한국음향학회지 제25권 제1호 pp. 1-6 (2006)

음향 임피던스를 해저면 입력인자로 이용하는 수중음장 계산

Computation of Underwater Acoustic Field Using Acoustic Impedance as an Input Parameter for the Ocean Bottom

이 성 욱*, 오 택 환**, 나 정 열**, 이 필 호***,윤 종 락****
(Seongwook Lee, Taekhwan Oh, Jungyul Na, Phil-Ho Lee, Jong Rak Yoon)

*부경대학교 음향진동공학연구소, **한양대학교 해양환경과학과, ***국방과학연구소 제2체계개발본부
****부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

(접수일자: 2005년 9월 2일; 수정일자: 2005년 11월 24일; 채택일자: 2005년 12월 26일)

천해에서의 수중음장 계산에서 음향 임피던스를 해저면 입력인자로서 도입하는 방안의 가능성을 고찰하였다. 먼저 탄성 해저면에서의 음파반사 특성을 고찰한 결과, 임계 접지각 이하에서 음향 임피던스는 접지각이 거의 0°에 가까울 때의 임피던스 Z_0 1개 값으로 근사가 가능함을 나타내었다. 이러한 특성과 'effective depth' 개념을 접목시켜 전달손실을 계산한 결과, 수중음장 계산에서 임피던스를 해저면 음향 특성을 나타내는 입력인자로 사용하는 것이 가능성이 있음을 확인하였다.

핵심용어: 수중음장, 해저면 음향 임피던스, 입력인자

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

The possibility of using acoustic impedance as an input parameter for computation of underwater acoustic field in shallow waters was investigated. Analysis of the acoustic reflection from the ocean bottom with shear wave effect showed that acoustic impedances below the critical grazing angle have nearly angle-independent property and could be approximated with a single value of near-grazing impedance Z_0. Computations of the propagation loss based on the concept of 'effective depth' indicate that near-grazing bottom acoustic impedances could be used as an input parameter for simulation of the acoustic fields in shallow waters.

Keywords: Underwater Acoustic Field, Bottom Acoustic Impedance, Input Parameter

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.2)

I. 서 론

음향모델을 이용하여 천해 수중음장을 모의하고 소나 성능을 예측하기 위해서는 수중 음파전달 특성에 큰 영향을 미치는 해저면 음향특성이 필수적인 입력인자이다. 해저면의 음향특성 정보는 과거에는 주로 해양에서 직접적으로 시료를 획득한 후 실험실에서 분석을 통해 얻은 값에 많이 의존하였으나, 최근에는 수치모델을 이용한 반복적인 계산을 통해 현장에서 획득한 음향신호를 가장 잘 나타낼 수 있는 모델 입력인자를 역으로 추정하는 연구가 많이 수행되고 있는 추세이다[1-5].

이러한 해저면 음향인자 역산의 목적이 환경탐사가 아니라 군사적 목적인 소나성능 예측을 위해서라면 중장거리 범위에서 수신한 음향신호에 비중을 두고 이 영역의 특성을 잘 설명할 수 있는 인자를 역산하는 것이 목적에 부합하는 것이라 할 수 있을 것이다[6].

천해에서 중장거리 범위의 음장에 주로 기여하는 성분은 음파가 해저면에 입사할 때의 접지각이 작아서 전반사 영역에 속하는 성분들이라 할 수 있다. 이러한 음파전달 조건에서는 해저환경을 1개의 반 무한 평면으로 단순화시켜 고려하는 것이 모델 입력인자를 줄이는 측면

책임저자: 이 성 욱 (swlee65@empal.com)
부산시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 음향진동공학연구소
(전화: 051-620-6473, 팩스: 051-620-6450)

에서 편리할 수 있다. 하지만 이 경우에도 해저의 탄성을 고려하면 밀도, 음파 속도 및 감쇠계수, 전단파 속도 및 감쇠계수의 5개 인자에 대한 값이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 역산을 염두에 두고 수중음장을 모의하고자 하는 경우에 해저면 음향특성을 나타내는 입력인자의 수를 줄이기 위한 노력의 일환으로 앞에서 언급한 5개 인자 대신에 1개의 해저면 음향 임피던스를 입력인자로 도입하는 방안의 가능성을 고찰하고자 한다.

이를 위하여 Ⅱ에서는 탄성이 있는 bottom에서의 음파반사 특성을 계산하고 bottom type 변화에 따른 임피던스 변화 특성을 분석하였다. Ⅲ에서는 임피던스를 입력인자로 하여 계산한 전달손실을 기존의 모델 결과와 비교하여 나타내었다.

Ⅱ. 탄성 해저면에서의 음파 반사 및 임피던스 특성

해저면 음향 임피던스의 특성을 이해하기 위해서는 먼저 음파의 반사 특성을 고찰할 필요가 있다.

평면 음파가 해저면에 접지각 (grazing angle) θ 로 입사하여 반사할 때 (그림 1)의 반사계수 R은

$$R=|R|e^{i\Psi}=\frac{Z_1-Z}{Z_1+Z} \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다[8,9]. 여기서 $|R|$과 Ψ는 반사계수의 크기와 위상 성분을 의미하고 Z와 Z_1은

$$Z=\frac{\rho c}{\sin\theta},\ Z_1=Z_p\cos^2 2\theta_s+Z_s\sin^2 2\theta_s \tag{2}$$

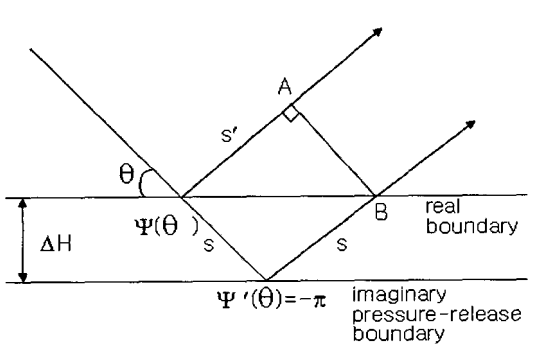

그림 1. 해저면에서의 음파반사 및 'effective boundary shift' 모식도[7]
Fig. 1. Schematics of acoustic wave reflection and effective boundary shift' at ocean bottom[7].

표 1. 6종의 bottom type에 대한 음향 인자[7].
Table 1. Acoustic parameters of six typical bottom types[7]

Bottom Type	Density ρ(g/cm^3)	Compressional Wave Speed c_1(m/s)	Shear Wave Speed b_1(m/s)	Critical Grazing Angle θ_{crit}(deg)
A	1.6	1550	125	14.6
B	1.7	1700	200	28.1
C	1.8	1850	300	35.8
D	1.9	2000	450	41.4
E	2.0	2150	650	45.8
F	2.1	2300	850	49.3

로 주어지는 수중 및 해저면의 음향 임피던스이다. Z_1은 탄성을 고려하는 경우의 해저면 음향 임피던스로

$$Z_p=\frac{\rho_1 c_1}{\sin\theta_p},\ Z_s=\frac{\rho_1 b_1}{\sin\theta_s} \tag{3}$$

로 주어진다. 여기서 ρ 와 ρ_1은 수중과 해저면의 밀도이고 c, c_1, b_1은 각각 수중에서의 음파 속도, 해저면에서의 음파 속도 및 전단파 속도를 의미한다. 그리고 θ p와 θ s는 투과된 음파와 해저면 전단파가 해저 경계면과 이루는 접지각이다.

해저면 음향 임피던스를 반사계수를 이용하여 나타내면

$$Z_n=\frac{Z_1}{\rho c}=\frac{1}{\sin\theta}\frac{1+R}{1-R} \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Z_n는 해저면 음향 임피던스 Z_1을 수중 임피던스를 이용하여 규준화한 값을 의미한다.

표 1은 해저면 상층부에서 흔히 나타날 수 있는 6종의 bottom type에 대한 지음향 인자를 나타낸 것이고 그림 1은 식 (1)~(4)를 이용하여 bottom type E에 대하여 계산한 반사 특성을 나타낸 것이다.

그림 2(a)는 반사계수의 크기를 나타낸 것이다. 점선은 해저면을 전단파가 존재하지 않는 유체 매질로 고려한 경우이고 실선은 전단파가 존재하는 탄성 매질로 고려하여 계산한 결과이다. 탄성을 고려하는 경우에는 음파가 반사할 때, 에너지의 일부가 해저 전단파로 변환되므로 반사계수가 감소하는데 특히 θ crit=cos−1(c/c1)로 주어지는 임계 접지각 이하에서 그 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. 임계 접지각 이하로 입사하는 음파가 주로 원거리까지 전달된다는 점을 고려하면 그림2(a)의 결과는 해저면의 탄성을 고려하는 것이 중요할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

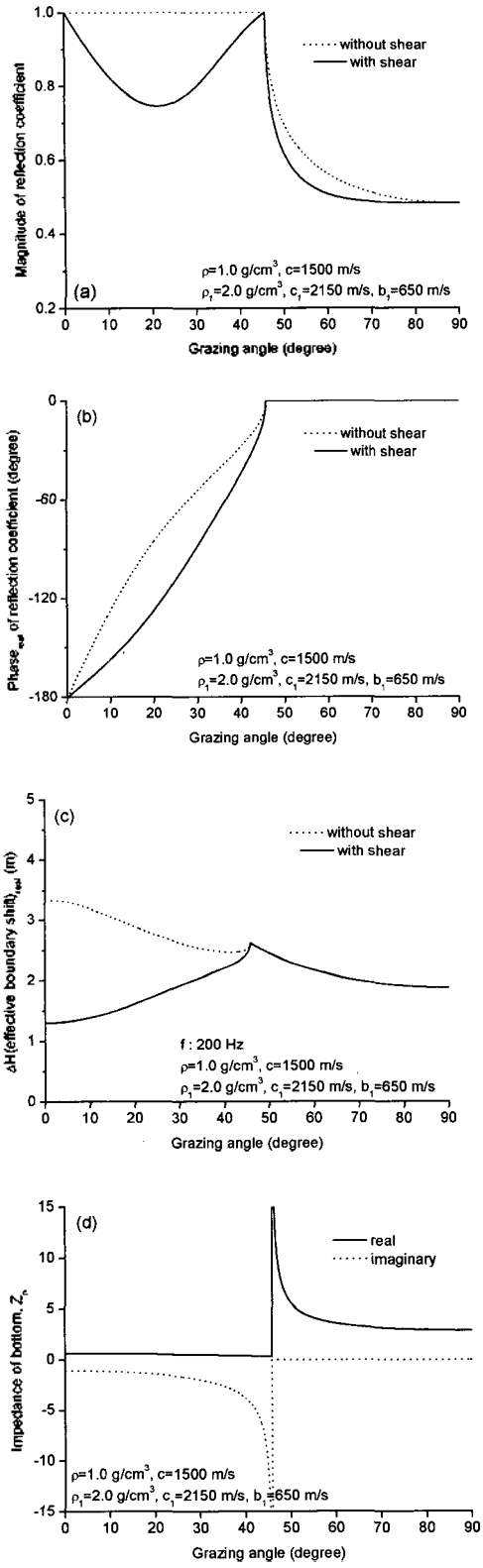

그림 2. 표 1의 bottom type E에 대한 접지각 변화에 따른 반사계수의 크기(a), 위상의 실수부(b), 'effective depth'의 실수부(c) 및 음향 임피던스(d)

Fig. 2. Magnitude(a) and phase(b) of the reflection coefficient, effective depth(c) and acoustic impedance(d) for the bottom type E of Table 1.

그림 2(b)와 2(c)는 반사계수의 위상 $\Psi(\theta)$와 ' effective boundary shift ' ΔH를 나타낸 것이다(그림 1 참조). 위상 변화는 임계각 이하에서만 나타나고 접지각 변화에 따라 $-\pi$ ~0 범위에서 거의 선형적으로 변화함을 볼 수 있다.

'effective boundary shift'는

$$\Delta H = \frac{\Psi(\theta) - \Psi'}{2k\sin\theta} \tag{5}$$

로 주어진다[7,10]. 여기서 k(=ω /c)는 파수이고 ψ' 는 압력해제 (pressure-release) 경계면에서의 반사시에 수반되는 위상변화로 $-\pi$ 값을 갖는다. 따라서 식 (5)와 그림 2(c)는 실제 경계면에서의 음파 반사시에 발생하는 위상변화 (그림 2(b))를 동일한 위상을 갖는 가상의 압력해제 경계면에서의 반사로 대체할 때 요구되는 깊이 변화를 의미한다.

그림 2(c)에서 주파수 200Hz인 경우에 임계 접지각 이하에서의 ΔH 값의 변화 범위는 전단파 고려 유무에 따라 1.5~2.5m 및 2.5~3.5m 정도로 접지각 변화에 따라 약 1m(=0.13λ) 정도의 변동성을 가지지만 파장에 비해서는 매우 작은 값이라 할 수 있다.

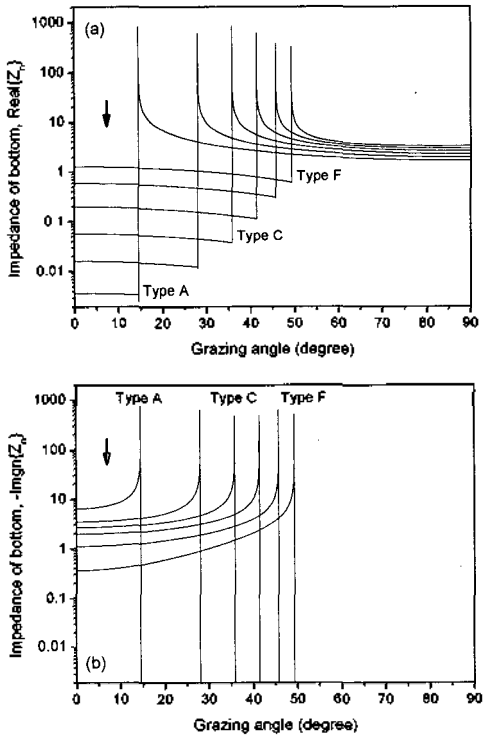

그림 3. 표 1의 bottom type에 대한 접지각 변화에 따른 음향 임피던스

Fig. 3. Acoustic impedances as a function of grazing angle for the bottom types given at Table 1.

그림 2(d)는 규준화한 해저면 음향 임피던스를 나타낸 것이다. 임계각 이하에서는 실수부와 허수부의 값이 접지각 변화와 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다. 접지각이 거의 0° 에 근접할 때의 규준화한 임피던스를 $Z_0=X_0+iY_0$라 하면 X_0와 Y_0는

$$X_0=4\rho b_1^3\sqrt{1-b_1^2}+\rho\alpha_{c_1}(1-2b_1^2)^2\frac{\cos^2\theta_{crit}}{\sin^3\theta_{crit}}+8\rho\alpha_{b_1}b_1^2\frac{1-2b_1^2}{\sin\theta_{crit}} \quad (6)$$

$$Y_0=-\rho\frac{(1-2b_1^2)^2}{\sin\theta_{crit}}$$

로 나타낼 수 있다[6]. 여기서 α_{c_1}과 α_{b_1}은 해저면에서의 음파와 전단파의 감쇠계수이다. 그림 2(d)의 결과에는 해저면 음향 특성으로 밀도, 음파 및 전단파 속도의 3개 인자만 사용되었지만 감쇠 효과가 포함된 식 (6)까지 함께 고려하면 임계각 이하 영역에서는 음향 특성을 나타내기 위해 필요한 5개의 인자를 임피던스 하나로 대치할 수 있음을 의미하는 것이라 할 수 있다.

그림 3은 표 1에 주어진 6개의 bottom type에 대한 음향 임피던스를 나타낸 것이다. 약 15° 이하의 접지각 범위에서의 임피던스는 접지각에 관계없이 거의 일정한 값을 가질 뿐만 아니라 bottom type 변화에 따라 서로 다른 값을 가지며 변화함을 볼 수 있다. 이것은 1개의 복소 임피던스로 서로 다른 해저면 음향 특성을 나타내고 구분하는 것이 가능할 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있을 것이다.

III. 음향 임피던스를 해저면 입력인자로 이용하는 수중음장 계산 방법

앞 절의 결과는 음파가 해저면에 입사할 때의 접지각이 임계각보다 작은 경우에는 해저면 음향 임피던스를 거의 상수로 고려할 수 있음을 보여준 것이라 할 수 있다. 이 절에서는 임피던스를 해저면 입력인자로 하는 음장 계산 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

천해에서의 수중 음장은 정상모드 이론을 적용하면 편리하다. 하지만 모드 방법을 적용하기 위해서는 주어진 환경에서의 모드 고유값을 수치적인 방법으로 구하여야 한다. KRAKEN[11] 모델이 대표적인 경우라 할 수 있다.

최근에는 모드 고유값을 구하는 과정을 보다 쉽고 효율적으로 하기 위한 방법의 일환으로 해저에서의 음파 반사시 수반되는 위상 변화와 ' effective boundary shift ' ΔH의 개념을 도입하는 방법도 개발되었다[12]. 이 방법은 접지각 변화에 따른 ΔH의 변화를 고려하는 것을 기반으로 한다.

하지만 그림 2(c)에도 한 예를 나타내었지만 대부분의 bottom type에서 ΔH의 변동 범위는 파장에 비해 매우 작은 값이므로 근사적으로는 상수로도 고려할 수 있다[7].

이 경우에 실제 환경에서의 수심 H는 압력해제 경계면까지의 수심인 ' effective depth '

$$H_e=H+\Delta H \quad (7)$$

로 대치가 가능하고, H_e를 이용하면 수치적 알고리즘에 의존하지 않고서도

$$\gamma_n=\frac{n\pi}{H_e},\ \kappa_n=\sqrt{k^2-\gamma_n^2},\ N_n^{-2}=\frac{H_e}{2},\ n=1,2,\ldots,n_{max} \quad (8)$$

등과 같은 음장 계산에 필요한 요소들의 산출이 가능하다[10]. 여기서 n_{max}=integer[$(2H_e/\lambda)\sin\theta_{crit}$], γ_n, κ_n 및 N_n는 모드 수, 수직 및 수평방향 파수 그리고 모드 규준화 상수를 의미한다. 식 (7)과 (8)을 이용하면 Pekeris waveguide 환경에서 음원으로부터 임의의 거리와 수심에서의 음압과 전달손실

$$p(r,z)=\left(\frac{2\pi}{r}\right)^{1/2}e^{i\pi/4}\sum_{n=1}^{n_{max}}N_n^2\frac{\sin(\gamma_n z_0)\sin(\gamma_n z)}{\sqrt{\kappa_n}}e^{i\kappa_n r}$$

$$PL=-10\log_{10}|p|^2=-10\log_{10}(pp^*) \quad (9)$$

을 계산할 수 있다.

한편 음파가 해저면에 입사하는 접지각이 거의 0° 일 때의 임피던스와 ' effective boundary shift ' 와의 관계는

$$\Delta H\approx i\lambda\frac{Z_0}{2\pi} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다[6]. 이는 밀도, 음파 및 전단파 속도 등의 인자에 의존하지 않고 임피던스 값만으로도 ΔH를

계산할 수 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다.

그림 4는 식 (7)~(10)을 이용하여 계산한 전달손실을 KRAKEN 모델의 결과와 비교한 것이다. 그림 4(a)는 수중 음속과 밀도가 1500m/s와 1g/cm^{3}이고 bottom type이 표 1의 F이고 수심 50m의 해역에서 음원과 수신기가 10m와 15m에 위치하면서 거리가 변화할 때 100Hz에 대한 전달손실을 나타낸 것이다. 얇은 실선은 밀도, 음파

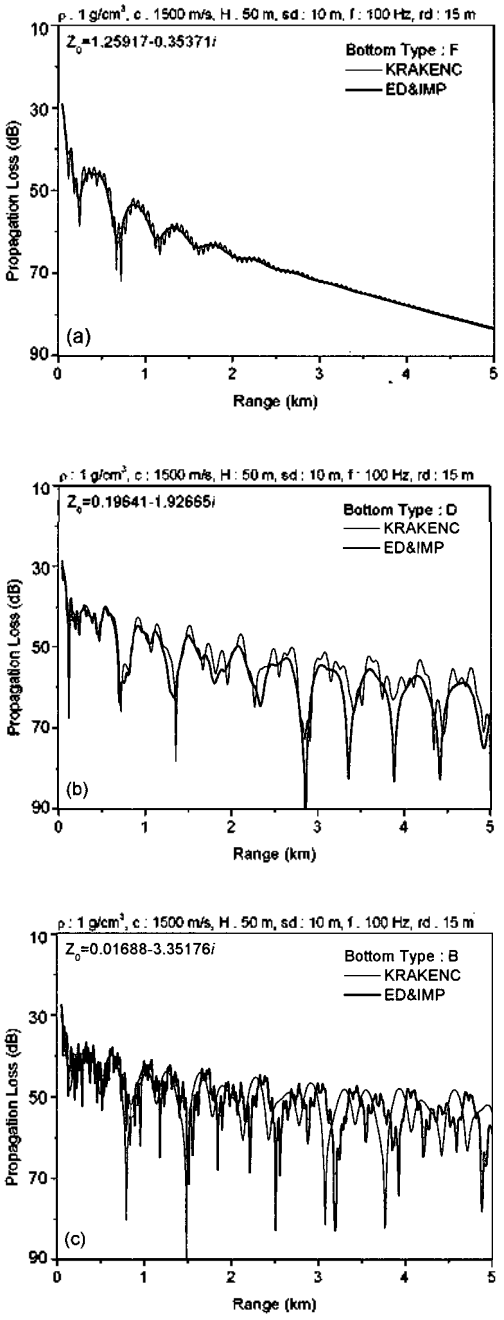

그림 4. 표 1의 환경에 대한 거리 변화에 따른 전달손실.(a):bottom type F, (b):bottom type D, (c):bottom type B

Fig. 4. Propagation losses as a function of range for the environment of Table 1.(a):bottom type F, (b):bottom type D and (c):bottom type B.

속도 및 전단파 속도를 지음향 인자로 입력하는 KRAKENC를 이용하여 계산한 것이고, 굵은 실선은 접지각이 거의 0°일 때의 임피던스 $Z_0 = 1.25917 - 0.35371i$를 해저면에 대한 입력인자로 입력하여 계산한 결과이다. KRAKENC 결과에서 나타나는 간섭길이 (interference length)가 짧은 변동성을 제외하면 두 결과가 거의 일치함을 볼 수 있다. 표 1의 bottom type D에 대하여 계산한 결과인 그림 4(b)도 주요한 특징들은 거의 일치함을 보이고 있다. 하지만 그림 4(c)에서는 음원과 수신기의 거리가 1.5km 이상 되는 지점에서부터 두 결과의 마루와 골이 나타나는 위치가 일치하지 않는 경향을 보인다. 이는 비록 약하기는 하나 ' effective boundary shift ' ΔH의 접지각에 따른 변화를 상수로 근사한데서 비롯되는 모드 고유값의 차이에서 발생하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 천해 수중음장 계산에서 음향 임피던스를 해저면 입력인자로서 도입하는 방안의 가능성을 고찰하고자 하였다.

이를 위하여 먼저 탄성이 있는 해저면에서의 음파반사 특성을 고찰한 결과, 임계 접지각 이하에서 음향 임피던스는 접지각이 거의 0° 에 가까울 때의 임피던스 Z_0 1개 값으로 근사가 가능하고 bottom type이 변화함에 따라 서로 다른 특징적인 값을 가짐을 나타내었다. 이러한 특성과 음파전달에서의 'effective depth' 개념을 접목시켜 전달손실을 계산한 결과, 복소임피던스를 해저면 음향특성을 나타내는 입력인자로 사용하는 것이 가능성이 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. 오택환,나정열,이성욱,김성일,박정수, "병렬 다층 개체군 유전 알고리즘을 이용한 지음향 파라미터 역산", 한국음향학회지, **24** (6), 238-247, 2005.
2. 한주영,이성욱,나정열,김성일, "천해환경에서 전구음원을 이용한 지음향인자의 역추정", 한국음향학회지, **23** (1), 8-16, 2004.
3. J. Hahn, S. Lee and J. Na, "Using ship-radiated noise to estimate geoacoustic properties in shallow water", Proceedings of International Congress on Acoustics, II, 1249-1252, Kyoto, Japan, April, 2004.
4. K. D. Heaney, "Rapid geoacoustic characterization

using a surface ship of opportunity", J. Oceanic Eng., **29** (1), 88-99, 2004.
5. R. A. Koch and D. P. Nobles, "Geoacoustic inversion with ships as sources", J. Acoust. Soc. Am., **117** (2), 626-637, 2005.
6. D. M. F. Chapman, "What are we inverting for ?", in Inverse problems in underwater acoustics(Springer, 2001) edited by M. I. Taroudakis & G. Makrakis, 1-14.
7. D. M. F. Chapman, P. D. Ward and D. D. Ellis, "The effective depth of a Pekeris ocean waveguide, including shear wave effects", J. Acoust. Soc. Am., **85** (2), 648-653, 1989.
8. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics* (Prentice Hall, 1994), Cha.3.
9. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (AIP Press, 2000), 36-49.
10. Z. Y. Zhang and C. T. Tindle, "Complex effective depth of the ocean bottom", J. Acoust. Soc. Am., **93** (1), 205-213, 1993.
11. M. B. Porter, "The KRAKEN normal mode program", Naval Research Lab. Tech. Report, NRL/MR/5120 -92-6920, 1992.
12. E. K. Westwood, C. T. Tindle and N. R. Chapman, "A normal mode model for acousto-elastic ocean environments", J. Acoust. Soc. Am., **100** (6), 3631-3645, 1996.

저자 약력

• **이 성 욱 (Seongwook Lee)**

한국음향학회지 제 21권 8호 참조

• **오 택 환 (Taekhwan Oh)**

한국음향학회지 제 24권 6호 참조

• **나 정 열 (Jungyul Na)**

한국음향학회지 제 21권 5호 참조

• **이 필 호 (Phil-Ho Lee)**

1985년 인하대학교 해양학과(학사)
1987년 인하대학교 해양학과(석사)
2005년 부경대학교 음향진동공학과(공학박사)
1990년-현재 국방과학연구소
※주관심 분야: 선박 방사소음, 표적식별

• **윤 종 락 (Jong Rak Yoon)**

한국음향학회지 제 24권 3E호 참조