



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.

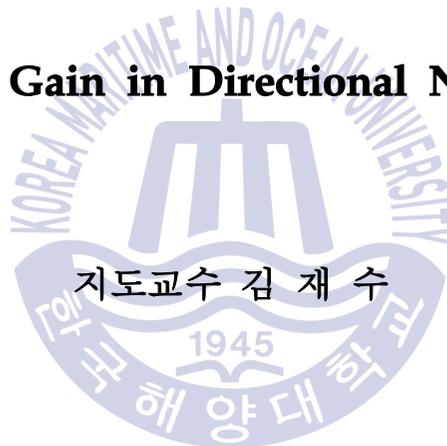
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

방향성 소음 환경에서 공간적 상관성을
이용한 배열성능 변동 연구

The Array Gain in Directional Noise Fields



2016년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

박지성

본 논문을 박지성의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 박 정 수 (인)

위 원 공학박사 김 재 수 (인)

위 원 이학박사 최 지 응 (인)

위 원 공학박사 김 기 만 (인)

위 원 공학박사 하 승 현 (인)

2016년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

박 지 성

목 차

목 차	i
그림 목차	iii
Abstract	vii

제 1 장 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 연구배경	3
1.3 논문의 구성	6

제 2 장 spatial coherence

2.1 spatial coherence의 정의	8
2.2 spatial coherence에 의한 배열이득	11
2.3 수신 신호의 spatial coherence	17
2.4 소음의 형태에 대한 spatial coherence	18
2.4.1 등방성 소음	18
2.4.2 방향성 소음	19

제 3 장 배열이득 추정 시뮬레이션

3.1 등방성 소음	22
------------------	----

3.1.1 등방성 소음 생성 모델링	24
3.1.2 등방성 소음에서 spatial coherence에 의한 배열이득	34
3.2 방향성 소음	47
3.2.1 방향성 소음 생성 모델링	47
3.2.2 방향성 소음에서 spatial coherence에 의한 배열이득	51

제 4 장 해양환경에 의한 배열이득 변동 분석

4.1 실험 환경	68
4.2 실험 데이터 분석	71
4.3 실험 데이터에 대한 배열이득	83
4.3.1 CW 주파수 195 Hz에 대한 배열이득	83
4.3.2 CW 주파수 410 Hz에 대한 배열이득	92
4.3.3 CW 주파수 605 Hz에 대한 배열이득	100
4.4 waveguide invariant	108

제 5 장 결 론

참고문헌

그림 목차

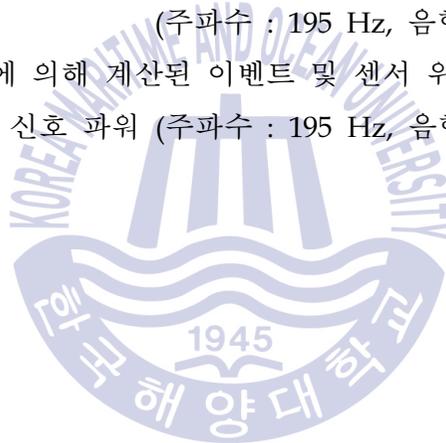
그림 1.1	소음의 형태	3
그림 1.2	소음의 형태에 대한 spatial coherence	4
그림 1.3	모델링에 의한 지향지수 및 수식적인 지향지수	5
그림 2.1	센서에 수신되는 신호	9
그림 2.2	구형좌표계	14
그림 3.1	배열센서의 빔 패턴 (등방성 소음 환경)	24
그림 3.2	소음원 분포	25
그림 3.3	임의의 소음원 분포	26
그림 3.4	임의의 소음원 분포의 방위	27
그림 3.5	배열센서 위치 (균등간격)	27
그림 3.6	등방성 소음 (a) 3차원 좌표, (b) x-y 좌표, (c) x-z 좌표, (d) y-z 좌표	29
그림 3.7	배열센서에 수신된 소음	30
그림 3.8	배열센서에 수신된 신호	31
그림 3.9	배열센서에 수신된 신호 & 소음	32
그림 3.10	신호 & 소음의 power spectral density	33
그림 3.11	소음의 power spectral density	34
그림 3.12	거리에 대한 spatial coherence (신호)	35
그림 3.13	거리에 대한 spatial coherence (등방성 소음)	36
그림 3.14	등방성 소음의 거리에 대한 spatial coherence (거리와 센서 간격 비)	37
그림 3.15	등방성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence (broadside 빔 조향)	38

그림 3.16 등방성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (broadside 빔 조향, 중심 주파수 400 Hz, 센서 수 9개) ……	39
그림 3.17 등방성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence (end fire 빔 조향) ……	41
그림 3.18 등방성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (end fire 빔 조향, 중심 주파수 400 Hz, 센서 수 9개) ……	42
그림 3.19 배열센서 위치 (비 균등간격, nested line array) ……	43
그림 3.20 등방성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 (broadside 빔 조향, 센서 수 21개) ……	44
그림 3.21 등방성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 (end fire 빔 조향, 센서 수 21개) ……	46
그림 3.22 방향성 소음 (a) 3차원 좌표, (b) x-y 좌표, (c) x-z 좌표, (d) y-z 좌표 ……	48
그림 3.23 빔 조향 방위에 대한 방향성 소음의 배열이득 (그림 3.22 방향성 세기 적용) ……	50
그림 3.24 신호의 거리에 대한 spatial coherence ……	51
그림 3.25 방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = -90^\circ$ 빔 조향) ……	52
그림 3.26 방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = -90^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz) ……	53
그림 3.27 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi = 0^\circ$, $\theta = -90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개) ……	54
그림 3.28 방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ 빔 조향) ……	55
그림 3.29 방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz) ……	56

그림 3.30	방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ, \theta=0^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개) ……	57
그림 3.31	방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 빔 조향) ……	58
그림 3.32	방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz) ……	59
그림 3.33	방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개) ……	60
그림 3.34	방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (빔 조향 수평각 : -90° & 0° & 90° , 센서 수 9개) ……	61
그림 3.35	방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ, \theta=-90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개) ……	63
그림 3.36	방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ, \theta=0^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개) ……	64
그림 3.37	방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ, \theta=90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개) ……	65
그림 3.38	방향성 소음 환경에서 nested line array의 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (빔 조향 수평각 : -90° & 0° & 90° , 센서 수 21개) ……	66
그림 4.1	수심 별 음속 분포 ……	69
그림 4.2	배열센서 및 음원의 위치 ……	70
그림 4.3	CW 송신 주기 ……	71
그림 4.4	수평 선 배열센서에 수신된 CW 신호 ……	72
그림 4.5	CW 신호의 power spectral density ……	73
그림 4.6	수평 선 배열센서에 수신된 소음 ……	74
그림 4.7	소음의 power spectral density ……	75
그림 4.8	CW 신호의 410 Hz에 대한 센서별 파워 ……	76
그림 4.9	소음의 410 Hz에 대한 센서별 파워 ……	76

그림 4.10 신호의 수평방위에 대한 power output ($\phi = 0^\circ$, normalized)	78
그림 4.11 CW 신호의 빔 조향에 의한 power spectral density	79
그림 4.12 소음의 빔 조향에 의한 power spectral density	80
그림 4.13 소음의 구형 좌표계의 power output (normalized)	81
그림 4.14 방향성 소음에 대한 spatial coherence	81
그림 4.15 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (195 Hz)	83
그림 4.16 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 195 Hz)	84
그림 4.17 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (195 Hz)	85
그림 4.18 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 195 Hz)	86
그림 4.19 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (195 Hz)	87
그림 4.20 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 195 Hz)	87
그림 4.21 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (195 Hz)	88
그림 4.22 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 195 Hz)	89
그림 4.23 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (195 Hz)	90
그림 4.24 이벤트에 대한 배열이득 (195 Hz)	91
그림 4.25 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (410 Hz)	92
그림 4.26 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 410 Hz)	93
그림 4.27 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (410 Hz)	94
그림 4.28 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 410 Hz)	94
그림 4.29 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (410 Hz)	95
그림 4.30 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 410 Hz)	96
그림 4.31 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (410 Hz)	97
그림 4.32 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 410 Hz)	97
그림 4.33 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (410 Hz)	98
그림 4.34 이벤트에 대한 배열이득 (410 Hz)	99
그림 4.35 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (605 Hz)	100
그림 4.36 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 605 Hz)	101

그림 4.37 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (605 Hz)	102
그림 4.38 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 605 Hz)	102
그림 4.39 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (605 Hz)	103
그림 4.40 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 605 Hz)	104
그림 4.41 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (605 Hz)	105
그림 4.42 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 605 Hz)	105
그림 4.43 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (605 Hz)	106
그림 4.44 이벤트에 대한 배열이득 (605 Hz)	107
그림 4.45 정규화된 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (195 Hz) ·	109
그림 4.46 실험을 수행한 해양의 음파 전달 환경 (주파수 : 195 Hz, 음향모델 : RAM) ···	110
그림 4.47 음향모델에 의해 계산된 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (주파수 : 195 Hz, 음향모델 : RAM) ···	111



The Array Gain in Directional Noise Fields

by

Ji Sung Park

Ocean Engineering

Graduate School of Korea Maritime & Ocean University



Abstract

Acoustic signals received in the ocean using receiver arrays result in array gain (AG), unlike the case when a single sensor is used. AG occurs when sensors are arranged in an array, and it can be calculated using the ratio of Signal-to-Noise ratio (SNR) obtained in the case of the array sensor and that obtained for a single sensor.

For a plane wave signal received from a single direction by a perfectly coherent array of sensors, the is equal to the directivity index (DI). However, AG changes in the presence of directional noise.

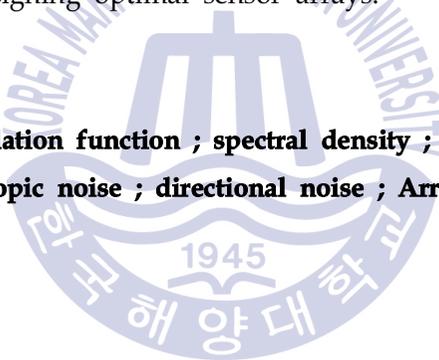
In this dissertation, the variability of AG with directional noise is studied using spatial coherence. Spatial coherence refers to a scenario when the time delay at the sensor's normalized space-time correlation function is zero, and it is calculated using the directional intensity of signals and noises.

Numeric modeling is conducted by simulating signals and noises in a linear array under the assumption of free space. Using spatial coherence, the AG was calculated and it was found to converge to the AG calculated using SNR. Furthermore, the AG in the presence of isotropic noise was verified to be equal to the DI.

A real ocean has a number of environmental factors operating, such as the ocean waves, currents, marine geology, and speed of sound. Additionally, a variety of noises is generated by ships, wind waves, and marine organisms that make the estimation of AG quite nontrivial. Hence, we conducted an experiment where a pure tone signal was received using a horizontal linear array. The AG was calculated using the spatial coherence of signals and noises received and was confirmed to converge to the AG calculated using SNR.

Our experiments indicate that it is possible to estimate AG in the presence of directional noise using spatial coherence. Thus, this technique can be utilized in designing optimal sensor arrays.

KEY WORDS : correlation function ; spectral density ; spatial coherence ; isotropic noise ; directional noise ; Array Gain.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적

해양에서 배열센서를 사용하여 음향신호를 수신하는 경우 개별센서를 사용하는 경우와 달리 배열이득(Array Gain, AG)이 발생한다. 배열이득은 다 수의 센서가 배열을 이루는 경우 발생하는 이득으로 개별센서 SNR(Signal to Noise Ratio)과 배열센서 SNR의 비로 계산할 수 있다 [Urick(1983)].

신호가 단일 방향에서 평면파로 수신되고, 센서의 배열에 따른 완벽한 상관관계인 조건에서 등방성 소음(isotropic noise)에 대한 배열이득을 계산하면 지향지수(Directivity Index, DI)와 동일하다. 하지만 균등간격인 선 배열센서에서 중심주파수가 아닌 주파수 대역의 신호가 수신되는 경우와 배열센서의 형상이 균등간격이 아닌 경우, 방향성 소음(directional noise)이 발생하는 경우 등과 같이 배열센서와 신호의 상관관계가 달라지는 조건에서 배열이득은 변화하게 된다[Burdic(1984)].

본 논문에서는 소음 환경이 변동하는 경우 배열이득의 변화를 예측하기 위하여 공간간섭성(spatial coherence)에 대한 연구를 수행하였다. Spatial coherence는 cross-correlation에 대한 공간적인 개념이다[Cox(1973)]. 그리고 방향성 소음이 발생하는 경우, 소음의 방향성 세기의 형태에 따라 소음에 대한 spatial coherence가 달라진다. [Urick(1983)]에서는 cross-correlation coefficient를 이용한 배열이득 계산 방법을 제시하였으며, 본 논문에서는 이를 이용하여 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하였다. 추가적으로 빔 조향에 의한 spatial coherence를 계산하는 방

안을 연구하였다. 이로써 배열센서에서 방향성 소음의 세기 및 빔 조향 방위에 대한 배열이득을 추정할 수 있게 된다.

해양에서 신호를 측정하는 경우 배열센서의 자세각 또는 음원의 위치, 소음의 방향성 형태에 따라 배열이득이 달라진다. 만약 기존의 SNR을 이용하여 배열이득을 계산하려면 배열센서를 해양에 설치 후 신호를 측정해야 한다. 하지만 spatial coherence를 이용하게 되면 배열센서를 설치하기 이전에 방향성 소음 및 빔 조향 방위, 배열센서의 형상의 정보만으로 배열이득을 추정할 수 있게 된다. 그러므로 예를 들게 되면, 수평 선 배열센서를 해양에 매설하는 경우 spatial coherence를 이용하여 최적의 성능이 도출되는 위치 및 자세각을 미리 예측할 수 있게 된다. 또는 spatial coherence를 이용함으로써 특정 소음 환경에서 최적의 성능이 도출되는 배열센서를 설계할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 spatial coherence의 계산 방법을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 해양실험을 수행하였다. 소음 환경 및 배열센서의 형상에 따라 SNR에 의한 배열이득을 계산하였고, 이에 대한 방향성 소음의 세기와 빔 조향 방위로부터 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하여 비교 및 분석하였다. 이를 통해 spatial coherence에 의한 배열이득과 SNR에 의한 배열이득이 수렴하는 것을 확인하였다. 이로써 spatial coherence를 이용하여 배열이득을 예측할 수 있음을 확인하였다.

1.2 연구배경

선진국에서는 소나의 상관성에 대한 연구가 다양하게 이루어졌다. 그 중 공간상관성인 spatial coherence는 [Cox(1973)]에 의해 수식적으로 정리되어졌다. [Cox(1973)]는 cross-correlation function과 cross-spectral density function의 관계에 대하여 정리하였고, 이를 3차원으로 확장된 space-time correlation function으로 표현하였다. 그리고 space-time correlation function에서 시지연이 0이 되는 경우 즉, 공간의 변화만 고려한 것을 spatial coherence로 정의하였다. 그림 1.1과 같이 소음의 형태를 설정하는 경우 그림 1.2와 같이 거리에 따른 spatial coherence를 계산하였다.

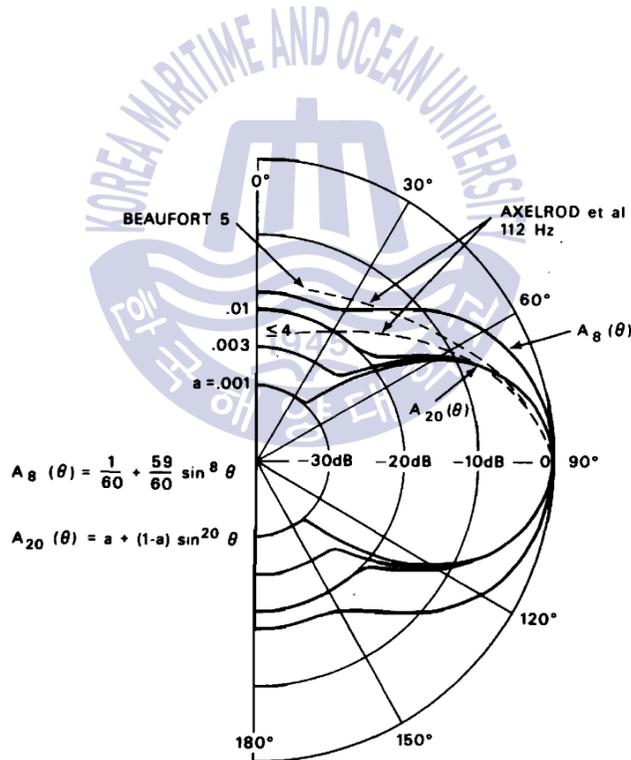


그림 1.1 소음의 형태 [Cox(1973)]

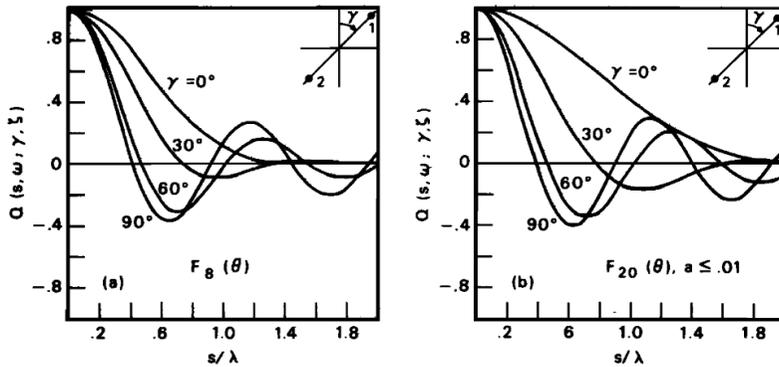


그림 1.2 소음의 형태에 대한 spatial coherence [Cox(1973)]

[Smith(1976)]는 multipath 또는 multimodal channels에서 spatial coherence의 변화를 모델링하였고, [Sloboda(1983)]는 semicircular의 소음 환경에서 spatial coherence를 수식적인 연구를 수행하였다. [Urick(1983)]은 cross-correlation coefficient를 이용하여 배열이득을 계산하는 방법을 정리하였는데, 이로 인해 spatial coherence에 의한 배열이득 계산이 가능하게 된다. [Buckingham(1997)]은 음원의 깊이 및 소음의 형태에 따른 spatial coherence의 변화를 연구하였고, [Habets(2007)]는 등방성 소음을 생성하는 모델링을 연구하고, 그림 1.3과 같이 spatial coherence를 이용하여 계산한 등방성 소음의 지향지수와 이론적인 지향지수의 비교를 통해 검증하였다.

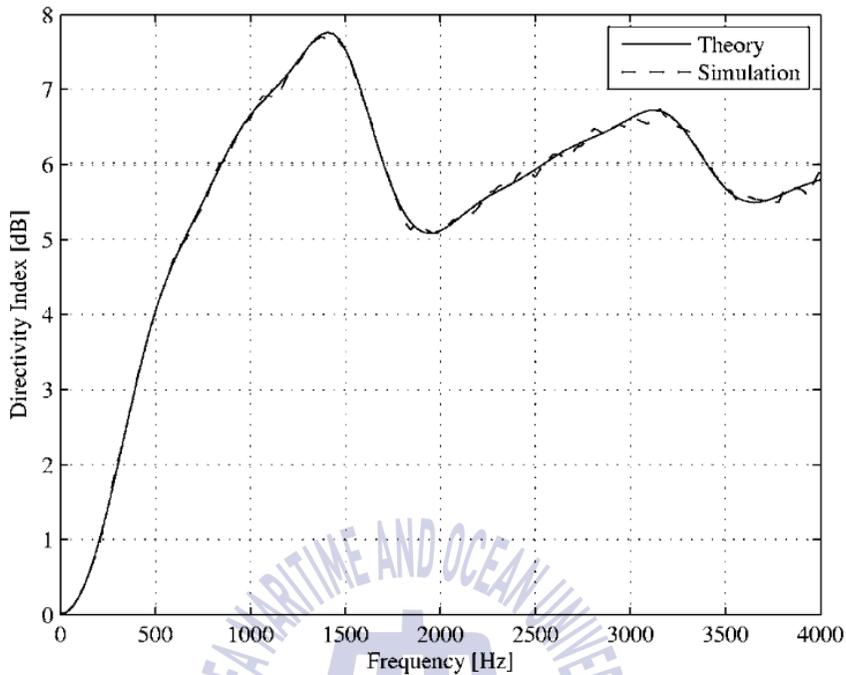


그림 1.3 모델링에 의한 지향지수 및 수식적인 지향지수
[Habets(2007)]

[Walker(2012)]는 3차원 공간에서 소음의 방향성 형태에 대한 spatial coherence 및 cross-correlation을 계산하는 모델링에 대하여 연구하였다.

국내에서는 [박지성(2015)], [최용화(2015)]에 의해서 등방성 및 방향성 소음의 환경에 대한 기초적인 배열성능 연구를 수행하였다.

이와 같이 spatial coherence에 대하여 다양한 연구가 수행되는 것을 확인하였다. 하지만 실제 해양환경에서 spatial coherence를 이용하여 방향성 소음 환경에서 배열이득에 대한 변동성을 연구한 사례는 찾기 쉽지 않았다.

1.3 논문의 구성

본 논문에서는 소음의 형태에 의한 배열이득을 계산하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 spatial coherence에 대한 수식적인 정리를 수행하였고, 소음의 방향성 세기를 적용하여 배열이득을 계산하였다. 모델링에 의해 생성된 등방성 및 방향성 소음으로부터 배열이득을 계산하고, 검증을 수행하였다. 그리고 해양 실험을 수행하여 spatial coherence에 의한 배열이득을 도출하였다.

2장에서는 cross-correlation function 및 cross-spectral density function의 관계를 정리하고, 3차원으로 확장하였다. space-time correlation function으로부터 시지연이 0이 되는 경우에 대한 실수부를 spatial coherence라고 한다. 이에 대하여 배열이득을 도출하는 과정을 수식적으로 정리하였고, 이로부터 방향성 소음에 의한 배열이득을 계산할 수 있음을 확인하였다.

3장에서는 소음의 형태에 대한 배열이득을 계산하기 위하여 신호 및 소음을 생성하는 모델링을 수행하였다. 등방성 소음환경에서 배열이득과 지향지수가 동일하므로, 신호 및 소음을 생성하는 모델링을 수행하였고, 균등간격 및 비 균등간격 센서에 대하여 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하여 검증을 수행하였다. 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서에 대하여 배열이득의 수식이 존재하는 경우 모델링 결과에 의한 배열이득을 계산하여 수식적인 결과를 통해 검증하였다. 하지만 등방성 소음 환경에서 비 균등간격 센서의 경우 배열이득을 예측하기 쉽지 않기 때문에 SNR에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득을 비교함으로써 검증을 수행하였다.

4장에서는 모델링과 달리 실제 해양환경에서는 다양한 환경적인 요소들이 존재하므로 실험을 수행하여 배열이득을 도출하는 연구를 수행하였다. 수평 선 배열센서를 해저에 배치하고, 실험선에서 CW를 송신하여 이에

대한 데이터 분석 및 배열이득을 계산하였다. 배열센서에서 CW에 대한 파워 준위를 계산하여 SNR에 대한 배열이득을 계산하였다. 그리고 방향성 크기를 계산하여 신호가 수신되는 방향으로 빔 조향하는 경우 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하였다. 이를 통해 SNR에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하여 비교하였다. 추가적으로 배열의 각 센서마다 수신되는 신호의 파워가 다른 이유를 waveguide invariant를 이용하여 분석하였다.

마지막으로 5장에서는 연구결과 요약 및 향후 연구방향에 대하여 기술하였다.



제 2 장 spatial coherence

[Cox(1973)]에 의하면 spatial coherence는 두 센서에서 수신되는 신호의 cross-correlation에 대한 공간적인 개념이다. 이를 통해 cross-correlation에서 spatial coherence가 도출되는 과정에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 [Urick(1983)]에서 cross-correlation coefficient를 이용하여 배열이득을 도출하는 방법을 언급하였고, 이러한 방법을 통해 배열센서에서 spatial coherence를 이용하여 배열이득을 계산하였다. 추가적인 연구를 통해 방향성 소음이 발생하는 환경에서 spatial coherence를 계산할 수 있음을 확인하였고, 이를 이용하여 방향성 소음 환경에서 배열센서에 대한 배열이득을 도출하는 연구를 수행하였다. 최종적으로 이와 같은 연구를 수행함으로써 배열센서의 형상 및 방향성 소음의 세기의 정보만 알게 된다면 배열이득을 추정할 수 있음을 확인하였다.

2.1 spatial coherence의 정의 [Cox(1973)]

두 센서에서 수신되는 신호는 시간 또는 공간적인 상관관계를 가지고 있다. 그림 2.1과 같이 무지향성의 두 센서에 평면파가 θ 방향에서 수신되는 경우 $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 의 신호는 Δ 의 시지연이 발생한다. Δ 는 센서의 간격 d 와 수신 방위 θ , 음속 c 의 관계로 결정되며, $d\cos(\theta)/c$ 가 된다. 이는 cross-correlation function의 경우 시지연이 Δ 가 되는 경우 상관성이 가장 높아지고, cross-correlation coefficient가 1이 된다.

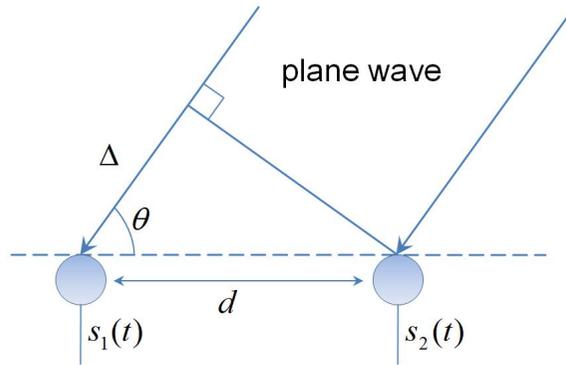


그림 2.1 센서에 수신되는 신호

두 센서에 수신되는 신호의 시간에 대한 cross-correlation function은 식 (2.1)과 같다.

$$q_{12}(\tau) = \overline{s_1(t)s_2(t-\tau)} \quad (2.1)$$

여기서 overbar는 앙상블 평균이다. $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 를 시간 τ 의 변화에 따라 앙상블 평균을 하게 되면 cross-correlation function이 계산되고, 식 (2.2)와 같이 τ 에 대하여 푸리에 변환(fourier transform)을 하면 주파수 영역의 cross-spectral density function이 된다.

$$Q_{12}'(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{12}(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau = s_1(\omega)^*s_2(\omega) \quad (2.2)$$

여기서 *는 켈레복소수를 나타낸다. 식(2.2)와 같이 cross-spectral density function은 신호의 주파수 영역에서 한 신호의 켈레복소수와 다른 신호의 곱과 동일하다. 만약 평면파가 수신되는 경우 한 센서에 대한

cross-spectral density function인 Q_{11}' 와 두 센서에 대한 cross-spectral density function인 Q_{12}' 는 식(2.3)과 같은 관계를 가진다.

$$Q_{12}'(\omega) = Q_{11}'(\omega)\exp(-i\omega\Delta) \quad (2.3)$$

두 센서 간의 cross-spectral density function Q_{12}' 은 한 센서에 대한 cross-spectral density function Q_{11}' 에서 Δ 만큼 시지연 된 것과 동일하다. 이를 이용하여 두 센서 간의 cross-spectral density function을 식(2.4)와 같이 정규화 할 수 있다.

$$Q_{12}(\omega) = Q_{12}'(\omega)/Q_{11}'(\omega) = Q_{12}'(\omega)/Q_{22}'(\omega) \quad (2.4)$$

앞서 설명된 시간에 대한 cross-correlation function을 3차원 공간으로 확장하면 센서 간의 space-time correlation function을 식(2.5)와 같이 정리할 수 있다.

$$q(\tau, v, \theta, \phi) = \overline{s(t, u, \theta, \phi)s(t - \tau, u - v, \theta, \phi)} \quad (2.5)$$

식(2.5)는 구형좌표계(spherical coordinate)에서 시간 및 공간의 변화에 따른 상관성을 나타낸 것이다. 식(2.1)과 달리 수평거리 θ 와 수직거리 ϕ 에 대하여 공간상 거리 u 가 고려되었고, 거리 변화 v 에 따른 상관성을 나타낸다. 식(2.6)과 같이 센서 간의 space-time correlation function을 푸리에 변환하면 cross-spectral density function이 계산된다.

$$Q'(\omega, v, \theta, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\tau, v, \theta, \phi) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (2.6)$$

만약 고정된 시간에서 한 센서에 대한 space-time correlation function 즉, 시간 변수 τ 및 공간 변수 v 를 0으로 가정한다면 $q(0,0,\theta,\phi)$ 와 같아진다. 여기서 $q(0,0,\theta,\phi)$ 을 푸리에 변환하여 cross-spectral density function을 계산하는 경우 θ 와 ϕ 가 무의미 해지므로 소거되어 $Q'(\omega)$ 로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 식(2.4)와 같이 cross-spectral density function을 정규화 한다면 식(2.7)과 같다.

$$Q(\omega, s, \theta, \phi) = Q'(\omega, s, \theta, \phi) / Q'(\omega) \quad (2.7)$$

[Cox(1973)]는 공간의 변화만 고려하기 위하여 space-time correlation function에서 시지연 τ 를 0으로 가정한다. 이러한 경우 단색 톤(tone) ω_0 에 대하여 정리하면 식(2.8)과 같아진다.

$$r(0, v, \theta, \phi) = \text{Re}[Q(\omega_0, v, \theta, \phi)] \quad (2.8)$$

이는 시간이 고정된 경우 공간의 변화에 따른 correlation function coefficient를 나타내고, 식(2.8)과 같이 정규화된 space-time correlation function의 실수부를 spatial coherence라고 한다.

2.2 spatial coherence에 의한 배열이득

배열이득(Array Gain, AG)은 다 수의 센서가 배열을 이루는 경우 발생하는 이득이다. 식(2.9)와 같이 배열센서의 SNR(signal to noise ratio)과 개별센서의 SNR의 비로 계산된다. 여기서 SNR은 신호와 소음의 파워

(power) 비이다[Urlick(1983)].

$$AG = 10 \log_{10} \frac{SNR_{array}}{SNR_{single}} = 10 \log_{10} \frac{\frac{S_{array}}{N_{array}}}{\frac{S_{single}}{N_{single}}} \quad (2.9)$$

본 논문에서는 spatial coherence를 이용한 배열이득을 계산하기 위하여, 소음의 방향성 세기 및 빔 조향 방위에 대한 spatial coherence를 계산하는 과정을 연구하였다. 우선 이를 위해 각 센서에 대한 spatial coherence를 계산해야 한다. 만약 배열의 수가 N 개인 경우 각 센서에 수신되는 신호의 주파수 성분을 식(2.10)과 같이 열벡터 \mathbf{s} 로 구성할 수 있다.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1(\omega, \theta, \phi) \\ s_2(\omega, \theta, \phi) \\ s_3(\omega, \theta, \phi) \\ \vdots \\ s_N(\omega, \theta, \phi) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

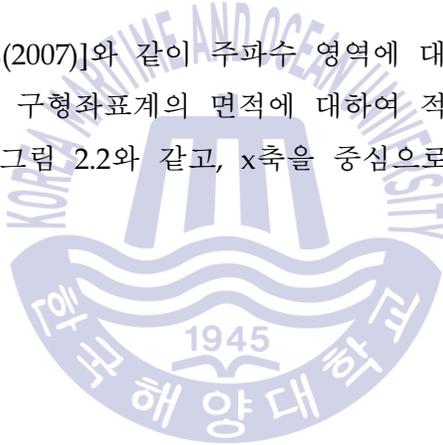
이를 이용하여 식(2.11)과 같이 계산하면 CSDM(cross-spectral density matrix)이 된다.

$$\tilde{\mathbf{Q}}' = \mathbf{s}\mathbf{s}^H = \begin{bmatrix} s_1 s_1^* & s_1 s_2^* & s_1 s_3^* & \cdots & s_1 s_N^* \\ s_2 s_1^* & s_2 s_2^* & s_2 s_3^* & \cdots & s_2 s_N^* \\ s_3 s_1^* & s_3 s_2^* & s_3 s_3^* & \cdots & s_3 s_N^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N s_1^* & s_N s_2^* & s_N s_3^* & \cdots & s_N s_N^* \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

여기서 H 는 Hermitian transpose이다. 행렬 \tilde{Q}' 의 각 성분은 센서 간의 cross-spectral density가 된다. 행렬 \tilde{Q}' 의 각 성분을 정규화하여 실수부를 계산하면 식(2.8)과 같이 spatial coherence가 계산된다. 이는 각 센서에 대한 spatial coherence가 되고, 식(2.12)와 같이 계산할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nm}'(\omega, \theta, \phi) \cos \phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega, \theta, \phi) \cos \phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.12)$$

식(2.12)는 [Habets(2007)]와 같이 주파수 영역에 대한 spatial coherence를 나타내기 위하여 구형좌표계의 면적에 대하여 적분하였다. 여기서 사용된 구형좌표계는 그림 2.2와 같고, x축을 중심으로 수평각 θ 와 수직각 ϕ 를 설정하였다.



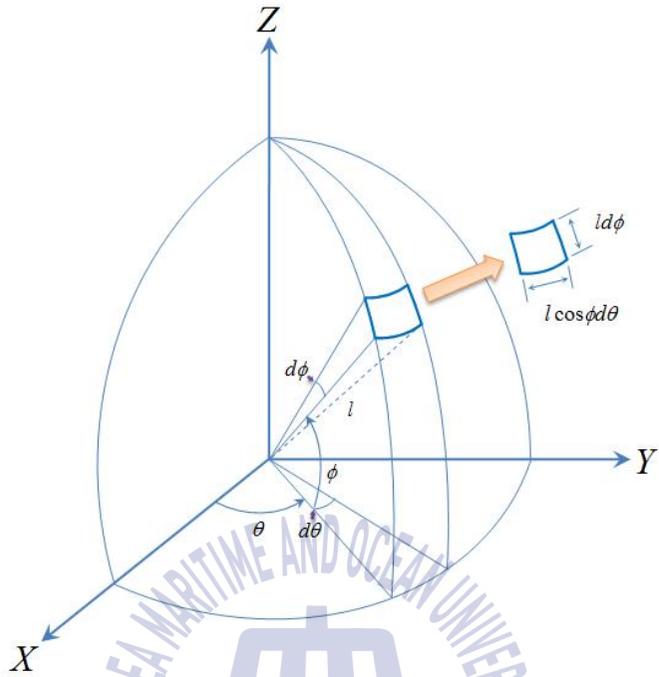


그림 2.2 구형좌표계

[Urick(1983)]에서 cross-correlation coefficient를 이용하여 배열이득을 계산하는 수식을 언급하였다. 이와 같은 방법을 이용하여 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산할 수 있다. 배열이득을 계산하기 위하여 식(2.13)과 같이 각 센서에 대한 spatial coherence를 모두 합한다.

$$r(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_{nm}(\omega) \quad (2.13)$$

식(2.13)을 이용하여 신호 및 소음에 대한 spatial coherence를 계산하고, 식(2.14)와 같이 계산하면 배열이득이 된다.

$$AG(\omega) = 10 \log_{10} \frac{r_{\text{signal}}(\omega)}{r_{\text{noise}}(\omega)} \quad (2.14)$$

여기서 $r_{\text{signal}}(\omega)$ 는 신호의 spatial coherence이고, $r_{\text{noise}}(\omega)$ 는 소음의 spatial coherence이다. 이와 같이 신호 및 소음의 spatial coherence로부터 배열센서에 대한 배열이득을 계산할 수 있다. 만약 spatial coherence에 빔 조향에 대한 수식을 추가하게 된다면, 빔 조향에 의한 배열이득을 계산할 수 있을 것이다. 이를 위해 수신되는 신호를 평면파로 가정하게 되면 식(2.12)는 식(2.3)에 의해 식(2.15)와 같이 표현할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q'_{mn}(\omega, \theta, \phi) \exp(-i\omega(p_n - p_m)/c) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q'_{mn}(\omega, \theta, \phi) \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.15)$$

여기서 p_n 과 p_m 은 센서 n 과 센서 m 의 위치이다. 만약 구형좌표계를 고려한다면, 배열의 각 센서에 대한 위치 p 를 식(2.16)과 같이 x , y , z 축에 대한 \mathbf{d}_x , \mathbf{d}_y , \mathbf{d}_z 의 열벡터로 설정할 수 있다.

$$\mathbf{d}_x = \begin{bmatrix} d_{x1} \\ d_{x2} \\ \vdots \\ d_{xN} \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}_y = \begin{bmatrix} d_{y1} \\ d_{y2} \\ \vdots \\ d_{yN} \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}_z = \begin{bmatrix} d_{z1} \\ d_{z2} \\ \vdots \\ d_{zN} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

\mathbf{d}_x , \mathbf{d}_y , \mathbf{d}_z 는 좌표계에서 N 개의 배열센서에 대한 x , y , z 축의 위치이다.

이에 대하여 구형좌표계에서 수평각 θ 와 수직각 ϕ 에 대한 위상(phase)을 식(2.17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{w}(\omega, \theta, \phi) = \exp(-i\omega(\mathbf{d}_x \cos\theta \cos\phi + \mathbf{d}_y \sin\theta \cos\phi + \mathbf{d}_z \sin\phi)/c) \quad (2.17)$$

여기서 c 는 음속이다. 만약 식(2.18)과 같이 계산한다면 행렬의 각 성분은 센서 간의 방위별 위상이 된다.

$$\mathbf{w}\mathbf{w}^H = \begin{bmatrix} w_1 w_1^* & w_1 w_2^* & \cdots & w_1 w_N^* \\ w_2 w_1^* & w_2 w_2^* & \cdots & w_2 w_N^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_N w_1^* & w_N w_2^* & \cdots & w_N w_N^* \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

즉 $\exp(-i\omega(p_n - p_m)/c)$ 는 구형좌표계에서 식(2.18)의 $w_n w_m^*$ 와 동일하게 된다. 만약 수평각 θ_s 와 수직각 ϕ_s 로 빔 조향하는 경우, 이를 고려하게 된다면 배열센서의 수평각 θ 와 수직각 ϕ 에 대한 위상은 식(2.19)와 같이 수정할 수 있다.

$$\mathbf{w}_s(\omega, \theta, \phi) = \exp(-i\omega(\mathbf{d}_x \cos\theta \cos\phi + \mathbf{d}_y \sin\theta \cos\phi + \mathbf{d}_z \sin\phi - \mathbf{d}_x \cos\theta_s \cos\phi_s - \mathbf{d}_y \sin\theta_s \cos\phi_s - \mathbf{d}_z \sin\phi_s)/c) \quad (2.19)$$

식(2.19)와 같이 위상 $\exp(-i\omega(p_n - p_m)/c)$ 에서 빔 조향에 대한 수식을 고려할 수 있고, 앞으로 빔 조향을 하는 경우 $B_{nm}(\omega, \theta, \phi)$ 으로 표현할 것이다.

추가적으로 $Q_{mn}'(\omega, \theta, \phi)$ 은 각 센서에서 방위에 따른 신호의 세기가 된

다. 신호의 경우 배열센서에 수신되는 방위는 단일 방향이 되지만, 소음의 경우 방위에 따른 세기가 달라질 수 있다. 그러므로 소음에 대한 *spatial coherence*를 계산하는 경우 $Q_{nm}'(\omega, \theta, \phi)$ 대신 소음의 방향성 세기를 적용할 수 있다. 이로써 배열센서에 대하여 소음의 방향성을 고려하여 빔 조향에 의한 배열이득을 계산할 수 있게 된다.

2.3 수신 신호의 *spatial coherence*

배열 센서에 수신되는 신호를 그림 2.2와 같은 구형좌표계에서 특정 수평각 θ_0 과 수직각 ϕ_0 로 수신된다고 가정하면, 이에 대한 센서 간의 *cross-spectral density*는 $Q_{nm}'(\omega, \theta_0, \phi_0)$ 이 된다. 이를 정규화한 $Q_{nm}(\omega, \theta_0, \phi_0)$ 는 수평각 θ_0 과 수직각 ϕ_0 에서 1이 되고, 그 외에서는 0이 된다. 수신 신호에 대한 *spatial coherence*는 식(2.20)과 같이 정리할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega, \theta_0, \phi_0) \exp(-i\omega(p_n - p_m)/c) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega, \theta_0, \phi_0) \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.20)$$

식(2.20)에서 $Q_{nn}'(\omega, \theta_0, \phi_0) \exp(-i\omega(p_n - p_m)/c)$ 와 $Q_{nn}'(\omega, \theta_0, \phi_0)$ 는 $d\theta$ 와 $d\phi$ 에 대하여 독립적이므로, 식(2.21)과 같이 정리할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} [\exp(-i\omega(p_n - p_m)/c)] = \cos(\omega(p_n - p_m)/c) \quad (2.21)$$

식(2.21)에서 센서의 배열 위치 p 를 구형좌표계에서 x, y, z 축에 대한 $\mathbf{d}_x, \mathbf{d}_y, \mathbf{d}_z$ 의 열벡터로 변환하고, 수평각 θ_s 와 수직각 ϕ_s 에 대하여 빔 조향하는 경우 식(2.22)와 같이 정리할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \cos(\omega(\mathbf{d}_x \cos\theta_0 \cos\phi_0 + \mathbf{d}_y \sin\theta_0 \cos\phi_0 + \mathbf{d}_z \sin\phi_0 - \mathbf{d}_x \cos\theta_s \cos\phi_s - \mathbf{d}_y \sin\theta_s \cos\phi_s - \mathbf{d}_z \sin\phi_s)/c) \quad (2.22)$$

여기서 만약 신호가 수신되는 방위로 빔 조향하는 경우, 즉 $\theta_0 = \theta_s, \phi_0 = \phi_s$ 가 되면 식(2.22)에 의해 수신 신호에 대한 센서 간의 spatial coherence $r_{nm}(\omega)$ 는 항상 1이 된다. 이로 인해 $r_{nm}(\omega)$ 을 식(2.14)와 같이 센서 간에 모두 합한다면 $r_{\text{signal}} = N^2$ 이 된다.

2.4 소음의 형태에 대한 spatial coherence

소음의 형태는 등방성 소음(isotropic noise)과 방향성 소음(directional noise)으로 구분할 수 있다. 등방성 소음은 단위 입체각(solid angle) 당 소음의 세기가 동일한 것이고, 방향성 소음은 단위 입체각 당 소음의 세기가 달라지는 것이다. 이러한 소음의 형태에 대한 spatial coherence를 도출할 수 있다.

2.4.1 등방성 소음

등방성 소음인 경우 센서 간의 spatial coherence는 식(2.23)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega) \exp(-i\omega(p_n - p_m)/c) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega) \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.23)$$

여기서 cross-spectral density $Q_{nn}'(\omega, \theta, \phi)$ 는 단위 입체각 당 소음의 세기가 동일하므로 $Q_{nn}'(\omega)$ 와 같이 표현할 수 있다. 식(2.23)에서 $Q_{nn}'(\omega)$ 는 $d\theta$ 와 $d\phi$ 에 대하여 독립적이므로 그에 대해 수식을 정리하고, 빔 조향을 고려하여 $\exp(-i\omega(p_n - p_m)/c)$ 를 $B_{nm}(\omega, \theta, \phi)$ 로 수정하면 식(2.24)와 같아진다.

$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{nm}(\omega, \theta, \phi) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.24)$$

2.4.2 방향성 소음

방향성 소음은 단위 입체각 당 신호의 세기가 모두 달라지므로 spatial coherence는 식(2.25)과 같이 $d\theta$ 와 $d\phi$ 에 대하여 독립적인 변수가 존재하지 않는다.

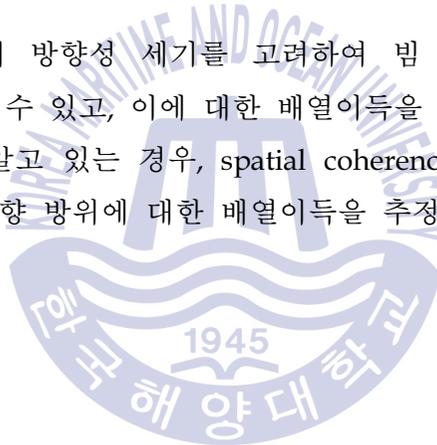
$$r_{nm}(\omega) = \text{Re} \left[\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega, \theta, \phi) \exp(-i\omega(p_n - p_m)/c) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{nn}'(\omega, \theta, \phi) \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \right] \quad (2.25)$$

여기서 $Q_{nn}'(\omega, \theta, \phi)$ 는 방향에 따른 세기이고, 만약 평면파로 가정한다면

$Q_{mm}'(\omega, \theta, \phi)$ 과 동일하다. 그리고 방향성 소음에 대한 spatial coherence를 계산하는 경우 $Q_{mm}'(\omega, \theta, \phi)$ 을 소음의 방향성 세기 $N(\omega, \theta, \phi)$ 이 될 수 있다. 추가적으로 빔 조향에 대한 수식을 고려한다면, 식(2.26)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{nm}(\omega) = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N(\omega, \theta, \phi) B_{nm}(\omega, \theta, \phi) \cos\phi \, d\phi \, d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N(\omega, \theta, \phi) \cos\phi \, d\phi \, d\theta} \quad (2.26)$$

이와 같이 소음의 방향성 세기를 고려하여 빔 조향에 의한 spatial coherence를 계산할 수 있고, 이에 대한 배열이득을 도출할 수 있다. 이것은 소음의 형태를 알고 있는 경우, spatial coherence를 사용하여 배열센서의 형상 및 빔 조향 방위에 대한 배열이득을 추정할 수 있음을 의미한다.



제 3 장 배열이득 추정 시뮬레이션

배열센서에 신호 및 소음이 수신되는 방향성의 형태에 따라 spatial coherence가 달라지고, 배열이득 역시 변동하게 된다. 만약 신호 및 소음의 방향성 형태와 배열센서의 형상에 대한 정보를 알고 있다면 배열이득을 추정할 수 있다. 이를 위해 특정 신호 및 소음을 생성하여 방향성에 따른 spatial coherence를 계산하였고, 배열센서의 형상에 대한 배열이득을 추정하는 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 평면파 및 등방성 소음의 환경에서 배열이득과 지향지수가 동일하므로, 방향성 소음에서 spatial coherence에 의한 배열이득과 SNR에 의한 배열이득을 지향지수와 함께 비교 및 검증을 수행하였다. 사용된 배열센서는 균등간격 배열센서와 비균등간격 배열센서이고, 이에 대하여 빔 조향 방위를 달리하며 주파수의 변화에 따른 배열이득을 계산하였다. 더 나아가 [Burdic(1984)]에 의한 방향성 소음을 생성하였고, 균등간격 배열센서에서는 주파수 변화에 따른 배열이득을 지향지수 대신 해석적인 수식과 비교하였다. 방향성 소음 환경에서는 비 균등간격 센서의 경우 현재 해석적인 수식이 존재하지 않으므로, spatial coherence와 SNR에 의한 배열이득 두 가지만 비교하였다. 방향성 소음 환경에서도 빔 조향 방위를 달리하며 배열이득을 계산하였다. 시뮬레이션을 통해 소음 환경에서 배열센서에 대한 배열이득을 spatial coherence를 이용하여 도출할 수 있음을 확인하였다. 이는 신호 및 소음의 파워를 계산하여 SNR에 의한 배열이득을 도출하는 방법과 달리, 소음의 방향성 세기 및 배열센서의 형상에 대한 정보만으로 spatial coherence를 계산하여 배열이득을 추정할 수 있음을 의미한다. 이를 위해 우선적으로 등방성 소음을 생성하며 시뮬레이션에 대한 설명을 수행하였다.

3.1 등방성 소음 [Kim(2005)]

단위 입체각 당 센서에 수신되는 소음의 세기가 동일하고, 수신되는 소음이 전 방위에 대하여 상관관계가 없는 경우(incoherent) 이를 등방성 소음이라고 한다. 소음과 달리 음원 신호는 상관관계가 있는 경우(coherent)이다. 상관관계의 유무에 따라 배열센서에서 수신되는 신호의 세기가 달라진다.

만약 센서가 신호의 중심주파수에 대하여 $\lambda/2$ 의 간격으로 배치되어 있다면, 센서 간에 수신되는 신호는 완벽한 상관관계를 가지므로 식(3.1)과 같이 음압준위(Pressure Level, PL)가 음압에 대하여 센서 수 N 의 제곱에 비례하게 증가한다.

$$PL_s = 10\log_{10} \frac{(Np_{rms})^2}{p_{ref}^2} = 10\log_{10} \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} + 10\log_{10} N^2 \quad (3.1)$$

여기서 p_{rms} 는 압력의 제곱 평균 제곱근(root mean square)이고, p_{ref} 는 압력의 reference로, 일반적으로 물에서는 $1 \mu Pa$ 이다. 신호와 달리 소음의 경우 센서 간의 상관관계가 없으므로 식(3.2)와 같이 음압준위가 음압에 대하여 센서 수 N 에 비례하게 증가한다.

$$PL_n = 10\log_{10} \frac{Np_{rms}^2}{p_{ref}^2} = 10\log_{10} \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} + 10\log_{10} N \quad (3.2)$$

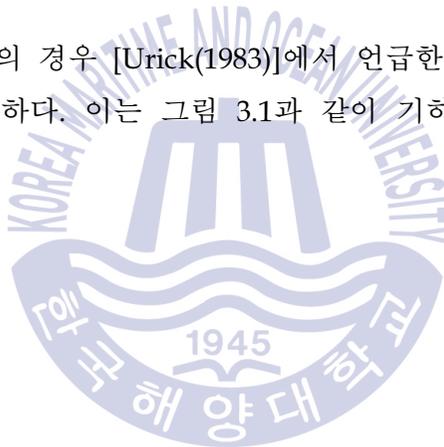
이러한 경우 배열센서의 SNR은 식(3.3)과 같아진다.

$$SNR_{\text{array}} = PL_s - PL_n = 10\log_{10}N \quad (3.3)$$

이와 같이 배열센서의 SNR은 $10\log_{10}N$ 이 되고, 개별센서의 SNR은 식 (3.3)에서 N 이 1이 되므로 0이 된다. 그러므로 배열센서가 중심주파수에 대하여 $\lambda/2$ 로 배치되어 있다면 등방성 소음의 환경에서 배열이득은 식 (3.4)와 같다.

$$AG = 10\log_{10}N \quad (3.4)$$

또한 등방성 소음의 경우 [Urick(1983)]에서 언급한 바와 같이 배열이득과 지향지수가 동일하다. 이는 그림 3.1과 같이 기하학적으로 설명할 수 있다.



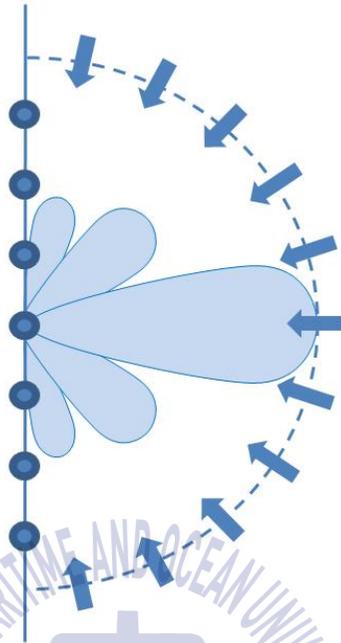


그림 3.1 배열센서의 빔 패턴 (등방성 소음 환경)

그림 3.1과 같이 배열센서는 빔 패턴이 발생한다. 이러한 경우 등방성 소음 환경과 같이 전 방위에서 수신되는 소음의 세기가 동일하더라도 각 방위에 대한 빔 패턴의 크기만큼 신호가 감소되어 수신되어 진다. 이는 수신되는 소음의 세기가 빔 패턴에 비례한 것을 의미한다. 이와 같이 등방성 소음을 생성하게 되면, 그에 대한 배열이득과 지향지수를 비교하여 결과를 검증할 수 있음을 알 수 있다.

3.1.1 등방성 소음 생성 모델링

등방성 소음을 생성하기 위하여 그림 3.2와 같이 자유공간에 소음원 (noise source)의 분포를 배치하였다. 여기서 소음원은 그림 2.2의 구형좌표계에서 수평각(θ)은 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 에서 단위수평각 $d\theta 5^\circ$, 수직각(ϕ)은 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 에서 단위수직각 $d\phi 5^\circ$ 에 대하여 배치되었다.

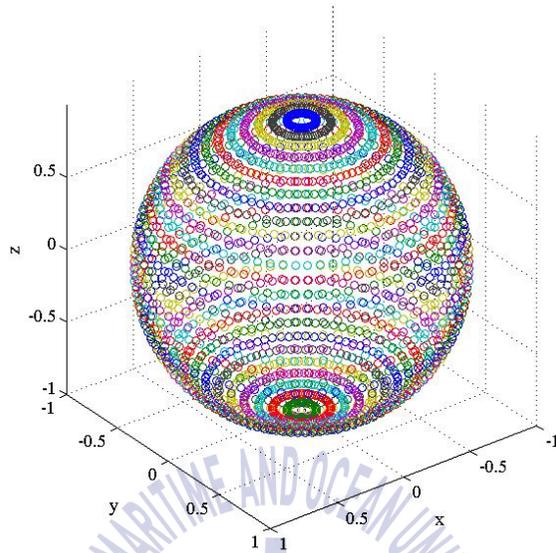


그림 3.2 소음원 분포

그림 3.2의 각 소음원에서 방사되는 소음이 배열센서에 평면파로 수신되는 것을 가정하였다. 그러므로 모델링에서 소음원의 수평각 및 수직각을 고려하였기 때문에 그림 3.2에 대한 스케일(원점으로부터의 거리)은 무시해도 무관하다.

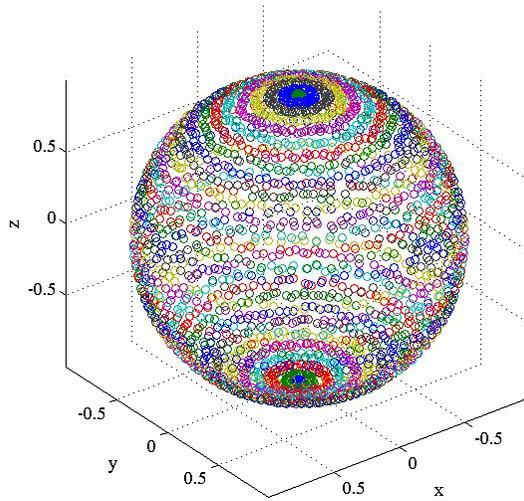


그림 3.3 임의의 소음원 분포

만약 소음원의 간격이 동일하게 되면 소음이 배열센서에 수신되는 경우 동일한 위상이 발생할 수 있으므로 그림 3.3과 같이 소음원의 위치를 임의적으로 변화시켰다. 임의적인 각의 범위는 수평각의 경우 $-d\theta/4 \sim d\theta/4$, 수직각의 경우 $-d\phi/4 \sim d\phi/4$ 이다. 그림 3.3은 소음원의 분포를 파악하기 쉽지 않으므로 그림 3.4와 같이 수평각(θ) 및 수직각(ϕ)에 대하여 표현하였다. 이와 같이 각 소음원에서 그림 3.4의 방위에 대한 위상을 가진 소음이 평면파로 배열센서에 수신된다. 그림 3.4에서 소음원의 임의적인 위치 변화를 비교적 쉽게 확인하기 위하여 단위수평각 $d\theta 5^\circ$, 단위수직각 $d\phi 5^\circ$ 마다 선으로 표시하였다.

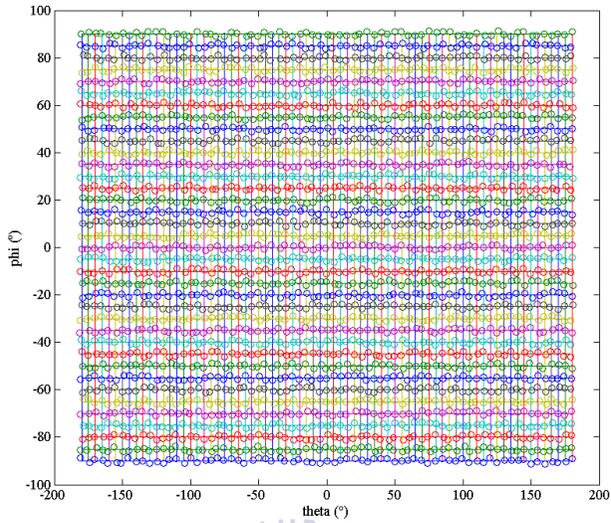


그림 3.4 임의의 소음원 분포의 방위

각 소음원에서 방사된 소음이 그림 3.5와 같이 배열센서의 각 지점에 수신된다. 여기서 배열센서는 중심주파수 400 Hz에 대하여 $\lambda/2$ 인 1.875 m의 간격으로 9개를 배치하였다.

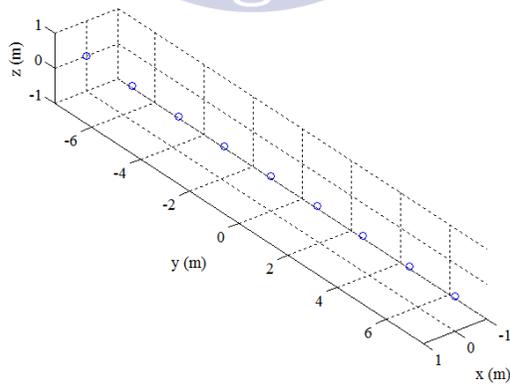


그림 3.5 배열센서 위치 (균등간격)

자유공간에서 소음이 센서에 수신되는 경우 각 센서에 대한 위상 (phase)을 식(3.5)와 같이 표현할 수 있다[Baladis(2005)].

$$n_S(\omega, \theta, \phi) = n_T(\omega, \theta, \phi) \exp(i\omega (s_x \cos(\theta) \cos(\phi) + s_y \sin(\theta) \cos(\phi) + s_z \sin(\theta) \sin(\phi)) / c) \quad (3.5)$$

여기서 $n_S(\omega, \theta, \phi)$ 는 수신되는 주파수영역 신호, $n_T(\omega, \theta, \phi)$ 는 방사되는 주파수영역 신호, ω 는 $2\pi f$, s_x 는 센서의 x 축 좌표, s_y 는 센서의 y 축 좌표, s_z 는 센서의 z 축 좌표, c 는 음속이다. 식(3.5)에서 수신되는 신호의 세기 $n_S(\omega, \theta, \phi)$ 를 면적에 대하여 적분하게 되면 파워가 계산된다. 이를 위해 소음의 세기를 설정해야 한다. 등방성 소음은 전 방위에 대한 세기가 동일하므로 이를 정규화하면 식(3.6)이 된다.

$$N(\omega, \theta, \phi) = 1 \quad (3.6)$$

식(3.6)의 등방성 소음을 3차원으로 표현하면 그림 3.6과 같다. 여기서 그림 3.6(a)와 같이 3차원 좌표계로 나타내는 경우 방위에 따른 세기가 모두 동일하므로 형태를 파악하기 쉽지 않다. 그러므로 3.6(b)의 x-y 좌표계, 3.6(c)의 x-z 좌표계, 3.6(d)의 y-z 좌표계에 대하여 표현하였다.

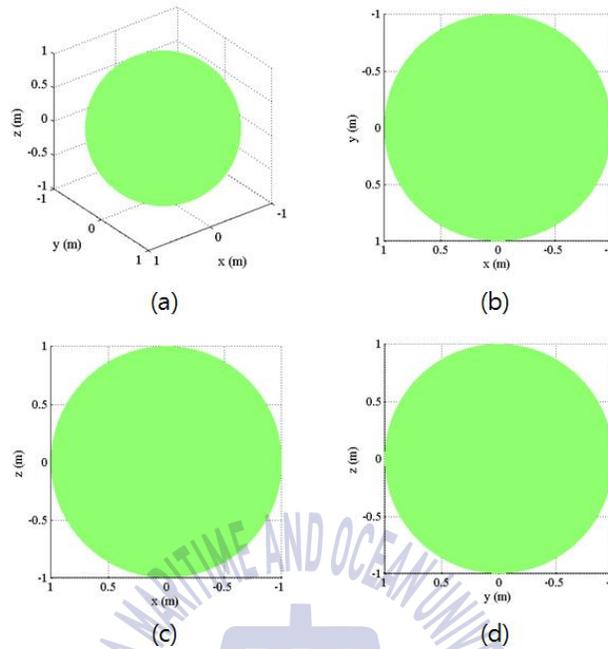


그림 3.6 등방성 소음 (a) 3차원 좌표, (b) x-y 좌표, (c) x-z 좌표, (d) y-z 좌표

설정된 소음원 분포 및 배열센서의 위치, 소음의 세기를 이용하여 배열 센서에 수신되는 소음을 생성하였다. 각 소음원에서는 백색잡음(Gaussian white noise)을 생성하였고, 소음원에서 생성된 소음마다 그에 따른 표준편차(standard deviation)를 나누어 소음의 세기를 평균화하였다. 여기서 분산(variance)은 세기의 평균과 동일하므로, 소음에 분산의 제곱근인 표준편차를 나누어주면 각 소음원에서 생성되는 소음의 세기가 모두 동일해진다. 이에 대하여 소음원의 수평각 및 수직각에 대하여 각 센서에 발생하는 위상을 적용하였다. 그리고 구형좌표계에서 입사되는 방위에 대한 면적의 제곱근을 소음에 곱해주면서 파워를 보정해 주었다. 이와 같이 그림 3.7과 같이 각 배열센서에 수신되는 소음을 생성하였다.

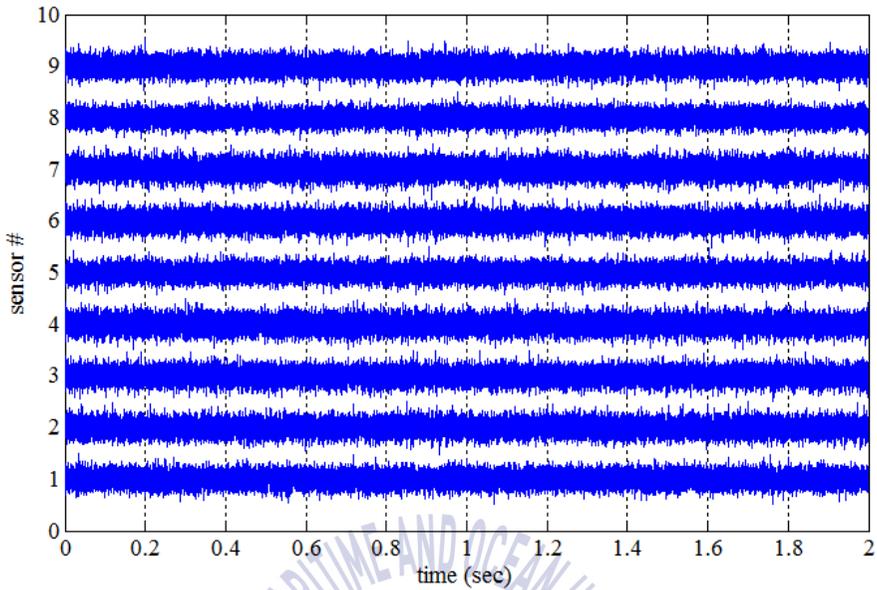


그림 3.7 배열센서에 수신된 소음

소음을 생성하는 것과 유사한 방법으로 수신되는 신호를 생성할 수 있다. 여기서 신호가 생성되는 음원은 수평각 0° , 수직각 0° 의 방위에만 위치한다고 설정하였고, 평면파를 가정하여 중심주파수 400 Hz의 정현파를 생성하여 배열의 각 센서에 위상을 적용하였다. 이에 대하여 그림 3.8과 같이 신호를 생성하였다.

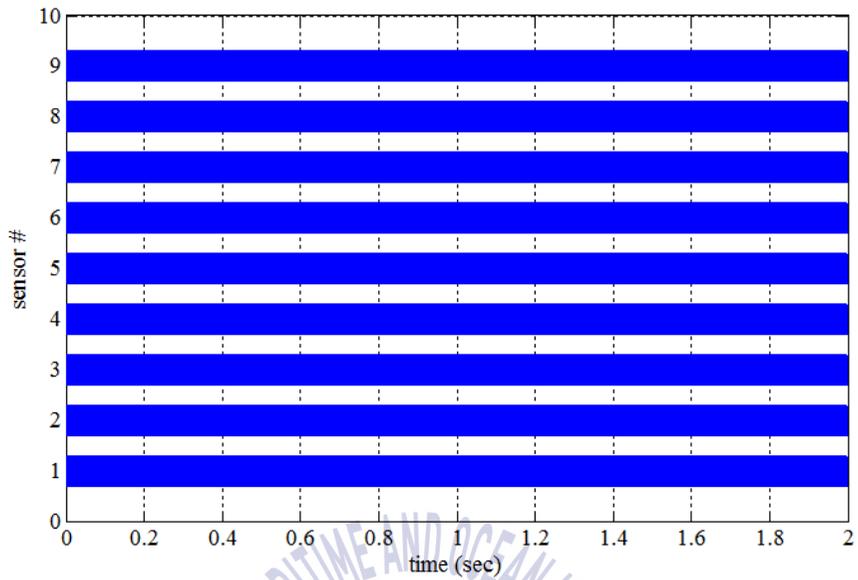


그림 3.8 배열센서에 수신된 신호

그림 3.7의 소음과 그림 3.8의 신호를 합하여 그림 3.9와 같이 각 센서에 수신되는 신호 및 소음을 도출할 수 있다.

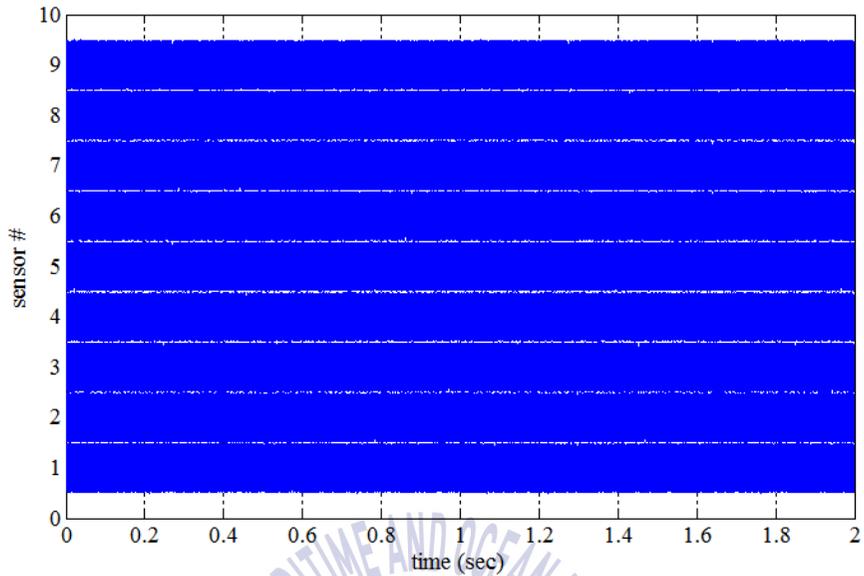


그림 3.9 배열센서에 수신된 신호 & 소음

배열이득을 도출하려면 개별센서 및 배열센서의 SNR을 계산해야 한다. 이를 위해 Welch's method에 의한 power spectral density를 계산하였다.

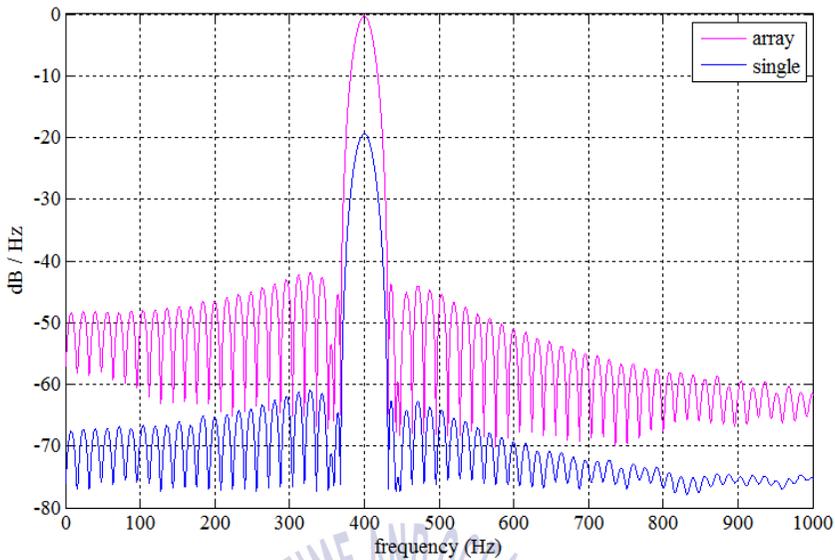


그림 3.10 신호 & 소음의 power spectral density

그림 3.9의 배열센서에 수신된 신호와 소음으로부터 그림 3.10과 같이 배열센서(분홍색선)와 개별센서(푸른색선)의 power spectral density를 계산하였다. 여기서 window size 1024에 대하여 50 % overlap을 수행하였다. 배열센서에 수신된 power spectral density는 음원이 존재하는 수평각 0°, 수직각 0°의 방위로 빔 조향하였고, 그에 대해 conventional beam-forming을 수행하여 계산된 power output이다. 그리고 개별센서의 경우 평면파를 가정하였기 때문에 중심 센서인 5번째 센서의 power spectral density를 계산하였다.

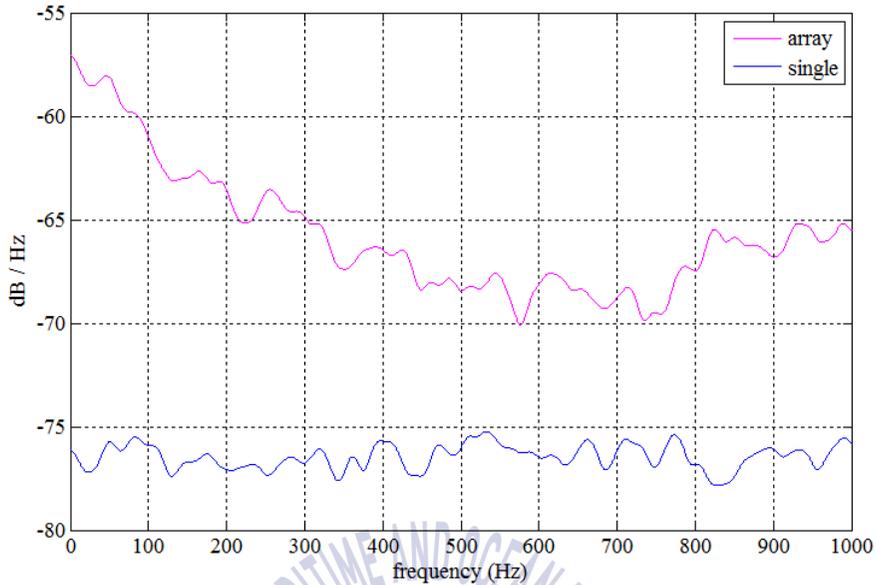


그림 3.11 소음의 power spectral density

그림 3.7의 배열센서에 수신된 소음을 이용하여 그림 3.11의 배열센서(분홍색선)와 개별센서(푸른색선)의 power spectral density를 계산하였다. 이 또한 window size 1024에 대하여 50 % overlap을 수행하였다. 그림 3.10과 그림 3.11에서 중심주파수 400 Hz에 대한 배열이득을 계산하면 9.84 dB가 된다. 여기서 배열센서의 수가 9개 이므로 $10\log_{10}9$ 는 9.54 dB 이므로 생성된 소음이 등방성에 유사함을 확인할 수 있다.

3.1.2 등방성 소음에서 spatial coherence에 의한 배열이득

spatial coherence를 이용하면 신호의 SNR을 계산하지 않더라도 소음의 방향성 세기 및 배열이득의 형상으로부터 배열이득을 계산할 수 있다. 이를 위해 우선적으로 식(2.22)를 사용하여 신호의 spatial coherence를 계산하였다. 여기서 음원이 존재하는 수평각 0° , 수직각 0° 의 방위로 빔 조향을 하였고, 이는 그림 3.5의 균등간격 배열센서의 경우 broadside와 동

일하다. spatial coherence를 중심주파수인 400 Hz에 대하여 거리변화에 따라 계산하였고, 그림 3.12와 같이 도식화하였다.

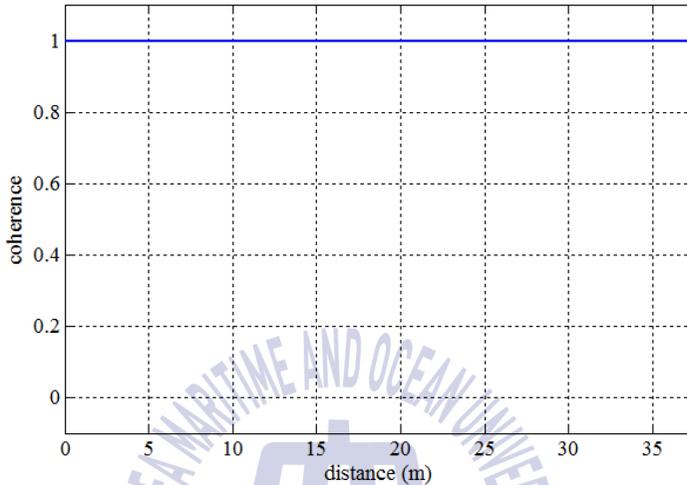


그림 3.12 거리에 대한 spatial coherence (신호)

그림 3.12와 같이 신호의 spatial coherence를 도식화하면, 거리가 달라 지더라도 모두 1이 됨을 확인할 수 있다. 이는 신호가 평면파로 수신되는 경우 음원의 방위로 빔 조향을 한다면 신호는 완벽한 상관관계가 된다는 것을 의미한다. 이에 대하여 그림 3.5와 같은 배열센서의 spatial coherence를 식(2.13)을 이용하여 계산할 수 있다. 배열센서는 1.875 m의 간격으로 9개의 센서가 균등간격으로 배치되어 있으므로, 각 위치에 대한 spatial coherence를 모두 합한다면 81이 된다.

신호의 spatial coherence와 같이 소음에 대한 spatial coherence도 계산이 가능하다. 소음의 경우 신호와 달리 방향성 형태가 존재하며, 이를 고려해야 한다. 등방성 소음에 대한 spatial coherence는 식(2.24)를 이용하여 계산할 수 있다. 식(2.24)에서 빔 조향에 의한 위상인 $B_{nm}(\omega, \theta, \phi)$ 을 음원

이 존재하는 방위 수평각 0° , 수직각 0° 으로 적용하여 계산한다면 그림 3.13과 같이 나타낼 수 있다.

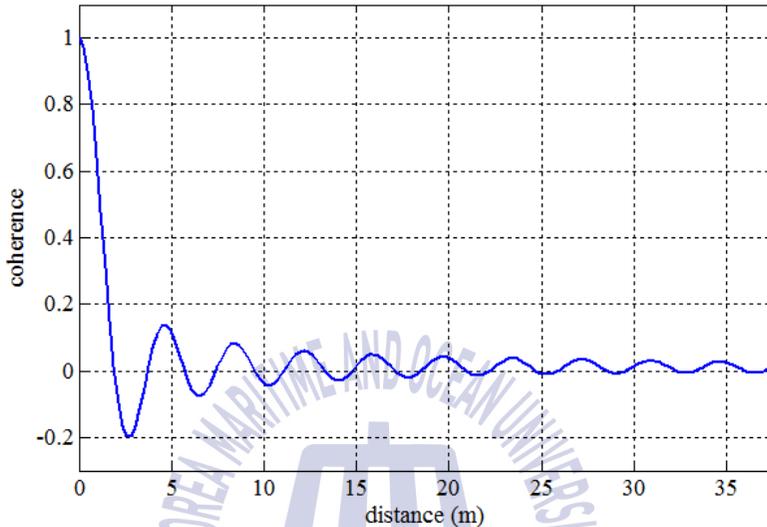


그림 3.13 거리에 대한 spatial coherence (등방성 소음)

신호와 달리 등방성 소음은 전 방위에서 동일한 세기의 백색잡음이 수신되어지고, 이에 따라 상관성에 변화가 발생한다. 그러므로 그림 3.13과 같이 등방성 소음의 spatial coherence는 거리에 따른 변동성이 발생하고, 거리가 멀어질수록 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 만약 그림 3.13을 그림 3.14와 같이 거리(distance)를 센서의 간격 $\lambda/2(1.875\text{ m})$ 로 나눈 스케일에 대해 나타낸다면, $\lambda/2$ 의 배수마다 0이 됨을 확인할 수 있다. 이것은 배열센서가 중심주파수에 대하여 $\lambda/2$ 의 간격으로 배치된다면 등방성 소음에서 동일한 센서의 경우 spatial coherence가 1이 되어 완벽한 상관성을 이루지만, 그 외의 센서 간에는 0이 되어 상관성이 없어지게 된다.

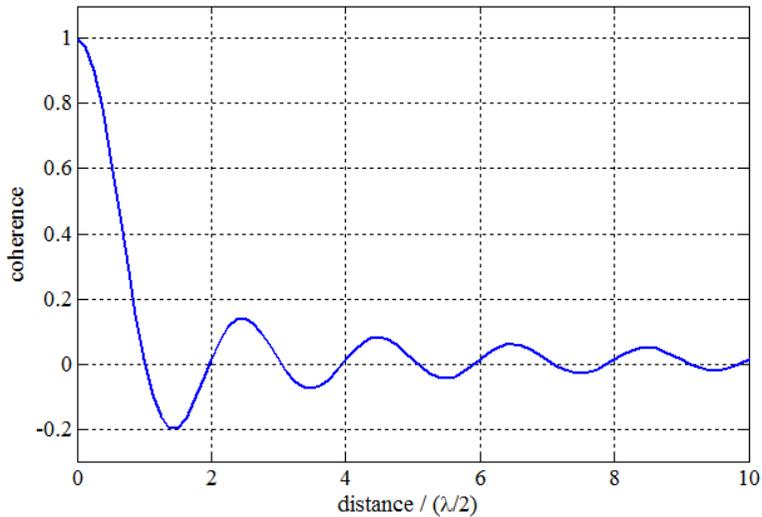


그림 3.14 등방성 소음의 거리에 대한 spatial coherence
(거리와 센서 간격 비)

그림 3.14에서 거리에 따른 spatial coherence가 센서의 간격 $\lambda/2$ (1.875 m)마다 0이 되어야 한다. 하지만 계산 결과에서는 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션을 수행하는 과정 중에 식(2.24)의 방위에 대한 적분을 수치적분으로 계산하게 되고, 계산 시간을 줄이기 위해 수치적분을 수행하는 단위 수평각 및 수직각을 5° 로 설정하여 발생하는 수치적 오차 때문이다.

신호와 마찬가지로 소음 역시 식(2.13)을 이용하여 배열센서에 대한 spatial coherence를 모두 합할 수 있다. spatial coherence가 동일한 센서에서는 1이 되지만, 다른 센서 간에는 약 0이 된다. 그러므로 그림 3.5의 배열센서에 대해 식(2.13)으로 spatial coherence를 모두 합하면 약 9가 계산된다. 이에 대해 시뮬레이션을 통해 계산된 등방성 소음의 배열이득은 9.57 dB이 되고, 해석적인 등방성 소음의 배열이득인 $10\log_{10}9$ 의 9.54 dB와 0.03 dB의 차이로 유사함을 확인할 수 있다.

spatial coherence를 거리의 변화 외에 주파수의 변화에 따라 계산할 수 있다. 그림 3.5의 배열센서가 broadside 방위로 빔 조향하는 경우 등방성 소음에 대해 spatial coherence를 거리 및 주파수의 변화에 따라 계산하면 그림 3.15와 같이 도식화할 수 있다.

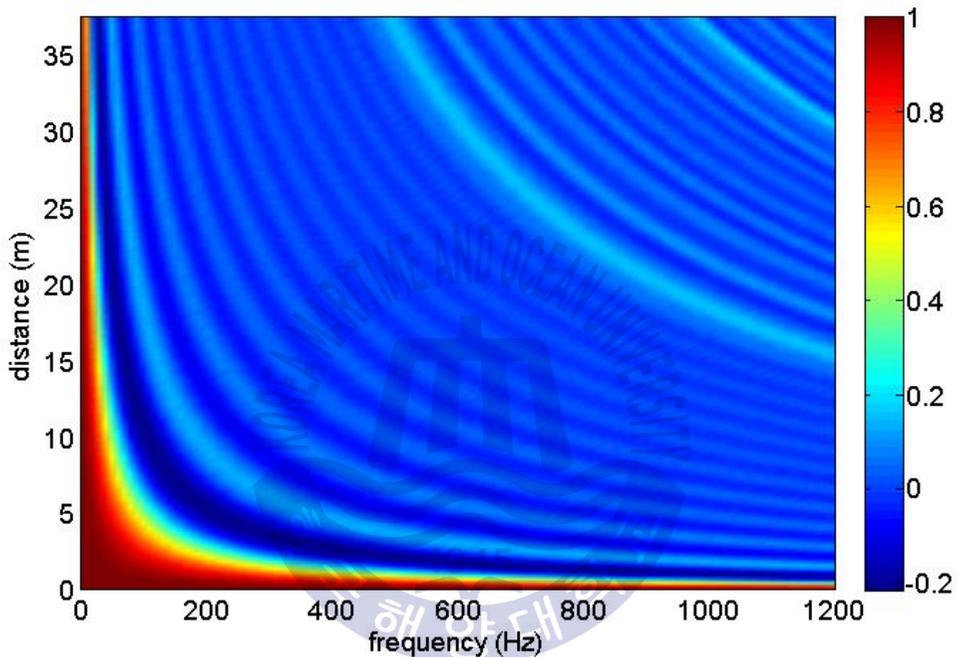


그림 3.15 등방성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence (broadside 빔 조향)

그림 3.15에서 spatial coherence가 거리 또는 주파수가 0이 되는 곳에서는 1이 되고, 거리와 주파수가 달라짐에 따라 변동하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 400 Hz에서 거리의 변화에 대한 spatial coherence의 단면을 나타내면 그림 3.13과 동일해진다. 이를 이용하면 그림 3.5의 배열센서에 대한 배열이득을 주파수의 변화에 따라 계산할 수 있다. 추가적으로 그림

3.15와 같이 거리 및 주파수에 대해 계산된 spatial coherence를 이용하면, 동일한 방위로 빔 조향하는 경우 그림 3.5의 배열센서 외에 다양한 형태의 배열센서에 대한 배열이득을 계산할 수 있다. 그러므로 소음 환경에서 거리 및 주파수의 변화에 따른 spatial coherence를 계산함에 따라 최적의 배열이득이 도출되는 배열센서를 설계할 수 있게 된다. 이를 검증하기 위해 그림 3.5의 균등간격 배열센서에 대한 배열이득을 계산하고, 이후 비 균등간격 배열센서에 대한 배열이득을 계산함으로써 다양한 배열센서의 형상에 대한 배열이득을 계산할 것이다.

그림 3.5의 배열센서가 broadside 방향으로 빔 조향하는 경우 주파수 변화에 대한 배열이득을 계산하면 그림 3.16과 같다.

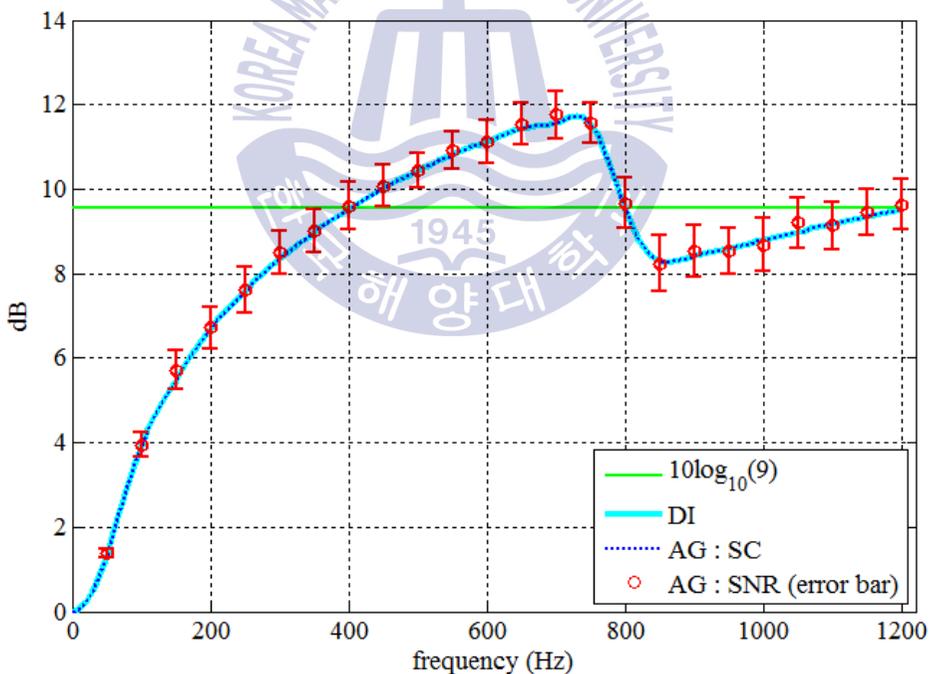


그림 3.16 등방성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (broadside 빔 조향, 중심 주파수 400 Hz, 센서 수 9개)

그림 3.16과 같이 주파수가 달라짐에 따라 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선)을 검증 및 분석하기 위하여 $10\log_{10}9$ (연두색 실선)과 지향지수(하늘색 실선), SNR에 대한 배열이득(붉은색 원, error bar의 평균)을 함께 도식화 하였다. 소음의 형태가 등방성이므로 지향지수와 spatial coherence에 대한 배열이득이 동일함을 확인할 수 있다. SNR에 대한 배열이득은 임의의 소음을 생성하기 때문에 계산할 때마다 결과가 조금씩 변동한다. 그러므로 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30 회를 계산하고, error bar로 나타내었다. error bar에서 붉은색 원은 평균을 나타내고, 붉은색 실선은 표준편차의 범위를 나타낸다. 지향지수와 spatial coherence에 대하여 SNR에 의한 배열이득이 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

등방성 소음에서 균등간격 배열센서의 broadside로 빔 조향하는 경우 주파수 변화에 따른 배열이득은 중심주파수인 400 Hz까지 점차 증가하고, 주파수 400 Hz에서는 $10\log_{10}9$ 와 동일한 것을 확인할 수 있다. 그리고 주파수 400 ~ 800 Hz에서는 $10\log_{10}9$ 보다 배열이득이 높아지고, 주파수 800 ~ 1200 Hz에서는 $10\log_{10}9$ 보다 배열이득이 낮아져 주파수가 증가함에 따라 $10\log_{10}9$ 를 중심으로 배열이득이 변동하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 신호가 수신되는 방향으로 빔 조향하는 경우 신호의 파워는 동일하지만, 배열센서의 빔 패턴이 중심주파수 외에서는 공간적인 에일리어싱(aliasing)이 발생하여 수신되는 소음의 파워가 달라져 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 주파수 800 Hz의 파장은 400 Hz 파장의 절반이기 때문에 각 센서마다 소음의 상관성이 0으로 동일해져 배열이득이 같아지는 것으로 생각된다.

그림 3.5의 배열센서가 end fire 방향으로 빔 조향하는 경우 등방성 소음에 대해 spatial coherence를 거리 및 주파수의 변화에 따라 계산하면 그림 3.17과 같이 도식화할 수 있다.

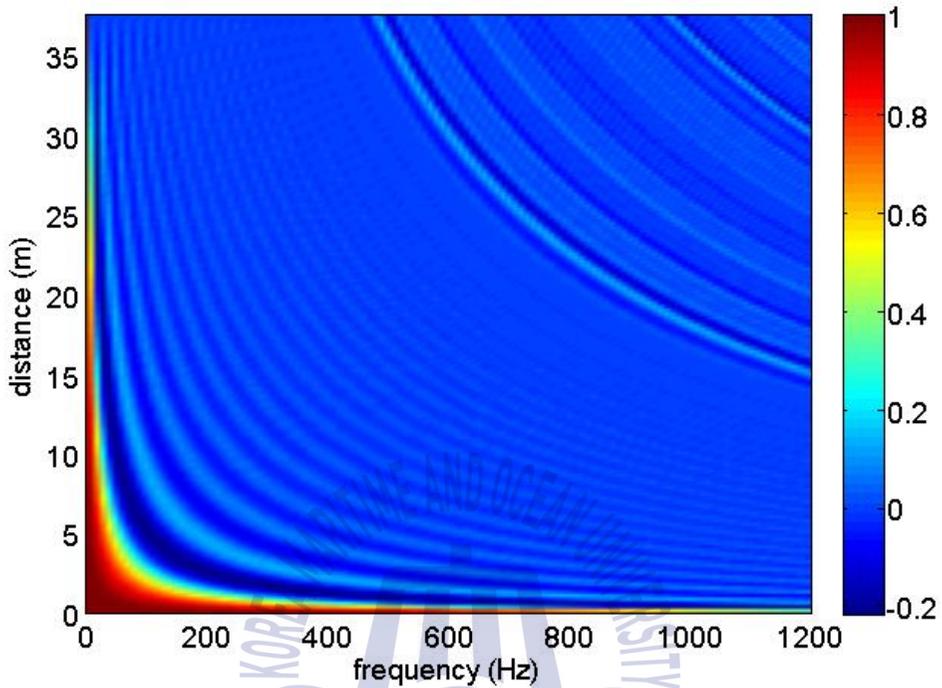


그림 3.17 등방성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence
(end fire 빔 조향)

그림 3.17의 end fire로 빔 조향하는 경우 spatial coherence는 그림 3.15와 동일하게 거리 또는 주파수가 0이 되는 곳에서는 1이 되고, 거리와 주파수가 달라짐에 따라 변동하는 것을 확인하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 거리와 주파수가 변함에 따른 spatial coherence의 변동성이 조금 더 조밀하게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 그림 3.5의 배열 센서의 배열이득을 계산하면 그림 3.18과 같다.

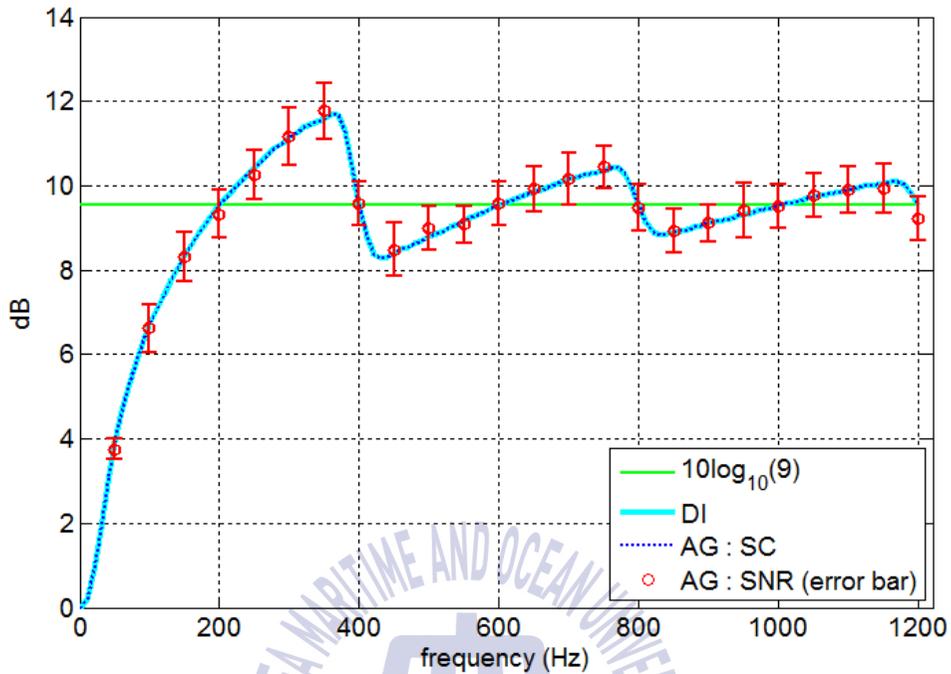


그림 3.18 등방성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (end fire 빔 조향, 중심 주파수 400 Hz, 센서 수 9개)

end fire 방향으로 빔 조향하는 경우 배열센서의 주파수 변화에 따른 배열이득을 그림 3.18과 같이 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선)과 $10\log_{10}9$ (연두색 실선), 지향지수(하늘색 실선), SNR에 대한 배열이득(붉은색 원, error bar의 평균)을 함께 도식화하였다. broadside의 경우와 마찬가지로 지향지수와 spatial coherence에 의한 배열이득이 동일함을 확인할 수 있다. 그리고 SNR에 의한 배열이득을 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30회를 계산하고, error bar로 나타내었다. 이에 대한 SNR의 배열이득의 평균이 지향지수와 spatial coherence에 의한 배열이득에 수렴하는 것을 확인하였다.

등방성 소음에서 균등간격 배열센서의 주파수 변화에 따른 배열이득은

broadside보다 빠르게 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상 역시 end fire로 빔 조향하는 경우 빔 패턴의 공간적인 에일리어싱에 의해 수신되는 소음의 파워가 broadside와 달라져 발생하는 것으로 생각된다. 배열이득이 주파수 200 Hz의 배수에서 $10\log_{10}9$ 과 동일하고, 주파수가 증가하며 $10\log_{10}9$ 에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 배열센서의 배열이득이 빔 조향 방위에 따라 달라지는 것을 확인하였다.

앞 서 등방성 소음 환경에서 배열센서가 균등간격인 경우 빔 조향 및 주파수 변화에 따른 배열이득을 계산하였다. 그림 3.15와 그림 3.17과 같이 빔 조향 방위에 계산한 거리 및 주파수에 따른 spatial coherence를 이용하면 센서의 간격이 비 균등간격인 경우의 배열이득을 계산할 수 있다. 이에 따라 사용된 배열센서는 그림 3.19와 같이 비 균등간격으로 배치하였다.

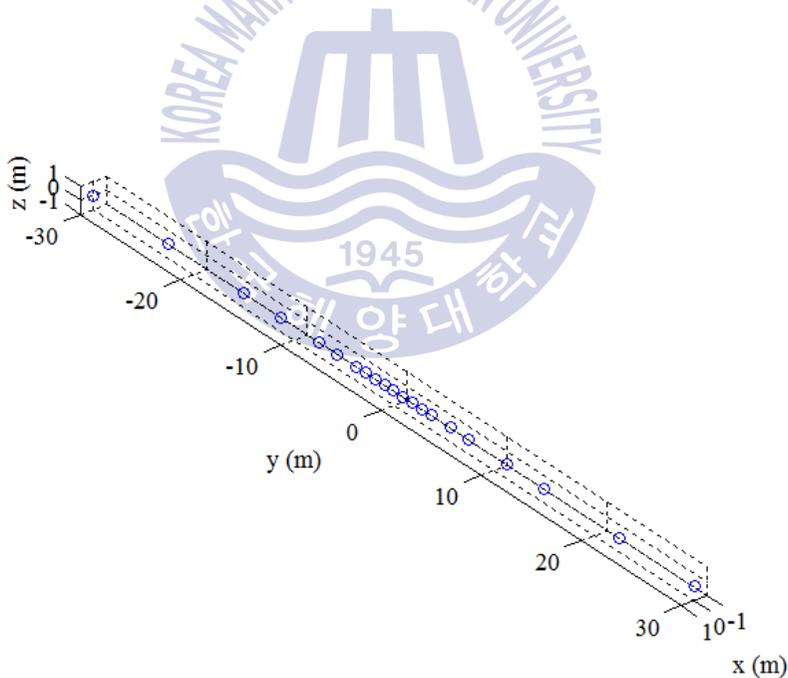


그림 3.19 배열센서 위치 (비 균등간격, nested line array)

그림 3.19의 비 균등간격 배열센서는 중심주파수 100, 200, 400, 800 Hz에 대한 nested line array이다. 이는 각 중심 주파수에 대하여 $\lambda/2$ 간격으로 9개의 센서가 배치되어 있는 형태이고, 전체적인 센서의 수는 21개이다. 이러한 nested line array를 이용하여 등방성 소음 환경에 대한 배열이득을 계산하였고, broadside로 빔 조향하는 경우 배열이득은 그림 3.20과 같다.

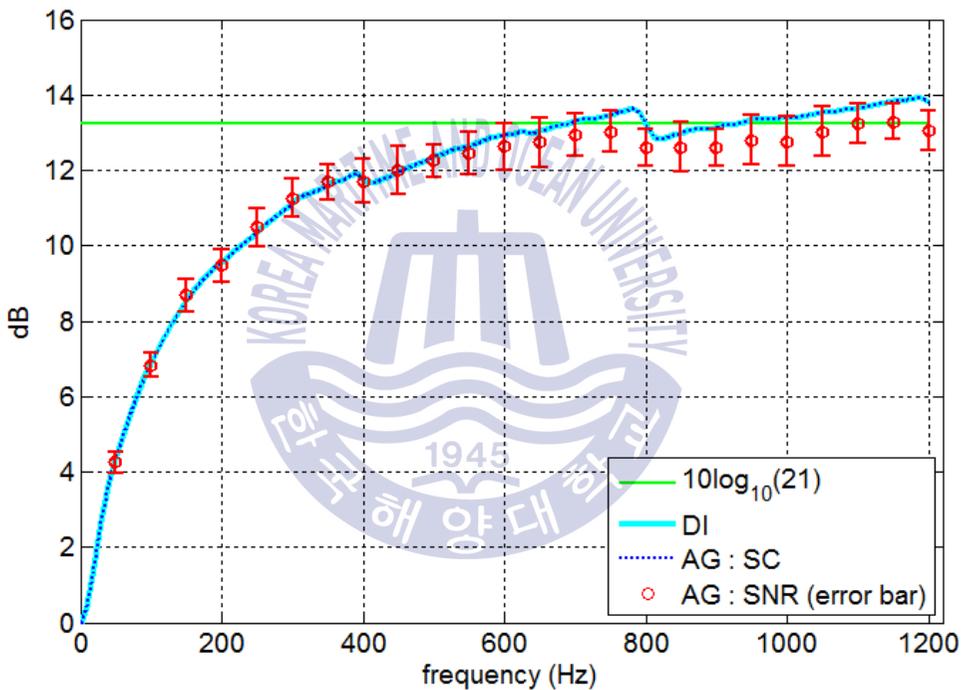
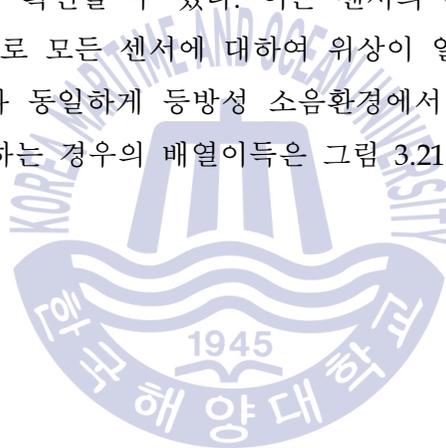


그림 3.20 등방성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 (broadside 빔 조향, 센서 수 21개)

등방성 소음환경에서 nested line array를 broadside 방향으로 빔 조향하는 경우 배열센서의 주파수 변화에 따른 배열이득을 그림 3.20과 같이 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선)과 $10\log_{10}21$ (연두색 실선),

지향지수(하늘색 실선), SNR에 대한 배열이득(붉은색 원, error bar의 평균)을 함께 도식화 하였다. 등방성 소음 환경이므로 spatial coherence에 의한 배열이득과 지향지수가 같아짐을 확인할 수 있다. SNR에 의한 배열이득을 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30회를 계산하여 error bar로 나타내었다. 평균이 약 1 dB의 오차가 있지만 전체적인 경향이 유사함을 확인하였다.

동일한 등방성 소음의 환경에서 균등간격 센서와 달리 비 균등간격 센서의 배열이득이 주파수에 따라 변하는 형태가 달라짐을 확인하였다. 주파수가 증가함에 따라 배열이득이 증가하고, 주파수 800 Hz에서 $10\log_{10}21$ 과 동일해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 센서의 각 위치가 800 Hz의 파장이 가장 짧으므로 모든 센서에 대하여 위상이 일치해져 나타나는 결과로 생각된다. 이와 동일하게 등방성 소음환경에서 nested line array를 end fire로 빔 조향하는 경우의 배열이득은 그림 3.21과 같다.



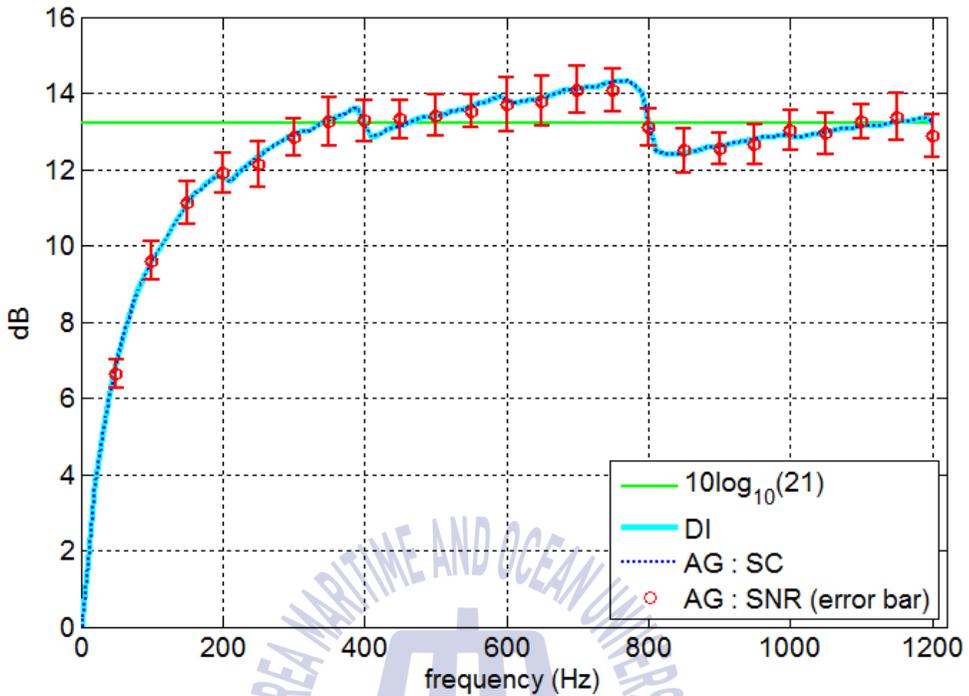


그림 3.21 등방성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 (end fire 빔 조향, 센서 수 21개)

end fire 방향으로 빔 조향하는 경우 그림 3.21과 같이 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선)과 $10\log_{10}21$ (연두색 실선), 지향지수(하늘색 실선), SNR에 대한 배열이득(붉은색 원, error bar의 평균)을 함께 도식화 하였다. spatial coherence에 의한 배열이득과 지향지수가 동일하고, 이에 대하여 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

broadside의 800 Hz에서 배열이득이 $10\log_{10}21$ 과 같아진 것에 반해 end fire에서는 비교적 주파수가 낮은 400 Hz에서 $10\log_{10}21$ 이 되는 것을 확인 하였다. 이것은 균등간격 배열센서에서 배열이득이 broadside에 비해 end fire에서 비교적 낮은 주파수에서 $10\log_{10}9$ 에 수렴하는 것과 유사한 결과로

생각된다. 그러므로 등방성 소음에서 end fire로 빔 조향하는 경우 비교적 낮은 주파수에서도 높은 배열이득을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

등방성 소음에서 균등간격 및 비 균등간격 배열센서에 대한 배열이득을 계산하였다. 배열이득의 결과 및 지향지수를 비교함으로써 spatial coherence에 의한 배열이득의 계산 방법을 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 추가적으로 등방성 소음이 아닌 방향성 소음 환경에서 배열이득이 어떻게 변화하는지 확인해야 할 것이다.

3.2 방향성 소음

방향성 소음이란 단위 입체각 당 센서에 수신되는 소음의 세기가 동일하지 않는 소음이다. 실제 해양의 소음은 대부분 등방성 소음이 아닌 방향성 소음의 형태를 가진다. 방향성 소음이 발생하는 경우 배열이득은 지향지수와 달라지게 되고, 예측하는 것이 쉽지 않다. 이를 위해 소음의 방향성 세기를 설정하고 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하였다. 그리고 방향성 소음의 세기를 소음 생성 모델에 적용하여 방향성 소음을 생성하고, SNR에 의한 배열이득을 계산하여 비교하였다.

3.2.1 방향성 소음 생성 모델링

방향성 소음을 생성하기 위하여 방향성 소음의 세기를 설정해야 한다. 이를 위해 [Burdic(1983)]의 해수면 소음에 대한 방향성 세기를 적용하였고, 배열센서가 수직으로 배치되어 있는 [Burdic(1983)]과 달리 그림 3.5와 같이 수평배열로 배치되어 있는 경우를 위해 방향성 소음 세기의 방위를 식(3.7)과 같이 변화시켰다.

$$N(\omega, \theta, \phi) = \begin{cases} |\sin\theta\cos\phi| & \text{for } -\pi \leq \theta \leq 0 \\ 0.1|\sin\theta\cos\phi| & \text{for } 0 < \theta < \pi \end{cases} \quad (3.7)$$

식(3.7)을 이용하여 도식화한 방향성 소음의 세기는 그림 3.22와 같다.

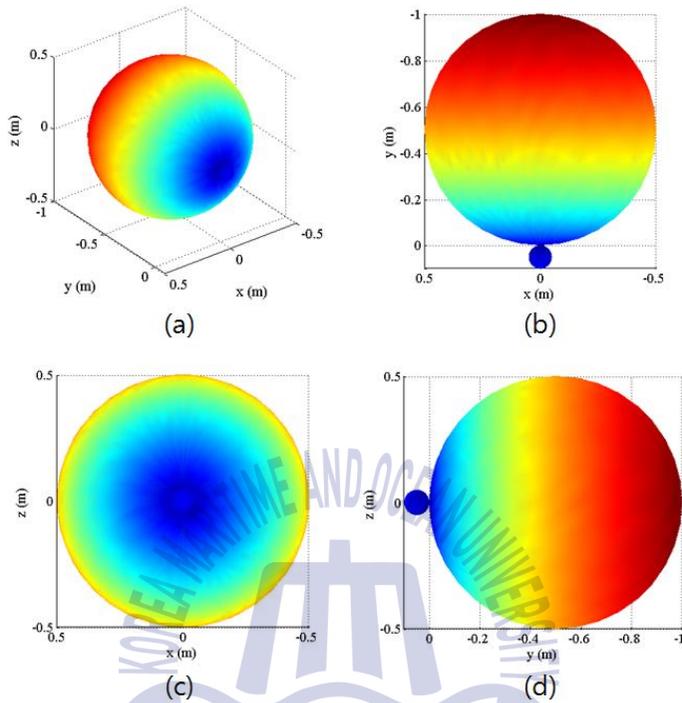


그림 3.22 방향성 소음 (a) 3차원 좌표, (b) x-y 좌표, (c) x-z 좌표, (d) y-z 좌표

그림 3.22와 같은 소음의 방향성 세기를 적용하여 등방성 소음 생성 방법과 동일하게 소음을 생성하였다. 배열센서의 end fire 양쪽에 대한 소음의 세기가 다르기 때문에 신호를 수직각 ϕ 는 0° 에 고정하고, 수평각 θ 을 -90° , 0° , 90° 에 대하여 수신되도록 신호를 생성하였다. 생성된 신호 및 소음을 Welch's method를 이용하여 window size 1024에 대하여 50% overlap을 수행하였고, power spectral density를 계산하였다. 이를 이용하여 배열이득을 계산하였다.

그림 3.22와 같은 소음의 세기 형태에서 [Burdic(1983)]에는 균등간격 센서의 배열이득을 수식적으로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
ag(\lambda) = & \\
& \frac{N^2 / \frac{\pi K(\lambda)(1 + L_b)}{N^2}}{N^2} \left\{ N + 4 \sum_{r=1}^{N-1} (N-r) \cos(2\pi r d u_0) \left[\frac{\sin(2\pi r d / \lambda)}{2\pi r d / \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\pi r d / \lambda)}{(\pi r d / \lambda)^2} \right] \right\} \\
& + \frac{4\pi K(\lambda)(1 - L_b)}{N^2} \sum_{r=1}^{N-1} (N-r) \sin(2\pi r d u_0) \left[\frac{\sin(2\pi r d / \lambda)}{(2\pi r d / \lambda)^2} - \frac{\cos(2\pi r d / \lambda)}{2\pi r d / \lambda} \right]
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

식(3.8)에서 ag 는 배열이득 인자이고, 배열이득 AG 는 $10\log_{10}(ag)$ 로 계산된다. 그리고 λ 는 파장으로 음속 c 와 주파수 f 가 주어질 경우 $\lambda = c/f$ 가 되므로 수식을 변환하면 주파수 f 에 대하여 배열이득을 계산할 수 있다. L_b 는 세기의 감쇠계수로 식(3.7)에서 0으로 설정하였다. 그리고 센서 수 N , 센서 간격 d , 마지막으로 u 는 빔 조향 각 θ 에 대하여 $u = \sin\theta/\lambda$ 가 된다.



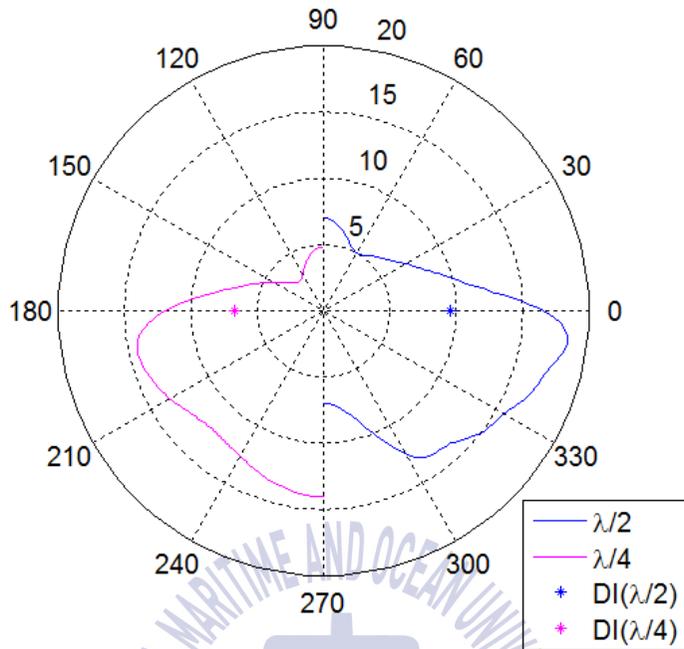


그림 3.23 빔 조향 방위에 대한 방향성 소음의 배열이득 (그림 3.22 방향성 세기 적용)

그림 3.22의 방향성 세기를 적용한 배열이득은 그림 3.23과 같다. 푸른색 실선은 배열센서가 주파수의 $\lambda/2$ 간격으로 배치되어 있는 경우에 대한 배열이득, 분홍색 실선은 배열센서가 주파수의 $\lambda/4$ 간격으로 배치되어 있는 경우에 대한 배열이득이다. 푸른색 별표는 배열센서가 주파수의 $\lambda/2$ 간격으로 배치되어 있는 경우에 대한 지향지수, 분홍색 별표는 배열센서가 주파수의 $\lambda/4$ 간격으로 배치되어 있는 경우에 대한 지향지수이다. 이와 같이 방향성 소음이 발생하는 경우 배열이득과 지향지수는 달라지고, 빔 조향방위에 따라 배열이득이 변화함을 확인할 수 있다. 여기서 broadside는 0° 및 180° 이다. 이를 이용하여 균등간격 센서에서 spatial coherence를 의한 배열이득을 계산하고, 검증을 위해 비교 분석하였다.

3.2.2 방향성 소음에서 spatial coherence에 의한 배열이득

그림 3.22의 방향성 세기를 이용하여 빔 조향 방위에 대한 spatial coherence를 계산하였다. 빔 조향 방위는 수직각 ϕ 를 0° 에 고정하고, 수평각 θ 를 -90° , 0° , 90° 에 대하여 적용하였다. 여기서 -90° 는 그림 2.2의 구형좌표계에서 y축의 음의 방향이고, 0° 는 x축의 양의 방향, 90° 는 y축의 양의 방향이다. 등방성 소음의 경우와 같이 빔 조향 방위에 따른 spatial coherence를 계산한다면 배열센서에 따른 배열이득을 계산할 수 있을 것이다. 우선 신호의 spatial coherence는 그림 3.24와 같다.

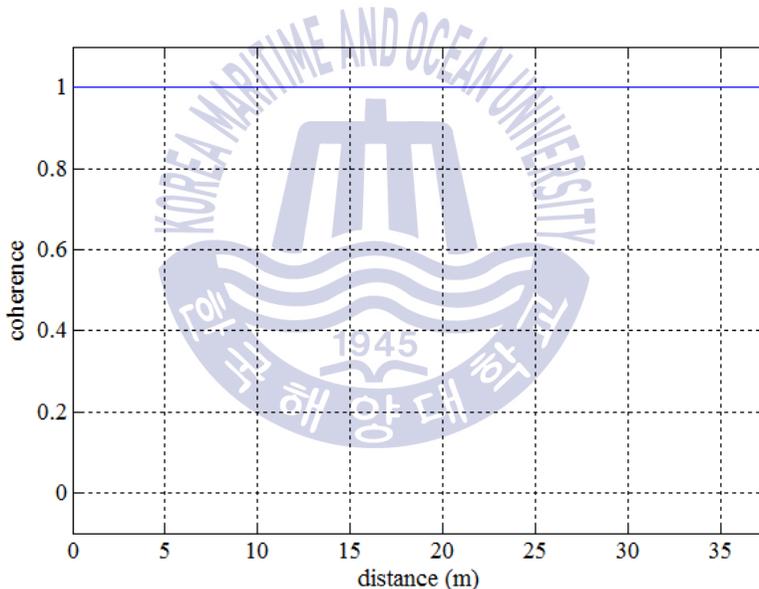


그림 3.24 신호의 거리에 대한 spatial coherence

그림 3.24와 같이 신호가 수신되는 방위에 대하여 빔 조향하게 되면 완벽한 상관관계가 되므로 거리 변화에 따른 spatial coherence는 1이 된다. 이와 달리 소음의 경우 방위에 따른 세기가 다르므로 빔 조향 방위에 대한 spatial coherence는 변화하게 된다.

수직각 ϕ 를 0° , 수평각 θ 를 -90° 로 빔 조향하는 경우 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence를 계산하면 그림 3.25와 같아진다.

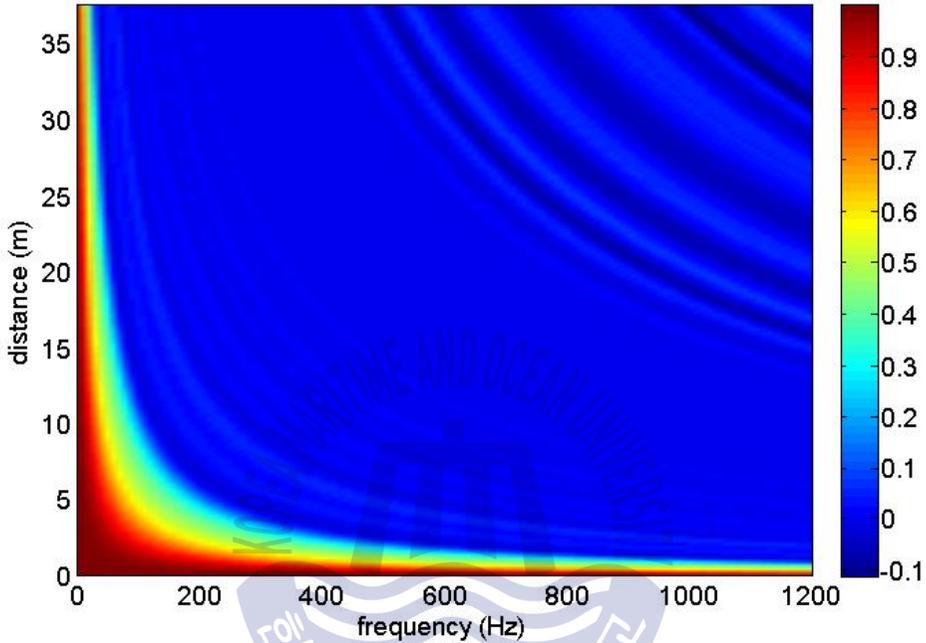


그림 3.25 방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence
($\phi=0^\circ$, $\theta=-90^\circ$ 빔 조향)

그림 3.25의 spatial coherence를 다른 방위로 빔 조향하는 경우와 경향을 비교하기 위하여 400 Hz의 주파수에 대한 단면을 도식화하면 그림 3.26과 같다.

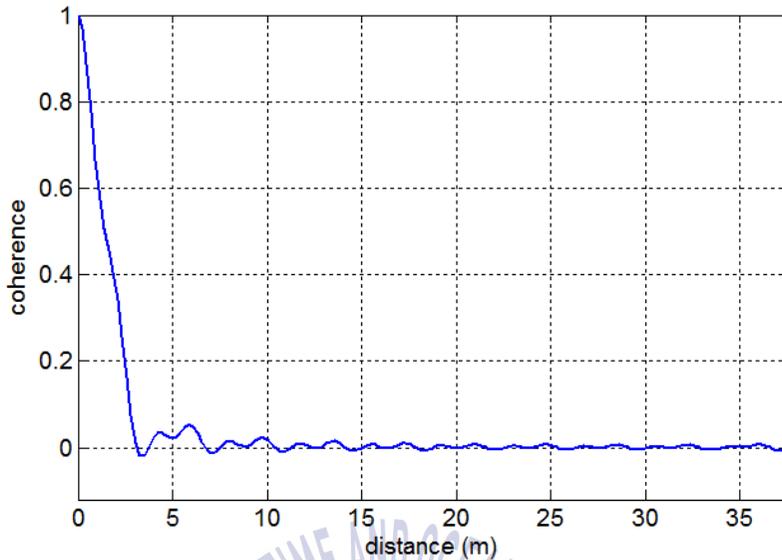


그림 3.26 방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence
($\phi = 0^\circ$, $\theta = -90^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz)

그림 3.26과 같이 방향성 소음에서 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우 spatial coherence는 등방성 소음의 spatial coherence와 달리 거리 변화에 따라 불규칙적으로 변화하고, 거리가 멀어짐에 따라 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 그림 3.5의 균등간격 센서에 대하여 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우 배열이득을 계산하면 그림 3.27과 같다.

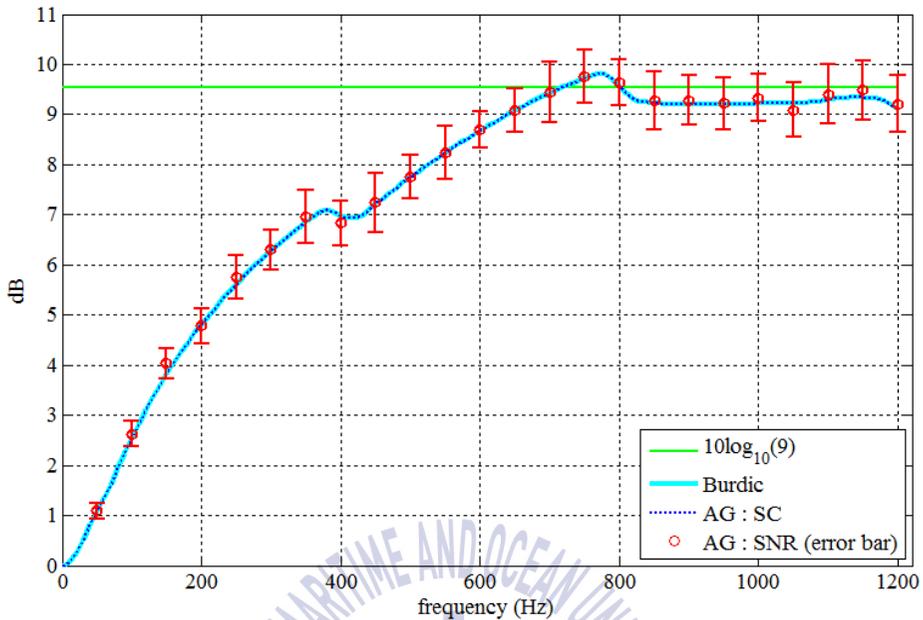


그림 3.27 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ$, $\theta=-90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개)

그림 3.27은 중심주파수 400 Hz에 대한 9개의 균등간격 배열센서를 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우 [Burdic(1983)]의 수식에 의한 배열이득(하늘색 실선), spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원) 그리고 $10\log_{10}9$ (연두색 실선)을 도식화한 것이다. SNR에 의한 배열이득을 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30회를 계산하여 error bar로 나타내었다. 방향성 소음에서는 배열이득과 지향지수가 다르기 때문에 [Burdic(1983)]의 수식에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득을 비교하여 동일함을 확인하였고, 이에 대하여 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 중심주파수 400 Hz에서는 배열이득이 $10\log_{10}9$ 보다 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 방향성 소음이 강한 방향으로 빔 조향하는 경우 배열이득이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 주파수가 증가함에 따

라 배열이득이 증가하여 $10\log_{10}9$ 에 수렴하는 경향을 확인하였다.

수직각 ϕ 를 0° , 수평각 θ 를 0° 로 빔 조향하는 경우 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence를 계산하면 그림 3.28과 같다.

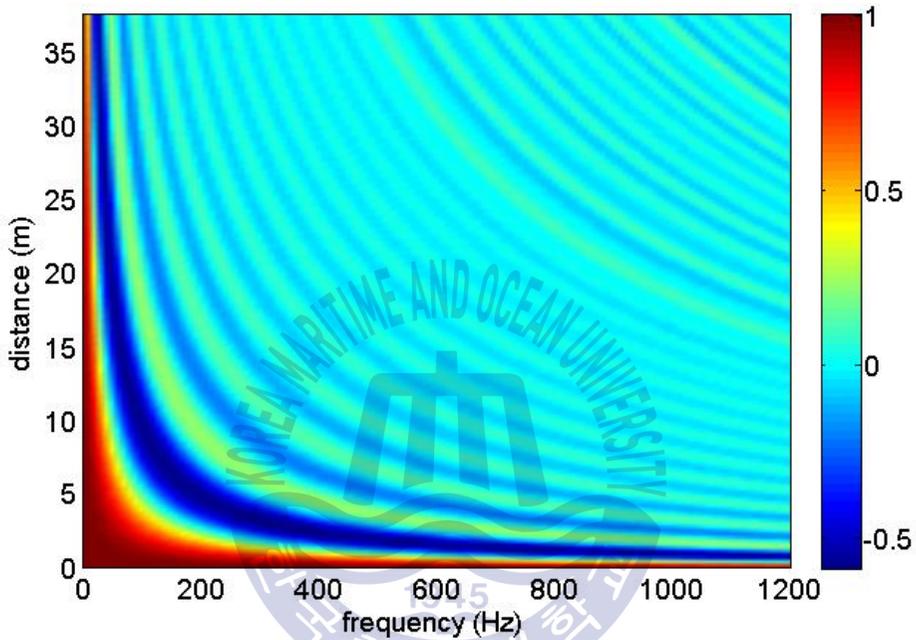


그림 3.28 방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence ($\phi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$ 빔 조향)

그림 3.28의 spatial coherence를 다른 방위로 빔 조향하는 경우와 경향을 비교하기 위하여 400 Hz의 주파수에 대한 단면을 도식화하면 그림 3.29와 같다.

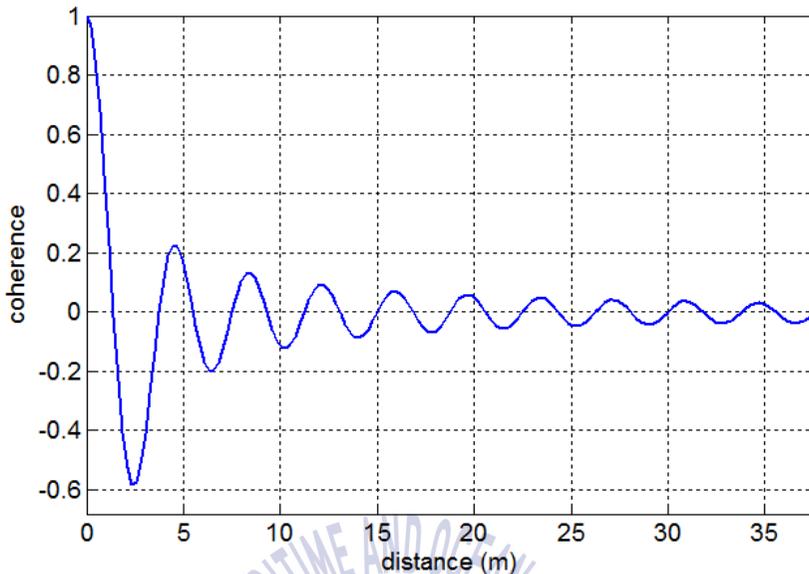


그림 3.29 방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence
 $(\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz)

그림 3.22의 방향성 소음 환경에서는 400 Hz에 대한 spatial coherence가 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우보다 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우 비교적 변동 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 거리가 멀어짐에 따라 spatial coherence가 0에 수렴하는 것을 동일하다. 그림 3.29의 spatial coherence를 이용하여 균등간격 센서에서 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우 배열이득을 계산하면 그림 3.30과 같다.

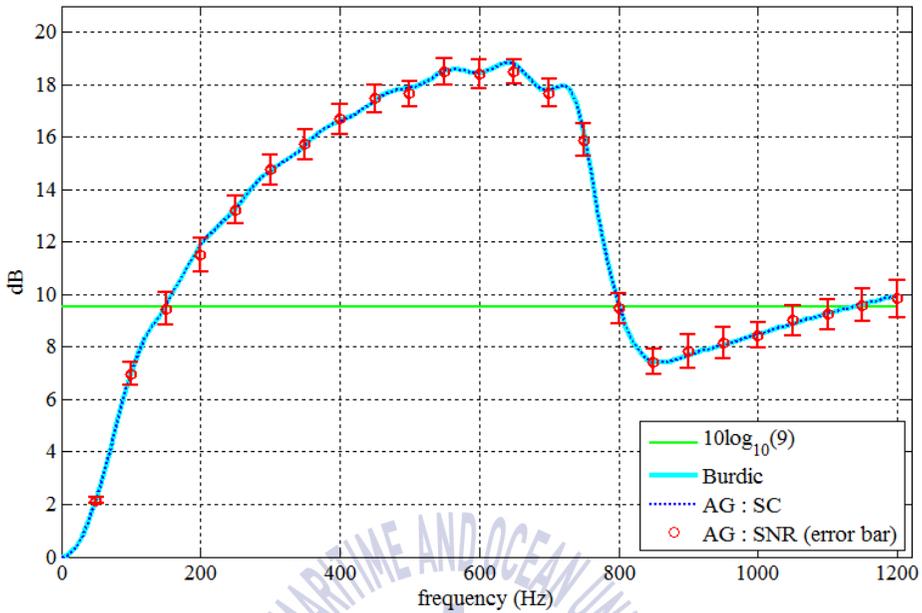


그림 3.30 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개)

그림 3.30은 균등간격 배열센서를 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우 [Burdic(1983)]의 수식에 의한 배열이득(하늘색 실선), spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원) 그리고 $10\log_{10}9$ (연두색 실선)을 도식화한 것이다. SNR에 의한 배열이득을 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30회를 계산하여 error bar로 나타내었다. [Burdic(1983)]에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득이 동일하고, 이에 대하여 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인하였다.

소음의 세기가 강한 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우에 비해 소음의 세기가 가장 약한 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우 전체적으로 배열이득이 높은 것을 확인하였다. 이를 통해 소음의 세기가 약한 방위로 빔 조향하

는 경우 높은 배열이득을 도출할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 수평각 -90° 및 0° 로 빔 조향하는 경우에 대한 배열이득 모두 주파수 800 Hz에서 $10\log_{10}9$ 와 동일해 지는 것을 확인하였고, 주파수가 증가함에 따라 배열이득이 $10\log_{10}9$ 에 수렴하는 것을 확인하였다.

수직각 ϕ 를 0° , 수평각 θ 를 90° 로 빔 조향하는 경우 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence를 계산하면 그림 3.31과 같아진다.

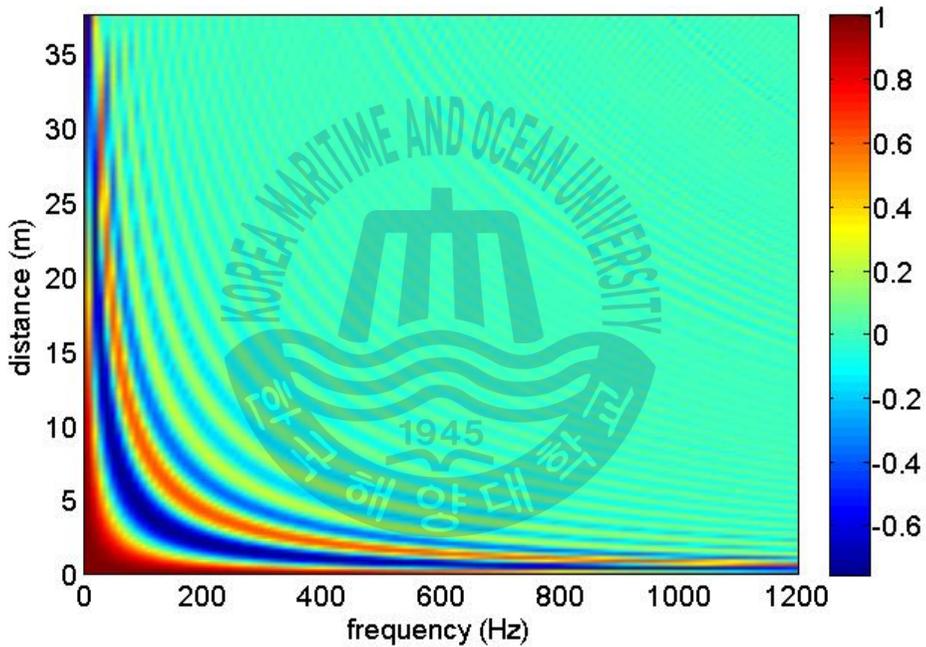


그림 3.31 방향성 소음의 거리 및 주파수에 대한 spatial coherence
($\phi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ 빔 조향)

그림 3.31의 spatial coherence를 다른 방위로 빔 조향하는 경우와 경향을 비교하기 위하여 400 Hz의 주파수에 대한 단면을 도식화하면 그림 3.32와 같다.

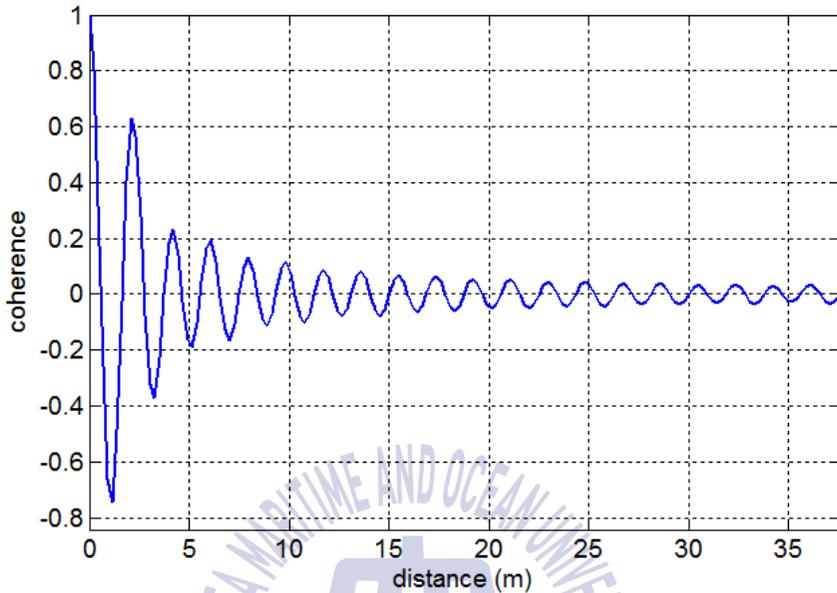


그림 3.32 방향성 소음의 거리에 대한 spatial coherence
($\phi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ 빔 조향, 주파수 400 Hz)

방향성 소음의 세기인 그림 3.22와 같이 90° 의 방향은 -90° 보다 소음의 세기가 0.1배로 낮은 곳이다. 이에 따른 spatial coherence는 수평각 -90° 및 0° 에 비해 90° 로 빔 조향하는 경우 거리에 따른 변동하는 간격 및 폭이 매우 커진 것을 확인하였다. 그리고 거리가 멀어짐에 따라 spatial coherence가 0에 수렴하는 것을 동일하다. 그림 3.32의 spatial coherence를 이용하여 균등간격 센서에서 수평각 90° 로 빔 조향하는 경우 배열이득을 계산하면 그림 3.33과 같다.

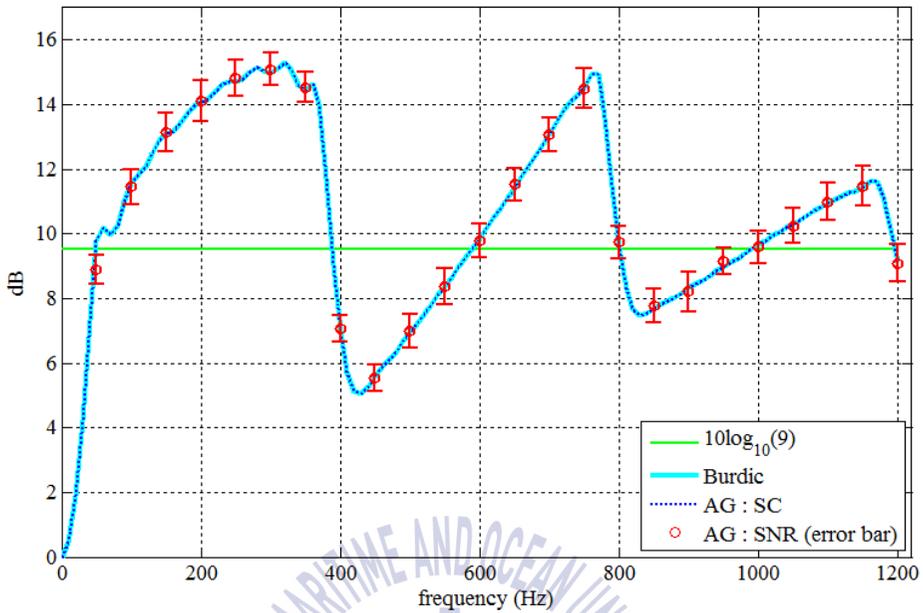


그림 3.33 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 9개)

그림 3.33은 균등간격 배열센서를 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우 [Burdic(1983)]의 수식에 의한 배열이득(하늘색 실선), spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 점선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원) 그리고 $10\log_{10}9$ (연두색 실선)을 도식화한 것이다. [Burdic(1983)]에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득이 동일하고, 이에 대하여 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인하였다.

수평각 -90° 및 0° 와 달리 90° 로 빔 조향하는 경우 배열이득이 주파수 변화에 따른 형태가 비교적 복잡해지는 것을 확인하였다. 90° 로 빔 조향하는 경우에 비해 특정 주파수에서는 -90° 로 빔 조향하는 경우보다 배열이득이 높거나 0° 로 빔 조향하는 경우보다 배열이득이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 대하여 각 방위로 빔 조향하는 경우에 대한 배

열이득을 비교하기 위하여 그림 3.34와 같이 수평각 -90° , 0° , 90° 에 대한 배열이득을 모두 도식화하였다.

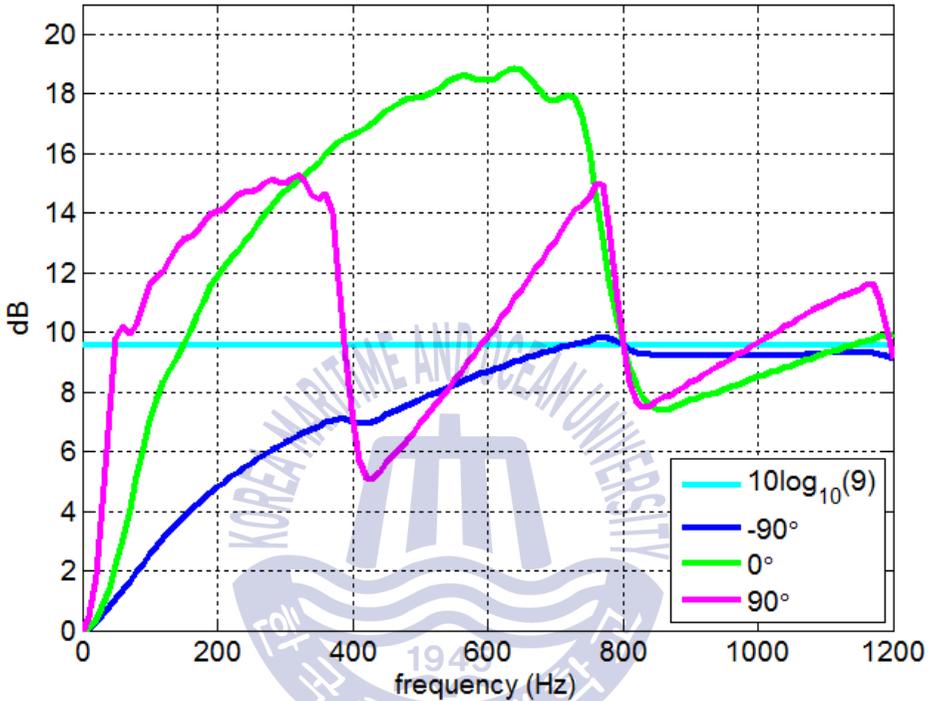


그림 3.34 방향성 소음 환경에서 균등간격 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (빔 조향 수평각 : -90° & 0° & 90° , 센서 수 9개)

그림 3.34에서 푸른색 실선은 균등간격 센서에서 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득, 연두색 실선은 균등간격 센서에서 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득, 분홍색 실선은 균등간격 센서에서 수평각 90° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득이다. 균등간격 센서는 중심주파수에서 한 쪽의 end fire로 빔 조향하는 경우 공간적 에일리어싱에 의해 반대 쪽 end fire에서도 동일한 빔 패턴이 발생한다. 그러므로 균등간격 센서에서는 end fire의 양 쪽에서 수신되는 신호를 구분할 수 없다. 이로 인해

그림 3.34와 같이 주파수 400 Hz에서 수평각 -90° 및 90° 로 빔 조향하는 경우에 대한 배열이득이 동일해진다. 그리고 주파수 800 Hz에서는 수평각 -90° , 0° , 90° 로 빔 조향한 배열이득이 $10\log_{10}9$ 와 동일해지는 것을 확인할 수 있다. 소음의 세기가 각 방위에서 달라짐에도 이러한 현상이 나타나는 것은 주파수 변화에 따른 빔 패턴의 공간적인 에일리어싱으로 추정되지만, 추가적인 연구가 필요하다. 이로써 방향성 소음의 환경에서 균등간격 센서의 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하고, [Burdic(1983)]의 수식 및 SNR에 의한 배열이득과 비교함으로써 신뢰할 수 있는 결과가 나타나는 것을 확인하였다.

앞서 계산한 균등간격 배열센서의 배열이득과 달리 방향성 소음의 환경에서 비 균등간격 센서에 대한 배열이득을 계산할 수 있는 수식을 찾기 쉽지 않다. 이러한 경우에 대하여 배열이득을 직관적으로 예측하는 것은 더욱 어렵다. 이를 위해 방향성 소음의 환경에서 nested line array를 이용하여 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하고, SNR에 의한 배열이득과 비교하여 결과를 분석하였다. 그림 3.22의 방향성 세기에서 수평각 -90° 로 빔 조향한 spatial coherence 그림 3.25를 이용하여 그림 3.19의 nested line array에 대한 배열이득을 그림 3.35와 같이 계산하였다.

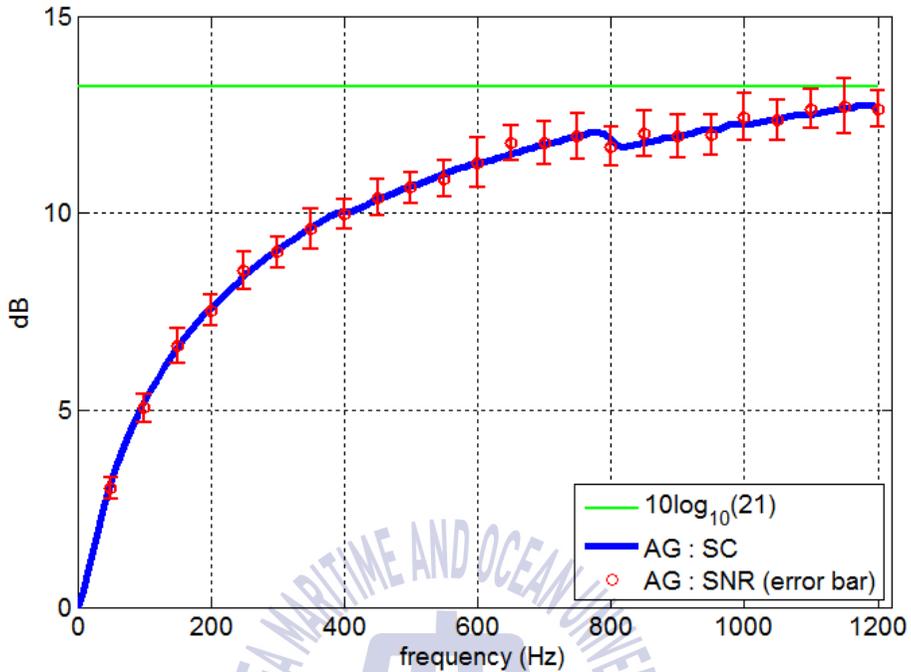


그림 3.35 방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ$, $\theta=-90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개)

그림 3.35는 방향성 소음 환경에서 nested line array의 수평각 -90° 로 빔 조향한 경우 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 실선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원)이다. SNR에 의한 배열이득을 주파수 50 ~ 1200 Hz에서 50 Hz 간격으로 30회를 계산하여 error bar로 나타내었다. spatial coherence에 의한 배열이득에 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 소음의 세기가 가장 높은 수평각 -90° 로 빔 조향하였기 때문에 그에 대한 배열이득이 전체적으로 $10\log_{10}21$ 보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 3.22의 방향성 세기에서 수평각 0° 로 빔 조향한 spatial coherence 그림 3.28을 이용하여 nested line array에 대한 배열이득을 그림 3.36과 같이 계산하였다.

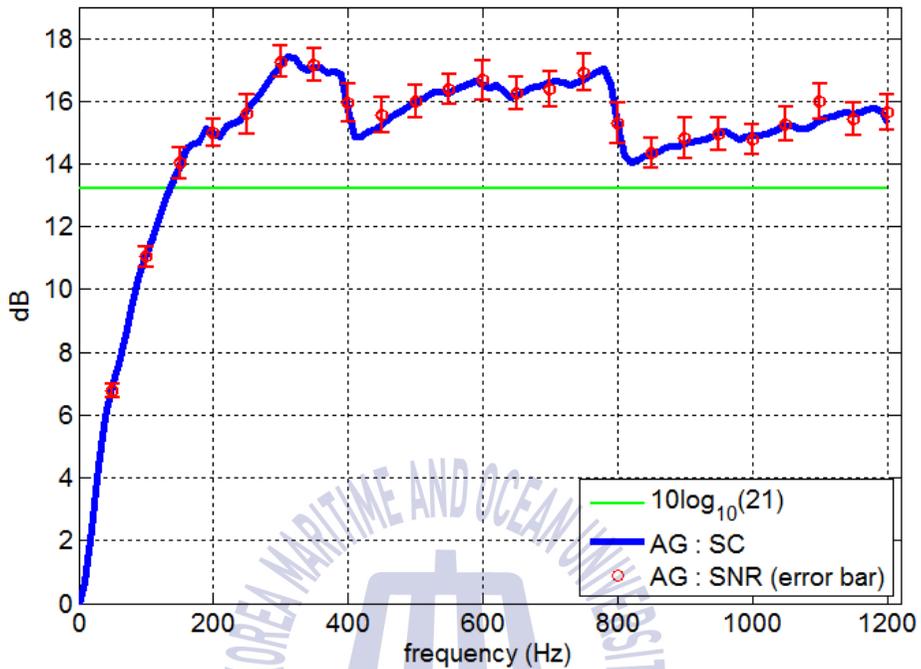


그림 3.36 방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개)

그림 3.36은 방향성 소음 환경에서 nested line array의 수평각 0° 로 빔 조향한 경우 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 실선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원)이다. spatial coherence에 의한 배열이득에 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 수평각 0° 은 소음의 세기가 가장 약한 곳으로 이에 대하여 빔 조향한 배열이득은 그림 3.36과 같이 전체적으로 수평각 -90° 로 빔 조향한 그림 3.35의 배열이득보다 비교적 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 3.22의 방향성 세기에서 수평각 90° 로 빔 조향한 spatial coherence 그림 3.31을 이용하여 nested line array에 대한 배열이득을 그림 3.37과 같이 계산하였다.

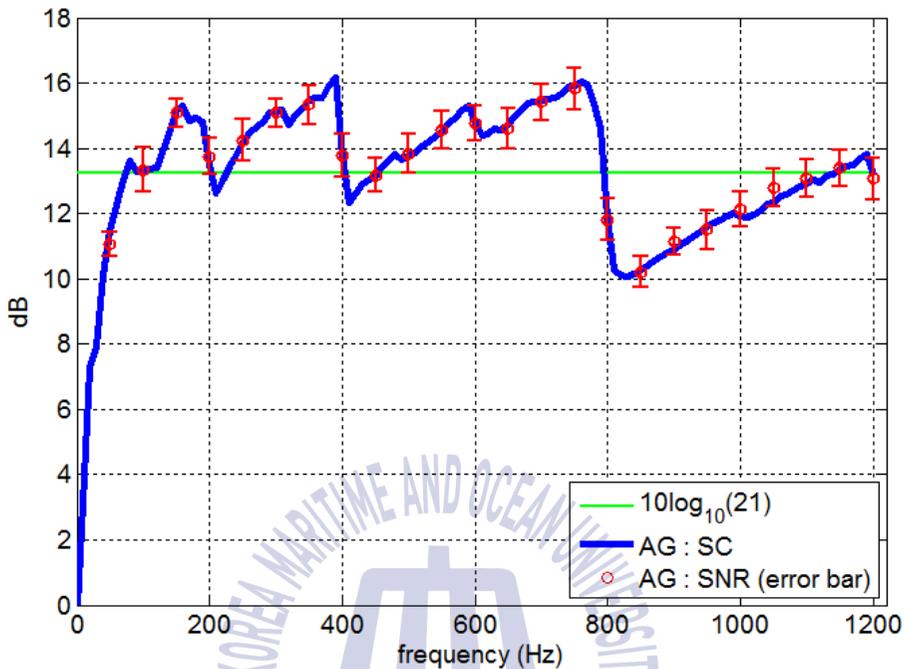


그림 3.37 방향성 소음 환경에서 nested line array의 주파수 변화에 따른 배열이득 ($\phi=0^\circ$, $\theta=90^\circ$ 빔 조향, 센서 수 21개)

그림 3.37은 방향성 소음 환경에서 nested line array의 수평각 90° 로 빔 조향한 경우 spatial coherence에 의한 배열이득(푸른색 실선), SNR에 의한 배열이득(붉은색 원)이다. 이 역시 spatial coherence에 의한 배열이득에 SNR에 의한 배열이득의 평균이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 균등간격 배열센서의 배열이득 결과와 같이 수평각 90° 방향으로 빔 조향한 배열이득은 수평각 -90° 또는 0° 과 달리 변동성이 비교적 복잡해지는 것을 확인할 수 있다. 이 역시 수평각 -90° , 0° , 90° 으로 빔 조향하는 배열이득을 비교하기 위하여 3.38과 같이 도식화하였다.

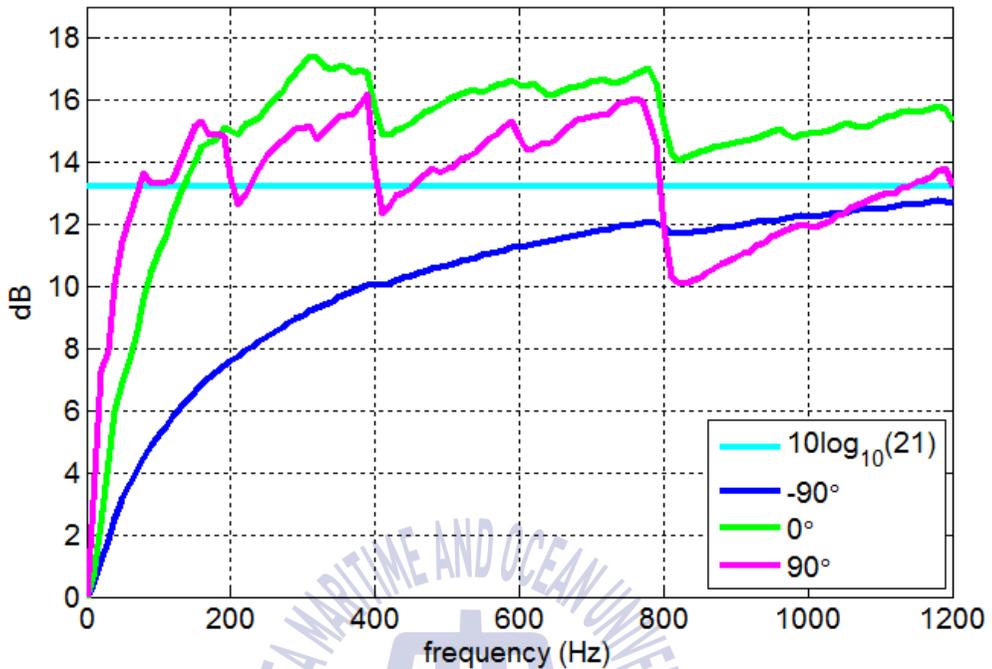


그림 3.38 방향성 소음 환경에서 nested line array의 센서의 주파수 변화에 따른 배열이득 (빔 조향 수평각 : -90° & 0° & 90° , 센서 수 21개)

그림 3.38에서 푸른색 실선은 nested line array에서 수평각 -90° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득, 연두색 실선은 nested line array에서 수평각 0° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득, 분홍색 실선은 nested line array에서 수평각 90° 로 빔 조향하는 경우의 배열이득이다. 주파수 변화에 따라 소음의 세기가 강한 수평각 -90° 의 배열이득은 전체적으로 낮고, 소음의 세기가 약한 수평각 0° 의 배열이득은 전체적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 수평각 -90° 에 비해 소음의 세기가 0.1배 낮은 수평각 90° 로 빔 조향한 배열이득은 주파수 변화에 따라 변동성이 비교적 큰 것을 확인할 수 있다.

등방성 소음 및 방향성 소음의 환경에서 배열센서의 형상에 따른 배열

이득을 계산하였다. 등방성 소음에서는 지향지수와 비교하고, 방향성 소음에서는 균등간격 배열센서의 경우 해석적인 수식과 비교하였다. 그리고 spatial coherence에 의한 배열이득이 SNR에 의한 배열이득과 전반적인 결과가 매우 유사함을 확인하였다. 이로부터 spatial coherence를 계산함에 따라 소음의 방향성 세기 및 배열센서의 형상, 빔 조향 방위의 정보만으로 배열이득을 추정할 수 있음을 확인하였다. 이것은 실제 해양에서 수평 선 배열센서를 해양에 배치하기 전에 방향성 소음의 정보만으로 배열이득 추정이 가능함을 의미한다. 또한 계산된 spatial coherence를 이용하여 특정 소음환경에서 최적화된 배열이득을 가지는 배열센서를 설계할 수 있을 것이다. 하지만 해양에는 복잡한 환경적인 요인이 많기 때문에 실제 실험데이터를 분석함으로써 검증이 필요하다.



제 4 장 해양환경에 의한 배열이득 변동 분석

해양에는 선박, 풍랑, 해양생물 등에 의해 다양한 형태의 소음이 발생한다. 이로 인해 배열센서에서 신호를 수신하는 경우 배열이득의 변동성이 발생하게 된다. 3장과 같이 소음 생성 모델링을 이상적인 환경인 자유공간(free space)에서 수행한 것과 달리, 실제 해양은 해양파, 조류, 해저지질, 음속분포 등 환경적인 요소가 다양한 형태로 존재한다. 그러므로 실측 데이터에 의한 배열이득이 spatial coherence에 의한 배열이득과 달라질 수 있다. 이를 위해 실제 해양환경에서 소음의 방향성 형태를 측정하고, 그에 따른 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하였다. 그리고 CW(continuous wave) 신호를 수신하여 SNR에 대한 배열이득을 계산하였다. 이와 같이 소음의 형태에 따른 spatial coherence에 의한 배열이득과 SNR에 의한 배열이득을 비교 분석하였다.

4.1 실험 환경

실험에 사용된 배열센서는 그림 3.19와 같이 nested line array를 사용하였다. 앞 서 설명한 바와 같이 nested line array는 100, 200, 400, 800 Hz의 각 중심 주파수에 대하여 $\lambda/2$ 간격으로 9개의 센서가 기하학적으로 배치되었고, 전체 센서 수는 21개이다. nested line array를 수평 선 배열센서(horizontal line array)로 사용하였고, 설치된 해양의 수심은 약 100 m 내외로 해저가 평탄한 곳이다. 이에 대한 음속 분포는 그림 4.1과 같다.

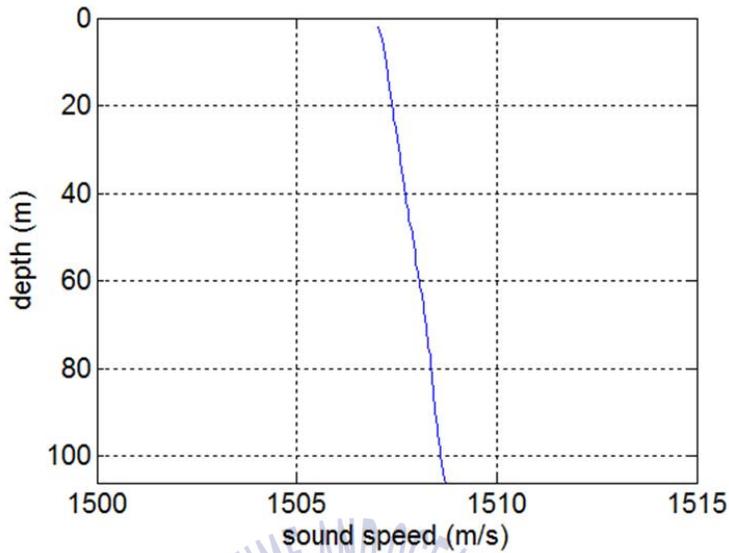


그림 4.1 수심 별 음속 분포

그림 4.1의 수심별 음속 분포는 CTD(Conductive, Temperature, Depth)로 측정하였고, 수평 선 배열센서가 설치된 해저의 음속은 약 1508 m/s 이다. 이에 대하여 15개의 지점에서 저주파 음원을 이용하여 CW를 송신하였다. 실험에 대한 GPS(Global Positioning System)을 이용하여 그림 4.2와 같이 수평 선 배열센서 및 음원의 위치를 도식화하였다.

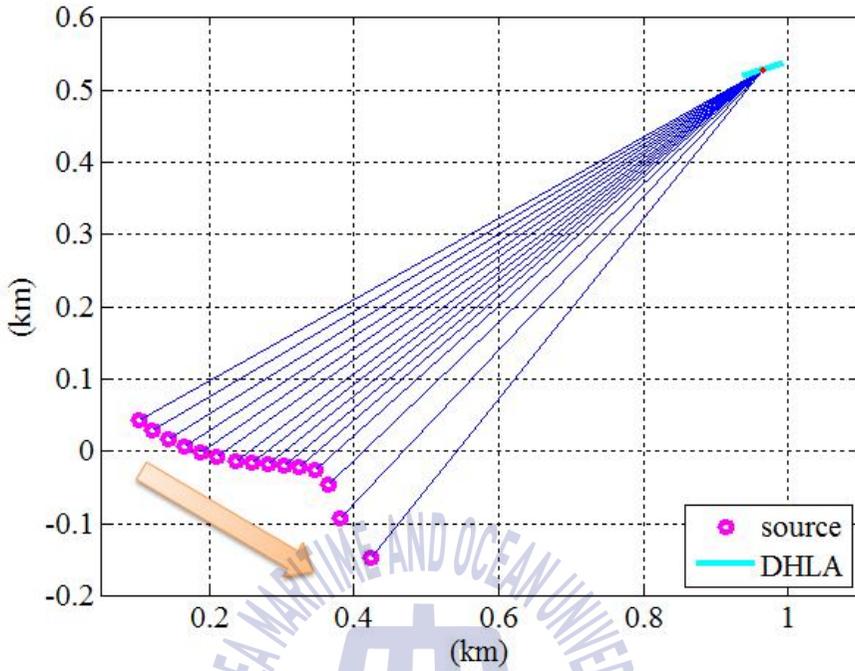


그림 4.2 배열센서 및 음원의 위치

그림 4.2에서 하늘색 실선은 수평 선 배열센서의 위치이고, 해저에 설치되었다. 분홍색 원은 음원의 위치로, 실험선에 저주파 음원을 예인하며 CW를 송신하였다. 배열이득이 소음의 방향성 형태에 따라 변하게 되므로 실험선에 대한 소음 영향을 줄이기 위하여 기동을 멈추었고, 조류에 의해 화살표 방향으로 실험선이 이동되어졌다. 실험선의 프로펠러를 가동하지 않아서 그에 따른 소음은 발생하지 않았지만, 엔진은 완전히 멈출 수 없기에 엔진에 의한 소음이 발생된 것으로 생각된다. 사용된 CW는 30초 주기로 15회 동안 송신하였고, 이에 대한 음원의 위치를 도식화하여 분홍색 원의 간격은 30초가 된다. CW를 12회 송신하는 시점부터 실험선의 엔진을 가동하고 기동을 시작하였으며, 이와 같이 분홍색 원의 경로가 변경되는 것을 확인할 수 있다. CW의 송신 형태는 그림 4.3과 같다.

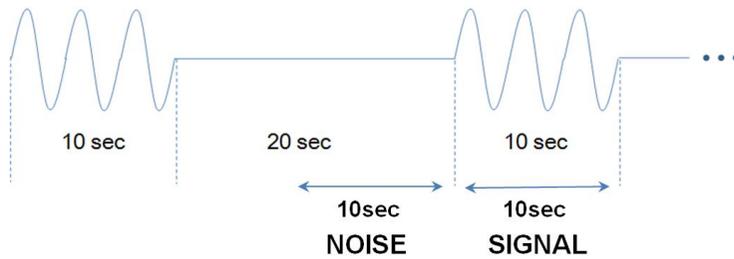


그림 4.3 CW 송신 주기

그림 4.3과 같이 CW를 10초 동안 송신하고 난 뒤 20초 후 다시 CW를 10초 동안 송신하는 형태로 30초의 주기로 반복하였다. 이와 같은 형태로 송신한 이유는 실험을 수행하는 위치가 선박의 운행이 잦은 곳으로 소음의 형태가 수시로 변하기 때문에 CW의 직전에 수신된 소음을 이용하여 방향성 소음의 세기를 계산하기 위함이다. CW에 사용된 주파수는 195, 410, 605 Hz의 단일 주파수 신호를 사용하였다. 이로써 그림 4.3과 같이 CW의 직전에 대한 10초는 소음, CW의 10초는 신호로 설정하여 분석하였다.

4.2 실험 데이터 분석

해상 실험에서 수평 선 배열센서에 수신된 CW 신호는 그림 4.4와 같다.

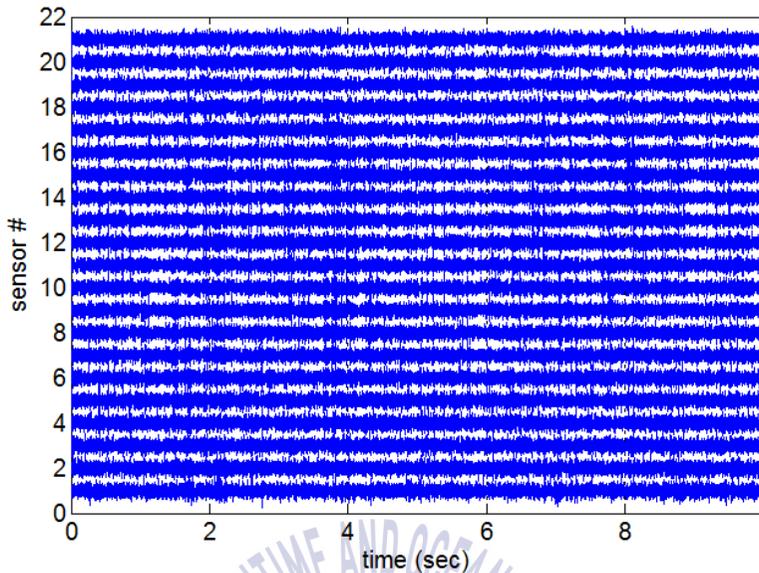


그림 4.4 수평 선 배열센서에 수신된 CW 신호

그림 4.4는 수평 선 배열센서의 각 센서에서 수신된 CW에 대한 시간영역이다. 여기서 1번 센서는 그림 4.2의 수평 선 배열센서에서 우측상단에 위치하고, 21번 센서는 좌측하단에 위치한다. sampling frequency는 2^{13} 이다. 이와 같이 수신된 CW 신호로부터 Welch's method를 이용하여 power spectral density를 계산하면 그림 4.5와 같다.

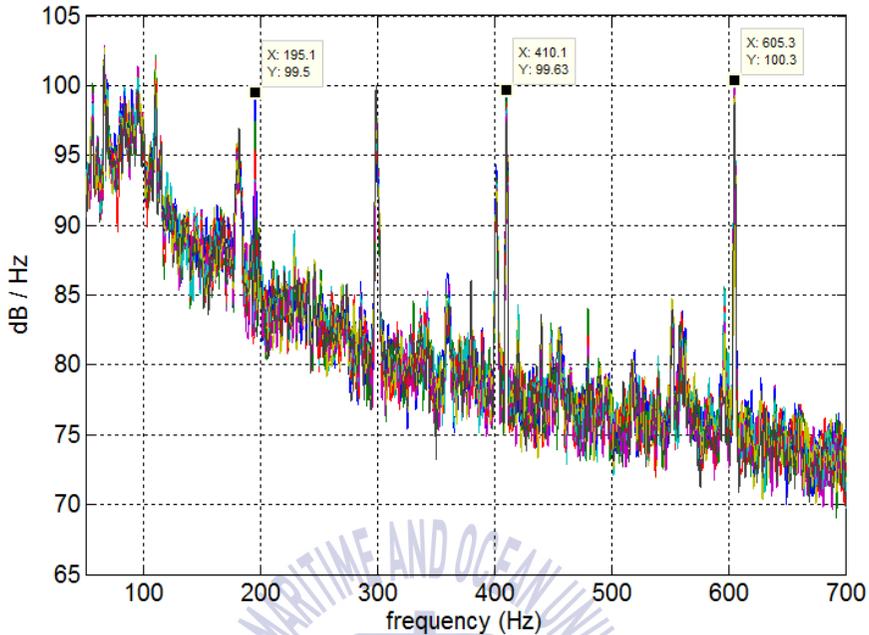


그림 4.5 CW 신호의 power spectral density

그림 4.5는 window size는 2^{12} 에 대한 Welch's method로 계산하였으며, 21개의 모든 배열센서에 대하여 CW 신호의 power spectral density를 중첩하여 도식화 하였다. 그림 4.5에서 주파수 변화에 따라 power가 높은 tonal 성분의 신호들이 확인된다. 이에 대하여 CW의 주파수인 195, 410, 605 Hz에 표시하였고, CW가 제대로 수신되는 것을 확인하였다. 표시된 CW의 주파수 외에 다른 tonal 성분은 소음이므로, 수신된 소음을 분석하였다. 수평 선 배열센서에 수신된 소음은 그림 4.6과 같다.

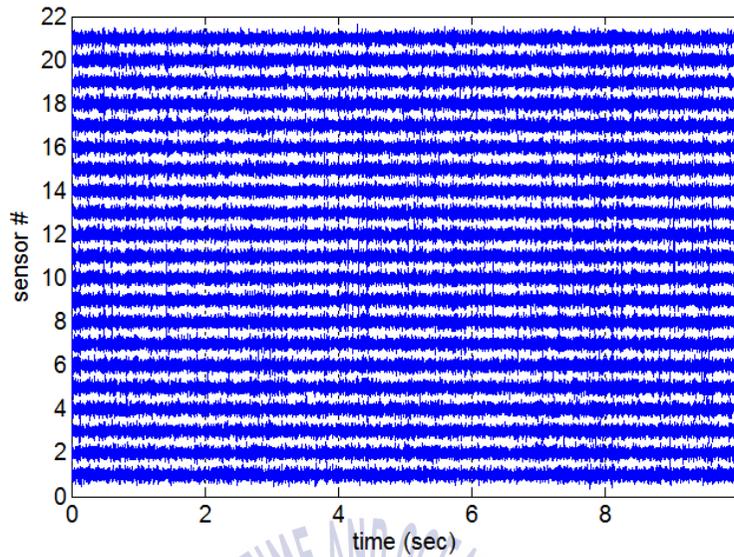


그림 4.6 수평 선 배열센서에 수신된 소음

그림 4.6은 수평 선 배열센서의 각 센서에서 수신된 소음에 대한 시간 영역이다. 이와 같이 수신된 소음을 Welch's method를 이용하여 power spectral density를 계산하면 그림 4.7과 같다.

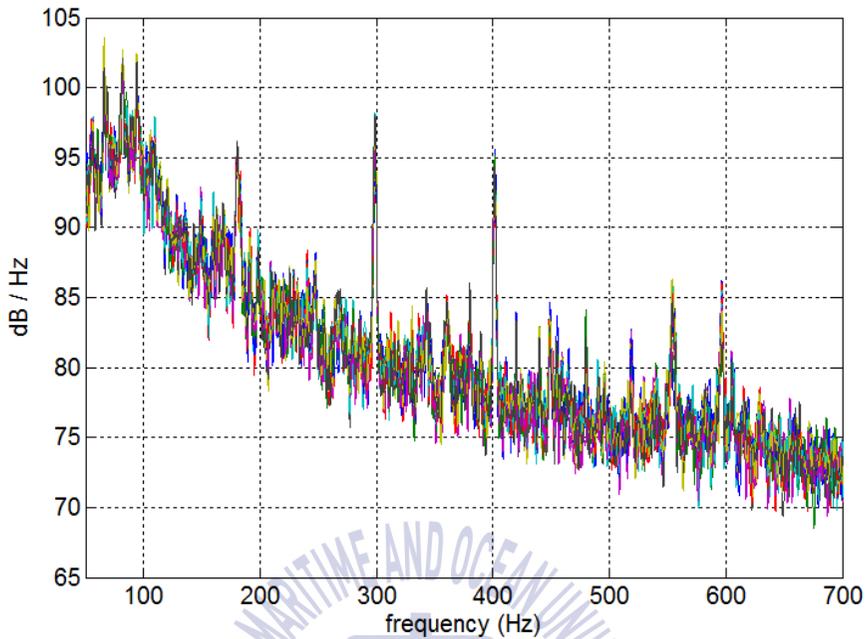


그림 4.7 소음의 power spectral density

그림 4.5는 window size는 2^{12} 에 대한 Welch's method로 계산하였으며, 21개의 모든 배열센서에 대하여 소음의 power spectral density를 중첩하여 도식화 하였다. 그림 4.5의 CW 신호에 대한 power spectral density에서 확인된 195, 410, 605 Hz 외에 tonal 성분이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 신호 및 소음을 분리하였고, power spectral density를 계산하여 SNR에 의한 배열이득을 도출해야 한다.

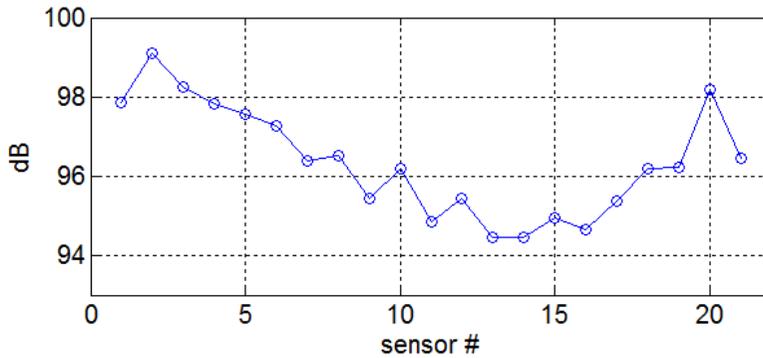


그림 4.8 CW 신호의 410 Hz에 대한 센서별 파워

그림 4.8은 CW 신호의 410 Hz에 대한 센서별 파워이다. 이상적인 환경에서 모델링을 수행한 경우와 달리 실제 해양환경에서는 센서마다 수신되는 신호의 파워가 일정하지 않다. 대표적인 예로 실험에 사용된 배열센서와 같이 센서의 길이가 길어지게 되면, 음원과 각 센서에 대한 공간적인 차이에 의해 전달특성이 달라지면서 발생하는 waveguide invariant가 있을 것이다. 또한 내부파(internal wave)가 발생하는 경우 음압 및 음속의 변화에 의한 영향도 있을 것이다.

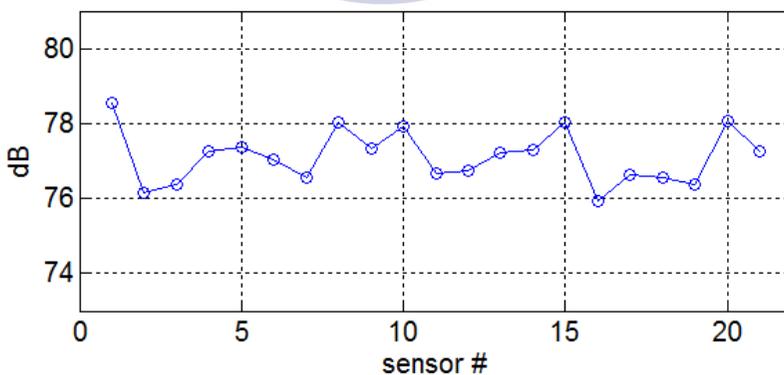


그림 4.9 소음의 410 Hz에 대한 센서별 파워

소음에 대한 410 Hz의 센서별 파워를 그림 4.9와 같이 도식화하면 그림 4.8의 CW 신호보다 변동 폭이 작지만 센서마다 파워가 다른 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 배열의 각 센서에서 수신되는 신호 및 소음의 크기가 달라지는 경우 개별센서에 대한 SNR이 모두 달라질 것이다. 그러므로 각 센서에 대한 압력의 크기를 평균하여 SNR을 계산해야 하며, 식(4.1)과 같이 계산할 수 있다.

$$SNR_{\text{single}} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N 10^{P_{s_i} / 20}}{\sum_{i=1}^N 10^{P_{n_i} / 20}} \right) \quad (4.1)$$

식(4.1)에서 N 은 센서의 수, P_{s_i} 는 센서에 대한 신호의 파워, P_{n_i} 는 센서에 대한 소음의 파워이다. 파워는 압력(pressure)의 제곱에 비례하므로 신호 파워의 데시벨(decibel) 값인 P_s 를 $10^{P_s/20}$ 에 의해 압력 크기로 변환 후 합하면 된다. 신호 및 소음의 센서별 압력 크기 합에 대한 비에 $20 \log_{10}$ 로 계산해주면 개별센서에 대한 SNR이 된다.

배열센서에 대한 SNR은 배열센서를 신호가 수신되는 방향으로 빔 조향하여 conventional beam-forming(CBF)를 수행하고, 이에 대한 신호 및 소음의 파워의 비를 계산함으로써 도출할 수 있다. 이를 위해 그림 4.10과 같이 수신 신호의 수평각에 대한 power output을 계산하였다.

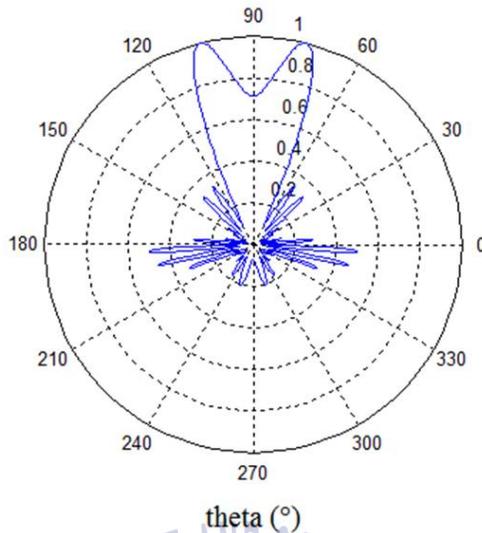


그림 4.10 신호의 수평방위에 대한
power output ($\phi = 0^\circ$, normalized)

그림 4.10은 수평 선 배열센서가 그림 3.24와 같이 배치되어 있는 경우 수평각에 대한 power output이다. power output을 계산하기 위하여 전체 신호에 대하여 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM(Cross Spectral Density Matrix)을 수행하여 적용하였고, 정규화하여 나타내었다. 수평각 약 77° 와 103° 에서 강한 신호가 수신되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 90° 는 배열센서의 endfire이고, 그림 2.2의 좌표계에서 y축 양의 방향이다. 이에 대하여 빔 조향하는 경우에 대한 신호의 power spectral density는 그림 4.11과 같다.

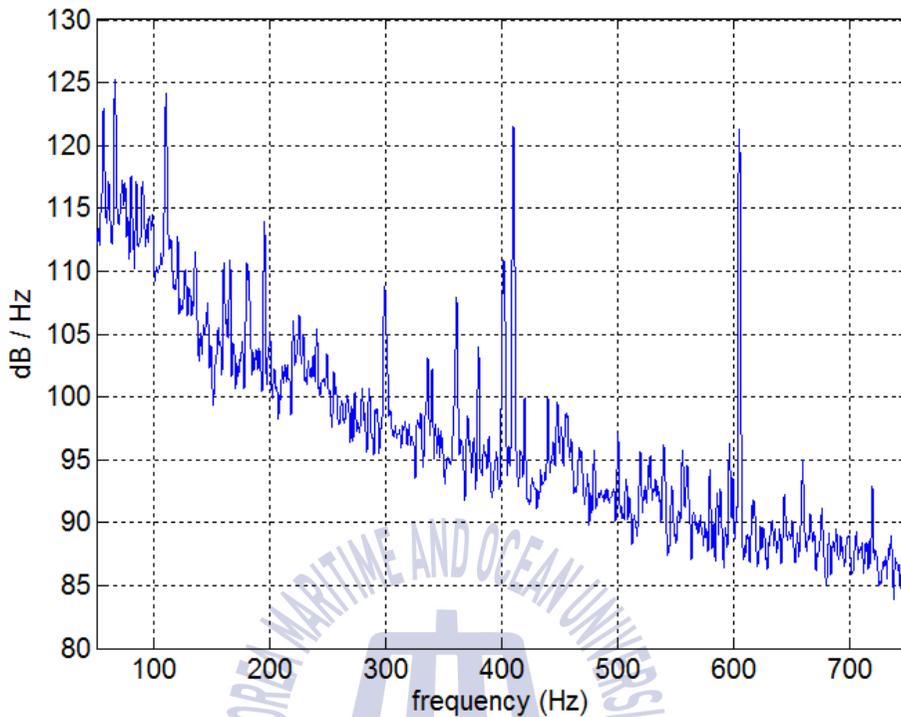


그림 4.11 CW 신호의 빔 조향에 의한 power spectral density

그림 4.11은 CW 신호를 수신 방위로 빔 조향하고, window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 power spectral density를 계산하였다. 이에 대하여 그림 4.5보다 신호의 파워가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 동일하게 계산한 소음의 power spectral density는 그림 4.12와 같다.

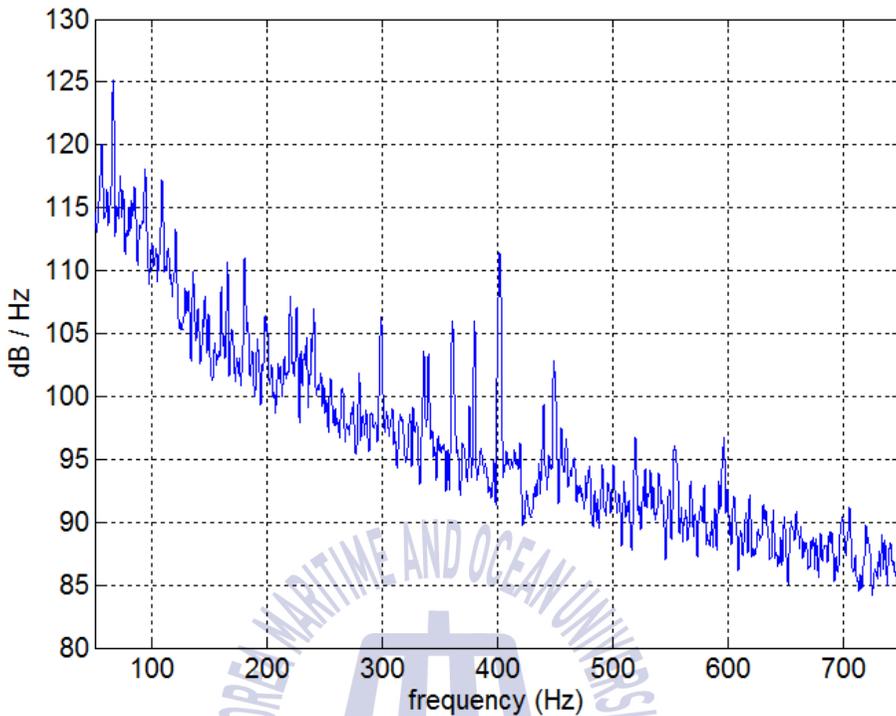


그림 4.12 소음의 빔 조향에 의한 power spectral density

이와 같이 신호 및 소음에 대한 power spectral density의 비를 계산함으로써 배열센서의 SNR을 도출할 수 있다. 최종적으로 배열센서의 SNR과 개별센서의 SNR로부터 신호의 배열이득을 계산할 수 있다.

해양 실험이 수행되는 환경에서 spatial coherence를 계산하기 위하여 소음의 방향성 소음을 계산해야 한다. 이를 위해 수신된 소음에 대하여 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였으며, 계산된 power output을 그림 4.13과 같이 도식화하였다.

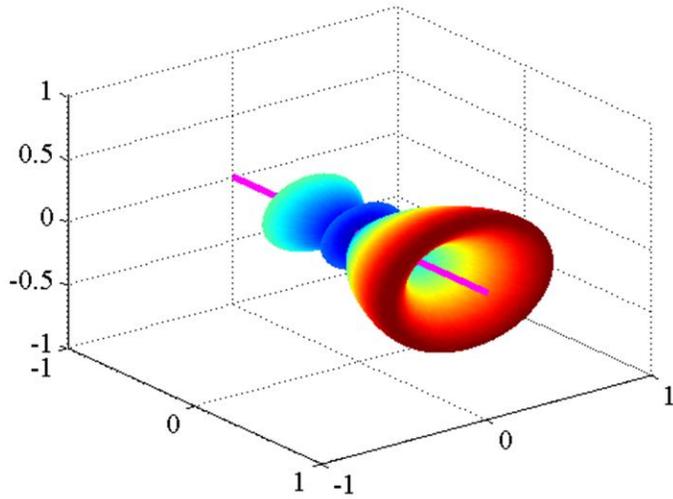


그림 4.13 소음의 구형 좌표계의 power output (normalized)

그림 4.13은 소음의 구형 좌표계에 대한 power output을 정규화한 것이다. 이를 이용하여 spatial coherence를 계산하면 그림 4.14가 된다.

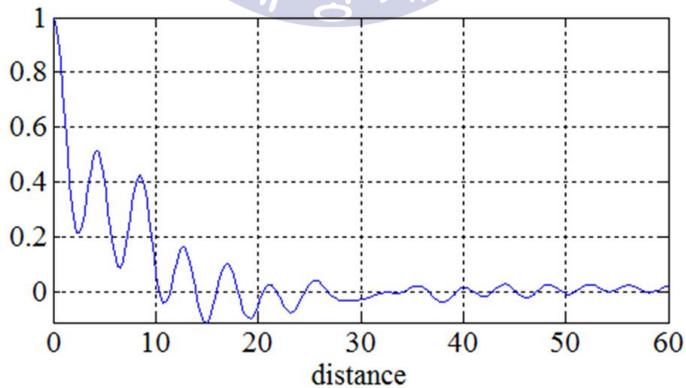


그림 4.14 방향성 소음에 대한 spatial coherence

그림 4.14와 같이 소음에 대한 spatial coherence를 이용하여 배열이득을 도출할 수 있다.



4.3 실험 데이터에 대한 배열이득

SNR에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득을 CW 신호의 주파수인 195, 410, 605 Hz에 대하여 계산하였고, 비교 분석을 수행하였다.

4.3.1 CW 주파수 195 Hz에 대한 배열이득

그림 4.2와 같이 실험선이 이동하며 15회의 CW를 송신하고, 수평 선 배열센서에서 수신하였다. 수신된 CW 신호의 195 Hz에서 센서에 대한 파워를 그림 4.15와같이 도식화하였다. 여기서 데이터 결과 분석에 대한 설명을 편리하게 하기 위하여 10초의 CW 신호를 수신하고, 20초 동안 소음만 측정하는 것 즉, 30초를 하나의 이벤트로 명명한다.

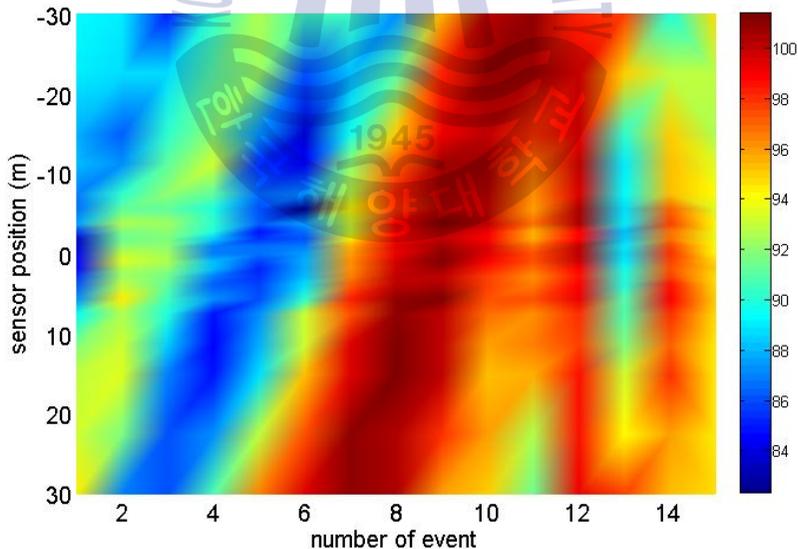


그림 4.15 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (195 Hz)

그림 4.15는 CW를 수신한 이벤트 및 센서 위치에 대한 파워이다. 여기

서 센서의 위치는 그림 3.24와 같이 nested line array의 y축과 동일하다. 실험선이 조류에 의해 이동되면서 30초 간격으로 10초 길이에 대한 CW를 15회 송신하였고, 수신하는 신호마다 window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 센서마다 파워를 계산하였다. 그림 4.15에서 신호가 수신되는 경우 센서마다 신호의 파워가 다른 것을 확인할 수 있다. 이에 대하여 수신 이벤트로 도식화 하면 특정 패턴이 발생하는 것이 확인된다. 파워의 강하고 약함이 이벤트 및 센서마다 연속적으로 달라지는데, 이러한 패턴이 발생하는 완벽한 이유를 분석하지 못하였다. 하지만 실험선이 이동되면서 신호가 송신되는 위치가 달라지며 waveguide invariant가 발생하는 것으로 추측된다. 그리고 CW를 12번째 이벤트의 시점부터 실험선의 기동을 위해 엔진을 가동하였기 때문에 패턴과 다르게 센서 전체로 파워가 강해지는 것을 확인할 수 있다. 이를 그림 4.16과 같이 3차원으로 나타낼 수 있다.

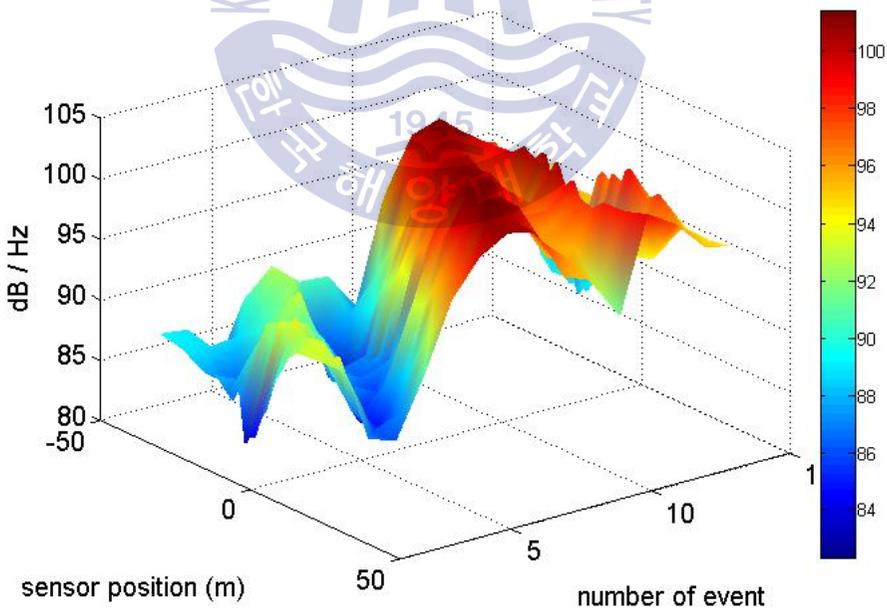


그림 4.16 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 195 Hz)

그림 4.16은 그림 4.15의 형태를 확인하기 쉽게 3차원으로 나타낸 것이다. 이와 같이 신호의 전체적인 파워 크기가 다르지만 특정 패턴이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수평 방위에 대한 파워를 계산하여 이벤트마다 도식화하면 그림 4.17과 같다.

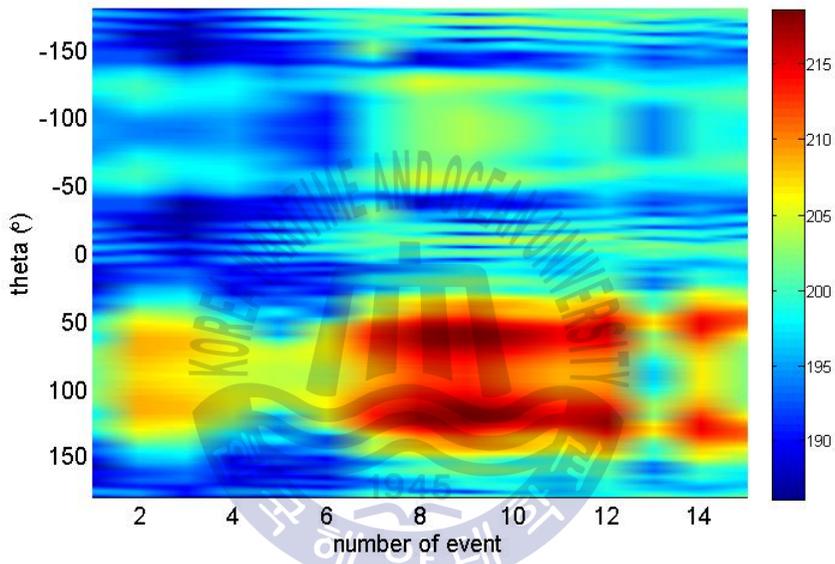


그림 4.17 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (195 Hz)

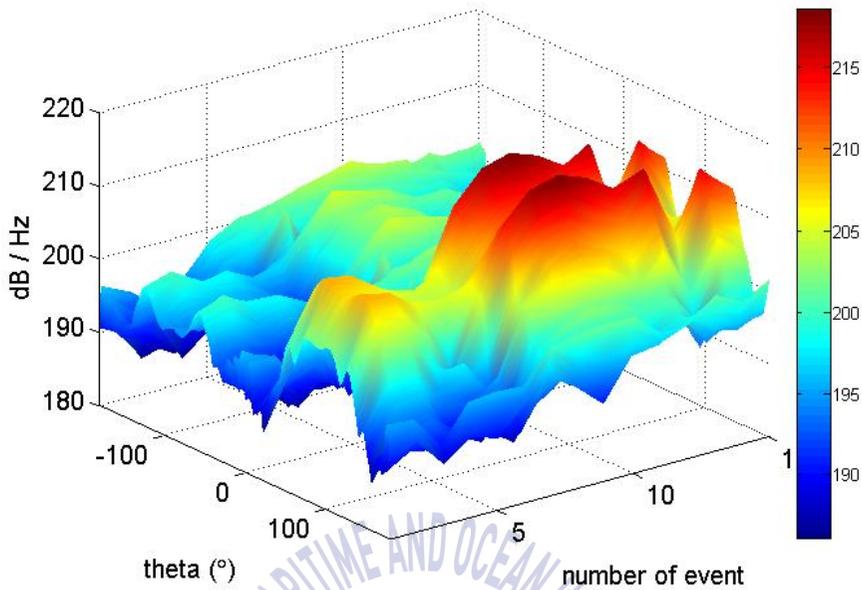


그림 4.18 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 195 Hz)

그림 4.17을 그림 4.18과 같이 3차원으로 나타내었다. 선 배열센서가 수평으로 설치되어 있고, power output이 센서 축을 중심으로 대칭이기 때문에 수직 방위각 0° 의 수평 방위에서만 도식화하였다. 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였고, 방위에 대한 power output을 계산하였다. 그림 4.2와 같이 실험선이 선 배열센서의 end fire 방향에서 broadside 쪽으로 이동하기 때문에 각 이벤트에서 수평 방위에 대한 파워의 가장 높은 지점이 유사한 형태로 변하는 것을 확인할 수 있다.

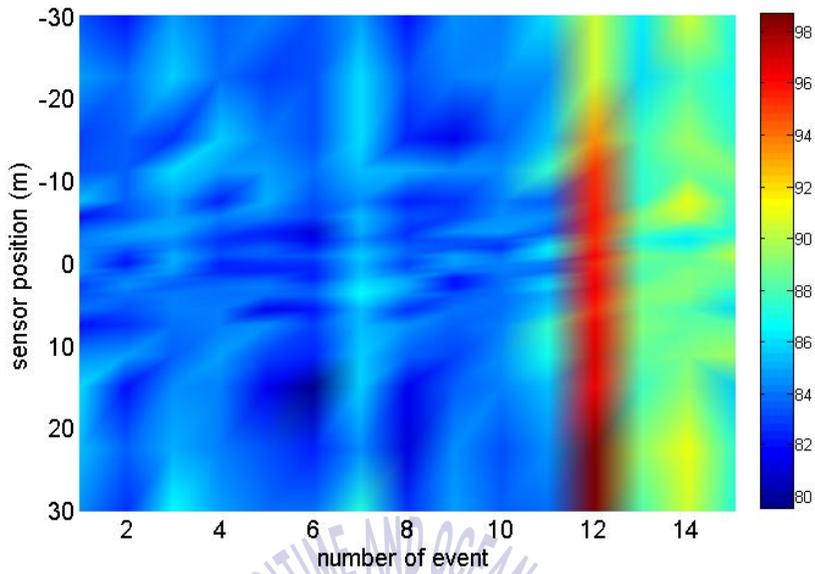


그림 4.19 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (195 Hz)

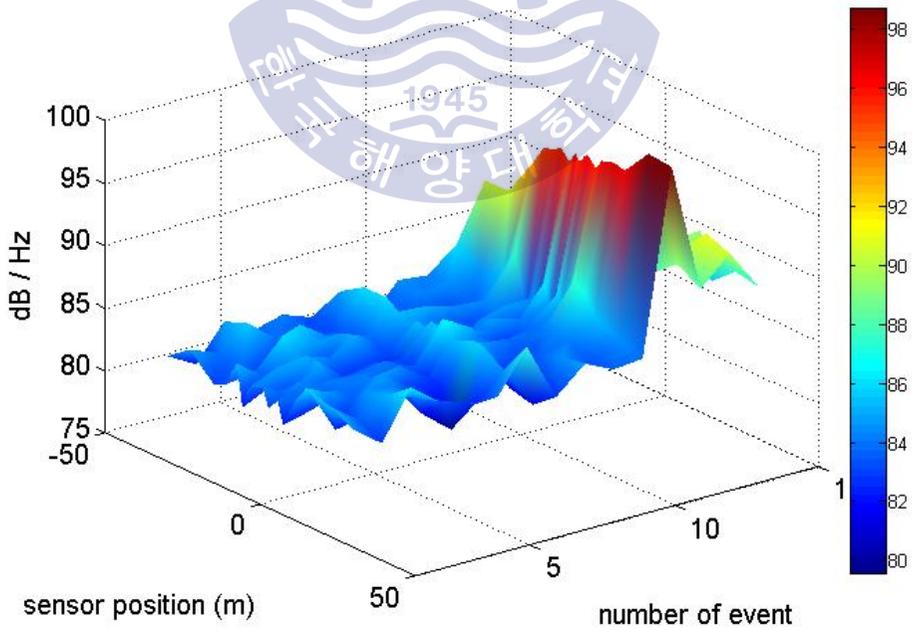


그림 4.20 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 195 Hz)

그림 4.19와 4.20은 소음 측정 이벤트에 대하여 센서 위치에 대한 파워를 도식화한 것이다. CW 신호와 동일하게 Welch's method를 통해 계산하였다. CW 신호와 달리 소음의 파워에 대하여 특정 패턴이 발생하지 않고, 전체적으로 약 84 ~ 88 dB의 임의적인 분포가 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 실험선의 엔진을 가동시키는 12번째 이벤트에서는 강한 소음이 수신되는 것을 확인할 수 있다.

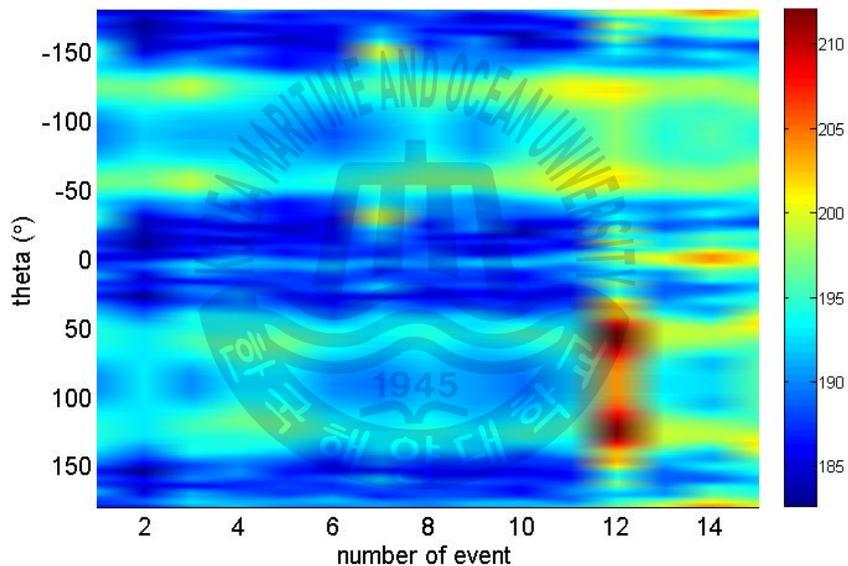


그림 4.21 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (195 Hz)

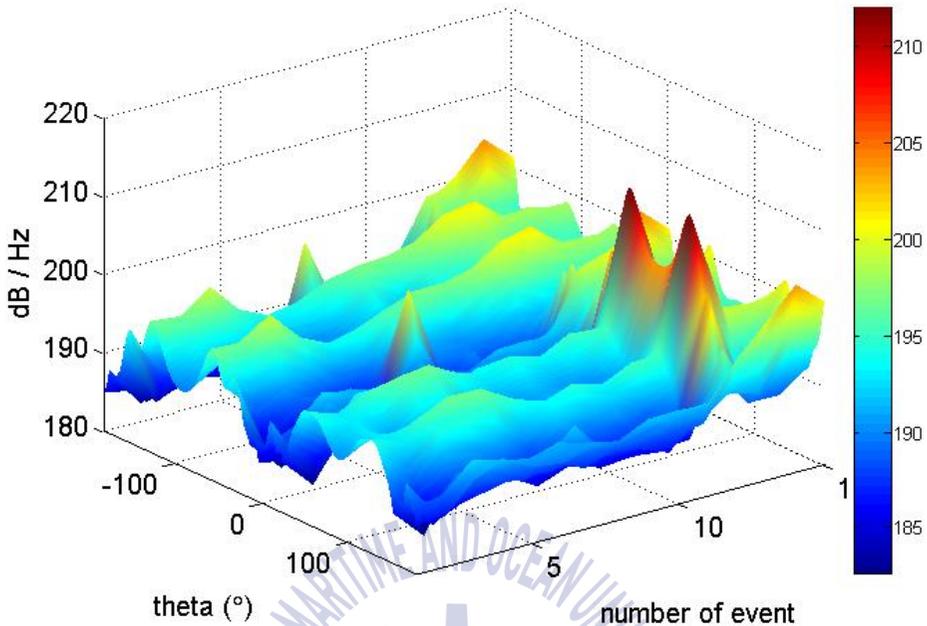


그림 4.22 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 195 Hz)

그림 4.21과 4.22는 소음 측정 이벤트 및 수평 방위에 대한 파워이다. 전체적인 파워의 준위가 비슷하지만 CW 신호가 수신되는 방위에 대한 파워 크기가 비교적 높은 이유는 다중 경로(multi path)에 의해 CW 신호가 매우 늦게 수신되거나, 실험선의 엔진을 완벽하게 끄지 않았기 때문에 발생하는 미약한 방사소음 때문인 것으로 추측된다. 다중경로의 경우 이전 이벤트에 대한 CW가 수신되고 10초 뒤에 소음을 측정하였기 때문에 영향이 매우 미약할 것으로 생각된다.

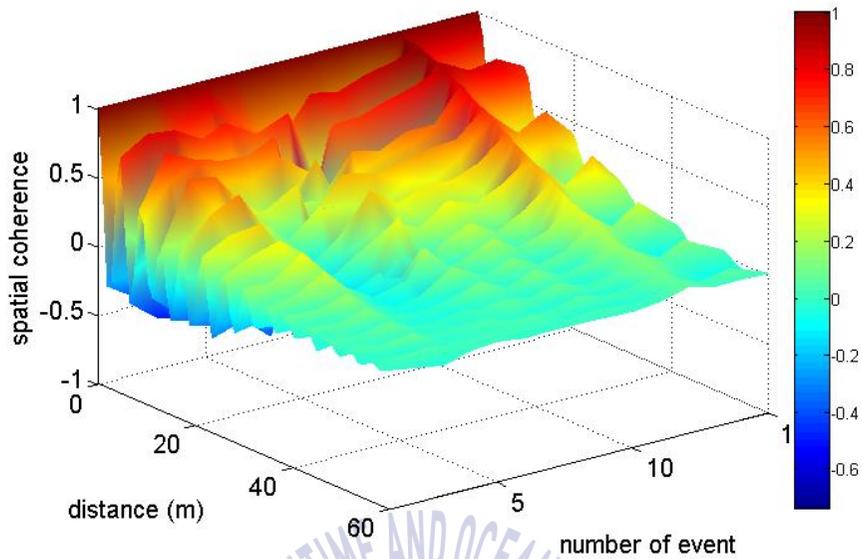


그림 4.23 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (195 Hz)

그림 4.23은 이벤트마다 소음의 방위에 대한 파워를 적용하여 계산한 spatial coherence이다. 거리가 멀어지면서 spatial coherence가 0에 수렴하고, 이벤트마다 소음의 방위에 대한 형태가 달라지기 때문에 spatial coherence가 모두 동일하지 않음을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 배열 이득을 계산하고, 앞서 계산한 파워 준위에 의한 배열이득을 그림 4.24와 같이 도식화하였다.

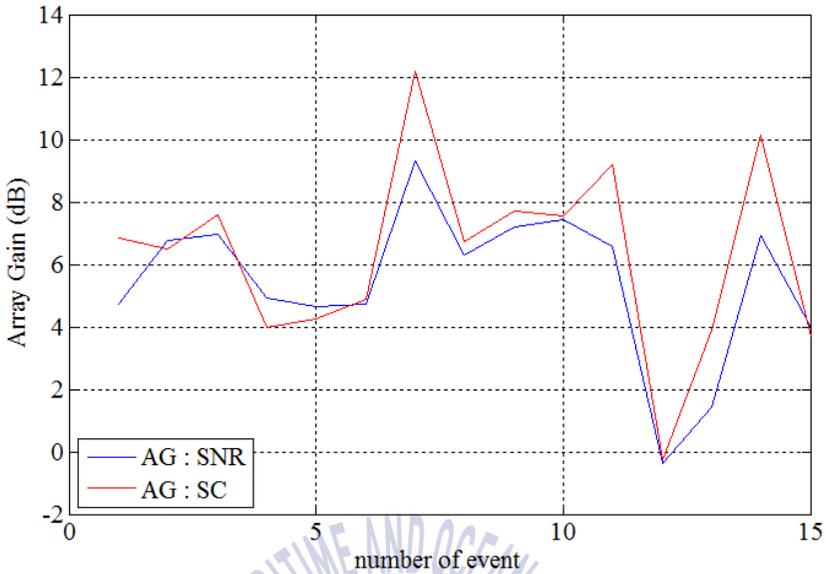


그림 4.24 이벤트에 대한 배열이득 (195 Hz)

그림 4.24에서 푸른색 실선은 SNR에 의한 배열이득이고, 붉은색 실선은 spatial coherence에 의한 배열이득이다. 이벤트마다 배열이득이 완벽하게 일치하지는 않지만 전체적으로 오차의 범위가 3dB 이내로 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 그림 4.21 및 그림 4.22에서 이벤트마다 소음의 방향성이 조금씩 변화하게 되는데 그에 따른 배열이득이 역시 달라지는 것을 확인할 수 있다. 7번째 이벤트에서 방위에 따른 소음의 세기가 기존과 다른 형태로 수신되고, 이에 따라 배열이득 역시 증가하게 하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 실험선을 기동하기 위하여 12번째 이벤트에서 프로펠러를 가동하게 되는데 이에 따라 음원과 동일한 방향에서 소음이 수신되어지므로, 배열이득 역시 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

4.3.2 CW 주파수 410 Hz에 대한 배열이득

CW 신호의 195 Hz와 동일하게 410 Hz에서도 데이터를 분석하고 배열 이득을 계산하였다. CW 신호의 410 Hz에서 이벤트 및 센서의 위치에 대한 파워를 그림 4.25와 그림 4.26과 같이 도식화하였다.

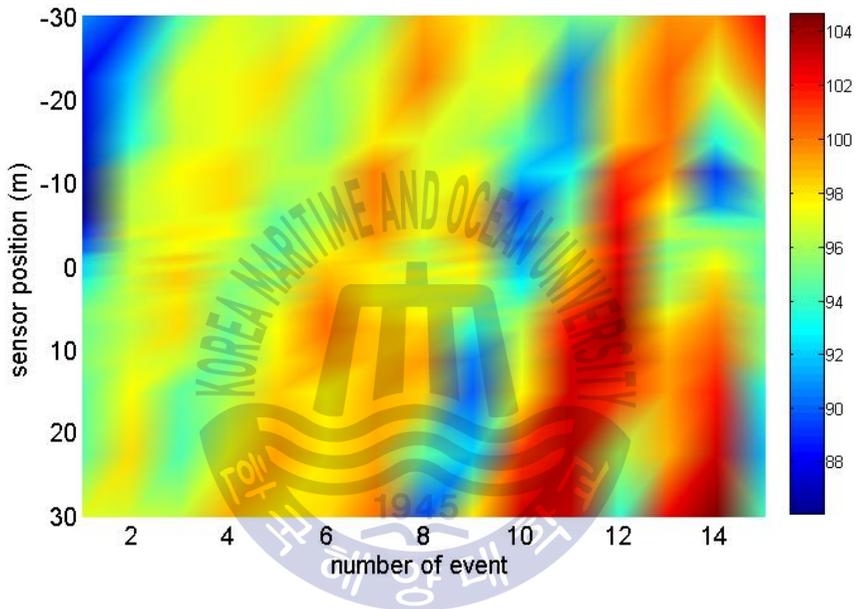


그림 4.25 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (410 Hz)

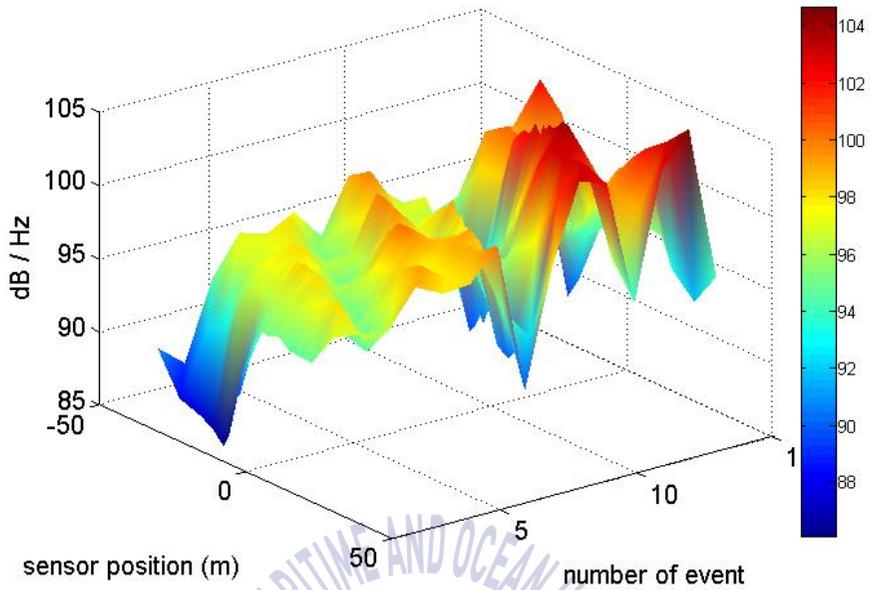


그림 4.26 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 410 Hz)

그림 4.25, 그림 4.26과 같이 window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 센서마다 파워를 계산하였다. 이 역시 195 Hz의 경우와 유사하게 특정 패턴이 발생하는 것을 확인하였다. 195 Hz의 패턴과 다른 점은 파워의 크기가 변동하는 폭이 비교적 좁아진 것을 알 수 있다. 이 역시 waveguide invariant의 영향으로 나타나는 패턴으로 보인다. 그리고 실험선의 기동에 의해 12번째 이후의 이벤트에서 패턴의 형태와 다른 강한 파워가 수신되는 것을 확인할 수 있다.

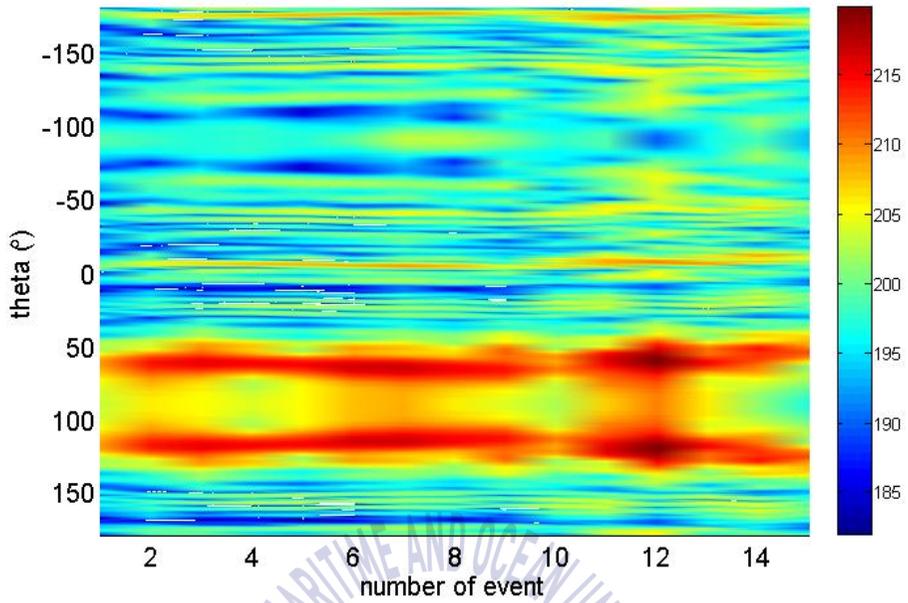


그림 4.27 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (410 Hz)

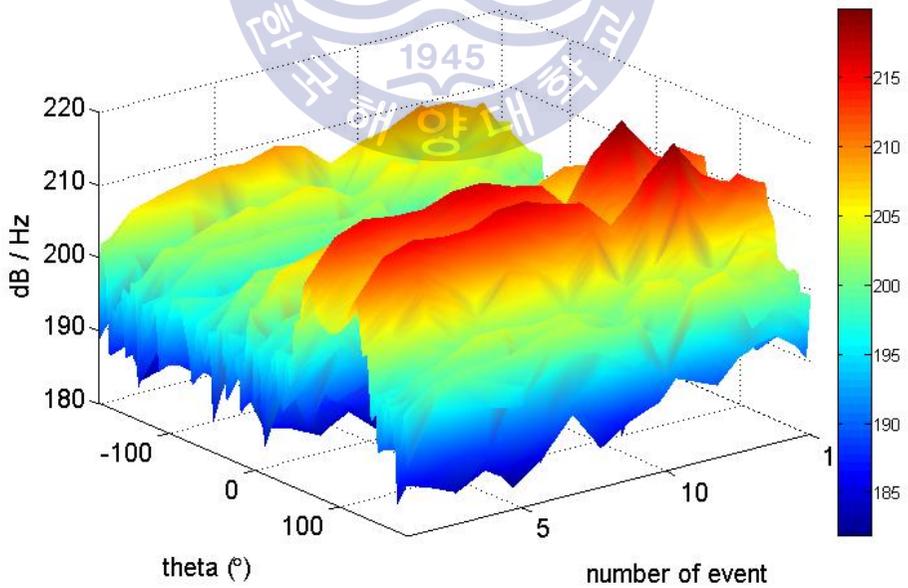


그림 4.28 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 410 Hz)

그림 4.27과 4.28은 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호의 power output이다. 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였고, 방위에 대한 power output을 계산하였다. 195 Hz와 동일하게 실험선의 방위에서 강한 신호가 수신되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 195 Hz에 비해 빔 폭이 비교적 작아진 것을 확인할 수 있다.

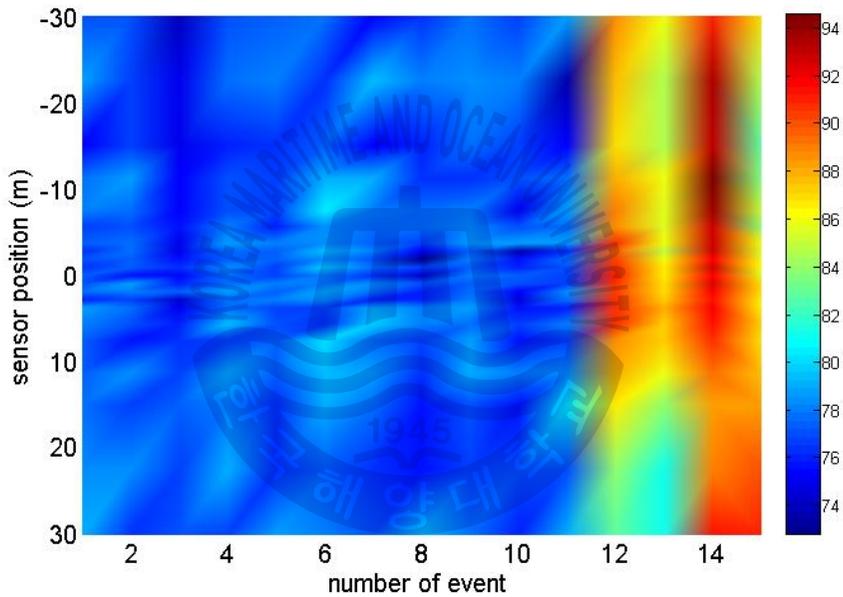


그림 4.29 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (410 Hz)

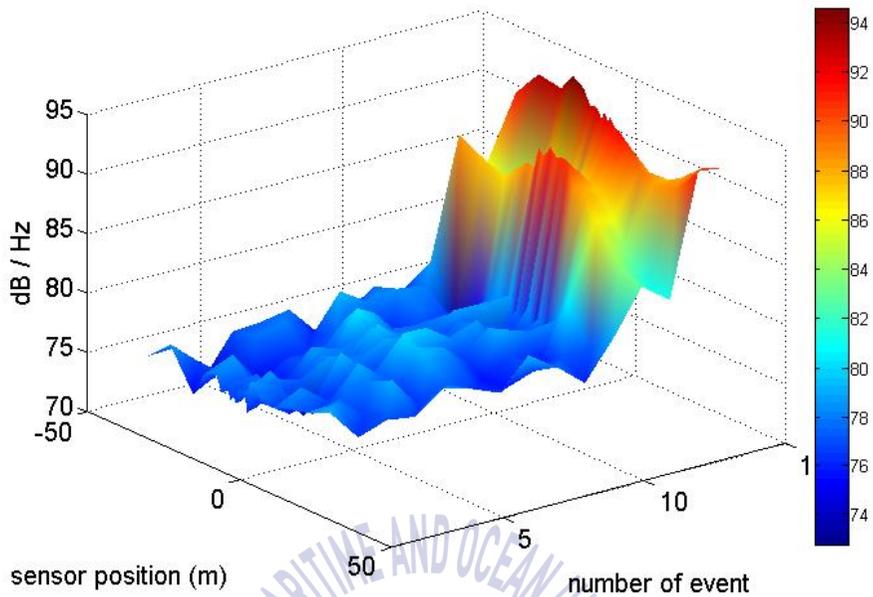


그림 4.30 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 410 Hz)

그림 4.29, 그림 4.30과 같이 소음을 window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 센서마다 파워를 계산하였다. 195 Hz와 동일하게 특정 패턴이 발생하지 않고, 전체적으로 약 78 ~ 80 dB의 임의적인 분포가 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 실험선의 엔진을 가동시키는 12번째 이후의 이벤트에서는 강한 소음이 수신되는 것을 확인할 수 있다.

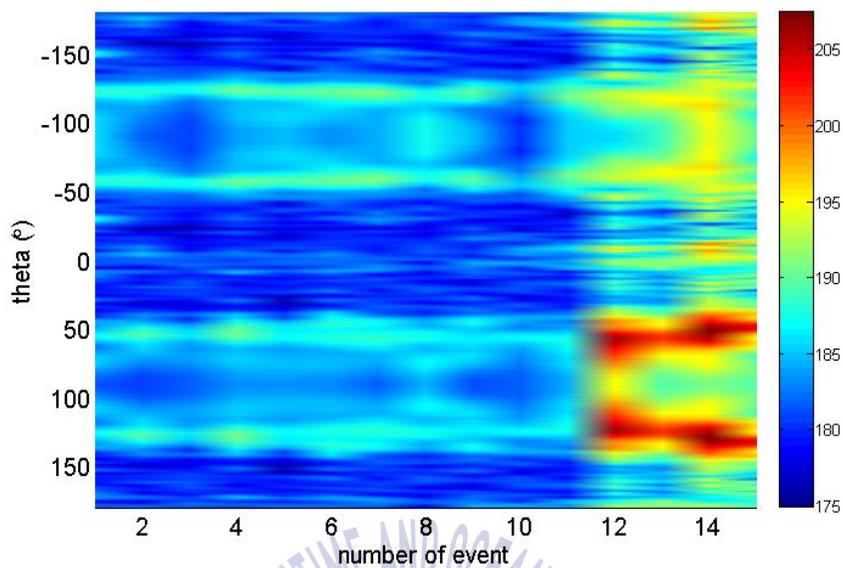


그림 4.31 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (410 Hz)

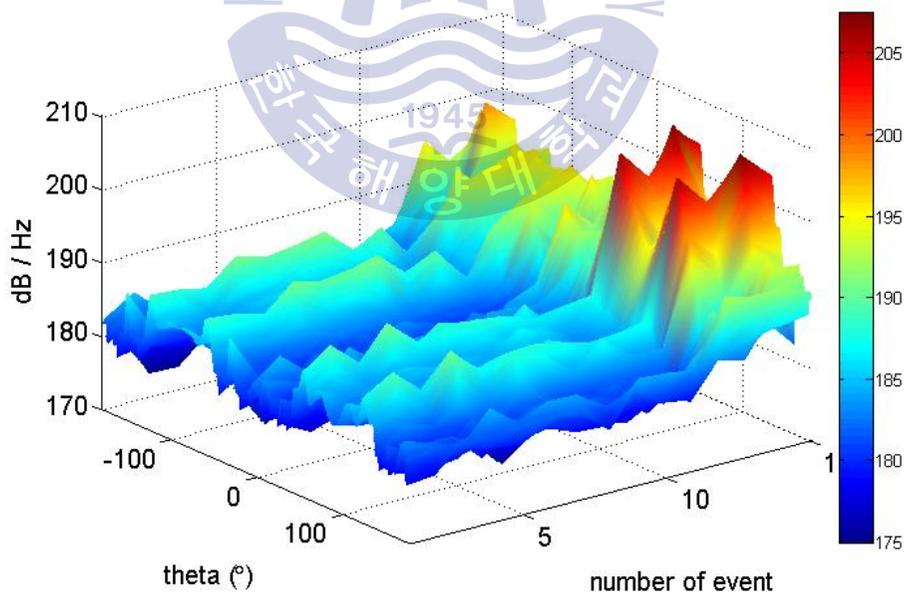


그림 4.32 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 410 Hz)

그림 4.31과 4.32는 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호의 power output이다. 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였고, 방위에 대한 power output을 계산하였다. 실험선의 엔진을 가동 중이기 때문에 이에 대한 방위에서 비교적 강한 소음이 수신되고, 실험선을 기동하는 12번째 이후의 이벤트에서 강한 소음이 수신되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 소음의 방향성을 적용하여 그림 4.33과 같이 이벤트에 따른 spatial coherence를 계산하였다.

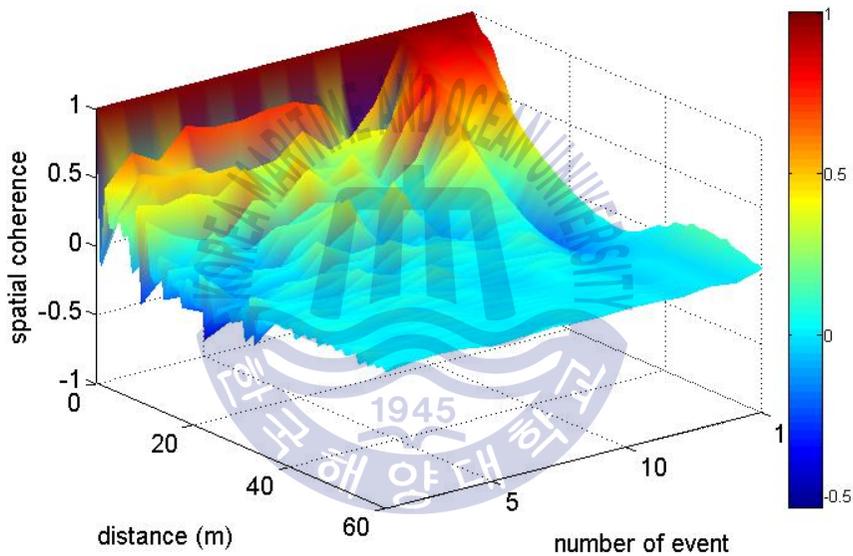


그림 4.33 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (410 Hz)

그림 4.33의 spatial coherence를 이용하여 그림 4.34와 같이 배열이득을 계산하였다.

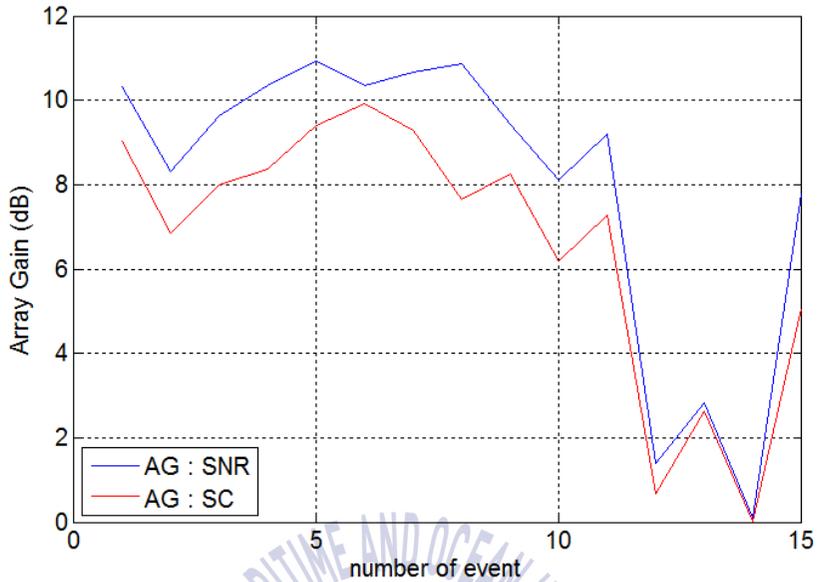


그림 4.34 이벤트에 대한 배열이득 (410 Hz)

그림 4.34에서 푸른색 실선은 SNR에 대한 배열이득, 붉은색 실선은 spatial coherence에 의한 배열이득이다. 약 3 dB 이내의 오차를 가지며 전체적인 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 오차가 발생하는 이유는 waveguide invariant의 영향으로 인해 센서마다 다른 세기의 신호가 수신되어지는데, 이에 대해 single sensor의 신호 파워 평균을 계산하며 발생하는 오차로 생각되어진다. 그림 4.25와 같이 동일한 이벤트에서도 배열센서마다 수신되는 신호의 세기가 경우에 따라 약 10 dB 이상 차이가 발생하여 식(4.1)로 계산한 결과의 오차가 발생할 수도 있다. 또한 그림 4.5에서 CW 신호의 주파수 410 Hz 외에 주파수 400 Hz에서도 강한 소음이 수신되어지는데 이에 대한 영향도 고려되어진다. 이에 따라 waveguide invariant 등과 같이 추가적인 해양환경을 고려하여 배열이득을 계산하는 연구가 수행되어야 할 것이다. 주파수 195 Hz의 경우와 마찬가지로 실험선을 기동하는 12번째 이벤트에서는 배열이득이 현저히 낮아지는 것을 확인하였다.

4.3.3 CW 주파수 605 Hz에 대한 배열이득

605 Hz에 대하여 데이터를 분석하고 배열이득을 계산하였다. 605 Hz에서 CW 신호의 이벤트 및 센서의 위치에 대한 파워를 그림 4.25와 그림 4.26과 같이 도식화하였다.

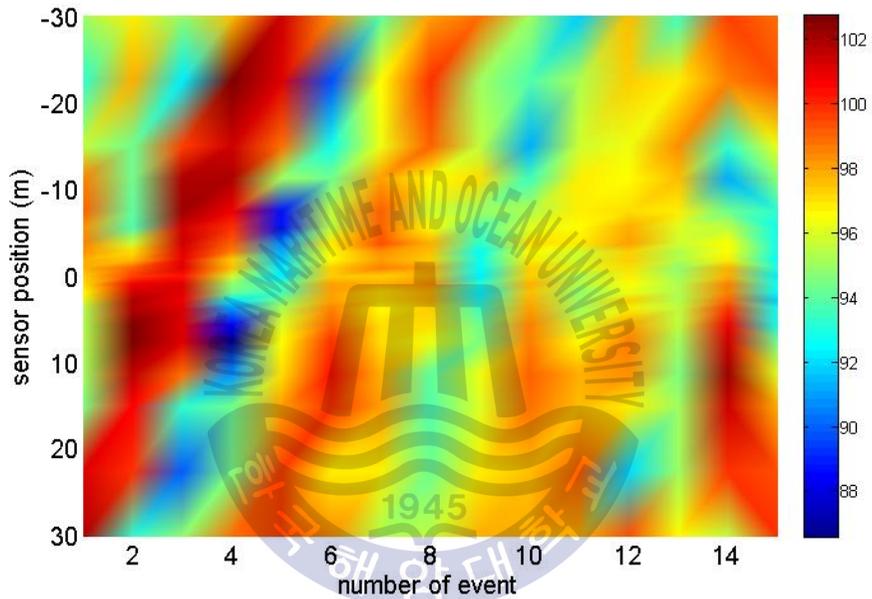


그림 4.35 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (605 Hz)

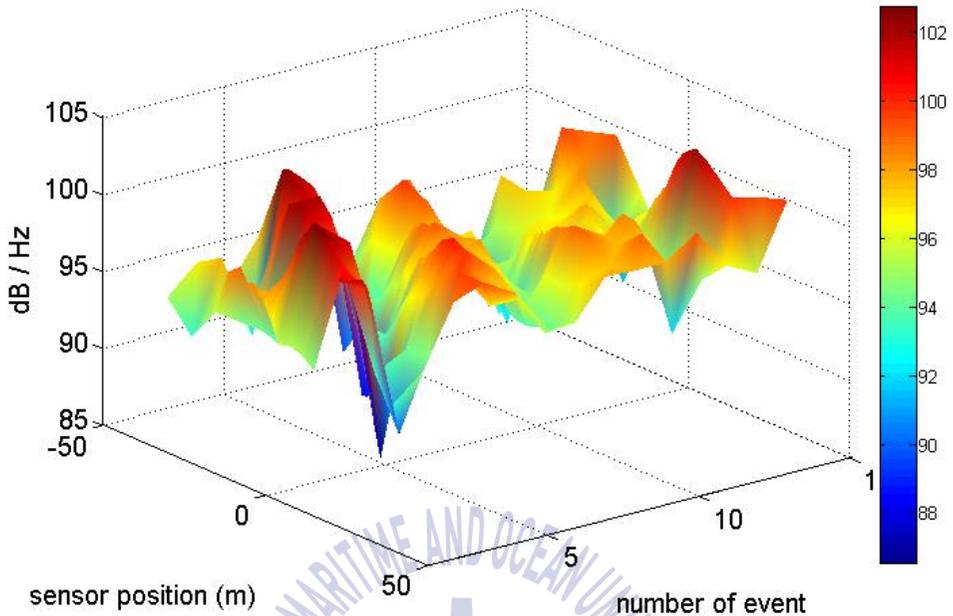


그림 4.36 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (3차원, 605 Hz)

그림 4.35, 그림 4.36과 같이 window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 센서마다 파워를 계산하였다. 이 역시 특정 패턴이 발생하는 것을 확인하였다. 195 Hz와 410 Hz의 패턴에 비해 파워의 크기가 변동하는 폭이 비교적 좁아진 것을 알 수 있다. 그리고 실험선의 기동에 의해 12번째 이후의 이벤트에서 패턴의 형태와 다른 강한 파워가 수신되는 것을 확인할 수 있다.

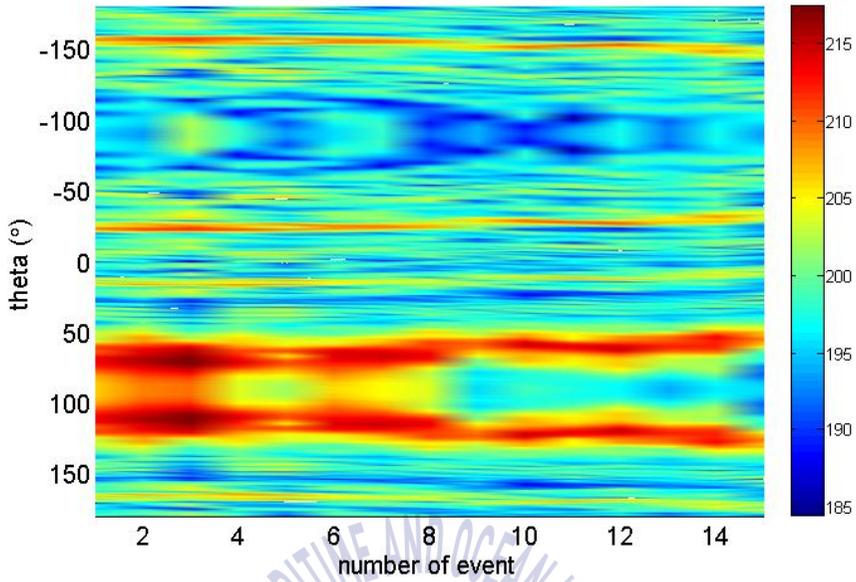


그림 4.37 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (605 Hz)

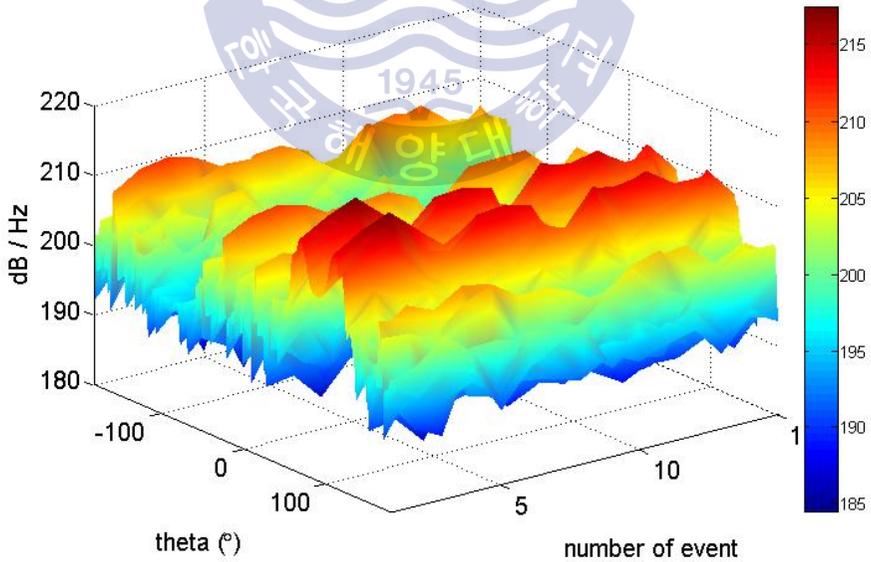


그림 4.38 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호 파워 (3차원, 605 Hz)

그림 4.37과 4.38은 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호의 power output이다. 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였고, 방위에 대한 power output을 계산하였다. 이 역시 실험선의 방위에서 강한 신호가 수신되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 195, 410 Hz에 비해 빔 폭이 비교적 작은 것을 확인할 수 있다.

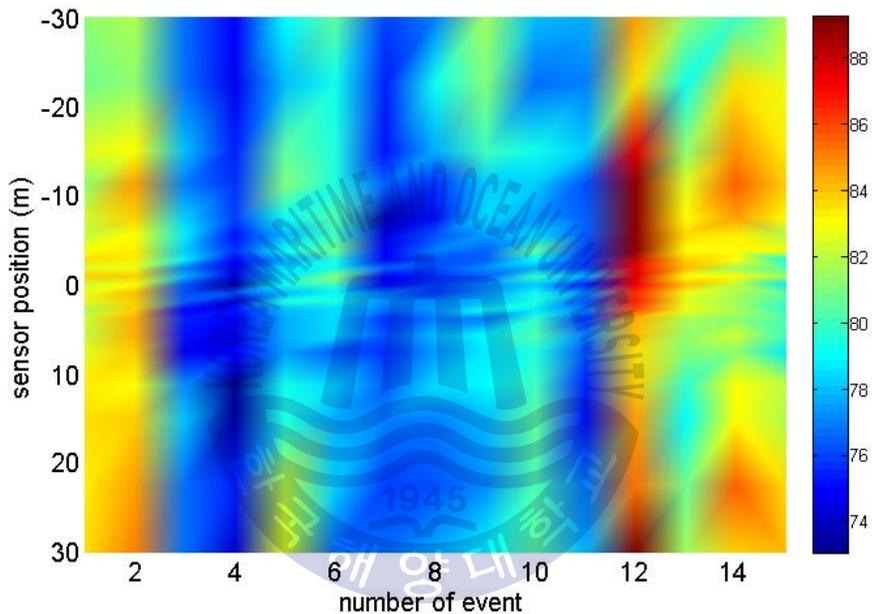


그림 4.39 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (605 Hz)

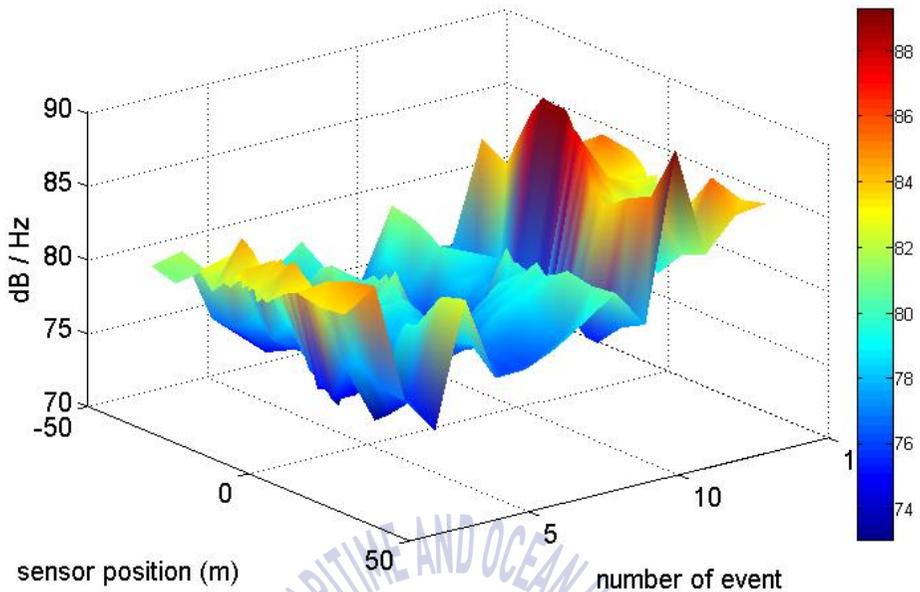


그림 4.40 이벤트 및 센서 위치에 대한 소음 파워 (3차원, 605 Hz)

그림 4.39, 그림 4.40과 같이 소음을 window size 2^{12} 에 대한 Welch's method를 적용하여 센서마다 파워를 계산하였다. 195, 410 Hz와 달리 1번째 이벤트에서 비교적 강한 소음이 수신되고, 전체적으로 약 76 ~ 83 dB의 임의적인 분포가 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 실험선의 엔진을 가동시키는 12번째 이후의 이벤트에서는 강한 소음이 수신되는 것을 확인할 수 있다.

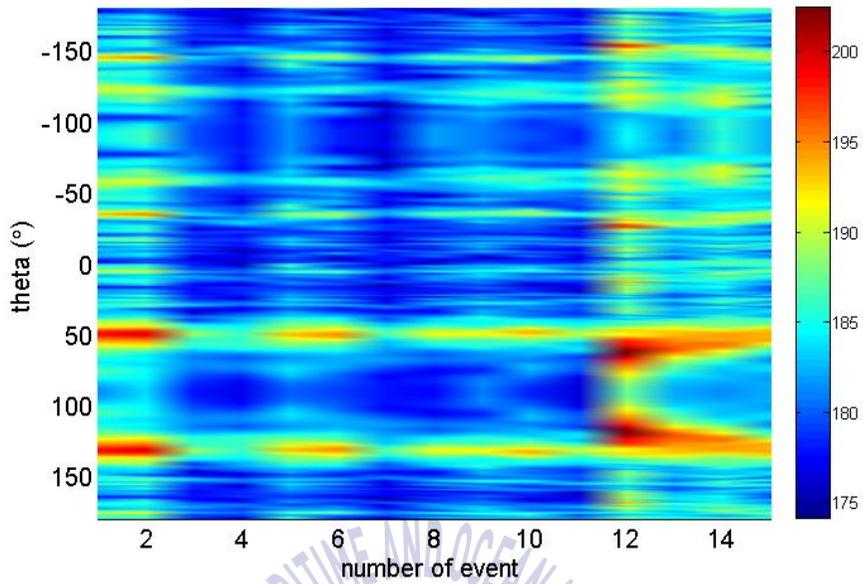


그림 4.41 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (605 Hz)

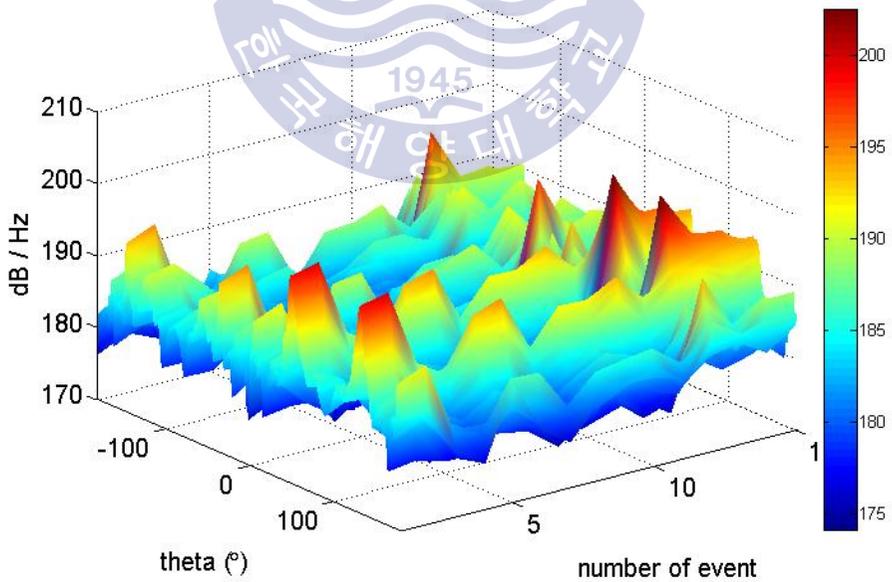


그림 4.42 이벤트 및 수평 방위에 대한 소음 파워 (3차원, 605 Hz)

그림 4.41과 4.42는 이벤트 및 수평 방위에 대한 신호의 power output이다. 샘플 간격 2^{12} 마다 CSDM을 수행하였고, 방위에 대한 power output을 계산하였다. 실험선의 방위에 대하여 비교적 강한 소음이 수신되고, 실험선을 기동하는 12번째 이후의 이벤트에서 강한 소음이 수신되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 소음의 방향성을 적용하여 그림 4.43과 같이 이벤트에 따른 spatial coherence를 계산하였다.

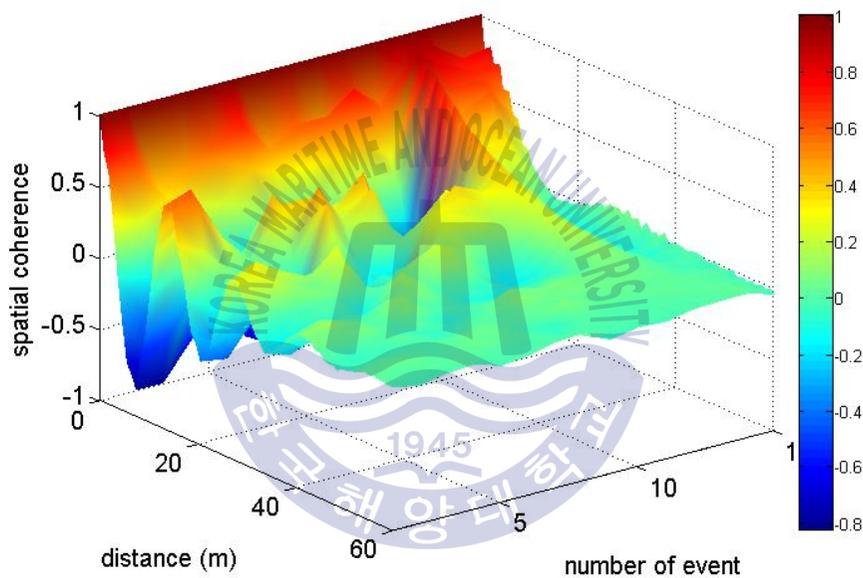


그림 4.43 이벤트 및 센서 위치의 spatial coherence (605 Hz)

그림 4.43의 spatial coherence를 이용하여 그림 4.44와 같이 배열이득을 계산하였다.

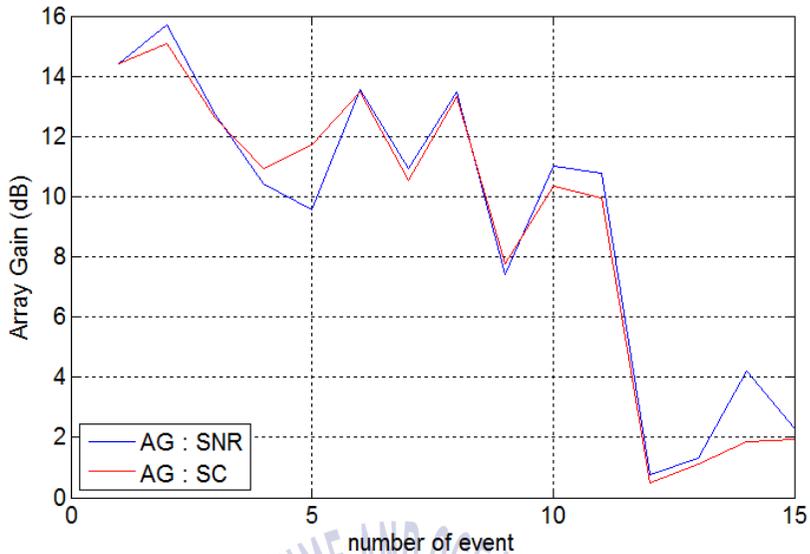


그림 4.44 이벤트에 대한 배열이득 (605 Hz)

그림 4.44에서 푸른색 실선은 SNR에 대한 배열이득, 붉은색 실선은 spatial coherence에 의한 배열이득이다. 약 2 dB 이내의 오차를 가지며 전체적인 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 그림 4.35와 같이 주파수 605 Hz에서도 waveguide invariant의 영향이 발생하는 것으로 확인되지만, 주파수 410 Hz보다 배열이득의 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 추가적인 연구를 통해 이와 같은 이유를 분석해야 할 것이다. 이 역시 실험선을 기동하는 12번째 이벤트에서는 배열이득이 현저히 낮아지는 것을 확인하였다.

해양 실험에 의해 CW의 195, 410, 605 Hz에서 배열이득을 계산하였다. 모델링에 의해 계산된 배열이득의 결과보다 비교적 오차가 존재하지만 전체적인 경향이 유사함을 확인하였다. 이로써 방향성 소음이 발생하는 해양의 소음에서 신호의 수신 방위에 대한 배열이득의 추정이 가능함을 확인하였다. 그리고 실제 해양환경에서 spatial coherence를 계산함에 따라 최적의 배열이득이 도출되는 배열센서를 설계 가능함을 확인하였다. 그렇

지만 오차를 최소화하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 앞서 언급한 waveguide invariant의 영향이 존재한다면, 이를 무시할 수 없을 것이다. 그러므로 배열센서마다 신호의 세기가 다르게 수신되는 것이 waveguide invariant의 영향이 맞는지 검증이 필요하다.

4.4 waveguide invariant

해양에서 수평 선 배열센서에 수신된 신호의 파워가 각 센서마다 다르게 수신되어지고, 식(4.1)을 이용하여 개별센서의 파워를 계산하였다. 하지만 식(4.1)과 같이 계산한 개별센서의 파워를 완벽하게 개별센서의 파워라고 할 수 없을 것이다. 이로 인해 배열이득의 결과에 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 각 센서마다 수신되는 신호의 파워가 다른 것이 waveguide invariant의 영향인지 명백히 짚고 넘어가야 할 것이다.

waveguide invariant의 영향을 검증하기 위하여 실험결과와 동일한 환경에서 수행한 음향모델의 결과를 비교하였다. 그림 4.15와 같이 195 Hz에서 이벤트 및 센서의 위치에 따라 신호의 파워가 다르게 수신된 것을 음향모델을 통해 검증을 수행하였다. 사용된 음향모델은 RAM(Range-dependent Acoustic Model)을 사용하였다. 결과의 비교를 용이하게 하기 위하여 그림 4.15를 그림 4.45와 같이 정규화하여 나타내었다. 그리고 color bar의 범위를 -20 ~ 0 dB로 지정하였다.

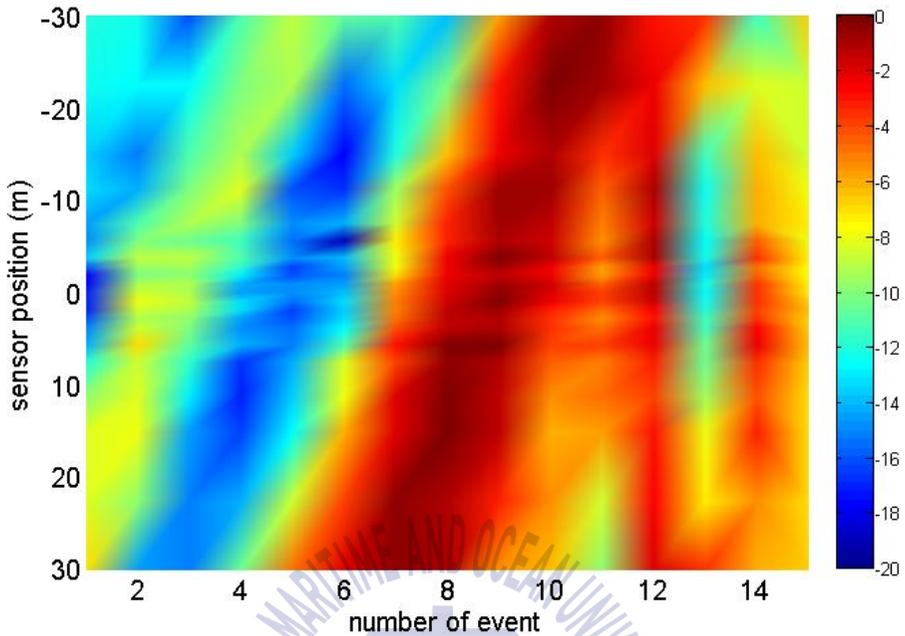


그림 4.45 정규화된 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워 (195 Hz)

그림 4.45와 같이 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호의 파워 패턴을 음향모델로 나타내기 위하여 RAM을 통해 그림 4.46과 같이 해양환경에 대한 음파 전달 환경을 계산하였다. 여기서 해저의 수심은 100 m이고, 음원의 수심은 40.8 m, 단위거리 1 m, 단위수심 0.2 m에 대하여 계산하였다. 그리고 그림 4.1과 동일한 음속분포를 적용하였다.

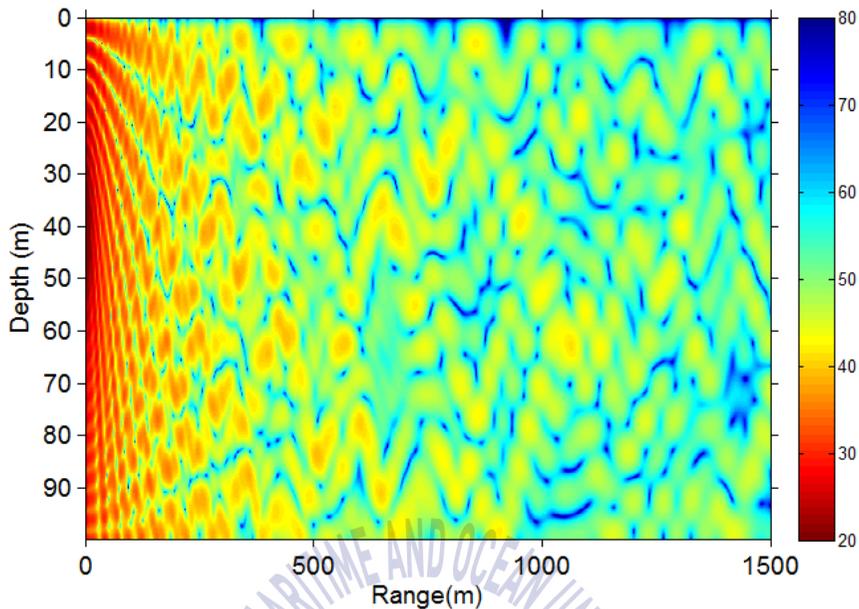


그림 4.46 실험을 수행한 해양의 음파 전달 환경
(주파수 : 195 Hz, 음향모델 : RAM)

그림 4.46의 음파 전달 환경은 음원 위치(거리 : 0 m, 수심 : 40.8 m)를 기준으로 전달손실을 나타낸 것이다. 전달손실이 붉은색에 가까워질수록 작아지고, 푸른색에 가까워질수록 커지게 된다. 이에 대하여 그림 4.2와 같이 신호가 송신되는 음원의 위치와 각 수신센서의 위치에 대한 거리를 계산하고, 그림 4.46의 음파 전달 환경에서 거리에 따른 전달손실을 계산하였다. 전달손실은 음파가 나아가며 음향 파워가 손실되는 것이므로, 그림 4.45와 비교하기 위하여 계산된 결과를 음수로 변화하여 정규화하였다. 이에 대한 결과를 4.47과 같이 도식화하였다.

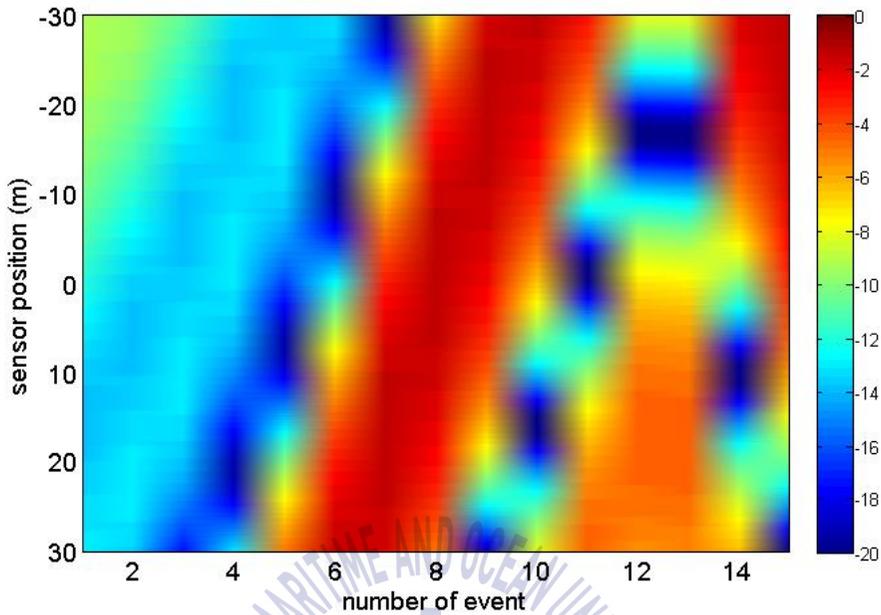


그림 4.47 음향모델에 의해 계산된 이벤트 및 센서 위치에 대한
신호 파워 (주파수 : 195 Hz, 음향모델 : RAM)

그림 4.45와 그림 4.47의 이벤트 및 센서 위치에 대한 신호 파워의 패턴이 유사함을 확인할 수 있다. 이벤트가 달라지는 즉, 음원의 거리가 달라짐에 따라 배열센서에 수신되는 신호 파워의 달라지는 경향이 유사하게 변하게 된다. 그러므로 패턴이 발생하는 것을 waveguide invariant의 영향인 것으로 볼 수 있다. 하지만 실험 결과의 경우 신호와 주변 소음이 함께 수신되어지고, 실험을 수행한 해양의 음속이 각 위치마다 그림 4.1과 조금의 차이가 발생할 수 있다. 더욱이 수평 선 배열센서가 조류의 영향으로 휘어지거나 또는 자세각이 변화할 수 있다. 그러므로 그림 4.45와 그림 4.47에 대한 패턴이 완벽하게 일치하지 않는 것으로 생각된다.

이와 같이 해양에서 각 배열센서에 대한 신호의 수신되는 파워 크기가 달라지므로, 추후에 waveguide invariant를 고려하여 배열이득을 계산하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 소음의 형태에 의한 배열이득을 계산하기 위하여 spatial coherence에 대한 연구를 수행하였다. 우선 배열센서에서 spatial coherence에 의한 배열이득을 계산하는 수식을 정리하였다. 모델링에 의해 생성된 등방성 및 방향성 소음으로부터 배열이득을 계산하였다. 그리고 해양 실험에서 수평 선 배열센서를 이용하여 CW를 수신하고, 측정된 소음에 대한 spatial coherence를 계산하여 배열이득을 도출하였다.

두 개의 센서로부터 cross-correlation function 및 cross-spectral density function의 관계를 정리하고, 3차원으로 확장하여 방위에 대하여 확장하였다. 이에 대하여 space-time correlation function으로부터 시지연이 0이 되는 즉, 시간을 고정시킨 경우의 실수부를 spatial coherence 라고 한다. space-time correlation function을 고려함에 따라 방향성 세기를 고려할 수 있게 된다. 그리고 신호 및 소음에 대한 spatial coherence를 계산하고, 배열이득을 도출하는 과정을 수식적으로 정리하였다. 이를 통해 최종적으로 방향성 소음에 의한 배열이득을 계산할 수 있다.

소음의 형태에 대한 배열이득을 계산하기 위하여 신호 및 소음을 생성하는 모델링을 수행하였다. 신호는 특정 방위에서 정현파가 배열센서에 수신되도록 하였고, 소음의 경우 자유공간에서 음원의 분포를 임의적으로 배치하고 음원마다 임의적인 신호를 생성하여 배열센서에 수신하여 생성하였다. 등방성 소음의 경우 배열이득은 지향지수와 동일하기 때문에 이를 이용하여 균등간격 센서 및 비 균등간격 센서에 대하여 spatial coherence에 의한 배열이득과 SNR에 의한 배열이득을 비교 검증을 수행하였다. 방향성 소음은 등방성 소음과 달리 배열이득과 지향지수는 달라

진다. 이에 따라 [Burdic(1983)]과 같이 균등간격 센서에 대한 수식적인 배열이득이 존재하는 경우의 방향성 소음을 생성하여 방위에 대한 배열이득의 변화를 계산하였다. 소음의 세기가 강한 방향으로 빔 조향을 수행하는 경우 배열이득이 비교적 낮아지고, 소음의 세기가 약한 방향으로 빔 조향하게 되면 배열이득이 비교적 높아지는 것을 확인하였다. 방향성 소음의 환경에서 비 균등간격 센서에 대한 배열이득은 예측하기 쉽지 않다. 그러므로 비 균등간격 센서에 대하여 방향성 소음을 생성하고, spatial coherence에 의한 배열이득과 SNR에 의한 배열이득을 비교하여 검증을 수행하였다.

이상적인 환경인 자유공간에서 모델링을 수행한 결과와 달리 실제 해양에서는 다양한 환경이 존재하기 때문에 배열이득이 실제와 달라질 수 있다. 이에 대한 배열이득을 계산하기 위하여 해양에 수신센서인 nested line array로 구성된 수평 선 배열센서를 배치하고, 실험선에서 저주파 음원을 이용하여 10초 길이에 대한 195, 410, 605 Hz의 CW 신호를 30초 간격으로 송신하였다. 그러므로 CW 신호 이전의 10초 동안 수신된 것을 소음, CW 신호의 10초 동안을 수신 신호로 하여 데이터를 분석하였다. 우선 Welch's method를 이용하여 power spectral density를 계산하였고, 이로부터 SNR에 대한 배열이득을 계산하였다. 그리고 방위에 따른 신호 및 소음의 세기를 계산하고, 신호의 수신 방위로 빔 조향한 경우에 대하여 소음의 방향성 크기를 이용하여 spatial coherence를 도출하였다. 이에 따라 SNR에 의한 배열이득과 spatial coherence에 의한 배열이득을 비교하였고, 약 3 dB 오차 이내로 적체적인 경향이 유사함을 확인하였다.

선진국에서는 spatial coherence에 대한 다양한 연구가 이루어졌고, 등방성 및 방향성 소음에서 spatial coherence를 계산하는 모델링이 수행되어졌다. 하지만 spatial coherence를 이용하여 실제 해양환경에서 배열이득을 계산하고 분석한 사례는 찾기 쉽지 않다.

본 논문에서는 모델링과 실험을 통해 spatial coherence에 의한 배열이

득을 계산하였고, 방향성 소음 및 빔 조향 방위에 대하여 배열센서에 따른 배열이득의 추정이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 실제 해양의 방향성 소음 환경에서 배열센서의 성능을 예측할 수 있고, 또한 spatial coherence를 이용하여 최적의 배열성능이 도출될 수 있는 배열센서를 설계할 수 있을 것이다.

앞으로 모델링과 달리 최대 3 dB의 실험적 오차가 발생하는 점에 있어서 그에 대한 원인을 분석해야 할 것이다. 오차의 원인으로 waveguide invariant 외에 내부파, 수괴의 분포에 의한 음속 변화, 조류 등 환경적인 요인과 측정 시스템에 대한 요인 등 다양하다. 그러므로 이를 고려하여 오차를 최소화 할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.



참고문헌

- 박지성, 최용화, 김재수, 강돈혁, 조성호, 박정수, "방향성 소음 환경에서 배열이득 변동 연구," 제 30회 수중음향학 학술대회 발표논문집, pp. 395-397, 2015.
- 박지성, 최용화, 정동환, 김재수, 강돈혁, 조성호, "방향성 소음 환경에서 선 배열 성능 평가," 2015년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp. 39, 2015.
- 최용화, 박지성, 김재수, 강돈혁, 조성호, 박정수, "등방성 소음환경에서 배열형상에 따른 배열이득 연구," 제 30회 수중음향학 학술대회 발표논문집, pp. 36-37, 2015.
- C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications," IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION, Vol. 4, pp. 351-354, 2005.
- E. Habets, "Generating Sensor Signals in Isotropic Noise Fields," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 122(6), pp. 3464-3470, 2007.
- E. Habets, "Generating Nonstationary Multisensor Signals Under a Spatial Coherence Constraint," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124(5), pp. 2911-2917, 2008.
- H. Cox, "Spatial Correlation in Arbitrary Noise Fields with Application to Ambient Sea Noise," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 54(5), pp. 1289-1301, 1973.

- D. R. Jackson and K. Y. Moravan, "Horizontal Spatial Coherence of Ocean Reverberation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 75(2), pp. 428-436, 1984.
- J. S. Kim, "Underwater Acoustics and Sonar Engineering," Lecture Note, 2005.
- M. J. Buckingham and N. M. Carbone, "Source Depth and the Spatial Coherence of Ambient Noise in the Ocean," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102(5), pp. 2637-2644, 1997.
- P. W. Smith, Jr., "Spatial Coherence in Multipath or Multimodal Channels," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 60(2), pp. 1260-1266, 1976.
- R. J. Nielsen, "Array Gain, Correlation Coefficients, and Patch Size," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61(1), pp. 60-64, 1977.
- R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound, 3rd edition," McGraw-Hill Book company, 1983.
- R. S. Sloboda and M. A. Manness, "Spatial Coherence in Semicircular Noise Fields," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74(4), pp. 305-310, 1983.
- W. S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- S. C. Walker, "A Model for Spatial Coherence from Directive Ambient Noise in Attenuating, Dispersive Medias," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 130(1), pp. EL 15-21, 2012.
- S. C. Walker, "A Model for the Spatial Coherence of Arbitrarily Directive Noise in the Depth-Stratified Ocean," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 131(5), pp. EL 388-394, 2012.
- S. C. Walker, "Spatial Coherence and Cross Correlation of Three-dimensional Ambient Noise Fields in the Ocean," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 131(2), pp. 1079-1086, 2012.

T. Usher, "Space-Time Correlation in Isotropic Noise Fields," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp. 1885, 1963.

W. S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis," Prentice Hall, 1984.

W. A. Kuperman and F. Ingenito, "Spatial Correlation of Surface Generated Noise in a Stratified Ocean," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 67, pp. 1988-1996, 1980.

