

잘피 서식지의 분포와 광합성에 의한 고주파 후방산란 특성

Distribution of Seagrass (*Zostera marina*) Beds and High Frequency Backscattering Characteristics by Photosynthesis

이 재 혁*, 윤 관 섭*, 라 형 술*, 나 정 열*

(Jae-Hyuk Lee*, Kwan-Seob Yoon*, Hyoung Sul La*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양학과 해양음향연구실

(접수일자: 2004년 8월 20일; 수정일자: 2004년 10월 18일; 채택일자: 2004년 10월 28일)

연안에서 잘피 (Seagrass) 서식지의 분포와 광합성에 의한 후방산란 특성 관측을 위한 실험을 실시하였다. 해저면이 니질로 구성된 잘피 서식지에서 수평입사각 및 방위각에 따른 음향신호를 획득하였으며, 120 kHz 정현파 음원을 이용하여 신호를 송수신 하였다. 잘피의 후방산란강도를 이용하여 수평입사각 및 방위각에 따른 잘피 서식지의 분포를 지도화 하였으며 서식지에 대한 후방산란강도 분포와 촬영을 이용한 실제 잘피의 서식지를 비교한 결과 비슷한 분포를 관측할 수 있었다. 또한 잘피의 광합성에 의해 생성되는 산소 공기방울의 음파산란을 분석하기 위해 주·야간별 잘피의 후방산란강도를 비교한 결과, 산소 공기방울의 음파산란 영향으로 인해 잘피 서식지의 분포관측에 차이가 있음을 확인하였다.

핵심용어: 잘피 후방산란, 광합성, 공기방울 감쇠, 시간분산

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

An experiment for observation of the distribution of the seagrass (*zostera marina*) beds and characteristics of high-frequency backscattering by the photosynthesis was conducted off the coast. Acoustic data were taken as a function of the grazing angles and the relative azimuth angles on the seagrass beds of which bottom type was sandy-mud. The transmitted source signal was a 120 kHz CW waveform. Mapping of the seagrass beds distribution was drawn up using the seagrass backscattering strength with azimuth and grazing angles. The result of the comparison backscattering strength distribution of the seagrass beds was shown to be the similar to the photograph of real seagrass beds. The seagrass backscattering strength was also compared between day and night to verify the effects of the acoustical scattering by the bubbles of photosynthetic oxygen formed on the seagrass. In these results, it is clear that observation of the seagrass beds between day and night showed the different characteristics because the bubbles of photosynthetic oxygen affect the acoustical scattering.

Keywords: Seagrass backscattering, Photosynthesis, Bubble attenuation, Time dispersion

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.1)

I. 서론

천해에서의 해저면에 대한 음파산란 연구는 경계면에 서의 음파산란 특성을 파악하기 위해 고주파를 이용한 단상태 해저면 산란특성 연구[1]와 양상태 해저면의 산

란특성 연구[2,3], 그리고 해저면의 반사손실을 이용한 해저면 구성분류 연구[4]와 퍼지이론을 접목시킨 해저면 구성분류 연구[5] 등 많은 해저면 음파전달 특성에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 해저 퇴적층의 연구를 위해서는 해저면 구성 물질의 분류가 선행되어야 하며 이를 위해서 천해 해저면의 경우에는 식물체의 서식에 대한 분류도 함께 실시되어야 한다. 하지만 해저면 구성성분 분류에 있어 식물체에 대한 음향특성 연구를

적용한 해저면 구성분류 연구가 미흡한 실정이므로 본 연구에서는 연안에 서식하는 식물체 중 잘피 (Seagrass : 그림 1)의 음향학적 관측을 통하여 해저면 구성성분의 하나인 잘피에 의한 음파산란이 음파전달을 변화시키는 특성을 연구하고자 한다.

잘피는 해조류와 구별되는 다년생 고등현화 식물로서 전세계 해양연안에 약 50여종이 분포되어 있으며 해양의 경제적 가치와 생태적 가치를 함께 지니고 있는 기초 생산자이다[6-9]. 기존의 여러 가지 잘피 분포 관측방법 중 대표적인 것은 시공간적으로 제약이 갖는 스쿠버를 통한 조사방법과 넓은 지역에 대한 분포관측은 가능하나 해수면의 상태와 광량에 따른 제한이 있는 항공사진 촬영방법이 있다[10]. 본 논문에서는 두 가지 방법에 비해 넓은 지역의 관측과 시공간적 제한을 줄이고 실시간으로 지속적인 관측을 위해 잘피로 인한 음향학적 특성을 관



(a)



(b)

그림 1. 잘피(*Zostera marina*)의 군집사진

(a) 잘피의 군집형태

(b) 잘피 줄기의 공기방울

Fig. 1. Picture of seagrass(*Zostera marina*) meadow

(a) Shape of the seagrass meadow

(b) Bubbles on the seagrass shoot

측하였다. 본 연구에서 제안하는 관측방법은 잘피 이외의 산란체 (어군, 부유물질 등)에 대한 영향을 받을 수 있다는 단점이 있으나 이러한 제한점은 환경자료 (조석, 수온, 부유물질량 등)와의 상관관계 연구를 통하여 분석이 가능하다.

현재까지 국내에서는 잘피 분포의 음향학적 관측에 관한 연구가 거의 전무한 실정이나 국외에서는 음향을 이용한 잘피의 계절별 성장과 분포 관측, 그리고 잘피의 광합성에 의해 생성된 공기방울의 음파산란 연구 등이 수행되고 있다[11-15]. Bruce M. Sabol 등은 420 kHz 고주파 음원을 이용하여 잘피 서식지를 음향학적 방법으로 관측함으로써 잘피의 계절별 성장변화와 서식지의 분포양상 관측을 통한 시공간적인 변화를 연구하였지만 잘피의 광합성에 의한 음파전달의 변화는 고려하지 않았다 [11]. Hermand는 0.1~1.6 kHz 저주파 음원을 이용하여 잘피의 광합성으로 생성된 산소 공기방울에 의한 음파산란과 음속변화, 그리고 시간분산 (Time dispersion)현상의 일주기 관측을 통해 공기방울이 음파전달에 미치는 영향을 연구 하였으며, 잘피 광합성에 의한 산소공기방울의 음파산란 영향이 잘피의 분포관측에 어떤 변화를 야기시키는가에 대한 연구 동기를 제시하였다[12]. 잘피를 비롯하여 엽록소를 지닌 해수 중의 모든 식물은 광합성을 통한 기체교환으로 해수 중의 용존산소량 변화를 야기시킨다. 산소 포화량의 변화에 의한 산소 과포화는 해수 중의 공기방울을 증가시키며 이러한 공기방울이 음속의 변화와 음파산란에 영향을 미친다[13]. D. Rouseff 등은 공기방울의 양과 크기에 따라서 음파전달이 어떻게 변하는지 연구하기 위하여 역조 (Rip current)에 의한 공기방울층 (bubble clouds) 내에서의 음파산란 영향을 연구하였으며, 공기방울에 의한 주파수별 감쇠계수를 산출하여 공기방울층의 밀도와 공기방울 크기를 역산할 수 있는 가능성을 확인하였다[14].

잘피는 군사적으로도 중요한 연구대상이 되는데, Elena M. McCarthy는 해저기뢰 탐지 소나 (Mine hunting sonar : 100 kHz)를 이용한 잘피 서식지 내의 기뢰 탐지 시 잘피로 인한 음파산란의 영향으로 잘피의 은닉 효과 (Masking effect)에 의해 기뢰 탐지가 어려움이 있음을 연구하였다[15]. McCarthy의 연구는 군사적으로 중요한 연안에서의 기뢰부설 및 소해 (Mine Hunting)에 있어 잘피에 의한 음파산란 분석의 필요성을 제시하고 있으나 잘피의 광합성에 의해 생성되는 공기방울의 영향에 관한 탐지 문제점의 연구는 실시하지

않았다.

본 연구에서는 120 kHz 고주파 음원을 이용하여 잘피 서식지 분포의 지도화를 시도하였으며 광합성에 의해 생성된 공기방울이 잘피 분포 관측에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 잘피 서식지의 생산성 변화 관측을 위하여 주·야간별 산란강도의 차이를 이용, 주간과 야간에 대한 감쇠효과의 역산으로 잘피 건강상태 측정 기법을 연구하였다.

본 논문의 2장에서는 해상실험의 방법을 설명하고 3장에서는 주·야간 산란특성 비교를 위한 자료분석 및 잘피 서식지 분포의 지도화 방법을 제시한다. 마지막 4장에서는 결론 및 차후 연구과제에 대해서 논하고자 한다.

II. 해상실험

잘피 서식지 분포 관측을 위해 2004년 2월 25일부터

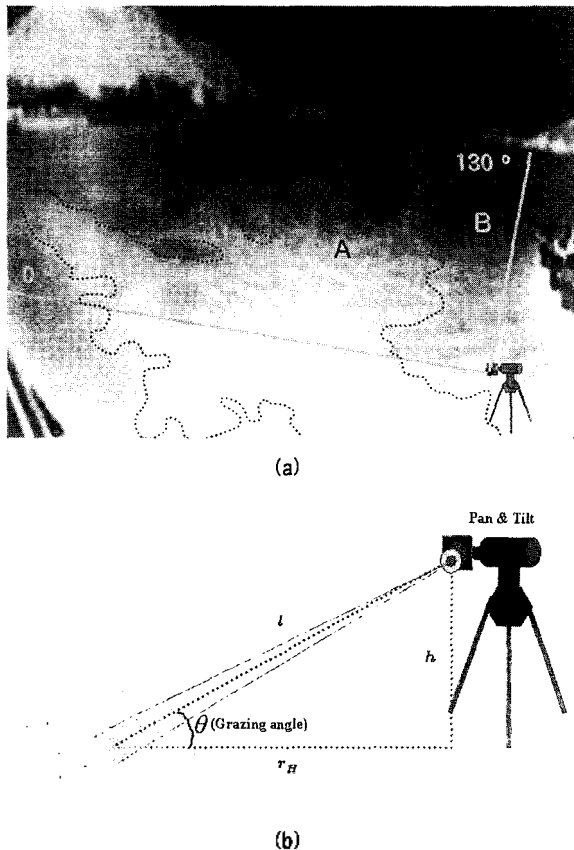


그림 2. (a) 실험해역의 잘피 서식지(A : 잘피 서식지, B : 비서식지), (b) 실험 구성도
 Fig. 2. (a) Seagrass beds of the experiment site(A : Seagrass beds, B : Non seagrass beds), (b) Experimental layout.

29일까지 경상남도 남해시 창선면 동대리 곤류방파제(그림 2 (a)) 주변의 잘피 서식지에서 음향실험을 실시하였으며 수평입사각 및 방위각에 대한 잘피 분포를 관측하기 위해 그림과 같이 PAN & TILT를 이용하였다. 그림 2의 (b)는 실험장비 설치를 나타낸 구성도이다. 해저면부터 송수신기 (Transducer)까지의 높이를 h , 음파가 해저면까지 도달하는 거리를 l , PAN & TILT로부터 잘피까지의 수평거리를 r_H 로 두었다. 수평입사각 θ 의 변화에 따라 입사 거리 l 이 변하며, 이에 따른 전달 손실 및 입사단면적 (Ensonified area)의 변화를 고려한다.

음원은 주파수 120 kHz의 신호길이 (Pulse length) 0.2 ms 정현파 (Continuous wave) 신호를 사용하였다. 잘피 서식지 분포의 지도화를 위해 수평입사각 및 상대방위각에 대해 주간 및 야간 각각 만조 시부터 2시간 동안 실험하였으며, 잘피 서식지와 잘피가 서식하지 않는 해저면의 산란강도를 비교하기 위해 그림 2의 (a)에서와 같이 A 지역과 B 지역으로 대조군을 선정하였다.

해저면으로부터 산란된 신호는 수신기로 수신되어 증폭기를 통해 증폭되며 고주파 대역통과 필터 (High Pass Filter : 1 kHz) 후 A/D 변환기를 거쳐 저장되었다. 환경자료 측정을 위해 CTD와 DO meter를 이용하여 음속과 용존산소량을 각각 측정하였으며 WTR 9을 이용하여 조석의 변화를 관측하였다.

표 1은 실험 음향인자 및 환경자료를 나타낸 것이며 표2는 음향신호의 송수신부 및 환경측정 장비에 대한 제원이다.

III. 자료분석 및 결과

수신 신호의 산란강도를 산출하기 위해 송수신기의 감도를 고려한 음원준위와 잔향음준위, 그리고 거리에 따른 전달손실 및 입사단면적 (Ensonified area)을 고려한 단상태 능동 소나 방정식을 적용하였다[16]. 식(1)은 단상태 능동 소나 방정식이다.

$$SS = RL - SL + 2TL - 10 \log_{10} A \quad (1)$$

식에서 SS는 산란강도 (Scattering strength), RL은 잔향음준위 (Reverberation level), SL은 음원준위 (Source

표 1. 실험 음향인자 및 환경자료

Table 1. Acoustical parameters and environmental data.

	Acoustical Parameters			Environmental Data					
	Frequency (kHz)	Pulse length (ms)	Angle	Water Temperature (°C)	Salinity (psu)	Sound speed (m/s)	DO (ppm)	WTR	Seabed
Day	120	0.2	5°~40°(Grazing)	8.0	33.0	1480.0	6.3	High Water	Sandy Mud
Night			0°~130°(Azimuth)	7.5	33.0	1479.6	5.4		

표 2. 음향신호 송수신부 및 환경측정 장비 재원

Table 2. Specification of Transmitter-Receiver and Environmental Equipments.

	Transmitter		Receiver			Environmental Equipment		
	Power Amplifier	Transducer (Hydrophone)	Measuring Amplifier	Filter	A/D Converter	CTD	DO meter	WTR
Company	B&K	Neptune Sonar	B&K	K-H	National Inst.	Sea-Bird	HORIBA	AANDERAA
Model	2713	T 38	2610	3940	BNC-2110	SBE 19	U-10	WTR 9

level:214.75 dB), TL은 전달손실 (Transmission loss), 그리고 A는 입사단면적 (Ensonified area)을 나타낸다. 여기서 입사단면적은 송신된 음파가 잘피 및 해저면에 도달했을 때 송신기의 신호길이와 빔폭 (Half intensity beam width)에 의해 결정되는 단면적을 의미하는데 수평입사각이 낮아 질수록 그 면적은 넓어지게 된다[3]. 식 (2)는 입사단면적 A를 표현한 것이며 c는 음속, τ는 신호길이, r_H는 송신기부터 해저면까지의 수평거리, 그리고 Φ는 송신기의 빔폭(9.6°)이다.

$$A = \frac{c\tau}{2} \Phi r_H \quad (2)$$

잘피로부터 수신된 신호의 크기를 비교하기 위해 음원 준위를 보정한 잔향음준위를 산출하였다. 잔향음준위

(RL)는 수신기로 수신된 음압에 수신기의 감도 (RVS: Receiving Voltage Sensitivity, -192.2 dB)를 보상하여 계산하며 음원준위(SL)는 음원의 송신음압에 송신기의 감도 (TVR: Transmitting Voltage Response, 174.9 dB)를 고려하여 산출한다. 잔향음준위는 음원준위에 따라 그 크기가 달라지므로 모든 잔향음준위에 음원준위를 보정(RL-SL : 이하 잔향음준위라 한다)해 주어야 신호의 상대적준위 비교가 가능하다.

그림 3은 120 kHz 음원의 수평입사각 40° 및 상대방 위각 0° ~130° 에 대한 잔향음준위 분포를 지도화 한 것으로 동일한 수평입사각 (40°)에 대한 주야간의 잔향음준위 분포를 살펴보면 주야간별로 분포양상은 유사하나 잔향음준위의 차이가 관측되었다. 이러한 주·야간의 차이를 분석하기 위하여 앞에서 설명한 주야간 잔향음준위의 평균에 대한 시계열 신호를 관측 (그림 4)한

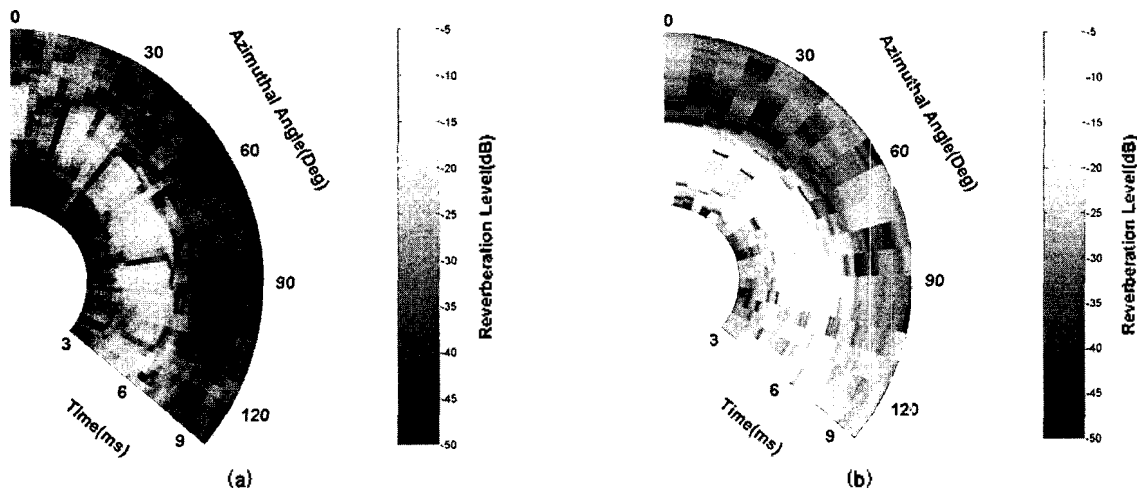


그림 3. 주야간(a) 및 야간(b) 잔향음준위 분포 비교(수평입사각 40°)

Fig. 3. The distributions of the reverberation level for day(a) and night(b)(grazing angle 40°).

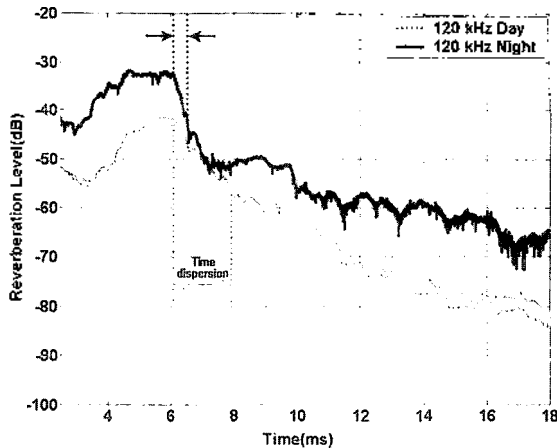


그림 4. 주·야간 잔향음준위 비교(수평입사각 40°)
 Fig. 4. The reverberation level for day and night (grazing angle 40°).

결과, 잔향음준위는 주간이 야간에 비해 약 9 dB 정도 낮게 관측 되었으며 주간 신호에서는 약 6~8 ms에서 시간분산 (Time dispersion) 현상[13]이 관측되었다. 시간분산 현상은 공기방울 등의 해수 내 산란체에 의해 음속의 변화 및 다중산란 현상이 발생하여 수신신호에서 시간이 연장되는 (Elongation) 현상을 의미한다. 그림 4의 경우에는 송수신기와 잘피사이의 해수 중에 주간의 공기방울층 (Bubble clouds)에 의한 음속의 변화와 다중 산란의 영향으로 시간분산 현상이 발생한 것으로 추정된다.

그림 5는 120 kHz 신호의 주·야간 수평입사각별 잔향음준위를 나타낸 것이다. 야간의 잔향음준위와 비교 시 전체적으로 주간 잔향음준위가 낮게 관측될 뿐만 아니라 주간의 잔향음준위에서는 앞에서 언급했던 시간분산 현상을 관측할 수 있으며 수평입사각이 낮아질수록 거리에 따른 음파산란이 야간에 비해 주간에 크게 관측된다.

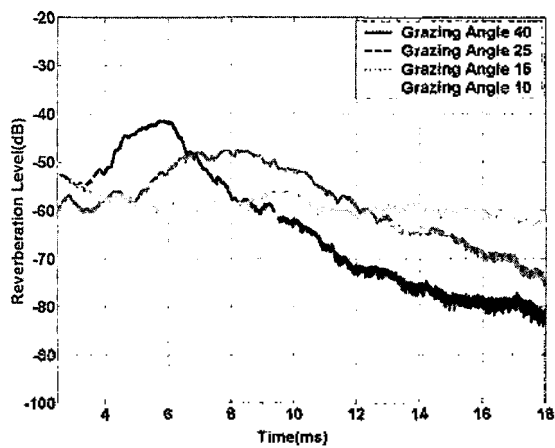


그림 5. 주간(a) 및 야간(b) 수평 입사각별 잔향음준위 비교
 Fig. 5. The reverberation level with grazing angles for day(a) and night(b).

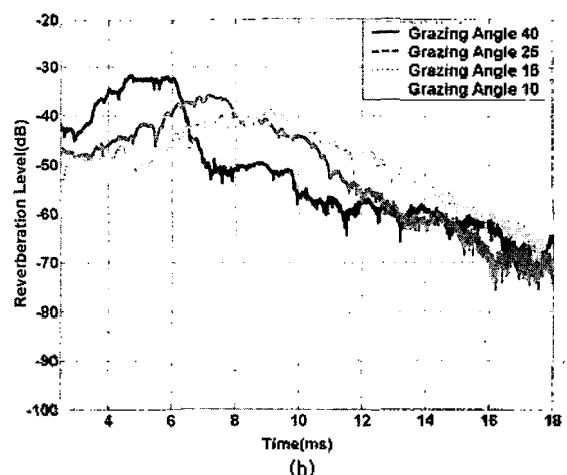
표 3. 수평입사각별 주·야간 잔향음준위의 차이
 Table 3. Difference of the reverberation level with grazing angles for day and night.

Grazing Angle (°)	40	25	15	10
Difference of the reverberation level (dB)	- 9	- 12	- 14	- 17

표 3은 그림 5의 수평입사각별 주·야간 신호에 대한 잔향음준위의 차이를 나타낸 것이다.

잘피 서식지 주변의 해수 전층은 주간의 잘피 광합성에 의해 많은 공기방울이 존재하게 되며 송수신기와 잘피 서식지 사이의 해수 중 공기방울이 음파의 감쇠를 야기시킨다[13]. 즉, 해수 중의 공기방울층은 송신된 음파를 전방향으로 다중 산란 시키며 잘피에 도달하여 수신기로 수신되는 시간까지 음압의 감쇠를 발생시킨다. 따라서 잘피에 부딪히고 수신기로 돌아오는 음압이 공기방울의 감쇠효과[13,14]로 인해 그 만큼 감소되는 것이다. 이와 같이 주·야간 잔향음준위의 차이는 광합성으로 생성된 공기방울에 의한 음파산란이 그 원인으로 추정되며, DO meter를 이용하여 주·야간 실험시간대의 용존산소량을 측정한 자료 (표 1)가 잔향음준위 차이의 결과를 뒷받침 한다.

실제 잘피 서식지의 분포와 잘피 군집밀도를 정량화할 수 있는 기법을 연구하기 위하여 잔향음준위에 전달손실 및 입사단면적을 고려한 수평입사각 및 방위각별 산란강도를 산출하였다. 산란강도는 송신된 음파의 입사단면적을 고려하여 잘피와 해저면에 부딪히고 돌아온 면적만큼의 잔향음준위를 선별하여 각각의 수평입사각 산란강도들의 값에 대한 표준편차 (Standard deviation)



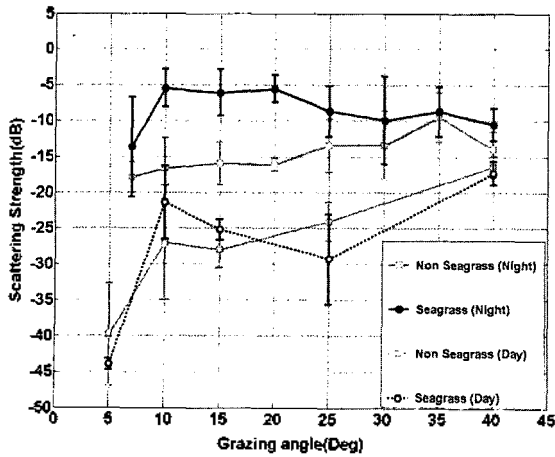


그림 6. 잘피 서식지와 비서식지의 수평 입사각별 주·야간 산란강도 비교
 Fig. 6. Scattering strength vs. grazing angle from seagrass beds and non seagrass beds for day and night.

와 평균값을 이용하여 산출하였다. 그림 2에서 언급한 A 지역 (잘피 서식지)과 B 지역 (비서식지)의 수평입사각

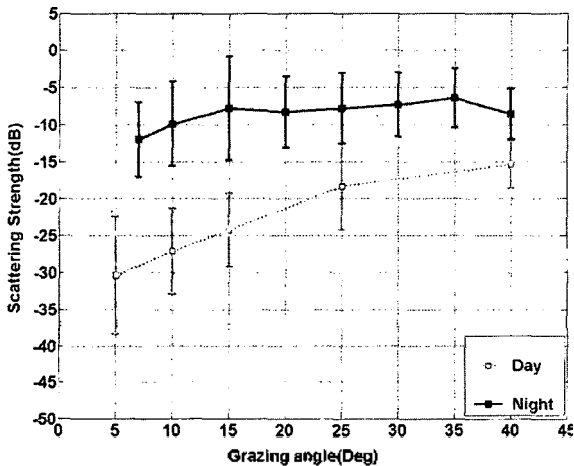


그림 7. 수평입사각별 주·야간 전체 방위각의 평균 산란강도 비교
 Fig. 7. The average scattering strength with all azimuthal angles vs. grazing angle for day and night.

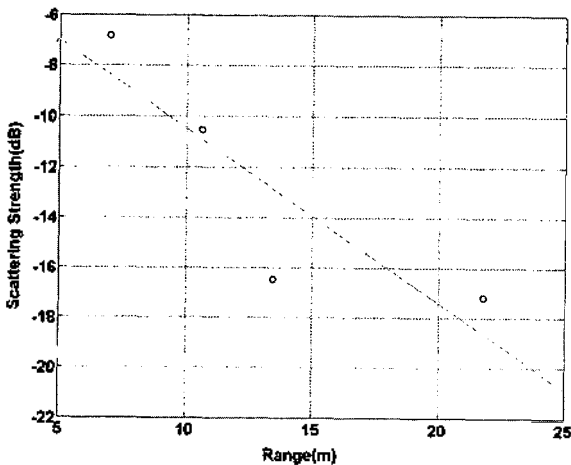


그림 8. 거리에 따른 주간 산란강도 변화(기울기 : 감쇠계수)
 Fig. 8. Variation of scattering strength vs. range(slope : attenuation coefficient).

별 주·야간 산란강도를 각각 산출 (그림 6)하여 잘피가 서식하는 지역과 서식하지 않는 지역에 대한 주·야간 후방산란 특성의 변화를 관측하였다.

야간의 산란강도를 살펴보면 잘피 서식지에 대한 수평 입사각별 산란강도와 잘피가 없는 비서식지의 수평입사각별 산란강도의 차이를 명확히 구별할 수 있으나 주간 의 수평입사각별 산란강도는 잘피 서식지와 비서식지의 구별이 모호할 뿐만 아니라 거리에 따른 종속성이 매우 크게 관측된다. 즉, 광합성이 없는 야간에는 잘피 서식지와 비서식지의 구분이 명확하지만 광합성이 활발한 주간에는 잘피가 서식하지 않는 비서식지 주변의 잘피 서식지에서 잘피가 광합성을 하게 됨에 따라 비서식지까지 공기방울층으로 포획된다. 이로 인해 비서식지 해수중의 공기방울층 영향으로 음파의 산란현상이 발생하여 비서식지 후방산란강도 역시 공기방울 감쇠효과를 받게 되며 잘피 서식지와 비서식지의 구분이 어렵게 되는 것이다. 주간 의 산란강도가 거리 종속성을 크게 갖는 것은 공기방울이 형성하는 공기방울층 (bubble clouds)의 감쇠 영향이 거리에 비례하기 때문으로 추정되며, 야간의 잘피 서식지 후방산란강도가 비서식지 후방산란강도에 비해 높게 관측되는 것은 수평입사각 40°로 음원을 송수신하였으나 잘피에 부딪히고 수신되는 신호들은 잘피의 자세 각에 따라 잘피에 대한 음원의 수평입사각 (Local grazing angle) 분포가 반사효과가 가장 지배적인 90°를 포함하여 다양하기 때문일 것으로 사료된다.

공기방울층에 의한 감쇠의 정도를 역산하여 수치화하기 위해 방위각 전체의 평균 산란강도를 수평입사각별로 주·야간 비교 (그림 7)하였다. 주간 의 수평입사각별 산란강도는 거리에 따른 종속성이 크게 관측되는데, 이 현

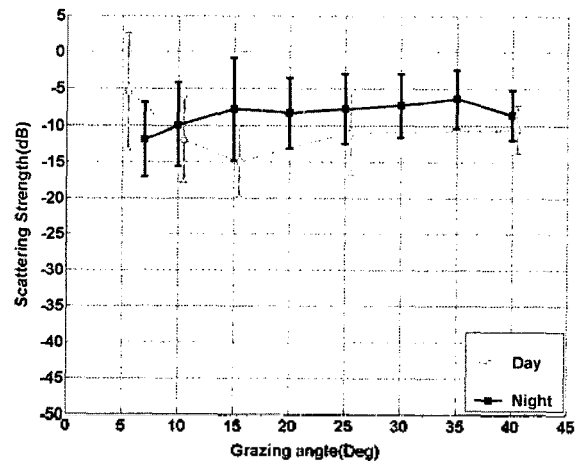


그림 9. 수평입사각별 주·야간 산란강도 비교(감쇠계수 보정)
 Fig. 9. Scattering strength vs. grazing angles (correction of attenuation coefficient).

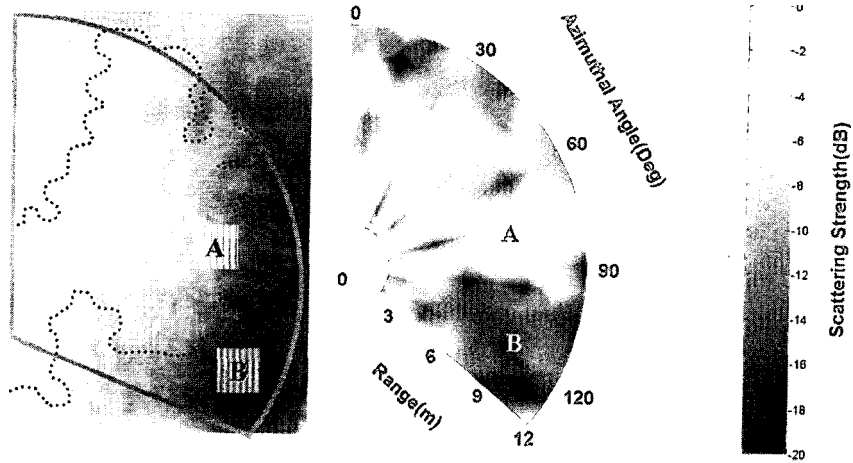


그림 10. 잘피 서식지의 촬영사진(a)과 야간의 산란강도를 이용한 잘피 서식지 분포의 지도화(b)
 Fig. 10. Photograph of seagrass beds(a) and Mapping of the seagrass beds using the night scattering strength(b)

상을 공기방울에 의한 감쇠현상으로 추정하여 그림 8에 서와 같이 거리에 따른 주간의 산란강도 변화량을 계산하였다.

이 변화량, 즉, 기울기는 공기방울에 의한 감쇠계수 (0.69 dB/m)가 되며 이 감쇠계수를 보정하여 야간의 산란강도와 비교 (그림 9)하였다. 그림 7과 비교해 볼 때 주간의 거리에 따른 종속성이 거의 없어지고 주·야간 산란강도의 차이도 현저하게 감소됨을 관측할 수 있었으며 이 기법을 이용하여 주간의 공기방울에 의한 감쇠계수를 역산, 공기방울층의 밀도를 역산할 수 있는 가능성을 확인하였다. 즉, 잘피 서식지에 대한 후방산란강도의 크기로 잘피의 성장정도를 관측할 수 있으며, 광합성량과 공기방울 밀도는 밀접한 관계가 있으므로 음파감쇠효과 역산을 이용한 잘피의 광합성량 파악을 통해 건강 상태를 확인[14]할 수 있을 것으로 추정된다.

그림 10은 실제 잘피 서식지에 대한 사진 (a)과 수평입사각 및 방위각별 산란강도를 위치별로 표현하여 잘피 서식지의 전체적인 분포를 지도화 (b) 한 것이다. 두 그림을 비교해 봤을 때 대조군 A와 B지역의 경계를 명확히 관측할 수 있으며 전체적인 분포양상이 유사함을 관측할 수 있다.

IV. 결론 및 토의

본 연구를 통해 해저면 및 잘피의 주·야간 산란강도 변화가 차이가 있음을 관측할 수 있었으며, 이는 광합성에 의한 산소 공기방울의 영향인 것으로 추정된다. 실험

시간대의 주·야간 조석 차이는 거의 없는 것으로 보아 공기방울 이외의 산란체 (부유물질) 영향은 없었던 것으로 추정할 수 있다. 그러나 차후에는 공기방울 이외의 음파산란 영향을 확인하기 위하여, 일주기 동안 용존산소량, 부유물질, 음속 등의 연속적인 환경 측정 자료와 후방산란강도와의 상관성 (Correlation)을 확인하여 공기방울의 감쇠효과에 대한 세밀한 검증이 수행되어야 할 것이다.

또한 수중음향을 이용한 잘피 서식지 분포의 지도화 가능성을 제안하였다. 본 연구에서는 공기방울에 의한 음파산란의 영향이 적은 야간의 산란강도를 이용하여 잘피 서식지 분포도를 작성하였다. 그러나 잘피의 산소 광합성으로 인한 공기방울의 영향으로 잘피 서식지 분포의 지도화가 어렵다는 것에 그치지 않고, 공기방울의 음파산란을 역산하여 잘피 서식지의 건강상태를 파악할 수 있는 가능성을 제안하였다.

차후 연구에서는 실측 생체량과 산란강도와의 상관성을 음향학적 관측만으로도 잘피의 군집밀도를 정량화 할 수 있는 알고리즘을 개발하고, 아울러 본 연구의 알고리즘을 이용하여 측면 주사 소나 (Side Scan Sonar)의 신호를 분석함으로써 광범위한 잘피 서식지의 분포 관측 가능성을 연구할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-11658-0)지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김형수, 최지웅, 나정열, 석동우, 나영남, "퇴적층 구성성분에 따른 추방 산란강도 측정", 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 20(1(s)), 645-648, 2001.
2. Jee Woong Choi, Jungyul Na, and Woojae Seong, "240-kHz Bistatic Bottom Scattering Measurements in Shallow Water", IEEE J. Ocean. Eng., 26(1), Jan, 2001.
3. Ji Woong Choi, "High-Frequency Bistatic Scattering from Ocean Boundaries", EMSOAL HanYang Univ., 2002.
4. 박순식, 윤관섭, 조진석, 나정열, "고주파 해저면 반사손실의 주파수 종속성 측정", 한국음향학회지, 22(8), 652-659, 2003.
5. 조진석, 윤관섭, 박순식, 나정열, 석동우, 주진용, "퍼지 이론을 이용한 해저면 분류 기법", 한국음향학회지, 23(4), 296-302, 2004.
6. 이재혁, 윤관섭, 라형술, 나정열, "수중음향을 이용한 질피 서식지 분포 관측", 한국음향학회 학술 발표대회 논문집, 23(1(s)), 187-190, 2004.
7. 라형술, 윤관섭, 이재혁, 나정열, "질피의 후빙산란", 한국음향학회 학술 발표대회 논문집, 23(1(s)), 191-194, 2004.
8. Sang Yong Lee, Sung Mi Lee and Chung il Choi, "Phenology and Morphometrics Vhange of *Zostera caespitosa* Miki Populations at the Duxsan Port in the Eastern Coast of Korea", Korean J. Environ. Biol., 2002.
9. 이상룡, "한국산 거머리말속(*Zostera*, *Zoteraceae*)의 생태 및 분류학적 특성에 관한 연구", 한양대학교, 박사학위논문, 2001.
10. Evgeni L. Shenderov, "Some physical models for estimating scattering of underwater sound by algae", J. Acoust. Soc. Am. 104(2), 791-800, 1998.
11. Bruce M. Sabol and Stephen A. Johnston, "Innovative Techniques for Improved Hydroacoustic Bottom Tracking in Dense Aquatic Vegetation", US Army Corps of Engineers, 2001.
12. J.-P. Hermand, P. Nascetti and F. Cinelli, "Inversion of Acoustic WaveGuide Propagation Features to Measure Oxygen Synthesis by *Posidonia oceanica*", IEEE J. Ocean. Eng., 2, 919-926, Sept, 1998.
13. J.-P. Hermand, "The effect of photosynthetic bubbles on underwater sound propagation", The 18th, ICA, April, IV-2515-2518, 2004.
14. Daniel Rouseff, Frank S. Henryey, Jerald W. Caruthers, and Stephen J. Stanic, "Tomographic Reconstruction of Shallow Water Bubble Fields", IEEE J. Ocean. Eng., 25(1), 131-140, Jan, 2001.
15. Elena M. McCarthy, "Acoustic Characterization of Submerged Aquatic Vegetation: Military and Environmental Monitoring Applications", IEEE J. Ocean. Eng., 1957-1961, 2000.
16. Robert J. Urick, *Principles of underwater sound*, The Catholic University of America, Chap. 8, 1983.

저자 이력

• 이재혁 (Jae Hyuk Lee)



1999년 2월: 해군사관학교 국제관계학과(문학사)
 2003년 3월~현재: 한양대학교 지구해양학과
 (석사과정)
 ※주관심분야: 수중음향 산란

• 윤관섭 (Kwan-Seob Yoon)

한국 음향학회지 제21권 제5호 참조

• 라형술 (Hyoung Sui La)

2002년 2월: 한양대학교 지구해양학과(이학사)
 2003년 3월~현재: 한양대학교 지구해양학과(석사과정)
 ※주관심분야: 수중음향 산란

• 나정열 (Jungyul Na)

한국 음향학회지 제21권 제8호 참조