

# 음속 확산을 이용한 잘피(거머리말) 서식지의 기공률 추정

## Estimation of Void Fraction in the Seagrass (*Zostera Marina*) Bed Using Sound Speed Dispersion

라 형 술\*, 나 정 열\*, 이 성 미\*  
(Hyoungsul La\*, Jungyul Na\*, Sungmi Lee\*)

\*한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2006년 9월 19일; 수정일자: 2007년 10월 31일 채택일자: 2007년 11월 25일)

공기방울에 의한 음속 확산 (sound speed dispersion)을 측정하여 잘피 서식지에서 광합성시 발생하는 기공률을 추정하였다. 해상 실험은 니질로 구성된 거머리말 서식지에서 광합성이 활발한 주간과 상대적으로 덜 활발한 야간에 실시되었고 120 kHz 정현파 음원을 이용하여 잘피 서식지로부터 후방산란된 음향 신호를 획득하였다. 실험 결과 잘피 서식지로부터 수신된 신호의 도달 시간이 주/야간 차이가 있음을 확인하였고 도달 시간의 변화는 잘피의 광합성에 의해서 발생하는 공기방울에 의한 음속 확산이 원인임을 추정할 수 있었다.

**핵심용어:** 잘피, 공기방울, 음속 확산, 기공률, 광합성

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.2)

Void fraction of air bubble in the seagrass bed by photosynthesis was estimated with sound speed dispersion. A field experiment was conducted at Seagrass bed of which bottom type is sandy mud and 120 kHz CW waveform was transmitted to obtain backscattered signals from seagrass bed. The differences of the arrival time of received signal from seagrass bed were observed between day and night. The diurnal variation of arrival time was caused by sound speed dispersion of air bubble generated by photosynthesis of seagrass.

**Key words:** Seagrass, Air bubble, Sound speed dispersion, Void fraction, Photosynthesis

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.2)

### I. 서론

해양의 경계면 (해수면, 해저면)과 체적내의 산란체 (생물 군집, 부유 물질, 공기방울 등)는 수중 음파 산란에 많은 영향을 미치는 요소들이며 그 중 체적산란은 시·공간적인 변동성이 크게 나타난다. 특히 해상풍에 의해 발생하는 미세 공기방울의 공진현상 및 공기방울 군집이 체적산란강도에 많은 영향을 끼치며 다량의 공기방울은 해수 중에 방사된 음파의 흡수 및 산란, 음압의 변위, 수신 신호의 위상 변화, 스펙트럼 확산, 음속 확산 등을 야기시켜 음 전달 특성에 영향을 준다 [1-3]. 해양

에서의 공기방울은 다양한 환경의 원인으로 존재한다. 외해의 해수면 부근에 존재하는 대부분의 공기방울은 강우 (rainfall), 붓고파 (spilling wave), 권파 (plunging wave)에 의해서 주로 발생되며, 연안 지역에서는 잣은 선박 통행, 인공 구조물에 의한 쇄파, 유기 물질의 분해, 해저면 내의 가스층으로부터의 분출 등으로 인해 외해에 비해 공기방울의 생성이 활발하다. 특히 내만은 많은 양의 해양 식물이 존재하기 때문에 광합성 작용이 활발하여 외해보다 연안의 공기방울 양이 많은 원인이 된다. 공기방울의 특성과 관측을 위한 연구는 Glotov et al. (1962)이 파쇄에 의한 발생하는 공기방울 크기의 분포를 통계적인 접근을 시도함으로써 처음 관측한 [4] 이래로 많은 연구가 진행되었다. Medwin (1977)은 공기방울의 밀도 및 크기 분포를 음향학적인 관측방법을 통하여 수

책임저자: 라 형 술 (hsla@hanyang.ac.kr)  
425-791 한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실  
경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지,  
(전화: 031-400-4233; 팩스: 031-502-6068)

심, 계절, 풍속 등과 같이 다양한 환경 변화에 따라서 측정하였다 [5]. Wu는 공기방울 발생 기작과 풍속이 변화함에 따라서 발생하는 공기방울 밀도 및 크기에 따른 분포를 수심별로 관측하였으며 공기방울 밀도에 대한 실험식을 제시하였다 [6-7]. Johnson (1979)은 음향학적인 방법 대신 광학적인 방법 (사진)을 적용하여 수심에 따른 공기방울의 분포 및 개수를 추정하였다 [8]. 사진을 이용한 광학적인 방법은 해양의 부유 물질이 없는, 즉 탁도가 낮은 깨끗한 환경에서만 적용이 가능한 제한점을 가지고 있다. 이와 같이 공기방울의 발생 원인과 공기방울의 분포 측정을 위한 연구가 많이 진행되었다. 하지만 이들 대부분의 연구는 풍속, 파쇄에 의해서 발생하는 공기방울 분포에 대한 연구이고 연안 공기방울 형성의 중요 요인 중 하나인 해양 식물의 광합성에 의해서 발생하는 공기방울의 분포에 대한 연구는 미비한 실정이다. 광합성에 의해서 발생하는 공기방울이 음파 산란에 끼치는 영향을 저주파와 고주파 대역에서 확인한 바 있지만 공기방울의 양을 추정하지는 못하였다 [9-12]. 본 연구에서는 해양 식물 중 해양의 경제적/생태적으로 중요한 가치를 지니고 있는 잘피 (거머리말) 서식지를 선택하여 광합성 시 발생하는 공기방울이 음파에 끼치는 영향을 관측하였으며 서식지의 기공률 (단위 체적의 해수 내 기체가 차지하는 부피)을 추정하였다.

## II. 이론

공기방울이 존재하는 해수에서의 음속 변화는 주변 해수의 밀도와 매질의 압축성에 의존한다. 이때 압축성은 공기방울이 존재하지 않는 해수내 (bubble-free water)에서의 압축성과 공기방울 자체의 압축성을 포함한다. 그리고 공기방울을 포함하는 해수내 평면파 (plane wave)의 진행은 입사파 음의 세기와 감쇠를 나타내는 허수 부분, 그리고 고정 위상 표면 (constant phase surface)을 진행하는 음파의 파수를 표현하는 실수 부분으로 정의된다. 음속 ( $\frac{\omega}{k_r}$ )을 단위 체적당 공기방울 형태의 기체가 차지하는 비, 기공률 (void fraction ;  $U = N\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)$ )을 이용하여 주파수의 함수로 표현하면 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\operatorname{Re}\{c\} = \frac{\omega}{k_{re}} = c_0 \left\{ 1 - \left[ \frac{(Y^2 - 1)}{(Y^2 - 1) + \delta^2} \right] \left[ \frac{3UY^2}{2a^2 k_r^2} \right] \right\} \quad (ka < 1) \quad (1)$$

$$k_R = \frac{\omega_R}{c_0} : \text{wave number at resonance}$$

$$Y = \frac{\omega_R}{\omega} : \text{the frequency ratio}$$

$$\delta = \frac{R_M}{(\omega m)} : \text{the damping constant}$$

( $R_M$  = mechanical resistance ;  $m = 4\pi a^3 \rho_A$  ; the effective mass)

여기서  $a$ 는 공기방울의 반경,  $\rho_A$ 는 매질의 밀도이며 음속은 사용 주파수 ( $f$ )와 공진 주파수 ( $f_R$ )의 비에 따라서 식 (2) 과 같이 표현된다 [2].

$$C_f = c_0 \left( 1 - \frac{3U}{2a^2 k_r^2} \right) ; f \ll f_R \quad (2)$$

Wood's equation은 사용 주파수가 공진 주파수에 비해 작을 때 그리고 공기방울의 크기와 그에 따른 밀도 분포를 정확히 파악할 수 없을 때 기공률을 계산할 수 있는 방정식으로서 아래와 같이 정의된다 [2].

$$C_f = \sqrt{\frac{E_A}{\rho_A}} = \sqrt{\frac{E_b E_w}{[UE_w + (1-U)E_b][U\rho_b + (1-U)\rho_w]}} \quad (3)$$

$$\rho_A = U\rho_b + (1-U)\rho_w$$

$$\frac{1}{E_A} = \frac{U}{E_b} + \frac{1-U}{E_w}$$

$E_b$  : bulk moduli of elasticity of air

$E_w$  : bulk moduli of elasticity of water

$E_A$  : average elasticity

$U$  : the fraction of air by volume

$(1-U)$  : the fraction of water by volume

여기서  $\rho_A$ 는 평균 밀도,  $\rho_b$ 는 공기방울의 밀도,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도를 의미한다.

## III. 해상 실험 및 분석

해상 실험은 2004년 2월 25~29일 기간중 남해 동대만에서 실시하였다 [10]. 실험 해역은 조간대 지역으로 수심은 만조시 4 m 였으며 실험 기간 중 해상 상태는 주

/야간 모두 파고 0.5 m 이내로 양호하였다. 실험을 위해 제작된 다중 주파수 송·수신 장치를 방파제에서 약 20 m 떨어진 곳에 위치시켰고 해저면에서 2 m 높이에서 수직 하방으로 지향시켰다. 120 kHz 단일 주파수를 이용하여 만조를 기준으로 약 1 시간 동안 잘피의 후방산란 신호를 주/야간동안 송·수신하였다. 음원 신호는 펄스 길이가 0.4 ms인 정현파 신호를 사용하였고, 0.5 초 간격으로 송·수신하였다. 환경 인자는 CTD (SBE 19)와 파고계 (WTR 9)를 이용하여 음속 구조 및 주/야간 파고를 측정하였고 그랩 (Grab)으로 상부 5 cm의 해저 퇴적물 시료를 채취 후 4  $\phi$  이하는 습식 체질법 (wet sieving)을 4  $\phi$  이상은 피펫팅 (pipetting)을 이용하여 입도 분석을 실시하였다 [13]. 그리고 용존 산소계 (dissolved oxygen meter)를 이용하여 주/야간 용존 산소량을 측정하였다. Table 1은 관측된 환경 인자를 보여준다. 모든 환경 인자 (온도, 염분, 음속 등)들이 주간과 야간 크게 차이가 나지 않았고 용존 산소량만이 주간 6.3 ppm, 야간 5.4 ppm 으로 큰 차이를 보였다.

해저면과 잘피로부터의 수신 신호는 고주파 필터를 사용하여 주변 소음의 영향을 제거하였고 A/D 변환기를 거쳐 저장하였다. 거머리말 서식지에서 주/야간 공기방울 밀도 변화에 따른 음향 신호 변화는 각각의 신호에 앙상블 평균을 취하고 송·수신 거리를 보정한 후 잔향음 준위로 환산하여 주간과 야간의 음향 신호 특성을 비교하였다. 음속 확산은 해저면으로부터 일정한 거리에 위치해 있는 수신기로 돌아오는 신호의 도달 시간을 속도로 환산함으로써 주/야간의 음속 변화를 관측하였다.

#### IV. 결과

그림 1 (a)는 거머리말 서식지에서 주간에 획득한 30 pings의 후방산란 신호이다. 해저면 위에 존재하는 거머리말에 의한 신호가 2.1 msec에서 2.8 msec 사이에 수신되며 그 후 2.8~3.2 msec 해저면 후방산란 신호가 가장 강하게 수신되었다. 그림 1 (b)는 30 pings의 시계열 신호를 잔향음 준위로 환산한 후 거리에 대한 손실을 보정하였다. 그림 1 (a)에서와 같이 2.8~3.2 msec 에 가장 강한 해저면 산란 신호가 수신되며 그전에 약 0.7 msec 동안 거머리말에 의한 신호를 보여주고 있다.

그림 2는 야간에 획득한 거머리말 서식지의 후방산란 신호의 시계열 신호와 잔향음 준위이다.

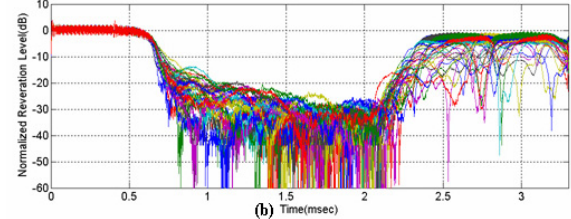
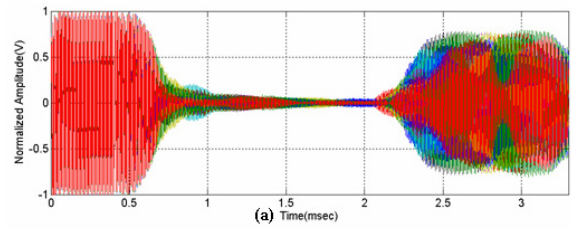


그림 1. 주간의 거머리말 서식지에 대한 후방산란 시계열 신호 (a), 잔향음 준위 (b)

Fig. 1. Time series signal (a) and reverberation level (b) from *Zostera marina* bed for day.

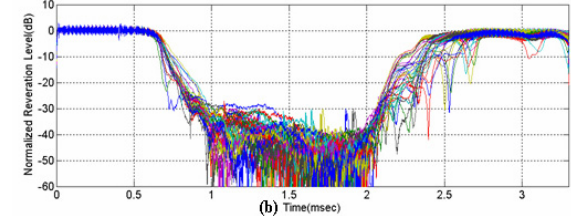
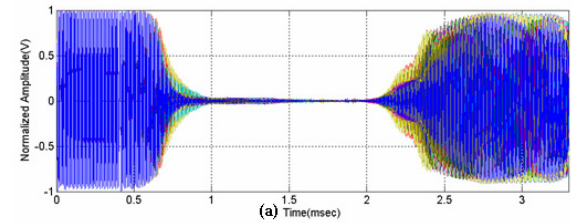


그림 2. 야간의 거머리말 서식지에 대한 후방산란 시계열 신호 (a), 잔향음 준위 (b)

Fig. 2. Backscattering time series signal (a) and reverberation level (b) from *Zostera marina* bed for night.

주간의 후방산란 신호와 동일한 시간대에서 거머리말과 해저면 신호가 수신되었지만 해저면의 수신 음압을 비교해 볼 때 30 pings 모두 전반적으로 야간이 주간에 비해서 높게 측정되었다. 반면 0.8~2.1 msec에 수신된 신호, 즉 송·수신기와 거머리말 사이의 수중에서 후방산란된 신호의 잔향음 준위의 변화는 야간에 비해 주간에 상대적으로 높게 나타나고 신호의 변동성 또한 크게 관측되었다.

그림 3은 주간과 야간에 획득한 수신 신호 30 pings을 각각 앙상블 평균 취한 후 잔향음 준위로 환산하여 비교한 결과이다. 송신기와 잘피 사이 (0.8~2.1 msec)의 수중에서 후방산란된 잔향음 준위는 주간이 야간에 비해 높게 나타나는 반면 해저면의 잔향음 준위는 주간이 야간에 비해 낮음을 확인할 수 있다. 시간 (주/야간)에 따른 변화를 제외하고 모두 동일한 환경에서 관측한 신호

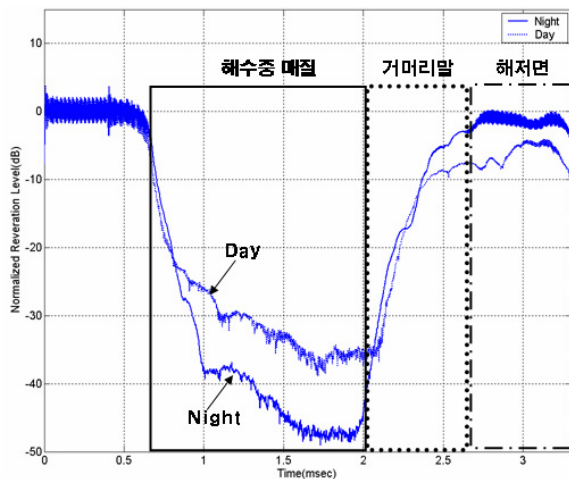


그림 3. 주/야간 잔향음 준위 비교 (수직 입사각 90도)  
Fig. 3. The reverberation level for day and night (grazing angle 90°).

에서 이와 같은 잔향음 레벨의 차이는 음파 산란에 가장 크게 영향을 끼치는 공기방울에 의한 영향으로 추정할 수 있다. 낮에는 광합성에 의해서 발생하는 다량의 공기방울이 송수신기와 잘피 서식지 사이에 (0.8~2.1 msec) 존재하기 때문에 주간의 잔향음 준위가 야간에 비해 높게 나타난다. 그리고 수중에 공기방울이 존재하게 되면 해저면으로 향하는 음파의 감쇠 또한 크기 때문에 해저면의 잔향음 준위는 주간이 야간보다 낮게 나타나게 된다.

잘피 서식지의 광합성시 발생하는 공기방울의 존재를 확인하기 위해서 제주도 하도리에 분포하는 거머리말 서식지에서 광합성이 활발한 주간에 사진 촬영을 실시하였다 (그림 4).

그림 4 (b)에서 광합성시 잘피 앞에 붙어있는 공기방울을 확인할 수 있으며 그림 4 (a)에서는 앞에서 떨어진 다량의 공기방울이 해수 중에 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.

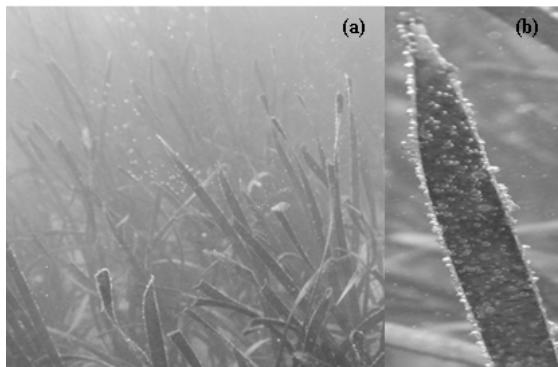


그림 4. 거머리말 서식지에서 광합성 시 생성된 공기방울  
Fig. 4. Bubbles by photosynthesis from *Zostera marina* bed.

표 1. 환경 인자

Table 1. Environmental parameters.

|             | 주간        | 야간     |
|-------------|-----------|--------|
| 수심(m)       | 4.0 (만조)  |        |
| 평균 입도(Ø)    | 6.0 (사니질) |        |
| 온도(°C)      | 8.0       | 7.5    |
| 염분(psu)     | 33.0      | 33.0   |
| 음속(m/sec)   | 1480.0    | 1479.6 |
| 용존 산소량(ppm) | 6.3       | 5.4    |

수중에 존재하는 공기방울 군집은 산란 신호의 크기 뿐만 아니라 수신 신호의 주파수 확산을 야기시키기 때문에 주파수 확산정도를 주/야간 비교함으로써 공기방울 밀도의 차이를 확인할 수 있다. 최 등 (2000)은 공기방울이 많이 존재할 때와 상대적으로 작을 때의 해수면 후방산란 신호를 획득한 후 주파수 확산을 비교하여 공기방울 양이 주파수 확산에 영향을 끼침을 확인한 바 있다 [3]. 그림 5는 광합성에 의해서 발생하는 공기방울에 의한 주파수 확산 정도를 주/야간 비교하기 위하여 수신 신호 (그림 5(a))로부터 잘피와 해저면 산란 이전의 산란 신호를 분리한 후 주파수 분석 (그림 5(b))을 실시한 결과이다.

주파수 분석 결과 주간과 야간 모두 120 kHz 중심 주파수를 가지지만 주간의 스펙트럼 레벨이 전체적으로 야간에 비해 높게 나타나고 주간의 주파수 확장폭이 야간보다 넓게 측정되었다. 지금까지 잘피 서식지의 광합성시 발생하는 공기방울의 존재를 수중카메라로 확인하였으며 음압 변위와 주파수 스펙트럼 준위의 확산 정도로부터 잘피 서식지의 주/야간 공기방울의 양이 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

그림 6은 만조부터 약 1 시간 동안 잘피와 해저면으로부터 후방산란된 신호의 도달 시간을 거리 (수심)로 환

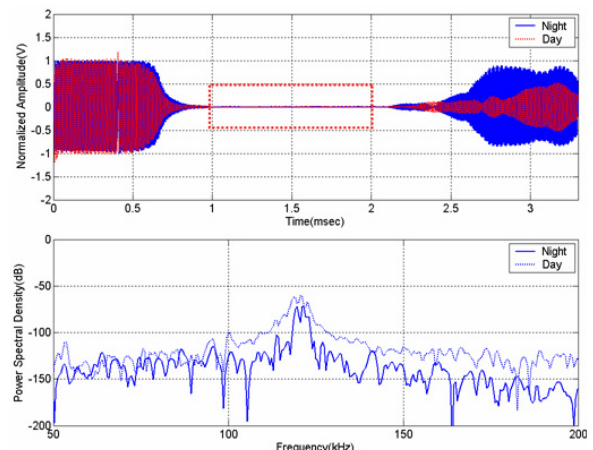


그림 5. 주/야간 후방산란 신호의 전력 스펙트럼 밀도  
Fig. 5. Power Spectral Density of the backscattering signal for day and night.

산란 결과의 시간에 따른 분포 (a)와, 산란된 수심의 주야간 확률밀도함수이다 (b). 거리를 환산하기 위하여 주간과 야간에 관측한 음속을 적용하였으며 (표 1) 수신된 산란 신호 (0.4 msec)의 최대값을 갖는 시간에 주간과 야간의 음속을 곱하여 거리 (수심)로 환산하였다. (a)에서 보듯이 야간의 경우 해저면으로부터 산란된 신호가 수심 2.1 m 지점에서 시간에 따라서 일정하게 측정되었다. 반면에, 주간은 수심의 분포가 야간에 비해 매우 불규칙적이게 관측되었다. (b)는 (a)의 시간에 따른 수심의 변화 분포를 주/야간 확률밀도함수로 표현하였다. 점선이 나타내는 야간은 수심 2.1 m 지점에서 후방산란된 신호의 분포가 지배적이며 0.13의 표준편차를 가지는 확률 분포를 보인다. 1.9, 2.3 m 거리에서 나타나는 분포는 빔폭이 9.6° 인 부엽 (side lobe)에 의한 영향이다. 주간의 확률 분포 역시 주엽 (main lobe)과 부엽 (side lobe)

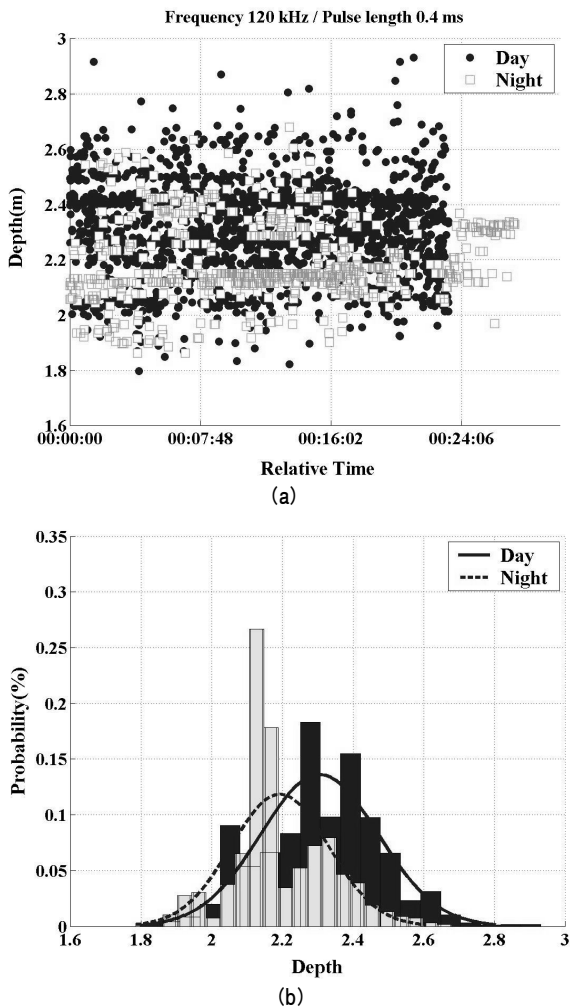


그림 6. 시간에 따른 주야간 산란체의 수심 변화 (a), 주야간 산란체 수심 변화에 따른 확률밀도함수 (b)  
 Fig. 6. Depth difference of the scatters with time for day and night (a), Probability density function of depth differences of the scatters for day and night (b).

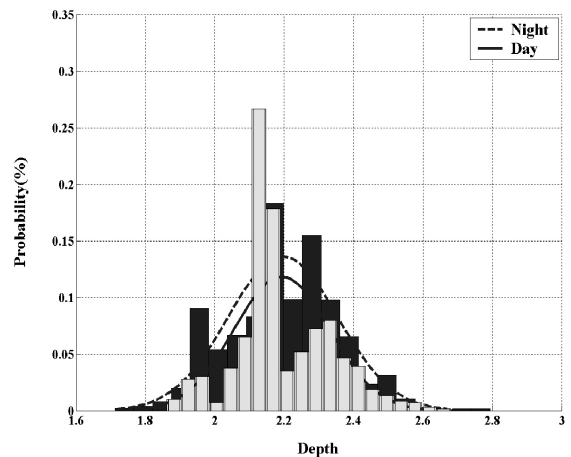


그림 7. 야간 산란체 수심 변화의 확률밀도함수와 음속 확산을 적용한 주간 산란체 수심 변화의 확률밀도함수  
 Fig. 7. Probability density function of depth differences of the scatters at night with changed sound speed at day (Day: 1410 m/s, Night: 1480 m/s).

에 의해 잘피와 해저면으로부터 수신된 신호의 수심 분포는 야간과 동일하게 관측되었지만 표준편차가 1.00로써 수심 변위가 야간보다 크게 나타났고 도달 거리에서 실제 수심보다 0.2 m 정도의 차이를 보였다. 동일한 실험 환경에서 주/야간 표준편차의 차이와 시간 지연은 잘피와 해저면 이외에 음파 산란을 유발시킬 수 있는 산소 공기방울의 영향과 그로 인한 음속 확산으로 추정할 수 있다.

그림 7은 다량의 공기방울이 존재하는 주간의 음속을 1410 m/s로 보정하여 표현한 산란된 수심의 주/야간 확률밀도함수이다. 주간의 음속을 보정한 결과 표준편차의 차이는 여전히 야간에 비해 크게 나타나지만 주엽과 부엽에 의해 산란된 잘피와 해저면으로부터의 신호 분포가 주/야간 잘 일치함을 보였다. 해수 내에 존재하는 공기

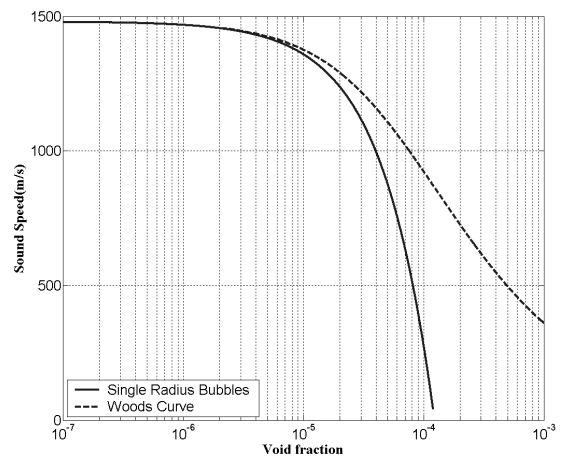


그림 8. 기공률에 따른 음속 확산 (직선 : 단일 크기의 공기방울, 점선 : Wood's curve)  
 Fig. 8. Sound speed dispersion with void fraction (solid line : single radius bubbles, dashed line: Wood's curve).

방울은 단위 체적내 존재하는 빈 공간, 즉 공기방울의 양을 나타내는 기공률 (void fraction)을 측정함으로써 간접적으로 표현될 수 있고 기공률과 음속과의 상관관계식을 이용하여 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 실선은 단일 크기의 공기방울이 존재한다고 가정할 때 공기방울에 대한 기공률과 음속의 관계를 나타내며, 다양한 크기의 공기방울이 존재할 때 사용되는 wood's equation을 사용하여 실선으로 표현하였다. Wood's equation에 대한 음속확산을 1410 m/s로 적용했을 때 기공률은  $6.5 \times 10^{-6}$ 로 추정할 수 있다. 따라서 광합성시 잘피 서식지에서 발생하는 기공률은  $O(10^{-6})$ 에 해당한다.

## V. 결론 및 고찰

본 논문에서는 주파수 120 kHz 능동 소나를 사용하여 잘피 서식지에 광합성시 분포하는 공기방울에 의한 음파 산란 특성과 기공률을 추정하였다. 잔향음 준위 비교 결과 0.8~2.1 msec 구간 (송신기와 잘피 사이)의 잔향음 준위는 주간이 야간에 비해 높게 관측되었으며 해저면 잔향음 준위는 야간이 주간보다 높게 관측되었다. 그리고 잘피 서식지에 분포하는 공기방울의 존재를 확인하기 위하여 사진 촬영과 주파수 확산 분석을 실시하였다. 사진을 통해서 광합성이 활발한 주간에 잘피 표면에 붙어 있는 공기방울과 수중에 존재하는 다량의 공기방울을 확인하였으며 공기방울이 상대적으로 많이 분포하는 주간의 주파수 스펙트럼 크기와 확산 폭이 야간에 비해 넓게 나타남을 확인하였다. 즉, 광합성에 의한 영향으로 주간이 야간에 비해 공기방울의 양이 많아지는 것을 확인할 수 있었다. 환경 자료로 관측한 용존 산소량 또한 주간이 야간에 비해 높게 측정되었다.

음속 확산은 해저면과 잘피로부터 수신되는 산란 신호의 주/야간 도달 시간의 차이를 분석함으로써 측정하였고 기공률과 음속 확산의 관계식을 통하여 잘피 서식지의 기공률을 추정하였다. 하지만 사용된 기공률과 음속 확산에 대한 이론식은 표면 장력, 에너지 흡수, 열 손실 등은 없다고 가정하고 해수와 공기방울의 탄성률과 밀도 차이를 고려한 간단한 관계식을 사용하였다. 즉 공기방울과 음속 변화의 정확한 물리적인 현상을 고려하지 못하기 때문에 그에 따른 이론식의 오차가 발생할 수 있으며 추후 이를 고려할 수 있는 이론에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문을 통해 잘피 서식지에서 광합성시 발생하는 공기방울은 음 전달에 영향을 미칠수 있음을 확인할 수 있었으며 향후 잘피 서식지에서의 주파수별, 수평 입사 각별 산란 특성과 잘피 형태 변화에 따른 산란 특성에 대한 연구가 요구된다. 또한 다양한 주파수의 음속 확산 및 감쇠등을 관측함으로써 해초 서식지에서 광합성시 발생하는 공기방울의 양 및 분포를 추정하는 연구가 진행되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-1658-0) 지원으로 수행 되었음.

## 참고 문헌

1. S. T. McDaniel, "Sea surface reverberation: A review", J. Acoust. Soc. Am. **94** (4), 1905-1922, 1933.
2. H. Medwin, C.S. Clay, *Acoustical Oceanography*. (John Wiley & Sons, New York, 1998)
3. 최지웅, 나정열, 조운현, "내만에서의 해수면 후방산란신호 특성", 한국음향학회 논문집, **19** (2), 46-52, 2000.
4. Glotov, V. P., et al., "Investigation of the scattering of sound by bubbles generated by and artificial wind in seawater and statistical distribution of bubble sizes," Sov. Phys. Acoust. **7**, 341-345, 1962.
5. Medwin, H., "In situ measurements of microbubbles at sea", J. Geophys. Res. **82**, 971-76, 1977a.
6. Jin Wu, "Bubble Populations and Spectra in Near Surface Ocean: Summary and Review of Field Measurements", J. Geophys. Res., **86**, 457-463, 1981.
7. Jin Wu, "Bubbles in the Near Surface Ocean: A General Description", J. Geophys. Res., **93**, 587-590, 1988.
8. B.D. Johnson, R.C. Cooke, "Bubble population and spectra in coastal waters: A photographic approach", J. Geophys. Res., **84**, 3761-3766, 1979.
9. 이재혁, 윤관섭, 라형술, 나정열, "수중음향을 이용한 잘피 서식지 분포 관측", 한국음향학회 학술 발표대회 논문집 **23**, 1(s), 187-190, 2004.
10. 라형술, 윤관섭, 나정열, "거머리말(잘피) 서식지의 고주파 후방산란 특성", 한국음향학회 학술 발표대회 논문집 **24**, 2(s), 97-102, 2005.
11. Jean Pierre Hermand, Pamela Nascetti, Francesco Cinelli, "Inversion of Acoustic Waveguide Propagation Features to Measure Oxygen Synthesis by Posidonia oceanica", Proc. Of IEEE, 919-926, 1998.
12. Jean Pierre Hermand, "The effect of photosynthesis bubbles on underwater sound propagation", The 18th ICA, April, 2515-2518, 2004
13. 박용안, *해양지질학 및 퇴적학 실험*, (1982)

---

## 저자 약력

---

- 라형술 (Hyoungsul La)

한국 음향학회지 제24권 제2호 참조

- 나정열 (Jungyul Na)

한국 음향학회지 제21권 제8호 참조

- 이성미 (Sungmi Lee)

2002년 한양대학교 지구해양학과(이학사)

2004년 한양대학교 지구해양학과(석사)

2004년~현재 한양대학교 해양환경과학과 박사 재학중

※ 주관심분야: 해양연안생태, 해초류