



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

등방성 소음환경에서 공간적 상관성을
이용한 배열이득 분석 및 시뮬레이션

Array Gain in Isotropic Noise

지도교수 김재수



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

최용화

본 논문을 최용화의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 박 정 수 (인)

위 원 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 공학박사 김 재 수 (인)



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

최 용 화

〈목 차〉

〈목 차〉	2
〈그림 목차〉	4
Abstract	6
1. 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 논문의 구성	4
2. 연구내용	5
2.1 등방성 소음	5
2.1.1 등방성 소음의 정의	5
2.1.2 등방성 소음 시뮬레이션	5
2.2 배열이득(Array Gain)	11
2.2.1 배열이득의 정의	11
2.2.2 배열이득을 계산하는 여러 방법	11
2.2.2.1 SNR을 이용한 AG 계산	11
2.2.2.2 공간적 상관성(spatial coherence)을 이용한 AG계산	15
2.2.2.2.1 공간적 상관성의 정의	15
2.2.2.2.2 등방성 소음환경에서의 공간적 상관성	18
2.3 지향지수	22
2.3.1 지향지수(Directivity Index, DI)의 정의	22
2.3.2 지향지수 시뮬레이션	22
3. 연구결과 비교검증	28
3.1 공간적 상관성을 이용한 등방성 소음 검증	28
3.2 등방성 소음환경에서 배열이득과 지향지수 비교검증	29
3.2.1 Discrete Uniform Line Array(DULA)의 경우	29
3.2.2 Plane Array(PA)의 경우	33

3.3 검증된 등방성 소음 신호를 이용한 배열이득 비교검증38

4. 결론43

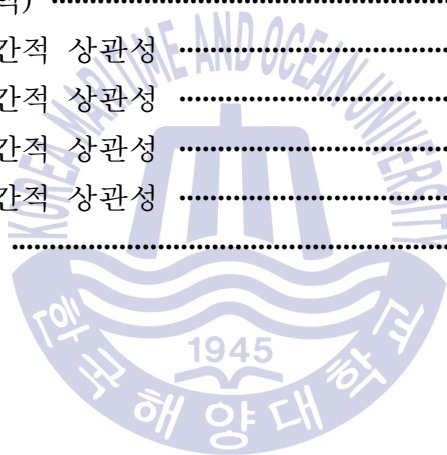
참고문헌45



〈그림 목차〉

Fig. 1	방위각과 주파수 변화에 따른 공간적 상관성	2
Fig. 2	방위각과 센서 간격 변화에 따른 공간적 상관성	2
Fig. 3	공간적 상관성의 비교/검증	3
Fig. 4	센서 배치도	5
Fig. 5	직교좌표계	6
Fig. 6	두 센서에 수신된 신호	6
Fig. 7	소음신호 (시간 영역)	7
Fig. 8	소음신호 (주파수 영역)	8
Fig. 9	소음 음원위치	8
Fig. 10	등방성 소음 신호	10
Fig. 11	배열센서 좌표계	13
Fig. 12	수신된 음원신호	13
Fig. 13	수신된 소음신호	14
Fig. 14	주파수에 따른 신호와 소음의 공간적 상관성	20
Fig. 15	센서의 간격과 파장의 비에 따른 신호와 소음의 공간적 상관성	21
Fig. 16	등방성 소음환경에서의 배열이득 변화	21
Fig. 17	continuous line array 좌표계	22
Fig. 18	continuous line array의 beam pattern	25
Fig. 19	beam pattern [normalized]	25
Fig. 20	beam pattern [dB]	25
Fig. 21	DI (continuous line array)	26
Fig. 22	DI (등방성 소음)	27
Fig. 23	등방성 소음의 공간적 상관성 검증	28
Fig. 24	배열센서 좌표계	29
Fig. 25	spatial coherence를 통해 계산된 AG	30
Fig. 26	beam pattern (broadside)	30
Fig. 27	beam pattern (broadside)	30
Fig. 28	beam pattern (endfire)	30
Fig. 29	beam pattern (endfire)	30

Fig. 30	beam pattern을 통해 계산된 DI	31
Fig. 31	배열이득과 지향지수 비교	32
Fig. 32	삼각 평면 배열센서 좌표계	33
Fig. 33	직교좌표계	33
Fig. 34	배열이득과 지향지수 비교($N=3$)	34
Fig. 35	사각 평면 배열센서 좌표계	35
Fig. 36	직교좌표계	35
Fig. 37	배열이득과 지향지수 비교($N=4$)	35
Fig. 38	육각 평면 배열센서 좌표계	36
Fig. 39	직교좌표계	36
Fig. 40	배열이득과 지향지수 비교($N=6$)	36
Fig. 41	센서 좌표계	38
Fig. 42	소음 음원	39
Fig. 43	소음 신호 (주파수 영역)	39
Fig. 44	소음 신호 (시간 영역)	40
Fig. 45	소음 신호 (시간 영역)	40
Fig. 46	1번, 2번 센서의 공간적 상관성	41
Fig. 47	1번, 3번 센서의 공간적 상관성	41
Fig. 48	1번, 4번 센서의 공간적 상관성	41
Fig. 49	1번, 5번 센서의 공간적 상관성	41
Fig. 50	배열이득 비교/검증	42



Array Gain in Isotropic Noise

by

Yong Hwa Choi

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime & Ocean University

Abstract

When an array of receivers is used in the ocean as a sonar system, compared to using a single receiver, there is a signal gain, which is called as Array Gain (AG). There are two methods to calculate the AG: One method is to use Signal to Noise Ratio (SNR), and the other method is to use spatial coherence.

In this thesis, AG is calculated and verified through Monte-Carlo simulation, assuming the isotropic noise and the perfect coherence of target signal in order to better understand the performance of an array of hydrophones. Spatial coherence of noise field was calculated through the cross-correlation coefficient of the signals received by two different receivers.

The contribution of this thesis is to summarize and to verify the existing algorithms to typical examples. Also, it is shown that the Directivity Index(DI) is the same as AG in isotropic noise for all frequencies.

In future study, two topics are suggested to be further explored. First

topic is that the signal and noise are simulated in time domain, which can be directly applied to the development of the simulator in time domain. Second topic is to extend the complexity of the simulation to the real ocean, which includes the simulation of directional noise and the realistic spatial coherence of target signals.

KEY WORDS: isotropic noise; array gain; spatial coherence



1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

해양에 대해 연구를 수행할 때 배열센서를 설치하여 신호를 분석함으로써 해양에 대한 정보를 얻는다. 하지만 해양에 배열센서를 설치하고 신호를 얻는 과정은 쉽지 않고 해양의 복잡성으로 인해 분석에 고려할 요인이 많다.

선진국의 경우 환경변화에 따른 배열이득 분석연구가 과거부터 현재까지 지속적으로 수행되고 있다. 또한 본 논문에서 배열이득에 이용하는 공간적 상관성 연구도 선진국에서 지속적으로 수행되어지고 있다. 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 계산하는 수식은 선진국에서 이미 수식적으로 증명되어있지만 실험을 통해 배열이득의 변화를 연구한 사례는 선진국에서도 미비한 실정이다.

본 논문에서는 선진국에서 증명된 수식을 바탕으로 배열이득과 공간적 상관성의 연구를 수행하였으며, 모든 방향에서 소음의 세기가 동일한 등방성 소음 환경에서 주파수 변화에 따른 배열이득 변화를 연구하였다. 국내에서 공간적 상관성을 이용한 배열이득 분석은 수행된 바 없으며, 향후 등방성 소음 환경이 아닌 실제 소음환경일 경우에 대하여 배열이득을 분석하고, 등방성 소음환경에서의 배열이득과 비교/분석할 예정이다.

본 논문은 등방성 소음환경에서 배열센서가 주어진 경우, 신호가 수신되는 방위각에 대하여 주파수 변화에 따른 배열이득 분석을 수행하고, 등방성 소음 환경에서 배열이득의 변화를 분석할 수 있는 시뮬레이터 개발을 목적으로 작성되었다.

1.2 연구동향

선진국의 경우 센서에 수신된 등방성 소음신호의 수식을 설정하여 cross correlation을 통해 2차원, 3차원 좌표계에서 공간적 상관성의 개념을 정의하였다[H. Cox(1973)]. 공간적 상관성은 신호의 주파수 변화, 센서의 간격, 신호의 방향성에 따라 변동이 발생한다.

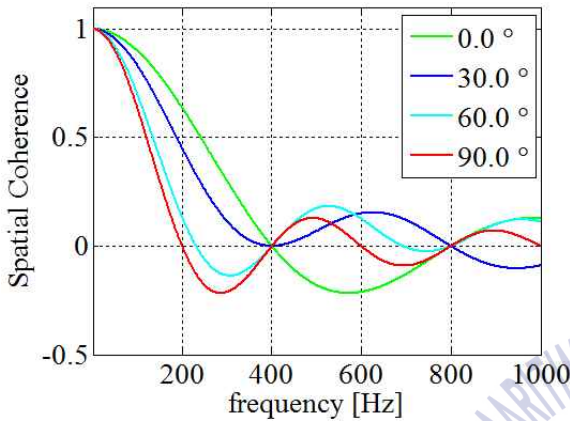


Fig. 1 방위각과 주파수 변화에 따른 공간적 상관성

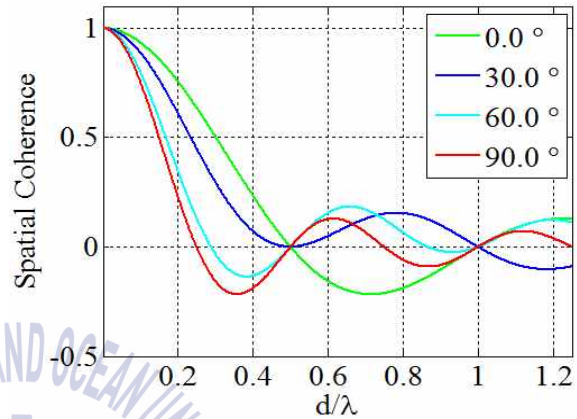


Fig. 2 방위각과 센서 간격 변화에 따른 공간적 상관성

이러한 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 계산하고, 방향성 소음환경, 신호의 주파수 변화에 따라 배열이득이 변화하는 연구를 수행하였다[R. J. Nielsen(1976); B. F. Cron et al.(1966)]. 하지만 선행된 연구들이 등방성 소음환경의 해석적인 수식을 활용하였을 뿐 실제 소음신호를 이용하여 공간적 상관성을 계산하지 않았다.

선진국에서는 등방성 소음에 대한 연구도 진행되었다[E. A. P. Habets et al.(2007)]. 소음음원을 공간상에 임의로 배치하고 임의의 소음신호를 생성하여 수신된 소음신호의 공간적 상관성과 등방성 소음의 해석적인 수식의 결과와 비교/검증하였다.

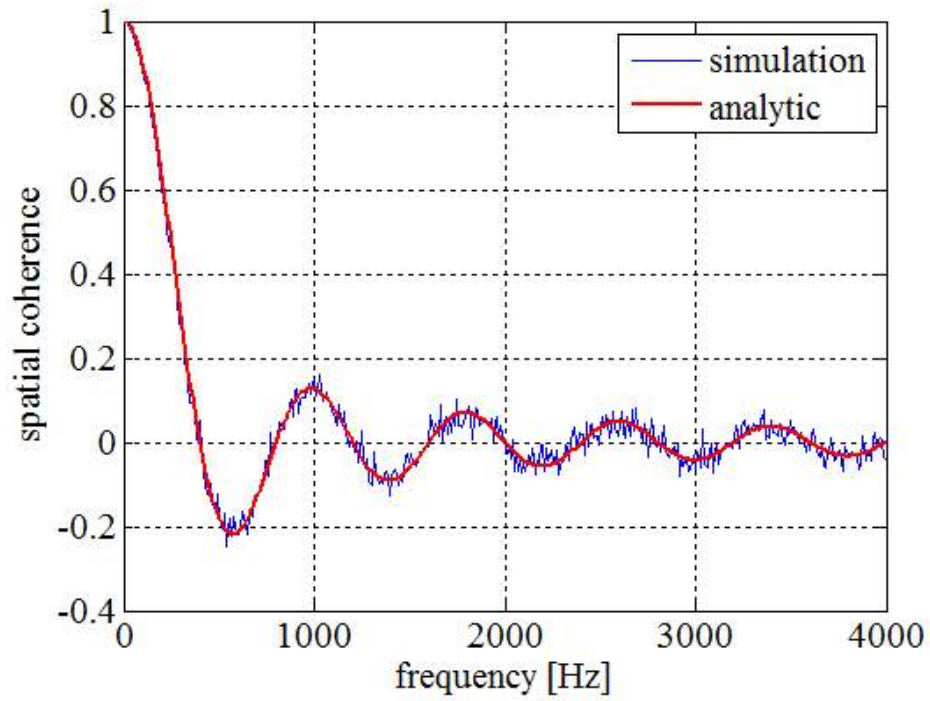
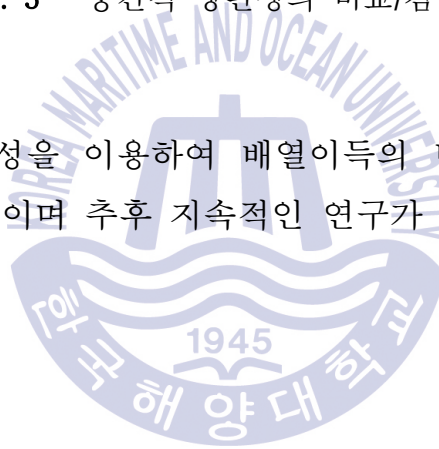


Fig. 3 공간적 상관성의 비교/검증

국내에서는 공간적 상관성을 이용하여 배열이득의 변화를 분석하는 연구가 선진국에 비해 부족한 실정이며 추후 지속적인 연구가 필요하다.



1.3 논문의 구성

본 논문에서는 등방성 소음환경의 경우 선 배열센서의 배열이득 변화를 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 주파수, 음속, 배열센서의 형상 등에 따라 배열이득이 변화하지만 본 논문에서는 주파수 변화에 따른 배열이득 변화를 연구하였다.

2.1 절에서는 등방성 소음에 대해 정의하고 해석적인 결과와 비교/검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 등방성 소음을 배열센서에 수신한 뒤 공간적 상관성을 계산하여 공간적 상관성의 해석적인 수식 결과와 비교하였고, 공간적 상관성의 해석적인 수식과 동일함을 확인하였다. 2.1 절에서 생성한 등방성 소음신호를 3.1 절에서 공간적 상관성을 이용하여 생성한 등방성 소음이 등방성 소음의 해석적인 수식과 동일한 결과가 나오는지 확인하였다.

2.2 절에서는 배열이득에 대해 정의하고, 배열이득을 계산하는 두 가지 방법에 대해 서술하였다. 두 가지 방법 중 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 계산하는 방법을 연구하였다. 왜냐하면 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 분석하면 주파수 변화, 음속 변화, 배열센서의 형상변화 등에 대해 분석이 가능하기 때문이다.

2.3 절에서는 지향지수에 대해 정의하였고, 등방성 소음환경에서 평면파로 신호가 수신되면 배열이득과 지향지수가 동일하기 때문에 동일한 조건에서 지향지수와 배열이득의 해석적인 수식을 비교/검증하였다.

3.2 절에서는 등방성 소음환경에서 균등간격 배열센서인 DULA와 비균등간격 배열센서인 NLA의 배열이득결과와 지향지수의 결과를 비교/검증하였다.

3.3 절에서는 등방성 소음 시뮬레이션을 통해 해석적인 수식이 아닌 등방성 소음신호를 생성하였고, 공간적 상관성을 계산하여 배열이득을 도출하였다. 이를 지향지수로 검증한 배열이득의 해석적인 결과와 비교하여 등방성 소음 환경에서 배열이득 변화 분석 시뮬레이션을 완성하였다.

마지막으로 4 절에서는 연구결과 요약과 향후 연구방향에 대해 기술하였다.

2. 연구내용

2.1 등방성 소음

2.1.1 등방성 소음의 정의

해양에서 소음환경은 방향성, 방향별 소음의 세기, 주파수 등 다양한 요소에 의해 변화한다. 이러한 해양의 소음환경은 실험을 통해서 얻을 수 있고, 시간과 공간에 따라 변화하기 때문에 이론적인 연구에 적용하기가 어렵다. 하지만 등방성 소음환경은 소음이 모든 방향에서 동일한 세기로 수신되기 때문에 상대적으로 적용하기가 용이하다[1].

2.1.2 등방성 소음 시뮬레이션

등방성 소음 시뮬레이션을 위해 2개의 센서를 그림 4와 같이 수직으로 배치하고, 그림 4와 같은 직교좌표계를 사용하였다. 그림 4에서 θ 는 수평각(azimuth angle)이고, ϕ 는 수직각(elevation angle)이다.

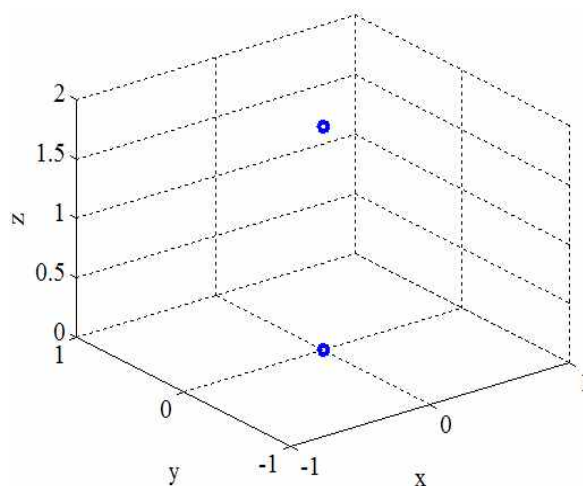


Fig. 4 센서 배치도

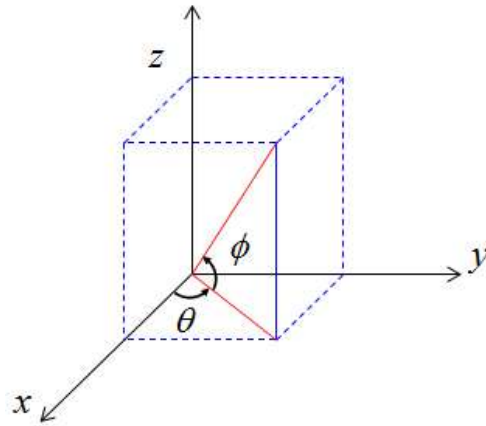


Fig. 5 직교좌표계

한 소음 음원에서 1, 2번 센서에 수신된 신호를 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 라 할 때 그림 6과 같이 표현할 수 있고, 두 센서 간 시간지연은 식 (1)과 같이 표현된다. 그리고 2번 센서에 수신된 신호 $x_2(t)$ 는 식 (2)와 같다. 식 (1)에서 d 는 센서 간 거리, c 는 음파의 속도, ϕ 는 수직각이다.

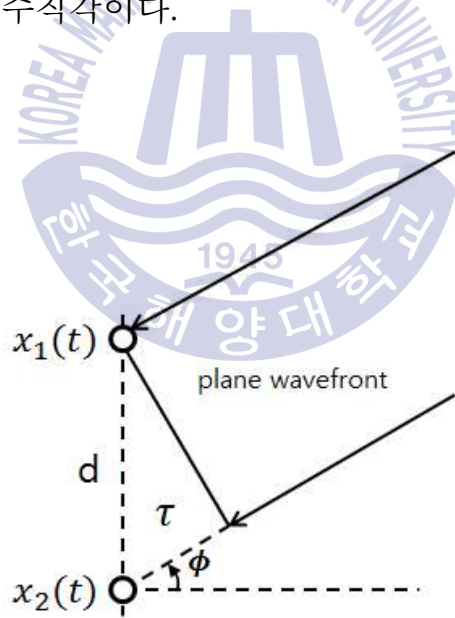


Fig. 6 두 센서에 수신된 신호

$$\tau = \frac{d}{c} \sin\phi \quad (1)$$

$$x_2(t) = x_1(t - \tau) \quad (2)$$

이러한 방법으로 수직각은 -90° 에서 90° 까지 수평각은 -180° 부터 180° 까지 소음 음원을 배치하여 각 방향에 대해 임의의 신호를 생성하였다. 임의의 소음신호는 그림 7과 같고, 이 소음은 그림 8과 같은 주파수 성분으로 구성되어 있다.

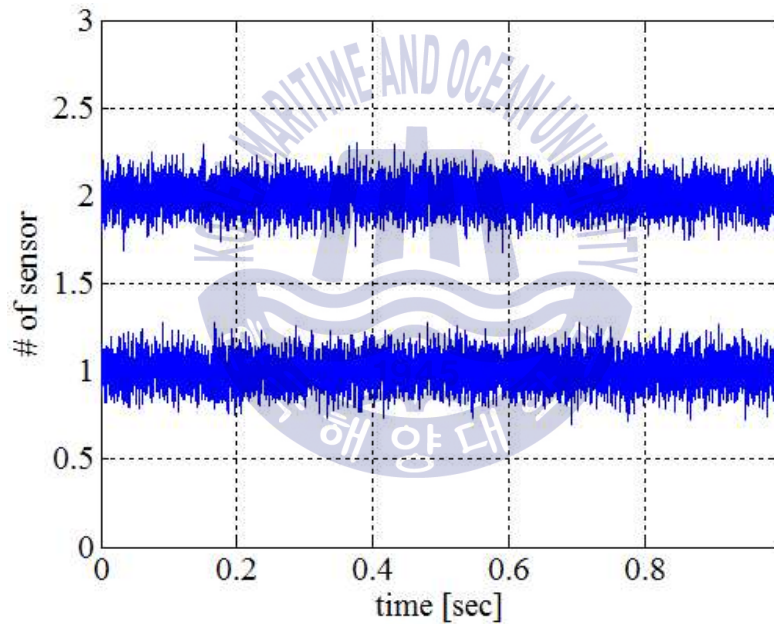


Fig. 7 소음신호 (시간 영역)

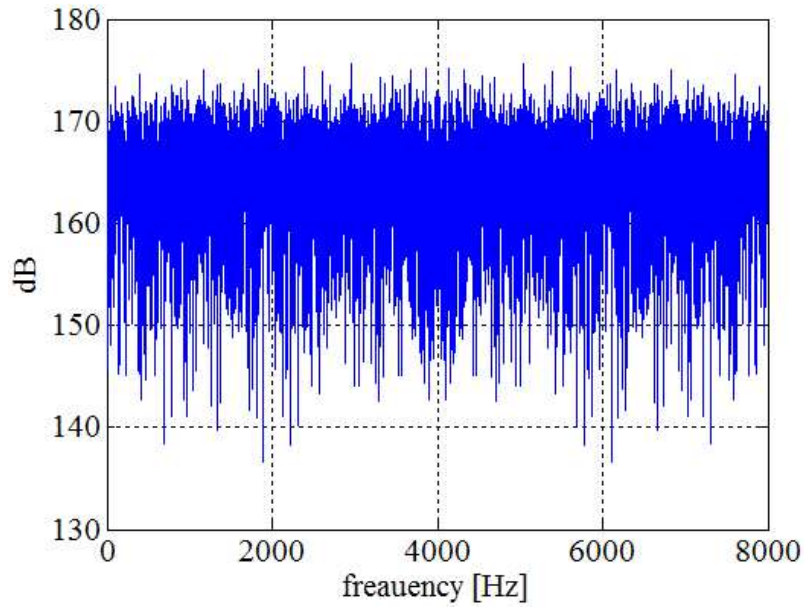


Fig. 8 소음신호 (주파수 영역)

그림 7과 같은 방법으로 임의의 소음신호를 그림 9의 각 소음 음원에서 생성하여 각 센서에 시간지연을 적용한 뒤 소음신호를 수신하였다.

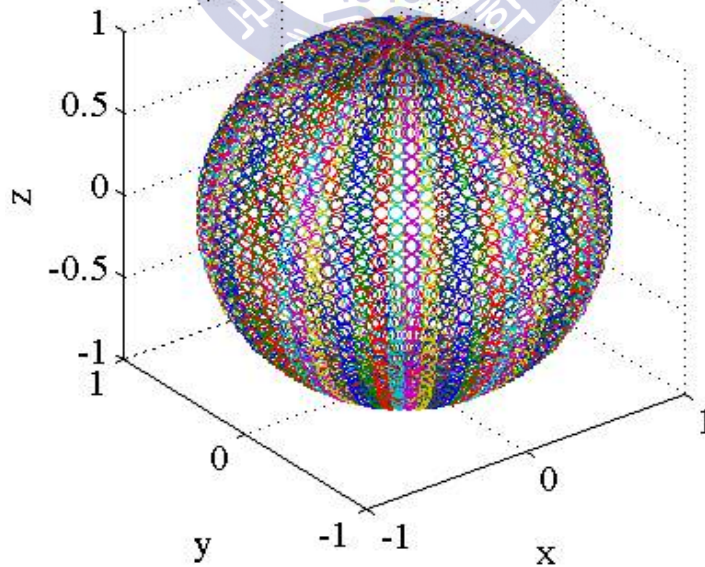


Fig. 9 소음 음원위치

등방성 소음은 단위 입체각당 소음의 세기가 동일하기 때문에 각 방향에서 생성된 임의의 소음 세기를 동일하게 해주어야 한다. 그래서 n 번째 소음 음원의 방향에서 수신된 소음의 세기를 I_n 이라 할 때, 각 방향에서 수신된 소음신호는 식 (3)과 같이 동일하다.

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (3)$$

식 (3)의 음파의 세기(I)는 단위면적 단위시간당 평균음향에너지의 흐름을 나타낸다. 즉, 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E/T}{A} \quad (4)$$

식 (4)에서 P 는 파워, A 는 단위면적, E 는 에너지, T 는 단위시간을 의미하고, 식 (3)에 적용하여 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{P_1}{A_1} = \frac{P_2}{A_2} = \frac{P_3}{A_3} = \dots = \frac{P_n}{A_n} \quad (5)$$

이때 단위면적은 직각 좌표계에 의해 식 (6)과 같이 표현된다.

$$A_n = \Delta\phi \Delta\theta \cos\phi_n \quad (6)$$

각 방향마다 소음을 생성하고 생성된 소음의 세기를 동일하게 한 뒤 각 센서에 수신하면 그림 10과 같다.

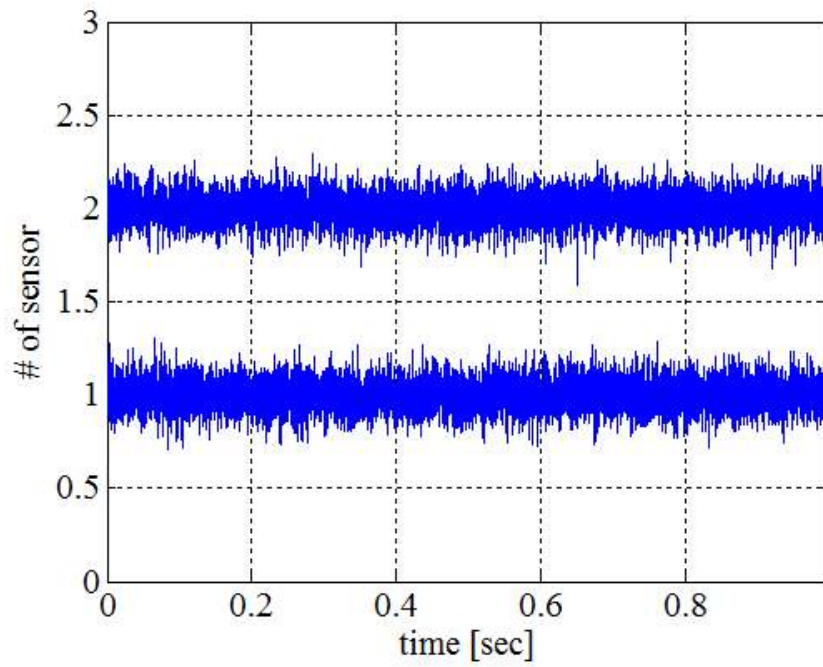


Fig. 10 등방성 소음 신호

생성된 등방성 소음은 3장 연구결과 비교검증에서 공간적 상관성을 이용하여 검증하였다.



2.2 배열이득(Array Gain)

2.2.1 배열이득의 정의

해양에서는 배열센서를 사용하여 신호를 수신하는 경우 개별센서를 사용하는 경우와 달리 배열이득(Array Gain, AG)이 발생한다[1]. 이러한 배열이득은 배열센서의 형상, 신호의 주파수, 소음의 방향성 등과 같이 배열센서에 수신된 신호의 상관관계에 영향을 주는 요소에 따라 변화한다.

2.2.2 배열이득을 계산하는 여러 방법

배열이득을 계산하는 방법에는 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 이용한 방법과 공간적 상관성(spatial coherence)을 이용한 방법이 있다.

2.2.2.1 SNR을 이용한 AG 계산

일반적으로 AG는 식 (7)과 같이 개별센서의 SNR과 배열센서의 SNR의 비로 계산할 수 있다[1].

$$AG = 10\log_{10} \frac{(\text{SNR})_{\text{array}}}{(\text{SNR})_{\text{single sensor}}} \quad (7)$$

위 식 (7)에서 SNR은 신호 대 잡음비로 신호 세기와 소음 세기의 비를 나타내고, SNR이 높다는 것은 신호의 세기가 소음의 세기보다 상대적으로 강한 것을 의미한다. 선 배열센서에 신호가 수신될 때 센서 간에 coherent관계가 발생하므로 신호에 대한 음압레벨(Pressure Level, PL)은 식 (8)과 같다.

$$PL_s = 10\log_{10} \frac{(Np_{rms})^2}{p_{ref}^2} = 10\log_{10} \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} + 10\log_{10} N^2 \quad (8)$$

식 (8)에서 N 은 센서의 수, p_{rms} 는 센서에 수신된 음압의 시간평균 값, p_{ref} 는 수중에서 음압 기준 값인 $1\mu Pa$ 이다. 하지만 소음의 경우 센서 간에 incoherent 관계가 발생하므로 소음에 대한 음압레벨을 계산하면 식 (9)와 같다.

$$PL_n = 10\log_{10} \frac{N(p_{rms})^2}{p_{ref}^2} = 10\log_{10} \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} + 10\log_{10} N \quad (9)$$

배열센서의 SNR은 신호의 음압레벨과 소음의 음압레벨을 사용하여 식 (10)과 같이 계산된다.

$$(SNR)_{array} = PL_s - PL_n = 10\log_{10} N \quad (10)$$

등방성 소음 환경에서 선 배열센서일 경우 SNR을 이용하여 AG를 계산하는 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11과 같이 15개의 배열센서를 직교좌표계로 배치하였고, 사용되는 신호의 주파수는 100Hz, 센서의 간격은 100Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 7.5m로 설정하였다.

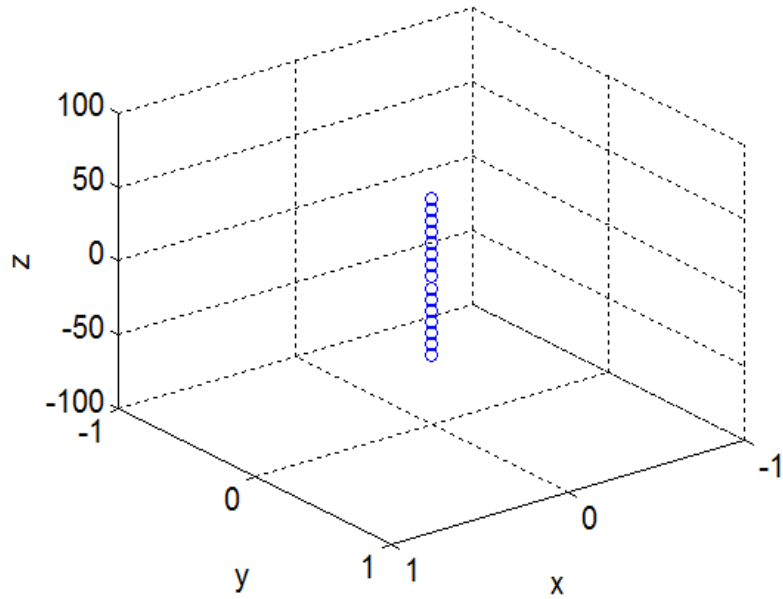


Fig. 11 배열센서 좌표계

배열센서에 수신된 음원신호는 100Hz의 연속파(Continuous Wave, CW)이고, 파워레벨(Power Level)은 0 dB re 1Watt, $\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$, 신호의 길이는 1000초이다. 각 센서에 수신된 음원신호는 그림 12와 같다.

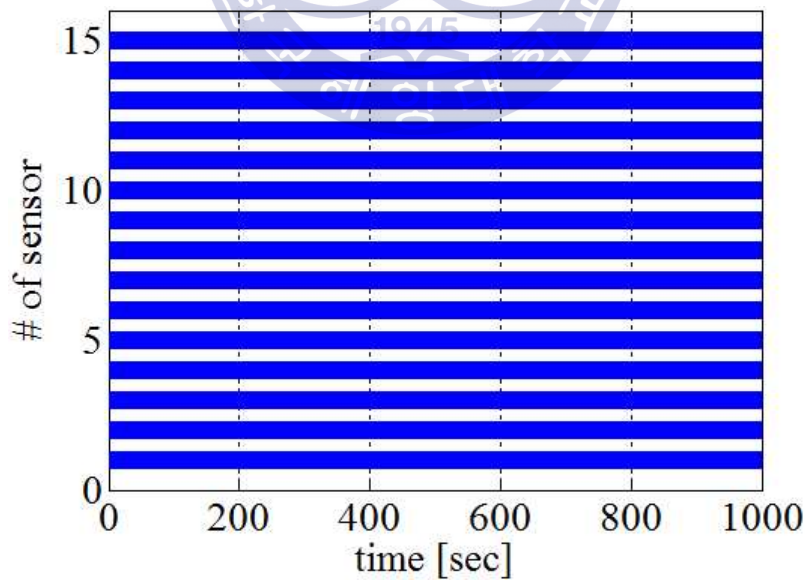


Fig. 12 수신된 음원신호

배열센서에 수신된 소음은 White Gaussian Noise를 사용하였고, 파워레벨은 음원신호와 동일하게 0 dB re 1Watt로 가정하였다. 각 센서에 수신된 소음신호는 그림 13과 같다.

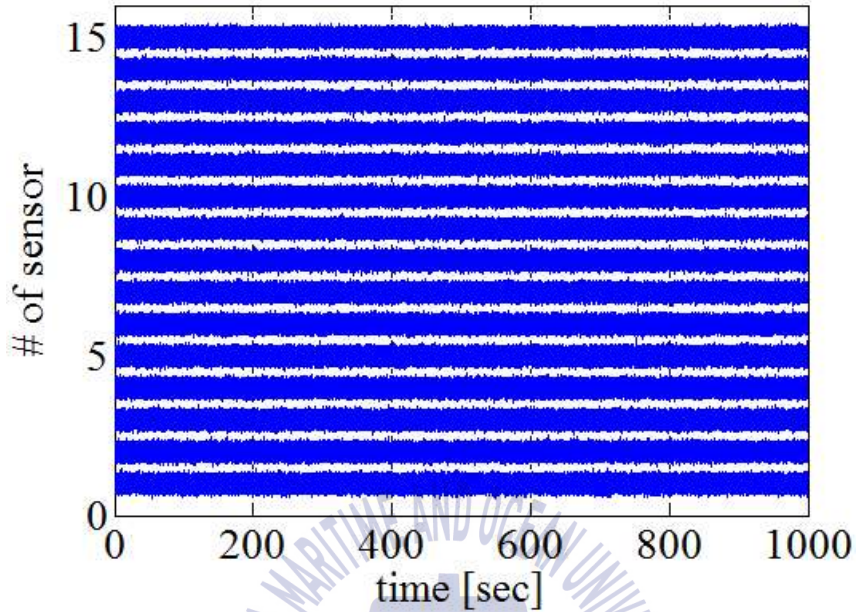


Fig. 13 수신된 소음신호

이에 대하여 각 센서에 수신된 신호를 음원신호 방향(θ , ϕ)에 대하여 conventional beam forming을 수행하여 신호와 소음의 파워레벨을 계산하였다. 음원신호의 파워레벨 PL_s 은 23.53dB, 소음신호의 파워레벨 PL_n 은 11.77dB로 계산되고, 배열센서의 SNR은 식 (10)에 의해 11.76dB이다. 이는 해석적인 수식 $10\log_{10}N$ 과 동일한 값이 나왔다. 신호의 길이가 길어질수록 파워레벨을 이용하여 계산한 AG값이 해석적인 수식인 $10\log_{10}N$ 에 수렴해가는 것을 확인하였다.

2.2.2.2 공간적 상관성(spatial coherence)을 이용한 AG계산

2.2.2.2.1 공간적 상관성의 정의

두 센서에 수신된 신호의 상관관계를 보기 위해 cross correlation을 사용한다. 상관관계란 두 신호가 얼마나 유사한지 수치를 통해 나타내는 것이다. 두 센서에 특정 방향으로 신호가 수신될 때 신호는 특정 방향에 대해 시간지연이 발생하여 수신되는데 이 때 시간지연(τ)을 $\frac{d}{c} \sin\phi$, d 는 센서 간 간격, c 는 음파의 속도, ϕ 는 신호가 수신되는 방향이라고 가정하여 공간적 상관성을 정의하였다. 수신된 신호를 신호처리 기법을 통해 특정 방향으로 조향을 한 뒤 cross correlation하였을 때 계산된 cross correlation coefficient를 특정 방향에 대한 공간적 상관성이라 한다. 두 센서에 수신된 신호를 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 라고 할 때, 두 센서의 공간적 상관성은 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\rho_{12} = \frac{\overline{x_1(t)x_2(t)}}{[(x_1(t))^2(x_2(t))^2]^{1/2}} \quad (11)$$

식 (11)은 cross correlation를 나타내고, 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1^*(t)x_2(t-\tau)dt \quad (12)$$

식 (12)에서 $x_1^*(\cdot)$ 는 공액 복소수(complex conjugate)를 의미한다. 식 (12)를 사용하여 cross-spectral density function을 계산할 수 있고, 식 (13)과 같이 표현된다.

$$Q_{12}'(\omega) = \int \rho_{12}(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau \quad (13)$$

또한 power-spectral density function을 계산할 수 있고, 식 (14)와 같이 표현된다.

$$Q_{11}'(\omega) = \int \rho_{11}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (14)$$

cross-spectral density function과 power-spectral density function을 이용하여 공간적 상관성을 계산할 수 있고, 식 (15)와 같다.

$$Q_{12}(\omega) = \frac{Q_{12}'(\omega)}{Q_{11}'(\omega)} = \frac{Q_{12}'(\omega)}{Q_{22}'(\omega)} \quad (15)$$

식 (13)에 식 (12)를 적용하면 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q_{12}'(\omega) &= \int \rho_{12}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1^*(t) x_2(t+\tau) dt \exp(-i\omega\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_2(t+\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau x_1^*(t) dt \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 $(t+\tau)$ 를 α 로 치환을 하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{12}'(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_2(\alpha) \exp(-i\omega(\alpha-t)) d\tau x_1^*(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_2(\alpha) \exp(-i\omega\alpha) d\alpha x_1^*(t) \exp(i\omega t) dt \end{aligned} \quad (17)$$

이 때 fourier transform을 식 (18)이라 할 경우 식 (17)을 정리하면 식 (19)와

같이 정리된다.

$$X_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_2(\alpha) \exp(-i\omega\alpha) d\alpha \quad (18)$$

$$Q_{12}'(\omega) = X_2(\omega) X_1^*(\omega) \quad (19)$$

power-spectral density function을 동일한 방법으로 계산하면 식 (20)과 같다.

$$Q_{11}'(\omega) = X_1(\omega) X_1^*(\omega) \quad (20)$$

이렇게 계산된 식 (19)와 식 (20)을 사용하여 공간적 상관성을 계산할 수 있다.



2.2.2.2 등방성 소음환경에서의 공간적 상관성

공간적 상관성은 등방성 소음환경에서 해석적인 수식이 존재한다. 신호와 소음의 파워가 각각 식 (21)과 (22)라 가정하였다.

$$\overline{S^2} = m \overline{[s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_k(t)]^2} \quad (21)$$

$$\overline{N^2} = m \overline{[n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_k(t)]^2} \quad (22)$$

식 (21)과 (22)에서 $s_k(t)$ 는 수신된 음원신호, $n_k(t)$ 는 수신된 소음신호, m 은 신호 파워와 소음 파워의 비를 나타내는 비례상수이고, k 는 센서 개수이다. 위 식 (21)과 식 (22)를 이용하여 SNR을 계산하면 식 (23)과 같다.

$$\frac{\overline{S^2}}{\overline{N^2}} = \frac{\overline{[s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_k(t)]^2}}{\overline{[n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_k(t)]^2}} \quad (23)$$

식 (23)을 전개하면 식 (24)와 같이 정리된다.

$$\frac{\overline{S^2}}{\overline{N^2}} = \frac{(\overline{s_1 s_1} + \overline{s_1 s_2} + \dots + \overline{s_1 s_k}) + (\overline{s_2 s_1} + \overline{s_2 s_2} + \dots + \overline{s_2 s_k}) + \dots}{(\overline{n_1 n_1} + \overline{n_1 n_2} + \dots + \overline{n_1 n_k}) + (\overline{n_2 n_1} + \overline{n_2 n_2} + \dots + \overline{n_2 n_k}) + \dots} \quad (24)$$

식 (24)에 식 (25)와 식 (26)을 적용하면 식 (27)과 같이 정리된다.

$$\overline{s_1^2} = \overline{s_2^2} = \dots = \overline{s_k^2} = \overline{s^2} \quad (25)$$

$$\overline{n_1^2} = \overline{n_2^2} = \dots = \overline{n_k^2} = \overline{n^2} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\overline{S^2}}{\overline{N^2}} &= \frac{\overline{s^2}}{\overline{n^2}} \frac{[(\rho_s)_{11} + (\rho_s)_{12} + \dots + (\rho_s)_{1k}] + [(\rho_s)_{21} + (\rho_s)_{22} + \dots + (\rho_s)_{2k}] + \dots}{[(\rho_n)_{11} + (\rho_n)_{12} + \dots + (\rho_n)_{1k}] + [(\rho_n)_{21} + (\rho_n)_{22} + \dots + (\rho_n)_{2k}] + \dots} \\ &= \frac{\overline{s^2}}{\overline{n^2}} \frac{\sum_i \sum_j (\rho_s)_{ij}}{\sum_i \sum_j (\rho_n)_{ij}} \end{aligned} \quad (27)$$

위 식 (27)을 이용해 배열이득을 계산하게 되면 식 (28)과 같다.

$$AG = 10 \log_{10} \frac{\overline{S^2}/\overline{N^2}}{\overline{s^2}/\overline{n^2}} = 10 \log_{10} \frac{\sum_i \sum_j (\rho_s)_{ij}}{\sum_i \sum_j (\rho_n)_{ij}} \quad (28)$$

식 (28)에서 등방성 소음 환경일 경우 신호의 공간적 상관성은 식 29와 같고, 등방성 소음의 공간적 상관성은 식 (30)과 같다.

$$\rho_s = \cos \omega(\tau_w + \tau_s) \quad (29)$$

$$\rho_n = \frac{\sin\left(\frac{\omega d}{c}\right)}{\frac{\omega d}{c}} \cos \omega \tau_s \quad (30)$$

식 (29)에서 ω 는 $2\pi f$, f 는 주파수, τ_w 는 신호방향으로의 시간지연, τ_s 는 특정

방향으로 조향을 했을 경우에 대한 시간지연이다. 식 (30)에서 d 는 센서 간 거리이다.

등방성 소음환경에서 공간적 상관성을 간단히 시뮬레이션을 수행하였다. 두 센서를 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 간격인 1.875m로 수직배치 하고 음속이 1500m/s, 신호의 방향은 $\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$ 일 경우 주파수에 따른 공간적 상관성을 도식화하면 그림 14와 같다. 여기서 θ 는 수평각, ϕ 는 수직각이다.

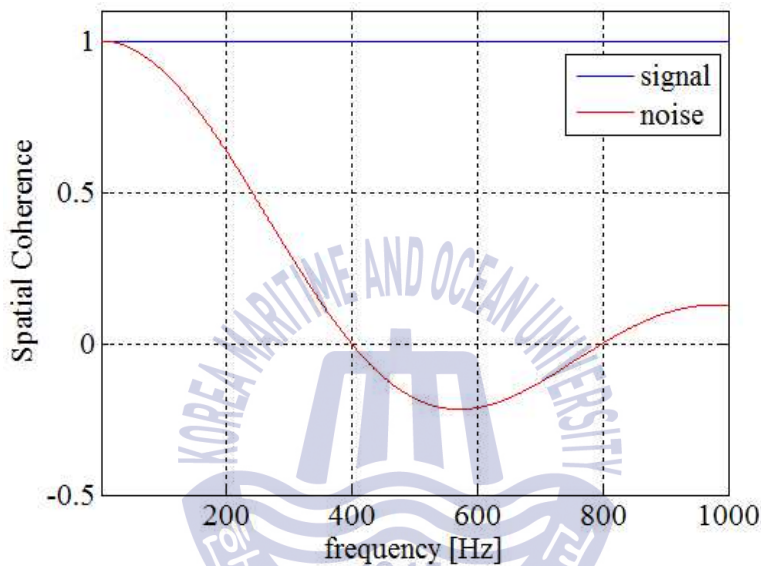


Fig. 14 주파수에 따른 신호와 소음의 공간적 상관성

그림 14와 동일한 환경에서 신호의 주파수가 일정할 경우 센서의 간격과 파장의 비에 따른 공간적 상관성은 그림 15와 같다.

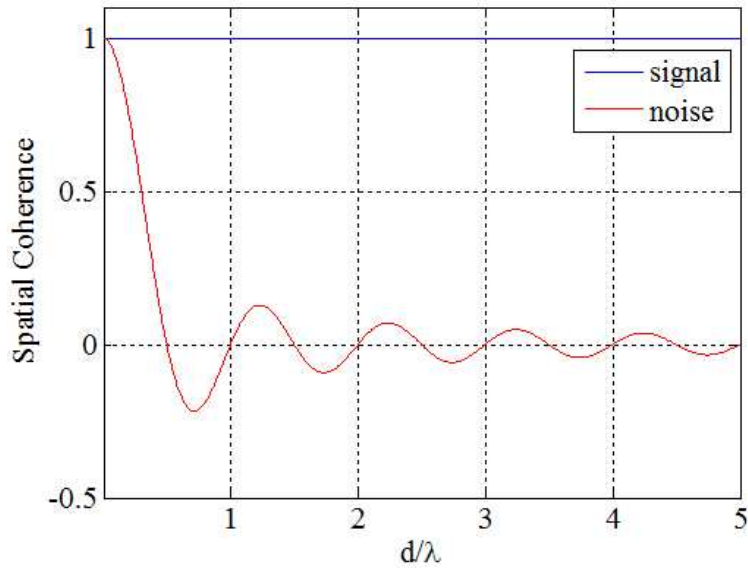


Fig. 15 센서의 간격과 파장의 비에 따른 신호와 소음의 공간적 상관성

등방성 소음환경에서 주파수에 따른 배열이득의 변화를 도식화하기 위해 간단히 시뮬레이션을 수행하였다. 센서 수가 9개, 선 배열센서의 간격이 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 1.875m일 경우 주파수에 따른 배열이득변화는 그림 16과 같다.

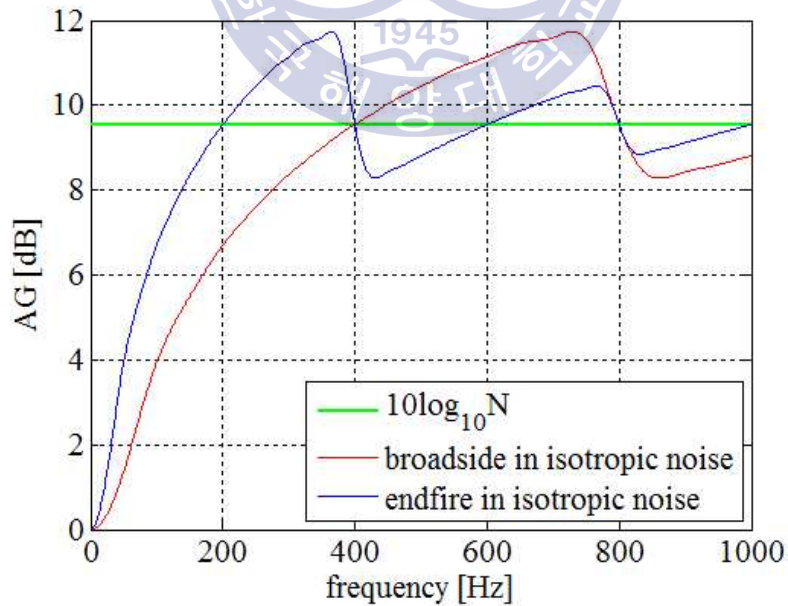


Fig. 16 등방성 소음환경에서의 배열이득 변화

2.3 지향지수

2.3.1 지향지수(Directivity Index, DI)의 정의

지향지수는 센서의 빔패턴을 공간상의 적분을 통해서 얻고, 이는 공간상에서 센서가 방위각에 따라 상대적으로 수신되는 비율을 세기로 표현한 것이다. 또한 신호가 단일 방향에서 평면파로 수신되고, 센서의 배열에 완벽한 상관관계 일 경우 등방성 소음(isotropic noise)에 대한 배열이득을 계산하면 지향지수(Directivity Index, DI)와 동일하다[1].

2.3.2 지향지수 시뮬레이션

DI는 자유공간(free space)에서 등방성 소음을 가정하고 배열센서가 수직으로 구성되어 있는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 17과 같이 continuous line array에서 직교좌표계의 수평각(azimuth angle)을 θ , 수직각(elevation angle)을 ϕ , 배열센서의 길이를 L , 음원 Q 가 공간상 임의의 위치에 있고, 미소요소(infinitesimal line element) dz 에 의한 음압은 식 (31)과 같다.[Kim]

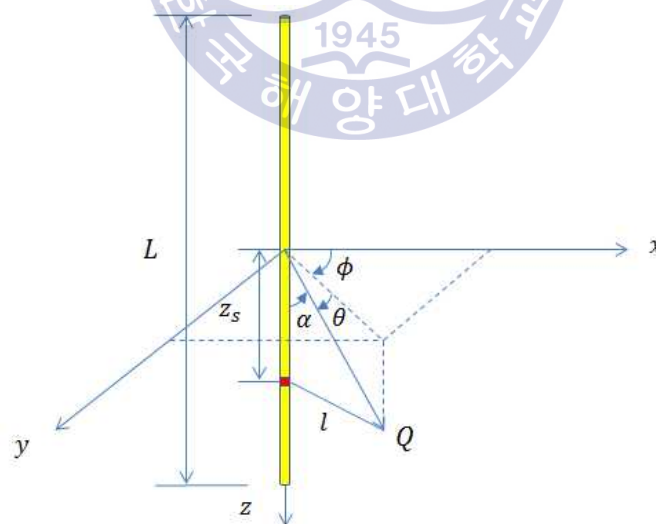


Fig. 17 continuous line array 좌표계

$$dp = \frac{A}{L} \frac{dz}{l} e^{i(kl - \omega t)} \quad (31)$$

식 (31)에서 $\frac{A}{L}$ 는 source strength per unit length, $\frac{A}{L}dz$ 는 source strength of dz , l 은 음원 Q 로부터 미소면적 dz 까지 거리이다. 그림 17에서 거리 l 은 식 (32)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_s)^2} \quad (32) \\ &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - 2zz_s + z_s^2} \quad (\because x^2 + y^2 + z^2 = r^2) \\ &= \sqrt{r^2 - 2rz_s \cos \alpha + z_s^2} \quad (\because z = r \cos \alpha) \\ &= r \sqrt{1 - \frac{2z_s}{r} \cos \alpha + \frac{z_s^2}{r^2}} \quad (\because -\cos \alpha = \sin \phi) \\ &= r \sqrt{1 + \frac{2z_s}{r} \sin \phi + \frac{z_s^2}{r^2}} \end{aligned}$$

식 (32)를 binominal 전개식에 의해 식 33과 같이 정리된다. 그리고 farfield 조건인 $r \geq \frac{L^2}{\lambda}$ 를 가정하게 되면 거리 l 과 r 이 유사해진다. 따라서 식 (33)의 2번째 항까지 적용을 해도 계산에 의한 오차는 무시할 수 있다.

$$l = r \left(1 + \frac{z_s}{r} \sin \phi + \frac{z_s^2}{2r^2} \cos^2 \phi + \dots \right) \quad (33)$$

식 (33)의 2번째 항까지 적용하여 음장의 음압을 식 (34)와 같이 정리할 수 있다.

$$p = \frac{A}{r} e^{i(kl - \omega t)} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} e^{iz_s k \sin \phi} dz \quad (34)$$

식 (34)에서 beam pattern에 해당하는 수식을 적분하여 식 (35)와 같이 sinc 함수로 정리할 수 있다. 여기서 z_s 는 센서의 위치벡터, k 는 파수이다.

$$B(\theta, \phi) = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} e^{iz_s k \sin \phi} dz = \frac{\sin\left(\frac{\pi L}{\lambda} \sin \phi\right)}{\frac{\pi L}{\lambda} \sin \phi} \quad (35)$$

식 (35)를 이용하여 식 (36)과 같이 directivity factor(d)를 계산할 수 있다.

$$d = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B^2(\theta, \phi) d\phi d\theta \quad (36)$$

식 (36)을 이용하면 식 (37)과 같이 DI를 계산할 수 있다.

$$DI = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{d} \right) \quad (37)$$

센서의 길이가 105m인 continuous line array의 beam pattern을 계산하여 3차원으로 도식화하면 그림 18과 같이 표현되고, 2차원으로 도식화하면 그림 19, 그림 20과 같다.

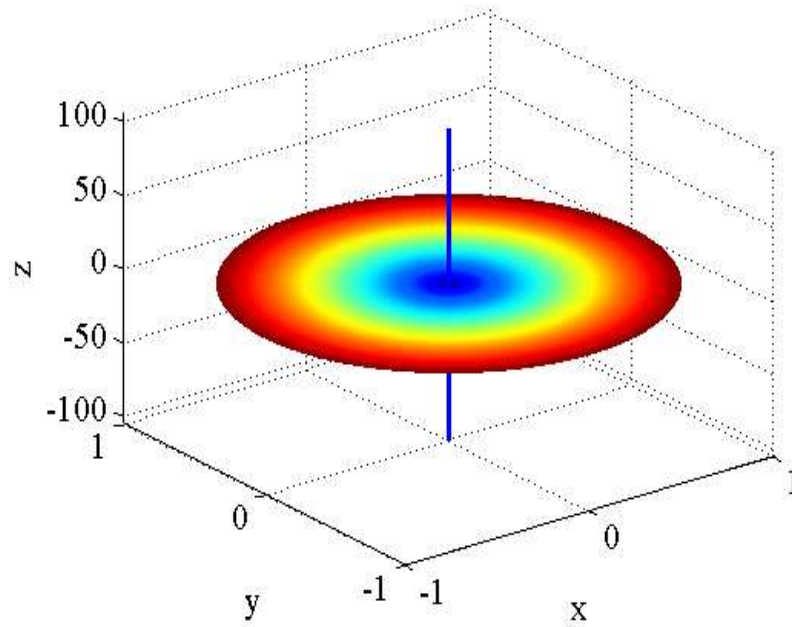


Fig. 18 continuous line array의 beam pattern

그림 18과 같이 선 배열센서는 축방향에 대하여 축 대칭을 이룬다.

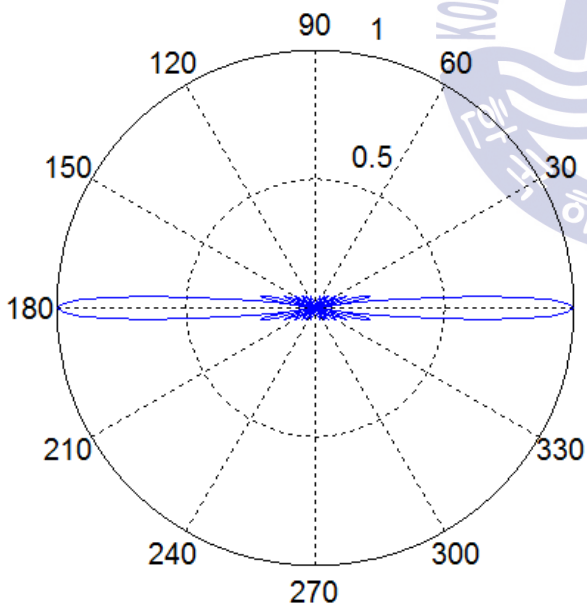


Fig. 19 beam pattern [normalized]

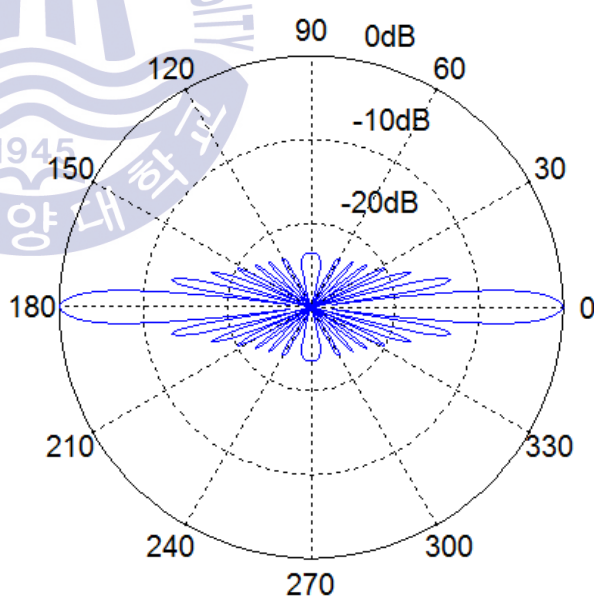


Fig. 20 beam pattern [dB]

그림 19, 그림 20은 $\theta = 0^\circ$ 일 경우에 대한 continuous line array의 beam pattern을 도식화한 것이다. beam pattern을 계산할 때 수평각 θ 는 -180° 부터 180° 까지, 수직각 ϕ 는 -90° 부터 90° 까지 식 (37)을 수치 적분하여 계산하면 DI는 11.76dB가 된다. 여기서 수직각 90° 는 해수면방향, 0° 는 배열센서의 broadside 방향이고, 270° 는 해저면 방향이다. 그림 19는 normalized된 beam pattern, 그림 20은 beam pattern을 dB로 표현하였다. continuous line array에서 $L \gg \lambda$ 의 조건을 만족하는 경우 식 37과 $10\log_{10}\frac{2L}{\lambda}$ 가 유사해진다[1].

그림 20의 beam pattern을 이용하여 continuous line array의 DI를 $\frac{L}{\lambda}$ 변화에 따라 도식화하면 그림 21과 같다.

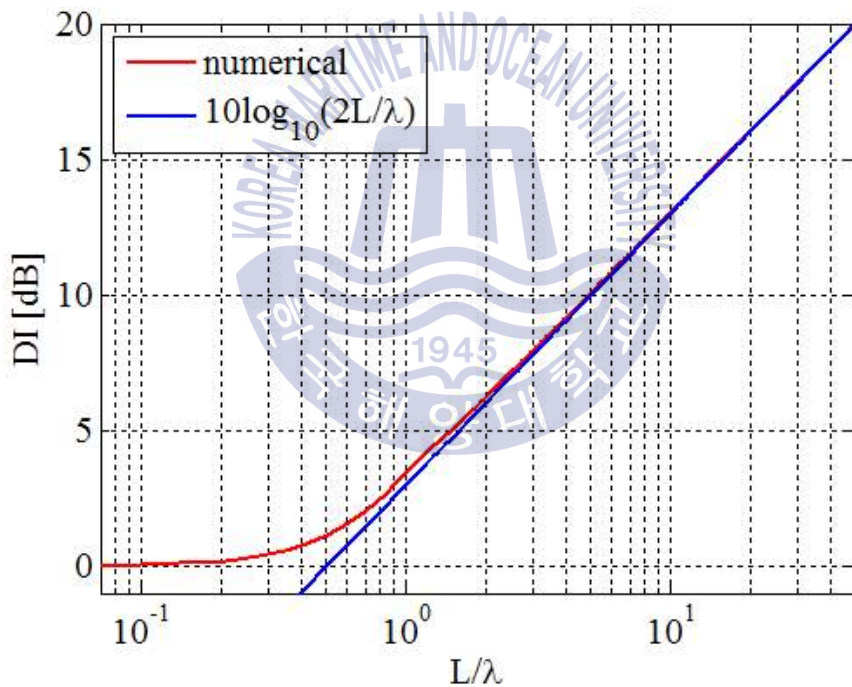


Fig. 21 DI (continuous line array)

그림 21을 보면 $\frac{L}{\lambda}$ 가 커질수록 수치적분을 통해 계산된 DI가 $10\log_{10}(\frac{2L}{\lambda})$ 그래프와 유사해진다.

등방성 소음환경일 경우 continuous line array가 아닌 discrete uniform line array에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. discrete uniform line array란 센서 간 간격이 특정 주파수의 파장의 배수로 구성된 선 배열센서 이다. 센서의 수 (N)는 9개, 주파수는 400Hz, 센서 간 간격은 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 1.875m이다. 수직으로 배치된 선 배열센서에서 broadside($\phi = 0^\circ$), endfire($\phi = 90^\circ$ or -90°)방향에 대한 DI를 도식화하면 그림 22와 같다.

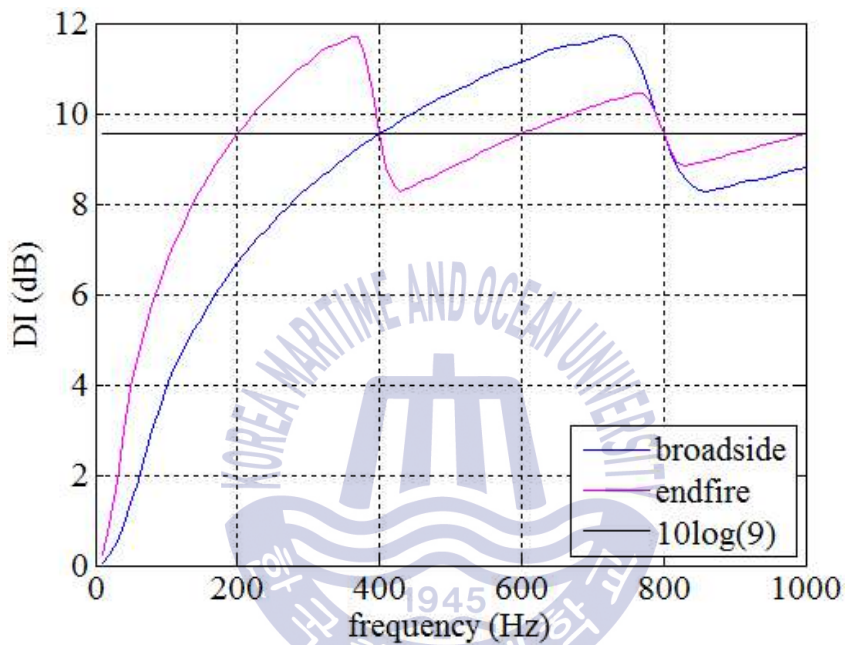


Fig. 22 DI (등방성 소음)

3. 연구결과 비교검증

3.1 공간적 상관성을 이용한 등방성 소음 검증

2.1.2 장에서 등방성 소음 시뮬레이션을 수행하였다. 2.1.2 장에서 생성한 등방성 소음(그림 12)을 식 (15)를 사용하여 공간적 상관성을 계산하고, 이를 등방성 소음의 해석적인 수식인 식 (30)과 비교하였다.

중심주파수는 400Hz, 음속은 1500m/s, 센서 수는 2개, 센서 간 간격은 중심주파수의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 1.875m로 설정하고, 센서를 수직으로 배치하였다. 이 때 시뮬레이션을 통해 생성한 소음의 공간적 상관성과 해석적인 수식의 공간적 상관성을 도식화하면 그림 23과 같다.

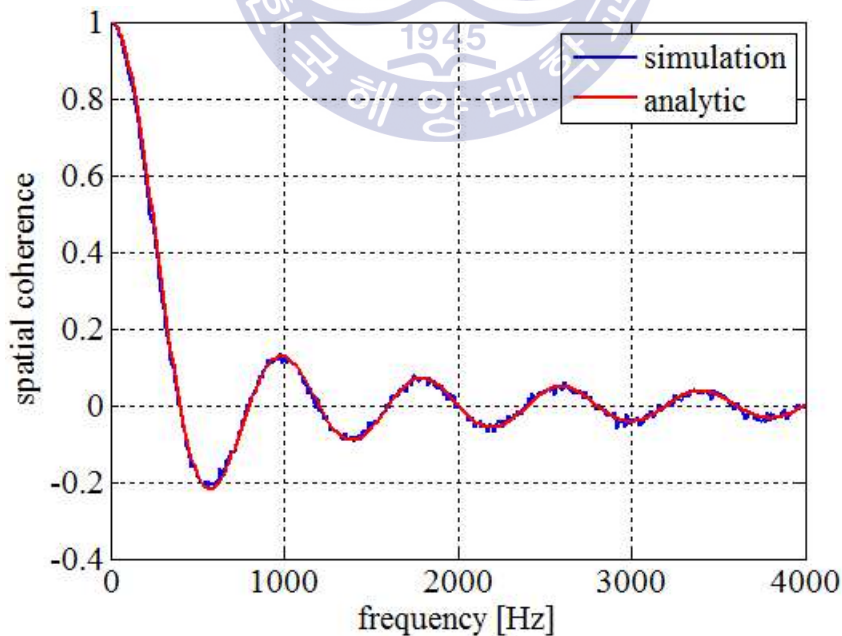


Fig. 23 등방성 소음의 공간적 상관성 검증

3.2 등방성 소음환경에서 배열이득과 지향지수 비교검증

등방성 소음환경에서 신호가 배열센서에 평면파로 수신될 경우 배열이득과 지향지수는 동일하다[1]. 공간적 상관성을 이용하여 계산한 배열이득과 beam pattern을 통해 계산한 지향지수를 동일한 조건에서 결과를 비교하였다. 비교검증을 등간격 선 배열센서인 DULA(Discrete Uniform Line Array)와 비균등간격 선 배열센서인 NLA(Nested Line Array)의 경우에 대하여 각각 비교검증을 수행하였다.

3.2.1 Discrete Uniform Line Array(DULA)의 경우

먼저 균등간격인 DULA에 대하여 비교검증을 수행하였다. 센서 간 간격이 중심주파수 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 1.875m이고 9개의 센서로 이루어진 수직 선 배열센서는 그림 24와 같고, 주파수에 따른 배열이득을 도식화하면 그림 25와 같다.

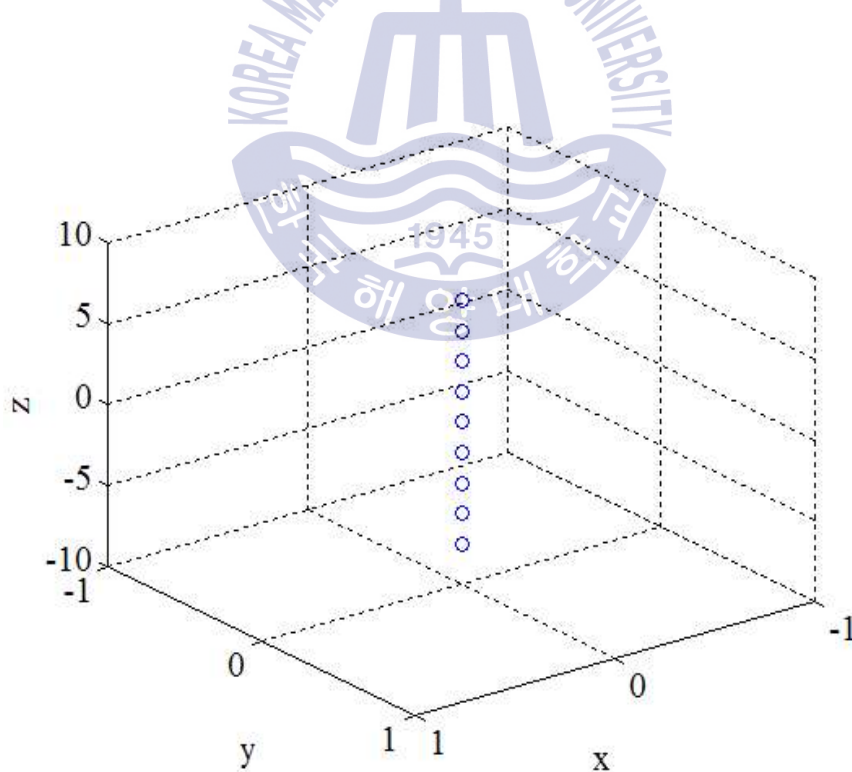


Fig. 24 배열센서 좌표계

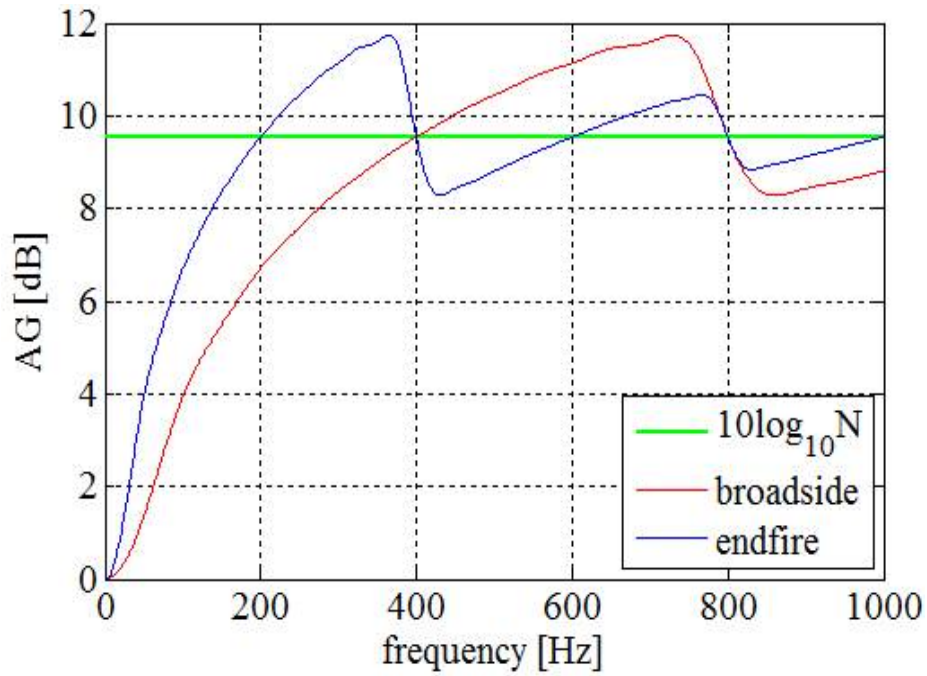


Fig. 25 spatial coherence를 통해 계산된 AG

동일한 조건에서 선 배열센서의 beam pattern을 broadside와 endfire방향에 대해 주파수 변화에 따른 beam pattern을 도식화하면 그림 26, 그림 27, 그림 28, 그림 29와 같다.

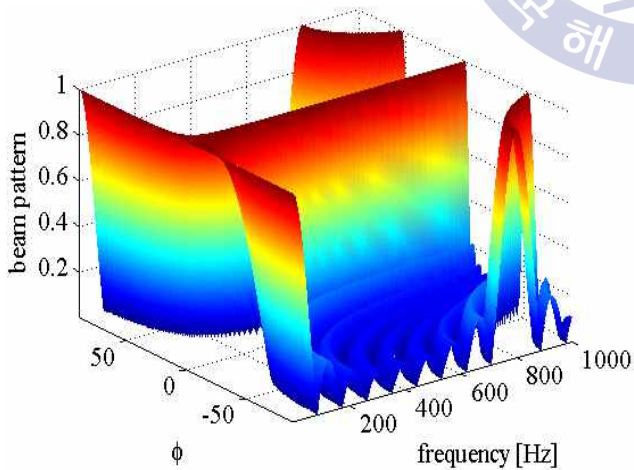


Fig. 26 beam pattern (broadside)

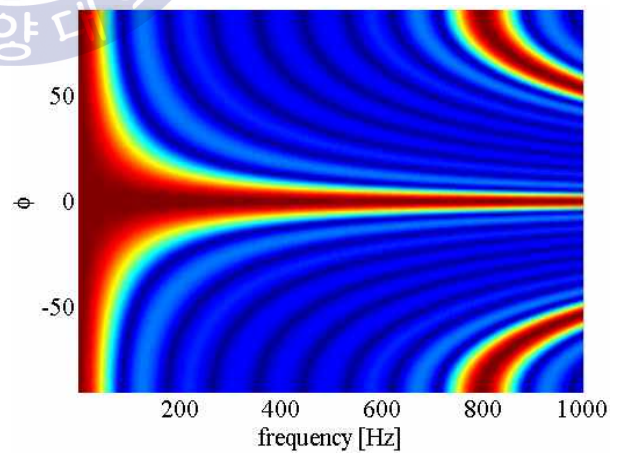


Fig. 27 beam pattern (broadside)

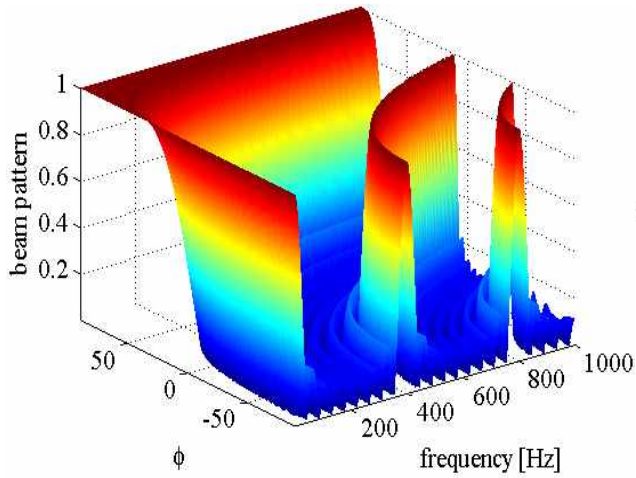


Fig. 28 beam pattern (endfire)

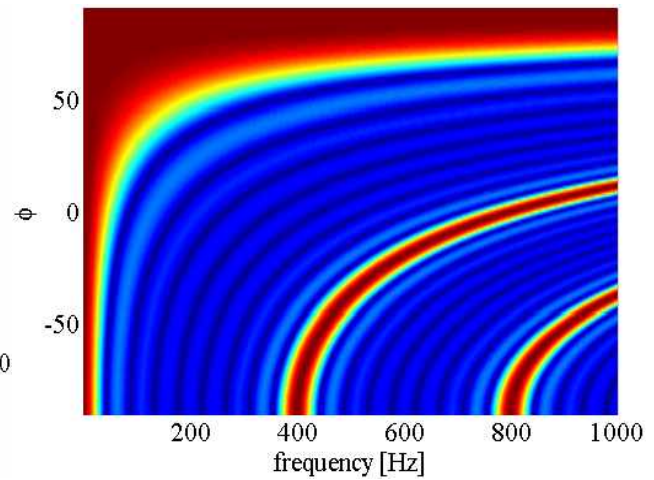


Fig. 29 beam pattern (endfire)

계산한 beam pattern을 이용하여 directivity factor를 계산하고, DI를 계산하면 그림 30과 같다.

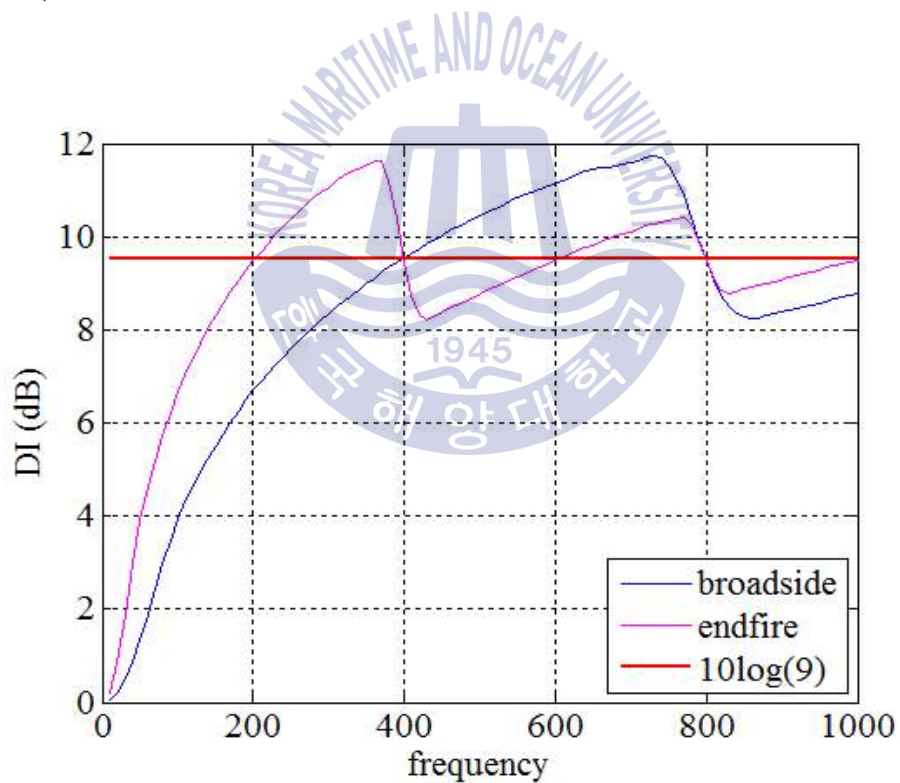


Fig. 30 beam pattern을 통해 계산된 DI

공간적 상관성을 이용하여 계산한 배열이득과 beam pattern을 이용하여 계산한 지향지수를 도식화하여 비교하면 그림 31과 같다.

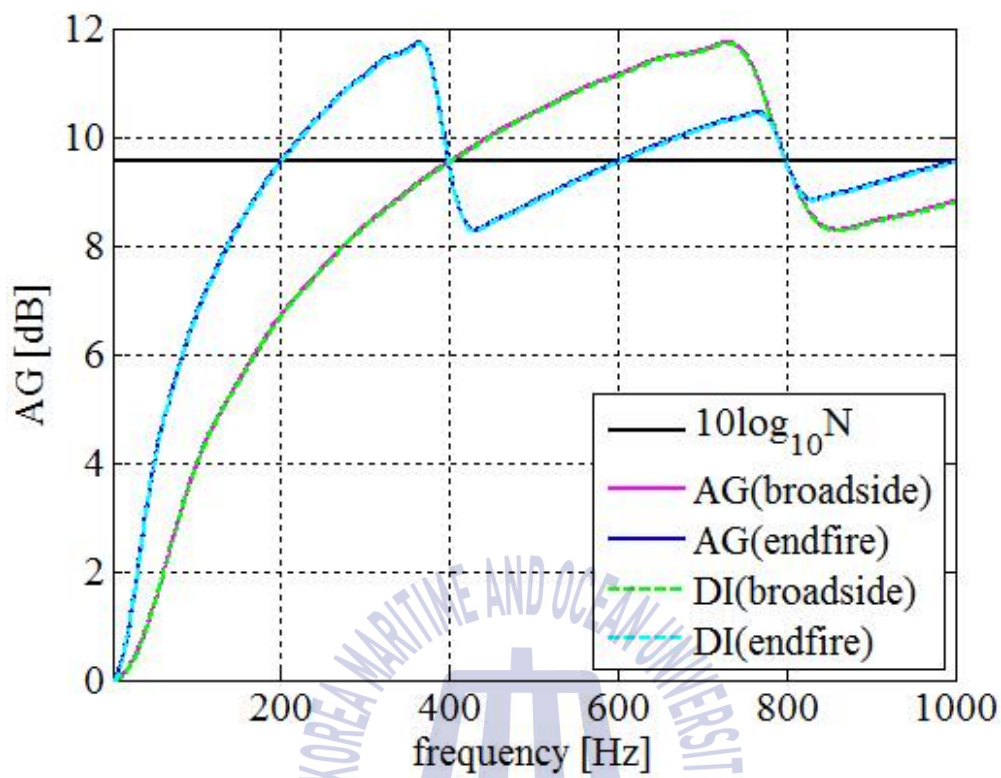


Fig. 31 배열이득과 지향지수 비교

3.2.2 Plane Array(PA)의 경우

등방성 소음환경에서 평면 배열센서(Plane Array, PA)에 대한 배열이득과 지향지수의 결과를 비교검증을 수행하였다. 평면 배열센서는 센서 수가 3개, 4개, 6개로 각각 이루어졌고, 배열센서의 형상은 삼각 평면 배열센서, 사각 평면 배열센서, 육각 평면 배열센서로 배치하였다. 센서 간 간격은 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 이고, 음속은 $1500m/s$ 일 때, 삼각 평면 배열센서는 그림 32와 같이 직교좌표계에 배치하고, 분석에 사용한 좌표계는 33과 같다. 이 때, 수직각(ϕ) broadside($\phi=0^\circ$)방향과 endfire($\phi=90^\circ$)방향에 대하여 주파수 변화에 따른 배열이득을 도식화하면 그림 34와 같다.

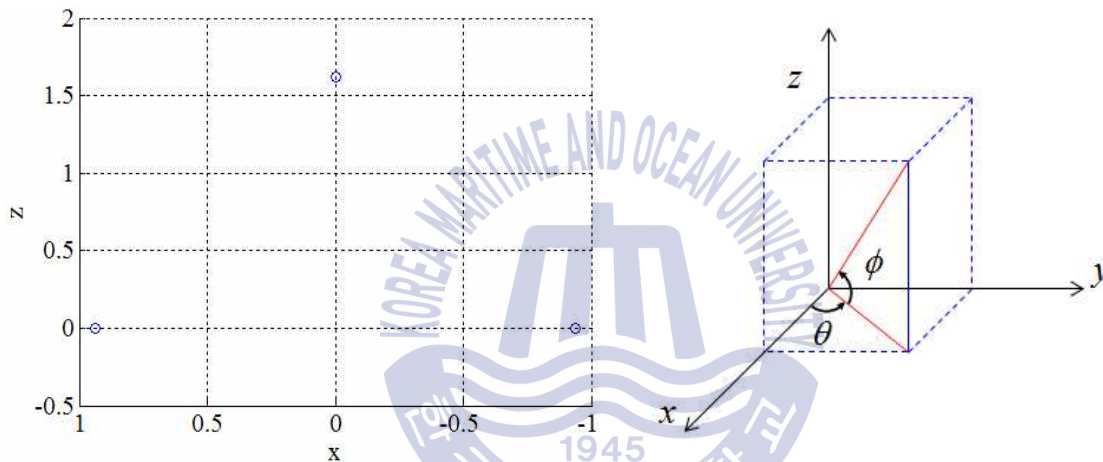


Fig. 32 삼각 평면 배열센서 좌표계

Fig. 33 직교좌표계

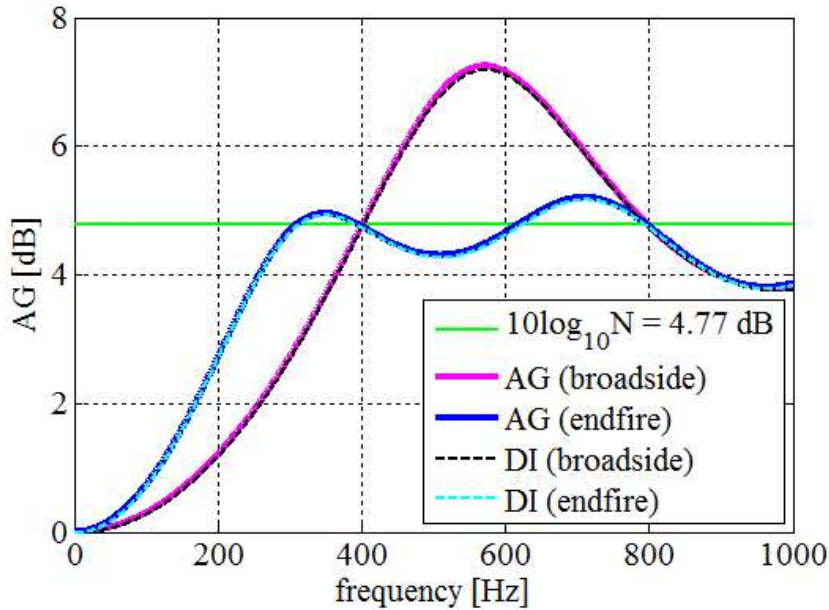


Fig. 34 배열이득과 지향지수 비교($N=3$)

그림 34를 보면 센서 간 간격이 모두 동일하기 때문에 그림 33의 400Hz대역에서 조향한 방향이 변화함에도 불구하고 배열이득이 일정한 것을 확인할 수 있다.

다음은 센서수가 4개인 사각 평면 배열센서에 대해 배열이득을 분석하였다. 그림 35와 같이 사각 평면 배열센서를 배치하였고, 그림 36은 분석에 사용한 좌표계이다. 등방성 소음환경에서 사각 평면 배열센서의 주파수 변화에 따른 배열이득을 도식화하면 그림 37과 같다.

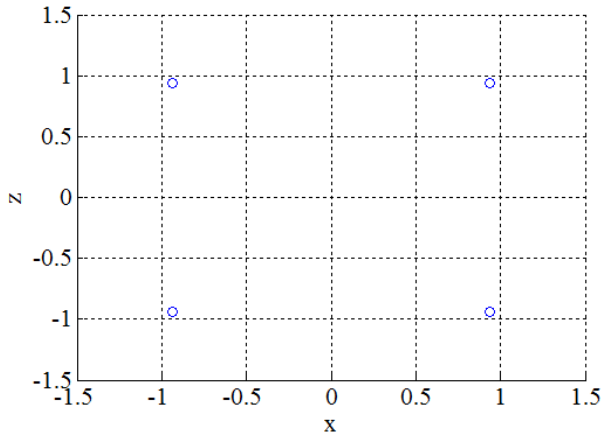


Fig. 35 사각 평면 배열센서 좌표계

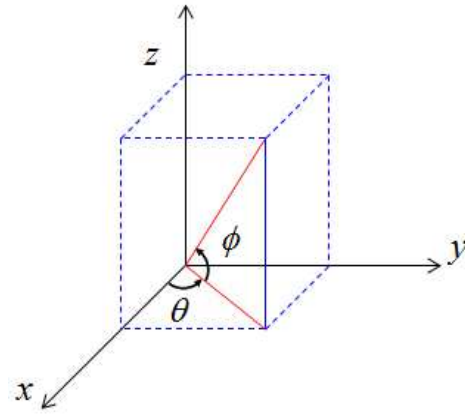


Fig. 36 직교좌표계

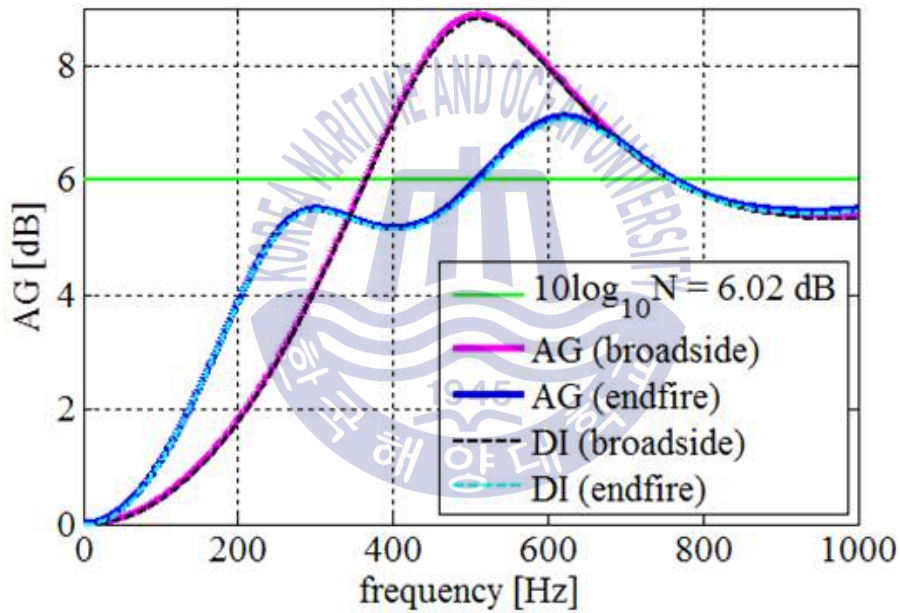


Fig. 37 배열이득과 지향지수 비교($N=4$)

그림 35의 사각 평면 배열센서에서 대각선의 두 센서 간 거리가 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 간격이 아니므로 그림 37의 400Hz대역에서 방향에 따라 배열이득이 변동하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 400Hz대역에서 대각선의 두 센서 간 거리에 대한 신호와 소음의 상관성이 깨지기 때문이다.

센서 수가 6개인 육각 평면 배열센서에 대하여 배열이득을 분석하였다. 그림 38과 같이 육각 평면 배열센서를 배치하였고, 그림 39는 분석에 사용한 좌표계이다. 등방성 소음환경에서 육각 평면 배열센서의 주파수 변화에 따른 배열이득을 도식화하면 그림 40과 같다.

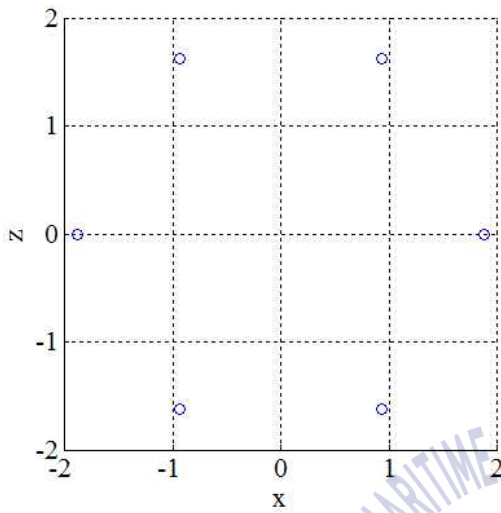


Fig. 38 육각 평면 배열센서 좌표계

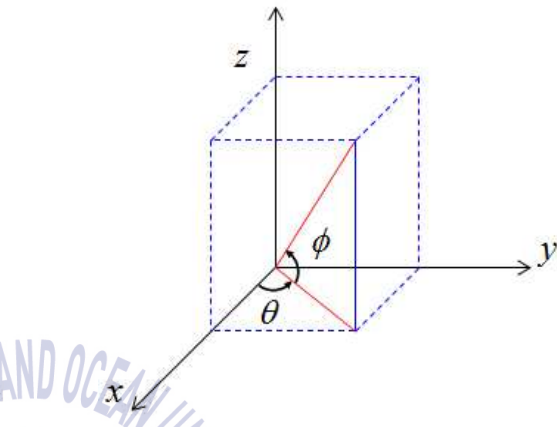


Fig. 39 직교좌표계

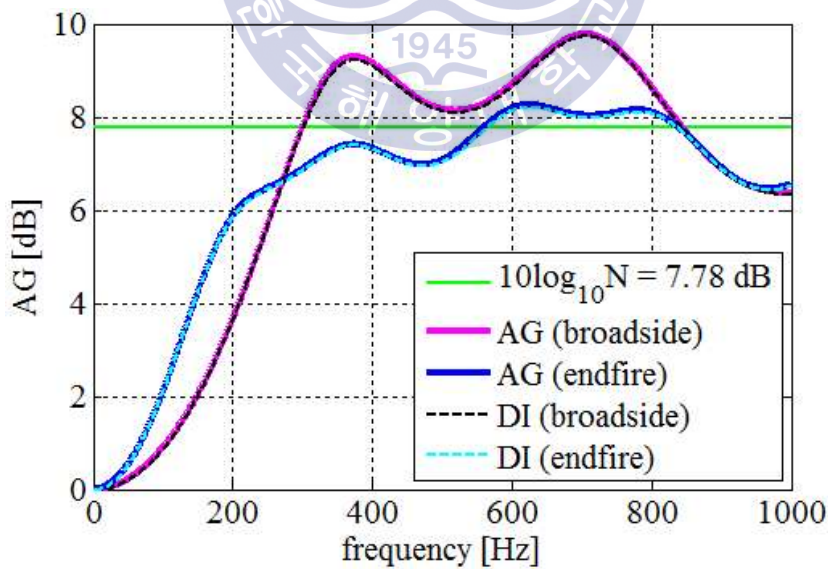


Fig. 40 배열이득과 지향지수 비교($N=6$)

그림 38에서 모든 센서 간 거리가 400Hz의 harmonic성분으로 구성되어 있지 않기 때문에 설계주파수에서 신호의 상관성이 깨지게 된다. 이로 인해 그림 40에서 설계주파수인 400Hz대역을 보면 조향한 방향에 따라 배열이득이 변화함을 확인할 수 있다. 센서 간 거리가 사각 평면 배열센서보다 다양해졌기 때문에 배열이득의 변화가 상대적으로 많이 복잡함을 확인할 수 있다. 이처럼 센서 간 간격과 배열센서의 형상은 배열이득 변화에 많은 영향을 끼침을 확인하였다.



3.3 검증된 등방성 소음 신호를 이용한 배열이득 비교검증

2.1.2 장에서 생성한 등방성 소음을 바탕으로 공간적 상관성을 계산하고 이를 이용하여 배열이득을 계산하였다. 3.2 장에서 검증한 배열이득의 결과와 비교/검증 하였다.

비교/검증을 위해 중심주파수 400Hz의 $\frac{\lambda}{2}$ 인 1.875m로 5개의 센서를 수직 배치하고, 음속은 1500m/s로 가정하였다. 센서의 좌표계는 그림 41과 같다.

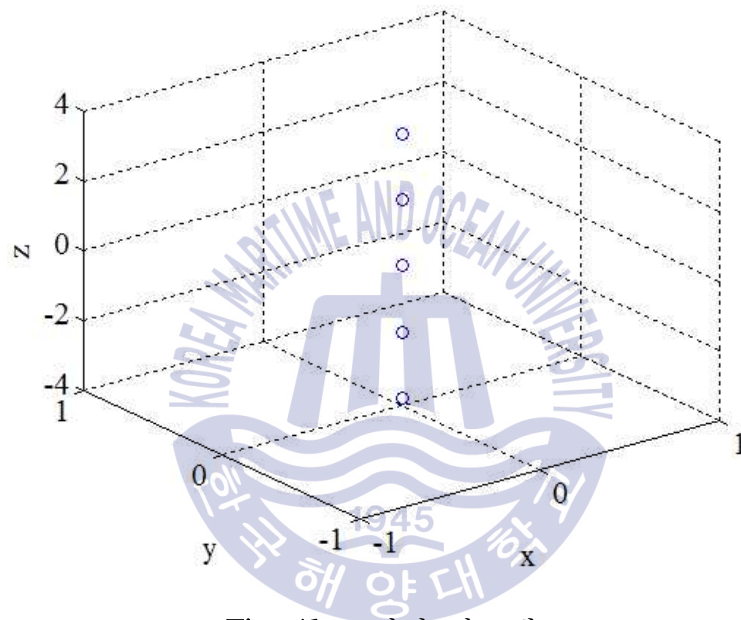


Fig. 41 센서 좌표계

그림 41의 좌표계에 소음음원을 수평각(θ) -180° 부터 180° 까지 10° 간격으로 배치하였고, 수직각(ϕ)은 -90° 부터 90° 까지 10° 간격으로 배치하였고, 그림 42와 같다.

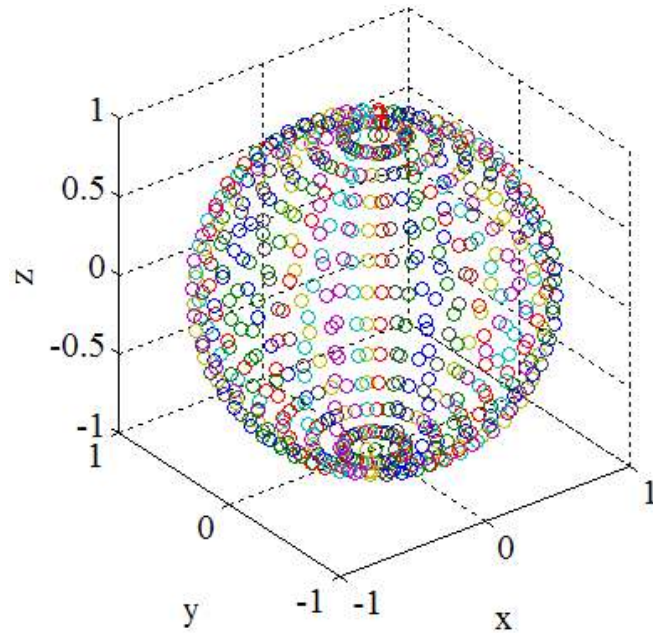


Fig. 42 소음 음원

그림 42의 각각 소음음원에서 그림 43과 같은 임의의 주파수 성분으로 구성된 신호를 생성하고, 5개의 센서에 시간지연을 적용하여 수신하였다.

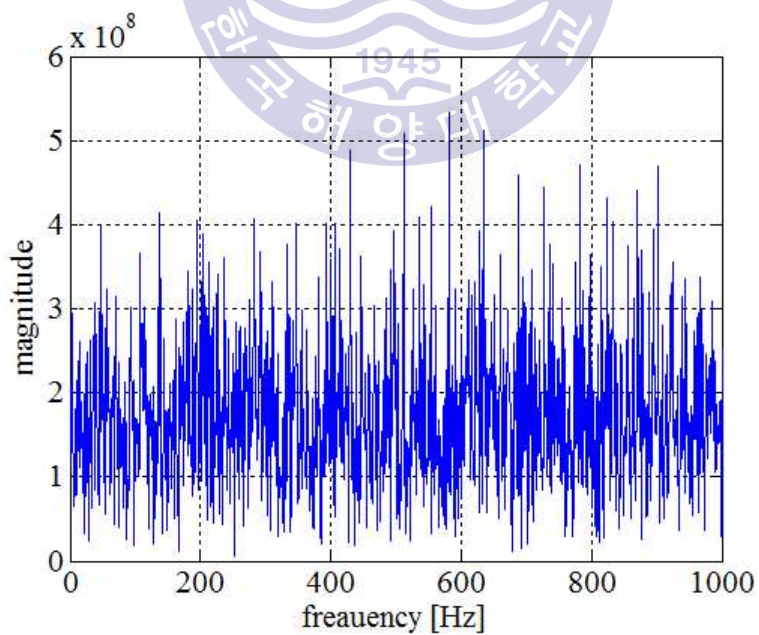


Fig. 43 소음 신호 (주파수 영역)

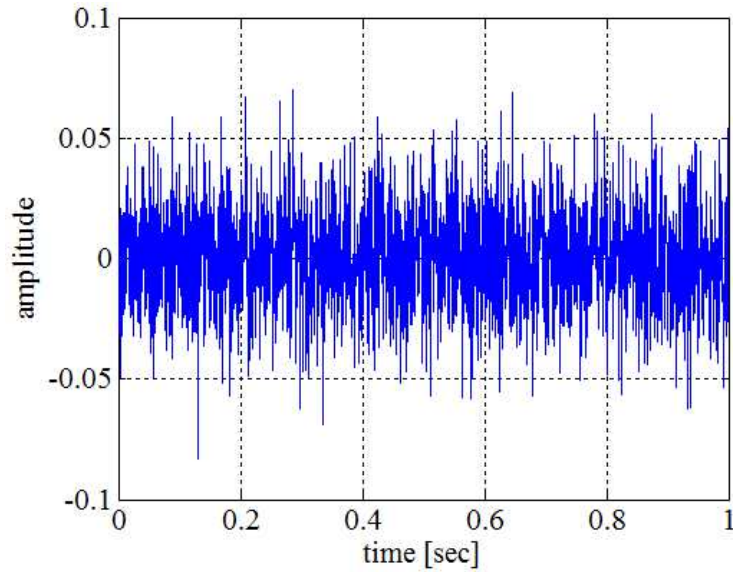


Fig. 44 소음 신호 (시간 영역)

그림 44와 같은 방법으로 모든 소음음원에서 소음 신호를 생성하여 수신하면 그림 45와 같다. 생성된 등방성 소음신호를 이용하여 1번 센서와 다른 4개의 센서의 공간적 상관성을 계산하면 그림 46, 그림 47, 그림 48, 그림 49와 같다.

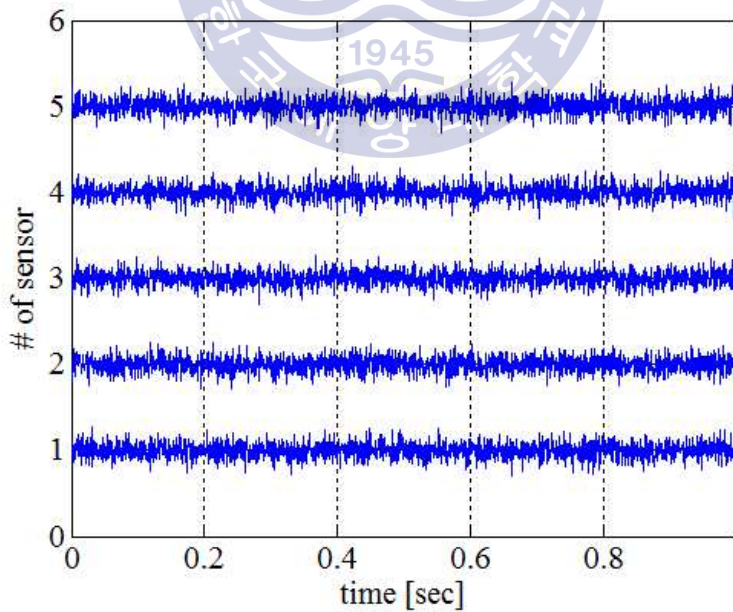


Fig. 45 소음 신호 (시간 영역)

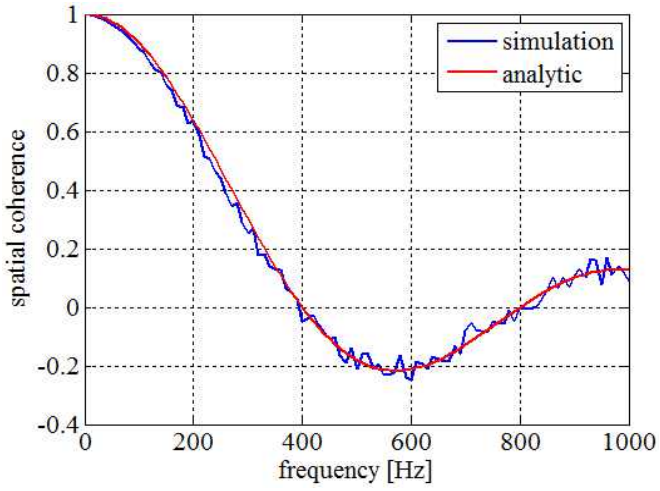


Fig. 46 1번, 2번 센서의 공간적 상관성

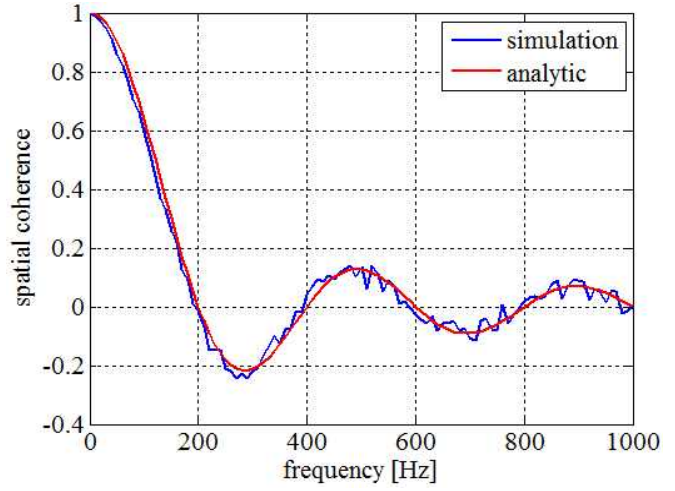


Fig. 47 1번, 3번 센서의 공간적 상관성

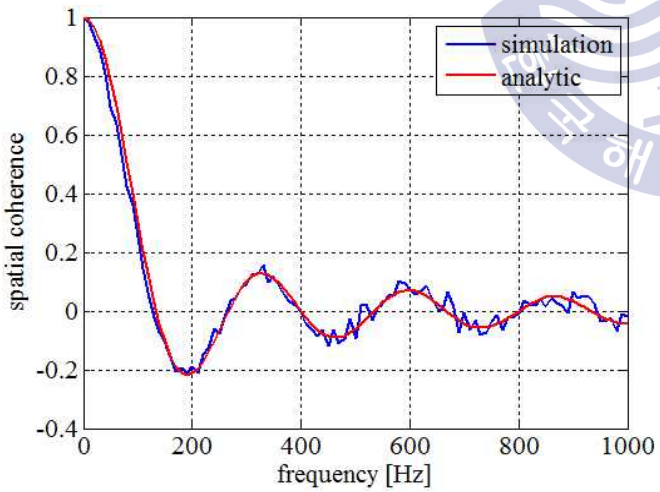


Fig. 48 1번, 4번 센서의 공간적 상관성

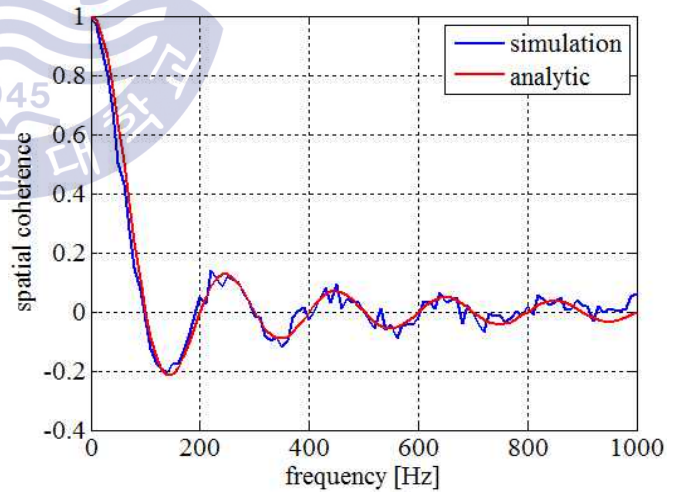


Fig. 49 1번, 5번 센서의 공간적 상관성

그림 46, 그림 47, 그림 48, 그림 49에서 보는바와 같이 공간적 상관성은 센서 간 거리, 주파수에 따라 변화한다. 이 때, 신호가 수직각(ϕ)의 broadside(0°) 방향, endfire(90°)방향에서 수신된 경우에 대하여 배열이득을 식 (28)을 적용하여 계산가능하고, 그림 50과 같다.

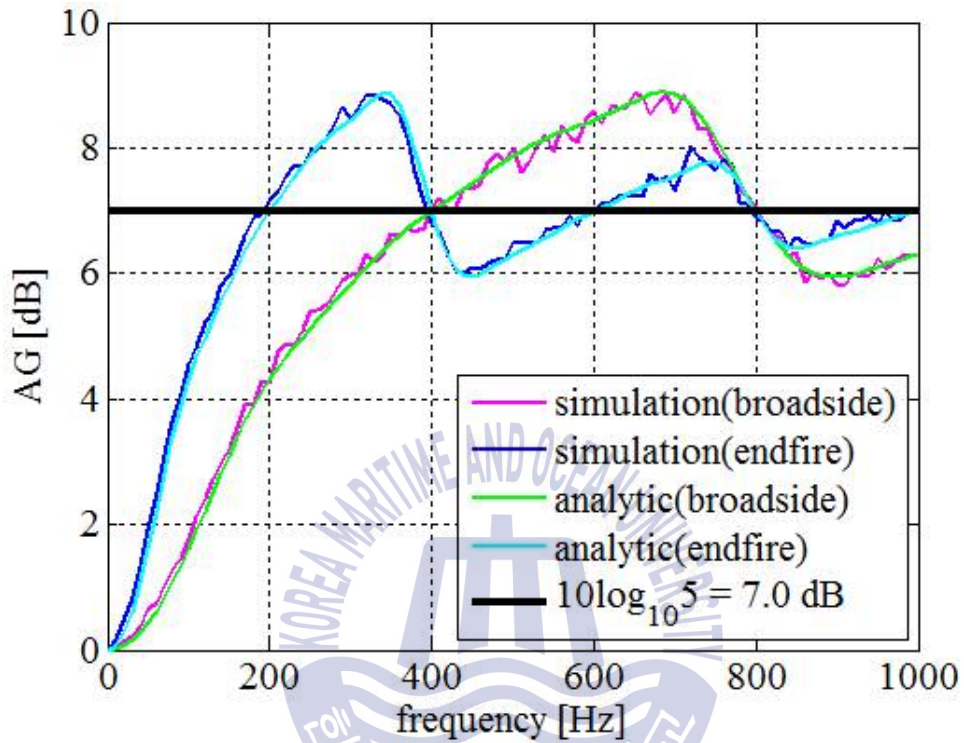


Fig. 50 배열이득 비교/검증

4. 결론

본 논문에서는 등방성 소음환경의 경우 선 배열센서의 배열이득 변화를 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 주파수, 음속, 배열센서의 형상 등에 따라 배열이득이 변화하지만 본 논문에서는 주파수 변화에 따른 배열이득 변화를 연구를 수행하였다.

먼저 등방성 소음에 대해 정의하고 해석적인 결과와 비교/검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 등방성 소음을 배열센서에 수신한 뒤 공간적 상관성을 계산하여 공간적 상관성의 해석적인 수식 결과와 비교하였고, 공간적 상관성의 해석적인 수식과 동일함을 확인하였다.

배열이득에 대해 정의하고, 배열이득을 계산하는 두 가지 방법에 대해 서술하였다. 두 가지 방법 중 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 계산하였다. 이유는 공간적 상관성을 이용하여 배열이득을 분석하면 주파수 변화, 음속 변화, 배열센서의 형상변화 등에 대해 분석이 가능하기 때문이다. 등방성 소음환경에서 신호와 소음의 공간적 상관성에 대한 해석적인 수식이 존재하기 때문에 등방성 소음 시뮬레이션을 수행한 뒤 신호의 공간적 상관성을 계산하여 해석적인 수식과 비교/검증하였다.

등방성 소음환경에서 평면파로 신호가 수신되면 배열이득과 지향지수가 동일하기 때문에 동일한 조건에서 지향지수와 배열이득의 해석적인 수식을 비교/검증하였고, 등방성 소음환경에서 균등간격 배열센서인 DULA와 비균등간격 배열센서인 NLA의 배열이득 결과와 지향지수의 결과를 비교/검증하였다.

등방성 소음 시뮬레이션을 통해 해석적인 수식이 아닌 등방성 소음신호를 생성하였고, 공간적 상관성을 계산하여 배열이득을 도출하였다. 이를 지향지수로 검증한 배열이득의 해석적인 결과와 비교하여 등방성 소음 환경에서 배열이득 변화 분석 시뮬레이션을 완성하였다.

비교적 이상적인 환경인 등방성 소음 시뮬레이션을 활용하면 실제 해역에 배열센서를 설치하기 이전에 시뮬레이션을 통해 배열이득 분석을 수행하고, 소음 환경이 어떤 특성을 가지는지 등방성 소음환경의 결과와 비교하여 분석이 가능하다.

차후 연구를 통해 실제 데이터와 시뮬레이션의 결과를 비교하여 실제 소음환경은 어떤 특성을 가지는지 분석할 예정이다. 또한 등방성 소음환경 뿐만 아니라 방위각별 가중치를 두어 방향성 소음환경을 생성하여 보다 현실적인 환경을 구성하여 분석할 예정이다.



참고문헌

- [1] R. J. Urick, 1983. *Principles of Underwater Sound*, 3rd edition, McGraw-Hill Book company.
- [2] J. S. Kim, 2005. *Underwater Acoustics and Sonar Engineering*, Lecture Note.
- [3] E. A. P. Habets, 2007. Generating sensor signals in isotropic noise fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, 122(6), pp. 3464-3470.
- [4] H. Cox, 1973. Spatial correlation in arbitrary noise fields with application to ambient sea noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 54(5), pp. 1289-1301.
- [5] S. C. Walker and M. J. Buckingham, 2011. Spatial coherence and cross correlation of three-dimensional ambient noise fields in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(2), pp. 1079-1086.
- [6] T. Usher, 1963. Space-Time Correlation in Isotropic Noise Fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, pp. 1885.
- [7] B. F. Cron and R. L. Shaffer, 1967. Array Gain for the Case of Directional Noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 41, pp. 864.
- [8] R. J. Nielsen, 1977. Array gain, correlation coefficients, and patch size, *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(1), pp. 60-64.
- [9] R. L. Shaffer and B. F. Cron, 1966. Array Gain for the Case of Horizontal Noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 39(6), pp. 1234.
- [10] M. J. Buckingham and N. M. Carbone, 1997. Source depth and the spatial coherence of ambient noise in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 102(5), pp.

2637-2644.

- [11] W. S. Burdic, 1984. *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice Hall.
- [12] R. S. Sloboda and M. A. Manness, 1983. Spatial coherence in semicircular noise fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(4), pp. 1260-1266.
- [13] W. A. Kuperman and F. Ingenito, 1980. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, pp. 1988-1996.
- [14] 최용화, 박지성, 김재수, 강돈혁, 조성호, 박정수, 2015. 등방성 소음환경에서 배열형상에 따른 배열이득 분석. *2015년도 제 30회 수중음향학 학술대회*.

