

음파전달에 미치는 풍성기포의 영향

Effects of Wind-Generated Bubbles on Sound Propagation

이 원 병*, 김 영 신*, 주 종 민*, 이 창 원*, 나 정 열*

(Wonbyoung Lee*, Youngshin Kim*, Jongmin Joo*, Changwon Lee*, Jungyul Na*)

*한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2006년 10월 13일; 수정일자: 2006년 11월 16일; 채택일자: 2006년 11월 21일)

능동소나를 이용하여 수중표적을 탐지하는데 있어 소나탐지 성능은 잔향음에 많은 제한을 받는다. 해상풍은 해양에서 기포 형성에 중요한 역할을 한다. 그리고 기포는 유효한 산란체로서 잔향음에 기여한다. 본 연구에서는 중주파수 선저 고정형 능동소나를 운용 시 풍성기포가 음파전달에 미치는 영향을 연구하였다. 주파수 5, 7.5, 10kHz에 대해 기포층을 고려한 음원수심 3, 5, 10m에서의 능동 신호초과비 (Active Signal Excess: ASE)를 계산하였다. 해수면 부근의 음속변화는 해수면 잔향음 준위를 증가시키며, 능동 신호초과비를 변화시킨다. 풍속이 10m/s에서 해수면 부근의 최대 탐지거리가 3km 이상 감소하였다. 그 원인은 풍성기포에 의한 해수면 방향으로의 굴절로 분석되었다.

핵심용어: 풍성기포, 기포 효과, 소나탐지 성능, 최대 탐지거리

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

When an active SONAR works in the subsurface, its detection performance is limited by the reverberation. The winds play a primary role in the production of bubbles in the ocean. And the bubbles as efficient scatters contribute to the reverberant field. In this paper, the effects of wind-generated bubbles on sound propagation in the subsurface are investigated as a mid-frequency Hull-mounted SONAR works. The active signal excess is calculated at source depths 3, 5, and 10m considering bubble layer for frequencies 5, 7.5, and 10kHz. The change of the near-surface sound speed tend to increase surface reverberation levels and change the active signal excess. In the 10m/s winds, the maximum detection range reduces over 3km through the near-surface. The reason is the upper refraction due to the wind-generated bubbles.

Key words: Wind-generated bubble, Bubble effect, Sonar detection performance, Maximum detection range

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.1)

I. 서 론

해수면 부근에서 능동소나를 운용하는데, 잔향음은 소나탐지 성능에 많은 제한을 주는 환경요소이다. 해수면 위에서 불고 있는 바람은 해수면의 거칠기 변화와 기포 형성에 많은 영향을 미친다 [1, 2]. 해상풍에 의해 생성된 기포는 해수면 부근의 음속을 급격히 감소시킨다. 이렇게 변화된 음속구조에 의해 해수면 부근의 음파전달은 많은 영향을 받는다. 기포는 20kHz 이하의 주파수에서 음속변화에 많은 영향을 주지만 그 이상의 주파수에서는 음속변화가 미약하였다. 또한 10kHz 이하의 주파수에서

감쇠효과는 미약하였고, 10kHz 이상의 주파수에서는 감쇠효과가 심하였다 [5]. 본 연구에서는 감쇠효과는 미약하지만 음속변화가 큰 5~10kHz의 주파수를 이용하였다. 기포 효과를 주기위해 1978~1995년까지 한반도 근해 일기도를 기반으로 해상풍속 변화에 대해 분석한 한양대학교 NABARAM 자료에서 특정 해역 18년간의 월 평균 해상풍속을 이용하였다 [3]. 또한 음속구조는 연간 동적인 변화를 포함하고 있는 해양 순환모델 자료를 이용하였다 [4]. 잔향음 준위와 능동 신호초과비 분석으로 시공간적인 음장변화를 구하여 음파전달 환경에 기포가 미치는 영향을 연구하였다. 이 때 음원에서 방사된 음파가 해수면 방향으로 굴절되어 해수면 잔향음 준위를 증가시킨다. 또한 해상풍속 및 해상상태 변화에 해수면과 해저면 잔향음 준위 변화 특성을 분석하였다. 기포 효과

를 적용한 능동 신호초과비 준위의 변화를 통해 소나탐지 성능에 기포가 미치는 영향을 연구하였다. 기포층을 고려하여 음원수심을 변화시키고, 주파수 변화를 통해 주파수 종속성을 확인하였다. 본 논문의 II장에서는 Hall이 제시한 해수면 부근의 음속 변화 알고리즘을 적용해서 한반도 근해 음속구조 변화를 구하였다. III장에서는 해수면 저질기 증가와 기포 효과에 의한 잔향음 준위 변화 특성과 IV장에서는 능동 신호초과비 분석을 통해 기포 효과가 소나탐지 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 해상풍에 의한 음속구조 변화

해수면에서 기포는 파도나 강우에 의해 생성된다. 강우에 의한 생성은 기상적 영향으로 전체적인 특징을 나타내기에는 지속적이지 않으며 시공간적 제약을 받는다. 또한 일단 생성된 기포는 해수 중에 일정시간 머물다가 사라지기 때문에 해상에서 기포의 정확한 양을 측정하기에는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 해수면 부근의 기포 형성이 파도에 의해서만 생성되며 전 해역에 균일하게 분포한다고 가정하였다. 해상풍에 의해 파도가 발달하기 위해서는 지속시간 (Duration), 취송거리 (Fetch) 및 풍속 (Wind speed)의 3가지 조건이 충족되어야 한다. 그러나 실제 해상에서 해상풍은 시간과 거리에 따라 크게 변하며, 방향도 일정하지 않다 [12]. 만일 해상풍이 충분한 시간과 거리에 대해 지속적으로 분다면, 기포 형성은 풍속에 가장 많은 영향을 받는다고 가정하였다. 계절별 해상풍속 변화는 해수면 부근 기포 생성으로 음속 변화를 야기한다. 기포에 의한 음속변화는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 연구자와 연구지역의 환경적인 특성, 주파수, 실험방법 등에 따라 다양한 연구결과가 발표되었다 [5-10]. 그러나 기포에 의한 해수면 부근의 음속변화를 주파수와 해상풍속으로 나타낸 Hall의 알고리즘을 이용하여 기포 효과를 적용하였다 [9]. 먼저 해수면 부근에서 해상풍에 의한 음속변화는 깊이에 따라 식 1과 같이 변한다고 가정하였다 [11].

$$c(z) = c_0 - \Delta c \cdot \exp(-z/d) \tag{1}$$

여기에서 $c(z)$ 은 수심 z 에서의 기포에 의해 변화된 음속이며, c_0 는 기포가 없을 때의 음속이다. 또한 Δc 는

해수면에서 기포에 의해 변화된 음속, z 는 수심, d 는 해상풍에 의해 영향을 받는 수심을 나타내고 있다. 해상풍에 의한 해수면에서 음속변화를 주파수와 해상풍속의 알고리즘으로 식 2와 같이 정의할 수 있다. 식 3에서 d 는 해상풍속 7.5m/s를 기준으로 변하는 알고리즘이다.

$$\Delta c(F, W, z = 0) = 33[(F/60)^{1/2} - 1](W/15)^3 \tag{2}$$

$$d(W) = \begin{cases} 0.4, & W \leq 7.5\text{m/s} \\ 0.4 + 0.115(W - 7.5), & W > 7.5\text{m/s} \end{cases} \tag{3}$$

한반도 근해 각 해역의 월평균 해상풍속 변화는 그림 1과 같으며, 동계에는 월 평균 해상풍속이 약 5~7m/s이고, 하계에는 약 0.5~2.5m/s로 동계가 하계에 비해 전반적으로 해상풍이 강하였다. 또한 동계에는 고위도인 동해와 서해가 저위도인 남해에 비해 해상풍속이 높았다.

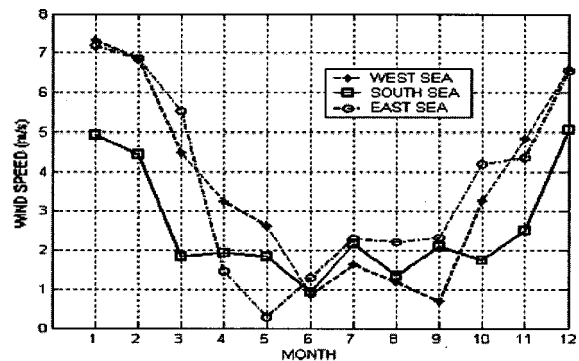


그림 1. 월 평균 해상풍속 (3)
Fig. 1. Monthly mean wind speed (3).

실제로 기포에 의한 음속 변화를 해상풍속과 주파수의 알고리즘으로 나타내기 위해 한양대 NABARAM 자료와 해양 순환모델 자료를 적용하였다. 주파수 7.5kHz에서

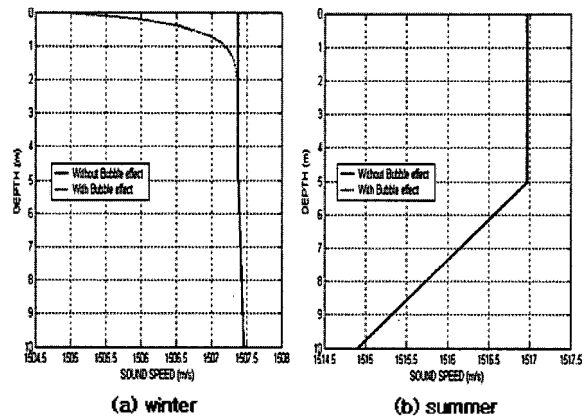


그림 2. 동해 해상풍에 의한 해수면 부근에서의 음속 변화 (a) 동계, (b) 하계
Fig. 2. The sound-speed perturbation by the wind in the east sea (a) winter, and (b) summer.

동해 특정 해역의 동계 및 하계 해수면 부근 음속구조 변화는 그림 2와 같았다. 서해와 남해에서도 계절별 해상풍속에 대한 해수면에서의 음속변화는 동해와 유사하게 나타났다. 그림 2에서 동계 해상풍이 약 7m/s 불었을 때 해수면에서 2.5m/s 음속이 감소하였으며, 수심 3m 까지 기포의 영향으로 음속이 감소하였다. 하계에는 해상풍속이 1m/s 미만으로 해수면 부근의 음속변화는 미비하였다.

III. 기포 효과에 대한 잔향음 특성

해수면 부근에서 함정이 중주파수 선저고정형 능동소나를 이용하여 수중표적을 탐지하는 환경을 모의하였다. 또한 특정 해역에서의 음속구조는 연간 동적인 변화를 포함하고 있는 해양 순환모델 자료를 이용하였다. 음원과 표적의 거리를 15km에 두고 음원 수심이 5m, 표적 수심 30m에 대한 잔향음 준위의 변화를 구하였다. 음선을 기반으로 음장의 변화를 계산하는 수치적 음향 모델을 통해 시공간적인 잔향음 준위 변화를 계산하였다. 표 1과 같이 해상풍과 해상상태의 관계에서 다른 환경요소가 동일한 조건에서 해상풍속만 1, 4, 7, 10, 13m/s로 변화시켰을 때, 시간에 따른 해수면 및 해저면 잔향음 준위 변화가 그림 3과 같았다. 또한 그림 4에서는 그림 3과 동일한 조건에서 해상상태를 1, 2, 3, 4, 5로 변화시켰을 때, 잔향음 준위 변화를 나타낸다.

잔향음 변화 특성에서 먼저 해상풍속이 1, 4m/s로 약 할 때나 해상상태가 잔잔한 1, 2에서는 해저면 잔향음이 전체 잔향음에 많은 영향을 미친다. 그러나 해수면이 거칠어지는 해상풍속 10, 13m/s나 해상상태 4, 5가 되면 해수면 잔향음 준위의 증가로 전반적으로 해저면 잔향음보다 해수면 잔향음이 우세하게 된다. 이는 해상풍속이 증가하여 해수면 거칠기가 증가하면 해수면에 맞고 되돌아오는 음선의 증가로 해수면 잔향음 준위는 증가한다. 해수면 잔향음이 증가하면 해저면에 도달하는 음압 에너지 감소로 해저면 잔향음 준위는 감소하게 된다. 이처럼

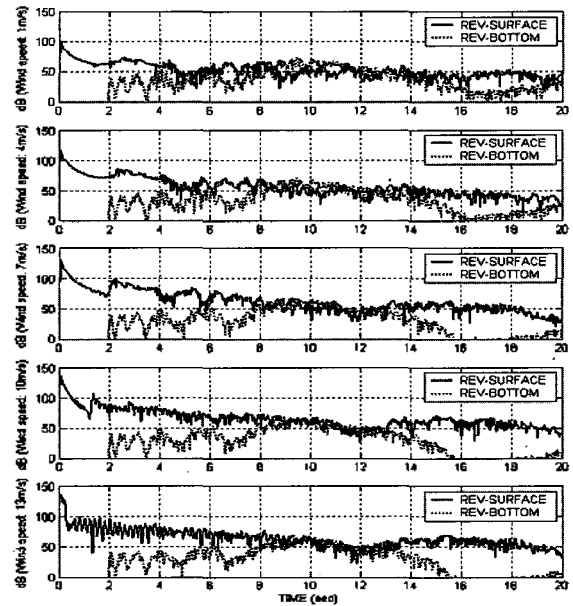


그림 3. 해상풍속 (1, 4, 7, 10, 13m/s) 변화에 따른 해수면 및 해저면 잔향음 변화

Fig. 3. The surface and bottom reverberation levels for wind speeds of 1, 4, 7, 10, and 13m/s respectively.

표 1. 해상풍과 해상상태 관계

Table 1. Wind wave and sea state table (The Beaufort Scale).

Wind				Sea state		
Beaufort number	Descriptive term	Wind Speed(m/s)	Effects observed at sea	Code	Descriptive term	Wave Height(m)
0	Calm	<0.3	Sea like a mirror	0	Calm (glassy)	0
1	Light air	0.3-1.5	Ripples with the appearance of scales are formed, but without form crests			
2	Light breeze	1.6-3.3	Small wavelets, still short but more pronounced: crests have a glassy appearance and do not break	1	Calm (rippled)	0.0-0.3
3	Gentle breeze	3.4-5.4	Large wavelets; crests begin to break: foam of glassy appearance; perhaps scattered white horses	2	Smooth (wavelets)	0.3-0.6
4	Moderate breeze	5.5-7.9	Small waves, becoming longer; fairly frequent white horses	3	Slight	0.6-1.2
5	Fresh breeze	8.0-10.7	Moderate waves taking a more pronounced long form; many white horses are formed; chance of some spray	4	Moderate	1.2-2.4
6	Strong breeze	10.8-13.8	Large waves begin to form: the white form crests are more extensive everywhere; probably some spray	5	Rough	2.4-4.0

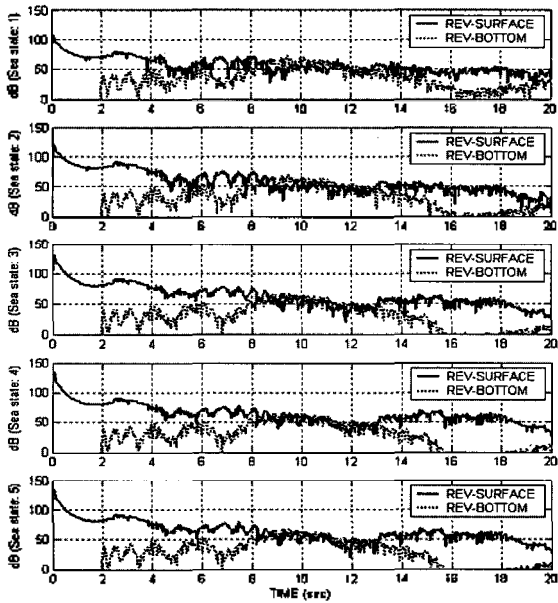


그림 4. 해상상태 (1, 2, 3, 4, 5) 변화에 따른 해수면 및 해저면 잔향음 변화
 Fig. 4. The surface and bottom reverberation levels for sea state 1, 2, 3, 4, and 5 respectively.

해상풍속이 강하고 해수면의 거칠기가 증가할수록 해저면 잔향음 보다 해수면 잔향음 준위가 우세하게 된다.

기포의 영향으로 해수면 부근의 음속 변화는 그림 5와 같이 해수면 잔향음 준위를 증가시킨다. 해수면 부근에 기포층이 존재하면 표층에서 음속이 급속히 감소하였다가 깊이에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다. 해수면 부근의 음원에서 방사된 일부 음파가 깊이에 따른 음속의 증가로 해수면 방향으로 굴절하게 된다. 그림 6과 같이 음파가 해수면 부근에 갇히게 되어 해수면 잔향음 준위를 증가시키는 원인이 된다.

연간 해상풍속 및 수온구조 변화에 대해 기포 효과를 적용하여 잔향음이 주변소음보다 우세한 잔향음 제한환

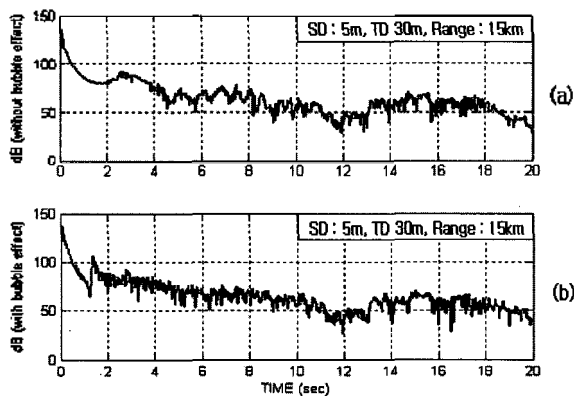


그림 5. 해수면 잔향음 변화 (a) 기포 효과 비적용, (b) 기포 효과 적용
 Fig. 5. The surface reverberation levels without(a), and with(b) bubble effect.

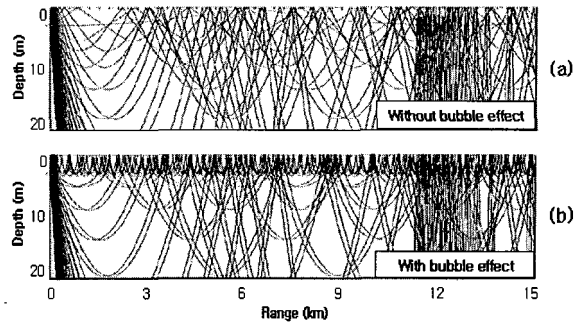


그림 6. 기포 효과에 의해 음파가 해수면 부근에 갇히는 현상 (a) 기포 효과 비적용, (b) 기포 효과 적용
 Fig. 6. Rays at near surface without (a), and with (b) bubble effect.

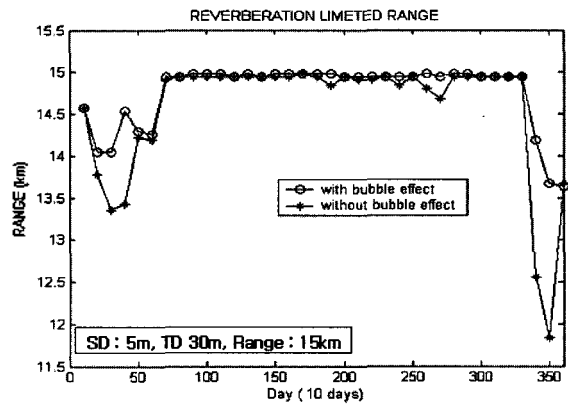


그림 7. 기포 효과에 의한 잔향음 제한환경의 연간 거리 변화 (*) 기포 효과 비적용, (○) 기포 효과 적용
 Fig. 7. The annual change of the reverberation-limited range change without (*), and with (○) bubble effect.

경의 거리변화를 그림 7과 같이 비교하였다. 그림 7은 해수면 부근의 음원으로부터 수중 표적에 대한 경우를 가정하여 음원수심을 5m, 표적수심을 30m로 동일한 조건에서 해상풍속과 음속구조의 연간변화에서 기포에 의한 잔향음 제한환경의 거리 변화를 나타낸다. 가로축은 연간 시간의 경과를 나타내며, 세로축은 탐지거리 15km에 대한 잔향음 제한환경 거리를 나타낸다. 계절별 변화 특징으로 해상풍이 약한 하계에는 기포에 의한 음속변화가 미비하여 잔향음 제한환경의 거리차가 미비하다. 그러나 해상풍이 강한 동계에는 해수면 잔향음 준위의 증가로 잔향음 제한환경의 거리도 증가한다. 계절에 따라 해상풍속이 변하게 되면 해수면 부근의 음원에서 수중 표적에 대해 계절별 잔향음 제한환경의 거리 변화에 많은 변화가 있음을 확인하였다.

IV. 기포 효과에 의한 능동 신호초과비 변화

기포에 의한 해수면 부근의 음속구조 변화는 잔향음 준위의 변화뿐만 아니라 능동 신호초과비 준위에도 영향을 준다. 기포층이 생성되는 수심을 고려하여 음원의 수심을 기포층 내부 (3m), 경계면 (5m) 그리고 기포층 아래(10m)로 구분하여 각각의 능동 신호초과비를 구하였다. 또한 주파수를 5, 7.5, 10kHz로 변화시켜 주파수 변화에 따른 특성을 구하였다. 해상풍속이 10m/s로 동일한 해역에서 주파수가 5, 7.5, 10kHz에 대해 음원의 수심이 3, 5, 10m로 변할 때, 각각의 능동 신호초과비 결과 그래프 8, 9, 10과 같았다. 먼저 그림 8의 주파수가 5kHz에서 음원의 수심변화에 무관하게 기포가 존재하면 능동 신호초과비 준위는 수심 및 거리에 따라 감소하였다. 음원이 기포층 내부에 존재 시 능동 신호초과비 준위의 변화폭이 더욱 컸다. 그러나 기포층 아래에 존재하면 음원으로부터 방사된 음파 중 일부만이 기포층의 영향을 받게 되어, 준위 변화에 미치는 영향은 미비하였다.

주파수 7.5kHz와 10kHz에서도 5kHz와 마찬가지로 음원이 기포층 내부에 존재하는 3, 5m에서는 수심 및 거리에 따라 능동 신호초과비 준위가 크게 감소하였으나, 기포층 아래인 10m에서는 준위 변화가 미비하였다. 그러나 주파수가 증가할수록 능동 신호초과비 준위의 감소로 원거리까지 탐지가 어렵다는 것을 확인하였다. 음원이 기포층 내부에 존재하게 되면 기포에 의한 음속의 급격한 변화로 능동 신호초과비 준위 변화에 많은 영향을 받지만, 기포층 아래서는 일부 음파만 기포층의 영향을 받게 되어 준위 변화는 미비하였다.

잔향음이 주변소음보다 우세한 잔향음 제한환경에서 능동 신호초과비는 식 4와 같다.

$$ASE=(SL-2TL+TS)-(RL+DT) \tag{4}$$

여기에서 SL은 음원준위, TL은 전달손실, TS는 표적 강도, RL은 잔향음 준위 그리고 DT는 탐지한계이다. 동일한 조건에서 기포에 의해 변화되는 값은 전달손실과

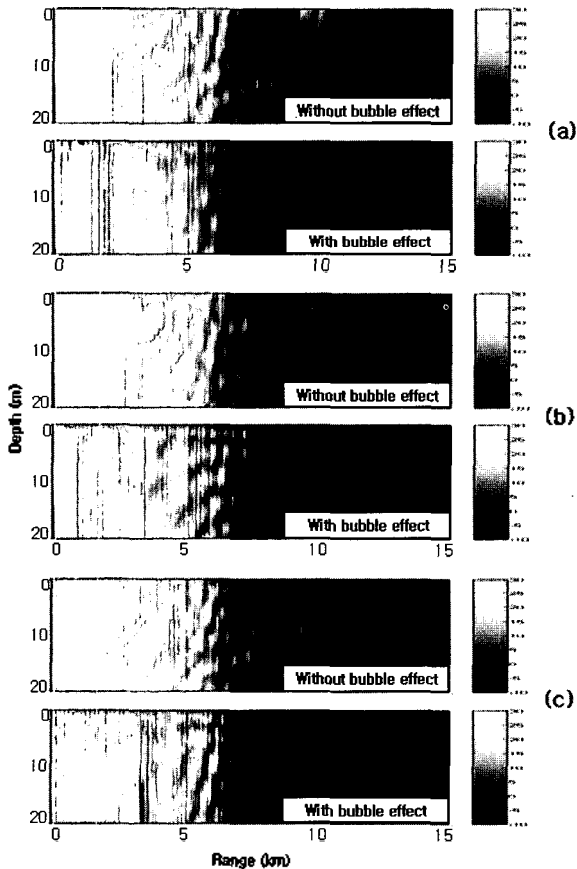


그림 8. 5kHz 음원 수심 (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m에 대한 능동 신호초과비 변화 (위 : 기포 효과 비적용, 아래 : 기포 효과 적용)
Fig. 8. ASE levels for various source depths (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m, and frequency is 5kHz (upper : without, lower : with bubble effect).

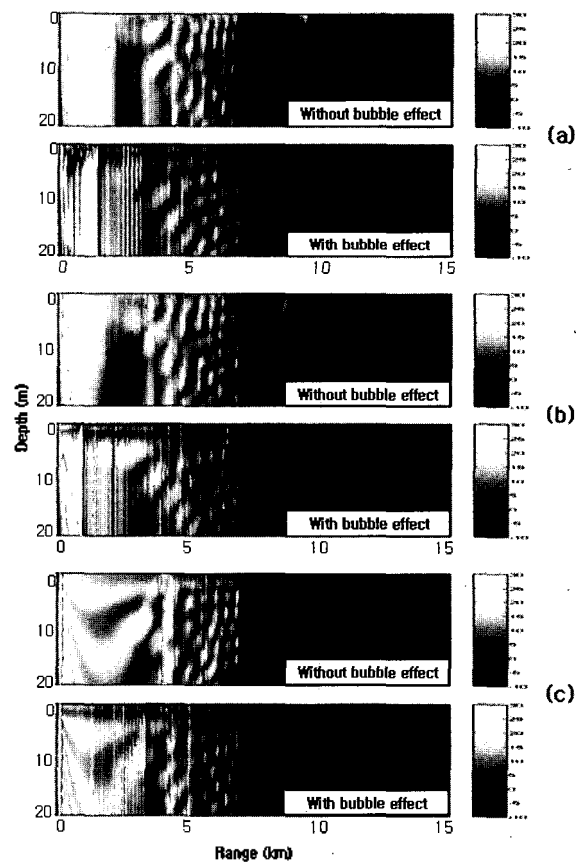


그림 9. 7.5kHz 음원 수심 (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m에 대한 능동 신호초과비 변화 (위 : 기포 효과 비적용, 아래 : 기포 효과 적용)
Fig. 9. ASE levels for various source depths (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m, and frequency is 7.5kHz (upper : without, lower : with bubble effect).

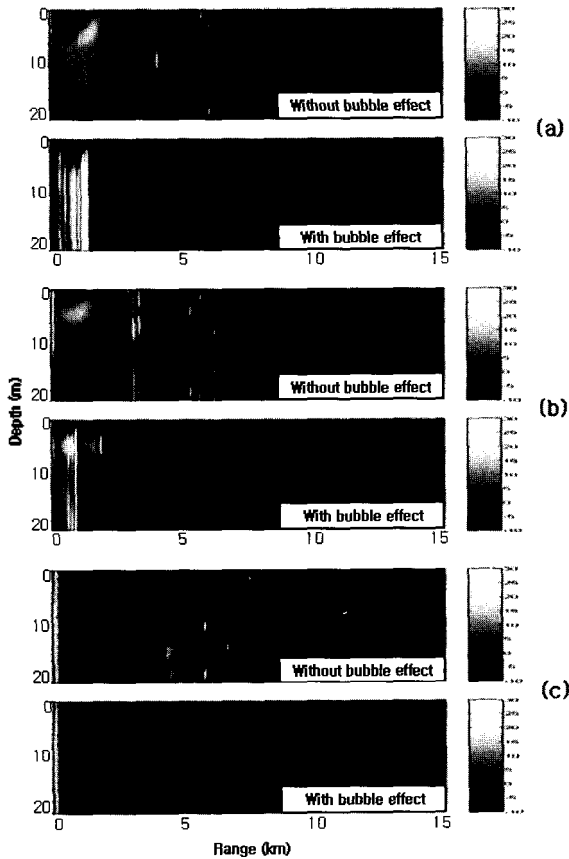


그림 10. 10kHz 음원 수심 (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m에 대한 능동 신호초과비 변화 (윗 : 기포 효과 비적용, 아래 : 기포 효과 적용)
 Fig. 10. ASE levels for various source depths (a) 3m, (b) 5m, (c) 10m, and frequency is 10kHz (upper : without, lower : with bubble effect).

잔향음 준위이다. 기포에 의한 음속구조 변화는 음선을 해수면 부근에 갇히게 하여 음파전달을 보다 원활하게 만들기 때문에 전달손실 준위는 감소한다. 그러나 III장에서 풍성기포는 해수면 잔향음 준위의 증가로 잔향음 제한환경의 거리를 증가시키고 해수면에서의 산란에 많은 영향을 주기 때문에 능동 신호초과비는 거리와 수심에 따라 변화가 심하였다. 풍성기포의 영향으로 많은 영향을 받는 해수면 부근 수심 5m에 음원과 표적을 두었다. 기포가 존재하지 않는 경우의 잔향음 준위에서 기포

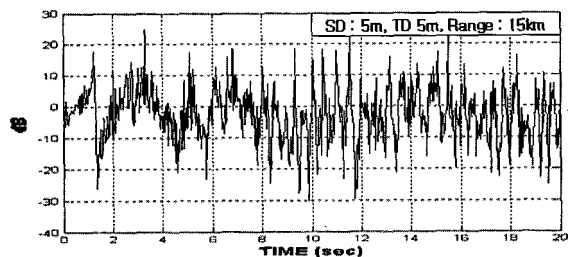


그림 11. 기포 효과에 의한 잔향음 준위차(기포 효과 비적용-기포 효과 적용)
 Fig. 11. The difference of reverberation levels between without, and with bubble effect.

가 존재하는 경우의 잔향음 준위를 감하여 기포에 의한 잔향음 준위차를 그림 11과 같이 구하였다. 그림 11에서 기포가 존재하지 않는 경우에 비해 기포가 존재하면 잔향음 준위가 높기 때문에 잔향음 준위차는 0보다 작은 값을 가진다. 이처럼 기포에 의해 잔향음 준위가 증가하게 되면 능동 신호초과비는 감소한다.

또한 기포의 영향으로 능동 신호초과비 준위는 일부 구역에서 파동이 생기고, 주위보다 변화가 심하게 나타났다. 공통적으로 음원으로 부터 근거리인 0~2km에서 능동 신호초과비 준위가 주위보다 낮았다. 음원의 수심이 기포층 내부에 존재하게 되면 깊이가 증가할수록 음속이 급격히 변하기 때문에 수심에 따른 음속차에 의해 음파는 해수면 방향으로 굴절하게 된다. 그림 12에서 기포 효과를 적용하여 음속이 급격하게 변하게 되면 해수면 부근에서 방사된 음파는 해수면 방향으로 굴절하여 음원에서 0~2km 거리에 대해 전달이 잘 되지 않는다. 기포에 의한 음속변화가 음원으로부터 근 거리에 있지만

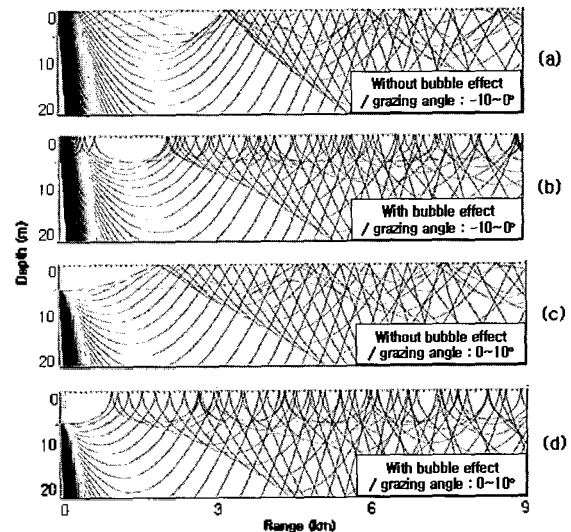


그림 12. 음원부근 음파가 전달되는 양상 (a, b) 수평입사각 -10~0°, (c, d) 수평입사각 0~10°, (a, c) 기포 효과 비적용, (b, d) 기포 효과 적용
 Fig. 12. Rays at near source (a, b) grazing angle -10~0°, (c, d) grazing angle 0~10° without(a, c), and with(b, d) bubble effect.

음파가 전달되지 않기 때문에 능동 신호초과비 준위가 낮아지는 특징을 확인하였다. 특히 기포 효과를 적용하면 급격한 음속변화로 능동 신호초과비 준위차는 더욱 크게 발생하였다.

기포 효과에 의한 해수면 부근 능동소나의 최대 탐지 거리 (Maximum Detection Range) 변화를 음원이 5m 일 때, 표적의 수심을 5, 10, 30, 50m에 두고 각각의 최대 탐지거리를 구하였다. 표 2는 통계 평균 해상풍속 6

표 2. 기포 효과에 대한 최대 탐지거리 비교

Table 2. The comparison of maximum detection range with and without bubble effect.

Wind Speed (m/s)	Target Depth (m)	Maximum Detection Range (km)		
		Without bubble effect (a)	With bubble effect (b)	Range difference (b)-(a)
5	5	13.75	13.85	0.10
	10	13.22	13.13	-0.09
	30	13.29	13.27	-0.02
	50	10.62	10.59	-0.03
6	5	13.14	12.10	-1.04
	10	10.48	10.29	-0.19
	30	12.21	12.11	-0.10
	50	9.78	9.77	-0.01
7	5	12.46	11.36	-1.10
	10	10.43	9.97	-0.46
	30	9.70	8.86	-0.84
	50	9.00	8.81	-0.19
8	5	11.34	10.83	-0.47
	10	10.37	9.13	-1.24
	30	7.06	8.75	1.69
	50	8.93	8.56	-0.37
9	5	11.31	9.16	-2.15
	10	6.94	5.67	-1.27
	30	7.06	6.92	-0.14
	50	8.91	8.66	-0.25
10	5	10.39	7.24	-3.15
	10	6.62	7.05	0.43
	30	6.92	6.86	-0.06
	50	8.89	8.74	-0.15

~10m/s에 대한 최대 탐지거리 산출시 기포 효과의 적용여부에 따른 거리차를 나타냈다. 기포의 영향을 고려하면 고려하지 않은 경우에 비해 최대 탐지거리가 1~3km 차이가 발생하였다. 이와 같은 기포의 영향으로 표적이 해수면 부근이면 2~3km이상 크게 감소하였으며, 기포층 아래에 존재 시에도 $\pm 1\text{km}$ 이상 거리차가 발생하였다.

V. 결론

해상풍이 약한 하계에는 기포 생성이 미비하여 음파전달에 미치는 영향도 미비하다. 그러나 해상풍이 강한 동계에는 해상풍에 의해 생성된 기포의 영향으로 해수면 부근 음속변화가 해수면 잔향음 준위의 증가와 거리별 능동 신호초과비 변화에 많은 영향을 주게 된다. 음원과 표적의 수심, 주파수 등에 따라 음파전달 특성에 많은 영향을 받는다. 특히 음원이 해수면 부근에 위치하게 되면 기포 효과에 의한 급격한 음속변화로 고유 음선이 해수면 방향으로 굴절되어 음원으로부터 근거리에서도 탐

사가 어려운 경우가 발생하였다. 해상풍속에 따라 해수면 부근 표적에 대해 3km 이상 거리차가 발생하였으며, 기포층 아래의 표적에 대해서도 $\pm 1\text{km}$ 이상 거리차가 발생하였다. 정확한 소나 탐지거리 예측을 위해서는 해상풍에 의한 기포 효과를 고려하여 음파전달 환경 특성을 분석해야 한다. 향후 기포에 의한 탐지거리 변화의 정확한 예측과 한반도 근해 해상풍속 변화와 기포 효과의 연계성에 대해 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구 (UD040002BD) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 남경완, "천해 잔향음의 변화 특성", 한양대학교 대학원 지구해양학과, 이학석사논문, 2003.
2. 윤관섭, "High-Frequency Bistatic Reverberation Model", 한양대학교 대학원 지구해양학과, 이학석사논문, 2006.
3. J. Y. Na, J. W. Seo and S. K. Han, "Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsula", J. of Oceanol. Soc. Korea, 27(1) 1-10, 1992.
4. S. H. You, "A Numerical Study of the Kuroshio system Southwest of Japan" Ph.D. dissertation, University of Kyushu, 2005.
5. E. Lamarre, W. K. Melville, "Sound-speed measurements near the ocean surface", J. Acoust. Soc. Am., 96 3605-3616, 1994.
6. E. Terrill, W. K. Melville, "Sound-speed measurements in the surface-wave layer", J. Acoust. Soc. Am., 102 2607-2625, 1997.
7. D. M. Farmer, S. Vagle, "Waveguide propagation of ambient sound in the ocean- surface bubble layer", J. Acoust. Soc. Am., 86 1897-1908, 1989.
8. J. C. Novarini, R. S. Keiffer, G. V. Norton, "A Model for Variation in the Range and depth dependence of the sound speed and attenuation induced by bubble cloud under wind-driven sea surfaces", IEEE J. Ocean Eng., 23 423-438, 1998.
9. M. V. Hall, "A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40kHz", J. Acoust. Soc. Am., 86 1103-1117, 1989.
10. R. S. Keiffer, J. C. Novarini, G. V. Norton, "The impact of the background bubble layer on reverberation-derived scatterin strengths in the low to moderate frequency range", J. Acoust. Soc. Am., 97 227-234, 1995.
11. J. Wu, "Bubbles in the near-surface ocean : a general description" J. Geophys. Res. 93 (C1), 587-590, 1988.
12. J. A. Knass, *Introduction to physical oceanography* (Prentice Hall, New jersey, 1997), Chap 9.

저자 약력

• **이 원 병 (Wonbyoung Lee)**



2001년 3월 : 해군사관학교 해양학과 (이학사)
 2005년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 해양환경과학과 대학원 (석사과정)
 * 주관심분야 : 올파전달, 소나말지 생성, 기포

• **김 영 신 (Youngshin Kim)**

1997년 2월 : 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 1997년 3월 ~ 2004년 8월 : 한양대학교 지구해양학과 대학원 (이학석사)
 2004년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 해양환경과학과 대학원 (박사과정)

• **주 종 민 (Jongmin Joo)**

2005년 2월 : 한양대학교 해양환경과학과 (이학사)
 2005년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 해양환경과학과 (석사과정)

• **이 창 원 (Changwon Lee)**

1999년 2월 : 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 1999년 3월 ~ 2002년 2월 : 한양대학교 지구해양학과 대학원 (이학석사)
 2002년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 해양환경과학과 대학원 (박사과정)

• **나 정 열 (Jungyul Na)**

한국해양학회지 제21권 8호 참조