



서남극 브랜스필드 중앙 해협 열수 작용: 해양 특성으로 본 증거

유규철^{1,‡} · 이종익¹ · 추미경² · 윤호일¹ · 금병철³

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소

²경인양행 중앙 분석연구팀

³한국해양과학기술원

요 약

2005년 12월 12일 브랜스필드 중앙 해협 열수 현상을 찾고자 세자매 해령 부근에서 SBE 911plus CTD를 이용하여 수온, 염분, 용존산소를 측정하였으며, 해저면의 세 측선(A'-A, B'-B 및 C'-C)을 따라 CTD를 견인하였다. 세자매 해령의 주요 수층 구조는 따뜻한 표층수, 남극표층수, 중앙분지 심층수이며, 탐사 기간 동안 여름철 변환된 남극순환심층수는 나타나지 않았다. 세자매 해령의 중앙 해령의 정상부에 나타난 왜곡된 수층 특성은 세자매 해령의 열수 활동에 따른 결과이며, 수심별 용존 금속 분포에서 수심 1,010~1,120 m 사이(중앙 해령의 정상부 바로 위)에 나타난 용존 철, 망간 그리고 구리의 이상치는 열수 분출의 직접적인 증거이다.

주요어: 서남극, 브랜스필드 해협, 세자매 해령, 열수 작용, 해양 특성

Kyu-Cheul Yoo, Jong Ik Lee, Mi Kyung Choo, Ho Il Yoon and Byong Chol Geum, 2017, Hydrothermal activity of the central Bransfield Strait, West Antarctica: evidence from water column characteristics. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 4, p. 533-543

ABSTRACT: To find out hydrothermal activity near Three Sisters Ridge in the central Bransfield Strait, water column characteristics (temperature, salinity, dissolved oxygen and turbidity) was measured using SBE 911plus CTD and towed across the seafloor bottom A'-A, B'-B and C'-C lines on December 12, 2005. The main water column structure was surface mixed layer, Antarctic Surface Water (AASW) and central basin bottom water, but there is no existence of modified Circumpolar Deep Water (MCDW) during the expedition. The distorted water column profiles prominent at the summit of middle ridge of Three Sisters Ridge were the results from hydrothermal activity. Anomalies of dissolved Fe, Mn and Cu appeared at 1,010~1,120 m water depth in dissolved metal analysis, matching well with the peculiarity of water column characters.

Key words: West Antarctica, Bransfield Strait, Three Sisters Ridge, hydrothermal activity, water column characteristics

(Kyu-Cheul Yoo, Jong Ik Lee and Ho Il Yoon, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea; Mi Kyung Choo, Analysis Research Team, Central Research Institute, KISCO, Seoul 07947, Republic of Korea; Byong Chol Geum, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 15627, Republic of Korea)

1. 서 론

브랜스필드 해협(Bransfield Strait)은 남극반도 북단과 남 쉘랜드 군도(South Shetland Islands) 사이에 위치하며 세 개의 분지(서부, 중앙 및 동부 분지)로 나누어지며(그림 1), 내대륙 분열에서 배호 확장(back-arc spreading)의 전환기에 놓여있다. 활발

한 호상 화산활동과 섭입(subduction)이 거의 없어 해양 지각 위에 해저 확장에 놓인 배호 분지보다는 평행축들을 따라 발생하는 내대륙 분열의 확장상 대륙주변부 분지로 알려져 있다(Keller *et al.*, 1991). 현재 이 해협은 열수계의 초기 진화단계를 보여주고 있으며, 1990년대에 해령 분출계의 일반적인 발달을 연구하기 위한 해양지화학적/지질학적인 연구지로

[‡] Corresponding author: +82-32-760-5363, E-mail: kcyoo@kopri.re.kr

관심이 높았다(Birkenmajer and Keller, 1990; Braut and Simoneit, 1990; Whiticar and Suess, 1990; Chin *et al.*, 1996; Dählmann *et al.*, 2001; Klinkhammer *et al.*, 2001). 브랜스필드 열수 활동에 대한 이전 연구(Suess *et al.*, 1987; Schlosser *et al.*, 1988)에서 동부와 중앙 분지의 열수 활동이 활발하며 7 nM 이상의 망간 농도와 7 이하의 $\delta^3\text{He}$ 의 이상값들이 수층에서 발견되었다. 또한, 퇴적물 내에는 철 황화물, 철-아연 황화물, 철-아연-구리 황화물, 아연 염화물 및

철과 아연 산화물이 발견되었다.

지구조적인 관점에서 이 해협은 북대륙붕 바깥 남 웨틀랜드 해구에서 3~4 백만년 전에 섭입이 멈추거나 적어도 급속하게 느려졌다(Barker and Austin, 1994; Livermoore *et al.*, 2000). 그리고 약 1~2 백만년 전에 이 해협에서 후열도 확장이 시작되었다(Keller and Fisk, 1992). 이러한 영향으로 킹조지 섬(King George Island)에서 3,000~300,000 년에 화산활동이 발견되었으며(Birkenmajer and Keller, 1990), 이 해협의 서

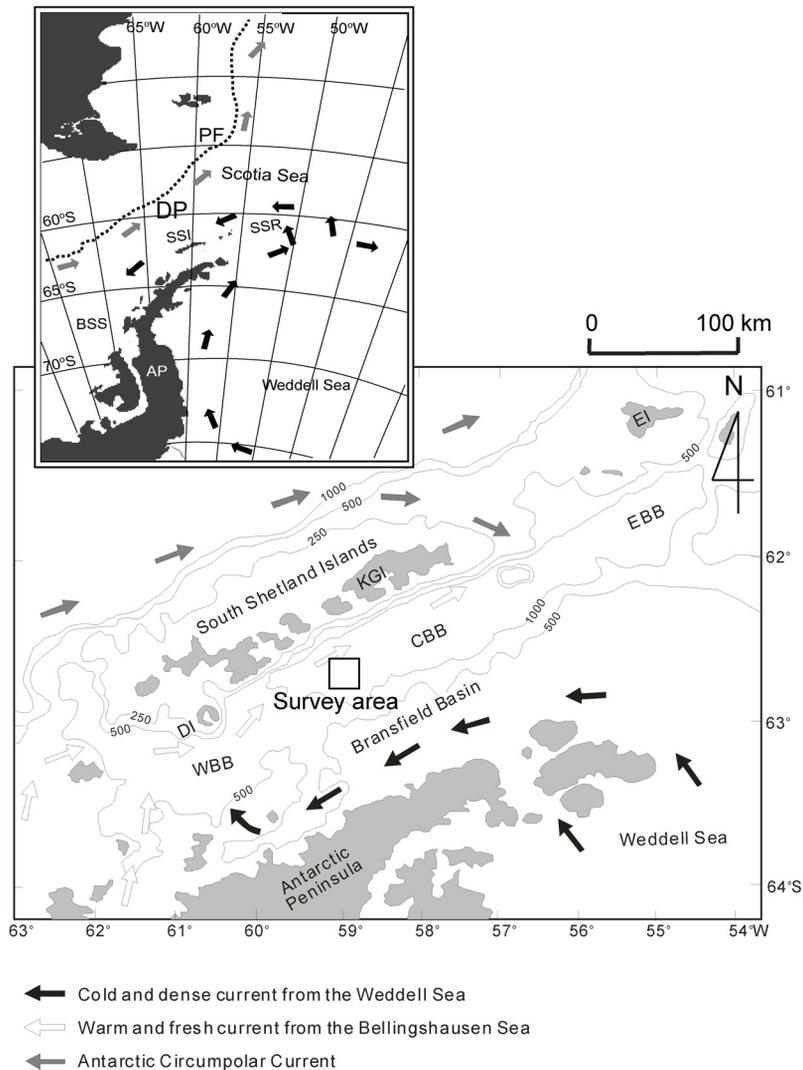


Fig. 1. General circulation and hydrothermal survey zone in the Bransfield Strait. WBB, CBB and EBB denote the western, central and eastern Bransfield basins, respectively. AP=Antarctic Peninsula; BSS=Bellingshausen Sea; DI=Deception Island; DP=Drake Passage; EI=Elephant Island; KGI=King George Island; SSI=South Shetland Islands; SSR=South Shetland Ridge.

부 분지에 위치한 디셉션 섬(Deception Island)에서도 화산활동이 보고되었다(Elderfield, 1972). 이러한 심해열수환경은 해양의 물질순환과 환경변화, 지각의 운동과 진화 과정, 생물학적 유기성 등을 연구할 수 있는 장소이며, 열수 주변의 환경탐사를 통하여 해양광물자원 개발에도 관여할 수 있다. 또한, 극지역의 장기적인 지구조적인 변동과 해저 열수 활동은 빙하의 증감에도 영향을 줄 수 있기 때문에, 열수 활동 지역의 퇴적 환경은 과거 극지 환경을 추적할 수 있는 기본적인 정보를 제공한다(Campbell, 2006).

이러한 관점에서 열곡이 잘 형성된 브랜스필드 해협은 열수 환경과 과거 지구조적인 환경 변화를 연구할 수 있는 최적지이다. 특히, 브랜스필드 해협에서 후크 해령(Hook Ridge)과 세자매 해령(Three Sisters Ridge)은 열수 분출공들이 있어 열수 활동이 활발한 지역이다. 2005/2006년 19차 남극하계연구 활동을 통해 이 중앙 해협의 세자매 해령(Three Sisters Ridge)에 대하여 처음으로 기본적인 열수 탐사가 이루어졌다. 당시 탐사는 “남극 브랜스필드 배호분지 열수시스템에 대한 선도적 연구” 과제의 일환으로 이루어졌으며, 연구 목적은 화산-열수 시스템 분석을 통해 핵심기술을 개발하여 한국형 극지 해양저 연구를 위한 대형 종합과제를 발굴하는데 있었다. 당시 브랜스필드 해협 분지를 포함하여 드레이크 해협(Drake Passage)에서 “Polar Ocean Gateways”라는 다학제간 국제 연구가 추진 중에 있어 국내 미흡한 해양저 열수 시스템 연구를 선도적으로 추진하기 위한 목적 아래 이 탐사가 시작되었다. 기본적으로 이러한 해역에서 열수 활동의 증거를 찾기 위한 기본적인 작업은 이 해역에 대한 해수 특성이며, 해수 내의 화학적인 자료를 획득하기 위해 철과 망간을 측정할 수 있는 센서를 부착한 CTD (conductivity/temperature/depth) 장비가 이용된다(Gamo *et al.*, 1987). 2009년 최첨단 연구장비를 갖춘 쇠빙연구선 아라온호 이전 남극 하계 연구 탐사는 임차 내빙선을 이용하였기 때문에 대부분의 연구선 기반 환경(장비 및 연구비, 탐사일정 등)은 열악하였다. 연구 여건상 연구 지역에서 기본적인 CTD 장비로 ‘Tow-yo’ 방식으로 해수 특성을 살펴본 결과 열수 분출의 관점에서 수온과 염분의 수층 특이성이 나타났다. Klinkhammer *et al.* (2001)은 이 해역에서 용존 금속 및 탁도를 통해 열수 활동을 찾아냈지만, 기본적인 수온과 염분

의 수층 특성에 따른 이상치 결과는 보여주지 못하였다. 간헐적인 열수 활동이 일어나는 본 연구 해역에서 해류 순환에 따라 쉽게 희석될 수 있는 수온과 염분 특성에 대한 열수 활동의 증거는 열수 플룸(plume)의 시계열 거동을 확인할 수 있는 해수 특성 계류 시스템을 도입할 수 있다. 이로 인해 연구 해역 내 열수 활동에 의한 해양과 해저에 전반적인 생지화적 순환을 이해하는데 도움을 줄 것이다.

2. 지형학적 환경

브랜스필드 해협은 약 120 km의 폭과 북동 클랜런스 섬(Clarence Island)에서 남서 로우 섬(Low Island)까지 약 460 km의 길이이다(그림 1). 이 해협을 둘러싸고 있는 수심 500 m보다 낮은 해저 실(submarine sill)이 주변의 드레이크 해협(Drake Passage)과 웨델 해(Weddell Sea)로부터 심층수의 유입을 막고 있다. 동부 분지의 일부 해역은 수심 500 m 보다 깊은 해저실이 있어 외부로부터 물이 들어올 수 있다. 중앙 분지는 서부와 동부 분지 경계에서 각각 수심 1,000 m와 1,100 m의 해저실로부터 주변 분지와 고립되어 있다. 해협의 해령계는 수심상 분명하게 드러나지 않지만, 고해상도 다중 측심에서 중앙과 동부 분지는 상이한 지형학적 특성을 보여 주며, 중앙분지는 동부 분지에 비해 매우 편평한 해저 측심이 특징적인 것으로 알려져 있다.

3. 해양학적 특성

브랜스필드 해협의 북쪽 드레이크 해협의 남극순환심층수(Circumpolar Deep Water)는 상부 남극순환심층수(UCDW: 수심 500 m 근처에서 발견되는 최대영양염과 최대수온층 그리고 최소산소층)와 하부 남극순환심층수(LCDW: 수심 700 m 근처 중심의 최대염분층)로 나누어져 있다. 이 해수의 일부가 브랜스필드 해협으로 들어오면서 해수 특성이 변형된다. 이 해수는 변형된 남극순환심층수(modified CDW, MCDW)이며, 해협 내 최대수온층과 최대염분층으로 나타난다. 브랜스필드 해협에 나타나는 변형된 남극순환심층수의 중심은 수심 약 300~400 m이며, 드물게 수온 0.5°C 이상의 특성을 지닌다(Cloues, 1934; Capella *et al.*, 1992).

중앙 분지 심층수는 -1.76°C 의 최소 온위에 이르며, 웨델해 심층수(WSBW; $-0.23\sim-0.37^{\circ}\text{C}$ 와 34.66 psu)보다 차가운 것으로 알려져 있다(Kerr *et al.*, 2009). 이 해협은 동부 분지가 중앙 분지보다 수심 500 m 깊지만 그 심층수는 0.5°C 따뜻하고 수심 1,000 m 아래로 중앙분지보다 균질한 염분을 지닌다. 해협 주변수와 유사한 해양 특성을 가진 해협 심층수가 없으며, 브랜스필드 심층수가 해협 내에서 지역적으로 형성되었다(Cloues, 1934; Gordon and Nowlin, 1978; Killworth, 1983). 또한, Whitworth *et al.* (1994)는 브랜스필드 심층수가 웨델해수, 남극순환 심층수, 그리고 북서 웨델 해 대륙붕수의 혼합이라고 제시하였다.

4. 연구 방법

열수 활동의 직접적인 증거를 수집하기 위해 일부 측선을 따라 조사선에서 해저면 3 m 위에 심해 디지털 카메라가 계류되어 0.3 knots 속도로 이동하면서 10초 간격으로 촬영되었다. 연구선에서 직접 자료를 시간적으로 분석하여 열수 침전물의 위치를 계산하였고, 이 지역을 중심으로 CTD 탐사 측선이 결정되었다. 2005년 12월 12일부터 약 3시간 동안 브

랜스필드 해협 중앙분지 서쪽 Three Sisters Ridge에서 해양 수층 특성을 측정하기 위해 SBE 911plus CTD를 해수면 아래 800 m까지 내린 후 최대 해저 수심(기기와 해저 바닥사이 약 10 m)까지 위아래로 견인하였다(그림 2). 연구지역에서 세 개의 측선(A'-A, B'-B 및 C'-C)을 설정하여 DO 센서와 탁도계가 부착된 이 기기(24 Hz sampling rate)를 견인하였다. 표층부터 저층까지의 CTD 측정 또한 동시에 이루어졌다. 상대적인 부유물질농도를 측정하기 위해 SEATECH 투광측정계(660 nm 파장과 20 cm beam path length)가 사용되었다. 660 nm에서 투광측정계의 출력은 0~5 V의 전압값이며 이것은 0~100% 투과도에 해당하기 때문에(Bishop, 1986), 전압값이 작을수록 고탁도를 의미한다. 용존산소 센서(SBE 43)는 모든 자연수에서 표층 포화의 120%를 측정할 수 있는 범위를 지니며, 정밀도는 포화의 2%이다.

세자매 해령에서 이루어진 세 개의 측선들 중 중앙 자매(Central sister)의 A'-A 측선에서 용존산소량이 적어지는 열수 분출의 이상치가 발견되어 해저면 1,120 m, 1,100 m, 1,060 m, 1,050 m, 1,020 m, 990 m, 940 m, 900 m, 845 m, 800 m, 700 m, 600 m 수심에서 채수되었다(그림 2). 해수의 용존성 금속을 분석하기 위해 해수 시료가 $0.45\ \mu\text{m}$ 필터 용지로

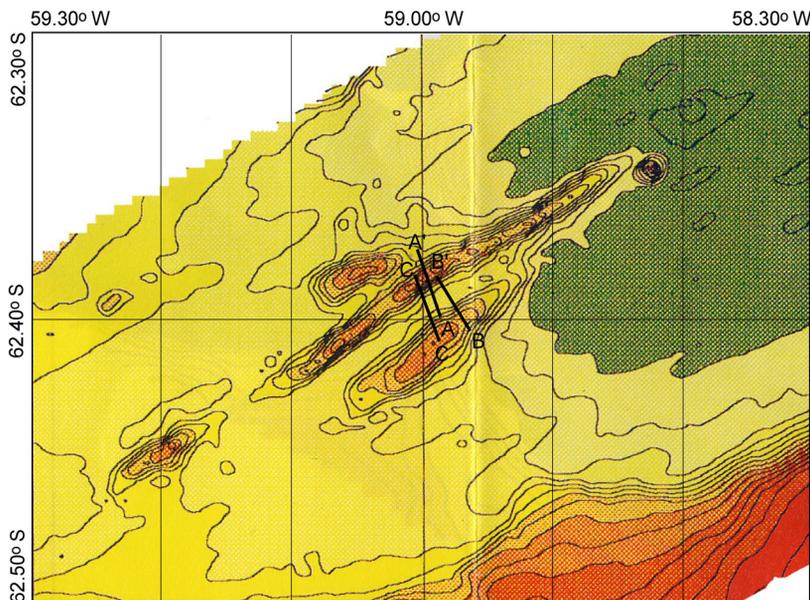


Fig. 2. Bathymetry of the central Bransfield Basin and three CTD towing line (A'-A, B'-B and C'-C). Bathymetric contours are drawn at 50 m intervals and color changes are at every 100 m.

여과된 후 여과된 시료를 500 mL 병으로 담아 질산을 넣어 산성화시킨다. 현장에서 용존성 금속을 분석하기에 어려움이 있어 -20°C 냉동실에 보관되었다.

시료는 실온에서 해동된 후 해수 내에 용존성 금속 추출 실험을 진행하였다. 해수내 존재하는 용존성 금속을 분리하기 위해 샘플을 100 mL를 250 mL 분별 깔데기(Separate Funnel)에 넣는다. 시료 내에 메틸오렌지를 한 방울씩 떨어뜨리고, pH를 2-3 정도로 맞추기 위해 2N NH₄OH와 6N HCl를 이용하여 조절한다. pH 유지는 Citrate Buffer 1mL를 넣으며, 용존성 금속이온을 착화합물을 결합하기 위해 APDC-DDTC (Ammonium Pyrrolidine Dithio Carbamate-Diethyldithio Carbamic Acid) 2 mL과 Fleon 10 mL 넣고 흔들고 준 후 정치한다. 이때 분리된 Fleon 층을 분리하여 125 mL 분별 깔데기에 받아낸다. 이와 같은 방법으로 5 mL의 Fleon을 추가 주입하여 잔존되어 있는 금속이온을 분리한다. 분리된 Fleon

은 teflon vial에 올려놓고 Fleon 층을 증발시키고, 모두 증발이 되면 1% HNO₃ 2.5 mL을 넣고 가열한 후, 완료된 용액은 금속이온 분석에 사용하였다.

금속이온 측정은 극지연구소 지구시스템 연구부 내 보유하고 있는 Perkin Elmer사 Elan 6100 ICP-MS를 이용하였다. ICP-MS 장비는 검출 감도가 2백만 카운트보다 낮은 농도인 저농도를 위한 펄스 검출기와 고농도를 위한 아날로그 검출기로 이중 검출기 장치가 내장되어 있다. 이들 검출기에 따른 저농도와 고농도 표준용액 검정곡선의 오차 보정을 위해 200 ppb의 모든 미량원소를 이용하여 이중 검출기 보정이 실행되었다. 검정곡선 작성을 위해 사용된 표준용액은 Inorganic Venture (USA)에서 제조된 100 ppm 농도의 다금속 표준용액(CCS-4, CCS-5)을 이용하여 ICP-MS 표준용액을 제조하였다. 매트릭스 효과와 기기상의 편차를 보정하기 위해 시료 내 내부표준물로 10 ppb의 ¹⁰³Rh가 사용되었다. 모든 시료는 peak hopping mode로 극지연구소에서 측정되었다. 분석에 측정된 용존 원소는 Fe, Mn, Cu이며, 기기상의 측정된 농도는 참고문헌 상의 결과와 비교를 위해 nM 농도로 계산하였다.

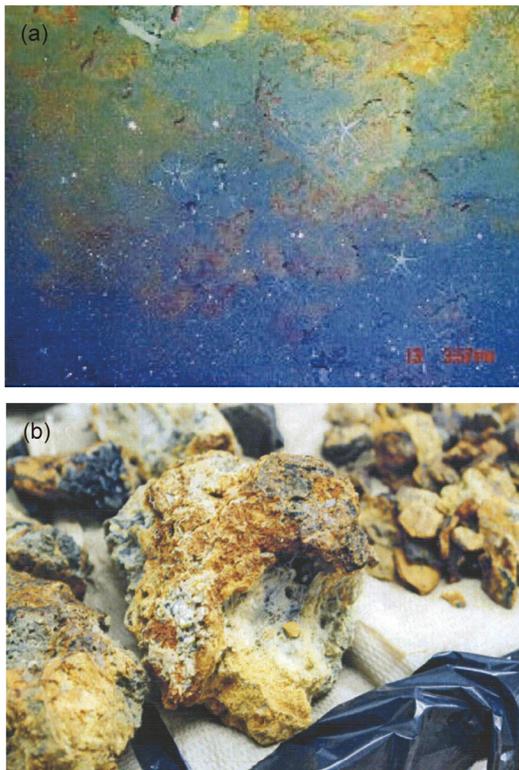


Fig. 3. (a) a photo image showing hydrothermal sediment at the top of middle syster (~1,100 m water depth) and (b) yellowish brown microcrystalline iron oxide. (KOPRI report, 2008).

5. 결과 및 토의

5.1 심해 카메라 촬영으로 나타난 열수 활동

제한적인 연구 측선과 활동 시간으로 인해 심해 카메라 촬영을 통한 직접적인 활동성 열수 분출공은 찾을 수 없었다. 단지 일부 장소에서 열수침전물로 짐작되는 촬영 사진이 얻어졌고, 그림 3a는 연구 지역 내 중앙 자매(middle syster)의 최정상부(수심 약 1,100 m)에서 확인되는 열수침전물의 사진이다. 황갈색 내지는 갈색으로 보이는 이 침전물들은 중앙 자매 최정상부 부근 직경 약 200~300 m 지점에 광범위하게 분포하였다. 일부 회수된 암석 시료는 황갈색의 가벼운 철산화물이 포함된 열수침전물이었으며(그림 3b), 황화광물 등은 관찰되지 않았다 (KOPRI report, 2008).

5.2 세 측선(A'-A, B'-B 및 C'-C)의 전체적인 수층 특성

세 측선에서 얻어진 수온-염분 관계는 세자매 해령의 심층수 근원을 말해주며(그림 4), 탐사 기간 동안

에 나타난 수층에서 변형된 남극순환심층수(MCDW)가 보이지 않는다. 브랜스필드 해협 중양과 동부 분지 사이에 놓인 지형학적인 장벽(해령)으로 인해 웨델해 중층수나 동부 분지 저층수가 중앙 분지에 영향을 줄 수 없다. 세자매 해령의 심층은 특징적인 중앙 분지 저층수이며, 웨델해의 차가운 빙봉수의 영향으로 인해 그 수온이 약 -1.6°C 정도로 차갑다. 겨울 동안 차가워진 일부 빙봉수가 동부 및 중앙 분지로 들어오면서 세자매 해령 부근 심층수에 영향을 줄 수 있다(Whitworth *et al.*, 1994).

A'-A 측선의 시작점인 A 정점의 연직 수층 특성에서 당시 브랜스필드 해협의 수층 구조가 나타난다(그림 5). 수심 500 m 이내의 수층 특성은 $-1.1\sim-0.3^{\circ}\text{C}$ 의 온위와 염분 $34.30\sim34.45$ psu 사이를 지닌다(그림 5a와 5b). 일반적으로 브랜스필드 해협의 수심 300~400 m 사이의 주된 수층은 변형된 남극순환심층수(0.0°C 이상의 최대수온층)이다. 탐사 연구 기간 동안 수온 0.0°C 보다 높은 수온이 수심 약 40 m 이내에 나타나며, 이 수심 아래로는 모두 0.0°C 이하의 수온을 지닌 물이다. 이는 변형된 남극순환심층수가 잘 발달되지 않았음을 보여준다. 그렇지만, 수심 300 m에서 360 m 사이에 뚜렷하게 나타나는 최소산소

층(그림 5c)은 외부에서 해협 내로 들어오는 심층수의 영향력이 점차 커지고 있음을 말해준다. 해협 바깥의 남극순환심층수는 남 쉘랜드 군도 서부 스미스 섬을 거쳐 디셉션 섬을 통과해 브랜스필드 해협 중앙분지 서쪽 수심 300~360 m 이내에 나타나는데, 시간이 지날수록 이 수층 부근에서 최대수온층이 나타나는 것으로 알려져 있다. 또한, 킹조지 섬과 엘레판트 섬 사이의 수심 약 500 m 사이의 통로를 통해 남극순환심층수의 유입이 일부 관찰된다.

수층 40 m에서 200 m 사이에 수온 $-0.8\sim-0.0^{\circ}\text{C}$, 염분 $34.35\sim34.50$ psu의 혼합층이 존재한다(그림 5). 남극 여름은 보통 12월 초에 시작된다. 동시에 대기의 복사량도 증가하며, 대기 복사로 인해 브랜스필드 해협의 표층수 수온이 따뜻해진다. 여름 기간 동안 남극반도 주변이나 남빙양에서 수심 200 m 이내에 보이는 중요 수층은 남극표층수(AASW: Antarctic Surface Water)이다. 이 물의 특징은 겨울 동안에 생성된 표층의 차가운 물(보통 Winter Water)이 여름 동안 더워진 표층수 내에 고립되어 나타난다(Orsi *et al.*, 1995). 수심 1,200 m 아래에서 최소수온층이 나타나는데, 이는 일반적인 심층수의 특징이다(그림 5a).

5.3 연직 수층 특성

CTD 견인으로부터 열수현상으로 볼 수 있는 증거가 A'-A 측선의 연직 단면도에서 나타났다(그림 6). 일반적으로 열수의 수층 특성은 연구 지역 내 열수분출공의 활성도와 분포에 따라 달라진다. 특히, 열수분출공의 밀도가 높고 분출 활동이 높을수록 주변 해수는 따뜻하고 저염분의 특성이 나타난다. 이 측선에서 세자매 해령의 정상 해저면을 따라 그리고 능선 해저면을 따라 열수분출공을 찾을 수 있는 특징적인 수층 특성들은 보이지 않았다(그림 6). 이는 CTD 견인(그림 6)에서 볼 수 있듯이 연구 해역의 수층 특성 분포를 자세하고 조밀하게 파악하지 못한 결과(CTD가 거의 해저면 약 50 m까지만 견인됨)로 볼 수 있다. 하지만, 세자매 해령의 정상 위 수심 820 m 근처에서 주변수에 비해 약간 따뜻한 물($>-1.15^{\circ}\text{C}$)이 나타나는데 이는 일반적으로 해협 내 심층의 안정된 해수 특성과 상반된 결과임을 보여준다(그림 6). 일반적으로 이 해협의 중층에 나타나는 따뜻한 물은 해협의 북쪽 외해에서 유입되는 변환된 남극순환심층수이며 실제로 여름 동안 해협 내의 최대수온

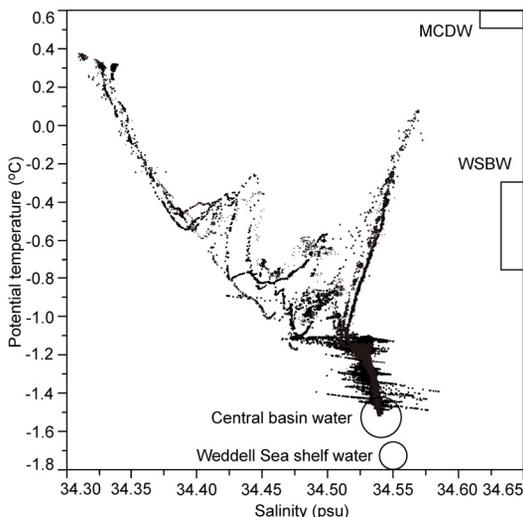


Fig. 4. Potential temperature-salinity diagram of A'-A, B'-B, and C'-C line. The circles can be expressed as Weddell Sea shelf water and central basin water (Whitworth *et al.*, 1994) and the boxes indicated modified Circumpolar Deep Water and Weddell Sea Bottom Water (Orsi *et al.*, 1995).

층으로 나타난다. 이 수층은 보통 수심 500 m 이내의 $\sigma_\theta = 27.7$ 등밀도선을 따라 존재하기 때문에, 본 연구 결과에 나타난 물은 변환된 남극순환심층수의 침강수로 절대 볼 수 없다. 또한, 같은 수심의 수층에서 염분이 낮게 나타나는데, 아마도 탐사 시기 이전 세자매 해령 해저에서 분출된 저염의 따뜻한 열수가 일정기간 상승하여 나타난 결과로 사료된다.

실제 세자매 해령의 활발한 열수 활동과 관련한 간접적인 증거로 볼 수 있는 것은 A'-A 축선의 등밀도 분포의 왜곡이다(그림 6c). 세자매 해령의 정상에서 남쪽으로 27.78의 등밀도선의 골(trough)이 나타난다. 브랜스필드 해협 분지 주변은 최대 수심 약 500 m 이내의 대륙붕으로 둘러싸여있다. 이는 대륙붕 주변으로 들어오는 수평적인 심층 순환이 잘 이루어지지만, 이보다 깊은 수심의 분지는 안정된 심층 수괴 분포를 유지한다는 것이다. 일반적으로 해협의 서부 분지 외해와 웨델해 해저 실(sill)에서 넘어오는 빙봉수가 중앙분지로 유입되어 수직적인 혼

합이 이루어지며(그림 1), 중앙 분지의 심층은 웨델해 빙봉수의 영향을 전적으로 받는다. 다시 말해서 중앙분지의 심층수는 일정한 수심을 따라 동일한 밀도선을 유지한다. 하지만, 세자매 해령 정상부에 나타나는 27.78의 등밀도선의 왜곡은 이러한 범주에서 벗어나는 결과로써 세자매 해령의 열수 활동에 의한 결과임을 말해준다. 무엇보다도 수온과 염분 분포에서 나타난 결과와 유사하게 용존산소 분포에서도 볼 수 있었다(그림 6d). A'-A 축선의 중앙 해령을 따라 수심 약 800 m 아래에 나타났던 특이한 용존산소 분포가 B'-B와 C'-C 축선 결과에서 잘 나타나지 않았는데(그림 6, 7과 8), 이는 다른 두 축선이 A'-A 축선에 비해 작은 열수 활동의 결과이거나 조밀하지 못한 견인 차이에서 나타난 결과로 생각된다.

C'-C 축선에서 -1.35°C 의 등수온선이 세자매 해령들 중 중앙 해령으로 접근할수록 기울어지며, 중앙 해령의 사면을 따라 수심에 따른 연직 수온 차이는 크지 않았다(그림 8a). 이러한 특징은 B'-B 축선

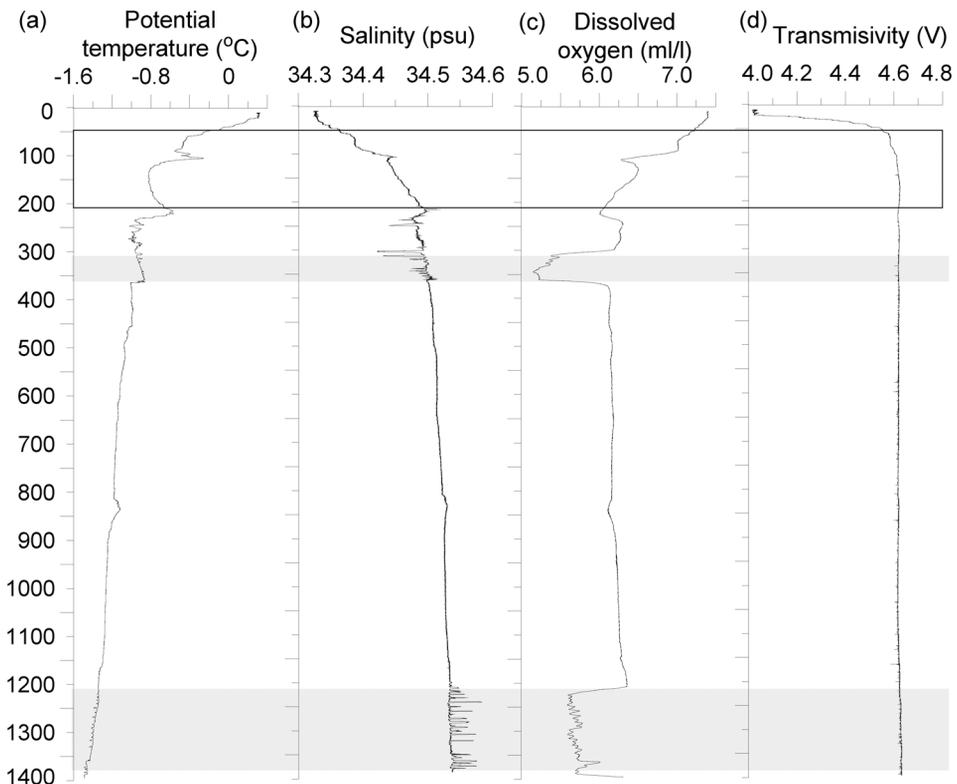


Fig. 5. Water column characteristics at A point of A'-A line. (a) Potential temperature, (b) salinity, (c) dissolved oxygen and (d) transmissivity. The box indicates the water column characters of Antarctic Surface Water.

에도 유사하게 관찰된다(그림 7). 등밀도 분포 또한 중앙 해령의 사면으로 갈수록 기울어진다(그림 7c). 이는 중앙 해령의 정상부 이외에도 사면을 따라 발생하는 열수 활동과 관련된 것으로 해석된다. 중앙 해령 사면의 열수 근원지에서 나오는 열수는 주변 해수에 비해 수온이 높고 저염의 특성을 보이기 때문이다.

A'-A 측선의 연직 분포와 마찬가지로 C'-C 측선의 중앙 해령의 정상에서 열수 활동의 증거가 연직 수층 분포에서 볼 수 있다(그림 8). 해저 해수에 비해 고온과 저염인 해령 정상부 열수의 분출은 등수온 및 등밀도 분포의 왜곡으로 나타난다. A'-A 측선의

연직 수층 단면에서 볼 수 있는 왜곡이 깊이에 따라 등염분선과 등밀도선에서 뚜렷하게 나타난다. 다만 C'-C 측선에서 뚜렷하게 보이지 않는데, 이는 아마도 해령 정상부 부근의 CTD 견인이 수심 800 m까지 이르지 못한 결과로 보인다. 특징적인 것은 B'-B 측선에는 이러한 형태가 나타나지 않는다는 것이다. A'-A와 C'-C 측선의 유사한 특징은 두 가지 측면에서 해석될 수 있다. A'-A 측선 중앙 해령 정상에 활발한 열수 활동이 저층 흐름의 방향을 따라 C'-C 측선의 정상부로 전달되었거나 약한 저층 흐름을 감안할 때 C'-C 측선의 중앙 해령 정상에도 약한 열수 분출이 존재할 수 있다.

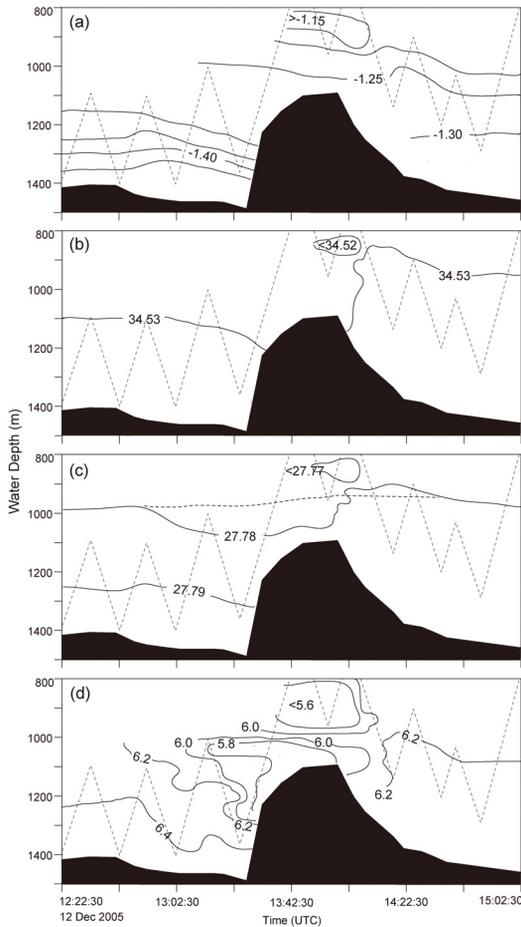


Fig. 6. Water column characteristics of CTD towing in A'-A line. (a) Potential temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) potential density (kg m^{-3}) and (d) dissolved oxygen (ml l^{-1}). The dotted line indicates actual 27.78 isopycnal.

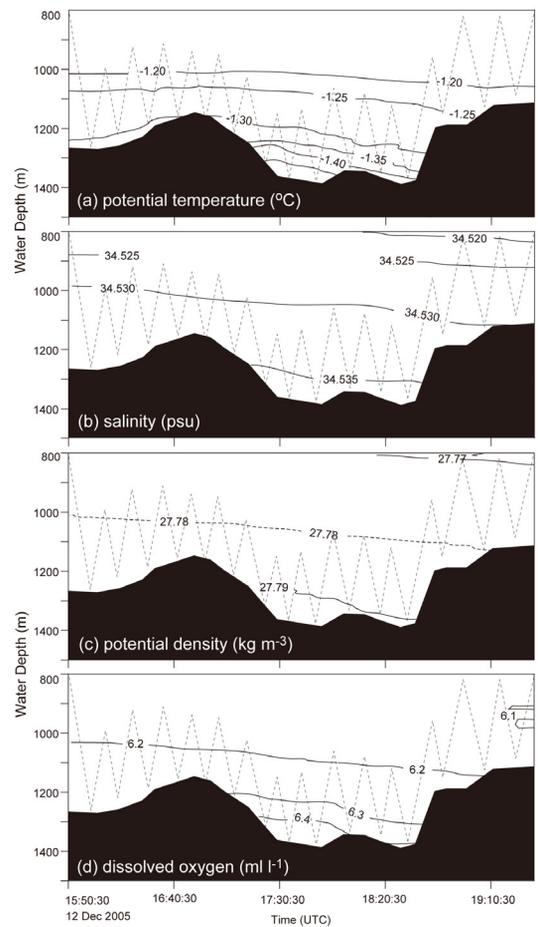


Fig. 7. Water column characteristics of CTD towing in B'-B line. (a) Potential temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) potential density (kg m^{-3}) and (d) dissolved oxygen (ml l^{-1}). The dotted line indicates 27.78 isopycnal.

5.4 용존 금속 이상

A'-A 측선에서 열수 작용이 강하게 나타나는 세자매 해령들 중 중앙 해령 정상에서 CTD 견인하는 도중에 수심 600~1,120 m에서 해수 시료 채수한 후 해수 내 용존 금속 철, 망간 및 구리를 ICP-MS 기기로 분석하였다(그림 9). 수심 1,010~1,120 m에서 용존 철, 망간 및 구리의 이상치가 나타났다. 용존 철은 정상 근처에서 다른 수층에 비해 약 36 nM 이상, 용존 망간은 13 nM 이상, 그리고 용존 구리는 1,800 nM 이상의 높은 값을 보여준다. 이 용존성 금속들의 최대치는 열수 분출의 직접적인 증거이며, "철-구리 풍성 플룸"을 지시한다(Dählmann *et al.*, 2001;

Klinkhammer *et al.*, 2001). 이러한 이상치 값들은 A'-A 측선에서 세자매 중앙 해령 정상부에서 나타나는 왜곡된 수층 특성과 잘 일치하고 있어서 이러한 수층 특성은 이 연구 지역의 활발한 열수 활동의 결과로 볼 수 있다(그림 6).

6. 결론

남극해 중앙 해령의 열수 탐사의 기초적인 연구를 위해 처음으로 2005/2006년 남극 하계 탐사 기간 동안 브랜스필드 해협 세자매 해령에서 CTD 견인을 통한 수층 특성과 해수의 지화학적 분석이 이루어졌다. 탐사 기간 동안 수온-염분 관계에서 해협의 서부 분지 외해에서 들어오는 변형된 남극순환수층수는 연구 지역에 나타나지 않았으며, 세자매 해령의 심층은 특징적인 중앙 분지 저층수를 보여준다. 세자매 해령의 정상 위 수심 820 m 근처에서 주변수에 비해 약간 따뜻한 물(>-1.15°C)이 나타나는 데, 아마도 탐사 시기 이전 세자매 해령 해저에서 분출된 저염의 따뜻한 열수가 일정기간 동안 상승하여 나타난 결과로 사료된다. 세자매 해령의 정상에서 남쪽으로 27.78의 등밀도선의 왜곡은 해협 내 심층 순환의 결과가 아닌 세자매 해령의 중앙 해령의 열수 활동의 결과로 사료된다. 특히, 이 부근에서 채수된 해수 시료의 용존 금속의 이상치는 "철-구리 풍성 플룸"으로 나타나고 해수 특성 결과와 잘 일치한다. 이러한 결과는 열수 활동이 지속적으로 나타나지 않고 간헐적인 분출이 나타나는 본 해역에서 해

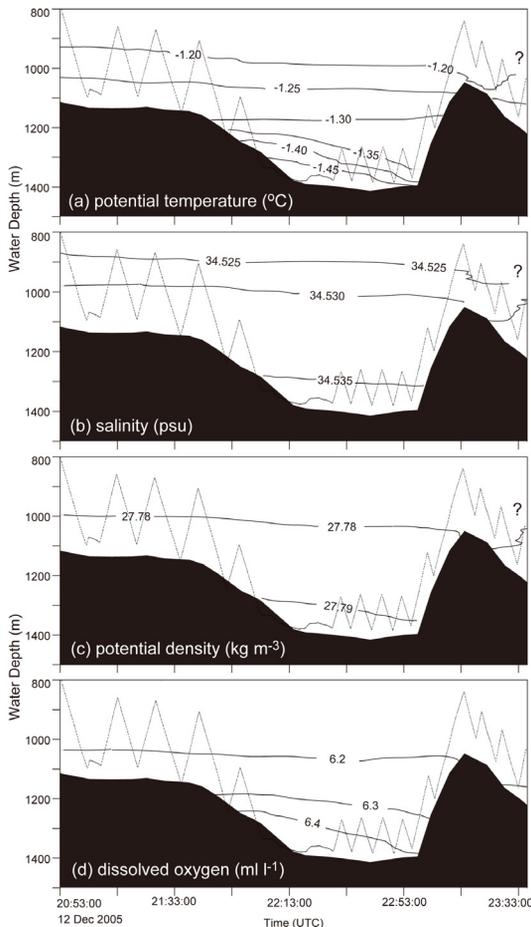


Fig. 8. Water column characteristics of CTD towing in C'-C line. (a) Potential temperature (°C), (b) salinity (psu), (c) potential density (kg m⁻³) and (d) dissolved oxygen (ml l⁻¹). The dotted line indicates actual 27.78 isopycnal.

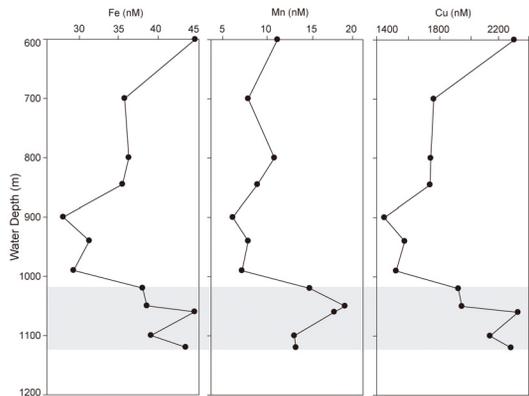


Fig. 9. Dissolved metal anomalies (Fe, Mn, and Cu) above the top of Three Sisters Ridges on the A'-A line.

수의 수층 특성만으로 찾아낸 열수 활동의 증거이며, 차후 이런 해역에서 장기적인 해수 특성 및 해류 관측을 위한 계류를 이용할 경우 열수 분출 플룸의 거동과 확산을 연구할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 극지연구소 주요사업인 “퇴적물을 활용한 지난 2백만년간의 남극 빙권 및 해양 변화 복원 (PE17030)”의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

REFERENCES

- Barker, D.H.N. and Austin Jr, J.A., 1994, Crustal diapirism in Bransfield Strait, West Antarctica: Evidence for distributed extension in marginal-basin formation, *Geology*, 22, 657-660.
- Birkenmajer, K. and Keller, R.A., 1990, Pleistocene age of the Melville Peak volcano, King George Island, West Antarctica, by K-Ar dating. *Bulletin of Polish Academic Science*, 38, 17-24.
- Bishop, J.K.B., 1986, Instrument and methods: the correction and suspended particulate matter calibration of Sea Tech transmissometer data. *Deep-Sea Research*, 33(1), 121-134.
- Brault, M. and Simoneit, B.R.T., 1990, Mild hydrothermal alteration of immature organic matter in sediments from the Bransfield Strait, Antarctica. *Applied Geochemistry*, 5, 149-158.
- Campbell, K.A., 2006, Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232, 362-407.
- Capella, J.E., Ross, R.M., Quetin, L.B. and Hofmann, E.E., 1992, A note on the thermal structure of the upper ocean in the Bransfield Strait-South Shetland Islands region. *Deep-Sea Research*, 39, 1221-1229.
- Chin, C.S., Klinkhammer, G.P., Wilson, C., Lawver, L.A. and Lupton, J.E., 1996, Hydrothermal activity in a nascent backarc basin: the Bransfield Strait, Antarctica (abstract). *Eos Trans. American Geophysical Union*, 77, F413.
- Clowes, A.J., 1934, Hydrology of the Bransfield Strait. *Discovery Republic*, 9, 1-64.
- Dählmann, A., Wallmann, K., Sahling, H., Sarthou, G., Bohrmann, G., Petersen, S., Chin, C.S. and Klinkhammer, G.P., 2001, Hot vents in an ice-cold ocean: Indications for phase separation at the southernmost area of hydrothermal activity, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 381-394.
- Elderfield, H., 1972, The effects of volcanism on seawater chemistry, Deception Island, Antarctica. *Marine Geology*, 13, M1-M6.
- Gamo, T., Ishibashi, J., Sakai, H. and Tilbrook, B., 1987, Methane anomalies in seawater above the Loihi submarine summit area, Hawaii. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2857-2864.
- Gordon, A.L. and Nowlin, W.D.J., 1978, The basin waters of the Bransfield Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 8, 258-264.
- Keller, R.A. and Fisk, M.R., 1992, Quarternary marginal basin volcanism in the Bransfield Strait as a modern analogue of the southern Chilean ophiolites, in: Parson, L.M., Murton, M.J., Browning, P. (Eds.), *Ophiolites and their Modern Oceanic Analogues*, Geological Society Special Publication 60, The Geological Society, London, 155-169.
- Keller, R.A., Fisk, M.R., White, W.M. and Birkenmajer, K., 1991, Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin volcanism, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth Planetary Science Letters*, 111, 287-303.
- Kerr, R., Mata, M.M. and Garcia, C.A.E., 2009, On the temporal variability of the Weddell Sea Deep Water Masses, *Antarctic Science*, 21, 383-400.
- Killworth, P.D., 1983, Deep convection in the world ocean. *Rev. Geophysical Space Physics*, 21, 1-26.
- Klinkhammer, G.P., Chin, C.S., Keller, R.A., Dählmann, A., Sahling, H., Sarthou, G., Petersen, S., Smith, F. and Wilson, C., 2001, Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 395-407.
- KOPRI report, 2008, Antarctic challenging Experiment for hydrothermal system in the Bransfield back-arc basin.
- Livermoore, R., Balayá, J.C., Maldonado, A., Martinez, J.M., De Galdeano, C.S., Zaldivar, J.G., Jabaloy, A., Barnolas, A., Somoza, L., Hernández-Molina, J., Sřiñach, E. and Viseras, C., 2000, Autopsy on a dead spreading center The Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. *Geology*, 28, 607-610.
- Orsi, A.H., Whitworth III, T. and Nowlin Jr, W.D., 1995, On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Research*, 42, 641-673.
- Schlosser, P., Suess, E., Bayer, R. and Rhein, M., 1988, ³He in the Bransfield Strait waters: indication for local injection from backarc rifting. *Deep-Sea Research*, 35, 1919-1935.
- Suess, E., Fisk, M. and Kadko, D., 1987, Thermal inter-

- action between back-arc volcanism and basin sediments in the Bransfield Strait, Antarctica. *Antarctic Journal of US*, 22, 46-49.
- Whiticar, M.J. and Suess, E., 1990, Hydrothermal hydrocarbon gases in the sediments of the King George Basin, Bransfield Strait, Antarctica. *Applied Geochemistry*, 5, 135-147.
- Whitworth, T., Nowlin, W.D., Orsi, A.H., Locarnini, R.A. and Smith, S.G., 1994, Weddell Sea shelf water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence. *Deep-Sea Research*, 41, 629-641.
-
- Received : June 16, 2017
Revised : August 29, 2017
Accepted : August 30, 2017