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 소음원 모의 및 간섭패턴 분석

Noise Simulation and Interference Pattern Analysis for Submarine Passive Sonar

2013년 2월

서울대학교 대학원

산업·조선공학부

김 병 욱

수동소나 시뮬레이터 소음원 모의 및 간섭패턴 분석

Noise Simulation and Interference Pattern Analysis for Submarine Passive Sonar

지도교수 성 우 제

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 병 욱

김병욱의 공학석사 학위논문을 인준함

2012년 12월

위 원 장 _____ 인

부위원장 _____ 인

위 원 _____ 인

국 문 초 록

잠수함에서 적 수상함이나 잠수함을 원거리에서 탐지하고 공격까지 수행하기 위한 장비로 수동소나를 들 수 있다. 수동소나에 수신되는 소음원은 적 수상함이나 잠수함의 방사소음과 해양환경의 변화에 따른 해양배경소음, 잠수함의 속력에 따라 잠수함 선체를 흐르면서 소나에 수신되는 자체소음 등이 있다. 국내의 기존 잠수함 시뮬레이터들은 이런 소음원들을 모의하기 위하여 아주 간단한 알고리듬을 사용하거나 실제원음을 불러오는 방식으로 모의를 하였다. 그러나 이러한 방식은 실제 해양에서 환경과 기동시나리오에 따라 수신음의 레벨과 패턴이 다르게 나타날 수 있는 점을 간과하고 있다. 본 논문에서는 각 소음원들을 실제와 가깝게 모의할 수 있도록 알고리듬을 제시하며, 그러한 소음원들이 전달모델을 통해 잠수함에 전달되는 과정을 모의하여 실제와 가까운 소음원을 모의하는데 중점을 두었다. 이렇게 함으로써 잠수함 수동소나에 소음원 알고리듬을 적용하여 잠수함 승조원들이 평시에 시뮬레이터를 통하여 실제와 가까운 해양환경에서 잠수함 시뮬레이션이 가능하게 함으로써 잠수함 승조원들의 훈련효과를 극대화하는데 도움이 되리라 본다.

주요어 : 수동 소나 시뮬레이터, 방사소음 모델, 해양배경소음 모델, 자체소음 모델, 음선모델

학번 : 2011-22952

목 차

국문초록 i

그림목차 iv

표 목차 vii

1. 서론 1

1.1 연구 배경 및 현황 1

1.2 연구 개요 2

2. 소나 시뮬레이터 소음원 모의 및 검증 4

2.1. 수동 소나 모델링 5

2.2. 선박 프로펠러 소음 모델링 6

2.3. 선박 방사소음준위 모델링 10

2.4. 잠수함 자체 소음원 모델링 16

2.5. 해양 배경소음원 모델링 26

3. 소음원 전달모델 및 좌표계 설정 34

3.1. 소음원 전달 모델 35

3.2. 시뮬레이션 좌표계 35

3.2.1. 3차원 기동에 따른 도플러효과 산출 35

3.2.2. 변침과 변침율 적용 40

3.2.3 자함중심 좌표계 43

4. 해양환경과 기동시나리오에 따른 간섭패턴 분석 ···· 44

5. 소나 위치별 수신신호 근사 ····· 48

6. 결론 ····· 61

참고문헌 ····· 63

Abstract ····· 72

그림 목차

그림 1. 프로펠러 소음원 ····· 7
그림 2. 실제 프로펠러 소음 및 발생원인 ····· 8
그림 3. 프로펠러 변조신호 예 ····· 9
그림 4. 프로펠러 소음원 모의 과정 ····· 9
그림 5. BLADE에 따른 변조신호 모의 ····· 10
그림 6. 선박의 RPM에 따른 방사소음 레벨 ····· 11
그림 7. 선박의 배수톤수와 속력 증가에 따른 레벨 비교 ····· 12
그림 8. P. Scrimger 와 R.M. Heitmeyer의 선박소음 측정해역 ····· 13
그림 9. P. Scrimger 와 R.M. Heitmeyer의 선박소음 측정 및 Ross 식 비교 결과 ····· 14
그림 10. 2차 대전 영국 순양함 HMS 카디프 방사소음 측정 및 모의결과 비교 ····· 14
그림 11. 속력에 따른 선박방사소음 모의결과(주파수 영역) ····· 15
그림 12. 속력에 따른 선박방사소음 모의결과(시간-주파수 영역) · 15
그림 13. 잠수함 함수소나 주위의 유체소음 ····· 16
그림 14. Skudrzyk 유체소음 측정시험 ····· 17
그림 15. Skudrzyk의 경험식에 의한 유체소음 모델 ····· 18
그림 16. 유체소음의 소나 전달과정 도식 ····· 19
그림 17. CRC-19 폴리우레탄 투과손실 측정값, 경험식, 수치계산식 비교결과 ····· 22
그림 18. GRP 물리적 특성을 고려한 투과손실(주파수영역) ····· 23
그림 19. 유체소음의 투과손실 고려시와 미고려시의 차이비교 ····· 24
그림 20. 자체소음 시뮬레이션 시나리오, (a) 해양환경, (b) 기동 시

나리오 ····· 24
그림 21. 시나리오 기반 시뮬레이션 결과 ····· 25
그림 22. wenz 곡선(해양배경소음) ····· 27
그림 23. wind 소음 모의환경 ····· 28
그림 24. 시계열신호 근사결과(Varying-Sound speed) ····· 29
그림 25. wind 소음 모의 최대거리 수렴도 테스트 ····· 30
그림 26. wind 소음 거리간격 수렴도 테스트 ····· 31
그림 27. 해양배경소음 모의 시나리오 ····· 32
그림 28. wind 소음 방향성 모의 결과 ····· 32
그림 29. 해양배경소음 모의 결과 ····· 33
그림 30. 소음 전달 모델 개념도 ····· 34
그림 31. 잠수함 3차원 기동 ····· 36
그림 32. 잠수함과 수상함의 3차원 기동 ····· 37
그림 33. 3차원 기동에 따른 도플러 효과 확인 ····· 40
그림 34. 함정 변침 적용에 따른 스펙트럼 구조 변화 ····· 41
그림 35. 함정의 변침률에 따른 변침 이동거리 변화 ····· 41
그림 36. 함정의 변침속력에 따른 선회경 변화 ····· 42
그림 37. 함정의 변침률에 따른 변침 이동거리 변화 ····· 42
그림 38. 자함중심에 따른 상대적인 적함 운동 ····· 43
그림 39. 해양에서 일반적인 음선 간섭패턴 ····· 44
그림 40. 음선 출력형태 정확도 분석 시나리오 ····· 45
그림 41. 음선 출력형태 정확도 시뮬레이션 결과 ····· 46
그림 42. 천해 여름과 겨울 음속구조 및 해양환경 시나리오, 전달손실 ····· 47
그림 43. 천해 여름철의 음선 간섭패턴 ····· 47

그림 44. 천해 겨울철의 음선 간섭패턴 ····· 48
그림 45. 심해 여름과 겨울 음속구조 및 해양환경 시나리오, 전달손실 ····· 48
그림 46. 심해 여름철의 음선 간섭패턴 ····· 47
그림 47. 심해 겨울철의 음선 간섭패턴 ····· 47
그림 48. 산타 바바라 해협의 선박 방사소음 측정실험 ····· 50
그림 49. 산타 바바라 해협의 측정된 선박 방사소음레벨 ····· 51
그림 50. 잠수함에 부착된 대표적인 수동소나 종류 ····· 52
그림 51. 국가별 잠수함 크기 비교 ····· 53
그림 52. 잠수함 수신신호 근사 ····· 53
그림 53. 잠수함 소나 위치에 따른 수신신호 ····· 54
그림 54. 시뮬레이터 전달손실과 Lloyd Mirror pattern 비교 (Iso-Sound speed) ····· 56
그림 55. 음원과 수신기 거리에 따른 수신신호 근사 정확도 (Iso-Sound speed) ····· 56
그림 56. 음원과 수신기 거리에 따른 수신신호 근사 정확도 (Varying-Sound speed) ····· 57
그림 57. 시계열신호 근사 시나리오(Varying-Sound speed) ····· 58
그림 58. 시계열신호 근사결과(Varying-Sound speed) ····· 60

표 목차

표 1. 수동 소나 시뮬레이터 입력 변수 ····· 6
표 2. 선박 소음원 분류 ····· 7
표 3. GRP의 물리적 특성 ····· 23
표 4. 음선 출력형태 정확도 분석 결과 ····· 46

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 현황

잠수함 수동소나는 잠수함에서 표적의 최초탐지와 공격에 필수적인 중요한 장비이다. 이러한 수동소나에 수신되는 다양한 소음원을 모의함으로써 평시에 소나 운용요원들이 해상이 아닌 육상에서 실제와 가까운 훈련을 할 수 있도록 구현해주는 시스템이 잠수함 수동소나 시뮬레이터이다. 2차 대전시 독일에 의한 유보트 전술이 연합군 수상함정에겐 아주 큰 위협이었다. 이후 잠수함을 탐지 및 공격하기 위해 소나시스템이 많이 개발되었지만 잠수함 역시 수중에서 효과적으로 수상함을 탐지하고 공격하기 위한 방법이 많이 강구되었다. 그중에 하나가 잠수함 수동소나 시뮬레이터이다. 굳이 해상에 나가지 않고도 육상에서 효율적으로 잠수함 소나 운용요원을 훈련시킬 수 있는 장비이기 때문이다. 이러한 수동소나 시뮬레이터에 적용되는 소음원 알고리듬은 아주 오래전부터 연구가 많이 되어왔다. 그러나 대부분 알고리듬을 간략히 모의하여 시뮬레이션 속도측면을 중시하였고 모의가 힘든 부분은 실제원음을 사용하여 모의하고 있다. 그러나 이런 방법은 실제 해양환경과 기동시나리오, 전달과정에 따라 차이가 생길 수밖에 없어서 실제에 가까운 훈련모의가 제한될 수밖에 없다.[9]

본 논문에서는 표적 방사소음, 해양배경소음, 자체소음을 실제와 가깝게 모의하기 위한 알고리듬을 제시하고 음선모델을 통한 전달과정을 고려하여 수동소나에 수신되기까지의 과정을 모의하여 실제와 가까운 잠수함 수신신호를 모의할 수 있는 알고리듬을 제안하였다.

1.2. 연구 개요

안00 등은 수동소나 시뮬레이터에 수신되는 소음원을 모의하기 위하여 표적소음만을 모의하였다.[10] 그러나 수중에서 활동하는 잠수함 수동소나에는 이러한 표적소음 수신을 방해하는 다른 소음원들이 존재한다. 그러한 소음원에는 해양배경소음과 자체소음이 있을 수 있다. 본 논문에서는 안00 등이 제시한 표적소음 모의 방법을 프로펠러의 BR과 PSR에 따라 진폭 변조된 속력의존적인 표적방사소음 모델을 위한 알고리듬을 제시하였다. 또한 잠수함 수동소나 수신 주파수대역에 주요한 바람에 따른 해면파에 의한 해양배경소음 모델을 제안하였다. 그리고 잠수함이 수중에서 활동하면서 속력에 의해 선체를 따라 흐르는 유체소음에 의한 자체소음 모델 알고리듬을 제안하였다. 또한 이러한 소음원의 효과적인 전달과정을 모의하기 위해 전달모델 및 잠수함 좌표계를 제안하고 일련의 해양환경과 기동시나리오에 따른 시뮬레이션을 통해 나타날 수 있는 간섭패턴의 종류를 분석하였다. 마지막으로 함수 수동소나에 수신되는 소음원을 이용하여 다른 위치에 설치된 소나에 수신되는 소음원을 모의하기 위한 알고리듬 제시 및 검증을 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다.

1장에서는 본 연구의 배경 및 개요, 논문의 구성에 대하여 설명하였다. 2장 소나시뮬레이터 소음원 모의 및 검증에서는 잠수함에 수신 가능한 표적방사소음, 해양배경소음, 자체소음의 모델에 대해 기술하였으며 3장 소음원 전달모델 및 좌표계 모의에서는 소음원이 잠수함에 전달되기까지의 전달모델 및 잠수함 기동에 적합한 좌표계 모델에 대해 기술하였다. 4장 해양환경과 기동시나리오에 따른 간섭

패턴 분석에서는 심해와 천해의 여름과 겨울의 해양환경을 모의하고 표적과 잠수함의 기동시나리오에 따라 나타나는 주요한 간섭패턴 경향을 분석하였다. 5장 소나위치별 수신신호 근사에서는 방수소나에서 수신되는 소음원을 이용하여 특정 알고리듬을 통해 다른 위치에 설치된 소나에 수신되는 소음원 패턴을 근사하여 모의하기 위한 알고리듬을 제시 및 검증하였다. 마지막으로 6장에서는 논문을 요약하고 추후 기대되는 효과를 기술하였다.

2. 소나 시뮬레이터 소음원 모의 및 검증

소나 시뮬레이터란 실제 전장 환경에서 소나에 탐지되는 신호와 동일한 신호를 생성하여 평시에 잠수함 승조원으로 하여금 실전과 가까운 훈련을 제공하는 장비이다.[9] 따라서 선박소음, 해양소음, 자체소음 등 여러 가지 소음원이 해양환경에서 자함의 소나에 수신되었을 때 신호를 모의하는 것이 최종 목표이며, 실제와 가까운 신호를 모의할수록 훈련의 효과는 높아진다.[10]

현재 까지 진행된 시뮬레이터 개발을 위한 연구들은 소음원에서 방사된 소음들을 소음 신호의 특성과 발생 원인에 따라 간략히 모의하는 것을 중점으로 두고 있다. 또한 모의가 힘든 부분은 실제원음을 활용하여 훈련에 이용하고 있다. 소음원에서 방사된 소음이 해양 환경 속에서 전달경로를 거쳐 소나에 수신 될 때까지의 과정은 간략화 하거나 생략되어 있는 실정이다. 소음원이 전달되는 과정은 간략하게 근사하여 모의하거나 생략함으로써 실제 소나에서 수신되는 신호와 차이가 생길 수 있다.[22, 46] 실제로 해양환경에 따라 소음이 전달되는 경로는 많은 차이가 발생할 수 있으며, 해양환경에 따른 전달 과정을 고려하지 않는다면 실제 신호와 차이로 인해 훈련의 효과도 낮아질 수 있다.[42] 본 논문에서는 발생 원리에 근거하여 함정 방사소음, 해양배경소음, 잠수함 자체소음을 모의하고 모의된 소음원에 음선모델을 적용하여 소음원이 자함의 소나에 수신되었을 때의 각 고유음선의 진폭, 위상, 시간지연을 계산하였다. 고유음선 마다 계산된 진폭, 위상, 시간지연을 합산하여 특정 시간에서 전달함수를 설계하고, 각 시간마다 전달함수를 설계하여 스펙트럼으로 수신신호를 전시하고, 시간영역으로 변환하여 실제 수신신호를 모의하였다.

2.1. 수동 소나 모델링

안00 등은 수동소나 신호 모델링을 위해 표적소음 모델 및 전달함수 모델을 제안하였다.[10] 그러나 잠수함에 수신되는 소음원은 표적소음 외에 해양배경소음 및 잠수함 자체소음 등 다양하게 존재한다.[82] 수동 소나 신호 모델링을 위해 표적소음을 프로펠러 진폭변조 신호모의를 중점으로 연구하고 해양 배경 소음원, 자체소음원을 모델링하였다. 이러한 소음원 모델에 전달함수 모델을 적용하면 최종적인 소나 수신신호를 생성 할 수 있다.[10]

시뮬레이션을 수행하기 위해서 입력변수들을 설정하게 되는데, 표 1과 같이 크게 3가지의 모델로 나누어 입력 변수 값을 입력한다. 기동모델에서 자함/적함의 초기 위치와 침로 및 속도, 기동시간을 입력 해주면 자함과 적함의 시간에 따른 거리를 계산하여 음선모델 적용시 입력변수로 사용하게 되고, 시간에 따른 자함과 적함간의 상대각을 계산하여 도플러효과를 고려하게 된다. 소음원 모델에서는 함형별 특성(톤수, 속력), 해상상태(바람속력), 자함 속력 변화 등에 따라 사용자가 입력하여 다양한 소음원을 만들어 내게 된다. 최종적으로 이러한 소음원이 전달모델을 통해 잠수함 수동소나에 수신되는 소음 간섭패턴을 모의하게 된다.

표 1. 수동 소나 시뮬레이터 입력 변수

모 델	내 용	변수 값	비 고
기동모델	자함/적함 초기위치	r_position_x0,y0 s_positoin_x0,y0	
	자함/적함 침로 및 속도	r_speed / course s_speed / course	자함/적함 위치, 거리, 상대각 산출
소음모델	표적 소음원	협대역, 광대역 변조 /비변조 신호, 진폭변조된 프로펠러 소음	
	해양 배경 소음원	wind 소음	
	자체 소음원	유체 소음	
전달모델	Source/receiver depth	Source/receiver depth	
	해양환경(음속,감쇠비, 바닥음속, 바닥정보)	SSP, rho_bot, s_loss, bottom	

2.2. 선박 프로펠러 소음 모델링

표적소음은 표 2와 같이 비변조 협대역 소음, 변조 협대역 소음, 비변조 광대역 소음, 변조 광대역 소음을 모의하여 융합함으로써 최종적으로 모의할 수 있다.[10] 이러한 소음원의 종류중에서도 잠수함 입장에서 표적의 종류와 속력을 추정하는 근거가 되는 소음원이 프로펠러의 소음원인 변조 광대역 소음이다.[23] 표적 소음원을 모의하면 시뮬레이터상 그래픽과 오디오라는 2가지의 최종적인 결과물이 생기게 된다. 실제 잠수함에서는 이렇게 생기는 결과물중 오디오 신호를 분석하

여 적함의 종류와 속력을 분석하는 turn count 훈련이라는 식별훈련을 수행하고 실제 해상 작전시 적용하여 잠수함을 운용한다.[43]

프로펠러 소음원을 그림 1과 같이 시간영역에 따른 진폭을 살펴보면 특정한 시간주기에 따라 진폭이 큰 신호가 발생하는 것을 알 수 있다.[23] 그러나 이러한 프로펠러 소음원을 FFT하여 주파수 영역에서 살펴보면 이러한 주기성의 특징을 확인할 수 없다.(그림 1, 오른쪽) 따라서 프로펠러 소음원은 주파수 변조방식이 아닌 진폭변조 방식을 통해 구현할 수 있음을 알 수 있다.[23]

표 2. 선박 소음원 분류

비변조 협대역 신호	변조 협대역 신호	비변조 광대역 신호	변조 광대역 신호
· 엔진류 소음 · 보기류 소음 · 프로펠러 날개 및 축계소음	· 프로펠러 소음 (singing)	· 소나 근방 유동소음	· 프로펠러 cavitation 소음

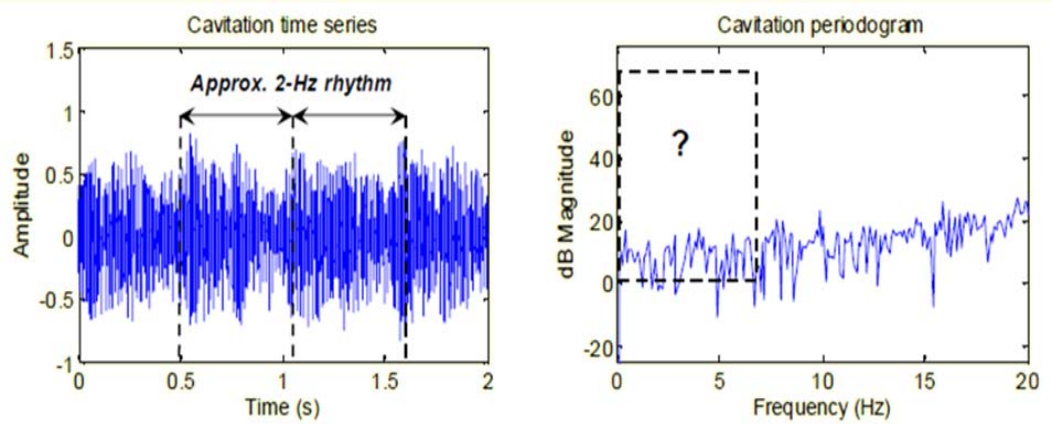


그림 1. 프로펠러 소음원, 시간영역(좌), 주파수영역(우)

프로펠러 소음원이 발생하는 이유는 기본적으로 프로펠러 블레이드간에 미세한 형태 차이에 따라 발생하긴 하나 그림 2와 같이 비공동 소음의 경우 lift force의 영향 및 공동 소음의 경우 캐비테이션 지수의 차이로 인해 공통적으로 날개수와 축수에 따른 진폭변조된 소음으로 나타나게 되며, 이는 PSR과 BR이라는 2가지의 특정한 주파수로 나타낼 수 있다.[37]

PSR은 축회전 주파수로써 초당 축의 회전수로 나타나고 BR은 블레이드 회전 주파수로써 초당 블레이드 회전수로 나타낼 수 있다. 따라서 BR은 PSR × Blades수 로 나타낼 수 있다.

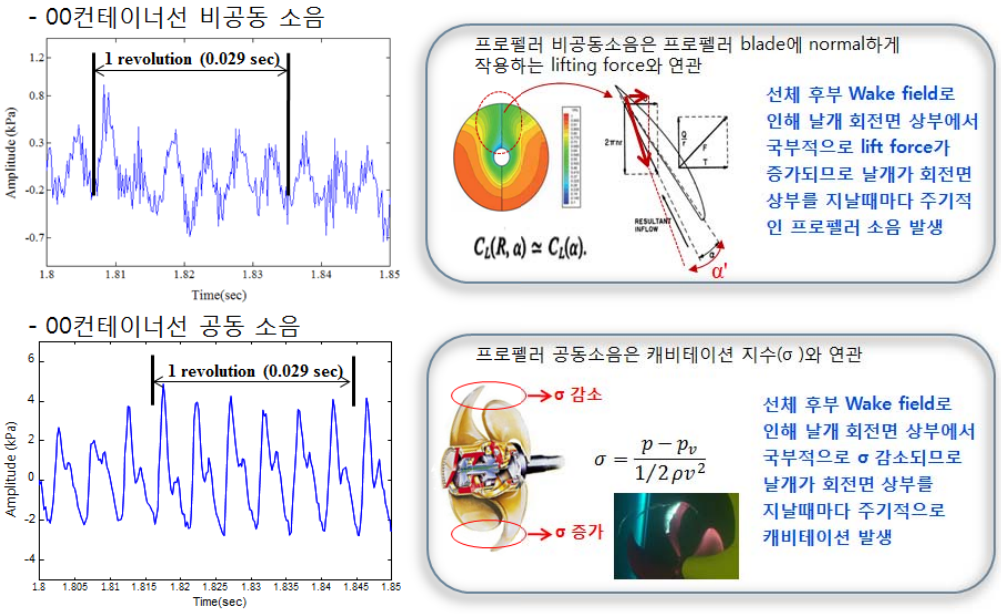


그림 2. 실제 프로펠러 소음 및 발생원인, 비공동 소음(위), 공동 소음(아래)

이러한 PSR과 BR을 시간영역에서 나타내면 특정 시간에 따라 PSR과 BR이 겹쳐져서 상대적으로 진폭이 큰 신호가 발생하게 된다.

이러한 프로펠러 소음의 특성인 PSR과 BR을 그림 3과 같이 변조신호의 형태로 나타낼 수 있고 이를 프로펠러 광대역 신호에 결합하여 줌으로써 최종적으로 프로펠러 소음원을 만들 수 가 있다.(그림 4) 이러한 일련의 과정을 통해 구현한 프로펠러 소음원은 변조신호를 통해 진폭이 큰 광대역 신호가 오디오로 출력되어 소나 운용자가 표적의 블레이드 개수, RPM에 따른 표적종류와 속력을 식별 가능하기 때문에 효과적으로 표적의 소음원을 모의할 수 가 있게 된다.[23]

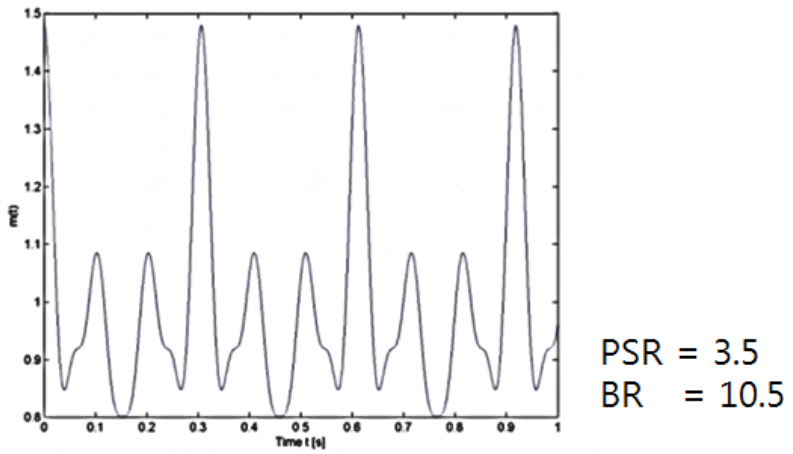


그림 3. 프로펠러 변조신호 예

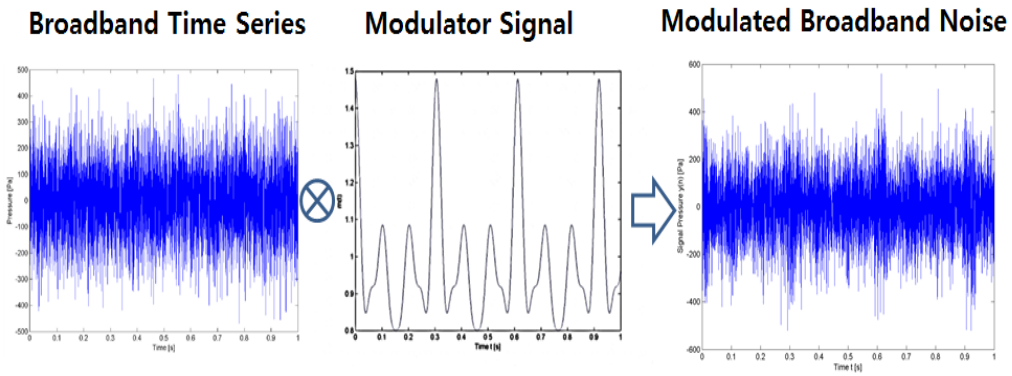


그림 4. 프로펠러 소음원 모의 과정

또한 변조신호는 수식을 다양하게 조합함으로써 그림 5와 같이 다양한 blade와 RPM의 프로펠러 소음 모의가 가능하다. 이는 시뮬레이터상 사용자가 원하는 특정 RPM과 blade를 가진 표적 소음원 모의가 가능함으로 시뮬레이터로서 운용성을 극대화 할 수 있게 된다.[23]

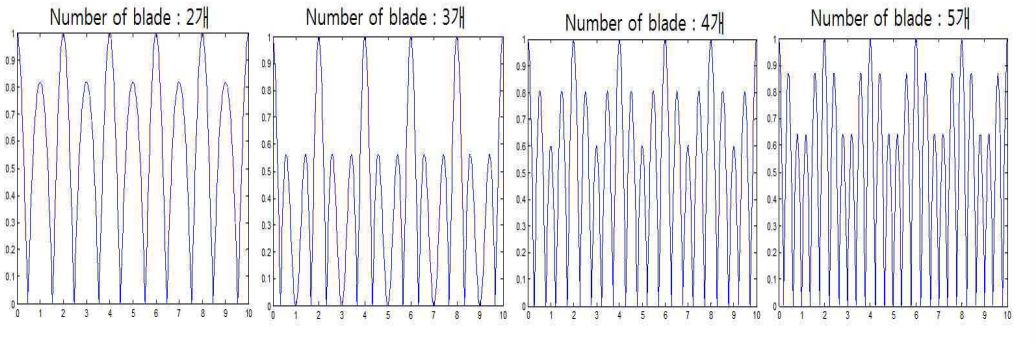


그림 5. BLADE에 따른 변조신호 모의

2.3. 선박 방사소음준위 모델링

선박 방사 소음준위는 그림 6과 같이 속력의 증가에 따라 상승을 하며, 주로 프로펠러 소음이 큰 비중을 가지게 된다.[69] 따라서 선박 방사 소음준위는 속력에 의존적인 식으로 표현 가능하게 된다. 이러한 선박의 속력 증가에 따른 방사소음을 가장 잘 표현한 식으로 Ross의 식을 인용할 수 있다. Ross는 미국 해양조사원(Office of Naval Research)의 위탁연구를 받아서 2차 세계대전 중 미국, 캐나다, 영국의 선박의 측정된 방사소음을 분석한 결과 다음의 공통된 특성을 확인하였다. 첫째, 중주파수대역인 500 ~ 1,000Hz 구간에서 선박 방사 소음준위는 속력의 5제곱 또는 6제곱비로 증가한다. 둘째, 스펙트럼 레벨은 100Hz 이하 주파수 대역에서 속력에 따른 증가 양상을 보인

다. 셋째, 높은 속력에서는 스펙트럼 최대레벨부터 1/3옥타브 간격으로 -5.5dB 에서 -6dB로 감소하고 낮은 속력에서는 -7dB 에서 -8dB로 감소한다. 이러한 2차 세계대전중 선박의 방사 소음준위 양상을 분석하여 Ross는 모든 선박에 공통으로 적용될 수 있는 선박 방사 소음준위 공식을 식 (1)로 나타내었다.[70]

$$L_S = L_S^{'} + 20 - 20\log f \quad (f > 100Hz) \tag{1}$$

여기서 L_S 는 선박 방사 소음준위(dB) 이며, $L_S^{'}$ 은 선박 속력에 의존적인 소음레벨(dB), f 는 주파수(Hz)이다.

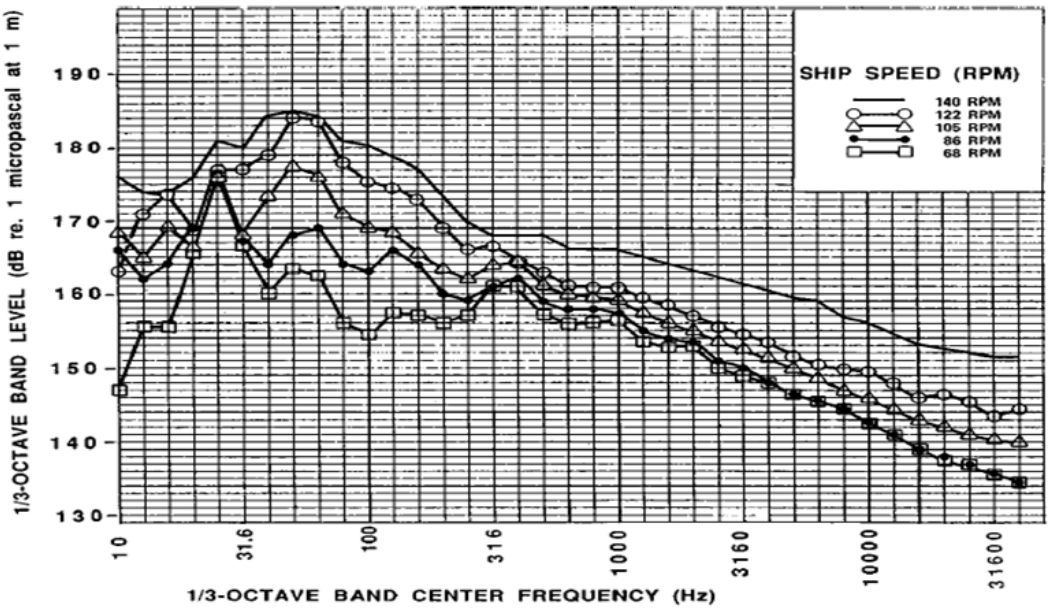


그림 6. 선박의 RPM에 따른 방사소음 레벨

$L_S^{'}$ 은 최초에 속력만의 함수로 나타내어졌다가 이후에 선박의 방

사소음이 속력뿐만 아니라 배수톤수가 큰 함정이 일반적으로 많은 펌프와 큰 프로펠러 등의 이유로 방사 소음준위가 크다는걸 발견하여 식 (2) 또는 식 (3) 과 같이 속력과 배수톤수에 의존적인 식으로 나타내었다.[70]

$$L_S^{'} = 112 + 50\log\frac{U}{10kts} + 15\log D \qquad (2)$$

$$L_S^{'} = 134 + 60\log\frac{U}{10kts} + 9\log D \qquad (3)$$

두 식 모두 경험식으로 한 식을 취하여 사용하면 되나 배수톤수의 증가에 따라 특정속력에서 그림 7과 같이 항공모함 급인 10만톤에서 최대 8dB의 오차를 보임을 알 수 있다. 따라서 Ross도 두식을 배수톤수 3만톤 이내 범위에서 사용토록 권장하였다.[70]

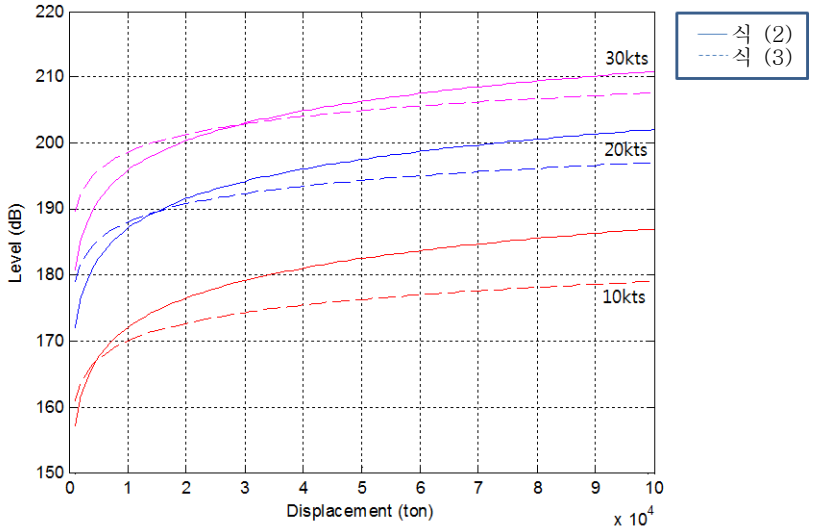


그림 7. 선박의 배수톤수와 속력 증가에 따른 레벨 비교

1988년 P. Scrimger 와 R.M. Heitmeyer은 그림 8의 지중해 제노아 항에서 출항하는 50척의 다양한 선박(탱크선, 화물선, 상선, 여객선 등)에 대한 방사 소음준위를 선배열 센서로 주파수 70~700Hz 범위에서 측정하였다.[66]

그림 8. P. Scrimger 와 R.M. Heitmeyer의 선박소음 측정해역

측정된 선박 방사소음 결과를 그림 9와 같이 Ross 식과 비교하였으며, Ross 식으로 계산된 결과보다 측정 평균값이 4dB정도 높았으나, 주파수대역에 따라 거의 유사한 패턴으로 측정되어서 실제 선박 방사 소음준위 해석을 위해 유용하게 사용될 수 있음을 알았다.[66] 또한 Ross 식을 2차대전 영국 경순양함인 HMS 카디프의 속력에 따른 방사 소음준위와 비교 결과 그림 10과 같이 거의 유사함을 알 수 있다.[70]

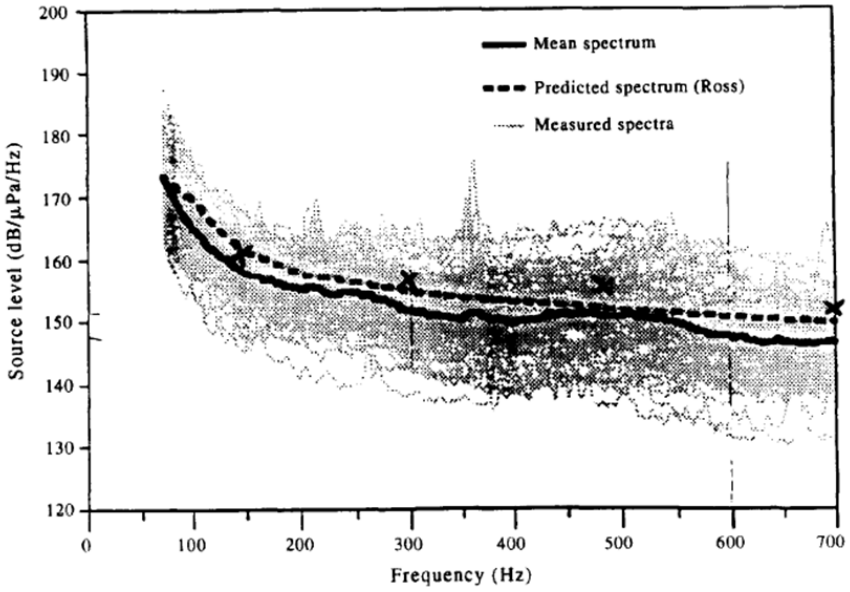


그림 9. P. Scrimger 와 R.M. Heitmeyer의 선박소음 측정 및 Ross식 비교 결과

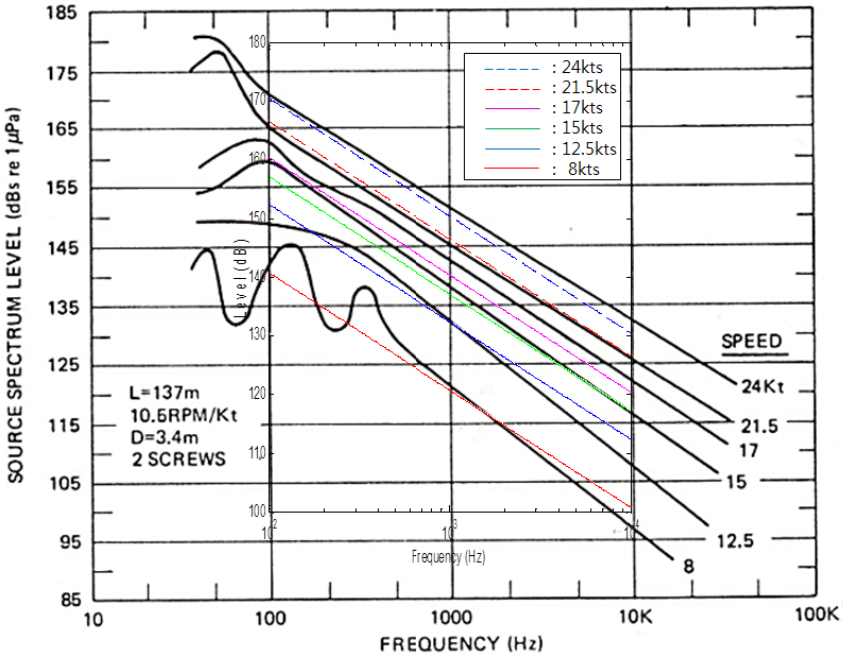


그림 10. 2차 대전 영국 순양함 HMS 카디프 방사소음 측정 및 모의결과 비교

Ross의 식을 속력을 증가시켜 주파수영역과 시간-주파수영역에 관한 소음준위 모의 결과는 그림 11과 그림 12와 같다.

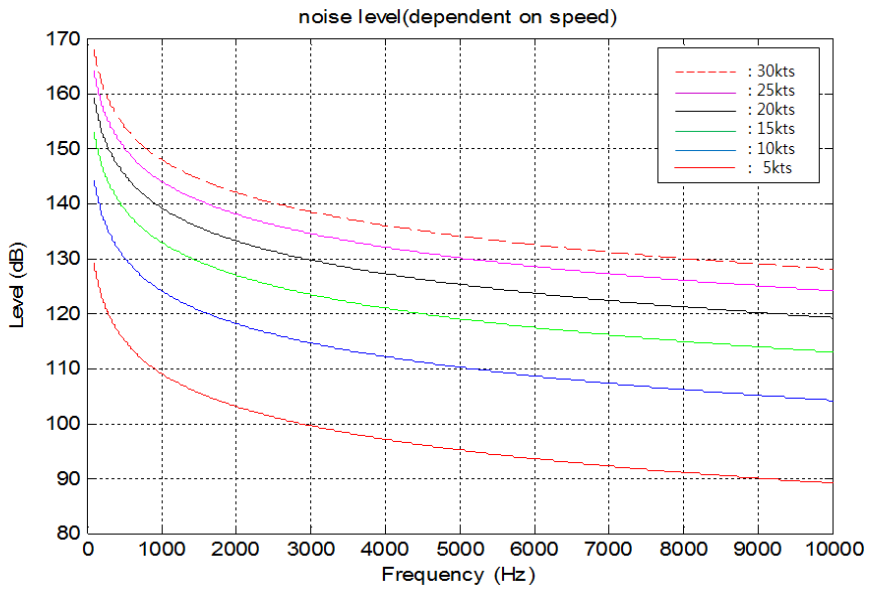


그림 11. 속력에 따른 선박방사소음 모의결과(주파수 영역)

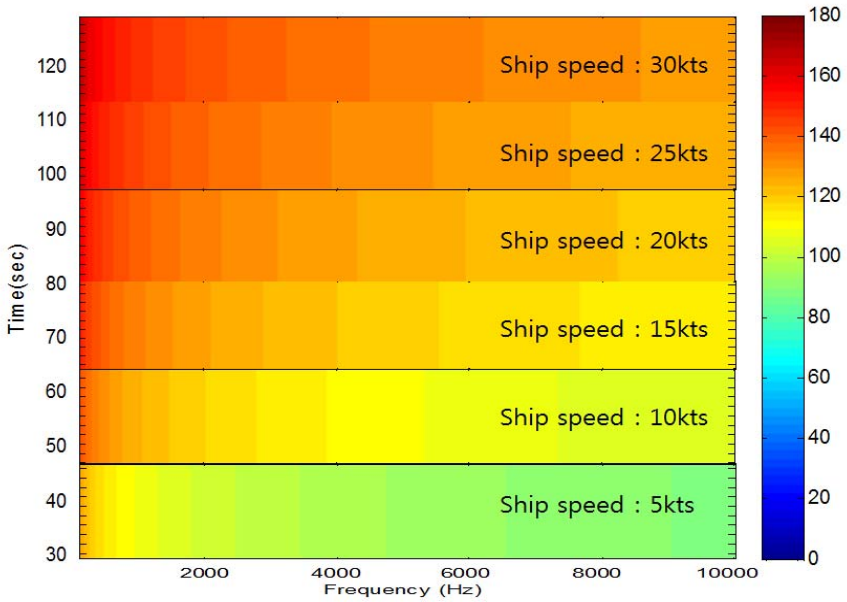


그림 12. 속력에 따른 선박방사소음 모의결과(시간-주파수 영역)

2.4. 잠수함 자체 소음원 모델링

자체소음원은 잠수함 속력에 따라 자함 소나에 영향을 주는 소음원으로서 유체소음, 크랭크축 등과 같은 기계류 소음, 소나 구동을 위한 전기소음, 프로펠러 소음, 유체에 의한 선체 진동소음 등이 있다.[61] 이중 속력의 증가에 따라 잠수함 함수 방수소나에 가장 크게 작용하는 자체 소음원은 그림 13과 같이 잠수함 선체주위로 흐르는 유체소음이라고 할 수 있다.[71]

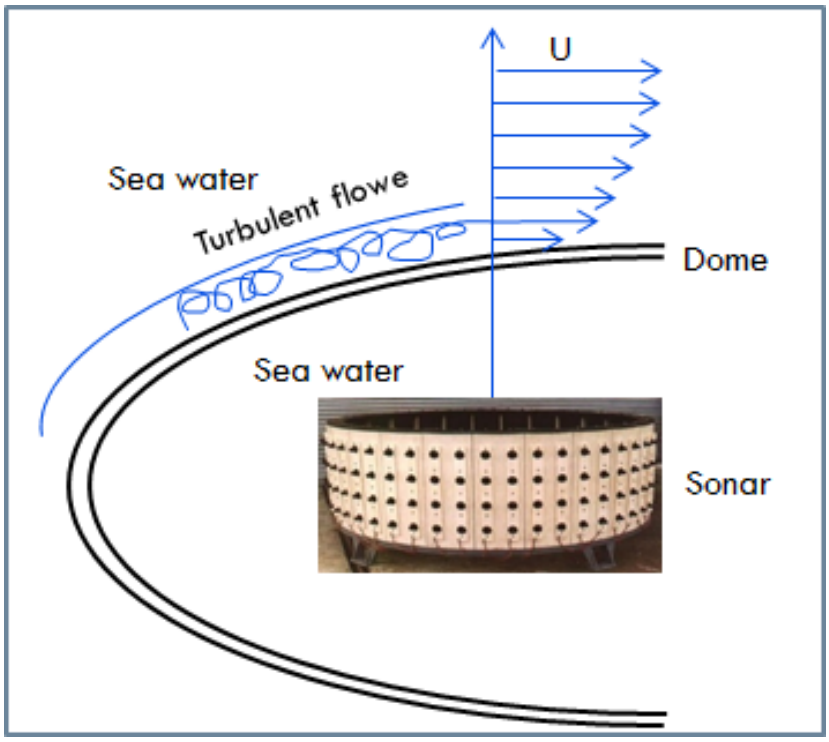
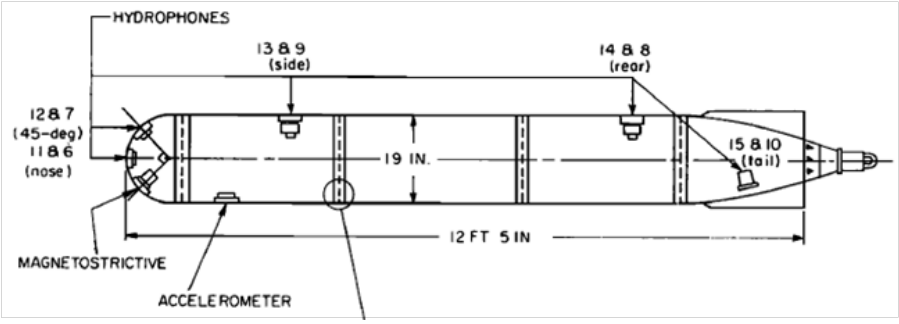


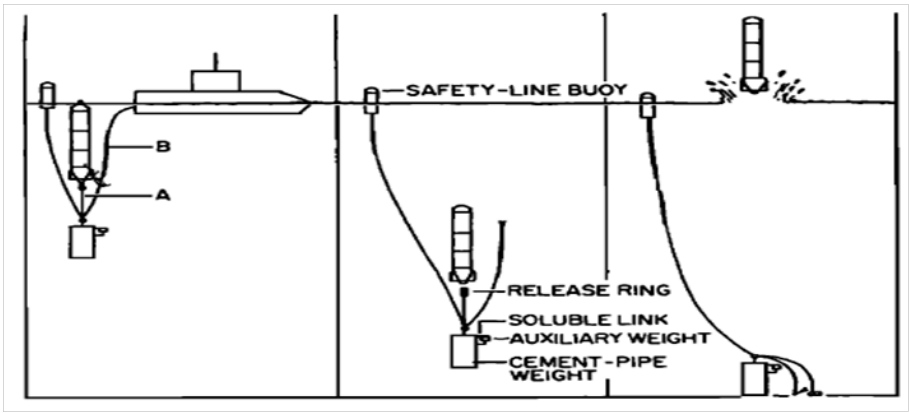
그림 13. 잠수함 함수소나 주위의 유체소음

Skudrzyk은 유체속력에 따라 하이드로폰에 미치는 유체소음을 그림 14와 같은 방법의 실험을 통하여 실험용 buoy가 실험용 수조바닥

에서 발사되어 수면으로 상승하면서 buoy 주위로 흐르는 유체속력에 따른 유체소음을 경험식으로 얻었다.[71]



(a)



(b)

그림 14. Skudrzyk 유체소음 측정시험, (a) 유체소음 시험용 buoy, (b) 유체소음 측정방법

이렇게 얻어진 경험식을 살펴보면 그림 15와 같이 천이주파수 이전까지 유체 소음레벨은 일정하게 유지되다 천이주파수 이후부터 주파수의 3제곱승에 반비례하게 감소하는 경향을 보였는데 이를 식으로 정리하면 식 (4)와 같다.[71]

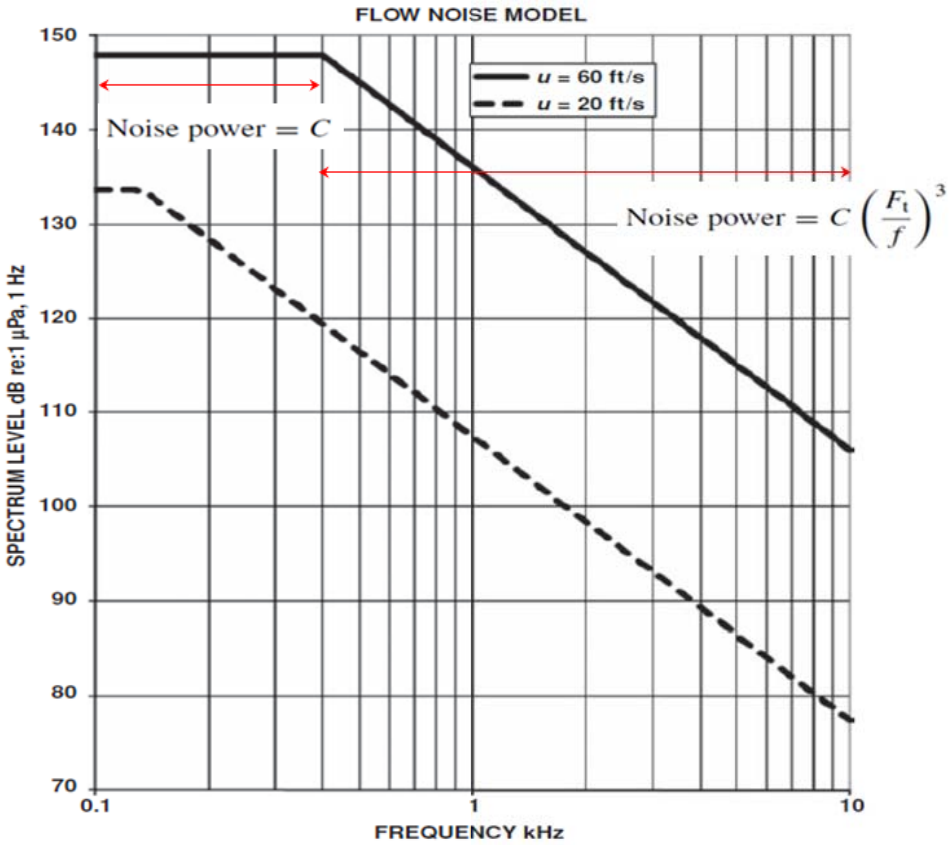


그림 15. Skudrzyk의 경험식에 의한 유체소음 모델

① $for \quad f < f_0$

$$Ln(f) = 20\log\left(\alpha\frac{1}{2}\rho\frac{u^2}{0.000001}\right) - 10\log(f_0)$$

② $for \quad f > f_0$

$$Ln(f) = 20\log\left(\alpha\frac{1}{2}\rho\frac{u^2}{0.000001\sqrt{f_0}}\right) + 30\log\left(\frac{f_0}{f}\right) \qquad (4)$$

여기서 ρ는 유체밀도, u는 유체속력(free-stream), α는 Kraichnan 상수로 통상 1로 가정하며, f는 주파수, f^0는 천이주파수

로 유체속력을 유체 경계면의 두께로 나눈 값과 같다. 그런데 이렇게 측정된 Skudrzyk의 유체소음레벨은 직경 1인치 하이드로폰으로 측정된 결과를 정리한 식이다. 하이드로폰의 크기가 2배가 될 때마다 약 6dB가 감소되는 경향이 있다는 것을 Corcos와 Skudrzyk의 실험에 의해 확인되었으며, 잠수함 함수소나의 직경을 약 3m의 구형소나라고 가정시 Skudrzyk 실험식 대비 약 40dB의 유체소음 레벨이 감소하게 된다.[39, 62] 이러한 유체소음은 잠수함의 경우 직접적으로 소나에 수신되지 않고 소나돔을 따라 흐르면서 소나돔을 투과하여 소나돔안에 설치된 소나에 수신되는 과정을 거치게 된다.[8, 14, 19, 77] 이를 간단한 도식으로 나타내면 그림 16과 같다.

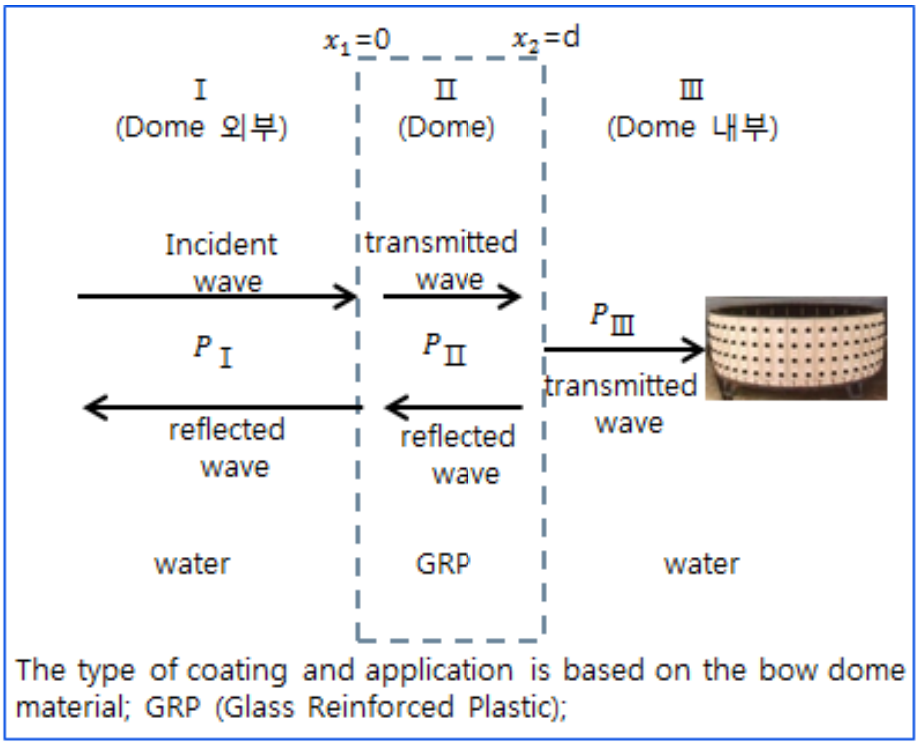


그림 16. 유체소음의 소나 전달과정 도식

이렇게 소나돔을 투과하여 소나에 수신되는 과정에서 유체소음의 소나돔 투과손실이 발생하게 된다. 투과손실은 식 (5)와 같이 소나방식에서 시그날 이득값의 감소요인이 되며, 입사하는 음압을 투과하는 음압으로 나누어준 값을 로그단위로 나타내준 값이다.

$L_{S/N} = SL - TL - IL - NL + DI$

➔ including the sonar dome adds an additional term, the insertion loss(IL)

$$\mathrm{IL} = 20\log_{10}\left|\frac{incident\ sound\ pressure\ \mathbf{P_i}}{transmitted\ sound\ pressure\ \mathbf{P_t}}\right| \tag{5}$$

투과손실을 구하기 위하여 그림 16에서 $x < x_1$ 의 매질 I 에서의 음압과 $x_1 \le x \le x_2$ 의 매질 II에서의 음압은 각각 식 (6), 식 (7)과 같이 입사하는 음압과 반사되는 음압에 관한 식으로 나타낼 수 있다. 또한 $x > x_2$ 의 매질 III에서의 음압은 식 (8)과 같이 최종 투과하는 음압으로 나타낼 수 있다.

$$P_{\mathrm{I}} = A_1 e^{i(wt-k_1x)} + B_1 e^{i(wt+k_1x)} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{II}} = A_2 e^{i(wt-k_2(x-x_1))} + B_2 e^{i(wt+k_2(x-x_1))} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{III}} = A_3 e^{i(wt-k_3(x-x_2))} \tag{8}$$

여기서 소나돔 매질을 GRP라고 가정시 유체의 감쇄는 GRP 대비 매우 작으므로 매질 I , III에서의 감쇄는 무시가능하고 매질 II에서의

감쇄를 고려하여 진폭 A_2 와 B_2 는 식 (9) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2 = A_2{}'e^{[-\alpha(x-x_1)]},\ B_2 = B_2{}'e^{[-\alpha(x_2-x)]} \tag{9}$$

여기서 α는 감쇄계수(NP/m), $A_2{}'$ 과 $B_2{}'$ 은 각각 소나돔내에서의 감쇄전의 입사파와 반사파의 진폭이다. 경계면 조건을 적용하여 $x = x_1$ 에서 $P_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{II}}$ 이며, 식 (6) , 식 (7)과 식 (9) 를 전개하여 정리하면 식 (10) 과 식 (11) 로 나타낼 수 있고 두식을 합하면 식 (12) 로 정리되어 진다.

$$A_1 + B_1 = A_2{}' + B_2{}'\ e^{-\alpha d} \tag{10}$$

$$A_1 - B_1 = \frac{Z_1}{Z_2}(A_2{}' - B_2{}'e^{-\alpha d}) \tag{11}$$

* $Z_1 = \rho_1 c_1,\ Z_2 = \rho_2 c_2$

$$2A_1 = (1+\frac{Z_1}{Z_2})A_2{}' + (1-\frac{Z_1}{Z_2})B_2{}'e^{-\alpha d} \tag{12}$$

경계면 조건을 적용하여 $x = x_2 = \mathrm{d}$ 에서 $P_{\mathrm{II}} = P_{\mathrm{III}}$ 이며, 식 (7), 식 (8) 과 식 (9) 로부터 식 (13) 과 식 (14) 로 나타낼 수 있고 두식을 합하면 식 (15), 두식을 빼면 식 (16) 으로 정리되어 진다.

$$A_2{}'e^{-\alpha d}e^{-ik_2 d} + B_2{}'e^{ik_2 d} = A_3 \quad (13)$$

$$A_2{}'e^{-\alpha d}e^{-ik_2 d} - B_2{}'e^{ik_2 d} = \frac{Z_2}{Z_3}A_3 \quad (14)$$

$$2A_2{}'e^{-\alpha d}e^{-ik_2 d} = (1+\frac{Z_2}{Z_3})A_3 \quad (15)$$

$$2B_2{}'e^{ik_2 d} = (1-\frac{Z_2}{Z_3})A_3 \quad (16)$$

식 (12), 식 (15) 와 식 (16) 으로부터 투과손실 계수 T는 식 (17) 로 나타내 지며, 투과손실은 식 (18) 로 나타내 진다

$$T = \frac{A_1}{A_3} = \frac{2\times(e^{\alpha d}e^{ik_2 d} + e^{-\alpha d}e^{-ik_2 d}) + \frac{Z_1+Z_2}{Z_1 Z_2}\times(e^{\alpha d}e^{ik_2 d} - e^{-\alpha d}e^{-ik_2 d})}{4} \quad (17)$$

$$IL=20\log(T) \quad (18)$$

이렇게 얻어진 이론식을 바탕으로 E. Eugene Mikeska의 경험식과 CRC-19의 폴리우레탄 재질의 투과손실을 비교결과 그림 17 과 같이 잘 일치하였고, 이를 통해 소나돔 투과손실을 수치적으로 계산 가능함을 알 수 있다.[38]

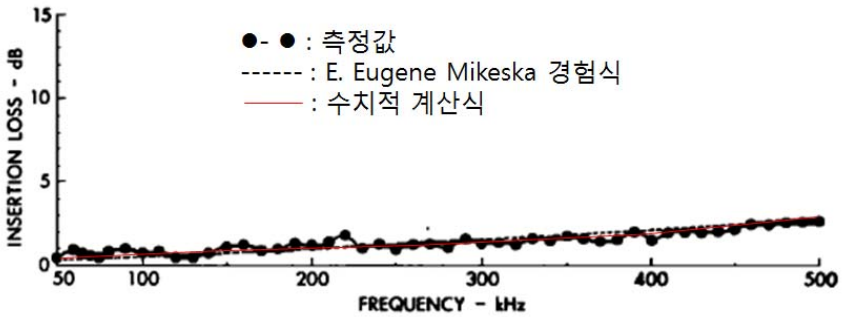


그림 17. CRC-19 폴리우레탄 투과손실 측정값, 경험식, 수치계산식 비교결과

소나돔의 매질을 GRP로 가정시 GRP의 물리적 특성은 표 3 과 같고 이 물리적 특성을 기준으로 식 (18) 에 대입시 그림 18 과 같은 투과손실값을 얻을 수 있다.[14. 19]

표 3. GRP의 물리적 특성

material	thickness (mm)	Density ρ(kg/m^3)	Sound speed C(m/s)	Attenuation α(NP/m)
GRP	20.5	1494	2609	$5.30622\times 10^{-5}f$

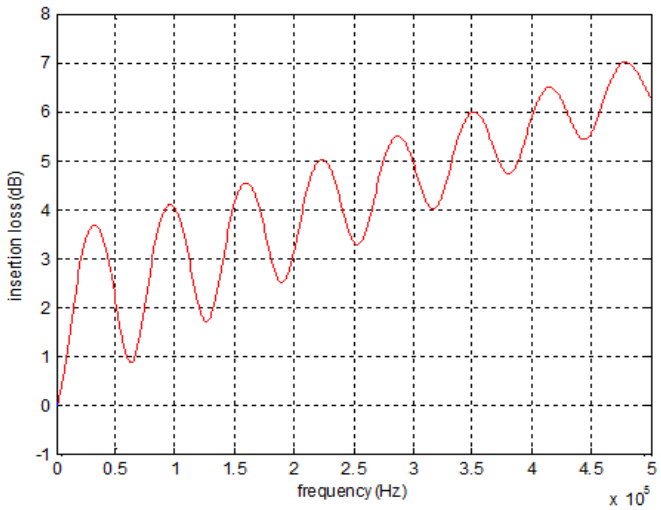


그림 18. GRP 물리적 특성을 고려한 투과손실(주파수영역)

식 (4) 의 Skudrzyk의 유체소음레벨을 식 (18)의 투과손실을 고려 및 미고려시 그림 19 와 같이 나타내어지며, 소나돔 투과손실 고려시 5kHz 이상 고주파수 영역에서 약 1dB의 유체소음레벨이 감소함을 알 수 있다.

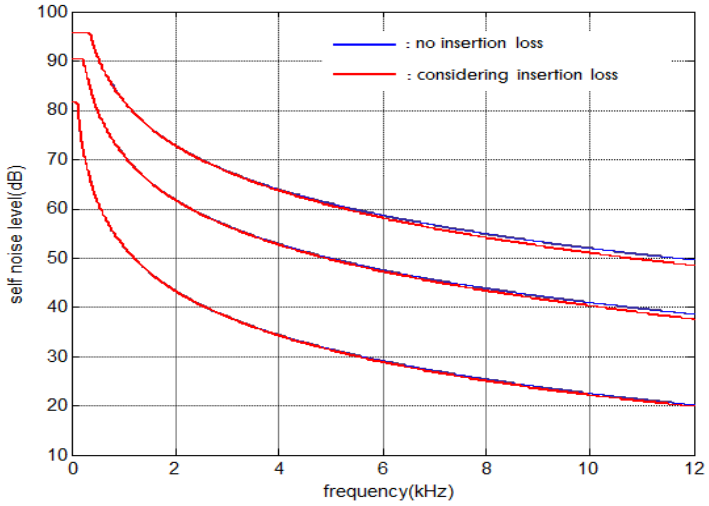
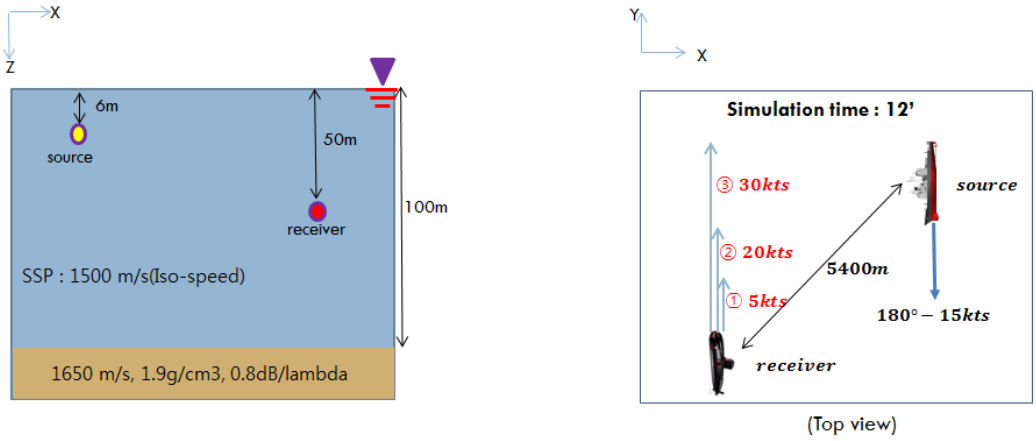


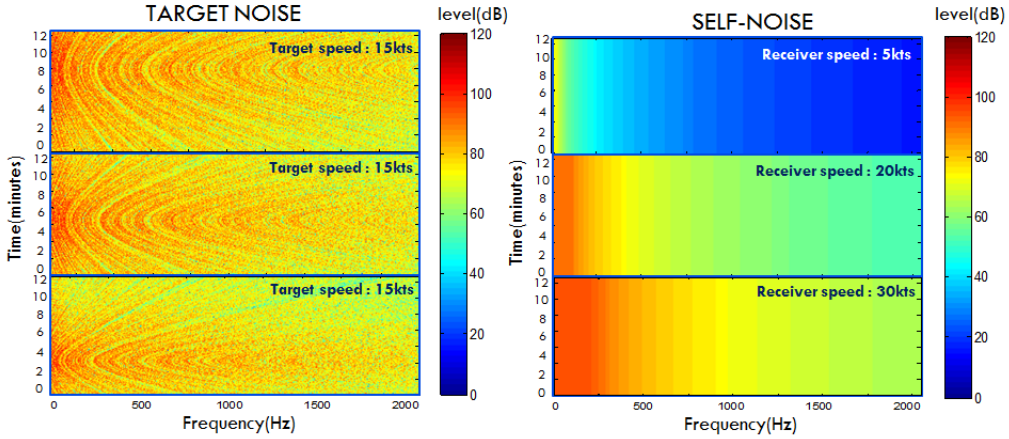
그림 19. 유체소음의 투과손실 고려시와 미고려시의 차이비교

이를 종합하여 그림 20 과 같은 환경 및 시나리오 기반 시뮬레이션결과 그림 21 과 같이 잠수함의 속력이 증가할수록 자체소음이 우세하여 표적소음 식별이 어려워짐을 알 수 있다.

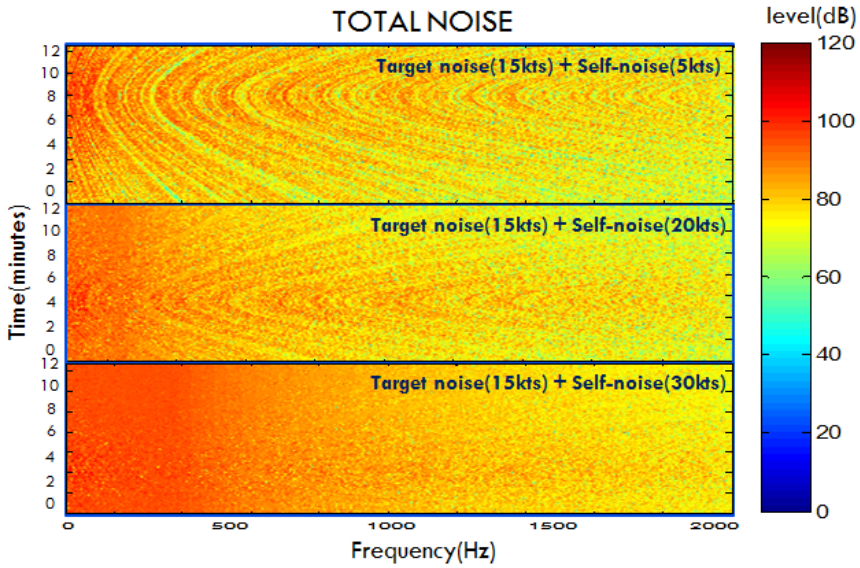


(a) (b)

그림 20. 자체소음 시뮬레이션 시나리오, (a) 해양환경, (b) 기동 시나리오



(a) (b)



(c)

그림 21. 시나리오 기반 시뮬레이션 결과, (a) 표적소음레벨, (b) 자체소음레벨, (c) 표적+자체소음레벨

2.5. 해양 배경소음원 모델링

해양 배경소음원은 수중에서 잠수함이 표적을 식별하기 위한 과정에서 수동소나 공식에서도 볼 수 있듯이 장애요소로 작용하는 소음이라고 할 수 있다. 이러한 해양 배경 소음원은 그림 22 의 Wenz 곡선에서와 같이 주파수 영역에 따라 4가지 소음원으로 구분할 수 있다. 첫 번째로 10Hz 미만의 주파수 영역에서 turbulence 소음이 해양 배경소음원으로서 우세한 영향을 끼친다. turbulence 소음은 해류가 이동하는 과정에서 발생하는 해류끼리의 충돌 혹은 소용돌이 등의 원인으로 발생하는 소음원이다. 두 번째로 10~100Hz 의 주파수 영역에서 shipping 소음이 큰 영향을 미친다. shipping 소음은 해상 이동선박에 의해 발생하는 소음으로 해상 주요 이동로상 선박의 이동 밀도에 따라 소음의 레벨크기가 결정된다. 예를 들어 부산항같이 선박 이동이 많은 항구가 그렇지 못한 항보다 shipping 소음이 큰 경향을 보인다. 셋째로 0.1~100kHz 구간에서 wind 소음이 해양 배경소음원으로서 큰 영향을 미친다. wind 소음은 통상 바람의 속력에 따라 해상의 파고 높이에 영향을 미치고 발생된 파고는 버들, 충격음을 통해 소음원으로 역할을 함으로 수중에서는 광대역 소음으로 수신되게 된다. 마지막으로 100kHz 이상의 구간에서 thermal 소음이 큰 영향을 미친다. thermal 소음은 유체 분자간의 충돌과정에서 발생하는 열소음으로서 고주파수 영역에서 영향을 미치게 된다. 통상의 소나들이 100kHz 이하의 대역에서 작동하므로 이러한 thermal 소음은 소나에 큰 영향을 못 미치게 된다. 이러한 4가지 소음원 가운데 잠수함 소나 주파수 대역을 고려시 가장 우세

하게 영향력을 미치는 소음원은 wind 소음이라고 할 수 있다. 따라서 잠수함 소나의 주 수신대역에서 우세한 표면파에 의한 wind 소음을 모의함으로서 잠수함에 미치는 해양배경소음을 충분히 모의가 능하다고 말할 수 있다.[82]

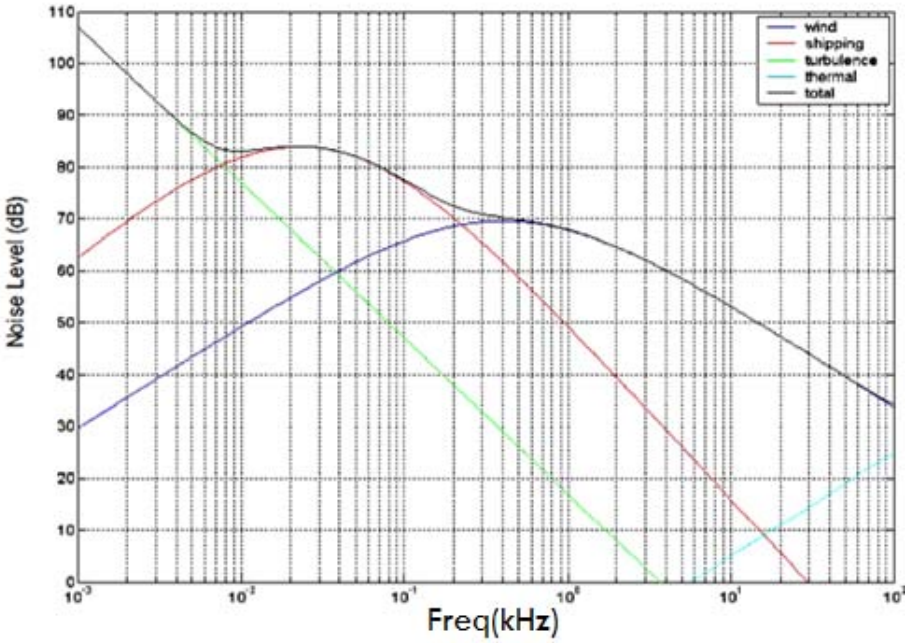


그림 22. wenz 곡선(해양배경소음)

wind 소음은 바람에 의한 파고의 마찰음과 버블의 발생과 소멸과정에서의 burst 소음이므로 해수면의 영향을 고려하여 dipole source로 모의가 되어 질 수 있다.[42] 본 연구에서는 wind 소음을 모의함에 있어 그림 23 과 같이 등속 및 반무한 해양 영역을 가정하였다.

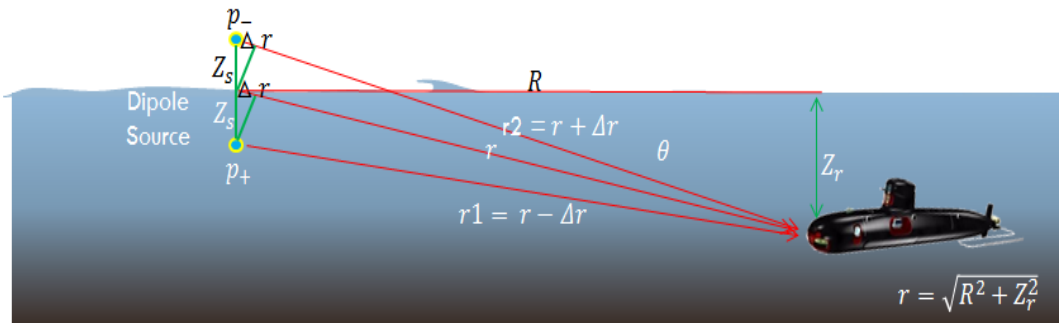


그림 23. wind 소음 모의환경

그림 23에서 wind 소음의 dipole source는 P+와 P-이고 잠수함 소나에 수신되는 dipole source의 합은 식 (19) 와 같이 나타낼 수 있다.[42]

$$P = \frac{1}{r1}e^{ikr1} - \frac{1}{r2}e^{ikr2} = \frac{-2i}{\sqrt{R^2 + Z_r^{\,2}}}\sin(kZ_s \sin\theta)e^{ik\sqrt{R^2+Z_r^{\,2}}} \tag{19}$$

이러한 dipole source를 이용하여 식 (20) 과 같이 수신 가능한 수면영역에서 각각의 random phase를 고려하여 모의시 실질적으로 잠수함 소나에서 수신되는 wind 소음이 모의되게 된다.[82]

$$P_{noise} = \sum_{f=1}^{\max f}\sum_{R=0}^{\max R}\sum_{\theta=0}^{2\Pi}\frac{-2i\sqrt{IS}\sqrt{A}}{\sqrt{R^2 + Z_r^{\,2}}}\sin(kZ_s \sin\theta)e^{jk(\sqrt{R^2+Z_r^{\,2}})}e^{j\varphi} \tag{20}$$

여기서 IS는 noise source intensity, A는 noise total area, $e^{j\varphi}$는 noise random phase이다. noise source intensity는 식 (21) 과 같이 나타낼 수 있고, w는 wind 속력(kts), f는 주파수(kHz)이다.[74]

$$NSL = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20\log_{10}(f) - 40\log_{10}(f + 0.4)$$
$$IS = 10^{NSL/10} \qquad (21)$$

noise total area는 그림 24 와 같은 구영역에서 식 (22) 와 같이 $\Delta\theta$ 각도만큼의 일정 S구역내에서 소음원이 Δr 의 등간격으로 분포하고 있다고 가정하고 Δr 에 각 호의 가로길이 $\Delta\beta$ 를 곱해주고 수신 가능한 거리 $r_\max$ 까지 적분하여 360도의 구영역을 고려하여 다시 곱해주면 최종적으로 wind 소음을 고려 가능한 noise total area가 된다.[82]

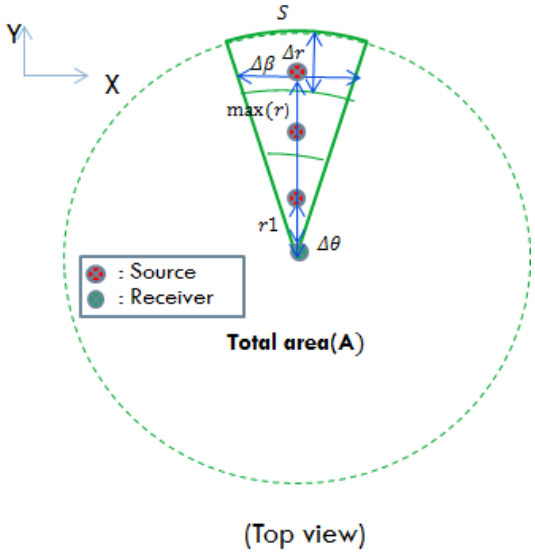
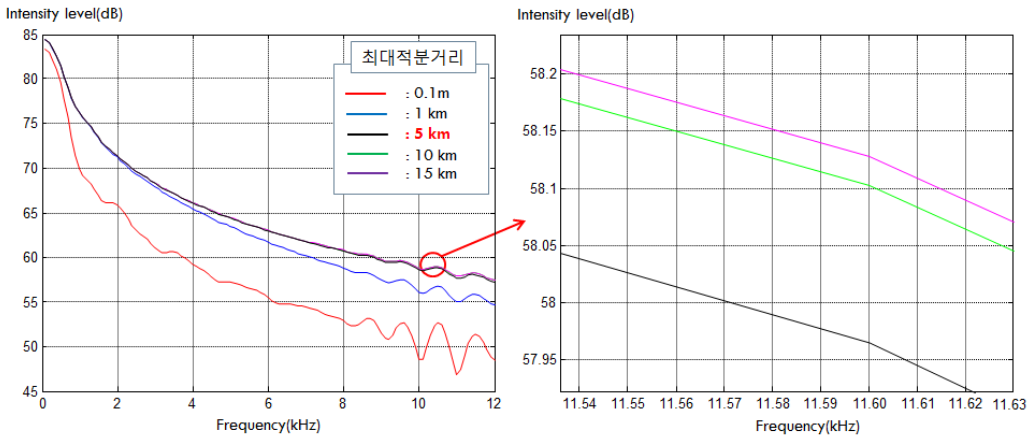


그림 24. 시계열신호 근사결과(Varying-Sound speed)

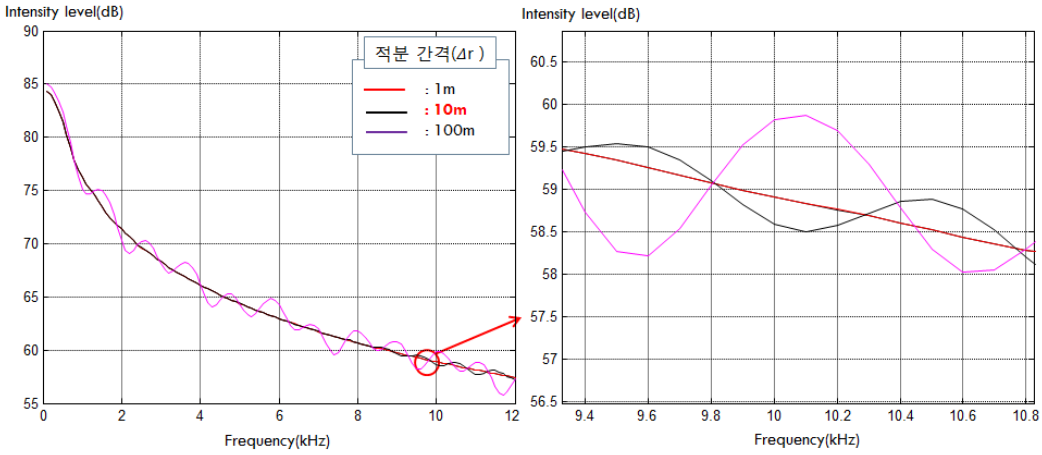
$$S = \sum_{r=r1}^{\max(r)} \Delta\beta \times \Delta r = \sum_{r=r1}^{\max(r)} r \times \Delta\theta \times \Delta r$$
$$A = S \times \frac{360°}{\Delta\theta} \qquad (22)$$

여기서 최대 어느 정도의 거리를 얼마의 거리간격으로 나누어야 할까라는 문제가 생기게 된다. 이러한 문제점은 최대거리 $r_\max$ 와 거리간격 Δr 의 수렴값을 확인하므로서 해결할 수 있다. 먼저 그림 25 에서 최대거리 $r_\max$ 에 관해 수렴도 테스트 결과 5km의 거리에서 수렴됨을 알 수 있었다. 또한, 그림 26 에서 거리간격 Δr 에 관해 수렴도 테스트 결과 10m의 간격으로 등분시 수렴함을 보이고 있다. 따라서 wind 소음 모의시 10m 간격으로 거리 5km까지 dipole source 적분시 잠수함 소나에 수신되는 wind 소음 모의가 가능함을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 25. wind 소음 모의 최대거리 수렴도 테스트, (a)최대거리에 따른 수렴도 결과, (b) 수렴도 결과 확대



(a) (b)

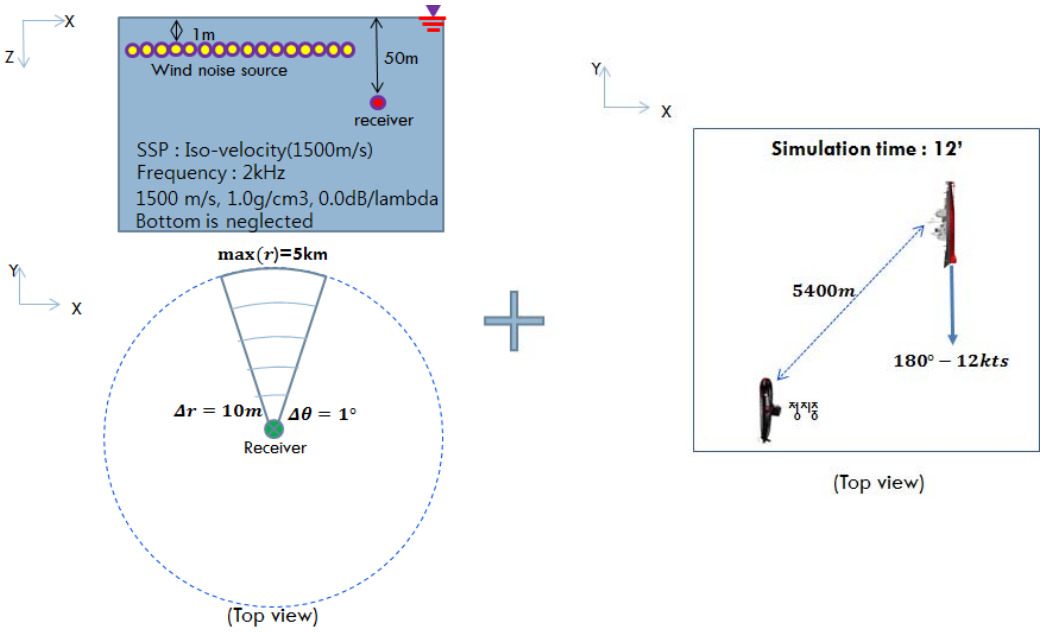
그림 26. wind 소음 거리간격 수렴도 테스트, (a)거리간격에 따른 수렴도 결과, (b) 수렴도 결과 확대

최종적으로 식 (20) 을 식 (23) 과 같이 로그를 취해주면 잠수함 소나에 수신되는 wind 소음의 noise level로 나타난다.[74]

$$I(dB) = 10\log_{10}(|P_{noise}|^2) \tag{23}$$

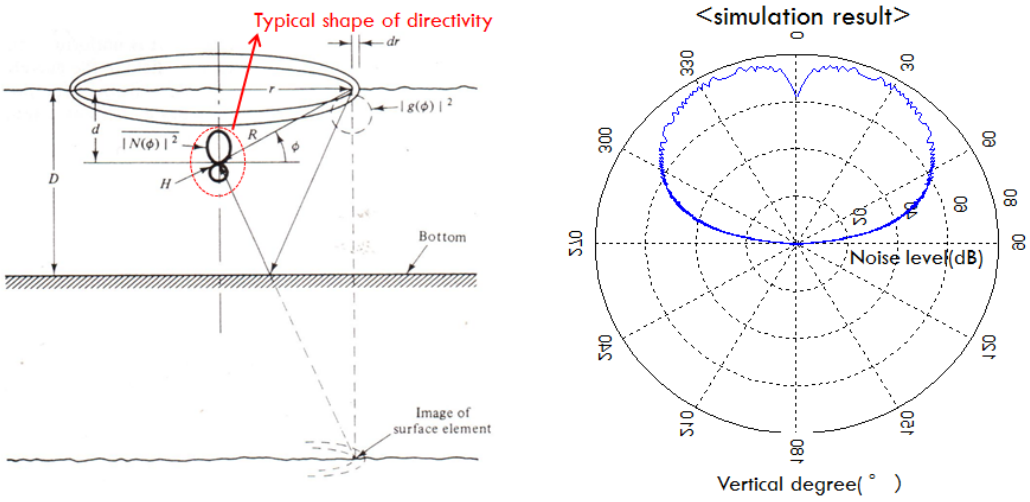
wind 소음 모의 알고리듬을 이용하여 그림 27 과 같은 배경 소음과 기동 시나리오를 적용하여 모의하였다.

모의 결과 wind 소음 방향성은 그림 28, (b) 와 같이 모의되었으며, 표주박 형태의 방향성을 보여야 하나 반무한 해양환경 가정에 따라 바닥 미고려로 반사되는 noise 방향성이 나타나기 않기 때문이다. 소음 레벨은 그림 29 와 같이 모의되었다. 결국 풍속이 증가하면 wind 소음레벨이 증가하고 우세하게 작용하여 표적소음 식별이 어려워짐을 알 수 있다.



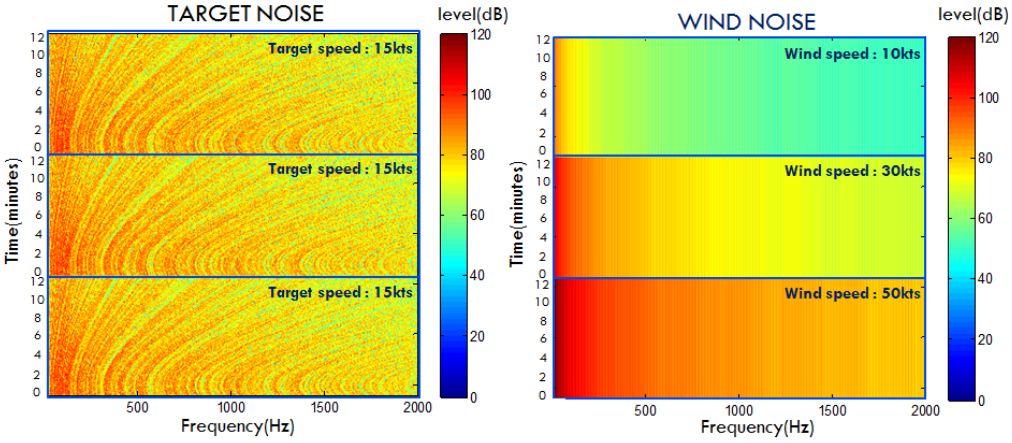
(a) (b)

그림 27. 해양배경소음 모의 시나리오, (a) 환경 시나리오, (b) 기동 시나리오

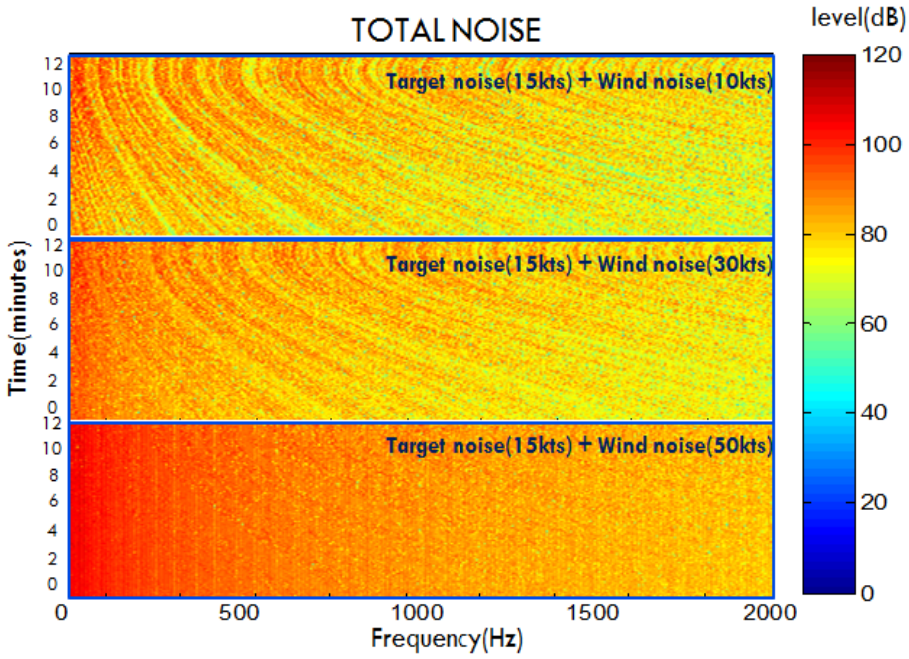


(a) (b)

그림 28. wind 소음 방향성 모의 결과, (a) 표준적인 wind 소음 방향성, (b) 모의된 방향성



(a) (b)



(c)

그림 29. 해양배경소음 모의 결과, (a) 표적소음 레벨, (b) 해양배경소음 레벨, (c) 표적+해양배경소음 레벨

3. 소음원 전달모델 및 좌표계

3.1. 소음 전달 모델

안00 등은 소음신호가 소나까지 전달 될때의 과정을 모의하기 위하여 SNU-ray모델을 적용하여 전달함수를 설계하였다.[10] 자함과 표적이 움직인 시간을 일정한 시간간격으로 나누어 각 time-step에서 자함과 표적간 거리를 산출하고, 자함과 표적간의 거리와 해양환경을 입력 변수로 하여 time-step별로 SNU-ray model을 적용하였다. 음선모델에서 각 고유음선들의 진폭, 위상, 시간지연을 계산하여 모두 합산하여 전달함수를 설계하고 모든 time-step에 대하여 동일하게 음선모델을 적용하여 진폭, 위상, 시간지연 값을 계산하여 전달함수를 구성하였다. 그림 30 은 소음 전달 모델의 개념도 이다.[10]

식(24) 는 전달함수의 수학식이다.[10]

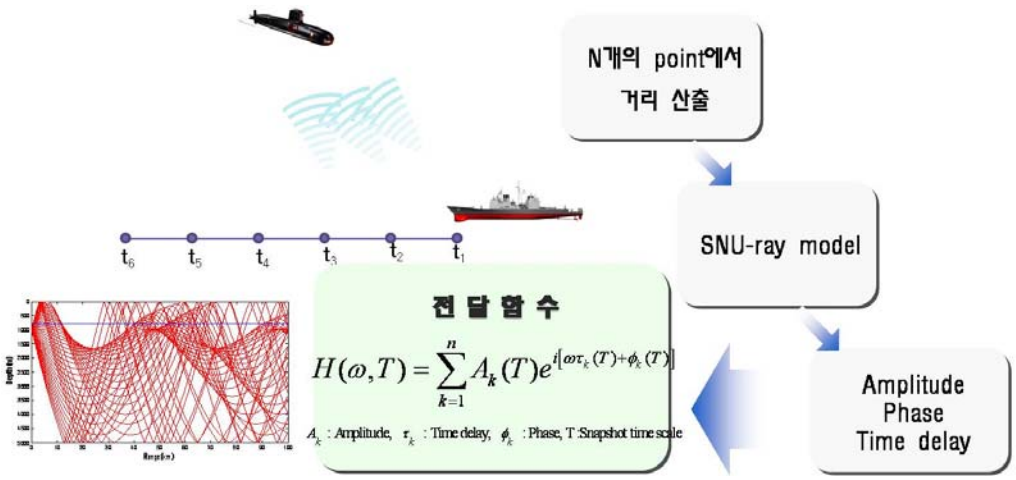


그림 30. 소음 전달 모델 개념도

$$H(\omega, T) = \sum_{k=1}^{n} A_k(T) e^{i[\omega\tau_k(T) + \phi_k(T)]} \quad (24)$$

$A_k(T)$는 k번째 time step의 고유음선의 진폭, $\tau_k(T)$는 k번째 time step의 고유음선의 시간지연, $\phi_k(T)$는 k번째 time step별 고유음선의 위상차 이다.

이렇게 설계된 전달함수를 소음원 신호와 주파수 영역에서 곱해주면 수동 소나에서 수신되는 최종적인 신호를 생성할 수 있다.[10]

3.2. 시뮬레이션 좌표계

시뮬레이션 좌표계 설정시 실제 함정의 해양에서 변침, 변속 등 복잡한 운동과 잠수함의 심도 변경을 고려한 해양에서의 X-Y-Z의 3차원 운동을 고려하여야 한다. 이를 위해 변침, 변침율, 변속, 심도변경 등을 고려 하여 시뮬레이션 할 수 있도록 좌표계를 설정하여야 한다.

3.2.1. 3차원 기동에 따른 도플러효과 산출

그림 31 과 같이 잠수함이 3차원 기동을 한다고 하면 X, Y, Z축에 관한 각각의 속력은 식 (25) 와 같이 나타낼 수 있다. 또한 그림 32 와 같이 음원과 수신기가 해양에서 3차원 기동을 하면 속력과 시간을 고려하여 음원과 수신기의 위치벡터가 생성되고 이를 시간(T)에 관해 미분하면 음원과 수신기의 속력벡터가 생성된다.(식 26)

$$V_X = \mathrm{V} \times \cos(\varphi) \times \sin(\theta)$$

$$V_Y = \mathrm{V} \times \cos(\varphi) \times \cos(\theta)$$

$$V_Z = \mathrm{V} \times \sin(\varphi) \tag{25}$$

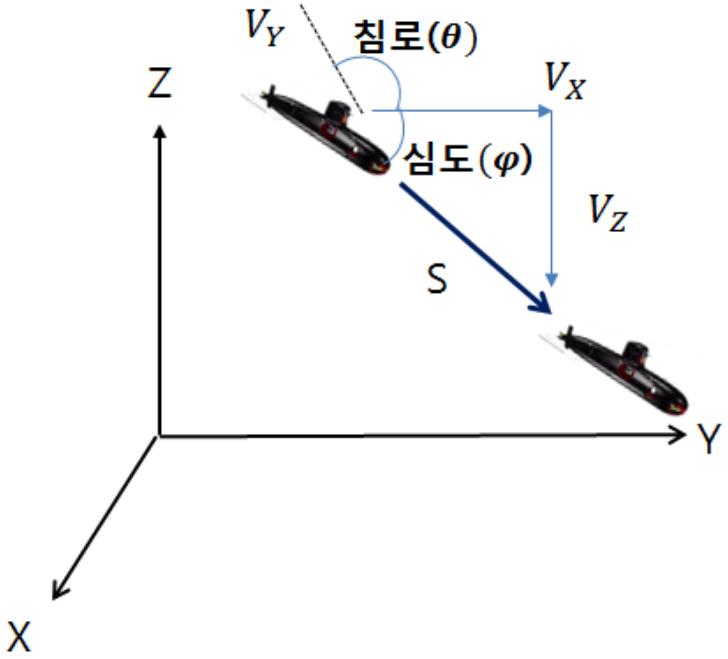


그림 31. 잠수함 3차원 기동

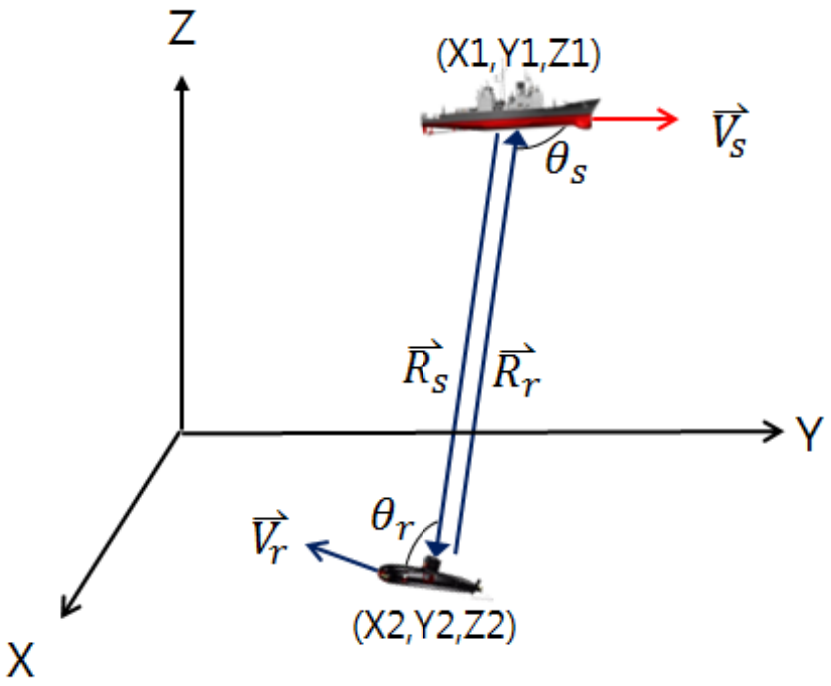


그림 32. 잠수함과 수상함의 3차원 기동

$$
\begin{aligned}
&Source\ \text{위치벡터} = (\mathrm{X1} + V_{X1} \times T, \quad \mathrm{Y1} + V_{Y1} \times T, \quad \mathrm{Z1} + V_{Z1} \times T) \\
&Receiver\ \text{위치벡터} = (\mathrm{X2} + V_{X2} \times T, \quad \mathrm{Y2} + V_{Y2} \times T, \quad \mathrm{Z2} + V_{Z2} \times T) \\
&Source\ \text{속력벡터}(\vec{V_s}) = (V_{X1,} \quad V_{Y1,} \quad V_{Z1}) \\
&Receiver\ \text{속력벡터}(\vec{V_r}) = (V_{X2,} \quad V_{Y2,} \quad V_{Z2})
\end{aligned}
\tag{26}
$$

그러면 식 (27) 과 같이 음원과 수신기의 거리벡터와 그 크기를 산출 가능하고 벡터의 내적공식을 통해 식 (28) 과 같이 음원과 수신기에서 서로를 바라보는 각각의 사잇각을 얻을 수 있다. 이렇게 산출한 사잇각을 이용하여 그림 32 와 같이 3차원 운동을 하는 음원과 수신기에서 발생하는 doppler 효과를 식 (29) 와 같이 산출 할 수 있다. 그

림 33 에서 해양환경의 도파관 효과를 무시하고 음원과 수신기가 X-Y 평면과 X-Z 평면에서 동일한 시나리오에 따라 기동하였을 때 산출되는 도플러 효과가 같음을 알 수 있다. 이를 통해 3차원 기동에 따른 도플러 효과 산출이 양호함을 알 수 있다.

$$\vec{R_s} = \text{Receiver 위치벡터} - \text{Source 위치벡터} = (R_{SX,} \quad R_{SY,} \quad R_{SZ})$$

$$\vec{R_r} = \text{Source 위치벡터} - \text{Receiver 위치벡터} = (R_{rX,} \quad R_{rY,} \quad R_{rZ}) = -\vec{R_s}$$

$$|\vec{R_S}| = \sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 + (z1-z2)^2} \tag{27}$$

$$|\vec{V_r}||\vec{R_r}|\cos\theta_r = \vec{V_r}\cdot\vec{R_r} \quad \Rightarrow \quad \theta_r = \cos^{-1}\frac{\vec{V_r}\cdot\vec{R_r}}{|\vec{V_r}||\vec{R_r}|}$$

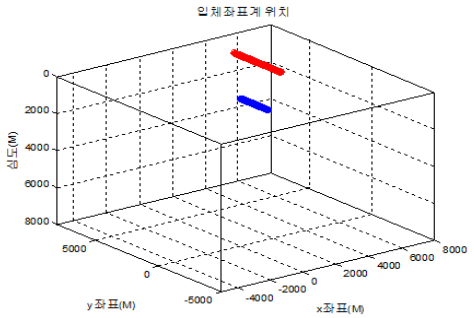
$$|\vec{V_s}||\vec{R_s}|\cos\theta_s = \vec{V_s}\cdot\vec{R_s} \quad \Rightarrow \quad \theta_s = \cos^{-1}\frac{\vec{V_s}\cdot\vec{R_s}}{|\vec{V_s}||\vec{R_s}|} \tag{28}$$

① source approaching to a receiver

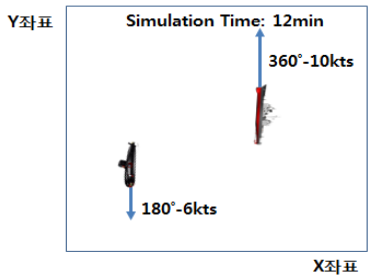
$$f_+ = \frac{f_0}{sound\ speed - V_S \times \cos\theta_s}$$

② source receding from a receiver

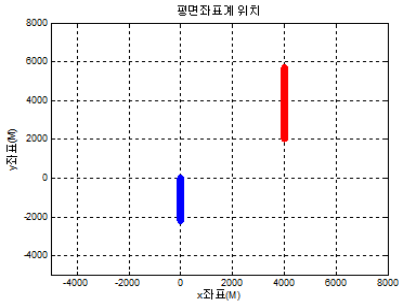
$$f_- = \frac{f_0}{soundspeed + V_S \times \cos\theta_s} \tag{29}$$


입체좌표계 위치
심도(M)
y좌표(M)
x좌표(M)

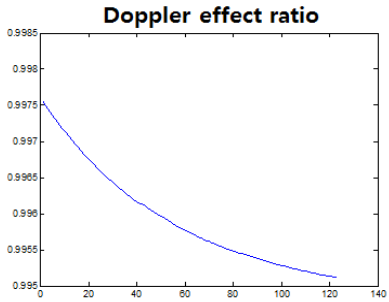
(a)


Y좌표
Simulation Time: 12min
360°-10kts
180°-6kts
X좌표

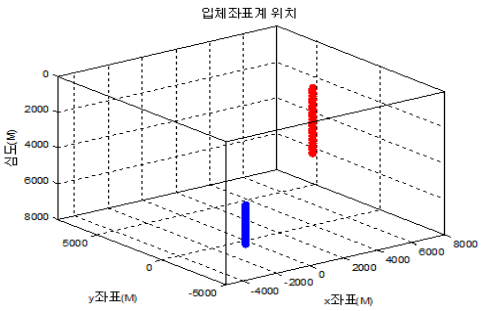
(b)


평면좌표계 위치
y좌표(M)
x좌표(M)

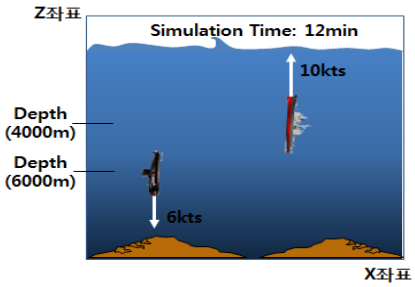
(c)


Doppler effect ratio

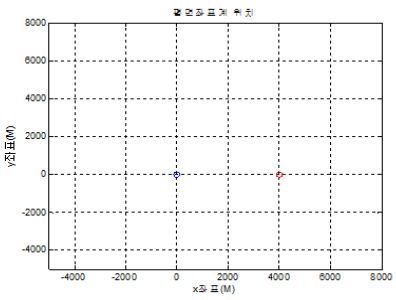
(d)


입체좌표계 위치
심도(M)
y좌표(M)
x좌표(M)

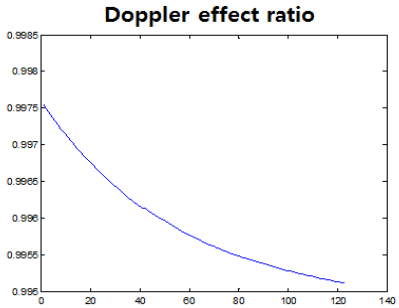
(e)


Z좌표
Simulation Time: 12min
10kts
Depth
(4000m)
Depth
(6000m)
6kts
X좌표

(f)


y좌표(M)
x좌표(M)

(g)


Doppler effect ratio

(h)

그림 33. 3차원 기동에 따른 도플러 효과 확인,
(a) 입체좌표계(X-Y기동), (b) 기동시나리오(X-Y기동),
(c) 평면좌표계(X-Y기동), (d) 도플러 효과(X-Y기동),
(e) 입체좌표계(X-Z기동), (f) 기동시나리오(X-Z기동),
(g) 평면좌표계(X-Z기동), (h) 도플러 효과(X-Z기동)

3.2.2. 변침과 변침율 적용

함정의 기동은 특정 상황과 시간에 따라 변침과 변침율이 적용되며, 이러한 영향에 따라 수신기에 수신되는 음원의 스펙트럼 간섭구조가 달라지게 된다. 시뮬레이터에 함정의 총 시간을 사용자가 원하는 기동수로 분할하여 각각의 위치벡터를 산출하여 최초위치와 더해줌으로써 변침운용이 가능하도록 설정하였다. 이를 시뮬레이션 하여 변침시 얻어지는 스펙트럼 간섭구조를 기존의 단순기동시 얻어지는 2개의 스펙트럼 간섭구조와 비교시 그림 34 와 같이 일치함을 확인하였다. 그림 35 와 같이 특정속력 V로 움직이는 함정이 특정 변침률로 변침을 한다고 가정을 하면 변침률과 속력에 따른 B점에서 D점까지의 변침 이동거리는 식 (30) 과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 변침 이동거리는 속도와 변침률에 따라 2가지 조건을 만족해야한다. 첫째, 함정의 속도가 높을수록 변침 이동거리는 늘어나고 속도가 낮을수록 변침 이동거리는 줄어든다. 둘째, 변침률이 작으면 변침 이동거리는 늘어나고 변침률이 크면 변침 이동거리는 줄어든다. 또한, 변침률에 따라 고려되어야 할 것이 선회경이다. 선회경은 함정의 변침시 발생하는 원운동의 직경으로 식 (30) 과 같이 나타낼 수 있다. 선회경은 변침률이 높을수록 작아지고 변침속력이 클수록 커지는 조건을 가진다.(그림 36) 이

러한 변침률과 변침속력에 따른 변침 이동거리와 선회경의 시뮬레이션 결과는 그림 37 과 같다.

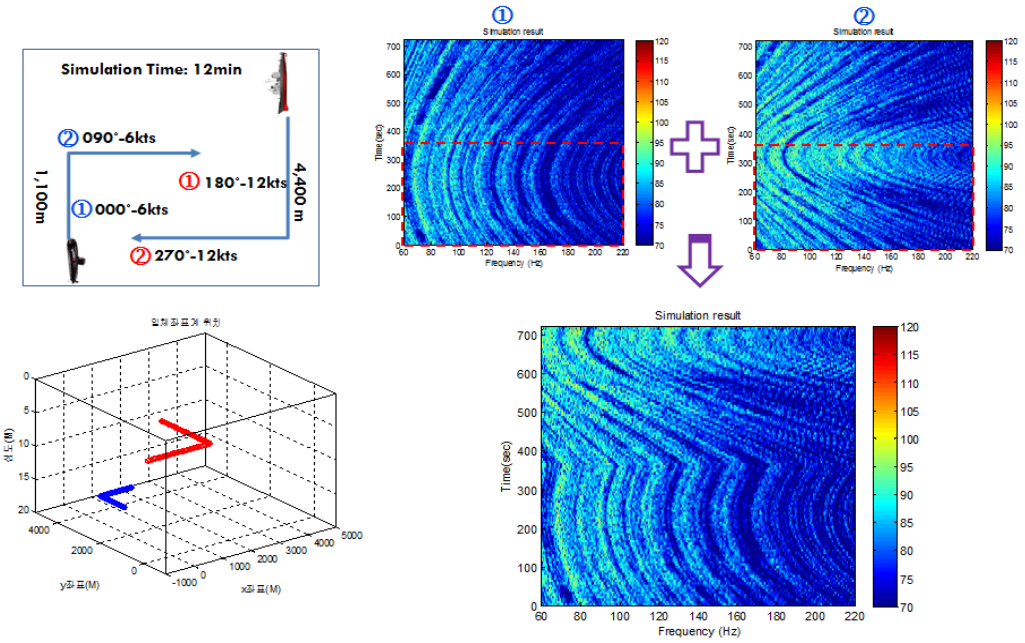


그림 34. 함정 변침 적용에 따른 스펙트럼 구조 변화

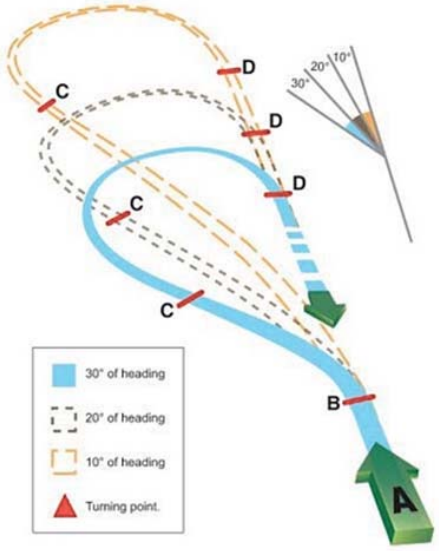


그림 35. 함정의 변침률에 따른 변침 이동거리 변화

$$\text{변침이동거리 (B → D)} = \frac{(Co_{\text{start}} - Co_{\text{end}}) * V(\text{속력})}{\text{변침률}}$$

$$\text{변침률(DEGREE / SEC)} = \frac{Co_{\text{start}} - Co_{\text{end}}}{T}$$

$$\text{선회경(D)} = \frac{2 \times V(\text{속력})}{\text{변침률}} \qquad (30)$$

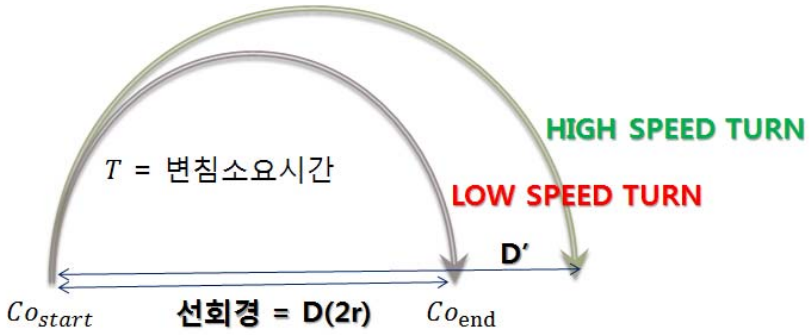


그림 36. 함정의 변침속력에 따른 선회경 변화

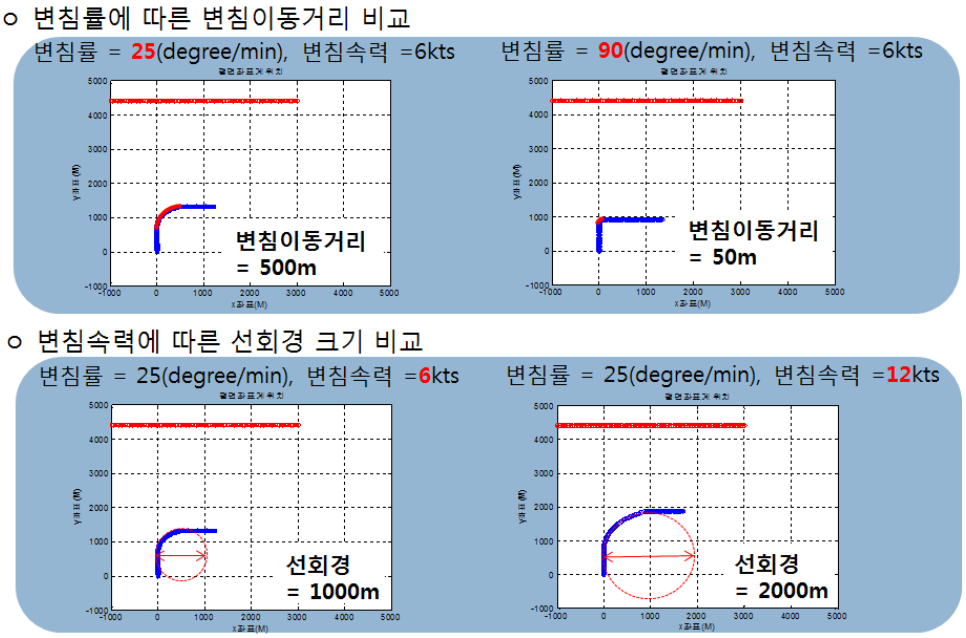


그림 37. 함정의 변침률에 따른 변침 이동거리 변화

3.2.3. 자함중심 좌표계

자함중심 좌표계란 자함을 좌표계의 중심좌표(0, 0, 0)에 두고 자함과 적함과의 상대적인 운동을 나타내는 좌표계라 할 수 있다. 이러한 자함중심 좌표계가 시뮬레이터에서 중요한 이유는 소나 콘솔의 운용 특성상 음원의 움직임은 자함중심의 상대적인 움직임으로 나타나기 때문이다. 이러한 자함중심에 따른 적함의 상대적인 운동은 그림 38과 같이 상대적인 속력과 상대적인 운동방향으로 나타낼 수 있고 이는 식 (31) 과 같이 표현할 수 있다.

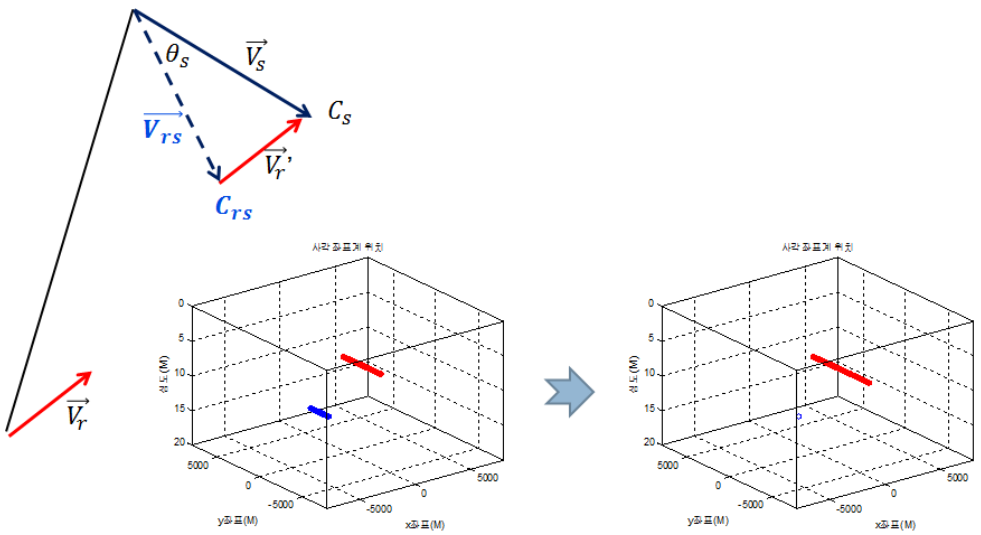


그림 38. 자함중심에 따른 상대적인 적함 운동

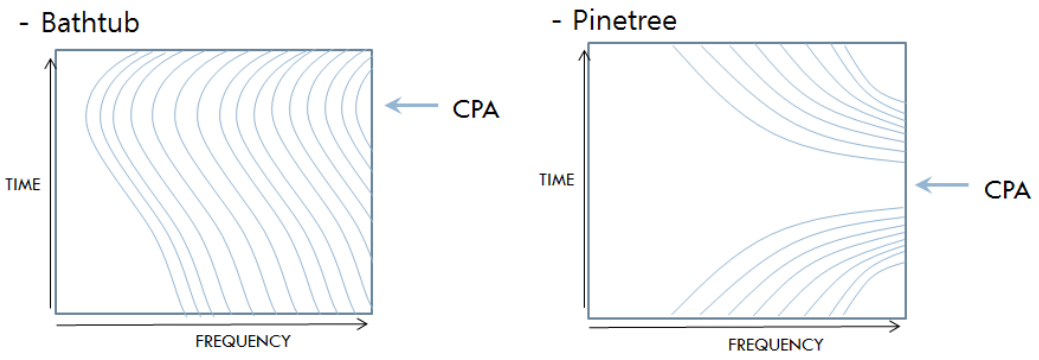
$$\overrightarrow{V_{rs}}(\text{상대적 속력}) = |\overrightarrow{V_s} - \overrightarrow{V_r}|$$

$$\overrightarrow{C_{rs}}(\text{상대적 방향}) = C_s \pm \theta_s$$

$$* \theta_s = \cos^{-1}\frac{\vec{V_s}\cdot\vec{V_{rs}}}{|\vec{V_s}||\vec{V_{rs}}|} \qquad (31)$$

4. 해양환경과 기동 시나리오에 따른 간섭패턴 분석

해양환경과 표적과 잠수함의 기동 시나리오에 따라 다양한 간섭패턴이 생길 수 있다. 통상 잠수함에서 수신되는 표적 간섭패턴에는 그림 39 와 같이 Bathtub와 Pinetree 간섭패턴이 있는데 이러한 2가지의 간섭패턴이 어떠한 해양환경과 기동 시나리오에서 발생하는지 분석하였다.[1]



(a) (b)

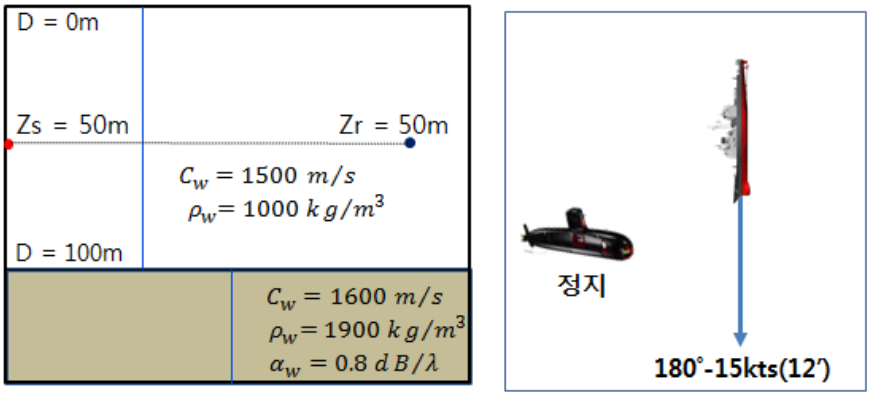
그림 39. 해양에서 일반적인 음선 간섭패턴
(a) Bathtub 패턴, (b) Pinetree 패턴

음원이 수신기에 수신될 때 간섭패턴은 자연적으로 r, f도메인으로 기록된다.(r : 음원과 수신기간 거리 f : 주파수) 이러한 간섭패턴의 구조는 β라는 양적 수치로 표현되며, 이것을 waveguide invariant 라고 한다. 음원 강도, $I(r,f)$ 는 길다란 줄무늬 형태로 나타나며 이 줄무늬의 경사 $\frac{df}{dr}$ 는 주파수와 음원-수신기간 거리에 따라 다양하게 나타나며, waveguide invariant는 식 (32)과 같이 나타낼 수 있다.[57]

$$\beta = \frac{r}{f} \times \frac{df}{dr} \tag{32}$$

waveguide invariant는 임의의 sound speed 의 복잡한 waveguide 에서는 다양한 값으로 나타나지만 완벽하게 반사되는 바닥의 iso-velocity waveguide 에서는 거의 1값을 가진다. waveguide 이론에 따라 소나 시뮬레이터의 스펙트럼상 음선 출력형태의 정확도를 확인하였다.[57]

그림 40과 같은 해양환경과 기동 시나리오를 적용하여 시뮬레이션 결과 그림 41과 같은 스펙트럼 형태를 얻었다. 이 스펙트럼을 waveguide 이론을 적용하여 표 4와 같이 분석결과 waveguide invariant는 거의 1의 값을 나타내었고 완벽하게 반사되는 바닥의 iso-velocity waveguide의 waveguide invariant 값과 일치함을 확인하였다.



(a) (b)

그림 40. 음선 출력형태 정확도 분석 시나리오
(a) 해양환경, (b) 기동 시나리오

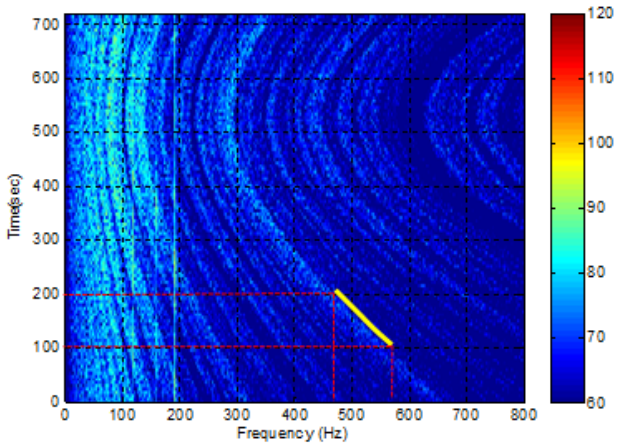


그림 41. 음선 출력형태 정확도 시뮬레이션 결과

표 4. 음선 출력형태 정확도 분석 결과

구분	Range(m)	Frequency (Hz)
100초	3,824	570
200초	3,216	475
Difference	-608	-95
$\beta = \frac{r}{f} \times \frac{df}{dr} = \frac{3824}{570} \times \frac{-95}{-608} = 1.048 \approx 1$		

그림 42 와 그림 45 와 같이 천해와 심해의 여름과 겨울구조의 해양환경에서 표적과 잠수함이 특정 CPA로 접근하면서 발생하는 간섭패턴을 분석하였다.

분석결과 Bathtub 간섭패턴이 발생하는 경우는 표적이 잠수함에 근거리(1,000~6,000m)로 CPA를 통과하는 경우로서 심해환경보다 천해환경에서 뚜렷하게 나타났다.

Pinetree 간섭패턴이 생기는 경우는 표적이 잠수함에 On top하여 CPA를 통과하는 경우로서 심해환경에서는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

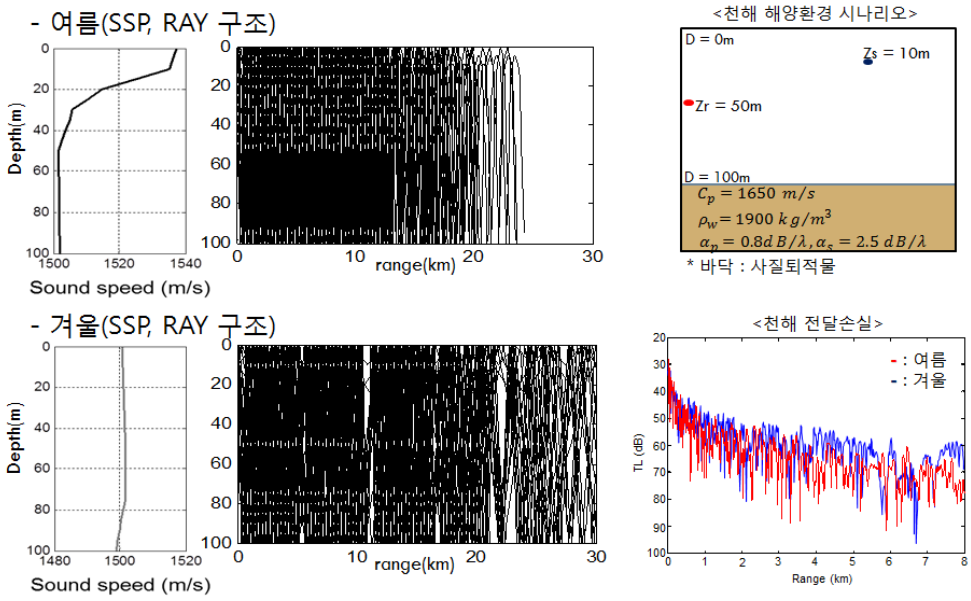


그림 42. 천해 여름과 겨울 음속구조 및 해양환경 시나리오, 전달손실

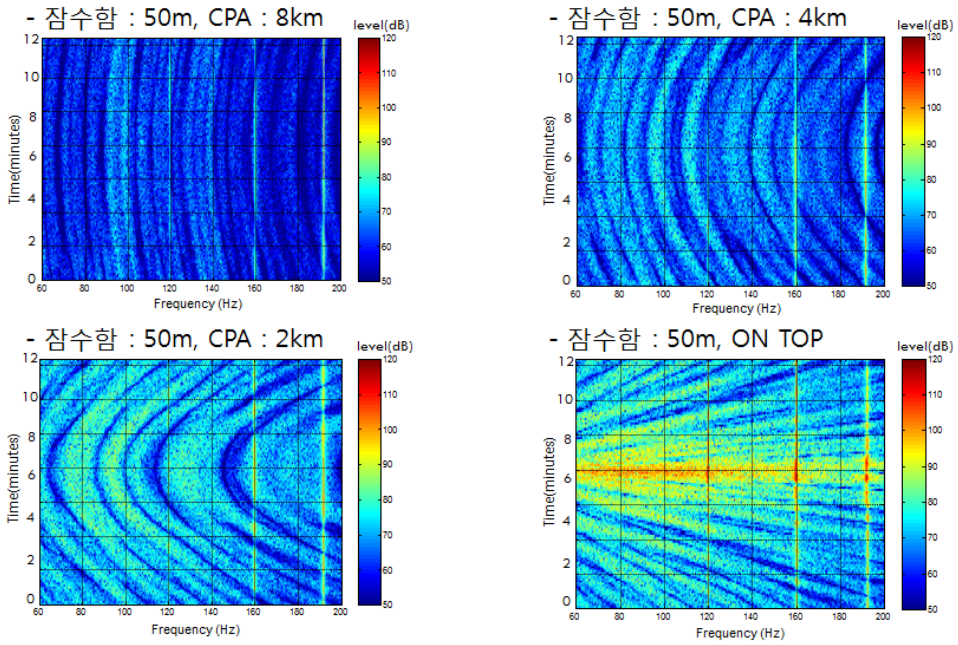


그림 43. 천해 여름철의 음선 간섭패턴

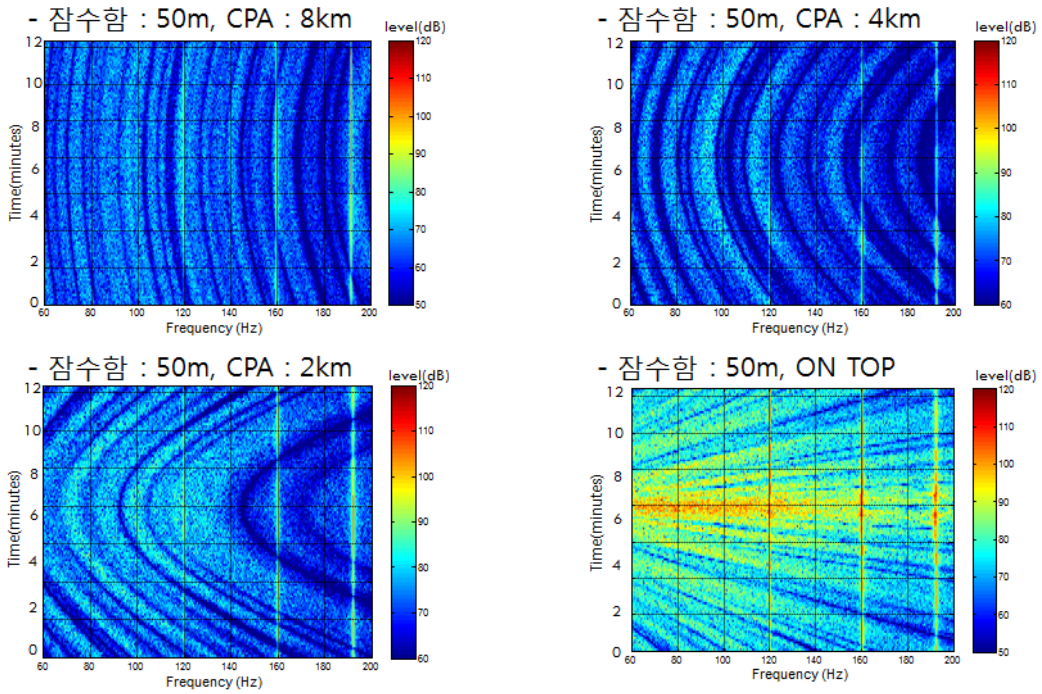


그림 44. 천해 겨울철의 음선 간섭패턴

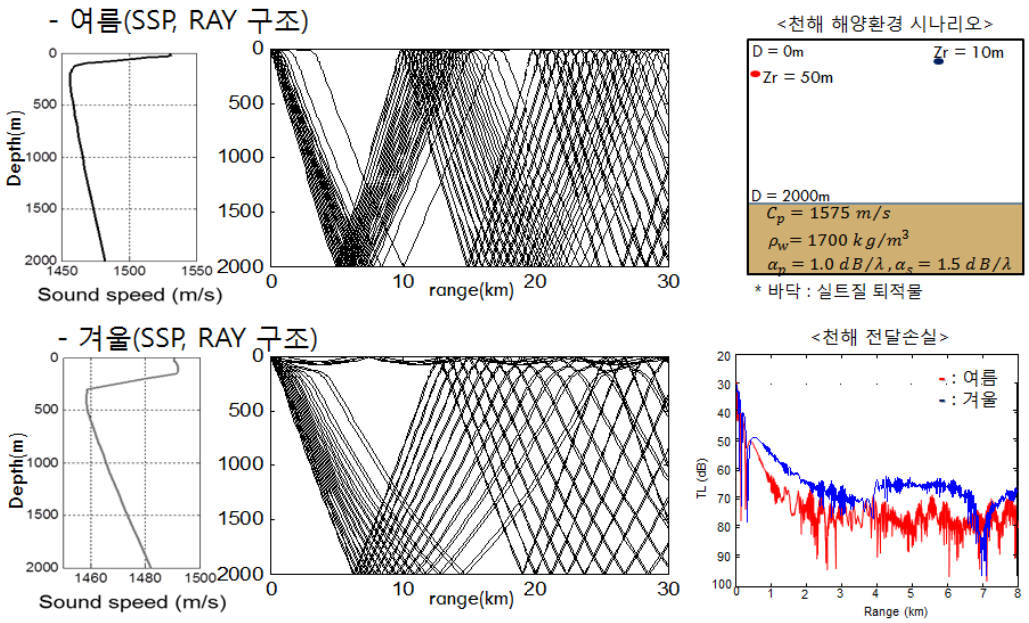


그림 45. 심해 여름과 겨울 음속구조 및 해양환경 시나리오, 전달손실

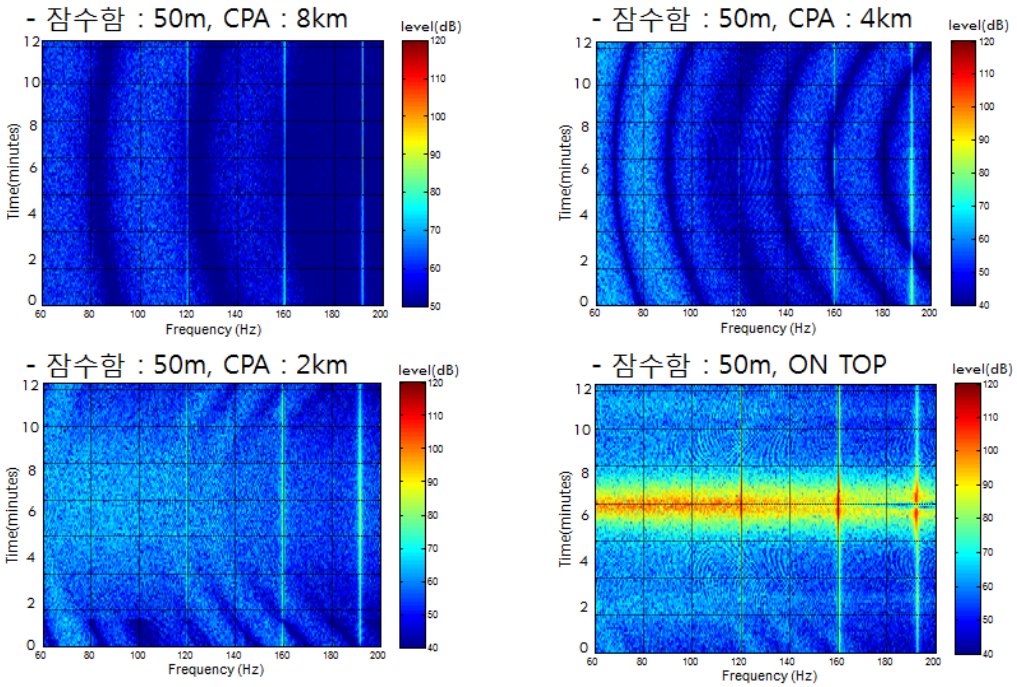


그림 46. 심해 여름철의 음선 간섭패턴

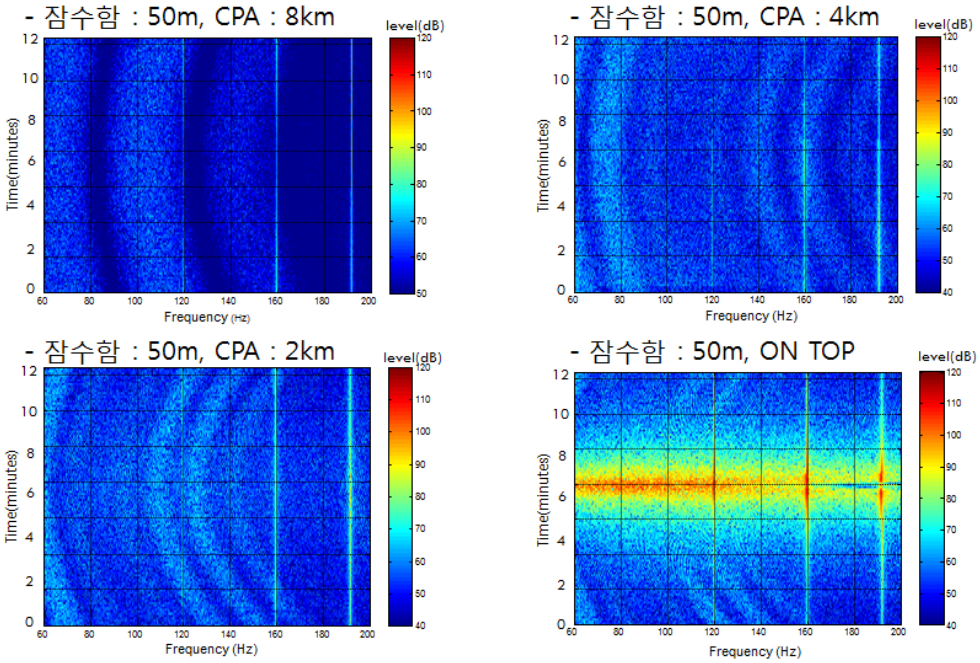


그림 47. 심해 겨울철의 음선 간섭패턴

이를 검증할 수 있는 주요 논문이 있어서 소개한다. Megan F.McKenna는 그림 48과 같이 캘리포니아 하단 산타 바바라 해협에 위치하는 주요 선박항로를 따라 이동하는 선박의 방사소음 레벨을 측정하기 위하여 HARP에 하이드로폰을 설치(580m)하고 약 3km의 CPA를 통과하는 선박의 방사소음레벨을 측정하였다.[60]

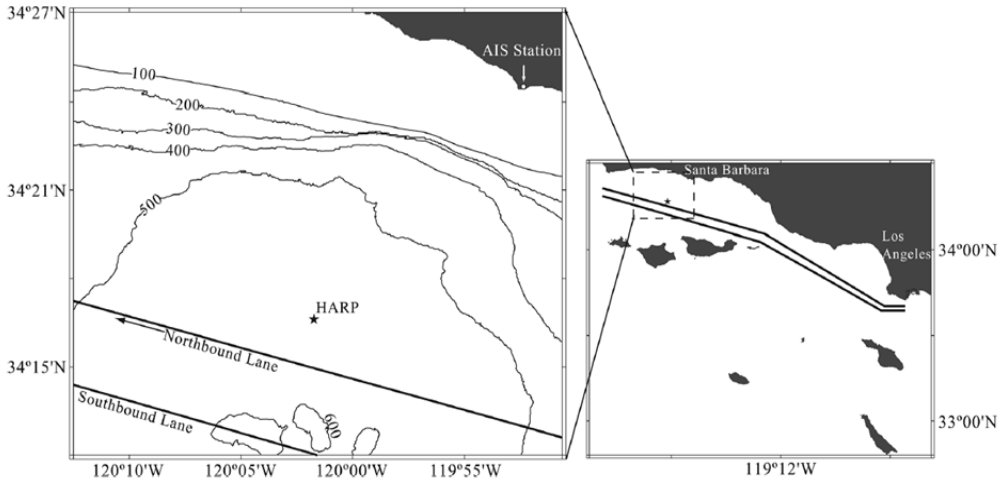


그림 48. 산타 바바라 해협의 선박 방사소음 측정 실험

측정결과 그림 49와 같이 3가지 주요한 특성을 확인할 수 있었다. 첫째, 100Hz 미만에서 프로펠러 캐비테이션과 하모닉성분에 따른 토날 성분이 식별되었다. 둘째, 100Hz 미만에서 소음레벨이 아주 컸으며 선박소음과 해양배경소음의 영향으로 판단된다. 셋째, CPA 3km를 통과하는 함정의 간섭패턴이 모두 U패턴(Bathtube)패턴을 보인다는 것이다. 이 결과는 본 시뮬레이터를 활용하여 분석한 간섭패턴과도 일맥상통하는 결과이다. [60]

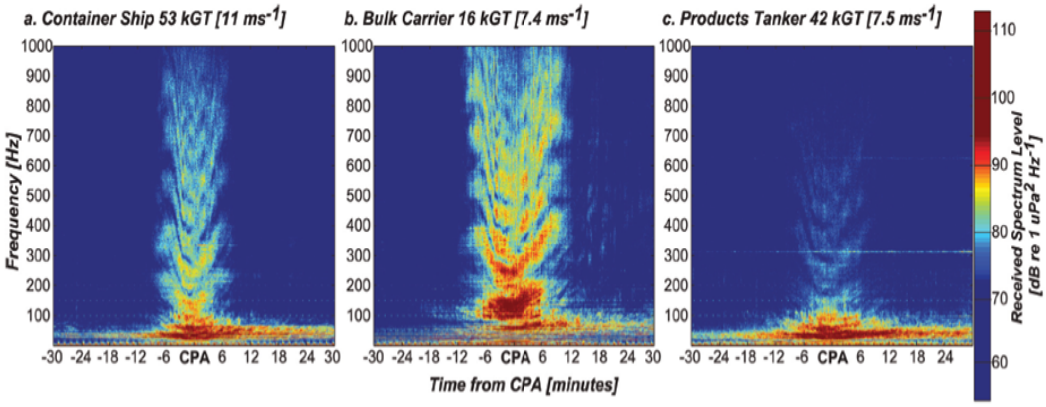


그림 49. 산타 바바라 해협의 측정된 선박 방사소음레벨

5. 소나 위치별 수신신호 근사

잠수함에 부착된 수동소나는 그림 50 과 같이 다양하여 잠수함 그 자체가 하나의 수동소나라고 해도 과언이 아니다. 표적소음원은 감쇄와 굴절을 통해 최종적으로 수신기에 특정한 amplitude, phase, timedelay를 가지고 도달하게 된다. 현대 국가별로 운용중인 잠수함은 그림 51 과 같이 길이 100m 이내의 디젤잠수함과 길이 100m이상의 핵잠수함으로 구분할 수 있다. 장보고-3 잠수함은 길이 100m이내의 디젤 잠수함이며, 따라서 중심소나에 수신되는 수신신호와 주변의 다른 소나에 수신되는 수신신호는 그림 52 와 같이 amplitude와 phase는 동일하고 위치에 따라 timedelay만 달라진다는 가정하에 frounhofer 근사법과 fresnel 근사법을 이용하여 수신신호를 근사할 수 있다.(식 33)[47]

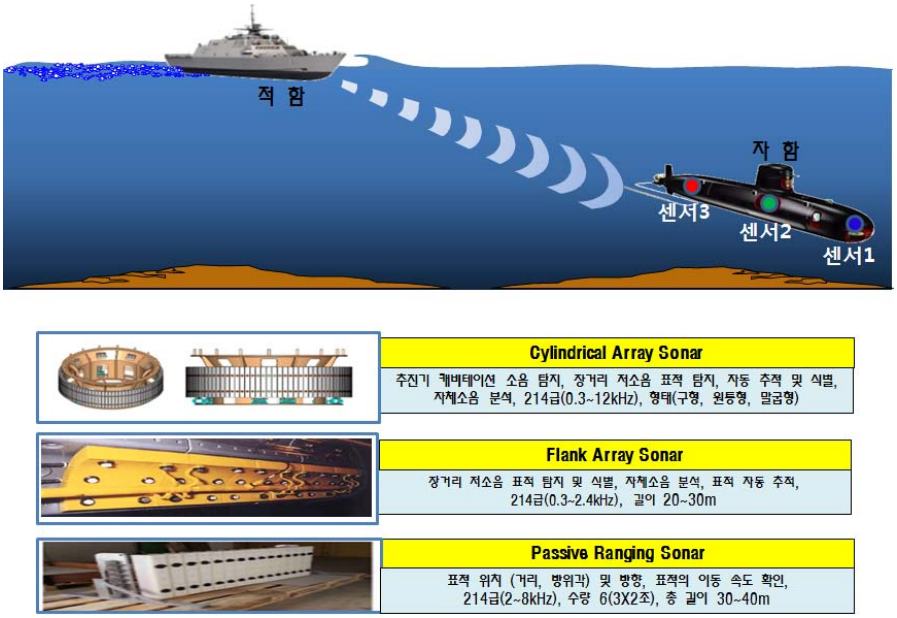


그림 50. 잠수함에 부착된 대표적인 수동소나 종류

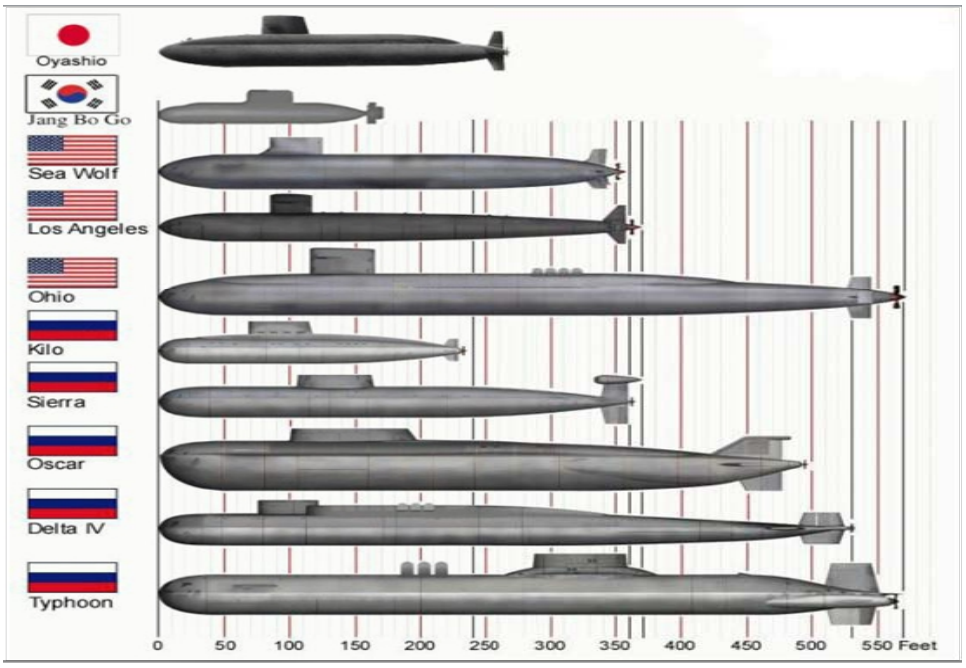


그림 51. 국가별 잠수함 크기 비교

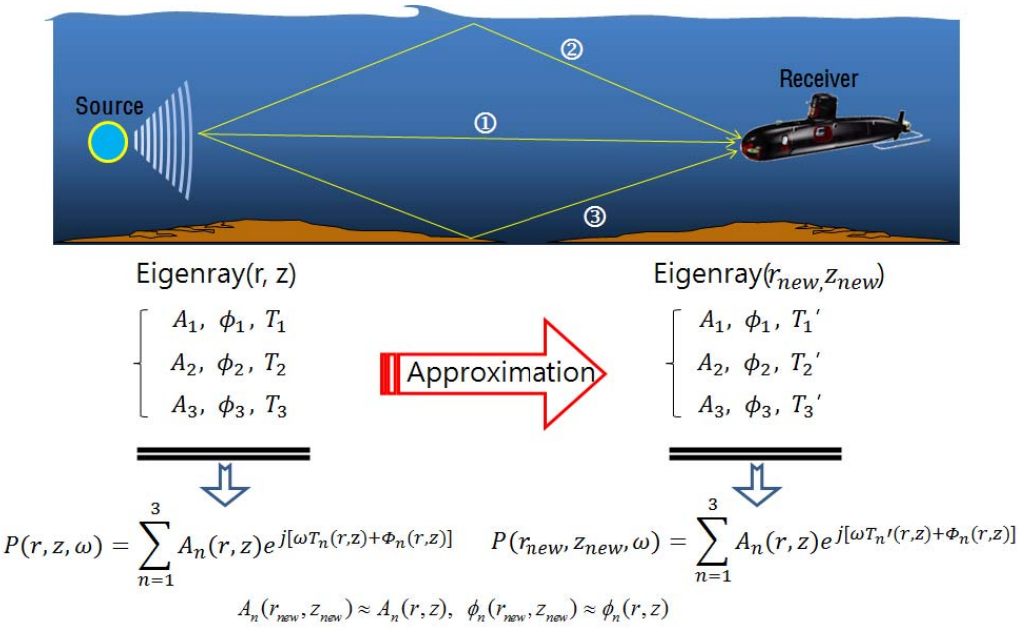


그림 52. 잠수함 수신신호 근사

$$
\begin{aligned}
T_n(\vec{r}_{new}) \approx\ & T_n(\vec{r}) + (\vec{r}_{new} - \vec{r}) \cdot \nabla T_n(\vec{r}) && \text{Fraunhofer approx.} \\
& + \frac{1}{2T_n(\vec{r})}\left[\left|\vec{r}_{new} - \vec{r}\right|^2 \left|\nabla T_n(\vec{r})\right|^2 - [(\vec{r}_{new} - \vec{r}) \cdot \nabla T_n(\vec{r})]^2 \right] && \text{Fresnel approx.} \\
& + \ldots \\
& A_n(r_{new}, z_{new}) \approx A_n(r, z),\ \ \phi_n(r_{new}, z_{new}) \approx \phi_n(r, z)
\end{aligned}
\tag{33}
$$

fraunhofer 근사법은 식 (33) 의 첫 번째 term까지의 근사방법이며, far field 영역에서 근사를 수행한다. fresnel 근사법은 식 (33) 의 두 번째 term까지의 근사방법이며, near field 영역에서 근사를 수행하는 차이가 있다. 여기서 $\nabla T_n(\vec{r})$는 잠수함의 중심을 그림 53 과 같이 X, Y, Z좌표로 설정하면 각 소나별로 수신되는 수신신호의 입사각과 거리차이에 따라 식 (34) 와 같이 나타낼 수 있다.[47]

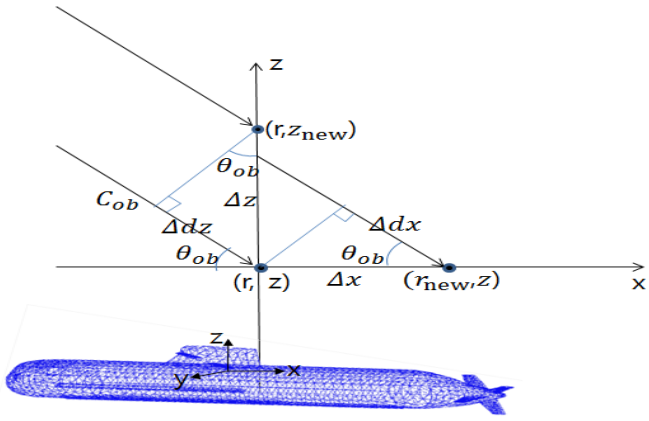


그림 53. 잠수함 소나 위치에 따른 수신신호

$$
\nabla T_n(\vec{r}) = \left(\frac{\partial T_n}{\partial x}, \frac{\partial T_n}{\partial y}, \frac{\partial T_n}{\partial z}\right) \approx \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta x}, \frac{\Delta T_n}{\Delta y}, \frac{\Delta T_n}{\Delta z}\right) \approx \left(\frac{\cos\theta_{ob}}{C_{ob}}, 0, \frac{-\sin\theta_{ob}}{C_{ob}}\right)
\tag{34}
$$

이 두 근사법을 적용하여 음원과 수신기의 거리에 따른 수신신호 근사의 정확도를 확인하였다. 특정 위치에서 수신되는 음장에는 식 (35) 와 같이 amplitude, phase, timedelay term으로 나타내어 진다.

특정거리에서 수신되는 소음레벨은 식 (36) 과 같이 source level 에서 전달손실을 감한 값이 된다. 여기서 SL은 거리 1M에서의 amplitude를 1로 두면 0이 되고 전달손실은 $-10\log|P|^2$ 으로 구할 수 있다.[47]

$$P(r,z,\omega)=\sum_{n=1}^{N}A_n(r,z)e^{j[\omega T_n(r,z)+\Phi_n(r,z)]} \tag{35}$$

$$RL=10\log|P|^2=10\log|A|^2-10\log r^2=SL-TL \tag{36}$$

식 (33) 를 통해 구해진 timedelay를 식 (35) 에 대입하여 특정한 소나에 수신되는 음장을 얻고 이를 식 (36) 에 대입하면 거리에 따른 전달손실 산출이 가능하다. 이렇게 얻어진 근사된 음장에 따른 전달손실을 거리에 따라 측정한 정확한 전달손실 결과와 비교하였다. 먼저 그림 54와 같이 시뮬레이터상 Half space, Iso-Soundspeed 환경에서 전달손실을 구하여 Nearfield Lloyd Mirror pattern과 비교결과 일치하였으며 시뮬레이터상 얻어지는 전달손실 값을 근사값과 비교하기 위한 비교군으로 사용하였다.[47] 비교결과 fresnel 근사법이 fraunhofer 근사법보다 음원과 수신기의 거리 변화에 따라 수신신호의 근사결과가 보다 정확하게 근사되어짐을 알 수 있다.(그림 55, 그림 56)

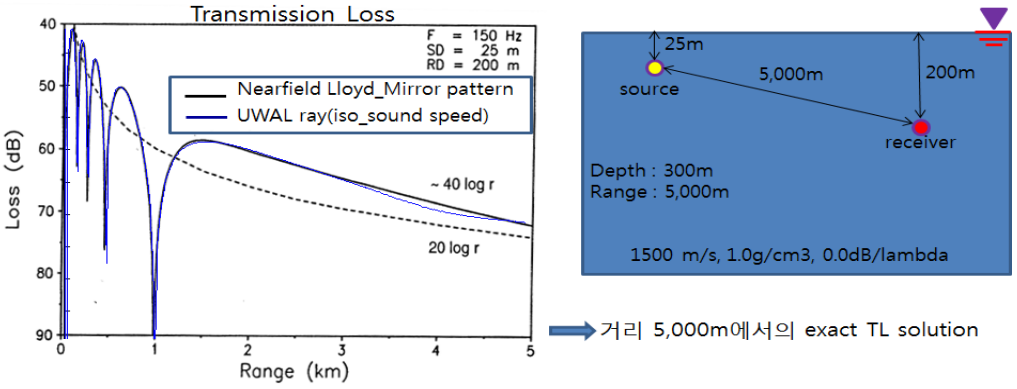


그림 54. 시뮬레이터 전달손실과 Lloyd Mirror pattern 비교(Iso-Soundspeed)

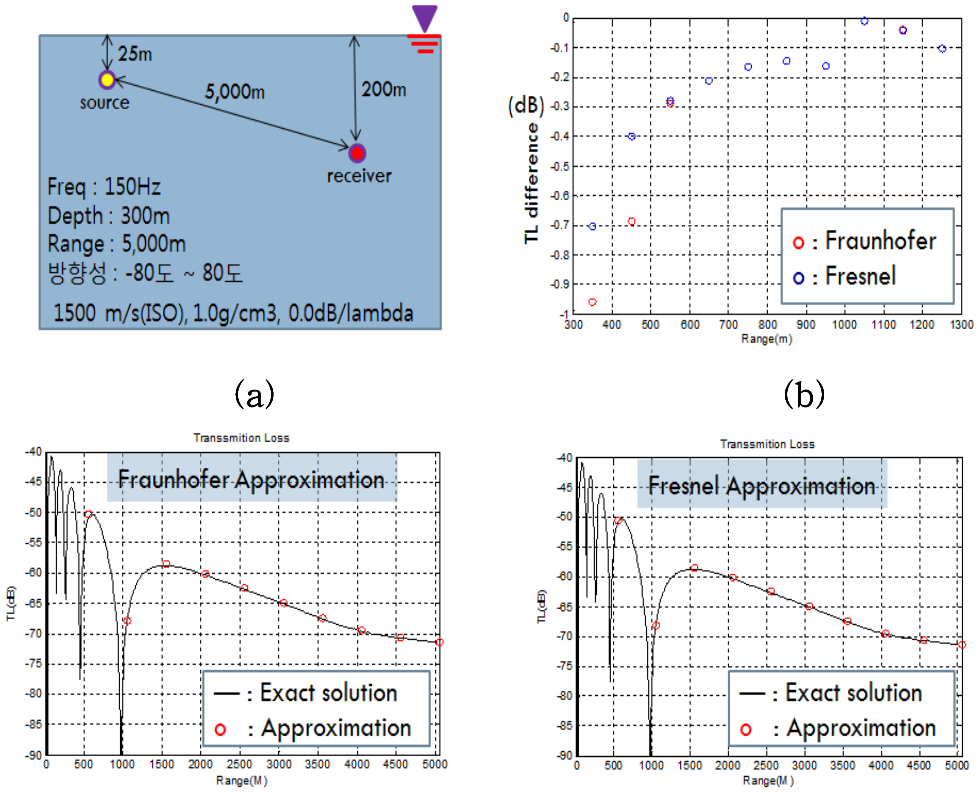


그림 55. 음원과 수신기 거리에 따른 수신신호 근사 정확도(Iso-Soundspeed), (a) 시뮬레이션 환경, (b) 각 근사법을 통한 TL과 정확한 TL의 차이, (c) fraunhofer 근사결과 비교, (d) fresnel 근사결과 비교

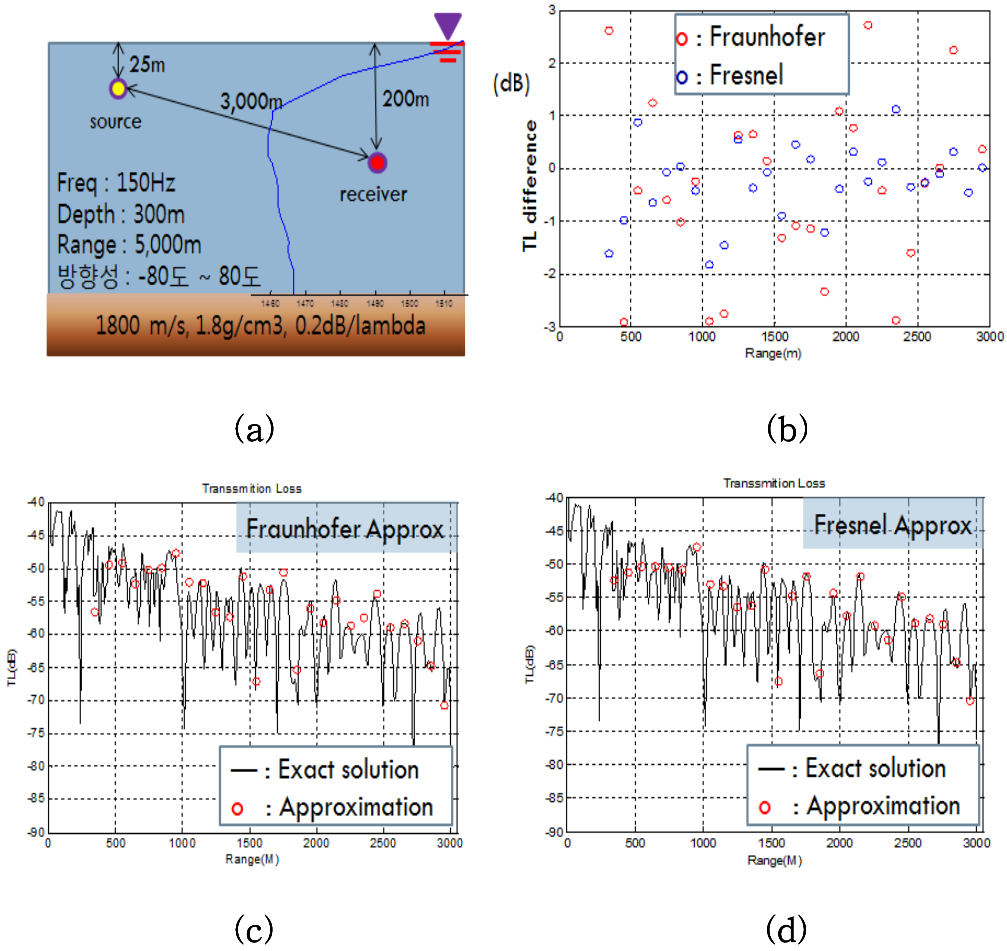


그림 56. 음원과 수신기 거리에 따른 수신신호 근사 정확도(Varying-Soundspeed), (a) 시뮬레이션 환경, (b) 각 근사법을 통한 TL과 정확한 TL의 차이, (c) fraunhofer 근사결과 비교, (d) fresnel 근사결과 비교

이러한 결과를 통해 fresnel 근사법이 fraunhofer 근사법 보다 정확하게 근사되어 질 수 있음을 확인하였고 fresnel 근사법을 적용하여 시뮬레이터 중심소나 시계열신호를 이용 소나위치에 따른 시계열 신호 근사를 시뮬레이션 하였다.

그림 57 과 같은 음속구조와 해양환경 파라메타를 적용하고 음원

은 수심 10M에서 180도 15KTS로 12분간 직선기동하였고, 중심소나는 (0, 0, 0)에 두고 중심소나에 수신되는 시계열신호를 이용하여 4개 위치 (-30, 0, 0), (-50, 0, 0), (-80, 0, 0), (-100, 0, 0) 에서의 시계열 신호를 근사하여 모의하였다. 그리고 그 결과를 정확한 결과와 비교하였다.

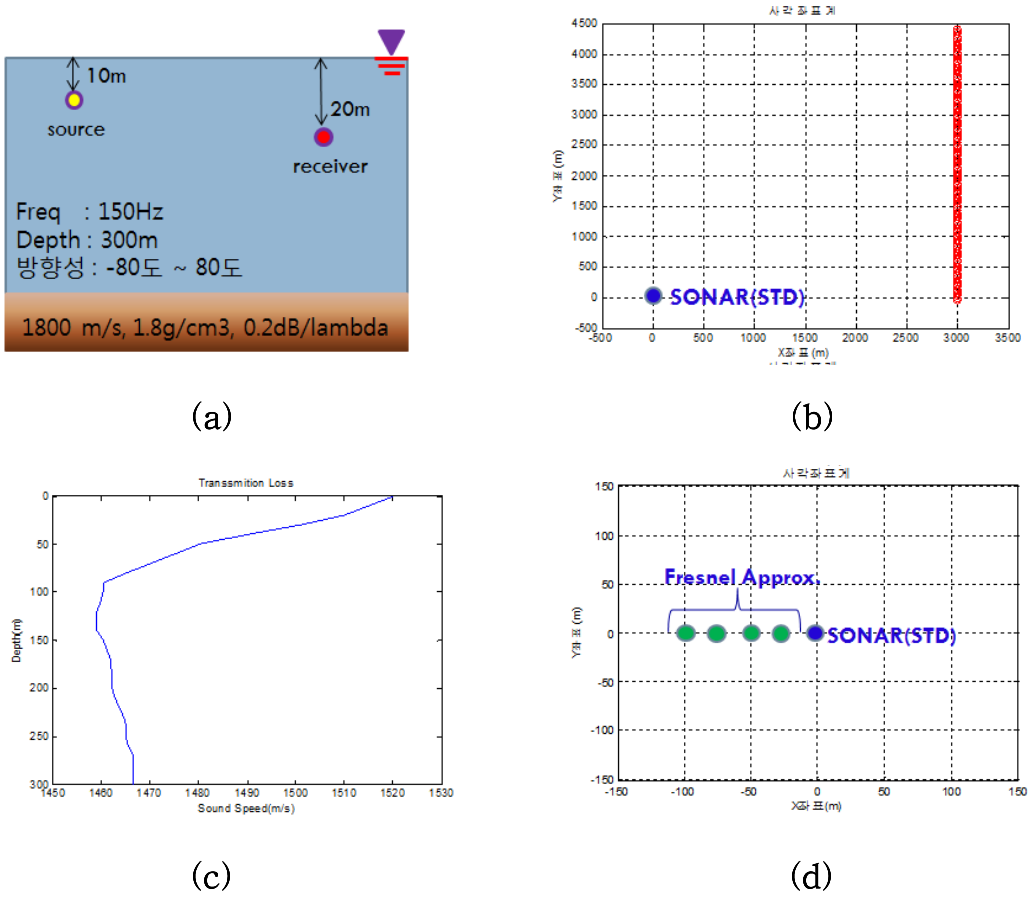
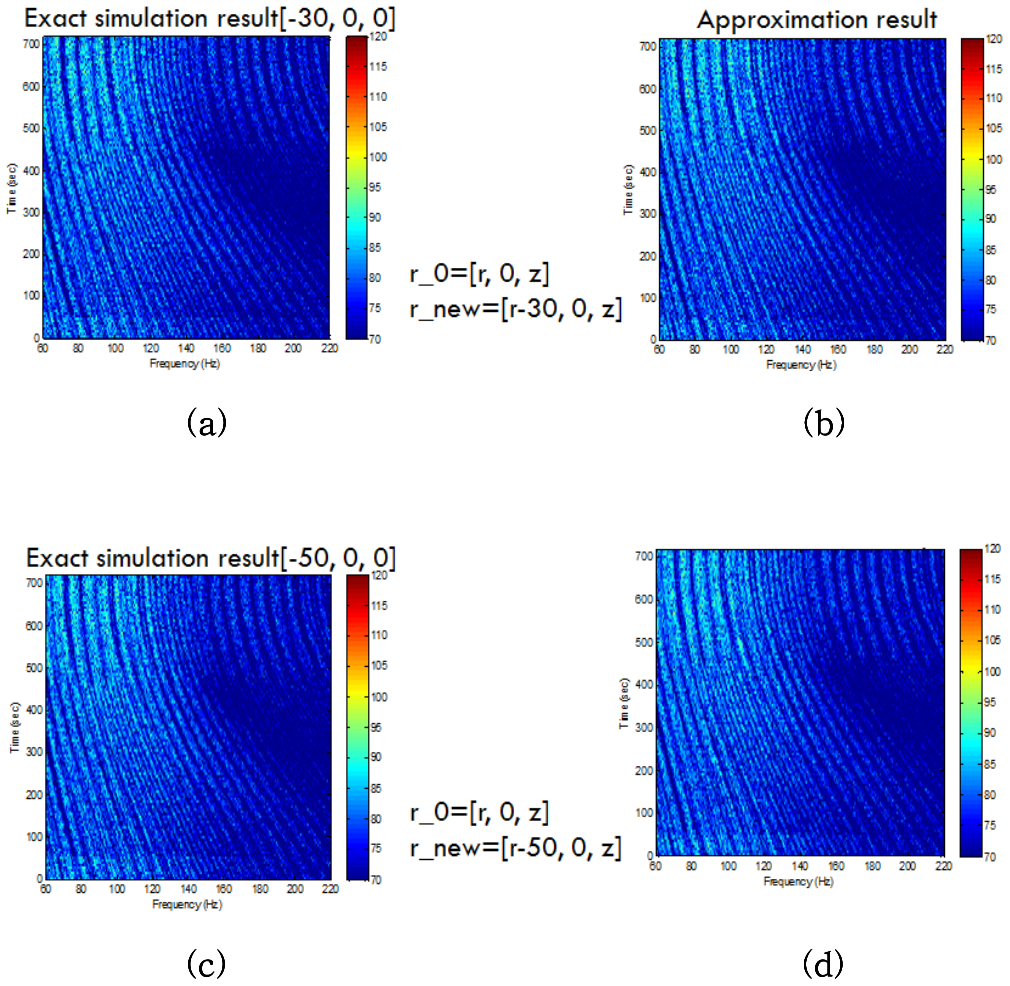


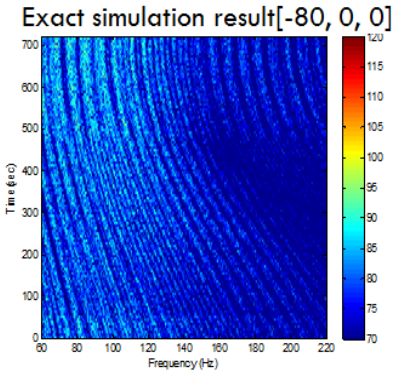
그림 57. 시계열신호 근사 시나리오(Varying-Soundspeed), (a) 시뮬레이션 환경, (b) 시뮬레이션 시나리오, (c) 시뮬레이션 음속구조, (d) 소나(중심소나 1개, 근사소나 4개) 배열

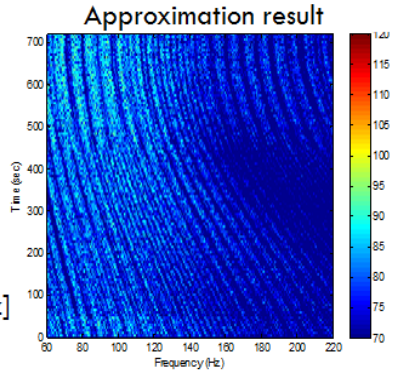
시계열신호 근사결과와 정확한 결과의 비교결과 그림 58 과 같이 중심소나로부터 거리 100M까지의 시계열신호 근사 결과값이 정확한 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다. 잠수함 길이가 100M 이내라고 가정시 잠수함에 부착된 각 소나거리는 최대 100M 이내라고 할 수 있다. 따라서 중심소나 시계열신호 이용 fresnel 근사를 통해 주변 소나의 시계열신호를 근사 가능함을 알 수 있으며, 이를 통해 시계열신호 계산 시간을 단축함으로써 잠수함 수동소나 시뮬레이터로서 효율성이 높아지게 된다.



(a) (b)

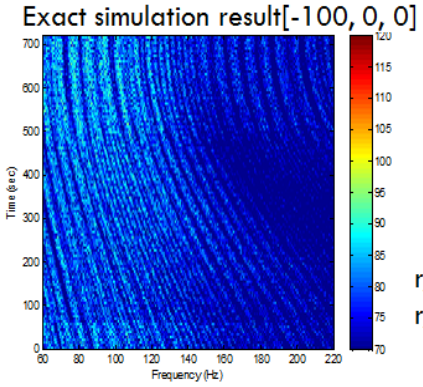
(c) (d)

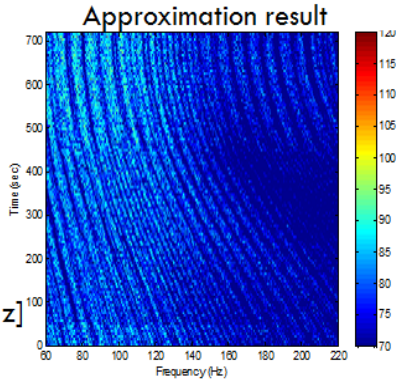




r_0=[r, 0, z]
r_new=[r-80, 0, z]

(e) (f)





r_0=[r, 0, z]
r_new=[r-100, 0, z]

(g) (h)

그림 58. 시계열신호 근사결과(Varying-Soundspeed), (a) (-30, 0, 0) 근사값, (b) (-30, 0, 0) 정확한 값, (c) (-50, 0, 0) 근사값, (d) (-50, 0, 0) 정확한 값, (e) (-80, 0, 0) 근사값, (f) (-80, 0, 0) 정확한 값, (g) (-100, 0, 0) 근사값, (h) (-100, 0, 0) 정확한 값

6. 결 론

본 논문는 수중에서 활동하는 잠수함 수동소나에 수신가능한 다양한 소음원의 신호특성에 따라 모델링하고 SNU-ray의 전달모델을 통해 잠수함 수동소나에 수신되는 과정을 모델링하였다. 표적소음원 중에서 우세적인 프로펠러 변조신호를 모의하여 특정 blade와 RPM에 따른 변조신호를 모의하여 잠수함 승조원으로 하여금 오디오신호를 통해 표적종류와 속력을 식별가능토록 하였다. 해양배경소음원 중 잠수함 소나 주파수대역에서 우세한 바람에 의한 해수면의 DIPOLE 소음을 모의하여 수신가능한 거리에 대하여 적분함으로써 바람속력에 따른 해양배경소음을 모의하였다. 모의결과 바람속력이 높을수록 표적소음 식별이 어려워짐을 알 수 있었다. 또한 잠수함 속력 증가에 따라 잠수함 소나에 우세적인 영향을 미치는 유체소음에 의한 자체소음원을 모의하였으며, 이러한 유체소음이 소나돔을 통해 소나돔내 소나에 수신되는 투과손실을 고려하여 보다 실제와 가까운 신호를 모의토록 강구하였다. 모의결과 잠수함 속력이 증가할수록 표적 소음 식별이 어려워짐을 알 수 있었다. 이로써 수동소나 식에서와 같이 시그날 이득값에서 자체소음과 해양배경소음이 장애요소로 작용함을 확인하였다. 잠수함을 수중에서 3차원 기동과 변침, 변속을 고려토록 모의하여 다양한 해양환경과 기동시나리오에 따라 수신되는 소음 간섭패턴을 비교결과 CPA를 근접통과시 Bathtub 현상과 잠수함에 표적이 ON TOP시 Pinetree 현상이 나타남을 확인하였고 실제 측정결과와 유사성을 확인하였다. 마지막으로 함수 소나에 수신되는 소음원을 이용하여 fresnel 식을 이용하여 다른위치에 수신되는 소음원을 근사로 모의하여 정확한 값과 비교결

과 거의 일치하였으며, 소나 시뮬레이터의 효율성을 위하여 fresnel 식을 활용하여 다른 위치의 소나에 수신되는 소음원 근사가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 일련의 알고리듬을 잠수함 수동소나 시뮬레이터에 활용함으로써 평시에 잠수함 승조원들이 보다 효율적으로 훈련을 진행할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 국과연, 장-3소나 시뮬레이터 3차년도 중간보고, 과제회의, 2011.

[2] 김경섭, 이근화, 성우제, 김성일, 김영규, “L-자형 선배열을 이용한 지음향학적 인자 역산 및 음원 위치 추정,” 한국 음향학회지 25(7), 346-355, 2006

[3] 김재수, 임준석, 김성일, 김영규, 정문섭, 다종 소나 운용에 대한 음향탐지 효과도 분석, 국방과학연구소, 제 6기술연구본부, 2007.

[4] 나영남, 김영규, 박정수, 김정훈, “수상함용 능동소나 음탐환경분석체계(FAIMS 2.0) 개발,” 제4회 해상무기체계 발전 세미나, 국방과학연구소, pp. 215-219, 2002.

[5] 나영남, 김영규, 김성일, 조창봉, 김형수, 이용곤, 이성호, “잠수함용 소나성능예측시스템 SAIMS 1.0 개발, 2004년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제23권 제1(s)호, pp. 195-198, May. 2004.

[6] 나영남, 김영규, 김성일, 조창봉, 김형수, “잠수함용 수동소나 음탐환경분석 기법 연구,” 2004년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제22권 제2(s)호, pp. 195-198, Nov. 2004.

[7]] 박규태, 이정훈, 백광석, 김성덕, “능동 표적 탐지 시뮬레이터 구현,” 제 7회 해양무기 학술대회, 2008.

[8] 서영수, “FRP 음향창의 음향성능 설계기법 연구”, 한국 소음진동공학회 논문집 제 21권 제 10호, pp. 890~896, 2011.

[9] 성우제, 차세대 잠수함 탑재 소나체계 기술 개념 연구, 해군전투발전단, 2008.

[10] 안상겸, “음선모델을 적용한 수동소나 시뮬레이터 개발”, 서울대

학교 석사학위 논문, 2011.
[11] 이경택, "소나형상에 따른 수동 탐지효과도 분석," 공학박사 논문, 한국해양대학교 대학원, 2011.
[12] 장덕홍, 이형욱, 조상훈, 김인수, 표적 식별 시뮬레이터 예비 설계, 국방과학연구소, 2006.
[13] 장덕홍, 조상훈, 김인수, 김형문, 음향 식별 시뮬레이터 운용화면 설계, 국방과학연구소, 2006.
[14] 정우진, "소나 돔 음향창 시편 투과손실 측정/분석 방법 고찰", 한국소음진동공학회 2006년 춘계학술대회논문집, 2006
[15] 조정홍, "수중음향 모델링에 기반한 소나체계의 성능 분석," 공학박사 논문, 한국해양대학교 대학원, 2011.
[16] 제2체계개발본부, 예인음탐기용 표적시뮬레이션 모델을 위한 전달특성 필터 설계, 국방과학연구소, 2000.
[17] 제2체계개발본부, 예인음탐기용 표적시뮬레이션 모델을 위한 광대역 전달특성 필터 설계, 국방과학연구소, 2000.
[18] 오원천, "잠수함 소나 개발 현황," 국방과학연구소 국방과학기술아카데미, 2007. 10.
[19] 이지혜, "A study of acoustic characteristics for acoustic window materials of sonar dome", 성균관대 석사논문, 2007
[20] 최복경, 김봉채, 김철수, 김병남, "한반도 주변해역 수중배경소음의 풍속과 선박분포에 따른 의존성 분석", 한국음향학회지 22 (3), 233-241, 2003
[21] Anthony J.Perrone, "Ambient-Noise-Spectrum Levels as a function of water depth", Journal of the Acoustical Society of America, 1970.

[22] ATLAS ELEKTRONIK GmbH, Operating Instructions ATLAS Onboard Simulator SIM 90-xx manual, issue:1.0, 2005.

[23] Ali Can TAKINACI, Tarkan TARALP., “PROPELLER NOISE SIMULATION WEB PAGE”, Istanbul Technical University..

[24] A.D.Waite, “SONAR for Practising Engineers, 3rd edition”, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.

[25] Barkat, M., and Varshney, P. K., "Decentralized CFAR signal detection," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 25(2): 141-149, 1989.

[26] Baxley, P. A., Bucker, H. and Porter, M. B., "Comparison of beam tracing algorithms," Proceedings of the 15th European Conference on Underwater Acoustics, 2000.

[27] Brown, S. S., "Optimal search for a moving target in discrete space and time," Operations Research, Vol. 28, No. 6, pp 1275-1289, 1980.

[28] Burdic, W.S, “Underwater Acoustic System Analysis 2nd edition”, Prentice-Hall, 1991.

[29] Chair, Z. and Varshney, P. K., " Optimum data fusion in multiple sensor detection systems," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 22 (1): 98-101, Jan 1986.

[30] Chernyak, Victor S., "Effective Simplified Decentralized Target Detection in Multisensor Systems," Information Fusion, 2000. FUSION 2000. Proceedings of the Third International Conference on Volume 2, 10-13 July 2000 Page(s):THB4/9 -

THB415, Vol. 2.

[31] Chu, P. C., Cintron, C., Haeger, S.D. and Keenan, R. E., "Acoustic Mine Detection Using the Navy's CASS/GRAB Model," This work was supported by the U.S. Office of Naval Research, 2002. 1.

[32] C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications," IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION, 2005

[33] Dawe, Ross L., "Detection Threshold Modeling Explained," DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, 1997

[34] Deatte, M. A., "Signature modeling for acoustic trainer synthesis," IEEE J. Oceanic. Eng., Vol. OE-12, No. 1, pp. 143-147, 1987.

[35] DelBalzo, D. R., Hemsteter, K. P., and Kierstead, D. P., "Improving ASW with GRASP Multi-Sensor Search Optimization," in Proceedings of the 6th conference Undersea Defense Technology Conference, 30 October-1, 2001, Honolulu.

[36] DelBalzo, D. R., Hemsteter, K. P., Wagstaff, M. D., Rike, E. R., and Leclere, J. H., "Environmental Effects on MCM Tactics Planning," MTS/IEEE Conference on Ocean, Vol. 3, pp. 1394-1399, 2002.

[37] Dongho Kim, "Non-cavitating propeller noise inversion and induced hull pressure prediction", AMEC, 2012.

[38] E. Eugene Mikeska and John A. Behrens, "Evaluation of

transducer window materials" JASA, 1976.

[39] ELAC Nautic, "http://www.elac-nautic.com"

[40] Etter, P. C., "Recent advances in underwater acoustic modelling and simulation," J. Sound and Vibration, Vol. 240, No. 2, pp. 351-383, 2001.

[41] Ferla, Carlo M. and Porter, Michael B., "Receiver Depth Selection for Passive Sonar Systems," IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL.16, NO. 3, JULY 1991.

[42] Finn B. Jensen, William A. Kuperman, "Computational Ocean Acoustics, Springer, 2011.

[43] Fundamentals of Naval Weapons Systems, "www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/fun/part09.htm"

[44] G.L.D'Spain, W.A.Kuperman, "Application of waveguide of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth", Journal of the Acoustical Society of America, 106(5) pp 2454-2468, Nov. 1999

[45] G. M. Corcos, "resolution of pressure in turbulence", Journal of the Acoustical Society of America, 1962

[46] Goddard, R. P., The sonar simulation toolset, Release 4.1: Science, Mathematics, and Algorithms, APL-UW technical report, 2005.

[47] Herman Medwin and Clarence S. Clay, "Fundamentals of Acoustical Oceanography", Academic Press, 1998.

[48] Jackson, D. R. and Richardson, M. D., High-frequency seafloor acoustics (Springer, NY, 2007).

[49] Jean-Paul Marage, Yvon Mori, "Sonar and Underwater

Acoustics", JOHN WILEY & SONS, LTD, 2010.

[50] Jenson, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., and Schmidt, H., Computational ocean acoustics (AIP Press, NY, 1994).

[51] Joseph T. Hansen, "LINK BUDGET ANALYSIS FOR UNDERSEA ACOUSTIC SIGNALING", Lieutenant, United States Navy B.S. Auburn university, 1994.

[52] Jung-Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning Based on Genetic Algorithm in Continuous Path System" OCEANS'2006 IEEE Asia Pacific-Singapore. pp. 116-117, May 2006.

[53] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seong il Kim, Young Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning for a Moving Target in Continuous Path", The 9th Western Pacific Acoustics Conference, June 26-28, 2006.

[54] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, and Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning for Sonar System Based on Genetic Algorithm," pp. 218-224, Vol. 17, No. 3, International Journal of Offshore and Polar Engineering, September 2007 (SCIE, ISSN 1053-5381).

[55] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seong il Kim, Young Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning in Realistic Environments Based on Genetic Algorithm", Proceedings of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN'08 (OTO'08) Conference, Kobe, Japan, April 8-11, 2008.

[56] J. S. Kim, "Underwater Acoustics and Sonar Engineering,"

Lecture Note, 2005.

[57] Kevin L.Cockrell and Henrik Schmidt, “Robust passive range estimation using the waveguide invariant”, JASA, 127(5), 2010.

[58] Kierstead, D. P., "The Operational Route Planner," Presentation file, ADD, October 22-25, 2007.

[59] Kierstead, D. P. and DelBalzo, D. R., "A Genetic Algorithm Applied to Planning Search Paths in Complicated Environments," Military Operations Research, Vol. 8, No. 2, pp 45-59, 2003.

[60] Megan F.McKenna, “Underwater radiated noise from modern commercial ships”, Journal of the Acoustical Society of America, 2011.

[61] McCammon, D., Active sonar modeling with emphasis on sonar stimulators, DRDC Atlantic report, 2004.

[62] McMahon, D. R. A. and Bartel, D. W., "Multi-sensor sonar data simulation," SIMTECT 96 Proceedings, pp. 53-57, 1996.

[63] Michael A. Deatte, "Signature Modeling for Acoustic Trainer Synthesis,"IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-12, No.1, pp 146-146, Jan. 1987

[64] Modular Signal Analysis & Intelligent Capability/MOSAIC Thales Underwater Systems, 2006

[65] M. Barkat, P.K. Varshney, "Decentralized CFAR signal detection," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 25(2): 141-149, 1989.

[66] P. Scrimger and R. M. Heitmeyer, “Acoustic source-level measurements for a variety of merchant ships”, JASA, 1988.

[67] Richard O,Nielsen, “Sonar Signal Processing”, Artech House Publishers, 1991.

[68] Richard P,Hodges, “Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar ”, WILEY Publishers, 1991.

[69] R.J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd edition, McGraw-Hill Book company, 1983

[70] Ross, Donald, “Mechanics of Underwater Noise”, PeninsulaPub, 2007

[71] Skudrzyk, F. J., and Haddle, G. P., "Noise production in a Turbulent Boundary Layer by smooth and rough surfaces." Journal of the Acoustical Society of America, 1960

[72] Skudrzyk, F. J., and Haddle, G. P., "The physics of Flow Noise." Journal of the Acoustical Society of America, 1969

[73] Srinivasan, R., "A theory of distributed detection," Signal Processing, 1 1(4): 319-327, Dec 1986.

[74] Srinivasan, R., "Distributed radar detection theory," IEEE Proceedings, Part F, 133(1):55-60, Feb 1986.

[75] Sung H. Ko and Albert H. Nuttall, “Analytical evaluation of flush-mounted hydrophone array response to the Corcos turbulent wall pressure spectrum“, Journal of the Acoustical Society of America, 1991

[76] Theriault, J. A., and Ellis, D. D., "Shallow-water low frequency active sonar modelling issues," IEEE Oceans '97 Proceedings, pp. 672-678, 2009. 4.

[77] V. Bhujanga Rao, “Flow induced noise of a sonar dome”, Elsevier Ltd, 1983

[78] Wayne A. Strawderman, “Turbulence-Induced plate Vibrations:an Evaluation of finite and infinite plate models”, Journal of the Acoustical Society of America, 1969

[79] Wagner, D. H., Mylander, W. C. and Senders, T. J., "Naval Operations Analysis," Naval Institute Press. 3rd Ed. 1999.

[80] Weinberg, H. and Keenan, R. E., "Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100, No. 3, pp. 1421-1431, 1996. 9.

[81] Weinberg, H., "CASS Roots," IEEE Oceans '00 Proceedings, pp. 1071-1076, 2000.

[82] Wenz, G. M., “Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34, 1936(1962)

[83] William M. Carey and Richard B. Evans, “Ocean Ambient Noise”, Springer Publishers, pp. 99-126, 2011. 6

[84] Zynwalt, M. W., Korsakm, A. J., and Ratner, R. S., "Appendix A Standard Antisubmarine Warfare Measures of Effectiveness and Measures of Performance,'' PEO (MUW) INST 3370.1, 2000.

Abstract

Noise Simulation and Interference Pattern Analysis for Submarine Passive Sonar

Byoung-Uk, Kim

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Passive sonar of submarine can detect the target ships in long range and can attack using it. there are many noises which can be received at passive sonar of submarine. first target radiated noise, it is based on the target ship's propeller, machinery etc.. but mainly caused by propeller and we can model it using the modulated signal. second ocean ambient noise, and there are many sources for ambient noise. but when we consider frequency range of passive sonar then wind noise is dominant. so in this paper, we researched only for the wind noise. and last self noise,

it caused by water which pass though the submarine surface. so it dependent on the submarine's speed.

There are many reserachs and studies for sources of sonar, but they usually modeled the source simply. and some cases they just used real data(sound sources). so it have some differences with real signal when it is received on the sonar.

In this paper, I am focusing on modeling variety sources. and using the already developed model for transfer, finally we can obtain real like a signal which received on the sonar. and analysis the interference pattern of sonar signal using the variety ocean ambient and movement scenarios.

Finally approximate source signal using the fresnel equation. when we using it, we can approximate different position's sonar signal using the original one.

When we using these algorism for sonar simulator, sonar operators can real like a train and they can achieve victory at fight against enemy.

keyword : passive sonar simulator, ray model, vessel noise model
student number : 2011-22952

감사의 글

누군가 그랬죠. 시간이 화살보다 빠르다고...정말로 저에게 주어진 2년이란 시간은 전광석화와 같이 지나간 것 같습니다. 한편으로 후련하고 한편으로는 너무나 아쉽기도 합니다. 2년이라는 시간동안 맨땅에 헤딩하는 저에게 진정한 스승이 되셔서 학문뿐만 아니라 인생에 관해서도 많은 가르침을 주신 성우제 교수님께 진정으로 감사의 말씀을 드립니다.

한 번 이루어진 사제지간이므로 죽을때까지 잊지 않고 자주 연락드리고 기회가 되면 자주 찾아뵙도록 하겠습니다.

그리고 연구실에서 이것저것 챙겨주시고 가까운 동네형처럼 연구에 많은 도움을 주신 이근화형께 감사드립니다. 형 너무 빵만 드시지 마시고 맛있는 밥도 많이 챙겨드세요. 형같은 사람에게 왜 여자들이 줄을 서지 않는지 안타깝습니다.

지금은 졸업하고 안계시지만 입학때부터 이것저것 챙겨주신 이재혁 선배님과 박상현 선배님께 감사드립니다. 선배님들이 서울대에서 수중음향분야에서 해군장교로서 좋은 모습을 보이셔서 많은 후배들에게 귀감이 되셨고 저도 선배님들을 보면서 많은 가르침을 받았습니다. 앞으로 실무에서도 자주 뵐 수 있었으면 좋겠습니다.

1살 어린 동생이지만 학문에서 만큼은 선배인 추영민, 요즘 연애사업하랴 연구실 챙기랴 많이 바빠보이네. 학문에서 만큼은 남보다 뛰어난 열정을 가지고 있는 모습이 보기 좋고 앞으로도 그런 열정 계속 유지했으면 좋겠다.

해군동기이자 연구실 동문인 김동호..내가 먼저 졸업할게. 연구실을 책임져다오..동기이자 항상 맏형으로서 이것저것 연구실 동생들 챙

길려는 모습이 보기 좋은거 같다. 남은 2년간 소귀의 성과를 이루고 복귀하기를 기원할게.

그리고 또 한명의 동기, 이정철..작년에 나의 모습을 보는거 같아서 많이 도와주려고 했는데 부족했던거 같네..자전거 타다가 팔 부러져서 고생도 많이 하고..나와 마찬가지로 연구하랴 가장으로서 집안 챙기랴 힘들겠지만 2년간 후회가 남지 않는 생활을 하길 바래.

해군후배이자 연구실 후배인 정영철...다소 딱딱하고 기합 든 모습이 처음에는 어색하더니 어느새 너의 트레이드 마크가 된 것 같네. ^^ 그렇지만 연구는 항상 유연한 사고로 생각하고 해야지 잘될거야. 너도 이제 2년밖에 남지 않은 석사생활을 후회남지 않도록 잘 보내기 바란다. 장-3 과제를 잘 마무리 해다오 ㅎㅎ

2012년도 신임 방장 박지수.. 대구 싸나이답게 뭐든지 열정적이고 유쾌한 모습이 보기 좋아. 앞으로 방장으로서 연구실을 훌륭하게 이끌어가길 기대할게. 차 수리할 때 많이 도와줘서 정말 고마워^^ 내 차 볼 때마다 너 생각이 제일 먼저 날 것 같다.^^

연구실의 홍일점(청일점?) 현아라...항상 유쾌한 연구실 분위기(?)를 만들어 줘서 고맙고 처음에 연구실 생활 헤매고 있을 때 많이 도와줘서 고맙다. 제주감귤도 맛있게 잘 먹었어..앞으로 진해로 배달 부탁해 ^^ 연구생활 잘하고 항상 파이팅 해라.

언제나 묵묵히 연구 열심히 하는 해상아....술자리 아니면 너랑 말할 수 있는 기회가 적어서 다소 아쉽네.. 지난해 여름 MT때 술마시면서 너의 고민을 말할 때 얼굴표정에 드러나진 않지만 많은 어려움을 안고 연구를 하고 있는걸 알았다. 그렇지만 항상 묵묵히 잘하고 있는거 같아서 보기 좋네. 후회없는 연구 및 소귀의 성과 이루고 여자친구와의 연애사업도 잘되길 바란다.^^

석사 동기 세현아...함께 수업듣고 모르는 건 서로 도와주며 공부하다 보니 어느새 2년이 지났네...졸업준비로 맘고생이 많았을 건데 잘 마무리된거 같아 기쁘네. 해군 장교로 간다니 진해에서 자주 보자.. 해군생활 쉽지 않을건데 연락주면 많이 도와줄게..술도 한잔씩 하고^^

연구실 막내 중용아...처음엔 말없는 애인줄 알았는데 1년이 지나니 방언이 터져 수다쟁이(?)가 되었구나.^^ 공부나 연구나 운동이나 뭐든지 열심히 하는 모습이 보기 좋네... 막내지만 항상 연구실 발전을 위해 노력하는 모습이 많은 본보기가 된거 같다. 박사 졸업할때까지 열심히 해서 후회없는 연구실 생활이 되길 바래.

사랑하는 아내..공부한다고 가장으로서 많이 도와주지 못해 미안해. 처음엔 서울 여기저기 구경다니자고 했는데 지나고보니 약속 많이 못지켰네..주말에는 바쁘거나 피곤하다는 핑계로 함께 하지 못한 시간도 많았던거 같고...앞으로 해군 복귀하면 더 시간이 없을 듯 한데 그래도 싫어하는 내색없이 내조 잘해줘서 고마워..아들 시우와 딸 단아도 잘 키워줘서 고맙고..사랑해.

장인, 장모님..저를 많이 믿어주시고 지원해주셔서 감사드립니다. 서울에서 가까운 거리에 계신데 자주 찾아뵙지 못해서 죄송하고 앞으로도 좋은 사위가 되도록 노력할께요.

항상 아들 걱정이 많으신 아버지, 어머니..효도도 잘못하고 용돈도 잘 못드려서 죄송합니다. 진해가면 애들데리고 자주 찾아뵐께요.

마지막으로 해군에 감사드립니다. 아낌없는 지원을 해주셔서 좋은 성과를 이루고 복귀합니다. 더 나은 해군장교로 해군발전을 위해 성실히 근무하겠습니다. 감사합니다.