

정합필터배열처리를 이용한 수조내에서의 음원 특징 개선에 관한 연구

노용주, 손근영, 윤종락
부경대학교 정보통신공학과

Study for the Enhancement of Signal Characteristics using Matched Filter Array Processing in the Water-Tank

Yong-ju Ro, Geun-young Son, Jong-rak Yoon
Dept. of Telematics Eng. Pukyong National Univ.

요 약

수중소음체의 음원 특징을 해석하기 위해서는 배경잡음과 해면·해저반사파의 영향이 적은 심해에서 측정하여 분석하여야 한다. 그러나 측정의 어려움으로 인공 수조에서 측정하여 수면과 수조벽에 의해 발생하는 반사파들을 제거하여 신호 고유의 특징을 해석한다. 이러한 반사파들의 부가효과를 보상하여 수중소음체의 신호특징을 해석하기 위하여 정합필터배열처리(Matched Filter Array Process : MFAP)기법을 적용하고자 할 때 각 센서에 적용되는 정합필터는 처리시간의 문제로 인해 필터길이를 제한하여 구성되게 된다. 정합필터는 수조의 임펄스응답함수의 시역전함수로 정의되는데 필터길이에 따라 수신신호 특징 개선 정도가 좌우된다. 본 연구에서는 인공수조에서 부가되는 반사파들의 효과를 보상하여 수신신호 특징 개선을 위해 정합필터배열처리기법을 적용할 때 각 센서의 정합필터의 시간길이가 특징 개선에 미치는 영향을 신호대잡음비(SNR)로 정의하여 분석하였고 수조의 특성에 따른 최적의 정합필터 시간길이를 제안하고자 한다.

1. 서 론

배열시스템은 음향공간의 특성이나 음원의 정보를 획득하는데 응용된다. 인공수조에서 수중소음체의 소음특성을 해석하기 위해 사용되는 배열시스템은 수면과 수조벽의 반사파들의 영향으로 실제 소음원의 특징을 해석하기가 어렵다. 이러한 반사파들의 영향을 보상하는 방법으로 수조벽에 흡음재를 설치하는 방법과 배열신호처리기법을 이용하는 방법이 있다. 흡음재의 설치 비용이 많이 들고 수면반사파의 효과를 제거할 수 없는 단점이 있다. 배열신호처리기법으로는 빔포밍기법과 정합필터 배열처리기법 등이 제안되어 있으며, 빔포밍기법에 비해 정합필터배열처리(MFAP)는 임펄스응답함수의 시역전함수로 정의되는 정합필터를 각 센서에 적용하고 동시에 각 센서 출력을 더하여 반사파들의 부가효과를 충분히 보상하는 것으로 알려져 있다.

그러나 각 센서의 정합필터를 결정할 때 처리시간의 효율성을 위해 임펄스응답함수에서 모든 반사파들을 포함하는 시간길이를 할 수 없다. 따라서 각 센서의 정합

필터는 제한된 길이로 구성하게 되며, 모든 반사파들의 부가효과를 보상하지 못하여 분석 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 반사파들은 시간에 따라 지수적으로 감쇠되어 나타나므로 수신신호에 크게 영향을 미치는 시간영역까지만 정합필터를 구성하게 된다.

본 연구에서는 수치모의실험으로 인공 수조에서 반사파들의 부가효과를 보상하여 수중방사소음 특징을 개선하기 위해 정합필터를 적용할 때 정합필터 시간길이가 분석시스템의 성능에 미치는 영향을 신호대잡음비로 정의하여 분석하였으며, 수조의 특성(벽면의 재질)에 따른 최적의 정합필터 시간길이를 제안한다. 최적의 정합필터 시간길이는 최대 신호대잡음비의 90% 이상을 나타내는 필터길이를 정의한다.

2. 이론적 배경

인공수조에서 수중소음체로부터 방사되는 음원 $s(t)$ 가 수중청음기에 의해 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음식으로 나타내어 진다.

$$r(t) = \int s(\tau)h(t-\tau)d\tau = s(t)*h(t) \quad (1)$$

여기서 $h(t)$ 는 수조의 임펄스응답함수이다.

정합필터는 각 수중청음기의 임펄스응답의 시역전함수 $h(-t)$ 로 정의되고 각 수중청음기에서 정합 필터된 신호 $y(t)$ 는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$y(t) = r(t)*h(-t) = s(t)*h(t)*h(-t) \quad (2)$$

따라서, N개의 수중청음기로 구성된 MFA의 출력은 각 수중청음기의 정합필터 출력의 합으로써 정의된다.

$$\begin{aligned} y_o(t) &= \sum_{i=0}^N y_i(t) \\ &= \sum_{i=0}^N s(t)*h_i(t)*h_i(-t) \\ &= s(t)*\sum_{i=0}^N h_i(t)*h_i(-t) \\ &= s(t)*\hat{h}_n(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$y_i(t)$: 각 수중청음기에서 정합필터된 신호

$h_i(t)$: 각 수중청음기의 임펄스 응답

$\hat{h}_n(t)$: N개 정합필터배열처리의 임펄스응답함수의 합

인공수조에서 각 수중청음기의 임펄스 응답함수는 다음 식으로 정의된다.

$$h_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{i,k} \delta(t - \tau_{i,k}) \quad (4)$$

$A_{i,k}$: k번 반사된 파의 감쇠상수,

$\tau_{i,k}$: k번 반사된 파의 시간지연

만약 인공수조에서 K개의 반사가 있고, $A_{i,k}=1$ 인 이상적인 경우, 단일 임펄스 여기에 대한 각 수중청음기에서 정합 필터된 출력은 $(K+1)^2$ 개의 임펄스의 합으로 나타난다. 여기서 정합필터 임펄스응답의 크기는 $t=0$ 에서는 $(K+1)$ 이고 잔향신호를 형성하는 나머지 $(K+1)K$ 는 이상적인 경우 서로 다른 시각에 분포한다.

즉, Fig. 2-1에서 보이는 바와 같이 N-채널 MFA에서, $N(K+1)^2$ 개 신호중 $N(K+1)$ 개는 시간축 중심에서 나타나고 잔향잡음으로 남은 $N(K+1)K$ 개는 서로 다른 시각에 분포한다.

따라서, MFA 처리시의 SNR은 다음과 같이 정의된다.

$$SNR_{MFA} = \frac{(N(K+1))^2}{N(K+1)K} = \frac{N(K+1)}{K} \approx N \quad (5)$$

또한 전형적인 배열처리인 빔포밍기법의 SNR은 아래 식으로 표현된다.

$$SNR_{BF} = \frac{N^2}{NK} = \frac{N}{K} \quad (6)$$

식 (5), (6)을 비교하면 빔포밍기법은 반사가 많을수록 SNR이 저하되는 반면 MFA는 반사에 거의 독립적인

SNR을 얻게된다.

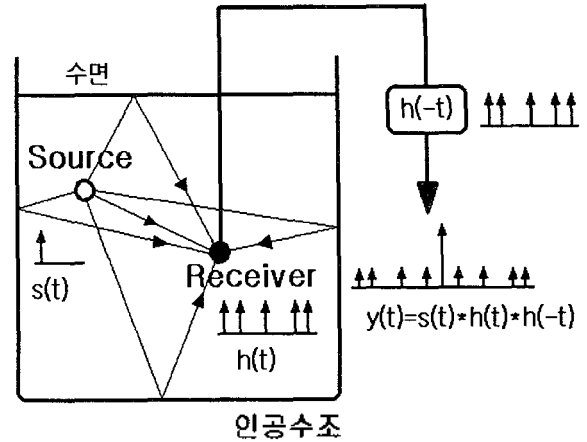


Fig. 2-1 Effect of matched filtering in an water-tank

MFA처리에서 정합필터의 길이를 제한하는 가장 큰 목적은 시스템의 처리속도를 빠르게 하기 위한 것이다. 또한 정합필터의 길이를 제한함으로써 MFA 처리의 임펄스 응답함수의 비인과성 문제를 다소 줄일 수 있다.

그러나 MFA 처리에서 제한된 시간길이로 구성된 정합필터를 적용할 때 반사파들의 부가효과 보상은 다소 저하된다. 이러한 특성은 다음과 같이 설명된다.

식(3)에서 N개의 MFA 처리의 임펄스응답함수는 각 수중청음기의 임펄스함수의 자기상관함수의 합으로써 다음식과 같이 나타난다.

$$\hat{h}_n(t) = \sum_{i=0}^N R_i(t) \quad (7)$$

여기서, $R_i(t)$: 각 센서 임펄스응답함수의 자기상관함수

그러나, 각 수중청음기에 제한된 길이의 정합필터를 적용할때 MFA 처리의 임펄스응답함수는 다음 식과 같다.

$$\hat{h}_{n,t}(t) = \sum_{i=0}^N \Phi_i(t) \quad (8)$$

$\Phi_i(t)$: 각 센서에서 전체길이 임펄스응답함수와

제한된 길이의 임펄스응답함수의 상호상관함수

정합필터 길이가 제한되면 임펄스함수의 자기상관함수가 아닌 식 (8)과 같이 전체길이 임펄스응답과 제한길이 임펄스응답과의 상호상관함수의 합으로 나타나게 되어, MFA처리 임펄스응답함수는 $t=0$ 에서 에너지가 감소하여 반사파 부가효과와 보상은 저하되고 출력신호의 SNR은 감소한다. 따라서, 인공수조에서 반사파들의 부가효과를 보상하여 수중방사소음 특징을 개선하기 위해서 적용된 정합필터배열처리시스템의 성능저하 없이 처리속도를 향상시킬 수 있는 최적의 정합필터 제한 길이를 결정하는 것이 요구된다.

3. 수치모의실험

수치모의실험은 음원영상법을 이용하여 인공수조의 수면과 바닥과 벽면에 의한 반사의 효과를 충분히 포함하도록 임펄스응답함수를 계산하였다. 인공수조의 기하학적 크기는 가로 2.5m, 세로 1.5m, 높이 1.1m(수면의 높이 1.0m)의 직육면체를 가정하였으며, 수조벽면과 바닥의 재질은 임펄스응답함수의 잔향시간에 크게 영향을 주게되는데, 수조의 재질은 콘크리트, 유리, 강철을 사용하였고 이때의 임펄스응답함수의 잔향시간은 각각 22.27, 31.77, 98.91 msec 이다. 그림 3-1은 수조 재질에 따른 임펄스응답함수를 보여준다.

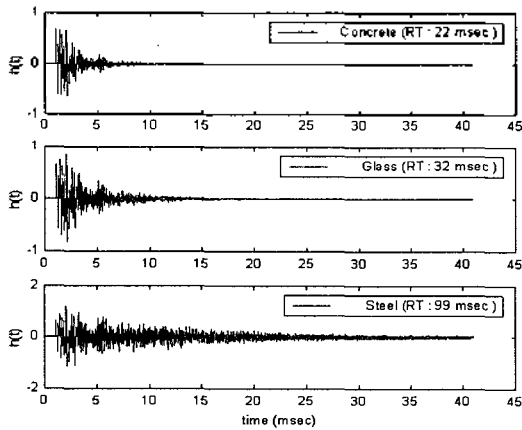


Fig. 3-1 수조의 재질에 따른 임펄스응답함수

배열에 사용된 센서의 수는 3, 6, 9개로 하였고 각 센서의 임펄스응답함수는 최대 40msec까지 취하여 정합필터 시간간격을 1msec 간격으로 2~35 msec까지 바꾸어가면서 정합필터배열처리를 수행하여 SNR를 비교하였다. 이때, 정합필터배열처리된 신호의 최대 SNR과 비교하여 90%까지의 SNR을 얻는 정합필터의 시간간격을 최적의 정합필터 시간간격으로 제시하였다. 샘플링 주파수는 100 kHz를 사용하였다.

성능비교 지표인 SNR은 임펄스 응답신호의 최대 피크치의 에너지와 그 외의 신호영역에서의 에너지와의 비로서 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 4-1은 수조 벽면의 재질이 유리인 경우(잔향시간 : 31.77msec)의 임펄스응답함수, 빔포밍(6개 센서) 처리된 결과, MFA(6개 센서, 정합필터 길이 : 10msec) 처리된 결과를 나타낸다. 빔포밍의 결과보다 MFA의 결과가 높은 직접파 임펄스와 낮은 반사파 임펄스 성분들을 나타내고 있다.

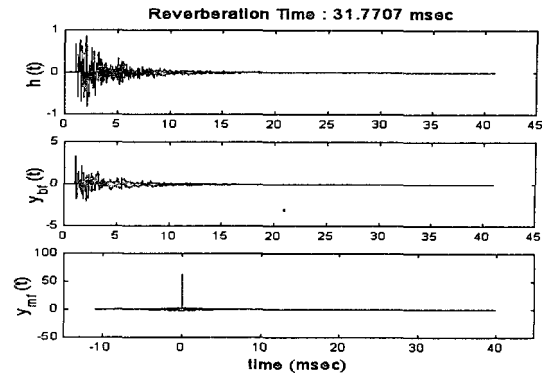
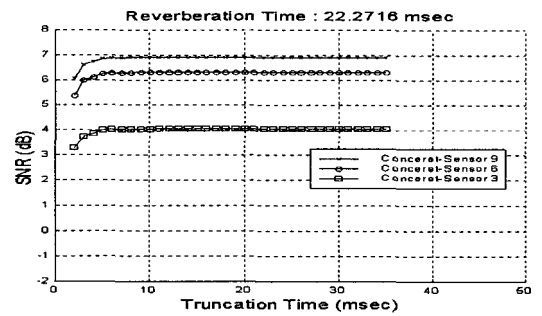
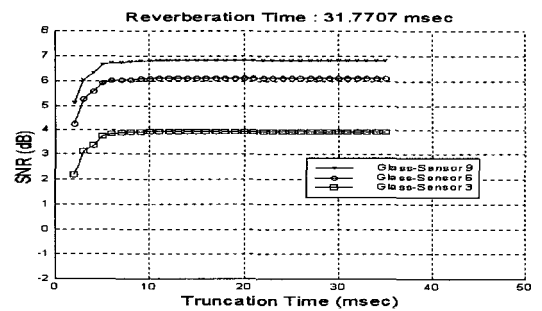


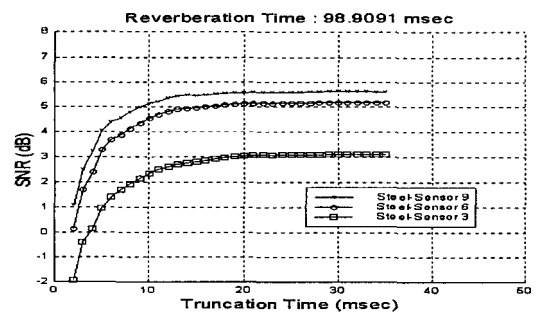
Fig. 4-1 임펄스응답과 빔포밍, MFA 임펄스응답함수



(a) 수조재질이 Concrete 인 경우



(b) 수조재질이 Glass 인 경우



(c) 수조재질이 Steel 인 경우

Fig. 4-2 정합필터 길이에 대한 MFAP의 SNR

그림 4-2는 정합필터 시간간격에 따른 MFA처리된 출력신호의 SNR을 나타낸다.

수조의 재질이 콘크리트인 경우 잔향시간이 짧아 정합 필터의 길이가 짧아도 높은 SNR을 나타내었고 강철인 경우는 잔향시간이 길어 정합 필터의 길이가 상대적으로 길어야 높은 SNR을 나타내었다. 사용된 센서의 개수가 3개인 경우 수조 재질이 콘크리트인 경우 약 4dB로 이론치와 거의 일치하지만 강철인 경우는 약 3dB로 1dB정도 낮게 나타났으며, 센서의 수가 두배 증가할수록 약 2dB 정도 증가하여 이론적인 3dB 보다 1dB정도 낮았다. 이와같은 결과는 잔향시간이 긴 강철인 경우 모든 반사파들의 영향을 보상하지 못한 것으로 판단되며 센서의 수가 증가할수록 센서간의 임펄스 응답함수에서 시간적으로 중첩되는 영역이 증가하기 때문으로 판단된다.

표1은 수조의 재질과 센서의 수에 따라 MFA 처리된 신호의 최대 SNR과 최적의 정합 필터 길이와 그때의 SNR의 결과이다.

인공수조의 재질은 인공수조의 임펄스 응답함수의 잔향시간으로 대표될 수 있다. 잔향시간이 길수록 정합 필터의 시간길이는 길게해야 하며, 잔향시간이 짧을수록 센서의 수에는 크게 좌우되지 않는 것으로 나타났다. 센서의 수가 증가할수록 MFA처리의 성능이 향상됨을 확인할 수 있으며 잔향시간이 길면 센서수가 많을수록 더 짧은 정합 필터 길이를 사용할 수 있다. 또한 센서의 수가 두배 증가할수록 MFA처리된 신호의 SNR이 두배(3dB)보다 약간 낮게 2dB 정도 증가되어 나타났다. 이것은 센서가 많을수록 센서간의 임펄스 응답함수가 시간 축상에서 중첩되어 나타나기 때문으로 판단된다.

수조의 재질 (잔향시간)	센서수	최대 SNR (dB)	정합필터길이 (msec)	SNR (dB)
Concrete (22.27 msec)	3	4.04	3	3.74
	6	6.31	3	6.01
	9	6.89	3	6.61
Glass (31.77 msec)	3	3.93	5	3.73
	6	6.31	4	5.56
	9	6.83	4	6.32
Steel (98.91 msec)	3	3.13	16	2.86
	6	5.19	11	4.67
	9	5.64	10	5.12

표 1. 수치모의실험 결과

5. 결 론

MFA처리 기술이 인공수조에서 수신된 신호의 잔향성분을 제거하는데 효과적임을 보였다. 또한 인공수조에서 수중소음체의 소음특성을 해석하는데 MFA처리기술을 적용시 인공수조의 재질에 따라 각 수중청음기에 적

용되는 정합필터의 시간길이를 어떻게 결정할 것인가를 제시하였다. 시뮬레이션 결과는 이론적인 계산값과 약간 차이를 보일때 이는 원하지 않는 반사경로간의 동시성 때문으로 반사파들이 정합필터 임펄스 응답함수의 시간축상에서 중첩되어 나타나는 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과, 인공수조의 재질에 따라 MFA 처리에서 정합필터의 길이는 잔향시간이 길수록 길게 하는 것이 높은 성능을 나타내고 센서수를 증가시키면 짧게 해도 성능 저하를 가져오지 않음을 확인하였다. 표1에서 수조의 재질에 따른 정합필터 길이를 제시하였다.

참고문헌

- [1] Jont B. Allen and David A. Berkely, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics", 943-950, JASA, 65(4), 1979.
- [2] D. Rabinkin, R. Renomeron, J. Flanagan, "Optimal truncation time for matched filter array processing", 3629-3632, ICSSP98, 1998.
- [3] 윤종락, 노용주, "정합필터배열처리를 이용한 음질 개선", 323-326, 신호처리합동학술대회 논문집, 1998.
- [4] R.J. Renomeron, D.V. Rabinkin, J.C. French and J.L. Flanagan, "Small-scale matched filter array processing for spatially selective sound capture", 134th meeting of ASA, December 5, 1997.
- [5] C. Sydow, "Broadband beamforming for a microphone array", JASA, 96(2), pp 845-849, 1994
- [6] C. S. Clay and Saimu Li, "Time domain signal transmission and source location in a waveguide : Matched filter and deconvolution experiments", JASA, 83(4), pp 1377-1383, 1988.
- [7] C. S. Clay, "Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide", JASA, 81(3), pp 660-664, 1987.
- [8] J. L. Flanagan, J. D. Johnson, R. Zahn, and G. W. Elko, "Computer-steered microphone arrays for sound transduction in large rooms", JASA, 78(5), pp 1508-1518, 1985
- [9] L.E.Kinsler, A.R.Frey, A.B.Coppens, J.V.Sanders, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, 1982.
- [10] Sybil P. Parker. "Acoustics Source Book", McGRAW-Hill Book Company, 1987.
- [11] V.K. Madisetti, D.B. Williams "The Digital Signal Processing Handbook", CRC Press, Ch-32, 1998.