creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사학위논문

수동소나 시뮬레이터 적용을 위한 선박 소음원 방향성 요인 연구

A Study on Vessel Noise Directivity Factor for Passive Sonar Simulator

2015년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 민 규

수동소나 시뮬레이터 적용을 위한 선박 소음원 방향성 요인 연구

A Study on Vessel Noise Directivity Factor for Passive Sonar Simulator

지도교수 성 우 제

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 민 규

김민규의 공학석사 학위논문을 인준함

2014년 12월

위 원 장 _____ 인

부위원장 _____ 인

위 원 _____ 인

국 문 초 록

잠수함에서 항해 및 공격을 위해 운용되는 대표적인 장비가 수동 소나이며, 소나 시뮬레이터는 실제 전장 환경에서 소나에 탐지되는 신호와 유사한 신호를 모델링하는 전산 알고리듬이다.

본 연구는 잠수함 실제 해상에서 운용 되는 소나와의 유사도를 증가시키기 위해 선박의 수중방사 소음에서 나타나는 방향성 요인을 분석하여 시뮬레이터에 적용하는 것에 중점을 두었다. 음향경계요소법을 통해 산출한 선박의 방향성 요인을 기존의 선박 방사소음원 알고리듬에 추가하여 수신신호를 모사하였다. 또한 시뮬레이션과 해상실험 선박소음신호의 주파수영역 스펙트로그램을 비교 검증하였다. 이러한 알고리듬이 적용된 잠수함 수동 소나 시뮬레이터를 통해 잠수함 승조원들이 해상에 나가지 않고도 실제 해상상황과 유사한 훈련을 가능케 함으로써 그 효과를 극대화 할 수 있으리라 예상된다.

주요어 : 잠수함, 수동소나, 방향성 요인, 음향경계요소법

학번 : 2013-22547

목 차

초 록 ····· i

그림 목차 ····· v

표 목차 ····· vi

1. 서론 ····· 1
   1.1 연구 배경 및 목적 ····· 1
   1.2 연구 개요 ····· 3

2. 선박 소음원의 방향성 요인 분석 ····· 5
   2.1. 선박 소음원의 방향성 요인 특성 ····· 5
   2.2. 선박 소음원 방향성 요인 산출 해상실험 ····· 8
      2.2.1. 실험 환경 및 도구 ····· 8
      2.2.2. 계측 및 분석 방법 ····· 10
      2.2.3. 실험 결과 ····· 17

3. 선박 소음원의 방향성 요인 모의 ····· 21
   3.1. 음향경계요소법 이용 방향성 요인 산출 ····· 21
      3.2.1. 모의 환경 ····· 21
      3.2.2. 모의 결과 ····· 23

3.2. 선박소음원 방향성 모의 및 실험결과와 비교 ····· 27
3.2.1. 모의 환경 ····· 27
3.2.2. 모의 결과 ····· 29

4. 결론 ····· 33

참고문헌 ····· 35

Abstract ····· 37

그림 목차

그림 1. 산타바바바라 해협 해역도 ····· 5

그림 2. 선박 수중방사소음 수신 준위 스펙트로그램 ····· 6

그림 3. 선박과 수신기간 선수각 ····· 7

그림 4. 선박 프로펠러 소음 방향성 요인 ····· 7

그림 5. 계측실험 해역도 ····· 8

그림 6. 측정장비 계류 모식도 ····· 9

그림 7. 실험해역 음속분포도 ····· 9

그림 8. 피측정 선박 기동에 따른 선수각 ····· 10

그림 9. 피측정 선박과 청음기간 직선거리 ····· 12

그림 10. 등급 A, B 청음기 설치 위치 ····· 15

그림 11. 등급 C 청음기 설치 위치 ····· 15

그림 12. 청음기 설치 방법 ····· 16

그림 13. 선박 수중방사소음 계측시 선박 기동 ····· 16

그림 14. 계측결과 스펙트로그램 ····· 17

그림 15. 현측별 평균 방향성 요인 ····· 19

그림 16. 평균 방향성 요인 ····· 20

그림 17. 음향경계요소법 모의 선박 ····· 21

그림 18. 평면 음장 ····· 22

그림 19. 음향경계요소법 모의 결과 스펙트로그램 ····· 23

그림 20. 전달손실 보정을 위한 기준 위치 ····· 24

그림 21. 음향경계요소법 이용 산출 방향성 요인 ····· 25

그림 22. 음향경계요소법 이용 산출 방향성 요인 추세식 ····· 26

그림 23. 모의 환경 ····· 27

그림 24. 1차 계측 기동요도 ····· 28

그림 25. 1차 계측 기동요도 ····· 28

그림 26. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 20m 청음기) ····· 30

그림 27. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 50m 청음기) ····· 31

그림 28. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 80m 청음기) ····· 32

표 목차

표 1. 측정등급별 요구조건 요약 ····· 14

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

잠수함의 은밀한 기동과 타격능력은 해상에서 어떠한 무기체계 보다 효과적이고 위협적인 방어 및 공격을 가능하게 하며, 수중발사 전략 유도무기 의 탑재로 인해 선제 공격에 대한 취약성을 최소화 하고 전쟁 억제력 및 보복력을 극대화할 수 있는 무기체계로 잘 알려져 있다. 소나체계는 잠수함이 수중에서 은밀하게 활동하여 적 수상함이나 잠수함을 원거리에서 탐지 및 식별하고 공격할 수 있게 하는 핵심 탑재 장비이다. 소나체계의 임무를 컴퓨터를 이용하여 가상으로 구현한 도구를 소나 시뮬레이터(sonar simulator)로 정의한다.[1]

소나 시뮬레이터는 사용목적에 따라 잠수함 소나의 성능 검증을 위한 소나 성능 모델, 소나 운용자의 훈련을 위한 소나 훈련 모델, 잠수함 전투모의 및 시험평가 모델 등으로 분류할 수 있다.

수동 소나 시뮬레이터 알고리듬 제시와 관련한 연구성과로 안[2]은 음선모델을 적용한 수동 소나 시뮬레이터 알고리듬을 제시하였다. 수상함, 잠수함 등의 표적에서 방사되는 소음을 신호의 특성에 따라 비변조/변조 협대역, 비변조/변조 광대역 신호로 분류하였으며, 소음원에서 방사된 소음이 소나에 전달 될 때의 과정을 음선모델을 적용하여 설계하였다. 또한 MAPLE 4 해상실험의 결과로 나타난 신호를 모의하고 측정 자료와 비교 검증하였다.

김[3]은 안[2]의 연구에 추가하여 수동 소나 시뮬레이터에 해양 배경소음(ocean ambient noise), 소나돔 삽입손실(sonar dome

insertion loss), 선박 방사소음 준위(ship radiated noise level) 등의 알고리듬을 제시하였다. 기존 Wenz 곡선의 바람 소음 준위를 이용하여 등속 반무한 환경에서 바람 소음을 쌍극자 전달(dipole propagation)로 모의하였고, Skudrzyk의 경험식을 이용하여 자체 소음인 유체소음, 소나 돔 삽입 손실 등을 적용하여 실제와 유사하게 모의하였다. 또한 Ross의 경험적 실험식으로 선박의 톤수와 속력에 따른 선박 방사소음 준위를 적용하였으며, 다양한 해양 환경에서 스펙트로그램(spectrogram)의 간섭패턴(interfere pattern) 변화에 대한 연구도 진행하였다[4, 5].

이어서 정[6]은 실제 해상에서 짧은 순간 불규칙적으로 발생하는 수중 순간 소음(underwater transient noise)의 수동소나 시뮬레이터의 소음원 모의를 위한 연구를 진행하였으며, 순간 소음 중 프로펠러 항공기에서 발생하는 수중 소음과 기뢰, 어뢰, 소노부이 등이 입수 시에 발생할 수 있는 입수 충격 소음에 대한 연구를 하였다.

본 논문에서는 기존의 수동소나 시뮬레이터 알고리듬으로 모의된 선박의 수중방사 소음에 선박이 가지는 방향성 요인을 적용하여 보다 실제와 가까운 잠수함 수신신호를 모의할 수 있는 알고리듬을 제안하였다.

1.2. 연구 개요

본 연구는 잠수함 수동소나 시뮬레이터와 실제 해상에서 운용 되는 소나와의 유사도를 증가시키기 위해 선박의 수중방사 소음에서 나타나는 방향성 요인을 분석하여 시뮬레이터에 알고리듬에 적용하는 것에 중점을 두었다. 해상에서 선박의 기동에 따른 방사소음 측정결과를 보면 선박이 일정한 침로와 속력으로 기동시 수신기의 최단접근점(CPA, Closest Point of Apporach) 통과 전후를 기준으로 프로펠러 캐비테이션 소음 주파수 대역에서 수신 준위가 비대칭성을 보임을 발견할 수 있다. 선수와 수신기간의 선수각(AOB, Angle Of Bow)을 기준으로 통상적으로 통과 전 선수가 수신기를 볼 때의 수신 준위가 최단접근점 통과 후 선미 방향의 수신 준위보다 낮으며, 이는 지배적인 선박 방사소음인 프로펠러 소음이 선체구조상 선미 쪽에 치우쳐 있어 선수방향으로 소음전달시 선체에 의한 차단 및 회절 현상이 나타나기 때문이다. 선박 프로펠러 소음 해상실선 계측 실험결과로부터 피 측정선박 소음원의 방향성 요인을 산출하여, 그 경향을 분석하였고, 음향경계요소법(BEM)을 이용하여 산출한 방향성 요인과 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 또한 음향경계요소법을 통해 산출한 선박의 방향성 요인을 시뮬레이터 알고리듬 내 기존의 선박 방사소음원에 추가하여 실험과 동일한 환경 하에 수신신호를 모사하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 모의신호와 해상실선 계측 실험 선박소음신호의 주파수영역 스펙트로그램을 비교하여 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 1장에서는 본 연구의 배경 및 개요 논문의 구성에 대하여 설명하였고, 2장에서는 선박 소음원

의 방향성 요인을 분석하였다. 3장에서는 방향성 요인을 고려하여 선박의 수중방사소음을 모의 후 이를 실험결과와 비교하여 검증하고, 4장에서는 본 논문을 요약하고 추후 기대되는 효과에 대하여 기술하였다.

2. 선박 소음원의 방향성 요인 분석

2.1. 선박 소음원의 방향성 요인 특성

잠수함이 수중에서 임무수행 중 항해 및 공격을 위해 표적문제해결을 하는 대부분의 표적은 수상선박이다. 그런데 수상선박에서 방사되는 소음의 수신준위가 선박과 수신기간의 선수각(AOB, Angle Of Bow)에 따라 차이가 남을 알 수 있다. McKenna는 그림 1과 같이 캘리포니아 인근 산타바바라 해협에 위치하는 주요 선박항로를 따라 이동하는 선박의 방사소음 준위를 측정하기 위해 청음기를 설치(심도 570 m)하고 약 3 km 거리에서 최단접근점(CPA, Closest Point of Approach)을 통과하는 선박의 방사소음준위를 측정하였다.[7]]

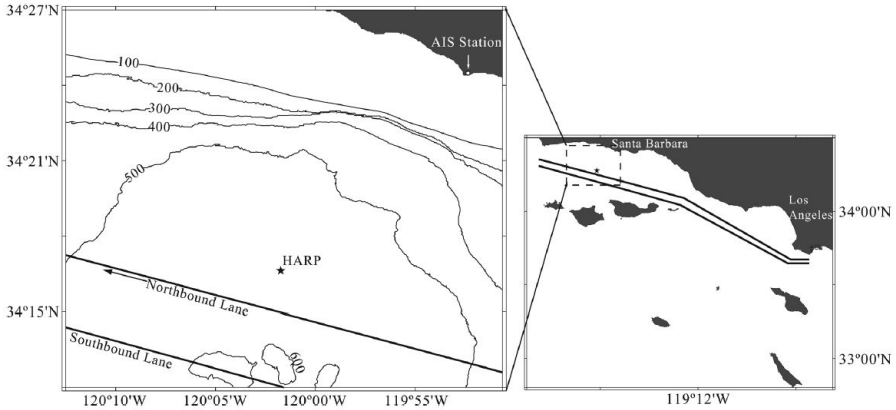
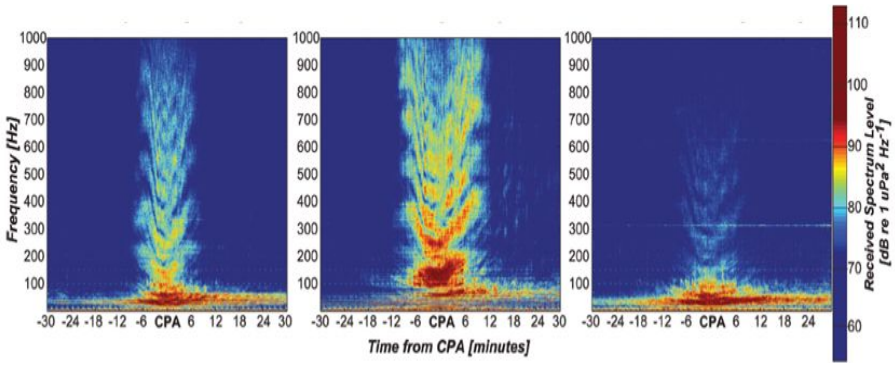


그림 1. 산타바바라 해협 해역도.[7]

측정결과 그림 2와 같이 선박이 수신기로 접근할 때와 수신기 최단접근점 통과이후 멀어질 때, 간섭패턴은 U패턴(Bathtub)형태를 보

이나 방사소음준위의 비대칭성을 보임을 확인할 수 있다. 최단접근점으로 접근 시보다 통과 후 이격 시 방사소음 준위가 5 ~ 10 dB 정도 크며 이는 선박 소음의 방향성 요인(Directivity Factor)에서 기인한다고 추정하였다.



(a) (b) (c)

그림 2. 선박 수중방사소음 수신 준위 스펙트로그램, (a) 컨테이너선 53kGT [11 m/s], (b) 벌크선 16kGT[7.4 m/s] (c) 탱커선 [7.5 m/s].[7]

Sasajima는 벳푸만에서 청음기를 설치(심도 25 m)하고 해양조사선의 프로펠러 방사소음 준위를 측정하였다. 그리고 선박 수중방사소음의 방향성 요인(Directivity Factor)을 다음과 같이 분석 하였다.[8]

$$SSL + L(\theta) = SPL + 20\log_{10}\frac{R}{R_0} \qquad (1)$$

여기서 SSL은 음원 준위(Sound Source Level), SPL은 계측 음압

준위(Sound Pressure Level), $L(\theta)$는 방향성 요인(Directivity Factor), R은 소음원과 수신기간 거리(m), R_0는 기준 거리 1 m 이다.

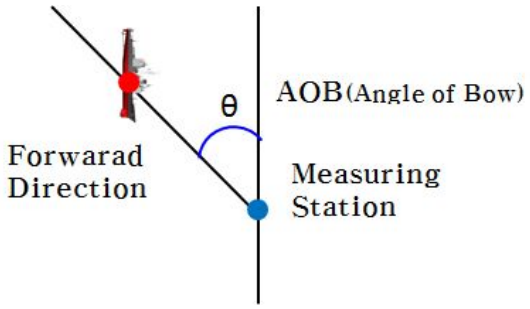


그림 3. 선박과 수신기간 선수각(AOB, Angle Of Bow).

식 (1)을 이용하여 산출한 방향성 요인(Directivity Factor)을 그림 3의 AOB에 따라 그림 4의 폴라차트로 도시하였다.

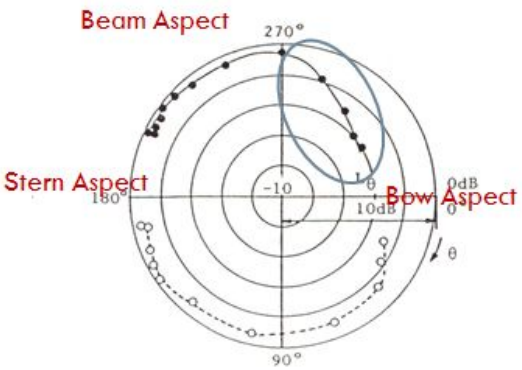


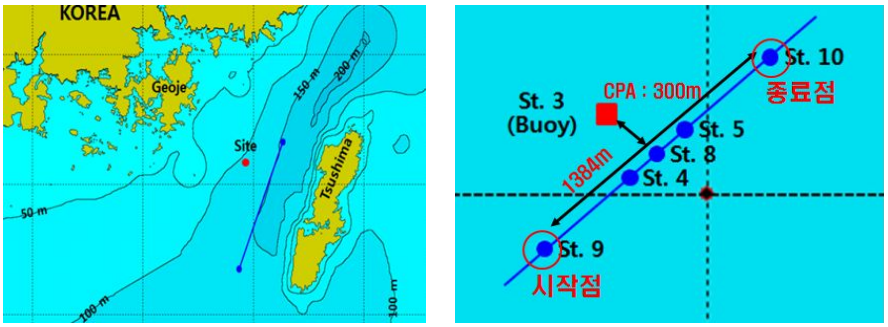
그림 4. 선박 프로펠러 소음 방향성 요인(Directivity Factor).

선수방향(Bow Asepect)으로 갈 수록 방향성 요인에 의한 감쇠 폭이 크고, 정횡방향(Beam Aspect) 및 선미방향(Stern Aspect)으로 갈수록 그 영향이 작아짐을 확인할 수 있다.

2.2. 선박 소음원 방향성 요인 산출 해상실험

2.2.1. 실험 환경 및 도구

선박 프로펠러 소음 해상실선 계측 실험은 거제 동남방 00 NM 대한해협내 수심 약 100 m 해점에서 한국해양과학기술원 주관 하에 진행되었다. 실험해역 저질은 뻘, 모래였고, 기상은 맑았으며, 풍속계 계측결과 바람속력은 7.3 m/s로 Jebson[9]의 보퍼트 풍력계급(The Beaufort Scale)에 따라 해상상태 4를 보였다.



(a) (b)

그림 5. 계측실험 해역도, (a) 계측실험 해역, (b) 기동요도.

실험에는 한국해양과학기술원 소속 두리호(500톤급 해양조사선)와, SPP조선의 50000톤급 Tanker가 피측정 선박으로 참가하였으며, 음향 측정 장비로는 그림 6과 같이 심도 20 m, 50 m, 80 m에 자체녹음기(SRH, Self-Recording Hydrophone)가 설치된 해저 고정형 측정 장비가 운용되었다. 실험 계측에 앞서 피측정 선박에 설치된 음향측심기 이용하여 측심 정점의 수심을 확인하고, 실험선의 수온・염분・수심 측정기(CTD, Conductivity Temperature Depth Profiler)를 이용하여

실험해역의 음속분포도(Sound Speed Proflie)를 그림 7과 같이 확인하였다.

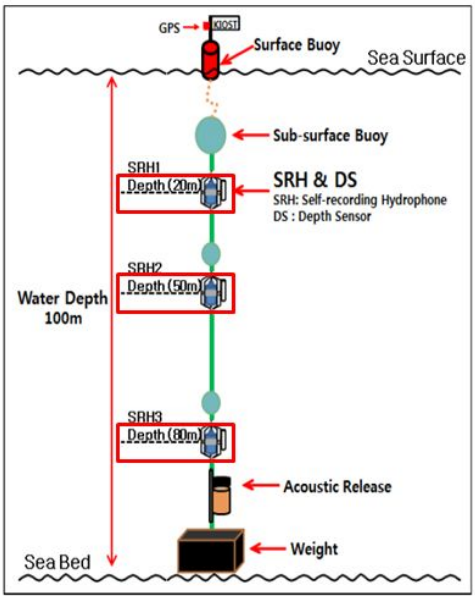


그림 6. 측정장비 계류 모식도.

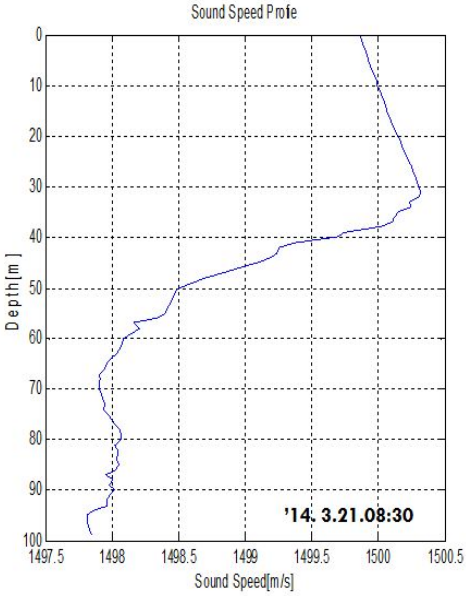


그림 7. 실험해역 음속분포도(SSP, Sound Speed Profile).

2.2.2. 계측 및 분석 방법

계측은 ANSI(American National Standards Institute) 표준 계측 규정을 준용하여 실시하였다.[10] 본 실험에서는 표 1에서 보이는 측정등급별 요구조건 중에서 A급 정밀측정 방법을 적용하였는데, 실험해역 수심이 100 m로 제한됨에 따라 최소 요구 수심 및 청음기 설치 심도는 준수하지 못하고 변경하여 적용하였다. 피측정 선박은 그림 5와 같이 수신기 최단접근점을 약 300 m 유지하여 직선기동하며 계측 시작점(St. 9)에서 종료점(St.10)까지는 일정한 침로, 속력을 유지한다. 그 이후에는 선회하여 침로를 반대로 변경한 후 계측 시작점(St.10)에 재 진입하여 계측 종료점(St. 9)까지 일정한 침로, 속력으로 계측을 반복하는데 이 과정을 좌/우현 각 3번씩 총 6회 실시하였다.

본 연구에서는 피측정 선박과 수신기간 선수각(AOB, Angle of Bow)에 따른 방향성 요인(Directivity Factor) 산출을 위해 선박과 수신기가 매 5도별 1초간 음향신호를 처리하였다.

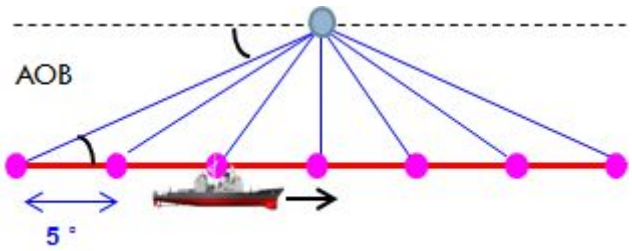


그림 8. 피측정 선박 기동에 따른 선수각(AOB, Angle of Bow)

음향 신호 측정이 완료된 이후에는 청음기 수신감도 보정, 거리에 따른 전달손실 보정, 청음기별 수신신호 처리 등 계측 후 분석과정을 실시한다. 수중방사소음 준위는 1/3 옥타브밴드 값을 사용하며, 다음의 절차로 청음기의 수신감도 보정을 실시하였다.

$$L_p^{'} = L_p + A_{sen} \tag{2}$$

여기서 $L_p^{'}$ 는 청음기 수신감도 보정이 완료된 음압 준위, L_p 는 1/3 옥타브밴드 계측 음압 준위, A_{sen}는 청음기 수신감도 값이다.

이어서 거리에 따른 전달손실(TL, Transmission Loss)을 보정해 준다. 선박과 청음기간의 직선거리는 선박의 음원중심과 청음기 상부 수면사이의 수평거리와 수면으로부터 수직방향으로 청음기까지의 거리를 통해서 산출한다.

$$d_{Total} = \sqrt{d_H^2 + d_V^2(h)} \tag{3}$$

여기서 d_{Total}은 선박과 청음기간 직선 거리(m), d_H는 선박의 음원중심과 수면 부표간의 수평 거리(m), $d_V(h)$는 청음기의 설치 심도(m)이다.

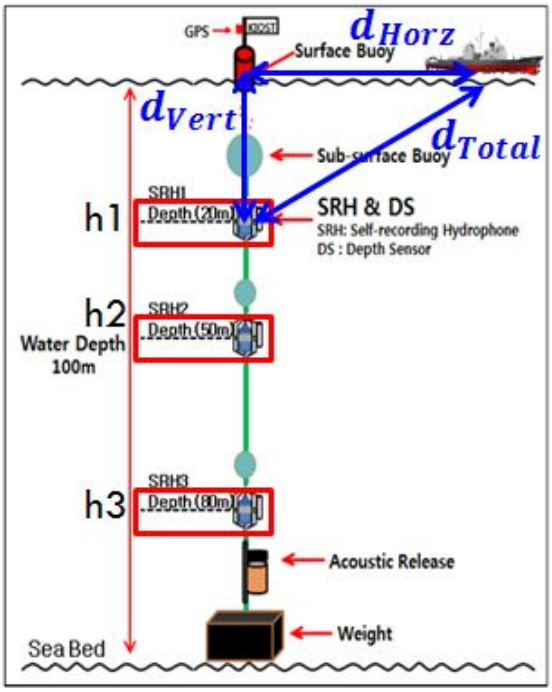


그림 9. 피측정 선박과 청음기간 직선거리.

전달손실을 보정한 청음기별/측정모드별 수중방사소음 준위는 다음과 같다.

$$L_s(r,h) = L_p^{'} + 20\log_{10}(d_{Total}/d_{ref}) \qquad (4)$$

여기서 $L_s(r,h)$은 음원 준위(r-측정번호, h=h1, h2, h3-심도)이고 d_{Total}은 선박과 청음기 사이의 거리(m), d_{ref}는 기준거리 1 m이다.

식 (4)로부터 구한 음원 준위는 어느 한 계측에 대해 한 청음기에서 계측한 1/3 옥타브밴드 준위(dB re 1 μPa, 1 m)에 해당한다. 따라서 한 선박의 수중방사소음 계측에서는 좌/우현에 대해 각 3회씩

모두 총 6회의 계측을 수행하고 개별 계측에 대해 각각 3개의 청음기를 사용하므로 모두 18개의 계측 자료를 얻는다. 18개의 음원 준위의 평균을 얻기 위한 첫 번째 단계는 각 계측에서 3개의 청음기(h1, h2, h3)에서 얻는 음원 준위로부터 식 (5)와 같이 음원 준위의 파워 평균(Power average)을 구하는 것이다.

$$L_s(r,h) = 10\log_{10}\left\{(10^{L_s(r,h1)} + 10^{L_s(r,h1)} + 10^{L_s(r,h1)})/3\right\} \tag{5}$$

여기서 $L_s(r)$는 측정번호 “r”에서 3개의 청음기 음원 준위 평균, $L_s(r,h1)$는 측정번호“r”에서 h1 청음기의 음원 준위, $L_s(r,h2)$는 측정번호 “r”에서 h2 청음기의 음원 준위, $L_s(r,h3)$는 측정번호“r”에서 h3 청음기의 음원 준위이다.

최종 음원 준위는 6회에 걸친 계측자료로부터 얻은 평균 음원 준위 식 (5)를 식 (6)과 같이 산술 평균하여 얻는다.

$$L_s = \frac{\sum_{r=1}^{r=K} L_s(r)}{K} \tag{6}$$

여기서 L_s는 K회 측정한 음원 준위의 평균이고 $L_s(r)$은 “r”번째 측정한 3개의 청음기 음원 준위 평균, 식 (5)이며, K는 측정횟수(A급 측정시 K = 6 또는 3, B/C급 측정시 K = 4 또는 2)이다.

L_s는 좌/우현 측정 결과(K=3)를 이용해 좌/우현 준위를 각각 별도로 산출한 후 좌/우현 준위의 평균값을 산출한다.

표 1. 측정등급별 요구조건 요약.[10]

등 급	A	B	C
등급명	정밀측정 방법	공학적 방법	간이 방법
측정 불확도	1.5 dB	3.0 dB	4.0 dB
측정 재현성	±1.0 dB	±2.0 dB	±3.0 dB
대역폭	1/3 옥타브 밴드		
주파수 범위 (1/3옥타브대역)	10Hz～50 kHz	20Hz～25 kHz	50～10 kHz
청음기 수	3	3	1
청음기 구성	그림 10 참조		그림 11 참조
청음기 설치심도	15°, 30°, 45°	15°, 30°, 45°	20° ± 5°
최소 요구수심	300 m 이상 혹은, 3×선박 전장	150 m 이상 혹은, 1.5×선박 전장	75 m이상 혹은, 1×선박 전장
최근접 거리	100 m 이상 혹은, 1×선박 전장		
CPA에서 거리정확도	2%	2%	5%
음향중심위치	음향 CPA기준	엔진실-프로펠러 중간 지점	
Data 윈도우 각 (±CPA)	±30도		
Data 윈도우 거리(m)	관련 식에 의해 결정(그림 13 참조)		
Data 윈도우 시간(s)			
Data 윈도우 평균시간	≤ 1sec	샘플 전 구간	
최소 측정횟수	총 6회 (좌/우현 3회)	총 4회 (좌/우현 2회)	총 4회, 좌/우현 최소 각 1회 포함
해상/기상 조건	풍속 ≦ 20 kts		
이동형 청음기 교정주기	· 1년 주기 실험실 교정 · 측정기간 동안 매일 현장 교정		
고정형 청음기 교정주기	· 설치 전 실험실 교정 · 1년 주기 교정음원을 이용한 교정 · 측정기간 동안 매일 현장 교정		
현장 장비교정	전압인가 교정	전압인가 교정	단일 주파수 교정
보조 측정자료	· 엔진 RPM · 풍속/풍향 · 수직음속구조	· 엔진 RPM · 풍속/풍향	· 엔진 RPM · 풍속/풍향

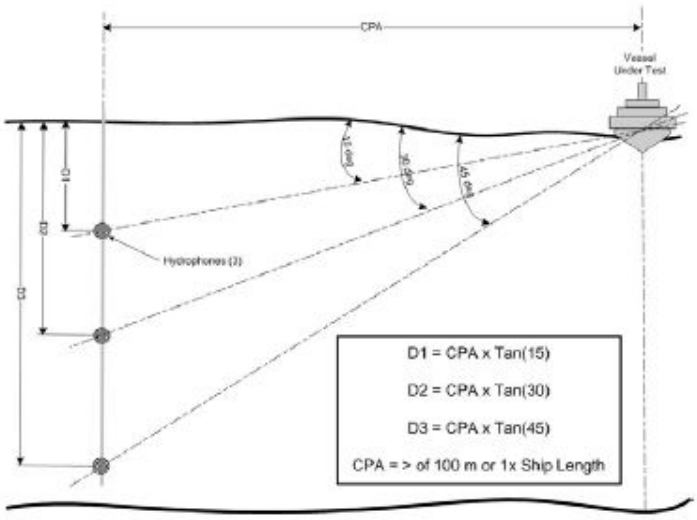


그림 10. 등급 A, B 청음기 설치 위치.[10]

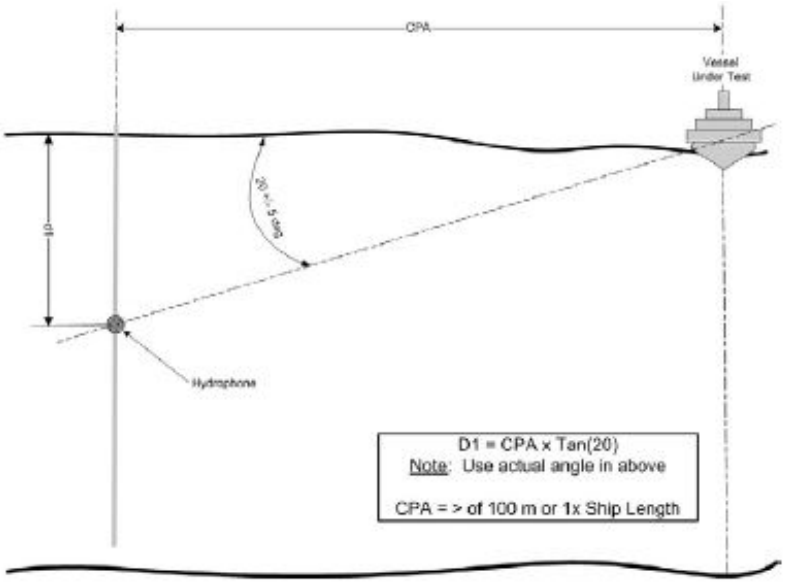
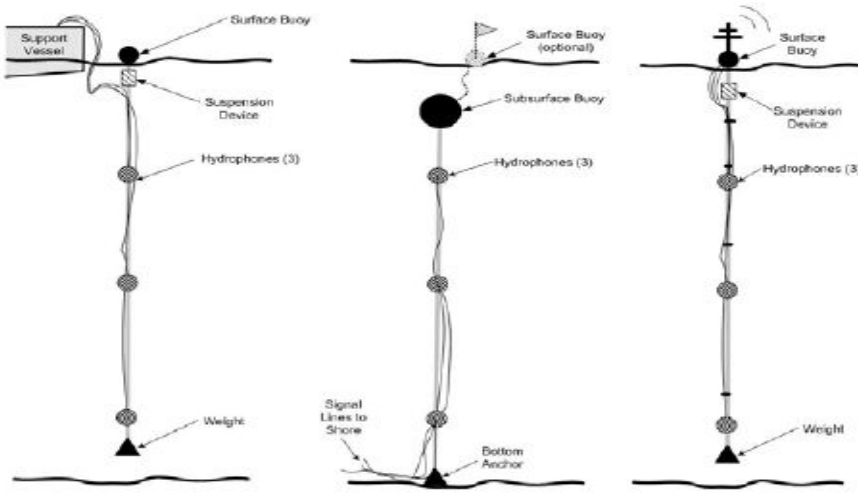


그림 11. 등급 C 청음기 설치 위치.[10]



(a) (b) (c)

그림 12. 청음기 설치 방법, (a) 측정선 유형, (b) 해저 고정형, (c) 부표형.[10]

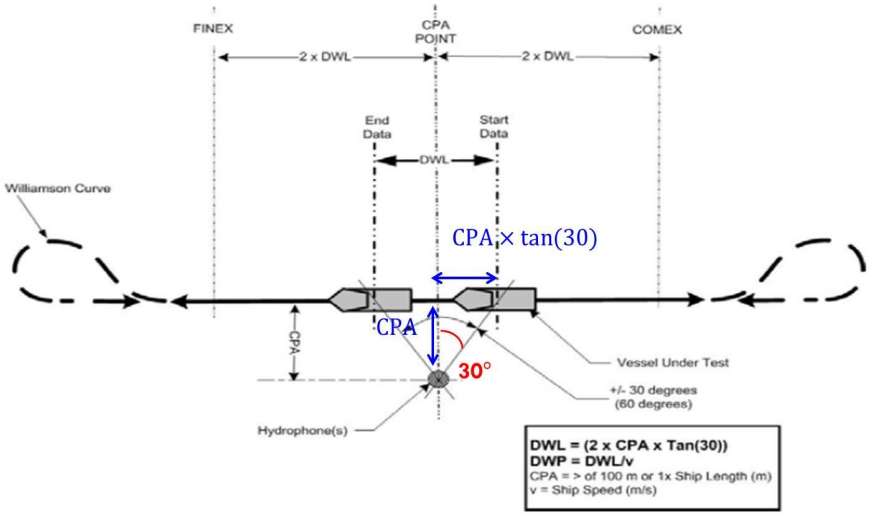


그림 13. 선박 수중방사소음 계측시 선박 기동.[10]

2.2.3. 실험 결과

그림 14는 해상실험의 계측결과의 스펙트로그램이다. 스펙트로그램상 프로펠러 소음이 지배적인 피측정 선박이 프로펠러 캐비테이션 발생 주파수 대역인 50~100Hz 대역에서 최단접근점 통과 전후 비대칭성이 강하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 선박소음의 방향성 요인(Directivity Factor)에 의한 것으로 선체구조상 프로펠러의 위치가 선미에 치우쳐 있기 때문에 프로펠러에서 발생되는 소음이 선수방향으로 전달시 선체(Hull)에 의한 차단 및 회절현상이 나타나기 때문이다.[7, 11, 12]

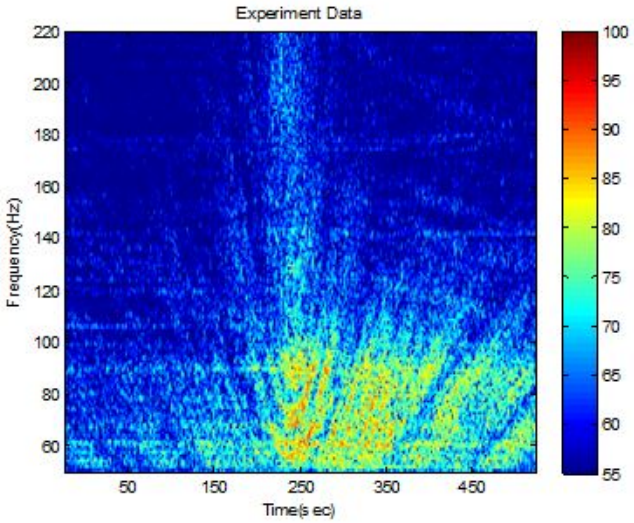


그림 14. 계측결과 스펙트로그램(0905시 심도 80 m)

여기서 음원 준위(SSL, Sound Source Level)와 계측 음압 준위(SPL, Sound Pressure Level), 방향성 요인(Directivity Factor)과의 관계식인 식 (1)을 이용하면 식 (7)으로 방향성 요인$L(\theta)$를 산출할 수 있다.[8]

$$L(\theta) = SPL + 20\log_{10}\frac{R}{R_0} - SSL \tag{7}$$

여기서 음원 준위(SSL)는 계측 음압준위(SPL)에 전달손실(TL)을 보정한 값의 최대값인데, 그 값이 방향성 요인(Directivity Factor)이 0이 되는 값, 즉, 방향성 요인의 영향을 받지 않는 고유의 음원 준위이기 때문이다.

본 연구에서는 방향성이 우세하게 나타나는 50 ~ 100Hz 주파수 대역대의 1/3 옥타브 밴드 신호를 분석하여 그 경향을 살펴보았다. 총 6회의 계측 기동 중 1, 3, 5차 계측은 청음기를 피측정 선박의 좌현에 두고 통과한 경우이며, 2, 4, 6차 계측은 청음기를 우현에 두고 통과한 경우이다. 50~100Hz 주파수 대역의 1/3 옥타브밴드 중심 주파수인 50, 63, 80, 100Hz에서 이상의 산출방법을 통해 방향성 요인을 산출하여, 폴라차트로 도시하면 그림 15과 같이 나타난다.

그림 15의 좌현값(200° ~ 340°)은 청음기를 피측정 선박 좌현에 두고 통과한 1, 3, 5차 계측값 3개의 평균이고, 우현값(20° ~ 160°)은 청음기를 피측정 선박 우현에 두고 통과한 2, 4, 6차 계측값에 대한 평균이다. 좌/우현 값은 비대칭 형상을 보이고 있으나 공통적으로 선수 방향(Bow aspect)에서 정횡 방향(Beam aspect) 및 선미 방향(Stern aspect)보다 방향성 요인(Directivity Factor)의 영향이 큼을

알 수 있다. 다만, 프로펠러는 선체구조상 전후를 기준으로 보면 후미에 위치하지만 좌/우현을 기준으로 보면 중심선상에 위치하기 때문에 좌/우 대칭이 되어야하는데 비대칭으로 나타남을 볼 수 있다.

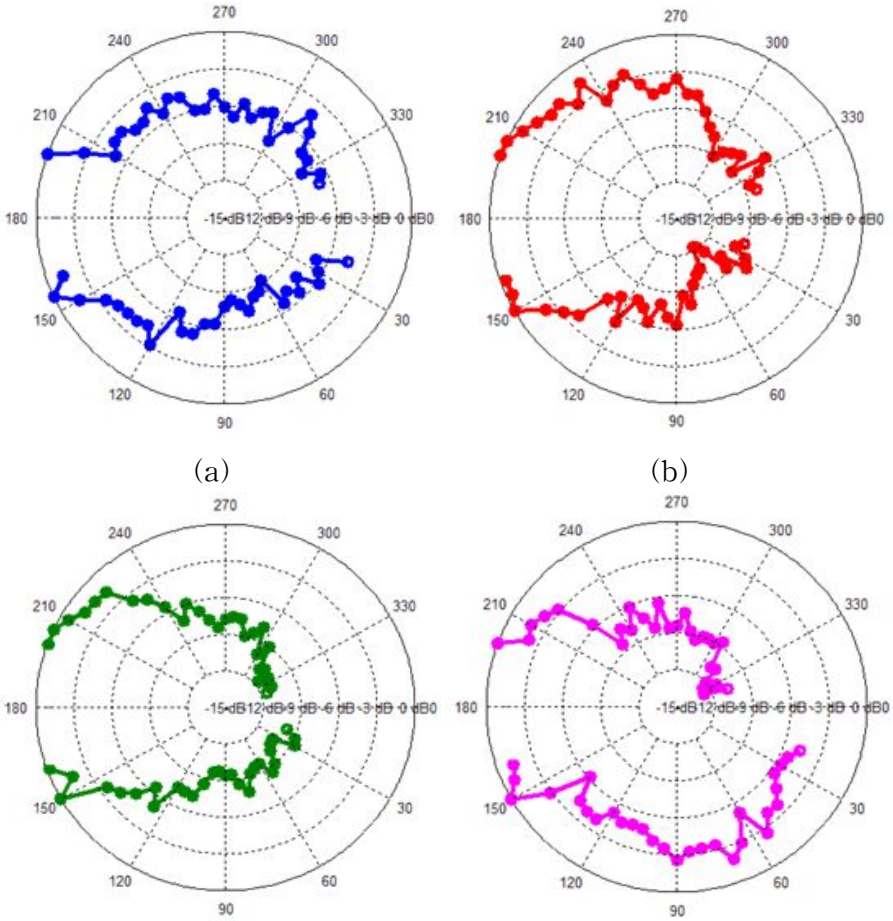


그림 15. 현측별 평균 방향성 요인, (a) 50 Hz, (b) 63 Hz, (c) 80 Hz, (d)100 Hz.

이것은 프로펠러 소음외에 다른 소음원의 영향이 있음을 추정해 볼 수 있다. 프로펠러는 선체의 좌/우현 중앙에 위치하지만 발전기를

비롯한 다른 보조 기기류는 좌/우현 비대칭하게 배치되기 때문이다. 그래서 그러한 소음들의 영향을 배제하고 프로펠러 소음의 방향성 요인(Directivity Factor)의 영향만을 확인하기 위해, ANSI(American National Standards Institute) 표준 계측규정의 자료 처리방법과 마찬가지로 좌/우현 6개 값을 모두 산술평균하여 방향성 요인을 산출한 후 그림 16과 같이 폴라차트로 도시하였다.[10]

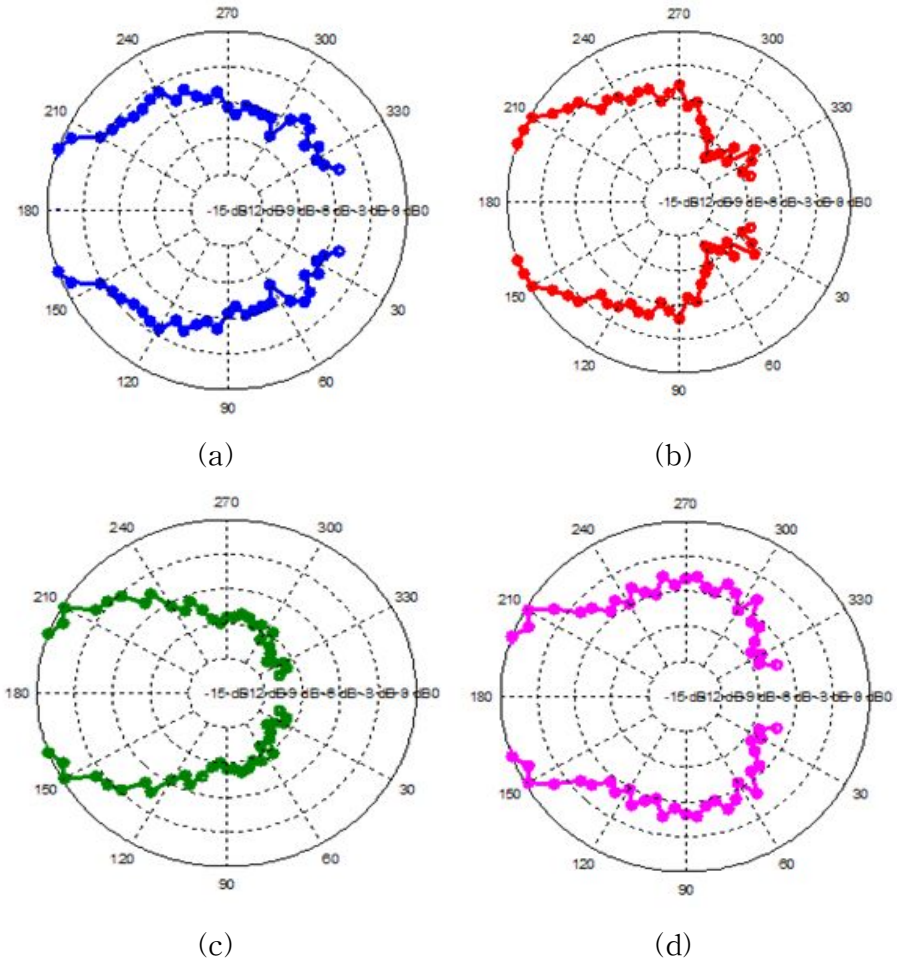


그림 16. 평균 방향성 요인, (a) 50Hz, (b) 63 Hz, (c) 80 Hz, (d) 100 Hz.

3. 선박 소음원 방향성 요인 모의

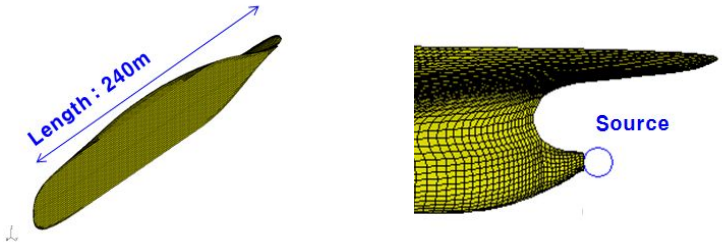
3.1. 음향경계요소법 이용 방향성 요인 산출

선체의 구조적인 형상으로부터 기인하는 방향성 요인을 모의하기 위해 본 연구에서는 경계면 적분을 통해 임의의 위치에서 음장계산이 가능한 음향경계요소법(acoustic boundary element method)을 적용하였다.[13]

3.1.1. 모의 환경

경계요소법(Boundary Element Method)과 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 방사(Radiation), 산란(Scattering) 문제의 예측에 널리 활용되고 있는 상용 소프트웨어인 SYSNOISE를 활용하였다.

이를 위해 그림 17에서 보는 것처럼 피측정 선박과 동일한 크기인 전장 240 m 상선의 프로펠러 위치에 단극자 음원(monopole source)을 위치시키고, 그림 18처럼 음장(field)은 가로, 세로 각 2 km(100개의 요소)의 평면(plane)으로 설정하였다.



(a) (b)

그림 17. 음향경계요소법 모의 선박, (a) 선박 형태, (b) 음원 위치.

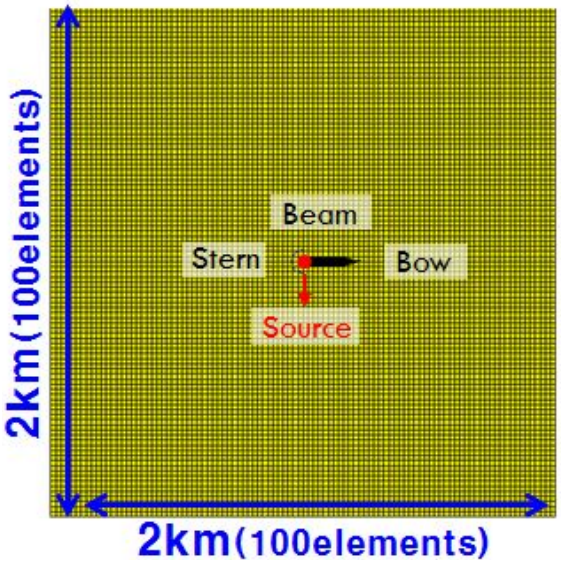


그림 18. 평면 음장.

SYSNOISE를 이용 모의시 위치별 절대적인 음압 준위를 산출하는 것이 아니라 상대적인 음압의 분포를 보기 위함이므로 진폭(Amplitude)은 100 Pa로 설정하였고, 주파수 영역에서의 모의결과를 그림 19와 같이 스펙트로그램으로 도시하였다.

선미 프로펠러에 위치한 음원의 선체(hull)에 따른 음압 분포는 주파수별로 정도의 차이는 있지만 선수쪽(Bow aspect)으로 갈수록 간섭 및 감쇠가 강하게 나타나며 좌/우현 대칭을 보임을 확인할 수 있다.

3.1.2. 모의 결과

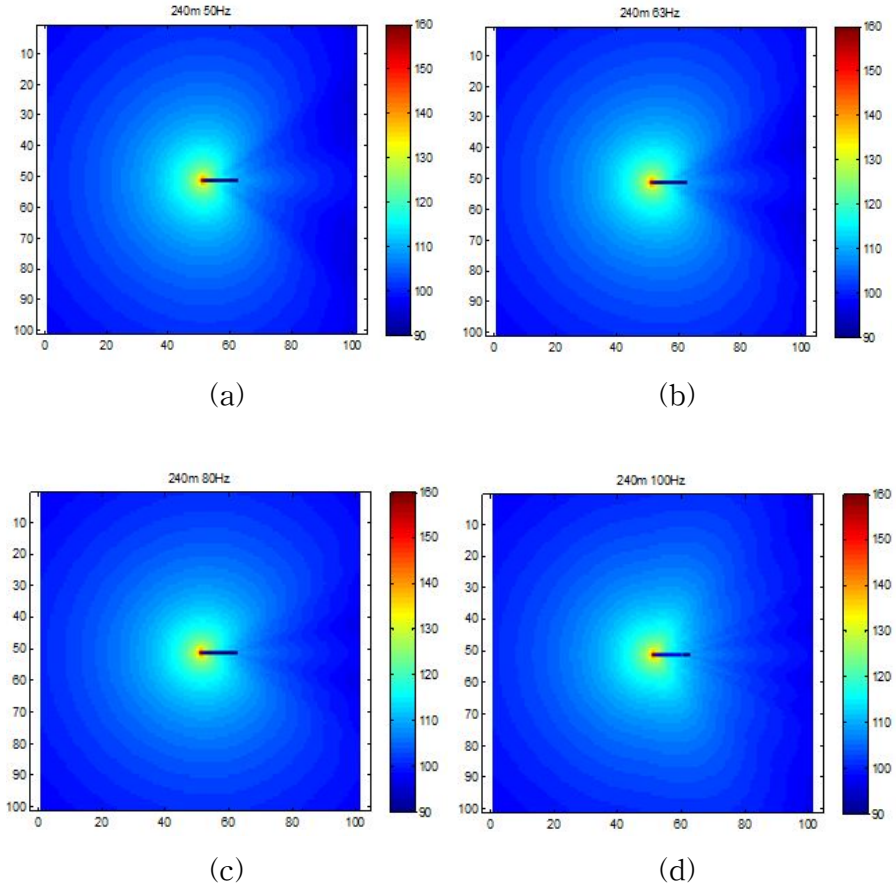
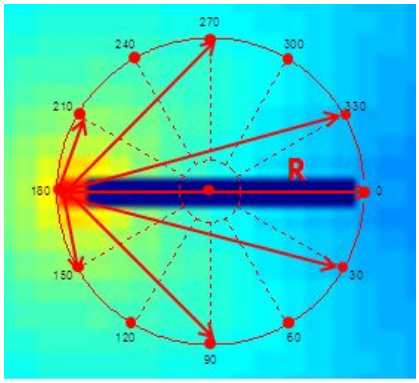


그림 19. 음향경계요소법 모의 결과 스펙트로그램, (a) 50Hz, (b) 63 Hz, (c) 80 Hz, (d) 100 Hz.

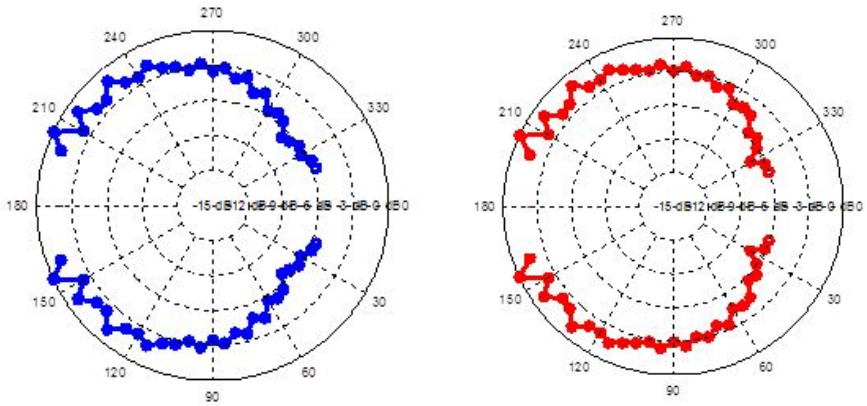
여기서 식 (7)을 이용한 방향성 요인을 산출을 위해 거리에 의한 전달 손실을 보정하는데 그림 20에서처럼 선박의 중심을 기준으로 동심원을 그려 선미 프로펠러 위치로부터의 거리를 이용하여 전달 손실을 구하였다.



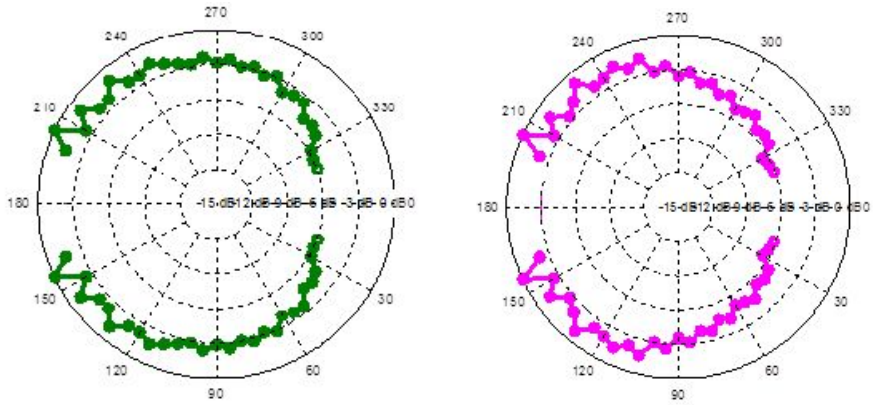
$$TL = 20\log_{10} R$$

그림 20. 전달손실 보정을 위한 기준 위치

이렇게 산출한 방향성 요인(Directivity Factor)결과를 그림 21과 같이 폴라차트로 도시하였다. 주파수 별로 차이는 있지만 선수 방향(Bow aspect)이 정횡 방향(Beam aspect) 및 선미 방향(Stern aspect)보다 감쇠폭이 큰 것을 볼 수 있으며, 좌/우현 기준 정 중앙에 위치한 단극자 소음원에 대한 모의 결과로 산출하였으므로 좌/우현 대칭이다.



(a) (b)



(c) (d)

그림 21. 음향경계요소법 이용 산출 방향성 요인, (a) 50Hz, (b) 63 Hz, (c) 80 Hz, (d) 100 Hz.

음향경계요소법으로 산출한 방향성 요인은 선미에 위치한 프로펠러 소음원이 방사 시에 선체(hull)에 의한 차단과 회절만 반영된 것으로 선체 구조에 의한 선박 고유의 방향성 요인이라고 할 수 있다. 이를 그림 16의 해상실험 계측결과로 산출한 방향성 요인과 비교해 보면 전반적인 경향은 유사하나 계측결과로 산출한 방향성요인이 보다 변동이 심함을 확인할 수 있다.

ANSI(American National Standards Institute) 표준 계측 규정은 심도가 다른 다수의 청음기를 이용하여 동시에 계측한 값을 평균함으로써 해수면의 반사파 간섭현상(Loyd's mirror effect)에 의한 음압 변동을 최소화 하였는데, 명시된 최소 수심 규정(수심 300 m 또는 선박 전장의 3배) 준수시 해저면 반사(bottom reflection)에 의한 영향은 없는 것으로 보고 배제하였다.[10]

그러나 선박의 수중방사소음 계측시 해역 수심이 100 m로 ANSI

표준 계측규정의 최소 수심 규정을 미준수하여 해저면에 의한 반사 효과를 충분히 감소시켜주지 못했기 때문이다.

여기서 피측정 선박 고유의 방향성 요인이라고 할 수 있는 음향경계요소법 이용 산출 방향성 요인은 좌/우 대칭이므로 한쪽 현측 값을 기준으로 그림 23과 같이 선박과 청음기간의 선수각(AOB, Angle Of Bow)에 따라 도시해 볼 수 있다. 그리고 전반적인 경향을 따라 커브피팅(Curve Fitting)을 하여 식 (8)과 같이 평균적인 추세식을 구할 수 있다.

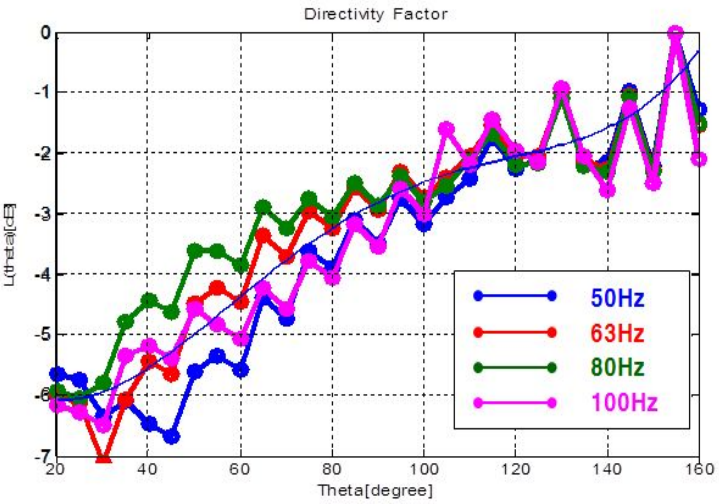


그림 22. 음향경계요소법 이용 산출 방향성 요인 추세식.

$$L(\theta) = (9.4862e-08)\theta^4 + (-3.3557e-05)\theta^3 + (0.0039068)\theta^2 - 0.12625\theta - 4.8749[dB] \quad (8)$$

3.2. 선박소음원 방향성 모의 및 실험결과와 비교

3.2.1. 모의 환경

모의환경은 실제 계측이 이루어졌던 환경과 유사하게 소음원인 선박과 수신기의 수심은 100 m, 해저면은 실트성 저질의 특성대로 밀도는 1.7 g/㎤, 음속은 1,575 m/s 로 설정하였다. 소음원의 심도는 10 m, 수신기는 청음기의 심도인 20 m, 50 m, 80 m 로 설정하였다. (그림 23.). 수온음속정보는 실험당시 측정한 음속 정보를 사용하였다.(그림 7.)

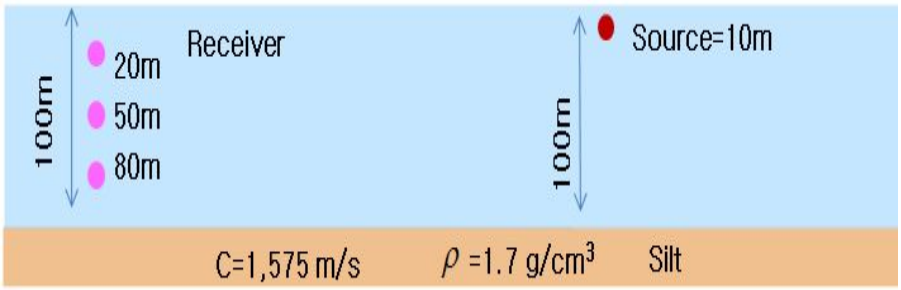


그림 23 모의 환경

실험기간 중 기동 및 계측은 좌/우현 각 3 회 등 총 6 회 이루어졌는데, 0900 시부터 0910 시까지 실시한 1 차 계측을 모의하였다. 실험 계획 당시 기본 속력은 15 kts, 최단접근점 거리는 300 m 였으나 해상상황 고려 1 차 계측 시에는 그림 25 와 같이 속력은 13.5 kts 로 기동하였으며, 수신기와의 최단접근점 거리는 154 m 를 유지하였습니다.

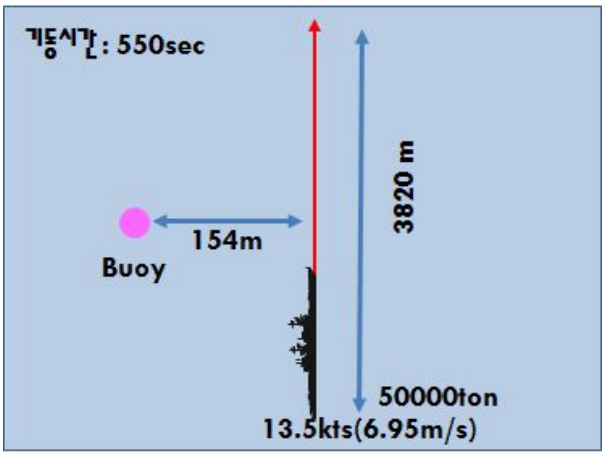


그림 24. 1차 계측 기동요도(개념도)

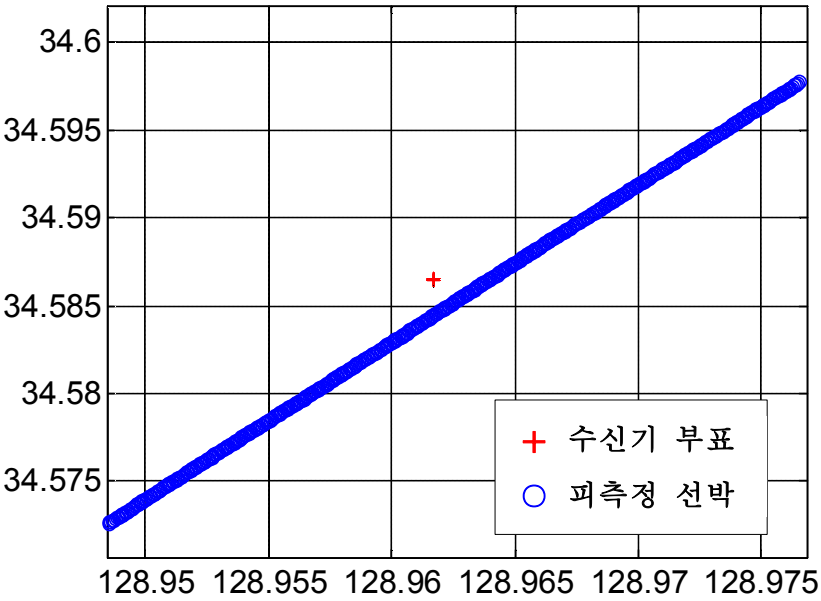
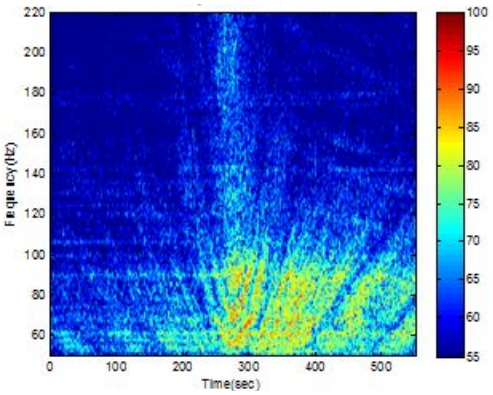


그림 25. 1차 계측 기동요도(GPS 실측위치)

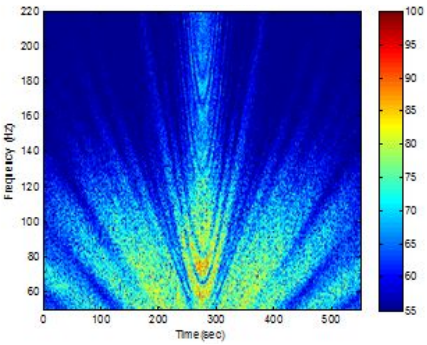
또한 음향경계요소법을 이용하여 산출한 방향성 요인의 적용결과를 비교 검증하기 위해 다른 환경조건 및 기동은 동일하게 하고 선박 소음원의 방향성 요인만 적용 및 미적용하고 모의를 하여 결과를 산출하였다.

3.2.2. 모의결과

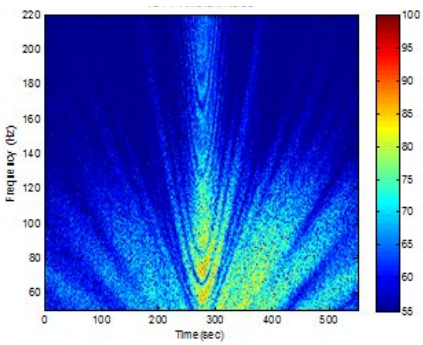
모의결과를 주파수영역 스펙트로그램으로 도시해 보면 그림 26, 27, 28 에서처럼 시간의 경과에 따라 선박이 일정한 속력으로 기동하여 수신기에 근접할 때 수신 준위가 강하게 나타나고, 수신기 최단접근점 통과 후 멀어질 때 소음 준위가 강하게 나타나고 음선간섭패턴 또한 U 자 패턴(Bathtub)으로 계측 결과와 비슷하게 나옴을 확인할 수 있다.[7] 또한 방향성요인을 적용하지 않았을 때는 수신기 최단접근점 통과 전과 후가 수신준위가 거의 비슷하게 나오는 등 계측결과와는 다르게 대칭형태의 패턴이 나온다. 그러나 음향경계요소법으로 산출한 방향성 요인을 소음원에 적용하여 모의한 결과를 보면 계측결과와 마찬가지로 수신기 최단접근점 통과시점을 기준으로 전보다 후에 수신준위가 강하게 나타나는 비대칭 패턴이 뚜렷이 나타난다. 즉 방향성 요인을 적용할 경우 보다 실제와 계측결과와 유사한 경향이 나타나는 것이다.



(a)

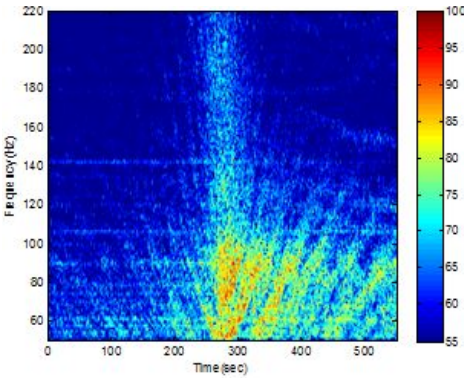


(b)

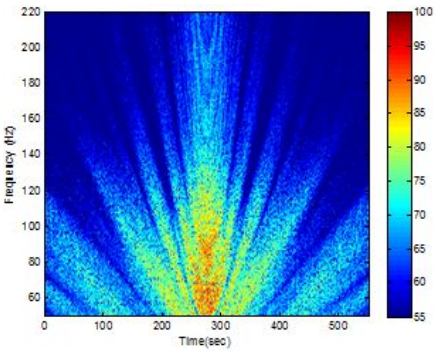


(c)

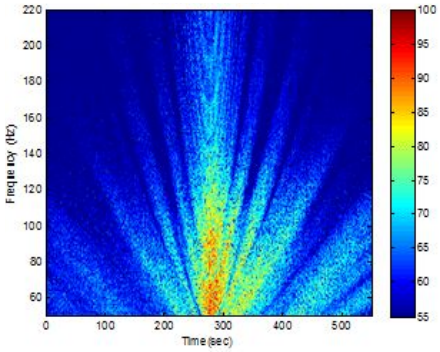
그림 26. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 20 m 청음기), (a) 계측 결과, (b) 방향성 요인 미적용 모의, (c) 방향성 요인 적용 모의



(a)

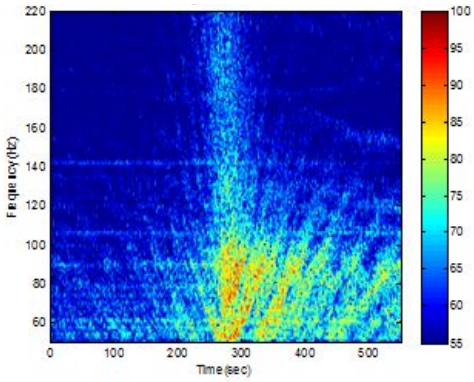


(b)

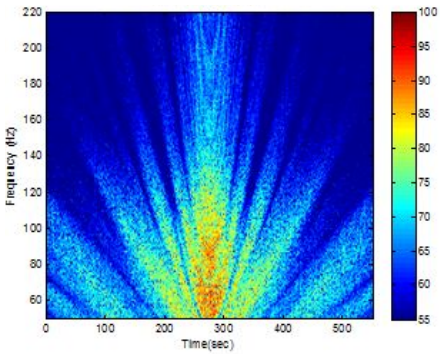


(c)

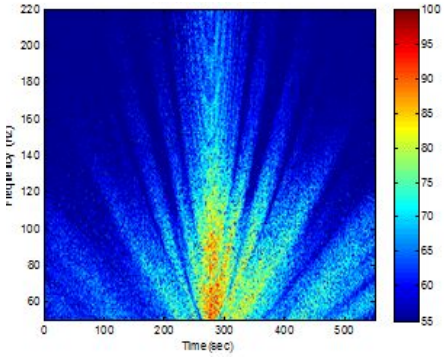
그림 27. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 50 m 청음기), (a) 계측 결과, (b) 방향성 요인 미적용 모의, (c) 방향성 요인 적용 모의



(a)



(b)



(c)

그림 28. 계측 결과 및 모의 결과 스펙트로그램(심도 80 m 청음기), (a) 계측 결과, (b) 방향성 요인 미적용 모의, (c) 방향성 요인 적용 모의

4. 결 론

본 연구에서는 잠수함 수동소나에 수신되는 실제와 유사한 신호를 모의하기 위해 선박 소음원이 가지는 방향성 요인의 특성을 분석하고 모의하였다. 해상에서 선박의 기동에 따른 방사소음 계측결과를 보면 선박이 일정한 침로와 속력으로 기동시 수신기의 최단접근점 통과 전후를 기준으로 추진기 공동소음 주파수 대역에서 수신 준위가 비대칭성을 보임을 발견할 수 있다. 해상 실선 계측결과를 통해 방향성 요인(Directivity Factor)을 산출하여 그 경향을 분석하면 선수와 수신기가 이루는 선수각(AOB, Angle Of Bow)에 따른 경향을 확인할 수 있다. 음향경계요소법(BEM, Boundary Element Method)을 이용하여 선체의 구적적인 특성과 소음원의 위치에서 기인하는 선박 소음원 고유의 방향성 요인을 산출하여 계측결과를 통해 산출한 방향성 요인과 그 유사성을 확인할 수 있다. 이것은 지배적인 선박 방사소음인 프로펠러 소음이 선체구조상 선미 쪽에 치우쳐 있어 소음의 선수방향 전달시 일어나는 선체에 의한 차단 및 회절 현상에 의한 것이다.

그리고 음향경계요소법을 이용하여 도출한 선박 고유의 방향성 요인을 잠수함 수동소나 시뮬레이터의 선박 소음원 알고리듬에 추가하였다. 그리고 이것을 해상 계측 실험 결과와 동일한 상황으로 모의한 후 비교하여 방향성 요인 적용하였을 때 보다 실제와 유사한

신호를 모의 할 수 있음을 확인하였다. 이처럼 알고리듬의 개선을 통해 보다 실제와 유사한 정보를 제공하는 잠수함 소나 시뮬레이터를 활용함으로써 잠수함 승조원들의 실전적인 훈련과 임무능력향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] W. J. Seong, “A study on technical concept of sonar system equipped next-generation submarine,” R.O.K Naval combat development group report (2008).

[2] S. K. An, Development of a passive sonar simulator based on ray model, (Master’s thesis, Seoul National University, 2011).

[3] B. U. Kim, Noise simulation and interference pattern analysis for submarine passive sonar, (Master’s thesis, Seoul National University, 2013).

[4] B. U. Kim, S. K. An, K. Lee, W. Seong and J. Y. Hahn, “Interference pattern analysis of the radiated noise in submarine passive sonar,” Journal of the KIMST, 16, 456-464 (2013).

[5] Y. C. Jung, B. U. Kim, S. K. An, W. Seong, K. Lee and J. Y. Hahn, “An algorithm for submarine passive sonar simulator,” (in Korean) J. Acoust. Soc. Kr. 32, 472-483 (2013).

[6] Y. C. Jung, A Studiy on Underwater Transient Noise for Passive Sonar Simulstor, (Master’s thesis, Seoul National University, 2014).

[7] McKenna, Megan F., et al. “Underwater radiated noise from modern commercial ships,” The Journal of the Acoustical Society of America 131.1 (2012): 92-103.

[8] Sasajima, T., N. Nakamura, and A. Oshima, “Model and Full Scale Measurements of Propeller Cavitation Noise on an Oceanographic Research Ship with Two Different Types of Screw Propeller,” Shipboard Acoustics. Springer Netherlands, 1986. 63-74.

[9] S. Jebson, “Fact sheet number 6: The beaufort scale,” (2007).

[10] ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1, *American National Standard Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships- Part 1: General Requirements,* Introduction (American National Standards Institute, New York).

[11] Trevorrow, Mark V., Boris Vasiliev, and Svein Vagle., “Directionality and maneuvering effects on a surface ship underwater acoustic signature,” The Journal of the Acoustical Society of America 124.2 (2008): 767-778.

[12] Arveson, Paul T., and David J. Vendittis. “Radiated noise characteristics of a modern cargo ship,” The Journal of the Acoustical Society of America 107.1 (2000): 118-129.

[13] Wu, *Boundary Element Acoustics* (WIT Press, Southampton, 2000).

Abstract

A Study on Vessel Noise Directivity Factor for Passive Sonar Simulator

Min-Gyu, Kim

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Passive sonar is a representative equipment to navigate and attack in submarine operation. The sonar simulator is a computational algorithm for modeling a signal similar to the signal that is detected by sonar in a real battlefield environment.

The purpose of this study is to increase the similarity of actual submarine sonar operating in the sea by improving the simulator with directivity factor of underwater radiation noise.

The directivity factor of the vessel calculated from boundary element method to be applied on the existing noise generation algorithm of the sonar simulator. In addition, the results were verified by comparing the frequency domain noise signal spectrograms of simulation and experiments conducted at sea. The effectiveness of this study can be maximized by utilizing it results in simulator system to train passive submarine crew without leaving shore.

keyword : Submarine, Passive sonar, Directivity factor, Boundary element method
student number : 2013-22547