

Pekeris 도파관에서 음선 접근법을 이용한 지면파 해석

Interpretation of Ground Wave Using Ray Method in Pekeris Waveguide

최 지 웅

(Jee Woong Choi)

한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과 해양음향연구실
(접수일자: 2009년 2월 26일; 채택일자: 2009년 3월 26일)

지면파는 해저면 음속이 깊이에 따라 일정할 경우 해저면 음속으로 진행되는 음파로 일반적으로 모드분산으로부터 설명된다. 모드분산은 도파관의 기하학적 구조에 의한 음파의 반사 및 굴절에 의해 발생되므로 본 논문에서는 지면파를 음선이론에 기초하여 모의하였다. 지면파는 일련의 선두파들의 조합으로써 해석될 수 있으므로 [Choi와 Dahl, J. Acoust. Soc. Am, 119, 3660-3668 (2006)], 음선 접근법을 이용하여 시간영역에서 여러 경로로 전파되는 선두파들의 채널 임펄스 응답과 선두파 신호의 건볼루션을 취하여 지면파를 모의한다. 모의된 지면파는 광대역 시간영역 포물선 방정식 기법을 이용하여 모의된 지면파와 비교, 검증된다.

핵심용어: 지면파, 선두파, 모드분산, 해양도파관

투고분야: 수중음향 분야 (5.1), (5.3)

Ground wave is an acoustic wave propagating at a sediment sound speed in the case that sediment sound speed is constant with depth, which is explained by modal dispersion effects. In this paper, the ground wave in time domain is simulated using the ray-based approach, which is possible because the modal dispersion can be explained by the guiding of energy caused by reflection and refraction in the waveguide geometry. For a Pekeris waveguide, the ground wave can be interpreted as a sequence of head waves, called a head wave sequence [Choi and Dahl, J. Acoust. Soc. Am, 119, 3660-3668 (2006)]. The ground wave is simulated by convolution of the source signal with a channel impulse response of the head wave sequence, which is compared with simulated signals obtained via a Fourier synthesis of a complex parabolic equation (PE) field.

Keywords: Ground wave, Head wave, Modal dispersion, Ocean waveguide

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.1), (5.3)

I. 서론

선두파 (head wave)는 해저면 음속 (c_1)이 일정하면서 해수음속 (c)에 비해 빠를 경우, 임계각 (critical angle, θ_c) 방향으로 입사한 음파가 해저 경계면을 따라 일정 거리를 진행한 후 임계각 방향으로 해수 중에 재 방사되는 음파로써 브랜치 라인 (branch line) 적분을 통하여 계산될 수 있다 [1-3]. 이에 반해서 지면파 (ground wave)는 일반적으로 모드분산 (modal dispersion) 으로부터 설명 가능하다. 즉, 지면파는 에어리 양상 (airy phase) 보다

낮은 주파수 대역의 신호로 이 대역의 군속도 (group velocity)는 급격히 해저면 음속으로 수렴하게 되고, 결국 지면파는 해저면 음속으로 진행되는 신호로 알려져 있다 [3,4]. 이 두 신호는 해수를 통하여 전파되는 음파 (water-born wave, WW)보다 빠르게 전파되는 특성을 일반적으로 최근까지도 각기 다른 신호로 인식되어 왔다. 비교적 최근에 발표된 두 문헌 [5,6]에서는 지면파의 진폭 (amplitude)은 거리에 비례하여 감소하지만, 선두파의 진폭은 거리의 자승에 비례하여 감소하며, 선두파의 군속도와 위상속도 (phase velocity)는 지면파와는 달리 주파수에 따라 분산적이지 않다는 이유로 두 신호를 분리하여 고려하였다. 그러나 Choi와 Dahl [7]은 2006년 발표된 논문에서 연속적으로 수신되는 선두파의 행렬로써

책임저자: 최 지 웅 (choijw@hanyang.ac.kr)
경기도 안산시 상록구 사3동 1271번지 한양대학교 과학기술대학 해양환경
과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-5531; 팩스: 031-406-6458)

지면파를 설명하였으며, 이를 'head wave sequence' (HWS)로 정의하였다. 모드분산에 의한 군속도로부터 설명 가능한 광대역 신호의 시간확산은 음향 도파관 (acoustic waveguide) 내에서의 경계면에 의한 반사 및 굴절에 의해 발생하므로 음선 접근법을 이용한 지면파의 설명 또한 가능하다. 본 논문은 참고문헌 [7]의 확장으로써 음선이론에 기초하여, 선두파 행렬들의 진폭과 도달시간을 계산하며, 이를 이용하여 지면파를 계산하고, 이를 광대역 시간영역 포물선 방정식 (parabolic equation) 기법으로부터 얻어진 지면파와 비교 검증한다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 제 2장에서는 참고문헌 [7]에서 제시된 선두파의 행렬로써 표현되는 지면파 이론에 대한 간단한 리뷰가 이루어진다. 제 3장에서는 음선 접근법을 이용한 지면파 모의가 이루어지며, 제 4장에서는 결과와 토의가 제5장에서는 본 논문의 간단한 요약이 제시된다.

II. HWS로서의 지면파

본 장에서는 참고문헌 [7]의 내용 중 선두파들의 집합으로 지면파를 해석한 부분에 대해 간단히 리뷰한다. Pekeris 도파관을 가정하였을 경우, 선두파 압력은 아래와 같이 주어진다 [2, 4, 7, 8].

$$p_H = \frac{i2nS(\omega)}{km(1-n^2)r^{1/2}L_2^{3/2}} \exp[ik(L_1 + L_3) + ik_1L_2] \quad (1)$$

여기서 $S(\omega)$ 는 음원 스펙트럼, k 와 k_1 는 해수와 해저면에서의 음파의 파수 (wavenumber), n 은 굴절지표 (index of refraction), m 은 해수와 해저면의 밀도비이다. 또한 L_1 과 L_3 는 각각 음원에서 해저면까지, 해저면에서 수신기까지의 실제 전파거리, L_2 는 음파가 해저면에 입사된 후 해저면을 따라 수평적으로 이동하는 거리이다. 만일 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 설치되어 있을 경우나, 수평이동거리가 음원과 수신기의 해저면에서의 높이보다 훨씬 클 경우에는 선두파의 진폭은 음원에서 수신기까지의 수평거리 (r)의 자승에 비례하여 감소하게 된다. 또한 선두파의 주파수 스펙트럼 $S(\omega)$ 는 음원 스펙트럼과 아래의 관계에 있다.

$$S_{HW}(\omega) \sim \frac{S(\omega)}{\omega} \quad (2)$$

그림 1은 해저면 바로 위에 음원과 수신기가 존재할 경우, 발생하는 여러 선두파들의 경로를 보여주고 있다. 경로 II는 해수면 반사를 한번 포함한 선두파로써, 두 경로에 의해서 발생된 선두파의 위상, 진폭 크기, 그리고 도달시간은 같다. 경로 III 또한 같은 위상, 진폭 크기, 도달시간을 갖는 해수면 반사를 두 번 포함한 선두파들을 보여준다. 경로 I과 경로 II의 선두파는 해수면 반사로 인해서 π 만큼의 위상 차이를 나타내며, 경로 III의 경우 해수면 반사가 두번 발생함에 따라 경로 I과 같은 위상을 나타내게 된다. 따라서, 경로 I의 도달시간 (t_1)부터 경로 III의 도달시간 (t_3)까지를 선두파 행렬의 한주기로 볼 수 있으며, 이 주기의 역수인 HWS의 특성주파수 (characteristic

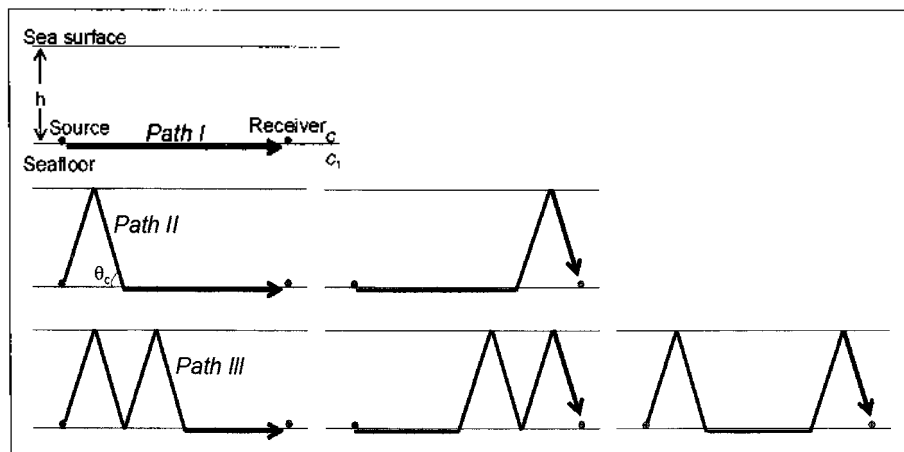


그림 1. 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 존재할 경우 발생하는 여러 선두파 경로. 같은 경로에 포함된 선두파들은 동일한 도달 시간과 위상, 그리고 진폭을 갖는다.

Fig. 1. Ray paths for head waves generated between a near-bottom source and a near-bottom receiver. The head waves belonging to the same path are the same travel time, phase and amplitude.

frequency)는 아래와 같다.

$$f_{II} = 1/(t_2 - t_1) = 1/\left(\frac{4h}{c \sin \theta_c} - \frac{4h}{c_1 \tan \theta_c}\right) = \frac{c}{4h\sqrt{1-(c/c_1)^2}} \quad (3)$$

이는 Pekeris 도파관에 대한 모드 I의 차단주파수 (cutoff frequency)와 일치한다. 경로 I으로 전파되는 선두파는 제일 먼저 수신되며, 이 때의 도달시간 (arrival time)은 r/c 로 지면파의 도달시간과 일치한다. 또한 경로 I의 선두파는 진폭 크기가 $1/r^2$ 로 감소하는 반면, 경로 II 이하는 수중에서 전파 시는 진폭이 $1/r$ 로 퇴적층 내에서 전파 시는 $1/r^2$ 로 감소하게 되므로 HWS의 크기는 시간에 따라 점진적으로 증가하게 되며, 이러한 특성 역시 지면파의 특성과 정확히 일치한다.

III. 음선 접근법을 이용한 지면파 모의

본 장에서는 음선 접근법을 이용하여 HWS로서의 지면파를 모의한다. 시간영역에서의 HWS ($s(t)$)는 아래와 같이 표현가능하다.

$$s(t) = s_{HW}(t) * h(t) \quad (4)$$

여기서 $s_{HW}(t)$ 는 선두파의 주파수 스펙트럼 $S(\omega)$ 의 역푸리에 변환으로 식 (2)로부터 구해질 수 있다. $h(t)$ 는 선두

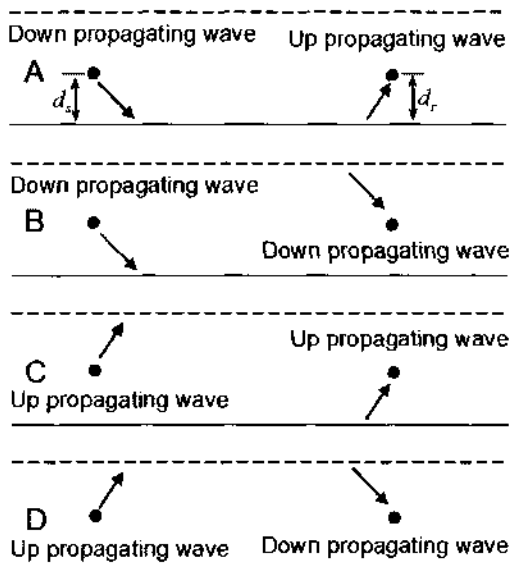


그림 2. 선두파의 네가지 타입
Fig. 2. Four types of head wave.

파들에 의한 채널 임펄스 응답 (channel impulse response)으로 Pekeris 도파관에서 그림 2에서와 같이 네 가지 타입의 조합으로 구성된다. A 타입은 음원에서 임계각도로 해저면을 향하여 전파되기 시작한 후, 최종적으로 해저면 방향에서 임계각도로 수신기에 수신되는 선두파들을 대표한다. B 타입은 해저면 방향으로 임계각도로 전파되기 시작한 후 최종적으로 해수면 방향에서 수신되는 선두파들이다. C와 D 타입 신호들 역시 각각 그림과 같은 경로로 전파된 선두파들이다. 각 타입의 선두파들의 진폭 크기는 식 (1)로부터 아래 식으로 유도할 수 있다.

$$P \sim \frac{M}{r^{3/2} \left(r - \frac{2hN + Q}{\tan \theta_c} \right)^{3/2}} \quad (5)$$

윗 식에서 N 은 선두파가 해수면에서 반사되는 횟수이며, h 는 도파관의 수심을 나타낸다. 그림 2에 표시되어 있는 d_s 와 d_r 은 각각 음원과 수신기의 해저면으로부터의 높이이다. A 타입의 경우 $M = N + 1$, $Q = d_s + d_r$, B타입의 경우 $M = N$, $Q = d_s - d_r$, C 타입인 경우 $M = N$, $Q = -d_s + d_r$, 마지막으로 D 타입 경우 $M = N - 1$, $Q = -d_s - d_r$ 이다. 또한 D 타입인 경우는 해수면을 두 번 이상 반사한 경우 ($N \geq 2$)에만 존재함에 주의하여야 한다. 또한 각 타입의 선두파들의 도달시간은 아래 식으로부터 계산된다.

$$T = \frac{2hN + Q}{c \sin \theta_c} + \frac{r - (2hN + Q) / \tan \theta_c}{c_1} \quad (6)$$

그림 1에서와 같이 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 존재하는 경우 식 (5)는 다음과 같이 단순화된다.

$$P \sim \frac{A}{r^{1/2} \left(r - \frac{2hN}{\tan \theta_c} \right)^{3/2}} \quad (7)$$

여기서 A 는 해수면 반사가 존재하지 않을 경우는 1이며, 해수면 반사 존재 시는 해수면 반사 횟수의 4배 ($4N$)가 된다.

그림 3(a)는 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 존재하는 경우 광대역 시간영역 포물선 방정식 기법으로부터 구해진 수신신호의 모의 결과이다. 해양 도파관의 수심은 40 m, 음원과 수신기의 수평거리는 1500 m, $c = 1508$

m/s, $c_1 = 1689$ m/s, 해수 밀도 (ρ) 1033 kg/m³과 2ρ 인 해저면 밀도 (ρ_1)를 가정하였으며, 선두파에 의한 전달 손실만을 고려하기 위하여 해저면 감쇠손실 (attenuation loss)은 무시되었다. 포물선 방정식 모델인 RAM (Range dependent Acoustic Model) [9]을 이용하여 음원 주파수 대역폭만큼의 음장을 계산한 후 아래 식과 같이 역푸리에 변환을 이용하여 시간영역 신호를 모의하였다 [10].

$$p(r, z, t) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) g(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \right\} \quad (8)$$

여기서 $g(r, z, \omega)$ 는 RAM으로부터 구해진 음장 (acoustic field)이며, 가정된 $S(\omega)$ 는 중심주파수 150 Hz, 반전력 대역폭 (half-power bandwidth)이 110 Hz인 헤닝 (Hanning) 원도우 형태의 음원 스펙트럼을 사용하였다. 모의 결과, 약 0.89초부터 신호가 수신되고 있으며, 시간에 따라 점진적으로 진폭이 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이는 해저면 음속으로 전파되면서 해수 내에서 진파된 신호 (WW)의 도달시간인 1초 이전까지는 시간에 따라 점진적 진폭 증가를 보이는 지면파의 특성과 일치한다. 그림 3(b)는 모의된 지면파와 본 논문에서 제시된 방법에 의해 모

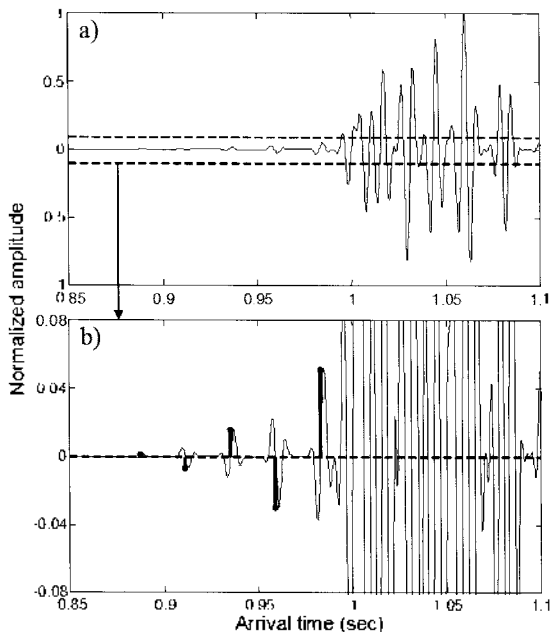


그림 3. (a) 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 존재할 경우 광대역 시간영역 포물선 방정식 기법으로부터 구해진 시간영역 모의 신호와 (b) 음선 접근법을 이용하여 모의된 채널 임펄스 응답과의 비교

Fig. 3. (a) Simulated time signal obtained via a Fourier synthesis of a PE solution and (b) its comparison with channel impulse response simulated using the ray-based technique.

의된 채널 임펄스 응답과의 비교를 위해서 그림 3(a)의 점선 부분을 확대한 그림이다. 굵은 바는 음선 접근법으로 계산된 채널 임펄스 응답을 보여준다. 모의된 채널 임펄스 응답 또한 위에서 언급한 지면파의 특성들을 잘 반영하고 있다.

IV. 결과 및 토의

일반적으로 WW 신호의 주파수 스펙트럼은 음원 스펙트럼과 일치한다. 그러나 선두파의 스펙트럼은 식 (2)에서 제시되었듯이 주파수에 반비례한다. 지면파의 스펙트럼은 선두파들의 조합으로 이루어져 있으므로 스펙트럼의 포락선은 선두파의 스펙트럼을 따르면서 도파관의 기하학적 구조 (geometry)에 의해서 각 모드의 차단주파수에서 임펄스를 갖는다. 그러나 음원과 수신기가 해저면 바로 위에 설치되어 있지 않고 수중에 존재 시 수신에 의존적인 모드 고유함수 (modal eigenfunction)에 의해서 스펙트럼의 크기는 변형되며, 지면파의 특성도 이에 따라 변형된다 (상세한 설명은 참고문헌 [7] 참조). 그림 4는 음원과 수신기가 수중에 존재할 경우 음선 이론에 기초한 접근법으로부터 모의된 HWS로서의 지면파 (흑색선)와 광대역 시간영역 포물선 방정식 기법을 통하여 모의된 지면파 (회색선)의 비교이다. 해양 도파관 수심 100 m, 음원과 수신기의 수평거리 2000 m, 음원과 수신기의 해저면으로부터의 높이는 각각 10 m와 30 m를 가정하였다. 사용된 지음향 파라미터로는 $c = 1500$ m/s, $c_1 = 1650$ m/s, $\rho = 1033$ kg/m³과 $\rho_1 = 2\rho$ 이었으며, 해저면 감쇠는 무시되었고, 앞에서 제시되었던 것과 동일한 음원 스펙트럼이 사용되었다. 처음 수신되는 선두파는 음원과 수신기가

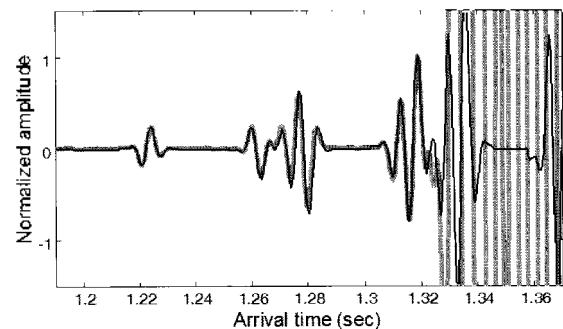


그림 4. 음선 접근법으로 모의된 지면파 신호 (흑색선)와 포물선 방정식으로부터 모의된 지면파 (회색선)의 비교

Fig. 4. Comparison of ground wave simulated using the ray-based technique to that simulated using Fourier transform of a Parabolic equation solution.

해수 중에 존재함에 따라 해지면 음속에 의한 도달시간 약 1.21초 보다 늦은 1.22초에 도달하고 있으며 그 뒤를 잇는 선두파들 역시 모드 고유함수의 영향에 의해서 주기 적이지 않게 수신되고 있다. 약 1.33초 이후부터는 WW 신호에 의해서 지면파들이 불히나 본 논문에서 제시된 음선 접근법으로부터 WW 수신 이후에도 지면파는 계속 수신됨을 알 수 있다.

V. 요약

본 논문에서는 참고문헌 [7]에서 제시된 선두파 행렬 (HWS)로서의 지면파 해석을 음선이론을 이용하여 검증 하였다. 일반적으로 지면파는 정상모드법에 의해서 설명 되고 있으나, 음선 이론을 통하여 지면파를 모의, 검증하 였다는데 본 논문의 의의가 있다. 지면파는 선두파들의 조합으로 발생되므로, 지면파의 주파수 스펙트럼의 포락 선은 음원 주파수에 반비례하면서 차단주파수에서 임펄 스를 갖는 스펙트럼 형태를 따른다. 그러나 도파관의 기 하학적 구조에 의해서 음원과 수신기가 수중에 존재 사 이러한 특성은 모드 고유함수의 영향을 받게 된다. 본 논 문에서 제시된 음선 기법을 이용한 지면파 모의에서도 모드 고유함수의 영향이 잘 재현되었으며, 이러한 결과는 광대역 시간영역 포물선 방정식 기법과의 모의를 통하 여 검증되었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 국방과학연구소의 위탁연구 (계약 번호: UD080001DD)와 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원 (계약번호: R01-2008-000-11446-0) 을 받아 수행된 연구 임.

참고 문헌

1. A. Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
2. V. Červený and R. Ravindra, *Theory of seismic head waves*, University of Toronto Press, Toronto, 1971.
3. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics: A Theory of Wave Propagation*, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1994.
4. C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography:*

Principles and applications, John Wiley & Sons, New York, 1977.

5. M. V. Hall, "Measurements of seabed sound speeds from head waves in shallow water," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 413-422, 1996.
6. O. A. Godin, N. R. Chapman, M. C. A. Laidlaw, and D. E. Hannay, "Head wave data inversion for geoaoustic parameters of the ocean bottom off Vancouver Island," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, no. 5, pp. 2540-2551, 1999.
7. J. W. Choi and P. H. Dahl, "First-order and zeroth-order head waves, their sequence, and implications for geoaoustic inversion," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, pp. 3660-3668, 2006.
8. L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, 2nd ed. Academic, New York, 1980.
9. M. D. Collins, "A split-step Padé solution for the parabolic equation method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 4, pp. 1736-1742, 1993.
10. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, New York, 2000.

저자 약력

• 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
 1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학석사)
 2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학박사)
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate
 2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양환경과학과 조교수