

# 천해 체적 산란강도의 변동성

박 경 주, 김 은 혜, 강 돈 혁, 나 정 열  
한양대학교 지구해양과학과

## Variability of Volume Scattering Strength Observed in the Shallow Water

Kyoungju Park, Eunhye Kim, Donhyug Kang, Jungyul Na  
Department of Earth & Marine Science Hanyang University, Ansan  
E-mail : [pkj@ihanyang.ac.kr](mailto:pkj@ihanyang.ac.kr), [ehkim@ihanyang.ac.kr](mailto:ehkim@ihanyang.ac.kr)

### 요 약

연안역의 천해 해저면에 설치된 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 300kHz, 1200kHz)를 이용, 천해에서 체적 산란강도(volume scattering strength) 수직분포의 시간적인 변동 특성을 알아보았다. 수심 85m와 113m에서 ADCP로 측정된 산란강도의 일주기 변동성은 동물플랑크톤(zooplankton)으로 추측되는 산란체의 일주기 수직 이동(daily vertical migration)의 원인으로 추정되었다. 그러나 수심 20m의 천해에서 관측된 산란강도의 시변동성은 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석 결과 해저면 부근의 변화가 천해 체적 산란의 변동성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

### 1. 서 론

해양의 경계면(해수면, 해저면)과 해수 체적내의 산란체 등은 수중 음파산란(sound scattering)에 많은 영향을 미치는 요소들이며, 이러한 요소들은 수중물체의

탐지측면에서 장애요소로 작용한다. 음파산란의 연구에 있어서 경계면 산란에 비해 체적 산란에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 편이며, 이러한 원인은 능동소나(active sonar)의 탐지와 관련하여 상대적인 중요성 저하와 큰 시변동성(temporal variations)에 따른 변수화의 어려움으로 보인다.

하지만 체적 산란강도는 해상풍에 의해 생성된 미세 공기방울들의 공진현상 및 공기방울군에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으며[1], 또한 해저면 부유물질(suspended materials)에 의한 체적 산란강도도 큰 비중을 차지하고 있다[2]. 따라서 이러한 요인들에 대한 체적 산란강도의 변화성 파악은 정확한 음향모델의 구현에 있어서 반드시 연구되어야 할 부분이다.

일반적으로 저주파 대역에서 체적 산란강도에 가장 큰 영향을 주는 요소는 부레를 가진 어군이며[3], 고주파 대역에서는 동물플랑크톤 및 부유물질 등이다[4]. 저주파 대역의 산란 특성은 음파 전달 손실에 큰 영향을 미치므로 수중 폭발성 음원(SUS) 및 저주파 음원을 이용한 여러 실험이 있었으며[5], 고주파 대역의 산란 특성은 주로 플랑크톤의 생물학적 특성이나 군집조사에 한정되어 있었다[6].

이러한 고주파음원으로서 ADCP를 많이 사용하고 있으며, ADCP로부터 계산된 후방 산란강도 자료를 이

용하여 동물플랑크톤이나 해저 부유물질의 산란강도 측정에 이용하고 있다[7].

그 예로써 아라비아해에의 200m이상의 수심에서 265kHz~3MHz 주파수대역의 합성 예인형 ADCP를 이용한 실험에서 체적 산란의 시간적 변화 및 동물플랑크톤의 수직이동 등에 대하여 언급하고 있으며[4], 여기서 420kHz의 저주파대역에서의 산란강도 변화의 가장 큰 요인은 동물플랑크톤의 일주기 수직이동에 기인한다고 하였으며, 이러한 운동은 고주파수 대역보다 잘 나타난다고 분석하고 있다. 또한 ADCP의 후방 산란강도 자료를 이용, 해저면 부근의 부유물질에 의한 탁도(turbidity)를 측정하기도 하였다[7].

한국 연안에서 체적 산란강도의 변화성에 대한 연구는 매우 한정되어 있는 실정으로 1987년 대한해협에서 ADCP를 이용한 동물플랑크톤의 시공간적 분포를 파악하였으며[8], 최근 연구로는 1999년 제주해협 수심 120m되는 지점에서 해저면 설치 300kHz ADCP를 이용하여 동물플랑크톤의 일주기 수직이동을 확인하고, 또한 해저 부유 퇴적물(suspended sediments)의 산란강도와 그 해역의 조류(tidal current)와 상관관계를 밝혔다[2].

기존의 ADCP를 이용한 여러 체적 산란에 관한 연구[2,4,6,7]는 대부분 깊은 수심에서 수행되었으며, 상대적으로 연안부근에서 체적 산란강도의 특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 특히 이러한 환경에서 체적 관측은 능동소나 운용 시 탐지측면에서 중요한 요소이므로 관심을 가져야 한다.

본 연구에서는 기존 연구해역의 수심과는 상당한 차이가 있는 연안 20m 수심에서 측정된 1200kHz에 의한 81일 간의 산란강도 자료를 이용, 경험적 직교함수 분석법을 적용하여 천해에서 체적 산란강도의 시간적인 변화 특성과 수심 85m와 113m에서 측정된 300kHz의 자료를 이용, 동물플랑크톤에 의한 체적 산란의 일주기 변화성을 파악하고자 하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2. 1. 자료 수집

2001년 6월 17일부터 9월 5일 사이에 동해시 인근 해역의 해저면에 300kHz와 1200kHz ADCP를 설치하고 해류 및 산란강도 자료를 수신하였다(그림 1). 1200kHz 자료는 20m(위치 BM3) 수심에서 81일간, 300kHz 자료는 85m(BM1) 및 113m(BM2)에서 50시간 동안 관측하였다. 또한 실험기간 동안 실시간 해상

관측부이로부터 바람 자료를 수신하였으며, 이들 해류, 산란강도 및 바람자료는 10분 간격으로 기록하였다. 각 조사 위치에서 층 별 산란강도를 측정하기 위한 음향변수 및 수층 간격은 표 1과 같다.

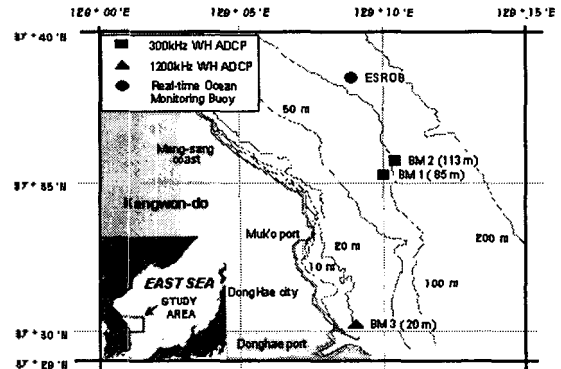


그림 1. 실험 위치

고주파 체적 산란강도에 큰 영향을 주고 있는 동물플랑크톤 자료는 국립수산진흥원 자료를 인용하였다[9]. 또한 해저면 부근의 수온은 ADCP 자체 수온 센서를 이용하여 실험 기간 동안 10분 간격으로 기록하였다. 실험지역 BM3의 해저면 지형은 평탄하였고 퇴적물의 구성물질은 주로 모래입자로 구성되어 있는 것으로 관측되었다.

표 1. 각 조사 정점에서의 음향변수 및 수층간격

	BM1 300kHz	BM2 300kHz	BM3 1228.8kHz
	Upward-looking orientation		
Transducer	convex		
Beam angle	20° relative to vertical		
Bin size	2.0 m	5.0 m	0.5 m
Number of bins	43	23	30
Blank	1.50 m	1.50 m	0.3 m
Distance to First bin	3.78 m	6.86 m	0.8 m
Sample interval	30 sec	30 sec	10 min
Pings per ensemble	60	45	80
Duration	50 hours	50 hours	81 days

### 2. 2. 경험적 직교함수 산출 및 체적 산란강도 계산

체적 산란의 시간적인 특성을 분석하기 위하여 경험적 직교함수 분석법을 적용하였다. 이 분석법은 시공간적인 변동성을 동시에 효과적으로 제시할 수 있는 대표적 통계적 방법 중의 하나이다[10]. 이 방법의 장점

은 단지 몇 개의 고유함수만으로 전체 현상을 설명할 수 있으며, 또한 관측치를 재현할 수도 있다.

이는 임의의 공간적 범위 내에서 시계열 자료를 이용하여 시간에 대하여 평균을 구하고 원래 자료로부터 각 시간에서의 잔차(residual)를 구한 후 잔차의 교차 공분산 행렬을 구성하여 고유값(eigenvalue)과 고유벡터(eigenvector)를 구하는 방법이다[11]. 분석에 사용된 체적 산란강도 자료는 ADCP에서 수신된 산란강도(echo intensity) 자료를 다음 식을 이용하여 환산한 값이다[12].

$$S_V = C + 10 \log_{10} ((T_X + 273.16)R^2) -$$

$$L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_C (E - E_r)$$

$S_V$  : 체적산란강도(dB re (4  $\pi$ m)  $^{-1}$ )

$L_{DBM}$  :  $10 \log_{10}$  (transmit pulse length, m)

$P_{DBW}$  :  $10 \log_{10}$  (transmit power, Watts)

$T_X$  : 센서면이 위치한 수심에서의 온도 ( $^{\circ}$ C)

$R$  : 센서면과 각 수층까지의 거리(m)

$K_C$  : system constant

$\alpha$  : 해수의 흡수손실계수 (dB/m)

$E$  : echo intensity,  $E_r$  : reference echo level

### 3. 결과 및 토의

#### 3. 1. 환경자료(바람, 해류 및 해저면 수온)

산란강도 자료를 비롯한 바람, 해류 및 수온 자료의 주기성 분석은 대역통과 필터(bandpass filter)를 적용하여 8시간보다 짧은 주기와 10일 이상의 긴 주기성분은 제거시킨 후 나타내었다. 바람자료를 관측한 곳은 그림 1에서 보는바와 같이 1200kHz ADCP 실험위치(BM3)로부터 약 15km 정도 떨어져 있으며, 풍속은 81일간 자료로서 최고 12.6m/s, 평균 3.3m/s로 관측되었다.

또한 실험기간 동안 해저면 수온은 평균 14.5 $^{\circ}$ C이었으며 6 $^{\circ}$ C~25 $^{\circ}$ C의 범위를 보이고 있다. 수온 변화에 있어 특이한 사항은 6월 17일부터 8월 4일까지는 평균 수온이 11.9 $^{\circ}$ C이며 그 이후는 평균 19.3 $^{\circ}$ C로써 7 $^{\circ}$ C 이상 수온차이를 나타내고 있다.

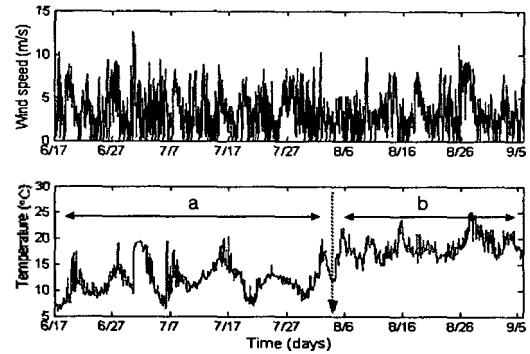


그림 2. 실험기간 동안 관측된 바람과 ADCP의 수온 시계열(위치 BM3), 구간 (a)의 평균수온은 11.9 $^{\circ}$ C, 구간 (b)의 평균수온은 19.3 $^{\circ}$ C

이러한 양상은 동해연안 3 $^{\circ}$ C이하의 북한한류계수(North Korea cold current)가 5월 중순과 6월말에 연안쪽으로 크게 확장, 6월에 가장 강하고 8월에 약화되는 경향과[13] 관련이 있을 것으로 보인다. 그림 3에서 바람의 주기는 3.7일과 4.4일이 우세하며 7일과 1일주기도 잘 나타나고 있으며, 해저면 수온자료의 경우는 8일과 약 5일 주기가 우세하게 나타나고 있다.

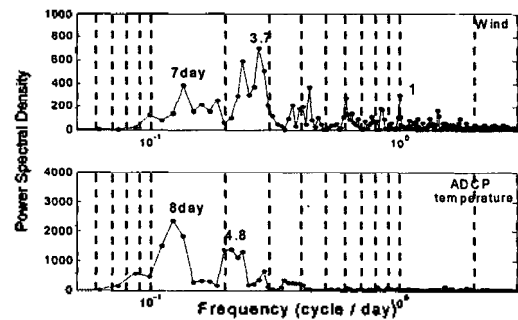


그림 3. 바람과 ADCP 수온 자료의 파워 스펙트럼

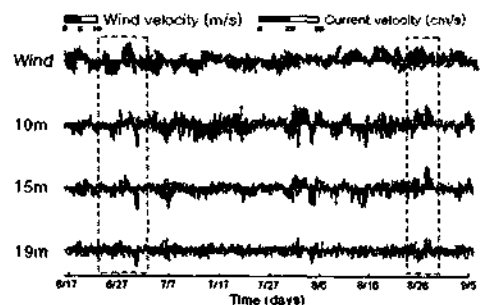


그림 4. 바람과 해류의 속도 벡터 그림

그림 4는 바람과 1200kHz의 각 층별 해류 자료의 속도 벡터를 나타내고 있다. 바람이 일정한 시간 이상 지속적으로 강하게 불었을 때에는 해류도 같은 방향으로 흐르며 유속은 수심이 깊어짐에 따라 약해진다. 그러나 바람 방향과 일치하지 않는 경우도 보인다.

### 3. 2. 체적 산란강도의 변화 특성

1200kHz의 81일간 체적 산란강도 자료를 보면 전체적으로 -80~-40dB의 분포를 보이고 있으며, 해수면쪽이 평균적으로 높게 나타나고 해저면 부근은 변화가 심한 것으로 나타났다. 그러나 중간층은 해수면쪽과 해저면 부근에 비해 상대적으로 약하게 나타나고 있다 (그림 5).

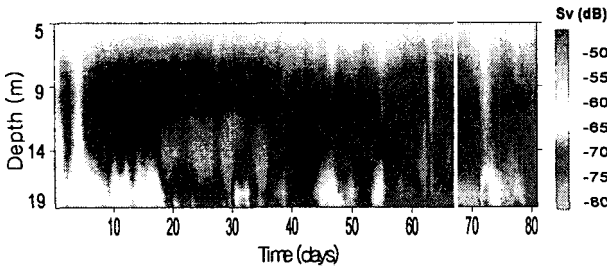


그림 5. 수심과 시간에 따른 1200kHz 체적 산란강도

이러한 체적 산란강도의 시간적인 변화 특성을 파악하기 위하여 81일 간의 체적 산란강도 자료에 대하여 경험적 직교함수 분석을 적용, 고유값 및 고유벡터를 계산하였고(그림 6), 이로부터 각 모드(mode)의 시간계수(time coefficient)를 계산한 후, 이에 대해 주기성 분석을 하였다(그림 7).

계산된 고유값에서 상위 2번째까지의 분산은 총 분산의 약 91%에 해당되며, 제 1모드는 전체의 74%에 해당하는 변동성으로 주로 해저면 부근에서 발생되고 있으며, 주파수 특성은 8일 주기가 우세하며 4.5일 주기도 나타나고 있다. 이것은 ADCP의 수온 자료의 8일 주기와 4.8일 주기와 유사하다.

제 2모드는 전체의 17%를 차지하며 주로 중층과 하층에서 발생하는 변동을 나타내고 있다. 주기성을 보면 제 1모드에서는 나타나지 않던 1일 주기가 잘 나타나고 있다. 1일 주기가 강하게 나타나는 것은 해상풍과 가장 밀접한 관련이 있는 상층의 영향을 받은 것으로 보인다.

실험기간 중 실시간 해상관측부이에서 관측된 해상풍은 최고 12.6m/s로 불었다. 해상풍으로 인한 쇄파(wave breaking)에 의해 발생하는 미세공기방울(micro

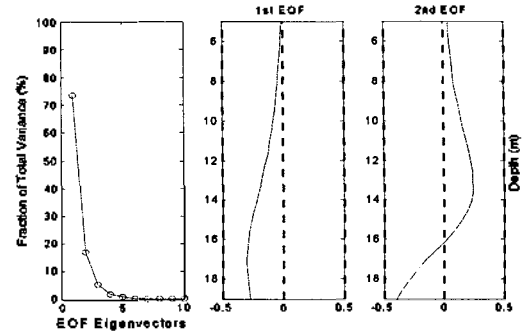


그림 6. 각 모드의 기여도 및 제 1, 2모드 경험적 직교 함수

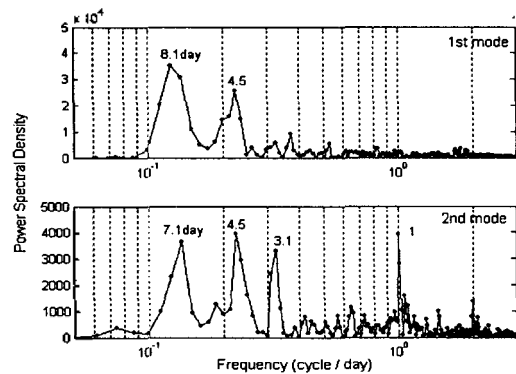


그림 7. 체적 산란강도의 EOF 분석에 따른 제 1, 2모드의 시간계수에 대한 파워 스펙트럼

bubble)의 밀도는 풍속에 강한 종속성을 보이며, 풍속의 증가에 따른 공기방울의 밀도를 추정하는 실험식 [14]에 의하면 풍속이 증가할수록 해수 내 공기방울 밀도는 증가하는 것으로 나타난다. 또한 공기방울의 생성량이 많아짐에 따라 해수면 후방 산란강도가 높게 나타나는 것으로 알려져 있다[1].

실제 풍속이 4m/s 경우 수심 1~5m사이에 존재하는 총 공기방울개수는  $5.3 \times 10^2 \sim 5$ 개이며 12m/s 경우는  $1.2 \times 10^5 \sim 5764$ 개 정도이다[15]. 또한 1200kHz에 대해 공진(resonance)을 발생시킬 수 있는 공기방울의 반지름은 수심 1~10m 경우  $2.9 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-4}$ cm로 계산된다[16].

본 실험은 동해항 부근의 내해 20m에서 이루어졌으므로 방파제, 해변 등에 의한 쇄파 및 선박통행까지 고려한다면, 해수내의 공기방울은 상당히 많이 분포했으리라 추측되며, 이러한 미세공기방울과 공진현상은 해수면 부근의 후방 산란강도에 많은 영향을 미칠 수 있다.

그림 8은 해류의 움직임에 따른 해저면에서 발생하는 체적 산란강도 변화를 잘 보여주고 있으며, 그림 9는 그림 8의 해류를 속도 벡터그림으로 표현한 것으로

수심 17m부터 해류의 방향이 급변하는 모습을 볼 수 있다.

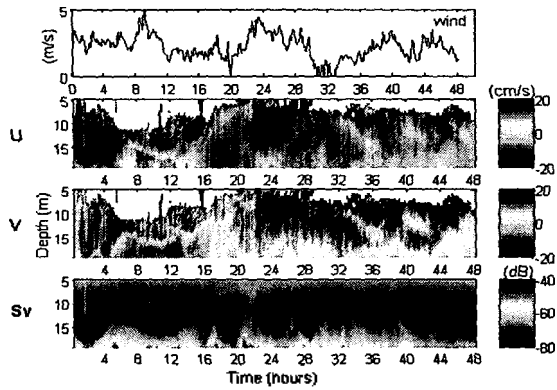


그림 8. 바람, 동서(U) 및 남북(V)방향 해류속도와 체적산란강도(Sv)

특히 4~16시간 사이에 해류의 방향이 급변하는 상황에서 해저면 부근의 체적 산란강도 변화도 크게 나타나고 있으며, 이러한 원인은 해류의 움직임에 의한 해저면 퇴적물들의 부유에 기인하는 것으로 추정된다. 또한 이러한 현상은 실제 모의실험을 통해 입증된 바도 있다[17].

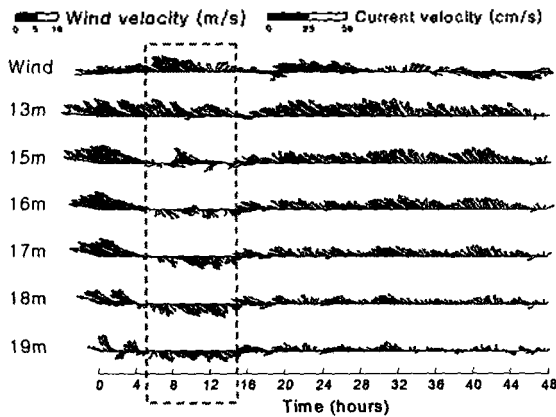


그림 9. 바람과 해류의 속도 벡터 그림

그림 10은 300kHz 자료의 체적 산란강도를 보여주고 있다. 수심에 따른 산란체의 분포 특성은 수중물체 탐지 및 음향모델 구현에 있어 중요한 변수로 작용하게 되며, 주변해역에 대한 산란체의 분포 특성을 파악하는 것은 중요하다. 수층 내 존재하는 산란체로는 여러 가지가 있지만 생물체에 의한 것이 대부분이다. 특히 동물플랑크톤에 의한 산란강도는 상대적으로 크게 나타나며, 일주기 이동 특성을 가지고 있다. 국립수산진흥원 정점 관측자료에 의하면 300kHz ADCP 관측기간인 6

월 중 동해시 연안역에 서식하고 있는 동물플랑크톤은 주로 우점종인 Copepoda와 Amphipoda가 분포되어 있는 것을 알 수 있으며, Copepoda는 전형적인 일주기 수직운동을 하는 동물플랑크톤으로 낮 동안에는 수심이 깊은 해저면 근처에서 머물다가 밤에는 주로 해수면 근처에서 활동하는 특성이 있는 것으로 알려져 있다 [2,7].

체적 산란강도의 수심과 시간에 따른 변화에 있어서 수심 20m의 자료에서는 나타나지 않았던 산란체의 일주기성이 수심 85m와 113m에서는 산란체가 오후 5~8시경 해수면 부근으로 상승, 해수면 근처에서 활동하다가 오전 5~8시경 다시 해저면쪽으로 하강하여 낮 동안에는 해저면쪽에서 주로 활동하는 형태인 산란체의 체적 산란강도의 일주기 변화를 볼 수 있다(그림 11). 국립수산진흥원 자료와 그림 10의 체적 산란강도 변화 형태를 종합해 볼 때 동물플랑크톤의 일주기 수직 이동으로 추정 가능하다.

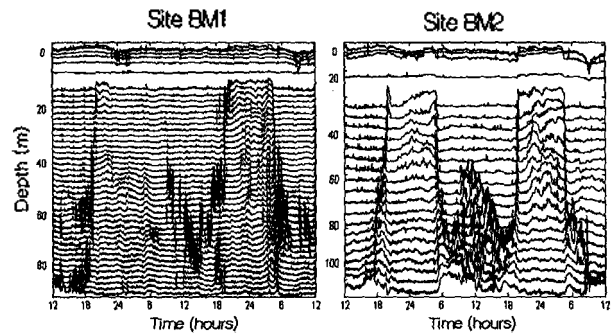


그림 10. 수심과 시간에 따른 300kHz 체적 산란강도의 일주기 변화

#### 4. 결론

본 연구의 중점은 천해 체적산란강도의 시간적인 변동성 파악에 있다.

천해 20m 수심에서의 1200kHz 자료에 대한 EOF 분석 결과 대부분의 체적 산란강도의 변동성은 해저면 부근에서 발생되고 있는 것으로 나타났다. 제 1모드의 시간계수에 대한 주기 분석상 ADCP 온도 센서에 의한 해저면 수온 변화의 주기와 거의 일치하고 있으며, 이것은 해저면 수온 변화의 양상이 실험기간 중 북한한류 계수의 연안으로의 확장과 관련 있는 것으로 추정된다.

특히, 극 천해에서는 해상풍과 해류의 흐름이 체적 산란강도 변화에 많은 영향을 주는데, 이러한 해류의 흐름 방향이 급변하는 상황에서 해저면 부유 퇴적물로 예상되는 산란체에 의해 체적 산란강도가 높게 나타남을 알 수 있다.

그리고 해수면 부근의 미세 공기방울에 의한 체적 산란강도의 변화는 어느 정도 크게 나타났지만 기대했던 만큼 큰 변화는 볼 수 없었다. 만약 표층 부근의 자료가 충분했다라면 EOF 분석 결과 제 1모드에 대한 변동 양상은 상당히 다르게 나타났을 가능성이 높다고 판단된다.

또한 300kHz 체적 산란강도의 일주기 변화 양상은 동물플랑크톤의 서식 특성과 기타자료를 종합해 볼 때, 실험해역의 우점종인 Copepoda(요각류)로 추측되는 동물플랑크톤의 일주기 수직 이동임을 추정할 수 있다. 이러한 동물플랑크톤의 수직 이동 특성은 체적 산란강도의 변동성에 아주 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

### 후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, ADCP 자료를 제공해 준 서울대 대학원 해양순환연구실에 감사드린다.

### 참 고 문 헌

1. S. T. McDaniel, "Sea surface reverberation : A review," J. Acoust. Soc. Am. 94(4), 1905-1922, 1993.
2. K. I. Chang, W. S. Kim, M. S. Suk and Y. H. Ahn, "Variation of backscatter strength and Doppler currents on the continental shelf," International Workshop, Ansan, Kcrea, 2000.
3. C. Feuillade, R. W. Nero and R. H. Love, "A low-frequency acoustic scattering model for small schools of fish," J. Acoust. Soc. Am. 99(1), 196-208, 1996.
4. D. V. Holliday and R. E. Pieper, "Volume scattering strength and zooplankton distributions at acoustic frequencies between 0.5 and 3 MHz," J. Acoust. Soc. Am. 67(1), 135-146, 1980.
5. P. M. Ogden and F. T. Erskine, "Surface and volume scattering measurements using broadband explosive charges in the Critical Sea Test 7 experiment," J. Acoust. Soc. Am. 96(5), 2908-2920, 1994.
6. D. E. McGehee, C. F. Greenlaw, D. V. Holliday

- and R. E. Pieper, "Multifrequency acoustical volume backscattering patterns in the Arabian Sea-265 kHz to 3 MHz," J. Acoust. Soc. Am. 107(1), 193-200, 2000.
7. X.-H. Zhu, Y. Takasugi, M. Nagao and E. Hashimoto, "Diurnal Cycle of Sound Scatters and Measurements of Turbidity Using ADCP in Beppu Bay," *Journal of Oceanography* 56, 559-565, 2000.
8. 나정열, 박정수, "한국 해협에서 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)의 음파 산란신호에 의한 동물플랑크톤 분포의 추정," 한국해양학회지 24(4), 172-183, 1989.
9. 국립수산진흥원, 해양조사연보 제49권 (2000년도 조사결과), 2001.
10. J. Y. Na, S. K. Han, J. W. Seo, Y. G. Noh and I. S. Kang, "Empirical orthogonal function analysis of surface pressure, sea surface temperature and winds over the East Sea of the Korea (Japan Sea)," J. Korean Fish. Soc. 30, 188-202, 1997.
11. R. W. Preisendorfer and C. D. Mobley, *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography* (ELSEVIER, New York, 1988).
12. K. L. Deines, "Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers," Proc. IEEE Conf., San Diego, 1999.
13. 조창봉, "동해시 연안역의 시-공간적 물성변화," 서울대학교 대학원 지구환경과학부, 이학석사논문, 2001.
14. J. C. Novarini and G. V. Norton, "Acoustic index of refraction in the background bubble layer of the ocean: an updated bubble spectrum and the computer program CBUBBLY," *Naval Research Lab Rept.*, NRL/FR/7181-93-9432, 1994.
15. J. Wu, "Bubbles in the Near-Surface Ocean : A General Description," J. Geophys. Res. 93(C1), 587-590, 1988.
16. L. M. Brekhovskikh and Yu. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics* (Springer-Verlag, New York, 1982).
17. 윤관섭, "간향음 특성 파악을 위한 해저면 산란 신호의 분석 기법," 한양대학교 대학원 지구해양과학과, 이학석사논문, 2001.