

技術解説

해양에서의 수중 소음원으로서 기포들의 음향학적 역할

윤 석 왕

(성균관 대학교, 물리학과, 음향학 연구실)

I. 서 론

물리 음향학의 한 분야로 수중 음향학의 학분적 체계는 20세기에 들어와서 비로서 이루어졌다. 그러나 수중에서 소리의 이용은 보다 많은 물고기들을 잡기 위한 수단으로 마디를 뚫은 긴 장대를 물속에 넣고 물고기 떼가 직접 또는 이동에 의해 발생하는 소리를 들으므로 그들의 이동을 알았던 어부들에 의해서 오래 전부터 실생활에 이용되고 있었다. 어부들이 소리를 이용하여 물고기 떼의 이동을 알았던 것과 같이 수중에서 먼 거리까지 전파가 가능한 역학파의 대표적인 음파는 해양에서 앞을 볼 수 있는 눈의 역할을 하게 되었다.

학문적으로 보고된 초기 수중 음향학의 실험은 Colladon과 Sturm(1827)이 스위스의 Lake Geneva에서 1826년 11월 행한 수중에서 음파의 속력을 측정 한 실험이다. 13,487 m 떨어져 있는 두 배에서, 한 배에 음원으로 수중에 큰 종을 설치하고 종을 치는 순간, 선상에 종을 치는 망치에 연결된 촛불이 화약을 점화하여 불꽃을 만들어 다른 배에 종을 쳤음을 알리고, 다른 배에서는 큰 원통을 수중에 설치하여 종 소리를 듣고, 음원이 있는 배에서의 불꽃을 본 순간 부터 종 소리를 들은 순간까지의 시간을 측정하므로 수중에서의 음속을 결정하였다. 측정된 평균 시간은 9.4 s로, 8 m의 민물에서 음속의 1435 m/s로 보고되었다. 이는 원시적인 실험장치였으나 같은 조건에서 현재 보편적으로 이용되고 있는 음속의 값 1438 m/s

(Urlick, 1983)와 놀랍게도 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 1912년 유람선 Titanic호의 방산과의 충돌로 수 백명이 희생된 사건이 있기까지 해양에서 음파의 이용은 매우 미미한 상태였으며, Titanic호의 침몰 사고 후 해양에서의 항해를 위한 음파의 이용에 대한 관심이 고조 되었다. 수중 음향학의 초기 성공은 현대까지 사용되는 철판 사이에 압전 물질인 석영판을 끼워 샌드위치 형태로 만든 Langevin의 유원에 기인하며, 1918년 수중에서 이와 같은 고풍력 음파 발생기를 이용하여 8 km까지 음파가 전파되어 처음으로 잠수함의 탐지가 가능함이 입증되었다.(Clay and Medwin, 1977.)

제 1차 세계 대전이 끝난 직후, 1919년 수중 음향학에 있어 첫 번째 학술 논문으로 간주될 수 있는 논문이 독일의 Lichte(1919)에 의해 해양에서의 수온과 염분도의 작은 변화가 음파를 굴절시키므로 음파 전달 거리에 큰 영향을 미칠 수 있다는 이론적인 연구가 독일 물리학회지에 발표되었다. 제 1차 세계 대전 후 수중 음향학의 실질 응용에 관한 연구는 다소 저조하였으나, 1925년 미국의 Submarine Signal Company에 의해 개발된 음파를 이용한 수심 측정기인 fathometer가 미국과 영국에서 이미 상용으로 판매되기 시작 하였다. 또한 1차 대전후 전자 장비들의 급속한 발달로 음파를 이용한 탐지 장치인 음탐 장비 소나(Sound Navigation and Ranging : SONAR)의 개발과 더불어 제 2차 세계 대전이 임박한 1938년 이미 미국에서는 소나의 대량 생산이 가능하였다. 제 2

차 세계 대전의 발발과 함께 미국의 대부분 군함에는 소나를 장착, 운영하므로 독일의 잠수함 U-boat 섬멸에 지대한 공헌을 하였다.

보다 근대적인 소나가 개발되기 전인 제 2차 세계 대전 전까지의 수중 음향학의 연구는 음파의 발생, 탐지, 전파 그리고 반향음의 수신에만 집중되었다.

그러나 제 2차 세계 대전의 발발과 함께 해양에서 군함 또는 어뢰에 장착된 소나의 표적 탐지 능력을 향상시키기 위하여서는 필수적으로 수중 주변 소음의 주파수 특성 및 강도에 대한 정확한 자료 및 예보가 요구되어지며, 음향 기뢰의 개발에 따른 음향 감시기의 폭파 감도 설정을 위하여는 지역적인 수중 소음의

Knudsen Spectra

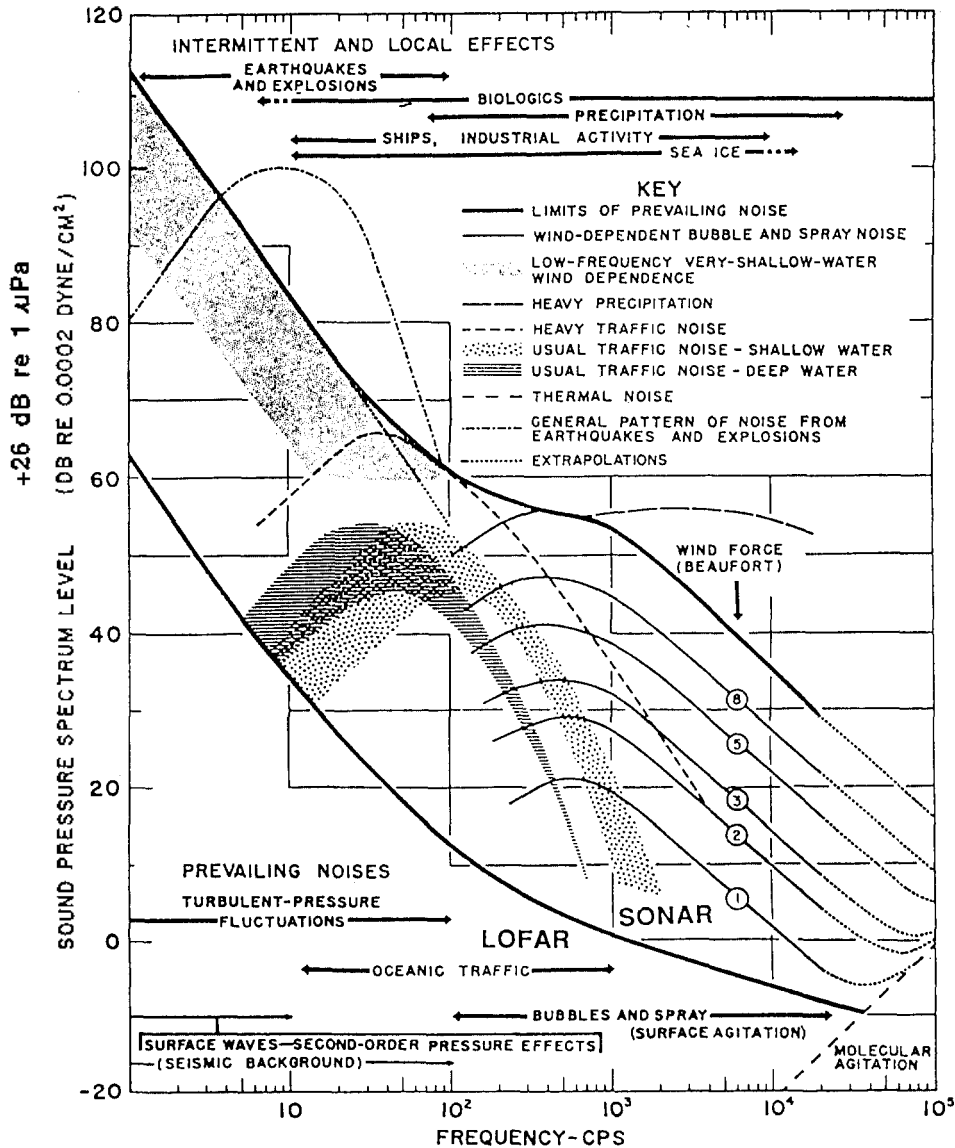


그림 1. 해양에서 측정된 수중 주변 소음 스펙트럼(Wenz, 1962). (일명 Knudsen 스펙트럼으로 불리워짐) 0.0002 dyne/cm²(20 μPa) 기준의 스펙트럼 레벨은 1 μPa 기준 스펙트럼 레벨로 환산하기 위하여서는 26 dB를 더함.

보다 정확한 자료가 필수적으로 요구되어진다. 이를 위해 미국은 National Defense Research Committee(NDRC)의 Knudsen 등(1948)을 중심으로 미국 California, San Diego에 연구팀을 구성하고, 해양에서 수중 주변 소음의 직접 측정 및 연구를 본격적으로 실행하게 되었다. 이들의 연구 결과는 전후 Journal of Marine Research에 발표되어, 수중 소음 연구의 고전적인 논문으로 현재까지 연구 논문에서 인용되고 있다. 제 2차 세계 대전 이후로 수중 주변 소음에 대한 이해의 중요성은 높게 인식되어 많은 연구가 진행되었다. 1960년대 Wenz(1962)에 의해 그 간 출간된 자료와 새로운 자료를 종합하여, 해양에서의 수중 소음을 발생시키는 소음원에 대한 보다 체계적인 논의가 이루어졌으며, 현재 Knudsen 소음 스펙트럼(그림 1)으로 알려지고 있다. 1970년에 들어 Crouch와 Burt(1972) 그리고 Wenz(1972) 등이 각각 수중 주변 소음에 대한 과거의 연구 결과를 종합적으로 논의 하였으며, 1980년대 Urick(1984)에 의한 총괄적인 수중 주변 소음에 대한 종합 보고서가 미국의 Naval Sea Systems Command에 의해 발간되었다.

II. 수중 소음 스펙트럼

해양에서 수중 소음을 발생시키는 소음원은 지각 변동, 해류 흐름, 해상 교통, 해양 생물, 해표면 교란, 해수 분자 교란 등 발생원을 기준으로 또는 발생 주파수 대역과 관심 주파수 대역에 따라 구분되어질 수 있으나, 이들은 절대적인 기준은 아니며 단지 원리에 따른 구분이다.

수중 소음의 발생원 관점에서의 분류는 그림 1의 Knudsen 소음 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 일반적으로 지진 또는 지하 핵 실험 등에 의한 지각 변동은 1 Hz 미만부터 100 Hz의 주파수 대역에서 1 μ Pa의 기준 압력에 대해 86 dB - 126 dB의 큰 진폭의 소음 레벨로 나타나며, 10 Hz 주변에서 최대 진폭을 보이는 것으로 관측되고 있다. 이와 같은 지각 변동에 따른 소음은 간헐적인 소음원이며 발생 지역에 따라 지역적인 소음원으로 볼 수 있으나 매우 낮은 주파수이므로 먼 거리까지 전파가 가능하며, 지각 변동이 발생된 위치로부터 지구의 반대편 지점에서도 보편적으로 관측되어지고 있다. 해수의 교란도 지각 변동과 같은 주파수 대역의 주된 소음원으로 해양에 상존하는 소음원으로 구분되어진다. 또한 간헐적인 소음원으로 해양 생물과 비 등이 있으며, 이들은 해양 생물인 경

우 지역에 따라 10 Hz - 2 kHz의 넓은 범위에 걸친 수중 소음으로 나타나고 있다. 10 Hz - 1 kHz 주파수 대역의 소음은 주로 해상에서 운항되는 선박들에 기인하며, 해상 교통량이 많은 경우 40 Hz 주변에서 1 μ Pa 기준 음압에 대한 90 dB 정도의 최대 소음 레벨을 나타내며, 보통의 해상 교통량에 대하여서는 30 Hz 주변에서 80 dB 정도의 최대 소음 레벨을 갖는 것으로 관측되고 있다. 특히 해상 교통에 따른 소음 레벨은 측정 지점에 따라 많은 변화가 있을 수 있음을 예상할 수 있다. 해표면 교란에 의한 수중 소음은 100 Hz - 20 kHz 주파수 대역에서 발생되며, 해표면에서의 풍속과 매우 좋은 상관 관계를 보이고 있다. 해수의 분자들의 교란에 의한 수중 소음은 열소음으로 불리워지기도 하며, 일반적으로 20 kHz 이상에서 주파수 증가와 함께 6 dB/octave로 소음 레벨이 증가되는 현상이 관측되고 있다.

수중 소음의 발생 주파수 관점에서의 분류는 20 Hz - 200 Hz 주파수 대역의 소음은 해상 교통에 큰 영향을 받고 있으며, 100 Hz - 20 kHz 주파수 대역의 소음 레벨은 해상의 풍속과 매우 좋은 상관관계를 보이고 있다. 이는 해표면에 형성된 파도와 해상의 바람에 의해 해표면에 형성된 개개의 기포 또는 불보라들에 의한 압력 변화에 기인하는 것으로 추정하였다.(Wenz, 1962, 1972.) 그러나 이들의 해표면 교란에 의해 형성된 기포들의 실질적인 기포 크기의 분포 현황으로 보아 수 kilohertz 대역의 소음원으로서의 역할은 가능하나, 저주파수 대역의 발생 매체로서 개개 기포의 진동반의 설명은 불가능하며, 수백 hertz대역 수중 소음의 발생 과정과 소음원의 실체에 대하여는 최근까지도 불분명한 상태였다.

III. 수중 기포의 진동 소음 발생 과정

수중에서 개개 기포들의 운동은 역학적 진동자로서 설명이 가능하며, 홀극자로서 수중에서 매우 효율적으로 음파를 방출하는 것으로 알려지고 있다. 수중에 형성된 반경 a 인 기포의 경우 개개 기포의 공진 주파수 f_0 (Hz)는 Minnaert(1933)에 의해 이미 오래 전에 다음과 같이 밝혀졌다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}$$

여기서 P_0 는 주변 압력, ρ 는 물의 밀도, γ 는 기포 내 부 기체의 비열비이다.

해표면 교란에 따른 수중 소음 스펙트럼의 극대값은 300 Hz 주변에서 관측된다. 이를 개개 기포들에 의해 방출된 소음으로 해석하기 위하여는, 수중 주변 음압 $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$, 물의 밀도 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, 비열비 $\gamma = 1.4$ 를 Minnaert의 관계식에 대입하면, 기포의 공진 주파수 f_0 와 반경 a 의 곱은 3.3으로, 300 Hz의 소음을 방출하기 위하여서는 반경 11 mm의 기포들이 해표면에 무수히 많이 형성되어야만 한다. 그러나 해양에서의 관측 결과는 일반적으로 반경 2 mm 이하의 기포들이 대부분으로 수 m 깊이까지 해표면층을 형성하고 있음이 관측되었다.(Thorpe, 1982.) 이상의 추론으로 알 수 있듯이 해양의 수중에서 2 kHz 이상 고주파수 대역의 소음원은 파도 등의 해표면 교란에 따라 발생된 개개 기포들로부터 방출되는 소음으로서 설명은 가능하다, 수백 hertz 대역 소음의 발생 매체로서 개개 기포의 직접적인 역할에 대한 근거로서는 불충분하다.

해양에서의 수백 hertz 대역 수중 소음원으로서 Carey(1985)와 Prosperetti(1985)는 수중에 형성된 기포군의 집단 운동에 의한 소음 방출의 이론적 가능성을 제안하였다. 결합 역학 진동자의 공진에서 알 수 있듯이, 두 개 진동자의 직접 연결인 경우 공진 진동수는 개개 공진 진동수의 약 70 %로 감소하게 된다. 이와 같이 진동자로 볼 수 있는 개개의 기포들이 집단으로 형성되어 집단 운동을 하므로 개개 기포들의 공진 주파수에 비하여 기포군의 집단 운동은 현저히 낮은 공진 주파수의 소음을 방출할 수 있다. 순수한 물에 비하여 기포가 내포된 물의 경우 매질의 압축률이 변하게 되며, 따라서 음속이 변하게 된다. 또한 매우 적은 양의 기체가 포함된 물인 경우라 하더라도 순수한 물에 비하여 음속이 현저히 낮을 수 있다는 사실(Prosperetti, 1988)로부터 같은 결론에 도달할 수 있다. Carey와 Prosperetti의 이론적 제안은 Yoon 등(1989, 1991, 1993)이 실험실 내에서 수중 기포군을 형성하여 개개 기포들의 상호 작용에 따른 기포군의 집단 운동을 유도하고, 이들 집단 운동의 공진 진동수를 직접 측정하므로 실험적으로 수중 기포군의 집단 운동이 해양에서 수 백 hertz 대역 수중 소음의 소음원이 될 수 있음을 입증하였다.

해양에서의 비에 의한 해표면 교란으로부터 발생되는 소음을 Franz(1959)와 Nystuen 등(1987)은 빗방울과 해수면과의 충격에 의한 충격소음이 주된 원인으로 설명하였다. 그러나 Kim 등(1988)과 Pumphrey 등(1990a, b)은 빗방울이 수표면에 부딪치면서 1차적

으로 충격에 의한 충격소음이 형성되나, 충격소음 보다는 2차적으로 충격에 의해 형성된 기포가 발생하는 기포소음이 한층 효율적인 수중소음 발생 매체로서 작용함을 실험실내 실험으로 입증하였으며, 빗방울이 수표면 충격 후 형성된 기포들이 기포소음이 15 kHz 주변의 소음 스펙트럼에서 넓은 피크를 이루고 있음을 실험적으로 밝혔다. 그림 2는 Pumphrey 등(1990b)이 실험실내에서 물방울이 수표면에 떨어지면서 일

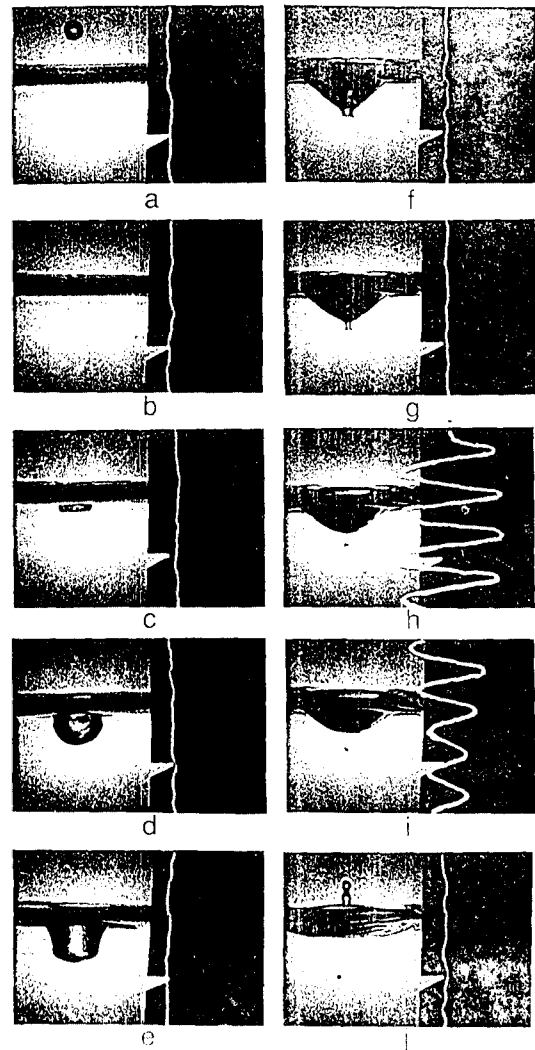


그림 2. 실험실내에서 물방울이 수표면에 떨어지면서 일어나는 충격 및 기포가 형성되는 과정(각 사진의 왼쪽면)과 동시에 수중형용 기포 수신된 수중 소음 신호의 oscilloscope 화면(각 사진의 오른쪽면)을 고속 촬영한 사진 결과 (Pumphrey 등, 1990b).

어는 충격 및 기포가 형성되는 과정과 동시에 수중 청음기로 수신된 수중 소음 진폭의 oscilloscope 화면을 고속 사진 촬영한 결과로, 충격소음보다는 기포가 형성된 경우 기포에 의해 발생하는 기포소음의 방출 음압이 매우 크며, 효율적인 수중소음의 발생 매체임을 직접적으로 보여 주고 있다.

IV. 논 의

본 해설에서는 간략히 수중 음향의 주된 실험장이 되는 해양에서의 수중 소음원으로서 수중에 형성된 기포들의 음향학적 역할에 대하여 고찰하였다. 전 주파수 대역의 수중 소음이 모두 중요한 연구 대상이나, 해양 음향 탐사와 현대 음향 탐지 장치 소나의 주된 사용 주파수인 수 백 hertz로부터 수 kilohertz까지 그리고 강우에 의해 발생하는 15 kHz 주변에서의 해표면 교란에 의한 수중 소음의 발생 매체를 살펴본다. 해표면 교란에 의해 발생하는 수중 소음의 가장 있음직한 발생 매체로서 해표면 수 meter 깊이까지 일상 존재하는 기포군의 운동을 제안하고, 개개 기포들이 기여할 수 있는 주파수 대역의 소음과 개개 기포들이 구성한 기포군이 집단으로 운동하므로 발생시킬 수 있는 주파수 대역의 소음에 대하여 살펴보았다. 해양에서 바람, 파도 등의 해표면 교란에 의해 표층에 형성된 기포군이 개개 기포들의 집단 운동에 의해 수 백 hertz 대역의 수중 소음의 주된 소음원으로 작용할 수 있음을 확인하였다. 이상의 연구 결과는 소나등의 음향 탐지 장치의 탐지 능력의 향상 뿐 아니라, 현재 각광을 받기 시작하는 음향 원격 탐사의 중추가 되며, 해양에서 형성되고 있는 자연 소리의 발생 신비를 다소나마 이해하는데 도움이 될 것이다.

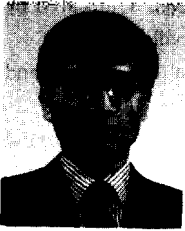
참 고 문 헌

Carey, W.M.(1985), "Low-frequency ocean surface noise sources," *J. Acoust. Soc. Am.* 78, S1.
 Clay, C.S. and Medwin, H. (1977), *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*(John Wiley & Sons, N. Y.).
 Colladon, J.D. and Sturm, J.K.F. (1827), "The compression of liquid." *Ann. Chim. Phys. Series 2*, 36, 236.
 Crouch, W.W. and Burt, P.J. (1972), "Logarithmic dependence of surface-generated sea noise spectrum load on wind speed," *J. Acoust. Soc. Am.*, 51, 1066.
 Franz, G.J. (1959), "Splashes as sources of sound in

liquids" *J. Acoust. Soc. Am.* 31, 1080.
 Kim, E.J., Park, K.J. and Yoon, S.W. (1988), "Underwater noise due to the interaction of single water drops with air/water interface" *J. Acoust. Soc. Am.* 84, S122.
 Knudsen, V.O., Alford, R.S. and Emling, J.W. (1948), "Underwater ambient noise," *J. Mar. Res.* 7, 410.
 Lichte, H. (1919), "On the influence of horizontal temperature layers in sea water on the range of underwater sound signals," *Physik. Z.* 17, 385. Translated by A.F. Wittenborn, Tracor, Inc., Rockville, MD.
 Minnaert, M. (1933), "On musical air bubbles and the sounds of running water," *Phil. Mag.* 16, 235.
 Nystuen, J. A. and Farmer, D.M. (1987), "The sound generated by precipitation striking the ocean surface," *Sea Surface Sound*, edited by B.R. Kerman(Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherlands), 485-499.
 Prosperetti, A (1985), "Bubble-related ambient noise in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* 78, S2.
 Prosperetti, A (1988), "Bubble-related ambient noise in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 1042.
 Pumphrey, H.C. and Crum L.A.(1990a), "Free oscillations of near-surface bubbles as a source of the underwater noise of rain," *J. Acoust. Soc. Am.* 87, 142.
 Pumphrey, H.C. and Elmore, P.A. (1990b), "The entrainment of bubbles by drop impacts," *J. Fluid. Mech.* 220, 539.
 Thorpe, S.A. (1982), "On the clouds of bubbles formed by breaking wind-waves in deep water, and their role in air-sea gas transfer," *Phil. Trans. R. Soc. London A304*, 155.
 Urick, R.J. (1983), *Principle of Underwater Sound, 3rd Ed.* (McGraw-Hill, N.Y.).
 Urick, R.J.(1984), *Ambient Noise in the Sea* (Naval Sea Systems Commands, Washington, D.C.).
 Wenz, G.M. (1962), "Acoustic ambient noise in the ocean : spectra and sources," *J. Acoust. Soc. Am.* 34, 1936.
 Wenz, G.M. (1972), "Review of underwater acoustics research : noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 51, 1010.
 Yoon, S.W., Crum, L.A. and Prosperetti, A. (1989), "An experimental investigation of bubble clouds as sources of ambient noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 86, S88.
 Yoon, S.W., Crum, L.A., Prosperetti, A. and Lu, N.Q. (1991), "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud," *J. Acoust. Am.* 89, 700.
 Yoon, S.W., Park, K.J., Crum, L.A., Nicholas, M., Roy, R.A., Prosperetti, A. and Lu, N.Q. (1993), "Collective oscillations in a bubble column," *Natural Physi-*

cal Sources of Underwater Sound, edited by B.R. Kerman (Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherland), 371-378.

▲윤 석 왕



1975년 : 서강 대학교, 물리학과, 이학사.

1978년 : 서강 대학교, 물리학과 이학석사(우주선 물리학).

1983년 : The University of Texas at Austin, Department of Physics, Ph.D. (Physical Acoustics).

1978년~1980년 : 국방과학연구소, 연구원

1981년~1983년 : Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, 연구원

1984년~1987년 : U.S. Naval Postgraduate School, Department of Physics, 조교수, 초빙교수

1989년~1990년 : University of Mississippi, Department of Physics, 초빙교수

1990년~1993년 : U.S. National Center for Physical Acoustics, 연구자문위원

1985년~현재 : 성균관 대학교, 물리학과, 조교수 부교수

- 한국음향학회, 한국물리학회(정회원)
- The Acoustical Society of America, The Optical Society of America (Member)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Senior Member)