

움직이는 표적 전달신호의 도플러 효과

진운환, 나정열

한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실

Doppler effects of Transmission signal from Moving Target

Un-Hwan Jin, Jungyul Na

Ocean Acoustics Laboratory Department of Earth & Marine Science,
Hanyang University, Ansan
E-mail : whjin@hymail.hanyang.ac.kr

요약

본 논문은 중거리 수중표적이 고정 설치된 수신기에 접근 시 표적신호의 다중경로에 신호변형을 일으키며, 특히 신호의 변형 중 도플러효과를 변화정도를 신호모의를 통하여 분석하였다. 동해의 동계와 하계의 대표적인 음속구조에 따른 고유음선(eigenray)의 도플러 주파수를 계산하였다. 수중표적의 속도는 12노트, 주파수는 135Hz, 350Hz, 신호는 정현파로 가정하여 신호모의를 하였다. 그 결과 해저면 반사가 한번인 음선은 수신신호에 주로 Up-doppler를 형성하였고 두 번인 음선은 주로 Down-doppler를 형성하였다.

1. 서론

도플러효과는 움직이는 표적의 상대속도가 변하면서 표적 방사소음 신호의 주파수가 고주파 또는 저주파 방향으로 편이하는 현상이다[1]. 성층화된 해양 환경에서 표적과 수신기의 이동은 다중경로 현상 때문에 더욱 복잡한 도플러 구조

를 만들어 낸다[2]. I. B. Burlakova는 도플러효과를 이용한 새로운 개념의 해양음향 토모그래피(OAT : Ocean Acoustic Tomography) 방법을 제시하면서 해저면 반사, 경계면 거칠기에서의 산란동에 의해 표적 방사신호가 표적이 수신기에 접근 또는 멀어질 때 수신된 신호에서 Up-doppler와 Down-doppler가 동시에 존재함을 보였다[3],[4]. 또한 움직이는 표적의 속도가 음속보다 매우 작을 때, 움직이는 표적에 의해 일 반화된 음장은 서로 다른 도플러 주파수(Doppler shifted frequency)를 가지는 각각의 고유음선(eigenray)로 나타낼 수 있다[3],[4],[5].

본 논문은 표적이 고정된 수신기에 접근하면서 방사한 신호의 도플러효과를 거리 변화율이 적용된 [3], [4]의 도플러효과 알고리즘을 적용하여 계절(동계/하계) 및 해저면 반사 횟수에 따른 도플러효과 특성을 모의하였다. Ray-tracing 방법을 통하여 고정된 수신기와 움직이는 표적에 적용하였으며[5], 음선 모델에서 해저면 반사를 거친 고유음선(eigenray) 정보를 구한 후 각각의 도플러효과에 의해 변화된 주파수를 구하여 그 특성을 분석하였다.

II. Moving Source Model

본 논문에서 구현한 모의과정은 크게 두 부분으로 나누어져 있다. 먼저 음선모델에서 구한 각각의 고유음선(eigenray)의 도플러 주파수를 구하고 신호모의를 통하여 시간영역에서 도플러효과를 고려한 신호를 합성한 후 주파수영역에서 변형된 표적신호의 전체적인 도플러 주파수를 구하였다. 움직이는 수중표적에서 방사된 신호를 정현파로 가정하면 다음과 같다.

$$s(t) = A(t) \sin[2\pi ft + \theta(t)] \quad (1)$$

여기서 $A(t)$ 는 신호의 amplitude, $\theta(t)$ 는 위상(phase) 그리고 f 는 표적 주파수(carrier frequency)이다. 한편 수신된 신호는 음선(ray)들의 합이므로 다음과 같이 표현된다.

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin[2\pi ft + \theta_i(t)] \quad (2)$$

표적이 움직임에 따라 수신기에 도착한 각각의 고유음선(eigenray)에 대하여 수신된 신호는 도플러효과에 의해 주파수가 변하게 된다. 따라서 식(2)를 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin[2\pi(f + \Delta f_i)t + \theta_i(t)] \quad (3)$$

여기서 Δf_i 는 각각의 고유음선(eigenray)의 도플러효과에 의한 주파수의 변화율이며 수신기에서 합성된 신호는 다음과 같다.

$$S(t) = A(t) \sin[2\pi(f + \Delta f)t + \theta(t)] \quad (4)$$

여기서 Δf 는 모든 고유음선(eigenray)의 평균 주파수 변화(average frequency shift)를 나타내며 실제 수신기에 수신된 주파수는

$$f' = f + \Delta f \quad (5)$$

이다. 만약 표적이 고정된 수신기에 접근할 때 수신기에서 수신된 도플러 주파수는 음속(c)와 표적속도(v)의 관계식으로 나타낼 수 있다[6].

$$f' = f \left(\frac{c}{c-v} \right) \quad (6)$$

식(6)에 거리에 따른 변화율을 적용하면 다음과 같다[3], [4].

$$f' = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \right) \frac{r}{R_j} \quad (7)$$

여기서

$$R_j = \sqrt{r^2 + (2mH + h_j)^2}$$

$$j = \{1, 4\}$$

$$h_1 = -(Z_s + Z_r), \quad h_2 = -(Z_s - Z_r),$$

$$h_3 = Z_s - Z_r, \quad h_4 = Z_s + Z_r \quad (8)$$

[H : 수심, m : 해저면 반사 횟수, Z_s : 표적수심, Z_r : 수신기 수심, h_j : 해저면 반사 경로]

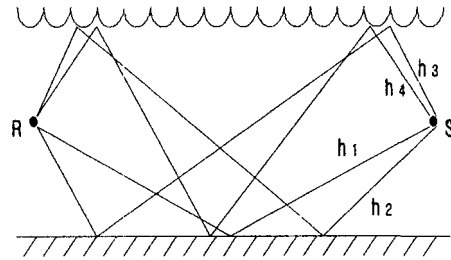


그림 1. 해저면 반사경로(one bounce)

만약 표적과 수신기가 해수면 가까이에 있을 경우 [$(h_j/2mH)^2 \ll 1$], 식 (8)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$R_j \approx R = \sqrt{r^2 + (2mH)^2} \quad (9)$$

III. 모의 방법 및 결과

동해의 동계와 하계의 대표적인 음속구조를 이용하여 움직이는 표적의 도플러효과를 모의하기 위하여 수중표적 속도는 12노트, 주파수는 135Hz와 350Hz로 하였다. 그림 2과 같이 수신기 수심은 600m에 두고 표적은 150m에서 연안으로 90Km(수심 : 2283m)에서 80Km(수심 : 2173m)까지 접근하도록 하였다. 수신기에 접근하는 수중표적이 방사한 신호가 해저면 반사를

거치면서 도플러효과에 의해 주파수의 변화가 일어난다. 이러한 해저면 반사의 영향에 의해 초기에는 Up-doppler가 형성되다가 일정한 거리에서 Down-doppler가 형성된다(그림 3). 그림 3의 (a), (b)는 135Hz, 350Hz에 대하여 동계와 하계의 거리에 따른 도플러효과를 나타내고 있다. 그림 (a)에서 동계는 135.04~135.53Hz, 하계는 134.82~135.36Hz의 변화를 보이고 있으며 그림 (b)에서는

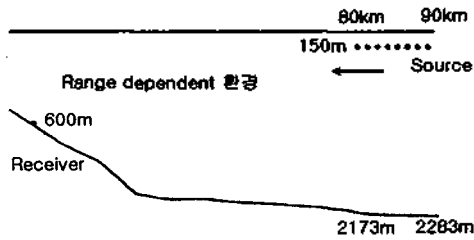


그림 2. Simulation 모의 환경

동계는 350.10~351.38Hz, 하계는 349.45~350.95Hz의 변화를 보이고 있다. 계절에 관계없이 90km에서 84km까지는 Up-doppler가 나타나다가 84km에서부터는 Down-doppler가 나타났다. 동계에서는 전체적으로 Up-doppler가 형성되지만 84km부터 Down-doppler의 형태를 나타내고 있으며 하계에서는 뚜렷한 Down-doppler가 형성되었다.

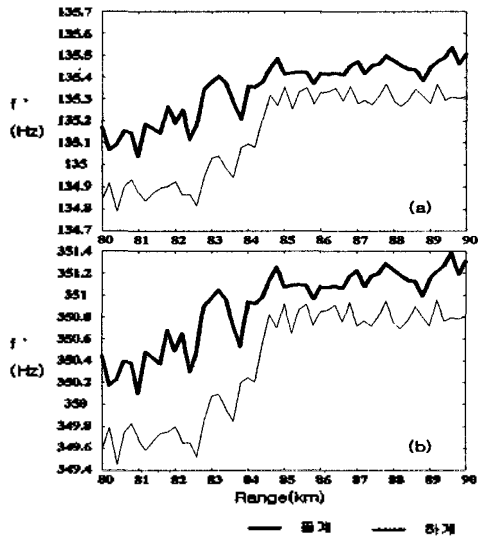


그림 3. 거리에 따른 수신 주파수 변화

이러한 현상은 해저면 반사의 영향[3],[4]에 의해 나타난다. 그림 4[(a) 135Hz, (b) 350Hz]은 해저면 반사 횟수에 따른 거리별 주파수 변화율을 나타내고 있다. 전체적으로 해저면 반사가 한번인 음선은 Up-doppler를 보이고 있으나 해저면 반사가 두 번인 음선은 Down-doppler를 보이고 있다. 또 84km부터는 Up-doppler보다는 Down-doppler가 우세하게 나타나고 있으며 해저면 반사가 두 번인 음선이 Down-doppler를 나타내고 있다. 이와 같이 해저면 반사가 두 번인 음선으로 인하여 84km부터 수신 주파수가 Down-doppler의 양상을 띄고 있다.

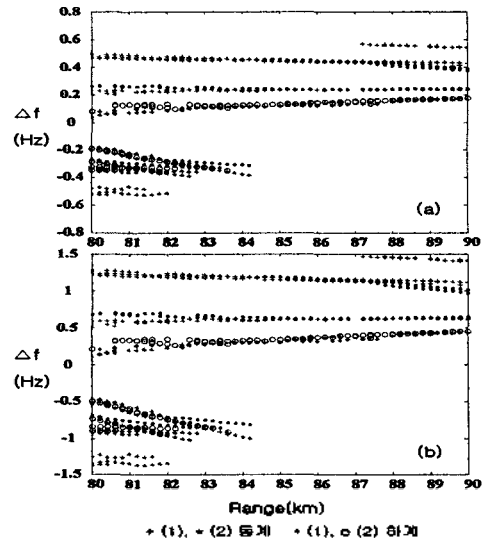


그림 4. 해저면 반사 횟수에 따른 거리별 주파수 변화
(1) : 1번 반사, (2) : 2번 반사

그림 4에서와 같이 해저면 반사 횟수에 따라 수신 주파수에서 Up-doppler와 Down-doppler가 나타나는 것은 식 (7)에서의 음속(c)과 표적속도(v) 그리고 거리 변화율(r/R_j)과의 관계에서 그 값이 1 이상에서는 Up-doppler가 형성되고 1 이하에서는 Down-doppler가 형성된다. 그림 5는 이러한 거리 변화율(그림(a))과 음 전달경로의 평균음속(그림(b))과의 관계를 잘 나타내고 있다. 음 전달경로의 평균 음속이 1464.2m/s 이상에서는 두 번 반사한 음선이 Down-doppler를 형성하였고 그 이하에서는 한번 반사한 음선이 Up-doppler가 형성되었다. 거리 변화율은 0.994를 기준으로 그 이상에서는 Up-doppler가 형성되고 그 이하에서는

Down-doppler가 형성되었다. 그 이유는

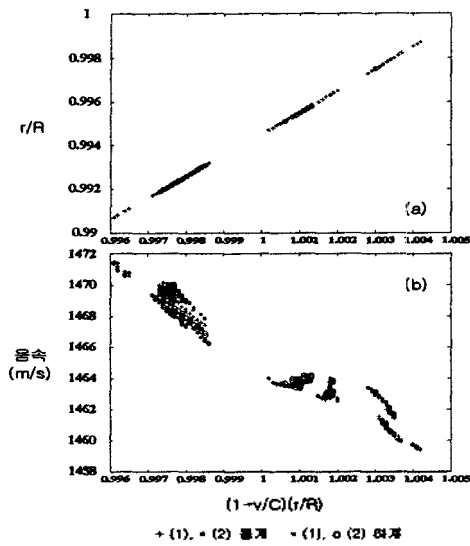


그림 5. 거리 변화율과 음속 변화

해저면 반사가 두 번인 음선인 한번인 음선보다 신호의 도달시간에 비해 전달거리가 크고 높은 음속층을 통과하기 때문에 전달속도는 빨라진다. 또한 한번 반사한 음선보다는 전달거리가 커서 거리 변화율 (< 0.994)이 작은 값을 가지게 되므로 수신신호에서 down-doppler를 형성한다

IV. 결론

본 논문은 동해 거리종속 환경에서 음선모델을 이용하여 중거리 표적에 의한 표적신호의 도플러효과를 모의하였다. 모의 결과 움직이는 표적에서 방사한 신호가 해저면 반사를 거치면서 반사 횟수에 따른 신호의 도달시간과 전달거리의 차이로 인해 도플러 변위가 나타나며, 특히 표적이 수신기에 접근 시 Up-doppler뿐만 아니라 Down-doppler도 나타나는 것으로 모의 되었다. 계절에 관계없이 해저면 반사가 한번인 음선은 수신신호에 주로 Up-doppler를 형성하고 두 번인 음선은 주로 Down-doppler를 형성하는데 영향을 주었으며, 음 전달경로의 평균 음속 1464.2m/s 이상, 거리 변화율 0.994 이하에서 Down-doppler가 형성되었다.

결론적으로 수중에서 움직이는 음원에 의한 방사음은 음전달 경로 및 전달 경로에서의 평균 음속에 따라 Up & Down-dopple가 모두 나타날

수 있으며 이는 수동음향센서 운용시 표적기동 분석에 영향을 미치는 중요한 요소로 판단된다. 따라서 향후 현장 실험을 통한 중거리 수동음향센서에서의 주파수 변화요인을 파악해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1]. R. J. Urlick, Principles of Underwater Sound /3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1993.
- [2]. J. G. Clark, R. P. Flanagan and N. L. Weinberg, "Multipath acoustic propagation with a moving source in a bounded deep ocean channel", J. Acoustic. Soc. Am., Vol 60, No. 6, pp1274-1284, December 1976.
- [3]. I. B. Burlakova, Yu. V. Petukhov, and M. M. Slavinskii, "Determination of the acoustical characteristics of the bottom of ocean waveguide by Doppler tomography", Sov. Phys. Acoust. 35(6), Nov.-Dec. 1989.
- [4]. I. B. Burlakova, V. N. Golubev, A. I. Zharov, A. G. Nechaev, Yu. V. Petukhov, and M. M. Slavinskii, "Doppler tomography in ocean acoustics", Sov. Phys. Acoust. 34(4), July.-Aug. 1988.
- [5]. R. P. Flanagan, N. L. Weinberg, and J. G. Clark, "Coherent analysis of ray propagation with moving source and fixed receiver", J. Acoustic. Soc. Am., Vol 56, No. 6, pp1673-1680, December. 1974.
- [6]. L. E. Kinsler, A. R. frey, A. B. coppens, J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", Third edition, pp415-417, 1980.