연구논문

북극해 척치해저고원 남서부 대륙사면에서의 가스하이드레이트 탐사

강승구¹ · 장우근² · 김수관³ · 최연진⁴ · 김영균⁵ · 홍종국⁶ · 진영근^{6*}¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 선임연구원, ²충남대학교 지구환경과학과 박사후연구원,³한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 기술원, ⁴한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 연수생,⁵강원대학교 지구자원연구소 연구교수, ⁶한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 책임연구원

Exploration of the Gas Hydrates on the Southwestern Continental Slope of the Chukchi Plateau in the Arctic Ocean

Seung-Goo Kang¹, Ugeun Jang², Sookwan Kim³, Yeonjin Choi⁴, Young-Gyun Kim⁵, Jong Kuk Hong⁶ and Young Keun Jin^{6*}¹Senior Research Scientist, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea²Postdoctoral Researcher, Department of Geological Sciences, Chungnam National University, Daejeon, Korea³Technician, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea⁴Research Scientist, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea⁵Research Professor, Research Institute of Earth Resources, Kangwon National University, Kangwon, Korea⁶Principal Research Scientist, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea***Corresponding Author.** Young Keun Jin, ykjin@kopri.re.kr, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

Received

10 August 2021

Final version Received

29 September 2021

Accepted

26 October 2021

Abstract

A single-channel sparker seismic survey was conducted to investigate the distribution of gas hydrates around a sea mound cluster on the southwestern slope of the Chukchi Plateau, where the gas hydrates were first recovered by gravity coring in 2016. Reflections with reversed polarity were discovered on the continental slope of the acquired seismic sections. The depths of the lower bound of the gas hydrate stability zone calculated from the heat flow data and the water temperature at the seafloor were used to confirm that these reflections were gas hydrate related bottom simulating reflections (BSRs). This implies that the regional distribution of gas hydrates in the southwestern continental slope of the Chukchi Plateau is being reported for the first time based on geophysical data. The proposed distribution map of the BSRs related to the gas hydrates is expected to be used as significant information for future gas hydrate surveys in the Chukchi Sea.

Key words : Arctic Ocean, bottom simulating reflection, gas hydrates, gas hydrate stability zone, single-channel sparker seismic survey

요약

2016년 실물 가스하이드레이트가 최초로 채취되었던 북극해 척치해저고원 남서부 대륙사면 해저산 군집지역을 중심으로 그 주변에 대한 가스하이드레이트 분포를 규명하기 위한 단일채널 탄성파 탐사가 수행되었다. 탄성과 단면에서는 대륙사면 지역에 나타나는 반전된 위상을 가진 강한 반사 신호를 확인할 수 있었다. 해저 지열류량과 해저면 수온을 기반으로 계산한 가스하이드레이트 안정영역 하부경계와의 비교를 통해 탄성과 단면상에 나타나는 반전된 위상을 가진 강한 반사 신호가

가스하이드레이트 부존에 따른 해저면 모방 반사면임을 확인하였다. 이는 북극 척치해저고원 남서부 대륙사면 지역에 대한 가스하이드레이트 분포를 지구물리학적 자료를 기반으로 최초로 제시한 결과이다. 제안된 가스하이드레이트 부존을 지시하는 해저면 모방 반사면 분포도는 향후 해당 지역 가스하이드레이트 탐사 및 연구에 중요한 기초 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

주요어: 북극해, 해저면 모방 반사면, 가스하이드레이트, 가스하이드레이트 안정영역, 단일채널 스파커 탄성과 탐사

서 론

가스하이드레이트는 저온 고압의 조건에서 천연가스와 물 분자가 결합하여 형성된 고체상 화합물(Sloan and Koh, 2008)이다. 최근 가스하이드레이트는 미래의 에너지 자원(Milkov, 2004)과 해저 지질재해의 원인 및 기후변화(Kennett *et al.*, 2003)에 미치는 영향 등으로 큰 관심을 받고 있다. 가스하이드레이트는 안정조건을 만족시키는 해저대륙사면과 극지방 영구동토지역 퇴적층에 주로 분포되어있는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 1997년 동해 울릉분지에서 가스하이드레이트에 대한 탐사가 시작되었고, 탄성과 단면상의 해저면 모방 반사면(Bottom simulating reflection, BSR)과 같은 가스하이드레이트의 부존 가능성을 시사하는 지구물리학적 지시자들이 잘 발달되어 나타나고 있음이 확인되었다(Lee *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2008; Ryu *et al.*, 2009).

가스하이드레이트 부존을 탐지할 수 있는 지구물리탐사 방법으로는 물리검층(well logging), 탄성과 탐사, 전자기 탐사(electro magnetic survey), 다중빔 해저지형 탐사(multi-beam echo sounder), 천부 해저지층 탐사(sub-bottom profiler) 및 해저면 측사 탐사(side scan sonar survey) 등이 있다. 이중 탄성과 탐사는 가장 많이 사용되는 탐사 방법으로, 탄성과 단면에 나타나는 BSR을 통해 가스하이드레이트 부존 여부를 간접적으로 확인할 수 있다. BSR은 가스하이드레이트 안정영역(Gas hydrate stability zone, GHSZ)의 하부 경계에서 가스하이드레이트층과 자유가스층이 가지는 탄성과 속도와 밀도의 차이에 의해 탄성과 단면상에 나타난다(Shipley *et al.*, 1979). 일반적으로 BSR은 강한 진폭을 가지며, 해저면 반사파와 반대의 위상을 보이고 해저면과 평행하게 나타나는 특징을 갖는다. 하지만 가스하이드레이트 층 아래에 자유가스가 존재하지 않거나 퇴적층의 탄성과 속도가 빠른 경우 탄성과 단면상에 BSR이 나타나지 않을 수도 있다(Kvenvolden and Barnard., 1983). 이에 따라 가스하이드레이트의 부존과 관련된 BSR에 대해서는 추가적인 확인과 이에 대한 분석이 요구된다. 주로 탄성과 속도정보를 활용하는 방법과 지열 및 수온 구배를 이용하여 계산한 연구지역 GHSZ를 활용하여 가스하이드레이트

와 관련된 BSR을 판별하는 방법 등이 있다. GHSZ를 활용하는 경우, 계산된 GHSZ 하부경계 깊이를 탄성과 단면 내 해저면 아래 나타나는 역전된 위상을 가진 반사면의 깊이와 비교하여 그 깊이가 같을 때 해당 반사면은 가스하이드레이트에 의한 BSR로 판단한다(Riedel *et al.*, 2010). BSR과 더불어 일반적으로 알려진 가스하이드레이트 부존을 가리키는 탄성과 단면상의 지시자로는 음향공백대(acoustic blanking), 침니(chimney), BSR상부에 나타나는 강한 반사면(strong reflector) 및 하부의 증폭반사면(enhanced reflection), 폭크마크(porkmark) 등이 있다(Yoo *et al.*, 2013).

고위도 북극 지역에 부존하는 가스하이드레이트는 영구동토층과 깊은 관계가 있다고 알려져 있다(Kvenvolden *et al.*, 1993; Collett *et al.*, 2011). 극지방 영구동토층은 비교적 얇은 수심의 대륙붕 지역에서도 가스하이드레이트가 형성될 수 있는 온도-압력 조건을 만든다(Kvenvolden *et al.*, 1993). 현재까지 미국 알래스카(Collett *et al.*, 2011) 및 캐나다 보퍼트해 대륙붕 지역은 영구동토층과 연관된 가스하이드레이트가 발견 혹은 확인된 대표적인 지역이다(Carcione and Gei, 2004; Osadetz and Chen, 2010; Riedel *et al.*, 2017). 그린란드 Svalbard 남동쪽 Vestana Ridge에서도 가스 플레어(gas flare), 핑고(Pingo), 진흙화산(mud volcano) 등 가스하이드레이트와 관련된 가스분출 지질구조가 다양하게 관측되었다(Hustoft *et al.*, 2009). 이 지역에서는 최근 다중채널 탄성과 자료와 OBS자료를 획득하고 이에 대한 정밀 분석을 통해 Vestnesa Ridge의 속도모델과 포화도모델을 제안하고, 지형과 단층에 의해 조절되는 가스하이드레이트의 분포형태를 제시하는 등 최신 탐사 기술을 활용한 심도 있는 가스하이드레이트 관련 연구가 활발히 수행되고 있다(Singhroha *et al.*, 2019). 이에 반해 척치해 및 동시베리아해 지역은 현재까지 발표된 가스하이드레이트 관련 연구결과 및 관련 정보가 없는 미지의 영역으로 남아있다(Fig. 1).

극지연구소에서는 2016년 그리고 2018년 두 차례에 걸쳐 북극 공해상의 동시베리아해(East Siberian) 및 척치해(Chukchi) 대륙붕 지역을 대상으로 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 북극 해저환경변화 및 해저자원 부존에 대한 기초지질 및 지구물리 탐사를 수행하였다. 2016년 1차 탐사

에서는 북극 척치해저고원 남서부 대륙사면에 존재하는 해저산(sea mound)구조를 발견하였고, 중력 코어링을 통해 가스하이드레이트 시료를 세계 최초로 채취하였다(Jin *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020). 2018년 수행된 2차 척치해저고원 탐사에서는 남서부 대륙사면 지역에 분포하는 해저산 구조와 그 주변 지역을 대상으로 탄성과 탐사를 포함한 집중적인 가스하이드레이트 탐사를 수행하였다. 그 결과 탐사지역 내 분포하는 총 8개의 해저산 구조를 찾았고, 이 중 2개의 해저산 구조에서 다량의 가스하이드레이트 시료를 채취하였다(Jin *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2020). 또한, 총 15개 측선에 대한 탄성과 자료 및 척치해저고원 대륙붕-대륙사면 지역에 걸친 총 5개 정점에서 해저 지열류량 및 CTD(conductivity, temperature, and depth)프로파일을 확보하였다.

이번 연구에서는 탄성과 탐사자료를 기반으로 실물 가스하이드레이트가 발견된 척치해저고원 해저산 군집지역 및 그 주변을 대상으로 가스하이드레이트 분포를 규명하기 위한 기초연구를 수행하였다. 획득한 단일채널 스파커 탄성과 자료를 분석하여 역전된 위상을 가진 강한 반사 구조가 해저산군집지역을 중심으로 대륙사면 전반에 걸쳐 해저면 아래에 널리 분포되어있음을 확인하였다. 해당 반사 구조가 가스하이드레이트 부존과 관련된 BSR로 해석될 수 있는지를 판단하기 위해, 해당 탐사 기간 중 관측한 지열 및 해저면 수온 값을 이용하여 GHSZ의 하부경계 깊이를 계산하고(Miles, 1995) 이를 단면상 해저면 아래 나타나는 역전된 위상의 강한 반사 구조가 나타나는 깊이와 비교하였다. 단면상에 나타나는 역전된 위상의 강한 반사구조의 깊이가 계산한 GHSZ 하부경계 깊이와 같을 때 이를 가스하이드레이트 부존과 관련된 BSR로 해석하였다. 그리고 탄성과 탐

사 구간 내 확인된 모든 BSR의 위치를 지도에 표시함으로써 연구지역에 부존하는 가스하이드레이트에 대한 지구물리학적 근거 및 분포정보를 최초로 제시하였다.

북극 척치해저고원 남서부 대륙사면 지역 해저산 구조에서 발견된 가스하이드레이트

2016년 8월 25일부터 9월 10일, 그리고 2018년 8월 29일부터 9월 20일까지 두 차례에 걸쳐 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서는 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 북극 척치해 척치해저고원 지역을 대상으로 급격한 기후변화에 따른 해저 환경변화의 관측과 해저자원에 대한 기초조사를 위한 지구물리탐사를 수행했다. 2016년 탐사에서는 다중빔 해저지형 탐사기, 천부 해저지층 탐사기 그리고 단일빔 수중음향 측심기 등을 활용한 해저지형탐사를 수행하였다(Jin *et al.*, 2017). 그 결과 척치해저고원 남서부 대륙사면에 발달한 높이 약 10 m 정도의 해저산 구조를 최초 발견하였고, 해저산 정상부에서 중력 코어링을 실시하여 가스하이드레이트 시료 채취에 성공하였다(Jin *et al.*, 2017). 이는 현재까지 공식적으로 알려진 사례가 없었던 북극 척치해저고원 지역에 부존하는 가스하이드레이트에 대한 새로운 발견이다(Chuvilin *et al.*, 2020).

Fig. 1에는 우리나라 동해 울릉분지를 비롯하여 일본의 난카이 트러프, 인도의 뱅갈만 해역 분지, 미국의 멕시코만 및 Blake Ridge, 그리고 극지방인 미국 알래스카 및 캐나다 보퍼트해 대륙붕-대륙사면 지역, 그린란드 해역, 남극 로스해 등 현재까지 가스하이드레이트 부존이 확인된 전 세계 모든 지역이 표시된 지도를 제시하였다. 지도 내에는 가스하이드레이트 시추가 진행되어 실물 가스하이드레이트가

Fig. 1. The map of global occurrences of gas hydrates (Waite *et al.*, 2020).

확인된 지역(빨간색 점, Known hydrate)과 탄성과 단면상의 BSR과 같은 간접적 가스하이드레이트 증거가 나타나는 지역(노란색 점, Inferred hydrate)을 구분하여 표시하였다(Waite *et al.*, 2020). 2016년과 2018년 가스하이드레이트를 대상으로 지구물리탐사 및 정점조사가 수행된 지역은 Fig. 1 내 검은 사각형으로 표시하였다.

Fig. 2에는 2016년 그리고 2018년에 걸쳐 획득한 다중빔 해저지형 탐사자료를 바탕으로 작성한 척치해저고원 남서부 해저 대륙사면 지역에 대한 3차원 정밀 해저지형도를 제시하였다. 해저지형도 가운데 검은색 박스로 표시된 지역

에 총 8개의 해저산 구조가 발달 되어 있음을 확인할 수 있다. Kim *et al.*(2020)은 다중빔 해저지형 탐사를 통해 발견한 총 8개의 해저산 구조를 아라온 마운드(Araon Mounds, AM01~08)로 명명하였다. Fig. 3에서는 해저산 구조(AM01~08)를 모두 지나는 천부 해저지층 단면과 함께 2018년 탐사에서 중력코어링을 통해 확보한 실물 가스하이드레이트 시료의 사진을 제시하였다. 천부 해저지층 단면 내 붉은색으로 표시된 ‘AM03’ 그리고 ‘AM06’ 해저산 구조는 사진으로 제시된 실물 가스하이드레이트 시료가 채취되었던 해저산 구조를 나타낸다.

Fig. 2. Three-dimensional bathymetry map of eight sea-mound structures found on the western slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean (modified from Jin *et al.*, 2019).

Fig. 3. Sub-bottom profiling (SBP) image for the Araon mounds structures, and the pictures for the gas hydrate samples acquired by gravity coring for the sea-mound structures (modified from Jin *et al.*, 2019).

가스하이드레이트 분포규명을 위한 단일채널 스파커(고주파수)탄성파 탐사

2018년 탐사에서는 실물 가스하이드레이트 시료가 채취된 척치해저고원 남서부 대륙사면 해저산 구조들과 그 주변 지역에 대한 지하 지질구조 및 가스하이드레이트 분포 확인을 위해 탄성파 탐사를 수행하였다. 탐사는 고압의 전기에너지를 음파로 전환시킴으로서 수층에서 고주파수 영역대의 탄성파 음원을 발생시키는 스파커 음원(seismic sparker source)과 단일채널 수신기(single-channel receiver)로 구성된 탐사 시스템을 활용하였다. Fig. 4(a)에는 2018년 스파커 탄성파 탐사에서 활용한 탐사 시스템을 구성하는 각각의 구성 장비와 이들 간의 연결정보를 상세히 제공하는 탐사 시스템 모식도를 제시하였다. 탐사를 위한 탄성

파 음원은 5,000J의 전기에너지 용량을 가지는 스파커 음원 발생기(SIG Plus L5)로부터 생성된 고압의 전기에너지가 선미 갑판 끝단에서 50 m 떨어진 위치의 해수면 아래 설치된 전극(ELP100)을 통해 순간적으로 방출되어 생성된다. 탄성파 음원은 3초의 간격으로 발생되도록 설정하였다. 음원으로부터 발생된 탄성파는 수층을 거쳐 해저 지층을 맞고 반사되어 48개 하이드로폰이 1 m 간격으로 배열되어 신호를 기록하도록 설계된 스트리머에 기록된다. 스트리머 내 각각의 하이드로폰에 기록된 탄성파 신호는 신호대 잡음비(signal-noise ratio, S/N ratio)의 향상을 위해 다시 하나의 신호로 중합되어 운용 컴퓨터에 전송, SEG-Y 포맷으로 저장된다. 탄성파 신호를 기록하는 수신부에는 하이드로폰 총 48개로 구성된 스트리머 48 m, 선 내 탄성파 기록 장치 및 선미 갑판과 신호 수신부를 연결하는 lead-in 케이블

Fig. 4. Schematic diagram of the seismic sparker survey: (a) diagram for the seismic system with connecting information including the seismic sparker source, single channel receiver, recording and control parts, and (b) geometry information of the seismic survey for the source and receiver parts.

블 71 m, 스트리머 앞 그리고 뒷부분에서 작용하는 인장력의 흡수를 위해 배치된 스트레칭 튜브 18 m, 그리고 맨 끝에 배치된 tail buoy 등으로 구성된다(Fig. 4(b)). 탐사 중 신호는 2.5초 동안 0.25 ms 간격으로 기록하도록 설정하여 탐사를 진행했다. 자료획득 시 항속 4.5에서 5노트를 유지하며 계획된 측선을 따라 탐사를 진행하였고, 돌발적인 해빙의 출현에는 해빙을 피해가면서 탐사를 진행했다(Jin *et al.*, 2019). 따라서 이로 인한 잡음이 탄성과 자료 내 포함되어 나타나는 경우가 있다.

Fig. 5. Pictures of the fieldwork for the single-channel sparker seismic survey in the southwestern slope of Chukchi Plateau, Arctic Ocean (modified from Jin *et al.*, 2019).

Fig. 5에는 단일채널 스파크 탐성과 탐사 기간 중 아라온 호 후갑판에서 수신부인 스트리머를 바다로 내리는 작업 중 촬영한 사진과 탐사 진행 중 측선과 측선 사이 이동 구간에서 전극을 정비하는 사진 그리고 탐사 진행 중 바닷물 속 전극에서 스파크가 생기며 음원을 생성시키는 장면이 담긴 현장사진을 각각 제시하였다. Fig. 6에는 모든 탄성과 측선을 해저지형도를 배경으로 도시하였다. 해당 측선도에는 지열탐침을 통한 지열류량 관측 정점과 발견된 총 8개의 해저산 구조의 위치, 그리고 가스하이드레이트 실물이 채취된 위치도 함께 표시하였다. 탄성과 탐사에 대한 세부적인 정보(각 측선의 시작과 끝점 위치 및 자료획득 시간, 측선 길이, 측선 별 평의 갯수 등)는 현장에서 기록한 야장을 바탕으로 정리하여 Table 1에 제시하였다(Jin *et al.*, 2019).

단일채널 탄성과 자료는 다중채널 탄성과 자료와 달리 그 특성상 탄성과 속도분석 과정을 활용하여 탐사지역 지하 속도구조를 추정해 낼 수 없다. 또한 자료의 중합 혹은 구조보정과 같은 탄성과 단면 작성을 위한 별도의 자료처리 과정이 필요 없다. 이번 탐사자료는 단일채널 자료로 정보정(Static correction), 탐사 지오메트리(geometry) 입력과 같이 탐사 위치 및 배열, 지형정보 등의 입력 과정과 대역통과 주파수 필터링, 디콘볼루션 과정과 같은 자료 내 포함된 잡음을 제거하는 최소한의 과정만을 활용하여 해석을 위한 최종 탄성과 단면을 작성하였다.

Fig. 7에는 해저산 구조를 모두 지나는 북-남 방향의 탄성과 측선 ‘ES_SP004’, 그리고 실물 가스하이드레이트 시료가 채취된 해저산 구조(AM06) 및 해저대륙사면을 서-동 방향으로 지나는 탄성과 측선 ‘ES_SP007’에 대한 최종 탄성과 단면을 제시하였다. Fig. 7(a)에 제시된 측선 ‘ES_SP004’

Fig. 6. Track-chart of the single-channel sparker seismic survey on the southwestern slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean.

Table 1. Detailed information based on the field-log for each line of the single-channel sparker seismic survey in 2018 including date, time, location of start and endpoint of the survey lines, the number of the total shot, and length of the seismic survey lines (Jin *et al.*, 2019)

Line Name	Start of Line			End of Line			No. of Shots	Length (km)
	Date/Time (UTC)	Latitude	Longitude	Date/Time (UTC)	Latitude	Longitude		
ES_SP001	2018.09.03. 00:37:28	75°37.2213'N	170°04.3958'W	2018.09.03. 02:25:35	75°41.5006'N	169°30.6148'W	1923	17.50
ES_SP002	2018.09.04. 00:33:05	75°43.7019'N	170°20.4213'W	2018.09.04. 03:30:17	75°52.1469'N	169°36.1645'W	3039	24.85
ES_SP003	2018.09.04. 03:30:25	75°52.1405'N	169°36.1948'W	2018.09.04. 06:08:26	75°45.0061'N	170°18.0729'W	2710	22.12
ES_SP004	2018.09.04. 15:56:08	75°43.2909'N	169°49.1720'W	2018.09.04. 17:59:20	75°34.0290'N	169°45.3396'W	2113	18.12
ES_SP005-1	2018.09.04. 18:04:00	75°33.8511'N	169°46.3236'W	2018.09.04. 18:50:15	75°35.9702'N	169°58.8419'W	794	7.02
ES_SP005-2	2018.09.04. 18:50:54	75°36.0008'N	169°59.0038'W	2018.09.04. 19:03:02	75°36.5393'N	170°02.1602'W	209	1.78
ES_SP006	2018.09.04. 19:03:12	75°36.5507'N	170°02.1833'W	2018.09.04. 19:26:39	75°38.2179'N	170°04.7751'W	403	3.39
ES_SP007	2018.09.04. 19:26:50	75°38.2226'N	170°04.7484'W	2018.09.04. 21:56:34	75°43.4757'N	169°22.3147'W	2568	21.85
ES_SP008	2018.09.04. 22:11:06	75°44.3855'N	169°23.8198'W	2018.09.05. 00:33:54	75°39.4305'N	170°03.7949'W	2449	20.57
ES_SP009	2018.09.06. 02:32:06	75°47.6650'N	169°47.0390'W	2018.09.06. 04:17:44	75°43.6501'N	170°14.6720'W	1814	14.72
ES_SP010	2018.09.07. 02:15:44	75°39.3552'N	170°09.0379'W	2018.09.07. 06:13:04	75°47.6861'N	169°01.6219'W	4068	34.79
ES_SP010T	2018.09.07. 06:16:27	75°47.9340'N	169°01.0611'W	2018.09.07. 06:43:42	75°50.1377'N	169°00.0503'W	469	4.13
ES_SP011	2018.09.07. 06:48:48	75°50.3288'N	169°00.6917'W	2018.09.07. 09:46:16	75°44.3641'N	169°51.4692'W	3043	25.81
ES_SP012-1	2018.09.07. 16:35:40	75°35.5221'N	169°31.5694'W	2018.09.07. 18:08:36	75°42.8493'N	169°32.4383'W	1859	13.70
ES_SP012-2	2018.09.07. 18:55:10	75°45.1615'N	169°32.9479'W	2018.09.07. 19:25:57	75°47.2750'N	169°36.8911'W	627	4.33
ES_SP013	2018.09.07. 19:31:21	75°47.4123'N	169°38.0193'W	2018.09.07. 22:03:27	75°37.2048'N	169°49.9111'W	3043	22.49
ES_SP014	2018.09.07. 22:05:42	75°37.0887'N	169°49.4684'W	2018.09.07. 22:27:45	75°36.9908'N	169°42.4873'W	441	3.24
ES_SP015	2018.09.07. 22:31:41	75°37.1690'N	169°41.5459'W	2018.09.08. 01:33:50	75°50.8190'N	169°57.9046'W	3644	27.01

에 대한 탄성과 단면에서는 총 8개의 해저산 구조들, 그리고 이들과 함께 동반되어 나타나는 음향공백대가 관측된다. 또한 해저산 구조 및 그 주변지역의 해저면 아래 1.0초부터 1.2초(two-way travel time, TWTT)사이 구간에서 불연속적으로 나타나는 역전된 위상의 강한 반사 신호를 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7(a) 우측에 제시된 확대된 그림을 통해 상세한 확인(해저면 신호와 비교하여 역전된 반사면

의 위상 등)이 가능하다. ‘ES_SP004’ 측선은 가스하이드레이트 시료가 해저면에서 직접 채취되었던 해저산 2개를 포함하고 있기에 단면상에 관측되는 음향공백대와 해저산 주변 지역의 해저면 아래에 불연속적으로 나타나는 역전된 위상의 강한 반사 신호의 경우 가스하이드레이트와 연관이 있을 가능성이 있다고 볼 수 있다.

Fig. 7(b)에서는 실물 가스하이드레이트 시료가 해저면에

Fig. 7. Seismic images including the strong reflections with reversed polarity and acoustic blanking under the sea-mound structures: (a) seismic image for the survey line “ES_SP004”, which includes the total 8 sea-mound structures, and (b) seismic image for the survey line “ES_SP007” which contains ‘AM6’ sea-mound structure with the seismic traces for showing the polarity reversed reflection under the seafloor.

서 직접 채취된 해저산 구조 ‘AM06’을 서-동 방향으로 지나 는 탄성파 측선 ‘ES_SP007’에 대한 최종 탄성파 단면과 해 저면 아래 역전된 위상의 강한 반사면의 존재를 확인할 수 있는 탄성파 트레이스가 포함된 일부 구간에 대한 확대 단면 을 제시하였다. 단면 가운데에 해저산 구조 ‘AM06’가 위치 하며 이를 기준으로 좌-우측에서는 해저면 아래에 잘 발달

된 퇴적층과 함께 불연속적으로 나타나는 위상이 반전된 강 한 반사 신호가 관측된다. 해저산 구조 ‘AM06’ 아래에는 Fig. 7(a)에 제시된 해저산 구조에서 보였었던 경우와 같이 주변 해저지층구조를 지워내는 음향공백대가 관측된다. ‘ES_SP007’ 측선 역시 가스하이드레이트 시료가 해저면에 서 직접 채취되었던 해저산 ‘AM06’을 포함하고 있기에 관

측되는 음향공백대 그리고 해저산 주변 지역 해저면 아래에 불연속적으로 나타나는 역전된 위상의 강한 반사 신호의 경우 또한 가스하이드레이트와 연관이 있을 수 있다고 볼 수 있다. 하지만, 자료 내 포함된 다량의 잡음으로 인해 해저면 아래 반사구조에 대한 분명한 해석이 육안상으로 힘든 경우 혹은 역전된 위상의 강한 반사 신호들이 출현하는 깊이가 근거리 내에서 유의미한 차이를 보이는 경우 이에 대해 객관적인 과학적 자료에 근거한 명확한 구분이 요구된다.

가스하이드레이트 안정영역(GHSZ)과의 비교분석

저온 고압의 가스하이드레이트 부존 조건을 만족시키는 구간 내에서 탄성과 단면에 위상이 역전된 강한 반사면이 해저 퇴적층에서 해저면과 평행하게 나타난 경우, 탄성과 구간속도를 확인하거나 혹은 GHSZ의 하부경계 깊이와의 직접적인 비교를 통한 추가적인 검증은 바탕으로 해당 반사 신호가 가스하이드레이트와 관련된 BSR임을 확인하는 절차가 요구된다. BSR은 가스하이드레이트로 채워진 해저 퇴적층과 그 아래 가스로 채워진 퇴적층 사이 각 매질의 밀도 그리고 탄성과 속도 값의 차이에 기인하여 탄성과 단면상에 나타나는 강한 진폭을 동반한 위상이 역전된 반사면이다. 따라서 BSR로 의심되는 탄성과 반사 신호가 나타나는 구간에 대해 정밀 속도분석을 통해 해당 구간 내 지하 속도 값이 일반 퇴적지층보다 상대적으로 높은 가스하이드레이트가 포함된 해저 퇴적지층과 그 아래 상대적으로 낮은 속도 값을 가지는 가스가 포함된 퇴적지층이 차례로 함께 존재하고 있는지를 확인하고, 이를 탄성과 속도값을 통해 구분해냄으로써 단면상의 역전된 위상의 강한 반사 신호가 가스하이드레이트와 관련된 것임을 확인할 수 있다(Yoo *et al.*, 2013). 또는, 해당 지역에 대한 지열구배도, 가스하이드레이트의 평형조건, 그리고 수온구배도 등을 이용하여 하이드레이트가 해리되지 않고 고체상으로 안정하게 부존될 수 있는 구간인 GHSZ를 계산하고, 이에 대한 하부 경계면의 깊이를 탄성과 단면상에 나타나는 해저면과 평행하며 역전된 위상을 가지는 강한 반사 신호가 나타나는 깊이와 직접 비교하여 해당 신호가 가스하이드레이트와 관련된 BSR임을 증명하는 방법이 있다.

2018년 척치해저고원 남서부 대륙사면 지역에서 획득한 탄성과 자료는 단일채널 자료로 탄성과 속도분석을 이용한 가스하이드레이트 및 가스층에 대한 탄성과 속도의 확인이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 탐사지역에 대한 GHSZ를 계산하고, 이에 대한 하부 경계면의 깊이를 단일채널 탄성과 단면상에 나타나는 역전된 위상을 가지는 강한 반사 신호가 나타나는 깊이와 직접 비교하여 가스하이드레이트와 관련된 BSR임을 확인하고자 한다. 이를 위해 2018년 탐

Fig. 8. Bathymetric map for the southwestern part of the Chukchi Plateau with the marked locations for five heat-flow measurement stations during the 2018 Arctic expedition.

Table 2. The geothermal gradient based on the values for the heat-flow measurement (mK/m) and water depth (m) on the southwestern slope of the Chukchi Plateau

	St.01	St.03	St.08
Water Depth (m)	2,283	820	814
Geothermal Gradient (mK/m)	56.5	36.2	42.5

사에서 관측했던 해저 지열류량(Heat flow) 관측값을 기반으로 연구지역 지열구배도(Geothermal gradient, mK/m)를 계산했다(Table 2). 총 5개의 지열 정점 중 이번 연구에서는 서로 겹쳐지는 수심 영역을 제외한 3개 정점(St.01, St.03, St.08)에 대한 지열구배 값을 사용하였다. 이와 함께 CTD를 통해 각 정점에서 측정된 해저면 수온 값을 활용하여 Miles(1995)가 제안한 GHSZ 계산 방법에 적용, 탐사지역에 대한 GHSZ의 두께를 계산하였다. Fig. 8에는 2018년 북극 척치해저고원 탐사 기간 중 관측했던 해저 지열류량 및 해저면 수온 측정 정점이 표시된 해저지형도를 제시하였으며, Table 2에는 Fig. 8에 표시된 관측 정점 중 본 연구에서 활용한 3개의 정점에 대한 수심과 지열탐침을 통해 관측한 지열류량을 바탕으로 계산한 각 정점별 지열구배도를 표로 제시하였다.

Fig. 9에는 정점별 지열구배 값, 해저면 수온 측정 값 그리고 이들을 활용하여 계산한 연구지역 GHSZ의 두께를 각각 Fig. 8에 제시된 해저지형도에 외삽(extrapolation)하여 작성한 분포 지도를 제시하였다. Fig. 9(a)에는 연구지역에 대한 지열구배 분포를 제시하였고, Fig. 9(b)에서는 연구지역 해저면 수온 분포도를 제시하였다. Fig. 9(c)에는 연구지역

에 대한 GHSZ의 두께(하부경계 깊이)에 대한 분포를 제시하였다.

연구지역에 대한 GHSZ의 두께, 즉 하부경계의 깊이는 각 탄성과 단면상에 나타나는 역전된 위상의 강한 반사면의 출현 깊이와 비교하여 해당 반사면이 가스하이드레이트와 연관된 BSR 인지를 검토하였다. Fig. 10에는 본 연구지역에 대해 계산한 GHSZ 두께가 반영된 탄성과 단면들을 제시하였다. 이를 통해 해저면 아래 역전된 위상을 가지는 강한 반사구조가 나타나는 깊이와 GHSZ의 하부경계를 단면상에서 직접적으로 비교할 수 있다. Fig. 10(a)는 GHSZ 하부경계가 표시된 탄성과 측선 'ES_SP004'에 대한 탄성과 단면으로, 단면상 회색 실선으로 표시된 GHSZ 하부경계는 1.3초에서 0.9초 사이에 나타나고 있다. 해저산 구조들 사이 지역에서 불연속적으로 관찰되는 위상이 반전된 강한 반사 신호의 경우 회색 실선으로 표시된 GHSZ 하부경계 깊이와 비슷한 깊이를 가지는 것으로 보인다. Fig. 10(b)에서는 GHSZ 하부경계가 표시된 측선 'ES_SP007'에 대한 탄성과 단면을 제시하였다. 해당 탄성과 단면 중앙에는 해저산 구조 'AM06'가 보이며, 이를 기준으로 좌 우측에는 해저면 아래 위상이 반전된 강한 반사 신호가 관측되었다. 이는 회색 실선으로 표시한 GHSZ의 하부경계의 깊이와 비교하였고 그 깊이가 서로 일치하게 나타나 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 10(c)에는 가스하이드레이트 실물이 채취한 해저산 구조 'AM03'을 지나는 탄성과 측선 'ES_SP010'에 대한 탄성과 단면에 GHSZ 하부경계를 함께 표시하여 제시하였다. 단면 내 좌측에서 약 1/3지점(핑번호 1,400지점)에는 해저산 구조 'AM03'이 보이며, 이를 기준으로 좌 우측에는 해저면 아래 위상이 반전된 강한 반사 신호가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대부분 회색 실선으로 표시한 GHSZ 하부경계 깊이와 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 마지막 Fig. 10d에는 탐사지역 중앙부에 위치하며 남서부 대륙사면의 중간부를 가로지르는 측선 'ES_SP015'의 탄성과 단면에 GHSZ의 하부경계 깊이를 도시하여 제시했다. 해당 탄성과 단면에서도 역시 해저면 아래 나타나는 위상이 반전된 강한 반사 신호가 불연속적으로 다량 분포되어있음을 확인할 수 있었고, 그 깊이가 회색 실선으로 표시된 GHSZ의 하부경계와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

이번 연구에서 다뤄진 북극 척치해저고원 남서부 대륙사면 지역에서 획득한 탄성과 자료의 경우 이미 탐사지역 내에서 중력 코어링을 통해 해저산 구조 표면에서 가스하이드레이트 실물이 채취되었기 때문에 탄성과 단면 내 널리 분포되어 나타나는 위상이 반전된 강한 반사 신호는 기본적으로 가스하이드레이트와 연관성 높다고 볼 수 있다. 하지만 해당 반사 신호의 출현 깊이가 동일 측선 내 근거리에서

Fig. 9. Maps of the (a) geothermal gradient, (b) bottom water temperature, and (c) estimated thickness of the gas hydrate stability zone for the Chukchi Plateau, Arctic Ocean.

Fig. 10. Single-channel seismic images, including confirmed gas hydrate related BSRs: (a) seismic image for the survey line “ES_SP004”, (b) seismic image for the survey line “ES_SP007”, (c) seismic image for the survey line “ES_SP010”, and (d) seismic image for the survey line “ES_SP015”.

Fig. 11. The distribution map of the BSR for the southwestern slope of the Chukchi- Plateau.

서 일정하지 않게 불규칙적으로 나타나는 구간이 있었고, 자료 내 포함된 강한 잡음으로 단면상에서 육안상으로 신호의 식별이 힘든 구간이 존재했다. 이에 대해 추가적인 확인이 필요했고, 모든 탄성과 측선에 대해 단면상의 해저면 아래 나타나는 역전된 위상의 반사 신호 중 계산된 해당 연구지역 GHSZ의 하부경계와 그 깊이가 일치하는 부분만을 확인하여 이를 가스하이드레이트 부존과 관련된 BSR로 해석하였다. 이로써 연구지역에서의 가스하이드레이트 관련 BSR을 재차 확인할 수 있었고, 이를 바탕으로 연구지역 내 가스하이드레이트의 분포를 간접적으로 제시할 수 있는 지구물리학적 기초 근거를 마련할 수 있었다.

북극해 척치해저고원 남서부 대륙사면 지역 BSR 분포

탄성과 단면에서 해저면 아래 나타나는 역전된 위상을 가진 강한 반사 신호는 GHSZ의 하부경계와의 비교를 통해 가스하이드레이트의 부존과 관련된 BSR인지를 확인하는 과정을 거쳤다. 그 결과 탐사지역 내 대륙사면 구간에 분포되어 나타나는 대부분의 역전된 위상의 강한 반사 신호가 가스하이드레이트와 관련된 BSR임이 확인되었다. 반면 수심이 낮은 대륙붕 구간에서는 위상이 반전된 강한 반사

신호가 없거나, 간혹 관찰되는 반사면의 경우에는 GHSZ의 하부경계와 큰 오차가 있는 것이 확인되어 가스하이드레이트와 관련된 탄성과 신호가 아님을 확인했다. Fig. 11에는 GHSZ 하부경계와의 비교를 통해 확인된 가스하이드레이트와 관련된 BSR의 분포를 탄성과 측선도에 주황색으로 표시하였다. 이는 북극 척치고원 남서부 해저대륙사면에서의 가스하이드레이트 분포를 탄성과 자료, 지열구배 및 수온 분포에 따른 종합적 분석을 통해 제시하는 최초의 척치고원 지역 가스하이드레이트 부존에 대한 연구결과로 향후 해당 지역에 대한 추가적인 가스하이드레이트 탐사 및 관련 연구에서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

결론

북극 척치해를 대상으로 기후변화에 따른 해저환경변화와 공해상 해저자원에 대한 기초자료 수집을 위해 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 해저지질/지구물리 탐사가 수행되었다. 2016년에는 척치해저고원 대륙사면 지역을 대상으로 해저지형탐사를 수행하였다. 그 결과 척치해저고원 남서부 대륙사면 중앙부에서 최초로 해저산구조를 발견하였으며, 이로부터 중력 코어링을 통해 실물 가스하이드레

이트 시료의 획득에 성공하였다. 이어진 2018년 2차 척지 해저고원 지질 및 지구물리 탐사에서는 발견된 해저산 구조를 중심으로 정밀 다중빔 해저지형 및 천부지층 탐사와 함께 주변 지역에 대한 가스하이드레이트의 분포와 그 특성을 확인하기 위한 단일채널 스파커 탄성과 탐사가 수행되었다. 이로써 총 8개의 해저산 구조를 발견하였고 탄성과 자료에 대한 분석을 통해 단면상의 해저면 아래 역전된 위상을 가지는 강한 반사구조가 해저대륙사면 구간 내 해저산 구조를 중심으로 널리 분포하고 있음을 확인했다. 해당 반사구조가 연구지역 내 가스하이드레이트 부존과 관련된 것으로 해석될 수 있는지를 확인하기 위해 지열 및 해저면 수온 값을 이용하여 계산한 연구지역에 대한 GHSZ 하부경계 깊이와 비교하였다. 탄성과 단면 내 해저면 아래 나타나는 역전된 위상의 반사 신호 중 GHSZ의 하부경계와 그 깊이가 일치하는 것만을 선정하여 이를 가스하이드레이트 부존과 관련된 BSR로 해석하였다. 이에 모든 탄성과 측선에 대해 가스하이드레이트와 관련된 BSR의 위치를 확인하고 이를 탄성과 측선에 표시함으로써 북극 척지해저고원 남서부 해저사면에 부존하는 가스하이드레이트의 분포를 제시할 수 있었다. 이는 기존에 보고된 적 없었던 북극 척지해저고원 해저대륙사면 지역에 부존하는 가스하이드레이트에 대한 최초의 지구물리자료 기반 연구 결과로, 향후 해당 연구지역에서의 심층적인 가스하이드레이트 연구 및 탐사 활동에 기초적인 지구물리학적 근거자료로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

이 논문은 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 해양수산부의 재원으로 수행하는 극지 해양환경 및 해저조사 연구사업(R&D) ‘북극해 해저지질조사 및 해양환경변화 연구(과제번호: 1525011795)’의 지원을 받아 연구한 결과를 바탕으로 작성되었습니다. 저자 중 김영균은 한국연구재단의 연구비(2019R1A6A1A03033167, 2020R1C1C1007495)지원도 받았습니다.

References

- Carcione, J.M. and Gei, D., 2004. Gas-hydrate concentration estimated from P- and S-wave velocities at the Mallik 2L-38 research well, Mackenzie Delta, Canada, *Journal of Applied Geophysics*, 56(1), p.73-78.
- Chuvilin, E., Ekimova, V., Davletshina, D., Sokolova, N., and Bukhanov, B., 2020. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic, *Geosciences*, 10(10), 383p.
- Collett, T.S., Lee, M.W., Agena, W.F., Miller, J.J., Lewis, K.A., Zyrianova, M.V., Boswell, R., and Inks, T.L., 2011. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope, *Marine and Petroleum Geology*, 28(2), p.279-294.
- Hustoft, S., Bünz, S., Mienert, J., and Chand, S., 2009. Gas hydrate reservoir and active methane-venting province in sediments on <20 Ma young oceanic crust in the Fram Strait, offshore NW-Svalbard, *Earth and Planetary Science Letters*, 284, p.12-24.
- Jin, Y.K. and Onboard ship scientific party, 2017. *ARA07C Cruise Report: 2016 Korea-Russia-Germany East Siberian Sea Research Program*, Korea Polar Research Institute, KIOST, BSPM16050-080-3.
- Jin, Y.K. and Shipboard scientific party, 2019. *ARA09C Cruise Report: 2018 Korea-Russia-Japan East Siberian/Chukchi Sea Research Program*, Korea Polar Research Institute, BSPM18050-019-3.
- Kang, D.H., Yoo, D.G. Park, K.P., Koo, N.H., Kim, W.S., Park, K.S., and Lee, H.Y., 2008. *The seismic indicators of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea off KOREA*, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia, CANADA, July 6-10, 62p.
- Kennett, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L., and Behl, R.J., 2003. *Methane hydrates in Quaternary climate change: The clathrate gun hypothesis*. American Geophysical Union, Washington, DC, p.273-296.
- Kim, Y.-G., Kim, S., Lee, D.-H., Lee, Y. M., Kim, H. J., Kang, S.-G., and Jin, Y.K., 2020. Occurrence of active gas hydrate mounds in the southwestern slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean, *Episodes*, 43(2), p.811-823.
- Kvenvolden, K.A. and Barnard, L.A., 1983. Gas hydrates of the Blake Outer Ridge Site 533, Deep Sea Drilling Project Leg 76, In: Initial Reports, *Deep Sea Drilling Project*, 76, p.353-365.
- Kvenvolden, K.A., Ginsburg, G.D., and Soloviev, V.A., 1993. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates. *Geo-Marine Letters*, 13, p.32-40.
- Lee, J.H., Baek, Y.S., Ryu, B.J., Riedel, M., and Hyndman, R.D., 2005. A seismic survey to detect natural gas hydrate in the East Sea of Korea, *Marine Geophysical Researches*, 26, p.51-59.
- Miles, P. R., 1995. Potential Distribution of Methane Hydrate beneath the European Continental Margins, *Geophysical Research Letters*, 22(23), p.3179-3182.
- Milkov, A.V., 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?, *Earth-Science Reviews*, 66(3-4), p.183-197.

- Osadetz, K.G., and Chen, Z., 2010. A re-evaluation of Beaufort Sea-Mackenzie Delta basin gas hydrate resource potential: petroleum system approaches to non-conventional gas resource appraisal and geologically-sourced methane flux, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58(1), p.56-71.
- Riedel, M., Brent, T.A., Taylor, G., Taylor, A.E., Hong, J.K., Jin, Y.K., and Dallimore, S.R., 2017. Evidence for gas hydrate occurrences in the Canadian Arctic Beaufort Sea within permafrost-associated shelf and deep-water marine environments, *Marine and Petroleum Geology*, 81, p.66-78.
- Riedel, M., Willoughby, E.C., and Chopra, S., 2010. *Geophysical Characterization of Gas Hydrates*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA, p.1-36.
- Ryu, B.J., Riedel, M., Kim, J.H., Hyndman, R.D., Lee, Y.J., and Chung, B.H., 2009. Gas hydrates in the western deep-water Ulleung Basin, East Sea of Korea, *Marine and Petroleum Geology*, 26(8), p.1483-1498.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., and Buffler, R.T., 1979. Seismic reflection evidence for widespread occurrence of possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises, *AAPG Bulletin*, 63(12), p.2204-2213.
- Singhroha, S., Chand, S., and Bünz, S., 2019. Constraints on gas hydrate distribution and morphology in vestnesa ridge, western svalbard margin, using multicomponent ocean-bottom seismic data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), p.4343-4364.
- Sloan, E.D. and Koh, C.A., 2008. *Chathrate hydrate of natural gases (Third edition)*, CRC Press, New York, USA, 721p.
- Waite, W.F., Ruppel, C.D., Boze, L.-G., Lorenson, T.D., Buczkowski, B., McMullen, K., and Kvenvolden, K.A., 2020. *Preliminary global database of known and inferred gas hydrate locations*, U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P911FVJM>.
- Yoo, D. G., Kang, N. K., Yi, B. Y., Kim, G. Y., Ryu, B. J., Lee, K., Lee, G. H., and Riedel, M., 2013. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 47, p.236-247.

강 승 구

2008년 강원대학교 공과대학 지구환경공학부 공학사
 2010년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학석사
 2013년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학박사

현재 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 선임연구원
 (E-mail; ksg9322@kopri.re.kr)

장 우 근

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사
 2013년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학과 공학박사

현재 충남대학교 지질환경과학과 박사후연구원
 (E-mail; ugeun.jang@cnu.ac.kr)

김 수 관

2010년 부산대학교 자연과학대학 지질학과 이학사
 2018년 과학기술연합대학원대학교 극지과학전공 이학박사

현재 극지연구소 지권연구본부 기술원
 (E-mail; skwan@kopri.re.kr)

최 연 진

2013년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사
 2015년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학석사

현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 박사과정
 극지연구소 지권연구본부 연수생
 (E-mail; yjchoi@kopri.re.kr)

김 영 균

2000년 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 이학사
 2003년 서울대학교 자연과학대학원 지구환경과학부 이학석사
 2013년 서울대학교 자연과학대학원 지구환경과학부 이학박사

현재 강원대학교 지구자원연구소 연구교수
 (E-mail; younggyun.kim@gmail.com)

홍 종 국

1986년 서울대학교 자연과학대학 지질학과 이학사
 1988년 서울대학교 대학원 지구물리전공 이학석사
 1996년 서울대학교 대학원 지구물리전공 이학박사

현재 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 책임연구원
 (E-mail; jkhong@kopri.re.kr)

진 영 근

1985년 서울대학교 자연과학대학 지질학과 이학사
 1988년 서울대학교 자연과학대학원 지질과학과 이학석사
 1995년 서울대학교 자연과학대학원 지질과학과 이학박사

현재 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부 책임연구원
 (E-mail; ykjin@kopri.re.kr)