

초저주파 대역 수중 자체소음 저감에 관한 실험 연구

An Experiment on Reduction of Infrasonic Underwater Self-Noise

이 성 욱*, 이 용 국*, 김 성 렬**

(Seongwook Lee*, Yong-Kuk Lee*, Seong-Ryul Kim**)

*한국해양연구원 해양위성·관측기술연구부, **한국해양연구원 남해연구소

(접수일자: 2010년 10월 25일; 수정일자: 2010년 11월 19일; 채택일자: 2010년 12월 3일)

수중에서 음향신호를 측정할 때에 청음기 주위에서의 유동에 의해 발생하는 초저주파 대역 자체소음을 저감시키기 위해 청음기 주위에 다공성 발포재를 씌우는 기법의 효과를 해상 실험을 통해 고찰하였다. 두께가 다른 10 ppi 폴리우레탄 발포재를 이용하여 실험한 결과, 2-10 Hz 대역에서 발포재의 두께가 1 cm일 때에는 최대 20 dB 그리고 발포재의 두께가 3 cm인 경우에는 최대 28 dB의 자체소음 저감 효과가 있음을 확인하였다.

핵심용어: 수중 유동, 자체소음 저감, 초저주파 대역, 다공성 발포재

투고분야: 수중음향 분야 (5.4)

The effects of screening hydrophones with open-cell foams for reduction of the infrasonic self-noise induced by the flow around hydrophones are investigated by at-sea experiment. Test results of the 10 ppi polyurethane open-cell foams with different thickness show that the foams of 1 cm and 3 cm thickness reduce the flow-induced self-noises up to 20 dB and 28 dB at the frequency band of 2-10 Hz, respectively.

Keywords: Underwater Flow, Self-Noise Reduction, Infrasonic Band, Open-Cell Foam

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.4)

I. 서론

선박으로부터 발생하는 수중음향 신호는 수 헤르쯔(Hz)에서 수 십 키로헤르쯔(kHz)에 이르는 넓은 주파수 대역에 걸쳐 그 특성이 나타나지만 신호 분석을 통한 음향특성 진단 및 식별 등을 위해 이용되는 정보는 주로 수 백 헤르쯔 미만의 저주파수 대역에 집중되어 나타난다. 이 중에서 특히 20 Hz 미만의 초저주파수 대역은 선박의 추진 계통 소음원의 기본 주파수 및 저차 조화 성분들이 출현하는 주파수 대역으로서 정확한 측정이 요구되는 대역이라 할 수 있다 [1-2].

선박음향 측정은 해저 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 심해에서 수행하는 것이 일반적이다. 하지만 측정 해역에 해류가 지속적으로 존재하거나 바람에 의한 측정 선박의 표류 등이 발생하는 조건에서 신호를 측정할 경우

에는 청음기 주위로 유동이 발생하게 되고, 이로 인해 청음기에 유입되는 유동에 내재하는 난류(turbulence)와 후면에 형성되는 와류(vortex) 등으로 인해 청음기 주위에 압력 변동이 발생한다. 이러한 변동은 압력 감지 센서인 청음기에 그대로 유입되어 배경소음으로 나타나는데, 이 성분은 음향신호라고 하기 보다는 유동장 내에 청음기가 존재함으로 인하여 발생하는 가음(pseudo-sound) 또는 자체소음(self-noise)이라 할 수 있으며 유동소음(flow-induced noise)이라 지칭되기도 한다.

일반적인 해양환경 조건에서 수중음향 측정 시에 유동의 영향에 의한 자체소음 특성은 20 Hz를 전후하여 주파수가 증가함에 따라 배경소음 준위가 -8~-10 dB/octave로 감소하는 경향으로 나타나지만 [3-5], 유속이 강하거나 인위적으로 센서를 예인하거나 하는 경우에는 보다 높은 주파수 대역까지 그 영향이 나타날 수 있을 뿐만 아니라 배경소음 준위를 증가시켜 표적으로부터 방사되는 신호의 측정을 어렵게 할 수도 있으므로 신호대잡음비 향상을 위해서는 적절한 저감 대책이 필요하다고 할 수

책임저자: 김 성 렬 (srkim@kordi.re.kr)
656-830 경상남도 거제시 장목면 해양연구소길
한국해양연구원 남해연구소
(전화: 055-639-8410, 팩스: 055-639-8419)

있다.

청음기 주변으로의 유동으로 인해 야기되는 자체소음을 저감시키기 위한 노력의 대표적인 예는 공기중에서 음향을 측정할 때에 유동의 세기와 방향이 불규칙한 바람의 영향을 저감시키기 위해 마이크로폰에 부가적으로 씌우는 방풍망(windscreen)을 들 수 있다. 방풍망은 센서에 유입되는 풍속과 난류를 감소시켜서 결과적으로는 바람에 의한 압력변동이 야기하는 자체소음을 저감시키는 것으로 보고되고 있다. 방풍망의 효과에 대한 연구는 주로 실험적인 방법에 의존하였으나 [6], 최근에는 이론적 및 수치적 접근을 통한 연구도 시도되고 있다 [7-9].

공기중에서 음향을 측정할 때에는 바람의 영향이 넓은 주파수 대역에 걸쳐 나타나지만 수중환경은 자연발생적인 유동의 속도가 공기중에 비하여 약하기 때문에 자체소음의 영향이 나타나는 주파수 범위가 초저주파 및 저주파 대역의 일부분으로 한정된다. 자연발생적 수중 유동에 의한 자체소음 저감을 위한 연구 사례로는 Bardyshev [10-11]의 보고가 대표적인 것이라 할 수 있다. Bardyshev 등은 직경 0.5 m의 구형 모직물인 'flow deflector'를 씌운 청음기를 연안역의 해저에 설치한 후 0.6 m/s의 유속 조건에서 측정하여 2-20 Hz 대역에서 약 24 dB의 유동소음 저감 효과가 있는 것으로 기술한 바 있고, 최근에는 직경 5 cm인 구형 청음기 주위에 직경 39 cm의 'flow deflector'를 씌운 후 0.3 m/s의 유속 조건에서 실험하여 20-30 Hz 대역에서 8-9 dB의 저감 효과가 있는 결과를 나타내기도 하였다.

본 논문에서는 센서 주위로의 유동으로 인해 발생하는 자체소음을 저감시키기 위하여 공기중에서 바람에 의한 효과를 저감시키기 위해 도입되는 방풍망과 유사하게 수중청음기 주위에 폴리우레탄 재질의 다공성(open-cell) 발포재(foam)를 씌우는 방식의 효과를 해상에서의 실험을 통해 고찰하였다.

II. 실험 및 결과

다공성 발포재를 이용한 유동에 의한 자체소음 저감 효과 실험은 경상남도 남해안에 위치하는 진해만 내의 저도 앞 해상에서 수행하였다. 저도는 진해만 입구인 거제도과 가덕도 사이에 위치하는 섬으로서 남북방향으로 발달하는 왕복성 조류의 영향을 강하게 받는 해역이므로 조류에 의해 야기되는 자체소음이 배경소음 측정 결과에 미치는 영향과 이의 저감 효과 고찰을 위한 실험에 적절

한 해역이라 할 수 있다.

그림 1은 해상 실험 모식도를 나타낸 것이고 그림 2는 센서 부설 장면을 나타낸 사진이다. 그림 2의 오른쪽 박스 안은 실험에 사용된 청음기에 보호용 프레임이 추가되었을 때의 형태를 나타낸 것이다.

실험은 높이가 1.4 m이고 한 변의 길이가 1 m인 사각형 구조물의 상부에 4개의 B&K 8101 청음기를 설치하고 중앙에는 RCM-4 유속계를 설치한 후 수심 20 m인 해저에 부설하여 유속과 배경소음을 측정하였다. B&K 8101 청음기는 1 Hz - 20 kHz에 이르는 넓은 주파수 대역에서 수신감도 특성이 일정한 다목적 수중음향 측정 센서이다. 3개의 청음기에는 그림 2에서 볼 수 있듯이 청음기 보호용 프레임 주위에 두께가 각각 1, 2, 3 cm인 10 ppi 규격의 다공성 폴리우레탄 발포재를 씌웠고 나머지 1개의 청음기는 발포재를 씌우지 않고 보호용 프레임도 제거한 후 설치하였다. ppi는 발포재의 open-cell 크기를 나타내는 척도로서 pore-per-inch의 약어이다. 숫자가 작을수록 open-cell의 크기가 커서 해수의 투과성이 좋음을 의미한다.

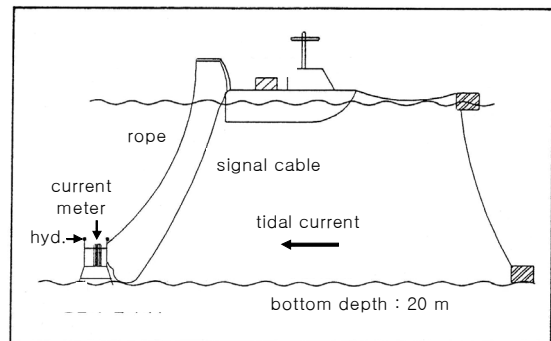


그림 1. 유동에 의한 자체소음 저감 실험 모식도
Fig. 1. Schematic of the experiment for reduction of flow-induced self-noise.

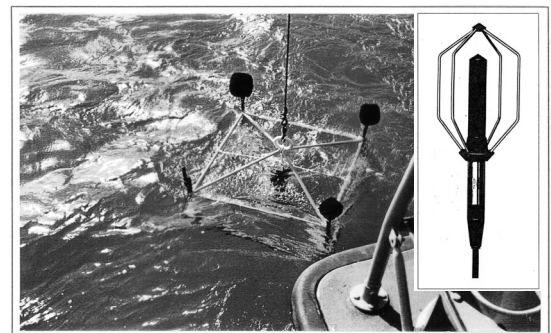


그림 2. 청음기 및 유속계 부설 사진
Fig. 2. Photograph of the deployment of hydrophones and current meter.

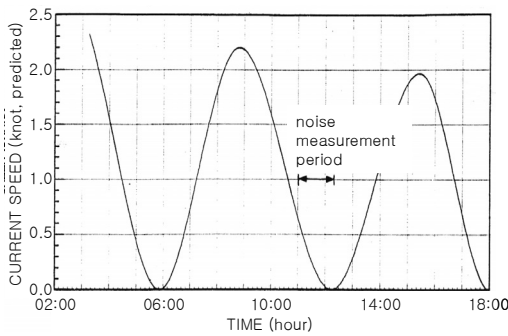


그림 3. 실험 당일의 측정 해역 부근 조류 속도 예측 값
 Fig. 3. Predicted speed of tidal current near the measurement site on the date of experiment.

배경소음과 유속의 동시 측정을 시도하였으나 유속계의 작동 불량으로 인하여 유속 자료 획득에는 실패하였다. 그림 3은 현장에서 관측한 결과는 아니지만 정성적인 유속 변화 파악을 위해 실험해역으로부터 동쪽으로 약 4-5 km 떨어진 가덕도 조위 관측소에서의 조위 예측 값에 근거하여 계산된 실험 당일의 조류 속도 예측 값과 배경소음 측정 시간을 함께 나타낸 것이다. 그림 3으로부터 배경소음 측정은 유속이 지속적으로 감소하다가 흐름이 거의 없는 상태에 도달하는 약 1시간 10분 동안 수행되었음을 알 수 있다. 측정 종료 시점에 흐름이 거의 없었음은 센서를 회수할 때 시각적으로 확인된 바이기도 하다.

그림 4는 그림 3에 나타난 배경소음 측정 주기를 유속이 상대적으로 강할 때, 중간일 때, 약할 때 및 거의 없을 때의 4개 시점으로 등분하여 각각의 시점에서의 배경소음 스펙트럼 준위를 나타낸 것이다. 유속이 강할 때와 거의 없을 때는 측정 시작 및 종료 시점에 해당한다. 실선은 발포재를 씌우지 않은 청음기로 측정된 배경소음 준위를 나타내고 점선과 일점쇄선은 두께 1 cm와 3 cm의 발포재를 청음기 보호용 프레임 주위에 씌운 상태에서 측정된 것이다.

그림 4 (a) - 4 (c)로부터 발포재를 씌움으로 인해서 10 Hz 이하의 스펙트럼 준위가 현저히 낮게 측정됨을 볼 수 있다. 그림 4 (b)에서 볼 수 있듯이 발포재의 두께가 1 cm 인 경우에는 5 Hz에서 볼 수 있는 것처럼 20 dB 그리고 발포재의 두께가 3 cm 인 경우에는 3 Hz에서 볼 수 있는 것처럼 28 dB 정도 낮게 나타나고 있다. 이것은 발포재를 씌우지 않은 상태에서 측정된 배경소음은 유동에 의한 자체소음일 뿐만 아니라 이에 대하여 다공성 발포재를 이용하여 효과적으로 저감이 가능함을 보여주는 것이라 할 수 있다.

그림 4 (d)는 유동이 거의 없을 때의 배경소음을 나타낸

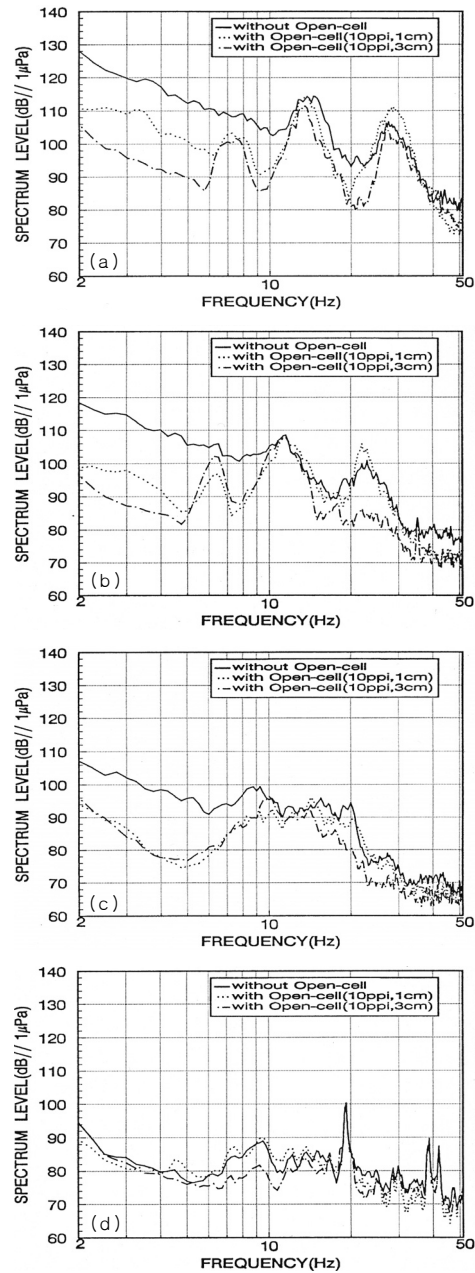


그림 4. 유속이 상대적으로 강할 때 (a), 중간일 때 (b), 약할 때 (c) 및 거의 없을 때 (d)에 측정된 배경소음의 스펙트럼 준위

Fig. 4. Spectrum levels of ambient noises measured when the current speed is relatively strong (a), middle (b), weak (c) and nearly-zero (d).

다. 20 Hz와 40 Hz 부근에서 나타나는 폭이 좁은 피크는 측정 당시 주위를 통행한 선박에서 기인한 음향 신호이다. 이 신호의 피크 준위는 발포재 적용 여부와 관계없이 거의 일정함을 볼 수 있다. 이것은 그림에 나타난 주파수 대역 범위에서는 발포재로 인한 음향신호 감쇠 효과가 거의 없거나 무시할 수 있는 정도임을 암시해 주는 것이라 할 수 있다.

자체소음 저감 효과는 유속이 강할 때에는 두께 3 cm가 1 cm보다 효과적인 것이 뚜렷하게 나타나지만 유속이 약할 때에는 두께 변화의 효과가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 이것은 유속이 약할 때에 두께 1 cm 발포재를 씌워 측정된 2-5 Hz 대역의 스펙트럼 준위와 유속이 거의 없을 때의 준위가 94-76 dB로 거의 같음에서 볼 수 있듯이 두께 1 cm의 발포재로 유동에 의한 자체소음이 이미 충분히 저감된 상태이기 때문에 두께 3 cm의 효과가 제대로 나타나지 않고 있기 때문이라 할 수 있다.

유속이 강할 때에는 두께 3 cm의 발포재를 씌워 측정하더라도 2-5 Hz 대역 스펙트럼 준위가 유속이 거의 없을 때의 준위인 94-76 dB보다 높은 106-90 dB인 것에서 볼 수 있듯이 자체소음의 영향이 12-14 dB 정도 포함되어 있음을 알 수 있다. 이것은 두께 3cm의 발포재로도 자체소음이 완전히 저감되지 않은 상태임을 나타내 주는 것이라 할 수 있다.

이러한 경향은 유속이 중간일 때에도 볼 수 있다. 이 경우에는 두께 3 cm의 발포재를 씌웠을 때의 2-5 Hz 대역 스펙트럼 준위가 96-82 dB로 유속이 거의 없을 때의 준위인 94-76 dB와 비교하면 자체소음의 영향이 2-6 dB 정도 남아 있는 상태라 할 수 있다.

10 Hz 이상에서도 발포재 적용의 효과가 있는 것으로 보이지만 7, 14, 28 Hz를 중심으로 출현하는 피크로 인하여 10 Hz 이하에서처럼 뚜렷하지는 않다. 그림 4 (a) - 4 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 이 피크들은 발포재 적용과 관계없이 동일한 주파수에서 출현함을 알 수 있다. 발포재를 씌우지 않은 청음기에서는 2개의 피크만 나타나지만 발포재를 씌운 청음기에서는 3개가 나타남을 볼 수 있다. 이것은 첫 번째 피크가 발포재를 씌우지 않은 상태에서는 보다 높은 수준의 소음에 의해 차폐되어 있다가 발포재를 씌워 자체소음이 저감된 상태에서 나타나는 것이라 할 수 있다. 이 피크들은 유속이 감소함에 따라 출현 주파수가 낮아지다가 흐름이 거의 없을 때인 그림 4 (d)에서는 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 피크 발생 주파수가 유속과 밀접한 관련이 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다. 또한 그림 4 (b)의 20-30 Hz에서 볼 수 있는 것처럼 동시에 측정된 결과에서도 피크의 세기가 다르게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 센서 및 지지 구조물 부재간의 복잡한 와류 간섭에 의해 발생했을 가능성이 크며 향후 보다 정밀한 실험적 연구가 필요한 부분이라고 생각된다.

유동장 내에서 유동 방향에 대하여 수직으로 위치하는 원통형 물체의 후면에는 와류 (vortex)가 주기적으로

표 1. 유속이 0.7 노트 (= 0.36 m/s)이고 Strouhal number 값이 0.2인 경우에 대하여 계산한 와류 발생 주파수

Table 1. Vortex shedding frequencies calculated for the current speed of 0.7 kt (= 36 cm/s) and Strouhal number of 0.2.

vortex source	diameter (cm)	vortex shedding frequency (Hz)
유속계 고정용 로프	1.0	7.2
센서 설치 구조물	2.0	3.6
발포재를 씌우지 않은 청음기	2.4	3.0
유속계 몸체	12.7	0.6
두께 1 cm의 발포재를 씌운 청음기	14.0	0.5

형성된다. 이때의 와류 발생 주파수 (vortex shedding frequency) f_s 는 유속 (U)과 원통 직경 (D)의 함수로서 $f_s = S(U/D)$ 로 주어진다. 여기서 S 는 Strouhal number로서 $S \approx 0.2$ 이다. 본 실험에서 와류를 발생시킬 수 있는 것으로는 청음기, 유속계, 센서 설치 구조물, 유속계 고정용 로프 등을 들 수 있다. 현장에서 관측한 유속 자료가 없어서 원인을 정확하게 진단할 수는 없지만 그림 4 (a)의 유속이 강할 때를 0.7 노트 (= 36 cm/s)로 가정한 경우의 와류 발생 주파수를 표 1에 나타내었다.

표 1로부터 그림 4 (a)에 나타나는 피크들은 유속계 고정을 위해 사용한 로프의 진동 또는 로프와 구조물의 복합적 진동이 청음기에 전달되어 나타난 것일 가능성이 큼을 짐작할 수 있다. 하지만 이에 대해서는 향후에 유속과 소음의 동시 관측 실험을 통해 보다 명확하게 파악할 필요가 있다고 판단된다.

III. 결론

유동이 있는 환경에서의 수중음향 측정 시에 발생할 수 있는 문제와 대책의 일환에 대하여 고찰하였다. 해양에서는 해조류, 바람에 의한 표류 및 인위적 예인 등에 의해 청음기 주위에 지속적 또는 일시적 유동장이 형성될 수 있다. 청음기 주위에서의 유동에 의해 발생하는 초저주파 대역 자체소음을 저감시키기 위해 다공성의 발포재를 청음기 주위에 씌우는 방법을 채택하여 발포재의 두께 변화에 따른 효과를 해상에서 실험하였다.

현장 관측 유속 값이 없어서 정확하게 기술할 수는 없지만 약 0.7 노트 이하로 추정되는 유속 범위에서 두께가 다른 10 ppi 다공성 폴리우레탄 발포재를 청음기 주위에 씌워 실험한 결과, 2-10 Hz 대역에서 두께 1 cm의 발포재는 최대 20 dB까지 그리고 두께 3 cm의 발포재는 최대

28 dB까지 자체소음 저감 효과가 있음을 확인하였다.

유속이 상대적으로 약할 때에는 두께 1 cm의 발포재로도 자체소음 저감 효과가 충분하지만 유속이 강할 때에는 두께 3 cm의 발포재가 두께 1 cm의 발포재보다 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 두께 3 cm의 발포재로도 자체소음이 완전히 저감되지는 않는 것으로 나타났는데, 이것은 보다 효과적인 저감 기법에 대한 추가 연구가 필요함을 암시하는 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 유동에 의한 초저주파 대역 자체소음 저감을 위한 기초적인 실험에 국한하였으나 향후에는 초저주파 및 저주파 대역 유동소음의 발생 역학과 저감 방안에 대하여 보다 다양한 실험과 체계적인 이론 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다. 또한 본 연구에서는 고찰하지 않았지만 다공성 발포재로 인하여 야기될 수 있는 고주파 대역에서의 흡음손실 (insertion loss)에 대해서도 이론 및 실험 연구가 필요하다고 생각된다. 이러한 연구는 황해에서와 같이 국지적으로 강한 조류가 발생하는 해역에서의 수중음향 측정뿐만 아니라 수중글라이더 및 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 등과 같은 자율 운항 체계를 이용한 음향신호 획득 등에 기여하는 바가 클 것이라 생각된다.

감사의 글

이 연구를 지원해 주신 국방과학연구소 이필호 박사님께 감사드립니다. 이 연구는 CATER 2006-5101 과제에 의해 수행되었습니다.

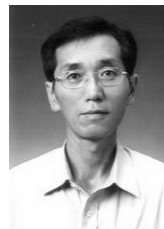
참고 문헌

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983.
2. R. J. Urick, *Ambient Noise in the Sea*, Peninsula Publishing, 1986.
3. M. Strasberg, "Non-acoustic noise interference in measurement of infrasonic ambient noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, no. 5, pp. 1487-1493, 1979.
4. J. F. McEachern and G. C. Lauchle, "Flow-induced noise on a bluff body," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 2, pp. 947-953, 1995.

5. S. C. Webb, "Long period acoustic and seismic measurements and ocean floor currents," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 263-270, 1988.
6. S. Morgan and R. Raspet, "Investigation of the mechanisms of low-frequency wind noise generation outdoors," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no. 2, pp. 1180-1183, 1992.
7. R. Raspet, J. Webster, and K. Dillion, "Framework for wind noise studies," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 2, pp. 834-843, 2006.
8. G. P. van den Berg, "Wind-induced noise in a screened microphone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 2, pp. 824-833, 2006.
9. Z. C. Zheng and B. K. Tan, "Reynolds number effects on flow/acoustic mechanisms in spherical windscreens," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 1, pp. 161-166, 2003.
10. V. I. Bardyshev, A. M. Velikanov, and S. G. Gershman, "Experimental studies of underwater noise in the ocean," *Sov. Phys. Acoust.*, vol. 16, no. 4, pp. 512-513, 1971.
11. V. I. Bardyshev, "Underwater Ambient Noise in Shallow-Water Areas of the Indian Ocean within the Tropical Zone," *Acoust. Phys.*, vol. 53, no. 2, pp. 167-171, 2007.

저자 약력

•이 성 욱 (Seongwook Lee)



1989년: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 2004년: 한양대학교 지구해양학과 (이학박사)
 1991년 ~ 1997년: 국방과학연구소
 2009년 ~ 현재: 한국해양연구원, 선임연구원
 ※ 관심분야: 수중음향

•이 용 국 (Yong-Kuk Lee)



1983년: 인하대학교 해양학과 (이학사)
 2009년: 인하대학교 해양학과 (이학박사)
 1984년 ~ 현재: 한국해양연구원, 책임연구원
 ※ 관심분야: 해저지형

•김 성 렬 (Seong-Ryul Kim)



1977년: 서울대학교 지구과학교육과 (이학사)
 1997년: 일본 동경대학교 지구물리학과 (이학박사)
 1981년 ~ 현재: 한국해양연구원, 책임연구원
 ※ 관심분야: 해양지구물리