

제 3 차 년 도
연 차 보 고 서

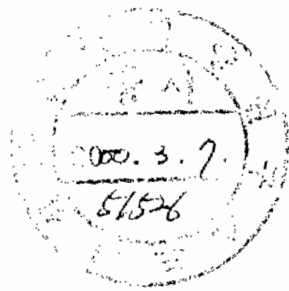
BSPE 99755-00-1236-5

동해분지의 해양환경 변화와 지구조
진화 연구 (3차년도)

Marine Environment Changes and Basin Evolution
in the East Sea of Korea (MECBES-99)

1999. 12.

한 국 해 양 연 구 소



제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구”의 (3차년도) 보고서로 제출합니다.

1999. 12

총괄연구책임자 : 김 한 준

참 여 연 구 원 :

지구물리분야

(책임자) 김한준

(연구원) 유해수, 홍종국, 주형태, 박찬홍, 민동주,
최동림, 박건태, 조현무, 장남도, 장재경,
정백훈, 이유진, 김성렬, 이용국, 석봉출,
김창환, 최규홍, 정창범, 김연실, 김지희

퇴적·고생물분야

(책임자) 이식

(연구원) 한상준, 이희일, 신동혁, 유홍룡, 현상민,
신임철, 진종화, 박장준, 장 석, 이현주,
김광산, 김신정, 최현주, 백양선

위탁연구

(강원대) 김기영, (강원대) 정대교

(서울대) 조성진, (이화여대) 신동환

요 약 문

I. 제목

동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화 연구 (III)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 한반도의 연안에서 울릉분지 선체를 포함하는 동해의 중·자력도 완성
2. 심부 탄성과 탐사로부터 파악된 한반도 대륙주변부의 지각구조와 다중채널 탄성과 자료의 연계 해석
3. 한반도 대륙주변부 및 울릉분지의 형성과 진화 구명
4. 자동코아다중검침기 (Automated Multi-Sensor Core Logger: AMSCL)를 이용하여 시추퇴적물의 정밀퇴적상 분석 및 간접시대 결정, 고해양환경 및 고기후 해석, 퇴적물 안정성 파악
5. 코아 퇴적물에 함유된 미고생물의 연구를 통한 고해양환경 및 고기후 연구
6. 빙하기 및 간빙기동안 동해의 생산성 변화 및 수괴의 안정성 연구
7. 시추퇴적물 분석을 통한 한국대지, 울릉분지간 통로, 울릉분지 남서부 대륙붕의 퇴적환경 해석
8. 시추퇴적물간 시간층서대비에 이용되는 표식테프라층 분류 및 분포범위 파악

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 중·자력자료의 취합과 보정
2. 동아시아 맨틀대류의 운동 해석
3. 한반도 대륙주변부의 리프팅 해석
4. 울릉분지와 그 주변부를 포함하는 동해 남서부의 형성과 진화 구명
5. 다중코아검침기 (AMSCL)를 이용한 동해 울릉분지 주변 (대륙주변부, 한국대지 및 울릉분지-일본분지 통로 등)의 고해상도 퇴적환경변화 파악

6. 퇴적물에 함유된 부유성 및 저시성 유광층의 정량분석
7. 고기후 지시자인 부유성 유광층 층의 정량분석
8. 시추퇴적물들의 퇴적상 및 퇴적구조들의 세분에 의한 후기 플라이스토세동안의 고해양환경 변화 해석
9. 표식테프라층의 층후, 입도 및 내부퇴적구조 분석에 의한 분출기작과 집적과정 해석

IV. 연구개발결과

1. 한반도 주변 동해의 정밀 중·자력도 완성 : 본 연구사업을 통해 획득된 자료와 외국의 연구기관이 보유하고 있는 자료를 통합하여 동해의 중·자력 분포도를 완성하였다.
2. 탄성파자료의 특수처리기법 개발 : 공심점영역에서 쌍곡선의 궤적을 갖는 반사 신호의 통계학적 특성을 이용한 반사신호의 보강 및 집음의 제거방법을 개발하여 적용하였다.
3. 한반도의 대륙주변부는 대륙지각의 변형에 의한 리프트분지가 먼저 형성되고 그 이후 해저면 확장에 의해 울릉분지가 형성되었다.
4. 한국대지는 두 부분으로 나뉘어지는데 서쪽에서는 확장성 지각변형을 보여주는 지구와 반지구 형태의 분지가 발달해있고 동쪽의 용기부는 주향이동에 의해 남쪽으로 현 위치에 오게 된 것으로 해석된다.
5. 이외 함께, 울릉분지의 지각이 정상보다 뜨거운 맨틀지역에서 형성된 해양지각임을 감안하면 한반도의 대륙주변부를 volcanic rifted margin으로 해석할 수 있다.
6. 지화학적 분석에 의한 퇴적물 조성은 홀로세 퇴적물과 그외 퇴적물에서 확실히 다르게 나타난다. 이러한 현상은 비록 홀로세의 퇴적층의 두께는 다르지만 동해 전지역에서 공통적으로 일어나는 현상이다. 퇴적물 조성에 차이가 일어나는 것은 대륙기원 퇴적물의 공급원 차이이거나 생물기원 퇴적물의 공급 정도에 의해 달라지는 것으로 해석된다.

7. 화학분석의 결과 해석된 화학적 풍화지수는 홀로세 기간동안에 점진적인 증가로 특징지을 수 있으며, 공간적으로는 약간의 차이를 보여준다. 이와 같은 현상은 풍화를 많이 받은 대륙기원 물질의 유입 정도가 공간적으로 다름을 의미한다.
8. 탄산염함량과 유기물 함량에 근거한 동해의 고생물생산을 유추하여 본 결과 농해는 빙기에 감소하고 간빙기에 증가하는 경향은 보이고 있으며, 일반적인 중위도 지역의 생물생산 형태와 반대되는 경향을 보인다. 이러한 현상은 동해의 고생물생산이 일반적 해양과는 달리 지형학적, 또는 지리학적인 요소에 의해 영향받고 있음을 지시한다.
9. 자동코아다중검침기로 6개의 퇴적상을 구분하였으며, 코아 퇴적상간의 대비를 성밀하게 연결하였다.
10. 동해 한국측 대륙주변부에서 채취된 코아퇴적물의 상부층인 홀로세와 플라이스토세 상부층은 적어도 4개는 서로 상호 대비가 잘 이루어진다.
11. 한국대지의 서측에서 채취된 코아퇴적물은 매우 안정된 환경에서 형성되었으나 한국대지 동측에서 채취된 코아퇴적물은 매우 불안정한 환경에서 퇴적되었음을 보여준다.
12. 울릉분지 일부분지 통로에서 채취된 코아퇴적물에서는 두꺼운 해저화산재층이 여러 번 반복하여 나타나며, 코아퇴적물간의 대비를 잘 보여준다.
13. 자동코아다중검침기를 사용하면 홀로세층의 경계를 명확하게 잡을 수 있는 경우가 많으며, 퇴적율 계산도 가능하다. 홀로세동안의 퇴적율은 최저 0.07 mm/yr에서 최고 0.60 mm/yr까지 계산되었다.
14. 수심이 깊은 곳에 위치한 두 코아 (MB99PC-2, MB99PC 3)는 용해를 많이 받았다.
15. 실리카의 증가에 의한 생산성의 증가와 용승작용이 유공충의 생산성을 통제했다.
16. 저층수의 부식성은 코아 하부구간부터 코아의 중간부근까지가 퇴적될 동안 서서히 감소하는 경향을 보인다. 코아의 상부구간이 퇴적될 동안 저층수의 부식성은 증가하는 경향을 보인다.
17. 부유성 유공충 *N. pachyderma*가 풍부히 나타나는 구간은 용승작용이 활발했다.

18. 코아의 최하부부터 상부로 향할수록 차가운 표층수가 존재하다가 표층수의 변화가 작은 안정된 표층수가 존재하는 기간을 지나 상대적으로 따뜻한 표층수로 바뀐다.
19. 한국대저는 반원양성 퇴적물의 집적이 우세하고 저서생물에 의한 교란작용이 활발히 진행되는 해역이지만, 일부 해저산 사면에서는 저해수면시기에 해당하는 구간에서 압설류가 확인됨.
20. 울릉분지간 통로에서 채취한 시추퇴적물의 최표층은 적갈색의 산화층이 수십 cm 층후를 갖는 반면에 울릉분지평위으로는 층후가 감소하고 일본분지를 향하여 증가하는 경향을 보임.
21. 울릉분지 남서측에 위치한 대륙붕은 팔립세스트퇴적물의 재능에 의한 조개편 또는 암편들이 포함된 사질퇴적물의 집적이 우세함.
22. 울릉분지간 통로에서 채취된 테프라층들은 대부분 퇴적동시적으로 재동된 내부퇴적구조를 가짐.

V. 연구개발결과와 활용계획

1. 울릉분지와 한반도 대륙주변부의 형성과 진화과정을 밝힘으로써 국제적인 관심사인 동해의 열염모델을 완성할 수 있다.
2. 한국 대륙붕의 두꺼운 퇴적분지의 지질/지각구조를 영상화하는 데에 직접적으로 필요한 탄성과 탐사자료의 처리방법을 구축하는 데에 기여할 것이다.
3. 한국 대륙붕에서 성공적인 석유탐사를 위해 필수적인 퇴적분지의 형성과정, 퇴적중심의 시·공간적 변화를 구명하는 데에 활용될 것으로 기대된다.
4. 자동코아다중검침기의 장점은 코아를 열기 전에 퇴적환경을 파악할 수 있으며, 퇴적물의 교란이 없는 코아퇴적물을 선징할 수 있다.
5. 자동코아다중검침기는 코아간격 1 cm까지 자료분석이 가능하므로, 고해상의 환경변화를 이해할 수 있고 화산재층이나 퇴적구조의 변화를 코아를 열기 전에 예측할 수 있다.
6. 해저 구조물 설치시 불안정한 퇴적지역을 파악할 수 있다.

7. 코아퇴적물간의 성분 대비가 가능하므로 고해양환경 변화를 자세하게 분석할 수 있고 크기후 해석을 정확하게 파악할 수 있다.
8. 고해양 및 고기후의 자료를 인근 대평양, 황해, 및 남해와 비교하므로써 동해의 시대변 쿠루시오 해류의 유입 정도 및 극전선의 이동방향을 알 수 있다
9. 기후변화에 따른 동해의 해양생태계에 일어날 변화를 예측할 수 있다.
10. 해수면 변화가 동해의 환경 (생산성, 수피의 특성)에 미칠 영향을 파악하는데 활용될 수 있다.
11. 울릉분지간 통로에 나타난 최표층의 적갈색 산화층의 분포 및 성인분석에 의해서 현생 환경변화를 유추할 수 있다.
12. 각 퇴적구간별 표식대프라층의 분포범위 복원에 의한 고해양환경, 퇴적물 및 고해류 복원자료로 활용될 수 있다.

SUMMARY

I. Title of the study

Marine Environment Changes and Basin Evolution in the East Sea of Korea
(MECBES-99)

II. Significance and Objectives of the Study

1. Completion of gravity and magnetic anomaly maps of the East Sea comprising the Korean coast to the entire Ulleung Basin
2. Interpretation of multichannel seismic data at the continental margin of Korea in conjunction with crustal structure computed from ocean bottom scismometer data
3. Investigation of evolution of the Korean margin and the Ulleung Basin
4. To understand the sediment composition through the geochemical analyses (major and minor elemental analysis, organic carbon and carbonate content estimation).
5. Interpretation of paleoenvironmental changes in the East Sea based on geochemical data.
 - Linkage between the sediment composition and the climatic change
 - Assessment of paleoproductivity based on organic carbon and carbonate content variation.
6. Detailed sedimentary facies analysis, indirect chronological decision, paleoceanographic and paleoclimatic interpretation and sediment stability can be understood by Automatic Multi-Sensor Core Logger (AMSCL).
7. Study of the paleoceanographic and paleoclimatic history in the East Sea core sediment.

8. Study of the productivity and stability of watermass during the glacial and interglacial times.
9. Study of the sedimentary environment in the Korea Plateau, the Ulleung Interplain Gap, and the southwestern continental shelf based on the analyses of piston cores.
10. To identify each marker tephra according to its pattern of distribution, mineralogy, and geochemical characteristics.

III. Contents of the Study

1. Correction and collection of gravity and magnetic data of the East Sea
2. Interpretation of mantle dynamics in East Asia and its affection on the opening of the East Sea
3. Interpretation of the rift at the Korean continental margin in the East Sea
4. Proposition of an evolutionary model for the southwestern East Sea that is more consistent with observations and new findings than those hitherto
5. To understand the linkage between sediment composition and climatic change, terrigenous conservative elements (Ti, Al etc.) and chemical index of weathering (CIW) are used.
6. To estimate the paleoproductivity variation during glacial and interglacial, and assess the carbon budget in the East Sea, organic carbon content, carbonate content, and organic carbon/carbonate carbon rain ratio are used.
7. High resolution sedimentary environments of sedimentary sequences can be recognized by Automatic Multi-Sensor Core Logger (AMSCL) in the adjacent area of Ulleung Basin (continental margins, Korea Plateau, Ulleung-Japan Basin Intergaps).
8. Quantitative analysis of planktonic and benthic foraminifera in the core sediment.
9. Quantitative analysis of paleoclimatic indicator species of specific planktonic foraminifera.

10. Interpretation of palcoenvironment and paeloceanographic history based on sediment facies and structures.
11. Classification of eruptional and transportational processes based on thickness, grain size, and structures of marker tephra layers.

IV. Results of the Study

1. Completion of gravity and magnetic anomaly maps : These maps were completed by integrating the data acquired through this study and those from variable institutional sources.
2. A special seismic data processing technique based on full hyperbolic statistics was implemented and applied to seismic data to enhance signals and suppress noise.
3. The continental margin of Korea is the area where continental rifting occurred first and followed the opening of the Ullung Basin by seafloor spreading.
4. The Korea Plateau is divided into two parts by a central trough. The western part is characterized by grabens and half-grabens indicating extensional crustal deformation. The eastern basement high area is interpreted to have been moved southward by a strike-slip activity to the present location.
5. In addition, considering that the Ullung Basin crust was formed in a region of hotter than normal mantle temperature, the Korean margin may well be interpreted as one of volcanic rifted margins.
6. The sediment chemical composition is quite different between the Holocene and the other part of sediments. Even though the thickness of Holocene sediment is different from location to location, the compositional difference is common phenomenon in the East Sea. The geochemical sediment difference between Holocene and last glacial period is interpreted as cause of difference

- in provenance of terrigenous and biogenic materials.
7. The excursion of chemical index of weathering (CIW) is different in terms of location with the same pattern in Holocene. This implies that the supply of well weathered terrigenous materials is different from location to location.
 8. Paleoproductivity variation based on organic carbon and carbonate contents indicates glacial decrease and interglacial increase pattern and shows reverse pattern with respect to mid latitude productivity pattern. This phenomenon suggests that the paleoproductivity variation in the East Sea is tightly linked with the geographic or geo-morphological conditions.
 9. Six sedimentary facies are recognized and correlated among core sediments in detail by AMSCL.
 10. Well-correlated core sediments, especially part of upper sedimentary sequences, are found from the continental margins.
 11. Core sediments collected from the western Korean Plateau are more or less stable, while those in the eastern Korean Plateau are formed in the unstable conditions.
 12. Core sediments from the Ulleung-Japan Basin Intergap contain thick and several thick submarine volcanic layers. In this gap, well correlated sedimentary facies show erosional processes in the core sediments.
 13. Holocene deposits are clearly identified by AMSCL if core sediments are formed in the stable environments. Therefore, sedimentation rates of the Holocene deposits range from 0.07 mm/yr to 0.60 mm/yr.
 14. Cores MB99PC-1 and MB99PC 2 are affected by dissolution.
 15. Foraminiferal productivity is controlled by the increase of dissolved silica in the water column and upwelling.
 16. The corrosiveness of bottom water decreases from the core bottom to the middle of core. Then, it shows increasing dissolution during the deposition of the upper part of core.
 17. The abundance of *N. pachyderma* is partly controlled by upwelling.

18. From core bottom to the core top, there exist cold surface water, stable surface watermass with small variations of water temperature, and relatively warm watermass, respectively.
19. The sediments mainly originated from the hemipelagic settling in the Korea Plateau, and these are sometimes disturbed by strong bioturbation. The thick debris flow deposits occur in the core sediment of the slope of seamount during glacial period.
20. The reddish-brown colored sediments occur in the topmost parts of cores from the Ulleung Interplain Gap. The thickness of the oxic layers increases from the channelized Ulleung basinplain to the Japan Basin.
21. The shell or rock fragments bearing sediments are caused by reworked palimpsest in the southwest continental shelf.
22. The thick bedded tephra layers are supposed to have been deposited under syndepositional reworking by bottom currents in the Ulleung Interplain Gap.

V. Suggestions for Applications

1. The investigation of evolution of the Korean margin and the Ulleung Basin can complement the opening model for the East Sea that has long been controversial.
2. The correct interpretation of basement stratigraphy will help establish imaging techniques for the thick sediment cover in the continental shelf areas.
3. The results of this study are expected to provide factors to investigate the formation processes of basins and the temporal and spatial changes in depocenters that are crucial for successful exploration of hydrocarbon.
4. The sediment composition in the East Sea is tightly linked with climatic change, i.e., the supply from the terrigenous material including atmospheric dust.

5. Paleoproductivity changes are also related with climatic changes, but they show inverse productivity excursions, suggesting that the paleoproductivity in East Sea reflect geographic condition.
6. The advantage of AMSCL is that sedimentary environments can be identified before opening of cores. Therefore, undisturbed core sediments can be selected for further paleocenographic and paleoclimatic study.
7. The high resolution paleoceanographic and paleoclimatic conditions can be recognized based on the detailed analysis (1 cm core interval) of core sediments by AMSCL.
8. Volcanic layers and sedimentary structures can be identified by AMSCL before opening of cores.
9. Unstable sedimentary environments can be identified by AMSCL, so that stable areas for the submarine construction such as cables can be selected.
10. Detailed correlation among core sediments provide information of more clarified and high-resolved paleoenvironments in order to interpret detailed paleoceanographic and paleoclimatic changes.
11. To use as an essential data set to know the amount of the Kuroshio Current influx and movement of polar front with time by comparing with the data with the adjacent North Pacific Ocean, Yellow and South Seas.
12. To predict the alterations of ecosystem in the East Sea caused by climatic change
13. To as a data to predict the impact of sea level changes on the environment (productivity, water mass, and sediment).
14. Interpretation of recent redox condition by distribution pattern and origin of the reddish-brown colored sediments in the Ulleung Interplain Gap.
15. Reconstruction of detailed tephrostratigraphy, this could define depositional characteristics such as sedimentation rate, paleocurrent, and the paleoceanography.

목 차

세출문	
요약문	1
Summary	7
목차	13
Contents	17
List of Figures	20
List of Tables	30
제 1 장 서론	31
제 2 장 국내의 기술현황	39
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	43
제 1 절 중력 및 자력 연구	45
1. 서론	45
2. 자료 및 분석	46
3. 결과 및 토의	55
4. 결론	64
제 2 절 한국대지의 탄성과 층서 및 지질구조 해석	66
1. 서론	66
2. 해저지형	68
3. 연구자	68
4. 연구방법	68
5. 탄성과 층서해석	71
6. 지질구조 해석	76

7. 결론	82
제 3 절 한반도 대륙주변부 및 울릉분지의 진화	83
1. 서론	83
2. 지질환경	85
3. 자료 획득 및 처리	87
4. 주변부의 특징	89
5. 토의	103
6. 동아시아의 맨틀대류	110
7. 결론	116
제 4 절 시추퇴적물 특성과 퇴적환경	118
1. 서론	118
2. 연구방법	119
3. 연구결과 및 토의	125
제 5 절 유공충을 이용한 동해의 고해양환경 및 고기후 연구	175
1. 서론	175
2. 방법	176
3. 결과	178
4. 토의	190
5. 결론	197
제 6 절 시화학분석에 의한 동해의 고해양환경변화	198
1. 서론	198
2. 연구방법 및 재료	199
3. 주요원소 및 미량원소의 결과	200
4. 유기탄소 및 탄산염함량의 변화	214
5. 결론 및 고찰	224
제 7 절 한국대지와 울릉분지간 통로 주변의 데프라시온증서	234
1. 서론	234
2. 분석방법	236
3. 제4기 후기 플라이스토세 이후의 동해 화산활동	237
4. 연구결과	244
제 8 절 자동차아다중검침기를 이용한 고해상 퇴적환경, 고기후 및 퇴적물 안정도연구	257
1. 서론	257

2. 연구방법	258
3. 코아퇴적물의 물성적 특성	260
4. 토론	288
5. 결론	293
제 9 절 동해분지의 망간 카보네이트 형성 기작	297
1. 서론	297
2. 연구재료 및 방법	299
3. 연구결과 및 토의	301
4. 결론	309
제 10 절 한국대지에서 채취된 기반암과 인회석암들의 기재암석학적 특성	310
1. 서론	310
2. 한국대지에서 채취된 기반암	310
3. 인회석암의 분포 및 특성	317
4. 토의	320
5. 결론	322
제 11 절 동해 울릉분지의 생성진화와 퇴적층 simulation에 의한 매몰 속성 연구	324
1. 서언	324
2. 퇴적층 simulation의 주요위리와 단계	325
3. 동해 울릉분지 퇴적층에 대한 graphic simulation (SEDPAK) 분석을 이용한 분지 진화 및 퇴적층 매몰 진화 해석	333
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	349
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	355
제 6 장 참고문헌	359
부 록	379
본 연구사업 연구결과와 전문 학술지 발표논문 현황	

CONTENTS

Summary	7
Contents	17
List of Figures	20
List of Tables	30
Chapter 1. Introduction	31
Chapter 2. Status of Domestic and Foreign Technical Trends	39
Chapter 3. Contents and Results of the Study	43
Section 1. Gravity and magnetism	45
1. Introduction	45
2. Data and analysis	46
3. Results and discussions	55
4. Conclusion	64
Section 2. Seismic survey at the Korea Plateau	66
1. Introduction	66
2. Seabed topography	68
3. Data	68
4. Method	68
5. Stratigraphic interpretation	71
6. Structural interpretation	76
7. Conclusion	82
Section 3. Evolution of the Korean margin and the Ullung Basin	83
1. Introduction	83
2. Geological setting	85
3. Acquisition and processing of data	87
4. Characteristics of the margin	89

5. Discussions	103
6. Mantle dynamics in East Asia	110
7. Conclusion	116
Section 4. Characteristics of core sediments and depositional environments ..	118
1. Introduction	118
2. Methods	119
3. Results and discussion	125
Section 5. Paleocenographic and paleoclimatic environments based on planktonic foraminifera	175
1. Introduction	175
2. Methods	176
3. Results	178
4. Discussion	190
5. Conclusion	197
Section 6. Paleoceanographic environments based on major elements	198
1. Introduction	198
2. Methods	199
3. Major and trace elements	200
4. Organic carbon and carbonate contents	214
5. Discussion and conclusion	224
Section 7. Tephrostratigraphy of the Korea Plateau and the Ulleung Interplain Gap	234
1. Introduction	234
2. Methods	236
3. Explosive volcanic eruptions in the East Sea since Late Pleistocene	237
4. Results	244
Section 8. Paleoenvironments, paleoclimate, and sediment stability based on Multi Sensor Core Logger	257
1. Introduction	257
2. Methods	258

3. Physical properties of core sediments	260
4. Discussion	288
5. Conclusion	293
Section 9. Origin of Mn carbonate in the Ulleung Basin	297
1. Introduction	297
2. Methods	299
3. Results and discussion	301
4. Conclusion	309
Section 10. Petrography of granite and phosphorite rocks sampled from the Korea Plateau	310
1. Introduction	310
2. Granitic rocks obtained from the Korea Plateau	310
3. Characteristics and distribution of the phosphorite	317
4. Discussion	320
5. Conclusion	322
Section 11. Evolution of Ulleung Basin (East Sea) an reconstruction of burial history by graphic simulation of sediment	324
1. Introduction	324
2. Principle and sequence of graphic simulation	325
3. Evolution and burial history of the Ulleung Basin based on graphic simulation (SEDPAK)	333
Chapter 4. Accomplishment and Contribution of the Study	349
Chapter 5. Suggested Applications of Results	355
Chapter 6. References	359
Appendix	379

List of Figures

Fig. 3-1-1. Study area and topography of the Ulleung Basin. The contour interval is 100 m. DH=Donghae, JB=Jukbyeon, HP=Hupo, PH=Pohang, KP=Kuryong-po, US-Ullsan, and PS-Pusan.	47
Fig. 3-1-2. Shipborne gravity data coverage.	48
Fig. 3-1-3. Combined shipborne and satellite altimetry derived free-air gravity anomalies after crossover adjustment.	50
Fig. 3-1-4. Shipborne magnetic data coverage.	51
Fig. 3-1-5. Magnetic anomaly contour map produced from crossover error adjustments. Yangsan fault, Tsushima fault, folds off SW Japan, and Tertiary basins offshore the Korean Peninsula are mapped from Minami (1979), KIER (1982), Park (1990), and Choi (1995). The Hupo fault is after Yoon (1994).	52
Fig. 3-1-6. The analytic signal map of magnetic anomalies. The analytic signal reveals scattered circular features due to volcanic bodies over the basin. Triangles denote possible magnetic sources. Rectangles are a series of inferred volcanic intrusions emplaced along the fractures at both margins of the central Ulleung Basin.	53
Fig. 3-1-7. Locations of seismic profiles used in this study.	54
Fig. 3-1-8. A typical seismic profile showing four major sedimentary units in the Ulleung Basin (Park, 1998). See Fig. 3-1-7 for the location.	57
Fig. 3-1-9. The contour map of total sediment thickness in second. Contour interval is 0.2 s TWTT.	58
Fig. 3-1-10. The contour map of total sediment thickness in meters. Contour interval is 500 m.	59
Fig. 3-1-11. The isobase map. Contour interval is 200 m. Thick dashed lines show boundaries of the central deep acoustic basement.	61
Fig. 3-2-1. Physiography of the East Sea and study area (framed).	67
Fig. 3-2-2. Detailed bathymetry of the Korea Plateau and its surrounding area.	69
Fig. 3-2-3. Ship's track in the study area.	70
Fig. 3-2-4. Example of seismic reflection profile showing 3 sequences I, II, and III. See Fig. 3-2-3 for the location of the profile.	72
Fig. 3-2-5. Example of seismic reflection profile. See Fig. 3-2-3 for location.	73
Fig. 3-2-6. Example of seismic reflection profile showing opal A/CT BSR at 0.5 sec. See Fig. 3-2-3 for location.	75

Fig. 3-2-7. Example of seismic reflection profile showing seafloor truncation in Sequence I. See Fig. 3-2-3 for location. 77

Fig. 3-2-8. Structural map of the Korea Plateau. 79

Fig. 3-2-9. Example of seismic reflection profile showing the domino style-rotated block faults in the Korea Plateau basement. See Fig. 3-2-3. for location. 80

Fig. 3-2-10. Example of seismic reflection profile showing gentle folding structure in sequence III. See Fig. 3-2-3. for location. 81

Fig. 3-3-1. Tectonic map of the East Sea (Japan Sea) showing the discrimination of crustal type (modified from Tamaki et al., 1992): (1) continental crust, (2) rifted continental crust, (3) extended continental crust, (4) oceanic crust, (5) strike-slip fault, (6) thrust, and (7) metallogenic belts (Sillitoe, 1977). JB, YB and UB - Japan, Yamato and Ulleung Basins; (k)yb = (Kita) Yamato Bank, n- and skp - north- and south Korea Plateau, ob = Oki Bank; TF and YF - Tsushima and Yangsan faults; BTL, ISTL, MTL, and TTL = Butsuzon, Median, and Itogawa-Shizuoka, Tanakura Tectonic Lines. Bathymetry is shown in meters. Inset shows distribution of rift basins at the inner margin of Korea. Note that the Ulleung Basin is defined as "oceanic" after Kim et al. (1998). 84

Fig. 3-3-2. Bathymetry in the southwestern East Sea with locations of multichannel and single channel seismic profiles. Inset shows OBS profiles in Kim et al. (1999). 86

Fig. 3-3-3. Magnetic anomalies in the southwestern East Sea with locations of multichannel and single channel seismic profiles. The area of extrusive volcanic rocks (25-17 Ma) in the southeast Korean Peninsula is shown by hatching (from Chough and Lee, 1992; Yoon and Chough, 1995). 88

Fig. 3-3-4. MCS profiles combined with single channel profiles to delineate geologic sections from the Hupo Bank to the Ulleung Basin. (See Fig. 3-3-2 for location) (a) 97-2 and 6. (b) 97-4 and 19. The boxed regions give the location of example reflection profiles in Fig. 3-3-6. 90

Fig. 3-3-5. (a)- (d) Interpretive line drawings superposed on MCS profiles 94-1 to 94-4 (See Fig. 3-3-2 for location). 91

Fig. 3-3-6. (a) Single channel profile 19. (b) and (c); MCS profile of 97-2 with and without tau-g HVF. (d) MCS profile 97-4. Note that tau-g HVF improved the continuity of reflections. 97

Fig. 3-3-7. (a) MCS profile A (See Fig. 3-3-2 for location) and (b) its line drawing interpretation (from Kim et al., 1998). 100

Fig. 3-3-8. Free air gravity anomaly map of the southern East Sea computed from



the integration of satellite derived and shipborne gravity (from Han et al., 1997).	105
Fig. 3-3-9. Structural map of the eastern Korean margin and the Ullung Basin.	107
Fig. 3-3-10. Schematic diagram showing the evolution stages of the eastern Korean margin from early Miocene to the present. (a) Rifting at an inner margin, (b) volcanic intrusion at a marginal high, (c) breakup, (d) extrusive volcanism generating seaward dipping reflectors, (e) subsidence with sediment accumulation, and (f) present geologic structure pertaining to Fig. 4b.	108
Fig. 3-3-11. Initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for Quaternary alkali volcanic rocks from the Ullungdo, Jeju, Jeongok and Yeong-il areas in South Korea. Isotopic data of basaltic rocks from northeast and southwest Japan (from Kim et al., 1999).	115
Fig. 3-4-1. Location map of piston cores in the East Sea. Solid squares represent the cores of this study; solid circles do the cores of previous study. For location data, see Table 3-4-1.	122
Fig. 3-4-2. Vertical core description and sedimentary facies of six piston cores.	123
Fig. 3-4-3. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-13 core.	130
Fig. 3-4-4. Sediment characteristics of MB98PC-13 core.	131
Fig. 3-4-5. X-radiographs of MB98PC-13 core.	132
Fig. 3-4-6. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-14 core.	136
Fig. 3-4-7. Sediment characteristics of MB98PC-14 core.	137
Fig. 3-4-8. X-radiographs of MB98PC-14 core.	138
Fig. 3-4-9. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-14 core.	141
Fig. 3-4-10. Sediment characteristics of MB98PC-15 core.	142
Fig. 3-4-11. X-radiographs of MB98PC-15 core.	143
Fig. 3-4-12. Vertical core description and mean grain size of MB99PC-1 core.	148
Fig. 3-4-13. Sediment characteristics of MB99PC-1 core.	149
Fig. 3-4-14. X-radiographs of MB99PC-1 core.	150
Fig. 3-4-15. Vertical core description and mean grain size of MB99PC-2 core.	155
Fig. 3-4-16. Sediment characteristics of MB99PC-2 core.	156

Fig. 3-4-17. X-radiographs of MB99PC-2 core.	157
Fig. 3-4-18. Vertical core description and mean grain size of MB99PC 3 core.	162
Fig. 3-4-19. Sediment characteristics of MB99PC 3 core.	163
Fig. 3-4-20. X-radiographs of MB99PC-3 core.	164
Fig. 3-4-21. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-11 core.	167
Fig. 3-4-22. Sediment characteristics of MB98PC-11 core.	168
Fig. 3 4 23. X-radiographs of MB98PC-11 core.	169
Fig. 3 4 24. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-12 core.	171
Fig. 3-4-25. Sediment characteristics of MB98PC-12 core.	172
Fig. 3-4-26. X-radiographs of MB98PC-12 core.	173
Fig. 3-5-1. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC-1.	179
Fig. 3-5-2. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), number of arenaceous foraminifera, and left- and right-coiled <i>N. pachyderma</i> in 10 g of dried sediment of core MB99PC-1.	180
Fig. 3 5 3. Relative abundance of <i>N. pachyderma</i> in core MB99PC-1. <i>N.</i> <i>pachyderma</i> (l) (%)=percent of left-coiled <i>N. pachyderma</i> among 100 <i>N.</i> <i>pachyderma</i> ; <i>N. pachyderma</i> (r) (%)=percent of right coiled <i>N.</i> <i>pachyderma</i> among 100 <i>N. pachyderma</i> ; <i>N. pachyderma</i> (l) (w%)=percent of left-coiled <i>N. pachyderma</i> among whole planktonic foraminifera; <i>N. pachyderma</i> (r) (w%)=percent of right-coiled <i>N. pachyderma</i> among whole planktonic foraminifera.	183
Fig. 3-5-4. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC-2.	184
Fig. 3 5 5. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), and left- and right-coiled <i>N.</i> <i>pachyderma</i> in 10 g of dried sediment of core MB99PC-2.	187
Fig. 3-5-6. Relative abundance of <i>N. pachyderma</i> in core MB99PC-2. <i>N.</i> <i>pachyderma</i> (l) (%)=percent of left-coiled <i>N. pachyderma</i> among 100 <i>N.</i> <i>pachyderma</i> ; <i>N. pachyderma</i> (r) (%)=percent of right-coiled <i>N.</i> <i>pachyderma</i> among 100 <i>N. pachyderma</i> ; <i>N. pachyderma</i> (l) (w%)=percent of left-coiled <i>N. pachyderma</i> among whole planktonic foraminifera; <i>N.</i>	

pachyderma (r) (w%)=percent of right-coiled N. pachyderma among whole planktonic foraminifera.	188
Fig. 3-5-7. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC 3. ...	189
Fig. 3 5 8. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), and left and right-coiled N. pachyderma in 10 g of dried sediment of core MB99PC-3.	191
Fig. 3-5-9. Relative abundance of N. pachyderma in core MB99PC-3. N. pachyderma (l) (%)=percent of left-coiled N. pachyderma among 100 N. pachyderma; N. pachyderma (r) (%)=percent of right-coiled N. pachyderma among 100 N. pachyderma; N. pachyderma (l) (w%)=percent of left coiled N. pachyderma among whole planktonic foraminifera; N. pachyderma (r) (w%)=percent of right-coiled N. pachyderma among whole planktonic foraminifera.	192
Fig. 3-6-1. Vertical profiles of major elements at core 99PC-2.	204
Fig. 3 6-2. Vertical profiles of the representative major elements ratios at core 99PC 2.	208
Fig. 3-6-3. Major elements ratios and total organic carbon, total carbon vertical profiles at core 98PC-4.	209
Fig. 3 6 4. Vertical profiles of major elements ratio at 96PC-4.	211
Fig. 3 6 5. Vertical profiles of major elements ratio, and chemical index (CIW) of weathering at 95PC 4.	213
Fig. 3 6-6. Vertical profiles of major elements at core 95PC-1.	215
Fig. 3-6-7. Vertical profiles of major elements ratio at 94PC 2.	216
Fig. 3-6-8. Total organic carbon and total carbon profiles at three cores, 98PC-4, 95PC 1 and 98PC-7.	219
Fig. 3 6 9. C/N ratio variation at three cores, 98PC-4, 95PC-1 and 98PC-7.	220
Fig. 3 6 10. Carbonate content at three cores, 98PC-4, 95PC-1 and 98PC 7.	223
Fig. 3-6-11. TiO ₂ /Al ₂ O ₃ variation at five cores.	225
Fig. 3-6-12. Chemical index of weathering (CIW) variation at five cores.	227
Fig. 3-6-13. Organic carbon/carbonate carbon ratio at three core, 98PC 4, 95PC 1 and 98PC 7.	230
Fig. 3-7-1. A number of tephra layers in DSDP cores (320 sites) are acquired from the whole world ocean (data from Kennet and Thunell, 1975).	235
Fig. 3-7-2. Flow chart for classification of tephra using the tephrostratigraphic data in the East Sea.	238

Fig. 3-7-3. The correlation between oxygen isotope stages and volcanic eruption ages of tephra in the cored sediment of the East Sea.	240
Fig. 3 7 4. Summary column of textural variation and eruption events (ages) in Ulleung Island.	241
Fig. 3-7-5. Backscattered electron images (BSEI) of the polished section of pumice lapilli from the Ulleung tephra showing microtexture of vesicles. (A) Ulleung-III tephra. (B) and (C) Ulleung-II tephra. (D) Ulleung I tephra.	242
Fig. 3-7-6. Photomicrographs showing clast compositions of the tephra. (A) Ulleung tephra. (B) SKP tephra.	243
Fig. 3 7 7. Diagrams showing ratios of SiO ₂ vs. other oxides of the SKP and Ulleung tephtras. Open squares represent the SKP tephra; small open circles do the Ulleung tephtras.	245
Fig. 3-7-8. Backscattered electron image (BSEI) of polished section showing microtexture of vesicles in pumice lapilli within the SKP tephra. (A) SKP-IV tephra. (B) SKP-III tephra. (C) SKP-II tephra. (D) SKP I tephra.	246
Fig. 3-7-9. Morphology of glass shards in the tephtras erupted from the Japan. (A) Aso-3 tephra. (B) Aso-4 tephra. (C) AT tephra.	247
Fig. 3 7 10. Textural change of the Ulleung-II tephra.	249
Fig. 3-7-11. Texture and grain size distribution of the SKP II tephra.	251
Fig. 3-7-12. Very thick-bedded deformed mud. It is intercalated with the Ulleung-II tephra and AT tephra of MB99PC-1 core.	252
Fig. 3-7-13. Vertical change of texture and grain size distribution of the Ulleung II tephra of MB99PC-3 core.	254
Fig. 3 7 14. Vertical change of texture and grain size distribution of the SKP-II tephra of MB99PC 3 core.	255
Fig. 3-7-15. Reworked tephra layers of MB98PC 15 core.	256
Fig. 3-8-1. The schematic diagram of AMSCL (Automated Multi-Sensor Core Logger).	259
Fig. 3-8-2. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-3 core sediments.	261
Fig. 3-8-3. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-4 core sediments.	262
Fig. 3 8 4. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-4 core sediments.	264
Fig. 3 8 5. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic	

susceptibility of MB98PC 5 core sediments.	266
Fig. 3-8-6. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-6 core sediments.	267
Fig. 3-8-7. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC 6 core sediments.	269
Fig. 3-8-8. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC 7 core sediments.	270
Fig. 3-8-9. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC 7 core sediments.	271
Fig. 3-8-10. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-11 core sediments.	272
Fig. 3-8-11. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-12 core sediments.	273
Fig. 3-8-12. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-11 core sediments.	274
Fig. 3-8-13. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-12 core sediments.	275
Fig. 3-8-14. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-13 core sediments.	277
Fig. 3-8-15. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC 13 core sediments.	278
Fig. 3-8-16. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-14 core sediments.	279
Fig. 3-8-17. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-14 core sediments.	280
Fig. 3-8-18. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-15 core sediments.	282
Fig. 3-8-19. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC 15 core sediments.	283

Fig. 3-8-20. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-1 core sediments.	284
Fig. 3-8-21. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC-1 core sediments.	285
Fig. 3-8-22. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-2 core sediments.	286
Fig. 3-8-23. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC-2 core sediments.	287
Fig. 3-8-24. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-3 core sediments.	289
Fig. 3-8-25. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC-3 core sediments.	290
Fig. 3-8-26. Comparison of magnetic susceptibility among MB98PC-4, MB98PC-6 and MB98PC-7 cores.	291
Fig. 3-8-27. Comparison of magnetic susceptibility among MB98PC-13 and MB98PC-14 cores.	292
Fig. 3-8-28. Comparison of magnetic susceptibility among MB99PC-2 and MB99PC-3 cores.	294
Fig. 3-9-1. A) Physiographic map of the East Sea (Sea of Japan) and the surrounding region. Note shallow sills and straits connecting the East Sea and the western Pacific. Box indicates study area expanded in B. Redrawn from Ingel, Suychiro, von Breymann et al. (1990). B) Bathymetry of the study area (contours in metres) and locations of piston cores. UIG=Ulleung Interplain Gap.	298
Fig. 3-9-2. Sedimentary logs of cores 95PC-7, 96EBP-6 and 96EBP-5. Sections detailed in this study are indicated by arrow-headed lines. M, S and G denote mud, sand and gravel, respectively. The gravel mostly consists of pumice lapilli. Arrowheads in core 96EBP-6 denote sample location for AMS14C dating.	300
Fig. 3-9-3. X-radiographs (A, B and C) and a photograph (D) of selected sections. Symbols on the right side represent sedimentary facies: LM=laminated mud, CLM=crudely laminated mud, HM-homogeneous mud and BM=bioturbated mud. Thin units are collectively indicated in descending order.	303

Fig. 3-9-4. A) Backscattered electron image (BSEI) and B) electron microprobe element line-scan of Mn-carbonate mud from core 96EBP-5. The element concentrations are given in relative intensity. The line-scan position is marked on the BSEI. The tick spacing along the profiles represents 1 mm of sediment. In the BSEI, non-porous areas with densely distributed Mn carbonate particles appear brighter than porous areas. Note in-phase variation of Mn and Ca with higher peaks generally in the non-porous areas. Al and Si contents rarely decrease to zero with higher peaks in both the non porous and the porous areas.	304
Fig. 3-9-5. Summary of sedimentary logs, AMS14C dates, and correlation of cores. For location of cores, see Fig. 3-9-1.	306
Fig. 3-9-6. Depth profiles of aluminum, organic carbon, manganese, sulfur, copper, cadmium and molybdenum in core 96EBP-6. Concentrations of copper, cadmium and molybdenum are normalized relative to the Al concentration. Open dots indicate values in the Mn carbonate mud. For lithologic symbols, see Fig. 3-9-5.	307
Fig. 3-10-1. Dredged sampling sites of the granitic fragments in the Korea Plateau.	312
Fig. 3-10-2. Photomicrograph of microcline porphyroblast showing periclinic twining (sample No. S1-2-9) (x5, cross).	313
Fig. 3-10-3. Poikilitic microcline porphyroblast containing fine grained plagioclase, quartz and biotite (sample No. S1-2-6) (x5, cross).	313
Fig. 3-10-4. Myrmekite occurring between quartz and altered plagioclase (sample No.S1-3-2) (x10, cross).	314
Fig. 3-10-5. Recrystallized quartz showing undulatory extinction (sample No. S1-3-1) (x5, cross).	314
Fig. 3-10-6. Recrystallized, elongated quartz forming schstosity (sample No. S1-3-6) (x5, cross).	315
Fig. 3-10-7. Biotite altered to chlorite, muscovite and hematite (sample No. S1-3-10) (x5, open).	315
Fig. 3-10-8. Fractured, deformed plagioclase (sample No. S1-2-3) (x5, cross).	316
Fig. 3-10-9. Recrystallized quartz showing undulatory extinction (sample No. S1-3-11) (x5, cross).	316
Fig. 3-10-10. Photomicrograph of phosphorite (scal bar = 0.2 mm).	318
Fig. 3-11-1. General flow diagram for graphic simulation process of sedimentary sequence within one step.	327

Fig. 3-11-2. Tectonic configuration for the Ulleung Basin and adjacent area, and location of the modeled seismic profile. Sedimentary basins are marked as dotted areas.	334
Fig. 3-11-3. Modeled seismic profile on the southern margin of the Ulleung Basin, offshore Korea. For location, see Fig. 3-11-2, interpreted by Nester and Mitchum (1989).	334
Fig. 3-11-4. Simulation of the initial Sequence 1 of Ulleung Basin deposited between 16.5 Ma and 15.4 Ma. The units are aggradational to slightly progradational.	337
Fig. 3-11-5. Simulation of the deposition of Sequence 2, a progradational sequence, which was deposited between 15.4 Ma and 13.8 Ma.	338
Fig. 3-11-6. Simulation of the deposition of Sequence 3, showing further progradation, which was deposited between 13.8 Ma and 12.5 Ma.	339
Fig. 3-11-7. Simulation of the deposition of Sequence 4, which is also progradational, and was deposited between 12.5 Ma and 10.4 Ma. Note the thicknesses of all four sequences deposited to this point in time are approximately equal despite a changing subsidence and sediment supply rate.	340
Fig. 3-11-8. Simulation of the deposition of Sequence 5 which is a backstepping unit and was deposited between 10.4 Ma and 6.3 Ma. The subsidence and sediment supply rates were set very low to create this thin, retrogradational unit.	341
Fig. 3-11-9. Simulation of the deposition of Sequence 6 which was deposited between 6.3 Ma and 3.8 Ma. A sea level rise increased accommodation and, together with increased subsidence and sediment supply rates, and a thick progradational sequence was the result.	342
Fig. 3-11-10. Simulation of the deposition of the final Sequence 7 which shows further progradation with deposition occurring from 3.8 Ma to the present. It is the thickest sequence, created by increasing the subsidence and sediment supply rates to counteract the effects of a lowstand of sea level.	343
Fig. 3-11-11. Graph showing the varying rate of subsidence throughout the simulation run at the northeastern side of the simulated section.	346
Fig. 3-11-12. Time-Depth-Elevation plot showing the sea level history and burial path of the sediment surface for a fixed elevation datum at the shelf margin at 22.2 km (center of the seismic section) from the southwestern end of the simulated section.	347

List of Tables

Table 3-1-1. Range and average of seismic velocities in each.	56
Table 3-4 1. Location of piston cores in the East Sea.	121
Table 3 4 2. Sediment characteristics of MB98PC 13 core.	127
Table 3 4 3. Sediment characteristics of MB98PC 14 core.	134
Table 3 4 4. Sediment characteristics of MB98PC 15 core.	140
Table 3-4-5. Sediment characteristics of MB99PC 1 core.	145
Table 3-4-6. Sediment characteristics of MB99PC-2 core.	152
Table 3-4-7. Sediment characteristics of MB99PC-3 core.	159
Table 3-4 8. Sediment characteristics of MB98PC-11 core.	166
Table 3-4-9. Sediment characteristics of MB98PC-12 core.	170
Table 3 5 1. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC-1. The abbreviations are as follows: ODW (g)=original dry weigh in grams; >63um=weigh (g) in >63um size fraction; P (N)-number of planktonic foram/10 g; Pbr (%)=percent of broken planktonic foram; B (N)-number of benthic foram/10g; P-B (N)=number of planktonic plus benthic foram/10g; P/B (%)=percent of planktonic/benthic ratio; Are=number of arenaceous foram/10g; Ples=number of left coiled <i>N. pachyderma</i> /10g; Pris= number of right-coiled <i>N. pachyderma</i> /10g; Ple (%)=percent of left coiled <i>N. pachyderma</i> among 100 <i>N. pachyderma</i> ; Pri (%)=percent of right-coiled <i>N. pachyderma</i> among 100 <i>N. pachyderma</i> ; Plew (%)=percent of left-coiled <i>N. pachyderma</i> among whole planktonic foraminifera; Priw (%)percent of right-coiled <i>N. pachyderma</i> among whole planktonic foraminifera.	177
Table 3-5-2. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC 2. All abbreviations are shown in Table 3-5-1.	182
Table 3-5-3. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC-3. All abbreviations are shown in Table 3-5-1.	186
Table 3-6-1. Analytical results of the major and minor elements concentration.	201
Table 3 6 2. Analytical results of major and minor elements at the core of MB98PC 4	207
Table 3-10-1. Elements of phosphorite in the Korea Plateau.	319
Table 3-11-1. Clastic supply data.	345

제 1 장 서 론

제 1 장 서 론

대표저자 : 김한준, 허 식 (한국해양연구소 해양지질연구단)

동해는 한국, 일본, 러시아에 의해 둘러싸인 후열도해 (back-arc sea)이면서 아시아 대륙의 대륙주변해 (marginal sea)이다. 후열도해는 대부분 서태평양에 존재하며 그 형성과 진화과정에 대해서는 판구조론이 제시된 이후 국제적으로 상당히 많은 연구가 행해지고 있다. 하지만 동해의 경우 지금까지 수행된 다양한 연구에 비례하여 형성과 진화과정에 대해서는 의견이 분분하다. 특히 한반도에 가까운 울릉 분지를 중심으로 하는 동해의 남서해역의 형성과 진화과정은 아직도 수수께끼로 남아 있다.

동해는 산업적으로 해저케이블과 파이프라인 등의 해저구조물의 설치, 오염 및 유해 폐기물의 투기, 지진, 해일 등 자연재해의 예방 및 해역방위에 있어서도 그 중요성이 점차 증대되고 있다. 동해의 한국 대륙붕과 같은 일부 지역에서 천연가스 자원의 부존이 확인되었고 인산염 광물 등의 해저유용자원의 부존도 알려져 있다.

이러한 관점에서 지난 20년간 미국, 일본, 러시아, 프랑스 등은 독자적으로 혹은 공동연구를 통하여 동해의 심부 지질구조와 퇴적층의 형성, 고해양환경 등에 대한 연구를 활발히 수행하였다. 특히 일본은 동해의 형성기원과 최근 활발해지고 있는 지각운동의 원인을 규명하기 위해 심부지각까지 시추를 할 수 있는 OD 21 (Ocean Drilling 21st Century) 프로그램을 계획하고 2003년에 실행을 목표로 대형시추선을 건조중에 있다. 그러나 1990년 이전까지 한국은 장비와 인력에서 제한을 받아서 선진국 수준의 연구를 수행할 수 없었다. 그러다가 한국은 1992년 종합연구선 온누리호를 건조하고 여기에 다중채널 탄성과 탐사장비, 다중빔 음향측심기, 그리고 12 m 길이의 코어채취기 등을 탑재함으로써 동해의 여러 분야에서 독자적인 연구를 수행하게 되었다. 이러한 여건을 갖추어 동해의 지형, 퇴적작용, 지구조적 진화, 그리고 제4기 고해양 환경변화를 규명하기 위해 1994년부터 1996년까지 “한국 대수심해역의 지구적 해저환경 연구”를 수행한 바 있다 (한상준 등, 1994, 1995, 1996). 이 사업을 통해서 다중채널 탄성과 탐사 등의 조사방법을 익히고 그 동안 불가능했던

동해의 제반 연구의 기틀을 마련할 수 있었다. 그 성과를 바탕으로 더 깊은 연구를 하기 위해 1997년부터 “동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화연구”를 수행하고 있다. 1997년부터 1998년까지 2년 동안 수행된 본 과제의 연구 분야와 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. 정밀 해저지형도 작성 및 현생 퇴적과정 해석

(1) 연구방법

- 다중빔 음향 측심기인 SeaBeam 2000과 고해상 진부 지층탐사기를 사용하여 해저지형을 수치적으로 도면화 하여 2차원 및 3차원의 정밀 해저지형도를 작성하고 사면 안정성과 퇴적물의 이동을 조사하였다. 또한 해저면 영상과 진부 지층탐사자료권을 결합하여 현생 퇴적과정을 해석하였다.

(2) 연구결과

- 울릉분지의 해저면을 영상화하였으며 심해 바닥을 가로지르는 수로들의 분포상황을 파악하였다. 이들 수로들을 침식형과 퇴적형으로 구별하여 울릉분지에서 현생 퇴적작용을 설명하였다.
- 독도 부근에서는 대규모의 해저사태기 발생하지 않았으며 지반의 화산작용 후 침하도 그 크기가 작았다.
- 다중빔 음향자료에서 잡음으로 작용하는 이상치들을 제거하는 통계학적 기법을 개발하였다.

2. 중·자력 연구

(1) 연구방법

- 운누리호의 선상중력계와 자력계를 사용하여 중·자력자료를 획득하였다. 이들 자료를 미국, 일본 등의 연구기관이 보유하고 있는 자료와 결합함으로써 울릉분지를 중심으로하는 전체지역의 중·자력도를 완성하였다.

(2) 연구결과

- 중력분포는 울릉분지 중심부에 주변의 내륙지각보다 밀도가 더 높은 지각이 존재하며 모호면도 상승되어 있다.

- 울릉분지의 중앙부에는 화산체의 관입을 시사하는 선상구조가 나타나며 독도 부근의 쌍극 자기 현상은 이 지역에 여러 개의 화산체가 분포함을 시사한다.

3. 지구조 및 퇴적분지해석

(1) 연구방법

- 한반도의 대륙주변부, 그리고 한반도의 대륙사면부터 울릉분지를 관통하는 축선을 따라 획득된 다중채널 단성과 탐사자료를 처리하고 해석하였다.
울릉분지에서 획득된 해저면 지진계 (OBS: ocean bottom seismometer) 자료를 처리 및 해석하였다.
- 울릉분지의 지구조적 특성과 형성과정을 제시하기 위해 심부 단성과 탐사의 결과와 중·자력자료를 연계해석하였다.

(2) 연구결과

- 울릉분지의 지각은 해저면 확장에 의해 형성된 해양시각이며 그 형성 당시 내륙 쪽에 위치했을 것으로 추정되는 맨틀플룸의 영향을 받아서 정상적인 해양지각보다 더 두꺼워 졌다.
- 한국 남동 대륙붕과 대륙사면은 비환성 대륙주변부의 형태를 보여주나 하부기만암의 구조가 복잡하고 단층, 화산체, 그리고 퇴적물의 이동에 의해 복잡한 지질 구조를 보여 준다.

4. 현생퇴적환경

(1) 연구방법

- 국내 최장인 12 m 길이의 피스톤 코아러를 이용하여 해저면 퇴적물을 채취하였고, 퇴적물의 퇴적상 분석을 통해 제4기 퇴적물의 퇴적기구, 퇴적환경, 그리고 고해양환경의 변화를 파악하였다.
동해 및 그 주변 화산의 폭발에 의해 공급된 테프라층들로부터 테프라 시간층서를 확립하고 이와 관련된 고해양환경을 복원하였다.
퇴적물의 주원소 분석을 통해 동해에서 빙기 간빙기 동안에 퇴적된 퇴적물의 주원소 성분 조성과 기후변동과의 관계를 복원하고 규조 성분으로부터 고기후, 고

해양환경을 파악하였다.

(2) 연구결과

- 후포뱅크와 동쪽 대륙사면에서 채취된 시추퇴적물들의 상부는 사질 혹은 실트질 니로, 그리고 하부는 점토질 니로 구성되어 있는데 이는 최근세 최대 빙기 이후의 급격한 해수면 변동에 따른 퇴적물의 공급의 변화를 반영하고 있다.
- 울릉분지의 테프라중에서는 수중화산의 폭발시에 수중화쇄류, 수지밀도류에 의해서 공급된 층들이 협재하며, 수중화산활동에 의한 급격한 고해양환경 변화가 해석되었다.
- 고해상 지층탐사 자료에서 나타나는 해저면 퇴적물은 반사의 명확성, 측면연속성, 형태 및 해저지형에 따라 6개의 반사특성 (echo facies)으로 분류된다. 각각의 특성은 진해 해양작용에 의한 반원양성 퇴적층, 암설류 퇴적층, 슬러프, 슬라이드 및 암설류에 의한 퇴적층, 암석낙하 퇴적층을 반영하는 것으로 해석된다.
- 독도 화산체는 해수면이 현재보다 100-150 m 낮았던 시기에 정상부가 평탄하게 침식되었으며, 사면에는 주로 해저 협곡을 따라 발생한 암설류와 국지적인 암석낙하에 의한 퇴적물의 재배치가 일어났다.

본 보고서는 “동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구”의 마지막인 3년차 1999년 사업의 결과를 수록한 것이다. 3년차 사업에서는 한반도 대륙주변부의 대륙지각의 리프팅과정에 대한 해석을 보완하기 위해 북위 38° 이북의 한국대지 부근의 리프팅분지구조로 추정되는 지역에서 다중채널 탄성파자료를 획득하였다. 또한 현생 퇴적작용에 대한 이해를 완성하기 위해 피스톤 코어를 채취하였다. 본 연구에서 획득한 자료로부터 얻은 결과를 그동안 축적된 연구결과와 함께 해석함으로써 울릉분지를 중심으로 하는 동해 남서부의 형성과 진화과정, 그리고 현생퇴적작용을 보다 상세히 연구하고자 하였다. 이를 위해 이번 3차년도에서는 지구조 진화와 현생 퇴적작용에서 다음과 같은 내용을 중심으로 연구를 수행하였다.

1. 1994년부터 1999년까지 수행한 다중채널 탄성파 탐사의 결과로서 한반도의 대륙주변부에서 발생한 대륙지각의 리프팅과 그 이후 발생한 울릉분지의 형성과정을 재구성하였다.
2. 울릉분지와 그 주변부를 포함하는 지역 전체에 대한 중·자력 이상치를 구하여

이와 관련된 동해남서부의 지구조 해석을 수행하였다.

3. 퇴적·고생물 분야

한국대지는 반원양성 퇴적물의 집적이 우세하고 저서생물에 의한 교란작용이 활발히 진행되는 해역이지만, 일부 해저산 사면에서는 저해수면시기에 해당하는 구간에서 암설류가 확인된다. 울릉분지간 통로에서 채취한 시추퇴적물의 최표층은 적갈색의 산화층이 수십 cm 층후를 갖는 반면에 울릉분지평원으로는 층후가 감소하고 일본분지를 향하여 증가하는 경향을 보인다. 울릉분지 남서측에 위치한 대륙붕은 팔립세스트퇴적물의 재동에 의한 조개편 또는 암편들이 포함된 사질퇴적물의 집적이 우세하다. 울릉분지간 통로에서 채취된 테프라층들은 대부분 퇴적동시적으로 재동된 내부퇴적구조를 가진다.

- 시화학적 분석에 의한 퇴적물 조성은 홀로세 퇴적물과 그외 퇴적물에서 확실히 나르게 나타난다. 이러한 현상은 비록 홀로세의 퇴적층의 두께는 다르지만 동해권지역에서 공통적으로 일어나는 현상이다. 퇴적물 조성에 차이가 일어나는 것은 대륙기원 퇴적물의 공급원 차이이거나 생물기원 퇴적물의 공급 정도에 의해 달라지는 것으로 해석된다. 화학분석의 결과 해석된 풍화지수는 홀로세 기간동안에 점이적인 증가로 특징지을수 있으며, 공간적으로는 약간의 차이를 보여준다. 이와 같은 현상은 풍화를 많이 받은 대륙기원 물질의 유입 정도가 공간적으로 다를수 의미한다. 탄산염함량과 유기물 함량에 근거한 동해의 고생물생산을 유추하여 본 결과 동해는 빙기에 감소하고 간빙기에 증가하는 경향은 보이고 있으며, 일반적인 중위도 지역의 생물생산 형태와 반대되는 경향을 보인다. 이러한 현상은 동해의 고생물생산이 일반적 해양과는 달리 지형학적 또는 지리학적인 요소에 의해 영향받고 있음을 지시한다.
- 자동코아다중검침기로 6개의 퇴적상을 구분하였으며, 코아 퇴적상간의 대비를 정밀하게 연결하였다. 동해 한국측 대륙주변부에서 채취된 코아퇴적물의 상부층인 홀로세와 플라이스토세 상부층은 적어도 4개는 서로 상호 대비가 잘 이루어진다. 한국대지의 서측에서 채취된 코아퇴적물은 매우 안정된 환경에서 형성되었으나 한국대지 동측에서 채취된 코아퇴적물은 매우 불안정한 환경에서 퇴적되었음을 보여준다. 울릉분지 일본분지 통로에서 채취된 코아퇴적물에서는 두꺼운 헤저화산재층이 여러 번 반복하여 나타나며, 코아퇴적물간의 대비를 잘 보여 주어서 퇴적물의 침식 과정을 이해할 수 있다. 자동코아다중검침기를 사용하면 홀로세층의

성계를 명확하게 삼을 수 있는 경우가 많으며, 퇴적율 계산도 가능하다. 홀로세 동안의 퇴적율은 최저 0.07 mm/yr에서 최고 0.60 mm/yr까지 계산되었다.

수심이 깊은 곳에 위치한 두 코아 (MB99PC-2, MB99PC-3)는 용해률 많이 받았다. 실리카의 증가에 의한 생산량의 증가와 용승작용이 유공충의 생산성을 통제했다. 저층수의 부식성은 코아 하부구간부터 코아의 중간부근까지가 퇴적된 동안 서서히 감소하는 경향을 보인다. 코아의 상부구간이 퇴적될 동안 저층수의 부식성은 증가하는 경향을 보인다. 부유성 유공충 *N. pachyderma*가 풍부히 나타나는 구간은 용승작용이 활발했다. 코아의 최하부부터 상부로 향할수록 차가운 표층수가 존재하다가 표층수의 변화가 적은 안정된 표층수가 존재하는 기간을 지나 상대적으로 따뜻한 표층수로 바뀐다.

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1. 국외 기술동향

- (1) 동해의 퇴적환경 연구는 일본의 몇 개 대학이 주도적으로 수행했으나 주로 미고생물과 지화학적인 방법을 이용하였기 때문에 총체적인 규모로는 시도되지 못했다.
- (2) 선진국에서는 1970년 이후 막대한 자금을 투자하여 나중채널 단성과탐사를 중심으로 자국 및 외국의 해양자원탐사를 수행해 오고 있다.
- (3) 캐나다, 미국, 유럽, 일본 등은 물질플럭스의 이동, 일차생산력과 표층해양과정 그리고 저서과정 등을 연구하고 있다.

2. 국내 기술동향

- (1) 탄화수소, 메탄가스수화물, 그리고 인산염 광물의 부존가능성이 높지만 지난 20년간 한반도 남동쪽의 6광구 일부에서만 외국의 기술에 의해 자원탐사가 단편적으로 소득없이 행해졌다.
- (2) 최근까지 인원, 장비, 그리고 기술면에서 동해의 분지규모연구를 국내의 연구진이 독자적으로 수행하기 불가능하였으나 1992년 한국해양연구소에서 종합조사선 온누리호와 연구장비를 도입하면서 국내의 연구능력은 비약적으로 발전했다.
- (3) 1992년 이후 현재까지 한국해양연구소는 동해의 해양환경과 지구조 연구를 성공적으로 수행하였으며 그 연구결과 동해전체의 짜임새를 도출하기 위해서는 분지규모의 연구가 필요하다고 인식하고 있다.

3. 우리의 기술수준

국별 기술내용	주요기술선진국	우리나라
심부 지진의 구조 및 층서 해석	* 다중채널던성파 탐사를 주 로하며 그 외 중력 및 사력 해석을 병행함. * 해저면 지진계를 이용하여 얻는 심부 탄성파자료로부터 모호면까지 약 30 km 두께 까지 지각구조를 연구.	* 한국 해양연구소에서는 선진국과 나란가지의 장비와 기술을 보유. * 한국해양연구소만이 해저면 지진 계자료의 처리 및 해석을 수행중이 며 그 기술은 선진국 수준임.
제4기 퇴적환 경 연구	* 해양분시규모의 제4기 퇴 적작용을 연구	* 국내에서는 유일하게 한국해양연 구소에서 1993년부터 연구를 추진

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 탄성과 및 중자력자료에 의한 울릉분지의 구조 연구

대표저자: 박찬홍 (한국해양연구소 해양지질연구단)

1. 서 론

울릉분지의 탄성과 자료가 분지 전체의 구조적 특성을 공간적으로 설명할 만큼 충분치 않고, 탄성과 자료에서 도출된 시간 구조도의 특성상 심부로 갈수록 실제 구조와 다르게 왜곡되어 표현될 수 있다. 뿐만 아니라 울릉분지에는 퇴적층이 두껍고 화산체들이 산발적으로 관입 혹은 분출 현상되어 있다는 것 (Chough and Lee, 1992; Lee, 1992)을 고려할 때 탄성과 자료와 함께 이를 공간적으로 해석하기 위한 중력 및 자력자료가 필요하다. 탄성과 및 중력, 자력자료를 결합하여 울릉분지를 구조 해석한 결과가 일부 있지만 (서 등, 1998; Lee et al., 1999) 이들 연구에서는 주로 탄성과의 층서 및 시간구조 등이 중점적으로 다루어졌고, 사용된 중력 및 자력자료도 울릉분지 전체를 해석하기에는 공간적인 분포가 충분치 않았다. 1990년대 들어 한국해양연구소가 동해의 지구물리조사를 본격화하면서 자료결핍 지역에 대해 상당한 지구물리자료를 축적할 수 있게 되었다. 특히, 조사선 온누리호에 탑재된 다중채널 탄성과 탐사 시스템 및 신상중력계와 이어도호의 선상 그래디오미터를 이용한 지구물리탐사는 조밀하지는 않지만 울릉분지 전역에 고른 자료분포를 제공하였다. 또한 탄성과 속도 분석 자료를 이용하여 산출한 퇴적층 두께나 심도분포는 중력이상이나 자기이상과 결합함으로써 울릉분지의 심부구조 특성을 해석하는데 보다 도움이 될 수 있다.

본 연구에서는 울릉분지내의 탄성과 자료에 의하여 기 분류된 퇴적층서를 기준으로 하여 탄성과 단면에서 각 층 단위를 구분하고 층별 두께 및 심도를 수치자료화 함으로써 중력 및 자력자료와 상관관계 분석을 통한 상호 보완적 해석을 시도하였다. 무과의 한계가 있기는 하지만 탄성과 자료로부터 중천부의 해저지층 심도 및 두께를 알 수 있다면 중력 및

자력자료의 보완을 통한 이치적인 해석에 의해서 울릉분지의 심부구조에 접근할 수 있을 것이다. 따라서 인공위성 및 선상 관측 중력 및 자력 자료의 활용을 통해서 탄성과 자료 해석의 신뢰성을 기하고 자료결핍지역에 대한 보완을 통해서 울릉분지의 퇴적구조와 음향기반구조를 보다 정확히 파악하였다. 두꺼운 퇴적층의 존재로 인하여 드러나지 않는 기반암내의 화성암체의 분포를 파악하기 위해서는 효과적인 방법으로서 자기이상에 의한 해석신호(analytic signal) 계산 기법을 활용하였다. 본 연구에서는 이와 같은 시도를 통하여 두꺼운 퇴적층과 많은 화성암의 분출 및 관입 때문에 해석이 난해한 울릉분지의 구조 및 지각·층을 파악하고, 울릉분지의 확장과 관련하여 논의하고자 한다.

2. 자료 및 분석

연구지역은 Fig. 3-1-1과 같이 울릉분지를 중심으로 하며 본 연구에서 주로 사용된 자료는 수심, 자력, 중력 및 탄성과 자료이다. 수심, 중력 및 자력자료는 미국 NGDC (National Geophysical Data Center) 및 1990년 이후 한국해양연구소에서 획득한 자료를 최대한 확보하여 사용하였다. 중력자료는 선상중력자료에 인공위성 해수면고도 자료로부터 산출한 중력 자료를 결합하여 사용하였다.

선상중력은 NGDC의 자료에 바탕을 두고 있으며, 최근 한국해양연구소가 울릉분지 북서 주변부에서 획득한 자료 (석 등, 1993)도 포함한다 (Fig. 3-1-2). 2' 간격의 격자로 구성된 위성중력자료는 ERS 1, Geosat ERM, Geosat-GM 위성의 해수면 고도 측량으로부터 산출한 최신 자료 (Sandwell and Smith, 1997; Smith and Sandwell, 1995)에 기초하고 있다. 선상중력 자료 중에는 선상중력에서 나타나는 축선간 혹은 조사시기 및 기간의 차이에 따른 오차는 Sandwell 과 Smith (1997)가 최근 공개한 정밀 위성 중력 자료에 대하여 보정하고 결합하였다. 각 축선상의 선상중력을 안정된 위성중력분포에 대비하여 보정하고 결합하기 위하여 모든 가용한 선상중력 자료는 축선별로 분리한 후 위성중력 비교를 통해서 교차점과 오차 크기를 산출하고 최소자승법을 이용하여 보정하였다. 이 방식은 개별 축선을 따라서 상대적인 중력 이상을 보존하면서 교차오차를 감소시키는 이점을 갖기 때문에 선상중력-위성중력간의 교차점 오차 보정 기법에 비해서 훨씬 신뢰성이 높다. 결합된 후리에어이상 분포는 위성중력의 광역적 성분과 선상중력의 상세한 성분을 모두 포함하

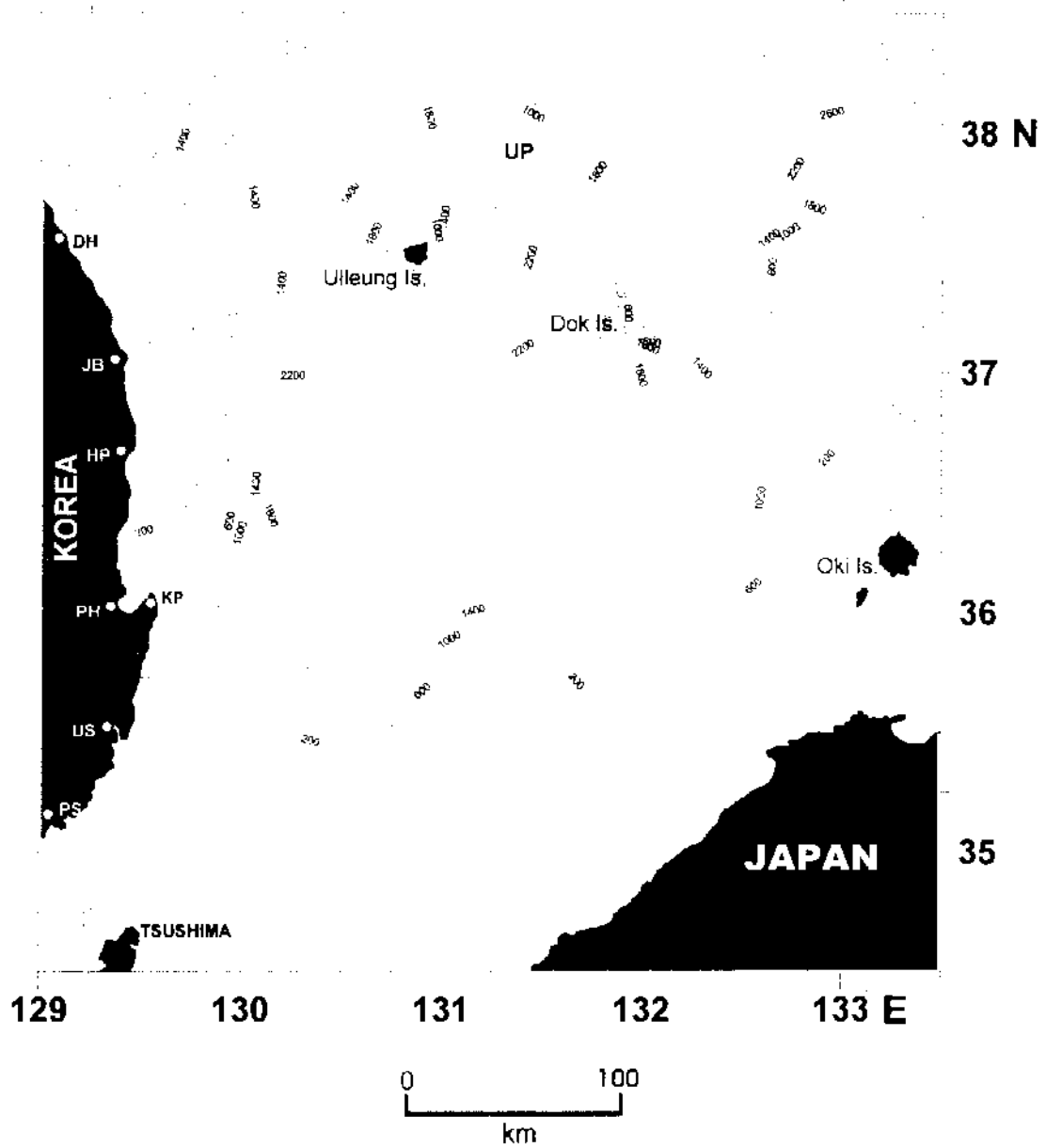


Fig. 3-1-1. Study area and topography of the Ulleung Basin. The contour interval is 100 m. DH=Donghae, JB=Jukbyeon, HP=Hupo, PH=Pohang, KP=Kuryong-po, US=Ullsan, and PS=Pusan.

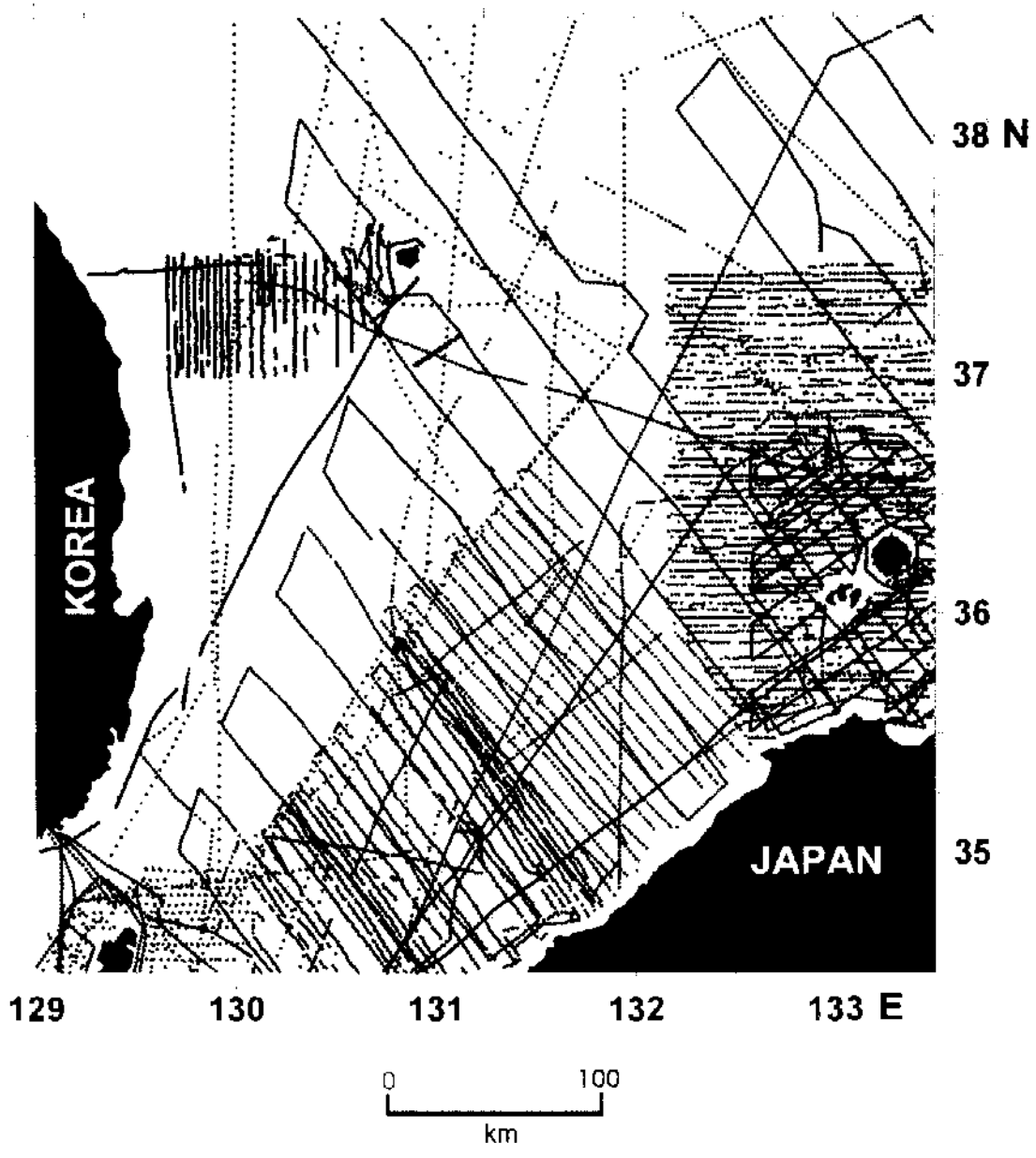


Fig. 3 1 2. Shipborne gravity data coverage.

고 있으며, 선상자료가 결여된 울릉분지의 서부 및 북부 해역을 포함하여 울릉분지 선체에 고른 중력분포를 제공한다 (Fig. 3-1-3). 이와 같은 위성중력과 선상중력의 결합은 선상중력 자료의 불균질성을 해소하고 단주기 성분을 포함한 고해상도의 중력 분포를 제공할 뿐 아니라 선상자료가 결여된 지역과 광역적으로 연결시키기 때문에 해저지질구조 해석에 크게 기여할 수 있다.

자력자료는 NGDC 자료 및 한국해양연구소 자료를 포함하여 18개 항해자료로 되어 있다 (Fig. 3-1-4). NGDC 데이터베이스에서 자료가 빈약한 울릉분지 중앙부 및 서부 해역에 대해서는 1987년 이후 획득된 한국해양연구소의 자료에 의해서 보충되었다. 특히, 1992년 한국해양연구소와 일본 치바대, 고베대, 농정대 해양연구소 등 공동연구팀은 자료가 거의 없었던 울릉분지 중앙부를 중심으로 자력자료를 획득하여 울릉분지 연구에 귀중한 자료를 추가하였다. 본 연구에서 사용한 총 자력자료는 약 49,000점에 이른다. 측선간 혹은 조사단위간에 존재하는 오차를 줄이기 위하여 Verhoef et al. (1991)에 의해서 제안된 교차점오차 최소화 기법을 적용하고 결과를 자기이상도로 나타내었다 (Fig. 3-1-5). 자기이상에서 해저 자성체 분포를 보다 뚜렷이 파악하기 위해서 자기이상의 수평미분과 수직미분의 결합으로 이루어지는 해석신호를 산출하였다. 해석신호의 중요한 특징은 기존의 자극화 변환곡선은 나르케 자성체의 사화방향과 무관하게 자기이상을 단순화시킨다는 것이다 (MacLeod et al., 1993). 해석신호의 진폭은 자성체 자화상도의 진폭과 관계가 있다. 자기이상의 해석신호 진폭은 주변 자기장이나 자성체의 자화방향과 무관하게 자화특성 차가 나타나는 경계를 따라 최대치를 이룬다 (Nabighian, 1972; Atchuta et al., 1981). 따라서 최대의 해석신호는 대체로 자성체의 경계를 따라 나타난다 (Roest et al., 1992). 이러한 특성을 이용하면 해석신호의 절대치로서 자성체의 자화방향에 대한 가정 없이 자성체의 경계를 파악할 수 있다. 이것은 특히 잔류자화가 크게 영향을 주는 자성체의 자기이상을 단순화하는데 매우 효과적인 방법이다. 해석신호는 진폭 함수를 이용하여 서로 직교하는 3개의 미분치에 의해서 계산할 수 있는데 (Roest et al., 1992) 이것을 구하기 위하여 자기이상치를 3° 간격으로 격자화하고 각 방향에 대한 미분치를 계산하였다. 자기이상분포에서 북향, 동향에 대한 수평미분치와 수직미분치로부터 진폭을 계산하여 작성한 해석신호의 분포는 Fig. 3-1-6과 같다.

탄성과 자료는 한국석유개발공사에서 1987년 획득한 11개 측선 및 한국해양연구소에서 1994년 획득한 4개의 측선 등 15개 측선자료를 사용하였다 (Fig. 3-1-7). 울릉분지내 15개의

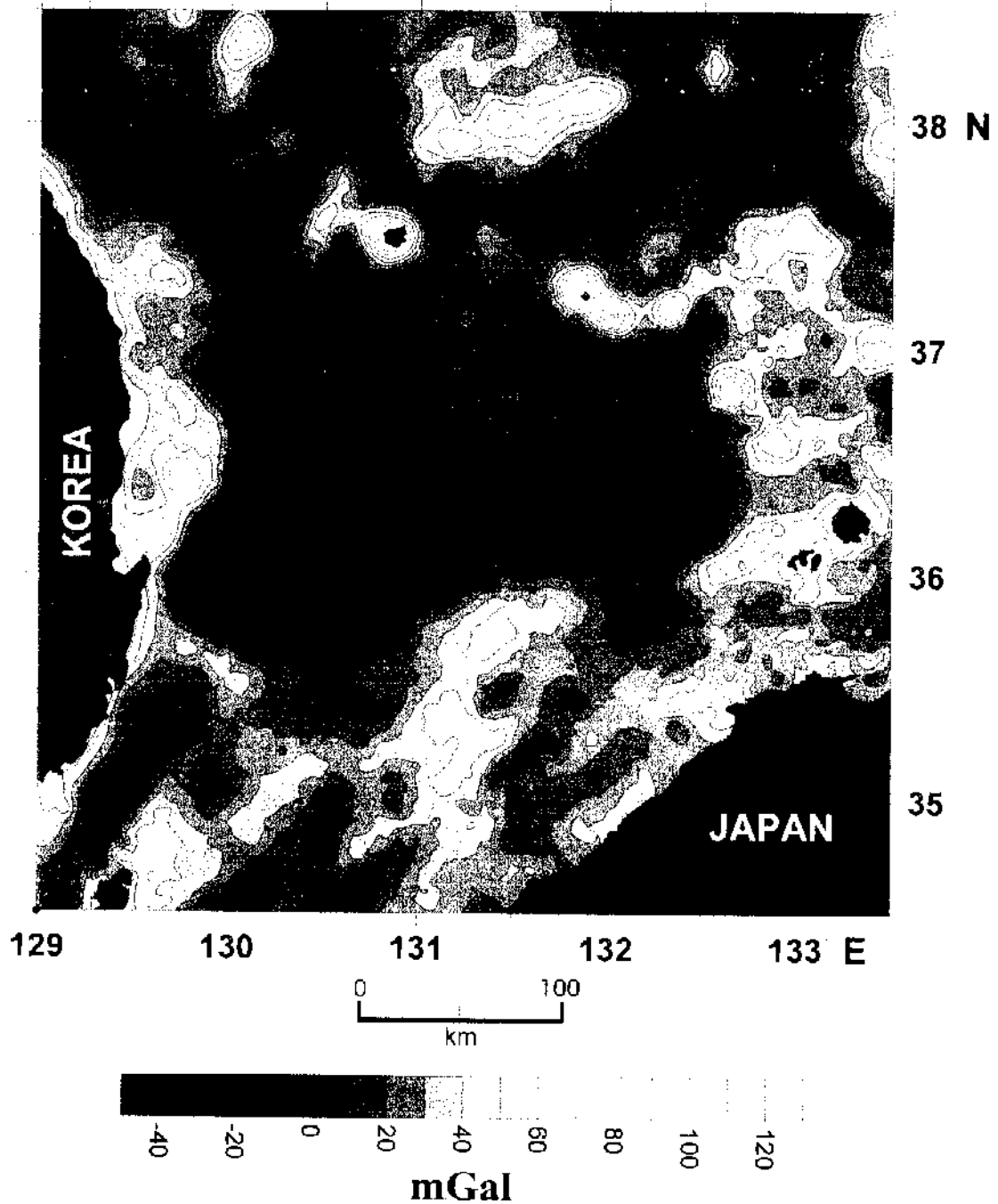


Fig. 3 1-3. Combined shipborne and satellite altimetry derived free-air gravity anomalies after crossover adjustment.

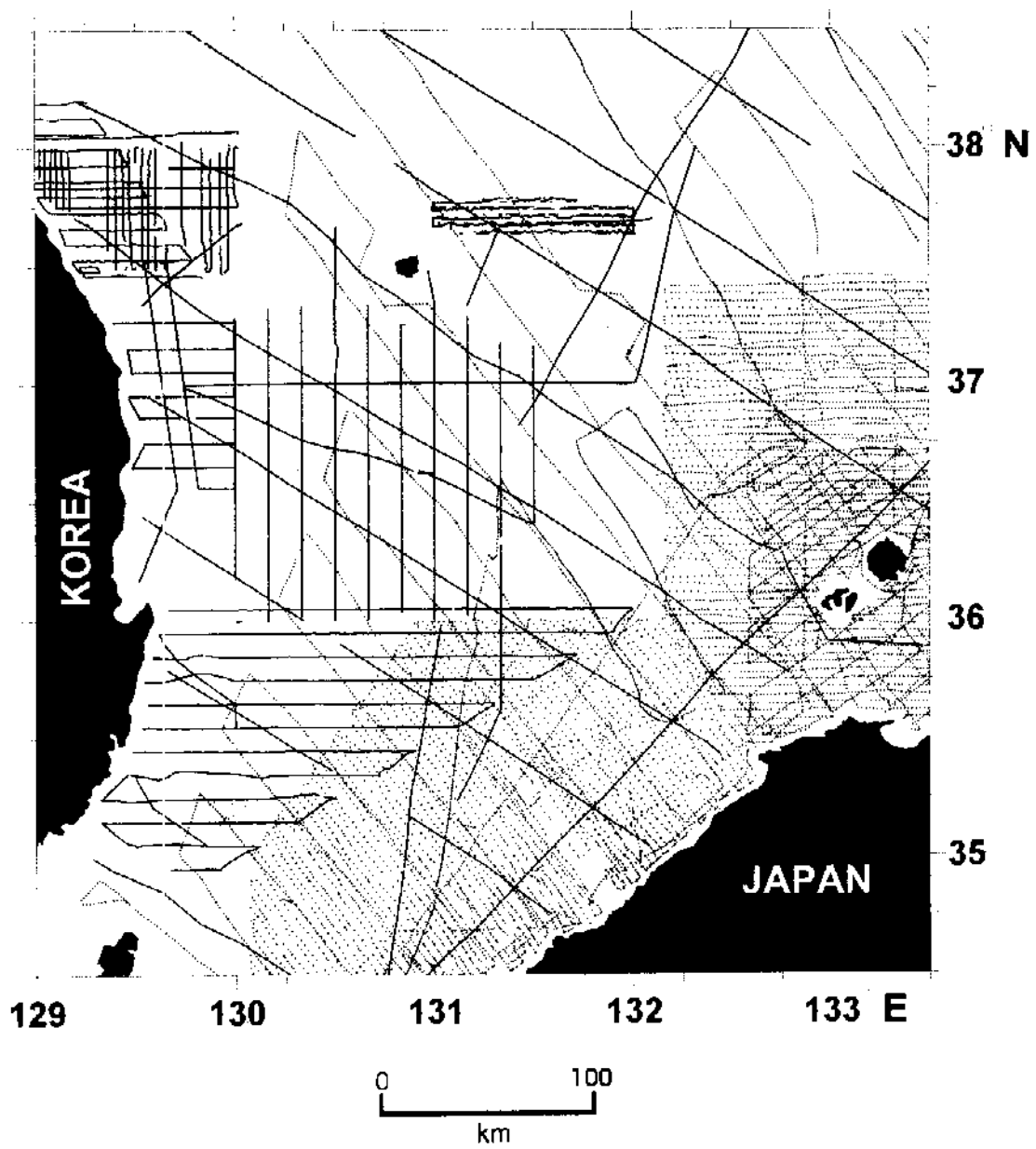


Fig. 3 1-4. Shipborne magnetic data coverage.

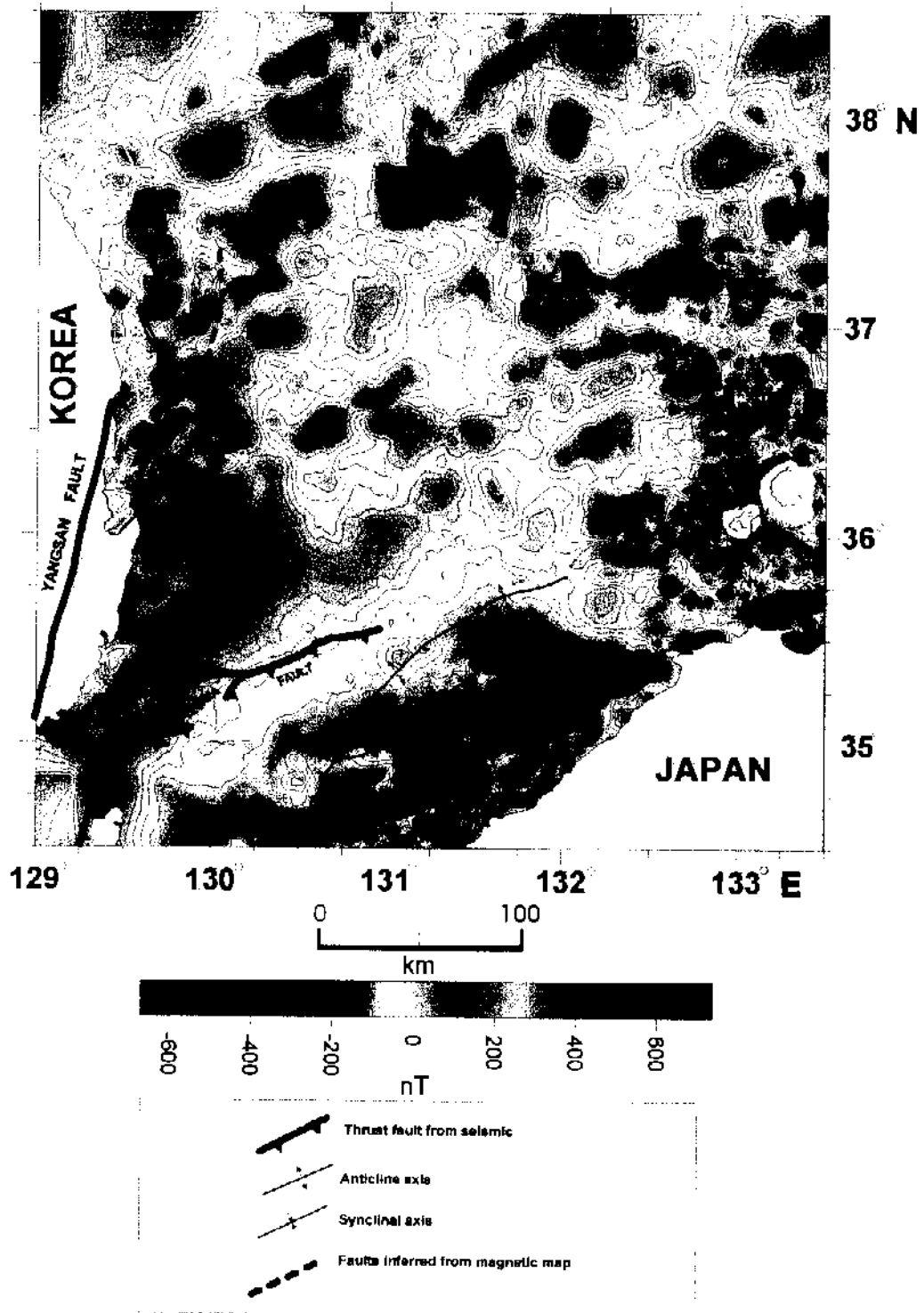


Fig. 3-1-5. Magnetic anomaly contour map produced from crossover error adjustments. Yangsan fault, Tsushima fault, folds off SW Japan, and Tertiary basins offshore the Korean Peninsula are mapped from Minami (1979), KIER (1982), Park (1990), and Choi (1995). The Hupo fault is after Yoon (1994).

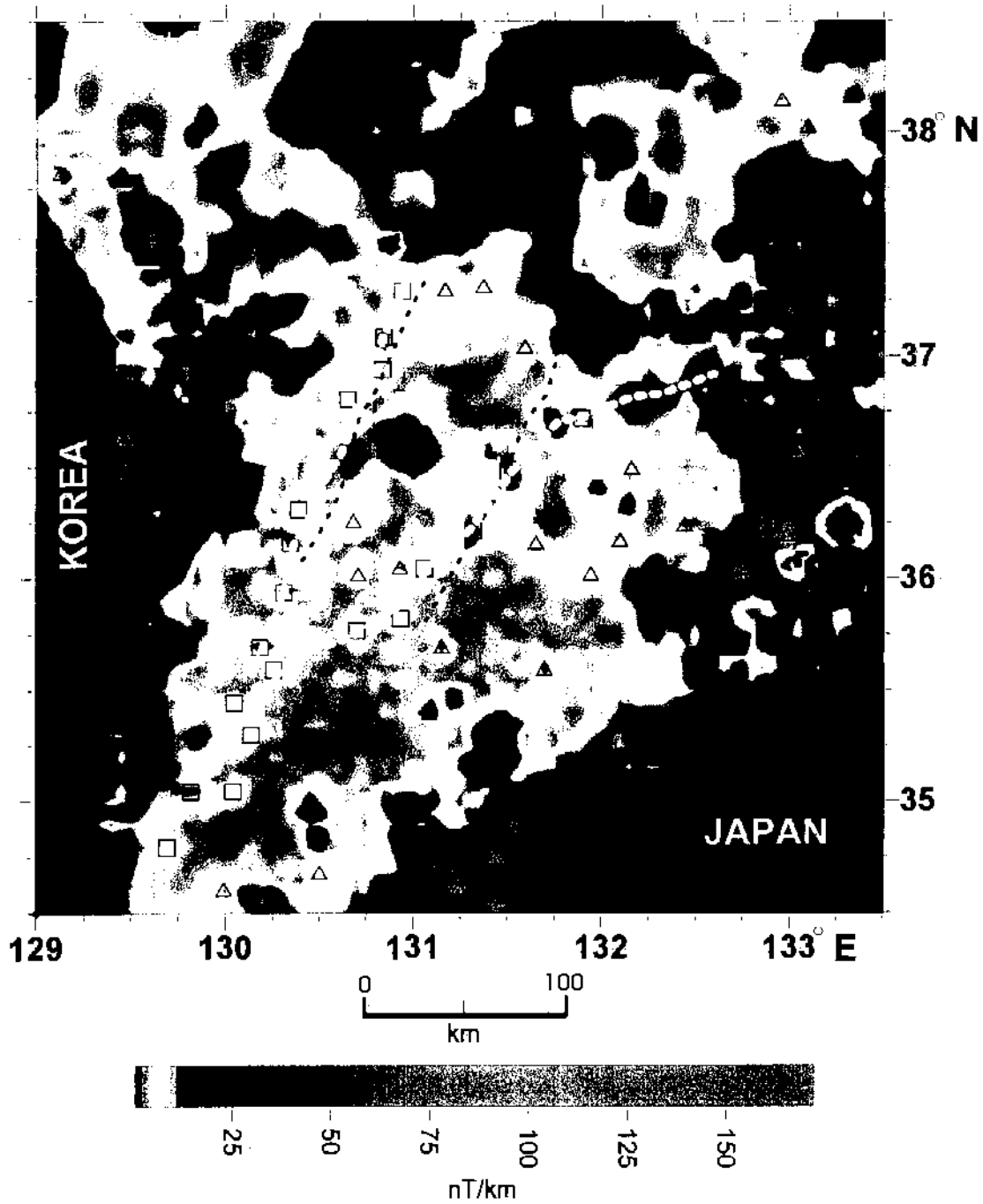


Fig. 3-1-6. The analytic signal map of magnetic anomalies. The analytic signal reveals scattered circular features due to volcanic bodies over the basin. Triangles denote possible magnetic sources. Rectangles are a series of inferred volcanic intrusions emplaced along the fractures at both margins of the central Ulleung Basin.

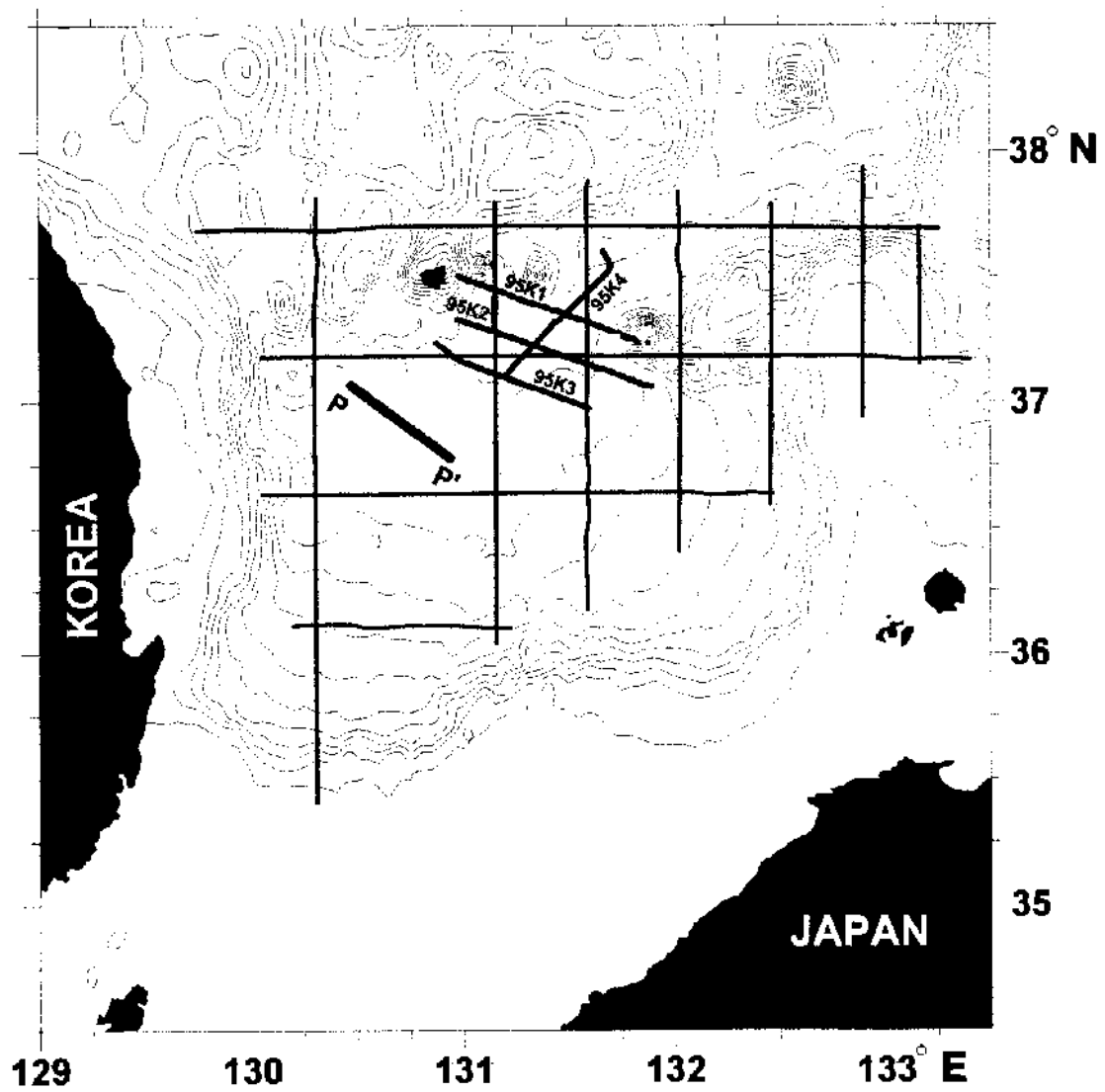


Fig. 3 1 7. Locations of seismic profiles used in this study.

탄성과 단면에서 5개 층 각각의 두께를 왕복주기로 수치회한 후 구간 속도지표를 이용하여 거리 단위의 층후와 심도를 산출하였다. 각 층의 구간속도는 동일 층내 속도 (Lee, 1992)를 개략 평균한 값을 이용하였다.

3. 결과 및 토의

울릉분지에서 음파반사특성 및 시대층서를 고려할 때 다중채널 탄성과 단면상에서의 층서는 unit I, II, III, IV (또는 III-1)로 분류된다 (Lee, 1992; 한 등, 1997; Fig. 3-1-8). 본 연구에서는 음향기반 상부의 4개의 퇴적층 각각에 대하여 구한 두께를 합하여 총 퇴적층 층후분포를 만들었다. 음향기반 상부의 퇴적층은 울릉분지 중앙부에서 지역적인 박층을 제외하고는 2.5-3.0 s의 두께로 고르게 쌓여 있다 (Fig. 3-1-9). 이와 같은 퇴적층의 두께는 야마토 분지의 1.6 s (Tamaki et al., 1979)와 일본분지의 2.2 s (Tamaki, 1988) 보다 훨씬 두꺼운 것이다. 퇴적층은 울릉분지 북동부에서부터 남서부쪽으로 점차 두꺼워지는 양상을 나타낸다. 울릉분지 중앙부에서 국부적으로 나타나는 얇은 퇴적층은 기반암 노출부 상부에 놓인다. 퇴적층은 한국대시나 북도, 오키뱅크 부근 쪽으로 1.0 s 이하로 얇아지나 울릉분지간 평원 쪽으로는 1.5 s 이상 두꺼운 퇴적층이 연장되어 발달하고 있다. 울릉분지 동남부인 오키뱅크에서 울릉분지쪽으로 이어지는 대륙사면의 기저에서는 3.5 s 이상의 두께를 가진 퇴적층이 지역적으로 발달하고 있다. 울릉분지의 두꺼운 퇴적층은 분지가 확장되면서 빠르게 침강한 때 분지 주변에서 일어난 사태에 의해서 축적되었거나, 분지가 열리면서 일어난 외부로부터 급격한 퇴적물 유입에 의해서 형성된 것으로 보인다.

각 단위 퇴적층 unit I, II, III, IV내에서 구간속도를 평균한 값으로부터 각 층의 두께를 깊이단위미터로 산출하고 합산하여 총 퇴적층후를 구하였다. 4개 단위층 I, II, III, IV의 평균속도는 각각 1.60 km/s, 2.17 km/s, 3.03 km/s, 4.20 km/s이다 (Tab. 3-1-1). 깊이단위인 미터로 환산한 울릉분지의 퇴적층 층후 분포는 지역적인 차이를 제외하면 전체적으로 왕복주기에 의한 층후분포 양상과 유사하다. 울릉분지 중앙부에서 3,000-4,000 m의 두께를 보이는 이 두꺼운 퇴적대는 분포범위가 남서쪽으로 넓어지면서 북동-남서 방향성을 가지고 분포한다 (Fig. 3-1-10). 퇴적층은 울릉분지의 중앙 북동부, 서북서 및 동남동과 남서 주변부에서 지역적으로 4,000 m 이상 두꺼워 지는데, 특히 남서단에서는 6,000 m 이상으로 가장 두꺼운 퇴적대를 이룬다.

Table 3 1 1. Range and average of seismic velocities in each.

Unit \ Velocity	Range(km/sec)	Average(km/sec)
Unit I	1.52-1.69	1.60
Unit II	2.04-2.38	2.17
Unit III	2.40-3.80	3.03
Unit IV	3.82-4.67	4.20

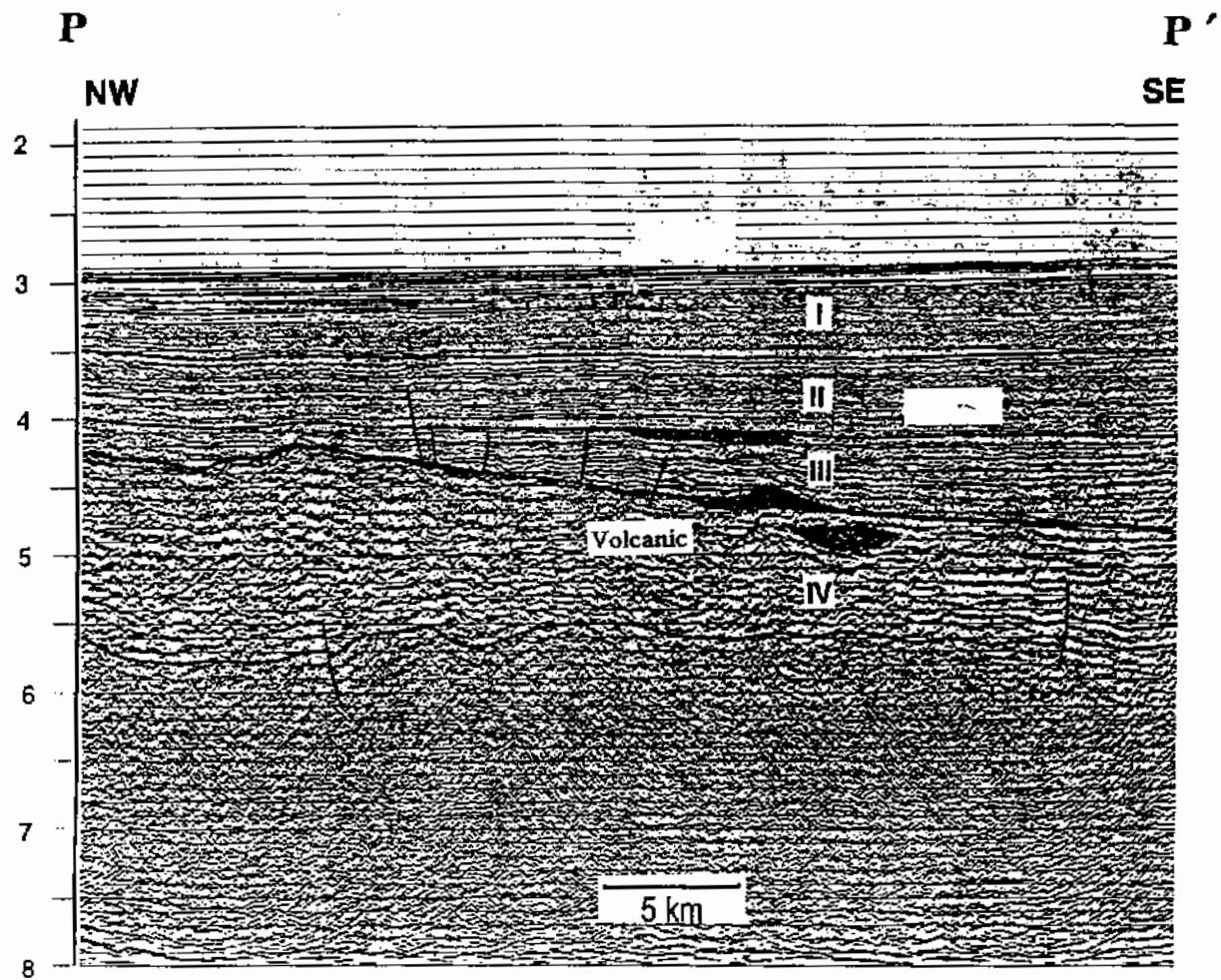


Fig. 3 1-8. A typical seismic profile showing four major sedimentary units in the Ulleung Basin (Park, 1998). See Fig. 3 1-7 for the location.

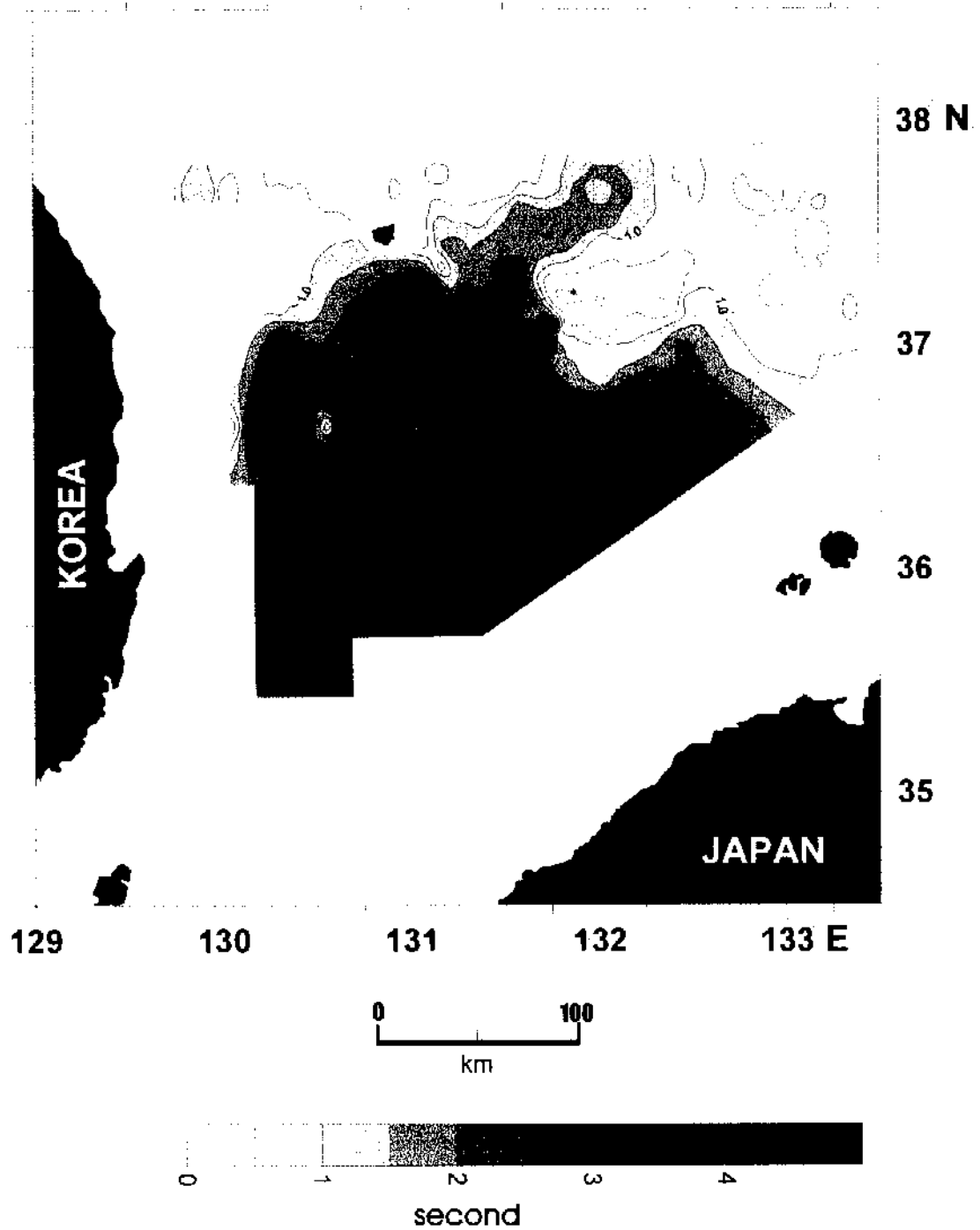


Fig. 3 1 9. The contour map of total sediment thickness in second. Contour interval is 0.2 s TWTT.

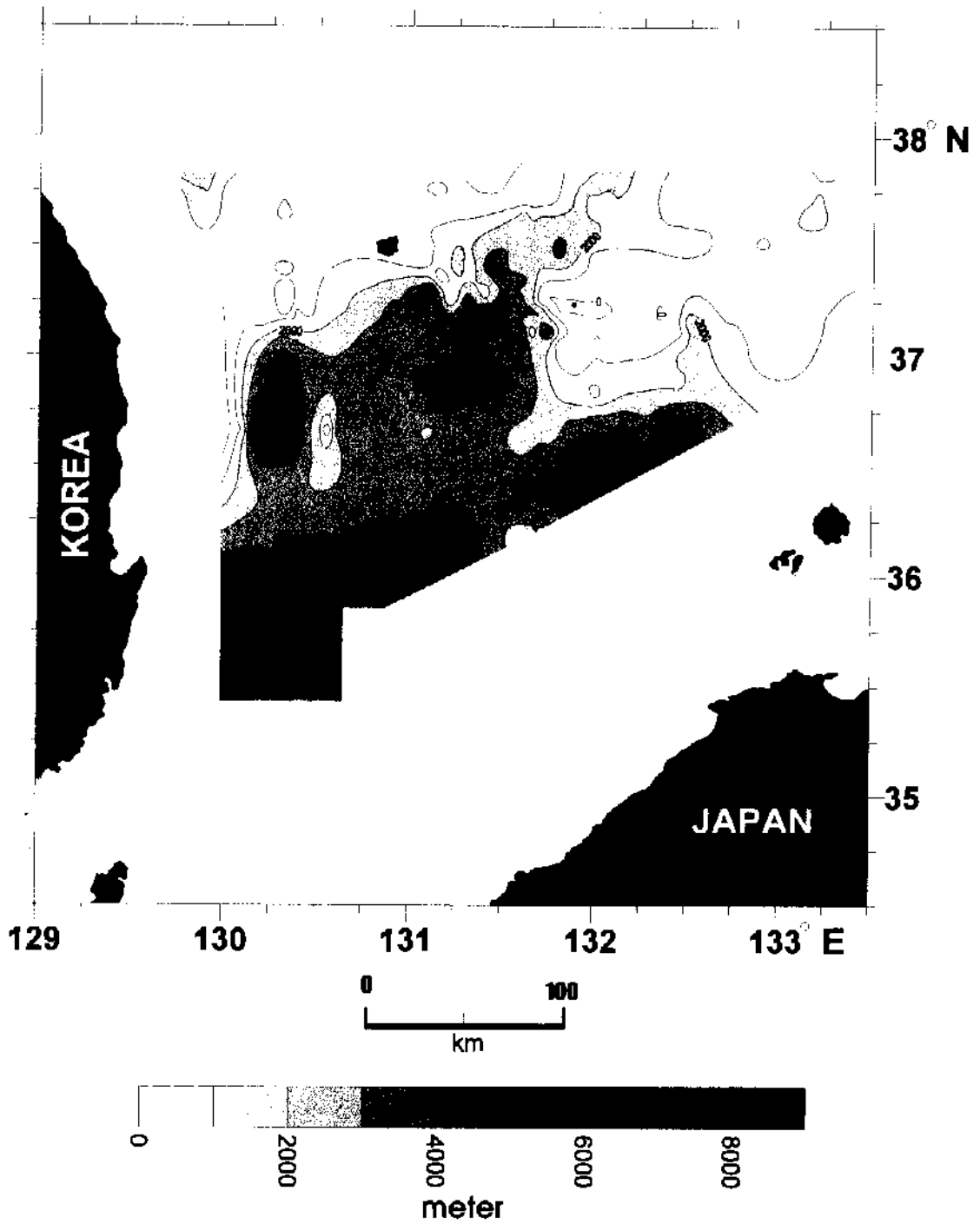


Fig. 3-1-10. The contour map of total sediment thickness in meters. Contour interval is 500 m.

음향기반은 한국대지, 오끼뱅크 및 한국동해 연안 등에서 1,000 m 이하까지 알아지는 반면 울릉분지 내부에서는 4,000 m 이상으로 깊어진다 (Fig. 3-1-11). 특히, 서쪽 가장자리 및 남서단에서 음향기반은 7,500 m 이상 깊어로 나타나며, 울릉분지 중앙 북동부와 동쪽 주변부에서는 국지적으로 6,000 m 이상 깊어진다. 음향기반은 울릉분지 중앙부에서는 북동-남서 방향으로 길게 저지대를 형성하고 있다. 이 저지대는 분지 중앙부에서 지역적으로 약간 솟아 있는 구릉 지역에 의해서 남서단과 북동단의 함몰대로 분리된다. 이와 같은 북동-남서 축의 분지 중앙부 저지대는 울릉분지의 확장시 분지의 함몰 및 새로운 지각의 형성과 관련이 있다. Ludwig et al. (1975)이 일본분지나 야마토분지의 분지 중앙부에서 퇴적기반은 대체로 평탄한 반면에 울릉분지의 퇴적기반이 전체적으로 약간 굴곡져 나타나는 것은 기반암 상부에 높은 탄성과 속도를 갖는 퇴적층이나 화산용암 (volcanic flows)이 놓여있기 때문으로 해석한 반면에, Lee et al. (1999)은 울릉분지 중앙부에서 퇴적기반이 비교적 평탄하고, 지구 (graben)이나 반지구 (half graben) 구조가 나타나지 않는 것은 기반암이 연성적 (ductile nature) 특성을 갖는다는 것을 지지하는 것으로서 해양지각일 가능성을 시사하였다. 울릉도-독도간 지역에서는 음향기반이 약간 높은 구릉을 형성하고 있어 울릉분지간 평원의 깊은 퇴적기반을 울릉분지 중앙부와 분리한다. 울릉분지 중앙부에서 unit III는 이와 같은 퇴적기반의 용기의 영향으로 주변에 비해 얇게 분포한다.

울릉분지에서 후리에어층력이상은 대체적으로 해저지형 변화와 상관성이 큰 것으로 나타나고 있다 (Figs. 3-1-2, 3-1-3 in 박 등, 1999). 그러나 깊도가 매우 낮고 두꺼운 퇴적층이 있거나 화성기반암이 노출한 지역에서는 부분적인 이상대가 형성되기도 한다. 탄성과 자료에 의한 각 단위 퇴적층구조와 후리에어 이상 분포는 부분적으로만 상관성을 갖는다. 탄성과 자료에 의한 각 지층까지의 심도 분포에 따르면 unit II, III 퇴적층 및 음향기반의 구조는 울릉분지의 중앙부에서 북동-남서 방향으로 길게 저지대를 형성하고 있으며, 특히 남서단에서는 주변에 비해서 가장 깊은 지역적인 함몰대를 이루고 있는 것으로 나타났다 (Figs., 3-1-12, 3-1-13, 3-1-14). 36° 40' N, 130° E 및 36° 35' N, 132° 10' E에 중심을 둔 함몰대는 unit I-III와 음향기반 모두에서 발견되었다. 기반암이 드러나거나 얇은 퇴적층으로 피복되어 있는 독도-오끼뱅크 지역, 한반도 연안 및 한국대지 쪽으로는 후리에어 이상 분포나 탄성과에 의한 지층 분포 모두에서 급구배를 이루면서 경계가 거의 일치한다. 울릉분지는 해저 천부 구조나 해저지형상 그 폭에 있어서 남서단이 약 100 km로 좁고 북동쪽으로 가면서 최대 270 km로 넓어지는 형태의 구조를 갖는다. 울릉분지 서쪽 가장자리, 남서단 및 동남단을 따라 나타나는 국지적인 저이상대는 퇴적층의 두께가 상대적으로 두껍고 기반

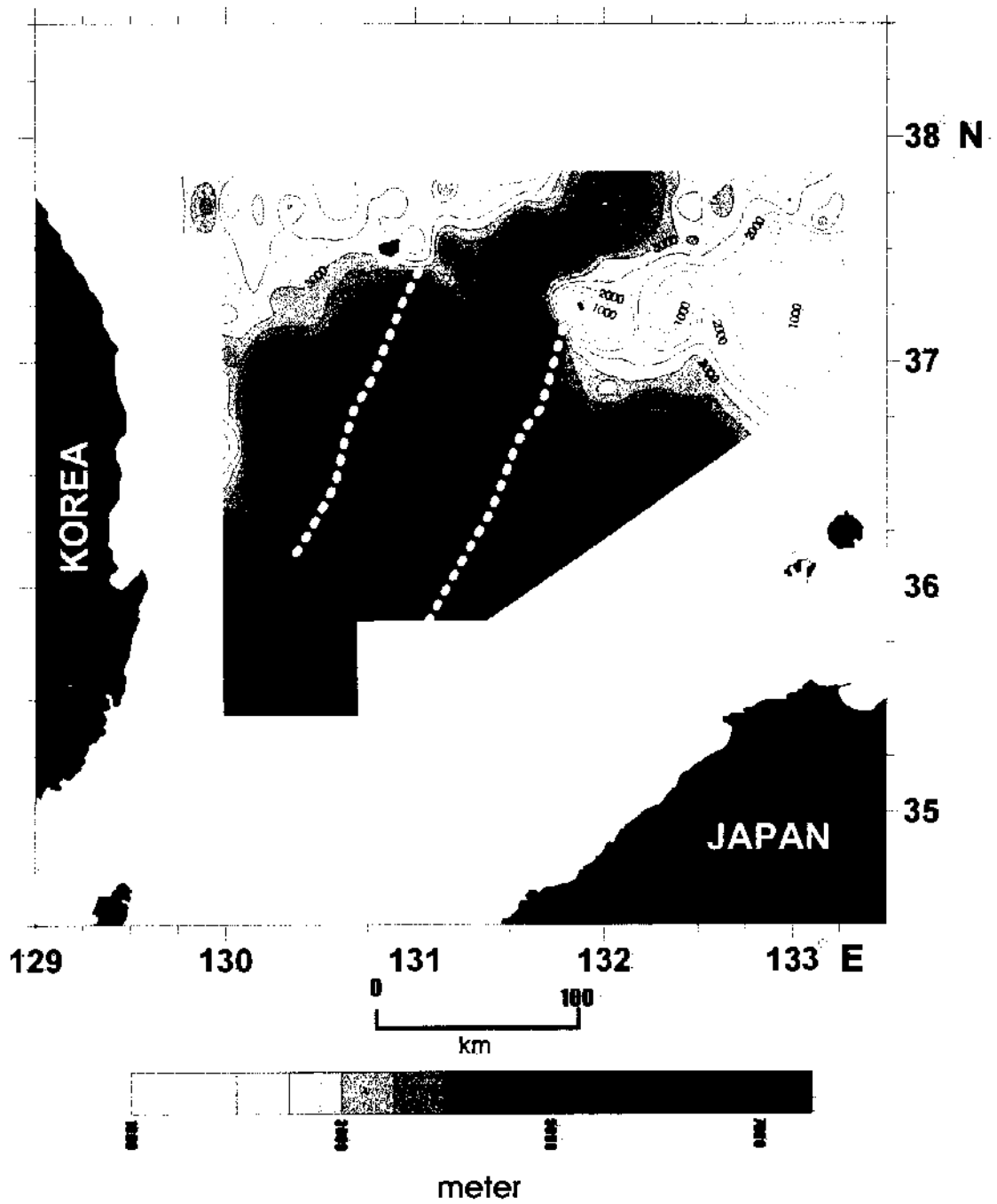


Fig. 3 1 11. The isobase map. Contour interval is 200 m. Thick dashed lines show boundaries of the central deep acoustic basement.

이 함몰되어 있는 기반 지지대의 존재를 지시한다. 그러나 후리에어 이상분포는 공간적으로 부족한 탄성과 자료에 의해서 얻어진 지층 구조도에서 볼 수 있는 것 보다 훨씬 연속적이고 광범위한 퇴적 및 기반구조의 변화 양상을 보여준다. 후리에어 이상분포에 의하면 울릉분지 서쪽 가장자리에 나타나는 두꺼운 퇴적층을 갖는 함몰대는 탄성과 지료에서 보여주는 것과 같이 국지적이지 않고 북쪽의 한국대지 남단에서부터 울릉분지의 남단까지 연속적으로 발달하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 탄성과 자료가 울릉분지를 공간적으로 충분히 메울 만큼 충분치 않은 데에도 원인이 있지만 탄성과가 퇴적층내 협재되어 있는 volcanic sills이나 flow에 의해서 차단되어 기반암까지 투과하지 못한데 (Lee et al., 1999)도 원인이 있다. 한편 울릉분지의 중앙부에서 unit III와 음향기반구조는 울릉분지의 남동단이 깊고, 중앙부가 부분적으로 높아지다가, 울릉도-독도 근처인 북동단에서 지역적으로 약간 깊어지는 형태에서 전체적인 분포 경향이 유사하다. 이에 반해 울릉분지 중앙부에서의 후리에어 이상분포는 전반적으로 이와 같은 구조와 나르게 나타난다. 남서단의 함몰대는 낮은 중력이상과 대체로 잘 일치한다. 그러나 울릉분지 중앙부 및 그 북동부에서 나타나는 고후리에어 이상대는 음향기반이 지역적으로 깊은 것과 배치된다. 이와 같은 고중력 이상은 기반 하부 심부 지각 구조나 지각의 밀도 변화가 존재함을 시사하는 것이다. 박 등 (1996)이 해저면지진계 자료와 반사법 탄성과 단면으로부터 얻은 탄성과 속도와 암석밀도간의 상관관계로부터 지층의 밀도를 산출하여 중력모델링을 실시한 결과에 따르면, 퇴적 기반암층의 밀도는 대륙쪽에서 2.58 g/cm^3 , 중앙부에서 2.63 g/cm^3 로서 대륙쪽에서 분지 내부로 증가하고 있다. 밀도가 2.6 g/cm^3 에서 2.9 g/cm^3 까지의 범위 내에 있는 하부지각 역시 대륙쪽에서 분지 중앙부쪽으로 밀도의 획적인 증가 경향을 나타내고 있는데 이는 대륙지각이 분지쪽으로 가면서 그 물리적 특성이 변화함을 지시한다. 이러한 전이지각의 특징은 분지의 주변부를 따라서 분포하는 저중력 이상대에 의해서도 나타난다. 한편 지각과 상부의 퇴적층을 합한 두께는 대륙쪽인 분지 남서쪽으로 27 km 이상 두껍고 분지 중앙쪽으로 13 km까지 급격히 얇아짐으로써 분지쪽으로는 뚜렷한 지각 박층화를 나타내는 것으로 밝혀졌다 (박 등, 1996). 울릉분지의 후리에어 이상 분포는 퇴적층 및 음향기반 구조가 북동-남서 방향으로 평행하게 긴 저지대를 형성하는 것과 다르게 북동단의 고이상대 분포가 넓고 남서단 쪽으로 고이상대가 좁아지는 분포로 나타나고 있다. 이것은 울릉분지내 박층의 고밀도 지각이 울릉분지 중앙부 전체에 존재하는 것이 아니라 분지 중앙부에서 나타나는 고중력분포 범위와 같이 보다 좁고 제한된 지역에 한정되어 있다는 것을 지시한다. 이것은 해양지각의 존재 범위와 관련되며 서 등 (1993)에서 제시한 마륙보존 형태의 것과는 차이가 있다.

울릉분지에서의 자기이상 분포는 중력이상분포에 비해서 더욱 복잡한 양상을 나타낸다. 울릉분지의 자기이상은 한국대지, 울릉도, 독도, 울릉해산, 한국동해연안 등 해산이나 화산, 기반암 돌출에 의해서 해저지형이 뚜렷이 형성된 곳을 제외하면 전반적으로 해저지형과 대비하기 어려운 분포를 가지고 있다 (Fig. 3-1-5). 이와 같은 자기이상 분포 특성은 두꺼운 퇴적층과 함께 관입 혹은 분출되어 혼재하고 있는 화성암체와 관련지어 설명되어야 한다. 울릉분지의 자기이상은 분포 특성상 250 nT에서 -80 nT까지 완만하고 점진적 변화를 갖는 한국동남부 연안에서 남서일본의 북서연안 지역, 기반암의 돌출과 제3기 퇴적분지의 발달로 음-양 자기이상이 남북 방향으로 배열되어 나타나고 있는 한국동해연안 지역, 30-50 km 파장과 30-100 nT의 저진폭을 가지면서 체계적이지 않은 분포형태를 보이는 울릉분지 중앙부 및 이들의 양쪽 경계를 이루고 있는 일련의 북동-남서 방향의 쌍극자기이상 분포대, 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향의 쌍극자기이상이 배열되어 나타나는 울릉대지 및 한국대지 지역, 단파장으로 변화가 복잡한 오키뱅크 및 일본 북서 연안 지역 등 5개 지역으로 구분된다.

자기이상의 해석신호 분포에는 울릉분지의 곳곳에 화산암의 존재에 기인하는 선상 이상대 및 산발적인 원형의 독립 이상대가 잘 나타나고 있으며 (Fig. 3-1-6), 그 분포 특성상 화산활동은 울릉분지를 둘러싼 외곽 지역 및 한반도 동해 연안과 일본 열도 연안에서 보다 활발하였다는 것을 지시한다. 해석신호 분포에서 구룡포 근해를 포함하는 한반도 남동 해역의 북동-남서 방향성을 가진 선상 이상대는 울릉분지의 확장 초기에 구조선을 따라 일어난 화산활동의 결과로 형성된 염기성 관입암 혹은 분출암의 존재를 반영한다. 울릉분지 중앙부의 북서 및 남동쪽에서 나타나는 원형 자기이상들의 집단적인 선상 배열은 울릉분지의 확장시 분지의 경계부에서 지각의 균열이 일어나고 이곳을 따라 발생한 화성활동의 결과로서 화산분출암 혹은 관입암들이 형성되었음을 지시한다. 분지의 남단에서 울릉분지의 중앙부에서는 소수의 화성 관입체가 산발적으로 나타나고 있는 반면, 울릉분지의 북서와 남동 경계의 외곽에서는 다수의 화성 관입체가 집단적으로 선상 배열되어 나타나고 있다. 이것은 분지 중앙부와 그 외곽 지역의 지각 특성이나 진화 단계가 다르다는 것을 지시하는 것으로서 울릉분지 외곽에서 나타나는 집단적인 화산체 분포는 동해확장시 내륙지각이 열개되면서 형성된 구조선들과 관련되어 있는 반면에, 울릉분지의 중앙부는 지각의 탄성과 속도 구조에서도 제시된 바와 같이 해양지각의 특성을 나타낸다. 울릉분지내에 해양지각이 존

재할 것이라는 주장은 탄성과속도분포 (Kim et al., 1994, 1998; Lee et al., 1999), 중력이상 분포의 정성적 해석 (서 등, 1993), 중력 및 탄성과 속도 구조에 근거한 지각구조 모델링 (박 등, 1996), 탄성과 단면의 해석 (Lee et al., 1999) 등에서 제기된 바 있다. 그러나 기존 연구에서의 주장은 주로 축선에 한정되어 있어서 전체 분포를 보여주지 못하거나 추론적인 결과에 의존한 것이었다.

탄성파에 의해서 얻어진 음향기반은 울릉분지 중앙 북동에서 분지 경계로 보이는 일련의 화산암체들과 거의 비슷한 경계를 보이는 반면 남서쪽에서는 일치하지 않는다. 이것은 퇴적층이 두꺼운 울릉분지 남서부에서는 기반암까지 도달할 정도로 충분히 투과되지 않았음을 지시한다. 즉, 자기이상 및 해석신호에서 보여주는 울릉분지 중앙부 양쪽의 선상분포는 울릉분지의 확장과 관련되어 형성된 화산암체의 배열에 기인한 것으로서 이것은 울릉분지의 지각특성 경계를 시사한다. 이 경계의 안쪽은 탄성과 속도 분포나 지각의 두께에서 그 외곽과 구분된다. 분지내부 지각층내 약 1 km 구간에서 속도가 5.7 km/s에서 6.3 km/s로 증가하는 현상은 층단위 2C의 존재를 시사하는 것이며 이는 해양지각의 존재 가능성을 보여준다 (김, 1999). 분지의 지각은 주변부쪽으로 27 km 이상 두꺼운 반면에 중앙쪽으로 13 km까지 얇아져서 분지쪽으로는 뚜렷한 지각 박층화를 나타낸다 (박 등, 1996). 분지내 한 조의 선상자기이상 중에 남쪽의 경계를 이루는 것은 북동 남서 방향으로 이어지다가 131° 45' E 부근에서 서남서 동북동 방향으로 급하게 휘어진다. 이것은 울릉분지내 해양지각이 남서부에서 좁고 북동쪽으로 기면서 120 km까지 넓어지는 한정된 지역에만 분포한다는 것과 필리핀판 등 해양지각편이 일본열도에 충돌할 때 받은 압축력의 영향으로 울릉분지가 변형되었다는 것을 지시한다.

4. 결 론

음향기반 상부의 퇴적층은 울릉분지 중앙부에서 지역적인 박층을 제외하고는 2.5-3.0 s의 두께로 고르게 쌓여 있으며, 이것은 아마도 분지의 1.6 s와 일본분지의 2.2 s 보다 훨씬 두꺼운 것이다. 울릉분지내 퇴적층은 중앙부에서 3000-4000 m, 극부적으로는 6000 m까지의 두께를 나타내기도 하며 북동에서 남서쪽으로 분포가 넓고 두꺼워지는 양상을 보인다. 음향기반은 울릉분지 중앙부에서 약 4000 m 정도의 깊이를 보이지만 남서단 및 서쪽 주변부에

서 최대 7500 m까지 깊어지고 전체적으로는 남서-북동 방향으로 길게 저지대를 형성하고 있으며 음향기반 상부의 단위 퇴적층들도 기반구조의 영향으로 남서 북동방향성 구조를 나타낸다. 중력 및 자력이상 분포는 자료가 제한적이고 두꺼운 퇴적층 및 화산암체에 의한 투과한계를 갖는 탄성과 자료 보다 심부구조의 경향을 잘 나타낸다. 울릉분지 서쪽 및 남쪽 가장자리의 저중력분포는 두꺼운 퇴적층을 갖는 기반합몰대 및 대륙-해양의 전이지각의 존재를 반영하며, 특히 기반합몰대는 탄성과 자료에 근거한 것과 같이 국지적이지 않고 북쪽의 한국대지 남단에서부터 울릉분지의 남단까지 주변부를 따라 연속적으로 발달하고 있다. 탄성과 자료에서 얻은 분지내부 기반구조는 해저지형분포나 천부 지층구조에서 나타나는 것에 비해서 좁고 긴 저지대를 형성하고 있으며 이 저지대는 분지 중앙부의 고중력이상대와 일치하고 있다. 깊은 수심과 기반암 심도에 대비되는 분지 중앙부의 고중력이상 분포는 울릉분지 지각의 상대적 고밀도와 맨틀의 천부 존재를 지시하는 것으로 탄성과 속도 분포에서도 지시한 바와 같이 해양지각의 존재와 관계가 있다. 분지 중앙부의 고중력 분포 및 깊은 기반지역의 외곽 경계에서의 자기이상과 해석신호의 신상분포는 지각의 열곡대를 따라 형성된 일련의 화성암체를 지시한다. 해양지각은 이 경계 안쪽에 분포하고 있는 것으로 보이는데 그 분포범위는 남서단에서 좁고 북동부쪽으로 그 폭이 120 km까지 넓어지는 제한된 지역이다. 지각의 남쪽 경계가 휘어져 있는 것은 필리핀판이 일본열도와 충돌할 때 울릉분지의 남쪽 지괴를 압축함으로써 변형된 것으로 해석된다.

제 2 절 한국대지의 탄성과 층서 및 지질구조 해석

대표저자: 최동립 (한국해양연구소 해양지질연구단)

1. 서론

동해는 서태평양 연변에 위치한 배호상 분지 중 하나로 서쪽의 한반도와 동쪽의 일본열도로 둘러 싸여 있다. 동해는 크게 3개의 분지 (일본분지, 야마토분지, 그리고 울릉분지)와 각 분지들을 구분하는 3개의 고 구조대 (한국대지, 야마토 뱅크, 그리고 오키뱅크)의 지구조적 특성을 갖는다 (Fig. 3-2-1). 그 동안 일본쪽의 일본분지와 야마토분지 그리고 오키뱅크 및 야마토뱅크 등에 대한 해양지질 및 지구물리탐사는 심해서 굴착프로젝트를 비롯하여 많은 조사 및 연구가 이루어졌다 (Tamaki, 1988; Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki et al., 1992). 한국해양연구소에서는 동해의 지구조적 진화연구를 위해 1993년부터 울릉분지 및 한국대지 해역에 대해 해양지질 및 지구물리탐사를 실시해 왔으며 동해 형성 해석에 필수적인 매우 귀중한 연구결과들을 생산하여 왔다 (한상순 등, 1995, 1996, 1997, 1998). 이들 결과들과 기존 연구결과들을 종합하여 합리적인 동해의 지구조해석에 기여할 수 있게 되었다.

한국해양연구소는 1999년에 한국대지지역에서 다중채널 탄성과 자료를 획득하였다 (Fig. 3 2 1). 울릉분지 북쪽에 위치한 한국대지는 지구조적으로 동해에 남아 있는 여러 대륙조각 중 하나이며, 지형적으로 일본분지와 연결을 가로막는 고 구조대 (structural high)이다. 따라서 한국대지에서 획득한 다중채널탄성과 자료는 한국대지의 지질 및 구조반달을 밝히는데 크게 도움이 될 것이다. 한국대지에 대한 지질학적 정보는 동해 형성과 관련된 지구조적 해석에 매우 가치 있는 자료로 활용될 것이다.

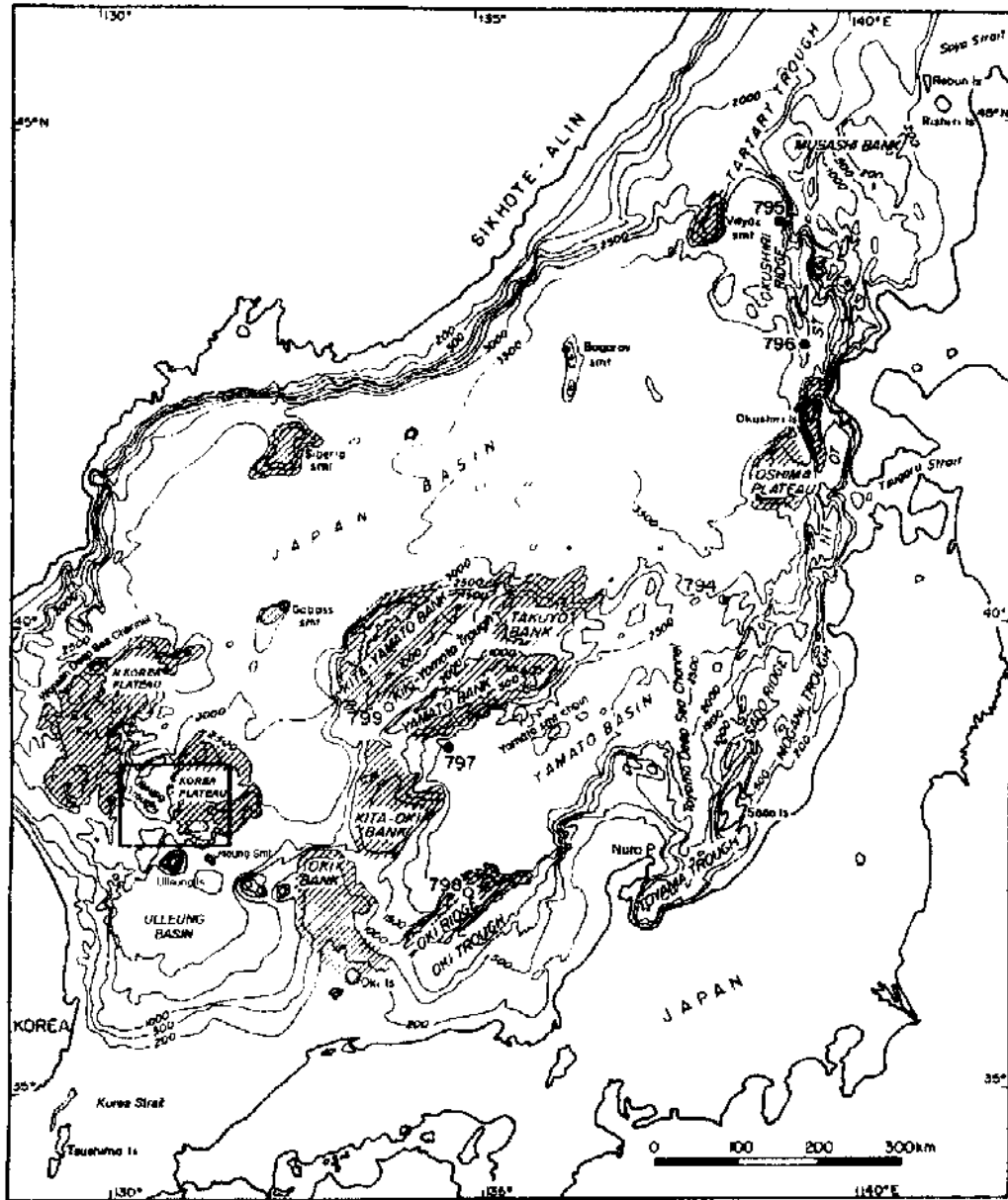


Fig. 3-2-1. Physiography of the East Sea and study area (framed).

2. 해저지형

한국대지 주변해역의 해저지형은 북북동-남남서 방향의 단층애 (fault scarp)를 경계로 서쪽의 수심이 깊은 저지대와 동쪽의 수심이 얕은 고지대로 구분된다 (Fig. 3-2-2). 저지대 분지해역은 남-북 방향의 해저골 (trough) 지형을 이룬다. 수심분포는 남쪽에서 북쪽으로 가면서 약 2,000 m에서 2,900 m 이상으로 깊어진다. 한국대지 해저골은 울릉 분지간 수로 (interplain gap)이외의 또 다른 일본분지와 연결되는 통로이다. 한국대지 해저골 해역은 북쪽 중앙에 발달한 남-북 방향의 아치형 해저릉 (ridge)에 의해 구분된다. 전체적인 해저골의 수심분포는 서측과 동측의 고구조대에 의해 둘러쌓여 있고 남쪽에서 북쪽을 향해 수심이 증가하는 양상을 보인다.

한국대지는 지형적으로 남서쪽 지역이 높고 북동쪽으로 향해 낮아지는 경사진 형상을 보인다. 그리고 한국대지는 몇 개의 북동-남서 방향의 해저릉 (ridges)과 골이 나란히 분포한다. 이들 해저능과 골의 지형적 형태는 지질 구조선으로서 해석된다. 수심의 분포는 남서쪽 해저능의 약 800 m 이하의 고지대에서 북동쪽으로 향해 2,800 m 이상 깊어진다.

3. 연구자료

한국대지해역에 대해 1999년 4월 한국해양연구소 종합 연구선 온누리호를 이용하여 56 채널 탄성과 탐사를 실시하였다. 탄성과 자료의 표준적인 처리과정을 거쳐 축선별 탄성과 단면을 제작하였다. 탐사시 조사선의 속도는 5 노트를 유지하였다. 탐사축선은 3개의 동-서 방향과 1개의 북북동-남남서 방향으로 구성되었다 (Fig. 3-2-3). 위치측정은 GPS 시스템을 이용하였다.

4. 연구방법

연구지역의 탄성과 시퀀스는 크게 3개로 구분하였다. 각 시퀀스 경계는 퇴적층서의 상향결침, 하향결침, 그리고 트런케이션 등의 반사층리 종결양상으로부터 부정합면이나 그와 대응하는 정합면을 찾아 구분하였다 (Mitchum 등, 1977). 3개의 시

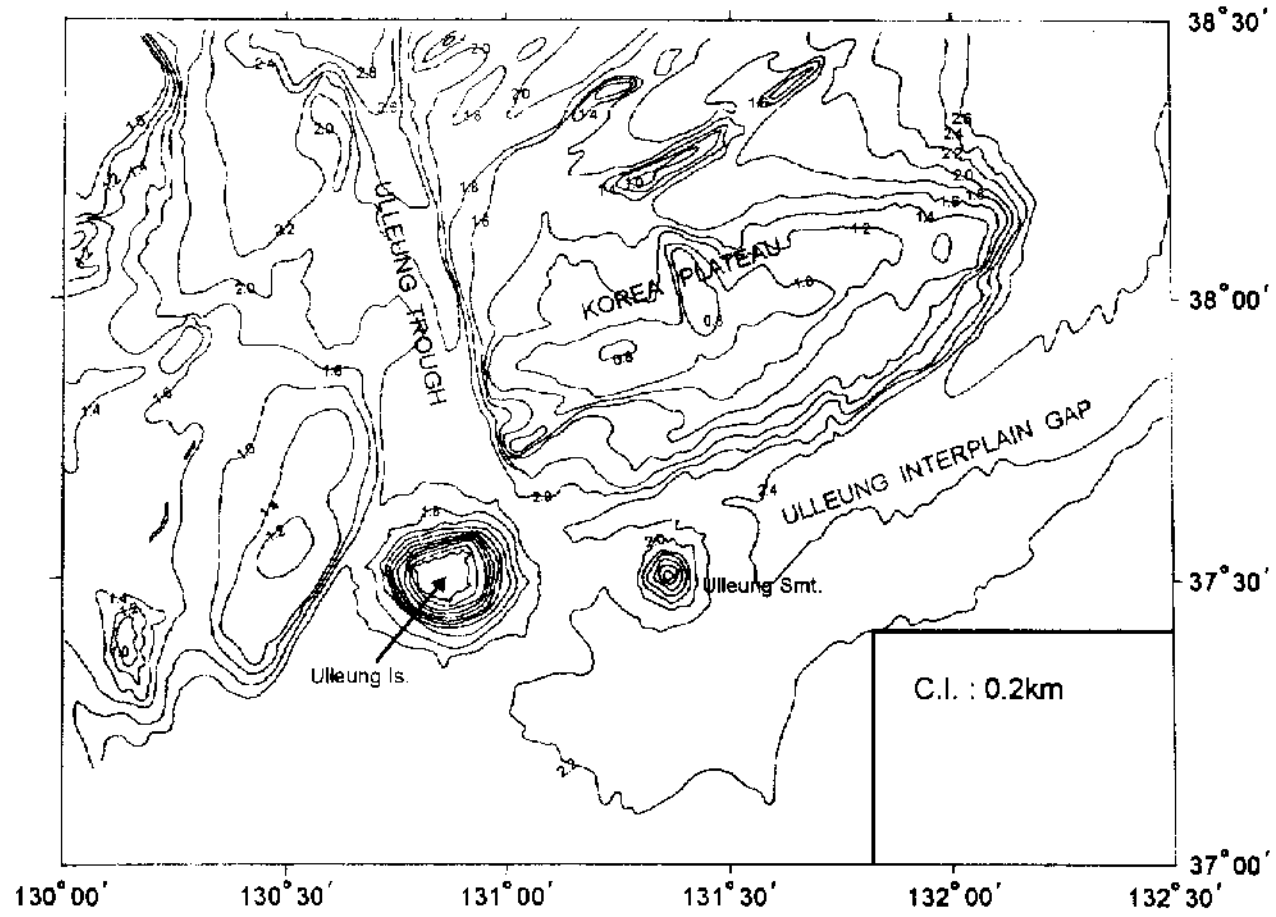


Fig. 3-2-2. Detailed bathymetry of the Korea Plateau and its surrounding area.

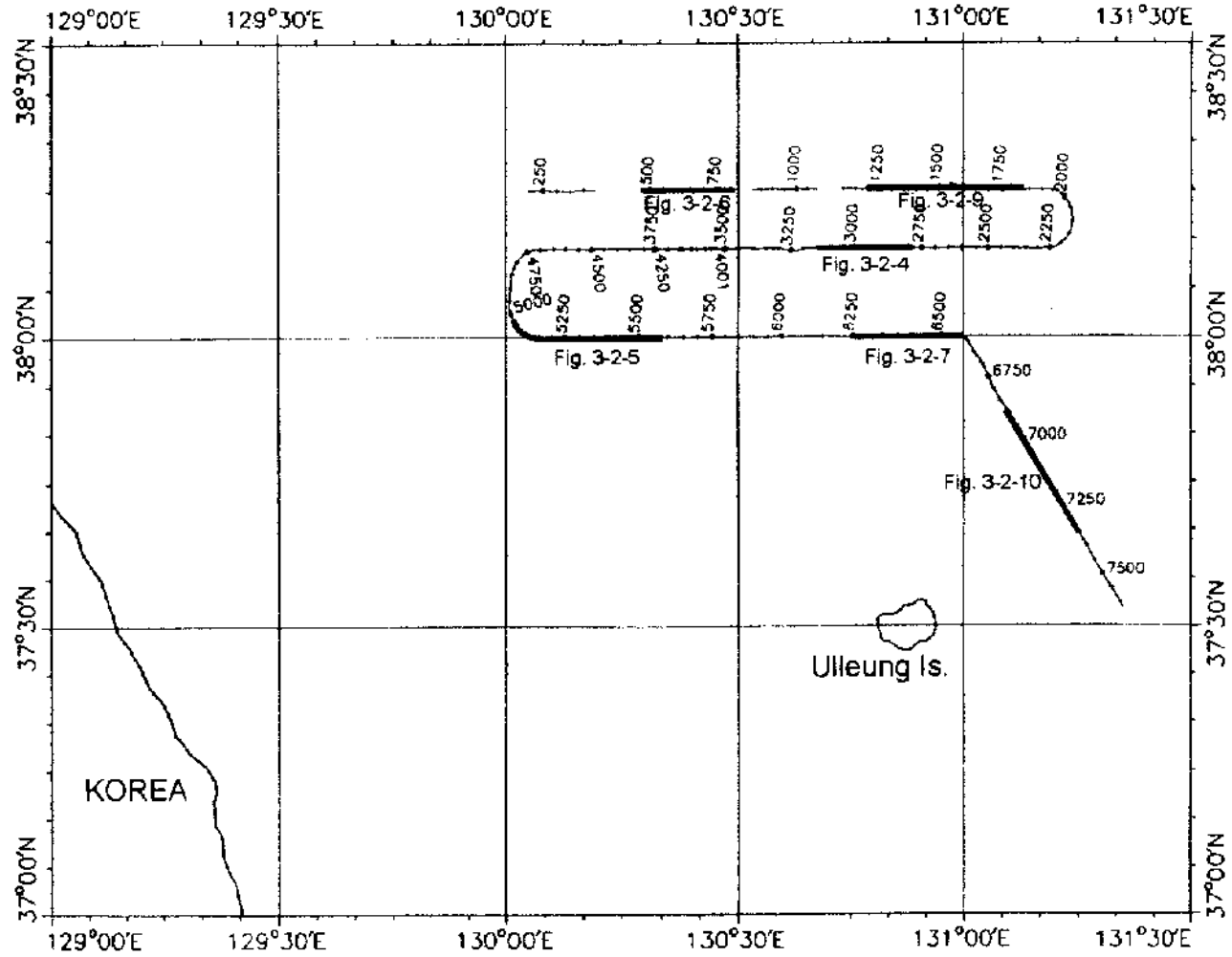


Fig. 3-2-3. Ship's track in the study area.

퀸스는 상부에서 하부로 가면서 시퀀스 I, II, 그리고 III으로 지정하였다 (Fig. 3-2-4). 최하부층인 시퀀스 III는 기반암위에 상향 걸침하고, 상층부는 분지 연변부에서 지역적으로 트런케이션이 나타난다. 중간층인 시퀀스 II는 하부 시퀀스 III에 분지연변에서 상향걸침하면서 부정합 경계가 발달하고 분지 중심지역에서 정합적으로 나타난다 (Fig. 3-2-4). 상부층인 시퀀스 I는 하부 시퀀스 II에 상향걸침으로 경계된다.

연구지역의 각 시퀀스에 대한 암상과 지층연대는 시추자료의 결여로 인해, 연구지역에서 가장 가까운 야마토 트리프과 야마토 분지에서 심해굴착 시추공 797과 799의 보고자료를 이용하여 간접적으로 대비하였다 (Tamaki et al., 1992). 이들 결과 및 주변자료들을 종합하여, 시퀀스 I는 후기 플라이오세-제4기, 시퀀스 II는 후기 마이오세-초기 플라이오세, 그리고 시퀀스 III는 초기 마이오세-중기 마이오세로 각각 설정하였다.

5. 탄성파층서 해석

가. 시퀀스 III:

가장 하위에 놓인 층서로서 한국대지분지의 서측지역과 동측 해저골 그리고 한국대지의 일부 분지지역과 한국대지와 울릉 해저산 사이 분지지역에서만 지역적으로 분포한다. 이들 퇴적층은 기반암에 상향걸침 (onlap)한다. 그리고 서측의 퇴적층서는 상부 반사층리가 트런케이션 (truncation)하고 있다. 이는 III 층서가 퇴적된 후 침식작용이 있었음을 의미한다. 더불어 퇴적층이 단층운동에 의해 변형을 많이 받았음을 알 수 있다. 한국대지와 울릉 해저산 사이분지 퇴적층은 완만한 습곡구조가 잘 발달하였다. 탄성과 퇴적상은 반사층리의 연속성이 불량하고 진폭이 다양하다. 그리고 반시형태 (configuration)는 썩기형 퇴적층서가 일반적인 특징이다 (Fig. 3-2-5). 이 퇴적층의 구성물질은, 시추자료의 결여로 인해 직접 확인은 불가능하나 야마토 해저골이나 분지에서 획득한 심해저 굴착자료들을 이용하여 (ODP), 탄성과 퇴적상 발달양상과 더불어 가능한 유추하였다. 퇴적층서 III는 주로 기저부에 사질 퇴적물이 분포하고 점차 상부로 가면서 생물입자를 다량 포함한 썩질퇴적물의 해양성 퇴적물로 구성되었을 것이다. 여기에 퇴적층내 연속성이 불량한 강한 진폭의 반

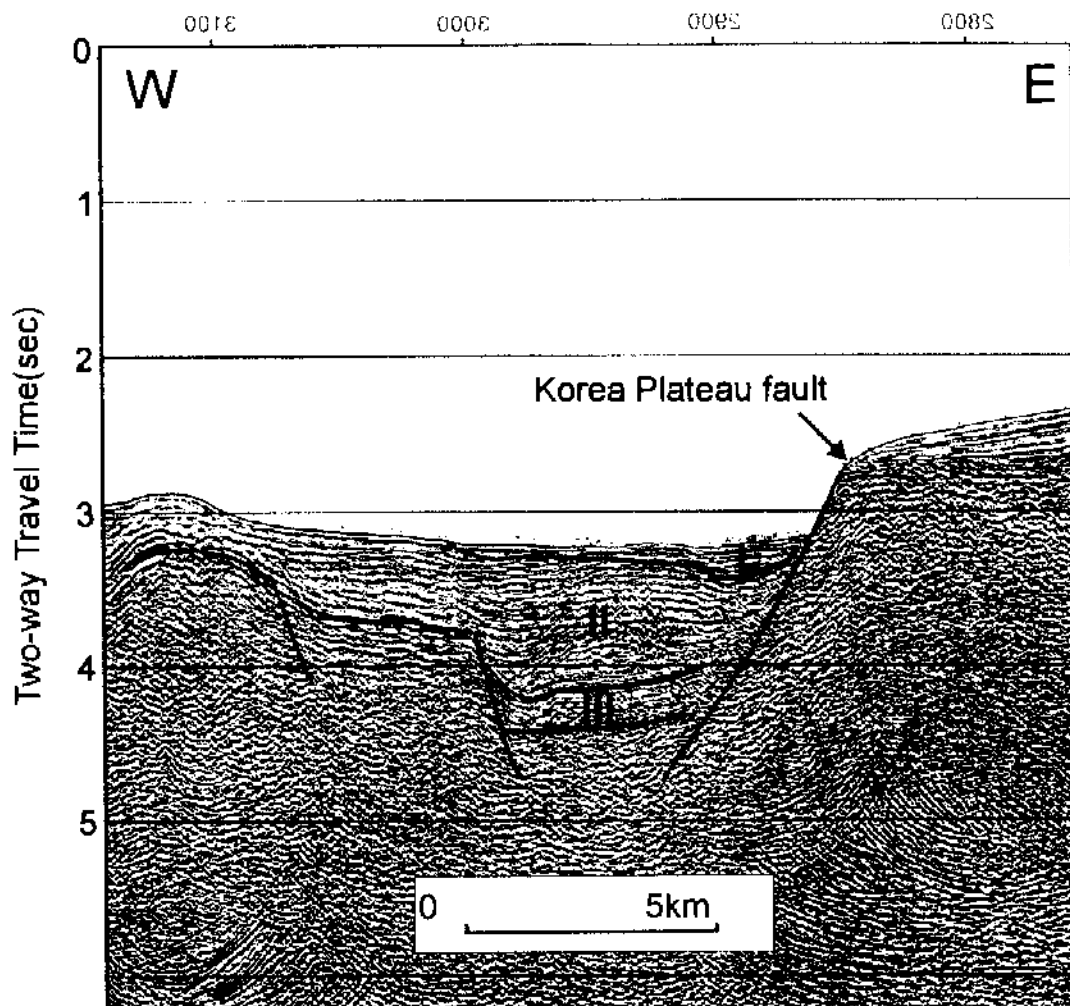


Fig. 3-2-4. Example of seismic reflection profile showing 3 sequences I, II, and III. See Fig. 3-2-3 for the location of the profile.

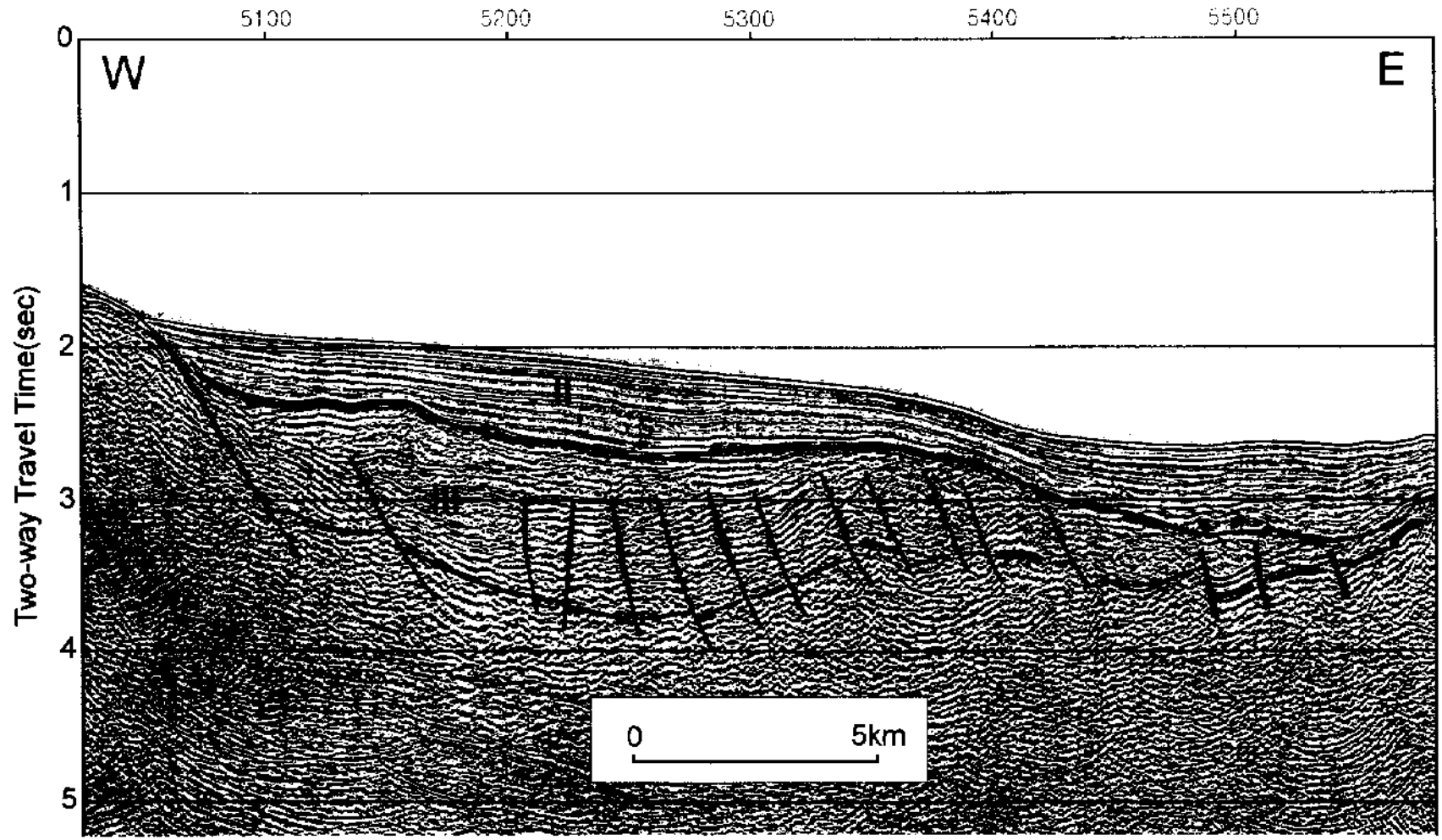


Fig. 3 2 5. Example of seismic reflection profile. See Fig. 3-2-3 for location.

사층리들의 발달로 보아 화산암이 sill이나 flow 형태로 끼여 있을 것으로 사료된다. 이 퇴적층서는 분지가 활발하게 확장될 때 퇴적된 동시성 리프팅 퇴적층서 (synrift sequence)로 해석된다. 동해분지는 리프팅과 해저확장운동이 초기에서 중기 마이오세 동안 활발하였던 것으로 보고되고 있어 (Jolivet & Tamaki, 1992), 초기 마이오세에서 중기 마이오세시기에 시퀀스 III 층서가 형성된 것으로 판단된다.

나. 시퀀스 II:

시퀀스 II는 시퀀스 III에 상향걸침하며, 전 연구지역에 분포한다. 퇴적층서의 발달특징이 지역에 따라 다르게 나타난다. 퇴적층서는 다시 상층과 하층으로 세분된다.

한국대지분지의 하층 퇴적층서의 단성과 퇴적상은 거의 무층리의 투명하게 분포한다. 그러나 해저면하 약 0.5초 깊이에서 해저면 모방반사층리가 연속적으로 강한 진폭으로 매우 뚜렷하게 발달한다 (Fig. 3-2-6). 이것은 opal A (amorphous silica)에서 CT (cristobalite)로의 속성작용변이과정 (diagenetic transformation)에서 발생하는 단성과 반사층리로 해석된다. 이와 같은 opal A/CT 반사층리가 야마토 분지 및 북 야마토 트러프에 널리 분포하는 것으로 보고되어 있다 (Holler and Suyehiro, 1992; Kuramoto et al., 1992). 규조토산 뿔진 (diatomaceous mud) 퇴적물이 분포하는 지층은 압력보다는 지열에 의해 opal A에서 CT로의 속성작용이 발생한다고 알려진 바, 야마토분지에서 연구된 결과들을 토대로 연구지역의 지층 온도와 지층연대를 간접적으로 확인할 수 있다 (Kuramoto et al., 1992). 따라서 연구지역의 지층연대는 직접적인 측정자료는 없지만 이웃의 야마토분지에서의 연구결과를 통해 대략 6-8 Ma로 추정된다. 하부 지층의 무층리 퇴적상은 규조토가 풍부한 뿔진 퇴적물이 널리 분포하기 때문으로 해석된다. 한국대지에 분포하는 하부층의 퇴적상은 진폭이 낮은 연속성은 좋은 반사층리로 구성된다.

한국대지분지의 상부층은 하부층을 일정한 두께로 덮으면서 널리 분포한다. 단성과 퇴적상은 불연속적이며 높은 진폭으로 구성된다. 반사형태는 hummocky 내지 파랑 (wavy) 모양이 우세하다. 무층리의 하부층에서 층리가 잘 발달한 상부층으로의 변화는 구성 퇴적물이 바뀌는 것이 원인으로 판단되며, 따라서 하부의 규조토질 우세층에서 상부의 쇄설퇴적층의 증가 때문으로 해석된다. 그리고 파랑 반사형태는 과거 해저유에 의해 퇴적물이 이동하면서 형성된 것으로 유추된다. 한국대지에 발

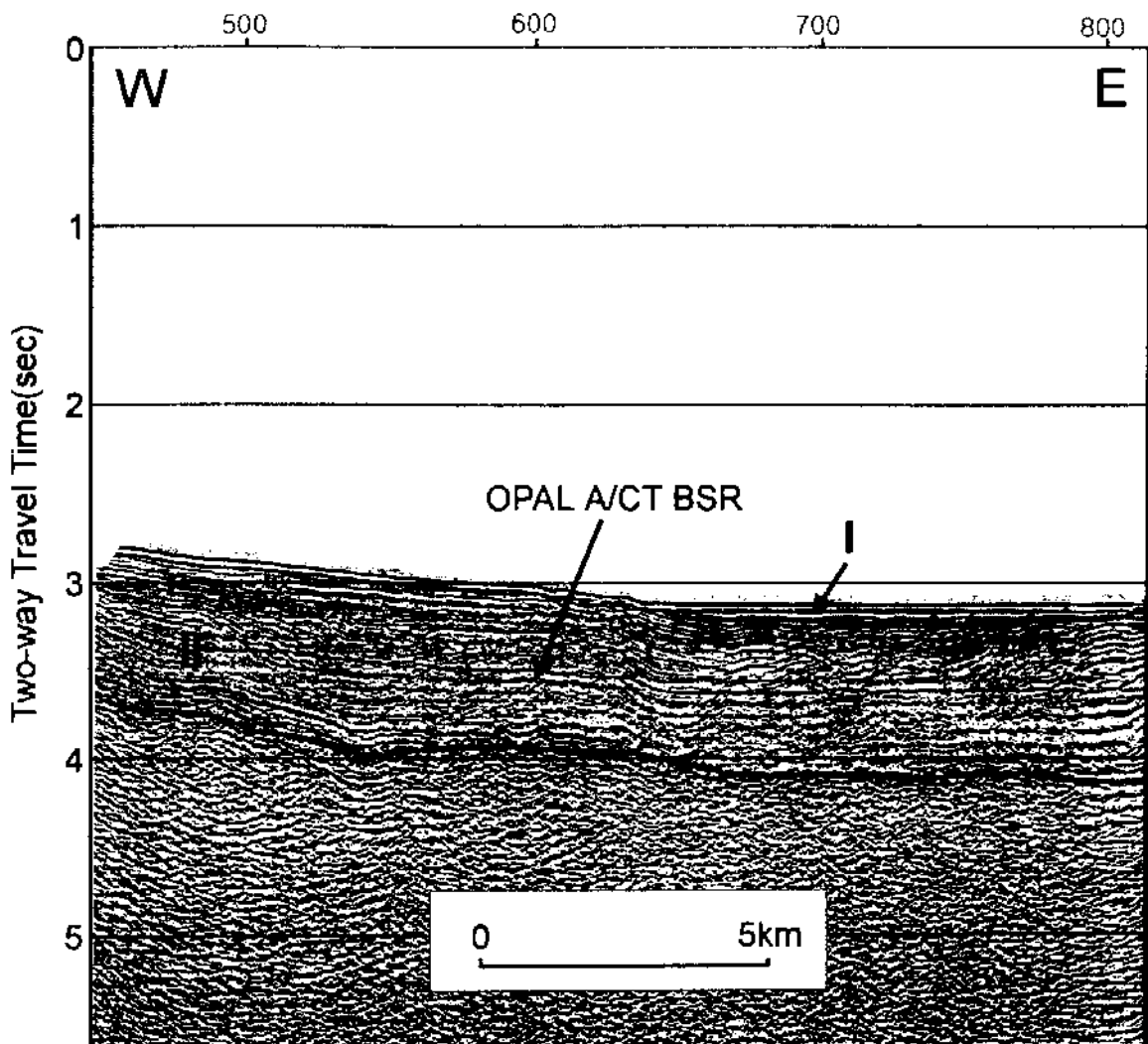


Fig. 3-2-6. Example of seismic reflection profile showing opal A/CT BSR at 0.5 sec. See Fig. 3-2-3 for location.

달한 상부층은 연속성이 양호하고 진폭이 강한 평행 반사형태의 퇴적층이 널리 분포한다. 하부의 두명층에서 상부의 층리양호 퇴적층으로 변화는 한국대지분지에서와 마찬가지로 규조질퇴적층에서 쇄신상 퇴적층으로 바뀌기 때문으로 해석된다.

퇴적층서 II는 후기리프팅과성 (post rift phase)에서 서서히 침강하면서 쌓인 퇴적층으로 생각되며, 퇴적시기는 후기 마이오세에서 초기 플라이오세 동안으로 추정된다.

다. 시퀀스 I:

최상부 시퀀스 I는 시퀀스 II에 상합결친하면서, 한국대지 분지지역의 저지대와 한국대지단층 사면기서부 해저골에 분포한다. 탄성과 퇴적상은 연속성이 양호하고 진폭 크기가 다양하다. 퇴적층서의 외형 (external form)은 합몰지형에 상향신침 농진 (onlap-fill)으로 이루어졌다. 이 퇴적층서는 주변의 고지대나 사면지역에서 퇴적물 붕괴에 의한 중력류에 의해 이동된 퇴적물이 재퇴적된 저덕류층일 것이다. 해저골에 분포하는 퇴적층서의 해저면은 침식에 의한 트린케이션 반사층리가 발달하였다 (Fig. 3-2-7). 이는 해저저층 해류에 의한 침식작용이 있었음을 시사한다. 이 퇴적층은 지구조적으로 매우 안정된 시기동안 쌓인 것으로 보이며, 퇴적시기는 후기 플라이오세에서 제4기까지로 추정된다.

6. 지질구조 해석

탄성과 단면도상에서 나타나는 지질구조는 기반암의 정단층에 의한 지구 (graben) 및 반지구 (half-graben)와 지루 (horst)들에 의해 매우 분명하게 특징지어진다. 지구 및 반지구의 합몰지대는 퇴적물이 쌓이고, 지루의 고지대는 분지사이의 경계대 역할을 한다. 연구지역에는 시추의 지형적으로 지지대인 퇴적분지와 동축의 고구조대 (structural high)가 발달하였으며, 한국대지분지 (Korea Plateau Basin)와 한국대지 (Korea Plateau)로 각각 명칭하였다. 그리고 한국대지분지와 한국대지 사이는 커나란 북북서 남남동 방향의 정단층 (NNW SSE trending normal fault)에 의해 구분되는 것이 확인되었으며, 이 단층을 한국대지단층 (Korea Plateau Fault)으로 이름하였다. 지질구조의 발달특징을 한국대지분지, 한국대지단층, 그리고 한국

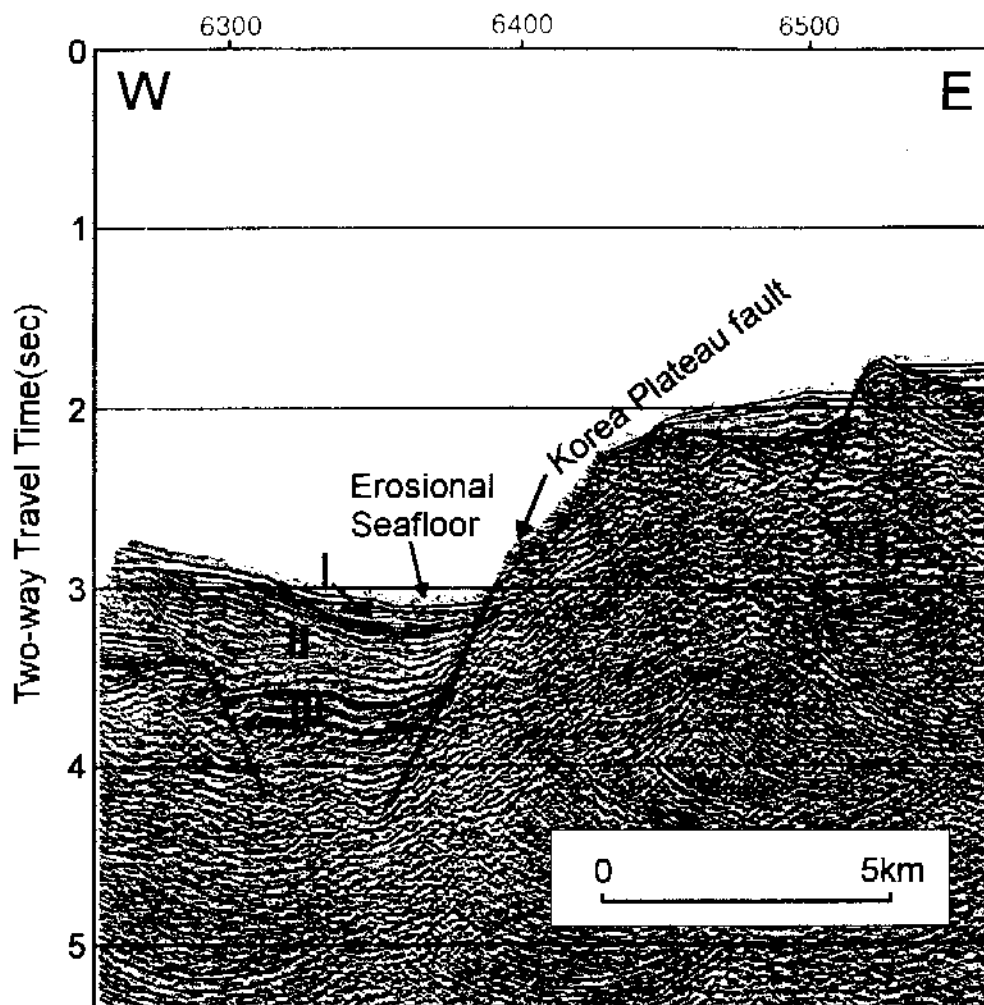


Fig. 3-2-7. Example of seismic reflection profile showing sea floor truncation in Sequence I. See Fig. 3-2-3 for location.

대지의 세 지역으로 구분하여 설명하였다.

한국대지분지는 서쪽의 북북동-남남서 방향의 동측면 정단층과 동쪽의 한국대지 단층대에 의해 경계된다. 그리고 한국대지분지내에는 작은 반지구와 지구의 소분지 (sub basin)들로 구성된다 (Fig. 3-2-8). 정단층구조는 planar 단층으로 이루어졌다. 정단층구조선의 발달방향은, 비록 많지 않은 탄성과 탐사단면 자료가 사용되었지만 정밀 수심도상에 발달한 지형적 특징들을 근거하여, 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향이 우세한 것으로 판단된다 (Fig. 3-2-9). 한국대지분지 서측지역에 발달한 퇴적층에 단층들이 다수 발달하였다. 탄성과 층서편에서 이미 언급하였지만, 시퀀스 III내에 정단층들이 다수 발달하였다. 이들은 리프팅이 활발한 시기동안에 형성된 동시리프팅 (syn-rifting) 퇴적층으로 해석된다.

한국대지단층은 연구지역에서 규모가 가장 큰 서측면 정단층 (west-facing normal fault)으로 북북서-남남동 방향의 직선으로 발달하였다 (Fig. 3-2-9). 한국대지단층의 하반 (foot wall)은 한국대지이며, 상반 (hanging wall)은 한국대지분지의 동측연변부이다. 연구에 사용된 탄성과 단면도상에서 해저면 단층애 (fault scarp)의 겉보기 경사 (apparent dip)는 19-28° 범위이다. 실제로 퇴적물에 덮여있는 하부 단층 경사는 해저면 단층애보다 더 급할 것으로 생각된다. 왜냐하면 단층애는 침식에 의해 실제 경사면보다 많이 완만해졌기 때문이다. 한국대지단층의 안티세틱 단층 (antithetic fault)이 북북서-남남동 방향으로 한국대지단층과 나란히 발달하였다. 또한 이들 단층 사이에 최대 4.5 초 이상의 깊은 해저골 (trough)이 길게 북북서-남남동 방향으로 발달하였다.

한국대지는 지형적으로 높은 지역으로 planar 정단층들이 다수 발달하였다. 대부분의 단층들은 서측면 정단층이다. 정단층들은 상반 (hanging wall)의 붕괴가 일련의 도미노형 회전 블록 단층 (domino-style rotated block faults)들이다 (Fig. 3-2-9). 단층선들은 한국대지 분지에서 발달한 단층구조선과 매우 유사한 북북동-남남서와 북동-남서 방향이 우세한 것으로 사료된다. 단층선의 방향은 탄성과 단면 자료가 부족하여 정밀 해저지형의 발달양상을 근거로 추성하였다. 한국대지 남쪽지역에는 한국대지와 울릉 해저산 (Ulleung Seamount) 사이에 반지구 분지가 발달하였다. 이 분지는 북북서-남남동 축선의 탄성과 단면도상에 뚜렷하게 나타난다. 단층선은 북동-남서방향이다 (Fig. 3-2-10). 이 단층선의 방향도 성령해저지형의 발달양상을 고려하여 작성하였다. 반지구내 시퀀스 III 퇴적층서는 예외적으로 완만한 습

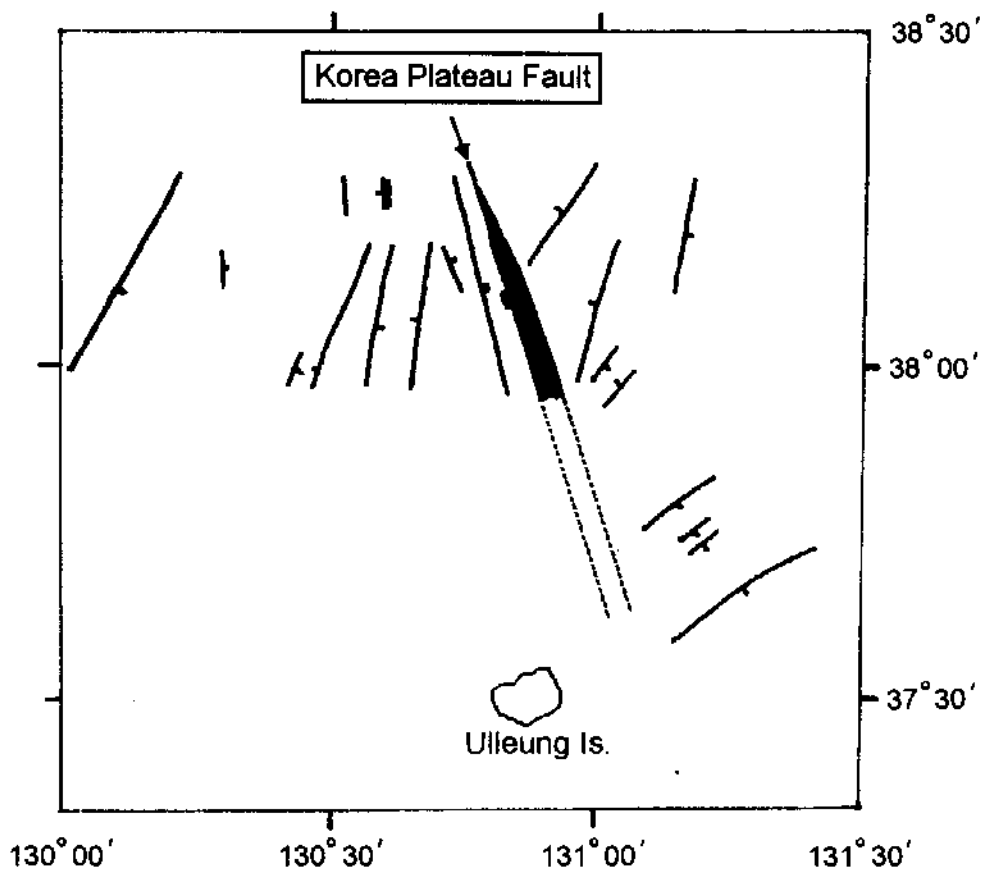


Fig. 3-2-8. Structural map of the Korea Plateau.

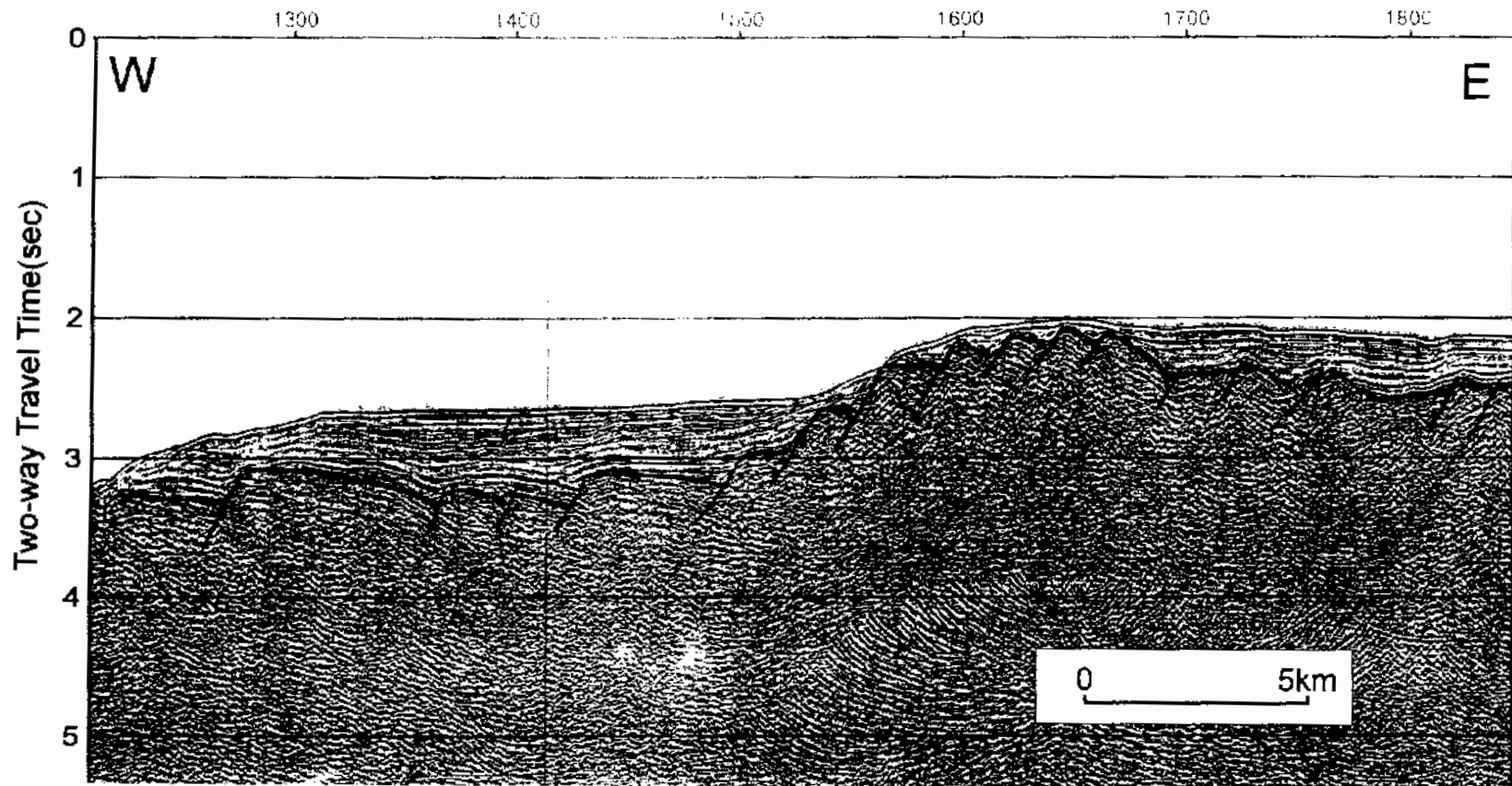


Fig. 3-2 9. Example of seismic reflection profile showing the domino style rotated block faults in the Korea Plateau basement. See Fig. 3-2 3. for location.

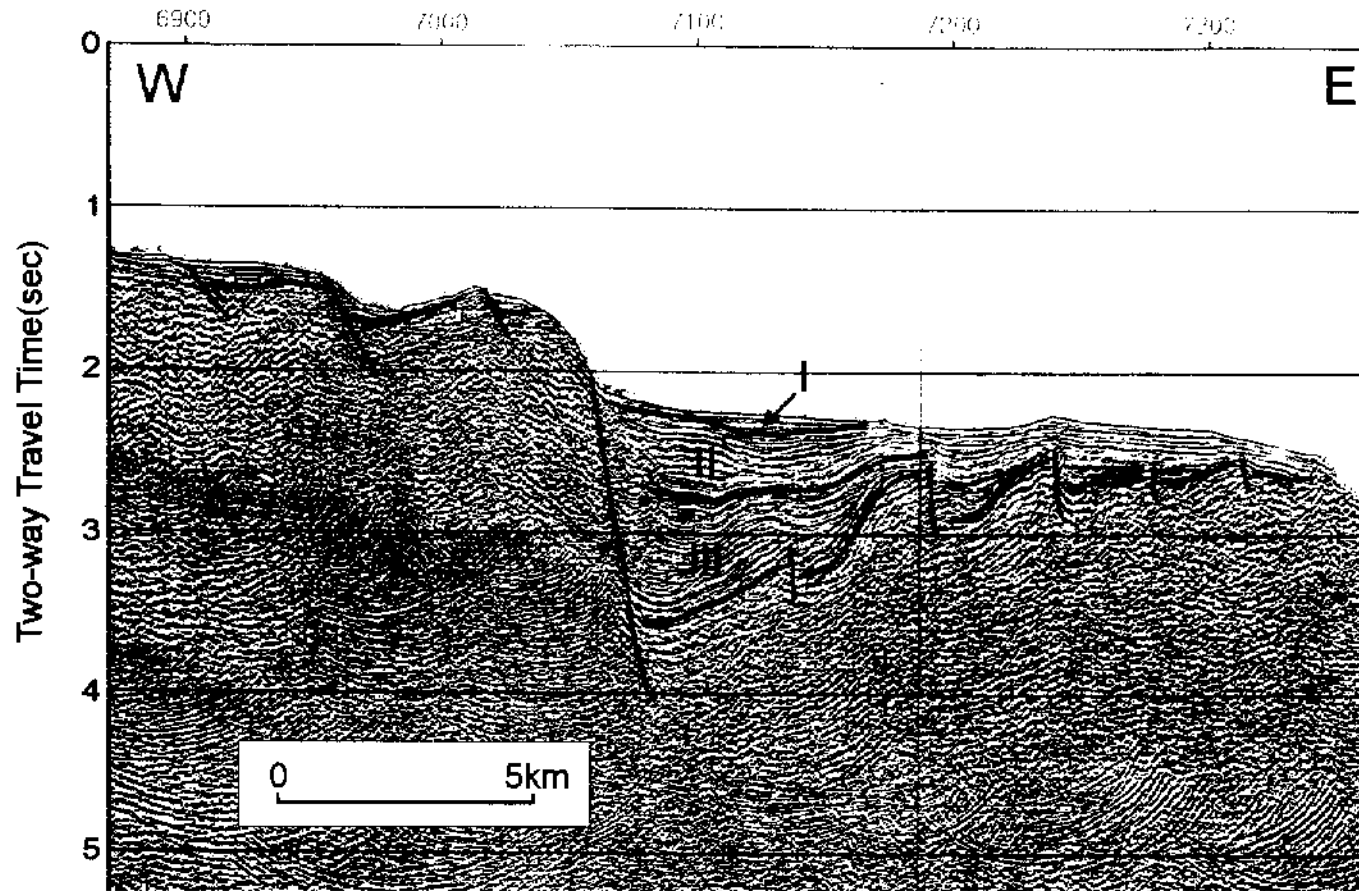


Fig. 3-2-10. Example of seismic reflection profile showing gentle folding structure in sequence III. See Fig. 3-2-3. for location.

곡구조가 발달하였다 (Fig. 3-2-10). 습곡구조축은 분지의 발달방향을 고려하면 북동-남서 방향으로 판단된다.

7. 결 론

다층채널 탄성과 단면도상에서 3개의 탄성과 시퀀스 I, II, 그리고 III를 구분하였다. 시퀀스 III는 최하부의 층서로 기반암에 상향결침하고 상층부는 지역적으로 트러케이션된다. 탄성과 퇴적상은 쉐기형 반사형태와 더불어 불연속적이고 다양한 반사층리가 대부분이다. 서측 조사지역은 난층운동에 의해 퇴적층이 변형되었다. 이 시퀀스는 지구조적으로 동시성 리프팅 퇴적층이며, 퇴적연대는 초기에서 중기 마이오세로 추정된다. 시퀀스 II는 중간층으로 시퀀스 III에 상향결침한다. 퇴적상은 하부의 투명 반사층리와 상부의 불연속적이고 진폭이 강한 평행한 반사층리가 특징적이다. 이 시퀀스내에 opal A/CT BSR이 발달하고 있는데 지구조적으로 활발한 분지의 리프팅운동이 일어난 다음 쌓인 후기 리프팅 퇴적층으로 해석된다. 퇴적시기는 후기 마이오세에서 초기 플라이세로 판단된다. 시퀀스 I는 최상부층으로 연속적으로 층리가 잘 발달한 퇴적상을 보이며 시퀀스 II에 상향결침한다. 분포지역은 일부 저지형지대에 제한되어 있다. 지구조활동이 정지된 후기 리프팅동안의 후기 플라이오세에서 제4기에 퇴적되었을 것으로 해석된다.

한국대지의 시추 경계를 지시하는 규모가 큰 북북서-남남동 방향의 정단층인 한국대지 단층이 일직선으로 발달한다. 한국대지단층의 하반은 한국대지 그리고 상반은 한국대지분지로 구성된다. 한국대지분지는 지구 내지 반지구 구조가 잘 발달하였으며, 단층선은 북동-남서 내지 북북동-남남서 방향이 우세하다. 한국대지도 반지구 구조가 우세하며, 도미노형 블록 회전 난층구조가 매우 특징적이다. 단층선 방향은 북동-남서 방향이 우세하다. 한국대지 및 한국대지분지의 반지구 구조는 동해의 확장성 리프팅 운동환경하에서 형성되었음을 지시한다.

제 3 절 한국 동쪽 주변부와 울릉분지의 진화

대표저자: 김한준 (해양연구소 해양지질연구단)

1. 서론

일본열도의 안쪽에 위치하는 동해는 지구조적 연구가 매우 많이 수행된 후열도해 (back-arc sea)이다 (Fig. 3-3-1). 동해의 북쪽은 대부분 일본분지가 차지하고 있어서 지형적으로 단순하다. 확인된 자력이상 (Seama and Isezaki, 1990)과 지각구조 (Ludwig et al., 1975; Hirata et al., 1992)는 일본분지가 해저면 확장에 의해 형성되었음을 지시한다. 이에 반하여 동해의 남쪽은 매우 울릉분지와 야마토분지와 같은 심해분지뿐만 아니라 한국대시, 오키뱅크, 그리고 야마토리지와 같은 고지형단위가 분포하여 복잡한 지형을 보여준다.

동해의 남쪽도 일본열도가 한반도의 가까운 곳으로부터 현재의 위치로 이동하면서 열린 것은 확실해 보인다. 하지만 한반도와 일본열도 사이에 위치하는 울릉분지의 경우 그 지각의 특성이 제대로 알려져 있지 않았다. 그 결과 동해남부의 열림모델이 가정에 의해 추론되어 다양할 뿐만 아니라 울릉분지의 지각이 해양지각인지 아니면 대륙지각인지도 불분명하였다. 예를 들어, 다음과 같이 두 가지의 열림모델이 현재 자주 인용되고 있다. Otofuji 등 (1991)은 남서일본열도가 한반도로부터 시계방향으로 회전하면서 멀어졌다는 부채꼴 열림모델을 제시하였다. 반면, Jolivet and Tamaki (1992)는 남서일본열도가 주향이동운동에 의해 남쪽으로 이동하였다는 당겨열린 모델을 제시하였다. 부채꼴 열림모델에서는 울릉분지의 직각이 해양지각임을 가정하였으나 당겨열린 모델에서는 울릉분지의 지각이 일본열도의 대륙지각이 들어난 것으로 해석하였다. 최근에 해저면지진계자료를 바탕으로 Kim et al. (1999)은 울릉분지의 지각이 정상보다 두꺼운 해양지각이며 그 속도구조는 해저면확장시

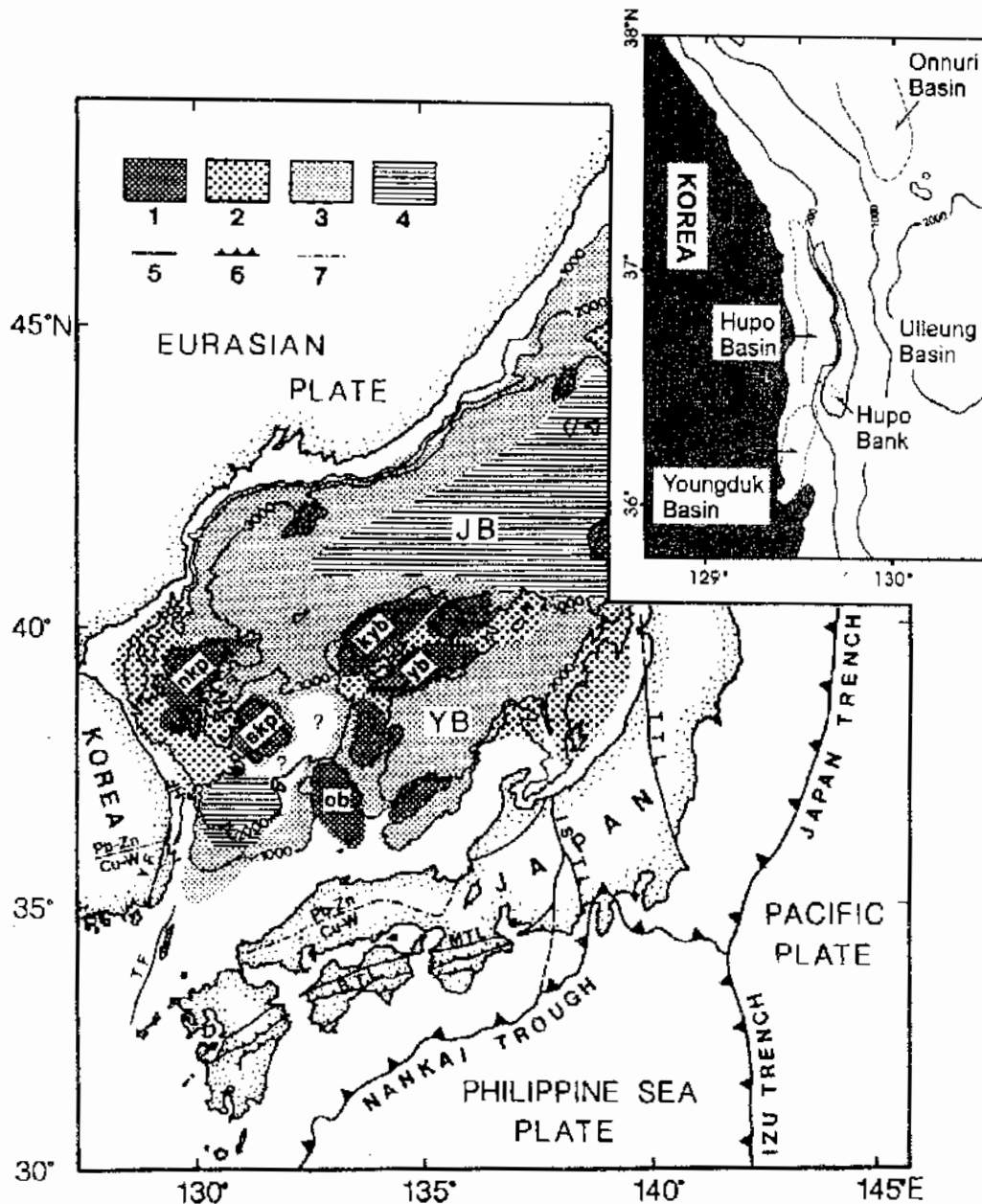


Fig. 3-3-1. Tectonic map of the East Sea (Japan Sea) showing the discrimination of crustal type (modified from Tamaki et al., 1992): (1) continental crust, (2) rifted continental crust, (3) extended continental crust, (4) oceanic crust, (5) strike slip fault, (6) thrust, and (7) metallogenic belts (Sillitoe, 1977). JB, YB and UB = Japan, Yamato and Ulleung Basins; (k)yb = (Kita) Yamato Bank, n- and skp = north- and south Korea Plateau, ob = Oki Bank; TF and YF = Tsushima and Yangsan faults; BTL, ISTL, MTL, and TTL = Hutsuzon, Median, and Itogawa Shizuoka, Tanakura Tectonic Lines. Bathymetry is shown in meters. Inset shows distribution of rift basins at the inner margin of Korea. Note that the Ulleung Basin is defined as "oceanic" after Kim et al. (1998).

내륙에 위치한 맨틀플룸의 영향 때문에 정상보다 뜨거워진 맨틀위에서 해저면 확장이 일어난 모델로써 설명됨을 보였다.

동해남서부의 열림을 설명하기 위해 맨틀플룸의 영향을 상정한 것은 지금까지 제시된 모델들과는 다른 것으로 한반도의 동쪽 주변부의 진화가, 대서양의 Vøring 및 북미 주변부와 같은 화산성 열개 주변부 (volcanic rifted margin)의 진화모델에 의해 설명될 수 있음을 의미한다. 화산성 주변부에는 특징적으로 기반면 아래에 SDRs (seaward dipping reflectors)가 발달해 있다 (Eldholm and Grue, 1994). 대륙 지각이 쪼개진 후 해저면확장의 직전 혹은 시작단계에서 확장중심이 대기에 노출되거나 진해에서 형성된다. 여기에서 분출되는 용암은 퇴적물과 혼재되어 화성층서 (igneous sequences)를 가지게 되는데 이것이 MCS 단면상에 SDR로 나타난다 (Mutter et al., 1982; Eldholm et al., 1989). 따라서 한반도 주변부에서 기반면의 정확한 해석은 동해의 지구조적 열림을 이해하는 열쇠가 된다. 이 연구에서는 한반도의 대륙 주변부에서 얻은 960 km의 MCS 단면을 이용하여 기반면의 구조를 파악하고 이의 형성과정을 제시한다.

2. 지질 환경

동해의 지질 환경에 대한 전반적인 사항들은 Tamaki 등 (1992)에 기재되어 있다. 여기에서는 중복을 피하기 위해 한반도의 동쪽 주변부와 울릉분지를 중심으로 (Fig. 3-3-1) 기술하고자 한다. 한반도의 동쪽 대륙붕은 폭이 20 km 미만으로 좁으며 경사가 급한 대륙사면으로 연결된다. 대륙사면에는 물에 잠긴 리지 (후포뱅크)와 온누리, 후포, 그리고 영덕분지와 같은 일련의 열개분지가 해안선에 평행하게 분포한다 (Fig. 3-3-2). Yoon and Chough (1995)에 의하면 후포분지와 영덕분지는 수항이동 시스템내에서 형성되었으며 이 작용은 결국 울릉분지의 열림으로 이어졌다.

울릉분지의 남북방향 당겨열림모델을 제시하기 위해 Jolivet and Tamaki (1992)는 한반도 동남부의 양산단층이 동해의 남서경계부를 따라 발생한 우수주향운동을 이끌었다고 가정하였다. 한반도의 남동부와 일본 남서부에는 동일한 광화대가 존재하는데 이들 두 지역간 이격거리는 250-300 km이다 (Sillitoe, 1977). 따라서 이 값은 울릉분지의 당겨열림모델에서 남서 일본이 남쪽으로 이동한 거리에 해당할 것이

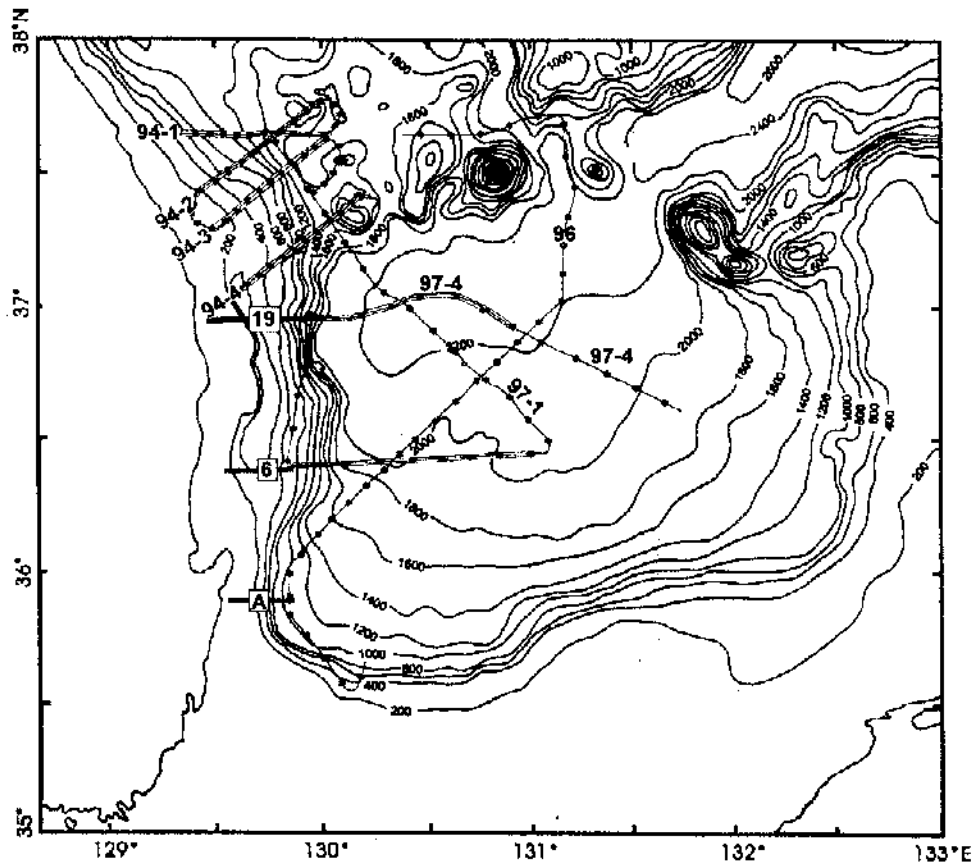


Fig. 3-3-2. Bathymetry in the southwestern East Sea with locations of multichannel and single channel seismic profiles. Inset shows OBS profiles in Kim et al. (1999).

나.

일본분지와 야마토분지에서 수행된 ODP Leg 127 and 128에서 기반암의 성질과 연대에 관한 자료가 수집되었다 (Tamaki et al., 1992). 이들과 육상에서 얻은 자료들을 분석한 것은 23-19 Ma 동안 단층활동에 의한 지각의 늘어남과 후열도분지들의 확장이 수반된 주된 열림이 진행되었음을 보여준다. 한반도의 동쪽 주변부는 후열도의 리프팅과, 이후 계속된 울릉분지의 열림과 밀접하게 관련된 것으로 믿어지는 화산활동이 일어난 지역이다 (Yoon and Chough, 1995). 예를 들어, 한반도의 남동해안을 따라 현무암과 용회암이 널리 분포하고 있는 것에서 보듯이 분출성 화산활동의 증거가 있다 (Fig. 3-3-3). 이들 화산암들의 연대는 올리고세 후기에서 마이오세 초기 (25-17 Ma)로서 리프팅 및 울릉분지의 열린 시기를 나타낸다.

울릉분지는 동해남서부의 주된 지구조 단위이다. 울릉분지의 지각은 정상적인 해양지각보다 두꺼우나 그 속도분포는 정상적인 해양지각과 일치한다 (Kim et al., 1994). Kim et al. (1999)은 동해의 다른 분지들과는 달리 울릉분지의 경우 해양지각의 특징인 층단위 2C (Layer 2C)가 있음을 보였다. 그들은 내륙에 위치하는 맨틀 플룸을 에워싸는 열이상대 (thermal anomaly)의 바깥쪽에서 일어난 해저면 확장에 의해 울릉분지가 형성되었으며 그 결과 지각의 두께가 10 km로 정상보다 두꺼운 것임을 제시하였다. 울릉분지내의 기반암을 형성하는 데에는 화산활동 또한 중요한 역할을 하였는데 이 화산활동은 마이오세 중기까지 지속되었다 (Chough and Lee, 1992).

3. 자료획득 및 처리

1994, 1996, 그리고 1997년 한반도 주변부와 울릉분지에서 연구선 온누리호를 이용하여 전체 690 km의 MCS자료를 획득하였다 (Fig. 3-3-2). 1994년의 조사에서는 690 in³의 에어건 배열과 96채널 스트리머를 이용하여 반파간격 25 m로 중합도 48의 자료를 획득하였다. 나머지 조사에서는 56채널로 구성된 1400 m 길이의 스트리머를 이용하여 반파간격 50 m로 중합도 14의 자료를 획득하였다. 프로파일 94 1에서 94-4는 각각 약 60 km의 길이로서 온누리분지에서 획득되었다. 프로파일 96은 온누리분지에서 시작하여 울릉분지를 북동-남서 방향으로 가로지른다. 프로파일

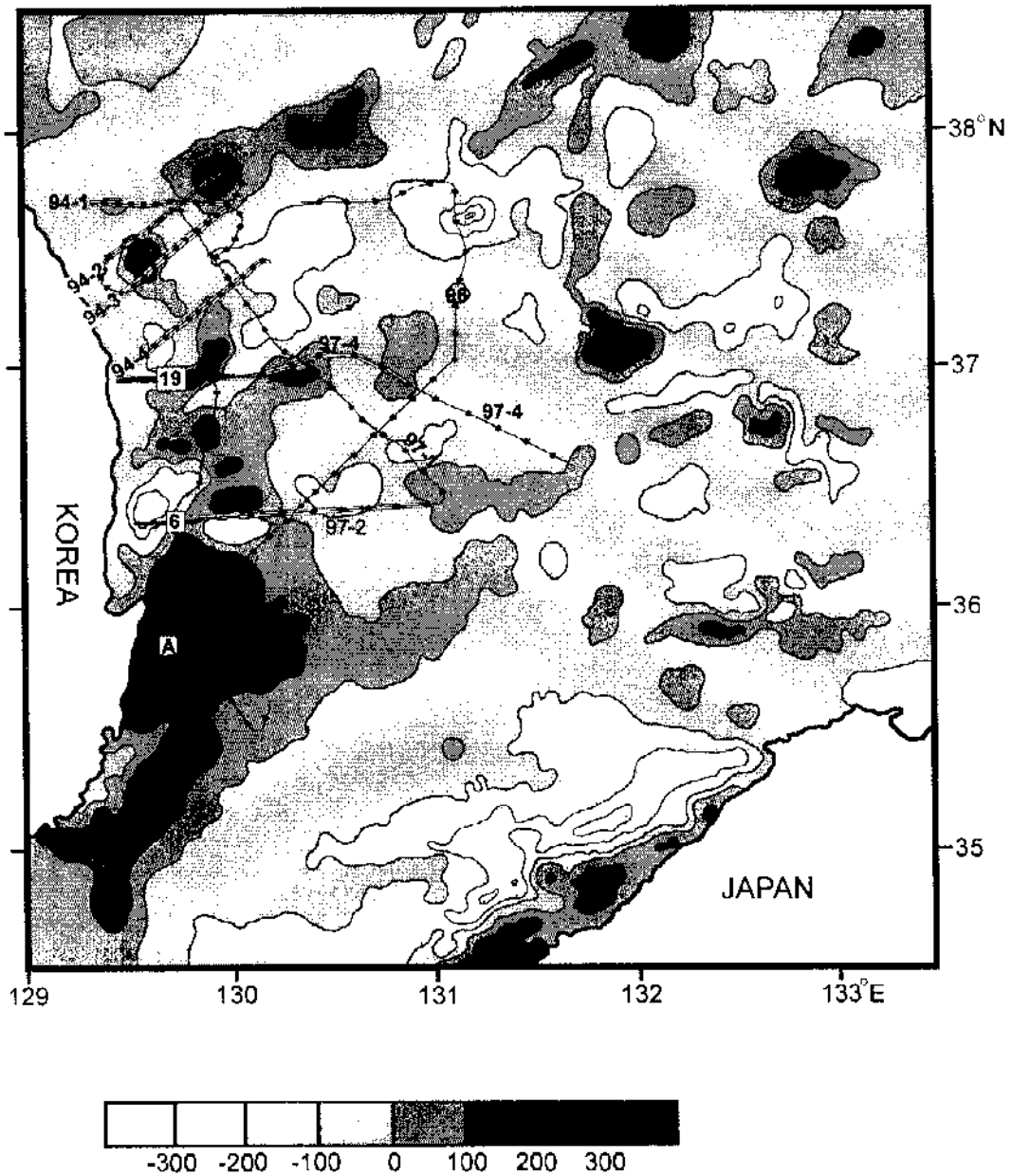


Fig. 3-3-3. Magnetic anomalies in the southwestern East Sea with locations of multichannel and single channel seismic profiles. The area of extrusive volcanic rocks (25-17 Ma) in the southeast Korean Peninsula is shown by hatching (from Chough and Lee, 1992; Yoon and Chough, 1995).

97-1에서 97-4는 울릉분지 안으로 연장되어 있으며 이중 97-2와 97-4는 각각 이전에 후포뱅크의 안쪽에서 얻은 단채널 프로파일 6, 19 (Yoon, 1995)와 연결된다. 따라서 이렇게 연결된 프로파일들은 세 개의 지질단위 (후포분지, 후포뱅크, 울릉분지)를 포함하는 한반도 주변부의 전형적인 단면을 나타낸다.

한반도 주변부가 화산성인지 비화산성인지를 구명하기 위해서는 MCS 자료로부터 기반암의 구조를 잘 파악해야 한다. 이 경우, 대륙주변부에서 SDR의 존재와 화산작용과 관련된 특징들이 명백히 구명되어야 한다. 바깥쪽 주변부에서 기반암은 비교적 경사가 급하므로 일반적으로 사용되는 MCS 자료처리방법은 기반암 구조를 적신히 파악하는 데에 효과적이지 못하다. 또한, MCS 자료를 얻기 위해 사용한 예이건의 용량은 690 in^3 로서 이 경우 대륙주변부에서 두꺼운 퇴적물에 쌓여 있는 기반암의 아래까지 전파할 수 있을 정도로 강력한 탄성과 펄스를 발생시키기가 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 MCD 자료의 종합선에 hyperbolic velocity filtering 과정까지 구현한 tau g 변환 (τ g HVF) (Jou et al., 1996)을 이용하였다. τ -g HVF는 반사면들을 강조시킬 뿐만 아니라 삼음의 억제에도 효과적인 것으로 알려져 있다.

추가적인 MCS 자료로서, 이 연구에서는 프로파일 A를 이용한다 (Fig. 3-3-2) (Kim et al., 1999). 이 프로파일은 1971년 Prakla Seismos Inc.가 1130 in^3 의 에어선과 48채널 스트리머를 사용하여 종합도 48로써 한반도 남동대륙붕에서 획득하여 처리한 것이다.

자력자료는 주로 Isezaki and Shevaldin (1996)에서 나온 것이지만 한반도의 가까운 지역에서는 자료가 미비하므로 간격이 좁은 탐사측선망에서 얻은 자료 (Han et al., 1997)를 첨가하였다.

4. 주변부의 특징

여기에서는 탄성과 프로파일의 해석된 단면 (Figs. 3-3-4, 3-3-5)을 기초로 한반도 주변부의 지질구조에 대해 설명한다. 특히, 후포분지에서 얻은 프로파일 19와 6을 각각 프로파일 97-4와 97-2와 연결하였다 (Fig. 3-3-2). 이러한 연결은 울릉분지의 열립과 관련하여 안쪽 및 바깥쪽 주변부의 진화에 대한 유용한 정보를 제공할

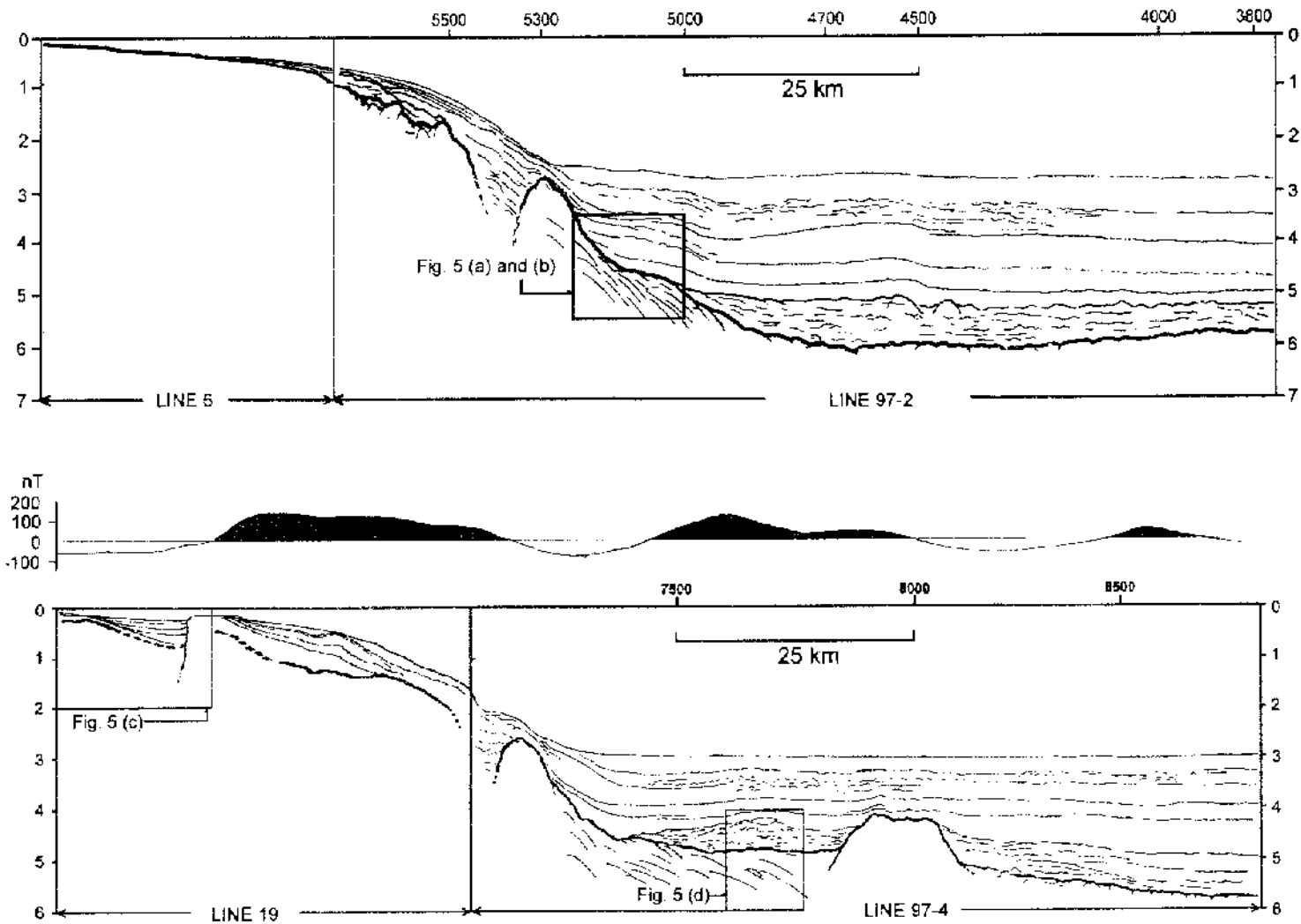


Fig. 3-3-4. MCS profiles combined with single channel profiles to delineate geologic sections from the Hupo Bank to the Ulleung Basin. (See Fig. 3-3-2 for location) (a) 97-2 and 6, (b) 97-4 and 19. The boxed regions give the location of example reflection profiles in Fig. 3-3-6.

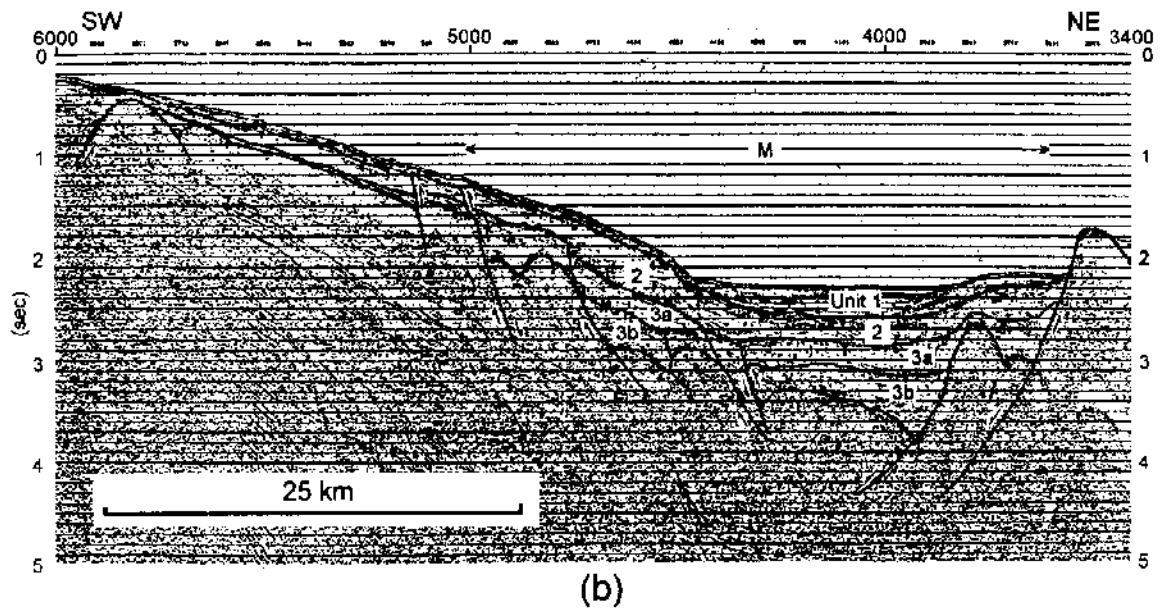
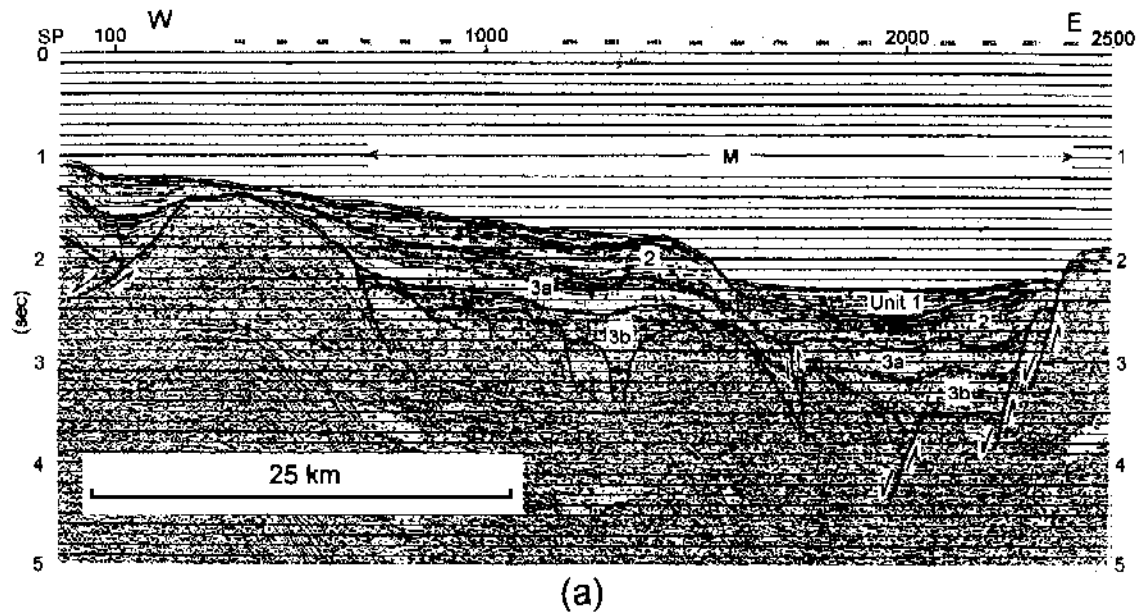
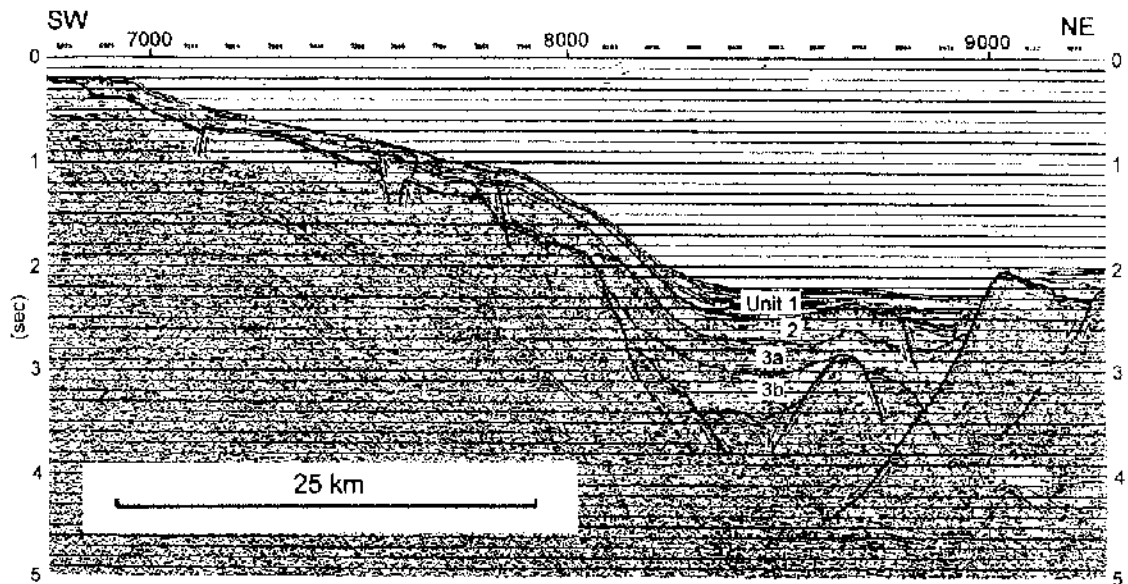
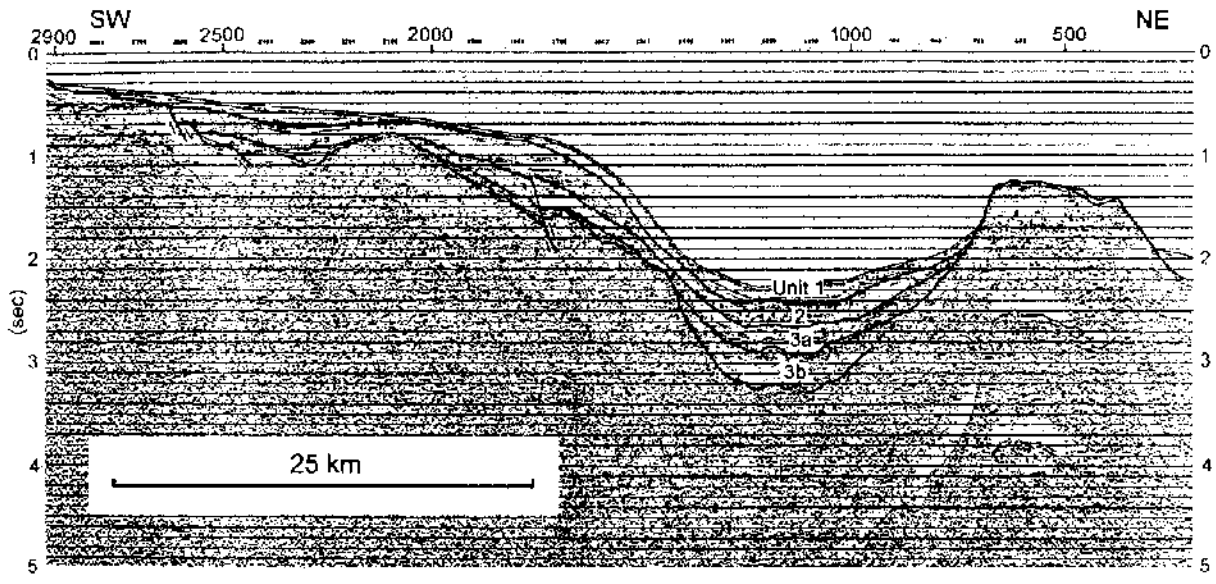


Fig. 3-3-5. (a)- (d) Interpretive line drawings superposed on MCS profiles 94-1 to 94-4 (See Fig. 3-3-2 for location).



(c)



(d)

것이다. 해석된 단면에 상응하는 실제 단성파단면의 일부는 Fig. 3-3-6에 예시되어 있다.

가. 후포분지

후포분지는 남-북 방향으로 길게 배열된 골짜기 (trough)로서 후포단층의 안쪽에 위치한다. 후포단층은 한반도의 동쪽 주변부에서 주된 단층으로 거의 수직인 단애 (scarp)를 이룬다 (Fig. 3-3-4). Yoon and Chough (1995)는 후포분지에서 얻은 단채널 단성파자료로부터 후포단층의 역할에 중점을 두어 안쪽 주변부의 구조적 특성을 해석하였으나 여기에서는 후포분지의 리프팅과정을 해석하고자 한다. 프로파일 19는 후포분지의 퇴적중심을 통과하므로 리프팅과 관련된 퇴적구조를 잘 보여준다 (Fig. 3-3-4). 따라서 이 글에서는 프로파일 19를 중심으로 후포분지의 발달상황을 설명한다.

음향기반 상부의 퇴적층서는 반자구 (half-graben)에서 인지될 수 있는 분지 진화의 세 단계를 보여준다. 이들 세 단계는 리프트의 시작 (rift initiation), 리프트 절정기 (rift climax), 그리고 리프트 후기 (post-rift)로서 Fig. 3-3-6의 층서 S2, S3, 그리고 S4에 해당한다. S2 층서는 전반적으로 썩기모양으로 나타나는데 그 내부 구조는 기반암으로 온랏 (onlap)하며 하반으로부터 유래된 퇴적물의 증거가 없다. 이러한 사항은 리프트의 형성에 대한 퇴적반응을 설명하는 Prosser (1993)의 모형과 일치한다. 리프트 절정기 층서 (S3)는 확장형의 발달을 특징적으로 보여주는데 이것은 퇴적 당시 상반의 지속적인 기울어짐 (tilting)과 관련되었을 가능성이 크다. 하반과 가까운 S3a 층서는 내부 반사면이 교란되어 있으므로 정돈된 층서를 가지지 못하는 굵은 입자의 돌, 혹은 쇄설류 (debris)의 붕괴로 구성되어 있음을 지시한다. 리프트 후기 층서 (S4)는 그 이전의 층서보다 더 연속성이 좋은 평행한 내부 반사면들로 구성되어 있다. S4는 S3로 강하게 온랏하는데 이것은 퇴적작용에 미치는 지구조적 힘이 점차 약해짐을 의미하며 리프트 후기단계에서 나타나는 현상이다. 프로파일 19는 단채널 (single channel)자료이므로 퇴적층서의 속도정보는 얻을 수 없다.

진폭이 큰 이중 파형요소 (doublet)로 나타나는 음향기반면은 비교적 평탄하다 (Fig. 3-3 6a). 음향기반면 아래에서는 리프트 전기 (pre rift) 단계와 관련된 내부반사면이 나타나지 않는데 아마도 일반적인 다중채널 단성파탐사에 비해 더 작은 에

어 권을 사용하는 단채널 단성과탐사의 한계 때문으로 생각된다. 평탄하고 불투명한 후포분지의 기반면은 한반도의 동쪽을 따라 노출된 암석복합체의 연장선으로 보인다 (Yoon and Chough, 1995).

Klaus et al (1992)은 서태평양의 Izu-Bonin island arc system에서 얻은 탄성과 자료를 기초로 호상열도의 뒤에서 일어나는 리프트의 두 단계 진화모형을 다음과 같이 제시하였다. 첫 번째는 "반지구 (half graben)" 단계로서 그 특징은 큰 윗셋을 가지는 단층대를 향하여 경사진 반지구의 형성이다. 두 번째 "완전지구 (full graben)" 단계의 특징은 상반의 붕괴와 리프트에 평행하게 화산작용이 발생하는 것으로 이것이 궁극적으로 해저면 확장으로 발전된다. 후포분지는 두 번째 단계와 관련된 형상을 보여주지 않는다. 프로파일 19에서 후포분지가 반지구로서 왼쪽의 경계가 큰 윗셋을 갖는 정단층, 즉, 후포단층에 의해 이루어졌음을 볼 수 있다 (Fig. 3-3-4). 따라서 후포분지는 호상열도의 뒤에서 일어나는 리프트의 발달과정중 첫 번째 단계에서 형성되었음을 알 수 있다. 분지침강의 대부분은 후포단층을 따라서 발생하였으므로 깊은 곳에서 후포단층이 리스트릭 (listric)함을 제시한다. 리프트 후기 (S4) 동안 침강이 일어나지 않은 것으로 미루어 보아 후포분지는 주로 화산활동을 거의 수반하지 않은 지각의 변형에 의해 형성되었음을 짐작할 수 있다. 주향 이동 단층을 따라서 관측되는 지구대는 rhomb graben과 wedge graben의 두가지 유형으로 나뉘어진다. 후포분지는 양산단층의 연장선에 해당하는 단층과 후포단층의 사이에서 좁게 발달해 있으며 후포단층쪽으로만 경사진 반지구를 이룬다. 또한 분지내 가장 깊은 함몰대가 후포단층과 양산단층의 연장선이 가깝게 위치하는 곳에 있다는 사실은 후포분지가 양산단층과 후포단층 사이에서 발달한 wedge graben임을 지시한다.

나. 온누리분지

MCS 프로파일 94 1에서 94-4까지는 온누리분지 또한 남북방향으로 배열되고 동쪽에 고지형대가 있음을 보여준다 (Fig. 3-3-5). 온누리분지는 후포뱅크와 떨어져 있으며 후포뱅크의 연장선상에 있지 않다. 후포분지의 북쪽 끝은 프로파일 94-4의 사쪽에 퇴적물이 덮인 반지구로 나타나 있다 (s.p. 2600-2300, Fig. 3-3-5d). 분명히 후포분지와 온누리분지는 기변압 용기부에 의해 분리되어 있다. 온누리분지의 전체 직인 모양은 반지구로 정의될 수 있지만 중앙부의 정단층 ("A" in Fig. 3-3-5)은 퇴

적물이 가장 두껍게 쌓여있는 (~1.5 km) 주함몰대의 서쪽 경계를 이룬다.

후포분시의 경우 기반면이 평탄한 것에 반해, 온누리분지의 기반면은 굴곡이 심하고 불규칙적이다. 온누리분지에서는 리프트와 평행한 단층작용이 상반의 붕괴를 촉발하였다. 또한 동쪽에 있는 주 경계단층과 같은 방향으로 분포하는 단층은 하반의 붕괴도 발생하였음을 지시한다. 따라서 온누리분지는 더욱 진행된 열개분지의 발달과정을 겪었다고 볼 수 있다. 프로파일 94-2에서 94-4는 북동방향으로 얻은 것인데 “M”으로 표시된 주함몰대가 북쪽으로 갈수록 상당히 넓어지며 기반암의 변형이 동서방향의 신장에 의해 초래되었음을 보여준다. 따라서 온누리분지의 형성은 남북방향의 주향이동과 관련된 것 같지는 않다.

한반도와 가까운 온누리분지의 서쪽에는 상대적으로 굴곡이 적은 기반암이 보이는데 이것은 아마도 해안을 따라 노출된 암석들의 연장으로 생각된다; 이들 암석은 선캠브리아 편마암과 고생대의 퇴적암인데 주라기에서 백악기에 생성된 화강암에 의해 관입되어 있다 (KIER, 1981). 온누리분지의 함몰대내에서 변위가 큰 몇 개의 단층 때문에 기반암은 몹시 불규칙하다. MCS 프로파일들은 주경계단층이 분지내로 진행된 대부분의 변위를 수용하였음을 보여준다. 주경계단층은 깊어짐에 따라 평탄해지는데 이것은 신장운동이 리스트릭한 단층작용 (listric faulting)에 의해 발생하였음을 제시한다. 함몰대에서 기반암은 1 2초 (t.w.t)두께의 퇴적물로 덮혀 있어서 그 암상을 추정하기가 곤란하다. 하지만 다음과 같은 이유로 리프트와 평행한 화산활동이 일어나지 않았다고 해석한다; (1) 불규칙하고 굴곡이 있는 반사양상에도 불구하고 기반암의 배그리운 표면은 화성기원이 아님을 지시한다. (2) 만약 화산관입이 일어났다면 이의 결과로서 형성되는 화산체로 해석될 수 있는 기반암 융기부 (“H”, Fig. 3-3-5)조차 분지의 주향을 따라 배열되어 있지 않다. (3) 리프트 시기동안 퇴적된 것으로 짐작되는 최하부의 퇴적층 (unit S3, Fig. 3 3 5)은 퇴적후 화산관입을 지시해주는 내부 반사구조를 보여주지 않는다.

MCS 프로파일에서 확인되는 퇴적단위 1, 2, 그리고 3은 주함몰대내에서 인지되며 각 퇴적단위의 특징은 다음과 같다. 단위 1의 인대는 홀로세로 해석되는데 강하고 평행한 반사면들을 가진다. 단위 2는 기반암의 상반의 계속되는 기울어짐과 관련되어 나타나는 확산양상 (divergent pattern)을 보여주지 않으므로 리프트 후기의 위상을 나타내는 것으로 보인다. 단위 3은 전체적으로 췌기형으로 퇴적되어 있는데 리프트시기 (syn-rift)의 위상을 나타낸다. 단위 3내에서는 서로 구분되는 반사면을

볼 수 있으므로 그것을 경계로 단위 3을 3a와 3b로 나누었다. 부분적으로 기반암은 용기, 동쪽으로 성사진 역단층, 그리고 습곡과 같은 지각의 축소 (crustal shortening)의 증거를 보여준다 (e.g., s.p. 4200-5000 on profile 94-2). 역단층이 단위 3의 최상부까지 연장되어 있지만 단위 2는 변형을 받지 않았다. ODP Legs 127 and 128의 결과는 동해의 일련이 마이오세 중기 끝부분에 (ca 12 Ma) 중시되었으 며 이때 응력장이 신장성에서 압축성으로 바뀌었음을 지시한다 (Jolivet and Tamaki, 1992). 응력장의 바뀌은 Bonin Arc가 일본연도의 중앙부로 치고 들어온 결과로 해석된다 (Matsuda, 1979). 이러한 운동은 한반도의 동남주변부에 있는 영덕 분지 (Fig. 3-3-1)의 지각의 축소를 야기하였다 (Yoon and Chough, 1995). 온누리 분지에서 보이는 압축성 변형은 이러한 운동에 의한 것으로 해석될 수 있다. 따라서 지구조적으로 평온한 시기를 나타내는 퇴적단위 2의 연대는 마이오세 중기이후 로 해석되며 단위 3은 마이오세 중기 및 그 이전이 될 것이다.

다. 한반도의 남동대륙붕

한반도의 남동부에서 양의 자력이상대가 북쪽으로 약 250 km 뻗어 있는데 울릉 분지쪽의 비갈쪽 주변부에서 감쇠된다 (Fig. 3-3-3). 이 자력이상대는 북미의 대륙 주변부에서 볼 수 있는 East Coast Magnetic Anomaly (ECMA) (Keen and Potter, 1995)보다 그 길이가 작으나 최대 세기 (>400 nT)는 ECMA (200~300 nT) 보다 더 크다. 인접한 한반도 남동부의 해안지역에는 현무암 및 응회암과 같은 분출성 화산암이 널리 분포한다 (Fig. 3-3-3). K-Ar 방사능 측정법에 의하면 이 분출성 화산암의 연대는 25-17 Ma로 알려져 있으므로 (Lee and Pouclot, 1988; Chough and Lee, 1992), 한반도 주변부에서의 리프팅과 그 이후 일어난 울릉분지의 형성과 밀접한 관련을 가진다고 볼 수 있다.

분지의 경계를 이루는 단층이 없으므로 단층과 관련된 층서가 관찰되지 않으나 MCS 프로파일상에서 리프트의 시작 (S2), 리프트의 절정기 (S3), 그리고 리프트 이후 (S4)를 나타내는 퇴적상이 구분된다 (Fig. 3-3-7). 리프트가 일어나기 전의 층서와 S2간의 경계는 확실하게 나타나지 않는데, 이것은 리프팅의 초기에 회산분출암이 sheet flow의 형태로 퇴적되고 광범위하게 침식받았음을 지시한다. 침식작용은 특히 해안 가까운 쪽에서 잘 나타나는데 여기에서 S2는 기반면위로 온랭하지만 S3에 의해 잘려져 있다. 이것은 리프팅이 시작된 때 수심이 가장 얕은 곳이 노출되어

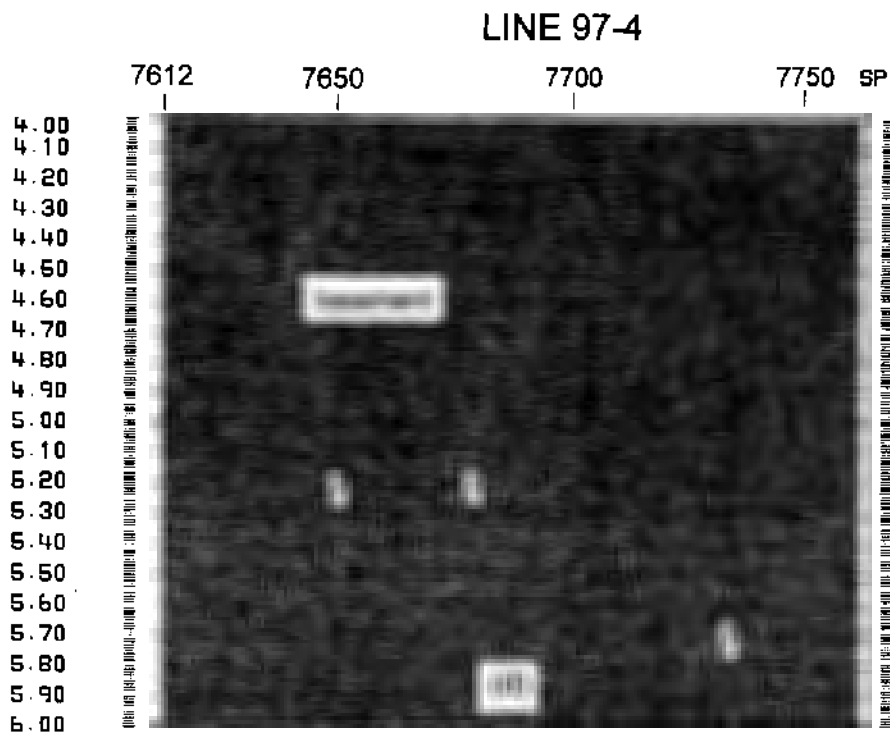
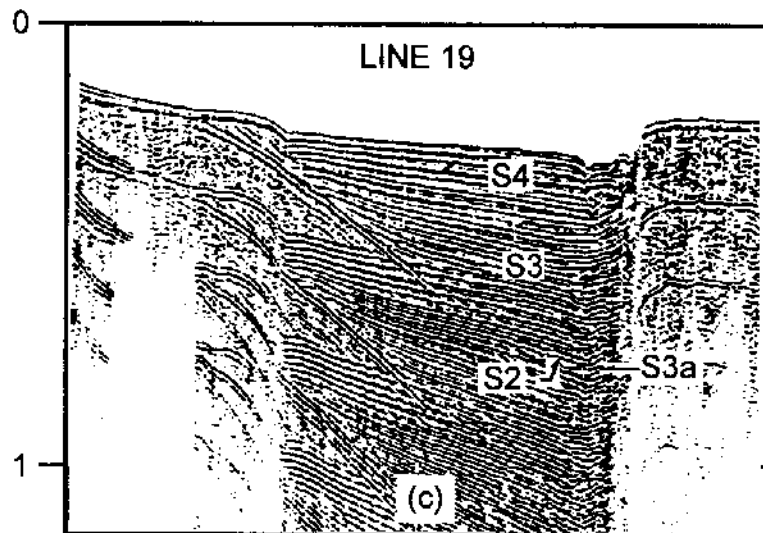


Fig. 3-3-6. (a) Single channel profile 19. (b) and (c); MCS profile of 97-2 with and without tau-g HVF. (d) MCS profile 97 4. Note that tau-g HVF improved the continuity of reflections.

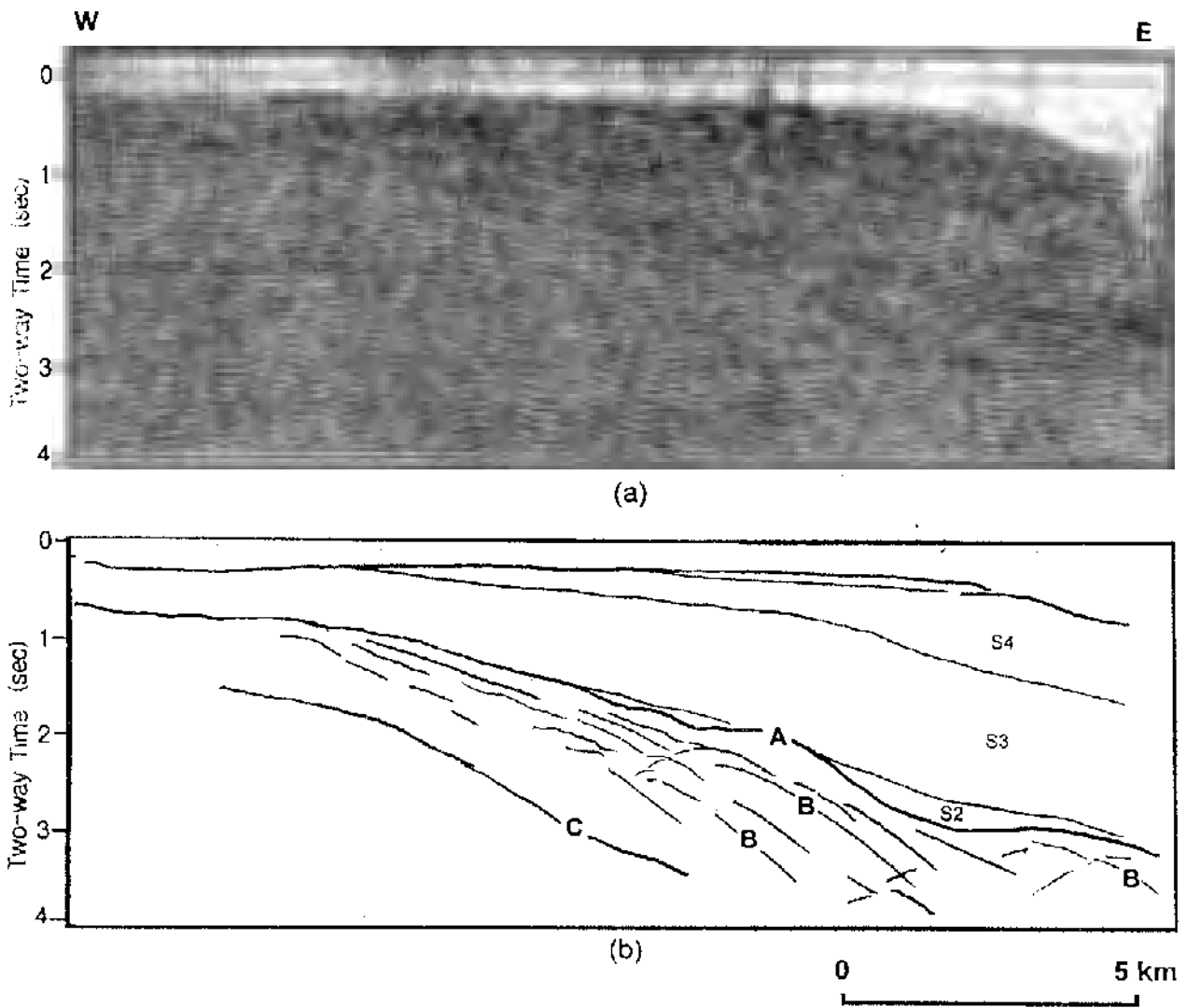


Fig. 3.3.7. (a) MCS profile A (See Fig. 3.3.2 for location) and (b) its line drawing interpretation (from Kim et al., 1998).

(profile 97-2의 s.p. 5300)에 달하는데 퇴적층의 구간속도를 고려하면 약 2 km에 상응한다. 단애는 바깥사면의 전체에서 발달해 있다 (Fig. 3-3-4). 기반암의 경계와 내부 반사면들은 울릉분지쪽으로 낮게 자리잡은 음향기반면까지 발달한 단애가 화산체로 이루어져 있음을 지시한다.

단애의 바깥쪽으로 기반암에는 약 30 km의 거리에 걸쳐 SDR이 나타난다. τ -g HVF로 처리한 MCS 단면에서는 일반적인 처리 후 얻은 단면에 비해 SDR이 더 뚜렷이 나타난다 (Figs. 3-3-5b and c). SDR이 윗쪽하는 것은 전형적인 용암류 (lava flow)의 특징이라고 할 수 있으며 프로파일 97 4에 나타나 있다 (Fig. 3 3 5d). 여기에서 음향기반암 아래에서 보이는 SDR은 복합적인 용암류의 흐름을 보여주는데 이것은 용암류의 확산속도가 낮아서 작은 단위로 이루어진 것임을 지시한다 (Cas and Wright, 1987). SDR이 나타나는 지역을 벗어나면 기반암의 반사특성은 구릉모양의 (hummocky) 해양지각을 나타낸다. 단애의 바깥쪽에서 보이는 화산체와, 울릉분지의 기반암으로 합쳐지는 용암류들은 강렬한 화산작용을 증명한다. 수평방향으로 잘 구분되는 화성층서는 또한 용암의 큰 유출 (outflow)이 가능한 분출환경을 지시한다. 하지만 한반도의 동쪽 주변부에서 보이는 SDR들은 남동대륙붕에서 만큼 뚜렷하지 않다. 이것은 아마 작은 에어건 (690 in^3)을 사용하여 화성기반암을 충분히 통과할 정도로 강한 탄성파를 발생시키지 못했기 때문으로 사료된다. 혹은 이곳에서의 화산활동이 남동 대륙붕지역에서 관찰되는 정도까지 이르지 못하였을 가능성도 있다.

화산성 대륙주변부에서 분출암의 변화하는 양상을 설명하기 위해서는 대륙주변부를 Zone I에서 Zone 4까지 나누는 화성 지역분류 (igneous zonation)를 채택한다 (Skogseid and Eldholm, 1987; Eldholm and Grue, 1994); Zone I은 리프트된 대륙지각으로서 Zone II로 정의되는 주변부의 고지형대에서 육지쪽으로 존재하는데 부분적으로 용암으로 덮혀 있다. Zone III는 Zone II에서 바다쪽으로 위치하는데 SDR이 존재하는 지역으로서 기반면 하부에서 나타나는 SDR은 초기에 형성되는 해양지각내에 다이크-용암의 경계면으로 해석된다. Zone IV는 기반암이 해양지각으로 구성된 분지이다.

음향기반암의 특징을 나타내는 위의 분류에 따라 한반도의 대륙주변부와 울릉분지를 Zone I에서 Zone IV까지 4개로 나눌 수 있다 (Fig. 3 3-4). Zone I은 한반도의 동쪽 연안에 인접한 두 개의 분지 (후포분지와 온누리분지)로 이루어져 있으며

리프트 분지의 특징을 잘 나타낸다. Zone II는 대륙주변부의 구조적 고지형대로서 후포뱅크에 해당한다. Zone III는 바깥쪽 사면의 단애와 바다쪽으로 분포하는 유향 기반암을 포함하는데 SDR이 분포하는 지역이다. Zone III는 또한 후포뱅크와 울릉 분지의 경계로서 정의된다. 최종적으로 Zone IV는 해양지각이 분포하는 울릉분지의 중심부이다. 한반도 주변부의 전체적인 양상은 노르웨이의 리프트된 주변부에서의 양상 (Skogseid and Eldholm, 1987)과 매우 일치한다. 하지만 Zone I에 해당하는 후포분지에서 얻은 탄성과 프로파일은 용암류의 증기를 보여주지 않는다.

Fig. 4b는 주변부에서 서로 다른 지각단위와 자력이상분포간의 중요한 관계를 보여준다. 후포분지에서 음의 자력이상치는 화산관입이 거의 없는 대륙지각을 시사한다. 반면에 후포뱅크에서 나타나는 양의 자력이상은 강렬한 화산관입에 의한 것으로 해석된다. 울릉분지 쪽으로 분포하는 바깥쪽 사면에서 자력이상은 최대치와 이차적인 이상치를 보여준다. 이상치의 전체 폭은 SDR단위의 폭과 유사한데 이것은 강하게 자화된 SDR 지역이 자력이상치에 가장 많은 기여를 하고 있음을 지시한다. 이차 이상 (s.p. 7800-8000)은 기반암 용기와 관련된 것으로 보인다.

Chough and Lee (1992)는 탄성과 프로파일들을, 울릉분지의 남쪽 경계에 있는 시추공에서 획득된 층서와 대비하여 퇴적층을 4개의 단위 (I에서 IV)로 나누었다. 울릉분지의 퇴적구조는 Chough and Lee (1992)에 자세히 나와 있으므로 여기에서는 그것에 대해 논의하지 않는다. 대신 퇴적층서의 연대는 다음과 같이 간단히 기술할 수 있다: 단위 I에서 IV는 각각 마이오세 중기 (16.2 (혹은 그 이전) - 11.2 Ma), 마이오세 후기 (11.2 - 5.3 Ma), 플라이오신 (5.3 - 1.6 Ma), 그리고 플라이스토신에서 홀로세 (< 1.6 Ma)이다. 이 중 단위 I은 화산암으로 알려져 있다 (Chough and Lee, 1992). Ludwig et al., (1975)은 단채년 탄성과 프로파일 자료로부터 동해의 분지에는 유향기반암위에 화산암이 많이 분포하고 있음을 추론하였으며 이러한 화산암들은 유향기반암이 형성된 이후에 퇴적된 것임을 주지하였다. Chough and Lee (1992)는 울릉분지에서의 화산작용이 마이오세 중기까지 지속되었음을 제시하였다.

울릉분지는 해양지각이 형성된 지역이다 (Kim et al., 1998; Lee et al., 1999). 따라서 한반도의 주변부에서 MCS 프로파일들을 자력자료와 대비해보면 지각의 구성이 변하는 두 개의 중요한 지구구조적 경계가 존재함을 추론할 수 있다. 먼저, 후포단층은 리프트 화산작용에 의해 (기외) 영향을 받지 않은 대륙지각이 끝나는 지역을 나타낸다. 두 번째로, 바깥쪽 사면에서 남북방향으로 길게 분포하는 단애는 대륙의

조개집과 그 이후에 발생한 해저면 확장 of 시작을 나눈다. 그 사이에 있는 지역은 해저면 확장이 시작되기 직전에 많은 양의 관입이 발생한 대륙지각임을 제시한다.

5. 토의

가. 울릉분지의 당겨열림모델

Jolivet and Tamaki (1992)는 동해의 열림이 올리고세 말기에서 마이오세 초기 (32-20 Ma) 동안 동해의 좌우 경계부를 따라 위치한 두 개의 남-북 방향의 우수주향 주단층에 의해 인도되었다고 제시하였다. 그들은 한반도의 남동부에 있는 양산 단층 (Fig. 3-3-1)이 당겨열림을 이끈 왼쪽의 주단층으로 가정하였다. 한국 남서부와 일본 남서부의 광상대 (metallogenic belt)가 서로 대비되나 위도상 차이가 나는 것을 근거로 Sillitoe (1977)는 한반도와 일본 남서열도 사이에 약 250-300 km의 우수변위가 있음을 제시하였다 (Fig. 3-3-1). 이 우수주향의 이동은 가장 젊은 광상대가 약 46 Ma에 형성된 이후 올리고세와 마이오세동안 발생하였다. 한편, Jolivet and Tamaki (1992)의 가정과는 달리, 정밀한 육상지질조사 결과는 양산단층을 따라 발생한 변위는 겨우 35 km 밖에 이르지 못했음을 보여준다 (Chang, 1990). 따라서 울릉분지의 당겨열림 모델을 보완하기 위해 Yoon and Chough (1995)는 후포뱅크의 바깥사면을 따라 있는 Ulleung Escarpment가 남북방향의 우수주향 전단대 (shear zone)로서 쓰시마단층까지 연결되어 있으며 (Fig. 3-3-1) 여기에서 마이오세 초기 (23-18 Ma)동안 나머지 이격거리 215-265 km에 해당하는 울릉분지의 당겨열림이 발생하였다고 제시하였다. 그들은 이 주 전단운동이 2차 전단대로서 후포단층을 활성화시켜 그 결과로서 마이오세 초기에 후포분지가 형성되었다고 가정하였다. 당겨열림모델에서 울릉분지는 일본열도의 지각신장에 의해 형성되었다고 해석된다.

하지만 울릉분지의 지각이 해양지각이라는 사실은 울릉분지의 당겨열림모델에 근본적인 문제가 있음을 제시한다. MCS 프로파일에서 보이는 기반암의 층서는 한반도의 주변부에서 활발한 화산작용이 있었음을 보여준다. 일반적으로, 화산성 대륙 주변부에서 대륙지각이 늘어나는 지역은 50-80 km를 넘지 않는다 (Mutter et al., 1988). White and McKenzie (1989)는 이것을 뜨거운 화성 관입암에 의해 지각이 약해지기 때문으로 풀이하였다. 일단 암권이 리프트되기 시작하면 이것은 지

각의 박층화가 가장 큰 지역에서 암권을 상당히 약화시킬 것이다. 내양의 분지들에 비해 작지만 울릉분지의 폭은 200 km 정도 된다. 이러한 깊은 화산성 주변부에서 대륙지각이 늘어나는 과정에서 쪼개지지 않고 지탱할 수 있는 범위를 넘어선다. 울릉분지 지각의 구조의 특성은 맨틀플룸의 영향하에서 해양지각이 형성되는 모델로써 가장 잘 설명된다 (Kim et al., 1998). 양산단층의 운동시기에 대한 연구는 Yoon and Chough (1995)의 모델과 양립되지 않는다. 양산단층은 에오세 중기의 rhyolitic tuff (44.7 Ma)를 절단하고 있으며 마이오세 중기의 지층에 의해 덮혀 있다 (장기홍 등, 1990). 따라서 양산단층의 주향이동 운동은 이들 두 시기 사이에 일어났음을 알 수 있다. 가장 최근에 장태우 등 (1999)은 양산단층의 서쪽에 있는 유진층군내 화산암 기원의 미시 (gouge)의 연령을 측정하여 양산단층의 초기 운동시기가 37.3 Ma 임을 제시한 바 있다. 이 연대는 당겨열림 모델이 제시하는 것과는 달리 양산단층의 활동이후 동해의 분지들이 열렸음을 의미하며 한반도의 안쪽 주변부에서 대륙의 리프팅이 발생한 후 즉, 리프트 분지들이 형성된 후 대륙의 설개가 시작되고 울릉 분지가 열렸음을 지시한다.

중력이상도 (Fig. 3-3-8)는 한반도의 주변부를 따라 쓰시마 단층까지 지구조적 인 연결양상을 보여주지 않는다. 울릉분지의 서쪽과 남쪽 경계부에는 주변방향으로 불록하게 중력최소치가 존재하는데 그 위치는 양의 사력이상치 (Fig. 3-3-3)와 일치한다. 한반도의 동쪽 주변부에서 자력이상치는 SDR이 존재하는 지역에서 나타난다. 따라서 중력최소치는 강력한 화산작용이 발생하여 한반도의 남동쪽과 일본열도 남서 대륙붕에 분포하는 날이나고 리프트된 대륙지각과 해양지각을 나누는 지구조적 경계를 표시하는 것으로 보인다. MCS 프로파일 97-2와 97-4는 동서방향으로 있었으므로 만약 큰 규모의 주향이동 단층이 후포뱅크의 바깥쪽을 따라 남북방향으로 존재하고 쓰시마 단층까지 연결이 되어 있으면 그러한 단층의 단면을 보여줄 것이다. 하지만 이들 단면은 급경사의 단층면 그리고 flower structure와 같이 주향이동단층과 관련된 뚜렷한 특징을 보여주지 않는다.

나. 부채꼴 열림모델

앞에서 울릉분지의 당겨열림 모델이 갖는 문제를 거론하였지만 그렇다고 Otofujii et al. (1985)이 제시한 부채꼴 열림 모델을 지지하지 않는다. Otofujii et al. (1985)에 의하면 남서 일본열도의 마이오세 암석들은 56°의 편기를 보여준다. 따라서 그들은

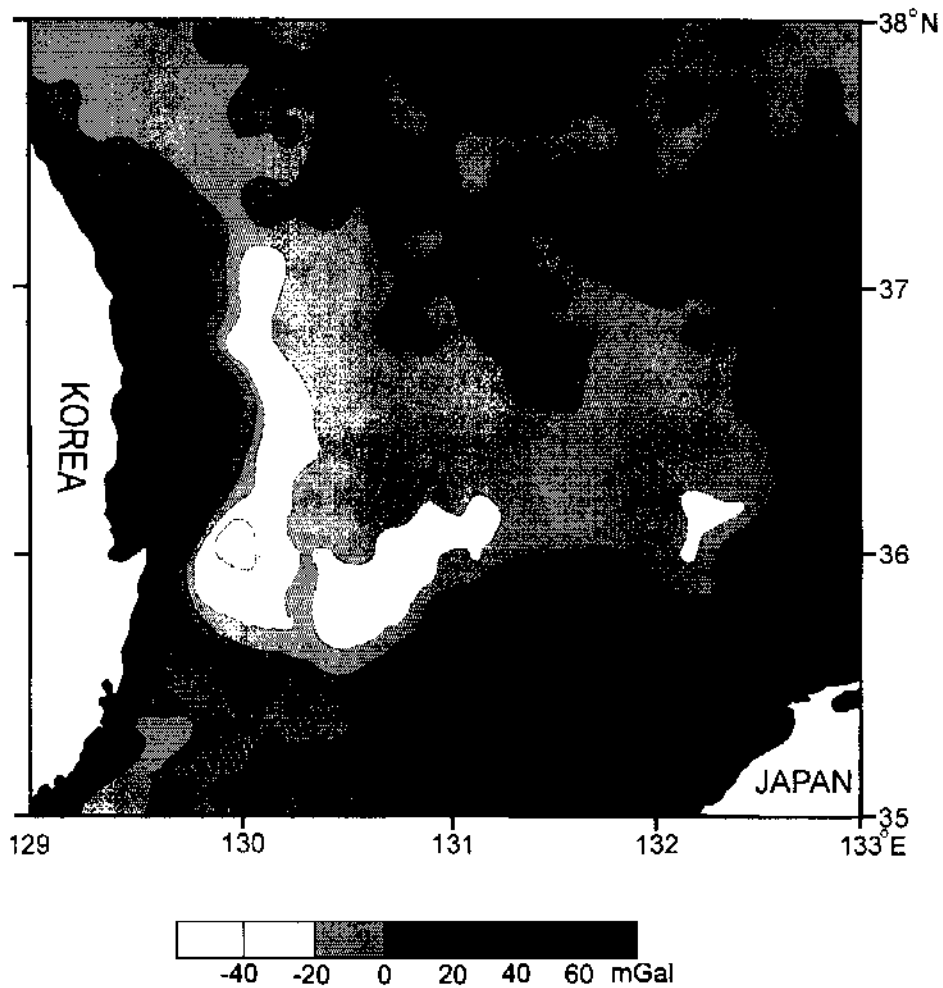


Fig 3-3-8. Free-air gravity anomaly map of the southern East Sea computed from the integration of satellite-derived and shipborne gravity (from Han et al., 1997).

마이오세 초기에 남서 일본열도가 이 양만큼 한반도의 남동부로부터 시계방향으로 회전하면서 떨어져 나왔다고 제시하였다. 하지만 한반도의 남동부에 분포하는 마이오세 지층에서도 남서 일본열도에서 관측된 값에 맞먹는 55°의 편기가 관측되었으므로 (김인수, 1992) 남서 일본열도가 한반도로부터 떨어져 나가면서 시계방향의 회전하였다는 것이 부정된다. 어쩌면 두 곳에서 측정된 값들은 고시자기의 편각을 측정하는 데 있어서 발생하는 불확실성을 반영하는 것 일수도 있다. 부채꼴 열림모델의 또 다른 문제점은 비현실적인 회전속도 (60 cm/yr)이다.

한반도의 동쪽 주변부에서 리프트의 폭은 북쪽으로 갈수록 증가한다. 특히 온누리분지에서 한물내가 북쪽으로 가면서 확장되고 있음이 뚜렷이 나타난다. 주변부에서 이러한 변화는 전체적인 모양에서 오른쪽으로 펼쳐진 부채꼴로 나타나는 바 (Fig. 3 3 9). 동해 남서부의 부채꼴 열림모델에서 수장되는 회전의 일부를 반영하고 있을 가능성이 있다. 하지만 이러한 부채꼴 모양의 확장은 한반도의 안쪽 대륙 주변부에 분포하는 리프트 분지에 대해서만 관찰할 수 있다. 울릉분지의 경우 미약하지만 선형의 자력이상(북동-남서 방향으로 평행하게 배열되어 있음)을 볼 수 있는데 이것은 울릉분지가 남동쪽으로 열렸음을 의미한다. 즉, 한반도 주변의 대륙 리프팅이 시계 방향으로 진행되고 울릉분지가 동남쪽으로 열린 과정이 전체적으로 부채꼴 모양을 이루게 된 것으로 해석된다.

다. 한반도 대륙주변부의 진화모델

MCS 자료를 다른 자료와 함께 연관시켜 한반도 동쪽의 화산성 대륙주변부의 발달모델을 유추할 수 있다. Fig. 3 3 10은 23 Ma 혹은 그 이전부터 현재까지 진행된 진화과정으로서 단성과 프로파일 19와 97 4 (Fig. 3 3 4b)에 나타나는 구조에 해당된다. 한반도의 대륙주변부에서 울릉분지의 열림과 관련된 지구조활동은 반지구 (후포분지)의 형성을 야기한 리프트 단계와 함께 시작된다 (Fig. 3-3-10a). 이 반지구는 경계 단층지역 (후포단층)쪽으로 경사져 있다. Wernicke (1981)의 모델은 취성의 (brittle) 상부지각내에서 발생하는 지각의 초기 리프팅단계를 설명하는 데에 폭넓게 적용되는데 이 모델은 비대칭적인 리프트구조를 가지는 주된 listric-detachment 단층을 포함한다. 대륙 및 초기 해양지각의 형성환경, 그리고 비활성 대륙주변부에서 구조적인 비대칭성은 잘 드러나고 있다. 즉, 후포분지는 비활성 대륙주변부에서 발생하는 대륙지각의 리프팅으로 해석할 수 있다.

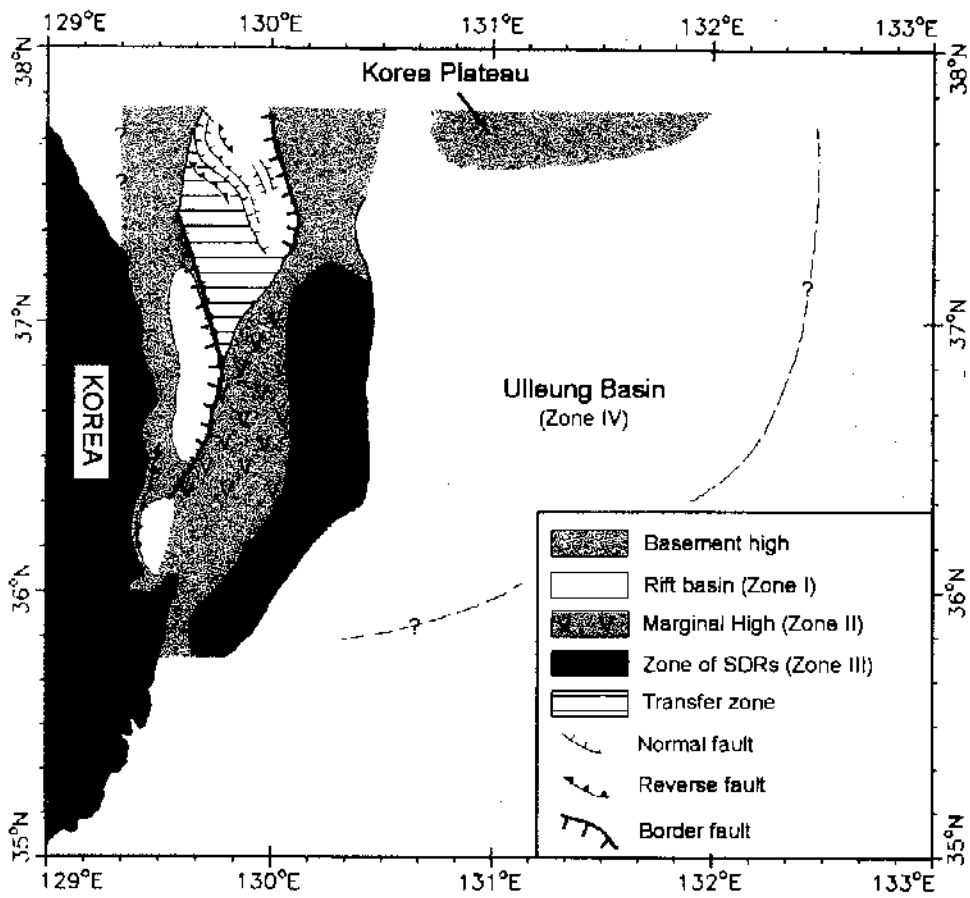


Fig. 3-3-9. Structural map of the eastern Korean margin and the Ulleung Basin.

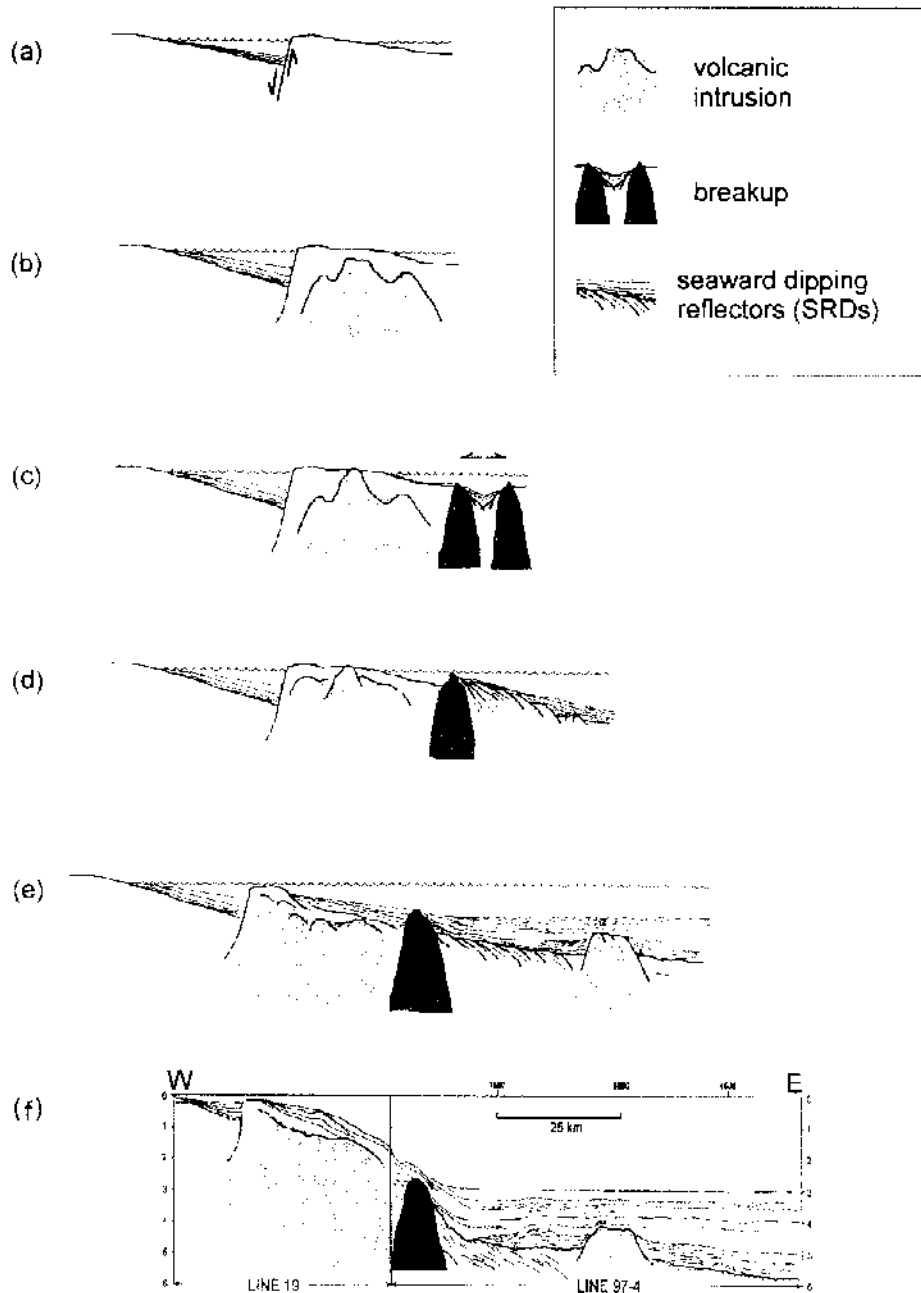


Fig. 3 3 10. Schematic diagram showing the evolution stages of the eastern Korean margin from early Miocene to the present. (a) Rifting at an inner margin, (b) volcanic intrusion at a marginal high, (c) breakup, (d) extrusive volcanism generating seaward dipping reflectors, (e) subsidence with sediment accumulation, and (f) present geologic structure pertaining to Fig. 4b.

다음에, 강력한 화산관입이 단층의 하반에서 발생하였다 (Fig. 3-3-10b). 화산작용이 지속되고 더 강하게 됨에 따라 대륙지각은 완전히 쪼개지고 화산관입의 바다 쪽으로 해저면확장이 시작되었다 (Fig. 3-3-10c). 해저면 확장의 시작에 잇달아 용암은 대기에 노출된 환경에서 분출하여 용기된 지역에서 SDR을 형성하였다 (Fig. 3-3-10d). 이 단계 혹은 그 직전에서 안쪽 주변부에 위치한 대륙지각의 신장은 멈추어지고 대신 바깥쪽 주변부에서 해저면 확장이 진행되었다. 해저면 확장과 침강이 계속되는 동안 퇴적물 (혼탁류와 암설류)가 퇴적되고 화산활동이 해양지각의 배치 이후에도 지속되었다 (Fig. 3-3-10e).

후포분지와 온누리분지내에 화산관입이 거의 없는 것은 안쪽 주변부가 주로 지각의 변형 때문에 형성된 것임을 지시한다. 온누리분지를 후포분지와 갈라놓은 기반암상승부는 평탄하고 음의 사리이상치를 보여주므로 역시 화산관입이 (거의) 일어나지 않은 것으로 판단된다. 대륙주변부의 지질구조도 (Fig. 3-3-9)는 다음 사항을 보여준다; 온누리분지가 후포분지보다 폭이 크다. 이들 두 분지는 볼록한 모양을 (convex) 가지며 비스듬한 기반암 용기부에 의해 연결된다. Rosendahl (1987)은 리프트구조의 기본적인 단위는 곡선형태를 보이는 반지구이며 이들 중 몇몇은 비스듬한 transfer zone에 의해 연결된다고 주장하였다. 따라서 후포분지와 온누리분지 사이에 있는 기반암 용기부는 서로 다른 신장의 정도를 수용한 전환지역 (transfer zone)을 나타낸다고 해석된다.

울릉분지에서는 북쪽으로 갈수록 깊어지는 화산작용이 마이오세 중기까지 지속되었던 것으로 보고된 바 있다 (Chough and Lee, 1992). 이것은 남서 일본열도가 한반도의 남동부로부터 멀어져 가는 동안 화산 활동은 한반도에 가까운 지역에 국한되었음을 의미한다. Kim et al. (1998)은 울릉분지가 해저면확장에 의해 열릴 때 중국 북동부에 위치한 맨틀플룸에 의해 형성된 열이상대의 변두리에 있었음을 제시하였다. 따라서 한반도의 대륙주변부에서 지속되고 국한된 화산작용은 이 열이상대의 범위를 지시한다고 생각된다. 맨틀플룸의 효과는 마이오세 중기까지 지속되었을 것이다. 한반도의 대륙주변부와 대규모의 맨틀 상승이 있었다고 보고된 (Miyashiro, 1987; Tatsumi and Kimura, 1991) 중국 북동부의 화산지역사이의 거리는 800-1500 km 범위로서 맨틀플룸을 중심으로 형성되는 열대류 단위의 범위 2000 km (White and McKenzie, 1989)를 넘어서지 않는다. 최종적으로 기반암이 더 침강되고 퇴적물이 쌓이면서 현재 관측되는 탄성과 프로파일 (Fig. 3-3-10f)과 같은 구조를 이루게

된다. 노르웨이의 대륙주변부에서 지각이 조개진 것을 나타내는 선구조는 대륙지각이 최대로 얇아진 지역 (Voring 분지)에 위치하지 않고 기반암 융기부 (Voring Plateau)의 바깥쪽 사면에 위치한다. (Skogseid and Eldholm, 1987). 이것은 미완동성 대륙주변부에서 지각의 경계를 나타내는 궤적이 해양지각보다 상대적으로 더 두껍지만 약한 대륙지각 지역내에서 존재함을 의미한다 (Mutter et al., 1988). 이에 대한 적절한 설명은 많은 사람들에 의해 제시되었으며 (e.g., England, 1983) 다음과 같다; 얇아진 대륙지각에서는 상대적으로 강한 맨틀이 더 약한 하부 지각을 대치함으로써 전체적으로 강도가 더 큰 압력을 형성한다. 마찬가지로, 동해 남서부에서 해저면 확장은 기반암 융기부에 해당하는 후포뱅크의 바깥쪽 사면에서 발생하였을 것으로 추측된다.

6. 동아시아의 맨틀대류

가. 개요

동아시아에서 지역에 따라 화산활동을 재구성하는 것은 Whitford Stark (1987)과 Zhou et al. (1988)에 의해 시도되었다. 이들 연구에 기초하여 아시아의 화산지역을 7개의 province (northeast Siberia, eastern Russia, Baikal, Mongolia, eastern China, Indochina, 그리고 Burma)로 나누었다. 동해의 South China Sea의 확장후 (post spreading) 화산활동은 각각 eastern Russia와 Indochina province에 포함된다.

초기 신생대의 화산활동은 대부분 동쪽 대륙주변부를 따라서 집중되었다. Paleocene에서 Oligocene 동안의 퇴적분자를 충전한 tholeiitic to transitional basalts는 eastern China province의 발해만 지역에서 발생하였으며 Paleocene potassic basalts는 northeast Siberian province의 Aniuski range에서 발견된다. 하지만 Mongolian province의 최서단에서는 Eocene basalts가 작은 양으로 존재하며 late Cretaceous to Paleocene basalts가 Baikal province에 분포하고 있다. 가장 범위가 넓은 화산활동상은 Miocene에서 최근까지 발생하였다. Burma와 동중국에서는 Miocene tholeiitic와 alkaline basalts가 수천 단층계의 가까운 곳에서 분출하였다. 마찬가지로 Baikal province에서도 Miocene 동안 특징적으로 tholeiitic, transitional,

그리고 alkaline basalts가 Sayan 및 Vitim 지역에서 많이 분출하였으며 basalt-trachyte 층서가 Utokan plateau에 쌓여 있다. Mongolian province에서는 또한 Pleistocene to recent 화산활동이 일어났는데 여기에서는 trachybasalt associations가 주를 이루고 북동 Siberia에서는 hawaiites가 많이 분포한다.

몇 가지의 공통적인 경향이 province간에 식별될 수 있다. 비록 말해만 (Bohai Gulf) 주위의 basalts는 flood basalt province를 나타낸다고 간주되지만, 어떤 지역에서라도 화산활동은 1000 km^3 의 양을 거의 초과하지 않는다 (Zhou et al., 1988). 대부분의 지역에서 시간이 경과함에 따라 tholeiitic 혹은 transitional basalt로부터 점차 다양한 alkaline basalt로 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 변화는 province의 크기와 관계없이 일어난다; 이와 유사한 분출 층서가 동중국 혹은 Hainan Island에서의 비교적 양이 많은 분출에 대해, 그리고 전체 양이 2 km^3 정도인 Thailand의 Denchai basalt에 대해서도 확인된다. 희귀원소의 프로파일들은 DUPAL OIB와 유사하게 incompatible element enrichment를 특징적으로 보여준다. 동위원소 조성은 basalts의 생성시 DUPAL components EM1과 EM2의 역할을 분명히 보여준다 (Figs. 3, 4). EM1은 동아시아와 Mongolia province에서 주를 이루며 반면에 EM2는 Indochina에서 주로 나타난다. 남 동위원소 조성은 Hart (1984)의 북반구 기준선 (Northern Hemisphere Reference Line)의 상부에 존재하며 Hart (1988)의 $\Delta 8/4 > +60$ 기준에 따라 대부분 DUPAL로서 분류될 수 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 신호들이 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 근거로 남반구의 DUPAL belt에서 관측되는 신호들에 직접 상응하는 지는 불확실하다. 이러한 점은 특히 Hart (1988)에 의해 정의된 0.7050보다 더 낮은 비율 보이는 Indochina province에서 그러하다.

나. 아시아에서 대륙판들의 진화

현재 Siberian platform의 남쪽에 놓여 있는 craton의 조각들 대부분은 고생대 초기에 Gondwana 동부 및 북동부의 부분들이었다. Sino-Korean 블록 및 주변의 고생대 초기 벨트를 포함하는 북중국은 남극의 동쪽에 놓여 있었다. 남중국과 타림 블록은 Indochina와 Indonesia와 함께 Australia에 가까운 지역에 놓여 있었다. 동 Gondwana의 분리는 North China 블록의 리프팅과 함께 early Devonian에 시작되었으며 Permian과 Triassic 동안 계속되었는데 이때 동남아시아 지역이 Tethys를 가로질러 이동하였으며 North China 블록의 동쪽 부분이 Ordovician과 Cenozoic사

이의 어느 단계에서 120 km 이상의 대륙맨틀을 잃어버렸음을 보였다. 이러한 경향은 대륙맨틀의 소실을 중생대 후기 혹은 신생대에 발생한 사건으로서 간주하였으나 인도양에 대한 Mahony et al. (1989)의 모델과 유사성은 대륙맨틀의 소실이 곧드와나의 분리동안 발생하였을 가능성이 더 클 것을 제시한다. 분리된 열 성계층 (detached thermal boundary layer)은 남태평양의 판내 화산활동의 근원으로 제시된다 (Lewis and Smith, 1995).

아시아의 형성은 Mongol Okhotsk 습곡대의 massif가 Siberian platform에 더해지는 것과 함께 시작되었으며 그 이후 Permian과 Triassic동안 남중국과 북중국의 충돌이 발생하였다. 이후 Farallon과 Izanagi판과의 상호작용은 주라기 후반부터 백악기 초기에 걸쳐 아시아의 동쪽 대륙주변부를 따라 NNW방향의 섭입을 가져왔다. 판 상호간의 아주 oblique한 특성은 Tan-Lu system의 단층작용의 원인으로 제시된다. WNW방향의 섭입은 백악기 후기에 다시 시작되었으며 그 결과 Chukotki-Sikote-Alin belt가 생겨났다. 동쪽의 대륙주변부를 따라 섭입한 슬랩의 존재는 맨틀이동을 제한하여 아시아 아래에서 약권 영역을 tap했을 것이다. 동쪽의 대륙주변부를 따라 단열에 의한 온도의 상승은 섭입하는 슬랩의 냉각효과에 의해 상쇄되었을 것이다. 하지만 중앙 아시아와 Indochina에서는 이러한 냉각효과가 없었을 것이므로 약권의 온도가 점차 상승되었을 것이다. Miyashiro (1986)에 의해 제시된 또 다른 모델은 hot cell이 이동하면서 편리편해, 남지나해, 그리고 동해를 연속적으로 열었으며 현재 동중국의 아래에 위치한다는 것으로 설득력이 없어 보인다. 마찬가지로 인도양의 약권이 아시아의 아래로 이동하였다는 모델 (Hickey-Vargas, 1995)도 가능성이 없어 보인다.

맨틀의 유동 (mantle flow)이 서쪽으로 이동하는 슬랩의 경사가 급해지는 원인으로 제시된 바 있으며 따라서 동해의 열림 동인 쇄대에 달했던 발해인과 동러시아의 신장에 대한 작용을 제공한다. 슬랩의 경사가 더 급해지고 섭입대가 동쪽으로 후퇴함에 따라 약권이 후열도 지역으로 주입되었을 것으로 보인다. 이 지역의 다른 곳에서 화산활동과 마이크로 플레이드의 경계 및 대륙괴의 중심과의 상관성은 약권-대륙 맨틀 경계에서 불균일한 지형의 영향을 제시하며 이들 중 일부는 대륙블록들이 곧드와나로부터 리프팅되는 단계까지 거슬러 올라간다. 동해가 열리는 단계까지 가장 멀리 진행된 리프트는 맨틀유동과 수직으로 놓여있는 깊은 지형구조와 관련이 있는 것 같다. 지형적 특성이 있는 지역에서의 맨틀유동은 이차 대륙단위

(secondary convection cell)를 형성하는데 여기에서 단열 감압이 flood basalt를 생성시킨다 (King and Anderson, 1995). 동중국의 화산활동 중 상당히 많은 부분이 암권의 두께변화가 상당히 일어날 것으로 예상되는 Sino-Korean craton의 북쪽 경계부를 따라 존재한다. 이와 마찬가지로 북동 시베리아에서의 화산활동은 Omolon 블록의 북서쪽 경계면을 따라 발생하였다. Baikal province의 리프팅은 Siberian craton의 경계에 수직방향으로 발생하였다. 이 지역의 구조는 암권의 두께가 Siberian platform 아래에서 대략 150 km이고 Mongol Okhotsk 습곡대 아래에서 약 100 km인 계단모양임을 제시한다. Zonenshain and Savostin (1981)에 의해 이 지역의 아래에서 추론된 활동기간이 상당히 긴 약권의 용승은 암권 두께의 이러한 변화의 결과가 된다. Baikal호의 북동쪽에 있는 Vitim과 Udokan 지역의 화산활동은 이러한 시형적 특징에 의해 유도되는 대류단위로부터 생겨나는 용융물질의 모델과 잘 일치한다.

Smith (1998)는 동아시아의 맨틀대류와 관련하여 다음과 같이 동해와 같은 후열도해가 맨틀플룸의 영향에 의해서가 아니라 대류성 부분용융에 의하여 형성되었음을 제시하였다. 지형에 의해 유도된 대류영역은 이미 얇아진 암권을 침식하는 작용을 할 것이다. Tariat지역과 동중국에 대한 xenolith geotherm은 정상적인 약권 (potential temperature 1280°C)이 75내지 100 km의 깊이까지 상승하는 것과 일치한다. 유체가 풍부한 EM 성분이 관련될 경우 열 이상이 없어도 용융이 발생할 수 있다. Hydrous (EM2?) 및 carbonated (EM1?) peridotite의 고상선은 anhydrous lherzonite에 대한 고상선보다 상당히 낮은 온도로 이동하는데 이 경우 약권과의 상호작용은 용융을 유도하기에 충분할 것이다. Flower et al. (1996)은 Indochina 아래에서 hydrous한 용융조건을 선호하였다. 이 지역에서 anhydrous한 조건을 위한 계산결과는 약권의 potential temperature이 1480°C일 것을 제시하지만 용융물질의 분리를 위해 비현실적으로 크며 때로는 너무 낮은 깊이범위를 준다. Hydrous한 용융조건에 대한 동일한 압력-온도의 추정치는 potential temperature이 1350°C인 한 곳을 제외한 모든 지역에서 1320°C보다 작을 것을 지시한다. 정상적인 약권의 단열선 위의 $\Delta T=40-70^{\circ}\text{C}$ 범위에 있는 이 basalts의 근원에 대한 온도차이는 플룸에 대한 추정치 $\Delta T=300^{\circ}\text{C}$ 보다 훨씬 낮다. 이와 대조적으로, potential temperature 1580°C를 가지며 아시아와 같은 곳의 아래에 있는 대륙맨틀의 기저로부터 상승하는 플룸은 심지어 anhydrous한 peridotite로부터도 komatiite를 생성시킬 것으로 기대되므로

아시아에서 관측되는 적은 양의 basalt를 생성시키기에는 부적합하다.

나. 울릉분지의 화산암 특성

약권의 potential temperature가 정상보다 약 200°C 높은 1480°C까지 증가함에 따라 MgO의 percentage는 약 10%에서 18%까지 계통적으로 증가하며 Na₂O의 percentage는 동시에 감소한다. 1480°C의 온도를 갖는 약권의 상부에서 암권이 2배 가늘어지는 것은 신장이 더 진행됨에 따라 알칼리 현무암에서 솔라아이트 현무암으로 변화하는 화산암을 형성시킨다. 따라서 서 그린랜드의 Disko Island에서 관측되는 MgO의 함량이 높은 picritic basalts는 비정상적으로 높은 약권의 온도를 지시한다 (White and McKenzie, 1989).

동해 분지들 내에 위치하는 화산섬들과 대륙주변부에서 형성된 화산암들의 암석학 및 지화학적 자료들은 특이하게도 울릉분지내에 위치하는 독도와 울릉도, 그리고 그 사이의 울릉해저화산의 암석들만이 MgO의 함량이 10%를 넘으며 picritic basalt를 함유하고 있음을 보여준다 (Lee and John, 1985; S'edin and Sato, 1996). 이에 반해, 일본 및 야마토 분지와 같은 신해분지, 그리고 야마토 리지와 같은 동해의 다른 곳에서 획득한 화산암은 각각 전형적인 후열도 분지 솔라아이트와 island-arc 유형의 암석들이다. Nakamura et al. (1989)가 수행한 중국과 한국의 알칼리 현무암의 주원소 및 희귀원소 분석결과는 태평양판의 섭입효과가 화학적으로는 이들 지역의 상부 맨틀까지 미치지 못하였음을 보였다. 중국과 한국에 분포하는 현무암은 대륙 및 ocean island의 알칼리 현무암과 유사하며 반면에 남서일본의 현무암은 island arc의 신호를 약하게 보여준다. 이러한 사실은 태평양판이 일본열도 아래로 섭입하는 것이 한반도 주변부의 형성에 주된 지구조운동이 아님을 의미한다.

화산작용이 강렬한 미판동성 대륙주변부의 형성을 설명하는 데에는 주로 다음의 두 가지 모델이 사용되고 있다. 하나는 수동적인 플룸모델 (White and McKenzie, 1989)이며 나머지 하나는 대류성 부분용융 (convective partial melting) (Mutter et al., 1988)이다. 울릉분지 시각의 속도구조는 분지지가이 맨틀플룸 주위를 에워싸는 대류권의 중심이 아니라 주변부에서 형성되었음을 지시하므로 (Kim et al., 1999) 한반도 대륙주변부의 형성에 대하여는 수동적인 플룸모델이 더 직진할 것으로 생각된다. 하지만 동아시아에서 발생한 화산작용은 맨틀플룸이 아니라 DUPAL신호기

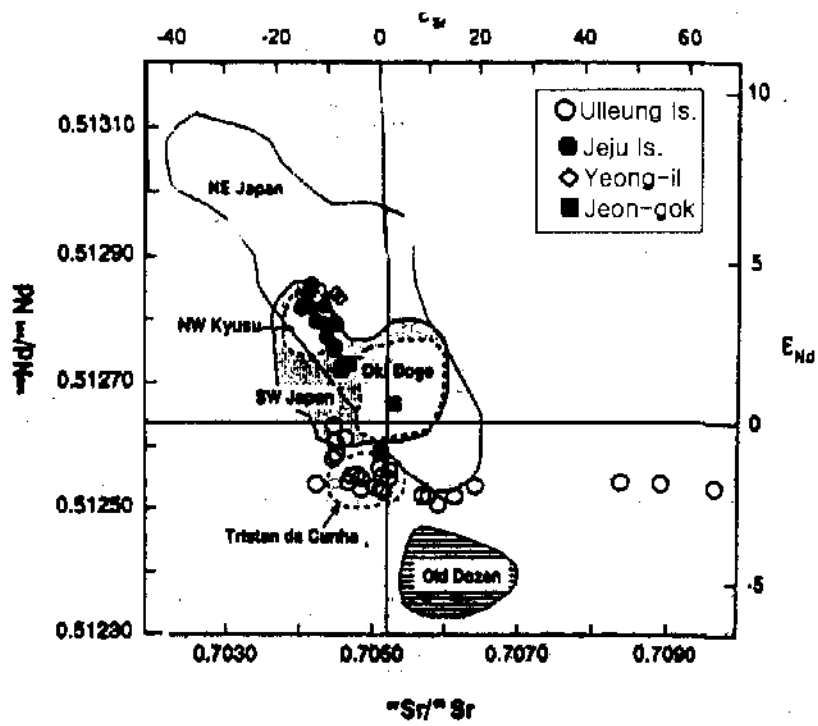


Fig. 3-3-11. Initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for Quaternary alkali volcanic rocks from the Ulleungdo, Jeju, Jeongok and Yeong-il areas in South Korea. Isotopic data of basaltic rocks from northeast and southwest Japan (from Kim et al., 1999).

강하게 나타나는 정상보다 뜨거운 맨틀과 관련시켜 해석하는 것이 우세하므로 울릉 분지의 해양지가이 형성될 당시 동아시아의 내륙에 맨틀플룸이 존재하였는지는 의문시될 수 있다. 그럼에도 불구하고 한반도 내륙주변부에서 발생한 리프팅과 울릉 분지의 열림을 맨틀플룸의 영향과 결부시켜 해석하는 것은 울릉분지내에 위치하는 화산섬에서 채취한 화산암의 높은 MgO함량이 하부의 맨틀이 정상보다 훨씬 더 뜨거웠으며 이러한 사실은 정상온도를 갖는 약권의 상승에 의해 화산작용이 발생하였다는 Smith (1989)의 이론과 일치하지 않기 때문이다. 더욱이 최근의 연구결과는 울릉도 화산암의 지화학적 특성이, hot spot에 의해 생긴 Tristan da Cunha Island의 그것과 매우 일치함을 보여준다 (Fig. 3-3-11) (Kim et al., 1999).

울릉분지의 경우 마이오세 중기까지 지속된 화산활동은 북쪽지역에 국한되어 있음을 관찰할 수 있는데 (Chough and Lee, 1992) 이러한 비내성적인 화산작용은 중국 북동부를 중심으로 하는 뜨거운 맨틀대류의 영역범위를 지시하거나 울릉분지를 중심으로 발달한 소규모의 맨틀플룸의 존재를 시사한다. 만약 대류성 부분용융이 이 지역에서의 화산활동을 초래하였다면 그것은 시간이 경과함에 따라 대칭적으로 감쇠하였을 것이다. 결과적으로 울릉분지에서 관찰되는 비대칭적인 화산활동은 내륙성 부분용융보다는 (소규모의) 맨틀플룸의 영향에 의한 것으로 해석된다.

7. 결론

동해의 울릉분지와 한반도의 주변부에서 다중채널 탄성파자료를 획득하였다. 이들 지역의 초기 마이오세동안의 진화과정에 대한 짜임새를 제공하기 위해, 탄성파 자료를 자력 및 중력자료와 결합하여 해석하였다. 한반도 주변부에서 거만년의 구조는 전형적인 화산성 대륙주변부 (volcanic margins)에서 관측되는 화성층서에 의해 적절히 설명된다. 대륙붕과 안쪽 주변부에서는 대륙의 열개 (rifting)와 관련된 syn-rift, rift climax, 그리고 post-rift의 퇴적상들이 잘 나타나고 있다. 내륙사면에서는 경사반사면들이 발달되어 있으며 이들이 분포하는 지역은 양의 사력이상대와 관련되어 있다. 탄성파 단면들은 울릉분지의 열림에 관해 현재 자주 인용되고 있는 두 개의 모델, 즉, 남-북 방향의 당겨열림 (pull-apart opening)과 부채꼴 열림 (fan-shaped opening) 모델 중 어느 하나를 지지해줄 결정적인 증거는 보여주지 않

는다. 대신, 한반도의 주변부에는 두 개의 중요한 지구소적 경계가 존재하는데 이들은 각각 좁은 범위에 걸쳐 열개된 대륙지각과, 많은 양의 화산활동이 수반된 대륙의 분리에 해당한다. 이 연구에서는 동해에서 한반도의 대륙주변부가 화산성임을 제시하며 이러한 해석은 대륙주변부의 리프팅과 그 이후 울릉분지가 형성될 당시 해저면 확장이 내륙쪽에 중심을 둔 정상보다 더 뜨거운 맨틀영역에서 해양지각이 정상보다 더 두꺼워졌다는 모델과 부합한다.

제 4 절 시추퇴적물 특성과 퇴적환경

대표저자: 한상준 (한국해양연구소)

천종화 (강원대학교 지구과학부)

1. 서 론

동해는 제4기 동안에 기후변화와 관련된 빈번한 해수면변동에 의해서 다양한 해류의 영향과 퇴적물 기원의 변화를 겪어왔다. 지난 7년 동안의 정밀한 해저지형 조사와 해저퇴적층의 층서 및 퇴적기작 연구에 의해서 동해의 고해양적 연구는 비약적인 발전을 이루었다 (한상준 등, 1995; 한상준 등, 1996; 한상준 등, 1997; 한상준 등, 1998; 한상준 등, 1999).

동해는 울릉분지, 일본분지, 야마토분지로 구성되어 있으며, 동한난류 (쿠로시오 난류)와 북한한류 (리만한류)의 복합적인 영향을 받고 있다. 울릉분지는 현재와 같은 고해수면시기에 주로 동한난류의 지속적인 영향을 받으며, 이에 반해서 일본분지는 리만한류의 영향을 주로 받고 있다. 이 해류들은 이동 경로가 뚜렷히 차이를 가지며, 한국대지는 이들 해류의 이동을 분리하는 지형적인 장벽으로 작용한다. 저해수면시기에는 해류들의 이동 및 발달양상이 현재와 판이한 양상을 보이면서 (Oba et al., 1991), 고해양환경에 극적인 변화를 초래하기도 하였다. 한편 대륙사면에서는 이 시기에 빈번한 신랑류의 형성이 특징적으로 보고되었다 (Bahk et al., 2000; Chough, 1984; Chun et al., 1997).

동해는 지리적으로 후열도분지에 위치함으로써 다양한 기원의 화산활동에 의해서 다량의 테프라가 공급되었고, 일부 해역에서는 직접적으로 해양환경 변화에 영향을 미쳤다 (Chun, 2000). 해저퇴적물내에 포함된 테프라층들은 시간총서대비의 표식지층으로 활용될 수 있는데, 울릉분지에서 채취된 12 m 길이의 시추퇴적물내에서는 10 매의 표식테프라층이 확인되었다 (Chun, 2000). 이 결과에 의해서 각 퇴적환

본 조사에서는 용출분지를 중심으로 남서대곡동, 북서대곡동, 북서대곡사면, 한국대지, 용출분지가 용로 등 광범위한 지역에서 1998년 10월과 1999년 4월의 두 차례에 걸쳐서

가. 지표채취

2. 연구방법

표로 활용될 것이다.

라시 기후변화에 따른 해수면변동과 관련된 퇴적상변화를 밝힐 수 있는 중요한 자
여, 동해의 고해양연구에서 필수적인 지역을 선택하여 시추퇴적물을 채취하였다. 파
퇴적환경을 해석하고자 한다. 본 조사에서는 그 동안 축적된 자료와 기술을 이용하
정적인 시추퇴적물의 채취가 이루어지지 않았는데, 이번 조사에 의해서 수로바다의
의하면 강한 융항학적 반사면을 갖는다. 지금까지 동해에서 수로바다에 대해서 지
다. 용출분지가 용로는 대규모의 쇄수로가 발달하며, 이 수로들은 지구물리탐사에
에서는 한국대지 또는 해저산의 사면에서의 정밀한 고해양환경 변화를 탐하고자 한
대지 동측에서는 해저화산분출에 의한 다량의 테프라들이 열재되어 있다. 본 조사
한 지시생물의 교란작용에 의해서 대부분의 퇴적구조들이 교란되었다. 그리고 한국
안에 만원양성 퇴적물의 집적양상이 가장 우수한 퇴적기적으로 작용하였으며, 활발
는데, 이 주변해역의 퇴적물 특성을 규명하고자 한다. 그리고 한국대지는 제4기 동
또한 대륙붕에서도 지구물리탐사자료에 의하면 다수의 천부가스의 분포가 관찰되었
적상과 상관없이 수 cm 두께의 수평 균열조적이 흔히 관찰되었다 (희석 등, 1999).
이 분포하는 것이 확인되었다. 용출분지 남동부 대륙사면에서는 시추퇴적물내에 퇴
대륙붕과 대륙사면에서는 천부가스 (희석 등, 1999)의 해리에 의한 가스함유퇴적물
한 해역들을 선정하여 총 8 정점의 시추퇴적물을 채취하였다. 용출분지 남측 일부
본 조사기간동안에는 이전 조사지역에 포함되지 못하였거나, 새로이 밝혀져야

경계면의 발달 등이 저층부의 활동을 지시한다 (천중화, 1998).
추퇴적물들에 비해서 낮은 퇴적률을 보였는데, 표식테프라층의 부재와 빈번한 침식
등, 1995, 1996). 쇄수로주변에서 채취된 시추퇴적물들은 기타 해역에서 채취된 시
발달이 보고되었으며, 이들은 용출분지간동로에서 수로의 규모가 증가한다 (한상준
적환경을 밝힐 수 있게 되었다 (천중화, 1998). 용출분지는 분지평원에 쇄수로의
경별로 채취된 시추퇴적물들은 표식테프라층에 의해서 각 퇴적구간별 퇴적률과 퇴

총 8 점의 시추퇴적물을 채취하였다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). 남서대륙붕에서 채취된 MB98PC-11 시추퇴적물은 수심 145 m의 대륙붕 해역에서 채취하였으며, 길이 467 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). 또한 MB98PC-12 시추퇴적물은 수심 200 m의 대륙붕 해역에서 채취하였으며, 길이 160 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). 북서대륙사면에서 채취된 MB98PC-13 시추퇴적물은 수심 989 m의 하부 대륙사면에서 채취하였으며, 길이 1,055 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). 한국대지에서 채취된 MB98PC-14 시추퇴적물은 수심 1,567 m의 서측 한국대지 해저산에서 채취되었으며, 길이 964 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). MB98PC-15 시추퇴적물은 수심 1,796 m의 서측과 동측 한국대지사이에 발달된 골의 서측 한국대지사면에서 채취되었으며, 길이 608 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). MB99PC-1 시추퇴적물은 동측 한국대지의 해저산에서 채취되었으며, 길이 948 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). 울릉분지간 통로에서 채취된 MB99PC-2 시추퇴적물은 수심 2,707 m의 해저수로에서 채취되었으며, 길이 931 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2). 또한 MB99PC-3 시추퇴적물은 수심 2,435 m의 해저수로에서 채취되었으며, 길이 910 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-2).

시추퇴적물 채취는 종합연구선 온누리호에 설치된 길이 12 m 피스톤코아러 (Benthos사)를 사용하였으며, 시추된 퇴적물은 선상에서 3 m 간격 (배럴 간격)으로 절단하였다. 각기 절단된 시추퇴적물은 완전히 빈폐가 되도록 타이핑을 한 후에 연구소의 실험실로 운반되었다. 실험실에서는 시추퇴적물을 질개되지 않은 상태에서 퇴적물 물성을 MSCL를 사용하여 측정하였다. 이후에 시추퇴적물을 양분하여 육안으로 관찰되는 퇴적구조, 색상, 입도 등을 기술하였고, 퇴적물 슬랩을 제작하였다. 퇴적상 및 색상 등의 특징들에 의해서 퇴적학, 미생물학, 지구화학 분석을 위한 각각의 퇴적물 시료를 채취하였다. 퇴적물 슬랩은 미세퇴적구조 및 생흔구조관찰과 각 퇴적상들의 경계를 파악하기 위하여 퇴적물 슬랩에 대한 X 선 사진을 촬영하였다. 시추퇴적물의 퇴적학적인 특성을 밝히기 위해서 약 20 cm의 등간격으로 시료를 채취하여 입도와 함수율을 측정하였으며, 급격한 퇴적상 변화가 관찰되는 시점에서는 추가로 분석하였다. 또한 시추퇴적물의 전단응력은 20 cm의 등간격으로 hand vane을 사용하여 측정하였다.

Table 3-4-1. Location of piston cores in the East Sea.

Core Number	Core Length (cm)	Location		Water Depth (m)
		Latitude	Longitude	
MB98PC-11	467	35 26.546	130 2.624	145
MB98PC-12	160	35 26.170	130 2.478	200
MB98PC-13	1,055	37 39.325	129 32.852	989
MB98PC-14	964	37 39.651	130 06.240	1,567
MB98PC 15	608	37 46.416	130 42.304	1,796
MB99PC-1	948	38 12.077	131 23.207	1,712
MB99PC-2	931	38 09.706	132 20,893	2,707
MB99PC- 3	910	37 35.711	131 37.811	2,435

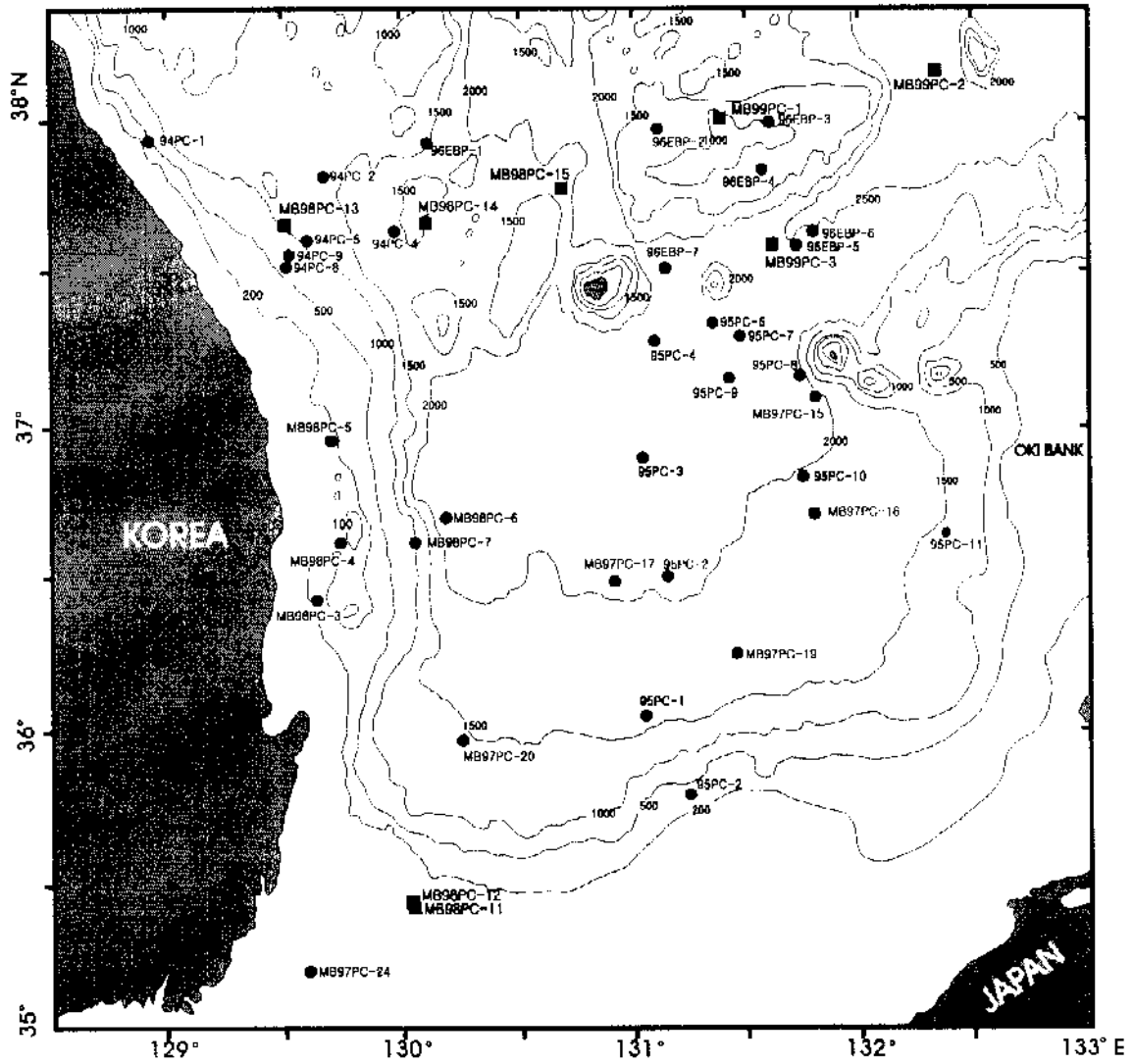


Fig. 3 4 1. Location map of piston cores in the East Sea. Solid squares represent the cores of this study; solid circles do the cores of previous study. For location data, see Table 3-4-1.

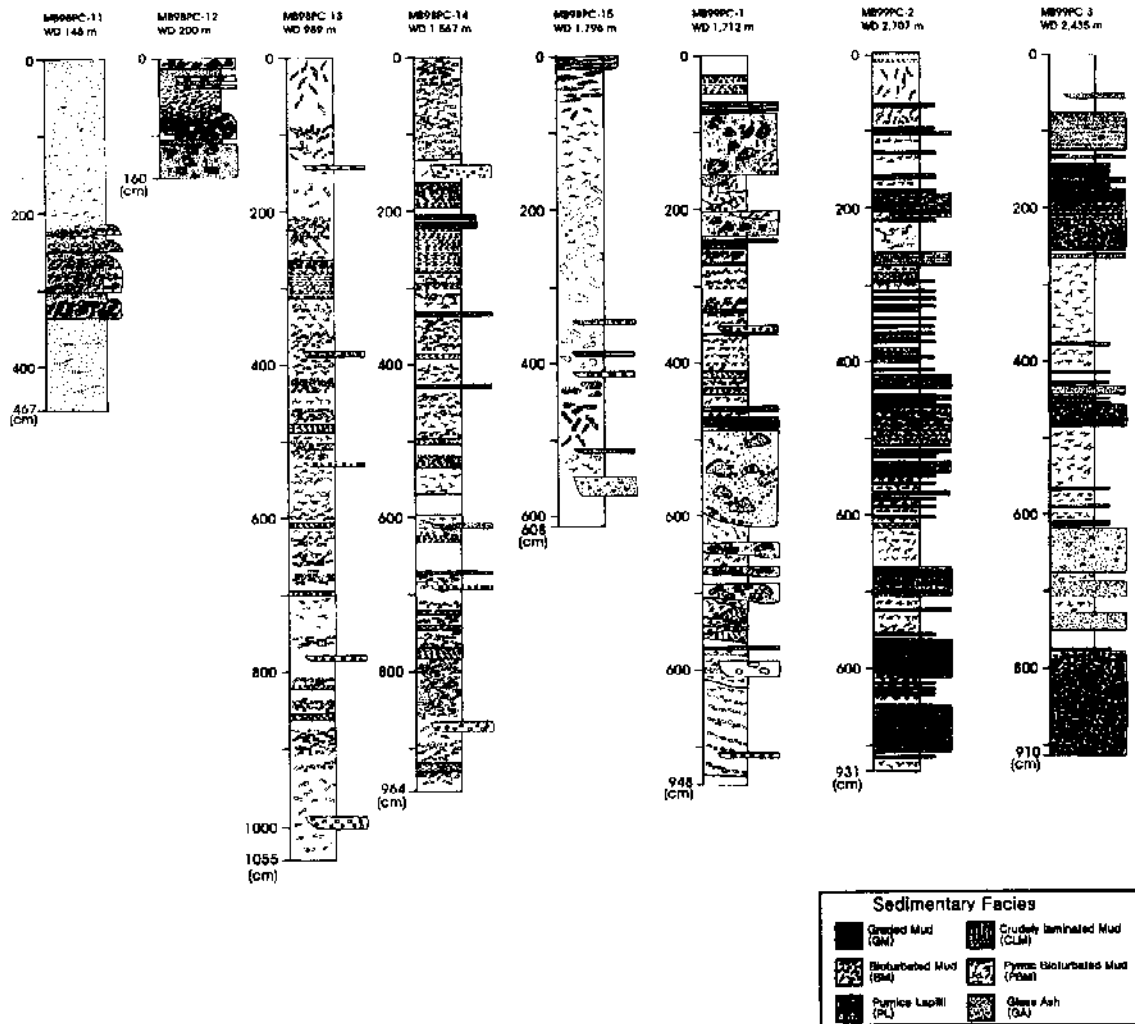


Fig. 3-4-2. Vertical core description and sedimentary facies of six piston cores.

나. 입도 및 퇴적물의 특성 분석

가 시추퇴적물에서 20 cm의 등간격과 테프라층 및 급변하는 퇴적상에서 채취된 시료들은 30%의 과산화수소수와 0.1 N 염산을 차례로 넣어서 유기물과 탄산염을 제거하였다. 이 시료들은 건조후에 무게를 측정하였고, 다시 습식체질을 하여 4 ϕ 기준으로 조립질과 세립질 퇴적물의 분석방법을 달리하였다. 4 ϕ 이하의 조립질 퇴적물은 보탭진탕기로 30 분간 체질하여 입도별로 무게 백분율을 구하였다. 4 ϕ 보다 세립질 퇴적물은 무게 전체를 대표하는 2 g 을 선택하여 300 ml의 0.1% 칼콘 용액에 넣어 초음파 진동기와 자기진동기로 퇴적물 입자를 분산시킨 후에 자동입도 분석기 (Sedigraph 5000D)로 입도를 측정하였다. 입도분석 결과는 통계분석프로그램을 사용하여 분석하였으며, 이때 입도분류 명칭은 Folk (1954)의 분류법에 의거하였으며, 평균입도, 분급도, 첨도, 왜도 등이 계산되었다.

다. 함수율

가 시추퇴적물에서 20 cm의 등간격 또는 급변하는 퇴적상 구간 등에서 퇴적물 시료 약 30 g 을 채취하여, 무게를 측정한다. 전기오븐에서 110° C에서 하루 동안 건조시킨 후, 실온으로 냉각시켜 다시 무게를 측정한다. 이후 아래와 같은 계산식에 의해서 함수율 (W)을 구하였다.

$$W (\%) = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

이 식에서 W_w 는 자연상태의 건조하기 전 시료의 무게이며, W_d 는 건조 후의 퇴적물 시료의 무게이다.

라. X-선 사진

시추퇴적물의 절개시 제작한 퇴적물 슬랩의 규모는 길이 30 cm, 두께 1 cm이며, 투명 아크릴에 시추퇴적물이 변형을 받지않도록 제작하였다. 이 퇴적물 슬랩은 미세퇴적구조 및 생존구조를 관찰하고, 각 퇴적상들의 경계를 파악하는데 이용된다. X 선 촬영은 Softex M-1005 형 촬영기를 사용하여 퇴적상과 입도특성에 따라서 노출시간과 전압을 조정하여야 한다. 일반적으로 70 kV, 4 mA, 노출 8 sec, 거리 40 cm의 조건에서 촬영하였으며, 앞서 기술한 바와 같이 퇴적상과 입도특성에 따라서 조건을 조금씩 달리하였다.

마. 전단응력

질개된 시추퇴적물에서 지름 2 cm의 핸드베인 (hand vane)을 사용하여, 뿔 퇴적물에 대한 전단응력을 측정하였다. 핸드베인의 사용시에 회전속도는 60° /min으로 유지하였으며, 퇴적물의 투과깊이는 퇴적물의 고화 정도에 따라서 2 cm에서 0.5 cm로 달리 측정하였다. 측정된 퇴적물의 전단응력 값은 전단력에 대한 토오크 값으로, 아래와 같은 식에 의해서 전단응력 (S)을 구하였다.

$$S = \frac{T}{\pi D^2 (H/2 + D/6)}$$

3. 연구결과 및 토의

가. 북서대륙사면

한국 동해안의 북위 39° 40' 에 위치하는 대륙사면은 온누리분지 (한상준 등, 1995; Huh et al., 1996)의 남시쪽에 해당한다. 이 해역은 한국대지와 경계되는 곳으로 동한난류의 이동경로에서 상당히 벗어난 지역으로 북한한류와 연안류의 영향이 우세한 해역이다. 따라서 울릉분지와 한국대지에서 채취된 시추퇴적물과의 대비에 의해서 분지규모 또는 지역규모의 고해양학적 사건을 추론할 수 있다.

(1) MB98PC-13

한국 동해안은 좁고 긴 남북방향의 대륙붕이 형성되어 있으며, 한국대지와외의 사이에 대륙사면과 골이 발달한다. MB98PC-13 시추퇴적물은 하부 대륙사면의 수심 989 m 지점에서 채취되었으며, 주로 생물교란된 뿔퇴적물과 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물로 구성되어 있다 (Fig. 3 4-3). 시추퇴적물의 상부구간인 표층에서 265 cm 구간의 퇴적물은 담회색의 생물교란된 뿔퇴적물이 덮힌다. 265~318 cm 구간의 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물은 1 mm 이내의 엽리로 구성되어 있다. 대략 340~860 cm 구간에서는 암색 (5Y 4/2)과 단색 (5Y 5/1)의 생물교란된 뿔퇴적물의 빈번한 교호양상이 특징이다. 간혹 암색의 퇴적물 하부는 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물이 생물교란된 뿔퇴적물과 점이적인 접촉관계를 갖는다. 시추퇴적물의 하부구간

에서는 담회색의 생물교란된 뿔퇴적물이 두껍게 형성되어 있다. MB98PC-13 시추 퇴적물은 울릉도와 SKP 해저화산 (Chun, 2000)으로부터 서쪽으로 상당한 거리를 떨어져있음에도 불구하고 유백색의 부식질 라필리들이 신재되어 협재하며, 이에 의해서 테프라층서구분이 일부 가능하다.

MB98PC-13 시추퇴적물은 퇴적상과 입도 및 함수율의 상관관계를 뚜렷이 보여 준다. 시추퇴적물의 상부구간의 담회색의 생물교란된 뿔퇴적물은 평균입도가 약 8.5 ϕ 이고 함수율은 150~200% 범위이다 (Figs. 3-4-4 and 3-4-5). 이 구간내에서는 유백색의 부식질 라필리들이 산재되어 협재된다. 암색과 담색의 생물교란된 뿔퇴적물들이 교호하는 구간은 평균입도가 약 8.0 ϕ 이고 함수율은 80~100% 범위로 조립해지고 낮은 함수율의 특성을 갖는다 (Figs. 3-4-4 and 3-4-5). 이에 반해 깊이의 증가에도 불구하고, 시추퇴적물 860 cm 이하 구간에서는 함수율이 다시 약 120%로 증가하는 양상을 보이며, 평균입도가 약 8.5 ϕ 로 세립해진다 (Fig. 3-4-4).

MB98PC-13 시추퇴적물은 지형적으로 하부 대륙사면에 위치하나 지하수면시기 동안의 질량류의 영향을 거의 받지 않은 곳으로 해석된다. 이는 94년도에 채취한 3점의 시추퇴적물 (94PC-5, 94PC-8, 94PC-9)에서 북서부 대륙사면에서도 질량류층의 형성이 확인된 것과는 대조적인 결과이다. 반면에 MB98PC-13 시추퇴적물에서 약 60 cm 층위의 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물이 형성되어 있다 (Fig. 3-4-5). 또한 한국대지에서 보고된 바와 같이 빈번한 해수면변동시기에 나타나는 담색과 암색의 뿔퇴적물의 교호양상이 잘 보존되어 있다. 이 교호퇴적상은 고해양환경의 용존산소 변동 또는 해수의 성층화에 기인된 분지규모의 사건으로 해석되었다.

나. 한국대지

(1) MB98PC-14

한국대지는 수심 약 1,500 m 이하의 다수의 해저산들이 형성되어 있으며, 울릉도부근에서 남북방향으로 발달된 수심 2,000 m 이상의 골에 의해서 서측과 동측으로 지형적으로 구분된다 (Fig. 3-4-1). MB98PC-14 시추퇴적물은 서측 한국대지 해저산의 평탄한 지형이 발달된 수심 1,567 m에서 채취하였다. 시추퇴적물은 길이 964 cm가 획득되었으며, 주로 생물교란된 뿔퇴적물과 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물로 구성되어있다. 일부 구간에서는 상하부 경계면이 뚜렷한 테프라층과 하부 침식경계면을 갖는 짙은 층리가 발달된 뿔퇴적물이 협재된다 (Fig. 3-4-6).

Table 3-4-2. Sediment characteristics of MB98PC-13 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
0	0	0	35.97	64.03	M	8.66	1.69	0.18	2.49	206.9	0.76
20	0	0	31.23	68.77	C	8.7	1.56	-0.04	2.99	184.9	1.62
40	0	0	33.25	66.75	C	8.68	1.48	0.24	2.85	178.8	2.68
60	0	0	31.17	68.83	C	8.65	1.40	0.01	2.87	185.8	2.29
80	0	0	35.22	64.78	M	8.55	1.52	0	3.11	185.8	2.87
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	166.7	1.72
120	0	0	42.86	57.14	M	8.44	1.78	0.01	2.56	176.5	3.82
140	0	0	37.35	62.65	M	8.51	1.57	0.15	2.85	166.4	4.59
160	0	0	34.41	65.59	M	8.61	1.57	0.02	2.82	176.7	4.39
180	0	0	37.42	62.58	M	8.45	1.57	-0.02	2.87	174.1	2.29
187	0	0	41.54	58.46	M	8.39	1.60	0.22	2.62	-	-
200	0	0	41.54	58.46	M	8.38	1.66	0.13	2.67	158.8	2.68
212	0	0	47.74	52.26	M	8.12	1.42	0.19	2.60	153.5	-
220	0	0	48.58	51.42	M	8.21	1.64	0.46	2.62	138.2	5.16
230	0	0	49.52	50.48	M	8.09	1.49	0.19	2.81	155.3	-
240	0	0	58.29	41.71	M	7.86	1.56	0.53	2.91	101.4	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.25
260	0	0	50.26	49.74	M	8.10	1.58	0.37	2.75	96.9	-
270	0	0	53.79	46.21	M	8.03	1.69	0.45	2.66	87.7	3.82
280	0	0	53.39	46.61	M	8.02	1.66	0.48	2.66	92.4	-
285	0	0	52.45	47.55	M	8.05	1.76	0.40	2.59	92.2	-
300	0	0	54.81	45.19	M	7.94	1.58	0.39	2.69	96.2	3.82
315	0	0	54.11	45.89	M	7.93	1.58	0.35	2.87	92.7	-
320	0	0	54.84	45.16	M	7.92	1.57	0.38	2.78	92.7	4.01
340	0	0	56.47	43.53	M	7.91	1.58	0.51	2.83	90.01	4.78
360	0	0	58.69	41.31	M	7.81	1.49	0.46	2.74	68.1	4.97
375	0	0	56.09	43.91	M	7.92	1.67	0.38	2.79	102.3	5.16
380	0	0	51.70	48.30	M	8.05	1.59	0.29	2.80	106.0	-
390	0.39	6.21	56.50	36.89	(g)M	7.34	2.18	-1.1	5.74	87.8	-
400	0	0	59.34	40.66	M	7.74	1.46	0.32	2.56	97.4	4.78
420	0	0	56.57	43.43	M	7.89	1.58	0.45	2.76	94.6	5.16
440	0	0	50.81	49.19	M	8.1	1.66	0.38	2.69	103.1	6.31
450	0	0	54.87	45.13	M	7.98	1.47	0.44	2.94	84.7	-
465	0	0	52.53	47.47	M	8.06	1.61	0.42	2.75	104.8	7.07
480	0	0	54.55	45.45	M	7.95	1.62	0.36	2.68	115.2	6.69
500	0	0	55.41	44.59	M	8.0	1.6	0.57	2.86	90.7	6.50
510	0	0	53.88	46.12	M	8.01	1.59	0.46	2.75	103.5	-
520	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.88
530	0	0	56.87	43.13	M	7.9	1.5	0.58	3.08	83.2	-
538	3.02	1.26	54.15	41.58	(g)M	7.52	2.39	-2.02	9.95	85.4	-
540	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.69
557	0	0	55.7	44.3	M	7.94	1.55	0.48	2.85	79.6	-

Table 3-4-2. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.69
575	0	0	55.58	44.42	M	7.98	1.56	0.6	2.92	73.0	-
580	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.26
590	0	0	54.96	45.04	M	7.98	1.62	0.48	2.81	81.3	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.26
605	0	0	52.87	47.13	M	8.01	1.61	0.35	2.67	106.4	-
620	0	0	53.24	46.76	M	8.03	1.61	0.45	2.79	83.8	7.26
635	0	0	54.49	45.51	M	7.92	1.61	0.3	2.64	110.6	-
640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.83
650	0	0	54.42	45.58	M	7.96	1.64	0.33	2.83	92.5	-
660	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.45
665	0	0	54.6	45.4	M	7.97	1.67	0.45	2.58	104.8	-
680	0	0	52.7	47.3	M	8.03	1.66	0.37	2.71	120.7	7.45
700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.98
702	0	0	46.27	53.73	M	8.25	1.61	0.31	2.69	119.9	-
715	0	0	59.25	40.75	M	7.87	1.57	0.63	3.03	81.2	-
720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.22
730	0	0	54.68	45.32	M	8.01	1.68	0.46	2.66	99.5	-
740	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.22
745	0	0	56	44	M	7.88	1.69	0.36	2.73	105.7	-
760	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.19
765	0	0	59.44	40.56	M	7.82	1.74	0.51	2.76	94.8	-
780	0	8.24	62.07	29.68	Z	7.08	1.98	-0.21	3.53	84.1	8.19
785	0.42	5.66	61.64	32.29	(g)M	7.2	1.98	-0.37	4.72	82.5	-
800	0	0	53.96	46.04	M	8.01	1.72	0.48	2.6	99.2	7.37
810	0	0	59.45	40.55	M	7.81	1.66	0.51	2.81	82.7	-
820	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.37
825	0	0	51.09	48.91	M	8.05	1.62	0.35	2.67	98.0	-
835	0	0	51.03	48.97	M	8.08	1.66	0.28	2.79	95.2	-
840	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.37
850	0	0	47.05	52.95	M	8.22	1.59	0.31	2.76	52.9	-
860	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.64
866	0	0	43.03	56.97	M	8.26	1.49	0.1	2.63	122.5	-
880	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.74
890	0	0	39.45	60.55	M	8.44	1.57	0.07	2.92	107.7	-
900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.46
910	0	0	37.02	62.98	M	8.52	1.56	0.06	2.86	122.2	-
920	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.55
930	-	-	31.5	68.5	C	8.68	1.5	-0.06	3.17	120.2	-
940	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.92
950	0	0	29.33	70.67	C	8.78	1.43	0.11	2.82	122.7	-
960	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.56

Table 3-4-2. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
970	0	0	30.43	69.57	C	8.73	1.42	0.17	2.78	122.3	-
980	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.01
990	4.23	0.17	30.29	65.31	(g)M	8.2	2.71	-2.57	11.36	130.6	-
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.74
1010	0	0	34.23	65.77	M	8.63	1.58	0.07	2.8	131.6	-
1020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.83
1030	0	0	38.68	61.32	M	8.54	1.73	0.13	2.49	125.7	-
1050	0	0	38.69	61.31	M	8.45	1.56	0.06	2.84	129.3	13.64
1054	0	0	40.04	59.96	M	8.41	1.58	0.15	2.64	108.3	-

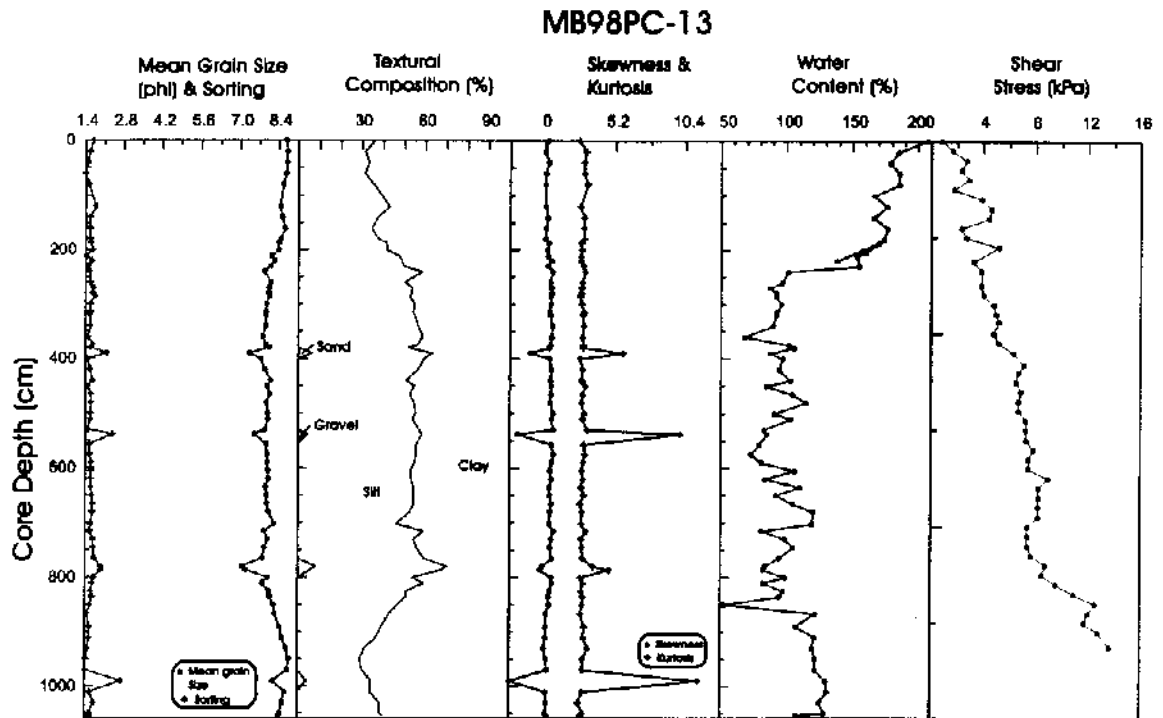


Fig. 3 4 4. Sediment characteristics of MB98PC-13 core.

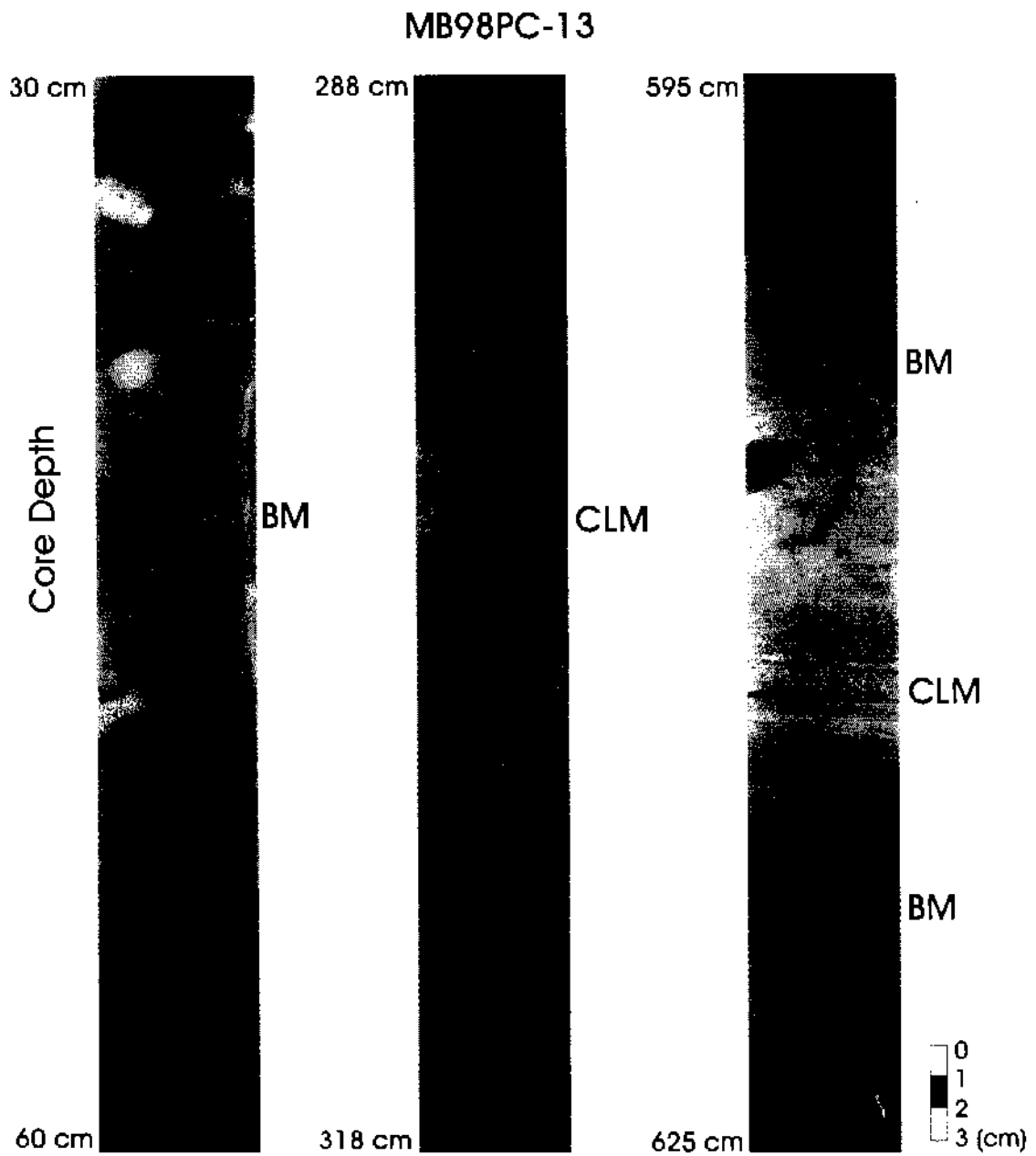


Fig. 3-4-5. X-radiographs of MB98PC-13 core.

MB98PC 14 시추퇴적물의 퇴적상과 평균입도 및 함수율은 밀접한 관계를 보인다 (Fig. 3 4 7). 이 시추퇴적물의 최상부에 덮히는 생물교란된 백퇴적물은 평균입도가 8.5~9.5 ϕ 이고 함수율은 160~210%의 범위로, 고함수율의 세립질 퇴적물로 구성되어 있다 (Fig. 3 4 7; Table 3 4 3). 암색의 회미한 층리가 발달된 백퇴적물과 생물교란된 백퇴적물의 교호퇴적상 구간은 평균입도가 7.5~8.5 ϕ 이고 함수율은 85~120%의 범위이다 (Fig. 3 4 7; Table 3 4 3). 이 시추퇴적물의 하부는 담회색의 생물교란된 백퇴적물이 놓이는데, 평균입도가 약 8.5~8.9 ϕ 이고 함수율은 125~185%로 다소 증가되었다 (Fig. 3-4-7; Table 3-4-3).

MB98PC-14 시추퇴적물이 채취된 수심은 비록 MB98PC-13 보다 깊은 곳이지만 최상부에서부터 저서생물의 교란작용에 의해서 형성된 *planolite* 생흔상이 잘 보존되어 있다 (Fig. 3 4 8). 시추퇴적물 깊이 226~282 cm 구간에서는 회미한 층리가 발달된 백퇴적물이 형성되어있으며, 상위에는 점어층리가 발달된 백퇴적물이 침식 경계면을 가지며 놓인다 (Fig. 3-4-8). 시추퇴적물 깊이 290~650 cm 구간에서는 암색의 회미한 층리가 발달된 백퇴적물 또는 생물교란된 백퇴적물과 담색의 생물교란된 백퇴적물의 빈번한 교호 퇴적층이 발달한다 (Fig. 3-4-8).

한국대지의 서측 해저산 주변에서 채취한 MB98PC 14 시추퇴적물은 질량류 또는 암설류의 공급에 의한 퇴적작용보다 만원양성 퇴적작용에 의한 퇴적물 집적이 우세하게 나타났다. 그럼에도 불구하고 최후빙하기의 저해수면시기에는 일부 구간에서 저탁류층의 존재가 확인되었다. 이것은 울릉분지 사면과 평원에 넓게 분포하고 있는 두꺼운 저탁류층과 층서적으로 대비되는 위치에 나타난다. 그리고 울릉도, SKP 해저화산, 일본 화산기원의 다수의 테프라층들이 잘 보존되어 있어, 시추퇴적물의 퇴적층서구분에 활용될 수 있다.

(2) MB98PC-15

서측 한국대지의 동측사면에 위치하는 MB98PC 15 시추퇴적물은 수심 1,796 m에서 채취하였으며, 길이 608 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3 4 1; Table 3-4-1). MB98PC-15 시추퇴적물의 주요 퇴적상은 과동층리가 발달된 백질 모래퇴적물과 생물교란된 백퇴적물이다 (Fig. 3-4-9). 이들 퇴적상들의 모래 성분들은 대부분이 테프라들로서 생흔구조들도 대부분이 테프라들로 채워져 있다.

MB98PC-15 시추퇴적물의 표층에서 40 cm까지는 평균입도 4.5~5.5 ϕ 의 백질

Table 3-4-3. Sediment characteristics of MB98PC-14 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
0	0	0	19.27	80.73	C	9.16	1.47	-0.22	3.14	193.8	2.10
20	0	0	22.22	77.78	C	9.61	1.42	-0.3	2.29	172.0	2.29
40	0	0	27.07	72.93	C	8.66	1.23	-0.11	3.79	206.6	1.91
60	0	0	28.18	71.82	C	8.86	1.41	0.42	2.74	179.3	2.29
80	0	0	24.17	75.83	C	8.89	1.34	-0.11	3.01	192.8	2.48
100	0	0	24.13	75.87	C	9.01	1.49	-0.07	3.06	179.5	3.25
120	0	0	24.94	75.06	C	8.95	1.6	-0.35	3.3	183.5	2.87
140	0	0	24.48	75.52	C	9.02	1.49	-0.13	2.71	205.3	1.91
150	0	0	35.12	64.88	M	8.54	1.47	0.04	3.15	210.6	-
159	0	0	41.19	58.81	M	8.43	1.64	0.22	2.6	193.5	2.29
166	0	0	38.61	61.39	M	8.51	1.62	0.14	2.5	161.7	-
180	0	0	41.3	58.7	M	8.36	1.6	0.15	2.62	124.8	2.68
200	0	0	41.45	58.55	M	8.34	1.51	0.17	2.65	106.6	2.48
210	0	0	46.06	53.94	M	8.29	1.61	0.35	2.59	102.1	-
220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.87
225	0	4.65	65.65	29.71	Z	6.97	1.97	0.36	2.82	85.3	-
230	0	0	52.81	47.19	M	8.06	1.86	0.24	2.5	129.8	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.91
252	0	0	45.21	54.79	M	8.22	1.63	0.14	2.5	111.5	-
260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.10
270	0	0	41.74	58.26	M	8.33	1.58	0.15	2.56	106.7	-
280	0	0	40.37	59.63	M	8.45	1.67	0.07	2.44	123.4	2.68
282	0	0	46.74	53.26	M	8.21	1.54	0.33	2.76	109.0	-
290	-	9.29	49.29	41.42	M	7.44	2.22	-0.57	3.41	92.0	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.10
310	0	0	38.66	61.34	M	8.48	1.59	0.13	2.52	113.0	-
320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.87
330	0	0	49.22	50.78	M	8.17	1.57	0.39	2.66	114.7	-
336	53.29	2.47	23.35	20.88	mG	2.35	5.21	0.33	1.31	123.6	-
340	0	0	46.9	53.1	M	8.27	1.58	0.42	2.65	113.2	3.25
351	0	0	46.86	53.14	M	8.2	1.51	0.3	2.64	119.7	-
360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.39
375	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.8	-
380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.82
390	-	-	-	-	-	-	-	-	-	129.3	-
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.82
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111.1	3.44
434	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85.4	-
440	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.44
450	0	0	54.2	45.8	M	7.98	1.57	0.42	2.96	102.0	-
455	0	0	52.54	47.46	M	8.07	1.55	0.52	2.85	93.3	-
460	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.82

Table 3-4-3. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
470	0	11.95	46.51	41.54	sM	7.46	2.1	-0.41	2.99	96.1	-
480	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.63
490	0	0	54.26	45.74	M	7.98	1.59	0.45	2.84	96.7	-
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.44
506	0	0	48.24	51.76	M	8.17	1.62	0.28	2.71	131.3	-
520	0	0	58.88	41.12	M	7.79	1.55	0.47	2.86	91.7	3.06
540	0	0	47.78	52.22	M	8.12	1.53	0.17	2.78	135.4	5.16
555	0	0	50.37	49.63	M	8.11	1.56	0.34	2.8	106.5	-
560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.78
570	0	0	43.4	56.6	M	8.36	1.55	0.33	2.63	135.7	-
580	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.35
590	0	0	38.54	61.46	M	8.47	1.52	0.2	2.76	161.7	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.11
610	0	0	49.2	50.8	M	8.14	1.56	0.31	2.77	111.0	-
617	0	63.75	21.35	14.9	mS	3.77	3.22	0.74	2.05	-	-
620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.39
637	0	0	47.12	52.88	M	8.17	1.53	0.21	2.86	134.2	-
640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.11
655	0	0	45.92	54.08	M	8.26	1.58	0.31	2.77	129.0	-
660	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.54
678	0	0	42.38	57.62	M	8.32	1.57	0.21	2.74	121.5	-
680	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.16
685	0	14.54	42.73	42.73	sM	7.31	2.33	-0.53	2.8	119.2	-
700	25.25	2.94	35.29	36.52	gM	5.47	4.42	-0.75	1.98	142.6	4.97
720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.59
725	0	0	48.26	51.74	M	8.18	1.5	0.33	2.84	107.5	-
740	0	0	44.72	55.28	M	8.26	1.55	0.22	2.78	124.8	5.54
751	0	0	48.43	51.57	M	8.14	1.53	0.33	2.74	105.5	-
760	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.16
770	0	0	38.57	61.43	M	8.47	1.51	0.2	2.77	136.4	-
780	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.54
785	0	0	37.95	62.05	M	8.51	1.49	0.17	2.92	146.7	-
800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.73
805	0	0	31.74	68.26	C	8.73	1.46	0.25	2.79	125.8	-
820	0	0	28.52	71.48	C	8.79	1.41	0.24	2.86	125.2	6.69
840	0	0	28.65	71.35	C	8.77	1.49	-0.07	3.36	127.8	3.63
860	0	0	25.25	74.75	C	8.91	1.4	0.16	2.83	135.7	6.31
880	-	-	-	-	-	-	-	-	-	161.3	7.64
886	0	0	25.83	74.17	C	8.86	1.36	0.16	2.86	-	-
900	0	0	23.18	76.82	C	9	1.42	0.17	2.82	170.2	5.54
920	0	0	25.41	74.59	C	8.93	1.44	0.23	2.78	176.9	6.30
940	0	0	26.01	73.99	C	8.89	1.38	0.24	2.83	187.6	6.69
964	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168.0	6.11

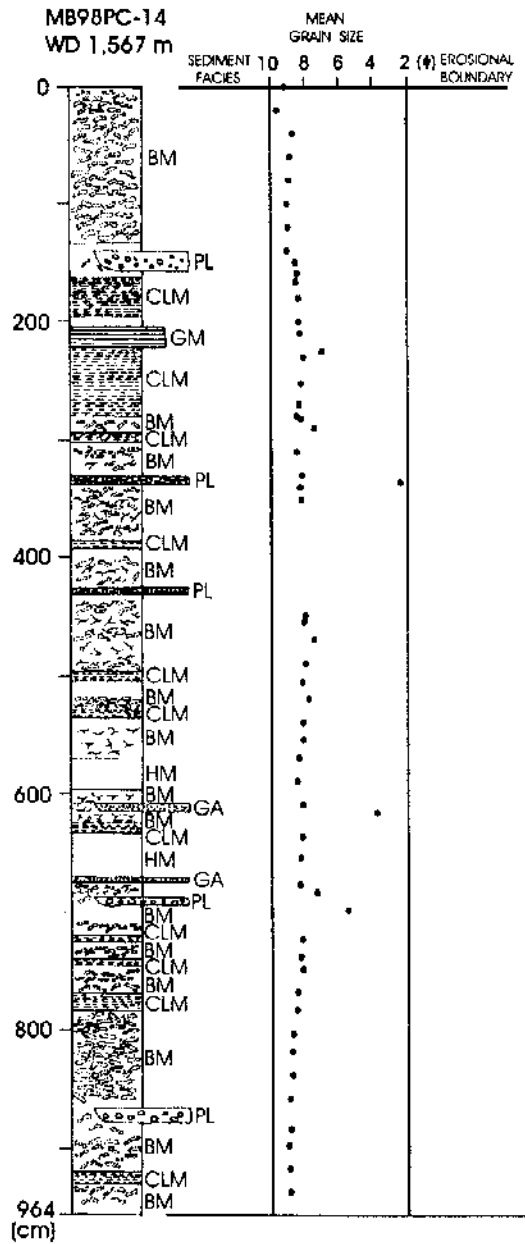


Fig. 3-4-6. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-14 core.

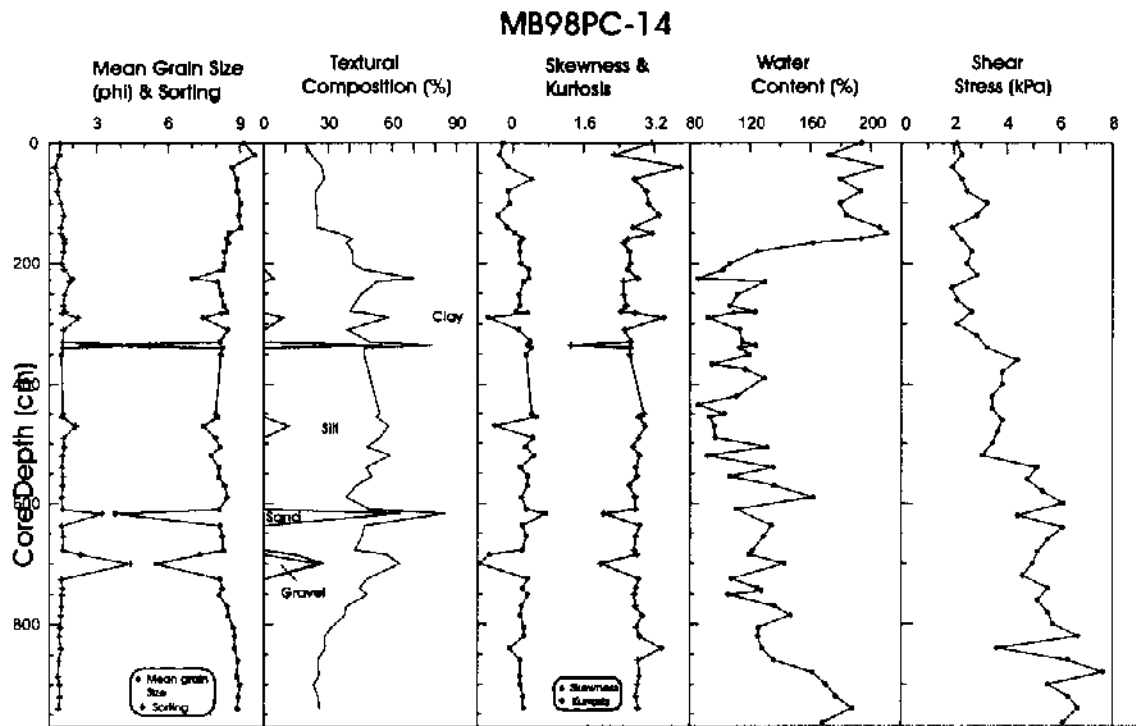


Fig. 3-4-7. Sediment characteristics of MB98PC-14 core.

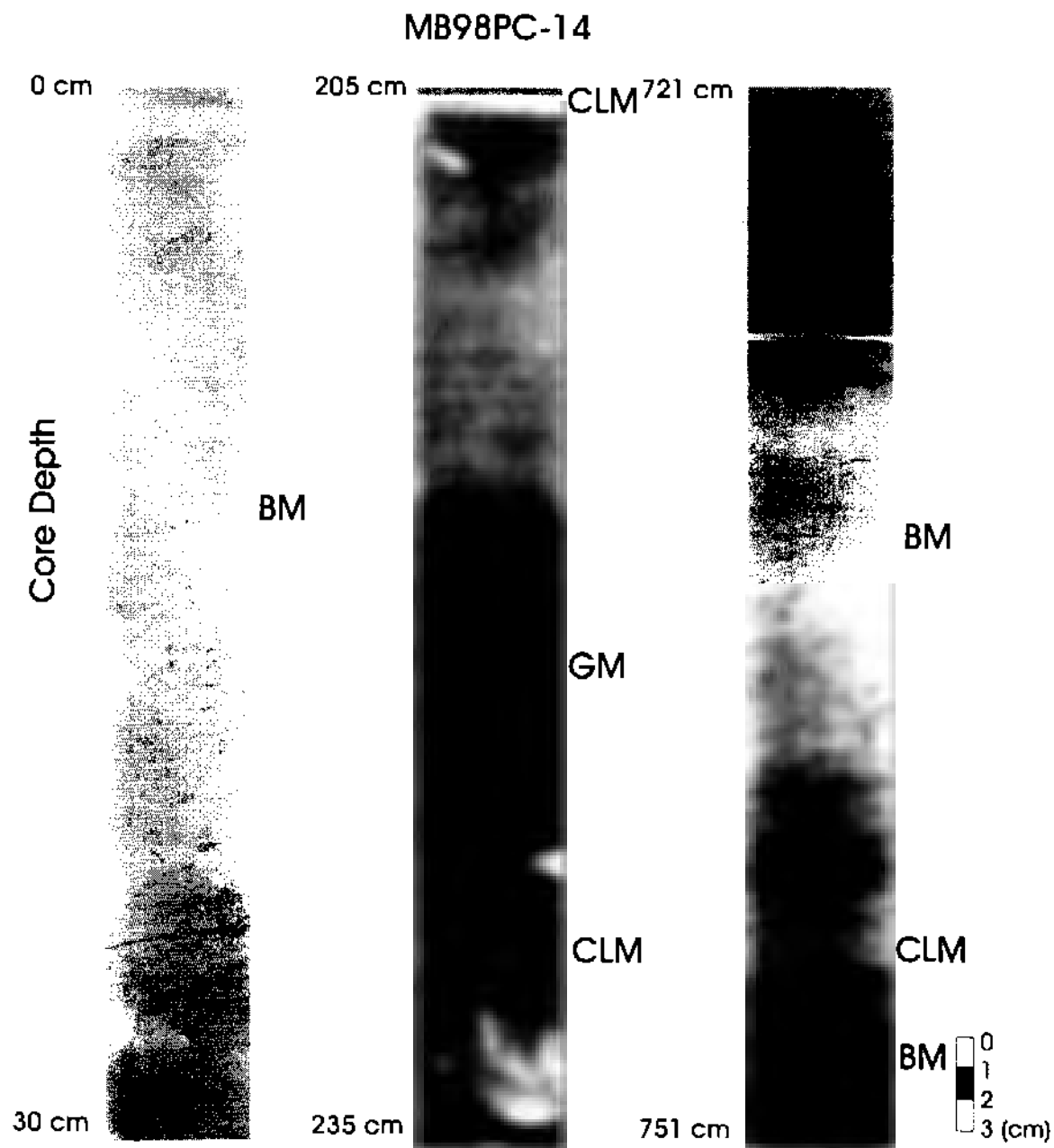


Fig. 3-4-8. X-radiographs of MB98PC-14 core.

모래퇴적물들로 구성되어 있으며, 파동충리가 발달된다 (Fig. 3-4-10; Table 3-4-4). 시추퇴적물 깊이 40 cm 이하의 구간은 평균입도 7.7~8.7 ϕ 의 모래질 백퇴적물 또는 백퇴적물로 구성되며, 함수율은 약 160%에서 약 125%로 점차적으로 감소한다 (Fig. 3-4-10; Table 3-4-4). 하지만 시추퇴적물 깊이 440~460 cm 구간은 생흔구조의 충전퇴적물이 테프라 (tephra)로 구성되어 있어, 평균입도가 약 6.5 ϕ 로 다소 조립해지기도 한다 (Fig. 3-4-10; Table 3-4-4).

시추퇴적물의 상부에 발달된 파동충리가 발달된 백질 모래퇴적물은 그 하부에서는 파동충리가 백퇴적물과 백질 모래퇴적물이 교호한다 (Fig. 3-4-11). 이에 반해 최상부에서는 모래성분이 점차적으로 증가한다. MB98PC-15 시추퇴적물에서 생흔구조를 뚜렷이 확인할 수 없으며, 황철석 필라멘트 (pyrite filament)로 치환된 생흔구조들이 무질서하게 배열되어 있다 (Fig. 3-4-11). 일부 구간에서는 직경 1 내지 2 cm 규모의 생흔구조들이 조립질의 테프라들에 의해서 충전되어 생흔구조가 뚜렷이 구별되기도 한다 (Fig. 3-4-11).

서측 한국대지의 사면에서 채취된 MB98PC-15 시추퇴적물은 상부 구간에서 퇴적물의 입도와 퇴적구조의 특성에 의해서 고에너지의 저층류 (bottom current) 등에 의해서 씻겨짐 현상 (winnowing)이 관찰된다. 그리고 하부 구간에서는 저서생물에 의해서 퇴적물들이 대부분 교란작용을 받은 것으로 해석된다.

(3) MB99PC-1

MB99PC-1 시추퇴적물은 동측 한국대지에 위치하는 수심 1,712 m인 해저산 사이의 골 (trough)에서 채취하였으며, 길이는 948 cm이다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). MB99PC-1 시추퇴적물은 다양한 퇴적상들로 구성되는데, 희미한 충리가 발달된 백퇴적물과 생물교란된 백퇴적물, 퇴적구조가 변형된 백퇴적물, 그리고 퇴적암편을 다수 포함하는 백퇴적물들이 발달한다 (Fig. 3-4-12). 그리고 다수의 테프라층들이 백퇴적물내에 협재되어 있다 (Fig. 3-4-12). 퇴적구조가 변형된 백퇴적물들은 구간별로 협재하며, 상하부의 퇴적상들과는 뚜렷한 접촉경계면을 갖는다 (Fig. 3-4-12). 그리고 퇴적암편들을 포함하는 백퇴적물은 무질서하게 배열된 다수의 부서진 라필리들이 산재되어 있다 (Fig. 3-4-12).

MB99PC-1 시추퇴적물의 상부에 덮히는 희미한 충리가 발달된 백퇴적물은 평균입도가 약 8 ϕ 이고 함수율은 약 168% 이다 (Fig. 3-4-13; Table 3-4-5). 퇴적암

Table 3-4 4. Sediment characteristics of MB98PC-15 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
0	0	54.64	18.46	26.89	mS	5.05	3.31	0.46	1.71	77.3	6.50
20	0	59.88	14.01	26.11	mS	4.67	3.52	0.57	1.82	133.1	5.92
40	0	50.23	14.59	35.19	cS	5.59	3.39	0.22	1.48	115.4	6.88
60	0	0	34.23	65.77	M	8.69	1.6	0.23	2.56	170.4	7.64
80	0	15.43	28.33	56.24	sM	7.65	2.37	-0.95	3.1	157.9	6.50
100	0	10.3	35.18	54.52	sM	7.83	2.2	-0.92	3.79	164.0	6.11
120	0	9.58	29.04	61.38	C	8.21	2.29	-0.78	3.54	163.1	6.88
140	0	66.24	11.2	22.56	cS	5.08	2.73	1.01	2.44	163.9	5.92
160	0	6.48	30.32	63.19	C	8.37	2.16	-0.88	4.3	159.3	9.17
180	0	8.96	28.06	62.99	C	8.21	2.33	-1.14	4.71	155.9	8.79
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	154.3	8.79
220	0	11.98	26.33	61.69	sC	8.1	2.41	-0.92	3.52	168.7	9.28
240	0	14.97	30.48	54.55	sM	7.7	2.56	-0.85	3.23	147.9	8.46
260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	164.1	9.83
280	0	9.48	31.53	58.99	M	7.95	2.26	-1.09	4.1	158.4	10.9
300	0	14.82	28.1	57.08	sC	7.8	2.42	-0.76	2.92	145.4	9.28
320	0	7.65	36.02	56.34	M	8.02	2.15	-0.92	4.2	153.4	8.74
342	0	13.84	28.23	57.93	sC	7.84	2.41	-0.88	3.26	133.0	9.83
360	0	10.76	23.23	66.01	sC	8.3	2.34	-0.91	3.46	156.0	8.46
380	0	9.54	25.77	64.69	C	8.24	2.38	-1.16	4.6	186.5	13.10
400	0	9.67	28.77	61.56	C	8.15	2.33	-0.99	4.18	159.9	12.56
420	0	0	32.14	67.86	C	8.71	1.58	0.09	2.64	143.8	12.56
440	0	30.65	21.29	48.06	sC	6.89	3.07	-0.38	1.83	123.6	8.46
460	0	35.97	19.62	55.59	sC	6.54	3.27	-0.21	1.63	122.2	6.55
480	0	15.3	26.65	58.05	sC	7.76	2.66	-0.9	3.12	141.3	7.10
500	0	15.13	25	59.87	sC	7.81	2.52	-1.01	3.33	111.5	5.46
512	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95.4	-
530	0	6.81	30.87	62.32	C	8.27	2.1	-1.01	4.64	113.6	-
540	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.37
550	0	10.16	19.79	70.05	sC	8.31	2.35	-1.31	4.54	132.1	-
560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.28
570	0	40.93	18.67	40.4	sC	6.14	3.28	-0.23	1.71	127.4	-
580	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.28
590	0	18.12	18.45	63.43	sC	7.82	3.02	-1.04	3.22	128.9	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.19
608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.3	8.19
628	0.4	17.06	21.83	60.71	(g)sM	7.74	2.71	-0.98	3.27	-	-

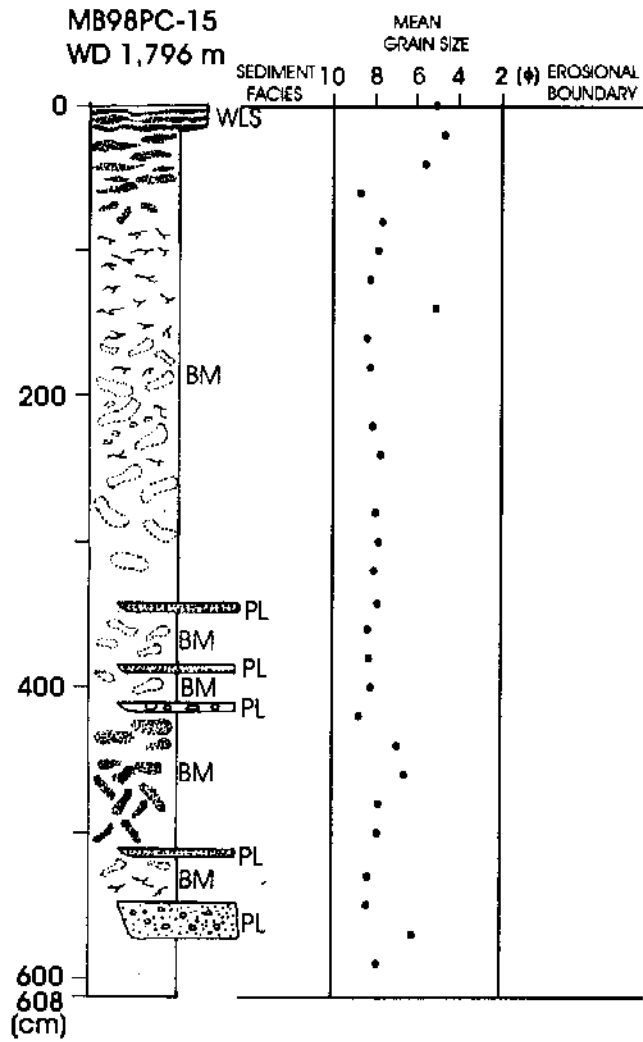


Fig. 3-4-9. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-14 core.

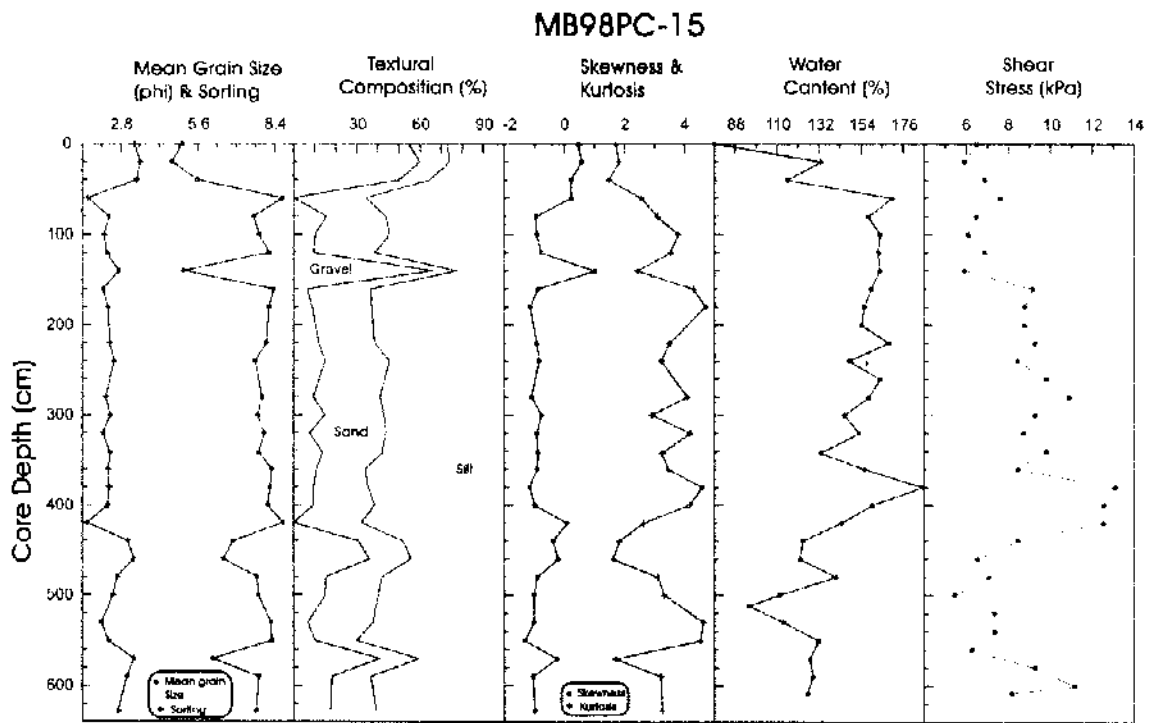


Fig. 3-4-10. Sediment characteristics of MB98PC 15 core.

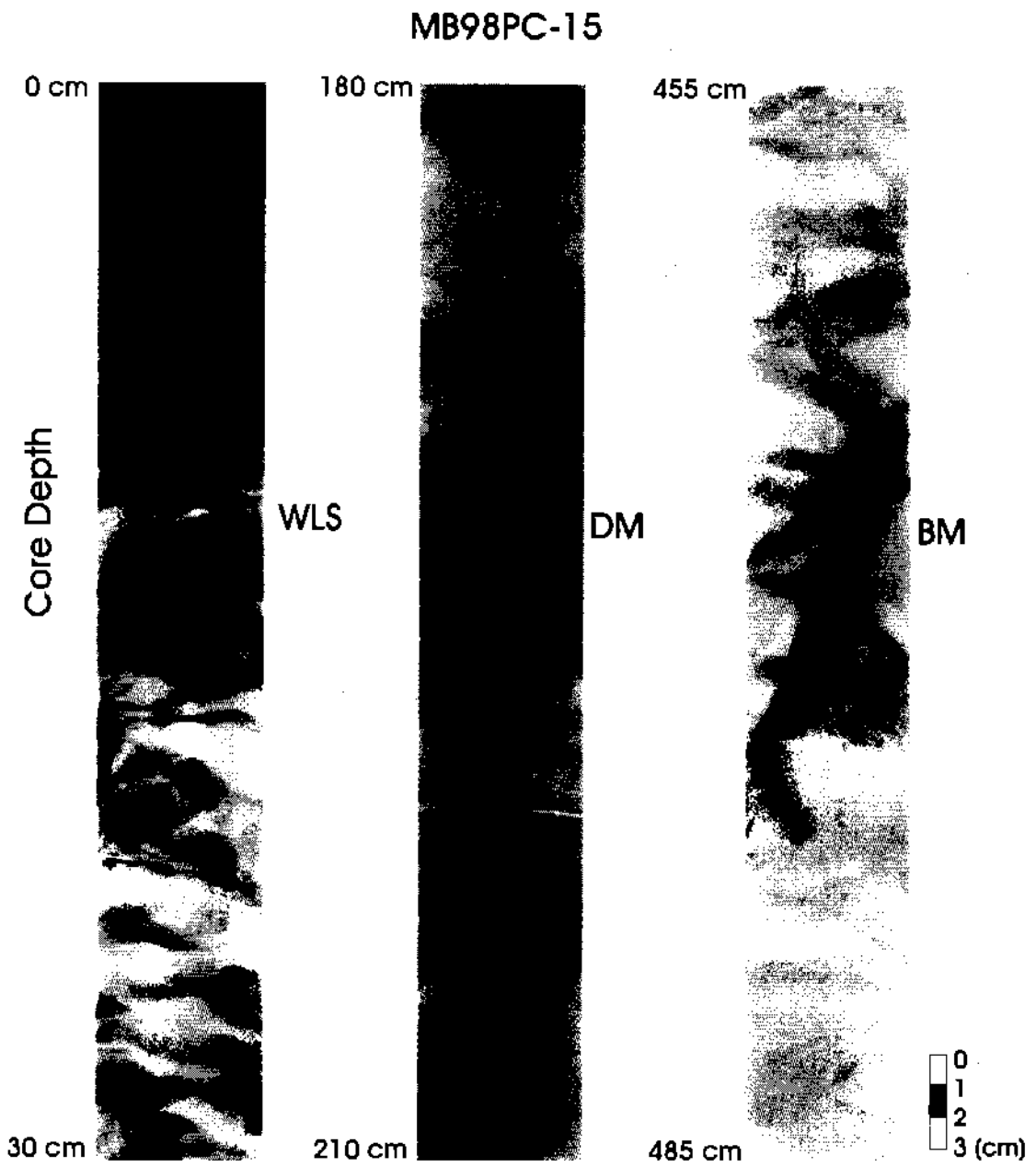


Fig. 3-4-11. X radiographs of MB98PC-15 core.

편들을 포함하는 뿔퇴적물의 경우도 평균입도가 약 8.2 ϕ 이고 함수율은 약 110%로, 오히려 낮은 함수율을 가진다. 시추퇴적물 깊이 240~800 cm 구간에서는 평균입도가 7.3~8.5 ϕ 의 범위를 가지며, 함수율은 75%에서 127%까지 변화의 폭이 크게 나타난다 (Fig. 3-4-13; Table 3-4-5). 그리고 시추퇴적물 깊이 800 cm 이하구간에서는 평균입도가 7.9~8.9 ϕ 로 다소 세립해졌으며, 함수율은 83%에서 155%로 증가하는 경향을 갖는다 (Fig. 3-4-13; Table 3-4-5).

MB99PC 1 시추퇴적물의 최상부는 생물교란된 뿔퇴적물이 덮히고, 그 하부에 30 cm 증후의 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물이 놓인다 (Fig. 3-4-14). 퇴적암편을 포함하는 뿔퇴적물은 층서적으로 울릉-II 테프라층과 AT 테프라층 사이에 협재된다. 퇴적암편들은 암색과 담색의 생물교란된 뿔퇴적물들이 주를 이루며, 퇴적암편들은 양호한 원마도를 갖는다 (Fig. 3-4-14). 또한 퇴적암편을 포함하는 뿔퇴적물들은 다수의 부석질 라필리들이 산재되어 나타난다. 시추퇴적물 깊이 240 cm에서 800 cm 구간에서는 담색의 생물교란된 뿔퇴적물과 암색의 희미한 층리가 발달된 뿔퇴적물들이 빈번히 교호된다 (Fig. 3-4-14).

동측 한국내지의 해저산 밑에서 채취한 MB99PC 1 시추퇴적물은 반원양성 퇴적물들의 집적작용에 의해서 대부분 퇴적된 것으로 사료되며, 홀로세 동안에도 울릉분지와는 구별되는 저산소환경이 형성된 것으로 사료된다. 그리고 층서적으로 최후빙하기에 해당되는 퇴적구간에는 이전에 형성된 뿔퇴적물과 테프라들이 재동되어 암설류층을 형성하고 있다. 또한 일부 퇴적구간별로 암설류의 공급에 의한 퇴적작용이 간헐적으로 일어났음이 확인되었다.

다. 울릉분지간 통로

동해 울릉분지 (Ulleung Basin)와 일본분지 (Japan Basin)는 얇은 수심의 한국내지 (Korea Plateau)와 오키천퇴 (Oki Bank)사이에 형성된 울릉분지간 통로 (Ulleung Interplain Gap)에 의해서 연결되어 있다. 전체적으로 울릉분지에서 일본분지로 가면시 수심은 점차적으로 증가한다 (Fig. 3-4-1). 울릉분지에서는 다수의 심해수로들이 확인되었으며, 이 수로들은 울릉분지간 통로를 향하여 합쳐지는 양상을 보인다 (한상준 등 1995). 그리고 울릉분지간 통로는 음향학적으로 강한 반사면을 갖는다 (한상준 등 1995).

Table 3-4-5. Sediment characteristics in MB99PC-1 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
5	0	0	28.17	71.83	C	8.78	1.5	-0.16	3.08	169.9	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.34
20	0	0	25.4	74.6	C	8.89	1.45	-0.05	2.98	106.3	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.91
32	0	0	51.42	48.58	M	8.07	1.58	0.36	2.66	168.7	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	102.5	-
50	0	0	52.22	47.78	M	8.03	1.55	0.36	2.74	-	1.34
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113.1	-
65	0.79	49.37	25.31	24.53	(g)sM	5.15	3.24	0.29	1.81	-	-
70	5.64	9.93	39.73	44.7	gM	6.99	3.4	-1.39	4.63	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.72
80	0	0	48.83	51.17	M	8.17	1.64	0.33	2.61	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108.2	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.10
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	119.6	-
105	0	0	48.83	51.17	M	8.18	1.64	0.37	2.57	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.10
120	0	0	54.71	45.29	M	7.93	1.67	0.3	2.72	-	-
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	114.0	1.53
140	0.78	6.12	43.33	49.76	(g)M	7.72	2.35	-1.22	5.6	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.1	2.48
160	0	0	44.38	55.62	M	8.32	1.68	0.26	2.45	-	-
170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118.7	2.87
174	0	0	38.7	61.3	M	8.48	1.62	0.1	2.51	-	-
190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111.2	4.97
200	0	1.61	47.58	50.81	M	8.04	1.93	-0.43	4.38	-	-
210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107.2	2.87
220	0.14	7.25	76.52	16.09	(g)M	6.26	1.95	-0.95	5.04	-	-
230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108.0	4.59
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.7	-
242	0	23.86	37.54	38.6	sM	6.89	2.61	-0.33	2.18	-	-
250	0	0	41.42	58.58	M	8.42	1.59	0.17	2.4	-	2.87
260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	115.0	-
270	0	0	49.69	50.31	M	8.17	1.64	0.37	2.59	-	2.87
280	0	0	46.39	53.61	M	8.25	1.57	0.33	2.62	-	-
290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118.4	2.29
300	0	0	37.61	62.39	M	8.6	1.71	0.02	2.39	-	-
310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.1	2.48
320	0	0	41.68	58.32	M	8.47	1.65	0.19	2.33	-	-
330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	153.6	2.87
340	0	0	50.31	49.69	M	8.13	1.62	0.38	2.53	-	-
350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	131.0	3.06

Table 3-4-5. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.25
362	2.07	27.49	37.02	33.43	(g)sM	5.9	3.57	-0.52	2.05	-	-
370	0	0	42.3	57.7	M	8.42	1.68	0.17	2.37	-	-
380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.4	-
390	0	0	52.74	47.26	M	8.03	1.54	0.42	2.84	-	2.87
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87.8	-
404	0	0	47.83	52.17	M	8.22	1.61	0.41	2.61	-	-
410	0	0	44.24	55.76	M	8.29	1.6	0.28	2.6	-	2.87
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.0	-
430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85.7	3.06
437	0	0	39.54	60.46	M	8.47	1.54	0.25	2.6	-	-
440	-	-	-	-	-	-	-	-	-	119.9	-
450	0	0	44.53	55.47	M	8.34	1.6	0.34	2.54	-	3.44
460	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89.7	-
463	11.17	43.38	25.19	20.26	gM	4.2	3.81	-0.06	2.07	-	-
470	23.47	49.63	13.69	13.2	gmS	2.24	4	0.77	2.48	-	-
477	11.61	63.19	12.57	12.64	gmS	2.37	3.58	0.97	2.77	-	-
480	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77.3	-
487	11.78	13.3	33.5	41.42	gM	6.08	4.17	-0.9	2.6	-	-
490	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109.2	7.64
499	7.54	11.96	35.89	44.62	gM	6.68	3.69	-1.13	3.48	-	-
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95.7	-
504	2.1	6.45	46.18	45.28	(g)M	7.38	2.55	-1.66	7.21	-	8.22
510	20.75	12.26	31.27	35.71	gM	5.15	4.67	-0.63	1.92	-	-
520	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95.5	-
530	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.78
540	24.62	11.93	28.77	34.67	gM	4.76	4.83	-0.5	1.66	-	-
545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91.2	-
565	-	-	-	-	-	-	-	-	-	141.9	-
570	0	0	39.09	60.91	M	8.44	1.52	0.17	2.58	-	-
572	10.89	11.45	29.89	47.77	gM	6.53	4.17	-0.99	2.79	112.1	4.78
580	4.25	4.25	32.91	58.6	(g)M	7.79	3.03	-1.79	6.7	-	6.50
590	10.33	9.75	34.31	45.61	gM	6.5	3.93	-1.12	3.16	-	-
595	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109.8	-
606	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.35
610	7	5.64	34.63	52.72	gM	7.27	3.45	-1.55	4.85	-	-
615	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.8	-
625	0	0	38.45	61.55	M	8.53	1.58	0.19	2.53	-	4.78
630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127.5	-
635	6.38	5.99	39.06	48.57	gM	7.23	3.26	-1.53	5.16	-	5.16
650	0	0	36.75	63.25	M	8.56	1.69	0.04	2.62	-	6.88
669	2.53	9.05	40.61	47.8	(g)M	7.4	2.87	-1.32	4.98	95.1	-

Table 3 4 5. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
708	12.56	5.74	34.88	46.82	gM	6.62	4.04	-1.28	3.6	-	4.78
710	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101.0	-
718	0	1.36	44.62	54.02	M	8.15	1.77	-0.34	4.23	-	-
725	0	0	47.46	52.54	M	8.16	1.69	0.21	2.47	-	4.78
730	-	-	-	-	-	-	-	-	-	81.2	-
740	0	0	50.17	49.83	M	8.08	1.7	0.31	2.42	-	5.35
747	0	0	38.62	61.38	M	8.52	1.64	0.12	2.47	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.8	-
760	0	0	37.99	62.01	M	8.6	1.73	0.06	2.31	-	5.35
770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76.5	5.73
785	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108.8	-
790	0	0	44.31	55.69	M	8.33	1.64	0.27	2.55	-	6.69
795	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.9	-
800	0	0	36.78	63.22	M	8.56	1.59	0.16	2.54	-	-
810	0	0	28.54	71.46	C	8.83	1.51	0.08	2.69	-	6.69
815	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155.3	-
820	0	0	27.17	72.83	C	8.8	1.41	-0.03	2.93	-	-
830	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139.4	7.26
840	0	0	46.56	53.44	M	8.22	1.68	0.22	2.41	-	-
845	-	-	-	-	-	-	-	-	-	86.8	-
850	0	3.24	51.39	45.37	M	7.9	1.92	-0.14	3.64	-	8.22
860	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67.3	-
870	0	0	44.74	55.26	M	8.3	1.59	0.27	2.57	-	6.88
880	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.3	-
890	0	0	37.72	62.28	M	8.5	1.53	0.14	2.61	-	9.17
900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107.7	-
905	0	0	34.69	65.31	M	8.69	1.63	0.1	2.4	-	-
910	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.22
915	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.7	-
920	1.68	2.71	43.94	51.68	(g)M	7.95	2.26	-1.45	8.03	-	-
930	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89.9	8.98
933	0	0	38.1	61.9	M	8.51	1.61	0.1	2.51	-	-
943	0	0	31.05	68.95	C	8.86	1.68	-0.05	2.32	-	-
948	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.2	7.64

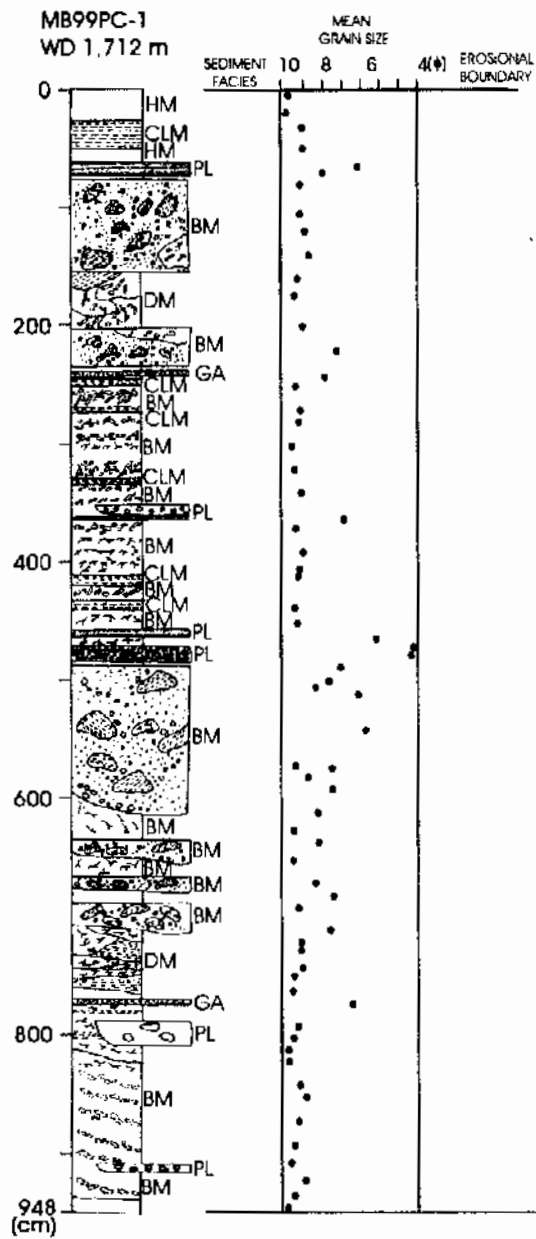


Fig. 3-4-12. Vertical core description and mean grain size of MB99PC-1 core.

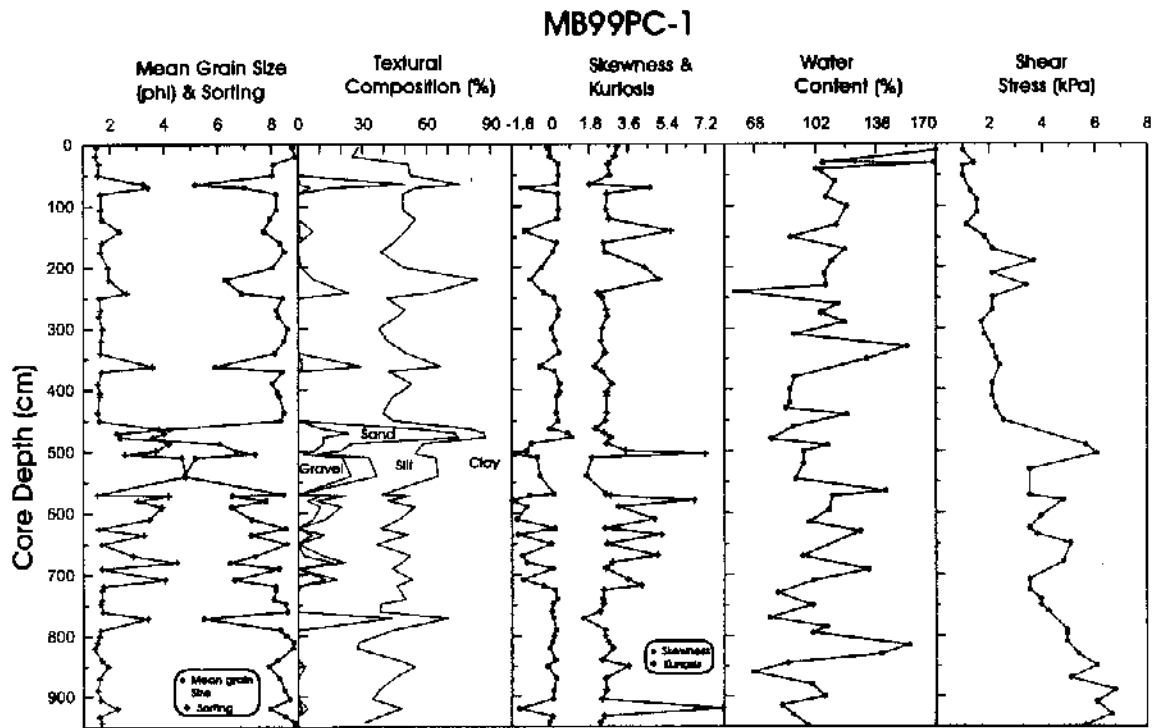


Fig. 3 4 13. Sediment characteristics of MB99PC-1 core.

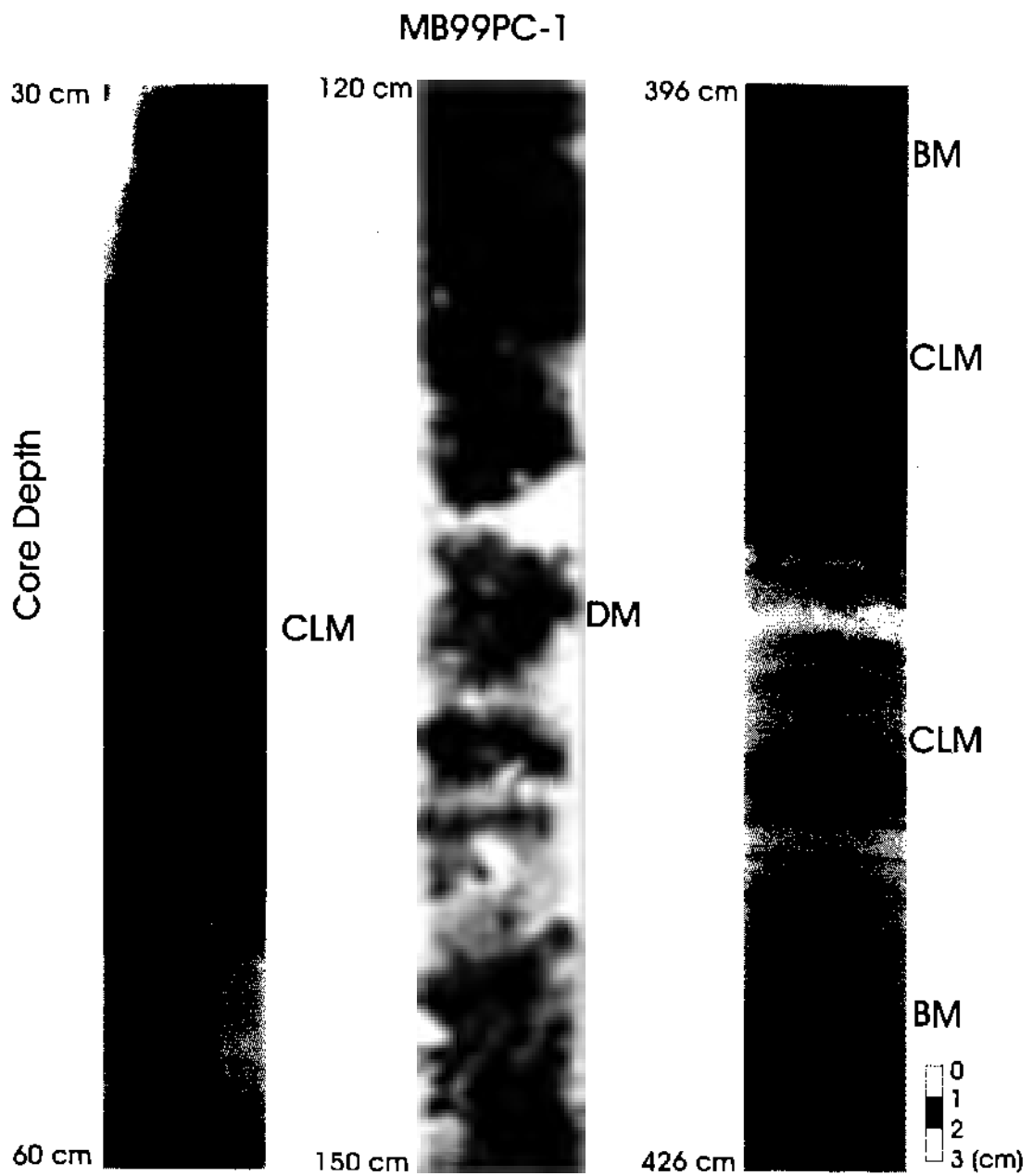


Fig. 3 4-14. X-radiographs of MB99PC-1 core.

(1) MB99PC-2

MB99PC-2 시추퇴적물은 울릉분지간 통로에서 일본분지로 전이되는 수심 2,707 m에서 채취하였으며, 깊이는 931 cm이다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). MB99PC-2 시추퇴적물의 주요 퇴적상은 점이층리가 발달된 빨퇴적물과 생물교란된 빨퇴적물, 그리고 부서질 또는 스코리아질 라필리로 구성된 테프라층이다 (Fig. 3-4-15). 하부 침식경계면을 갖는 점이층리가 발달된 빨퇴적물은 시추퇴적물의 전 구간에서 빈번히 나타나는 특징을 가진다. 또한 테프라층에서도 밀도분급 (density grading) 뿐만 아니라 파동층리 (wavy bedding) 또는 사층리 (cross bedding)가 흔히 관찰된다.

울릉분지간 통로의 최북단에 위치하는 MB99PC-2 시추퇴적물은 최상부에 적갈색 (reddish brown) 빨퇴적물이 높이며, 평균입도는 약 9.2ϕ 이고 함수율은 약 290%에 달한다 (Fig. 3-4-16; Table 3-4-6). 이것은 울릉분지와 한국대지에서 채취된 시추퇴적물에 비하여 고함수율의 세립질 퇴적물이 형성되었음을 지시한다. 시추퇴적물의 하부로 갈수록 함수율은 점차적으로 감소하는 경향을 보이지만, 일부 구간을 제외하면 약 140%의 높은 함수율을 유지한다 (Fig. 3-4-16; Table 3-4-6). 그리고 시추퇴적물의 전 구간에서 테프라층을 제외한 빨퇴적물들은 평균입도가 약 8ϕ 에서 9ϕ 의 범위의 세립질로 구성되어 있다 (Fig. 3-4-16; Table 3-4-6).

MB99PC-2 시추퇴적물의 최상부에서 30 cm 구간까지는 적갈색 빨퇴적물이 높이며, 생물교란작용 및 층리가 발달한다. 이 적갈색 빨퇴적물은 울릉분지간 통로 주변에서 채취한 시추퇴적물들의 최상부에서 흔히 관찰되며, 울릉분지평원과 한국대지에서는 관찰되지 않는 반면에, 일본분지에서는 더 두꺼운 적갈색 빨퇴적물이 형성되어 있다 (한상준 등, 1997). MB99PC-2 시추퇴적물에서는 하부 침식경계면을 갖는 점이층리가 발달된 빨퇴적물이 전 구간에 흔히 나타나는데, 층서적으로 홀로세에 해당하는 구간에서도 점이층리가 발달된 빨퇴적물이 관찰된다 (Fig. 3-4-17). 또한 최후빙하기에 해당하는 구간에서는 점이층리가 발달된 빨퇴적물과 퇴적구조가 관찰되지 않는 빨퇴적물의 교호층이 하부침식경계면을 가지며 두껍게 형성되어 있다 (Fig. 3-4-17). 그리고 MB99PC-2 시추퇴적물의 중부와 하부구간에서도 점이층리가 발달된 빨퇴적물의 빈번한 협재가 특징적으로 관찰된다 (Fig. 3-4-17). 일부 테프라층은 층서적으로는 타 지역과 대비되는 위치에 협재되어있지만, 내부적으로는 파동층리 또는 사층리가 발달한다. 이것은 화산폭발에 의한 테프라의 공급이후에 동시기적인 재동에 의한 영향으로 해석되며, 울릉분지간 통로에서의 저층류 발

Table 3-4-6. Sediment characteristics of MB99PC 2 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.	
0	0	19.21	23.48	57.32	sC	7.49	2.98	-0.87	2.81	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	241.6
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	242.4
20	0	0	19.89	80.11	C	9.15	1.41	0.12	2.68	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	234.0
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	287.3
55	0	0	33.21	66.79	C	8.83	1.7	0.1	2.3	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	265.1
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	149.3
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	232.1
80	0	0	22.73	77.27	C	9.04	1.4	0.15	2.72	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	227.8
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	232.1
105	0	25.27	28.84	45.89	sM	7.06	2.93	-0.22	1.93	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	226.2
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	222.9
125	0	0	35.37	64.63	M	8.62	1.62	-0.03	2.78	-
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	204.4
136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	283.3
140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201.0
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180.6
155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	183.2
165	-	-	-	-	-	-	-	-	-	175.8
168	0	0	26.98	73.02	C	9	1.54	0.13	2.44	-
170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	220.3
176	0	0	33	67	C	8.74	1.51	0.13	2.82	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	133.0
185	0	12.7	76.79	10.51	sZ	6.05	1.65	0.77	4.72	-
203	0	82.92	14.51	2.57	zS	3.36	1.58	1.85	9.25	-
210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200.8
219	-	-	-	-	-	-	-	-	-	145.7
230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	214.9
235	0	0	31.12	68.88	C	8.67	1.57	-0.26	3.38	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200.1
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158.2
257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140.4
262	0	52.59	37.07	10.34	zS	4.71	2.28	0.91	3.11	-
265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.4
270	0	68	21.75	10.25	zS	4.09	2.42	1.27	3.73	-
280	0	0	38.42	61.58	M	8.55	1.6	0.24	2.64	-
283	-	-	-	-	-	-	-	-	-	171.8
290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	177.1

Table 3-4-6. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.	
295	0	0	42.49	57.51	M	8.37	1.56	0.24	2.67	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172.2
310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.3
323	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158.0
330	0	0	51.29	48.71	M	7.95	1.81	0.13	2.49	-
335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156.2
350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	160.8
357	0	0	42.45	57.55	M	8.42	1.55	0.28	2.75	-
370	-	-	-	-	-	-	-	-	-	152.6
375	6.51	53.88	30.53	9.09	gmS	3.64	3.22	0.27	2.69	-
380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139.2
390	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140.8
402	0	0	45.89	54.11	M	8.3	1.45	0.45	2.87	-
405	-	-	-	-	-	-	-	-	-	146.4
415	-	-	-	-	-	-	-	-	-	153.1
420	3.87	90.26	3.72	2.16	(g)S	1.01	1.94	2.7	11.7	-
434	1.7	93.81	3.2	1.29	(g)S	1.33	1.47	3.25	17.04	-
440	0.86	86.72	5.81	6.62	(g)mS	1.66	2.63	2.17	6.67	-
465	0	0	60.08	39.92	M	7.52	2.01	0.28	2.24	-
490	3.48	88.55	5.39	2.57	(g)S	1	2.08	2.6	10.07	-
500	7.11	58.68	24.24	9.96	gmS	3.26	3.34	0.49	2.52	-
505	1.27	76.95	16.23	5.55	(g)mS	2.38	2.8	1.18	3.73	-
514	0.05	64.18	26.62	9.16	(g)mS	3.82	2.71	0.75	2.87	-
517	-	-	-	-	-	-	-	-	-	115.3
531	5.35	87.51	5.35	1.8	gS	0.8	1.95	2.47	9.88	-
540	10.02	78.78	7.78	3.42	gmS	0.8	2.56	2.12	7.08	-
555	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96.1
557	1.06	25.33	37	36.6	(g)sM	6.11	3.69	-0.67	2.2	-
564	-	-	-	-	-	-	-	-	-	151.1
570	8.73	74.39	13.43	3.44	gmS	1.65	2.66	1.16	3.87	-
581	-	-	-	-	-	-	-	-	-	146.1
593	-	-	-	-	-	-	-	-	-	154.5
602	0	0	39.59	60.41	M	8.5	1.59	0.24	2.55	-
609	-	-	-	-	-	-	-	-	-	142.2
621	-	-	-	-	-	-	-	-	-	153.1
630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	161.5
634	0	0	28.09	71.91	C	8.81	1.57	-0.18	3.1	-
640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181.8
656	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170.6
660	0	0	22.41	77.59	C	9.02	1.36	0.19	2.76	-
670	53.68	35.71	5.51	5.1	msG	-0.15	3.06	2.18	6.86	-
685	37.79	51.96	6.76	3.49	msG	0.18	2.81	2.02	6.64	-

Table 3-4-6. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.	
697	17.43	65.89	9.79	6.9	gmS	1.14	3.22	1.6	4.43	-
708	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156.6
718	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.4
725	4.16	82.04	5.12	8.67	(g)mS	1.87	2.94	1.74	5.31	-
730	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.3
742	-	-	-	-	-	-	-	-	-	167.0
750	0	0	38.34	61.66	M	8.49	1.52	0.17	2.65	-
756	-	-	-	-	-	-	-	-	-	187.4
765	0	0	65.93	34.07	M	7.21	1.81	0.31	2.26	-
778	24.02	66.55	5.29	4.14	gmS	0.8	2.76	1.69	6.34	-
790	29.13	59.09	5.66	6.13	gmS	0.51	3.1	1.83	5.76	-
803	27.9	62.34	4.63	5.13	gmS	0.4	2.84	2.22	7.48	-
812	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.0
820	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84.4
828	0	0	33.86	66.14	M	8.68	1.52	0.19	2.59	-
835	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93.1
850	5.71	75.3	11.52	7.47	gmS	1.57	3.19	1.57	4.37	-
870	5.1	92.05	1.71	1.13	gS	0.72	1.51	3.49	21.86	-
895	6.34	91.87	1.12	0.66	gS	0.75	1.29	2.74	20.74	-
922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.4
927	0	0	33.45	66.55	M	8.71	1.43	0.36	2.66	-

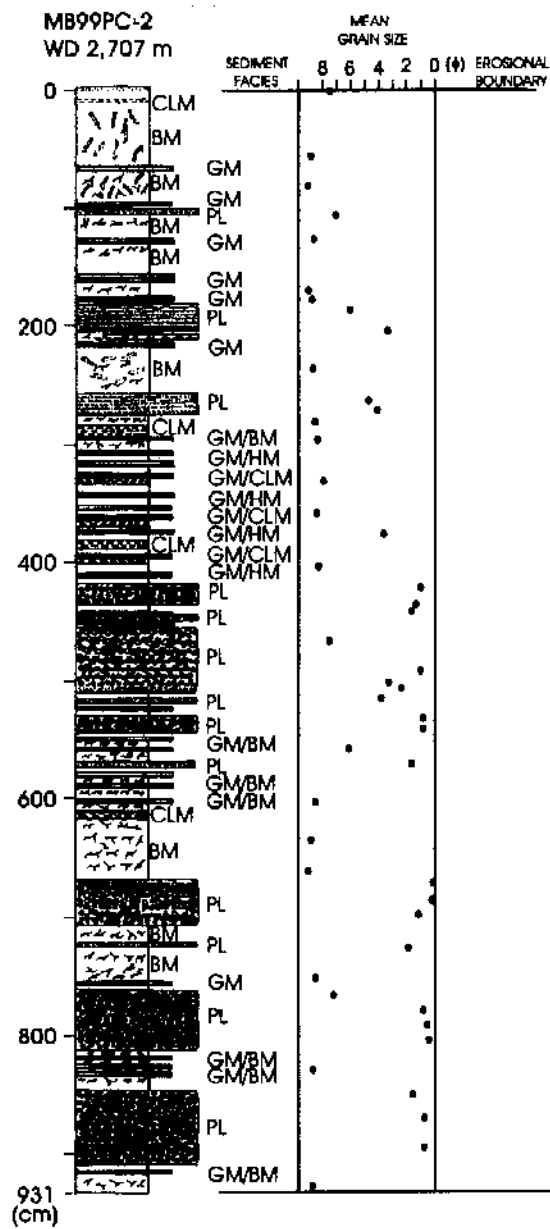


Fig. 3-4-15. Vertical core description and mean grain size of MB99PC-2 core.

MB99PC-2

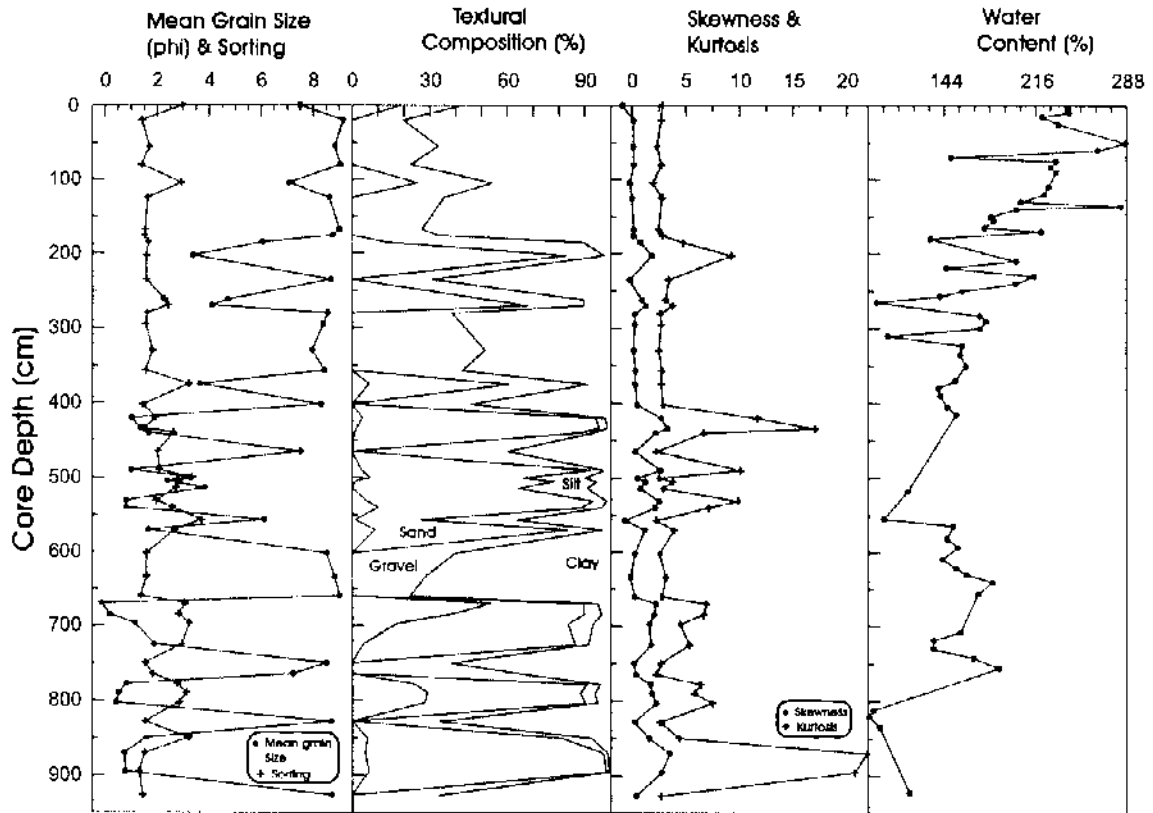


Fig. 3-4-16. Sediment characteristics of MB99PC-2 core.

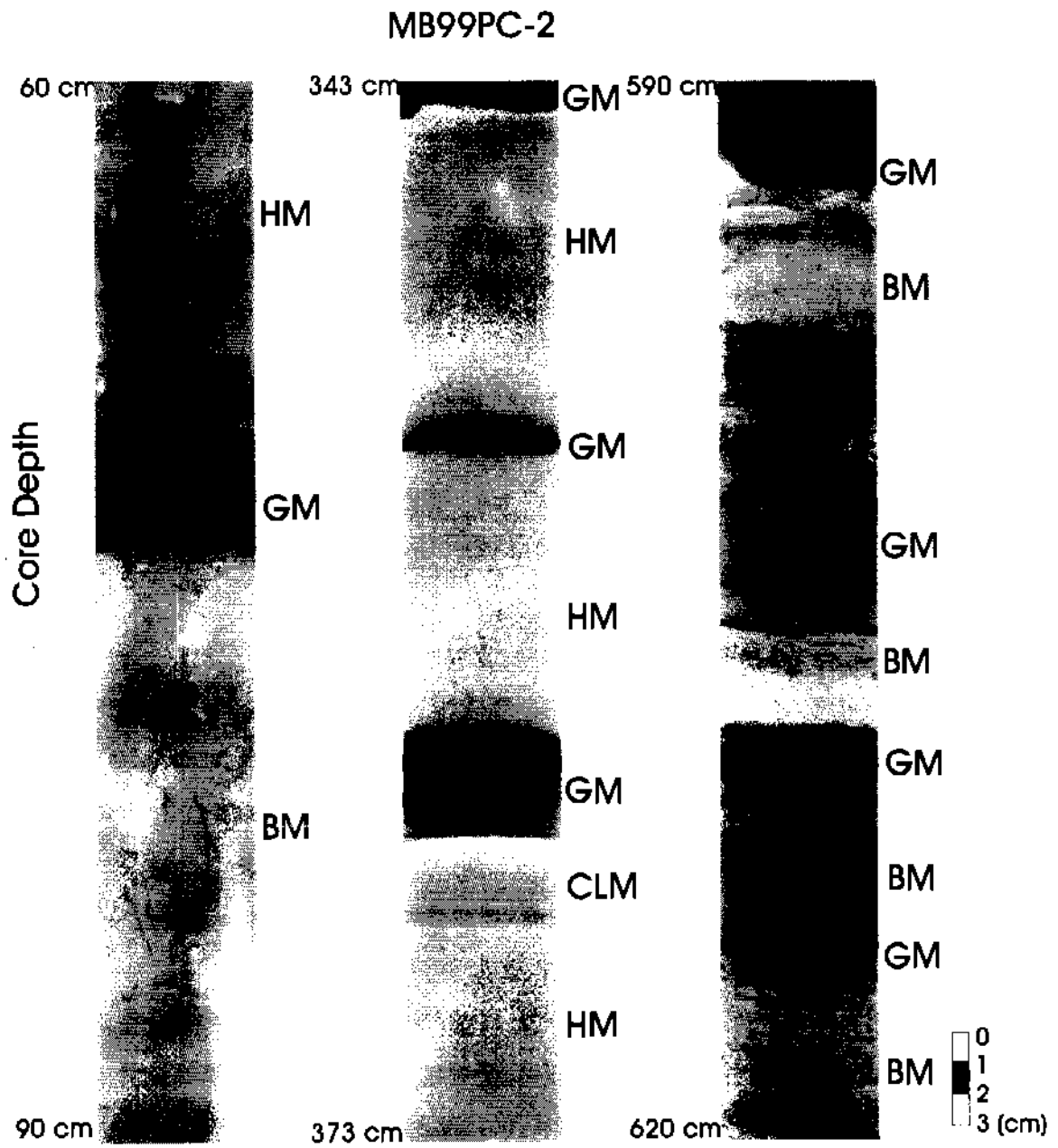


Fig. 3-4-17. X-radiographs of MB99PC-2 core.

단을 지시하는 것으로 해석된다.

(2) MB99PC-3

MB99PC-3 시추퇴적물은 울릉분지간 통로의 최남단인 울릉분지와 경계지점에서 채취하였으며, 수심 2,435 m에서 길이 910 cm의 퇴적물을 획득하였다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). MB99PC-3 시추퇴적물의 주요 퇴적상은 점어층리가 발달된 빨퇴적물과 생물교란된 빨퇴적물이며, 대부분 테프라층이 협재되어 있다 (Fig. 3-4-18).

이 시추퇴적물의 최상부는 평균입도가 8.7~9.2 ϕ 의 범위이고, 함수율이 최대 281%에 달하는 고탄수율의 세립질 퇴적물이 나타난다 (Fig. 3-4-19; Table 3-4-7). 시추퇴적물 깊이 290 cm 이하의 빨퇴적물은 평균입도가 8.1~8.4 ϕ 이고 함수율은 135~145%로서 입도는 다소 조립해지고 함수율은 감소한다 (Fig. 3-4-19; Table 3-4-7).

MB99PC-3 시추퇴적물의 최상부에서 깊이 10 cm까지의 구간에는 적갈색의 빨퇴적물이 덮히며, 약 80 cm 구간까지는 유사한 형태의 생물교란된 빨퇴적물이 놓인다 (Fig. 3-4-20). MB99PC-2 시추퇴적물의 적갈색 빨퇴적물에 비해서 층후가 현저히 얇아졌음이 확인된다. 점어층리가 발달된 빨퇴적물은 MB99PC-3 시추퇴적물의 주된 퇴적상이지만 MB99PC-2 시추퇴적물에 협재된 것보다 빈도수와 층후가 현저히 감소하였다 (Fig. 3-4-20). 이에 반해 테프라층은 층후의 입도 등이 뚜렷히 증가하였으며, 일부 구간에서는 밀도분급과 함께 층리의 발달이 관찰된다.

울릉분지통로에서는 고산소 저층류에 의한 산화환경이 형성되어 울릉분지평원과 한국대지와는 해수의 수괴특성이 뚜렷이 구별된다. 그리고 시추퇴적물의 전 구간에서 점어층리가 발달된 빨퇴적물이 협재하는 것은 저층류에 의한 침식작용이 있었음을 반영하는 것으로 해석된다. 또한 일부 구간의 테프라층들에서 관찰되는 층리의 발달도 저층류의 재동을 지시하는 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 MB99PC-2 시추퇴적물과 비교하면, 점어층리의 협재 빈도수와 테프라층내의 층리 발달이 감소하였음이 관찰되는데, 따라서 MB99PC-3 시추퇴적물은 저층류의 영향이 MB99PC-2 보다 감소하였음을 유추할 수 있다.

라. 남서대륙붕

Table 3-4-7. Sediment characteristics of MB99PC-3 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
3	0	0	27.17	72.83	C	8.87	1.56	-0.08	3.14	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	281.0	-
20	0	0	23.55	76.45	C	8.94	1.49	-0.27	3.68	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	236.0	-
40	0	0	26.6	73.4	C	8.72	1.6	-0.59	4.07	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	260.3	-
60	0	0	23.12	76.88	C	9.12	1.53	0.11	2.49	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	249.0	-
80	2.64	91.2	4.19	1.76	(g)S	1.61	1.82	2.18	10.88	-	-
82	0.5	95.78	2.46	1.26	(g)S	1.62	1.36	3.34	18.02	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.8	-
100	0.92	94.63	2.63	1.83	(g)S	1.36	1.61	3.12	16.02	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.9	-
125	4.27	87.13	4.43	4.16	(g)S	1.4	2.3	2.16	8.25	-	-
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49.5	-
140	0.7	46.78	21.22	31.3	(g)sM	4.97	3.81	0.11	1.45	-	1.15
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.0	-
153	2.33	17.97	71.14	8.56	(g)sM	4.99	2.52	-0.53	3.98	-	-
163	1.2	88.33	7.95	2.53	(g)mS	1.85	1.91	2.07	7.54	-	-
167	0.7	71.91	21.65	5.74	(g)mS	3.59	2.41	1.13	4.85	-	-
170	18.04	70.61	8.46	2.89	gmS	1.54	2.67	0.6	4.03	60.8	-
190	10.39	74.72	9.94	4.94	gmS	1.6	2.82	1.47	4.88	41.4	-
195	2.7	66.28	22.34	8.67	(g)mS	3.64	2.64	0.66	3.38	-	-
200	1.31	46.06	39.15	13.47	(g)sM	4.48	2.91	0.3	2.32	-	-
210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77.4	-
220	34.26	49.35	9.97	6.42	msG	1.27	3.5	0.85	3.01	-	-
228	39.95	49.58	7.28	3.19	msG	0.61	3.03	1.02	3.67	-	-
230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.2	-
248	19.88	31.43	27.58	21.12	gM	3.95	4.26	-0.01	1.67	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111.5	-
253	0	0	50.68	49.32	M	8.15	1.6	0.44	2.79	-	-
260	8.33	65.37	13.43	12.86	gmS	2.88	3.48	0.76	2.77	-	-
270	0	0	55.51	44.49	M	7.95	1.71	0.44	2.64	120.0	2.68
290	0	0	47.05	52.95	M	8.24	1.66	0.28	2.58	144.6	3.25
310	0	0	40.86	59.14	M	8.44	1.59	0.24	2.73	-	3.63
315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	138.0	-
330	0	0	50.94	49.06	M	8.07	1.53	0.34	2.82	-	3.25
340	-	-	-	-	-	-	-	-	-	137.0	-
350	0	0	47.29	52.71	M	8.18	1.51	0.25	2.81	-	3.06
360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.8	-
368	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.25
370	0	0	47.24	52.76	M	8.27	1.63	0.42	2.69	-	-

Table 3-4-7. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
376	0	0	65.96	34.04	M	7.41	1.78	0.63	2.66	-	-
378	-	-	-	-	-	-	-	-	-	132.4	-
380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.25
390	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140.8	-
395	0	0	46.2	53.8	M	8.24	1.6	0.28	2.75	-	-
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.87
405	0	0	48.1	51.9	M	8.18	1.62	0.3	2.55	-	-
410	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.1	-
417	0	47.33	41.98	10.69	sZ	4.94	2.1	1.26	4.19	-	-
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	119.4	2.10
425	0.85	12.75	46.74	39.66	(g)sM	6.99	2.91	-1.28	4.31	-	-
430	17.95	75.71	4.03	2.31	gS	0.44	2.18	2.17	8.95	-	-
435	18.65	47.27	15.43	18.65	gmS	2.75	4.32	0.62	1.88	-	-
440	-	-	-	-	-	-	-	-	-	145.4	2.29
442	0	26.62	35.84	37.54	sM	6.34	3.55	-0.67	2.43	-	-
452	29.85	65.74	3.15	1.26	gS	-0.3	1.91	2.93	13.47	-	-
460	38.68	57.26	2.32	1.74	sG	-0.44	1.99	3.19	15.31	-	-
465	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.7	-
468	48.45	47.76	2.02	1.78	sG	-0.67	2.07	3.04	14.68	-	-
477	28.74	47.38	11.43	12.45	gmS	1.51	4.02	1.21	2.98	-	-
480	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.6	-
490	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58.5	3.06
500	0	0	45.77	54.23	M	8.28	1.56	0.29	2.79	-	-
510	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.7	3.44
520	0	0	46.76	53.24	M	8.25	1.59	0.28	2.81	-	-
530	-	-	-	-	-	-	-	-	-	114.4	4.78
540	0	0	41.3	58.7	M	8.4	1.56	0.12	2.86	-	-
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134.4	3.63
560	0	0	47.74	52.26	M	8.28	1.65	0.4	2.59	-	-
570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127.6	4.01
583	11.73	41.49	22.75	24.03	gM	3.81	4.35	0.24	1.51	-	-
590	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157.3	4.20
609	0	0	49.38	50.62	M	8.11	1.67	0.19	2.85	123.1	-
612	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.01
613	23.29	43.7	19.22	13.8	gmS	2.24	4.2	0.65	2.06	-	-
625	0	4.1	62.97	32.93	M	7.12	2.1	0.15	3.08	-	-
630	25.95	61.49	7.89	4.66	gmS	0.59	3.08	1.64	5.71	-	-
640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60.2	-
650	46.2	43.22	5.21	5.37	msG	0.01	3.2	1.88	6.2	-	-
660	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.0	-
668	47.5	44	5.64	2.86	msG	-0.29	2.8	1.86	6.67	-	-
679	2.05	19.83	30.6	47.52	(g)sM	6.76	3.6	-0.92	2.76	-	-

Table 3-4-7. Continued.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content	Shear Strength
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.		
680	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111.9	1.91
684	12.67	80.12	5.24	1.97	gS	1.07	2.25	1.59	6.91	-	-
697	7.64	85.76	4.23	2.37	gS	0.81	2.1	2.36	10.23	-	-
700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.1	-
710	7.04	64.08	14.53	14.53	gmS	2.63	3.72	0.9	2.48	-	1.53
720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79.7	-
725	13.08	70.19	4.2	12.54	gmS	2.08	3.43	1.34	3.82	-	-
730	2.45	93.7	2.35	1.5	(g)S	0.95	1.61	3.21	17.27	-	-
740	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35.1	-
742	4.58	87.55	4.33	3.54	(g)S	1.34	2.19	2.41	9.54	-	-
755	3.83	19.88	39.51	36.79	(g)sM	6.21	3.59	-0.8	2.51	-	1.91
759	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.3	-
763	12.62	82.67	3.11	1.6	gS	0.41	1.9	2.55	11.7	-	-
765	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.29
771	12.3	82.86	3.73	1.11	gS	0.32	1.82	2.56	11.78	-	-
780	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.1	-
787	7.88	85.64	4.99	1.49	gS	0.9	2.04	1.81	7.03	-	-
800	5.58	86.62	5.58	2.23	gS	0.67	2.22	2.18	7.38	-	-
810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127.4	-
815	2.26	25.85	37.16	34.73	(g)sM	6.02	3.61	-0.61	2.29	-	-
840	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.4	-
850	1.54	94.63	2.3	1.54	(g)S	1.08	1.61	4.24	25.04	-	-
900	3.44	94.45	0.97	1.15	(g)S	0.68	1.35	3.96	26.32	-	-

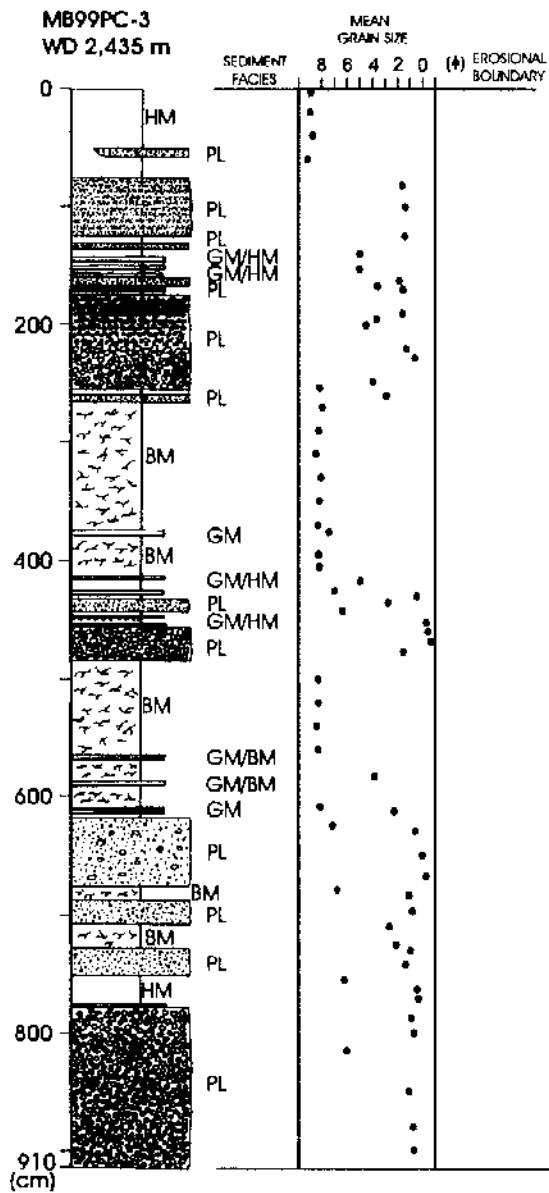


Fig. 3-4-18. Vertical core description and mean grain size of MB99PC-3 core.

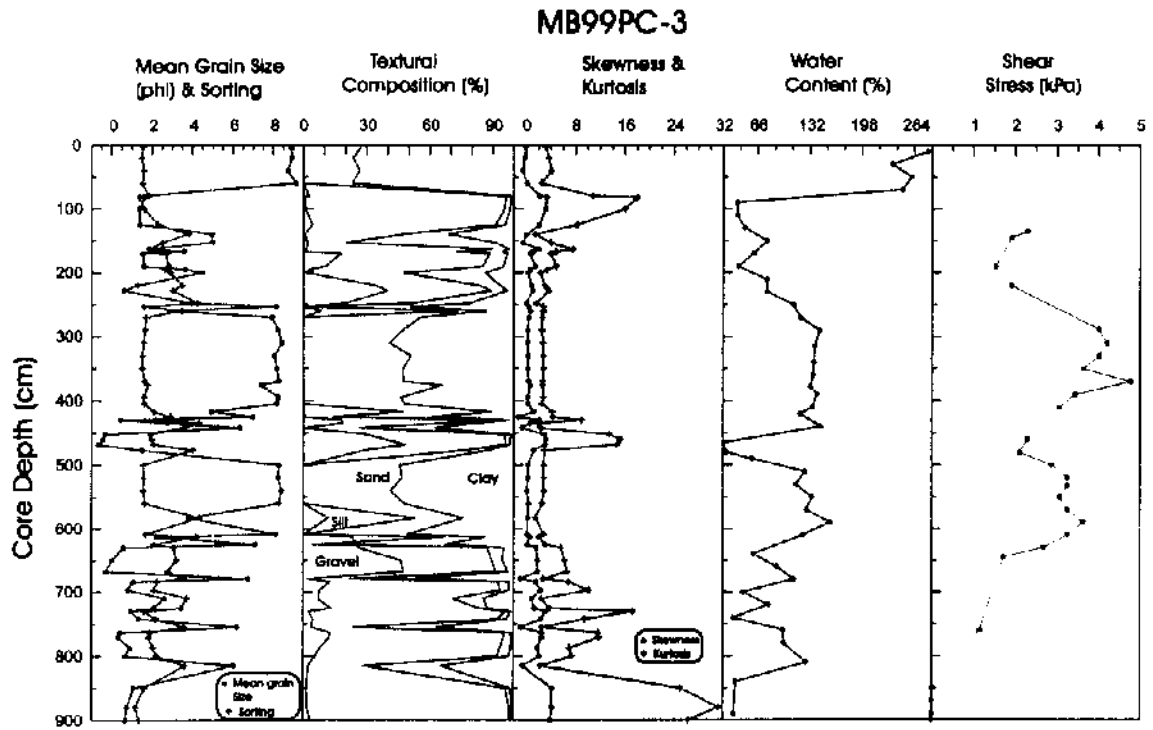


Fig. 3-4-19. Sediment characteristics of MB99PC-3 core.

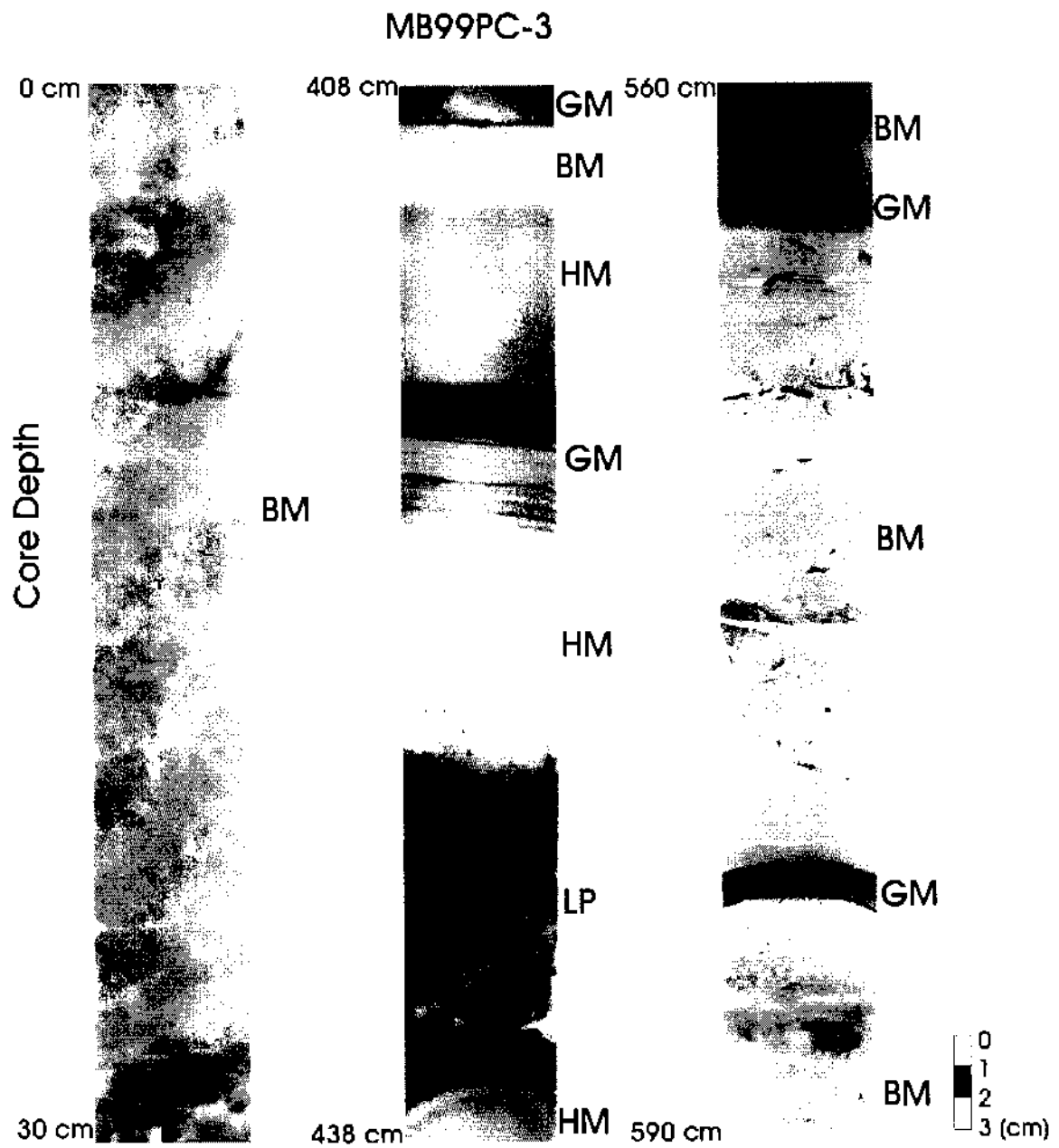


Fig. 3 4 20. X-radiographs of MB99PC 3 core.

한국 남해안에 넓게 발달된 대륙붕은 대한해협을 거쳐 울릉분지 남서쪽까지 연장되며, 저해수면시기에 활동한 해저수로들이 지형적으로 일부 저지대를 형성하고 있다. 이 대륙붕의 표층퇴적물은 대부분 모래퇴적물로 구성되어 있으며, 다수의 패각들을 포함하고 있다. 일부 해역에서는 표층퇴적물에서도 팔림세스트 (palimpsest) 퇴적물들이 보존되어 있고, 대부분의 해역에서는 재동된 팔림세스트 퇴적물과 반원양성 백퇴적물이 혼합되어 나타난다 (전종화 등, 1999).

(1) MB98PC-11

울릉분지 남서쪽에 형성된 대륙붕의 수심 145 m에서 채취된 MB98PC-11 시추퇴적물은 길이가 467 cm이다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). MB98PC-11 시추퇴적물의 주요 퇴적상은 상향세립화 양상을 보이는 패각편을 포함하는 모래퇴적물과 퇴석구조가 관찰되지 않는 모래퇴적물로만 구성되어 있다 (Fig. 3-4-21).

MB98PC-11의 최상부에서 깊이 190 cm까지는 평균입도가 상부로부터 3.6 ϕ 에서 3.2 ϕ 로 비약하게 상향 세립화양상을 보이고, 함수율은 41%에서 26%로 다소 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 3-4-22; Table 3-4-8). 패각편을 포함하는 모래퇴적물이 발달하는 구간에서는 최대 평균입도가 약 2.7 ϕ 에 달한다 (Fig. 3-4-22; Table 3-4-8). MB98PC-11 시추퇴적물의 하부에 형성된 퇴적구조가 관찰되지 않는 모래퇴적물은 평균입도가 하부로부터 3.2 ϕ 에서 3.9 ϕ 로, 상위로 향하여 다소 세립해진다 (Fig. 3-4-22; Table 3-4-8).

울릉분지 남서쪽에 발달된 대륙붕에서 채취한 MB98PC-11 시추퇴적물은 패각편을 포함하는 모래퇴적물로부터 퇴석구조가 관찰되지 않는 모래퇴적물로 상향세립화 현상을 특징으로 한다. 패각편들은 대부분이 층리에 평행하게 배열되어 있으며, 하부로부터 상부로 갈수록 패각편의 크기가 감소한다. 이것은 고에너지의 파랑에 의한 팔림세스트 퇴적물의 재동에 의한 것으로 해석된다. MB98PC-11 시추퇴적물에서는 백퇴적물이 거의 관찰되지 않는 것으로 반원양성 퇴적물의 집적이 거의 일어나지 않으며, 간헐적인 퇴적물 공급이 우세한 환경으로 해석되어 진다.

(2) MB98PC-12

MB98PC 12 시추퇴적물은 울릉분지 남서쪽에 형성된 대륙붕인 수심 200 m에서 채취되었으며, 길이는 160 cm이다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). MB98PC-12 시추퇴

Table 3-4-8. Sediment characteristics of MB98PC-11 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.	
0	1.31	78.66	17.71	2.32	(g)mS	3.63	1.53	1.25	14.86	41.0
20	0	85.08	13.27	1.65	zS	3.51	1.13	3.28	16.71	28.5
40	0	92.11	6.89	1	S	3.27	0.92	3.7	21.88	27.1
60	0	86.07	11.99	1.95	zS	3.55	1.2	3.25	16.99	28.9
80	0	87.7	10.46	1.84	zS	3.32	1.28	3.06	16.37	28.8
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.3
120	0	88.96	9.57	1.47	zS	3.29	1.15	2.77	14.25	25.6
140	0	89.56	8.66	1.78	zS	3.25	1.27	2.95	16.56	15.7
160	0	89.17	9.75	1.08	zS	3.14	1.16	2.01	11.04	23.8
180	0	88.33	10.26	1.42	zS	3.15	1.27	2.37	13.3	23.9
190	0	86.39	12	1.61	zS	3.29	1.26	2.15	11.06	25.9
210	1.33	79.25	17.03	2.39	(g)mS	3.42	1.59	1.1	12.78	32.10
230	0	85.54	12.29	2.17	zS	3.27	1.48	1.85	9.23	27.2
240	0	86.16	11.3	2.55	zS	3.22	1.63	2.19	10.9	24.6
254	0.42	83.8	11.99	3.79	(g)mS	3.25	1.75	2.15	9.37	26.5
270	0	89.38	6.59	4.03	mS	2.84	1.8	2.46	9.93	29.2
290	0.12	95.99	2.85	1.05	(g)S	2.81	1.12	3.15	22.54	31.4
310	0.16	95.4	3.28	1.15	(g)S	2.81	1.07	2.99	19.34	29.0
315	0.17	86.62	9.92	3.29	(g)mS	3.27	1.64	2.42	10.63	30.9
323	0	76.83	19.19	3.97	zS	3.83	1.64	2.56	10.52	29.8
334	5.72	83.18	9.24	1.86	gmS	2.74	1.87	0.36	7.65	-
340	2.3	97.49	0.22	0	(g)S	2.73	0.93	-3.48	19.02	26.1
354	1.71	74.36	18.01	5.92	(g)mS	3.85	2.03	1.43	6.82	31.7
360	0	78.33	16.93	4.74	zS	3.89	1.67	2.28	8.3	31.7
380	0	77.84	17.2	4.96	zS	3.91	1.72	2.42	9	31.9
400	0	75.42	18.65	5.93	zS	3.8	1.99	1.86	6.31	31.4
412	0	71.28	24.33	4.38	zS	4.12	1.55	1.96	6.83	26.5
430	0	79.11	17.9	2.99	zS	3.73	1.44	2.55	10.31	28.2
450	0	90.97	7.83	1.2	S	3.43	1	3.52	18.88	26.7
465	0	96.44	3.56	0	S	3.22	0.72	3.81	20.91	27.4

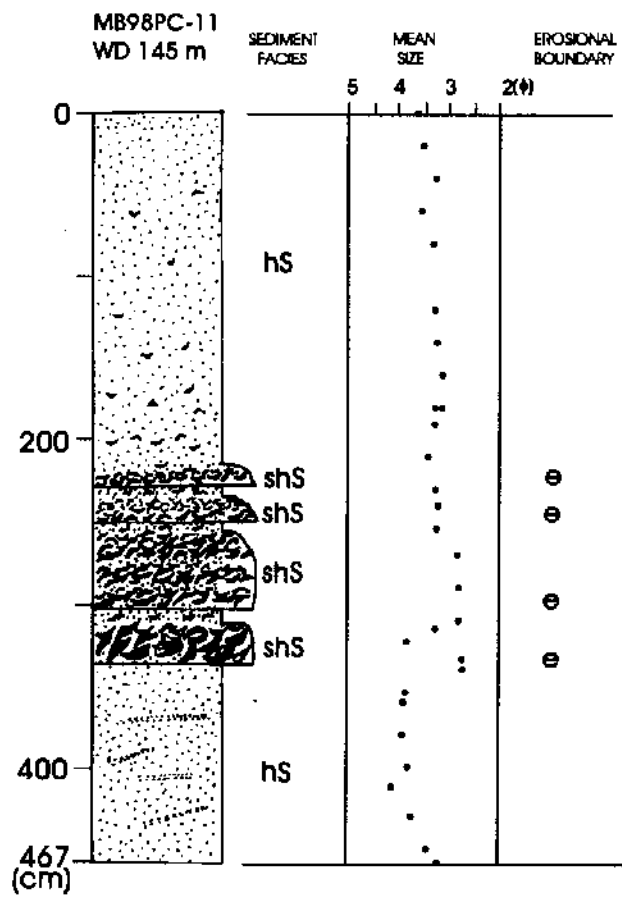


Fig. 3-4-21. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-11 core.

MB98PC-11

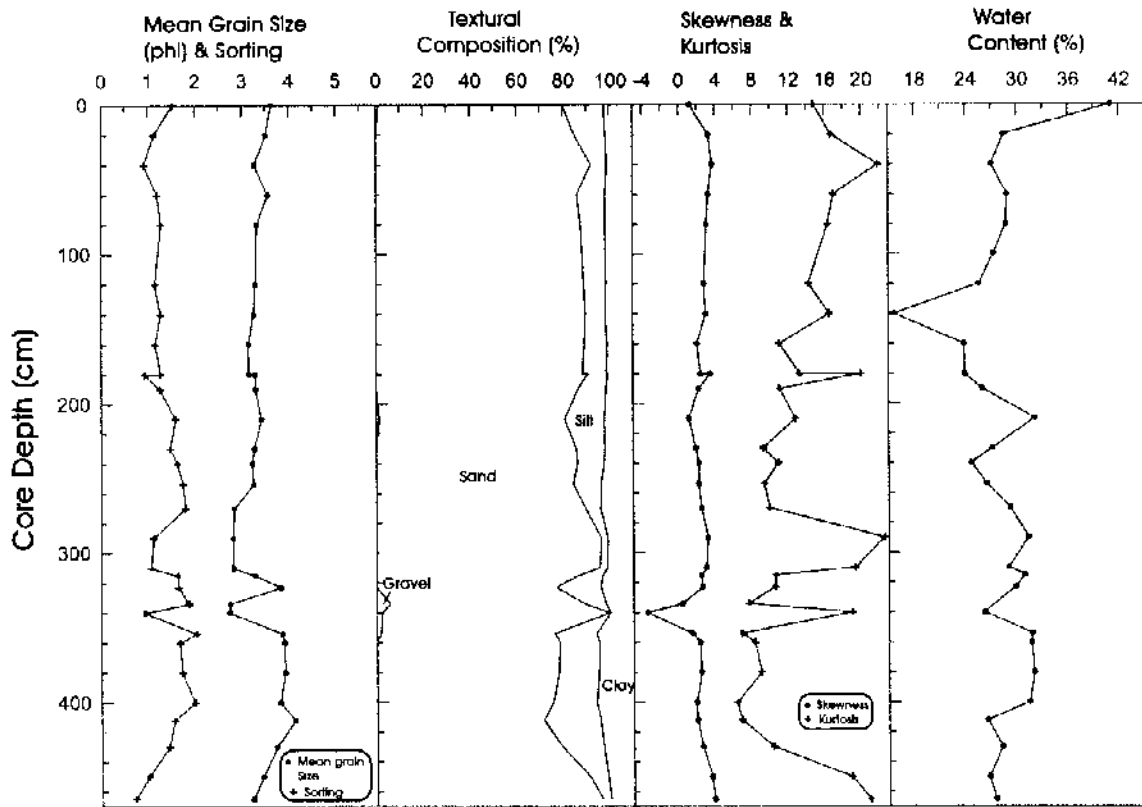


Fig. 3-4-22. Sediment characteristics of MB98PC 11 core.

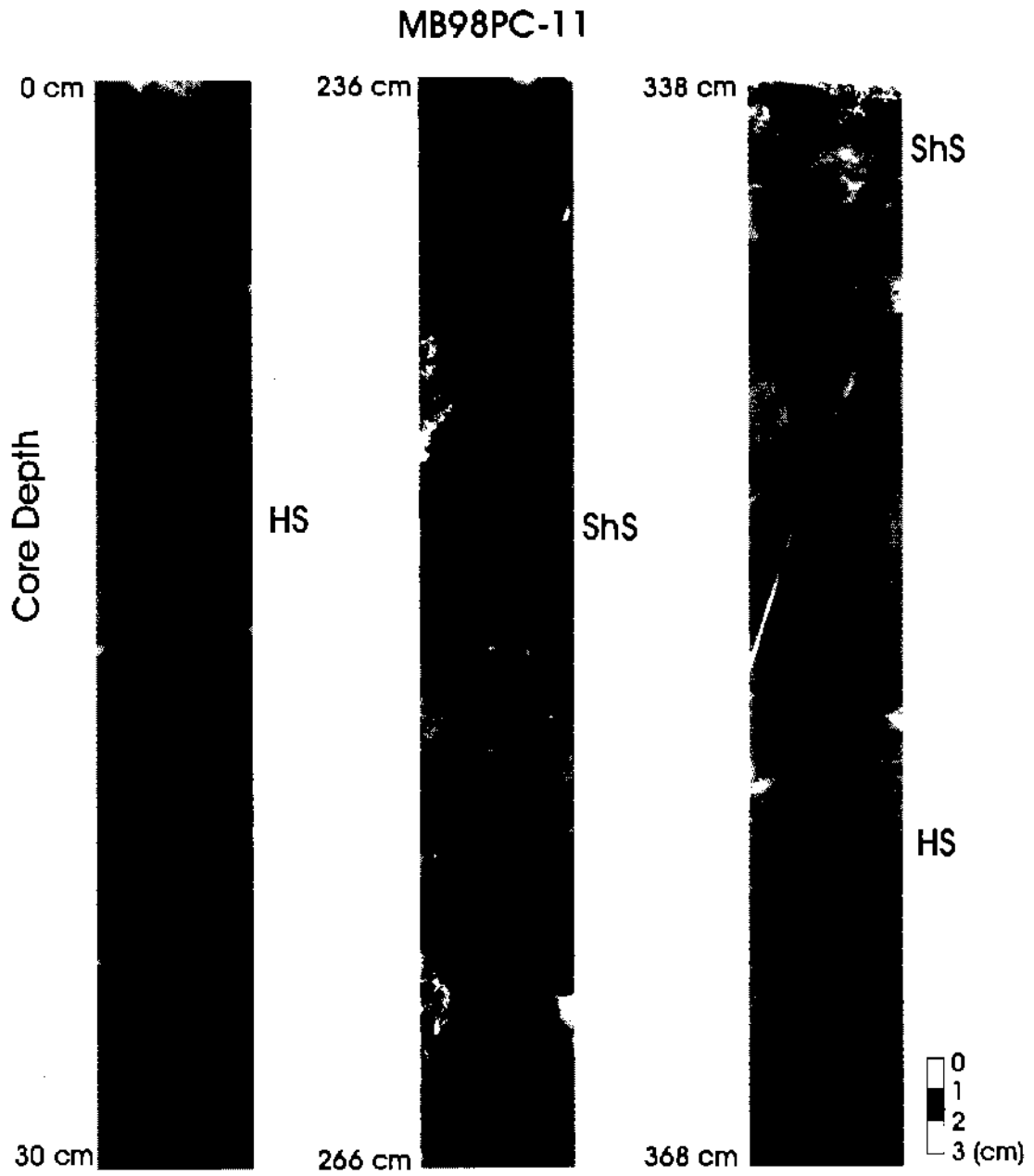


Fig. 3-4-23. X-radiographs of MB98PC-11 core.

Table 3-4-9. Sediment characteristics of MB98PC-12 core.

Depth (cm)	Composition (%)				Sediment type	Statistical Parameter				Water Content
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz (phi)	Sorting	Skew.	Kurt.	
0	0	87.91	6.22	5.87	mS	3.31	1.98	2.2	8.28	86.0
10	0	94.44	3.77	1.79	S	2.73	1.36	2.92	16.92	52.7
30	0	96.95	2.19	0.86	S	2.78	0.96	3.69	29.74	38.4
45	0	99.71	0.29	0	S	2.47	0.56	0.79	12.13	27.3
50	0	99.24	0.54	0.22	S	2.26	0.69	2.95	26.33	28.9
70	0	99.45	0.33	0.22	S	1.7	0.79	3.39	30.83	26.6
85	0	95.6	2.85	1.55	S	1.94	1.43	3.15	16.4	27.9
100	0	99.18	0.57	0.25	S	2.47	1	1.07	11.69	24.6
115	0	98.42	0.98	0.61	S	2.4	1	2.85	23.64	28.0
123	0	99.41	0.44	0.15	S	2.18	0.81	1.75	18.29	22.6
140	20.02	78.37	1.12	0.49	gS	1.05	2.33	-0.7	3.9	25.2
155	0	97.91	1.15	0.95	S	2.27	1.15	2.44	18.08	22.1
170	0.13	99.42	0.39	0.06	(g)S	2.31	0.8	1.1	17.36	29.2

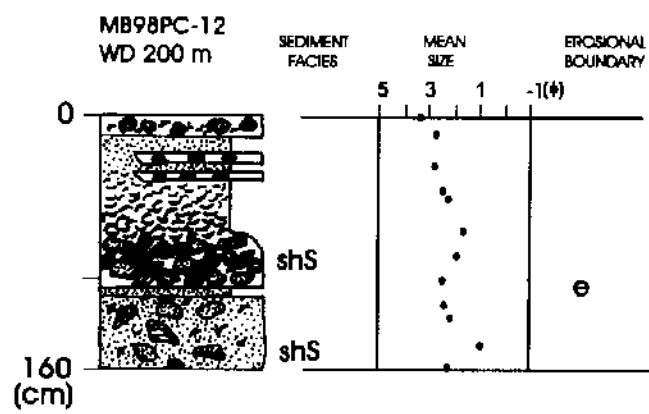


Fig. 3-4-24. Vertical core description and mean grain size of MB98PC-12 core.

MB98PC-12

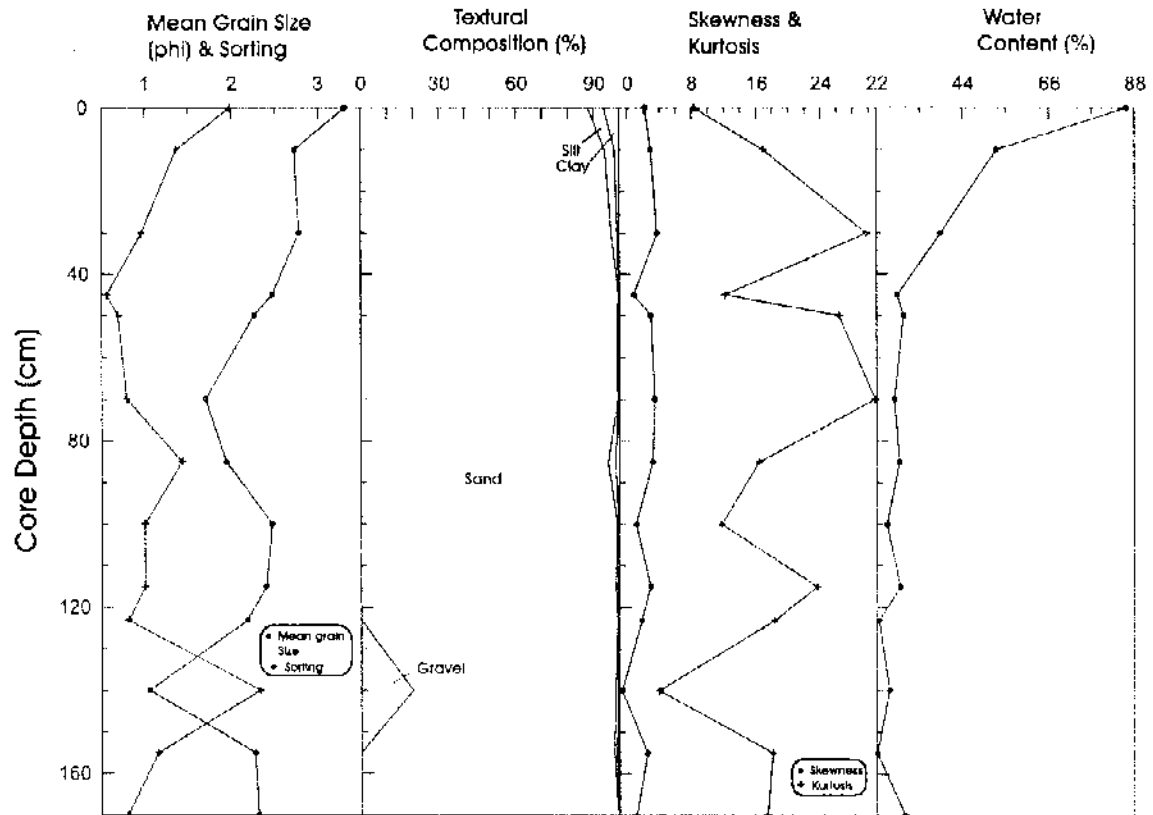


Fig. 3-4-25. Sediment characteristics of MB98PC-12 core.

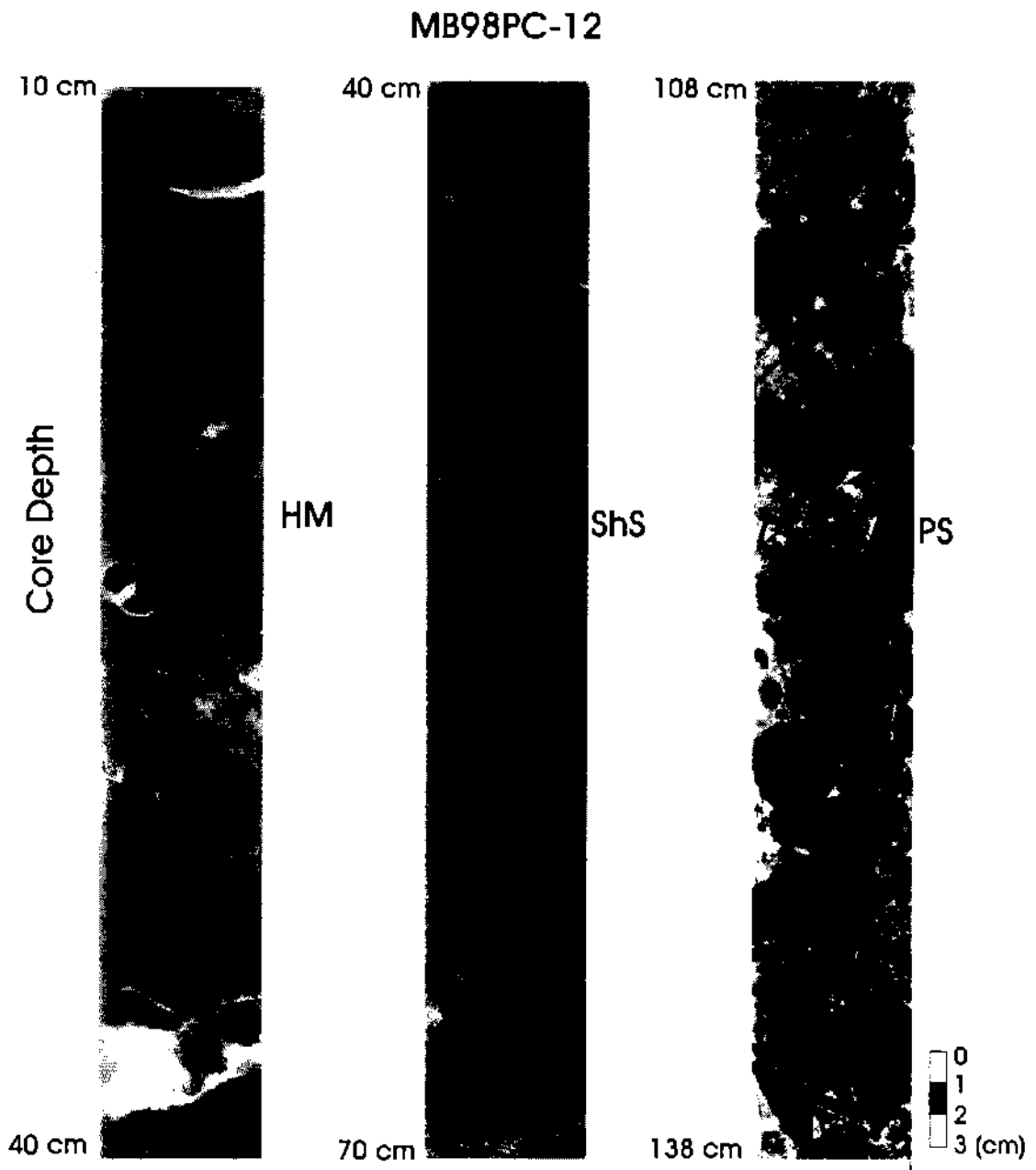


Fig. 3-4-26. X-radiographs of MB98PC-12 core.

적물의 주요 퇴적상은 패각편과 암편을 포함하는 역질 모래퇴적물과 모래퇴적물로 구성된다 (Fig. 3-4-24).

시추퇴적물의 상부에 덮히는 역들과 패각편이 산재된 모래퇴적물은 평균입도가 2.7~3.3 ϕ 의 범위로 장경 2 cm의 역들을 포함한다 (Fig. 3-4-25; Table 3-4-9). 시추퇴적물의 깊이 40 cm에서 78 cm까지는 패각편들을 포함하는 모래퇴적물이 현재하는데, 하부로부터 평균입도가 1.7 ϕ 에서 2.5 ϕ 로 상향세립화 양상을 뚜렷히 보여준다 (Fig. 3-4-25; Table 3-4-9). 시추퇴적물 깊이 78 cm 이하 구간은 장경 3 cm 내지 5 cm의 패각편과 암편들이 포함되어 있으며, 매질의 평균입도는 1~2.5 ϕ 의 범위에 속한다 (Fig. 3-4-25; Table 3-4-9).

MB98PC-12 시추퇴적물은 깊이 78 cm 이하의 구간은 최대 5 cm의 패각편 또는 암편들이 층리에 거의 평행하게 놓여져 있는데, 이들은 팔립세스트 퇴적물로 해석된다 (Fig. 3-4-26). 그 상부에 관찰되는 패각편을 포함하는 모래퇴적물들은 상향세립화양상을 보이는데, 이 퇴적물은 파랑에너지의 의해서 간헐적으로 재동된 퇴적물로 해석된다. 따라서 울릉분지 남시추 대륙붕에서는 팔립세스트 퇴적물의 재동에 의한 퇴적작용이 주로 일어나며, 해역에 따라서 재동된 퇴적물의 양과 입도가 크게 차이가 있음을 확인하였다.

제 5 절 유공층을 이용한 동해의 고해양환경 및 고기후 연구

대표저자 : 신임철 (한국해양연구소 해양지질연구단)

1. 서론

유공층은 탄산염으로 이루어져 있으며 모든 해양의 수층 및 저층에 일반적으로 풍부히 서식하고 있다. 유공층의 분포 및 양을 통제하는 요인에는 저층의 형태, 퇴적물 입자의 크기, 영양염의 양, 온도, 염도, 용존산소의 양 및 포화 정도, 유기물의 양 등 여러 요소가 있다. 하지만 심해유공층의 분포는 온도, 염도, 용존산소의 양에 의해서 특정 지워지는 수괴의 특성이 유공층의 현존량 및 종의 분포에 가장 큰 영향을 미친다 (Tolderlund and Be, 1971; Fairbanks and Wiebe, 1980; Arikawa, 1983; Park and Shin, 1998).

일반적으로 심해는 수괴의 제일 밑바닥에 남극 저층수 (Antarctic Bottom Water)가 존재하며 그 위에 북대서양 심층수 (North Atlantic Deep Water)가 놓여 있다. 전지구적인 기후 및 환경변화는 남극 저층수의 형성 양에 달려 있다. 즉 남극 저층수의 유입이 증가하면 전 지구의 기후는 차가워지며 반대로 남극 저층수의 유입이 줄어들고 북대서양 심층수가 증가하면 기후는 따뜻해진다. 하지만 동해의 심층에는 동해 고유의 수괴가 존재한다 (Moriyasu, 1972).

동해는 평균수심이 약 1,350 m이며 최대깊이는 약 3,700 m 정도이다. 부유성 유공층의 분포는 표층수의 물리 및 화학적인 특성에 의해서 통제되며 부유성 유공층 및 저서성 유공층의 보존 정도는 저층수의 특성 (온도, 염도, 용존산소의 양)에 의해서 특정 지워진다. 동해의 표층수는 북쪽에 위치한 오호츠크해와 타타스키 해협 (sill 깊이가 15 m 이하)을 통하여 교환이 이루어지며 북태평양과는 소야 해협 (sill 깊이 55 m)을 통하여 이루어진다. 동해의 표층수는 쪄가루해협 (sill 깊이 130 m)을

통하여 태평양으로 나간다. 쿠로시오 해류의 가지가 동중국해를 통하여 약간 특성이 변형된 후에 동해로 들어온다.

아한대전선 (Subarctic Front)이 약 40 °N 근처에 존재한다. 차가운 표층수 (약 <20 °C)가 아한대전선의 북쪽 (North Korean Water Mass)에 위치하는 반면에 따뜻한 표층수 (약 >20 °C)는 아한대 전선의 남쪽 (Kuroshio Water Mass)에 위치한다 (Bradshaw, 1959; Hirose et al., 1996).

본 연구의 목적은 동해에서 채취한 3개의 피스톤 코어를 사용하여 고기후 및 고해양 환경을 밝힘으로써 미래에 동해의 생태계가 겪어야 할 운명을 연구하기 위한 기본자료를 도출하는데 있다.

2. 방법

본 연구에 사용된 3개의 피스톤 코어의 위치 및 수심은 Fig. 3-4-1과 Table 3-4-1에 있다. 약 5-10 g 정도의 퇴적물을 비이커에 담아 약 60 °C의 오븐에 약 24 시간 정도 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 건조시킨 시료에 물을 부어 실험실에 약 1 시간 정도 방치한 후 63 µm 체를 사용하여 체질한 후 63 µm 보다 큰 입자의 무게를 측정하였다. 63 µm 보다 큰 입자의 무게에서 원래 건조시료의 무게로 나눈 후 100을 곱하여 조립질퇴적물의 상대적인 양 (%)을 구하였다. 본 연구에서 유공충의 정량분석은 정보의 손실을 줄이기 위하여 63 µm 보다 큰 입자에서 행하였다 (Sen Gupta et al., 1987).

유공충을 많이 함유한 시료는 부유성 및 저서성 유공충의 수를 Otto Microsplitter로 나눈 후 수를 헤아려 퇴적물 10 g 당 개체수로 표시하였다. 깨어진 부유성 유공충의 수는 150 µm 보다 큰 입자에서 구하였다. 부유성/저서성 유공충의 비율 (%)은 63 µm 보다 큰 퇴적물입자를 사용하였다. 이외에도 고기후의 지시자로 사용할 수 있는 부유성 유공충 *Neogloboquadrina pachyderma*의 정량분석을 하였다. 퇴적물 10 g 당 right-coiled와 left-coiled *N. pachyderma*의 개체 수, *N. pachyderma* 100 개체 내에서 right- 및 left-coiled *N. pachyderma*의 상대적인 양 (%) 및 총 부유성 유공충 100 개체 내에서 right 및 left coiled *N. pachyderma*의 상대적인 양 (%)을 구하였다. 언급한 자료들은 Tables 3-5-1, 3-5-2, 3-5-3에 있

Depth(cm)	ODW(g)	>63 um	CF(%)	P(N)	Pbr(%)	B(N)	P+B(N)	P/B(%)	Are	Ples	Pris	Ple(%)	Pri(%)	Plew(%)	Priw(%)
0-10	4.74	0.33	6.96	34	na	13	59	na	13	6	27	na	na	na	na
50-52	4.27	0.03	0.70	1190	4	9	1199	99	0	824	197	80	20	68	17
100-102	3.93	0.12	3.05	8224	2	41	8264	99	0	4030	814	92	8	86	8
150-152	5.67	0.20	3.53	19414	1	0	19414	100	0	13319	4063	77	23	67	21
200-202	3.10	0.03	0.97	1600	3	116	1716	3	0	1135	297	80	20	71	20
250-252	4.32	0.03	0.69	3093	8	0	3093	100	0	2278	519	82	18	77	15
300-302	5.63	0.09	1.60	3410	6	0	3410	100	0	2615	398	88	12	80	11
350-352	3.35	0.04	1.19	3820	2	0	3820	100	0	2699	621	85	15	71	14
400-402	6.83	0.12	1.76	6325	5	47	6372	99	0	4873	1078	85	15	82	15
450-452	4.84	0.03	0.62	1008	4	0	1008	100	0	818	140	86	14	81	14
500-502	7.79	1.31	16.82	5587	4	1479	7065	77	0	4108	904	80	20	78	18
550-552	5.47	0.74	13.53	12168	11	468	12636	96	0	9945	1755	85	15	81	15
600-602	5.60	0.74	13.21	8343	14	2057	10400	81	0	7429	914	89	11	59	10
650-652	4.55	0.03	0.66	20	na	20	40	na	0	20	0	na	na	na	na
700-702	6.27	0.46	7.34	2118	7	434	2552	83	0	1735	357	83	17	82	17
750-752	5.44	0.06	1.10	6	na	2	7	na	0	4	2	na	na	na	na
800-802	5.85	0.03	0.51	0	na	154	154	na	0	0	0	na	na	na	na
850-852	10.20	0.29	2.84	1678	30	235	1914	86	0	1098	580	67	33	67	33
900-902	6.27	0.25	3.99	21640	3	1633	23273	95	0	16740	4695	80	20	78	21

Table 3-5-1. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC 1. The abbreviations are as follows: ODW (g)=original dry weigh in grams; >63um=weigh (g) in >63um size fraction; P (N)=number of planktonic foram/10 g; Pbr (%)=percent of broken planktonic foram; B (N)=number of benthic foram/10g; P+B (N)=number of planktonic plus benthic foram/10g; P/B (%)=percent of planktonic/benthic ratio; Are=number of arenaceous foram/10g; Ples=number of left-coiled *N. pachyderma*/10g; Pris= number of right-coiled *N. pachyderma*/10g; Ple (%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; Pri (%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; Plew (%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera; Priw (%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera.

다. 본 연구에서 수집된 자료의 구간은 50 cm이다.

3. 결과

가. 코아 MB99PC-1

울릉도의 북동쪽에 위치한 수심 1,711 m에서 채취되었다 (Fig. 3-4-1 and Table 3-4-1). 조립질퇴적물의 함량은 0.51-16.82%이다. 조립질퇴적물은 코아 곳곳에 석영, 화산유리, 부석을 함유하고 있으며 코아 상부 구간은 방산층이 나타난다. 조립질퇴적물의 상대적인 양은 코아 깊이 500-600 cm를 제외하고 낮은 값을 보이며 큰 변화도 없다 (Fig. 3-5-1 and Table 3-5-1). 특히 코아 깊이 500 cm는 직경 약 5 mm 정도의 부석이 많이 나타난다.

퇴적물 10 g당 부유성 유공충의 수는 0-21,640 개체이며 저서성 유공충의 수는 0-2057 개체이다. 부유성 유공충의 상대적인 양 (%)은 대체적으로 코아 깊이 150 cm, 550 cm, 900 cm를 제외하고 낮은 값과 큰 변화를 보이지 않는다 (Fig. 3-5-1). 저서성 유공충의 상대적인 양 (%)은 코아 깊이 500-600 cm 구간을 제외하고는 낮은 값을 보이며 큰 변화를 보이지 않는다 (Fig. 3-5-1). 하지만 코아의 상부 (0-400 cm)에 비해 하부 (400-900 cm)에 퇴적물 10 g 당 상대적으로 약간 많은 저서성 유공충을 함유하고 있다.

퇴적물 10 g당 사질유공충의 수는 오직 코아 최상부 (0-2 cm)에서만 나타난다 (Fig. 3-5-1 and Table 3-5-1).

깨어진 부유성 유공충의 수는 전 코아 깊이에 걸쳐서 낮게 나타난다 (1-30%). 일반적으로 코아 하부 구간 (500-900 cm)이 상부구간 (0-500 cm) 보다 깨어진 부유성 유공충의 상대적인 양 (%)이 높게 나타난다 (Fig. 3-5-2).

부유성/저서성 유공충의 비율은 3-100%이다. 부유성/저서성 유공충의 비율은 코아 하부구간 (500-900 cm)이 상부구간 (0-500 cm)에 비해 상대적으로 낮은 값을 보인다 (Fig. 3-5-2).

퇴적물 10 g 당 left coiled *N. pachyderma*의 수는 0-16,740 개체이며 right-coiled *N. pachyderma*의 수는 0-4,695 개체이다. Right-coiled *N. pachyderma*와 left coiled *N. pachyderma*는 코아 깊이 100-150 cm, 500-600 cm, 900 cm 구간

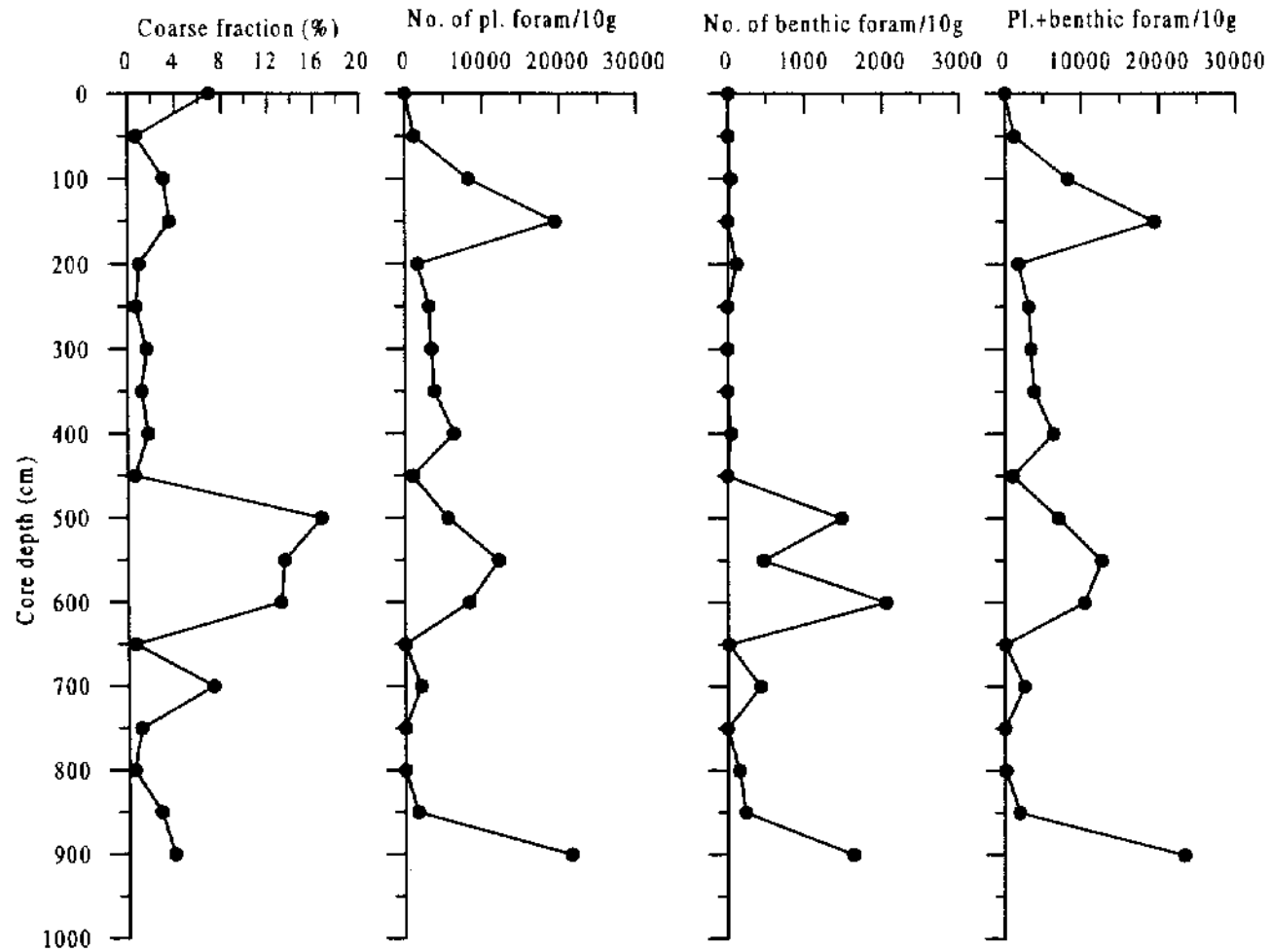


Fig. 3-5-1. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC-1.

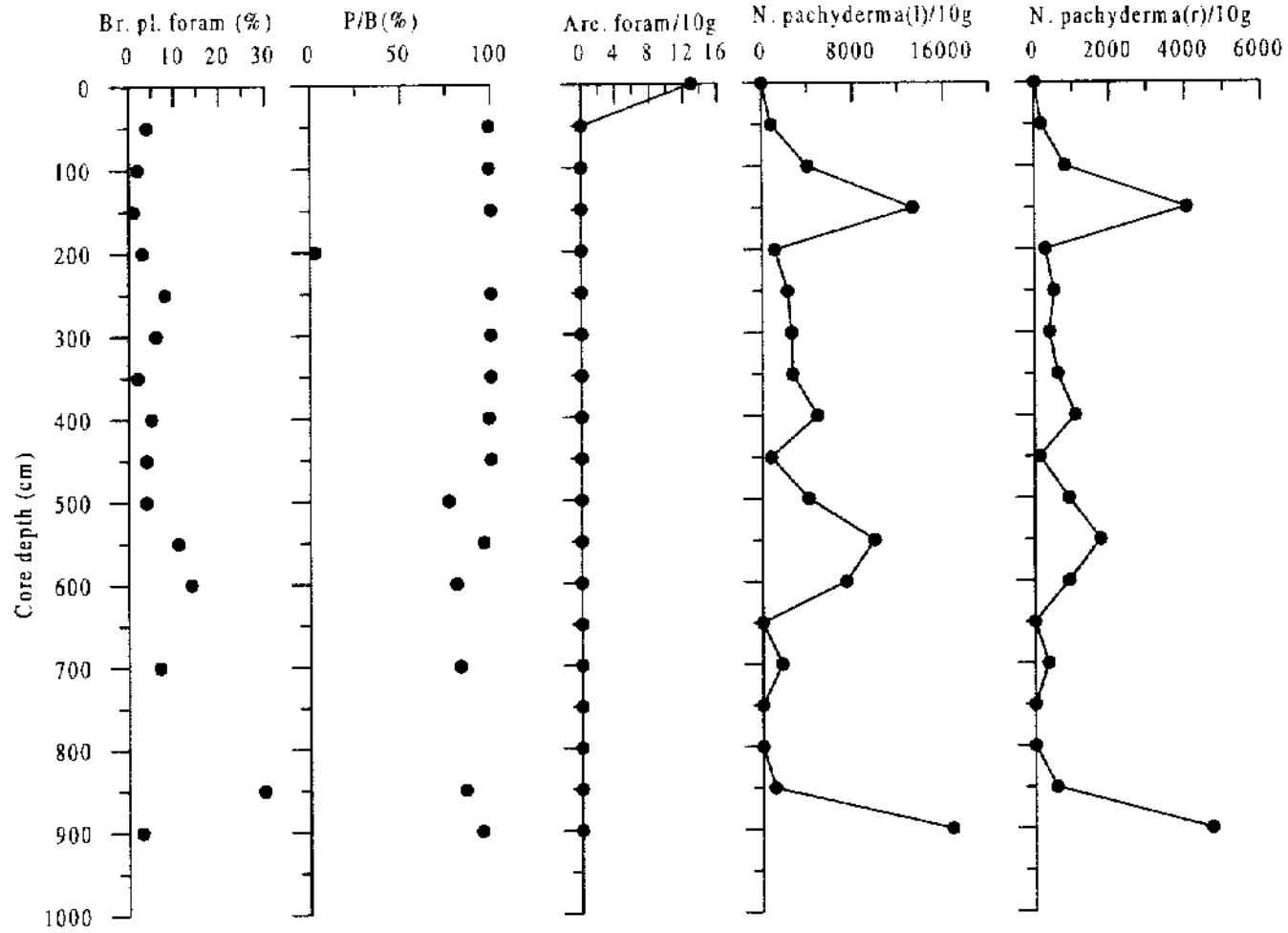


Fig. 3-5-2. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), number of arenaceous foraminifera, and left and right-coiled *N. pachyderma* in 10 g of dried sediment of core MB99PC-1.

에서 다른 구간에 비해 상대적으로 많은 양을 보이며 그의 변화폭도 크나 (Fig. 3-5-2).

N. pachyderma 내에서 left-coiled *N. pachyderma*는 67-92%이며 right-coiled *N. pachyderma*는 59-86%이다. 총 유공충 중 left coiled *N. pachyderma*는 59-86%이며 right-coiled *N. pachyderma*는 8-33%이다 (Table 3-5-1).

N. pachyderma 중 left-coiled *N. pachyderma*는 코아 깊이 900 cm부터 600 cm까지는 약간 증가하며 600 cm부터 150 cm까지는 서서히 감소하는 경향이 있다 (Fig. 3-5-3).

나. 코아 MB 99PC 2

울릉도 북동쪽의 수심 2,707 m에서 채취되었다 (Table 3-4-1). 조립질퇴적물은 코아 전구간에 걸쳐 많은 차이를 보인다 (0.21-94.42%) (Table 3-5-2). 몇몇 코아 구간에서는 방산충, 스펀지 스피칼, 방산충, 부석 등을 함유하고 있다. 특히 조립질의 함량이 매우 높은 코아 깊이 (200, 450, 500, 700, 800, 850, 900 cm)에서는 많은 양의 부석을 함유하고 있다. 부석은 위에서 언급한 외의 코아 구간에서도 나타난다. 부석이 나타나지 않는 코아 구간은 매우 낮은 조립질퇴적물의 함량을 보인다 (Fig. 3-5-4).

퇴적물 10 g 당 부유성 유공충의 수는 코아 깊이당 많은 차이를 보인다 (6-366943 개체) (Table 3-5-2). 코아 깊이당 부유성 유공충의 수는 코아 하부 (500-900 cm) 구간이 상부 구간 (0-500 cm)에 비해 매우 낮게 나타난다 (Fig. 3-5-4).

퇴적물 10 g 당 저서성 유공충의 수는 0-11467 개체이다 (Table 3-5-2). 저서성 유공충의 수 또한 부유성 유공충과 마찬가지로 코아 하부구간 (500-900 cm)이 상부 구간 (0-500 cm) 보다 매우 낮게 나타난다 (Fig. 3-5-4).

깨어진 유공충의 수는 1-15%의 범위에서 나타난다 (Table 3-5-2). 코아 깊이 850 cm부터 400 cm까지의 구간에서 깨어진 유공충은 감소하며 400 cm부터 300 cm 구간은 거의 깨어진 유공충이 나타나지 않는다. 코아 깊이 300 cm부터 코아 깊이 100 cm까지는 증가하는 경향을 보인다 (Fig. 3-5-5). 깨어진 유공충의 상대적인 양 변화 폭은 코아 깊이 당 큰 변화를 보이지 않는다.

부유성/저서성 유공충의 비율은 전 코아 구간에 53-100%의 범위에서 나타난다

Depth(cm)	ODW(g)	>63 um	CF(%)	P(N)	Pbr(%)	B(N)	P+B(N)	P/B(%)	Are	Ples	Pris	Ple(%)	Pri(%)	Plew(%)	Prw(%)
0-10	3.70	1.52	41.08	221405	3	0	221405	100	0	177124	35978	81	19	77	17
27-29	2.69	0.01	0.37	89	na	0	89	na	0	71	11	na	na	na	na
50-52	1.43	0.01	0.70	245	na	0	245	na	0	203	35	na	na	na	na
76-78	3.08	0.07	2.27	506	11	58	565	89	0	399	88	85	15	85	14
100-102	6.97	1.21	17.36	25342	10	1836	27179	95	0	21468	3857	87	13	87	13
150-152	4.85	0.01	0.21	33	na	2	35	na	0	29	0	na	na	na	na
200-202	12.04	8.88	73.75	229635	6	3402	233037	99	0	182007	39123	83	17	79	17
250-252	4.85	0.01	0.21	6	na	0	6	na	0	0	4	na	na	na	na
300-302	5.57	0.03	0.54	1659	2	0	1659	100	0	1329	280	78	22	73	22
304-305	4.82	0.22	4.56	89228	1	0	89228	100	0	65859	18589	80	20	75	20
350-352	5.18	0.02	0.39	386	4	4	390	100	0	324	39	88	12	83	11
375-377	8.93	2.64	29.56	366943	1	11467	378410	98	0	259153	84856	75	25	73	22
400-402	8.38	0.31	3.70	64764	1	611	65375	99	0	55599	9165	85	15	85	15
450-452	18.88	16.92	89.62	32000	7	3797	35797	87	0	25492	5153	82	18	79	17
500-502	10.68	7.05	66.01	18217	12	479	18697	98	0	12464	5753	76	24	73	23
550-552	6.32	0.43	6.80	2076	6	127	2203	94	0	1747	278	85	15	83	15
600-602	3.85	0.09	2.34	62	na	8	70	na	0	42	16	na	na	na	na
650-652	3.95	0.01	0.25	10	na	0	10	na	0	10	0	na	na	na	na
700-702	6.34	4.17	65.77	568	17	164	732	78	0	492	76	82	18	79	17
750-752	5.59	0.25	4.47	16	na	2	18	na	0	9	7	na	na	na	na
800-802	14.50	12.36	85.24	193	13	138	331	53	0	154	39	79	21	78	20
850-852	9.26	7.11	76.78	4596	15	242	4838	93	0	3940	518	93	7	89	7
900-902	12.36	11.67	94.42	78	na	71	149	na	0	71	6	na	na	na	na

Table 3-5-2. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC-2. All abbreviations are shown in Table 3-5-1.

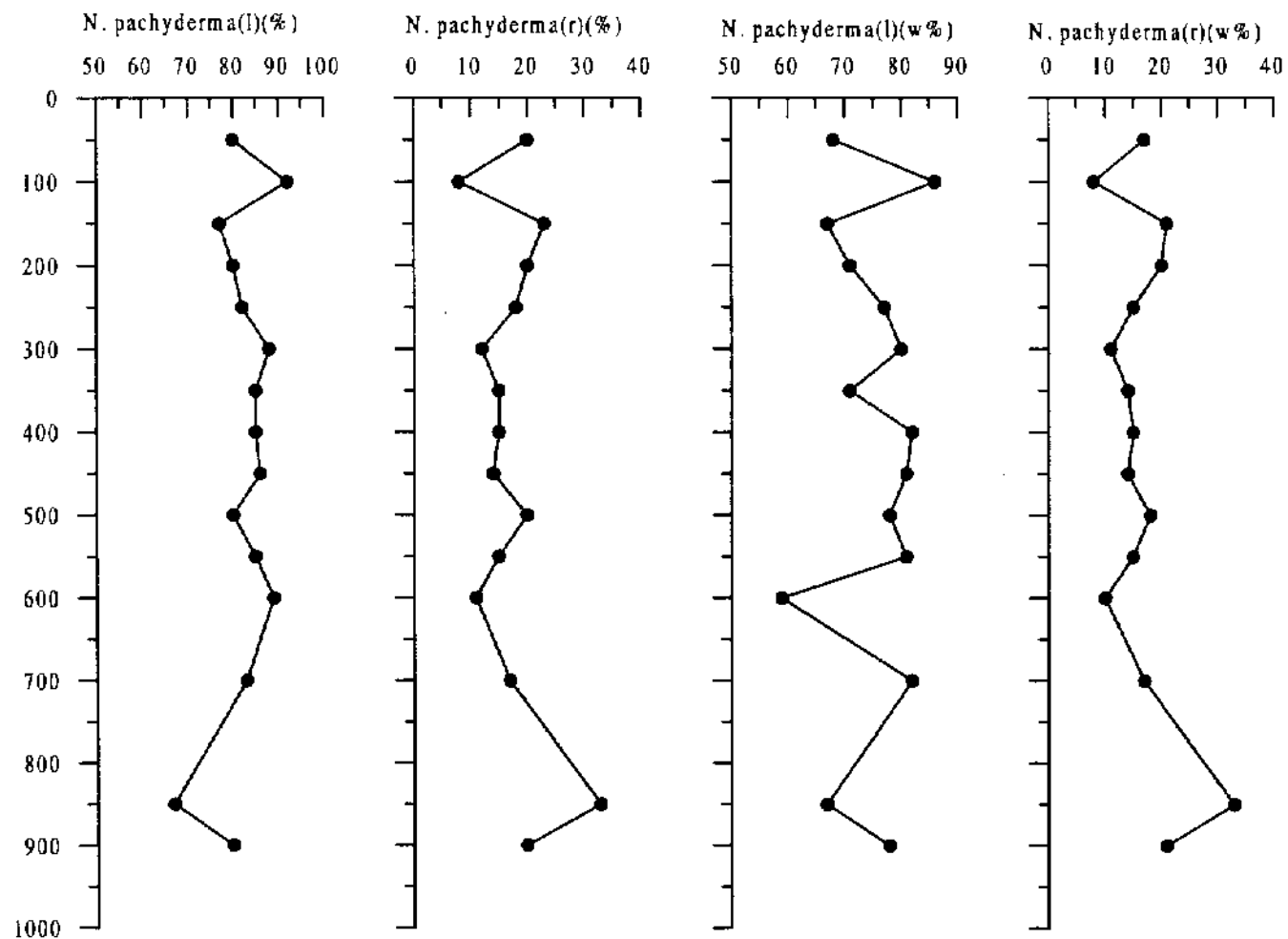


Fig. 3-5-3. Relative abundance of *N. pachyderma* in core MB99PC-1. *N. pachyderma* (l) (%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (r) (%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (l) (w%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera; *N. pachyderma* (r) (w%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera.

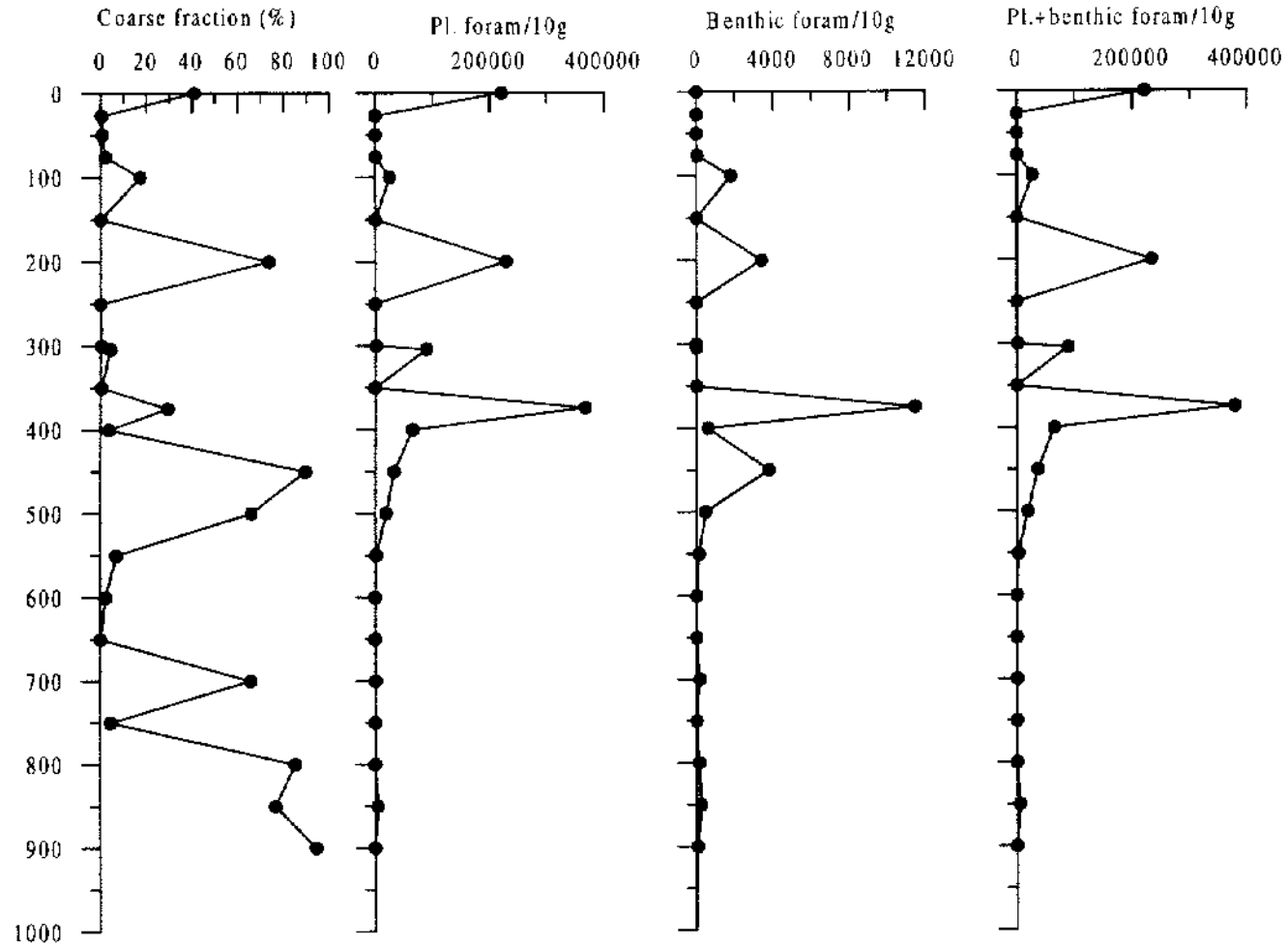


Fig. 3-5-4. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC-2.

(Table 3-5-2). 부유성/저서성 유공충의 비율은 코아의 하부구간 (700-850 cm)이 상부구간 (0-700 cm)에 비해 낮은 값을 보인다 (Fig. 3-5-5). 부유성/저서성 유공충의 비율은 코아의 상부구간 (0-700 cm)에서는 큰 변화폭을 보이지 않는다.

퇴적물 10 g 당 함유된 left-coiled *N. pachyderma*의 수는 9-259153 개체이며 right-coiled *N. pachyderma*의 수는 0-84856 개체이다 (Table 3-5-2). 코아의 하부구간 (500-900 cm)이 상부구간 (0-500 cm)에 비해 right coiled와 left-coiled *N. pachyderma*의 수가 매우 낮게 나타난다 (Fig. 3-5-5).

N. pachyderma 내에서 left-coiled *N. pachyderma*는 75-93%의 범위 내에서 나타나며 right-coiled *N. pachyderma*는 7-25% 범위를 차지한다. 총 부유성 유공충 중 left-coiled *N. pachyderma*는 73-89%의 범위를 차지하며 right-coiled *N. pachyderma*는 7-23%를 차지한다 (Table 3-5-2). *N. pachyderma*는 코아 깊이 당 큰 차이를 보이지 않으며 그들의 변화폭도 크지 않다 (Fig. 3-5-6).

다. 코아 MB99PC-3

수심이 2,435 m인 울릉도의 오른쪽 해역에서 채취되었다 (Fig. 3-4-1). 조립질퇴적물의 함량은 0.33-94.82% 이다. 방산충, 해면스피쿨, 화산재, 부석 등이 일부 코아 구간에 나타난다. 코아 깊이 100, 150, 200, 450, 650 cm 구간에서 조립질퇴적물의 상대적인 함량이 높는데, 이는 연습한 코아 구간에서 암석파편을 함유하고 있기 때문이다. 암석파편을 함유하지 않은 나머지 구간에서는 매우 낮은 조립질퇴적물의 함량을 보인다 (Fig. 3-5-7).

퇴적물 10 g 당 부유성 유공충의 수는 0-60444 개체이다 (Table 3-5-3). 특히하게도 부유성 유공충은 코아 깊이 200-250 cm에서 많이 나타나며 다른 구간에서는 거의 나타나지 않는다 (Fig. 3-5-7). 퇴적물 10 g 당 서서성 유공충의 수는 0-711 개체이다 (Table 3-5-3). 코아 깊이 200-250 cm, 450 cm, 650 cm 구간이 다른 구간에 비해서 많이 나타난다 (Fig. 3-5-7).

깨어진유공충의 상대적인 양 (%)은 매우 낮은 값을 보인다 (5-12%) (Table 3-5-3). 코아 깊이 650 cm부터 250 cm까지는 서서히 감소하는 경향을 보이며 250 cm부터 150 cm까지는 증가하는 경향을 보인다 (Fig. 3-5-8).

부유성/저서성 유공충의 비율은 70-100% 이다 (Table 3-5-3). 부유성/저서성 유공충의 비율은 코아 깊이 650 cm부터 350 cm까지 서서히 증가하며 350 cm부터

Depth(cm)	ODW(g)	>63 um	CF(%)	P(N)	Phr(%)	B(N)	P+B(N)	P/B(%)	Are	Ples	Pris	Ple(%)	Pri(%)	Plew(%)	Priw(%)
0-10	3.00	0.01	0.33	0	na	0	0	na	0	0	0	na	na	na	na
50-52	2.80	0.01	0.36	0	na	4	4	na	0	0	0	na	na	na	na
100-102	7.92	7.51	94.82	3636	5	242	3879	92	0	3192	444	89	11	89	11
150-152	4.43	1.30	29.35	767	12	63	831	93	0	641	108	85	15	83	15
200-202	7.20	6.15	85.42	60444	9	711	61156	98	0	46222	11378	77	23	72	21
250-252	9.31	0.42	4.51	36571	6	275	36846	99	0	30797	4950	87	13	84	13
300-302	5.34	0.01	0.19	86	na	6	92	na	0	58	26	na	na	na	na
350-352	5.63	0.07	1.24	194	na	0	194	100	0	128	50	72	28	66	25
400-402	4.83	0.05	1.04	112	na	6	118	na	0	85	23	na	na	na	na
450-452	13.84	12.65	91.40	3168	6	277	3445	92	0	2428	509	81	19	77	17
500-502	4.59	0.03	0.65	4	na	2	7	na	0	2	2	na	na	na	na
550-552	4.38	0.06	1.37	2	na	0	2	na	0	2	0	na	na	na	na
600-602	3.37	0.01	0.30	9	na	0	9	na	0	9	0	na	na	na	na
650-652	3.19	2.79	87.46	903	11	577	1480	70	0	702	201	71	29	69	28

Table 3 5-3. Down core values of several environmental parameters in core MB99PC-3. All abbreviations are shown in Table 3-5-1.

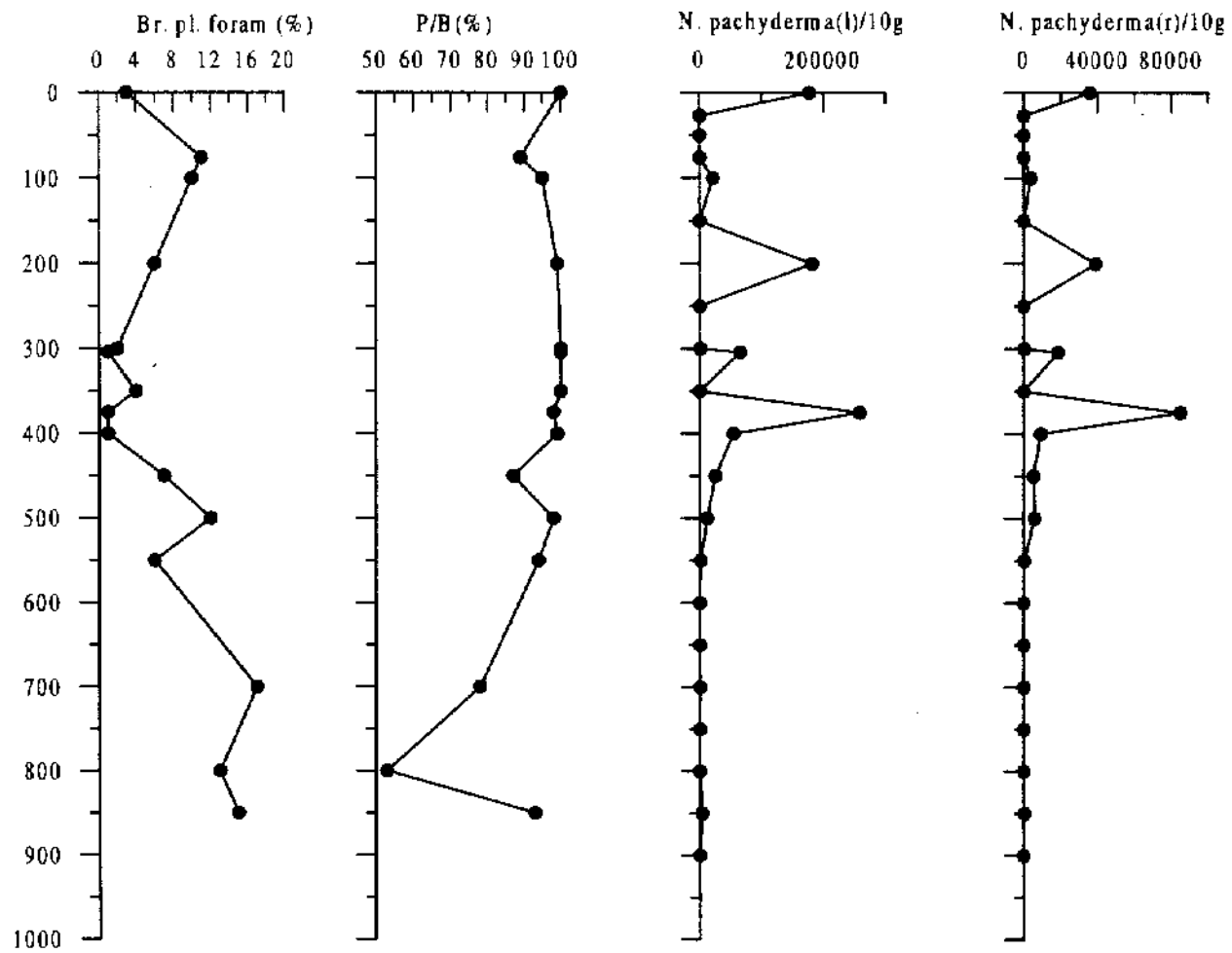


Fig. 3-5-5. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), and left- and right-coiled *N. pachyderma* in 10 g of dried sediment of core MB99PC-2.

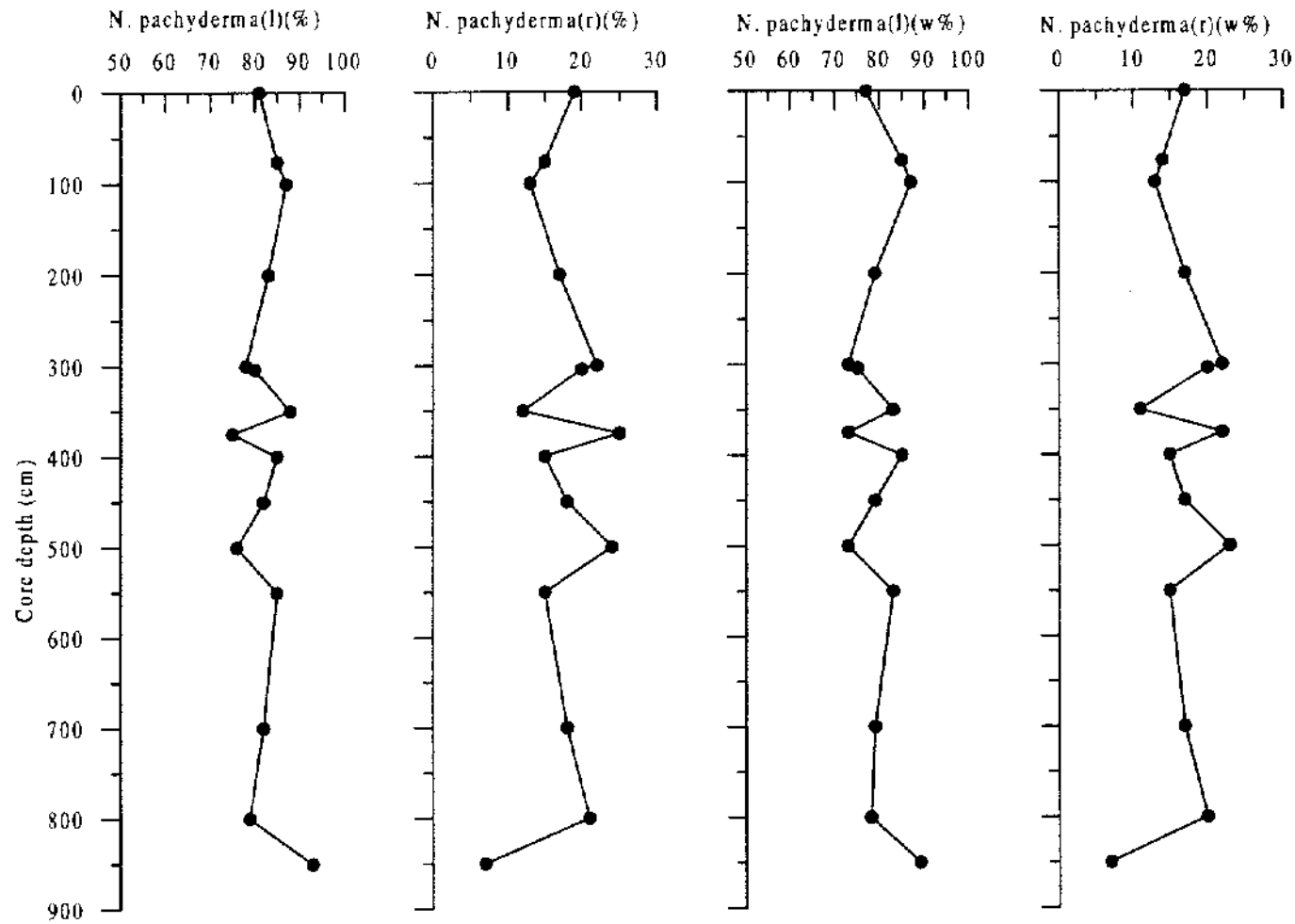


Fig. 3-5-6. Relative abundance of *N. pachyderma* in core MB99PC-2. *N. pachyderma* (l) (%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (r) (%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (l) (w%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera; *N. pachyderma* (r) (w%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera.

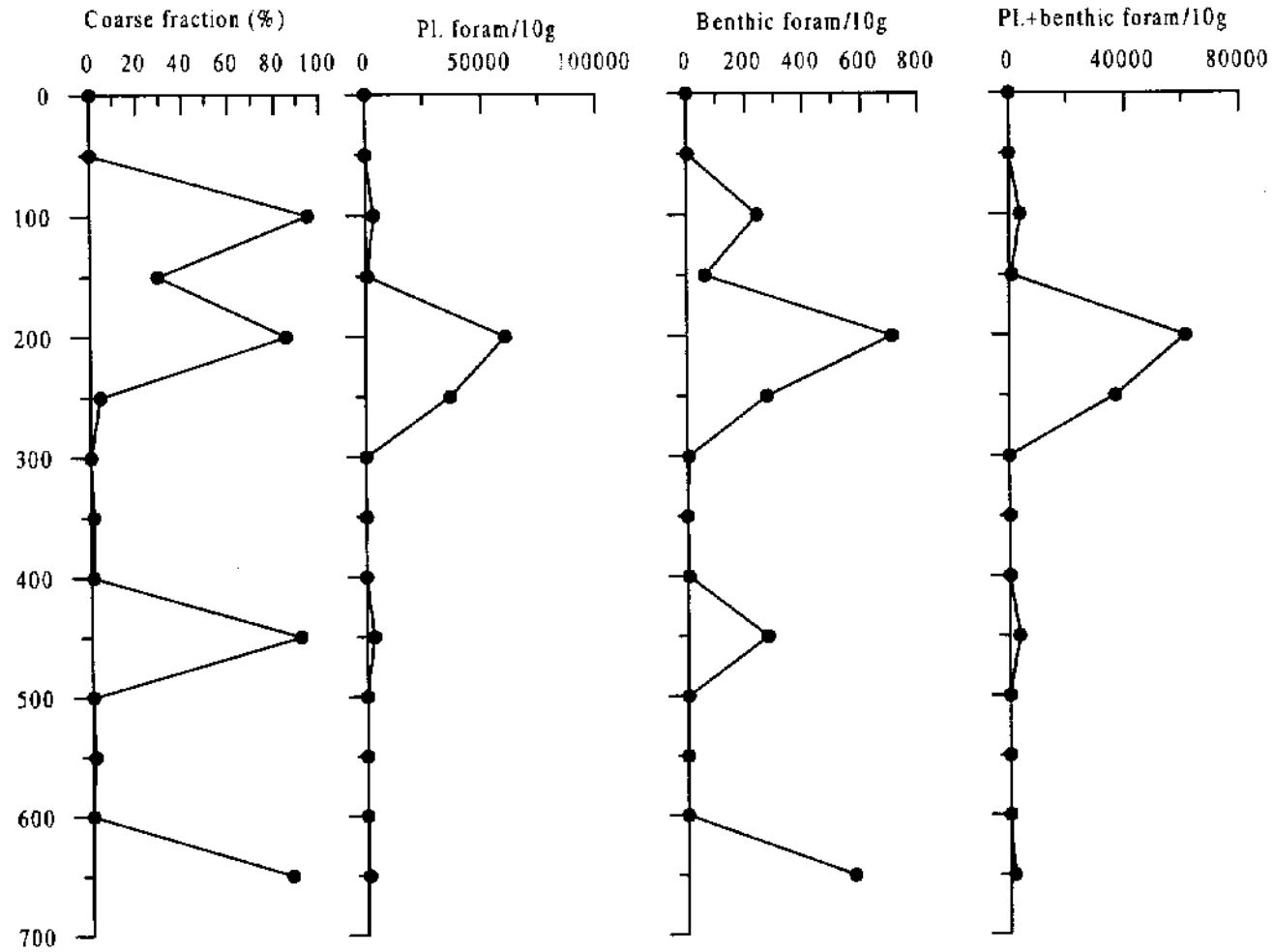


Fig. 3-5-7. Down core variations of coarse fraction (%), number of planktonic, benthic, and total foraminifera in 10 g of dried sediment of core MB99PC-3.

100 cm까지는 점차적으로 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 3-5-8).

퇴적물 10 g 당 left-coiled *N. pachyderma*의 수는 0-46222 개체이며 right-coiled *N. pachyderma*의 수는 0-11378 개체이다 (Table 3-5-3). 코아 깊이 200-250 cm에서 right coiled와 left coiled *N. pachyderma*가 가장 많이 나타난다. 다른 코아 구간에서는 거의 나타나지 않는다 (Fig. 3 5 8).

N. pachyderma 내에서 left-coiled *N. pachyderma*는 71.89%를 차지하며 right coiled *N. pachyderma*는 11.29%를 차지한다. 총 유공충 내에서 left-coiled *N. pachyderma*는 66.89%를 차지하며 right-coiled *N. pachyderma*는 11.28%를 차지한다 (Table 3-5-3). 코아 깊이 650-250 cm까지는 left-coiled *N. pachyderma*가 서서히 증가하며 250 cm부터 200 cm까지는 감소 그리고 200 cm부터 100 cm로 향할수록 서서히 증가하는 경향을 보인다 (Fig. 3-5-9).

4. 토의

본 연구는 50 cm 간격으로 시료를 분석하였으므로 시간간격이 비교적 큰 범위 내에서의 고환경 및 고기후 해석을 하였다. 고해양환경 및 고기후 연구시 먼저 선행되어야 할 사항은 퇴적물이 이동 되었는지의 여부와 퇴적물에 보존된 화석이 용해를 받았는지 혹은 수심이 다르거나 다른 환경으로부터 이동되어 퇴적되었는지의 여부를 가리는 것이 먼저 선행되어야 한다. 일반적으로 퇴적물의 이동 (저탁류 등)은 저서성 유공충의 종 조성, 부유성/저서성 유공충의 비율, 퇴적물 10 g 당 함유된 저서성 유공충의 수, 조립질퇴적물의 상대적인 양 등으로 알 수 있다.

일반적으로 저탁류의 영향을 받은 지역의 퇴적물은 퇴적물 10 g 당 저서성 유공충이 많이 나타나며 천해에 서식하는 저서성 유공충 종이 나타나며 조립질퇴적물의 함량이 상대적으로 많이 나타난다. 부유성 유공충은 수심이 깊어질수록 증가한다. 일반적으로 수심이 약 2000 m 이상인 심해는 부유성 유공충이 99%를 차지한다. 그러므로 저탁류의 영향을 받은 지역은 부유성/저서성 유공충의 비율이 상대적으로 낮게 나타난다. 또한 현미경 관찰시 퇴적물이 천해에서 심해로 이동된 지역은 식물 파편이나 천해에 서식하는 조개껍데기 등이 나타나기도 한다.

퇴적물에 함유된 미화석의 용해 정도는 고해양 고기후의 해석시 매우 중요하게 고려되어야 한다. 이유는 용해를 받은 퇴적물에 함유된 미화석에 의한 고환경 해석

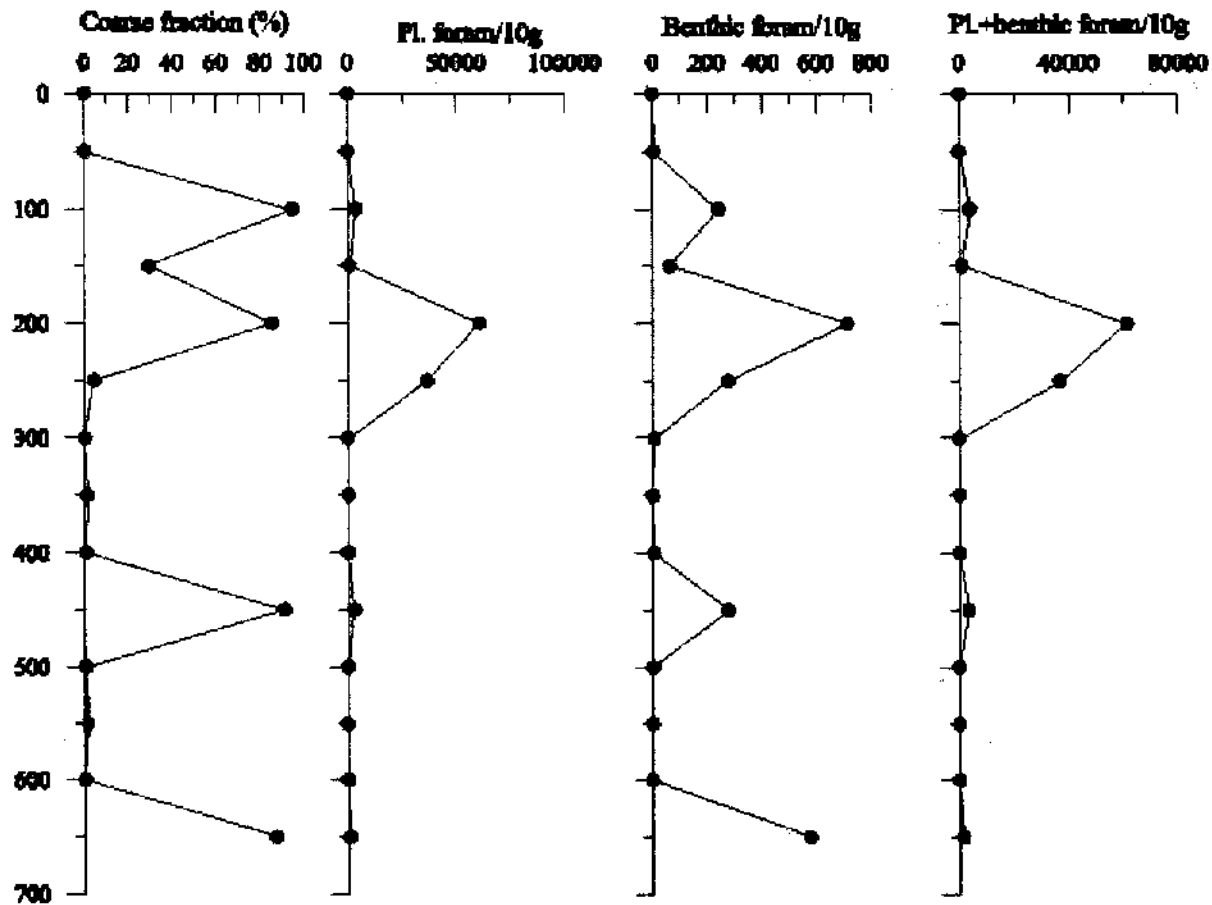


Fig. 3-5-8. Down core variations of broken planktonic foraminifera (%), planktonic/benthic foraminifera ratio (%), and left- and right-coiled *N. pachyderma* in 10 g of dried sediment of core MB99PC-3.

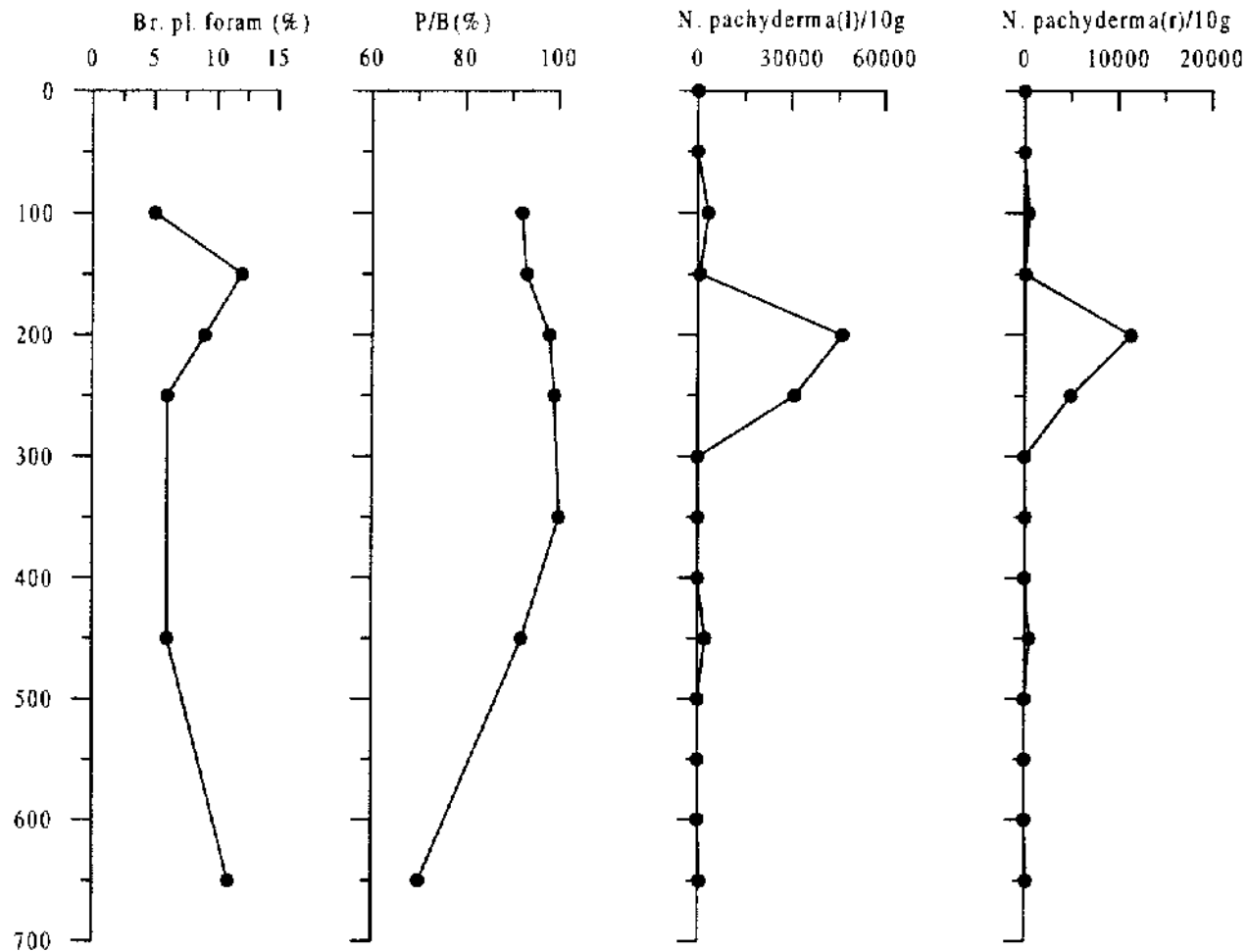


Fig. 3-5-9. Relative abundance of *N. pachyderma* in core MB99PC-3. *N. pachyderma* (l) (%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (r) (%)=percent of right-coiled *N. pachyderma* among 100 *N. pachyderma*; *N. pachyderma* (l) (w%)=percent of left-coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera; *N. pachyderma* (r) (w%)=percent of right coiled *N. pachyderma* among whole planktonic foraminifera.

은 중요한 해식의 오류를 범할 수 있기 때문이다. 일반적으로 용해 정도는 조립질 퇴적물의 상대적인 양, 부유성/저서성 유공충의 비율 및 깨어진 부유성 유공충의 상대적인 양으로 알 수 있다. 용해를 많이 받은 심해 지역의 퇴적물에서는 조립질 퇴적물의 상대적인 양이 낮게 나타난다. 또한 저서성 유공충이 부유성 유공충에 비해 용해에 매우 강하다. 그러므로 용해가 심한 지역의 퇴적물은 부유성/저서성 유공충의 비율이 낮으며 깨어진 부유성 유공충이 많이 나타난다. 용해를 많이 받지 않은 지역의 퇴적물에서는 유공충의 유생이 또한 많이 나타나기도 한다. 고해양연구시 서탁류의 영향 및 용해에 관한 중요성은 기존의 연구가들에 의해서 많이 연구되어 있다.

연구된 3개의 코아 모두 부석과 암석파편을 함유한 구간을 제외하고는 매우 낮은 조립질퇴적물을 함유하고 있다. 본 연구에서 사용된 3 개의 코아 퇴적물의 최상부 (0-2 cm)는 코아 MB99PC-1 (수심 1711 m)에서만 저서성 유공충이 나타나고 코아 MB99PC-2 (수심 2707 m)와 코아 MB99PC-3 (수심 2435 m)에서는 저서성 유공충이 나타나지는 않는다. 이는 수심이 깊은 곳에 위치한 코아 MB99PC-2와 MB99PC-3가 용해를 많이 받았음을 의미한다. 용해를 많이 받은 지역의 퇴적물은 조립질퇴적물의 상대적인 함량이 낮다 (Peterson and Prell, 1985). 본 연구지역에서 사용된 코아 중 수심이 깊은 두 코아 (MB99PC-2, MB99PC-2)는 조립질퇴적물의 함량이 매우 낮다 (Figs. 3-5-4 and 3-5-7). 이는 용해를 받았음을 의미한다. 코아 MB99PC-1에 의하면 부석을 함유한 구간을 제외하고는 낮은 조립질퇴적물의 함량을 보이며 큰 변화도 보이지 않는다 (Fig. 3-5-1). 이는 저층수의 흐름이 약했으며 강도의 변화도 크게 없었음을 의미한다.

퇴적물 10 g 당 함유된 부유성 유공충의 수는 몇몇 코아 깊이 구간에는 다른 코아 깊이 구간에 비해 많은 수를 보인다 (Figs. 3-5-1, 3-5-4, and 3-5-7). 특히 부석을 함유한 구간에는 일반적으로 많은 수의 부유성 유공충이 나타난다. 이에 대한 이유는 현재로는 알 수 없다. 하지만 가능한 가설은 부석에 함유된 실리카가 용해되어 실리카로 이루어진 플랑크톤이 변성하므로써 이를 먹고사는 유공충이 번성을 가늠할 수 있다. 부석이 나타나는 많은 코아 깊이 구간에는 실리카로 이루어진 규조가 나타나기도 한다. 하지만 이의 가설을 증명하기 위해서는 실리카로 이루어진 규조, 방산충, 및 헤면 스피쿨의 정량분석이 필요하다.

하지만 많은 수의 유공충이 부석이 나타나는 구간에만 많이 나타나는 것은 아니

다. 부석이 나타나지 않는 구간에서도 부유성 유공충이 많이 나타난다. 부유성 유공충이 많이 나타나는 구간에 부유성 유공충 *Globigerina bulloides*가 나타난다. *G. bulloides*는 용승작용이 일어나는 곳에서 많이 나타난다 (Curry et al., 1992; Thunell and Sautter, 1992). 그러므로 부유성 유공충이 많이 나타나는 구간은 용승작용으로 인하여 영양염을 많이 함유한 중층수가 용승작용을 하여 표층에 부유성 유공충이 잡지기 증가했을 것이다. 또한 코아 MB99PC-1은 수심이 비교적 다른 코아에 비해 낮은 관계로 모든 코아 구간에 걸쳐서 부유성 유공충이 나타난다. 다른 코아 구간은 코아의 하부에 부유성 유공충이 나타나지 않는데 이는 탄산염 보상심도의 깊이가 낮아졌거나 아니면 수심이 깊어서 용해되었기 때문이라 생각된다.

퇴석물 10 g 당 함유된 저서성 유공충은 코아 깊이당 꾸준히 나타나지 않고 몇몇 코아 구간에서 급격히 증가한다. 일반적으로 부유성 유공충이 많이 나타나면 저서성 유공충도 많이 나타나는 게 일반적으로 다른 대양에서 나타나는 특징이다. 하지만 본 연구에서 사용된 세 코아는 반드시 부유성 유공충의 수와 저서성 유공충의 수가 평행해서 나타나지는 않는다 (Figs. 3-5-1, 3-5-4, and 3-5-7). 저서성 유공충이 많이 나타나는 구간은 생산성이 높았기 때문이다. 하지만 왜 몇몇 구간에는 저서성 유공충의 수가 많이 나타나는지는 현재로서는 알 수 없다. 이를 위해 연구된 시료의 간격을 줄여서 자세히 연구를 해야한다.

부유성 유공충은 용해에 민감한 종과 용해에 민감하지 않은 종이 있다. 일반적으로 *Globigerina* 종류는 각이 얇기 때문에 각이 두꺼운 *Globorotalia* 보다 용해에 민감하다 (Arrhenius, 1952; Berger, 1967; Berger 1975). 부유성 유공충이 용해를 받기 시작하면 먼저 깨어지기 시작한다. 그러므로 깨어진 부유성 유공충의 상대적인 양은 저층수의 부식성 정도를 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공한다 (Berger, 1970; Thunell, 1976; Vincent and Berger, 1981).

본 연구에서 수심이 2,435 m에 위치한 코아 MB99PC-3의 깨어진 부유성 유공충의 해석은 제외했다. 이유는 많은 구간이 충분한 개체의 부유성 유공충을 함유하고 있지 않아서 150 μ m 보다 큰 입자에서 100 개체 이상의 부유성 유공충이 나타나지 않았다 (Fig. 3 5 8). 많은 수의 부유성 유공충이 나타나지 않는 이유는, 본 코아가 깊은 수심에 위치해 있는 관계로 부유성 유공충이 용해를 받았기 때문이라 생각된다.

또 다른 가능성은 동해의 시대별 탄산염 보상심도의 깊이가 자세히 연구되지는

않았지만 일반적으로 빙하기 때 탄산염 보상심도의 깊이가 깊어진다 (Oba et al., 1991). 예를 들어 오끼뱅크 부근의 시추코아 퇴적물에서 유공충은 약 30,000 년경에 수심이 3,000 m인 곳에서도 나타난다. 본 연구지역에서 연구된 세 코아의 방사성탄소 동위원소의 자료는 없지만 코아의 하부는 빙하기때 퇴적되었으리라 생각된다. 하지만 수심이 3000 m 이하임에도 불구하고 유공충이 나타나지 않는 이유는 본 연구지역이 Oba et al. (1991)이 연구한 지역보다 북쪽에 위치한 관계로 탄산염 보상심도의 깊이가 오끼뱅크 지역보다 얕았음을 시사한다.

위에서도 언급했지만 두 코아 (MB99PC-1, MB99PC-2) 퇴적물에 함유된 깨어진 부유성 유공충의 상대적인 양에 의해서 저층수의 부식성 정도와 변화를 설명하고자 한다. 코아 MB99PC-1은 코아 최하부 (850 cm)부터 약 500 cm, 그리고 코아 MB99PC-2는 코아 최하부 (850 cm)부터 약 400 cm까지 깨어진 부유성 유공충의 상대적인 양 (%)이 점차적으로 감소하는 경향을 보인다 (Figs. 3-5-2 and 3-5-5). 이는 코아 최하부 (850 cm)가 퇴적될 때부터 약 400-500 cm가 퇴적될 때까지 저층수의 부식성 정도가 점차적으로 감소하고 있음을 의미한다.

코아 MB99PC-2는 코아 깊이 약 300 cm 구간부터 약 100 cm 구간까지 깨어진 부유성 유공충이 서서히 증가한다 (Fig. 3-5-5). 이는 저층수의 순환이 활발해지며 부식성이 증가했음을 의미한다. 코아 MB99PC-1은 350-250 cm, 그리고 150-50 cm 구간에 깨어진 부유성 유공충이 서서히 증가한다 (Fig. 3-5-2). 저층수의 흐름 및 강도의 변화가 있었음은 기후 변화가 저층수의 흐름에 영향을 미쳤음을 의미한다.

부유성/저서성 유공충의 비율은 고수심이나 퇴적물의 이동 및 용해 정도를 지시하는 추적자로 사용되어져왔다 (Parker and Berger, 1971; Berger, 1968, 1973). MB99PC-1 코아의 50 cm 간격으로 연구한 결과에 의하면 퇴적물이 이동된 구간은 발견되지 않는다. 특히 코아 깊이 450 cm부터 코아 최상부까지는 부유성/저서성 유공충의 비율이 99% 정도 나타나는데 이는 전형적인 원양성 퇴적물의 특징이나 (Fig. 3-5-2). 코아 MB99PC-1에서 주목할만한 사실은 코아 하부 (900-500 cm)는 상부 (500-0 cm)가 퇴적되는 동안보다 부유성/저서성 유공충의 비율이 약간 낮다는 사실이다 (Fig. 3-5-2). 이는 아마도 코아 하부가 퇴적되는 동안 상부가 퇴적되는 동안보다 저층수의 부식성이 강했기 때문으로 생각된다. 코아 하부의 구간에서 깨어진 부유성 유공충이 많이 나타나는데 이는 코아 하부가 퇴적되는 동안 상부가 퇴적될 때보다 부식성이 강했음을 의미하는 또 다른 증거이다.

코아 MB99PC 2의 퇴적물도 상부구간 (500-0 cm)이 하부구간 (900-500 cm)에 비해 부유성/저서성 유공충의 비율이 높게 나타난다 (Fig. 3-5-5). 이는 상부 구간의 퇴적물이 이동되지 않은 원양성 퇴적물임을 의미한다. 코아 MB99PC-2의 최하부 부터 약 500 cm 코아 깊이까지는 부유성/저서성 유공충의 비율이 증가하는데 이는 저층수의 부식성이 약해지기 때문에 상대적으로 부유성 유공충의 보존 정도가 좋아 부유성/저서성 유공충의 비율이 증가하는 것으로 생각된다. 본 코아에서 또한 깨어진 부유성 유공충이 같은 구간에서 감소하는데 이는 위에서도 언급했듯이 저층수의 부식성이 약해짐을 의미하는 하나의 증거이다. 코아 MB99PC 3는 용해를 많이 받았기 때문에 해석에서 제외했다.

부유성 유공충 *N. pachyderma*는 기후에 의해서 민감하게 영향을 받는 종이다. 특히 left-coiled *N. pachyderma*는 right-coiled *N. pachyderma*에 비해 상대적으로 더 차가운 해수에 서식한다 (Jenkins, 1967; Kennett, 1968, 1970; Bandy, 1972; Ortiz and Mix, 1992; Thunell and Sautter, 1992; Park and Shin, 1998).

본 연구지역에서 퇴적물 10 g 당 함유된 *N. pachyderma*의 절대적인 수를 살펴 보면 전반적으로 차가운 표층수에 서식하는 left-coiled *N. pachyderma*의 수가 right-coiled *N. pachyderma*의 수에 비해 많이 나타난다. 이는 본 연구지역의 표층수가 상대적으로 따뜻한 물보다는 차가운 물의 유입이 우세했음을 의미한다. 또한 본 연구 지역의 특징 중의 하나는 어떤 구간에는 left- 및 right coiled *N. pachyderma*의 수가 주변구간에 비해 급격히 증가하는 구간이 있다. 이러한 구간은 또한 *Globigerina bulloides*가 나타난다. *G. bulloides*는 용승작용이 일어나는 지역에 풍부히 나타나는 종이다 (Curry et al., 1992). 그러므로 비이상적으로 *N. pachyderma*가 많이 나타나는 구간은 용승작용의 부분적인 영향이 있었으리라 생각된다.

*N. pachyderma*의 상대적인 양 또한 코아 깊이당 차이를 보인다 (Figs. 3-5-3, 3-5-6, and 3-5-9). 전반적으로 3 개의 코아 모두 최하부 구간부터 상부의 어느 구간 (코아마다 깊이가 다름)까지는 left-coiled *N. pachyderma*의 상대적인 양이 약간 증가하는 경향을 보인다. 이는 표층수가 점진적으로 차가워짐을 의미한다. 코아의 중간부분은 MB99PC 1과 MB99PC-2 코아가 큰 변화가 없으며 변화폭도 작다. 이는 코아의 중간부분이 퇴적될 때 표층수의 변화가 적었으며 안정된 표층수의 상태였음을 의미한다. 코아의 최상부는 left-coiled *N. pachyderma*의 상대적인 양이

감소하는데 이는 표층수가 따뜻해짐을 의미한다. 하지만 이의 결과는 50 cm 간격으로 분석한 자료이다. 보다 자세한 해석을 위해서는 시료의 분석 간격을 줄여서 미래에 해석할 예정이다.

5. 결론

1. 수심이 깊은 곳에 위치한 두 코아 (MB99PC-2, MB99PC 3)는 용해될 많이 받았다.
2. 실리카의 증가에 의한 생산성의 증가와 용승작용이 유공층의 생산성을 통제했다.
3. 저층수의 부식성은 코아 하부구간부터 약 코아의 중간부근까지가 퇴적될 동안 서서히 감소하는 경향을 보인다. 코아의 상부구간이 퇴적될 동안 저층수의 부식성은 증가하는 경향을 보인다.
4. 부유성 유공층 *N. pachyderma*가 풍부히 나타나는 구간은 용승작용이 활발했다.
5. 코아의 최하부 부터 상부로 향할수록 차가운 표층수가 존재하다가 표층수의 변화가 적은 안정된 표층수가 존재하는 기간을 지나 상대적으로 따뜻한 표층수로 바뀐다.

제 6 절 지화학분석에 의한 동해의 고해양환경 변화

대표저자 : 현상민 (한국해양연구소 해양지질연구단)

한상준 (한국해양연구소)

1. 서 론

동해는 전형적인 배호상분지 (back-arc basin)로, 4곳의 얕은 해협 (Tsugaru, Korea (Tsushima), Soya, Tatarskiy)으로 둘러싸인 반폐쇄적 해역이다. 이와 같은 동해의 고해양환경변동은 이와 같은 동해의 지형학적인 면과 빙기-간빙기 (glacial-interglacial) 동안의 해수면변동 (sea-level change)과 밀접히 관련되어 있는 것으로 보고되어 있다 (Oba et al., 1991; Tada et al., 1992). 즉, 배호분지의 동해는 평균수심이 100 m 이하인 한국 해협을 통한 쿠로시오의 지류인 쓰시마 난류의 유입여부에 따라 해양환경이 달라지고 있음이 지적되었다. 또한 중위도 지역에 위치하고 있어 편서풍에 의해서 인근대륙으로부터 대륙기원 물질이 비교적 용이하게 유입되는 해역으로, 퇴적물중의 대륙기원 물질조성이 빙기-간빙기를 통하여 변화했다 (Dersch and Stein, 1994). 따라서 동해분지의 주상시료 퇴적물은 생물기원 물질과 다량의 대륙기원 물질, 화산성 쇄설물 (pyroclastic materials)을 주로하는 전형적인 반위양성 퇴적물 (hemipelagic sediment)로 사료된다. 이러한 퇴적물은 퇴적속도가 비교적 높기 때문에 고분해 (high resolution)의 분해능력을 가지고 있어서 상세하고 연속적인 고해양환경 변화를 연구하는데 적합하다.

동해퇴적물은 기후변동 및 해양환경 변동을 연속적으로 기록하고 있으며, 이를 이용한 기후변동과 관계된 수많은 연구가 시행되어 왔다 (e.g., Park et al., 1997; Hyun et al., 1998; 한국해양연구소, 1996, 1997, 1998). 동해의 지형학적 특성과 빙

기- 간빙기를 통한 해수면 변동의 결과, 동해는 최후빙기 동안에 표층수와 심층수의 순환이 인근 태평양의 순환보다 활발하지 못한 것으로 보고되어 있다 (Yasui et al., 1967; Keigwin and Gorbarenko, 1992). 퇴적물 조성과 반복되는 퇴적양상 또한 저층환경이 산화-환원환경을 반복하여 왔음을 지시한다 (Bahk et al., 1997). 이러한 변화는 범 지구적인 기후변동과 밀접히 관련되어 있음이 보고되었다 (Oba et al., 1991; Tada et al., 1992; Hyun et al., 1998).

본 연구에서는 이와 같은 동해의 종합적인 고해양환경변화를 지구화학적인 측면에서 접근하고자 한다. 이를 위하여 한국해양연구소에서 실시한 “동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화연구”의 사업결과의 내용 중에서 최근까지 연구된 주상시료 퇴적물 중 지화학적 자료를 종합하였다. 현재까지 밝혀진 고해양환경 변화를 종합적으로 고찰함과 더불어 앞으로의 연구과제 등에 대해서도 토의하고자 한다.

2. 연구방법 및 재료

본 연구에서는 현재까지 밝혀진 기후변동과 해양환경변화를 더 정밀하게 파악하기 위하여 기존 자료에 '99년에 울릉분지간 통로에서 얻어진 새로운 자료를 추가하여 주상시료에 대한 분석자료를 추가하였다. 본 조사에 사용된 주상시료는 99PC-2, 98PC-4, 96PC 4, 95PC-4, 95PC-1 및 94PC-2로 총 6개의 주상시료가 검토되었다. 이들 주상시료 퇴적물은 울릉분지, 온누리분지, 한국대지를 포함하여 동해 전지역에서 얻어진 것으로서 공간적인 퇴적물 조성을 파악하고 고환경변화를 추적하는데 유효하다.

시추퇴적물에 대한 화학원소 (주요원소 및 미량원소)의 분석은 X-선 형광분석과 ICP를 이용하여 한국기초과학 지원센터에서 분석되었다. 시료는 20 40 cm 간격으로 취해졌으며 105°C에서 24시간 이상 건조한 다음 완전히 분말화 (powdered) 하였다. X 선 형광분석에 의한 주요원소의 분석은 분말화 한 시료를 다시 105°C에서 건조시킨 다음 주요원소 및 미량원소를 분석하였고, 일부 주상시료 (99PC-2와 98PC-4)는 ICP를 이용하여 기초과학 지원센터에서 분석하였다. '99년에 분석된 99PC-2 주상시료에서는 총 27 개의 시료에 대한 주요원소 및 미량원소가 분석되었

고, 98PC-4 주상시료 퇴적물에 대해서는 일부구간에 대한 주요원소 및 미량원소가, 그리고 94PC-2, 95PC-4에서는 X-선 형광분석에 의해 주요원소가 분석되었다.

본 연구의 토의에 사용된 유기탄소 및 탄산염 함량은 98PC-4의 기존 자료가 사용되었으며 이 자료는 CHN 분석기에 (Leco CHN-1000) 의해 분석되었으며, 분말화한 시료를 대상으로 총 탄소 (total carbon)를 측정 한 다음 1 N 염산으로 무기탄소 (inorganic carbon)를 제거시킨 다음 유기탄소 (organic carbon)가 측정되었다. 탄산염 함량은 총 탄소와 유기탄소를 측정 한 다음 함량차에 의해 계산하였으며 계산 방법은 한국해양연구소 (1988)를 따랐다.

3. 주요원소 및 미량원소의 결과

주요원소 및 미량원소는 퇴적물 중의 대륙기원 물질을 대변하는 원소이다. 이들의 함량은 탄산염과 유기물 등의 함량변화에 의해 조정되지만 주요원소 및 미량원소들간의 비 (ratio)를 검토해 봄으로써 퇴적환경, 공급지 및 기후변동과의 관계를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 “동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화연구”에서 현재까지 얻어진 6개의 주상시료 퇴적물 중의 주요원소 및 미량원소에 대한 자료를 가지고 검토해 보기로 한다.

가. 99PC 2 (울릉분지간 통로)

본 주상퇴적물에 대한 주요원소 및 미량원소의 함량과 최고값, 최소값 및 평균값은 Table 3-6-1에 표시하였다. 주요원소의 연직적인 분포변화에 근거하여 본 주상시료퇴적물은 4개의 지화학적 층서로 구분된다 (Fig. 3-6-1). 주요원소의 완만한 변화를 보이는 표층에서 약 150 cm까지, 그리고 급격한 함량변화를 보이는 심도 약 550 cm가 경계가 된다. 각 unit의 경계는 뚜렷한 Ca (%)의 증가로 특징 지을 수 있다. 즉, 생물기원으로 생각되는 탄산염함량의 공급에 의해 지화학적 층서가 구분되며 퇴적물 조성이 달라졌다고 생각된다. 탄산염함량이 현장에서 생성된 생물기원 물질임을 가정한다면, 일시적이고 짧은 기간내의 해양학적 변화 (events)가 일어났다고 예측 가능하다. 그러나 대표적인 보존성 원소인 Al (%), Ti (%), Mg (%) 등의 수직변화는 대체적으로 동일한 변화양상을 보이고 있어 본 주상시료 퇴적물의

Table 3-6-1. Analytical results of the major and minor elements concentration.

99PC-2	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Sr	Ba	Li	P	S	Sc	V
Depth(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
5	2.99	1.59	7.57	2.50	1.08	0.374	0.521	4.44	163	575	74.8	773	2084	14.0	107
15	3.04	1.74	7.99	3.15	0.54	0.403	1.025	4.86	158	628	80.0	739	1186	14.1	112
25	3.24	1.70	7.38	2.65	0.51	0.405	0.081	4.70	121	477	85.3	602	1807	14.9	109
50	3.20	1.71	7.58	2.88	0.69	0.419	0.064	3.95	122	450	80.7	602	7912	14.0	102
75	3.56	1.69	7.80	2.77	0.52	0.367	0.207	3.93	126	608	78.7	524	6406	14.5	113
110	3.46	1.54	7.05	2.40	0.55	0.388	0.058	4.10	122	438	92.3	624	15670	13.4	140
136	3.87	1.62	6.51	2.22	1.66	0.331	0.068	3.57	169	687	70.3	758	10091	13.1	213
140	3.21	1.89	7.80	2.48	0.77	0.413	0.084	4.09	137	487	79.1	620	6222	15.9	143
165	2.34	1.32	5.56	1.96	11.30	0.293	0.127	3.05	484	379	63.9	558	5275	10.4	76
170	3.50	1.92	7.97	2.89	1.03	0.422	0.120	4.72	150	500	85.4	598	6760	13.9	108
210	3.30	1.88	7.81	2.97	0.69	0.407	0.278	4.45	130	455	91.2	569	5620	14.6	104
230	3.36	1.86	7.51	2.49	0.56	0.403	0.240	4.75	128	428	88.3	592	7729	13.8	97
250	2.87	1.80	7.83	2.98	0.61	0.437	0.108	4.27	131	486	89.2	569	5727	15.2	111
283	3.11	1.95	7.57	3.04	1.40	0.414	1.582	4.86	160	446	78.9	928	12771	13.8	94
300	2.89	1.82	6.48	2.38	2.71	0.378	2.969	4.50	206	512	70.4	966	19138	12.5	107
364	2.52	1.55	6.31	2.53	6.41	0.357	0.115	4.61	294	546	54.2	606	24117	12.2	95
446	2.67	1.46	7.06	2.77	3.68	0.407	0.081	4.27	266	539	64.1	640	17982	12.0	90
555	2.55	1.80	7.49	2.78	2.85	0.418	0.077	4.11	213	531	70.0	592	7386	10.6	105
564	3.11	1.73	7.21	3.00	0.94	0.394	0.054	5.41	159	829	74.8	612	27009	11.7	205
609	1.98	1.18	4.55	1.37	11.91	0.243	0.081	5.02	524	202	48.8	569	34923	8.3	149
621	3.78	2.12	8.02	3.54	0.71	0.425	0.068	5.03	158	842	84.7	504	7353	15.1	145
640	3.13	1.81	7.70	2.98	0.55	0.386	0.080	4.34	138	927	84.9	415	5425	14.5	135
708	3.42	1.91	8.28	3.51	0.60	0.435	0.117	5.57	140	478	87.7	531	4701	14.2	107
730	2.63	1.82	7.69	2.78	0.49	0.437	0.118	4.83	124	512	89.4	498	8740	10.7	113
756	2.78	2.22	4.96	1.89	2.77	0.282	7.280	4.16	166	326	53.7	1242	11061	9.9	116
835	2.43	2.09	7.75	3.08	0.80	0.451	0.076	4.77	150	489	76.2	551	8674	10.7	128
922	3.04	1.79	8.24	3.36	0.74	0.415	0.069	4.43	142	603	79.7	470	6220	13.1	113
최대값	3.87	2.22	8.24	3.36	11.91	0.451	7.280	5.57	524	687	92.3	1242	34923	15.9	213
최소값	1.98	1.18	4.96	1.37	0.49	0.243	0.054	3.05	121	202	48.8	498	1186	8.3	76
평균값	3.04	1.76	7.25	2.72	2.11	0.39	0.58	4.47	184.48	533	76.91	639	10296	13.0	120

Cr	Zn	Zr	Co	Ni	Cu	Rb	Y	Nb	Mo	Cd	Cs	La	Ce	Pr
(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
70	142	95	22.23	54.12	47.01	118.82	20.76	5.20	3.67	0.22	9.53	32.90	69.50	8.19
73	113	88	23.15	52.59	51.19	126.70	20.67	5.15	4.45	0.14	10.47	32.65	70.20	8.14
69	120	89	10.92	40.55	39.45	125.54	21.09	5.24	0.89	0.20	9.55	34.18	67.78	8.47
71	116	91	13.40	50.75	38.89	114.19	19.58	5.24	6.32	0.87	8.56	32.01	63.09	7.62
65	112	109	23.86	79.05	50.20	128.66	20.25	6.27	5.69	0.38	9.79	33.72	68.80	8.02
72	103	101	12.70	46.85	45.56	107.00	19.24	6.85	21.39	3.14	7.79	30.05	61.18	7.32
73	141	119	21.01	58.91	89.00	98.50	24.93	5.94	3.40	1.36	7.58	30.43	61.66	7.41
70	104	104	19.74	49.08	56.02	124.04	24.81	6.18	2.83	1.60	9.84	38.23	80.55	9.51
47	70	79	20.54	32.44	35.89	89.95	22.96	4.77	1.14	0.25	7.07	30.33	61.50	7.38
65	108	159	16.95	37.07	61.38	118.91	25.96	10.86	1.84	0.41	9.06	42.20	86.39	10.40
69	101	99	14.53	35.75	36.55	130.22	22.26	5.76	1.91	0.18	9.45	35.29	70.42	8.51
67	97	95	21.17	45.53	34.45	108.84	22.03	5.08	4.15	0.18	8.63	31.43	64.54	7.95
76	102	106	15.51	41.52	49.46	85.92	19.91	7.16	3.14	0.21	9.22	23.78	53.36	6.79
65	90	97	16.45	37.64	31.72	114.07	24.80	5.14	4.65	0.33	8.46	34.72	70.89	8.51
73	91	91	18.28	47.94	38.98	98.91	25.70	5.40	14.25	1.24	7.42	37.88	73.05	8.98
58	82	95	22.77	40.33	40.74	101.58	23.35	4.95	36.26	1.29	7.65	34.88	68.30	8.52
61	87	143	16.31	36.22	35.16	106.45	21.60	10.09	38.02	1.14	7.20	38.48	71.36	8.81
67	89	133	17.11	39.26	41.33	117.64	24.39	8.49	6.94	0.34	8.93	39.69	77.85	10.09
75	134	106	15.98	59.97	70.39	90.74	18.49	5.65	83.38	13.14	7.55	26.52	55.08	6.72
47	79	61	20.73	52.47	36.44	73.42	27.91	3.45	58.54	4.03	5.69	24.36	52.36	6.05
72	110	99	23.15	56.29	46.02	127.18	22.83	5.23	4.78	0.50	10.09	36.92	76.78	8.94
70	115	100	21.94	63.04	54.95	105.79	19.42	5.19	2.20	0.17	9.61	29.27	63.16	7.43
68	95	164	17.54	35.04	39.35	127.51	25.46	11.23	3.41	0.26	8.56	42.14	83.12	10.25
76	100	100	19.52	44.60	40.18	115.56	21.06	5.94	5.49	0.27	8.95	32.93	65.93	8.43
61	75	84	22.53	43.49	39.01	83.78	33.46	6.02	8.16	0.71	6.16	44.09	84.44	9.92
76	99	118	20.97	45.61	46.26	125.19	22.99	7.19	4.70	0.22	9.50	36.47	76.01	9.75
62	99	260	10.51	32.38	35.60	138.89	24.55	19.07	2.65	0.32	9.37	51.10	101.08	11.89
75	141	260	23.86	79.05	89.00	138.89	33.46	19.07	83.38	13.14	10.47	51.10	101.08	11.89
47	70	61	10.51	32.38	31.72	73.42	18.49	3.45	0.89	0.14	5.69	23.78	52.36	6.72
67	103	111	18.50	46.61	45.60	111.26	22.98	6.77	12.38	1.23	8.58	34.69	70.31	8.52

Table 3 6-1. Continued.

Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Th	U
(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
27.33	5.57	1.29	0.80	4.77	4.41	0.73	2.26	0.33	1.98	0.31	36.19	11.8	2.3
27.98	5.40	1.22	0.85	4.69	4.56	0.75	2.26	0.30	2.03	0.32	35.57	12.3	2.3
27.72	5.18	1.22	0.74	4.60	4.21	0.72	2.07	0.30	1.96	0.29	28.76	11.4	2.0
25.91	4.81	1.06	0.75	4.26	4.03	0.67	2.10	0.28	1.77	0.27	24.01	11.5	5.4
26.81	5.26	1.18	0.78	4.55	4.15	0.72	2.18	0.28	2.00	0.30	34.10	12.0	3.3
23.89	4.44	0.99	0.65	3.96	3.57	0.61	1.84	0.27	1.62	0.26	21.78	10.5	6.8
24.88	5.25	1.17	0.79	4.59	4.70	0.84	2.69	0.37	2.45	0.39	27.68	10.3	6.5
32.36	6.49	1.37	0.89	5.53	5.12	0.86	2.43	0.34	2.11	0.32	31.03	12.3	5.9
25.11	5.22	1.11	0.82	4.82	4.61	0.82	2.44	0.32	2.00	0.31	24.79	9.5	2.9
34.22	6.43	1.35	0.95	5.66	5.09	0.89	2.59	0.36	2.27	0.33	31.47	13.7	3.0
28.58	5.43	1.22	0.79	4.75	4.41	0.76	2.13	0.31	1.92	0.31	26.24	11.5	2.9
26.90	5.17	1.23	0.76	4.60	4.21	0.75	2.27	0.31	1.89	0.28	24.58	11.2	2.8
24.72	4.93	1.20	0.74	4.46	4.49	0.79	2.23	0.31	2.12	0.31	27.83	10.1	3.1
29.31	5.50	1.24	0.81	4.97	4.46	0.74	2.28	0.32	2.15	0.32	22.89	11.2	2.8
30.62	5.78	1.31	0.79	5.32	4.70	0.84	2.43	0.35	2.09	0.33	22.04	10.9	5.2
28.64	5.35	1.21	0.79	4.84	4.38	0.76	2.21	0.31	1.98	0.29	20.43	10.2	5.8
28.06	5.30	1.23	0.73	4.51	4.19	0.69	2.09	0.30	1.81	0.28	20.58	11.1	5.6
31.97	6.09	1.30	0.84	5.06	4.69	0.81	2.33	0.33	2.09	0.33	24.54	11.8	4.8
22.60	4.58	1.11	0.66	3.69	3.57	0.62	1.86	0.27	1.69	0.25	24.59	9.3	8.2
21.51	4.56	0.96	0.75	4.54	4.44	0.89	2.65	0.38	2.40	0.38	15.17	7.4	26.0
30.65	5.87	1.39	0.85	5.11	4.67	0.76	2.32	0.31	1.90	0.29	33.79	11.9	4.7
25.54	5.22	1.33	0.78	4.81	4.50	0.79	2.13	0.30	1.94	0.29	37.07	11.0	3.4
32.77	6.23	1.24	0.87	5.37	4.88	0.83	2.50	0.36	2.17	0.34	23.63	12.8	3.5
27.18	5.27	1.19	0.73	4.35	3.99	0.73	2.09	0.29	1.88	0.28	24.22	11.0	3.4
33.00	5.89	1.29	0.93	5.67	5.15	0.96	2.88	0.39	2.40	0.37	16.69	8.5	3.9
31.30	5.96	1.28	0.84	5.04	4.60	0.78	2.32	0.32	2.09	0.32	27.69	12.0	3.1
36.15	6.35	1.25	0.87	5.25	4.92	0.85	2.33	0.34	2.28	0.33	25.61	15.0	3.5
36.15	6.49	1.39	0.95	5.67	5.15	0.96	2.88	0.38	2.45	0.39	36.19	15.0	26.0
21.51	4.44	0.96	0.65	3.96	3.57	0.62	1.84	0.27	1.62	0.25	15.17	7.4	2.3
28.36	5.46	1.22	0.80	4.81	4.47	0.78	2.29	0.32	2.04	0.31	26.41	11.2	4.93

Table 3-6-1. Continued.

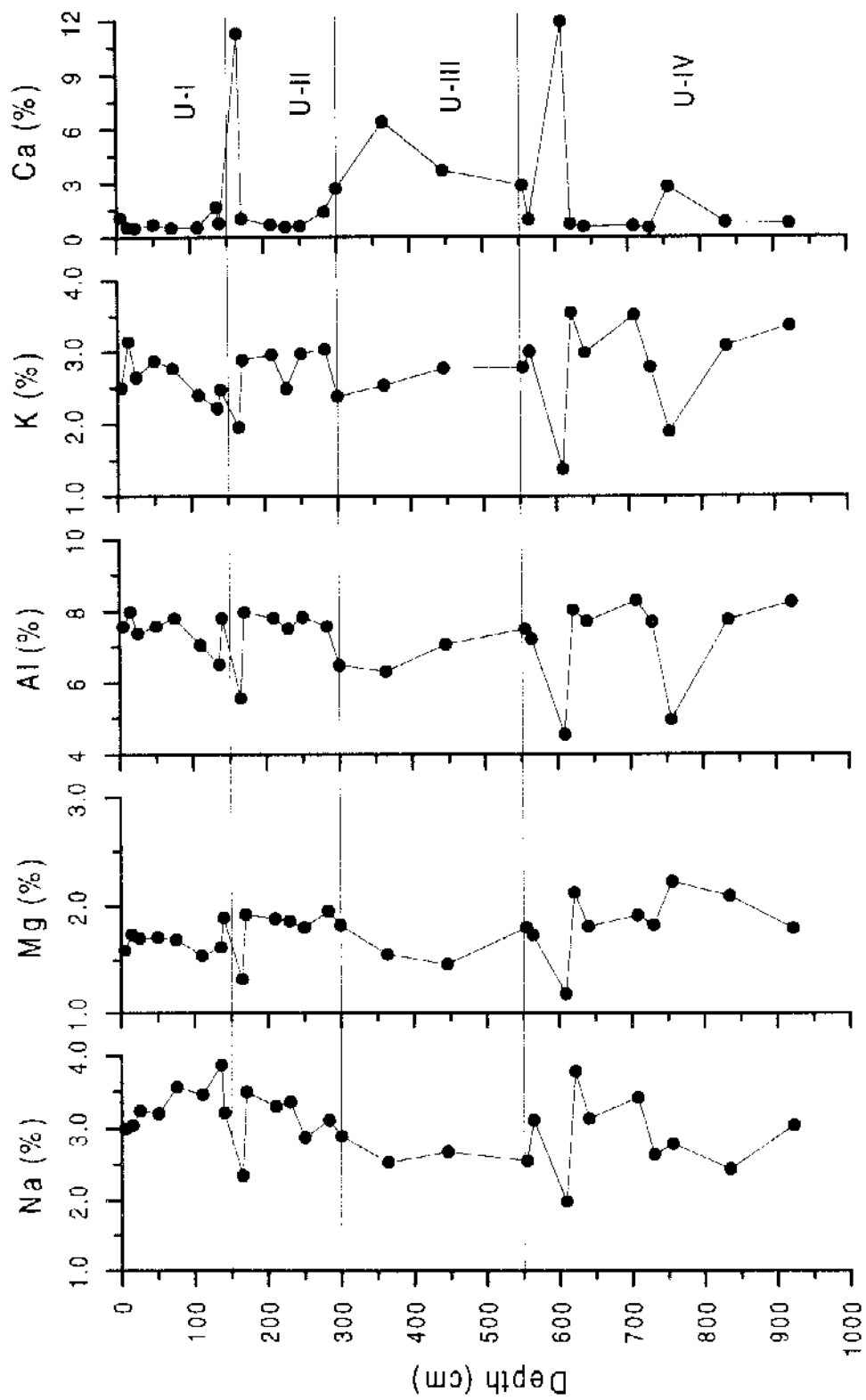


Fig. 3-6 1. Vertical profiles of major elements at core 99PC-2.

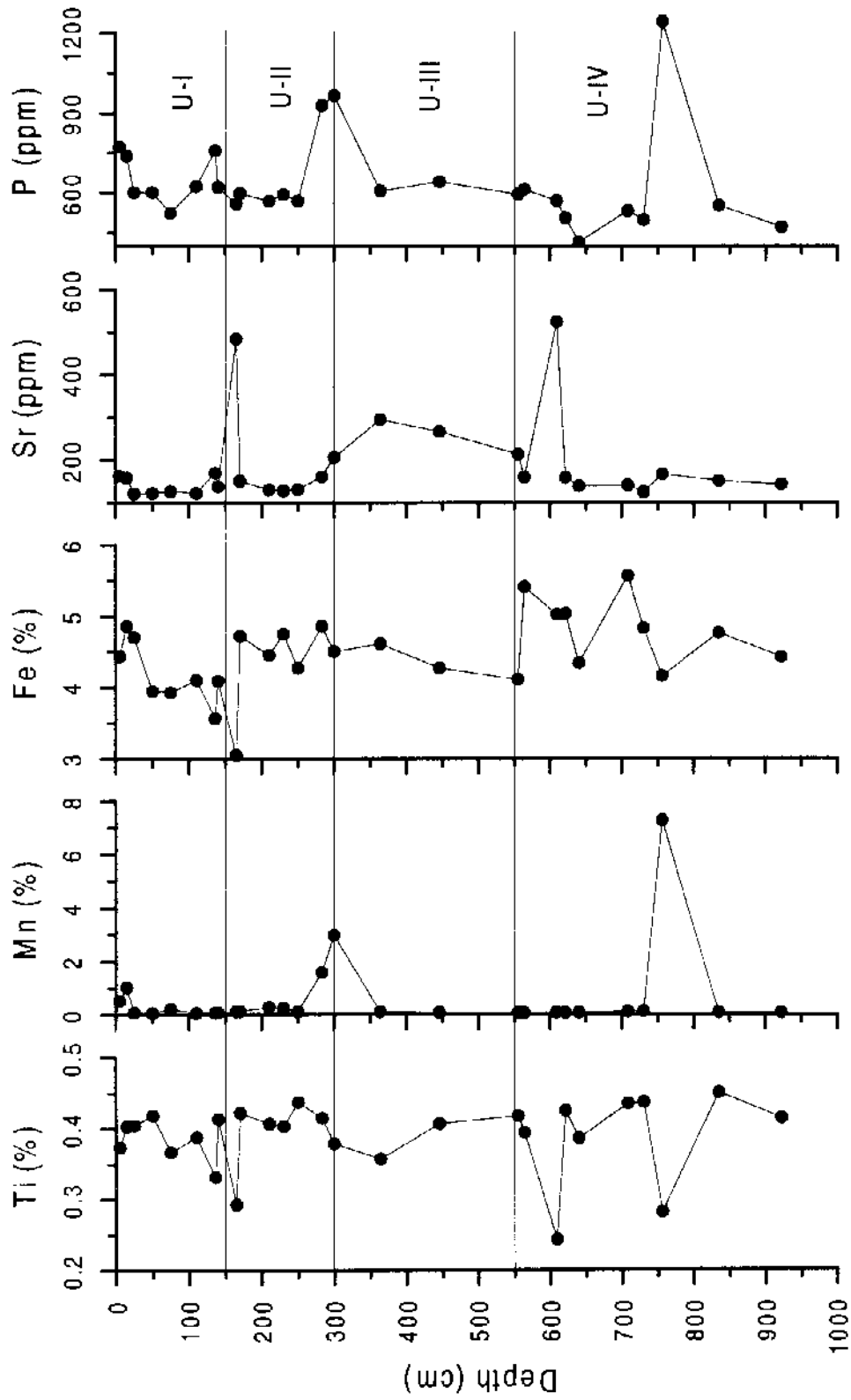


Fig. 3-6-1. Continued.

연식변화는 대륙기원 퇴적물의 조성에 따라 변화하는 것으로 해석된다. 연 상태에서 이러한 대륙기원 물질의 유입경로가 확실하지 않기 때문에 유기물 분석을 통한 퇴적물조성 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요하다.

전형적인 대륙원소간 (TiO_2 (%) and Al_2O_3 (%))의 비 (ratio)는 Fig. 3-6-2에 보이기듯이 다소 복잡한 변화를 보이고 있다. 그러나 큰 폭의 변화를 보이면서도 주요원소 자체의 연직분포에 의한 지화학 총서구분과 대체적으로 일치하고 있다. 풍화지수는 unit 1에서는 하부쪽으로 약간 감소하는 경향을 보이며 그 외 다른 unit들에서는 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 특히 탄산염 함량이 급격히 증가한 심도에서는 낮은 풍화지수의 값을 보이고 있다. 최상부 unit 1에서는 풍화지수 및 $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ 의 점진적 감소, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 및 $\text{Na}_2\text{O}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 점진적인 증가로 특징 지을 수 있어 보다 뚜렷한 변화양상을 보여주고 있다.

나. 98PC 4 (후포뱅크 대륙사면)

유기물 및 탄산염의 분석결과 (추후 논의), 98PC 4는 심도 700-800 cm에서 뚜렷한 변이점 (switching point)를 보이고 있다 (Fig. 3-6-3). 이 뚜렷하게 변화하는 지점을 좀더 세밀하게 파악하기 위하여 이 구간 변이점 부근의 퇴적물에 대해 추가로 주요원소 및 비량원소가 분석되었으며 그 분석결과는 Table. 3-6-2에 표기하였다. 주요원소의 분석결과 원소 함량 변화의 경계는 유기물에 의한 경계화는 잘 일치하고 있음이 나타났다 (Fig. 3-6-3). 보존성원소간의 비인 대륙기원 원소간의 비 ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)에 의한 변화와 풍화지수도 이 경계에서 뚜렷한 변화가 나타나고 있다. 650 cm 이상의 심도와 830 cm 이하의 심도에서는 지화학적 원소 분석이 이루어지지 않아 평가하기는 무리가 있으나 최소한 상부부분에는 그리 심한 변화를 보이지 않을 것으로 기대된다. 이러한 변화는 주상시료퇴적물이 채취된 지점이 후포뱅크의 대륙사면으로, 높은 퇴적률 때문인 것으로 생각된다. 본 주상시료 퇴적물에 대한 테프라 층서를 조사한 결과 심도 약 706-723 cm에 연대 9,300 yrBP인 올랑-II 테프라 층이 존재하는 것으로 보고되어 있다 (한국해양연구소, 1998). 또한 본 주상시료 퇴적물은 수심이 199 m인 지점에서 채취되었으며 올랑-II 테프라 층을 경계로 상하의 퇴적양상이 약간 달라지는 것으로 보고되었다 (한국해양연구소, 1988). 따라서 상부 unit의 퇴적물은 홀로세 동안에 퇴적된 것으로 판단되며 육지와 비교적 가까운 지역이므로 퇴적률이 높게 나타나고 있다. 그러나 심도 약 720 cm를 경계로 변

Depth(cm)	Na(%)	Mg(%)	Al(%)	K(%)	Ca(%)	Ti(%)	Mn(ppm)	Fe(%)	Sr(ppm)
645	2.52	1.51	7.01	2.77	3.11	3982	349	3.86	237
675	2.28	1.5	7.33	2.82	3.2	4134	346	4.03	234
705	2.4	1.5	7.37	2.75	3.27	4038	332	3.84	243
730	2.59	0.98	6.28	2.7	1.67	4108	314	3.24	184
760	2.41	1.05	7.05	3.03	2.08	4100	307	3.08	237
790	2.38	0.88	6.44	3.11	0.93	2215	265	2.56	195
810	2.19	0.73	6.4	3.24	0.83	3116	233	2.15	199
830	2.36	1.12	7.35	3.36	0.98	4058	297	3.21	195

Depth(cm)	Ba(ppm)	Li(ppm)	P(ppm)	S(ppm)	Sc(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Zn(ppm)	Zr(ppm)
645	329	78.3	577	7664	12.7	84	71	95	78
675	345	81	613	9670	13	84	69	95	82
705	360	80.1	615	7725	12.8	82	65	90	78
730	361	70.5	535	8586	8.8	69	54	76	76
760	491	52	544	6985	10.2	64	48	58	99
790	512	48.6	462	4922	9	51	44	53	85
810	538	44.5	414	3089	7.9	49	39	49	80
830	539	63	516	5317	10.1	71	54	64	86

Depth(cm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)	Rb(ppm)	Y(ppm)	Nb(ppm)	Mo(ppm)	Cd(ppm)	Cs(ppm)
645	12.43	40.95	31.48	91.85	17.35	7.06	4.95	0.41	7.53
675	12.09	39.68	31.47	114.99	17.97	4.87	4.29	0.4	7.84
705	12.42	40.04	33.82	114.85	18.01	5.08	3.71	0.31	7.87
730	8.53	27.28	28.22	49.07	10.76	4.98	2.07	0.36	3.91
760	7.96	20.84	24.26	110.29	17.43	5.12	1.34	0.3	5.02
790	6.42	18.88	17.94	110.32	18.44	3.04	0.7	0.22	4.93
810	5.42	15.2	17.79	110.29	17.29	4.03	1.46	0.2	4.29
830	8.07	22.1	23.29	125.66	20.27	5.07	1.83	0.21	6.01

Depth(cm)	La(ppm)	Ce(ppm)	Pr(ppm)	Nd(ppm)	Sm(ppm)	Eu(ppm)	Tb(ppm)	Gd(ppm)	Dy(ppm)
645	27.34	54.92	6.93	23.01	4.51	0.96	0.62	3.82	3.52
675	30.58	60.91	7.52	25.13	4.73	1.01	0.63	3.8	3.68
705	31.14	61.3	7.64	25.16	4.95	0.93	0.66	3.8	3.48
730	14.64	31.74	4.07	14.3	3.11	0.72	0.44	2.57	2.5
760	34.99	68.82	8.64	28.53	5.35	1.07	0.69	4.13	3.41
790	38.16	76.13	9.76	31.48	5.96	1.1	0.75	4.55	3.83
810	38.65	77.66	10.29	32.37	6.12	1.04	0.74	4.8	3.74
830	41.35	81.75	10.53	33.96	6.51	1.18	0.82	5.19	4.1

Depth(cm)	Ho(ppm)	Er(ppm)	Tm(ppm)	Yb(ppm)	Lu(ppm)	Pb(ppm)	Th(ppm)	U(ppm)
645	0.6	1.8	0.24	1.61	0.24	18.74	10.8	4.2
675	0.61	1.69	0.24	1.57	0.24	19.48	11.2	4.1
705	0.56	1.73	0.24	1.45	0.23	19.73	11.4	3.8
730	0.42	1.27	0.19	1.2	0.18	19.32	7.71	2.81
760	0.57	1.72	0.21	1.43	0.21	17.3	11.4	3.2
790	0.61	1.86	0.22	1.47	0.24	19.16	13.5	3.2
810	0.59	1.64	0.23	1.38	0.21	21.47	14.4	3.2
830	0.66	1.88	0.26	1.59	0.26	21.13	14.2	3.5

Table 3 6 2. Analytical results of major and minor elements at the core of MB98PC-4

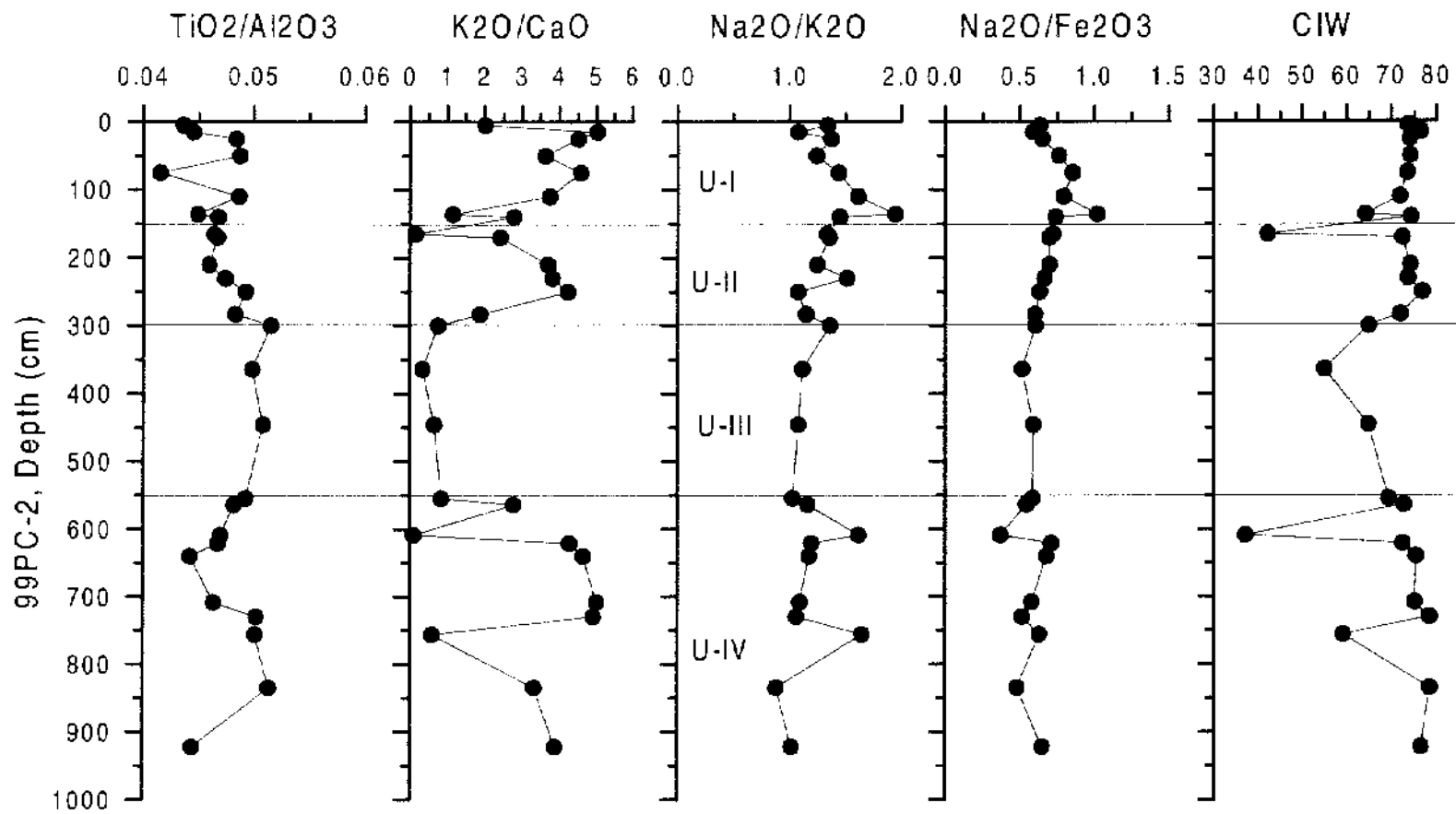


Fig. 3-6-2. Vertical profiles of the representative major elements ratios at core 99PC 2.

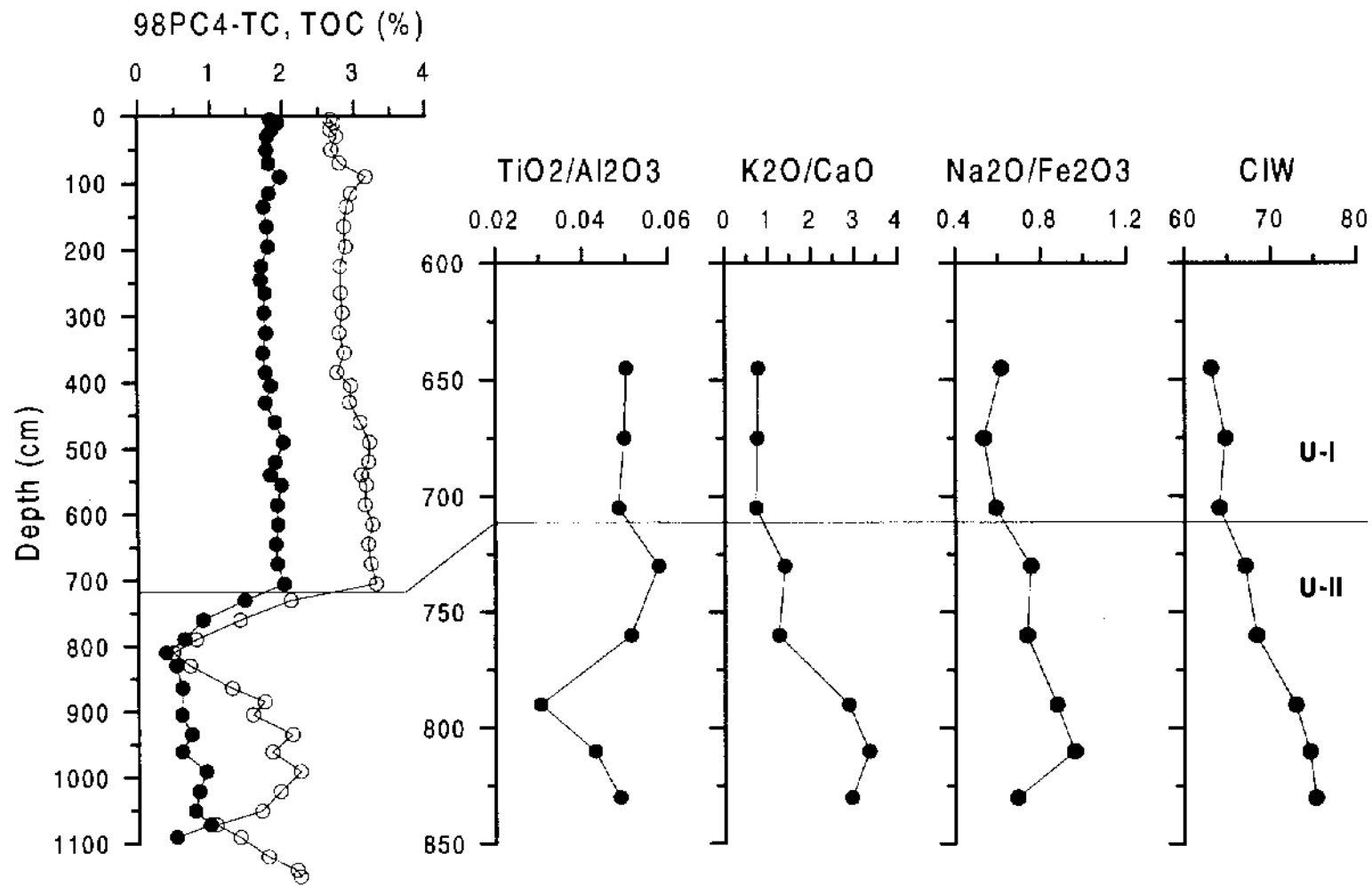


Fig. 3 6-3. Major elements ratios and total organic carbon, total carbon vertical profiles at core 98PC-4.

화하는 퇴적물 조성 및 주요원소간 비의 변화, 풍화지수의 점진적인 증가 등은 해양환경의 변화와 결부된 것으로 생각된다. 이 시기는 아마도 빙기에서 간빙기로의 전이기 (transitional period)로 생각되어 해수면변동 등 급격한 해양환경의 변화가 수반된 결과 주요원소 및 유기물의 수직적인 변화가 일어났으리라 생각된다.

다. 96PC-4 (한국대지 남단)

본 주상시료 퇴적물은 한국대지 남단의 수심 1413 m의 해저산 정상에서 채취되었다. 따라서 분지긴룡로 등과 같은 곳에서 보다 지탁류 등에 의한 퇴적물의 재동이 상대적으로 미약할 것으로 기대되는 곳이다. 그러므로 본 채취지점에서는 원양성 퇴적작용이 우세하여 평균적인 해양환경 변동을 잘 반영하고 있을 것으로 기대된다.

Fig. 4에 보여지듯이 주요원소의 연식적인 변화는 크게 3개의 unit로 구분 가능하며, 각각의 경계는 심도 350 cm와 심도 550 cm에서 나타나고 있다. 보존성 주요원소 (TiO_2/Al_2O_3)의 비는 심도 약 380-560 cm 구간에서 감소한다 (Fig. 3-6-4). 이 구간은 다른 주요원소의 비 변화에 있어서도 뚜렷한 차이를 보여주고 있다. 전체적으로 지화학 총서는 크게 3개의 units로 구분이 가능하며, 본 주상시료에 대한 탄산염과 유기탄소를 측정된 결과 탄산염 함량은 최고 20%에서 0%까지 극단적인 변화를 보이고 있다 (한국해양연구소, 1997). 탄산염 함량이 높은 곳은 유공충 등이 잘 보존된 층으로서 이와 같은 현상은 해양환경의 변화로 추정된다. 현재까지 본 주상시료에 대한 산소동위원소는 분석되지 않았다. 기존의 연구결과 본 주상시료에서 9300 yr BP를 지지하는 울릉-II 테프라층은 심도 약 50 cm에서 나타나고 있는 것으로 보고되어있다. 이러한 사실을 인용한다면, 최상부층의 분석된 시료 1개는 홀로세 퇴적물임을 지지하고 있다. 화학원소간의 비와 풍화지수가 최상부층의 시료와는 다른 양상을 보이는 것은 이와 같은 사실을 대변하고 있다. 또한 이와 같은 사실로 본 주상시료의 퇴적물이 매우 낮음을 알 수 있다. 연대 약 23,000년을 지지하는 AT 회산재 층서가 심도 약 100 cm에 나타나고 있는 것은 매우 느린 퇴적속도를 지지하고 있다. 주상시료의 채취지점이 해저산인 점을 고려한다면, 본 주상시료의 퇴적물은 고해양 환경 연구에 매우 유의한 정보를 제공하리라 생각된다. 또한 매우 낮은 퇴적률과 K_2O/CaO 의 비변화에 근거한다면, 심도 약 400 cm에 나타난 변화는 산소동위원소 stage 5를 지지할 가능성도 배제 할 수는 없다. 따라서 본 주상시료를

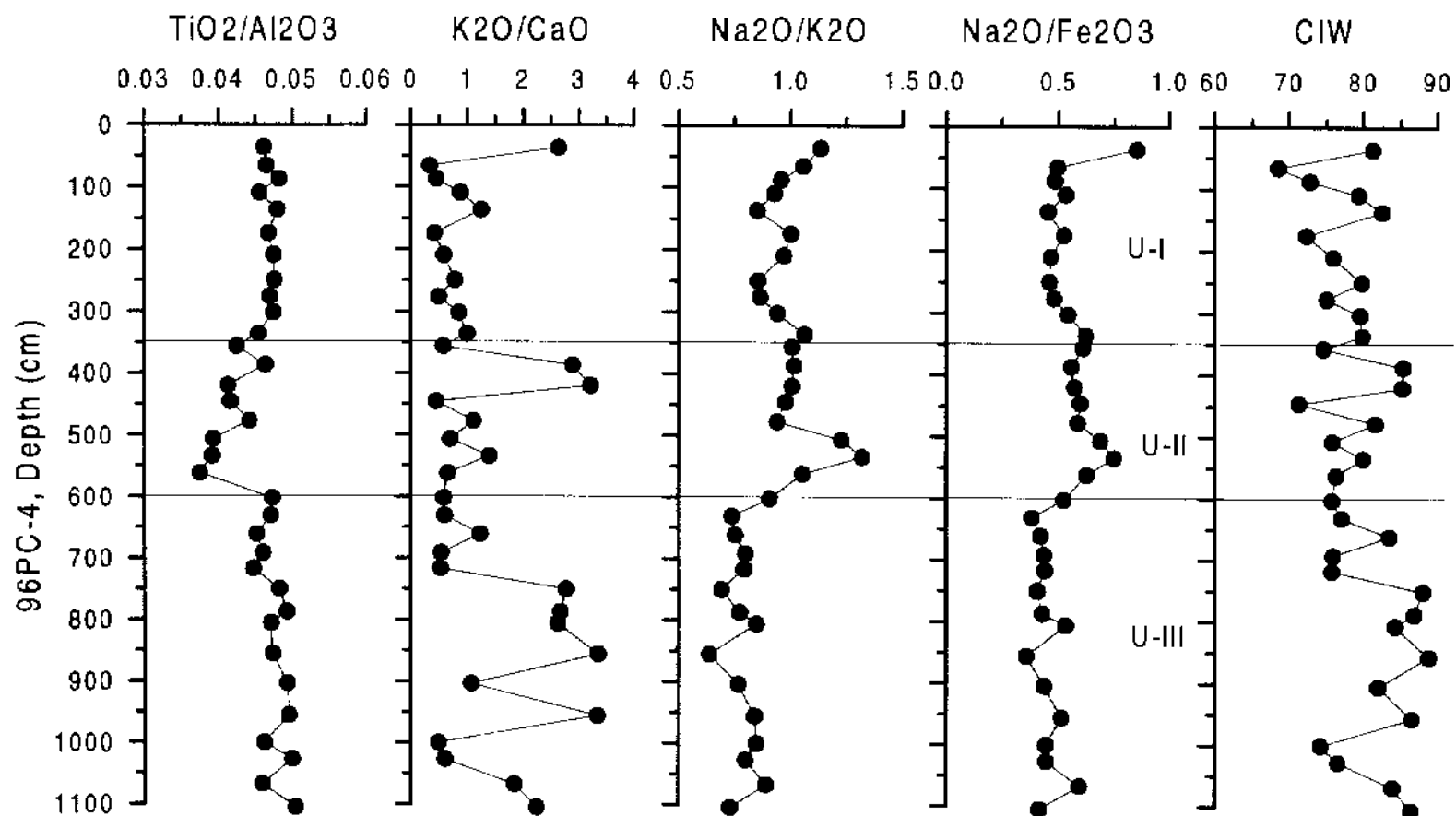


Fig. 3-6-4. Vertical profiles of major elements ratio at 96PC-4.

좀더 세밀하게 (high resolution) 분석하여 연구할 필요가 있다.

라. 95PC-4 (울릉분지 중앙)

본 주상시료 퇴적물은 울릉분지 중앙의 분지평원 수심 2197 m에서 얻어진 퇴적물로서 지화학적원소의 변이에 근거하여 뚜렷한 2개의 unit로 구분이 가능하다 (Fig. 3-6-5). 두 지화학적 층서의 경계는 심도 약 250 cm에 나타나고 있으며 그 상부는 보존성원소 비가 하부쪽으로 완만하게 감소하며, 그 하부는 거의 일정한 변화를 보인다. 본 주상시료는 심도 224 cm에 울릉-II 데프라 층이 나타나며, 그리고 심도 250, 290 cm에서 탄소동위원소 연대가 각각 14.86 ka, 15.09 ka로 측정되었다. 그리고 심도 약 593 cm에 AT 화산재 (연대 약 22 ka) 존재한다 (한국해양연구소, 1996; Hyun et al., 1998). 따라서 주요원소가 완만히 감소하는 unit I은 홀로세의 퇴적물임이 거의 확실하다. 즉, 울릉분지 중앙 분지평원에 있어서도 한국내지의 현상처럼 홀로세 퇴적물과 그와 다른 연대의 퇴적물에 대한 구분이 지화학적 성분변화에 의해 구별되었다. 시추퇴적물의 퇴적학적 연구에 의하면, 상부층 286 cm까지는 생물교란 (bioturbation)된 지토가 우세하게 나타나고, 하부층은 사질니렁이 반복하여 나타나는 것으로 보고되었다 (한국해양연구소, 1996). 동해에 있어서의 탄산염보상심도는 2000 m 이하로 보고되는 만큼 본 주상시료가 채취된 지점은 탄산염보상심도 보다 깊은 곳에 위치하고 있다. 탄산염 및 유기탄소의 값이 큰 폭으로 변화하는 것 (한국해양연구소, 1996)은 고해양학적인 현상과 깊이 관계되는 것으로 사료된다. 수직적인 화학적 풍화지수의 뚜렷한 변화 (unit I의 경계)와 작은 폭의 변화는 이러한 현상을 반증하는 것이라 사료된다.

마. 95PC-1

대표적인 주요원소의 비가 Fig. 3-6-6에 표시되었다. 본 주상시료는 울릉분지의 최남단수심 1634 m에서 채취되었다. 이 지역은 쿠로시오 해류의 지류인 쓰시마 난류 (Tsushima warm current)가 유입되는 지역으로 다른 지역에 비해 고 환경변화를 잘 기록하고 있는 지점으로 사료된다. 보존성원소이며 대표적인 대륙기원 원소 간의 비 (TiO_2/Al_2O_3)를 조사해본 결과 본 주상시료 퇴적물은 일차적으로 심도 약

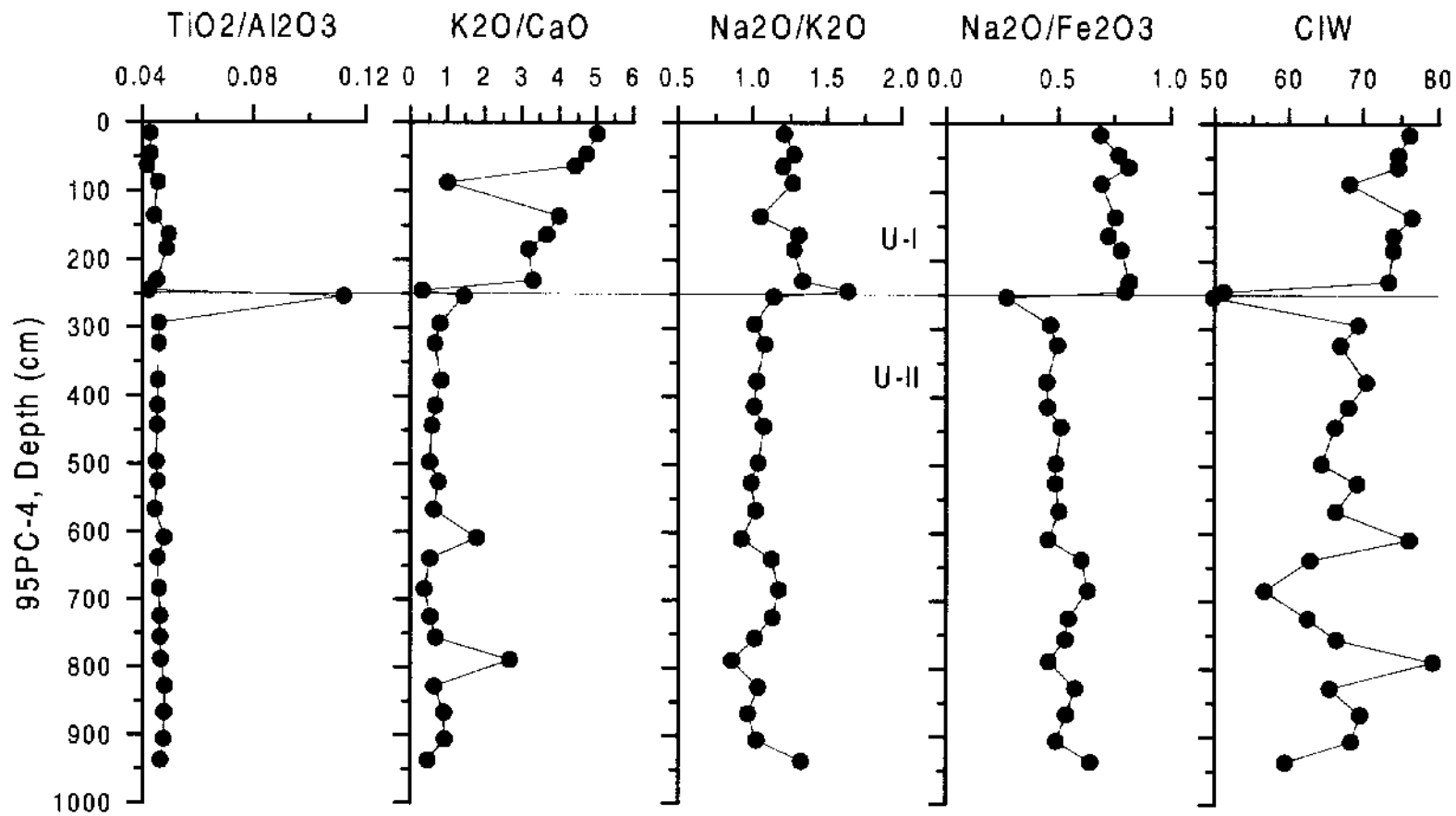


Fig. 3-6-5. Vertical profiles of major elements ratio, and chemical index (CIW) of weathering at 95PC-4.

150 cm에서 변이점이 나타나고 있다 (Fig. 3-6-6). 주상시료의 가장 마지막 부분에서도 약간의 변화가 나타나고 있지만 전체적으로 2개의 지화학적 층서로 구분이 가능하다. 층의 경계가 되는 심도 약 150 cm를 중심으로 완만한 변화를 보이면서 상·하의 지화학적 특성이 명료한 차이를 보여주고 있다.

기존의 연구결과 밝혀진 동위원소 측정결과에 의하면 본 주상시료는 심도 168 cm에서 연대가 약 10,430 yrBP로 나타났다. 이러한 점을 고려한다면, 지화학적 층서가 뚜렷하게 변화하는 심도 약 150 cm 보다 상부의 퇴적물은 홀로세의 퇴적물이 거의 확실하며 변이점은 홀로세의 시작점이라 판단된다. 기존의 연구결과에 의하면 코아 하부는 다량의 조립질 퇴적물이 포함되어 있으며 탄산염함량이 많아지는 경향을 보이고 있다 (한국해양연구소, 1996). 주요원소간의 비 (ratio)변화를 포함하여 탄산염함량의 변화 등은 최종빙기 (last glacial maximum) 동안에 낮아진 해수면의 변동과 밀접히 관계되는 것으로 판단된다.

바. 94PC 2 (온누리 분지)

온누리 분지에서 취득된 주상시료에 대한 주요원소의 변화를 Fig. 3-6-7에 표시하였다. 주요원소의 변화에 근거한 지화학적 층서는 4개의 unit로 구분이 가능하다. 심도 250 cm에서의 탄소동위원소연대가 20.1 ka로 나타나고 있어 최상부 unit (심도 약 100 cm)의 퇴적물은 홀로세 동안에 퇴적된 것으로 추정된다. 그러나 전체적으로는 최상부의 unit I 과 다른 unit, 2개로 구분이 가능하기도 하다. 화학원소간의 비를 나타내는 연식분포도 최상부 홀로세 퇴적물은 그와 다른 심도의 퇴적물과는 현저한 차이를 보이고 있다. 탄소동위원소 연대는 심도 약 570 cm에서 24.4 ka로 나타났다. 따라서 unit II, III, IV는 최종빙기 동안에 퇴적된 퇴적물로서 특히 20 ka를 전후하여 (unit III구간) 퇴적물 조성이 약간 변화했음을 의미한다. Unit III 구간을 제외한 다른 구간 즉, unit II 및 IV구간은 그리 현저한 변화를 보이지 않고 있다. 이 unit III 구간에서 어떠한 고해양학적인 변화가 일어났는지에 대해서는 추가 검토가 필요하다.

4. 유기탄소 및 탄산염 함량의 변화

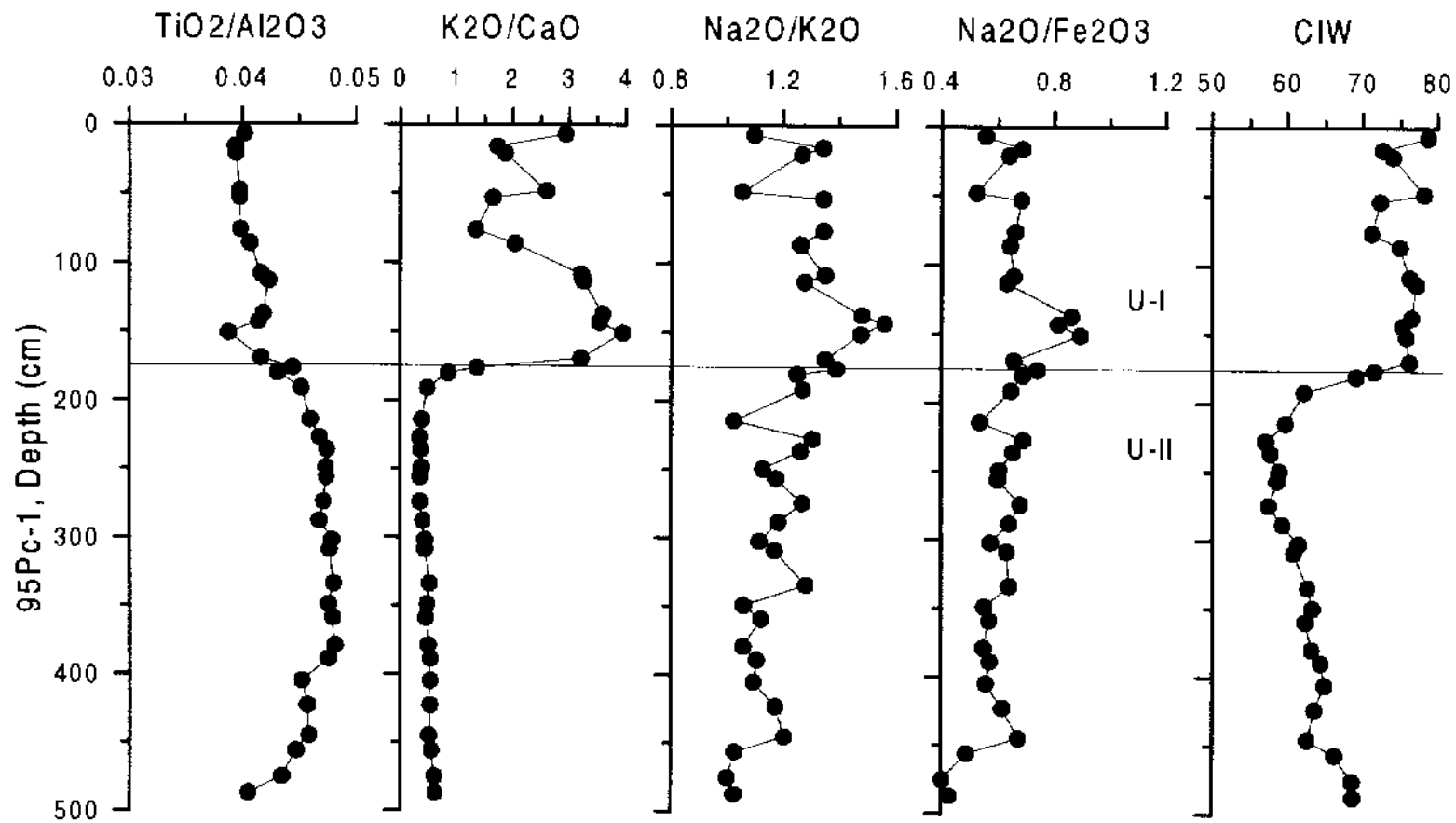


Fig. 3-6 6. Vertical profiles of major elements at core 95PC-1.

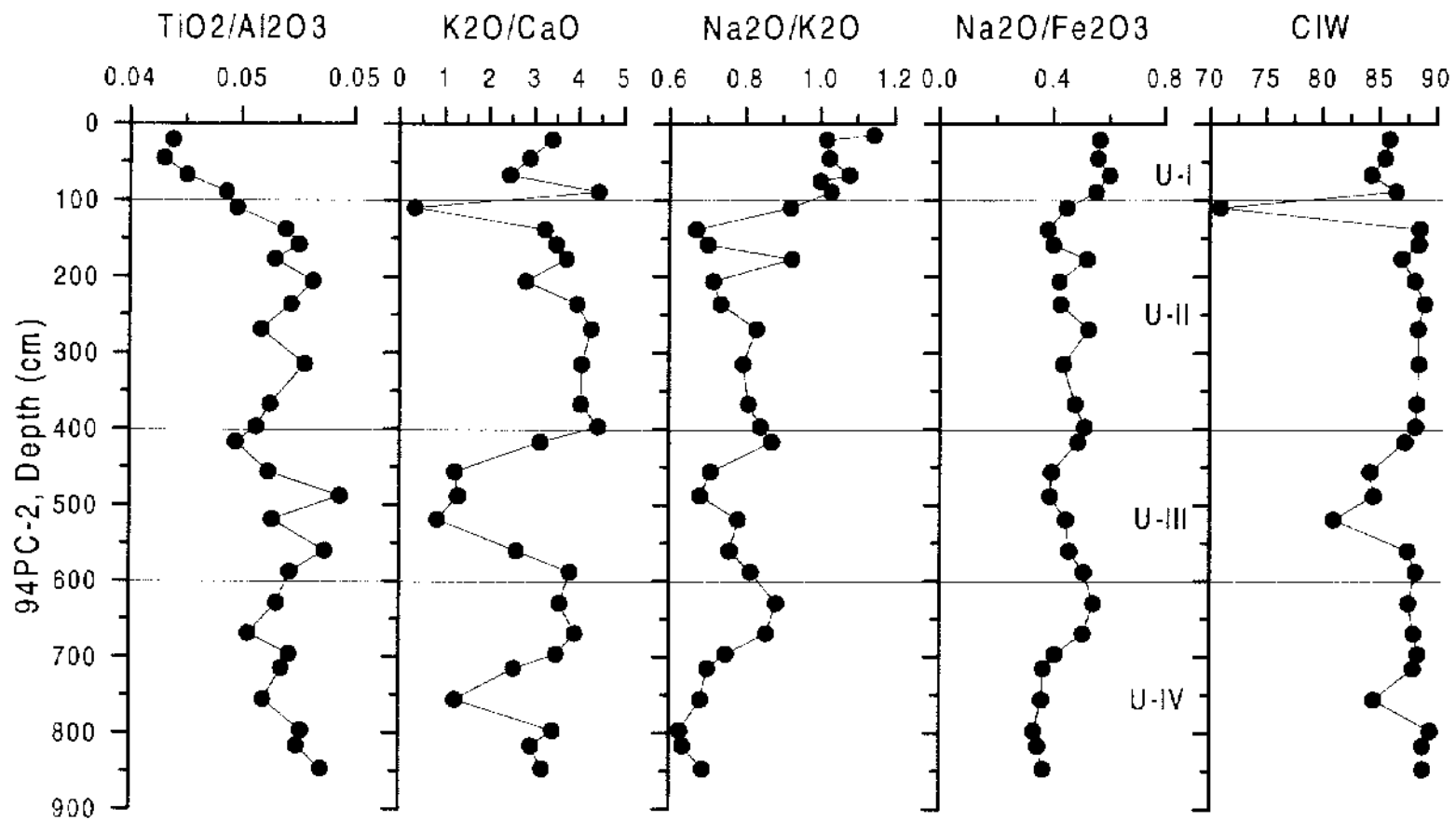


Fig. 3 6-7. Vertical profiles of major elements ratio at 94PC 2.

해양퇴적물속에 존재하는 유기물의 함량변화는 대륙으로부터 유입된 유기물의 양, 생물생산에 의해 생성된 유기물의 양, 그리고 유입된 유기물의 보존 정도에 따라 결정된다 (Stein, 1991). 반면 퇴적물속의 탄산염 함량은 유입과 보존의 기작외에 해수특성과 연계된 저층수의 지화학적 요인에 크게 영향 받는다. 즉, 저층환경이 심한 무산소환경 (anoxic condition)을 형성하고 있을 때에는 탄산염의 용해가 촉진되어 탄산염함량이 감소하게 된다. 시층해 등에서 보이는 다량의 유기물 함량과 더불어 탄산염을 포함하지 않은 퇴적물은 이와 같은 결과 생성된 것이다. 따라서 퇴적물중의 유기물함량 및 탄산염함량은 공급의 정도와 저층환경을 대변하는 것으로 생각된다. 탄산염함량과 유기물함량변화를 초래하는 또 다른 한가지 요인, 대륙기원 물질 (siliciclastic material)의 유입이다. 따라서 퇴적물중의 유기물, 혹은 탄산염이나 대륙기원 물질은 서로 상충하는 작용을 가지고 있으므로 흔히 "three-component system (TCS)"으로 설명되며 (Ricken, 1993), 이들 사이의 flux로 퇴적환경이나 고해양환경을 유추할 수 있다.

퇴적물 중에는 이와 같은 TCS 관계가 항상 존재하며, 각각의 요소는 다른 환경 요인에 의해 조절되기 때문에 그들의 환경요소를 추정하는 것은 고환경 해석에 대단히 의미있는 작업에 속한다. 예를 들어, 퇴적물중의 탄산염 함량은 해양생물에 의해 생성된 탄산염과 소량이지만 대륙기원의 탄산염 (detrital carbonate fraction)을 포함한다. 대륙기원 퇴적물 (siliciclastic fraction)의 경우는 강에서 운반된 물질과 바람에 의해 운반된 물질을 포함하므로 해수면변동과 기후변동에 대한 정보를 제공한다. 유기물의 경우는 일차생산에 의해 공급되는 양과 대륙에서 유입된 유기물의 양 등에 의해 조절되며, 수괴의 용존산소농도에 의해서도 조절된다. 따라서 한가지 요소로서 고환경을 추적하기는 대단히 어려운 작업이며 항상 이들 세 요인간의 관계를 면밀히 검토해야 한다. 본 연구에서는 상기와 같은 퇴적물중의 TCS의 관계를 염두에 두고 현재까지 분석된 동해의 3개의 주상시료에 대한 검토를 해 보기로 한다.

가. 총탄소, 유기탄소 및 C/N ratio

(1) 95PC 1

본 주상시료 퇴적물에서 빙기-간빙기간의 총 탄소 (total carbon) 및 유기탄소 (organic carbon)의 함량변화는 뚜렷하게 나타나고 있다 (Fig. 3-6-8). 탄소동위원소

연대는 심도 168 cm에서 약 10,430 yrBP으로 나타났다. 따라서 유기탄소의 함량은 최종빙기최성기 (LGM; last glacial maximum)가 끝나고 홀로세로 접어드는 전이기 (transitional period)에 증가한다. 이 시기는 해수면이 급격히 상승한 시기로 이러한 총 탄소 및 유기탄소의 증가는 해양환경의 변동과 밀접히 관계되는 것으로 사료된다. 전이기를 제외한 빙기 간빙기 기간만을 비교한다면 간빙기 (홀로세)에서 다소 높은 유기탄소 및 탄산염 함량을 보이고 있다. 하지만 이렇게 높아진 탄산염 및 유기탄소의 함량이 생물 증가에 의한 것인지 보존이 양호하여 나타난 결과인지는 불분명하지만 현재 나타난 자료에 근거한다면, 빙기동안에 약간 감소한 생물생산이 보다 주요한 원인으로 생각된다. 기존의 연구결과 최종빙기 동안에는 낮아진 해수면으로 인해 해수의 교환이 비교적 제한 적이어서 생물생산이 제한적일 가능성이 제시된 바 있다 (한국해양연구소, 1998). 그러나 전이기에는 차단되었던 쓰시마 난류가 유입되면서 해수의 교환이 활발해져 생물생산이 증가한 것으로 판단된다.

유기물의 특성과 기원을 지시하는 C/N 비는 심도 약 160 cm에서 최초로 10이 넘게 나타났다 (Fig. 3 6 9). 일반적으로 C/N 비가 10 이하인 경우는 해양생물에 의해 생성된 해양기원의 유기물, 10 이상을 보일 경우에는 대륙기원의 유기물이 유입된 것으로 여겨진다 (Stein, 1991). 따라서 본 주상시료에서 10 이하의 값을 보이는 구간은 홀로세로, 이 시기는 비교적 안정한 해양환경이 지배적이었으며 대륙기원 유기물의 유입은 없었다고 생각된다. 반면, 전이기에는 10 이상의 값과 10 이하의 값이 공존하고 있어 비교적 불안정한 해양환경을 지시하며, 10 이상의 값이 연속되는 구간인 250-350 cm는 대륙기원의 유기물이 지배적이었음을 시사하고 있다. 이 시기는 최종빙기에 해당하는 구간으로 상대적으로 낮아진 해수면에 의해 쓰시마 난류의 유입이 부분적으로 차단된 시기로 판단된다.

(2) 98PC 4

유기탄소 및 총탄소의 변화는 Fig. 3 6 8에 표시하였다. 가장 뚜렷한 변이점을 보이는 지점은 750 cm 부근으로 이 부분을 경계로 뚜렷한 변화가 보인다. 상부쪽으로는 거의 변화가 없는 2%, 2.5% 전후의 일정한 값을 보이고 하부쪽으로는 심도 약 800 cm에서 최소치를 보이다가 약간 증가하는 경향을 보인다. 이러한 크기 변화를 보이는 변이점에 대해 주요원소 및 미량원소를 측정된 결과 거의 유사한 변화양상을 보이고 있다. 본 주상시료에 대한 연대측정은 아직 이루어지지 않았지만 심도

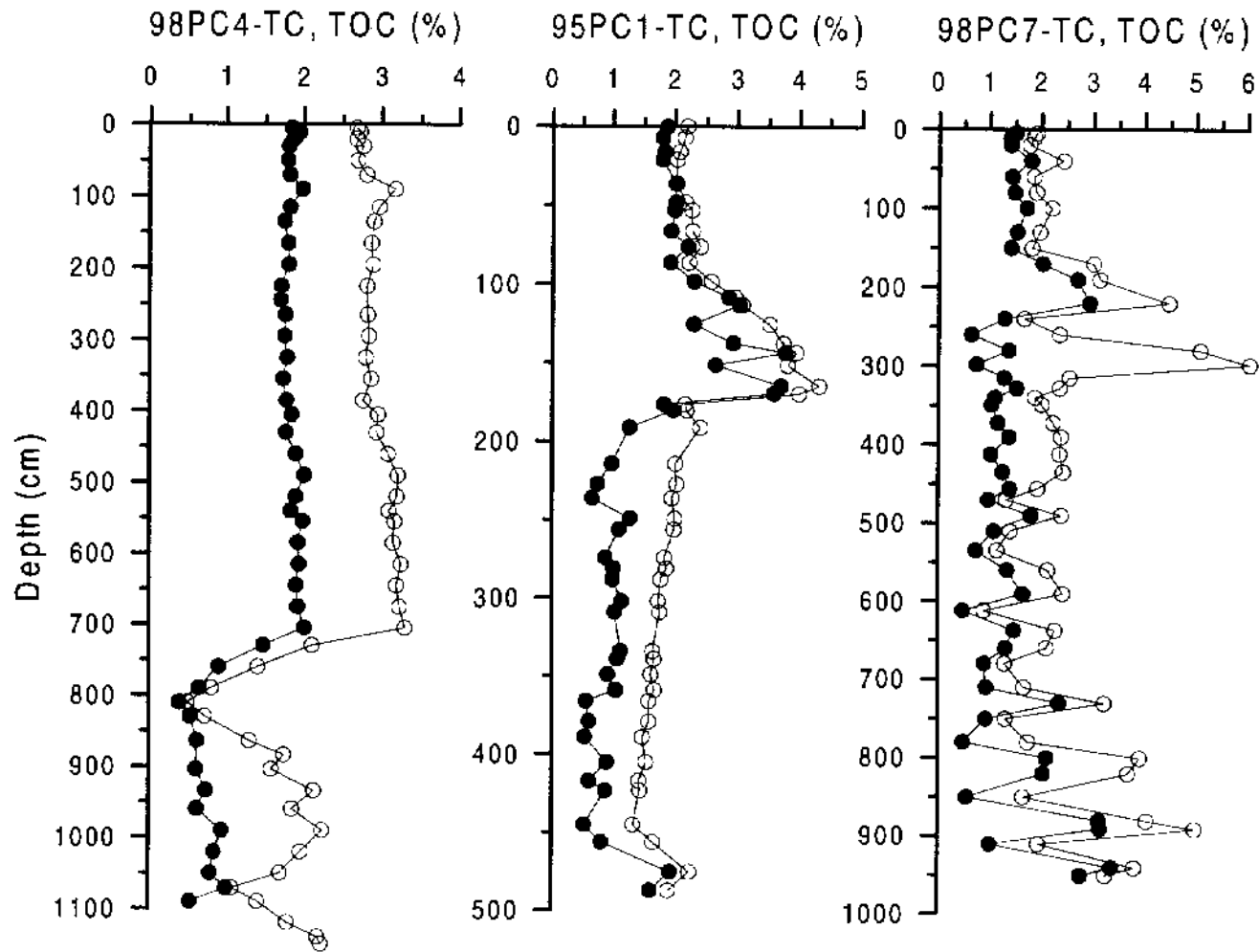


Fig. 3-6-8. Total organic carbon and total carbon profiles at three cores, 98PC-4, 95PC 1 and 98PC-7.

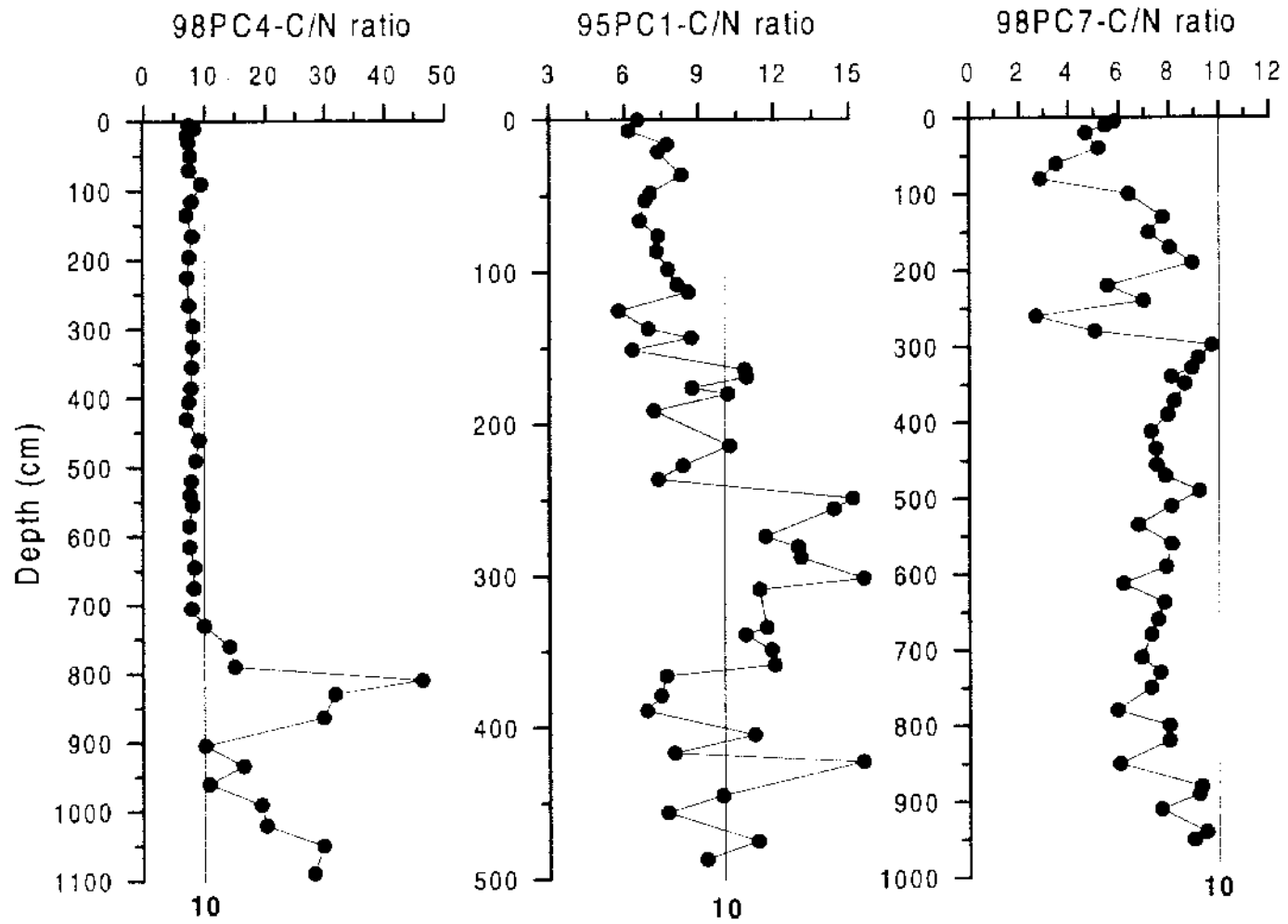


Fig. 3-6-9. C/N ratio variation at three cores, 98PC 4, 95PC 1 and 98PC 7.

본 주상시프는 용출판지의 서쪽끝에서 얻어졌다. 이에 대한 용탄소 및 유기탄소 함량변화는 서의 비슷한 변화양상을 보이고 있으며, 크게 침도 150-300 cm 구간을 중심으로 2개의 구간으로 구별 가능하다. 용탄소 및 유기탄소가 가장 증가하는 구간은 침도 약 150 cm-300 cm 구간으로 이 시기는 해양환경이 다소 유동적인 것으로 생각되는 시기이다 (Fig. 3-6-8). 테프라라 층서에 의하면 연대 9,300 YBP를 지시하는 용출-II 테프라라 침도 약 200 cm, 22 ka를 지시하는 AT 테프라라는 침도 약 460 cm에 나타난다. 이 테프라 연대를 이용한다면 유기탄소 및 탄산염 함량이 증가하는 구간은 아마도 최종빙기를 포함하여 빙기에서 간빙기로의 전이기인 것으로 판단된다. 이 증가하는 탄산염 및 유기탄소함량은 생물생산량의 증가에 의한 결과일지 혹은 모퉁이 양호한 결과에 의한 것인가는 판단이 어렵다. 하지만 유기탄소의 특성과 기원 등을 지시하는 C/N 비는 최상부 표층에서 최하부 시프까지 일관되게 10 이하의 값을 보이고 있다 (Fig. 3-6-9). 따라서 생물생산의 증가 결과, 탄산염과 유기탄소의 함량이 증가했을 가능성이 있지만 퇴적물에 대한 연대측정과 퇴적물의

(3) 98PC 7

유기물의 특성을 나타내는 C/N 비는 침도 약 740 cm를 경계로 하부층으로 뚜렷하게 증가한다. 이 경계층을 중심으로 상부층으로는 일관되게 10 이하의 값을, 그리고 하부층에서는 10 이상의 값을 보이고 있다 (Fig. 3-6-9). 상부층에서 일관되게 10 이하의 값을 보이는 것은 비교적 안정한 해양환경이었음을 지시하고 있으며, 하부층은 상부층의 퇴적속도로 추론해보면 빙기 간빙기의 전이기, 이 부분에 10 이상의 C/N 값을 보이는 것은 해수면 상승 등 다소 불안정한 해양환경으로 대륙기원 후포앵크 대륙사면에 위치한다는 점, 그리고 빙기-간빙기의 전이기가 기후학적으로, 해양학적으로 불안정한 구간을 고려한다면 하부층에 10 이상의 C/N 값을 보이는 현상을 추론할 수 있다. 따라서 본 주상시프 채취점의 해양환경변화도 약 10-9 ka를 기점으로 크게 변화했음을 지시한다.

약 720 cm에서 용출II 테프라라층이 보고되었다 (한국해양연구소, 1998). 따라서 최소 한 침도 700 cm까지는 홀로세동안 퇴적된 퇴적물도 판단되나 보다 자세한 해양학적 사건 (events)를 해석하기 위해서는 퇴적물의 연대에 대한 연구가 필요한 실정이다.

빈도를 포함하여 좀더 자세한 연구가 필요하다.

나. 탄산염 함량

(1) 95PC-1

본 주상시료 퇴적물에 대한 탄산염함량은 뚜렷하게 2개의 구간으로 구별이 가능하다. 심도 약 100 cm 이하에서는 거의 변화가 없으면서 4% 내외의 탄산염함량을 보이고 있으며 그 이상의 심도에서는 심한 폭의 변화를 보이고 있다. 탄산염의 최대값은 10%까지 미치고 있다 (Fig. 3-6-10). 그러나 최상부에서 심도 100 cm까지는 작은 변화의 폭을 보이는 것으로 특징지을 수 있다. 유기탄소함량에서 언급했듯이 심도 100-200 cm 구간은 빙기에서 간빙기로의 전이기에 해당한다. 따라서 탄산염 함량은 홀로세에 작은값을 보이고 전이기를 포함한 빙기에는 많은 폭의 변화를 보이지만 다소 증가한 함량을 보여주고 있다. 최종빙기로 생각되는 심도 약 200 cm 이하는 하부쪽으로 점이적인 감소를 보이고 있다. 따라서 본 주상시료의 탄산염함량변화는 홀로세 기간의 다소 안정한 값, 전이기의 불안정 값, 그리고 최종빙기 동안의 점진적인 감소 구간으로 구별이 가능하다. 이와 같은 탄산염함량의 수직적인 변화는 해수면 변동을 포함하여 해양환경변동과 관계되는 것으로 해석된다.

(2) 98PC-4

주상시료의 최상부 표층에서 심도 약 100 cm까지는 점이적인 증가, 심도 100 cm를 경계로 변이점이 되는 심도 750 cm까지는 탄산염의 수직적이 변화가 거의 없고 10%진후의 값을 보이고 있다 (Fig. 3-6-10). 심도 700 cm를 경계로 하부쪽으로 급한 감소를 보이고 다시 급하게 증가하는 경향을 보인다. 기존의 연구결과에 의하면 연대 약 9,300 yrBP를 지시하는 울릉 II 테프라 층은 심도 약 720 cm에 존재하고 있어 상부층의 탄산염함량은 홀로세기 동안에 퇴적된 것임을 지시한다. 울릉분지 최남단의 주상시료 95PC-1과 비교해 보았을 때 이와 같은 값은 2-3배 정도 높은 것으로 나타났다.

(3) 98PC-7

전체적으로 5% 내외의 값을 보이고 있으나 심도 약 300 cm에서 40% 이상의 탄산염 함량을 보이고 있다 (Fig. 3-6-10). 심도 약 200-400 cm 구간은 비교적 높

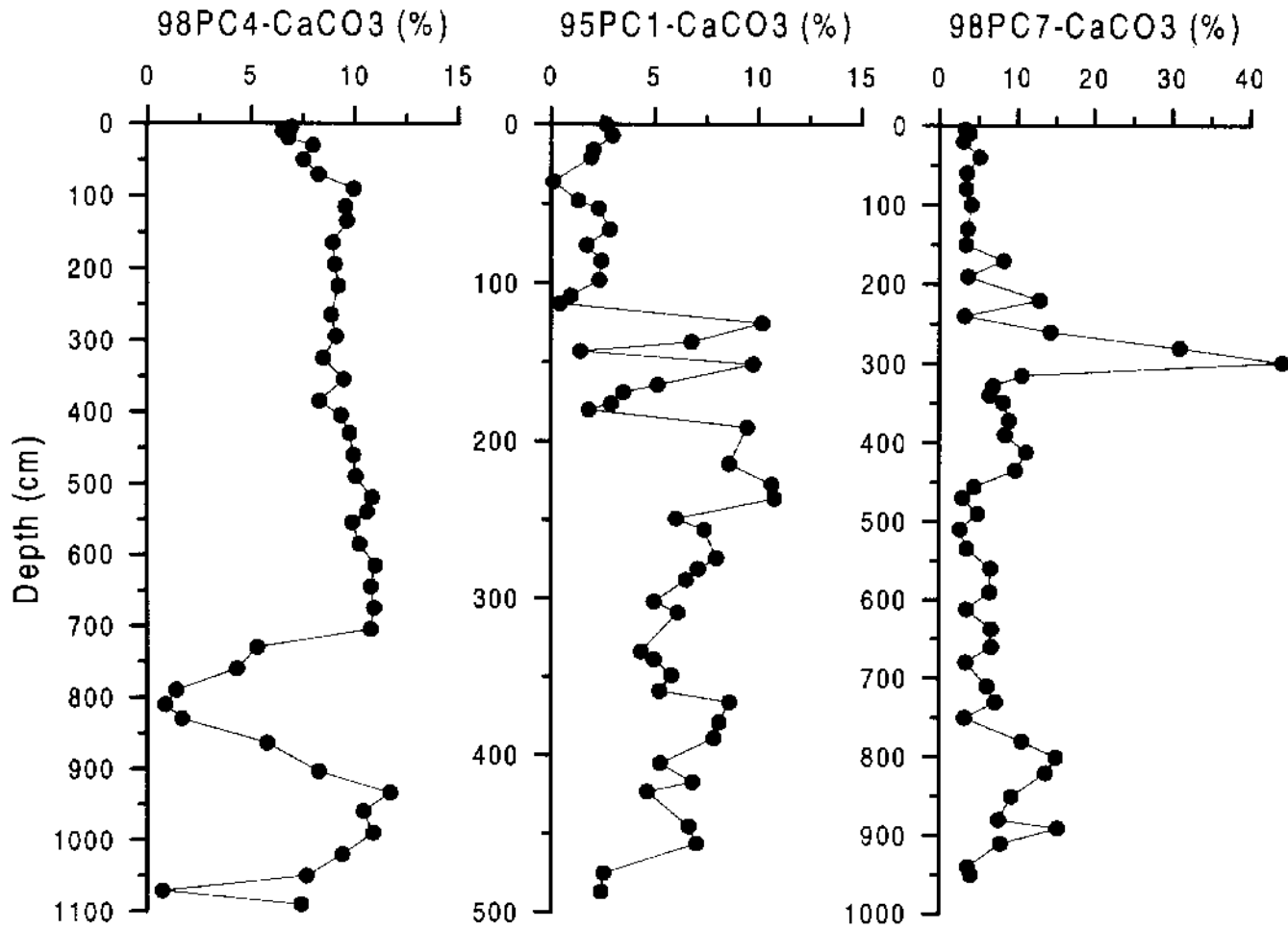


Fig. 3-6-10. Carbonate content at three cores, 98PC-4, 95PC-1 and 98PC-7.

은 탄산염 함량을 보이는 것으로 특징지을 수 있다. 심도 약 200 cm는 울릉-II 테프라가 존재하는 층으로서 상부층의 비교적 안정한 5% 선후의 값은 홀로세 동안 퇴적된 탄산염 값으로 판단된다. 하지만 현재까지 본 주상시료에 대한 연대측정은 이루어지지 않았다. 탄산염함량의 변화 원인 등을 밝히기 위해서는 연대측정을 비롯한 좀더 세밀한 지화학적 연구가 필요하다.

5. 결론 및 고찰

가. 퇴적물 조성의 수직적 변화

퇴적물의 조성은 대륙기원과 해양기원 그리고 자생기원 입자들도 구별할 수 있다. 특히 본 연구에서 사용된 주상시료는 전형적인 반원양성 퇴적물로 대륙기원 퇴적물이 많은 양을 점하고 있다. 또한 대륙기원 퇴적물은 대기를 통해 유입되는 것과 저탁류 등에 의해 재동 (reworking)되는 것으로 구별된다. 따라서 정확한 대륙기원 원소의 유입 정도를 유추하고자 할 때는 생물기원 원소에 대한 보정이 필요하다. 이러한 타 원소에 대한 보정법으로 흔히 보존성 원소인 Al로 다른 원소를 표준화하는 방법이 자주 쓰이고 있다 (element/Al; F/Al). 본 연구에서는 보존성 원소로 (Goldberg and Arrhenius., 1958) 여겨지는 Ti와 Al의 비를 조사해 보았다 (Fig. 3 6 11). 따라서 TiO_2/Al_2O_3 의 변화는 공급지의 변화로 생각되며 퇴적물 조성변화에 대한 평가를 가능하게 한다.

빙기-간빙기간의 원소간 비 (ratio)는 Fig. 3 6 11에 표시하였다. 본 주상시료들에 대한 TiO_2/Al_2O_3 의 값은 최대 약 0.11로 95PC-4에 나타나고, 최소값은 95PC 1에서 약 0.04로 나타난다. 하지만 전체적으로 그 범위는 0.04-0.05 사이에 존재하며, 이들 변이점은 유기탄소 및 탄산염함량, 그리고 다른 주요원소의 비 변화에서 보이는 것과 대체적으로 일치하고 있다. TiO_2/Al_2O_3 에 의한 변화는 99PC-2에서는 심도 약 200 cm에서, 95PC 1에서는 심도 약 150 cm에서 경계점을 가지고 있으며 상부층으로 생각되는 홀로세 퇴적물에서는 약간 작은 값을 보이고 있다. 96PC-4에서는 전이기에 약간 작은 값을 가지고 있으며 94PC-2에서는 최종빙기에 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 TiO_2/Al_2O_3 는 홀로세 퇴적물에서는 약간 작은 값

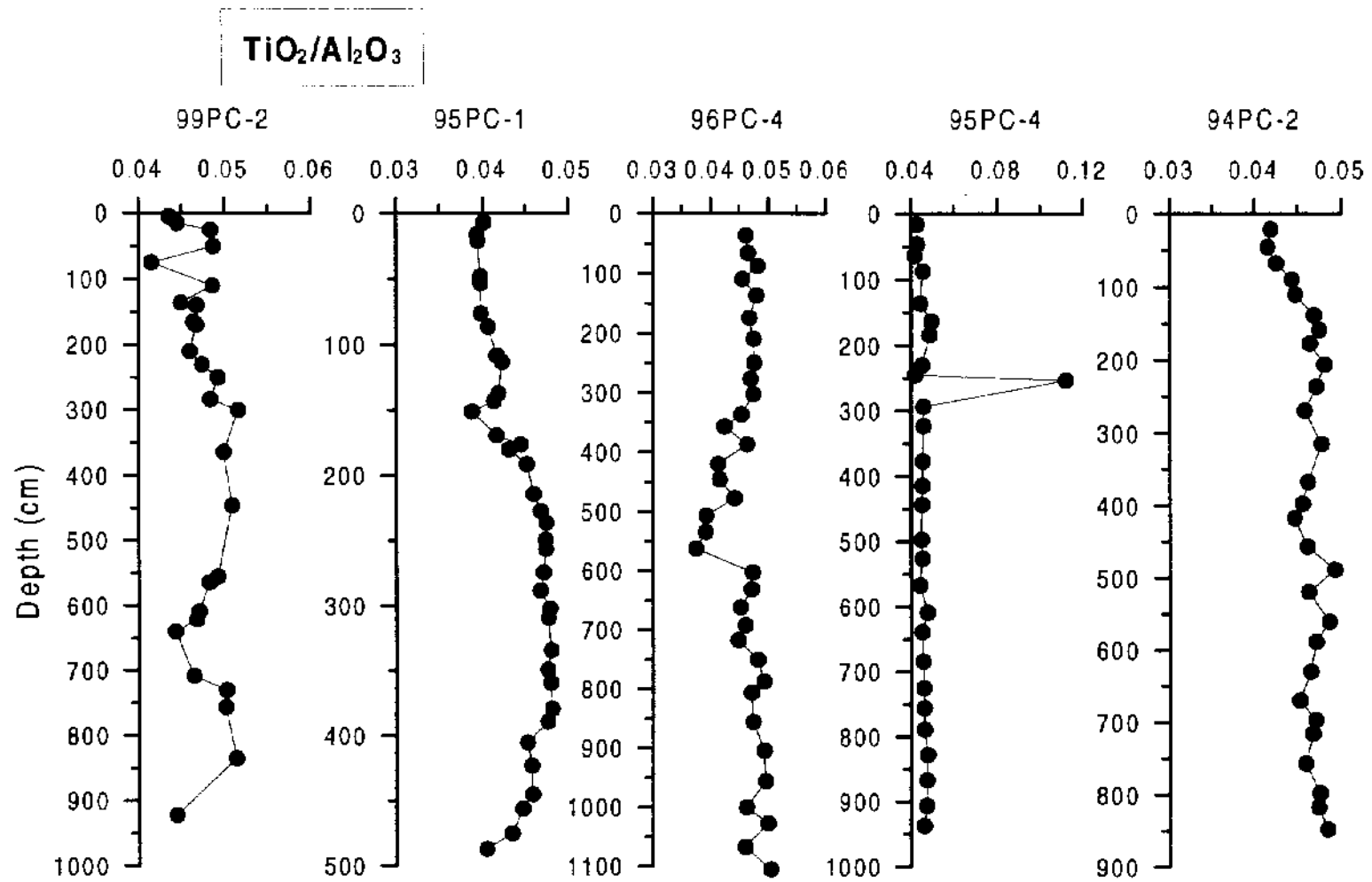


Fig. 3-6 11. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ variation at five cores.

음, 최종빙기를 포함한 빙기로 생각되는 퇴적물에서는 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 현재까지 대륙기원 원소의 end member에 (특히 Ti 및 Al) 대해서는 연구되지 않았다. 대륙기원 원소에 대한 end member는 추후 연구될 퇴적물 조성변화의 궁극적인 원인을 규명하기 위해 선결되어야 할 문제라고 판단된다.

본 연구에 사용된 주상시료 퇴적물은 동해 전 지역에서 얻어진 것으로서 동해 전 지역을 통해 빙기-간빙기간 일어난 이들 주상 시료에서 나타나는 퇴적물 조성의 변화들을 이해하는데 중요하다. 동해퇴적물은 바람에 의해 유입된 대륙기원 퇴적물을 다량 포함하고 있으며 이는 빙기-간빙기를 통하여 퇴적물 조성을 변화시키는 중요한 요인의 하나이다 (Dersch and Stein, 1994). 풍성 대륙기원의 퇴적물은 석영, 장석 등을 포함하고 있어 이들의 변화는 화학적으로 Si, Al, Mg, Ca 등의 함량을 변화하게 된다. 현재까지 본 주상시료들에 대한 풍성 대륙기원 물질의 정량적인 분석은 이루어지지 않았다. 퇴적물에 포함된 생물기원 Si와 대륙기원 Si의 구분 및 이들의 빙기-간빙기를 통하여 어떻게 변해 왔는지를 추적하는 것은 퇴적물조성의 변동에 대한 궁극적인 이해에 도움이 될 것으로 판단된다.

나. 해양환경과 관련된 기후변동, 풍화지수

이미 기술한 바와 같이 동해는 수변대륙으로부터 공급되는 풍성 퇴적물과 화산쇄설물 등 막대한 양의 대륙기원 퇴적물을 포함하고 있다. 그러므로 퇴적물 조성은 이들 대륙기원 퇴적물의 근원지를 판단하는데 중요한 역할을 한다. 기후변동과 관계된 퇴적물의 특성을 이해하기 위해 본 연구에서는 풍화지수 (chemical index of weathering)를 조사하였다. 본 연구에 사용된 6개의 주상시료에 대한 풍화지수를 Fig. 3-6-12에 표시하였다.

최상부층의 풍화지수는 조사된 모든 주상시료 퇴적물에서 약 80 정도의 값을 보이고 있다. 95PC 1, 99PC-2, 95PC-4 코이에서는 최상부에서 하부쪽으로 약간 감소하는 경향을 보이고 있으며, 94PC-2 주상시료에서는 홀로세를 경계로 하부쪽으로 증가하는 경향을 보인다. 풍화지수는 근원지역의 풍화 정도를 의미하며 (Harnouis, 1988), 이들의 차이는 immobile 원소인 포타슘 (K_2O), 칼슘 (CaO)의 공급차이에 의한 것이다. 풍화지수가 상대적으로 작은 값을 보이는 99PC-2, 95PC 4의 주상시료 퇴적물은 공급지의 퇴적물이 덜 풍화되었음을 의미하며, 따라서 풍화지수값이 다르다는 것은 공급지가 다르거나 공급지가 같으면서 풍화 정도를 달리하는 물질이 유입되었

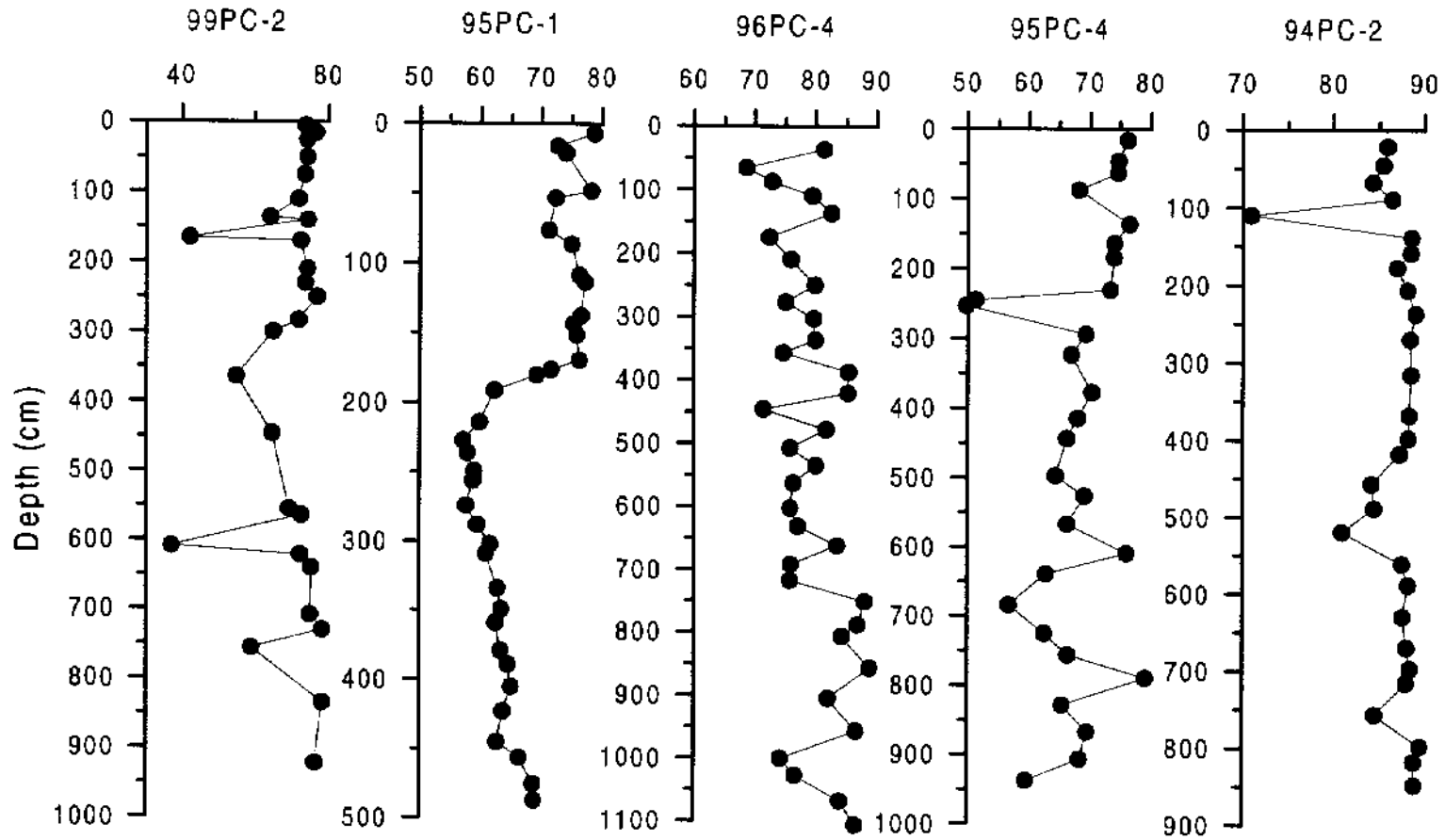


Fig. 3-6-12. Chemical index of weathering (CIW) variation at five cores.

음을 의미한다. 동해에는 인근 주변, 특히 중국대륙이나 한반도에서 공급되는 많은 양의 퇴적물이 축적되고 있다. 따라서 풍화지수의 변화는 공급지에 차이가 있음을 암시적으로 나타내고 있다.

94PC 2 주상시료의 심도 약 100 cm에 나타난 급격히 낮아진 풍화지수는 연대상으로 Park et al. (1997)이 제시한 Younger Dryas의 시기와 일치하며, 95PC-4의 심도 약 25 cm에 나타난 50 정도의 풍화지수는 Oba et al (1991)가 제시한 동해의 담수유입에 의한 low salinity event와 연대적으로 일치한다. 또한 울릉분지의 최남단에 위치하고 있는 95PC-1, 한국대지에 위치하는 96PC 4의 주상시료에서는 수직적으로 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 이러한 변화는 풍화지수의 변화가 기후변동 및 해양환경의 변동과 무관하지 않음을 제시하고 있다.

다. 생물생산과 고해양환경의 변화

세계의 다른 분지들과 더불어 동해분지는 전형적인 반원양성 퇴적물을 보유하고 있다. 이러한 반원양성 퇴적물 (hemipelagic sediment)의 퇴적물 조성은 대륙기원 물질의 유입과 생물생산에 의해서 형성된 생물기원 탄산염, 유기물의 3 체계 (three component system)에서 조절된다고 할 수 있다. 이들 3 체계는 인산 퇴적물 속에 축적된 후에도 얼마나 보존이 양호한가에 따라 그 함량이 달라지며 퇴적후의 2차적인 숙성과정과도 밀접한 관계를 가진다. 따라서 생물생산을 추정하는 것은 퇴적물 속의 함량으로만 추정되는 것이 아니며 상기와 같은 일련의 모든 과정을 고려해야 하기 때문에 그리 간단하지 않다. 그러나 본 연구에서는 상기와 같은 2차적인 요인을 고려하는데 필수적인 요소, 예를 들어 퇴적물의 density, age control point 등, 기본적인 배경 자료 (background data)가 없기 때문에 퇴적물 중의 생물기원 탄산염 및 유기물의 함량으로 간단하게 고찰하고자 한다.

유기탄소의 함량변화 중에서 가장 특이한 변화를 보이는 주상시료는 95PC 1이다. 빙기-간빙기의 전이기로 생각되는 심도 100-200 cm를 경계로 상부층에는 하부층 보다 약간 많은 유기탄소 함량을 보인다. 반면, 총 탄소의 함량은 상부층과 하부층이 거의 동등한 값을 보이고 있다. 즉 이와 같은 현상은 무기탄소 함량에 근거한 탄산염 함량이 상부층과 하부층이 다를 것을 의미한다 (Fig. 3-6-10). 일반적으로 생물생산을 지시하는 지표중에서 organic carbon/carbonate carbon (Org.C/Carb.C) rain ratio는 무기탄산염에 대한 유기탄소의 생산량을 지시하고 있다. 본 주상시료에서는

전이기를 중심으로 하부층에서 다소 작아진 Org.C/Carb.C를 볼 수 있다 (Fig. 3-6-13). 따라서 하부층에서는 표층에서의 일차생산이 다소 감소했을 가능성이 있다. 그러나 빙기 간빙기의 전이기에는 큰 폭의 변화를 보이고 있어 이 기간에는 생물생산을 조절하는 요인이 극단적으로 변화했을 가능성을 시사하고 있다. 이와 같은 관점에서 고찰한다면, 98PC-4 주상시료는 최상부에서 심도 약 700 cm까지 일정하게 안정된 기간으로 생각되며 홀로세로 생각되는 이 기간은 선이기의 불안정한 시기보다 생물생산을 조절하는 요인의 변화가 거의 없었음을 의미한다. 또한 98PC-7의 주상시료에 있어서도 심도 약 300 cm의 갑자기 증가된 Org.C/Carb.C를 제외하면 거의 일정한 변화를 보이고 있다. 이 시기는 데프라 층서에 근거한다면 최종빙기 기간으로 생각되고 있지만 작아진 Org.C/Carb.C로 근거한다면 표층생물생산은 다른 홀로세에 비해 감소했음을 시사한다. 즉, 동해 전체적으로는 표층생물생산의 시간적인 변화는 빙기에 다소 감소한 경향을 보이고 있어 일반적 중위도 지역의 형태와는 상반되는 결과를 보이고 있다. 이와 같이 일반적 중위도 지역의 생물생산 형태와 반대의 현상을 보이는 것은 동해의 지형학적 조건과 연관이 있는 것으로 생각된다. 또한 공간적으로도 빙기 간빙기간 생물생산력의 차이도 다소 나타나고 있지만 이에 대한 연구를 위해서는 질량퇴적속도 (mass accumulation rate)를 좀더 세밀하게 조사할 필요가 있다. 또한 빙기 간빙기는 다소 해양환경이 불안정하거나 생물생산을 증가시키거나 감소시키는 요인이 극단적으로 변화하여 생물생산이 큰 폭으로 변화했음을 지적해 주고 있다. 이와 같은 현상은 아마도 기후변동 및 해수면의 상승 등 전이기의 불안정한 해양환경과 밀접히 관계되는 것으로 판단된다. 또 다른 주상시료 퇴적물 혹은 다른 생물생산 지시자 (tracer)를 가지고 엄밀히 연구할 필요가 있다.

라. 동해퇴적물에 대한 퇴적속도의 공간적 변화

현재까지 밝혀진 지화학분석의 결과 동해퇴적물은 뚜렷한 홀로세 경계를 가지는 것으로 보고되어 있다 (Hyun et al., 1998). 이러한 홀로세와의 뚜렷한 경계는 퇴적물 조성 차이로 설명되며, 퇴적물 조성은 다시 생물생산의 결과와 대륙기원물질의 공급의 변화로 설명이 가능하다. 즉, 홀로세를 경계로 대륙기원 물질의 유입 정도나 그 조성이 달라졌음을 의미한다. 홀로세를 경계로 하면서 퇴적속도가 공간적으로 차이가 난다는 것은 공급지로부터의 운반이나 보존 등의 요소가 결부되어 있음을

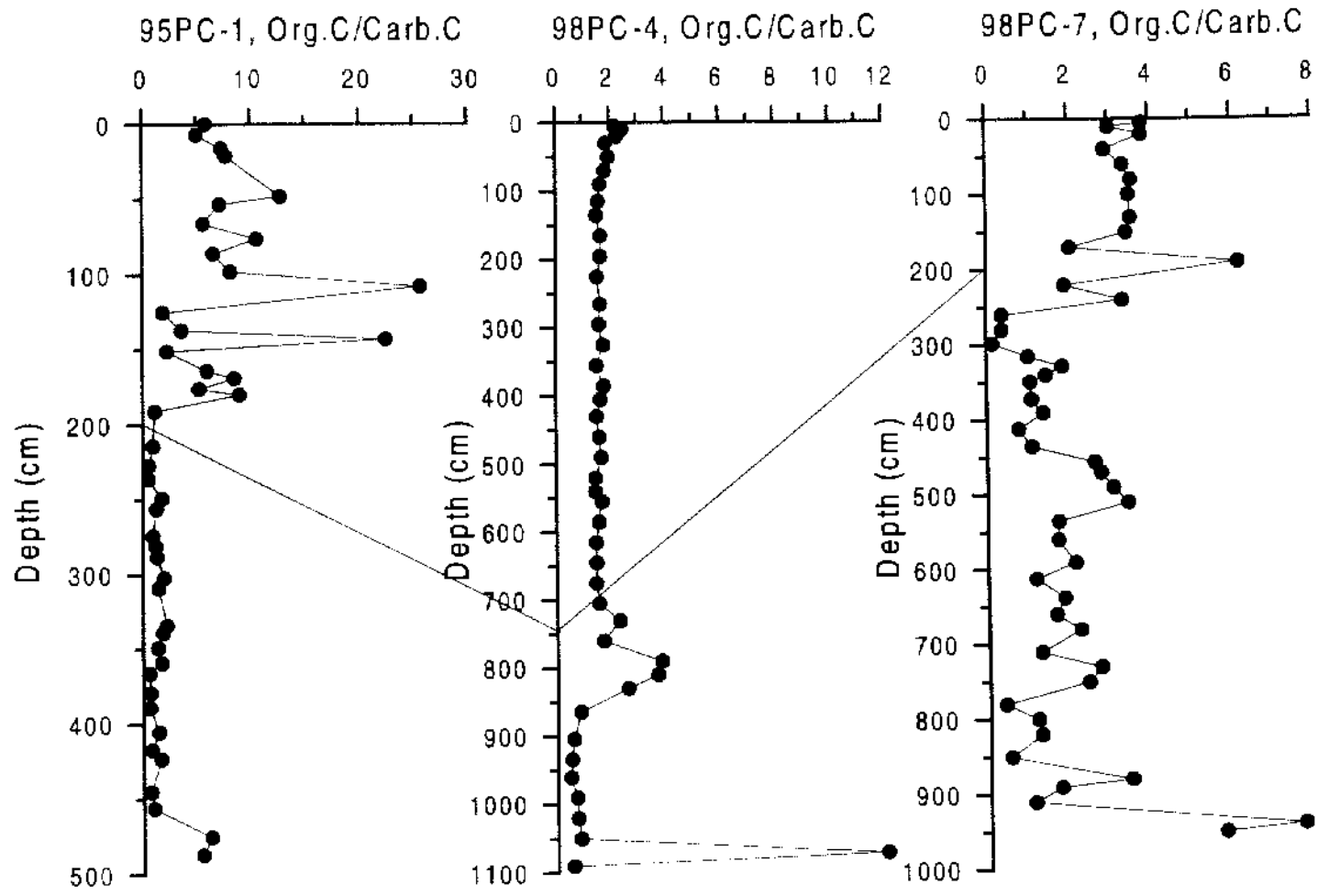


Fig. 3 6 13. Organic carbon/carbonate carbon ratio at three core, 98PC-4, 95PC-1 and 98PC 7.

지시한다.

퇴적속도의 공간적 변화를 알아보기 위해서는 각 주상시료에 대한 연대측정이 필수적이거나 본 연구에서는 현재까지 밝혀진 동위원소 연대 및 테프라연대를 이용하여 퇴적속도의 공간적 변화를 고찰하기로 한다.

주상시료 94PC-2에는 3개의 산소동위원소 age control points가 있다. 이에 근거한다면, 홀로세 동안의 퇴적률은 약 9.4 cm/kyr로써 빙기에 해당하는 퇴적률 20 ka까지의 퇴적률 17 cm/kyr과 24 ka까지의 74 cm/kyr 보다 약 2-8배 정도 높게 나타나고 있다 (Hyun et al., 1998). 또한 95PC 4의 주상시료 퇴적률에 대해서는 홀로세의 퇴적률 (24 cm/kyr)은 빙기의 퇴적률과 비슷하다. 주상시료 94PC-2는 온누리 분지 남단 대륙사면에 일어난 코아로서 울릉분지 중앙의 분지평원에 위치하는 95PC-4 주상시료 보다 퇴적률이 높게 나타나고 있다. 이러한 퇴적률의 차이는 주상시료의 위치에 영향받는 것으로 생각된다. 또한 빙기의 퇴적률이 간빙기의 퇴적률보다 높게 나타나고 있어 빙기동안에는 대륙으로부터의 보다 많은 퇴적물이 공급되고 있음을 시사한다. 주상시료 98PC-4 퇴적물의 경우 테프라층 (울릉-II, 9,300yr)이 심도 약 720 cm에 나타난다. 단순한 계산에 의하면 본 주상시료에서는 이 구간에 대한 퇴적률이 77.4 cm/ka로 본 연구에서 다루어진 주상시료 중에서 가장 높은 퇴적률을 보이고 있다. 하지만 이 주상시료에 대해 하부의 연대가 현재까지 측정되지 않았으므로 빙기-간빙기 퇴적률은 비교하기가 곤란하다. 주상시료 95PC-1에서는 심도 168 cm에서 탄소동위원소 연대가 10,430 yr로 나타나고 있어 이 구간까지의 퇴적률은 16.15 cm/ka로 계산되었다. 또한 98PC-7 주상시료 퇴적률에 대해서는 2개의 테프라 층이 존재한다. 심도 약 200 cm에서 울릉II 테프라가 심도 450 cm에서 AT 화산재가 존재하고 있어 각각의 연대 9,300 yrBP 과 22,300 yrBP를 기준으로 계산한다면 개략적인 퇴적률은 홀로세 퇴적물인 경우 약 21.5 cm/kyr, 빙기의 퇴적률은 19.2 cm/kyr이다.

마. 금후의 연구과제 및 제안

현재까지 동해에 대한 연구는 단편적인 연구의 결과로 종합적인 고해양환경 변화에 대한 추론을 하는데 주력해 왔다고 할 수 있다. 금후의 연구과제는 이러한 고해양환경변화를 주도하는 여러 요인별 연구가 선행되어야 할 것이며, 본 장에서는 이에 대한 문제를 제기하고자 한다.

(1) 고생물생산의 추정과 새로운 추적자 (tracer)의 개발

고생물생산에 대한 적절한 추정과 고생물생산이 지역적인 기후변동과 어떻게 결부되어 왔는지, 그리고 앞으로 어떻게 전개되어 갈 것인가에 대한 연구가 시급하다. 이를 위해서는 우선 현재까지 보유하고 있는 주상사료 퇴적물에 대한 지화학적 증거를 명확히 한 필요가 있다. 이를 위해 산소동위원소 분석 등과 같은 적극적인 지화학 증거 (연대증서)를 집중적으로 연구할 필요가 있다. 부유성 유공충 및 저서성 유공충을 이용한 산소동위원소의 증거는 범 지구적인 시간스케일과 대비가 가능한 만큼 가능한 한 많은 연구·분석이 필요한 실정이다.

고생물생산의 추정에는 여러 지구화학적 추적자 (geochemical tracer)가 사용되고 있다. 유기물, 탄산염 등의 기본적인 추적자 외에 새로운 추적자를 개발한 필요가 있다. 예를 들어, biomarker 등에 의한 고생물생산의 추적은 좀더 심도 있는 고생물생산의 추정에 유효하다. 또한 biomarker에 의한 유기화합물의 추적은 고생물생산 뿐만아니라 고수온의 변화 등 전반적 고생태계 및 해양환경과 결부된 해양환경변화를 추적하는데 유효하다고 사료된다. 이미 동해의 다른 지역에서는 biomarker에 의한 고환경변동을 연구한 사례가 있으나, 우리나라에서는 현재까지 연구되고 있지 않은 실정이다. 또한 무기물에 의한 (예를 들어, 생물기원 바륨 (Ba) 등) 고생물생산의 추적은 고생물생산의 결과, 동해에서 일어나는 빙기-간빙기간 이산화탄소의 수지를 이해하고 전반적인 기후변동과의 관계를 규명하는데도 유익할 수 있다.

(2) 해수변동과 관계된 해양환경 변화

쿠로시오 해류의 유입과 차단은 정확히 어느 시점에서 시작되었으며, 또한 쿠로시오 해류의 유입의 동해 해양생태계의 미친 영향과 고환경변화와의 관계는 어떻게 되었느냐에 대한 연구가 필요하다. 반 세계적일 동해의 환경변화는 해수가 유입되고 유출되는 정도가 변화한다는 것은 해수의 수직혼합 (vertical mixing) 등 동해의 해양환경에 주요한 요인으로 작용한다. 특히 4개의 얕은 해협으로 둘러 쌓인 동해는 해수의 유입과 밀접히 관계되는 것으로 사료된다. 현재까지 연구결과에 의하면 해수면 변동은 기후변동, 범 지구적 해수면 변동의 범주내에서 약 6,000 yr 이전에 현재의 해수면 상태로 높아졌다는 의견이 있다. 불론 지역에 따른 약간의 차이는

있지만 해수면 변동과 관계된 동해의 고해양환경에 대한 연구는 동해 전반의 고해양환경변동을 이해하는데 필수적인 요인이라 생각된다.

(3) 기후변동과 관계된 해양환경 변화

주변의 기후변화에 대해 동해는 어떠한 반응을 보이고 있는가에 대한 연구가 필요하다. 퇴적물 조성의 시간적 변화는 퇴적물의 공급 정도와 현장에서 생성된 생물기원 물질의 조합으로 나타난다. 대륙기원 물질은 기후변동과 연계되어 공급의 정도를 달리 할 것으로 기대되는 만큼 퇴적물조성의 변화와 기후변동과의 관계는 중요한 연구과제로 사료된다.

현재의 연구결과에서도 빙기-간빙기간의 퇴적물조성에는 현저한 차이가 나타나고 있다. 또한 동해퇴적물이 반원양성 퇴적물임을 감안한다면 대륙기원 물질의 유입이 중요한 요인으로 작용하고 있음은 당연한 사실이다. 이미 기존의 연구결과에 의하면 빙기-간빙기를 통하여 대륙기원 물질의 질량퇴적속도 (mass accumulation rate)를 조사한 결과 빙기에는 간빙기 보다 많은 양의 퇴적물이 공급되고 있음이 밝혀졌다 (Dersch and Stein, 1994). 빙기에는 대륙이 보다 건조한 상태이고 또한 편서풍이 강해져 보다 많은 양의 퇴적물을 심해로 이동시키는 역할을 한 것으로 판단된다. 따라서 보다 양호한 주상시료를 선택적으로 연구하여 빙기-간빙기간 퇴적물의 공급 정도와 그 근원지 및 전반적 고해양환경과의 관계를 규명하는 것은 흥미 있는 연구과제 중의 하나이다.

제 7 절 한국대지와 울릉분지간 통로 주변의 테프라시간층서

대표저자: 천종화 (강원대학교 지구과학부)

한상준 (한국해양연구소)

1. 서론

동해에서의 테프라 연구는 1980년대 초 일본학자들이 길이 수 m의 시추퇴적물을 획득하면서 시작되었다 (Machida and Arai, 1983; Furuta et al., 1986). 이후 동해에서 시추한 ODP Leg 128의 798 site와 799 site의 코아등에서 수백개의 테프라층들이 확인되었다 (Pouclet and Scott, 1992). 동해 울릉분지와 한국대지의 제4기 후기 플라이스토세 이후에 일어난 화산활동과 테프라시간층서 연구는 수십 정점의 바렐 길이 12 m의 시추퇴적물이 획득되면서 본격적으로 이루어지게 되었다 (한상준 등, 1995; 한상준 등, 1996; Chun et al., 1997a; Chun et al., 1997b; 한상준 등, 1997; 천종화 등, 1998; 한상준 등, 1998; 천종화, 2000).

테프라 연구의 중요성은 전세계의 대양에서 획득한 시추퇴적물에서 시간층서대비에 이용될 수 있는 표식테프라층들이 확인되면서 제기되었다 (Kennet and Thunell, 1975). 이 자료들에 의하면 화산활동은 중기 마이오세와 초기와 중기 플라이오세에 거의 전 지구적인 규모의 화산활동이 있었으며, 제4기에 접어들면서 화산활동이 급격히 증가했음이 보고되었다 (Fig. 3-7-1). 이 시기에 테프라의 절대 연령을 밝히는 테프라연대학 (tephrochronology; Thorarinsson, 1974)과 상대적인 연령과 관련된 퇴적환경을 해석하는 테프라층서학 (tephrostratigraphy; Westgate and Fulton, 1975; Sigurdsson and Carey, 1981)의 눈부신 발전을 보았다.

동해에서 채취된 시추퇴적물의 테프라시간층서 연구는 후기 플라이스토세 이후의 화산활동을 체계적으로 정립할 수 있는 계기를 마련하였으며, 각 퇴적환경별로 퇴적환경에 대한 해석을 가능하게 하였다. 지금까지는 울릉분지평원과 대륙시면 및

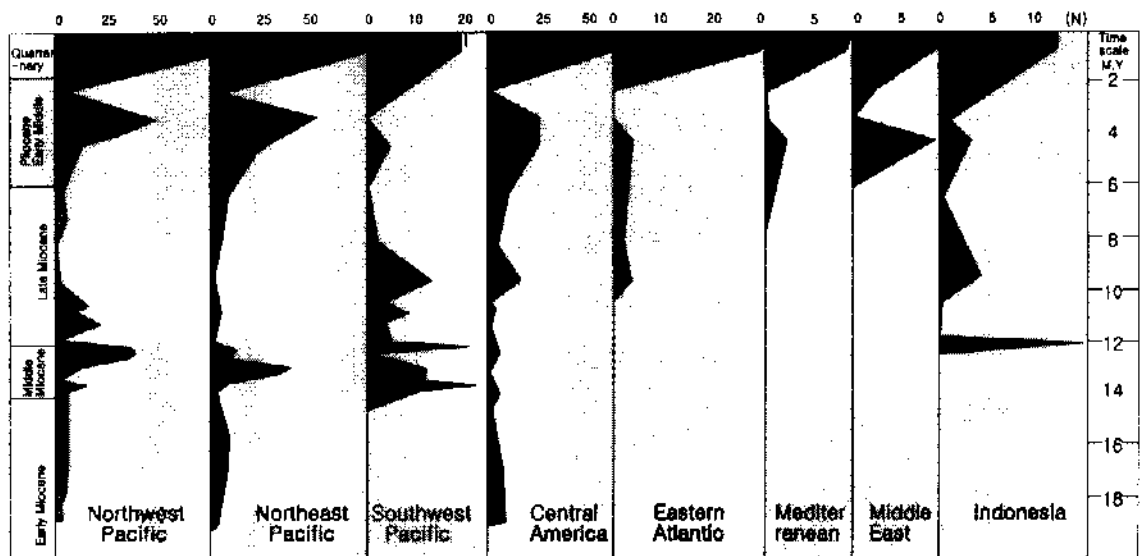


Fig. 3-7-1. A number of tephra layers in DSDP cores (320 sites) are acquired from the whole world ocean (data from Kennet and Thunell, 1975).

동측 한국대지에서 채취된 시추퇴적물들을 분석하여 각 테프라들을 분류하고 퇴적물을 계신하였으며 퇴적환경을 해석하였다. 본 연구는 서측 한국대시의 울릉분지간 통로 및 울릉분지 남서측 대륙붕에서 채취된 시추퇴적물에 협제된 테프라층을 분석코자 한다. 울릉도 및 SKP 해저화산에서 분출된 테프라들은 편서풍에 의해서 기원 화산체로부터 동쪽으로 편향된 분포양상을 가진다고 보고되었다. 이에 서측 한국대지에서 획득한 시추퇴적물들은 고기후 연구에 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 울릉분지평원에 형성된 심해수주변에서 채취된 시추퇴적물에서는 다수의 테프라층들이 침식작용에 의해서 제거된 것으로 해석된다. 따라서 일본분지와 인접한 울릉분지간 통로에서 채취된 시추퇴적물의 테프라층 분석 결과는 지층류의 작용시기 및 퇴적기작을 밝힐 수 있는 자료로 활용될 것이다. 본 연구는 기존의 연구결과에 의해서 제거된 다수의 의문점을 해결하고, 동해에서의 정밀한 테프라시각층서대비를 가능케 할 것으로 기대된다.

2. 분석방법

동해 한국대지와 울릉분지간 통로 및 대륙붕들에서 채취된 시추퇴적물들의 절개된 단면과 연 X-선 사진 등을 사용하여 테프라층을 확인하였다. 시추퇴적물에서 소립질의 테프라층은 육안으로 세립질 백퇴적물과 뚜렷이 구별되며, 대부분 부식질 또는 스크리아질 리필리 (pumice or scoria lapilli)로 이루어져 있으며, 일부는 유리질 화산재 (glass shard)들로 구성되어 있다. 절개된 시추퇴적물에서는 각 테프라층들의 입도, 두께, 광물조성 등을 관찰하였으며, 내부퇴적구조와 상하부 퇴적물과의 경계면 등은 연 X-선 사진에 의해서 분석하였다.

테프라층의 수직적인 입도변화를 관찰하기 위하여 각 테프라층은 최소한 상, 중, 하의 3 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다. 그리고 각 테프라층들의 광물조성, 주성분원소 (major element) 및 미량원소 (trace or rare earth element), 미세구조관찰을 위한 시료는 4 ϕ 체로 점도퇴적물을 제거한 후에 초음파 진동기를 사용하여 세척 및 분산시켜 준비하였다. 테프라층의 광물조성은 편광현미경과 실체현미경을 사용하여 관찰하였으며, 이를 위하여 박편을 제작하였다. 박편들은 레진 (caldofix)을 사용하여 시료를 슬라이드 글라스에 고정시킨 후에 70 $^{\circ}$ C 온도로 1 시간 30 분간 가열하여 굳혔다. 테프라의 원소분석을 위하여 실체현미경하에서 샤드 (glass or

pumice shards) 만을 선택하여 연마편을 제작하였다. 연마편은 1 μm diamond paste까지 연마한 후에 기초과학연구원연구소가 보유한 EPMA (CAMECA SX-51 모델)장비를 사용하여 분석하였다. 테프라의 주성분원소는 Al, Si, Na, Mg, K, Ca, Ti, Mn, Fe^{*}를 분석하였다. 분석조건은 전압 15 keV, 전류 12 nA와 beam diameter 15 μm 이다. 각각의 원소 측정시간은 10 sec counting time을 주었으며, 실험오차를 줄이기 위하여 동일한 시료에 대하여 2 회 이상의 분석을 실시하였다. 테프라의 미량원소는 원소종류에 의해서 ICP/AES (SHIMAZ ICPSIV 모델)과 ICP/MS (VG Elemental PQII⁺ 모델)을 사용하여 분석하였으며, 원소 분석의 신뢰성을 확인하기 위하여 미국 지질조사소의 표준시료를 같은 방법으로 분석하여 비교하였다. 테프라의 기공의 형태 및 크기 등은 EPMA에 부착된 backscattered image 촬영장치를 사용하여 분석한후에 컴퓨터에 장착된 영상분석기로 측정하였다.

3. 제4기 후기 플라이스토세 이후의 동해의 화산활동

동해의 울릉분지의 대륙사면과 분지평원, 남측과 서측의 대륙붕, 그리고 동측 한국대지에서 채취된 시추퇴적물들에 협재된 테프라층의 분류에 의해서 총 10 개의 표식테프라층이 확인되었다. 이 표식테프라들은 후기 플라이스토세 이후에 분출된 것으로 분석되었으며, 각 테프라들은 구성광물, 주요원소, 미량원소, 미세퇴적구조, 층서적 위치 등에 뚜렷한 차이를 가진다. 일부 테프라층들은 해류 및 지층류에 의해서 퇴적동시적으로 재동되거나, 저서생물의 교란에 의해서 수직적인 혼합이 관찰된다. 그리고 화산분출당시에 고기상학적 조건에 의해서 편향된 분포범위를 가지기도 한다. 그러므로 일부 테프라층들은 시추퇴적물간의 층서대비에 있어 해상력이 다소 떨어진다는. 또한 퇴적이후에 저탁류에 의한 재동된 테프라들도 다수 포함되어 있는데, 이 테프라들은 시추퇴적물간의 층서대비에 오류를 범할 수 있는 가능성이 있음으로 배제시켰다.

화산활동은 다양한 테프라를 형성하는데, 시간층서대비에 이용될 수 있는 표식 테프라는 플리니안형의 화산분출시에 대기 또는 수중 낙하에 의해서 운반된 것들이 가장 적합하다 (Fig. 3-7-2). 동해의 시추퇴적물에서 분류된 테프라중에서 울릉도와 일본 류슈에 위치하는 육상화산으로부터 기원된 테프라들은 대기 낙하에 의해서 동해로 공급된 것으로 해석된다. 반면에 한국대지에 위치하는 SKP 해저화산으로부터

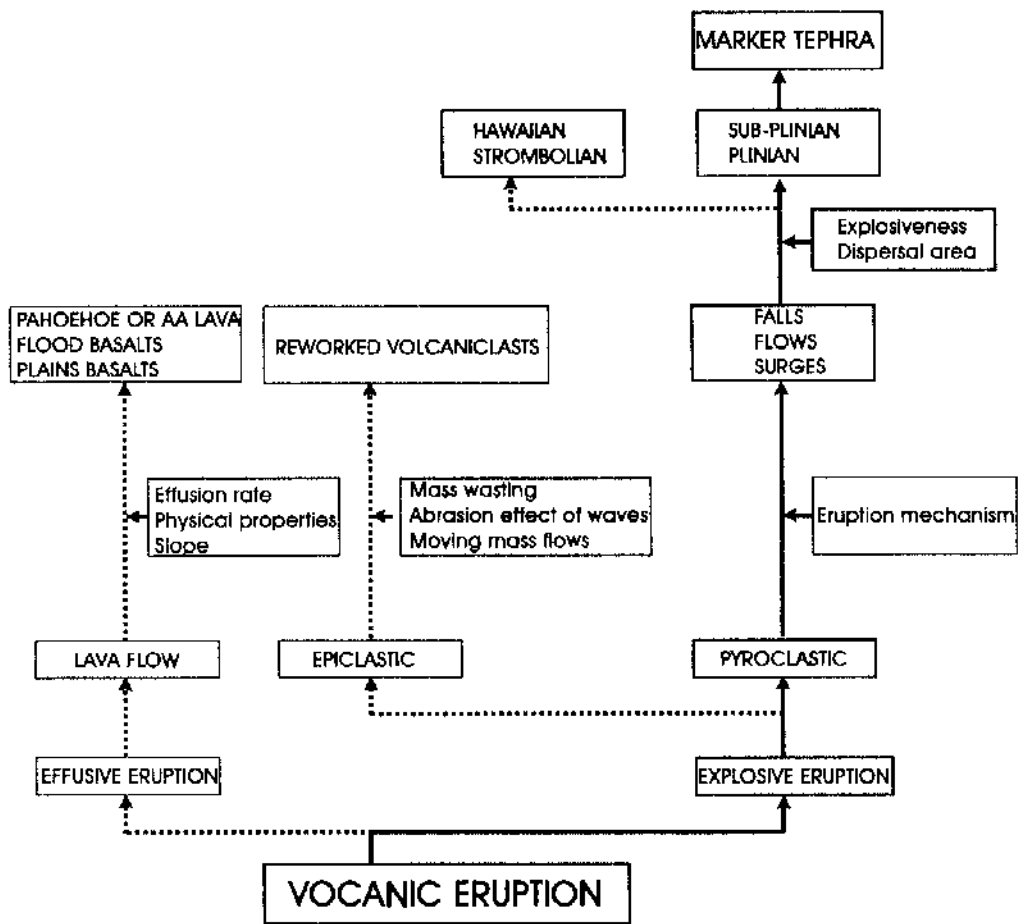


Fig. 3-7-2. Flow chart for classification of tephra using the tephrostratigraphic data in the East Sea.

기원전 테프라들은 수증 나하에 의해서만 공급된 것들로 분석되었다. 울릉도 화산 폭발에 의해서 공급된 테프라는 울릉 III 테프라 (ca. 16,500 yr. B.P.), 울릉 II 테프라 (ca. 9,300 yr. B.P.), 울릉 I 테프라 (ca. 5,600 yr. B.P.)로 구분되었다 (Fig. 3-7-3). 해저퇴적물과 함께 자세한 울릉 테프라층의 연구를 위하여 수차례에 걸친 야외조사에 의해서 울릉도 육상에 분포하는 후기 플라이스토세 이후에 분출된 3 개의 테프라층이 분류되었다 (Fig. 3-7-4; 허식 등, 1997; Chun et al., 1997b; Chun, 2000). 이 울릉-테프라들은 분출기작과 폭발력의 차이를 보이는데, 초기에는 화산재 분출 (ash fountaining)에 의한 세립질 화산재와 소량의 부석질 라필리를 공급한 것으로 해석되었다. 울릉도 육상노두에서 관찰된 울릉-III 테프라층은 성장라필리 (accretionary lapilli; Fig. 3-7-5A)를 포함하는 수 cm 간격의 평행층리를 갖는 특징을 보인다. 울릉-II 테프라는 가장 광범위한 지역에 분포하고 부석질 라필리와 다수의 암편들을 포함하는 하부층단위와 성장라필리 (Fig. 3-7-5C)와 화산재로 구성된 상부층단위로 구분된다. 이들 라필리들은 신장된 원형의 기공이 발달하는데 (Fig. 3-7-5B), 이것은 마그마의 점성보다 빠른 유동력에 의해서 분출직전에 전단변형을 받아 원통형의 기공을 형성한 것으로 해석된다 (Heiken and Wohletz, 1991). 이에 비해서 울릉-I 테프라는 부석질 라필리만으로 구성되어 있으며, 신장된 원형의 기공이 발달한다 (Fig. 3-7-5D). 동해 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물내에 현재된 울릉-I 테프라층은 생물교란작용에 의해서 수직적으로 산재되어 나타난다. 한국대지에 위치하는 SKP 해저화산의 폭발적인 화산분출에 의해서 공급된 테프라들은 SKP-IV 테프라 (ca. 117,000 yr. B.P.), SKP-III 테프라 (ca. 93,000 yr. B.P.), SKP-II 테프라 (ca. 50,000 yr. B.P.), SKP-I 테프라 (ca. 27,000 yr. B.P.)로 구분되었다 (Fig. 3-7-3). 한국대지에서의 해저화산체는 자기이상과 천부지층탐사자료에 의해서 확인되었다. 시추퇴적물내에 현재된 해저화산으로부터 공급된 테프라들도 구성광물, 주요원소 및 미량원소, 미세기공구조 등에 의해서 뚜렷히 구별된다. SKP 테프라들은 육안으로 관찰시 울릉-테프라들이 유백색의 부석질 라필리만으로 구성된 것에 반해 (Fig. 3-7-6A), 암색의 스킨리아와 암편들을 다양 포함하고 있다 (Fig. 3-7-6B). 또한 육상화산분출에 의한 테프라들은 단모드 입도분포를 보이는 반면에 해저화산분출시에는 테프라들이 해수와의 접촉에 의해서 뜨거운 부석들의 밀도가 해수와의 밀도차이가 거의 나타나지 않아서, 암편과 부석들간의 낙하속도 차이가 커져 뚜렷한 복모드 입도분포를 보이게 된다 (Fig. 3-7-6B; Cashman and Fiske, 1991). 샤프의

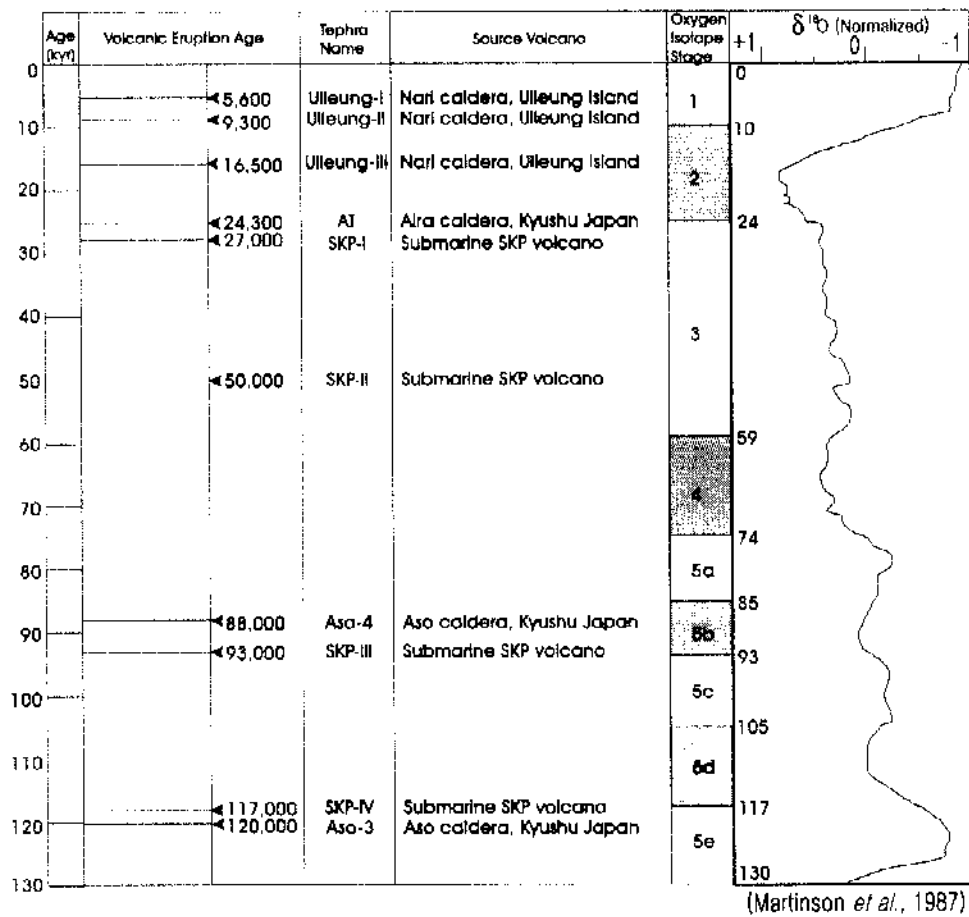


Fig. 3 7 3. The correlation between oxygen isotope stages and volcanic eruption ages of tephra in the cored sediment of the East Sea.

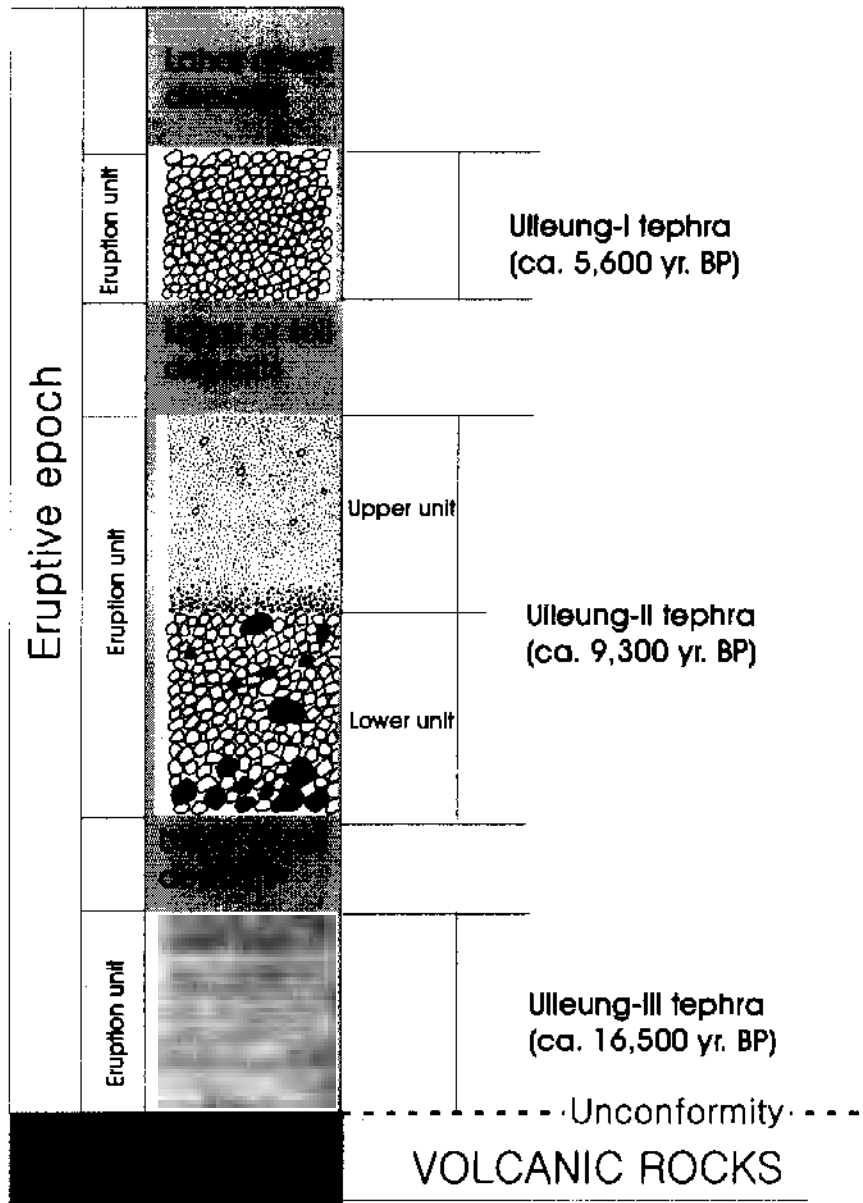


Fig. 3-7-4. Summary column of textural variation and eruption events (ages) in Ulleung Island.

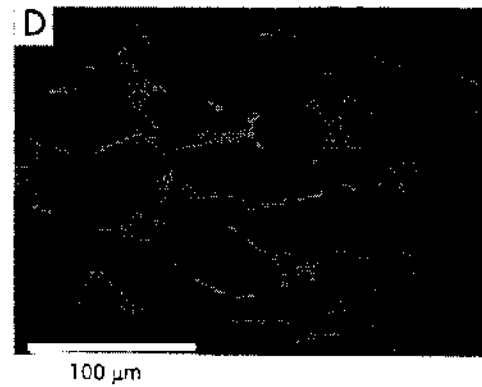
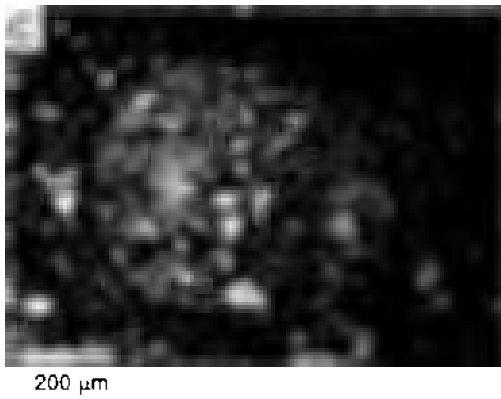
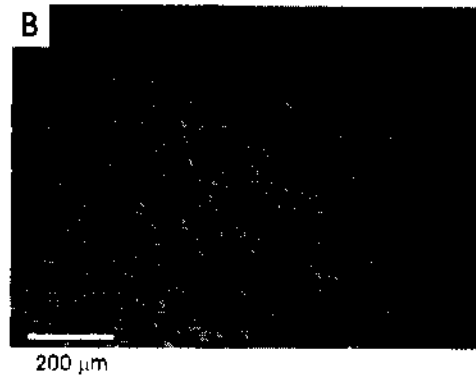
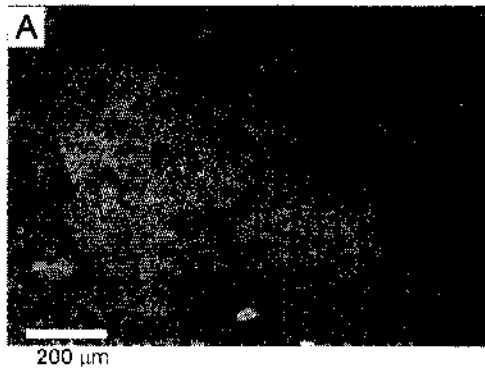
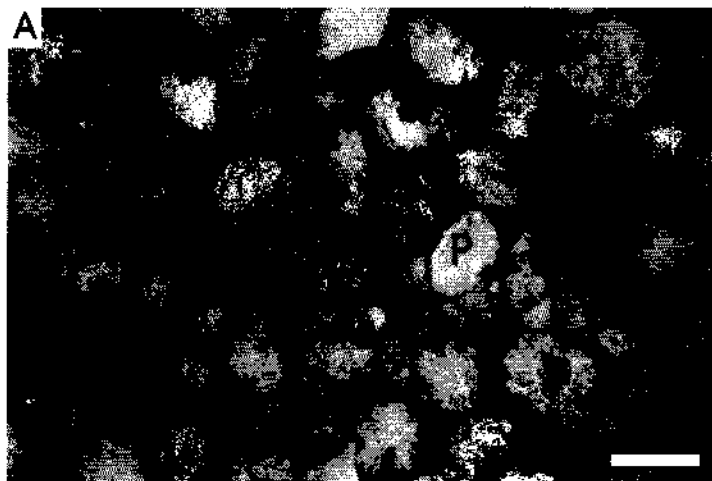
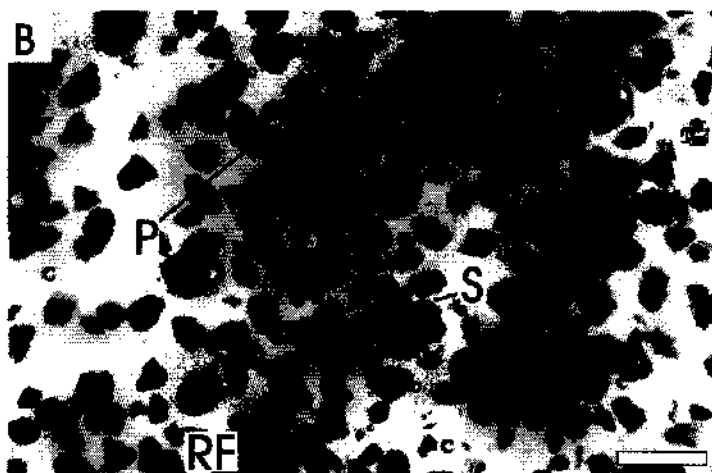


Fig. 3-7-5. Backscattered electron images (BSEI) of the polished section of pumice lapilli from the Ulleung tephra showing microtexture of vesicles. (A) Ulleung III tephra. (B) and (C) Ulleung II tephra. (D) Ulleung I tephra.



1 mm



1 mm

Fig. 3-7-6. Photomicrographs showing clast compositions of the tephra. (A) Ulleung tephra. (B) SKP tephra.

주요원소 분석에 의해서도 SKP 테프라들은 울릉-테프라와 대비하여 낮은 TiO_2 , CaO, MgO 값과 높은 FeO^* 값에 의해서 구별되지만, 일부는 중첩되어 나타난다 (Fig. 3-7-7). 특히 한국대지에 위치한 SKP 해저화산 주변에서 채취한 시추퇴적물들에서는 화성쇄설성 중력류 (pyroclastic gravity flow; Fiske et al., 1989)의 유입에 의한 용결작용 (welding)이 보존된 테프라층이 발달하고, 해수표층에 부유된 테프라의 고집적에 의해서 야기된 수직밀도류 (vertical density current)의 공급으로 아주 두꺼운 층후의 SKP 테프라들이 협제한다. SKP 테프라들의 기공형태는 기공사이의 벽이 아주 두껍게 발달하고, 벽에서는 다수의 수화균열 (hydration crack)들이 관찰된다 (Fig. 3-7-8). 이것은 뜨거운 화성쇄설성 중력류가 해수에 의해서 급작스럽게 냉각되면서 형성된 것으로 해석된다 (Heiken and Wohletz, 1991). 그리고 동해에서 채취된 시추퇴적물에서는 일본 규슈지방의 유상화산의 폭발적인 분출에 의해서 공급된 Aso-3 테프라 (ca. 120,000 to 110,000 yr. B.P. (TL); Machida and Arai, 1992), Aso-4 테프라 (ca. 88,000 yr. B.P. (K Ar); Machida and Arai, 1992), AT 테프라 (ca. 24,300 yr. B.P. (AMS ^{14}C); Oba et al., 1995)들이 확인되었다. 이 테프라들은 유문암질 마그마 성분으로 울릉-테프라와 SKP 테프라와는 뚜렷한 주요원소 차이가 나타나고, 구성광물도 대부분 유리질 사드로 구성되어 있다 (Fig. 3-7-9).

동해에서 채취된 시추퇴적물내에 협제된 10개의 표식테프라들은 내륙사면과 울릉분지평원, 한국대지의 퇴적물과 저층류의 작용들에 의한 연구에 이용될 수 있다.

4. 연구결과

가. 한국대지와 울릉분지간 통로에서의 테프라층시대비

한국대지에 위치하는 MB98PC-14, MB98PC-15, MB99PC-1 시추퇴적물들은 해저산과 해저산 사면 등에서 채취하였다 (Fig. 3-4-1; Table 3-4-1). 시추퇴적물내에 협제된 테프라들의 층후, 입도, 조적 등은 서측과 동측 한국대지에서 서로 상이하게 나타난다. 이러한 차이는 폭발적인 화산분출 당시의 고기상과 고해류 등을 간접적으로 지시하는 증거로 이용될 수 있다.

서측 한국대지에서 획득된 MB98PC-14와 MB98PC-15 시추퇴적물에서는 부식질

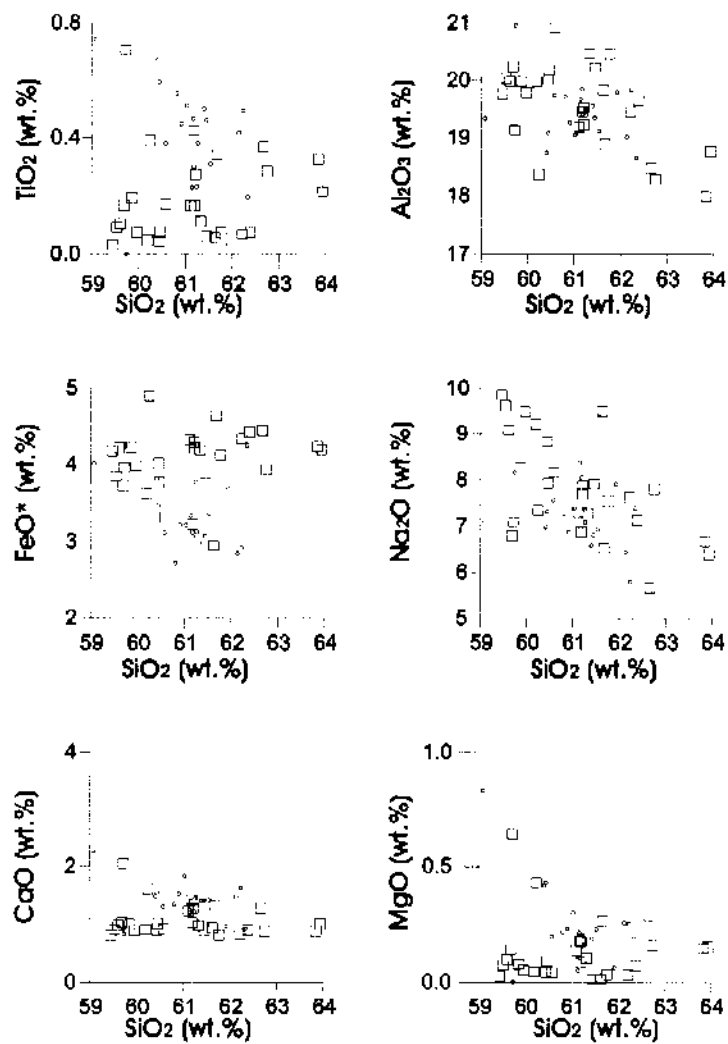


Fig. 3 7-7. Diagrams showing ratios of SiO₂ vs. other oxides of the SKP and Ulleung tephtras. Open squares represent the SKP tephra; small open circles do the Ulleung tephtras.

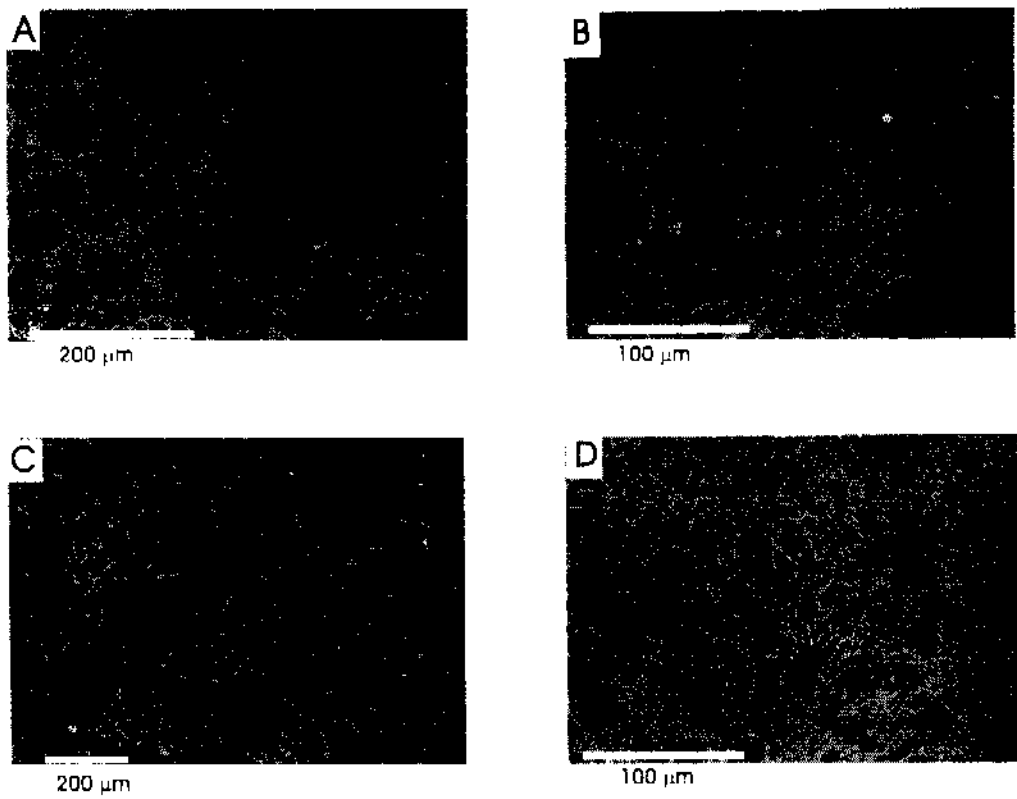


Fig. 3 7 8. Backscattered electron image (BSEI) of polished section showing microtexture of vesicles in pumice lapilli within the SKP tephra. (A) SKP IV tephra. (B) SKP III tephra. (C) SKP II tephra. (D) SKP-I tephra.

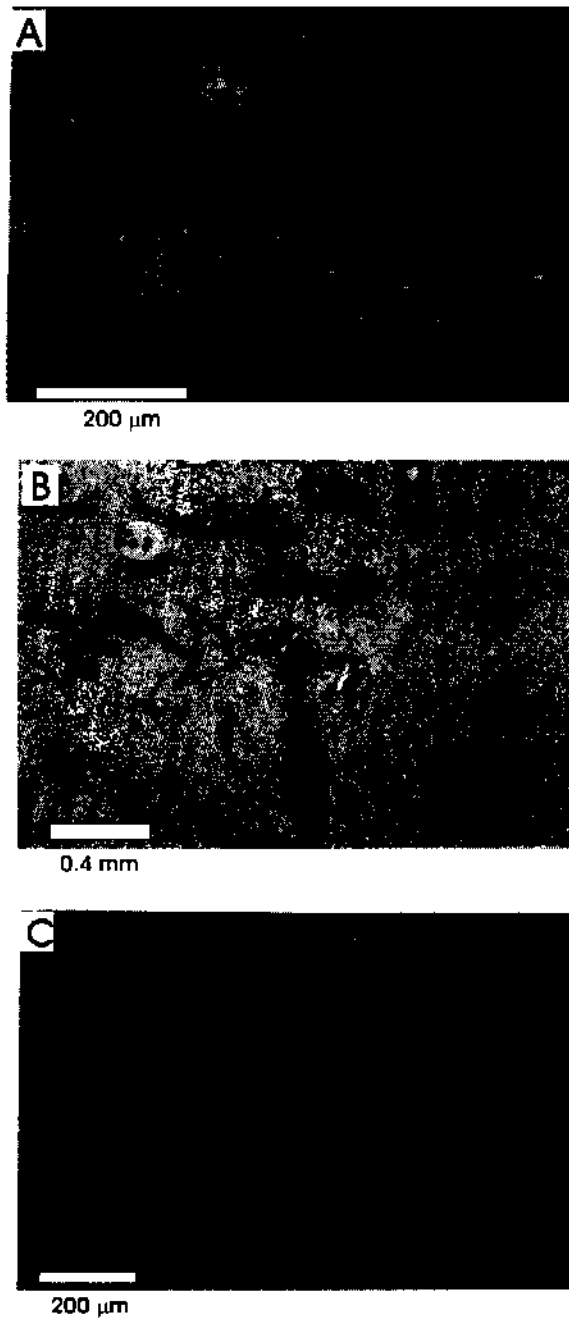


Fig. 3-7-9. Morphology of glass shards in the tephras erupted from the Japan. (A) Aso-3 tephra. (B) Aso-4 tephra. (C) AT tephra.

라필리들이 수 cm 총후를 가지며, 시추퇴적물 진 구간에서 대부분 산재되어 나타난다 (Fig. 3-4-2). 그리고 MB98PC-15 시추퇴적물에서는 전 구간에서 저층류 또는 생흔작용에 의한 지속적인 영향을 받은 것으로 해석된다. 동측 한국대지에서 획득된 MB99PC 1 시추퇴적물내에 협재된 테프라층들은 서측 한국대지에 협재된 테프라층에 비해서 총후와 입도 등이 증가한다. 이것은 지리적으로 울릉도와 SKP 해저화산을 기준으로 하여 서측보다는 동측에 상대적으로 많은 양의 테프라들이 공급되었음을 지시한다.

울릉분지간 통로에서 채취된 MB99PC-2와 MB99PC-3 시추퇴적물에서는 한국대지와 울릉분지평원에 비해서 아주 두꺼운 테프라층이 협재한다 (Fig. 3-4-2). 이 테프라들의 총후는 상대적으로 두꺼워졌으나, 테프라들의 입도는 한국대지에 비해서 감소하는 특징을 갖는다. 울릉분지 남서측 대륙붕에서 채취한 MB98PC 11과 MB98PC 12 시추퇴적물에서는 뚜렷한 테프라층의 협재가 확인되지 않는다 (Fig. 3-4-2).

동해 울릉분지와 한국대지에서 가장 넓게 분포하는 울릉-II 테프라층은 기원전 약 9,300 년에 울릉도의 폭발적인 분출에 의해서 공급되었으며, 대부분 부식질 라필리와 세립질의 암편들로 구성되어 있다 (Chun, 2000; Machida and Arai, 1992). 동해 서측 대륙사면과 한국대지, 그리고 울릉분지간 통로 등에 채취된 시추퇴적물내에 협재된 울릉-II 테프라층은 다양한 퇴적구조로 협재되어 있다 (Fig. 3-7-10). 서측 대륙사면 (MB98PC-13; 198~215 cm)과 한국대지 (MB98PC-14; 146~160 cm)에서는 수개의 부식질 라필리들이 산재되어 나타나며, 동측 한국대지 (MB99PC 1; 60~71 cm)와 울릉분지간 통로 (MB99PC-2; 258~274 cm)에서는 세립질 테프라들이 평행층리 또는 사층리를 갖는다 (Fig. 3-7-10). 그리고 울릉분지간 통로에서 획득한 MB99PC 3 시추퇴적물의 울릉-II 테프라층은 198~251.8 cm 구간에 협재되어 있다 (Fig. 3-7-10). 평행층리 또는 사층리가 발달된 울릉-II 테프라층은 상하부 퇴적상과 층서적으로는 기타 해역에서 채취된 울릉-II 테프라층과 거의 일치하지만, 퇴적동시성 또는 직후에 저층류에 의한 재봉을 받은 것으로 해석된다. 그럼에도 불구하고 울릉-II 테프라층에 의해서 계산된 기원전 약 9,300 년까지의 퇴적률은 한국대지에서 7.6 cm/kyr로 낮게 나타났으며, 울릉분지간 통로에서는 29.5 cm/kyr로 아주 높게 나타난다. 이것은 한국대지에서 채취된 96EBP 4와 96EBP 3 시추퇴적물에서도 울릉-II 테프라층을 기준으로 한 퇴적률이 낮게 나타난 것과 결과가 일치한다.

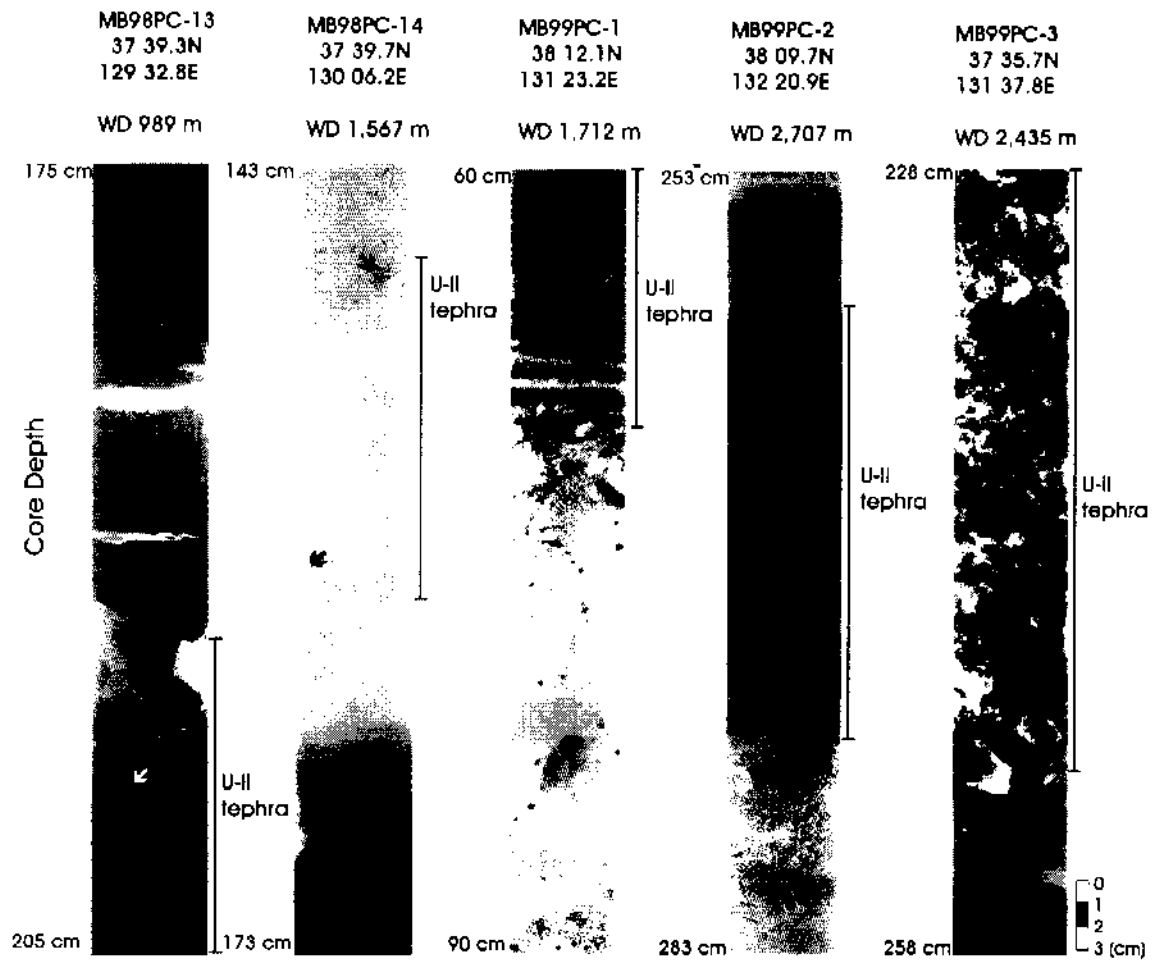


Fig. 3-7-10. Textural change of the Ulleung-II tephra.

또한 울릉분지간 통로에서 울릉-II에 의해서 계산된 퇴적물은 울릉분지평원에서의 값보다 높게 나타나는데, 이것은 반원양성퇴적물의 높은 퇴적작용 뿐만아니라, 많은 양의 울릉-II 테프라 공급에 의한 것으로 해석된다.

동측 한국대지에 위치한 SKP 해저화산에서의 수차례에 걸친 폭발적인 화산활동은 부식질 또는 스코리아질 라필리와 암편들을 주변해역에 공급한 것으로 밝혀졌다 (Chun, 2000). 한국대지와 울릉분지간 통로에서도 SKP-II 테프라층을 포함하는 다수의 SKP 테프라들이 협재되어 있다 (Figs. 3-4-2 and 3-7-11). 한국대지에서의 SKP II 테프라층은 직경 약 4 mm의 부식질 라필리들로 구성되어 있으며, 시추퇴적물 깊이 431~434 cm 구간에 협재한다 (Fig. 3-7-11). 이에 반해 울릉분지간 통로에서 채취된 SKP-II 테프라층은 직경 약 7 mm의 부식질 또는 스코리아질 라필리와 암편들로 구성되어 있으며, 시추퇴적물 깊이 약 663.5~702 cm 구간에 발달한다 (Fig. 3-7-11). 따라서 SKP 해저화산의 폭발적인 수증분출은 주로 해류에 의한 이동에 의해서 가장 많은 영향을 받는 것으로 추정되는데, 이 해류에 의한 이동은 SKP 해저화산을 중심으로 서측보다는 동측으로 우세한 것으로 해석된다.

나. 테프라층에 의한 고환경 해석

한국대지와 울릉분지간 통로에서 획득한 시추퇴적물내에 협재된 각 테프라층들은 퇴적구간별 퇴적률과 퇴적당시의 해류 및 고환경을 지시한다. 울릉분지평원과 대륙사면에서는 울릉-II 테프라층과 AT 테프라층사이에 협재된 세립질 지탁류층을 확인할 수 있었다 (Chun et al., 1997a). 이에 반해 동측 한국대지의 해저산 부근에서는 저해수면시기에 공급된 질량류층들의 발달을 확인 할 수 없었다 (한상준 등, 1997; 1998). 현재까지는 주로 한국대지에서 채취된 시추퇴적물들은 고해양학적인 연구에 적합한 질량류의 발달이 거의 없는 것으로 예상된 해저산에서 채취된 것들이다. 이번 연구에서는 해저산의 사면 (MB99PC-1)과 한국대지의 사면 (MB98PC-15)에서 시추퇴적물들을 채취하였다. 해저산의 사면에서 채취된 MB99PC-1 시추퇴적물에서는 울릉 II 테프라와 AT 테프라층이 잘 보존되어 있다 (Fig. 3-7-12). 이들 테프라층 사이에는 양호한 원마도의 퇴적암편과 부식질 라필리들이 산재된 아주 두꺼운 변형층리가 발달된 벨퇴석물이 협재한다 (Fig. 3-7-12). 따라서 한국대지에서도 국부적으로 저해수면시기에 사면퇴적물의 재동에 의한 암설

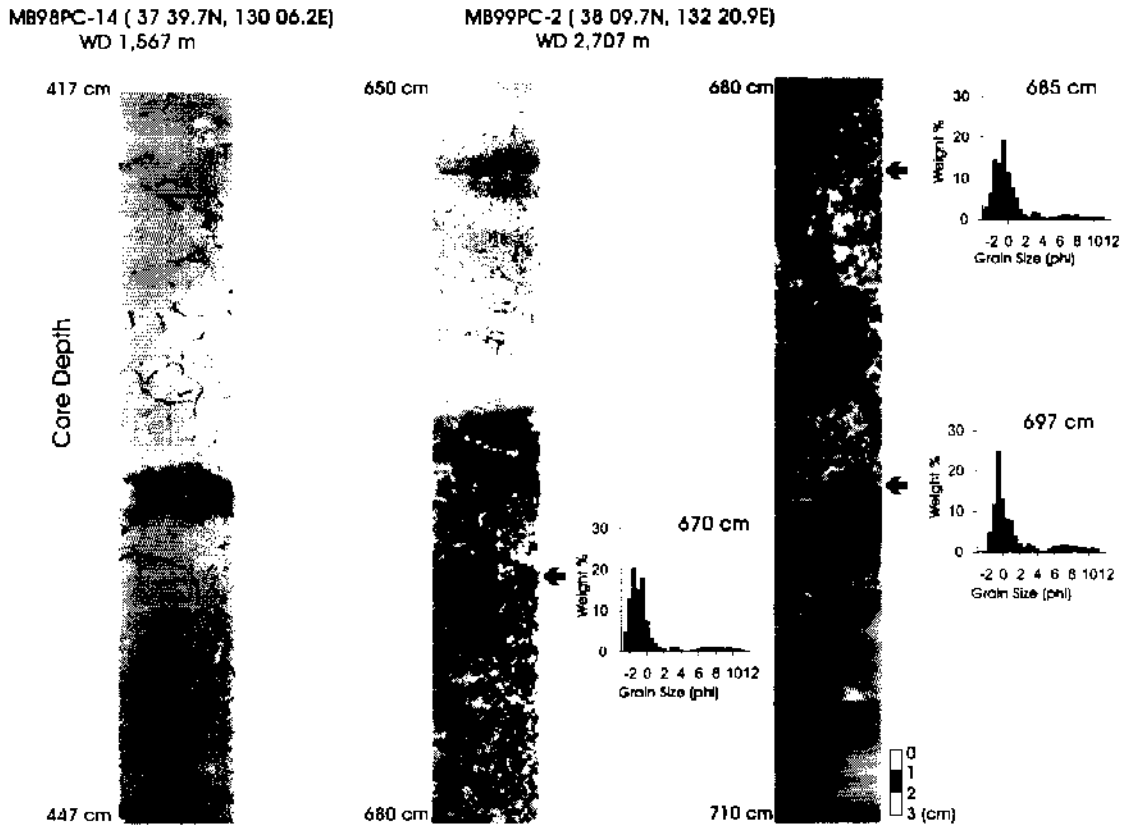


Fig. 3-7-11. Texture and grain size distribution of the SKP II tephra.

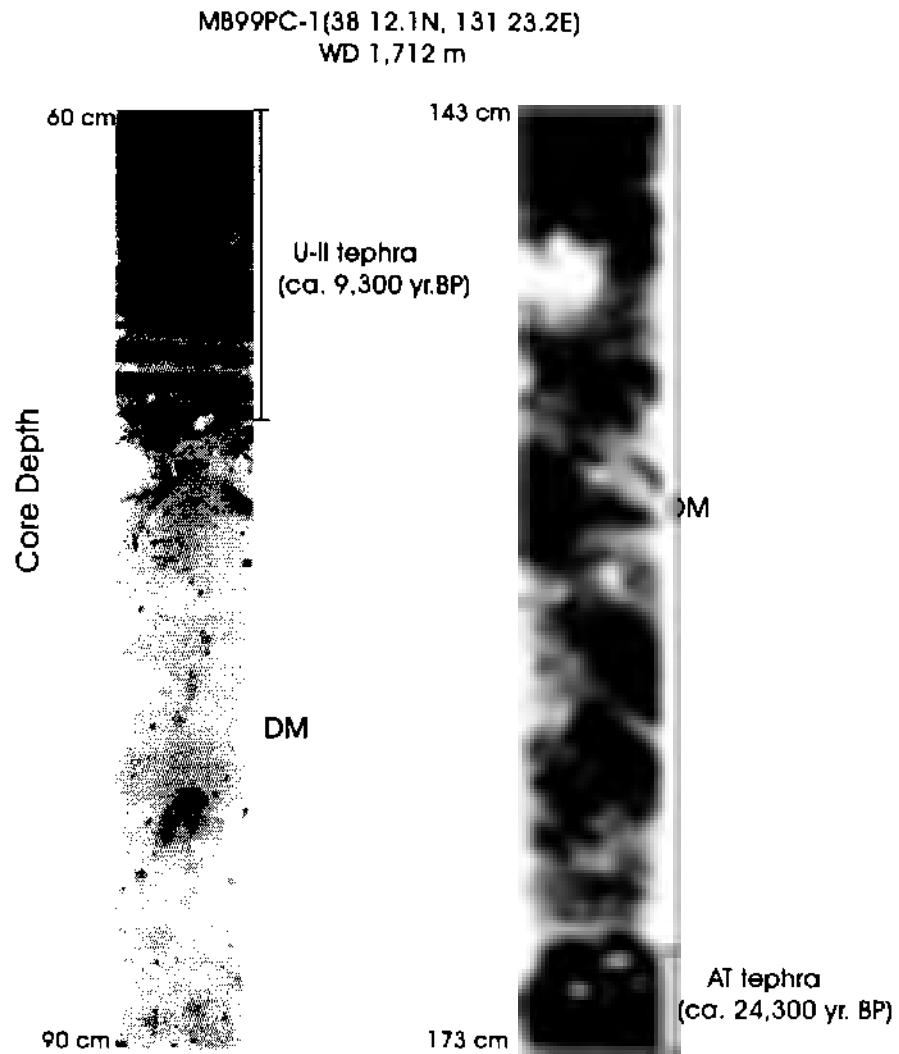


Fig. 3-7-12. Very thick-bedded deformed mud. It is intercalated with the Ulleung-II tephra and AT tephra of MB99PC-1 core.

류의 발달을 직접적으로 지시하는 것이다.

울릉분지간 통로에서 채취된 시추퇴적물들은 각 구간별 테프라층들이 미약한 층리와 밀도분급의 입도특성이 거의 나타나지 않으나 (Fig. 3-7-13), MB99PC 3 시추퇴적물에 함유된 울릉 II 테프라층의 경우도 하부로부터 상부로 가면서 점차적으로 평행층리가 발달한다 (Fig. 3-7-13). 또한 시추퇴적물 깊이 609~905 cm 구간에 함유된 SKP-II 테프라층의 경우도 입도의 상향세립화양상과 신장된 역들이 층리에 평행하게 배열된 특징을 갖는다 (Fig. 3-7-14). 울릉분지간 통로에서는 기원전 약 9,300 년까지도 저층류에 의한 테프라들의 재동이 우세하게 일어났음을 지시한다. 그리고 해저수위가 발달된 울릉분지평원에서는 테프라들의 저층류에 의한 침식, 이동이 우세한 반면에 울릉분지간 통로에서는 저층류에 의한 집적현상이 지배적이었음이 추론된다. 한국대지에서 채취된 MB98PC 15 시추퇴적물의 최상부에서도 세립질 테프라들과 뿔퇴적물들의 교호사층리가 특징적으로 나타난다 (Fig. 3-7-15). 그리고 일부 구간에서는 세립질 테프라들이 생흔구조내의 충전퇴적물로 나타난다. 따라서 동해에서는 퇴적환경별로 저층류에 의한 세립질 테프라들의 재동이 빈번히 일어나고 있음이 밝혀졌다. 이것은 시추퇴적물간의 테프라시간층서대비에 더욱 어려운 요소로 작용한다.

MB99PC-3 (37 35.7N, 131 37.8E, WD 2,435 m)

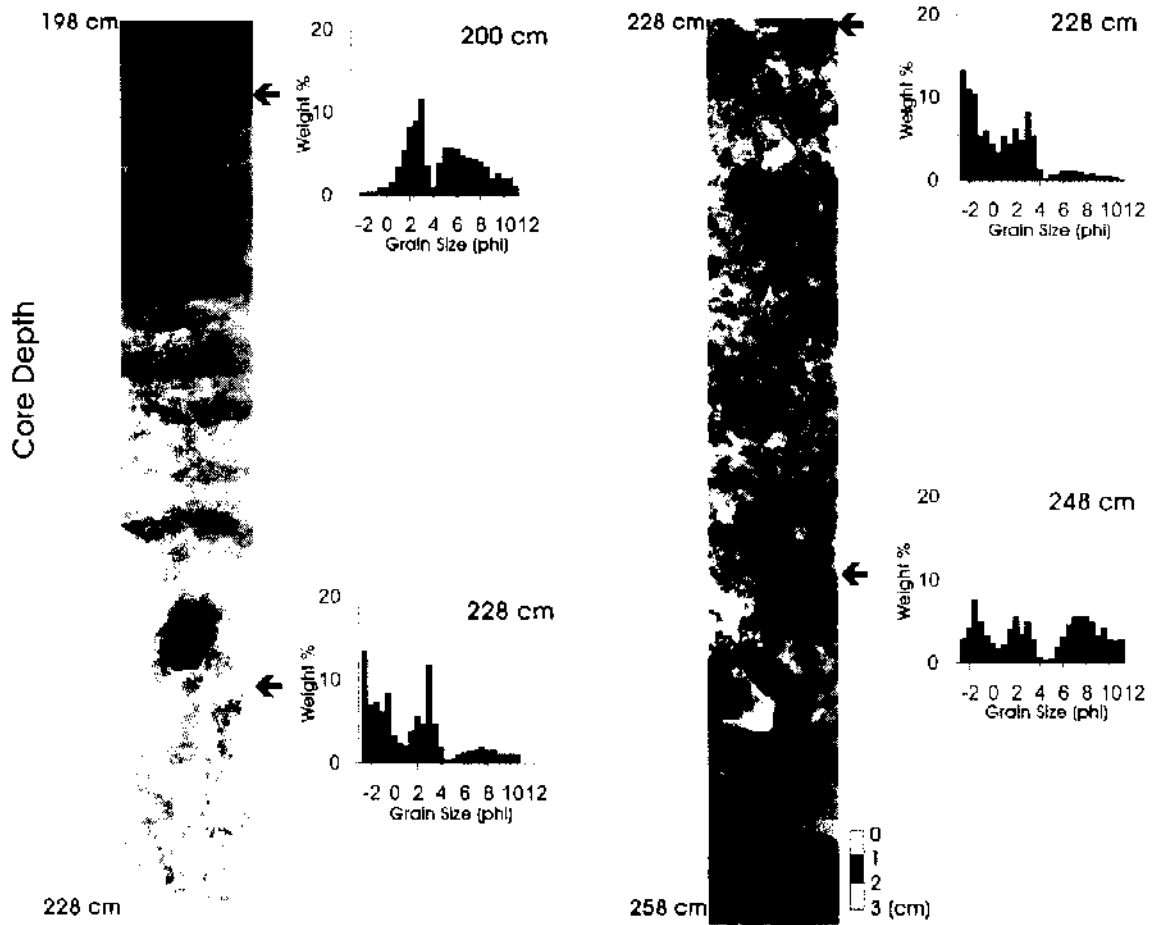


Fig. 3-7-13. Vertical change of texture and grain size distribution of the Ulleung-II tephra of MB99PC-3 core.

MB99PC-3 (37 35.7N, 131 37.6E, WD 2,435 m)

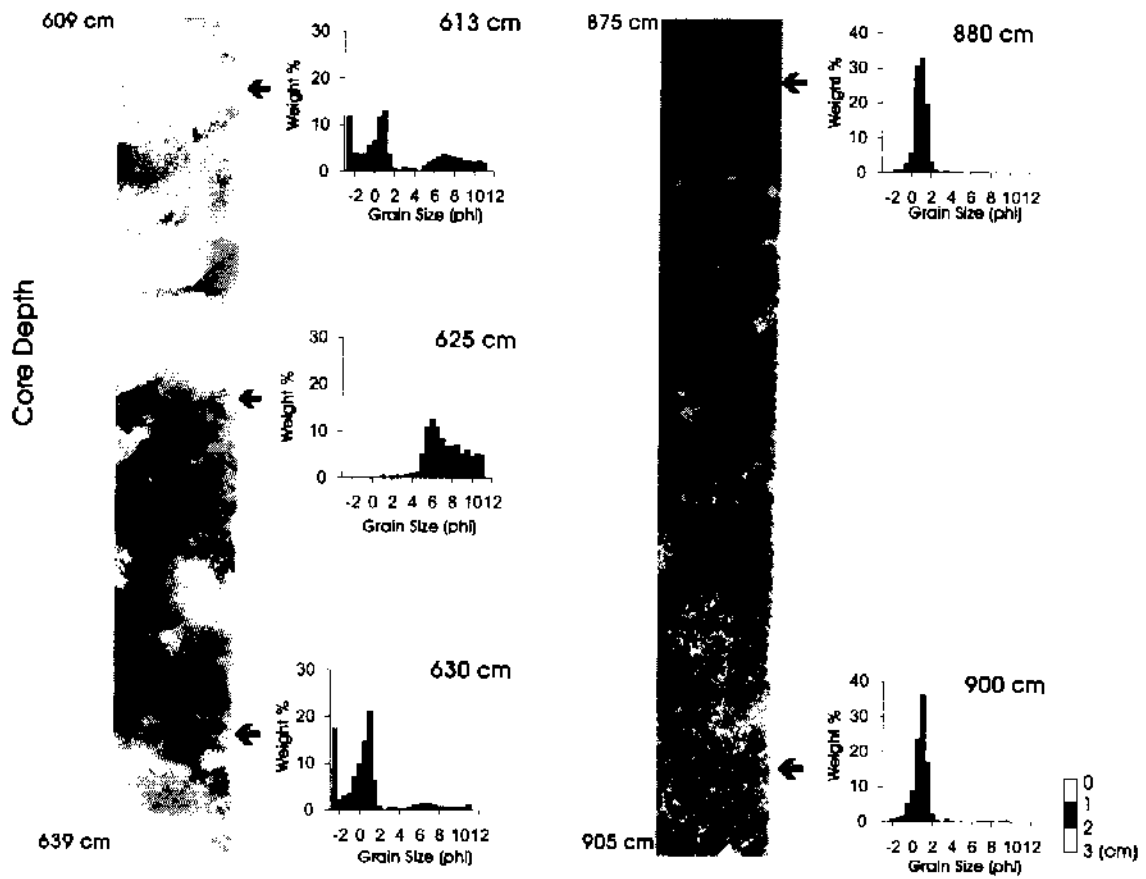


Fig. 3 7 14. Vertical change of texture and grain size distribution of the SKP II tephra of MB99PC 3 core.

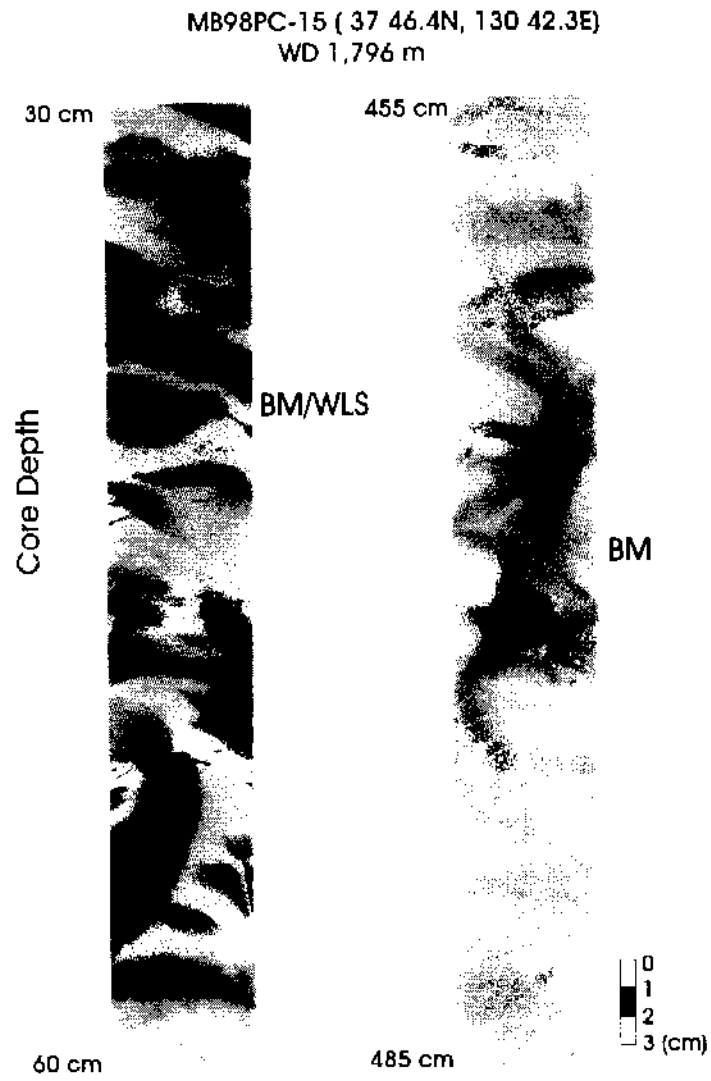


Fig. 3-7-15. Reworked tephra layers of MB98PC-15 core.

제 8 절 자동코아다중검침기 (Automated Multi-Sensor Core Logger: AMSCL)를 이용한 고해상 퇴적환경, 고기후 및 퇴적물 안정도 연구

대표저자: 이희일, 김신정, 최현주 (한국해양연구소, 해양지질연구단)

1. 서론

국내에서는 최초이며 세계적으로 35번째 구입된 자동코아다중검침기 (Automated Multi-Sensor Core Logger: AMSCL)는 P파 속도 (P wave velocity), 밀도 및 자화율 (magnetic susceptibility; MS)을 동시에, 연속적으로 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다. 자동코아다중검침기의 사용 역사는 그리 오래되지 않았다. 1970년대 이후 (Whitmarsh, 1971), 감마감쇄법 (gamma ray attenuation method)을 사용하여 코어를 교란시키지 않은 채 정확하게 밀도를 측정하는 것에 대한 발표들이 있었다.

1960년대 후반부터 이 방법들에 대한 꾸준한 연구가 수행되어 왔으며 (Evans, 1965; Preiss, 1968; Brier et al., 1969; Corey and Hayes, 1970; Whitmarsh, 1971), 자동코아다중검침기를 사용하여 퇴적물의 특성 특히, P파 속도, 밀도 및 자화율에 대한 보정과 응용에 대한 연구가 Weber et al. (1997)에 의해서 발표되었다. 국내에서는 최초로 음속과 감쇠계수를 통해 시추퇴적물을 조사한 적이 있으나 (김 등, 1991), P파 속도, 감마밀도 및 자화율을 동시에 2 cm 간격으로 연속적으로 측정할 사례는 이 장비가 구입된 1998년부터이다. 자동코아다중검침기 (AMSCL)를 활용한 최초의 분석자료로서 동해에서 채취된 피스톤코아를 이와 신 (1998), 이 등 (1999)이, 황해에서 채취된 피스톤코아를 이 등 (1998, 1999)이 분석하여 보고하였다.

분석된 시추퇴적물이 위치한 연구해역은 한국 동해의 후포와 삼척사이의 대륙붕 (MB98PC-3 코아, MB98PC-4 코아 및 MB98PC-5 코아)과, 대륙사면 (MB98PC-6

코아), 심척과 속초사이의 대륙시면 (MB98PC 13 코아), 울릉분지의 서측의 가장자리 (MB98PC 7 코아), 한국대지 서측 (MB98PC 14 코아와 MB98PC 15 코아), 대한해협에서 동해로 들어오는 대륙붕 (MB98PC 11 코아와 MB98PC 12 코아), 한국대지 동측 (MB99PC-1 코아), 울릉-일본분지 통로 (MB99PC-2 코아와 MB99PC 3 코아) 등이며, 모두 총 13정점에 대한 P파 속도, 감마밀도 및 자화율 (MS)을 측정하였다.

2. 연구방법

자동코아나중감침기 (Automated Multi Sensor Core Logger, AMSCL)장비는 P파 속도, 감마밀도 및 자화율을 동시에 같은 간격으로 측정한다는 장점이 있으며, 채취된 퇴적물코아를 교란하지 않고 그대로 측정하는 방법 (whole core logging)과 코아를 반으로 절개한 후, 그 표면을 측정하는 방법이 있으며 이 두가지 방법을 모두 사용하는 것이 좋으나 장비의 수직과 수평교체에 많은 시간이 걸리고, 소립하는 과정에서 손상이 많이 일어나고 있다. 연구결과에 의하여 whole core logging 방법만으로도 충분한 자료가 수집되므로 이 방법을 꾸준히 사용하고자 한다. AMSCL를 사용하여 측정된 자료와 실험실에 분석한 입도의 특성 (평균입도, 분급) 및 함수율과 잘 대비되는 점이 주목할 만하다. 따라서 코아를 열기 전에 코아의 특성을 파악하므로써 미리 예측이 가능하며, 코아를 인 후, 코아들의 특성의 변화부분을 자세히 관찰할 수 있다는 점이 매우 중요하다. 또 민일 코아를 보관한 후 다른 분석 (유농층 등 미고생물학 연구 및 지화학 연구 등) 자료들과의 대비를 위하여 절개할 코아를 선택해야 할 경우 매우 요긴하게 쓸 수 있다.

이 장비는 영국 Geotek 회사에서 다년간 단계별로 개발한 것으로 (GEOTEK, 1998) 장비의 사용방법은 우선 실린더모양의 잘 밀봉된 1.5 m 길이의 퇴적물코아를 컴퓨터로 조절되는 스텝모터 (stepper motor)로 밀면서 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값을 재는 3개의 센스를 통과시킨다 (Fig. 3-8-1). 퇴적물의 습윤 전밀도 (wet bulk density)는 ^{137}Cs 에서 방출되는 감마선이 감쇠되는 정도로 계산된다. 그리고 퇴적물의 자화율은 자기장을 지나가면서 측정된다. 본 연구에서는 퇴적물코아를 2 cm 간격으로 측정하였으며, 측정시간은 5 초씩 주었다. 모든 측정된 값들은 컴퓨터로 입력되어서 계산되고 데이터파일로 로딩되어, 6개의 값들이 (코아두께편차, p파 이

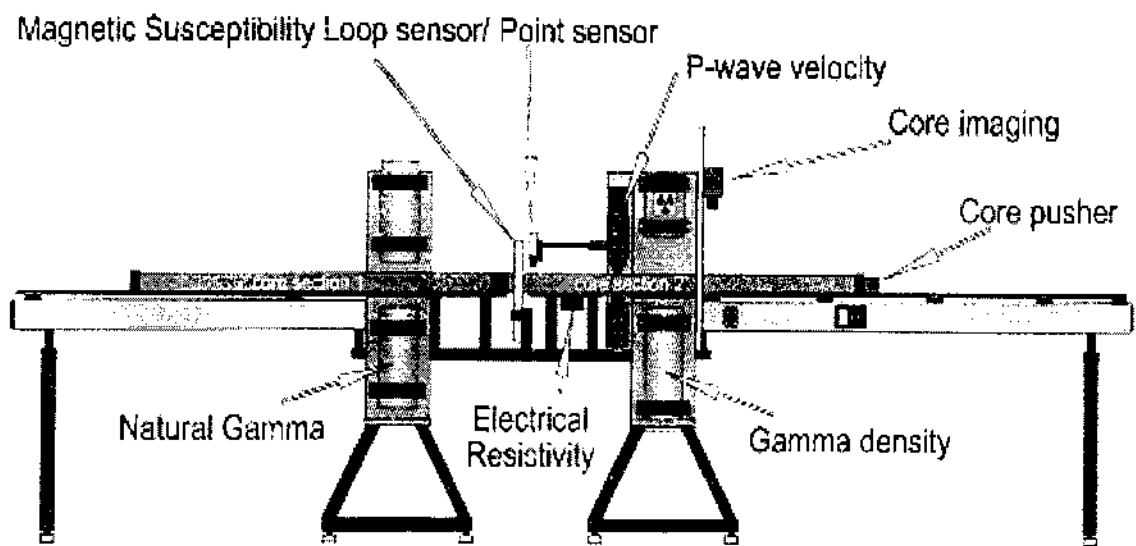


Fig. 3-8-1. The schematic diagram of AMSCL (Automated Multi-Sensor Core Logger).

동시간, p파 사그날 진폭, 감마선감쇄값, 자화율 및 실험실 온도) 실시간으로 컴퓨터에 그래프화된다. 이 값들을 보정하여 그 자료를 다시 그려서 비교한다.

3. 코아퇴적물의 물성적 특성

1998년과 1999년 2년에 걸쳐서 채취된 13개의 코아퇴적물의 P파속도, 감마밀도 및 자화율이 측정되었으며 그 특성들을 분류하고 유사성 및 차이점을 논하고자 한다.

가. 한국측 대륙주변부

한국동해 대륙주변부의 코아로는 MB98PC-3에서 MB98PC 7까지 5코아에 대한 분석 결과를 언급하겠다. 이 코아들은 2차년도 보고서 (한 등, 1998)에 언급되었지만, 이 보고서에는 좀 더 자세한 자료와 새로운 해석이 포함되어 있다.

우선 후포와 삼척사이의 대륙붕에 위치한 MB98PC-3코아는 수심이 약 150.4 m, 코아길이 527 cm이며, 모두 과상모래 (massive sand)로 구성되어 있다. 모래의 특성을 관찰하면 분급이 좋고 현생해빈에서 관찰되는 모래, 특히 나선이 거의 없는 모래해빈과 매우 유사하므로 해수면이 낮았을 때 해안환경 중 해빈 (beach)에서 형성된 것으로 사료된다. P파 속도, 밀도 및 자화율의 측정결과는 Fig. 3-8-2에서 보여준다. 모래가 많은 퇴적층은 측정시 P파 속도의 값이 좋지 않다. 밀도나 자화율은 어떤 경향을 보여 줄 수도 있으며, 특히 자화율은 퇴적환경의 주기성을 보여준다. 코아퇴적물 전체는 홀로세기간동안 해수면이 낮았을 때 연안선에 위치한 것으로 보이므로 해수면이 150 m까지 낮았을 것으로 추측되지만 이에 대한 검증이 앞으로 필요하다.

MB98PC-4 코아는 코아길이 1,150 cm이며 수심 199 m에서 채취하였고 MB98PC-3보다 약 50 km 남쪽에 위치한다. 두 정점간의 거리에 비하여 이 정점에서 채취된 코아퇴적물 특성은 매우 다르다. 즉 MB98PC-4 코아퇴적물 상부는 두꺼운 니질퇴적물, 하부는 모래와 실트가 우세한 퇴적물로 구성되어 있다. Fig. 3-8-3은 자동코아다중검침기 (AMSCL)로 측정한 P파 속도, 감마밀도 및 자화율 (MS)의 값을 그린 것이며 이 값들을 근거로 다섯 개의 퇴적상을 나누었다. 퇴적상 I의 연대는 홀로세이며 동위원소 stage I에 해당한다. 한편 퇴적상 II~IV은 플라스토세동안

MB98PC-3

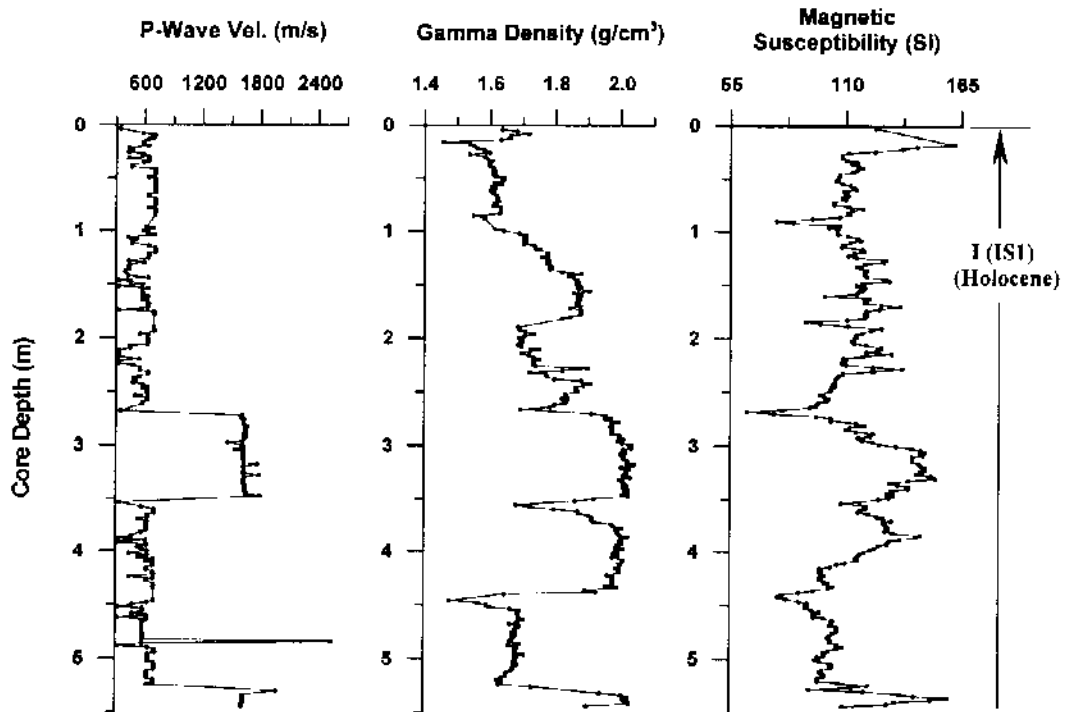


Fig. 3-8-2. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-3 core sediments.

MB98PC-4

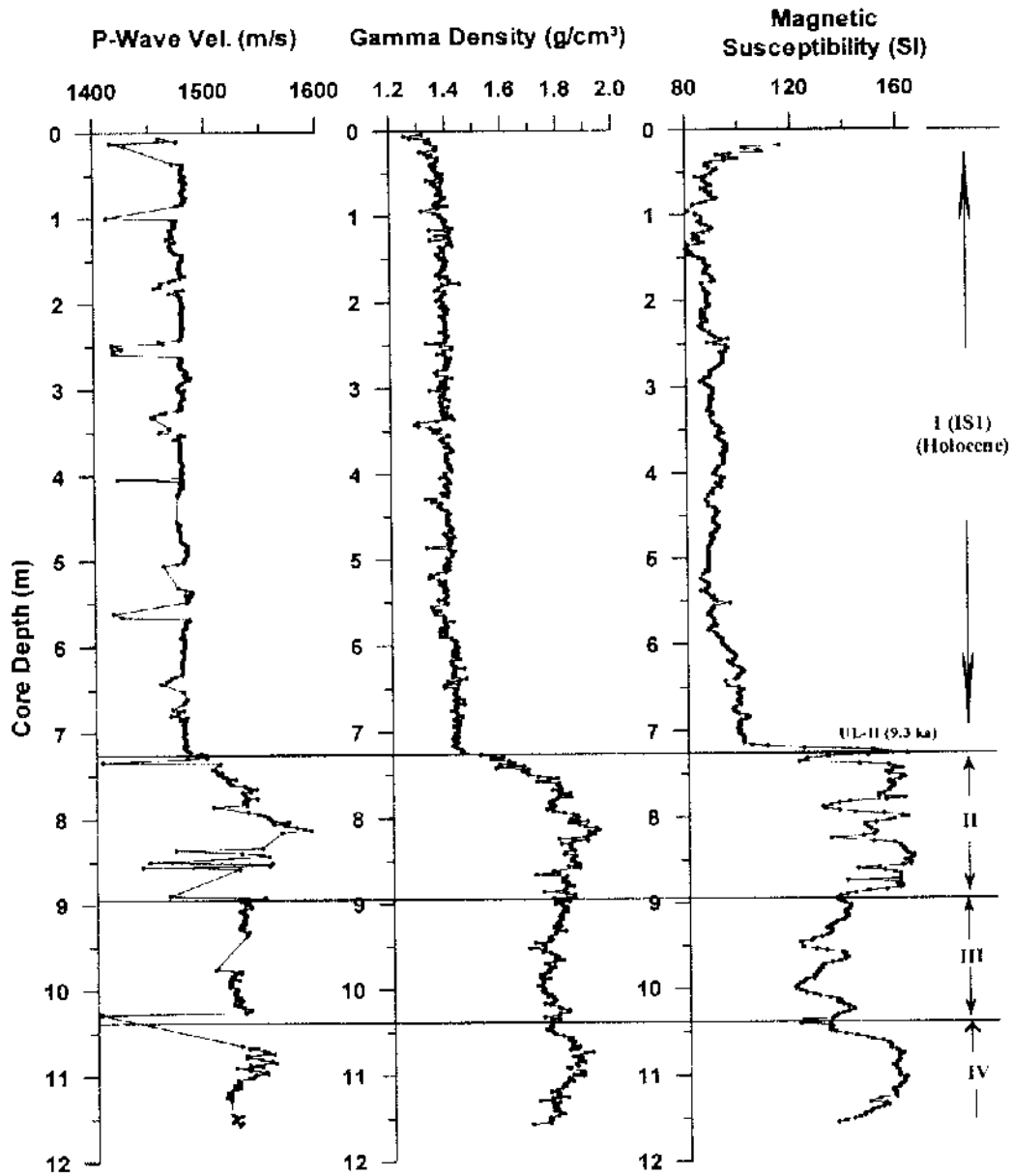


Fig. 3-8-3. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC 4 core sediments.

형성된 것이다. 퇴적상 II, III, 및 IV의 감마밀도와 자화율값을 비교하여 보면 감마 밀도는 뚜렷한 차이를 보이지 않으나, 자화율은 주기적인 변화의 경향을 보인다. 일반적으로 자화율값이 높은 경우는 자철석을 많이 포함하고 있는 황사 등이 많이 날아오는 빙하기일 가능성이 높다. 따라서 퇴적상 II가 퇴적상 III 보다는 더 추운 빙하기일 가능성이 높으며 퇴적상 II와 IV는 같은 기후일 가능성이 있으나 그 차이점에 대한 고해양·고기후학적인 연구가 필요하다. 자화율과 감마밀도는 코아깊이 718 cm에서 급격하게 값이 증가하면서 뚜렷한 환경변화가 있었음을 보여준다. 한국 쪽 울릉분지와 대륙주변부는 이 생물교란된 니와 층리니의 경계 바로 위에 약 9,300 yr B.P.에 울릉도에서 분출한 울릉화산층이 끼여있는 경우가 대부분이다. MB98PC-4에서도 약 724 cm에서 부석질 라필리가 발견된다 (Fig. 3-8-3). 그리고 이 부분에서 자화율 (MS)이 거의 70% 이상 증가하므로 화산테프라층의 존재를 자화율값에서 파악할 수 있다. 부석질 라필리가 쌓인 층 아래에서도 자화율의 값은 대체로 높으며 주기적인 변화양상을 보여준다. MB98PC-4 코아는 홀로세의 특징인 생물교란된 니층 아래 UL-II 테프라층 그리고 그 하부에 보여주는 전형적인 층리니가 보이지 않고 바로 사질층이 나타나므로서 시대적인 구분에 대표적인 코아는 아니다. 그러나 홀로세층이 매우 두껍게 쌓였으므로 홀로세 연구에 좋은 해상도를 갖는 코아이다. 입도와 함수율값을 자화율과 감마밀도값과 비교하였을 때 좋은 상관관계가 나타난다 (Fig. 3-8-4). 밀도가 낮으면 세립퇴적물이 우세하고 자화율이 낮은 반면 함수율은 높은 값으로 나타난다. 감마밀도, 입도분포, 자화율 및 함수율값이 급격히 변하는 코아깊이인 726 cm가 홀로세와 플라스토세 경계이다. 이 경계는 입도나 함수율값으로도 뚜렷하게 나타나지만 실험실에서 이런 값들을 구하기 전에 이미 자동코아다중검침기로 파악이 가능하므로 코아를 자르기 전 좀 더 정밀한 분석을 요하는 코아선택에 좋은 정보를 제공할 수 있다. 따라서 이런 요소들이 급격히 변하는 깊이에서 환경 및 기후의 변동이 일어났음을 파악할 수 있다. MB98PC-4 코아에서 홀로세 동안 0.60 mm/yr의 퇴적률을 보이고 있다.

MB98PC-5 코아는 수심 175.5 m인 후포에 가까운 대륙붕에 위치하며 코아길이는 약 370 cm로서 짧다. 채취 당시에 이미 인위적인 교란이 발생하여 코아퇴적물 전체적으로 섞여 버렸다. 코아길이가 짧아 자동코아다중검침기 (AMSCL)를 사용한 P과 속도, 밀도 및 자화율 값이 급격히 변하지 않는 것도 이유가 되지만 인위적인 교란이 그 원인인 것으로 보인다 (Fig. 3-8-5). 특히 자화율값은 일반적으로 경향성

MB98PC-4

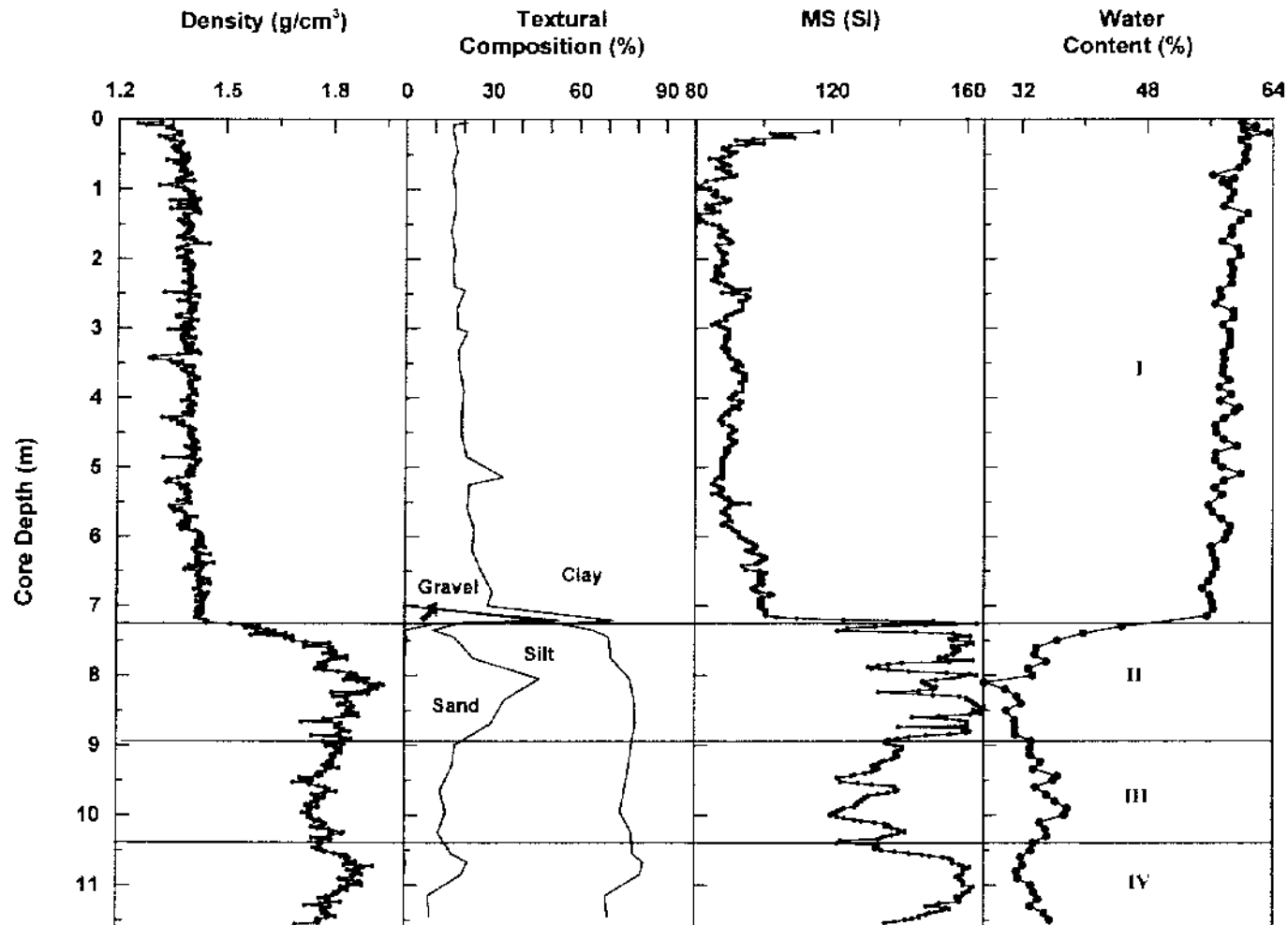


Fig. 3 8 4. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-4 core sediments.

이 좋은데 이 코아에서는 큰 변동을 보이지 않는다. 따라서 코아를 열기 전에 이미 인위적인 교란이 일어났는지의 여부를 자동코아다중점침기 (AMSCL)를 사용하여 파악하면 시간과 인력을 절약할 수 있다.

MB98PC-6 코아는 후포에서 동쪽으로 약 200 km 떨어진 곳으로 수심 931 m인 대륙사면에서 채취되었고 코아길이는 1,120 cm이다. P파 속도, 밀도 및 자화율들을 근거로 측정된 값에서 6개의 퇴적상을 나누었다 (Fig. 3-8-6). 퇴적상 I인 홀로세층은 코아깊이 498 cm까지이며 퇴적율은 0.42 mm/yr로서 MB98PC-4보다는 퇴적율이 70% 정도로 낮다. 생물교란된 니가 있는 상부 498 cm에서는 P파 속도가 하부층보다 훨씬 오차의 값들이 적게 나왔지만 하부층은 오차가 심하여 많은 값들이 제거되었다. 감마밀도는 울릉화산재가 터지기 직전의 깊이인 약 466 cm에서 뚜렷하게 변하지만 자화율값이나 코아관찰에 의하여 홀로세와 플라스토세의 경계는 코아 깊이가 약 498 cm로 정하였다. 이는 울릉화산재가 터지기 전에 이미 간빙기 퇴적물이 쌓였음을 지시한다. 코아깊이 416~454 cm에서 9,300 yr B.P.때 분출된 UL-II 화산재가 라필리 형태로 코아에 흩어져 나타난다. UL-II 화산층에서 현재까지의 퇴적률은 0.50 mm/yr이다. 희미한 층리나 일부 층리를 보이는 층들, 테프라층들, 사질니층에는 자화율값이 높게 나오며, 감마밀도값에서 일부의 특징들이 대비되므로써 자화율값과 밀도값이 전체적인 퇴적층 경계선을 잡는데 중요한 지시자인 뿐만 아니라 퇴적층내의 다양하면서도 성밀한 퇴적구조를 밝혀 고환경변화 및 고기후변화간에 상관관계가 있음을 보여준다. 테프라층이 생물교란작용을 받거나 퇴적되는 시간의 길어서 퇴적층 내에 흩어져 나타나는 경우는 자화율값이나 감마밀도값이 평균값의 형태로 나타난다. Aira-Tanzawa (AT) 유리질 화산재가 나타나는 코아깊이 548 cm부터 680 cm까지를 퇴적상 III이라고 칭하였고 자화율값은 평균 126 SI이다. 따라서 홀로세와 플라스토세 경계에서 AT까지의 퇴적율은 0.04 mm/yr로 대륙주변부라는 환경을 고려할 경우 거의 퇴적물의 공급이 없었다고 볼 수 있다. 자화율값이 서서히 감소하다가 다시 증가하는 코아깊이 680 cm에서 808 cm까지를 퇴적상 V로 정하였다. 퇴적상 V에는 partly laminated mud층과 생물교란니가 나타나지만 무엇보다도 주목할 점은 흩어진 부식질 화산재층으로 인한 자화율값과 감마밀도값의 증가이다. 이 타원곡선을 그리면서 값이 증가하다가 감소하는 화산재층은 해저화산재층으로 해석되었다 (한 농, 1998). 이 타원형 곡선이 있는 퇴적상이 MB98PC 4 코아깊이 1036 cm - 1156 cm의 퇴적상과 매우 유사한 점이 주목할 만하다. 그러나 실제

MB98PC-5

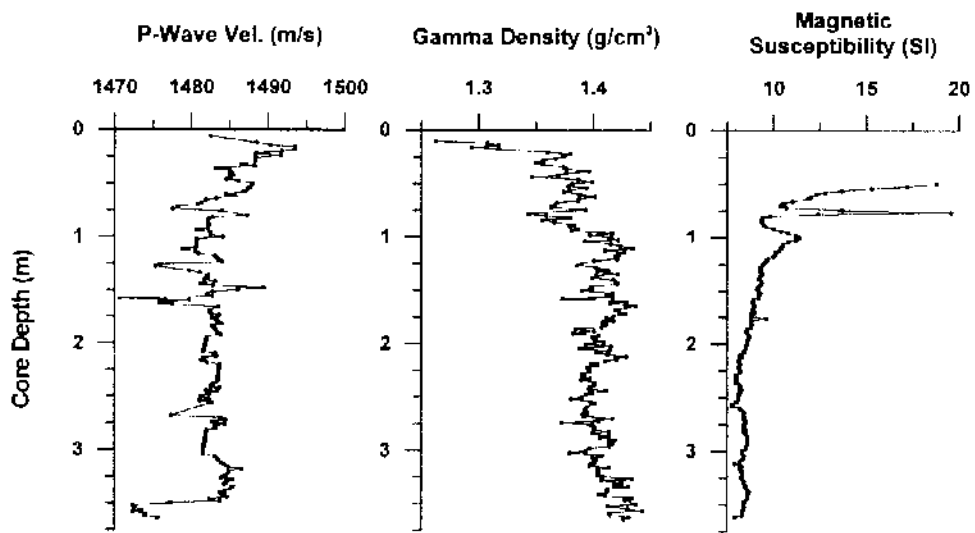


Fig. 3-8-5. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-5 core sediments.

MB98PC-6

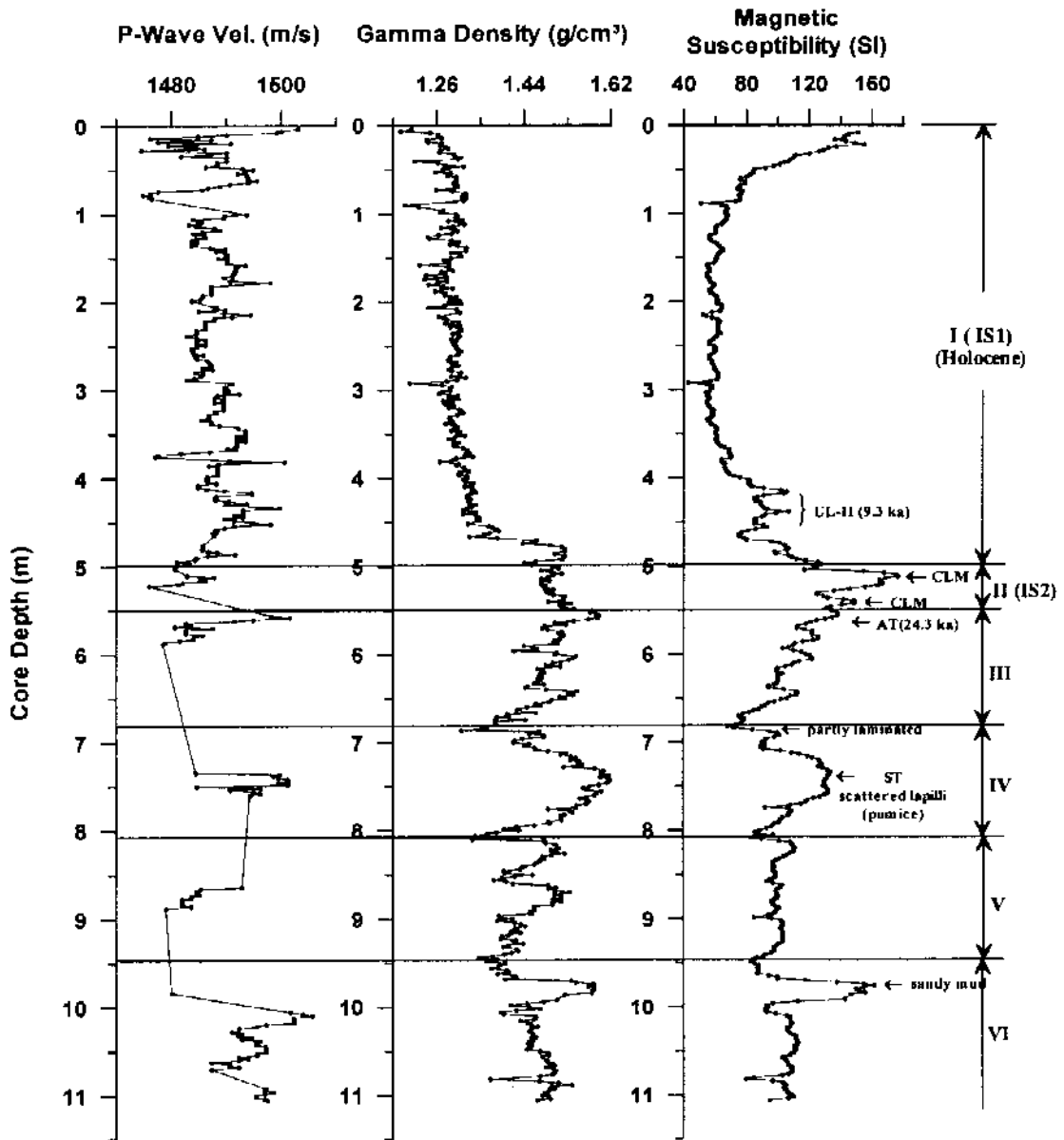


Fig. 3-8-6. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-6 core sediments.

코아를 관찰하였을 때 퇴적상의 유사성은 없다. MB98PC 4 코아와 마찬가지로 자동코아나중검침기 (AMSCI)에서 측정된 감마밀도 및 자화율값과 입도 및 함수율 관계를 비교하였다 (Fig. 3-8-7). 함수율과 감마밀도는 홀로세동안은 뚜렷한 역내비를 보이고 있다. 입도나 자화율값은 홀로세동안 변화가 뚜렷하지만 함수율값이나 감마밀도값처럼 홀로세와 플라이스토세 경계로 뚜렷하게 차이나지는 않는다.

MB98PC-7은 울릉분지의 서쪽 가장자리, 수심은 약 2,156 m에서 채취되었으며, 코아길이는 958 cm이다. P파 속도, 감마밀도 및 자화율값을 이용하여 6개의 퇴적상을 나누었다. 퇴적상 I은 동위위소 stage 1에 해당하는 홀로세층이며 퇴적상 II는 플라스토세 중 동위위소 stage 2에 해당한다. 홀로세와 플라스토세 경계는 248 cm이며 홀로세층의 퇴적율은 0.21 mm/yr로 MB98PC-4 코아와 MB98PC-6 코아보다 퇴적율이 매우 낮다. 즉 MB98PC 4 코아의 0.60 mm/yr, MB98PC-6 코아의 0.42 mm/yr에 비하면 거의 30~50%로 퇴적율이 떨어지는 것이다. 이는 분지가장자리가 대륙주변부보다 퇴적물의 유입이 급격하게 줄어들었다는 것을 의미하며 해수면상승에 따른 해양환경변화를 지시한다. 홀로세층과 플라스토세층 경계에서 AT화산재층까지 퇴적율은 0.18 mm/yr로 MB98PC-6 코아보다 4.5배 높은 퇴적율을 보인다.

테프라층이나 층리를 보이는 니가 많은 곳은 자화율값이 매우 높게 나타나며, 특히 층리를 보이는 니층이 자화율값이 높은 것은 빙하기동안 황사가 바람을 타고 날아와서 쌓였음을 의미한다. 따라서 자화율값이 높게 나타나는 층리를 보이는 니는 기후변동에서 추운 시기로 해석할 수 있다. 홀로세층 하부는 다양한 변화를 보이지만 현재로서는 연대를 예측하기가 어렵다. 유공충 등 미고생물을 통한 고생태 및 고환경 해석과 더불어 안정동위원소를 사용한 연대나누기, 절대연대측정값 등을 통해서 좀 더 자세한 시기들이 파악될 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 3-8-9에서는 MB98PC 7 코아에서 밀도와 자화율값, 함수율과 입도의 상관관계를 보여준다.

울릉분지의 동서쪽에 위치하며 대한해협에 가까운 대륙붕에서 두 개의 코아를 채취하였다 (MB98PC-11과 MB98PC-12). 수심은 각각 145 m와 200 m이며 코아길이는 467 cm, 160 cm이다. 이 코아들의 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값은 Figs. 3-8-10과 3-8-11에 나타나 있다. 두 코아 모두 모래가 대부분이며 조개껍질이 때때로 나타난다 (Figs. 3-8-12와 3-8-13). MB98PC-11 코아의 깊이 212-282 cm에서 더 굵은 모래가 나타나면서 자화율이 급격히 증가하였다가 감소한다 (Fig. 3-8-12).

장릉 앞 약 60 km 동쪽 대륙사면 수심 1,055 m에서 채취된 MB98PC 13은 코아

MB98PC-6

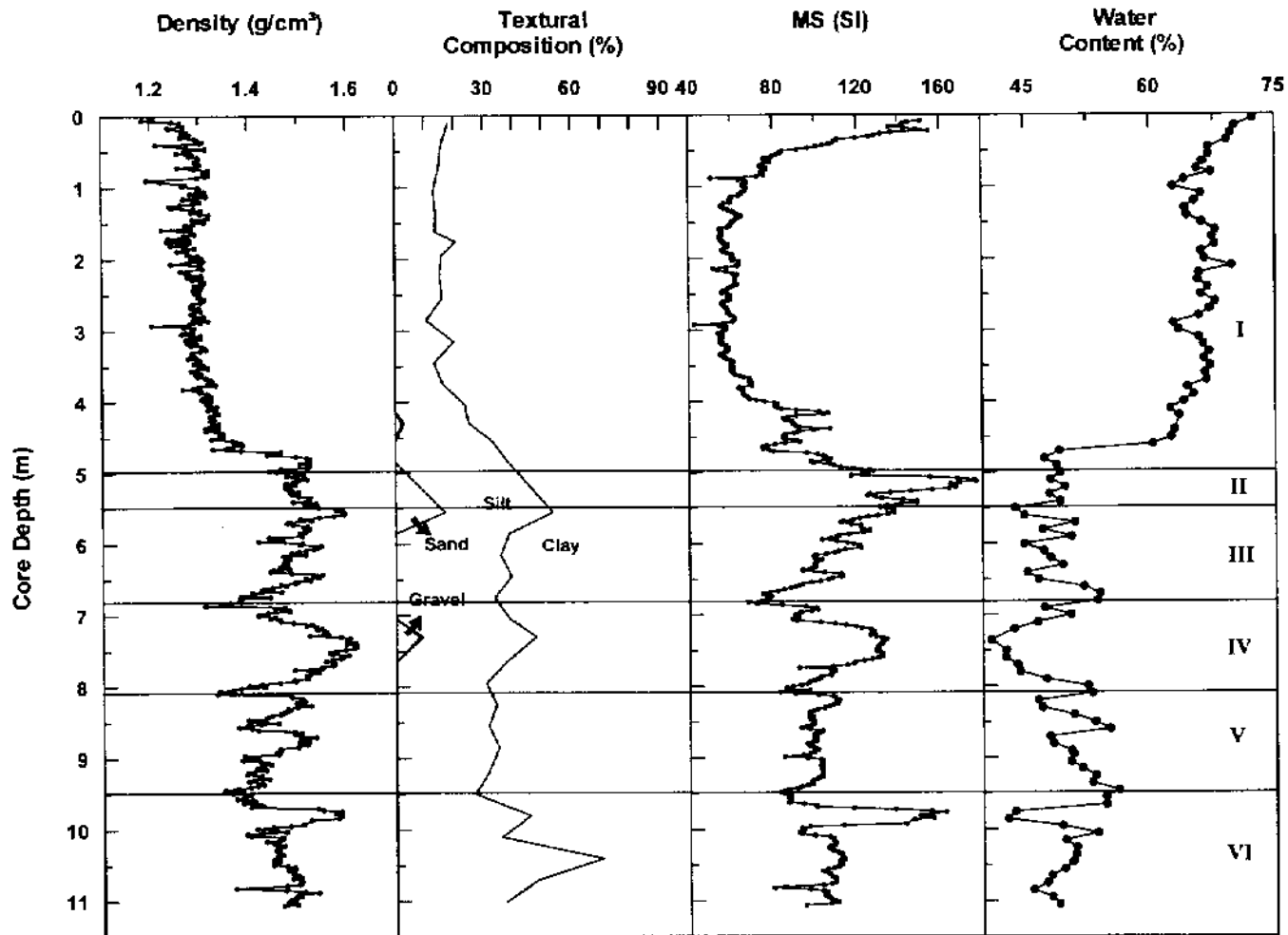


Fig. 3-8-7. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-6 core sediments.

MB98PC-7

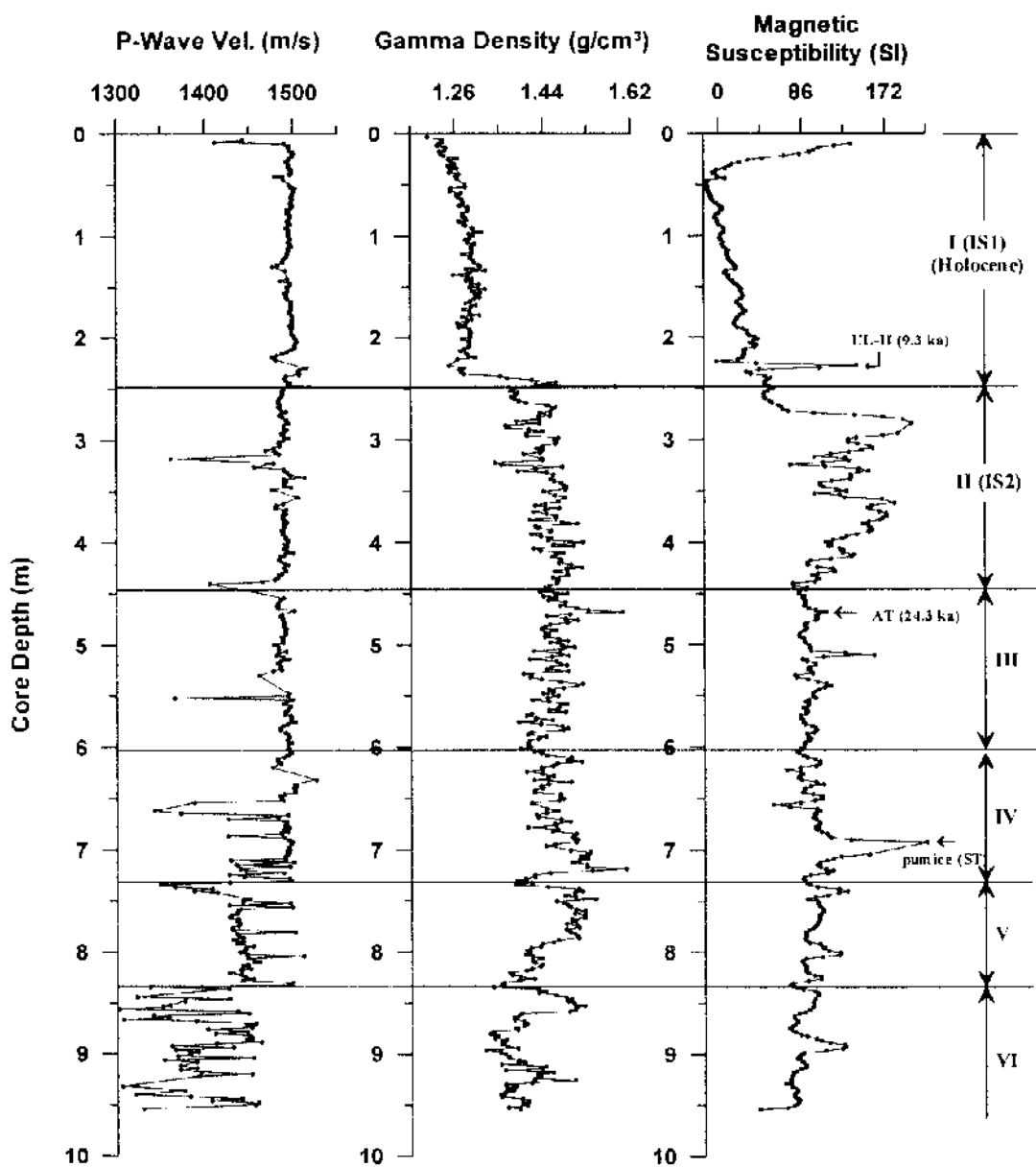


Fig. 3-8-8. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-7 core sediments.

MB98PC-7

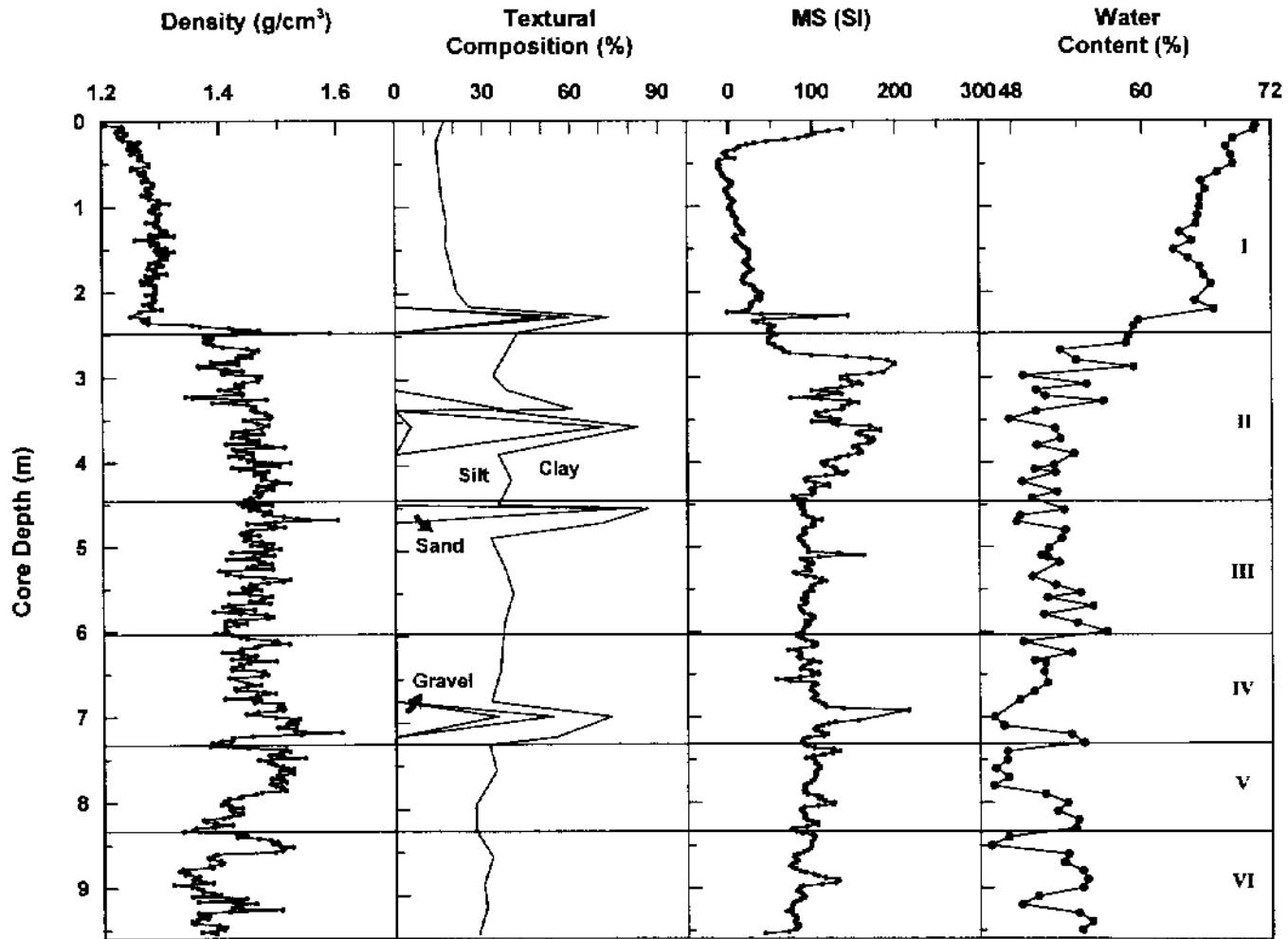


Fig. 3-8-9. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC 7 core sediments.

MB98PC-11

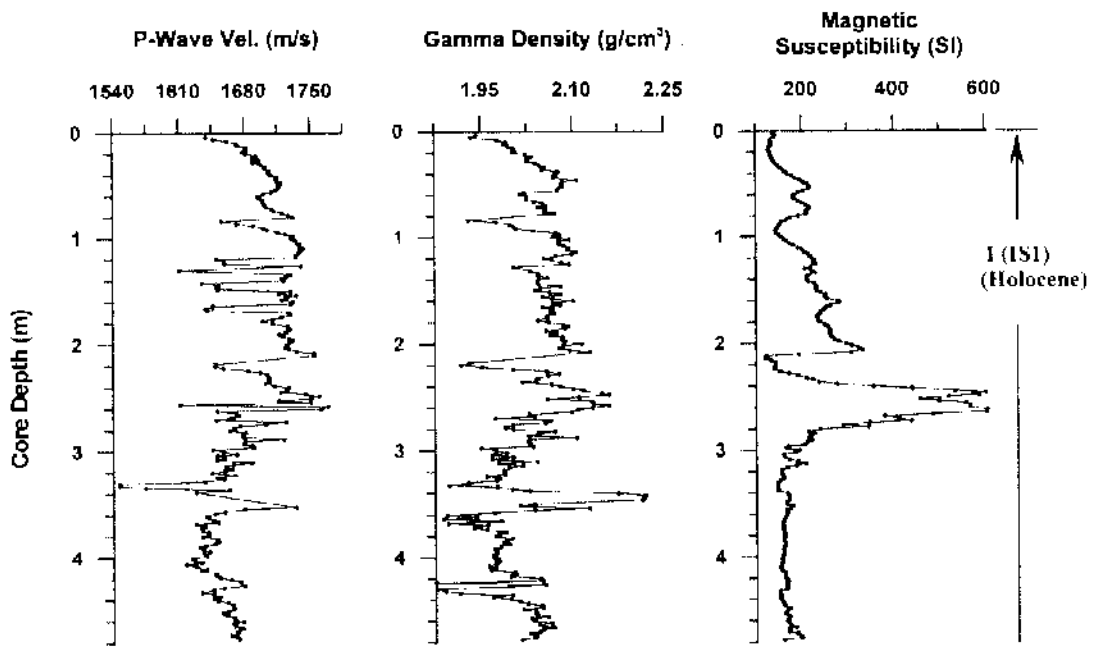


Fig. 3-8-10. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-11 core sediments.

MB98PC-12

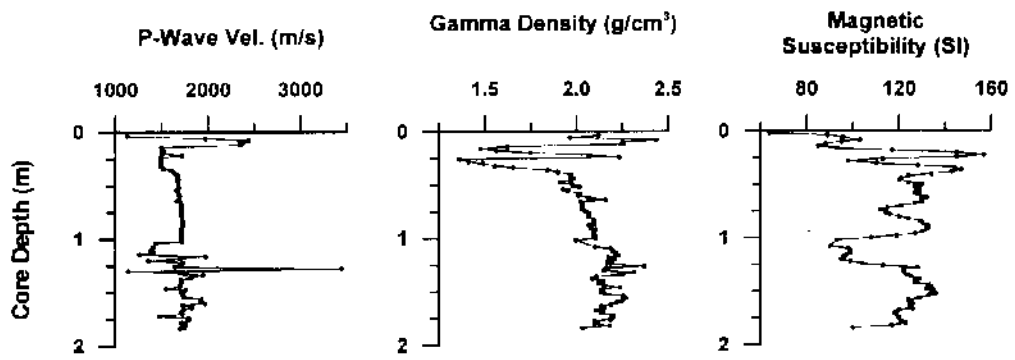


Fig. 3-8-11. Curves from data of p wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-12 core sediments.

MB98-PC11

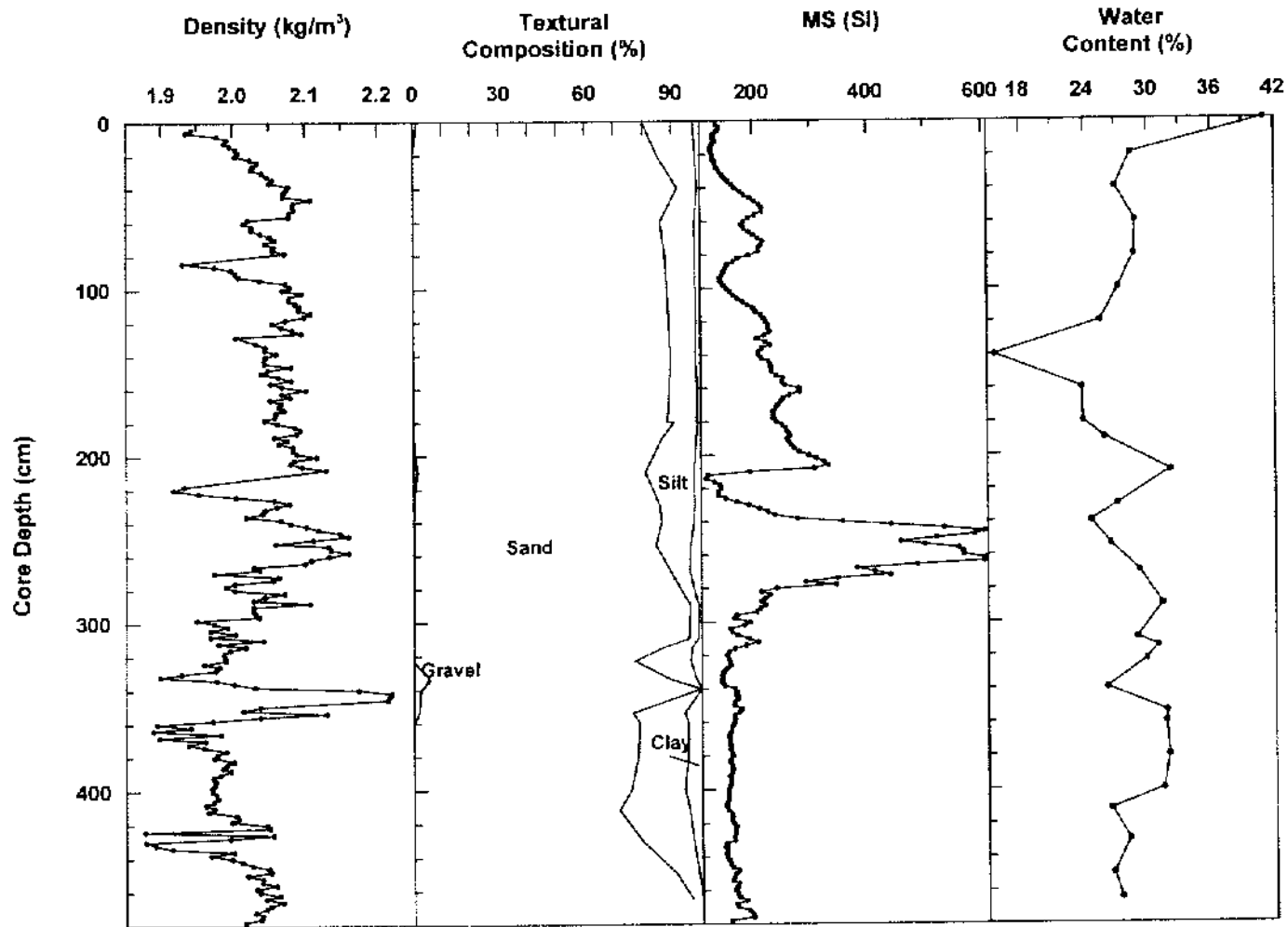


Fig. 3 8 12. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-11 core sediments.

MB98-PC12

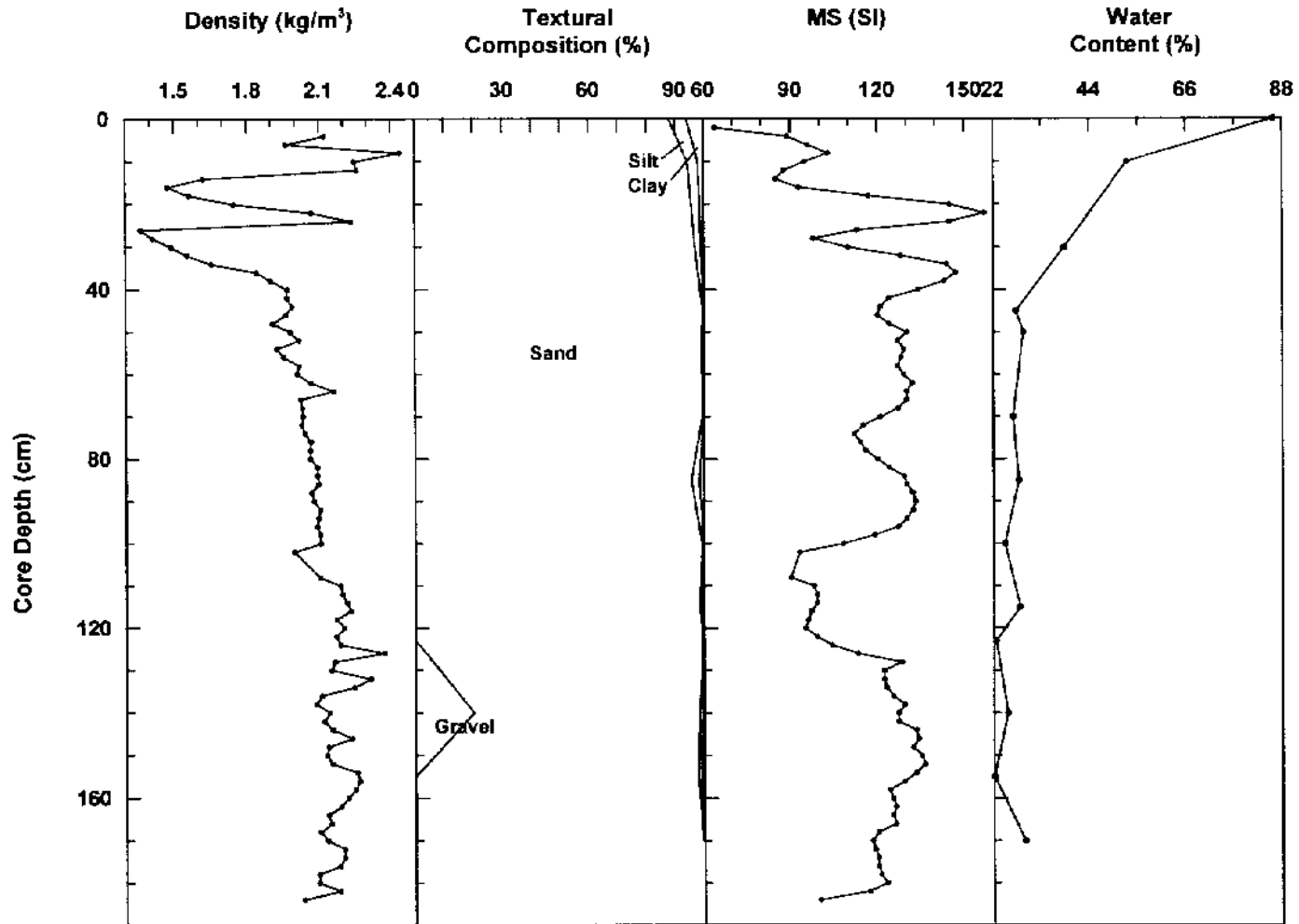


Fig. 3 8 13. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-12 core sediments.

깊이가 989 cm이며 자동코아다중검침기로 측정된 P파속도, 감마밀도 및 자화율값으로 나눈 퇴적상은 7개이다 (Fig. 3-8-14). 홀로세층과 플라이스토세층 경계는 232 cm이며 퇴적율은 0.19 mm/yr이며 홀로세층과 플라이스토세층의 경계에서, AT 화산재층이 나타나는 깊이사이의 퇴적율은 0.13 mm/yr이다. 해저화산재층으로 보이는 부석질층이 코아깊이 554 cm와 716 cm에서 나타난다. 특히 코아깊이 554 cm에 나타나는 화산재층의 자화율값 곡선형태는 MB98PC-4코아와 MB98PC-6코아의 퇴적상 IV과 매우 유사하며, 특히 MB98PC-6 코아는 같은 해저화산재층에서 유사한 자화율곡선값을 보여서 앞으로 대비값으로 사용할 수 있을 것으로 본다. Fig. 3-8-15는 입도와 함수율값을 감마밀도와 자화율값과 대비한 것이다. 감마밀도, 자화율값과 함수율값은 홀로세와 플라이스토세 경계선에서 뚜렷한 값의 변화를 보이고 있으나 입도는 그다지 뚜렷하게 차는 나지 않는다.

나. 한국대지

한국대지는 서한국대지와 동한국대지로 나뉘어지는데 서한국대지에서 코아 2점, 동한국대지에서 코아 1점을 채취하였다. 서한국대지에서 채취된 코아는 MB98PC 14코아와 MB98PC-15 코아로서 각각 수심 1,567 m와 1,796 m, 코아깊이는 964 cm, 608 cm이다. MB98PC-14 코아퇴적물에서 자동코아다중검침기를 이용하여 측정한 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값이 Fig. 3-8-16에 나타나 있으며 퇴적상은 7개로 나뉘었다. 홀로세와 플라이스토세 경계는 162 cm로 퇴적율은 0.14 mm/yr이다. 또한 홀로세와 플라이스토세 경계선과 AT 화산재가 나오는 코아깊이까지의 퇴적율은 0.15 mm/yr이다. 퇴적상 IV에는 해저기원으로 추측되는 부석질 화산재층이 발견되는데, MB98PC 6, 7 및 13 코아에서 모두 발견된 것으로 앞으로 그 기원에 대한 좀 더 정확한 조사가 필요하다. 한편 또 다른 해저기원 화산재층이 퇴적상 VI에서 발견되고 이는 MB98PC-13 코아 퇴적상 VI에서 발견된 것과 같은 시대일 것으로 본다. MB98PC-14 코아의 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값의 변화곡선과 MB98PC-13 코아의 이 세값들의 변화곡선은 매우 유사한 점은 매우 특이하다. 입도와 함수율값을 감마밀도와 자화율값과 대비한 그림은 Fig. 3-8-17에 잘 나타나 있다. 특히 퇴적상 VII은 함수율값이 높고 세립질 퇴적물이 우세하며 자화율값이 낮아지고 밀도값도 상대적으로 작아진다.

MB98PC-15 코아는 서한국대지 1,796 m 수심에서 채취되었고 코아깊이는 964

MB98PC-13

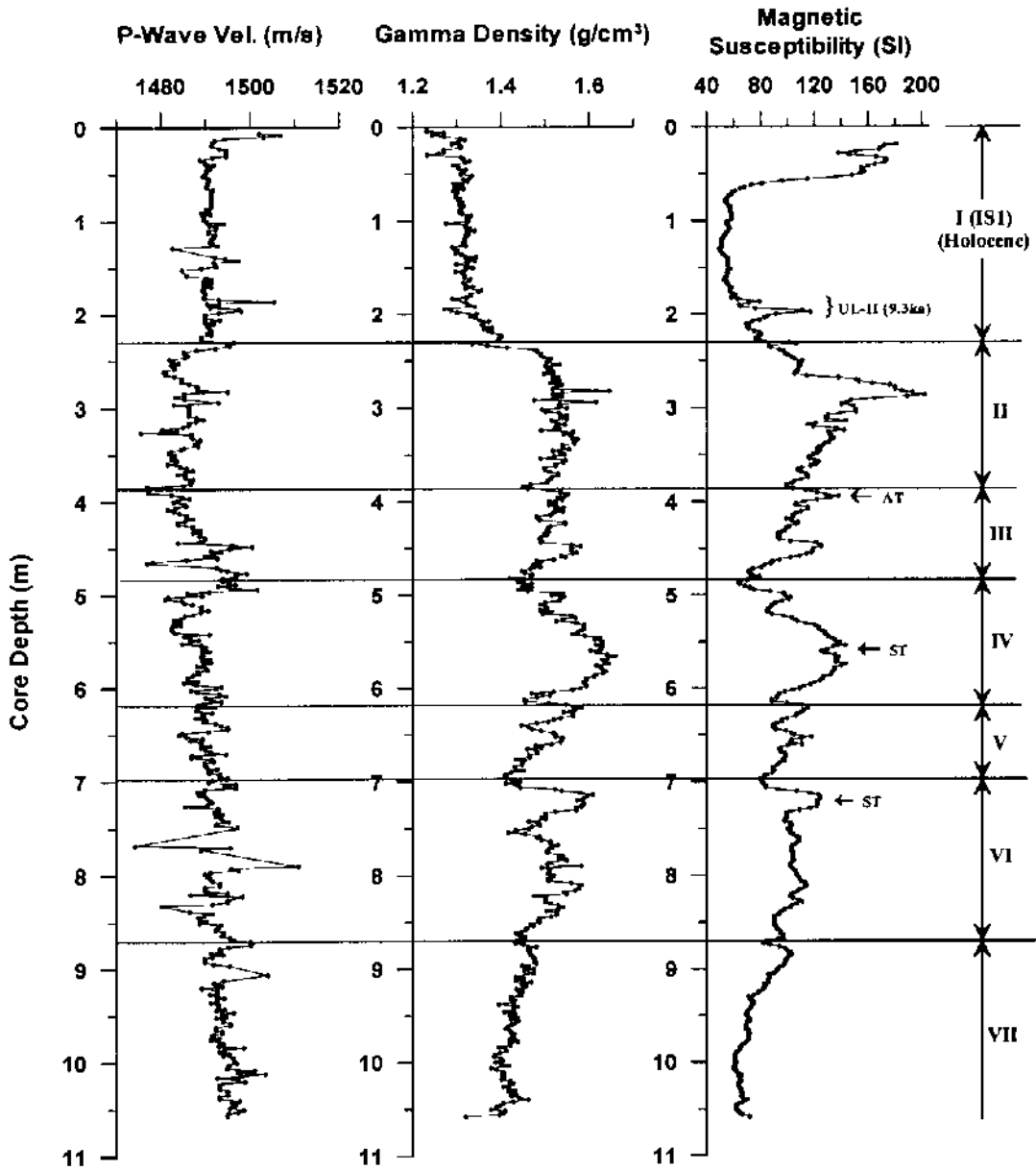


Fig. 3 8 14. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC 13 core sediments.

MB98PC-13

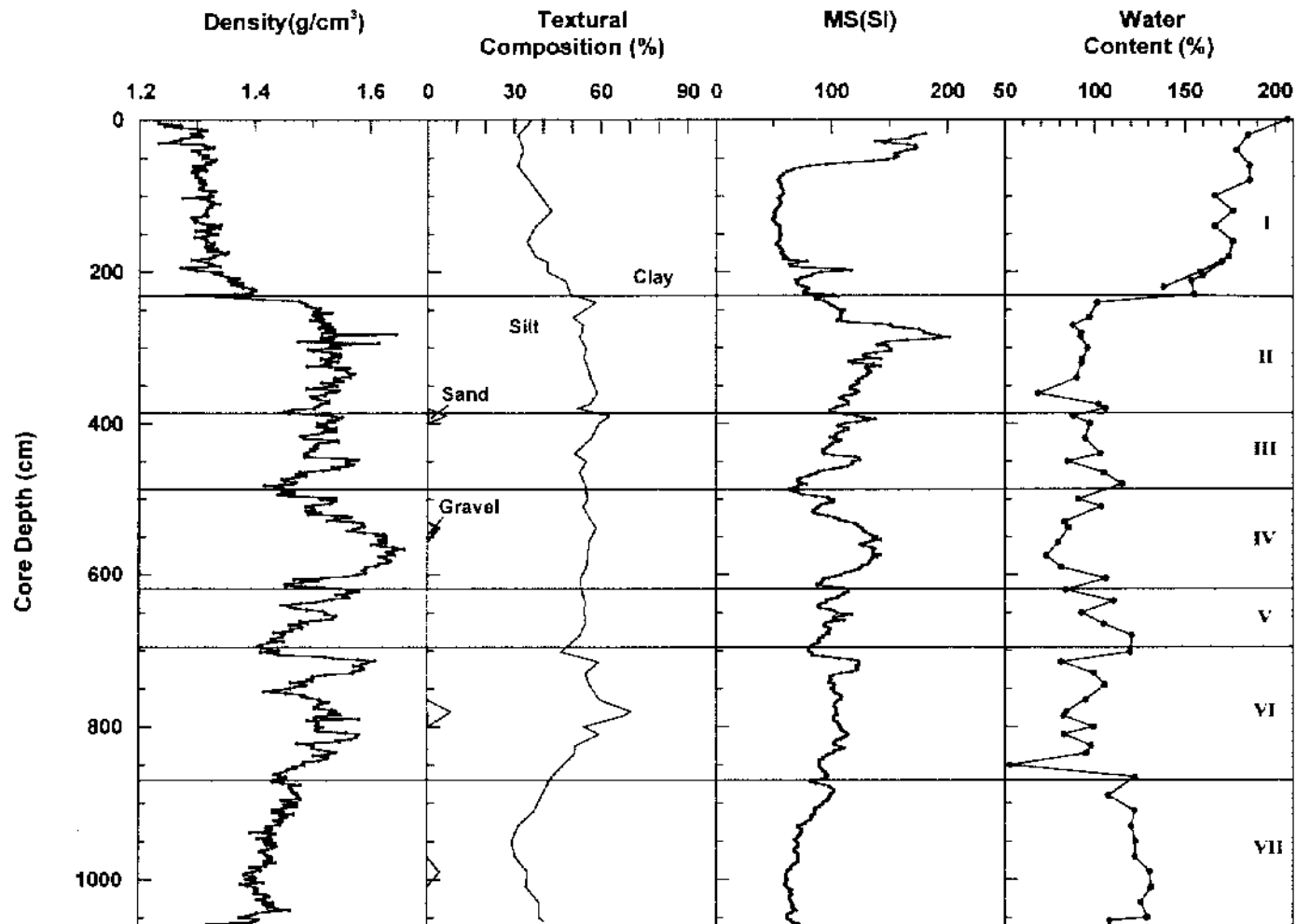


Fig. 3 8 15. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-13 core sediments.

MB98PC-14

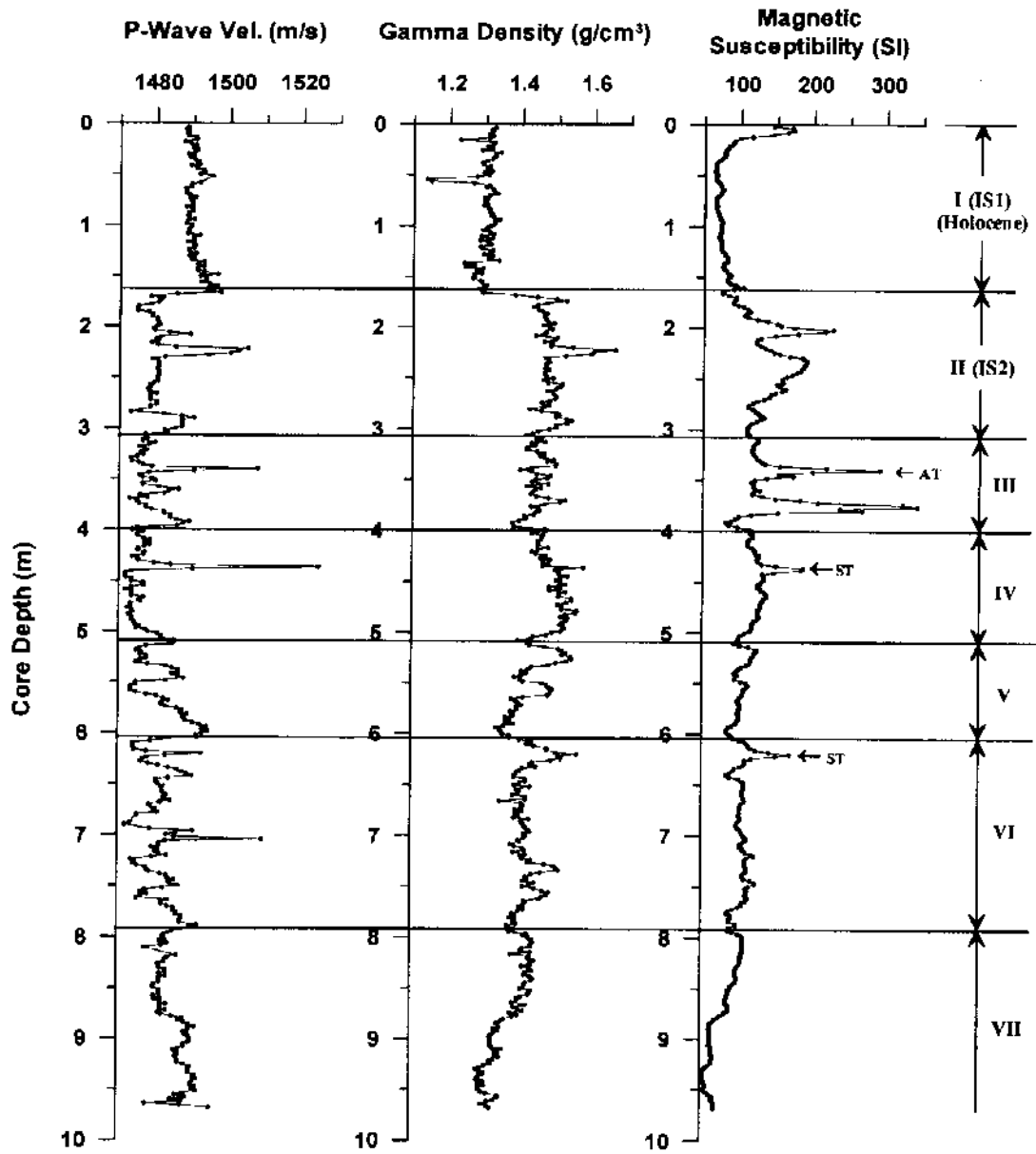


Fig. 3-8-16. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-14 core sediments.

MB98-PC14

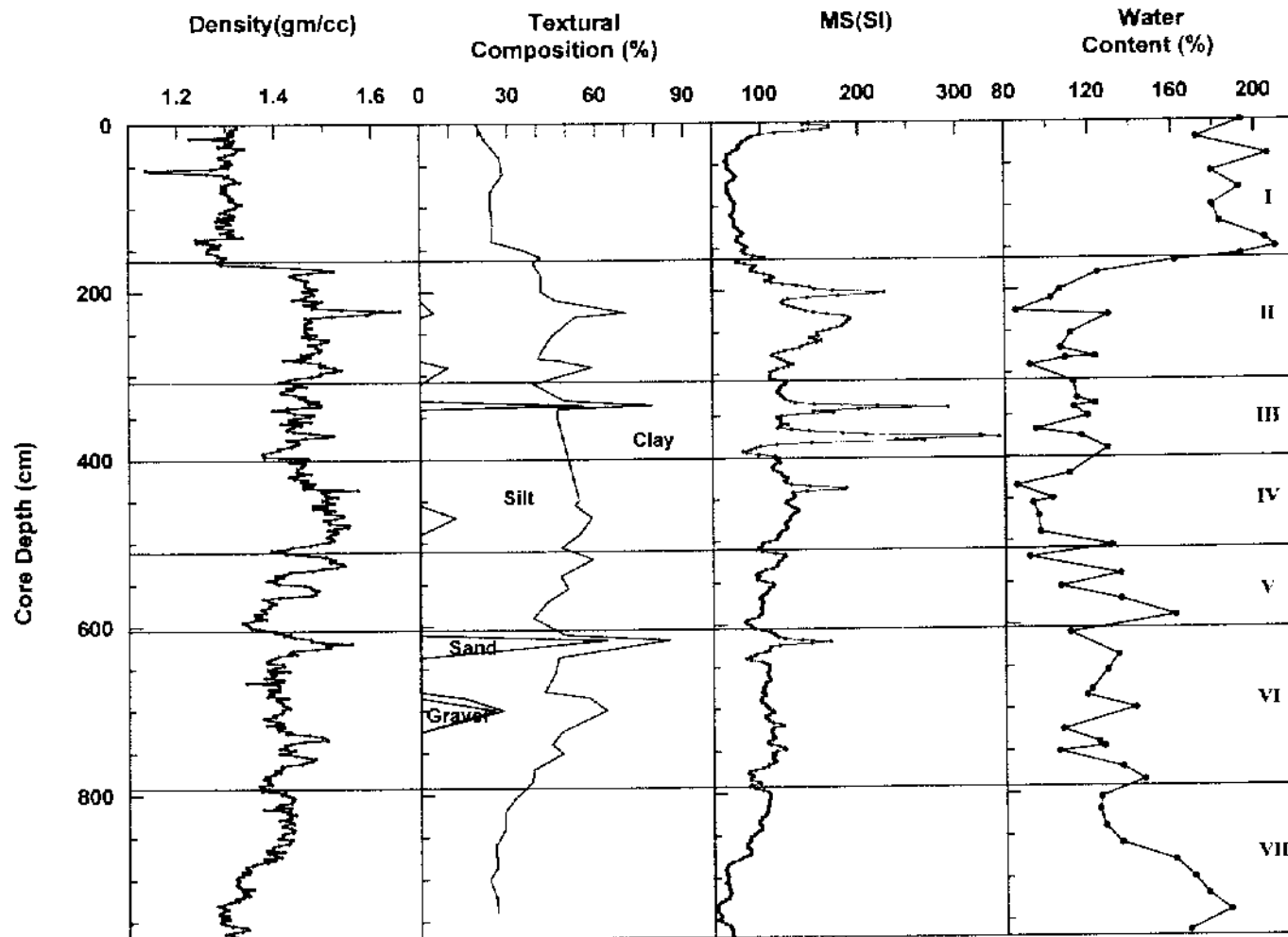


Fig. 3 8-17. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-14 core sediments.

cm이다. 자동코아다중검침기를 이용한 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값은 Fig. 3-8-18에 나타나 있다. 코아 전체적으로 생물교란니가 우세하며 홀로세동안 퇴적된 것으로 추정된다. Fig. 3-8-19은 입도와 함수율값을 감마밀도와 자화율값과 비교한 것이다.

MB99PC 1 코아는 동한국대지 정상에 위치하며 코아퇴적물 중에 슬럼프에 의하여 교란된 퇴적층이 많이 포함되어 있다. 자동코아다중검침기를 이용한 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값에 의해 6개의 퇴적상이 나뉘어졌다 (Fig. 3-8-21). 앞에서 언급된 코아들과는 달리 자화율값들이 높게 나오는 곳이 많으며, 이 높은 값들의 대부분은 부식질 화산재층과 대비된다. 적어도 5개의 화산재층이 분류되었고 이 중에 코아깊이 70 cm, 246 cm 및 472 cm에서 발견된 부식질 화산재층은 해저화산이 기원인 것으로 추론된다. 764 cm, 782 cm, 796 cm 및 912 cm에서도 부식질 화산재층이 발견된다. 입도와 함수율값을 감마밀도와 자화율값과 대비한 것은 Fig. 3-8-21에 나타나 있다.

다. 울릉분지-일본분지 통로

MB99PC-2와 MB99PC-3 코아퇴적물은 울릉분지 일본분지 통로에서 채취되었다. MB99PC-2코아는 일본분지쪽에 가까운 곳에 위치하고 MB99PC-3 코아는 울릉분지에 가까운 통로이면서 울릉도 옆 해저화산에 가까운 곳이다. MB99PC-2 코아는 수심 2,707 m, MB99PC 3 코아는 수심 2,435 m, 코아깊이는 각각 931 cm, 910 cm이다. 자동코아다중검침기로 측정된 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값으로부터 MB99PC 2 코아와 MB99PC-3 코아 모두 4개의 퇴적상으로 나누었는데 3~4개의 두꺼운 화산재층이 나타나는 것이 특징이며 대부분 해저화산재층으로 추론된다 (Figs. 3-8-22 and 3-8-23). 이 두 코아퇴적물을 비교하면 퇴적상 I은 MB99PC-2 코아가 MB99PC-3 코아보다 두꺼우며, 108 cm와 194, 201 cm 코아깊이에서 자화율에 의해 화산재층이 파악된다. 홀로세에 해당되는 퇴적상 I의 퇴적율은 MB98PC-2 코아는 0.35 mm/yr이며, MB98PC-3 코아는 0.07 mm/yr이다. 퇴적상 II은 퇴적층의 두께가 비슷하며 자화율이나 감마밀도의 경향곡선이 매우 유사하다. 퇴적상 III은 MB99PC-2 코아의 자화율값 곡선이 MB99PC-3 코아의 자화율값 곡선의 상부층에 해당된다. 따라서 MB99PC-3 코아의 하부층에 해당되는 퇴적층은 MB99PC 2 코아 퇴적층에 퇴적되지 않았거나, 퇴적되었다가 침식된 것이 아닌가

MB98PC-15

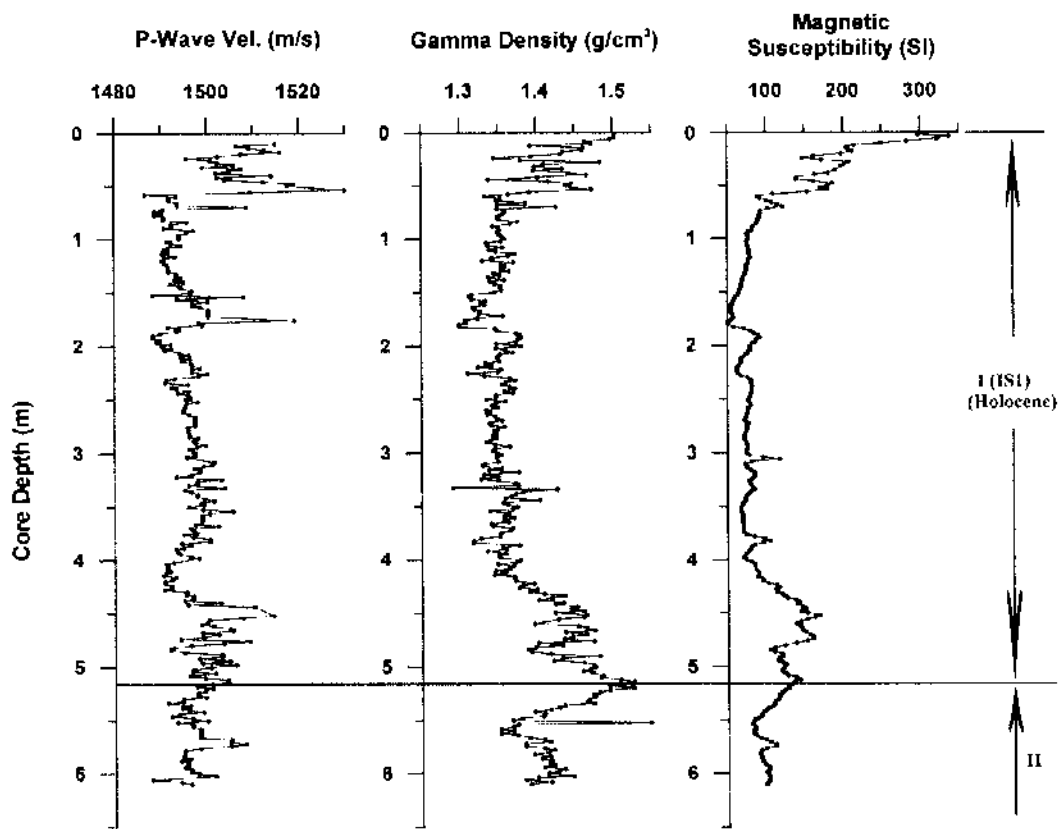


Fig. 3-8-18. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB98PC-15 core sediments.

MB98PC-15

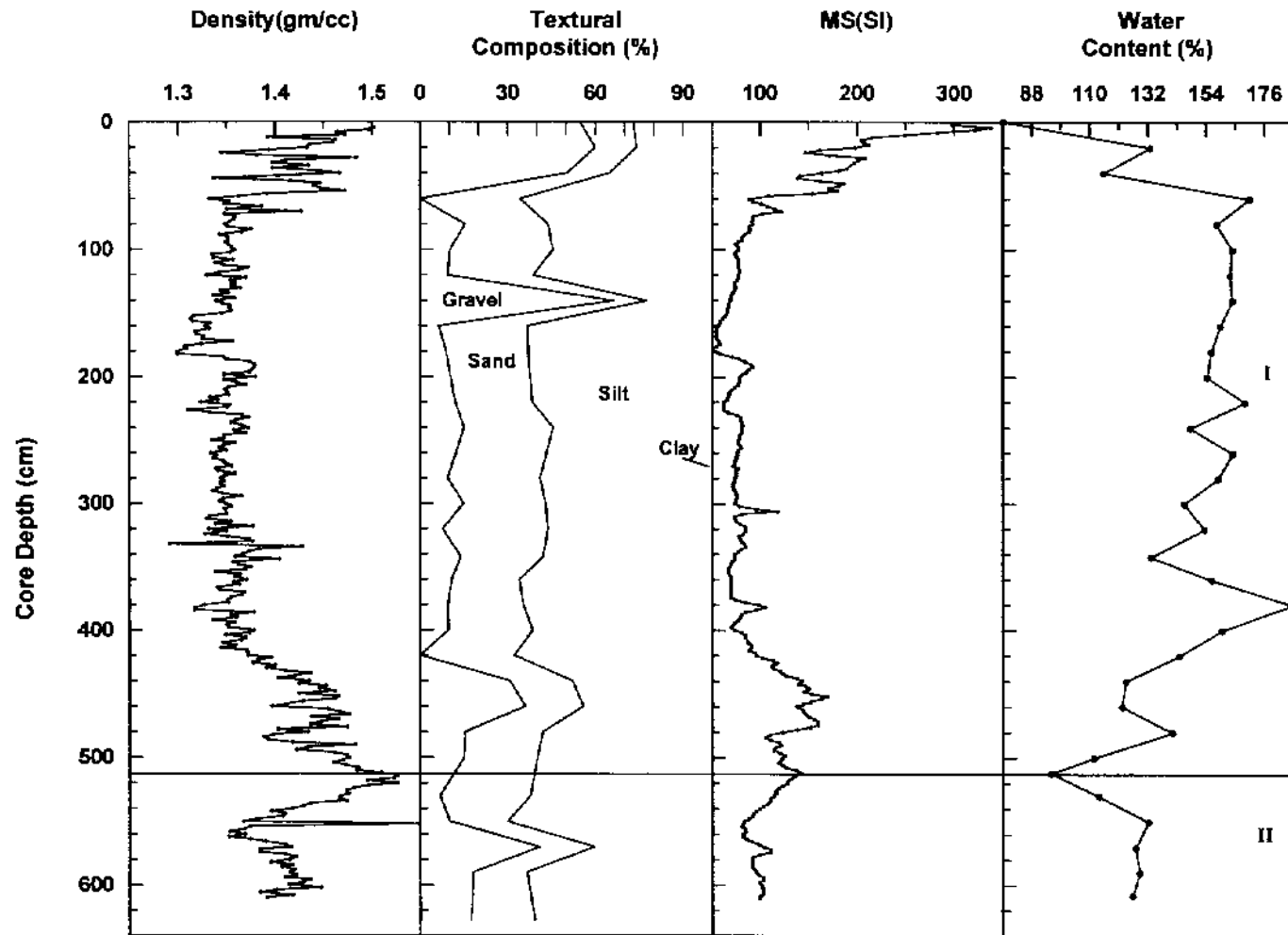


Fig. 3-8-19. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB98PC-15 core sediments.

MB99PC-1

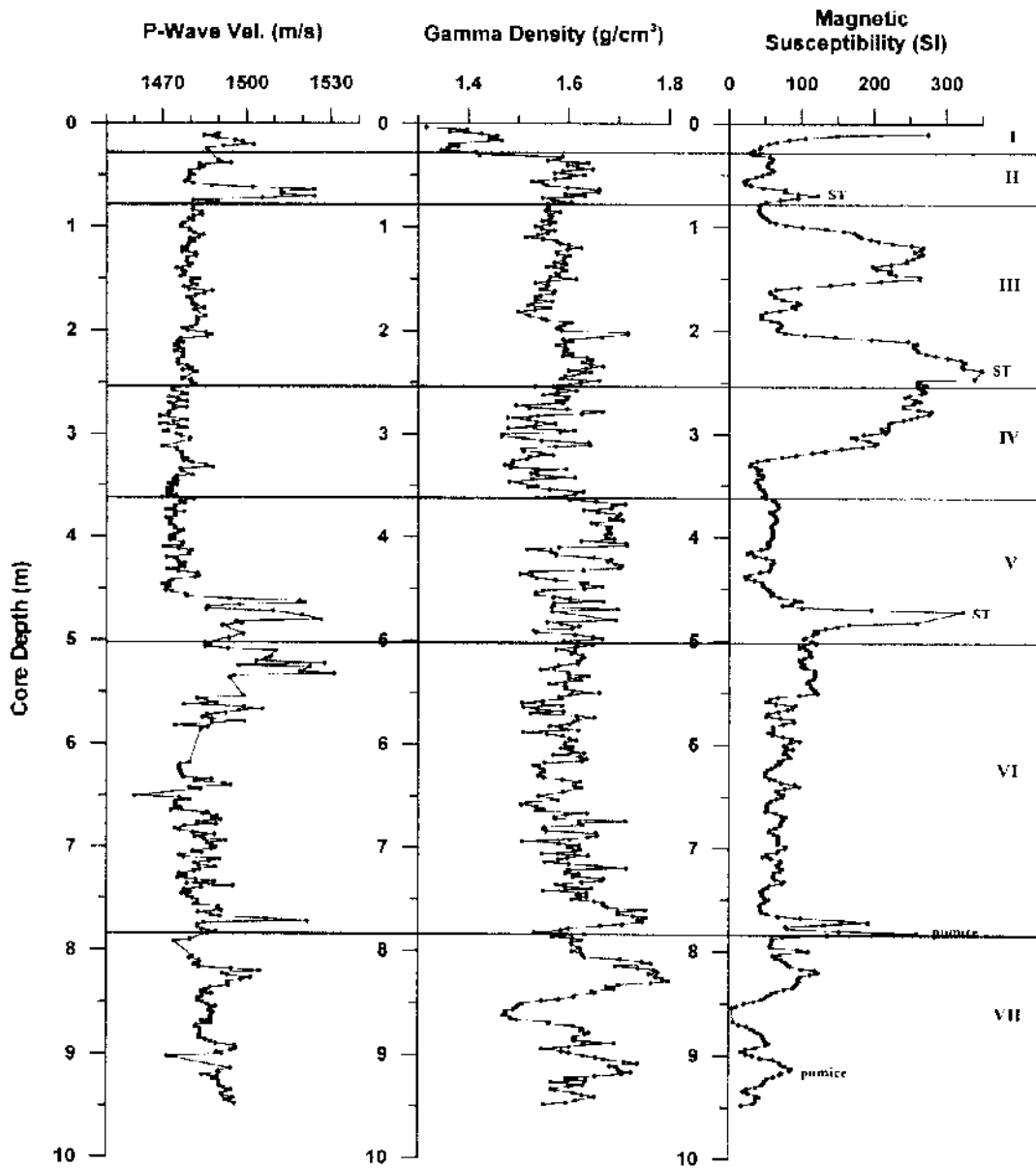


Fig. 3 8-20. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-1 core sediments.

MB99PC-1

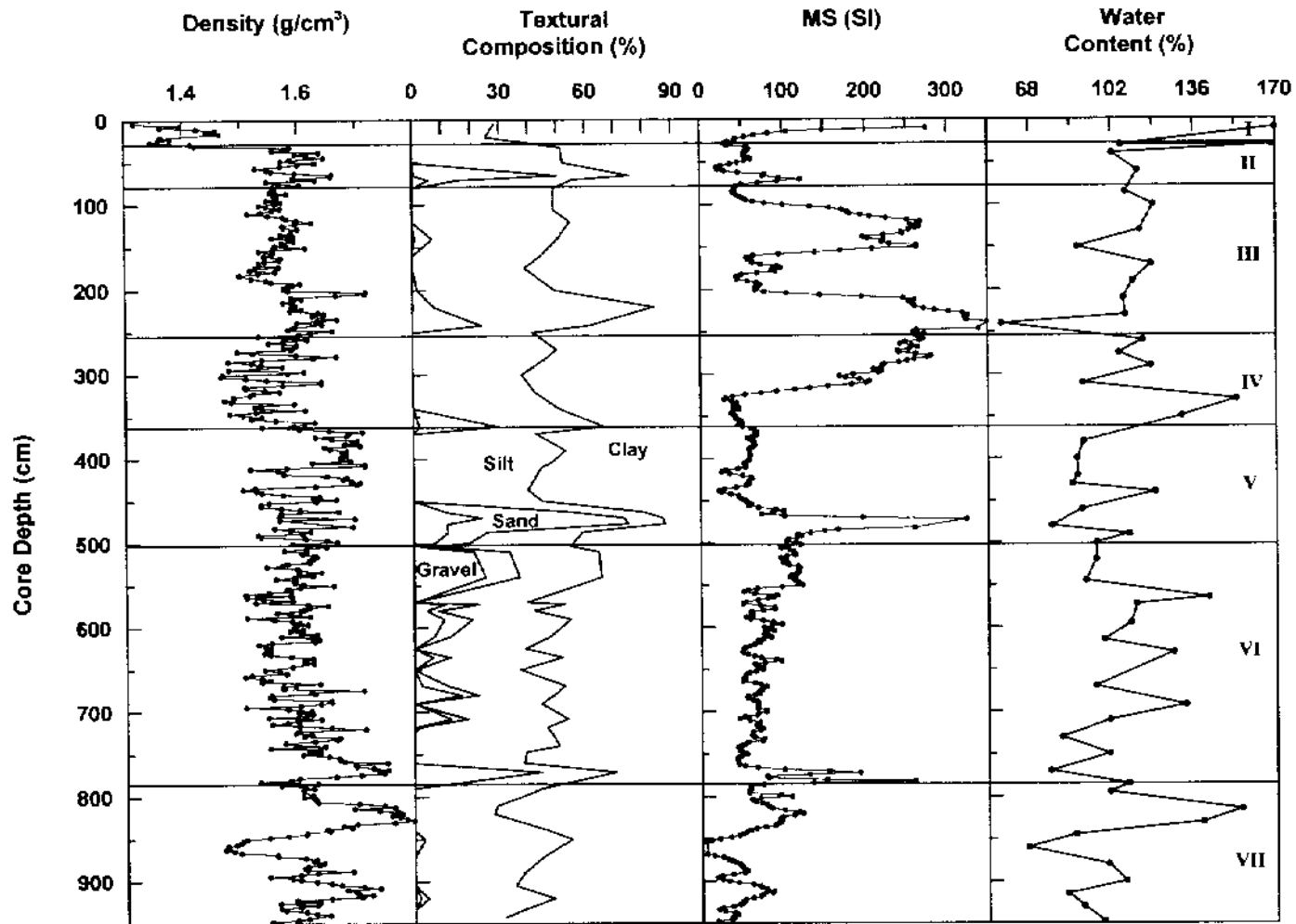


Fig. 3-8-21. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC 1 core sediments.

MB99PC-2

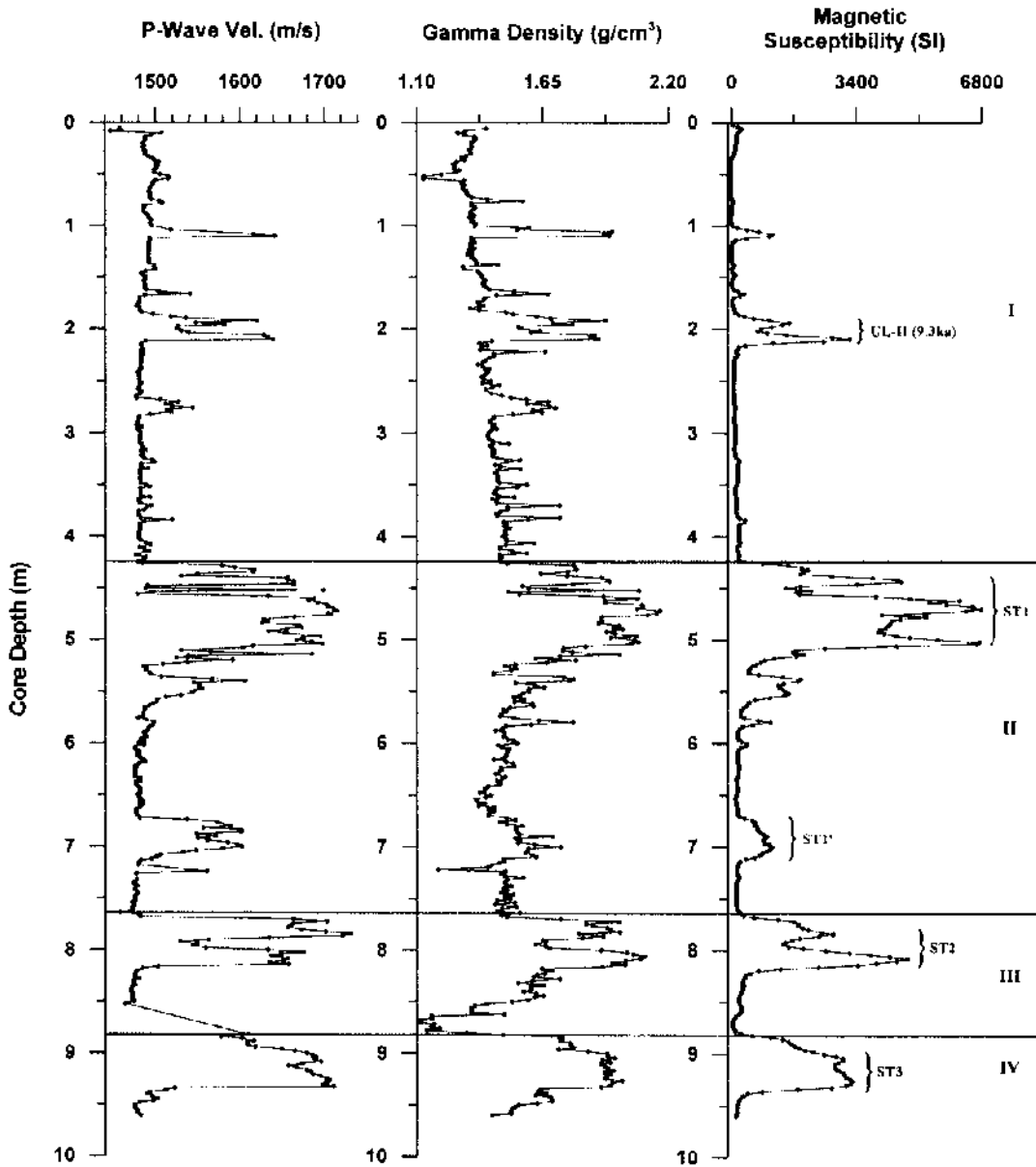


Fig. 3-8 22. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-2 core sediments.

MB99PC-3

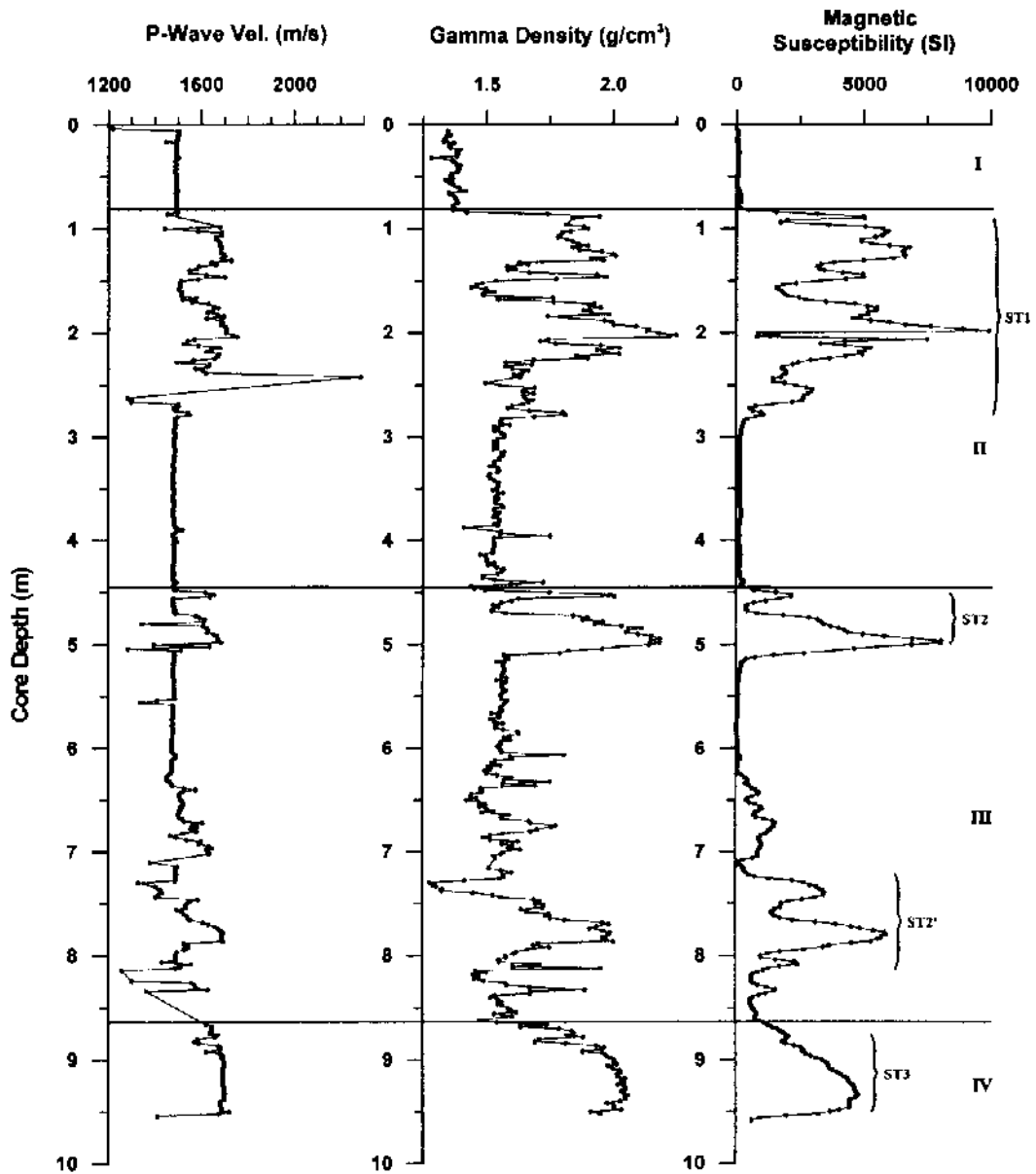


Fig. 3-8-23. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC-2 core sediments.

사료된다. 퇴적상 IV는 이 두 코아에서 비슷한 형태로 나타나고 있다. MB99PC 2 코아와 MB99PC-3 코아의 입도 및 함수율값을 감마밀도와 자화율값과 비교한 것이 Figs. 3-8-24와 3-8-25에 나타나 있다.

4. 토론

13개의 코아를 분석한 결과 P파 속도는 감마밀도와 자화율값보다 해상도가 떨어지므로 본 연구에서 거의 언급되지 않았다. 감마밀도와 자화율값 중에서도 자화율값의 해상도가 훨씬 높다. 따라서 이 13개의 코아퇴적물 중에서 자화율값으로 좋은 내비가 가능한 코아 7개를 선택하여 도의하고자 한다. 이 코아퇴적물은 MB98PC 4 코아, MB98PC 6 코아, MB98PC 7 코아, MB98PC 13 코아, MB98PC 14 코아, MB99PC-2 코아 및 MB99PC 3 코아이다. 이 중에서 동해 한국측 대륙주변부에서 채취된 MB98PC 4 코아, MB98PC 6 코아 및 MB98PC-7 코아퇴적물의 자화율값간의 비교가 Fig. 3-8-26에 나타나 있다. 이 3 코아는 홀로세층에서 두개의 차이를 보일 뿐, 뚜렷한 유사경향 곡선을 보인다. MB98PC-4 코아 퇴적상 III과 IV는 MB98PC 6 코아 퇴적상 III과 IV와 비슷하다. 그러나 MB98PC-7 코아 퇴적상 III과 IV는 앞의 두 코아퇴적물의 경우와는 매우 다르다. 대신 MB98PC-4 코아 퇴적상 II는 MB98PC-7 코아 퇴적상과 유사하다. 다음은 MB98PC-13 코아와 MB98PC 14 코아를 비교하였다 (Fig. 3-8-27). 7개의 퇴적상으로 나누어진 이 두 코아퇴적물에서 퇴적상 VI과 VII는 매우 유사한 경향을 보이므로 같은 환경과 시대에 퇴적된 것으로 사료된다. 퇴적상 I에 해당하는 홀로세 퇴적상도 두 코아간에 유사하며 MB98PC-13 코아의 퇴적상 I (홀로세) 하부에 나타나는 높은 자화율값은 UL-II 화산재층으로 뚜렷하게 구별되지만 MB98PC-14 코아의 홀로세와 플라스토세 경계에서는 피크는 보이지만 뚜렷하지 않다. 퇴적상 II는 MB98PC-13 코아는 286 cm 코아깊이에서, MB98PC 14 코아는 202 cm 코아깊이에서 자화율 피크가 나타난다. 퇴적상 III은 AT 화산재가 MB98PC 13 코아깊이 394 cm에서, MB98PC-14 코아깊이 340 cm에서 나타나며 자화율값에서 그 피크가 뚜렷하다. MB98PC-14 코아의 퇴적상 III에서는 자화율값 피크가 두 개 뚜렷하게 나타난다. 하나는 이미 언급한 AT 화산재이지만 코아깊이 376 cm에서 나타나는 피크는 의미한 총리니이다. 퇴적상

MB99PC-2

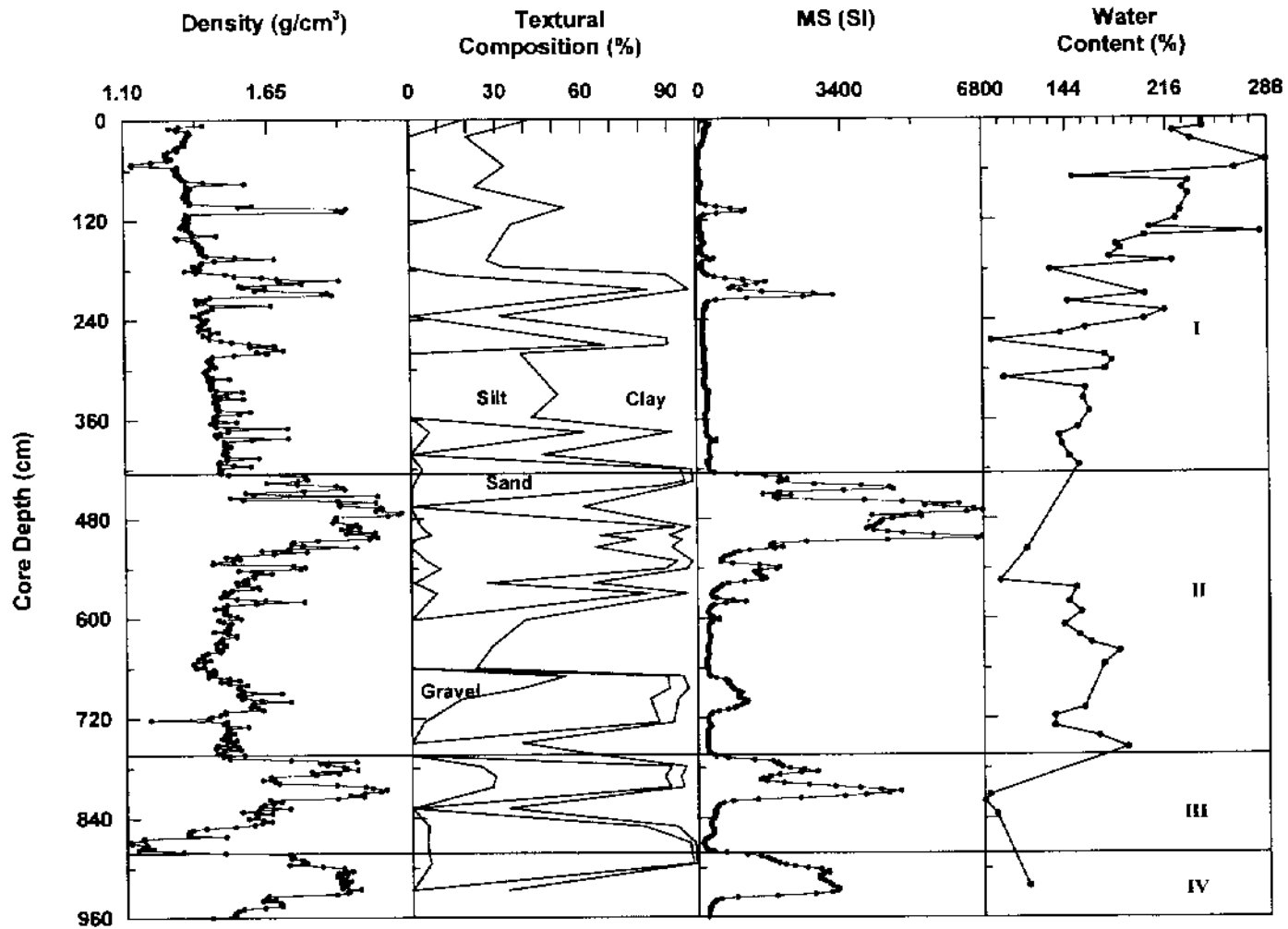


Fig. 3-8-24. Curves from data of p-wave velocity, gamma density and magnetic susceptibility of MB99PC-3 core sediments.

MB99PC-3

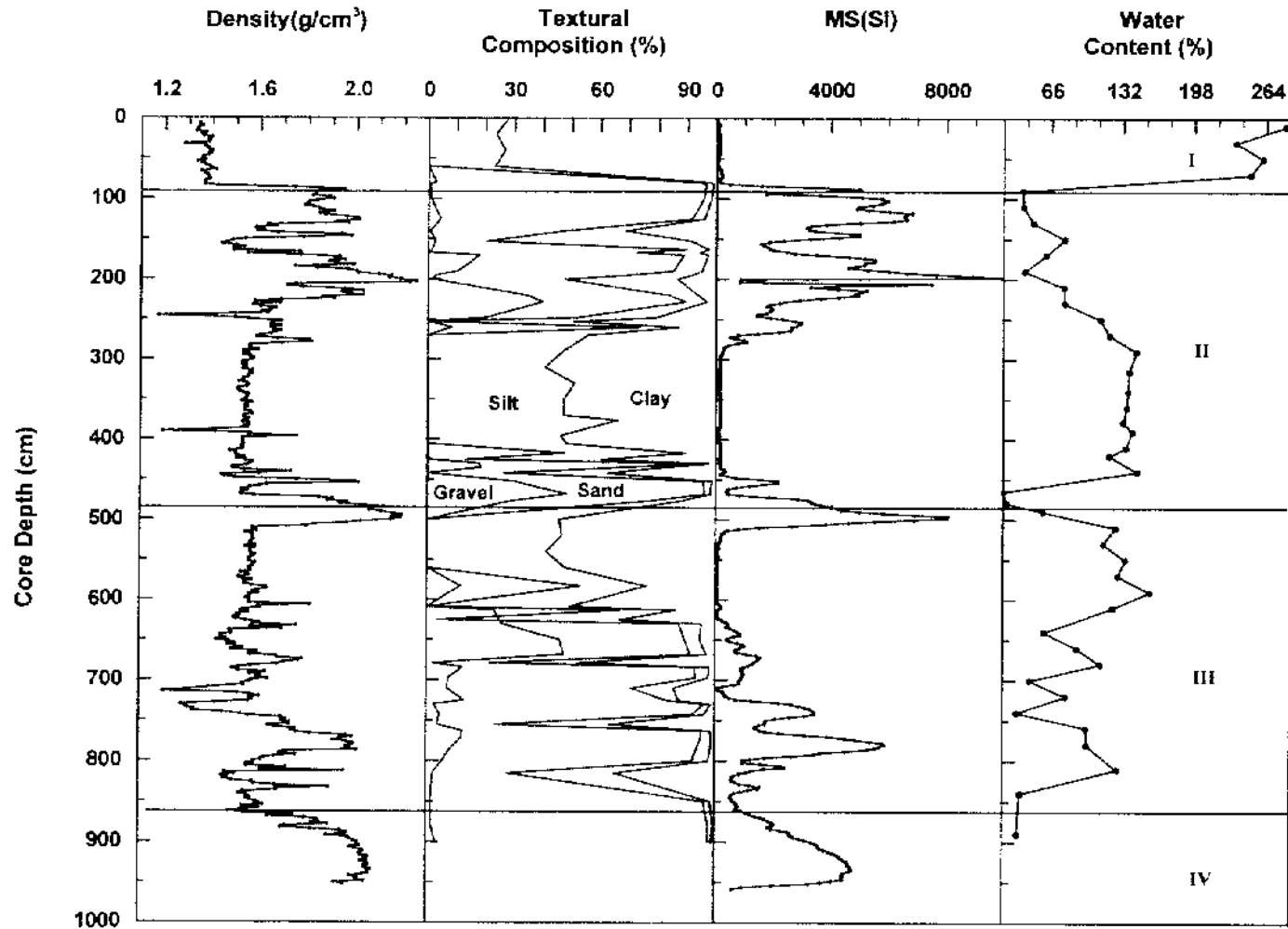


Fig. 3-8-25. Comparison of data curves between grain textural composition and water contents and gamma density and magnetic susceptibility from AMSCL from MB99PC-3 core sediments.

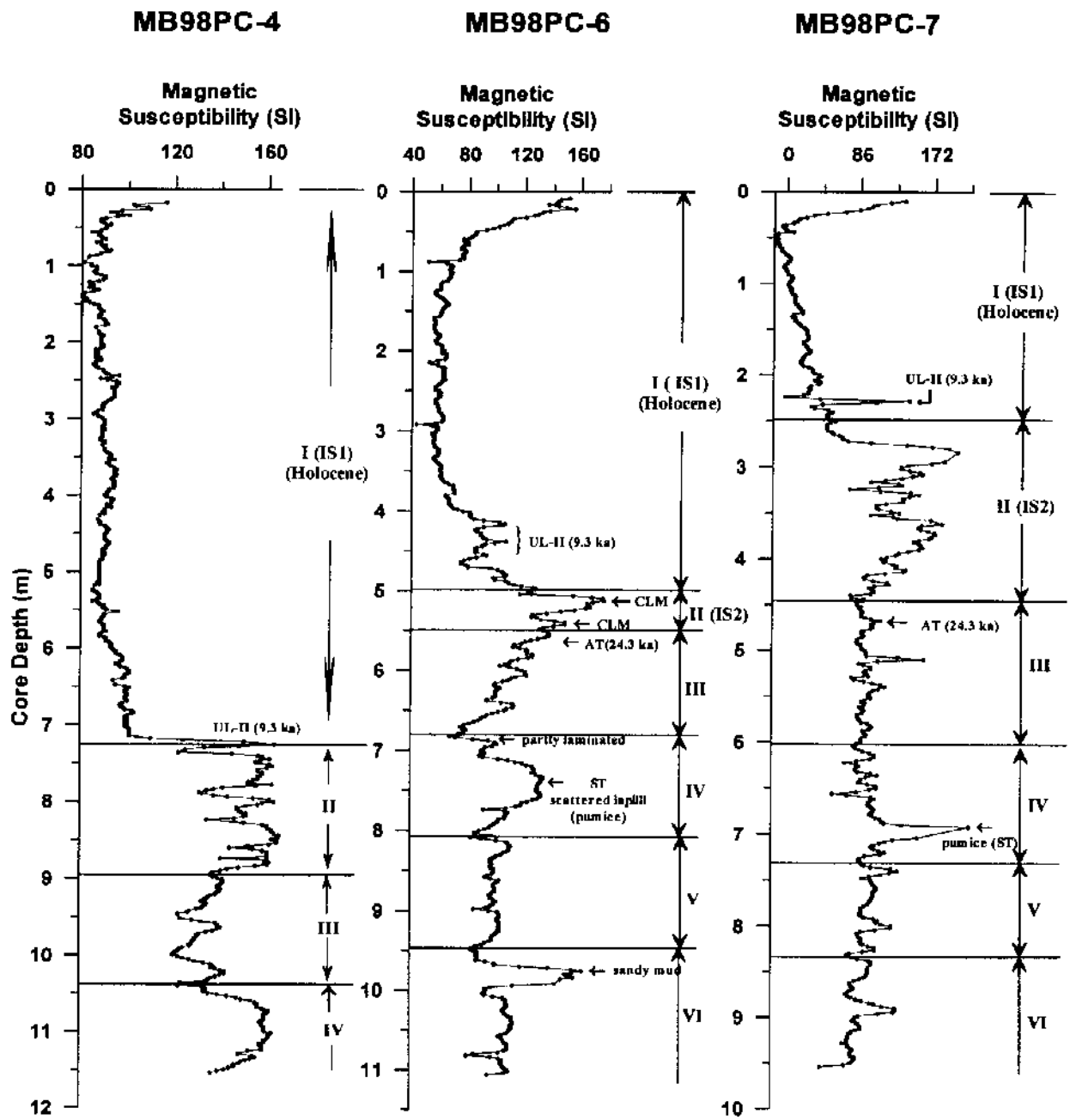


Fig. 3-8-26. Comparison of magnetic susceptibility among MB98PC-4, MB98PC-6 and MB98PC-7 cores.

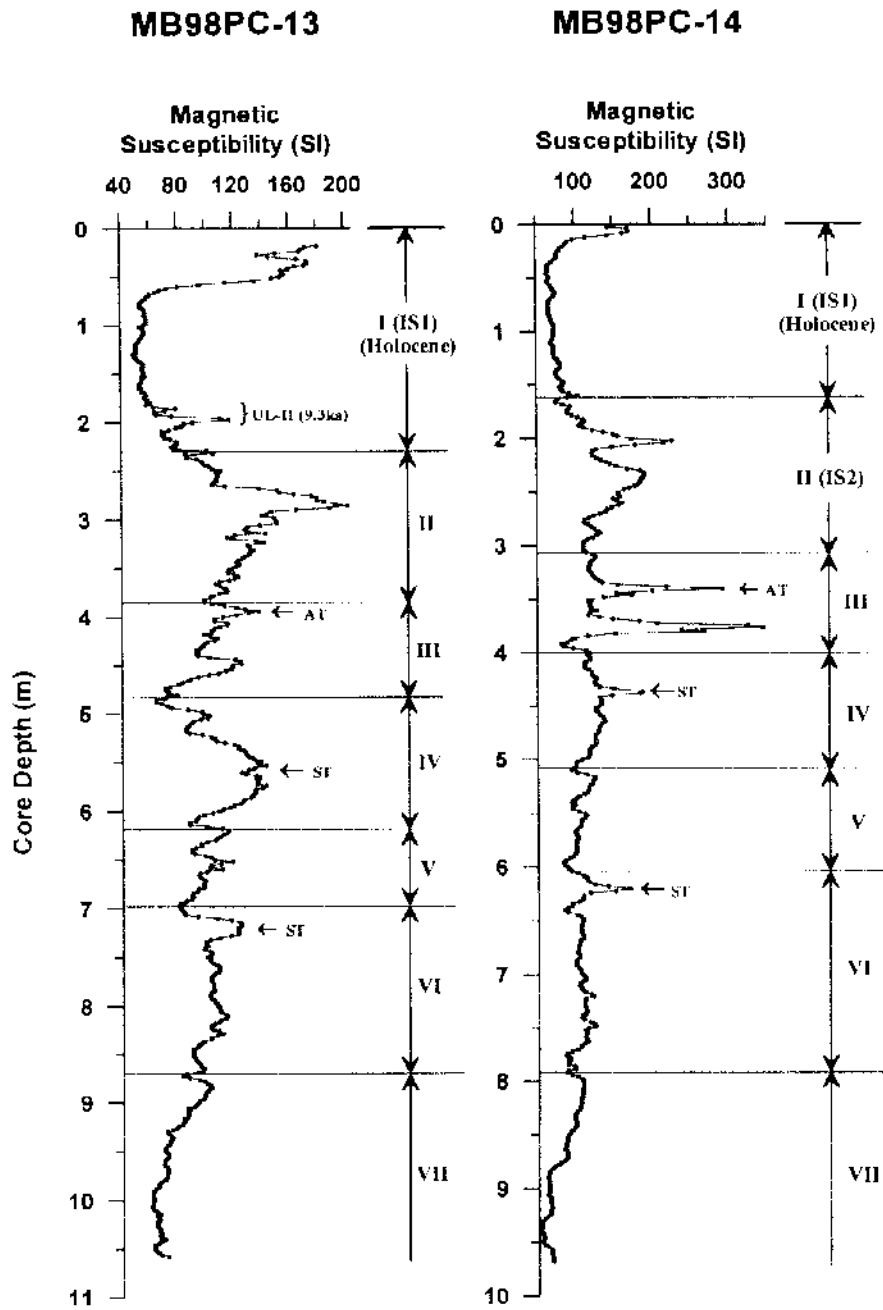


Fig. 3-8 27. Comparison of magnetic susceptibility among MB98PC 13 and MB98PC-14 cores.

IV는 MB98PC-13 코아깊이 554 cm에서, MB98PC-14 코아깊이 436 cm에서 자화율 피크와 감마밀도 피크가 나타나며 해저화산재층으로 사료된다. 이 퇴적상에서 두 코아간의 자화율 곡선은 많은 차이를 보인다. 퇴적상 V는 두 코아 모두에서 자화율값 피크가 작지만 2개씩 나타나는데 이는 회미한 층리니이다. 퇴적상 VI는 MB98PC-13 코아의 716 cm와 MB98PC-14 코아의 620 cm에서 해저화산재층이 나타나며 퇴적상의 하부에서 나타는 작은 피크들은 회미한 층리니로 파악되었다. 퇴적상 VII는 두 코아에서 모두 자화율이나 감마밀도의 곡선경향이 매우 유사하며 이는 퇴적환경이 유사한 같은 시기로 사료된다. 울릉분지-일본분지 통로의 해저수로에서 채취된 두 코아인 MB99PC-2 코아와 MB99PC 3 코아의 자화율곡선은 유사한 부분이 매우 많다 (Fig. 3-8-28). MB99PC-2 코아 퇴적상 I은 코아깊이 424 cm까지이지만 MB99PC-3 코아의 경우는 82 cm까지로 퇴적물이 매우 낮다. MB99PC 2 코아의 퇴적상 I에서는 자화율에 의해 화산재층이 두 군데에서 뚜렷하게 삼히는데 코아퇴적물의 관찰에 의하면 코아깊이 108 cm는 UL-I인 것으로 추론되며, 코아깊이 194-210 cm는 UL II인 것으로 파악된다. MB99PC- 3 코아에서는 울릉도 분출화산재층이 기록되어 있지 않다. 두 코아의 퇴적상 II는 상부층에 두꺼운 해저화산재층 (ST1로 칭함)이 나타나며, 자화율 곡선을 비교하면 같은 시기에 퇴적된 것으로 본다. MB99PC 2 코아의 경우는 퇴적상 II의 하부층에도 해저화산재층 (ST1'로 칭함)이 나타나지만 MB99PC 3 코아의 경우는 하부층의 대부분이 생흔층리로 구성되어 있다. 퇴적상 III는 MB99PC 2 코아의 762-882 cm 구간을, MB99PC-3 코아는 444-862 cm 구간을 잠았는데, 상부층에 해저화산재층 (ST2로 칭함)이 서로 대비된다. 퇴적상 III의 경우는 MB99PC-3 코아의 하부층에 또 다시 해저화산재층 (ST2'로 칭함)이 발견되지만, MB99PC-2 코아에서는 발견되지 않는다. 퇴적상 IV는 두 코아 모두에서 발견된다.

5. 결론

1) 동해 한국측 대륙주변부, 울릉분지 가장자리, 한국대지 및 울릉분지-일본분지 통로에서 채취된 13개의 시추퇴적물을 자동코아다중검침기 (Automated Multi-Sensor Core Logger: AMSCL)를 이용하여 퇴적환경 변화 및 고해양·고기후, 퇴적물 안정성을 파악하였다.

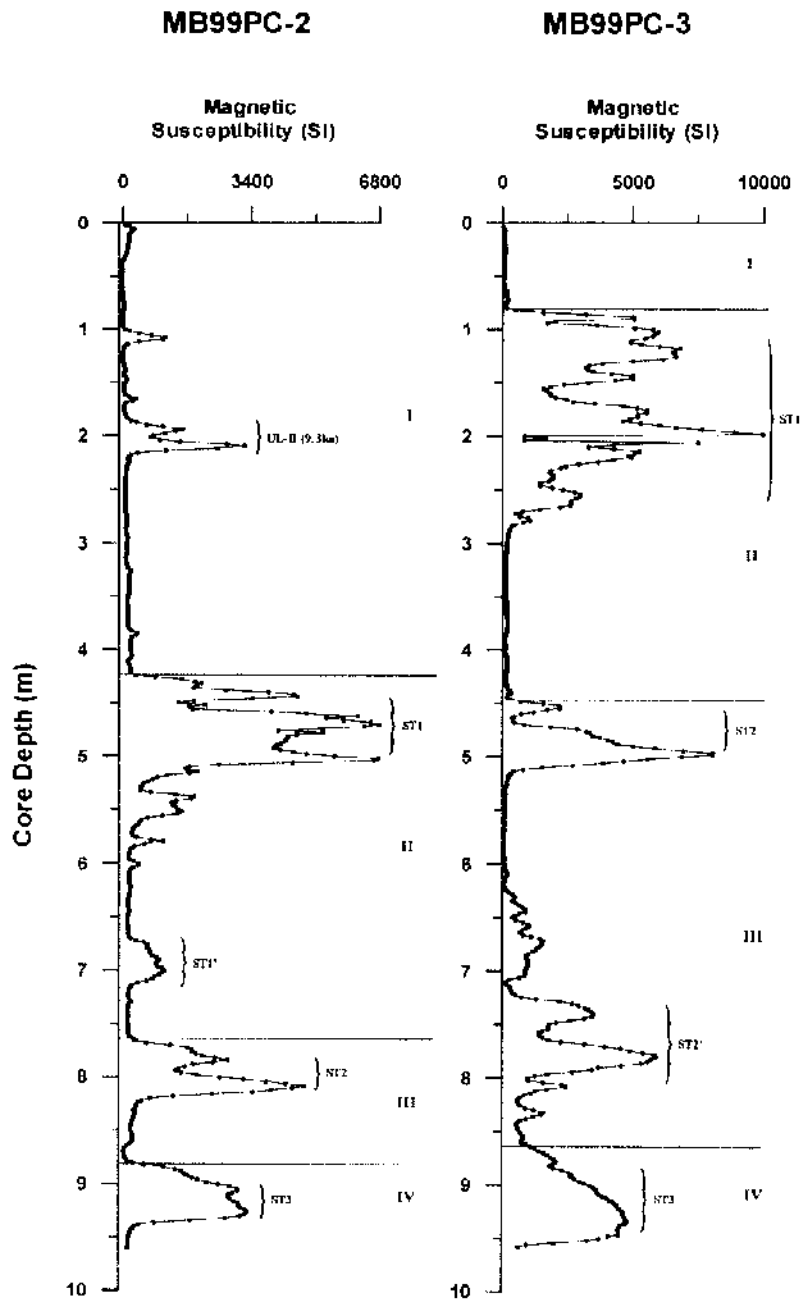


Fig. 3-8-28. Comparison of magnetic susceptibility among MB99PC-2 and MB99PC 3 cores.

- 2) 자동코아다중검침기에서 시추코아를 열기 전에 검침기로 측정된 자료이므로, 실험실에서 코아를 열어서 시료선택을 위한 코아선정에 활용할 수 있다.
- 3) 자동코아다중검침기를 이용하여 측정된 P파 속도, 감마밀도 및 자화율값에서 자화율값이 기후 및 환경변동 기록에 가장 민감하게 기록되어 있고, 다음이 감마밀도이다. P파 속도는 기록의 오차가 많아 본 연구에서는 거의 이용되지 못하였다.
- 4) 자동코아다중검침기를 이용하여 분석된 퇴적상은 6개까지 분류가 가능하였다.
- 5) 시추퇴적물간의 대비는 대부분 자화율값을 사용하였으며, 유사한 특징을 보이는 시추퇴적물의 그룹으로 한국측 대륙주변부에 위치한 MB98PC-4 코아, MB98PC-6 코아 및 MB98PC-7 코아간의 대비, 또 한국 대륙사면에 위치한 MB98PC-13 코아와 한국대지 서측에 위치한 MB98PC-14 코아간의 대비, 울릉분지-일본분지 통로에 채취된 MB99PC-2 코아와 MB99PC 3 코아간에 서로 대비된다.
- 6) 동해 한국측 대륙사면에 위치한 MB98PC-6 코아와 MB98PC-13 코아의 상부층인 퇴적상 I~IV은 유사한 점은 MB98PC-13 코아의 하부층이 대륙사면 서측에 위치한 MB98PC-14 코아의 하부층과 대비되는 점이다. 이는 MB98PC-13 코아가 홀로세와 플라스토세 중에서 상부층에는 같은 대륙사면에 위치한 MB98PC-6 코아와 비슷한 환경에서 퇴적된 것으로 보지만 하부층은 대륙사면 서측에 위치한 MB98PC-14 코아와 같은 환경에서 형성된 것으로 사료된다.
- 7) 한국대지 동측에서 채취된 MB99PC-1 코아는 퇴적층의 슬립프나 슬라이딩이 파악되며 자화율값 또한 변화가 많으면서 어떤 경향곡선이 나타나지 않아서 층서간의 대비가 어려우며 퇴적물이 매우 불안정하게 형성되었다.
- 8) 여러 화산재층들이 자동코아다중검침기에 의하여 측정된 자화율값에 매우 민감하게 반응하므로 분류가 가능하였으며, 특히 홀로세층이 분류될 시에는 UL-I이나 UL-II는 쉽게 파악이 가능한 장점이 있다. 다른 화산재층들은 좀 더 정밀분석이 필요하지만 대부분 해저화산재층일 가능성이 높다.
- 9) 홀로세층이 파악된 코아들의 퇴적율을 계산하였으며, 그 퇴적율은 MB98PC 4

코아는 0.60 mm/yr, MB98PC-6 코아는 0.42 mm/yr, MB98PC-7 코아는 0.21 mm/yr, MB98PC-13 코아는 0.19 mm/yr, MB98PC-14 코아는 0.14 mm/yr, MB99PC-2 코아는 0.35 mm/yr 및 MB99PC-3 코아는 0.07 mm/yr이다.

10) 자동코아다중검침기에서 측정한 감마밀도와 자화율값은 입도 및 함수율과 잘 대비된다.

제 9 절 동해분지의 망간 카보네이트 형성 기작

대표저자 : 한상준 (한국해양연구소)

박장준, 조성권 (서울대학교 해양학과)

1. 서론

동해는 반폐쇄된 대륙주변부 바다로, 네 개의 얇고 좁은 해협 (수심 12-140 m) 을 통해 주변 대양과 연결되어 있다 (Fig. 3-9-1). 동해의 수심 200-300 m 아래에는 낮은 수온 (<1°C)과 높은 용존 산소농도 (5-6 mL)로 특성 지워지는 수괴가 분포하는 것으로 알려져 있다 (Gamo et al., 1986; Kim et al., 1996). 이 심층수괴는 클라디보스톡 연안에서 겨울에 발생하는 북서계절풍의 지형적 강화 현상에 의해 표층수가 냉각되어 형성된 것으로 여겨진다 (Kawamura and Wu, 1998). 이 심층수의 영향으로 동해의 수심 2000 m 이하의 해저면에 분포하는 니질 퇴적물들은 산화되어 황갈색을 띠며, 유기물 함량 (<1%)과 탄산염 함량 (<1%)이 낮다 (Ninno et al., 1969). 최근세 최빙기에 전 지구적 해수면은 약 120 m 가량 하강한 것으로 보고되고 있는데 (Shackleton, 1987), 이러한 해수면 하강은 동해와 주변 대양간의 해수 순환을 차단하여, 동해 심층수의 특성에 상당한 영향을 미쳤을 것이다. 동해의 시추 퇴적물에 대한 지화학적, 고생물학적 연구 결과는 이 시기에 무산소저층수 환경이 형성되었음을 지지하고 있다 (Oba et al., 1991; Oba et al., 1995). 산소 동위원소 자료에 의하면, 이 무산소 저층수 환경은 해수면 하강으로 폐쇄된 동해에 담수가 유입되어 표층수의 염분도가 낮아진 결과, 수층이 밀도차에 의해 성층화된 때문으로 해석되었다 (Oba et al., 1991; Keigwin and Gorbarenko, 1992).

울릉분지에서는 해수면 변동과 더불어 심층수 특성 뿐만 아니라 사면 안정성 또한 상당한 변화를 보였다 (Lee et al., 1996). 울릉분지에서 획득된 시추 퇴적물에

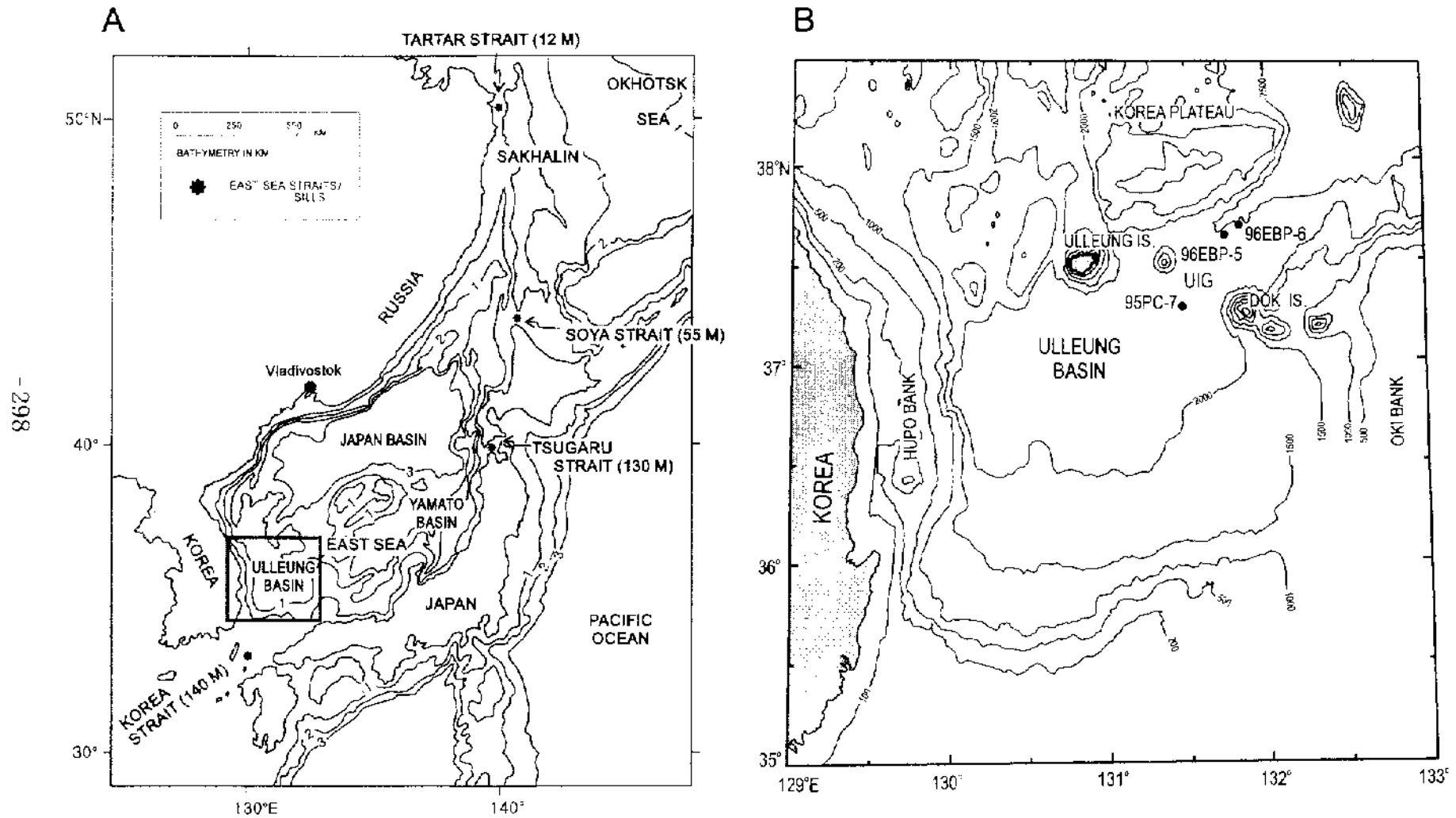


Fig. 3-9-1. A) Physiographic map of the East Sea (Sea of Japan) and the surrounding region. Note shallow sills and straits connecting the East Sea and the western Pacific. Box indicates study area expanded in B. Redrawn from Ingle, Suyehiro, von Breyman et al. (1990). B) Bathymetry of the study area (contours in metres) and locations of piston cores. UIG=Ulleung Interplain Gap.

대한 연구 결과, 해저면으로부터 1-2 m 아래에서 하부의 후기 플라이스토세 저탁류 퇴적층과 상부의 홀로세 만원양성 니가 구분됨이 밝혀졌다 (Chough et al., 1984; Chough and Bahk, 1984-1985). 이러한 암상 변화는 해수면 상승에 의한 사면의 안정화를 반영한 것으로 해석되었다 (Lee et al., 1996). 울릉 분지간 통로 (Ulleung Interplain Gap, UIG)는 울릉 분지와 일본 분지를 연결하는 좁고 깊은 통로다 (수심 약 3000 m, 폭 약 70 km) (Fig. 1B). UIG는 이 두 분지간 심층수의 통로 역할을 하고 있기 때문에, UIG의 심층수 특성은 동해의 심층수 순환의 변화에 대단히 민감하였을 것으로 여겨진다.

이 연구 보고서는 UIG에서 시추된 퇴적물의 최근세 빙하기 이후의 퇴적학적, 지화학적 특성의 변화를 기술하고 있다. X선 사진과 박편을 통한 퇴적구조 관찰과 지화학적 분석의 결과, 망간 카보네이트 (Mn-carbonate) 니 층이 하부 층리 니와 상부 생물교란 니 사이에 특징적으로 나타남을 확인하였다. 본 연구는 이러한 특징적인 암상조합의 고해양학적 함의와 망간 카보네이트 형성 기작에 대한 함의를 구명하고자 한다.

2. 연구재료 및 방법

동해분지 사면을 통해 UIG에서 획득된 세 개의 시추심 (95PC-7, 96EBP-5, 96EBP-6)이 본 연구에 사용되었다 (Fig. 3-9-1B). 이들 시추심들은 대개 생물교란된 니로 이루어져 있으며 산형적으로 층리 니와 균질니로 이루어진 생물교란되지 않은 층이 협재한다 (Fig. 3-9-2). 시추심 표층으로부터 처음 나타나는 상부의 생물교란된 니와 하부의 생물교란되지 않은 층 사이의 경계는 기존 연구결과 보고된 플라이스토세 저탁류 퇴적층과 홀로세 만원양성 니 사이의 암상 경계와 일치하는 것으로 여겨진다 (Chough et al., 1984; Chough and Bahk, 1984-1985). 최근세 빙하기 이후의 변화에 초점을 맞추기 위해, 자세한 분석은 시추심 표층으로부터 처음 나타나는 생물교란되지 않은 층이 분포하는 깊이까지 이루어졌다 (Fig. 3-9-2)

거시적인 퇴적구조 관찰은 1 cm 두께의 퇴적물 스텝에 대한 X선 사진을 통하여 이루어졌다. 퇴적물의 입도는 사질 부분은 표준 망체로, 니질 부분은 Micrometrics

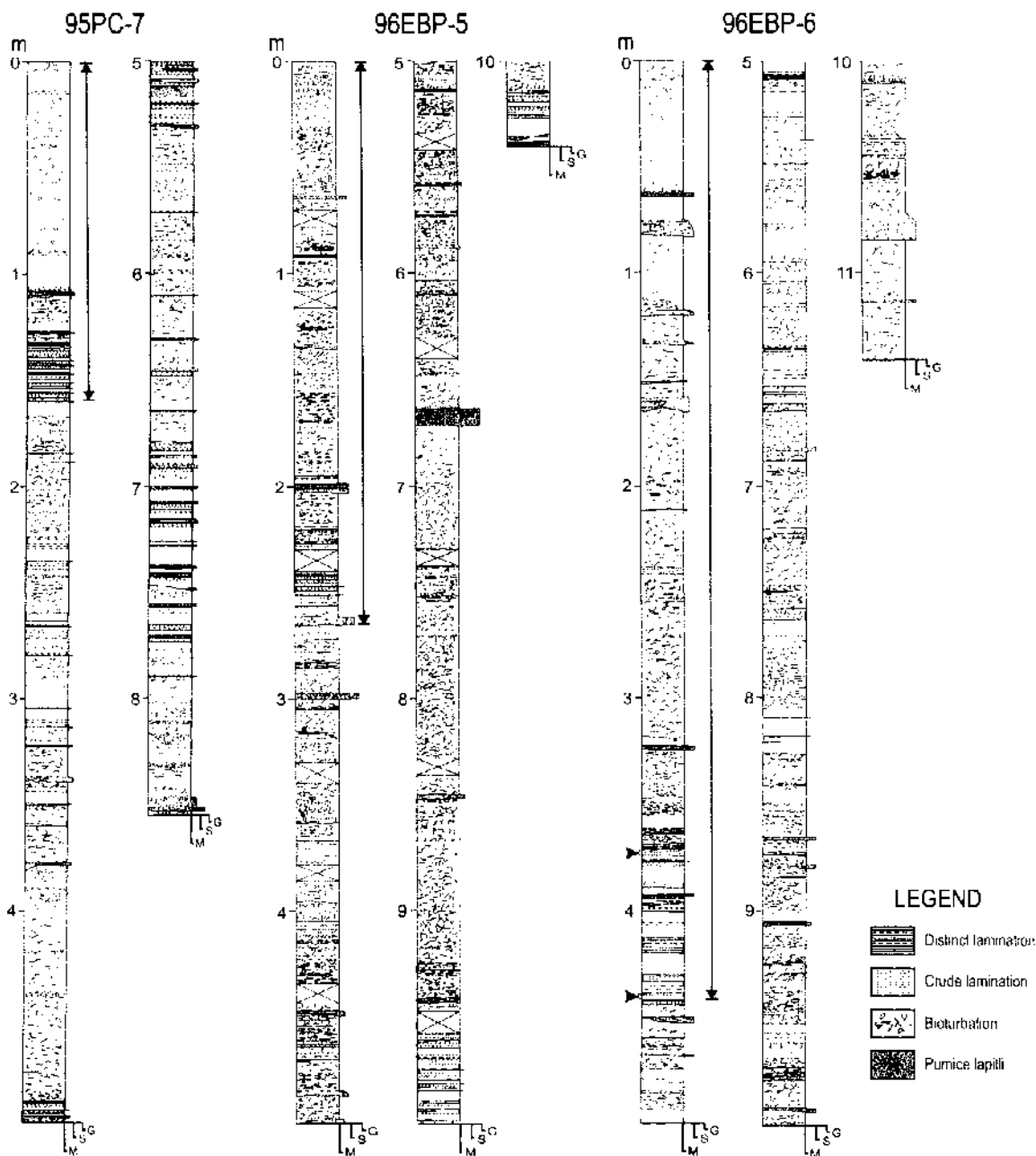


Fig. 3-9-2. Sedimentary logs of cores 95PC 7, 96EBP 6 and 96EBP-5. Sections detailed in this study are indicated by arrow-headed lines. M, S and G denote mud, sand and gravel, respectively. The gravel mostly consists of pumice lapilli. Arrowheads in core 96EBP 6 denote sample location for AMS14C dating.

SediGraph 5100D로 분석하였다. 퇴적 염리에 대한 미시적 구조와 성분 에 대한 분석은 퇴적물을 굳혀 연마 박편을 만든 후, 이에 대한 광학 현미경 관찰과 전자 현미경 관찰을 통해 이루어 졌다. 자생 탄산염 광물에 대한 성분 분석은 연마 박편에 대한 전자 현미 분석을 통해 이루어 졌다. 염리층 내에서의 수직적 성분 변화는 Mn, Ca, Al, Si 원소의 상대 함량을 선상으로 전자 현미경을 통해 측정하였다.

Al, Mn, S, Cu, Cd, Mo 등의 원소 함량과 유기 탄소 함량 측정은 시추심 96EBP-6에서 이루어졌다. 시료는 암상변화를 고려하러 2-30 cm의 간격으로 채취 되었으며, 오븐에서 건조 시킨 후 아케이트 모타르에서 분말로 만들었다. 분말화된 시료는 산처리한 후 원소함량은 ICP-MS (VT Elemental PQII+)로, 유기 탄소 함량은 원소분석기 (CE instruments EA 1110)로 측정하였다.

탄소 연대 측정을 위한 시료는 시추심 96EBP-6의 373-375 cm와 444-446 cm 구간에서 각각 채취되었다 (Fig. 3-9-2). 각 시료 당 대략 1000 내지 2000 마리의 부유성 유공충을 채집하여 탄소 연대 측정에 사용하였다. 연대 측정은 서울대학교 공동기가원에서 이루어 졌다.

3. 연구결과 및 토의

가. 퇴적상

입도와 일차 퇴적구조, 광물 조성 등에 기초하여 시추심의 세립질 퇴적물은 다음 5개의 퇴적상으로 나뉘어 진다: 층리 니, 희미한 층리 니, 균질 니, 생물교란 니, 망간 카보네이트 층리 니. 이들 중 층리 니, 희미한 층리 니, 균질니, 생물교란 니 퇴적상들은 울릉분사의 분지 평원의 시추심에서 보고된 퇴적상들과 유사하며, 각각 하부 저탁류 퇴적층, 무산소 저층환경에서의 반원양성 니, 상부 저탁류 퇴적층, 유산소 저층환경에서의 반원양성 혹은 원양성 니로 해석된다 (Bahk et al., 2000). 여기서는 UIG에서 새롭게 관찰된 망간 카보네이트 층리 니에 대해서 상세히 기술하겠다.

(1) 망간 카보네이트 층리 니

이 퇴적상은 2-4 cm 두께의 짙은 갈색의 염리를 보이는 황갈색 니로 이루어져

있다 (Fig. 3-9-3D). 각 퇴적 단위들의 하부에는 회미한 층리니가, 상부에는 생물 교란된 니가 비교적 분명한 경계를 가지며 나타난다 (Fig. 3-9-3D). 이들 퇴적 단위들의 박편을 현미경으로 관찰해 보면, 대개 직경 약 수십 μm 의 원형의 미세한 결정들로 이루어져 있다. 이들 미세 결정들은 불규칙하게 분포하여 교호하는 치밀한 엽리와 싱긴 엽리를 이루고 있다 (Fig. 3-9-4A). 어떤 경우엔 미세 결정들이 렌즈형이나 다원형으로 뭉쳐서 나타나기도 한다 (Fig. 3-9-4A). 치밀한 엽리의 두께는 0.1-1.5 mm 범위에 있으며, 흔히 추방향으로 두께가 변화한다. 비교적 두꺼운 치밀한 엽리의 내부에는 연장성이 불량한 싱긴 엽리들이 종종 협재한다 (Fig. 3-9-4A). 상대 원소 함량 분포 (Fig. 3-9-4B)를 보면 높은 Si, Al 원소 함량이 흔히 나타나는데, 이는 엽리들에 현미경으로 동정되지 않는 규소와 알루미늄을 포함하는 미세 광물들이 상당량 포함되어 있음을 지시한다. 연 세 개의 개개 미세 결정에 대한 전자 현미 분석 결과 (Table 3-9-1), 이들 미세결정들의 평균 화학조성은 $(\text{Mn}_{44}\text{Ca}_{32}\text{Mg}_4)\text{CO}_3$ 으로, 망간 카보네이트 혹은 칼슘 로도크로사이트로 판명되었다. 상대 원소 함량 분포 (Fig. 3-9-4B)를 보면 Mn과 Ca의 함량 변화는 Mn/Ca 비가 약 2.3으로 일정하게 유지되는 동일한 기동을 보인다.

자생 망간 카보네이트는 발틱 해의 무산소 환경을 보이는 소분지의 홀로세 퇴적물에서 수 차례 보고된 바 있다 (Suess, 1979; Jakobsen and Postma, 1989; Sternbeck and Sohlenius, 1997; Lepland and Stevens, 1998). 무산소 환경의 퇴적물에서 망간 카보네이트는 망간 산화물로부터 유리된 Mn (II) 이온과 황산 이온 환원 작용에 따른 알칼리니티 (alkalinity) 증가에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다 (Sternbeck and Sohlenius, 1997; Lepland and Stevens, 1998). 망간 카보네이트가 추방향으로 연장성이 좋은 엽리를 이루어 나타나는 것은 퇴적물 내에서의 숙성 작용에 의한 것이 아니라, 퇴적물 표면에서 수층으로부터 침전되어 형성되었음을 지시한다 (Sternbeck and Sohlenius, 1997; Lepland and Stevens, 1998). 해성성 입자들의 유입량과 망간 카보네이트 침전 속도의 주기적 변화가 불규칙적인 엽리 형성의 원인인 것으로 생각된다.

나. 퇴적상 분포와 고해양 환경 변화

다섯 개의 퇴적상은 다음 두 개의 암상 단위로 나뉘어 진다: (1) 생물교란된 니

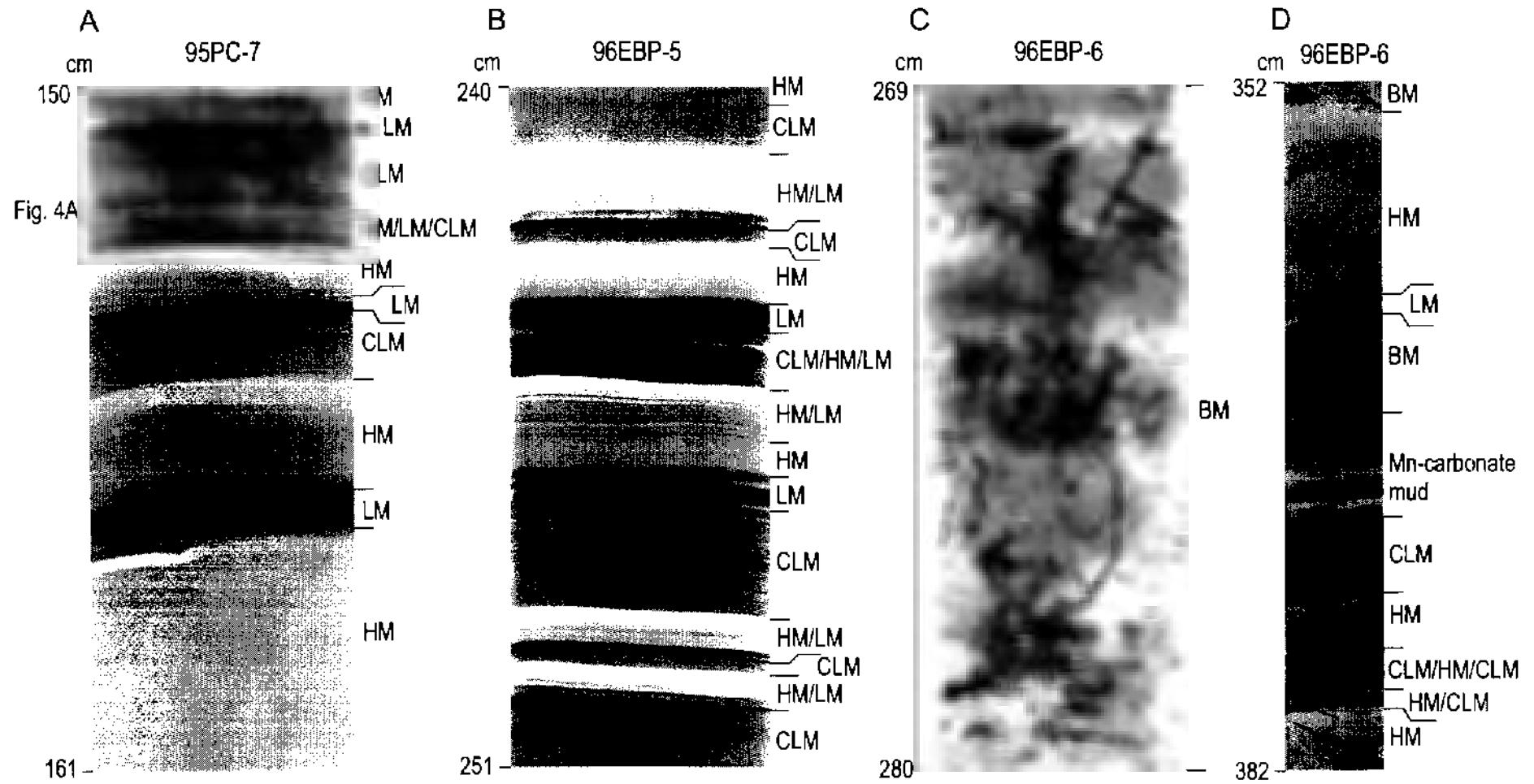


Fig. 3-9-3. X-radiographs (A, B and C) and a photograph (D) of selected sections. Symbols on the right side represent sedimentary facies: LM=laminated mud, CLM=crudely laminated mud, HM=homogeneous mud and BM=bioturbated mud. Thin units are collectively indicated in descending order.

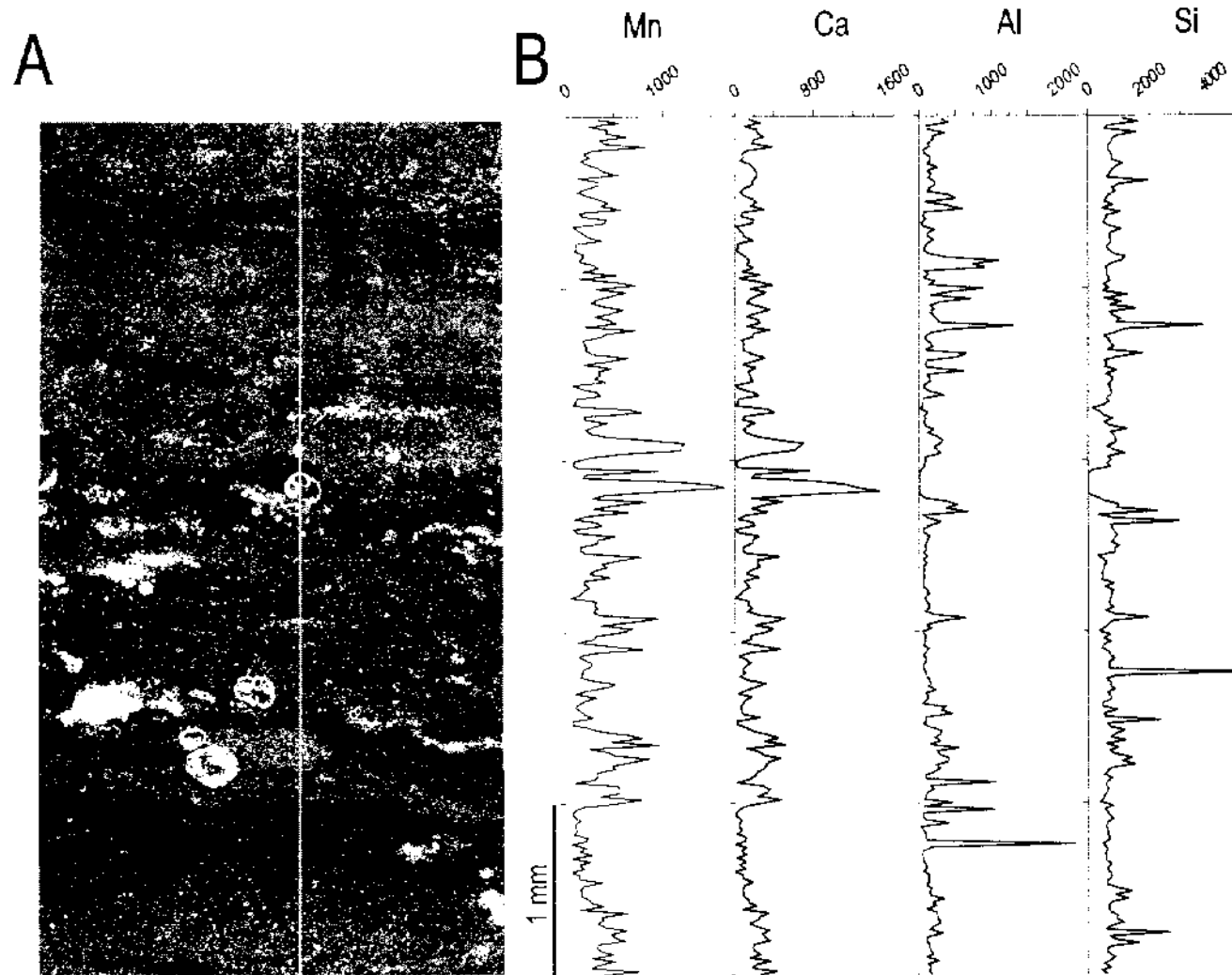


Fig. 3-9-4. A) Backscattered electron image (BSED) and B) electron microprobe element line-scan of Mn-carbonate mud from core 96EBP 5. The element concentrations are given in relative intensity. The line-scan position is marked on the BSED. The tick spacing along the profiles represents 1 mm of sediment. In the BSED, non-porous areas with densely distributed Mn-carbonate particles appear brighter than porous areas. Note in-phase variation of Mn and Ca with higher peaks generally in the non-porous areas. Al and Si contents rarely decrease to zero with higher peaks in both the non-porous and the porous areas.

로 이루어진 상부 암상 단위 (Unit I), (2) 반복적인 층리 니, 균질 니, 회미한 층리 니 순차층으로 이루어진 하부 암상 단위 (Unit II) (Fig. 3-9-5). 이 두 개의 암상 단위의 경계에 망간 카보네이트 층리 니가 나타난다 (Fig. 3-9-5). 시추심 96EBP-6에서 이루어진 탄소 연대 측정 결과와 암상단위간의 대비를 통해 Unit II의 퇴적시기는 대략 17.3-14.5 ka인 것으로 추정하였다 (Fig. 3-9-5).

(1) Unit II: 최근세 빙하기 저탁류 퇴적층과 민원양성 퇴적층

Unit II에는 하부로부터 층리 니, 균질 니, 회미한 층리 니로 이루어지는 순차층이 반복적으로 나타난다 (Fig. 3-9-3A, B, and 3-9-5). 층리 니나 회미한 층리 니 구간이 없는 순차층도 흔히 나타난다. 각각의 순차층은 세립질 저탁류 퇴적물 (층리 니와 균질 니)과 그 상부의 무산소 저층수 환경에서 형성된 민원양성 퇴적물 (회미한 층리 니)로 해석된다 (Bahk et al., 2000). 이 암상 단위에는 생물교란 흔적이 없어, 회미한 층리와 균질 니 상부에 나타나는 규조 연나 층이 보존되어 있으며, 이는 무산소 저층 환경에서 저서생물의 활동이 없었거나 상당히 억제되었음을 의미한다. 시추심 96EBP-6의 Unit II의 원소함량 분석 결과 (Fig. 3-9-6), S, Cu, Cd, Mo 등 환원 환경의 퇴적물에 농축되는 것으로 알려진 원소들의 높은 함량 또한 무산소 저층수 환경을 지시한다.

(2) Unit I: 홀로세 원양성 니

Unit I은 저탁류 퇴적층과 화산재층이 간헐적으로 협재하는 원양성 니로 이루어져 있다 (Fig. 3-9-5). Unit I이 퇴적되기 시작한 시기는 약 12 ka에 일어난 빠른 해수면 상승보다 약간 오래된 것으로 추정된다 (Fig. 3-9-5). Unit I은 빙하기 후기에서 홀로세에 이르는 동안 비교적 안정된 사면과 유산소 저층환경에서 퇴적된 것으로 해석된다.

시추심 96EBP-6의 Unit I에서는 상당히 높은 S, Cu, Cd 원소 함량과 유기물 함량이 100-143 cm 구간에서 발견된다 (Fig. 3-9-6). 주로 쇄설성 점토 광물을 통해 유입되는 것으로 알려진 Al 함량이 이 구간에서 거의 일정하기 때문에, 증가된 유기물 함량은 증가된 인자 생산에 기인한 것으로 여겨진다. 유기물들이 분해되면서 형성된 무산소 환경에서 Cu, Cd와 같은 원소들은 황화합물을 형성하며 침전되었을 것이다 (Klinkhammer et al., 1982; Sawlan and Murray, 1983). Mn과 Mo는 표층에

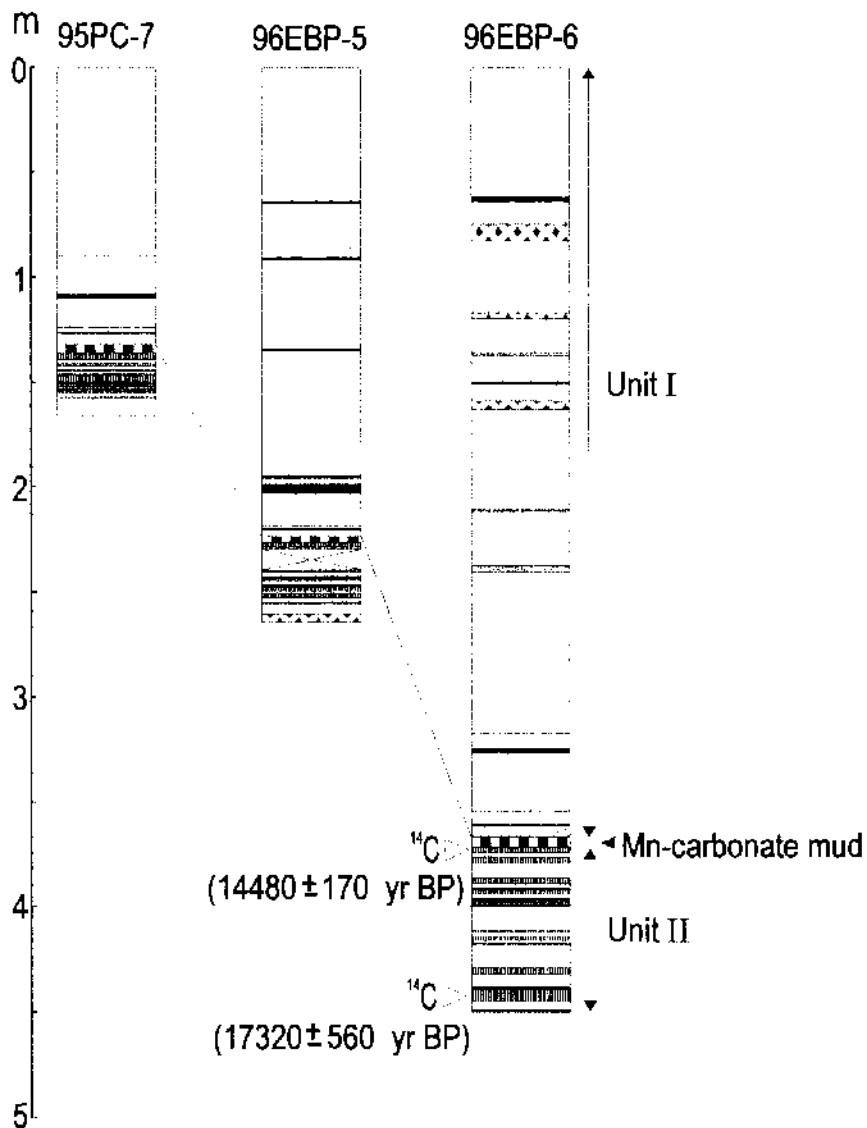


Fig. 3-9-5. Summary of sedimentary logs, AMS14C dates, and correlation of cores. For location of cores, see Fig. 3-9-1.

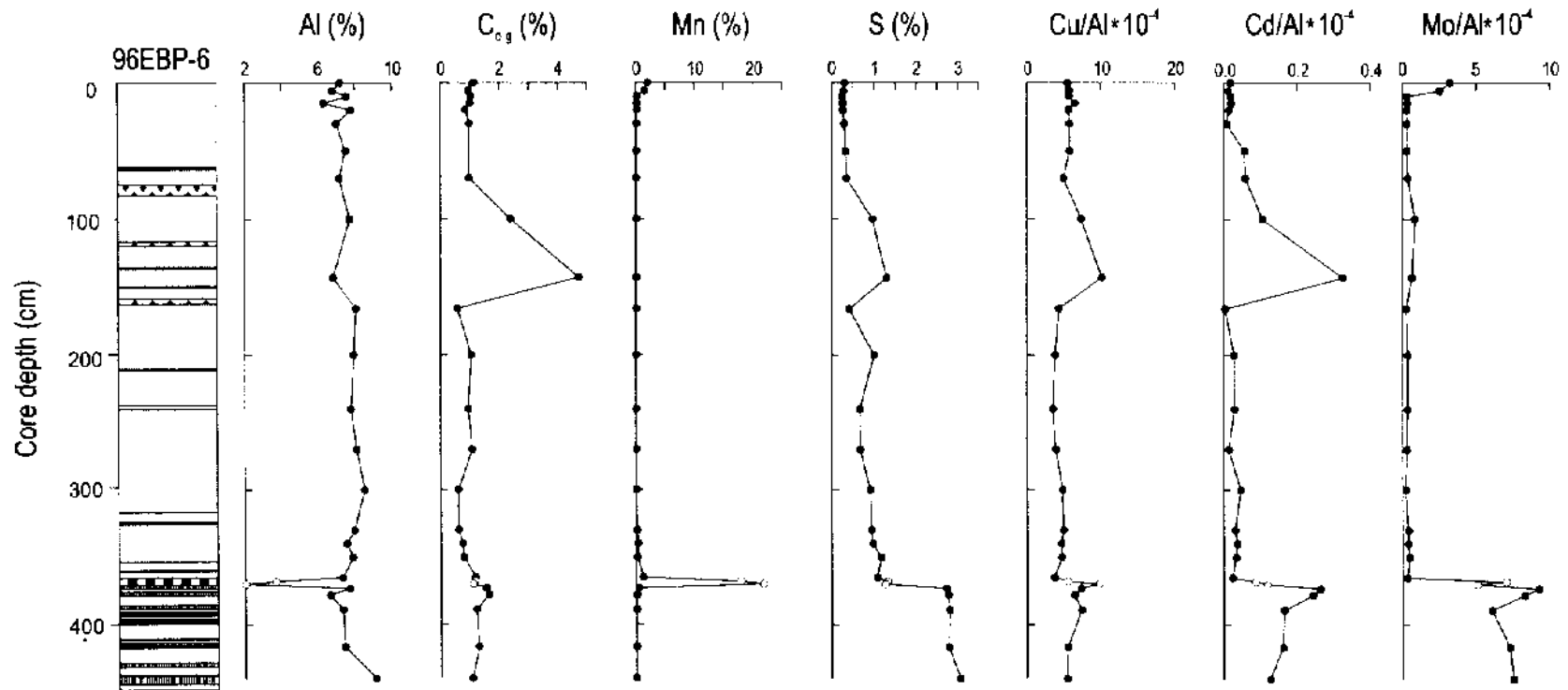


Fig. 3-9-6. Depth profiles of aluminum, organic carbon, manganese, sulfur, copper, cadmium and molybdenum in core 96EBP-6. Concentrations of copper, cadmium and molybdenum are normalized relative to the Al concentration. Open dots indicate values in the Mn-carbonate mud. For lithologic symbols, see Fig. 3-9-5.

서 약간 높은 함량을 보이는데 (Fig. 3-9-6), 이는 현재의 유산소 저층수 환경에서 형성된 산화 표층에 존재하는 Mn-oxyhydroxide와 이와 관련된 Mo를 나타내는 것으로 여겨진다 (Shimmield and Price, 1986; Calvert and Pedersen, 1993).

(3) 암상 경계에 위치하는 망간 카보네이트 니

망간 카보네이트 니가 특징적으로 Unit II와 I의 경계에 나타나는 사실은 그 형성과정이 최근에 간빙기 동안의 저층수의 산소 농도 변화와 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다. 이러한 추론은 최근의 망간 카보네이트 형성 기작에 대한 논의와 일치한다 (Calvert and Pedersen, 1993, 1996; Sternbeck and Sohlenius, 1997). Calvert와 Pedersen (1993, 1996)은 무산소 저층환경의 해양 분지에서 용존 Mn (II) 이온의 농도가 망간 카보네이트를 침전시킬 수 있는 농도까지 도달하지 않기 때문에, 무산소 환경의 퇴적물에서 망간 카보네이트가 형성 되기 위해서는 그 이전에 유산소 저층 환경에서 퇴적물 표층에 망간 산화물이 집적되어 있어야 한다고 주장하였다. 즉 이와 같이 집적된 망간 산화물이 환원 환경에서 다량의 Mn (II)이온을 유리시켜야 한다는 것이다. 이러한 기작은 약간의 변형을 거쳐 반딧해 소분지의 홀로세 퇴적물에 나타나는 망간 카보네이트 염리의 형성을 설명하는데 적용되었다 (Huckride and Meischner, 1996; Sternbeck and Sohlenius, 1997). Sternbeck와 Sohlenius (1997)는 무산소 환경 분지의 수층에 용존되어 있는 Mn (II)이온이 유산소 해수가 유입되면서 빠르게 산화되어 표층에 퇴적된 것으로 제안하였다. 그들의 모델에 따르면, 무산소 환경의 퇴적물 표층에서 이 망간 산화물의 환원과 높은 알칼리니티가 결합되어 망간 카보네이트 염리가 형성되었다.

동해에서 무산소 저층수의 산소농도는 해수면 상승과 더불어 주변 대양과의 해수 순환이 시작되면서 증가하였을 것이다. 망간 카보네이트 니의 염리는 주변 대양으로부터 유입되는 유산소 해수의 주기성을 반영하고 있는 것으로 여겨진다. 이 망간 카보네이트 니는 분지평원이나 대륙사면, 한국대지 등 울릉분지의 다른 곳에서는 발견되지 않는다 (Bahk et al., 2000). 망간 카보네이트가 UIG, 즉 울릉분지의 가장 깊은 곳에서만 발견되는 이유는 첫째, 이곳에서 육성기원 입자나 생물기원 입자들의 퇴적률이 낮기 때문에 상대적으로 망간 카보네이트가 농축될 수 있기 때문이다. 보다 중요한 것으로 여겨지는 두 번째 이유는 UIG가 심층수의 통로역활을 하고 있다는 점이다. 즉 UIG에서의 저층수 산소 농도의 변화는 다른 곳보다 보다 급격히

였을 것이고 이러한 급격한 산소농도의 변화가 망간의 산화-환원 상태 변화를 촉진 하였을 것이다.

4. 결론

울릉분지의 분지간 통로 (UIG)에서 획득된 시추심의 분석 결과, 최근세 빙기-간 빙기 동안의 해수면 변동과 고해양환경 변화를 반영하는 망간 카보네이트 형성과 관련된 암상변화를 인지하였다. 최근세 빙하기 동안의 퇴적물 (Unit II)은 반복적인 세립질 저탁류 퇴적층과 그 상부의 반원양성 니로 이루어져 있다. 저탁류 퇴적층은 주로 하부의 총리 니와 상부의 균질 니로 이루어져 있으며, 해수면이 낮은 시기에 불안정한 사면의 사면 사태 등에서 기원한 저탁류에 의해 퇴적되었다. 반원양성 니는 희미한 총리를 보이며, 환원 환경을 지시하는 원소들이 농축되어 있어, 해수면 하강으로 동해에 유발된 수층의 밀도 성층화 결과인 무산소 저층수 환경을 지시하고 있다. 최근세 빙하기 후기에서 홀로세 기간에 퇴적된 퇴적물 (Unit I)은 점토질의 생물 교란된 니로 이루어져 있으며 이는 해수면 상승이후 유산소 저층수 환경에서의 원양성 퇴적작용에 의해 퇴적되었다. Unit I에서 유기물 함량의 증가와 환원 환경 지시 원소 함량의 증가를 보이는 구간은 이 시기의 높은 일차 생산에 기인한 것으로 여겨진다. 암상 단위의 경계에 나타나는 망간 카보네이트는 무산소 환경에서 유산소 환경으로의 급격한 저층수 환경의 변화를 반영하고 있다.

제 10 절 한국대지에서 채취된 기반암과 인회석암들의 기재암석학적 특성

대표저자 : 허식, 이종익, 천종화 (한국해양연구소)

1. 서론

동해는 일부 확장축을 중심으로 새로운 해양지각이 형성되기도 하는 반면 대지 등에는 동해확장 당시 대륙으로부터 떨어져나온 대륙지각도 상당히 존재할 것으로 생각된다. 따라서 동해 성인을 규명하기 위해서는 확장축에 분포하는 화산암류에 대한 연구뿐만 아니라 대륙지각의 구성 성분이 어느 정도 되는지, 또 이 대륙지각은 우리나라 또는 일본의 어느 지체구조 환경과 연관되는지를 먼저 살펴볼 필요가 있다. 금년도 한국대지에서 채취된 화강암편들은 위의 관점에 입각해 동해 성인을 풀어가는 데 있어 매우 중요한 사료가 될 것으로 기대된다 (Fig. 3-10-1). 따라서 본 연구에서는 이 화강암편들에 대한 상세한 기재암석학적 특성을 정리하고, 이들이 우리나라의 여러 지체구조 환경에서 산출되는 화강암들과의 유사성 및 차이점에 대해 비교 검토해 보고자 한다.

2. 한국대지에서 채취된 기반암

한국대지에서 채취된 시료는 거의 대부분이 우백질 반상화강암편들로 상경 10 cm 내외의 각력질 암편이 우세하고, 최대 장경 30 cm에 달하는 것도 간혹 있다. 일부 암편은 유색광물의 함량이 풍부해 흑운모화강암 내지 화강섬록암의 조성에 해당하지만 전체적인 광물조합은 우백질 화강암편과 동일하다. 모든 암편들은 전체적으로 조립질이며 다소 변질, 변형을 받았다. 주성분광물은 알칼리장석, 석영, 사장석, 흑운모 등이며, 부성분광물로는 지어콘, 인회석과 불투명광물이 산출된다. 이차변질

광물로는 백운모, 녹염석, 녹니석 등이 수반된다.

알칼리장석은 전형적인 페리클리닉 (periclinic) 쌍정과 일부 피싸이트화된 미사장석으로 주로 반상변정으로 산출된다 (Fig. 3-10-2). 반정면정 미사장석은 사장석, 석영, 흑운모 등을 함유하고 있는 포이키리틱 (poikilitic) 조직을 흔히 보인다 (Fig. 3-10-3). 따라서 이런 반정들은 주성분광물 보다는 후기에 정출된 것으로 생각된다.

사장석은 자형 내지 반자형으로 산출되는 경우가 우세하고 안바이트 쌍정이 우세하지만 종종 알바이트-칼스바드 쌍정을 보이기도 한다. 석영과 접하는 부분에서는 미르메카이트 (myrmekite)가 산출되기도 하는데, 미르메카이트의 산출빈도는 변질이 심할수록 우세해진다 (Fig. 3-10-4). 변질을 받은 경우는 일부분 또는 전체적으로 견운모화되어 있다.

석영은 흔히 변형에 의해 파동소평을 보이며 재결정되어 있거나 파쇄되어 세립의 집합체로 산출되며 (Fig. 3-10-5), 엽리 방향으로 신장되어 있는 경우가 흔히 관찰된다 (Fig. 3-10-6).

흑운모는 변질이 심해 대부분이 백운모화 또는 녹니석화되어 있다 또 변형에 의해 구부러지거나 신장되어 엽리를 형성하기도 한다 (Fig. 3-10-7). 백운모는 변질 흑운모를 교대하거나 역시 변질 사장석을 교대하며 산출되기 때문에 모두 이차광물로 생각된다.

블투명광물은 거의 산출되지 않지만 일부 시료에서 티탄철석 (ilmenite)이 산출되고, 흑운모의 변질 산물로서 적철석이 흑운모내에 수반되는 경우가 있다. 파쇄된 틈을 따라서 갈철석 또는 피싸이트 (goethite) 등이 산출된다. 이러한 특성은 이 화강암편들이 관원적인 환경하에서 형성되는 티탄철석계열의 화강암류 (Ishihara, 1977)에 해당함을 지시한다. 세립이며 자형의 저어콘은 대표적인 부성분광물로 내부에는 전형적인 pleochroic halos를 보인다.

모든 시료들은 변형을 받아 다양한 변형 조직을 보인다. 사장석은 취성변형 (brittle deformation)을 받아 쌍정이 일부 휘어져있거나 kink band화 되어 있다 (Fig. 3-10-8). 깨진 틈을 따라 이차 석영이 충전하고 있기도 하다. 석영은 전체적으로 파동소평이 우세하고 재결정되어 있다 (Fig. 3-10-9). 연성변형 (ductile deformation)이 심해 엽리 방향으로 신장되어 있는 경우가 흔하다 (Fig. 3-10-6). 운모류는 자형을 형성하지 못하고 장석의 주변을 둘러싸거나 신장된 석영과 함께 엽리를 형성한다 (Fig. 3-10-7).

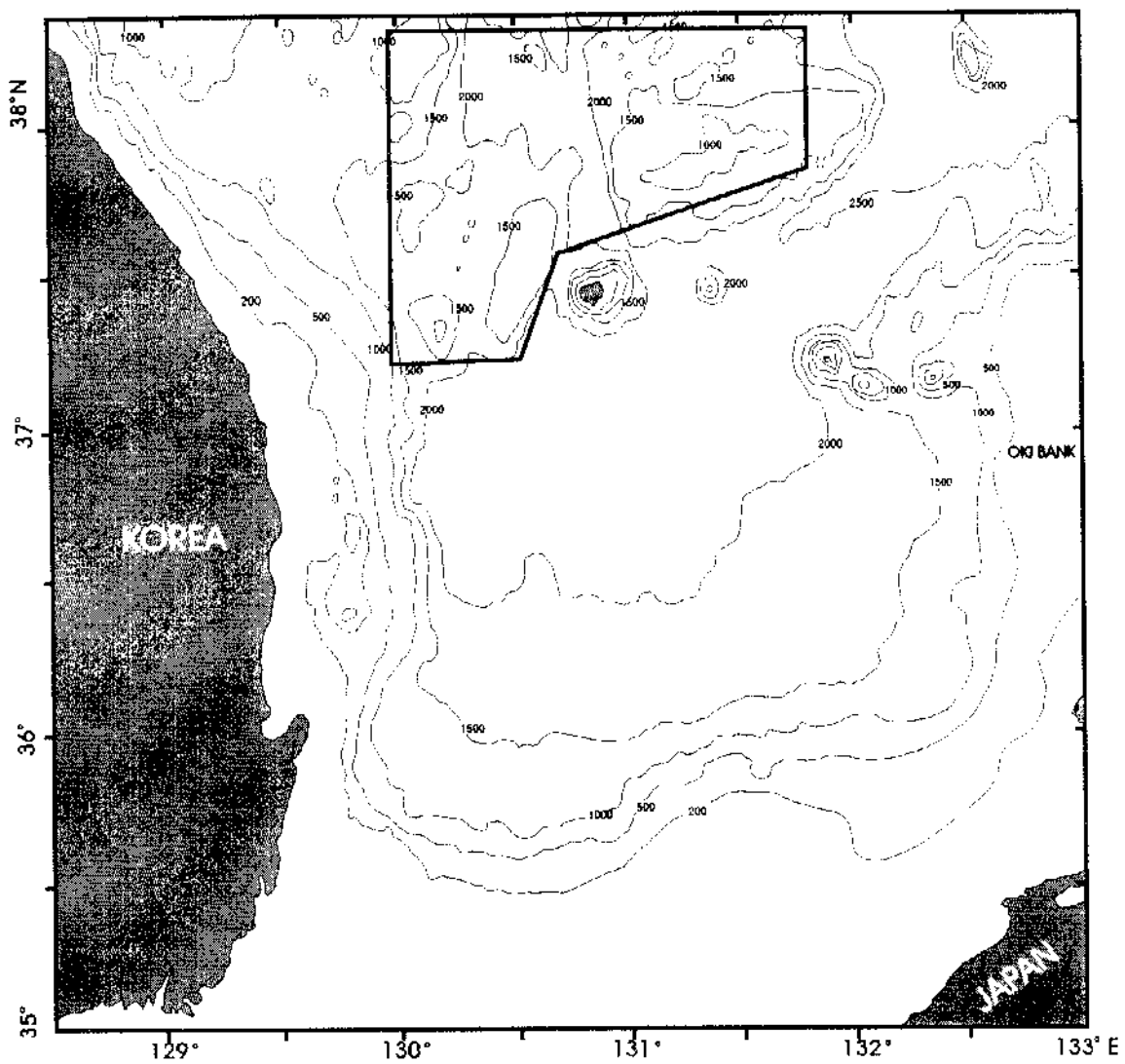


Fig. 3-10-1. Dredged sampling sites of the granitic fragments in the Korea Plateau.



Fig. 3-10-2. Photomicrograph of microcline porphyroblast showing periclinic twinning (sample No. S1-2-9) (x5, cross).

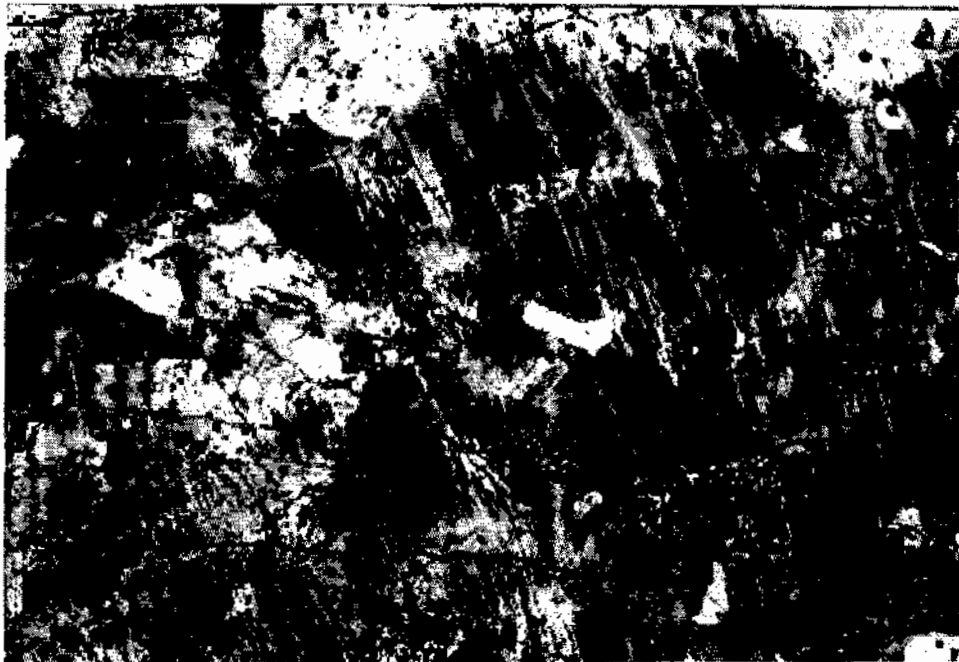


Fig. 3-10-3. Poikilitic microcline porphyroblast containing fine-grained plagioclase, quartz and biotite (sample No. S1-2-6) (x5, cross).



Fig. 3 10-4. Myrmekite occurring between quartz and altered plagioclase (sample No. S1-3-2) (x10, cross).

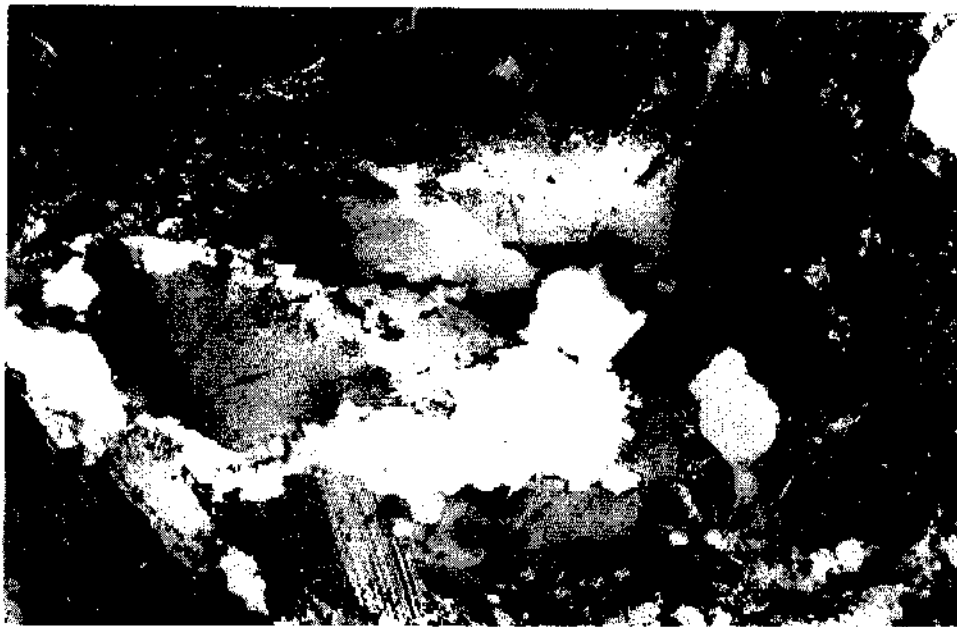


Fig. 3 10 5. Recrystallized quartz showing undulatory extinction (sample No. S1 3 1) (x5, cross).

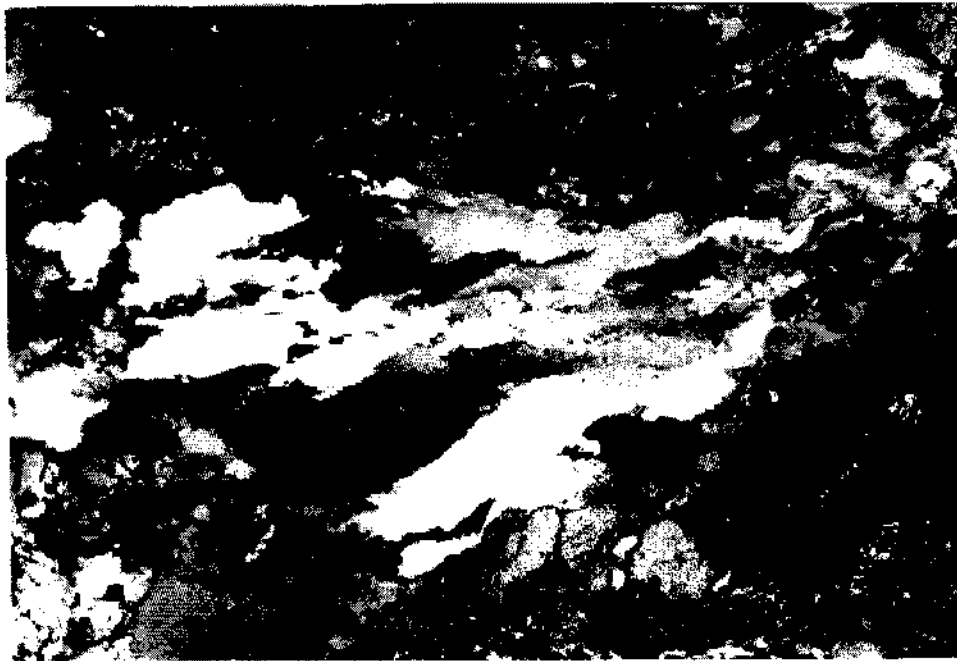


Fig. 3-10-6. Recrystallized, elongated quartz forming schistosity (sample No. S1-3-6) (x5, cross).

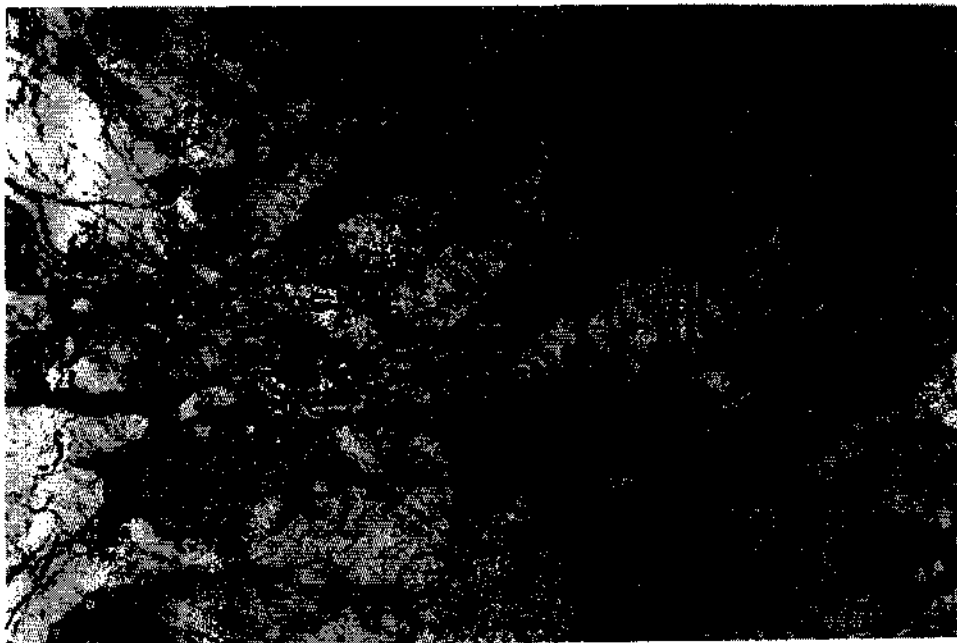


Fig. 3-10 7. Biotite altered to chlorite, muscovite and hematite (sample No. S1-3-10) (x5, open).

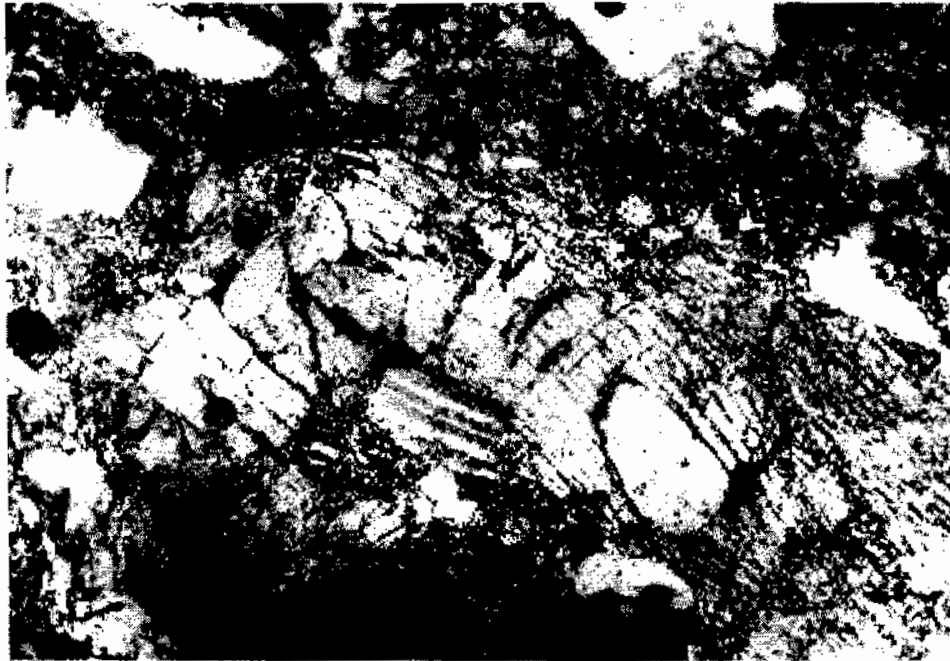


Fig. 3-10-8. Fractured, deformed plagioclase (sample No. S1 2 3)
(x5, cross).



Fig. 3 10-9. Recrystallized quartz showing undulatory extinction
(sample No. S1 3-11) (x5, cross).

3. 인회석암의 분포 및 특성

동해의 해지고원인 한국대지 (Korea Plateau)와 울릉도 주변 해역에서 정밀 해저지형 측정과 암석준설기를 이용한 해저광물자원을 지속적으로 탐사하였다. 그 결과로 북위 38° 20' 주변해역인 수심 600~1,500 m의 한국대지 사면에서 고품위 인산염 광물을 채취하는데 성공하였다 (Fig. 3-10-1). 인산염 광물의 모양은 해성층 규조석 (diatomite)이며, 이 규조석은 대부분이 인회석화 (phosphatized diatomite) 작용을 받았다 (Fig. 3-10-10). 인산염 광물의 총 오산화인 (P_2O_5) 함량은 최대 40~60%에 달하는 고품위로 인산염 광물의 세계생산량의 약 17%는 화성기원 광상 경제적인 가치가 충분하다 (Table 3-10-1).

인산염 광물은 오산화인을 20% 이상 함유하고 있는 경우에 쓰이며, 성인에 따라 화성기원, 퇴적기원 및 구아노로 구별된다. 인산염 광물은 선캠브리아기에서 신생대 제4기까지 광범위한 지질시대에 걸쳐서 산출된다. 인산염 광물의 산출상태는 판상, 단괴상 또는 집합체 등이다. 또한 인산염 광물은 주로 대륙붕 가장자리의 비교적 수심이 낮고 쇄설성 퇴적물이 거의 없는 뱅크 (bank)나 지형이 높은 곳에서 많이 생성되는 것으로 보고되었다. 그리고 대륙에서 멀리 떨어진 해저산 (seamount)과 기요 (guyot) 또한 인산염 광물의 생성에 적합한 장소이다. 인산염 광물은 일반적으로 용승류 (upwelling)가 발달하는 해역에서 부존 가능성이 높으며, 이러한 해역에서는 영양분이 풍부한 저층 해수가 표면으로 상승하여, 해수면 부근에서 해수의 온도가 상승하여 산도 (pH)가 증가함으로써 인산염이 침전된다. 만약 이러한 해역에 육지로부터 이동된 퇴적물의 혼합이 일어나지 않으면 풍부한 인산염 광물이 형성된다. 그리고 한류가 발달한 주변 해역에 지형적으로 높은 곳이 있으면 광상 형성이 더욱 용이하다.

동해 한국대지에서 채취한 인산염 광물의 형태는 두께 15~20 cm 정도의 체적이 균일한 원형이나 판형이 주를 이룬다. 한국대지에서 채취한 인산염 광물은 비중이 높으며 색상은 짙은 갈색에서 검은색이나, 울릉도 주변 해역에서 채취한 인산염 광물은 옅은 갈색이며 비중이 높지 않다. 기존 연구에 의하면 동해에서 산출되는 인산염 광물들은 주로 해저면 상승부 (울릉분지의 한국대지, 울릉도 주변 해역, 야마토해퇴, 오키뱅크)에 부존되어 있다. 이들은 상부 마이오세의 역암, 사암, 규조토

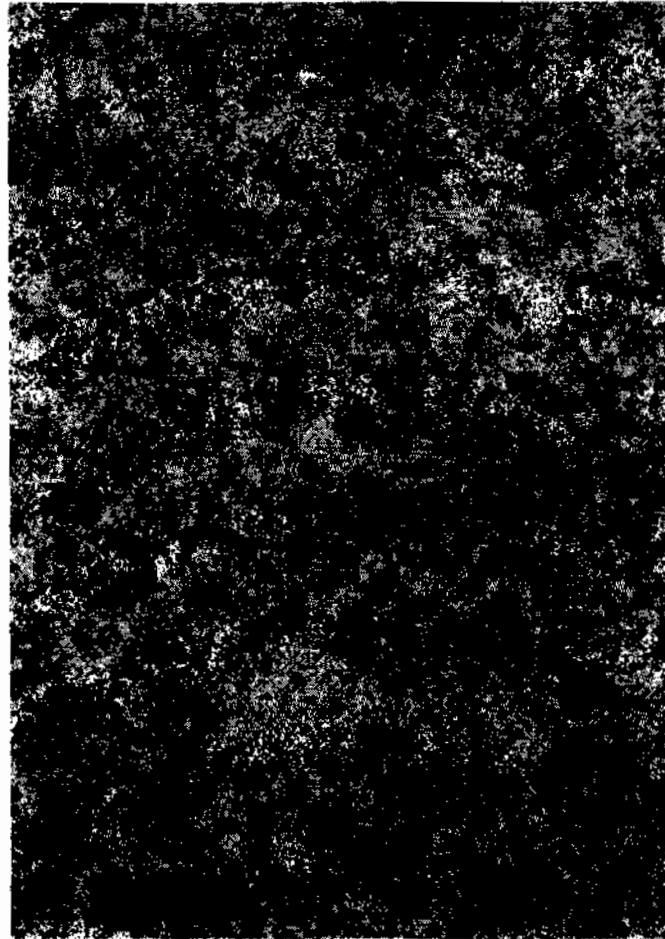


Fig. 3-10-10. Photomicrograph of phosphorite (scal bar - 0.2 mm).

Table 3-10-1. Elements of phosphorite in the Korea Plateau.

Sample No.	P (%)	Ca (%)	Al (%)	Fe (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)
1	13.04	31.96	1.30	1.31	375	1750
2	13.34	31.89	1.06	2.51	428	1832

층에 배태되어 있다. 인산염 광물중 일부는 후기 마이오세의 탄산염 연니(carbonate ooze)에서 인산염화 되기도 하지만 대부분이 점토-규조 연니질(clay-diatomaceous ooze)에서 산출된다.

4. 토 의

한국대지에서 금년도 채취된 화강암편들은 기재암석학적 특성에서 우리나라의 대보화강암류와 매우 유사하다. 화강암계열(Ishihara, 1977; Hine *et al.*, 1978)이 제창된 후 국내화강암류를 기재암석학 및 지구화학적 특성에 의해 구분하고자 하는 노력이 체계화되었다. Jin (1980)은 국내 화강암류를 대별하는 대보화강암류(드라이아스기-쥐라기)와 불국사화강암류(백악기 제3기)의 지구화학적 특성 및 암석기제적 특성을 종합 정리하였다.

우리나라 경기육괴와 영남육괴에 광범위하게 분포하는 대보화강암류는 다소 변형을 받았고, 알칼리장석으로 페리크리닉 쌍정을 갖는 미사장석이 산출된다. 반면 목천대 일부와 경상분지에 주로 분포하는 불국사화강암류는 거의 변형 양상이 나타나지 않고, 알칼리장석은 전형적인 칼스바드(carlsbad) 쌍정을 보이는 홍색의 정장석이 산출된다. 불국사화강암류에서 산출되는 홍색의 정장석은 대부분이 퍼싸이트화되어 있으며, 홍색의 색깔이 진해질수록 천수와의 교환반응을 많이 겪은 것으로 보인다(Lee and Kusakabe, 1998). 대보화강암류에서 석영은 자형을 이루지 못하고 흔히 재결정화되어 산출되며, 과동소광이 우세하다(Lee and Lee, 1991; Lee *et al.*, 1998). 불국사화강암류에서 석영은 알칼리장석 보다 먼저 정출하여 종종 반정으로도 산출되며, 화산암류에서 흔히 보이는 만입된 경계면을 갖는다(Lee, 1992).

연정 조직(intergrowth texture)의 산출상태에서도 양자의 차이가 뚜렷하다. 다소 변질을 받은 대보화강암류는 석영과 사장석의 연정한 미르메카이트 조직을 보여주는 반면, 불국사화강암류는 석영과 알칼리장석의 연정한 미분상 조직(micrographic texture)을 갖는다. 대보화강암류에서 흔히 보이는 미르메카이트 조직의 성인에 대해서는 논란의 여지가 많지만, 이 조직들은 대체로 변질, 변형을 받은 암석에서 산출빈도가 높은 점으로 미루어 이차적인 원인에 의해 생성된 것으로 생각된다. 반면 불국사화강암류가 갖는 미분상조직은 결정작용이 완전히 끝나기 전인 고상선(solidus) 이상의 온도에서 액과 결정과의 비평형상태가 증대되고, 적당한 정

도의 undercooling 효과를 받아서 형성되는 것으로 해석된다 (Lee, 1997).

불투명광물의 산출 상태도 대보화강암류와 불국사화강암류는 그 특성을 달리한다. 대보화강암류는 티탄철석계열이 우세한 반면, 불국사 화강암류는 자철석계열이 월등히 우세하다. 불국사화강암류 중에서 경상분지에서 산출되는 것은 모두 자철석계열이고, 옥천대에서 산출되는 일부 화강암류 (예를 들면, 월출산 화강암)가 티탄철석계열에 해당한다. 이번에 채취된 우백질 화강암편들은 모두 일차적인 자철석이 산출되지않고, 불투명광물의 함량 (<0.1 vol.%)도 매우 낮은 전형적인 티탄철석계열의 화강암류에 해당한다.

또 이번에 채취된 화강암편들은 우리나라 옥천대와 영남육괴 사이에서 발달하는 호남전단대 (Otoh and Yanai, 1996) 주변에 산출되는 대보화강암류의 변형 양상과도 매우 유사하다. 이들은 앞서 언급한 바와 같이 사장석의 쌍징이 휘어지거나 kink band화되어 있으며, 석영은 매우 세립화되고 신장되어 있다. 운모류는 장석과 석영의 입자 간극에서 엽리를 형성하고 있다. 이러한 특징들은 전체적으로 연성전단변형 (ductile shear deformation)을 받아 형성된 것으로, 변형 심도는 적어도 대륙 지각 중부 (middle crust)보다 깊어야 한다.

우리나라의 대보화강암류와 불국사화강암류에 대한 기재암석학적 특성을 종합해서 이번에 채취된 우백질 화강암편들과 비교하면, 이들은 전형적인 대보화강암류가 갖는 기재적특성을 모두 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 화강암편들은 적어도 대륙지각의 중부 보다 깊은 곳에서 고결된 화강암류로 결론지어진다. 또 환원적인 환경하에서 형성된 티탄철석계열의 화강암류에 해당하는 것으로 보아 이들은 대륙지각의 재용융 (remelting) 산물이거나 맨틀기원 마그마가 대륙지각 물질과 혼합되어 형성된 것으로 해석된다. 모든 시료가 연성전단변형 양상을 보이는 것으로부터 형성 후 어느시기에 강한 변형작용을 받은 것으로 보인다.

결국, 이 화강암편들이 대륙 지각의 상당부분을 구성하는 화강암류에서 떨어져 나온 암편임은 확실하다. 그러나 아직까지 이 화강암편들이 트리아스기에서 쥐라기에 형성된 대보화강암류의 일부일 것이라고는 단정지을 수 없다. 서남일본에 분포하는 백야가의 Sanyo 또는 Rokyé 화강암류도 티탄철석계열의 것이 우세하고 그 일부는 강한 변형작용을 받고 있기 때문이다 (Ishihara, 1977). 따라서 향후 이 암편들의 생성시기 및 환경을 규명하기 위한 절대연대측정 및 동위원소 조성 연구가 수반되어야 한국대지의 일부를 차지하는 대륙지각이 우리나라의 여러 육괴 중 어떤

것과 지체구조적으로 관련이 있는지가 밝혀질 것으로 생각된다.

5. 결 론

가. 채취된 시료는 거의 대부분이 우백질 반상화강암편들로 장경 10 cm 내외의 각력질 암편이 우세하고, 최대 장경 30 cm에 달하는 것도 간혹 있다. 일부 암편은 유색광물의 함량이 풍부해 흑운모화강인 내지 화강섬록암의 조성에 해당하지만 전체적인 광물조합은 우백질 화강암편과 동일하다.

나. 주성분광물은 알칼리장석, 석영, 사장석, 흑운모 등이며, 부성분광물로는 저어콘, 인회석과 불투명광물이 산출된다. 알칼리장석은 전형적인 페리크리틱 쌍정과 일부 피사이트화된 미사장석으로 주로 반상면정으로 산출된다. 알바이트 쌍정이 우세한 사장석은 자형 내지 반자형으로 산출되고, 석영과 접하는 부분에서는 미르메카이트가 산출되기도 한다. 석영은 흔히 변형에 의해 파동소광을 보이며 재결정되어 있거나 파괴되어 세립의 집합체로 산출된다. 불투명광물은 일차적인 자철석이 산출되지 않고, 함량 (<0.1 vol.%)도 매우 낮다.

다. 모든 화강암편들은 변형을 받아 다양한 변형 조적을 보인다. 사장석의 쌍정은 휘어지거나 kink band화되어 있으며, 석영은 매우 세립화되고 신장되어 있다. 운모류는 장석과 석영의 입자 간극에서 엇리를 형성하고 있다. 이러한 특징들은 전체적으로 연성전단변형 (ductile shear deformation)을 받아 형성된 것으로 생각된다.

라. 우리나라의 대보화강암류와 불국사화강암류에 대한 기재암석학적 특성을 채취된 우백질 화강암편들의 그것과 비교하면, 이들은 전형적인 대보화강암류가 갖는 기재적특성을 모두 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 화강암편들은 적어도 대륙지각의 중부 보다 깊은 곳에서 고결된 화강암류로 결론지어진다. 또 환원적인 환경하에서 형성된 티탄철석계연의 화강암류에 해당하는 것으로 보아 이들은 대륙지각의 재용융 (remelting) 산물이거나 맨틀기원 마그마가 대륙지각 물질과 혼연되어 형성된 것으로 해석된다. 모든 시료가 연성전단변형 양상을 보이는 것으로부터 형성 후 어느시기에 강한 변형작용을 받은 것으로 보인다.

마. 결론적으로 채취된 화강암편들이 대륙 지각의 상당부분을 구성하는 화강암류에서 떨어져나온 암편임은 확실하다. 그러나 아직까지 이 화강암편들이 트리아스기에서 쥐라기에 형성된 대보화강암류의 일부일 것이라고는 단정지을 수 없다. 따라

시 향후 이 암편들의 생성시기 및 환경을 규명하기 위한 절대연대측정 및 동위원소 조성 연구가 수반되어야 한국대지의 일부를 차지하는 대륙지각이 우리나라의 여러 육괴 중 어떤 것과 지체구조적으로 관련이 있는지가 밝혀질 것으로 생각된다.

제 11 절 동해 울릉분지의 생성진화와 퇴적층 Simulation에 의한 매몰 속성 연구

대표저자: 허식 (한국해양연구소)

정대교, 이현주 (강원대학교 지구과학부)

1. 서 언

동해 울릉 퇴적분지 내에 분포하고 있는 신생대 후기 퇴적층으로부터 획득된 탄성과 탐사 자료를 이용하여 퇴적층의 매몰 속성에 대한 graphic simulation 분석을 실시하여 울릉 퇴적분지의 생성 및 진화과정과 퇴적층의 축적 이후 매몰 진화과정을 추정해 보았다. 이번 연구를 통해 환용된 탄성과 탐사도면은 울릉 퇴적분지 남시단과 북부에 분포하는 신생대 후기 퇴적층으로부터 획득된 탄성과 탐사 자료로서 총 2개의 도면 (총 길이 약 80 km)이다. 그러나 이번 연구보고서에서는 비교적 상세한 지질학적 자료에 의해 적절하게 해석된 첫 번째 도면에 대한 simulation 결과를 중심으로 기술하였다.

이번 연구 기간 중 graphic simulation을 위해 사용된 software는 미국 South Carolina 주립대학에 의해 개발된 SEDPAK simulation system으로서 강원대학교 지구과학부 퇴적학 연구실에 비치되어 있는 Micro Sun 사의 SparcStation 5 workstation에 SEDPAK을 장착하고 이를 이용하여 graphic simulation을 실시하였다. 이번 연구 수행 기간동안 본 과제의 연구책임자는 1999년 6월 29일부터 7월 10일까지 미국 South Carolina 주 Columbia 소재의 South Carolina 주립대학 지질학과를 방문하여 그 곳에 설치되어 있던 SEDPAK을 이용한 울릉분지 퇴적층에 대한 simulation 분석 연구를 실시하였고, 이후 SEDPAK system의 개발 책임자인 South Carolina 주립대학 지질학과의 Kendall 교수를 1999년 8월 23일부터 9월 2일까지 직접 한국에 초빙하여 강원대학교 지구과학부 퇴적학 연구실에 설치되어 있던 Sun workstation의 SEDPAK system을 통해 당시까지 도출된 탄성과 도면의 sediment

simulation 중간 결과를 이용한 울릉분지의 생성 진화에 대하여 상호 토의하였고 울릉분지 퇴적층에 대한 매몰 속성 진화단계를 해석하였다.

2. 퇴적층 시물레이션 (Simulation of Sedimentary Sequences)의 주요원리와 단계

퇴적층 simulation은 컴퓨터에 입력되어 있는 simulation program을 이용하여 과거의 퇴적분지내에서 형성된 두꺼운 퇴적층의 형성과 이후 진화과정을 그래픽으로 재현하여 당시의 퇴적진행 상황 및 퇴적 후 퇴적층의 침강 및 변화과정을 순차적으로 해석하는 작업을 의미한다.

이러한 simulation을 이용한 퇴적층의 정량적인 분석방식은 1980년대 후반에 이르러서야 미국 석유회사의 연구 group에 의해서 처음 시도되었고, 현재까지 몇 가지 모델이 개발되어, 상업적으로도 다수 판매되고 있는 상황이다. 초기의 시도로서는 1984년 Watts와 Thorne에 의해 개발된 passive margin 지역에서의 2차원적인 모델링 시도와 1986년 Tetzleff에 의해 개발된 STANSIM의 SEDSIM 모듈부분, Gulf Corp. Research Center의 Burton, Kendall과 Lerche (1987)에 의해서 개발된 SEDFIL이 있고, 이후 Jervey (1989), Helland-Hansen (1988) 등에 의해서 보다 나은 version으로의 개선 시도가 있었으며, Scaturro 등 (1989)과 Strobel 등 (1987, 1989)에 의해 University of South Carolina에서 개발된 SEDBSN이 시초이다. 또한 현재까지도 계속 개발중인 SEDPAK (Kendall 등 1989; Kendall 등, 1993; Cheong 등, 1999)과 Shell 석유회사 연구그룹인 Lawrence (1990) 등에 의한 모델 등 여러 연구팀에 의해 많은 연구가 진행중인 것으로 전해지고 있다.

가. 퇴적층 Simulation의 주요 원리

퇴적분지내에 축적되어 있는 두꺼운 퇴적층은 퇴적당시의 여러 조건들과 퇴적 후 매몰 진화단계에서 변화요인들의 산물이므로, 이러한 조건과 변수를 이론적으로 재현할 수 있다면 퇴적층의 생성과정을 복원할 수 있을 것이다.

이와 같은 이론적 근거를 가진 computer graphic program을 활용하여 현재 보존되어 있는 퇴적층의 배열로부터 산출된 퇴적율, 해수면의 변화, 지구조적 변화 등을 입력하고, 이를 지질시대별로 (cach time step) 순차적인 축적을 실시함으로써

퇴적층의 외형적인 분포를 graphic 제현하여 퇴적층의 축적 이후 퇴적분지 내에서 공간적인 배치와 분지기반을 침강속도 및 총시 배열을 정량적으로 분석하고자 하는 것이 sedimentary modeling (simulation)의 목적이다.

Simulation 분석을 위해서는 퇴적분지내 퇴적층의 형성에 관여하는 세 가지 주요 변수-퇴적물 (쇄설성 퇴적물의 유입속도 또는 탄산염 퇴적물의 분지내 성장속도), 분지 주변의 지구조적 변화 (tectonic movement) 외에도 퇴적물이 축적되는 퇴적 분지 기저면의 초기형태 (initial basin surface) 및 수심 (water depth), 퇴적중 또는 퇴적 이후 생성된 구조적 변화 (structural deformation), 수층에서의 퇴적물의 안정적인 모형 (wave damping and repose angle), 퇴적하중에 따른 퇴적기반의 침강율 및 다짐작용 (subsidence and compaction) 등의 변수를 직진하게 입력하여야만 원하는 modeling을 완성할 수 있게 된다.

따라서 이러한 많은 변수를 처음부터 정확하게 분석하여 입력하는 것은 현실적으로 거의 불가능하고 modeling 결과를 점검하면서 반복하여 기존 변수를 계속 수정, 입력함으로써 보다 현재 보존되어있는 퇴적 단면도 (예 : 탄성과 탐사단면도)와 근접한 퇴적단면을 graphic으로 완성해나가는 것이 통상적인 과정이다 (Fig. 3-11-1).

한 퇴적분지내에 축적된 퇴적층서의 형태는 크게 두 가지 기본적인 요소들간의 상호 작용의 결과인 것으로 해석할 수 있는데 (Lawrence 등, 1990), 하나는 퇴적물이 운반되어 안착할 수 있는 공간의 생성과 소멸에 관련된 요소들이고, 나머지 하나는 이러한 공간을 채우는 퇴적물의 유입과 침식 그리고 축적을 결정하는 요소들이다. 공간과 관련된 요소로는 분지의 기반을 이루는 암층의 침강 및 융기, 퇴적물의 다짐에 의한 퇴적층의 부피감소, 퇴적하중에 의한 분지 기저면의 하강, 또는 해수면변화에 의한 퇴적분지의 수심증감 등이 있다. 이러한 퇴적 공간 결정요소들에 의해 형성된 분지의 공간에 이를 채우고 남은 정도로 많이 유입되면 퇴적물은 progradation을 보이며 퇴적물 공급방향에서 점점 먼 쪽으로 이동 축적하게 될 것이며, 퇴적물이 생성된 퇴적공간에 비해 아주 낮으면 유입되는 쪽으로 퇴적되는 위치가 후퇴하는 retrogradation 형태를 띠게 될 것이다. 따라서 일정한 시간간격으로 분지내에서 발생한 일련의 사건들을 종합하여 2차원적으로 또는 3차원적으로 복원할 수 있다면, 이는 곧 우리가 현재 지표면 또는 지하에 보존된 퇴적층서의 외형 (basin geometry)을 재생하게 되는 것이다.

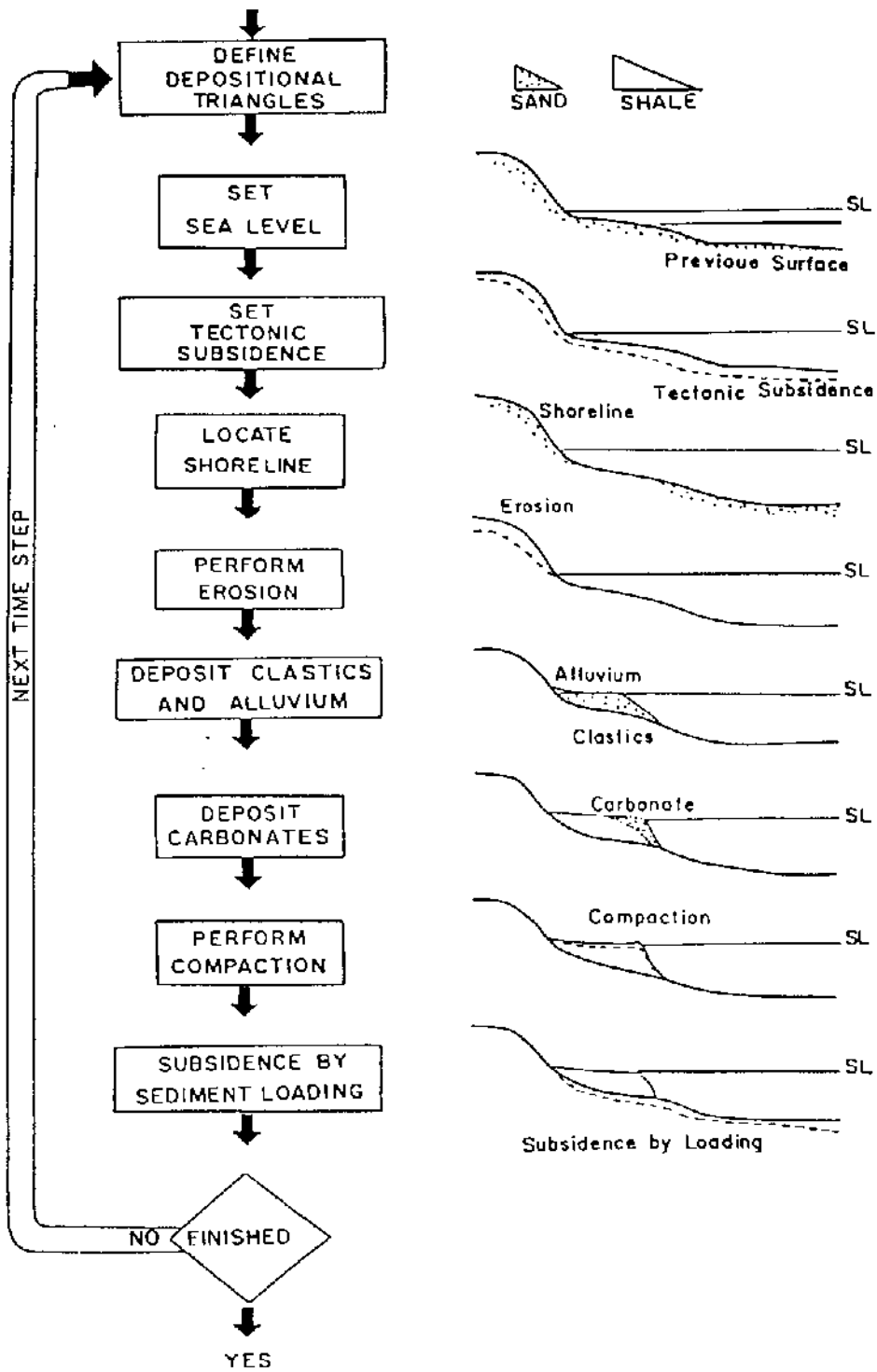


Fig. 3-11-1. General flow diagram for graphic simulation process of sedimentary sequence within one step.

대개 현재의 분지 내 퇴적층의 분포는 다중 채널의 심부 탐성과 탐사와 well log 자료에 의해 조합된 퇴적단면도에 의해 파악될 수 있으며, simulation의 최종적 단계는 이러한 퇴적단면도와 똑같은 modeling 도면을 단기간 내에 그려낼 수 있는 system을 완성하는 것이다.

나. 퇴적층 Simulation의 주요 단계

Fig. 3-11-1에서 보여주는 바와 같이 simulation은 퇴적층 단면으로부터 쉽게 추정할 수 있는 주요변수들 (퇴적 심도에 따른 사암 또는 이암의 compaction rate, 공기중에서의 퇴적물의 안식각, 기반암의 하중에 대한 침강율)을 초기 상수로서 입력시켜놓고 다음과 같은 순서로서 작업을 실시하게 되는데, 보통의 경우에는 한 퇴적 분지의 2차원 또는 3차원적인 수직단면에 인정한 수평거리 간격으로 쪼개어 좌표로 표시된 자료를 입력하고, 이를 각 time step별로, 단계적으로 가치를 축적시켜 단면이 완성될 때까지 여러 번 반복하면서 필요에 따라 초기 입력상수를 수정하여 진행한다. 한 time step에서의 주요 입력 parameter들과 작업순서를 도식화하면 Fig. 3-11-1과 같은데 일반적으로 다음과 같은 단계로 simulation이 진행된다.

(1) 퇴적분지 기저면 (initial basin surface)의 입력

퇴적이 일어나기 전 퇴적분지의 기저면 상태를 도식화하여 입력하는 과정으로서 전체면의 형태를 200-300개 정도의 조각기둥으로 쪼개고 조각기둥 별 높이를 좌표로서 입력한 선으로 연결시켜 (interpolation) 그려낸다. Simulation 동안 이 면의 아래로는 침식이 일어나지 않으며, 퇴적물이 축적되는 동안에도 이 암석층에서는 더 이상의 다짐작용이 일어나지 않음을 전제로 한다. 그러나 그 후 상부에 퇴적물이 축적되거나 또는 쌓였던 퇴적물이 침식되면 그 결과로서 기저면의 침강 (subsidence)과 융기 (uplift)는 일어날 수 있으며, 조구조적인 변화에 의해 단층이나 습곡도 일어날 수 있다.

초기의 기저면에 관한 정보는 탐사파 탐사 단면, 지구물리 검층자료, 노두 자료로부터 얻을 수 있으나, 실제로 이러한 정보는 이미 후기 퇴적작용의 결과로서 변형된 기저면 형태를 반영한 것이기 때문에 이를 퇴적초기의 본래 상태로 환원시켜서 고수준 자료로서 정확하게 재생하여 입력시켜야한다. 따라서 고환경을 지시해주는 회석자료나 퇴적구조가 존재치 않을 경우에는 위의 여러 자료로부터 얻은 정

보를 종합하여 내물 진화곡선을 그려서 활용하는 것이 일반적이다.

(2) 해수면 변화 (eustatic sea-level change) 자료의 입력

해양퇴적환경에서 형성된 퇴적층은 퇴적 당시 수심 변화에 따라 퇴적층의 두께가 좌우되므로 해수면 변화곡선은 퇴적층 simulation의 주요변수 중 하나로서 취급된다. 과거 시질시대에 대한 해수면 자료는 지금까지 제시된 많은 해수면 변화곡선 중 선택할 수 있으며 중생대, 신생대의 해수면 변화에 대해서는 Haq, Hardenbol과 Vail (1987)에 의해 제시된 해수면곡선을, 고생대에 대해서는 Vail 등 (1977)에 의해 제시된 해수면 곡선을 주로 참조한다. 퇴적층의 형성당시 각 시간 단계별로 주어지는 해수면 변화곡선은 분지의 수심을 결정하며 분지 내에 형성되는 최대 퇴적가능 두께를 한정하는 요소로 작용하는데, 주어진 시간단계 (Time step) 동안 존재한 가장 낮은 해수면이 이후 형성되는 퇴적층후의 최대 한계점 역할을 하게 된다.

(3) 구조변형요소 (structural movement) 입력

퇴적층이 형성되는 동안 또는 퇴적 후 매몰되는 동안 퇴적층에 영향을 주는 구조 변형 요소는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 분지 전체에 영향을 주는 광역적 분지 침강 (regional subsidence), 둘째는 분지의 일부에만 영향을 주는 지역적 분지침강 (hinged subsidence), 셋째는 단층 (fault)이다. 광역적 분지 침강은 특정한 시간 단계에서 전 분지 지역에 대해 거의 동등한 양으로 일어나는 침강으로서 퇴적 분지 기저면의 하강이 해당되는 깊이만큼 추가로 일어나는 것을 지칭하는 것이고, 이러한 정보는 단성과 단면으로부터 도출된 매몰 역사 곡선 (burial history curve)이나 지각 침강 곡선 (crustal subsidence curve)으로부터 얻어지며 해수면 변화 자료를 입력하는 것과 거의 같은 방법으로 입력하면 된다. 부분적 분지 침강은 전체 분지 중 일부 지역의 퇴적층에만 영향을 미친 기저면의 침강을 의미하는 것으로서 해당하는 위치의 자료를 각 시간대별로 변형 정도를 각 (angle)으로 표시하여 입력한다.

(4) 쇄설성 퇴적 작용 (clastic deposition)에 관한 요소 입력

쇄설성 퇴적물의 퇴적 정도를 표현하는 세 가지 요소는 단위시간 동안 유입되는

퇴적물의 총량과 퇴적물의 종류, 그리고 퇴적물이 유입되는 방향이다. 이러한 종류의 정보는 단성과 담사도면과 물리검층 자료의 종합을 통해서 가장 잘 획득될 수 있으며 아외 노두 자료도 이용된다. 유입되는 퇴적물의 총량은 통상 유입되는 방향에 직각 축을 갖는 삼각형으로 표시되는데, 삼각형의 아래 축은 퇴적물이 분지 중앙 쪽으로 진출할 수 있는 최대거리를 반영한다. 한쪽 방향에서 유입되는 퇴적물은 퇴적물의 양이 충분할 때는 유입되는 곳에 가까운 지점부터 차례로 축적되기 시작하여 안식각 (angle of repose, slope stability)에 도달한 때까지 퇴적되고 차츰 분지 중앙 쪽으로 이동하여 자리를 잡게 된다. 이때 퇴적이 해수면 하에서 일어날 때는 이 각도는 공기 중에서보다 높은 해저 퇴적층의 경사를 갖게 될 것이나 공기 중에 노출하여 퇴적되는 퇴적물의 경우는 낮은 층적 평원의 경사를 반영하게 된다.

(5) 탄산염 퇴적 작용 (carbonate accumulation)에 관한 정보 입력

탄산염 퇴적층은 쇄설성 퇴적물의 축적과는 달리 생물학적 기원으로 형성되므로 퇴적분지의 수심 변화에 많은 영향을 받는다. 즉 생물체가 광합성 작용을 할 수 있는 깊이 이내이고 파도에 의해 탄산염 퇴적층이 마모되는 (wave damping) 깊이가 모다는 깊어야만 퇴적암체 (build-up 또는 reef)로서 보존 될 수 있기 때문에 수심에 관한 자료가 탄산염 퇴적암체의 축적에 관여하는 요소들 중에서 가장 큰 비중을 갖는다. 또한 외부에서 유입되는 영양소의 공급이나 탄산염암의 생성을 방해하는 역할을 하는 쇄설성 퇴적물의 유입 또한 고려되어야 한다. 통상 탄산염암의 축적에 영향을 줄 수 있는 파도의 최대영향권 깊이가 산출되면, 그 깊이보다 초과하여 성장하는 탄산염암층은 조각으로 부서져 나와 보초 (reef)의 진방 경사쪽으로 이동하여 쇄설성 퇴적물처럼 축적되거나 보초의 후방이나 플랫폼 (platform)상에 진류하고, 파도의 영향권 깊이에 도달하지 못하는 탄산염암은 그대로 퇴적층을 이루며 보존되는 것으로 간주된다. 따라서 석호나 천해 대륙붕에서는 파도에 의한 파쇄 효과가 일반적으로 높기 때문에 탄산염 퇴적암체가 해수면에 도달하는 경우는 거의 없으나, 보나 바깥쪽으로 열려 있는 바다는 수심의 영향보다는 쇄설성 퇴적물의 공급, 영양소의 공급 정도 또는 광합성에 필요한 빛의 도달여부가 퇴적층 형성에 중요한 인자로서 작용하게 되며 때로는 해수면 이상으로 성장하는 보초도 존재하게 된다.

(6) 퇴적층의 축적에 따른 다짐작용 (compaction)과 분지 기반의 침강

(subsidence)에 따른 퇴적층의 변화

퇴적물이 계속해서 축적됨에 따라 하부의 퇴적물은 차츰 공극율이 감소하며 치밀한 조직을 갖게 된다. 이에 따라 퇴적층의 두께도 점차 감소하게 되는데 이 부문에 관한 연구는 상당한 진척이 있어, 기존 자료로부터 도출된 일정한 수식을 통상 입력 시켜놓고 이를 이용하여 전체 퇴적층의 나진 정도를 계산한다. 주로 이용하는 다짐을 계산식 (compaction equation)으로는 Baldwin과 Butler (1985)에 의한

$$\text{매물깊이 (km)} = 3.7 \ln (0.49/1-S) \quad (S : \text{퇴적물의 고화 정도})$$

이 있다.

기존의 많은 모델들은 대개 지각평형 이론에 기초를 둔 단순한 개념의 침강을 주로 사용해 왔으나, 최근에는 지각 자체가 단순한 지각 평형관점에서 침강과 융기를 계속하기보다는 지각을 이루는 암층의 역학적 성질이 암층의 생성연대에 따라 달라지는 탄성 (elastic) 또는 반탄성 (viscoelastic) 모델을 채택하여 퇴적물의 하중에 다른 분지의 침강을 계산하려는 시도가 많이 있다 (Watt 등, 1982).

퇴적층의 나짐이나 퇴적분지의 침강에 따른 분지의 진화는 추가적인 자료의 입력 없이 시뮬레이션 시스템 자체에 이미 내장된 고유 수식에 따라 계산하기 때문에 이 단계에서의 작업은 기 형성된 퇴적층의 다짐과 분지의 침강에 의한 새로운 영향만을 고려하여 단계별 퇴적층의 배열 및 위치를 보여주게 된다.

이러한 여섯 단계의 자료 입력 및 입력된 자료에 의한 시뮬레이션 작업 동안 각 단계에서 보여주는 중간 결과는 퇴적층이 형성, 진화 되어온 각 지질시대에서의 퇴적층의 분포와 매물 정도를 지시해주기 때문에 현재의 퇴적단면에서는 해석하기 힘든 많은 지질정보를 제공해 준다. 첫 번째 단계인 분지 기저면 형태의 입력부분을 제외하고는 최종 퇴적물이 축적 완료되는 시기까지 각 시간 단계별로 퇴적층 생성과 관련된 자료의 입력이 여러 번 반복되어 실시되어야 한다.

다. 퇴적층 simulation의 퇴적분지 해석 및 매물 속성 연구분야에서의 활용 현황

퇴적층이 퇴적분지내에서 생성, 매물된 과정을 각 지질시대별로 분석키 위해 주로 사용했었던 방식은 Sleep (1971), Watts와 Ryan (1976), Sclater와 Christie

(1980), Bond와 Kominz (1984)에 의해 제시된 백스트리핑 (backstripping)에 의한 매몰역사 곡선 (burial history curve) 방식이다. 매몰역사 곡선은 한 지점에서 의 퇴적층의 매몰 진화를 각각 시간대 별로 1차원적으로 분석하여 인접층들과 함께 도표로서 표시한 것으로서, 퇴적물은 축적 이후 매몰되면서 상부에 새속해서 쌓이는 퇴적물과 물의 하중에 의해 퇴적층 자체의 두께가 감소된 뿐 아니라 분지 기반을 침강시키기도 한다. 따라서 현재의 퇴적층 단면을 이용하여 각 층이 생성되었 당시에 기존 퇴적층들이 얼마나 깊이 매몰되어 있었는지를 파악키 위해서는 상부의 층을 차례로 하나씩 제거시켜서 분지의 침강을 계산하여야 한다.

Simulation에 의한 퇴적 모델링은 이러한 분석 작업에서 한 단계 더 나아가 2차원적 또는 3차원적으로 퇴적층의 매몰 진화를 그래픽으로 재현하는 것인데 개별 층 단위의 분석보다는 분지 생성 이후의 전체 시간 길이를 일정한 시간 단위 (time step)로 균일하게 분할하여 분석하는 방식을 택한다. 따라서 simulation을 이용하면 매 시간 단위마다 각 퇴적층이 위치했었던 매몰 심도를 알아낼 수 있으며 그 지역에서의 지온증온율 (geothermal gradient)을 이용하여 각 퇴적층이 어느 시점에서 석유 또는 천연가스의 생성 단계에 도달했는지를 추정할 수 있고 그 때의 퇴적층의 배열을 보면 생성된 석유가 이동한 방향과 저장될 수 있는 지류층을 개략적으로 평가할 수 있다. 또한 Nakayama와 Lerche (1987)의 연구에서처럼 시뮬레이션 결과에 의해 얻은 퇴적층의 배치와 암상에 따른 심도별 다짐율을 함께 분석하면 한 시점에서 각 퇴적층내를 이동하는 유체의 방향을 추정할 수 있어 이에 따라 석유 부존 가능성층의 위치도 예측할 수 있다.

각 퇴적층에서의 유체의 이동은 수압차, 부력, 모세관력에 의해 결정이 되는데 대개의 경우 석유나 가스는 생성된 이후 물보다 낮은 비중 때문에 상부쪽으로 이동하는 것으로 알려져 있지만, 공극율의 차이에 기인한 모세관압 차이에 의해 하부쪽으로의 이동도 가능함을 보여주고 있다.

또한 시뮬레이션 결과를 이용하면 각 지질시대별 퇴적암층의 공극율변화, 온도 변화, 유기물을 포함하는 규원암층의 성숙화 정도와 공극압의 변화 및 유체 포화도, 유체의 이동경로 및 분지내 구조적 변화를 포함하는 전반적인 퇴적분지의 진화 역사를 폭넓게 이해할 수 있다.

따라서 지금까지는 시뮬레이션 결과를 이용하여 퇴적층을 분석하고 이를 석유탐사에 적용하려던 시도가 많지 않았지만 향후 수 년 내 이와 같은 연구는 더욱 증가

될 것이며 또한 이러한 모델링을 통한 퇴적층 형성 진화의 재현 연구는 기존의 많은 방식들에 의해 단편적으로만 활용되던 퇴적층의 매몰 진화 역사에 대한 정보를 보다 정량적으로 체계적으로 퇴적학 분야와 석유탐사분야에 제공할 것으로 기대한다.

3. 동해 울릉분지 퇴적층에 대한 graphic simulation (SEDPAK)분석을 이용한 분지 진화 및 퇴적층 매몰 진화 해석

가. 울릉분지의 생성, 진화 및 퇴적층 분포

동해 울릉분지는 서쪽으로는 선캄브리아기와 고생대의 대륙강괴인 한반도와 동쪽으로는 신생대의 일본 열도 사이에 분포하는 신생대 퇴적분지로서, 대평양 plate와 필리핀 plate를 overriding하고 있는 Amurian plate의 동쪽 연변부에 분포하고 있는 몇 개의 신생대 초기에 형성된 back-arc rift 분지의 하나로서 알려져 있다 (Fig. 3-11-2). 또한 울릉분지는 일본 해구와 Ryukyu 해구의 수렴대 및 Nankai Trough와도 상인적으로 연계되어 있다 (Minami, 1979, Uyeda and Kanamori, 1979, Chough and Barg, 1987). Back-arc rifting은 25 Ma 이전에 Amurian plate 하부로 대평양 plate 및 필리핀 plate가 섭입하면서 시작된 것으로 추정된다. Back-arc 분지는 마이오세 동안은 인장력 상태 하에 놓여 있었지만 마이오세 후기에 이르러서는 일본 열도 중앙부 지역에서 Amurian plate가 Bonin arc와 충돌하면서 수렴대가 전체적으로 대륙 방향으로 이동함에 따라 back-arc 분지가 단히게 되었다 (Matsuda, 1979). 이러한 후기 마이오세 이후의 압축운동은 대한해협을 따라 북동-남서 방향으로 울릉분지 퇴적층 내에 thrusting과 wrenching 구조를 형성하게 되었고 일부 남동쪽 퇴적층 내에는 부정합을 남기게 되었다 (Inoue, 1982, Chough and Lee, 1992).

울릉분지의 서쪽 경계부는 북동-남서 방향으로 배열하고 있는 일련의 우수향 주향이동 단층들 (양산단층 등)이 분포하고 있다. 또한 분지의 남쪽 경계부를 따라 중기 마이오세에 이르기까지 발생한 침강율을 계산한 결과는 700 m/m.y에 달하는데 이는 세계 다른 지역에 분포하고 있는 back-arc 분지의 초기 rifting 단계에서의 일반적으로 알려져 있는 침강율과 유사한 값이다 (Chough and Barg, 1987; Scalter

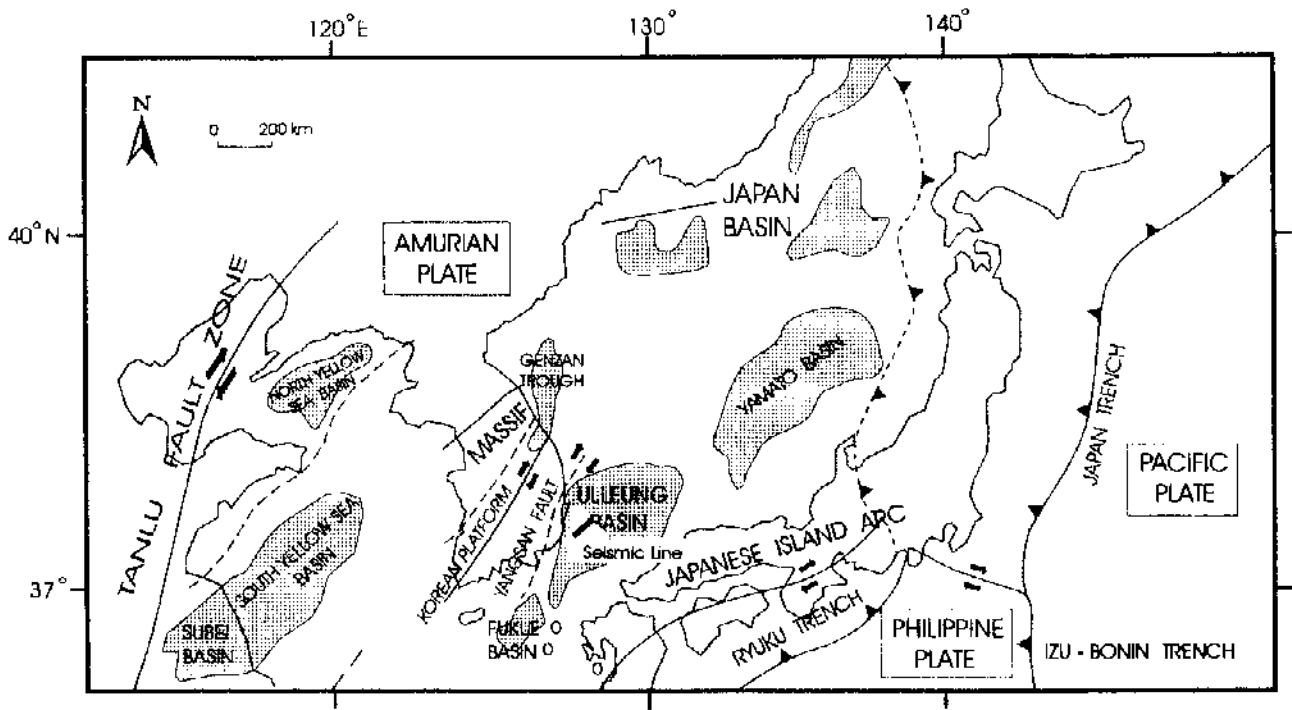


Fig. 3-11-2. Tectonic configuration for the Ulleung Basin and adjacent area, and location of the modeled seismic profile. Sedimentary basins are marked as dotted areas.

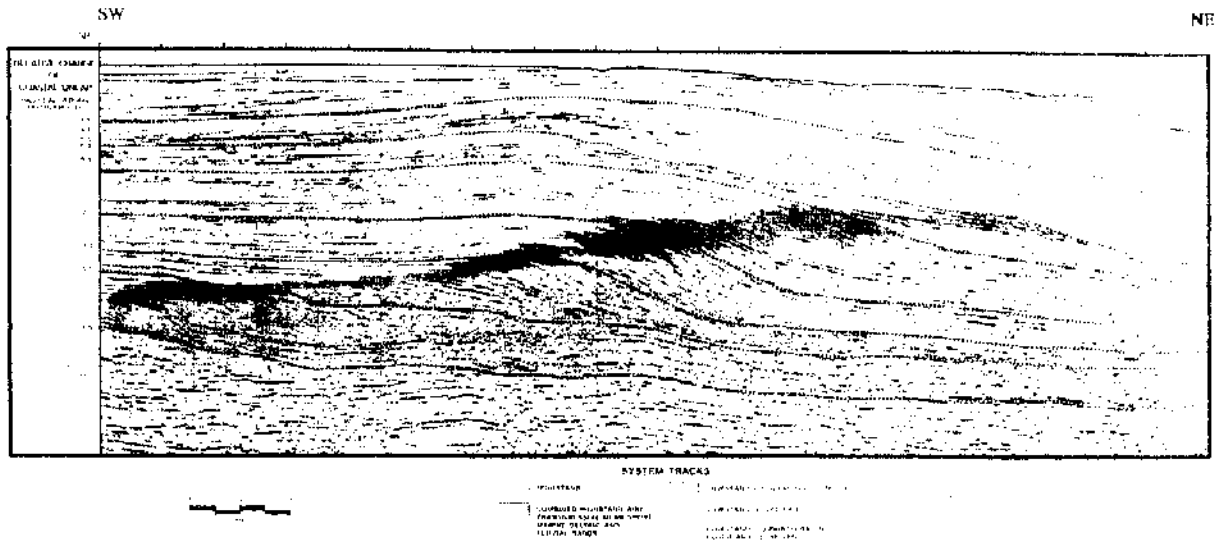


Fig. 3 11 3. Modeled seismic profile on the southern margin of the Ulleung Basin, offshore Korea. For location, see Fig. 3-11-2, interpreted by Nester and Mitchum (1989).

et al., 1980). 이러한 사실들을 종합해 보면 울릉분지는 생성 초기인 마이오세 초기와 중기 동안에는 비교적 빠른 침강작용을 겪다가 마이오세 후기에 들어서는 용기를 보였고 Pliocene과 Pleistocene 동안에는 다시 비교적 완만한 침강작용을 기친 것으로 판단된다. 특히 울릉분지 생성 초기의 빠른 침강작용은 마이오세 동안의 일본 열도 남서부의 시계 방향으로의 회전운동과도 관련을 갖고 있는 것으로 추정된다 (Otofujii and Matsuda, 1983; Hayashida and Ito, 1984).

울릉분지의 퇴적환경은 심해분지에서 대륙사면을 거쳐 대륙붕단 환경으로 점차 전이한 것으로 추정되는데, 따라서 simulation 분석에서 사용한 탄성과 도면에서도 관찰되는 전진퇴적 양상의 clinoform의 퇴적체는 대륙붕단에서 심해쪽으로 성장하였던 삼각주 퇴적체로서 추정된다 (Nester and Mitchum, 1989).

나. Graphic simulation 분석 결과를 이용한 퇴적층 매몰 진화 해석

동해 울릉 퇴적분지 내에 분포하고 있는 신생대 후기 퇴적층으로부터 획득된 탄성과 탐사 자료를 이용하여 퇴적층의 매몰 속성에 대한 graphic simulation 분석을 실시하여 울릉 퇴적분지의 생성 및 진화과정과 퇴적층의 축적 이후 매몰 진화과정을 추정해 보았다. 이번 연구를 통해 활용된 탄성과 탐사도면은 울릉 퇴적분지 남서단과 북부에 분포하는 신생대 후기 퇴적층으로부터 획득된 탄성과 탐사 자료로서 총 2개의 도면 (총 길이 약 80 km)이다.

Graphic simulation을 위해 사용된 software는 미국 South Carolina 주립대학 연구팀 (개발책임자: Christopher G. St. C. Kendall 교수)에 의해 1986년부터 십여 년에 걸쳐 연구 개발된 후 현재는 여러 석유회사들에 의해서도 상업적으로 이용되고 있는 SEDPAK simulation system으로서 일반적으로 UNIX system을 운영체제로 이용하는 workstation computer에 설치 운용할 수 있도록 제작되어 있다. 금번 연구는 강원대학교 지구과학부 퇴적학 연구실에 비치되어 있는 Micro Sun사의 SparcStation 5의 workstation에 SEDPAK을 장착하고 이를 이용하여 graphic simulation을 실시하였다.

이번 연구를 통해 Simulation 분석된 탄성과 도면상의 울릉분지 퇴적층은 sequence boundary에 의해 총 7개의 sequence로 나뉘어 지는데 Nester and Mitchum (1989)은 대부분의 퇴적층은 highstand와 transgressive system track 으로 구성되어 있으나 일부 하부층 내에는 highstand system track의 clinoform 발달

부분에 lowstand wedge의 slope fan을 포함하고 있는 것으로 해석했다 (Fig. 3-11-3).

Simulation을 통한 퇴적층 분석 결과는 Sequence 5의 상부를 제외한 모든 sequence들은 전진퇴적 양상의 clinoform과 onlapping transgressive 층의 형태를 보여주고 있는 편이다 (Figs. 3-11-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). 이러한 양상들은 마이오세 초기 이후 울릉분지가 back-arc 분지 성숙단계에 있었다는 기존의 다른 연구들과도 일치하는 결과들이다. Sequence 5의 상부에서 관찰되는 사박 양상은 Sequence 5 퇴적 이후 해수면 하강과 마이오세 후기의 압축운동에 따라 형성됐던 북동-남서 방향의 thrusting과 wrenching 구조, 부정합과도 연계되어 있을 것으로 추정된다. 이 시기에 형성된 incised valley가 현재의 단성과 노면이 획득된 방향 (북동-남서)과는 약간 어긋난 각도로 퇴적층을 침식하였고 이러한 침식작용은 6.3 Ma에 이르러 종료된 것으로 보인다. 이러한 부정합면으로 대표되는 사박 퇴적층의 본래 두께는 어느 정도였는지 현재의 단성과 자료로는 추정할 수 없다. 그러나 침식에 의해 새로이 조성된 많은 퇴적물들은 멀리 이동하지 않고 경사면 아래쪽의 대륙사면과 심해 분지 지역에 다시 퇴적되었을 것으로 판단되나 simulation 결과로는 정확하게 분석되지 않는다.

이와 같이 simulation 결과가 퇴적층 생성 당시 또는 이후에 발생한 침식작용의 정확한 시기나 두께에 대해서는 정보를 직접 제공하지는 못하지만 퇴적층의 형성에 영향을 미치는 주요 변수들인 입력 정보들 (해수면 변동, 지구조 운동, 퇴적물의 유입량과 방향)과 침식 부정합면의 분포를 상호 비교해 보면, 개략적인 사박작용의 시기와 양을 어느 정도 추론하는 것은 어렵지 않다.

SEDPACK에 의한 simulation 과정에서 도출된 각 sequence들의 형태와 두께들은 본래 Nester and Mitchum (1989)에 의해 해석된 단성과 노면 자료들과 매우 유사함을 보이는데 이는 입력된 정보인 퇴적물의 유입량과 방향 및 해수면 변화 정보, 지구조 운동의 자료 (기반의 침강속도)들이 비교적 신뢰할 만한 수준임을 반사적으로 보여주는 것이다 (Table 3-11-1, Fig. 3-11-11).

SEDPACK을 이용한 graphic simulation을 통한 현재까지의 매몰 속성 심도의 분석 결과로는 울릉분지 퇴적층 중 최하부층인 중기 마이오세층 (17.5-16.5 Ma)은 약 12.5 Ma 시기에 현재의 수심으로부터 하부 약 3,000 m 지점에, 약 6.3 Ma 시기에 3,200-3,900 m 지점에, 약 3.2 Ma 시기에는 3,500-4,200 m 지점에 각각 위치했

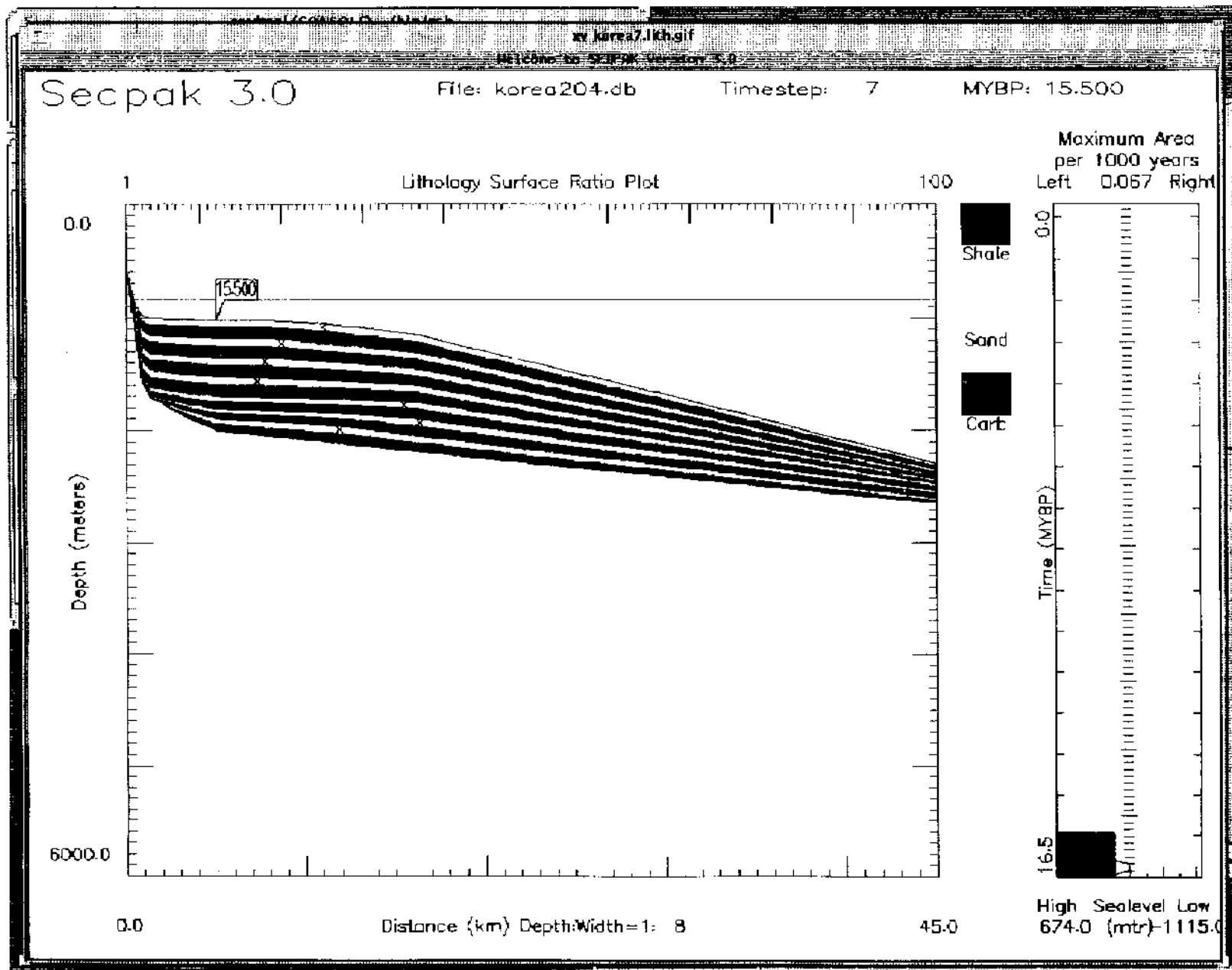


Fig. 3 11-4 Simulation of the initial Sequence 1 of Ulleung Basin deposited between 16.5 Ma and 15.4 Ma. The units are aggradational to slightly progradational.

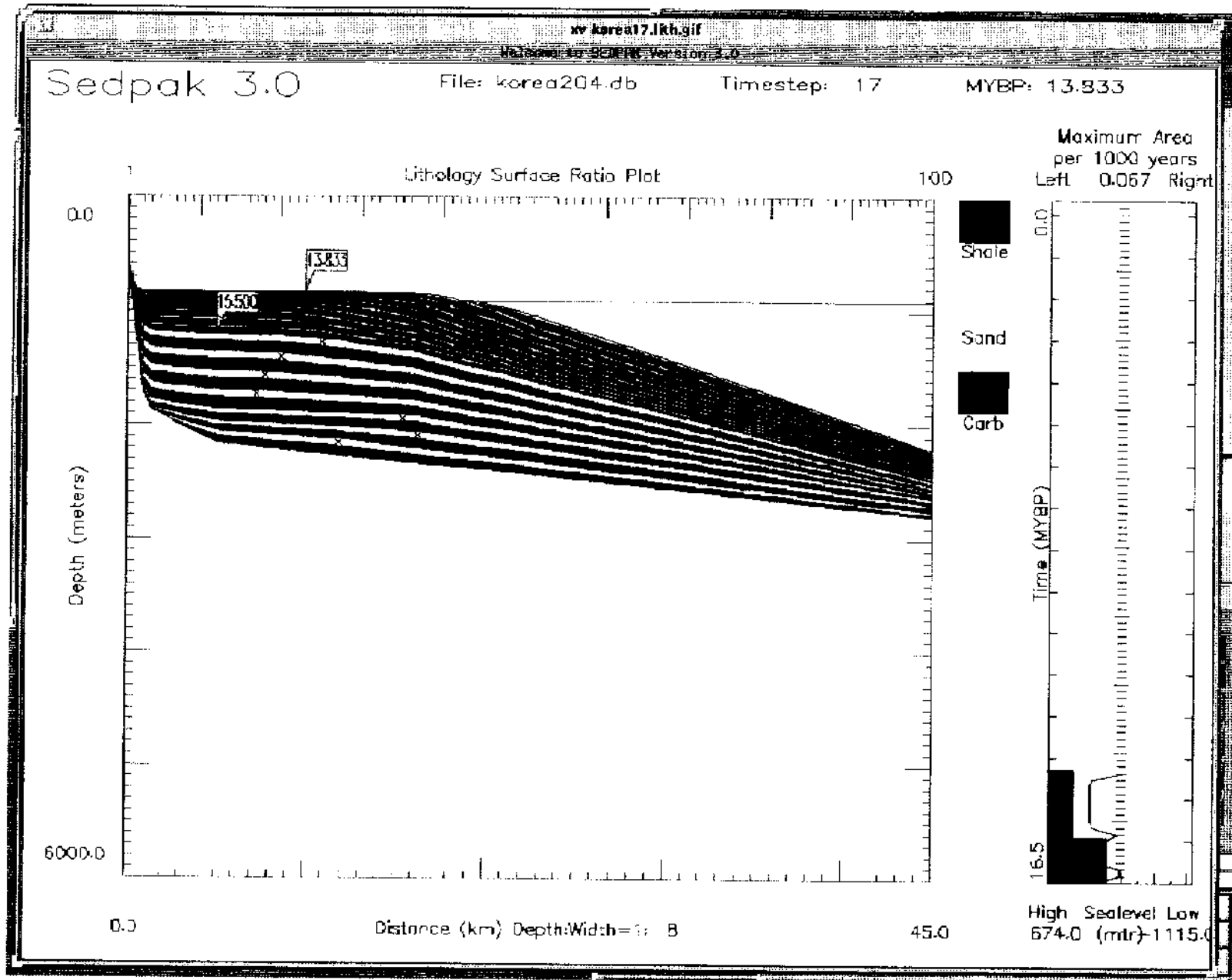


Fig. 3 11-5. Simulation of the deposition of Sequence 2, a progradational sequence, which was deposited between 15.4 Ma and 13.8 Ma.

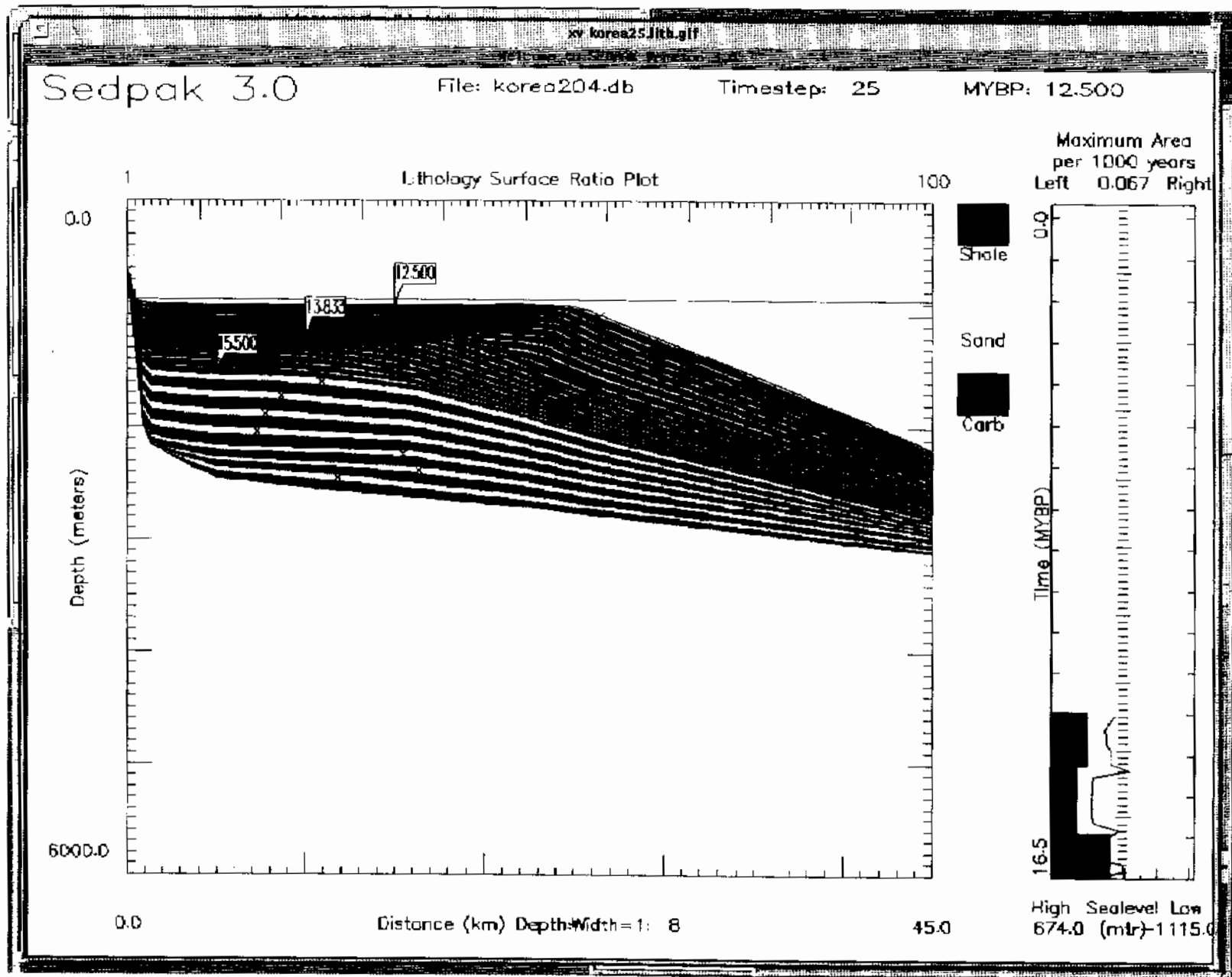


Fig. 3-11-6. Simulation of the deposition of Sequence 3, showing further progradation, which was deposited between 13.8 Ma and 12.5 Ma.

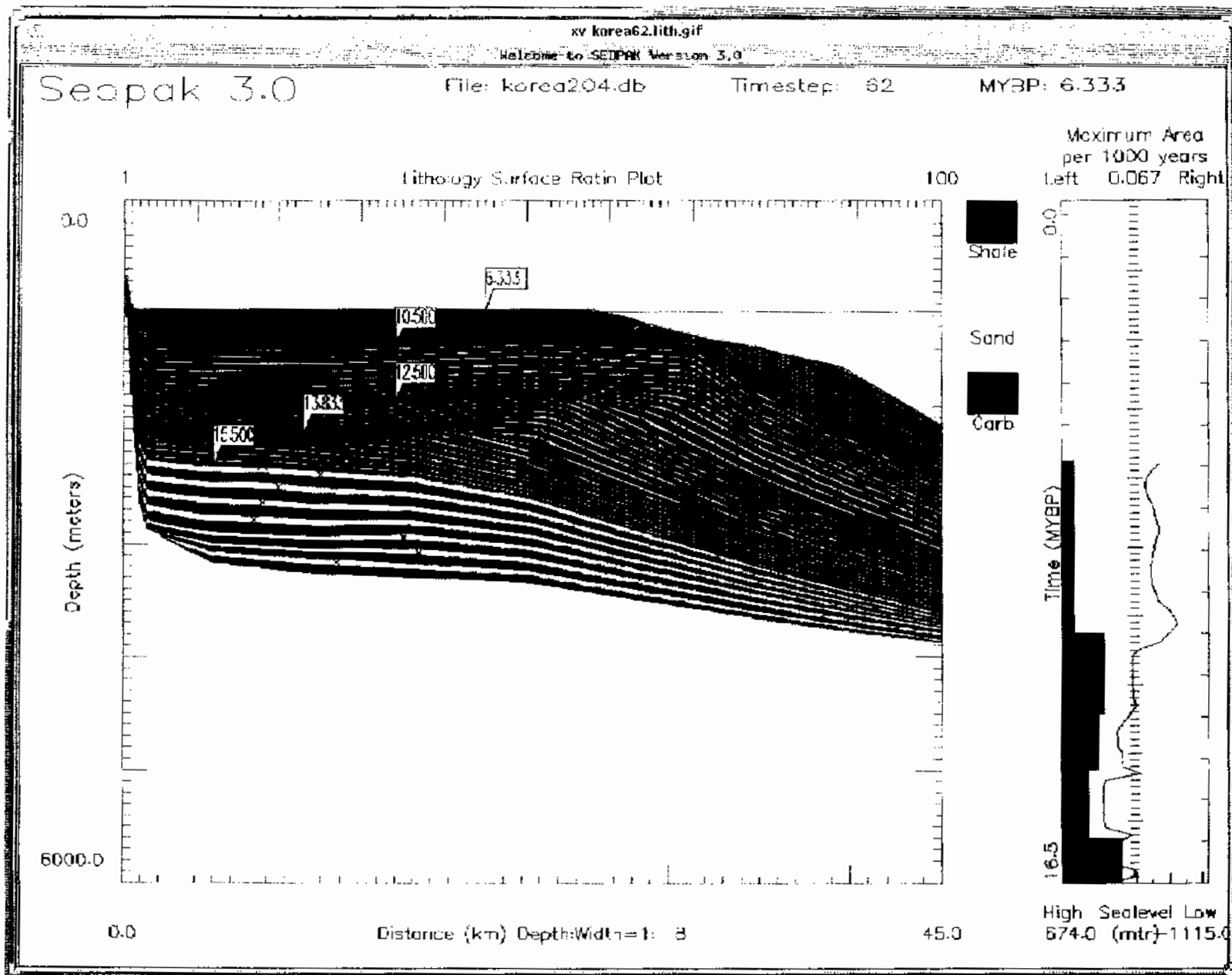


Fig. 3 11-7. Simulation of the deposition of Sequence 4, which is also progradational, and was deposited between 12.5 Ma and 10.4 Ma. Note the thicknesses of all four sequences deposited to this point in time are approximately equal despite a changing subsidence and sediment supply rate.

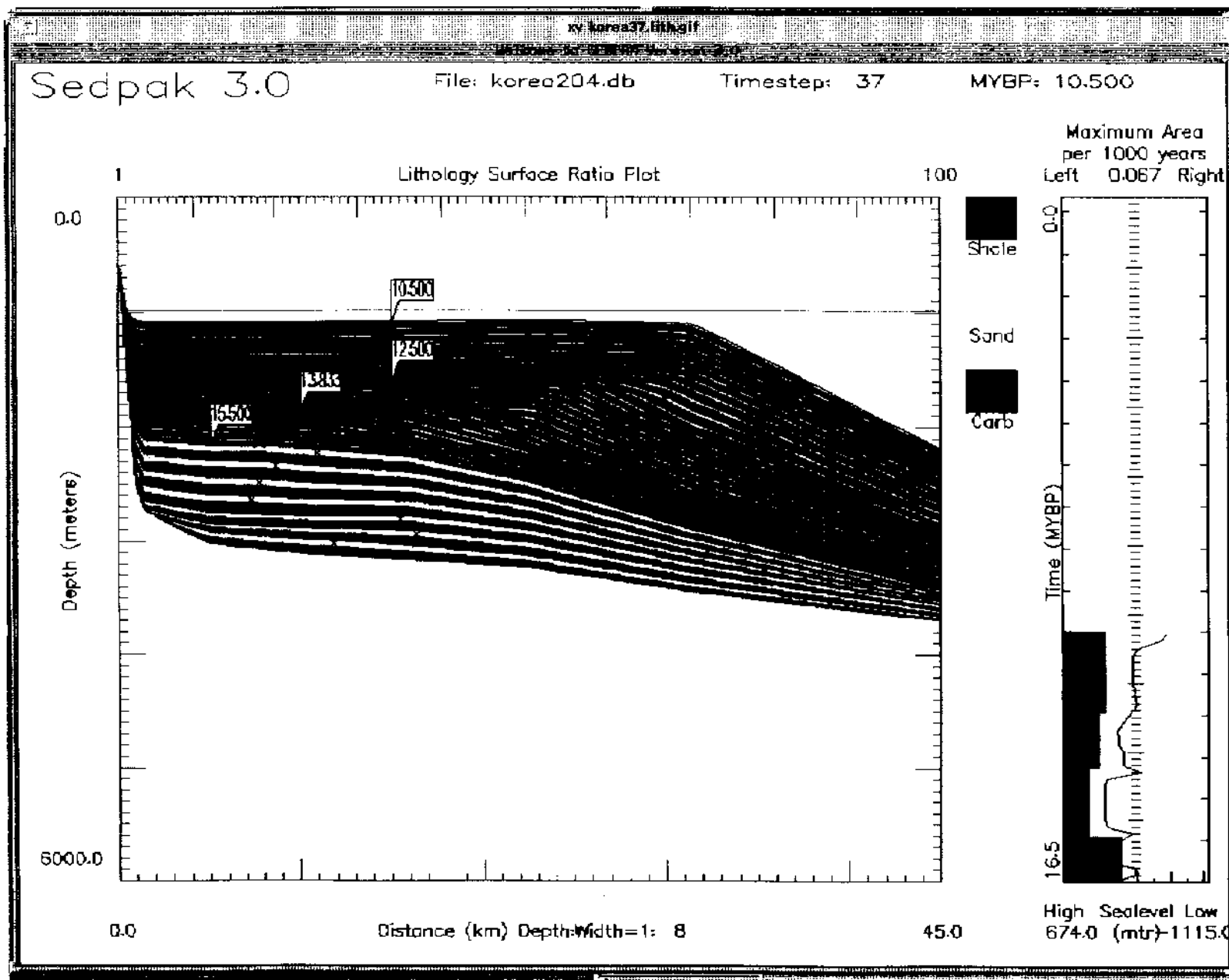


Fig. 3-11-8. Simulation of the deposition of Sequence 5 which is a backstepping unit and was deposited between 10.4 Ma and 6.3 Ma. The subsidence and sediment supply rates were set very low to create this thin, retrogradational unit.

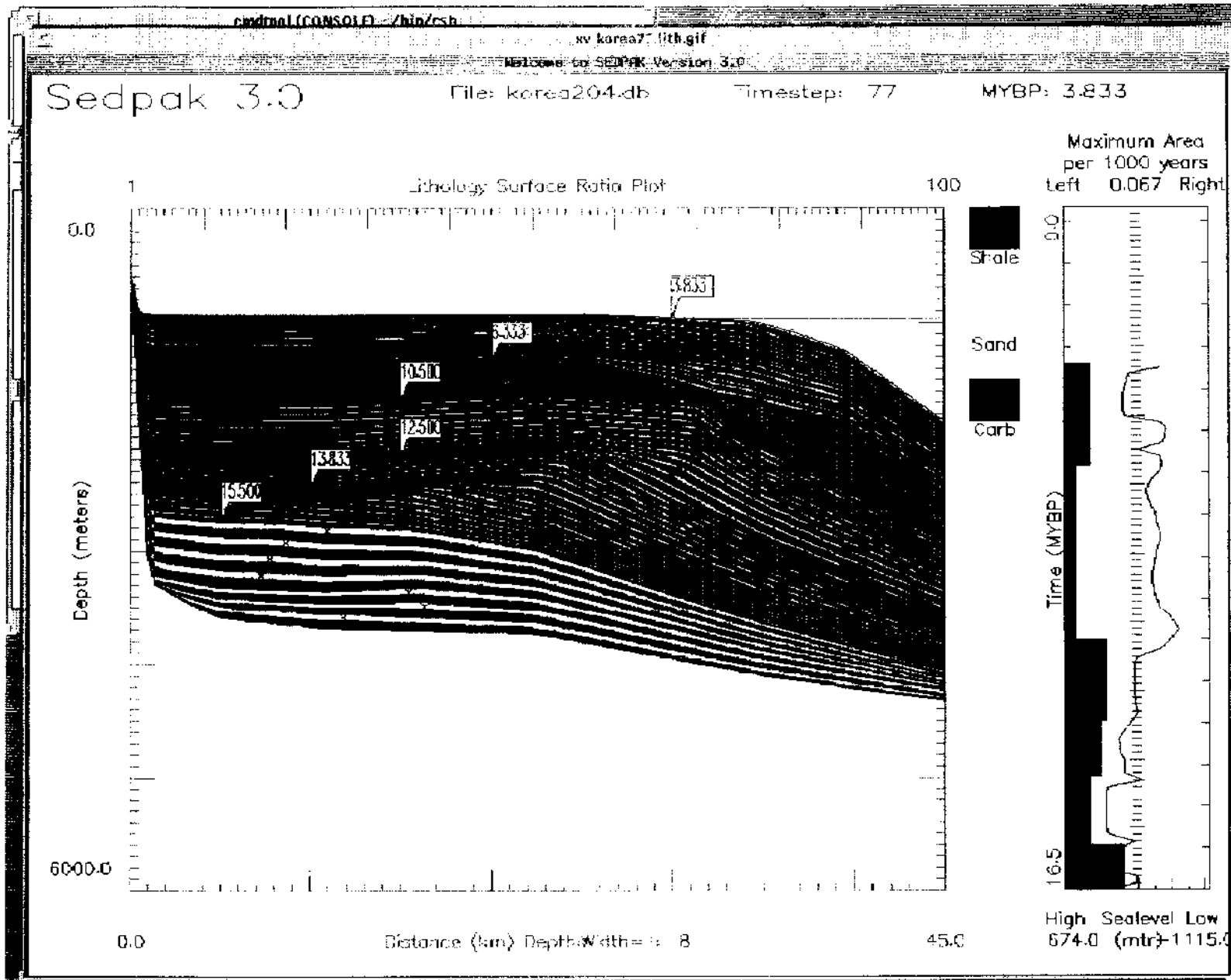
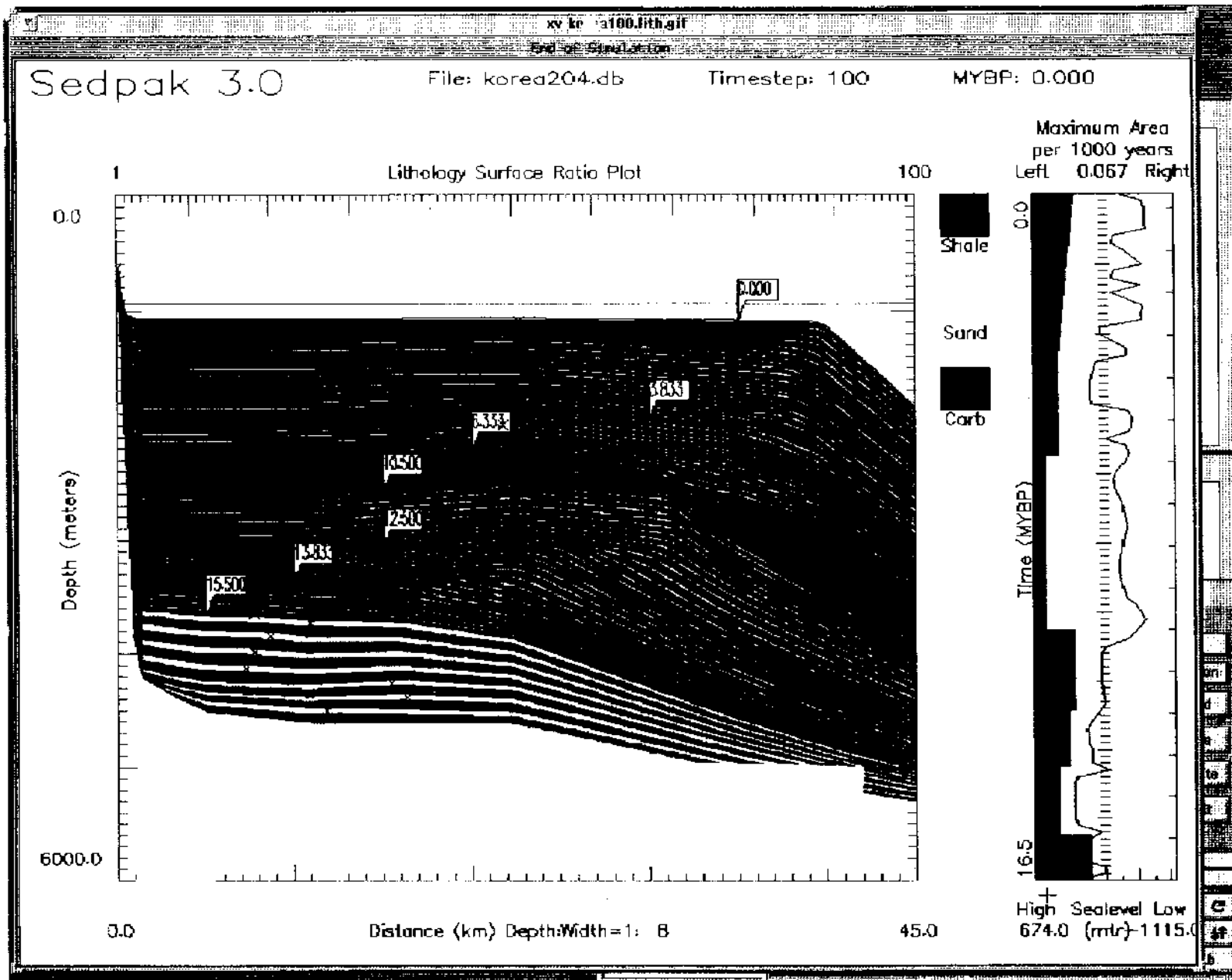


Fig. 3-11-9. Simulation of the deposition of Sequence 6 which was deposited between 63 Ma and 3.8 Ma. A sea level rise increased accommodation and, together with increased subsidence and sediment supply rates, and a thick progradational sequence was the result.



-343-

Fig. 3-11-10. Simulation of the deposition of the final Sequence 7 which shows further progradation with deposition occurring from 3.8 Ma to the present. It is the thickest sequence, created by increasing the subsidence and sediment supply rates to counteract the effects of a lowstand of sea level.

던 것으로 추정된다. 현재는 이 퇴적층이 4,000~4,700 m 지점에 위치하고 있는데, 이러한 분석 결과는 울릉 퇴적분지가 생성된 후 퇴적층 축적 초기인 마이오세 중기에서 후기까지는 분지의 기반 침강속도가 비교적 빨랐고 따라서 퇴적층의 매몰속도도 비교적 빠른 burial history를 보이다가 이후 마이오세 후기부터 세4기에 들어서는 퇴적층이 완만한 매몰속도를 보이는, 즉 분지의 지구조적 침강이 감소하고 분지가 안정해지는 역사를 기렸음을 지지해 주고 있다.

SEDPAK에 의한 퇴적층 simulation 결과를 이용하면 특정 가상 시추지점에 분포하고 있는 각 지층별 매몰 역사 (burial history)를 간편하게 재현할 수 있다. Fig. 3-11-11에 있는 매몰 역사 곡선은 분석된 탄성파 자료가 획득된 조사 축선의 중간 지점에 해당하는 곳에 위치하고 있는 퇴적층에 대해 각 지질시대별로 매몰된 깊이를 보여 주고 있다. 즉 12.5 Ma를 지시하고 있는 sequence boundary 면은 10.5 Ma 시기에 약 600 m의 깊이에, 6.3 Ma 시기에 900 m 깊이에, 3.8 Ma 시기에 약 1,300 m 깊이에, 현재는 약 2,100 m 깊이에 위치하고 있음을 가사 보여 주고 있다 (Fig. 3-11-12).

또한 현재 울릉분지 퇴적층으로부터 획득된 두 번째 도면을 이용한 simulation 분석 연구를 계속 실시하고 있는데 이후 얻게될 graphic simulation 결과를 이번 첫 번째 연구 결과와 비교하여 울릉분지 퇴적층의 매몰 진화 과정을 계속적으로 종합 분석할 계획이다.

Table 3-11-1. Clastic supply data.

Sequence (km)	Time (Ma)	Sedimentation	Sedimentation	Distance of Transport
		rate (m/ka) Sand	rate (m/ka) Shale	
1	16.5-15.5	0.012	0.055	45
2	15.4-13.8	0.0025	0.025	45
3	13.7-12.5	0.0035	0.035	45
4	12.4-10.5	0.0040	0.040	45
5	10.4-6.3	0.0012	0.012	45
6	6.2-3.9	0.0025	0.025	45
7	3.8-0.0	0.0033	0.033	45

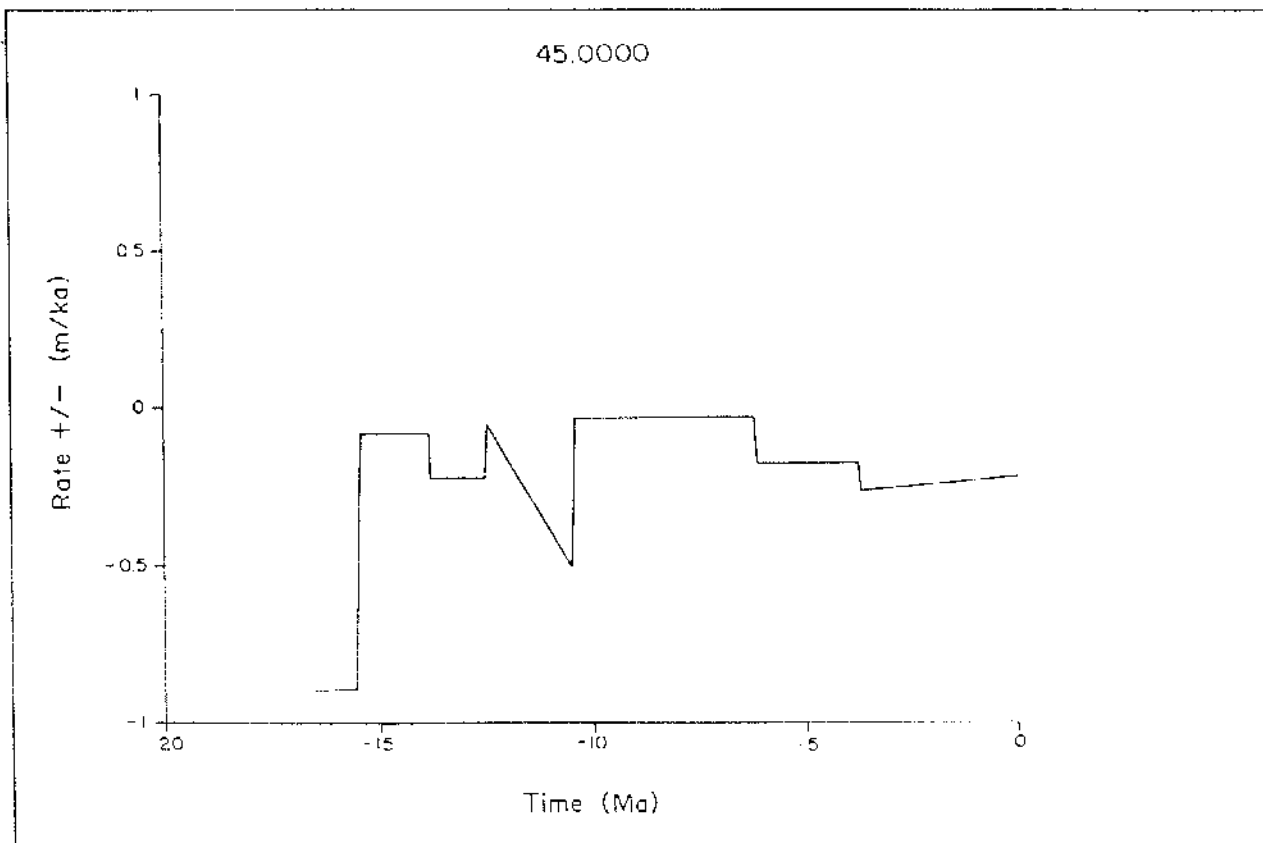


Fig. 3-11-11. Graph showing the varying rate of subsidence throughout the simulation run at the northeastern side of the simulated section.

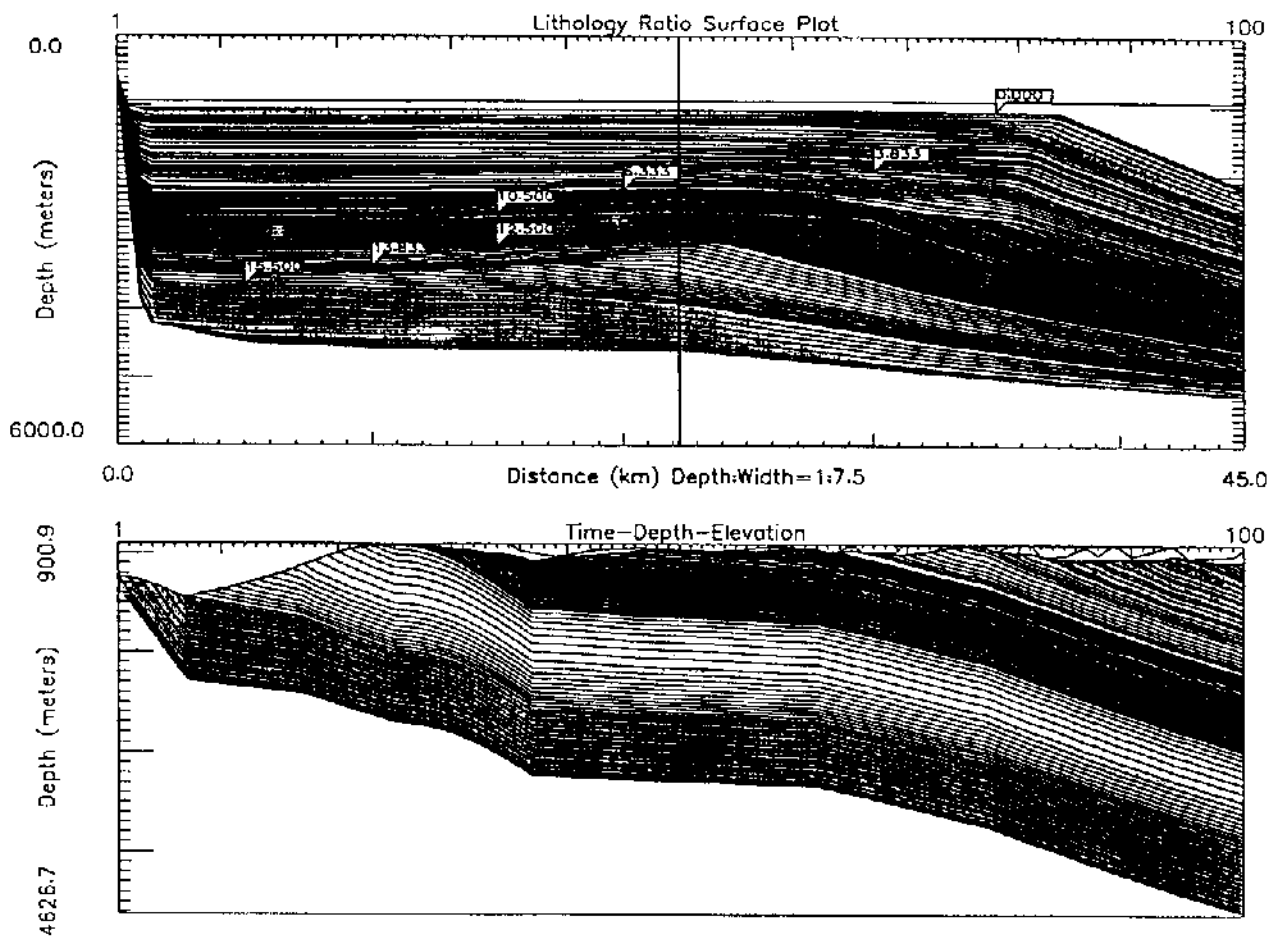


Fig. 3-11-12. Time Depth Elevation plot showing the sea level history and burial path of the sediment surface for a fixed elevation datum at the shelf margin at 22.2 km (center of the seismic section) from the southwestern end of the simulated section.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 연구개발 목표의 달성도

분야	계획	성과	달성도
독도 주변의 해저 지형 자료 획득 및 해석	독도 주변 정밀해저 지형 자료 획득 및 분포 파악	독도를 중심으로 한 주변 해저 지형 구현/ 주변 경사면의 낙석규모 및 분포	100%
지구조	울릉분지의 지각구조 및 형성과정 규명	울릉분지의 지각은 해양지각이며 시각의 형성시 뜨거운 맨틀의 영향을 받았음을 규명	100%
심부 탄성과 및 중·자력자료 획득	한반도와 울릉분지간 전이지각 지대에서 해저면 지진세, 중·자력 자료 획득	한국 러시아-일본의 공동작업을 통하여 성공적으로 해저면 지진세 자료 획득	98%
울릉분지에서 나중 탄성과 자료 해석	울릉분지와 주변해역에서 퇴적층서 해석	한국대지, 울릉분지 중심부 및 포항 앞바다 대륙붕에서의 퇴적구조 규명	100%
독도 주변의 중·자력 해석	독도주변의 지체구조적 의미 및 화산작용 파악	기존의 중·자력자료를 정밀 재처리하여 중·자력 이상지세산	100%
퇴적학	제4기 동해분지의 퇴적환경의 모델화	울릉분지의 분지평원에서 제4기 해수면 변동과 관련된 사면 안정성 변화와 저층수 산소농도의 변화를 반영하는 층서 모델을 수립	100%
테프라 시간층서	시간층서 확립과 해저화산 분출 작용 규명	표식 테프라층의 확인과 이를 통한 시간 층서의 확립, 한국대지 테프라의 성분, 조직 분석을 통하여 새로운 해저화산의 존재를 규명함	100%

분야	계획	성과	달성도
고생물 및 지화학	제4기 고해양환경 해석	최종빙기에서 간빙기사이의 뚜렷한 퇴적물 조성차와 유기물 함량의 차이를 확인함, 유공종의 수직적 분포 변화로부터 동해 해양환경의 변화 유추	100%
MSCL 활용	MSCL을 활용한 시추 퇴적물 물성 측정 기법의 확립과 고해양환경 연구에 대한 적용성 검증	국내 최초로 시추 퇴적물에 대한 연속적이고 조밀한 P파 속도, 밀도, 및 자기감화율을 동시에 측정하여 대비함, 고해양환경 연구에 대한 적용 가능성 검증	100%

2. 대외 기여도

작업명	성과	달성도
다중분지자료와 다중 채널 탄성파자료를 연계하여 한국대지의 지구구조 해석	한국대시 및 주변부에 위치하는 리프트분지의 형성과정 해석	97%
한반도 대륙주변부의 지구구조 형성과정 해석	대륙주변부에 위치하는 리프트분지와 울릉분지의 기반구조 층서해석을 통한 동해남서부의 진화구명	100%
울릉분지의 지각의 특성 규명	울릉분지의 형성과정에 대해 지구물리 자료를 기초로 하는 새로운 모델 제시	100%
지구물리자료의 처리를 위한 방법 개발	해지면 지진계 자료에서 잡음을 없애고 신호를 보강하는 신호처리 기법 개발	100%
울릉분지에서 다중 탄성파 자료 해석	한국대시, 울릉분지 중심부 및 포항 앞바다 대륙붕에서의 시질구조 규명	100%
국제 및 국내 학술지 논문 게재	현재 국제학술지에 5편 게재되었으며 국내 학술지에 5편이 게재되었음	100%

확인점	심과	달성도
고환성 변화 해석을 위한 층서적 모델 확립	퇴적성 분석과 테프라 시간층서를 통하여 분지평원과 한국대지에서의 층서 모델 확립	100%
고생물 및 지화학 분석을 통한 고해양 환경변화 규명	최종빙기에서 간빙기사이의 뚜렷한 퇴적물 조성과 유기물 함량의 차이를 확인함, 유공충의 수직적 분포 변화로부터 동해 해양환경의 변화 유추	100%
MSCL 활용	성공적인 분석 자료 획득과 고해양연구로의 적용 가능성 검증	100%
천부 해저자원 조사	천부가스층이 울릉분지 남동대륙붕에 대규모로 분포함 러시아와 공동으로 한국대지에서 채취한 인산염 분석	100%
국제 및 국내 학술지에 게재되는 논문	현재 국제 학술지에 3편, 국내 학술지에 5편 게재	100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 한반도 동남부 해역 퇴적분지의 기반구조를 파악하고 퇴적분지의 구조를 보여주는 탄성파단면을 제작함으로써 에너지자원의 탐사를 위한 기초자료로서 활용될 수 있다.
2. 한반도의 대륙사면에 몇 개의 천부 가스층이 보이고 있는 바 가스수화물의 정밀 탐사가 필요하다.
3. 울릉분지와 주변부의 지각 및 퇴적층의 형성 및 진화과정을 구명함으로써 동해의 진화사를 정립할 수 있다.
4. 시추퇴적물의 퇴적상 분석을 통한 퇴적환경과 지층수의 변화에 대한 연구결과는 기후변화와 관련된 해수면변동, 해수순환 등의 고해양환경 변화를 추적하는 기본틀로 활용된다.
5. 테프라층의 연구는 각 퇴적환경별 시추퇴적물들의 시간층서대비 뿐만 아니라, 테프라층 형성 당시의 기상 및 해류 등의 고해양환경을 복원시킬 수 있다. 또한 해저화산기원의 테프라층으로부터 새로운 표식테프라의 확인 및 유용광물의 존재여부를 확인해 볼 가치가 있다.
6. 이번 연구에서는 시범적으로 주요원소에 의한 퇴적물의 조성을 파악하는 것에서부터 기후변화의 영향을 평가하는 연구가 이루어졌다. 시료수가 적어 전체적인 동해 퇴적물 공급원에 대한 평가, 그리고 기후변동간의 관계를 명확히 설명할 수는 없으나, 지속적인 연구를 통하여 동해 전반에 걸친 퇴적물공급, 퇴적과정과 기후변동간의 관계를 규명할 수 있을 것이다.
7. 규조종 분포 및 산출빈도, 인안종, 한·난류종의 변화는 동해의 해양환경 및 기후변화를 매우 예민하게 나타내는 지시자로 사용될 수 있다. 동위원소의 직접적인 측정이 없더라도 동위원소의 stage를 어느 정도 예측할 수 있다. 앞으로 14C (AMS)와 동위원소 자료 및 테프라층의 대비와 함께 고해양 고기후의 복원에 중요한 자료로 사용될 수 있으며, 역으로 이들 자료에 대한 검증방법에도 사용할 수 있다.
8. 기후변화에 따른 지역해의 변동성 연구 능력을 증대시킨다.
9. 동해의 해양변동에 대한 예측적 확충으로 자원 변동성 등 동해의 종합적 이용에 대한 장기 정책자료로 활용될 수 있다.

제 6 장 참고문헌

참고문헌

- 김한준, 1999. 탐성과 탐사를 통해 본 울릉분지의 지각특성과 동해형성에 있어서의 의미. 지구물리 2, 9-26.
- 박찬홍, 김정우, 허식, 원중신, 석봉출, 유해수, 1999. 울릉분지에서의 선상중력과 위성중력 통합에 의한 중력 해상도 향상 및 해석. 지구물리 32, 27-38.
- 박찬홍, 김한준, 양철수, 석봉출, N. Iszaki, 1996. 중력 및 해지면지진계탐사 자료에 의한 울릉분지의 지각구조 연구. 지질학회지 32, 276-290.
- 서만철, 이광훈, 손호응, 1998. 동해울릉분지의 지구조 및 성인에 관한 지구물리학적 연구. 바다 3, 34-44.
- 서만철, 이미경, 석봉출, 1993. 해상중력을 이용한 울릉분지의 지질구조연구. 지질학회지 29, 119-127.
- 석봉출, 김한준, 박찬홍, 박맹헌, G. I. Anosov, 1993. 동해지역 국제공동 해양연구 (한국-러시아 공동연구), 한국해양연구소 보고서.
- 신임철, 1999, in press, 한국대지 및 오키뱅크의 심해퇴적물에 함유된 유공충을 이용한 고해양환경연구: 유해수, '99 배다적 경제수역 해양자원조사.
- 이희일, 김신정, 최현주, 1999a, in press, 자동코아다중검침기를 이용한 퇴적물 이동현상 및 퇴적환경변화 : 이희일, 신동혁, '99 황해퇴적물 이동현상 및 퇴적환경변화 연구.
- 이희일, 김신정, 최현주, 1999b, in press, 자동코아다중검침기를 이용한 퇴적물 안정성 및 고해양·고기후변화 : 허식, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화연구 (3차년도).
- 이희일, 신동혁, 1998, 다중코아검침기를 이용한 퇴적특성 및 고기후연구: 한상준, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화연구 (2차년도), BSPE 98709-00-1136-5, p. 271-285.
- 이희일, 신동혁, 김신정, 1988, 다중코아검침기 (Multi-Sensor Core Logger: MSCL)를 이용한 퇴적물특성: 신동혁, 이희일, '98 황해 퇴적물 이동현상 및 퇴적환경연구, p. 303-321.
- 천종화, 한상준, 정대교, 허식, 박장준, 최동립, 1998, 울릉분지 북동부 해저수로 주변 퇴적층의 화산재층서, 지질학회지, 34, 192-210.

- 천종화, 허식, 한상준, 신동혁, 성대교, 홍기훈, 김석현, 1999, 동해 울릉분지 남서해역 해양투기장의 퇴적물 특성, 한국해양학회지 '마다' 4, 312-322.
- 한상준 등, 1995, 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구 (1차년도). BSPN 00259-808-5. 한국해양연구소, 407p.
- 한상준 등, 1996, 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구 (2-3차년도). BSPN 00321-950-5, 한국해양연구소, 548p.
- 한상준 등, 1997, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 (1차년도). BSPE 97605-00-1037-5, 한국해양연구소, 657p.
- 한상준 등, 1998, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 (2차년도). BSPE 98709-00-1136-5, 한국해양연구소, 522p.
- 허식, 천종화, 한상준, 유해수, 김성렬, 김한준, 최동립, 이용국, 울릉분지 남동부 천부가스층의 분포, 특성 및 퇴적환경, 지질학회지, 35, 201-212.
- 허식, 한상준, 정대교, 천종화, 김규중, 한신찬, 1997, 울릉도에 분포하는 화성쇄설암 및 화산암 연구, BSPE 97657-00-1060-5, 한국해양연구소 보고서, 103p.
- Arikawa, R., 1983. Distribution and taxonomy of *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) off the Sanriku Coast, northeast Honshu, Japan. Tohoku Univ., Sci. Rep. 2nd ser. (Geol.), v. 53, p. 103-157.
- Arrhenius, G., 1952. Sediment cores from the East Pacific: Reports Swedish Deep-Sea Exped., v. 5, p. 1-227.
- Atchuta, R.D., Babu, H.V.R. and Narayan, P.V.S., 1981. Interpretation of magnetic anomalies due to dikes, The complex gradient method, *Geophysics*, 46, 1572-1578.
- Bahk, J. J., Kim, S. H., Han, S. J. and Chough, S. K., 1997. Origin of laminated muds and its paleoceanographic implication: Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Ocean Research*, 19, 265-274.
- Bahk, J.J., Chough, S.K. and Han, S.J., 2000. Origin of laminated muds and its paleoceanographic significance in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, 162: 459-477.
- Bandy, O.L., 1972. Origin and development of *Globorotalia* (*Turborotalia*) *pachyderma* (Ehrenberg). *Micropaleontology*, v. 18, p. 294-318. Berger, W.H.,

1967. Foraminiferal ooze: Solution at depth. *Science*, v. 156, p. 383-385.
- Berger, W.H., 1968. Planktonic foraminifera: Selective solution and paleoclimatic interpretation. *Deep Sea Research*, v. 15, p. 31-43. Berger, W.H., 1970. Planktonic foraminifera: selective solution and the lysocline. *Marine Geology*, v. 8, p. 111-138.
- Berger, W.H., 1973. Deep-sea carbonates: Pleistocene dissolution cycles. *J. Foram. Res.*, v. 3, p. 187-195.
- Berger, W.H., 1975. Deep-sea carbonates: dissolution profiles from foraminiferal preservation. *Cushman. Found. Foram. Res., Spec. Pub.*, v. 13, p. 82-86.
- Bradshaw, J.S., 1959. Ecology of living planktonic foraminifera in the north and equatorial Pacific ocean: Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, v. X, p. 25-64.
- Brier C., Chester, R., and Rona, P.A., 1969, Preliminary evaluation of a core scintillation counter for bulk density measurement in marine sediment cores, *Jour. Sed. Petrology*, v. 39, p. 1509-1519.
- Burton, R., Kendall, C. G. St. C. and Lerche, I., 1987, Out of depth : On the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record : *Earth Science Reviews*, v. 24, no. 4, p. 237-277.
- Calvert, S.E. and Pedersen, T.F., 1993. Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record. *Mar. Geol.*, 113: 67-88.
- Calvert, S.E. and Pedersen, T.F., 1996. Sedimentary geochemistry of manganese: implications for the environment of formation of manganeseiferous black shales. *Econ. Geol.*, 91: 36-47.
- Campbell, I.H., and Griffiths, R.W., 1990, Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts, *Earth and Planetary Science Letters* 99, 79-93.
- Cas, R.A.F., and Wright, J.V., 1987, *Volcanic successions: modern and ancient*, Allen & Unwin Publ. Ltd.

- Cashman, K.V. and Fiske, R., 1991, Fallout of pyroclastic debris from submarine volcanic eruptions, *Science*, 253, 275-280.
- Chang, T.-W., and Choo, C. O., 1999, Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan fault zone, *J. of Korean Earth Sci. Soc.* 20, 25-37. (in Korean)
- Cheong, Daekyo, C. Kendall, and Whittle, G., 1999, Graphic simulation of clastic margin progradation: Ulleung Basin offshore, Korea, *Geoscience*, v. 3, no 1, p. 63-73.
- Chough, S.K., 1984, Fine-grained turbidites and associated mass flow deposits in the Ulleung (Tsushima) Basin, in Stow, D.A.V. and Piper, D.J.W., eds., *Fine-grained sediments, Deep water Processes and Facies: Geol. Soc. of London Spec. Pub. 14*, 184-196.
- Chough, S.K., Lee, G.H., Park, B.K. and Kim, S.W., 1984, Fine structures of turbidite and associated muds in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan). *J. Sediment. Petrol.* 54, 1212-1220.
- Chough, S.K. and Bahk, K.S., 1984-1985, Deposition of muds in the Ulleung Marginal Basin. *Geo Mar. Lett.* 4, 235-241.
- Chough S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- Chough, S.K. and Lee, K.E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung back arc Basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, 32-39.
- Chun J.H., Han, S.-J. and Cheong, D.K., 1997a, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene, *Geoscience Journal*, 1, 154-166.
- Chun J.-H., Han, S.-J., Cheong, D.K., Huh, S., Shin, D.-H., 1997b, Volcanic Processes of the Ulleung II tephra (Ulleung-Oki ash) erupted from the Ulleung Island, *Ocean Research*, 19, 275-283.
- Chun, J.-H., 2000, Late Pleistocene to Holocene Tephrostratigraphy and Paleoenvironment of the Ulleung Basin in the East Sea, Korea, Kangwon Univ. Ph.D. Thesis, 283 p.

- Corey, J.C. and Hayes, D.W., 1970, Determination of density and water content of marine sediment in an unextruded core using fast neutron and gamma-ray attenuation, *Deep Sea Research*, v. 17, p. 917-922.
- Curry, W.B., Ostermann, D.R., Gupta, M.V.S., and Ittekkot, V., 1992. Foraminiferal production and monsoonal upwelling in the Arabian Sea: evidence from sediment traps. In: *Upwelling Systems: Evolution since the Early Miocene*, Summerhayes, C.P., Prell, W.L., and Emcis, K.C. (eds.), Geological Society Special Publication, no. 64, p. 93-106.
- Derch, M. D and Stein, R., 1994. Late Cenozoic records of colian flux in the Sea of Japan (ODP Leg 128, Sites 798 and 799) and paleoclimate in Asia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 108; 523-535.
- Eldholm, O., Thiede, J., and Taylor, E., 1989, Evolution of the Voring volcanic margins, *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 104, 1033-1065.
- Evans, H.B., 1965. GRAPE A device for continuous determination of material density and porosity, *Proceedings of 6th Annual SPWLA Logging Symposium*, 2, Dallas, TX. USA, p. B1-B25.
- Fairbanks, R.G., and Wiebe, P.H., 1980. Foraminifera and Chlorophyll maximum: Vertical distribution, seasonal succession, and paleoceanographic significance. *Science*, v. 209, p. 1524-1526.
- Fiske R.S., Cashman, K.V., Shibata, A. and Watanabe, K., 1998, Tephra dispersal from Myojinsho, Japan, during its shallow submarine eruption of 1952-1953., *Bull. Volcanol.*, 59, 262-76-106.
- Fukuma, K., and Shinjoe, H., and Hamano, Y., 1998, Origin of the absence of magnetic lineations in the Yamato Basin of the Japan Sea: Magnetic properties of mafic rocks from Ocean Drilling Program Hole 794D, *J. Geophys. Res.* 103, 17,791-17,805.
- Furuta T., Fujioka, K. and Arai, F., 1986, Widespread submarine tephra around Japan petrographic and chemical properties. *Marine Geology*, 72, 125-142.

- Gamo, T., Nozaki, Y., Sakai, H., Nakai, T. and Tsubota, H., 1986. Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. *J. Mar. Res.* 44, 781-793.
- GEOTEK, 1998, Multi Sensor Core Logger Manual, 7-15 p.
- Goldberg, E.D and Arrhenius, G.O.S., 1958. Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochemica et Cosmochima Acta*, 13: 153-212.
- Guidish, T. M., C. G. St. Kendall, L. Lerche, D. J. Toth, and Yarzab, R. F., 1985. Basin evaluation using burial history calculations : an overview : *AAPG Bulletin*, v. 69, no. 1, p. 92-105.
- Harnouis, L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55: 319-322.
- Hart, S.R., 1984, A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle, *Nature* 371, 149-151.
- Hayashida, A. and Ito, Y., 1984, Paleoposition of southwest Japan at 16 Ma: Implication for paleomagnetism of the Miocene Ichishi Group. *Earth and Planetary Science Letters*, 68, 335-342.
- Heiken, G. and Wohletz, K., 1991, Fragmentation processes in explosive volcanic eruptions, *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM Special Publication, 45, 19-26.
- Holland-Hansen, W., Kendall, C. G. St. C., Lerche, I. and Nakayama, K., 1988, A Simulation of continental basin margin sedimentation in response to crustal movements, eustatic sea level change and sediment accumulation rates : *Jour. Math. Geology*, v. 20, no. 7, p. 777-802.
- Hine, R., Williams, I. S., Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1978, Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko batholith, *J. Geol. Soc. Australia*, 25, 219-234.
- Hirose, K., Hong, G. H., and Miyao, T., 1996. A preliminary study of the temperature structure in the North Central Japan Sea: *The Oceanographical Magazine*, v. 45, p. 1-8.

- Holler, P.R. and Suyehiro, K., 1992. Seismic stratigraphy of the Kita Yamato Trough, in Tamaki, K. et al. (eds.), Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results 127/128, pp.1135-1143.
- Huckriede, H. and Meischner D., 1996. Origin and environments of manganese-rich sediments within black-shale basins. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1399-1413.
- Huh, S., Kim, H.J., Hong, J.K., Jou, H-T., Yoon, S-H., Kim, K.Y., Yoo, H-S., Han, S.J., 1996, Structures of the Onnuri Basin (37-38° N, 129-130° E) near the Korea Plateau in the East Sea. Korean Society of Oceanography: Proceedings of the Third International Conference on Asian Marine Geology, Cheju, October 17-21, 1995, 177-186.
- Hyun, S., Han, S.J., and Bahk, J.J., 1998. Major element changes in the upper Quaternary sediment of the East Sea (Sea of Japan): their implications for the onset of Holocenc. *J. Kor. Occanogr.*, 33, 185-195.
- Ingle, J.C., Jr., Suyehiro, K., von Breymann, M.T., et al., 1990. Proc. ODP, Init. Repts., 128: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Inoue, E., 1982, Geological problems on Cretaceous and Tertiary rocks in and around Tsushima-Korean Strait. United Nations Economics and Social Commission for Asian and the Pacific, Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas, Technical Bulletin, 15, 86-121.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite series and ilmenite series granitic rocks, *Mining Geol.*, 27, 293-305.
- Jakobsen, R. and Postma, D., 1989. Formation and solid solution behavior of Ca-rhodochrosites in marine muds of the Baltic deeps. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2639-2648.
- Jenkins, D.G., 1967. Recent distribution, organic, and coiling ratio changes in *Globorotalia pachyderma* (Ehrenberg). *Micropaleontology*, v. 13, p. 195-203.
- Kennett, J.P., 1968. Latitudinal variation in *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) in surface sediments of the southwest Pacific ocean.

- Micropaleontology, v. 14, p. 305-318.
- Jervey, M.T., 1989, Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequence and their seismic expression : SEPM Special Publication 42, p. 47-69.
- Jin, M. S., 1980, Geological and isotopic contrasts of Jurassic and Cretaceous granites in south Korea, J. Geol. Soc. Korea, 16, 205-215.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992. Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan arc, in Tamaki, K. et al. (eds.), Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results 127/128, pp.1311-1331.
- Kawamura, H. and Wu, P., 1998. Formation mechanism of Japan Sea Proper Water in the flux center off Vladivostok. J. Geophys. Res. 103, 21,611-21,622.
- Keigwin, W.D and Gorbarenko, S.A., 1992. Sea-level, surface salinity of the Japan Sea, and the Younger Dryas event in the northwest Pacific Ocean. Quat. Res., 37, 346-360.
- Kendall, C. G. St. C., G. L. Whittle, R. Ehrlich, P. Moore, R. L. Cannon, and Hellmann, R., 1993, Computer sedimentary simulation sequence stratigraphy, Oil & Gas Journal, no. 26 p. 46-51.
- Kendall, C. G. St. C., Moore, P., Strobel, J., Cannon, R., Bezdek, J. and Biswas, G., 1989, Simulation of sedimentary fill of basins : In Sedimentary Modeling Computer simulation and methods for improved parameter definition, Franseen, Watney, Kendall and Ross eds., Kansas Geological Survey Bulletin 233, p. 9-30.
- Kennet, J.P. and Thunell, R.C., 1975, Global increase in Quaternary explosive volcanism, Science, 187, 497-503.
- Kennett, J.P., 1970. Comparison of *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) in Arctic and Antarctic areas: Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, v. 21, p. 47-49.
- Kim, H.J., C.H. Park, J.K. Hong, and H.T., Jou, 1994. A seismic experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern Japan Sea (East Sea of

- Korea). *Geophys. Res. Lett.* 21, 1975-1978.
- Kim, H.J., S.J. Han, G.H. Lee and S. Huh, 1998. Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). *Mar. Geophys. Res.* 20, 219-237.
- Kim, K., Kim, K.R., Kim, Y.G., Cho, Y.K., Chung, J.Y., Choi, B.H., Byun, S.K., Hong, G.H., Takematsu, M., Yoon, J.H., Volkov Y. and Danchenkov, M., 1996. New findings from CREAMS observations: water masses and eddies in the East Sea. *J. of Korean Soc. Oceanogr.* 31, 155-163.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Nagao, K., and Jang, S.K., 1999. Nd and Sr isotopes and K Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea, *Geochemical Journal* 33, 317-341.
- Klinkhammer, G., Heggic, D.T., and Graham, D.W., 1982. Metal diagenesis in oxic marine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 61, 211-219.
- Klaus, A., Taylor, B., Moore, G.F., Murakami, F., and Okamura, Y., 1992. Back-arc rifting in the Izu-Bonin Island Arc: Structural evolution of Hachijo and Aoga Shima Rifts, *The Island Arc* 1, 16-31.
- Kuramoto, S., Tamaki, K., and Langseth, M.G., 1992. Can opal-A/opal-CT BSR be an indicator of the thermal structure of the Yamato Basin, Japan Sea? in Tamaki, K. et al. (eds.), *Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results 127/128*, pp.1145-1151.
- Lawrence, D. T., Doyle, M. and Aigner, T. 1990, Stratigraphic simulation of sedimentary basins : Concepts and calibration : AAPG Bulletin, v. 74, no. 3, p. 237-295.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Suh, M.C., and Hong, J.K., 1999. Crustal structure, volcanism, and opening mode of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Tectonophysics* 308, p.503-525.
- Lee, H.J., Chough, S.K. and Yoon, S.H., 1996. Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Sediment. Geol.* 104, 39-51.
- Lee, J. I. and Kusakabe M., 1998, Hydrogen and oxygen isotopic compositions of

- the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang Basin, Korea, *Geochem. J.*, 32, 253-265.
- Lee, J. I. and Lee, M. S., 1991, Mineralogy and petrology on the granitic rocks in the Youngju Area, Kyeongsang Buk-Do, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 626-641.
- Lee, J. I., 1992, Mineralogy and petrography of the shallow-depth emplaced granitic rocks distributed in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 13, 176-199.
- Lee, J. I., 1997, A review on the origin of micrographic granites (Masanites) in the southern Kyeongsang Basin, Korea. *Geosci. J.*, 1, 202-215.
- Lee, J. I., Jwa, Y. J., Park, C. -H., Lee, M. J. and Moutte, J., 1998, Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam Massif, Korea, *Geosci. J.*, 2, 1-14.
- Lee, K.E., 1992. Geological structure of Ulleung back arc basin, East Sea. M. Sc thesis, Seoul National Univ., Seoul, 121pp.
- Lee, M.S., and John, Y.W., 1985, Study on the Quaternary volcanics and their tectonic environments of southern Korea, *J. Geol. Soc. of Korea* 21, p.260-288.
- Lepland, A. and Stevens, R.L., 1998. Manganese authigenesis in the Landsort Deep, Baltic Sea. *Mar. Geol.*, 151: 1-25.
- Lewis, C., and Smith, A.D., 1995, Earth rotation and stress fields as controls on the distribution of Pacific intraplate volcanism, *Eos Trans. AGU*, 76, Fall Mtg. Suppl. 617.
- Lister, G.S., Etheridge, M.A., and Symonds, P.A., 1986, Detachment faulting and the evolution of passive continental margins, *Geology* 14, p.246-250.
- Ludwig, M.S., S. Murauchi, and R.E. Houtz, 1975. Sediments and structure of the Japan Sea, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 651-664.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the sea of Japan from large Late Quaternary eruptions, *Jour. of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 151-164.

- Machida, H. and Arai, F., 1992, Atlas of tephra in and around Japan, Univ. of Tokyo Press, ISBN 4 13 66700 9, 276p.
- MacLeod, I.N., S. Vierra, and A.C. Chavaes, 1993. Analytic signal and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes, in *Proceedings of the Third International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro.
- Mahoney, J.J., Natland, J.H., White, W.M., and Baxter, A.N., 1989, Isotopic and geochemical provinces of the western Indian Ocean spreading centers, *J. Geophys. Res.* 94, 4033-4052.
- Matsuda, K., 1979, Collision of the Izu-Bonin Arc with central Honshu: Cenozoic tectonics of the Fossa Magna, Japan. In: Uyeda, S., Kroenke, R.W., and Kobayashi, K. (eds.), *Geodynamics of the Western Pacific*. Center for Academic Publications, Japan Scientific Societies Press, Tokyo, Japan, 409-421.
- Minami, A., 1979, Distribution and characteristics of the sedimentary basin offshore San-in to Tsushima Island. *Japanese Association for Petroleum Technology Journal*, 44, 321-328. (in Japanese)
- Mitchum, R.M. Jr., Vail, P.R., and Sangree, J.B., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, in Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 26, pp.117-134.
- Moorby, S.A., 1983. The geochemistry of transitional sediments recovered from the Galapagos hydrothermal mounds field during DSDP leg 70 - implications for mound formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 62: 367-376.
- Moriyasu, S., 1972. The Tsushima Current, In: Stommel, H., and Yoshida, K., (eds.), *Kuroshio, its physical aspects*. Univ. Tokyo Press, Tokyo, p. 353-369.
- Muller, P.J and Suess, E., 1979. Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic carbon in the ocean 1. Organic carbon preservation. *Deep Sea*

Research. 26A: 1347-1362.

- Mutter, J.C., Buck, W.R., Zehnder, C.M., 1988, Convective partial melting, 1. A model for the formation of thick basaltic sequences during the initiation of spreading, *J. Geophys. Res.* 93, 1031-1048.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37, 507-517.
- Nakamura, E., and Campbell, I.H., McCulloch, T., and Sun, S.S., 1998, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan, *J. Geophys. Res.* 94, 4634-4654.
- Nakayama, K., and Lerch, I., 1989, Two-dimensional basin analysis : Editions Technip, Paris, p. 597-611.
- Nester, D. and Mitchum, B., 1989, Exploration and production evaluation Block VI-1, Ulleung Basin, Exploitech Inc., Houston, v.1 7 (unpublished exploration report)
- Niino, H., Emery, K.O. and Kim, C.M., 1969. Organic carbon in sediments of Japan Sea. *J. Sediment. Petrol.* 39, 1390-1398.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T., and Takayama, T., 1991, Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoenography*, 6, 499-518.
- Oba, T., Murayama, M., Matsumoto, E. and Nakamura, 1995, AMS ^{14}C ages of Japan Sea core from the Oki ridge, *The Quaternary Research*, 34, 289-296.
- Ortiz, J.D., and Mix, A.C., 1992. The spatial distribution and seasonal succession of planktonic foraminifera in the California Current off Oregon, September 1987-September 1988. In: *Upwelling Systems: Evolution since the Early Miocene*, Summerhayes, C.P., Prell, W.L., and Emeis, K.C. (eds.), Geological Society Special Publication, no.64, p. 197-213.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T., 1983, Palcomagnetic evidence for the clockwise rotation of southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 349-359.

- Otoh, S. and Yanai, S., 1996, Mesozoic inversive wrench tectonics in far east Asia: examples from Korea and Japan. In: Yin, A. and Harrison, T.M. (eds), *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 401-419.
- Park, B. K., I.C. Shin and S. J. Han, 1997. East Sea (Japan Sea) climatic event during the Younger Dryas and last deglaciation. *Ocean Res.*, 19, 257-264.
- Park, B.-K., and Shin, I.C., 1998. Seasonal distribution of planktonic foraminifers in the East Sea (Sea of Japan), a large marginal sea of the northwest Pacific. *J. Foram. Res.*, v. 28, p. 321-326.
- Park, C.H., 1998. Crustal structure and evolution of the Ulleung Basin in the East Sea of Korea (the Japan Sea) by deep penetrating seismic refraction, reflection and potential field data. Ph.D. thesis, Chiba Univ., Chiba, Japan, 245 pp.
- Parker, F.L., and Berger, W., 1971. Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific. *Deep Sea Research*, v. 18, p. 73-107.
- Peterson, L.C., and Prell, W.L., 1985. Carbonate dissolution in Recent sediments of the eastern equatorial Indian ocean: Preservation patterns and carbonate loss above the lysocline. *Marine Geology*, v.64, p. 259-290.
- Poulet, A. and Scott, S.D., 1992, Volcanic ash layers in the Japan Sea: tephrochronology of sites 798 and 799, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 791-803.
- Preiss, K., 1968, Non destructive laboratory measurement of marine sediment density in a core barrel using gamma radiation, *Deep Sea Reserach*, v. 15, p. 401-407.
- Ricken, W., 1993. *Sedimentation as a three-component system -Organic carbon, carbonate, noncarbonate-*, Springer-Verlag, 211 pp.
- Roest, W.R., J. Verhoef, and M. Pillington, 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics* 57, 116-125.
- Rosendahl, B.R., 1987, *Architecture of continental rifts with special reference to*

- East Africa, *Annual Review of Earth and Planetary Science Letters* 15, 445-503.
- S'edin, V. T., and Sato, H., 1996, Volcanic rocks, in Isezaki, N. et al. (eds.), *Geology and Geophysics of the Japan Sea*, pp.353-368.
- Sandwell, D.T. and W.H.F. Smith, 1997. Marine gravity anomalies from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *J. Geophys. Res.* 102 (B5), 10,039-10,054.
- Sawlan, J.J. and Murray, J.W., 1983. Trace metal remobilization in the interstitial waters of red clay and hemipelagic marine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 64, 213-230.
- Scaturro, D., Strobel, J., Kendall, C. G. St. C., Wendte, J., Biswas, G., J. and Cannon, R., 1989, Judy Creek : A case study for a two-dimensional sediment deposition simulation : SEPM Special Publication 44, p. 63-76.
- Sclater, J.C., Royden, L., Horvath, L., Burchfiel, B.C., Semkin, S., and Stegena, L., 1980, The formation of the Intra Carpathian basins as determined from subsidence data. *Earth and Planetary Science Letters*, 51, 139-162.
- Sen Gupta, B.K., Shin, I.C., and Wendler, S.T., 1987. Relevance of specimen size in distribution studies of deep-sea benthic foraminifera. *Palaios*, v. 2, p. 332-338.
- Shackleton, N.J., 1987. Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quat. Sci. Rev.* 6, 183-190.
- Shimmield, G.B. and Price, N.B., 1986. The behavior of molybdenum and manganese during early sedimentary diagenesis offshore Baja California, Mexico. *Mar. Chem.*, 19: 261-280.
- Sigurdsson, H. and Carey, S.N., 1981, Marine tephrochronology and Quaternary explosive volcanism in the Lesser Antilles Arc. In: Self S. and Sparks, R.S.J. (eds) *Tephra Studies*, 255-280.
- Skogseid, K., and Eldholm, O., 1987, Early Cenozoic evolution crust at the Norwegian continental margin and the conjugate Jan Mayan Ridge. *J. Geophys. Res.* 92, 11,471-11,491.
- Smith, A.D., 1998, The geodynamics of the DUPAL anomaly in Asia, in Flower,

- M.F.J. et al. (eds.), Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, pp. 89-105.
- Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell, 1995. Marine gravity field from declassified Geosat and ERS-1 altimetry, EOS Trans. AGU 76, G42A-2.
- Stein, R., 1991. Accumulation of organic carbon in marine sediments. Springer-Verlag. pp. 6.
- Sternbeck, J. and Sohlenius, G., 1997. Authigenic sulfide and carbonate mineral formation in Holocene sediments of the Baltic Sea. Chem. Geol., 135: 55-73.
- Strobel, J., Kendall, C. G. St. C., Biswas, G. and Bezdak, J., 1987, Preliminary description of the program SEDFIL with carbonate module added : Proc. Geotech, 1987, Denver Colorado, p. 341-349.
- Strobel, J., Kendall, C. G. St. C., Biswas, G. and Bezdak, J., 1989, Interactive (SEDPACK) simulation of clastic and carbonate sediments in shelf to basin settings : Computer & Geoscience, v. 15, no. 18, p. 1279-1290.
- Suess, E., 1979. Mineral phases formed in anoxic sediments by microbial decomposition of organic matter. Geochim. Cosmochim. Acta, 43: 339-352.
- Tada, R., Koizumi, I., Cramp, A and Rahman, A., 1992. Correlation of dark and light layers: the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. Proc. ODP Sci. Res., 127/128, 577-601.
- Tamaki, K., 1988. Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications, Bull. Geol. Surv. Japan 39, 269-365.
- Tamaki, K., F. Murakami, K. Nishimura and E. Honza, 1979. Continuous seismic reflection profiling survey, in Honza, E. (ed.), Geological Investigation of the Japan Sea, Geol. Surv. Japan Cruise Rept. 13, 48-51pp.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle Jr., J.C., Pisciotto, A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP Drilling, in Tamaki, K. et al. (eds.), Proc. Ocean Dri. Prog. 127/128, pp. 1333-1348.
- Tatsumi, Y. and Kimura, N., 1991, Backarc extension versus continental breakup: petrological aspects for active rifting, Tectonophysics 197, 127-137.
- Tetzleff, D. M., 1986 Computer simulation model of clastic sedimentary processes

- (abs.) : AAPG Bulletin, v. 70, p. 655.
- Thorarinsson, 1954, The eruption of Hekla 1947-48, part 2, Ch. 3, The tephra fall from Hekla on March 29, 1947, Soc. Sci. Islandica, Reykjavik, 1-68.
- Thunell, R., and Sautter, L.R., 1992. Planktonic foraminiferal faunal and stable isotopic indices of upwelling: a sediment trap study in the San Pedro Basin, Southern California Bight. In: Upwelling Systems: Evolution since the Early Miocene, Summerhayes, C.P., Prell, W.L., and Emeis, K.C. (eds.), Geological Society Special Publication, no. 64, p. 77-91.
- Thunell, R.C., 1976. Optimum indices of calcium carbonate dissolution in deep-sea sediments. *Geology*, v. 4, p. 525-528.
- Tolderlund, D.S., and Be, A.W.H., 1971. Seasonal distribution of planktonic foraminifera in the western North Atlantic. *Micropaleontology*, v. 17, p. 297-329.
- Uyeda, S. and Kanamori, H., 1979, Back arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84, 1049-1061.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese Islands: A synthesis, *Geol. Soc. Am. Bull.* 85, 1159-1170.
- Verhoef, J., B.J. Collette, J.J. Danobeitia, H.A. Roeser, and W.R. Roest, 1991. Magnetic anomalies off West-Africa (20-38° N), *Mar. Geophys. Res.* 13, 81-103.
- Vincent, E., and Berger, W.H., 1981. Planktonic foraminifera and their use in paleoceanography. In: *The Oceanic Lithosphere (The Sea, v. 7)*, Emiliani, C., (ed.), John Wiley, New York, p. 1025-1119.
- Watts, A. B., and Thorne, J., 1984, Tectonics, global changes in sea level and their relationship to stratigraphical sequences at the U.S. Atlantic continental margin : *Marine and Petroleum Geology*, v. 1, p. 319-339.
- Westgate, J.A. and Fulton, R.J., 1975, Tephrostratigraphy of Olympia interglacial sediments in south-central British Columbia, Canada, *Canadian Journal of Earth Science*, 12, 489-502.

- White, R.S. and McKenzie, D., 1989, Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margin and flood basalts, *J. Geophys. Res.* 94, 7685-7729.
- White, R.S., Westbrook, G.K., Fowler, S.R., Spence, G.D., Barton, P.J., Joppen, M., Bowen, A.N., Prestcott, C., and Bott, M.H.P., 1987, Hatton Bank (northwest U.K.) continental margin structure, *Geophys. J. R. astr. Soc.* 89, 265-272.
- Whitmarsh, R.B., 1971, Precise sediment density determination by gamma-ray attenuation alone, *Jour. Sed. Petrology*, v. 41, p. 882-883.
- Wright, I.C., 1997, Morphology and evolution of the Remnant Colville and Active Kermadec Arc Ridge south of 33°30'S, *Marine Geophysical Researches* 19, 177-193.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Geol. Soc. Am. Bull.* 107, 83-97.
- Zhou, X.H., Zhu, B.Q., Liu, R.X., and Chen, W.J., 1988, Cenozoic basaltic rocks in eastern China, in Macdougall, J.D. (ed.), *Continental flood basalts*, pp.311-330.
- Zonenshain, L.P., and Savostin, I.A., 1981, Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia, *Tectonophysics* 76, 1-45.

부 록

본 연구사업 연구결과의 전문 학술지 발표논문 현황

1. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 (1997)

국내 학술지	국외 학술지	Proceedings	국내 학술회의	국외 학술회의	합계
12 건	1 건	4 건	4 건	10 건	31 건

2. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 (1998)

국내 학술지	국외 학술지	Proceedings	국내 학술회의	국외 학술회의	합계
10 건	2 건	1 건	12 건	5 건	30 건

3. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 (1999)

국내 학술지	국외 학술지	Proceedings	국내 학술회의	국외 학술회의	합계
5 건	3 건	8 건	12 건	5 건	33건

4. XXXXXXXXXX 개최

(Marine Environment Changes and Basin Evolution in the East Sea, Korea)

주제 : 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구 결과 발표 및 연구방향 선정

일시 : 1999년 12월 23일

장소 : 한국해양연구소 본관동



Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea)

Han-Joon Kim¹, Sang-Joon Han¹, Gwang Hoon Lee² & Sik Huh¹

¹*Marine Tectonics Lab., Korea Ocean R & D Inst., Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea*

²*Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea*

Received 16 July 1998, accepted 19 January 1999

Key words: Ocean bottom seismometer, Ulleung Basin, back-arc sea, crustal structure, layer 2C, mantle plume

Abstract

The Ulleung Basin (Tsushima Basin) in the southwestern East Sea (Japan Sea) is floored by a crust whose affinity is not known whether oceanic or thinned continental. This ambiguity resulted in unconstrained mechanisms of basin evolution. The present work attempts to define the nature of the crust of the Ulleung Basin and its tectonic evolution using seismic wide-angle reflection and refraction data recorded on ocean bottom seismometers (OBSs). Although the thickness of (10 km) of the crust is greater than typical oceanic crust, tau-p analysis of OBS data and forward modeling by 2-D ray tracing suggest that it is oceanic in character: (1) the crust consists of laterally consistent upper and lower layers that are typical of oceanic layers 2 and 3 in seismic velocity and gradient distribution and (2) layer 2C, the transition between layer 2 and layer 3 in oceanic crust, is manifested by a continuous velocity increase from 5.7 to 6.3 km/s over the thickness interval of about 1 km between the upper and lower layers. Therefore it is not likely that the Ulleung Basin was formed by the crustal extension of the southwestern Japan Arc where crustal structure is typically continental. Instead, the thickness of the crust and its velocity structure suggest that the Ulleung Basin was formed by seafloor spreading in a region of hotter than normal mantle surrounding a distant mantle plume, not directly above the core of the plume. It seems that the mantle plume was located in northeast China. This suggestion is consistent with geochemical data that indicate the influence of a mantle plume on the production of volcanic rocks in and around the Ulleung Basin. Thus we propose that the opening models of the southwestern East Sea should incorporate seafloor spreading and the influence of a mantle plume rather than the extension of the crust of the Japan Arc.

Introduction

The East Sea (Japan Sea) behind the Japan Arc is in a region of complex boundaries of the Amurian, Pacific, and Philippine plates (Figure 1). The morphology of the East Sea characterized by three major basins (Japan, Yamato, and Ulleung Basins) and topographic highs such as the Yamato Ridge is suggestive of intricate back-arc opening tectonics (Figure 1).

Deep seismic experiments using sonobuoys (Ludwig et al., 1975) and ocean bottom seismometers (OBS) (Hirata et al., 1989; Shinohara et al., 1992) reveal that there is a wide range of back-arc basin crust in the East Sea from typically oceanic to intermediate between oceanic and continental. The eastern part

of the Japan Basin is floored by crust with thickness and velocities that may well be defined as oceanic. In contrast, the crust underlying the Yamato Basin is 11 to 12 km thick. Ludwig et al. (1975) and Hirata et al. (1989) postulated this as thicker than typical oceanic crust, while Shinohara et al. (1992) considered it to be intermediate by defining it neither oceanic nor continental due to the anomalous thickness.

The Ulleung Basin (Tsushima Basin) is a major physiographic unit in the southwestern (SW) East Sea. It is bounded by the Korean Peninsula to the west and flanked to the east by the Yamato Ridge and the Oki Bank east of which the Yamato Basin is located (Figure 1). A number of models for the opening of the Ulleung Basin have been proposed to explain the evo-



Crustal structure, volcanism, and opening mode of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)

Gwang H. Lee^{a,*}, Han J. Kim^b, Man C. Suh^c, Jong K. Hong^d

^a Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, South Korea

^b Marine Tectonics Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-160, South Korea

^c Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, South Korea

^d Marine Tectonics Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-160, South Korea

Received 29 September 1998; accepted 24 March 1999

Abstract

A study of the Ulleung Basin in the southwestern East Sea (Sea of Japan), based on single- and multi-channel seismic reflection profiles and ocean bottom seismometer (OBS) data, suggests that the basin formed largely by pull-apart opening and the deep, northern basin is underlain by thicker-than-normal oceanic crust (10 km thick), probably formed during the earliest stage of seafloor spreading. Volcanic activity in association with basin opening occurred over much of the basin but it ceased first in the south while it continued in the north until recently. The principal evidence for pull-apart opening includes: (1) an overall rhomboidal shape of the basin consisting of two basement lows and a median high, known to be characteristic of pull-apart basins; (2) the location and orientation of the major volcanic sources suggesting more-or-less N–S opening; and (3) the strike-slip fault system along the western basin margin, which appears to have guided the pull-apart opening. The lack of extensional deformation along the western basin margin, which would have been prevalent if SW Japan had rotated away from the Korean Peninsula as suggested by paleomagnetic data, is also not in favor of the alternative, rotational opening of the basin. The absence of graben-and-rift topography in the acoustic basement in the deep, northern Ulleung Basin is indicative of the non-brittle or ductile nature of the crust. Tau-*p* analysis of the OBS data reveals that the igneous crust consists of upper and lower layers with velocities typical of oceanic layers. The velocity–depth profiles with a two-gradient velocity structure is also characteristic of oceanic crust. However, the lower layer is much thicker than oceanic layer 3 and the change of velocity gradient, which occurs at around 6.5 km/s in typical oceanic crust, occurs at about 6 km/s, suggesting that the crust is not a typical oceanic crust. The meager basin size and short opening period may suggest that the basin opening did not lead to the formation of full-fledged oceanic crust but instead resulted in embryonic or incipient oceanic crust thickened by upper-mantle thermal perturbations evoked by rifting. © 1999 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: back-arc basins; pull-apart basins; volcanism; oceanic crust

* Corresponding author. Tel.: +82 654 469 4606; Fax: +82 654 465 3917; E-mail: gwanglee@knusun1.kunsan.ac.kr

Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)

J.J. Bahk^{a,*}, S.K. Chough^a, S.J. Han^b

^a Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea

^b Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, South Korea

Received 20 October 1998; accepted 17 June 1999

Abstract

A detailed facies analysis of long piston-core sediments from the Ulleung Basin reveals four mud facies: laminated mud, crudely laminated mud, bioturbated mud, and homogenous mud. The laminated and homogeneous muds were most likely deposited from turbidity currents, whereas the bioturbated and crudely laminated muds were formed by hemipelagic/pelagic sedimentation under well-oxygenated and poorly oxygenated bottom-water conditions, respectively. A detailed analysis of vertical distribution of the mud facies together with a chronostratigraphic framework derived from correlative tephra layers with known eruption ages reveals paleoenvironmental changes during the late Quaternary. During the period between 49 and 23 ka, eustatic lowering of sea level facilitated frequent slope failure, resulting in repeated deposition of fine-grained turbidites on the basin floor. Normal hemipelagic sediments were intensively bioturbated under well-oxygenated bottom-water conditions. During the period between 23 and ~13 to 11 ka, deposition from turbidity currents continued, but hemipelagic sediments were non-bioturbated under poorly oxygenated bottom water conditions. The bottom-water deoxygenation is attributed to further lowering of sea level during the last glacial period and consequent intensified stratification in the water column by freshwater supply to the nearly isolated sea. Primary laminae preserved in the crudely laminated mud generally exhibit low compositional bimodality in backscattered electron images, which suggests low surface primary productivity and presence of superficial micro-bioturbation. After rapid rise of sea level at ~13 to 11 ka, the slopes were stabilized and pelagic sedimentation has prevailed under well-oxygenated bottom-water conditions. © 2000 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: laminated muds; paleoceanography; backscattered electron images; Ulleung Basin

1. Introduction

Deposition of deep-sea laminated sediments commonly results from periodic variations of hemipelagic/pelagic sedimentation in anoxic silled basins

(e.g., California Borderland basins), marginal seas (e.g., Black Sea), or continental slope under high primary productivity (e.g., Peru margin). Such laminated sediments have been used as fine-scale paleo-indicators because they record annual or inter-annual variations of biogenic or terrigenous flux that reflect changes of paleoclimatic conditions (Kemp, 1996). Recently, seasonal-scale variation of particle influx

* Corresponding author. Fax: +82-2-872-0311;
E-mail: sedlab@snu.ac.kr

탄성과 탐사를 통해 본 울릉분지의 지각특성과 동해형성에 있어서의 의미

김한준

한국해양연구소 해저지구조 연구실

요 약

동해의 남서해역에 위치하는 울릉분지의 지각은 정상적인 해양지각보다 두꺼워서 과연 해양지각인지 아니면 얇아진 대륙지각인지가 불분명하다. 울릉분지의 지각구조와 그 특성을 정확히 모르는 가운데 분지의 진화에 관한 서로 다른 모델들이 제시되고 있음에 비추어 이 논문에서는 심부 탄성과 탐사자료를 이용하여 울릉분지의 지각구조와 특성을 밝히고, 형성에 대한 단서를 제시하고자 한다. 울릉분지 지각의 두께는 10 km로서 정상적인 해양지각보다 두꺼우나 해저면 지진계 자료의 τ - p 분석과 2차원 파선추적을 기초로 하는 해석의 결과는 다음과 같이 해양지각의 특징을 시사한다. (1) 울릉분지의 지각은 깊이에 따른 속도와 속도기배(velocity gradient)의 분포에서 상부층과 하부층으로 구성되는데 이들은 각각 전형적인 해양지각을 이루는 층단위 2 (layer 2)와 층단위 3 (layer 3)과 일치한다. (2) 상부층과 하부층 사이에는 약 1 km 구간에 걸쳐 5.7-6.3 km/s의 속도를 갖는 층을 관찰할 수 있는데, 이것은 해양 층단위 2와 3 사이의 전이층으로 알려진 층단위 2C를 나타낸다. 그러므로 전형적인 대륙지각의 특징을 보이는 남서 일본열도가 늘어나면서 울릉분지가 형성되었다고는 볼 수 없다. 대신, 지각의 속도와 두께는 맨틀플룸의 바로 위가 아니라 그 수위에서 형성되는 정상보다 뜨거운 맨틀대류권내에서 발생시킨 해저면확장에 의해 울릉분지가 형성되었음을 시사한다. 울릉분지의 형성에 영향을 미친 맨틀플룸은 중국 북동부에 존재하였을 것으로 추정되는데 이러한 논리는 울릉분지내와 그 주변에 분포하는 화산암의 형성시 맨틀플룸의 영향을 받았다는 지화학식 추론과 일치한다. 따라서 이 논문에서는 동해 남서부의 열림이 일본열도의 늘이남에 의한 것이 아니라 해저면 확장과 맨틀플룸의 영향을 받은 것임을 제시한다.

주요어: 울릉분지, 지각구조, 층단위 2C, 맨틀플룸

Kim, Han-Joon, 1999, Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea, *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 2, n. 1, p. 9-26.

ABSTRACT: The Ulleung Basin (Tsushima Basin) in the southwestern East Sea (Japan Sea) is floored by a crust whose affinity is not known whether oceanic or thinned continental. This ambiguity resulted in unconstrained mechanisms of basin evolution. The present work attempts to define the nature of the crust of the Ulleung Basin and its tectonic evolution using seismic wide-angle reflection and refraction data recorded on ocean bottom seismometers (OBSs). Although the thickness of (10 km) of the crust is greater than typical oceanic crust, tau-p analysis of OBS data and forward modeling by 2-D ray tracing suggest that it is oceanic in character: (1) the crust consists of laterally consistent upper and lower layers that are typical of oceanic layers 2 and 3 in seismic velocity and gradient distribution and (2) layer 2C, the transition between layer 2 and layer 3 in oceanic crust, is manifested by a continuous velocity increase from 5.7 to 6.3 km/s over the thickness interval of about 1 km between the upper and lower layers. Therefore it is not likely that the Ulleung Basin was formed by the crustal extension of the southwestern Japan Arc where crustal structure is typically continental. Instead, the thickness of the crust and its velocity structure suggest that the Ulleung Basin was formed by seafloor spreading in a region of hotter than normal mantle surrounding a distant mantle plume, not directly above the core of the plume. It seems

조간대 지역에서의 고해상 탄성파 탐사를 위한 파원 특성 분석

홍종국* · 김기영** · 김한준*

*한국해양연구소 해양지질연구단 · **강원대학교 지구물리학과

요 약

조간대 지역의 고해상 반사법 탐사에 적합한 탄성파 파원을 밝히기 위하여, 이동식 진동기, 1.2 kg 스패너, 4.7 kg 해머, 30 kg과 100 kg 중력추 등 모두 5 종류의 파원을 워커웨이 방식으로 시험하여 파원의 특성을 구명하였다. 원시자료 및 고주파 통과필터 적용 후의 자료를 이용하여 파원에 따른 탄성파 이벤트들의 수직분해능을 분석하였으며, 고해상 탄성파 탐사에 적합한 파원을 결정하기 위하여 파원별 토 발생에너지 및 주파수 성분의 변화를 비교하였다. 분석결과에 의하면 20-30 m 정도의 천부 지층을 상세하게 구명하기 위해서는 주파수 대역이 가장 넓고 고주파 성분을 많이 발생시키는 이동식 진동기가 가장 적합한 것으로 나타난다. 반면 대상심도가 100 m 까지 증가하는 경우, 해머가 효과적인 파원으로 사용될 수 있을 것으로 분석된다.

주요어: 고해상 반사법 탐사, 탄성파 파원, 조간대, 워커웨이, 이동식 진동기

Hong, Jong Kuk, Kim, Ki Young, and Kim, Han-Joon, 1999, Analysis of source characteristics for high-resolution seismic surveys on a tidal flat. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 2, n. 2, p. 100-110.

ABSTRACT: In order to find a good seismic source for high-resolution reflection surveys on a tidal flat, characteristic features of several sources were examined through test recording by the walkaway configuration. The sources comprise portable vibrator, 1.2 kg monkey spanner, 4.7 kg sledge hammer, and weight drops with a 30 kg and a 100 kg iron ball, respectively. We analyzed raw and filtered seismic data for the resolution of individual events, then compared various seismic sources to define suitable one for the high-resolution survey in terms of energy level and frequency contents. The study reveals that the portable vibrator is the most suitable source for the detection of and imaging geologic structures less than 20-30 m deep in a tidal flat. We ascribe this to the wide frequency band and high-frequency contents of the portable vibrator. In contrast, the hammer may be an alternative where the target depth increases up to 100 m.

Key words: high-resolution reflection survey, seismic source, tidal flat, walkaway, portable vibrator

(Hong, Jong Kuk and Kim, Han-Joon, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea; Kim, Ki Young, Department of Geophysics, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chuncheon, 200-701, Korea. email: jkhong@kordi.re.kr)

1. 서 론

고해상 탄성파 탐사는 천부의 지질구조를 상세하게 밝히기 위한 탐사방법으로서 주로 건설, 토목, 지하수 조사 등에 기초자료를 제공하는 지질

공학적인 목적으로 활발하게 수행되고 있다(Hunter et al., 1984; Steeples-Miller, 1990). 고해상 탄성파 탐사시 탐사목적에 적합한 지층의 분해능, 투과심도 등을 만족시키기 위해서 탄성파 파원, 수신기, 기록 장비 등을 신중하게 선택하여야 한다. 특히

탄성과 자료 고해상도 재처리를 통한 동해해역의 제4기 단층 및 천부 가스 인지

정미숙* · 김기영** · 허식* · 김한준*

한국해양연구소* · 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과**

요 약

심부 지층구조 연구를 위해 획득된 다중채널 반사파 자료를 재처리하여 제4기 단층 및 해저면 부근 천연 가스층 탐지를 위한 고해상도 단면도를 작성하였다. 사용된 자료는 한국해양연구소에서 동해해역 퇴적분지 지각구조 연구를 목적으로 1994년부터 1997년까지 기록한 총 1900 km의 다중채널 반사파 자료 중 근거리 12채널 자료이다. 고해상도용 재처리과정은 자료복사 및 자료편집, 침진폭 회수, 공심점 분류, 초기 뮤트, 중합전 디컨볼루션, 대역필터, 중합, 고주파 통과필터, 중합후 디컨볼루션, 구조보정, 자동이득조절 등의 순서로 이루어지며, 이 중 예측 디컨볼루션, 고주파 통과필터, 짧은 창길이의 자동이득조절 적용 등이 해상도를 높이는 데 가장 중요한 처리단계이다. 해저면 하부 약 1초 정도까지의 지층을 대상으로 처리된 중합 및 구조보정 단면상에는 총 200개 이상의 제4기 단층이 인지되며, 이들 대부분은 대륙사면과 울릉분지 경계부에 밀집되어 나타나지만 분지 내에도 상당수 존재한다. 이들 단층중 상당수는 기반암과 세3기 퇴적층에 발달된 단층의 재활성화와 화산활동을 포함한 지구조 운동에 의해 형성된 것으로 추정되며 동해가 구조적으로 다소 불안정한 상태에 놓여 있을 가능성을 지시한다. 또한 3개소 이상에서 발견된 천부 가스층의 존재는 시추나 해저 케이블 및 파이프라인 등 해양구조물 설치시 반드시 경계해야 할 위험 요소가 존재하고 있음을 보여준다. 이러한 천부 가스층의 발견은 최근 관심이 고조되고 있는 가스수화물의 근원 물질이 동해에 존재한다는 긍정적인 면이 있으나, 해저면에 평행한 반사면 등 가스수화물의 전형적인 탄성과 특징은 울릉분지 서부 대륙사면 및 중앙부의 재처리 단면상에서는 발견되지 않는다.

주요어: 제4기 단층, 천부 가스층, 예측 디컨볼루션, 고주파 통과 필터, 자동이득조절

Jung, Mee-Sook, Kim, Ki Young, Huh, Sik and Kim, Han-Joon, 1999, Identification of Quaternary Faults and shallow gas pockets through high-resolution reprocessing in the East Sea, Korea, *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 2, n. 1, p. 39-44.

ABSTRACT: High-resolution images are drawn from existing seismic data which were originally obtained by Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI) during 1994-1997 for deep seismic studies on the East Sea of Korea. These images are analyzed for mapping Quaternary faults and near-bottom gas pockets. First 12 channels are selected from shot gathers for reprocessing. The processing sequence adopted for high-resolution seismic images comprises data copy, trace editing, true amplitude recovery, common-midpoint sorting, initial muting, prestack deconvolution, bandpass filtering, stacking, highpass filtering, poststack deconvolution, f-x migration, and automatic gain control (AGC). Among these processing steps, predictive deconvolution, highpass filtering, and short window AGC are the most significant in enhancement of resolution. More than 200 Quaternary faults are interpreted on the migrated sections in the shallow depths beneath the seafloor. Although numerous faults are found mostly at the western continental slope and boundaries of the Ulleung Basin, significant amount of the faults are also indicated within the basin. Many of these faults are believed to be formed with reactivation of basement, from geotectonic activities including volcanism, and often originated in Tertiary, indicating that the tectonic regime of the East Sea might be unstable. Existence of shallow gas pockets casts real hazardous warnings

울릉분지 남동부 천부가스층의 분포, 특성 및 퇴적환경

허 식 · 천종화 · 한상준 · 유해수 · 김성렬 · 김한준 · 최동립 · 이용국
한국해양연구소 해양지질연구단

요 약

동해 울릉분지 남동부 해역에는 대규모 천부가스층이 배태되어 있다. 고해상 천부 탄성파자료에 나타나는 음향이상인 음향 혼탁상, 음향 공백상, 그리고 포크마크 등으로 천부가스층을 확인할 수 있다. 이 해역에서 채취된 시추퇴적물들은 대기하에서 관열조직이 급속스럽게 형성되었는데, 이는 퇴적물내 가스함유를 지시한다. 이 시추퇴적물들은 저해수면 시기에 사면사태에 의해서 공급된 압실류와 질량류 퇴적물들이 우분 이루어, 질량류층의 최상부는 로노크로사이트 자생광물이 형성되어 있다. 이와 같이 울릉분지 남동부 해역에 특성적으로 나타나는 포크마크, 가스함유 퇴적물과 사생 광물 등은 가스수화물의 존재 가능성을 시사한다.

주요어: 울릉분지, 천부가스, 로노크로사이트, 관열조직, 가스수화물

Huh, S., Chun, J.-H., Han, S.-J., Yoo, H.-S., Kim, S.-R., Kim, H.-J., Choi, D.-L. and Lee, Y.-K., 1999, Distribution, Characteristics, and Depositional Environments of Gas-Charged Sediment in the Southeastern Ulleung Basin, the East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 35, no. 3, p. 201-212

ABSTRACT: Large-scale surface gases are distributed in the southeastern part of the Ulleung Basin, the East Sea. High-resolution seismic profiles show acoustic anomalies such as acoustic turbidity, acoustic void, and pock mark which indicate the presence of gas-charged sediments. The patterns of horizontal degassing cracks originated from free methane expansion are also the strong indicator of shallow gas-charged sediments in the 12 m piston core samples. Submarine slides and slumps during lowstand sea-level are observed in destabilizing sediments. Some samples represent the presence of concentrated rhodochrosite nodules in the top of turbidite. Pock marks, gas-charged sediments, and concentrated rhodochrosite nodules may be related to the existence of gas hydrate zone in the study area.

Key words: Ulleung Basin, Surface gas, rhodochrosite, degassing crack, gas hydrate

(Huh, S., Chun, J. H., Han, S.-J., Yoo, H.-S., Kim, S. R., Kim, H.-J., Choi, D.-L. and Lee, Y. K., *Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P-O-Box 29, Seoul 425-600, Korea*)

1. 서 론

동해 울릉분지는 연안에서부터 대륙붕, 대륙사면 그리고 분지평원으로 급격한 지형 변화를 갖는다. 육지로부터 유입되는 대규모 하천이 발달되어 있지 않지만, 대륙붕단 일부에서 소규모의 해저수로들이 형성되어 있다(한상준 외, 1995, 1996, 1997, 1998; Chough et al., 1997; 유해수 외, 1997,

1998). 동해에 발달된 내륙붕과 대륙사면은 제4기 동안의 빈번한 해수면 변동(Oba et al., 1991)에 의해서, 저해수면 시기에 일부 대륙붕은 대기중에 노출되었고 해저시층에 작용한 압력 또한 감소되었을 것이다. 동해 남부 대륙사면에서는 다수의 사면 흔적이 관찰되며(한상준 외, 1995, 1996, 1997, 1998; Chough et al., 1997), 저해수면시기에 일어난 사면에 의한 암실류의 질량류의 분지 유입

동해 울릉분지 남서해역 해양투기장의 퇴적물 특성

친중화 · 허 식 · 한상준 · 신동혁 · 정대교¹ · 홍기훈² · 김석현³

한국해양연구소 해양지질연구단, ¹강원대학교 지질학과, ²한국해양연구소 해양화학연구단

Sediment Characteristics of Waste Disposal Sites in the Southwestern Ulleung Basin, the East Sea

JONG-HWA CHUN, SIK HUH, SANG-JOON HAN, DONG-HYEOK SHIN
DAE-KYO CHEONG¹, KI-HOON HONG² AND SUK HYUN KIM³

Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea
Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

³Chemical Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea

동해 울릉분지 남서측 해양투기장해역의 퇴적환경을 밝히기 위하여 해저지형과 퇴적물 특성을 조사하였다. 울릉분지 남서측 외대륙붕에 위치한 해양투기장 정해역은 팔림세스트(palimpsest) 퇴적물과 니질퇴적물의 교호퇴적이 두껍게 나타난다. 울릉분지 남서측 대륙사면에 위치한 병해역은 대륙붕단으로부터 시질퇴적물의 간헐적인 유입을 제외하고는 반원양성 입자들의 수직적인 집적에 의해서 유농성이 큰 니질퇴적물(fluidized mud)이 해저지형을 평행하게 피복한다. 정해역과 병해역에서의 시추퇴적물에서는 저서생물의 교란에 의한 생흔구조들이 다수 관찰되며, 이에 의해서 퇴적물의 수직적인 혼합이 우세하게 일어난다. 표층퇴적물은 진류퇴적물의 재동에 의한 조립질의 팔림세스트와 세립질퇴적물의 상대적 함량, 분급도, 그리고 중량분 특성들에 의해서 네 종류의 사질퇴적물(S-1, S-2, S-3, S-4)과 두 종류의 니질퇴적물(M-1, M-2)로 구분된다. 사질퇴적물들은 대부분이 태풍 또는 폭풍으로 야기된 고에너지 환경하에서 잔류퇴적물로부터 재동된 것으로 해석된다. 이에 반해 니질퇴적물은 낙동강에서 유입된 원생 퇴적물, 대륙붕에서 재동된 세립질퇴적물, 그리고 동한난류(East Sea Warm Current)에 의해서 탄김으로 공급되는 입사성 부유물질 풍으로 다양한 기원을 가진다.

We have studied both submarine morphology and sediment characteristics of waste disposal sites in the southwestern Ulleung Basin, East Sea, as part of a marine environmental preservation program. The Jung waste disposal site in the outer shelf is characterized by the thick accumulation of coarse-grained palimpsest sediments and fine-grained sediments from various sources. The Byung waste disposal site in the continental slope is generally characterized by hemipelagic muds with intermittent sandy sediments originated from the outer shelf and upper slope. The hemipelagic sediments, draping the seafloor, consist of fluidized muds. The core sediments show numerous bioturbation structures which cause vertical mixing of sediments. The surface sediments can be divided into four sand types (S-1, S-2, S-3, and S-4) and two mud types (M-1 and M-2) based on relative contents of reworked coarse-grained palimpsest sediments and fine-grained sediments, sorting and heavy mineral contents. The sands are probably relict sediments reworked during high-energy conditions such as typhoon or storm. On the other hand, the muds were originated from various sources such as recent input from the Nakdong River, reworked fine-grained sediment from the shelf or suspended particulate matter from the East Sea Warm Current.

서론

울릉분지 남측은 평탄한 대륙붕에서 급경사의 대륙사면으로 전이되는 환경으로 외대륙붕은 다수의 해저수로들이 대륙붕단까지 연장되어 있다(한국해양연구소, 1998b). 동해 해양투기장인 정해역과 병해역은 각각 외대륙붕과 대륙사면에 위치하며 폐기물 투기량은 해마다 증가하고 있다(한국해양연구소, 1997, 1998a). 국내에서는 해양투기물의 배출에 대한 해양환경영향에

관한 논의가 1990년대부터 시작되었으며(백 등, 1998; 신과 이, 1998), 최근에 종합적이고 체계적인 연구가 이루어졌다(한국해양연구소, 1997, 1998a). 1996년 10월부터 1997년 9월까지의 동계자료에 의하면 동해 정해역에는 약 7,200 톤의 입자성 해양투기물인 각종 오니들이 투기되었다(한국해양연구소, 1997). 그리고 동해 병해역에서는 각종 오니 약 1,600,000 톤과 수지준설토가 약 14,500 톤이나 투기되었다(한국해양연구소, 1997). 정해역에는 주로 분뇨가 투기되는 반면에 병해역은 각종 오니와 수지