The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 32, No. 1, March, 2022, pp. 113-126
https://doi.org/10.9720/kseg.2022.1.113

RESEARCH ARTICLE

북극 척치 해저평원의 해양지열관측 초기결과와 지각기원에 대한 의미

김영균[1] · 홍종국[2] · 진영근[2] · 장민석[3] · 소병달[4*]

[1]강원대학교 지구자원연구소 연구교수, [2]극지연구소 지권연구본부 책임연구원,
[3]강원대학교 지구물리학과 석사과정, [4]강원대학교 지구물리학과 부교수

Preliminary Results of Marine Heat Flow Measurements in the Chukchi Abyssal Plain, Arctic Ocean, and Constraints on Crustal Origin

Young-Gyun Kim[1] · Jong Kuk Hong[2] · Young Keun Jin[2] · Minseok Jang[3] · Byung Dal So[4*]

[1]Research Professor, Research Institute for Earth Resources, Kangwon National University
[2]Principal Researcher, Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute
[3]Master Student, Department of Geophysics, Kangwon National University
[4]Associate Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract

The tectonic history of the Chukchi Abyssal Plain in the Amerasia Basin, Arctic Ocean, has not been fully explored due to the harsh conditions of sea ice preventing detailed observation. Existing models of the tectonic history of the region provide contrasting interpretation of the timing of formation of the crust (Mesozoic to Cenozoic), crust type (from hyper-extended continental crust to oceanic crust), and formation process (from parallel/fan-shaped rifting to transformation faulting). To help determine the age of the oceanic crust, the geothermal gradient was measured at three stations in the south of abyssal plain at depth of 2,160-2,250 m below sea level. Heat flow measurement stations were located perpendicular to the spreading axis over a 40 km-long transect. In-situ thermal conductivity measurement, corrected by the laboratory test, gave observed marine heat flows of 55 to 61 mW/m^2. All measurements were taken during Arctic expeditions in 2018 (ARA09C expedition) and 2021 (ARA12C expedition) by the Korean ice-breaking research vessel (IBRV) *Araon*. Given the assumption of oceanic crust, the results correspond to formation in the Late Cretaceous (Mesozoic). The inferred age supports the hypothesis of formation activated by the opening of the Makarov Basin during the Late Mesozoic-Cenozoic. This would make it contemporaneous with rifting of the Chukchi Border Land immediately east of the abyssal plain. The heat flow data indicate the base of the gas hydrate stability zone is located 332-367 m below the seafloor, this will help to identify the gas hydrate-related bottom simulating reflector in the future seismic survey, as already identified on the Chukchi Plateau. Further geophysical surveys, including heat flow measurements, are required to increase our understanding of the formation process and thermal mantle structure of the abyssal plain.

Keywords: marine heat flow, origin of crust, IBRV Araon, Chukchi Abyssal Plain, Arctic Ocean

초 록

북극해 아메라시아 분지(Amerasia Basin)에 속한 척치 해저평원(Chukchi Abyssal Plain)의 지구조 역사(tectonic history)는 혹독한 해빙 조건으로 인한 관측 부족으로 인하여 아직 밝혀지지 않았다. 지구조

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Byung Dal So
E-mail: bdso@kangwon.ac.kr

Received: 10 January, 2022
Revised: 17 February, 2022
Accepted: 24 February, 2022

Ⓒ 2022 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

역사에 대한 여러 경쟁 가설들은 형성 시기로는 중생대에서 신생대까지, 지각 유형으로는 과도하게 확장된 대륙 지각에서 해양 지각까지, 형성 기작으로는 평행/부채꼴 균열에서 평행이동까지의 광범위한 범위를 갖는다. 2018년(ARA09C 항차)과 2021년(ARA12C 항차)에 쇄빙연구선 아라온을 이용해 해저평원의 수심 2,160~2,250 m 범위의 3개 정점에서 해양지각의 연령 결정에 필수적인 역할을 하는 해양지열의 관측이 이루어졌다. 해양지열 정점은 약 40 km에 걸쳐 확장축에 수직으로 위치한다. 퇴적물 코어 시료의 실험실 열전도도로부터 보정된 현장 열전도도를 사용하면, 관찰된 해양지열은 54~60 mW/m^2 범위를 보인다. 해양지각을 가정할 때, 해양지열 관측결과는 형성 시기로서 후기 백악기(중생대)에 해당한다. 추정된 연대는 후기 중생대-신생대 동안 마카로프 분지가 열리면서 척치 해저평원 형성이 활성화되었다는 가설을 뒷받침한다. 이 시기는 동쪽으로 해저평원에 인접한 척치 보더랜드(Chukchi Border Land)의 열개 현상 발생과 동시대이다. 본 연구의 해양지열 관측결과로 퇴적물 내 가스하이드레이트 안정영역 하부(the base of the gas hydrate stability zone)의 위치가 추정되었고(332~367 mbsf), 이는 척치 고원(Chukchi Plateau)에서처럼 가스하이드레이트와 연관된 해저면 모사 반사면을 식별하는 데 도움이 될 것이다. 척치 해저평원의 정확한 형성 과정과 맨틀 열구조에 대한 이해를 높이기 위해 해양지열 관측을 포함한 추가적인 지구물리 탐사가 필요하다.

주요어: 해양지열, 지각기원, 쇄빙연구선 아라온, 척치 해저평원, 북극해

서 론

북극해 해양 분지들의 형성과정은 제한적인 현장탐사 조건으로 인하여 모식적인 수준에서만 규명되고 있다(Grantz et al., 2011; Coakley et al., 2016). 게켈 해령에서 일어난 일반적인 해저면 확장(seafloor spreading)이 유라시아 분지(Eurasian Basin)의 형성기작인 것에 비하여, 아메라시아 분지(Amerasia Basin)는 분지 확장의 요인이 시공간적으로 다양하다(Nikishin et al., 2021a). 아메라시아 분지의 구성원 중 캐나다 분지(Canada Basin) 및 알파-멘델레예프 해령(Alpha-Mendeleev Ridge)의 지구조사(tectonic history) 복원 연구가 수행되었고(예, Oakey and Saltus, 2016; Zhang et al., 2019),

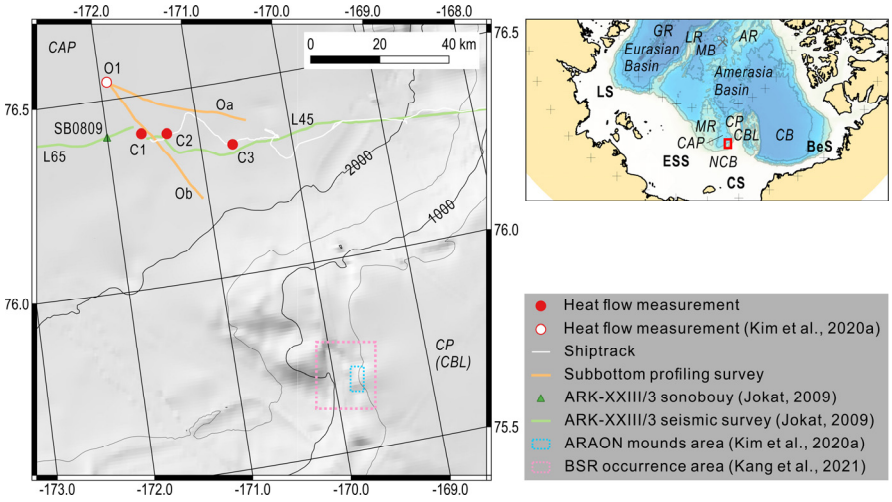

Fig. 1. Hillshade map of study area with a inset for the tectonic map showing wider Arctic Ocean (GEBCO Compilation Group, 2020). Circles represent measurement stations: the open circle (O1) indicates a station from the 2018 ARA09C expedition, and closed circles (C1~C3) indicate stations from 2021 ARA12C expedition. Orange lines (Oa and Ob) are sub-bottom profiling survey line from the 2018 expedition. The white line indicates the path of the ship during the 2021 expedition. Green lines (L45 and L65) are the ARK-XXIII/3 seismic survey lines (Jokat, 2009), and the triangle indicates the location of the sonobouy for the same expedition. The blue and purple dashed rectangles indicates the location of the Araon mound (Kim et al., 2020a) and the bottom simulating reflector (BSR) (Kang et al., 2021), respectively. CAP: Chukchi Abyssal Plain, CP: Chukchi Plateau, CBL: Chukchi Boarder Land, MR: Mendeleev Ridge, CB: Canada Basin, AR: Alpha Ridge, MB: Makarov Basin, LR: Lomonosov Ridge, GR: Gakkel Ridge. NCB : North Chukchi Basin. LS: Laptev Sea. ESS: East Siberian Sea. CS: Chukchi Sea. BeS: Beaufort Sea.

척치보더랜드(Chukchi Board Land, CBL)는 부차적인 연구대상이었다(Fig. 1).

기존 척치보더랜드의 형성가설은 척치보더랜드가 유라시아 대륙으로부터 중생대(145.5~140 Ma)에 시계방향으로 회전하며 분리되었다는 것이었으나(Grantz et al., 2011), 최근에 수행된 탐사 결과를 바탕으로 제시된 새로운 형성가설은 주로 신생대(69~57 Ma)에 수평이동을 통해 척치대지(Chukchi Plateau)가 유라시아 대륙방향으로 이동해 척치보더랜드가 만들어졌다는 것이다(Døssing et al., 2017; Chernykh et al., 2018). 척치보더랜드 서편에 인접한 척치 해저평원(Chukchi Abyssal Plain, CAP)는 그 범위(북쪽 한계)와 형성 시기 및 진화과정이 아직 규명되지 않은 곳으로서, 이 분지의 지구조사(tectonic history)는 척치보더랜드 형성과 밀접하게 연관되어 있다. 이 지역은 연구가 잘 되어있지 않아, 척치 분지(Chukchi Basin)(예, Wang et al., 2012; Butsenko et al., 2019), 톨 분지(Toll Basin)(예, Ilhan and Coakley, 2018), 찰리 분지(Charlie Basin)(예, Grantz et al., 1998) 등 여러 이름으로 불리우며, 심지어 독립된 분지가 아닌 북척치 분지(North Chukchi Basin)와 연결된 분지로 여겨지기도 한다(예, Bird and Houseknecht, 2017).

심부탄성파탐사 및 중력탐사 결과가 지시하는 척치 해저평원의 형성기작은 동-서 방향의 열개 확장(rifting)이다(Grantz et al., 1998; Ilhan and Coakley, 2018). 지각 속도구조 분석 결과와 남-북 주향의 지구대(graben)(Hegewald and Jokat, 2013)는 최소한 척치 해저평원 남쪽은 대륙지각의 열개 확장이 해저면 확장(seafloor spreading)까지 진행되었음을 지시한다. 또한, 일반적으로 대륙 분리(continental breakup)의 마지막 단계로서 화산성 수동형 대륙주변부(volcanic passive margin)의 대륙지각-해양지각 경계부분(continent-ocean crust boundary)에서 특징적으로 나타나는 바다방향 경사 반사파(seaward dipping reflector; Paton et al., 2017)가 분지 동쪽 경계에서 확인되기도 하였다(Ilhan and Coakley, 2018; Nikishin et al., 2019). 이러한 최근 연구결과는 척치 해저평원의 남쪽에서 해양지열 관측을 수행한 동기가 되었다.

해양지열(marine heat flow)은 해저면 확장 시기와 일정한 관계(즉, 시기 $\propto$ 1/해양지열)가 있음이 확인되었고(Stein and Stein, 1992; Sclater et al., 2014), 이는 판구조론을 정립하는 데에도 중요한 근거가 되었다(Wilson et al., 2019). 긴 관측 시간동안 연구선의 움직임이 제한되는 해양지열 관측의 특성상, 해빙/빙산이 떠다니는 극지역 해역은 관측자료 획득이 어렵다(Pollack et al., 1993). 척치 해저평원 역시 아주 제한적인 관측결과가 보고되었다(Kim et al., 2020a). 2021년 쇄빙연구선 아라온 탐사를 통해, 분지 남쪽에서 열개 확장 방향인 동-서 탐사측선을 따라 지열 탐사를 수행하여(Fig. 1의 흰선) 해저면 확장의 형성시기를 추정할 기초자료를 획득하였다. 경쟁가설들의 형성시기에 큰 격차가 존재하기 때문에, 이 논문에서는 척치 해저평원에서 관측한 새로운 해양지열 결과를 보고하고 이를 이용해 형성시기를 한정한다. 나아가, 동편으로 인접한 척치 대지에서만 수행된 가스하이드레이트 안정영역(gas hydrate stability zone)연구(Kang et al., 2021)를 척치 해저평원까지 확장하고자 한다.

자료 획득 방법

아라온 북극 탐사

아라온은 국내유일의 쇄빙연구선으로서 다양한 지구물리 및 해양지질 장비를 극지 해역에서 운용한다. 아라온을 이용한 종합해양탐사가 2016(ARA07C 항차), 2018(ARA09C 항차), 2019(ARA10C 항차)과 2021(ARA12C 항차)년에 서북극해에서 수행되었다(Jin and Onboard Ship Scientific Party, 2017; Jin and Shipboard Scientific Party, 2019, 2020). 척치 대지, 척치 분지, 동시베리아해 대륙붕에서 메탄 방출 현상 및 해저 환경 변화를 이해하기 위해 탄성파 탐사, 코어링, 멀티빔 탐사, 천부지층 탐사 및 해양지열 탐사를 수행해왔다.

현재까지의 연구결과로서 척치 대지 남서쪽 사면에서 코어링과 지구물리탐사를 통해 일련의 가스 하이드레이트 언덕(gas hydrate mound)(Fig. 1의 파란색 점선 영역; Kim et al., 2020a)이 확인되었고, 마운드 주변의 사면에 넓게 분포하는

해저면모사 반사파(Kang et al., 2021)가 해양지열과 지구물리탐사로 확인되었다. 또한, 가스하이드레이트 및 퇴적물 공극수의 지화학 분석을 통해 이 두 구조는 심부 기원의 메탄가스 부존과 수직적인 이동에 관련되었음이 확인되었다(Kim et al., 2020b). 가스하이드레이트 언덕들은 북척치 분지(North Chukchi Basin)의 경계를 따라 발달했을 가능성이 제시되었으며, 현재 이 언덕에서 활동적인 유체방출도 확인되었다(Kim et al., 2020a).

ARA09C, ARA10C, 그리고 ARA12C 항차들 동안 해양지열은 가스 하이드레이트 언덕의 메탄 방출량을 정량화하기 위해 척치 대지 및 척치 분지에 해당하는 척치대지 대륙사면 및 척치 해저평원에 관측되었다. 특히 ARA12C 항차에서는 척치 해저평원에서 심부퇴적층 해석이 이루어진 동-서 방향 탄성파 측선(Jokat, 2009)을 따라, 9~12 해리 간격으로 해저면 퇴적층의 교란이 발견되지 않는 3정점에서 해양지열이 관측되었다.

해양지열

해양지열은 퇴적물 열전도도(thermal conductivity)와 지온경사도(geothermal gradient)의 곱으로 얻어지는 물리량이다. 지온경사도는 중력에 수직인 방향으로 깊이별 온도차를 가리키는 물리량으로, 온도 센서를 해저면 퇴적층 내 다른 깊이에 투입하여 온도를 관측한다. 획득된 깊이별 온도 결과를 바탕으로 퇴적층내에서 열이 전도로 전달되는 경우에 깊이별 온도들로 직선 추세선을 결정해 지온경사도를 도출한다. 단위는 mK/m (°C/km)을 사용한다. 해양지각에서는 평균적으로 50 mK/m, 대륙지각에서는 30 mK/m이 관측되지만(Pollack et al., 1993), 하부 지각구조 및 퇴적층의 열교란 상황에 따라 그 값의 편차가 크다. 퇴적물 열전도도는 퇴적물 내에서 열이 얼마나 빨리 전달되는지를 나타내는 물리량으로서, 두 가지 방법으로 관측이 가능하다. in-situ 방식으로 해저면 퇴적층 내에서 관측하거나, 채취된 퇴적물 코어를 실험실에서 열전도도 관측장비 TeKa TK04를 이용하여 여러 층준에서 측정한 뒤, 조화평균을 이용해 전체 퇴적물 코어에 대한 대푯값을 계산한다(Expedition 317 Scientists, 2010). 조화평균값은 열전도도-온도-압력 간의 관계를 나타내는 경험식을 이용하여 실제 환경과 실험실 사이에 존재하는 온도와 압력 차이를 보정한다(Hyndmann et al., 1974). 단위는 W/m/K를 사용한다.

극지역의 추운 환경에서 장비의 정비 및 운용의 편의성을 극대화하기 위해, 중력코어러(gravity corer)에 온도센서를 장착하여 중력코어링을 통해 퇴적물 코어를 획득하는 동시에 해저면 이하 퇴적물 내 깊이별 온도를 관측한다(Fig. 2a). 획득된 퇴적물 코어는 일반적인 코어 분석 절차가 시작되기 전, 실험실과 열평형을 이룰 시간동안 방치한 뒤 실험실 열전도도를 측정한다(Expedition 317 Scientists, 2010). 중력코어러에 부착되는 온도센서로는 Antares의 Miniaturized Temperature Data Logger Type 1854가 이용된다(Fig. 2b). 온도분해능이 0.001°C이며, 온도관측 범위는 -5~50°C, 측정 주기는 최소 1초이다. 중력코어러가 해저퇴적면에 침투할 때의 기울기를 관측하기 위해 Star-Oddi의 DST Tilt가 이용된다(Fig. 2c). 기울기 분해능은 0.2°이며, 3축의 기울기 측정이 가능하고, 최대 관측가능수심은 3,000 m, 측정 주기는 최소 1초이다. 모든 장비는 자체 배터리와 기록장치를 내장하고 있고, 장치의 설정 및 자료의 다운로드는 무연결 방식(유선을 이용한 연결이 아닌, 표면 접촉 혹은 전자기파로 연결됨) 으로 PC와 연결 후 수행된다. 무연결 방식은 장비의 수밀 유지에 있어 커다란 장점이다.

지온경사도 관측의 경우 관측오차를 줄이기 위해 정점당 두 번의 관측 후 평균을 이용한다. 약 6 m의 길이를 갖는 중력코어러 배럴에 간격을 두고 온도 센서와 기울기 센서를 설치한 후, 저질에 따라 해저면 상부 50~100 m 위에서 잠시 대기 후 분당 30~50 m의 속도로 중력코어러를 낙하시켜 해저면에 침투시킨다. 해저면 상부에서 대기하는 것은 해수층 속에서 하강하던 코어러가 배와 수직으로 정렬할 수 있는 시간을 확보하며, 온도센서의 관측값을 상대정렬할 수 있는 기회를 만들기 위해서이다. 퇴적층 침투 시 생긴 마찰열이 사라지고 주변 퇴적층과 온도센서가 평형을 이룰 수 있는 시간(최소 20분)동안, 중력코어러를 해저면에 침투시킨 채로 기다린다(Fig. 3a~3c). 이때 탐사선과 케이블로 연결된 중력코어러가 배의 움직임에 의해 흔들리지 않도록 탐사선의 위치고정기능(dynamic positioning)과 윈치의 장력 조절이 필수적이다.

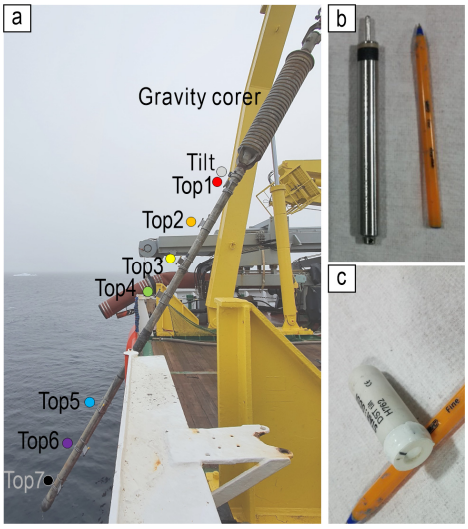

Fig. 2. Photographs of the heat probe. A. Deployment of the gravity corer with seven temperature sensors (Top1-Top7) and tilt meter (Tilt) during the 2021 ARA12C expedition. B. Miniaturized Temperature Logger (MTL: Antares). C. Tilt meter (Star-Oddi).A ball-pen is placed for scale in B and C.

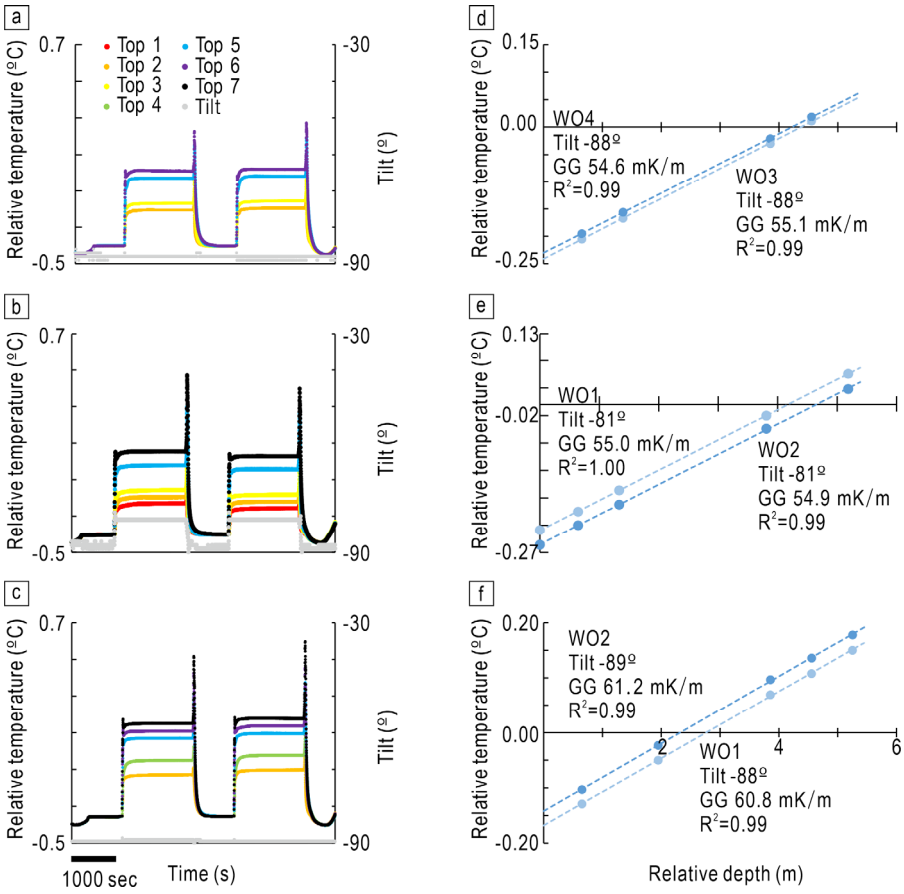

Fig. 3. Heat probe data. A~C. Temperature with respect to time at C1~C3, respectively. Top1~Top7: temperature sensors, as shown in Fig. 2. Tilt: tilt meter, as shown in Fig. 2. D~F. Calculated geothermal gradient (GG) for two measurements at each station (C1 to C3). WO: working order in Table 1. Tilt values are relative to the horizontal (-90 for a vertical downward direction).

천부지층탐사

천부지층 탐사는 탐사선이 운항중일 때 연속적으로 수행되었다. 장비는 Kongsberg의 멀티빔음향측심기(EM122)의 연장장치인 SBP27을 사용하였다. 주파수는 2.5~7 kHz를 주파수 변조(chirp) 형태로 방출하며 수직해상도는 수십 cm이고 통상, 해상도는 0.5 m보다 높다. 탐사선의 롤(roll)과 피치(pitch) 움직임을 전자적으로 보정할 수 있고, 송수신(ping) 주기는 주장비인 EM122의 설정과 동기화된다.

결 과

지온경사도

2021(ARA12C 항차)년 동안 수심 2,160~2,250 m에 해당하는 척치 해저평원에서 지온경사도가 총 3정점에서 관측되었다(Fig. 1의 정점들 C1~C3; Table 1). 2018년에 관측이 수행된 정점 O1(Kim et al., 2020a)과 2021년 정점 C1의 거리는 18 km로서, 비교적 가까이 위치하기 때문에 지온경사도 관측결과의 신뢰도를 비교하기에도 적절하다.

관측 원시자료를 분석하여 정상작동 하지 않은 온도 센서의 결과를 제외하고, 각 관측당 4~5개의 온도 센서 결과를 사용하였다(Table 1의 # of MTL). 관측결과는 퇴적층 내 깊이별 온도값은 뚜렷하게 증가하며, 깊이별 온도에 대한 직선의 추세선을 그렸을 경우 추세선의 R^2 범위가 0.99~1.00을 보인다(Fig. 3d~3f). 1에 가까운 R^2값은 퇴적층 내에서 열이 심부에서 해저면으로 전도 현상에 의해 전달되고 있음을 지시한다. 정점 O1의 경우에도 R^2값이 0.99인 것과, 정점들 C1~C3의 공간적 분포를 고려하면, 척치 해저평원에서는 퇴적층 내에서 전도 현상에 의해 열이 해저면까지 상승하고 있음을 알

Table 1. Results of heat flow measurements in the Chukchi Abyssal Plain in 2018 (O1) and 2021 (C1~C3). ST: station, WO: working order, GG: geothermal gradient, MTL: miniaturized temperature data logger, TC: thermal conductivity, HF; heat flow

ST	WO	Site full name (prefix:ARA)	Sampling site (ddd:mm.mmmm)		Water depth (m)	GG (mK/m)			In situ TC (W/m/K)	HF (mW/m^2)	Est. age (Myr)[1]	Remark
			Lon.	Lat.		Measu-rement	# of MTL	Ave-raged				
O1[2]	1	09C01CTD01	-171:55.2610	76:32.7630	2,250[3]	-		-	-	-	-	-0.3735°C[4]
	2	09C01GVC02	-171:55.3122	76:32.7798	2,283	-		-	0.998	56.4	88	4.51 m[5]
	3,5	09C01HFP03 09C01HFP05				-	6	56.5[6]	↑[7]			
C1	3	12C30HFP03	-171:37.3980	76:24.0995	2,248	55.1	4	54.9	↑	54.8	95	
	4	12C30HFP04	-171:37.3997	76:24.0997	2,245	54.6	4					
C2	1	12C31HFP01	-171:20.7440	76:23.5240	2,208	55.0	5	55.0	↑	54.9	95	
	2	12C31HFP02	-171:20.5088	76:23.5085	2,167	54.9	5					
C3	1	12C32HFP01	-170:38.9963	76:20.2984	2,164	60.8	5	61.0	↑	60.9	72	
	2	12C32HFP02	-170:38.9949	76:20.2983	2,164	61.2	5					

1) Estimated with the formation age-heat flow relationship (Stein and Stein, 1992).
2) Same location with Core 03M03 (Wang et al., 2012).
3) Maximum depth of the Conductivity-Temperature-Depth (CTD) casting.
4) Observed bottom water temperature at the maximum depth of the CTD casting.
5) Total length of the sedimentary core.
6) Data from Kim et al. (2020a).
7) The value from the cell above is used. See the text for detail.

수 있다. 열이 전도 현상으로 전달되는 경우 깊이별 온도 변화량을 지온경사도로 정의한다. 관측 정점에서 지온경사도는 54.8~60.9 mK/m의 범위를 갖는다(Table 1). 관측결과는 해양지각에서 관측되는 범위에 해당한다(Pribnow et al., 2000). 척치 해저평원에서 지온경사도와 수심 간에는 특별한 경향이 확인되지 않는다.

기존 정점 O1과 본 연구에서 획득된 C1의 지온경사도를 비교해 보면, 56.5 mK/m와 54.9 mK/m으로 <3%의 차이가 나타난다. 일반적으로 5~15%의 불확실성을 고려하는 해양지열 관측(Grevemeyer and Villinger, 2001)에서 두 정점의 지온경사도 결과는 상당히 유사하다고 판단할 수 있으며, 이 사실은 두 항차의 지온경사도 관측이 일관되게 수행되었음을 지시한다.

퇴적물 열전도도 및 천부지층탐사 프로파일

ARA09C항차 동안 척치 해저평원에서 획득된 퇴적물 코어 시료(Table 1의 ARA09C01GVC02)에 대해 상기한 열전도도 관측장치를 이용해 퇴적물 열전도도가 관측되었다(Fig. 4; Table 1). 관측된 퇴적물 코어의 열전도도는 깊이에 따른 경향성이 확인되지 않는다. 전체 범위는 일반 해양 표층퇴적물에서 관측되는 값들(0.58~1.54 W/m/K)과 비견된다(Pribnow et al., 2000). 층준별 암상 분석, 밀도, 함수율, 공극률 등은 측정이 되지 않아, 열전도도의 변화에 영향을 주는 원인을 파악하기는 어렵다. 일반적으로 해저면 표층에서 깊어질수록 함수율이 줄어들며, 열전도도가 증가하는 경향이 관측되나 이는 수십~수백 m의 깊이에서 나타나는 현상으로(예, Expedition 317 Scientists, 2010), 중력코어에서 획득된 수 m 길이의 코어에서는 확인하기 어렵다. 단, 1.3 W/m/K에 가깝게 측정된 큰 열전도도 값은 해당 층준에 모래 함량이 높을 수 있음을 지시한다(Goto and Matsubayashi, 2008).

퇴적물 코어에 대한 대푯값은 1.038 W/m/K (Fig. 4의 점선)이며, 이는 실험실에서 관측된 값이므로 현장(in situ)값으로 보정되어야 한다. 실험실에서 관측된 해양지열 값은 현장 환경의 온도-압력과는 큰 차이를 보일 수 있기 때문에, 알려진 해양지열-온도-압력 관계경험식을 이용하여 온도와 압력의 영향을 보정한다(Hyndmann et al., 1974). ARA09C01에서 CTD 운용으로 획득된 가장 깊은 수심의 온도는 -0.3735°C이며(Table 1), 실험실 온도는 20°C이었다. 퇴적물의 밀도는 로모노소프 해령의 시추공 결과(O'Regan, 2007) 중 ARA09C01GVC02의 길이에 해당하는 상부 5 m를 평균하여 사용하였다(Table 1). 현장 환경으로 보정된 퇴적물 열전도도는 실험실 열전도도에 비해 3.8%낮은 0.998 W/m/K (Fig. 4에서 실선)이다.

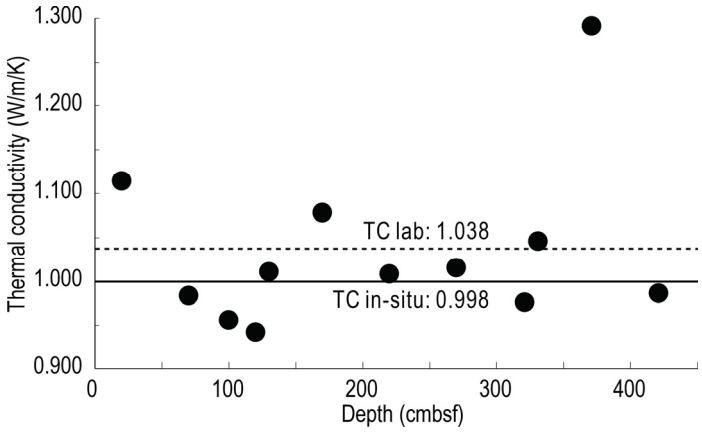

Fig. 4. Observed thermal conductivity (TC) with respect to core depth for site ARA09C01GVC2 (O1 in Table 1). TC lab: laboratory thermal conductivity, TC in-situ: In-situ thermal conductivity. Text gives the correction from the TC lab to TC in situ.

정점들 O1과 C1~C3의 주변지역에 대한 천부지층 탐사 프로파일은 원양성 퇴적물의 퇴적으로 인해 연장성이 좋은 층리들이 뚜렷하다(Fig. 5). 정점 O1의 현장 퇴적물 열전도도 관측결과를 C1~C3에 원용하여 사용할 수 있다고 판단하였는데, 이 판단의 근거로는 1) 네 정점 모두 원양성 퇴적물의 퇴적과정이 짐작되는 수심 >2,000 m의 분지 중앙부에 해당하며, 2) 이 범위에서 층리가 뚜렷하게 연장되는 것이 확인되고, 3) 정점 O1 외에 척치 해저평원에서 관측된 결과가 존재하지 않는다는 점이다(Pollack et al., 1993; Zhang et al., 2021).

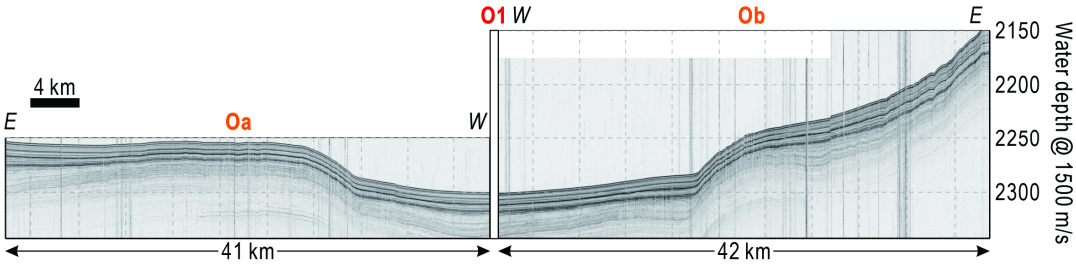

Fig. 5. Sub-bottom profiling survey (Oa and Ob shown in Fig. 1). Water depth is calculated with the sound velocity of 1,500 m/s.

해양지열 분포

관측된 지온경사도와 현장값으로 보정된 퇴적물 열전도도를 이용하여 해양지열을 계산하였다. 일반적인 해양지열 오차 범위 10~15%를 고려하면(Kim et al., 2010), 척치 분지 해저평원 내 해양지열의 분포는 54.8~60.9 mW/m^{2}으로 상당히 일정하다. 이 범위는 일반적으로 해양지각에 관측될 수 있는 범위에 포함된다(Pribnow et al., 2000).

토 의

해양지열을 이용한 척치 해저평원의 형성연대 측정

해양지각에서 형성시기와 반비례 관계를 보이는 해양지열의 분포는 맨틀 대류에 관련한 지구의 판구조론을 지지하는 강력한 증거로써 사용되었다(McKenzie et al., 1974; Wilson et al., 2019). 현재 대양의 해양지각, 그리고 주변해역(marginal sea)의 해양지각에서 모두 형성연대-해양지열의 관계식이 유지됨이 확인되었다(Stein and Stein, 1992; Stein, 2013). 해저면으로부터 수 미터 이내의 표층해저면에서 관측되는 해양지열은 퇴적층 내 해수 순환(예, Géli et al., 2001), 연간 해저면 해수 온도 변화(예, Von Herzen et al., 2001), 기반암의 굴곡(예, Fisher and Harris, 2010), 퇴적률(예, Hutnak and Fisher, 2007) 등에 의해 교란되기 쉽다. 따라서, 이러한 영향들이 고려한 후에 해양지열-형성시기의 경험식을 적용하여야 한다.

본 연구에서 해양지열 관측이 이루어진 정점들은 수심이 2,000 m가 넘으며 연안과 상당한 거리가 있는 분지 중앙부의 해저평원으로서, 일반적으로 연간 해저면 해수 온도 변화 영향이 무시할만 하여 높은 정밀도의 해양지열 관측이 가능한 곳이다(예, Davis et al., 2003). 이 분지에서 관측된 장기간 해저면 해수 온도 변화 결과는 없지만, 척치 분지와 인접한 마카로프 분지와 캐나다 분지의 장기간 해수온도 관측결과 수심 2,000~2,500 m에서 해수면 온도 변화는 0.01°C 이하로 무시할 수준이다(Timmermans and Garrett, 2006). 퇴적층의 수평 연장성이 좋고, 수직적인 단층이 발견되지 않는 퇴적체 내에서는 수직적인 유체의 흐름이 제한된다. 해양지열 관측정점 간의 천부지층탐사 결과는 두꺼운 해빙으로 인하여 획득할 수 없었으나, 2018년 척치 해저평원에서 수평 연장성이 매우 좋은 퇴적층들로 구성된 퇴적체가 천부지층탐사 결과로 확인되었다(Fig. 5). O1의 퇴적물 코어 분석 결과도 원양성/반원양성 퇴적물로 해석되고 있다(Wang et al., 2012). 심부 탄

성파 해석결과 역시 후기 백악기 이후 퇴적된, 분지 규모의 연장성을 보이며 두께 변화가 적은 퇴적층들이 해저 평원에서 확인된 한편, 연구지역에서 퇴적층 내 관입암의 부재와 평탄한 기반암 또한 확인된다(Hegewald and Jokat, 2013). 이 지역의 퇴적률은 탄성파 탐사로 밝혀진 시기를 바탕으로 수 cm/ky이며, 이 퇴적률은 일반적인 해양퇴적물에서 1~3% 작은 해양지열 감소를 일으킨다(Beardsmore and Cull, 2001).

정점 O1, C1~C3의 해양지열 관측결과는 54.8~60.9 mW/m^{2}의 범위를 갖는다(Table 1). 해양지열-형성시기 관계식을 이용하면, 형성시기가 후기 백악기에 해당하는 약 88~72 Ma로 추정된다(Fig. 6; Stein and Stein, 1992). 기존의 형성 시기로 제시되는 가설들은, 1) 전기 백악기(145 Ma) 유라시아 판으로부터 척치보더랜드가 시계방향으로 회전(Grantz et al., 2011), 2) 후기 백악기-신생대(69~57 Ma)에 수평이동을 통해 척치 대지가 유라시아 대륙으로 이동(Døssing et al., 2017; Chernykh et al., 2018), 3) 제4기 척치 대지와 멘델레예프 해령 사이의 확장(Grantz et al., 1998)이 있다. 이는 판 복원과정의 정역학으로서 제시된 가설들이다. 한편, 척치 분지의 심부 퇴적층 중 가장 오래된 시기로 전기 백악기를 추정하는 연구결과가 있다(Ilhan and Coakley, 2018; Nikishin et al., 2021b). 해양지열을 이용해 척치 보더랜드(척치 분지 동쪽의 대륙지각의 확장 부분)의 형성시기를 추정한 최근 연구 역시, 기존의 연구결과인 중기 쥬라기-초기 백악기보다 상당히 늦은 시기인 후기 백악기-전기 신생대에 대륙지각의 확장 및 주변부의 확장이 일어났음을 주장하였다(Zhang et al., 2021). 이 확장은 마카로브 분지의 확장과 유라시아 분지의 형성 시작시기와 동시대라고 여겨진다.

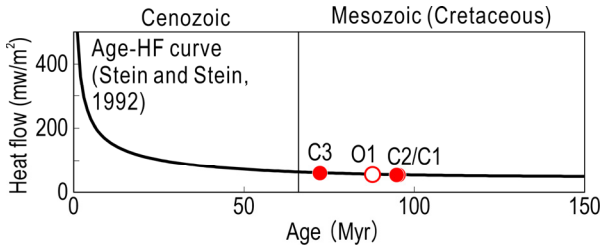

Fig. 6. Formation age estimated from measured heat flow and the relationship between age and heat flow (Stein and Stein, 1992). Circles represent measurement stations. Solid line is the relationship from the GHD1 model.

이번 연구의 해양지열 관측결과는 시기상으로 후기 백악기의 마카로브 분지 확장과 관련되어 수평이동으로 형성되는 가설(Døssing et al., 2017)과 척치 보더랜드와 동시대에 확장이 이루어졌다는 가설(Zhang et al., 2021)과 일관된다. 전기 백악기와 제4기 확장의 경우, 관입암과 단층의 부재를 고려하면 현재 관측되는 해양지열을 설명할 수 없다. 한편, 척치 보더랜드의 후기 백악기-전기 신생대 확장 가설은 척치 해저평원 하부 맨틀에서 하강된 등온선을 주장하고 있다(Zhang et al., 2021). 그러나, 이는 탄성파 속도 분석으로 확인된 척치 해저평원에서 얕아지는 모호면(즉, 열개 확장-해저면 확장동안 상승한 맨틀 등온선)과는 배치된다(Kashubin et al., 2018).

척치 해저평원 하부 맨틀의 열구조를 파악하기 위해서는 추가적인 지구물리 탐사가 요구된다. 4개의 정점 연구 결과, 척치 해저평원의 해양지열 분포는 ~40 km 거리에서 변화양상이 확인되지 않는다. 앞서 논의처럼 해양지열 결과를 통해 형성 시기의 한정은 가능했지만, 동시대 확장을 주장하는 가설에서 발견되는 모호면 깊이와 맨틀 온도의 모순점을 파악하고 이해하기 위해서는 관측영역의 확장이 필수적이다. 한편, 지각의 두께에 대한 정보를 제공할 수 있는 중력탐사 및 아직 확인되지 않은 지자기 이상(즉, 확장시기 및 속도)에 대한 정보를 제공할 수 있는 해저견인 자력계 등을 사용한 심부 자력탐사도 필요하다. 척치 해저평원의 확장 방향과 평행한 동-서 측선을 따라 수행되는 분지 규모의 관측이 효과적일 것이라 판단한다.

해저평원의 가스하이드레이트 안정영역

척치대지 남서쪽에서 발견된 가스하이드레이트 언덕(Fig. 1의 파란 점선 영역)에서 코어링을 통해 가스하이드레이트 시료가 획득되었고, 주로 생기원의 메탄으로 구성되었음도 확인되었다(Kim et al., 2020a, 2020b). 척치 대지 남서쪽 및 남서 대륙사면에서 수행된 스파커 탄성파 탐사에서 해저면 모사 반사면(bottom-simulating reflector, BSR)이 확인(Fig. 1의 보라색 점선 영역)되었고, 이 반사면 깊이는 해양지열로 추정한 가스하이드레이트 안정영역 하부 깊이와도 근사함이 보고되었다(Kang et al., 2021). 분지 중앙부에서 수행된 심부 탄성파 탐사결과에서는 해저면 모사 반사파가 확인되지 않았다(Hegewald and Jokat, 2013; Nikishin et al., 2021b).

심부 탄성파의 경우 긴 주파수로 인해 해저면 모사 반사면이 확인되지 않을 가능성이 있으며, 천부를 자세히 보여주는 스파커 탄성파 탐사는 수행된 적이 없다. 더욱이 가스하이드레이트 부존이 확인된 곳에서도 해저면 모사 반사파가 발견되지 않는 경우도 존재한다(Kvenvolden and Barnard, 1983; Xu and Ruppel, 1999). 다른 한편, 퇴적물 내 유기탄소량 등 가스하이드레트 부존 가능성에 대한 지화학적인 연구가 분지 중앙부에서 수행되지 않았기 때문에, 현재로서는 가스하이드레이트가 분지 중앙에도 부존할 가능성에 대해 단언할 수는 없다.

그럼에도 불구하고 예상 가스 하이드레이트 안정영역을 알고 있는 경우, 이후 분지 중앙에서 수행되는 탄성파 탐사 결과에서 가스하이드레이트 자유가스로 인한 해저면 모사 반사면을 식별할 때 일차적인 판단 근거로 사용할 수 있다. 퇴적층내에서 특징적인 분포 및 반사파 위상으로 해저면 모사 반사면은 선상 탄성파 탐사 현장에서 손쉽게 확인이 가능하나, 그 반사면이 가스하이드레이트와 연관되었음을 판단하는 것은 그렇지 않다. 해상에서는 규산염 속성작용인 스멕타이트-일타이트 변화(smectite-to-illite transformation)로도 해저면과 위상이 반대되는 해저면 모사 반사면이 생성될 수 있으며(Lee et al., 2003; Berndt et al., 2004), 드물지 않게 해저면 모사 반사면이 수직적으로 2회 이상 나타나기도(Foucher et al., 2002; Geletti and Busetti, 2011) 하기 때문이다.

가스하이드레이트와 척치 대지 대륙사면에서 분석된 가스하이드레이트 조성(메탄 99.7%, 에탄 0.3%; Kim et al., 2020b)을 가정하여, 이번 연구에서 관측된 지온경사도, 해저면 해수 온도를 고려하면 정점들 O1, C1~C3에서 추산한 메탄 가스하이드레이트 안정영역의 하한 깊이는 332~367 m 범위가 된다(Fig. 7; Vadakkepuliyambatta, 2019). 단, 가스하이드레이트와 연관된 해저면 모사 반사파의 깊이와 해양지열과의 차이가 퇴적층 내 탄성파 속도, 가스하이드레이트 상변화 곡선 등이 내재한 불확실성으로 인해 최대 ~30%까지 발생할 수 있다는 점은 고려할 필요가 있다(Grevemeyer and Villinger, 2001).

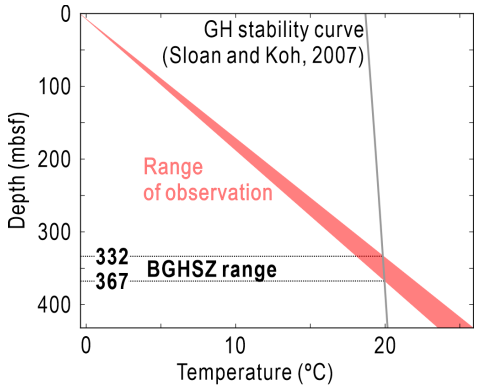

Fig. 7. Range of the base of the gas hydrate stability zone (BGHSZ) estimated from observation results (red area). Grey line indicates the stability (Sloan and Koh, 2007) of the gas hydrate with a composition at the Araon mounds (Kim et al., 2020b).

결 론

(1) 2021년 아라온 북극해 탐사를 통해 척치분지의 수심 >2,000 m 해저평원에서 해양지열 관측을 수행하였다. ~27 km 길이의 측선상의 총 3정점(C1~C3)에서 54.9~61.0 mK/m의 범위의 지온경사도를 관측하였다. 정점 C1에서 18 km 떨어진 2018년 관측결과(정점 O1; 56.4 mK/m)도 상당히 일관된다.

(2) 정점 O1의 현장 퇴적물 열전도도는 실험실 퇴적물 열전도도로부터 보정되었으며, 값은 0.998 W/m/K이다. 이를 2021년 정점들에 원용하면 척치 해저평원에서 54.8~60.9 mW/m^{2}의 해양지열이 추산되며, 해양지각의 해양지열-형성시기 관계로 추정한 형성시기는 후기 백악기에 해당하는 95~72 Ma이다.

(3) 해양지열로 추정된 척치 해저평원의 형성시기는 다양한 가설 중 전기 중생대와 제4기에 형성되었다는 가설과는 배치되는 반면, 마카로브 분지가 형성되며 수평이동으로 중생대 후기-신생대에 형성되었다는 가설과 상통한다. 동시대에 형성되었다고 추정되는 동으로 인접한 척치보더랜드 형성가설과는 척치 해저평원 하부의 맨틀 열구조가 정합되지 않아 규명을 위한 추가 연구가 필요하다.

(4) 관측한 해양지열을 이용해 추산한 척치 해저평원 내 메탄 가스하이드레이트 안정영역 하한의 깊이는 332~367 m 이다. 이 정보는 이후 천부 탄성파 탐사시에 가스하이드레이트 관련 해저면 모사 반사면을 일차적으로 확인하는 데 유용하게 사용될 것이다.

사 사

2018, 2021년 쇄빙연구선 아라온 북극 탐사 동안 자료획득을 도와준 아라온 선장 이하 승조원, 그리고 연구자들께 감사드린다. 이 연구는 해양수산과학기술원 지원(KIMST Grant 1525011795)을 통해 이루어졌다. 김영균은 강원대학교 박사후연수연구원활용사업 및 한국연구재단 지원(NRF No. 2019R1A6A1A03033167, No. 2020R1C1C1007495)을 받았다.

References

Beardsmore, G.R., Cull, J.P., 2001, Crustal heat flow: A guide to measurement and modelling, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 324pp.

Berndt, C., Bünz, S., Clayton, T., Mienert, J., Saunders, M., 2004, Seismic character of bottom simulating reflectors: Examples from the mid-Norwegian margin, Marine and Petroleum Geology, 21(6), 723-733.

Bird, K.J., Houseknecht, D.W., 2017, Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Chukchi Borderland Province, 2008, Professional Paper 1824-C, U.S. Geological Survey, Reston, VA, 8p.

Butsenko, V.V., Firsov, Y.G., Kashubin, S.P., Piskarev, A.L., Zholondz, S.M., 2019, Chukchi Plateau and Chukchi Basin, In: Piskarev, A., Poselov, V., Kaminsky, V. (Eds.), Geologic Structures of the Arctic Basin, Springer International Publishing, 269-280.

Chernykh, A., Glebovsky, V., Zykov, M., Korneva, M., 2018, New insights into tectonics and evolution of the Amerasia Basin, Journal of Geodynamics, 119, 167-182.

Coakley, B., Brumley, K., Lebedeva-Ivanova, N., Mosher, D., 2016, Exploring the geology of the central Arctic Ocean; understanding the basin features in place and time, Journal of the Geological Society, 173(6), 967-987.

Davis, E.E., Wang, K., Becker, K., Thomson, R.E., Yashayaev, I., 2003, Deep-ocean temperature variations and implications for errors in seafloor heat flow determinations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B1), 2034.

Døssing, A., Gaina, C., Brozena, J.M., 2017, Building and breaking a large igneous province: An example from the High Arctic, Geophysical Research Letters, 44(12), 6011-6019.

Expedition 317 Scientists, 2010, Canterbury Basin Sea Level: Global and local controls on continental margin stratigraphy, IODP Preliminary Report, 317, doi:10.2204/iodp.pr.317.2010.

Fisher, A.T., Harris, R.N., 2010, Using seafloor heat flow as a tracer to map subseafloor fluid flow in the ocean crust, Geofluids, 10(1-2), 142-160.

Foucher, J.P., Nouzé, H., Henry, P., 2002, Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope, Marine Geology, 187(1), 161-175.

GEBCO Compilation Group, 2020, GEBCO 2020 Grid, doi:10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9.

Geletti, R., Busetti, M., 2011, A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B4), B04101.

Géli, L., Turon, J.L., Aslanian, D., Balut, Y., Beuzart, P., Cochran, J., Francheteau, J., Harmegnies, F., Landuré, J.Y., Le Suavé, R., Mazaud, A., Michel, E., Normand, A., Pichon, J.J., Vlastelic, I., 2001, Deep-penetration heat flow probes raise questions about interpretations from shorter probes, Eos, Transactions American Geophysical Union, 82(29), 317-320.

Goto, S., Matsubayashi, O., 2008, Inversion of needle-probe data for sediment thermal properties of the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B8), B08105.

Grantz, A., Clark, D.L., Phillips, R.L., Srivastava, S.P., Blome, C.D., Gray, L.B., Haga, H., Mamet, B.L., McIntyre, D.J., McNeil, D.H., Mickey, M.B., Mullen, M.W., Murchey, B.I., Ross, C.A., Stevens, C.H., Silberling, N.J., Wall, J.H., Willard, D.A., 1998, Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia basin, Arctic Ocean, GSA Bulletin, 110(6), 801-820.

Grantz, A., Hart, P.E., Childers, V.A., 2011, Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean, In: Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A.V., Sørensen, K. (Eds.), Arctic Petroleum Geology, Geological Society Memoir No. 35, The Geological Society of London, 771-799.

Grevemeyer, I., Villinger, H., 2001, Gas hydrate stability and the assessment of heat flow through continental margins, Geophysical Journal International, 145(3), 647-660.

Hegewald, A., Jokat, W., 2013, Tectonic and sedimentary structures in the northern Chukchi region, Arctic Ocean, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(7), 3285-3296.

Hutnak, M., Fisher, A.T., 2007, Influence of sedimentation, local and regional hydrothermal circulation, and thermal rebound on measurements of seafloor heat flux, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B12).

Hyndman, R.D., Erickson, A.J., Von Herzen, R.P., 1974, Geothermal measurements on DSDP Leg 26, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 26, 451-463.

Ilhan, I., Coakley, B.J., 2018, Meso-Cenozoic evolution of the southwestern Chukchi Borderland, Arctic Ocean, Marine and Petroleum Geology, 95, 100-109.

Jin, Y.K., Onboard Ship Scientific Party, 2017, ARA07C Cruise Report: 2016 Korea-Russia-Germany East Siberian Sea research program, BSPM16050-080-3, Korea Polar Research Institute, 103p.

Jin, Y.K., Shipboard Scientific Party, 2019, ARA09C Cruise Report: 2018 Korea-Russia-Japan East Siberian/Chukchi Sea research program, BSPM18050-019-3, Korea Polar Research Institute, 205p.

Jin, Y.K., Shipboard Scientific Party, 2020, ARA10C Cruise Report: 2019 Korea-Russia East Siberian/Chukchi Sea research program, BSPM19050-101-3, Korea Polar Research Institute, 161p.

Jokat, W., 2009, The expedition of the research vessel “Polarstern” to the Arctic in 2008 (ARK-XXIII/3), Alfred Wegener Institute, 222p.

Kang, S.G., Jang, U., Kim, S., Choi, Y., Kim, Y.G., Hong, J.K., Jin, Y.K., 2021, Exploration of the gas hydrates on the southwestern continental slope of the Chukchi Plateau in the Arctic Ocean, Journal of the Korean Society of Mineral

and Energy Resources Engineers, 58(5), 418-432 (in Korean with English abstract).

Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Artemieva, I.M., Morozov, A.F., Vyatkina, D.V., Golysheva, Yu.S., Kashubina, T.V., Milshtein, E.D., Rybalka, A.V., Erinchek, Yu.M., Sakulina, T.S., Krupnova, N.A., Shulgin, A.A., 2018, Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment “Arctic-2012”, Journal of Geodynamics, 119, 107-122.

Kim, J.H., Hachikubo, A., Kida, M., Minami, H., Lee, D.H., Jin, Y.K., Ryu, J.S., Lee, Y.M., Hur, J., Park, M.H., Kim, Y.G., Kang, M.H., Park, S., Chen, M., Kang, S.G., Kim, S., 2020b, Upwarding gas source and postgenetic processes in the shallow sediments from the ARAON Mounds, Chukchi Sea, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 76, 103223.

Kim, Y.G., Kim, S., Lee, D.H., Lee, Y.M., Kim, H.J., Kang, S.G., Jin, Y.K., 2020a, Occurrence of active gas hydrate mounds in the southwestern slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean, Episodes, 43(2), 811-823.

Kim, Y.G., Lee, S.M., Matsubayashi, O., 2010, New heat flow measurements in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan): Relationship to local BSR depth, and implications for regional heat flow distribution, Geo-Marine Letters, 30(6), 595-603.

Kvenvolden, K.A., Barnard, L.A., 1983, Gas hydrates of the Blake Outer Ridge, Site 533, Deep Sea Drilling Project Leg 76, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project Covering Leg 76 of the Cruises of the Drilling Vessel Glomar Challenger, Norfolk, Virginia to Fort Lauderdale, Florida, October-December, 1980, 76, 353p.

Lee, G.H., Kim, H.J., Jou, H.T., Cho, H.M., 2003, Opal-A/opal-CT phase boundary inferred from bottom-simulating reflectors in the southern South Korea Plateau, East Sea (Sea of Japan), Geophysical Research Letters, 30(24), 2238.

McKenzie, D.P., Roberts, J.M., Weiss, N.O., 1974, Convection in the earth’s mantle: Towards a numerical simulation, Journal of Fluid Mechanics, 62(3), 465-538.

Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Freiman, S.I., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Zhukov, N.N., Startseva, K., 2021a, Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 - Mesozoic to Cenozoic geological evolution, Earth-Science Reviews, 217, 103034.

Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Freiman, S.I., Rodina, E.A., Startseva, K.F., Zhukov, N.N., 2021b, Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 - Arctic stratigraphy and regional tectonic structure, Earth-Science Reviews, 217, 103581.

Nikishin, A.M., Startseva, K.F., Verzhbitsky, V.E., Cloetingh, S., Malyshev, N.A., Petrov, E.I., Posamentier, H., Freiman, S.I., Lineva, M.D., Zhukov, N.N., 2019, Sedimentary basins of the East Siberian sea and the Chukchi sea and the adjacent area of the Amerasia basin: Seismic stratigraphy and stages of geological history, Geotectonics, 53(6),635-657.

Oakey, G.N., Saltus, R.W., 2016, Geophysical analysis of the Alpha-Mendeleev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province, Tectonophysics, 691, 65-84.

O'Regan, M., 2007, Data report: high-resolution bulk density, dry density, and porosity records from the Arctic Coring Expedition, IODP Expedition 302, In: Backman, J., Moran, K., McInroy, D.B., Mayer, L.A., Expedition 302 Scientists (Eds.), Proc. IODP, 302: Integrated Ocean Drilling Program Management International Inc., Edinburgh.

Paton, D.A., Pindell, J., McDermott, K., Bellingham, P., Horn, B., 2017, Evolution of seaward-dipping reflectors at the onset of oceanic crust formation at volcanic passive margins: Insights from the South Atlantic, Geology, 45(5), 439-442.

Pollack, H.N., Hurter, S.J., Johnson, J.R., 1993, Heat flow from the Earth’s interior: Analysis of the global data set, Reviews of Geophysics, 31(3), 267-280.

Pribnow, D.F.C., Kinoshita, M., Stein, C.A., 2000, Thermal data collection and heat flow recalculations for ODP Legs 101-180, Hannover, Germany.

Sclater, J.G., Hasterok, D., Goutorbe, B., Hillier, J., Negrete, R., 2014, Marine heat flow, In: Harff, J., Meschede, M., Petersen, S., Thiede, J. (Eds.), Encyclopedia of Marine Geosciences, Springer Netherlands, Dordrecht, 1-16.

Sloan Jr., E.D., Koh, C.A., 2007, Clathrate hydrates of natural gases (3rd ed.), CRC Press, 752p.

Stein, C.A., 2013, Heat flow of the Earth, In: Ahrens, T.J. (Ed.), Global Earth Physics, American Geophysical Union, 144-158.

Stein, C.A., Stein, S., 1992, A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age, Nature, 359(6391), 123-129.

Timmermans, M.L., Garrett, C., 2006, Evolution of the deep water in the Canadian Basin in the Arctic Ocean, Journal of Physical Oceanography, 36(5), 866-874.

Vadakkepuliyambatta, S., 2019, A graphical user interface for estimating the gas hydrate stability in marine sediments, https://doi.org/10.18710/OIXJEK, DataverseNO, V1.

Von Herzen, R., Ruppel, C., Molnar, P., Nettles, M., Nagihara, S., Ekström, G., 2001, A constraint on the shear stress at the Pacific-Australian plate boundary from heat flow and seismicity at the Kermadec forearc, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B4), 6817-6833.

Wang, R., Xiao, W., Shao, L., Chen, J., Gao, A., 2012, Paleoceanographic records in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean during the late Quaternary, Acta Oceanologica Sinica, 31(1), 83-94.

Wilson, R.W., Houseman, G.A., Buiter, S.J.H., McCaffrey, K.J.W., Doré, A.G., 2019, Fifty years of the Wilson Cycle concept in plate tectonics: An overview, Geological Society, London, Special Publications, 470(1), 1-17.

Xu, W., Ruppel, C., 1999, Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104(B3), 5081-5095.

Zhang, T., Dyment, J., Gao, J.Y., 2019, Age of the Canada Basin, Arctic Ocean: Indications from high-resolution magnetic data, Geophysical Research Letters, 46(23), 13712-13721.

Zhang, T., Shen, Z.Y., Zhang, F., Ding, M., 2021, Heat flow distribution in the Chukchi Borderland and surrounding regions, Arctic Ocean, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22(12), e2021GC010033.