



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

# 육상수조에서의 파라메트릭 어레이를 이용한 저주파수 신호 특성 측정 실험

Measurement experiment of low-frequency characteristic using  
parametric array in acoustic tank



지도교수 김재수

2020년 08월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

송지영

본 논문을 송지영의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 고 병 준 (인)

위 원 공학박사 김 기 만 (인)

위 원 공학박사 김 재 수 (인)

2020년 06월 30일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	IV
List of Figures .....	V
Abstract .....	IX
1. 서 론 .....	1
1.1 연구의 목적 .....	1
1.2 연구 동향 및 논문 구성 .....	2
2. 배경이론 .....	3
2.1 PA 기본원리와 비선형 현상 .....	3
2.2 육상수조의 음향환경 .....	5
3. 실험구성 .....	8
3.1 실험환경 .....	8
3.2 육상수조의 장점 - 신호의 일관성 .....	11
3.3 송신신호 .....	13
3.4 실험 목적 및 실험절차 .....	15
3.4.1 차주파수 측정 실험 .....	15
3.4.2 송신신호 길이 변화 실험 .....	16
3.4.3 송신신호 입력전압 변화 실험 .....	16
3.4.4 빔패턴 측정 실험 .....	17

3.4.5 송·수신기 간 거리변화 실험 .....	17
<b>4. 실험결과 .....</b>	<b>19</b>
4.1 차주파수 신호 측정 실험결과 .....	19
4.2 송신신호 길이 변화 실험결과 .....	21
4.3 송신신호 입력전압 변화 실험결과 .....	24
4.4 빔패턴 측정 실험결과 .....	26
4.4.1 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정 .....	26
4.4.2 송신방식 차이에 따른 원주파수 신호의 빔패턴 측정 .....	28
4.4.3 다양한 주파수 범위에서 원주파수 신호의 빔패턴 측정 .....	29
4.4.4 다양한 주파수 범위에서의 차주파수 빔패턴 측정 .....	31
4.5 송·수신기 간 거리변화 실험결과 .....	33
<b>5. 결론 .....</b>	<b>35</b>
5.1 결론 .....	35
5.2 향후 계획 .....	36
<b>참고문헌 .....</b>	<b>38</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>40</b>
<b>A. 4장 실험결과 보충 .....</b>	<b>40</b>
A.1 차주파수 신호 측정 실험결과 .....	40
A.1.1 5kHz 차주파수 신호 측정(거리 1.5m) .....	41
A.1.2 5kHz 차주파수 신호 측정(거리 1.9m) .....	42

A.1.3 10kHz 차주파수 신호 측정(거리 1m) .....	43
A.2 송신신호 길이 변화 실험결과(거리 1.5m) .....	44
A.3 송신신호 입력전압 변화 실험결과(거리 1.5m) .....	45
A.4 빔패턴 측정 실험결과 .....	47
A.4.1 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정(거리 1.5m) .....	47
A.4.2 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정(거리 1.9m) .....	48
A.4.3 송신방식 차이에 따른 원주파수 신호의 빔패턴 측정(205kHz, 195kHz) .....	49
<b>B. 측정시스템 구축 .....</b>	<b>50</b>
B.1 육상 정밀측정용 수조 .....	50
B.2 위치제어용 치구 .....	50
B.3 송·수신기 고정용 치구 .....	55
B.4 전자 계측 장비의 세부 사양 .....	56
B.4.1 송신기, 송신기용 임피던스 매칭 .....	57
B.4.2 PXIe 송신모듈, 데이터 저장모듈 .....	60
B.4.3 송신앰프, 앰프용 임피던스 매칭 .....	61
B.4.4 수신기 .....	63
B.4.5 수신필터 .....	65
B.4.6 오실로스코프 .....	66
<b>C. 송신신호 구성 방법(Bentho 앰프방식) .....</b>	<b>67</b>

## List of Tables

Table. 3.1 전자 계측 장비 사양 .....	10
Table. 4.1 거리(cm)가 두배 늘어날 때의 세기(dB) 변화 .....	34
Table. A.1 1.5m거리에서 5kHz 차주파수 신호 측정결과 .....	41
Table. A.2 1.9m거리에서 5kHz 차주파수 신호 측정결과 .....	42
Table. A.3 1m거리에서 10kHz 차주파수 신호 측정결과 .....	43
Table. B.1 송신기(BII-7544) 사양 .....	58
Table. B.2 송신모듈(PXIe-5433) 사양 .....	60
Table. B.3 데이터 저장모듈(PXIe-5172) 사양 .....	61
Table. B.4 송신앰프(ENI100S04) 사양 .....	62
Table. B.5 임피던스 매칭기(JT-12) 사양 .....	62
Table. B.6 수신기(TC4034) 사양 .....	63
Table. B.7 수신필터(KH-3944) 사양 .....	65
Table. B.8 오실로스코프(RTE-1054) 사양 .....	66

## List of Figures

Fig. 2.1 송신한 두 고주파수 신호에 의해 차주파수 신호가 생성되는 PA의 기본원리 .....	3
Fig. 2.2 위상속도 차에 의한 파형 왜곡 현상[12] .....	4
Fig. 2.3 근거리장과 원거리장의 경계 회절 거리 .....	5
Fig. 2.4 비선형 현상에 의한 육상수조의 음향환경 .....	6
Fig. 3.1 측정시스템 순서도, 빨간색 선과 파란색 선은 각각 송신신호와 수신신호의 흐름을 의미 .....	9
Fig. 3.2 전자 계측 장비 구성도 .....	9
Fig. 3.3 시간 영역에서의 오차 평균값 .....	11
Fig. 3.4 1회 측정한 100개 신호 사이의 상관도 계산 결과 .....	12
Fig. 3.5 송신기 BII-7544 .....	13
Fig. 3.6 송신신호로 사용되는 두 원주파수의 파형 .....	14
Fig. 3.7 제어 S/W 화면 .....	15
Fig. 3.8 차주파수 측정 실험 .....	16
Fig. 3.9 빔패턴 측정 실험 .....	17
Fig. 3.10 거리에 따른 세기 측정 실험 .....	18
Fig. 4.1 5 kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450 kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분 .....	20
Fig. 4.2 송신신호 길이 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호 .....	22
Fig. 4.3 송신신호 길이 변화에 따른 차주파수 성분 세기 변화 .....	26
Fig. 4.4 송신신호 길이 변화에 따른 스펙트럼 결과 .....	26



Fig. 4.5 송신신호 입력전압 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호 .....	24
Fig. 4.6 입력전압 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화 .....	25
Fig. 4.7 입력전압 변화에 따른 스펙트럼 결과 .....	25
Fig. 4.8 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz .....	27
Fig. 4.9 빔폭(-3dB) 측정결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz .....	27
Fig. 4.10 송신방식에 따른 빔패턴 측정 결과, (a),(b) 두 원주파수 신호를 동시에 송신한 방식, (c),(d) 원주파수 신호를 각각 송신한 방식 .....	28
Fig. 4.11 다양한 높은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)203kHz, (c)205kHz, (d)207kHz .....	30
Fig. 4.12 다양한 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과, (a)190kHz, (b)193kHz, (c)195kHz .....	30
Fig. 4.13 다양한 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과, (a)197kHz, (b)198kHz, (c)200kHz, (d)202kHz .....	31
Fig. 4.14 10kHz 차주파수 빔패턴 측정 결과 .....	32
Fig. 4.15 5kHz 차주파수 빔패턴 측정 결과 .....	32
Fig. 4.16 수신기 거리변화에 따른 원주파수와 차주파수의 세기 변화 측정 결과 34	
Fig. 5.1 향후 연구 계획 로드맵 .....	37
Fig. A.1 1.5m 거리에서의 5kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분 .....	41
Fig. A.2 1.9m 거리에서의 5kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분 .....	42
Fig. A.3 1m 거리에서의 10kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450kHz), (d)확대한 차주파수 성분,	

(e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분 .....	43
Fig. A.4 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호	44
Fig. A.5 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화 .....	44
Fig. A.6 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화에 따른 스펙트럼 결과 .....	45
Fig. A.7 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호 .....	45
Fig. A.8 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화 .....	46
Fig. A.9 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화에 따른 스펙트럼 결과 .....	46
Fig. A.10 1.5m 거리에서의 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz	47
Fig. A.11 1.5m 에서의 빔폭(-3dB) 측정결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz	47
Fig. A.12 1.9m 거리에서의 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz	48
Fig. A.13 1.9m 에서의 빔폭(-3dB) 측정결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz	48
Fig. A.14 송신방식에 따른 빔패턴 측정 결과, (a)205kHz, (b)195kHz, (c)205kHz, (d)195kHz .....	48
Fig. B.1 육상 정밀측정 수조 .....	51
Fig. B.2 수조 내 장비 및 구조물 배치도 .....	51
Fig. B.3 수조, 치구 3D 설계도 .....	51
Fig. B.4 수직/회전 방향 제어 치구 .....	52
Fig. B.5 수평 방향 제어 치구 .....	52
Fig. B.6 수평 방향 레일 .....	53
Fig. B.7 음향재료, 음향필터 제어 치구 .....	53
Fig. B.8 송·수신기 제어 치구 .....	54

Fig. B.9 (a)송신기 고정 치구, (b)수신기 고정 치구 .....	55
Fig. B.10 전자 계측 장비 구성도(ENI앰프 방식) .....	56
Fig. B.11 측정시스템이 구현된 모습 .....	57
Fig. B.12 (a)송신기(BII-7544), (b)임피던스 매칭기(BII-6000) .....	57
Fig. B.13 Admittance of Transducer .....	59
Fig. B.14 Impedance of Transducer .....	59
Fig. B.15 Transmitting Voltage Response .....	59
Fig. B.16 송신 모듈(상단 좌측), 데이터 저장 모듈(상단 우측), 모듈 슬롯(하단) 60	
Fig. B.17 (a)송신앰프(ENI100S04), (a)임피던스 매칭기(JT-12) .....	61
Fig. B.18 수신기(TC4034) .....	63
Fig. B.19 Receiving Sensitivity .....	64
Fig. B.20 Electrical Diagram and Outline Dimensions .....	64
Fig. B.21 수신필터(KH-3944) .....	65
Fig. B.22 오실로스코프(RTE-1054) .....	66
Fig. C.1 전자 계측 장비 구성도(Bentho앰프 방식) .....	67
Fig. C.2 (a)고주파수 사각파, (b)신호길이 제어용 사각파, (c)고주파수 사인파	68
Fig. C.3 전압 역류 현상 .....	69

# 육상수조에서의 파라메트릭 어레이를 이용한 저주파수 신호 특성 측정 실험

송 지 영

한국해양대학교 대학원  
해양공학과

## 초 록

과장보다 짧은 배열로 고지향성 저주파 신호를 생성하는 파라메트릭 어레이 (Parametric Array, PA)는 1963년 Westervelt에 의해 제안된 이후 수중 통신, 해저 지층탐사 등과 같은 다양한 수중음향 영역에서 연구되었다. 본 실험의 목적은 PA의 음향특성을 고려하여 크기가 제한된 육상수조에서 PA를 음향재료의 특성을 측정하는 음원으로 제안하는 것이다. 실험은 BII-7544(Benthowave) 송신기를 사용하여 190~207 kHz 범위의 원주파수 신호를 가지고 10 kHz, 5 kHz의 차주파수 신호를 발생시켜 빔패턴, 주파수 특성 등 다양한 음향특성을 측정하였다. 실험결과 송신신호보다 약 50 dB 작은 세기의 저주파 신호가 발생하였으며, 빔폭(-3 dB)은  $2^{\circ}$  ~  $5^{\circ}$  범위로 원주파수 신호의 빔패턴과 유사하였다. 실험을 통해 확인된 고지향 특성은 수조실험의 주요 문제인 반사 및 회절 신호의 발생을 사전에 차단하는 데 강점이 있으므로, PA는 저주파 음원으로 사용하기에 적합할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 정확한 차주파수 신호 측정을 방해하는 pseudo sound의 영향을 분석하기 위해 음향필터 설치 여부에 따른 차주파수 신호의 변화를 측정하고 장거리 측정이 가능한 대형수조에서 거리변화에 따른 차주파수 신호를 측정할 예정이다.

핵심용어: 파라메트릭 어레이, 음향특성, 비선형성, 육상수조



# Measurement experiment of low-frequency signal characteristic using parametric array in acoustic tank

Song Ji Young

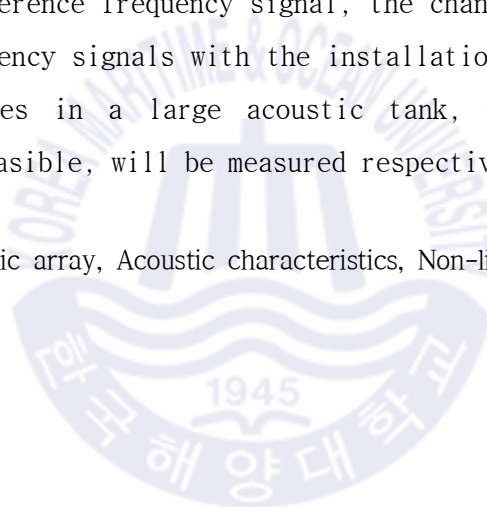
Department of Ocean Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Since the theory of Parametric Array(PA) was proposed by Westervelt in 1963, researches using PA have been implemented in various underwater acoustic areas such as underwater communication, sea-bottom profiling and so forth. This is because the signal characteristics of PA, which is a narrow beam at low frequency propagating in the distance with a shorter array than wavelength, are proper for such research topics. Therefore, the objective of this experiment is to propose the suitability of using PA as a transmitter for measuring acoustic properties of materials in a small acoustic tank, considering such acoustic characteristics of PA. In the experiments, a BII-7544(Benthowave) transmitter was used to generate signals with difference frequencies of 10 and 5kHz respectively, with a primary frequencies in the range of 190 to 207 kHz. And various acoustic characteristics of the PA such as beam patterns and frequency characteristics were measured. As the result of the experiments, signals with a power of about 50 dB smaller than the primary frequency signals

were generated at difference frequencies. Their beam widths(-3 dB) ranged from 2 to 5 ° and similar beam patterns to those of the primary frequencies were measured. The high directivity characteristics confirmed through the experiments have strengths in blocking the generation of reflection and diffraction signals in advance, which are the main problems in water tank experiments. So it is concluded that the PA is suitable for using as a transmitter for low-frequency acoustical property measurement of materials. In a future research, in order to analyze the effect of pseudo sound, which interferes accurate measurement of difference frequency signal, the changes in the intensity of difference frequency signals with the installation of acoustic filter at various distances in a large acoustic tank, where long distance measurements are feasible, will be measured respectively.

KEY WORDS: Parametric array, Acoustic characteristics, Non-linearity, Acoustic tank



# 1. 서 론

## 1.1 연구의 목적

파라메트릭 어레이(Parametric Array, PA)에 관한 연구는 1963년 Westervelt에 의해 제안된 이후 수십 년 동안 진행되고 있는 분야이다[13]. 본 분야의 연구가 지속해서 이루어지고 있는 이유는 주파수가 낮아질수록 음원의 크기가 증가하여 제작비용 증가와 운용의 어려움이 커지는 일반적인 음원과는 달리 PA는 파장보다 짧은 배열로 고지향성·저주파 신호를 발생시켜 비용과 운용 측면에서 큰 장점이 있기 때문이다. 본 연구의 목적은 앞서 언급한 장점을 바탕으로 PA를 저주파 영역의 음향특성 측정용 음원으로 사용하는 것이다. 이를 검증하기 위해 PA를 사용하여 차주파수 주파수 특성, 빔패턴 특성, 각종 변수에 따른 차주파수 세기 변화 등을 크기가 제한된 육상수조에서 측정하고 결과를 분석하고자 한다.

다양한 주파수 범위에서 음향재료의 주파수별 투과 및 반사손실과 같은 음향 특성을 효과적으로 측정하기 위해서는 배경소음 준위가 낮고 측정용 장비의 미세 거리조정이 용이한 육상수조에서의 실험이 적합하다. 또한, 투명 아크릴로 제작된 육상수조는 송신기, 수신기, 음향 필터 등 장비들의 정렬상태와 실험 상황을 관측하는 데 큰 장점이 있다. 이렇게 육상수조 실험의 다양한 장점이 있는 한편 수조의 크기로 인한 단점이 존재한다. 송신기와 수신기 사이의 거리를 변화시켜가며 음향특성을 측정하는 실험을 수행할 때 유한한 수조 크기로 인한 제약이 따른다. 또한, 저주파 영역에서 음향특성을 측정하는 경우에는 송신신호의 넓은 빔폭으로 인해 음향재료의 가장자리로부터 회절 신호가 발생한다. 원치 않게 발생한 회절신호는 측정하려는 투과·반사 신호와 중첩을 일으켜 실험



을 어렵게 만든다. 회절 효과를 최소화하기 위해 수신기를 음향재료의 표면에 가깝게 배치할 수도 있지만, 역으로 입사 신호와 반사 신호를 분리하기 어려워지는 문제점이 발생하게 된다. 고지향성을 갖는 저주파 음원으로 언급한 단점들을 극복할 수 있으나, 일반적인 고지향성 저주파 음원의 물리적인 크기는 측정 주파수가 낮아질수록 크기가 커지기 때문에 소규모의 육상수조에서의 사용은 실질적으로 어렵다. 본 연구에서는 위와 같은 문제를 해소하기 위한 대안으로써 PA를 적용하기 위해 수중에서의 고지향성을 검증하는 실험을 수행하였다.

## 1.2 연구 동향 및 논문 구성

PA를 이용한 국내연구는 수중과 공기 중에서 다음과 같이 진행되었다. 수중 표적 탐지용 능동 소나의 음원을 PA로 사용하기 위한 음장 측정 연구[1], PA배열을 이용한 해저 지층탐사 연구[3], 고지향 수중 통신을 위한 PA 설계 및 개발 연구[6] 등이 수중음향 분야에서 이루어졌다. 공기 중에서는 PA를 가청 주파수 대역의 초지향성 소리를 생성하는 스피커 형태로 구현하여 근접음장 방향성 특성연구[5], 전기음향 효율을 높이기 위한 PA 트랜스듀서 연구[7]를 진행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PA신호의 특성과 비선형현상에 대한 이론적 배경을 설명하고, 3장에서는 실험에 사용된 수조와 전자장비의 구성 및 배치를 소개한 뒤, 송신신호와 전체적인 실험절차에 관해 설명한다. 4장에서는 측정된 실험결과를 가지고 시간 영역, 주파수 영역, 빔패턴 그래프로 도시하여 분석한다. 5장에서는 PA의 음향적 특성을 정리하고 저주파 음원으로서의 PA의 적합성을 제기하며 결론을 맺는다.

## 2. 배경이론

### 2.1 PA 기본원리와 비선형 현상

PA는 고주파 신호를 송신하여 매질에서 일어나는 비선형 현상을 이용해 저주파 신호를 발생시키는 장비로, 생성한 저주파 신호의 파장보다 방사 면적이 짧지만 고지향성 빔을 발생시키는 특징이 있다.

비선형 현상이란 Fig. 2.1과 같이 높은 음압의 두 고주파수(원주파수,  $f_{p1}$ ,  $f_{p2}$ ) 신호를 동일한 방향으로 송신하면 상호작용을 일으켜 저주파수(차주파수,  $f_{p1} - f_{p2}$ )음과 합주파수 음을 발생시키는 현상이다. 송신한 고주파 신호는 높은 음압으로 인해 파의 각 부분에서 체적변화율 차가 발생하게 되고 이로 인해 위상속도 차가 생긴다. 예를 들어 정현파의 경우 Fig. 2.2와 같이 위상속도 차에 의해 파형이 점점 왜곡되어 톱날파에 가까워지게 되는데, 인접한 두 고주파수 신호를 동시에 송신하면 두 신호가 매질을 전파하면서 상호작용을 일으켜 두 신호 간의 차주파수와 합주파수 신호들을 발생한다[5][6].

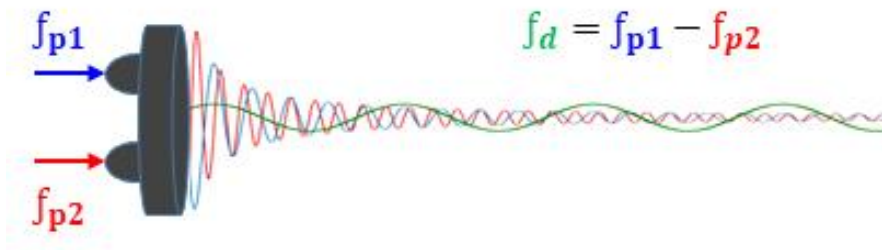


Fig. 2.1 송신한 두 고주파수 신호에 의해 차주파수 신호가 생성되는 PA의 기본원리

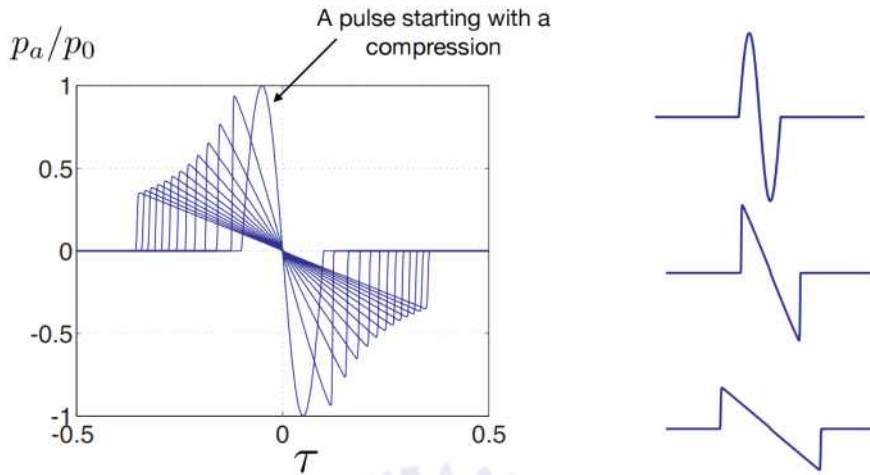


Fig. 2.2 위상속도 차에 의한 파형 왜곡 현상[12]

거리가 증가할수록 송신한 고주파수 성분들은 주파수 자승에 비례하여 크기가 급격히 감소하게 되어 원거리 영역(far field)에서는 비선형 상호작용으로 생성된 차주파수 신호만 남게 된다. 차주파수 성분은 두 원주파수 신호에 의해 생성되었으므로 원주파수 특성을 따라 빔폭이 좁고, 부엽이 상호작용에 의해 거의 사라지기 때문에 고지향 특성을 갖게 된다. 또한, 차주파수 신호의 음압은 비선형성에 의해 생성된 2차 신호이기 때문에 직접 방사한 1차 신호인 원주파수 음압에 비해 약 40~60 dB 정도 낮은 특징을 갖는다[1][2].

## 2.2 육상수조의 음향환경

비선형 현상이 일어나는 음향환경은 일반적으로 다음과 같이 정의된다. PA에서 송신된 두 개의 원주파수 성분이 상호작용을 일으키며 차주파수 성분을 생성하는 구간을 가리켜 ‘가상 어레이 길이’로 규정한다. 이는 실제로는 저주파수 음원이 존재하지 않지만, 저주파수 신호가 생성되므로 마치 가상의 음원이 있는 것으로 여겨 붙여진 개념으로 가상 어레이 길이( $R_m$ )는 회절 거리( $R_R$ )와 감쇠 거리( $R_\alpha$ )에 의해 결정된다.

Fig. 2.3에 표시된 회절 거리는 근거리 음장과 원거리 음장의 경계로써  $R_R = s/\lambda_p$ 로 정의되며,  $s$ 는 사용한 PA의 방사 면적으로 두 원주파수가 각각 200kHz, 195kHz일 때  $\pi \times (0.057)^2 = 0.0102m^2$ 이고,  $\lambda_p$ 는 두 원주파수의 평균값

주파수의 파장 길이로  $\lambda_p = \frac{1500}{\left(\frac{200+195}{2}\right) \times 10^3} = 0.0076m$  이므로 육상수조에서

의 회절 거리는  $1.3421m$  이다. 차주파수 신호의 감쇠 거리는  $R_\alpha = 1/\alpha_T$ 로 정의되며  $\alpha_T$ 는 전체 흡음계수(Total absorption coefficient,  $\alpha_T = \alpha_{p1} + \alpha_{p2} - \alpha_d$ )로써 수식[11]을 통해 원주파수와 차주파수 감쇠계수에 의한 감쇠 거리를 계산하면  $58.865m$  이다.

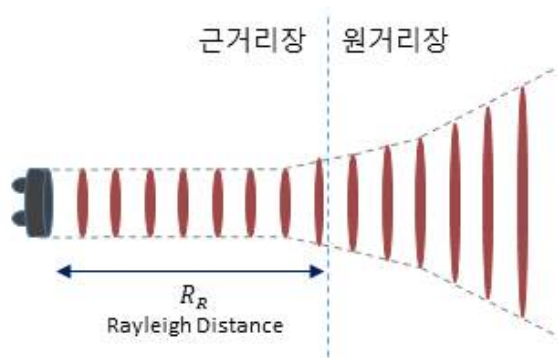


Fig. 2.3 근거리장과 원거리장의 경계 회절 거리

본 실험에서 사용된 육상수조의 길이는 2.5m로 앞에서 계산한 회절 거리와 감쇠 거리의 중간 범위 값으로  $R_R < R_{nl} < R_\alpha$ 이라는 관계식으로 표현할 수 있다. 관계식에 의해 육상수조의 음향환경은 Fig. 2.4와 같이 송신신호의 회절과 비선형 현상에 의한 차주파수 생성이 활발하게 일어나는 환경임을 알 수 있다. 또한, 송신기로부터 계산한 회절 거리(1.3421m)만큼 떨어진 지점에서 근거리장과 원거리장이 교차하고 있으므로 송신기와 수신기 사이의 거리가 2m 미만인 것을 고려하면 수조 환경은 대부분 근거리장에 해당되는 것으로 판단된다.



Fig. 2.4 비선형 현상에 의한 육상수조의 음향환경

차주파수 신호의 세기는 송신된 원주파수 신호의 진폭, 배열 구조 그리고 비선형 현상이 일어나는 상호작용 공간의 부피로 결정된다[9]. 이러한 이유로 차주파수 성분은 상호작용 거리를 충분히 확보할 수 있는 원거리장에서 측정할수록 좋으나 거리에 제한이 있는 육상수조에서 차주파수 성분을 활용하려는 본 논문의 연구목표에 따라 근거리장에서의 차주파수 성분의 음향특성을 측정하고자 한다.

PA의 비선형 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 일반적인 선형현상이 아

닌 비선형 음향 현상 해석 모델이 사용되는데, 여러 가지 모델 중 대표적으로 KZK(Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) 방정식이 사용된다[10]. 이 방정식을 통해 육상수조 실험을 미리 시뮬레이션하고 결과를 예측한다면 탁월한 선행연구가 되겠지만 대부분 모델은 원거리장의 근사해가 존재할 뿐 근거리장의 해가 존재하지 않는다. 그러므로 본 논문은 이론을 통한 수치적 접근이 아닌 직접 설계하고 제작한 측정시스템을 이용하여 근거리장에서의 차주파수 신호의 특성을 측정하고 분석하였다.

지금까지 육상수조의 음향환경을 정의하고 수조에서 일어나는 비선형 현상에 대해 감쇠 거리와 회절 거리를 기준으로 정의하였다. 그 결과 육상수조는 근거리장과 원거리장이 교차하면서도 대부분이 근거리장에 해당하는 조건이라는 결론을 얻었고, 이론적 접근보다 실험적 접근을 통한 차주파수 신호 특성을 측정해야 한다는 방향을 세웠다. 3장에서는 실험을 위해 설계한 측정시스템을 구성하는 수조와 치구, 전자계측장비의 사양과 음향특성을 측정하기 위해 수행한 실험절차에 관해 상세히 설명할 것이다.

## 3. 실험구성

### 3.1 실험환경

실험환경은 크게 송·수신기를 배치한 수조와 측정용 전자 계측장비로 나뉜다. 육상수조에는 송·수신기를 X, Y, Z축 방향과 회전축 방향으로 제어할 수 있는 정밀치구를 설치하여 수조 내 모든 공간에서 음장을 측정할 수 있도록 설계하였다. Fig. 3.1은 수조와 전자 계측장비를 이용한 측정시스템의 순서도이며, 제어부에서 생성된 신호가 송신부에서 증폭된 후 송신되어 수신부를 거쳐 수신 신호가 저장되는 흐름을 간략하게 표현한 그림이다. Fig. 3.2는 Fig. 3.1의 제어부, 송신부, 수신부를 확대하여 전자 계측 장비 구성을 상세하게 표현한 그림이다. Table. 3.1은 실험에 사용된 전자 계측 장비의 사양을 요약 정리한 표이다. (Appendix. B.에 수조와 각종 치구의 설계도, 사진, 전자 계측 장비의 세부 사양 등을 수록하였다.)

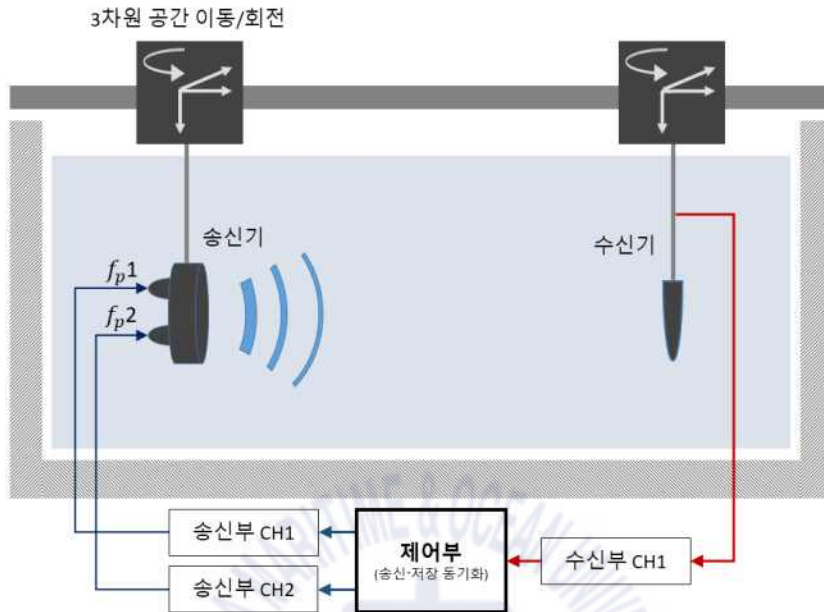


Fig. 3.1 측정시스템 순서도, 빨간색 선과 파란색 선은 각각 송신신호와 수신신호의 흐름을 의미

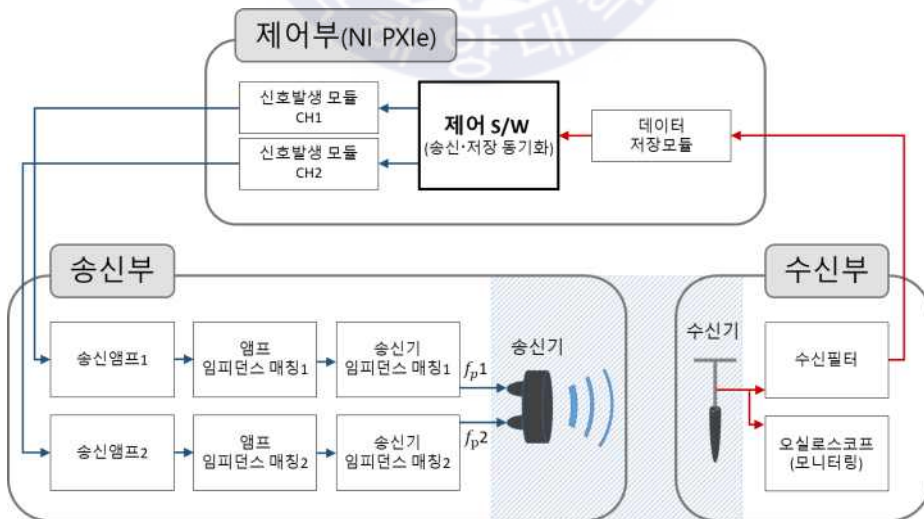


Fig. 3.2 전자 계측 장비 구성도



Table. 3.1 전자 계측 장비 사양

장비	사양
제어 S/W	실험용 S/W 개발(NI LabView 2018)
데이터저장 모듈	PXIe-5172(NI), 샘플링: 25 MHz
신호발생 모듈	PXIe-5433(NI), 주파수범위: 0 Hz ~ 80 MHz
송신기	BII-7544(Benthowave), 빔폭: 8 ° 원주파수 범위: 180 ~ 210 kHz 차주파수 생성 범위: 2 ~ 20 kHz 크기: 14 mm(D)×50 mm(H), 최대출력: 1kW
송신앰프	1000S04(E&I), 이득: 60 dB
수신기	TC4034(Reson), 주파수범위: 1 Hz ~ 470 kHz
수신필터	KH-3944(Krohn-Hite), 대역통과(1~300 kHz)
모니터링	RTE-1054(Rohde), 샘플링: 5 GS/s, 대역폭: 500 MHz
육상수조	제작(이루자), 크기: 2.5 m(L) × 1.2 m(W) × 1.2 m(D)



### 3.2 육상수조의 장점 - 신호의 일관성

다음은 육상수조 실험의 장점인 신호의 일관성을 계산한 결과이다. 일반적으로 음향특성 측정 실험시 같은 실험을 수차례 반복하여 수신신호를 측정하고 평균화(averaging)하여 분석한다. 하지만 제작한 육상수조의 환경은 신호의 일관성이 매우 뛰어나 평균화하지 않고 1회 측정한 신호를 가지고 분석하였다.

Fig. 3.3은 식 (3.1)과 같이 임의의 1회 측정한 신호를  $reference(s(t)_{ref})$ 로 설정하여 1회 측정한 100개의 신호( $s(t)$ )와 시간 영역에서의 오차 평균을 계산한 결과이다.

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |s(t)_{(i)} - s(t)_{ref}|^2 \quad (3.1)$$

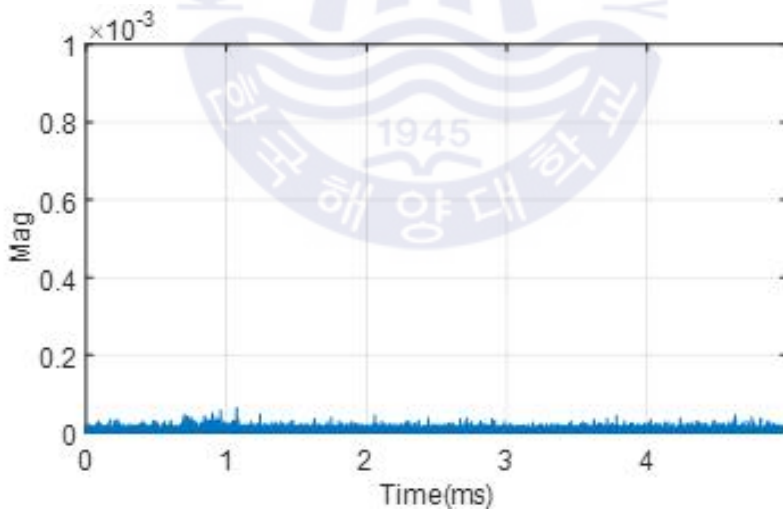


Fig. 3.3 시간 영역에서의 오차 평균값

Fig. 3.4는 1회 측정한 100개의 신호 사이의 correlation(상관도) 계수를 계산하여 2차원으로 도시한 결과이다. 그래프 오른쪽에 표시된 범위를 참고하여 분석한 결과 자기 상관도를 의미하는 대각선 성분을 포함해서 모든 결과값이

‘1’에 매우 가까웠는데, 이는 신호 간의 상관도가 매우 높은 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 Fig. 3.3, Fig. 3.4 그래프를 통해 신호의 일관성을 확인한 뒤 모든 실험에 대해 측정횟수를 기본 1회로 설정하였다.

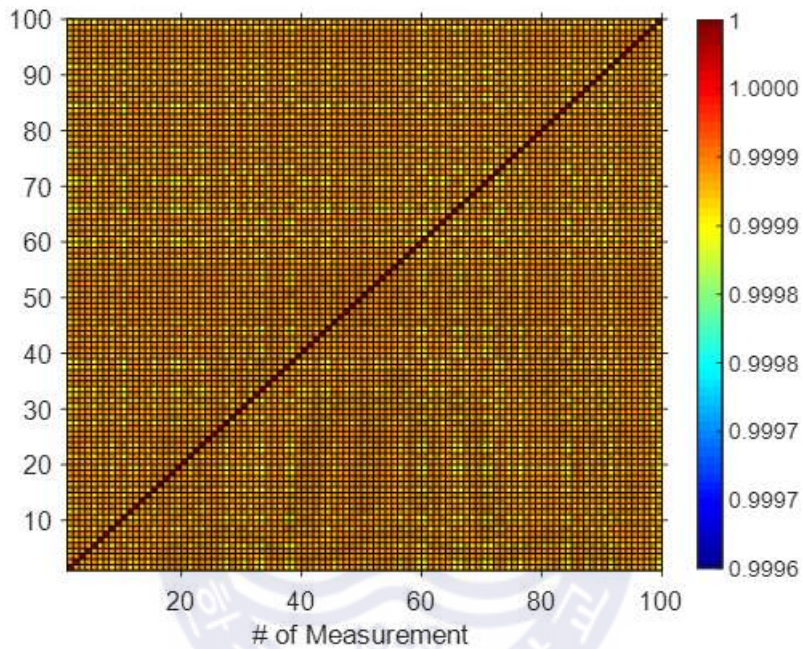


Fig. 3.4 1회 측정된 100개 신호 사이의 상관도 계산 결과

### 3.3 송신신호

실험에서 사용한 송신기(BII-7544)는 한 개의 신호를 입력해 사용하는 일반적인 음원과 달리 두 개의 신호를 동시에 입력하여 구동하는 방식이다. Fig. 3.5 과 같이 원판형태의 송신기 후면에 두 개의 고주파 신호를 각각 독립적으로 입력해야 하는 형태이며, 제품 특성상 반드시 두 개의 채널 중 1번 채널에 2번 채널 보다 상대적으로 더 높은 고주파수 신호를 입력해야만 한다.



Fig. 3.5 송신기 BII-7544

송신신호 생성을 위해 신호의 형태, 주파수, 세기 세 가지 요소를 고려해 설계하였다. 첫 번째로 신호형태는 5 kHz 단일 차주파수 성분을 만들기 위해 Fig. 3.6와 같이 단일 주파수 신호로 생성하였고, 두 번째로 주파수는 Fig. B.15를 참고하여 송신기의 TVR값이 우수한 190~210 kHz 대역을 기준으로 high primary frequency( $f_{p1}$ )를 200 kHz, low primary frequency( $f_{p2}$ )는 195 kHz로 설정하였다. 마지막으로 차주파수의 세기는 원주파수에 비해 약 40~60 dB 낮게 생성된다는 문헌의 정보를 참고하여 최대 세기로 출력하고자 하였다. 이를 위해 사양이 60

dB gain인 고출력 송신 앰프를 사용하여 송신기의 최대 파워 입력인 1 kW를 생성하였다. Fig. 3.2를 통해 송신신호를 생성하기 위해 배치한 전자 계측 장비의 순서를 세부적으로 확인할 수 있다.

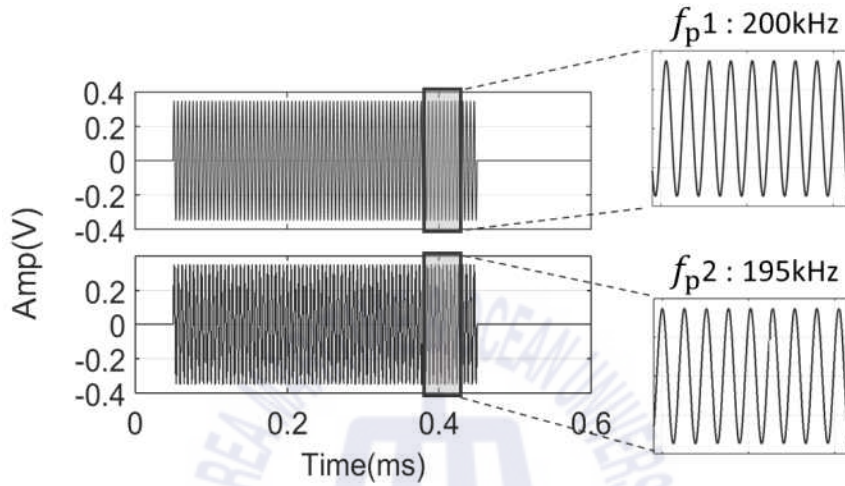


Fig. 3.6 송신신호로 사용되는 두 원주파수의 파형

### 3.4 실험 목적 및 실험절차

모든 실험은 Labview(NI)를 기반으로 개발한 실험용 S/W를 통해 수행되었다. Fig. 3.7와 같이 S/W 상에서 송신하고자 하는 신호의 길이·파형·세기를 제어하고, 송신 모듈과 데이터 저장 모듈을 시간 동기화하기 때문에 실험시간을 제어하여 데이터를 저장할 수 있다. 또한, 실험 직후 시간 영역과 주파수 영역 그래프로 결과를 도시하는 모니터링 기능 또한 수행한다.

모든 실험에서의 송·수신기 위치는 수면과 수조 바닥과의 중앙에 위치시키며, 수조 양쪽 벽으로부터 중앙에 설치하여 반사의 영향이 최소화되도록 설치한다. 측정 시간은 총 5 ms이며 측정횟수는 소음이 적은 육상수조의 특성상 평균화(averaging) 측정을 하지 않고 실험당 1회씩만 측정한다. 측정된 데이터는 텍스트 파일 형태로 저장되며 본 논문의 수치적 자료들은 매트랩(MATLAB)을 이용하여 시계열, 스펙트럼, 빔패턴 그래프 등으로 도시하였다.



Fig. 3.7 제어 S/W 화면

#### 3.4.1 차주파수 측정 실험

차주파수 측정 실험은 가장 기본적인 실험으로써 송신한 신호가 매질을 통해 전파하면서 차주파수 성분을 생성하는지를 확인하기 위한 실험이다. Fig. 3.8과 같이 송신기를 정면( $0^\circ$ )으로 고정된 뒤 수신기와의 거리를 1 m, 1.5 m, 1.9 m

로 하여 측정하였다. 이때 송·수신기의 각각의 중앙은 정밀 치구를 제어하여 같은 수심에서 일직선상에 위치시킨다.

### 3.4.2 송신신호 길이 변화 실험

길이가 2.5 m로 제한된 육상수조에서는 송신신호의 길이의 제한을 받는다. 산술적으로 200 kHz 원주파수의 파장은 0.75 cm지만 1~5 kHz의 차주파수 파장은 30~150 cm로 상당히 긴 거리를 차지한다. 다음 실험의 목적은 송신신호 길이 변화에 따른 차주파수 세기 변화를 측정하여 육상수조에서 사용할 최적화된 신호 길이를 결정하는 것이므로 최대길이를 1ms로 설정한다. 실험은 Fig. 3.8과 같이 송·수신기를 일직선으로 정렬한 뒤, 신호의 길이를 0.1~1 ms(0.1 ms 간격)범위로 변화시켜가며 1 m, 1.5 m 거리에서 측정한다.

### 3.4.3 송신신호 입력전압 변화 실험

다음 실험은 신호의 입력전압을 변화시켜가며 차주파수 세기를 관측하는 실험이다. 실험은 Fig. 3.8과 같이 1 m, 1.5 m 거리에서 송·수신기를 일직선으로 정렬시킨 뒤, 입력전압의 범위를 50~350 mV(50 mV 간격)로 변화시켜가며 차주파수의 세기를 측정한다.

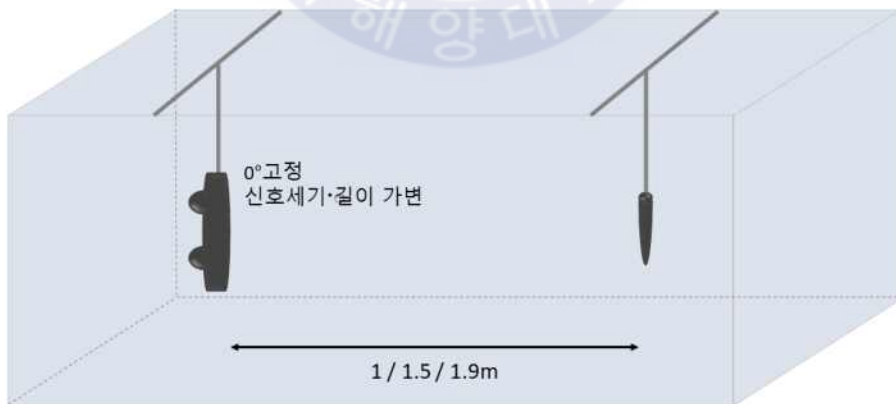


Fig. 3.8 차주파수 측정 실험

### 3.4.4 빔패턴 측정 실험

다음 실험은 음원의 지향성을 검증하기 위한 실험으로써 공간제약을 가지는 육상수조에서 음원을 사용하기 위해서 반드시 요구되는 실험이다. 지향성을 확인하기 위한 지표인 빔패턴을 측정하기 위해서는 Fig. 3.9과 같이 일정 거리에서 송·수신기를 직선상에 위치시킨 뒤 수신기는 고정한 채 송신기를  $-30\sim 30^\circ$  ( $1^\circ$  간격) 범위로 회전시켜가면서 측정한다.

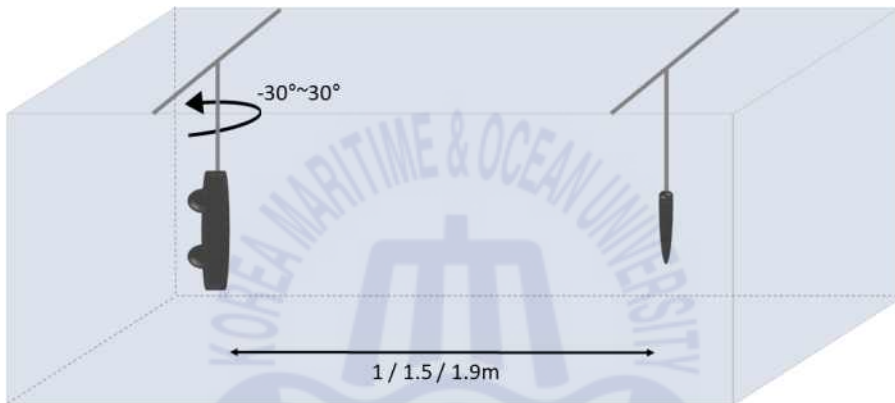


Fig. 3.9 빔패턴 측정 실험

### 3.4.5 송·수신기 간 거리변화 실험

다음 실험은 수조 내 공간에서 거리변화에 따라 원주파수와 차주파수의 세기가 어떻게 변화하는지를 측정하기 위한 실험으로써 송신된 원주파수 신호가 매질을 따라 진행하면서 일으키는 비선형 현상을 관측하기 위해서 수행한 실험이다. Fig. 3.10과 같이 송신기 방향은  $0^\circ$  로 고정한 뒤 송신기와 수신기를 같은 수심의 일직선상에 정렬시킨 뒤, 오직 수신기만 이동시켜가면서 측정한다. 이때 측정 거리의 범위는 60~190 cm( $5\text{ cm}$  간격)이다.



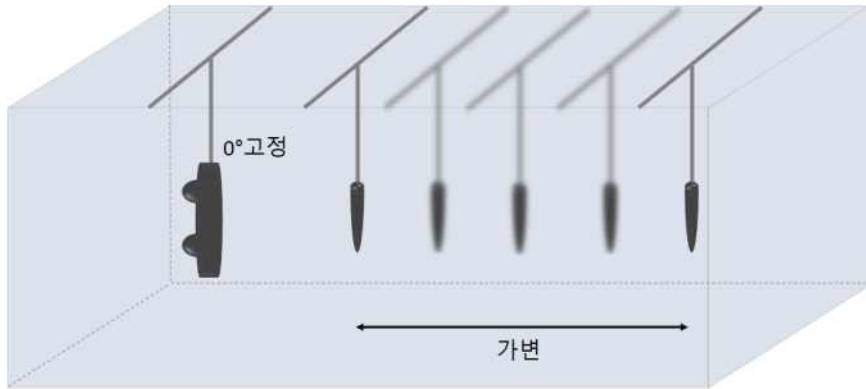


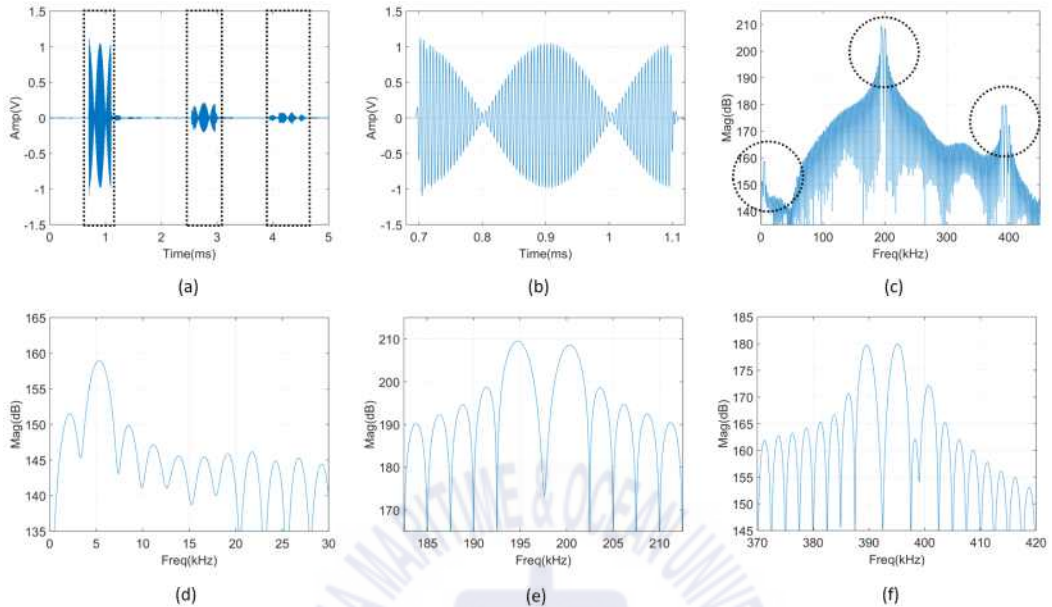
Fig. 3.10 거리에 따른 세기 측정 실험



## 4. 실험결과

### 4.1 차주파수 신호 측정 실험결과

Fig. 4.1는 원주파수 200 kHz, 195 kHz 신호를 송신하여 5 kHz의 차주파수 신호를 생성하는지를 측정한 실험결과이다. Fig. 4.1(a)는 송신하기 시작한 시점부터 측정한 총 5 ms에 대한 시계열 그래프이다. 약 0.7 ms에 들어온 신호(첫번째 네모칸으로 표시된 신호)를 통해 1 m 거리에서의 음속을 역으로 추정하면 약  $1425.6 \text{ m/s}$ 이며, 계산된 음속으로 두 번째 수신된 신호의 거리를 추정하면  $2.53 \text{ ms} \times 1425.6 \approx 3.6 \text{ m}$ 이다. 3.6m는 송신기와 수신기 사이의 거리인 1 m와 수신기와 수신기 가까운 수조 벽과의 왕복거리인 2.56 m를 합한 거리로써 반사 신호가 측정 됐음을 알 수 있다. 세 번째 네모칸에 표시된 신호를 거리로 환산하면  $4.11 \text{ ms} \times 1425.6 \approx 5.8 \text{ m}$ 이고 이는 송신된 신호가 수신기와 가까운 수조 벽에 반사된 이후 송신기 뒤쪽 수조 벽에 2차로 반사된 신호임을 추정 할 수 있다. Fig. 4.1(b)는 반사되지 않고 직접 들어온 신호를 약 0.7~1.1 ms로 확대한 그래프이다. 확대된 신호의 길이는 0.4 ms로 3.2절에서 설계한 송신신호 길이와 일치했으며, 포락선의 모양이 마치 맥놀이가 일어난 것과 같은 형상이다. Fig. 4.1(c)는 확대한 신호를 0~450 kHz 범위의 주파수 영역에 20 Hz 간격으로 스펙트럼을 도시한 결과이다. 원으로 세 부분을 표시했는데, 왼쪽 원은 차주파수 성분을 표시했으며, 가운데 원은 두 개의 원주파수 성분, 오른쪽 원은 합주파수와 고조파 성분이 각각 관측됨을 표시하였다.



**Fig. 4.1** 5 kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450 kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분

Fig. 4.1(d)는 0~30 kHz 대역을 확대한 스펙트럼으로 차주파수 성분은 5.4 kHz(158.9 dB)이고, Fig. 4.1(e)는 182~212 kHz 대역을 확대한 스펙트럼으로 원주파수 성분  $f_{p1}$ 은 200.3 kHz(208.6 dB),  $f_{p2}$ 는 194.9kHz(209.5 dB)이며 두 성분의 크기 차는 0.9 dB이다. 수신된 원주파수 신호는 최초 설계했던 주파수 200 kHz, 195 kHz와 달리 실제 200.3 kHz, 194.9 kHz로 수신됐는데, 오차가 발생한 원인은 하나의 송신기에서 주파수가 다른 두 원주파수 신호를 한꺼번에 생성할 때 송신기 내부 압전소자의 특성으로 인해 발생된 오차로 예상된다. 4.1절 실험의 주 관심사인 차주파수 신호의 생성 여부는 Fig. 4.1(c)와 Fig. 4.1(d)를 분석하여 판단하였다. 두 그래프를 통해 측정된 두 원주파수 신호의 차인 5.4 kHz에서 주변 대역보다 최소 6 dB 이상 높은 세기를 가지는 차주파수 성분이 존재함을 확인했고, 참조 문헌에서 언급한 원주파수 성분과 차주파수 성분의 차이인 40~60 dB 범위를 만족하는 것 또한 확인하였다[5].

Fig. 4.1.(e)는 370~420 kHz 대역을 확대하여 고조파 성분과 합주파수 성분을 도시한 스펙트럼이며 측정된 고조파 성분은 두 원주파수의 배수 성분으로 각각 400.9 kHz(172.1 dB), 389.5 kHz(179.7 dB) 이고, 두 원주파수의 합인 합주파수 성분은 395.4 kHz/179.6 dB로 측정됐다. (Appendix A.1에 1.5 m, 1.9 m에서의 5 kHz 차주파수 측정 실험결과와 1 m에서의 10 kHz(200 kHz, 190 kHz) 차주파수 신호 측정 실험결과를 수록하였다.)

## 4.2 송신신호 길이 변화 실험결과

다음은 1 m 거리에서 원주파수 신호를 200 kHz, 195 kHz로 설정한 뒤 송신 신호의 길이를 변화시켜가며 측정한 실험결과이다. Fig. 4.2(a)는 길이를 총 0.1~1 ms(0.1 ms 간격)범위로 원주파수 신호를 생성한 그래프이다. Fig. 4.2(b)는 측정된 수신신호로써 실험마다 첫번째로 수신된 직접파의 길이는 송신신호 길이와 같게 측정됐음을 알 수 있다. Fig. 4.3은 직접파 영역의 세기를 계산하여 신호 길이 변화에 따른 차주파수 성분의 세기를 그래프로 도시한 결과이다. 차주파수 성분의 세기는 신호의 길이가 증가함에 따라 증가한 원주파수 성분의 세기와 달리 불규칙하게 변화함을 보였다. Fig. 4.4는 차주파수 성분의 주변 대역까지 볼 수 있는 스펙트럼으로 Fig. 4.3과 복합적으로 분석한 결과 송신신호 길이가 증가함에 따라 세기는 불규칙 변화하지만 주엽의 폭은 점차 좁아졌다. 특히 신호의 길이가 0.4 ms 이상일 때부터 주변 대역과 세기 차이가 최소 6 dB 이상 생기기 시작했는데, 송신신호의 길이와 차주파수 신호의 주파수 영역 분해능이 비례하는 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

길이의 제한이 있는 육상수조에서 저주파수 신호를 음원으로 사용하기 위해서는 무한으로 신호 길이를 늘일 수 없기에 이 논문에서는 파장과 중첩을 고려하여 실험에서 측정할 신호 길이를 0.4 ms로 설정하였다. 신호 길이를 설정하기 위해 고려한 첫 번째 사항은 5 kHz 차주파수 신호의 한 파장은 30 cm이고

시간으로는 0.2 ms이므로 주파수 분석을 위해 두 파장을 확보하고자 0.4 ms로 설정하였다. 두 번째로 4.1절 Fig.2(a)에서 첫 번째 직접파와 두 번째 반사파의 시차가 약 1.1 ms이다. 송신기와 수신기 거리가 1 m일 때는 차이가 1.1 ms지만 Fig. Appendix.A.2(a)와 같이 1.9 m로 거리가 멀어질 때 0.3 ms 이하로 줄어들게 된다. 만약 신호 길이를 더 길게 설정한다면 두 파는 중첩되어 소위 ‘reflection free time’을 확보할 수 없게 된다. 따라서 두 가지를 고려하여 최소 파장을 확보하면서도 합리적인 길이인 0.4 ms로 신호 길이를 설정하여 모든 실험을 수행하였다. (Appendix A.2에 1.5 m 거리에서 측정한 실험결과를 수록하였다.)

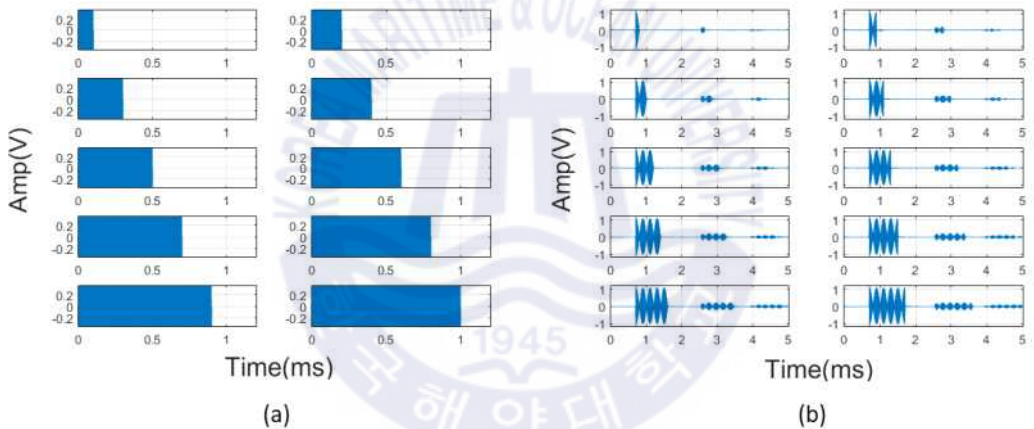


Fig. 4.2 송신신호 길이 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호

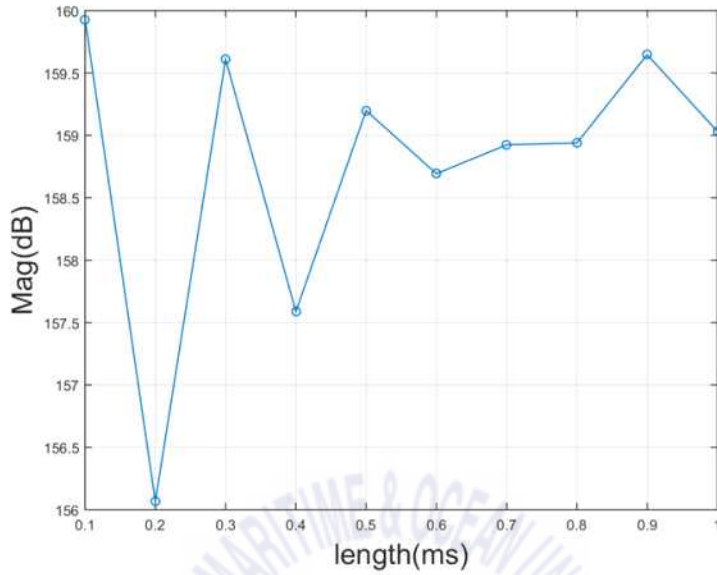


Fig. 4.3 송신신호 길이 변화에 따른 차주파수 성분 세기 변화

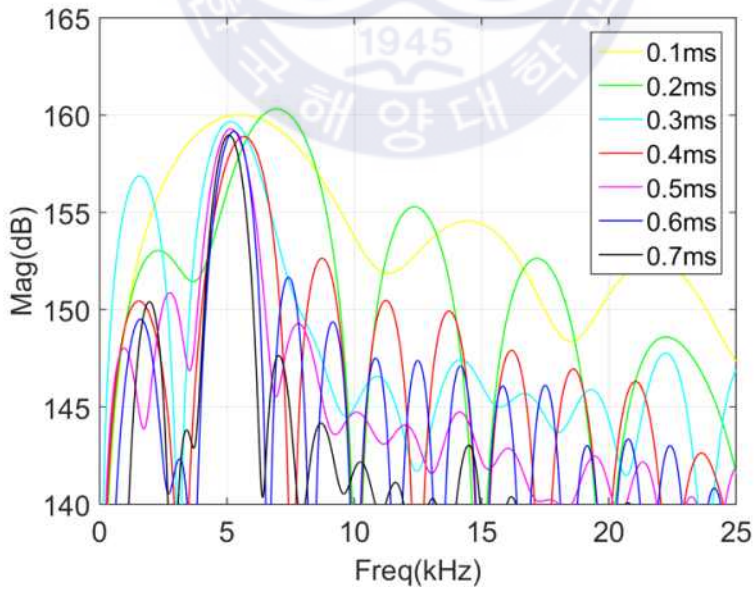


Fig. 4.4 송신신호 길이 변화에 따른 스펙트럼 결과

### 4.3 송신신호 입력전압 변화 실험결과

다음 실험은 1 m 거리에서 원주파수 신호를 200 kHz, 195k Hz로 설정한 뒤 길이 0.4 ms의 송신신호를 50~350 mV(50 mV 간격범위에서 입력전압을 변화시켜가며 측정한 실험결과이다. Fig. 4.5(a)는 동일한 길이, 다른 진폭을 갖는 송신신호 그래프이다. Fig. 4.5(b)는 수신신호 그래프로써 신호 길이가 0.4 ms로 일정하며 진폭만 다르게 수신됨을 볼 수 있다. Fig. 4.6는 수신신호에서 직접파 영역의 세기를 계산하여 입력전압 변화에 따른 차주파수 성분의 세기를 도시한 그래프이고 Fig. 4.7은 5 kHz 차주파수 성분의 주변 대역 세기를 도시한 스펙트럼 결과이다. 측정된 차주파수 신호의 세기는 입력전압이 150 mV보다 큰 범위에서 일정한 비율로 증가하는 경향을 보였는데, 이는 원주파수 신호의 세기가 일정수준 이상이 되어야 비선형 현상에 의한 차주파수가 형성된다는 것을 보여주는 결과이다. 가능한 높은 세기의 차주파수 신호를 생성하는 것이 실험 목적에 부합하나 송신기의 입력 최대전력 사양이 1000 W(350 mV)로 제한되므로 본 실험에서는 송신신호의 입력전압을 최대치인 350mV로 설정하여 실험을 수행하였다. (Appendix A.3에 1.5m 거리에서 측정한 실험결과를 수록하였다.)

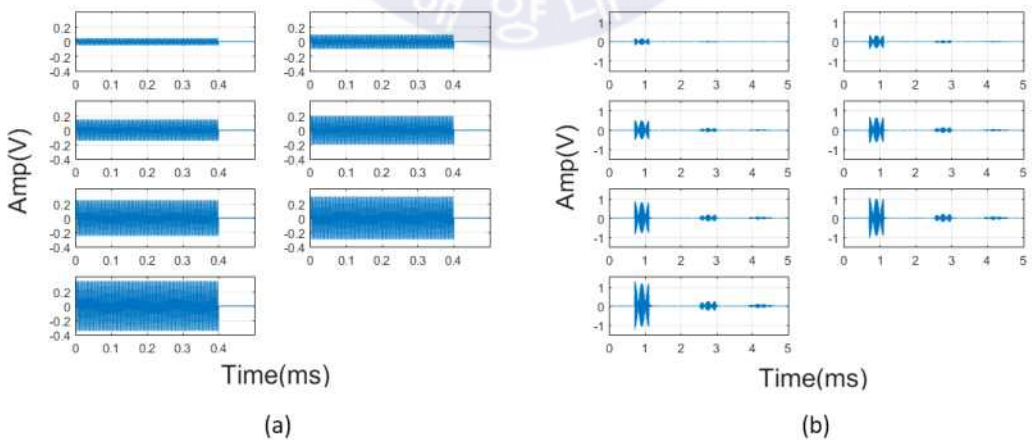


Fig. 4.5 송신신호 입력전압 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호

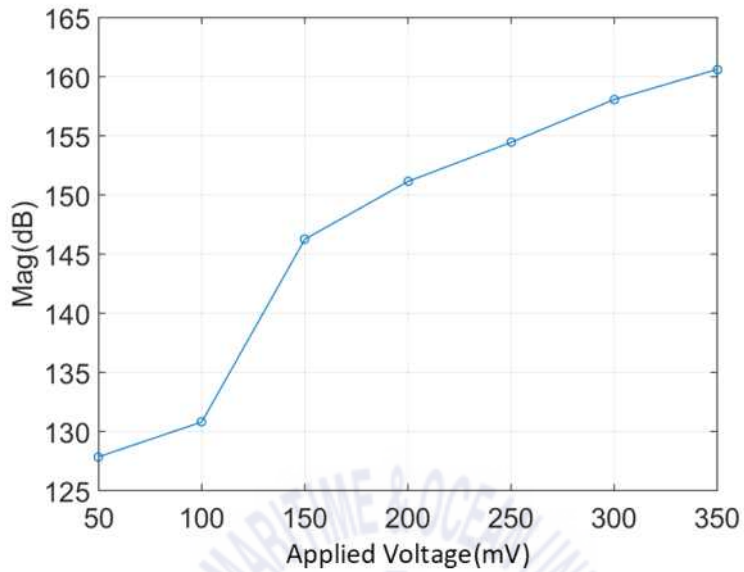


Fig. 4.6 입력전압 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화

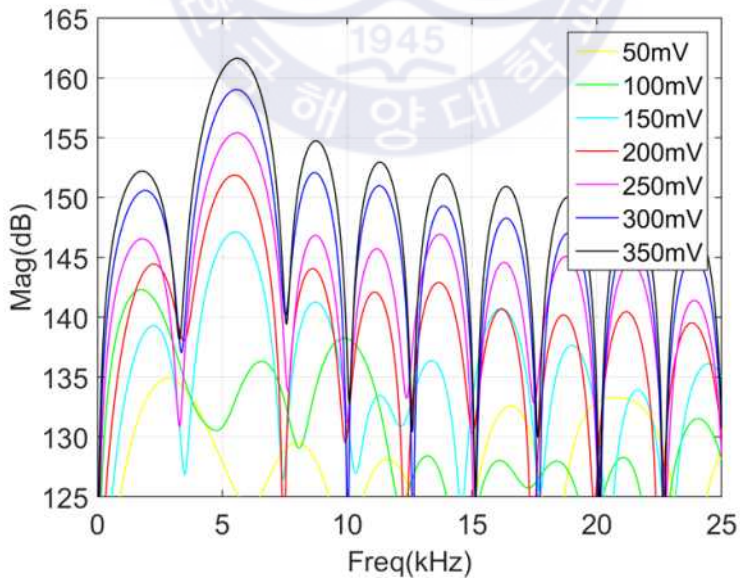


Fig. 4.7 입력전압 변화에 따른 스펙트럼 결과



## 4.4 빔패턴 측정 실험결과

### 4.4.1 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정

Fig. 4.8는 200 kHz, 195 kHz 원주파수 신호를 길이 0.4 ms, 입력전압 350 mV로 설정하여 1 m 거리에서 측정한 빔패턴을 극좌표 그래프로 도시한 결과이다. Fig. 4.8(a)는 높은 원주파수 신호의 빔패턴 결과로서 주엽이 좁고 부엽이 대칭적으로 형성된다. Fig. 4.8(b)는 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 형상으로 높은 원주파수 신호의 빔패턴보다 주엽이 상대적으로 넓고 부엽이 낮은 특징을 보인다. Fig. 4.8(c)는 비선형 현상에 의해 생성된 차주파수 신호의 빔패턴으로 주엽의 형상은 높은 원주파수 신호의 빔패턴처럼 좁고, 부엽은 낮은 원주파수 신호의 빔패턴과 같이 낮다. 이는 마치 두 원주파수 신호의 장점을 결합한 것과 같은 특징을 보인다. 빔패턴 측정 실험의 주요 목적인 지향성을 확인하기 위해 빔폭을 측정하였다. Fig. 4.9은 Fig. 4.8의 그래프를 정규화한 뒤 -3 dB 빔폭을 표시한 그래프이다. 그래프를 통해 원주파수 신호의 빔폭은 각각  $4^\circ$ ,  $7^\circ$  임을 알 수 있으며 차주파수 신호의 빔폭은 수치적으로는  $4^\circ$  이하 이지만 그래프를 통해 원주파수 신호의 빔패턴 보다도 더 좁게 형성됨을 볼 수 있다. (Appendix A.4.1, A4.2에 1.5 m, 1.9 m 거리에서 측정한 실험결과를 수록하였다.)

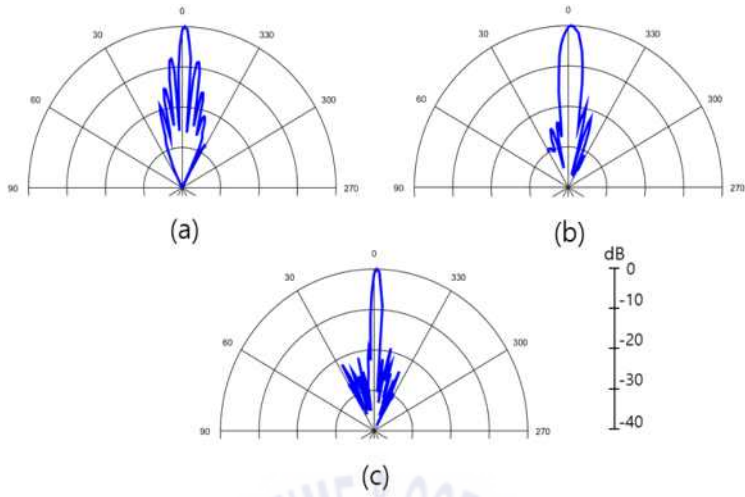


Fig. 4.8 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

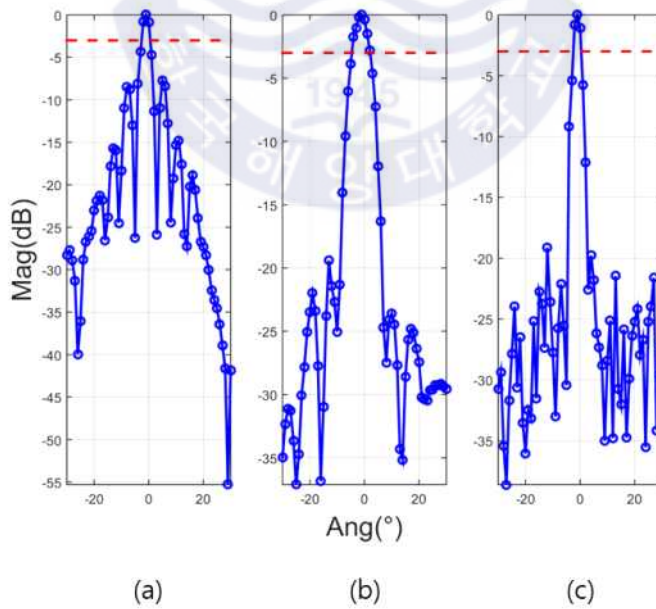


Fig. 4.9 빔폭(-3dB) 측정 결과, (a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

#### 4.4.2 송신방식 차이에 따른 원주파수 신호의 빔패턴 측정

다음 실험은 원주파수 신호의 송신방식에 따른 빔패턴 차이를 확인하기 위해 진행한 실험이다. 빔패턴을 측정하는 방식은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 기존에 방식과 같이 두 원주파수 신호를 동시에 송신하여 차주파수 신호를 생성할 때 측정하는 방법이고, 두 번째는 단독으로 높은 차주파수 신호와 낮은 차주파수 신호를 따로 송신하여 빔패턴을 측정하는 방식이다. Fig. 4.10(a),(b)는 200 kHz, 195 kHz 원주파수 신호를 동시에 송신하여 측정한 빔패턴 결과이고 Fig. 4.10(c),(d)는 원주파수 신호를 각각 송신하여 측정한 빔패턴 결과이다. 같은 주파수인 Fig. 4.10(a)와 (c), Fig. 4.10(b)와 (d)의 형상을 각각 비교하면 빔폭의 크기와 부엽의 형상이 두 가지 방식에 의해 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 결과를 통해 빔패턴 측정 시 첫 번째 방식으로 빔패턴을 측정하여 실험의 시간적·절차적 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. (Appendix A.4.3에 205 kHz, 195 kHz 거리에서 두 가지 방식을 비교한 실험결과를 수록하였다.)

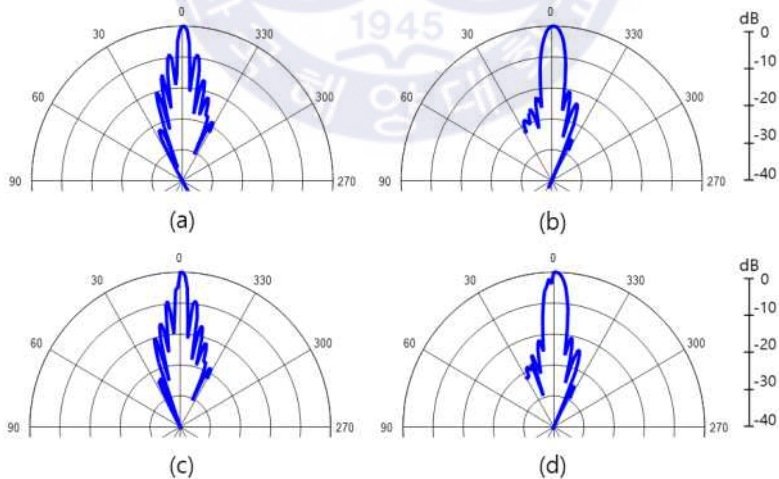


Fig. 4.10 송신방식에 따른 빔패턴 측정 결과,  
 (a),(b) 두 원주파수 신호를 동시에 송신한 방식,  
 (c),(d) 원주파수 신호를 각각 송신한 방식

#### 4.4.3 다양한 주파수 범위에서 원주파수 신호의 빔패턴 측정

앞서 진행한 4.3절 실험에서 차주파수 신호의 세기는 원주파수 신호의 세기가 강할수록 함께 커짐을 확인하였다. 다음 실험에서는 원주파수 신호를 최대 세기로 송신하기 위해 원주파수 신호의 Transmitting Voltage Response(TVR) 특성이 높은 주파수 범위에서의 빔패턴을 측정하고자 한다. PA는 하나의 센서로 송신신호를 생성하지만 입력은 Fig. 3.3과 같이 두 종류의 신호를 받기 때문에 TVR 또한 Fig. B.15과 같이 두 종류가 존재한다. 이 점을 고려하여 높은 원주파수 신호의 TVR 특성이 높은 영역(200~207 kHz)과 낮은 원주파수 신호의 TVR 특성이 높은 영역(190~202 kHz)에서 빔패턴을 측정하였다. Fig. 4.11은 높은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과로써 높은 원주파수 신호의 빔패턴은 부엽이 대칭을 이루는 특성을 가짐을 다양한 범위의 주파수에서 확인할 수 있다. Fig. 4.12, Fig. 4.13는 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 결과로써 부엽이 거의 없는 형상을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig.4.11(a)와 Fig.4.13(c)를 비교 했을 때 같은 200 kHz 일지라도 높은 원주파수와 낮은 원주파수 중 어떤 주파수로 송신되느냐에 따라 빔패턴 형상이 확연하게 달라짐을 알 수 있다. 그리고 이 차이를 통해 송신기 내부의 높은 원주파수 신호와 낮은 원주파수 신호를 발생시키는 배열의 구조가 다름을 추측해 볼 수 있다.

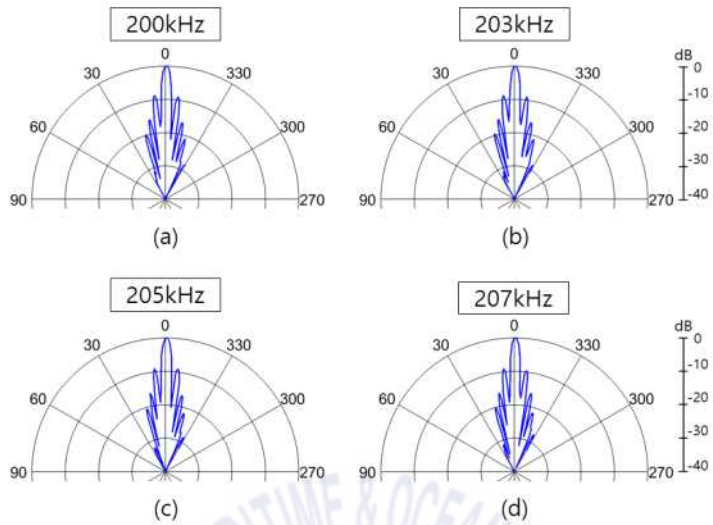


Fig. 4.11 다양한 높은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과, (a)200kHz, (b)203kHz, (c)205kHz, (d)207kHz

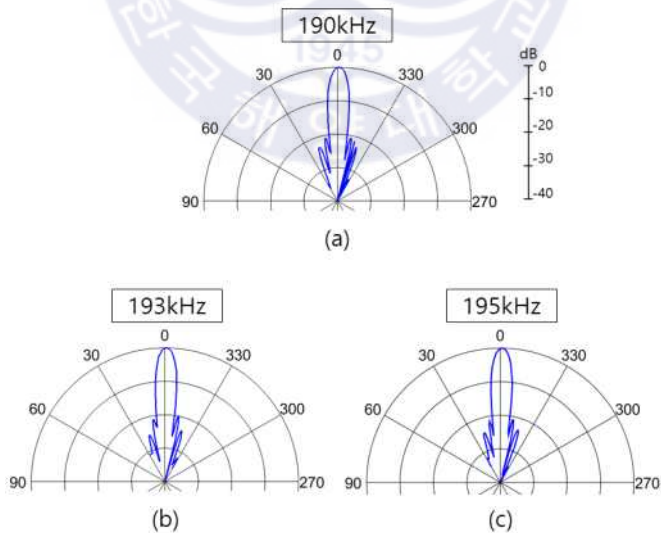


Fig. 4.12 다양한 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과, (a)190kHz, (b)193kHz, (c)195kHz

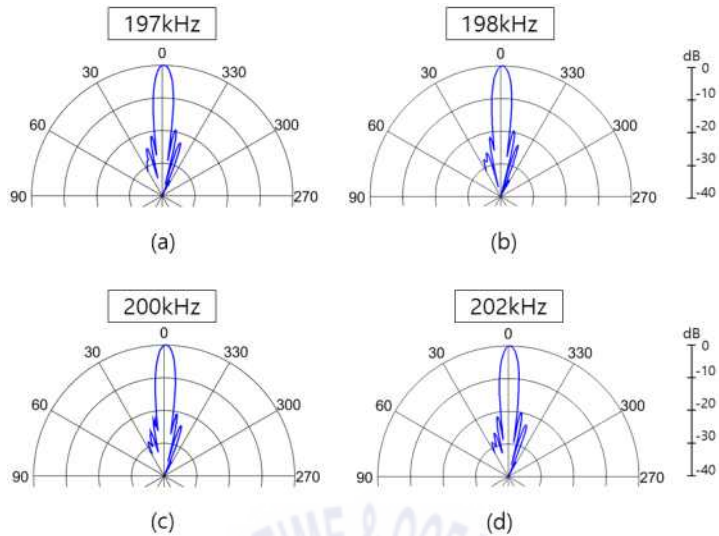


Fig. 4.13 다양한 낮은 원주파수 신호의 빔패턴 측정 결과,  
(a)197kHz, (b)198kHz, (c)200kHz, (d)202kHz

#### 4.4.4 다양한 주파수 범위에서의 차주파수 빔패턴 측정

다음은 동일한 차주파수 신호 일지라도 발생시키는 원주파수의 조합이 달라짐에 따라 지향성이 어떻게 변하는지 측정하고자 차주파수는 고정된채 원주파수 신호의 범위를 190~207 kHz 범위로 다양하게 하여 측정한 실험결과이다. Fig. 4.13는 10 kHz 차주파수 실험결과이고 Fig. 4.14는 5 kHz 차주파수 결과이다.

Fig. 4.14, Fig.4.15 통해 알 수 있듯이 차주파수의 크기에 상관없이 10 ° 미만의 빔폭을 가지는데, 이는 PA의 가장 대표적인 음향특성을 확인시켜주는 결과로써 일반적인 음원과 달리 저주파 신호임에도 불구하고 고지향성을 보이는 흥미로운 결과라 할 수 있다. 또한, 차주파수 신호의 빔패턴 형상은 원주파수 신호의 주파수 크기보다 빔패턴 형상에 따라 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다. 다만 원주파수 신호의 빔패턴들이 다양한 범위에서도 형상이 비슷한 것과 달리 차주파수 신호 빔패턴의 부엽은 제각기 다른 형상을 보이는데, 이는 비선형성을 고려한 이론적인 해석과 수중환경에 대한 정밀한 분석을 통해 오차를

구명할 수 있을 것으로 보인다.

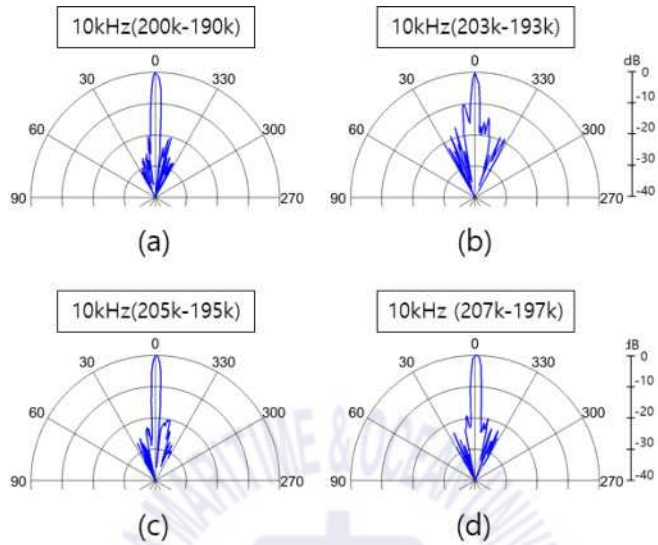


Fig. 4.14 10kHz 차주파수 빔패턴 측정 결과

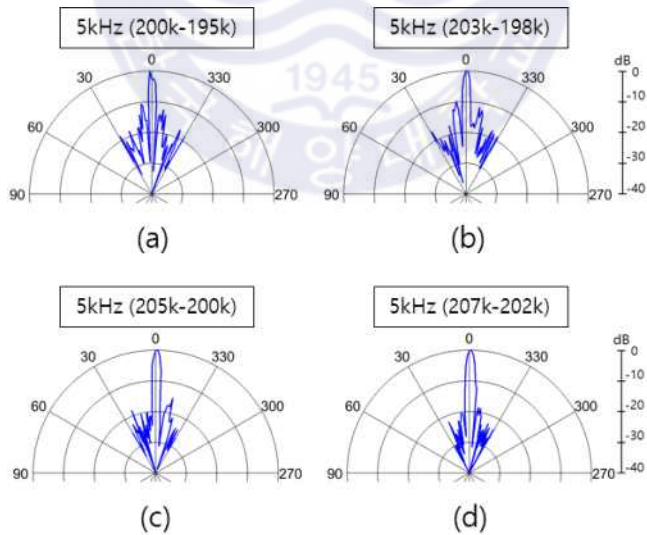


Fig. 4.15 5kHz 차주파수 빔패턴 측정 결과

#### 4.5 송·수신기 간 거리변화 실험결과

다음 실험은 수조 내 공간상에서의 음압의 변화를 측정한 실험결과이다. 송신기와 수신기의 거리를 60 cm부터 수조의 벽 근처인 190 cm까지 5 cm 간격으로 변화시켜가며 음압의 변화를 측정한다. Fig. 4.16는 거리에 따라 원주파수 신호와 차주파수 신호의 세기 변화를 나타낸 그래프로써 왼쪽의 y축이 원주파수 성분의 준위를 나타내고, 오른쪽 y축이 차주파수 성분의 준위를 나타낸다. 두 원주파수 신호는 거리에 따라 차주파수 신호보다는 비교적 적게 감소하는 반면 차주파수 신호는 원주파수 신호보다 큰 폭으로 작아질 뿐만 아니라 150 cm 부근에서는 거리가 멀어지는 상황에서 오히려 세기가 커지는 불규칙한 변화를 보였다. 확산손실을 확인하기 위해 거리가 두 배 차이나는 지점 간의 세기 변화를 Table. 4.1에 정리한 결과 두 원주파수 신호의 평균 감소 폭은 5.11 dB 였고 차주파수 신호의 감소 폭은 10.61 dB였다. 구형 전파를 가정했을 때 두 배 거리변화에 의한 확산손실은  $-6(=20\log\frac{1}{2})$  dB로 계산할 수 있으며, 이는 원주파수 신호의 평균 감소 폭과 약 0.89 dB 차이가 났다. 발생한 오차는 수조 실험의 환경이 원거리장과 근거리장이 교차하여 완전한 구형 전파를 가정할 수 없는 조건에서 비롯된 것으로 보인다.

차주파수 신호는 원주파수 신호와 달리 이론값인 -6 dB보다 큰 폭으로 감소함을 보였는데 그 원인은 비선형 현상에 근거한 'pseudo sound'로 예상된다. pseudo sound란 가짜 차주파수 신호를 이르는 용어로 짧은 수조 길이로 인해 수신기에 도달한 원주파수 신호가 여전히 큰 세기를 유지하여 수신기 표면이나 수신기 내부 회로에서 차주파수와 같은 주파수를 재차 발생시키는 현상을 말한다[1][5]. 발생한 pseudo sound는 매질을 전파하는 동안 생성된 진짜 차주파수 성분과 합쳐져 정확한 차주파수 신호를 측정하기 어렵게 만들 뿐만 아니라 감소하는 폭도 크고 일정하지 않아 예측하기가 어렵다. 이를 방지하기 위해서는 송·수신기 사이에 저주파는 통과시키면서 고주파를 크게 감쇠시키는 음향필터



를 설치하여 pseudo sound의 근본적인 원인인 원주파수 신호를 수신기로부터 차단하는 것이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며[8] 본 연구에서도 추후 음향필터를 설치하여 pseudo sound의 유무를 확인하고 발생을 감소시키는 방안을 후속 연구로 진행할 예정이다.

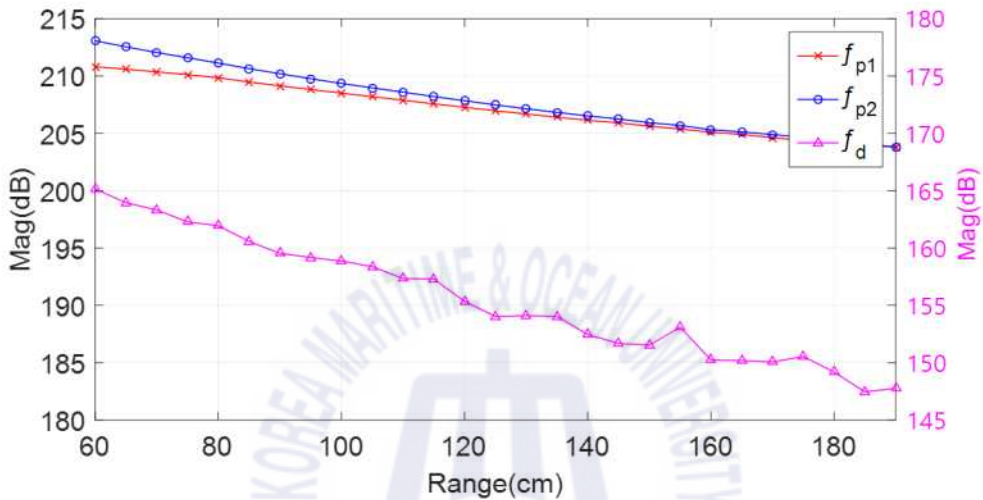


Fig. 4.16 수신기 거리변화에 따른 원주파수와 차주파수의 세기 변화 측정 결과

Table. 4.1 거리(cm)가 두배 늘어날 때의 세기(dB) 변화

거리	$f_{p1}$	$f_{p2}$	$\frac{(f_{p1} + f_{p2})}{2}$	$f_d$
60cm→120cm	3.54	5.23	4.52	9.80
65cm→130cm	3.90	5.41	4.76	9.84
70cm→140cm	4.23	5.53	4.96	10.87
75cm→150cm	4.49	5.67	5.14	10.75
80cm→160cm	4.75	5.82	5.33	11.71
85cm→170cm	4.86	5.74	5.34	10.52
90cm→180cm	4.99	5.86	5.45	10.37
95cm→190cm	5.03	5.95	5.52	11.41

## 5. 결론

### 5.1 결론

일반적인 저주파 음원을 가지고 음향재료의 특성을 육상수조에서 측정하는 것은 비용적 증가, 공간의 제약 그리고 운용의 어려움 등이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 대안은 파장보다 짧은 배열로 고지향성·저주파 신호를 생성하는 PA를 음원으로 사용하는 것이다.

본 논문에서는 PA를 크기가 제한된 수조에서 저주파 음원으로 사용하기 위한 적합성을 확인하는 실험을 수행하였다. 송신기의 TVR을 고려하여 원주파수 신호의 대역을 190~210 kHz로 설정한 뒤 송신신호 길이와 입력전압을 변화시켜가며 생성되는 차주파수 신호를 측정하였다. 실험결과 송신신호의 길이와 0.4 ms로 했을 때 차주파수 성분이 발생 되었으며 'reflection free time'을 확보할 수 있었다.

송신기의 출력을 최대로 하기 위해 입력전압을 350 mV로 설정한 뒤 5 kHz와 10 kHz의 차주파수 신호를 발생시켜 빔패턴을 측정하였다. 측정 결과를 통해 확인한 원주파수 신호와 차주파수 신호의 -3 dB 빔폭은 각각  $10^\circ$ ,  $5^\circ$  이하로 뛰어난 고지향 특성을 확인할 수 있었다.

마지막으로 수신기를 5 cm 간격으로 이동시켜가며 원주파수 신호와 차주파수 신호의 세기를 측정하여 거리에 따른 세기 변화를 분석하였다. 원주파수는 거리에 따라 일정하게 세기가 감소했으며 거리가 두 배 멀어질 때 평균 5.11 dB 감소하였다. 이는 원거리장과 근거리장이 교차하는 수조의 환경을 고려했을 때 구형 전파에 의한 이론적 확산손실 값인 6 dB와 비슷한 감소 폭이었다. 한편 차주파수 신호의 세기는 거리가 두 배 증가할 때 평균 10.6 dB 감소했고

특정 구간에서는 거리가 멀어짐에도 차주파수 신호의 세기가 더 커지는 불규칙 현상을 보였는데 이는 수신기 내부에서 발생하는 가짜 차주파수 신호인 이른바 ‘pseudo sound’의 영향으로 예측된다.

## 5.2 향후 계획

본 논문에서는 수조와 측정시스템을 구축하여 앞서 언급한 다양한 실험을 수행하였다. 실험결과를 통해 확인한 PA의 저주파·고지향 특성은 수조실험의 주요 문제인 반사 및 회절 신호의 발생을 사전에 차단하는 데 강점이 되므로 PA를 저주파 음원으로 사용하는 것이 적합하다고 판단된다. 그러나 최종 목표인 음향재료의 특성을 측정하는 데 PA를 사용하기 위해서는 차주파수 세기의 불규칙한 변화와 같은 현상에 대해서 원인을 분석해야 할 필요가 있다.

향후 연구에서는 불규칙한 차주파수 신호 변화의 주원인이 되는 pseudo sound의 영향을 확인하고 발생을 최소화하는 실험을 두 가지 방법으로 진행할 예정이다. 첫 번째는 원주파수 신호를 크게 감쇠시키면서도 차주파수 신호는 통과시키는 음향필터를 송신기와 수신기 사이에 설치하여 pseudo sound 발생 여부를 확인하는 방법이다. 필터를 이용하여 수신기 표면에 도달하는 원주파수 신호의 크기를 큰 폭으로 감소시키면 pseudo sound 발생이 자연적으로 줄어들게 되고, 필터의 설치 여부에 따른 차주파수 신호의 세기를 비교하여 pseudo sound 발생 여부를 분석할 예정이다. 두 번째로는 대형 수조에서의 차주파수 신호의 세기 변화를 측정하는 방법으로 송신기와 수신기 사이의 거리를 15 m 이상으로 넓혀 원주파수 신호가 충분히 감소할 수 있는 거리를 확보하고 pseudo sound 발생 여부를 측정할 예정이다. 이 실험은 기존의 육상수조에서는 측정할 수 없는 원거리장 범위를 측정하는 실험이며, 원주파수 신호의 크기가 긴 송신 거리에 의해 자연적으로 감소해 pseudo sound의 영향이 없는 영역에서 측정할 수 있으므로 차주파수 신호의 규칙적인 변화를 측정할 수 있을 것으로 예상된다. 두 가지 실험 방법을 통해 pseudo sound의 여부를 확인하고 차주파

수 신호의 음향특성을 분석한 뒤, 최종적으로 PA를 저주파 음원으로 사용하여 음향재료의 특성을 측정하는 실험을 수행할 예정이다.

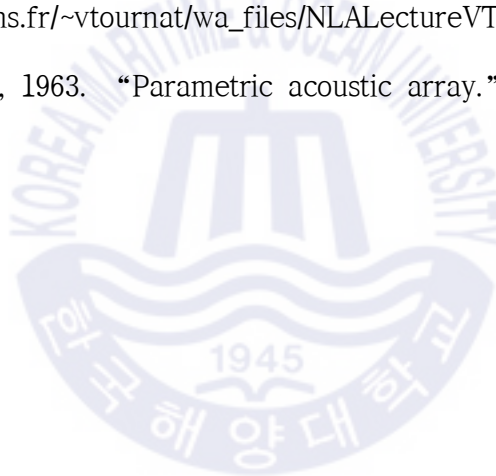
순번	예정실험	연도		연도					
		2020	2021	3	4	1	2	3	4
1	육상수조에서 음향필터 설치 여부에 따른 차주파수 세기 변화 측정								
2	대형수조실험을 통한 원거리장에서의 차주파수 세기 변화 측정								
3	대형수조에서 음향필터를 설치 여부에 따른 차주파수 세기 변화 측정								
4	PA음원을 이용한 음향재료 특성 측정								

Fig. 5.1 향후 연구 계획 로드맵

## 참고문헌

- [1] 김원호, 2012. “파라메트릭 배열의 음장 측정 결과 고찰.” 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp.202-203.
- [2] 문병천, 김무준, 하강열, 김천덕, 2000. “파라메트릭 송파 방식을 이용한 기중 지향성 음원의 개발.” 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19(2).
- [3] 이종현, 이재일, 배진호, 2014. “파라메트릭 배열을 이용한 해저지층 탐사 알고리즘.” 한국해양공학회지, 28(1), pp.55-63.
- [4] 제엽, 이재일, 이종현, 문원규, 2009. “파라메트릭 어레이를 이용한 공기 중 디지털 통신 연구.” 한국음향학회지, 28(8), pp.768-773.
- [5] 주형식, 김양한, 2005. “파라메트릭 스피커의 근접음장 방향성 특성연구.” 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp.545-550.
- [6] 황용환, 제엽, 문원규, 2015. “고지향 수중 통신을 위한 파라메트릭 어레이 트랜스듀서의 설계 및 개발 연구.” 한국음향학회지, 34(2), pp.117-129.
- [7] Haksue Lee, Daesil Kang, and Wonkyu Moon. 2009. “A micro-machined source transducer for a parametric array in air.” J. Acoust. Soc. Am. 125 (4)
- [8] Humphrey, V. F., Robinson, S. P., Smith, J. D., Martin, M. J., Beamiss, G. A., Hayman, G. and Carrol, N. L., 2008. “Acoustic characterization of panel materials under simulated ocean conditions using a parametric array source.” J. Acoust. Soc. Am. 124, 803

- [9] Laurent Kopp, Daniel Cano, Evelyne Dubois, Liansheng Wang, Brian Smith, and Rodney F. W. Coates, 2000. "Potential performance of parametric communications." IEEE journal of oceanic engineering, Vol. 24, No.3.
- [10] Mark F. Hamilton, David T Blackstock, 1998. "Nolinear Acoustics." Academic Press.
- [11] Michael A. Ainslie, and James G. McColm, 1998. "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water." J. Acoust. Soc. Am. 103, 1671.
- [12] Nonlinear Acoustics Lecture (2014, February 12). Retrieved from [erso.univ-lemans.fr/~vtournat/wa\\_files/NLALectureVT.pdf](http://erso.univ-lemans.fr/~vtournat/wa_files/NLALectureVT.pdf)
- [13] P. J. Westervelt, 1963. "Parametric acoustic array." J. Acoust. Soc. Am. 35, 535-537.



## Appendix

### A. 4장 실험결과 보충

#### A.1 차주파수 신호 측정 실험결과



### A.1.1 5kHz 차주파수 신호 측정(거리 1.5m)

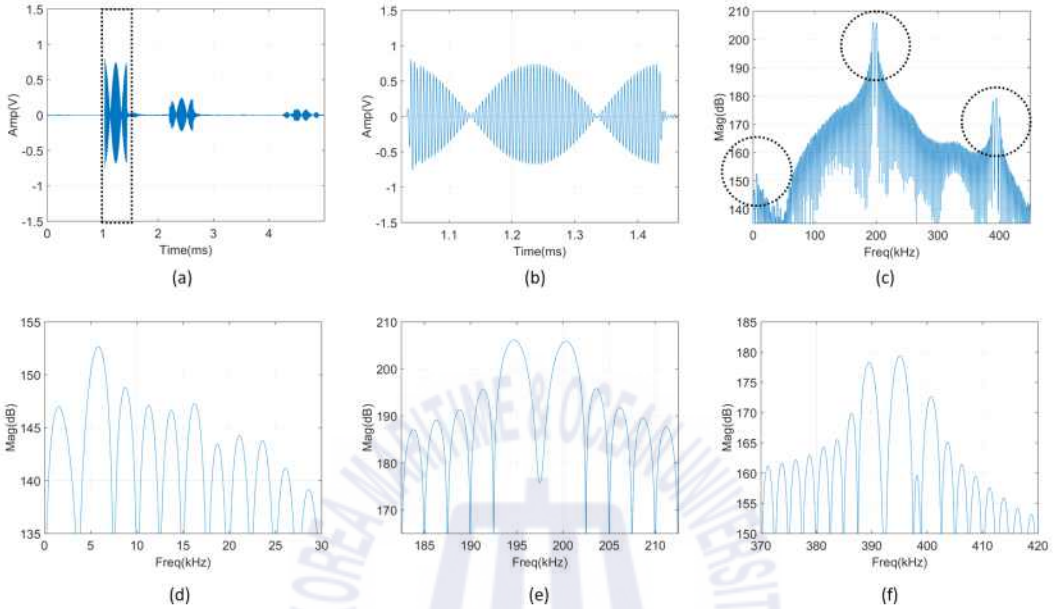


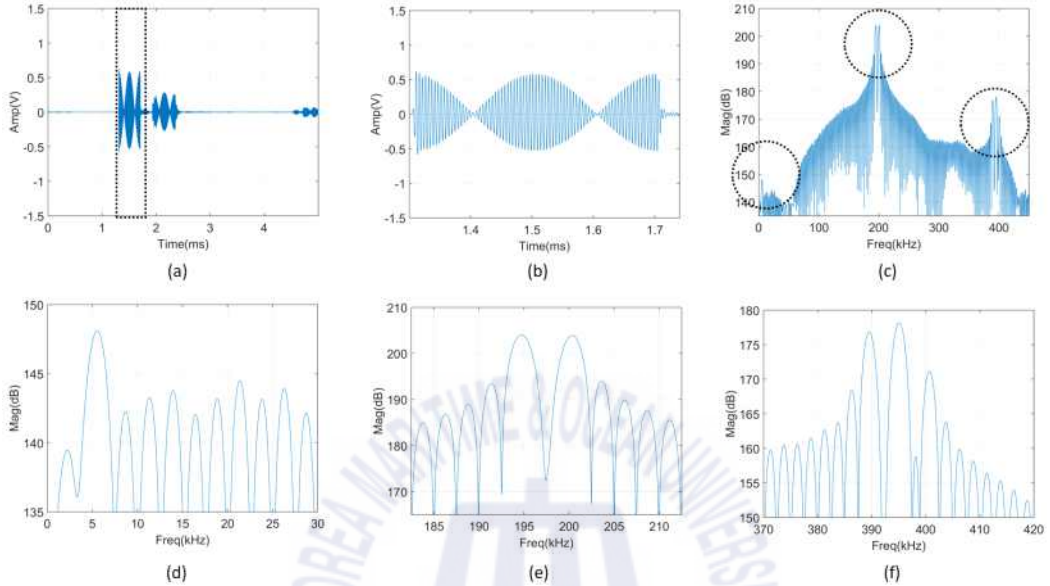
Fig. A.1 1.5m 거리에서의 5kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분

Table. A.1 1.5m거리에서 5kHz 차주파수 신호 측정결과

	예상값	측정값(주파수/ 파워)
높은 원주파수	200kHz	200.4kHz / 205.9dB
낮은 원주파수	195kHz	194.7kHz / 206.1dB
차주파수	5kHz	5.86kHz / 152.7dB
합주파수	395kHz	395.3kHz / 179.3dB
높은 고조파	400kHz	400.7kHz / 172.6dB
낮은 고조파	390kHz	389.6kHz / 178.3dB



### A.1.2 5kHz 차주파수 신호 측정(거리 1.9m)

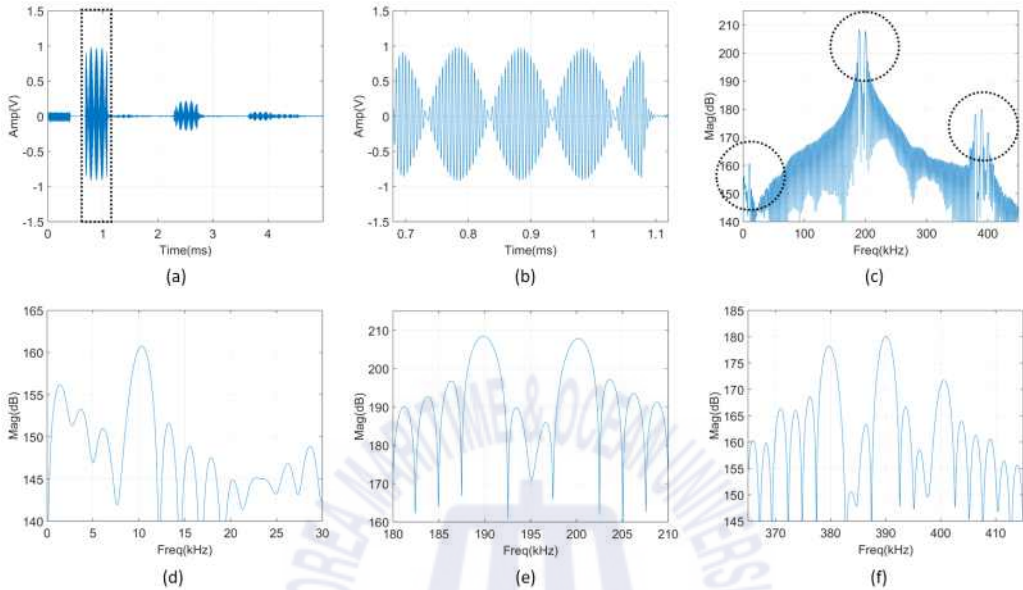


**Fig. A.2** 1.9m 거리에서의 5kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0~450kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분

**Table. A.2** 1.9m거리에서 5kHz 차주파수 신호 측정결과

	예상값	측정값(주파수/ 파워)
높은 원주파수	200kHz	200.3kHz / 203.9dB
낮은 원주파수	195kHz	194.7kHz / 204.0dB
차주파수	5kHz	5.54kHz / 148.1dB
합주파수	395kHz	395.2kHz / 178.1dB
높은 고조파	400kHz	400.7kHz / 171.2dB
낮은 고조파	390kHz	389.6kHz / 176.9dB

### A.1.3 10kHz 차주파수 신호 측정(거리 1m)



**Fig. A.3** 1m 거리에서의 10kHz 차주파수 신호 측정 결과 (a)시계열 수신신호, (b)확대한 직접파 신호, (c)주파수 스펙트럼(0-450kHz), (d)확대한 차주파수 성분, (e)확대한 원주파수 성분, (f)확대한 고조파, 합주파수 성분

**Table. A.3** 1m거리에서 10kHz 차주파수 신호 측정결과

	예상값	측정값(주파수/ 파워)
높은 원주파수	200kHz	200.2kHz / 207.8dB
낮은 원주파수	190kHz	189.kHz / 208.5dB
차주파수	10kHz	10.32kHz / 160.8dB
합주파수	390kHz	390.1kHz / 180.1dB
높은 고조파	400kHz	400.7kHz / 171.7dB
낮은 고조파	380kHz	379.7kHz / 178.2dB

## A.2 송신신호 길이 변화 실험결과(거리 1.5m)

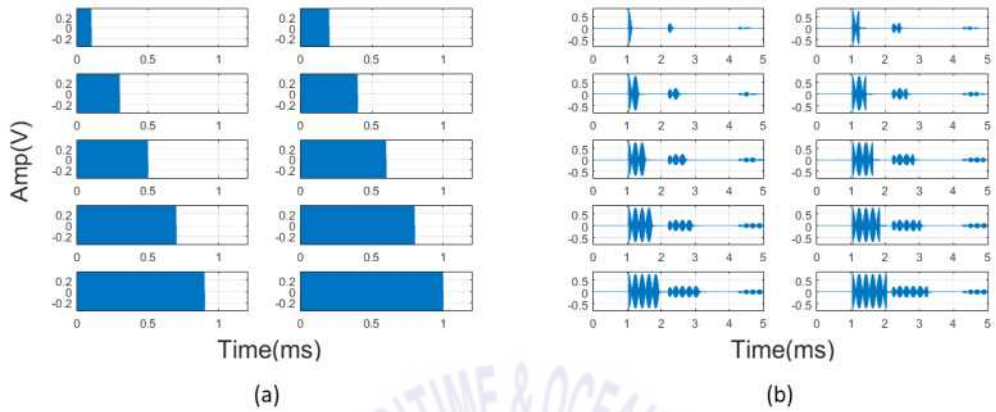


Fig. A.4 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호

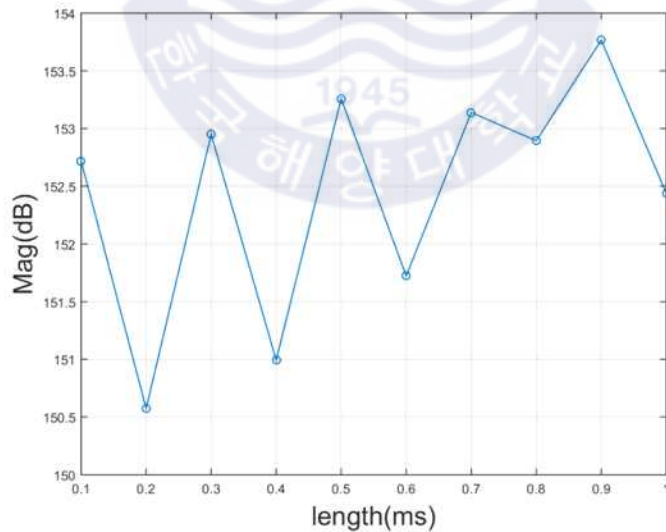


Fig. A.5 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화

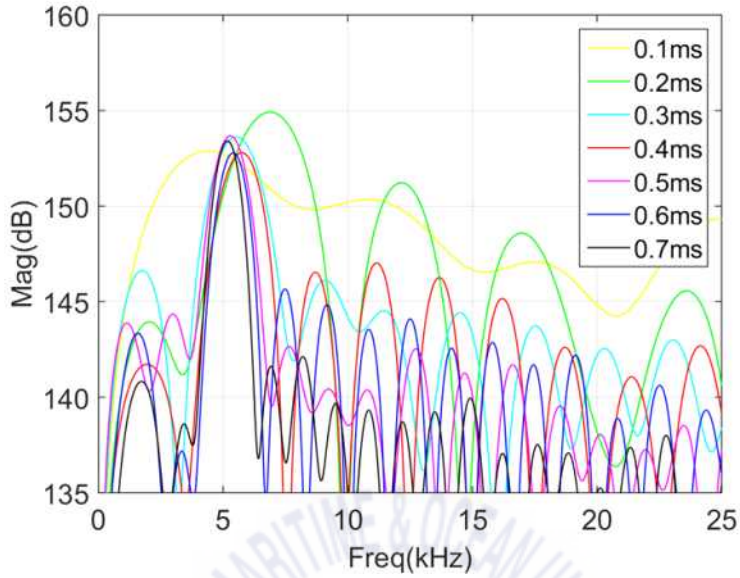


Fig. A.6 1.5m 거리에서의 송신신호 길이 변화에 따른 스펙트럼 결과

### A.3 송신신호 입력전압 변화 실험결과(거리 1.5m)

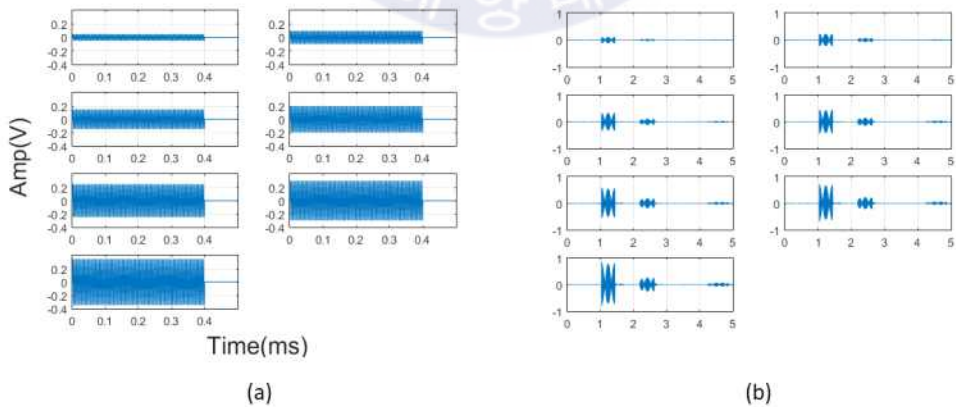


Fig. A.7 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화 실험, (a)송신신호, (b)수신신호

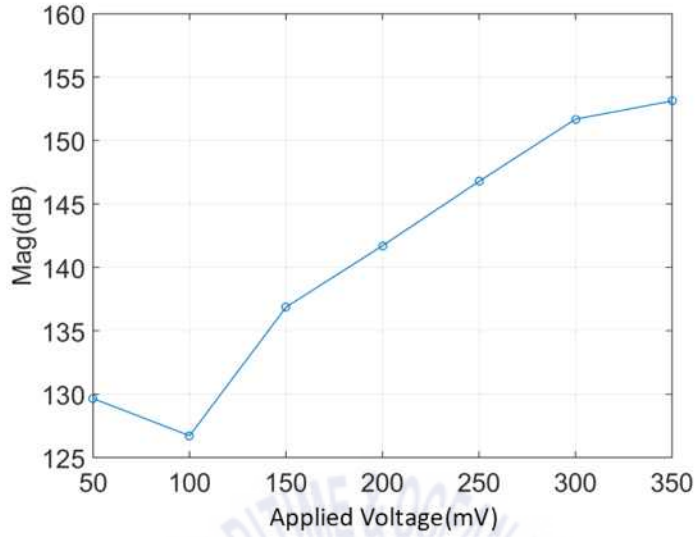


Fig. A.8 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화에 따른 차주파수 신호의 세기 변화

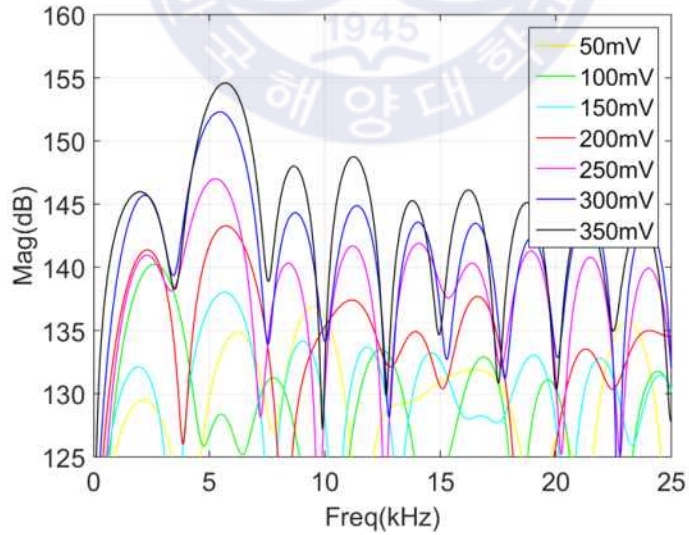


Fig. A.9 1.5m 거리에서의 송신신호 입력전압 변화에 따른 스펙트럼 결과

## A.4 빔패턴 측정 실험결과

### A.4.1 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정(거리 1.5m)

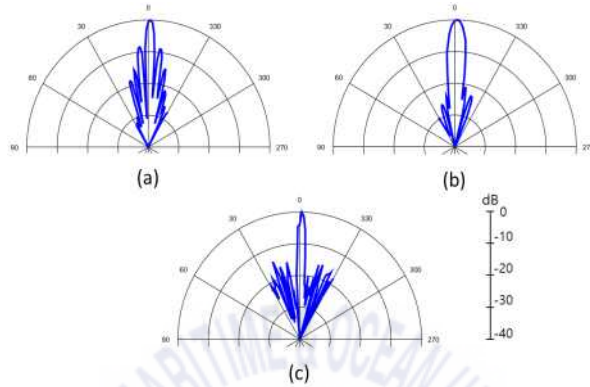


Fig. A.10 1.5m 거리에서의 빔패턴 측정 결과,  
(a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

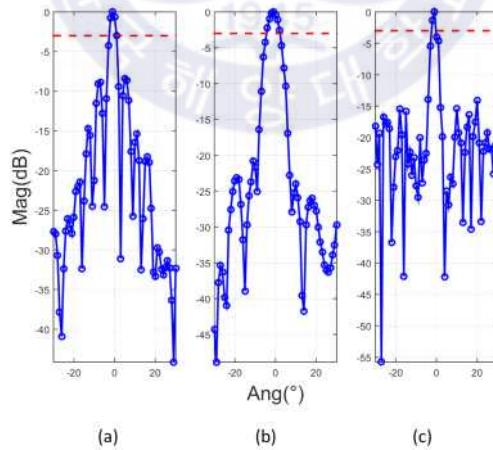


Fig. A.11 1.5m 에서의 빔폭(-3dB) 측정결과,  
(a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

A.4.2 원주파수 신호와 차주파수 신호의 빔패턴 측정(거리 1.9m)

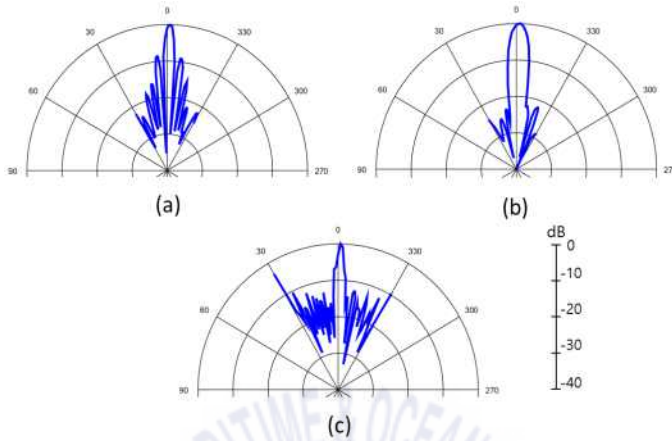


Fig. A.12 1.9m 거리에서의 빔패턴 측정 결과,  
(a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

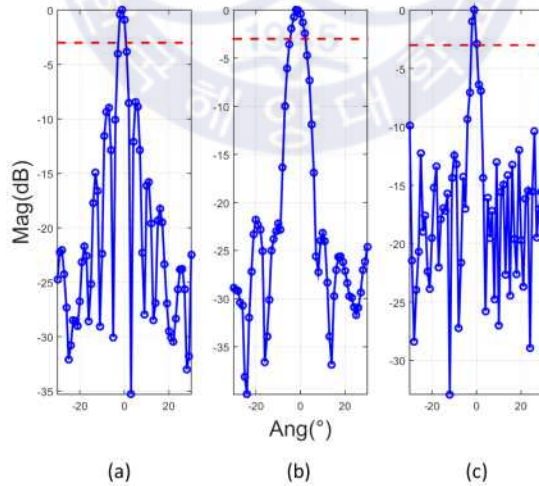


Fig. A.13 1.9m 에서의 빔폭(-3dB) 측정결과,  
(a)200kHz, (b)195kHz, (c)5kHz

A.4.3 송신방식 차이에 따른 원주파수 신호의 빔패턴 측정(205kHz, 195kHz)

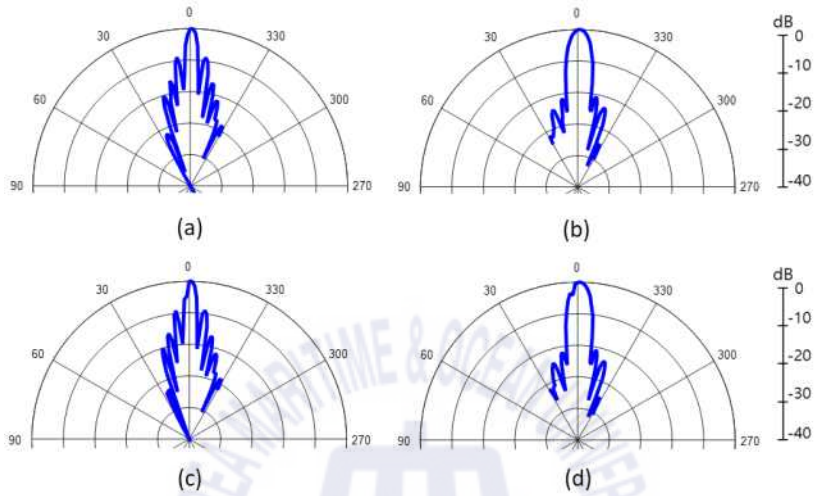


Fig. A.14 송신방식에 따른 빔패턴 측정 결과, (a)205kHz, (b)195kHz, (c)205kHz, (d)195kHz



## B. 측정시스템 구축

본 연구에서는 PA의 특성을 측정하기 위한 수조, 치구, 전자계측 장비등을 제작 및 구매하여 측정시스템을 구축하였다. A.1, A.2절에 실험에서 사용된 장비들의 사양, 용도 등을 상세히 기록하였다.

### B.1 육상 정밀측정용 수조

수조의 정확한 명칭은 “육상 정밀측정 수조” 로써 실험 수행시 송·수신기의 위치를 정밀하게 제어하고 공간상의 정렬을 확인하고자 투명 아크릴로 Fig.B.1과 같이 제작하였다. 크기는 물 부피 기준 1.2 m(폭)×1.2 m(수심)×2.5 m(길이) 이고 용량은 3.6 ton이다. 물을 채웠을 경우 수조벽이 볼록해지는 현상을 방지하기 위해 40 mm의 아크릴로 제작했으며, 수조 가운데 철제 프레임을 세로로 설치하여 보강하였다.

### B.2 위치제어용 치구

위치제어용 치구는 Fig.B.2와 같은 개념을 바탕으로 설계 및 제작을 수행하였다. 본 논문의 단계에서는 송·수신기용 치구만 있어도 실험할 수 있지만, 연구의 최종단계에서는 송신기, 수신기, 음향필터, 음향재료를 동시에 설치하여 실험해야 하기 때문에 장기적인 관점으로 제작을 진행하였다.

위치제어용 치구는 세 부분으로 구성되는데 레일, 레일 위에서 이동하는 치구 그리고 Z축(수심방향)과 회전축을 제어하는 치구로 나뉜다. 레일은 수조 상단에 결합하는 방식으로 수조와 결합 분리가 가능하도록 설계했다. Fig.B.3과 같이 수조 위에 레일을 설치하고 치구를 제작하여 장비들이 3 차원 공간에서 자유롭게 위치를 변경할 수 있도록 하였고 회전 또한 가능하도록 설계하였다.



Fig. B.1 육상 정밀측정 수조

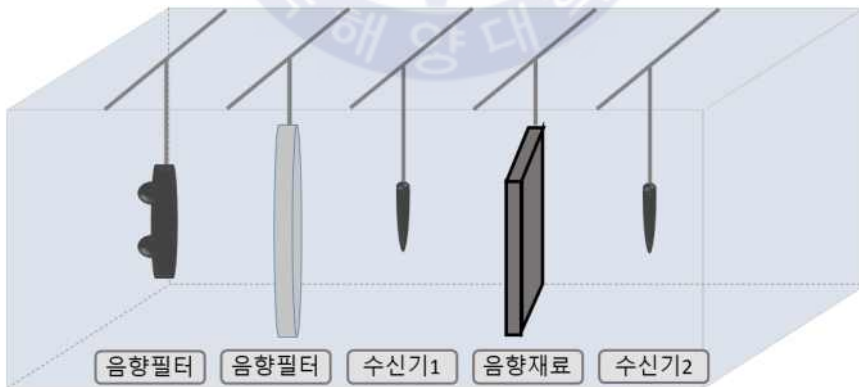


Fig. B.2 수조 내 장비 및 구조물 배치도

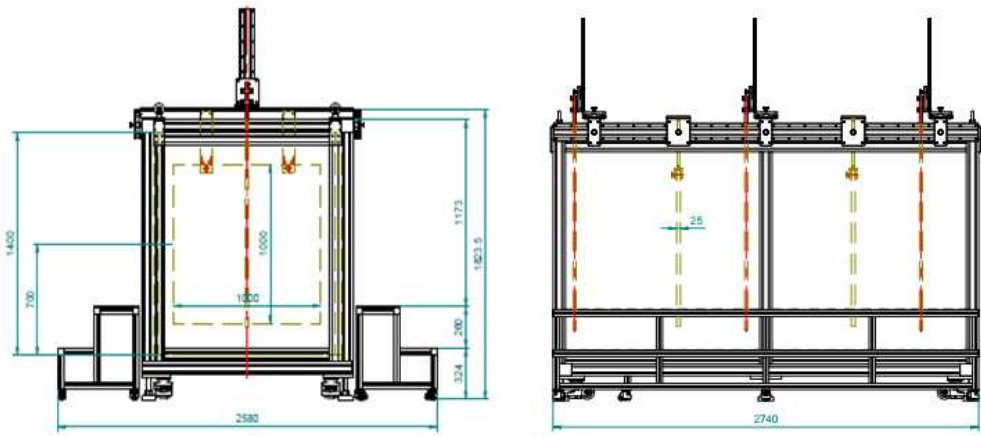


Fig. B.3 수조, 치구 3D 설계도



Fig. B.4 수직/회전 방향 제어 치구

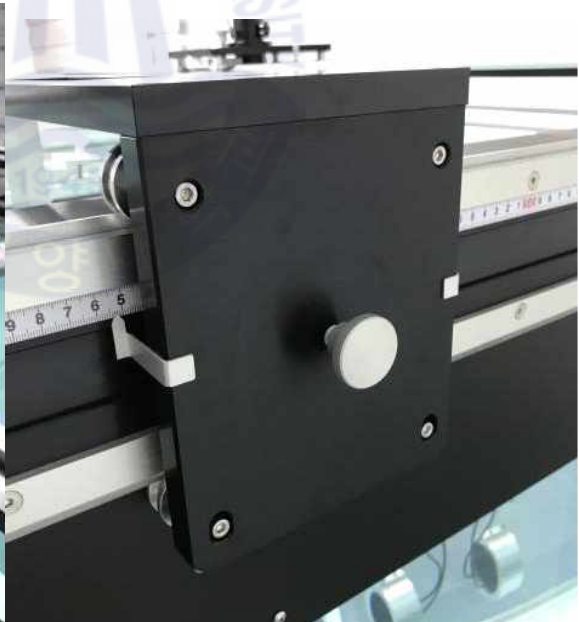


Fig. B.5 수평 방향 제어 치구

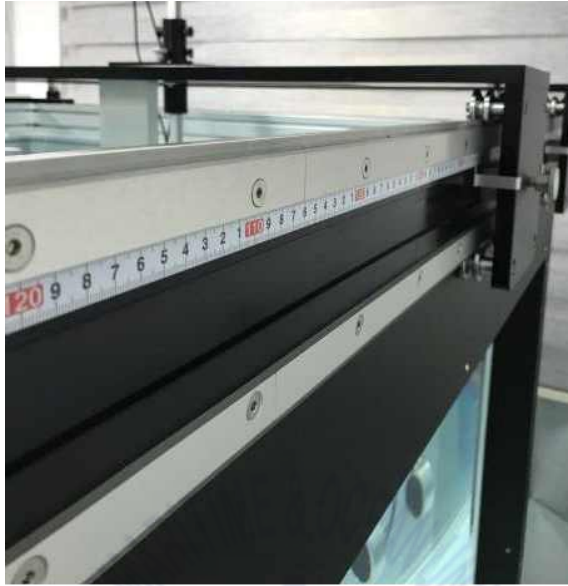


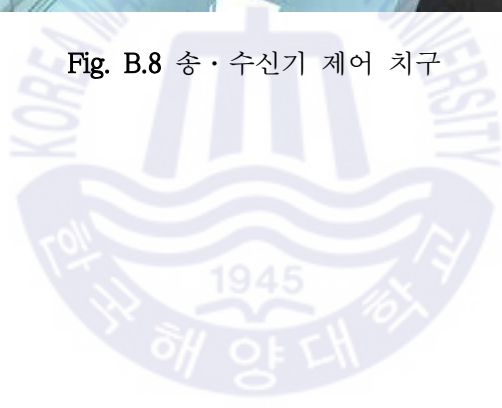
Fig. B.6 수평 방향 레일



Fig. B.7 음향재료, 음향필터 제어 치구



Fig. B.8 송·수신기 제어 치구



### B.3 송 · 수신기 고정용 치구

Fig.5 각각 알루미늄과 합성수지로 제작한 송신기 수신기 치구이다. 송신기 치구는 Tilt를 제어할 수 있도록 설계했으며 센서와 치구 사이에 스펀지를 끼워 치구로 인한 진동이 작용하지 않도록 설치하였다. 수신기 치구는 수신기의 하단에 있는 오링을 사용하여 수중에서 고정시켜 설치하였다. 또한, 수신 시 반사 신호가 생기지 않도록 수신기와 접촉되는 부위를 최대한 얇게 제작하였다.

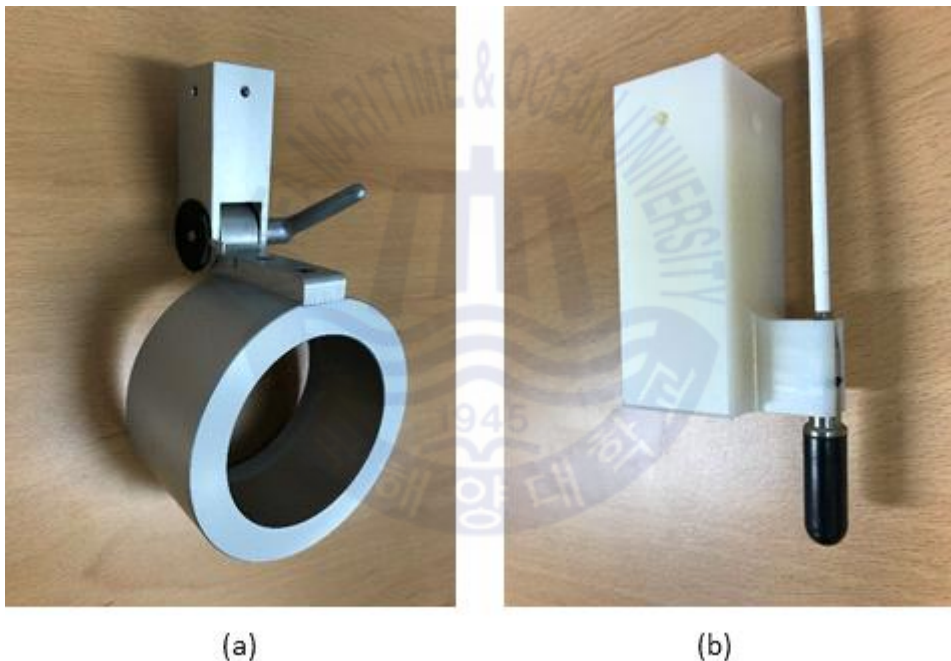


Fig. B.9 (a)송신기 고정 치구, (b)수신기 고정 치구

#### B.4 전자 계측 장비의 세부 사양

Fig. B.10은 실험에 사용한 측정시스템의 전자 계측 장비 구성도이다. 본 실험에서는 장비 구성을 크게 2가지 방식으로 사용하였는데 ENI앰프 방식과 Bentho앰프 방식이다. 최초의 측정시스템은 Bentho앰프 방식으로, 송신신호의 세기를 제어할 수 없는 단점과 전압이 역류하는 현상이 발견되어 최종 시스템은 ENI앰프 방식으로 개선하여 구성하였다. Fig. B.11은 구성한 장비 사진이다. (Bentho앰프 방식은 Appendix. C에 따로 상세히 정리하였다.)

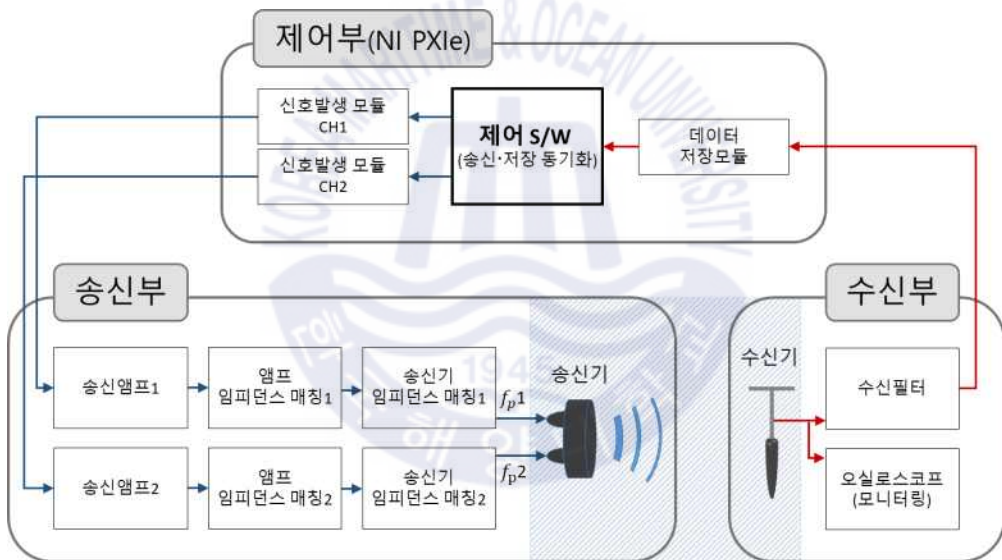


Fig. B.10 전자 계측 장비 구성도(ENI앰프 방식)



Fig. B.11 측정시스템이 구현된 모습

#### B.4.1 송신기, 송신기용 임피던스 매칭



(a)

(b)

Fig. B.12 (a)송신기(BII-7544), (b)임피던스 매칭기(BII-6000)



Table. B.1 송신기(BII-7544) 사양

사양
Signal Type : Ricker, Pulsed SINE, Chirp/FM, PSK, FSK, etc., Pulsed Square Waveform, CW.
Primary Frequency : 180 to 210 kHz
Secondary Frequency : 2 to 20 kHz
Source Level (10kHz) : >199 dB $\mu$ Pa@1m
Free-field Voltage Sensitivity : -185 dB V/ $\mu$ Pa
-3dB Beam Width : 8°
Beam Pattern : Conical
Side Lobe Level : $\leq$ -17.7 (dB)
Admittance or Impedance : Refer to admittance graph.
Maximum Input Pulse Power (MIPP) : 850 Watts @ +17°C water
Maximum Pulse Width MPW @ MIPP : 35 Seconds @ +17°C water
Maximum Continuous Input Power (MCIP) : 23 Watts @ +17°C water
Cable Length : 2 x 10m.
Maximum Operating Depth : 10m
Mounting Options : Free Hanging
Connector : BNC Male
Size : $\Phi$ DxH= $\Phi$ 89x50mm
Operation Temperature : -10 to +60°C, Refer to Warning.
How to determine pulse width, duty cycle and off-time with input pulse power (peak power) :
1. Determine the input pulse power (IPP, peak power) with sound intensity required by the project. IPP MUST be less than MIPP;
2. Pulse Width $\leq$ (MIPP * MPW)/IPP;
3. Duty Cycle D $\leq$ MCIP/IPP;
4. Off-time $\geq$ PW*(1-D)/D.

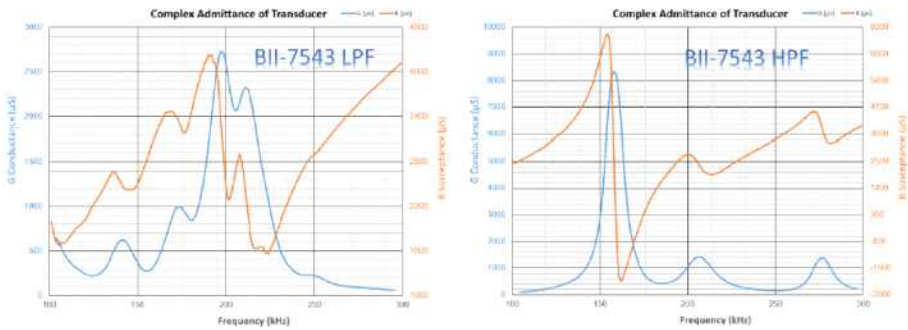


Fig. B.13 Admittance of Transducer

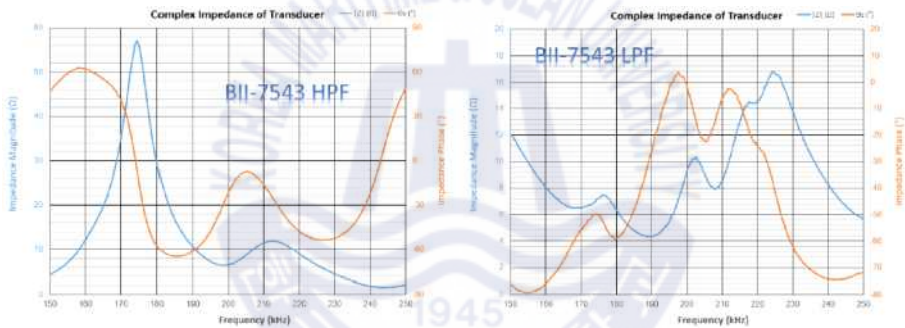


Fig. B.14 Impedance of Transducer

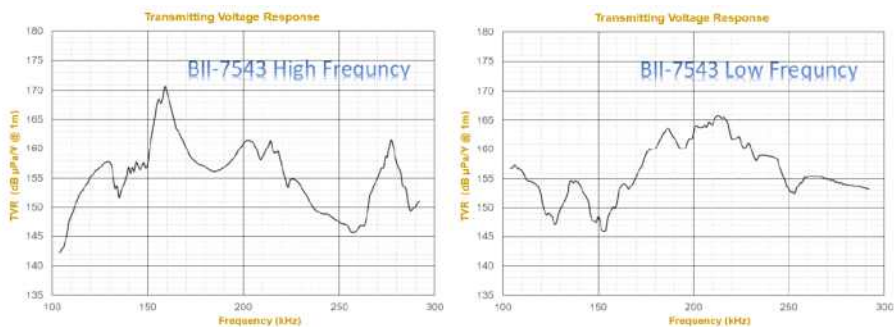


Fig. B.15 Transmitting Voltage Response

## B.4.2 PXIe 송신모듈, 데이터 저장모듈



Fig. B.16 송신 모듈(상단 좌측), 데이터 저장 모듈(상단 우측), 모듈 슬롯(하단)

Table. B.2 송신모듈(PXIe-5433) 사양

사양
출력 채널수 : 2채널
최대대역폭 : 80MHz
최대업데이트 속도 : 800MS/s
아날로그 출력 분해능 : 16비트
아날로그 출력 전압 범위 : -12V ~ 12V
아날로그 출력 온보드 메모리 크기 : 512MB

Table. B.3 데이터 저장모듈(PXIe-5172) 사양

사양
입력 채널수 : 4채널 동기 신호 저장
최대대역폭 : 100MHz
최대샘플 속도 : 250MS/s
아날로그 입력 분해능 : 14비트
아날로그 입력 전압 범위 : -40V ~ 40V
아날로그 온보드 메모리 크기 : 750MB

### B.4.3 송신앰프, 앰프용 임피던스 매칭



(a)



(b)

Fig. B.17 (a)송신앰프(ENI100S04), (a)임피던스 매칭기(JT-12)

Table. B.4 송신앰프(ENI100S04) 사양

사양
주파수 범위 : 20kHz~400kHz
전력이득 : 60dB
정격출력 : 1000 Watts into 50Ω
전력이득평탄도 : 1dB into 50Ω
입력임피던스 : 50Ω
출력임피던스 : 50Ω
크기 : 88.9×482.6×571.5mm
무게 : 14Kg

Table. B.5 임피던스 매칭기(JT-12) 사양

사양
주파수 범위 : 10kHz~10MHz
최대 입력 파워 : 150Watts
입력임피던스 : 50Ω
출력임피던스 : 12Ω
입력/출력 커넥터 : BNC cable
크기 : 120×120×94mm

#### B.4.4 수신기



Fig. B.18 수신기(TC4034)

Table. B.6 수신기(TC4034) 사양

사양
Usable Frequency range:1Hz to 470kHz (+3, -10dB)
Linear Frequency range:1Hz to 250kHz (+2, -4dB)
Receiving Sensitivity: (re 1V/ $\mu$ Pa)-218dB $\pm$ 3dB (at 250Hz)
Horizontal directivity:Omnidirectional $\pm$ 2dB (at 100 kHz )
Transmitting sensitivity:122dB $\pm$ 3dB (typical) re 1 $\mu$ Pa/V at 1m at 100kHz
Vertical directivity:>270° $\pm$ 3dB (at 300kHz)
Nominal Capacitance:3nF
Operating Depth:900m, Survival Depth:1000m
Operating Temperature range:-2°C to +80°C
Storage Temperature range:-40°C to +80°C
Weight incl. cable,(in air):1.6 kg
Cable (length and type):Standard 10m shielded pair DSS-2MIL-C915.
Encapsulating Material:Special formulated NBR
Metal body:Alu-bronze - AlCu10Ni5Fe4
Connector type:BNC

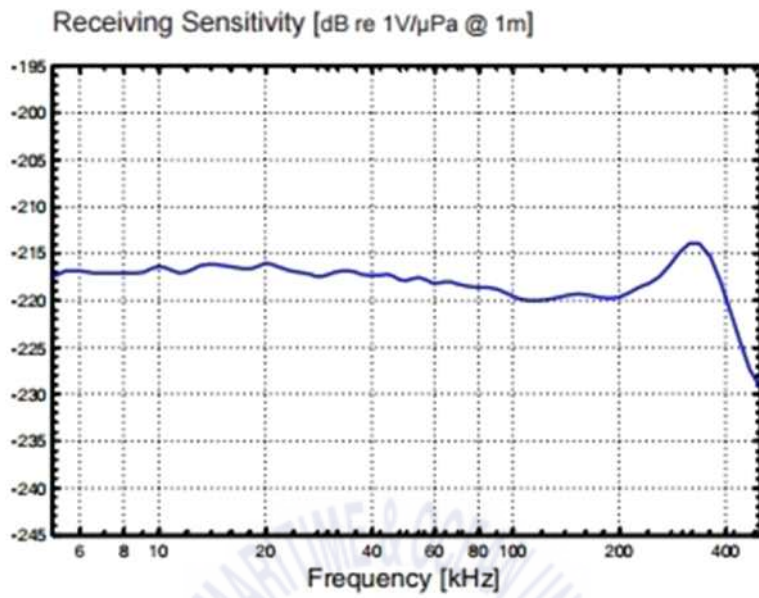


Fig. B.19 Receiving Sensitivity

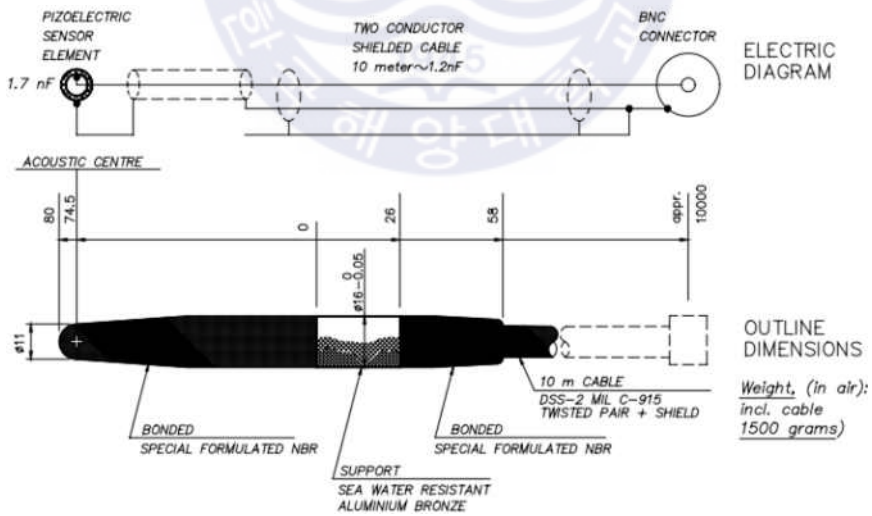


Fig. B.20 Electrical Diagram and Outline Dimensions

## B.4.5 수신필터



Fig. B.21 수신필터(KH-3944)

Table. B.7 수신필터(KH-3944) 사양

사양
입력 채널 : 4 채널(독립)
필터종류 : Butterworth or Bessel
감쇠경도 : 24dB/Octave/Channel
주파수 범위 : 3Hz ~ 2MHz
입력이득 : 0dB, 20dB
출력이득 : 0dB, 20dB
저지 대역 감쇠 : >95dB
입력/출력 커넥터 : BNC cable



## B.4.6 오실로스코프



Fig. B.22 오실로스코프(RTE-1054)

Table. B.8 오실로스코프(RTE-1054) 사양

사양
채널 : 4채널
샘플링 : 5 GS/s
분해능 : 16비트
10.4" 컬러 디스플레이
입력/출력 커넥터 : BNC cable
크기 : 427 mm × 249 mm × 204 mm
추가기능 : 주파수영역 분석 (FFT)

### C. 송신신호 구성 방법(Bentho 앰프방식)

측정시스템 구성 초기에는 송신부를 Benthowave 앰프를 사용하여 실험했으나, 전압 역류 현상이 발생하고 전압제어가 불가능한 문제점이 발생하여 ENI 앰프방식으로 개선하였다. Fig. C.1은 Benthowave 앰프방식을 사용해 구성된 측정시스템 구성도이다. 본 절에서는 측정시스템 구성 시 문제해결의 한 과정으로써 Benthowave 앰프방식을 설명한다.

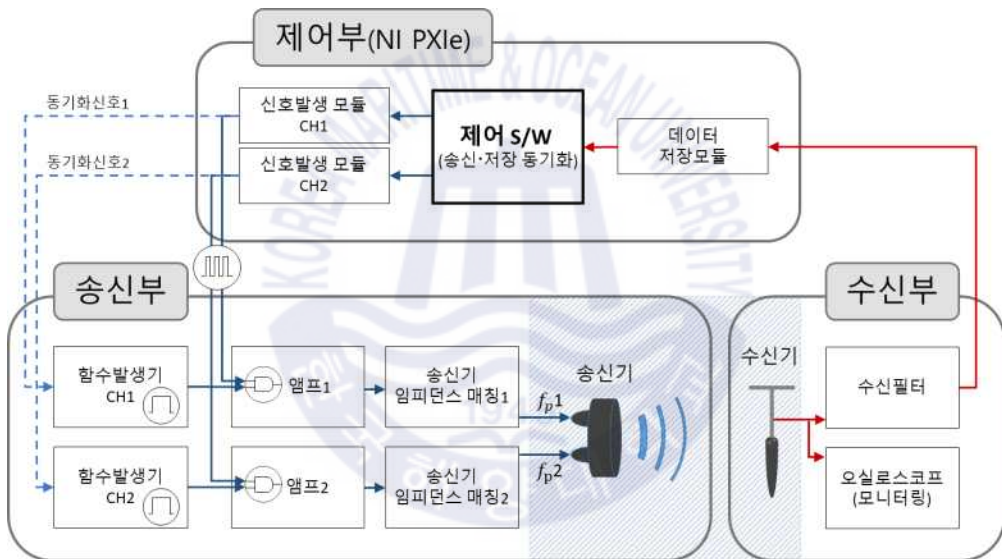


Fig. C.1 전자 계측 장비 구성도(Bentho앰프 방식)

최초에 사용한 파워앰프(BII-5101, Benthowave)는 한 개의 증폭된 신호를 발생하기 위해 두 개의 사각파 신호를 동시에 입력해야 한다. 첫 번째 입력 신호는 최종 송신하고자 하는 신호의 주파수를 결정하는 신호로써 Fig. C.2(a)와 같이 사각파 형태의 신호를 CMOS 또는 TTL 레벨에 맞게 전압을 맞추어 입력해야 한다. 실험에서는 NI 신호발생 모듈을 이용해 고주파수의 사각파를 High Level 4.25 V, Low Level 0.4 V로 생성하였다. 두 번째 입력 신호는 최종 송신 신호의 길이를 결정하는 신호로써 Fig. C.2(b)처럼 펄스 신호형태로 입력해야

하며 실험에서는 별도의 함수발생기를 사용하여 High Level 4.3 V, Low Level 0.3 V의 신호를 0.4 ms 길이로 생성하였다. 두 입력 신호를 앰프에 입력한 결과는 Fig. C.2(c)과 같은 사인파로써 첫 번째 입력 신호의 주파수 성분을 가지며 두 번째 입력 신호만큼의 길이를 갖는 형상이다.

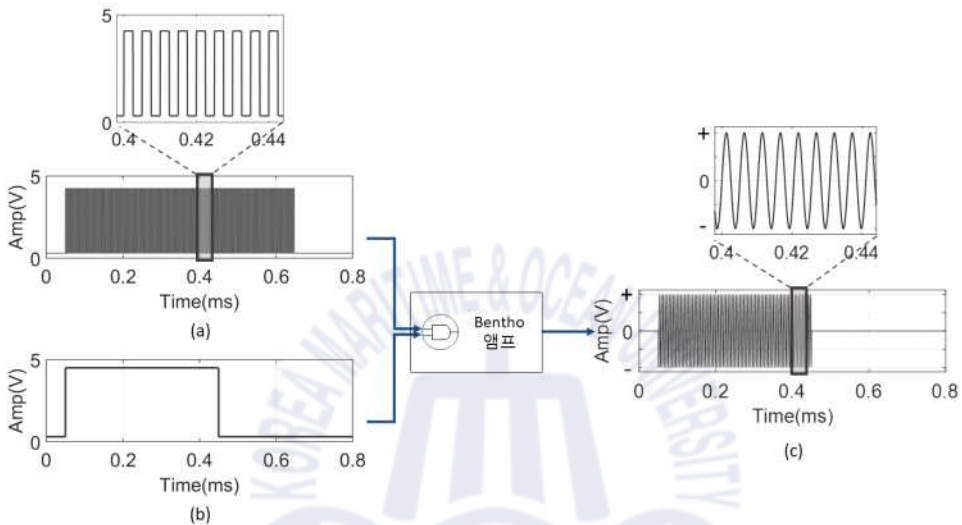


Fig. C.2 (a)고주파수 사각파, (b)신호길이 제어용 사각파, (c)고주파수 사인파

송신기에 두 개의 입력 신호를 인가하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 펄스파 2개, 사각파 2개 총 4개의 신호가 필요하다. 실험에서는 2채널 신호 발생 모듈과 2채널 함수발생기를 사용하여 총 4채널을 구성했으며 신호 발생 모듈과 함수발생기는 트리거 신호를 연결하여 동기화하였다. Fig. C.1의 제어부에 있는 NI 신호 발생 모듈에서는 서로 다른 고주파수 사각파를 2개 생성하여 두 대의 파워앰프 각 1번 채널에 인가했고, Fig. C.1의 송신부에 있는 함수발생기로는 0.4 ms 펄스 신호 2개를 만들어 두 대의 파워앰프 각 2번 채널에 인가하였다. 펄스파와 사각파를 각각 한 채널씩 입력받은 파워앰프는 1번 채널로 입력받은 사각파 신호의 고주파수와 같은 주파수의 사인파 신호 1개를 출력한다.

두 대의 파워앰프를 통해 얻은 서로 다른 고주파수의 사인파는 두 개의 임피던스 매칭기를 각각 거쳐 최종적으로 송신기에 입력된다. Bentho 앰프방식으로

생성한 송신신호를 가지고 실험한 결과는 Fig. C.3과 같다. 수신된 신호 파형은 ENI앰프 방식과 같았지만, 점선으로 표시한 원형과 같이 시작하자마자 데이터가 측정되는 전압 역류 현상이 발견되었으며 진폭을 제어할 수 없는 한계점이 존재하였다.

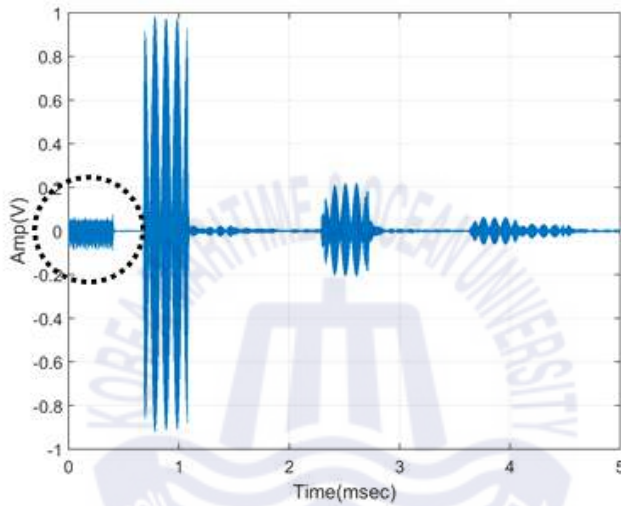


Fig. C.3 전압 역류 현상