



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](#)

박사학위논문

어군에 의한 중주파수 대역의  
음향 감쇠 실험 및 탐지 성능 모델링

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

김 한 수

2020년 2월

# 어군에 의한 중주파수 대역의 음향 감쇠 실험 및 탐지 성능 모델링

김 한 수

지도교수 팽동국

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2020년 01월

김한수의 공학박사 학위논문을 인준함

심사위원장            배 진 호



위 원            팽 동 국



위 원            배 윤 혁



위 원            조 성 호



위 원            박 지 성



제주대학교 대학원

2020년 01월



**Sound Attenuation by Fish Schools at  
Mid-frequency through Experiments  
and Modeling of Detection Performance**

Hansoo Kim

(Supervised by Professor Dong-Guk Paeng)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Doctor of Philosophy

2020. 2

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

<b>LIST OF FIGURES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LIST OF TABLE</b> .....	<b>x</b>
<b>요약문</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 어류 설명 및 어군에 의한 음파 전달 영향.....	7
1.3 기존 연구 분석 및 본 연구 목적.....	9
<b>제 2 장 음향 감쇠 특성 이론</b> .....	<b>12</b>
2.1 음향 산란 및 감쇠 이론 .....	12
2.2 어류의 체중 및 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적 .....	15
<b>제 3 장 어군에 의한 음향 감쇠 특성 해상 실험</b> .....	<b>18</b>
3.1 대상 어종 .....	18
3.2 해상 실험 방법.....	22
3.2.1 송신 센서 주파수 별 감도 측정 .....	22
3.2.2 어군 밀도에 따른 음향 감쇠 특성 실험 구성 .....	25
3.2.3 송신 음향 신호 및 준위.....	28
3.2.4 수신 음향 자료 분석 및 처리.....	29

3.3 해상 실험 획득 자료 분석 결과.....	31
3.3.1 어군 밀도에 따른 주파수 별 수신 음향 준위 분석 결과.....	31
3.3.2 음향 감쇠 계수 분석 결과.....	35
3.3.3 기존 연구 및 본 연구 소멸 단면적 값 비교 분석 결과.....	42
3.4 토의.....	49
<b>제 4 장 생물학적 요소를 적용한 중주파수 대역의 소나 탐지 성능 모델링 .....</b>	<b>54</b>
4.1 수중음향 모델링 개요.....	54
4.2 소나 탐지 성능 모델 적용 .....	57
4.3 탐지 성능 예측을 위한 잔향음 준위, 능동 신호 초과, 탐지 확률 계산.....	61
4.4 탐지 성능 모델링을 위한 우리나라 연근해 환경 변수 자료 수집... 64	
4.4.1 해양 환경 자료 수집.....	64
4.4.2 해저 지형 자료 수집.....	68
4.4.3 해저면 저질 성분 자료 수집.....	69
4.5 탐지 성능 모델 입력 변수 및 시나리오 구성.....	72
4.5.1 해역 별 수집된 환경 자료.....	72
4.5.2 탐지 성능 모델 환경 및 시스템 입력 변수.....	76
4.5.3 탐지 성능 모델링 시나리오 구성.....	79
4.6 어군이 존재하지 않는 환경에서 해역 별 탐지 성능 모델링 수행 결과.....	83

4.7 어군이 존재하는 환경의 해역 별 탐지 성능 모델링 수행 결과.....	89
4.7.1 황해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과.....	91
4.7.2 남해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과.....	95
4.7.3 동해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과.....	99
4.8 토의.....	103
<b>제 5 장 결론 및 향후 연구 계획.....</b>	<b>111</b>
5.1 결론.....	111
5.2 향후 연구 계획.....	114
<b>부록.....</b>	<b>116</b>
<b>참고문헌.....</b>	<b>123</b>

## LIST OF FIGURES

Figure 1. 해양생물의 등가 구형 지름에 따른 음향탐지 주파수 피라미드 (Medwin and Clay, 1998) .....	5
Figure 2. 해군 함정에 설치되어 있는 선저 고정형 소나 (Aselsan, 2019) .....	5
Figure 3. 선저 고정형 소나 운용 시, 필요한 중요 음향 변수 (물리학적, 지질학적, 생물학적 요인) (NOAA, 2019) .....	6
Figure 4. 주파수와 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적 결과. 각각의 심볼들은 기존 연구 및 어종을 기반으로 정규화하여 소멸 단면적으로 나타낸 결과이며, 굵은 직선은 기존 연구들의 정규화된 소멸 단면적 결과를 토대로 2 차 회귀 분석 결과 (Furusawa et al. 1992) .....	17
Figure 5. 우리나라 주변 해역 주요 어종의 어획량 변화 (통계청 어업생산동향조사, 2018) .....	20
Figure 6. (좌) 음향 감쇠 실험에 사용한 전갱이의 총 체장(Total length)별 대표적인 샘플 12 마리, (우) 음향 감쇠 실험에 사용한 대표적인 전갱이 총 체장의 히스토그램(Histogram) 분포도 .....	20
Figure 7. 실험에 사용한 전갱이의 가랑이 체장(Folk length, cm)과 체중(Wet weight, g) 관계식을 통해 변환한 각 개체 별 가랑이 체장과 체중 분포 .....	21
Figure 8. 송신 센서 T335 트랜스듀서의 TVR (Transmit Voltage Response) 그래프 (회색 음영 부분은 실험에서 사용한 주파수 대역) .....	24
Figure 9. 실내 수조에서 송신 감도 측정 실험 방법 모식도 .....	24
Figure 10. 한국해양과학기술원 통영해양생물자원기지 연구용 가두리 내에서 설치한 송신 센서, 미세 그물, 수신 센서 .....	27



Figure 11. 송수신 센서, 그물, 수중카메라를 이용한 음향 감쇠 실험 모식도.....	27
Figure 12. Case 1 (Non-net) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	34
Figure 13. Case 1~7 실험에 따른 주파수 별 평균 수신 준위 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz .....	37
Figure 14. Case 1~7 실험에 따른 주파수 별 최저 수신 준위(최대 감쇠) 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz .....	38
Figure 15. 어군 밀도 별(100 마리 파란색 점선, 200 마리 빨간색 직선, 300 마리 녹색 직선, 400 마리 분홍색 파선, 500 마리 검은색 일점 쇄선) 3~7 kHz 주파수 대역의 (상단) 평균 음향 감쇠 계수 및 (하단) 최대 음향 감쇠 계수 결과.....	41
Figure 16. 기존 연구 및 본 연구의 주파수에 따른 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적 결과 그림 (검은색 회귀선은 Furusawa et al.,(1992)가 제시한 2 차 회귀 분석 모델, 빨간색 회귀선은 본 연구에서 새롭게 계산한 2 차 회귀 분석 모델).....	45
Figure 17. 기존 연구 및 본 연구의 주파수에 따른 어류의 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적 결과 그림 (빨간색 회귀선은 본 연구에서 새롭게 계산한 2 차 회귀 분석 모델).....	46
Figure 18. 주파수 7 kHz 에서의 어군 밀도(Only net, 100, 200, 300, 400, 500 EA)에 따른 수신 준위(Direct path, 3.6~4.0 ms) 히스토그램 분포도.....	53
Figure 19. 다양한 수중음향 모델의 천해/심해 환경, 주파수에 따른 환경, 독립	

혹은 종속 변수 환경에 따른 적용성 (Jensen et al., 1994).....	56
Figure 20. GDEM 모델 자료를 통해 획득한 우리나라 연근해 표층 수온 분포 (a) 하계와 (b) 동계 시기 .....	67
Figure 21. 우리나라 황해, 남해, 동해 해역의 해저면 저질 분포 및 표층 퇴적물의 종류에 따른 평균 입도 크기 자료 분류 (국립해양조사원, 2019) .....	71
Figure 22. (a) 황해, (b) 남해, (c) 동해 해역의 소나 탐지 성능 모델링 정점 및 계절(2 월, 8 월)별 수심에 따른 음속 프로파일 .....	75
Figure 23. 황해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률 .....	86
Figure 24. 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률 .....	87
Figure 25. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률 .....	88
Figure 26. 황해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	93
Figure 27. 황해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선	

경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	94
Figure 28. 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	97
Figure 29. 남해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	98
Figure 30. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	101
Figure 31. 동해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	102
Figure 32. (상) 황해 및 (하) 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 대형 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	108

Figure 33. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 대형 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률.....	109
Figure 34. (상) 황해, (중) 남해, (하) 동해 해역 별 수심 50 m 지점에서의 탐지 확률 (a) 어군이 존재하지 않는 환경, (b) 어군이 존재하는 환경, (c) 대형 어군이 존재하는 환경 (빨간 점선은 탐지 확률 50 %을 의미).....	110
Figure 35. Case 2 (Only net) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	117
Figure 36. Case 3 (100 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	118
Figure 37. Case 4 (200 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	119
Figure 38. Case 5 (300 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	120
Figure 39. Case 6 (400 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.....	121
Figure 40. Case 7 (500 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz,	

(e) 7 kHz..... 122

## LIST OF TABLE

Table 1. 각 케이스 별 어류 음향 감쇠 실험 .....	26
Table 2. 각 주파수 별 송신 센서 TVR, 입력 전압 ( $V_p$ ), RMS 입력 전압과 압력 (Voltage, Pressure), 송신 준위 (Source level) .....	28
Table 3. 송신기, 수신기 및 음향 감쇠 실험에 사용되는 환경 변수 .....	30
Table 4. Case 1~7 실험 및 주파수 별 평균 수신 준위 (Mean received level) 및 최소 수신 준위(Minimum received level) 계산 결과 .....	39
Table 5. 어군을 이용한 음향 감쇠 실험을 통해 획득한 기존 및 본 연구 결과 요약(연구자, 어종, 주파수, 체중, 총 체장, 체적당 밀도, 소멸 단면적, 체중으로 정규화된 소멸 단면적, 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적) .....	47
Table 6. 모델링을 수행하기 위한 각 해역 정점의 위/경도, 수심, 해저면 저질 성분, 평균 입자 크기 .....	74
Table 7. 모델링을 수행하기 위해 필요한 시스템 및 환경 입력 변수 .....	78
Table 8. 모델링의 생물학적 요소들, 각 해역 별 주파수에 따른 감쇠 계수, 어군의 위치(수심, 거리)에 따른 크기 .....	90
Table 9. 각 해역 별로 주파수 4 kHz 동계 시기 소나 성능 탐지 모델링, 어군이 존재하지 않는 환경, 어군이 존재하는 환경, 대형 어군이 존재하는 환경에서 수심 50 m 지점의 최소 및 최대 탐지 거리 계산 결과 (탐지 확률 50 % 이상) .....	107

## 요약문

수중에서 음파의 전달은 유체 매질과 경계면에 의한 반사, 투과, 감쇠, 산란의 복잡한 상호 작용에 의해 영향을 받는다. 특히 해양 환경에서 소나 시스템을 운용할 때, 음속과 같은 물리학적 요인과 해저 지형, 해저면 저질 성분과 같은 지질학적인 요인과 해수면에 의해 발생하는 경계면에서의 반사 및 산란의 영향을 받는다. 물리학적이나 지질학적 요소에 의한 음파 전달 연구는 많이 진행되어 왔으나, 어군과 같은 생물학적 요소에 의한 음파 전달 연구는 미흡하다. 해양 환경에서 어군에 의한 음향 감쇠 특성 연구도 중요하기에 본 논문에서는 선저 고정형 소나 시스템에서 주로 사용하는 중주파수 대역에서 어군에 의한 음향 감쇠 특성을 연구하였다.

음향 감쇠 특성은 감쇠 이론을 기반으로 한 소멸 단면적을 계산하였으며, 실험을 통해 측정된 음향 감쇠 계수를 기존 선행 연구 결과와 비교 분석하였다. 남해안 통영 해역에 위치한 연구용 양식장 내에서 전갱이 어군을 이용하여 중주파수 대역(3~7 kHz)의 음향 감쇠 실험을 수행하였다. 송신 및 수신 센서를 수심 약 3.3 m 에 설치한 후, 송수신 센서 사이에 미세한 그물 내의 어군 밀도(non-net, only net (0), 100, 200, 300, 400, 500 EA)를 변경하면서 감쇠된 음압을 측정하였다. 그 결과, 어군 밀도에 따른 평균 감쇠 계수는 6~16 dB/m 범위로 나타났으며, 최대

감쇠 계수는 약 15~21 dB/m 범위로 측정되었다. 결과적으로 어군 밀도와 주파수가 증가함에 따라 음파의 감쇠가 증가하였으며, 이를 통해 어군과 같은 생물학적 요인은 음파 전달 측면에서 무시할 수 없음을 실험적으로 확인하였다.

어군의 영향을 포함하는 환경에서 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 수중 표적의 탐지 거리와 확률을 예측하기 위한 탐지 성능은 음향 감쇠 실험 결과를 기반으로 하여 우리나라의 대표적 세 해역인 황해, 남해, 동해 해역에서 동계(2 월)와 하계(8 월) 시기에 음선 기반 모델링을 수행하였다. 그 결과, 황해와 남해에서는 음파 전달 측면에서 상대적으로 작은 어군에 의해서도 많은 영향을 미치기 때문에 탐지 성능의 큰 변동성이 나타났다. 동해 해역에서도 음파가 전달되는 구간에서 어군에 의해 음영대가 형성됨을 확인하였다.

본 논문에서는 연구용 양식장에서 어군에 의한 감쇠 특성을 중주파수 대역에서 측정하였다. 어군에 의한 감쇠를 반영한 소나 탐지 성능 모델링을 통해 탐지 성능에 영향이 미치는 것을 확인하였으며, 이는 어군이 허위 표적으로 탐지되거나, 어군에 의해 신호를 잃어버릴 수 있음을 의미한다. 따라서 해군 작전 운용에 생물학적인 요소를 반영한다면 소나 탐지 성능이 더 향상될 것으로 판단된다.



## ABSTRACT

Sound propagation is influenced by complex interference of reflection, transmission, attenuation, and scattering with the boundaries in the acoustic fluid media. When operating sonar systems in the marine environments, they are affected by physical parameters, such as sound speed, and the geological parameters, such as the bottom topography, sediment types, and sea surface, which can cause sound reflections and scattering. Prior research extensively covered the propagation of sound waves by physical and geological parameters, but few by biological parameters, such as fish schools. The acoustic attenuation characteristics of fish schools are important to marine biology. In this study, the acoustic attenuation characteristics of fish schools were investigated in the mid-frequency range, typically used in hull mounted sonar systems.

The extinction cross-section was calculated based on the acoustic attenuation theory, and the attenuation coefficients were measured from the *in situ* experiments and compared with the ones reported in the previous studies. The fish attenuation experiments were carried out in the mid-frequency band (3~7 kHz), at the floating fish farm sea-cages, which were built for research purposes in the Tongyeong area at the Korean South Sea. The target fish is Japanese horse mackerel (*Trachurus japonicus*), which typically forms schools in the coastal ocean. The transmitter and receiver were installed at a depth of about 3.3 m, and a thin net was artificially installed for the attenuation experiments near the fish schools. The attenuated acoustic waves were measured for the cases of non-net, only net (0), 100, 200, 300, 400, and 500 fish in the

net cage. As a result, we observed that the attenuation was increased with concentrations of fish and frequency. The mean attenuation coefficient was 6~16 dB/m, and the maximum attenuation coefficient was about 15~21 dB/m. Therefore, it was experimentally confirmed that the biological parameters of fish schools could not be ignored in the context of marine sound propagation.

Sonar performance modeling was modeled in a range of marine environments, including fish schools. The system was used for predicting the target distance and detection, including the results of the acoustic attenuation experiments. The modeling, based on the ray theory, was performed during the winter (February) and summer (August) seasons in the Yellow Sea, the South Sea, and the East Sea of Korea. As a result, the detection performance varied due to the relatively small fish schools in the Yellow Sea and the South Sea. In the East Sea, it was confirmed that the fish schools formed the acoustic shadow zones in the propagation paths.

In this thesis, the attenuation characteristics of fish schools were measured at the mid-frequency band in a research aquaculture farm. Sonar performance modeling, including the experimental attenuation coefficient by the fish school, confirmed that fish schools could affect detection performance, which may result in more false positives and greater noise. Therefore, sonar detection performance will be improved by considering regional biological parameters in navy operation.

---

# 제 1 장

## 서 론

### 1.1 연구 배경

해양생물의 탐지를 위해 수중음향 기술이 처음으로 사용되기 시작한 것은 제 2 차 세계 대전 직후였다. 당시에 수중음향 기술은 주로 군사적 활용에 목적을 두었다. 따라서 해양생물 분야에 대한 수중음향의 역할은 단순히 심해 산란층(Deep scattering layer, DSL)의 존재 파악 등 한정적인 연구 분야에 활용되는 수준으로만 진행되어 왔다 (MacLennan and Simmonds, 1992). 그러나 1970 년대 이후로 능동 소나가 발달하기 시작하면서 해양생물에 대한 음향 특성 등의 연구가 진행되었다 (Kang et al., 2003). 특히 해양생물 분야에서 대상 생물을 탐지하기 위한 최적의 음향 탐지는 생물체의 크기와 연관되어 있으며, 대형 포유류에서 나노플랑크톤까지 다양한 생물체 크기에 따라 1 kHz 미만의 저주파 영역에서 250 MHz 의 초음파 영역까지 다양하게 적용되고 있다 (Figure 1). 현재까지 수중음향을 이용한 해양 생물 관련 연구에서 가장 활발하게 적용되고 있는 분야는 해양 생태계 먹이 사슬 내에서 상위 영역에 해당하는 어류의 연구이며, 주로 어군 분포 조사 및 자원량 추정 분야로

대상 주파수는 수 kHz 에서 수백 kHz 대역을 사용하고 있다 (Medwin and Clay, 1998).

반면 수 kHz 의 중주파수 대역은 음향 시스템의 규모가 상대적으로 크기 때문에 현재는 군사용으로 사용되고 있다. 군사용으로 사용되는 소나(Sound Navigation and Ranging; SONAR)는 음파를 이용하여 군사적인 목적으로 수중에 존재하는 다양한 표적들을 탐지하고 인식하는데 사용하는 시스템을 통칭한다. 일반적으로 소나는 운용 방법에 따라서 수동 소나와 능동 소나로 구분할 수 있다. 수동 소나는 수신기를 이용하여 음향 신호를 수신하여 분석하는 소나 시스템이며, 능동 소나는 표적을 탐지하기 위해 신호를 송신하고 표적에서 반향 되는 신호를 수신하여 분석하는 시스템이다. 특히 대잠수함전은 탐지 센서 성능이 큰 영향을 미치며, 현재까지 소나가 가장 효과적인 수중 표적 탐지 체계로 운용되고 있다. 주변 소음이 낮은 대양 환경에서 상대적으로 소음이 높은 디젤 잠수함이 주로 사용되던 냉전 시대에는 잠수함 방사 소음을 탐지하는 수동형 소나가 주력 탐지 장비로 운용되었다. 그러나 냉전 시대 이후에는 여러 나라들이 저소음으로 향상된 디젤 잠수함 또는 핵추진 잠수함을 보유하면서 대잠수함 작전 해역이 천해로 이동하고 있다. 이처럼 대잠수함전 상황 변화 이외에도 잠수함의 기술 발전으로 인하여 수동 소나의 탐지 거리는 수 km 미만으로 감소하는 추세이다. 또한 전 세계 해역에서 높은 해상 교통량으로 인하여 수중 배경 소음이 높아졌기

때문에 수동 소나의 표적 탐지 성능은 제한적이다. 이러한 환경에서 여러 표적을 효율적으로 탐지하기 위해 군사적인 목적을 기반으로 능동 소나의 중요성이 지속적으로 강조되고 있는 추세이다. 현재 전 세계적으로 해군 함정에서 수중 내 표적 탐지를 위해 사용하고 있는 능동 소나의 선저 고정형 소나(Hull Mounted Sonar; HMS) 시스템은 중주파수 대역을 사용한다 (Figure 2). 선저 고정형 소나의 사용 주파수는 장비에 따라 다르지만, 우리나라 해군은 약 7~10 kHz 의 중주파수 대역을 사용하고 있다. 추후에는 더 원거리까지 탐지 가능하도록 사용 주파수 대역을 3~4 kHz 까지 낮추려고 한다 (DSIT, 2019; ASELSAN, 2019).

이처럼 수중 내 표적의 탐지를 목적으로 한 효율적인 소나 사용을 위해서 해양의 음파 특성을 먼저 파악해야 한다. 일반적으로 수중에서 음파가 전달될 때, 음속의 수직 및 수평적인 구조의 물리학적 요인과 밀접하게 연관되어 있다. 수중에서는 음속이 약 1,500 m/s 로 공기 중보다 약 4.5 배 빠르고, 수온, 염분, 수심에 따른 음속의 변화가 수중 내의 음파 전달에 큰 영향을 미치게 된다 (Medwin and Clay, 1998). 또한 음파 전달 측면에서 해수 경계면에 의한 요인 이외에도 해저면 지형 또는 저질 상태 등의 지질학적 요인에 의한 반사, 투과, 감쇠, 산란 등 복잡하고 다양한 요인들에 의해 많은 영향을 받는다. 그러나 해양 생물과 같은 생물학적 요인에 의한 음파 전달 측면에 영향을 받는 감쇠 및 산란의 영향은

크다고 알려져 있지만, 현재까지 해당 연구는 상대적으로 불충분하다 (Figure 3).

해양에서 불규칙하게 존재하는 어군은 음파 전달 과정에서 방해물로 작용하게 되는 중요한 생물학적 요소이다. 수중에서 존재하는 어군은 음파의 패턴을 크게 변동시킨다 (Ye, 1996; Ye and Farmer 1996). 특히 어류의 부레는 공기로 구성되어 있으므로 해수에 비하여 음향 임피던스가 큰 차이가 있다. 따라서 음파가 어군에 전달하면서 투과, 반사, 산란, 감쇠 등 여러 작용에 의하여 음향 에너지가 손실된다 (Davies, 1973). 또한 음파의 전달 과정에서 어군의 위치, 방향, 크기 등에 영향을 받아 큰 에너지 손실을 발생시킨다 (Furusawa et al., 1992; Alvarez and Ye, 1999). 현재까지 주로 어류 또는 여러 해양생물의 단일 개체에 대한 표적 강도(Target strength; *TS*)와 체적 후방산란 강도(Volume backscattering strength; *Sv*)에 관련한 연구가 한정적으로 수행되어 왔다. 그러나 어군에 의한 음향 감쇠 연구는 그 위치와 크기가 시·공간적으로 다양하기 때문에 현재까지 정량적으로 연구되지 않았다. 해군에서 선저 고정형 소나를 이용한 표적 탐지 측면에서 물리학적, 지질학적 요소들 이외에도 생물학적인 요소까지 고려한다면 더욱 향상된 소나 운용이 될 것으로 예측된다.

<u>Marine Plants or Animals</u>	<u>Equivalent Diameter</u>	<u>Minimum Effective Detection Frequency For Non-Resonant Bodies</u>
<u>Largest Nekton: Whales and Sharks</u>	<u>2 ~ 6 M</u>	<u>75 ~ 250 Hz</u>
<u>Larger Nekton and Largest Plankton: rat-tails, deep sea cods, tuna,</u>	<u>0.2 ~ 6 M</u>	<u>250 ~ 2500 Hz</u>
<u>Smallest Nekton and Larger Plankton: Myctophids (6) stomiatoids, hatchet fishes</u>	<u>2 ~ 20 cm</u>	<u>2.5 ~ 25 kHz</u>
<u>Megaplakton: euphausiid (6), amphipod, chaetognath, some fish larvae</u>	<u>2 ~ 20 mm</u>	<u>25 ~ 250 kHz</u>
<u>Macroplankton: copepods</u>	<u>0.2 ~ 2 mm</u>	<u>250 ~ 2500 kHz</u>
<u>Microphytoplankton: dinoflagellates and diatoms (4)</u>	<u>20 ~ 200 um</u>	<u>2.5 ~ 25 MHz</u>
<u>Microzooplankton: radiolarians, foraminiferan and ciliates</u>	<u>2 ~ 20 um</u>	<u>25 ~ 250 MHz</u>
<u>Nanoplankton: flagellates, coccolithophores and diatoms</u>	<u>&lt; 2um</u>	<u>&gt; 250 MHz</u>
<u>Ultranaplankton: bacterioplankton</u>		

Figure 1. 해양생물의 등가 구형 지름에 따른 음향탐지 주파수 피라미드 (Medwin and Clay, 1998)



Figure 2. 해군 함정에 설치되어 있는 선저 고정형 소나 (Aselsan, 2019)

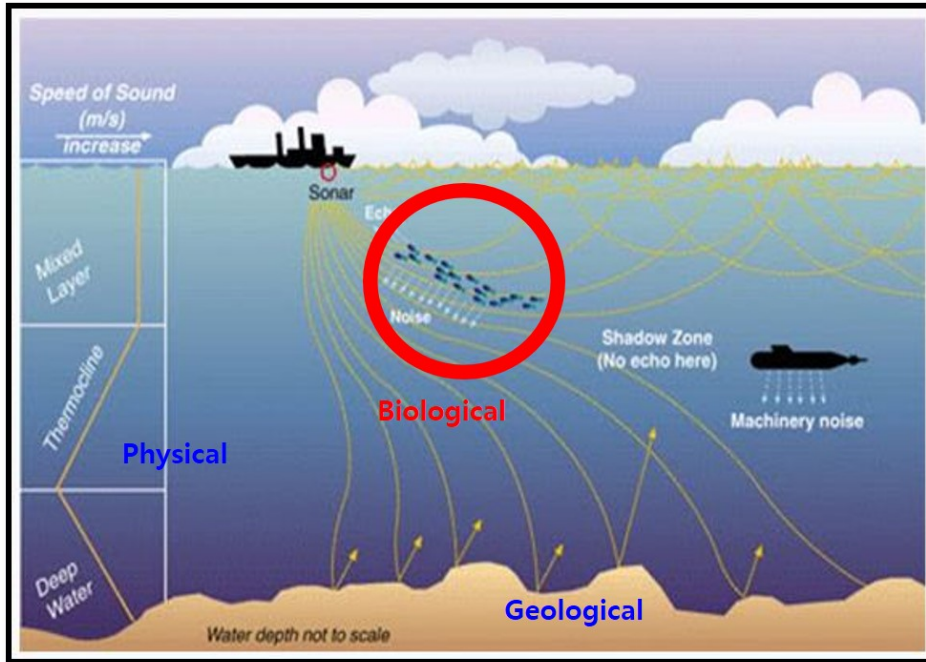


Figure 3. 선저 고정형 소나 운용 시, 필요한 중요 음향 변수 (물리학적, 지질학적, 생물학적 요인) (NOAA, 2019)



## 1.2 어류 설명 및 어군에 의한 음파 전달 영향

어류는 수중에 서식하며 아가미가 있는 척추 동물을 총칭한다. 어류는 담수와 해수에 분포하며, 표층부터 심층까지 다양한 해양 내에 서식하고 있다 (Fish base team, 2019). 일반적으로 생물학에서는 사회적인 이유로 함께 머물러 있는 어류의 그룹이 있다. 이를 통칭하여 어군(Fish schools)이라고 부르고 있다 (Helfman, et al., 1997). 어군은 생태학적으로나 형태적으로 동일한 어종들이 같은 행동을 하며 무리를 이루며 많은 개체로 구성된 어류의 집합체이다 (Helfman, et al., 1997). 현재까지 어군을 이루는 어종은 약 2,000 여 종 이상 있다고 알려져 있으며, 어군 중에는 태어나서 평생 동안 무리를 이루는 종이 있는 반면에 흩어져서 살다가 산란기 때만 모여드는 종도 존재한다 (Shaw, 1978; Helfman, et al., 1997). 어군을 이루는 이유는 포식자로부터 보호하기 위하여 군체를 이루면서 밀집하여 행동하는 성향이 있고, 특히 산란의 시기에는 이 경향이 두드러지는 측면이 있다 (Marras et al., 2015). 또한 무리를 이루어 다니기에 포식자에게 발견되기 쉽지만 오히려 포식자의 공격을 막아내는데 유리한 측면이 있다. 반면 포식 행위를 하기 위하여 무리를 이루는 경우도 존재한다 (Marras et al., 2015).

어군은 해양 생태계 내에서 불규칙적으로 존재하는 하나의 물체로 작용한다. 특히 음파가 전달하는 측면에서 소형 혹은 대형 어군과 같은

---

해양 생물의 존재는 큰 방해 요소로 작용하게 된다 (Kim et al., 2019). 주로 우리나라 인근 해역에서 서식하는 멸치, 고등어, 전갱이, 청어, 정어리 등은 일반적으로 큰 어군을 이루기 때문에 (통계청 어업생산동향조사, 2018), 음파가 수층 내에서 전달될 때 어군에 의해서 산란과 감쇠의 영향이 나타나게 된다. 또한 중주파수 대역의 음파 전달 과정에서 예측 가능한 거리 손실과 해수에 의한 흡수 손실과 불규칙성이 큰 어군에 의한 음파의 감쇠는 대잠수함전이나 수중 물체의 탐지 환경에 대한 변화가 발생한다.

### 1.3 기존 연구 분석 및 본 연구 목적

어군에 의한 음향 감쇠 특성 연구를 수행하기 위해서 관련성이 있는 기존 연구를 조사하였다. Davies (1973)는 태평양 멸치를 투명한 구에 넣고 중주파수 대역(1~20 kHz)에서 실험을 통한 어군의 감쇠 계수를 측정하는 연구를 수행하였다. Furusawa et al., (1992)는 생물음향에서 사용하는 50 kHz 주파수 대역에서 방어와 감성돔을 이용하여 어군의 감쇠 계수를 측정하였으며, 기존 연구와의 결과를 비교하였다. Ye (1996)은 어류의 총 체장에 따른 몸체와 부레에 대한 음향 감쇠 이론을 계산하였다. Gorska (2000)와 Zhao and Ona (2003)은 높은 밀도의 어군 및 동물플랑크톤이 생성하는 음향 산란 층에 의한 이론적인 음향 감쇠 특성을 연구하였다. Diachok (2005)은 천해 환경에서 중주파수 하위 대역 1~3 kHz 에서 낮과 밤에 따른 멸치 어군의 음향 감쇠를 전달 손실 측정 기반하여 연구를 수행하였다.

그러나 위 연구들은 해군에서 주로 사용하는 선저 고정형 소나 시스템의 현재 및 향후에 사용하는 중주파수 대역에서의 어군 밀도에 따른 정량적인 음향 감쇠 연구와 다르다. 또한 우리나라의 황해, 남해, 동해 해역에서 주로 서식하며 어군을 이루는 고등어과인 전갱이에 대한 음향 감쇠 연구는 알려진 바 없다. 또한 전 세계적으로 해양 방위

목적으로 사용하고 있는 중주파수 대역에서 생물학적인 요소를 포함한 탐지 성능 분석 연구는 현재까지 적용되지 않았다.

본 학위 논문의 목적은 해군에서 주로 사용하는 중주파수 대역인 3~7 kHz 주파수의 음파 전달 과정에서 어군의 존재에 따른 음향 감쇠 특성을 살펴보고자 한다. 어군의 음향 감쇠 이론을 기반으로 고등어과인 전갱이 어군의 밀도에 따른 음향 감쇠 실험을 수행하였고, 그 결과를 적용하여 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 음향 감쇠 이론에서는 어군을 대상으로 한 주파수에 따른 음향 감쇠 특성을 계산하였다. 해상 실험을 통해 송수신기 사이에 설치한 미세한 그물 내에 어군을 밀도에 따라 위치한 후 각 주파수 별로 음향 감쇠 실험을 수행하였다. 또한 기존 연구와 실험을 통해 계산된 감쇠 계수를 비교 및 분석하였다. 마지막으로 탐지 성능 모델링에서 물리학적, 지질학적 요소 이외에도 생물학적인 요소도 포함하여 모델링을 수행하였다. 이 때 선저 고정형 소나에서 잠수함 탐지를 목적으로 한 음선 기반 모델과 잔향음(Reverberation) 모델을 모두 고려한 소나 탐지 성능 모델을 토대로 생물학적인 요소를 고려하여 우리나라 대표적인 세 해역의 해양 환경을 토대로 하계와 동계 시기에 탐지 성능 모델링을 수행하여 분석하였다.

본 논문의 구성은 총 5 장으로 구성되어 있다. 제 1 장에서는 연구 배경, 어군이 음파에 미치는 영향, 기존 연구 및 본 연구 목적에 대해 기술하였다. 제 2 장에는 주파수와 어군 밀도에 따른 음향 감쇠 이론과

---

기존 연구의 결과를 분석하였다. 제 3 장에서는 실 해역에서 주파수 별로 어군 밀도에 따른 음향 감쇠 실험을 수행하였다. 실험 결과를 토대로 음향 감쇠 계수를 계산하였으며, 기존 연구 결과와 본 실험 결과를 통해 계산된 음향 감쇠 계수 값을 비교하였다. 제 4 장에서는 물리학적, 지질학적인 요소 이외에도 생물학적 요소인 어군을 고려하여 우리나라 세 해역에서 표적 탐지를 목적으로 한 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였고 탐지 확률을 제시하였다. 마지막으로 제 5 장에서는 결론 및 향후 연구 계획으로 본 학위 논문을 구성하였다.

## 제 2 장

### 음향 감쇠 특성 이론

수중에서 어군의 존재는 음파를 산란 또는 감쇠시키는 장애물로 작용한다. 특히 어류의 체내에 존재하는 부레는 해수에 비해 임피던스 차이가 크기 때문에 입사하는 음파를 감쇠 시킨다.

#### 2.1 음향 산란 및 감쇠 이론

수중에서 음파의 소멸, 즉 감쇠 현상은 여러 형태로 나타날 수 있다. 일반적으로 감쇠는 두 가지로 구분할 수 있는데, 흡수에 의한 손실과 산란에 의한 손실로 분류할 수 있다. 음향학에서는 일반적으로 특정 매질 내에 존재하는 어떤 물체에 의한 음파 에너지의 소멸을 유효 단면적을 이용하여 표현한다. 총 산란 단면적( $\sigma_s$ , Scattering cross-section)은 전 방향에서 산란 단면적의 총 합이다. 이를 식 (1)로 표현할 수 있다 (Medwin and Clay, 1998).

$$\sigma_s \equiv \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \Delta\sigma_s(\theta, \phi, f) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (1)$$

또한 총 산란 단면적은 간략하게 정리하여 식 (2)로도 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = \Pi_{scat}/I_{inc}, \quad (2)$$

여기서  $\Pi_{scat}$  는 물체에 의해 총 산란된 파워 값이며,  $I_{inc}$  는 입사 파의 세기이다. 물체에 의한 흡음으로 인해 입사 파에서 손실된 절대 파워 값은  $\Pi_{abs}$  이며, 이를 흡음 단면적( $\sigma_a$ , Absorption cross-section)으로 나타낼 수 있다 (식 3).

$$\sigma_a = \Pi_{abs}/I_{inc}, \quad (3)$$

식 (3)의 흡음 단면적을 통해 계산된 총 파워, 즉,  $\Pi_{scat} + \Pi_{abs}$  는 소멸 단면적( $\sigma_e$ , Extinction cross-section)으로 다시 정의할 수 있다 (식 4).

$$\sigma_e = (\Pi_{scat} + \Pi_{abs})/I_{inc}, \quad (4)$$

식 (2)~(4)를 기반으로 흡음에 의한 손실인 흡음 단면적과 산란에 의한 손실인 산란 단면적으로 나타내며, 이 합을 소멸 단면적이라고 정의한다 (Medwin and Clay, 1998). 이는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a, \quad (5)$$

이 때 흡음이 없으면 총 산란 단면적과 소멸 단면적이 동일하게 나타난다. 위 식의 (2)~(5)를 종합하여 수중에서 부피 내의 단위 거리당 소멸 단면적을 감쇠 계수( $\alpha$ )로 나타낸다. 감쇠 계수를 식으로 표현하면 다음의 식 (6)과 같이 나타낸다 (Medwin and Clay, 1998).

$$\alpha \text{ (dB/m)} = \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma_e, \quad (6)$$

여기서  $n$ 은 단위 체적 내의 산란체의 밀도이다. 이처럼 음향 감쇠 계수를 계산할 때 흡음 및 산란 단면적이 모두 포함된다. 그러나 실험적으로 입사파로부터 간섭이 있는 환경에서 어군에 의해 흡음된 신호와 산란된 신호를 정확하게 분리하기가 어려우며, 산란 단면적의 이론 값은 실수 또는 허수 모두 포함되어 계산하기 어렵다. 따라서 Furusawa et al., (1992)가 제안한 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적으로 계산하여 비교 및 분석해보았다.



## 2.2 어류의 체중 및 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적

식 (6)에서 계산된 감쇠 계수는 어군의 밀도와 소멸 단면적에 대한 함수로 나타난다. 그러나 소멸 단면적은 어류의 크기나 체중에 따라 다르게 나타나기 때문에 직접적으로 그 값을 비교할 수 없다. 따라서 어류의 체중(Wet weight,  $W$ )과 총 체장(Total length,  $L$ )으로 정규화된 소멸 단면적으로 계산하면 경향을 한눈에 파악할 수 있다. 식 (7), (8)와 같이 각각 어류의 체중과 총 체장으로 소멸 단면적을 나눠주게 되면 체중으로 정규화된 소멸 단면적( $\sigma_{eW}$ ) 또는 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적( $\sigma_{eL}$ )으로 계산할 수 있다 (Furusawa et al. 1992).

$$\sigma_{eW}(m^2/g^{2/3}) = \sigma_e/W^{2/3}, \quad (7)$$

$$\sigma_{eL}(\text{Non\_dimension}) = \sigma_e/L^2, \quad (8)$$

여기서  $W$ 는 어류의 체중이고,  $L$ 은 총 체장이다.

Furusawa et al., (1992)는 여러 기존 연구결과, 즉 일본 멸치, 북태평양 멸치, 북대서양 대구, 방어, 감성돔, 고등어, 청어에서 얻은 감쇠 계수 결과를 토대로 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적으로 계산한 다음, 2차 회귀 분석을 수행하였다. 이를 식 (9)과 같이 정리하였다.

$$\sigma_{eW}(m^2/g^{2/3}) = 5.34 \times 10^{-3} + 2.16 \times 10^{-5}f + 3.15 \times 10^{-8}f^2, \quad (9)$$

이 때  $\sigma_{ew}$ 는 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적이고,  $f$ 는 kHz 단위의 주파수이다 (Furusawa et al. 1992). 위 식을 기반으로 3장에서 획득한 감쇠 계수를 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적으로 변환한 다음 비교 및 분석을 수행하였다 (Hashimoto, 1955; Davies, 1973; Foote, 1978; Ishii et al., 1983; Furusawa et al., 1984; Ishii et al., 1985; Burczynski et al., 1990).

기존 연구를 분석한 결과, Davies (1973)는 주파수 20 kHz 에서 북태평양 멸치가 단위 체적당 650 마리 존재할 때, 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적은 약  $0.011 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$ 로 나타났다. 반면 Hashimoto (1955)는 50 kHz 에서 일본 멸치가 단위 체적당 250 마리 존재할 때, 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적은 약  $0.021 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$ 로 나타났고, Foote (1988)와 Ishii et al. (1983)의 연구는 주파수 38, 25 kHz 에서 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적이 각각  $0.0058$ ,  $0.0104 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$ 으로 나타났다. 그러나 이러한 연구들이 20 kHz 미만의 주파수 대역에서 수행되지 않았고, 전갱이에 대한 음향 감쇠 특성도 알려진 바 없다. 따라서 Furusawa et al. (1992)가 제안한 식 (9)를 토대로 3장에서 측정한 연구 결과와 비교하였다. Figure 4의 검은색 직선은 기존 연구들을 정리하여 Furusawa et al. (1992)가 회귀 분석한 수식을 나타내었다. 결과적으로 주파수가 높아질 때 체중으로 정규화된 소멸 단면적의 경향이 증가한다.

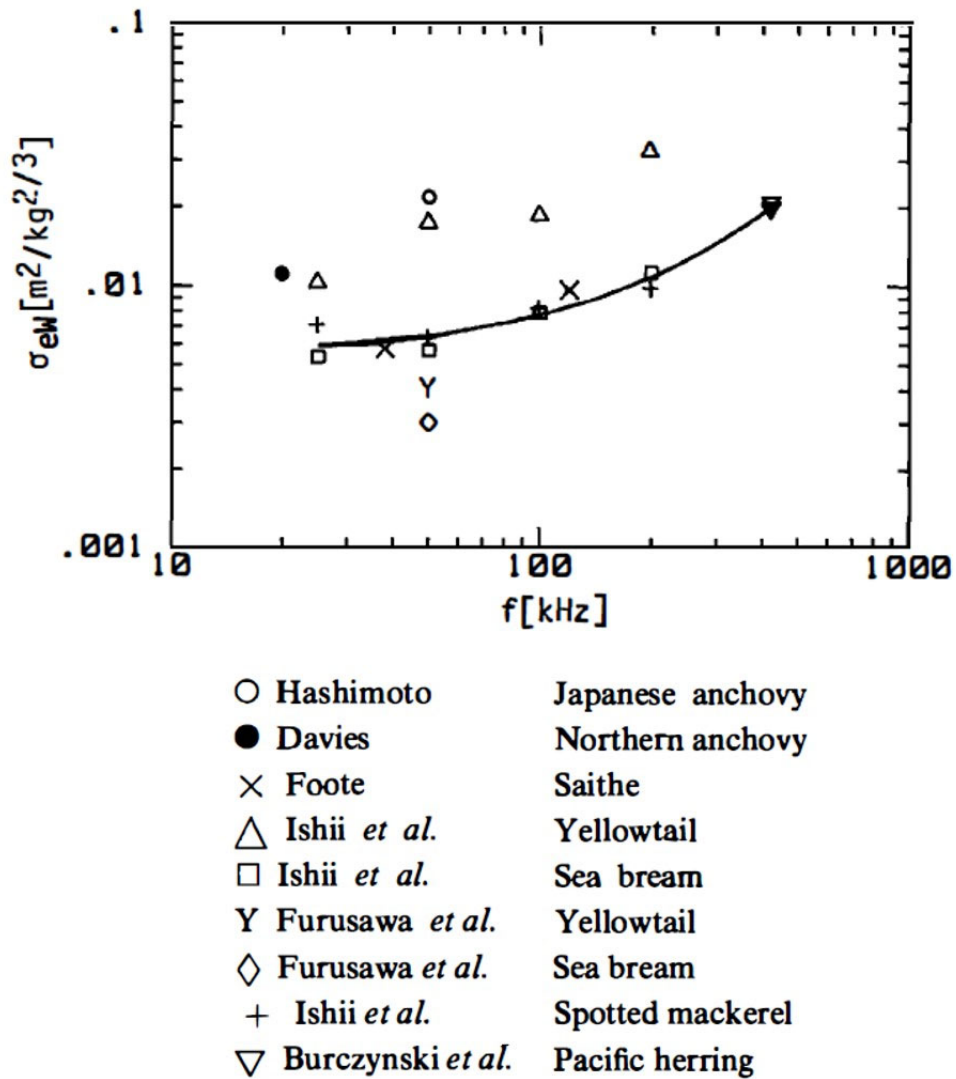


Figure 4. 주파수와 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적 결과. 각각의 심볼들은 기존 연구 및 어종을 기반으로 정규화하여 소멸 단면적으로 나타낸 결과이며, 굵은 직선은 기존 연구들의 정규화된 소멸 단면적 결과를 토대로 2차 회귀 분석 결과 (Furusawa et al. 1992)

## 제 3 장

# 어군에 의한 음향 감쇠 특성 해상 실험

### 3.1 대상 어종

어군에 의한 음향 감쇠 특성 실험을 위하여 대상 어종은 학명이 *Trachurus japonicus* 인 전갱이(Japanese horse mackerel)를 이용하였다. 전갱이는 난류성 회유어로서 북동아시아의 동중국해, 한국 및 일본 근해에서 분포하며, 한국에는 봄, 여름에 걸쳐 어군을 이루어 서식하는 어종으로 주로 연안에서 분포한다 (NIFS, 2010; Lee et al. 2016). Figure 5 에는 우리나라 인근 해역에서 각 해역 별로 주요 어종의 어획량을 나타내었다. 특히 전갱이는 남해와 동해에서 1970 년대에 비해 2017 년에 상대적으로 높은 어획량이 보고되었고, 이를 통해 우리나라 연, 근해역에 많이 서식 및 분포하는 어종으로 알 수 있다 (통계청 어업생산동향조사, 2018).

음향 감쇠 특성 실험을 위해 한국해양과학기술원 통영 해양생물자원기지(Korea Institute of Ocean Science and Technology, Tongyeong Marine Resource Center) 연구용 가두리 양식장에서 포획한 전갱이를 이용하였다. 음향 감쇠 실험이 끝난 후 대표적인 샘플 12 마리를 가지고 총 체장을 측정하여 분포를 파악하였다 (Figure 6). 일반적으로 전갱이의 총

체장은 20~40 cm 로 알려져 있으며 (Lee et al. 2016), 실험에 사용한 12 마리의 총 체장 범위는 20~35 cm 이내로 측정되었고, 평균 체장은 약 27.6 cm 으로 계산되었다.

본 실험에서 실험 어류의 체중을 측정하지 않았으므로, Lee et al., (2016)의 연구에서 제시한 전갱이의 가량이 체장( $FL$ , Folk length)과 체중의 관계식을 사용하여 체중을 추정하였다. 그러나 본 연구에서는 총 체장만을 측정했기 때문에 Zare et al., (2011)이 제안한 관계식을 통해 가량이 체장을 계산하였다 (식 10).

$$FL = L \div 1.1096 - 0.119, \quad (10)$$

여기서  $L$  은 총 체장,  $FL$  은 가량이 체장이다. 식 (10)을 이용하여 가량이 체장으로 변환한 후, 식 (11)의 가량이 체장-체중 관계식을 통해 체중( $W$ )을 계산하였다.

$$W = 0.0236 \cdot FL^{2.8362} \quad (11)$$

그 결과, 전갱이 12 마리의 체중 범위는 132~308 g 이고 평균 체중 값은 217 g 다. 평균 체중 값은 2 장에서 제시한 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적을 계산할 때 입력 자료로 사용하였다 (Figure 7).

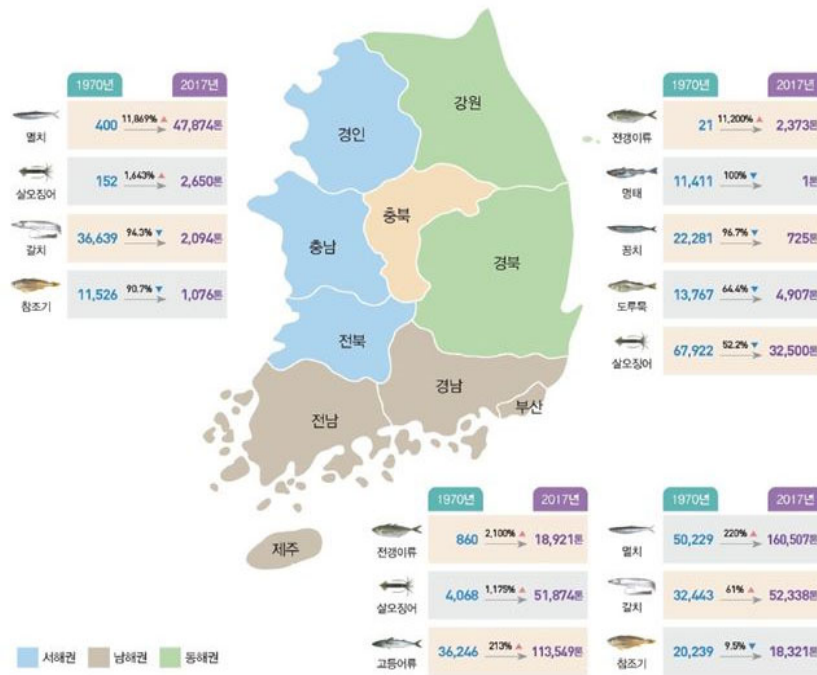


Figure 5. 우리나라 주변 해역 주요 어종의 어획량 변화 (통계청 어업생산동향조사, 2018)

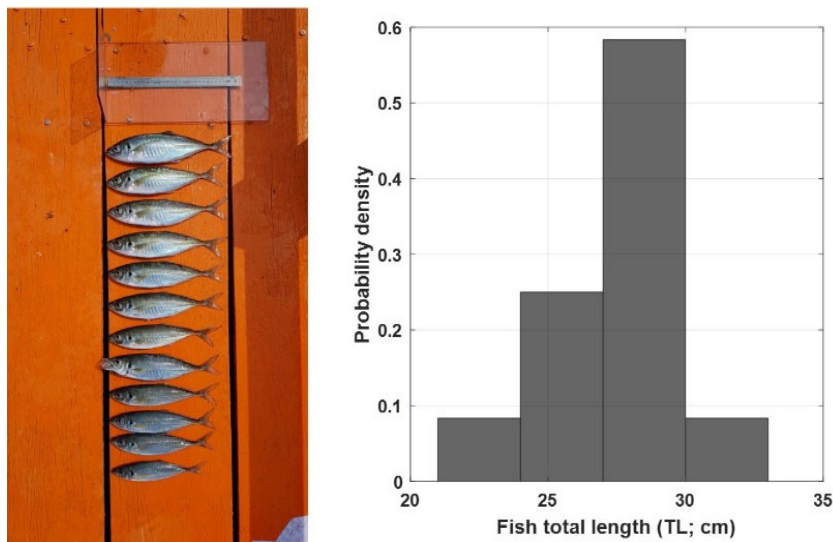


Figure 6. (좌) 음향 감쇠 실험에 사용한 전갱이의 총 체장(Total length)별 대표적인 샘플 12 마리, (우) 음향 감쇠 실험에 사용한 대표적인 전갱이 총 체장의 히스토그램(Histogram) 분포도

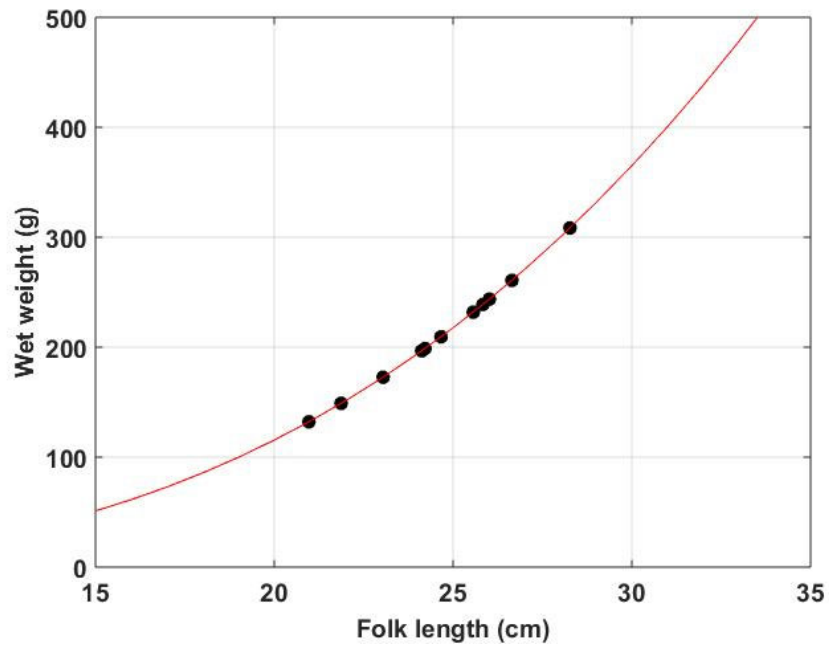


Figure 7. 실험에 사용한 전갱이의 가랑이 체장(Folk length, cm)과 체중(Wet weight, g) 관계식을 통해 변환한 각 개체 별 가랑이 체장과 체중 분포

## 3.2 해상 실험 방법

### 3.2.1 송신 센서 주파수 별 감도 측정

해상 실험에 앞서 사전에 송신 센서의 각 주파수 별 감도를 확인하기 위하여 한국해양과학기술원에 위치한 실내 수조에서 측정하였다. 송수신 센서, NI DAQ 보드와 파워 앰프를 기반으로 제작한 송수신 시스템과 노트북을 통해 음향 신호를 송수신하였다. 송신 센서는 방향성 트랜스듀서(T335; Neptune Sonar; Kelk Lake, Kelk, UK)를 사용하였다. 동일한 음원 준위를 발생시키고자 약 145 dB 를 중심으로 3 dB 이내의 TVR(Transmit Voltage Response)을 가지는 주파수를 선정하였다. 송신 주파수는 3~7 kHz 로, 해당 주파수 대역은 해군 함정에서 사용되는 선저 고정형 소나 사용 주파수를 포함한다. 송신 센서의 TVR 은 3, 4, 5, 6, 7 kHz 에서 각각 145.2, 148.0, 147.5, 148.2, 147.4 dB re  $\mu\text{Pa}/1\text{ V}@1\text{ m}$  이다 (Figure 8). 송신 신호의 펄스 길이는 1 ms 로 설정하였고, 총 100 회 송수신하였다.

수신 센서는 하이드로폰(TC-4013; Teledyne RESON; Slangerup, Denmark)을 사용하였다. 하이드로폰에서 수신된 자료는 DC 잡음을 제거한 후, 각각의 사용 주파수를 기준으로  $\pm 1\text{ kHz}$  의 대역 통과 필터를 사용하였다. 그 후 힐버트 변환(Hilbert transform)을 통해 포락선을



검출하였고, 100 회 모두 가장 높게 수신된 값을 평균하여 음향 에너지로 변환하여 수신 준위를 데시벨 단위로 계산하였다.

실험은 10 m × 10 m × 10 m 실내 수조의 중앙에 송신 센서와 수신 센서를 각각 로프에 고정한 다음 수심 약 3 m 에 위치하였다. 송수신 센서의 거리는 3 m 로 고정시켜 둔 후, 신호를 송수신하였다 (Figure 9). 각 주파수 별로 TVR 을 고려하여 파워 앰프를 사용하여 출력을 증폭시킨 후, 음원을 약 190 dB 로 송신하였다. 획득 자료 분석 시, 송신 센서와 수신 센서의 떨어진 3 m 거리에 대한 전달 손실을 보상하였고 중주파수 대역의 해수에 의한 감쇠 손실은 큰 변화가 없기 때문에 이를 고려하지 않고, 음원 준위를 계산하였다. 음원 준위 측정 결과, 전 주파수 대역 모두 제조사에서 제시한 값과 약 1 dB 이내의 오차 내에서 신호가 송신됨을 확인하였다.

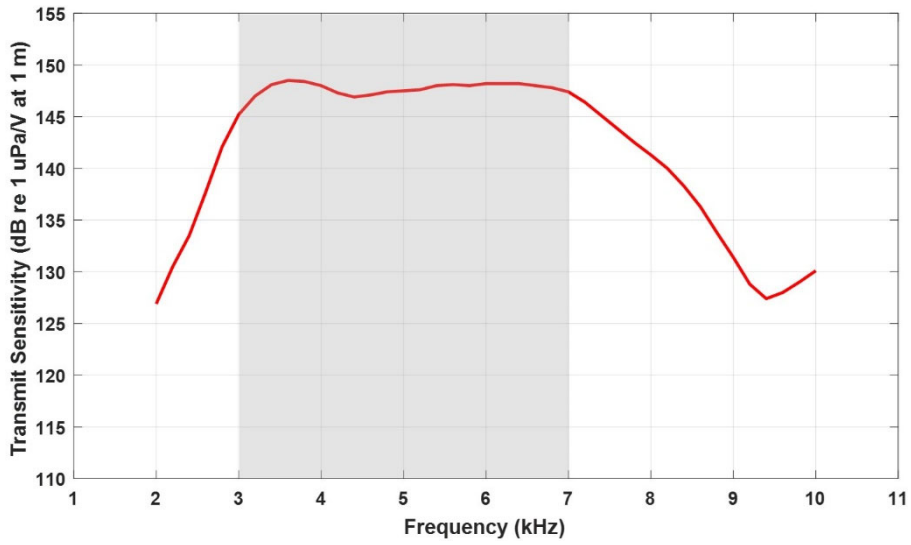


Figure 8. 송신 센서 T335 트랜스듀서의 TVR (Transmit Voltage Response) 그래프  
(회색 음영 부분은 실험에서 사용한 주파수 대역)

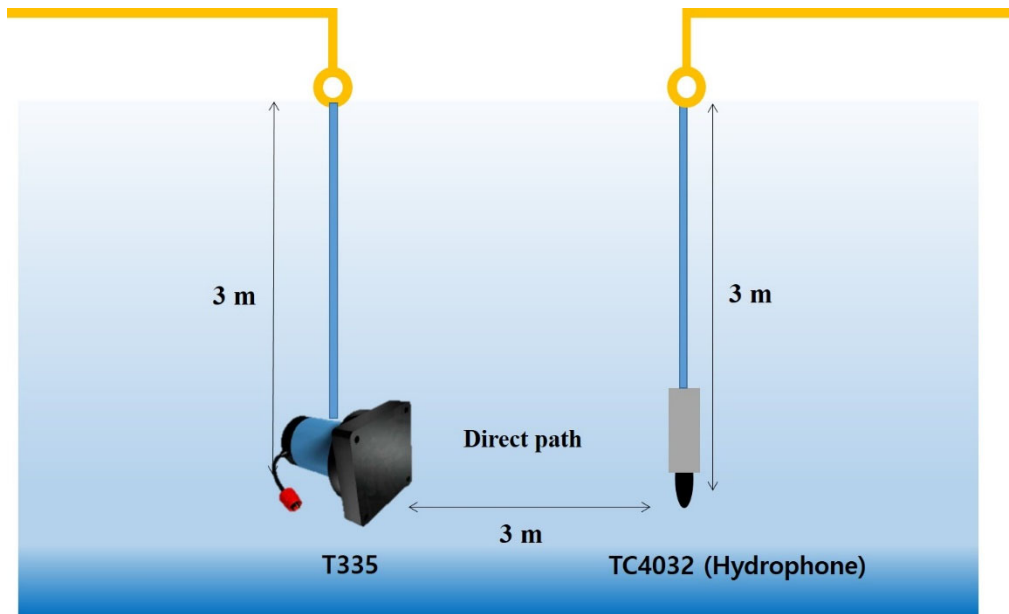


Figure 9. 실내 수조에서 송신 감도 측정 실험 방법 모식도

### 3.2.2 어군 밀도에 따른 음향 감쇠 특성 실험 구성

어군의 밀도에 따른 음향 감쇠 특성을 파악하기 위하여 2019 년 3 월 27 일부터 29 일까지 해상 실험을 수행하였다. 실험 해역은 우리나라 남해안 통영시 산양읍 연명항 인근 해역에 위치한 한국해양과학기술원 통영 해양생물자원기지 연구용 양식장이다. 해당 양식장은 수심 약 8~30 m 의 경사면 위에 계류되어 있으며, 실험 지점은 수심 약 14 m 이다. 실험 구성은 빈 가두리를 선정하여 송신기와 수신기의 거리를 5 m 떨어진 위치에 고정하여 설치한 후, 송수신 센서 사이에 그물을 설치하였다. 그물은 음파의 영향을 최소화하기 위해서 얇은 메쉬 타입을 사용하여 제작하였고, 그물의 크기는 사각 형태인 1×1×1 m 이다. 그물망 상부에는 플라스틱 지퍼를 달아서 어류의 밀도를 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 실험 당시에는 조류 및 해류의 움직임이 최소화되는 조금(Neap tide)이었으며, 주로 정조 시간에 실험을 수행하였다.

총 7회에 대한 음향 감쇠 실험을 수행하였다. Case 1은 그물이 없는 경우 (Non-net), Case 2는 그물만 존재하는 경우 (Only net), Case 3부터 7까지는 그물 내에 어류가 각각 100, 200, 300, 400, 500 마리로 존재하는 환경에서 실험을 수행하였다 (Table 1). 송신 센서는 스테인레스 봉에 거치하여 해수면으로부터 수심 약 3.3 m 에 고정하였고 (Figure 10), 수신 센서는 앵글에 거치하여 해수면으로부터 송신 센서와 동일 수심에

고정하였다. 동시에 수중카메라를 송신 센서 약 10 cm 상부에 설치하여 그물 및 어류 상태를 실시간으로 확인하였다 (Figure 11). 실험을 수행하기 전에 보유하고 있는 해양 환경 관측 장비(YSI Pro Plus Water Quality Instrument, Xylem, USA)를 이용하여 수온, 염분을 측정된 결과, 3 m 수심의 수온은 섭씨 13.4 도, 염분은 31.6 psu 로 나타났다. 측정된 수온, 염분, 수심 값을 Medwin (1975)의 음속 공식에 대입하여 음속이 1497.6 m/s 로 계산되었다.

Table 1. 각 케이스 별 어류 음향 감쇠 실험

Cases	Experiments	Explanation
Case 1	Non-net	그물이 없을 때
Case 2	Only net (0 EA)	그물만 존재할 때
Case 3	100 EA	그물 내 전갱이 100 마리
Case 4	200 EA	그물 내 전갱이 200 마리
Case 5	300 EA	그물 내 전갱이 300 마리
Case 6	400 EA	그물 내 전갱이 400 마리
Case 7	500 EA	그물 내 전갱이 500 마리

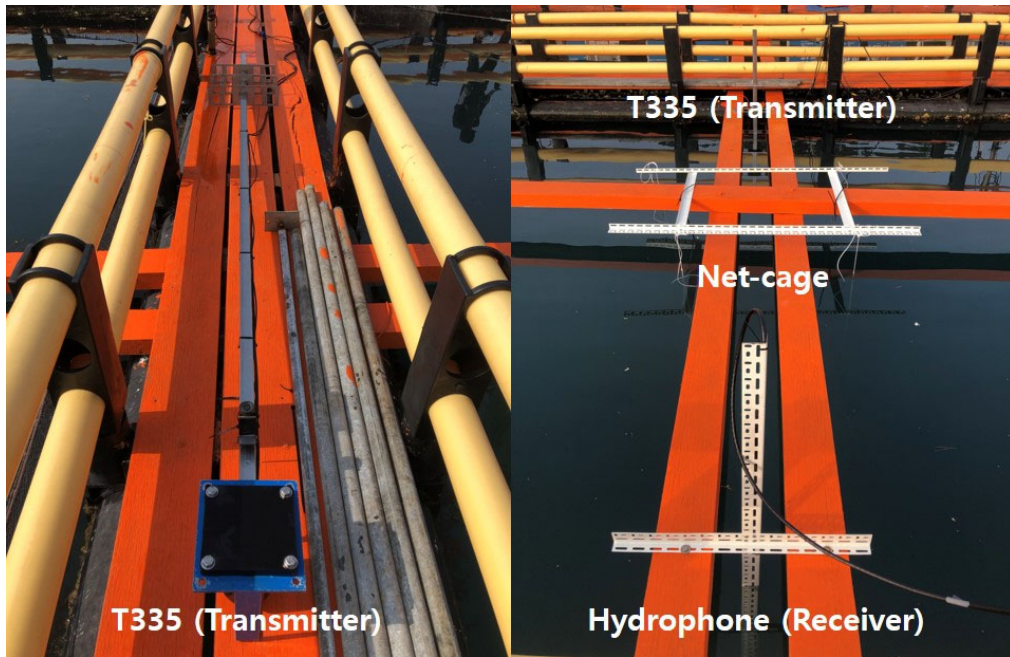


Figure 10. 한국해양과학기술원 통영해양생물자원기지 연구용 가두리 내에서 설치한 송신 센서, 미세 그물, 수신 센서

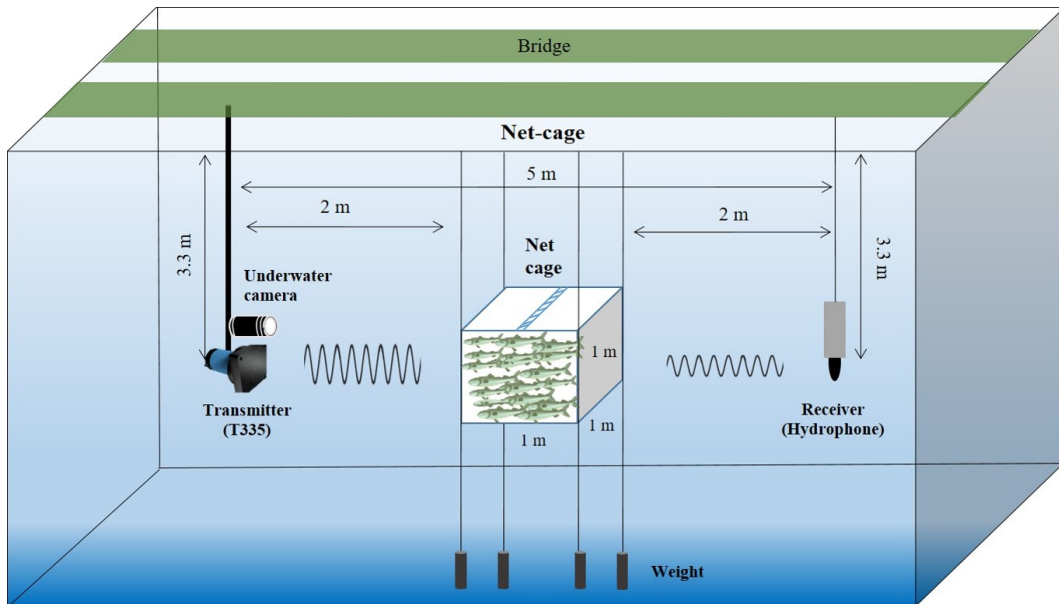


Figure 11. 송수신 센서, 그물, 수중카메라를 이용한 음향 감쇠 실험 모식도

### 3.2.3 송신 음향 신호 및 준위

음향 감쇠 실험을 위해 송신 시스템에 연결된 T335 트랜스듀서를 통해 음파를 송신하였다. 해당 송신 센서의 TVR 값을 고려하여 송신 시스템에 입력 전압 0.6 V 값을 인가할 때, 사용 주파수 대역에서 송신 준위가 약 190 dB 였다. 따라서 사용하는 3~7 kHz 주파수 대역 모두 동일한 입력 전압 값을 인가하였다. 입력 전압 값은 송수신 시스템을 통해 내부 파워 앰프에서 증폭된 후에 신호가 송신되었다. 송신 준위는 3 kHz 에서 189.2 dB, 4 kHz 에서 192.0 dB, 5 kHz 에서 191.5 dB, 6 kHz 에서 192.2 dB, 7 kHz 에서 191.4 dB 이다. Table 2 에는 각 주파수 별 송신 센서 TVR, 입력 전압, RMS 입력 전압, 송신 준위를 나타내었다.

Table 2. 각 주파수 별 송신 센서 TVR, 입력 전압 (Vp), RMS 입력 전압과 압력 (Voltage, Pressure), 송신 준위 (Source level)

Frequency (kHz)	Transducer TVR (dB)	Vp (V)	Vrms (Voltage, V)	Prms (Pressure, re 1 $\mu$ Pa?)	Source level (SL, dB)
3	145.2	0.6	159	44.0	189.2
4	148.0				192.0
5	147.5				191.5
6	148.2				192.2
7	147.4				191.4

### 3.2.4 수신 음향 자료 분석 및 처리

음향 신호는 초당 1 회로, 어군이 그물 내에 존재할 환경에서 낮은 밀도(0~300 EA)에서는 100 회, 높은 밀도(400~500 EA)에서는 300 회 송수신하였다. 이 때 펄스 길이는 동일하게 1 ms 로 고정하였다. 일반적인 수신 음향 신호 처리 과정을 기반으로 획득 자료를 분석 및 처리하였다. 수신 신호의 분석 방법은 먼저 수신 신호의 DC 잡음을 제거한 후, 해당 주파수를 기준으로  $\pm 1$  kHz 의 대역 통과 필터를 사용하였다. 그 후 힐버트 변환을 통해 포락선을 검출하였고, 검출된 포락선을 음향 에너지로 변환하여 데시벨 단위로 수신 준위를 계산하였다.

실험 시, 음파가 어군이 위치한 그물을 지나갈 때, 어군에 의한 감쇠 이외에 산란도 발생하게 된다. 따라서 Son et al., (2015)의 기존 연구 결과를 참고하여 산란 신호가 포함되는 지점인 수신된 신호 중 3~5 ms (2 ms) 구간을 수신 신호에 포함하여 분석하였다. 음향 신호 수신 시, 몇몇 신호에 대하여 오류 제거 및 신호 처리 구간 등에 관련한 내용은 토의 부분에 상세하게 작성하였다. Table 3 에는 송신, 수신 센서, 측정 환경에 대한 자세한 실험 변수를 표로 나타내었다.

사전 분석 결과 특정 주파수 실험에서 수신된 일부 음향 자료에서 음파의 직접 경로(Direct path)와 해수면 반사 경로(Surface path) 신호가 같은 시간에서 수신되지 않고 시간 오차가 발생하였다. 이는 해상 가두리에

고정해 둔 수신 센서가 파도에 의해 가두리 전체가 움직여 시간 지연이 발생함을 확인하였다. 이 때 발생한 시간 지연은 직접 경로에서 약 0.06 ms, 해수면 반사 경로에서 약 0.1 ms 로 나타났다. 그러나 해수면 반사 경로의 수신 준위는 변동성이 큰 반면에 직접 경로의 수신 준위는 변동이 없었다. 결과적으로 센서의 빔 각도가 저주파인 3 kHz 에서는 약 102 도, 7 kHz 에서는 66 도로 고주파로 갈수록 빔 각도가 좁아지기 때문에, 센서가 파도에 따라 움직이면서 수신 준위는 변하지 않고 단순히 시간 지연만 발생한 것으로 확인되었다.

Table 3. 송신기, 수신기 및 음향 감쇠 실험에 사용되는 환경 변수

<b>Transmitter</b>	Frequency (kHz)	3, 4, 5, 6, 7
	Pulse length (ms)	1
	Ping rate (pps)	1
	Total pings (ping)	100, 300
<b>Receiver</b>	Sampling frequency (kHz)	100
	Hydrophone RVS (dB)	-170
	Gain (dB)	0
<b>Environments</b>	Water temperature (°C)	13.4
	Salinity (psu)	31.6
	Sound speed (m/s)	1497.6



### 3.3 해상 실험 획득 자료 분석 결과

#### 3.3.1 어군 밀도에 따른 주파수 별 수신 음향 준위 분석 결과

이 장에서는 Case 1 의 실험에 대한 수신 전압, 평균 수신 준위와 최소 수신 준위(최대 감쇠) 결과 분석과 부록에 나타낸 Case 2, Case 3, Case 7 의 실험 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 3~7 kHz 주파수 대역에서 수신 전압, 수신 음향 준위, 음향 감쇠 준위를 계산하였다. 이 때 수신 음향 준위는 송신 센서와 수신 센서가 떨어진 5 m 거리에 대한 전달 손실을 보상하여 그림에 나타내었다.

Figure 12 (a~e)은 Case 1 에 대한 주파수 3~7 kHz 에서 전체 수신된 신호의 수신 전압(상단), 수신 준위(하단) 결과이다. 이 때 수신 준위에서 진하게 표시한 부분은 가장 낮게 수신이 된 값, 즉 최대로 감쇠 되어 수신된 값이다. Figure 12 (a~e)의 상단 그림에서 시간 축의 3.5~4.5 ms 에 수신된 신호는 직접 경로이며, 5.5 ms 에 수신된 신호는 해수면 반사 경로이다. 그 결과, 3 kHz 에서 0.32 V, 4 kHz 에서 0.49 V, 5 kHz 에서 0.54 V, 6 kHz 에서 0.65 V, 7 kHz 에서 0.35 V 로 측정되었다. Figure 11 (a~e)의 하단 그림은 평균 수신 준위로 변환하여 나타낸 그림이다. 결과적으로 3 kHz 에서는 약 185 dB, 4 kHz 에서 약 188 dB, 5 kHz 에서 약 189 dB, 6 kHz 에서 약 190 dB, 7 kHz 에서 약 185 dB 로 계산되었다. 이 때 평균과 최저로

수신된 수신 준위는 대부분 약 0.3 dB 이내로 나타나 모든 수신된 신호의 변동성은 없는 것으로 확인하였다.

부록에는 Case 2~7 까지의 실험 결과 그림을 별도로 첨부하였다. 이를 해당 주파수 별로 수신한 음향 신호 모두에 대한 수신 전압, 수신 준위를 나타내었다. 또한 그래프 우측 하단에는 실험 환경, 분석 주파수, 실험에 사용했던 펄스 길이, 펄스 개수, 총 획득 수신 신호에 대해 나타내었다.

Case 2 의 수신 준위가 3 kHz 에서 약 184 dB, 4 kHz 에서 약 187 dB, 5 kHz 에서 약 188 dB, 6 kHz 에서 약 188 dB, 7 kHz 에서 약 185 dB 이며, 평균 값과 최저 수신 준위는 대부분 0.5 dB 이내로 나타남을 실험을 통해 확인하였다. 이를 토대로 그물에 의한 신호의 감쇠는 약 1 dB 이내로 나타남을 확인할 수 있었다.

Case 3 의 평균 수신 준위는 3 kHz 에서 약 178 dB, 4 kHz 에서 약 179 dB, 5 kHz 에서 약 179 dB, 6 kHz 에서 약 180 dB, 7 kHz 에서 약 175 dB 로 나타났다. 따라서 1 m<sup>3</sup> 체적 내에 어군이 100 마리 존재하는 Case 3 실험은 Case 2 실험 대비 약 10 dB 가 감쇠됨을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 어류가 그물 내에 존재할 때 신호들이 감쇠 또는 산란되는 것을 확인할 수 있었다.

Case 7 의 3 kHz 에서 수신 전압 값이 0.07 V, 4 kHz 에서 0.1 V, 7 kHz 에서는 0.05 V 까지 낮게 나타나 어류에 의한 감쇠가 높게 나타남을 확인하였다. 수신 준위 분석 결과, 평균 수신 준위가 각각 3 kHz 에서 약

171 dB, 4 kHz 에서 약 171 dB, 5 kHz 에서 약 175 dB, 6 kHz 에서 약 179 dB, 7 kHz 에서 약 175 dB 로 나타났다. 분석한 수신 준위를 토대로 어군의 밀도에 따라 음파의 감쇠 및 산란을 확인할 수 있었다.

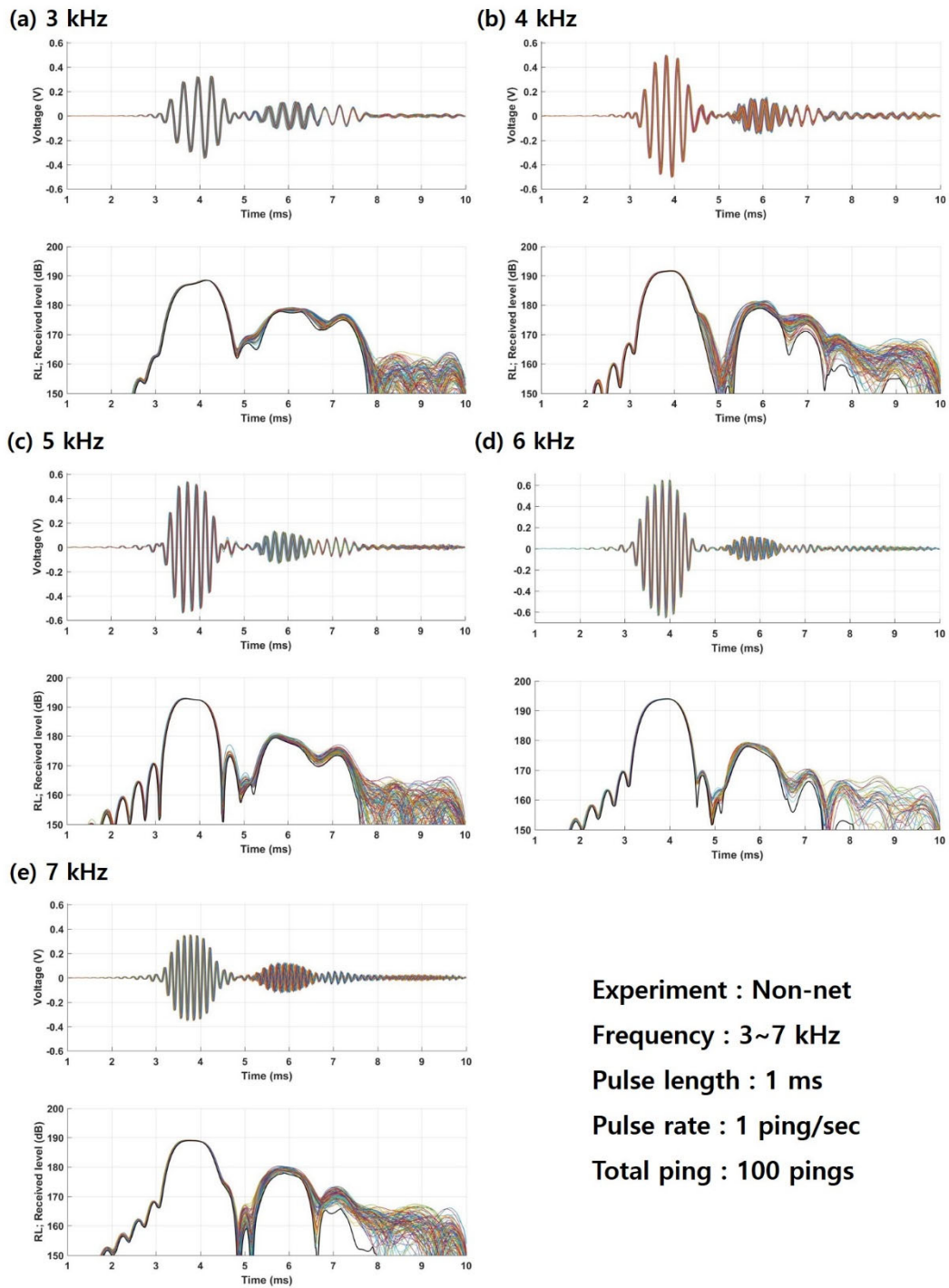


Figure 12. Case 1 (Non-net) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz.

### 3.3.2 음향 감쇠 계수 분석 결과

3.3.1 장에서 분석한 결과를 토대로 이 장에서는 Case 2 의 그물만 존재하는 환경에서 획득한 평균 수신 준위를 기준으로 하여 Case 3~7 의 실험 평균 및 최소 수신 준위와 비교 분석하여 음향 감쇠 계수를 계산하였다.

Figure 13 (a~e)는 Case 1~7 의 실험을 통해 획득한 주파수 별 평균 수신 준위이다. 여기서 파란색으로 나타낸 영역은 직접 경로, 녹색으로 나타낸 영역은 어군에 의해 산란된 구간, 빨간색은 해수면 반사 경로 신호를 나타낸다. 그림에서 음향 신호가 어군을 통과하는 직접 경로는 약 3.5~4.5 ms 신호이며, 어류에 의한 산란 구간은 약 4.5~5.0 ms, 해수면 반사 경로는 약 5.0 ms 이상의 구간이다. 수신된 신호는 대부분 안정적인 특성을 보였다. 감쇠 및 산란 영향을 모두 포함한 3.0~5.0 ms 전체 구간에 대하여 평균 수신 준위 분석 결과, 각각 3 kHz 에서는 약 170 dB, 4 kHz 에서 약 171 dB, 5 kHz 에서 약 175 dB, 6 kHz 에서 약 179 dB, 7 kHz 에서 약 175 dB 로 나타났다. 결과적으로 어군이 500 마리 존재할 때 그물만 있는 환경 대비하여 약 14 dB 이상 감쇠함을 확인하였다.

Figure 14 (a~e)은 Case 1~7 의 실험을 통해 획득한 주파수 별 최소 수신 준위, 즉 어군에 의해 최대 감쇠된 수신 준위를 나타내었다. 최소 수신 준위 분석 결과, 4 kHz 에서는 약 165 dB 가, 7 kHz 에서는 약 168

---

dB 까지 나타나 어군에 의한 감쇠 영향이 최대 약 22 dB 까지 나타남을 알 수 있었다. 결과적으로 몇몇 자료를 제외하고 대부분의 자료에서는 그물 내에 어류 밀도가 높아질수록 수신 신호가 감소하는 경향을 보였다. Table 4 에는 각 어군의 밀도에 따른 실험의 각 주파수에 대한 평균 수신 준위와 최소 수신 준위의 분석 결과를 나타내었다.

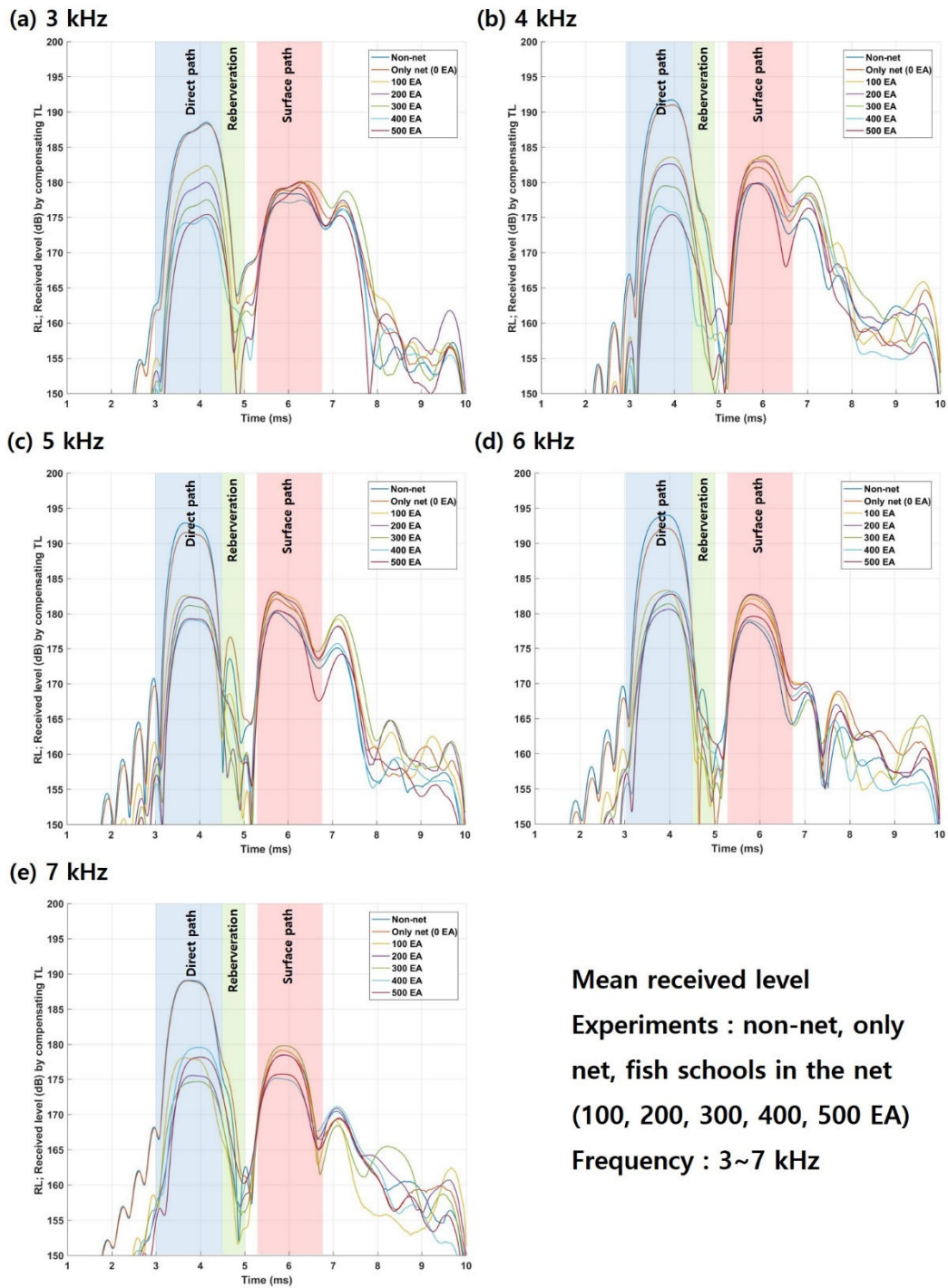


Figure 13. Case 1~7 실험에 따른 주파수 별 평균 수신 준위 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

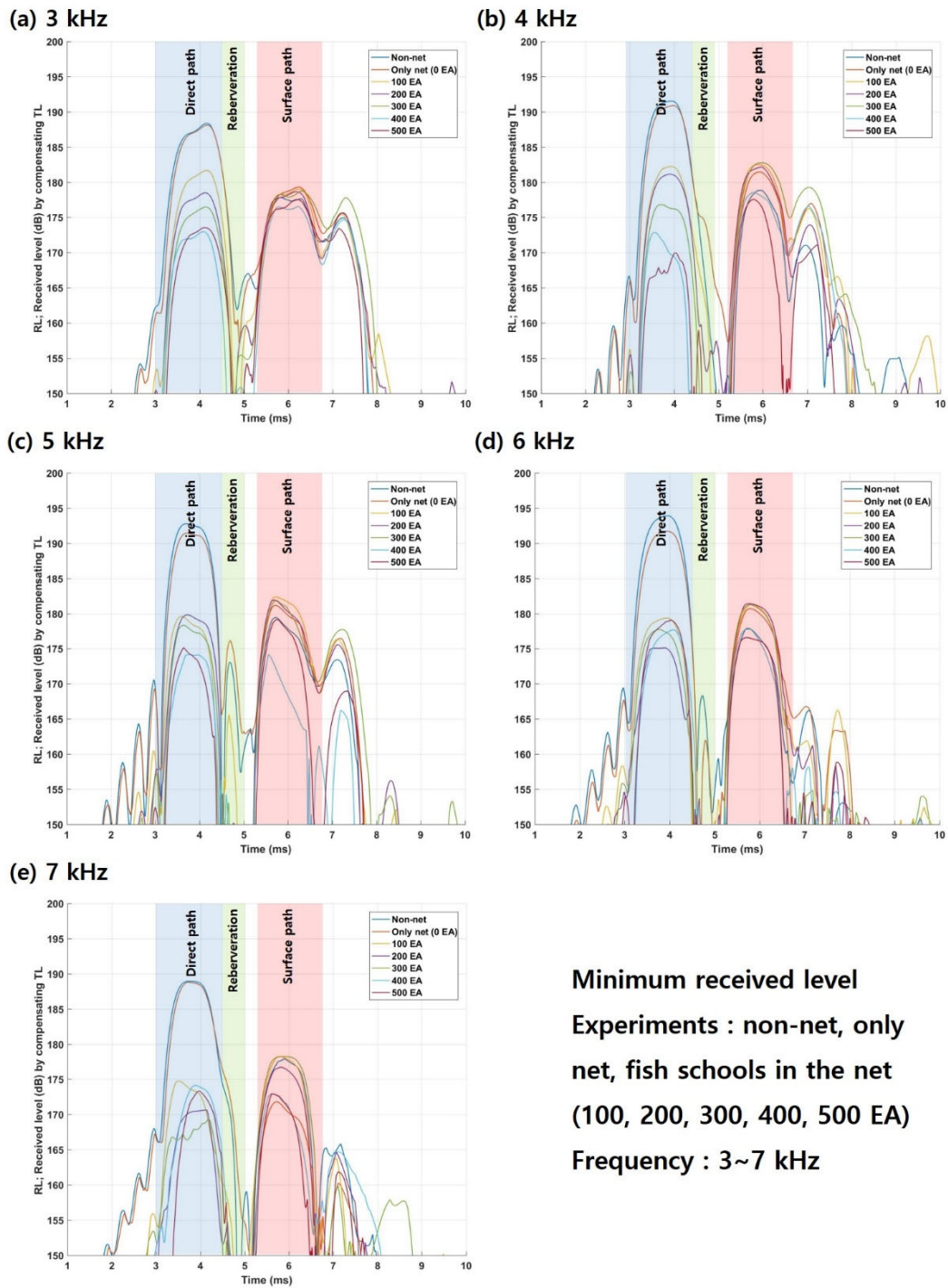


Figure 14. Case 1~7 실험에 따른 주파수 별 최저 수신 준위(최대 감쇠) 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz



Table 4. Case 1~7 실험 및 주파수 별 평균 수신 준위 (Mean received level) 및 최소 수신 준위(Minimum received level) 계산 결과

Exp.	Freq. (kHz)	Mean received level (dB)	Minimum received level (dB)	Exp.	Freq. (kHz)	Mean received level (dB)	Minimum received level (dB)
Case 1 (Non-net)	3 kHz	184.62	184.33	Case 2 (Only net)	3 kHz	184.42	184.00
	4 kHz	187.51	187.20		4 kHz	186.79	186.51
	5 kHz	188.82	188.54		5 kHz	187.55	187.17
	6 kHz	189.83	189.55		6 kHz	187.88	187.36
	7 kHz	185.24	184.92		7 kHz	185.18	184.51
Case 3 (100 EA)	3 kHz	178.39	177.46	Case 4 (200 EA)	3 kHz	176.08	174.46
	4 kHz	179.32	177.68		4 kHz	178.49	176.71
	5 kHz	178.81	175.02		5 kHz	178.49	175.48
	6 kHz	179.63	175.25		6 kHz	178.07	171.77
	7 kHz	174.94	170.22		7 kHz	172.76	166.29
Case 5 (300 EA)	3 kHz	173.73	172.34	Case 6 (400 EA)	3 kHz	171.49	168.91
	4 kHz	175.50	172.56		4 kHz	172.67	167.27
	5 kHz	177.41	173.77		5 kHz	175.95	169.67
	6 kHz	177.41	173.38		6 kHz	179.35	173.08
	7 kHz	172.43	165.12		7 kHz	176.35	169.41
Case 7 (500 EA)	3 kHz	170.64	169.44				
	4 kHz	171.39	164.71				
	5 kHz	175.11	169.56				
	6 kHz	179.11	174.38				
	7 kHz	175.34	167.85				

Figure 15 의 상단 그림은 어군 밀도 및 주파수에 따른 평균 감쇠 계수와 최대 감쇠 계수의 결과이다. 그림에서 어군 100 마리 결과는 파란색 점선, 200 마리 결과는 빨간색 직선, 300 마리 결과는 녹색 직선, 400 마리 결과는 분홍색 파선, 500 마리 결과는 검은색 일점 쇄선이다. 실험 결과 상대적으로 낮은 주파수 대역에서는 평균 감쇠 계수가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 3 kHz 에서는 100 마리일 때 약 6 dB/m, 200 마리일 때 약 8 dB/m, 300 마리일 때 약 11 dB/m, 400 마리 일 때 약 13 dB/m, 500 마리 일 때 최대 14 dB/m 였다. 특히 4 kHz 에서는 어군이 500 마리 존재할 때 감쇠 계수가 약 16 dB/m 였으며, 5 kHz 에서는 약 13 dB/m 였다. 이러한 평균 감쇠 계수의 차이는 어군의 존재가 음파에 영향을 미치며, 결과적으로 어군 밀도가 증가함에 따라 감쇠 계수가 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나 Case 6~7 의 주파수 6, 7 kHz 실험 결과에서는 감쇠 계수가 낮게 나타났다. 위 실험 결과에 대한 설명은 3.4 토의 부분에 상세하게 기술하였다.

Figure 15 의 하단 그림은 어군 밀도에 따른 주파수 별 최대 감쇠 계수이다. 그 결과 주파수 3 kHz 에서 최대 감쇠 계수는 약 15 dB/m, 4 kHz 에서 약 22 dB/m, 5 kHz 에서 약 18 dB/m, 6 kHz 에서 약 17 dB/m, 7 kHz 에서 약 19 dB/m 가 나타남을 알 수 있었고, 수층 내에 존재하는 어군에 의하여 무시할 수 없는 감쇠 영향이 나타남을 알 수 있었다.

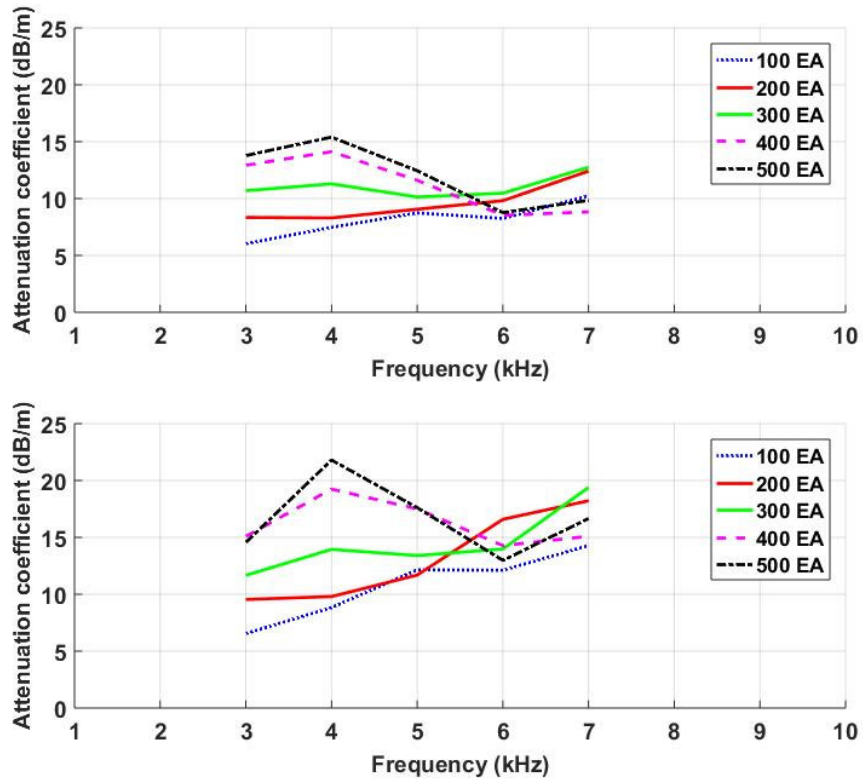


Figure 15. 어군 밀도 별(100마리 파란색 점선, 200마리 빨간색 직선, 300마리 녹색 직선, 400마리 분홍색 파선, 500마리 검은색 일점 쇄선) 3~7 kHz 주파수 대역의 (상단) 평균 음향 감쇠 계수 및 (하단) 최대 음향 감쇠 계수 결과

### 3.3.3 기존 연구 및 본 연구 소멸 단면적 값 비교 분석 결과

3 장의 실험을 통해 획득한 감쇠 계수를 2 장에서 제시한 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적으로 변환하여 소멸 단면적 값의 기존 연구 및 본 연구 결과와 비교 분석을 수행하였다.

Figure 16 에서 각각의 심볼은 본 연구와 기존 연구들의 결과들을 나타낸 그림이며, 굵은 직선은 Furusawa et al. (1992)의 2 차 회귀 분석 모델이다. 이 회귀 분석 모델을 본 연구에서 실험한 주파수 대역까지 확장한 후, 기존 연구와 본 연구의 결과를 비교 분석하였다. 현재까지 전갱이에 대한 음향 감쇠 특성 결과가 알려진 바 없기 때문에 같은 종으로 직접적인 비교는 할 수 없었다. 따라서 기존에 음향 감쇠 관련 연구를 살펴보면 Hashimoto (1955)는 일본 멸치에 대한 배양 그물 내에서 주파수 50 kHz 감쇠를 측정했으며, 이 때 체중으로 정규화된 소멸 단면적은  $0.0217 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$  로 나타났다. Davies (1973)는 북태평양 멸치를 이용하여 감쇠를 측정하였고, 부레의 공진 영향을 관찰하기 위하여 주파수 1~20 kHz 에서 측정하였으며, 20 kHz 에서 체중으로 정규화된 소멸 단면적은  $0.0111 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$  였다. Foote (1978)는 주파수 38, 120 kHz 의 정규화된 소멸 단면적 계산 결과 각각  $0.0058, 0.0096 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$ 로 나타났다. 또한 Ishii et al. (1983)는 방어 및 감성돔을 대상으로 25, 50, 100, 200 kHz 주파수에서 정규화된 소멸 단면적 계산 결과 각각  $2.827, 4.798, 5.107, 8.979 \text{ m}^2/\text{g}^{2/3}$

(방어), 0.499, 0.532, 0.738, 1.052  $\text{m}^2/\text{g}^{2/3}$  (감성돔)로 나타났다. 종합적으로 3 장에서 획득한 주파수 별 음향 감쇠 결과를 포함하여 재 회귀 분석 모델을 수행하여 Figure 16 와 Figure 17 에 나타내었다. Figure 16 의 빨간 회귀선은 체중으로 정규화된 소멸 단면적으로 회귀 분석을 수행한 결과이고, Figure 17 의 빨간 회귀선은 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적으로 회귀 분석을 수행한 결과이다. 각각의 회귀 수식은 다음과 같은 식 (12)과 (13)로 표현된다.

$$\sigma_{eW} = 5.06 \times 10^{-3} + 8.284 \times 10^{-5}f - 1.12 \times 10^{-7}f^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{eL} = 2.51 \times 10^{-2} + 5.76 \times 10^{-4}f - 9.03 \times 10^{-7}f^2, \quad (13)$$

이 때  $\sigma_{eW}$ 는 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적이고,  $\sigma_{eL}$ 는 어류의 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적이다. 여기서  $f$ 는 kHz 대역의 주파수이다. 기존의 Furusawa et al., (1992) 연구 결과는 체중으로만 정규화한 회귀 분석식을 나타냈고, 총 체장에 대한 회귀 분석은 수행하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 체중 및 총 체장으로 정규화한 후에 회귀 분석하였고, 이는 일반적으로 감쇠 계수가 주파수의 제곱으로 계산되기 때문에 2 차 회귀 분석을 수행하였다 (Kinsler et al., 1999).

주파수 25 kHz 대역에서 체중과 체장으로 정규화된 각 어종 별로 비교 분석 결과, 체중에 대한 정규화된 소멸 단면적 값은 방어, 점박이

---

고등어, 감성돔 순으로 높게 나타났다. 그러나 체장에 대한 결과는 감성돔 결과 값이 가장 높게 나타났다. 이는 해당 어종이 체중에 비해 상대적으로 체장이 짧기 때문이다. 따라서 각 어종 별로 직접적인 비교를 위해서는 체중 값으로 표준화하여 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 결론적으로 주파수가 상대적으로 높을수록 어류 체중 및 체장으로 정규화된 소멸 단면적 값은 증가함을 보였다. Table 5 에는 어군을 이용한 음향 감쇠 실험을 통해 획득한 기존 및 본 연구의 어종과 주파수에 따른 결과를 정리하여 나타내었다. 이 때 몇몇 연구자의 결과를 본 연구 결과와 직접적인 비교를 위하여 일부분 수정하였다.

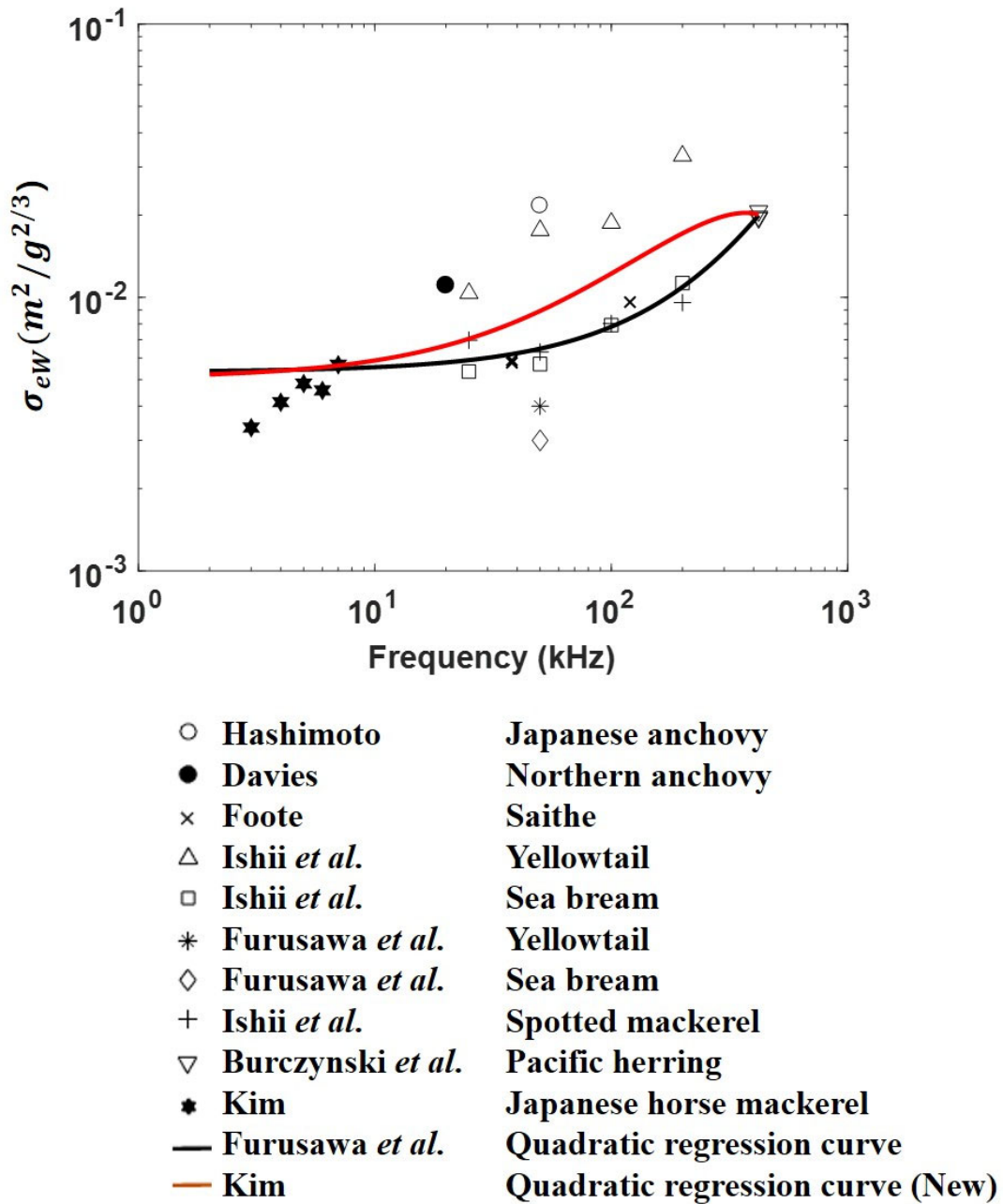


Figure 16. 기존 연구 및 본 연구의 주파수에 따른 어류의 체중으로 정규화된 소멸 단면적 결과 그림 (검은색 회귀선은 Furusawa et al.,(1992)가 제시한 2 차 회귀 분석 모델, 빨간색 회귀선은 본 연구에서 새롭게 계산한 2 차 회귀 분석 모델)

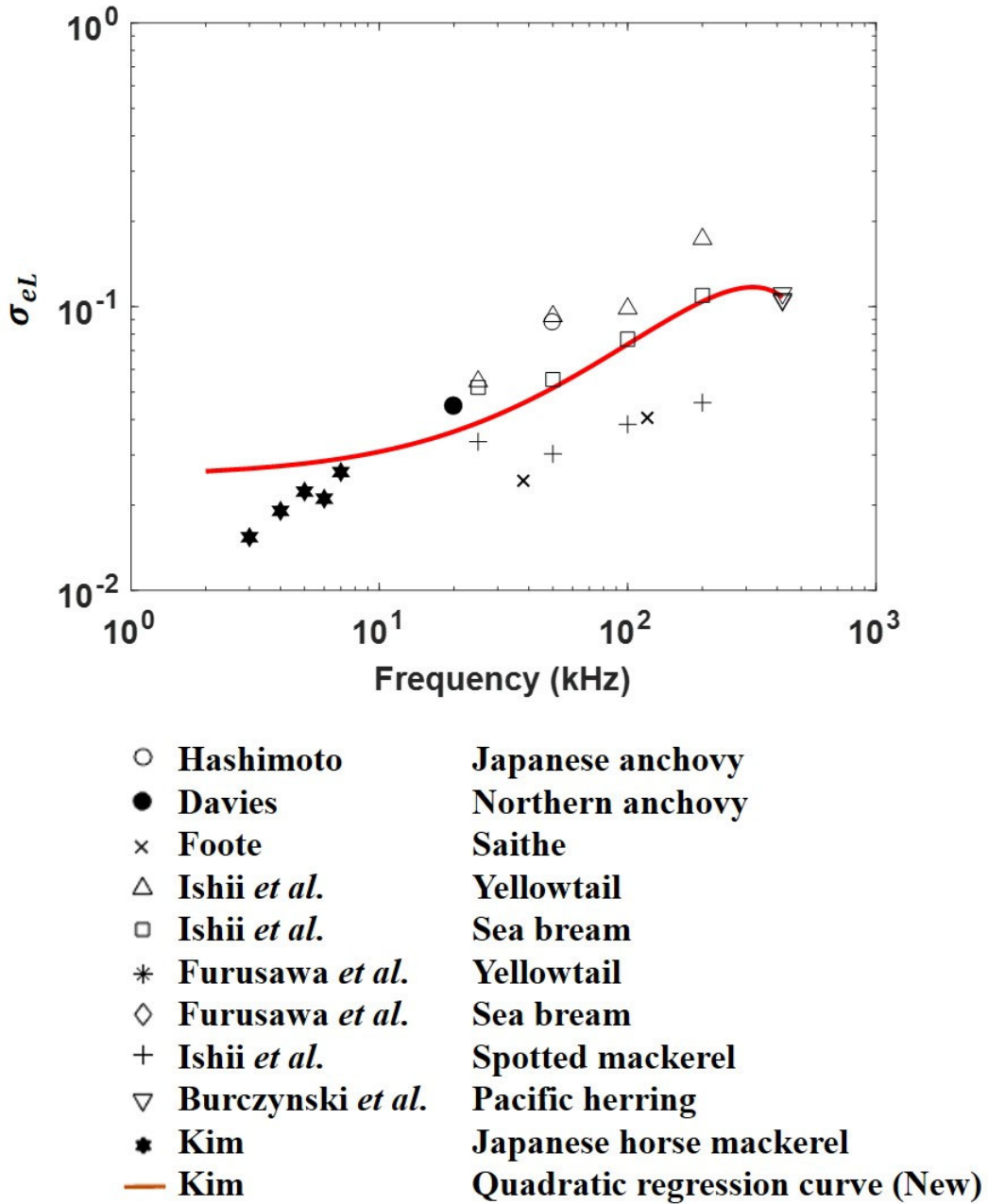


Figure 17. 기존 연구 및 본 연구의 주파수에 따른 어류의 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적 결과 그림 (빨간색 회귀선은 본 연구에서 새롭게 계산한 2차 회귀 분석 모델)



Table 5. 어군을 이용한 음향 감쇠 실험을 통해 획득한 기존 및 본 연구 결과 요약(연구자, 어종, 주파수, 체중, 총 체장, 체적당 밀도, 소멸 단면적, 체중으로 정규화된 소멸 단면적, 총 체장으로 정규화된 소멸 단면적)

Number	Researcher	Species	Frequency (kHz)	Wet weight (g)	Total length (cm)	n (/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (m <sup>2</sup> )	$\sigma_{ew}$ (m <sup>2</sup> /g <sup>2/3</sup> )	$\sigma_{eL}$
1	Hashimoto	Japanese anchovy	50	5.2	8.6	250	0.065	0.0217	0.0879
2	Davies	Northern anchovy	20	9.6	10.6	650	0.050	0.0111	0.0445
3	Foote	Saithe	38 120	375	35.1	10~340	0.030 0.050	0.0058 0.0096	0.0244 0.0406
4	Ishii et al.	Yellowtail	25	4500	72	9.7	2.827	0.0104	0.0545
			50				4.798	0.0176	0.0926
			100				5.107	0.0187	0.0985
			200				8.979	0.0329	0.1732
		Sea bream	25	900	31	21.2	0.499	0.0054	0.0519
			50				0.532	0.0057	0.0554
			100				0.738	0.0079	0.0768
			200				1.052	0.0113	0.1095
5	Furusawa et al.	Yellowtail	50					0.0040	
		Sea bream	50					0.0030	

6	Ishii et al.	Spotted mackerel	25	261	29.2	169.5	0.285	0.0070	0.0334
			50				0.258	0.0063	0.0303
			100				0.328	0.0080	0.0385
			200				0.391	0.0096	0.0459
7	Burczynski et al.	Pacific herring	420	100	20	92	0.426	0.0198	0.1065
							0.421	0.0195	0.1053
							0.446	0.0207	0.1115
8	Kim	Japanese horse mackerel	3	217	27.7	100	0.121	0.0033	0.0154
			4				0.149	0.0041	0.0191
			5				0.175	0.0048	0.0223
			6				0.165	0.0046	0.0210
			7				0.205	0.0057	0.0261

### 3.4 토의

해양에서 존재하는 어군은 크기와 밀도가 불규칙하게 나타나지만 적게는 수 백 마리, 많게는 수 만 마리까지 하나의 어군을 이룬다. 해양 환경의 음파 전달 측면에서 어군에 의한 영향은 물리학적 및 지질학적 요소에 비해 상대적으로 영향이 적을 수 있지만, 비교적 높은 손실을 발생하는 요인이므로 생물학적 요소도 고려해야 할 필요가 있다.

본 논문의 3 장에서 어군에 의한 음파 전달 손실 실험을 통하여 어류 밀도에 따른 음향 감쇠 특성을 분석해보았다. 그 결과, 상대적으로 낮은 주파수 대역에서는 선형적으로 감쇠 계수가 증가하는 반면, 상대적으로 높은 주파수 대역에서는 간섭 현상으로 인하여 수신된 음향 준위가 변동하였다. 이와 같은 음향 준위 변동은 6~7 kHz 주파수의 파장이 각각 25 cm, 21 cm 로 어류의 총 체장과 유사하게 나타났기 때문에 서로 상호 작용하여 수신 준위가 현저하게 감소하였다고 생각된다. 따라서 이렇게 간섭 현상이 나타난 신호를 제거하기 위하여 제거 알고리즘을 사용하였다. 간섭 현상이 나타난 신호 제거를 위해 전체 수신된 음향 신호에서 먼저 코히런스(Coherence)가 나타나는 수신 준위가 거의 변하지 않는 안정된 3.6~4.0 ms 구간을 선정하여 수신된 에너지 준위의 히스토그램을 통해 분포를 확인하였다 (Figure 18). 일반적으로 생물에 대한 표적 강도 혹은 체적 후방 산란 강도를 히스토그램으로 나타낸 후,

레이리히 분포(Rayleigh distribution) 형태가 나타난다면 그 변화폭이 크다고 알려져 있고, 정규 분포는 도수 분포 곡선이 평균값을 중앙으로 하여 좌우 대칭인 모양을 이루기 때문에 자료가 안정된다고 알려져 있다 (Kim et al., 2018). Figure 18 에서 나타낸 주파수 7 kHz 에서 어군의 밀도에 따른 히스토그램 분석 결과, 어군 밀도 별 수신된 음향 신호 대부분이 정규 분포를 보였다. 그러나 일부분의 수신 음향 신호에서 파장과 어류 체장에 따른 상호 작용에 의해 수신 준위가 크게 흔들리거나 현저하게 준위가 낮아지는 부분이 상대적으로 높은 주파수 대역에서 발생하였기 때문에 95 % 신뢰 구간을 적용하였다.

95 % 신뢰 구간을 적용한 후에 평균 및 최대 감쇠 계수를 계산하였다. 그러나 Figure 15 의 상단 그림과 같이 평균 감쇠 계수가 상대적으로 높은 주파수와 어군의 밀도가 높은 경우는 선형적으로 증가하지 않았다. 이렇게 나타난 원인은 Medwin and Clay (1998)의 산란 방향성 이론에 따르면 주파수의 함수인 파수( $k$ )와 구의 단면적( $a$ )에 따라서 산란 신호의 방향성이 나타나기 때문이다.  $ka$  가 0.0136 을 만족할 때는 공진이 발생하여 산란 준위가 가장 높게 나타난다.  $ka$  가 1 보다 적을 때 전 방향에서 산란 준위가 동일하게 나타나지만, 1 보다 클 경우에는 전방 산란 준위가 후방 산란 준위에 비해 크게 나타나게 된다. 따라서 상대적으로 높은 주파수 대역과 그물 내에 높은 밀도의 어군(400, 500 EA)이 존재할 때, 하나의 커다란 기포 운(Bubble cloud)으로 가정하고  $ka$

값을 계산해보았다 (커다란 기포 운 반지름  $a = 0.5$  m). 주파수가 각각 3, 4, 5, 6, 7 kHz 일 때,  $ka$  값은 각각 27.7, 36.9, 46.2, 55.4, 64.7로 계산되었다. 따라서 주파수가 증가할수록  $ka$  가 높게 나타나 어군에 의해 전방 산란 에너지가 높아져 상대적으로 높은 신호가 수신되었다고 판단된다 (Medwin and Clay, 1998). 그러나 하나의 기포 운에 대한 산란이 아닌 다중 산란(Multiple scattering)으로 작용하고, 어군 밀도가 높을수록 다중 산란에 의해 높은 전방 산란 에너지가 나타나는 영향도 고려해야 할 필요성이 있다 (Medwin and Clay, 1998).

Davies (1973)의 기존 연구는 북태평양 멸치를 이용하여 투명한 구체 내에서 움직임이 없는 상태에서 음향 감쇠 실험을 수행하였다. 중주파수 대역인 1~20 kHz 에서 실험을 수행하였고 약 3 kHz 에서 가장 높은 공진 감쇠가 나타났다. 그러나 어군의 밀도에 따라 정량적으로 계산하지는 않았으며, 살아 있지 않는 상태의 어류이므로 해양 환경이 모두 고려되지 않았다. 감쇠 계수 결과를 주파수 별로 단순히 최대, 평균, 최소 값으로 나타냈다. 최대 감쇠 계수도 높은 주파수 대역에서는 선형성이 나타나지 않았다. Ye (1996)의 연구에서는 어류의 몸체와 부레에 따른 음향 감쇠 특성 연구를 수행하였고, 어류 10 cm, 72 cm 의 체장에 따라서 몸체와 부레의 소멸 단면적 만을 계산하였으며, 기존 연구 결과와 단순히 비교만 수행하였다. Diachok (2005)의 연구에서는 실 해역에서 멸치 어군을 이용하여 낮과 밤에 따른 감쇠 계수를 계산하였으며, 약 3 kHz

미만 주파수 대역에서 감쇠 계수가 최대 6 dB/km 로 나타남을 실험적으로 검증하였다. 그러나 어군 밀도에 따른 정량화 실험은 수행하지 않았고, 전달 손실 측정을 이용하여 낮과 밤에 따른 공진에 따른 감쇠 계수를 나타내었다. 최근 Meseguer and Ramiro-Manzano (2017) 연구에서는 부레를 하나의 기포로 모델링하여 공진에 대한 감쇠 이론을 연구하였다. 그러나 이론적인 음향 감쇠 계수만 고려되었고, 어군의 밀도에 따라 정량적으로 계산하지는 않았다. 이외에도 어군의 후방 산란에 대해서만 연구가 일부 수행되었을 뿐이며, 음향 감쇠에 의한 특성은 미진하다 (Miyancohana et al., 1993; Ding, 1996; Sigfusson et al., 2001). 기존 연구에서는 실험한 어류의 종도 다르며, 대부분 이론적 및 실험적으로만 접근하여 음향 감쇠 계수만을 산출하였다. 그러나 해양 환경 내 어군의 밀도, 중주파수 대역 별 조건들을 모두 고려하지 않았기 때문에, 본 연구 결과와 직접적으로 비교하기는 어려운 측면이 있다.

향후 음향 감쇠 실험에서는 많은 수신 음향 신호 분포 경향을 확인해야 할 필요가 있다. 또한 광범위한 주파수 대역에서의 감쇠 실험을 통하여 주파수에 따른 상관성을 분석할 필요가 있다.

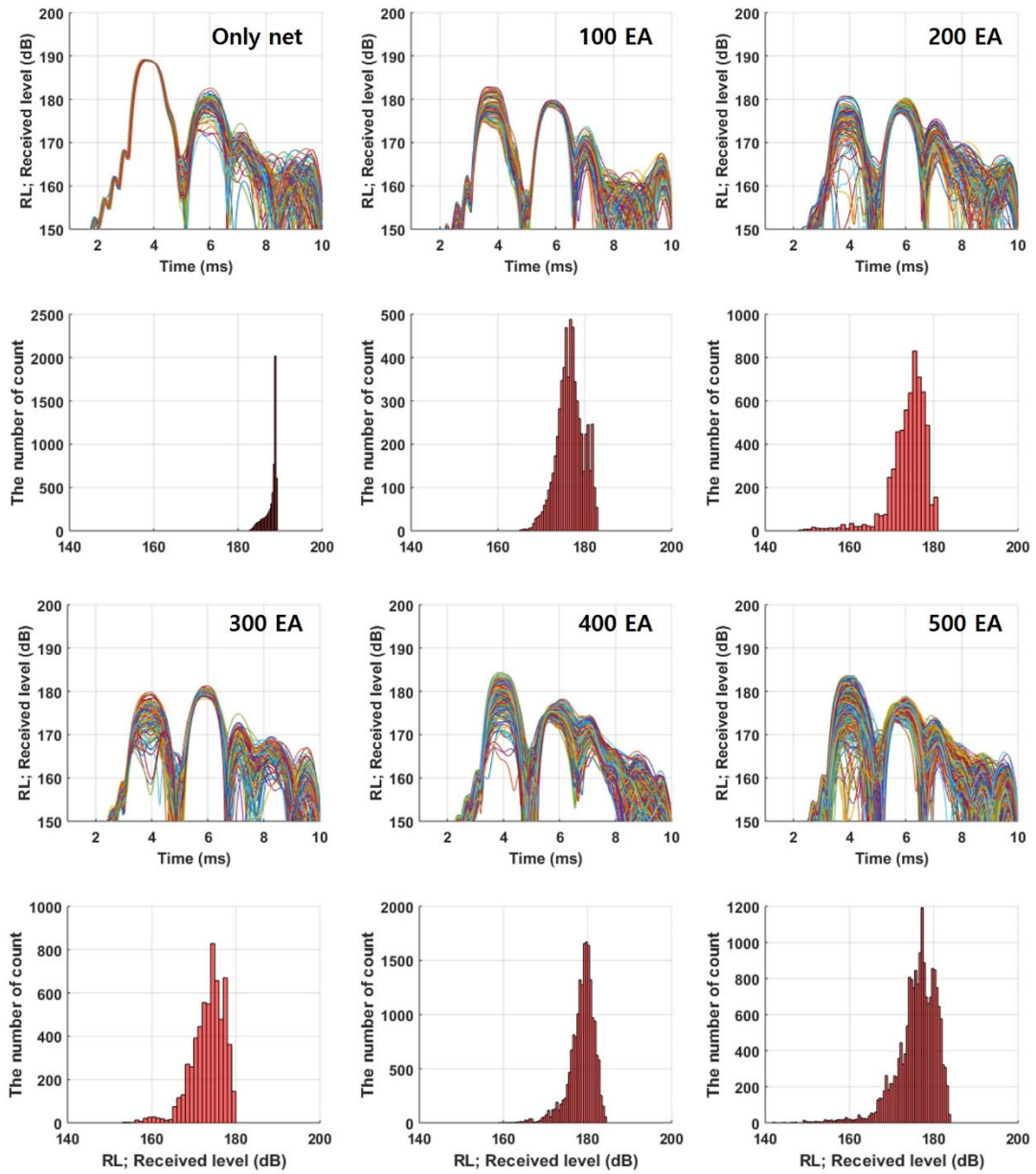


Figure 18. 주파수 7 kHz 에서의 어군 밀도(Only net, 100, 200, 300, 400, 500 EA)에 따른 수신 준위(Direct path, 3.6~4.0 ms) 히스토그램 분포도

## 제 4 장

# 생물학적 요소를 적용한 중주파수 대역의

## 소나 탐지 성능 모델링

### 4.1 수중음향 모델링 개요

해양 환경 내에서 음파 전달 현상을 이해하는 것은 효과적인 소나 시스템 운영에 있어서 필수적인 요소이다. 이러한 음파 전달 현상은 수중 음향 모델링을 통해 사전에 이해할 수 있다. 수중음향 모델링은 관측을 통해서 축적된 지식 혹은 기초 원리를 유추하는 지식을 체계화하는 방법으로 주로 군사적 용도와 비군사적 용도로 구분되어 사용되었다. 군사적인 용도로는 소나 기술자들이 해군 운용을 지원하기 위한 소나 시스템 설계와 평가를 발전시키기 위해서 수중음향 모델을 개발하였고, 이는 해상 실험 계획, 최적화된 소나 시스템 설계, 함정의 소나 탐지 성능 예측을 위한 음향학적 조건을 만족하기 위하여 사용되었다. 반면 비군사적 용도로는 연구자들의 수중음향 및 음파 채널 관련 연구, 지구 물리 탐사를 위한 방법으로 사용되었다. 이러한 수중음향 모델링은 파동 방정식이나 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식의 해를 찾는 과정으로, 물리적이거나 수학적인



---

가정에 따라서 음선 기반 모델, 파수 적분(Wavenumber integral, WI) 모델, 정상 모드(Normal mode; NM) 모델, 포물선 방정식(Parabolic equation; PE) 모델로 크게 네 가지로 구분되고 있다 (Jensen et al., 1994). 각 모델들은 천해 혹은 심해, 저주파 또는 고주파, 독립 혹은 종속 변수에 따라 구분되어 사용된다 (Figure 19).

파동 방정식의 해를 구하기 위한 방법으로는 유한 요소법과 경계 요소법이 있다. 이와 같은 방법을 활용하여 파동 방정식의 해를 구한 다음 해양 환경에서 음파 전달 특성을 예측할 수 있으나 계산 효율을 고려하면 시간이 많이 소요되고, 고성능의 컴퓨터가 사용되어야만 한다. 따라서 수치 기반의 유한 요소법 또는 경계 요소법에서 도출된 파동 방정식의 해를 활용하여 음파 전달 특성을 예측할 수 있다 (Choo, 2012). 그러나 이는 비교적 이상적인 해양 환경에서만 적용되고, 해양 내에서 효과적인 소나 시스템 운영을 목적으로 물리, 지질, 음향의 복합적인 해양 환경들의 이해가 바탕이 된 후, 수중음향 모델링이 수행되어야 한다.

Model type	Application							
	Shallow water				Deep water			
	Low freq.		High freq.		Low freq.		High freq.	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray	○	○	●	●	◐	◐	●	●
Wavenumber integration (WI)	●	○	●	○	●	○	◐	○
Normal mode (NM)	●	◐	●	◐	●	◐	◐	○
Parabolic Equation (PE)	◐	●	○	○	◐	●	◐	◐

Low freq (  $f < 1000$  Hz)

High freq (  $f > 1000$  Hz)

RI: Range independent environment

RD: Range dependent environment

●: High efficiency & accuracy

◐: Limited efficiency & accuracy

○: Low efficiency & accuracy

Figure 19. 다양한 수중음향 모델의 천해/심해 환경, 주파수에 따른 환경, 독립 혹은 종속 변수 환경에 따른 적용성 (Jensen et al., 1994)

## 4.2 소나 탐지 성능 모델 적용

일반적으로 환경 모델은 경험적 알고리즘을 기반으로 음속, 해수 감쇠, 경계면의 반사 및 산란 손실, 체적 후방 산란 강도 모델들을 포함하고, 기초 음향 모델로 전달 손실, 주변 소음, 잔향음 등을 적용 및 포함하는 음향 관련된 모델이 있다 (Etter, 2013). 효율적인 소나 성능을 계산하기 위해서 위와 같은 모델 이외에 신호 처리 모델을 포함하여 사용되는 소나 탐지 성능 모델이 있다. 소나 탐지 성능 모델은 주로 잠수함, 어뢰, 기뢰 탐지 및 어뢰 자동 유동 장치와 음향 측심기 성능 분석 연구 등에 주로 사용하는 모델이다 (Etter, 2013).

기초 음향 모델 중 하나인 음선 기반 모델은 환경 모델을 포함하는 수중음향 모델 중 하나로 현재까지 전 세계적으로 가장 많이 사용하고 있다. 그 중 대표적인 BELLHOP 모델은 B. P. Michael 이 개발한 음선 기반 모델로 1 kHz 이상의 중주파수 대역에서 가장 널리 사용되고 있다 (Michael, 1987) 해당 모델은 미국 해군 연구소(U.S.A, The Office of Naval Research)의 Ocean Acoustic Library 에서 소프트웨어와 데이터를 Fortran, Matlab, Python 형태로 제공하고 있다. BELLHOP 은 해양 환경에서 음압장을 예측하기 위한 음선 기반 모델이다. 해당 모델에서 물리 및 지음향 자료는 중요한 입력 요소들이지만, 현재까지 생물학적인 요소는 고려하지 못하고 있다.

이와 같이 기초 음향 모델에서 잔향음을 예측하는 모델이 있다. 일반적으로 수중으로 송신된 음파는 해수면이 비교적 잔잔하여 파도가 없는 환경이거나, 평탄한 해저면의 경우에는 대부분의 음파가 전파하거나 반사되어 수층 내로 전달되게 된다. 그러나 해양 환경은 각 지역별로 변동성이 심하게 나타난다. 예를 들면, 바람에 의한 파도와 거친 지형의 해저면 등 불규칙한 경계면, 수층 내에 불규칙하게 존재하고 있는 수중생물(어군, 음향 산란층 등)에 의해 산란 및 감쇠 된다. 특히 심해에 비해 천해에서는 해수 및 해저 경계면에 의하여 음파 전달 양상이 복잡하기 때문에 산란이 우세하게 나타나게 된다. 표적 이외의 다른 환경 요소들에 의해 산란되어 들어오는 신호를 잔향음이라고 부른다. 이러한 환경에서 능동 소나를 운용하게 된다면 잔향음에 의해 탐지 거리 예측 등 여러 제한 요소가 발생하게 된다. 기초 음향 모델 중 이러한 잔향음 특성을 파악하고 예측하기 위하여 국내에서는 Choi et al., (2002)이 천해에서 고주파 산란 모델을 적용한 잔향음 모델을 개발하였고, Oh et al., (2006)은 거리 독립 해양 환경에서 중주파수 음선 이론을 이용하여 양상태 잔향음 신호를 모의하였으며, 이 결과를 실측 자료와 비교하였다. Choo et al., (2009)은 음선과 환경 자료 기반 중주파수 대역의 잔향음 모델을 개발하였고, Kim et al., (2012)이 음선 기반 BELLHOP 모델에 잔향음 모델을 추가하여 개발하였다.

반면 국외에서는 H. Weinberg and R. E. Keenan (1996)이 음선 모델의 일종인 GRAB(Gaussian RAY Bundle) 모델을 개발하였다. Keenan (2000)이 GRAB 모델 기반으로 개발된 CASS(Comprehensive Acoustic System Simulation) 모델을 소개하였고, 이는 특정 시간에 영향을 주는 산란 신호를 탐색하며 이에 대하여 산란 면적을 계산한 다음 최종 잔향음 신호를 계산하는 모델이다. 또한 Weinberg (2000)는 CASS 잔향음 모델 결과를 실측 데이터와 비교하여 그 효용성을 검증하였다. 이를 기반으로 미 해군에서는 현재까지도 CASS 모델을 사용하고 있다. 그러나 잔향음을 고려할 때 중요 변수 중 하나인 경계면(해수면, 해저면)에 의한 반사 및 산란 모델과 해수 감쇠 모델, 주변 소음 모델에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔으나, 수층 내에 존재하는 생물학적인 요소의 체적 산란 모델 연구는 어군의 불규칙성으로 인하여 현재까지 연구된 바 없으며, 단순히 하나의 값(예: -80 dB)만을 적용하고 있다. 이렇게 복잡한 해양 환경 내에서 효율적으로 소나 시스템을 운영하기 위해서 해양에서 다양하게 존재하는 잔향음 요소들을 고려하여 반영해야 한다.

따라서 본 논문의 4 장에서는 우리나라의 해양 환경에 따른 음파 전달 특성을 파악하기 위하여 해수와 해저의 경계면에 대한 반사 및 산란이 고려된 잔향음 모델을 기반으로 한 소나 탐지 성능 모델 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 생물학적인 요소인 어군에 의한 영향을 고려하기 위하여 잔향음(체적 산란 모델)과 어군에 의한 감쇠 계수를

---

적용하였다. 소나 탐지 성능 모델링은 우리나라 황해, 남해, 동해의 세  
해역에서 수행하였고, 각각의 해역에서 수치 모델 자료 및 해저 저질  
자료를 산출한 다음 모델링을 수행하여 표적의 탐지 거리와 확률을  
예측하였다.

### 4.3 탐지 성능 예측을 위한 잔향음 준위, 능동 신호 초과, 탐지 확률 계산

소나의 탐지 성능은 환경, 장비, 운용자 요소가 모두 포함되어 계산된다. 이 때 능동 소나의 탐지 성능은 간단한 방정식을 통해 계산할 수 있다. 탐지 성능을 계산할 때 사용하는 변수인 전달 손실, 잔향음, 주변 소음은 각각의 모델을 통해 계산된다. 특히 소나 송신 모드에서는 필수적으로 잔향음이 발생하게 되는데, 표적 탐지를 제한하는 주요 요소이므로 정확하게 예측 및 계산하는 것이 중요하다. 잔향음 준위는 음원 준위, 전달 손실, 산란 면적 및 단위 면적 당 산란 강도들을 기반으로 식 (14)와 같이 계산된다 (Urick, 1983).

$$RL = SL - TL1 - TL2 - SS + 10 \cdot \log_{10} A, \quad (14)$$

이 때  $RL$  은 잔향음 준위,  $SL$  은 송신기에서 방사된 음원 준위 (1 m 거리에서  $1 \mu\text{Pa}$  기준 음압),  $TL1$  은 음원에서 표적까지의 전달 손실,  $TL2$  는 표적에서 수신기까지의 전달 손실,  $SS$ 는 단위 면적 당 산란 강도,  $A$ 는 산란 면적을 나타낸다. 잔향음은 해수면, 수층, 해저면 등 다양한 해양 환경으로부터 발생하기 때문에 실험적으로 정립된 모델을 사용하였다.

능동 소나 운용에 따른 표적의 탐지 거리를 예측하기 위해서는 표적 강도, 전달 손실, 잔향음 준위, 주변 소음 준위를 토대로 능동 신호

초과(*ASE*, Active signal excess)를 먼저 계산해야 한다. 능동 신호 초과는 시간에 따라 계산되며, 거리에 따른 함수로 나타낼 수 있다. 능동 신호 초과는 음원에서부터 각 표적과 경계면까지의 전달 손실, 도달 시간 및 각도 등의 음선 정보들을 계산한다. 그 후, 시간에 따른 각 음선의 음압 정보(음원 준위, 빔 패턴, 표적 강도)를 고려하여, 반향 되는 준위를 계산한다. 각각의 거리에서 고유 음선의 시간에 따라 해당되는 잔향음 준위와 주변 소음 준위를 계산할 수 있다. 이 때 잔향음과 주변 소음은 탐지 거리에 제한을 주는 요소로 작용하게 된다. 능동 신호 초과는 다음과 같은 식 (15)와 (16)으로 계산한다 (Urick, 1983; Waite, 2002).

$$ASE = SL - TL1 - TL2 + TS - (RL) + DI - DT, \quad (15)$$

$$(RL > NL)$$

$$ASE = SL - TL1 - TL2 + TS - (NL) + DI - DT, \quad (16)$$

$$(RL < NL)$$

이 때, *SL*, *TL*, *RL* 은 식 (14)와 동일하며, *TS* 는 표적 강도, *NL* 은 주변 소음 준위, *DI* 는 송신기의 지향 지수, *DT* 는 탐지 문턱을 나타낸다. 식 (15)는 *RL* 이 *NL* 에 비해 우세한 환경에서, 식 (16)은 *NL* 이 *RL* 보다 우세한 환경에서 능동 신호 초과를 계산하는 수식이다.

일반적으로 정규 분포를 가정하여 계산된 능동 신호 초과 값이 0 dB 일 때 표적 탐지 확률은 50 %를 의미한다. 탐지 확률을 높이기



위해서는 능동 신호 초과 값이 최소 0 dB 이상이어야 한다. 각각의 음장을 가우시안 합을 취하였으며, 위와 같은 과정으로 계산된 능동 신호 초과 탐지 확률을 식 (17)과 같이 계산할 수 있다 (Urlick, 1983).

$$P_D(ASE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{ASE} e^{\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)} dx, \quad (17)$$

이 때  $P_D$ 는 탐지 확률,  $\sigma$ 는 능동 신호 초과에 대한 표준 편차이다. 본 모델링에서는  $\sigma$  값을 Urlick (1983)과 Michael (1993)이 제시한 8 로 정한 후에 탐지 확률을 계산하였다.

## 4.4 탐지 성능 모델링을 위한 우리나라 연근해 환경 변수 자료 수집

### 4.4.1 해양 환경 자료 수집

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있고, 각 해역 별로 복잡한 해저 지형과 해류의 영향으로 음향 탐지 환경 변화가 다양하다. 특히 동해의 경우에는 대잠수함전 훈련 및 잠수함 탐지 장비에 대한 성능 시험에 적절한 해역이며, 주변 강대국들이 잠수함을 운용하는 무대가 되고 있다. 따라서 심해인 동해와 천해인 황해와 남해의 대표적인 정점에서 소나 탐지 성능 모델링을 수행하기 위해 해양 환경 자료를 수집하였다.

일반적으로 우리나라 연근해의 수온과 염분과 같은 해양 환경 자료는 여러가지 방법을 통해서 수집할 수 있다. 먼저 공개된 자료인 미국립 해양 자료 센터(National Oceanographic Data Center, NODC)의 수층 별 수온, 염분이 포함된 전 세계적 Levitus 자료 (NODC, 2019)가 있다. 또한 국내 연해 및 근해 자료인 한국 해양 자료 센터(Korea Oceanography Data Center, KODC)의 정선 관측 자료의 수층 별 수온, 염분 자료 (KODC, 2019)가 있으며, 마지막으로 해양 수치 모델(Generalized Digital Environmental Model, GDEM)를 통해서 해양 환경 자료를 수집할 수 있다 (Carnes, 2009).

NODC 의 자료는 연간, 계절별, 매 월마다 시간적 해상도와  $1^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  의 간격을 갖는 공간 해상도를 포함하는 자료이다. 반면 우리나라의 연, 근해 자료인 KODC 의 정선 관측 자료는 1960 년대부터 현재까지 각 정점마다 1 년에 6 회(2, 4, 6, 8, 10, 12 월)에 우리나라 연근해 25 개 정선, 207 개 정점에서  $3^{\circ}$  간격의 공간적 해상도를 가지고 수온, 염분, 용존 산소 등 여러 해양 환경 자료가 축적되고 있다. 이러한 이유로 NODC 와 KODC 자료는 해상에서 관측을 바탕으로 우리나라 연근해의 해양 환경을 반영할 수 있다는 장점이 있지만, 시·공간적 해상도가 낮기 때문에 해양 변동성을 반영하지 못한다는 단점이 있다. 수중음향 모델링을 수행할 때, 해양 환경 자료들은 모델의 결과에 큰 영향을 미치기 때문에, 정확히 모의하기 위해서는 해양 및 음향 환경 변동성에 의한 영향도 함께 필수적으로 고려해야 한다. 또한 GDEM 모델 자료도 해양의 변동성을 포함하고 있지 않는 자료이므로 실측 해양과는 차이가 발생하므로 우리나라 연근해의 대표 해역을 설정하여 그 해역의 반경을 설정하고 실 해역 자료를 반영하도록 수치 모델 자료를 업데이트 하였다.

따라서 본 연구에서는 해양의 변동성을 포함하고 있는 자료를 얻기 위해서 10 일 간격의 시간적 해상도와  $1/12^{\circ}$  간격의 공간적 해상도를 이용하여 수십 별 수온, 염분 등의 실 해역 자료를 반영한 수치 모델 기반의 GDEM 모델 자료를 사용하였다. Figure 20 에는 GDEM 모델 자료를

통해 획득한 우리나라 인근 해역의 하계 및 동계 시기 표층 수온 분포를 나타내었다.

일반적으로 우리나라는 해역 및 계절 별로 수온, 염분 구조가 다르기 때문에 음속 구조도 다르게 나타난다. 따라서 각 해역 별로 동계(2 월)와 하계(8 월) 시기의 해양 환경 자료를 수집하여 활용하였다. 수집한 수온, 염분 자료는 Medwin (1975) 음속 공식을 기반으로 수심별 음속을 계산하였다. 음속 공식에 의하면 음속( $c$ )은 수온( $T$ ), 염분( $S$ ), 수심( $z$ )의 함수로써 식 (18)처럼 표현된다.

$$c(T, S, z) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 \\ + (1.34 + 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (18)$$

해역 별 두 계절에서 수집한 수온, 염분 자료를 토대로 내삽법을 사용하여 음속을 계산한 후, 모델링의 환경 입력 변수로 사용하였다.

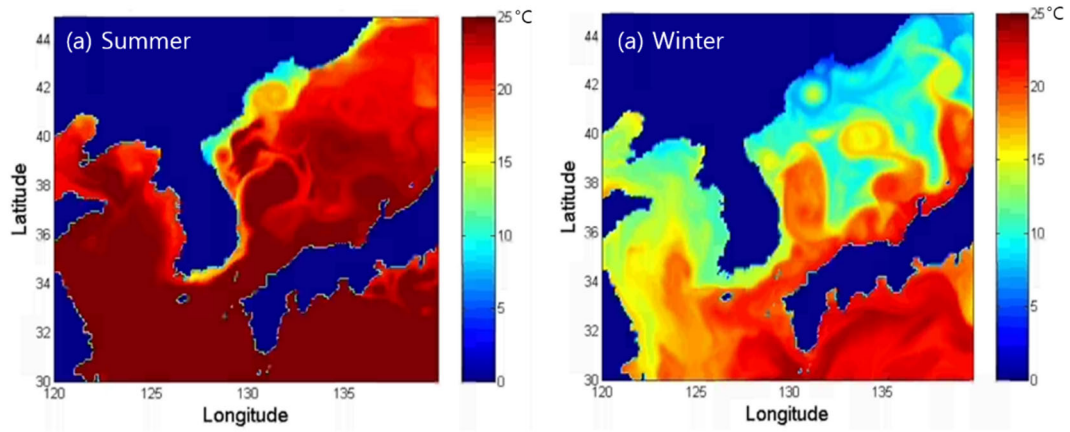


Figure 20. GDEM 모델 자료를 통해 획득한 우리나라 연근해 표층 수온 분포 (a) 하계와 (b) 동계 시기

#### 4.4.2 해저 지형 자료 수집

우리나라 연, 근해의 해저 지형 자료를 수집하기 위해서 NOAA 의 NGDC(National Geophysical Data Center)에서 제공하는 ETOPO1 모델을 이용하였다. ETOPO1 모델은 전 세계적으로 지표면과 해수면을 통합한 넓은 해역 모델 자료이다 (NOAA, 2019). 일반적으로 황해는 평균 수심이 약 40 m, 남해 평균 수심은 약 100 m, 동해 평균 수심은 약 1,800 m 이다. 황해와 남해는 천해 해역으로 수심의 변화가 크지 않은 해역이지만, 동해는 대륙붕부터 심해 평탄한 지역까지 수심 약 250 m 부터 2,000 m 로 급격하게 수심이 변화하는 해역이고, 위도 35° 보다 37~38° 구간에서 경사가 더 커진다. 또한 동해의 경우 공간적 변동이 황해나 남해 해역에 비해 크기 때문에 해저면 기울기에 의한 음파 전달 경로에서 차이가 발생하는 해역이다. 이처럼 각 해역 및 해저 지형에 따라 음파 전달 경로 차이가 발생하므로, ETOPO1 모델 자료를 통해 황해, 남해, 동해의 해저 지형 자료를 수집하여 모델링의 환경 입력 변수로 사용하였다.

### 4.4.3 해저면 저질 성분 자료 수집

우리나라 연, 근해의 해저면 저질 자료는 탄성과 탐사를 통해 조사된 해저면 단면도와 퇴적물 채집 장비로 취득한 시료의 입자 분석을 통해 공개된 국립해양조사원의 천부 지층 분포도로부터 황해, 남해, 동해 해역의 해저 저질 자료를 수집하였다. 해저면 저질 상태는 Folk and Ward (1957)의 표층 퇴적물 유형 분류법에 의거하여 분류된 해저면 저질 자료이고, 위 연구에서 제시된 평균 입도 계산 식을 통해 계산하였다. 황해 해역의 해저면 평균 입도 자료는 위경도 34~37° N, 124~127° E 내에 측정된 각 정점 간의 거리가 약 10~20 km 내외로 일정 간격을 이루지만 연안에서 외해로 갈수록 정점 간의 간격이 최소 5 km 에서 최대 50 km 이상 차이가 나타나는 자료이다. 황해의 경우 위도 36° 에서 남북을 경계로 하여 북쪽은 비교적 굵은 입자의 평균 입도가 1~2  $\Phi$  인 사질이 분포되어 있으나, 남쪽은 평균 입도가 4~7  $\Phi$  에 해당하는 사질과 니질의 다양한 퇴적 성분이 분포되어 있다.

남해 해역의 해저면 평균 입도 자료는 위경도 32~35° N, 124~131° E 내에서 측정된 각 정점 간의 거리가 평균적으로 7~15 km 내외로 분포하지만, 외해로 나갈수록 황해 해역 자료보다 최소 10 km 에서 최대 60 km 이상 차이가 나타나는 자료이다. 남해 해역은 연안에서 주로 강이나 하천의 퇴적물에 의해서 평균 입도가 6~7  $\Phi$  인 니질로 구성되어

있는 해역이며, 외해로 갈수록 주로 평균 입도가 1~2  $\Phi$  에 해당하는 사질로 구성되어있다.

동해 해역의 해저면 평균 입도 자료도 황해 해역 자료 간격보다 상세하게 나타나 있지 않다. 동해는 평균 입도가 7~9  $\Phi$  에 해당하는 니질 또는 점토로 주로 구성되어 있고, 몇몇 연안에서는 평균 입도가 1~2  $\Phi$  인 사질로 구성되어 있는 해역이다. 위 결과를 종합하면 우리나라 연근해 지역의 자료는 간격이 상대적으로 조밀하게 측정되어 있으나, 외해의 자료는 상대적으로 상세하게 나타나 있지 않았다.

일반적으로 해저면으로부터 투과, 반사, 산란되어 전달되는 음파는 해저면 퇴적물의 평균 입도에 영향을 받는다. 해저면 퇴적물 성분은 음파의 전달 측면에서 중요한 변수 중 하나이다. 그러나 현재까지 공개된 자료를 살펴보면 황해 해역의 특정 부분만 균등하게 조사되어 있지만, 그 외의 해역들은 불규칙적으로 조사되어 있기 때문에 해당 자료를 사용하게 되면 각 위치 별로 정확도가 떨어지게 된다. 또한 해저면 퇴적물 자료는 불연속으로 분포되어 있기 때문에 전 해역 모두 고해상도 자료로 획득하기 어렵다. 따라서 연속적인 해저면 저질의 입도 자료를 획득하기 위해서 공개되어 있는 자료를 기반으로 내삽법을 적용하여 모델링의 환경 입력 변수로 사용하였다. (Figure 21).



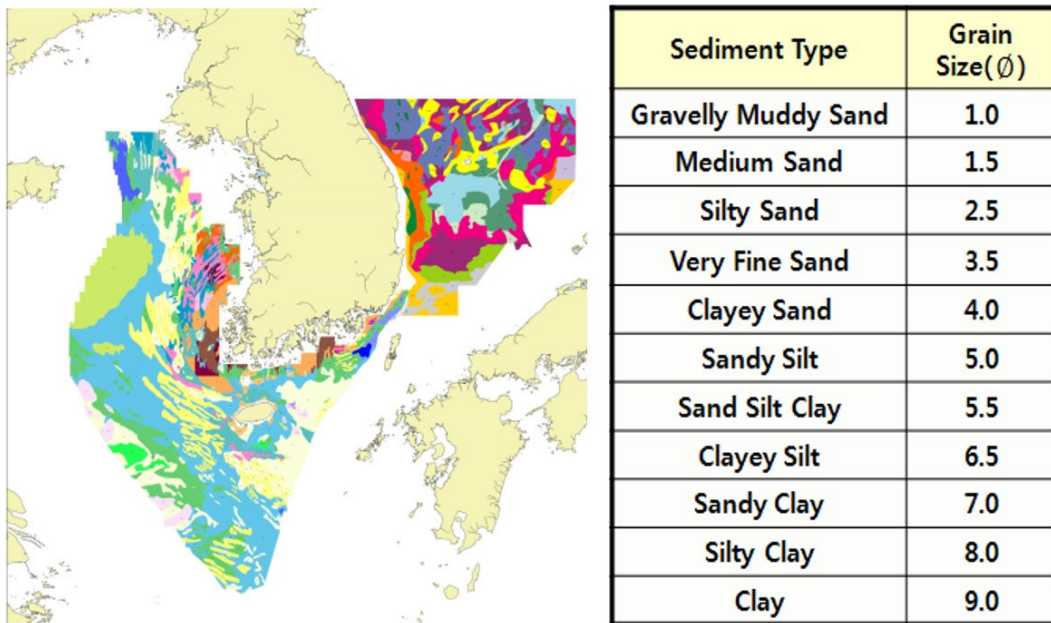


Figure 21. 우리나라 황해, 남해, 동해 해역의 해저면 저질 분포 및 표층 퇴적물의 종류에 따른 평균 입도 크기 자료 분류 (국립해양조사원, 2019)

## 4.5 탐지 성능 모델 입력 변수 및 시나리오 구성

### 4.5.1 해역 별 수집된 환경 자료

황해, 남해, 동해 해역에서 수집된 해양 환경 자료, 해저 지형 자료, 해저면 저질 자료를 모델링 입력 변수로 사용하였다. 이 때 해역 별로 위, 경도를 설정한 기준은 잠수함 표적 탐지를 대상으로 정한 후, 영해 외측에 위치한 지점을 선정하였다. 일반적으로 영해는 영토에 인접한 해역으로서 그 나라의 통치권이 미치는 바다를 일컫는다. 영해 기준은 해안선이 원칙이지만, 섬이 많은 경우에는 가장 외측을 직선으로 연결한 기선을 기준으로 하고 있다 (Kim, 2015).

Figure 22 (a)에 나타난 황해 해역은 안면도부터 약 90 km, 또한 우리나라 영해 직선 기점인 어청도에서 43 km 떨어진 지점인 위도 36.0°, 경도 125.5° 인 해역이며, 해당 해역의 수심은 약 69 m 이다. 이 해역은 수심이 낮고 조류가 강한 해역으로, 동계 음속은 1,470 m/s 로 표층부터 저층인 수심 100 m 까지 변화가 없는 해역이다. 반면 하계 시기에는 표층이 강한 일사량으로 인하여 급격한 수온 상승으로 인하여 표층 음속은 1,530 m/s 로 상대적으로 높게 나타나고, 저층의 음속은 해당 해역에서 음속 최소 층(Sound fixing and ranging channel; SOFAR)인 약 1,500 m/s 로 나타났다. 따라서 표층과 저층의 음속이 약 30 m/s 이상 차이가

나는 해역이다. 해당 해역의 해저면 저질 성분은 일반적인 사질로 평균 입도 크기는 약  $1.95 \Phi$  이다.

Figure 22 (b)에 나타낸 남해 해역은 제주도에서 북동쪽으로 약 22 km, 영해 직선 기점인 여서도에서 약 30 km 떨어진 곳에 위치한 수심 약 123 m 인 해역으로 위도  $33.7^\circ$ , 경도  $127.0^\circ$ 이다. 해당 해역의 동계에는 해수면부터 수심 100 m 까지 음속이 일정하게 나타나는 해역이지만, 수심 100 m 부터 수심 120 m 의 해저면까지는 저층의 제주 난류로 인해 음속이 약 8 m/s 높게 나타나는 해역이다. 반면 하계 시기 표층의 음속은 약 1,530 m/s, 저층의 음속은 음속 최소 층인 약 1,505 m/s 로 표층과 저층의 음속 차이는 약 25 m/s 이상 나타났다. 해당 해역의 해저면 저질 성분은 고운 사질로 구성되어 있고, 평균 입도 크기는 약  $3.03 \Phi$  이다.

Figure 22 (c)에 나타낸 동해 해역 정점은 영해 직선 기점인 울진 해변에서 약 25 km 떨어진 수심 약 520 m 해역으로 위도  $37.05^\circ$ , 경도  $129.7^\circ$  이다. 수심이 가장 깊은 이 해역에서는 동계와 하계 시기 모두 표층과 저층의 음속 차이가 나타나는 환경이다. 특히 하계 시기에는 표층 음속이 약 1,530 m/s 로 높게 나타나는 해역이지만, 수심이 깊어질수록 음속이 점차적으로 감소하여 저층에서 음속 최소 층이 나타났다. 표층과 저층의 음속은 약 70 m/s 이상 차이가 발생하는 해역임을 확인하였다. 해당 해역의 해저면 저질 성분은 입자가 상대적으로 부드러운 니사질로 구성되어 있고, 평균 입도 크기는 약  $4.97 \Phi$  이다.

위 자료들은 탐지 성능 모델링을 수행할 때, 각각의 입력 변수로 사용하였다. 각 해역 별로 선정된 해역에 대한 위치 지도와 음속 프로파일은 Figure 22 에 나타내었으며, 위도 및 경도 좌표 값, 해역 수심, 해저면 저질 성분, 평균 입자 크기를 Table 6 에 나타내었다.

Table 6. 모델링을 수행하기 위한 각 해역 정점의 위/경도, 수심, 해저면 저질 성분, 평균 입자 크기

<b>Yellow sea</b>	Latitude (°)	36.0
	Longitude (°)	125.5
	Depth (m)	69
	Sediment type	Medium sand
	Mean grain size ( $\Phi$ )	1.95
<b>South sea</b>	Latitude (°)	33.7
	Longitude (°)	127.0
	Depth (m)	123
	Sediment type	Fine sand
	Mean grain size ( $\Phi$ )	3.03
<b>East sea</b>	Latitude (°)	37.05
	Longitude (°)	129.7
	Depth (m)	521
	Sediment type	Sandy silt
	Mean grain size ( $\Phi$ )	4.97

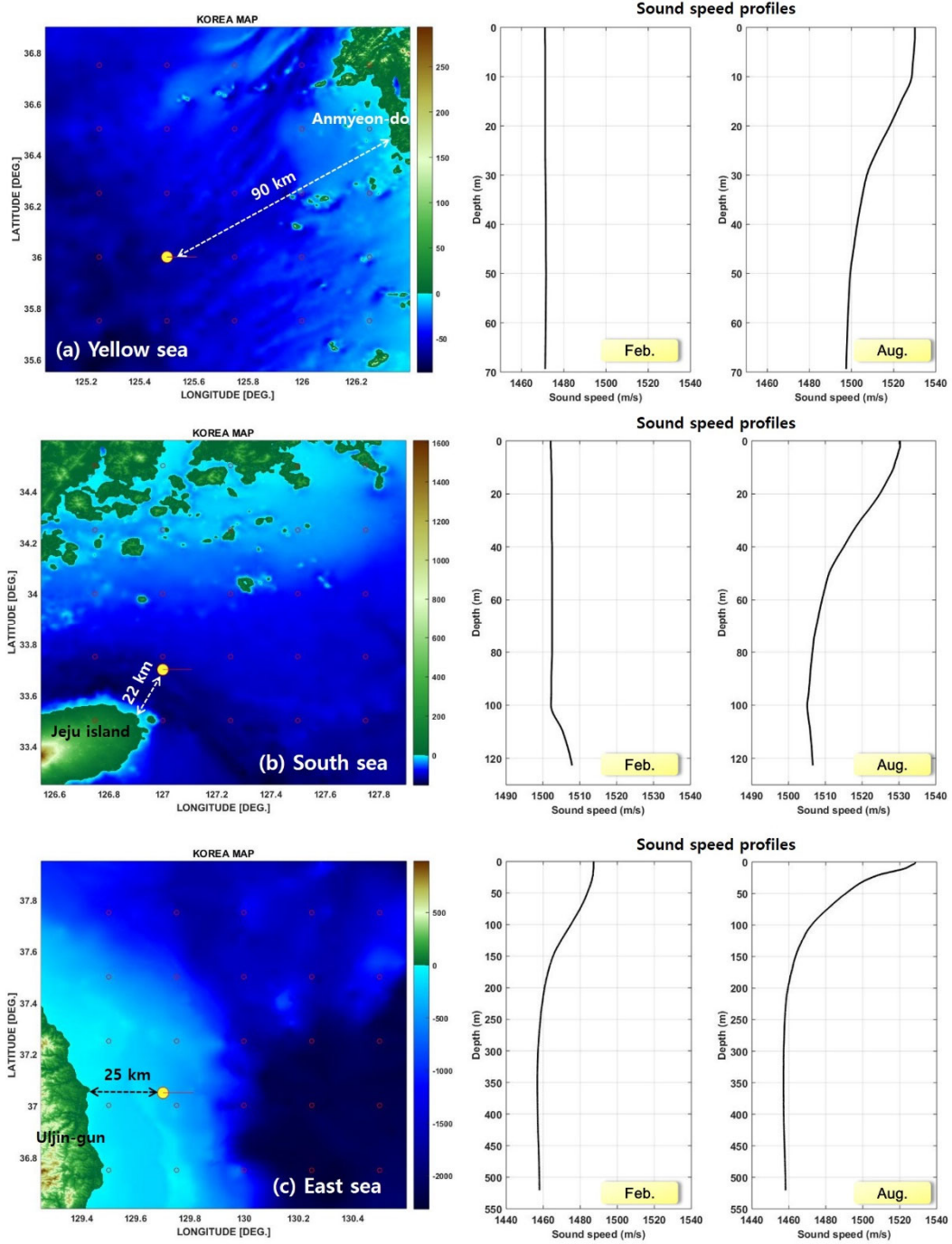


Figure 22. (a) 황해, (b) 남해, (c) 동해 해역의 소나 탐지 성능 모델링 정점 및 계절(2 월, 8 월)별 수심에 따른 음속 프로파일

#### 4.5.2 탐지 성능 모델 환경 및 시스템 입력 변수

소나 탐지 성능 모델링을 수행하기 위해서는 환경 및 시스템 입력 변수 설정이 필요하다. 따라서 우리나라의 황해, 남해, 동해 해역 정점의 계절 별 수온, 염분의 해양 물리 자료와 해저 지형 및 해저면 저질 성분, 입자 크기의 해양 지질 자료, 수층 내 체적 산란 강도 자료인 해양 생물 자료를 환경 입력 변수로 두고 모델링을 수행하였다.

모델링을 수행하기 앞서 시스템 및 환경 변수들을 정하였다. 주파수는 선저 고정형 소나의 현재 사용 주파수인 10 kHz 와 추후 해군에서 도입하려고 계획 중인 4 kHz 로 정하였다. 해군 함정에서 사용하는 선저 고정형 소나의 운용 변수와 유사한 시스템 변수를 설정하기 위해서, 밴드 폭 100 Hz, 펄스 길이 10 ms, 음원 수심 5 m, 음원 수직 빔 폭  $\pm 10^\circ$  ( $0.05^\circ$  간격), 음원 준위 218 dB, 신호 종류는 주파수 변조 신호(FM)로 정한 후에 모델링을 수행하였다. 이 때 탐지하는 대상은 잠수함이며, 표적 강도는 선체와 형상에 의해 다르게 나타나지만 측면은 약 +25 dB, 함수 및 함미 이외에 다른 부분은 약 +10~15 dB 로 나타난다고 알려졌다 (Urick, 1983). 그러나 1960 년대 측정한 자료이므로 현재는 기술의 발전으로 인하여 표적 강도가 감소하였으나, 군사적인 측면으로 인하여 공개된 자료가 존재하지 않기 때문에 본 모델링에서는 표적 강도를 +10 dB 로 정하였다. 또한 생물학적 영향의 변수 중 하나인 어군

체적 산란 강도 준위는 기존 연구를 참고하여 -30 dB 로 설정하였다 (Kang et al., 2003). 또한 해역 별로 어군이 1 m<sup>2</sup> 내에 어류가 20~100 마리가 존재한다고 가정하여, 감쇠 계수는 2~10 dB/m 범위로 설정하였다. 모델링에 필요한 시스템 변수는 Table 7 에 상세하게 나타내었다.

위에서 언급한 환경 및 시스템 변수를 정한 다음 잔향음 모델에서 필수적인 요소들인 경계면 반사 및 산란 모델, 해수 감쇠 모델, 주변 소음 모델은 주파수에 따라서 다음과 같은 모델들을 사용하였다. 해수면 반사 모델은 주파수 10 kHz 이상의 대역에서 주로 사용하는 APL-UW 이론 모델 (Jackson and Richardson, 2007)을 사용하였다. 해수면 산란 모델은 주파수 4 kHz 에서 주로 사용하며 실험적으로 정립된 Chapman-Harris 모델 (Chapman and Harris, 1962)을, 10 kHz 에서는 APL-UW 이론 모델을 사용하였다. 해저면 반사 모델은 레일리히 반사 계수(Rayleigh reflection coefficient) 모델 (Yoon et al., 2015)을 사용하였고, 해저면 산란 모델은 주파수 4 kHz 대역에서 주로 사용하며 실험적으로 정립된 Lambert's Law 모델 (Mackenzie, 1961)을, 10 kHz 에서는 APL-UW 이론 모델을 사용하였다. 이 때 해수면 상태에 영향을 미치는 풍속 값은 일반적으로 해상에서 나타나는 평균 4 m/s 로 정하였다.

해수에 의한 감쇠 모델은 Francois and Garrison (1982)이 제안한 모델을 사용하였으며, 주변 소음 모델은 Wenz (1962)의 소음 준위 모델을 적용하였다. 체적 산란 강도 모델은 전갱이 밀도에 따른 표적 강도를

가지고 후방 산란 강도 값으로 변환하여 사용하였다. 또한 3 장에서 실험한 결과를 토대로 어군에 의한 감쇠 계수 값을 두 주파수에서 동일하게 10 dB/m 값을 적용하여 어군이 존재하는 구간에서 음파가 수중 내에서 전달될 때 감쇠에 의한 영향을 반영하여 각 해역 별로 10 km 까지 탐지 성능 모델링을 수행하였다.

Table 7. 모델링을 수행하기 위해 필요한 시스템 및 환경 입력 변수

<b>System &amp; environmental input parameters</b>	Frequency	4, 10 kHz	Band width	100 Hz
	Beam width	$\pm 10^\circ$ (0.05 $^\circ$ )	Range	10 km
	Source level	218 dB	Source depth	5 m
	Wind speed	4 m/s	Signal type	FM
	Target	Submarine	Target strength	+10 dB
	Volume scattering level	-30 dB	Volume attenuation level	2~10 dB/m



### 4.5.3 탐지 성능 모델링 시나리오 구성

표적(잠수함)을 대상으로 한 효율적인 소나 탐지 성능 모델링을 위하여 시나리오를 구성하였다. 일반적으로 능동 소나의 탐지 거리에 영향을 미치는 제한 요인으로는 환경에 의한 요인과 시스템에 의한 요인으로 구분할 수 있다. 환경 요인으로는 수중 지형의 변화, 해저면 저질 성분, 음속 구조 변화, 와류에 의한 수중 내 탁도 변화 등이 있다. 시스템에 의한 요인으로는 능동 소나의 여러 특성인 주파수, 수직·수평 빔 폭, 대역폭, 신호 길이, 음원 준위, 표적 강도 등이 있다. 이들은 소나 탐지 성능에 영향을 주며, 변동성의 원인이 되므로 탐지 제한 요인이 각각의 소나 변수에 대한 영향에 대해 파악하는 것이 중요하다.

수층 내에서 어군이 존재하는 환경을 두고 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였고, 표적 탐지 거리 및 확률을 계산하였다. 이 때 각각의 해역, 계절, 주파수, 어군 위치, 어군 크기, 감쇠 계수에 따라서 다양한 시나리오를 선정하였다.

소나 탐지 성능 모델링 시나리오: 선저 고정형 소나를 이용하여 잠수함 탐지를 목적으로 어군 유/무에 따른 능동 신호 초과 및 탐지 확률 제시

- 1) 해역 (황해, 남해, 동해),
- 2) 계절 (동계 2 월, 하계 8 월),
- 3) 주파수 (4, 10 kHz),
- 4) 어군 수심 (1~250 m 내외),
- 5) 어군 크기 (소형 : 40~80 m<sup>2</sup>, 중형 : 160~240 m<sup>2</sup>, 대형 : 480~1,000 m<sup>2</sup>),
- 6) 어군 감쇠 계수 (소형 : 2~3 dB/m, 중형 : 4~5 dB/m, 대형 10 dB/m).

위에서 제시한 6 가지 시나리오를 기준으로 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 시나리오 1~3 번 경우(세 해역, 두 계절, 향후 해군 함정의 선저 고정형 소나에서 적용하려는 주파수 4 kHz, 현재 사용 10 kHz 주파수)는 모두 적용하여 수행하였다. 반면 시나리오 4~6 번 경우까지 고려하게 된다면 너무 많은 결과가 도출되기 때문에, 어군 수심과 크기, 감쇠 계수에 대한 모델링은 일부분만 선별하여 수행하였다. 어군의 위치는 대상 어종인 전갱이가 우리나라 연, 근해에서 서식하는 수심 1~250 m 범위로 정하였다. 어군의 크기는 Hara (1985)와 Pavlov and Kasumyan (2000)의 연구 결과를 참고하여 전갱이 어군의 최대 길이 150 m, 넓이는 최대 15 m 로 알려진 내용을 기반으로 설정하였다. 천해 환경인 황해 해역에서는 수심이 낮기 때문에 소형 어군이 존재한다고 가정하여 어군

크기는 40~80 m<sup>2</sup> 범위로 정하였다. 남해 해역에서는 중형 어군이 존재한다고 가정하였으며, 어군 크기는 160~240 m<sup>2</sup> 범위로 정하였다. 동해 해역에서는 수심이 깊고 자원량이 풍부하기 때문에 대형 어군이 존재한다고 가정하였고, 어군 크기는 480~1,000 m<sup>2</sup> 의 범위로 정하고 모델링을 수행하였다. 감쇠 계수도 어군의 크기와 동일하게 각 해역의 특성에 맞도록 다르게 설정하였다. 3 장의 해상 실험에서 획득한 감쇠 계수는 한 체적 내에 어류 밀도가 100 마리 환경에서 측정 및 계산되었다. 이 때 감쇠 계수는 4 kHz 에서 약 7~8 dB/m, 10 kHz 에서 추정 값은 약 10 dB/m 로 나타났다. 그러나 위 감쇠 계수를 모델링의 입력 변수로 적용한다면, 모델링 결과를 산출할 때 많은 음파가 손실되어 해역 및 계절에 따른 탐지 확률 특성이 직관적으로 나타나지 않게 된다. 감쇠 계수를 어류의 밀도 및 주파수에 따라 측정 값 대비 소형 어군은 30 %, 중형 어군은 50 %, 대형 어군은 100 % 비율로 정하였다. 이를 통해 황해는 소형 어군이 존재한다고 가정하여 감쇠 계수는 주파수 4 kHz 에서 2 dB/m, 10 kHz 에서 3 dB/m, 남해는 중형 어군이 존재한다고 가정하여 주파수 별로 각각 4 dB/m, 5 dB/m 로 설정하였으며, 동해는 대형 어군이 존재한다고 가정하였고, 4, 10 kHz 주파수 모두 감쇠 계수를 10 dB/m 로 동일하게 적용하였다.

각 해역의 주파수 및 계절 별 모델링의 결과는 총 5 가지로 제시하였다. 1) 음속 프로파일, 2) 어군 위치 및 크기와 음선 경로, 3)

---

어군을 통과하는 음선 경로, 4) 어군의 영향이 포함된 능동 신호 초과, 5) 탐지 확률을 결과로 나타내었다. 또한 어군의 유무에 따른 탐지 영향 및 대형 어군이 존재하는 환경에서의 탐지 성능을 분석하였고, 이를 토대로 모든 해역의 주파수 4 kHz 에서 표적 탐지 수심 50 m 를 기준으로 하여 탐지 확률을 비교 및 분석하였다.

## 4.6 어군이 존재하지 않는 환경에서 해역 별 탐지 성능 모델링 수행 결과

이 장에서는 황해, 남해, 동해의 각 해역 별로 어군이 존재하지 않을 환경에서 탐지 성능 모델링을 10 km 까지 수행하였다. 모델링 수행 결과, 표적 잠수함의 탐지 거리 예측을 위한 능동 신호 초과를 계산하였고, 이를 통해 탐지 확률을 제시하였다. Figure 23 는 황해, Figure 24 는 남해, Figure 25 에는 동해 해역에서 (a) 동계(2 월)와 (b) 하계(8 월) 시기 어군이 존재하지 않을 때 주파수 4 kHz 모델링 수행 결과이다. Figure 23~25 의 상단 그림은 음선 경로의 경향을 보기 위하여 계산된 음선 중 일부분만을 나타내었고, 중간 그림은 능동 신호 초과이며, 하단 그림은 탐지 확률을 나타내었다. 탐지 확률 결과 그림에서 노란색으로 나타나면 표적 탐지 확률이 100 % 가능한 영역이고, 파란색으로 갈수록 탐지 확률이 0 %로 낮아지는 구간을 의미한다.

황해와 남해 해역에서 음선 경로를 나타낸 Figure 23~24 의 상단 그림에서는 상대적으로 수심이 낮기 때문에 해수, 해저 경계면에서 많은 음선이 반사되어 전파한다. 두 해역의 해저면 성분은 사질로 구성되어 있다. 따라서 대부분의 음선이 해수면과 해저면에 반사되어 전달되어도 손실이 적게 나타나기 때문에 상대적으로 원거리까지 음파가 전달되는 현상을 보였다. 특히 몇몇 음선은 최소 음속 층 내에 존재하여 경계면의

영향이 없이 수평으로 음파가 전달됨을 확인하였다. 그 결과, 동계 시기에는 수층 모두 포함하는 10 km 지점까지 탐지 확률은 100 %로 나타났다. 반면 하계 시기에는 대부분의 음선이 음속이 낮은 저층 쪽으로 하향 굴절하였으며, 해저면과 해수면의 영향을 받으면서 전파됨을 확인할 수 있었다. 그 결과, 두 해역 모두 하계 시기 표층에서는 10 km 까지 높은 탐지 확률이 나타났으나, 저층 일부 지점에서는 탐지 확률이 50 % 이하로 확인되었다. 결과적으로 황해와 남해의 해역에서는 동계 시기에 10 km 이상 지점까지 표적 탐지가 100 %로 가능하며, 하계 시기에도 일부분의 지점을 제외하고는 표층에서는 10 km 지점까지 표적 탐지가 100 % 가능하다고 확인되었다.

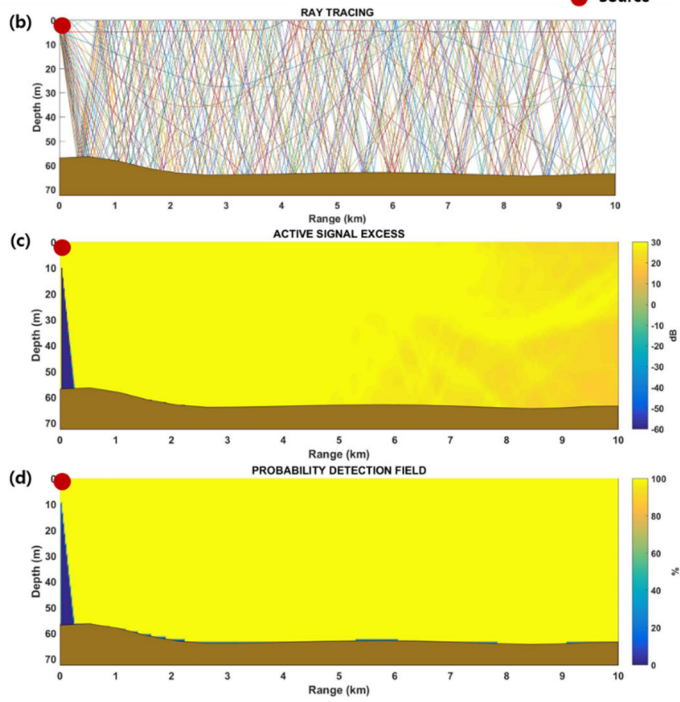
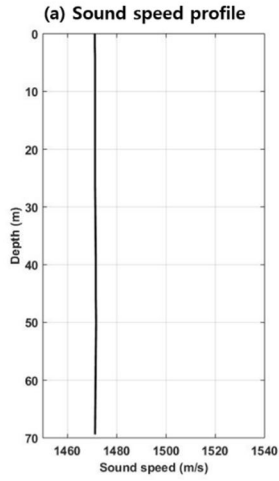
Figure 25 의 상단 그림은 동해 해역의 음선 경로를 나타내었다. 동해 해역에서는 해저면 성분이 미세한 니사질 성분으로 구성되어 있으며, 외해로 갈수록 수심이 깊어지는 해역이다. 또한 동해 해역은 황해, 남해와는 다르게 표층과 저층의 음속 차이가 발생하는 해역이다. 저층으로 갈수록 음속이 낮아지는 해역이기 때문에 대부분의 음선이 해저면으로 굴절되어 전파한다. 모델링 분석 결과 동계 시기에는 수심 100 m 에서 약 5 km 지점까지는 대부분 탐지 확률이 100 %로 나타났고, 7 km 일부 지점까지 60 % 이상의 탐지 확률이 나타났다. 반면 하계 시기에는 음선 경로가 음원에서부터 근거리의 해저면 방향으로 대부분 음선이 집속되어 하향 굴절하는 결과를 보였다. Figure 25 (b)의 1 km 지점처럼 니사질로

---

구성되어 있는 해저면 저질 성분에 의해 잔향음이 발생하게 되어 능동 신호 초과 값이 상대적으로 떨어지게 된다. 따라서 해저면에 의한 높은 음파 손실이 나타나 2 km 이내의 거리에서는 대부분의 탐지 확률이 0 %로 나타났으나, 2 km 이상은 음선 경로 이외의 지점에서 음영대(Acoustic shadow zone)가 발생하여 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 따라서 동해 해역에서 표적이 수심 100 m 지점에 위치한다고 가정하면 동계 시기에는 음원에서부터 7 km 까지 탐지가 가능하지만, 하계 시기에는 해저면에 의한 손실로 인하여 약 4 km 까지 탐지가 가능한 해역으로 모델링을 통해 확인되었다.

YELLOW SEA (4 kHz) – non-fish school

February



August

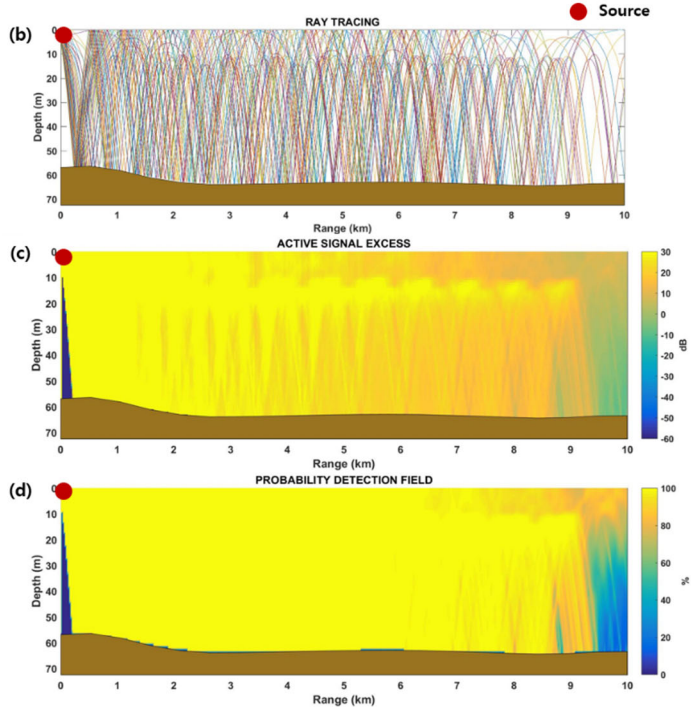
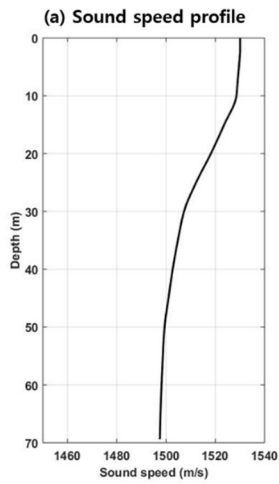
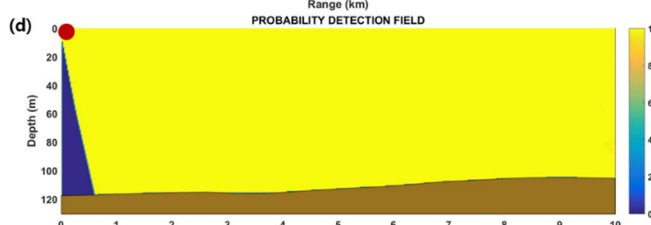
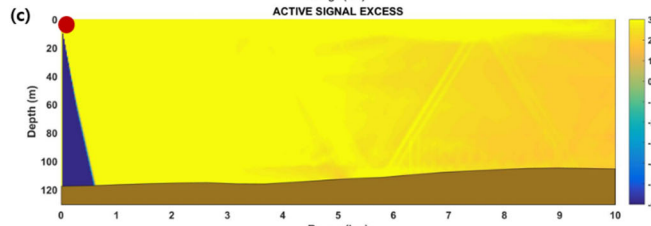
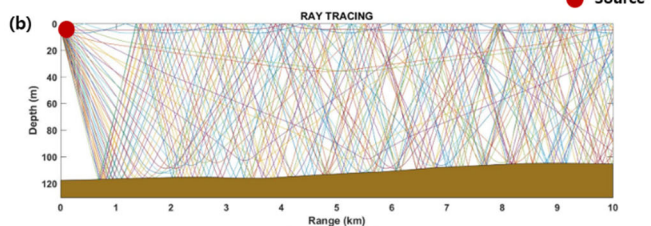
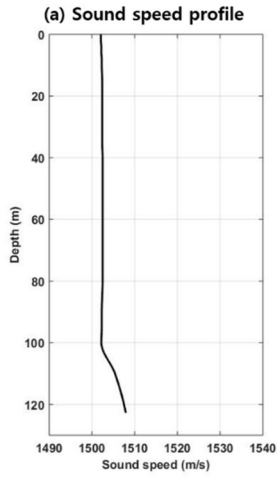


Figure 23. 황해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률



SOUTH SEA (4 kHz) – non-fish school

February



August

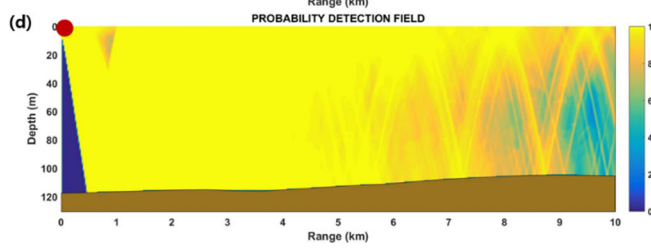
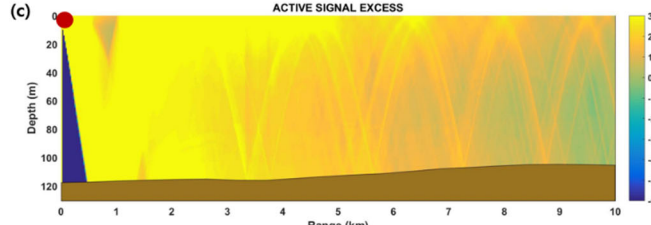
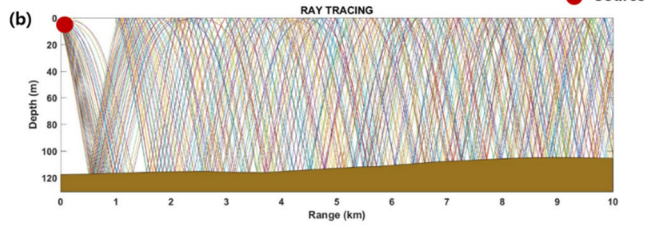
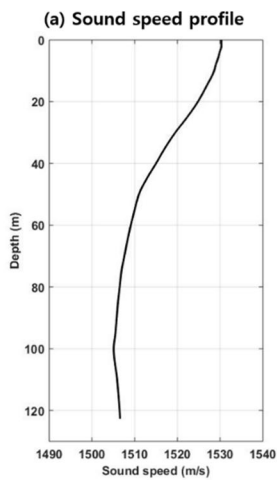
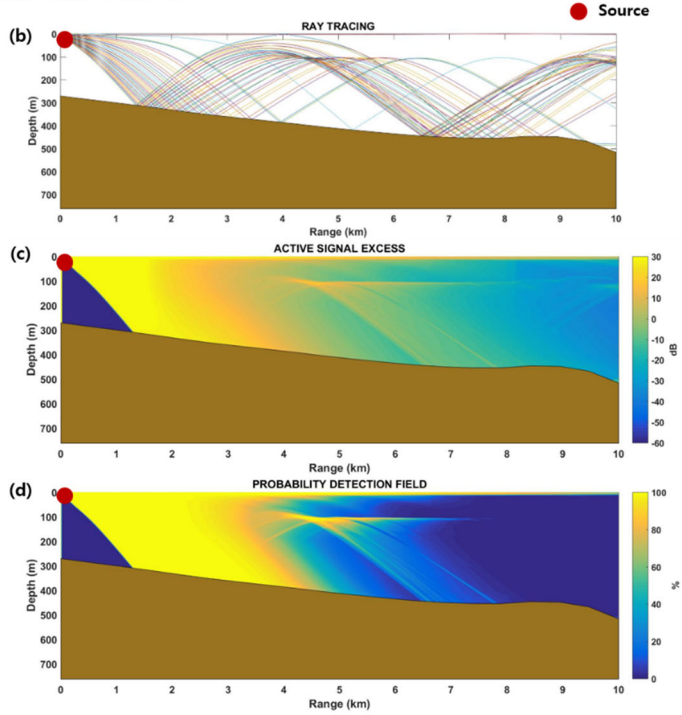
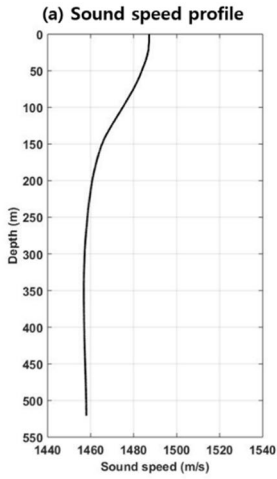


Figure 24. 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

EAST SEA (4 kHz) – non-fish school

February



August

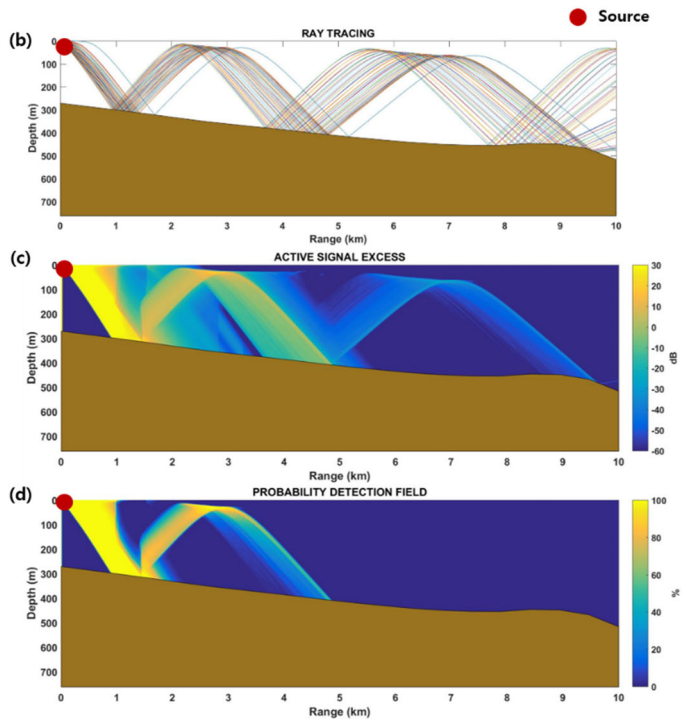
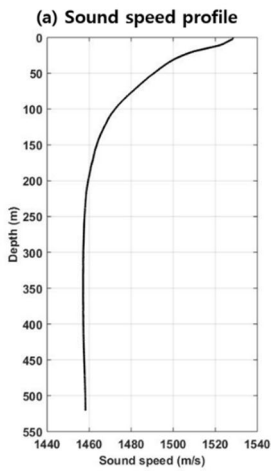


Figure 25. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하지 않는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로, (c) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

## 4.7 어군이 존재하는 환경의 해역 별 탐지 성능 모델링 수행

### 결과

이 장에서는 어군이 존재하는 환경의 황해, 남해, 동해의 해역 별 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 세 해역에서 설정해둔 시나리오를 기반으로 모델링을 수행한 후에 그 결과를 분석하였다. 모델링 수행 시, 어군의 위치, 크기, 감쇠 계수는 입력 변수로 포함된다. 모델링 결과는 계절 별 음속 프로파일 이외에 총 네 장의 그림을 음원의 위치와 함께 나타내었다. 모델링 첫 번째 결과 그림은 음원에서부터 전파하는 음선 경로(흰색 선) 및 어군의 위치(검은색 점), 두 번째 결과 그림은 어군을 통과하는 음선 경로(빨간색 선), 세 번째 결과 그림은 능동 신호 초과, 마지막 결과 그림은 능동 신호 초과를 토대로 계산된 탐지 확률 결과를 나타내었다. 각 해역 및 주파수 별로 모델링에 사용된 생물학적 요소 변수의 어군 수심 및 거리 분포 위치, 크기 및 감쇠 계수를 Table 8 에 상세히 나타내었다.

Table 8. 모델링의 생물학적 요소들, 각 해역 별 주파수에 따른 감쇠 계수, 어군의 위치(수심, 거리)에 따른 크기

Site	Frequency (kHz)	Attenuation coefficient (dB/m)	Fish school position		Fish school size (m <sup>2</sup> )
			Depth (m)	Range (km)	
Yellow sea	4	2	20~22	3.00~3.02	40
	10	3	56~60	2.00~2.02	80
South sea	4	4	30~34	3.00~3.04	160
	10	5	10~16	2.00~2.04	240
East sea	4	10	190~198	3.00~3.06	480
	10	10	40~50	3.20~3.30	1000

#### 4.7.1 황해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과

본 장에서는 황해 해역의 주파수 4 kHz 와 10 kHz 에서 동계 및 하계 시기의 수심 별 음속 환경을 기반으로 어군의 영향을 반영한 탐지 성능 모델링을 수행하였다 (Figure 26, 27). Figure 26 의 상단 그림은 주파수 4 kHz 에서 동계(2 월), 하단 그림은 하계(8 월) 모델링 결과이다. 소형 어군이 수심 20~22 m, 음원으로부터 3~3.02 km 거리에 위치하여 크기는 40 m<sup>2</sup> 로 가정하였고, 감쇠 계수는 2 dB/m 로 설정한 후에 모델링을 수행하였다. Figure 26 의 상단 그림은 3 km 지점에서 잔향음에 의한 산란 신호와 어군에 의한 감쇠도 발생하여 일부분 탐지가 되지 않는 지점이 나타났다. 5 km 지점의 수심 20~40 m, 10 km 지점의 수심 40 m 부터 해저면까지 낮은 탐지 확률이 일부분 발생함을 확인하였다. 따라서 10 km 지점의 수심 50 m 에 표적이 있다고 가정하면, 어군에 의해 탐지가 불가능한 구간이 나타남을 모델링을 통해 확인하였다. Figure 26 하단 음속 프로파일 그림에서 표층보다 저층의 음속이 낮기 때문에 대부분의 음파들이 표층의 음원에서부터 해저면으로 하향 굴절하여 해저면에 반사된 후 수층으로 전파하게 된다. 따라서 해저면 인근에 위치해 있는 어군 쪽으로 많은 음선이 통과하였으며, 해저면을 반사하는 음선이 전파되는 부분에서 감쇠가 발생해 탐지 확률이 낮게 나타났다. 계절 별로

같은 크기의 어군이 존재하는 환경에서 동계보다 하계 시기 탐지 성능이 감소함을 확인하였다.

Figure 27의 상단 그림은 주파수 10 kHz의 동계 시기 모델링 결과를, 하단 그림은 동일 주파수에서 하계 시기의 모델링 결과를 나타내었다. 소형 어군의 위치는 수심 56~60 m, 음원으로부터 2~2.02 km 거리에 분포한다고 가정하여 크기는 80 m<sup>2</sup>이고, 감쇠 계수는 3 dB/m로 설정한 후 모델링을 수행하였다. 동계 시기에는 음선이 해수, 해저 경계면에 지속적으로 반사되어 수층 내로 복잡하게 전파하는 경로를 보였고, 일부분의 음선이 저층에 위치한 어군을 통과하여 감쇠된 음파로 인해 음영대가 넓게 발생하였다. 그 결과, 음원으로부터 2 km 이상의 해역에서 표층, 저층 일부분 이외에는 탐지 확률이 0 %로 나타나 표적 탐지가 불가능하게 되었다. 반면 하계 시기에는 많은 음선이 저층 방향으로 굴절되어 일부분은 해수면에 반사되지 않고 표층 부근에서 집속되어 해저면으로 굴절되는 음선 경로가 나타났고, 음선들이 저층에 있는 어군을 통과하였다. 그 결과 해수면에서 약 2 km 이상의 지점부터 10 km 까지 탐지 확률은 0 %로 나타났으며, 중층과 저층에서도 일부분을 제외하고 탐지 확률이 낮게 나타났다. 결과적으로 해당 해역에서는 표층에 표적이 존재한다고 가정하면 어군에 의해 탐지가 불가능한 구간이 발생하였다.

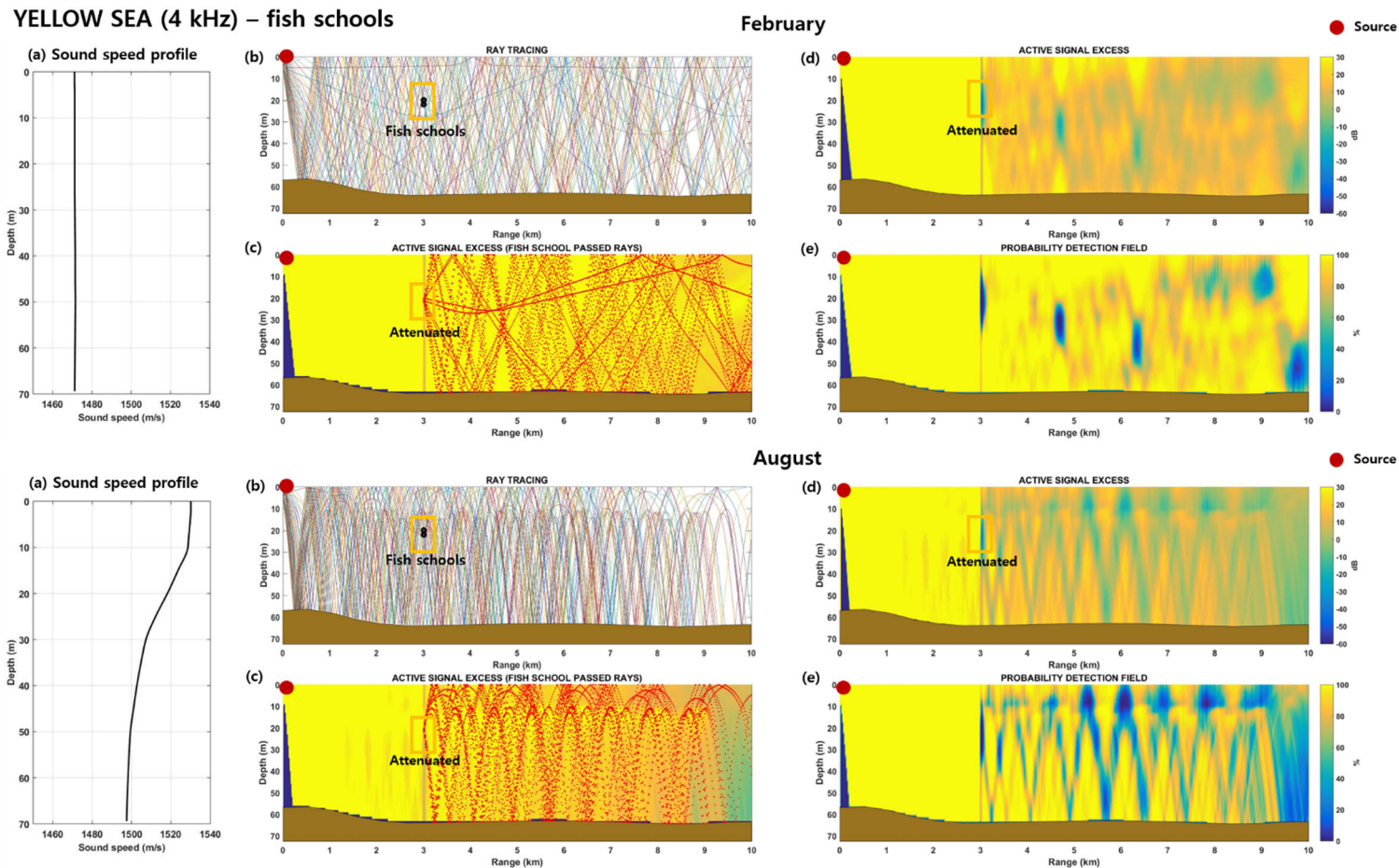


Figure 26. 황해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

YELLOW SEA (10 kHz) – fish schools

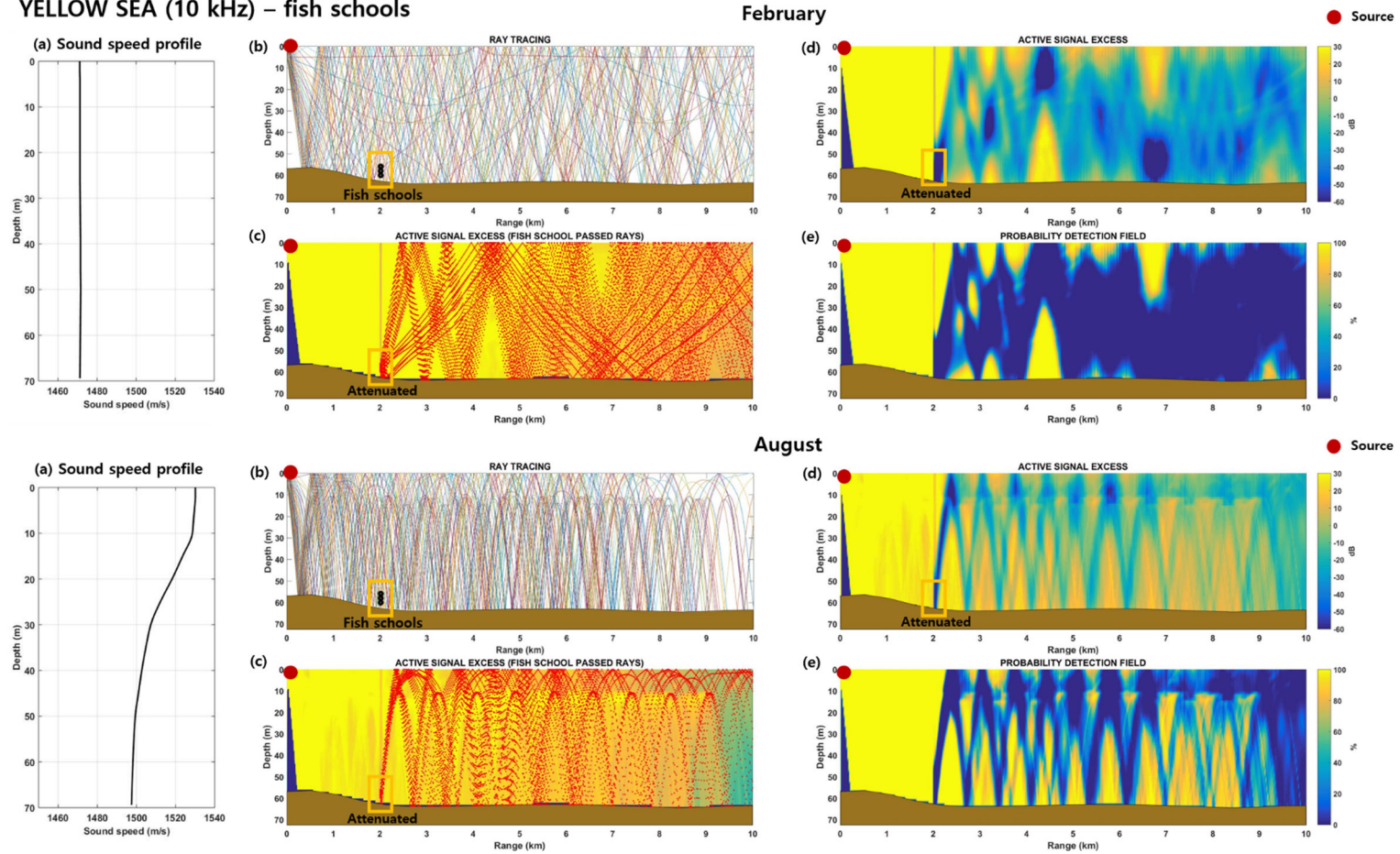


Figure 27. 황해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률



#### 4.7.2 남해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과

본 장에서는 남해 해역의 각각 동계와 하계 시기의 해양 환경을 기반으로 어군의 영향을 반영하여 주파수 4 kHz, 10 kHz 에서 모델링을 수행하였다 (Figure 28, Figure 29). Figure 28 의 상단 그림은 주파수 4 kHz 의 동계, 하단 그림은 동일 주파수의 하계 시기 모델링 결과이다. 이 때 중형 어군이 중층에 존재한다고 가정하여 수심 30~34 m, 음원으로부터 떨어진 거리는 3~3.04 km 에 위치하여 크기는 120 m<sup>2</sup> 로 가정하였으며, 감쇠 계수는 4 dB/m 로 설정한 후에 모델링을 수행하였다. 동계 시기 결과, 해수면, 해저면을 반사하고 전파되는 일부 음선, 수평적으로 전달되는 일부 음선, 해저면을 반사하지 않고 수심 약 100 m 에서 해수면 방향으로 굴절되어 전파되는 음선 경로가 확인되었다. 이렇게 다양하게 수층 내로 전파되는 여러 음선들이 어군을 통과한 후 감쇠 되어 음선 경로에서만 음영대가 형성되었다. 이 때 표적이 3 km 이상의 해역에서 수심 10~40 m 부근에 존재한다면 낮은 탐지 확률이 나타났다. Figure 28 의 하단 그림의 음선 경로에서 음속이 낮은 저층 방향으로 굴절하는 특성으로 인하여 해저면과 해수면에 반사되며 전파하게 된다. 수심 약 30 m 에 위치한 어군을 통과하면서 음파가 감쇠 되어 4 km 이상에서는 탐지 확률이 수층 일부분에서 낮아졌고, 8 km 이상의 해역에서는 탐지 확률이 대부분 0 %로 나타났다.

Figure 29 상단 그림의 동계 시기 주파수 10 kHz 모델링 결과에서는 음선이 해수면 인근에서만 전파되는 특성을 확인하였다. 이 때 표층에 위치한 어군에 의해 감쇠가 나타나 2 km 이상의 해역에서는 표층 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 하단 그림의 동계 결과는 많은 음선들이 해저면 및 해수면에 반사된 후 표층에 위치한 어군을 통과한 후 감쇠 되어 넓은 음영대가 나타났다. 특히 3 km 이상에서는 수층 일부분만 탐지가 가능하게 나타났고, 6 km 이상에서는 모든 수층의 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 따라서 수심 50 m 에 표적이 있다고 가정한다면 동계 시기에는 부분적으로 탐지가 되지 않지만 최대 약 9 km 지점까지 탐지가 가능하며, 하계 시기에는 약 3 km 이내의 지점까지 탐지가 가능하다고 판단된다.

SOUTH SEA (4 kHz) – fish schools

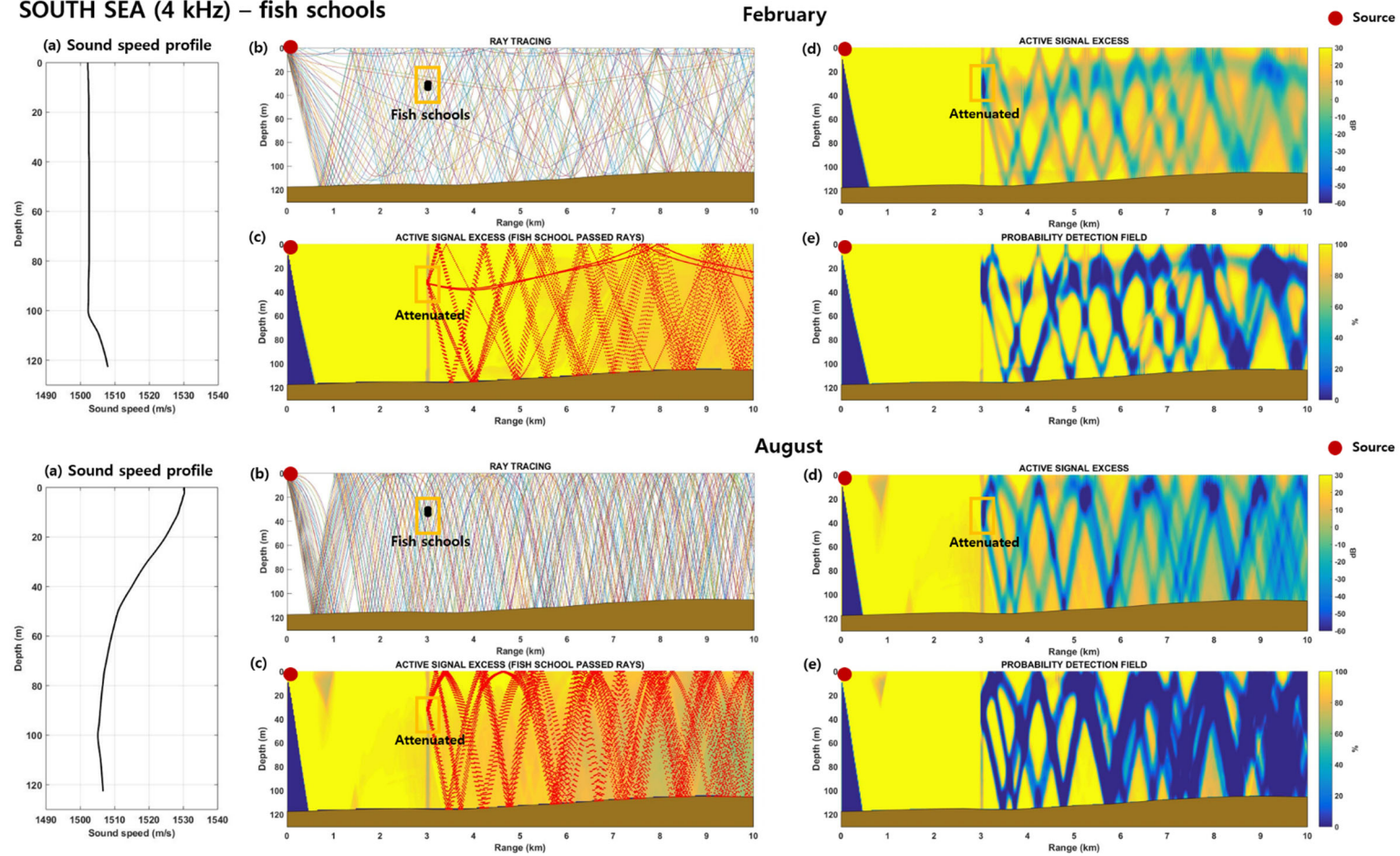


Figure 28. 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

SOUTH SEA (10 kHz) – fish schools

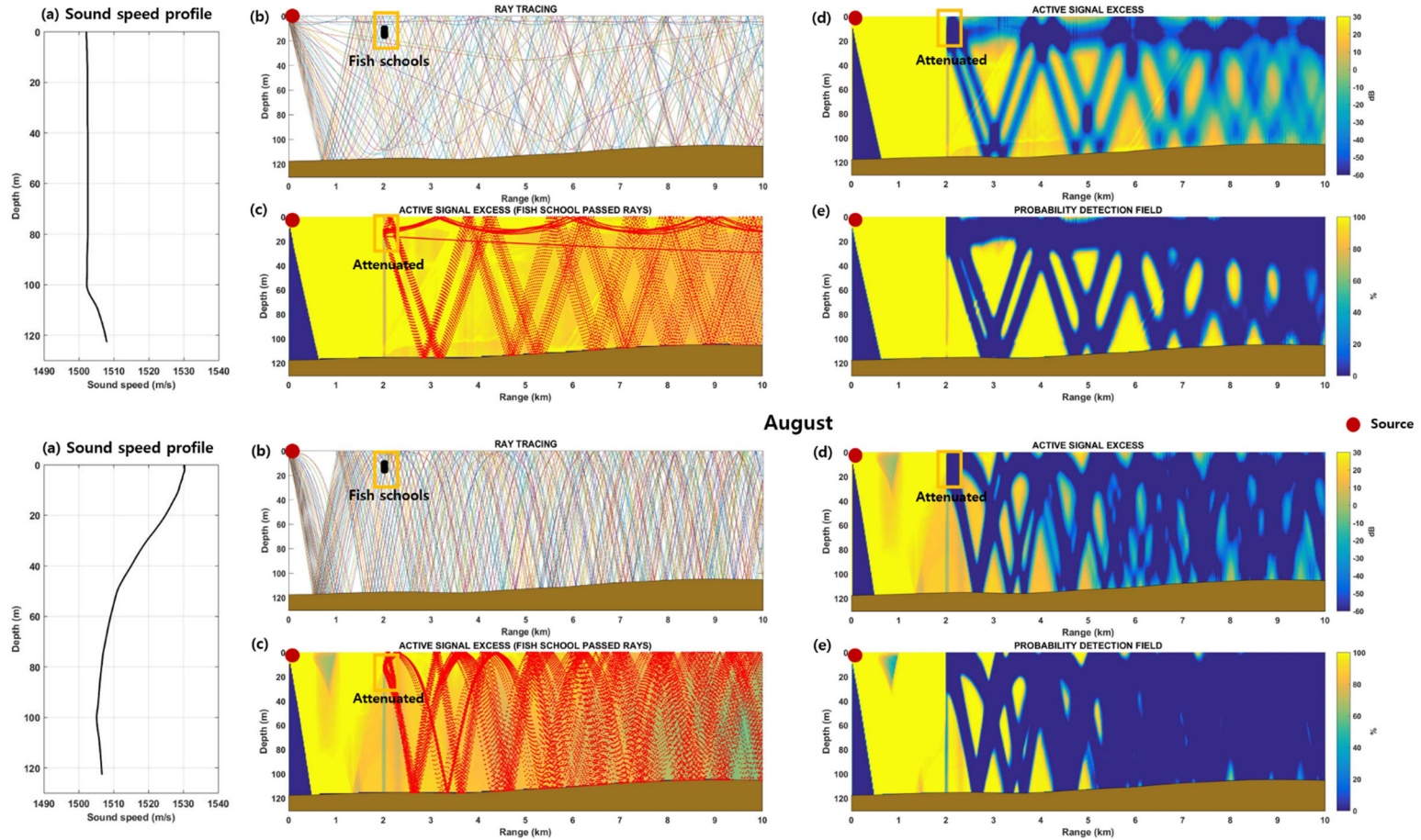


Figure 29. 남해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

### 4.7.3 동해 해역에서 주파수 및 계절에 따른 모델링 결과

본 장에서는 동해 해역에서 주파수 4 kHz, 10 kHz 모델링을 수행하였다. 대형 어군의 수심 190~198 m, 음원으로부터 떨어진 거리는 3~3.06 km 로 어군 크기는 480 m<sup>2</sup> 로 모의하여 주파수 4 kHz 모델링을 수행하였고 (Figure 30), 주파수 10 kHz 모델링에서는 대형 어군의 수심 40~50 m, 거리 2.3~2.4 km 에 위치하여 어군 크기는 1,000 m<sup>2</sup> 으로 모의하였다 (Figure 31). 두 주파수의 모델링에서 어군 감쇠 계수는 동일하게 10 dB/m 로 설정하였다.

Figure 30 상단 그림은 동계 4 kHz 모델링 결과이며, 음선이 해저면에 두 차례 반사되어 원거리까지 전파되는 경향을 보였다. 음원으로부터 3 km 떨어진 지점에서 대형 어군에 의해 발생한 잔향음으로 인하여 탐지 확률이 일부분 감소하였고, 어군을 통과한 음선의 감쇠도 발생하여 음선 경로에서는 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 그 외 7 km 이내의 지점에서는 탐지 확률 50 % 이상 나타남을 확인하였다. 따라서 표적 탐지가 7 km 이상 지점의 전 수층 내에서 불가능하였다. Figure 30 의 하단 그림은 하계 시기 결과이며, 대부분의 음파들이 표층에서 음속이 상대적으로 낮은 해저면으로 하향 굴절하여 1 km 지점의 해저면에 반사된 후 해수면 인근 수심 30 m 에서 다시 해저면으로 굴절하는 특성을 보인다. 이 때 해저면에 의해 높은 잔향음이 발생하여 대부분의 음파가 산란되어

낮은 탐지 확률을 보였고, 4 km 지점에서 동일하게 해저면에 반사된 후 전파하는 특성을 보였다. 이 지점에서 동일하게 잔향음이 발생하여 4 km 이상의 지점부터는 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 계절 별로 같은 위치에 어군이 존재하는 환경에서 동계보다 하계 시기 원거리까지 전파 되지 않는 해역 음속 구조 및 해역 특성으로 인하여 그 차이를 나타내지는 못하였다.

Figure 31 의 상단 그림에서는 동계 주파수 10 kHz 결과이며, 음선이 해저면에 반사된 후 수심 100 m 지점에서 다시 해저면 방향으로 굴절하는 특성을 보였다. 이 때 표층 인근에 위치한 대형 어군에 의해 음영대가 넓게 발생하여 6 km 이상의 지점에서는 탐지 확률이 0 %로 나타났으며, 3 km 이상 표층에서는 탐지 확률이 동일하게 0 %로 나타났다. 하단 그림의 하계 시기 모델링 결과, 2 km 이상의 지점부터는 일부분을 제외하고 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 따라서 4 km 이상의 지점의 표층 부근에 표적이 존재한다고 가정하면 두 계절 모두 탐지가 불가능한 구간이 발생하였다. 종합적으로 동해 해역에서는 동계 음선 경로가 밀집되는 위치에 어군이 존재하게 되면 넓은 음영대가 나타나 탐지 확률이 감소하고, 하계 시기에는 높은 잔향음이 나타나 어군에 의한 감쇠 영향을 확인하기 어려웠으나, 음선 경로에 어군이 존재하면 동일하게 탐지 확률이 감소함을 확인하였다.

EAST SEA (4 kHz) – fish schools

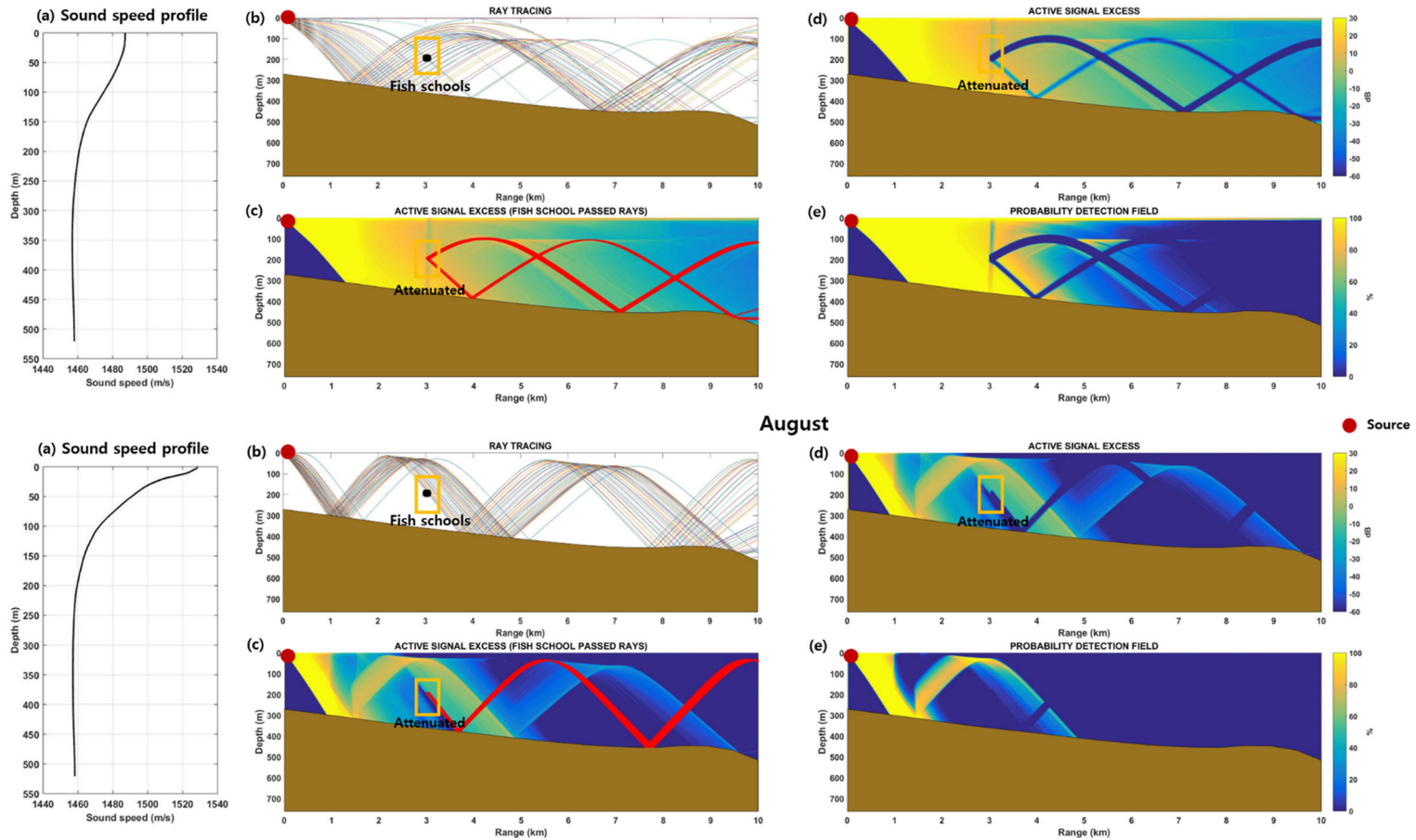


Figure 30. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

EAST SEA (10 kHz) – fish schools

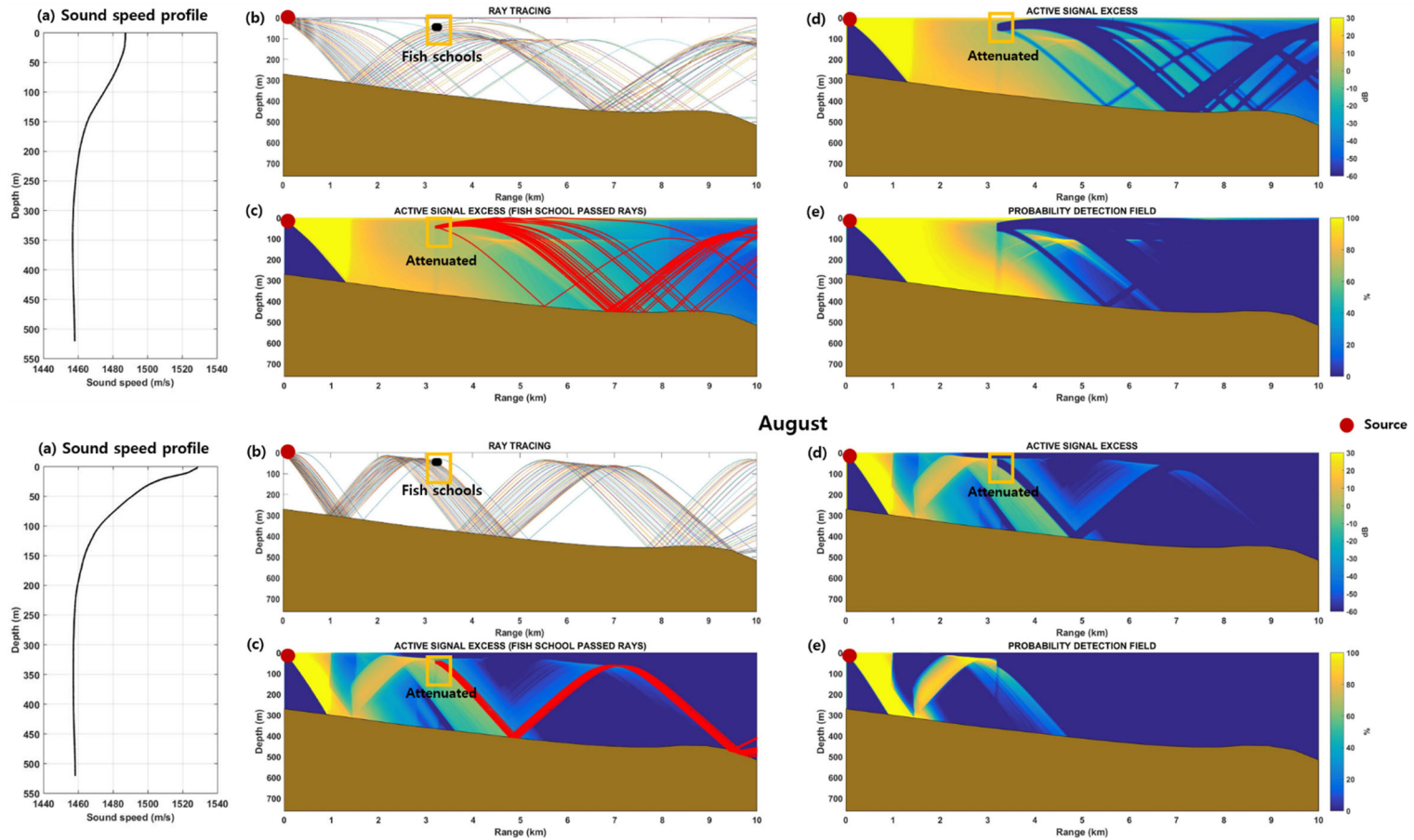


Figure 31. 동해 해역 주파수 10 kHz 에서 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (상) 동계, (하) 하계 시기의 (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률



## 4.8 토의

4 장에서는 해양 환경에 따른 음파 전달 특성을 고려하여 경계면에서의 반사, 산란 및 어군의 감쇠 영향을 포함한 표적의 탐지 거리와 확률 예측을 목적으로 두고 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 먼저 우리나라 황해, 남해, 동해 해역에서 연근해의 대표 정점을 선정 한 후, 해당 정점에서 해양 환경 수치 모델 자료 및 해저 지형, 해저면 저질 성분 자료를 산출하여 해역, 계절 그리고 주파수 별 탐지 예측 모델링을 수행하였다.

황해와 남해 해역에서는 계절 별로 음속 구조가 다르게 나타나지만, 해저면 영향이 적어 상대적으로 원거리까지 음파가 전달되는 해역이다. 두 해역에서는 상대적으로 작은 어군에 의해 높은 감쇠 영향이 나타나 표적 탐지 성능을 제한하고 탐지 변동성이 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 반면 동해 해역은 심해 환경으로 표층과 저층에서 높은 음속 차이가 발생하여 음파 전달 영향 이외에도 표층 퇴적물이 대부분 니질 또는 점토로 이루어져 있어 높은 잔향음이 발생하는 해역이다. 이 해역에서는 원거리까지 표적 탐지가 어려운 해역이다. 동해에서는 음파가 전달되는 구간 내에서 어군이 존재함에 따라 음영대가 일부분 형성되어 계절별 탐지 확률의 변동성을 확인하였다. 해역 별 모델링 수행 결과,

어군의 유무에 따라 표적 탐지 성능이 시·공간적으로 변동성을 보일 것으로 판단된다.

4 장에서는 각 해역 및 주파수 별로 어군의 유무에 따른 소나 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 반면 Figure 32~33 에는 세 해역 모두 대형 어군이 존재하는 환경을 모의하여 모델링을 수행하였다. 기존 연구(Hara, 1985; Pavlov and Kasumyan, 2000)를 토대로 모든 해역에서 대형 어군이 존재한다고 가정하였고, 어군의 크기를 각각 황해  $400 \text{ m}^2$  ( $10 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ), 남해  $1,440 \text{ m}^2$  ( $12 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ ), 동해  $2,250 \text{ m}^2$  ( $15 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ )로 해역 별로 다르게 설정하였다. 어군의 유무에 따른 탐지 거리와 대형 어군이 존재하는 환경의 탐지 거리 비교 분석을 위하여 수심 및 거리에 따른 어군 위치는 4.7 장과 동일하게 설정하였다. 모든 해역에서 동일하게 감쇠 계수는  $10 \text{ dB/m}$  로 정하였고, 주파수  $4 \text{ kHz}$  와 동계 시기만을 대상으로 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 4 장에서 수행한 모델링 결과와 동일하게 음속 프로파일, 음선 경로 및 어군 위치, 어군 통과하는 음선, 능동 신호 초과 그리고 탐지 확률을 결과로 나타내었다. 대형 어군이 존재하는 환경의 탐지 성능 모델링 수행 결과, 황해와 남해 해역에서는 많은 음선들이 해수면과 해저면에 반사되어 수층 내에서 전체적으로 복잡하게 전파되는 특성이 나타나는 해역이므로 음선이 어군을 통과한 후, 높게 감쇠 되어 어군이 존재하는 수심 및 거리 이후의 수층에서는 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 반면 동해 해역에서는 주요한 음선이 대형 어군을

통과하여 음영대가 발생하였으며 일부 지점에서 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 종합적으로 음파가 전달되는 구간 내에 대형 어군이 존재하면 황해와 남해는 전 수층 탐지 확률이 0 %, 동해는 음선이 통과하는 부분에서만 탐지 확률이 0 %로 나타나 해역 별로 어군에 의한 탐지 성능을 확인할 수 있었다.

Figure 34 에는 표적이 수심 50 m 에 위치한다고 가정하고 각 해역 별로 동계 시기 (a) 어군이 존재하지 않는 환경, (b) 어군이 존재하는 환경, (c) 대형 어군이 존재하는 환경에서 탐지 확률을 계산하여 나타내었다. 그림에서 x 축은 거리를, y 축은 탐지 확률이며, 파란 직선은 거리에 따른 탐지 확률을, 빨간 점선은 탐지 확률 50 % 기준으로 한 유효 탐지 가능 거리를 나타냈다. 황해 해역의 어군이 존재하지 않는 환경에서 음원이 위치해있는 부분을 제외하고 전 수층 탐지 확률이 100 %로 나타났고, 어군이 수층 내에 존재하는 환경에서 최대 9 km 까지 일부분을 제외하고 탐지 확률이 약 90 % 이상으로 높게 나타났다. 그러나 대형 어군이 존재하는 환경에서는 어군이 위치해 있는 3 km 이상 해역에서 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 남해 해역의 어군이 존재하지 않는 환경에서는 황해와 동일하게 전 수층 탐지 확률이 100 %로 나타났고, 어군이 수층 내에 존재할 때 탐지 확률이 거리에 따라 크게 변하면서 나타났다. 대형 어군이 존재하는 환경에서 어군이 위치해 있는 3 km 이상 해역에서 탐지 확률이 0 %로 나타났다. 동해 해역의 어군이 존재하지 않을 환경에서 약

2 km 지점까지 탐지 확률이 100 %, 4 km 지점까지 탐지 확률이 50 %로 나타났다. 어군이 존재하는 환경과 대형 어군이 존재할 환경에서는 어군이 중층에 나타나 직접적인 영향이 나타나지 않았고, 잔향음에 의하여 3 km 지점에서만 탐지 확률이 낮아졌다. Table 9 에는 각 해역 별로 어군의 영향에 대한 탐지 확률 50 % 이상의 탐지 거리를 정리하여 나타내었다.

위와 같이 어군을 고려한 환경에서의 탐지 성능 모델링 결과는 해군 함정의 선저 고정형 소나를 운용하여 표적을 탐지할 때 효율적인 소나 운용에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 이루어져 있고, 세 해역의 해양 환경이 다르기 때문에 어군의 영향도 시, 공간적으로 다르게 나타난다. 또한 세 해역에서 계절에 따라 우점하거나 서식하는 어종이 다르게 나타난다. 따라서 각 해역 및 계절에 따라 어군을 이루는 어종의 분포 연구도 함께 필요하다. 해역 별 어군을 이루는 주요 어종 분포 조사 결과, 황해 해역에서는 주로 멸치, 참조기, 오징어, 갈치가 주로 분포하고, 남해 해역에서는 멸치, 전갱이, 고등어, 갈치, 참조기가, 동해 해역에서는 오징어, 전갱이, 고등어, 청어, 삼치 등이 주로 서식하며 그 외에도 다양한 어종들이 계절에 따라서 어군을 형성하고 있다고 알려져 있다 (통계청 어업생산동향조사, 2018). 이와 같이 군사적인 측면에서 계절에 따른 우점 어종 또는 어군 크기에 대한 생물학적 연구가 필요한 실정이다. 또한 매년 해양의 수온 상승과 함께 각

해역 별로 서식하는 어종들이 다르게 나타날 수도 있기 때문에 지속적인 조사가 필요하다고 예측된다.

본 연구에서는 하나의 어군이 아닌 복수의 어군이 존재하는 환경에서의 탐지 성능 모델링은 수행하지 못하였으나, 복수의 어군이 존재하게 된다면 음파가 더 손실될 확률이 높아지고 탐지 확률이 더 낮아질 것을 4 장의 결과를 통해 예측할 수 있다. 종합적으로 어군은 표적 탐지 시 신호를 잃어버리는 측면에서 큰 영향을 미치며, 높은 오염물질로 오인할 수 있는 생물학적 요인 중 하나이다. 따라서 군사적인 작전에 효율적인 소나 탐지를 위해서 필수적으로 생물학적인 영향을 포함한 탐지 성능 모델링 접근이 중요하며, 해역, 계절에 따른 어군 형성 등 생물학적인 요소를 필수적으로 고려해야 한다.

Table 9. 각 해역 별로 주파수 4 kHz 동계 시기 소나 성능 탐지 모델링, 어군이 존재하지 않는 환경, 어군이 존재하는 환경, 대형 어군이 존재하는 환경에서 수심 50 m 지점의 최소 및 최대 탐지 거리 계산 결과 (탐지 확률 50 % 이상)

Sites	Non-fish school	Fish schools (position range: 3 km)	Large fish schools (position range: 3 km)
Yellow sea	10 km	6.5~9.5 km	3 km
South sea	10 km	3~10 km	3 km
East sea	4 km	4 km	4 km

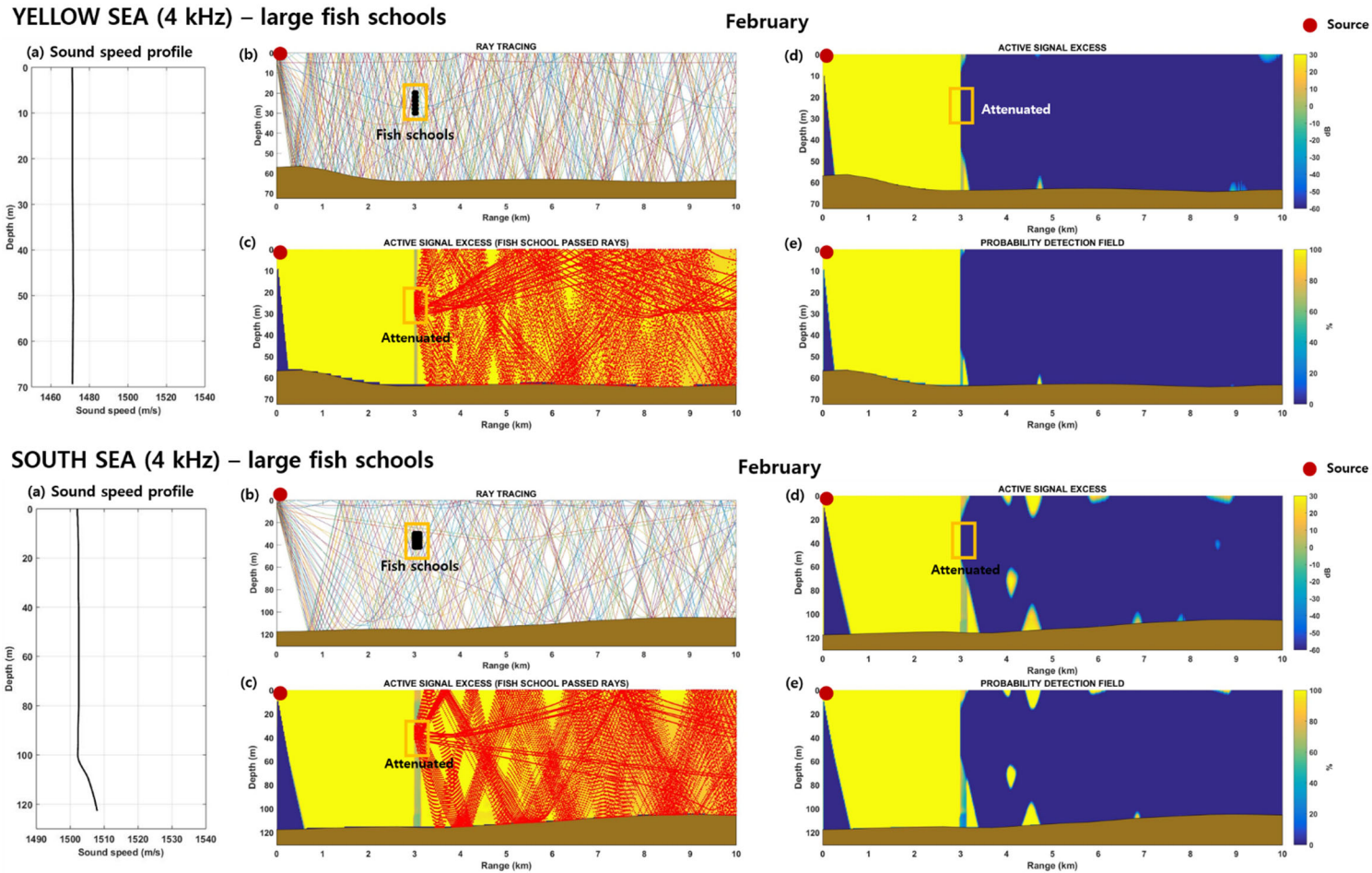


Figure 32. (상) 황해 및 (하) 남해 해역 주파수 4 kHz 에서 대형 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

## EAST SEA (4 kHz) – large fish schools

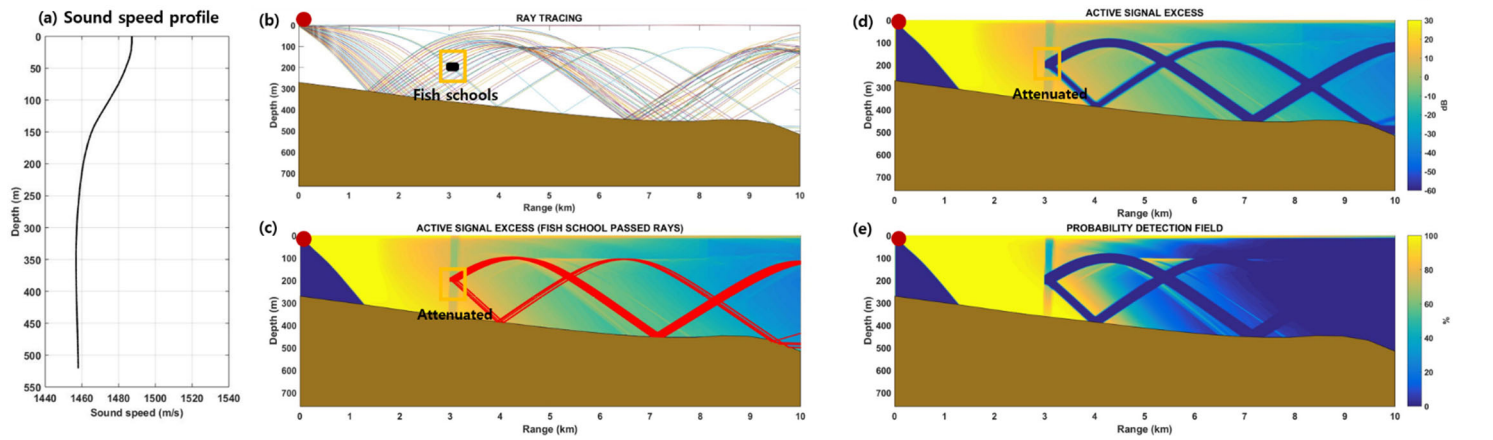


Figure 33. 동해 해역 주파수 4 kHz 에서 대형 어군이 존재하는 환경의 소나 탐지 성능 모델링 결과, (a) 음속 프로파일, (b) 음선 경로 및 어군 위치, (c) 어군을 통과하는 음선, (d) 능동 신호 초과, (e) 탐지 확률

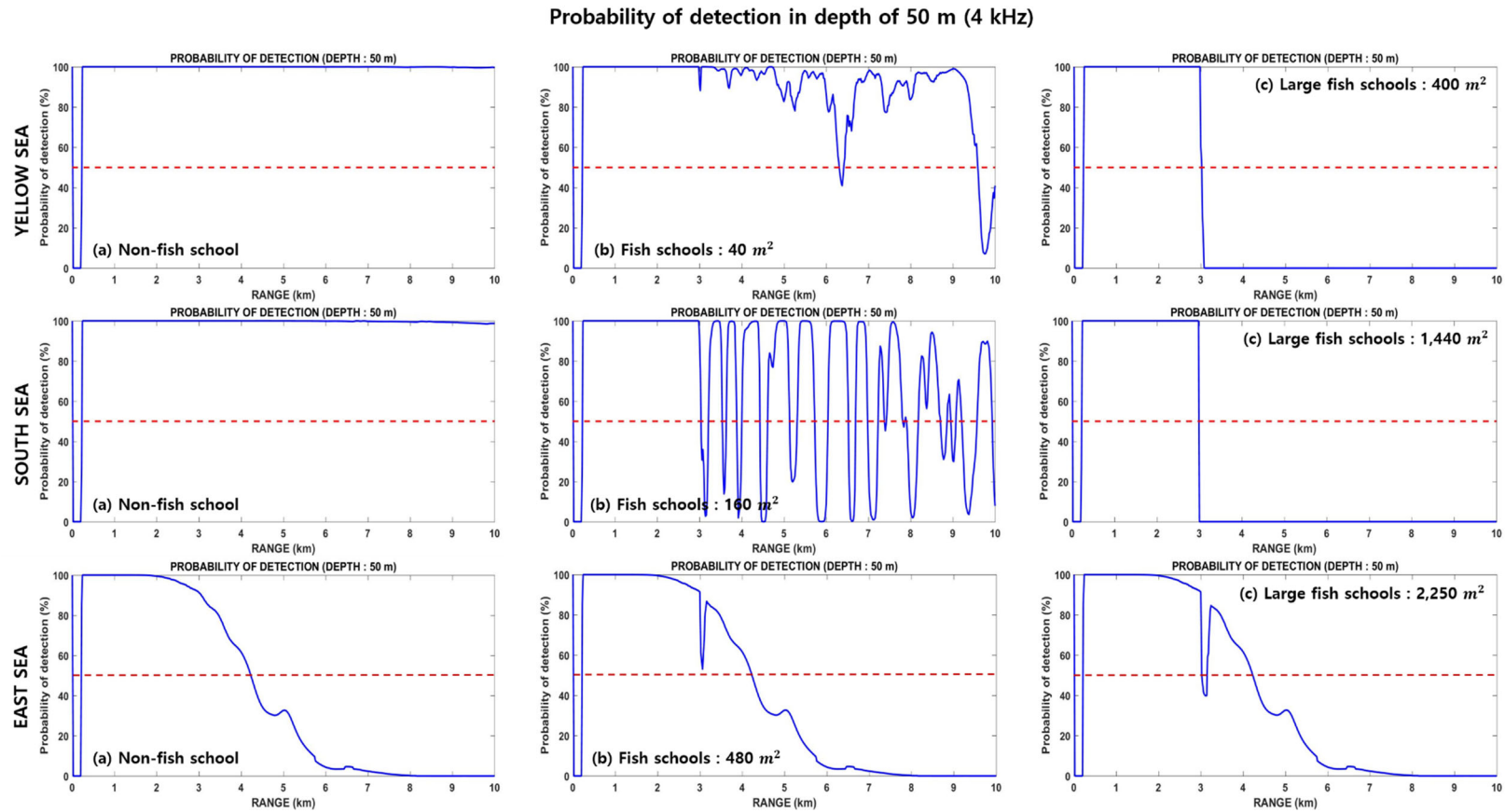


Figure 34. (상) 황해, (중) 남해, (하) 동해 해역 별 수심 50 m 지점에서의 탐지 확률 (a) 어군이 존재하지 않는 환경, (b) 어군이 존재하는 환경, (c) 대형 어군이 존재하는 환경 (빨간 점선은 탐지 확률 50%을 의미)



## 제 5 장

### 결론 및 향후 연구 계획

#### 5.1 결론

수중에서 음파의 전달은 수온, 염분, 수심의 함수로 표현되는 음속의 수직 및 수평적인 구조인 물리화학적 요소와 밀접하게 연관되어 있으며, 해저 지형과 해저 입자 구성으로 인한 지질학적인 요소가 음파 전달 현상에 영향을 미친다. 마찬가지로 생물학적인 요소도 음파 전달 현상에 큰 영향을 미치는 변수 중에 하나이다. 그러나 생물학적 요소 중 하나인 어군은 시·공간적으로 변동하기 때문에 정량적인 값을 고려하기 어렵다.

본 논문에서는 해양 방위 목적으로 현재 선저 고정형 소나에서 주로 사용하고 있는 중주파수 3~7 kHz 대역에서 어군에 의한 음향 감쇠 특성 연구를 해상 실험 및 결과 분석을 통해 확인하였다. 이 때 어군을 형성하는 대표적인 어종 중 하나인 고등어과 전갱이를 이용하여 밀도에 따른 음향 감쇠 특성 연구를 수행하였다. 먼저 어군에 의한 음향 감쇠 특성 관련한 기존 연구를 분석하였으며, 어군의 밀도와 주파수에 따른 음향 감쇠 해상 실험을 통해 계산된 음향 감쇠 계수와 기존 연구

결과와의 비교 분석을 수행하였다. 대표적으로 주파수 3 kHz 에서 어군 밀도에 따라 감쇠 계수는 약 6~14 dB/m 범위로 나타났으며, 4 kHz 에서는 어군 밀도가 500 마리일 때 최대 감쇠 계수는 약 16 dB/m 로 나타났다. 이를 통해 어군 밀도가 증가함에 따라 감쇠 계수가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 기존 연구와 비교 분석 결과 Furusawa et al., (1992)가 제시한 회귀 분석 결과와 본 연구 결과의 경향이 유사함을 확인하였고, 본 연구 결과를 포함하여 체중과 체장의 정규화된 소멸 단면적 값을 토대로 2 차 회귀 분석을 통해 회귀 수식을 제시하였다.

음향 감쇠 해상 실험을 통해 획득한 결과를 기반으로 국내, 외 연구자들과 해군에서 사용하는 수중음향 모델링을 수행하였다. 수중음향 모델 중 하나인 소나 탐지 성능 모델은 해양 환경을 반영하여 표적 대상의 탐지 거리와 확률을 예측하기 위한 성능 평가 모델이다. 위 모델을 기반으로 생물학적인 요소를 반영하여 우리나라의 대표적인 해역의 황해, 남해, 동해 해역에서 동계(2 월)와 하계 시기(8 월)에 탐지 성능 모델링을 수행하였다. 수심이 비교적 낮고 해저면 성분이 사질로 구성되어 있는 천해 해역의 황해와 남해에서는 음파가 수층 내에 존재하는 어군을 통과하면서 감쇠와 산란 등의 영향을 받기 때문에 어군의 유무에 따라 탐지 확률의 변동성이 크게 나타나는 것으로 모의되었다. 반면 해저면 성분이 니사질로 구성되어 있는 동해 해역에서는 수심이 깊은 심해 환경으로 대부분의 음선들이 음속이 낮은 해저면으로 굴절된 후, 해저면에

---

반사되어 수층 내로 음파가 전달되는 해역이다. 주요한 음선이 지나가는 구간에 어군이 존재하면 음영대가 형성되어 탐지 확률이 저하됨을 확인하였다. 종합적으로 물리학적, 지질학적 이외의 생물학적인 요인도 소나 탐지 성능이 변동할 수 있는 요인 중 하나로 무시할 수 없음을 확인하였다.

결론적으로 본 논문에서는 중주파수 대역에서 어군 밀도에 따른 음향 감쇠 특성을 확인하였다. 해상 실험 및 소나 탐지 성능 모델링 결과를 토대로 음파 전달 과정에서 어군의 존재는 중요한 요소로 확인되었다. 또한 어군이 허위 탐지 목표로 오인되거나 신호 손실 영향을 미칠 수 있기 때문에 소나를 이용한 음파 전달 및 탐지 측면에서 효율적으로 운용 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5.2 향후 연구 계획

향후 연구 계획으로는 어군에 대한 음향 감쇠 특성 연구를 확장하여 연구를 수행할 예정이다. 어군 음향 감쇠 특성 연구 관련한 추후 연구 계획은 아래에 대표적인 다섯 가지 주제로 나열하였다.

1. 밀도가 높은 대형 어군의 음향 감쇠 특성 연구,
2. 우리나라 해역 별로 어군을 형성하는 대표적인 중요 상업 어종에 대한 음향 감쇠 특성 연구,
3. 광대역 (1~20 kHz)에서 음향 감쇠 특성 연구 및 탐지 성능 모델링,
4. 생물음향에서 주로 사용하는 과학 어군 탐지기를 이용한 주파수 38~333 kHz 대역의 음향 감쇠 특성 연구,
5. 음향 산란층 (Sound scattering layer; SSL)에 의한 음향 감쇠 특성 연구.

본 연구에서는 최대 500 마리의 전갱이 어군을 이용하여 음향 감쇠 실험을 수행하였으나, 추후에는 더 큰 그물망을 설치하여 높은 밀도의 어군을 이용한 음향 감쇠 특성 실험을 수행할 예정이다. 또한 어군 밀도를 세부적으로 분류하여 음향 감쇠 측정 후, 장시간 동안 음향 신호를 측정할 예정이다. 또한 전갱이 뿐만 아니라 국내의 대표적인 중요 상업

---

어종들에 대한 음향 감쇠 특성 연구를 수행할 예정이며, 광대역 (1~20 kHz)에서 음향 감쇠 특성 연구를 수행할 예정이다. 또한 생물음향의 연안 자원량 분포 또는 연구 목적으로 사용하는 과학 어군 탐지기의 사용 주파수인 38, 70, 120, 200, 333 kHz 대역의 음향 감쇠 특성 연구도 수행할 예정이며, 그 외에도 다른 해양 생물(자치어 또는 동물플랑크톤)이 형성하는 음향 산란 층에 대한 감쇠 특성 연구도 수행할 예정이다.

[본 논문은 한국해양과학기술원의 지원을 받아서 수행되었습니다.]

---

## 부록

부록의 Figure 35~40 에는 3 장에서 음향 감쇠 특성 실험의 어군 밀도에 따른 실험 결과를 나타내었다. 3 장 실험의 Case 2~7 의 그물만 있는 환경(Only net), 그물 내에 어군이 100 마리부터 500 마리가 존재할 환경에서의 획득한 모든 수신 자료를 3~7 kHz 주파수 별 수신 전압과 수신 준위의 분석 결과를 나타내었다.

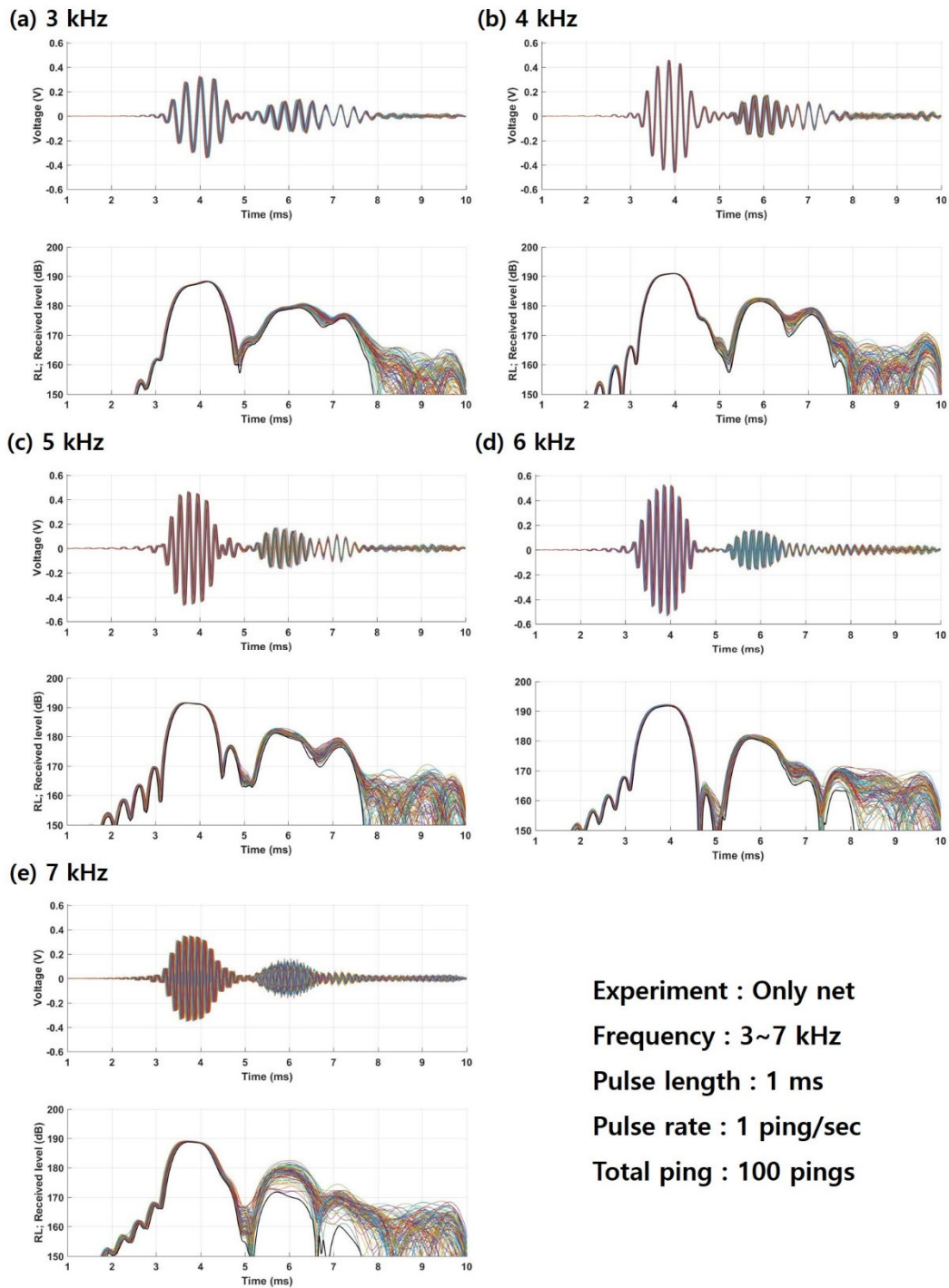


Figure 35. Case 2 (Only net) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

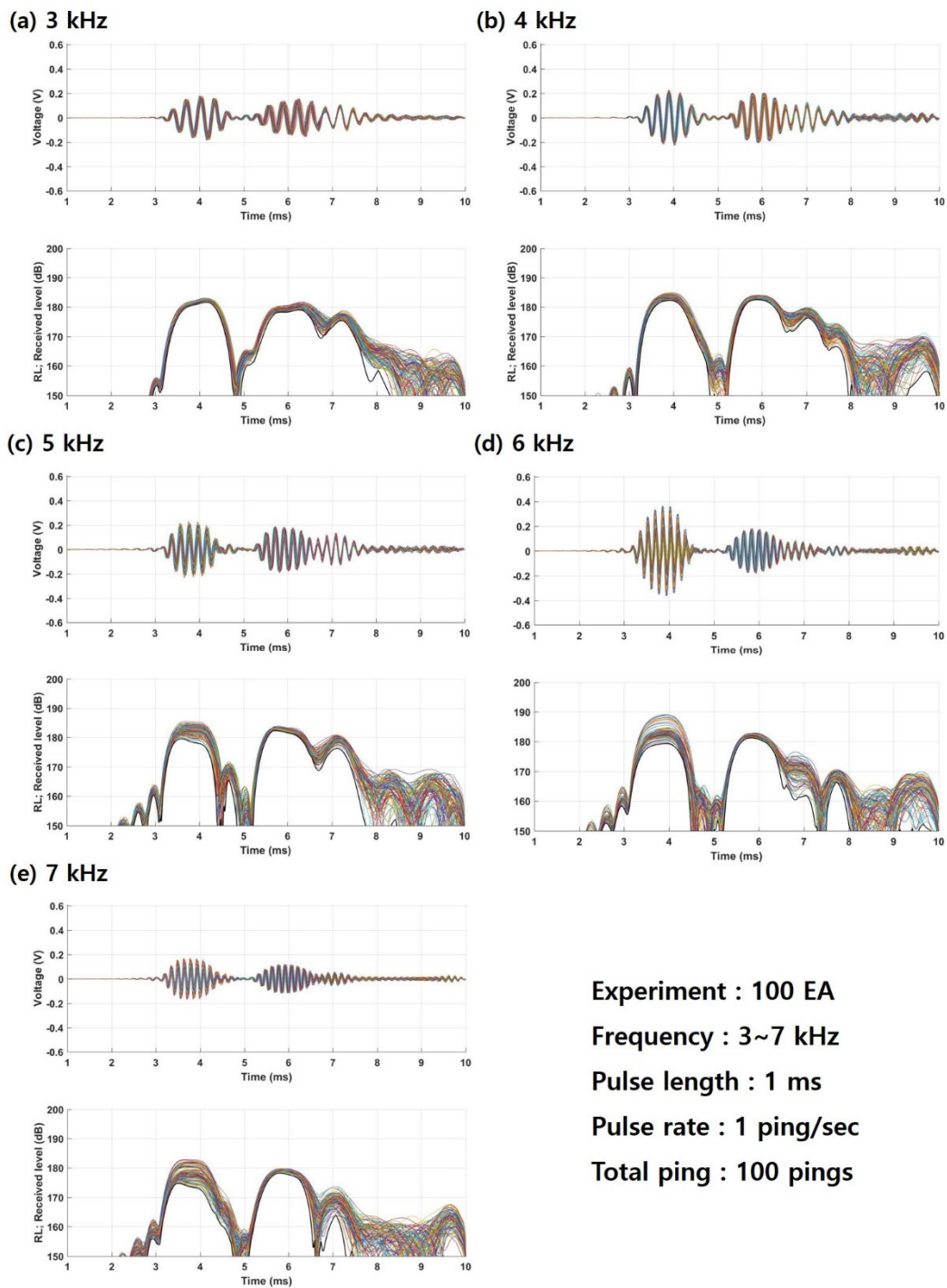


Figure 36. Case 3 (100 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz



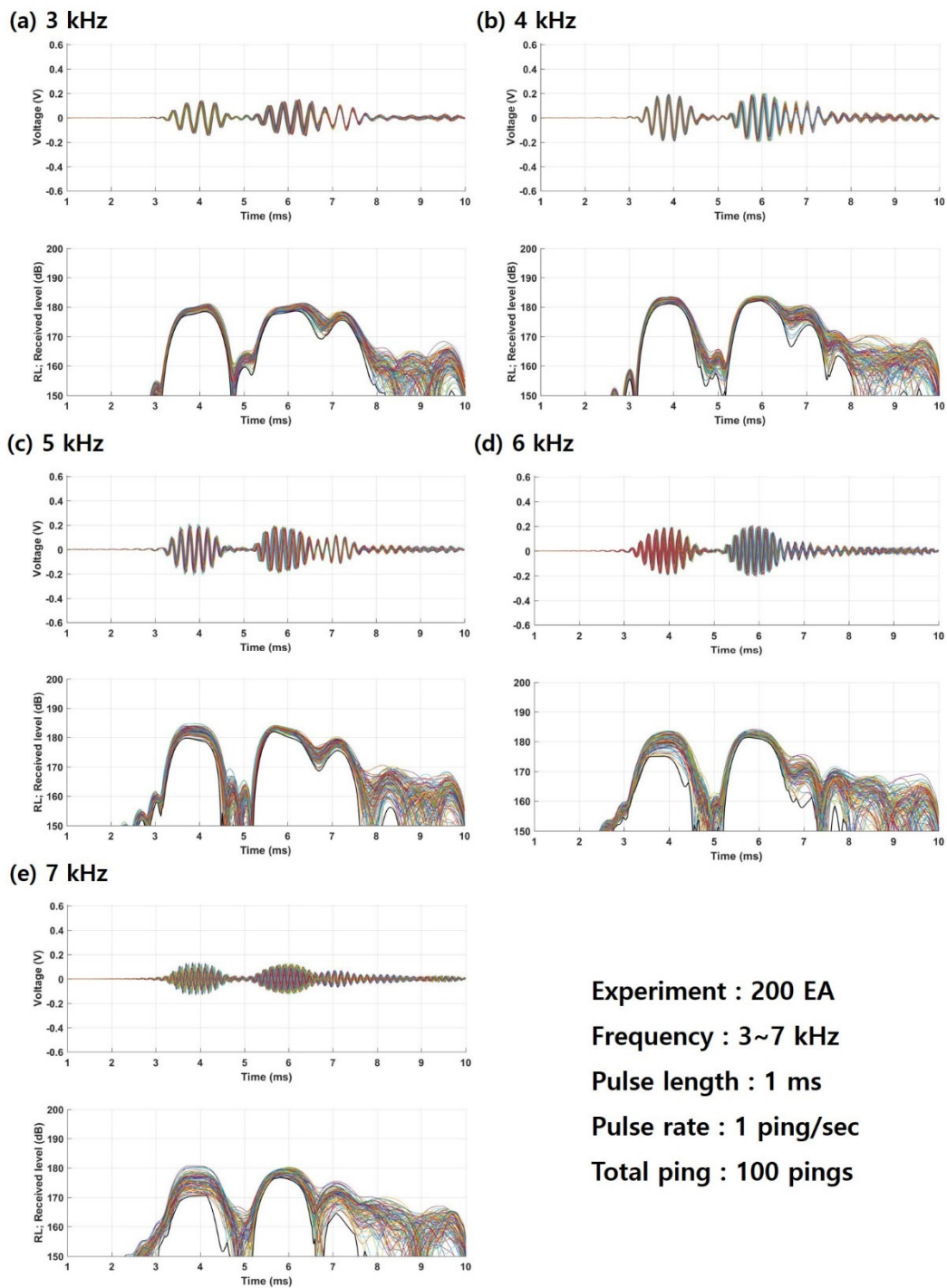


Figure 37. Case 4 (200 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

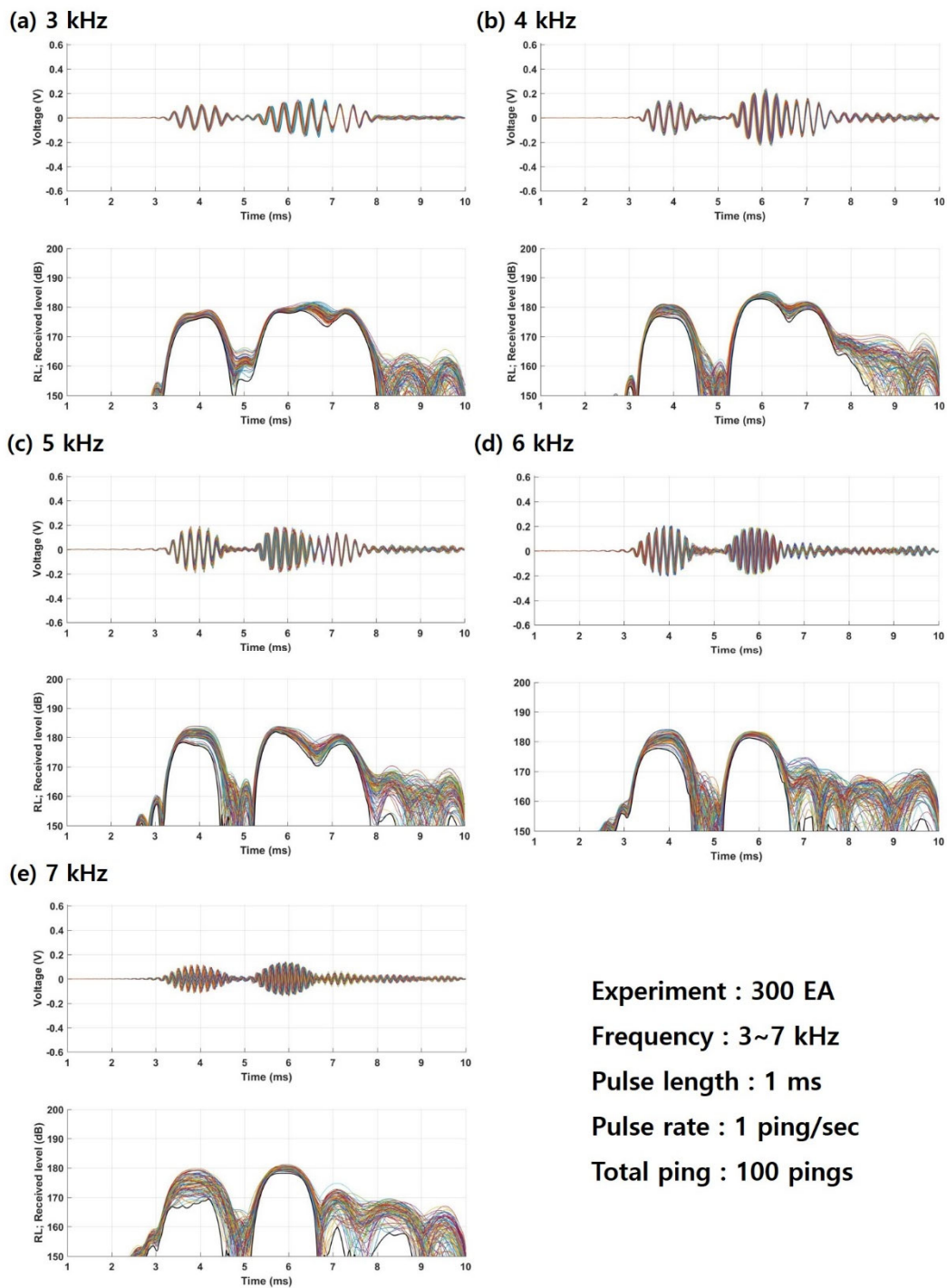


Figure 38. Case 5 (300 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

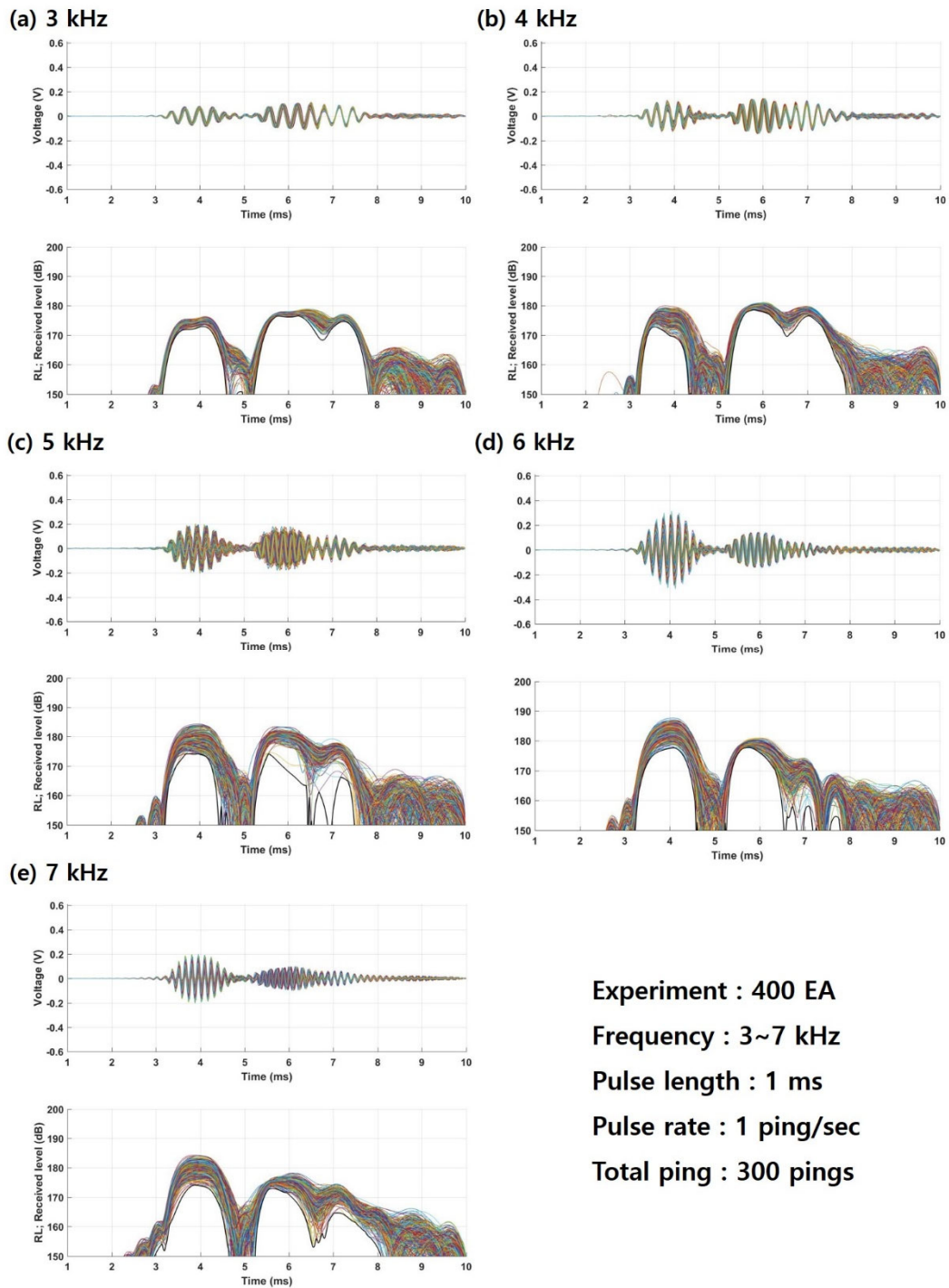


Figure 39. Case 6 (400 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

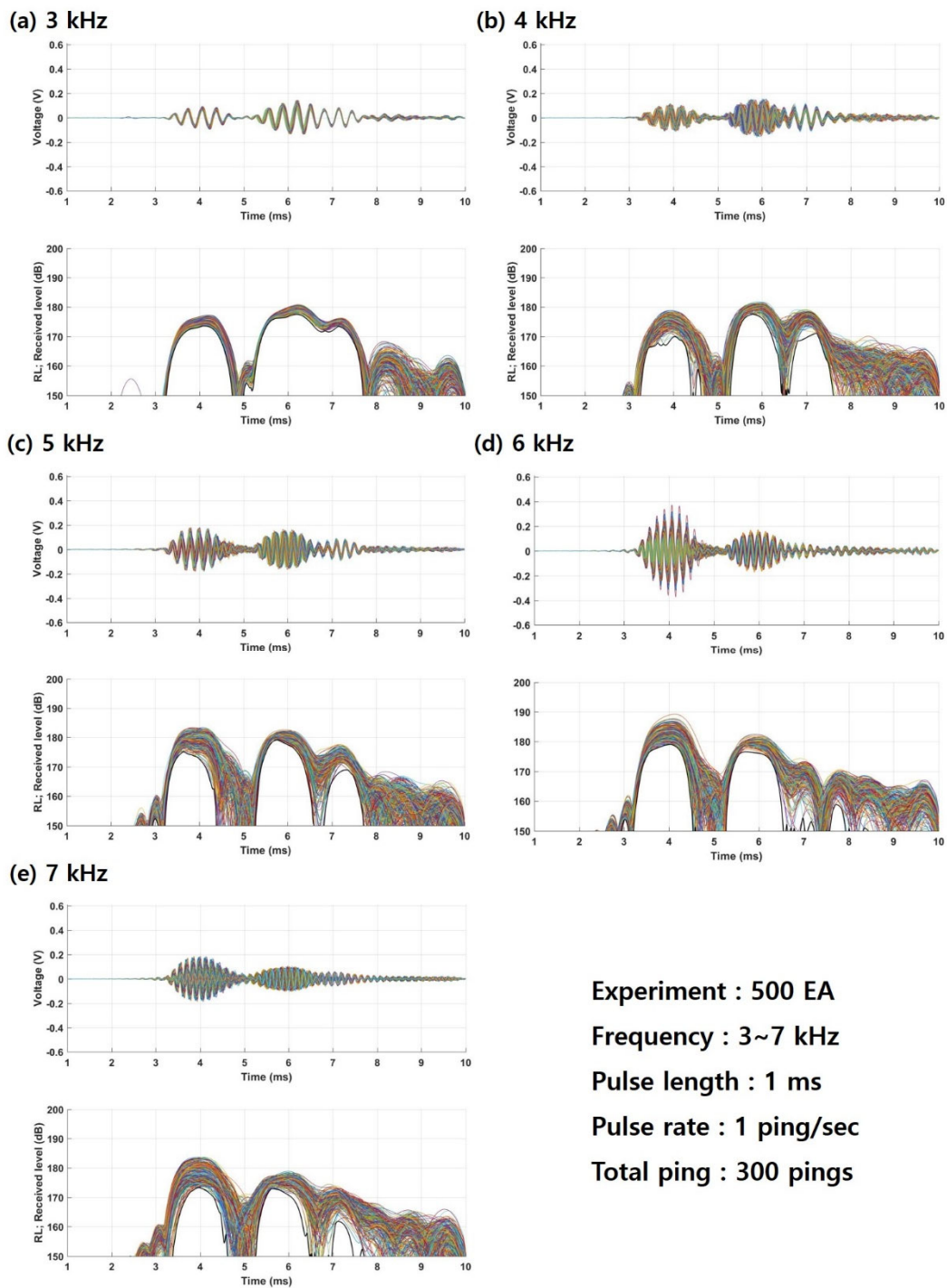


Figure 40. Case 7 (500 EA) 실험에서 획득한 수신 신호와 주파수에 따른 각각의 수신 전압과 수신 준위 분석 결과, (a) 3 kHz, (b) 4 kHz, (c) 5 kHz, (d) 6 kHz, (e) 7 kHz

---

## 참고문헌

- A. Alvarez and Z. Ye, 1999. Effects of fish school structures on acoustic scattering, ICES Journal of Marine Science, 56, 361-369.
- APL-UW, 1997. APL-UW High-frequency ocean environmental acoustic models handbook, APL-UW TR 9407, AEAS 9501, Applied Physics Laboratory, University of Washington, Tech. Rep.
- Aselsan, 2019. Hull mounted sonar system, <https://www.aselsan.com.tr/>.
- B. K. Choi, B. Kim, C. S. Kim and B. N. Kim, 2003. Analysis of dependence on wind speed and ship traffic of underwater ambient noise at shallow sea surrounding the Korean peninsula, Journal of the Acoustical Society of Korea, 22 (3), 233-241 (in Korean).
- B. P. Michael, 1987. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields, Journal of the Acoustical Society of America, 82 (4), 1349-1359.
- B. P. Michael, 1993. Acoustic models and Ssonar systems, Journal of Ocean Engineering, 18 (4), 425-437.
- D. J. Lee, S. Kang, K. M. Jung and H. K. Cha, 2016. Age and growth of Jack mackerel *Trachurus japonicus* off Jeju island, Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 49 (5), 648-656 (in Korean).
- D. Kang, D. Hwang, H. Soh, Y. Yoon, H. Suh, Y. Kim, H. Shin and K. Iida, 2003. Density estimation of an Euphauiid (*Euphausia pacifica*) in the sound scattering layer of the

- East China sea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 36 (6), 749-756 (in Korean).
- D. N. MacLennan and E. J. Simmonds, 1992. Fisheries acoustics. Chapman & Hall, London, 320 pp.
- D. Pavlov and A. O. Kasumyan, 2000. Patterns and mechanisms of schooling behavior in fish: A review, Journal of Ichthyology, 40 (2), S163-S231.
- D. R. Jackson and M. D. Richardson, 2007. High-frequency seafloor acoustic, Springer, New York, 383 pp.
- E. J. Simmonds and D. N. MacLennan, 2006. Fisheries acoustics: Theory and Practice, Blackwell Science, Oxford, UK, 437 pp.
- E. Shaw, 1978. Schooling fishes, American Scientist, 66 (2), 166–175.
- F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, 1994. Computational Ocean Acoustics, AIP Press, New York, 612 pp.
- F. Meseguer and F. Ramiro-Manzano, 2017. Acoustic resonance by fish schools: A proposal for the schooling mechanism, Cornell University. 1-8.
- Fish base team, 2019. Fishbase, <https://www.fishbase.in/search.php>.
- G. Helfman, B. Collette and D. Facey, 1997. The Diversity of Fishes, Blackwell Science, Oxford, UK, 375 pp.

- 
- G. M. Wenz, 1962. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources, *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 1936-1956.
- H. Kim, D. Kang, S. Cho and M. Kim, 2018. Effect of densely fish school on the acoustic propagation, 13<sup>th</sup> Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC 2018), 1-4.
- H. Kim, D. Kang, S. Cho and M. Kim, 2019. Mid-frequency sound attenuation by dense fish schools, In *Proceeding of Oceans 2019 MTS/IEEE Conference*, 1-4.
- H. Medwin and C. S. Clay, 1998. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Wiley, New York, 712 pp.
- H. Medwin, 1975. Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameter. *Journal of the Acoustical Society of America*, 58, 1318-1319.
- H. Sigfusson, E. A. Decker and D. J. McClements. 2001. Ultrasonic characterization of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*), *Food Research International*, 34, 15-23.
- H. Weinberg and R. E. Keenan, 1996. Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 1421-1431.
- H. Weinberg, 2000. CASS roots, In *Proceeding of Oceans 2000 MTS/IEEE Conference*, 1071-1076.
- I. E. Davies, 1973. Attenuation of sound by schooled anchovies, *Journal of the Acoustical Society of America*, 54, 213-217.

- 
- I. Hara, 1985. Moving direction of Japanese Sardine school of the basis of aerial surveys, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 51 (12) 1939–1945.
- J. J. Burczynski, R. L. Johnson, H. Kreiberg and W. B. Kirchner, 1990. Acoustic estimation of dense aggregation offish in sea pens, *International Council for the Exploration of the Sea*, 189, 54-64.
- J. W. Choi, K. S. Yoon, J. Na, J. S. Park and Y. N. Na, 2002. Shallow water high-frequency reverberation model, *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 21, 671-678 (in Korean).
- K. G. Foote, 1978. Analysis of empirical observations on the scattering of sound by encaged aggregations of fish, *Report on Norwegian Fishery and Marine Investigations*, 16, 422-455.
- K. G. Foote, 1988. Correcting acoustic measurements of scatterer density for extinction, *Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 1543-1546.
- K. G. Foote and J. J. Traynor, 1988. Comparison of Walleye pollock target strength estimates determined from in situ measurements and calculations based on swimbladder form, *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 9-17.
- K. Ishii, M. Furusawa and Y. Miyanohana, 1983. Measurements of attenuation of sound by schooling fish, *Technical Report of National Research Institute of Fisheries Engineering*, 4, 73-94 (in Japanese).



- 
- K. Ishii, M. Furusawa and Y. Miyanohana, 1985. Measurement of attenuation of sound by schooling fish, In Proceeding of Journal of Acoustical Society of Japanese. March 1985, 715-716 (in Japanese).
- KODC (Korea Oceanographic Data Center), 2019. NIFS, <http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>.
- K. V. Mackenzies, 1961. Bottom reverberation for 530- and 1030-cps sound in deep water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33 (11), 1498-1504.
- L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, 1999. *Fundamentals of Acoustics*, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley, New York, 560 pp.
- L. Ding, 1996. Direct laboratory measurement of forward scattering by individual fish. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101 (6), 3398-3404.
- L. Xavier, 2002. *An Introduction to Underwater Acoustics*, Springer, Chichester UK, 347 pp.
- M. Furusawa, K. Ishii, Y. Miyanohana and Y. Maniwa, 1984. Experimental investigation of an acoustic method to estimate fish abundance using culture nets, *Japanese Journal of Applied Physics*, 23 (1), 101-103.
- M. Furusawa, K. Ishii and Y. Miyanohana, 1992. Attenuation of sound by schooling fish, *Journal of the Acoustical Society of America*, 92, 987-994.
- M. Kim, 2015. Rights and jurisdiction of coastal states in the overlapping waters adjacent to Korean peninsula, Master of thesis, Seoul National University, 216 pp.

- 
- M. R. Carnes, 2009. Description and evaluation of GDEM-V 3.0, Naval Research Laboratory, Report of NRL/MR/7330-09-9165.
- N. C. Makris, 1996. The effect of saturated transmission scintillation on ocean acoustic intensity measurements, *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 769–783.
- Neptune sonar limited, 2019. Low frequency transducers model T335, <http://www.neptune-sonar.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/Model-T335.pdf>.
- NODC (National Oceanographic Data Center), 2019. Coastal Ocean Laboratory, NOAA, <https://www.nodc.noaa.gov/cwtg/>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2010. Ecology and fishing ground of fisheries resources in Korea Waters, NIFS of Korea, 217-224.
- O. Diachok and S. Wales, 2005. Concurrent inversion of geo- and bio-acoustic parameters from transmission loss measurements in the Yellow Sea, *Journal of the Acoustical Society of America*, 117, 1965-1976.
- P. C. Etter, 2013. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, 5<sup>th</sup> Edition, CRC Press, New York, 638 pp.
- P. Zare, S. Moodi, J. Masudinodushan and A. Abdoli, 2011. Length-weight and length-length relationships of three fish species (*Cyprinidae*) from Chahnimeh reservoirs, Zabol, in eastern Iran. *Journal of Applied Ichthyology*, 27, 1425-1426.

- 
- R. E. Francois and G. R. Garrison, 1982. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 1879-1890.
- R. E. Keenan, 2000. An introduction to GRAB eigenrays and CASS reverberation and signal excess, In *Proceeding of Oceans 2000 MTS/IEEE Conference*, 1065-1070.
- R. L. Folk and W. C. Ward. 1957. A study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- R. P. Chapman and J. H. Harris, 1962. Surface strengths measured with explosive sound sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34 (10), 1592-1597.
- R. J. Urick, 1975. *Principle of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 285 pp.
- S. Marras, S. S. Killen, J. Lindstrom, D. J. McKenzie, J. F. Steffensen and P. Domenici, 2015. Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position, *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 69, 219-226.
- S. I. Kim, Y. S. Kim, Y. N. Na and Y. G. Kim, 2012. Monostatic reverberation calculation using the BELLHOP model, *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 1(s) 28, 456-457 (in Korean).
- Statistics Korea, 2018. Changes in major fish catches due to climate (water temperature) changes, <http://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156276790>, 1-30 (in Korean).

- 
- T. Hashimoto, 1955. Characteristics of ultrasonic waves transmitted horizon-tally in the water, Report of Fishing Boat Laboratory, 2, 55-58 (in Japanese).
- T. H. Oh, H. S. La, J. Y. Na and C. Y. Park, 2006. Mid-frequency bistatic reverberation model, Journal of the Acoustical Society of Korea, 25, 389-394 (in Korean).
- W. Son, S. Son, J. W. Choi, S. Cho and S. Jung. 2015. Measurements of monostatic bottom backscattering strengths in shallow water of the Yellow Sea, Journal of the Acoustical Society of Korea, 34 (6) 444-454 (in Korean).
- Y. G. Yoon, C. Lee, J. W. Choi, S. Cho, S. Oh and S. K. Jung, 2015. Measurements of mid-frequency bottom loss in shallow water of the Yellow sea, Journal of the Acoustical Society of Korea, 34, 423-431 (in Korean).
- Y. M. Chu, W. J. Seong, I. S. Yang and W. T. Oh, 2009. Mid frequency band reverberation model development using ray theory and comparison with experimental data, Journal of the Acoustical Society of Korea, 28, 740-754 (in Korean).
- Y, Miyanohana, K. Ishii and M. Furusawa. 1993. Spheres to Calibrate Echo Sounders at Any Frequency, Nippon Suidan Gakkaishi, 59 (6), 933-942.
- Z. Ye, 1996. On acoustic attenuation by swimbladder fish, Journal of the Acoustical Society of America, 100, 669-672.
- Z. Ye and D. M. Farmer, 1996. Acoustic scattering by fish in the forward direction, ICES Journal of Marine Science, 53, 249-252.