

북극 보퍼트해 420 MV (진흙화산)의 점토광물 특성

Clay Mineral Characteristics of 420 MV (Mud Volcano) in Beaufort Sea, Arctic Ocean

장정규(Jeong Kyu Jang) · 구효진(Hyo Jin Koo) · 조현구(Hyen Goo Cho)*

경상대학교 지질과학과 및 기초과학연구소

(Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University,
Jinju 52828, Korea)

요약 : 점토광물은 진흙화산(MV)을 구성하는 중요 광물로서, 진흙화산의 특성 및 형성 메커니즘을 밝히는 데에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되지만, 이에 대한 연구는 거의 수행된 바가 없다. 본 연구에서는 북극 보퍼트해 420 MV와 주변 해역 퇴적물들의 점토광물학적 차이를 규명하여, 진흙화산의 특성 및 형성과 점토광물과의 관계를 규명하고자 하였다. 420 MV와 맥켄지곡에서 8개의 박스 코어에 대해 점토광물과 입도 분석을 실시하였다. 맥켄지곡의 4가지 주요 점토광물의 상대적인 함량비는 맥켄지강과의 거리에 상관없이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 거의 일정하지만, 입도는 맥켄지강으로부터 멀어질수록 점점 세립화하는 경향을 나타낸다. 맥켄지곡의 퇴적물들은 주로 스멕타이트/일라이트의 비가 낮고 카올리나이트/녹니석의 비가 높은 맥켄지강의 특징을 가진다. 420 MV의 퇴적물은 점토광물의 함량이 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트 순으로 감소하며, 깊이에 따른 입도가 거의 일정하다. 스멕타이트와 조립질 퇴적물의 함량은 비교 코어보다 약 2배 높다. 녹니석보다 카올리나이트의 함량이 높은 강은 보퍼트해 내에서는 연구된 결과가 없으며, 맥켄지강과 스멕타이트/일라이트, 카올리나이트/녹니석의 비가 같은 비교 코어와 구분된다. 비교 코어보다 많은 조립질 퇴적물과 깊이에 따라 일정한 입도는 MV에 의한 분출로 인한 것으로 유추된다. 비교 코어의 퇴적물은 맥켄지강 기원, 420 MV의 퇴적물은 MV의 분출에 의한 것으로 해석된다.

주요어 : 진흙화산, 맥켄지곡, 보퍼트해, 맥켄지강, 점토광물

ABSTRACT : Clay minerals, a major component of mud volcano (MV) sediments, are expected to provide important information for characterizing mud volcano formation mechanisms, but clay minerals have rarely been studied. The purpose of this study is to investigate the characteristics of 420 MV and surrounding marine sediments. Clay minerals and grain size were analyzed for 8 box cores from 420 MV and Mackenzie Trough. The relative proportions of the four major clay minerals in the Mackenzie Trough are almost constant in the order of illite, chlorite, kaolinite, and smectite, regardless of the distance from the Mackenzie River. However, the grain size tends to become fining as they move away from the Mackenzie River. Comparing the clay mineral characteristics of river (Colville River, Kuparuk River, Sagavanirktok River, Canning River, Mackenzie River) sediments entering the Beaufort Sea in order to determine the origin of the Mackenzie Trough and 420 MV sediments, the sediments of the Mackenzie Trough are characterized mainly by the Mackenzie River with a low ratio of smectite/illite and a high ratio of kaolinite/chlorite. In 420 MV sediments, the contents of clay minerals decrease in

*Corresponding author: +82-55-772-1474, E-mail: hgcho@gnu.ac.kr

the order of illite, kaolinite, chlorite, and smectite, and the grain size with depth is almost constant. The content of smectite and coarse sediments is about two times higher than the reference core. No river with higher kaolinite content than chlorite exists in the Beaufort Sea, and the ratio of smectite/illite to kaolinite/chlorite is different from the reference core such as the ratio of the Mackenzie River. Compared to the reference core, the high contents of coarse sediments and the constant grain size with depth might be attributed to the ejection by MV. The reference core is interpreted as originating from Mackenzie River, and sediment of 420 MV is interpreted as originating from eruption of MV.

Key words : Mud volcano, Mackenzie Trough, Beaufort Sea, Mackenzie River, clay mineral

서 론

최근 북극에서 영구동토층이 녹으면서 메탄이 방출되어 지구온난화에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Ruppel *et al.*, 2011). 가스 하이드레이트는 고위도의 영구동토층 내의 저온 및 고압 상태에서 안정적이지만, 대기 및 해양의 온난화가 퇴적물 내 메탄의 안정영역을 불안정하게 하여 메탄을 방출시키고 온실가스로서 지구온난화를 가속시킨다(Kvenvolden, 1988; Milkov, 2004; Boswell and Collett, 2011; Ruppel and Kessler, 2017). 이러한 이유로 북극해의 해저환경 및 메탄 방출 현상은 많은 연구자들의 관심을 받고 있으며, 국내에서도 극지연구소의 쇄빙선 아라온호(R/V ARAON)를 이용해 2010년부터 매년 북극해 탐사가 수행되고 있다(Paull *et al.*, 2015; Kobayashi *et al.*, 2016; Jin *et al.*, 2018).

2013년 수행된 ARA04B 탐사 동안 보퍼트해(Beaufort Sea)의 다중빔 심층 탐사(multibeam bathymetric mapping survey)를 통해 수심 약 740 m에서 3개, 약 282 m에서 1개, 약 420 m에서 1개의 진흙화산(mud volcano, MV)이 발견되었으며, 각 진흙화산들은 수심에 따라 MV의 명칭이 부여되었다(Paull *et al.*, 2015). 420 MV에서는 ROV (remoted operated vehicle) 탐사를 통해 해저로부터의 메탄 방출을 실제로 확인하였다(Paull *et al.*, 2015). 또한, 2017년 수행된 ARA08C 탐사에서 420 MV에 대한 재탐사를 실시하였으며, MV의 지속적인 메탄 방출과 규모의 확대를 확인하였다(Jin *et al.*, 2018).

MV는 다량의 퇴적물과 가스 및 유체가 표면으로 분출되어 형성된 퇴적체를 말한다(Milkov *et al.*, 2000; Kopf, 2002; Bonini, 2012; Paull *et al.*, 2015; Mazzini and Etiope, 2017). MV는 심부의 점토층 내의 압력이 높아져 과압 상태가 되면 단층을 따라 퇴적물이 표층까지 이동한 후 분출하여 형

성되며(Mazzini *et al.*, 2009; Bonini, 2008; Mazzini and Etiope, 2017), 이러한 활동은 MV 퇴적물의 재동과 이동을 야기한다(Paull *et al.*, 2007; Blasco *et al.*, 2013; Paull *et al.*, 2015). MV는 각 퇴적체의 크기와 구조, 그리고 MV에 의해 분출되는 유체와 퇴적물이 매우 다양하며, 분출 기간 또한 수 시간에서 수백 년으로 크게 차이가 날 수 있다(Zoporowski and Miller, 2009; Bonini, 2012; Paull *et al.*, 2015). MV는 용암이나 재가 생성되지 않아 화산과 구분이 가능하다(Bredehoeft and Hanshaw, 1968; Jakubov *et al.*, 1971; Plumley, 1980; Gretener, 1985; Milkov *et al.*, 2000; Mazzini *et al.*, 2009). MV는 육지와 해저 모두에서 발견되며 대륙주변부, 심해퇴적분지의 판 경계, 삼각주, 암염돔 등에서 전 세계적으로 광범위하게 분포한다(Etiope, 2015). MV의 수는 육지에서 900여 개, 해양에서 500~800여 개로 추정되고 있다(Milkov *et al.*, 2000; Dimitrov, 2002; Etiope and Milkov, 2004). 육지의 MV는 아프리카를 제외하고, 유럽, 아시아, 미주, 오세아니아 등 적어도 26여 개국에서 보고되었으며 특히, 루마니아와 아제르바이잔에서는 각 200여 개의 MV가 확인되었다(Guliyev and Feizullayev, 1997). 해저의 MV는 흑해, 카디스만, 카스피해, 지중해, 멕시코만, 인도양, 카리브해, 노르웨이해, 대서양, 태평양, 중국해, 북극해 등에 분포한다(Milkov *et al.*, 2000; Dimitrov, 2002; Kholodov, 2002; Hensen *et al.*, 2004; Mazzini *et al.*, 2004; Mhammedi *et al.*, 2008; Mazzini and Etiope, 2017). 북극해에서는 420 MV가 속한 보퍼트해와 하콘 모스비 MV(Haakon Mosby Mud Volcano)가 발견된 바렌츠해(Barents Sea) 등 두 해역에서 보고되었다(Vogt *et al.*, 1997; Ginsburg *et al.*, 1999; Paull *et al.*, 2015). 해저탐사가 계속됨에 따라 해저 MV의 수는 계속 증가할 것으로 여겨진다(Milkov *et al.*, 2000; Soloviev and Mazurenko, 2000).

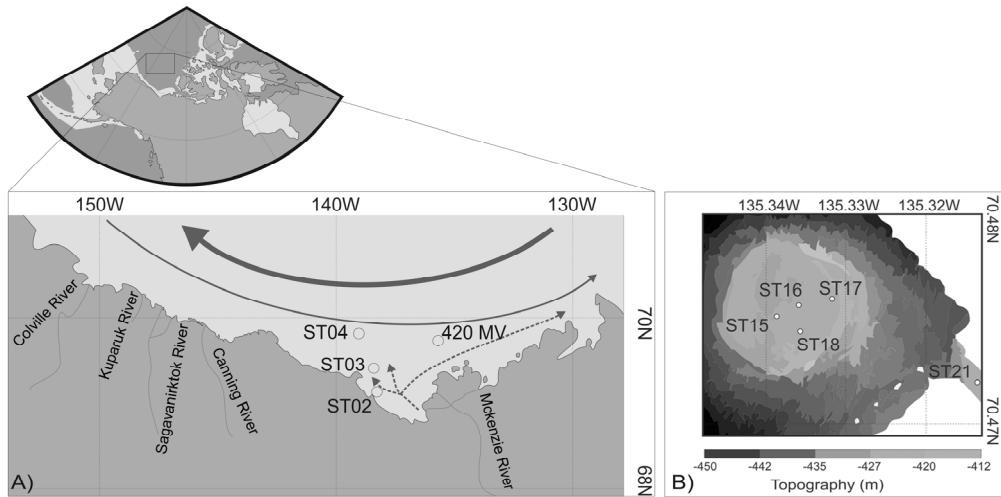


Fig. 1. A) Map showing the locations of sediment core and rivers. Modified from Stabeno *et al.* (1995). B) 420 mud volcano in Beaufort Sea. The thick arrow represents Beaufort Gyre, the narrow arrow represents Alaska coastal current, and the dashed arrows represent Mackenzie River plume.

북극해는 유라시아 부근의 동시베리아해(East Siberian Sea), 랍테브해(Laptev Sea), 카라해(Kara Sea), 바렌츠해, 척치해(Chukchi Sea), 캐나다 북부의 중앙 북극해, 보퍼트해 등으로 구성된다. 420 MV가 속한 보퍼트해는 알래스카와 캐나다의 북부 연안을 포함하는 해역으로 평균수심은 124 m이며, 랍테브해, 동시베리아해와 비교하여 좁은 대륙붕을 가진다(Jakobsson *et al.*, 2003). 보퍼트해는 베링 해협(Bering Strait)을 통해 북극해로 들어오는 따뜻하고 염분이 많은 태평양 해수들이 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류(Alaska Coastal Current)를 형성하며, 북극해를 시계방향으로 크게 도는 보퍼트 환류(Beaufort Gyre)의 영향을 받는다(Naidu and Mowatt, 1983; Royer and Emery, 1987).

보퍼트해로 퇴적물을 공급하는 주요 강들에는 알래스카에 위치하는 콜빌강(Colville River), 쿠바룩강(Kuparuk River), 사가바니크톡강(Sagavanirktok River), 캐닝강(Canning River)과 캐나다에 위치하는 맥켄지강(Mackenzie River)이 있다. 특히, 맥켄지강은 북극해 전체로 유입되는 강들 중 담수 배출량이 평균 420 km²/yr로 네 번째로 크고, 퇴적물 배출량은 평균 127 Mt/yr로 가장 크다고 알려져 있다(Gordeev *et al.*, 1996; Holmes *et al.*, 2002; Rachold *et al.*, 2004). 맥켄지강의 동쪽에도 여러 작은 강들이 있지만, 연평균 배출량이 작아 퇴적물 공급에는 큰 기여를 하지 못한다(Holmes *et al.*, 2002).

머드 퇴적물의 주요 구성 성분인 점토광물은 MV의 특성 및 형성 메커니즘을 밝히는 데에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되지만, 420 MV에 대한 연구들은 대부분 지구물리학, 지화학 또는 생물학적인 관점에서 수행되었으며, 점토광물학적 연구는 거의 수행된 바가 없다(Paull *et al.*, 2015; Gamboa *et al.*, 2017; Jin *et al.*, 2018). 본 연구에서는 420 MV와 맥켄지곡(Mackenzie Trough)에서 획득한 코어 퇴적물에 대하여, 퇴적물의 입도 및 점토광물 함량을 분석하여 420 MV와 주변 해역 퇴적물들의 특성 차이를 규명하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에 사용한 시료는 2017년 8월 26일부터 9월 16일까지 극지연구소 쇠빙선 아라온호를 이용해 Arctic Expedition ARA08C 탐사에서 채취된 것으로 총 8개의 박스코어(box core; BC)로부터 187개의 부시료를 채취하였다. 코어 퇴적물은 보퍼트해 맥켄지 대륙붕 내의 맥켄지곡에 속하는 3개 코어(ST02, ST03, ST04), 420 MV 내의 4개 코어(ST15, ST16, ST17, ST18) 그리고 420 MV 근처의 비교 코어(ST21)로 구분된다. 맥켄지곡 코어들은 ST02, ST03, ST04 순으로 맥켄지강으로부터 멀어진다(Fig. 1). 420 MV의 코어들은 ST15가 420 MV의 중심에 가깝고 ST18이 420 MV의 중심에서

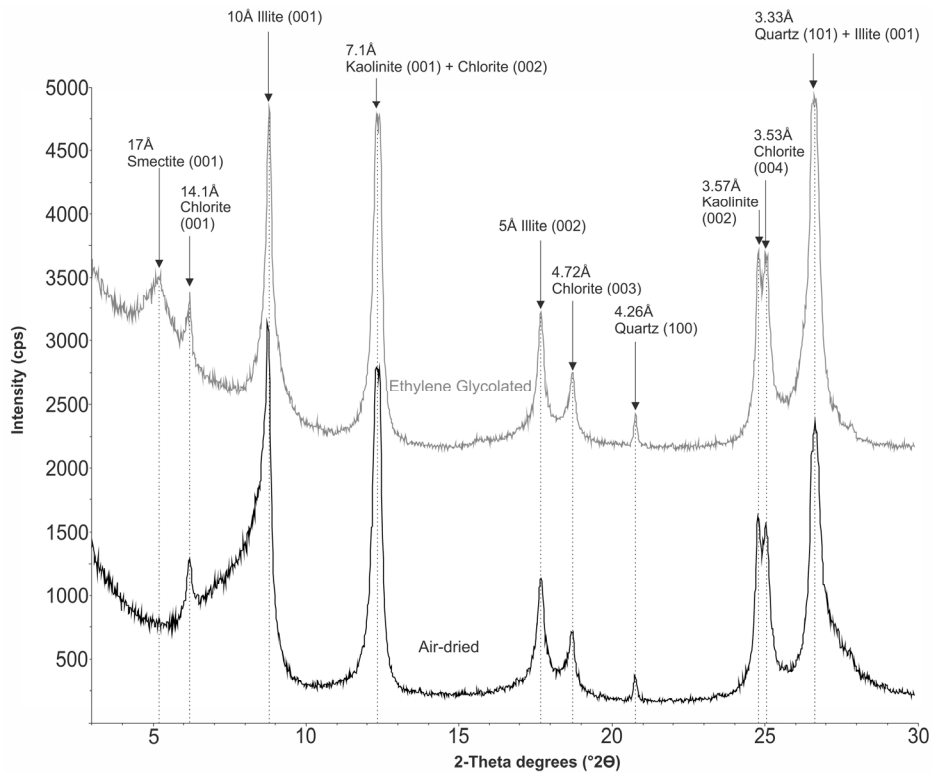


Fig. 2. Typical XRD patterns of ARA08C ST15-5 from the 420 MV, showing interpretation of major clay mineral species from the two classical runs (air-dried-black line, ethylene glycolated-gray line).

가장 멀다. 비교 코어 ST21은 420 MV와의 비교를 위해 인근의 동일한 수심에서 채취되었다(Fig. 1).

점토광물분석은 박스코어를 1 cm 간격으로 채취한 187개 부시료 중 97개의 부시료를 이용하였다. 각 시료들은 점토광물의 분석을 위해 2 μm 이하의 입자를 가진 점토부분을 분리하여 정방위 시편으로 제작하였다. 실험 및 분석 방법은 Koo *et al.* (2018)에 자세히 기술되어있다. X선 회절분석은 경상대학교 지질과학과에서 보유하고 있는 Siemens D5005 / Brucker 고분해능 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색화된 파장(CuKα = 1.5406 Å)을 사용하였다. 분석조건은 40 kV/40 mA, 3-30 ° 2-theta 구간에서 주사 간격 0.02 °, 주사 시간 2초로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절 값을 기록하였으며, 슬릿은 1.0-0.6-1.0 °를 이용하였다.

점토광물 반정량 분석은 공기 중 건조 시료(air-dried)와 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료(ethylene glycolated)에 대하여 X선 회절분석을 실시하여 그 결과를 비교해 결정하였다(Fig. 2). 일라이트, 녹니

석, 카올리나이트, 스멕타이트 등 네 가지 주요 점토광물의 상대적인 함량은 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료에서 각 광물의 특징적인 (001) 피크의 면적 비를 이용하여 계산하였다(Fig. 2). 각 광물의 (001) 피크 강도차를 보정하기 위하여 계산된 면적에 가중치를 곱하였다(Biscaye, 1965). 녹니석과 카올리나이트의 상대적인 함량은 녹니석 (004) 피크와 카올리나이트 (002) 피크 면적 비를 이용하여 계산하였다. 각 피크의 면적들은 Eva 3.0 프로그램을 이용하여 계산되었다. 녹니석과 카올리나이트의 함량은 공기 중 건조 시료의 X선 회절 분석 결과에서 카올리나이트 (002) 피크와 녹니석 (004) 피크의 회절 강도 비를 이용하여 결정하였다(Fig. 2).

92개의 부시료를 이용하여 입도분석을 실시하였다. 유기물 처리를 위해 시료 약 10 g과 6 % H₂O₂ 100 mL를 넣은 후, 초음파 세척기로 5분간 처리하고 상온에서 약 3일간 유기물을 제거하였다. 유기물 처리 후, 시료를 교반한 뒤 1 N 염산 5 mL를 넣어 탄산염을 제거하였다. 그리고 약 63 μm체(230

Table 1. Average clay mineral compositions (%) of study area

	Station	n	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite
Mackenzie Trough	St02	11	62.0	18.9	16.4	2.7
	St03	13	61.9	17.4	16.6	4.1
	St04	11	60.5	18.3	17.2	4.0
420 mud volcano	St15	12	54.9	19.3	20.0	5.8
	St16	12	54.8	18.4	19.4	7.4
	St17	13	54.0	19.1	19.8	7.1
	St18	13	52.2	19.4	20.4	8.1
Reference core	St21	12	56.7	20.8	20.8	3.6

mesh)를 이용하여 조립질 퇴적물을 분리하여 건조 후 무게를 측정하였으며, 남은 세립질 퇴적물들은 2 %의 확산제로 포화시켜 부산대학교 지질환경과 학과에서 보유하고 있는 Micromeritics Sedigraph III를 이용하여 분석하였다. 입도 분석 결과는 기기 분석을 통해 실트 및 점토의 함량을 ϕ 단위로 측정하였으며, 실트, 점토의 무게에 조립질 퇴적물의 무게를 합하여 전체 시료의 입도를 계산하였다.

결 과

점토광물 분석

맥켄지곡의 3개 코어(ST02, ST03, ST04)의 4가지 중요한 점토광물 함량은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 감소한다. 점토광물 중 일라이트는 57.5 %에서 66.0 %까지 포함되어 있으며 평균 61.5 %이다. 녹니석은 14.3 %에서 21.7 %로 평균 18.2 %이며, 카올리나이트는 13.8 %에서 18.7 %까지 포함되어 있으며, 평균 16.8 %이다. 스멕타이트는 1.5 %에서 6.5 %까지 포함되며 평균 3.6 %이다(Table 1).

420 MV의 4개 코어(ST15, ST16, ST17, ST18)의 점토광물 함량은 일라이트가 가장 많으며 그 다음으로 카올리나이트와 녹니석이 많고 스멕타이트는 가장 적다. 일라이트는 평균 54.0 % (49.3~57.7 %), 카올리나이트는 평균 19.9 % (17.7~22.1 %), 녹니석은 평균 19.1 % (16.7~22.0 %)이다. 스멕타이트는 3.4 %에서 9.2 %의 범위를 가지며 평균 7.1 %이다(Table 1).

비교 코어 퇴적물의 점토광물 함량은 맥켄지곡과 같이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트

의 순서로 감소한다. 일라이트는 53.0 %에서 62.3 %로 평균 56.7 %, 녹니석은 16.8 %에서 24.0 %로 평균 20.8 %, 카올리나이트는 18.0 %에서 20.7 %로 평균 18.9 %이며 스멕타이트는 2.2 %에서 5.4 %로 평균 3.6 %이다(Table 1).

420 MV와 비교 코어의 일라이트, 녹니석, 카올리나이트의 함량은 거의 비슷하지만, 스멕타이트의 함량은 420 MV가 비교 코어와 비교하여 약 2배 높다. 또한, 420 MV의 점토광물 함량을 맥켄지곡과 비교해보면 녹니석은 비슷하며 카올리나이트는 3.1 %, 스멕타이트는 3.5 % 높으며, 일라이트는 7.5 % 낮다(Table 1).

입도 분석

퇴적물 코어의 입도 분석 결과, 맥켄지곡 퇴적물의 조립질 퇴적물은 0.0 %에서 6.0 %로 평균 1.1 %, 실트는 12.0 %에서 30.4 %로 평균 20.2 %, 점토는 67.9 %에서 87.6 %로 평균 78.7 %이다. 맥켄지강과 가장 가까운 ST02의 조립질 퇴적물은 평균 1.1 %, 실트는 24.0 %, 점토는 74.9 %이다. ST03은 조립질 퇴적물 1.2 %, 실트 22.4 %, 점토 76.4 %이며, 맥켄지강에서 가장 멀리 위치한 ST04는 조립질 퇴적물 1.0 %, 실트 14.5 %, 점토 84.5 %이다. 맥켄지강으로부터 멀어질수록 실트의 양은 감소하고 점토의 양은 증가한다(Table 2). 조립질 퇴적물은 1 % 내외로 육지와 거리에 따른 함량 변화는 없다(Fig. 3A).

420 MV의 조립질 퇴적물은 2.8 %에서 9.0 %로 평균 4.5 %, 실트는 26.2 %에서 31.8 %로 평균 29.6 %, 점토는 61.3 %에서 70.9 %로 평균 65.8 %이며, 중심과 주변부의 입도 차이는 거의 없다

Table 2. Average grain size contents (%) of study area

	Station	n	Sand	Silt	Clay
Mackenzie Trough	St02	10	1.1	24.0	74.9
	St03	13	1.2	22.4	76.4
	St04	11	1.0	14.5	84.5
420 mud volcano	St15	12	4.5	30.0	65.5
	St16	12	5.2	30.5	64.2
	St17	11	4.3	30.1	65.6
	St18	12	4.1	28.0	67.9
Reference core	St21	12	0.3	18.7	81.0

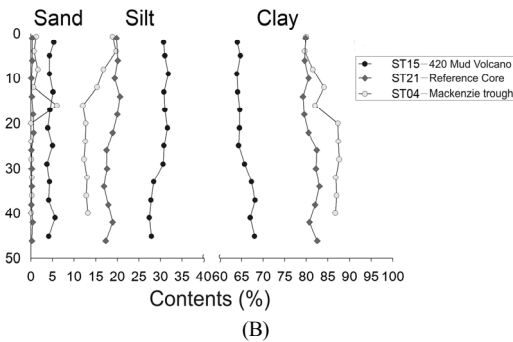
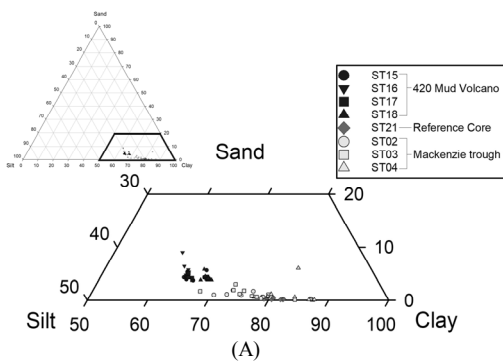


Fig. 3. (A) Ternary diagram of sand, silt, clay. (B) Vertical variations of grain size contents of core ST04, ST18, ST21.

(Table 2, Fig. 3A). 비교 코어는 조립질 퇴적물은 0.1 %에서 0.6 %로 평균 0.3 %, 실트는 16.9 %에서 20.6 %로 평균 18.7 %, 점토는 79.2 %에서 83.0 %로 평균 81.0 %이다(Table 2).

모든 코어 퇴적물은 대부분 점토로 구성되어 있으며, 일부 코어들은 소량의 조립질 퇴적물 입자를 포함한다. 맥켄지곡과 비교 코어의 조립질 퇴적물은 평균 0.9 %이지만, 420 MV는 평균 4.5 %로

약 3.6 % 높다. 맥켄지곡 퇴적물은 맥켄지강에서 멀어질수록 실트의 함량이 감소하며 점토는 증가한다. 420 MV는 실트와 점토의 평균 함량이 420 MV 중심부와 거리에 상관없이 일정하며 맥켄지곡의 퇴적물보다 420 MV의 퇴적물이 조립질 퇴적물과 실트의 함량이 높고 점토의 함량은 작다(Fig. 3A). 비교 코어는 조립질 퇴적물이 소량 존재하고 실트의 함량 또한 낮아, 420 MV와 차이가 있다 (Table 2).

토 의

맥켄지곡

맥켄지곡 코어 퇴적물의 4가지 주요 점토광물의 상대적인 함량비는 맥켄지강과의 거리에 상관없이 거의 일정하지만 입도는 맥켄지강으로부터 멀어질수록 점점 세립화하는 경향을 나타낸다. 즉, 맥켄지강에 제일 가까운 ST02부터 ST03, ST04 순으로 멀어질수록 실트의 함량은 감소하는 반면, 점토의 함량은 증가한다(Tables 1, 2).

맥켄지곡은 맥켄지강 유역의 서쪽에 위치하여, 보퍼트해에서는 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류가 흐르면서 알래스카강의 퇴적물이 맥켄지곡으로 유입될 수도 있다(Fig. 1). 맥켄지곡 퇴적물의 기원지를 알아보기 위하여 보퍼트해로 유입되는 강 퇴적물들의 점토광물 특성을 비교해보았다. 일라이트는 캐나다의 맥켄지강에서 64 %에서 66 %의 함량을 가진다. 알래스카의 캐닝강에서 82 %로 가장 높은 값을 가지며 알래스카의 나머지 강들은 46 %에서 58 %로 맥켄지강보다 낮은 값을 가진다(Table 3). 보퍼트해 내에서 스펙타이트는 상당한 지역적 차이를 가진다. 콜빌강은 약 30 %로 가장

Table 3. Average clay mineral compositions (%) of major river supplying clays to the Beaufort Sea

	River	n	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite	Reference
	Kobuk	2	66	27	3	4	
West of Alaska	Noatak	2	66	34	0	0	
	Yukon	6	41	26	12	21	
	Kouskokwim	12	60	35	5	0	Naidu and Mowatt (1983)
Colville	20	46	19	9	26		
North of Alaska	Kuparuk	10	47	22	15	16	
	Sagavanirktok	10	58	20	12	10	
	Canning	6	82	15	3	0	
Canada	Mackenzie	7	66	15	13	6	

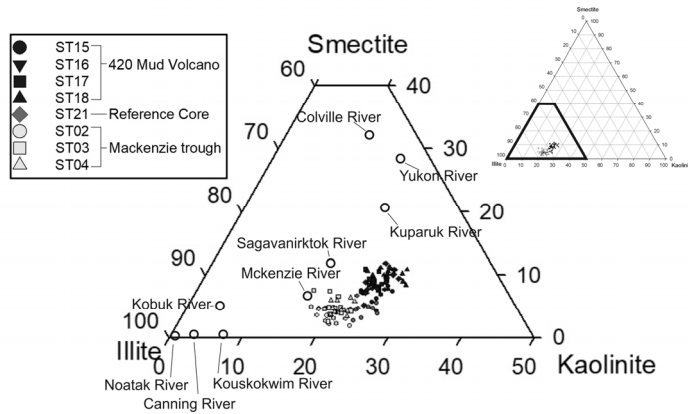


Fig. 4. Ternary diagram of major clay mineral groups, illite, kaolinite, smectite. Data regarding the potential source sediments comprising the major river supplying clays to the Beaufort Sea (Naidu and mowatt, 1983) are plotted for comparison.

높은 함량을 가진다. 쿠파룩, 사가바너크톡, 맥켄지강 등의 부근에서는 함량이 10 % 이하로 소량 존재한다(Table 3).

보퍼트해로 유입되는 강(콜빌강, 쿠파룩강, 사가바너크톡강, 캐닝강, 맥켄지강)과 맥켄지곡의 일라이트, 카올리나이트, 스멕타이트 함량을 비교하기 위해 삼각도표에 도시하였다(Fig. 4). 맥켄지곡의 평균 일라이트 함량은 61 %, 스멕타이트 함량은 평균 4 %로 사가바너크톡강과 맥켄지강의 점토광물 함량에 가깝게 도시된다(Fig. 4).

맥켄지강과 사가바너크톡강은 일라이트와 녹니석, 스멕타이트의 함량에서 차이를 보이기 때문에, 두 강의 함량 차이는 (카올리나이트/녹니석) 비와 (스멕타이트/일라이트) 비를 이용한 그래프를 통해 구분할 수 있다(Table 3, Fig. 5). 맥켄지곡 퇴적물

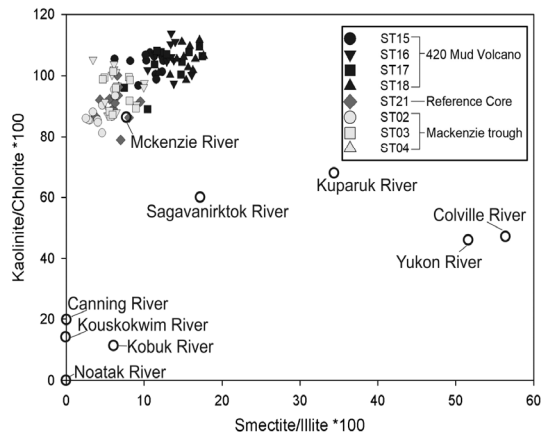


Fig. 5. Discrimination plot between smectite/illite ratio and kaolinite/chlorite ratio.

은 (스멕타이트/일라이트) 비가 평균 6(2~10)이고, (카올리나이트/녹니석) 비는 평균 93(81~105)이다. 맥켄지강은 (스멕타이트/일라이트), (카올리나이트/녹니석)의 비가 각 9, 87의 값을 가지며, 맥켄지강의 범위 안에 도시된다(Fig. 5). 그러나, 사가바너크 특강은 (스멕타이트/일라이트) 비가 17로 맥켄지강의 2~10의 범위보다 높고, (카올리나이트/녹니석) 비는 60으로 맥켄지강의 81~105의 범위보다 낮은 값을 가지기 때문에 맥켄지강의 퇴적물과는 차이를 보인다(Fig. 5). 따라서 맥켄지강의 퇴적물들은 주로 (스멕타이트/일라이트)의 비가 낮고, (카올리나이트/녹니석)의 비가 높은 맥켄지강의 영향을 받은 것으로 판단된다.

맥켄지강 퇴적물은 보퍼트해의 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류 때문에 보퍼트해 서쪽 강들의 영향을 받을 수 있다(Fig. 1). 그러나 점토광물 특성을 보았을 때 보퍼트해 서쪽의 강들과는 다르며, 맥켄지강에 가장 비슷하다. 더욱이 맥켄지강은 보퍼트해로 유입되는 강들 중 퇴적물 운반량과 담수 배출량이 가장 크다(Gordeev *et al.*, 1996; Holmes *et al.*, 2002; Rachold *et al.*, 2004). 그러므로 맥켄지강은 알래스카 연안류에 의한 영향보다는 맥켄지강의 직접적인 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 맥켄지강의 퇴적물은 맥켄지강으로부터 떨어질수록 세립화된다(Fig. 3A). 이는 강 하구로부터 멀어지면서 조립질 퇴적물이 감소하고, 세립질 퇴적물은 많아지는 연안 퇴적물의 특징과 일치한다(Olariu and Bhattacharya, 2006).

420 MV

420 MV의 코어는 점토광물의 함량이 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트 순으로 감소한다. 비교 코어는 점토광물 함량이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트 스멕타이트 순으로 차이가 있다(Table 1). 또한, 420 MV는 스멕타이트 함량이 5%에서 10%로 비교 코어의 2%에서 5%와 대조적으로 높으며, 조립질 퇴적물이 3%로 비교 코어보다 높다(Table 1). 조립질 퇴적물, 실트, 점토의 함량은 표층부터 50 cm까지 거의 일정한 경향을 보이지만, 맥켄지강의 퇴적물은 깊이에 따라 입도가 변한다(Fig. 3B).

420 MV에서 S/I × 100의 비는 평균 13(6~16), (카올리나이트/녹니석)의 비는 평균 105(89~113)의 값을 가져, 보퍼트해로 유입되는 강들 중, 맥켄지강

(스멕타이트/일라이트: 9, 카올리나이트/녹니석: 87)에 가장 가깝다. 반면, 비교 코어는 420 MV의 스멕타이트/일라이트와 카올리나이트/녹니석 비의 분포가 구분된다(Fig. 5). 420 MV는 점토광물 중, 일라이트 다음으로 카올리나이트를 많이 함유하고 있으며, 스멕타이트는 비교 코어보다 약 2배 많이 함유한다. 현재까지 보고된 결과에 의하면, 보퍼트해로 유입되는 강 중 카올리나이트가 녹니석보다 많은 함량을 보이는 강이 없다(Table 3).

비교 코어는 420 MV 부근에 위치하지만, Fig. 5에서 점토광물 함량이 맥켄지강의 결과와 유사하다. 이는 맥켄지강으로부터 유출된 퇴적물들이 비교 코어가 위치한 맥켄지 대륙붕 지역까지 영향을 미치고 있음을 의미한다. 최근 수행된 맥켄지 대륙붕 퇴적물에 대한 지화학, 광물학적 연구 또한 맥켄지 대륙붕을 맥켄지강의 영향을 받는 하나의 그룹으로 구분하였으며, 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류에 의하여 공급된 것으로 판단하였다(Gamboia *et al.*, 2017). 따라서 비교 코어는 맥켄지강의 영향을 받았으며, 420 MV 주변 지역까지 맥켄지강의 영향을 받는 것으로 판단된다.

420 MV에서는 조립질 퇴적물 함량이 평균 5%로 비교적 높다. 조립질 퇴적물을 공급할 수 있는 공급원은 해류, 빙하운반 퇴적물(ice rafted debris), MV에 의한 분출 등이 있다(Clark and Hanson, 1983; Yassir, 1989; Baumann *et al.*, 1995; Hebbeln *et al.*, 1998; Spilhagen *et al.*, 2004). 일반적으로 빙하운반 퇴적물은 호수나 해양에서 빙하에 의해 운반되고, 빙하가 녹을 때 퇴적되는 육성 퇴적물로(Kuijpers *et al.*, 2014), 조립질 퇴적물의 함량이 높은 특징을 가진다. 420 MV의 조립질 퇴적물 함량은 비교적 높지만, 동일한 퇴적 작용을 받았을 거라 생각되는 비교 코어의 조립질 퇴적물 함량은 1% 이하로 낮기 때문에 빙하운반 퇴적물의 영향은 제외될 수 있다. 강 퇴적물에 의해 공급되었다면, 거리에 따라 퇴적물이 세립화되며 맥켄지강 퇴적물과 같이 조립질 퇴적물의 함량이 낮아야 한다. 하지만, 420 MV의 조립질 퇴적물의 함량이 맥켄지강의 코어 퇴적물 중 육지에 가장 가까운 ST02보다도 높으므로 강 퇴적물의 공급도 제외될 수 있다. 깊이에 따라 일정한 입도와 보퍼트해로 유입되는 강들과의 점토광물 함량 차이를 통해 조립질 퇴적물이 공급될 수 있는 공급원은 MV의 분출하는 유체에 의한 퇴적물로 유추된다.

420 MV가 있는 지역에서 수행된 탄성파를 이

용한 층서 연구와 해저 MV 분포 연구에 의하면, 보퍼트해 MV는 홍적세 세립질 빙퇴토(glacial till)가 분출하여 재동된 퇴적체인 것으로 보고하고 있어 위의 결과들을 뒷받침하고 있다(Hill *et al.*, 1991; Paull *et al.*, 2007; Batchelor *et al.*, 2013; Blasco *et al.*, 2013; Paull *et al.*, 2015; Gamboa *et al.*, 2017).

ARA08C의 ROV 탐사를 통해 420 MV는 현재도 계속 분출하고 있는 것을 확인하였다(Jin *et al.*, 2018). 기존 연구 결과와 ARA08C 탐사로 보아 420 MV의 깊이에 따라 입도가 변화가 없는 이유는 분출하는 유체에 의해 MV 내에서 위아래의 혼합작용 때문인 것으로 유추된다. 북극의 MV 중, 바렌츠해의 하콘 모스비 MV의 입도분석 결과에서도 깊이에 따라 조립질 퇴적물, 실트, 점토의 함량이 거의 일정한 경향을 보인다(Ginsburg *et al.*, 1999).

결 론

보퍼트해에서 획득한 맥켄지곡 퇴적물 및 420 MV 퇴적물에 대하여, 점토광물과 입도 분석을 통하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 맥켄지곡의 퇴적물의 점토광물 함량은 보퍼트해의 다른 강들보다 맥켄지강의 점토광물 함량에 가깝고, 맥켄지강에서 멀어지며 수심이 깊어질수록 세립화하는 연안 퇴적물의 특징을 보인다. 맥켄지곡의 퇴적물의 기원지는 맥켄지강으로 구분된다.

2) 420 MV는 맥켄지곡과 비교 코어의 퇴적물보다 일라이트 함량이 낮고 스멕타이트 함량이 높다. 조립질 퇴적물의 함량이 높고 깊이별 입도가 일정한 특징을 갖는다. 420 MV의 퇴적물은 MV의 분출에 의해 퇴적되었으며, MV의 분출이 점토광물 함량과 입도에 영향을 준 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 대한민국 해양수산부(MOF, the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea)의 재원으로 한국극지연구소(KOPRI, Korea Polar Research Institute) 과제 PM16050의 지원으로 수행되었다. 시료 준비 및 분석을 도와준 경상대학교 지질과학과 문수인, 정선화, 최재영 학생에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Batchelor, C.L., Dowdeswell, J.A., and Pietras, J.T. (2013) Seismic stratigraphy, sedimentary architecture and palaeo-glaciology of the Mackenzie Trough: Evidence for two Quaternary ice advances and limited fan development on the western Canadian Beaufort Sea margin. *Quaternary Science Reviews*, 65, 73-87.
- Baumann, K.-H., Lackschewitz, K.S., Mangerud, J., Spielhagen, R.F., Wolf-Welling, T.C.W., Henrich, R., and Kassens, H. (1995) Reflection of Scandinavian ice sheet fluctuations in Norwegian Sea sediments during the last 150,000 years. *Quaternary Research*, 43, 185-197.
- Blasco, S., Bennett, R., Brent, T., Burton, M., Campbell, P., Carr, E., Covill, R., Dallimore, S., Davies, E., Hughes-Clarke, J., Issler, D., Leonard, L., MacKillop, K., Mazzotti, S., Patton, E., Rogers, G., Shearer, J., and White, M. (2013) 2010 State of knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development. *Geological Survey of Canada, Open File 6989*, 340p.
- Biscaye, P.E., (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America, Bulletin*, 76, 803-832.
- Bonini, M. (2008) Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy). *Geology*, 36, 131-134.
- Bonini, M. (2012) Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth-Science Reviews*, 115, 121-152.
- Boswell, R. and Collett, T.S. (2011) Current perspectives on gas hydrate resources. *Energy and Environmental Science*, 4, 1206-1215.
- Bredenhoft, J.D. and Hanshaw, B.B. (1968) On the maintenance of anomalous fluid pressures: Thick sedimentary sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 79, 1097-1106.
- Clark, D.L. and Hanson, A. (1983). Central Arctic Ocean sediment texture: A key to ice transport mechanism. In: Molnia, B.F. (ed.), *Glacial-Marine Sedimentation*. Springer, Boston, MA, 301-330pp.
- Dimitrov, L.I. (2002) Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*, 59, 49-76.
- Etioppe, G. (2015) Natural Gas Seepage. *The Earth's*

- Hydrocarbon Degassing. Springer International Publishing, Switzerland, 199p.
- Etiopie, G. and Milkov, A.V. (2004) A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology*, 46, 997-1002.
- Gamboa, A., Montero-Serrano, J.C., St-Onge, G., Rochon, A., and Desiage, P.A. (2017) Mineralogical, geochemical, and magnetic signatures of surface sediments from the Canadian Beaufort Shelf and Amundsen Gulf Canadian Arctic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 488-512.
- Ginsburg, G.D., Milkov, A.V., Soloviev, V.A., Egorov, A.V., Cherkashev, G.A., Vogt, P.R., Crane, K., Lorenson, T.D., and Khutorshkoy, M.D. (1999) Gas hydrate accumulation at the Hakon Mosby Mud Volcano. *Geo-Marine Letters*, 19, 57-67.
- Gordeev, V.V., Martin, J.M., Sidorov, I.S., and Sidorova, M.V. (1996) A reassessment of the Eurasian River input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *American Journal of Science*, 296, 664-691.
- Gretener, P. (1985) The national conference on earth science, Banff, November 5-9, 1984: "Geopressures and Hydrocarbon Occurrences". *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 33, 269-273.
- Guliyev, I.S. and Feizullayev, A.A. (1997) All About Mud Volcanoes. Nafta Press, Baku, 52p.
- Hebbeln, D., Henrich, R., and Baumann, K.-H. (1998) Paleoceanography of the last interglacial/glacial cycle in the Polar North Atlantic. *Quaternary Science Review*, 17, 125-153.
- Hensen, C., Wallmann, K., Schmidt, M., Ranero, C.R., and Suess, E. (2004) Fluid expulsion related to mud extrusion off Costa Rica - A window to the subducting slab. *Geology*, 32, 201-204.
- Hill, P.R., Blasco, S.M., Harper, J.R., and Fissel, D.B. (1991) Sedimentation on the Canadian Beaufort shelf. *Continental Shelf Research*, 11, 821-842.
- Holems, R.M., McClelland, J.W., Peterson, B.J., Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I., Zhulidov, A.V., Gordeev, V.V., and Bobrovitskaya, N.N. (2002) A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1849-1862.
- Jakobsson, M., Grantz, A., Kristoffersen, Y., and Macnab, R. (2003) Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor. *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1443-1455.
- Jakubov, A., All-Zade, A., and Zehnalov, M. (1971) Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR. Publishing House of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, Baku, 256p.
- Jin, Y.K. and Shipboard Scientific Party (2018) ARA08C Cruise Report: 2017 Korea-Canada-USA Beaufort Sea Research Program. Korea Polar Research Institute. 214p.
- Kholodov, V.N. (2002) Mud volcanoes, their distribution regularities and genesis: Communication 1. Mud volcanic provinces and morphology of mud volcanoes. *Lithology and Mineral Resources*, 37, 197-209.
- Kobayashi, D., Yamamoto, M., Irino, T., Nam, S., Park, Y., Harada, N., Nagashima, K., Chikta, K., and Saitoh, S. (2016) Distribution of detrital minerals and sediment color in western Arctic Ocean and northern Bering Sea sediments: Changes in the provenance of western Arctic Ocean sediments since the last glacial period. *Polar Science*, 10, 519-531.
- Koo, H., Lee, Y., Kim, S., and Cho, H. (2018) Clay mineral distribution and provenance in surface sediments of Central Yellow Sea Mud. *Geosciences Journal*, 22, 989-1000.
- Kopf, A.J. (2002) Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40, 2-1-2-52.
- Kuijpers, A., Knutz, P., and Moros, M., (2014) Ice-Rafted Debris (IRD). In: Harff J., Meschede M., Petersen S., and Thiede J. (eds.), *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Springer, Dordrecht, 1-7pp.
- Kvenvolden, K.A. (1988), Methane hydrate-A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*, 71, 41-51.
- Mazzini, A. and Etiopie, G. (2017) Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168, 81-112.
- Mazzini, A., Ivanov, M.K., Parnell, J., Stadnitskaia, A., Cronin, B.T., Poludetkina, E., Mazurenko, L., and van Weering, T.C.E. (2004). Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea: Geochemical characterisation and relation to seeping fluids. *Marine Geology*, 212, 153-181.
- Mazzini, A., Svensen, H., Planke, S., Guliyev, I., Akhmanov, G.G., Fallik, T., and Banks, D. (2009) When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1704-1715.
- Mhammedi, N.A., Moumni, B.E., Hmaid, A.E., Raissouni, A., and Arrim, A.E. (2008) Mineralogical and geochemical study of mud volcanoes in north Moroccan atlantic margin. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2, 387-396.
- Milkov, A.V., Sassen, R., Novikova, I., and Mikhailov,

- E. (2000) Gas hydrates at minimum stability water depths in the Gulf of Mexico: Significance to geohazard assessment. *Gulf Coase Association of Geological Societies Transactions*, L, 217-224.
- Milkov, A.V. (2004) Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there? *Earth Science Reviews*, 66, 183-197.
- Naidu, A.S. and Mowatt, T.C. (1983) Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 841-854.
- Olariu, C. and Bhattacharya, J.P. (2006) Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 212-233.
- Paull, C.K., Dallimore, S.R., Caress, D.W., Gwiazda, R., Melling, H., Riedel, M., Jin, Y.K., Hong, J.K., Kim, Y.G., Graves, D., Sherman, A., Lundsten, E., Anderson, K., Lundsten, L., Villinger, H., Kopf, A.S., Johnson, B., Clarke, J.H., Blasco, S., Conway, K., Neelands, P., Thomas, H., and Cote, M. (2015) Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 3160-3181.
- Paull, C.K., Ussler, W., Dallimore, S.R., Blasco, S.M., Lorenson, T.D., Melling, H., Mediola, B.E., Nixon, F.M. and McLaughlin, F.A. (2007) Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. *Geophysical Research Letters*, 34, L01603.
- Plumley, W.J. (1980) Abnormally high fluid pressure: Survey of some basic principles. *Bulletin of American Association of Petroleum*, 64, 414-422.
- Rachold, V., Eicken, H., Gordeev, V.V., Grigoriev, M.N., Hubberten, H.W., Lisitzin, A.P., Shevchenko, V.P., and Schirmeister, L. (2004) Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. In: Stein, R. and Macdonald, R.W. (eds.), *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Springer, Berlin, Heidelberg, 33-56pp.
- Royer, T.C. and Emery, W.J. (1987) Circulation in the Gulf of Alaska, 1981. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 34, 1361-1377.
- Ruppel C.D. (2011) Methane Hydrates and Contemporary Climate Change. *Nature Education Knowledge*, 3, 29p.
- Ruppel, C.D. and Kessler, J.D. (2017) The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55, 126-168.
- Soloviev, V.A. and Mazurenko, L.L. (2000) Sea floor venting and gas hydrate accumulation In: Max, M. (ed.), *Natural Gas Hydrate. Coastal Systems and Continental Margins*, Vol 5. Springer, Dordrecht, 371-378pp.
- Spilhagen, R., Baumann, K., Erlenkeuser, H., Nowaczyk, N., Nørgaard-Pedersen, N., Vogt, C., and Weiel, D. (2004) Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1455-1483.
- Stabeno, P.J., Reed, R.K., and Schumacher, J.D. (1995) The Alaska coastal current: Continuity of transport and forcing. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C2), 2477-2485.
- Vogt, P.R., Cherkashev, G., Ginsburg, G., Ivanov, G., Milkov, A., Crane, K., Lein, A., Sundvor, E., Pimenov, N., and Egorov, A. (1997) Haakon Mosby Mud Volcano provides unusual example of venting. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78, 549-557.
- Yassir, N.A. (1989) Mud volcanoes and the behaviour of overpressured clays and silts. *Doctoral Thesis, University of London*, 249p.
- Zoporowski, A. and Miller, S.A. (2009) Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1879-1887.

Received February 12, 2019, Revised March 26, 2019, Accepted March 28, 2019, Associate Editor: Yul Roh