

남극 남셰틀란드 군도 북부 해역의 크릴 분포 및 자원량

강동혁 · 황두진* · 김수암
한국해양연구소 극지연구센터, *여수대학교 해양생산학과

Biomass and distribution of Antarctic Krill, *Euphausia superba*, in the Northern part of the South Shetland Islands, Antarctic Ocean

Donhyug KANG, Doojin HWANG* and Suam KIM

Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P. O. Box 29, 425-600, Korea

*Department of Marine Science and Technology, Yosu National University, 550-749, Korea

To estimate biomass and distribution of the Antarctic krill (*Euphausia Superba*), hydroacoustic survey was conducted on board of R/V *Yuzhmorgeologiya*, which was chartered by Korea Antarctic Research Program (KARP) group from 18 to 21 December 1998, in the northern part of the South Shetland Islands, Antarctic Ocean. The scientific echo sounder (towing body type) used was EK-500 (SIMRAD, Norway) with echo integrator (BI-500) at 38 kHz frequency and recorded mean backscattering cross-section coefficient (SA) per 1 mile² of sea surface. Also, Bongo net sampling was carried out to determine the size of krill and CTD (Conductivity, Temperature and Depth) casting to understand physical structure. Water column was divided into 5 layers (22~65 m, 65~115 m, 115~165 m, 165~215 m and 215~315 m) to know vertical distribution of krill biomass. The standard length of krill collected was between 30 mm and 51 mm, and adult krill had single mode (41 mm). Maximum horizontal length of krill patch was about 35 nautical mile and vertical thickness was about 275 m. High density of krill was appeared in frontal area between Circumpolar Deep Water (>1°C) and very low temperature water mass (<-0.5°C) that originate from Weddell Sea. According to the results calculated using target strength equation, krill density was totally higher in continental slope and open water areas than in coastal area. In the study area, krill seems to distribute in depth; density was low at first layer ($\bar{\rho}=17.0 \text{ g/m}^2$) and higher at fourth layer ($\bar{\rho}=40.19 \text{ g/m}^2$). The estimated krill biomass at total survey area and water column was about 2.77 million metric ton ($\bar{\rho}=151.0 \text{ g/m}^2$) and coefficient of variance (CV, %) was 19.92. The proportions and biomass of krill biomass at each layer were as follows; layer 1 (11.3%, 0.31 million metric ton, CV=16.24), layer 2 (13.3%, 0.37 million metric ton, CV=34.91), layer 3 (23.7%, 0.66 million metric ton, CV=41.5), layer 4 (26.6%, 0.74 million metric ton, CV=27.84) and layer 5 (25%, 0.69 million metric ton, CV=26.83).

Key words: Antarctic krill, Scientific Echo Sounder (EK-500), Target Strength, Mean backscattering cross-section coefficient, South Shetland Islands

서 론

남극 크릴 (*Euphausia superba*)은 남극해 해양생태계에서 상위 포식자와 하위 포식자를 연결하는 중요한 연결 고리로 남극해에 존재하는 동물플랑크톤 가운데 가장 큰 군집을 형성하고 있다. 또한, 크릴은 엄청난 생체량 때문에 수산자원으로서의 가치도 매우 커서 미래에 인류에게 공급할 동물 단백질의 중요한 자원으로 인식되고 있다. 따라서, 남극해 생태계를 이해하기 위해서 뿐만 아니라 수산자원의 개발이라는 측면에서 크릴의 분포 및 현존량을 파악하여야 한다. 현재 크릴의 연간 생산력이 2~6 억 톤 정도로 추산하고 있다 (El-Sayed, 1988). 크릴의 연간 어획량은 1980년대에 약 36만 톤 정도였으나, 최근에는 연간 어획량은 약 80,000톤 정도로 감소하였다 (해양수산부, 1999). 이러한 크릴의 분포 및 현존량을 보다 정확히 예측하기 위하여 남극해 생물 군집의 연구중 크릴에 관한 연구가 여러 지역에서 다양하게 수행되고 있다 (Hewitt and Demer, 1991; Sprong and Schalk, 1992; Zhou et al., 1994; NOAA, 1997; Ichii et al., 1998).

크릴은 극전선 (Polar front)과 남극 대륙 사이의 circumpolar region에 주로 분포하는 것으로 조사되었으며 (Marr, 1962;

Miller and Hampton, 1989), 주요 분포 지역은 서대서양의 스코티아해, 웨델해 동부와 북서 해역이며, 인도양, 태평양에서는 남극 발산역 (Antarctic divergence zone) 부근으로 알려져 왔다 (Amos, 1984; 서 등, 1991). 비교적 널리 알려진 분포 지역과는 달리, 크릴의 현존량은 동일한 채집 방법임에도 불구하고 관측 해역간, 동일 해역 내, 연도별로 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 이유는 크릴 조사해역이 매우 제한되어 있을 뿐 아니라, 수온, 염분, 동·식물 플랑크톤, 해빙의 분포와 같은 환경적 변화, 크릴 군집의 행태, 그리고 크릴의 강한 유영 능력 때문에 분포가 균일하지 못한다기 인한다고 알려져 왔다 (Amos, 1984; Hamner, 1984). 세종 기지가 위치하고 있는 남극반도 북서부의 South Shetland 군도와 Bransfield 해협은 남극해에서 크릴의 분포가 매우 높은 지역의 하나이며, 동시에 남극 생태계에서 중요한 지역으로 여러 나라에서 크릴 조사를 실시하였다 (Hewitt and Demer, 1991; NOAA, 1991, 1993, 1997; Gutierrez, 1997; Ichii et al., 1998). South Shetland 군도는 북쪽으로 대서양과 태평양을 연결하는 Drake Passage, 동쪽으로는 웨델해, 남쪽에는 Bransfield 해협으로 둘러싸여 있다. 이 지역은 일본을 비롯한 여러 수산 선진국들에 의해 상업적인 크릴 조업이 이루어지고 있으며 (Ichii et al., 1998), 미국은 해양대기국

(National Oceanic and Atmospheric Administration ; NOAA)의 남극생태연구그룹에 의해 “Antarctic Marine Living Resources”이라는 이름으로 이 지역에서 1980년대 후반부터 10 여 년 동안 크릴 군집 조사 및 해양환경 조사를 실시해 오고 있다 (NOAA, 1997).

South Shetland 군도 주변에서 형성되는 고농도의 크릴 분포에 관한 정확한 기작은 밝혀지지 않았지만 현재까지 연구 결과, 해수 순환 (water circulation), 섭식 환경 (feeding environments) 그리고 산란 환경 (spawning environments) 등이 크릴 군집의 호조건이라고 알려져 있다. 이 해역에서 진행되고 있는 연구는 매우 다양하다. 해수 순환으로는 Antarctic Deep Water, Winter Water 등 년 중 존재하는 수괴와 지역적으로 형성되는 소용돌이 (eddy)로 수온, 염분을 이용한 지형류 (geostrophic current) 계산이 주로 이루어지고 있으며, 최근에 부이를 이용하여 표층 흐름 (Ichii et al., 1998)을, 초음파 유속계 (ADCP)를 이용하여 (강과 김, 1998) 여러 수층의 흐름을 측정하였다. 섭식 환경 연구는 주로 크릴의 중요한 먹이인 식물플랑크톤의 분포 및 풍도에 대한 연구인데, 이 지역은 봄과 여름에 걸쳐 식물플랑크톤의 대번식 (blooming)이 일어나 크릴의 섭식에 도움을 주고 있다 (Miller and Hampton, 1989). 또한, 남극 대륙을 따라 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 Circumpolar Deep Water의 존재로 크릴 유생의 발생 및 생존율이 증가하여 좋은 산란 환경이 형성된다.

크릴의 현존량 및 분포를 조사하기 위하여 플랑크톤 네트를 많이 사용하였다. 그러나, 이 방법은 정성적인 분석에는 장점을 가지고 있으나, 생물 군집의 회피, 자료 수집 및 관측 해역의 한계 등 많은 문제점을 가지고 있으므로, 1970년대 중반부터 군집을 이루는 개개 산란체의 음향학적 특성을 이용하여 현존량 및 분포 지역을 추정하는 기법이 활발히 진행되고 있다. 이러한 음향학적 방법으로부터 얻은 동물플랑크톤의 수직 이동, 공간 분포, 현존량의 결과가 직접적인 네트 자료와 일치하고 있음을 보여주고 있으나 (Kalinowski and Witek, 1980; Everson, 1982; Miller and Hampton, 1989) 정성적인 분석에는 단점을 가지고 있다. 그러므로 대부분의 조사는 두 가지 방법이 모두 사용되고 있다.

남극해에서는 다양한 형태의 음향 장비들이 남극해 크릴 자원량의 분포 및 현존량을 조사하기 위하여 사용되었다 (Ehrenberg, 1974; Inoue et al., 1985; Everson et al., 1990; Hewitt and Demer, 1991; Zhou et al., 1994). 이러한 방법이 선호되는 이유는, 짧은 시간동안 광범위한 해역을 조사할 수 있으며, 주요 산란체인 크릴이 군집을 이루는 특성이 있고, 다른 종 (*Euphausia crystallophias*, *Thysanoessa macrura*)에 비해 상대적으로 우점종을 형성되기 때문이다 (Zhou et al., 1994). 1980년 중반 이후 크릴 조사를 위한 대부분의 음향조사에서 선저형 (hullmounted)과 예인체 (towing body)의 센서에서 사용하는 주파수는 38, 120 kHz이며, 자원량 계산을 위한 target strength 실험도 이들 주파수를 대상으로 실시하였다 (Foote, 1990).

우리나라는 남극 세종과학기지 주변 해역의 해양환경 조사중 채집된 동물플랑크톤 자료로부터 크릴의 분포를 부분적으로 조사해 왔으나 (서 등, 1991; Lee et al., 1994) 세종 기지가 위치하고 있는 King George 섬 남쪽인 Bransfield 해협, Weddell 해 북서 해역인

남극반도 끝 부분과 Elephant 섬 부근에서 주로 연구를 수행하였으며, South Shetland 군도 북쪽 해역의 연구는 실시하지 못하였다. 따라서 기존의 연구로부터 크릴 자원량이 풍부하다고 알려진 South Shetland 군도 북쪽 해역에서 크릴의 분포 및 자원량 파악을 위해서는 해양 환경 조사와 더불어 크릴 조사가 필요한 실정이다. 이러한 연구는 이 지역의 크릴로 대표되는 수산 자원량 조사뿐 아니라 생태계 연구에 필수 불가결한 사항이다. 본 연구는 남극반도 북서부에 해당하는 South Shetland 군도 북쪽 해역에서 과학 어군탐지기기를 이용한 연속 관측 자료를 이용하여 크릴의 공간적인 분포 (수평, 수직분포) 및 자원량 파악을 주목적으로 하였다. 또한 자원량 계산을 위하여 플랑크톤 네트를 이용한 채집을 실시하였으며, CTD를 이용한 연구 해역의 수온 구조의 수직적 특성을 파악하여 크릴 군집과의 상호 관련성을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

연구지역 및 방법

연구 지역은 Livingstone 섬과 King George 섬이 포함되어 있는 South Shetland 군도 북쪽으로, 남극 대륙을 서에서 동에서 흐르는 남극 환류 (Antarctic Circumpolar Current)의 영향이 직접적으로 미치는 곳이다 (Fig. 1). 이 지역은 약 30 mile의 폭을 가지며 얇은 대륙붕 (insular shelf, <200 m)으로 형성되어 있는 연안역 (in-shore area), 급격한 경사면 위로 다른 성질의 해수가 만나고 있는 전선역 (frontal area) 그리고 외양역 (oceanic area)의 특징을 모두 가지고 있다. 조사 기간은 1998년 12월 18~21일 이었으며, 11개의 정선으로 구분하여 407 mile에 걸쳐 음향 관측을 실시하였다. 관측에 사용된 조사선은 5,000톤 규모의 러시아 조사선인 *Yuzhmorgeologiya* 였다.

음향 관측에 사용된 송·수파기는 38 kHz 주파수의 예인체형 진동자였다 (EK-500, SIMRAD). 크릴군의 분포 수심을 정확히 알기 위해서는 예인체의 수심을 알아야 하며, 이를 위하여 임의의 시간 간격으로 수온 및 수심을 관측하는 Time Depth Recorder

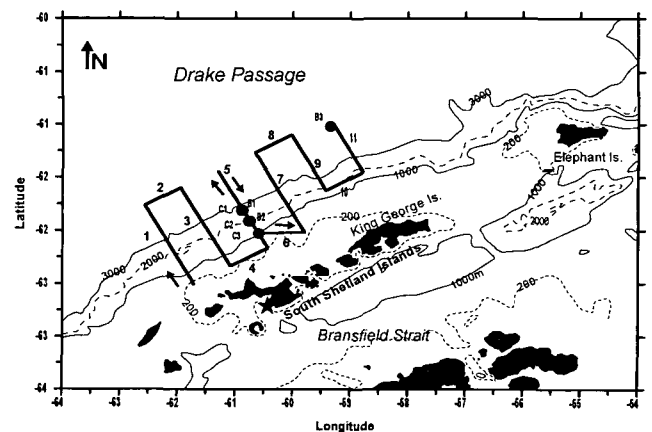


Fig. 1. Bathymetry and acoustic transect line for the survey on December, 1998. C (1,2,3) represents CTD station and B represents Bongo net sampling station.

(TDR, VEMCO Ltd.)를 이용하였다. TDR을 예인체 내부에 부착하여 매 20초마다 수심 및 수온을 측정하였으며, 예인 속도는 전 조사 지역에 걸쳐 8~9 knots로 거의 일정하게 유지하였다. 크릴군의 분포 수심을 정확하게 알기 위해 예인체내에 설치하였던 TDR 자료 처리 결과, 예인체 깊이는 전 조사 기간에 걸쳐 수심 15 m 내외를 유지하였으며 수온은 $-0.1\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 였다. 그러므로 각 층의 실제 수심에 예인체의 깊이를 더해 주어야 하며 따라서 크릴의 실제 존재 수심도 변하게 된다.

한편, 크릴 자원량 계산에 사용될 평균 면적산란계수 (mean area backscattering coefficient, S_A) 계산을 위한 위치 정보를 얻기 위하여 1 초마다 GPS 자료를 컴퓨터에 입력 시켰으며, 1 해리 (nautical mile) 당 echogram, S_A 값과 더불어 조사선의 위치를 프린터로 출력하였고, 5 해리 간격으로 echogram과 자원량 계산을 위한 S_A 값을 BI-500 software를 이용하여 저장시켰다 (Fig. 2).

연구 해역의 크릴에 대한 생물학적 정보 및 자원량 계산에 필요한 채장별 크릴의 Target Strength (TS) 분포를 알기 위하여 세 정점에서 Bongo 네트 (망목 : 333 μm , 505 μm)를 이용하여 채집을 시도하였다. 2개의 정점은 정선 5번의 외양과 대륙 사면이었고, 나머지 1개는 정선 11번의 외양이었다. 네트의 예인속도는 3 knots를 유지하였으며, 약 300~400 m의 줄을 풀어준 후, 매 정점당 약 30~40분간 채집을 실시하였다. 또한 네트의 예인 깊이를 알기 위하여 매 정점마다 TDR을 이용하였는데 160~300 m 깊이 까지 채집 되었으며, 채집된 크릴을 알코올로 고정시켰다. 한편, 관측 해역의 해수 특성을 파악하기 위하여 정선 5번의 세 정점에서 CTD (SEA-BIRD ELECTRONICS)를 이용하여 500 m 까지의 수온 및 염분을 측정하였다.

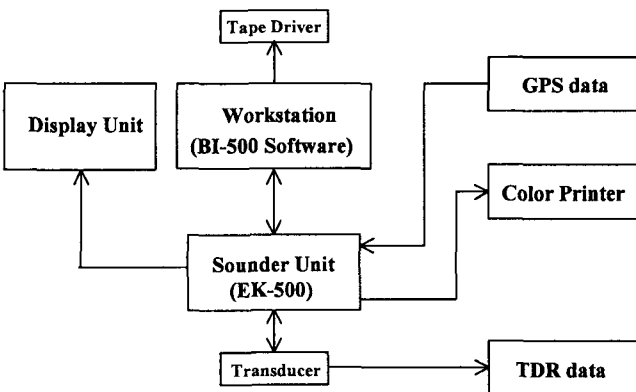


Fig. 2. Block diagram of scientific echo sounder and data flow.

체적산란 강도의 측정

EK-500 계량어군탐지기에 의해 측정된 면적산란계수 S_A (n mile^2)와 체적산란계수 S_V (m^2)와의 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$S_A = 4\pi \cdot \text{mean} \left[\int_{r_1}^{r_2} S_V dz \right] \cdot (1852 \text{ m/n mile})^2 \quad (1)$$

$$S_V = \frac{S_A}{4\pi \cdot (1852 \text{ m/n mile})^2 \cdot (r_2 - r_1)} \quad (2)$$

여기서, r_1 과 r_2 는 음향적분의 수심 구간이고, 본 연구에서는 GPS 위치를 토대로 1 n. mile 마다 수평면적 (n. mile^2)과 임의의 수심 간격에 대한 S_A 를 계산하였다. 한편, TVG (Time Varied Gain)는 $20 \cdot \log R$ 을 이용하였으며, 관측 자료중 송·수파기 면으로부터 200 m 이하의 수심에서 gain에 기인하는 잡음 효과를 없애기 위하여 크릴군이 없는 곳에서 측정되는 S_A 를 post-processing 과정에서 제거하였다. 이 분석 결과, 센서면으로부터 200~315 m 층에서는 null S_A 는 10으로 나타났다. 관측시 설정된 음향 변수들을 Table 1에 나타냈으며, 탐지 수층을 10개로 분리하여 자료를 취득하였다.

센서 보정 (Calibration)

해상 상태의 악화로 센서 보정은 음향 조사가 끝난 1998년 12월 26일 Livingstone 섬 서쪽의 스페인 기지와 불가리아 기지 사이에 있는 South Bay에서 실시하였다 (S $62^{\circ} 38.61'$, W $60^{\circ} 23.68'$; Fig. 1의 ★ 지점). 보정은 반사강도 (target strength, TS)의 절대값을 알고 있는 보정구를 사용하여 행하였는데, TS 측정시에 대한 송·수파기 이득 (TS Transducer gain)과 S_V 측정시의 송·수파기 이득 (S_V Transducer gain)은 다음 식에 의해 구하였다.

$$TS \text{ Transducer gain} = \text{Old transducer gain} + \frac{TS \text{ measured} - TS \text{ sphere}}{2} \quad (3)$$

여기서, $TS \text{ measured}$: 보정구의 측정 반사강도
 $TS \text{ sphere}$: 보정구의 이론 반사강도
 $\text{Old transducer gain}$: 보정 당시의 송·수파기 이득

$$S_V \text{ Transducer gain} = \text{Old transducer gain} + \frac{10 \log [S_A (\text{measured}) / S_A (\text{theory})]}{2} \quad (4)$$

여기서, $S_A (\text{measured})$: 보정구의 측정 면적산란계수
 $S_A (\text{theory})$: 보정구의 이론 면적산란계수

Table 1. Transducer type and parameters used for this survey.

Parameters	Value
Frequency	38 kHz
Beam type	split-beam
Absorption coeff.	10 dB/km
Pulse length (medium)	1.0 ms
Bandwidth	3.8 kHz (broad) 0.38 kHz (narrow)
Transmitt power	4 kw
2-way beam angle	-20.5 ± 1 dB
Transducer gain	28.0 ± 1 dB
3 dB beam width	$7 \times 7 \pm 1$ deg
Ping interval	1 sec

보정시 표층 수온은 2.0°C, 염분은 33.93‰, 수심은 112 m 내외였으며, 바람은 약 2~3 노트로 잔잔한 상태여서 조사선의 움직임은 매우 안정적이었다. 조사선의 선수(船首) 부분에서 닻을 내려 관측시 예인체의 회전을 최소화하도록 하였다. 선미(船尾)의 프로펠러에서 발생하는 기포의 영향을 최소화시키기 위하여 예인체를 표층 아래 5 m 수심에 설치한 후, 보정구가 음원축(acoustic axis) 상에 설치되도록 미세 조정을 하였다. 이때 보정구는 24시간 전에 세제에 담가 보정구 표면에 형성된 기포를 제거하였다. 보정에 사용된 구는 황동구(copper sphere)로 직경이 60 mm이다. 보정구의 절대 target strength (TS)는 해역의 음속에 따라 변한다. 관측 해역의 수온, 염분 및 센서의 수심 자료를 Mackenzie (1981)의 음속 계산식을 이용하면 1456.79 m/sec로 이때 38 kHz 음원에 의한 절대 TS는 펄스 길이에 따라 -33.70~-33.80 dB 이다 (SI-MRAD, 1998).

보정 시스템 설치 후, old transducer gain 값을 기본값으로 하여 38 kHz 센서에 대한 각 ping당 보정구에 의한 TS, 수심, 음속에 대한 보정구의 위치를 측정하였다. 이때 TS의 threshold 값은 -60 dB, ping 간격은 1초로 하였으며, 관측된 값은 프린터와 RS-232C 케이블을 통하여 저장하였다. 보정구가 음속에 들어온 후 30분 동안 관측하였으며, 자료 개수는 1339개 였다. Split-beam의 특징인 수신 위상차 각도에 의하면 보정시 구의 위치는 센서면을 기준으로 athwartship 각도는 78%가 양의 분포, fore-and-aft 각도는 98%가 양의 분포를 보이고 있었으며, 보정구는 센서면을 기준으로 수심 24.3~27 m를 유지하고 있었다. TS의 분포는 구가 음속에 위치할 때 -34.2 dB로 절대 TS -33.75 dB 와는 0.45 dB의 센서 감도 차이가 발생하였다. 한편, 보정시 설정한 TS gain과 Sv gain은 26.5 dB로 식 (3)와 (4)을 이용한 새로운 gain은 26.73 dB 이었다. 이러한 결과로부터 현장 관측시 사용한 센서의 감도는 실제 감도보다 0.23 dB 낮게 설정되어 있음을 알 수 있었다. 따라서, 식 (1)과 (2)를 이용하여 변경된 gain 값을 실제 관측한 S_A 에 맞게 고쳐 주었다. 계산 결과, 관측시 얻어진 S_A 값 (5.31)으로서 수정 입력하였다.

자원량 계산

관측된 체적 후방산란 강도(S_v)는 체적내의 각각의 산란체로부터 수신되는 신호의 선형적인 합이라는 가정을 할 수 있으므로 (Foote, 1983), 크릴의 밀도 (단위 면적당 크릴수)는 체적내의 평균 면적산란계수(S_A)을 단일 크릴의 후방산란 단면적(σ)으로 나눈으로써 계산할 수 있다 (MacLennan and Simmonds, 1992; Hewitt and Demer, 1993). 또한 크릴의 생체량, ρ (biomass, g/m³)는 밀도와 무게의 곱으로 계산할 수 있다. 사용된 송·수파기에 대한 크릴의 산란 강도식은 Greene 등 (1991)이 제안한 방법을 사용하였다. 즉, CCAMLR에서 제안한 120 kHz 주파수에 대한 크릴의 산란 강도식과 사용된 송·수파기의 파수(wavenumber)로부터 보정상수(correction factor)를 이용하여 다음의 식으로 계산 하였다.

$$TS = 10 \log_{10} (k_f/k_{120}) - 127.45 + 34.85 \log_{10} (I) \\ = -132.44 + 34.85 \log_{10} (I) \quad (5)$$

그러므로, 크릴 길이 (I , mm)에 따른 크릴의 산란강도 (TS) 및 후방산란 단면적, $\sigma (=4\pi 10^{TS/10})$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = 4 \pi 10^{-13.244} I^{3.485} \quad (6)$$

한편, 연구 지역에서 채집된 크릴의 표준길이 (mm)는 Makarov and Denys (1981)가 제안한 눈(rostrum)에서 꼬리(telson)까지를 측정하였으며, 또한 체중 (w , mg)은 습중량을 측정 하였다. 크릴의 길이와 체중의 관계는 다음의 식으로 나타났다.

$$w = 0.02286 (I)^{2.702} \quad (7)$$

그러므로 생체량을 위한 계산식은 식 (6), (7)로부터 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\rho = (S_A/\sigma) \cdot w = 9.302 I^{-0.783} S_A \quad (8)$$

위에서 표현된 모든 항들은 단일 크릴에 관한 식을 길이의 함수로 표현하였으므로 위 식을 크릴의 일반적인 길이 분포에 관한 식으로 바꾸어 주어야 한다. S_A 는 모든 길이의 크릴에 의한 영향이므로 크릴의 표준 길이 분포를 위 식에 적용해야 한다. 이를 위하여 연구 지역에서 채집한 크릴의 표준 길이당 상대적 빈도수(relative frequency) 결과를 이용하였다. 그러므로 연구 지역에서 관측된 각각의 S_A 자료로부터 크릴의 길이 분포를 고려하여 계산되는 생체량 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = 9.302 \sum_{i=1}^N f_i (I_i)^{-0.783} S_A \quad (9)$$

여기서, f_i : 표준체장 I_i 에 대한 크릴의 상대빈도, $\sum_{i=1}^N f_i = 1$

전체 생체량을 계산하기 위해서 Jolly and Hampton (1990)에 의해 제안된 방법을 이용하였다. Jolly and Hampton (1990)에 의하면 임의의 정선에서 관측된 음향 자료는 하나의 층에 의한 자료로 고려할 수 있으며, 또한 동일 기간 동안 전 조사 지역에서 얻어진 자료도 하나의 자료로 고려할 수 있다 (Hewitt and Demer, 1993). 그러므로 조사 지역의 평균 생체량 밀도($\bar{\rho}$)를 계산하기 위하여 각 정선에서 얻어진 자료를 가중 평균(weighted mean)하여 이용 하였다.

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (10)$$

여기서, $\bar{\rho}_i$ = i 번째 정선의 평균 밀도

n_i = i 번째 정선을 1 n. mile로 환산한 거리의 수

N = 정선의 수

그러므로 평균 생체량 밀도의 변량(variance, var)과 전체 생체량(B)은 다음과 같이 표현하였다.

$$var(\bar{\rho}) = \frac{N}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\rho}_i - \bar{\rho})^2 \cdot n_i^2}{(\sum_{i=1}^N n_i)^2} \quad (11)$$

여기서, A 는 전체 조사 면적 (m^2)이고 전체 생체량의 변량과 변량계수 (coefficient of variance, CV)는 다음과 같다.

$$var(B) = A^2 \times var(\bar{\rho})$$

$$CV = \frac{\sqrt{var(B)}}{B} \quad (12)$$

결 과

수온 · 염분의 수직구조

CTD를 관측한 세 지점은 South Shetland 군도의 북쪽에 형성되어 있는 약 30 n. mile의 대륙붕과 3000 m 이하의 심해를 연결하는 대륙사면 지역이다. 세 지역 모두 표층에서 30 m까지는 표층 혼합층 (surface mixing)이 형성되었으며, 이후 하층은 모두 다른 특징을 보이고 있었다. 표층 혼합층의 수온 및 염분 분포는 C1에서는 $0.1^{\circ}C$, 33.95‰, C2는 $0.15^{\circ}C$, 33.96‰, C3은 $-0.1^{\circ}C$, 34.10‰로 연안쪽으로 갈수록 염분이 증가하였다.

사면의 가장 북쪽인 C1에서는 여러 유형의 수괴가 존재하는 것으로 나타났다. 90~150 m 층에서는 $-0.3 \sim -0.6^{\circ}C$ 의 수온 분포를 가지는 최소 온도층 (cold water mass)을 형성하고 있는데 이는 외양역의 특징을 가지는 Winter Water의 일부이다. 한편, 200 m 이하에서는 $1.4^{\circ}C$ 이상의 고온수 (warm water mass)가 두껍게 나타나는데 이 층은 Circumpolar Deep Water의 특징을 가지고 있다 (Fig. 3-a).

사면 남쪽에 위치한 C3은 C1과는 다른 양상을 보이고 있다. 30~60 m 에 형성되는 $-0.2^{\circ}C$ 의 수온 분포는 Winter Water의 끝부분이며, 100 m까지의 강한 수온약층 (thermocline)을 경계로 300 m 까지 $-1.0^{\circ}C$ 의 낮은 수온층이 나타나고 있다 (Fig. 3-c). 이 층은 South Shetland 사면을 따라 흐르는 Weddel 해에 기원을 두는 해류에 의한 것으로, Weddel 해로부터 King George 섬과 Elephant 섬 사이로 흘러나오는 해류가 군도의 사면을 타고 남서쪽으로 흐르는 것으로 생각된다. 관측 지역의 중간인 C2는 C3과는 5 n mile 정도의 거리 차이에 불과하지만 C3와는 다른 양상을 나타내고 있으며 오히려 C1의 수직구조가 약해지는 형태를 보이고 있는 것으로 보아 외양역과 연안역을 따라 흐르는 수괴의 분리층으로 판단된다 (Fig. 3-b). 세 정점의 모든 자료를 T-S diagram에 나타냈을 때, C1과 C2가 그림의 윗 부분의 고온, 고염에서 만나는데 이 수괴가 Circumpolar Deep Water를 나타내며, 아래 부분의 저온수는 Weddell 해에 기원을 둔 해수이다 (Fig. 3-d).

동물플랑크톤 채집을 이용한 크릴 군집

정점 B1과 B2는 어군탐지기 자료와 네트 자료와는 약 8~12 시간의 차이가 나는데 음향 관측은 낮에, 네트 자료는 밤에 얻었다. 정점 B1에서 네트 채집 결과 크릴은 없고 Salp만 일부 채집이 되었다. 시간 차이는 나지만 이 지역의 echogram으로부터 약

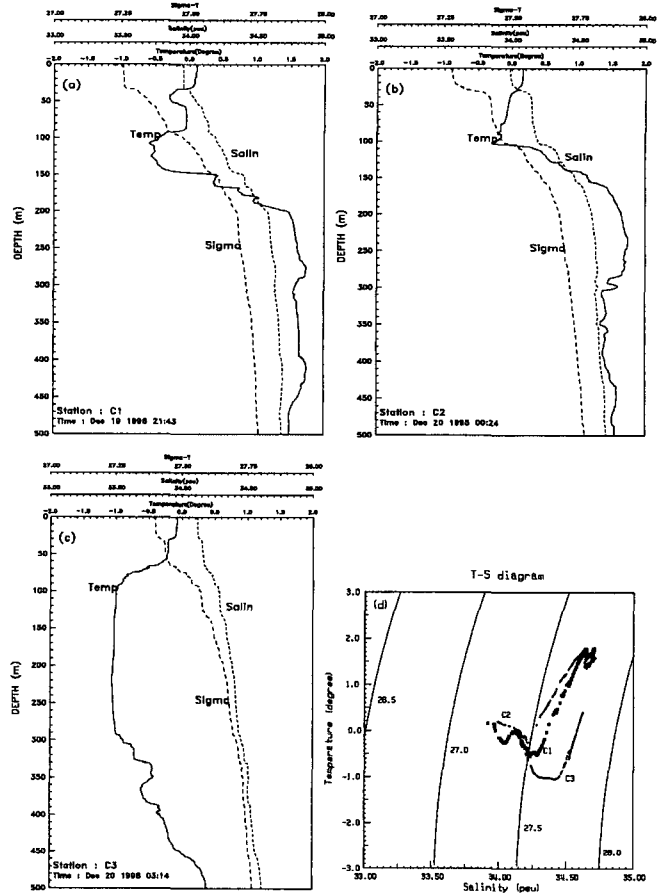


Fig. 3. Temperature, salinity and density profiles at each station and T-S diagram.

270 m 아래에서 작은 크릴 군집이 존재하고, 270 m 상층부에는 군집이 전혀 형성이 되지 않은 특징을 보이고 있었다. 네트 채집 당시 400 m의 케이블을 풀었으나 TDR 자료에 의하면 실제 최대 채집 수심은 160 m였다. 따라서 270 m 아래에 존재하는 크릴은 채집이 안되었고 Salp만 작은 양이 채집된 것으로 나타났다. 정점 B2에서는 어린 크릴이 10개체 미만으로 채집이 되었다. 낮에 관측된 이 지역의 echogram 특성은 95~275 m에서 크릴군이 분산되면서 다소 강하게 분포하였다. 또한 케이블을 600 m 풀었으나 최대 채집 수심은 300 m였다. 그러나 채집 결과와 어군탐지기의 결과가 일치하지 않은데, 이는 관측 시간 차이에 따른 크릴군의 이동 때문인 것으로 판단된다.

정점 B1, B2와는 달리 같은 시간대에 실시한 정점 B3의 경우, 두 자료의 상호 관련이 있게 나타났다. 과학 어군탐지기의 echogram 결과로는 145~275 m 전 수층에서 강한 크릴군이 떠를 형성하며 존재하는 것으로 나타났으며, 네트를 이용해서는 320 개체의 크릴을 채집하였다. 이때 케이블은 600 m가 풀렸으나, TDR 자료에 의하면 최대 채집 수심은 260 m로 네트로 채집된 결과는 echogram에서 나타난 크릴군을 반영하는 것으로 알 수 있다. 크릴의 표준 길이는 최소 30 mm에서 최대 51 mm까지 분포를 나타냈으며, 성체 크릴은 41 mm에서 하나의 모드만 나타내고 있었으며 30 mm 미만의 미성체 크릴은 채집되지 않았다 (Fig. 4).

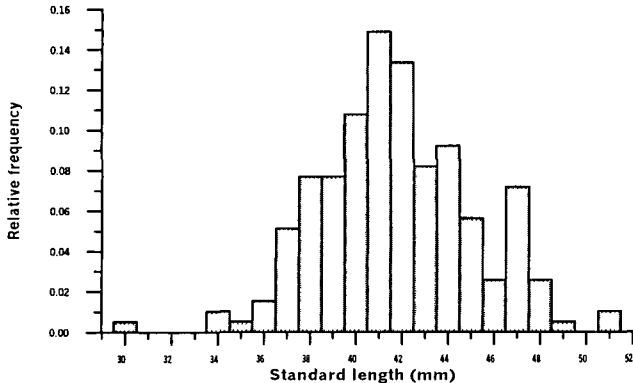


Fig. 4. Frequency distribution of krill standard length (n=165).

크릴군의 분포 유형

연구 지역에서 관측된 크릴군의 형태는 군집의 수평·수직 분포의 규모를 기준으로 분류할 때 크게 네 가지의 특징을 나타내었다. 전체 echogram으로부터 표층 분포, 100~200 m 수층의 연속적인 분포, 200~300 m 수층의 연속적인 분포 그리고 300 m 이하의 분포로 분류하였다. 표층 분포 형태는 표층에서 수심 100 m 까지 분포하는 크릴군을 의미하며 이와 같은 분포는 전 정선의 아주 작은 부분에서 나타났다. 정선 4번과 5번의 교차 부분, 정선 7번과 8번의 일부 지역에서 표층 크릴군 분포를 보였다. 이들 군집은 크기가 아주 작으면서 연속적이지 못한 특징을 가지고 있다. 그러나 군집의 크기에 비해 어군의 강도는 강하게 나타나고 있었다.

100~200 m 수층의 연속적인 분포 형태는 정선 1번과 5번의 중간 부분과 3, 9, 10, 11번의 많은 부분에서 이 같은 분포 특성을 보였다. 특히 정선 1번의 중간 부분과 11번에서는 전 층 가운데 이 수층에만 크릴군이 분포하는 특징을 보였다. 이 수층의 군집은 50 m 내외의 두께를 가진 층이 연속적으로 나타나고 있으며 어군의 강도 또한 균일하게 나타나고 있다. 한편, 200~300 m 수층의 연속적인 분포 형태는 정선 11번을 제외하고는 많은 지역에서 100~200 m 수층의 분포와 혼합되어 나타나고 있다. 이 분포 형태의 특징은 크릴군의 두께가 다른 층에 비해 두껍고 강도 또한 전 수층 중 가장 강하게 나타나고 있다. 전체적으로 본 연구 지역에서 형성된 대규모의 크릴군은 위의 두 가지 형태로 존재하고 있었다. 300 m 이하의 분포 형태는 주로 정선 7번에서 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이 수층의 크릴군은 표층의 분포와 유사하게 연속적이지 못한 군집을 형성하는데 표층과는 달리 강도가 강한 특징이 있다. 또한 중층의 크릴군과는 확연히 구별되는 분포 특성을 보이고 있었다.

한편, echogram으로부터 분리해 낸 군집의 최대 수평 분포는 정선 1번의 중간 부분에서 약 23 mile, 정선 11번의 중간부터 끝까지 약 35 mile에 걸쳐 나타났으며, 최대 수직 분포는 정선 8번의 중간 부근에서 0.4 mile 정도의 수평 크기를 가지며 최대 275 m의 두께를 보이고 있었다.

크릴의 분포 특성 및 추정된 자원량

1 nautical mile 당 수신된 S_A 자료를 2 n mile 간격으로 평균한 후, TS 관계식과 밀도 계산식을 이용하여 각 정선에서의 평균 자

원량 밀도 (g/m^2)를 계산하였다. 계산된 밀도값을 수층별로 나타냈는데 10개의 수 층 가운데 65 m 상층부에 해당하는 층을 하나의 층으로 고려하였다. 관측 장비가 예인체이므로 22 m 상층부의 크릴 분포 및 밀도는 알 수 없었다.

센서면 (22 m 깊이)으로부터 315 m 깊이에 이르는 자원량 밀도를 정선별로 나타낸 결과, 전체적으로 연안역보다는 대륙사면과 외양에서 높은 분포를 보였으며, 정선별로는 1번 정선의 중간, 2번 정선의 시작, 3번과 5번 정선의 가운데, 7, 8, 9번 정선의 외양 부분 그리고 11번의 전 정선에서 강한 밀도 분포를 나타냈다. 연안역에서는 정선 5번과 7번의 일부에서 높은 밀도를 나타내는 것으로 보아 분포가 제한된 지역에서만 형성되었음을 알 수 있었다 (Fig. 5). 분포 비율로 보면, 10~100 g/m^2 의 분포가 가장 많은 42.9%를 보이고 있었으며, 500 g/m^2 이상의 고농도는 전체의 7.8%에 해당하였다. 가장 밀도가 높은 곳은 1번 정선의 중간 부분에서 1076 g/m^2 로 나타났으며, 정선별로는 11번 정선에서 전체적으로 가장 높은 분포를 보이고 있었다. 이와 반대로 4, 6번 정선에서 가장 낮은 밀도 분포를 보였으며, 10 g/m^2 미만의 아주 낮은 분포는 전체의 15.6%였다. 전 층의 평균 밀도는 151.0 g/m^2 였다 (Table 2). 수 층별 분포는 다음과 같다.

해수의 표층 혼합이 강하게 일어나고 관측 자료 중 상층부에 해당하는 22~65 m 수층의 분포는 정선 5번의 대륙붕 지역, 1번의 대륙 사면, 정선 7, 11번의 외해 지역에서 다른 지역에 비해 높게

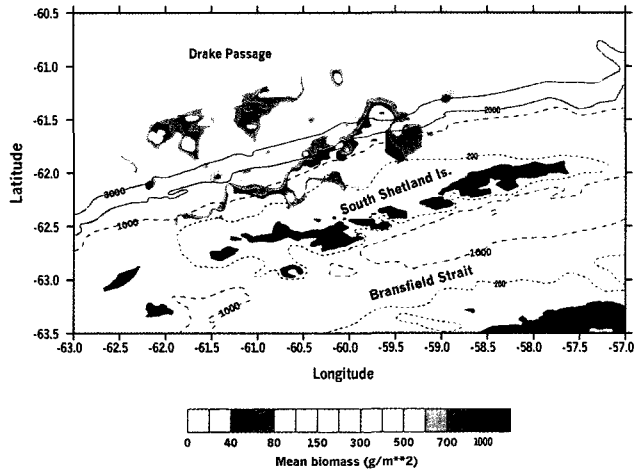


Fig. 5. Horizontal distribution of mean density (g/m^2) of krill biomass between 22 m and 315 m depth.

Table 2. Krill Abundance estimates for the survey at each layer.

Layer	Weighted mean S_A	Mean biomass (g/m^2)	Biomass ($\times 10^3$ ton)	CV (%)
22~ 65 m	33.83	17.00	312.7	16.24
65~115 m	40.08	20.14	370.5	34.91
115~165 m	71.34	35.85	659.5	41.49
165~215 m	79.97	40.19	739.3	27.84
215~315 m	75.22	37.81	695.4	26.83
Total		151.01	2,777	19.92

나타내고 있었다 (Fig. 6-a). 이 수층에서 전 정선의 평균 밀도는 17.0 g/m²로 계산되었으며, 이와 같은 분포는 5개의 수층 가운데 가장 낮은 분포이다 (Table 2). 전체적인 분포로는 98%의 지역에서 100 g/m² 미만의 분포를 보였으며 (10 g/m² 미만 -61.2%, 10~100 g/m² -36.9%), 100~500 g/m²의 분포는 2%를 차지했다. 1,000 g/m² 이상의 고밀도 분포는 전혀 발견되지 않았으며, 정선 5번의 대륙붕 지역에서 약 306 g/m²로 가장 높은 분포를 나타내고 있었다.

65~115 m 수층의 분포는 상층부와는 다른 공간적인 분포를 나타내고 있었다. 전체적으로 상층부에 비해 10 g/m² 미만의 낮은 분포가 71.8%의 넓은 범위를 차지하고 있으나, 평균 밀도는

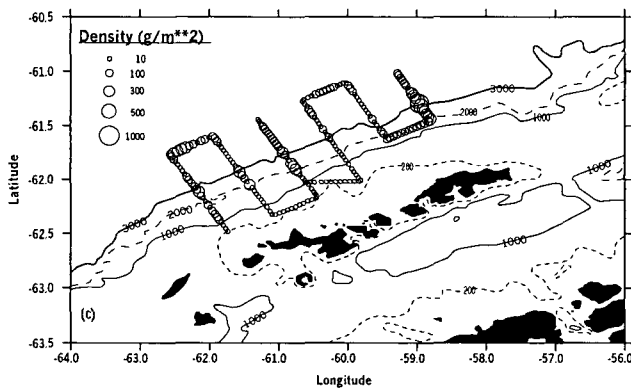
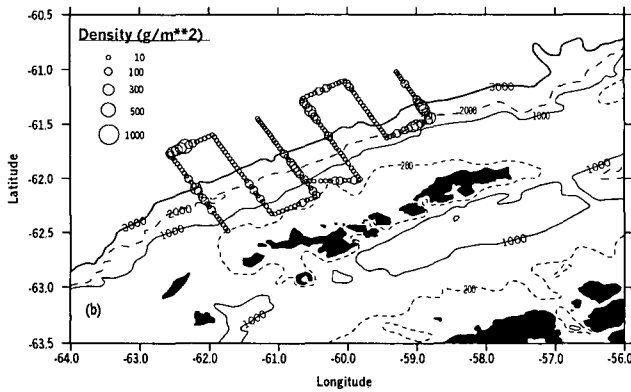
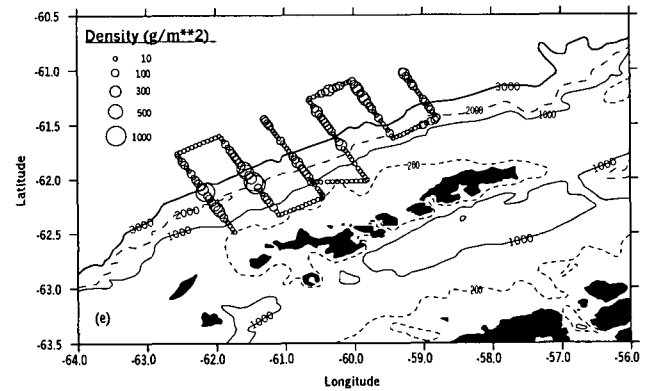
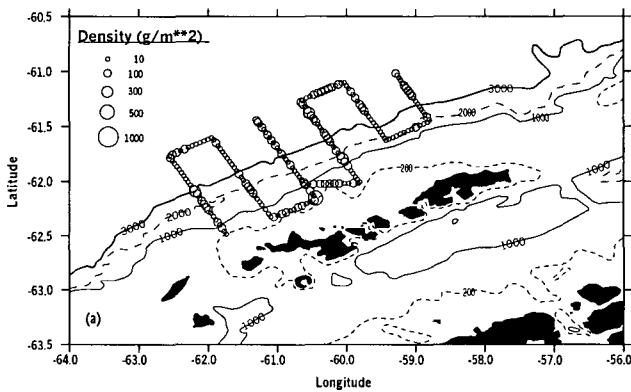
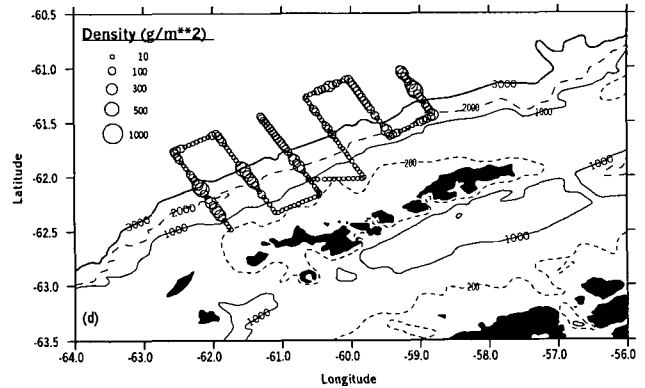


Fig. 6. Continued.

20.1 g/m²로 상층부보다는 높게 나타났다 (Table 2). 이와 같은 분포는 정선 2번과 11번의 시작 부근과 정선 1, 5, 10번의 중간 부분에서 군집의 크기는 상대적으로 작지만 고밀도의 군집이 형성되었기 때문이었다. 최대 밀도는 정선 2번에서 454.4 g/m²였으며, 정선 2번의 경우 약 7 mile, 정선 11번의 경우 약 8 mile에 걸쳐 150 g/m² 이상의 높은 분포를 보였다 (Fig. 6-b).

중층에 해당하는 115~165 m 수층에서는 1,000 m 수심을 경계로 대부분의 고농도 군집이 대륙사면과 외양 쪽으로 치우치고 대륙붕 쪽으로는 대부분이 10 g/m² 미만의 미약한 어군 형성이 나타나는 상반된 특징을 보였다 (Fig. 6-c). 이 수층의 평균 밀도는 35.9 g/m²로 상층부보다 2배 이상 높게 나타났다 (Table 2). 특히 정선 11번의 중간 부근에서 약 22 n mile에 걸쳐 매우 강한 어군이 형성되었으며, 전 연구 지역에서 가장 강한 밀도인 843 g/m²를 보였다. 분포 비율로 볼 때, 약 89%의 지역에서 100 g/m² 미만의 분포를 보였지만, 10%를 차지하는 100~500 g/m² 분포와 0.5%를 차지하는 500 g/m² 이상의 고밀도 분포가 자원량에 크게 영향을 미치고 있었다.

하층으로 접어드는 165~215 m 층의 분포도 1,000 m 등심선을 경계로 연안역과 대륙사면에서 상반된 분포를 보이며, 전체적으로 120~170 m 수층과 유사한 분포를 보이고 있다 (Fig. 6-d). 1,000 g/m² 이상의 고밀도 분포는 나타나지 않았지만, 정선 1, 3, 5번의 중간 지역과 정선 7번의 끝 부분에서 11.6%를 차지하는 100~500 g/m²의 고밀도 분포가 전체 자원량에 영향을 주었다. 이처럼 군집이 전

Fig. 6. Mean density of krill biomass per 2 n mile at each layer ; (a) 22~65 m, (b) 65~115 m, (c) 115~165 m, (d) 165~215 m, and (e) 215~315 m.

지역에 걸쳐 균일하게 나타나지 않고 일부 정선에서만 고농도로 나타나는 것으로 보아 크릴군이 일정한 크기를 형성하며 일부 수층에만 강하게 분포함을 알 수 있다. 이 수층의 평균 밀도는 40.19 g/m²로 전 수층 가운데 가장 높은 분포를 보였다 (Table 2).

관측 자료 중 가장 하층인 215~315 m 수층의 평균 밀도는 37.81 g/m²로 높은 분포를 보이고 있었다. 이러한 분포는 정선 1번과 3번의 가운데서 형성된 약 18 n mile 정도의 고밀도 군집 (최대 밀도 527 g/m²)과 14 n mile 정도의 9번 정선에 의한 영향 때문이었다 (Fig. 6-e, Table 2).

전 수층 (22~315 m)에서 추정된 자원량은 약 277만 톤 (CV=19.92 %)으로, 수층별로는 22~65 m에서 전체 양의 11.3% (31만 톤, CV=16.24%), 65~115 m에서 13.3% (37만 톤, CV=34.91%), 115~165 m에서 23.7% (66만 톤, CV=41.5%), 170~220 m에서 26.6% (74만 톤, CV=27.84%) 그리고 215~315 m에서 25% (69만 톤, CV=26.83%)를 차지했다 (Table 2). 이러한 결과로부터 전체 추정된 크릴 자원량의 약 75%가 115 m 하층에 분포하여 크릴군이 표층보다는 중층 이하에 높게 분포함을 알 수 있었다.

수온의 수직분포와 크릴군의 비교

세 지점에서 실시한 CTD 관측은 조사 지역의 가운데인 정선 5번의 3,000, 2,000, 1,000 m의 등심선을 따라 실시하였다. 음향조사 결과, 크릴군 밀도 분포는 CTD 정선 1과 2번의 수심 165~315 m에서 매우 높게 나타나고 있었고, 170 m 상층부의 경우 상대적으로 낮은 밀도 분포를 보였다. 한편 CTD 정선 3의 경우, 120 m 상층부에서만 10~100 g/m²의 분포를 보였고 이하 수심에서는 10 g/m² 미만의 아주 낮은 밀도로 나타났다.

CTD 자료와 비교해 보면, 고밀도의 분포는 1°C 이상인 Circumpolar Deep Water (정점 C1)와 연안쪽에서 형성된 Weddell 해에 기원을 두고 있는 -0.5°C 이하의 낮은 온도층 (C3) 사이에 존재하는 전선역 (frontal area, 정점 C2)에서 형성되고 있다. 전선역은 급격한 수온약층을 형성하고 있으며, 200 m 이하의 수심에서는 수온 변화가 적은 급격한 수직구조의 양상을 보이고 있었다.

고 찰

남극반도 해역에서 IKMT (Isaacs-Kidd Midwater Trawl)을 이용한 동물플랑크톤 채집 결과에 의하면 크릴 이외에도 다른 동물플랑크톤들 (amphipods, copepoda, salps, other euphausiids, *Thysanoessa macrura*)도 많은 부분을 차지하고 있다 (Loeb et al. 1992). 이러한 동물 플랑크톤들에 의한 후방산란 신호가 크릴 자원량을 증가시킬 가능성이 있으나 (Zhou et al., 1994), Wiebe 등 (1990)이 elongated model을 이용하여 계산한 결과, 이들이 크릴 자원량에 미치는 영향은 전체 양의 10% 미만으로 작을 것이라고 하였다. 특히, 가장 많은 양을 차지하는 Salps (*Salps thompsoni*)는 젤라틴 성분의 피막으로 구성되어 있어 해수와의 밀도 대비 (density contrast)가 작아 음파에 대한 산란 강도가 약하여 후방산란 강도가 작다고 하였다 (Hewitt & Demer, 1993). 그러므로 본 연구 지역에서 네트로 채집된 결과와

기존의 결과를 토대로 관측된 음향 자료는 크릴에 의한 것으로 가정하여 자원량을 예측하였다.

대부분의 echogram 형태가 기존의 연구 결과와 유사하게 폭이 넓은 띠를 형성하며 일정한 깊이를 가지고 있으나, 일부에서는 특이한 분포 형태를 보이고 있었다. 즉, 수심 250 m 상층부에서는 기존의 분포 형태를 보이고 있으나, 250~350 m 부근에서 폭이 아주 작은 반면 강한 산란을 일으키는 point scatterer의 특징을 가지는 복합적인 형태가 관측되었다. 이러한 형태는 기존의 연구 결과로 알려진 크릴군의 분포 특징과는 전혀 다른 것으로 크릴군이 아닌 다른 중층 어류일 가능성이 있다. 남극해에서 최근 제기되고 있는 이러한 중층 산란체는 엘통이류 (*Electrona carlsbergi*)로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서 추정된 자원량이 오차를 내포할 가능성이 있으나 본 연구 수행중 네트로 채집된 결과로는 규명할 수 없었다. 따라서 추정되는 크릴 자원량이 실제보다 많은 (over-estimation) 가능성이 있다.

1980년 이후 남극반도 북서 해역인 Elephant 섬 주변과 Bransfield 해협에서 크릴 분포와 자원량 추정을 위한 많은 음향 조사가 하게 기간 동안 (12월~2월) 집중적으로 진행되었으며 (Everson, 1982; Macaulay et al., 1984; Klindt, 1986; Macaulay and Mathisen, 1991; Sprong and Schalk, 1992; Hewitt and Demer, 1993; Torero, 1997; NOAA, 1997; 강과 김, 1998; Castillo et al., 1998; Gutierrez and Vasquez, 1998), South Shetland 북부 해역 또한 여러 연구팀에 의해 조사가 되었다 (Kalinowski, 1988; Nishikawa et al., 1995; Ichii et al. 1998). 시기에 따라 크릴의 분포 위치 및 자원량이 차이를 보이고 있지만 연구 지역으로부터 북동쪽에 위치한 Elephant 섬 부근에서 광범위한 크릴군이 형성되며, Elephant 섬과 King George 섬 사이에서도 큰 군집이 형성된다. 이 지역에서 크릴군의 분포 수심은 250 m 까지 확장되어 나타났으나 주로 150 m 상층부에서 큰 어군을 형성하였다. 이러한 분포 특성은 본 연구 결과와 다른 것으로 연도별 먹이 이용과 해양 환경 (지형, 해류 등)에 의한 것으로 생각된다. 실제로 연구 지역의 남동쪽인 Bransfield 해협에서 3년 동안 (1988, 1989, 1991) 관측한 음향 관측, 채집 자료, 환경 자료의 분석 결과, 수온·염분 구조에 큰 변화가 없으나 자원량은 서로 다르게 나타났다. 이러한 원인은 크릴 군집의 형성 및 분산의 단계와 환경 조건에 따라 크릴군의 분포가 변할 가능성이 크기 때문이다 (Gutierrez and Vasquez, 1998). Macaulay 등 (1984)은 크릴 군집의 형성 과정 및 분산되는 과정을 (1) 크릴이 해양의 경사면을 만날 때까지 작은 군집들이 모이거나 이동하는 단계로 보다 큰 군집을 형성하기 위하여 다른 작은 군집들과 합치게 되는 단계 (2) 큰 군집을 형성하는 단계 (3) 군집이 분산될 때까지 2~3일 동안 유지되는 단계 (4) 군집의 큰 부분이 깨어지게 되고 분산되는 단계 (5) 이들 과정의 반복 등 다섯 단계로 요약하였다. 그러므로 동일한 연구 지역일지라도 관측 시기가 서로 다르다면 해양 환경의 변화로 인하여 크릴 군집의 분포 위치가 변할 수 있다.

연구 지역인 South Shetland 군도 북쪽 지역에서는 시기에 따라 약간의 변화는 있지만 대부분의 크릴군은 전선역 혹은 연안역에서 강하게 형성되고 있다. Ichii 등 (1998)에 의하면 고밀도의 크릴군은 전선역과 연안역에서 형성되었으며, 특히 연안역에서 높게

나타나고 있다. 연안역인 경우, 단위 면적당 자원량이 1,000 g/m² 이상인 매우 강한 군집이 나타나고 있는데 이러한 고농도의 밀도 분포는 이번 조사 기간에도 일부 지역에서 나타났다. 분포 지역이 연안역인 것과는 달리 이번 연구 결과에서는 주로 전선역과 대륙 사면에서만 형성된 차이점이 있으며, 3,000 m 이상의 외양인 경우 크릴군이 크게 나타나지 않은 공통점이 있다. Nishikawa 등 (1995)은 이러한 연안역의 고밀도 분포를 Salps와 식물 플랑크톤의 자료를 이용하여 추정하였는데 식물 플랑크톤의 농도는 크릴 군집의 강도에 비례하고, Salps는 반비례하게 나타났다. 이러한 결과는 Salps와 크릴 사이는 서로 먹이 경쟁 관계임을 암시하고 있다. 그러나 이 지역에서 형성되는 크릴군의 큰 원인은 생물간의 관계보다는 해류와 해빙과 같은 해양환경 변수들에 의해 더 큰 영향을 받고 있다 (Everson and Murphy, 1987). 상업 어선의 크릴 자료를 이용한 이 지역에서 크릴군의 가입 (recruitment)과 해빙 (sea-ice)과의 연관성은 겨울에 해빙이 강하게 형성되었을 때 크기 지수 (size index)가 크게 나타났으며, 해빙이 약할 때는 크기 지수가 작게 나타났다 (Kawaguchi and Satake, 1994). 해류의 경우, Antarctic Deep Water, Winter Water, Weddell Sea에 기원을 둔 해수 등이 서로 만나는 지점으로 군도 북쪽 전역에 걸쳐 전선역이 형성되고, 이러한 전선역에 의해 중간 규모 (100 km 규모)의 난수성 소용돌이 (eddy)가 생성되어 이동하는 크릴군이 커다란 군집을 형성하기에 좋은 조건을 만들고 있다 (Everson and Murphy, 1987). 이러한 현상은 크릴군이 크게 형성되는 Elephant 섬 주변에서도 관측이 되었다 (강과 김, 1998). 크릴 체내의 밀도는 주변 해수보다 크기 때문에 자체 유영 능력이 없으면 가라앉는다. Kils (1979 a, b)에 의하면 크릴이 임의의 수심이 머물기 위해서는 10~15 cm/s의 유영 능력이 필요하며, 유영 속도는 20~40 cm/s 혹은 그 이상이며 이러한 유영을 몇 일~몇 주까지 지속할 수 있다. 또한, 성체의 경우 외부 저항에 대한 회피 속도는 길이의 11배 정도다 (45mm의 길이를 가진 크릴의 경우 약 0.5 m/s). 그러므로, 크릴군의 이동은 자체 유영 능력과 해류의 속도와 방향에 따라 크게 결정된다. 따라서 크릴 군집이 형성되는 이유는 지형과 해류의 패턴과 관련이 있음을 예상할 수 있다.

Elephant 섬과 Bransfield 해협 동쪽, South Shetland 군도 북쪽의 대륙 사면은 급격한 경사면을 이루고 있다. 한편 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 관측 결과, Elephant 섬 주변과 South Shetland 군도 북쪽에는 해류가 서로 부딪히는 와류 (eddy)가 형성되는 곳으로 (강과 김, 1998), 이때 해류를 따라 이동하던 크릴군이 이곳에서 큰 군집을 형성할 수 있는 물리적 환경이 형성된다. Bransfield 해협에서 크릴군의 분포 위치가 다양하게 나타나고, South Shetland 군도 북쪽의 연안역 혹은 전선역에서 고농도의 크릴 군집이 형성되는 해류의 세기 및 방향에 크게 영향을 받을 가능성이 있으므로 음향 조사와 더불어 해양 환경 조사가 필요함을 알 수 있다. South Shetland 군도 북쪽의 경우, 이러한 물리적 현상은 본 연구 기간 중 실시한 세 지점의 CTD 자료에서도 나타나고 있다.

Everson (1982)에 의하면 크릴 군집의 수직 이동 특성은 낮에 밀집되고 밤에는 수층 전체로 분산되는 특징을 보인다고 하였다. 그러나 Hewitt & Demer (1993)는 낮에 밀집되고 밤에 분산되는

형태, 낮에 분산되고 밤에 밀집되는 형태, 그리고 이들이 복합적으로 나타나는 혼합 형태가 나타나 일관성이 없었고 크릴의 생리학적 단계에 따라 다르게 나타난다고 하였다. 이러한 분포 형태는 Gutierrez (1997)의 결과와도 일치하며, 본 연구에서도 주·야 수직 이동의 뚜렷한 분포 형태가 나타나지 않고 있다.

일반적으로 음향을 이용한 크릴 자원량 예측시 장비 보정의 정확성과 개개 크릴의 TS 계산식에 따라 자원량 계산 결과가 변하게 된다. Macaulay 등 (1984)은 120 kHz 주파수에 대하여 $TS = -97.2 + 20 \log(I)$, $w = 0.0018 I^{3.8}$ 의 관계식을, Gutierrez (1997)와 Castillo 등 (1998)은 실험을 통하여 120 kHz 주파수에 대하여 $TS = -89.26 + 20 \log(I)$, $w = 0.003851 I^{3.8}$ 의 관계식을 사용하였다. 이들이 사용한 식은 1991년 Greene 등 (1991)과 CCAMLR Working Group (SC-CAMLR-X, 1991)에 의해 제안된 식 ($TS = -127.45 + 34.85 \log(I)$)보다 같은 길이의 산란체에 비해 TS가 높게 나온다. 즉 여러 관측자의 실험에 따라 다양한 산란강도 식이 유도되므로 자원량 계산이 서로 차이를 가지게 된다. 참고로, CCAMLR Working Group에 의해 제안된 식은 Stanton (1989)의 bent cylinder 모델에 근거를 Greene et al. (1991)이 Target Strength 계산식을 만들었다. 최근에 이 식이 크릴의 TS 식으로 많이 사용되는 식이나 크릴의 방향성 (orientation)과 유영시 몸의 형태 (body shape) 또한 크릴의 TS에 영향을 주므로 실험을 통하여 계산식을 보정하여야만 좀 더 정확한 자원량을 예측할 수 있다.

남극 반도 북서 해역에서 음향 조사 결과를 근거로 관측 시기, 조사 넓이, 조사 지역 별로 예측된 연도별 크릴의 자원량을 정리하였다 (Table 3). 연구 지역보다 북쪽인 Elephant 섬 부근의 자원량은 7~250 m 수심에서 약 $400 \times 10^3 \sim 2,220 \times 10^3$ 톤으로 계산되었다 (Hewitt and Demer, 1993). 관측 영역이 Bransfield 까지 넓어진 1988~1991년 관측 기간동안 전 층의 biomass는 $5,673 \times 10^3 \sim 17,000 \times 10^3$ 톤이었고 (Gutierrez, 1997), 1998년 1월의 조사

Table 3. Variation of krill biomass near the Elephant Island and Bransfield Strait using acoustic equipment. (* E : Near Elephant Island, B : Near Bransfield Strait)

Year	Month	Survey Area (n mile ²)	Biomass ($\times 10^3$ t)	Location	Source
1983	Oct. - Nov.	10507	52	E	Klindt (1986)
1984	Nov. - Dec.	10106	380	E	Klindt (1986)
1985	Mar. - Apr.	9283	16	E	Klindt (1986)
1988	Jan. - Feb.	9546	17000	B	Gutierrez (1997)
1989	Jan. - Feb.	10615	5673	B	Gutierrez (1997)
1990	Early Jan.	11925	465	E	Amos et al. (1990)
	Late Jan.	10575	1132	E	Amos et al. (1990)
	Early Feb.	11925	2133	E	Amos et al. (1990)
	Late Feb.	11925	2475	E	Amos et al. (1990)
1991	Late Jan.	12675	689	E	Macaulay et al. (1991)
	Feb. - Mar.	12525	822	E	Macaulay et al. (1991)
1991	Jan. - Feb.	16980	8434	B, E	Gutierrez (1997)
1992	Late Jan.	10575	2220	E	Hewitt & Demer (1993)
	Early Mar.	10575	1075	E	Hewitt & Demer (1993)
1998	January	19829	19378	B, E	Castillo et al. (1998)
1998	December	5363 (22~315 m)	2777		In this report

에서는 $19,000 \times 10^3$ 톤으로 평균 밀도는 284 g/m^3 이었다 (Castillo et al., 1998). 비슷한 조사 넓이 일지라도 관측자에 따라 크릴 자원량의 변동량이 큰 것을 알 수 있다.

요 약

본 연구는 남극반도 북서부에 해당하는 South Shetland 군도 북쪽 해역에서 과학어군탐지기를 이용한 연속 관측 자료를 이용하여 크릴의 공간적인 분포(수평, 수직분포) 및 자원량 파악을 주목적으로 하였다. 또한 자원량 계산을 위하여 플랑크톤 네트를 이용한 채집을 실시하였으며, CTD를 이용한 연구 해역의 수온 구조의 수직적 특성을 파악하여 크릴 군집과의 상호 관련성을 규명하고자 하였다.

고밀도의 크릴군은 1°C 이상인 Circumpolar Deep Water와 연안쪽에서 형성된 Weddell 해에 기원을 두고 있는 -0.5°C 이하의 낮은 온도층 사이에 존재하는 전선역(frontal area)에서 형성되고 있다. 크릴군의 분포 유형은 작은 군집을 이루는 표층 분포, 100~200 m 수층의 넓은 띠 모양의 연속적인 분포, 200~300 m 수층의 연속적인 분포 그리고 300 m 이하의 point scatter 분포 등 네 가지 특징을 보였으며, echogram으로부터 분리해 낸 군집의 최대 수평 분포는 약 35 mile에 걸쳐 나타났으며, 최대 수직 분포는 최대 275 m의 두께를 보이고 있었다. 채집된 크릴의 표준 길이는 최소 30 mm에서 최대 51 mm까지 분포를 나타냈으며, 성체 크릴은 41 mm에서 하나의 모드만 나타내고 있었으며 30 mm 미만의 미성체 크릴은 채집되지 않았다.

자원량 밀도를 정선별로 나타낸 결과, 전체적으로 연안역보다는 대륙사면과 외양에서 높은 분포를 보였으며, 전 층의 평균 밀도는 151.0 g/m^3 였다. 해수의 표층 혼합이 강하게 일어나고 관측 자료 중 상층부에 해당하는 22~65 m 수층의 분포는 이 수층에서 전 정선의 평균 밀도는 17.0 g/m^3 로 계산되었으며, 이와 같은 분포는 5개의 수 층 가운데 가장 낮은 분포이다. 중층에 해당하는 115~165 m 수층에서는 1,000 m 수심을 경계로 대부분의 고농도 군집이 대륙사면과 외양 쪽으로 치우치고 대륙붕 쪽으로는 대부분이 10 g/m^3 미만의 미약한 어군 형성이 나타나는 상반된 특징을 보였다. 이 수층의 평균 밀도는 35.9 g/m^3 로 상층부보다 2배 이상 높게 나타났다. 하층으로 접어드는 165~215 m 층의 분포도 1,000 m 등심선을 경계로 연안역과 대륙사면에서 상반된 분포를 보이며, 전체적으로 120~170 m 수층과 유사한 분포를 보이고 있다. 이 수층의 평균 밀도는 40.2 g/m^3 으로 전 수층 가운데 가장 높은 분포를 보였다. 관측 자료 중 가장 하층인 215~315 m 수 층의 평균 밀도는 37.8 g/m^3 로 크릴군이 비교적 깊은 수심까지 존재함을 나타내고 있다.

각 수층에서 예측된 자원량으로부터 22~315 m 사이의 총 예측 자원량은 약 277만 톤 ($CV=19.92\%$)으로 계산되었으며, 수층별로는 22~65 m 에서 전체 양의 11.2% (31만 톤, $CV=16.24\%$), 65~115 m에서 13.3% (37만 톤, $CV=34.91\%$), 115~165 m에서 23.7% (66만 톤, $CV=41.5\%$), 170~220 m에서 26.6% (74만 톤, $CV=27.84\%$) 그리고 215~315 m에서 25% (69만 톤, $CV=26.83\%$)를 차

지했다. 이러한 결과로부터 전체 예측된 크릴 자원량의 약 75%가 115 m 하층에 분포하여 크릴군이 표층보다는 중층 이하에 높게 분포함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 시행한 “남극해 유용생물자원 개발 연구(부제:남극 반도해역 유용생물의 분포 및 자원량 추정 연구)”의 연구 결과이며, 연구비를 지원해 준 해양수산부에 감사드립니다. 또한 남극해의 어려운 환경속에서 성실히 도와준 조사선 *Yuzhmorgeologiya*의 승무원들에게 고마움을 전합니다.

참 고 문 헌

- Amos, A.F. 1984. Distribution of krill (*Euphausia superba*) and the hydrography of the Southern Ocean : large-scale processes. *J. Crust. Biol.*, 4, 306~329.
- Castillo, R., M. Gutierrez, F. Ganoza and A. Aliaga. 1998. Estimates of biomass and distribution of krill (*Euphausia superba*), using 38 and 120 kHz, in the Strait of Bransfield and Elephant Island during the austral summer in the Antarctic 1998. Cruise BIC HUMBOLDT 9801 - ANTAR IX 12 - 24 January 1998. Preliminary reports. Instituto del Mar del PERU (in Spanish).
- Ehrenberg, J.E. 1974. Two applications for a dual beam transducer in hydroacoustic fish assessment systems. Processing of the 1974 IEEE International Conference on Eng. Ocean. Environ., 1, 152~155.
- El-Sayed, S.Z. 1988. The BIOMASS program. *Oceanus*, 31, 75~79.
- Everson, I. 1982. Diurnal variations in mean volume backscattering strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) patch. *J. Plankton Research*, 4, 155~162.
- Everson, I., J.L. Watkins, D.G. Bone and K.G. Foote. 1990. Implications of a new acoustic target strength for abundance estimates of Antarctic krill. *Nature*, 345, 338~339.
- Everson, I., J.L. and E. Murphy. 1987. Mesoscale variability in the distribution of krill *Euphausia superba*. *Marine Ecological Progress Series* 40, 53~60.
- Foote, K.G. 1983. Lineality of fisheries acoustics, with addition theorems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 73 (6), 1932~1940.
- Foote, K.G. 1990. Target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 16~24.
- Greene, C.H., T.K. Stanton, P.H. Wiebe and S. McClatchie. 1991. Acoustic estimates of Antarctic krill. *Nature* 349, 110.
- Gutierrez, M. 1997. Biomass and Distribution of krill (*Euphausia superba*) in the Bransfield Strait during the Peruvian ANTAR Expeditions I, II and III. *Korean Journal of Polar Research* 8 (1,2), 117~125.
- Gutierrez, M. and L. Vasquez. 1998. Vertical distribution of krill (*Euphausia superba*) in function of the oceanographical parameters along the Strait of Bransfield, Austral summer 1998. Cruise BIC HUMBOLDT 9801 - ANTAR IX 12 - 24 January 1998. Preliminary reports. Instituto del Mar del PERU (in Spanish).

- Hamner, W.M. 1984. Aspect of schooling in *Euphausia superba*. Journal of Crustacean Biology, 4, 67~74.
- Hampton, I. 1991. Measurements of difference in the target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarms at 38 kHz and 120 kHz. Selected Scientific Papers 1990, CCAMLR, HOBART (AUSTRALIA), 75~86.
- Hewitt, R.P. and D.A. Demer. 1991. Krill abundance. Nature, 353, 310.
- Hewitt, R.P. and D.A. Demer. 1993. Dispersion and abundance of Antarctic krill in the vicinity of Elephant Island in the 1992 austral summer. Mar. Ecol. Prog. Ser. vol. 99, 29~39.
- Ichii, T., K. Katayama, N. Obitsu, H. Ishii, M. Naganobu. 1998. Occurrence of Antarctic krill (*Euphausia superba*) concentrations in the vicinity of the South Shetland Islands: relationship to environmental parameters. Deep-Sea Research I. 45, 1235~1262.
- Inoue, Y.M., A. Kitazawa and T. Kashiwa. 1985. Estimation in standing stock of the Antarctic krill population in an Antarctic area south of Australia by means of a scientific echo sounder. J. of the Tokyo University of Fishery, 72, 13~19.
- Jolly, G.M. and I. Hampton. 1990. A stratified random transect design for acoustic surveys of fish stocks. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 47, 1282~1291.
- Kawaguchi, S. and M. Satake. 1994. Relationship between recruitment of the Antarctic krill and the degree of ice cover near the South Shetland islands. Fisheries sciences. Tokyo, 60, 123~124.
- Kalinowski, J. 1988. Biomass variability of krill in the South Shetland islands region (BIOMASS III, October 1986 - January 1987). Pol. Polar Res., 9, 327~338.
- Kalinowski, J. and Z. Witek. 1980. Diurnal vertical distribution of krill aggregation in the Western Atlantic. Pol. Polar Res., 1, 127~146.
- Kils, U. 1979a. Preliminary data on volume, density and cross-section area of Antarctic krill *Euphausia superba*. Meeresforschung 27, 207~209.
- Kils, U. 1979b. Swimming speed and escape capacity of Antarctic krill *Euphausia superba*. Meeresforschung 27, 264~266.
- Klindt, H. 1986. Acoustic estimates of the distribution and stock size of krill around Elephant Island during SIBEX I and II in 1983, 1984 and 1985. Arch. FischWiss. 37, 107~127.
- Lee J.U., J.N. Kwon, T.L. Kim and W.S. Yang. 1994. Some ecological aspects of Antarctic krill, *Euphausia superba* in the Antarctic Ocean. Bull. Korean Fish. Soc. 27 (2), 183~192 (in English).
- Loeb, V., K. Davis, F. Roddy, F. Siegel and V. Kelly, 1992. Direct krill and zooplankton sampling. In : Rosenberg, J., R. Hewitt (eds.). AMLR 1991/92 field season report. SWAFC Admin. Rep. LJ-92-17. Southwest Fisheries Science Center, La Jolla, CA, 51~66.
- Macaulay, M.C., T.S. English and O.A. Mathisen. 1984. Acoustic characterization of swarms of Antarctic krill (*Euphausia superba*) from Elephant Island and Bransfield Strait. J. Crustacean Biology, 4, 16~44.
- Macaulay, M.C. and O.A. Mathisen. 1991. AMLR Program: hydroacoustic observations of krill distribution and biomass near Elephant Island, austral summer 1991. Antarct. J. U.S. 26 (5), 203~204.
- Mackenzie, K.V. 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. J. Acoust. Soc. Am., 70, 807~812.
- MacLennan, D.N. and E.J. Simmonds. 1992. Fisheries acoustics. Chapman & Hall, London. 325pp.
- Makarov, R.R. and C.J. Denys. 1981. Stages of sexual maturity of *Euphausia Superba* Dana. BIOMASS Handbook, 11, 1~13.
- Marr, J.W.S. 1962. The natural history geography of the Antarctic krill (*Euphausia Superba*). Discovery Rept., 32, 33~464.
- Miller, D.G.M. and I. Hampton. 1989. Biology and ecology of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana): a review. Biomass Sci. Ser., 9, 166pp.
- Nishikawa, J., M. Naganobu, T. Ichii, H. Ichii, M. Terazaki and K. Kawaguchi. 1995. Distribution of salps near south Shetland Islands during austral summer, 1990~1991 with special reference to krill distribution. Polar Biology, vol. 15, 31~39.
- NOAA. 1991. 1990/1991 Field season report. NOAA Antarctic Ecosystem Research Group. 97pp.
- NOAA. 1993. 1992/1993 Field season report. NOAA Antarctic Ecosystem Research Group. 109pp.
- NOAA. 1997. 1996/1997 Field season report. NOAA Antarctic Ecosystem Research Group. 118pp.
- SC-CAMLR-X. 1991. Report of the tenth meeting of the scientific committee for the conservation of antarctic marine living resources. CCAMLR, Hobart.
- SIMRAD. 1998. EK500, Scientific Echo Sounder, Operator manual, Base version. A Kongsberg Company.
- Sprong, I., and P.H. Schalk. 1992. Acoustic observation on krill spring-summer migration and patchiness in the Northern Weddell Sea. Polar Biology, 12, 261~268.
- Stanton, T.K. 1989. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and elongated objects. J. Acoust. Soc. Am. 86, 1499~1510.
- Wiebe, P.H., C.H. Greene, T.K. Stanton and J. Burczynski. 1990. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: empirical studies with a dual-beam acoustical system. J. Acoust. Soc. Am., 88, 2346~2360.
- Zhou, M., W. Nordhausen and M. Huntley. 1994. ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter. Deep-Sea Research, 41, 1425~1445.
- 강돈혁, 김수암. 1998. ADCP를 이용한 남극 크릴 분포에 관한 연구. J. Korean Soc. Fish. Res., 1 (1), 67~80.
- 서해립, 김수암, 서호영. 1991. 남극크릴새우의 분포 및 자원량에 관한 연구. 한국극지연구, 2, 29~49.
- 해양수산부. 1999. 남극해 유용생물자원 개발 연구. BSPM98010-00-11 43-7, 240

1999년 6월 21일 접수

1999년 10월 21일 수리