포 오정합을 수치실험하기 위해서는 다양한 경우의 음속분포를 가정하여야 하나, 여기에서는 동계 및 하계의 음속분포를 가정하여 사용하였으며 다음 절에서 세부적으로 다루었다.

공분산 행렬을 구성하기 위한 모의신호와 복제음장의 모델링은 각각 정상모드 모델인 KRAKENC를 사용하여 거리독립인 환경으로 수치실험 하였다[43]. 그리고, 해저면 경사 오정합에서는 부분적으로 거리종속 환경을 수용할 수 있는 모델이 필요하여 포물선 방정식 모델인 RAM을 사용하였다[44]. 매개변수들의 오정합의 양이 정합장치처리에 미치는 영향만을 보기 위해 모의 신호는 잡음이 없는 것으로 가정하였다.

각각의 음향전파 모델에서 음원 위치의 탐색 격자는 수심 1m, 거리 10m로 하였으며 그 이유는 다음과 같다. 해양 도파관에서 배열의 수심과 거리의 해상도는 다음과 같이 계산된다[45].

$$A_z = 0.374 \lambda \sqrt{\frac{\alpha r}{D}} \quad (3.1)$$

$$A_r = 1.07 \lambda \frac{\alpha r}{D} \quad (3.2)$$

여기에서 λ 는 파장이며, α 는 감쇠계수, r 는 배열과 음원 사이의 거리, D 는 해양 도파관의 수심이다. 따라서 150Hz인 경우 수심은 28.9m, 거리는 64.2m이고, 200Hz인 경우 수심은 21.7m, 거리는 481.5m이며, 250Hz인 경우 수심은 17.4m, 거리는 385.2m이 된다. 그러므로 사용된 음원 위치의 탐색 격자는 모두 공간 해상도 범위 내에 해당된다.

3.3 개별 매개변수 오정합

개별 매개변수 오정합이 정합장치 출력에 미치는 영향을 살펴보기 위해 시스템과 해양환경의 매개변수로 구분하여 수치실험을 하였다. 시스템 매개변수는 주파수 및 배열 수심, 배열 경사로 구분하였으며, 수층의 해양환경 매개변수는 음속분포와 수층의 깊이, 해저면 경사로 하였고, 해저퇴적층은 상부 및 하부음속과 밀도, 감쇠계수를 대상으로 하였다. 저층의 해양환경 매개변수는 음속과 밀도, 감쇠계수들에 대해 각각의 매개변수 오정합의 양을 변화시키며 수치실험을 하였다.

매개변수 오정합의 수치실험은 해당되는 매개변수의 오정합을 수치실험할 경우 나머지 매개변수의 값은 고정하고, 해당되는 매개변수의 값을 변화시키면서 음원 수심 60m에서 오정합에 따른 탐색거리와 음원 거리 4km에서 오정합에 따른 탐색수심, 추정된 음원 거리와 수심, 그리고 상관계수 값을 각각 도시하였다.

사용된 프로세서는 오정합에 비교적 강인한 선형 프로세서를 사용하였으며, 표본 공분산행렬을 정규화하여 오정합이 없는 복제음장이 사용된 경우 상관계수 값이 '1'이 되도록 하였으며, 이것을 기준으로 오정합의 영향으로 감소되는 상관 계수 값을 계산하였다.

3.3.1 시스템 매개변수 오정합

3.3.1.1 주파수 오정합

250±10Hz 범위에서 1Hz 간격으로 변화시키며 수치실험을 하였다. 주파수 오정합의 양에 따라 추정거리에서 일정한 편이(offset)를 보이며, 이는 *D'Spain* 등의 결과와 같다[4]. 천해 음장에서 주파수 오정합에 대한 음원의 거리 추정은 불변량 $\beta = 1$ 로 유지되며, 이것은 주파수의 변화량과 추정된 음원의 거리 변화량이 선형의 관계임을 나타낸다.

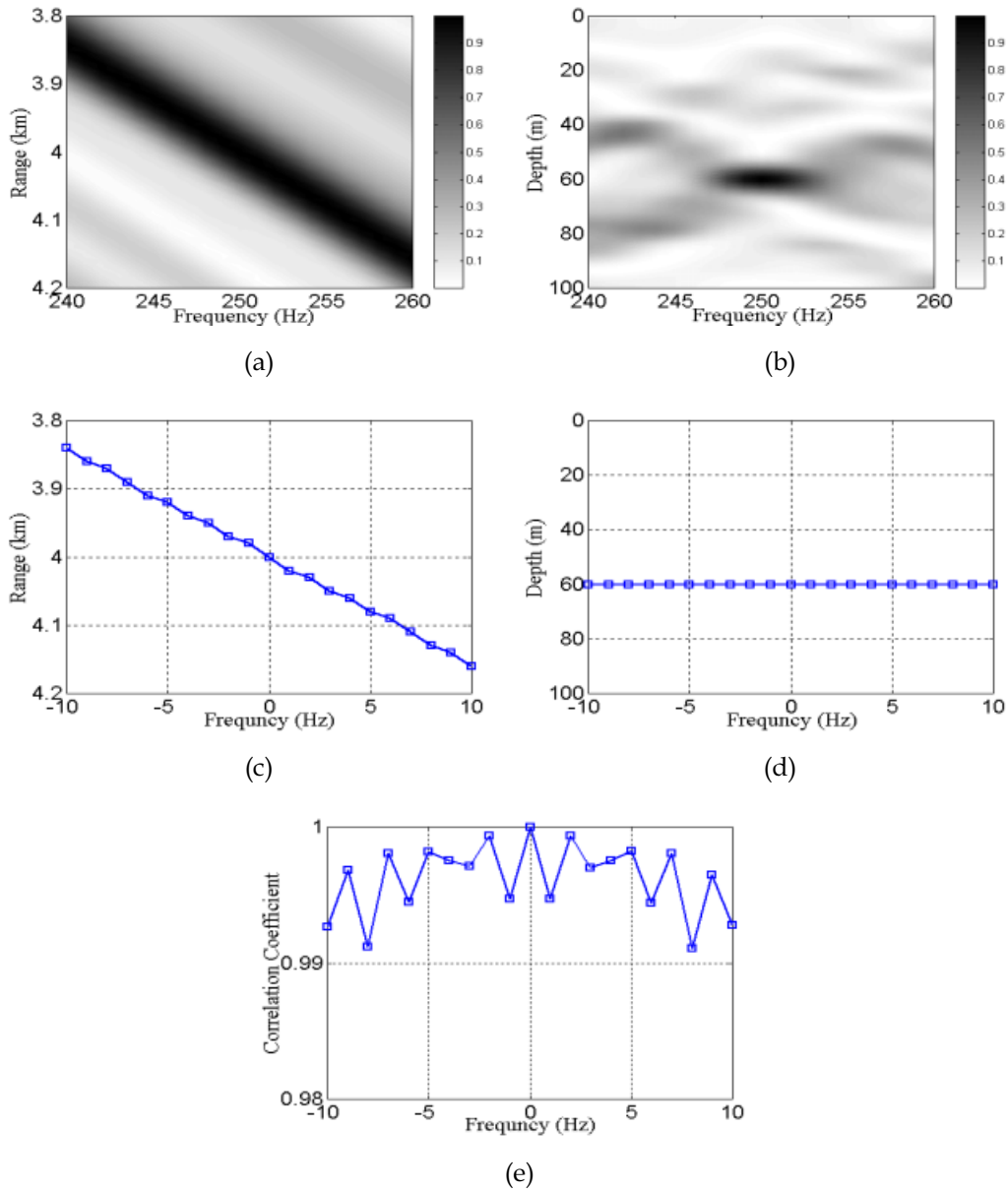


Fig. 3.2 Results of MFP for the frequency mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the frequency and range at true source depth. (b) Ambiguity surface as function of the frequency and depth at true source range. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

$$\frac{\Delta r}{r} = \beta \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (3.3)$$

위의 결과는 Fig. 3.2의 (a) 및 (c)와 같이 주파수를 낮게 예측할수록 음원의 거리는 근거리로 추정하며, 높게 예측할수록 원거리로 추정하였으며, 출력의 상관계수 값은 주파수 오정합 범위에서 0.99 이상으로 높은 값을 유지하였다. 그리고 그림 (a)는 음원 수심 60m에서 출력된 프로세서의 상관계수 값을 오정합의 양에 따라 거리별로 도시한 것으로서 추정된 음원 수심에 변화가 없으므로 거리에 대한 출력 바이어스가 충실하게 반영되어 나타나고 있다. 그림 (b)는 음원 거리 4km에서 오정합의 양에 따라 출력된 상관계수 값의 분포를 수심별로 도시한 것으로서 주파수가 변화됨에 따라 추정된 음원의 거리가 변하므로 주파수의 오정합이 없는 실제 음원의 거리에서만 강한 출력 상관계수 값을 가짐을 보인다.

이러한 결과에서 균질한 음장의 경우 모드의 수직파수와 고유함수가 주파수와 독립되므로 주파수 오정합은 추정된 음원의 수심에 영향을 주지 못하며, 음원의 거리 추정에만 영향이 있음을 확인하였다. 그러나 정합장치에서는 전처리(pre-processing) 과정을 통해 수신된 토널 신호에 대한 비교적 정확한 주파수를 검출한 후에 프로세서에 적용하므로 현실적으로 과도한 값의 주파수 오정합은 발생되지 않는다.

3.3.1.2 배열 수심 오정합

배열 수심 오정합은 배열의 전체 길이는 60m로서 변함이 없는 것으로 가정하고, 배열이 수심 20m에서 80m까지 설치된 것을 기준으로 상하로 변동되는 양을 $\pm\lambda$ 의 범위에서 0.1 λ 간격으로 변화시키며 계산하였다.

그 결과 Fig. 3.3의 (c) 및 (d), (e)와 같이 주파수가 낮아질수록 파장이 길어짐으로 동일한 오정합의 범위에서 출력의 저하가 상대적으로 적었고, 일정한 편차로 바이어스가 유지되는 오정합의 범위도 증가하였다. 배열 수심 오정합에 대한 음원 위치 바이어스는 배열 수심이 깊게 예측된 경우 음원 거리는 근거리로 추정하였고, 음원 수심은 깊게 추정하였다. 특히 주파수 150Hz인 경우 높은 주파수와 비교해 추정된 음원 수심의 오차가 상대적으로 많이 증가되었으며, 일관성을 유지하는

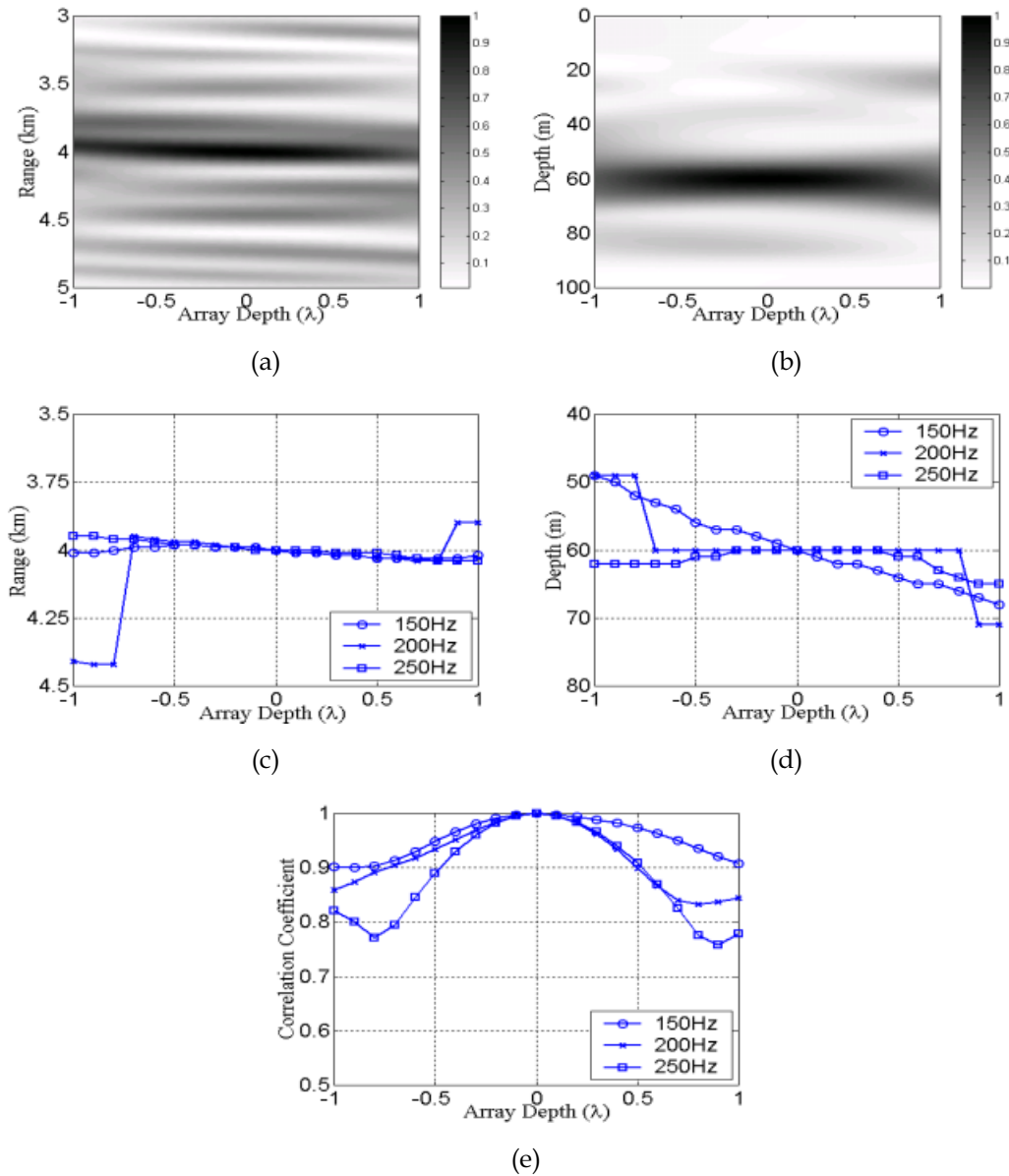


Fig. 3.3 Results of MVP for the array depth mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the array depth and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the array depth and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

바이어스의 범위도 증가된다. 그러므로 저주파 신호에 대한 정합장치에서 추정된 음원 수심에 대한 오차를 줄이기 위해서는 배열의 수심에 대한 정확한 매개변수 값을 사용해야함을 나타낸다.

3.3.1.3 배열 경사 오정합

배열 경사 오정합은 해류나 조류 등의 영향으로 수직으로 설치된 배열이 불규칙한 형상으로 운용되어 발생되며, 배열의 형상도 길이와 운용되는 해역의 특성에 따라 매우 불규칙하다. 근래에는 수직배열의 경우 이러한 영향을 배제하기 위해 배열의 하부를 해저면에 고정시키거나, 별도의 배열 위치 센서를 이용하여 시간별 배열의 형상 자료를 획득하기 위한 방법이 사용되고 있으나, 배열의 형상을 완전하게 재현하여 복제음장에 적용하기에는 한계가 있다.

배열 경사 오정합은 Fig. 3.4와 같이 해저면 쪽이 고정된 것으로 가정하여 해수면에 가까운 센서 쪽에서 경사가 발생된 경우로 하였으며 배열의 형상은 직선으로 하였다. 이때 배열의 전체 길이는 변함이 없는 것으로 가정하였다. 배열 경사 오정합의 범위는 $\pm\lambda$ 의 범위에서 0.1λ 간격으로 계산하였다. 이 경우에 배열의 전체 길이를 L_s , 배열 경사에 의한 각도를 θ , 배열 경사를 δ , 각각의 배열 센서 위치를 L_a 라고 하면

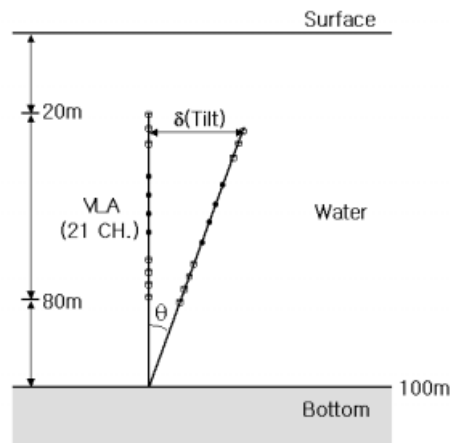


Fig. 3.4 A Schematic of the tilted array.

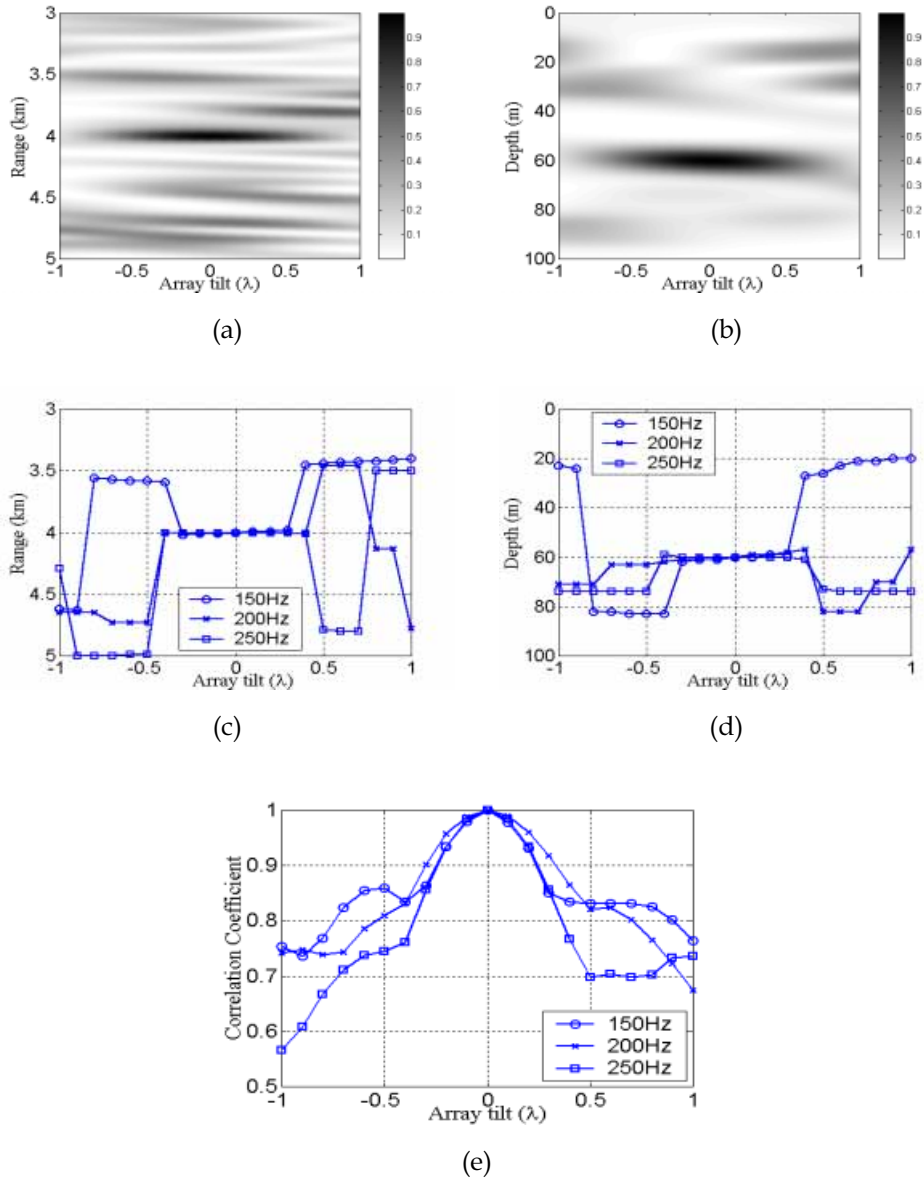


Fig. 3.5 Results of MFP for the array tilt mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the array tilt and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the array tilt and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\delta}{L_s} \quad (3.4)$$

가 되며, 배열 경사에 의한 각 배열 센서들의 x축과 z축에서의 위치 L_x, L_z 는

$$L_x = L_a \sin \theta \quad (3.5)$$

$$L_z = L_a \cos \theta \quad (3.6)$$

가 된다.

그 결과 Fig. 3.5의 (c) 및 (d), (e)와 같이 오정합에 따라 일정한 바이어스가 유지되는 배열의 경사는 주파수별로 $\pm 0.3 \sim \pm 0.4\lambda$ 의 범위를 보였다. 이러한 범위 내에서 추정된 음원 거리 및 수심의 바이어스는 수 m 이내로서 일정한 경향으로 해석하기에는 오차의 양이 너무 적었다. 주파수 250Hz인 경우를 자세히 살펴보면 추정된 음원 거리는 -0.4λ 에서 0.3λ 까지 오차가 없었으며, 0.4λ 에서 10m의 오차를 보였다. 추정된 음원 수심은 $\pm 0.3\lambda$ 까지 오차가 없었으며, -0.4λ 에서 59m이고 0.4λ 에서 61m를 보였다. 바이어스가 유지되는 출력의 상관계수는 -0.4λ 에서 0.7609, 0.4λ 에서 0.7666이다. 이러한 결과들은 배열의 센서들간에 수신되는 신호의 위상 정보를 사용하는 정합장치리에서 배열의 경사가 일정한 범위를 벗어날 경우 수신되는 신호의 위상이 제한된 범위를 초과하기 때문에 출력 결과에 많은 음원 위치 추정 오차가 유발되는 것으로 해석된다.

따라서 정합장치리를 수행하기 위해서는 배열의 형상에 대한 상세한 정보와 함께 복제음장을 구성하기 위한 예측된 배열 형상의 정확한 적용이 프로세서 결과에 매우 중요함을 나타낸다.

3.3.2 수층 매개변수 오정합

3.3.2.1 음속분포 오정합

수층의 음속분포 오정합에 대한 수치실험을 위하여 국립수산진흥원에서 207 정선의 03정점에서 1961년부터 1996년까지 측정된 격월별 수직 수온 평균 자료중에 2월과 8월의 자료를 사용하였다[46]. Fig. 3.6의 (a)와 (b)는 2월과 8월의 음속분포 자료 중에서 수심별 음속이 비정상적으로 급격히 변화되는 자료를 제외한 각 월별 18개의 음속분포 자료를 도시하였다. 그리고 (c)와 (d)는 (a)와 (b)의 음속분포를 표본 수심별로 평균한 음속과 표준편차를 나타내었다. 여기에서 음속분포별 수심의 표본은 0m에서 50m까지는 10m 간격이고, 이후는 25m 간격으로 총 8개의 자료로 구성되었다.

음속분포 오정합에 대한 수치실험은 EOF(Empirical Orthonormal Function)를 사용한 방법과 표본 음속분포의 수심별 평균과 표준편차에 따라 추정된 음원의 위치와 출력의 상관계수 값을 비교하는 방법으로 수행하였다.

먼저, EOF는 음속분포에 대한 자료가 충분히 많을 경우에 각각의 음속분포는 형상함수로 재구성이 가능하다. 즉, 수심별 음속 $c(z)$ 는 식 (3.7)와 같이 변환된다[47][48].

$$c(z) = \bar{c}(z) + \sum_{j=1}^J \mu_j v_j \quad (3.7)$$

여기에서 $\bar{c}(z)$ 는 수심별 평균 음속이고, j 는 형상함수의 수이다. 그리고 μ_j 는 특이치로 형상함수의 계수이고, v_j 는 고유벡터로 j 번째 형상함수인 EOF이다.

Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 주파수 250Hz를 사용하여 2월과 8월의 음속분포에 대한 EOF를 계산하여 정합장처리에 적용한 결과이다. 각 그림의 (a)는 고유벡터에 대한 특이치를 나타내었으며, (b)는 고유벡터별 EOF를 나타내었다. 정합장처리를 수행하기 위해 각각의 음속분포를 모의 신호음장으로 가정한 다음 EOF별로 재구성된 각 음속 구조를 사용하여 복제음장으로 계산하였다. 정합장처리 결과 EOF에 따른

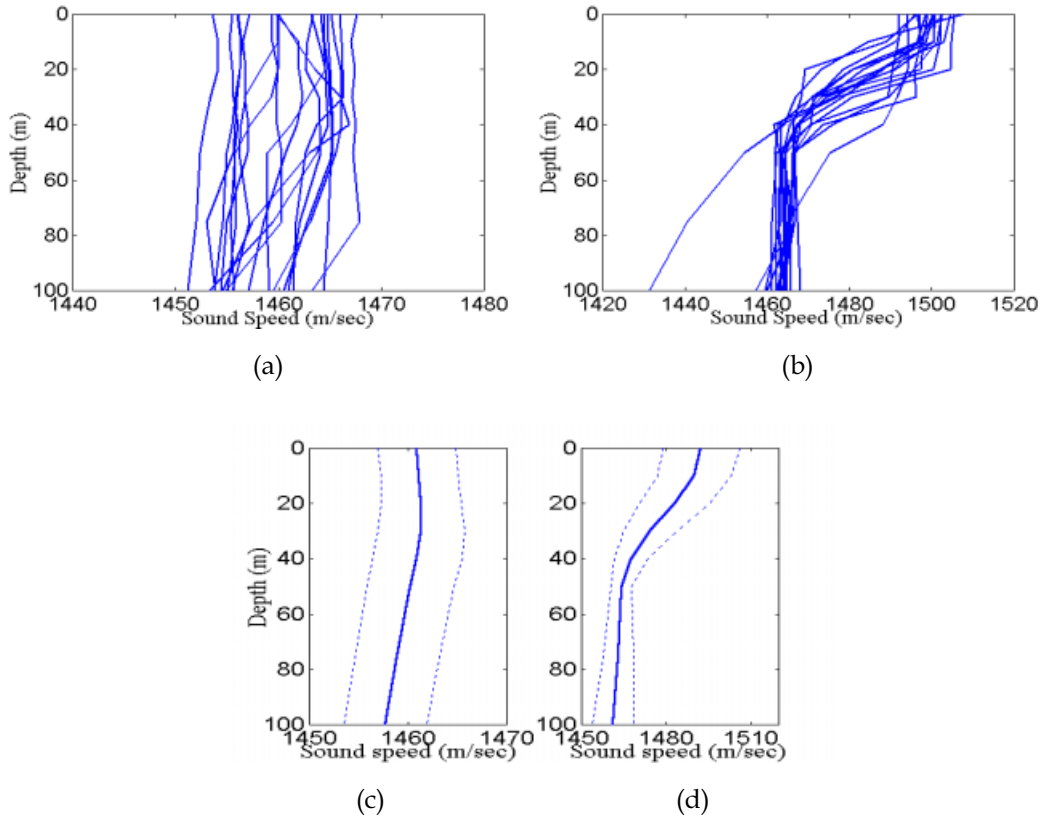


Fig. 3.6 Sound speed profile : (a) February, (b) August. (c) Average sound speed and standard deviation in February. (d) Average sound speed and standard deviation in August (solid line : average, dotted line : standard deviation).

음속분포별 추정된 음원의 거리는 각 그림의 (c)로 나타내었으며, (d)는 추정된 음원의 수심이다. 그리고 마지막으로 (e)는 정합장치리 출력의 상관계수 값이며, 정합장치리의 출력 결과는 다섯 번째 EOF까지 나타내었다.

2월 음속분포의 EOF에 따른 정합장치리를 살펴보면 네 번째 EOF부터는 출력의 상관계수 값이 0.95 이상이며, 추정된 음원의 거리와 수심에 오차가 없었다. 여기에서 첫 번째와 두 번째의 EOF에 대해 추정된 음원의 거리와 수심에 오차가 많이 나타나는 음속분포는 겨울의 음속분포 구조이며, 수온약층이 존재하거나 음

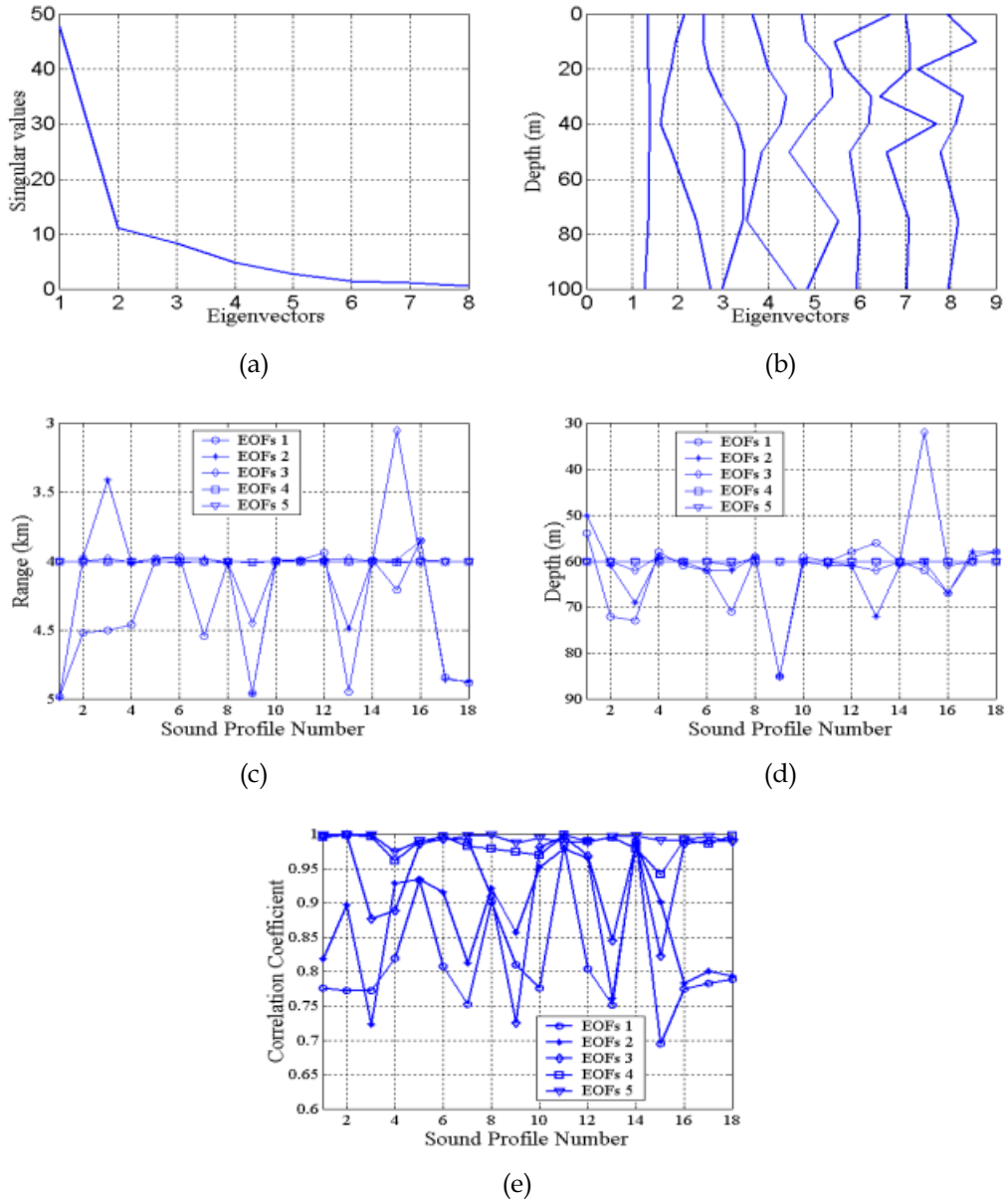


Fig. 3.7 EOF and MFP results of the SSP mismatch in February. (a) The singular values of the eigenvectors. (b) The EOF of the eigenvectors. (c) Estimated source range for the first five EOF coefficients. (d) Estimated source depth for the first five EOF coefficients. (e) Correlation coefficients for the first five EOF coefficients.

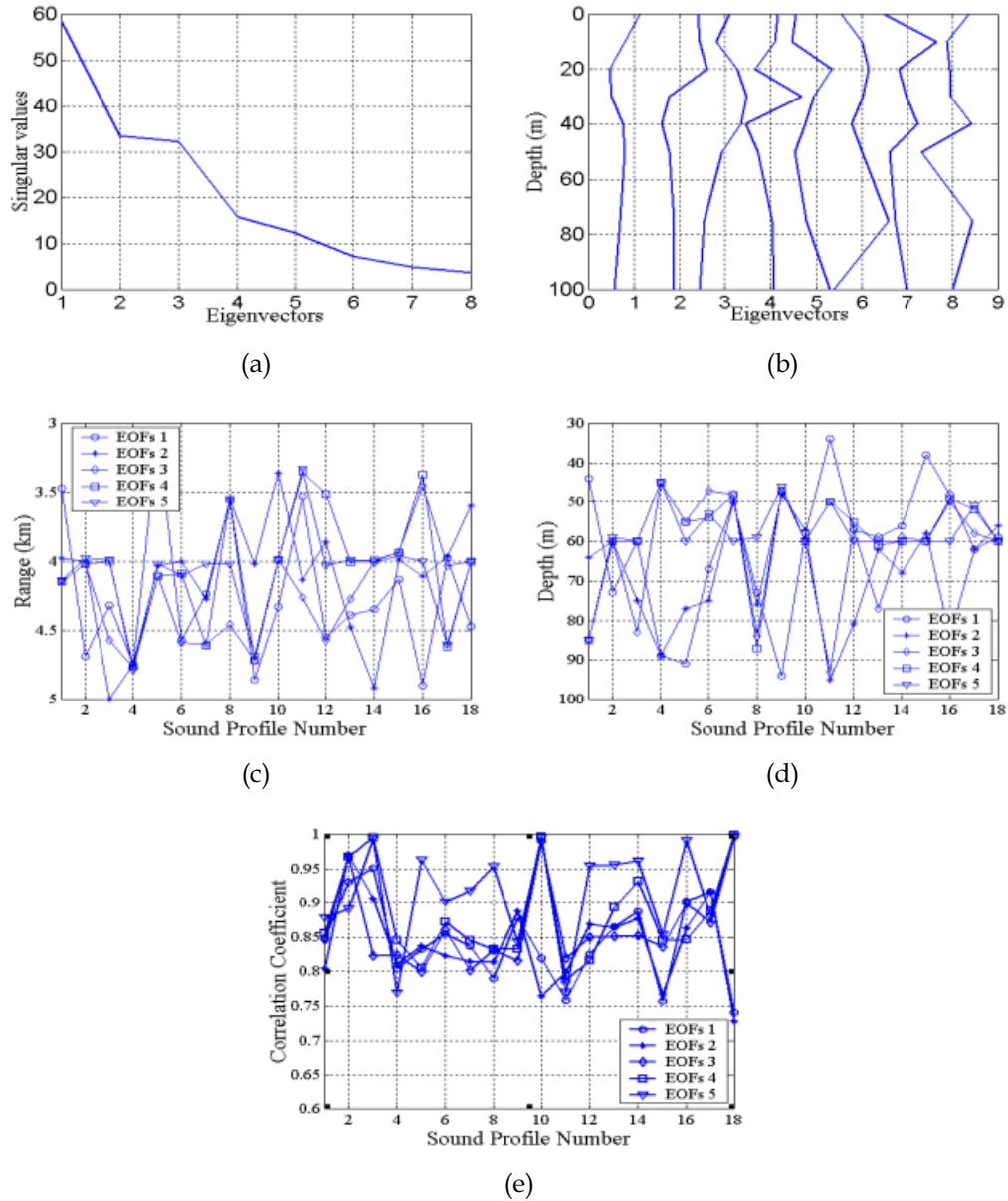


Fig. 3.8 EOF and MFP results of the SSP mismatch in August. (a) The singular values of the eigenvectors. (b) The EOF of the eigenvectors. (c) Estimated source range for the first five EOF coefficients. (d) Estimated source depth for the first five EOF coefficients. (e) Correlation coefficients for the first five EOF coefficients.

Table 3.1 Estimated source position and correlation coefficients for the SSP EOFs.

| EOFs | February | | | August | | |
|------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | Averaged source range(km) | Averaged source depth(m) | Averaged correlation coefficients | Averaged source range(km) | Averaged source depth(m) | Averaged correlation coefficients |
| 1st | 4.36 | 63 | 0.82 | 4.23 | 61.8 | 0.84 |
| 2nd | 4.19 | 62.5 | 0.87 | 4.11 | 68.7 | 0.84 |
| 3rd | 3.97 | 60.1 | 0.94 | 4.25 | 62.7 | 0.86 |
| 4th | 4.0 | 60 | 0.98 | 4.04 | 58.2 | 0.88 |
| 5th | 4.0 | 60 | 0.99 | 4.09 | 58.2 | 0.91 |
| 6th | 4.0 | 60 | 0.99 | 3.99 | 59.9 | 0.96 |
| 7th | 4.0 | 60 | 1.0 | 3.99 | 59.9 | 0.98 |
| 8th | 4.0 | 60 | 1.0 | 4.0 | 60 | 1.0 |

원이 위치한 수심에서 부경사가 강하게 나타나는 음속구조를 갖는 경우에 해당된다.

8월의 음속분포는 2월의 경우보다 복잡한 수온 구조를 보이며, 정합장처리의 출력 결과에서 다섯 번째 EOF에서도 2월의 경우보다 상관계수 값이 낮은 값을 나타내며, 추정된 음원의 위치 오차도 많았다. 첫 번째부터 세 번째까지의 EOF에서 추정된 음원의 거리와 수심의 오차를 비교하더라도 2월의 음속분포보다 8월의 음속분포에서의 오차가 더 많음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 음속 구조가 복잡한 환경일수록 동일한 EOF를 사용하더라도 추정된 음원의 위치 오차가 많아지며, 음속분포의 오정합에 매우 민감한 결과를 보이기 때문이다.

추정된 음원의 위치와 상관계수를 EOF별로 평균하여 비교한 표 3.1의 결과를 보면 2월과 8월의 음속분포에 대한 오정합의 차이가 확연히 나타난다. 2월의 경우 네 번째 EOF부터 추정된 음원의 위치 오차가 없으나, 8월의 경우에는 여덟 번째 EOF에서 오차가 없다.

이상에서 살펴본 바와 같이 수층의 음속분포는 형상함수인 EOF로 음속분포를 재구성할 수 있으며, 동계와 하계절의 음속분포 특성을 대표하는 2월과 8월의 음

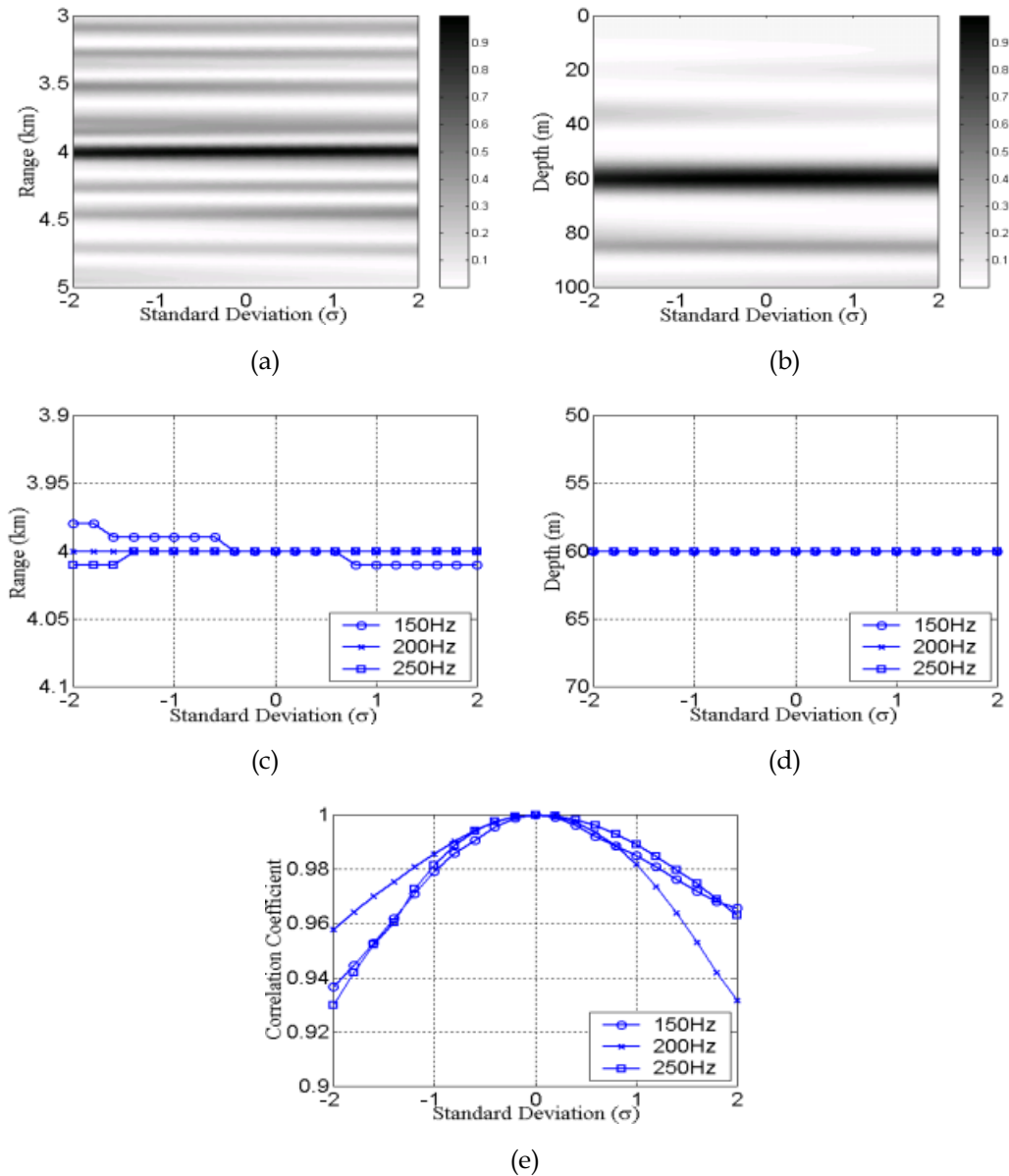


Fig. 3.9 Results of MFP for the SSP mismatch using the mean SSP in February. (a) Ambiguity surface as function of standard deviation of the SSP and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of standard deviation of the SSP and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

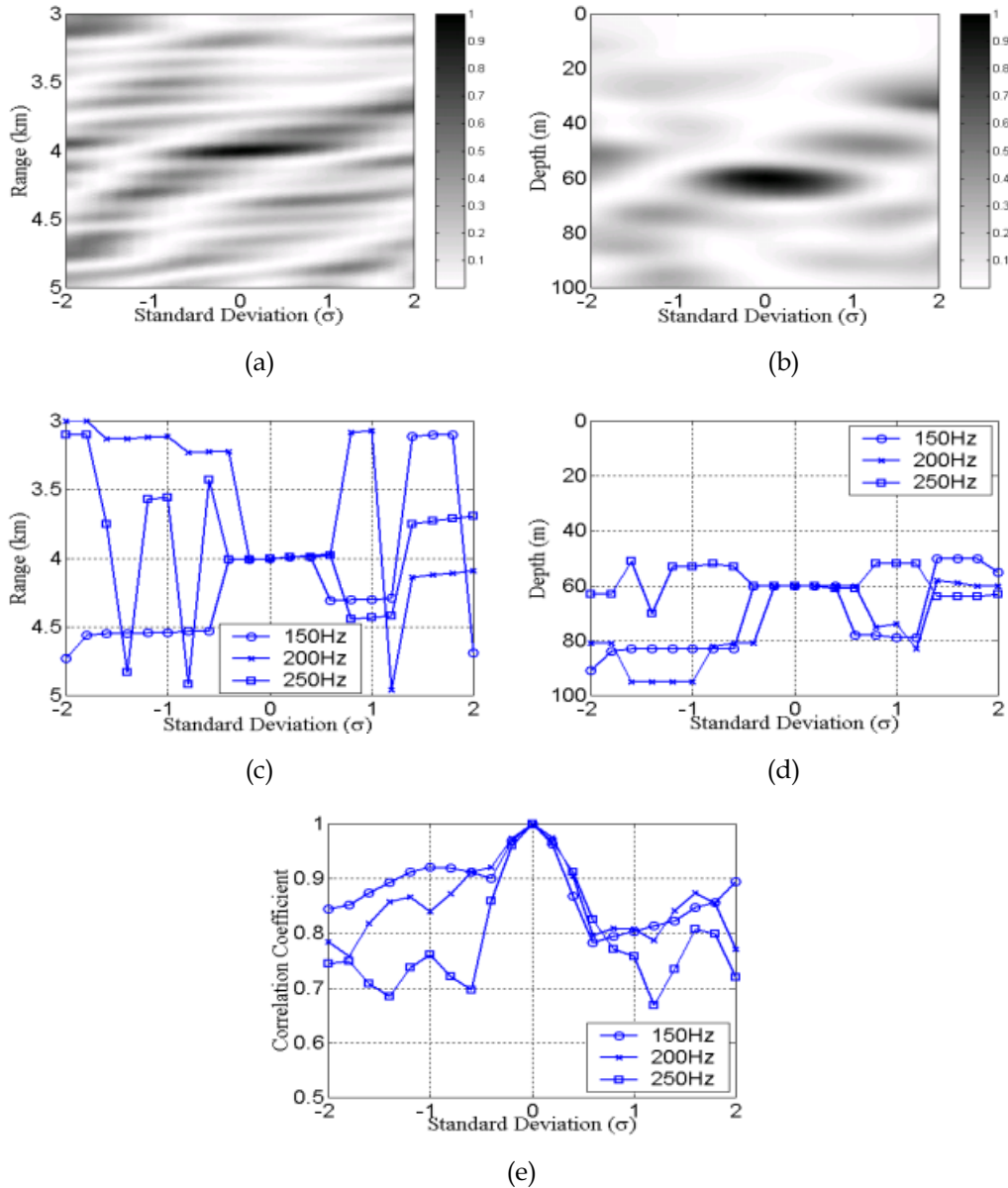


Fig. 3.10 Results of MFP for the SSP mismatch using the mean SSP in August. (a) Ambiguity surface as function of standard deviation of the SSP and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of standard deviation of the SSP and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

속분포를 이용하여 EOF에 따른 정합장처리를 수행할 경우 음속분포가 복잡한 8월의 음속분포에서 EOF별로 추정된 음원의 위치 오차가 2월의 경우보다 많았으며, 이것은 수심에 따른 음속구조가 복잡해질수록 적은 음속분포의 오차에도 정합장처리의 출력에 많은 영향이 있음을 확인할 수 있다.

다음으로는 Fig. 3.6의 (c), (d)와 같은 수심별 음속분포의 평균과 표준편차 σ 를 사용하여 평균 음속분포를 모의 신호 음장으로 하고, 각 표본 수심별 $\pm 2\sigma$ 의 범위에서 0.2σ 씩 변화시키며 복제음장을 계산하였다.

2월의 평균 음속분포는 천해에서 겨울의 전형적인 형태를 띄고 있다. 정합장처리를 수행한 결과 Fig. 3.9와 같이 수심별 음속의 편차가 적은 음속분포에서는 오정합이 증가됨에 따라 추정된 음원의 위치 오차가 상대적으로 적었고, 높은 상관계수 값을 보였다. 수심에 따라 음속이 일정하고 해저층의 음속도 일정한 경우 복제음장의 음속이 증가되면 음원의 위치는 근거리로 추정하며, 음속을 느리게 예측하면 원거리로 음원을 추정한다[49]. 그러나 수치실험된 2월의 음속분포에서는 이와 같은 현상이 뚜렷하게 보이지 않는데, 이것은 음원이 위치한 수심 60m에서 부경사를 가지며 해저퇴적층의 존재로 인한 영향으로 해석된다.

수온약층이 존재하는 8월의 음속분포 오정합에 대한 수치실험은 2월의 방법과 같이 수행하였으며, Fig. 3.10과 같이 2월의 음속분포 오정합과 비교하여 매우 불규칙한 음원 위치 추정 결과를 보였다. 오정합에 따라 일정한 바이어스가 유지되는 범위도 $\pm 0.6\sigma$ 를 초과하지 못하였다. 출력의 상관계수 값의 저하는 2월의 음속분포 환경보다 증가하였으며 다른 매개변수와 마찬가지로 고주파수에서 심하였다.

3.3.2.2 수심 오정합

수층의 수심 오정합은 천해에서 조석이나 장주기 파도 등에 의해 발생된다. 앞 절의 연구동향에서도 언급되었듯이 수심의 오정합에 대한 수치실험의 결과는 수심이 3m 깊게 예측되면 음원의 거리는 실제 음원의 거리보다 250m 가깝게 추정되었다[4][40][41]. *D'Spain*은 수심과 거리의 관계에 대한 해석적인 해를 다음과 같이 제시하였다[4].

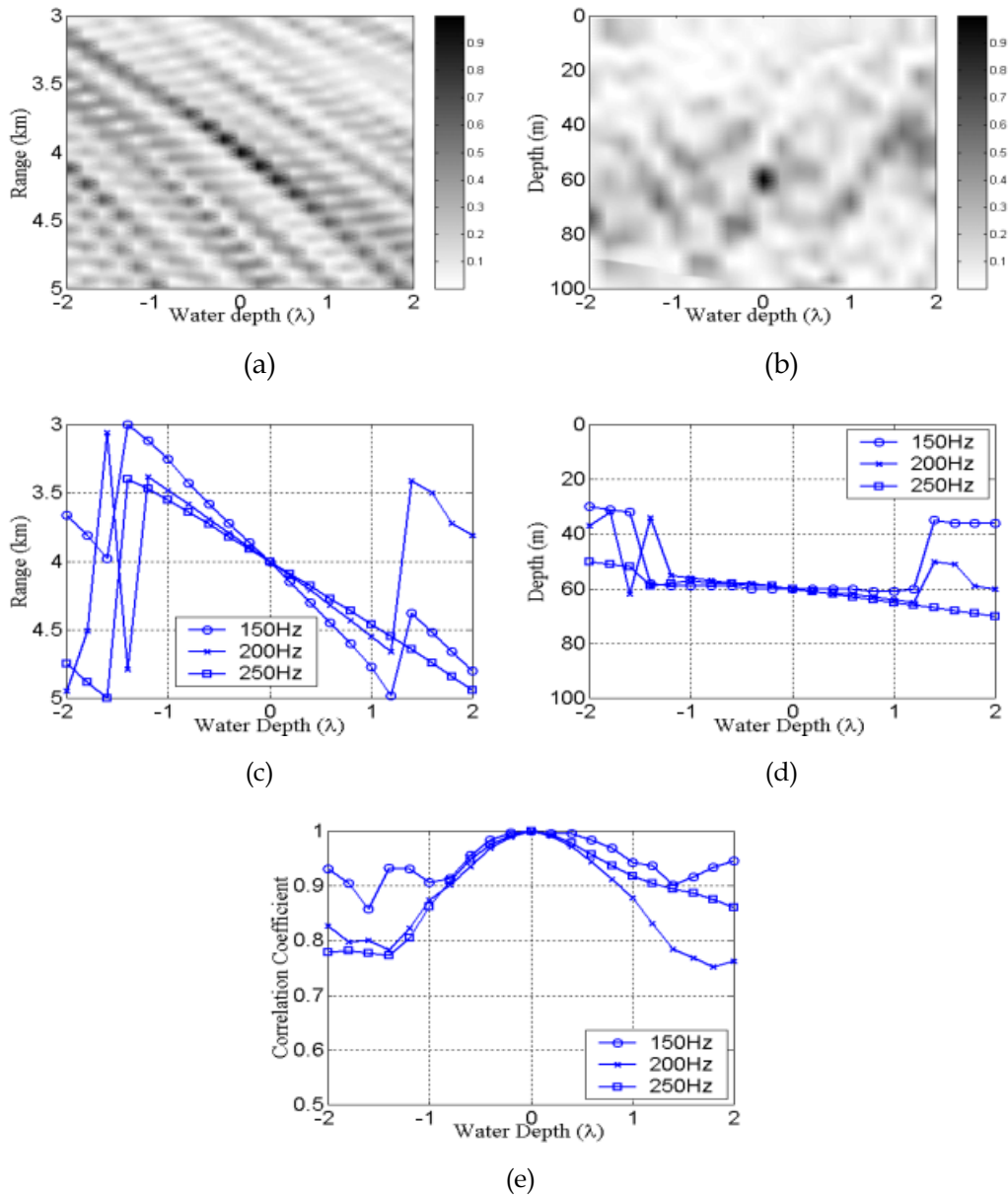


Fig. 3.11 Results of MFP for the water depth mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the water depth and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the water depth and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

$$\hat{r}_s - r_s \approx -2 \frac{a}{D} r_s \quad (3.8)$$

여기에서 \hat{r}_s 는 예측된 음원의 거리이며, r_s 는 실제 음원의 거리, a 는 파고의 진폭, D 는 예측된 음장의 수심이다.

그러나 파도의 영향을 고려한 수층 수심의 오정합에 대한 수치실험은 일시적인 현상이라 할 수 있으며, 다수의 신호단편을 사용할 경우 평균적인 수층의 수심에 대한 오정합을 고려해야 한다. 본 논문에서는 거리 독립인 환경에서 해저 수심 100m를 기준으로 변화 범위는 $\pm 2\lambda$ 에서 0.2λ 간격으로 수치실험을 하였다. 이러한 수치실험은 일시적인 파도의 영향만을 수치실험한 경우와 반대의 경우로 식 (3.8)은 복제음장의 수심을 고정하고 신호음장의 수심을 변화시켰으나 본 논문에서는 신호의 음장을 고정시키고 복제음장의 수심을 변화시켰다.

그 결과 Fig. 3.11과 같이 해저 수심을 실제 환경보다 더 깊게 예측하면 음원 위치는 실제 위치보다 더 멀고 깊게 추정하였다. 음원 위치 추정에서 바이어스의 일관성이 유지되는 오정합의 범위는 주파수 150Hz와 200Hz인 경우 약 $\pm 1.2\lambda$ 이며, 250Hz인 경우에는 -1.4λ 에서 $+2.0\lambda$ 까지 비교적 넓은 범위에서 바이어스가 일관성을 보였다. 그리고 주파수 150Hz인 경우 오정합에 따라 출력의 상관계수 값의 저하가 다른 주파수의 결과에 비해 적으나 불규칙한 음원 위치 추정을 보이고 있다. 이것은 출력 상관계수 값의 분포가 오정합에 따른 음원 위치 추정 결과에 대한 바이어스의 일관성 유지와 관계가 없음을 나타낸다.

Fig. 3.11의 (c)를 보면 수심이 106m로 예측된 경우 주파수별 추정된 음원 거리는 150Hz에서 4.45km, 200Hz에서 4.43km, 250Hz에서 4.46km이다. 따라서 거리 독립인 환경에서 신호음장의 수심을 고정하고 복제음장의 수심을 변화시킬 경우 수심의 오정합으로 인해 추정된 음원 거리의 바이어스는 식 (3.8)의 오른쪽 항의 부호가 반대되는 결과로 나타났으며, 수심의 오정합이 추정된 음원의 위치에 미치는 수심을 과다 예측할 경우 정합장치리 결과 음원의 위치는 실제 위치보다 멀고 깊게 추정하였다.

3.3.2.3 해저면 경사 오정합

해저면 경사 오정합은 해저 수심 오정합의 또 다른 형태가 될 수 있다. *D'Spain* 등은 거리중속인 환경에서 단일정상모드 모델을 사용하여 수심의 오정합이 발생할 경우 추정되는 음원의 거리와 수심을 다음과 같이 제시하였다[4].

$$\hat{z}_s = \frac{D}{d_s} z_s \quad (3.9)$$

$$\hat{r}_s = \frac{D}{d_s} r_s \quad (3.10)$$

여기에서 \hat{z}_s 와 \hat{r}_s 는 각각 추정된 음원 수심과 거리이며, D 는 예측된 음장의 수심, d_s 는 실제 음장의 수심, z_s 와 r_s 는 각각 실제 음원의 수심과 거리이다. 위의 식에서 보면 예측된 음장의 수심이 실제 음장의 수심보다 깊을 경우 추정된 음원의 위치는 모두 실제 음원 위치보다 깊고, 원거리로 추정한다.

그리고 *D'Spain* 등은 실제 음장이 해저면 경사가 없는 거리독립 환경에서 해저면 경사율이 $\hat{\alpha}$ 인 경우 거리중속 환경으로 예측한 복제음장에서의 음원 거리 추

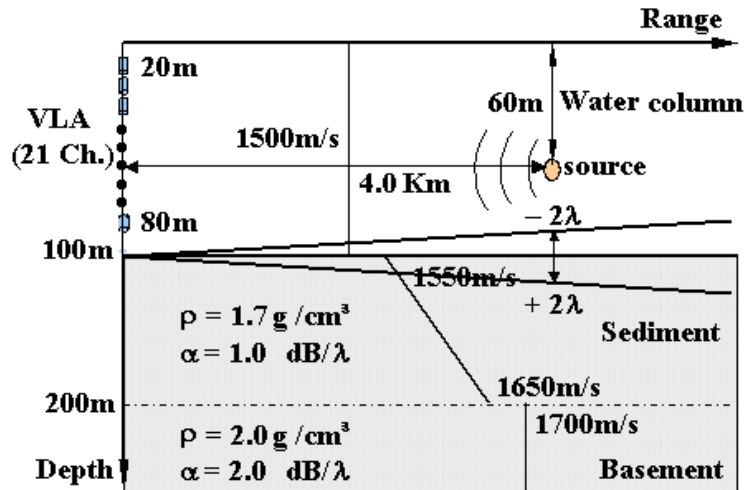


Fig. 3.12 Shallow water environment for the bathymetry case I.

정을 다음과 같이 해석하였다[4].

$$\hat{r}_0 \simeq \frac{D}{D + \hat{\alpha} R_0} R_0 \quad (3.11)$$

첫 번째 수행한 수치실험은 Fig. 3.12와 같이 거리종속인 환경에서 RAM을 사용하여 음원 거리인 4km에서의 해저수심을 100m를 기준으로 $\pm 2\lambda$ 에서 0.2λ 간격으로 변화시키며 공분산행렬을 각각 구성하였으며, 해저수심을 100m로 고정된 복제음장을 계산하기 위한 모델은 거리독립 모델인 KRAKENC를 사용하였다.

그 결과 Fig. 3.13과 같이 해저면 경사에 따라 실제 음장의 수심이 거리독립으로 예측된 복제음장의 수심보다 깊을수록 음원의 거리를 근거리로 추정하였으며, 일정한 바이어스가 유지되는 오정합의 범위는 주파수 150Hz는 -2λ 에서 $+1\lambda$ 이고, 200Hz와 250Hz에서는 -0.8λ 에서 $+1\lambda$ 의 범위를 보였다. 또한 주파수가 낮아질수록 오정합에 따른 출력의 저하는 감소하였으나, 바이어스에 미치는 영향과 출력상관 계수의 관계를 일률적으로 정의되는 값을 보이지는 않았다. 오정합의 양을 +6m로 하였을 경우 해저면 경사율은 0.0015이며, 음원 거리는 150Hz인 경우 3.8km, 200Hz인 경우 3.82km, 250Hz인 경우 3.83km를 각각 추정하였다. 식 (3.11)에 의하면 추정된 음원 거리는 약 3.77km로 계산되며, 또한 해저면 경사율 $\hat{\alpha}$ 가 실제음장의 경사율에서 복제음장의 경사율을 감한 값으로 하면 식 (3.11)과 식 (3.10)은 같은 결과를 보인다. 수치실험을 수행한 결과 값은 각각 약 30m에서 60m까지의 오차를 가지나, 이는 거리독립과 거리종속에 대해 각각 다른 음향전파 모델을 사용함으로써 발생된 결과로 오정합이 없는 경우 출력의 상관계수 값이 정확하게 '1'로 계산되지 않는 것으로 추정이 가능하다. 그리고 이러한 결과는 신호음장이 거리독립이고 복제음장이 거리종속으로 수치실험된 경우에도 같은 결과를 보이는데 이는 전달손실 모델의 상반원리(reciprocity principle)로 해석될 수 있다.

해저면 경사 오정합에 대한 다음 방법으로 Fig. 3.14와 같이 신호음장과 복제음장을 거리종속으로 가정하여 배열 위치에서 해저면 수심이 100m이고, 음원 거

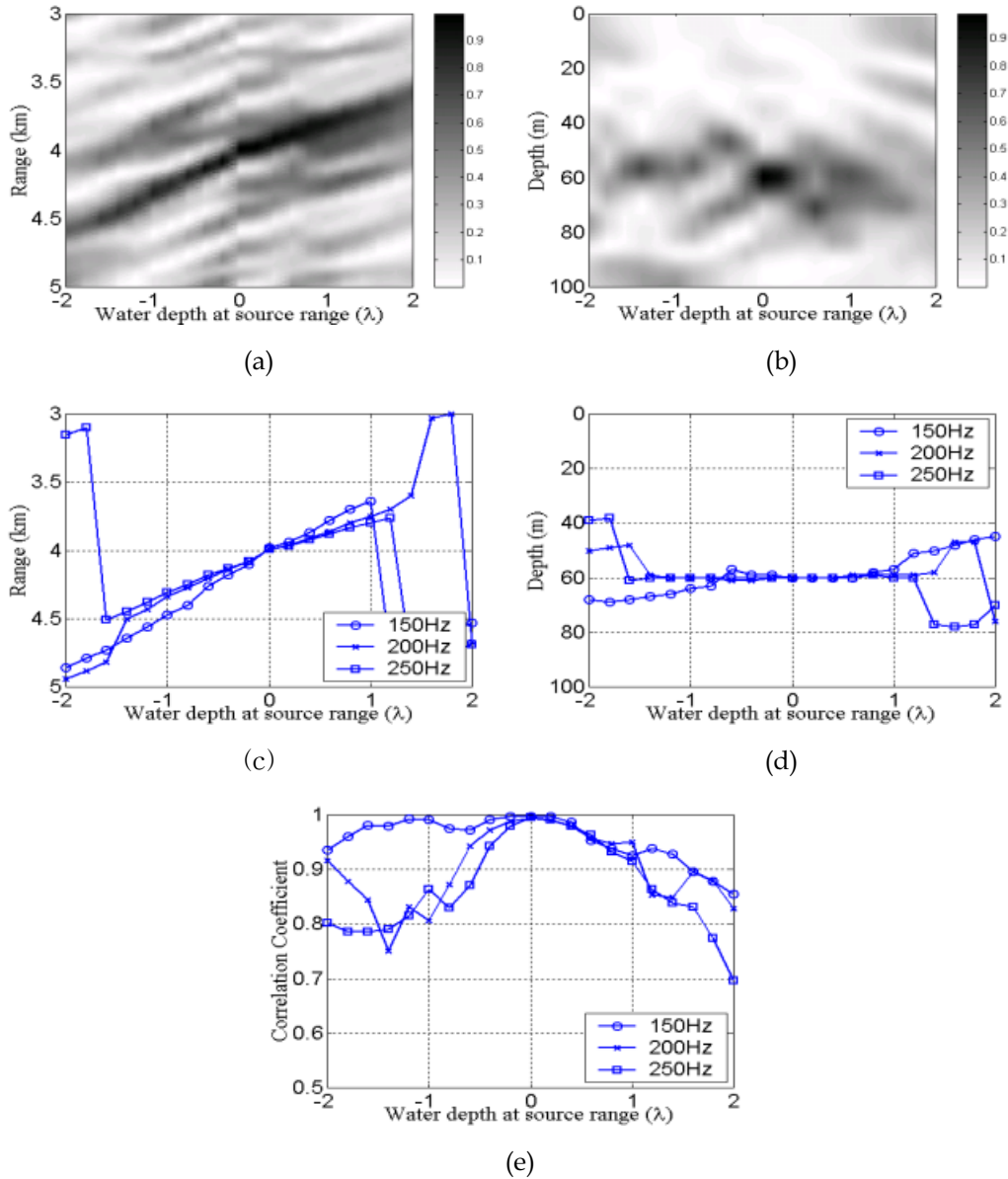


Fig. 3.13 Results of MFP for the bathymetry mismatch case I (signal field : range dependent, replica field : range independent). (a) Ambiguity surface as function of the water depth and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the water depth and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

리 4km에서 해저면 수심이 120m로 경사진 환경에서 모의신호의 공분산행렬을 구성하고, 복제음장을 위한 환경은 음원 거리 4km에서 $\pm 2\lambda$ 에서 0.2λ 간격으로 변화시키며 수치실험을 하였다.

그 결과 Fig. 3.15와 같이 복제음장이 실제 음장에 비교해 경사가 많은 것으로 예측된 경우, 즉 복제음장의 수심이 더 깊은 경우에 음원을 원거리와 얕은 수심으로 추정하였다. 그리고 일정한 바이어스가 유지되는 오정합의 범위는 주파수 150Hz와 200Hz는 -1λ 에서 $+0.8\lambda$ 이고, 250Hz에서는 -1.4λ 에서 $+1\lambda$ 의 범위를 보였다.

앞에서 실험된 모의 신호음장이 거리종속이고 복제음장은 거리독립인 환경의 경우와 비교할 때 주파수가 증가할수록 일정한 바이어스가 유지되는 오정합의 범위가 증가함을 보였다. 각 주파수에 대한 오정합의 양을 +6m로 가정할 경우 음원 거리는 150Hz에서 4.26km, 200Hz에서 4.25km, 250Hz에서 4.31km를 추정하였으며, 오정합의 양을 -6m로 가정할 경우 주파수에 따라 3.78km에서 3.8km 사이의 값을 보였다. 식 (3.10)과 식(3.11)로 계산한 이론적인 음원 거리 추정값은 오정합의 양이 +6m일 경우 4.2km이고 -6m일 경우 3.8km이다. 따라서 해저면 경사 오정합의 양이 양(+의 값으로 증가될 경우에 추정된 음원 거리의 오차가 증가되는 결과를 보였다.

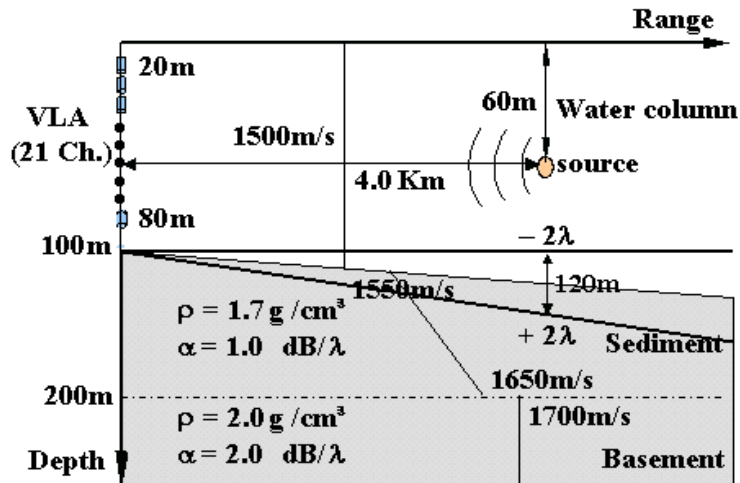


Fig. 3.14 Shallow water environment for the bathymetry case II.

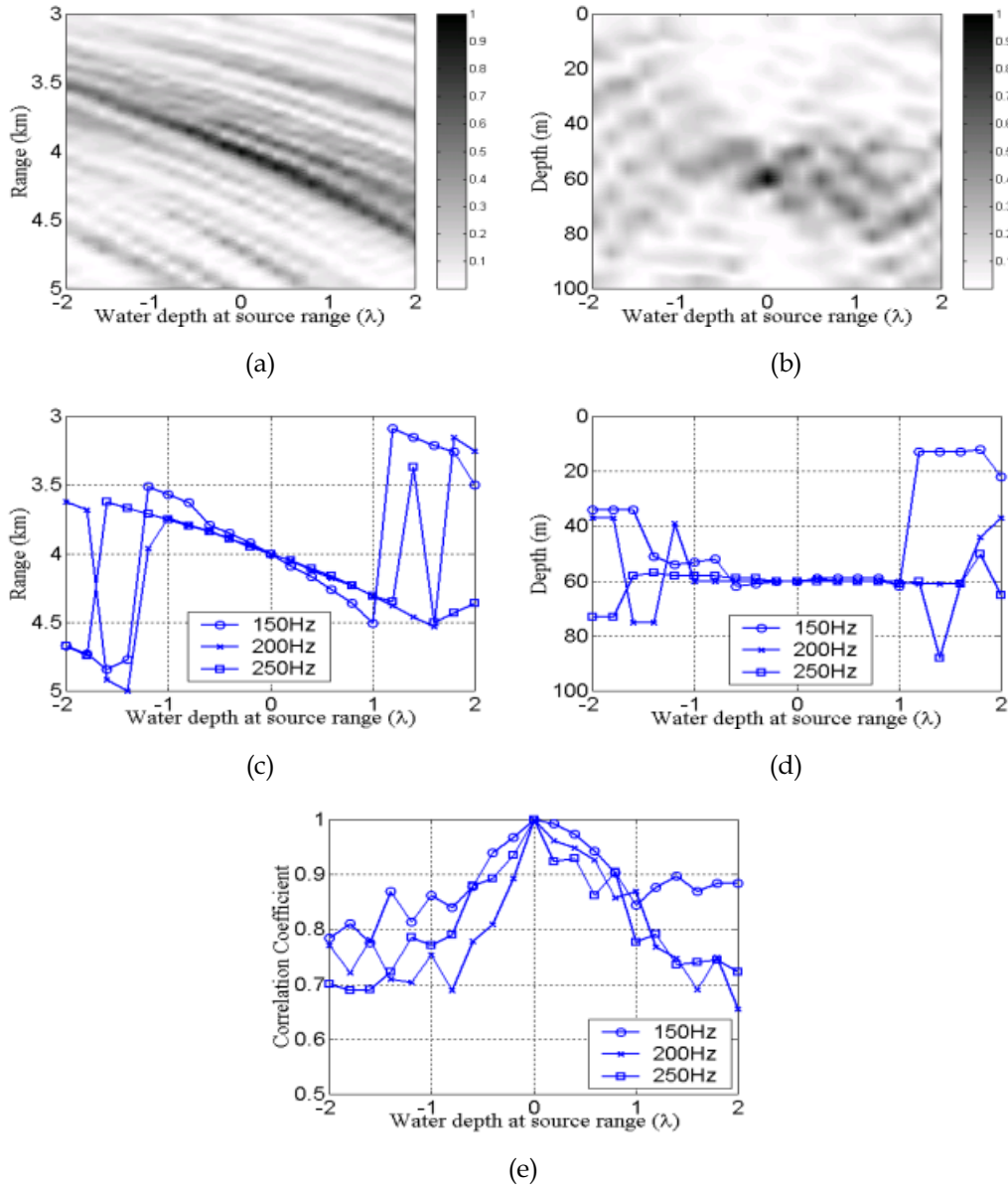


Fig. 3.15 Results of MFP for the bathymetry mismatch case II (signal and replica field : range dependent). (a) Ambiguity surface as function of the water depth and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the water depth and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

3.3.3 해저퇴적층 매개변수 오정합

일반적으로 해양환경에서 해저퇴적층은 다수의 층으로 구성된다. 해저표층은 조성에 따라 자갈과 모래, 펄 등으로 구분되어 이에 상응하는 지음향계수 값을 가지며, 하층으로 깊어질수록 밀도와 감쇠계수 값이 증가된다. 정확한 해저음장을 모사하기 위해서는 각각의 층을 구체적으로 다루어야겠지만 거리에 종속적으로 변화하는 층의 두께와 각각의 지음향계수를 모사하는 것은 현실적으로 제약이 많다. 따라서 해양 음장에서 해저퇴적층을 모사하는 것은 다른 매개변수도 마찬가지로 하지만 음원과 수신기 사이의 대표값으로 간략화하여 음장을 모델링한다.

본 논문에서는 Fig. 3.1과 같이 수층과 기반암으로 가정된 해저층 사이에 두께가 100m인 한 개의 해저퇴적층으로 대표된 모델을 가정하였으며, 밀도는 1.7 g/cm^3 , 감쇠계수는 $1.0 \text{ dB}/\lambda$ 로 하여 각각의 매개변수 오정합에 대해 정합장 처리를 수행하였다.

3.3.3.1 해저퇴적층 두께 오정합

해저퇴적층의 두께에 대한 오정합의 영향을 살펴보기 위한 수치실험은 해저퇴적층 두께 100m를 기준으로 해당 주파수에 따른 $\pm 5\lambda$ 의 범위에서 0.5λ 만큼 변화시키며 수행하였다.

그 결과 Fig. 3.16에서와 같이 오정합에 대해 매우 높은 출력 상관 계수값을 보이며 추정된 음원 수심의 오차는 없었다. 오정합이 음의 값으로 증가될수록 음원 거리는 근거리를 추정하였고, 예측된 퇴적층의 두께가 실제음장의 두께보다 두꺼울 경우에 음원 거리는 원거리를 추정하였으며, 전반적으로 오정합에 따른 영향은 매우 적었다. 그리고 오정합에 따라 추정된 음원의 거리와 수심의 위치 바이어스가 적음으로 인해 Fig. 3.16의 (a) 및 (b)와 같이 오정합과 거리 및 수심의 정합 출력장은 각각 음원의 위치에서 매우 강한 상관관계를 보였다.

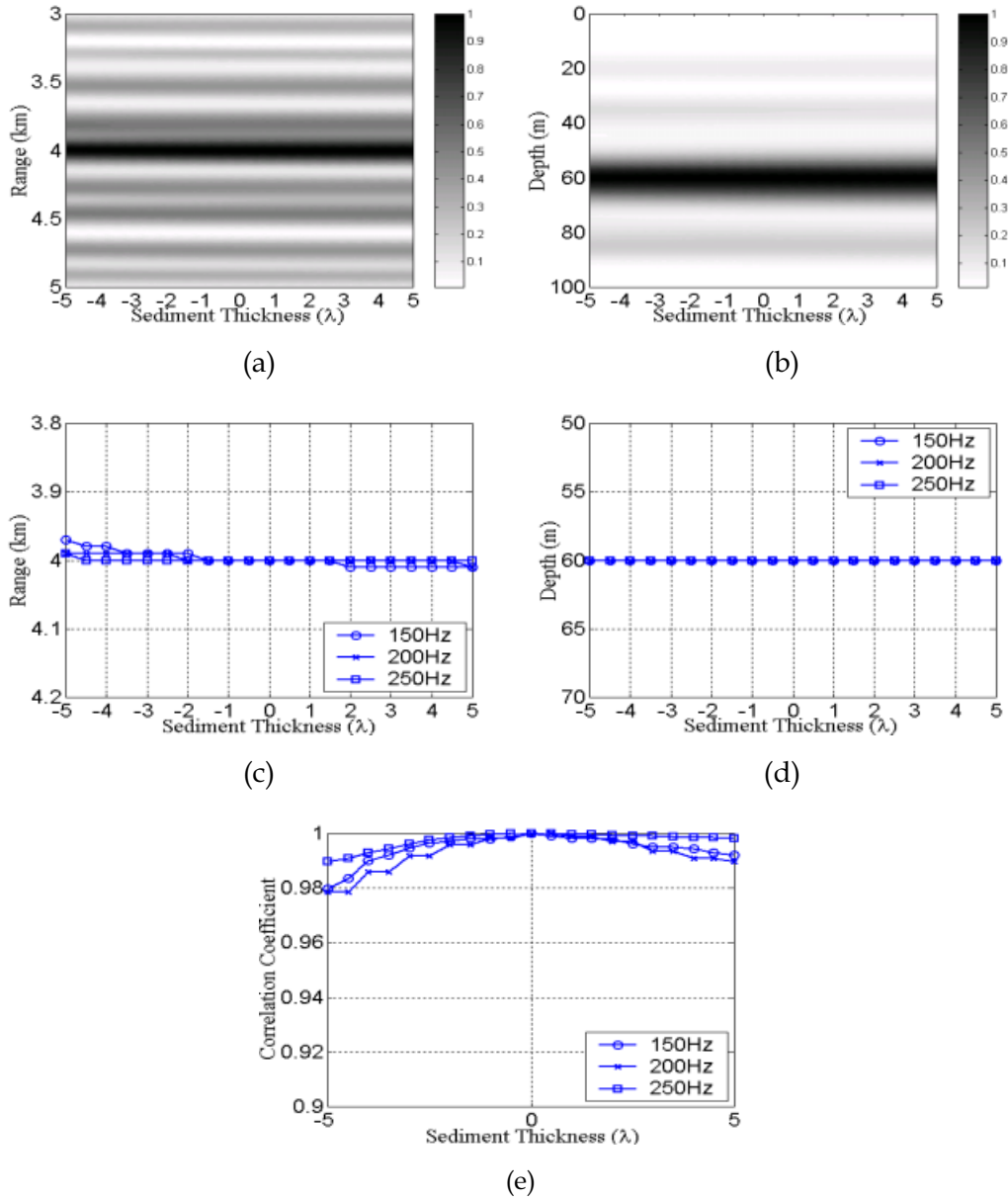


Fig. 3.16 Results of MFP for the sediment thickness mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the sediment thickness and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the sediment thickness and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

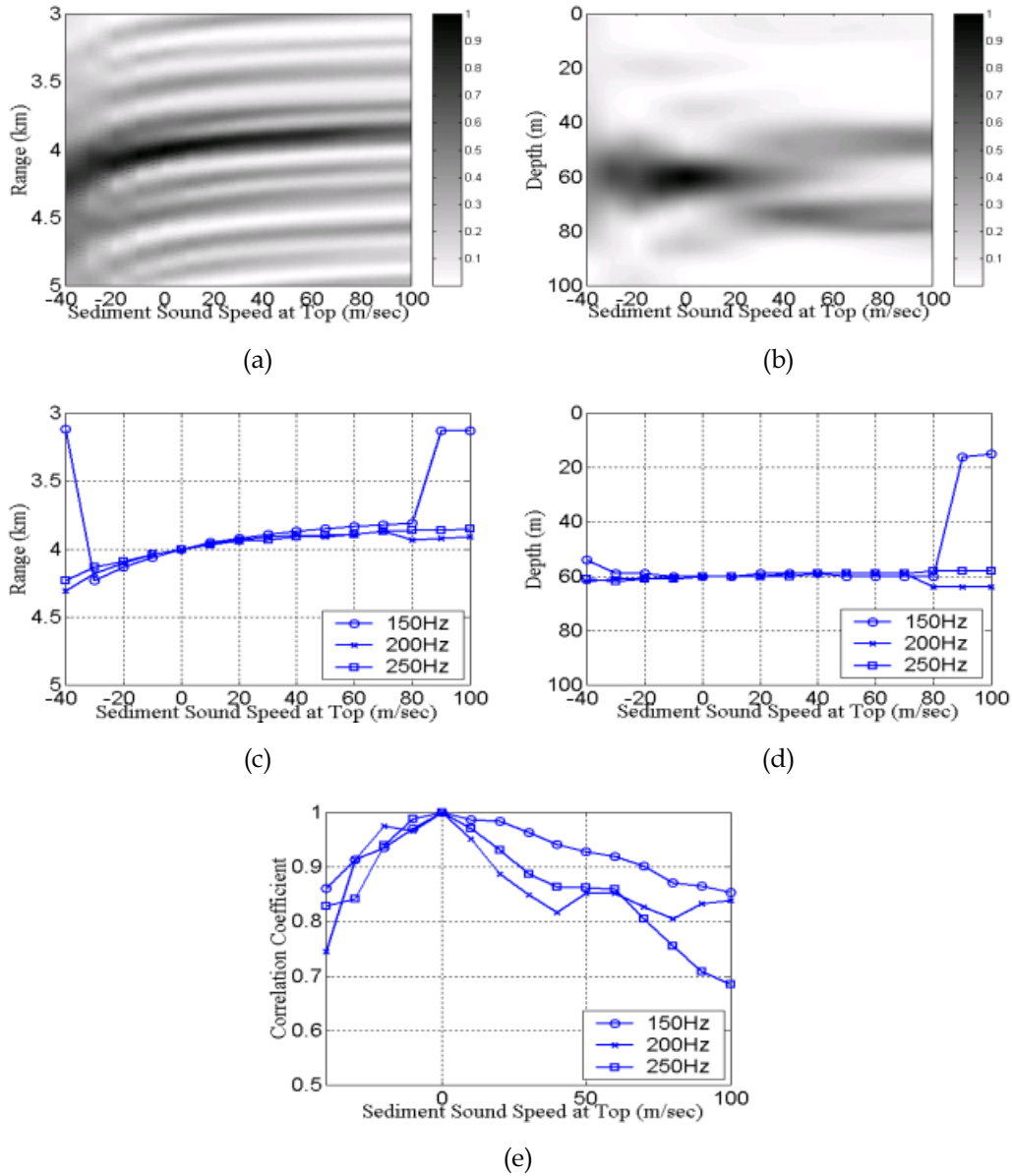


Fig. 3.17 Results of MFP for the mismatch of the sediment sound speed at top. (a) Ambiguity surface as function of the sediment sound speed at top and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the sediment sound speed at top and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

3.3.3.2 해저퇴적층 상부 음속 오정합

해저퇴적층 상부 음속 오정합에 대한 범위는 1550m/sec를 기준으로 -40~+100m/sec를 10m/sec씩 변화시키며 수치실험 하였다.

그 결과 Fig. 3.17에서와 같이 해저퇴적층의 다른 매개변수 오정합에 비교하여 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 퇴적층의 음속이 증가할수록 음원 거리를 근거리로 추정하였으며, 비교적 음원 수심 추정의 오차는 적었다. 수치실험된 오정합의 범위에서 추정된 음원 위치의 오차는 거리에서 약 300m 이내였고, 수심은 5m 미만이었다. 동일한 음속 오정합에 대한 주파수별 차이는 저주파일수록 추정된 음원 위치 오차가 증가하였다. 오정합의 증가에 따라 수심의 바이어스보다 거리의 바이어스가 많음으로 인해 Fig. 3.17의 (a)에서와 같이 음속 오정합과 거리의 정합출력장은 넓은 범위에서 높은 상관계수 값을 가지나, (b)에서 오정합과 수심의 정합출력장은 좁은 범위에서 높은 상관계수 값을 보였다. 따라서 해저퇴적층의 음향 매개변수 중에서 퇴적층 상부의 음속은 비교적 정확하게 파악해야 됨을 확인할 수 있었다.

3.3.3.3 해저퇴적층 하부 음속 오정합

해저퇴적층의 하부 음속은 1650m/sec를 기준으로 -100~+50m/sec 오정합 범위에서 10m/sec 간격으로 수치실험 하였다.

Fig. 3.18의 결과에서 보듯이 오정합 범위에서 추정된 음원 위치 오차는 적었으며, 출력의 상관계수 값의 저하도 미미하여 앞에서 수행된 상부 음속 오정합과 비교되는 결과를 보였다. 결과적으로 정합장처리에서 해저퇴적층 하부 음속의 오정합은 매개변수로서의 영향이 적다.

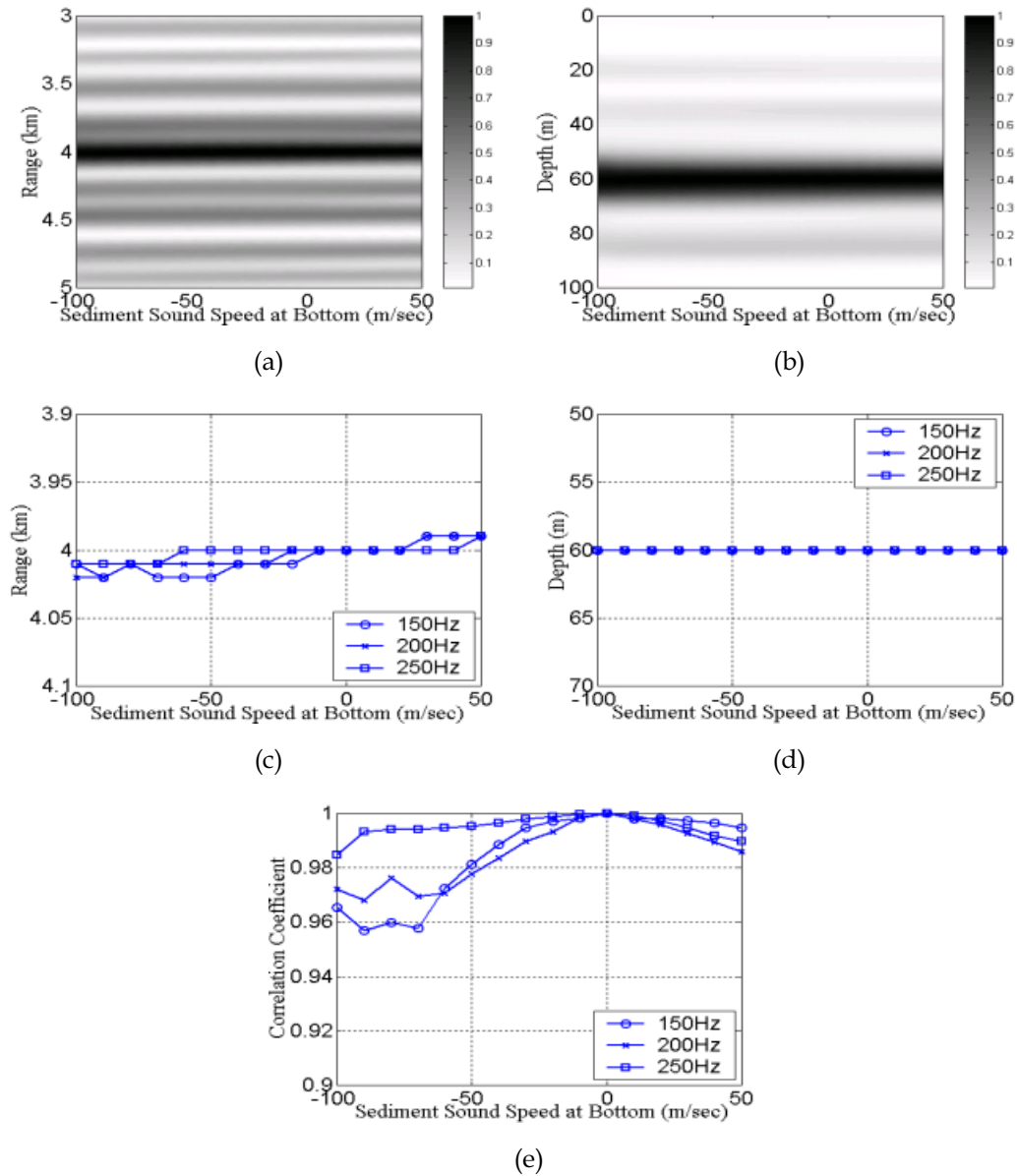


Fig. 3.18 Results of MFP for the mismatch of the sediment sound speed at bottom. (a) Ambiguity surface as function of the sediment sound speed at bottom and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the sediment sound speed at bottom and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

3.3.3.4 해저퇴적층 밀도 오정합

모의신호의 공분산행렬을 구성하기 위한 음장의 해저층 밀도를 1.7 g/cm^3 로 하였으며, 복제음장의 해저층 밀도 오정합 범위는 $-1.2 \sim +2.2 \text{ g/cm}^3$ 에서 0.1 g/cm^3 씩 변화되는 것으로 수치실험을 하였다.

그 결과 Fig. 3.19와 같이 밀도가 실제 값보다 적게 추정될수록 음원 수심을 얕고 근거리로 추정하였다. 또한 주파수가 낮아질수록 추정된 음원 위치의 바이어스가 증가하였고, 위치 바이어스의 일관성이 유지되는 오정합의 범위도 감소하였다. 다른 매개변수와 같이 오정합이 증가됨에 따라 주파수가 높아질수록 출력 상관계수 값의 저하가 심해졌다.

3.3.3.5 해저퇴적층 감쇠계수 오정합

해저퇴적층의 감쇠계수는 $1.0 \text{ dB}/\lambda$ 를 실제 음장값으로 가정하고, 오정합의 변화 범위는 $0.1 \sim 2.0 \text{ dB}/\lambda$ 에서 $0.1 \text{ dB}/\lambda$ 만큼 이동시키며 수치실험을 하였다.

그 결과 Fig. 3.20에서와 같이 해저퇴적층의 감쇠계수 오정합은 음원 수심에는 영향이 없었으나, 복제음장의 감쇠계수를 많이 예측할수록 음원의 거리를 근거리로 추정하였다. 그리고, 감쇠계수 값이 $0.1 \sim 0.3 \text{ dB}/\lambda$ 의 범위에서는 다른 오정합의 결과보다 추정된 음원 위치에 오차가 증가되며, 출력의 상관계수 값의 저하에도 많은 영향이 나타났다. 이에 반해 오정합이 양의 방향으로 증가될수록 상관계수 값의 저하가 미미하며, 추정된 음원의 위치 바이어스의 일관성도 유지되었다.

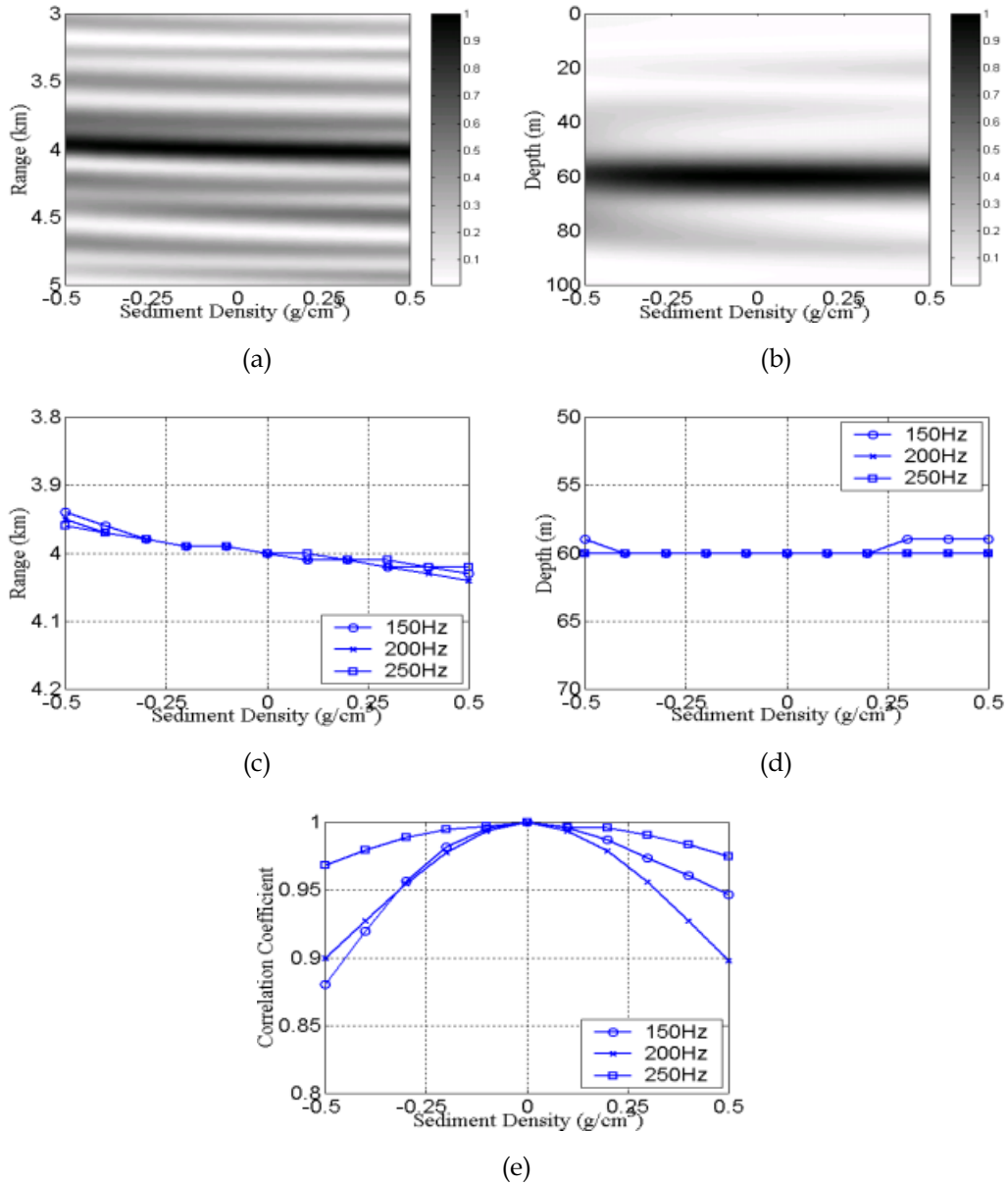


Fig. 3.19 Results of MFP for the sediment density mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the sediment density and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the sediment density and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

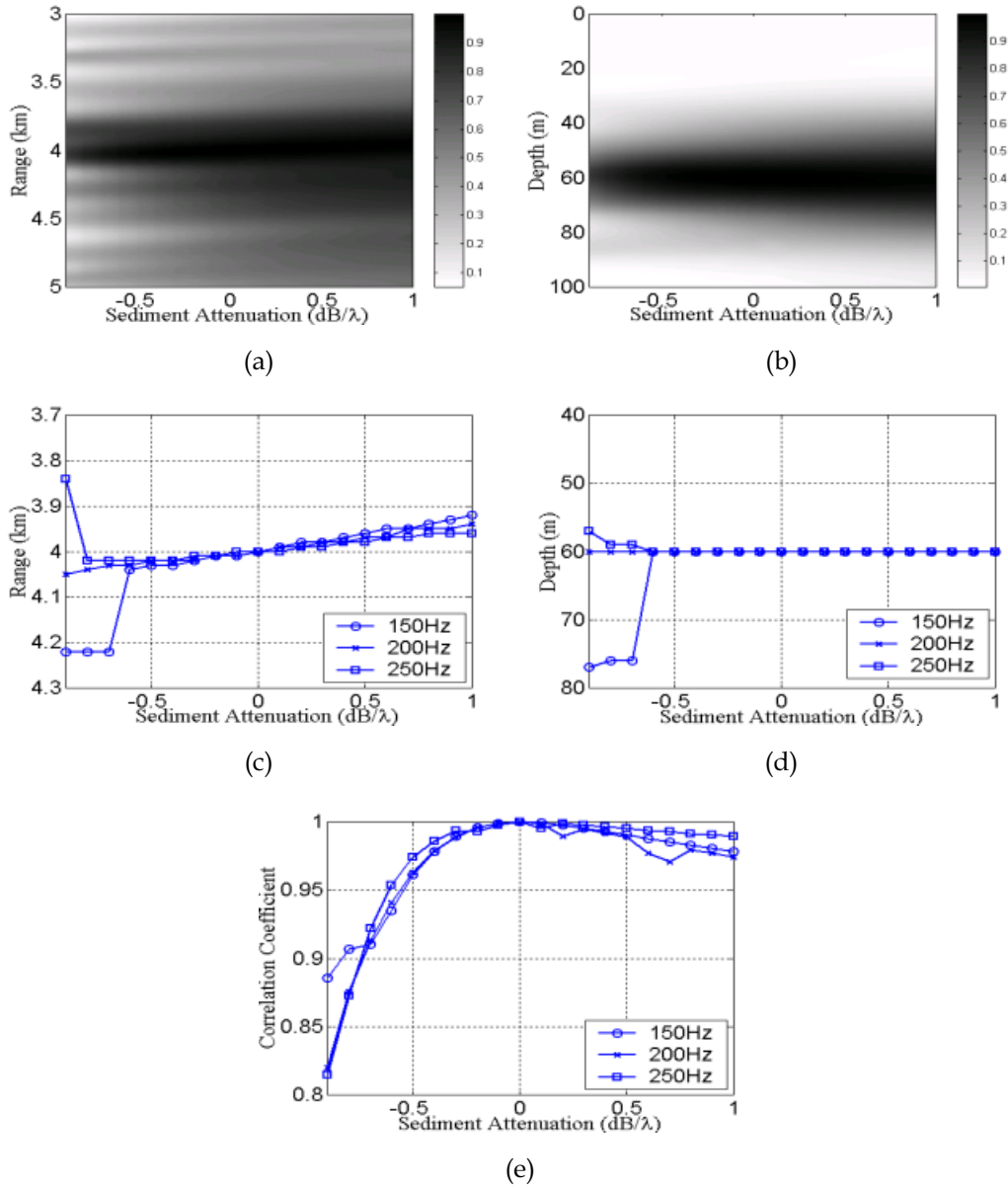


Fig. 3.20 Results of MFP for the sediment attenuation mismatch. (a) Ambiguity surface as function of the sediment attenuation and range at true source depth for the 250Hz. (b) Ambiguity surface as function of the sediment attenuation and depth at true source range for the 250Hz. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Correlation coefficients.

3.3.4 저층 매개변수 오정합

3.3.4.1 저층 음속 오정합

모의신호 음장에서 저층 음속을 1700m/sec을 기준으로 하였으며, 복제음장의 저층 음속은 1650m/sec에서 1800m/sec의 범위에서 ± 10 m/sec씩 변화되는 것으로 수치실험 하였다.

그 결과 Fig. 3.21과 같이 주파수별로 저층 음속의 오정합에 따라 추정된 음원 위치와 상관계수 값의 변화가 없음을 보였다.

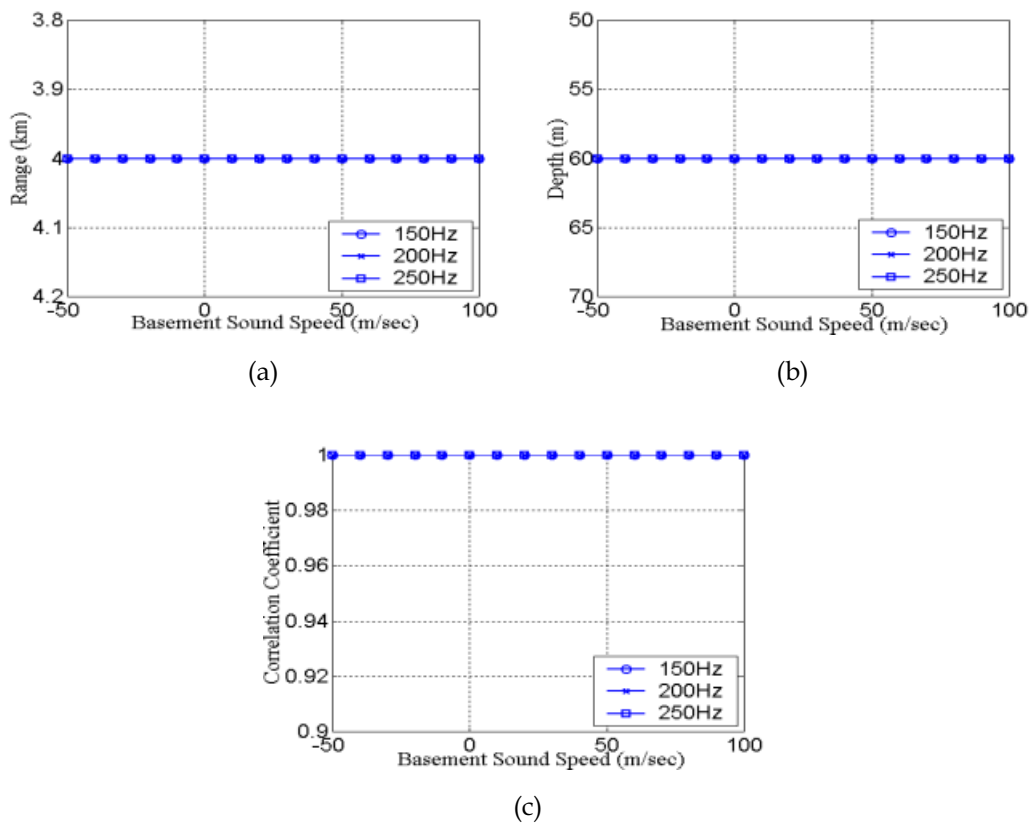


Fig. 3.21 Results of MFP for the basement sound speed mismatch. (a) Estimated source range. (b) Estimated source depth. (c) Correlation coefficients.

3.3.4.2 저층 밀도 오정합

신호벡터를 위한 음장의 저층 밀도는 2.0 g/cm^3 를 기준으로 하였으며, 복제음장의 저층 밀도 오정합 범위는 $-0.5 \sim +1.0 \text{ g/cm}^3$ 에서 0.1 g/cm^3 씩 변화되는 것으로 수치실험을 하였다.

그 결과 Fig. 3.22와 같이 저층 밀도 오정합에 의한 정합장치 처리 출력의 영향이 없는 것으로 확인되었다.

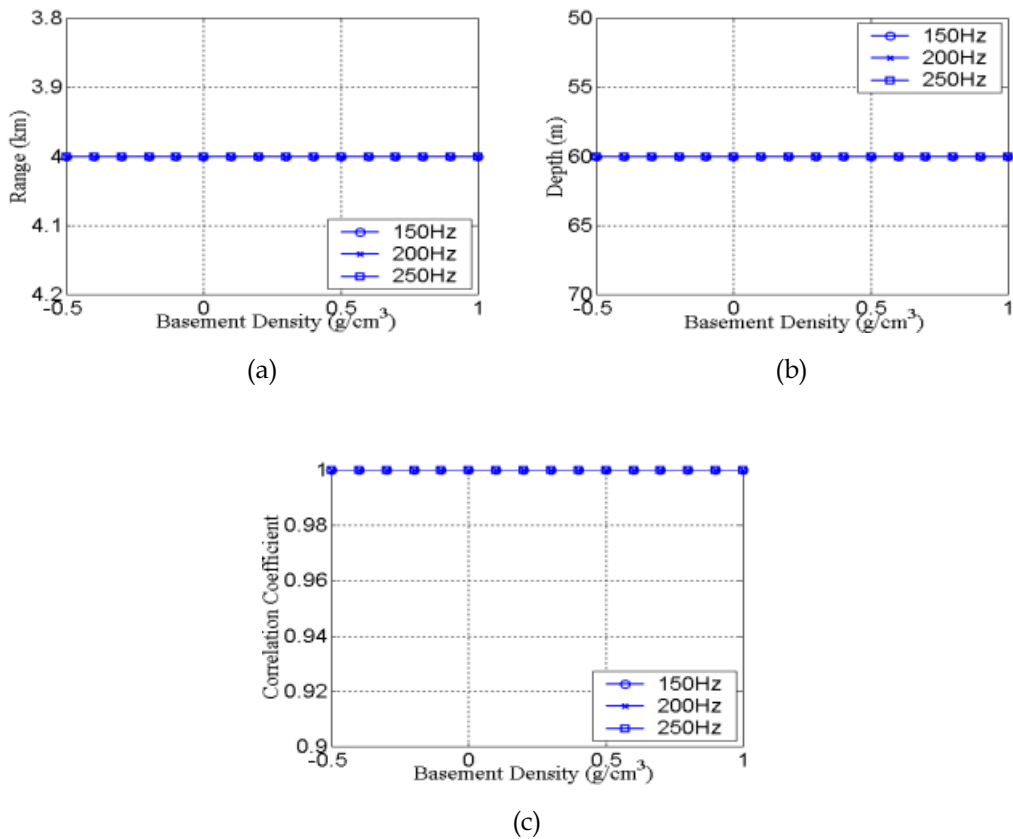


Fig. 3.22 Results of MFP for the basement density mismatch. (a) Estimated source range. (b) Estimated source depth. (c) Correlation coefficients.

3.3.4.3 저층 감쇠계수 오정합

저층의 감쇠계수는 $2.0 \text{ dB}/\lambda$ 를 실제 음장값으로 가정하고, 오정합의 범위는 신호 음장의 감쇠계수에서 $-1.0 \sim +1.0 \text{ dB}/\lambda$ 로 하여 $0.1 \text{ dB}/\lambda$ 씩 변화시키며 수치실험 하였다.

그 결과 Fig. 3.23에서와 같이 음원 위치 추정에 영향이 없는 것으로 나타났으며, 상관계수 값은 250Hz인 경우에 매우 적은 양이 감소되었으나 정합장치처리의 결과에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다.

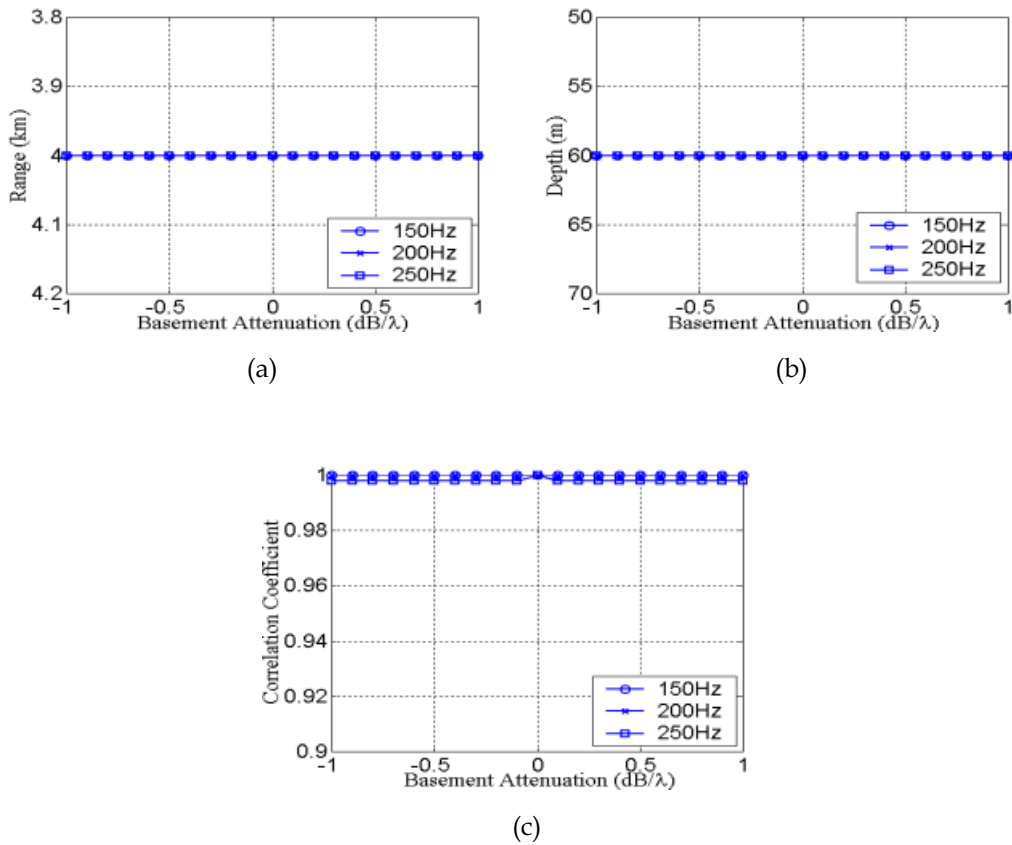


Fig. 3.23 Results of MFP for the basement attenuation mismatch. (a) Estimated source range. (b) Estimated source depth. (c) Correlation coefficients.

3.4 결합된 매개변수 오정합

예측된 복제음장을 사용하는 정합장치리는 각각의 매개변수가 배열에 수신된 신호 음장과의 오차로 인해 오정합이 종합적으로 발생된다. 따라서 앞 절에서 수행된 개별 매개변수에 대한 오정합이 다양한 매개변수 오정합 상황에서 어떤 형태의 바이어스를 유발하는가를 고찰함으로써 종합적인 오정합 상황에서 정합장치리 출력 결과를 추정하는 근거를 제공할 수 있을 것이다.

오정합의 영향으로 음원의 거리와 수심 모두에 영향을 미치는 수층의 수심을 기본적인 매개변수로 하여 배열 수심과 배열 경사, 해저층 음속, 해저층 밀도를 각각 결합한 두 가지 종류의 오정합 상황에 대해 수치실험을 하였으며, 주파수는 250Hz이고 선형 프로세서를 사용하였다. 수치실험 환경은 용이한 해석을 위해 Fig. 3.24와 같이 Pekeris 환경으로 하였다.

수치실험 결과에 대한 그림의 구성은 개별 매개변수 오정합에 대한 추정된 음원 거리와 음원 수심을 나타내었으며, 결합된 매개변수 오정합에서의 추정된 음원 거리와 음원 수심의 결과를 나타내었다. 수층 수심과 결합된 나머지 매개변수들에 대한 그림은 결합된 오정합을 해석하기 용이하도록 x축과 y축을 바꾸어서 해당

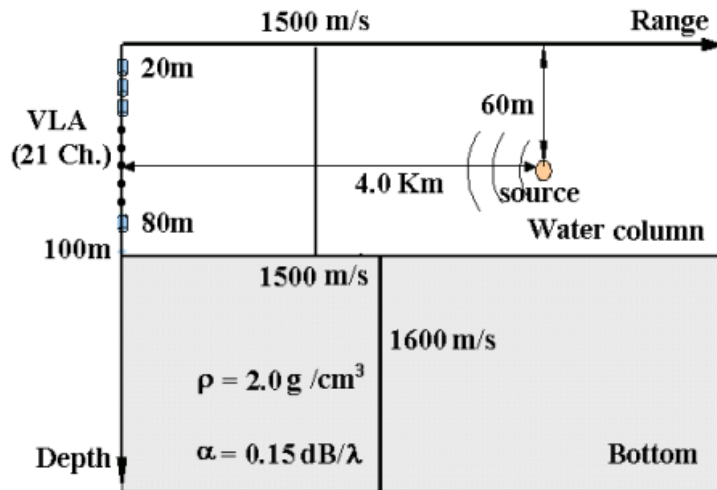


Fig. 3.24 A schematic of the Pekeris waveguide.

매개변수의 오정합 범위를 y 축에 나타내었다. 결합된 오정합의 그림에서 추정된 음원 거리는 3km에서 5km까지 100m 간격으로 표시하였으며, 음원 수심은 50m에서 70m까지 1m 간격으로 표시하였다.

3.4.1 수층 수심과 배열 수심과의 오정합

수층의 수심은 100m를 기준으로 $\pm 2\lambda$, 20m에서 80m까지 설치된 배열 수심을 기준으로 상하로 $\pm 1\lambda$ 의 범위에서 변화되는 오정합의 영향에 대해 수치실험을 하였다.

Fig. 3.25의 (a)와 (b)의 결과에서와 같이 수층의 수심이 증가될수록 추정된 음원의 수심과 거리가 증가되며, (c)와 (d)와 같이 배열 수심이 일정한 범위까지 증가될수록 추정된 음원의 거리는 감소되나 음원의 수심은 변화가 없는 개별적인 매개변수 오정합의 특성을 갖는다. 따라서 두 매개변수가 결합된 오정합은 모두 증가되는 쪽으로 강한 출력 상관계수 값의 분포를 보이며, 그 영향으로 추정된 음원 위치는 대각선 방향으로 일정한 바이어스가 유지되는 현상을 보였다. 또한 수층 수심의 오정합이 강하게 영향을 미치므로 수층의 수심이 일정하게 바이어스가 발생하는 오정합 범위에서 배열 수심의 오정합에 의한 영향이 부분적으로 포함되어 나타났다.

3.4.2 수층 수심과 배열 경사와의 오정합

수층의 수심은 100m를 기준으로 $\pm 2\lambda$, 배열 경사는 오정합의 영향으로 인하여 배열 형상이 직선으로 경사지고, 해저면 쪽이 고정된 것으로 가정하여 음원 위치를 중심으로 전후로 $\pm 1\lambda$ 의 범위에서 변화되는 것으로 수치실험 하였다.

그 결과 Fig. 3.26과 같이 배열 경사에 대한 오정합의 영향으로 약 $\pm 5\lambda$ 이내에서 일정한 음원 위치 바이어스가 유지되기 때문에 이러한 범위 내에서 수층 수심이 증가되면 추정된 음원의 거리와 수심이 증가되는 오정합의 결과를 보였다. 따라서 수층의 수심과 결합된 배열 경사에 대한 오정합은 다른 매개변수와 결합된 오정합의 경우에 비교해 상대적으로 좁은 범위로 한정되는 출력 상관계수 값의 분포를 보였다.

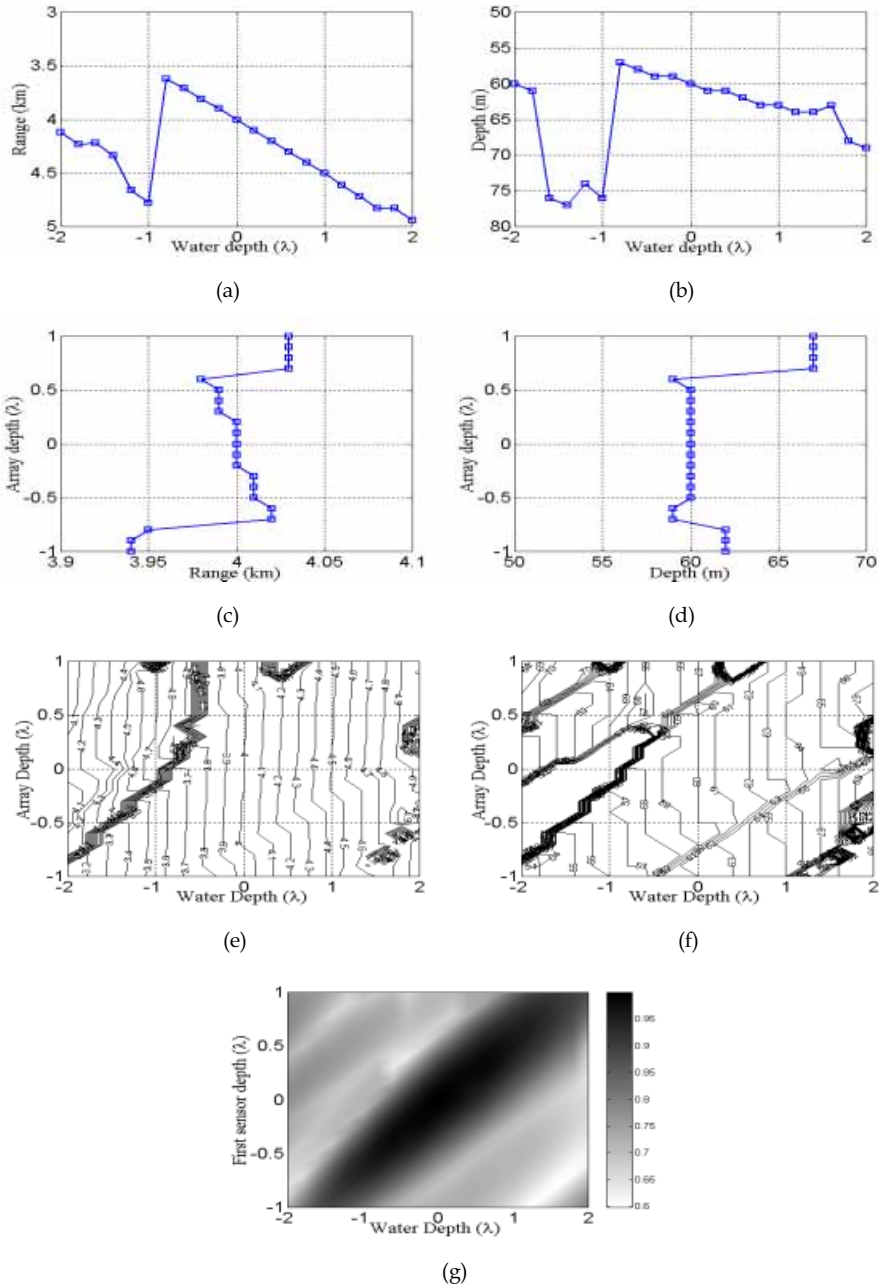


Fig. 3.25 Results of MFP as function of water depth and array depth mismatch. (a) Estimated source range for the mismatch of the water depth. (b) Estimated source depth for the mismatch of the water depth. (c) Estimated source range for the mismatch of the array depth. (d) Estimated source depth for the mismatch of the array depth. (e) Estimated source range. (f) Estimated source depth. (g) Contour of the correlation coefficients.

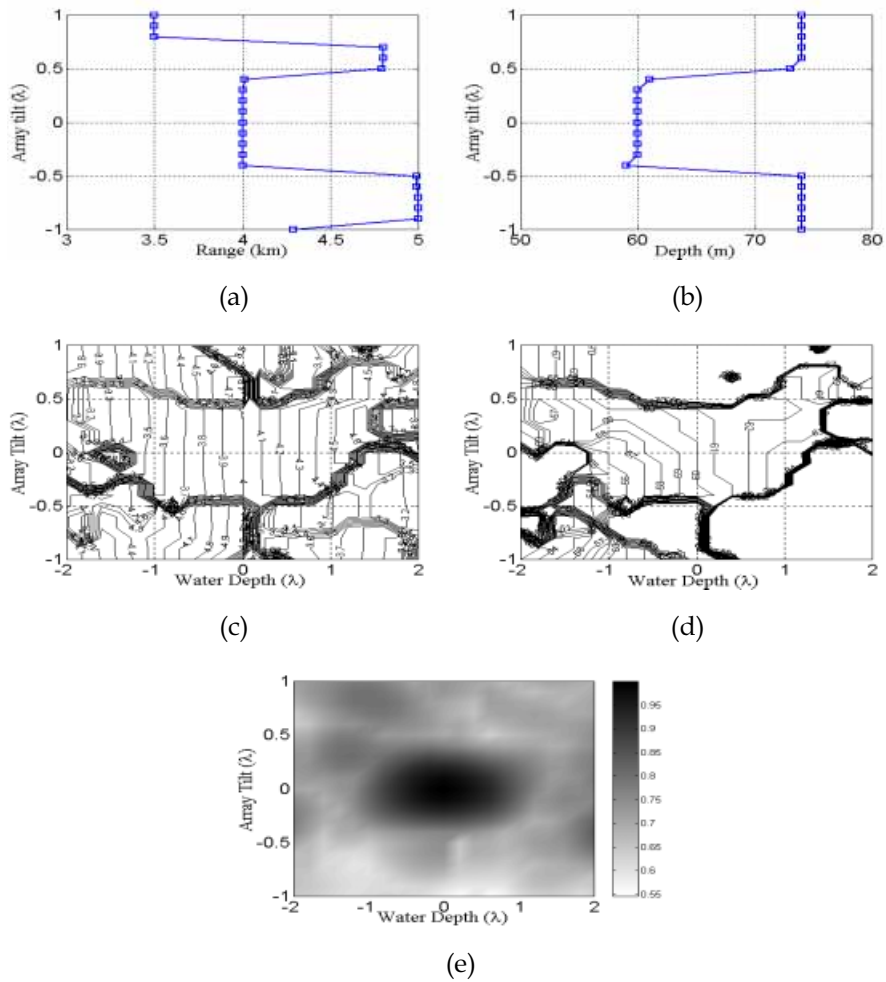


Fig. 3.26 Results of MFP as function of water depth and array tilt mismatch. (a) Estimated source range for the mismatch of the array tilt. (b) Estimated source depth for the mismatch of the array tilt. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Contour of the correlation coefficients.

3.4.3 수층 수심과 해저층 음속과의 오정합

수층의 수심은 100m를 기준으로 오정합을 $\pm 2\lambda$ 의 범위로 하였으며, 해저층 음속은 1600m/sec에서 ± 50 m/sec의 범위에서 오정합의 영향을 수치실험을 하였다.

그 결과 Fig. 3.27과 같이 해저층 음속이 증가되면 추정된 음원의 거리가 감소되는 오정합의 영향을 보이며, 이러한 감소량은 수층의 수심의 변화에 비교해 상대적으로 적기 때문에 전체적으로 수층의 수심의 오정합에 의한 영향이 지배적으로 나타났다. 따라서 두 매개변수가 결합된 오정합의 출력 상관계수 값의 분포는 수층의 수심 변화에 의한 영향으로 일직선의 형태를 보인다.

3.4.4 수층 수심과 해저층 밀도와의 오정합

수층의 수심은 100m를 기준으로 $\pm 2\lambda$, 해저층 밀도는 2.0 g/cm^3 에서 $\pm 1.0 \text{ g/cm}^3$ 의 범위에서 오정합의 영향을 수치실험 하였다.

해저층 밀도에 대한 오정합의 특성은 밀도를 실제 값보다 크게 예측할수록 음원의 거리는 원거리로 추정한다. 그러나 Fig. 3.28에서 보듯이 해저층 밀도의 오정합에 의해 추정된 음원 위치의 바이어스 양은 수층 수심의 오정합과 비교해 매우 적은 양이기 때문에 두 매개변수가 결합된 오정합의 경우 정합장치리 결과는 수층의 수심 오차에 의한 결과가 지배적인 영향을 주는 형태로 나타났다. 프로세서 출력의 상관계수 값은 각 매개변수 기준값에서 오정합이 증가되는 방향으로 높은 값을 보이며, 전반적으로 수층의 수심 오정합에 의해 일정하게 바이어스가 유지되는 오정합의 분포 형태로 나타났다.

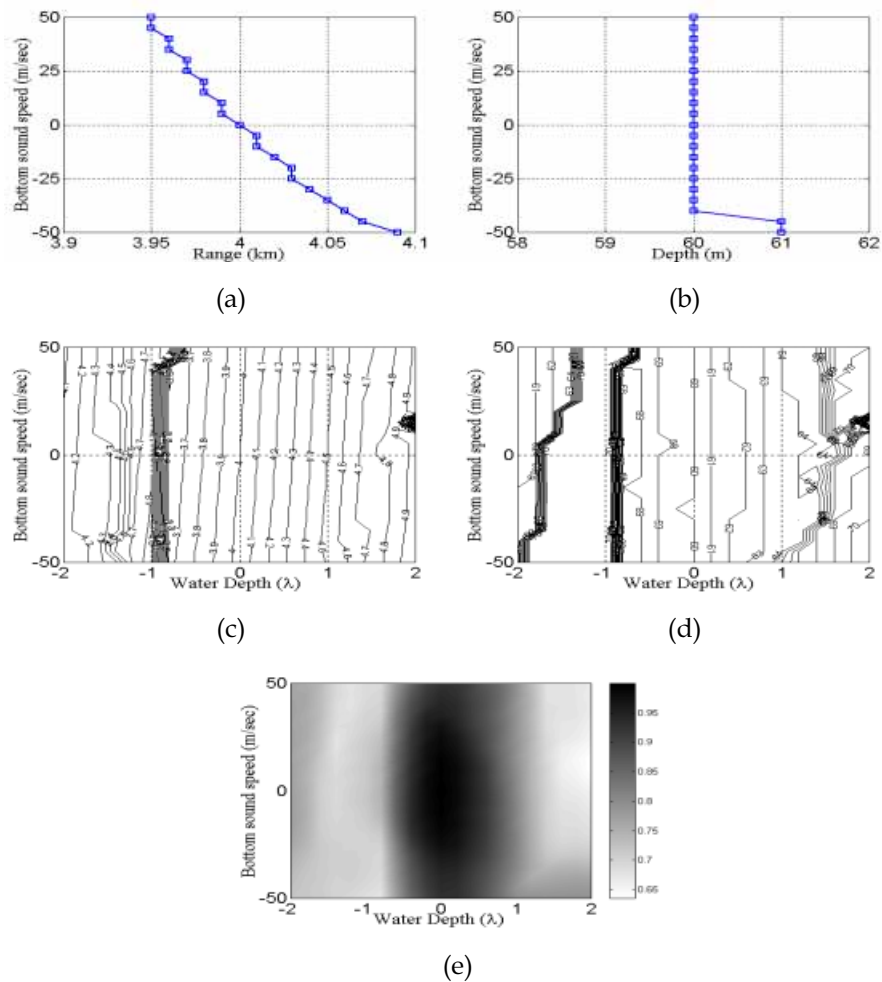


Fig. 3.27 Results of MFP as function of water depth and bottom sound speed mismatch. (a) Estimated source range for the mismatch of the bottom sound speed. (b) Estimated source depth for the mismatch of the bottom sound speed. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Contour of the correlation coefficients.

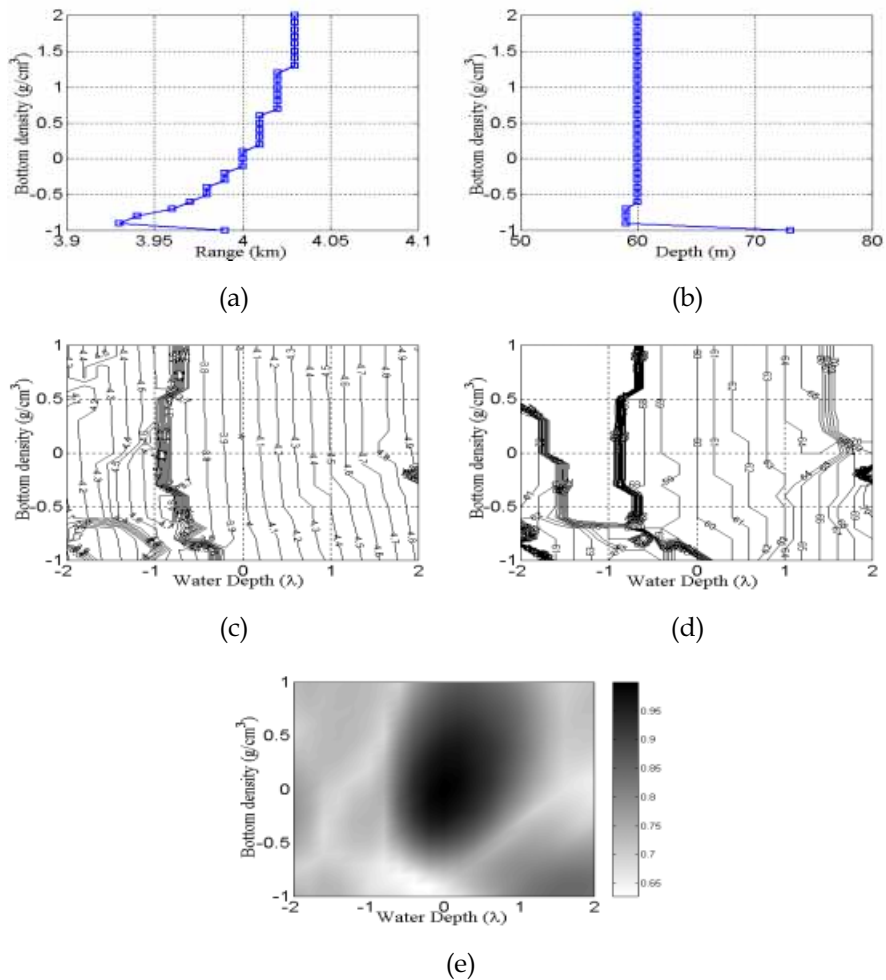


Fig. 3.28 Results of MFP as function of water depth and bottom density mismatch. (a) Estimated source range for the mismatch of the bottom density. (b) Estimated source depth for the mismatch of the bottom density. (c) Estimated source range. (d) Estimated source depth. (e) Contour of the correlation coefficients.

3.5 종합된 매개변수 오정합

실제 신호음장을 모사하여 음의 전파를 모델링하기 위해 요구되는 매개변수는 매우 다양하지만 계산량이나 효율성 그리고 환경에 대한 사전 정보 등으로 인해 한정적으로 사용될 수밖에 없다. 또한 전체적인 매개변수 오정합의 영향을 보기 위한 종합된 오정합의 상황은 표현 방법의 제한으로 각 매개변수들의 오정합들을 모두 탐색하기에는 많은 물리적 시간과 계산량이 요구되며 이러한 결과를 표현하는 방법에도 한계를 가진다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 방법중의 하나가 2.4절에서 언급한 매개변수 역산을 이용하는 것이다. 매개변수 역산은 수신된 신호와 예측된 음장을 상관시키며 다양한 매개변수들에 대해 최대 상관값을 찾는 효율적인 전역 최적화 방법으로 여러 가지 기법들이 소개되고 있다.

본 절에서는 유전자 알고리즘을 사용한 매개변수 역산으로 종합된 매개변수 오정합 상황에서 각각의 매개변수 추정값을 분석함으로써 오정합의 영향을 고찰하였다.

오정합의 영향을 살펴보기 위한 매개변수는 배열 수심, 배열 경사, 수층의 수심과 음속분포, 해저퇴적층의 두께 및 음속, 밀도, 감쇠계수 그리고 저층 음속과 밀도 및 감쇠계수를 대상으로 하였으며, 오정합의 결과가 음원 위치 추정에 미치는 영향을 보기 위해 음원의 수심과 거리를 포함하여 모두 14개의 매개변수를 대상으로 수치실험 하였다. 250Hz의 주파수에서 수층의 음속분포를 제외한 기본적인 수치실험 환경은 Fig. 3.1을 기준으로 하였으며, 수층의 음속분포는 Fig. 3.6의 (c) 및 (d)와 같이 2월과 8월의 수심별 음속 평균과 표준편차 자료를 사용하였다 [46]. 매개변수 역산을 위해 사용된 상세한 매개변수의 범위는 표 3.2와 같다.

유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 역산을 위한 목적함수는 선형 프로세서를 사용하였으며, 각 매개변수별 탐색공간의 크기는 128개로 하였다. 초기 모집단의 크기는 각 매개변수별로 32개, 재생산의 크기 $f=0.5$, 교배 비율 $p_x=0.8$, 돌연변이 비율 $p_m=0.05$ 로 하였다[35]. 사후 주변확률분포 계산을 위한 온도는 상관계수가 높은 순서로 32개의 모집단에 대해 평균한 값을 사용하였다.

Fig. 3.29와 Fig. 3.30은 한번의 역산을 수행한 2월 및 8월의 수층 음속분포에서의 매개변수를 역산한 주변확률분포로서 최대값으로 정규화한 결과이다. 최대 상

관계수 값은 각각 0.9506과 0.9314이며, 추정된 각각의 매개변수 값은 표 3.2의 마지막 부분에 나타내었다.

Fig. 3.29의 역산 결과에서 보듯이 수층의 음속분포가 수심에 따라 변동이 적은 2월의 해양환경에서 추정된 음원의 위치는 수심 52.6m, 거리 3.63km로 가정된 신호 음장의 음원 위치보다 얕은 수심과 근거리로 추정하였다. 이러한 음원 위치의 추정에 가장 큰 영향을 끼친 매개변수로는 수층의 수심이며, 그 다음으로는 해저퇴적층 상부 음속과 배열 수심 오차로 분석된다. 각각의 오정합에 따라 추정된

Table 3.2 GA parameters with search bounds and estimates.

| Model parameter | Search bound | | | Estimate | |
|---------------------------------------|--------------|------|-------|----------|--------|
| | Lower | True | Upper | February | August |
| source depth(m) | 47.4 | 60 | 72.8 | 52.6 | 63.4 |
| source range(km) | 3.37 | 4.0 | 4.64 | 3.63 | 4.17 |
| array depth(m) | 13.7 | 20 | 26.4 | 16.5 | 24.8 |
| array tilt(m) | -6.3 | 0.0 | 6.4 | 0.1 | 1.7 |
| SSP in water(σ) | -0.63 | 0.0 | 0.64 | -0.42 | 0.02 |
| water depth(m) | 93.7 | 100 | 106.4 | 94.6 | 102.8 |
| sediment thickness(m) | 31.1 | 50 | 69.2 | 53.9 | 69.2 |
| sediment sound speed at top(m/sec) | 1518.8 | 1550 | 1582 | 1524 | 1550.5 |
| sediment sound speed at bottom(m/sec) | 1618.5 | 1650 | 1682 | 1633.5 | 1618.5 |
| sediment density(g/cm ³) | 1.385 | 1.7 | 2.02 | 1.7 | 1.965 |
| sediment attenuation(dB/ λ) | 0.087 | 0.15 | 0.214 | 0.116 | 0.214 |
| basement sound speed(m/sec) | 1637 | 1700 | 1764 | 1751 | 1755 |
| basement density(g/cm ³) | 1.37 | 2.0 | 2.64 | 1.58 | 2.37 |
| basement attenuation(dB/ λ) | 0.137 | 0.2 | 0.264 | 0.19 | 0.221 |

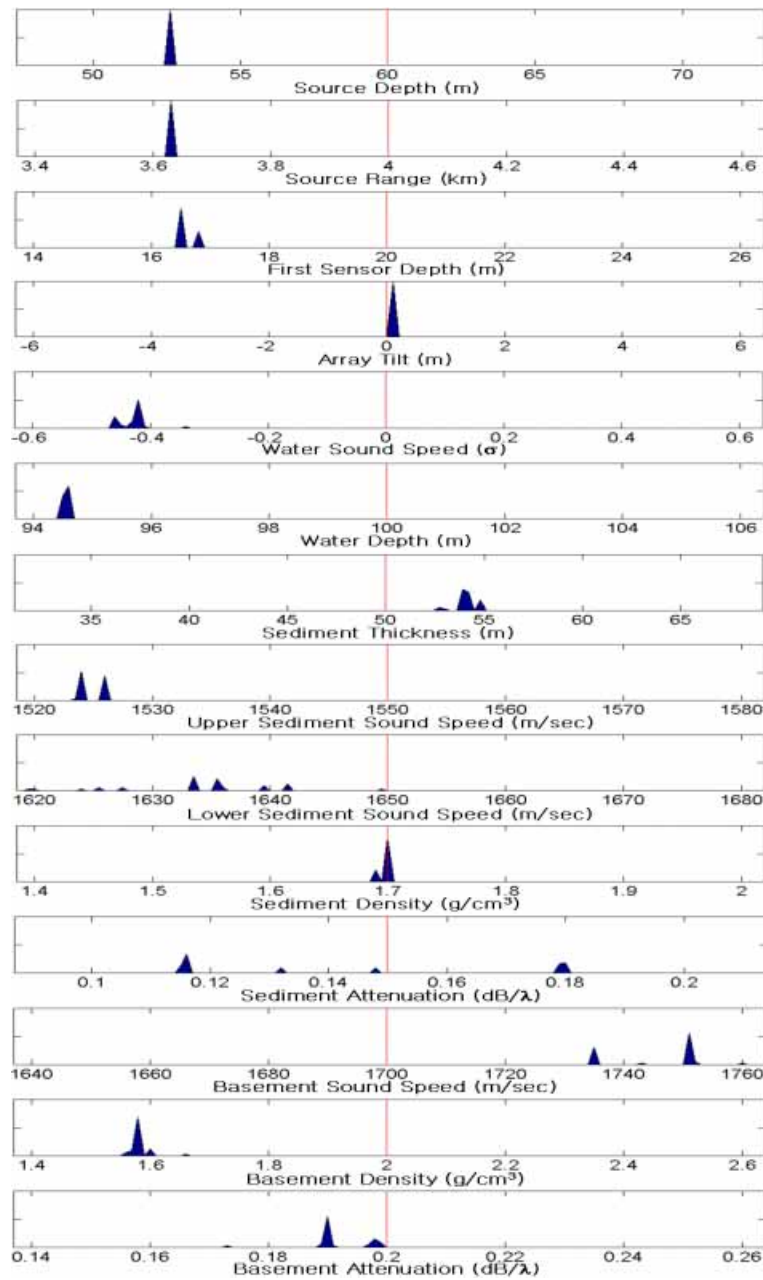


Fig. 3.29 *A posteriori* probability distribution based on the one observation for the general mismatch case using the mean SSP in February. (The solid line is the true model.)

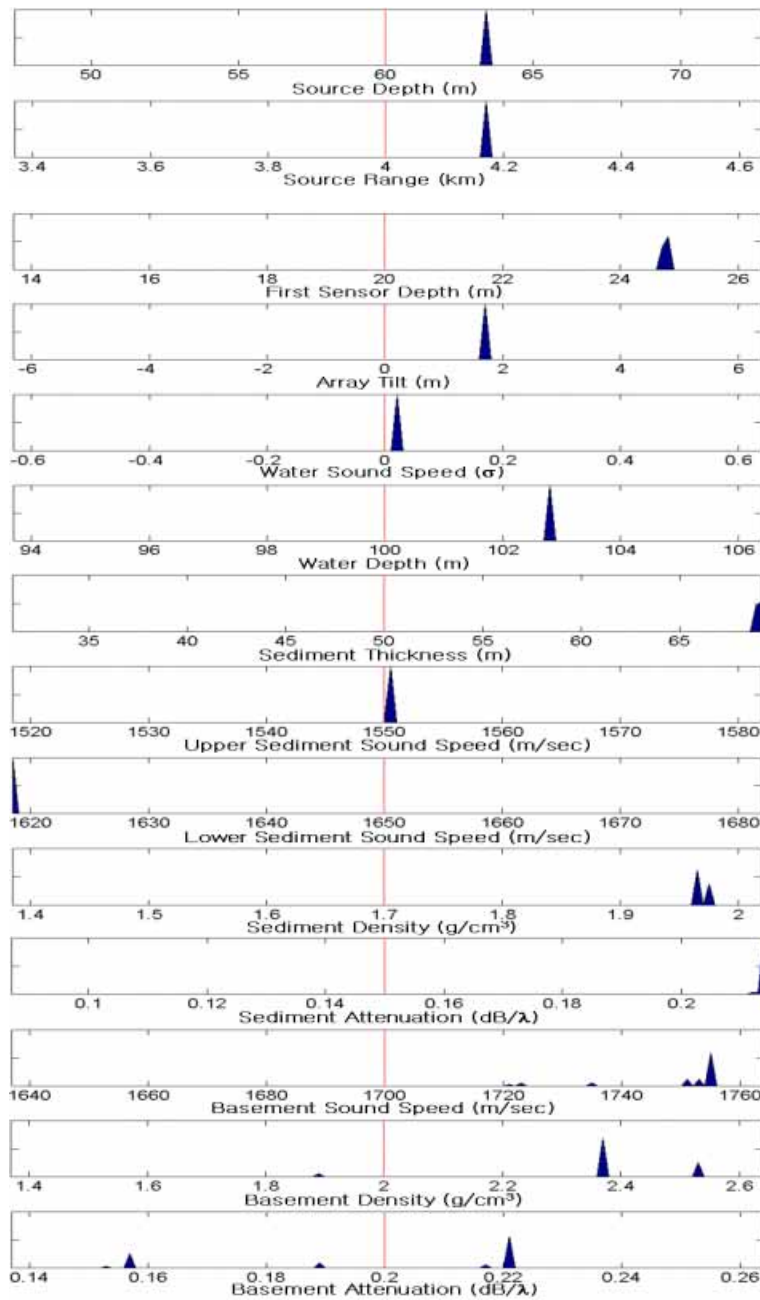


Fig. 3.30 *A posteriori* probability distribution based on the one observation for the general mismatch case using the mean SSP in August. (The solid line is the true model.)

음원의 위치 오차를 살펴보면 수층의 수심 오차가 -5.4m이므로 음원의 거리 오차는 -405m이고, 수심 오차는 -2.5m이다. 그리고 해저퇴적층 상부 음속 오차는 -3.5m/sec로 음원의 거리와 수심에서 +114m와 +1.6m의 오차를 유발하였으며, 배열 수심의 오차는 -3.5m로 음원의 위치는 -30m와 +1.83m의 거리와 수심의 오차를 발생시켰다. 기타 나머지 매개변수들의 오정합이 복합적으로 작용하여 실제 음원의 위치에서 거리는 -370m, 수심은 -7.4m의 오차가 발생되었다.

8월의 수층 음속분포에서 역산된 매개변수 추정값은 Fig. 3.30과 같다. 2월의 경우와는 상이하게 추정된 음원위치는 수심 63.4m, 거리 4.17km를 보였다. 8월의 음속분포에서도 2월의 경우와 같이 오정합에 따라 음원의 위치에 바이어스를 유발한 매개변수로는 대표적으로 수층의 수심과 해저퇴적층 배열 수심, 그리고 영향이 적지만 해저퇴적층 상부 음속과 밀도 등이었다. 이를 자세하게 살펴보면 수층의 수심 오정합은 +2.8m로 음원의 거리에 +210m, 수심에 +2.3m의 위치오차를 가져왔고, 배열 수심의 오정합은 +4.8m로 실제 음원의 위치에서 거리 +40m와 수심에 +4m의 바이어스를 유발하는 요인이 되었다. 그리고 해저퇴적층 상부의 음속과 밀도는 각각 -10m와 +10m의 거리 오차를 발생시켰다. 이러한 결과로 인해 음원은 실제 위치에서 +230m의 거리 오차와 +5.3m의 수심 오차를 보였다.

이러한 매개변수 역산 결과에서 추정된 음장의 매개변수들의 오정합의 양에 따른 음원의 위치 오차를 계산한 값과 역산된 음원의 위치가 상이한 것은 유전자 알고리즘의 사후 확률분포에 따라 평균된 매개변수 값을 사용함으로써 약간의 위치 오차가 포함된 것으로 해석된다.

이상에서 종합적인 오정합 상황을 묘사하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 역산을 수치실험 하였다. 2월과 8월의 수층의 음속분포에서 한번의 역산을 수행하여 각 월별로 추정된 음원의 위치가 가정된 신호 음장에서의 음원 위치와 반대되는 결과에 대해 고찰하였으며, 각 매개변수의 오정합이 음원 위치를 추정함에 있어서 개별적으로 영향을 주며 이러한 영향이 종합적으로 반영된 결과로 나타남을 확인하였다. 그러나 다양한 매개변수들의 오정합이 음원 위치 추정에 영향을 주는데 얼마나 민감한가를 정량화하는 것은 또 다른 중요한 문제이며 다음 장에서 다루었다.

IV. 오정합에 대한 매개변수 민감도 분석

4.1 연구 동향

정합장치처리에서 개별적인 매개변수의 오정합이 프로세서 출력에 미치는 영향을 제 3장에서 고찰하였다. 그러나 다양한 매개변수들 중에서 어떤 매개변수의 오정합이 프로세서 출력에서 추정된 음원의 위치 바이어스에 결정적인 영향을 주는가에 대해서는 별도의 매개변수 민감도 분석 과정이 필요하다. 이러한 이유로 매개변수들의 오정합에 대한 민감도를 정량화하기 위한 연구들이 수행되어져 왔다. 따라서 본 절에서는 정합장치처리에서 연구되었던 주요한 매개변수의 민감도 분석에 대해 소개하고자 한다.

*Gingras*는 선형 프로세서와 최소분산 프로세서를 사용하여 백색잡음에 의한 신호 대 잡음비와 음속분포 오차 및 배열 센서 위치 오차에 대한 프로세서 출력의 민감도를 수심과 거리의 탐색공간에서 최대값의 출력비를 다음과 같이 사용하여 분석하였다[42].

$$\rho(\omega; S) = \frac{\hat{P}[\hat{\mathbf{w}}(\omega; S)]}{\hat{P}[\mathbf{w}(\omega; S)]} \quad (4.1)$$

여기에서 $\hat{P}[\cdot]$ 는 프로세서 출력응답, S 는 음원 위치에 관한 매개변수이고, $\hat{\mathbf{w}}(\omega; S)$ 는 오차가 포함된 복제음장이며, $\mathbf{w}(\omega; S)$ 는 오차가 없는 기준 복제음장이다. 오정합이 없는 경우 $\hat{\mathbf{w}}(\omega; S) = \mathbf{w}(\omega; S)$ 가 되므로 $\rho(\omega; S) = 1$ 이 된다. 수치실험 결과에서 선형 프로세서가 최소분산 프로세서에 비해 오정합에 둔감하며 출력의 저하가 상대적으로 적음을 보였다.

Musil 등은 거리중속 환경의 종합적인 오정합 상황에서 DSA(Downhill Simplex Algorithm) 기법을 사용한 매개변수 역산으로 개별 매개변수들의 민감도를 분석하였는데, 각각의 매개변수에 대한 민감도 계수(S_{pdc})를 다음과 같이 정

의하여 분석하였다[50].

$$Spdc_i = \frac{\sqrt{12} s_i}{w_i}$$

(4.2)

여기에서 i 는 탐색하고자 하는 매개변수이며, w_i 는 매개변수별 탐색영역에서 상위 경계에서 하위 경계를 감한 범위이며, s_i 는 역산된 매개변수의 표준편차이다.

수층의 음속은 수심에 따라 1500m/sec로 일정하다고 가정하여 수층의 수심에 거리에 따라 알아지는 거리중속 환경에서 수치실험한 결과 배열 경사가 가장 민감하고, 다음으로는 음원의 깊이, 수층의 수심, 그리고 음원의 거리가 민감하며, 해저퇴적층의 두께가 가장 둔감한 매개변수임을 보였다.

4.2 매개변수 민감도 분석 결과

종합적인 오정합 상황에서 매개변수들의 민감도를 계산하기 위해 2.4절과 3.5절에서와 같이 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 역산을 수행하였다. 사용된 주파수는 250Hz이고, 거리독립인 환경으로 가정하였으며, 수층의 음속분포는 Fig. 3.6의 (c)와 (d)와 같이 2월과 8월의 평균 음속분포와 표준편차를 사용하였다. 매개변수만의 오정합 영향을 보기 위하여 음원의 위치는 수심 60m, 거리 4km로 고정하였으며, 50회의 독립적인 역산을 수행하였다.

개별 매개변수 오정합의 결과에서 보듯이 오정합에 따라 바이어스에 일관성이 유지되는 출력 상관계수 값은 250Hz인 경우 최소 0.9 이상의 값을 가져야 함에 따라 바이어스의 일관성이 유지되는 안정적인 범위인 상관계수 값 0.95 이상을 종결조건으로 한 결과 2월과 8월의 수층 음속분포에서 주변확률분포는 Fig. 4.1 및 Fig. 4.2와 같다. 여기에서 매개변수별로 중앙에 표시한 수직선은 모의신호의 공분산행렬을 계산하기 위한 매개변수들의 기준 값을 나타낸다.

민감도를 계산하기 위해 50회의 역산 결과에서 상관계수 값이 최대인 값을 매

개변수별 탐색공간에서 신호 음장으로 가정된 값과 비교한 결과는 Fig. 4.3과 Fig.

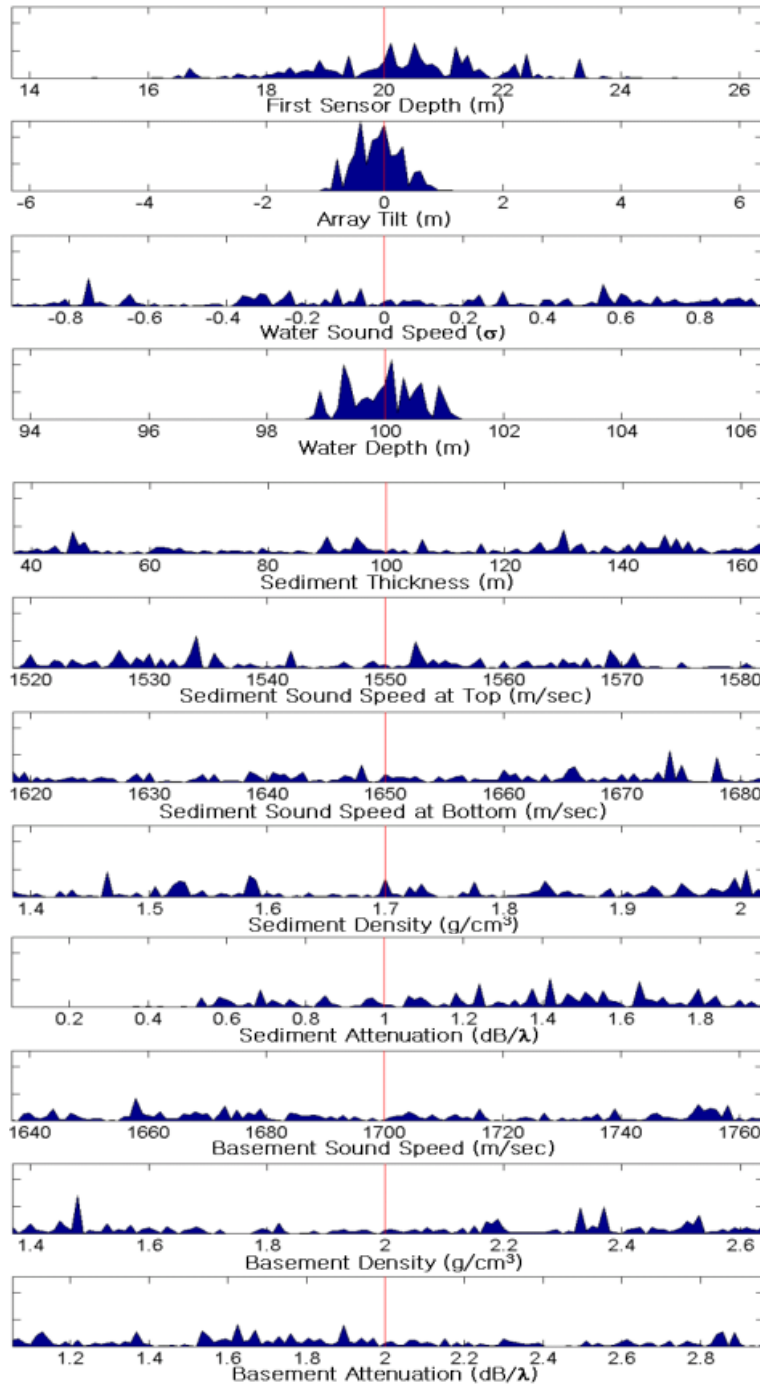


Fig. 4.1 Marginal *a posteriori* distribution based on the 50 observations using

the mean SSP in February.

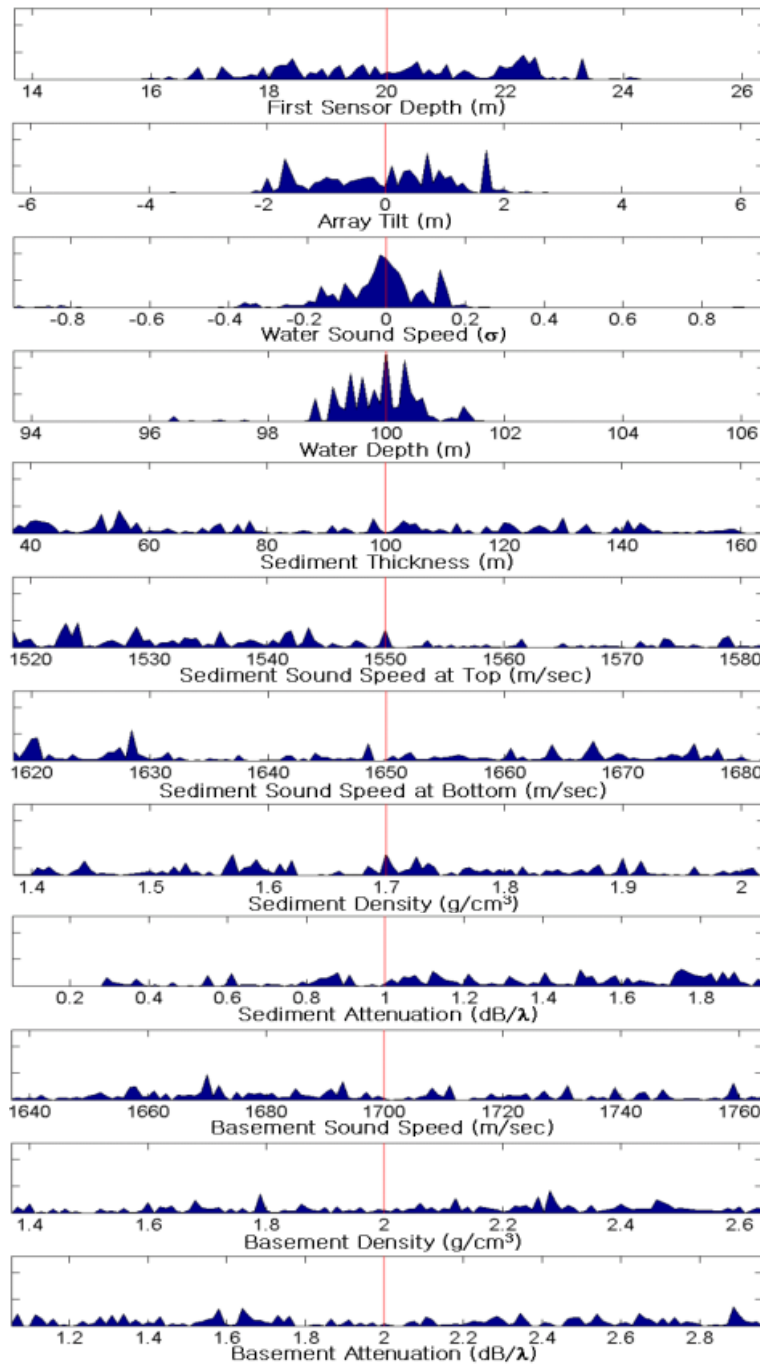


Fig. 4.2 Marginal *a posteriori* distribution based on the 50 observations using

the mean SSP in August.

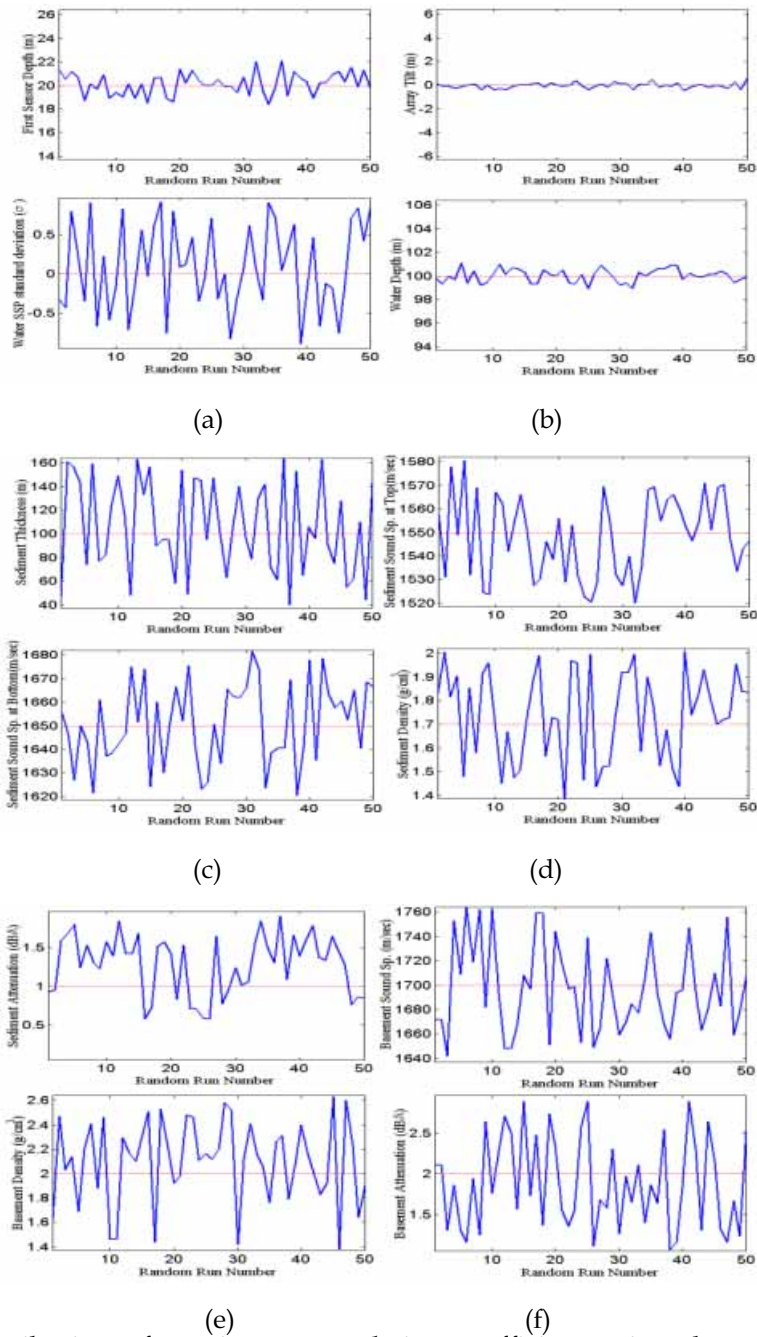


Fig. 4.3 Distribution of maximum correlation coefficient using the mean SSP in February : (a) array depth and standard deviation of SSP, (b) array tilt and water depth, (c) sediment thickness and sound speed at top, (d) sediment

sound speed at bottom and density, (e) sediment attenuation and basement density, (f) basement sound speed and attenuation.

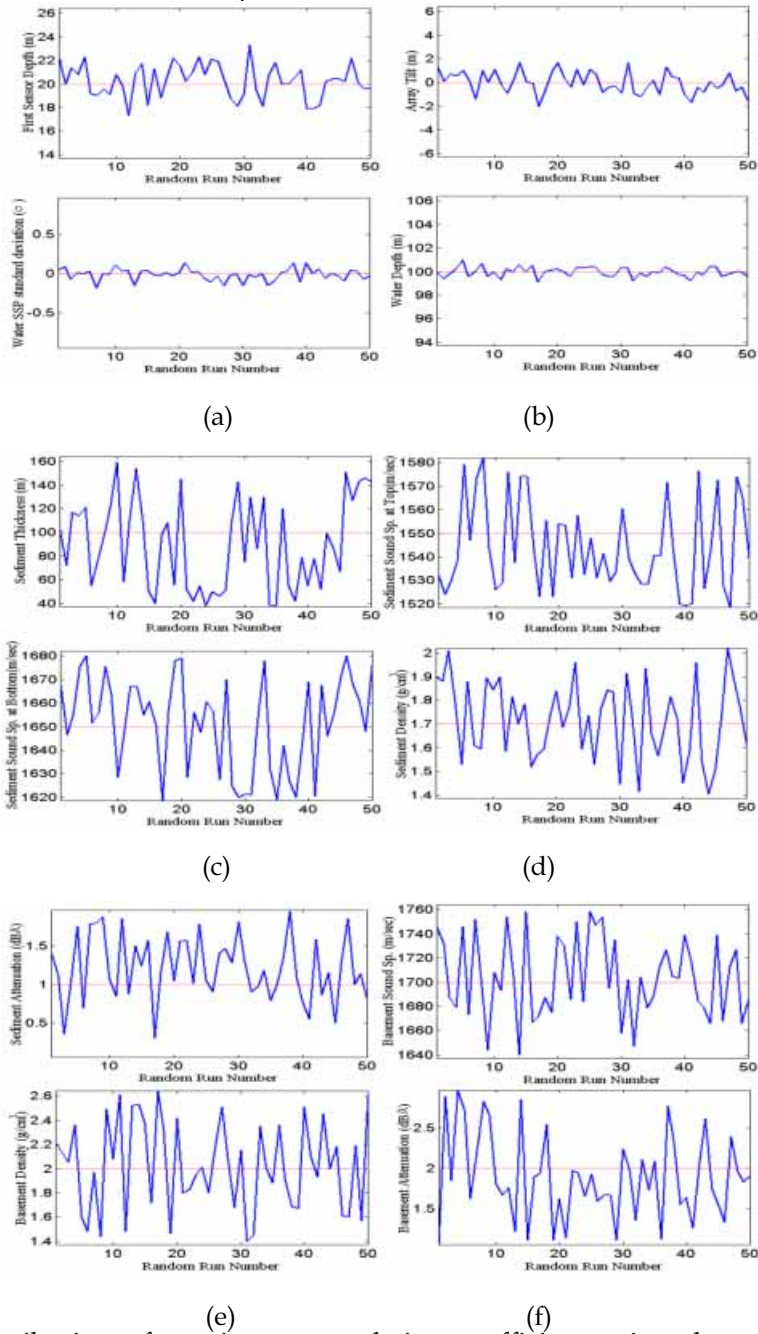


Fig. 4.4 Distribution of maximum correlation coefficient using the mean SSP in August : (a) array depth and standard deviation of SSP, (b) array tilt and water depth, (c) sediment thickness and sound speed at top, (d) sediment

sound speed at bottom and density, (e) sediment attenuation and basement density, (f) basement sound speed and attenuation. 4.4로 나타내었다. 음원의 위치가 고정된 상황에서 0.95이상의 상관계수 값을 출력하기 위해서는 각 매개변수별로 오정합의 범위가 한정될 수밖에 없다. 따라서 오정합에 민감한 매개변수는 독립적인 역산이 시행됨에 따라 매우 좁은 범위에서만 편차를 가지거나 또는 일정한 범위에서는 편차의 양이 적을 것이며, 반대로 오정합에 둔감한 매개변수는 비교적 넓은 범위에서 많은 편차를 보일 것이다. 독립된 유전자 알고리즘 시행 횟수에 따른 최대 상관 계수 값을 도시한 Fig. 4.3과 Fig. 4.4에서 보듯이 2월과 8월로 대표되는 동계와 하계의 음속분포에서는 8월의 음속 분포와 함께 시스템 오정합인 배열 경사와 배열 수심, 수층의 수심 등의 편차가 적음을 확인할 수 있다. 그리고 해저퇴적층 및 저층과 관련된 매개변수들은 상대적으로 편차가 많았다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 역산에서의 민감도계수 (Sensitivity Coefficient, SC)를 정량화하기 다음과 같은 계산식을 사용하였다.

먼저, 독립적으로 시행된 매개변수 역산에서 최대 상관계수 값들의 표준편차를 계산한 다음, 이를 정규화하기 위해 각 매개변수들의 탐색공간이 허용하는 최대값으로 나눔으로써 그 값은 최소 '0'과 최대 '1'의 값을 갖도록 하였다. 마지막으로 '1'에서 감하여 오정합의 영향에 민감한 매개변수인 경우 큰 값을 갖도록 하면 민감도 계수 SC는 다음 식과 같이 표현된다.

$$SC_i = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N_{try}} \sum_{k=1}^{N_{try}} (\epsilon_{i_k} - T_i)^2}}{|E_i - T_i|} \quad (4.3)$$

여기에서 N_{try} 는 독립적인 역산의 수행 횟수이며, ϵ 은 시행 횟수별 최대 상관 계수 값에서의 추정된 매개변수 값, T 는 기준값, E 는 각 매개변수별 탐색공간의 최대 또는 최소값 중에서 기준값과 가장 차이가 큰 값이다. 그리고 i 는 매개변수 항목이다.

민감도를 계산하기 위한 수층의 음속분포 값은 월별 평균 음속과 추정된 표준 편차 값을 수심에 대해 음속구조별로 평균하여 사용하였다. 즉, 2월 음속분포의

평균값과 표준편차를 환산한 값은 각각 1459.8m/sec와 4.695m/sec으로 하였으며,

Table 4.1 Sensitivity coefficient for the 12 parameters.

| Parameter | Sensitivity coefficient | |
|---------------------------------|-------------------------|--------|
| | February | August |
| Array depth | 0.8533 | 0.7797 |
| Array tilt | 0.9623 | 0.8569 |
| Standard deviation in water SSP | 0.4310 | 0.9222 |
| Water depth | 0.9133 | 0.9376 |
| Sediment thickness | 0.3787 | 0.3907 |
| Sediment sound speed at top | 0.4725 | 0.3831 |
| Sediment sound speed at bottom | 0.4646 | 0.3902 |
| Sediment density | 0.4024 | 0.4857 |
| Sediment attenuation | 0.5107 | 0.5137 |
| Basement sound speed | 0.4836 | 0.4382 |
| Basement density | 0.4299 | 0.4527 |
| Basement attenuation | 0.4454 | 0.4117 |

8월 음속분포에서 평균값과 환산된 표준편차 값은 1476.9m/sec, 7.0803m/sec으로 적용하였다.

2월과 8월의 수층 음속분포에서 식 (4.3)을 사용하여 매개변수의 민감도계수를 계산한 결과는 Table 4.1과 같다. 2월의 환경에서는 배열 경사가 가장 민감하며, 다음으로는 수층의 수심, 배열 수심, 그리고 해저퇴적층과 저층의 매개변수와 수층의 음속분포의 순서를 보였다. 8월의 환경에서는 수층의 수심이 가장 민감하였고, 다음으로 수층의 음속분포, 어레이 경사, 어레이 수심, 그리고 해저퇴적층과 저층의 매개변수의 순서로 나타났다. 해저퇴적층의 매개변수들 중에서는 감쇠계수

의 민감도가 가장 강하게 나타났다.

2월과 8월의 환경에서 배열 경사와 수층의 수심 오정합에 대한 민감도의 순서가 바뀌어서 나타난 것은 유전자 알고리즘의 특성상 8월의 환경에서 민감도가 강한 수층 음속분포가 각각의 매개변수들의 역산에 영향을 준 결과이다.

결과적으로 2월과 8월의 환경에서 각 매개변수들에 대해 민감도계수를 계산하여 분석하면 수층에서 작용되는 시스템과 해양 환경의 매개변수들이 오정합에 민감하며, 해저퇴적층과 저층의 매개변수들이 미치는 오정합의 영향은 정합장치처리에서 상대적으로 민감도가 약함을 확인할 수 있다. 또한 각각의 환경에서 가장 강한 민감도계수 값을 나타내는 배열 경사와 수층의 수심은 음속분포가 미치는 영향에 따라 변화됨이 확인되었다.

위와 같은 결과에서 민감도가 강한 매개변수는 실측 자료를 사용하여 정합장치처리를 수행함에 있어서 복제음장을 계산하기 위한 전달손실 모델의 입력 자료에 대해 정확성의 추구하고 함께 선택에 있어서도 보다 세밀한 주의가 요구된다. 또한 해저퇴적층과 저층의 매개변수들이 오정합에 따른 민감도가 약하게 나타남에 따라 정합장치처리를 이용한 지음향 매개변수의 역산이 매우 어렵다는 것을 역설적으로 나타낸다.

V. 실측 자료의 매개변수 최적화 및 오정합의 영향

해양에서 배열센서에 수신된 신호를 사용하여 미지의 음원 위치를 추정하는 정합장처리는 복제음장을 생성하기 위해 해양환경을 모델링하여야 하며 이때 시스템과 환경 매개변수들의 값은 신호가 전달되는 실제 음장의 값들과 차이를 갖는다. 이러한 오차는 거리에 독립적인 환경 모델링 뿐만 아니라 거리에 종속적인 환경 모델링에도 공통적으로 수반되는 현상이다. 실제 음장과 유사한 복제음장을 사용하는 것은 프로세서 출력의 상관계수 값을 향상시킬 뿐만 아니라 추정된 음원 위치의 오차를 줄임으로써 정합장처리의 정확도를 향상시킨다.

앞에서 수행된 수치실험은 각각의 매개변수들의 오차가 정합장처리의 출력에서 음원 위치 추정에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였으나, 사전 환경 자료가 제한적인 실제 해양 음장에서 수신된 배열 신호를 사용하여 정합장처리를 수행할 경우 많은 오차를 내포함에 따라 추정된 음원 위치에 대해 신뢰할 수 없는 결과를 출력할 것이다.

이에 해양에서 실측된 자료를 사용하여 정합장처리를 수행하여 민감도가 강한 몇 가지 경우의 매개변수들에 대한 오정합에 대해 프로세서 출력의 상관계수 값과 추정된 음원 위치 오차에 대해 미치는 영향을 고찰하였다.

5.1 실험 해역의 환경 및 신호 분석

5.1.1 실험 해역과 음원의 경로

2001년 6월 13일과 15일의 2일 동안 동해의 천해에서 수행된 정합장처리 관련 실험은 Fig. 5.1과 같이 거리독립인 Track-I, Track-III와 거리종속인 Track-II의 환경으로 구분되어 실시되었다. 6월 13일 실험은 Track-I에서 12시 37분부터 13시 5분까지 측정되었고, Track-II에서 13시 37분부터 14시 19분까지 측정되었다. 본 논

문에서는 거리독립인 Track-I의 정합장치리 실험을 분석 대상으로 한정하였다.

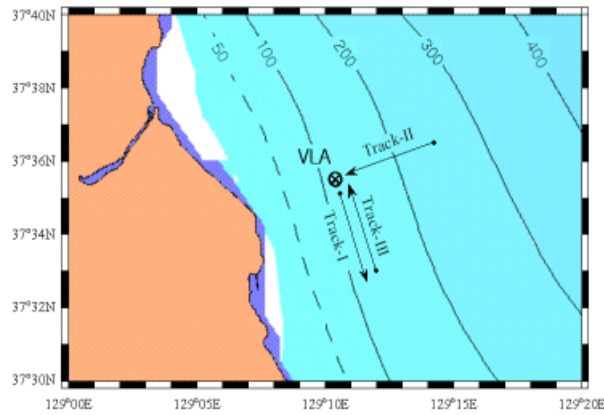


Fig. 5.1 Bathymetry and ship track of East Sea Experiment.

5.1.2 수직 선배열과 예인 음원

수직 선배열은 $37^{\circ} 35.507 N - 129^{\circ} 10.881 E$ 의 위치에 Fig. 5.2와 같이 수직으로 설치하였으며, 신호의 수신에 사용한 선배열의 길이는 90m이다. 수신 센서의 수는 총 25개이며 4개의 밴드 별로 10~11개씩 구성되어 있다[51]. 실제 측정에 사용된 센서의 수는 19개였으나, 이중 수심 64m부터 114m까지 5m 간격의 11개 센서로부터 수신된 신호를 사용하여 실험 분석에 사용하였다. 자료 분석 및 정합장치리에서 사용되는 센서의 번호는 수심 64m의 센서가 1번이고, 수심114 m의 센서가 11번 센서이다.

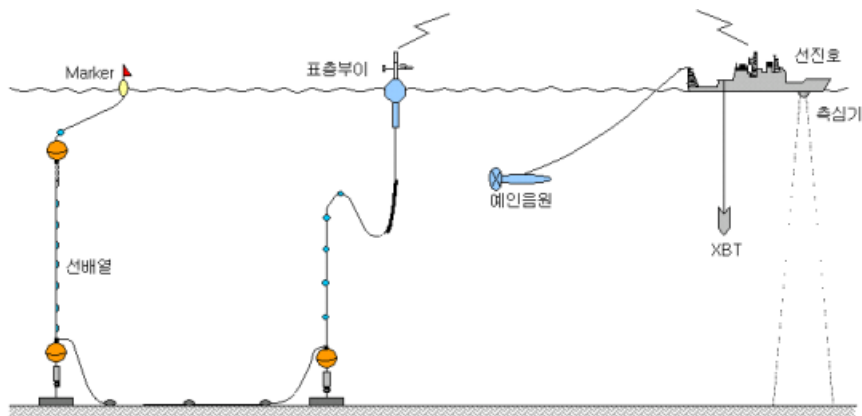


Fig. 5.2 The vertical array as deployed in a bottom moored configuration.

수직선배열 센서의 수중에서의 위치를 파악하기 위해 21번과 25번 센서의 하부 60cm에 수심측정용 센서(Seacat)를 부착하였다[51]. Fig. 5.3은 시간대별 센서의 위치를 나타낸 것이다.

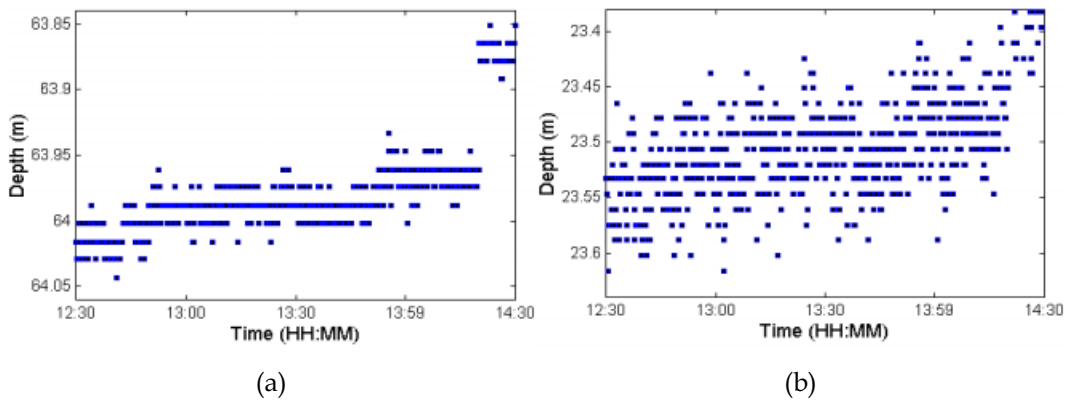


Fig. 5.3 The depth of the sensor as a function of time : (a) 21st sensor, (b) 25th sensor.

예인형 음원을 국방과학연구소의 연구선인 선진호에서 일정한 수심으로 트랙을 따라 4.1kts의 속력으로 예인하였으며 음원의 주파수는 50Hz와 70Hz, 90Hz의 3개 토널 신호를 발생시켰다. 예인되는 음원의 수심을 측정하기 위해 수심 측정용 센서를 예인 음원의 상부에 부착하였으며, 음원의 수심은 대략 25-30m 사이를 유지하였다.

5.1.3 실험 환경

실험 해역의 수온은 XBT(expendable bathythermograph)를 이용하여 실험 기간 동안 관측하였다. Fig. 5.4는 Track-I에 해당하는 실험시간 동안 측정된 수온을 음속으로 환산하여 도시한 것이다. 음속의 구조는 수온약층이 존재하는 부경사를 가지며, 대략 수심 40m부터는 수심에 따라 일정한 음속을 보이고 있어, 음향전파 조건들은 전형적인 하향 굴절(downward refracting)의 형태를 보인다. 시간대별

음속의 구조는 오후 효과(afternoon effect)에 의해 시간이 지남에 따라 음속이 증

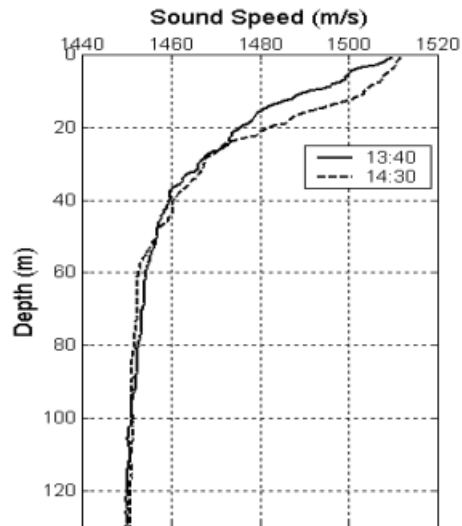


Fig. 5.4 Measured sound speed profile as a function of depth.

가되는 형태를 나타내고 있으며, 13시 40분에 측정된 음속과 14시 30분에 측정된 음속을 비교하면 음속의 변화가 큰 수심 10m 부근에서 20m/sec의 음속차를 나타내었다. 이와 같은 음속의 시간 변화성은 정합장치리에 있어 음원의 거리 추정 및 수심 추정에 영향을 주게된다.

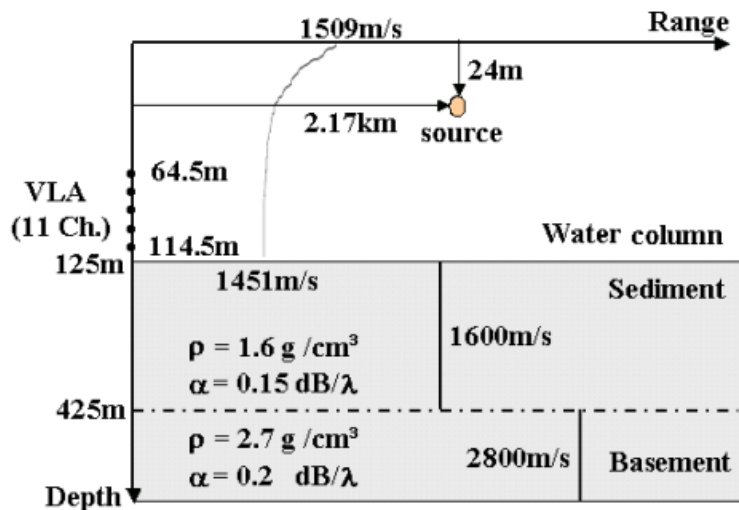


Fig. 5.5 A schematic of the baseline ocean environment.

실험 해역에서의 환경 자료는 제공된 해저층의 자료를 기초로 하여 근사적으로 추정된 값을 사용하였다[51]. 음원의 경로 근처를 대상으로 측정되어 제공된 지질의 정점 자료는 2개의 해저퇴적층과 저층의 기반암으로 구분되며 상부의 퇴적층은 모래와 진흙이 혼합된 조성으로 10.5cm에서 15m까지의 두께를 가지며, 하부의 퇴적층은 187m에서 374m의 두께를 갖는다. 본 논문에서는 거리 독립인 환경으로 제한함에 따라 해저퇴적층을 1개로 하였으며 두께는 300m, 음속은 1600m/sec, 밀도는 1.6g/cm^3 , 감쇠계수는 $0.15\text{ dB}/\lambda$ 로 추정된 값을 사용하였다. 화성암과 변성암으로 구성된 저층의 음속은 2800m/sec, 밀도는 2.7g/cm^3 , 감쇠계수는 $0.2\text{dB}/\lambda$ 이다. Fig. 5.5는 해양환경의 기본 모델을 도시한 것이다.

5.1.4 신호의 스펙트로그램 분석

예인 음원의 사용 주파수는 50Hz와 70Hz, 90Hz로 광대역 정합장처리를 수행할 경우 세 토널 주파수에 해당하는 복소수 빈 값을 사용하여 자료벡터(data vector)를 만든 후 표본 공분산행렬이 구성된다. 그러므로 각 토널 주파수의 신호 대 잡음비는 정합장처리의 성능에 영향을 주게 된다. Fig. 5.6은 Track-I의 스펙트로그램을 도시한 것이다. 분석에 사용된 신호는 1번 센서에 수신된 신호를 사용하였고, 표본화 주파수는 3kHz, 시간창(time window)은 2 sec(6000 pts), FFT 크기는 8192 points를 사용하였다.

스펙트로그램에서는 실험자료 송신을 위한 RF(radio frequency) 신호의 단절로 인한 현상을 확인 할 수 있었으며, 90Hz의 신호가 다른 토널 주파수 신호와 비교해 신호 대 잡음비가 좋았다.

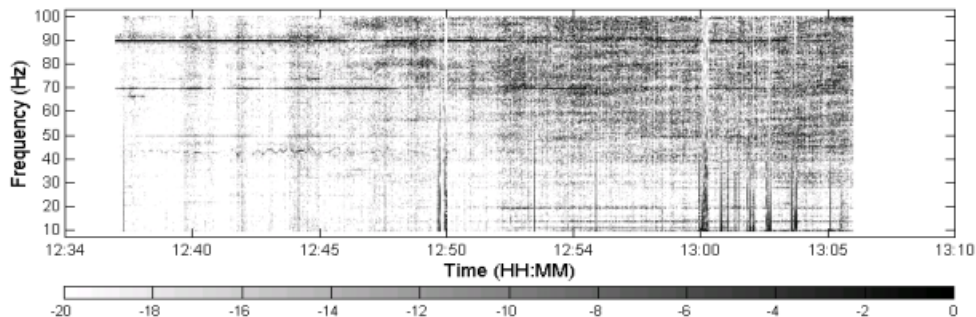


Fig. 5.6 Results of the spectrogram analysis.

5.2 매개변수 역산과 음원 위치 추적

정확한 음원 위치 추정을 위해 우선적으로 수행되어야 할 사항은 복제음장을 생성하기 위해 시스템 매개변수를 포함한 환경 매개변수를 최적화하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 신호 대 잡음비가 우세한 자료 중 6월 13일 12시 47분 50초에서 55초 사이에 수신된 신호를 사용하였다. 도플러의 영향을 고려하여 중심 주파수는 49.9878Hz와 69.9463Hz, 89.9048Hz를 각각 사용하였고, 샘플링 주파수는 3kHz이고, FFT 크기는 16,384개이다. 신호처리시 신호단편 하나의 크기는 6,000개로 하였고, 신호단편들은 50% 중첩(overlap)하여 사용하였다. 이동음원의 경우 표본 공분산행렬을 구성하기 위해 신호단편을 많이 사용할수록 거리 오차가 증가되므로 신호단편 5개를 평균하여 사용하였다. 그리고 복제음장을 구성하기 위한 음향전파 모델은 거리독립의 정상모드 기법인 KRAKEN을 사용하였다[43].

먼저 제공된 실험 환경을 근사적으로 추정한 Fig. 5.5의 자료를 사용하여 각 주파수별로 복제음장을 생성한 후에 이를 각 주파수의 공분산행렬과 선형 프로세서 사용하여 상관시켰으며, 최종적으로 주파수별 정합출력장을 비일관성 평균하였다. 그 결과 Fig. 5.7의 (a)와 같이 음원의 위치는 수심 29m와, 거리 2.6km로 추정되었으며, 세 주파수의 평균 상관계수 값은 0.615이다. 이러한 결과를 같은 시각에서 측정된 GPS 자료인 3.11km와 비교하면 거리의 오차는 약 510m이며, 수심은 26.7m에서 약 2.3m의 오차로 비교적 많은 음원 위치 추정 오차를 보였으며, 이것은 복제음장을 생성하기 위한 매개변수들의 종합적인 오정합의 영향으로 판단된다.

기초적인 실험자료에 의한 음원 거리 추정 오차를 줄이기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 역산을 시도하였다. 사용된 주파수는 다른 주파수에 비해 상대적으로 신호대잡음비가 우세한 90Hz를 사용하였다. 매개변수는 총 14개를 대상으로 하였으며, 수층의 음속분포에 대해서는 해수면에서 수심 40m까지의 음속 분포만을 대상으로 13시 30분에 측정된 XBT 자료를 기준으로 14시 20분에 측정된 XBT자료와의 차이를 σ 로 정의하여 $-2.0\sim 0.0\sigma$ 의 범위를 탐색공간으로 하였다. 각 매개변수별 탐색공간의 크기는 128개, 초기 모집단의 크기는 각 매개변수별로

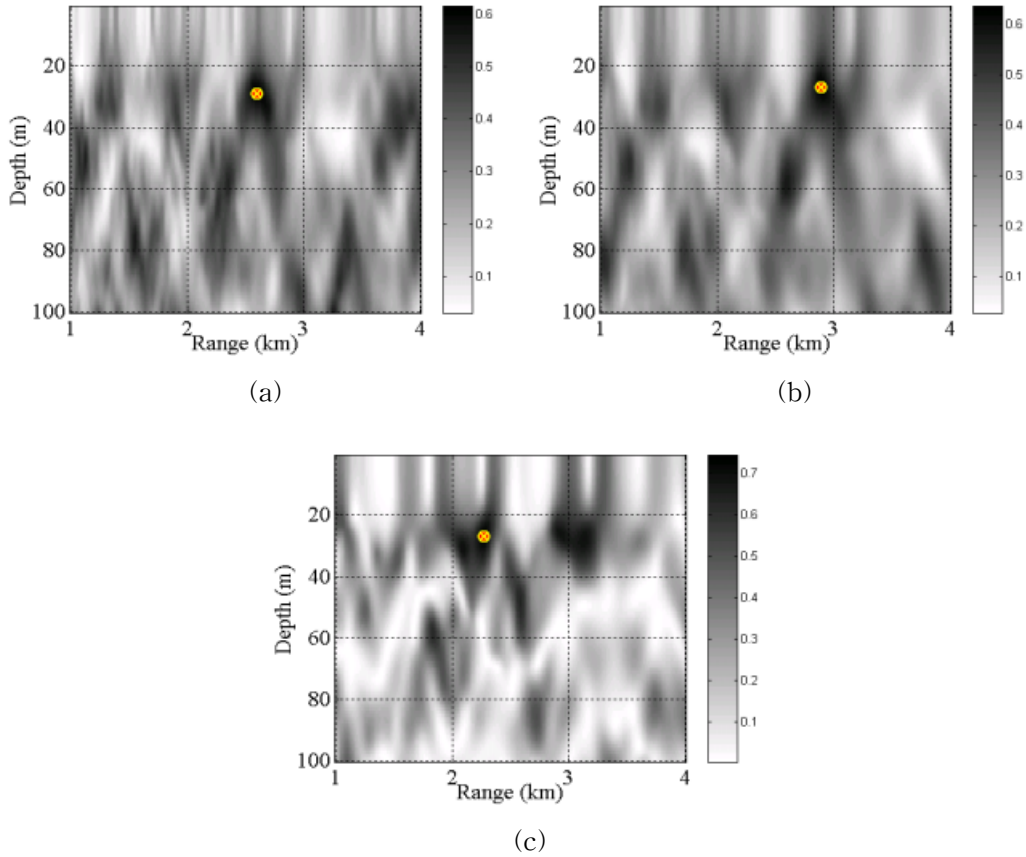


Fig. 5.7 Ambiguity surfaces for East Sea Experiment. (a) Incoherent broadband MFP using baseline parameters. (b) Incoherent broadband MFP using GA mean parameters. (c) Narrowband MFP using GA mean parameter at 90Hz. (\otimes : estimated source position)

64개, 재생산의 크기는 $f=0.5$, 교배 비율 $p_x=0.8$, 돌연변이 비율 $p_m=0.05$ 로 하였다[35]. 사후 주변확률분포 계산을 위한 온도는 상관계수가 높은 순서로 50개의 모집단에 대해 평균한 값을 사용하였다. 사후 확률분포의 평균값을 구하기 위해 독립적인 역산을 50회 시행하였으며, 그 결과 매개변수별 주변확률분포는 Fig. 5.8과 같으며, 평균값은 Table 5.1과 같다. 실측 자료를 사용한 매개변수 역산 결과 추정된 음원의 거리는 3.08km, 수심은 27.07m로 위치 오차가 현저하게 감소되었다.

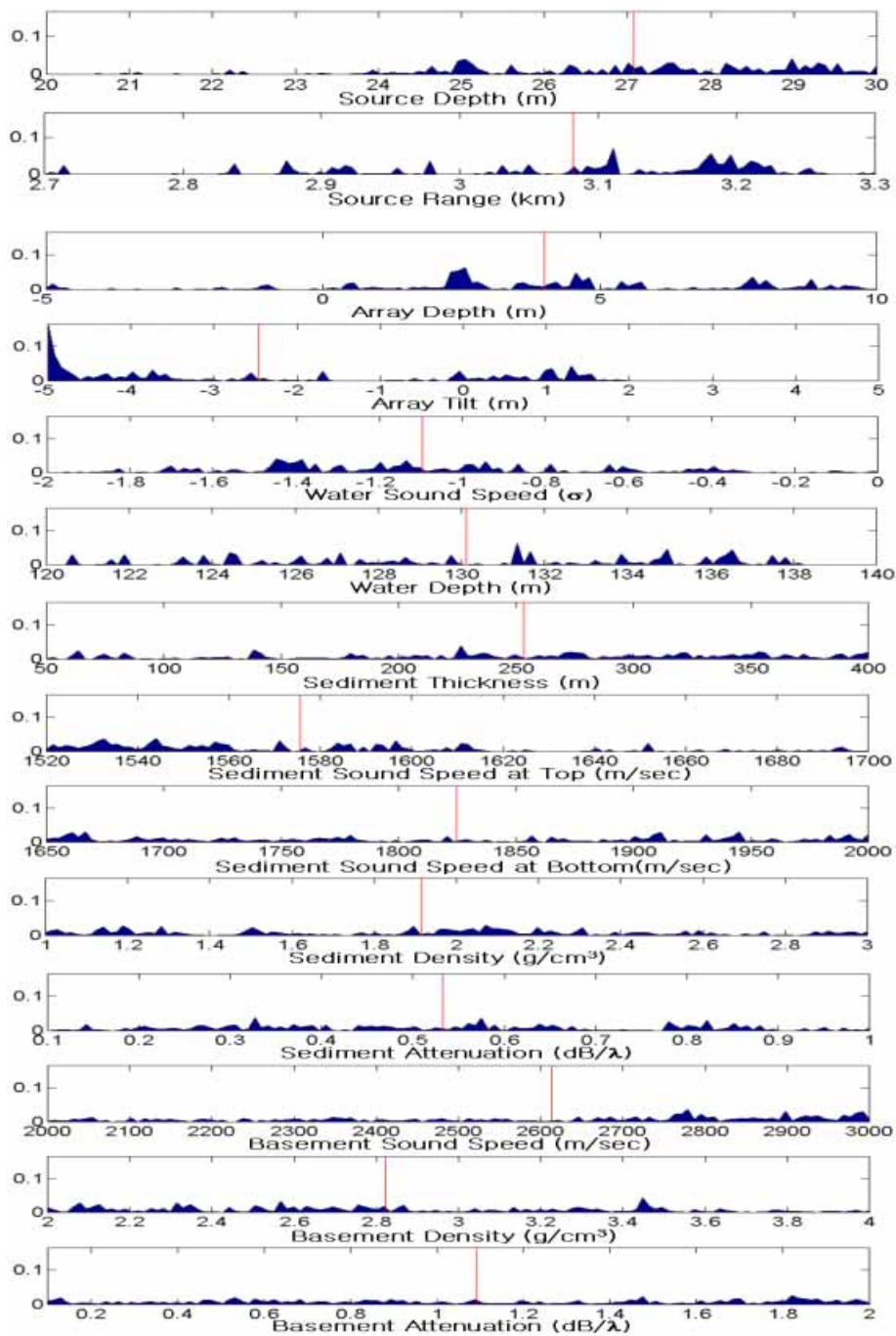


Fig. 5.8 Marginal *a posteriori* probability for each of the 14 model parameters for East Sea Experiment.

Table 5.1 GA parameter estimates based on the 50 observations for East Sea Experiment.

| Parameter | GA mean | Parameter | GA mean |
|-----------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| Source range(km) | 3.08 | Sediment sound speed at top(m/sec) | 1575.58 |
| Source depth(m) | 27.07 | Sediment sound speed at bottom(m/sec) | 1824.62 |
| Array depth error(m) | 3.99 | Sediment density(g/cm ³) | 1.92 |
| Array tilt(m) | -2.46 | Sediment attenuation(dB/λ) | 0.53 |
| SSP in water(σ) | -1.1 | Basement sound speed(m/sec) | 2613.06 |
| Water depth(m) | 130.12 | Basement density(g/cm ³) | 2.82 |
| Sediment thickness(m) | 253.14 | Basement attenuation(dB/λ) | 1.09 |

역산된 매개변수 값들을 사용하여 주파수에 대해 비일관성 광대역 정합장처리를 하면 Fig. 5.7의 (b)와 같이 음원 거리를 2.89km, 수심은 27m로 추정하였고, 출력의 상관계수 평균값은 0.635를 보였으며, 90Hz만을 사용한 매개변수 역산 결과 및 예상 음원 위치와의 오차가 증가된 결과로 나타났다. 이와 같이 매개변수의 역산은 예상 음원 위치에 대한 탐색 범위를 축소하여 시스템과 음장의 최적화된 값을 찾기 위한 목적으로 사용되었으며, 음원 위치에 대한 탐색 공간을 확장하여 넓은 범위에서 역산 결과를 적용하면 Fig. 5.7의 (c)와 같이 실제 음원의 위치보다 더 높은 상관계수 값을 갖는 부엽의 영향으로 예상되는 음원 위치와 오차가 있는 음원 거리 2.27km와 수심 27m를 추정한다. 따라서 부엽 성분에 의한 영향을 감소시키기 위한 방법으로 광대역 정합장처리가 사용되며, 이는 주파수별로 랜덤한 위치를 갖는 부엽 성분들이 평균화되어 감소됨에 따라 신호 위치에서의 상관계수 값들이 증대되는 효과를 보임으로써 음원의 위치 추정 오차가 감소되는 장점을 갖는다.

매개변수 역산 결과를 토대로 거리독립인 Track-I에 대하여 음원 위치 추적을

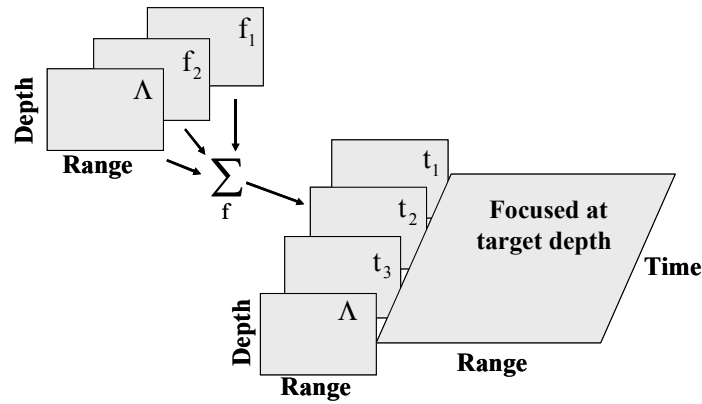
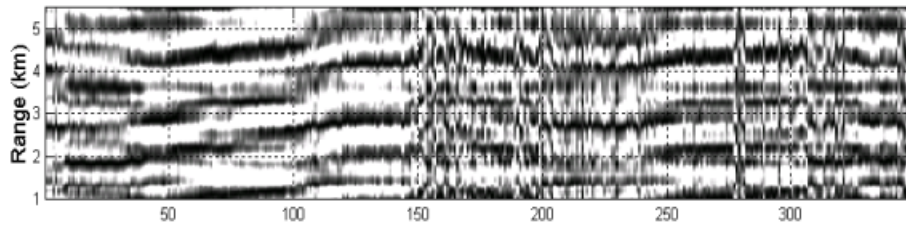


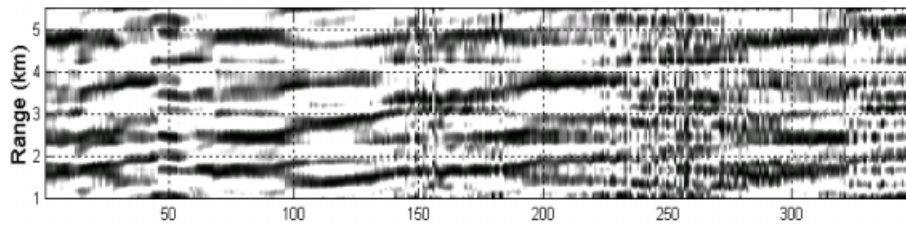
Fig. 5.9 A schematic of source tracking.

수행하였다. 신호처리시 신호단편 크기는 2 sec(6000 pts)로 하였고, 신호단편들은 50% 중첩(overlap)하여 만든 후 표본 공분산행렬을 구성하기 위해 5개의 신호단편을 평균하여 사용하였으며, 복제음장을 구성하기 위한 음향전파모델은 KRAKEN을 사용하였다. 사용된 프로세서는 비일관성 광대역 선형 프로세서를 사용하여 각 주파수별 정합출력장을 계산한 후 dB 단위에서 더하는 방법을 사용하였다. 음원 위치 추적은 Fig. 5.9와 같이 예상되는 음원의 수심을 예상되는 수심 범위로 집중하여 음원의 거리를 추정하였다.

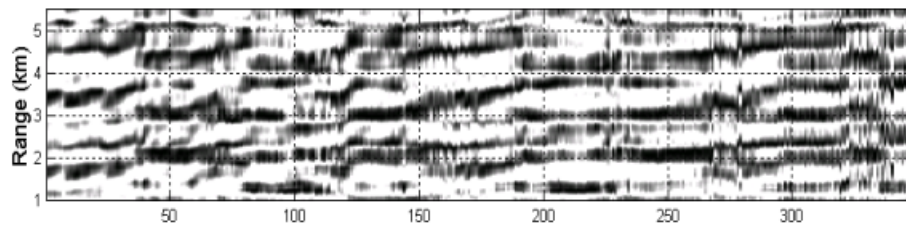
Fig. 5.10은 Track-I에 대한 음원 위치 추적 결과이다. Fig. 5.10의 (a)와 (b),(c)에서 각 토널 주파수별로 음원의 위치 추적 결과는 음원의 위치를 제대로 추적하지 못하고 있으나, 부엽의 양상은 수직선배열에서 멀어지는 형태를 보인다. 부엽의 이러한 현상과 각 주파수별로 같은 시간대에서 부엽의 위치가 다른 곳에 나타난다는 것을 이용하면 Fig. 5.10의 (d)와 같이 각 주파수 정합출력장을 비일관성 처리에 의해 dB 단위 또는 출력을 합할 경우 이동 음원의 궤적을 추적할 수 있다.



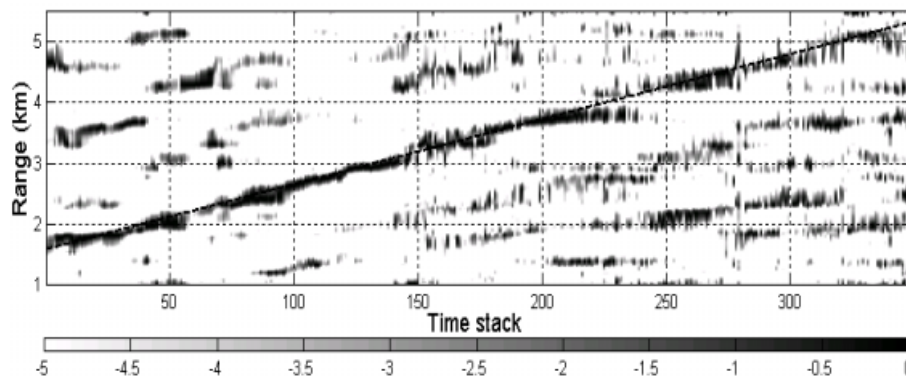
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.10 Results of the source tracking for the Track-I : (a) 50Hz, (b) 70Hz, (c) 90Hz, (d) Incoherent summation.

5.3 역산된 실험 자료의 오정합 영향 분석

앞에서 수행된 매개변수 역산으로 계산된 매개변수 값들의 오정합에 대한 영향을 보기 위해 Table 5.2와 같이 90Hz에서 예상되는 음원 위치에 가장 근접되게 역산된 단일 시행 횟수의 매개변수 값들을 선택하여 사용하였다. 협대역 선형 정합출력장으로 Table 5.2의 매개변수를 사용하여 협대역 선형 정합장처리를 수행한 결과 Fig. 5.11의 (a)와 같이 음원 거리는 3.11km, 수심은 25m로 추정하였다. 이때 출력의 상관계수 값은 0.779로 비교적 높게 나타났다.

매개변수들의 오정합의 영향을 살펴보기 위해 Table 5.2로 역산된 매개변수 값을 기준 값으로 하여 Fig. 5.5의 기본 환경 자료의 각 매개변수들로 변화시키며 정합장처리를 수행하였다. Fig. 5.11의 (b)에서 (e)는 시스템과 수층의 매개변수 오정합에 대한 정합출력장을 나타내었으며, Fig. 5.12는 해저퇴적층과 저층의 매개변수 오정합에 따른 정합출력장을 나타내었다.

매개변수별 오정합에 따라 추정된 음원 위치와 출력의 상관계수 값은 Table

Table 5.2 GA parameter estimates based on the one observation at the 90Hz for East Sea Experiment.

| Parameter | GA mean | Parameter | GA mean |
|-----------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| Source range(km) | 3.11 | Sediment sound speed at top(m/sec) | 1658.3 |
| Source depth(m) | 26.2 | Sediment sound speed at bottom(m/sec) | 1808.5 |
| Array depth error(m) | 2.6 | Sediment density(g/cm ³) | 2.4 |
| Array tilt(m) | -4.1 | Sediment attenuation(dB/λ) | 0.7 |
| SSP in water(σ) | -1.1 | Basement sound speed(m/sec) | 2307.2 |
| Water depth(m) | 131.4 | Basement density(g/cm ³) | 3.3 |
| Sediment thickness(m) | 292.7 | Basement attenustion(dB/λ) | 0.7 |

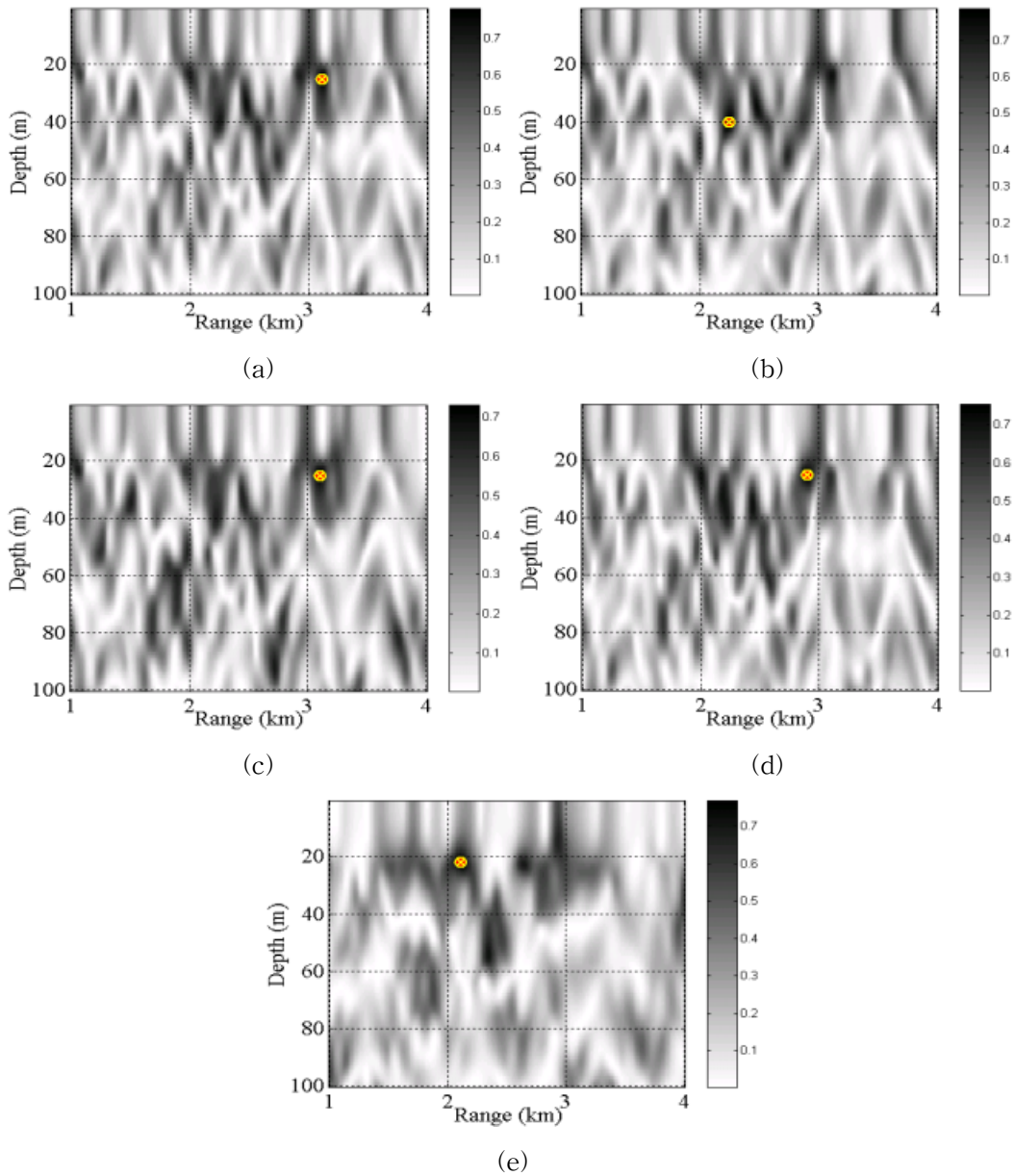


Fig. 5.11 Ambiguity surfaces of the system and water layer parameters for the 90Hz : (a) No mismatch, (b) Array depth mismatch, (c) Array tilt mismatch, (d) Water SSP mismatch, and (e) Water depth mismatch. (\otimes : Estimated source position.)

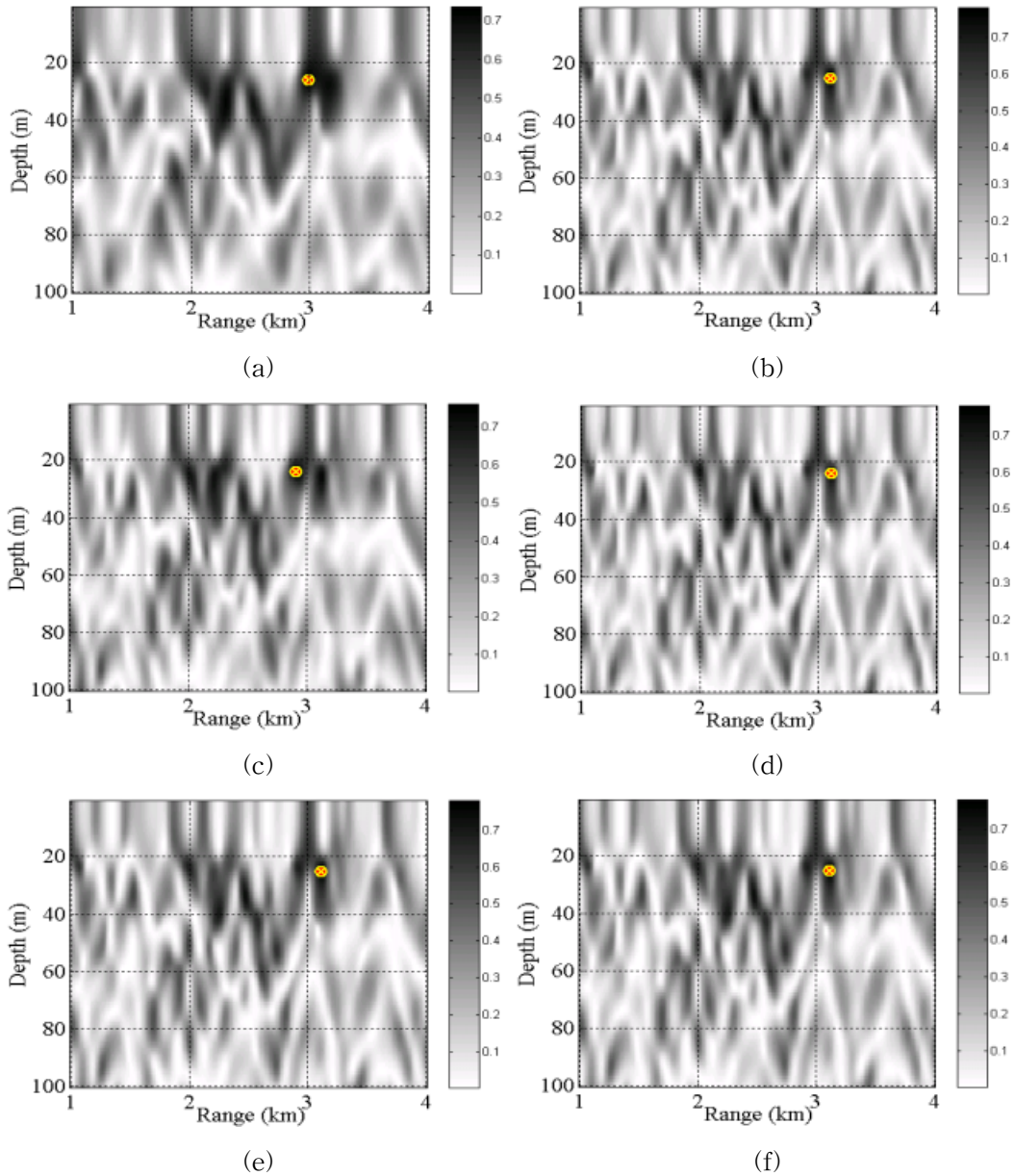


Fig. 5.12 Ambiguity surfaces of the sediment and basement layer parameters for the 90Hz : (a) Mismatch of sediment sound speed at top, (b) Mismatch of sediment sound speed at bottom, (c) Sediment density mismatch, (d) Sediment attenuation mismatch, (e) Sediment thickness mismatch, and (f) basement parameters mismatch. (\otimes : Estimated source position.)

Table 5.3 Results of estimation based on parameters mismatch for the 90Hz.

| Parameter | Mismatch | Source range (km) | Source depth (m) | Correlation coefficient |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------------|
| Array depth error | +2.6m | 2.25 | 40 | 0.786 |
| Array tilt | -4.1m | 3.1 | 25 | 0.73 |
| SSP in water depth | -1.1 σ | 2.9 | 25 | 0.753 |
| Water depth | +6.4m | 2.11 | 22 | 0.767 |
| Sediment thickness | -7.3m | 3.11 | 25 | 0.779 |
| Sediment sound speed at top | +58.3m/sec | 2.99 | 26 | 0.734 |
| Sediment sound speed at bottom | +208.5m/sec | 3.11 | 25 | 0.78 |
| Sediment density | +0.8g/cm ³ | 2.91 | 24 | 0.759 |
| Sediment attenuation | +0.55dB/ λ | 3.11 | 24 | 0.778 |
| Basement sound speed | -492.8m/sec | 3.11 | 25 | 0.779 |
| Basement density | +0.6g/cm ³ | 3.11 | 25 | 0.779 |
| Basement attenuation | +0.5dB/ λ | 3.11 | 25 | 0.779 |

5.3과 같다. 우선적으로 저층 매개변수들의 경우 기본 환경 자료와 비교하여 음속은 492.8m/sec, 밀도는 0.6g/cm³, 감쇠계수는 0.5dB/ λ 의 오차가 있음에도 상관계수 값과 함께 추정된 음원 위치에서 오정합에 대한 영향이 없는 것을 확인할 수 있으며, 해저퇴적층의 하부 음속과 감쇠계수, 두께에 대한 오정합의 영향도 없었다. 이는 지음향 매개변수들은 근사적으로 추정된 자료가 있는 상황에서도 오정합에 대한 영향이 없거나 비교적 적은 결과로 나타났으며, 이러한 매개변수들을 대상으로 보다 더 정확한 자료를 얻기 위한 추가적인 노력을 줄일 수 있음을 나타낸다.

민감도가 강한 매개변수인 수층의 음속분포와 배열 경사에 대한 오정합의 영

향이 비교적 적은 이유는 우선적으로 역산을 통해 오정합의 영향이 최소화되었으며, 다음으로는 수층 음속분포의 경우 수온약층의 음속분포 오정합만이 고려되어 음원의 거리에서 오차가 생겼으며, 배열 경사의 오정합은 0.25λ 로 바이어스의 일관성이 유지되는 $\pm 0.3\lambda$ 의 범위내에서 오정합이 발생된 결과이다. 배열의 수심과 수층 수심의 오정합은 예상되는 음원 위치에서 부분적으로 높은 상관계수 값을 갖는 주엽이 존재하나 다른 위치에서 발생된 부엽보다 상대적으로 낮기 때문에 많은 음원의 위치 오차를 보였다.

이상에서 실측 자료를 사용하여 매개변수 역산을 통해 음원의 경로를 추적하였으며, 일정 시점에서의 매개변수 역산과 함께 오정합의 영향을 살펴보았다. 실험 환경에 대한 실측 자료가 정확하더라도 거리에 종속적으로 변화하는 매개변수들을 완벽하게 재현하여 해양 음장을 모델링하는 것은 제약이 따른다. 이러한 이유로 시간 또는 공간적으로 일정한 범위에서 사용될 수 있는 최적화된 매개변수들의 대표 값이 요구된다. 최적화가 되지 않은 매개변수들을 사용한 정합장치리 결과는 추정된 음원 위치에 매우 많은 오차를 가지는 것으로 나타났으며, 예상되는 매개변수의 오정합에 대해 역산 과정을 거쳐 매개변수를 최적화 할수록 음원 위치 추정 성능이 향상됨을 보였다. 그리고, 매개변수 오정합의 경우 예상 음원 위치에서 출력 상관계수 값이 저하됨과 함께 추정된 음원 위치의 바이어스를 유발하였다. 또한 일부 해저퇴적층과 저층 매개변수의 오정합이 정합장치리에 미치는 영향은 무시될 정도로 미미함을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

정합장처리는 해양에서 배열센서로 수신된 신호와 모사된 음장(복제음장)을 상관시킴으로써 미지의 음원의 위치 또는 음장에 관한 매개변수를 추정하는 기법이다. 정합장처리를 수행함에 있어서 요구되는 구성요소 중의 하나인 해양 음장을 모사한 복제음장은 매우 복잡하고 시공간적으로 변동이 심한 해양음장을 모사한 복제벡터를 사용해야 되나, 수치적인 전달손실 모델링의 수많은 가정 조건으로 매개변수들의 오차가 반드시 존재하게 되며, 이를 정합장처리에서는 오정합이라고 한다.

정합장처리에서 고려해야 되는 매개변수의 오정합은 시스템 오정합과 환경 오정합으로 구분되며, 오정합의 영향으로는 수신된 신호와 복제음장과의 상관값인 프로세서 출력이 낮아지며, 또한 상관된 최대 출력값이 실제 음원 위치에서 이동됨으로 매개변수 추정 결과에 바이어스가 유발된다.

본 논문에서는 거리독립 및 종속 환경에서 수직 선배열을 사용하는 경우에 대해 선형 프로세서를 사용하여 매개변수 오정합이 프로세서 상관계수 값과 음원 위치 추정에 미치는 영향에 대하여 수치실험을 통해 살펴보았다. 그리고 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 역산으로 종합적인 오정합 상황에서 프로세서 출력에 의한 추정된 매개변수의 바이어스와 정합장처리 출력에 미치는 매개변수들의 민감도에 대해 고찰하였으며, 실측 자료를 사용하여 매개변수 역산을 통한 음원의 위치 추적과 함께 역산된 매개변수들의 오정합의 영향을 분석하였다.

그 결과 정합장처리에서 매개변수 오정합의 영향을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

- (1) 매개변수 오정합에 따라 추정된 음원 위치는 매개변수별로 일정한 범위에서 바이어스를 갖는다.
- (2) 매개변수 오정합의 양이 증가될수록 출력 상관계수 값이 저하되며 위치 추정 오차도 증가된다.
- (3) 동일한 음장에서는 주파수가 낮아질수록 출력 상관계수 값의 저하가 감소되

며, 추정된 음원 위치에 대한 바이어스 범위도 증가된다.

(4) 음원 위치 바이어스의 일관성이 유지되는 프로세서 출력 상관계수 값의 한계는 주파수에 따라 변화되며, 주파수가 낮아질수록 상관계수 값이 높아진다.

(5) 결합된 매개변수에 대한 오정합의 영향은 개별 매개변수들간의 오정합의 영향이 충실히 반영된다. 따라서 종합적인 오정합의 영향도 개별 오정합의 영향에 대한 결과로 해석이 가능하다.

(6) 개별 매개변수들의 오정합에 대한 민감도를 정량화하여 계산한 결과 오정합에 가장 민감한 매개변수는 수층에서 운용되거나 작용하는 시스템과 해양 환경의 매개변수들이며, 8월의 음속분포를 갖는 경우에는 수층의 수심이 가장 민감하며, 그 다음으로 수층의 음속분포, 배열 경사, 배열 수심 등의 순서로 나타났다.

(7) 해저퇴적층과 저층의 음향특성 계수에 대한 민감도는 (6)에서 언급된 매개변수들에 비해 상대적으로 약하였으나, 해저퇴적층 상부 음속의 오정합은 음원의 거리에 비교적 많은 양의 위치 바이어스를 유발하였다.

(8) 예측된 매개변수의 값이 실제 매개변수 값보다 클 경우 추정된 음원 거리를 증가시키는 매개변수는 주파수, 수층의 수심, 해저면 경사, 해저퇴적층 두께와 밀도 등이며, 음원 거리를 감소시키는 매개변수는 수층과 해저퇴적층의 음속, 배열 수심이다.

(9) 오정합에 따라 추정된 음원의 수심에 영향을 주는 매개변수는 수층의 수심과 해저면 경사, 배열 수심, 배열 경사이다.

(10) 각 매개변수별로 오정합이 양(+)의 값으로 증가되는 경우에 음(-)의 값으로 감소되는 경우보다 추정된 음원에 대한 위치 바이어스의 일관성이 유지되는 범위가 증가되며, 상관계수 값의 저하도 감소된다.

이와 같은 매개변수 오정합의 영향에 대한 수치실험 결과는 해양에서 실제 수신된 신호를 사용하여 정합장처리를 수행할 경우 프로세서 출력 결과를 해석하는데 유용하며, 정확도가 부족한 매개변수 값에 대한 보정 과정이 추가로 수행된 후에 출력 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다. 그리고 민감도가 강한 매개변수는 정합장처리에서 복제음장을 계산하기 위한 모델링의 매개변수 값의 범위를 선택함에 있어 보다 상세한 자료의 정보가 요구됨으로 사전에 양질의 자료를 확보하기 위한 과정이 선행되어야 한다. 또한 상대적으로 민감도가 낮은 해저퇴적층

과 저층의 매개변수들에 대해 정확도를 향상시키려는 추가적인 역산의 노력은 줄일 수 있다.

본 연구와 관련된 향후의 연구 방향을 제안하면 다음과 같다. 첫째는 수직 선 배열의 경우에 해당되는 매개변수들에 대해서만 연구가 수행되었는데 수평배열이나 수직과 수평이 복합된 배열 등을 사용할 경우에 추가되는 배열의 형상 등에 대한 오정합의 연구가 필요하다. 둘째는 주파수와 수층의 수심, 해저면 경사 오정합인 경우 근사적인 해석이 제시되었으나, 이것을 제외한 나머지 매개변수들의 오정합에 대해서는 해석적인 해를 구하는 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] A. Tolstoy, *Matched-field Processing for Underwater Acoustic*, World Scientific, Singapore, 1993
- [2] A. B. Baggeroer, W.A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky, "An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics," *IEEE J. Ocean. Eng.*, 18, pp. 401-424, 1993.
- [3] 박재은, 신기철, 김재수, "최소분산 프로세서를 사용한 정합장처리에서 신호단편 수에 따른 바이어스의 영향," *한국음향학회지 제 20권 제 7호*, pp. 94-100, 2001.
- [4] G. L. D'Spain, J. J. Murry, W. S. Hodgkiss, N. O. Booth, and P. W. Schey, "Mirages in shallow water matched field processing," *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(6), pp. 3245-3265, 1999.
- [5] J. L. Krolik, "Matched field minimum variance beamforming in a random ocean channel," *J. Acoust. Soc. Am.*, 92(3), pp. 1408-1419, 1992.
- [6] M. B. Porter and A. Tolstoy, "The Matched Field Processing Benchmark Problem", *J. Computational Acoustics*, Vol. 2, pp. 161-185, 1994.
- [7] M. J. Hinich, "Maximum likelihood signal processing for a vertical array," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 54(2), pp. 499-503, 1973.
- [8] H. P. Bucker, "Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 59(2), pp. 368-373, 1976.
- [9] R. Kelmm, " Range and depth estimation by line arrays in shallow water," *Signal Processing*, Vol. 3, pp. 333-344, 1981.
- [10] E. C. Shang, "Source depth estimation in waveguides," *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(4), pp. 1413-1418, 1985.
- [11] R. G. Fazel, "Application of high-resolution processing to range and depth estimation using ambiguity function methods," *J. Acoust. Soc. Am.*, 82(2), pp. 606-613, 1987.

- [12] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman and H. Schmidt, "Matched field processing : Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem," J. Acoust. Soc. Am., 83(2), pp. 571-587, 1988.
- [13] G. B. Smith, C. Feuillade, D. R. Del Balzo, and C. L. Byrne, "A nonlinear matched-field processor for detection and localization of a quiet source in a noisy shallow-water environment," J. Acoust. Soc. Am., 85(3), pp. 1158-1166, 1989.
- [14] H. Cox, R. M. Zeskind, and M. Myers, "A subarray approach to matched-field processing," J. Acoust. Soc. Am., 87(1), pp. 168-178, 1990.
- [15] H. Schmidt, A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and E. K. Sheer, "Environmentally tolerant beamforming for high-resolution matched field processing: Deterministic mismatch," J. Acoust. Soc. Am., 88(4), pp. 1851-1862, 1990.
- [16] A. M. Richardson, and L. W. Nolte, "A *posteriori* probability source localization in an uncertain sound speed, deep ocean environment", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 89, pp. 2280-2284, 1991.
- [17] J. A. Shorey, L. W. Nolte, and J. L. Krolik, " Computationally efficient Monte Carlo estimation algorithms for matched field processing in uncertain ocean environments," J. Computational Acoustics, Vol. 2, pp. 285-314, 1994.
- [18] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing : Concepts and techniques*, Prentice-Hall, Inc. 1993.
- [19] H. Cox, R. Zeskind, and M. Owen, "Robust adaptive beamforming," IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ASSP(35), pp. 1365-1376, June 1987.
- [20] D. H. Johnson, S. R. DeGraaf, "Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis", IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Proc., Vol. 30, pp. 638-647, 1982.
- [21] P. J. Book and L. W. Nolte, "Narrow-band source localization in the presence of internal waves for 1000km range and 25Hz acoustic frequency," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 101(3), pp. 1336-1346, 1997.

- [22] W. S. Hodgkiss and R. K. Brienzo, "Broadband source detection and range/depth localization via full-wavefield (matched field) processing," Processing ICASSP 90, pp. 2743-2746, 1990.
- [23] A. Tolstoy, "Computational aspects of matched field processing in underwater acoustics," , in Computational Acoustics, edited by D. Lee, A. Cakmak, and R. Vichnevetsky (North-Holland, Amsterdam, 1990), Vol. 3, pp. 303-310.
- [24] G. B. Smith, C. Feuillade, and D. R. DelBalzo, "Matched-field processing enhancement in a shallow-water environment by in coherent broadband averaging," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91 (3), pp. 1447-1455, 1992.
- [25] E. K. Westwood, "Broadband matched-field source localization," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, pp. 2777-2789, 1992.
- [26] S. M. Jesus, "Broadband matched-field processing of transient signals in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 93 (4), pp. 1841-1850, 1993.
- [27] R. K. Brienzo and W. S. Hodgkiss, "Broadband matched-field processing," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94, pp. 2821-2831, 1993.
- [28] D. P. Knobles and S. K. Mitchell, "Broadband localization by matched fields in range and bearing in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96 (3), pp. 1813-1820, 1994.
- [29] N. Booth and P. Schey, "Broadband matched-field processing of low level signals in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, pp. 3291(A), 1995.
- [30] S. P. Czenszak and J. L. Krolik, "Robust wideband matched-field processing with a short vertical array," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 101, pp. 749-759, 1997.
- [31] Z. H. Michalopoulou, "Robust multi-tonal matched-field inversion: A coherent approach" , J. Acoust. Soc. Am., Vol. 104 (1), pp. 163-170, 1998.
- [32] 신기철, 박재은, 김재수, "일관성 광대역 정합장처리에 의한 수중 이동음원의 위치추적," 한국음향학회지 제 20권 제 8호, pp. 67-73, 2001.
- [33] M. D. Collins and W. A. Kuperman, "Focalization: Environmental focusing and source localization," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 90, pp. 1410-1422, 1991.

- [34] M. D. Collins, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Nonlinear inversion for ocean-bottom properties," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 2770-1783, 1992.
- [35] P. Gerstoft, "Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and a posteriori probability distributions," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95(2), pp. 770-782, 1994.
- [36] D. F. Gingras and P. Gerstoft, "Inversion for geometric and geoacoustic parameters in shallow water: Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97(6), pp. 3589-3598, 1995.
- [37] M. B. Porter, R. L. Dicus, and R. G. Fizell, "Simulations of Matched field processing in a deep-water Pacific environment," *IEEE J. Oceanic Eng.* Vol. 12, pp. 173-181. 1987.
- [38] A. Tolstoy, "Sensitivity of matched field processing to sound-speed profile mismatch for vertical array in a deep water Pacific environment," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 85, pp. 2394-2404, 1989.
- [39] C. Feulliade, D. R. DelBalzo, and M. M. Rowe, "Environmental mis-match in shallow-water matched field processing : Geoacoustic parameter variability," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 85, pp. 2354-2364, 1989.
- [40] D. R. DelBalzo, C. Feullade, and M. M. Rowe, "Effects of water-depth mismatch on matched-field localization in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 83, pp. 2180-2185, 1988.
- [41] E. C. Shang and Y. Y. Wang, "Environmental mismatching effects on source localization processing in mode space," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 89, pp. 2285-2290, 1991.
- [42] D. F. Gingras, "Methods for predicting the sensitivity of matched-field processors to mismatch," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 86, pp. 1940-1949, 1989.
- [43] M. B. Porter, *The KRAKEN Normal Mode Program*, SACLANT Undersea Research Center, 1994.
- [44] M. D. Collins, "User's Guide for RAM," NRL, Washington, 1995.
- [45] Seongil Kim, G. F. Edelmann, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and H. C. Song, "Spatial resolution of time-reversal arrays in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(2), pp. 820-829, 2001.

- [46] 국립수산진흥원 한국해양자료센터 (<http://www.nfrda.re.kr/kodc/data/sodata/index-k.html>)
- [47] L. R. LeBlanc and F. H. Middleton, "An underwater acoustic sound velocity data model," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 67(6), pp. 2055-2062, 1980.
- [48] P. Gerstoft and D. F. Gingras, "Parameter estimation using multifrequency range-dependent acoustic data in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99(5), pp. 2839-2850, 1996.
- [49] 변양현, 박재은, 김재수, "수직선배열센서를 이용한 정합장치리에서 음속분포 오정합에 의한 음원 위치추정에 관한 연구," 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제 18권 제 1(s)호, pp. 210-213, 1999.
- [50] M. Musil, N. R. Chapman, and M. J. Wilmut, "Range-dependent matched-field inversion of SWellEX-96 data using the downhill simplex algorithm," J. Acoust. Soc. Am., 106, pp. 3270-3281, 1999.
- [51] 수중음향 토모그래피 동해 해상실험 계획, 국방과학연구소 제2체계개발본부, 2001.