

Array Invariant를 이용한 수중 광대역 음원의 거리 추정성능 분석

Range Estimating Performance Evaluation of the Underwater Broadband Source by Array Invariant

김세영*, 김기만*, 천승용**, 김부일**

(Se-Young Kim*, Ki-Man Kim*, Seung-Yong Chun**, Boo-Il Kim**)

*한국해양대학교 전파공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2006년 7월 21일; 채택일자: 2006년 8월 21일)

본 논문에서는 성층화된 천해 음향도파관 환경에서 빔-시간 강도 패턴을 이용한 음원 거리추정 기법인 배열 불변성 이론에 대한 성능을 분석하였다. 기존의 수중음원 위치추적 방법으로 잘 알려진 정합장 처리, 음향도파관 불변성 추정법 등에 비해 계산량을 절감 할 수 있고, 배열 이득을 충분히 활용할 수 있는 이점을 가진다. 또한, 기타 간섭 신호원의 영향을 크게 받지 않는 상황에서는 수중 환경에 대한 자세한 사전정보가 요구 되지 않는다. 기존의 수중 음원 위치 추정법들에 비해 간단하고 순간적인 음원의 거리 추정이 가능한 배열 불변성 방법의 성능을 분석하기 위해 모의 음파 전달 음장을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 광대역을 가지는 수중 충격성 음원에 대하여 SNR에 따른 거리 추정 결과를 나타내었고 고주파 신호의 다중경로 전파 현상을 억제시키기 위해 공간 스무딩 기법을 적용하였다. 거리추정 성능을 분석한 결과, SNR 10dB의 환경에서 20%내의 오차율을 보였다.

핵심용어: 다중 모드 분산, 음원 거리 추정, 배열 불변성, 빔-시간 강도 패턴, 공간 스무딩

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper the performance of a array invariant method is evaluated for source-range estimation in horizontally stratified shallow water ocean waveguide. The method has advantage of little computationally effort over existing source-localization methods, such as matched field processing or the waveguide invariant and array gain is fully exploited. And, no knowledge of the environment is required except that the received field should not be dominated by purely interference. This simple and instantaneous method is applied to simulated acoustic propagation filed for testing range estimation performance. The result of range estimation according to the SNR for the underwater impulsive source with broadband spectrum is demonstrated. The spatial smoothing method is applied to suppress the effect of mutipath propagation by high frequency signal. The result of performance test for range estimation shows that the error rate is within 20% at the SNR above 10dB.

Key words: multi modal dispersion, source range estimation, array invariant, beam-time intensity pattern, spatial smoothing

ASK subject classification: Underwater Acoustic (5.6)

1. 서론

천해 음향도파관 환경에서는 다중 모드간의 분산 현상으로 인해서 일반적인 평면파 빔형성 기법에 의한 음원의 방위각 추정성능은 저하된다. 이는 빔 패턴 상에 나

타나는 다중 침투치나 빔의 확산 현상과 같은 효과 때문에 정확한 방위 추정이 어렵기 때문이다. 이에 비해서 이미 잘 알려진 정합장 처리 (matched field processing) 기법은 음파 전달 모델을 이용하여 다중 모드의 분산을 고려하기 때문에 적절한 방위각을 추정한다. 그러나 정합장 처리기법은 많은 계산량이 요구되며, 음파 전달 환경에 대한 정확한 정보가 추정되어야 한다. 수중 환경에 대한 사전정보가 정확하지 않을 경우 오정합 (mismatch)

책임저자: 김 기 만 (kimkim@mail.hhu.ac.kr)
660-791 부산광역시 영도구 동삼동 한국해양대학교 전파공학과
(전화: 051-410-4918; 팩스: 051-404-3986)

문제가 발생하여 성능에 큰 저하가 생기는 단점이 있다 [1].

서로 다른 모드간의 간섭패턴이 거리-주파수 영역에서 일정한 기울기로 나타나며 이러한 기울기가 모드간의 군속도의 차와 위상속도의 차의 비로 설명되는 음향도파관 불변이론 (waveguide-invariant theory)을 적용시키면 더욱 간단하게 천해 음향도파관 환경에서 음원 위치추정을 할 수 있다. 하지만 해양환경의 변화에 따라 현저하게 달라지는 음향도파관 불변 파라메타에 대한 정확한 추정이 요구되며 다중 모드간의 간섭패턴을 나타내기 위해서는 많은 수의 도파관 모드에 대한 정보가 필요하다 [2][7].

본 논문에서는 적은 계산량으로 환경 변수와 수신음장의 다중 모드에 대한 사전정보 없이 간단하고 즉각적으로 수중음원의 거리를 추정 할 수 있는 새로운 방법으로 알려진 배열 불변성 이론의 성능을 분석하고자 한다. 배열 불변성 이론은 수중 음향 센서로부터 획득된 데이터에 기존의 평면파 빔형성 기법을 적용한 후 방위각을 따라 나타나는 최대 빔-시간 강도 패턴의 불변한 성질을 이용하며 이는 오직 음원과 수신단간의 거리에 의해서만 변한다고 가정한다. 즉, 방위각과 시간축에 나타나는 최대 빔 패턴의 기울기가 음원과 센서간의 거리 정보를 가지며 이를 통해 음원의 거리를 추정 할 수 있다 [3,4].

음원의 주파수 대역 100Hz~700Hz 및 SNR (Signal to Noise Ratio) -10dB~30dB에 따른 거리 추정 성능을 분석하기 위해 KRAKEN normal-mode 모델을 이용하여 모의 수신음장을 형성하였고, 빔-시간 강도의 기울기를 구하는 과정에는 최소자승 추정법을 적용하였다. 그리고 500Hz이상의 고주파 신호의 경우 다중경로 전파 효과로 인해 빔-시간 강도 패턴에 다중 침투치 현상이 일어나 정확한 기울기를 구하기가 어렵다. 다중 침투치 현상을 억제시키기 위하여 본 논문에서는 부분배열 공간 스무딩 (subarray spatial smoothing) 기법을 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 배열 불변성 이론에 대하여 설명하고 3장에서는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 토대로 배열 불변 파라메타를 이용한 음원 추정 기법의 성능 및 장단점에 대해 고찰하였다.

II. 배열 불변성 이론

그림 1과 같은 수중환경에서 수평 선배열 센서에 신호가 수신된다고 가정할 때, n번째 모드가 수신되는 시간 t

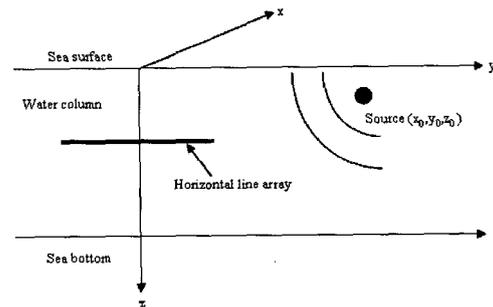


그림 1. 수중 음파 전달 환경
Fig. 1. Underwater acoustic propagation environment.

에 대한 빔형성기 출력의 최대치의 방위 $\hat{s}_n(t)$ 는 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\hat{s}_n(t) = \sin \hat{\phi}_n(t) \sin \theta_0 \quad (1)$$

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

$$t = \frac{r_0}{v_{gn}(\gamma)} \quad (2)$$

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

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

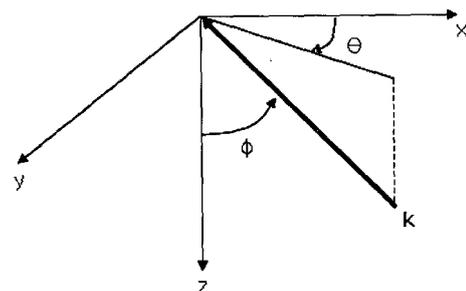


그림 2. 모드의 수신 고각과 방위에 대한 좌표
Fig. 2. The coordinate of modal elevation angle and bearing.

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

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

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

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

식 (5)를 살펴보면 이동하지 않고 방위가 고정된 음원에 대해서 배열 불변 파라메타 χ_n 는 음원의 주파수, 모드 번호, 음원 및 수신 선배열의 깊이, 음향도파관의 깊이 등의 여러 가지 수중환경 정보들에 대해 독립적인 성질을 가짐을 알 수 있다. 즉, 수중환경에 대한 정확한 사전정보가 없이도 적은 계산량으로 음원의 거리추정이 가능한 것이다. 음원의 거리는 다음과 같이 간단히 추정할 수 있다.

$$\tilde{r}_0 = \frac{c}{\chi_n \sin \theta_0} \quad (6)$$

\tilde{r}_0 는 음원의 거리 추정치를 의미하고, $\tilde{\chi}_n$ 와 $\tilde{\theta}_0$ 는 각각 배열 불변 파라메타 및 음원의 방위각의 추정치를 나타낸다. 빔형성기 출력에 나타나는 시간에 따른 빔-시간

강도 패턴으로부터 식 (6)의 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_n$ 와 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 을 직접 추출해 낼 수 있고, 이는 기존의 정합장 처리 기법이나 음향도파관 불변 파라메타를 이용한 위치 추정법에 비해 불확실성이 떨어지는 효과를 가진다.

식 (6)은 음향 도파관의 깊이에 따라 음속구조가 일정한 이상적인 경우의 거리 추정식을 나타내며, 만약 음속구조가 깊이에 따라 변한다면 음원의 거리 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{r}_0 \approx \frac{c(z)}{\tilde{\chi}_n \sin \theta_0} \quad (7)$$

식 (7)에 나타나는 깊이에 따른 음속구조의 변화는 음원의 거리 추정시 심각한 성능 저하를 야기하지는 않는다. 전형적인 천해환경에서 음속구조의 변화의 범위는 1440~1540m/s이며 만약, 음속구조를 정확히 측정하지 못한 경우 일반적으로 $c(z)=1490$ m/s로 가정하여 거리를 추정하게 된다. 이때의 거리 추정 오차율은 3% 이내이다. 식 (6)을 이용하여 정확한 음원의 위치를 추정하기 위해서는 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 와 배열 불변 파라메타 $\tilde{\chi}_n$ 를 정확히 구하는 것이 중요하다. 첫 번째 실제 음원의 방위각 $\tilde{\theta}_0$ 을 추정하는 방법은 빔-시간 강도 패턴상에서 시간에 나타나는 피크치중 최대값을 가지는 각을 음원의 방위각이라 추정하는 것이다. 즉, 모드의 차수가 고차 모드로 갈수록 수신 고각은 음원의 방위각으로부터 점점 증가하고 늦게 수신되며 신호의 감쇠가 많이 일어난다. 반면에 가장 빨리 수신되는 저차모드의 신호성분에서 감쇠가 가장 작게 되어 빔-시간 강도 패턴에서 최대값을 가지게 된다. 천해 환경에서 음원과 수신단간의 신호전달 경로를 그림3에 나타내었다. 저차 모드의 경우 감쇠가 적게 일어나고 전파 시간이 빠르며 고차 모드의 경우 감쇠 및 반사가 많이 일어나고 전파 시간이 느림을 확인할 수 있다 [5, 6].

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

$$s_{\max}(t) = \underset{s}{\operatorname{argmax}} I_{ij}(s, t) \quad (8)$$

$$\hat{s}(t) = \hat{\chi}t + d_i \quad (9)$$

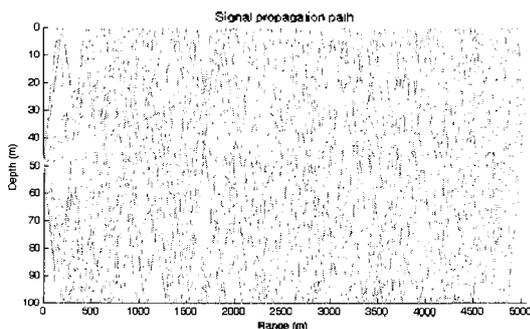


그림 3. 음원과 수신단 사이의 신호전달 경로
Fig. 3. Signal propagation path between source and receiver.

$I_b(s, t)$ 는 시간 t 와 방위각 s 에 대한 2차원 빔-시간 강도 패턴을 나타내고, $\hat{x}_k(t)$ 는 배열 불변 파라메타 \hat{x}_k 를 기울기로 가지는 1차함수이다. 최소자승 추정법을 통해 기울기 \hat{x}_k 를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$[\hat{x}_k \quad d_k]^T = (T^T T)^{-1} T^T S_1$$

$$S_1 = [s_{\max}(t_1), s_{\max}(t_2), \dots, s_{\max}(t_N)]^T \quad (10)$$

$$T = [(t_1, t_2, \dots, t_N)^T \bar{1}^T], \quad t_j = t_1 + (j-1) \Delta t_s$$

$t_s = \text{sampling interval}$

$$\bar{1} = [1, 1, \dots, 1]$$

III. 실험환경 및 시뮬레이션 결과

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

음원은 50Hz의 대역폭을 가지는 중심 주파수 100Hz ~ 700Hz의 충격성 신호가 사용되었다. 선배열 센서의 길이는 96m로 각 센서들은 등 간격으로 배치되고 Hanning-window로 taper 되었다. 모의 수신 음장은 Kraken normal-mode 모델을 사용하여 합성하였다 [8].

식 (6)으로부터 음원의 거리를 추정하기 위해 먼저 빔-시간 강도 패턴을 구하고 음원의 방위각 $\hat{\theta}_0$ 와 배열 불변 파라메타 \hat{x}_k 를 추출해야 하는데 이는 그림 5에서 보여진다. 그림 5는 중심주파수 400Hz의 음원에 대한 빔 형성기 출력의 최대값과 빔-시간 강도 패턴에 나타나는 기울기에 대한 한 예를 나타낸다.

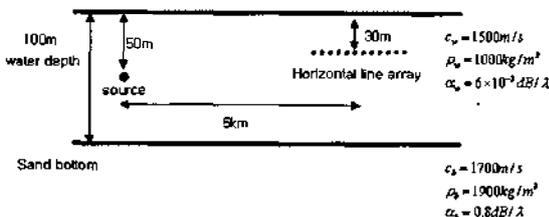


그림 4. 시뮬레이션 환경
Fig. 4. Simulation environment.

표 1. 음원의 거리 추정치

Table 1. Source range estimation value.

Source range(m) / true=5000m					
frequency \ SNR	-10dB	0dB	10dB	20dB	30dB
100Hz	1091	822	6078	4171	4062
200Hz	669	1481	3874	5505	4781
300Hz	904	3092	4848	5096	5074
400Hz	905	2798	5441	5244	5236
500Hz	451	795	1471	1187	1334
600Hz	822	1603	2766	2649	2821
700Hz	830	1287	1818	2142	2195

표 2. 거리 추정 오차율

Table 2. Error rate of range estimation.

Error rate(%)					
frequency \ SNR	-10dB	0dB	10dB	20dB	30dB
100Hz	78	83	21	16	18
200Hz	86	70	22	10	4
300Hz	81	38	3	2	1
400Hz	81	44	8	5	4
500Hz	90	84	70	75	73
600Hz	83	67	44	47	43
700Hz	83	74	63	57	56

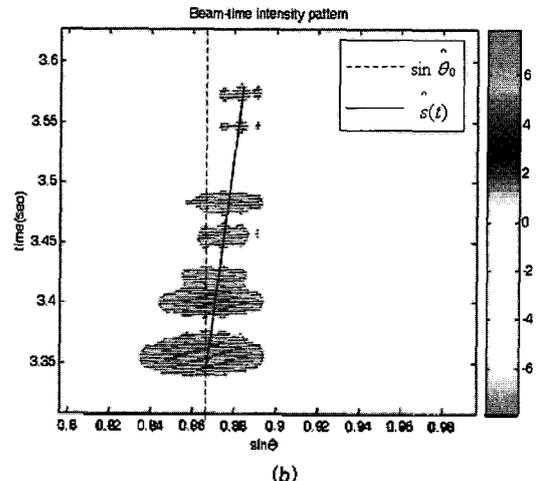
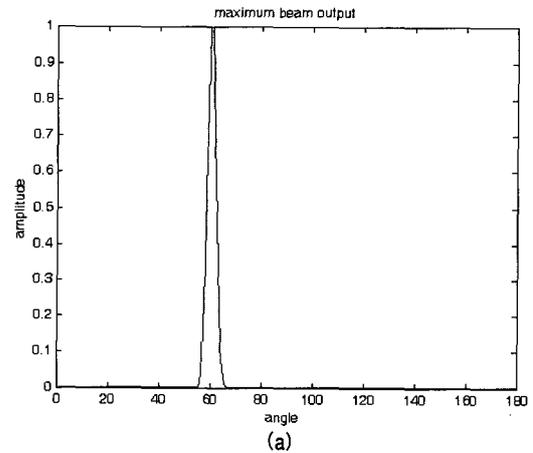


그림 5. (a) 빔출력 최대값 (b) 빔-시간 강도 패턴에 나타나는 기울기
Fig. 5. (a) maximum beamforming output (b) beam-time intensity migration line.

그림 5 (a)에서 알 수 있듯이 음원의 방위각을 60° 로 정확히 추정하고 있으며 그림 5 (b)와 같이 beam-time 패턴상에 기울기로 나타나는 배열 불변 파라메타 α_k 를 확인할 수 있다. 이때의 기울기 α_k 는 -0.1387 의 값을 가지며 식 (6)을 이용하여 거리를 추정해보면 약 5244m, 오차율은 4.86%의 결과를 가진다.

음원의 중심주파수 및 SNR에 따른 거리 추정 성능을 분석하기 위해 50Hz의 대역폭을 가지는 100Hz~700Hz의 충격성 음원에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. SNR은 $-10\text{dB} \sim 30\text{dB}$ 로 가정하였고 결과는 거리 추정치와 오차율로 나타내었다. 표 1과 2는 각각 SNR 및 신호 주파수에 따른 거리 추정치와 오차율을 보여준다. 음원의 실제 거리가 5km일때, 표 1의 거리 추정치 결과를 살펴보면 부가잡음이 현저하게 존재하는 SNR이 $-10\text{dB} \sim 0\text{dB}$ 의 환경에서는 거리 추정을 정확히 못하고 있다. 이에 따라 추정 오차율도 표 2에서와 같이 커지게 된다. 신호성분이 부가잡음에 비해 많이 존재하는 SNR이 10dB 이상인 경우의 결과를 살펴보면 100Hz~400Hz의 음원에 대해서는 오차율 20% 이내의 정확한 거리 추정 성능

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

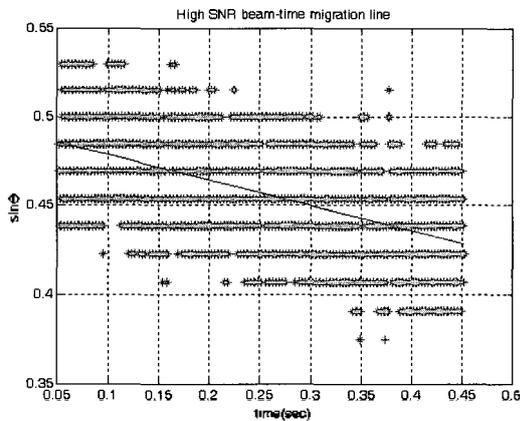


그림 6. SNR 10dB의 빔-시간 이동선
Fig. 6. SNR 10dB beam-time migration line.

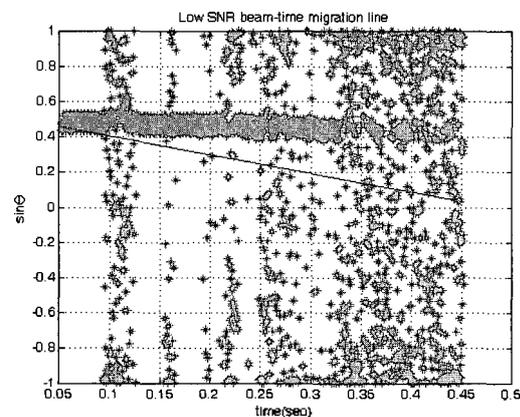


그림 7. SNR -10dB의 빔-시간 이동선
Fig. 7. SNR -10dB beam-time migration line.

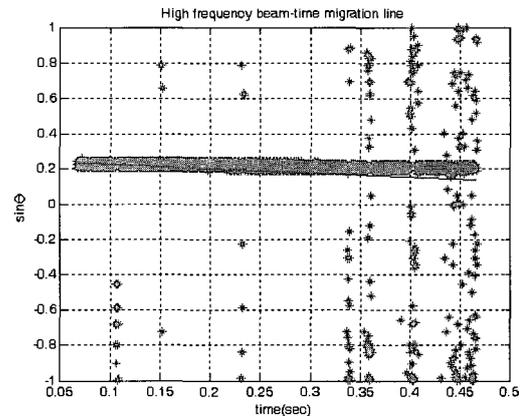


그림 8. 700Hz 신호의 빔-시간 이동선
Fig. 8. 700Hz signal beam-time migration line.

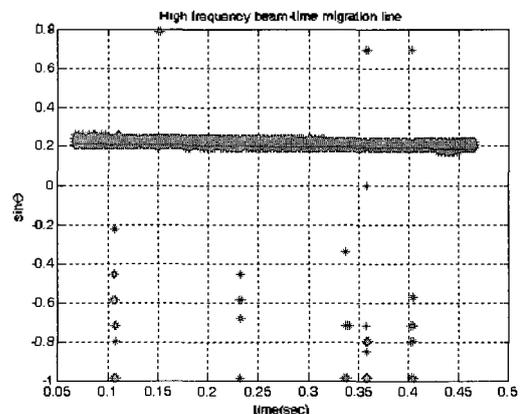


그림 9. 공간 스무딩 기법을 적용시킨 700Hz신호의 빔-시간 이동선
Fig. 9. Spatial smoothing method is applied to 700Hz signal beam-time migration line.

그림 6과 그림 7은 400Hz의 중심주파수를 가지는 신호에 대하여 SNR이 10dB인 경우와 -10dB인 경우에서 빔-시간 강도패턴을 최소자승법에 의해 fitting한 결과를 나타내고 있다. 그림 6과 같이 높은 SNR의 경우에는 신호성분의 시간에 따른 강도 패턴이 일정하게 잘 나오는 것을 볼 수 있고 스푸어리스 효과가 일어나지 않기 때문에 정확한 배열 불변 파라메타를 구할 수 있지만 그림 7과 같이 낮은 SNR의 환경에서는 신호성분에 의한 빔-시간 강도 패턴뿐만 아니라 잡음 성분으로 인해 정확한 배열 불변 파라메타를 추정할 수 없게 된다. 이는 그림 8의 고주파 700Hz 신호에 대한 빔-시간 강도 패턴에서도 같은 결과를 보여주고 있다.

다중 경로에 의한 스푸어리스 효과로 인해 주 신호성분의 방향이 아닌 다른 방향에서도 피크치가 검출되므로 최소 자승법을 적용시켜 배열 불변 파라메타를 구했을 때 오차가 나게 되고 결국 거리 추정 성능이 저하되었다. 이를 개선하기 위해 고주파 500Hz~700Hz의 신호에 대해서는 선배열 센서에 부분배열 공간 스무딩 기법을 적용시켜 빔-시간 강도 패턴을 구하였다. 부분배열 공간 스무딩 기법은 그림 10과 같이 전체 선배열 센서중 임의의 개수만큼의 센서들에 수신된 신호에 평균을 취하는 방법으로 다음과 같이 표현 할 수 있다 [9].

$$r(1) = [r_1, r_2, \dots, r_{M_s}]^T$$

$$n = M - M_s + 1 \tag{11}$$

$$R(k) = \frac{1}{M_s} \sum_{i=1}^{M_s} r(k)$$

여기서 M 은 전체 선배열 센서의 개수, M_s 는 부분배열의 개수를 의미하며 본 논문에서는 부분배열의 개수를 8개로 하였다. $R(k)$ 는 k 번째 부분배열 센서의 신호에 평균을 취한 값이다. 그림 9는 700Hz의 신호에 대하여 공간 스무딩 기법을 적용시킨 빔-시간 강도 패턴의 결과이다. 그림 8과 비교해서 스푸어리스 효과가 많이 줄어든 것을 확인 할 수가 있고 거리 추정 결과 오차율을 20%까지 향상 시킬 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 빔-시간 강도 패턴의 기울기로 나타나는 음향 불변 파라메타 \hat{x}_k 를 이용한 음원의 거리 추정

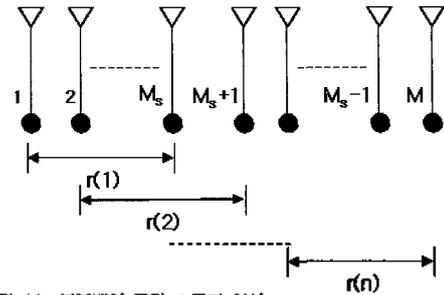


그림 10. 부분배열 공간 스무딩 연산
Fig. 10. Subarray spatial smoothing operation.

에 대하여 성능을 분석하였다. 기존의 음원 위치 추정 기법인 정합장 처리, 음향도파관 불변 이론을 이용한 방법들에 비해 계산상의 수고를 절감 할 수가 있고, 획득한 데이터로부터 음원의 거리 정보에 대한 파라메타를 바로 추출할 수 있는 장점을 가지고 간단히 음원의 거리를 추정 할 수 있었다. 시뮬레이션을 수행한 결과 SNR이 낮은 환경에서는 큰 성능 저하를 보이는 단점이 있었고 SNR이 10dB 이상되는 환경에서는 거리 추정 오차율 20% 내의 비교적 정확한 결과를 보임을 알 수 있었다. 특히 300Hz~400Hz의 주파수의 신호에 대해서는 오차율 10%내외의 정확한 거리 추정 성능을 보여줬고, 주파수 500Hz 이상의 신호에 대해서는 스푸어리스 효과로 인하여 오차율이 50%이상으로 성능이 떨어지는 결과를 볼 수 있었다. 고주파 영역에서 스푸어리스 효과를 억제하고자 공간 스무딩 기법을 적용하였고 오차율을 20%~30%까지 향상 시킬 수 있었다. 또한, 성능저하의 주요인이 되는 고차모드의 영향을 차단 할 수 있는 효과적인 방법이 적용된다면 더욱 성능을 향상 시킬 수 있을 것이다. SNR이 낮은 환경에서 큰 성능 저하를 나타내는 것으로 보아 잡음이 많이 존재하는 실제 수중 환경에 적합하게 적용시키기 위해서는 모의실험과 실제 음원에 대한 추정을 통하여 개선된 불변 파라메타 추정 방법을 고안해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 박정수, 김재수, 김성일, 신기철, 김영규 "적음 정합 처리장에서 도파관 공간내 필터링," 한국음향학회 논문지, 23 (4) 288-295, 2004.
2. 나영남 "전해 내부파에 의한 음파의 모드 간섭," 한국음향학회 학술대회지 17 (2) 125~128, 1998.
3. S. Lee and N. C. Makis, "The array invariant," J. Acoust. Soc. Am. 119 (1) 336~351, 2006.
4. S. Lee and N. C. Makis, "A new invariant method for instantaneous source range estimation in an ocean waveguide from passive beam-time intensity data," J.

Acoust. Soc. Am. **116** (4), 2646 (2004)

5. L. M. Brekhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 3rd ed. (Springer, New York, 2003)
6. T. C. Yang, "Beam intensity striations and applications," J. Acoust. Soc. Am. **113** (3), 1342-1352 (2003)
7. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, "Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow environments that vary in range and azimuth," J. Acoust. Soc. Am. **106** (5), 2454-2468 (1999)
8. M. B. Porter, *The KRAKEN Normal Mode program*, (SACLANT Undersea Research Centre, 1994)
9. T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-33, 806-811 (1985)

저자 약력

• 김 세 영 (Se-Young Kim)



2005년: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2005년~현재: 한국해양대학교 전파공학과 대학원 석사과정
 *주관실분야: 소나 신호처리, 어레이 신호처리

• 김 기 만 (Ki-Man Kim)

한국음향학회지 제22권 제5호 참조

• 천 승 용 (Seung-Yong Chun)

한국음향학회지 제16권 제6호 참조

• 김 부 일 (Boo-Il Kim)

한국음향학회지 제19권 제7호 참조