

# 다층 도플러 유속계(ADCP)를 이용한 황토 살포 해역의 플랑크톤 평가

박주삼\* · 추효상\*\* · 문성룡\*\*\*

\* 전남대학교 수산과학연구소 · \*\* 전남대학교 해양기술학부 · \*\*\* 강릉원주대학교 생물학과

## Distribution of Zooplankton by ADCP's Echo Intensity in the Coastal Water used Yellow Loess

Ju-Sam Park\* · Hyo-Sang Choo\*\* · Sung-Ryong Moon\*\*\*

\* The Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

\*\* Fisheries Ocean Science Division, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

\*\*\* Department of Biology, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, 210-702, Korea

**요 약 :** 우리나라에서는 적조가 발생하면 적조발생 해역에 황토를 살포하고 있다. 황토가 살포되는 해역은 대부분 가두리 양식장 주변이며 매년 권장 살포량이상으로 대량 살포되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 적조가 발생하여 매년 황토가 살포되어온 해역과 황토가 살포되지 않은 해역을 대상으로 추계(2008년 10월)와 춘계(2009년 4월)에 플랑크톤 네트에 의한 채집과 ADCP에 의한 체적산란강도를 계속하여 플랑크톤 분포특성과 플랑크톤의 분포밀도를 조사하였다. 황토를 살포하지 않은 해역에서 채집된 생물의 종수 및 단위체적당 개체수는 높았으나, 황토를 살포한 해역에서는 낮았다. 각 정점에서 채집한 플랑크톤의 종별, 체장별 개체수와 분포밀도의 평균치를 이용한 체적산란강도  $SV_c$ 와 ADCP에 의해 계속된 체적산란강도  $SV_m$ 를 비교해 본 결과, 황토를 살포하지 않은 해역의  $SV_c$ 와  $SV_m$ 는 거의 일치하였으나, 황토를 살포한 해역의  $SV_m$ 는  $SV_c$ 보다 4.3 dB 높았다. 즉 황토를 살포한 해역에서는 부유물이 ADCP에 크게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. ADCP에 의해 계속된 체적산란강도의 수평분포도에서 체적산란강도는 황토를 살포한 해역이 황토를 살포하지 않은 해역보다 높았으며, 봄철이 가을철보다 높았다. 또한 체적산란강도 추정에 ADCP를 이용하면 채집에 의한 분포밀도의 과대 또는 과소평가를 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어 :** 다층 도플러 유속계, 동물플랑크톤, 탐지범위, 체적산란강도, 황토

**Abstract :** Harmful algal blooms (HABs), commonly known as red tides, are aquatic phenomena caused by the rapid growth and accumulation of certain microalgae, which can lead to marked discoloration of surface waters, and severe impacts on public health, commerce, and the environment. In South Korea, the red tides have been a serious and recurrent problem, especially along the south coast. Plenty of yellow loess was used to control an outbreak of the red tides for 15 years from 1996 until now. Yellow loess was almost sprayed in the vicinity of a large fish farming industry. In this research, the distribution characteristics and density distribution of zooplankton were investigated in autumn (Oct. 2008) and spring (Apr. 2009) using volume backscattering strength (SV) calculated by the zooplankton collected with north pacific standard (NORPAC) net and the echo intensity measured with ADCP at stations on the study area in the spraying ocean of yellow loess (SOYL), and the non-spraying ocean of yellow ocean (NOYL) by the red tide generating every year. The species number and the individuals per unit volume of the zooplankton collected in NOYL was high and it which was collected in SOYL was low. As a result of comparing the volume backscattering strength ( $SV_c$ ) calculated by species and length of the zooplankton collected with NORPAC net with the volume backscattering strength ( $SV_m$ ) calculated by the echo intensity measured with ADCP at stations on the study area, although  $SV_c$  and  $SV_m$  of NOYL were generally in agreement,  $SV_m$  of SOYL was higher than  $SV_c$  4.3dB, i.e. ADCP is greatly influenced by suspended solid in SOYL. The horizontal distribution map of  $SV_m$  at the study area in autumn (Oct. 2008) and spring (Apr. 2009) was drawn.  $SV_m$  of SOYL is higher than NOYL and autumn is higher than spring.  $SV_m$  can suppress the overestimate or underestimate of  $SV_c$ .

**Key Words :** ADCP, Zooplankton, Detectable range, Volume backscattering strength, Yellow loess

\* 대표저자 : 정희원, hanna@chonnam.ac.kr, 061-659-2743

† 교신저자 : 정희원, choo@chonnam.ac.kr, 061-659-6364

## 1. 서론

플랑크톤은 해양생태계를 이해하고 수산자원 및 지구환경의 동태를 예측하는데 없어서는 안 될 중요한 생물이다. 지금까지 플랑크톤의 크기, 종, 그리고 현존량의 계측은 플랑크톤 네트 등을 이용한 직접적 샘플에 의존하여 왔다. 또한 식물플랑크톤에 빛을 비추면 광합성에 사용하고 남은 여분의 에너지를 2차적인 빛, 즉 형광으로 되돌려 주기 때문에 이것을 측정하여 플랑크톤 량을 예측하는 형광광도계가 편리하게 사용되어 왔다(Pinto et al., 2001). 최근에는 빔 내에서 플랑크톤이 가로막는 빛의 양을 검출하는 광학식 플랑크톤 카운터(Herman, 1992; Labat et al., 2002; Labat et al., 2009), 수중 비디오카메라를 예항하면서 비디오 화상을 해석하여 종, 크기, 량을 구하는 비디오 플랑크톤 레코더(VPR) 등 광학적인 방법도 눈부시게 발전하고 있다(Broughton and Lough, 2006). 이와 같은 방법에는 장점과 단점이 있지만 연속적이고 넓은 범위라는 두 가지의 특성을 만족시키기에는 한계가 있다.

이러한 점을 보완하기 위하여 음향학적 방법이 사용되고 있으며, 현재 사용 중인 음향에 의한 플랑크톤 계측방법은 고주파의 계량어군탐지기 등에 의해 평균분포밀도를 계측하는 에코적분방식(Pieper, 1979)과 자연상태에서 TS를 측정할 수 있는 듀얼빔 법(Richter, 1985; Greene, 1991) 또는 스프릿트빔 법(Hewitt and Demer, 1991)을 이용한 단체에코 계측방식이 플랑크톤 계측에 응용 되고 있다. 이 방법은 국제협력에 의해 수행되고 있는 남극크릴새우의 음향조사에도 이용되었다(Greene et al., 1989). 그리고 TS가 주파수가 의해 크게 변하는 특성을 이용하여 2주파(Madureira et al., 1993)와 다주파(Johnson, 1977a; Greenlaw, 1979; Pieper et al., 2001)로 체적산란강도를 측정하고, 적절한 TS 모델로 역해석을 하여 크기별 분포밀도를 구하고 있다.

또한 1980년대 후반부터는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)가 개발되어 유영력이 없는 플랑크톤의 산란과로부터 도플러 주파수차를 검출하여 해류의 유향·유속을 측정하는데 이용되고 있다. ADCP는 생물의 밀도와 행동을 측정하기 위해 개발된 것은 아니지만, 산란과의 진폭을 정량화하여 플랑크톤의 밀도를 측정할 수 있고, 산란체의 도플러 주파수 차를 검출하여 이동속도를 추정할 수 있다(Flagg and Smith, 1989; Smith et al., 1989; MacLennan and Holliday, 1996).

우리나라에서는 적조가 발생하면 그 피해를 줄이기 위해 황토를 살포하여 적조생물을 흡착, 침시시키고 있다. 황토 살포는 1995년 대규모 적조가 발생하여 큰 수산피해를 입은 이후 1996년부터 시·도에서 시작하여 1998년부터는 정부사업으로 수행되고 있다. 현재 권장하고 있는 황토의 적정 살포량은  $m^2$ 당 100~400g이지만 적조가 발생하면 가두리 양식장 주변으로 다량으로 살포되고 있다. 이와 같이 오랜 기간 가두리 양식장 주변에 황토가 다량으로 살포되어 황토 살포가 해양생태계에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다.

그러나 황토 살포에 의한 해양생태계 영향 평가 전반을 연구하기에는 경제적, 시기적으로 많은 어려움이 따르기 때문에, 본 연구에서는 그 기초적인 연구로 황토 살포에 의한 플랑크톤 종조성의 변화 및 음향학적 평가기법의 개발에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 방법

### 2.1 조사해역 및 실험방법

전남 여수시에 위치한 개도를 중심으로 한 월호도, 화태도, 송도 제리도 내만은 가두리 양식장이 다량으로 설치되어 있어 매년 적조가 발생하면 집중적으로 황토를 살포하고 있다. 금오도 외측은 조류가 강해 적조의 영향을 덜 받는다. 황토 살포에 의한 해양생태계를 변화를 관찰하기 위해서는 동일한 해역에서 황토 살포 이전과 이후를 비교하는 것이 합당하겠으나, 이전의 연구가 선행되지 않아 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역에서의 조사를 실시하였다. 따라서 황토가 살포된 해역(St. 1~9)과 황토가 살포되지 않은 해역(St. 10~17)의 플랑크톤 분포특성 및 량을 측정하기 위하여 Fig. 1의 해역에서 조사를 수행하였다. 조사는 추계(2008년 10월)와 춘계(2009년 4월)에 실시되었다. Fig. 1의 정점을 따라 전남대학교 실습선 청경호로 항해하면서 청경호의 선저에 부착되어 있는 도플러유속계를 이용하여 유향·유속과 플랑크톤에 의한 후방산란 신호를 연속으로 관측하였다. 또한 각 조사정점에서 수온, 염분 등의 물리적인 조사 및 플랑크톤 네트를 이용하여 수직채집을 수행하였다.

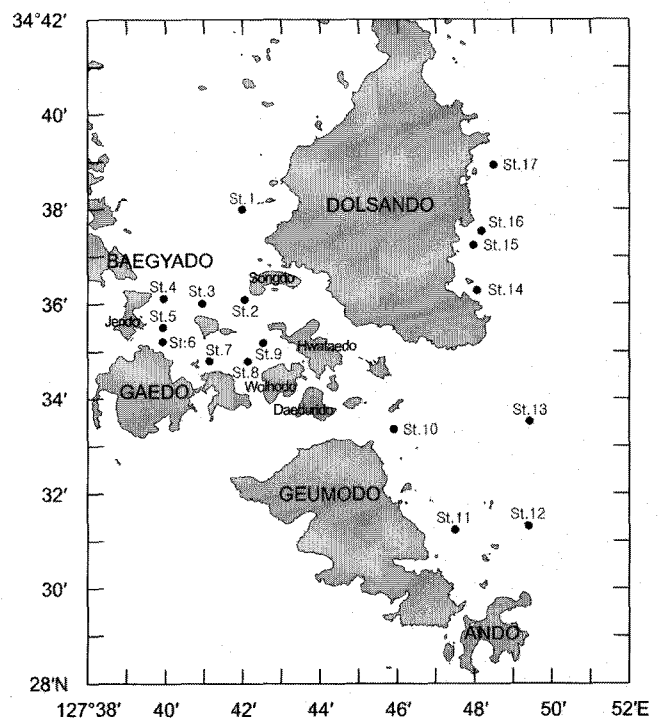


Fig. 1. Location of the study area.

ADCP는 계측시간을 단축하고 심도분해능을 향상시키기 위해 짧은 펄스를 사용한 광대역 ADCP (Teledyne Technologies Inc., Workhorse Mariner)가 사용되었다(RD Instruments, 1996). ADCP는 4개의 빔이 수직에 대해 각각 30°의 경사각을 가지고 대각으로 배치되어 있다. 시스템은 ADCP의 송수파기와 본체를 포함한 기본시스템과 조사선박의 위치자료를 수록하는 GPS(Global Positioning System), 선수방위를 기록하는 자이로컴퍼스, 각종 데이터를 보존하고 시스템을 제어하는 퍼스널컴퓨터로 구성하였다. 관측을 위하여 사용된 ADCP의 주요입력변수는 Table 1과 같다. 사용된 Vessel-Mounted type의 ADCP 주파수는 307.2 kHz이며, 수심 약 2.3m에 송수파기를 설치하였다.

Table 1. Parameter values of ADCP

	Parameter	Value
Transducer	Frequency ( $f$ )	307.2 kHz
	Diameter ( $2a$ )	13.3 cm
	Beam width at -3dB ( $B_w$ )	2.2 °
	Electrical power ( $W$ )	80 W
	Bandwidth ( $\Delta f$ )	76.8 kHz
Data set up	Depth cell size	100 cm
	Number of depth cell	50 bin
	Averaging time	20 sec
Other parameters	Water temperature ( $T$ )	11.4 °C
	Salinity ( $S$ )	34 psu
	Potential of hydrogen ( $pH$ )	8
	Depth of water ( $D$ )	50 m
	Sound speed in water ( $c$ ) <sup>*1</sup>	1494.3 m/sec
Absorption coefficient ( $a$ ) <sup>*2</sup>	0.0757 dBm	

\* 1  $c$  is calculated by Mackenzie's formula (1981)

\* 2  $a$  is calculated by Francois and Garrison's formula (1982)

동물플랑크톤 채집은 NORPAC(North pacific standard) 네트(망목 330 $\mu$ m, 망구직경 45cm)를 이용하여 저층에서 표층까지 수직 예인하였다. 채집된 시료는 즉시 선상에서 중성 포르말린을 사용하여 시료의 최종농도가 5%가 되도록 고정하였다. 동물플랑크톤의 정량분석을 위하여 네트 입구에 유속계(Hydro-Bios Apparatebau GmbH, Digital Flowmeter No 438115)를 부착하여 여과해수량을 산출하는데 이용하였다.

### 2.2 플랑크톤 분포특성 조사방법

플랑크톤 분포특성은 계수가 바르게 된 2009년 3월의 자료만을 활용하였다. 종조성 및 개체수 조사에 따른 시료의 분할이 필요시에는 Folsom식 분할기를 이용하여 분할한 후에, Bogorov 계수판에서 해부현미경(Olympus Optical co. Ltd., SZ4045)을 사용하여 동정 및 계수하여 단위체적당 개체수로 환산하였다. 정점별 단위체적당 개체수를 황토가 살포한 해역(St. 1~9)과 황토가 살포되지 않은 해역(St. 10~17)으로 나누어 정리하여 황토 살포에 따른 영향을 검토하였다.

정점별 플랑크톤의 출현종수와 개체수를 측정하여 군집의

특성을 설명하는 종다양성을 검토하였다. 종다양성  $H'$ 는

$$H' = - \sum_i \frac{n_{ij}}{N_j} \log_2 \frac{n_{ij}}{N_j} \text{ [bit]} \quad (1)$$

를 사용하였다(Shannon and Wiener, 1963; Dou, 1995), 여기서,  $n_{ij}$ 는  $i$ 종의  $j$ 정점에 있어서의 채집량,  $N_j$ 는  $j$ 정점의 총채집량으로 출현확률을 나타낸다. 출현확률이 모두 동일할 경우 종다양성은 최대가 되며 출현확률이 한 종에 크게 편중되면 될수록 종다양성은 적어진다.

정점별 플랑크톤 출현양상의 상호관련성을 파악하기 위하여 군집분석을 하였다. 군집분석을 위한 유사성 측정의 결정방법으로 제곱유클리안거리를 이용하였으며, 군집화는 Ward의 오차제곱합 방법을 이용하였다.

### 2.3 ADCP의 평가

ADCP의 송수파기에 수신된 신호에는 목적으로 하는 에코음압과 잡음의 수신음압이 포함되어 있다. 에코음압과 잡음음압으로부터 신호대 잡음비  $S_N$ 는

$$S_N = \frac{4\pi^3 \rho \eta W a^4 f^{5.8} \exp[-2(\pi a f / c)^2 \theta^2] 10^{-0.2\alpha r} T_S}{c^3 r^4 N_{P0}^2 \Delta f} \quad (2)$$

이 된다(박 2005). 여기서  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $c$ 는 수중에서의 음속을 나타내며,  $\eta$ 는 전기음향변환효율,  $W$ 는 송신전력이다.  $a$ 는 송수파기의 반경,  $f$ 는 주파수,  $\theta$ 는 지향성 주축으로부터의 각도이며,  $r$ 은 전달거리,  $N_{P0}$ 는 주파수대역 1Hz에서의 잡음스펙트럼계수,  $\Delta f$ 는 수신계의 대역폭이다.  $a$ 는 흡수계수,  $T_S$ 는 반사체의 반사의 강도이다.

탐지거리, 탐지폭, 탐지체적 등으로 구성되는 탐지범위(박, 2005)는 신호대 잡음비(SN비)로부터 얻을 수 있다. (2)식을 이용하여 조사에 사용한 307.2 kHz의 ADCP와 현재 유향·유속을 계측하기 위하여 폭넓게 이용되고 있는 사용 주파수의 1/2배와 2배의 주파수를 가지는 ADCP의 TS ( $TS=10\log T_S = -80 \text{ dB}, -90 \text{ dB}, -100 \text{ dB}$ )에 대한  $r$ 과  $\theta$ 의 탐지범위를 구하였다. 탐지범위를 계산하기 위하여 송수파기의 변수는 Table 2를 사용하였다. ADCP는 수신계의 대역폭을 25~50%로 요구한다(RD Instruments, 1996). 따라서 주파수의 25%를 수신계의 대역폭으로 하였다. 송수파기의 직경, 빔폭, 송신전력은 각 주파수에서 최대탐지거리, 캐비테이션 등을 고려하여 현재 일반적으로 사용되고 있는 값으로 하였다. SN비는  $S_N=10\log S_N=0 \text{ dB}$ , 잡음스펙트럼계수는  $N_{P0}=20\log N_{P0}=145 \text{ dB}$ 로 하였으며,  $\rho=1025\text{kg/m}$ ,  $c=1500\text{m/s}$ ,  $\eta=65\%$ 의 값을 사용하였다. 흡수계수  $a$ 는 Francois and

Table 2. Parameters used for computing detectable ranges of ADCP

$f$ (kHz)	$2a$ (cm)	$B_w$ (°)	$W$ (W)	$\Delta f$ (kHz)
153.6	16.5	4.0	250	38.4
307.2	13.3	2.2	80	76.8
614.4	10.1	1.5	30	153.6

Garrison(1982)의 식에 의해 계산하였다. 여기에 필요한 변수의 값은 전해역에서 표층(1m)과 중층(5m)을 계측하여 평균한 염분농도 34 psu, 수온 11.4 °C와 pH 8, 심도 50m인 평균적인 값을 사용하였다.

### 2.4 플랑크톤 량의 평가방법

플랑크톤을 샘플링할 때 조우한 해수의 양은 다음 식으로 계산하였다(日本氣象廳, 1990).

$$V_h = \pi R^2 D S_w \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 사용한 네트의 입구 반경,  $D$ 는 수심,  $S_w$ 는 네트의 여수율이다. 본 연구에서는 무망실험을 수행하지 못해 유속계에 의한 여과해수량은 보조수단으로 사용하였다. NORPAC 네트의 여수율은 98%로 하였다. 플랑크톤 수  $N$ 와 여수량으로 부터 분포밀도  $n = N/V_h$ 로 계산한다.

ADCP와 같은 수중 음향기기는 해양생물의 음향산란특성을 이용한다. 음파의 송수신, 전달, 신호처리의 각 단계는 대상 생물의 음파산란특성에 크게 좌우된다. 음향산란특성을 해명하기 위해서는 실측과 이론이 사용되며, 많은 경우 양자를 종합한 실용적 산란모델이 이용된다. 이 경우 이론모델은 실측과 실용적 산란모델의 기본이 된다. 특히 동물플랑크톤은 어류에 비해 소형이고, 복잡하며, 측정하기 어렵기 때문에 대부분 이론모델에 의존해야만 한다.

古澤(1995)에 의하면 현재 사용되고 있는 플랑크톤 이론모델은 액상구체모델, 회전타원체모델, 유한원통모델이 있다. 본 연구에서는 체장이 파장보다 작은 레일리영역과 체장이 파장보다 큰 기하영역에서 TS의 평균적 특성 즉 해양생물의 음향산란특성이 잘 들어맞는 Johnson의 하이패스모델(HPSM)인 액상구체모델을 사용하였다. 이 모델은 다음 식과 같이 간단히 표현할 수 있다(Johnson, 1977b).

$$T_s = a_c^2 \frac{2(k_0 a_c)^4}{2 + 3(k_0 a_c)^4} d^2$$

$$d = \frac{1 - \rho_r c_r^2}{3\rho_r c_r^2} + \frac{1 - \rho_r}{1 + 2\rho_r} \quad (4)$$

여기에서  $a_c$ 는 등가구반경,  $k_0$ 는 모질의 파수,  $d$ 는 생물체의 질에 따른 계수,  $\rho$ 는 생물체와 모질의 밀도차,  $c$ 는 생물체와 모질의 음속비이다.

이 식을 변형하여 표준화 TS를 체장/파장( $L/\lambda$ )의 함수로 하면

$$T_{sm} = \frac{\varepsilon^4 (\pi L/\lambda)^4}{4 + 6 \varepsilon^{8/3} (\pi L/\lambda)^4} d^2 \quad (5)$$

이 된다.  $d$ 는 위 식과 같고,  $\varepsilon$ 는 액상타원체의 단축과 장축의 비이다. 이 식에 의하면 TS의 특성은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서는 남극크릴새우의 변수(Furusawa et al., 1994; Foot et al., 1996)를 이용하여  $\varepsilon=0.117$ ,  $\rho_r=1.0357$ ,  $c_r=1.0279$ 로 하였다. 체장이 파장보다 작은 레일리영역에서 TS는 주파수의 4승, 체적의 2승에 비례하고, 체장이 파장보다 큰 기하영역에서 TS는 주파수에 의존하지 않고 플랑크톤의 산란단면적에 비

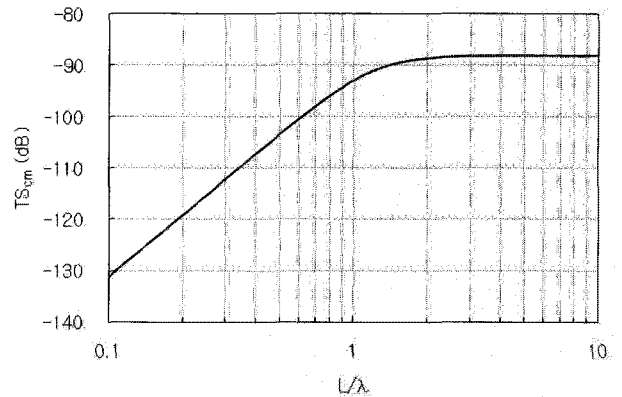


Fig. 2. Normalized TS( $T_{sm}$ ) on size-wavelength ratio ( $L/\lambda$ ) by high-pass sphere model.

례한다. 실제의 산란특성은 이처럼 간단하지는 않지만 평균적으로 큰 차이는 없을 것이라 생각된다.

플랑크톤의 채집에 의한 체적산란강도  $S_{Vc}$ 는 종별 · 체장별 분포밀도와 TS의 곱으로 계산된다.

$$S_{Vc} = \sum n T_s = \sum_{species} \sum_L n(L) T_s(L) \quad (6)$$

4개의 빔을 가진 ADCP에서는 각각 1m의 수심과 20초의 폭으로 에코강도를 적분하여 8bit의 counts라는 단위로 출력된다. 이 counts로 표현된 에코강도로부터 체적산란강도는 다음 식을 이용하여 구한다(Deines, 1999).

$$S_{Vm} = \frac{C_V (T_x + 273.16) r^2 10^{K_c (E - E_r)/10}}{PW 10^{-0.2\alpha r}} \quad (7)$$

여기에서  $C_V$ 는 ADCP 고유의 계수로  $C_V=10\log C_V=-148.2$  dB를 이용하였으며,  $P$ 는 펄스 길이,  $W$ 는 송신출력이다.  $T_x$ 는 설치한 ADCP 송수파기의 내부온도(°C)이고,  $K_c$ 는 송수파기의 표면온도에 따라 변하는 에코강도(counts)의 디지털변환 계수로서 조사해역의 봄철  $K_c$ 는 0.45(dB/count)이었으며, 가을철은 0.43(dB/count)이었다.  $r$ 은 전달거리,  $a$ 는 흡수계수이고,  $E$ 는 각 적분 층의 에코강도(counts),  $E_r$ 은 에코강도의 기준레벨이다. 본 연구에서는  $E_r$ 을 40(counts)로 하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 플랑크톤 분포특성

황토를 살포한 해역(St. 1~9)과 황토를 살포하지 않은 해역(St. 10~17)의 정점에서 춘계(2009년 3월)에 채집한 플랑크톤의 평균 단위체적당 개체수를 Table 3에 나타내었다. 채집된 생물은 총 21종이었으며 단위체적당 4311.8개체가 채집되었다. 이중 요각류(*Copepods*)가 65.0%, 야광충류(*Noctilucales*)가 31.2%로 전체 생물의 96.2%를 차지하였다. 황토를 살포하지 않은 해역(St. 10~17)에서는 21종의 생물이 단위체적당 5696.7개체가 채집되었으나, 황토를 살포한 해역(St. 1~9)에서는 15종의 생물이 단위체적당 3080.8개체가 채집되어 황토를 살포한 해역의 종수 및 단위체적당 개체수가 낮게 나타났다.

Table 3. The species composition of zooplankton collected by NORPAC net at stations on the study area in April, 2009

Species	Spraying ocean of yellow loess		Non-spraying ocean of yellow loess		Total	
	Average of density distribution (individual/m <sup>3</sup> )	%	Average of density distribution (individual/m <sup>3</sup> )	%	Average of density distribution (individual/m <sup>3</sup> )	%
<i>Noctilucales</i>						
<i>Noctiluca scintillans</i>	645.3	20.9	2131.1	37.4	1344.5	31.2
<i>Mudusae</i>						
<i>Siphonophorids</i>	0.0	0.0	1.5	0.0	0.7	0.0
<i>Trachymedusae</i>	2.8	0.1	1.0	0.0	2.0	0.0
<i>Copepods</i>						
<i>Acartia omorii</i>	158.1	5.1	230.3	4.0	192.1	4.5
<i>Calanus sinicus</i>	43.5	1.4	42.6	0.7	43.1	1.0
<i>Centropages abdominalis</i>	95.4	3.1	224.4	3.9	156.1	3.6
<i>Ctenocalanus vanus</i>	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
<i>Paracalanus parvus s.l.</i>	1533.0	49.8	2084.5	36.6	1792.5	41.6
<i>Pseudodiaptomus marinus</i>	0.0	0.0	5.8	0.1	2.7	0.1
<i>Oithona spp.</i>	480.8	15.6	637.2	11.2	554.4	12.9
<i>Corycaeus affinis</i>	6.9	0.2	124.6	2.2	62.3	1.4
<i>Monstrilla sp.</i>	0.0	0.0	1.2	0.0	0.6	0.0
<i>Triconia sp.(Oncaeidae)</i>	0.9	0.0	0.6	0.0	0.8	0.0
<i>Larvae decapods</i>						
<i>Decapod larvae</i>	6.0	0.2	4.9	0.1	5.5	0.1
<i>Amphipods</i>						
<i>Gammariid larvae</i>	0.6	0.0	0.6	0.0	0.6	0.0
<i>Euphausiids</i>						
<i>Euphausiid larvae</i>	0.0	0.0	12.0	0.2	5.6	0.1
<i>Chaetognatha</i>						
<i>Sagitta crassa</i>	4.0	0.1	5.1	0.1	4.5	0.1
<i>Appendicularia</i>						
<i>Oikopleura dioica</i>	88.6	2.9	176.9	3.1	130.1	3.0
<i>Others</i>						
<i>Gastropod larvae</i>	0.0	0.0	5.0	0.1	2.4	0.1
<i>Polychaete larvae</i>	1.8	0.1	4.0	0.1	2.8	0.1
<i>Cirripedia larvae</i>	13.0	0.4	3.1	0.1	8.4	0.2
Total	3080.8	100.0	5696.7	100.0	4311.8	100.0
Number of species	15		21		21	

조사해역의 정점별 출현종수, 단위체적당 개체수 (individuals/m<sup>3</sup>/1,000), 종다양성지수(bit)의 변동은 Fig 3과 같다. 황토를 살포한 해역(St. 1~9)의 정점별 출현종수, 단위체적당 개체수는 비슷하였으나, 황토를 살포하지 않은 해역(St. 10~17)의 그것은 변동이 컸다. 정점별 출현종수는 St. 10, 11, 13의 금오도 동쪽해역에서 13종 이상이 출현하여 가장 많았으며, 단위체적당 개체수는 St. 10, 15, 17에서 8,000 개체 이상이 채집되었다. 종다양성지수는 황토를 살포한 해역(St. 1~9)에서 1.360bit, 황토를 살포하지 않은 해역(St. 10~17)에서 1.414bit로 St. 1, 14, 15를 제외한 정점에서 출현 확률이 한 종에 크게 편중되어 있음을 확인할 수 있었다.

정점별 플랑크톤 출현양상의 상호관련성을 파악하기 위하여 군집분석을 하여 Fig. 4에 나타내었다. 군집분석 결과 4개의 유형으로 그룹이 형성되었다. 첫째는 황토를 살포한 해역의 그룹(St. 2, 3, 4, 8, 9), 둘째는 황토를 살포한 해역에 황토를 살포하지 않은 해역이 일부 포함된 그룹(St. 1, 5, 6, 7 과 St. 13, 14), 셋째, 넷째는 황토를 살포하지 않은 해역의 그룹이다. 전체적으로 황토를 살포한 해역의 유사성이 높게 나타났다.

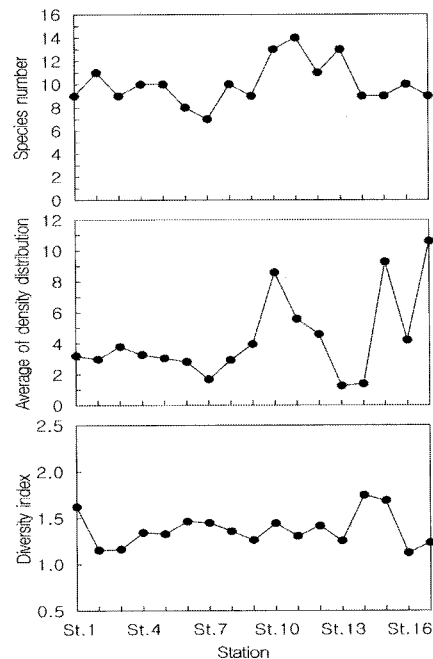


Fig. 3. The variations of species number, density distribution, and diversity index of zooplankton collected by NORPAC net at stations on the study area in April, 2009.

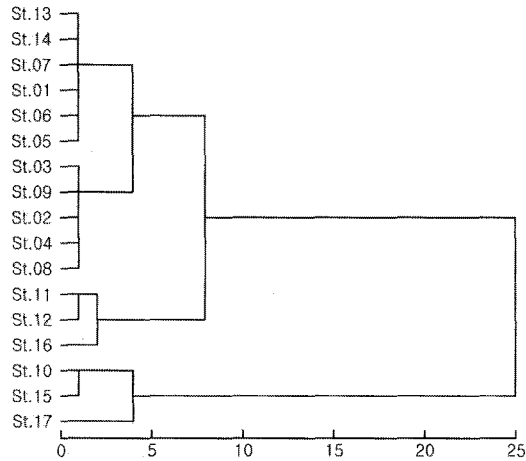


Fig. 4. The similarity index of stations on the study area in April, 2009.

### 3.2 ADCP의 특성

Fig. 5는 ADCP의 주파수  $f$ 와 TS 변화에 따른 탐지범위를 나타낸 것이다. 가로축이 탐지폭, 세로축이 탐지거리이며 축적은 동일하게 하였다. 각각의 주파수에서 TS 변화에 따른 탐지범위로부터 ADCP의 음향특성을 검토하였다.

지금까지 수중 음향기기의 탐지거리나 탐지범위와 유사한 개념으로 사용되는 샘플링체적에 대한 많은 연구가 선행되었으나 일반적이고 대략적인 탐지범위를 다루고 있었다. 특히 탐지거리 이외의 탐지폭과 전체를 탐지할 수 있는 범위의 검토가 불충분하였다. 따라서 주파수, 송·수파기의 직경, 송파음의 강도, 해양생물의 산란특성 등과 같은 주요변수에 의한 탐지범위를 정량적으로 계산할 수 있도록 하였다.

탐지거리와 탐지범위는 주파수, 송수파기의 직경, 송신전력의 증가와 함께 증가하지만 일정주파수 이상에서는 최대치가 된 후 주파수가 증가함에 따라 흡수계수의 영향으로 급격하게 감소한다. 어군탐지기의 경우에는 20~50 kHz에서 탐지범위가 최대가 되었다(박, 2005). 즉 송수파기의 직경, 송신전력, TS

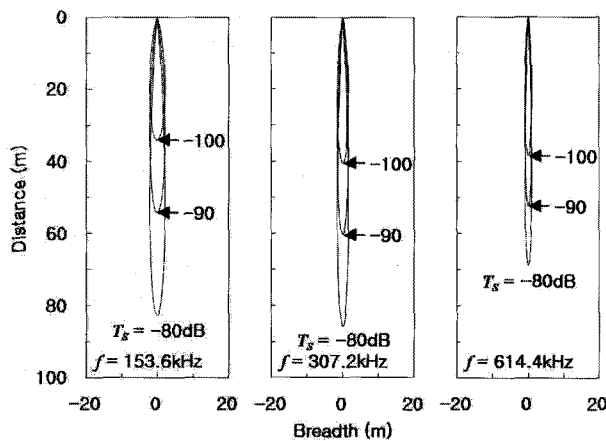


Fig. 5. Detectable ranges of ADCP dependence on TS for frequencies of 150 kHz, 300 kHz, and 600 kHz. Parameters are shown in Table 2.

증가에 따른 효과는 저주파에서는 크고 고주파에서는 작다.

본 연구에 사용한 153.6 kHz의 ADCP는 307.2 kHz의 ADCP보다 송파기의 직경, 송신전력을 크게 하고, 수신계의 대역폭을 작게 하였음에도 불구하고 탐지거리가 감소하였다. 614.4 kHz의 ADCP는 탐지거리도 짧았으며, TS 증가에 따른 효과도 작았다. 이와 같이 본 연구에 사용한 ADCP도 송수파기의 직경, 송신전력, TS 증가에 따른 효과는 고주파에서 크지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 조사해역은 수심 50m 이내로서 작은 TS 범위에서 탐지범위를 정량적으로 측정할 수 있는 것은 307.2 kHz의 ADCP임을 확인할 수 있었다.

### 3.3 플랑크톤의 량 추정

황토살포해역(SOYL) 9지점과 미살포해역(NOYL) 8지점의 플랑크톤의 종별, 체장별 개체수와 분포밀도의 평균치를 Table 4에 나타내었다. Table 4을 이용하여 체적산란강도를 (5)식으로 구하였다. 황토가 살포된 해역(St. 1~9)은 여수량 29.4m<sup>3</sup>에 체적산란강도  $SV_c=10\log(SV_c)=-84.4$  dB이었으며, 황토가 살포되지 않은 해역(St. 10~17)은 여수량 23.9 m<sup>3</sup>에 체적산란강도  $-80.0$  dB이었다.

각 지점에서 채집된 플랑크톤의 체적산란강도  $SV_c$ 와 플랑크톤을 채집한 동일한 시간대에 ADCP에 의해 측정된 체적산란강도  $SV_m=10\log(SV_m)$ 를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 지점의  $SV_c$ 와  $SV_m$ 는 St. 7과 9를 제외하고 비슷하게 표시되었으나, 실측치인  $SV_m$ 가 이론치인  $SV_c$ 보다 2.6 dB 높았다. 이것은 ADCP에 의해 측정된 체적산란강도에는 플랑크톤 이외의 부유물, 어류 등의 영향을 받고 있기 때문이라 생각된다.

$SV_c$ 는 SOYL에서  $-84.4$ dB, NOYL에서  $-80.0$ dB로 NOYL에서 4.4dB 높았으나,  $SV_m$ 는 SOYL과 NOYL에서 각각  $-80.1$ dB,  $-79.9$ dB로 거의 일치하였다. 즉 NOYL의  $SV_c$ 와  $SV_m$ 는 거의 일치하였으나, SOYL의  $SV_m$ 는  $SV_c$ 보다 4.3 dB 높았다. 따라서 황토를 살포한 해역에서는 부유물이 ADCP에

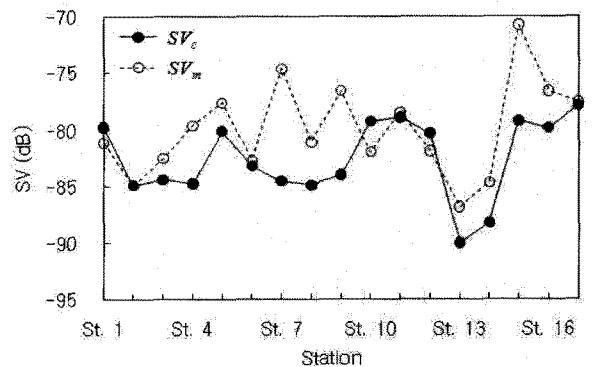


Fig. 6. Volume backscattering strength (SV) in the stations. The dotted and solid lines show SV calculated by the zooplankton collected with NORPAC net and the echo intensity measured with ADCP at stations on the study area.

Table 4. Size distribution of the zooplankton collected by NORPAC net at stations on the study area in April, 2009

Species	Size (mm)						Total
	0.1~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~	
<i>Noctilucales</i>	0	0	1,853 (645)	0	0	0	1,853
<i>Mudusae</i>	0	0	0	0	0	7 (3)	7
<i>Copepods</i>	6,872 (2,014)	817 (261)	0	131 (44)	0	0	7,820
<i>Larvae decapods</i>	0	0	20 (6)	0	0	0	20
SOYL <i>Amphipods</i>	0	0	0	4 (1)	0	0	4
<i>Euphausiids</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Chaetognatha</i>	0	0	0	0	0	9 (4)	9
<i>Appendicularia</i>	0	0	300 (89)	0	0	0	300
<i>Others</i>	11 (2)	35 (13)	0	0	0	0	45
Total	6,883	852	2,173	134	0	16	10,058
<i>Noctilucales</i>	0	0	6,740 (2,131)	0	0	0	6,740
<i>Mudusae</i>	0	0	0	0	0	9 (2)	9
<i>Copepods</i>	8,936 (2,722)	1,753 (586)	8 (1)	173 (43)	0	0	10,870
<i>Larvae decapods</i>	0	0	25 (5)	0	0	0	25
NOYL <i>Amphipods</i>	0	0	0	2 (1)	0	0	25
<i>Euphausiids</i>	0	0	22 (12)	0	0	0	225
<i>Chaetognatha</i>	0	0	0	0	0	12 (5)	125
<i>Appendicularia</i>	0	0	417 (177)	0	0	0	417
<i>Others</i>	39 (9)	14 (3)	0	0	0	0	53
Total	8,975	1,767	7,211	175	0	21	18,148

크게 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 조사정점을 따라 획득한 ADCP 에코데이터를 조사위치 (GPS의 위도와 경도)에 따라 작도한 플랑크톤의 체적산란강도  $SV_m$ 의 수평분포도이다. 이론치인  $SV_c$ 와 실측치인  $SV_m$ 의 차 2.6 dB을 보정하여 수평분포도를 작도하였으며,  $SV_m$ 의 수평분포도는 가을과 봄 자료를 모두 이용하였다. 조사선박은 정밀하게 조사정선을 따라 항주할 수 없었지만 대체로 처음 계획하였던 조사정선과 일치하였다. Fig. 7에서 추출된 에코그램은 적분주기를 20초, 적분폭을 표층 5m에서 저층까지로 하여  $SV_m$ 를 구하였다. Fig. 7에는 플랑크톤을 채집한 정점이 표시되어 있다. 시스템이 정지되어 시스템을 재부팅한 시점의 자료를 이용한 St. 2를 제외하고 Fig. 6과 봄의 정점별 플랑크톤 체적산란강도는 일치하였다. St. 8은 플랑크톤의 밀도가 높은 해역에 둘러싸인 저밀도 해역임을 알 수 있으며, St. 15는 플랑크톤의 밀도가 낮은 해역에 둘러싸인 고밀도 해역임을 확인할 수 있다. 이와 같이 ADCP에 의한

플랑크톤의 체적산란강도는 샘플 해역만의 체적산란강도보다 주변의 분포밀도를 효과적으로 확인할 수 있어 보다 정량적으로 전체해역의 분포밀도를 예측할 수 있다.

$SV_m$ 는 SOYL이 NOYL보다 높았으며, 봄철이 가을철보다 높았다. 가을의  $SV_m$ 은 SOYL에서 -85.1dB, NOYL에서 -89.2로 SOYL이 4.1dB 높았고, 봄의  $SV_m$ 은 -79.7dB, 84.5dB로 SOYL이 4.8 dB 높았다. 채집에 의한 체적산란강도는 NOYL이 고밀도 이었으나, ADCP의 계측에 의한 체적산란강도는 SOYL이 고밀도 이었다. 이것은 ADCP는 황토 살포 등에 의한 부유물의 영향을 크게 받고 있기 때문이라 생각된다. 따라서 SOYL의 부유물의 영향을 정점별  $SV_m$ 와  $SV_c$ 에서 계산한 4.3dB로 하여 전 해역의 플랑크톤 분포밀도를 평가하면 대체적으로 SOYL이 NOYL의 분포밀도는 큰 차이가 없었다. 그러나 봄과 가을에 고밀도 플랑크톤은 돌산도 남쪽과 금오도 북쪽 및 서쪽사이의 해역에 분포하였다. 특히 금오도 북쪽과 대두리도 남쪽사이의 해역은 대단히 높은 밀도로 플랑

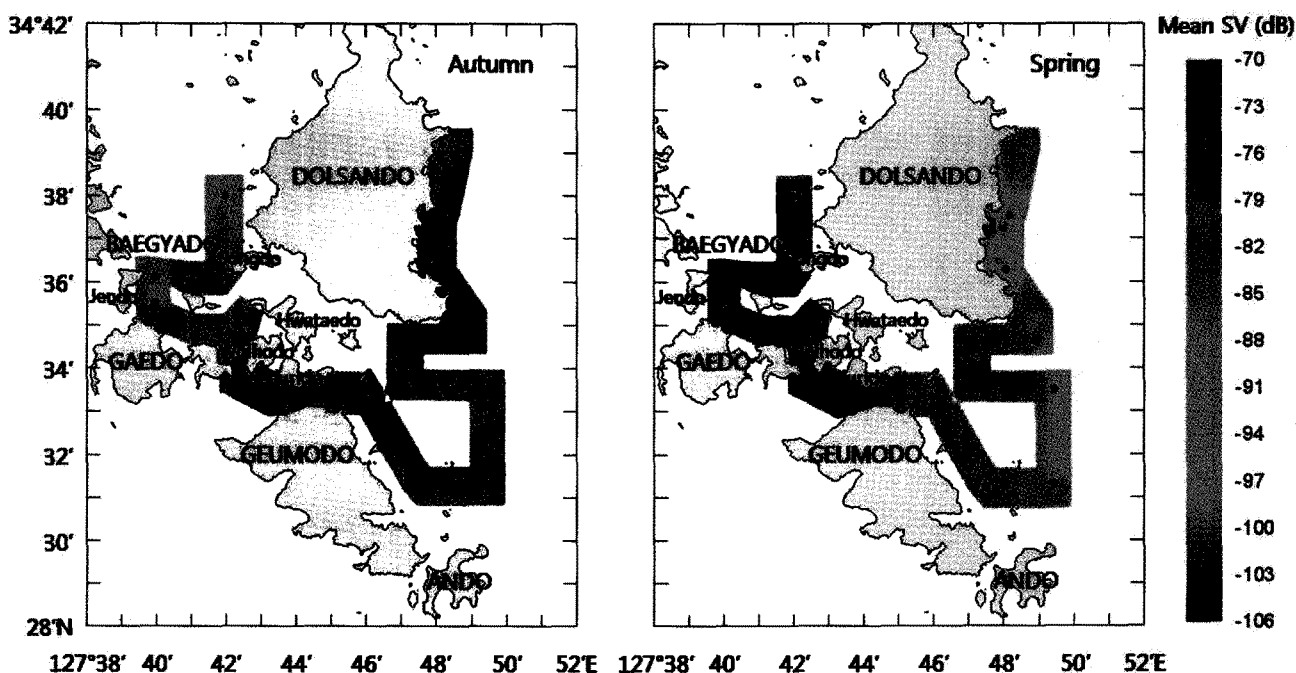


Fig. 7. Horizontal distribution of volume backscattering strength ( $SV_m$ ) at the study area in October, 2008 and April, 2009.

크톤이 분포하고 있었다. 저밀도 플랑크톤은 와류가 발생하는 돌산도 동쪽해역과 외해의 영향을 가장 많이 받는 금오도 동쪽 해역에서 관측되었다. 특히 봄에 돌산도 동쪽의 St. 15 지점은 관측점에서만 플랑크톤이 고밀도로 관측되고 주변해역은 가장 낮은 저밀도를 나타내어 채집에만 의존할 경우 분포밀도의 과대평가를 유발할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 고찰

ADCP는 수중의 부유물질, 플랑크톤 등으로부터 산란되어 되돌아온 음파의 도플러 주파수 변이를 측정하여 해류의 유향, 유속의 수직분포를 관측하는 계기이다. 이와 같은 ADCP를 이용하여 산란체로부터 되돌아온 음파의 에코강도를 체적산란강도로 정량화하여 수중에 분포하는 동물플랑크톤의 생물량을 측정하게 되었다. 그러나 ADCP에 의해 생물량을 정량적으로 측정하기에는 한계가 있다. 먼저 ADCP는 적분 층의 폭이 크기 때문에 거리분해능이 좋지 않다는 것이다. 다음은 ADCP의 음향 빔이 수직선에서 각각 30°씩 경사되어 있기 때문에 계량어군탐지기 등에서 일반적으로 사용하는 보정으로 보정을 하기가 어렵다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 계측하고자 하는 해역에서 가장 적합한 적분 층의 폭 등을 결정하고 ADCP의 특성을 확인하기 위하여 ADCP에 대한 평가를 수행하였다. 지금까지 ADCP를 이용하여 산란체의 체적산란강도를 측정된 대부분의 연구에서는 적분 층과 일부 변수를 조정하여 원거리 탐지에 목적을 두고 있어 사용해역에 적합하지 여부를 확인할 수 없었지만, ADCP의 특성을 평가함으로써 조사해역에 사용한 ADCP 시스템과 사용변수의 적합성 여부를 파악할 수 있었다. 또한 정량적인 생물밀도의

추정을 위하여 ADCP에 의해 측정된 산란체의 체적산란강도와 플랑크톤 네트에 의해 채집된 동물플랑크톤의 밀도와의 상관관계를 이용하였다. 현재까지의 많은 연구들은 ADCP의 보정의 어려움 때문에 ADCP에 의해 측정된 체적산란강도와 플랑크톤 네트로 채집한 동물플랑크톤의 밀도와의 상관관계로부터 생물의 밀도를 추정하거나(Fielding et al., 2004), ADCP에 의한 체적산란강도와 광학식 플랑크톤 가운터를 병용하여 생물밀도를 추정하여왔다(Wade and Heywood, 2001). 본 연구에서는 ADCP에 의해 측정된 산란체의 체적산란강도와 플랑크톤 네트에 의해 채집된 동물플랑크톤의 밀도와의 상관관계로부터 부유물 등의 영향을 보다 정량적으로 평가하여 체적산란강도의 과대 또는 과소평가를 줄일 수 있었다.

ADCP는 에코강도를 counts라는 단위로 출력하며 에코강도로부터 체적산란강도는 (7)식을 이용하여 구한다. (7)식에서 ADCP 고유의 계수  $CV = 10 \log C_V = -148.2$  dB를 이용하였다.  $CV$ 의 오차범위는  $\pm 3$  dB이다(Deines, 1999). ADCP의 체적산란강도를 계산할 때 그 값에 큰 영향을 미치는 요소는 측정해역의 적분 층의 에코강도 (counts)에 대한 기준레벨  $E_r$ 이다.  $E_r$ 은 크면 체적산란강도의 추정 값이 작아지고, 반대로 작아지면 커진다. 따라서  $E_r$ 은 현장에서 측정된 에코강도  $E$ 에서 가장 작은 값을 이용하는 것이 일반적이다(李, 2005). 2009년의 조사에서는  $E_r$ 은 38 (counts)이었지만, 2008년의 자료와의 균형을 맞추기 위하여 일반적으로 사용되는 40 (counts)로 하였다. 따라서 ADCP에 의해 측정된 체적산란강도  $SV_m$ 는 약간의 오차를 포함할 수 있으나 그 크기는  $CV$ 의 오차범위  $\pm 3$  dB에 한정된다.

2009년 봄의 자료에서는 ADCP에 의해 측정된 체적산란강도와 플랑크톤 네트에 의해 채집된 동물플랑크톤의 밀도와의



상관관계를 이용하였다. 그러나 2008년 가을의 자료에서는 정량적으로 체적산란강도를 추정하기 위해서는 동일한 계절에 채집된 플랑크톤의 밀도와 상관을 구해야 하겠으나, 채집한 플랑크톤을 정확하게 계수하지 못해 2009년 봄의 자료를 이용하여 상관관계를 분석하였다. 그러나 봄과 가을의 체적산란강도의 분포특성이 비슷하여 패턴을 설명하기에는 충분하였다고 생각된다.

동물플랑크톤의 분포 위치 및 분포 밀도 등을 파악하는데 ADCP에 의한 계측은 분포 밀도의 과대 또는 과소평가를 줄일 수 있어 중요하게 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 플랑크톤의 종류나 생태습성을 파악하기 위해서는 ADCP에 의한 조사와 동시에 고정도 채집기구에 의한 직접적인 채집과 ADCP의 분포 밀도를 평가할 수 있는 별도의 음향기기 또는 광학기기 등 다양한 기기와의 조합이 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결론

우리나라에서는 1996년부터 매년 적조가 발생하면 그 피해를 줄이기 위해 황토를 살포하여 왔다. 황토가 살포되는 해역은 대부분 가두리 양식장 주변으로 매년 권장 살포량인  $m^2$ 당 100~400g이상이 대량으로 살포되고 있었다. 본 연구에서는 지금까지 적조가 발생하여 매년 황토가 살포되어온 해역과 황토가 살포되지 않은 해역을 대상으로 추계(2008년 10월)와 춘계(2009년 4월)에 플랑크톤 네트에 의한 채집과 ADCP에 의한 체적산란강도를 계측하여 플랑크톤 분포특성과 플랑크톤의 분포밀도를 조사하였다.

황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역에서 플랑크톤의 채집은 춘계의 자료만을 이용하였다. 춘계에 채집된 생물은 총 21종이었으며 황토를 살포하지 않은 해역에서는 21종의 생물이 고루 채집되었으나, 황토를 살포한 해역에서는 15종의 생물이 채집되어 황토를 살포한 해역의 종수 및 단위체적당 개체수가 낮게 나타났다. 또한 황토를 살포한 해역의 정점별 출현종수, 단위체적당 개체수는 비슷하였으나, 황토를 살포하지 않은 해역의 그것은 변동이 컸다. 종다양성 지수는 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역에서 출현확률이 한 종에 크게 편중되어 있음을 확인할 수 있었다. 정점별 플랑크톤 출현양상의 상호관련성을 파악하기 위한 군집분석에서 황토를 살포한 해역의 유사성이 높게 나타났다.

계측하고자 하는 해역에서 가장 적합한 적분 층의 폭 등을 결정하고 ADCP의 특성을 확인하기 위하여 ADCP에 대한 평가를 수행하였다. ADCP의 특성을 평가함으로써 조사해역에 사용한 ADCP 시스템과 사용변수의 적합성 여부를 파악할 수 있었다.

평가된 ADCP를 사용하여 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역의 플랑크톤 분포밀도를 추정하였다. 플

랑크톤의 분포밀도를 비교하여 보정한 후 정량적으로 추정하기 위하여 각 정점에서 채집한 플랑크톤의 종별, 체장별 개체수와 분포밀도의 평균치를 이용하여 체적산란강도(이론치)  $SV_0$ 를 구하였다. 또한 플랑크톤을 채집한 동일한 시간대에 ADCP에 의해 계측된 체적산란강도(실측치)  $SV_m$ 를 구하였다.  $SV_0$ 는 황토를 살포하지 않은 해역에서 4.4 dB 높았으나,  $SV_m$ 은 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역에서 거의 일치하였다. 즉 황토를 살포하지 않은 해역의  $SV_0$ 와  $SV_m$ 는 거의 일치하였으나, 황토를 살포한 해역의  $SV_m$ 은  $SV_0$ 보다 4.3 dB 높아 황토를 살포한 해역에서는 부유물이 ADCP에 크게 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

다음은 조사정점을 따라 항해하면서 ADCP에 의한 계측된 체적산란강도의 수평분포도를 작도하였다. 체적산란강도는 적분주기를 20초, 적분 폭을 표층 5m에서 저층까지로 하여 구하였다. 체적산란강도는 황토를 살포한 해역이 황토를 살포하지 않은 해역보다 높았으며, 봄철이 가을철보다 높았다. 채집에 의한 체적산란강도는 황토를 살포하지 않은 해역이 고밀도이었으나, ADCP의 계측에 의한 체적산란강도는 황토를 살포한 해역이 고밀도로 나타나 ADCP는 황토 살포 등에 의한 부유물의 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있었다. 황토를 살포한 해역의 부유물 영향을 제거하면 황토를 살포한 해역과 황토를 살포하지 않은 해역의 분포밀도는 큰 차이가 없었다. 본 조사 해역에서 고밀도 플랑크톤은 돌산도 남쪽과 금오도 북쪽 및 서쪽사이의 해역에 분포하였다. 특히 금오도 북쪽과 대두리도 남쪽사이의 해역은 대단히 높은 밀도로 플랑크톤이 분포하고 있었다. 저밀도 플랑크톤은 와류가 발생하는 돌산도 동쪽해역과 외해의 영향을 가장 많이 받는 금오도 동쪽 해역에서 관측되었다. ADCP를 이용하면 채집에 의한 분포밀도의 과대 또는 과소평가를 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 사 사

이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(기초과학분야 : KRF-2007-359-F00008)

## 참 고 문 헌

- [1] 박주삼(2005), 수산음향계측장치의 탐지범위에 대한 연구, 한국어업기술학회지, 제41권, 제1호, pp. 54-63.
- [2] Broughton, E. A. and R. G. Lough(2006), A direct comparison of MOCNESS and video plankton recorder zooplankton abundance estimates: possible applications for augmenting net sampling with video systems, Deep-Sea Research II, Vol. 53, Issues 22-24, pp. 2789-2807.

- [3] Deines, K. L.(1999), Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers, Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement, San Diego, CA, March 11 - 13, 1999, pp. 249 - 253.
- [4] Dou S.(1995), Food utilization of adult Flatfishes co-occurring in the bohai sea of China. *Neth. J. Sea Res.*, Vol. 34, Issues 1-3, pp. 183-193.
- [5] Fielding, S., G. Griffiths and H. S. J. Roe(2004), The biological validation of ADCP acoustic backscatter through direct comparison with net samples and model predictions based on acoustic-scattering models, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol. 61, No. 2, pp. 184-200.
- [6] Flagg, C. N. and S. L. Smith(1989), On the use of the acoustic doppler current profiler to measure zooplankton abundance, *Deep-Sea Research I*, Vol. 36, Issue 3, pp. 455-474.
- [7] Foote, K. G., T. Knutsen, A. E. Bekkevold, P. Dalpadado and S. E. Johannessen(1996), Initial, collateral measurements of some properties of *Calanus finmarchicus*, *ICES C.M.*, L21 Ref. B, p. 23.
- [8] François, R. E. and G. R. Garrison(1982), Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, Issue 6, pp. 1879-1890.
- [9] Furusawa, M., Y. Miyanoana, M. Ariji and Y. Sawada(1994), Prediction of krill target strength by liquid prolate spheroid model, *Fisheries Science*, Vol. 60, No. 3, pp. 261-265.
- [10] Greene, C. H.(1989), Analyzing zooplankton size distributions using high-frequency sound, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 34, No. 1, pp. 129-139.
- [11] Greene, C. H., P. H. Wiebe, R. T. Miyamoto and J. Burczynski(1991), Probing the fine structure of ocean sound-scattering layers with ROVERSE technology, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36, No. 1, pp. 193-204.
- [12] Greenlaw, C. F.(1979), Acoustical estimation of zooplankton populations, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 24, No. 2, pp. 226-242.
- [13] Herman, A. W.(1992), Design and calibration of a new optical plankton counter capable of sizing small zooplankton. *Deep-Sea Research I*, Vol. 39, Issues 3-4, pp. 395-415.
- [14] Hewitt, R. P. and D. A. Demer(1991), Krill abundance, *Nature*, Vol. 353, p. 310.
- [15] Johnson, R. K.(1977a), Acoustic estimation of scattering-layer composition, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, Issue 6, pp. 1636-1639.
- [16] Johnson, R. K.(1977b), Sound scattering from a fluid sphere revisited, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, Issue 2, pp. 375-377.
- [17] Labat, J. P., S. Gasparini, L. Mousseau, L. Prieur, M. Boutoute and P. Mayzaud(2009), Mesoscale distribution of zooplankton biomass in the northeast Atlantic Ocean determined with an optical plankton counter: relationships with environmental structures, *Deep-Sea Research I*, Vol. 56, Issue 10, pp. 1742-1756.
- [18] Labat, J. P., P. Mayzaud, S. Dallot, A. Errhif, S. Razouls and S. Sabini(2002), Mesoscale distribution of zooplankton in the Sub-Antarctic Frontal system in the Indian part of the Southern Ocean: a comparison between optical plankton counter and net sampling, *Deep-Sea Research I*, Vol. 49, Issue 4, pp. 735-749.
- [19] Mackenzie, K. V.(1981), Nine-term equation for sound speed in the oceans, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 70, Issue 3, pp. 807-812.
- [20] MacLennan, D. N. and D. V. Holliday(1996), Fisheries and plankton acoustics: past, present, and future, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol. 53, No. 2, pp. 513-516.
- [21] Madureira, L. S. P., P. Ward and A. Atkinson(1993), Differences in backscattering strength determined at 120 and 38 kHz for three species of Antarctic macroplankton, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 93, pp. 17-24.
- [22] Pieper, R. E.(1979), Euphausiid distribution and biomass determined acoustically at 102 kHz, *Deep-Sea Research I*, Vol. 26, Issue 6, pp. 687-702.
- [23] Pieper, R. E., D. E. McGehee, C. F. Greenlaw and D. V. Holliday(2001), Acoustically measured seasonal patterns of zooplankton in the Arabian Sea, *Deep-Sea Research II*, Vol. 48, Issues 6-7, pp. 1325-1343.
- [24] Pinto, A. M. F., E. Von Sperling and R. M. Moreira(2001), Chlorophyll-a determination via continuous measurement of plankton fluorescence: methodology development, *Wat. Res.*, Vol. 35, No. 16, pp. 3977-3981.
- [25] RD Instruments(1996), Acoustic doppler current profiler: principles of operation, a practical primer, San Diego, California, U.S.A., p. 52.
- [26] Richter, K. E.(1985), Acoustic determination of small-scale distributions of individual zooplankters and zooplankton aggregations, *Deep-Sea Research I*, Vol. 32, Issue 2, pp. 163-182.
- [27] Shannon, C. E. and W. Wiener(1963), The mathematical theory of communication, Urbana, Univ. of Illinois Press, p. 125.
- [28] Smith, P. E., M. D. Ohman and L. E. Eber(1989),

Analysis of the patterns of distribution of zooplankton aggregations from an acoustic doppler current profiler, CaLCOFI Rep., Vol. 30, pp. 88-103.

- [29] Wade, I. P. and K. J. Heywood(2001), Acoustic backscatter observations of zooplankton abundance and behaviour and the influence of oceanic fronts in the northeast Atlantic, Deep-Sea Research II, Vol. 48, Issues 4-5, pp. 899-924.
- [30] 李垌勳(2005), 도플러-流向流速計(ADCP)を用いた音響散亂層の生物密度推定と種判別に關する研究, 北海道大學大學院, 博士論文, p. 100.
- [31] 古澤昌彦(1995), 音響による動物プランクトン計測の展望, 海洋音響學會誌, 第24巻, 第3号, pp. 162-169.
- [32] 日本氣象廳編(1990), 海洋觀測指針, 財団法人日本氣象協會, pp. 211-221.

---

원고접수일 : 2010년 04월 09일

원고수정일 : 2010년 05월 18일

게재확정일 : 2010년 06월 24일