

능동 소나 체계에서의 표적 탐지 거리 예측 알고리즘과 응용

박재은, 김재수
한국해양대학교 해양공학과

요 약

능동 소나 체계에서 표적의 탐지거리 예측을 위하여 소나방정식이 이용되는데, 이는 음원 준위, 전달 손실, 표적 강도, 복반사 준위, 소음 준위, 방향성 이득, Detection threshold, Signal excess, 탐지 확률과 탐지거리의 요소로 구성된다.

본 연구에서는 능동 소나 체계에서 소나 깊이와 표적 깊이의 함수인 탐지거리를 계산하기 위한 알고리즘에 대해 살펴보았다. 소나의 각 요소와 환경이 주어졌을 때 SAFARI 모델을 이용하여 각 수신기의 깊이와 거리에서의 전달손실을 계산하였으며, 구하여진 전달 손실과 배경 소음 준위를 이용하여 Signal excess를 계산하였다. ROC(Receiver-operating-characteristic)곡선을 이용하여 Signal excess를 탐지 확률로 계산한 후 두 항목 곱하여 각 깊이별 거리로 적분함으로써 탐지거리를 구하였다.

주파수 30Hz의 전방향 음원을 사용하여 여름의 일반적 음속 분포에서 계산한 결과 100m음원 보다 300m음원에서 상대적으로 큰 탐지거리를 얻었으며 각 음원 깊이별 평균 탐지거리는 100m이하의 표면을 제외한 500m까지는 거의 일정함을 알 수 있었다.

1. 서 론

수중에서의 표적 탐지는 수신기만을 이용하는 수동소나와 송신기 및 수신기를 이용한 능동소나를 사용하는 방법이 있다. 수동소나를 이용하여 탐지시에는 표적이 방사하는 음의 세기로서 표적을 탐지하므로 수동적인 반면, 변환자를 이용하여 음을 송신한 후 표적에 맞고 되돌아오는 음의 세기를 수신기로 탐지하는 능동소나를 이용한 표적탐지는 적극적인 표적탐색 방법으로서 이는 어군 탐지기, 어뢰, 수중표적의 탐색을 위한 함정등의 소나에 이용되고 있다.

탐지거리를 예측하는 것은 소나체계의 성능을 예측하는 것과 같은 과정인데 이러한 탐지거리를 예측하기 위해 여러가지 모델로서 연구가 수행되어 왔으며, 그 몇가지 예로서 미 해군의 MISSEM II 에서는 Ray 이론을 이용하여 각 Ray에 따른 전달 손실과 복반사 준위를 구한 후 협대역 탐지기를 이용한 호대 잡음비와 탐지 확률을 거리 함수에 따라 구하였으며, SCHIPPER는 능동 소나 거리예측(REACT)모델에서 Sound channel과 Bottom-surface path의 해석적인 Ray solution을 이용한 전달 손실 모델과 Lambert's Law를 이용한 후방산

란강도에 의한 복반사음을 계산하여 최소 탐지가능 신호를 결정한 후 거리탐수의 탐지확률과 탐지거리를 계산하였다. 특히 Ferla와 Porter[3]는 수동 소나 체계에서 음원 깊이를 아는 경우 음원 깊이 또는 음원 깊이에서와 같은 음속을 갖는 깊이에 수신기를 배치하는 것과, 음원 깊이를 모르는 경우 최저 음속 깊이에 수신기를 배치하는 것이 가장 적합한 수신기 위치 선택임을 보였다.

본 연구에서는 능동소나 체계에서 탐지거리 예측을 위한 계산과정을 살펴 보며, 음원깊이와 표적깊이의 함수인 탐지거리를 계산한 결과에 대해 살펴보고자 한다.

2. 배경 이론

2.1 소나 방정식과 각 요소

소나방정식은 소나 설계와 함께 소나 체계의 성능을 예측하는데 주로 이용된다. 능동 소나에서의 signal excess는 다음 식으로 표현 된다.

$$SE = SL - TL1 - TL2 + TS$$

$$- (NL - DI) * RL - DT \quad (2-1)$$

여기에서 사용된 각 변수들의 정의를 보면,

- SE : signal excess (dB)
- SL : 음원 준위 (dB re 1μPa & 1m)
- TL1 : 음원에서 표적까지의 전달 손실 (dB re 1μPa & 1m)
- TL2 : 표적에서 음원까지의 전달 손실 (dB re 1μPa & 1m)
- TS : 표적 강도(dB)
- NL : 소음 준위(dB)
- DI : 방향성 이득(dB)
- RL : 복반사 준위(db)
- DT : detection threshold

이며, (NL-DI)*RL은 소음 준위와 복반사 준위의 Power sum으로서 dB 크기이며 배경소음 준위(BGL: Background level)라고도 한다. 다음은 능동소나 방정식에서의 각 항들에 대해 기술하였다.

2.1.1 음원 준위 (SL)

일반적으로 방향성을 가진 변환자 배열에서 음원 준위는 표적의 방향으로 송신된 음의 세기로서 정의된다. 이러한 음원 준위는 입력된 힘과 전기적 에너지가 음향 에너지로 전환시의 효율성, 그리고 빔에 음이 집중되는 것으로 인한 방향 이득에 관계되며 다음과 같이 표현된다.

$$SL = 171 + 10 \log P + DI_T \quad (2-2)$$

여기에서 10logP는 power level로서 dB re 1watt이며 DI_T는 송신 방향 이득이다. 전방향음원일 경우 송신방향 이득(DI_T)은 0이다.

2.1.2 전달 손실 (TL)

매질에서 음파가 전달되며 발생하는 손실은 전파 모델을 사용하여 계산되는데 본 연구에서는 SAFARI 모델을 이용하였다. 이 방법은 탄성파를 비롯한 존재하는 모든 종류의 파를 포함하기 때문에 Full wave solution이라고도 불린다.

SAFARI 모델은 GAM 과정을 통해 해를 구하는 데 이를 간단히 살펴보면 다음과 그림과 같다.

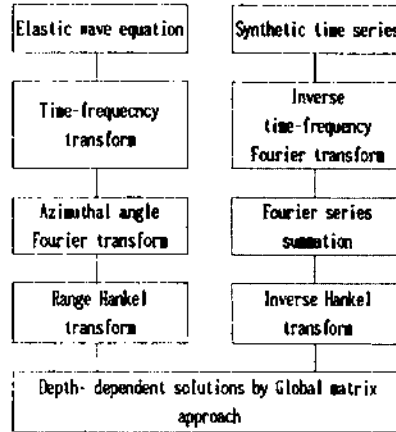


Fig 2-1. The solution procedure of GAM(Global Matrix Method)[7]

2.1.3 표적 강도 (TS)

능동소나에서 표적강도는 표적에 입사된 음의 세기와 음의 중심에서 1m 거리의 표적에 의해 맞고 되돌아온 음의 세기의 비(dB)로서 표현되며 표적의 크기,모양,구성 재질 및 자세각에 따라 좌우된다.

수중표적의 대표격인 잠수함의 경우에 대해 LRIK[4]의 표준화 된 세 값을 사용하였다. 즉, 정함수 또는 정함미일 경우 +10dB, 현측일 경우에는 +25dB, 기타 자세각의 경우에는 +15dB 이다.

2.1.4 소음준위 (NL)

소음준위는 크게 주변소음과 자체소음 두 가지로 나뉘어 진다. 소나를 사용시에는 이를 이용하는 선박의 속력이 20kts까지 증가될 때의 주변소음 상황과, 그 이상 속력에서의 자체소음 상황으로 구분된다. 주변소음은 10Hz에서 100kHz까지의 범위에서는 타 선박에 의한 소음과, 바람에 의한 해수면 상태에 따른 소음의 조합으로 나타나며 이를 계산하기 위해 Wenz곡선을 이용하였다.

2.1.5 복반사 준위(RL)

복반사 준위는 송신된 음원 준위나 펄스길이, 소나 빔폭이 증가함에 따라 증가된다. 따라서 소나 설계시에는 위의 세 가지 사항을 적절히 고려해야 하며 복반사의 종류로는 해수면 복반사, 해저 복반사, 체적 복반사가 있다. 이는 다음의 기본식으로 계산하였는데

$$RL = SL - 40 \log r + S_{V,S,B} + 10 \log A \quad (2-3)$$

여기에서 r 은 거리, A 는 ensonified area이며, $S_{V,S,B}$ 는 각각 제적, 해수면, 해저후방산란강도로서 해수면 후방산란 강도는 Chapman & Harris 식을 이용하여 구하였고, 해저 후방산란 강도는 Lambert's Law를 이용하여 각 복반사율 계산 후 power를 합하였다.

2.1.6 Detection Threshold (DT)

DT는 탐지 결정을 위해 특정하게 주어진 준위를 만족하는 수신 빔폭에서의 Signal power 대 수신단에서 측정된 1Hz band에서의 Noise power 비로서 정의된다. DT를 계산하기 위해 탐지확률(P_D)과 오탐지확률(P_{FA})이 주어져야 하는데, 탐지확률 50%와 오탐지확률 0.01%에서 Receiver-operating-characteristic(ROC) 곡선을 이용하여 Detection index (d)를 구한후 Reverberation-limited인 상황에서 소음과 복반사음 안에서 송수신 신호를 완전히 모를 경우에서의 에너지 탐지기인 Square law receiver를 사용하였다.

2.2 탐지 거리 계산

이상에서 Signal excess를 구하는데 필요한 각 항들에 대해 알아 보았으며 각 항들을 조합 소나 방정식에 대입하여 SE값을 구한다. 계산된 Signal excess는 각 거리에서 Log-normal distribution으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$P_D(SE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \int_{SE}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (2-4)$$

이며, 여기에서 σ 는 Signal excess의 표준편차로서 여러값에 따라 다양한 곡선으로 나타나는 데 σ 는 8~9 dB 사이의 값을 갖는다[4].

이 값을 가지고 표준편차 8dB를 대입 후 Signal excess 축으로 적분을 하면 각 Signal excess에서의 탐지확률을 구할 수 있다. 그리고 Signal excess는 거리 r 과 깊이 d , 음원의 깊이 d_s , 표적의 깊이 d_t 의 함수이며 이는 거리와 깊이에 따라 Signal excess값이 변하며 탐지확률이 변하므로 각각의 거리와 깊이에 대한 탐지확률이 계산되면, 이를 거리로 적분하여 탐지거리 DR을 구할 수 있다. 즉 탐지거리 DR은

SE, d_s , d_t , r , d 의 함수로서

$$DR(SE, d_s, d_t, r, d) = \int_0^{\infty} P_D(SE, d_s, d_t, r, d) dr \quad (2-5)$$

이다.

3. 탐지거리 계산 결과

주파수 30Hz(CW), 펄스 길이 100msec, 음원 깊이 100m와 300m인 전방향음원을 사용하여, 풍속 2m/sec, 해저 저질은 모래이며 전형적인 여름 음속분포의 환경에서 전달손실과 탐지거리는 다음과 같으며, 음원을 수심 500m까지 50m 간격으로 배열하여 거리에 대해 평균한 탐지 거리를 나타내었다.

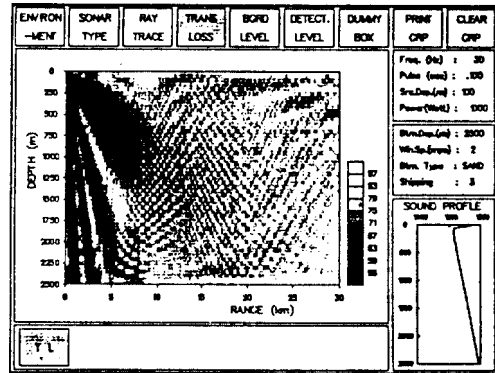


Fig 3-1. Transmission loss for the summer profile and a 30Hz source at depth 100m

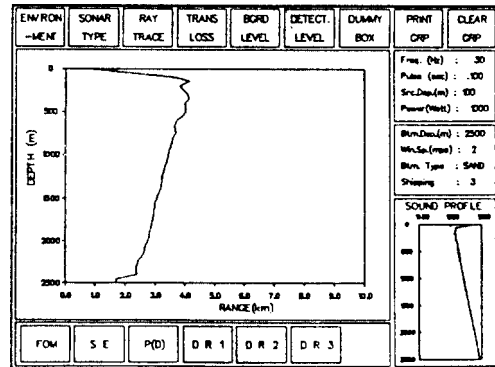


Fig 3 2. Detection range for the summer profile and a 30Hz source at depth 100m

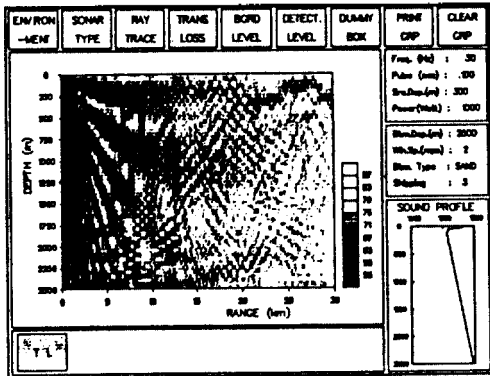


Fig 3-3. Transmission loss for the summer profile and a 30Hz source at depth 300m

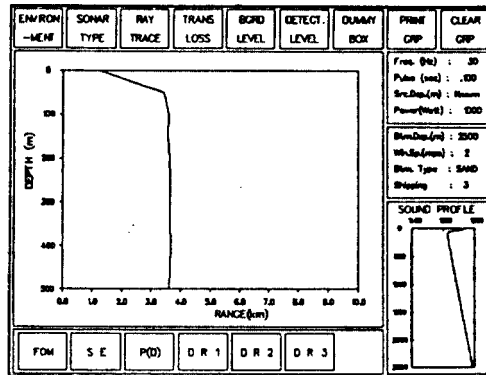


Fig 3-5. Detection range for the summer profile and a 30Hz source

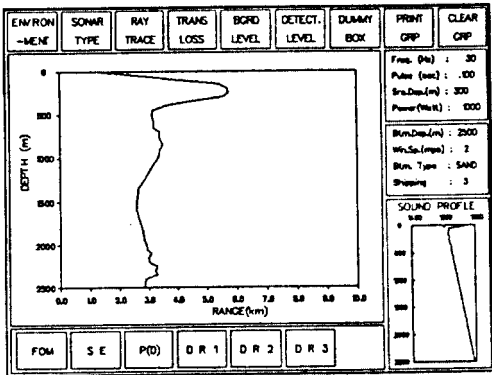


Fig 3-4. Detection range for the summer profile and a 30Hz source at depth 300m

4. 결론

위에서 능동 소나 체계에서 탐지확률 및 탐지거리 예측을 위한 알고리즘을 살펴 보았다. 그 결과 100m 음원일 때에는 전반적으로 각 깊이에서 탐지거리가 크게 변화되지 않지만, 300m에서 음원에서는 음원 깊이에서 탐지거리가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 각 음원 깊이별로 평균한 탐지거리는 표면 근처에서 짧으나 100m 이하에서는 거의 일정함을 볼 수 있었으며, 이는 전방향음원의 사용과 해수면 복반사의 영향으로 볼 수 있다.

참고 문헌

- [1] H. Weinberg, Navy Interrim Surface Ship Model(NISSM) II, NUSC Technical Report 4527, Oct. 1973
- [2] Schippers P., "REACT, A Model for Active Sonar Range Prediction", LDT'91 Conference Book of Proceedings, MEFL, 23-25 April 1991, London, UK
- [3] C.M. Ferla & M.B. Porter, "Receiver depth Selection for Passive Sonar Systems", pp267-278, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.16, No.3, July 1991.
- [4] Urick R J, Principles of underwater sound, McGraw-hill Book Company, New York, 3rd ed. 1983.
- [5] W.S. Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [6] H. Schmidt, SAFARI User's Guide, SACLANTCEN REPORT, Serial No. SR-113, Sep. 1988.
- [7] J. Kim, Radiation from Directional Seismic Sources in Laterally Stratified Media with Application to Arctic Ice Cracking Noise, Ph.D. Dissertation, Dept. of Ocean Eng., Mass. Inst. of Tech., May 1989.
- [8] James W. Jenkins, Sonar Principles and Antisubmarine Warfare, pp61-70, Sea Technology, Feb. 1993.
- [9] C.C.F. Adcock, Some Aspects of Bistatic Sonar, LDT'88, Conference Book of Proceedings, MEPL, pp192-210, 26-28 Oct 1988, London, UK.