

시역전 처리에서 센서 배열 최적화에 관한 연구

Optimization of Array Configuration in Time Reversal Processing

주 재 훈*, 김 재 수**, 지 윤 희**, 정 재 학***, 김 덕 영*
(Jae-Hoon Joo*, Jea-Soo Kim**, Yoon-Hee Ji**, Jae-Hak Chung***, Duk-Yung Kim*)

*LIG넥스원(주), **한국해양대학교 해양공학과, ***인하대학교 전자공학과
(접수일자: 2010년 7월 26일; 수정일자: 2010년 9월 27일; 채택일자: 2010년 10월 1일)

수중음향에서 시역전 처리는 잔향음 제거 및 표적방향음 향상, 수중감시, 수중통신 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히, 근래에 활발히 연구되는 수중통신에서 시역전 처리를 이용해 신호를 시-공간적으로 집속함으로써 신호 대 잡음 비를 증가시켜 전송거리를 높임과 동시에 비트 오차율을 상당히 개선하였다. 본 논문에서는 시역전 처리에서의 센서 배열 최적화에 대한 두 가지 이슈를 다루었다. 먼저, 다양한 해양환경에서의 센서 배열에 대한 최적 센서 수에 대해 연구하였다. 두 번째는 주어진 센서 수에 대해 최적의 센서 배치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 센서 배열 최적화 알고리즘을 집속점과 관심영역에서 음향에너지 대비를 최대화시키는 센서 위치와 수를 목적함수로 하는 유전알고리즘을 기초로 하여 구체화하였다. 또한, 시역전과 신호처리 과정이 동일한 원리로 수행되는 정합장 처리를 이용하여 모의실험 결과에 대한 타당성을 실제 해양 실험데이터를 통해 검증 하였다. 최적화의 결과로 집속점에서 음향에너지가 기존의 센서배치 보다 최대 3 dB 정도 향상되는 것을 확인하였다.

핵심용어: 센서 배열 최적화, 시역전 처리, 정합장 처리, 음향에너지 대비, 규준화 수신

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

A time-reversal mirror (TRM) is useful in diverse areas, such as reverberation nulling, target echo enhancement and underwater communication. In underwater communication, the bit error rate has been improved significantly due to the increased signal-to-noise ratio by spatio-temporal focusing. This paper deals with two issues. First, the optimal number of array elements for a given environment was investigated based on the exploitation of spatial diversity. Second, an algorithm was developed to determine the optimal location of the given number of array elements. The formulation is based on a genetic algorithm maximizing the contrast between the foci and area of interest as an objective function. In addition, the developed algorithm was applied to the matched field processing with ocean experimental data for verification. The sea-going data and simulation showed almost 3 dB improvement in the output power at the foci when the array elements were optimally distributed.

Keywords: Optimization of Array Configuration, Time Reversal, Matched Field Processing, Acoustical Contrast, Normalized Depth

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.1)

I. 서론

수중음향에서 시역전 처리는 잔향음 제거 및 표적방향음 증대, 수중통신 등 다양한 분야에 응용이 가능하다 [1, 2]. 특히, 근래에 활발히 연구되고 있는 수중통신에서는 시역전 처리를 이용해 신호를 시-공간적으로 집속함으로

써 신호 대 잡음 비를 증가시켜 전송거리를 높였고, 또한 시역전 처리된 데이터를 등화기 (equalizer)의 입력으로 사용하여 전송된 신호의 비트오차율 (BER)을 개선하였다 [2]. 시역전 처리를 적용하기 위한 기존의 해양 실험에서는 전통적으로 센서를 특정 수심에 등 간격으로 배치하여 사용했다. 하지만, 시역전 처리 분야 외에서는 최적 센서 배치에 대해 몇 가지 연구가 이루어졌다. 먼저, Thomas는 시뮬레이티드 어닐링 (simulated annealing) 기법을 이용하여 선배열 센서의 빔형성을 위한 최적 센서 배치에

대해 연구하였다 [3]. 그리고, Carlo Ferla는 예인형 선배열 센서의 최적 운용수심에 대한 몇 가지 간단한 규칙: “1) 음원의 수심을 알 때 수신기의 최적 수심은 음원과 같은 위치 또는 음원과 음속이 같은 위치 (conjugate depth) 이고, 2) 음원의 수심을 모를 때 수신기의 위치는 음속이 가장 느린 수심이 최적의 위치이다.”을 이끌어 내었다 [4]. 또한, 능동소음 제어 분야에서는 음원의 위치 등을 조절하여 음향에너지 세기가 높은 지역 (공간), 즉 음향에너지 대비 (Acoustical Contrast, 이하 AC 방법)를 생성하는 연구 등이 활발히 수행되고 있다 [5].

실제 해양에서는 여러 가지 요인에 의해 센서를 설치할 수 있는 수심이 제한되는 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 시역전 처리에서 제한된 센서를 가지고 최대한의 성능을 발휘할 수 있도록 최적의 센서 배치와 수에 대해 모의실험을 통해 연구하였다. 센서 배열 최적화와 같은 비선형 최적화 문제는 일반적으로 수 많은 지역해 (local optimum)를 가지게 되는데, 이럴 경우 유전알고리즘과 같은 광역 최적화 기법이 최적해 (optimal solution)를 찾는 데 효과적으로 사용될 수 있다. 본 논문에서도 마찬가지로 시역전 처리된 음장에서의 AC방법을 목적함수로 사용하여 유전알고리즘을 통해 센서의 배치와 수에 대한 최적화 문제에 접근하였다. 해양에서 음파는 음속구조, 해수면 거칠기, 해저면 특성에 따라 다양한 음장을 생성한다. 본 논문에서는 음속구조에 따라 달라진 음장과 최적 센서 배치와의 관계를 모의실험을 통해 분석하였고, 음속구조가 다른 해양환경으로부터 최적의 센서 수를 찾아 무차원 매개변수로 일반화 하였다. 모의실험에 사용된 음장은 음속구조의 형태와 해저 매질이 다른 네 가지 해양환경에 대해 KRAKEN 전달모델 [6]을 이용하여 생성하였다. 또한, 실제 실험데이터를 기반으로 시역전 처리와 신호처리 과정이 동일한 정합장 처리를 수행하여 최적화 모의실험 결과에 대한 검증 및 타당성에 대해 분석하였다.

II. 이론적 배경

본 절에서는 시역전 처리에서 최적의 센서 배치 및 센서 수에 대한 이론적 배경과 모의실험 방법에 대해 기술하고자 한다.

2.1. 시역전 처리

최근 수중통신 등에 많이 응용되고 있는 시역전 처리 기법은 말 그대로 어떤 공간에 위치한 음원에서 송신한

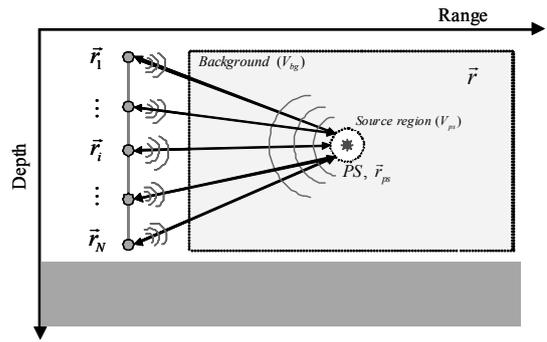


그림 1. 시역전 처리의 개념
Fig. 1. Schematic view of time reversal mirror.

신호를 수신기에 저장한 다음, 시간 영역상에서 역전 (time reversal) 시켜 다시 보내면 원래 음원 위치에 송신된 신호가 그대로 나타나는 물리적인 현상을 이용한 신호 처리 과정을 말한다. 그림 1에서 설명하는 것과 같이 주파수 영역에서의 시역전 처리 (phase conjugation)된 음장의 파워 분포 ($P(\vec{r})$)는 다음과 같이 표현된다 [7].

$$P(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N g^*(\vec{r}_i | \vec{r}_{ps}) g(\vec{r} | \vec{r}_i) = \mathbf{g}^\dagger(\mathbf{r}_{array} | \vec{r}_{ps}) \mathbf{g}(\vec{r} | \mathbf{r}_{array}) \quad (1)$$

여기에서 $g(\vec{r}_i | \vec{r}_{ps})$ 는 \vec{r}_{ps} 에 위치한 탐침음원 (probe source)으로부터 \vec{r}_i 에 위치한 수신배열의 i 번째 센서에 수신된 음압을 말한다. 마찬가지로 $g(\vec{r} | \vec{r}_i)$ 는 \vec{r}_i 에 위치한 i 번째 배열센서에서 임의의 위치 \vec{r} 로 전파되는 음압을 나타낸다. 배열의 센서 수는 N , 위 첨자 (\cdot)^{*}와 (\cdot)[†]는 각각 복소공액 (complex conjugate)과 복소전치 (Hermitian transpose)를 나타낸다. 벡터표현에서 \mathbf{g} 와 \mathbf{r}_{array} 는 $(N \times 1)$ 의 행벡터 나타낸다. 한편, 정합장 처리는 실제 해양 실험으로 얻은 $g(\vec{r}_i | \vec{r}_{ps})$ 와 음파전달 수치모델을 이용하여 얻은 $g(\vec{r} | \vec{r}_i)$, 즉 복제 음장을 이용하여 상관성을 얻는 처리 과정이다.

2.2. 유전알고리즘을 이용한 최적화

시역전 처리에서 집속점에서의 음압 준위를 높이기 위한 센서의 배치와 센서 수는 최적화 문제에 많이 적용되는 유전알고리즘을 이용하여 구하였다. 유전알고리즘은 생물이 유전과 진화 과정을 통해 더 나은 개체로 발전한다는 자연계의 진화원리를 모방하여 최적화 문제를 수치적으로 풀어가는 알고리즘을 말한다. 비교적 단순한 연산 방법으로 구현하기도 쉬워 다양한 분야에서 최적화 문제를 다룰 때 많이 사용한다 [8].

센서 배치와 센서 수를 최적화하는 문제의 목적함수로 는 음향에너지 대비, 즉 AC 방법을 사용하였다. AC방법

은 능동소음억제 분야 [5, 8]에서 연구가 활발히 진행되고 있는 음향에너지 집중 지역 (acoustical bright zone)의 개념을 지역전 처리에 적용한 것으로 그림 1에 나타난 것과 같이 지역전 처리된 음장의 파워 분포 ($P(\vec{r})$)에서 배경 영역 (V_{bg})의 공간-평균 파워와 집중 지점, 즉 탐침 음원 위치 (V_{ps})에서의 파워 비로 정의하였다. 배경 영역의 공간-평균 파워 (σ_{bg})와 집중점에서의 파워 (σ_{ps})는 각각 식 (2), (3)과 같이 표현되고 이 식들로부터 음향에너지 대비 (γ)는 식 (4)와 같이 된다 [9].

$$\sigma_{bg} = \frac{1}{V_{bg}} \int_{V_{bg}} P(\vec{r})P^*(\vec{r})dV \quad (2)$$

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{V_{ps}} \int_{V_{ps}} P(\vec{r})P^*(\vec{r})dV \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_{bg}} \quad (4)$$

유전알고리즘을 이용한 센서 배치 최적화 과정은 그림 2에서 설명하고 있다. 먼저, 시뮬레이션을 위한 파라미터 값을 초기화한다. 두 번째 단계에서는 교배 (crossover)를 위한 유전자를 난수적으로 발생하여 유전자 인구를 초기화한다. 최적화 문제의 성격에 따라 어떤 것을 유전자로 선택 해야 할 지를 결정하는데, 본 논문에서는 송수신 배열 (transmit/receiver array, TRA)에서 센서가 위치한 수심을 유전자로 하였다. 세 번째 단계에서는 난수적으로 발생된 유전자를 목적함수에 적합한 정도를 평가하여 순서대로 나열한다. 여기서, 세대별로 적합도가 가장 좋은 유전자를 이전의 적합도와 비교하여 갱신한 다음에 유전자와 적합도를 같이 저장한다. 네 번째 단계에서는 적합도에 따라 나열된 우수한 유전자들 간의 교배를 통하여 새로운 유전자를 생성하고 열성인 유전자는 도태시킨다. 여기서, 새로운 유전자 생성을 위해 돌연변이 과정을 수행하는데 돌연변이 비율은 1/16 (6.25%)로 하였다. 다음으로 앞의 세 번째와 네 번째 과정을 입력된 세대수만큼 수행한다. 그리고 세대별로 적합도가 가장 좋은 유전자를 이전의 적합도와 비교하여 갱신한 다음 유전자와 적합도를 저장한다. 유전알고리즘에 의해 성공적인 최적해를 얻기 위해서는 ‘인구 크기’, ‘세대 수’, ‘돌연변이 비율’ 등과 같은 유전알고리즘 파라미터들을 신중하게 선택해야 한다. 본 논문에서는 여러 차례 모의실험에서 목적함수의 값을 안정적으로 수렴하도록 하는 파라미터를 사용하였으며, 자세한 내용은 표1에 정리하였다. 추가 설명하자면, 표 1에 나타난 값들과 이들보다 큰 값을 사용해서 실험을 해도 결과는 거의 같은 것을 확인하였다.

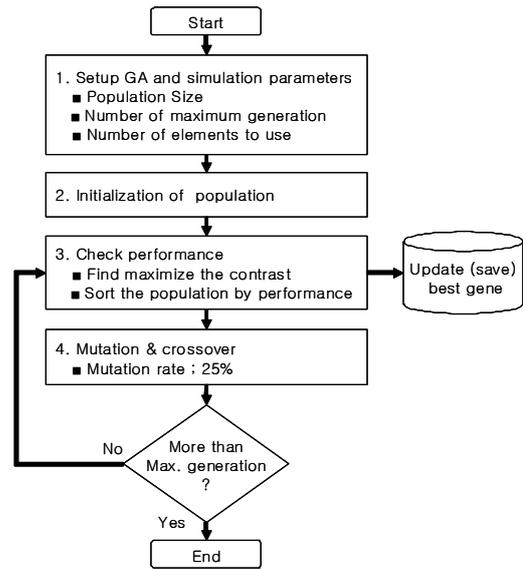


그림 2. 유전자 알고리즘을 이용한 센서 배치 최적화 과정
Fig. 2. Flow diagram for the optimization of array elements using GA.

표 1. 유전알고리즘의 입력 변수
Table 1. Parameters for genetic algorithm.

파라미터 (Parameter)	값 (Value)
인구 크기 (Population size)	1024
세대 수 (Number of generation)	25
돌연변이 비율 (Mutation rate)	6.25%

2.3. 센서 배열 최적화 모의실험 방법

센서배열 최적화를 위한 모의 실험에서 만족한 결과를 얻기 위해서는 지역전 처리의 집중크기 (focal size)를 충분히 반영할 수 있는 해상도로 수신 센서를 배치하여야 한다. 해양 도파관에서의 집중크기는 해수면과 해저면의 반사 효과를 반영한 이미지 배열 크기를 적용하여 구할 수 있는데 [11], 해양환경 1에서 100 Hz 음원일 경우 수심과 거리 방향으로 집중크기는 약 17 m와 160 m로 계산된다. 따라서, 본 논문에서는 수심 (1 m간격) 및 거리 (5 m 간격)에 적절한 간격으로 수신기를 설치하여 충분한 해상도를 확보한 후 모의실험을 수행하였다. 실험에 사용된 탐침 음원은 수심 50 m에 위치하고, 수신기와의 거리는 6 km로 하였다. 모의실험에 사용된 음장과 전달함수는 KRAKEN 전달모델 프로그램 [6]을 이용하여 생성하였다. 그림 3은 본 논문에 사용된 네 가지 음향환경을 보여주고 있다. 먼저, 수중음향 모의실험에서 일반적으로 많이 사용하는 페커리스 도파관 (Pekeris waveguide) 즉, 음속 구조가 수심 100 m (1번)와 200 m (2번)에 대해 1500 m/s로 일정한 경우 (등 음속구조)와 수심 별 음속이 동해의 여름철에 나타나는 형태와 비슷한 구조를 가지는 수심 100 m 환경 (3번)

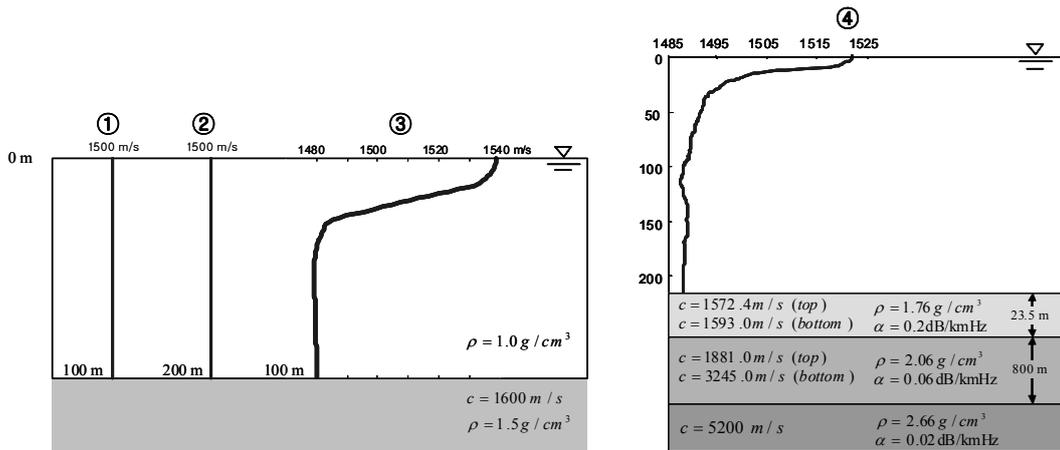


그림 3. 모의 실험에 사용된 해양환경
Fig. 3. Environment for the simulation.

과 음속, 수심, 그리고 지음향 조건이 SWellEx-96 해양 실험 [10] 시 얻은 데이터를 사용한 경우 (4번)로 하였다.

센서 배열 최적화는 센서 수가 제한되었다고 가정하여 최적 센서 배치에 대한 문제를 먼저 풀고, 다양한 해양환경에서의 최적의 센서 수에 대한 문제로 접근하였다. 해양에서는 음속구조에 따라 음파가 진행하는 경로가 달라지고 그 결과로 음장의 형성에 영향을 준다. 따라서, 최적 센서 배치는 음속구조의 변동에 따른 음장의 효과를 반영하기 위해 음속구조가 다른 해양환경 1, 3번에서 수행하였다. 최적 센서 수도 마찬가지로 음속구조가 다른 각각의 해양환경으로부터 주파수에 대한 수심, 즉 ‘규준화 수심 (normalized depth)’이라는 무차원 매개변수를 도입하여 등 음속구조와 동해의 여름철 음속구조에 일반화된 최적 센서 수를 도출하였다.

규준화 수심 (κ)은 수심을 파장으로 나눈 것으로 다음의 수식과 같이 정의하였다.

$$\kappa = \frac{D}{\lambda} = \frac{D}{c/f} = \frac{\omega D}{2\pi c} \quad (5)$$

여기서 c 는 음속, D 는 수심, λ 는 파장, 그리고 ω 는 각 주파수를 나타낸다. 수심이 동일한 해양환경에서 센서의 수를 달리하면서 음향에너지 대비 준위 (Acoustical Contrast Level, 이하 ACL)을 구할 수 있는데, 주파수를 고려한 시역전 처리는 식 (1)에 주파수 항을 추가하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\vec{r}, \omega) = \sum_{i=1}^N g^*(\vec{r}_i | \vec{r}_{ps}, \omega) g(\vec{r} | \vec{r}_i, \omega) = \mathbf{g}^*(\omega) \mathbf{g}(\vec{r} | \mathbf{r}_{array}, \omega) \quad (6)$$

식 (2)와 (3)을 확장하여 주파수 항이 들어간 음향에너지 대비 ($\gamma(\omega)$)는 최종적으로 식 (9)와 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma_{bg}(\omega) = \frac{1}{V_{bg}} \int_{V_{bg}} P(\vec{r}, \omega) P^*(\vec{r}, \omega) dV \quad (7)$$

$$\sigma_{ps}(\omega) = \frac{1}{V_{ps}} \int_{V_{ps}} P(\vec{r}, \omega) P^*(\vec{r}, \omega) dV \quad (8)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{\sigma_{ps}(\omega)}{\sigma_{bg}(\omega)} \quad (9)$$

본 논문에서 배경영역의 공간-평균 파워 $\sigma_{bg}(\omega)$ 는 전체 수심에 대한 1 km 거리의 면적을 가지는 영역의 공간-평균 파워로 하였고, 집중점에서의 파워 $\sigma_{ps}(\omega)$ 는 음원이 위치한 곳에서의 파워로 구하였다. 결국, 센서 수에 따른 ACL은 다음의 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$E(\omega, k) = \{\gamma(\omega, 1), \gamma(\omega, 2), \dots, \gamma(\omega, M)\} \quad (10)$$

여기서 k 는 1부터 최대 센서 수 (M)까지를 나타낸다. 따라서, 최적 센서 수의 목적함수인 ACL은 식 (10)과 같이 주파수에 따른 센서 수의 함수로 정리할 수 있고, 이것을 모의실험에 적용하였다.

III. 모의 실험 결과

3.1. 최적 센서 배치

해양에서 음파는 수심에 따른 음속 차이로 발생하는 굴절, 해수면 및 해저면 반사/산란 등에 의해 수심에 따라 수신되는 음향 에너지의 세기가 다르다. 시역전 처리는

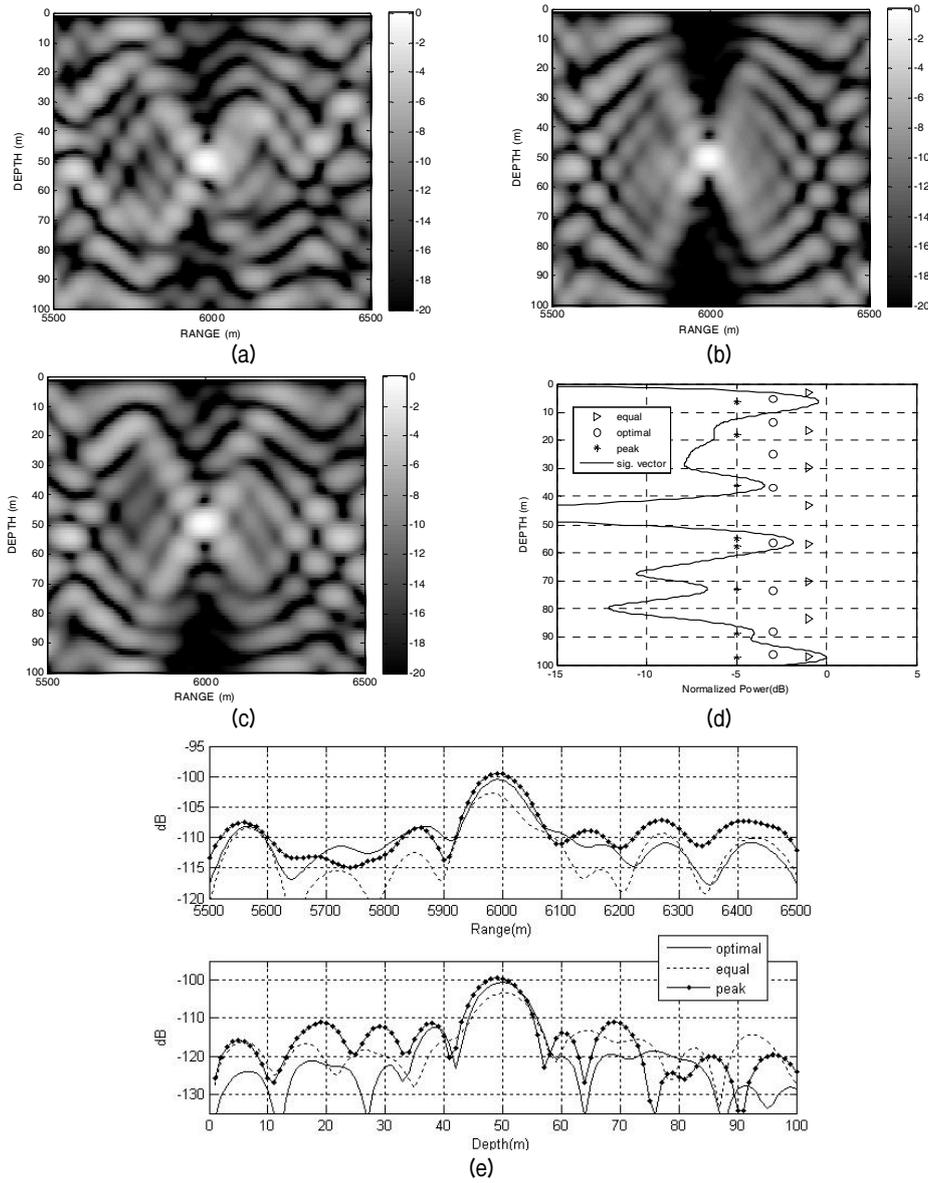


그림 4. 해양환경 1에서 (a) 등 간격 배치, (b) 최적 배치, (c) 신호벡터의 피크 지점 배치일 때 지역전 집중 결과와 (d) 센서 위치와 신호벡터 비교, (e) 집중 지점에서 거리 및 수심 별 파워 (사용된 센서 수는 8개)
 Fig. 4. Focused field of TRM with (a) equally spaced, (b) optimally placed, and (c) placed at the peak of signal vector sensors in environment 1, and comparison of (d) sensor position with signal vector, and (e) acoustic power at the foci. The number of sensors used is 8.

이러한 해양환경에 따른 음파 전달의 다양성을 이용한 것으로 수심 별 수신되는 신호의 크기, 즉 신호 벡터 (signal vector)의 파워와 최적 센서 위치와 관련이 깊다. 따라서, 본 논문에서는 센서의 위치를 신호벡터의 파워와 비교하여 분석하였다. 실험에 사용된 해양환경은 페커리스 도파관과 여름철 음속구조를 가지는 두 가지 환경으로 하여 음향 환경의 다양성을 확보하였다.

센서 배치 최적화 문제는 크게 세 가지 경우 즉, 센서를 등 간격으로 배치, 둘째 센서를 유전자 알고리즘에 의해 ACL이 최대가 되도록 하는 지점에 배치, 마지막으로 신호

벡터 파워의 피크 지점에 배치한 경우에 대해 지역전 처리 결과를 얻어 서로 비교 및 분석하였다. 여기서 주목할 점은 센서의 등 간격 배치는 수심 별 음향 환경의 다양성 확보 차원에서 수심 3 m부터 해저면으로부터 3 m 지점까지를 센서 수만큼 동일 간격으로 배치하였다. 최적 센서 배치 실험은 주어진 센서 수와 위치에 대해 지역전 처리를 실시하여 음장을 집중하고, 탐침음원의 위치에서 ACL을 최대화 하는 센서 위치를 유전자 알고리즘을 이용하여 구하였다.

그림 4는 페커리스 도파관 (해양환경 1)에서 8개 센서에 대한 최적 배치 결과를 나타낸 것으로, 사용된 음원의

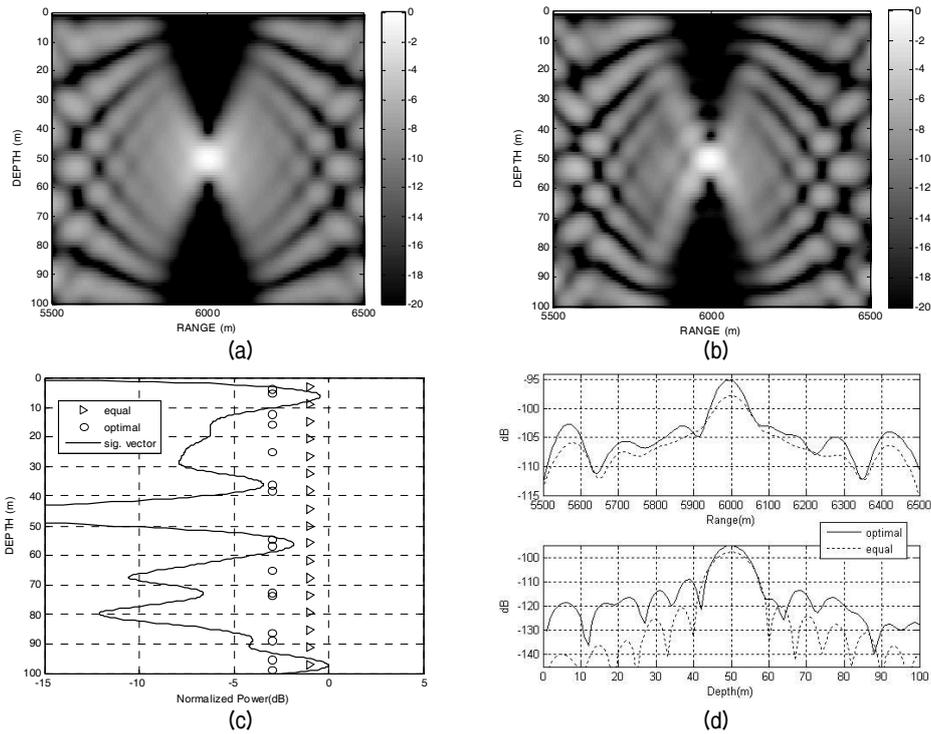


그림 5. 해양환경 1에서 (a) 등 간격 배치 및 (b) 최적 배치 일 때 시역전 집속 결과와 (c) 센서 위치와 신호벡터 비교, (d) 집속 지점에서 거리 및 수심 별 파워 (사용된 센서 수는 17개)

Fig. 5. Focused field of TRM with (a) equally spaced, and (b) optimally placed sensors in environment 1, and comparison of (c) sensor position with signal vector, and (d) acoustic power at the foci. The number of sensors used is 17.

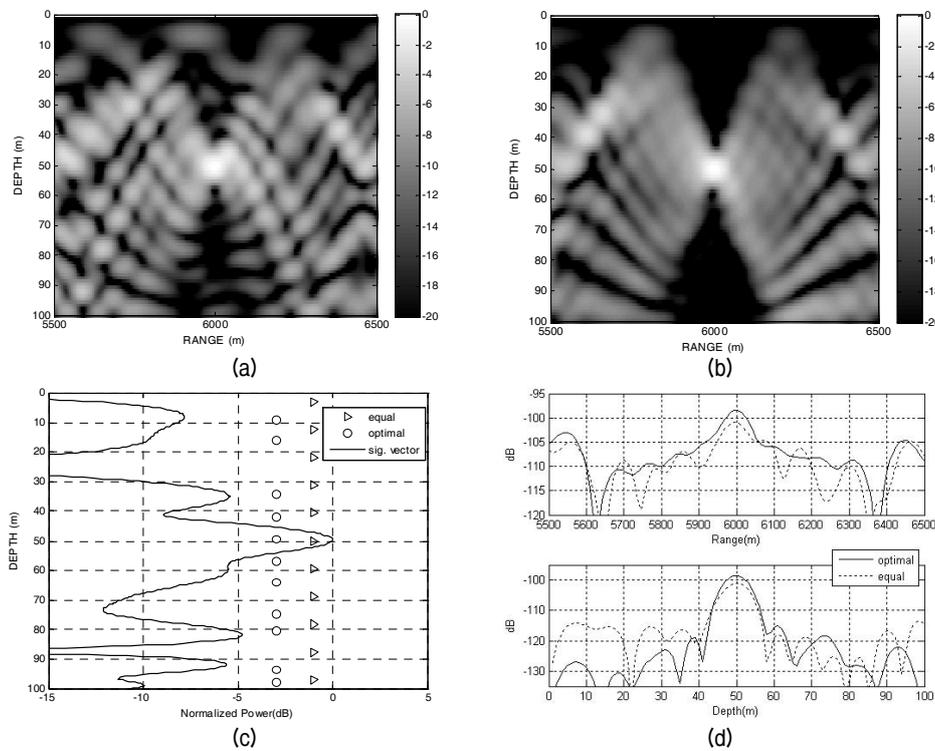


그림 6. 해양환경 3에서 (a) 등 간격 배치 및 (b) 최적 배치 일 때 시역전 집속 결과와 (c) 센서 위치와 신호벡터 비교, (d) 집속 지점에서 거리 및 수심 별 파워 (사용된 센서 수는 11개)

Fig. 6. Focused field of TRM with (a) equally spaced, and (b) optimally placed sensors in environment 3, and comparison of (c) sensor position with signal vector, and (d) acoustic power at the foci. The number of sensors used is 11.

수심은 50 m 이고 주파수는 300 Hz 이다. 그림 4 (a)와 (b), (c)는 각각 센서를 동일한 간격, 최적 배치 및 신호벡터의 피크 위치에 배치했을 때 지역전 처리에서 집속된 음장을 나타낸 것 이다. 센서를 최적으로 배치했을 때 집속 지점이 뚜렷하고 집속점 이외에서 에너지 준위가 낮은 것을 알 수 있다. 그림 4 (d)는 신호벡터의 파워 (실선)와 신호벡터 파워의 피크에 해당하는 위치 (*), ACL을 최대화하는 결과로 얻어진 센서 위치 (○)와 등 간격 위치 (▷)를 같이 나타낸 것으로, 등 간격 위치와 ACL을 최대화 하는 위치, 그리고 신호벡터 파워의 피크에 해당하는 위치는 그림 4 (a), (b), (c)에 사용된 센서 위치에 해당된다. 그림 4 (d)에서 보는 것과 같이 최적 센서 배치는 수심 전체에 골고루 분포하면서 대체적으로 신호벡터 파워가 큰 지점에 위치하게 되는 것을 알 수 있다. 그림 4 (d)에서 언급한 세가지 센서 배치에 대해 집속 지점에서의 거리 및 수심 별 파워 (최적 배치: 실선, 등 간격 배치: 점선, 피크 위치 배치: 점과 실선)를 그림 4 (e)에 나타내었다. 센서를 피크 지점에 배치하였을 때는 집속점에서 파워가 커지지만 원하지 않은 곳에서도 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 최적의 센서 배치는 집속점에서 파워를 높이면서 나머지 부분은 낮추는 이른바 ACL을 높이는 결과를 보인다.

그림 5는 그림 4와 동일한 해양환경에서 17개의 센서를 가지고 실험한 결과를 나타낸 것 이다. 센서의 위치가 앞에서 설명한 8개의 센서를 사용한 경우와 마찬가지로 수신기 위치에서 음장의 파워가 높은 지점에 집중되고 부엽을 방지하기 위해 파워가 낮은 쪽에도 몇 개의 센서가 위치하는 이른바 전체 수심에 대해 공간적으로 널리 분포한 것을 알 수 있다. 센서를 최적으로 했을 때 기존의 센서 배치보다 집속점에서 파워를 약 3 dB정도 높이는 결과를 보였다. 또한, 8개의 센서와 17개의 센서를 이용한 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

여름철 음속구조를 가지는 해양환경 3에서 센서 11개에 대한 최적 배치에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다. 앞에서와 마찬가지로 센서를 등 간격으로 배치하는 것보다 최적 위치에 배치하였을 때 집속점에서 음향에너지가 집중되고 부엽이 감소하는 것을 확인하였다. 그리고, 센서의 최적 위치는 대체적으로 음장의 파워가 큰 지점에 위치하게 되는 것 볼 수 있다. 여기서도 마찬가지로 최적의 센서 배치가 기존의 센서 배치보다 집속점에서 파워를 약 2.5 dB 정도 높이는 것을 볼 수 있다.

유전알고리즘을 이용하여 얻어낸 최적 센서 위치는 같은 모의 실험조건에서 반복적으로 수행해도 거의 비슷한

결과를 보였다. 따라서, 지역전 처리에서 최적 센서 배치는 다음과 같이 몇 가지 결론으로 정리할 수 있다. 첫째, 지역전 처리에서 최적 센서 배치는 신호벡터의 파워와 관계가 깊다. 둘째, 지역전 처리에서 최적 센서 배치는 수심에 따른 음장의 변화를 모두 반영하기 위해 수심에 따라 골고루 분포하는데, 특히 신호벡터의 파워가 큰 지점에 위치하게 된다. 마지막으로, 지역전 처리 집속음장의 부엽 준위를 줄이기 위해 일부 센서는 음장의 파워가 적은 쪽으로 이동한다.

정합장 처리 (matched field processing)는 수치모델에서 생성한 복제 음장 (replica)과 실제 실험에서 얻은 데이터와의 상관성을 분석하여 음원의 위치 등을 추정하는 기법으로 지역전 처리와 동일한 신호처리 과정으로 수행한다 [9, 10]. 본 논문에서는 실제 실험데이터를 이용한 정합장 처리를 수행하여 지역전 처리의 최적 센서 배치 결과와 비교 및 검증하였다.

정합장 처리의 입력으로 SWellEx-96 실험 데이터를 사용하였는데, 실험에 사용된 음원은 중심주파수가 130 Hz이고 수심 62 m에 위치하였으며, 수신기는 음원으로 부터 1.5 km 거리에 수심 94 m 에서 212 m까지 64개를 설치하였다. 본 논문에서 실시한 정합장 처리에 사용된 센서는 수심 94 m에서 212 m사이 배치된 64개 센서 중에서 11개를 사용하였다. 그림 7은 SWellEx-96 실험 데이터를 이용하여 센서를 (a) 동일한 간격으로 배치했을 때와 (b) 최적으로 배치 했을 때의 정합장 처리 결과와 (c) 여기에 사용된 센서 위치 (동일한 간격:▷, 최적 위치:○)를 신호벡터와 같이 나타내었고, (d) 음원이 위치한 수심에서 거리 및 수심에 대한 파워를 서로 비교하였다. 그림 7 (a), (b)와 (d)에서 나타내는 바와 같이 센서를 최적으로 배치하였을 때, 음원의 위치에서 파워가 증가하고 관심 영역에서 부엽이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 정합장 처리에서 최적센서 배치 또한 지역전 처리와 마찬가지로 수심에 따라 골고루 분포하면서 신호벡터의 파워가 큰 지점을 차지하는 것을 알 수 있다.

3.2. 유효 센서 개수

지역전 처리에서 수심과 주파수의 함수로 결정되는 규준화 수심 (k)과 음속구조 변동에 따라 최적의 성능을 발휘하는 유효 센서 수를 모의실험을 통해 분석하였다. 실험은 3.1절에서와 마찬가지로 음속구조 또는 수심이 다른 네 가지 해양환경 모두를 사용하여 수행하였다. 실험의 절차는 다음과 같다. 먼저, 주어진 센서 수에서 ACL을 최대화하는 최적의 센서 배치와 이 위치에서의 ACL을 특

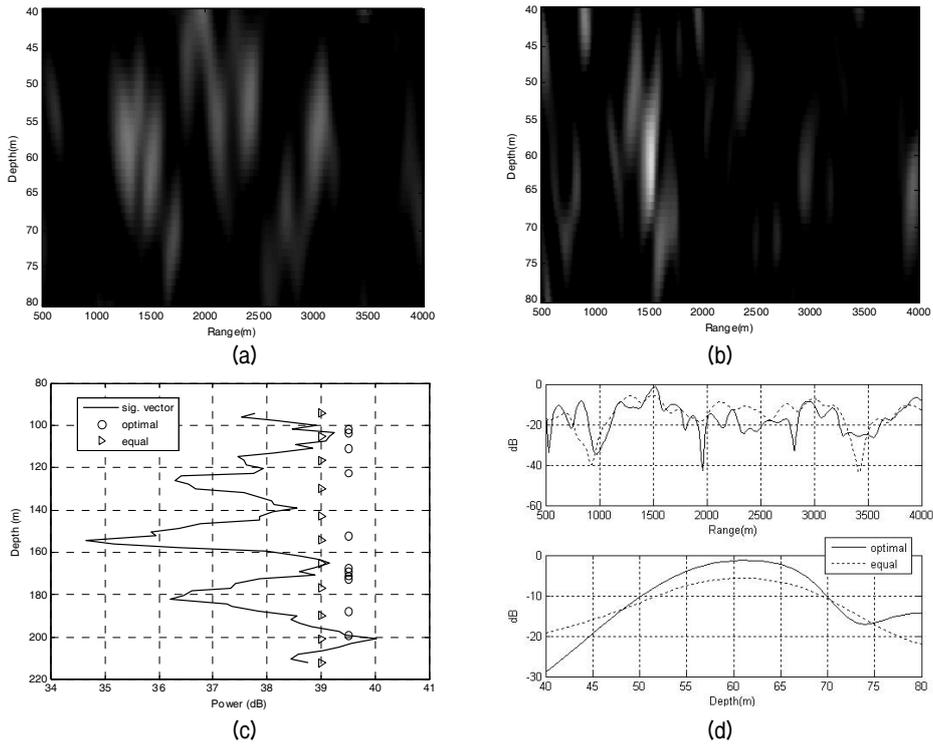


그림 7. SWellEx-96 실험에서 (a) 등 간격 배치 및 (b) 최적 배치 일 때 정합장 처리 결과와 (c) 센서 위치와 신호벡터 비교, (d) 집중 지점에서 거리 및 수심 별 파워 (사용된 센서 수는 11개)

Fig. 7. Ambiguity surface of matched field processing with (a) equally spaced, and (b) optimally placed sensors in the SWellEx-96, and comparison of (c) sensor position with signal vector, and (d) acoustic power at the foci. The number of sensors used is 11.

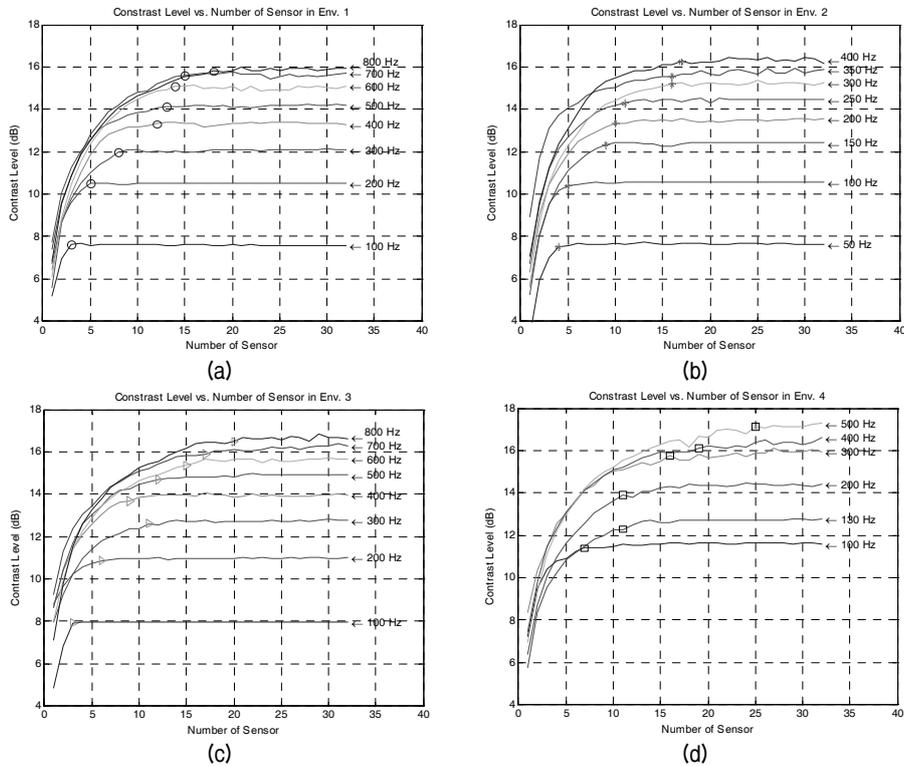


그림 8. 주파수 별 센서 수에 따른 음향에너지 대비 (a) 해양환경1, (b) 해양환경2, (c) 해양환경3, (d) 해양환경4

Fig. 8. Acoustical contrast level as a function of number of sensors with frequencies in (a) environment 1, (b) environment 2, (c) environment 3, and (d) environment 4.

정 주파수의 음원을 이용하여 구하였다. 그런 다음 센서 개수를 증가시키면서 센서 수에 대한 ACL을 차례로 구하였다. 그리고, 주파수가 다른 음원을 이용하여 앞의 과정을 반복 수행한 다음 최종적으로 주파수와 센서 수에 따른 ACL을 산출하였다.

모의 실험에 사용된 네 가지 해양환경에서 주파수 별 센서 수에 따른 ACL을 각각 그림 8의 (a) 해양환경 1, (b) 해양환경 2, (c) 해양환경 3, (d) 해양환경 4에 나타내

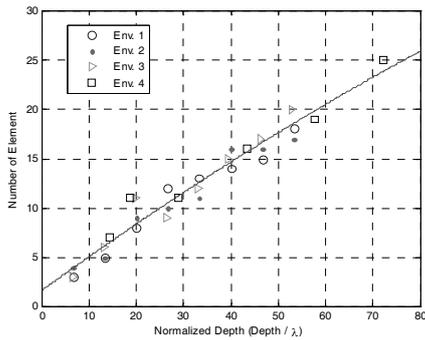


그림 9. 규준화 수심에 따른 최적 센서 수
Fig. 9. Optimal number of sensors as a function of normalized depths.

었다. 그림에서 알 수 있듯이 센서 수가 증가함에 따라 음향에너지 준위도 같이 증가하다가 어느 정도에서 더 이상 증가하지 않는 수렴상태가 된 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 센서 수가 증가해도 더 이상 음향에너지 준위가 증가하지 않는 유효 센서 수를 최적 센서 수로 하였다. 수심을 주파수로 나눈 무차원 매개변수인 규준화 수심을 적용하여 그림 8의 결과로부터 네 가지 해양환경에 대한 최적 센서 수를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 규준화 수심이 증가함에 따라 최적의 센서 수 역시 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

그림10은 SWellEx-96 실험데이터를 이용한 정합장 처리에서 (a) 사용된 센서 수에 대한 음향에너지 대비 준위와 유전자 알고리즘을 통해 선택된 센서가 (b) 3개, (c) 7개, (d) 21개 일 때 정합장 처리 결과를 나타낸 것이다. 그림 10 (a)에서 보는 바와 같이 음향에너지 대비 준위가 센서 수 7개 이상에서 수렴상태가 된 것을 알 수 있다. 그림 10 (b), (c), (d)는 각각 센서 수가 적을 경우, 적절할 경우와 많을 경우에 대해 정합장 처리 결과를 나타낸 것이다. 센서 수가 적을 때는 부엽 준위가 증가하여 원래 음원의 위치가 아닌 곳에 음향에너지 세기가 커지지만,

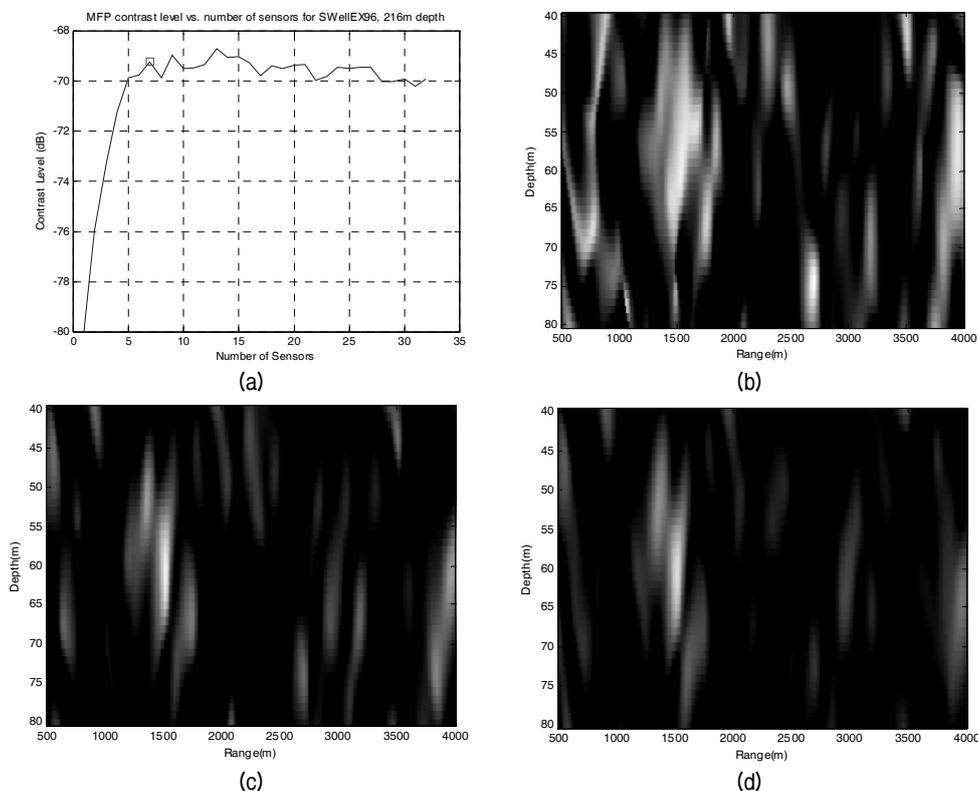


그림 10. 정합장 처리에서의 (a) 센서 수에 따른 음향에너지 대비 준위와 센서 수가 (b) 3개, (c) 7개, (d) 21개 일 때 결과 비교
Fig. 10. Optimal number of sensor with (a) contrast level as a function of number of sensors and comparison of ambiguity surface using (b) 3, (c) 7, (d) 21 sensors respectively.

표 2. 시역전 처리 배열에서의 센서 간격
Table 2. Spacing of sensors in the TRM array.

주파수	해양환경 1			해양환경 2			해양환경 3			해양환경 4			
	κ	N	β	κ	N	β	κ	N	β	κ	N	β	
50	-	-	-	6.7	4	1.3	-	-	-	-	-	-	
100	6.7	3	1.7	13.3	5	2.2	6.7	3	1.7	14.4	7	1.8	
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.7	11	1.6	
150	-	-	-	20	9	2.0	-	-	-	-	-	-	
200	13.3	5	2.2	26.7	10	2.4	13.3	6	1.9	28.8	11	2.4	
250	-	-	-	33.3	11	2.8	-	-	-	-	-	-	
300	20.0	8	2.2	40.0	16	2.4	20.0	11	1.7	43.2	16	2.5	
350	-	-	-	46.7	16	2.8	-	-	-	-	-	-	
400	26.67	12	2.1	53.3	17	3.0	26.7	12	2.1	57.6	19	2.9	
500	33.3	13	2.4	-	-	-	33.3	12	2.6	72.0	25	2.8	
600	40.0	14	2.7	-	-	-	40.0	15	2.5	-	-	-	
700	46.7	15	2.9	-	-	-	46.7	17	2.6	-	-	-	
800	53.3	18	2.8	-	-	-	53.3	20	2.5	-	-	-	
평균 (λ)			2.4				2.4				2.2		

적절한 수 이상일 때는 결과가 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3. 시역전 처리 센서 배열 최적화 결과 해석

앞에서 분석한 시역전 처리에서 최적 센서 배치와 유효 센서 수에 대한 결과를 바탕으로 하여 센서 배열에 대한 개략적인 규칙을 도출하였다. 표 2는 주파수 및 기준화 수심에 따른 해양환경 별 적절한 센서 간격을 파장에 대해 기준화한 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 κ 는 기준화 수심, N은 유효 센서 수, 그리고 β 는 파장에 대해 기준화 된 센서 간격을 나타낸 것이다. 표 2에서 보는 바와 같이 각 해양환경에서의 평균 센서 간격은 파장의 약 2.2에서 2.4배 정도가 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 시역전 처리에서 센서 간격은 파장의 약 2배 정도가 적절한 것으로 분석하였다.

의 파위가 큰 지점에 위치하게 된다. 이렇게 해서 얻은 최적의 센서 배치는 기존의 배치보다 집중점에서 파워를 3 dB정도 향상 시켰다. 시역전 처리에서 센서 수가 증가함에 따라 음향에너지 준위도 증가하는데, 센서 수가 증가해도 더 이상 음향에너지 준위가 증가하지 않는 수렴상태가 존재한다. 이러한 수렴상태를 기준으로 최적의 센서 수를 결정하였다. 또한, 최적의 센서 수를 기준화 수심이 라는 무차원 매개변수를 도입하여 다양한 해양환경에 적용이 가능하도록 일반화하였다. 모의 실험 결과, 시역전 처리에서 최적 센서 수는 기준화 수심에 따라 선형적으로 증가하였고, 센서간의 간격은 파장의 약 2배 정도가 적절하다는 개략적인 규칙을 이끌어 내었다. 끝으로, 본 논문의 알고리즘은 해양환경의 효과가 미리 파악된 고정된 위치에서 시역전 처리를 이용할 때 유용할 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD100002KD)

참고 문헌

1. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, K. G. Sabra, and T. Akal, "Passive reverberation nulling for target enhancement," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 122, no. 6, pp. 3296-3303, 2007.

IV. 요약 및 결론

실제 해양에서는 여러 가지 요인으로 인해 설치할 수 있는 센서의 수와 위치가 제한될 수 있다. 본 논문에서는 시역전 처리에서 최적의 센서 배치와 수에 대해 모의실험을 통해 분석하였다. 또한, 실제 실험데이터를 이용한 정합장 처리를 수행하여 시역전 처리의 최적 센서 배치와 수에 대한 결과의 타당성을 검증하였다. 실험 결과, 최적의 센서 배치는 수심에 따른 음장의 변화를 모두 반영하기 위해 수심에 따라 골고루 분포하는데, 특히 신호벡터

2. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, M. Stevenson, and T. Akal, "Improvement of Time-Reversal Communications Using Adaptive Channel Equalizers," *IEEE J. Ocean Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 487-496, 2006.
3. Thomas J. Hayward, "Optimization of hydrophone placement for acoustic arrays using simulated annealing," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 95, no. 1, pp. 201-212, 1994.
4. Carlo M. Ferla and Michael B. Porter, "Receiver Depth Selection for Passive Sonar System," *IEEE J. of Ocean Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 267-278, 1991.
5. J. W. Choi and Y. H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, no. 4, pp. 1695-1700, 2002.
6. M. Porter, "KRAKEN: User's Manual," <http://calib.hlsresearch.com/Modes/kraken.pdf>.
7. J. S. Kim, H. C. Song and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 5, pp. 1817-1825, 2001.
8. Bor-Tsuen Wang, "Optimal placement of microphones and piezoelectric transducer actuators for far-field sound radiation control," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 5, pp. 2975-2984, 1996.
9. K. C. Shin and J. S. Kim, "Matched field processing with contrast maximization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, no. 4, pp. 1526-1533, 2005.
10. N. O. Booth, T. Abawi, P. W. Schey, and W. S. Hodgkiss, "Detectability of low-level broad-band signals using adaptive matched-field processing with vertical aperture arrays," *IEEE J. Ocean Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 296-313, 2000.
11. Seongil Kim, G. F. Edelmann, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and H. C. Song, T. Akal, "Spatial resolution of time-reversal array in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110, no. 2, pp. 820-829, 2001.

저자 약력

• **주 재 훈 (Jae-Hoon Joo)**



1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한국해양대학교 해양공학, 수중음향 (공학석사)
 2001년 8월 ~ 현재: LIG 넥스원(주) Maritime연구센터 선임연구원
 2007년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학 (박사과정)
 ※ 관심분야: 수중통신 모델링, 수동소나 신호처리

• **김 재 수 (Jea-Soo Kim)**



1984년 5월: 미국 University of Florida, 해양공학 (공학석사)
 1989년 5월: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 (공학박사)
 1990년 ~ 1991년: 국방과학연구소 선임연구원
 1999년 8월 ~ 2001년 2월, 2009년: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
 1991년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 교수
 ※ 관심분야: 수중통신 채널 모델링, 소나 최적 탐색

• **지 윤 희 (Yoon-Hee Ji)**



2007년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)
 2009년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학석사)
 2009년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학 (박사과정)
 ※ 관심분야: 수중음향, 항적 탐지 분석

• **정 재 학 (Jae-Hak Chung)**



1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년: University of Texas at Austin 전기전산학과 (공학박사)
 2000년 ~ 2001년: University of Texas at Austin, post doctoral fellow
 2001년 ~ 2005년: 삼성종합기술원 수석연구원
 2005년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 부교수
 ※ 관심분야: cognitive radio, 차세대 이동통신, MIMO-OFDM, UWB, cross-layer 설계

• **김 덕 영 (Duk-Yung Kim)**



1982년 2월: 광운대학교 전자통신 (학사)
 1994년 2월: 아주대학교 전자공학 (석사)
 2000년 ~ 현재: 아주대학교 전자공학 (박사과정)
 1984년 ~ 현재: LIG 넥스원(주) Maritime연구센터 수석연구원
 ※ 관심분야: 수중감시, 수중통신