

표층 해상의 기포가 음파전달에 미치는 영향

The Effects of Ocean Surface Bubbles on Sound Wave Transmission

임 병 옥*, 심 태 보*, 김 영 규**, 박 정 수**
(Byungook Im*, Taebo Shim*, Young-Gyu Kim**, Joung-Soo Park**)

* 숭실대학교 정보통신전자공학부, ** 국방과학연구소
(접수일자: 2008년 12월 26일; 수정일자: 2009년 2월 19일; 채택일자: 2009년 4월 13일)

해양에서는 파도, 빗방울 등 해수면에 일어나는 많은 물과 물의 충돌, 해양에서 운행되는 선박, 여러 해양 생물들의 생명활동 그리고 여러 발생원들에 의해 많은 기포들이 생성될 수 있다. 이렇게 생성된 기포들은 해양에서 사용되는 음파의 세기와 음속에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 2007년 9월 19일 04:00 부터 17:00 까지 남해 남형제도 해역에서 Acoustic Bubble Spectrometer (ABS)와 CTD를 사용하여 해양 기포생성과 생성기포가 음파에 미치는 영향을 관측하였다. 관측자료들 통하여 풍속과 기포생성의 연관성, 기포의 반경에 따른 기포량, 주파수별 음속비율 분석 하였다. 최종적으로 분석자료들 통해 기포가 음파전달에 미치는 영향을 모의하였다.

핵심용어: 기포, 공진주파수, ABS (Acoustic Bubble Spectrometer), CTD, 음파

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

The bubbles are created by waves, raindrops, water collision, vessels sailing at sea, life activities of various marine organisms in the ocean and other sources. The bubbles affect the intensity and sound speed of acoustic waves in the ocean. We indirectly observed bubbles in order to understand the creation of and the effects of bubbles on sound waves, using an Acoustic Bubble Spectrometer (ABS) and CTD, from 04:00 to 17:00, 19 September, 2007. We also analyzed the correlation of wind speed and the generation of bubbles, the amount of bubbles, and the sound speed variation at 50, 60, and 70 kHz. Finally, We simulated the way how bubbles affect sound transmission based on the analysis results.

Keywords: Bubble, Resonance frequency, ABS (Acoustic Bubble Spectrometer), CTD, sound wave

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

해양에서 음파의 전달은 경계면 (해수면, 해저면)과 해수 체적내의 산란체 (기포, 동물플랑크톤)등에 영향을 받게 된다. 이때 기포의 크기에 따른 특성 주파수 내역에서 음속과 산란은 해수에 존재하는 기포부리에 체적에 따라서만 변한다. 반면 공진 주파수보다 높은 주파수 대역에서 기포부리의 공진현상에 따라 음속은 기포의 크기 분포에 따라 변화한다.

기포에 의한 산란은 고주파 음원을 사용 시 입사각 (grazing angle)이 작은 경우에 예측된 산란강도와 실측

치 사이에 많은 차이점이 있음을 발견한 Urick 과 Hoover [1]에 의해서 제시되었으며, Clay 와 Medwin [2]은 기포 공진에 의한 음속변화와 감쇠를 연구하였다. 또한 Famer 와 Vagle [3]은 쇄파에 의해 기포가 생성된 후 Langmuir 순환에 의해 음파 산란에 많은 영향을 미치는 기포기둥 (plume)이 생성된다고 하였다. 해수에서 이러한 기포의 단위체적당 분포의 기본적 변수는 풍속, 기포반경, 수심이며 Johnson and Cooke [4]는 여러 수심에서의 사진 촬영 결과를 토대로 기포반경 변화에 따른 단위체적당 기포분포를 구하였다. Marshall V. Hall [5]과 Koiffer [6]는 50 μ m 를 기준반경으로 하여 수십 μ m 기포의 단위 체적당수를 구하였다.

해수면에 분포한 기포는 여러 기법 [7][8]을 이용한 수중음향통신의 채널용량 [9]등에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 해수면의 공기방울의 분포와 공기방울

책임저자: 심태보 (tbshim@ssu.ac.kr)
156-746 서울시 동작구 상도5동 숭실대학교 형남공학관 050525호 수중음향통신연구실
(전화: 02-825-0918; 팩스: 02-821-7653)

이 음파에 미치는 영향을 파악하기위해 남해남형제도 해역에서 ABS (Acoustic Bubble Spectrometer)와 CTD를 사용하여 관측한 자료를 이용하여 깊이에 따른 기포의 분포와 기포에 의한 음속변화를 기포영향을 받지 않은 음속과 비교하였으며 관측 자료를 이용하여 음파전달을 모의하였다.

본 논문의 2장에서는 해양에서 바람, 깊이, 공진주파수에 따른 이론 모델을 기술하였고, 3장에서는 실험 내용을 보였으며, 4장에서는 실험 분석결과를 기술하였다. 5장에서는 관측자료를 통한 음파전달을 모의하였고 마지막 6장에서 전반적 실험내용에 대한 결론을 맺었다.

II. 기포가 음파에 미치는 영향 이론

2.1. 공진 주파수

해수에서 기포에 따른 공진주파수를 계산하기 위해 열과 불의 점성, 그리고 세 가지 파라미터 [10]의 계산 (b , d/b , β)을 고려해야 한다.

세 가지 파라미터는 식 2 ~ 4와 같으며, 이를 통하여 공진주파수를 계산할 수 있다.

$$\frac{d}{b} = \frac{3(\gamma-1)[X(\sinh(X) + \sin(X)) - 2(\cosh(X) - \cos(X))]}{X^2(\cosh(X) - \cos(X)) + 3(\gamma-1)X(\sinh(X) - \sin(X))} \quad (1)$$

$$b = \left[1 - \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right]^{-1} \left(1 + \frac{3(\gamma-1)(\sinh(X) + \sin(X))}{X(\cosh(X) - \cos(X))} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = 1 + \frac{2\tau}{P_A a} \left(1 - \frac{1}{3\gamma b} \right) \quad (3)$$

$$X = a \left(\frac{2\omega\rho_g C_{pg}}{K_g} \right)^{1/2} \quad (4)$$

위 공식에서 사용된 단위는 cgs 단위이다. 여기서 기체의 열전도도 K_g 는 $5.6 \times 10^{-5} \text{ cal}/(\text{cm})(\text{s})(^\circ\text{C})$, 해수준 위에서 자유가스의 밀도 ρ_{gA} 는 $1.29 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$, 기체의 밀도 ρ_g 는 $\rho_{gA}[1 + 2\tau/(aP_A)](1 + 0.1z)$, 표면장력 τ 는 $75 \text{ dyns}/\text{cm}$, $P_A = 1.013 \times 10^6(1 + 0.1z) \text{ dyns}/\text{cm}^2$, 특정압력에서 기체의 비열 C_{pg} 는 $0.24 \text{ cal}/\text{g}$, 물의 전단 점도 μ 는 $0.01 \text{ g}/\text{cm}/\text{s}$, 비열비 γ 는 1.4, z 는 기포의 깊이를 나타낸다.

공진주파수는 식 5와 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{3P_A b \beta \gamma}{\rho_A} \right)^{1/2} \quad (5)$$

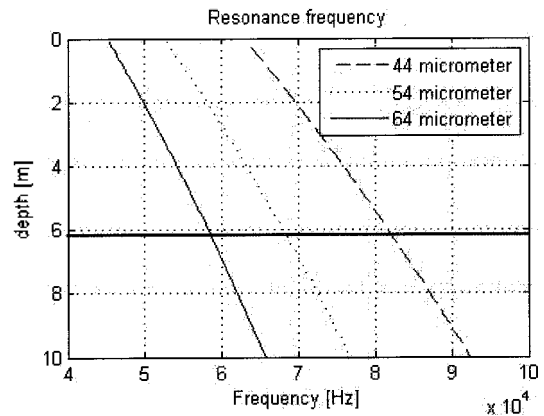


그림 1. 수심과 기포반경에 따른 공진 주파수
Fig. 1. Resonance frequency according to depth and bubble radius.

주변 물밀도 ρ_A 는 $1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ 와 같다.

해수에서 기포반경에 따른 공진주파수는 수심에 따라 달라지게 된다.

그림 1은 수심 약 0.1 ~ 6 m 사이에서 44, 54, 65 μm 의 기포반경을 가진 기포가 공진을 일으키는 공진주파수를 나타낸다.

그림 1을 통하여 각각의 기포반경 (44, 54, 64 μm)에서 수심변화에 따른 공진주파수 변화를 볼 수 있다.

2.2. 음속 변화

해수에 여러 가지 반경의 기포가 존재할 경우 각 기포의 반경별 기포량에 따라 주파수별 위상속도가 변하게 된다.

기포가 존재하는 유체의 음속과 기포가 존재하지 않는 유체에서의 음속의 비는 식 6과 같다.

$$\frac{c_t^2}{C_m^2} = 1 + 4\pi c_t^2 \int_{a_m}^{a_n} \frac{aN(a)}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib\omega} da \quad (6)$$

여기서 c_t 는 기포가 존재하지 않는 유체의 음속이며, C_m 은 기포가 존재하는 유체의 음속이다. ω 는 각주파수, ω_0 는 기포의 고유주파수, $N(a)$ 는 기포반경별 기포량, b 는 댐핑상수를 나타낸다.

식 6을 실수부와 허수부로 나누어 반경별 기포량에 대한 식 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{c_t}{C_M} = u - iv \quad (7)$$

식 7의 u 와 v 는 기포가 존재하는 유체에서 음속 c_m 과

감쇠정도를 측정하여 얻어질 수 있다.

기포에 의한 음속변화는 공진주파수의 주변에서 급격한 변화를 보이며, 공진주파수에서 멀어질수록 다시 음속 변화가 줄어들게 된다. 또한 공진주파수보다 낮은 주파수에서 음속감소, 높은 주파수에서 음속 증가를 확인할 수 있으며 여러 기포반경이 혼합된 유체 내에서는 주로적으로 분포하는 기포반경의 공진 주파수를 기준으로 낮은 주파수에서 음속감소, 높은 주파수에서 음속증가가 나타남을 볼 수 있다.

결국 유체에 함유된 기포반경에 따른 기포량의 정도에 따라 각 주파수에서 음속의 증가 혹은 감소가 나타날 수 있다 [11].

2.3. 음파 감쇠

기포가 존재함으로써 발생하는 음파의 흡수와 산란 효과를 나타내는 소멸면적은 식 8과 같으며, 단위길이 당 흡수손실은 식 9와 같다.

$$S_e = \int_{a_{min}}^{a_{max}} \left(\frac{4\pi a^2 N(a) (\delta/ka)}{((f_s/f)^2 - 1)^2 + \delta^2} \right) da \quad (8)$$

$$\alpha_b = (4.34) S_e \text{ dB/m} \quad (9)$$

여기서 a 는 기포반경, $N(a)$ 는 풍속, 기포반경, 수심을 고려한 기포의 수이며, δ 는 열, 재방사, 점성을 고려한 댐핑상수, f_s 은 공진주파수, f 는 음파의 주파수이다.

III. 해수 표층 기포측정 실험

3.1. 표층기포 측정실험

해수 표층 기포분포 및 기포가 음파에 미치는 영향을 관측하기 위해 2007년 9월 19일 남해 남형제도 해역 (35-02.954N 128-40.694E)에서 4시부터 17시 까지 매 시간마다 기포분석 장비인 ABS (Acoustic Bubble Spectrometer) [11]를 이용하여 기포관측실험을 수행 하였다. 당시 실험 해역의 수심은 50 m 였으며, 자체 제작한 강철 형틀에 송신장치와 수신장치를 15 cm 간격으로 고정하여 크레인을 사용하여 1시간마다 2 ~ 3회씩 수심 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 m의 깊이에서 기포량과 주파수별 음속데이터를 수집하였다. 형틀에는 정확한 수심에서 측정하는데 해류의 영향을 줄이기 위하여 무게추를 달았다.

그림 2는 ABS 장비 설치 구성도 이다.

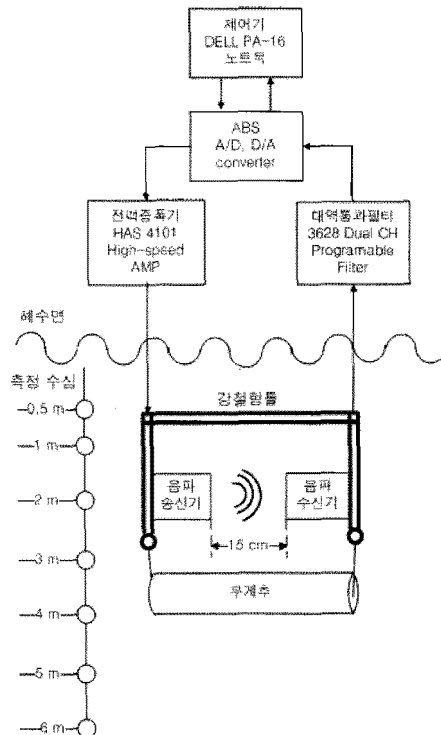


그림 2. 기포측정 시스템
Fig. 2. Measurement system of the bubbles.

실험에 사용된 ABS장비는 5 ~ 수백 kHz까지 관측하고자 하는 음파의 주파수를 설정해줄 수 있으며, 설정된 주파수들을 호핑하며 유체내의 기포량, 음속비를 측정할 수 있다. 이때 제공되는 자료는 기포가 함유되지 않은 유체에서 기준값을 먼저 측정하고 그 자료를 기준으로 측정하고자 하는 유체에서의 기포량, 음속을 측정하게 된다. 따라서 측정자료는 절대값이 아닌 기준값의 상대값이 측정된다.

본 실험에서 사용된 음파의 주파수는 10 ~ 100 kHz까지는 10 kHz 간격을 두고 설정하였으며, 기포가 없는 상태의 기준값 측정을 위하여 실험해역에서 측정시간 1시간 전 해수를 떠서 측정시간에 기준값 측정 자료로 이용하였다. 그러므로 본 논문에서는 기포량과 음속의 절대값 변화가 아닌 기준데이터에서 측정된 기포량과 음속에 대한 상대값을 관측하였다. 이 자료를 통하여 바람에 따른 기포량 변화 사이의 상관관계와 기포량 변화가 음파 전달에 미치는 영향을 연구 하였다.

IV. 실험 결과 분석

4.1. 시간에 따른 깊이별 기포분포

본 실험에서는 풍속과 해수면 기포량 변화에 대한 상관

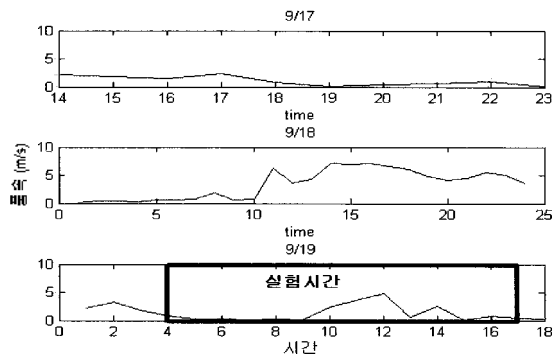


그림 3. 풍속 그림 (9/17 14:00 ~ 9/19 18:00)
Fig. 3. wind speed. (9/17 14:00 ~ 9/19 18:00)

관계를 분석하기 위해 실험선박의 상단에 별도의 풍속계를 설치하여 9월 17일 14시 부터 9월 19일 18시까지의 실험해역 풍속자료를 획득하였다.

그림 3은 9/17일부터 9/19일 사이의 풍속 그림이다. 장비를 통해 측정된 기포반경에 따른 기포량은 20 ~ 600 μm 까지 10 μm 의 간격을 두고 측정된 기포량의 평균치이다.

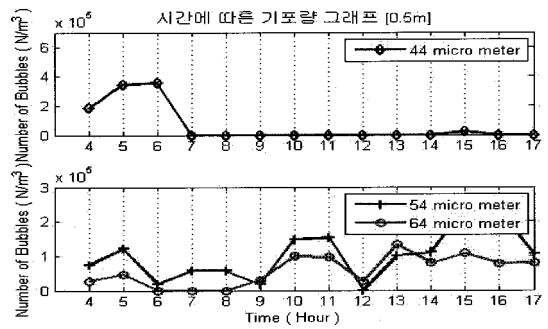
본 논문에서 사용한 기포반경은 시간에 따른 기포량 변화가 가장 두드러지는 44, 54, 64 μm 의 기포변화량 자료이다. 즉 40 ~ 49, 50 ~ 59, 60 ~ 69 μm 사이의 측정 기포량의 평균값으로 볼 수 있다.

그림 4는 실험일 수심 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 m에서 측정된 시간에 따른 기포량 변화이다.

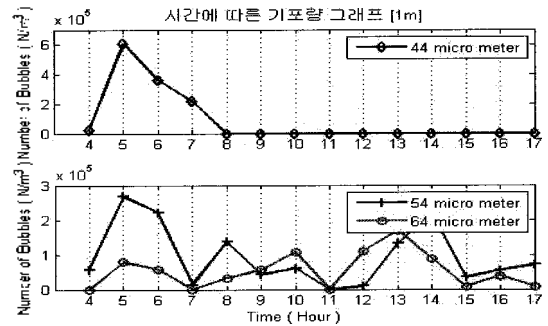
그림 4를 통하여 관측된 3개의 기포반경 중 가장 큰 기포량 변화를 보이는 기포반경은 44 μm 임을 알 수 있으며, 기포반경이 증가함에 따라 표층에 분포하는 기포량 변화가 감소함을 볼 수 있다. 이는 고주파수보다 저주파수에 영향을 미치는 기포량 변화가 풍속에 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다.

9/19일 기포분포 관측시간인 4시부터 17시까지의 자료를 통해 기포반경이 44 μm 인 기포의 시간에 따른 기포량 변화를 보면 4시부터 8시까지 약 4시간 동안 기포량이 증가하다 감소하는 경향을 보이며 8시 이후에는 기포량 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

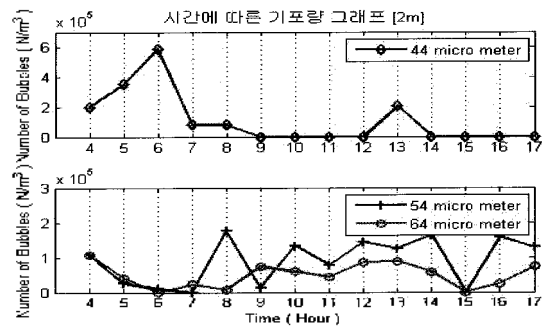
또한 수심 2 ~ 4 m 사이에서 10^5 개 이상의 기포량 유지 시간이 다른 수심보다 긴 것으로 관측 되었는데 이는 표층에서 생성된 기포가 수심 약 4 m까지는 전파가 활발하지만 기포가 가진 고유부양력으로 인해 수심 4 m 이상으로 내려가는 양이 줄어드는 현상으로 볼 수 있다. 그러므로 풍속이 10 m/s 이하인 경우 바람이 수심 6 m 이하에서의 기포 분포량에 크게 영향을 주지 않는 것으로 생각할 수 있다.



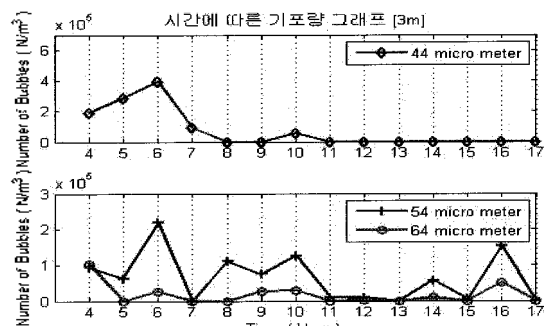
(a)



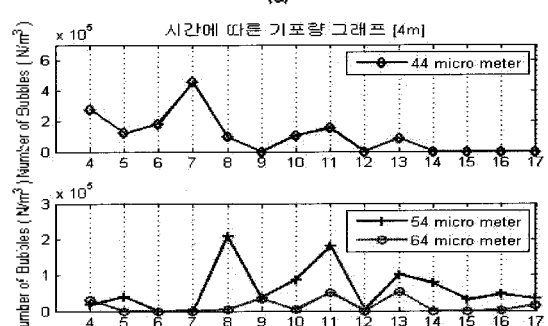
(b)



(c)



(d)



(e)

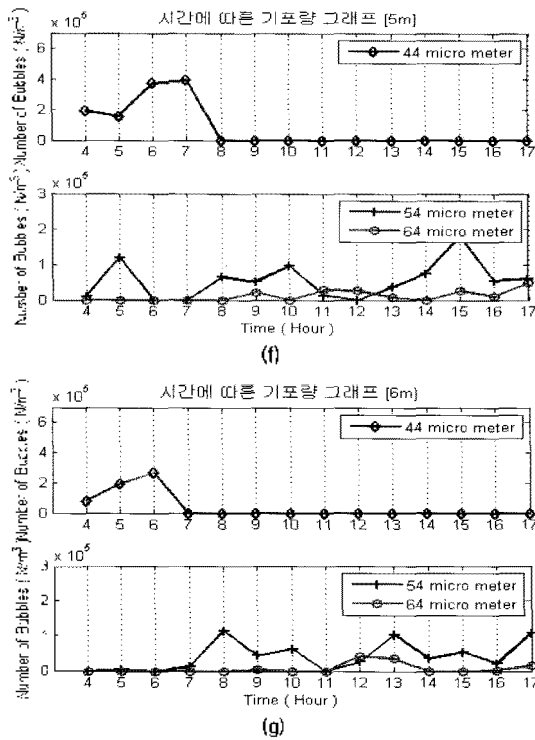


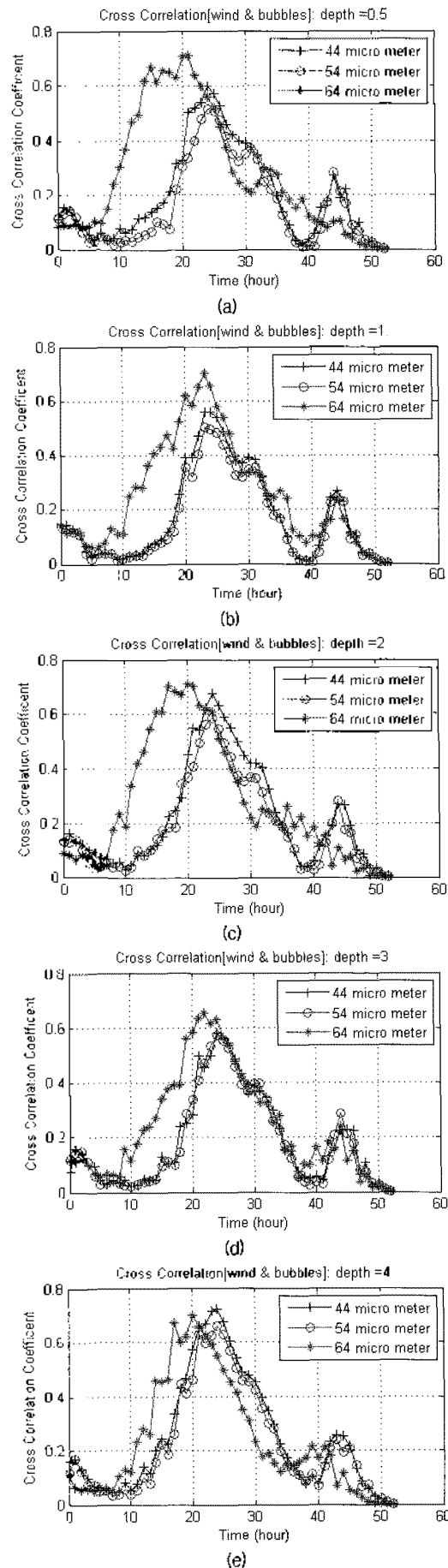
그림 4. 깊이별 기포분포
 (a) 수심 0.5 m (b) 수심 1 m (c) 수심 2 m (d) 수심 3 m (e) 수심 4 m (f) 수심 5 m (g) 수심 6 m
 Fig. 4. A distribution of bubbles according to depth.
 (a) 0.5 m (b) 1 m (c) 2 m (d) 3 m (e) 4 m (f) 5 m (g) 6m

기포반경이 54와 64 μm 인 기포는 관측시간 동안 최대 기포변화량이 3×10^5 을 넘지 않는 상대적으로 작은 기포 변화량을 보였으며 관측 수심 내에서는 비교적 균일한 변화를 나타내었다. 하지만 수심 0.5 ~ 2 m 사이에서 수심 3 ~ 6 m 보다 평균기포변화량이 10^5 개정도 많이 측정되었으며, 기포반경이 44 μm 인 기포의 증가 시간보다 약 1시간 정도 지연되어 기포량이 증가하는 양상을 보였다. 이는 두 가지 측면에서 해석될 수 있는데 첫째는 기포 반경이 44 μm 인 기포보다 느리게 깊은 수심으로 전파되는 것과 44 μm 의 기포가 부양력으로 인해 표층으로 서서히 올라오며 압력감소로 인해 기포반경이 커지는 것으로 볼 수 있다.

일반적으로 기포량변화는 파도의 변화와 가장 큰 관계를 갖게 되며, 파도는 풍속변화, 풍향변화, 풍속지속시간, 취송거리, 육지와 바다의 방향, 해저지형, 주변해역의 규모에 따라 발달율이 달라지는 것을 볼 수 있다 [12].

그림 5는 수심 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 m에서 측정된 시간에 따른 기포량 변화와 풍속과의 상관관계를 나타낸 것이다.

그림 5를 통하여 풍속과 기포량 변화와의 상관관계는 관측수심 내에서 64는 약 20시간 정도의 지연시간이 있을 때 가장 높았고, 44와 54에서는 약 23시간 정도의 지연



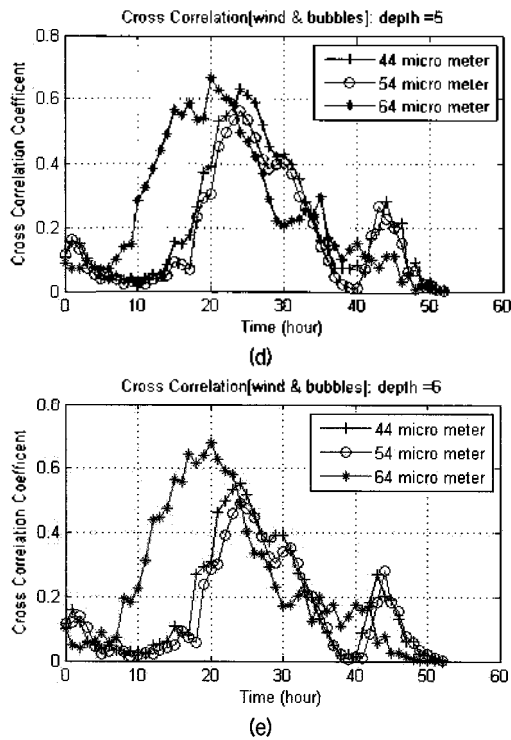


그림 5. 깊이별 기포량과 풍속의 상관관계
 (a) 수심 0.5 m (b) 수심 1 m (c) 수심 2 m (d) 수심 3 m (e) 수심 4 m (f) 수심 5 m (g) 수심 6 m
 fig. 5. Correlation of the amount of bubbles and wind speed according to depth.
 (a) 0.5 m (b) 1 m (c) 2 m (d) 3 m (e) 4 m (f) 5 m (g) 6 m

시간이 있을때 가장 높은 것으로 관측되었다.

풍속과 기포량변화 사이의 지연시간이 큰 차이를 보이는 이유는 두 가지로 예측해 볼 수 있다.

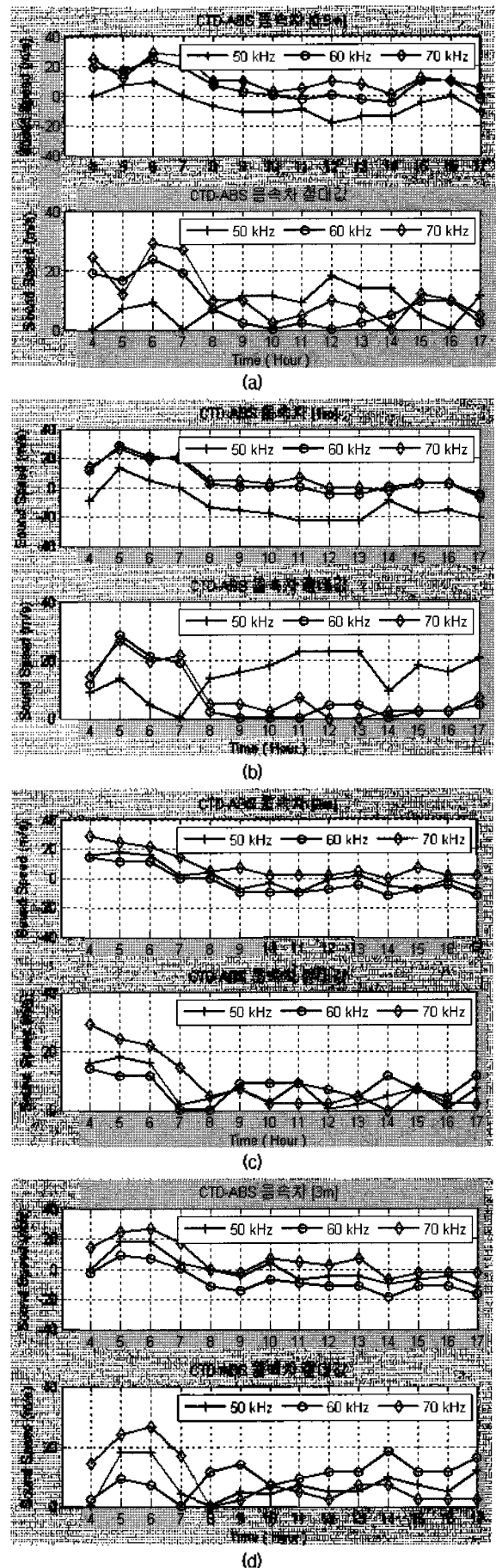
첫째, 관측해역이 남해이며 진해와 거제도 사이의 거의 육지로 둘러싸인 지점이라는 지역적 특색으로 인하여 파고가 서해와 동해보다 풍속의 영향을 크게 받지 않았으며, 때문에 큰 폭으로 변동하는 풍속에 따른 상관관계가 관측된 것으로 예측할 수 있다.

둘째, 17일부터 19일 사이의 풍속은 18일 10시 ~ 20시 사이의 풍속을 제외하면 거의 2 ~ 3 m/s 이하의 풍속이었으며, 관측해역 파도의 생성에 크게 기여를 하지 못한 것으로 예측할 수 있다.

이들 통해 본 관측장소와 같은 내해에서는 기포량변화가 실험 당시 형성되었던 낮은 풍속변화 보다 만 하루 전에 형성되었던 높은 풍속과 변화에 영향을 받았을 것으로 판단된다.

4.2. 주파수에 따른 음속변화

그림 6은 관측 수심에서 ABS 장비를 사용하여 50, 60, 70 kHz 주파수별 음속 변화를 CTD를 사용하여 관측한



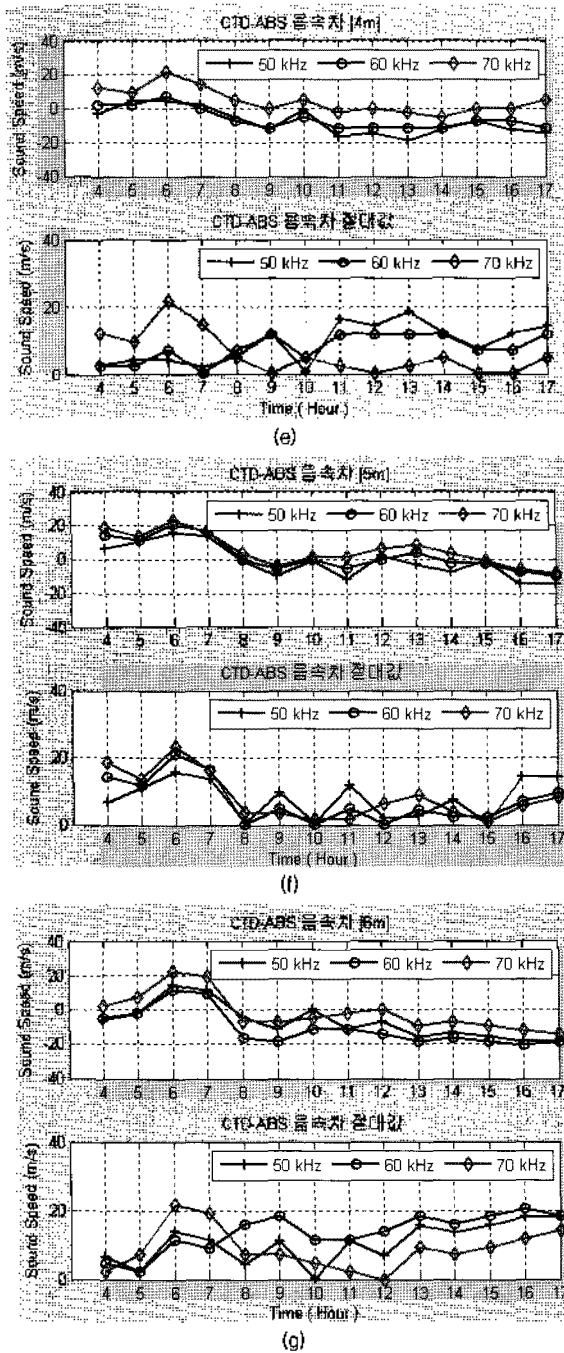


그림 6. 깊이별 주파수에 따른 음속차
 (a) 수심 0.5 m (b) 수심 1 m (c) 수심 2 m (d) 수심 3 m
 (e) 수심 4 m (f) 수심 5 m (g) 수심 6 m
 fig. 6. The difference of sound speed according to depth and frequency.
 (a) 0.5 m (b) 1 m (c) 2 m (d) 3 m (e) 4 m (f) 5 m (g) 6 m

기포가 없는 상태의 음속변화와 음속차를 시간에 따라 나타낸 그림이다.

그림 6에서 CTD와 ABS장비사이의 음속차를 보면 시간의 변화에 따라 50, 60, 70 kHz에서 음속의 증가와 감소가 관측되었다.

그림 4의 기포량 변화와 그림 6의 음속변화를 비교하

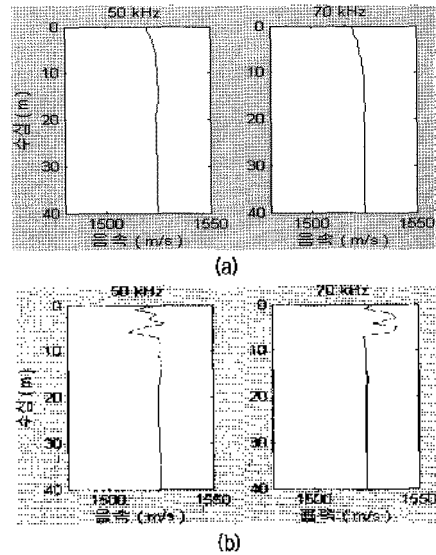


그림 7. CTD와 ABS를 이용하여 구한 음속구조
 (a) CTD (b) ABS
 fig. 7. Sound speed profile using CTD and ABS.
 (a) CTD (b) ABS

면 4시부터 8시 사이에 70 kHz에 주된 영향을 주는 44 μm 의 기포량이 변화함에 따라 70 kHz에서 음속변화가 일어남을 볼 수 있다.

8시부터 17시 사이에는 50, 60 kHz에 영향을 주는 54, 64 μm 의 기포들이 44 μm 보다 상대적으로 기포량 변화가 크므로 70 kHz보다 50과 60 kHz에서 더 많은 음속 변화가 일어남을 확인할 수 있다. 또한 기포량 변동이 크게 관측되지 않아도 해당 공진주파수에서의 음속변화를 확인함으로써 다양한 크기의 기포분포가 서로의 음속 변화에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

결과적으로 해수표층에 분포한 다양한 반경의 기포들이 시간에 따라 서로 다른 기포량 변화를 나타내며 이로 인하여 각 주파수에서 시간변화에 따라 음속의 증가 혹은 감소가 나타날 수 있음을 볼 수 있다.

V. 모의실험

표층의 기포가 음파 전달에 미치는 영향을 보기 위하여 음속감소와 음속증가의 두 가지로 경우로 나누어 모의실험을 수행하였다.

모의실험에서 사용된 음속구조는 각 깊이별 음속변화가 가장 크게 일어난 시각을 선택하였으며, 음속감소의 경우는 50 kHz에서 17시, 음속증가의 경우는 70 kHz에서 6시 자료를 이용하였다.

그림 7은 CTD로 측정된 깊이에 따른 음속구조와 ABS

표 1. 고유음선 변동

(a) 50 kHz (b) 70 kHz

Table 1. Changes of eigen rays.

(a) 50 kHz (b) 70 kHz

(a)

수심 (m)		거리 (m)	250	500	750	1000
5	전체 고유음선		23	23	23	23
	변동 고유음선		9	13	20	18
10	전체 고유음선		25	25	23	23
	변동 고유음선		17	20	14	14
15	전체 고유음선		25	25	23	23
	변동 고유음선		14	21	19	15
20	전체 고유음선		25	25	25	23
	변동 고유음선		15	21	24	15
25	전체 고유음선		25	25	25	22
	변동 고유음선		16	21	20	15
30	전체 고유음선		25	25	25	22
	변동 고유음선		13	18	16	18
35	전체 고유음선		25	25	22	21
	변동 고유음선		12	16	18	18

(b)

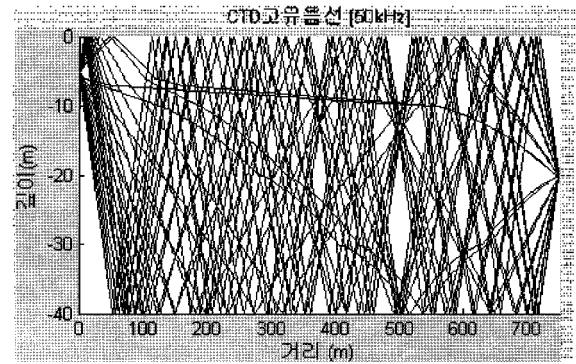
수심 (m)		거리 (m)	250	500	750	1000
5	전체 고유음선		23	27	19	19
	변동 고유음선		9	17	14	15
10	전체 고유음선		23	22	19	23
	변동 고유음선		13	17	11	14
15	전체 고유음선		23	21	19	20
	변동 고유음선		15	15	15	14
20	전체 고유음선		23	21	19	17
	변동 고유음선		14	16	15	12
25	전체 고유음선		23	21	19	19
	변동 고유음선		11	19	17	15
30	전체 고유음선		23	21	20	17
	변동 고유음선		17	14	14	12
35	전체 고유음선		24	21	21	17
	변동 고유음선		8	13	14	14

장비를 이용하여 측정된 깊이에 따른 음속구조이다.

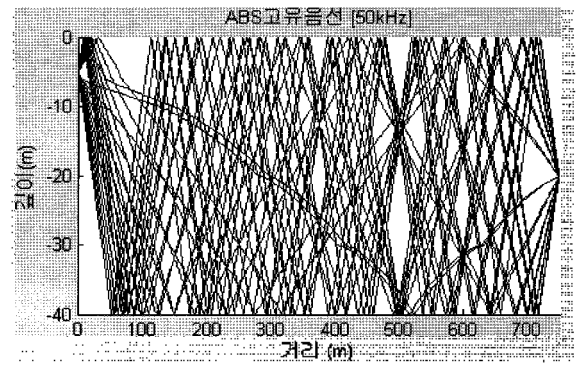
그림 7 (a)의 CTD 음속구조와 달리 (b)의 ABS 음속구조는 해수표층에서 기포의 영향으로 표층음속이 달라졌음을 확인할 수 있다.

5.1. 고유음선변동 모의실험

그림 7의 음속구조를 이용하여 실험해역과 같은 총수심 40 m, 송신기 깊이 5 m, 수신기깊이 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m, 송수신기간거리 250, 500, 750, 1000 m,



(a)



(b)

그림 8. 고유음선 경로 [50 kHz]

(a) CTD (b) ABS

Fig. 8. The path of eigen rays [50 kHz].

(a) CTD (b) ABS

로 수신기 깊이와 송수신기간 거리를 변동하였으며, 송신각은 각 1° 씩 $\pm 85^\circ$ 로 음선추정기법을 이용하여 고유음선의 변동을 모의하였다.

표 1은 CTD음속구조의 각거리별, 깊이에서 수신한 전체고유음선의 수와 ABS음속구조의 고유음선사이의 음선경도변동이 발생한 고유음선의 수이다.

표 1을 통해 50 kHz에서는 거리별 총 고유음선의 수는 크게 변동이 없지만 전체수심의 절반인 20 m에서 가장 많은 고유음선을 수신하였으며, 70 kHz의 경우는 표층과 가까운 수심 5 m에서 가장 많은 고유음선을 수신하였다.

이는 모의실험에 사용한 음속구조가 해수 표층에서 70 kHz 보다 50 kHz에서 약간 가파른 음속증가를 이룸으로서 해수 상층부를 따라 음선경로가 형성된 결과로 추정할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 50 kHz와 70 kHz에서 최대 변동율을 나타내는 지점에서의 고유음선을 보여준다.

그림 8과 9의 CTD고유음선에서 작은 송신각을 가진 음선이 해수 상층부를 따라 진행되는 것을 볼 수 있으며, ABS의 고유음선은 이러한 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 기포의 영향을 받은 표층의 음속구조

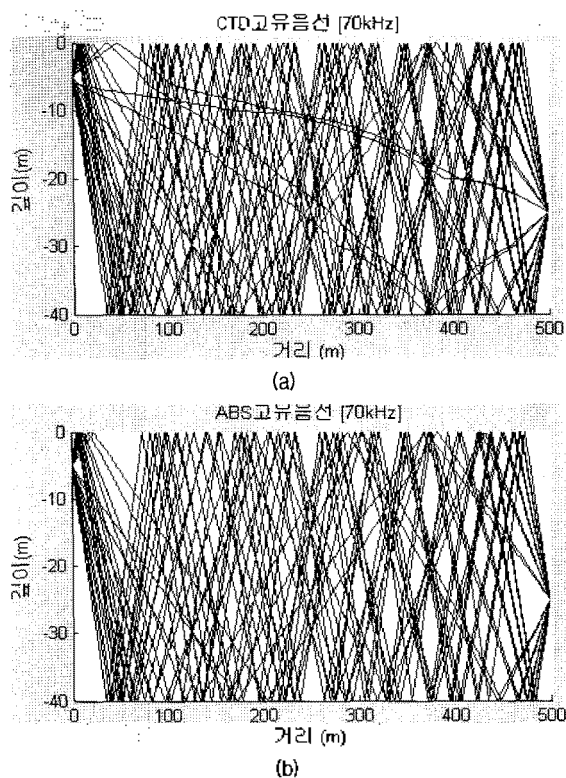


그림 9. 고유음선 경로 [70 kHz]
(a) CTD (b) ABS

Fig. 9. The path of eigen rays [70 kHz].
(a) CTD (b) ABS

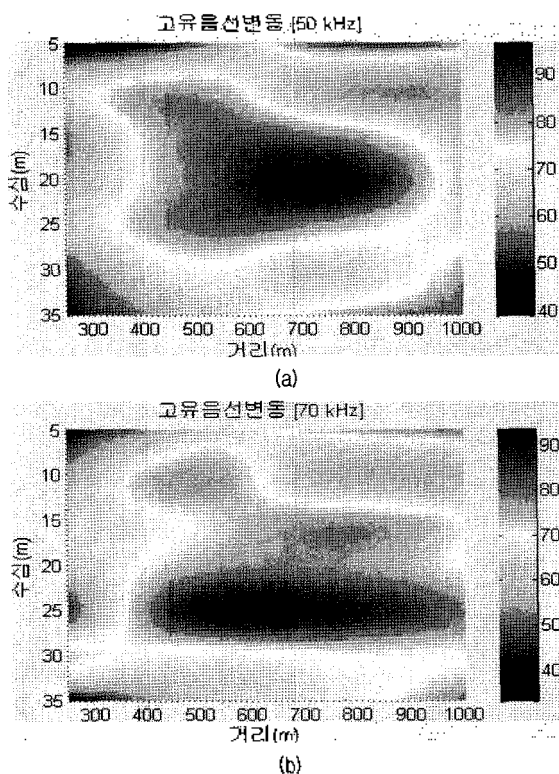


그림 10. 고유음선 변동 [단위:%]
(a) 50 kHz (b) 70 kHz

Fig. 10. A ratio of eigen ray changes.
(a) 50 kHz (b) 70 kHz

가 깊이별로 음속증가율과 감소율이 다르기 때문에 상대적 음속의 증가와 감소를 반복하여 해수상층부의 음선경로가 파괴되는 현상으로 볼 수 있다.

그림 10은 깊이별 거리에 따른 고유음선의 변동율을 나타낸다.

그림 10에서 기포영향으로 인한 고유음선변동범위는 50 kHz가 70 kHz보다 더 좁은 영역을 이루며, 상대적으로 약 5 ~ 10 m 위쪽에서 변동이 많이 일어남을 볼 수 있다.

이러한 변동율 차이는 50 kHz의 경우 CTD음속구조가 표층에서 양의 기울기를 가지고 ABS 측정음속 역시 음속감소가 측정되었으므로 전체적 음속구조가 크게 바뀌지는 않지만, 70 kHz에서는 ABS 측정음속이 음속증가가 일어나 표층의 음속구조가 음의 기울기로 완전히 변화를 일으켜 해수상층부를 따라 전파하는 음선경로를 완전히 파괴하며 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 그러므로 50 kHz에서는 상층부 음선경로 바로 밑의 수심에서 음선변동이 많고 70 kHz에서는 50 kHz보다 더 넓은 범위에서 고유음선변동이 일어나며 수심이 더 깊은 곳에서 더 큰 변동율이 나타나는 것으로 볼 수 있다.

5.2. 전송손실변동 모의실험

기포에 의한 음파감쇠를 알아보기 위하여 식 7을 이용하여 실험인 가장 강한 풍속인 9 m/s에서 50 kHz와 70 kHz의 깊이별 감쇠를 구하여 이를 그림 11에 나타내었다.

5.1절에서 사용된 음속구조와 깊이별 흡수손실을 이용하여 전달손실을 모의하였다.

그림 12에서 50 kHz 모의실험을 보면 수심 10 m 이상에서 미약하게 상층부를 따라 이동하는 음파경로가 형성되어 음파가 전달되는 것을 볼 수 있으며 기포의 영향으

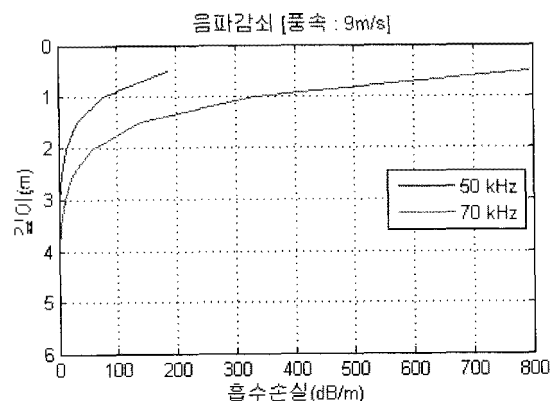


그림 11. 풍속에 따른 깊이별 흡수손실 (50, 70 kHz)
Fig. 11. Attenuation coefficient according to depth and wind speed (50, 70 kHz).

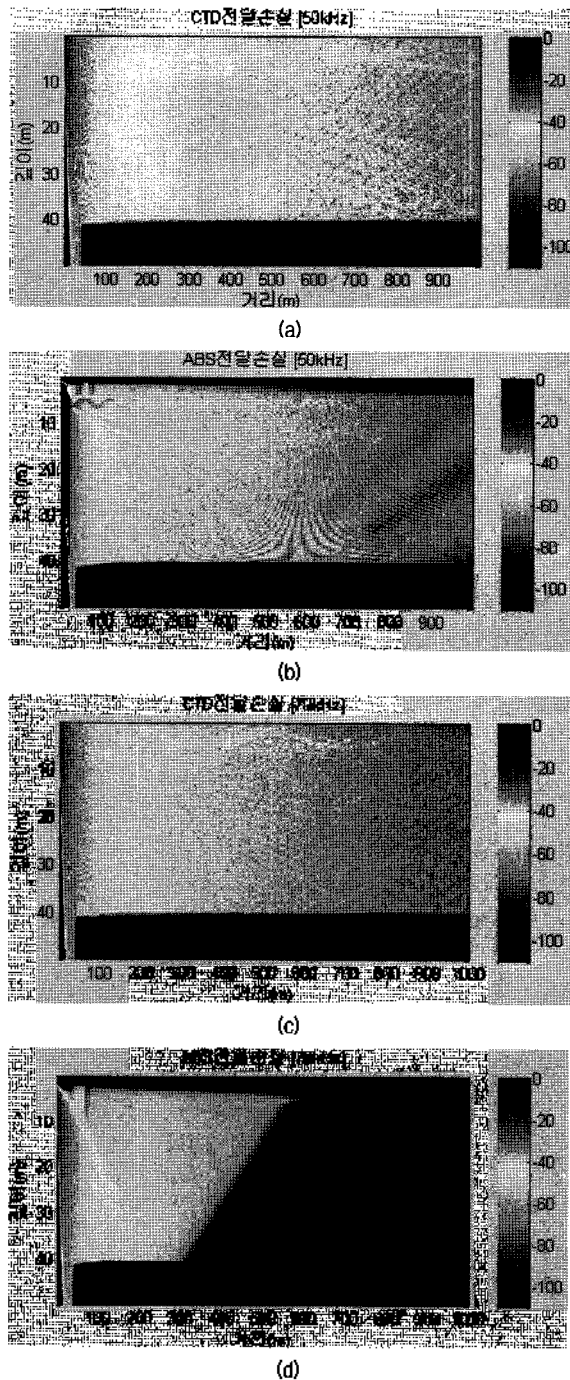


그림 12. 전달손실
 (a) CTD 50 kHz (b) ABS 50 kHz (c) CTD 70 kHz
 (d) ABS 70 kHz
 Fig. 12. Transmission loss
 (a) CTD 50 kHz (b) ABS 50 kHz (c) CTD 70 kHz
 (d) ABS 70 kHz

로 전달손실이 더 일어나는 것을 볼 수 있다.
 70 kHz ABS 전달손실 모의 실험에서는 해수상층부의 음속 증가로 인해 음파가 아래로 향하여 CTD 전달손실 모의 실험보다 더 많은 반사를 일으키며 50 kHz보다 높은 음파 감쇠로 인하여 CTD 전송손실과 비교하여 확연히 더

많은 전달손실이 일어나는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 해수표층기포가 음파전달에 미치는 영향을 보기 위하여 남해 남형제도 해역에서 ABS와 CTD 장비를 사용하여 44, 54, 64 μm 의 기포반경을 갖는 기포의 깊이별 분포를 관측하였다. 이러한 기포의 분포는 풍속과 밀접한 관계를 가지며 약 20시간 정도의 지연시간차와 상관관계가 가장 높음을 확인할 수 있었다. 또한 각 기포반경의 공진음파의 음속변화를 관측하여 CTD를 통한 음속구조와 비교 하였다.

측정을 통해 50, 60, 70 kHz에서 음속변화를 확인하였고 이러한 실측 데이터를 통해 음파전달을 모의하여 기포의 영향으로 해수상층부를 따라 이동하는 음선경로가 파괴될 수 있음을 확인하였다.

천해에서 표층의 음속이 증가할 경우 음파의 반사가 많아져 전달손실이 확연히 높아지는 현상도 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 풍속과 관계있는 해수면 기포층이 음파전달 및 전달손실에 미치는 영향을 예측하여 음파를 이용한 통신과 각종 음향장비 사용에 유용한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구과제 (ADDR-408-071158)의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. J. Urick and R.M. Hoover, "Backscattering of sound from the sea: Its measurement, causes, and application to the prediction of reverberation level," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, no. 6, pp. 1038-1042, 1956.
2. C. S. Clay and Medwin, *Acoustical Oceanography*, Wiley, New York, 1977.
3. D. M. Farmer and S. Vagle, "Waveguide propagation of ambient sound in the ocean surface bubble layer," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, no. 5, pp. 1897-1908, 1989.
4. D. B. Johnson and R. C. Cooke, "Organic particle and aggregate formation resulting from the dissolution of bubbles in

seawater." *Limnol Oceanogr.* vol. 25, no. 4, pp. 653-661, 1980.

5. Marshall V. Hall, "A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40 kHz," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 86, no. 3, pp. 1103-1117, 1989.
6. Richard S. Keiffer, "The impact of the background bubble layer on reverberation-derived scattering strengths in the low to moderate frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 97, no. 1, pp. 227-234, 1995.
7. Jin-Woo Jung and Taebo Shim, "Performance Analysis of and Underwater Acoustic Communication System Combining AMC and STBC Techniques," *The Journal of The Acoustical Society of Korea*, vol. 26, no. 3E, pp. 97-103, 2007.
8. 조진수, 정승백, 심태보, "PSK 변조방식이 수중통신에 미치는 영향에 관한 연구," *한국음향학회지*, 26권 7호, 366-374쪽, 2007.
9. Guoqing ZHOU, Jinsoo GHO, Taebo SHIM, "Underwater Acoustic Communication Channel Capacity In The Sloping Condition," *Korea-Japan Acoustical Society Joint Conference*, pp. 135-138, 2007.
10. C. Devin, "Survey of thermal, radiation and damping of pulsating bubbles," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 31, no. 1, pp. 1654-1667, 1959.
11. R. Duraiswami, S. Prabhukumar and G. L. Chahine, "Bubble counting using an inverse acoustic scattering method," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 104, no. 5, pp. 2699-2717, 1998.
12. 김태희, 방익찬, 고희종, "한반도 주변해역 5개 정점에서 파랑과 바람의 관계," *한국지구과학회지* 26권 3호, 240-252쪽, 2005.

저자 약력

•임 병 옥 (Byungook Im)



2007년: 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업 (공학사)
2007년~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정

•심 태 보 (Taebo Shim)



1974년: 서울대학교 문리대 졸업
1980년: 서울대학교 문리대 대학원 졸업 (물리 해양학 석사)
1986년: 미국 Louisiana 주립대학교 졸업 (물리 해양학 박사)
1986~2005년: 국방과학연구소 해양/음향 연구실장, 해양기술부장, 해군무기체계 개발본부 본부장 역임
2005년~현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
*관심분야: 수중음향 모델링, 수중음향 신호처리, 수중음향 통신, 수중음향 영상처리

•김 영 규 (Young-Gyu Kim)

한국음향학회지 제23권 제4호 참조

•박 정 수 (Joung-Soo Park)

한국음향학회지 제23권 제4호 참조