

한국해양연구원부설 극지연구소 위탁연구과제 보고서

서북극 척치해 해저퇴적물의 퇴적작용 및  
퇴적환경 복원연구

연구책임자 : 윤 석 훈

2011. 12. 31

제주대학교 산학협력단

# 제 출 문

한국해양연구원부설 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서북극 척치해 해저퇴적물의 퇴적작용 및 퇴적환경 복원연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2011년 12월 31일

연구기관명: 제주대학교 산학협력단

연구책임자: 윤 석 훈

연 구 원: 윤 우 석

고 창 성

조 영 진

## 요 약 문

본 연구에서는 서북극 척치해 천부퇴적층의 퇴적작용 및 퇴적환경을 규명하고, 이 지역 고해양환경 변화 복원에 필요한 해저퇴적물의 퇴적학적 특징들을 제시하고자, 2011년 제2차 북극해 탐사 동안에 척치해 대륙붕에서 취득된 고해상탄성과탐사(SBP) 단면자료로부터 해저퇴적물의 천부층서와 탄성과상을 분석하고, 중력시추 해저퇴적물의 퇴적학적 분석을 실시하였다.

베링해협 북쪽의 척치대륙붕은 대부분 비교적 매끈하고 평탄한 해저면을 보이지만, 국지적으로 성인 미상의 작은 기복이나 경계가 다소 불분명한 넓은 폭의 해저수로가 발달하기도 한다. 최대 약 70m의 투과깊이를 보이는 척치대륙붕 SBP 자료에서 극히 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 뚜렷한 층내 반사면을 기준으로 최대 3개의 층단위가 구분된다. 특히 하부의 층경계면에서는 10m 이상의 깊이를 갖는 수로단면 형태의 침식 지형이 4-5개소에서 발견되기도 한다. 이와 같은 뚜렷한 층내반사면은 해수면 하강에 의한 하천침식이나 대륙빙하의 연장에 따른 빙식이 우세했던 시기에 형성된 것으로 추정된다.

한편, SBP 단면의 고해상 탄성과 특성에 따라 5개의 탄성과상이 구분된다. 탄성과상 IIA는 주로 대륙붕 지역의 최상부 층단위에서 우세하게 나타나며, 국지적으로 대륙사면 지역의 최상부 층단위에서도 기록되는데, (반)원양성 퇴적과 함께 간헐적인 저밀도 세립질 저탁류 또는 밀도류의 퇴적작용의 결과로 해석된다. 확산되어 두꺼운 표층 반사특성을 보이는 탄성과상 IIB-2는 빙하기 대륙붕 지역까지 전진해 있었던 빙상의 기저에서 집적된 빙퇴석층을 나타내는 것으로 추정된다. 탄성과상 IIC는 암설류 퇴적체를 반영하는 탄성과적으로 투명한 음파특성으로서, 대륙사면의 일부 지역에 제한적으로 나타난다. 다양한 높이의 쌍곡선 반사파가 중첩되어 나타나는 탄성과상 IIIA는 주로 기반암의 구조적 변형이나 침식에 의한 사면 협곡, 혹은 화산기원의 불규칙한 지형을 대표하는 것으로서, 경사가 급한 대륙사면 지역에 분포한다. 탄성과상 IIIB는 주로 경사가 다소 급한 외대륙붕이나 대륙사면에서 광범위하게 관찰되는데, 대부분 중력에 의한 퇴적물 질량류(슬럼프 혹은 암설류)에 기인한 것으로 해석된다.

3개의 대륙붕 정점에서 취득된 시추 퇴적물 시료는 육안관찰결과, 대부분 반원양성 퇴적을 지시하는 생물교란 니 퇴적상이 우세하게 나타난다. 그리고 세립질 저탁류의 영향을 지시하는 박층리 니와 균질 니, 그리고 빙산운반 조립입자가 일부 코아와 층준에서 드물게 나타난다. 퇴적상 분석은 향후 X-radiograph과 조직분석 결과가 나오게 되면 좀 더 신뢰할만한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

# 목 차

제1장 서 언 .....	1
제2장 지역 개관 .....	3
2.1 북극해 해저지형 .....	3
2.1.1 개요 .....	3
2.1.2 대륙붕 .....	3
2.1.3 대륙사면과 대륙대 .....	4
2.1.4 심해저평원 .....	6
2.1.5 해령 .....	7
2.2 북극해의 판구조적 진화 .....	8
2.2.1 Eurasian Basin .....	8
2.2.2 Amerasian Basin .....	9
2.3 북극해 탐사의 역사 .....	10
2.3.1 북극해 주변해역 .....	10
2.3.2 북극해 중앙해역 .....	12
2.3.3 시추탐사 .....	14
제3장 고해상 탄성파탐사자료 분석 .....	17
3.1 연구자료 및 탐사장비 .....	17
3.1.1 연구자료 .....	17
3.1.2 탐사장비 .....	17
3.2 분석 방법 .....	18
3.3 분석 결과 .....	19
3.3.1 해저지형 .....	19
3.3.2 천부 층서 .....	20
3.3.3 탄성파상 .....	21
제4장 코아 퇴적물 분석 .....	26
4.1 연구 자료 .....	26
4.2 연구 방법 .....	26
4.3 분석 결과 .....	26
4.3.1 정점 1A .....	26
4.3.2 정점 2 .....	27
4.3.3 정점 3A .....	27
제5장 결 론 .....	29
참고문헌 .....	30
부록 .....	33

## 제 1 장 서 언

최근 북극해는 범세계적인 기후변동과 관련하여 자연환경이 가장 급변하는 지역 중에 하나로 관심을 모으고 있다. 북극해는 다음과 같은 특징들로 인해 세계의 다른 대양들과는 큰 차이를 보이며, 이와 같은 특징들은 북극해 자체의 환경, 전 지구적인 시스템, 그리고 기후 변화에 큰 영향을 미친다(Stein, 2008).

- (1) 세계에서 가장 넓은 대륙과 대륙붕으로 둘러싸여 일종의 ‘지중해’로서, Bering Strait와 Fram Strait를 통하여 태평양 및 대서양과 제한적으로 연결되어 있다.
- (2) 상당한 부분의 해역이 영구적 혹은 계절적으로 해빙에 덮여있다.
- (3) 전세계 하천 유출량의 10%를 차지하는 막대한 양의 하천수가 유입되며, 유입량은 계절적으로 심한 변화가 나타난다.
- (4) 주변 육지는 대부분 영구동토대이다.

아울러 이러한 독특한 특성 때문에 북극해에서의 퇴적작용은 남극대륙 주변의 고위도 일부 해역을 제외한 다른 해양에서와 매우 다른 양상으로 일어나며, 표층 퇴적물의 독특한 특성과 분포는 바로 이러한 차이를 반영한다. 특히, 극지성(polar) 및 아극지성(subpolar) 기후변화와 함께 극빙상(polar ice sheet)의 직접적인 영향을 받는 지역이기 때문에 일반 저위도의 해역에서와는 다른 독특한 해양환경 변화가 일어났으며, 따라서 남극대륙 주변부와 함께 플라이스토세-홀로세 고해양 변화와 기후 변화를 연구할 수 있는 최적의 장소라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 ‘서북극해 지구온난화 규명을 위한 노스윈드-멘델레프해령 해역의 고해양환경변화 정밀복원연구’의 위탁과제로서, 서북극 척치해 천부퇴적층의 퇴적작용 및 퇴적환경을 규명하고, 이 지역 고해양환경 변화 복원에 필요한 해저퇴적물의 퇴적학적 특징들을 제시하고자 한다. 이를 위해 2011년 제2차 북극해 탐사(Fig. 1) 동안에 척치해 대륙붕에서 취득된 고해상탄성과탐사(SBP) 단면자료로부터 해저퇴적물의 천부층서와 탄성과상을 분석하고, 중력시추 해저퇴적물의 퇴적상(조직 및 퇴적구조) 분석을 실시하였다.

이와 같은 연구결과는 학술적으로 플라이스토세 말기 및 홀로세 동안의 북극해의 고해양 환경의 변화를 규명함으로써 향후 지구 기후계의 변동 양상을 가늠하는 데 중요한 자료로 활용할 수 있으며, 기존 북극해 및 인접 지역에 나타난 고기후 변화 기록과 비교를 통해 퇴적학적 프록시를 개발함으로써 고해양환경 연구에 편의성과 정확성을 높이는 데 기여할 수 있다. 아울러 빙하기원 퇴적체에 대한 퇴적모델을 제시함으로써 북극해 다른 지역 해저퇴적층의 해석에 활용할 수도 있을 것이다. 한편으로는 향후 북극해 가스하이드레이트 등 해저자원탐사 및 북극항로탐사에 기본 자료로 활용하는 등 경제적인 효과도

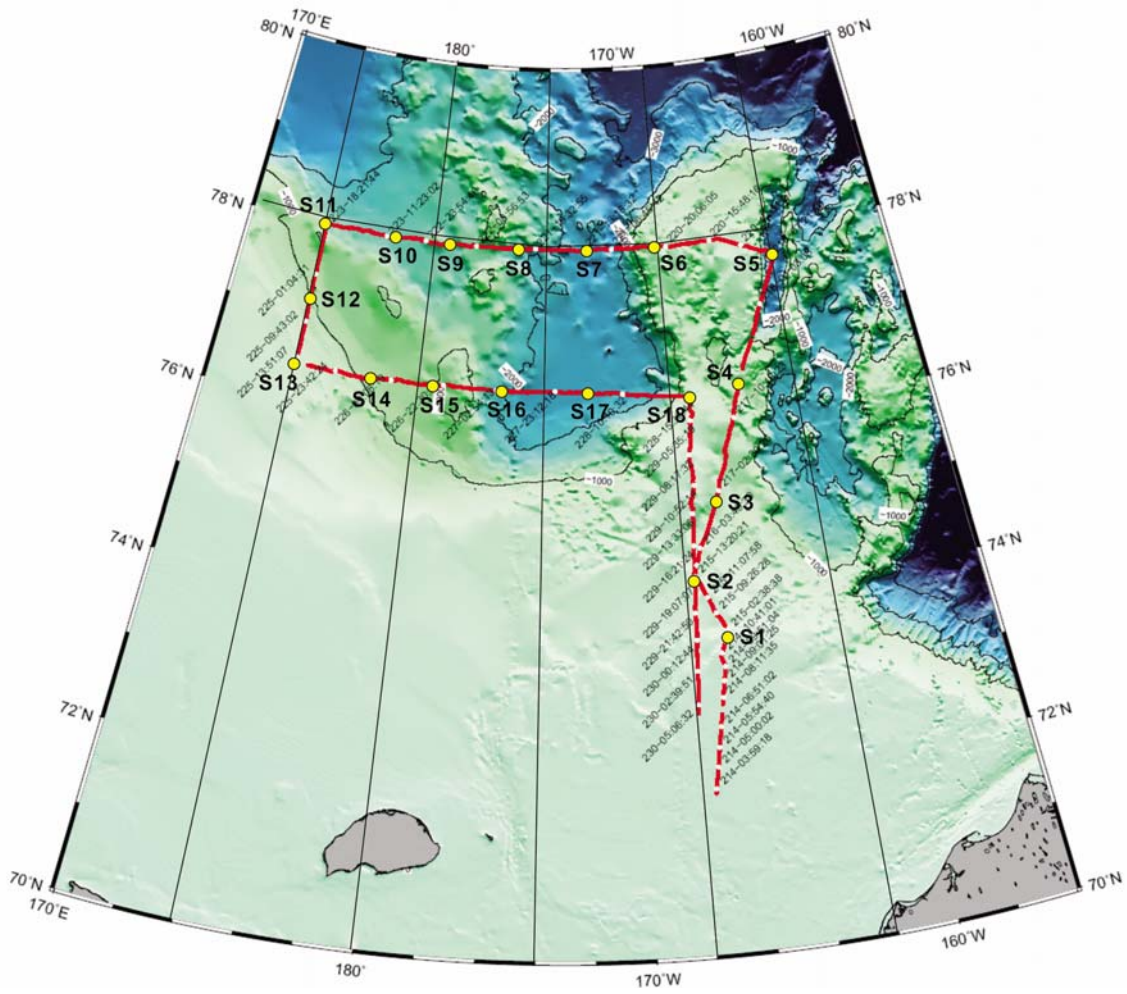


Fig. 1. Location map of the coring sites (dots) and high-resolution seismic profiling (lines) during the expedition of ARA02B in 2011.

기대할 수 있다.

## 제 2 장 지역 개관

### 2.1 북극해 해저지형

#### 2.1.1 개요

북극해 해저지형에 관한 가장 최근의 도면은 IBCAO(International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean) 맵(v.2.23)이다(Fig. 2). 이 도면에 따르면 심해저분지로 이루어진 북극해의 중앙부는 대륙지괴와 천해의 대륙붕으로 둘러싸여 있다. 유일한 대륙의 단절부는 북동 Greenland와 북서 Svalbard 사이의 Fram 해협으로서, 이를 통해 북극해의 심층수는 대서양과 교류되고 있다. 태평양쪽으로는 대륙지각 위의 바다인 Bering 해협을 통해 연결된다. 북극해의 전체 면적은 약  $9.5 \times 10^6 \text{km}^2$ 으로서, 전세계 대양 면적의 약 2.6%, 부피(약  $13 \times 10^6 \text{km}^3$ )로는 1% 미만을 차지한다.(Tables 1, 2) 면적비율에 비해 상대적으로 작은 부피비율은 넓은 면적의 대륙붕 때문이며, 북극해 전체의 평균 수심은 1,361m로 측정된다(Jakobsson et al., 2004).

북극해 자체는 Lomonosov Ridge를 가운데 두고 유라시아쪽의 Eurasian Basin과 북미 대륙과 동시베리아쪽의 Amerasian Basin 등 두 개의 해저분지로 구분된다(Fig. 2). Eurasian Basin은 Lomonosov Ridge와 Barents해, Kara해, Laptev해의 대륙붕에 의해 구획되며, Amerasian Basin은 Lomonosov Ridge와 동시베리아해, Chukchi해, Beaufort해 및 캐나다 북극다도해(Arctic Archipelago)의 대륙붕으로 둘러싸여 있다. Eurasian Basin은 다시 Gakkel Ridge에 의해 Amundsen Basin과 Nansen Basin으로 구분되며, Amerasian Basin은 Alpha-Mendeleev Ridge 복합체를 경계로 Canadian Basin과 Makarov Basin으로 분리된다(Fig. 2).

#### 2.1.2 대륙붕

북극해 주변부에 발달하는 대륙붕은 북극해 전체 면적의 52.7%를 차지하는데(Table 1), 이러한 넓은 대륙붕의 분포는 다른 대양에 비해 매우 특이한 지형특징이다. 그러나 북극해의 대륙붕은 규모와 수심에 있어서 지역에 따라 매우 변화가 심하다(Table 2). 즉, Beaufort해의 대륙붕은 매우 좁고 평균 수심이 124m에 달하지만, 동시베리아해와 Laptev해의 대륙붕은 세계적인 규모의 면적과 각각 58m와 48m 밖에 되지 않는 매우 얇은 수심을 보인다. 북극해 주변해에서 세번째로 넓은 Kara해는 면적이  $927 \times 10^3 \text{km}^2$ 이고 평균수심이 131m인데, 대륙붕의 북쪽으로 수심 약 400m의 대규모 Voronin Trough과 수심 600m의 St. Anna Trough 등 해저협곡이 발달되어 있다. 이러한 협곡들은 대륙붕



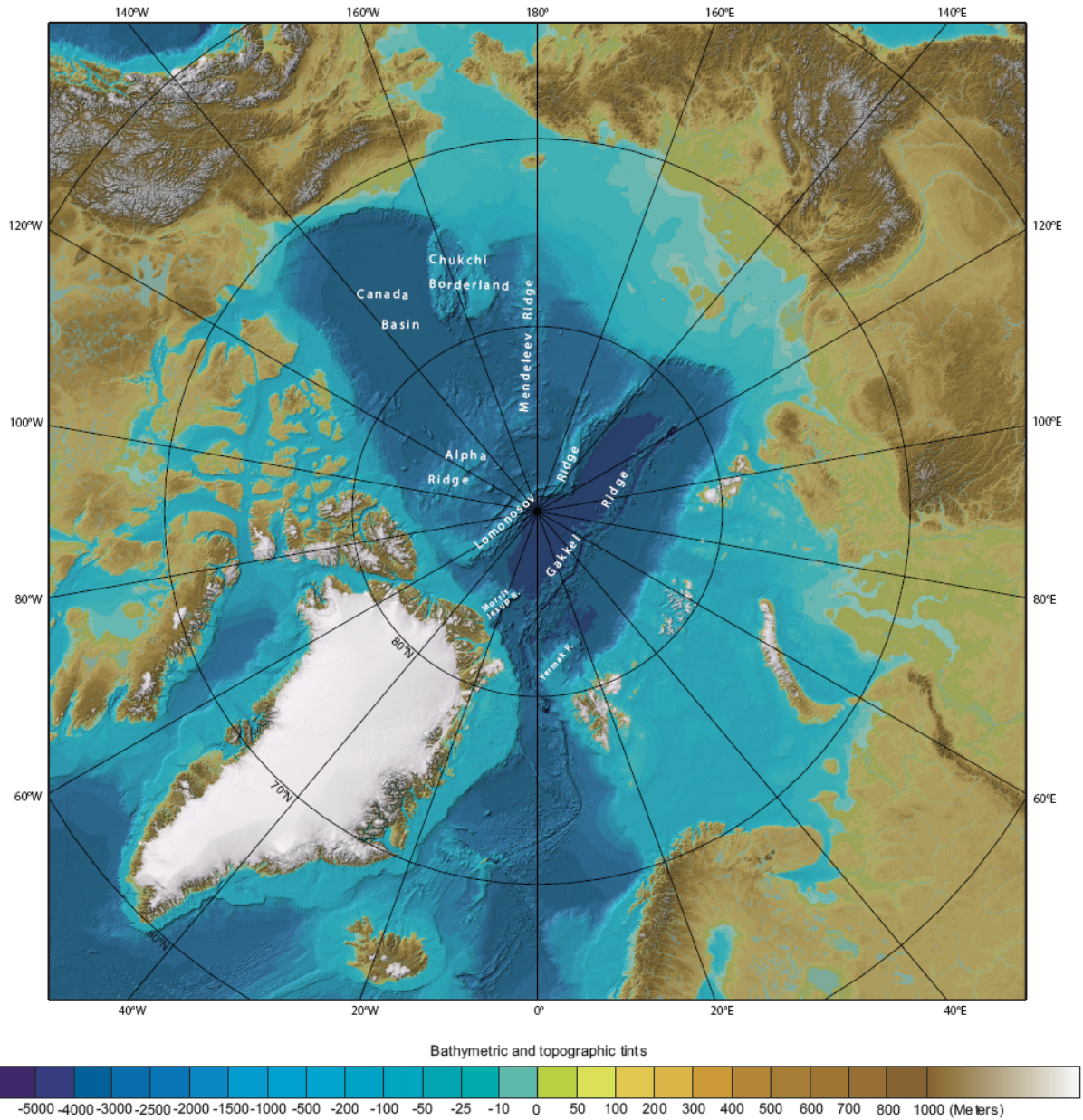


Fig. 2. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (v.2.23). From <http://www.ibcao.org> (data compiled from Jacobsson et al. (2008)).

과 월양 사이의 해수교환 뿐만아니라 퇴적물 운반에도 중요한 역할을 하고 있다. 면적  $1,512 \times 10^3 \text{km}^2$ 의 Barents해는 북극해에서 가장 넓은 주변해로서 대규모의 침하지 (depression)와 해곡 등이 특징적으로 발달한다.

### 2.1.3 대륙사면과 대륙대

대륙붕을 넘어서면 비교적 급한 경사의 대륙사면이 나타나고, 더 나아가면 완경사의 대륙대가 평탄한 심해저평원으로 이어진다. 대륙사면과 대륙대의 면적은 각각 전체 북극



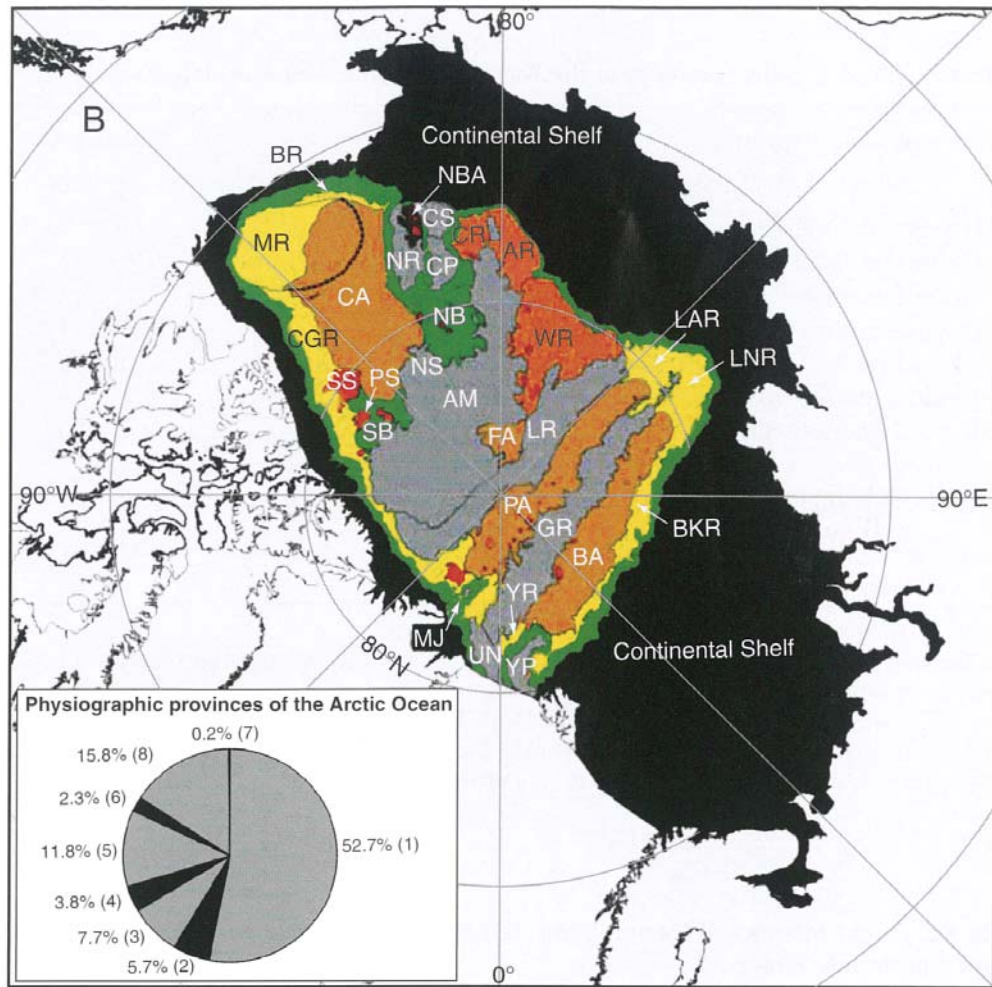
Table 1. Physiographic provinces of the Arctic Ocean and their calculated areas. After Stein (2008).

Physiographic province	Area (1,000 km <sup>2</sup> )	Relative area (%)
1. Continental shelves	5,025	52.7
2. Continental slopes	541	5.7
3. Continental rises	733	7.7
4. Perched continental rises	362	3.8
5. Abyssal plain	1,122	11.8
6. Perched abyssal basins	222	2.3
7. Isolated basins	23	0.2
8. Ridges	1,506	15.8
9. Submarine highlands	(65)	(0.7)
Total (rounded from sum of non rounded original calculations)	9,534	100

해 면적의 5.7%와 7.7%를 차지한다. 그러나 일부 지역에는 심해저평원의 해저보다 수백 내지 1,000m 정도 높은 대륙사면 말단부에 퇴적물담(sediment dam)이 형성되어 있어서 상대적으로 매우 좁은 대륙대가 발달하기도 한다. 이러한 지형을 대륙대 퇴적체프리즘(continental-rise sedimentary prism)이라 부르는데, 서부 Chukchi 대륙봉과 동시베리아 대륙봉의 외해역에 특징적으로 형성되어 있으며, Northwind Ridge, Chukchi Spur, Chukchi Plateau, Mendeleev Ridge, Lomonosov Ridge 등에 의해 Canada 및 Fletcher

Table 2. Area, volume and mean depth in the Arctic Ocean calculated with redefined limits for the constituents seas. After Stein (2008).

Seas	Area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Volume (10 <sup>3</sup> km <sup>3</sup> )	Mean depth (m)
Barents Sea	1,512	302	200
White Sea	85	5	56
Kara Sea	926	121	131
Laptev Sea	498	24	48
East Siberian Sea	987	57	58
Chukchi Sea	620	50	80
Beaufort Sea	178	22	124
Lincoln Sea	64	16	257
Central Arctic Ocean Basin	4,489	12,339	2,748
SNCAA	146	49	338
SNEG	30	4	119
SNWS	6	1	93
Totals and mean depth	9,541	12,990	1,361



- Continental Shelves (1)
- Continental Slopes (2)
- Continental Rises (3)
- Perched Continental Rises (4)
- Abyssal Plains (5)
- Perched Abyssal Basins (6)
- Isolated Basins (7)
- Ridges (8)
- Submarine Highlands (9)

Fig. 3. First-order physiographic provinces defined according to their bottom slope or other criteria (from Jakobsson et al., 2003). After Stein (2008).

심해저 평원과 분리되어 있다. 이렇게 심해저평원보다 100m에서 1,000m 이상 높은 해저에 위치한 대륙대를 ‘perched 대륙대’라 부르며, 분포면적은 전체 북극해 면적의 3.8%를 차지한다.

#### 2.1.4 심해저평원

북극해의 심해저 환경을 이루는 심해저평원은 Eurasian Basin에 속하는 Barents 심해

저평원과 Pole 심해저평원, 그리고 Amerasian Basin에 속하는 Canada 심해저평원과 Pletcher 심해저평원 등 4개 지역으로 구분된다(Fig. 3). 심해저평원에서 퇴적층의 두께는 수 km에 달하는데, 특히 Canada 심해저평원의 하부에는 6-14km 두께의 퇴적층이 집적되어 있는 것으로 알려져 있다. Pole 심해저평원은 북극해에서 가장 깊은 해저지형으로서 수심이 4,000m를 넘는다. 이에 반해 Barents 심해저평원은 주변대륙으로부터 유입되는 대규모 하천을 통해 상당한 양의 육성퇴적물이 유입되며 일부는 제4기 빙하기 동안 Barents-Kara 대륙붕을 덮은 빙하로부터 유입된 퇴적물이 집적되어 있어서 매우 얇은 수심을 보인다. 북극해 전체적으로 심해저평원은 북극해 전체 면적의 11.8%를 차지한다.

Canada 심해저평원의 북쪽에는 심해저평원의 해저보다 높은 곳에 두 개의 작은 심해분지가 발달하는데, Jakobsson (2004)은 이를 ‘perched abyssal basin’이라 명명하였다. 그 중 하나가 Nautilus Basin으로, 수심 3,200-3,800m의 심해평원 위에 수심 2,300m까지 솟은 해저돌출지형이 함께 발달하는 불규칙한 해저평원의 형태를 보이며, 다른 하나는 Stefansson Basin으로 수심 3,000-3,500m 범위의 해저면과 수심 2,000m까지 솟은 독립된 해저돌출지형이 특징적으로 나타난다. 이러한 perched abyssal basin은 북극해 전체면적의 2.3%를 차지한다(Table 1, Fig. 3).

### 2.1.5 해령(submarine ridge)

북극해에서 해령이 차지하는 면적비율은 15.8%이다. 주요 해령으로는 Gakkel Ridge, Lomonosov Ridge, Alpha-Mendeleev Ridge 등이 있다. 현재에도 활성적 해저확장이 진행되는 Gakkel Ridge는 Fram 해협을 통하여 북극해로 이어지는 북대서양 중앙해령(North Atlantic Mid-Ocean Ridge) 시스템의 연장으로 알려져 있다. 북위 81°20'N, 서경 120°45'W Laptev해 주변부에 인접한 Gakkel Ridge의 중앙부 열곡(axial valley)은 북극해에서 가장 깊은 해저로서 수심이 5,243m에 달한다. 북극해를 Eurasian Basin과 Amerasian Basin으로 양분하는 경계인 Lomonosov Ridge는 약 56Ma에 해저확장에 의해 유라시아 대륙주변부로부터 분리되어 나온 것으로서, 현재에는 그린란드 북부 주변부에서부터 북극해를 가로질러 New Siberian Islands 외해의 대륙붕까지 분포한다. 이 해령의 정상부는 700m 이하의 수심을 보이기도 하는데, 북극해 해양순환에 매우 중요한 영향을 미친다. 수심 1,000m 이하의 해령 중심부는 플라이스토세 후기에 빙하(ice grounding)나 이와 관련된 심해류의 영향으로 광범위한 침식을 받은 것으로 추정된다.

한편, 북극해에서 가장 큰 규모의 해령은 Amerasian Basin에 발달하는 Alpha-Mendeleev Ridge로서, 수많은 해저협곡과 돌출지형들이 수심 >2,000-740m 범위에 발달하면서 매우 복잡한 지형특성을 보인다. 이와 함께 북극해에는 대륙붕에 연결

된 소규모의 해령시스템이 많이 발달되어 있는데, Northwind Ridge, Chukchi Spur-Chukchi Plateau 복합해령, Yermak Plateau, Morris Jessup Rise 등이 이에 속한다(Fig. 3).

## 2.2 북극해의 판구조적 진화

북극해는 매우 다른 특성과 진화과정을 거친 수많은 복잡한 지형과 구조들로 둘러싸여 있다. 일반적으로, 지질구조들은 세가지 유형들로 구분될 수 있다: (1) 중생대 후기와 신생대 기간 동안에 형성된 얇은 해양 분지; (2) 고생대 후기 이래로 침강하여 형성된 깊은 퇴적분지들이 분포하는 대륙붕과 대륙 저지대; (3) 고기의 대륙순상지들과 그 사이의 습곡대로 구성된 대륙 기반암(Fig. 4). 한편, 북극해는 연대와 지구조적 진화에 따라 크게 Amerasian Basin과 Eurasian Basin으로 구분된다. 이들 분지들의 판구조적 진화를 정리해보면 다음과 같다.

### 2.2.1 Eurasian Basin

Eurasian Basin의 기원과 진화는 비교적 잘 알려져 있다. Heezen and Ewing(1961)이 대서양중양해령 시스템이 북대서양에서 북극해로 연장된다는 것을 밝힌 이후에, 1,800km 이상의 연장성을 보이는 Lomonosov Ridge가 기원적으로 Eurasian 대륙주변부로부터 떨어져 나온 대륙조각이었으며 해저 확장에 의하여 분리된 것으로 추정되어 왔다. 광역 항공지자기 자료에 의하면, Gakkel Ridge의 남쪽과 북쪽의 분지에 해저확장에 의한 지자기 이상이 존재하며, 해저확장의 실질적 중심은 Eurasian Basin의 중심부에 위치한다. 아울러, 해저확장 관점에서의 지자기 이상 해석과 지자기 연대 대비를 통하여, Eurasian Basin의 지구조적 진화가 노르웨이-그린란드 해의 형성과 밀접한 관계가 있는 것으로 제안되고 있다. 이러한 대비에 따르면, 해저 확장은 팔레오세 후기의 chron 24~25 사이에 Eurasian Basin에서 시작되었을 것으로 추정되며, 평균 확장 속도는 1~2cm/yr로 매우 느렸던 것으로 보인다.

Nansen Basin과 Amundsen Basin을 가로지르는 다중채널 탄성과 단면의 해석에 따르면 이들 분지에 집적되어 있는 두꺼운 퇴적층들은 모두 팔레오세 이후에 퇴적된 것이다. Nansen Basin에서는 4.5km의 최대두께를 갖는 퇴적층이 Barents Sea 대륙주변부 부근에서 발견되며, Gakkel Ridge로 갈수록 점차 두께가 감소한다. 반면, Amundsen Basin에 집적되어 있는 퇴적층의 두께는 1.7~2.0km로 상대적으로 얇게 나타난다. 이처럼 Nansen Basin에 훨씬 더 두꺼운 퇴적층이 분포하는 이유는 Eurasian 대륙으로부터 하천을 통하여 막대한 양의 퇴적물이 공급되기 때문이다.



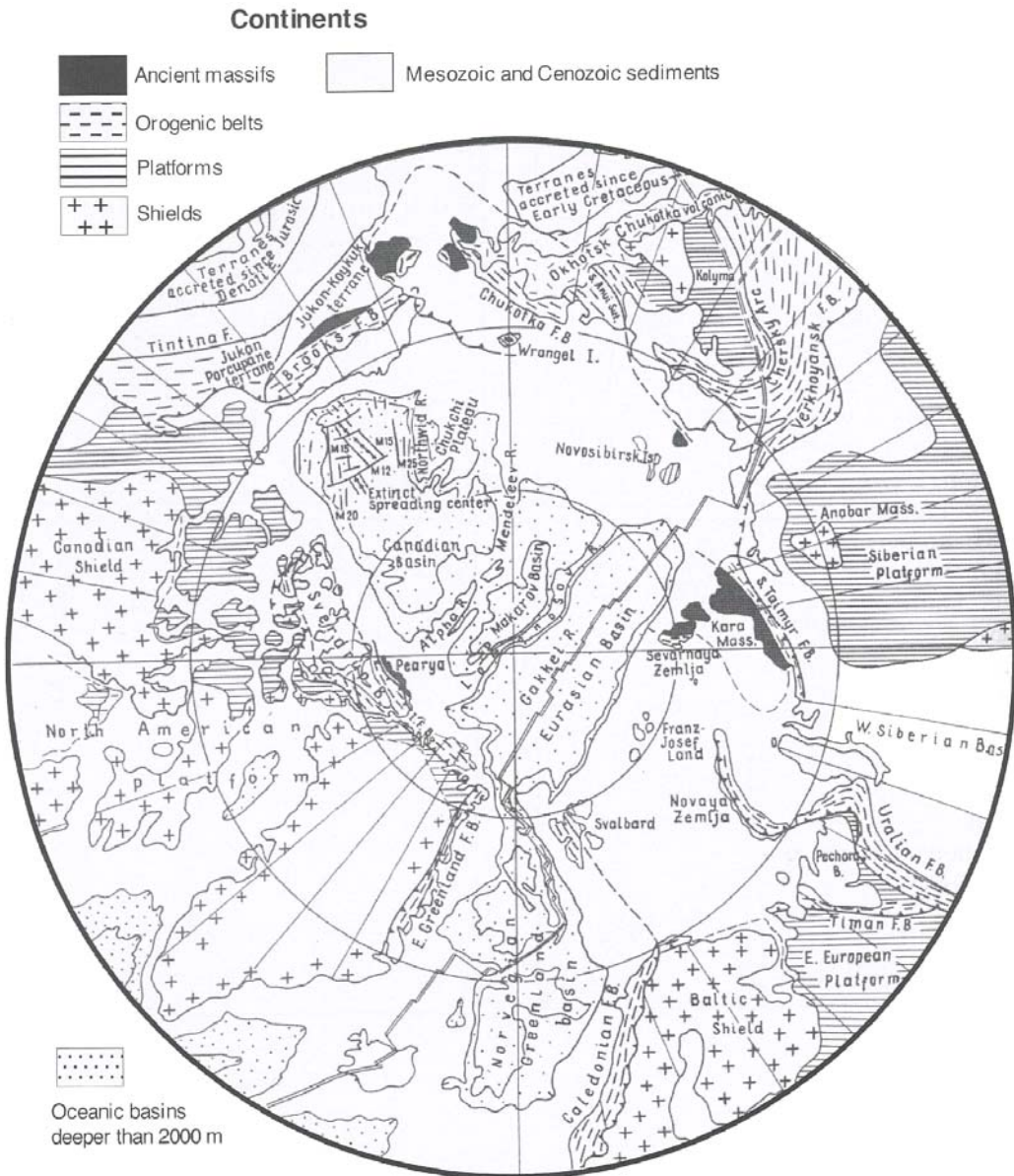


Fig. 4. Main geological structures of the Arctic Ocean and surrounding continents. After Stein (2008).

### 2.2.2 Amerasian Basin

Amerasian 분지는 Eurasian Basin에 비해 자료의 부족으로 분지의 기원과 진화에 대해 거의 알려진 없고 추측에 근거한 내용이 많다. 특히, Amerasian Basin과 그 subbasin(Canada and Makarov basin) 및 해령(Alpha and Mendeleev ridges)의 연대와 특성에 대한 상세한 정보는 지질학적 및 지구물리학적 자료가 부족하여 거의 알려져 있지 않다. 다만 알려진 범위에서, 가장 오래된 북극 심해 분지인 Canada Basin은 백악기에 해저가 확장하면서 형성되었으며, Canada Basin의 형성 이후 혹은 형성기간 동안, Alpha-Mendeleev Ridge와 Makarov Basin이 형성되었다. 지루/지구(horst and graben)

로 이루어진 화산암의 해령 위에는 0.5~2km 두께의 퇴적층이 집적되었다. 이 해령의 지자기 이상은 국지적으로 다소 불규칙하지만, 일반적으로 해령의 세부지형과 잘 부합된다.

Alpha-Mendeleev Ridge의 기원에 대한 가설로서는 (1) 대륙 기원; (2) 이전의 확장 중심; 혹은 (3) 열점기원 등이 제안되고 있다. Alpha-Mendeleev Ridge에 대한 자료로는 주로 미국의 유빙내 관측정점인 T-3과 Canadian CESAR 탐사에 의한 탄성과 반사법 탐사자료와 퇴적물 시료들이 있다(Jackson et al., 1985). 보다 최근(1998년)에, 러시아 핵 쇄빙선 Arktika호와 독일의 RV Polarstern호가 공동으로 Alpha Ridge의 중심부를 조탐사하였다. 이 탐사를 통해 총 320km 길이의 다중채널탄성과 자료가 취득되었는데, 퇴적층의 속도는 1.6~2.7km/sec이며 두께는 500~1,200m 범위에서 변화를 보이는 것으로 밝혀졌다. 기반암 위에 정합적으로 집적되어 있는 퇴적층은 일반적으로 두 개의 층단위로 구분되는데, 하부 층단위는 백악기로, 상부 층단위는 신생대로 추정되고 있다. 한편, 기반암에서의 탄성과 속도는 4.3~6.7km/sec의 범위를 보이고 있어서 해양지각의 존재를 지시하는 것으로 해석되고 있다. 아울러 중력코어링에 의하여 얻어진 현무암 시료로 볼 때, 적어도 Alpha Ridge의 서부 지역은 해양 기원이라는 것에 대하여 거의 의심의 여지가 없다. 최근에는 채취된 현무암에 대한  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대측정 결과 약 82Ma로 후기 백악기를 지시한다.

## 2.3 북극해 탐사의 역사

### 2.3.1 북극해 주변해역(Arctic marginal seas)

북극해에 대한 최초의 과학적 탐사는 1773년 Captain C.J. Phipps의 주도로 두 척의 범선을 이용하여 실시되었다. 원래 계획은 북극점을 목표로 하였으나, Spitsbergen 섬의 바로 북쪽에서부터 거대한 해빙과 빙산들을 만나게 되면서 북진이 어려워졌고, 그래서 주로 Greenland 근처에서부터 White Island까지의 해빙말단부를 따라 탐사가 이루어졌다(Weber and Roots, 1990). 당시 탐사의 주요 결과들로는 최초의 북극곰에 대한 과학적 기재(Ursus maritimus Phipps), West Spitsbergen 해류와 East Greenland 해류의 최초 측정, 최초의 북극 해수의 수심별 온도, 염분 측정, 그리고 Spitsbergen 최북단과 Greenwich 사이의 중력차 측정 등이 알려져 있다.

이후 19세기에 들어오면서 북극해의 자연환경에 대한 체계적인 조사활동들이 시작되었다. 1821~1824년 최초의 Barents Sea의 표층퇴적물들에 대한 상세한 조사가 러시아 과학자인 F.P. Litke에 의하여 이루어졌고, 1868년에는 독일인 Carl Koldewey는 ice margin의 특징을 연구하기 위하여 Fram Strait 해역을 탐사하였다(Thiede, 1996). A. E. Nordenskjold는 스웨덴인과 러시아인으로 구성된 Vega 탐사대를 이끌고 1878년부터

1879까지 시베리아 연안을 따라서 Tromso로부터 Bering Strait까지 항해하였다. 이 탐사기간 동안, 전 항로를 따라 수심측정이 이루어졌으며, 후에 'Northeast Passage'라 불리는 White Sea에서 Bering Sea의 천해 항로를 개척하였다. 1882년과 1883년에는 네덜란드의 Varka 탐사대가 남부 Kara Sea에서 철-망간 단괴들과 표층 퇴적물들의 분포에 대한 초기 정보를 획득하였다(Kulikov et al., 1999).

북극해 연구에서 국제적 과학협력사업의 시점은 '제1차 국제극지의 해(First International Polar Year (IPY) (1882~1883년))' 사업이었다(Weber and Roots, 1990). 이 협력사업의 주요배경은 북극이라는 거대한 지역의 지구물리학적 현상들이 단일 국가의 노력만으로는 규명될 수 없기에 좀더 조직화 된 국제적 노력이 필요하다는 것이었다. 이 사업에 따라 12개국이 참여하여, 13회의 북극탐사와 2회의 남극탐사가 이루어지게 되었다. 이러한 과학적 탐사를 이루었다는 것 이외에도 제1차 IPY 사업의 성과는 국제 과학 협력을 위한 관례를 구축하였다는 것이었다. 이러한 노력은 제2차 IPY사업(1932-1933년)과 '국제 지구물리학의 해(GPY: 1957-1958년)' 등의 사업으로 계속 이어지게 된다.

북극해에서의 대규모 연구 활동들은 Barents, White, and Kara seas에서, 제2차 세계대전 이전의 20세기 상반기에도 계속되었다. 1920년대에 Russian Arctic의 해저퇴적물들에 대한 체계적인 탐사가 시작되었으며, 암석, 입도, 퇴적물들의 광물, 그리고 화학적 조성에 대한 많은 자료들이 수집되어 논문과 보고서로 출간되었다. 제2차 세계대전 이후, Russian Arctic에서의 연구는 다시 강화되었으며, 표층 퇴적물의 특징들을 다루는 최초의 종합적 논문들이 그 후 10년 동안에 걸쳐 발표되었다. 또한 1960년대 이래로 시추퇴적물 시료들이 중력 코어링과 피스톤 코어링에 의하여 획득될 수 있었으며, 이를 이용하여 현세뿐만 아니라, 플라이스토세 후기의 퇴적물들까지도 연구할 수 있게 되었다. 또한 1962년과 1964년 사이에서, Chukchi, East Siberian, 그리고 Laptev seas에서 많은 수의 퇴적물 코어들이 미국 해안경비대 소속 해양조사선인 Northwind와 Burton Island에 의하여 취득되었다. 1970년대에는 러시아 대륙붕 해역 연구에서 지구물리학적 탐사가 수행되었다. 1981년에는 "Atlas of grounds of the Arctic Ocean"가 출간되었는데, 이 책자에는 해저퇴적물들의 물리화학적 특성뿐만 아니라 광물학적·지화학적 특성에 대한 많은 도면들이 포함되었다.

1990년대에는 러시아의 북극해 대륙붕 지역에서 유전이 개발되면서 해저 환경과 지생태학 연구 등 다학제간 연구들이 활발하게 수행되었다. 특히, 1991년과 1994년 사이에, 연구기관과 산업체가 공동으로 Kara Sea를 탐사하였으며, 1993년의 Kara Sea 탐사기간 동안에는 Ob와 Yenisei 염하구 뿐만 아니라 Kara Sea의 생태계와 퇴적작용에 대한 많은 양의 새로운 자료들이 취득되어 논문으로 발표되었다.



이와 같이 지난 수 십 년간 방대한 양의 퇴적학적, 지화학적, 고생물학적 자료들이 러시아 과학자들에 의하여 수집되었지만, 대부분의 자료들은 러시아어로만 출간되었고 서방세계로 거의 알려지지 않았다. 1980년대 말, 구소련이 몰락하면서 러시아 기관들은 북극의 국제적인 탐사에 적극 동참하게 되었으며, 그 동안 축적한 경험과 기술장비 및 자료들을 세계 여러 연구기관에 제공하기 시작하였다. 그 이후, 수많은 공동 연구와 탐사활동이 유라시아 대륙주변부와 이웃한 심해 분지들에서 수행되었다. 일례로, 독일-러시아 공동프로그램인 "Laptev Sea System"과 "Siberian River Run-off-SIRRO"가 Laptev Sea(1994년부터 현재까지)와 Kara Sea(1997-2003년)에서 각각 실시되었다. 이러한 연구프로그램들의 전반적인 목표는 고해상도의 하천유출량 변화와 생물, 화학, 지질학적 작용들 간의 관계, 현세(Holocene)의 기후 변화에 대한 빙하의 영향, 그리고 영구동토대의 역학적 현상 연구 등이다.

Beaufort Sea와 Chukchi Sea 등을 포함하는 캐나다와 알래스카 북극해 지역에서도 1970년 이래로 수많은 탐사가 수행되었으며, 그 결과 많은 양의 해양학, 지구물리학, 그리고 지질학적 자료들이 수집되었다(Weber and Roots, 1990). 특히 최근에는 대형 국제 공동 연구들이 시작되었는데, 대표적인 예로 'Arctic Shelf-Basin Interactions(SBI) Program'을 들 수 있다(Grebmeier and Harvey, 2005).

### 2.1.2 북극해 중앙해역(Central Arctic Ocean)

북극해 중앙해역에 대한 최초의 탐사는 1893년, 노르웨이의 유명한 탐험가인 Fridtjof Nansen에 의해 이루어졌는데, Nansen은 새로 건조된 극지 조사선 Fram호를 이용하여 1896년까지 북극해 동부의 해빙지역을 탐사하였다. 유빙(pack ice)을 따라 표류하면서 이루어진 이 탐사는 북극해 중앙해역에서 이루어진 최초의 과학적 탐사이며 극지 항해기술의 대전환점이 되는 중요한 사건이었다. 이 탐사를 통해 처음으로 빙하로 덮힌 북극해 내부의 신뢰할만한 과학적 자료를 성공적으로 수집할 수 있었다. 당시 시료를 이용하여 Böggild(1906)는 최초로 "North Polar Sea"로부터 심해 퇴적물의 특성을 기재하여 보고할 수 있었다. 더우기, Nansen이 제작한 북극해 수심도는 거대한 유라시아 및 북미 대륙과 그린랜드로 둘러싸인 심해저 분지가 북극해 아래에 형성되어 있으며, 이 심해저는 북대서양과 심해통로를 통해 연결되어 있다는 사실을 밝히게 되었다.

그러나 Nansen의 Fram호 탐사(1893~1896) 이후로 북극 중앙해역에서의 연구는 저위도지역의 대양에 대한 연구 뿐만 아니라 북극 주변해 연구활동들에 비해서도 상대적으로 더디게 진행되었다. 그 주된 이유는 일반조사선을 이용하여 영구적으로 얼음으로 덮여있는 북극해지역으로 항해하기 위한 기술적인 문제와 물류(보급)의 어려움을 당시에는 해결하기가 매우 곤란했기 때문이다. 따라서 1950년대까지는 러시아 과학자들만이 정기적

으로 얼음섬(북극에서 빙붕들에서 떨어져 나온 크고 두꺼운 sea ice과 북극 분지를 가로질러 표류하는 pack ice)을 이용하여 기초적인 해양학, 기상학, 지구물리학적 정보만을 수집할 수 있었다. 이후 1960년대에 미국과 캐나다 연구기관들도 새로운 지구과학적 자료를 수집할 목적으로 얼음섬을 이용한 많은 연구프로젝트들을 수행하기 시작하였다(Jokat, 2004). 미 해군성(ONR)의 북극과학프로그램의 일환으로 Arctic Ice Dynamics Joint Experiment(AIDJEX), FRAM I-IV, the Marginal Ice Zone Experiment(MIZEX), the Leads Experiment(LEADEX), the Coordinated Eastern Arctic Experiment(CEAREX), the Sea Ice Mechanics Initiative(SIMI), the Surface Heat Budget of the Arctic Experiment(SHEBA)와 같은 많은 국제공동연구가 시작되었다. 빙하 알베도와 구름 알베도의 피드백 과정들을 규명하기 위한 SHEBA 프로그램의 수행 중에는 캐나다 쇄빙선 Des Groseilliers호가 유빙에 갇혀 14개월 동안 유빙과 함께 표류하기도 하였다(Colon and Curtin, 2004).

지구물리적 조사들은 얼음 섬에서 수행된 이러한 많은 연구프로그램들 중 일부였으며, 이를 통해 해저퇴적물의 분포와 해저의 일반적인 구조에 관한 정보들을 제공할 수 있었다. 이와 동시에, 선박을 통해 접근하기 어려웠던 북극해 중앙해역에 대해서는 미국과 러시아 연구기관들이 장거리운항 항공기를 이용하여 항공 지자기탐사를 수행하였다. 또한 표류 관측점과 잠수함에서 취득된 개략적인 수심자료와 함께 지자기 자료를 통해 북극해의 광역구조를 알게 되었고, 해령과 분지에 대한 개략적인 지구조적 해석이 가능하게 되었다(Jokat, 2004).

또한 얼음섬으로부터 700개 이상의 짧은 퇴적물 코어들이 수 년간에 걸쳐 획득되었는데, 이를 통해 북극해 해저퇴적물의 입도, 광물학적, 미고생물학적, 그리고 지화학적 특징들과 층서학 대하여 집중적으로 연구되었다. 1987년 이전에 나온 북극해 중앙해역의 고환경적인 역사와 퇴적물 특징들에 대한 정보들은 대부분 이러한 퇴적물 코어들로부터 획득된 것이었다. 1980년대 말에는 북극해의 지질 및 고해양학에 대한 정보들이 종합적으로 요약되어 출간되었다(Herman, 1989; Bleilund and Thiede, 1990; Grantz et al., 1990).

1993년과 1999년 사이, **SCIENCE ICE EXERCISE**(SCICEX) 프로그램에서는 미해군과 해양탐사팀과의 전례없는 공동탐사가 실시되었는데, 총 8회의 해저탐사가 USS Pago(SCICEX-93), USS Cavalla(SCICEX-95), USS Pagy(SCICEX-99), USS Archerfish(SCICEX-97), 그리고 USS Hawkbill(SCICEX-98 and SCICEX-99) 등의 미해군 잠수함에 의해 수행되었다. 이 프로그램은 ice canopy의 분포와 시료채취; 북극 해수의 물리적, 화학적, 생물학적 특성; 해저지형; 그리고 천해역의 특성을 규명하기 위하여 계획된 것이었다. SCICEX 프로그램을 통해 특히 북극해와 전지구적인 현상들에 대한

이해가 한층 더 진일보하게 등, 대부분의 자연과학분야에 큰 기여를 하였다. 대표적인 성과로서, Gakkel Ridge에서의 젊은 화산들의 발견, 북극해로 확장하는 두꺼운 빙봉들의 증거, 그리고 오늘날 얕아지는 해빙에 대한 증거와 증층수들의 온도와 순환 방식 변화를 들 수 있다. 더 나아가, 다년간에 걸쳐 취득된 SCICEX 수심 자료들은 모두 종합되어 'International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean(IBCAO)'을 완성하는데 큰 역할을 하였다.

조사선박을 이용한 얼음으로 덮힌 북극해 중앙부에 대한 탐사는 1980년대에 들어오면서 비로소 시작되었다. 스웨덴에서 수행한 YMER 80-expedition(Fram Strait, Yermak Plateau, Nansen Basin 등을 탐사) 이후, 해양학적, 생물학적, 지질학적, 그리고 지구물리학적 탐사목적에 갖는 최소 15개의 주요 국제적 탐사들이 북극해 해저분지에서 수행되었다(Table 3). 1991년 탐사동안, 재래식 쇄빙선으로서는 처음으로 Oden호와 Polarstern호가 협력하여 북극점까지 도달하는데 성공하였으며, 교란되지 않은 표층 및 저층(롱코아) 퇴적물 시료들이 Nansen 분지, Amundsen 분지, Makarov 분지, Gakkel 해령, Lomonosove 해령, Morris-Jesup 해령 및 Yermak 대지 등지로부터 획득되었다. 최근에는 IPY 2007/2008 사업의 일환으로 2007년과 2008에 탐사활동이 수행되었다. 이들 탐사동안 취득된 자료와 퇴적물 시료에 대한 다학제간 연구를 통해 북극해 고환경과 제4기 동안의 변화양상에 대한 이해가 한층 증진되었다.

### 2.3.3 시추탐사

해저퇴적물 코아시료를 취득하는데 사용하는 중력코아러와 피스톤코아러는 대부분 해저면하 20m 상부로 제한되기 때문에 지난 수 십 년간 북극해 초기의 해양환경변화에 대한 정보는 공백으로 남아있었다. 따라서 장기간에 걸친 북극의 고환경 및 지구조적 역사를 규명하기 위해서는 시추(drilling)에 의한 퇴적물 시료확보가 관건이다.

제4기 이전에 해당하는 퇴적물 시료의 획득을 위하여 지난 수 십 년간은 주로 북극 주변해역들에서 이루어진 석유탐사 시추에 의존하여 왔다. 이러한 맥락에서, 서부 유라시안 대륙붕 해역들 안에 러시아 드릴링 시추 프로그램 또한 중요하다고 할 수 있다. 예를 들어, 1980년대 동안, AMURB(Arctic Murmansk Government of Exploration Drilling)와 Scientific Production Association "Arcticmorneftegazrazvedka"은 Barents Sea에서 수많은 심부시추를 하였다. 그와 동시에, AMIGE(Arctic Marine Engineer-Geological Expedition)에서는 Barents Sea와 Kara Sea에서 수 백개의 시추를 실시하여 제4기 이전 퇴적층의 두께, 연대, 그리고 조성에 대한 정보를 획득했다. 그리고 최근에 유라시안 북극해에서 얻은 많은 양의 자료들은 DB화되어 PANGAEA repository 온라인 사이트(<http://www.pangaea.de>)에 공개되어 있는데, 주로 Kara Sea와 Barents Sea의 시추를

Table. 3. List of selected geoscientific icebreaker cruises to the central Arctic Ocean. After Stein (2008).

Year of expedition and area	Ship and country	Reference (Cruise Report or related paper)
1980, Nansen Basin, Yermak Plateau	<i>Ymer</i> (Sweden)	Schytt et al. (1981); Boström and Thiede (1984)
1987, Nansen Basin, Gakkel Ridge	<i>Polarstern</i> (Germany)	Thiede (1988)
1988, Chukchi Plateau	<i>Polar Star</i> (USA)	Phillips et al. (1992)
1991, Nansen/Amundsen Basin/Lomonosov Ridge	<i>Oden/Polarstern</i> (Sweden/Germany)	Anderson and Carlsson (1991) and Fütterer (1992)
1993, Canada Basin/Chukchi Plateau	<i>Polar Sea</i> (USA)	Grantz et al. (1998)
1993, Nansen Basin	<i>Polarstern</i> (Germany)	Fütterer (1994)
1994, Transarctic (Canada Basin/Lomonosov Ridge)	<i>Polar Sea/Louis St. Laurent</i> (USA/Canada)	Aagaard, Barrie, and Carmack (1996) and Wheeler (1997)
1995, Amundsen/Makarov Basin/Lomonosov Ridge	<i>Polarstern</i> (Germany)	Rachor (1995)
1996, Lomonosov Ridge/Makarov Basin	<i>Oden</i> (Sweden)	Backman et al. (1997)
1998, Alpha Ridge/Lomonosov Ridge	<i>Polarstern/Arktika</i> (Germany/Russia)	Jokat (1999) and Jokat et al. (1999)
2000, Mendeleev Ridge	<i>Akademic Fedorov</i> (Russia)	Kaban'kov, Andreeva, Ivanov, and Petrova (2004)
2001, Nansen Basin/Gakkel Ridge (AMORE)	<i>Healy/Polarstern</i> (USA/Germany)	Thiede (2002)
2001, Nansen Basin/Lomonosov Ridge	<i>Oden</i> (Sweden)	Grönlund (2001)
2004, Yermak Plateau	<i>Polarstern</i> (Germany)	Stein (2005)
2004, Lomonosov Ridge (ACEX)	<i>Vidar Viking/Oden/Sovetskij Soyuz</i> (IODP)	Backman et al. (2006)
2005, Transarctic (HOTRAX)	<i>Healy/Oden</i> (USA/Sweden)	Darby, Jakobsson, and Polyak (2005)
2007, Eur. Cont. Marg/Nansen Basin/Lomo-, Alpha Ridge	<i>Polarstern</i> (Germany)	Schauer (2008)
2007, Lomonosov Ridge off Greenland (LOMROG)	<i>Oden/50 Let Pobedy</i> (Sweden/Russia)	Jakobsson et al. (2007b)
2008, East Siberian Sea/Alpha-Mendeleev Ridge (scheduled)	<i>Polarstern</i> (Germany)	Chief scientist: W. Jokat/AWI

통해 취득된 제3기, 백악기, 쥐라기, 트라이아스기 지층들의 입도, 중광물, 점토광물, 그리고 유기탄소 등의 자료를 접할 수 있다.

북극해 주변해역에서의 중요한 순수 학술적 시추활동은 1993년 7-9월에 노르웨이-그린란드-아이슬란드 해역 및 Fram 해협/Yermak 대지 지역에서 이루어진 ODP에 Leg 151 탐사이다. 이 탐사활동을 위하여 ODP 시추선인 Joides Resolution호가 핀란드 쇠빙선 Fennica의 도움을 받아 최초로 해빙이 분포하는 북반구 고위도(High Northern

Latitudes) 지역을 향해하여 탐사를 성공적으로 마무리하면서 북극해 학술탐사에 역사적인 이정표가 되었다.

가장 최근의 북반구 고위도 지역에서의 시추활동은 2004년 IODP Expedition 302의 일환으로 수행된 ACEX(Arctic Coring Expedition) 활동이다. ACEX의 성공적인 완료와 함께, 북극 연구의 새로운 시대가 시작되었다. 처음으로, 영구히 얼음으로 덮인 북극해에서 과학적 드릴링이 수행되었고, 87°N과 88°N 사이 북극점에 가까운 Lomonosov Ridge의 정상부에서 제4기, 신제3기, 팔레오세, 그리고 백악기에 집적된 480m 길이의 퇴적물 코어를 획득하였다.

IODP Expedition 302는 두 가지 이유에서 획기적인 성공을 거두었다고 볼 수 있다. 첫째, 가장 큰 기술적 도전은 Lomonosov Ridge 위의 육중한 해빙들 속에서 드릴링과 코어링을 하는 동안, 시추선의 위치를 유지했다는 것이다. 즉, 강력한 두 척의 쇄빙선을 이용하여 시추점으로 접근하는 유빙들을 분쇄하여 시추선을 보호하도록 하는 치밀한 계획(ice-management strategy)을 세우고 이를 실현함으로써 영구적으로 덮여있는 북극해 중앙해역에서 성공적인 과학적 드릴링이 가능하다는 것을 입증하였다. 둘째, 이 탐사 결과로 나온 학술정보들은 북극해 연구에 이정표가 될 정도로 중요하며, 아직도 진행 중인 시료분석이 마무리 되면 북극해 기후변동사와 그 중요성에 대한 새로운 사실들을 제공할 것으로 기대된다.

그러나 이러한 지난 수 십 년간에 걸친 북극해 연구의 주요 성과에도 불구하고, 북극해의 판구조적 진화역사, 장기 및 단기적인 고해양학 및 고기후학적 역사에 관한 정보는 세계의 다른 어느 대양들보다도 아직도 많이 뒤쳐져 있으며, 대부분의 북극해 지역은 여전히 연구되지 않은 상태로 남아 있다.

## 제 3 장 고해상 탄성파탐사자료 분석

고주파수(2~12 kHz)의 음파를 사용하는 고해상 천부탄성파 탐사는 천부지층의 퇴적물 특성, 내부구조, 층서 등을 거시적으로 알려주는 매우 유용한 방법이다(Damuth, 1975, 1978; Chough et al., 1985; Pratson and Laine, 1989). 고해상 천부탄성파 단면에서 관찰되는 반사면들은 퇴적물의 밀도와 음파속도 차이에서 연유하며 이들은 퇴적물 입도, 물성, 조직 및 형성시기를 반영한다(Damuth and Hayes, 1977; Damuth, 1980; Chough et al., 2002; Lee et al., 2002). 표층 반사면의 특성과 음파 투과깊이는 표층 및 저층 퇴적물 구성과 해저면의 지형에 대한 정보를 제공하며, 지층의 형태(morphology)은 퇴적체의 거시적인 퇴적 작용에 대한 정보를 제공한다(Damuth, 1978; Chough et al., 1997; Shinn et al., 2007). 따라서 고해상 탄성파 탐사에서 얻어진 음향 특성은 제4기 후기동안 형성된 천부(또는 최상부)지층의 퇴적물 특성, 형태 및 퇴적작용을 이해하는데 기초자료로 이용된다(Damuth, 1975, Pratson and Laine, 1989; Chough et al., 1997, 2002; Lee et al., 2002; Shinn et al., 2007).

### 3.1 연구자료 및 탐사장비

#### 3.1.1 연구자료

천부퇴적층의 고해상탄성파 특성 분석에 사용된 자료는 2011년 8월에 실시된 제2차 북극해 탐사 동안에 척치해 대륙붕과 사면을 남북으로 가로지는 측선(Fig. 5)을 따라 취득되었다. 음향신호는 해저면 하 최대 70m 정도까지 투과되어 나타난다.

#### 3.1.2 탐사장비

고주파수 고해상 천부탄성파 탐사장비는 1960년대 후반에 개발되어 현생 해양환경의 지질학적 연구에 활발하게 이용되고 있다(Damuth, 1975, Pratson and Laine, 1989; Chough et al., 1997, 2002; Lee et al., 2002; Shinn et al., 2007). 1960년대 후반에서 1980년대까지 활용된 초기의 고해상 천부탄성파 탐사 장비는 3.5 kHz의 음파를 사용하였다. 1980년대 후반~1990년대 초반에 초기의 장비를 개선하고자 2~10 kHz의 음파대역을 사용하는 Chirp 방식의 장비를 개발하였다(Schock et al., 1989; LeBlanc et al., 1992). 이 방식의 장비는 2~10 kHz의 음파대역을 동시에 내보내고 해저에서 반사된 음파 중에 2~10 kHz의 음파대역만을 필터링해서 수신한다. 이러한 방식은 기존의 3.5 kHz의 음파를 이용하는 장비보다 음파의 투과깊이를 증가시키고 해상도를 향상시켰다.

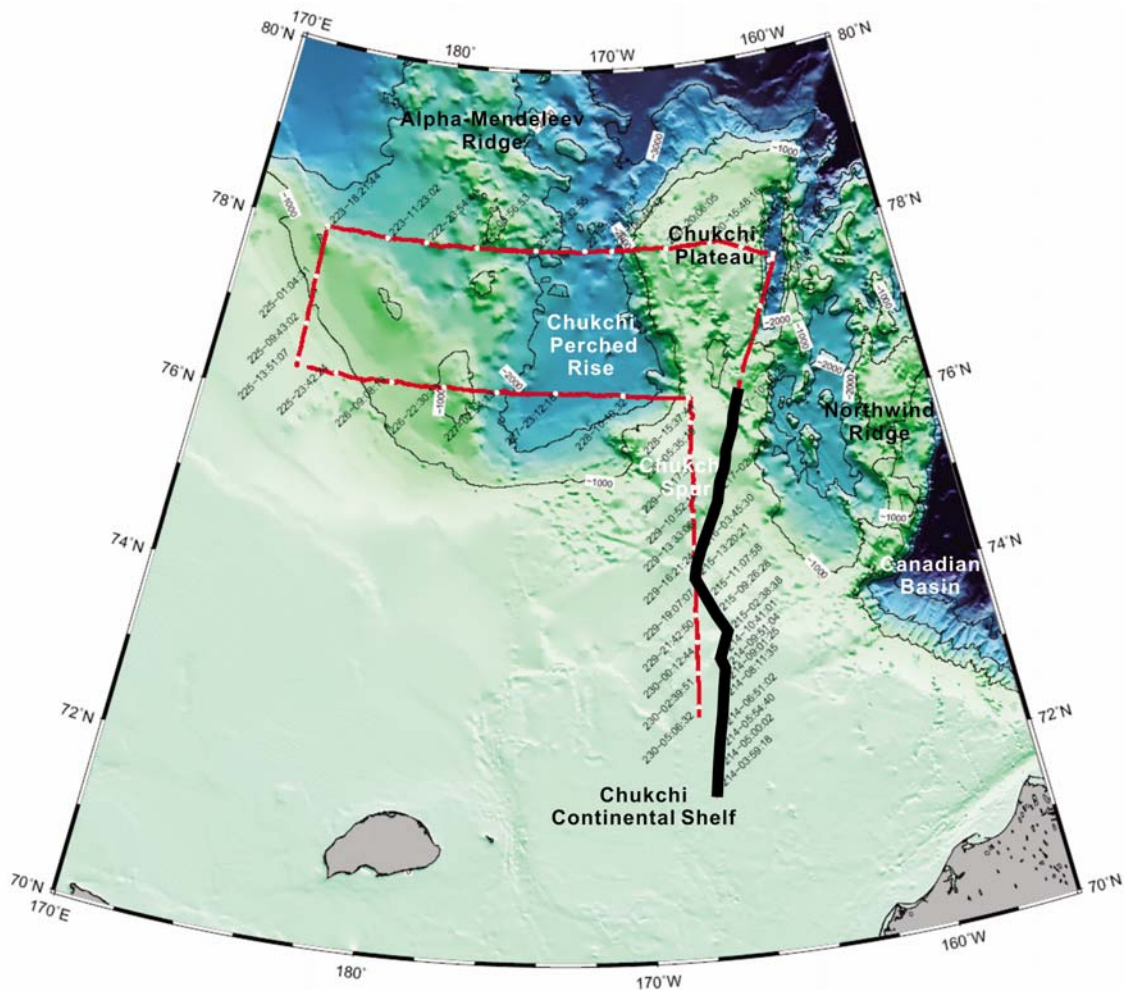


Fig. 5. Location map showing the trackline (a thick line) of SBP profiles analyzed in this study.

고해상 탄성과 탐사 장비는 장착 방식에 따라 마운트(mount) 형태와 토잉(towing) 형태로 나뉜다. 마운트 형태는 음파송·수신기를 조사선의 기저에 영구적인 형태로 장착하고, 토잉 형태는 음파송·수신기를 배의 뒤쪽에서 끌고 다닌다. 끌고 다니는 토잉 형태는 파도의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 토잉 형태보다 배의 기저에 장착된 마운트 형태에서 획득되는 자료의 질이 훨씬 좋다.

### 3.2 분석 방법

고해상 탄성과 탐사에 의해 기록되는 반사파의 음향학적 특성(echo character)은 일반적으로 해저 표층(bottom)과 그 하부의 심층(subbottom)에서 오는 반사파로 구분되는데, 이들 반사파들의 명확성(clarity) 또는 반사강도, 측면연속성, 형태, 그리고 해저지형



등을 기준으로 하여 탄성파상이 분류된다. 분류된 음향상의 자세한 음향특성과 형태를 기술하고 지리적인 분포를 확인한 후에 각 음향상에 대한 형성 작용에 관한 해석을 한다. 이 과정에서 시추퇴적물 자료가 있으면 이를 해석에 활용한다. 분류된 음향상의 경계 위치를 파악하여 지도에 음향상 분포도를 작성한다.

이미 1970년대 이후 표준화된 고해상 탄성파상의 특징들이 여러 연구자(예, Damuth and Hayes, 1977; Damuth, 1978, 1980; Chough et al., 1985)에 의해 발표되어 고해상 탄성파자료의 체계적 분석에 이용되어 왔다. 이렇게 분류된 각각의 탄성파상은 평면도에 그 분포범위가 도시되고, 기존 퇴적학적 연구결과와 현장에서 채취된 시추퇴적물 시료의 분석을 통해 얻어진 결과와 비교함으로써, 이러한 고해상 반사파 특성을 야기시키는 퇴적층의 기원(퇴적 메커니즘, 퇴적물 조직, 퇴적환경 등)이 해석된다.

### 3.3 분석 결과

#### 3.3.1 해저지형

베링해협 북쪽의 척치대륙붕은 세계적으로 가장 넓은 폭을 갖는 시베리아 대륙붕의 일부로서, 점차 북쪽으로 깊어지며 대륙붕단은 수심 150~300m 범위에 위치한다(Fig. 6). 대륙붕 해저의 표면은 비교적 평탄하고 매우 완만한 기울기를 갖으며, 국지적으로 성인 미상의 작은 기복이나 경계가 다소 불분명한 넓은 폭의 해저수로가 발달하기도 한다(Fig. 5).

조사지역에서 대륙붕단은 척치대지(Chukchi Plateau)로 연결되는데, 척치대지는 평균 수심은 700m 내외이며, 북북서-남남동 방향의 장축은 약 470km, 단축은 약 180km이다. 척치대지의 동쪽에는 거의 평행한 방향으로 노스윈드해령(Northwind Ridge)가 발달하고 있다. 노스윈드해령은 척치대지에 비해 폭이 2/3 정도로 좁고 표면지형이 더 불규칙한 특징을 보인다.

노스윈드해령은 동쪽으로 캐나다분지(Canadian Basin)와 접하고 있는데 최대수심은 약 3,800m에 이르며, 비교적 평탄한 심해저의 특성을 보인다. 그러나 캐나다쪽 대륙붕과 인접한 대륙사면에는 수많은 협곡들이 발달하고 있다. 한편, 척치대지의 서쪽은 Chukchi Perched Rise와 Alpha-Mendeleev Ridge system이 접하고 있어 다소 복잡하고 불규칙한 해저지형을 이룬다.

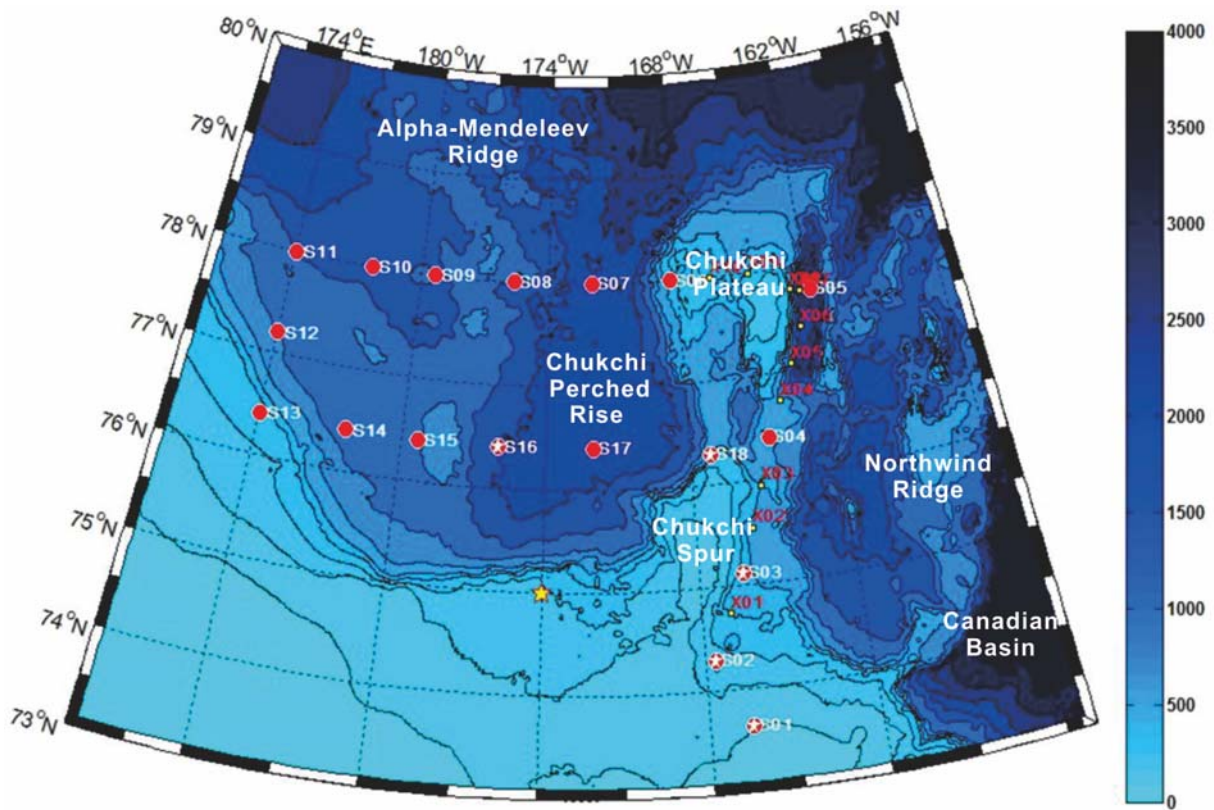


Fig. 6. Physiographic map of the study area.

### 3.3.2 천부 층서

최대 약 70m의 투과깊이를 보이는 SBP 자료에서 극히 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 뚜렷한 층내 반사면을 기준으로 얇은 수심의 내대륙붕에서는 3개(하부로부터 층단위 I, II, III)(Fig. 7A), 수심이 깊은 외대륙붕과 사면에서는 2개의 층단위(하부로부터 층단위 II, III)가 구분된다(Fig. 7B). 수심이 얇은 내대륙붕에서 주로 인지되는 하부의 층경계면은 음향반사강도와 형태가 지역에 따라 비교적 심한 변화를 보이는데, 전반적으로 다양한 규모의 침식에 의한 기복들이 잘 나타난다. 특히 10m 이상의 깊이를 갖는 수로단면 형태의 침식지형이 4-5개소에서 발견되기도 한다(Fig. 7A). 상부 층경계면은 대륙붕 지역에서 비교적 기복이 작고 평탄하며 다소 확산되어(prolonged) 나타나는 음향반사특성을 보이지만, 점차 수심이 깊어지면서 반사면의 기복이 점차 증가하여 크고 작은 낙타등(hummock) 모양의 기복들이 중첩되어 나타나는 특성을 보인다.

이와 같은 뚜렷한 층내반사면에 의해 구분되는 층단위들은 현재 연구단계에서 그 기원이나 의미를 정확히 해석하기는 곤란하지만, 해수면 하강에 의한 하천침식이나 대륙빙하의 연장에 따른 빙식이 우세했던 시기를 반영하는 것으로 추정해볼 수 있다.

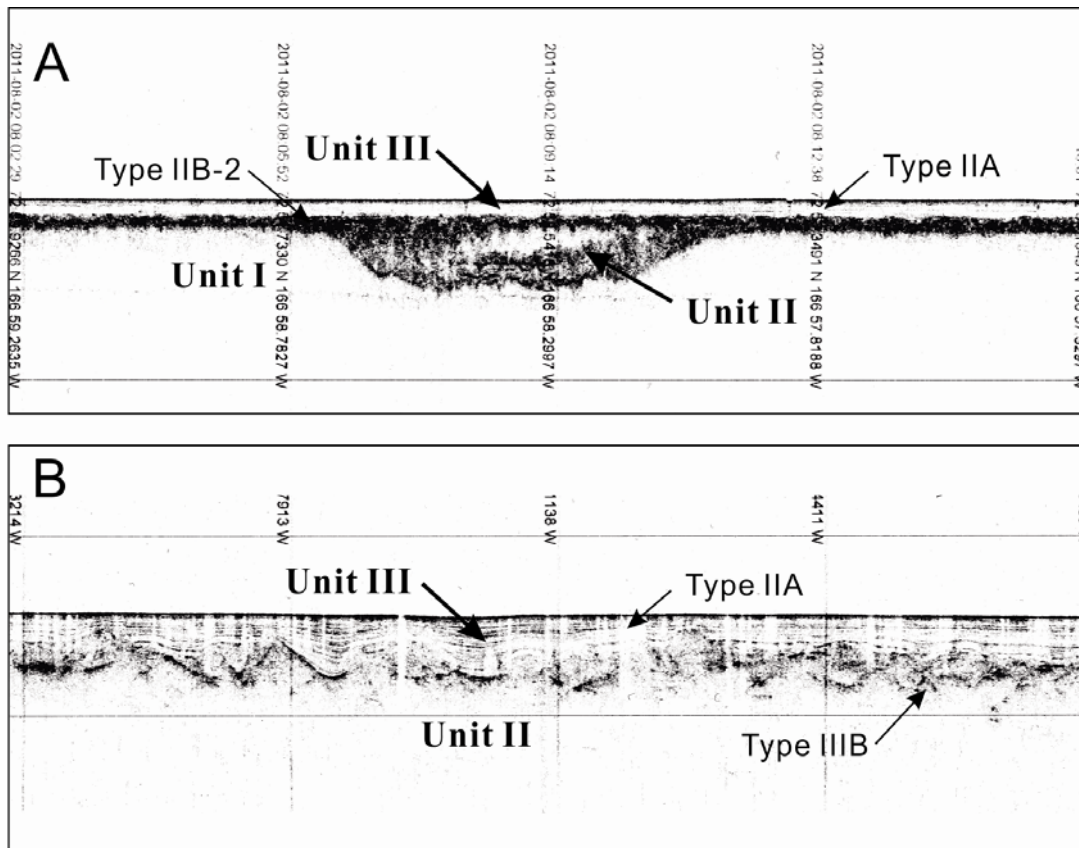


Fig. 7. SBP profiles from the inner (A) and outer (B) continental shelf showing stratigraphic units and seismic facies (echo types).

### 3.3.3 탄성파상(seismic facies)

#### 탄성파상 IIA

탄성파상 IIA는 약간 확산(semi-prolonged)되어 두껍게 나타나는 측면연속성이 양호한 해저표층 반사파와 그 하부 수 십 m에 걸쳐 나타나는 다수의 평행한 내부 반사파를 특징적으로 보인다(Figs. 7, 8). 내부 반사파의 형태는 표층 반사파와 동일하지는 않으며 반사면의 연속성이 다소 약하고 약간 확산되어 있는 경우도 있다. 내부 반사파의 측면연속성은 다소 불량하여 불연속적으로 나타나는 부분도 있다. 이와 같은 탄성파상은 주로 대륙붕 지역의 최상부 층단위(III)에서 우세하게 나타나며(Fig. 7), 국지적으로 대륙사면 지역의 최상부 층단위에서도 발견된다(Fig. 8). 내대륙붕 지역의 해저(표층반사파)는 거의 평탄하고 매끈하지만, 수심이 깊어지는 외대륙붕으로 갈수록 다소의 굴곡(undulation)을 보이며, 대륙사면 지역에서는 부분적으로는 침식되어 불규칙하게 나타나기도 한다.

서로 평행한 표층 및 내부 반사파는 퇴적물이 해저면을 따라 침전하면서 해저지형을

피복(draping)하였음을 의미하며, 내부 반사면의 발달은 입도, 밀도, 굳기 등 물리적 특성이 서로 다른 퇴적층이 교호하고 있음을 반영한다. 일반적으로 이러한 탄성과상은 해저지형을 정합적으로 피복하는 (반)원양성 퇴적과 함께 간헐적인 저밀도 세립질 저탁류 또는 밀도류의 퇴적작용의 결과로 알려져 있다(Damuth, 1978, 1980; Mullins et al., 1979; Yoon et al., 1991).

### 탄성과상 IIB-2

탄성과상 IIB-2는 전체적으로 확산되어 두껍게 나타나는 해저표층 반사과를 보이지만, 해저표면에 높이 수 m 이하의 작은 기복이나 낙타등 모양(hummocks)의 돌출부가 나타나며, 국부적으로 약간의 불규칙한 굴곡을 보이거나 소규모 침식 흔적이 관찰되기도 한다(Fig. 7A). 이러한 탄성과상은 조사지역 대부분의 층단위 I, II에서 광범위하게 관찰된다.

대륙붕에 폭넓게 분포하며 소규모의 돌출부나 침식 흔적으로 보이는 탄성과상 IIB-2는 빙하기 대륙붕 지역까지 전진해 있었던 빙상의 기저에서 집적된 빙퇴석층을 나타내는 것으로 추정된다. 표층반사과의 확산 정도는 다르지만 유사한 표면형태를 보이는 탄성과상(IA)이 남극 브랜스필드 해협 주변의 대륙붕과 킹조지섬의 맥스웰만에서 보고되어 빙퇴석층으로 해석된 바 있다(윤 등, 2002). Damuth(1978)도 노르웨이 북부 대륙붕에서 이와 유사한 표면지형 특성을 보이는 탄성과상(IA-2)을 보고하였으며, Holvedahl and Sellevoll(1972)은 동일지역에서 시추퇴적물을 분석하여 빙하에 의해 퇴적된 빙퇴석층으로 해석하였다. 일반적으로 확산된 반사과는 해저 표면에 소규모 불규칙한 기복이 우세하게 분포하는 지역에 흔히 나타나는데, 이들 불규칙한 기복들은 탄성과 탐사 시 음파를 산란시켜 매우 확산된 표층 반사과를 기록하는 주원인이 된다(Ewing et al., 1973; Damuth, 1980). 특히 빙퇴석층의 경우, 표면의 불규칙한 빙식구조나 노출된 조립질 암설의 작은 기복들이 음파의 확산을 야기할 것으로 추정된다.

### 탄성과상 IIC

탄성과상 IIC는 내부 반사과가 없는 음향학적으로 투명한 퇴적체의 특징을 반영한다(Fig. 8). 그러나 표층반사과는 명확도나 형태에 있어서 비교적 다양한 특성을 보이는데, 일반적으로는 수 m에서 십 수 m의 높이를 갖는, 비교적 규칙적으로 중첩하는 쌍곡선 형태의 반사과나 다소 확산된 특성의 반사과들을 포함한다. 탄성과상 IIC는 주로 대륙사면에 국지적으로 나타나는데, 탄성과상 IIIB와 점이적으로 연결되어 나타난다.

탄성과상 IIC에서와 같이 내부반사면이 없이 음향학적으로 투명하고 표면에 소규모 불규칙한 돌출지형이 발달하는 경우는 일반적으로 암설류(debris flow)에 의해 집적된 퇴

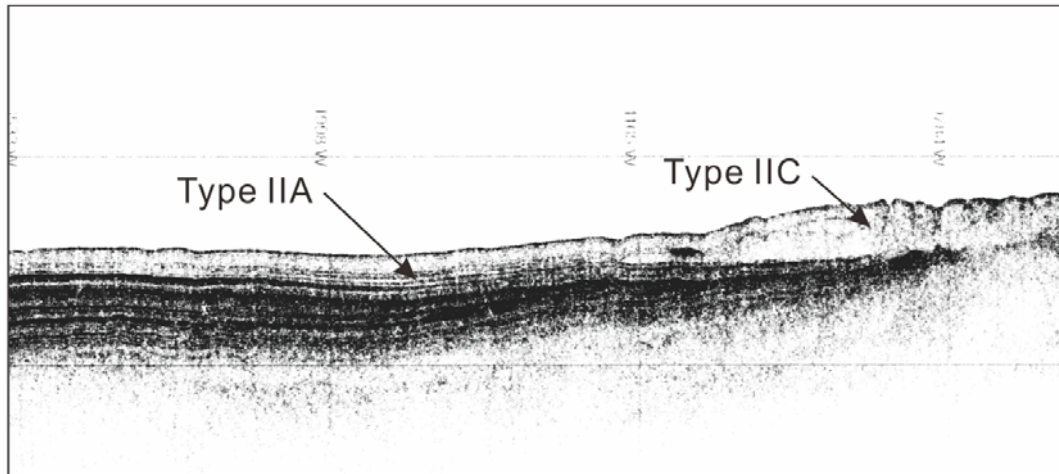


Fig. 8. SBP profile from the continental slope showing type IIA and IIC seismic facies.

적층으로 해석된다(Embley, 1976; Damuth and Embley, 1981; Piper et al., 1985). 탄성과 투명성은 내부에 층리가 발달됨이 없이 균질하게 퇴적물이 분포하고 있음을 반영하며, 이는 암설류가 발달하는 동안 전단변형(shear deformation)과 주변 해수와의 혼합으로 인하여 암설류로서 재동되는 퇴적층의 내부 층리가 소멸된 결과이다(Middleton and Hampton, 1973; Embley and Jacobi, 1977; Nardin et al., 1979). 또한 퇴적체의 표면에 나타나는 소규모 쌍곡선형태의 표층반사파와 확산 반사파(diffused echo)는 암설류가 집적되는 동안 퇴적체의 표면에 발달한 다양한 퇴적구조에 의한 것으로 추정된다(Embley, 1976; Damuth, 1980; Yoon et al., 1991).

### 탄성과상 IIIA

탄성과상 IIIA는 뚜렷하고 측면연속성이 매우 양호한 해저표층 반사파가 특징이며, 해저면 아래의 내부 반사파는 없거나 일정구간에 걸쳐 반사신호가 확산되어 나타나는 특징을 보인다(Fig. 9). 이러한 탄성과상이 나타나는 해저의 지형은 평탄하거나 약간 불규칙하며, 때로는 높이가 다양한(수-수십 m) 여러 개의 쌍곡선 반사파(hyperbolic reflector)가 불규칙하게 중첩되어 나타나는 매우 기복이 심한 지형특징을 보이기도 한다. 이 탄성과상은 대륙사면의 급경사 지역이나 돌출지형의 사면에서 특징적으로 나타난다.

불규칙하게 중첩하는 쌍곡선 반사파는 기복이 매우 심한 불규칙한 해저지형을 반영하는데, 대서양 중앙해령의 해저산, 단구대(fracture zone) 등 주로 화산암 기반의 불규칙한 해저나 침식이 활발하게 일어나는 대륙사면의 해저협곡이나 대륙대 등에서 보고되고 있다(Damuth, 1978; Pratson and Laine, 1989). 한편 단단한 기반암의 경우에는 일반적

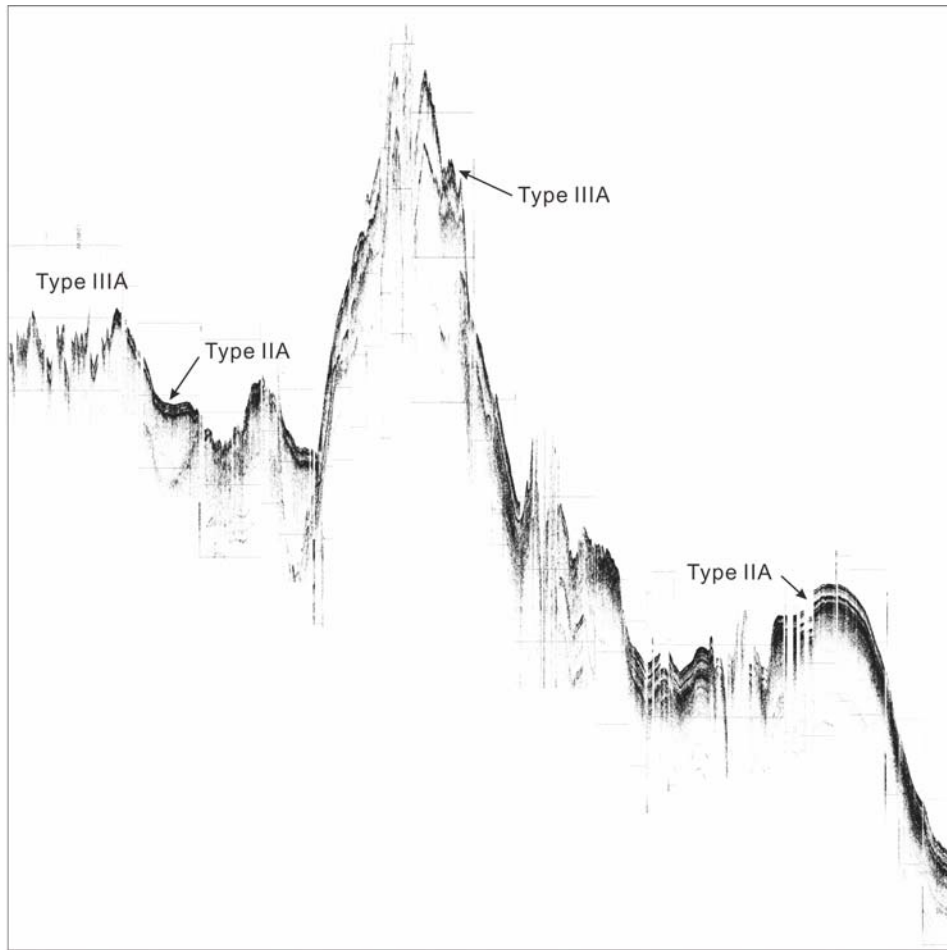


Fig. 9. SBP profile from the continental slope showing type IIA and IIC seismic facies.

으로 탄성파상 IA에서와 같은 심층 반사면이 없는 확산되지 않는 뚜렷한 표층 반사파만이 기록된다. 하지만 기반암 표면에 소규모 불규칙한 기복, 예를 들면 현무암질 화산암인 경우 불규칙한 다공질 특성, 로피구조(ropy structure)와 같은 용암의 흐름구조, 자생각력암(autobreccia) 등에 의한 기복들이 흔히 발견되며, 이들은 음파를 산란시켜 매우 확산된 표층 반사파를 기록하는 주원인이 될 수 있다(Ewing et al., 1973; Damuth, 1980).

### 탄성파상 IIIB

탄성파상 IIIB는 약간의 높이 차이를 보이는 쌍곡선 반사파나 낙타등 모양의 반사파가 다소 증첩되거나 독립적으로 나열되어 나타나는 특징을 보인다(Fig. 7B). 이와 같은 돌출형태의 표면반사파는 비교적 뚜렷하고 확산되어 있지 않으나, 지역에 따라 다소 확산되어 나타나기도 한다. 돌출 반사파의 높이는 대부분 10m 이하로 측정된다. 이러한 반사파 특성은 탄성파상 IIC에서와 유사하거나 규모가 다소 크며, 서로 연결되어 나타나기도

한다. 경사가 다소 급한 외대륙붕이나 대륙사면에서 광범위하게 관찰된다.

탄성파상 IIIB는 다수의 침식 또는 퇴적 구조가 일정한 간격으로 두고 근접하여 발달되어 있는 해저에서 특징적으로 기록된다(Damuth, 1978). 이러한 지형과 구조는 일반적으로 대륙대나 심해저 선상지에 발달하는 해저수로(Damth, 1975)나 해저사태 및 암설류 퇴적체(Embley and Jacobi, 1977; Pratson and Laine, 1989)와 관련 있는 것으로 보고되었다. 따라서 이러한 탄성파상은 대부분 중력에 의한 퇴적물 질량류(슬럼프 혹은 암설류)에 기인한 것으로 해석된다.



## 제 4 장 코아 퇴적물 분석

### 4.1 연구자료

2011년 8월 제2차 북극해 탐사 동안에는 총 9개 정점에서 중력시추 퇴적물시료가 채취되었는데, 본 연구에서는 3개 정점의 시추시료에 대해 퇴적학적 분석을 실시 중이다 (Table 4). 본 보고서에는 시추퇴적물시료의 육안 기재 특징을 간략히 설명하고자 하며, 퇴적학적 분석의 최종결과는 차년도 연구보고서에 수록할 계획이다.

### 4.2 연구방법

퇴적물 시추시료에 대해서는 입도, 색깔, 전단강도 등 조직적 특성을 분석기기를 사용하여 분석하고, 퇴적구조는 X-ray 사진을 제작하여 기재한다. 퇴적상(sedimentary facies)은 입도와 퇴적구조에 의해 구분되어지는 퇴적물의 특징으로서, 퇴적시의 수리역학적인 상태를 반영한다. 퇴적상 분석을 위해서는 먼저 시추퇴적물을 입도별로 구분하고 각 구간에서 나타나는 특징적인 1차 퇴적구조 및 2차 변형 및 생물교란 구조를 기술한다. 이 두 특성(퇴적물 조직 및 퇴적구조)을 조합하여 퇴적상 분류 기준표(facies classification scheme)를 작성한 후, 각 시추정점별로 주상도를 작성하고 타 정점과 대비시킨다. 한편 분류된 퇴적상은 기존 연구결과 및 타 분석결과와 비교하여 형성 메커니즘을 해석하며, 시추정점 간의 대비를 통해 형성메커니즘의 영향 범위를 파악하여 도시한다.

### 4.3 분석 결과

#### 4.3.1 정점 1A(Fig. 10)

정점 1A는 수심 약 110m의 대륙붕 지역에 위치하는데, 이 지역은 탄성과상 IIA가 우세하게 나타난다. 시추기에 의해 회수된 퇴적물은 총 548cm로서, 층서적으로는 최상부 층단위 III 구간에 해당된다. 구성입자는 주로 니에 해당하는 세립질이며, 육안으로 관찰되는 조립입자는 거의 없다. 아울러 주목할만한 1차 퇴적구조도 육안 관찰로는 발견되지 않으며, 주로 생물활동에 의한 것으로 보이는 1cm 이하 크기의 작은 생교란구조와 유기물이 보존된 검은색 반점 등이 나타난다. 퇴적물의 색상은 5YG3/2로 거의 전 구간에 걸

Table 4. Sediment recovery of gravity cores.

Station	Water depth (m)	Onboard Recovery (cm)	Corrected Recovery (cm)	Number of core sections
01A	111	563	548	4
01B	111	463		3
02	320	470	466	4
03A	423	250	248	2
03B	455	450		3
16A	1815	351		3
16B	1821	392		3
18A	435	207		2
18B	409	67		1

치 큰 변화가 없으며, 뚜렷한 침식면이나 퇴적상의 경계면도 육안으로는 관찰되지 않는다.

#### 4.3.1 정점 2(Fig. 10)

정점 2는 수심 320m의 외대륙붕 지역에 위치하는데, 정점 1A와 유사한 탄성파상 IIA가 우세한 지역이다. 시추기에 의해 회수된 퇴적물은 총 466cm로서, 층서적으로는 정점 1에서와 마찬가지로 최상부 층단위 III 구간에 해당된다. 구성입자는 니질이 우세하며, 균질 혹은 생물교란된 퇴적구조가 퇴적물 전반에 걸쳐 나타난다. 그러나 정점 1에서와 달리 퇴적물의 다양한 색상변화와 뚜렷한 경계부가 관찰되기도 한다. 특히 시추퇴적물 구간 내에서 총 3매의 사질입자층이 나타나는데, 각 층의 두께는 10cm 내외이며, 박층리 혹은 괴상의 구조가 육안으로 관찰된다. 아울러 체계적이지는 않지만 다양한 두께의 층리가 부분적으로 나타난다.

#### 4.3.1 정점 3A(Fig. 10)

정점 3A는 수심 약 420m의 대륙사면 지역에 위치하는데, 다소의 기록은 있지만 탄성파상은 정점 2와 유사한 IIA 타입이 우세한 지역이다. 시추기에 의해 회수된 퇴적물은

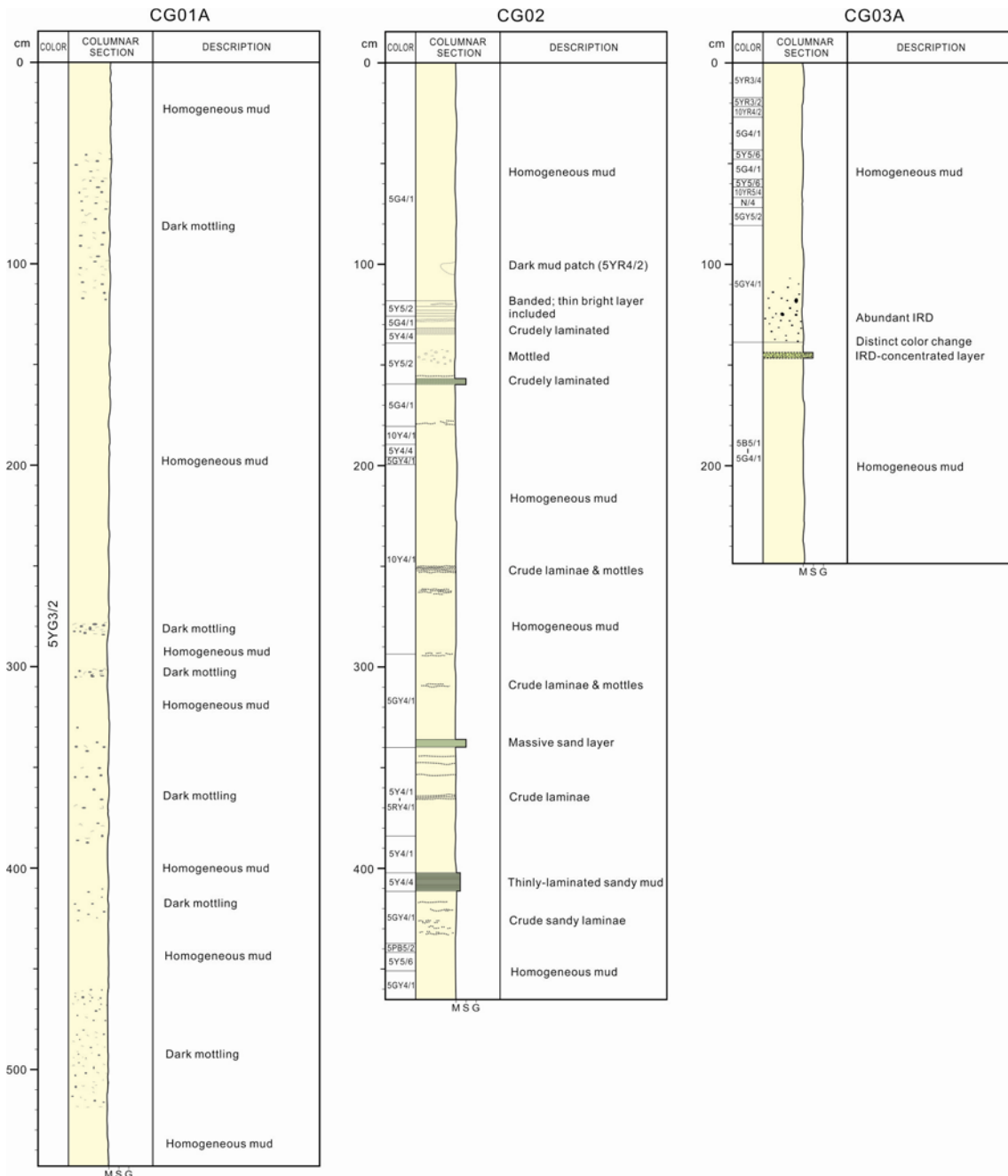


Fig. 10. Preliminary visual observation of gravity cores.

총 248cm로서, 층서적으로는 최상부 층단위 III 구간 내에 해당된다. 구성입자는 니질이 우세하며, 균질한 무구조가 특징적으로 나타나며, 시추심도 145cm 근처에 약 5cm 두께의 사질입자 층이 관찰된다. 아울러 심도 110-140cm 구간에서는 빙산운반입자(ice-rafted debris)로 추정되는 다양한 크기의 조립입자들이 불규칙하게 산재하고 있다. 육안으로 뚜렷한 퇴적상 변화가 관찰되지는 않으나, 색상변화는 다양하며, 일부 뚜렷한 색상변화 경계면이 나타나기도 한다.

## 제 5 장 결 론

베링해협 북쪽의 척치대륙붕은 대부분 비교적 매끈하고 평탄한 해저면을 보이지만, 국지적으로 성인 미상의 작은 기복이나 경계가 다소 불분명한 넓은 폭의 해저수로가 발달하기도 한다. 최대 약 70m의 투과깊이를 보이는 척치대륙붕 SBP 자료에서 극히 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 뚜렷한 층내 반사면을 기준으로 최대 3개의 층단위가 구분된다. 특히 하부의 층경계면에서는 10m 이상의 깊이를 갖는 수로단면 형태의 침식 지형이 4-5개소에서 발견되기도 한다. 이와 같은 뚜렷한 층내반사면은 해수면 하강에 의한 하천침식이나 대륙빙하의 연장에 따른 빙식이 우세했던 시기에 형성된 것으로 추정된다.

SBP 단면의 고해상 탄성과 특성은 해저표층과 그 하부의 저층에서 오는 반사파들의 명확성 또는 반사강도, 측면연속성, 형태, 그리고 해저지형 등을 기준으로 하여 특성이 서로 다른 5개의 탄성과상으로 분류된다. 탄성과상 IIA는 주로 대륙붕 지역의 최상부 층단위(III)에서 우세하게 나타나며, 국지적으로 대륙사면 지역의 최상부 층단위에서도 기록되는데, (반)원양성 퇴적과 함께 간헐적인 저밀도 세립질 저탁류 또는 밀도류의 퇴적 작용의 결과로 해석된다. 확산되어 두꺼운 표층 반사특성을 보이는 탄성과상 IIB-2는 빙하기 대륙붕 지역까지 전진해 있었던 빙상의 기저에서 집적된 빙퇴석층을 나타내는 것으로 추정된다. 탄성과상 IIC는 암설류 퇴적체를 반영하는 탄성과적으로 투명한 음파특성으로서, 대륙사면의 일부 지역에 제한적으로 나타난다. 다양한 높이의 쌍곡선 반사파가 중첩되어 나타나는 탄성과상 IIIA는 주로 기반암의 구조적 변형이나 침식에 의한 사면 협곡, 혹은 화산기원의 불규칙한 지형을 대표하는 것으로서, 경사가 급한 대륙사면 지역에 분포한다. 탄성과상 IIIB는 주로 경사가 다소 급한 외대륙붕이나 대륙사면에서 광범위하게 관찰되는데, 대부분 중력에 의한 퇴적물 질량류(슬럼프 혹은 암설류)에 기인한 것으로 해석된다.

한편, 시추 퇴적물 시료는 육안관찰결과, 대부분 반원양성 퇴적을 지시하는 생물교란 퇴적상이 우세하게 나타난다. 그리고 세립질 저탁류의 영향을 지시하는 박층리 니와 균질 니, 그리고 빙산운반 조립입자가 일부 코아와 층준에서 드물게 나타난다. 퇴적상 분석은 향후 X-radiograph과 조직분석 결과가 나오게 되면 좀더 신뢰할만한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- Bleil, U., & Thiede, J. (Eds). (1990). Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic. NATO ASI Series C 308, 823pp.
- Böggild, O. B. (1996). On the bottom deposits of the north Polar seas. Scientific results of the Norwegian North Polar Expedition 1893–1896, 5, 1–62
- Chough, S.K., Mosher, D.C. and Srivastava, S.P., 1985. Ocean Drilling Program (O D P) site survey (Hudson 84–30) in the Labrador Sea: 3.5 kHz profiles. Geological Survey of Canada, Paper, 85–1B: 33–41.
- Chough, S.K., S.H. Lee, J.W. Kim, S.C. Park, D.G. Yoo, H.S. Han, S.H. Yoon, S.B. Oh, Y.B. Kim, G.G. Back, 1997, Chirp (2–7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin, Geosciences J., 1, 143–153.
- Chough, S.K., Kim, J.W., Lee, S.H., Shinn, Y.J., Jin, J.H., Suh, M.C., Lee, J.S., 2002, High-resolution acoustic characteristics of epicontinental sea deposits, central-eastern Yellow Sea. Mar. Geol. 188, 317–331.
- Conlon, D. M., & Curtin, T. B. (2004). The ONR high latitude dynamics program. Arctic Research of the United States, 18, 2–5.
- Damuth, J.E., 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to dispersal and distribution of terrigenous sediments. Marine Geology, 18: 17–45.
- Damuth, J.E., 1978. Echo character of the Norwegian–Greenland Sea: relationship to Quaternary sedimentation. Mar. Geol., 28: 1–36.
- Damuth, J.E., 1980. Use of high-frequency (3.5–12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. Mar. Geol., 38: 51–75.
- Damuth, J.E. and Embley, R.W., 1981. Mass-transport processes on Amazon Cone: western equatorial Atlantic. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 65: 629–643.
- Damuth, J.E. and Hayes, D.E., 1977. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. Mar. Geol., 24: 73–95.
- Embley, R.W., 1976. New evidence for occurrence of debris flow deposits in the deep sea. Geology, 4: 371–374.
- Embley, R.W. and Jacobi, R.D., 1977. Distribution and morphology of large submarine sediment slides and slumps on Atlantic continental margins. Marine Geotechnology, 2: 205–228.
- Ewing, M., R.W. Embley and T.H. Shipley, 1973. Observations of shallow layering utilizing the pinger-probe echo sounding system. Mar. Geol., 14: 55–63.

- Grantz, A., Johnson, L., & Sweeney, J. F. (1990). The Arctic Ocean Region, Geological Society of America. *Geology of North America*, L, 644pp.
- Grebmeier, J. M., & Harvey, H. R. (2005). The Western Arctic Shelf–Basin Interactions (SBI) project: An overview. *Deep Sea Research Part II (Topical Studies in Oceanography)*, 52, 3109–3115.
- Heezen, B. C., & Ewing, M. (1961). The Mid–Oceanic Ridge and its extension through the Arctic Basin. In: G. O. Raasch (Ed.), *Geology of the Arctic* (pp. 622–642). Toronto: University of Toronto Press.
- Herman, Y. (1989). *The Arctic Seas — climatology, oceanography, geology, and biology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 888pp.
- Holtedahl, H. and Sellevoll, M., 1972. Notes on the influence of glaciation on the Norwegian continental shelf bordering on the Norwegian Sea. *Ambio Special Report*, 2: 31–38.
- Jakobsson, M., Grantz, A., Kristoffersen, Y., & Macnab, R. (2004). Physiography and bathymetry of the Arctic Ocean. In: R. Stein & R. W. Macdonald (Eds), *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* (pp. 1–6). Heidelberg: Springer–Verlag.
- Kulikov, N. N., Lapina, N. N., & Ivanov, G. I. (1999). The history of investigation of bottom sediments of the Western Arctic shelf: the Barents and Kara seas. In: R. Stein, K. fahl, G. I. Ivanov, M. A. Levitan & G. Tarasov (Eds), *Modern and Late Quaternary depositional environment of the St. Anna Trough area, Northern Kara Sea* (Vol. 342, pp. 3–9), Report on Polar Research.
- Lee, S.H., S.K. Chough, G.G. Back and Y.B. Kim, 2002, Chirp (2–7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau: styles of mass movement and sediment gravity flow, *Mar. Geol.*, 184, 227–247.
- Middleton, G.V. and Hampton, M.A., 1973. Mechanics of flow and deposition. In: Bouma, A.H. (ed.), *Turbidites and Deep Water Sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, Short Course, p.1–38.
- Mullins, H.T., Bordman, M.R. and Newmann, A.C., 1979, Echo character of off–platform carbonates. *Mar. Geol.*, 32: 251–268.
- Nardin, T.R., Hein, F.J., Gorsline, D.S. and Edwards, B.D., 1979. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics in slope and base–of–slope systems versus canyon–fan–basin floor systems. In: Doyle, L.J. and Pilkey, O.H. (eds.), *Geology of Continental Slopes*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 27: 61–73.
- Piper, D.J.W., Farre, J.A. and Shor, A., 1985. Late Quaternary slumps and debris

- flows on the Scotian slope. *Geological Society of America Bulletin*, 96: 1508–1517.
- Pratson, L.F. and Laine, E.P., 1989. The relative importance of gravity–induced versus current–controlled sedimentation during the Quaternary along the mideast United–States outer continental–margin revealed by 3.5 kHz echo character. *Mar. Geol.*, 89: 87–126.
- Shinn, Y.J., Chough, S.K., Kim, J.W., Woo, J.S., 2007, Development of depositional systems in the southeastern Yellow Sea during the postglacial transgression. *Mar. Geol.* 239, 59–82.
- Thiede, J. (Ed). (1996). Arctic paleoceanography – Quo vadis? In: R. Stein, G. Ivanov, M. Levitan, & K. Fahl (Eds), *Surface–sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and adjacent Eurasian continental margin*. Report on Polar Research, 212, 19–35.
- Weber, J. R., & Roots, E. F. (1990). Historical background; Exploration, concepts, and observations. In: A. Grantz, G. L. Johnson & J. F. Sweeney, (Eds), *The Arctic Ocean region* (pp. 5–36). *The Geology of North America DNAG L*. Boulder: Geological Society of America.
- Yoon, S.H., Chough, S.K., Thiede, J. and Werner, F., 1991. Late Pleistocene sedimentation on the Norwegian continental slope between 67°N and 71°N. *Mar. Geol.*, 99: 187–207.