



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

공학석사학위논문

거친 해수면에서의 수중표적
탐지 특성 연구

Target detection under rough sea surfaces

2014년 2월

서울대학교 대학원

산업·조선공학부

이 정 철

거친 해수면에서의 수중표적
탐지 특성 연구

Target detection under rough sea surfaces

지도교수 성 우 제

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원

산업·조선 공학부

이 정 철

이정철의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 12월

위 원 장 _____ 인

부위원장 _____ 인

위 원 _____ 인

초 록

군사적인 측면에서 소나(SONAR)를 사용하는 가장 큰 목적 중의 하나는 적 잠수함을 비롯한 수중 접촉물을 어떻게 하면 잘 탐지해 낼 수 있는가 하는 것이다.

소나가 운용되는 실제 해양환경은 음파의 진행에 영향을 미치는 매우 복잡한 변수들로 이루어져 있다. 이러한 변수에는 수온, 염분, 밀도, 해양 생물, 해수면과 해저바닥의 거칠기 등 매우 다양하며, 시간과 공간에 따라 매우 가변적이다. 특히 해수면의 거칠기는 음파를 산란시키는 대표적인 변수로, 소나를 이용한 수중 표적탐지를 어렵게 한다. 즉, 송신기에서 발생한 음파가 거친 해수면에 의해 산란되어 왜곡되면서 수신기의 표적탐지를 어렵게 하는 것이다.

본 논문에서는 이러한 거친 해수면이 수중 표적탐지에 구체적으로 어떻게 영향을 미치는지와 그러한 환경에서 표적탐지 확률을 조금이나마 높일 수 있는 방법에 대해서 능동소나 사용에 중점을 두고 모색하였다.

먼저 거칠기가 존재하지 않는 평평한 해수면(flat surface)에서 음파의 전달손실(Transmission loss) 특성을 확인하였으며, 거친 해수면(rough surface)은 PM(Pierson-Moskowitz) 스펙트럼을 이용하여 생성하였다. 총 50회의 풍속에 따라 거칠기가 다른 해수면을 모의하

였으며, 생성된 거친 해수면에서의 전달손실은 (Kirchhoff-Helmholtz) Integral Equation을 이용하여 분석하였다. 계산된 거친 해수면에서의 전달손실로부터 음압장의 변동성을 확인하였으며, 이 변동성을 바탕으로 수중 표적탐지확률을 모의하였다.

본 논문은 실제 거친 해수면과 유사한 환경을 모의하여 수중 표적탐지 특성을 통계적으로 분석하였다는 것에 그 의의가 있다고 할 수 있다.

주요어 : 거친해수면, 수중표적탐지확률, Kirchhoff Approximation,
능동소나, K-H Integral Equation, PM스펙트럼

학번 : 2012-22607

목 차

초 록	i
그림 목차	v
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 개요	5
2. 평평한 해수면에서의 전달손실 특성	7
2.1. 전단손실 계산 및 검증	7
2.2. 전단손실 계산결과 적용	11
3. 거친 해수면에서의 전달손실 특성	15
3.1. 거친 해수면의 생성	15
3.1.1. PM 스펙트럼을 이용한 해수면의 생성	15
3.1.2. 생성된 모의 해수면의 검증	17
3.2. 거친 해수면에서의 전달손실	19
3.2.1. 거친 해수면에서의 전달손실 계산	19
3.2.2. K-H Integral Equation 계산 검증 및 적용	24
3.2.3. 음압장의 변동성(Scintillation Index)	29

4. 수중표적 탐지를 위한 해군작전 적용	31
4.1. 소나 방정식	31
4.2. SE(Signal Excess)의 변동성과 탐지확률	34
5. 결론	40
참고문헌	43
Abstract	46

그림 목차

그림 1. 해수면의 거칠기와 표적탐지	2
그림 2. 반사현상(reflection)과 산란현상(scattering) (a) 반사현상(flat surface), (b) 산란현상(rough surface)	3
그림 3. 평평한 해수면에서의 전달손실 계산을 위한 모의 환경	7
그림 4. 음선모델을 이용한 전달손실 계산(5개 음선경로)	9
그림 5. 전달손실(Transmission loss) 계산 결과 비교(단위:dB) (a) 음선모델, (b) PE method	10
그림 6. 우리나라 서해 해양환경, (a) 서해 수심, (b) 서해 해저지형	11
그림 7. 서해 수치 모의환경	11
그림 8. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산 결과 (1 kHz)	12
그림 9. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산 결과 (5 kHz)	12
그림 10. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산 결과 (10 kHz)	13
그림 11. 바람의 세기에 따른 파고의 스펙트럼	16
그림 12. (a) 바람에 따른 파고의 스펙트럼, (b) 바람의 세기에 따라 생성된 해수면	16

그림 13. 생성된 모의 해수면과 식 (5)간의 스펙트럼 비교	18
그림 14. 거친 해수면에서의 전달손실 계산	19
그림 15. 모델검증 Geometry	25
그림 16. 모델 비교결과	
(a) PE model, (b) K-H Integral Equation method	25
그림 17. 거칠기에 따른 전달손실 계산 결과	
(소스수심 5 m / 해수면 1회 생성)	26
그림 18. 거칠기에 및 바닥 유무에 따른 전달손실 평균값	
(소스수심 5 m / 해수면 50회 생성)	27
그림 19. 거칠기에 및 바닥 유무에 따른 전달손실 평균값	
(소스수심 20 m / 해수면 50회 생성)	28
그림 20. 해수면의 거칠기에 따른 음압 변동성(SI) 비교	
(a) 10 m/s SI & TL(소스수심 20 m/리시버수심 20 m)	30
그림 21. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 SE 값	
(소스수심 5 m)	33
그림 22. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 SE 값	
(소스수심 20 m)	33
그림 23. SE(Signal Excess)의 변동성으로부터 탐지 확률 계산	34

그림 24. 해수면의 거칠기에 따른 탐지확률 (소스수심 20 m, 표적수심 20 m) (a) 신호초과 값(10 m/s), (b) 신호초과 값(20 m/s), (c) 거칠기에 따른 탐지확률 비교	35
그림 25. (a) SE 계산 결과(rough/mean/flat), (b) Range 300 m에서의 SE 차이분포(flat/rough)와 이를 fitting한 확률분포	36
그림 26. 확률분포로부터 탐지확률 계산	37
그림 27. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 탐지확률 (소스수심 20 m)	38
그림 28. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 탐지확률 (소스수심 50 m)	38

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

제1, 2차 세계대전을 치르는 동안, 잠수함이라는 새로운 무기체계가 해전에서 매우 막강한 능력을 발휘하면서 이에 대항하기 위한 대잠(對潛) 무기체계가 지속적으로 개발되어왔다. 그중에서도 수중에서 활동하는 잠수함을 탐지/식별하기 위한 대표적인 수단으로 수중음파를 이용한 SONAR(Sound Navigation And Ranging)를 들 수 있다. 음파를 이용한다는 것은 결국 ‘소리(sound)’를 이용한다는 것인데, 이는 수중에서 우리가 일반적으로 알고 있는 레이더(RADAR)보다도 ‘소리’가 훨씬 전달이 잘되기 때문이다. 전자기파는 수중에서 전달시 강하게 흡수되어 손실이 크기 때문에 수중에서의 정보전달 매체로 사용되기에는 적합하지 않다. 하지만 탄성파인 음파는 수중에서의 전달손실이 작기 때문에 정보전달 매체로서 사용하기에 적합하다. 즉, 공기 중에서의 레이더의 역할을, 수중에서는 소나가 하게 되는 것이다. 이러한 점에서 레이더와 소나는 상당히 유사성이 있다. 그러나 두 매체에 적용되는 물리적인 현상이 근본적으로 다르므로 불가피한 차이도 존재하는데, 그것은 파동이 전달되는 속도와 사용가능한 주파수의 범위 등이다.

공기 중에서 전자기파가 전달될 때 여러 가지 지형적인 장애물을

만나게 되듯이, 수중에서도 음파가 전달되는 과정에서 여러 가지 장애물이 존재하는데 가장 대표적인 것이 바로 ‘해수면’이다. 일반적으로 음파가 해수면을 만나게 되었을 때 일어나는 물리적인 현상은 반사(reflection)와 산란(scattering)이다. 반사현상은 해수면에 입사된 음파가 에너지의 손실 없이, 거의 같은 에너지로 입사각과 동일한 각으로 반사되는 현상을 일컫는다. 이러한 반사현상은 주로 해수면이 평평할 때 일어난다. 반면에 산란현상은 해수면의 거칠기로 인해 입사된 음파가 에너지의 손실을 겪고, 입사된 방향을 포함하여 전 방위로 퍼져나가는 현상을 말한다. 이러한 산란현상은 해수면이 얼마나 거친가에 따라 그 정도가 결정된다.

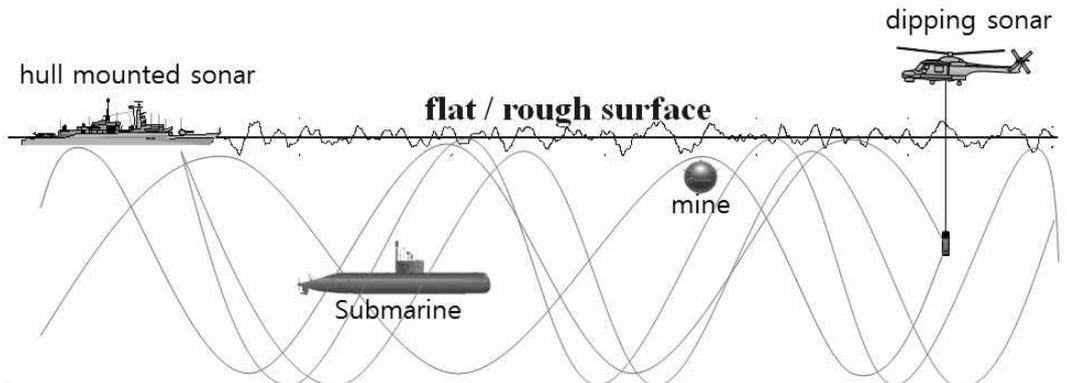


그림 1. 해수면의 거칠기와 표적탐지

반사현상과 산란현상이 일어나는 환경을 구분하는 기준은 바로 ‘거칠기’라고 할 수 있으며, 그 정도를 나타내주는 대표적인 지수로서 아래의 Rayleigh Parameter를 들 수 있다.[2]

$$R_p = khsin\theta_g \quad (1)$$

여기서 k 는 wave number로서 $2\pi/\lambda$ 이고, h 는 파고와 파저 사이의 높이, θ_g 는 입사각(grazing angle)을 의미한다. 여기서 $R_p \ll 1$ 이면 평평한 해수면이라고 할 수 있으며 반사현상이 주로 일어나게 되고, 반대로 $R_p \gg 1$ 이면 거친 해수면이라고 할 수 있으며 산란현상이 주로 일어난다. 특히 이러한 거친 해수면의 산란과 관련하여, Urlick 과 Saxton은 음원의 주파수가 25 kHz, 파고가 1 ft인 조건에서 입사각(grazing angle) $3 \sim 18^\circ$ 일 때, 평균적인 음파에너지(Intensity) 손실이 3 dB 정도가 된다는 것을 실험적으로 측정하였다.[13]

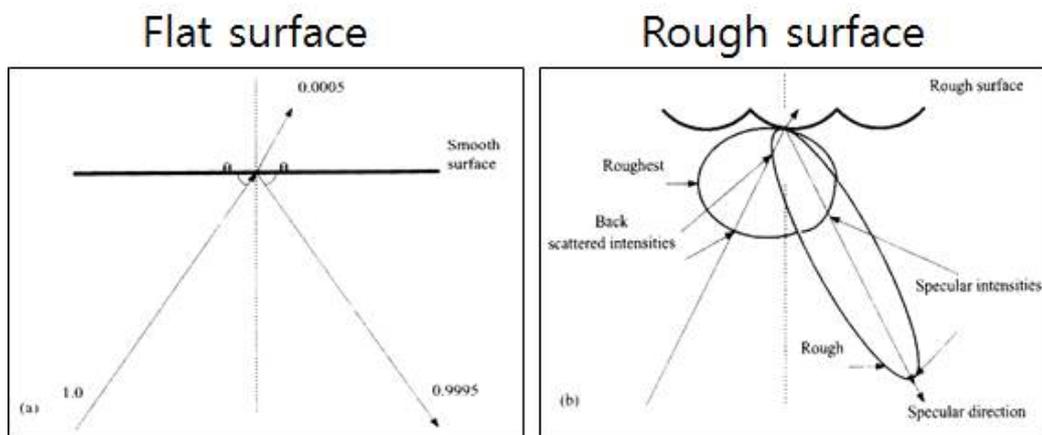


그림 2. 반사현상(reflection)과 산란현상(scattering)
 (a) 반사현상(flat surface), (b) 산란현상(rough surface)

그림 2(a)는 평평한 해수면에서의 반사현상을 설명해주고 있는 것으로, 해수면으로 입사된 음파 에너지가 입사된 각도와 같은 각으로

에너지의 손실이 거의 없이(99.9 %) 반사되어 나오는 모습을 나타내 주고 있다. 반면 그림 2(b)는 거친 해수면에서의 산란현상을 설명해 주고 있는 것으로, 입사된 음파 에너지가 해수면의 거칠기에 따라서 입사된 방향(back scatter) 및 거울반사 방향(specular direction)을 포함한 전 방향으로 산란되어 퍼져나가는 모습을 나타내주고 있다.[8]

본 논문에서는 이러한 해수면의 거칠기가 실제 수중 표적탐지에 구체적으로 어떠한 영향을 미치는지 여부와 거칠기가 존재하는 상황에서 어떻게 하면 표적 탐지확률을 조금이나마 높일 수 있는지를 실제 거친 해수면을 생성 과정을 통하여 모의하였다.

1.2. 연구 개요

거친 해수면을 발생시키는 근본적인 원인은 ‘바람(wind)’이다. 바람이 잔잔하게 분다면 해수면은 평평한 상태에 가까워질 것이고, 바람이 거세게 분다면 해수면은 거칠어질 것이다. 거친 해수면에서의 전달손실과 표적탐지 특성을 알아보기 전에, 먼저 극단적으로 거칠지 않은 상태, 즉 바람이 0 m/s인 평평한 해수면에서의 전달손실 특성을 먼저 확인하고 이어서 점차 해수면이 거칠어지는 환경에서의 전달손실 특성과 표적탐지 특성을 확인하였다.

평평한 해수면에서의 전달손실은 음선모델(Ray model)을 이용하여 쉽게 예측이 가능하다. 음속구조가 등 음속구조라는 가정 하에 우리나라 서해와 비슷한 해양환경을 모의하여 전달손실의 특징이 어떻게 나타나는지 확인하였다.

거친 해수면을 생성하는 방법으로 대표적인 해양파 스펙트럼인 PM 스펙트럼을 이용하여, 바람의 세기에 따른 거친 해수면을 모의하였다. 평평한 해수면에서의 음선모델과 달리 거친 해수면에서의 전달손실은 소스에서 해수면을 거쳐 리시버까지 전달되는 음선을 특정 짓기가 매우 곤란하다. 박00는 표적산란함수와 음선추적법을 결합한 혼합모델(Hybrid model)을 이용하여, 소스에서 거친 해수면을 맞고 리시버까지 전달되는 고유음선(eigen ray) 1개를 찾아내 4-path 법을 이용한 표적강도 특성을 분석하였다.[16] 그러나 해수

면의 거칠기에 따라 고유음선은 1개가 될 수도 있고, 그 이상도 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 음파전달 경로에 있는 거친 해수면의 모든 특징들을 모두 반영하기 위한 접근 방법으로 K-H (Kirchhoff-Helmholtz) Integral Equation을 이용하여 거친 해수면에서의 전달손실 특성을 분석하였다.[12, 15]

또한 앞에서 계산된 전달손실의 특징들이 실제 해군작전 측면에서 수중 표적탐지에 활용 가능한지 적용해보았다. 특별히 해군에서 소나를 운용하고 있는 특정 플랫폼을 기준으로 탐지확률 측면에서 분석을 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다.

1장에서는 본 연구의 배경 및 개요, 논문의 구성에 대하여 설명하였다. 2장에서는 평평한 해수면에서의 전달손실 특성을 음선모델(Ray model)을 이용하여 분석하였으며, 3장에서는 거친 해수면에서의 전달손실 특성을 K-H Integral Equation(Kirchhoff Approximation)을 이용하여 분석하였다. 4장에서는 앞에서 분석한 전달손실 특성을 바탕으로 해군작전 측면에서 표적 탐지확률을 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 논문을 요약하고 결론을 맺었다.

2. 평평한 해수면에서의 전달손실 특성

2.1. 전달손실 계산 및 검증

일반적인 전달손실(Transmission Loss)의 정의는 다음과 같다.

$$TL \equiv 10 \log \frac{I(1m)}{I(r)} = 10 \log \frac{p^2(1m)}{p^2(r)} \quad (2)$$

여기서 I 는 Intensity의 약자로 음향 파워(단위 면적/시간 당 음파가 가지는 에너지), p 는 pressure의 약자로 음압(acoustic pressure)을 나타낸다. ()안의 1m는 소스로부터 1m 위치, r 는 소스로부터 임의의 거리이다. 음파의 전달은 음파가 가지는 에너지(I)의 전달이라고 할 수 있고, 음파가 가지는 에너지는 결국 음압(p)의 제곱으로 표현 될 수 있는 것이다.

평평한 해수면에서의 전달손실 특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 모의 환경을 설정하였다.

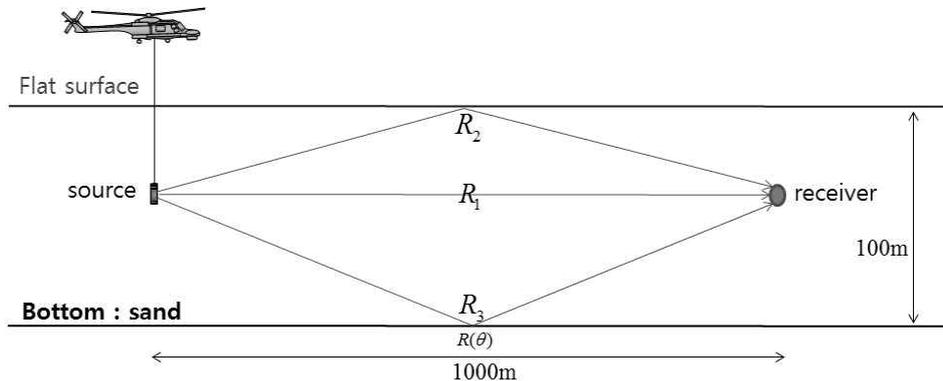


그림 3. 평평한 해수면에서의 전달손실 계산을 위한 모의환경

여기서 해수의 밀도와 음속은 각각 $1,000 \text{ kg/m}^3$, $1,500 \text{ m/s}$ 으로 균일하게 설정하였으며, 바닥(sand)의 밀도와 음속은 각 $1,900 \text{ kg/m}^3$, $1,650 \text{ m/s}$ 으로 설정하였다. $R(\theta)$ 는 반사계수(reflection coefficient)로서 다음과 같이 계산된다.

$$R(\theta) = \frac{\rho_2 c_2 \sin \theta_t - \rho_1 c_1 \sin \theta_i}{\rho_2 c_2 \sin \theta_t + \rho_1 c_1 \sin \theta_i} \quad (3)$$

여기서 ρ_1, c_1 은 각각 해수의 밀도와 음속을 나타내며, ρ_2, c_2 는 바닥(sand)의 밀도와 음속을 나타낸다. 또한 θ_i, θ_t 는 음파의 입사각과 투과각을 의미한다.

위와 같은 조건에서 전달손실을 계산하는 가장 대표적인 방법으로 음선모델(Ray model)¹⁾을 들 수 있다. 그림 3에 음선모델을 이용하여 소스에서 리시버로 전달되는 음압을 계산하면 식 (4)와 같이 계산될 수 있다.[16]

$$p(r) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} + (-1) \frac{e^{ikR_2}}{R_2} + R(\theta) \frac{e^{ikR_3}}{R_3} + \dots \quad (4)$$

1) 음선모델은 음선이론에 바탕으로 둔 전달손실 계산방법으로 1946년 미국 방위위원회에서 최초로 개발되었으며, 그 이론의 단순성과 적은 계산량 덕분에 1960년대 후반까지 음향분야에서 가장 널리 쓰이던 모델이었다. 음선모델은 음파전달 양상을 시각적으로 쉽게 이해할 수 있으며, 경계조건을 적용하기 쉽고, 고주파수 대역에서 계산결과를 빠르게 구할 수 있는 장점이 있으나 음파의 산란이나 회절 문제를 다루기 어려운 단점도 있다.

식 (4)의 첫 번째 항은 direct path를 나타내고, 두 번째 항은 해수면을 맞는 경로로서 에너지의 손실 없이 위상만 90° 바뀌므로 '-1'이 곱해졌고, 세 번째 항은 바닥을 맞는 경로로서 에너지 손실과 관련된 반사계수 $R(\theta)$ 가 곱해졌다.

이론적으로는 소스에서 리시버로 전달되는 모든 경로가 다 포함되어야 하므로, 가급적 음선경로가 많을수록 정확한 값을 얻을 수 있다. 하지만 음파가 바닥을 맞으면 맞을수록 더 많은 에너지가 손실되기 때문에 불필요하게 많은 음선경로를 포함할 필요는 없다. 따라서 아래 그림 4와 같이 대표적인 음선경로 5개만 특정하여 평평한 해수면에서의 전달손실을 계산하였으며, 그 결과는 그림 5(a)와 같다.

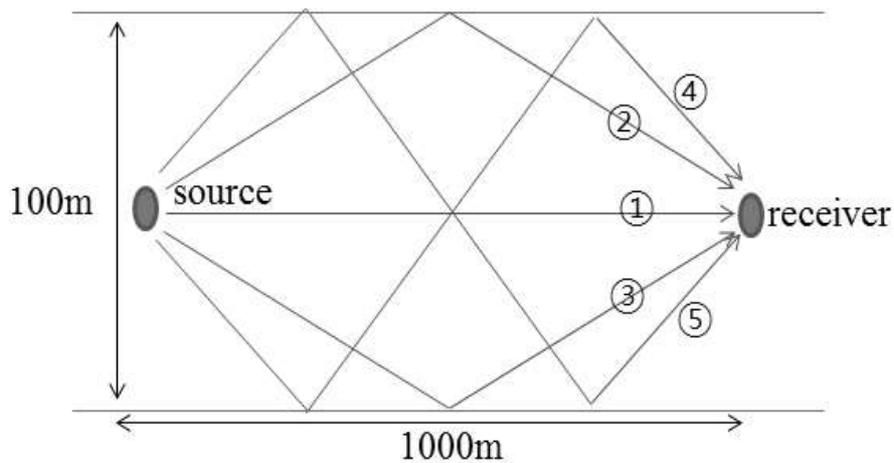


그림 4. 음선모델을 이용한 전달손실 계산(5개 음선경로)

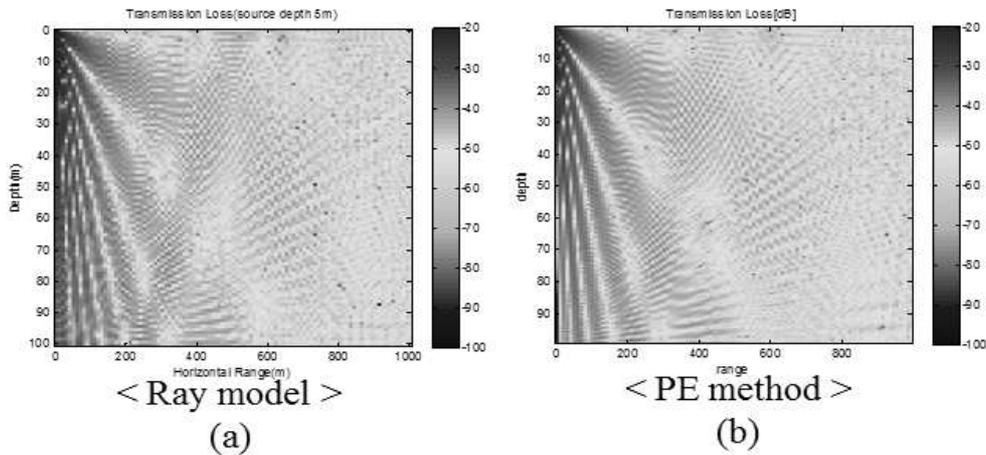


그림 5. 전달손실(Transmission loss) 계산 결과 비교(단위 : dB)
 (a) 음선모델, (b) PE

그림 5는 음원 주파수를 1 kHz로 하여 음선모델을 이용한 계산결과(a)와 PE(Parabolic Equation)²⁾을 이용한 계산결과(b)를 상호 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림의 결과에서 보듯이 음선모델(Ray model)을 이용한 방법과 PE를 이용한 방법이 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 다양한 환경에서 주파수를 변화시켜 가며 평평한 해수면에서의 전달손실 특성을 확인할 수 있다.

2) PE는 포물선방정식(Parabolic Equation)을 뜻하는 것으로, 1940년대 중반 대기권 전자파 전달 연구에 적용되어 물리학의 광학, 플라즈마 물리학, 지진학 및 수중음향학에 적용되고 있는 방법이다. 이 방법은 1970년대 초기에 R.H. Hardin과 F.D. Tappert에 의해 수중음향학에 처음 소개되었으며, 거리 종속 음파전달 문제에 있어서 가장 실용적이고 인기있는 방법 중의 하나가 되었다. 포물선 방정식의 장점은 복잡한 해양환경에 대해 수치적 적용이 용이하다는 것이며, 단점은 고주파수 대역의 계산에 많은 시간이 소비되고 40° 이상의 전달손실 계산에 대한 제한을 가지고 있다. 또한 퇴적층에서의 전달손실을 계산하는데 한계를 가지고 있고, 고유함수가 없기 때문에 도달 각 및 도달 시간에 대한 정보를 얻을 수 없다.

2.2. 전달손실 계산결과 적용

실제 해양 조건과 유사한 수심 및 해저지형을 바탕으로 평평한 해수면에서의 전달손실을 계산하기 위해 우리나라 서해의 해양환경을 고려하였다. 우리나라 서해는 그림 6과 같이 최고수심이 100 m를 넘지 않아 깊이에 따른 수온변화가 크지 않으며, 해저지형은 대부분 모래퇴적물로 되어있다. 이러한 서해의 해양환경을 고려하여, 그림 7과 같은 수치 모의환경을 구성하였다.

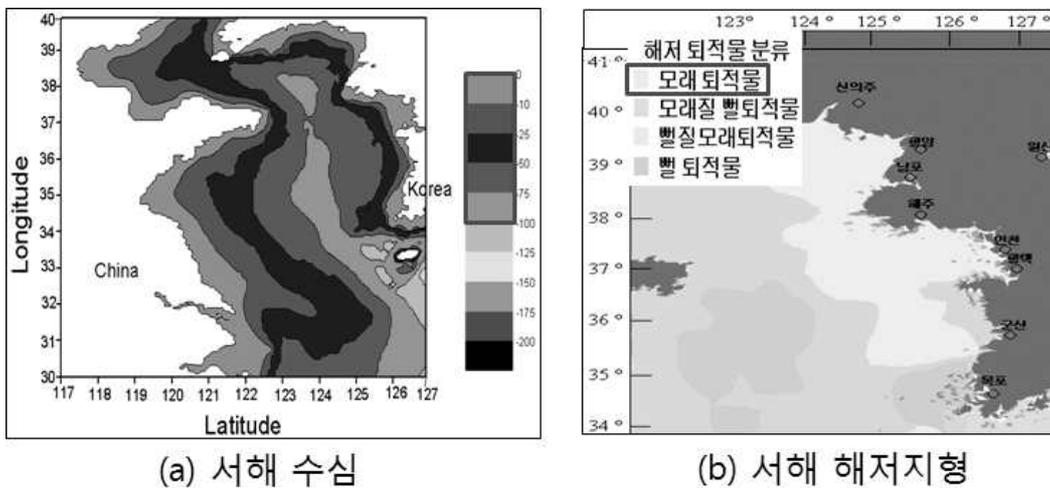


그림 6. 우리나라 서해 해양환경

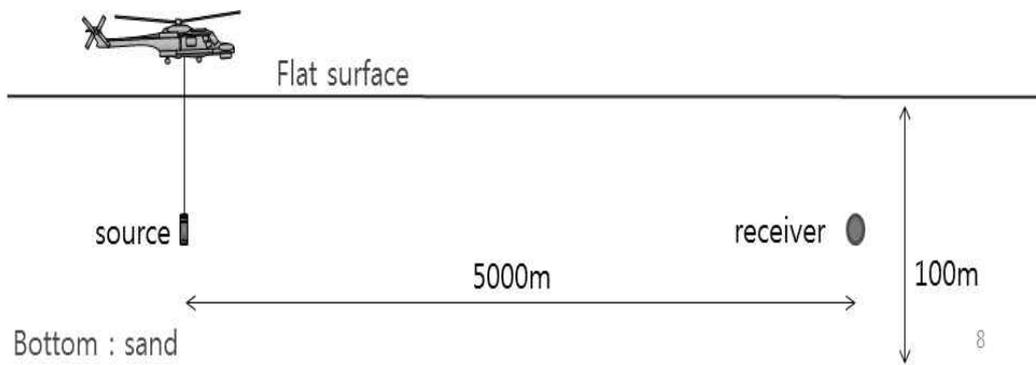


그림 7. 서해 수치 모의환경

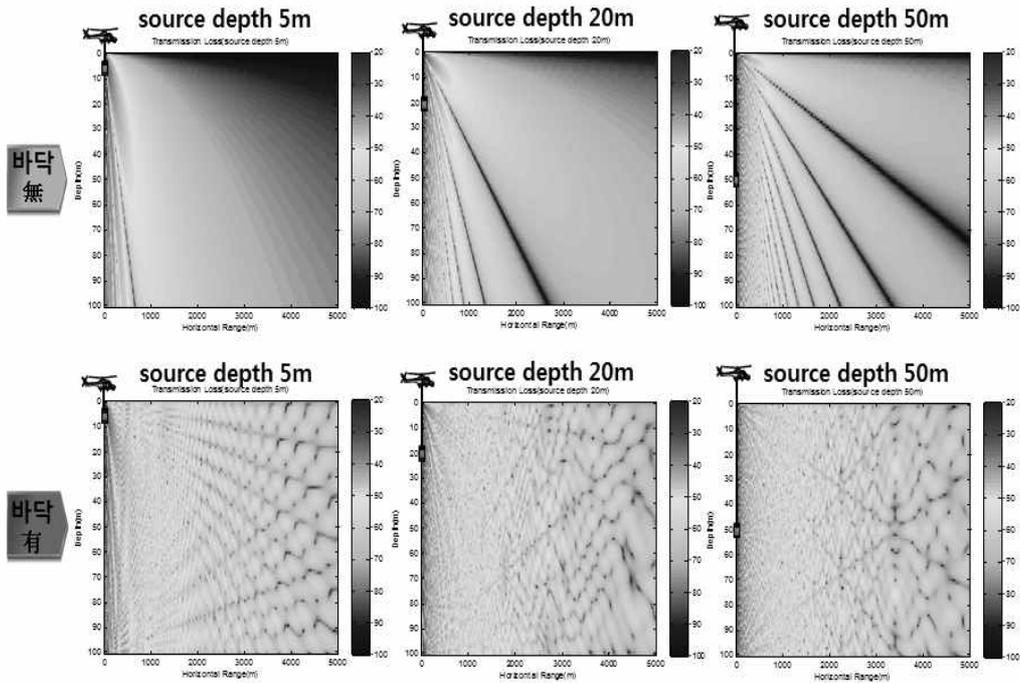


그림 8. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산결과(1 kHz)

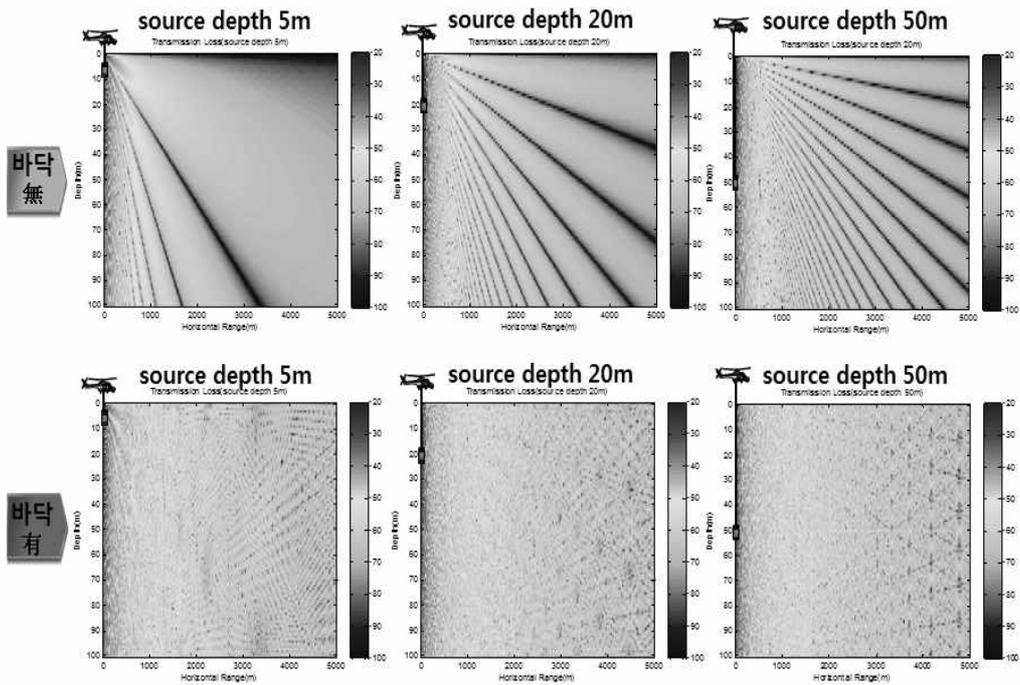


그림 9. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산결과(5 kHz)

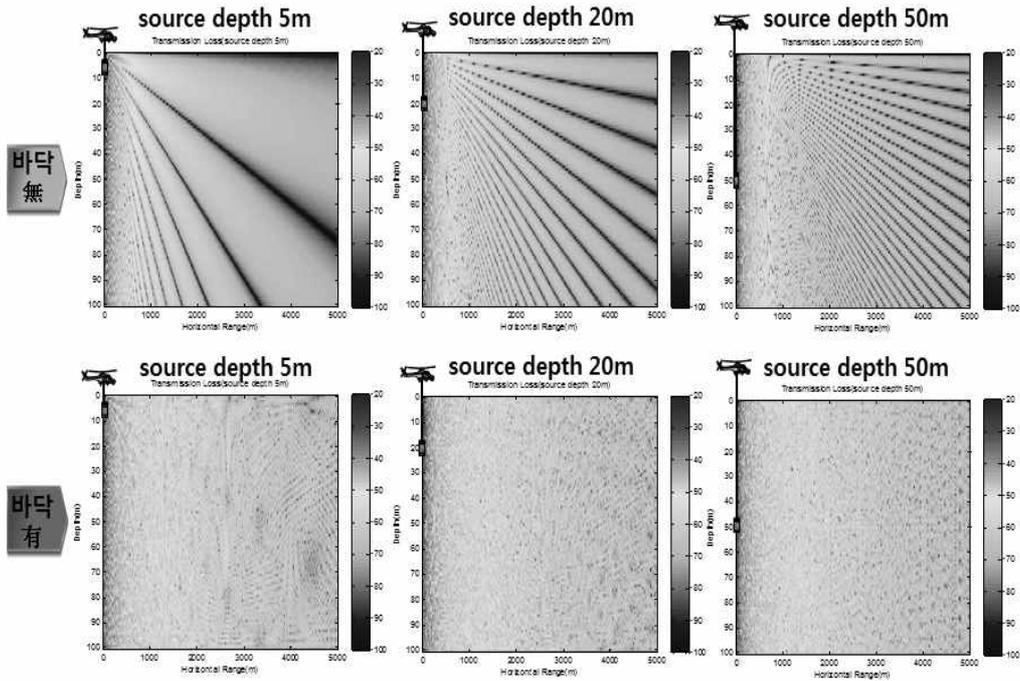


그림 10. 소스의 수심변경, 바닥의 유무에 따른 전달손실 계산결과(10 kHz)

그림 7의 수치 모의환경에서 해수와 바닥의 물성치는 그림 3에서 제시된 값과 동일하고, 수평거리(range)는 5,000 m로 하였으며, 소스는 수심을 자유롭게 변경 가능한 가변심도 소나를 사용하였다. 소스 주파수는 최대 10 kHz까지 증가시켜가면서 전달손실 특성을 확인해보았으며, 그 결과는 그림 8, 9, 10과 같다. 추가적으로 바닥이 없이 해수면만의 영향을 알아보기 위해 바닥이 존재하지 않는 환경도 별도로 고려하였다.

그림 8, 9, 10에 나타난 평평한 해수면에서의 전달손실 특성을 종합해보면 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째로 평평한 해수면에서의 전달손실 특성은 전체적으로 직접경로(direct path)와 반사경로

(reflected path) 간의 위상(phase)차이로 인해, 음압이 보강적 (constructive)이거나 또는 상쇄적(destructive)으로 더해져서 만드는 Lloyd mirror 간섭패턴의 특성을 보인다. 둘째로 소스의 주파수를 증가시키거나, 수심을 증가시킬수록 더 많은 Lloyd mirror 간섭패턴의 lobe 들이 발생하는 것을 볼 때, 상황에 맞는 주파수와 수심 조절을 통하여 특정 위치의 리시버로 전달되는 음파의 양을 조절할 수 있을 것이다.[1]

이와 같이 평평한 해수면에서의 전달손실은 주어진 환경조건에 맞는 결과가 항상 정해져 있는 형태이며, 이를 바탕으로 소스에서 리시버까지 전달되는 음파 에너지, 즉 전달손실에 대한 일관된 예측이 가능한 것이 특징이라고 할 수 있다.

3. 거친 해수면에서의 전달손실 특성

3.1. 거친 해수면의 생성

해수면의 거칠기를 유발하는 가장 주된 요소는 바람이다. 즉, 바람의 세기에 따라 해수면의 거칠기가 결정된다고 할 수 있다. 이런 바람의 세기와 해수면 거칠기(파도의 높이)와의 관계를 표현하는 대표적인 방법으로 PM 스펙트럼을 들 수 있다. 본 연구에서는 실제 해양과 유사한 다양한 해수면의 거칠기를 모의하기 위해 PM 스펙트럼을 이용하여 거친 해수면을 생성하였다.

3.1.1. PM 스펙트럼을 이용한 해수면의 생성

일반적으로 넓은 해역에서 일정한 세기의 바람이 지속적으로 불게 되면 파도가 충분히 발전된 상태(fully developed)가 되어 평형 상태를 이루게 된다. 이러한 상태에서의 해수면 거칠기는 식 (5)과 같은 스펙트럼으로 나타낼 수 있다.[14]

$$S(w) = \frac{\alpha g^2}{w^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{w U_{19.4}} \right)^4 \right] \quad (5)$$

여기서 $\alpha=0.0081$, $\beta=0.74$, $w=2\pi f$, g 는 중력 가속도이고, $U_{19.4}$ 는 19.4 m 높이에서의 바람 세기이다.

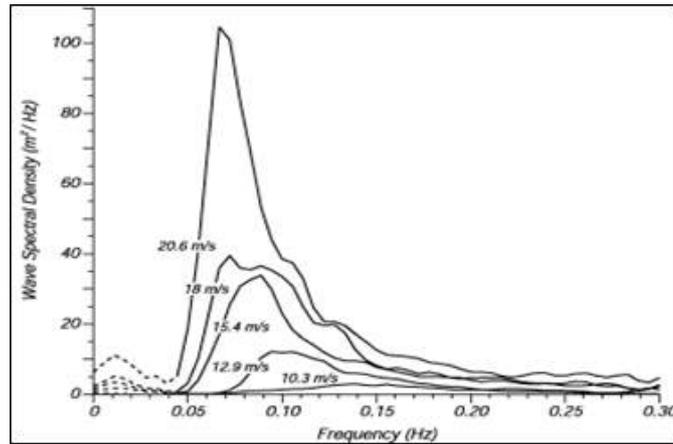


그림 11. 바람의 세기에 따른 파고의 스펙트럼

위 그림 11의 스펙트럼으로부터 해수면을 모의로 생성할 수 있으며, 생성된 해수면은 그림 12(b)와 같이 바람의 세기에 따라 구별된다.

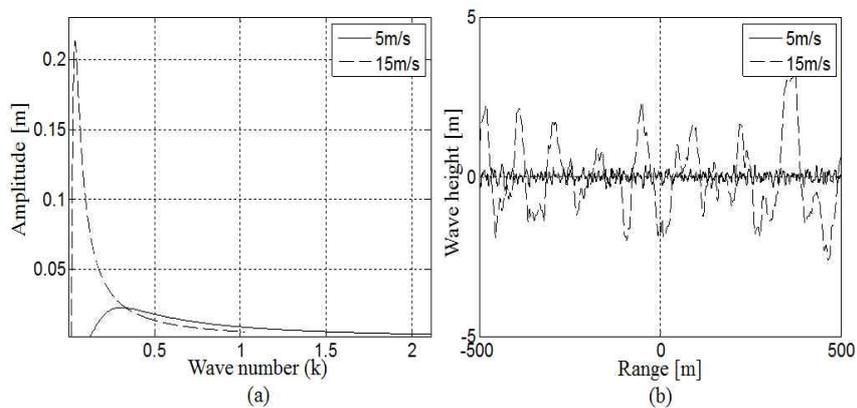


그림 12.(a) 바람의 세기에 따른 파고의 스펙트럼,
(b) 바람의 세기에 따라 생성된 해수면

3.1.2. 생성된 모의 해수면의 검증

그림 12에서 생성된 모의 해수면 정보로부터 파워 스펙트럼 (power spectrum)을 다시 구하여, 생성된 해수면이 PM 스펙트럼을 실제로 만족하는지 여부도 검증하였다. 임의의 해수면은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(r,t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n r - w_n t + \epsilon_n) \quad (6)$$

여기서 r 은 파고가 계산되는 위치이고, a_n 은 amplitude, k_n 은 wave number, $w_n = 2\pi f_n$, ϵ_n 은 random phase이며, N 은 500으로 하여 충분한 무작위성을 보장하였다. 시간에 따른 해수면의 변동을 고려하지 않으므로 t 는 0으로 설정하였으며, 식 (6)로부터 자기 상관함수 (auto-correlation function)는 아래 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z_o(r) &= \sum a_n \cos(k_n r + \epsilon_n), \quad z_o(r+h) = \sum a_m \cos\{k_m (r+h) + \epsilon_m\}, \\ z_o(r)z_o(r+h) &= \sum \sum a_n a_m \cos(k_n r + \epsilon_n) \cos\{k_m (r+h) + \epsilon_m\} \\ &= \frac{1}{2} \sum \sum a_n a_m [\cos\{k_n r - k_m (r+h) + \epsilon_n - \epsilon_m\} + \cos\{k_n r + k_m (r+h) + \epsilon_n + \epsilon_m\}] \\ \therefore \langle z_o(r)z_o(r+h) \rangle &= \frac{1}{2} \sum a_n^2 \cos(k_n h) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 자기 상관함수를 푸리에 변환(Fourier Transform)하면 식 (8)와 같은 k 에 대한 파워 스펙트럼을 얻을 수 있다.

$$W(k_n) = \frac{1}{4} \sum a_n^2 \{ \delta(k - k_n) + \delta(k + k_n) \} \quad (8)$$

a_n 을 구하기 위하여 식 (8)를 k 에 대해서 적분하면, 식 (9)와 같이 a_n 을 구할 수 있다.

$$\int W(k_n) dk = \sum W(k_n) \Delta k = \frac{1}{2} \sum a_n^2$$

$$\therefore a_n = \sqrt{2W(k_n)\Delta k} \quad (9)$$

바람을 10m/s로 설정하고, 식(9)에서 계산된 a_n 과 식(5)로부터 계산된 스펙트럼을 비교하면 그림 13과 같이 거의 동일한 형태의 스펙트럼이 얻어지는 것을 알 수 있다.

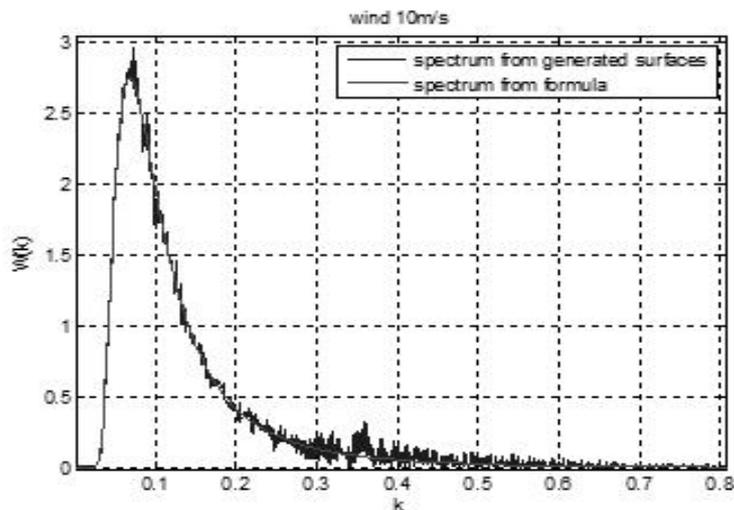


그림 13. 생성된 모의 해수면과 식 (5)간의 스펙트럼 비교

3.2 거친 해수면에서의 전달손실

3.2.1. 거친 해수면에서의 전달손실 계산

해수면이 평평한 조건에서의 전달손실은 앞의 식 (4) 및 그림 4에 제시된 음선모델을 이용하여 비교적 손쉽게 예측이 가능하다. 하지만 해수면의 거칠기를 고려한 음파전달 양상은 평평한 해수면과는 매우 다르다. 왜냐하면 거친 해수면에서는 음파가 반사(reflection)되지 못하고 산란(scattering)되기 때문이다. 그림 14에서 보는 바와 같이 해수면이 평평하다면 점선으로 표시된 음선만을 고려한 음선모델을 이용하여 소스로부터 리시버로 전달되는 음압을 계산할 수 있다.

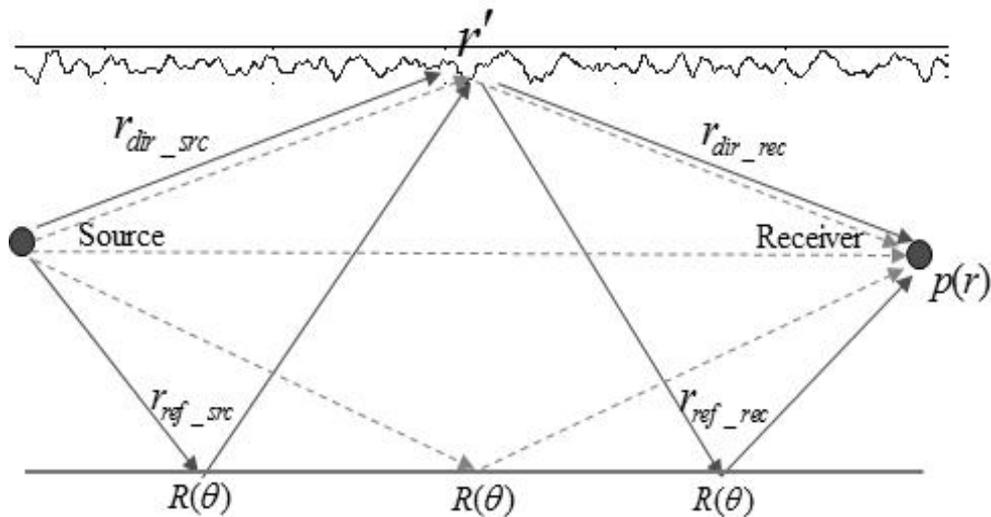


그림 14. 거친 해수면에서의 전달손실 계산

하지만 해수면이 거칠어진 상태라면, 그러한 거친 해수면의 모든 특성들이 음파전달에 미치는 영향을 전부 고려해야 하므로, 식 (10) 과 같은 K-H(Kirchhoff-Helmholtz) Integral Equation을 이용하여 소스에서 리시버로 전달되는 모든 음압을 계산할 수 있다.[12, 15]

$$p(r) = p_{dir}(r) + \int_s \left[p(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n'} - G(r, r') \frac{\partial p(r, r')}{\partial n'} \right] ds' \quad (10)$$

여기서 r 은 리시버의 위치, r' 는 거친 해수면 상의 위치이며, p_{dir} 은 소스에서 리시버로 direct로 전달되는 음압을 나타낸다. $p(r')$ 는 거친 해수면에서의 음압이고, n' 는 해수면의 법선(normal)방향을 나타낸다. $G(r, r')$ 는 거친 해수면에서 리시버까지 전달되는 그린함수를 말하는 것으로, 이는 다시 해수면에서 리시버로 direct로 전달되는 direct path(r_{dir_rec})와 바닥을 맞고 전달되는 reflected path(r_{ref_rec})로 구분된다. 일반적인 3차원 자유음장 그린함수를 적용하여, $G(r, r')$ 은 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.[7]

$$G(r, r') = \frac{e^{-jk|r_{dir_rec} - r'|}}{4\pi|r_{dir_rec} - r'|} + R(\theta) \frac{e^{-jk|r_{ref_rec} - r'|}}{4\pi|r_{ref_rec} - r'|} \quad (11)$$

여기서 $R(\theta)$ 는 바닥을 맞을 때의 반사 계수(reflection coefficient)를

나타내며, 앞의 식 (3)과 동일하다. 그 밖의 해수와 바닥의 물성치도 그림 3에서 적용한 값과 동일하게 설정하였다. 식 (10)에서 해수면은 압력해제 경계(pressure release boundary)라 할 수 있으므로 해수면에서의 압력 $p(r')$ 은 '0'이다. 따라서 식 (10)은 최종적으로 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$p(r) = p_{dir}(r) - \int_s \left[G(r, r') \frac{\partial p(r')}{\partial n'} \right] ds' \quad (12)$$

여기서 두 번째 항의 $\frac{\partial p(r')}{\partial n'}$ 는 거친 해수면 위치에서의 법선 방향 음압 변화율을 의미하는 것으로, 이는 입사파를 평면파(plane wave)로 가정하고, 해수면으로 입사되는 음파의 파장에 비해 거친 해수면의 곡률반경이 클 경우, 다음의 Kirchhoff Approximation을 적용할 수 있다.[7]

$$\frac{\partial p_r(r)}{\partial n} \approx 2 \frac{\partial p_i(r)}{\partial n} \quad (13)$$

즉, 경계면에서의 반사파($p_r(r)$)의 법선방향 음압 변화율은 대략적으로 입사파($p_i(r)$) 변화율의 2배가 된다는 의미를 갖는다. 그림 14에서 소스로부터 거친 해수면 상의 위치 r' 에 입사하는 음파는, 직접

해수면으로 전달되는 direct path(r_{dir_src})와 바닥을 맞고 전달되는 reflected path(r_{ref_src})로 구분된다. 따라서 식 (13)에 이 관계를 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial p(r')}{\partial n'} \approx 2 \left(\frac{\partial p_{i_dir}(r')}{\partial n'} + \frac{\partial p_{i_ref}(r')}{\partial n'} \right) \quad (14)$$

식 (14)에서의 $p_{i_dir}(r')$, $p_{i_ref}(r')$ 항은 식 (11)과 마찬가지로 3차원 자유음장 그린함수를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{i_dir}(r') = \frac{e^{-jk|r_{dir_src}-r'|}}{4\pi|r_{dir_src}-r'|}, \quad p_{i_ref}(r') = R(\theta) \frac{e^{-jk|r_{ref_src}-r'|}}{4\pi|r_{ref_src}-r'|} \quad (15)$$

여기서 식 (14)를 계산하기 전에, 먼저 해수면으로 입사되는 압력의 $p_i(r')$ 의 그래디언트(∇)는 다음과 같이 분리하여 나타낼 수 있다.

$$\nabla p_i(r') = \nabla p_{i_dir}(r') + \nabla p_{i_ref}(r') \quad (16)$$

식 (16)의 우변의 각항에 대하여, 식 (15)를 대입하여 계산하면 식 (17)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
\nabla p_{i_dir}(r') &= \frac{e^{-jk|r_{dir_src}-r'|}}{4\pi|r_{dir_src}-r'|} \left(-\frac{1}{|r_{dir_src}-r'|} - jk \right) \\
&\quad \times \left(\frac{x'-x_s}{|r_{dir_src}-r'|}, \frac{y'-y_s}{|r_{dir_src}-r'|}, \frac{z'-z_s}{|r_{dir_src}-r'|} \right) \\
\nabla p_{i_ref}(r') &= R(\theta) \frac{e^{-jk|r_{ref_src}-r'|}}{4\pi|r_{ref_src}-r'|} \left(-\frac{1}{|r_{ref_src}-r'|} - jk \right) \\
&\quad \times \left(\frac{x'-x_s}{|r_{ref_src}-r'|}, \frac{y'-y_s}{|r_{ref_src}-r'|}, \frac{z'-z_s}{|r_{ref_src}-r'|} \right)
\end{aligned} \tag{17}$$

여기서 (x', y', z') 는 실제 수치 계산 시 사용되는 거친 해수면 상의 좌표를 의미하며, (x_s, y_s, z_s) 는 소스의 좌표를 의미한다. 식 (17)을 통해서 구하고자 하는 것은 식 (14)에 명시된 바와 같이 해수면 위치에서의 법선(normal)방향 변화율($\frac{\partial}{\partial n'}$)이다. 생성된 해수면의 높이 함수를 $f(x, y)$ 라 할 때, 식 (17)에 해수면의 법선(normal) 벡터 $\vec{n} = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, -1 \right)$ 를 내적(inner product)하면 법선방향의 변화율($\frac{\partial}{\partial n'}$)을 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial p_{i_dir}(r')}{\partial n'} &= \frac{e^{-jk|r_{dir_src}-r'|}}{4\pi|r_{dir_src}-r'|} \left(-\frac{1}{|r_{dir_src}-r'|} - jk \right) \\
&\quad \times \left(\frac{x'-x_s}{|r_{dir_src}-r'|} \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{y'-y_s}{|r_{dir_src}-r'|} \frac{\partial f}{\partial y}, -\frac{z'-z_s}{|r_{dir_src}-r'|} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{i_ref}(r')}{\partial n'} &= R(\theta) \frac{e^{-jk|r_{ref_src}-r'|}}{4\pi|r_{ref_src}-r'|} \left(-\frac{1}{|r_{ref_src}-r'|} - jk \right) \\ &\quad \times \left(\frac{x'-x_s}{|r_{ref_src}-r'|} \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{y'-y_s}{|r_{ref_src}-r'|} \frac{\partial f}{\partial y}, -\frac{z'-z_s}{|r_{ref_src}-r'|} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 y 방향의 거칠기는 고려하지 않으므로 $\frac{\partial f}{\partial y}=0$ 으로 하여 계산하였다. 위의 결과들을 식 (14)의 우변에 대입하면, $\frac{\partial p(r')}{\partial n'}$ 을 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 최종적으로 소스에서 거친 해수면을 거쳐 리시버에 전달되는 식 (12)의 음압 $p(r)$ 에 대한 계산이 가능하다. 이를 활용하여 다양한 거칠기(바람)에 따른 전달손실 양상도 구할 수 있다.

3.2.2. K-H Integral Equation 계산 검증 및 적용

Kirchhoff Approximation을 적용한 K-H Integral Equation이 실제로 정확한 전달손실 계산결과를 주는 지 검증을 하였다. 조건은 바람이 0 m/s(flat surface), 음속은 1,500 m/s, 주파수는 1 kHz, 음원의 수심은 5 m, 바닥은 모래로 설정하였으며, 모델 검증을 위한 Geometry는 그림 15와 같다.

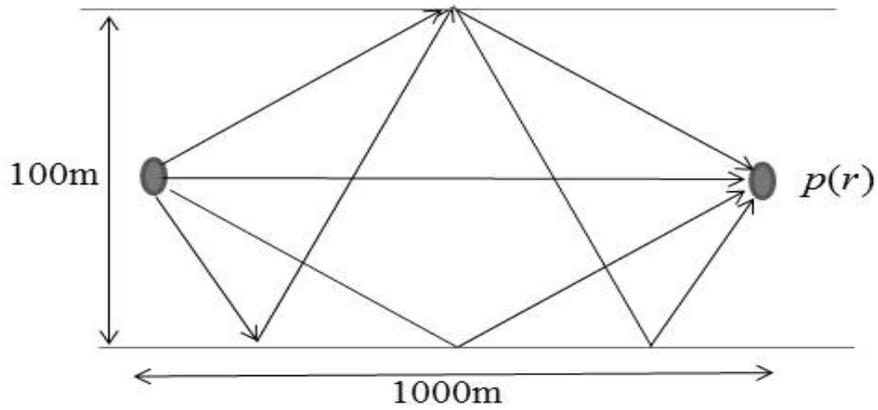


그림 15. 모델검증 Geometry

그림 15와 같은 조건에 K-H Integral Equation을 적용하여 계산한 전달손실 결과와 앞서 사용되었던 대표적인 음파전달 모델인 PE 모델 결과를 비교하였으며, 그 결과는 그림 16과 같다.

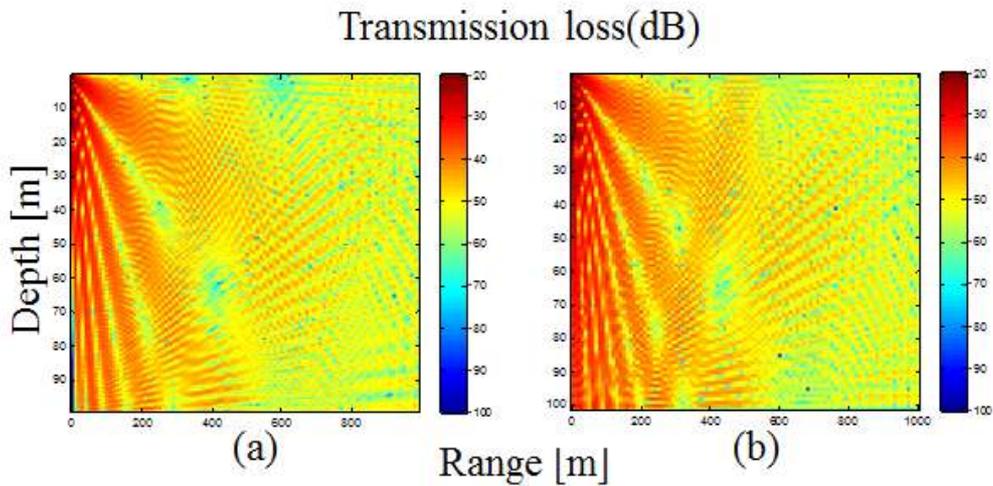


그림 16. 모델 비교결과

(a) PE model, (b) K-H Integral Equation method

그림 16의 결과에서 보듯이 K-H Integral Equation으로 계산한 결과가 PE 모델과 비교해도 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 다양한 조건(해수면 거칠기, 소스의 수심 변화, 바닥의 존재 유무)에서 전달손실을 계산할 수 있다.

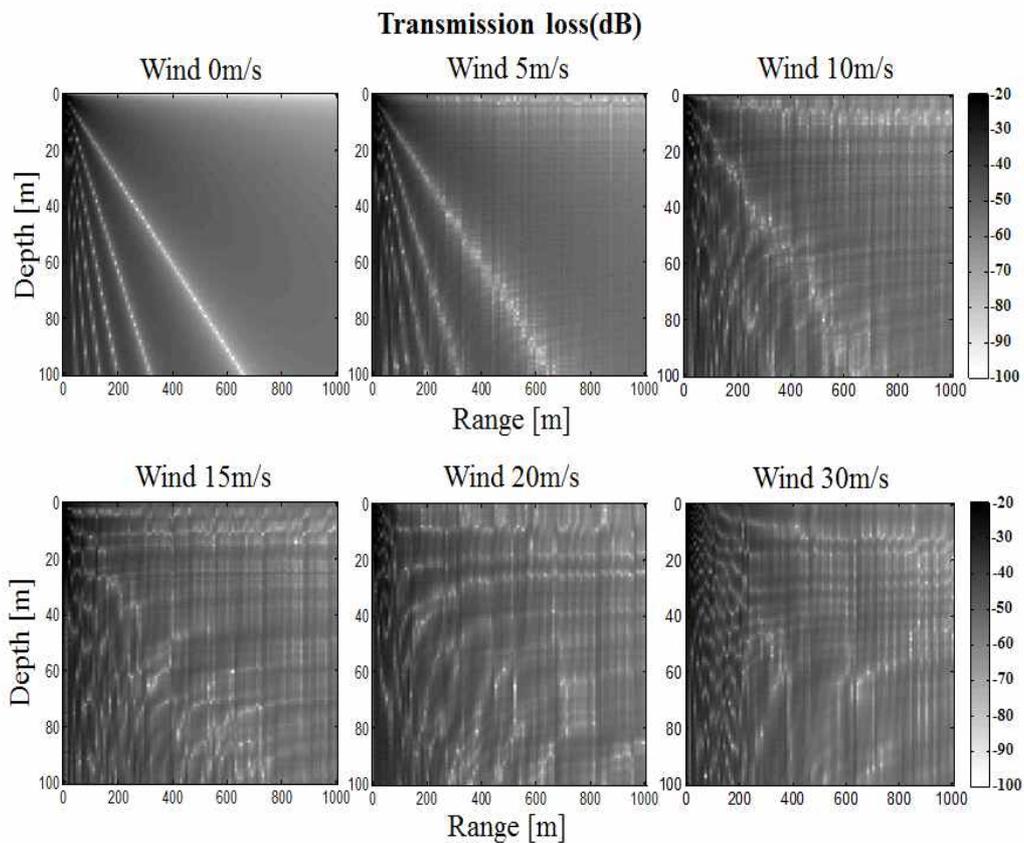


그림 17. 거칠기에 따른 전달손실 계산 결과
(소스수심 5 m / 해수면 1회 생성)

그림 17는 바닥이 없는 상황에서 거칠기의 증가에 따른 전달손실 계산결과를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 비교적 명확했던 전달

손실 패턴들이 거칠기가 증가함에 따라 왜곡되어 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 17의 결과들은 해수면을 단지 한번만 생성한 결과로 거친 해수면의 일반적인 특징이라고 보기 어렵다. 따라서 거친 해수면을 무작위로 여러 번 생성하여 평균을 구하면 거칠기에 따른 전달손실 특성을 확인할 수 있을 것이다.

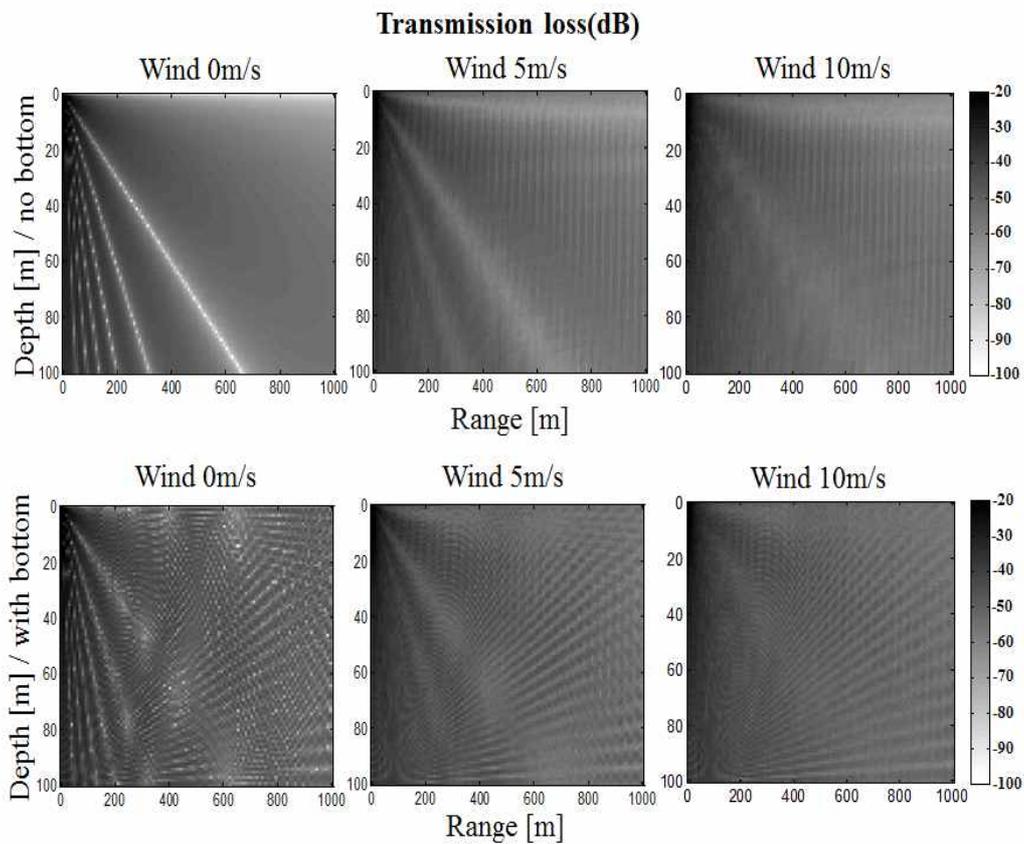


그림 18. 거칠기 및 바닥 유무에 따른 전달손실 평균값
(소스수심 5 m / 해수면 50회 생성)

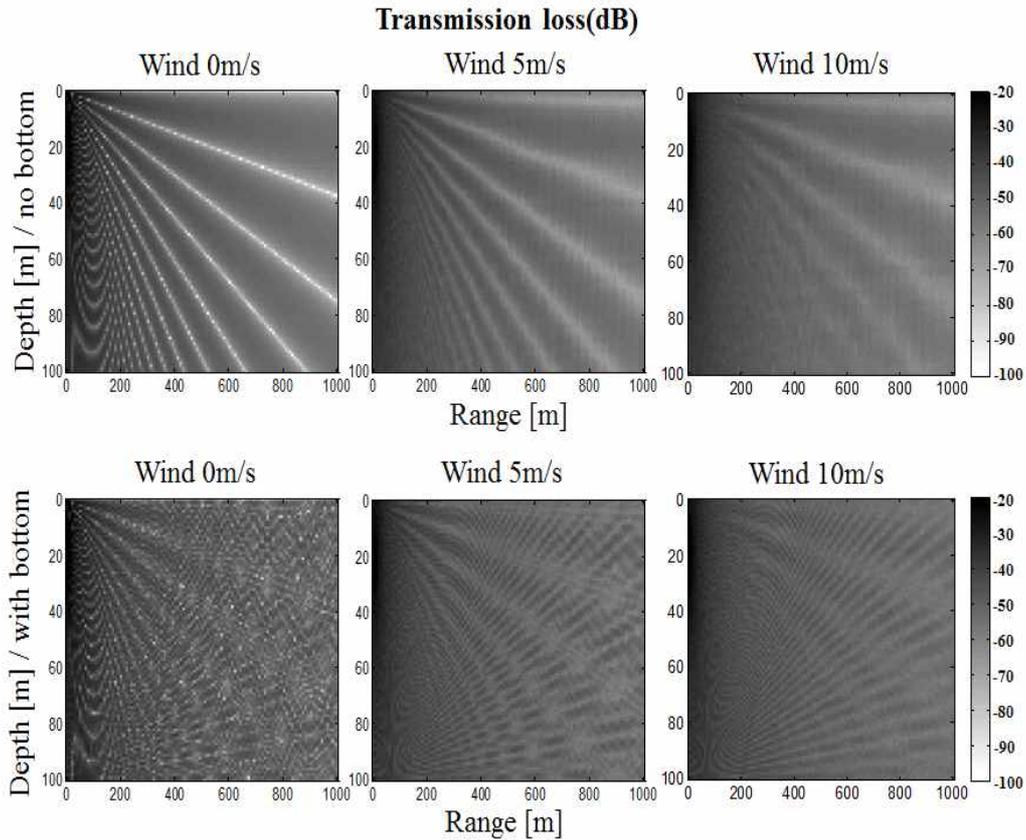


그림 19. 거칠기 및 바닥 유무에 따른 전달손실 평균값
(소스수심 20 m / 해수면 50회 생성)

그림 18, 19는 이러한 해수면을 다수(50회) 생성하여 전달손실을 계산하고 그 평균을 구한 값이다. 그림 18의 경우, 소스의 수심을 5 m로 운용했을 경우의 전달손실 계산 결과이고, 그림 19은 소스의 수심을 20 m로 운용했을 경우의 전달손실 계산 결과이다. 특히 바닥의 영향을 알아보기 위해 바닥이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우를 구분 하여 나타내었다. 바람이 0 m/s인 해수면은 flat surface와 동일하므로 평균을 하지 않았다.

3.2.3. 음압장의 변동성(Scintillation Index)

해수면이 거칠어질수록 전달손실의 변화는 심해진다. 하지만 앞의 전달손실 계산 결과에서도 보듯이, 이러한 변화도 해수면을 50회 생성하여 평균을 하면 그림 18, 19와 같이 그 패턴이 점차 희미해지면서 사라진다는 것을 알 수 있다. 여기서 그 변동성을 수치적으로 나타내는 방법으로 Scintillation Index를 들 수 있으며, 식 (19)와 같이 정의 된다.[3]

$$SI(r, z) = \frac{\langle I^2(r, z) \rangle - \langle I(r, z) \rangle^2}{\langle I(r, z) \rangle^2}, \quad I = p \times p^* \quad (19)$$

여기서 I 는 intensity로서 식 (2)에서 언급한 내용과 같다. 그림 20 은 소스를 20 m에서 운용할 경우, 거칠기에 따른 전달손실의 변동성, 즉 Scintillation Index를 전체 field에 대해서 구한 결과를 나타내고 있다. 특별히 리시버 수심이 20 m를 기준선으로 끊어서 보면, 해수면이 거칠어질수록(10 m/s→15 m/s) SI 값도 커질 뿐 아니라 실제 전달손실의 fluctuation도 매우 심하다 것을 눈으로 직접 확인할 수 있다.

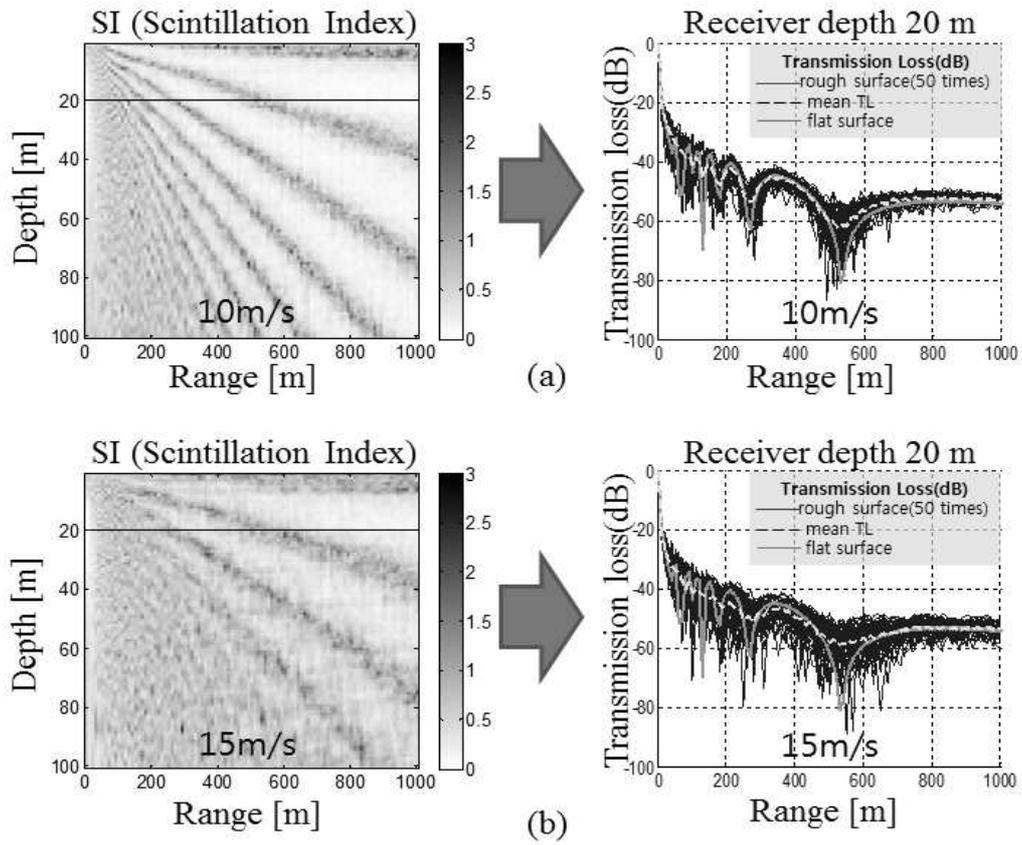


그림 20. 해수면의 거칠기에 따른 음압 변동성(SI) 비교
 (a) 10 m/s SI & TL(소스수심 20 m / 리시버수심 20 m)
 (b) 15 m/s SI & TL(소스수심 20 m / 리시버수심 20 m)

4. 수중 표적 탐지를 위한 해군작전 적용

해수면이 거칠어질수록 변동성(SI)이 더욱 심해진다는 것을 앞의 전달손실 계산 결과에서 확인하였다. 이러한 변동성이 표적탐지에 어떤 영향을 미치는지를 해군의 대잠작전과 연계하여 고찰하였다.

4.1. 소나 방정식

적극적인 잠수함 탐색을 위해서 통상 능동소나를 이용하여 잠수함을 탐지한다. 소음(Noise)이 지배적인 환경에서 수중표적 탐지를 위한 능동소나 방정식은 식 (20)과 같다.[8] (단위 : dB)

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI - DT \quad (20)$$

여기서 SE는 신호초과(Signal Excess), SL는 음원준위(Source Level), TL은 전달손실(Transmission Loss), TS는 표적강도(Target Strength), NL은 소음준위(Noise Level), DI는 지향지수(Directivity Index), DT는 탐지한계치(Detection Threshold)를 각각 나타낸다. 통상적으로 SE 값이 '0' dB 일 때 표적 탐지확률 50 %를 의미하며, 효과적인 탐지를 위해서는 SE 값이 최소 '0' dB 이상 되어야 한다.

식 (20)의 우변을 계산하기 위하여 해군에서 운용하고 있는 특정

플랫폼의 가변심도 능동소나(AN/AQS - 18V)를 적용하였으며, 표적은 반경 1m의 구(球)로 가정하면(표적강도 : -6 dB) 식 (20) 우변의 각 파라메타들은 다음과 같은 값을 갖는다. (단위 : dB) [17, 18]

$$SE = SL(215) - 2TL + TS(-6) - NL(95) + DI(17) - DT(21) \quad (21)$$

여기서 전달손실(TL)을 제외한 모든 파라메타는 상수 값으로, 전달손실 값만 알면 최종적인 신호초과(SE) 값을 알 수 있다. 거친 해수면에서의 전달손실(TL)은 앞서 검증한 K-H Integral Equation으로 계산하여 신호초과 값을 도출하면 그림 21, 22과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 21은 소스수심을 5 m로 하고 바닥의 유무를 분리한 상태에서, 평평한 해수면(0 m/s)과 거친 해수면(10 m/s)에서의 신호초과 값을 보여주고 있다. 특히 거친 해수면의 경우, 해수면을 1회 생성하여 계산한 값과 50회 생성하여 평균한 신호초과 값을 분리하여 나타내었다.

그림 22는 소스수심을 20 m로 설정하여 다양한 거칠기(10 m/s, 15 m/s, 20 m/s)의 해수면을 각 50회씩 생성하여 신호초과 값을 계산하고, 이를 평균한 값을 보여준다.

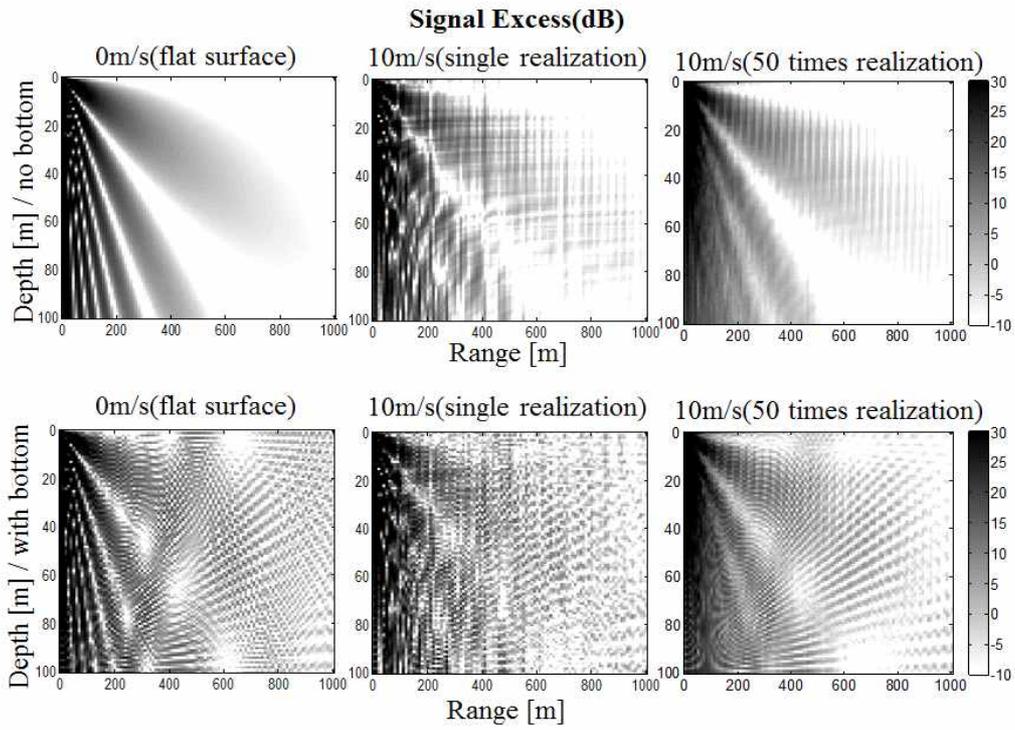


그림 21. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 SE 값(소스수심 5 m)

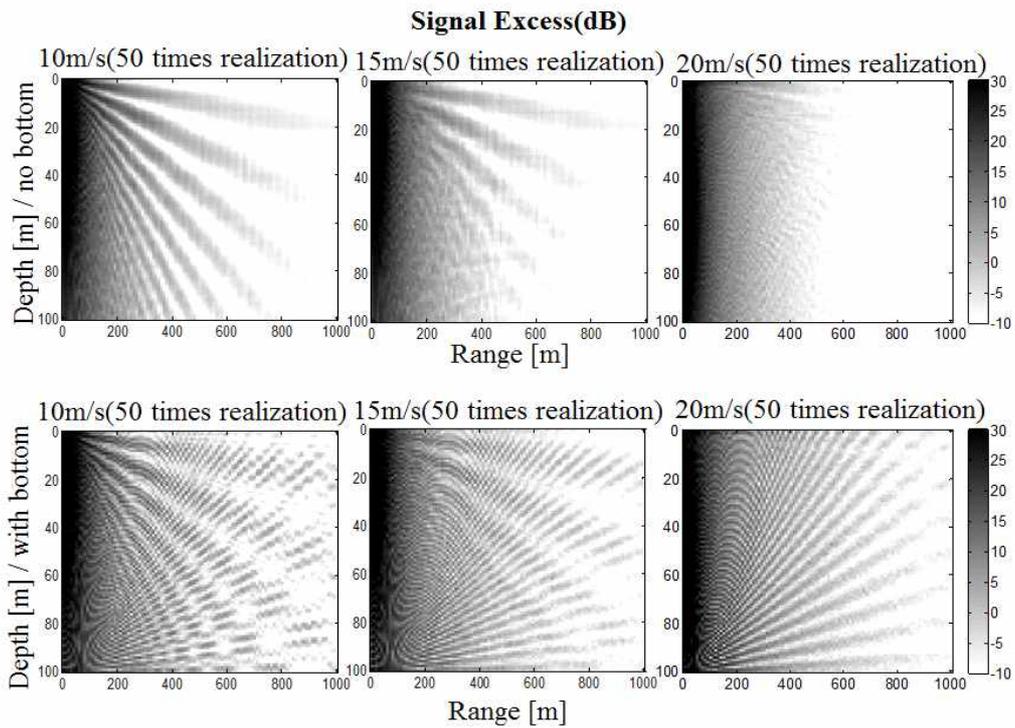


그림 22. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 SE 값(소스수심 20 m)

4.2. SE(Signal Excess)의 변동성과 탐지 확률

앞서 계산된 신호초과 값들은 기본적으로 식 (21)을 바탕으로 계산되었기 때문에 그림 20에 나타난 전달손실(TL)의 변동성 즉, Scintillation Index와 동일한 변동성을 갖게 될 것이다. 또한 신호초과 평균값으로부터 field내 특정 위치에서의 탐지 가능성에 대한 대략적인 예측을 할 수 있다. 하지만 구체적인 수치로서의 탐지 확률은 세부적으로 알 수 없다. 따라서 탐지 확률을 나타내기 위해 1회-50회 까지 계산된 개별적인 신호초과의 분포를 확률분포로 나타내어 탐지 확률을 계산하는 방법을 생각할 수 있다.

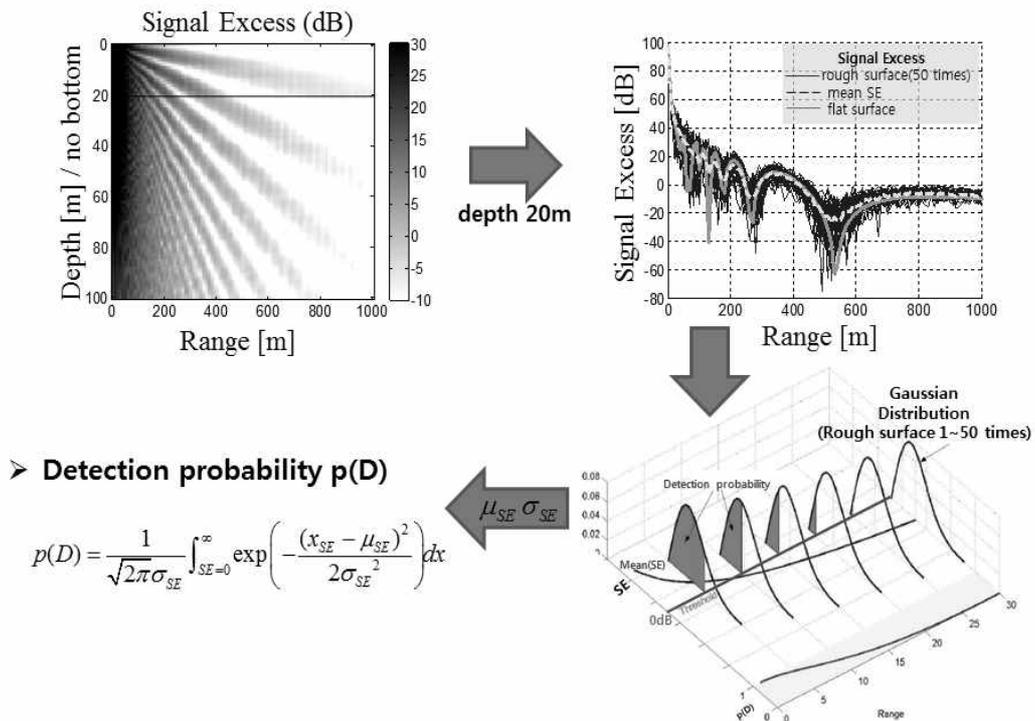


그림 23. SE (Signal Excess)의 변동성으로부터 탐지 확률 계산

그림 23은 신호초과의 변동성으로부터 탐지확률을 계산하는 방법을 예시적으로 설명하고 있다.[10] 세부적인 과정으로, 먼저 거친 해수면(10 m/s)을 다수 생성(50회)하여 신호초과를 개별적으로 계산하고 이를 평균한다. 계산된 신호초과 값(1회-50회)은 일정한 평균값을 중심으로 Gaussian 분포를 가진다는 가정 하에, 이 확률 밀도함수로부터 SE가 '0' dB 이상 되는 부분의 면적을 계산하면 field내 해당 위치(Depth & Range)에서의 탐지확률을 계산할 수 있다.

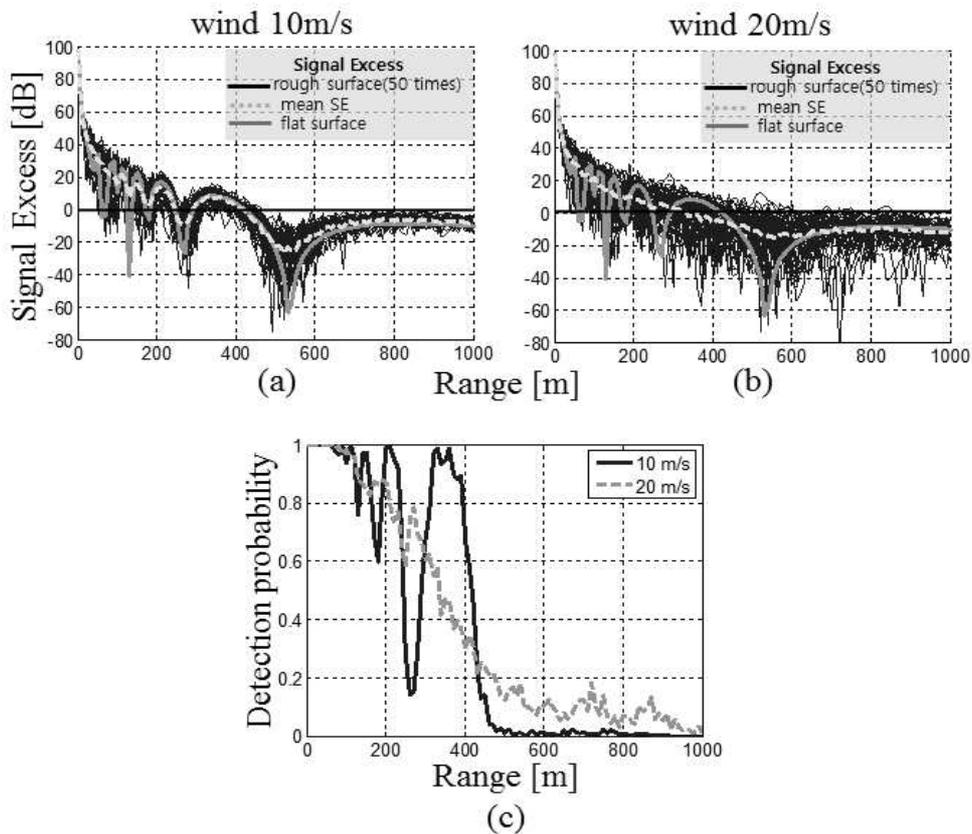


그림 24. 해수면의 거칠기에 따른 탐지확률(소스수심 20 m, 표적 수심 20 m)
 (a) 신호초과 값(10 m/s), (b) 신호초과 값(20 m/s),
 (c) 거칠기에 따른 탐지확률 비교

그림 24는 앞에서 말한 방법대로 소스수심 20 m, 표적수심 20 m에서 거리(Range)의 변화에 따른 탐지확률 계산결과를 나타내고 있다. 그림 24(c)에서 보듯이 해수면이 거친 환경(20 m/s)에서의 탐지확률이 그보다 덜 거친 환경(10 m/s)에서의 탐지확률보다 전반적으로 낮다는 것을 알 수 있다. 반면에 중간의 음영구역(200 m - 300 m)과, 원거리 이격으로 인해 탐지 가능성이 낮은 구역(500 m - 1000 m)에서의 탐지확률은 오히려 거친 환경(20 m/s)이 다소 높은 값을 갖는다는 것을 확인 할 수 있다.

앞에서 SE의 확률분포를 모두 Gaussian 분포로 가정을 하였으나, 보다 정밀한 탐지확률 분석을 위해서는 실제 SE의 분포를 확인하여 탐지확률을 계산하는 것이 더 정확할 것이다.

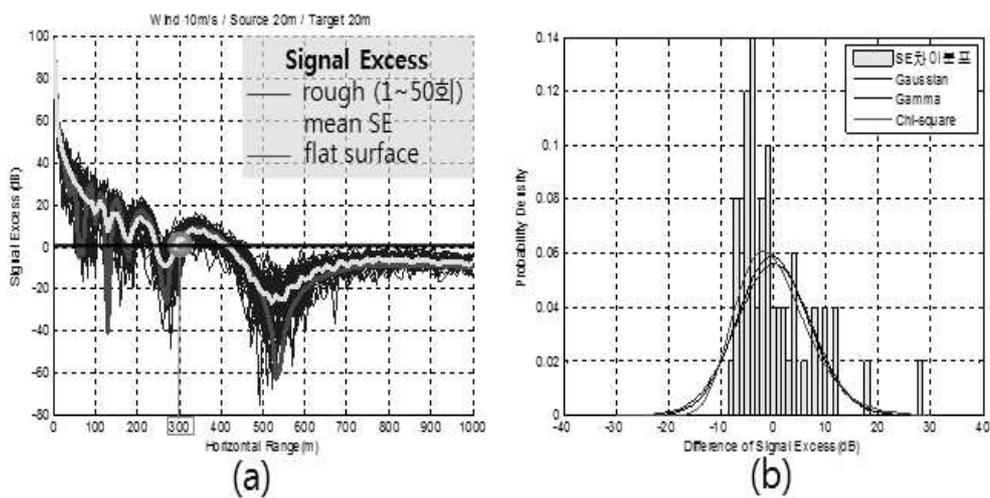


그림 25. (a) SE 계산 결과(rough/mean/flat), (b) Range 300 m에서의 SE 차이분포(flat/rough)와 이를 fitting한 확률분포

그림 25(a)는 바람 10 m/s, 소스수심 20 m, 표적수심 20 m에서 계산된 SE 결과를 나타내주고 있다. 그림 25(b)는 거리 300 m에서의 SE 값(1회-50회)들과 flat surface에서 SE 값의 차이를 확률분포로 나타낸 것이다. 그림 25(b)의 data 분포를 관찰해보면 좌우 대칭적인 Gaussian 분포가 아니라 오른쪽으로 약간 기울어진 비대칭 확률 분포임을 알 수 있다. 실제 data의 분포에 맞도록 fitting을 하면 비대칭 확률분포인 Gamma 분포나 Chi-square 분포가 실제 data의 분포와 유사함을 알 수 있다.

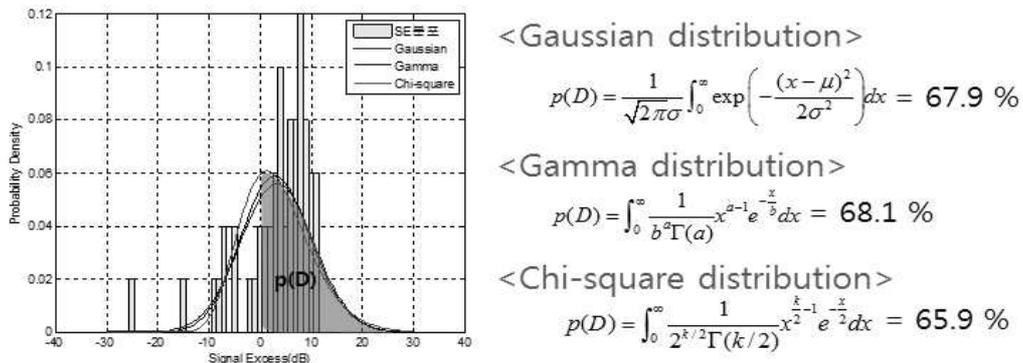


그림 26. 확률분포로부터 탐지확률 계산

그림 26은 그림 25(b)의 확률분포 곡선을 실제 SE 분포에 적용하여 탐지확률을 계산한 결과를 나타내주고 있으며, 각 확률분포별 탐지확률이 대체로 비슷한 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 일반적인 Gaussian 분포를 이용하여 전체 field에 대한 탐지확률을 계산할 수 있다.

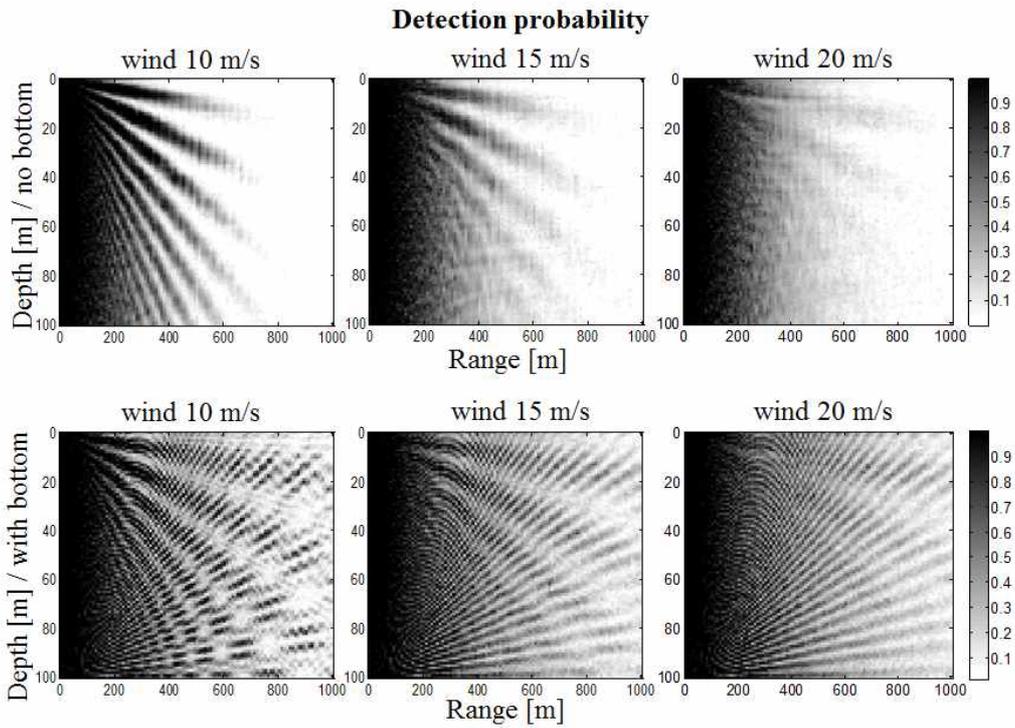


그림 27. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 탐지확률(소스수심 20 m)

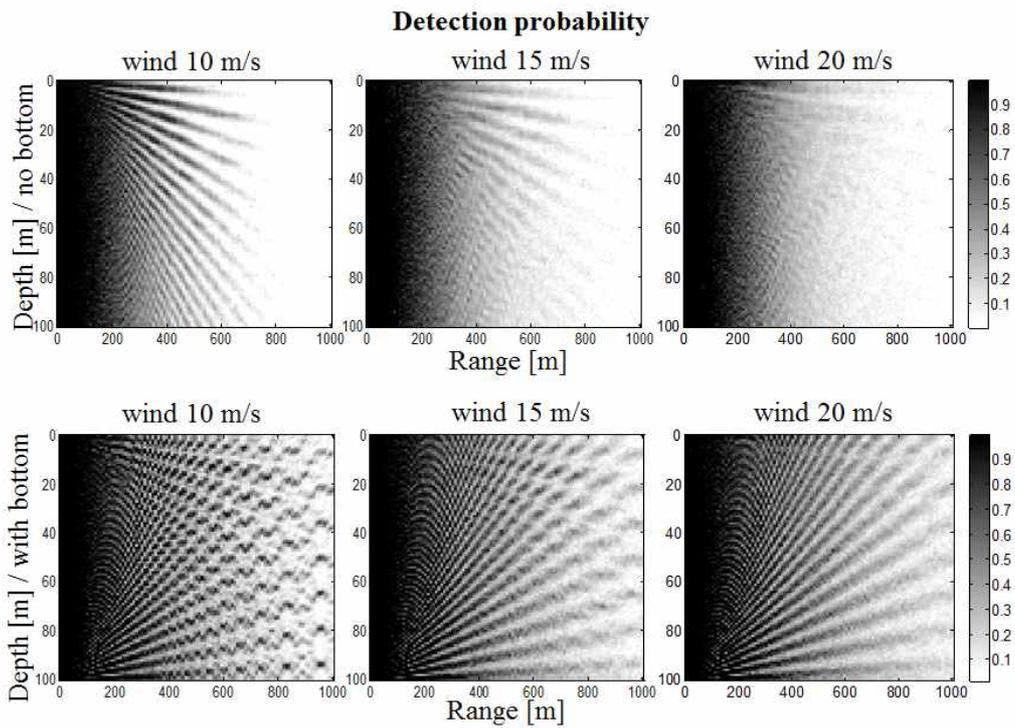


그림 28. 해수면의 거칠기 및 바닥 유무에 따른 탐지확률(소스수심 50 m)

그림 27은 소스수심 20 m에서 해수면의 거칠기 및 바닥의 유무에 따른 탐지확률 계산결과를 나타내고 있으며, 그림 28은 소스수심 50 m에서 해수면의 거칠기 및 바닥의 유무에 따른 탐지확률 계산결과를 나타내고 있다. 이 결과들로부터 해수면의 거칠기에 따른 탐지확률 변화양상을 살펴볼 수 있다.

그림 27, 28의 결과를 해석하면, 해수면이 거칠어질수록 Range가 먼 쪽부터 Lloyd mirror 간섭패턴이 희미해지면서 탐지확률이 감소되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 해수면 거칠어지면 그러한 패턴의 영향이 감소된다는 것을 짐작할 수 있다. 따라서 해수면이 거칠어지게 되면 원거리에서의 탐지확률은 필연적으로 감소될 수밖에 없으나, 반면에 그림에서처럼 중간 중간의 음파가 도달하지 않는 음영구역에서는 탐지확률이 조금 올라갈 수 있다.

또한, 바닥이 있는 경우의 탐지확률은 바닥이 없는 경우의 탐지확률 보다 전반적으로 높게 나타난다는 것을 알 수 있으며 해수면이 거칠어질수록 해수면의 효과는 희미해지는 대신 바닥을 맞는 path의 효과가 두드러지게 나타남을 그림 27, 28의 오른쪽 마지막 그림에서 확인할 수 있다.

5. 결론

소나시스템은 수중 표적탐지의 핵심 수단이다. 최근 과학기술의 발전으로 수상/수중 표적의 방사소음은 급격히 줄어들게 되었다. 수동소나 시스템은 이렇게 줄어든 방사소음 만을 가지고 수중표적을 탐지해야만 하므로 일정부분 한계가 있다고 할 수 있다. 이에 대한 대체수단으로 능동소나 시스템에 대한 관심과 중요도는 점점 커지고 있으며, 관련 분야에 대한 연구도 활발하다.

능동소나는 수동소나와는 달리 음파를 직접 방사하여 되돌아오는 신호를 가지고 표적을 탐지해내기 때문에, 소스에서 방사된 신호가 어떤 물체를 맞고 돌아오느냐에 따라 우리가 탐지하고자하는 Signal 인지, 불필요한 Noise인지가 결정된다. 특히, Noise는 대부분 해양의 비 균질성(inhomogeneity) 때문에 발생하며, 그 종류로는 해양의 미세 입자에서부터 수중 기포, 해양 생물, 해저 지형, 해수면 거칠기 등이 있다. 이중에서 해수면의 거칠기는 해군의 대잠작전이 비교적 얕은 수심에서 이루어짐을 감안할 때, 능동소나 시스템을 운용하는데 있어서 반드시 고려해야할 Noise라 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 해수면의 거칠기가 표적탐지에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고, 이를 활용한 수중표적 탐지확률 향상 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

먼저 거칠기가 존재하지 않는 평평한 해수면(flat surface)에서 전

달손실 특성을 확인하였는데, 평평한 해수면에서는 확일적으로 Lloyd mirror 갑섭패턴이 형성됨을 알 수 있었으며, 특히 소스의 주파수를 증가시키거나 수심을 증가시킬수록 많은 lobe가 형성됨을 확인하였다.

거친 해수면(rough surface)은 PM(Pierson-Moskowitz)스펙트럼을 이용하여 모의로 생성하였다. 생성된 거친 해수면에서의 전달손실은 K-H(Kirchhoff-Helmholtz) Integral Equation을 이용하여 분석하였으며, 계산된 전달손실 결과로부터 음압장의 변동성을 확인하였다. 이러한 전달손실 결과와 변동성을 소나방정식에 대입하여 SE(Signal Excess)를 계산하였으며, 계산된 SE의 변동성을 확률분포로 나타내어 표적 탐지확률을 모의하였다.

위에서 제시한 방법으로 전체적인 탐지확률을 모의한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째로, 해수면이 잔잔하면 소스와 표적과의 상대적인 수심조절로 원거리 탐지확률을 높일 수 있다. 이것은 수심을 마음대로 변경하여 운용할 수 있는 가변심도 소나를 사용하는 플랫폼에게 있어서 특히 유리한 측면이라 할 수 있다.

둘째로, 해수면이 거칠어지면 필연적으로 원거리 탐지확률은 떨어지나, 음영구역의 탐지확률은 조금 높아진다. 하지만 탐지확률이 높아지는 음영구역의 범위는 극히 제한적이다. 이는 해수면이 거칠 때, 가변심도 소나를 이용하는 플랫폼에게 있어서 표적이 잘 잡히지

않으면 불필요하게 수심을 변경하는 것보다는 신속히 다른 위치로 이동해서 탐색을 하는 것이 더 유리함을 의미한다.

셋째로, 바닥이 존재하는 경우의 탐지확률은 바닥이 없는 경우보다 전체적으로 높게 나타난다. 이는 바닥을 맞는 음선경로 때문으로 수심이 비교적 얇은 우리나라 서해가 잠수함 탐지에 특별히 유리한 측면이 있다고 할 수 있다.

마지막으로 해수면이 거칠어질수록 바닥의 영향이 주도적으로 나타난다. 즉, 거친 해수면이 미치는 영향보다 바닥이 미치는 영향이 커진다는 의미로서, 이는 해수면이 거칠어지더라도 수심이 아주 깊은 심해가 아니라면, 바닥의 영향 때문에 어느 정도의 탐지확률이 보장된다는 의미로 해석될 수 있다.

참 고 문 헌

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

[2] Robert J. Urick, *Principles of underwater sound*, 3rd edition, (McGraw-Hill book company, 1983)

[3] R. P. Chapman and J. H. Harris, "Surface back scattering strength measured with explosive sound sources," J. Acoust. Soc. Am. **34** (10), 1592-1597, 1962.

[4] Drik Tielburger and Steven Finette and Stephen Wolf, "Acoustic propagation through and internal wave field in a shallow water wave guide," J. Acoust. Soc. Am. **101** (2), 789-808, 1997

[5] H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of acoustical oceanography* (Academic Press, San Diego, 1998)

[6] E. I. Thorsos, "Acoustic scattering from, a 'Pierson-Moskowitz' sea surface," J. Acoust. Soc. Am. **88** (1) , 335-349, 1990.

- [7] M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **124** (1), 137–150, 2008.
- [8] A. D. Waite, *Sonar for practising engineers*, 3rd edition (John Wiley & Sons Ltd, 2002)
- [9] R. J. Urick and G. C. Gaunard, "Detection of fluctuating sonar targets," U.S. Naval Ordnance Laboratory Tech. Rep. 72-47, 1972
- [10] P. Abbot and I. Dyer, "Sonar performance predictions incorporating environmental variability," *Impact of littoral environmental variability on acoustic predictions and sonar performance*, 611–618 (Kluwer Acoustic Publishers, 2002)
- [11] E. I. Thorsos, "The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 78–92, 1988.
- [12] J. A. Ogilvy, "Wave scattering from rough surfaces," *Rep. Prog. Phys.* **50**, 1553–1608, 1987
- [13] Urick, R. J. and H. L. Saxson, "Surface reflection of short supersonic pulses in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **19**:140, 1947

- [14] W. J. Pierson, Jr. and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii," J. Geophys. Res. **69**, 5181-5190, 1964
- [15] B. J. Uscinski and C. J. Stanek, "Acoustic scattering from a rough sea surface : the mean field by the integral equation method," Waves in random media, 12:2, 247-263(IOP Publishing Ltd, 2002)
- [16] 박상현, "단일 산란 경로 방법을 이용한 거친 해수면 근처의 표적산란 연구," 서울대학교 박사학위 논문, 2012
- [17] http://www.l-3mps.com/oceansystems/pdfs/AQS18V-5_Nov07_low.pdf
- [18] Generic Sonar Model 세부항목 분석집(해군본부, 2003)

Target detection under rough sea surfaces

Jeongcheol, Lee

Abstract

One of the primary reason why we use sonar is for detecting the enemy's submarine or unknown submerged target.

The real ocean environment where sonar is operated is very complicated so that the sound wave could not propagate well. Such complicated ocean environment conditions are such as temperature, salinity, density, marine life, roughness of sea/bottom surface and so on. They are very changeable in terms of time and space. Especially, the rough sea surface makes it difficult for the sonar to detect submerged target because it scatters the source signals. That means, the signals radiated by the source are scattered by the rough sea surface and the distorted signals are finally received by the receiver.

There are two object in this paper. One is how the roughness of the sea surface affects the detection probability. The other is

to enhance the detection possibility in such a rough sea surface condition, especially using active sonar.

To begin with, flat surface transmission loss was investigated with ray model and then rough surface was generated with the PM spectrum. Total 50 times of realizations were conducted to generate random sea surfaces. K-H(Kirchhoff-Helmholtz) integral equation was applied to calculate the transmission loss at the rough surface. Variability of pressure fields was verified from the rough surface transmission loss. And through the variability, detection probability can be figure out with the probability distribution.

In some sense, this work could be valid because the transmission loss was calculated with real surface generating process and then the detection characteristics were analyzed statistically under rough sea surface .

keywords : rough surface, detection probability, active sonar,
Kirchhoff approximation, K-H Integral Equation,
PM spectrum

student number : 2012-22607

감사의 글

위탁교육을 간다고 부대에 신고를 한지가 엇그제 같은데 벌써 2년이라는 시간이 지나갔습니다. 돌이켜 보면 지난 2년이라는 시간은 저에게 있어서 때로는 시련이자 한편으로는 기회이기도 했습니다. 또한 해군 장교로 임관한지 10년 가까이 지났지만, 그 중에서 가장 길게 느껴졌던 시간이기도 했습니다.

시련이라고 생각되었던 이유는, 모든 군 위탁생들이 경험하는 측면이기도 하겠지만, 사관학교 졸업 후 책과는 동떨어진 삶을 살다가 굳어진 머리 때문이었습니다. 이런 치명적인 결점을 극복하기 위해 먼저 거쳐가신 선배님들은 남들보다 두세배 열심히 하셨다는 이야기를 들었지만, 저는 그렇게 하지 못한 것 같아 못내 아쉽습니다. 특히 왼쪽 팔꿈치에 작은 상처(?)를 입었을 때, 심신이 매우 힘들었던 기억이 납니다.

기회라고 생각되었던 것은, 제 자신이 실제 dipping sonar를 운용하는 대잠헬기의 조종사로서, 부대에서 접할 수 없는 수중음향학에 대한 많은 것을 보고 배울 수 있었다는 점입니다. 저에게는 실질적으로 매우 의미있는 시간이었으며, 부대에 돌아가서도 분명 유용하게 활용할 수 있으리라 봅니다.

그리고 제가 무사히 졸업할 수 있도록 지원을 아끼지 않으신 분들께 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 세미나 발표할 때마다 지적을 아끼지 않으신 성우제 교수님과 근화 형(교수님), 두 분의 애정 어

린 관심으로 그나마 제가 졸업을 하는 것 같습니다. 정말 감사드립니다. 그리고 항상 저의 부족한 부분에 대해 뒤에서 충고를 서슴치(?) 않았던 연구실의 터줏대감 추영민 박사에게도 고마운 마음을 전합니다. 영민아, 결혼식장 들어갈 때까지는 모르는 거다. 끝까지 최선을 다해. 연구실의 유일한 동기 동호야, 네가 계속 형처럼 느껴지는 이유는 뭘까? 너야말로 연구실의 모범(훌륭한 남편, 자상한 아버지, 성실한 연구생)을 제시하는 것 같다. 방장이라는 완장을 차더니 갑자기 책임감 게이지가 풀(full)로 상승한 지수야, 대청봉 등반은 내가 등산을 좋아하게 된 계기가 되었다. 앞으로 매년 등산 강추함! 항상 식욕과 잠과 다이어트와의 correlation 분석에 여념이 없는 아라야, 너 많이 슬림해졌다. 이제 좋은 남자만 찾으려. 이제 곧 아빠가 되는 해상아, 가장으로서 어깨가 한층 무거워질 테지만 그게 나중에 기쁨의 원천이 될 거야. 세상에 대한 비판보다는 나라를 사랑하는 새나라의 어린이로 키우렴. 석사 동기 중용아, 진실은 생명을 바탕으로 하고 생명은 근원은 하나님의 말씀이지. 항상 진실과 진리를 탐구하는 거룩한 삶을 살길 바란다. 그리고 형 먼저 졸업해서 미안하다. 근면함과 노력으로 뜻하는 모든 것을 이룬 영철아, 다시 한번 결혼 축하하고 졸업도 축하한다. 연구실의 시끄러운 새내기 선아·용성아, 매일 둘이 티격태격하다보면 정(?)들 수도 있으니 조심하렴, 하지만 뚜렷한 방향을 잡고 열심히 연구에 몰두하는 너희들의 모습도 보기 좋다. 마지막으로 해군 후배인 민규·대근아, 목적을 가지고 위탁교육을 왔으니 원하는 목표 다 이루길 바라고, 특히 민규는 다이어트, 대근이는 결혼에 성공하는 보람찬 대학원 생활

이 되길 빈다.

끝으로 1학기 기말고사 기간 중에 시험공부에 방해될까봐 나에게 말도 없이 덜컥 둘째를 낳았던 집사람에게도 고마운 마음을 전합니다. 당신의 헌신적인 내조가 없었다면 지금의 나는 없었을 것이오, 사랑한다. 은애야! 그리고 보석같은 내 두딸 아윤이와 다운이, 보기만 해도 미소가 절로 나오고 마음을 스르르 녹게 만드는 너희 두 귀염둥이는 아빠인 내가 사는 이유이기도 하단다.

이제 저는 대학원생에서 다시 해군 장교 본연의 모습으로 돌아가 군인의 삶을 계속 살아갈 것입니다. 한 층 성숙된 군인이 될 수 있도록 기회를 준 해군과 서울대학교 성우제 교수님께 다시 한번 감사 드립니다. 국민의 세금으로 공부를 한 만큼, 날로 더해가는 북한의 위협에 맞서 언제든지 명령이 떨어지면 조국과 민족을 위해 헌신적으로 임무를 수행하겠습니다. 그것이야말로 제가 나라와 국민에 대해 보답하는 길이라 생각합니다.