

# 특성치 추출 기법에 의한 강인한 정합장 처리에 관한 연구

## A Study on Robust Matched Field Processing Based on Feature Extraction

황 성 진\*, 성 우 제\*\*, 박 정 수\*\*\*  
(Sung Jin Hwang\*, Woojae Seong\*\*, Joung-Soo Park\*\*\*)

\* 서울대학교 대학원, \*\* 서울대학교 조선해양공학과, \*\*\* 국방과학연구소  
(접수일자: 2001년 5월 18일; 수정일자: 2001년 8월 27일; 채택일자: 2001년 9월 17일)

본 논문에서는 해양환경 인자의 오정합에 강인한 특성치 추출 기법에 의한 정합장 처리 방법 (FEM: Feature Extraction Method)을 요약하였다. FEM 기법을 이용하여 음원 위치를 추정하는데 선행되어 해결해야 할 두 가지 요소 즉, 제거해야 할 고유벡터의 수와 사용해야 할 환경 샘플 개수에 대하여 고찰해 보고 이에 대한 해결책을 제시하였다. 이 문제점들을 해결하기 위하여 주어진 해양환경에서 진행되는 모드들 중에서 지배적인 모드의 개수와 제거해야 할 고유벡터의 개수와의 관계를 살펴보았다. 그리고 신호벡터가 이루는 공간과 추출해야 할 고유벡터가 이루는 공간을 비교하고 두 공간의 유사성을 정량화하여 분석하였다. 정합장 처리 방법으로 추정된 음원의 위치와 실제 음원의 위치와의 상대적인 오차를 정의하고 분석결과를 보증하였다. 지배적인 모드의 개수만큼 가장 큰 고유벡터를 추출했을 경우 FEM 프로세서가 음원의 위치를 성공적으로 추정하였고, GENLMIS 해양 환경에서 최소 30개 이상의 환경 샘플을 사용해야 FEM 프로세서의 안정된 성능을 보장할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 정합장 처리, 오정합, 특정치 추출

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.5)

In this paper, matched field processing algorithm robust to environmental mismatches in an ocean waveguide based on feature extraction is summarized. However, in applying this processor to localize a source there are two preliminary issues to be resolved. One is the number of eigenvectors to be extracted and the other is the number of environmental samples to be used. To determine these issues, the relation between the number of dominant modes propagating in a given ocean waveguide and that of eigenvectors to be extracted is analyzed. Then, the analysis results are confirmed by the subspace analysis. This analysis quantifies the similarity between the subspace spanned by the signal vectors and that spanned by the eigenvectors to be extracted. The error index is defined as a relative difference between the location estimated by the current processor and the real source location. It is identified that in the case of extracting the largest eigenvectors equal to the number of dominant modes in a given environment, the processor localizes the source successfully. From the numerical simulations, it is shown that use of at least 30 environmental samples guarantee stable performance of the proposed processor.

**Keywords:** Matched field processing, Robustness, Dominant modes, Error index

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5.5)

## I. 서론

정합장 처리는 해양 도파관에서 음장의 공간적인 복잡성을 이용하여 음원의 거리, 수심, 방위각 등의 위치를 추정하는 일반적인 빔형성 방법으로, Bartlett, MV (minimum variance), MCM (multiple constraint method) 등 여러 가지 알고리즘이 고안되었다[1]. 실제 해양환경은 시·공간적으로 계속 변화하기 때문에 해양환경을 모델링하는 데에는 불확실성이 존재하며, 이러한 불확실성은 오정합이라는 형태로 나타난다. 오정합은 해양환경에 지배적인 영향을 받기 때문에 완전한 해결이 불가능하며, 정합장 처리 알고리즘의 음원 위치 추정 성능을 저하시킨다. 이러한 오정합의 영향을 극복하기 위한 연구가 계속 되어 왔고, 오정합에 견고한 여러 가지 정합장 처리 방법들이 고안되었으며 대표적인 방법으로 OUF (optimum uncertain field processor)[2]와 FEM (feature extraction method)[3]이 있다. OUF 알고리즘은 통계적인 처리방법으로 인하여 해양환경인자의 오정합에 강인하다는 장점을 지니고 있으나, 계산시간이 오래 걸린다는 단점을 지니고 있다. 이에 반해 FEM 알고리즘은 중요성 추출 방법을 도입함으로써 계산시간을 줄일 수 있도록 고안되었다.

특성치 추출기법인 FEM 프로세서는 교란된 환경 인자들을 가지고 얻은 다수의 복제 신호들로부터 공통된 신호의 특징을 추출해냄으로써 환경인자의 오정합에 대해 견고하게 반응하도록 고안되었다. 따라서 본 방법은 OUF의 음원 위치 추정 성능을 보이면서도 계산량을 줄일 수 장점을 지닌다. 그러나 FEM을 적용하기 위하여 선행되어 결정해야 할 두 가지 요인이 있다. 이는 (1) 제거해야 할 고유벡터의 수와 (2) 사용해야 할 환경 샘플 개수이다.

본 논문에서는, 위의 문제점을 해결할 목적으로 주어진 해양환경에서 진행하는 음파모드들을 분석하여 지배적인 모드의 개수와 제거해야 할 고유벡터의 개수와의 관계를 살펴보았다. 또한, 신호벡터가 이루는 공간과 공분산 행렬로부터 추출한 고유벡터의 유사성을 정량화하여 분석하였다. 끝으로, 정합장 처리 방법으로 추정된 음원의 위치와 실제 음원의 위치 사이의 상대적인 오차를 정의하고 이 오차 지표를 이용하여 분석 결과를 보증하였다.

지배적인 모드의 개수만큼 공분산 행렬의 가장 큰 고유벡터를 추출했을 경우 FEM 프로세서가 음원의 위치를 성공적으로 추정하였고, 최소 30개 이상의 환경 샘플을 사용하면 FEM 프로세서의 안정된 성능을 보장할 수 있음을 확인하였다.

## II. 특성치 추출 기법

이산 Karhunen-Loève 확장을 이용하면, 임의의 제한된 고유벡터들을 가지고 임의의 벡터를 표현할 수 있다 [4]. 이러한 특장을 이용하여, 해양환경 인자들에 변화를 줌으로써 얻어내는 일련의 음장들로부터 어떤 복제 위치의 특징을 추출해 낼 수 있다. 행렬  $\mathbf{H}(\vec{X})$ 를 변화를 준 다른 환경인자 값을 갖고  $\vec{X}$ 에 위치한 가정된 음원으로부터 수신된  $N$ 개의 수신기 배열에서 청취된 복제벡터들을 열로 배열한  $N \times M$  행렬이라고 하자.

$$\mathbf{H}(\vec{X}) = [H_1 \ H_2 \ \dots \ H_M] \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 수신기의 개수이며  $M$ 은 환경인자에 변화를 준 회수 즉, 사용해야 하는 환경 샘플개수이다. 이 행렬로부터 복제 음장들의 공분산 행렬  $\mathbf{E}$ 를 구성한다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{H} \mathbf{H}^+ \quad (2)$$

여기서  $+$ 는 공액전치를 의미한다. 이 공분산 행렬을 이산 Karhunen-Loève 확장을 하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^M \lambda_i V_i V_i^+ \quad (3)$$

이산 Karhunen-Loève 확장을 통해서 얻은 고유벡터  $V_i$ 와 고유값  $\lambda_i$ 들 중에서 큰 고유값들을 갖는 고유벡터들은 가정된 복제 위치에서 음원에 의해 생성된 음압장의 주요한 특징으로 생각할 수 있으며 따라서 가정된 복제 위치에서의 음원의 신호로 간주할 수 있다. 이러한 고유벡터들 중 가장 큰 고유벡터들을 제거하고 나머지 작은 고유값에 해당하는 고유벡터들로 형성한 행렬을 이용하여 제약공분산행렬  $\mathbf{E}_L$ 을 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^+ \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{E}_s$ 는  $k$ 개의 가장 큰 고유값에 해당하는 고유벡터들을 제거한 후 남은  $(N-k)$ 개의 고유벡터들로 이루어진 행렬이다. 식 (4)의  $\mathbf{E}_L$ 을 사용하여 FEM 프로세서의 식을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{B}_{FEM}(\vec{X}) = \frac{1}{P^+ \mathbf{E}_L P} \quad (5)$$

여기서  $P$ 는 주파수 영역 신호 벡터이다.

이와 같이 FEM 프로세서는 교란된 해양환경 인자들을

가지고 얻은 다수의 복제 신호들로부터 공통의 특징을 추출해냄으로써 해양환경인자의 오정합에 대한 강인함을 얻을 수 있다. 그러나, 변화를 가하는 환경 샘플 개수  $M$ 과 추출해야 하는 가장 큰 고유벡터의 개수  $k$ 의 선정에 따라 FEM 프로세서의 음원위치 추정 성능이 영향을 받으므로 가장 효율적이고 안정적인 성능 발휘를 위해서 이 두 인자를 선결적으로 결정해야 한다.

### III. FEM 프로세서의 해결 문제

FEM 프로세서를 음원의 위치 추정에 적용하기 위하여 결정해야 할 두 가지 선행조건이 있음을 서론에서 서술하였다. 그 중 사용해야 하는 환경 샘플의 개수가 많으면 보다 공통되는 특징적인 신호성분을 추출할 수 있으므로 음원의 정확한 위치를 추정하는데 이익이 되나 반면 계산량이 증가하게 된다. 제거해야 하는 고유벡터의 개수는 FEM 프로세서의 정확하고 안정적인 위치 추정 성능 등 제한 성능에 결정적인 요인으로 작용한다. 본 논문에서는 이 선행조건들의 결정을 위하여 모드분석, 부공간 분석, 오차 지표를 이용하였다.

#### 3.1. 모드 분석

해양에서의 음장은 음원의 깊이에 따른 모드의 가중합으로 표현될 수 있으며 진행하는 모드들에 의해 결정된다고 할 수 있다. 이러한 진행하는 모드들 중 지배적인 모드의 개수와 추출해야 하는 모드의 개수와의 연관성을 분석하였다. 주어진 해양환경에서 지배적인 모드를 확인하기 위해 SAFARI[5]를 이용하여 모드의 크기를 비교하였고, 추가적으로 ORCA[6]를 이용하여 SAFARI의 결과를 보충하였다.

#### 3.2. 부공간 분석

FEM 프로세서는  $(N - k)$ 개의 가장 작은 고유벡터들로부터 제약 공분산행렬  $E_L$ 을 구성하여, 실제 신호 행렬과의 상호상관 값의 역수가 출력 값이 된다.  $k$ 개의 가장 큰 고유벡터를 제거한 제약행렬 즉, 영공간 (null-space) 과 신호벡터가 이루는 부공간 사이에 유사성이 없을수록 상호상관 값은 작게 된다. 결국, 제거한 고유벡터와 실제 신호벡터와의 유사성을 결정하여 추출해야 하는 고유벡터의 개수와 사용해야 할 환경 샘플의 개수를 확인할 수 있다. 실제 신호벡터와 추출해야 하는 가장 큰 고유값에 해당하는 고유벡터 사이의 유사성을 다음과 같이 정량화

하였다.

$$Norm = \sum_i PV_i \tag{6}$$

여기서  $V_i$ 는 식 (1)에서 주어진 공분산 행렬로부터 추출한 식 (3)의 정규화된 고유벡터이고,  $P$ 는 정규화된 신호 벡터이다.  $Norm$ 의 값이 1에 가까울수록 고유벡터가 이루는 공간과 신호벡터가 이루는 공간이 유사함을 의미한다.

#### 3.3. 오차 지표

오차 지표는 정합장 처리 방법을 이용하여 추정한 음원의 위치와 실제 위치와의 오차를 상대적으로 표현하였다. 수치실험을 위해 복제 음장을 구성함에 있어서 복제 음원의 위치를 거리방향으로 50m, 깊이 방향으로 2m 간격으로 배치하였고, 복제 음원의 앞 뒤 50m, 2m 이내로 음원의 위치를 추정하게 되는 경우 정합장 처리 방법의 음원위치 추정 성능이 좋은 것으로 하고, 실제 음원의 위치로부터 거리방향으로 100m, 깊이 방향으로 5m의 오차가 있을 경우 오차 지표의 값을 1로 하였으며, 편의상 오차 지표의 값이 1보다 작은 값일 경우 음원의 위치를 정확하게 추정하였다고 정의하였다. 오차 지표는 다음과 같이 정의된다.

$$EI = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{|x_i - x_d|}{100}\right)^2 + \left(\frac{|z_i - z_d|}{5}\right)^2} \tag{7}$$

여기서,  $x_i, z_i, x_e, z_e$ 는 각각 실제 음원과 추정된 음원의 거리방향, 깊이방향 좌표를 나타낸다. 이 지표로부터, 정합장 처리 알고리즘의 음원 위치 추정 성능을 간단하게 판단할 수 있다.

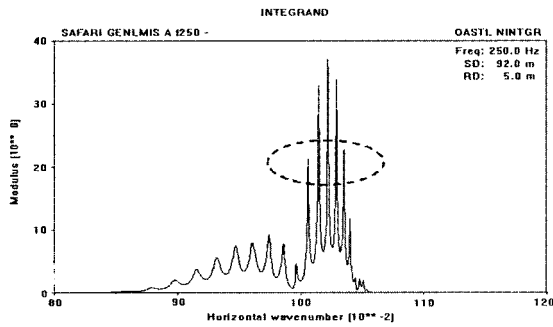
### IV. 분석 결과

본 논문에서 사용한 환경모델은 1993년 Naval Research Laboratory에서 열린 MFP workshop에서 제시된 벤치마킹 문제[7] 가운데 환경 오정합이 가장 극심한 GENLMIS 경우에 대한 수치 결과를 제시한다. 복제 음장들은 환경 인자들이 물리적으로 가능한 충분한 범위를 선택한 후 이 범위 내에서 균일하게 분포되어 있다는 가정 하에 인자들을 균일 분포에 따르도록 임의적으로 선택하여 구현하였으며[3] 사용해야 할 환경 샘플의 개수의 결정은 결정된 고유벡터의 개수를 바탕으로 환경 샘플 개수를 변화시키면서 FEM 프로세서의 위치 추정 성능을 비교하였다.

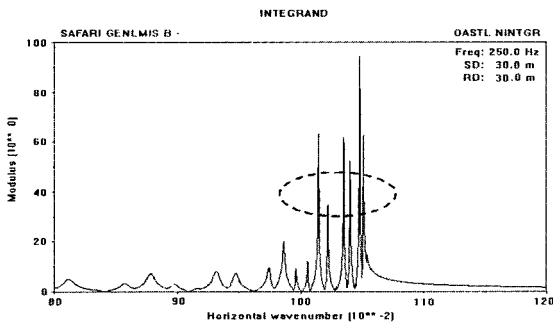
### 4.1. 고유벡터 개수 결정

SAFARI[5]를 이용하여 GENLMIS 환경에서 진행하는 모드들 중에서 지배적인 모드의 개수를 확인하였다. GENLMIS A, B, C 각각의 경우에 대해서 지배적인 모드의 개수는 각각 5, 6, 6개임을 확인하였다.

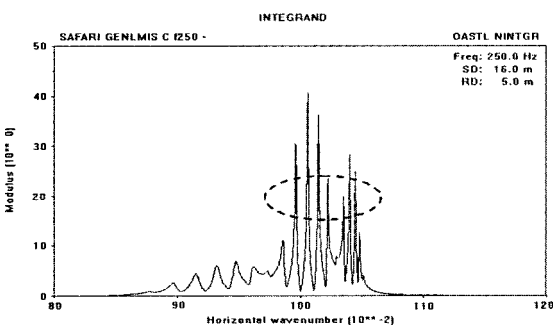
그림 1의 (a), (b), (c)는 각각 SAFARI를 이용하여 GENLMIS A, B, C 환경에서의 모드의 크기들을 보여준다. 그림 1에서 점선 타원부분이 지배적인 모드들의 크기를 나타낸다. A, B, C 각각의 모든 경우에 대해서 지배적인 모드의 개수만큼, 그리고 모드 개수보다 1~2개 적게 고유벡터를 제거했을 경우 좋은 위치 추정 결과를 보여준다. 이러한 위치 추정 결과를 표 1에 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

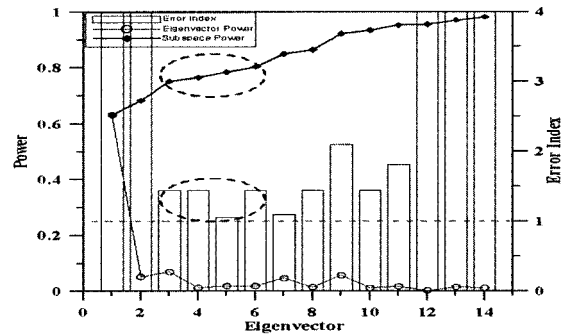
그림 1. GENLMIS 경우의 지배적인 모드  
Fig 1. Dominant modes for GENLMIS case.

표 1. FEM 프로세서 위치 추정 결과

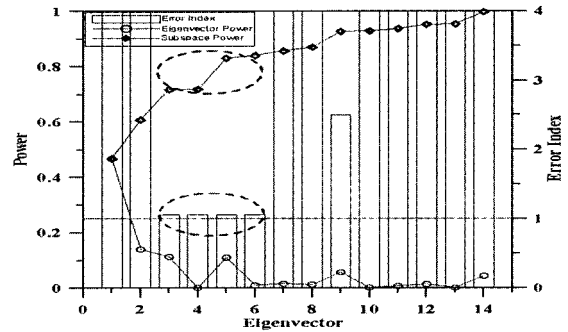
Table 1. Localization results for GENLMIS case using FEM processor.

| GENLMIS |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | A     |       | B     |       | C     |       |
| k       | range | depth | range | depth | range | depth |
| 4       | 6.05  | 90    | 8.85  | 74    | 7.05  | 16    |
| 5       | 6.05  | 90    | 8.85  | 74    | 7.00  | 8     |
| 6       | 6.10  | 92    | 8.85  | 74    | 7.00  | 16    |

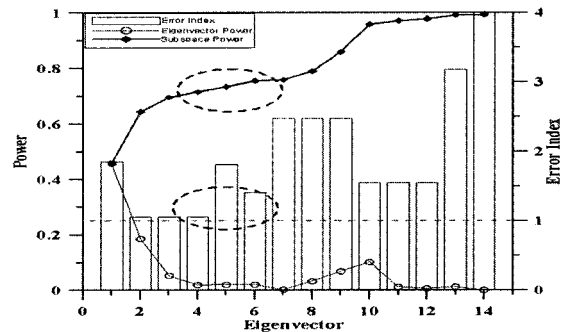
이 결과를 부공간 분석과 오차 지표를 이용하여 추출한 고유벡터의 개수에 따라서 비교하여 보증하였다. 모든



(a)



(b)



(c)

그림 2. GENLMIS 경우의 Norm과 오차 지표  
Fig. 2. Norm and error index for GENLMIS case.

경우 지배적인 모드개수와 같은 고유벡터를 추출하였을 경우에 오차 지표가 1내외의 작은 값을 보임을 확인하였고, *Norm*도 0.7 이상의 값으로 실제 신호벡터가 이루는 공간과 추출한 고유벡터들이 이루는 공간이 상당한 유사성을 보이고 있음을 확인하였다. GENLMIS A, B, C에 대한 오차 지표와 *Norm*을 각각 그림 2의 (a), (b), (c)에 나타내었다.

이러한 결과들로부터 FEM 프로세서를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 경우 주어진 해양환경에서 지배적인 모드의 개수에 해당하는 가장 큰 고유값에 해당하는 고유벡터들을 추출하는 것이 좋은 성능을 보장함을 확인하였다.

### 4.2. 환경 샘플 개수 결정

사용해야 할 환경 샘플 개수의 결정은 수치 실험 결과를 바탕으로 결정하였다. 사용하는 환경 샘플의 개수를 변화시키면서 FEM 프로세서의 위치 추정 성능을 보았고 그 결과 음원의 위치를 안정적으로 추정하는 샘플 개수를 결정하였다.

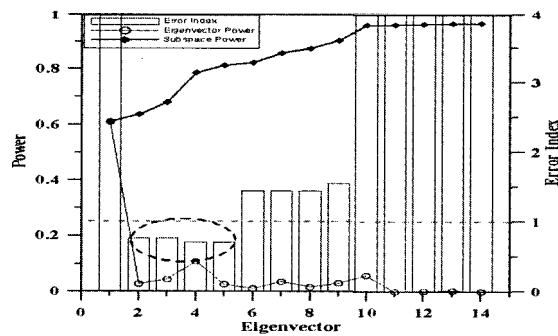
GENLMIS 해양환경일 때 각각 10, 20, 30개의 환경 샘플을 사용하여 음원의 위치 추정결과를 비교해 보았다.

서로 다른 10개의 환경 샘플을 사용한 결과를 그림 3에 나타내었다. 10개의 환경 샘플을 사용한 결과, 그림 3(a)의 경우에 환경 샘플로부터 얻은 고유벡터가 신호벡터를 잘 반영하고 있는 반면 그림 3(b)의 경우는 그렇지 않음을 알 수 있다.

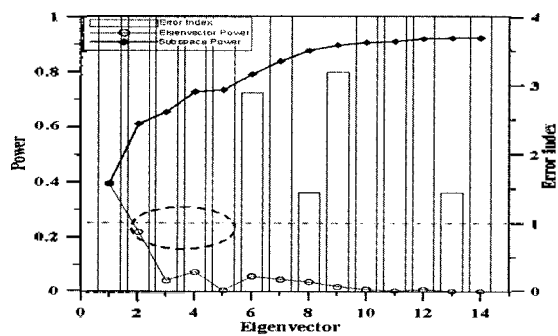
20개의 서로 다른 환경 샘플을 사용하였을 경우에도 10개의 경우와 유사한 결과를 주는 것으로 나타났으며 이는 그림 4에서 확인할 수 있다.

반면 30개의 서로 다른 환경 샘플을 사용하여 얻은 고유벡터는 일반적으로 신호벡터의 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 이 경우, 고유벡터의 개수에 따라서 오차 지표와 *Norm*을 그림 5에 나타내었다. 오차 지표의 값이 1에 가까운 값을 나타내고 있으며, *Norm*의 값도 0.8 정도의 큰 값을 나타내고 있어 성공적으로 음원의 위치를 추정했다고 판단할 수 있다.

40, 50개의 환경 샘플을 사용한 경우에도 30개 사용한 경우와 같은 결과를 주는 것으로 확인하였다. 따라서 FEM 프로세서를 사용하여 음원의 위치를 추정하는 경우 30개의 환경 샘플을 이용하는 것이 보다 효율적이고 안정적인 성능을 보장할 수 있다.



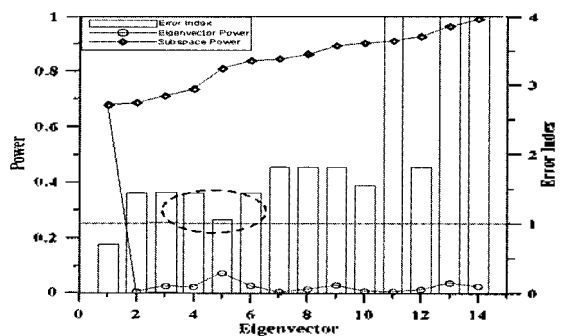
(a)



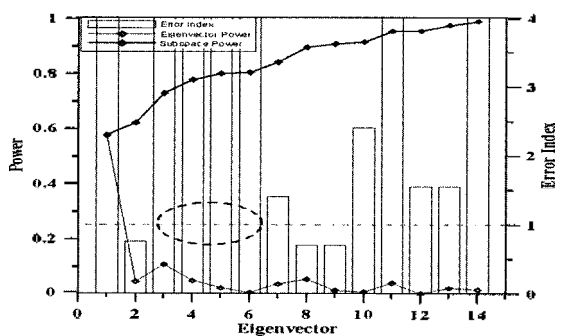
(b)

그림 3. GENLMIS A, 10개의 환경샘플을 사용한 경우의 *Norm*과 오차 지표

Fig. 3. Norm and error index using 10 environmental samples for GENLMIS A case.



(a)



(b)

그림 4. GENLMIS A, 20개의 환경샘플을 사용한 경우의 *Norm*과 오차 지표

Fig. 4. Norm and error index using 20 environmental samples for GENLMIS A case.

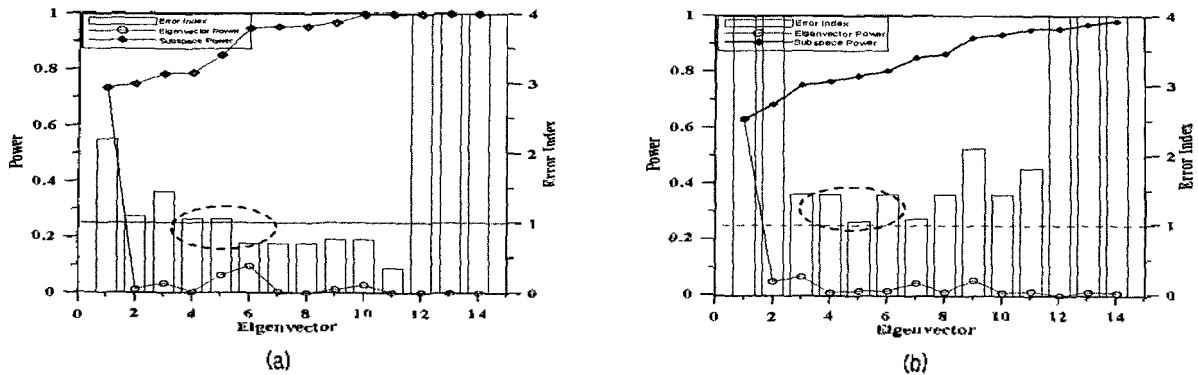


그림 5. GENLIS A, 30개의 환경샘플을 사용한 경우의 Norm과 오차 지표  
 Fig. 5. Norm and error index using 30 environmental samples for GENLIS A case.

V. 결론

본 논문에서는 가장 최근 개발된 해양환경 인자의 오정함에 견고한 FEM 프로세서에 대해 간략히 요약하였다. FEM 프로세서를 이용하여 보다 효율적이고 안정적으로 음원의 위치 추정을 수행하기 위해 선행되어 결정되어야 할 두 가지 실행 조건들을 고려하고, 이를 모드 분석, 부공간 분석, 오차 지표를 이용하여 실행 조건을 결정하였다.

주어진 해양환경에서 진행하는 모드들을 분석하여 지배적인 모드들의 개수와 추출해야 할 고유벡터의 개수와 관련이 있음을 확인하였다. 그리고, 사용해야 할 샘플의 개수를 결정하기 위해서 샘플 개수를 변화시키며 FEM 프로세서의 안정된 음원 추정 성능을 비교하였다. 이 두 가지 결정 조건을 부공간 분석과 오차 지표를 통해 보충하였다.

FEM 프로세서를 사용하여 수중에서의 음원의 위치를 추정하는 경우 주어진 해양환경에서 진행하는 모드들 중에서 지배적인 모드의 개수에 해당하는 가장 큰 고유벡터를 추출해야 하며, 30개의 환경 샘플을 사용하는 것이 보다 효율적이고 안정적임을 확인하였다. 따라서 FEM 프로세서를 가지고 음원의 위치추정을 수행하는 경우 주어진 환경에서 지배적인 모드의 개수를 확인하는 것이 요구된다.

참고문헌

1. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*, Singapore, World Scientific, 1993.
2. 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.
3. 변성훈, "음원 탐지를 위한 강인한 정합장 처리에 관한 연구," 서울대학교 조선해양공학과 석사논문, 2000.
4. K. Fukunaga, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, 2nd edition Academic press, San Diego, pp. 399-440, 1990.
5. H. Schmidt', "SAFARI: Seismo-Acoustic Fast field Algorithm for Range-Independent environments, User's Guide," SR-113, SACLANT Undersea Research Center, La Spezia, Italy, 1987.
6. E. K. Westwood, "ORCA Version 1.0 User's Guide," *Applied Research Lab.*, Univ. of Texas, Feb, 1998.
7. M. B. Porter and A. Tolstoy, "The matched field processing benchmark problems," *J. Comput. Acoust.*, vol. 2(3), pp. 161-185, 1994.

저자 약력

• 황 성 진 (Sung Jin Hwang)



1995년 3월~1999년 2월: 서울대학교 조선해양공학과 (공학사)  
 1999년 3월~2001년 2월: 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학석사)  
 ※ 주관심 분야: 정합장 처리 방법, 수중음향 신호 처리

• 성 우 재 (Woojae Seong)

현재: 서울대학교 조선해양공학과 교수  
 한국음향학회지 제13권 제2호 참조

• 박 정 수 (Joung-Soo Park)

현재: 국방과학연구소 연구원  
 한국음향학회지 제16권 제6호 참조