TSPE15050-004-4

자화특성을 이용한 남극주변부 해양판의 확장

On the use of magnetic properties for understanding the spreading of oceanic lithosphere, Antarctic margin

KOPRI
극지연구소

충남대학교

제 출 문

한국해양연구원 부설 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 열개구조 진화 연구: Adare Trough, 남극 중앙해령 인근의 지구조 및 화산활동 성인규명 (홍종국)”의 위탁연구과제 “자화특성을 이용한 남극주변부 해양판의 확장”의 2015년도 (최종) 보고서로 제출합니다.

2015. 12.

총괄연구책임자 : 유 용 재

위탁연구기관명 : 충남대학교

위탁연구책임자 : 유 용 재

보고서 초록

위탁연구과제명	자화특성을 이용한 남극주변부 해양판의 확장				
위탁연구책임자	유 용 재	해당단계 참여연구원수	9	해당단계 연구비	45,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	40

※ RC15 시추코어 사용 해양판의 진화 정량적 규명에 기여

- RC15-GC44 (남위 70.8325도 동경 174.7324도 수심 2392미터에서 채취한 596 cm의 시추코어)
- RC15-GC46 (남위 70.6019도 동경 172.8930도 수심 2434미터에서 채취한 666 cm의 시추코어)
- 시편대자율안정도측정 및 자화점성지표도시
- 단계별 소자 수행, 벡터 성분분석법 적용 및 자연잔류자화 복원
- 자성광물 관찰 및 미세탐침화학성분 분석을 통한 잔류자화 유지 광물 판독
- 자료의 추가 재측정 검증 이후 열개구조의 발달 과정 정립에 기여 예상
- 해양지각의 화성활동 및 변질 연구의 가능성 타진

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극, 자화특성, 퇴적물, 자성광물, 잔류자화, 해양지각
	영 어	Antaarctica, Magnetic Properties, Sediments, Magnetic Minerals, Remanent Magnetization, Oceanic Crust

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

자화특성을 이용한 남극주변부 해양판의 확장

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

약 2억 5천만년 전에 형성된 Pangea는 가장 최근에 지구상에 존재했던 초대륙(supercontinent)이다. 약 2억 3천만년부터 시작된 Pangea의 분리 이후 남극 대륙이 겪은 지체구조학적 위도 및 경도 변화에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 금번 연구를 통해 초대륙 팡게아(Pangea)의 남반구에 위치하던 곤드와나(Gondwanaland) 주변부의 진화과정에서 생성된 남극 대륙 주변 해양판의 열개구조(Fissure) 진화사 탐구 필요성을 제시하려 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

시추코어로부터 3 cm 간격으로 퇴적물을 추출하여 정육면체형 1인치 표준 시편 제작한다. 표준 시편에 대하여 자연잔류자화(自然殘留磁化, Natural remanent magnetization)를 자력계(磁力計, Magnetometer)를 이용하여 측정한다. 해양퇴적물에 기록되어있는 점성잔류자화(黏性殘留磁化, Viscous remanent magnetization) 혹은 2차잔류자화(二次殘留磁化, Secondary remanent magnetization)를 제거하기 위해, 국제적으로 통용되는 최소 12단계 이상의 소자구간에서 단계별 교류소자 실험을 수행한다. 각각의 단계별 교류소자 후에는 해당 소자구간에서 소자되고 남은 잔류자화를 연속적으로 측정한다. 또한 비자기이력자화(非磁氣履歷磁化, Anhysteretic remanent magnetization)의 이방성을 정량적으로 규명하여 대자율이방성과 비교하고, 비자기이력자화이방성이 대자율이방성과 통계적으로 일치하는지 확인한다. 자기이력자화(磁氣履歷磁化, Magnetic hysteresis measurements)를 측정하고, 이를 바탕으로 자성 광물의 종류 및 자성 광물의 변질 상태를 규명한다. 해양퇴적물을 구성하고 있는 광물의 성분을 정량적으로 규명하기 위해 주요 시료를 연마편과 박편으로 제작하여 광석 현미경과 편광현미경을 통해 광물을 관찰함으로써 광물의 종류, 입자크기, 조직 및 변질 상태를 규명한다. 또한 전자현미경 관찰을 통해 미세한 광물의 확인, 주변 광물과의 공생관계 및 변질상태를 규명한다. 좀 더 정량적인 성분 분석을 위해서는 전자탐침미세분석기 분석을 시행한다.

Ⅳ. 연구개발결과

RC15-GC44는 남위 70.8325도 동경 174.7324도의 수심 2392미터에서 채취한 596 cm의 시추코어이다. RC15-GC46는 남위 70.6019도 동경 172.8930도의 수심 2434미터에서 채취한 666 cm의 시추코어이다. 시추코어로부터 퇴적물을 추출하여 제작한 표준 시편을 분석한 결과 두 종류의 자성 광물을 판독하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

지구의 고위도에 위치하는 지질학적 시료를 대상으로 연구를 수행하는 경우, 시료가 상대적으로 큰 복각을 보이므로 일반적인 자화특성 규명 방법을 사용하기 매우 까다롭다. 실제 복각이 큰 지질학적 시료의 경우, 자료의 해상도를 증진시키기 위해 시료와 자기장의 방향을 3차원적으로 조절하며 실험을 수행해야 한다. 현재 극지과학 분야에서 Tertiary 이후 발달한 동남극(East Antarctica)과 서남극(West Antarctica)지괴의 개별적인 진화사 정립 문제가 과학계의 큰 미제로 남아있다. 특히 해양암권이 생성되는 삼중점(triple junction)의 진화 과정이 남극대륙 발달에 미친 영향을 분석하는 연구가 과학계의 관심사로 대두되고 있다. 이에 금번 연구가 남극판 주변부에 발달한 중앙해령의 지구조적 진화과정 규명에 일조하리라 기대한다.

KOPRI
극지연구소

Summary

Ⅰ. Title

On the use of magnetic properties for understanding
the spreading of oceanic lithosphere, Antarctic margin

Ⅱ. Research Purpose

Assembly and break-up of continents provide first-order constraint on the tectonic evolution of Earth. In particular, Antarctica provides a unique opportunity on the evolution of tectonic Earth as it recorded the least amount of latitudinal and longitudinal motions since the Pangea break-up. It is therefore necessary to highlight magnetic properties of major rock-forming minerals as an important tectonic indicator on the development and decay of mid-ocean ridge system.

KOPRI 극지연구소

Ⅲ. Experiments

One-inch cube specimens were retrieved from the sedimentary cores. All the samples were alternating-field (AF) demagnetized in 12 steps to 90 mT using a Molspin AF demagnetizer. Hysteresis loops were measured from twenty-four chips of mid-ocean ridge basalts (MORBs) on an alternating gradient force magnetometer. Values of saturation magnetization (M_s), saturation remanence (M_r), and coercive force (B_c) were determined from hysteresis loops. Hysteresis parameters were determined after appropriate paramagnetic slope-correction. Optimum demagnetization step to calculate a mean remanence direction was defined as that producing the minimum dispersion in direction. Sample storage, demagnetization, and spinner magnetometer measurements were performed in a magnetically shielded space with a nominal ambient field of < 200 nT.

Ⅳ. Results

We used two sedimentary cores in this study. The first core (RC15-GC44) is 596 cm long, retrieved from 70.8325S and 174.7324E at water depth of 2392 m. The other core (RC15-GC46) core is 666 cm long, retrieved from 70.6019S and 172.8930E at water depth of 2434 m. A suite of magnetic testing was carried out including demagnetization experiments, magnetic hysteresis observation, thermomagnetic analysis, scanning electron microscopy, and electron probe micro analysis. Remanent magnetization was carried by two different magnetic phases.

Ⅴ. Application

Systematic rock magnetic investigation on crustal material from high/intermediate latitudes is nearly unprecedented. Hence, it is highly optimistic that the present study provides valuable information on the evolution of lithosphere at high/intermediate latitudes. In particular, it is worthy of note that sediments near the Antarctic margin contain titanomagnetite crystals of varying size and composition as remanent magnetization carriers.

KOPRI
극지연구소

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction 9

Chapter 2. Research Progress 13

Chapter 3. Experiments and Results 14

Chapter 4. Achievements 35

Chapter 5. Application 37

Chapter 6. References 38

KOPRI 극지연구소

목　　차

제 1 장 서론 9

제 2 장 국내외 기술개발 현황 13

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 14

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 35

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 37

제 6 장 참고문헌 38

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

1-1. 남극주변부 해양판 연구의 필요성

지구가 가지고 있는 고유한 자기장인 지구자기장(地球磁氣場, Geomagnetic field)은 약 34-35억 년 전에 다이나모(dynamo)의 형태로 생성된 이후 (Tarduno et al., 2010), 계속해서 그 강도와 방향이 시간과 공간에 따라 변화해왔다. 지구자기장은 대략 90%의 쌍극자기장(雙極磁氣場, Dipole magnetic field) 성분과 상대적으로 그 크기가 10% 이하인 비쌍극자기장(非雙極磁氣場, Non-dipole magnetic field) 성분으로 구성되어 있다 (McElhinny and Senanayake, 1982). 비쌍극자기장의 특징에 대하여 심도 있게 규명하기 위해서는 고위도 지역에서 채취한 지질학적 시료를 대상으로 지구자기장의 시간에 따른 편각, 복각, 자기강도의 변화에 대한 연구가 필요하다.

태양계 내에 존재하는 다른 행성들과 달리 지구의 경우, 열의 발산 과정에서 발현된 맨틀의 대류로 인해 활발한 지판(地板, lithosphere)의 이동, 탄생, 소멸이 반복되고 있다. 암권에 해당하는 지판은 지구 생성 이래로 지속적으로 뭉치고 흩어지는 현상을 반복하였다. 이런 판구조론(板構造論, plate tectonics)적 관점에서, 가장 최근에 존재하였던 대륙 뭉침은 약 2억 5천만 년 전의 초대륙 Pangea이다. Pangea는 대략 약 2억 3천만 년 전부터 분리가 시작되어 현재의 지판 형태에 이르렀다 (Sager and Pringle, 1988; DeMets and Gordon, 1990; Schneider and Kent, 1990; Van der Voo, 1990; Besse and Courtillot, 1991, 2002; Muller et al., 1993; Prevot et al., 2000; Tarduno and Smirnov, 2001; Van der Voo and Torsvik, 2001; Kreemer et al., 2003; DeMets et al., 2010). Pangea의 분리가 시작되며 북반구에 해당하는 로라시아(Laurasia)는 유럽/아시아판(Eurasia plate)과 북아메리카판 (North America plate)판으로 진화하였으며, 남반구에 해당하는 곤드와나(Gondwanaland)는 남극 대륙판 (南極板,Antarctica plate), 남아메리카판 (South America plate), 아프리카판 (Africa plate), 인도판 (India plate), 오스트레일리아판 (Australia plate)으로 진화 하였다. 곤드와나의 지판가운데 중심부에 위치하며 지난 2억 5천만 년 동안 Pangea의 분리 과정에서 위도 및 경도상의 이동이 가장 적었던 남극대륙은 지체구조학적 중요성을 지니고 있음에도 불구하고, 고위도 연구의 난점과 혹한의 기후 등으로 연구가 더디게 진행되어 왔다.

지구에는 최소 지난 35억 년 동안 심부 기원(internal origin)의 지구자기장이 존재해 왔음을 현재까지 연구를 통해 얻어진 자료들을 토대로 알 수 있다(Tarduno et al., 2010). 지구의 최심부인 외핵과 내핵은 아직도 상당한 열을 발산하며, 이들의 상호 작용에 의해 심부 기원의 지구자기장(地球磁氣場, Earth Magnetic Field)이 생성된다. 생성된 지구자기장은 화성암(火成巖, Igneous Rocks)이 고화되거나 퇴적암(堆積巖, Sedimentary Rocks)이 고결되는 과정에서 자성 광물(磁性鑛物, Magnetic Minerals)에 기록된다. 이들 자성광물을 함유한 지질학적 시료와 해당 지판의 분석은 지체구조학적 진화 모델 수립에 결정적 자료를 제공한다.

지구 암권에 기록된 과거 지구자기장의 정보를 정확히 이해하기 위해서는 vector에 해당하는 지구자기장의 방향과 크기가 모두 정량적으로 분석되어야 한다. 따라서 vector로 정의되는 지구자기장을 정량적으로 분석하기 위해서는 지자기강도 (地磁氣强度, Magnetic Field Intensity), 지자기편각 (地磁氣偏角, Magnetic Declination), 지자기복각 (地磁氣伏角, Magnetic Inclination)이 모두 제시되어야 한다. 특히 고위도에서 생성되어 지구자기장을 기록한 암석은 매우 큰 복각을 내재하므로 일반적인 방법을 적용한 지자기 변화 연구가 상대적으로 어렵다. 왜냐하면 복각과 고위도(高緯度, Paleo-latitude)는 다음의 상관관계를 보이는데 tan (복각) = 2 tan (고위도), tangent 함수의 특성상 60도 이상의 값에서는 편차가 상대적으로 적게 표현되어 분석의 오차가 매우 커질 우려가 있다. 따라서 복각이 큰 고위도의 암석의 경우 시료(試料, Sample)와 자기장의 방향을 3차원적으로 조절해야만, 과거 지구자기장 변화 복원의 해상도가 증가한다.

앞서 언급했듯이 지난 2억 5천만 년 동안 남극 대륙판의 위도 및 경도 변화에 관한 정량적인 연구결과가 국제적으로 공인된 경우는 매우 드물다(Mankinen and Cox, 1988; Baraldo et al., 2003; Tauxe et al., 2004; Lawrence et al., 2009; Poblete et al., 2011). 남극의 지체구조학적 진화를 명확히 규명하려면 판의 이동을 정량적으로 제시할 수 있는 고지자기학(古地磁氣學, Paleomagnetism) 연구가 수반되어야 한다. 무엇보다 남극 대륙판은 곤드와나가 해체되는 동안 판의 절대적인 이동이 상대적으로 매우 적었던 지판으로 여겨진다. 왜 이러한 판의 정체 현상이 유독 남극 대륙판에 집중 되었는지 아직까지 해답의 실마리조차 제시되지 못한 상태이다.

KOPRI 극지연구소

1970년대부터 시작된 일부 선진국에서의 남극에 대한 지자기학적 연구는 위에 요약된 세 가지 한계를 극복하기 위해 나름 노력을 기울이고 있다. 국력과 경제력의 신장에 힘입어 대한민국도 남극의 세종기지/장보고기지와 북극의 다산기지를 운영하며 극지연구에 적극적으로 동참하고 있다. 아직 비용 문제가 예산의 확보라는 측면에서 쉬운 일만은 아니지만, 매년 탐사대를 성공적으로 운영할 정도로 접근의 용이성은 많이 향상되었다. 게다가 남극 대륙판 내부에 장보고기지가 건설되어 대한민국의 과학 위상을 과시하고 있다. 무엇보다 태양 빛의 그림자를 이용하여 진북을 찾아내는 방법인 태양컴퍼스 사용으로 방위 자동 탐지 기능이 향상되었고, 전기/전자 기기의 발달로 혹한의 상황에서도 탐사가 가능해 졌다. 다만 아직도 미해결 과제인 고위도에서 형성된 암석의 자화를 현 기술을 바탕으로 효과적으로 해석이 가능한지에 관한 점은 꾸준한 연구가 필요한 영역이다.

1-2. 자화 특성 연구의 필요성

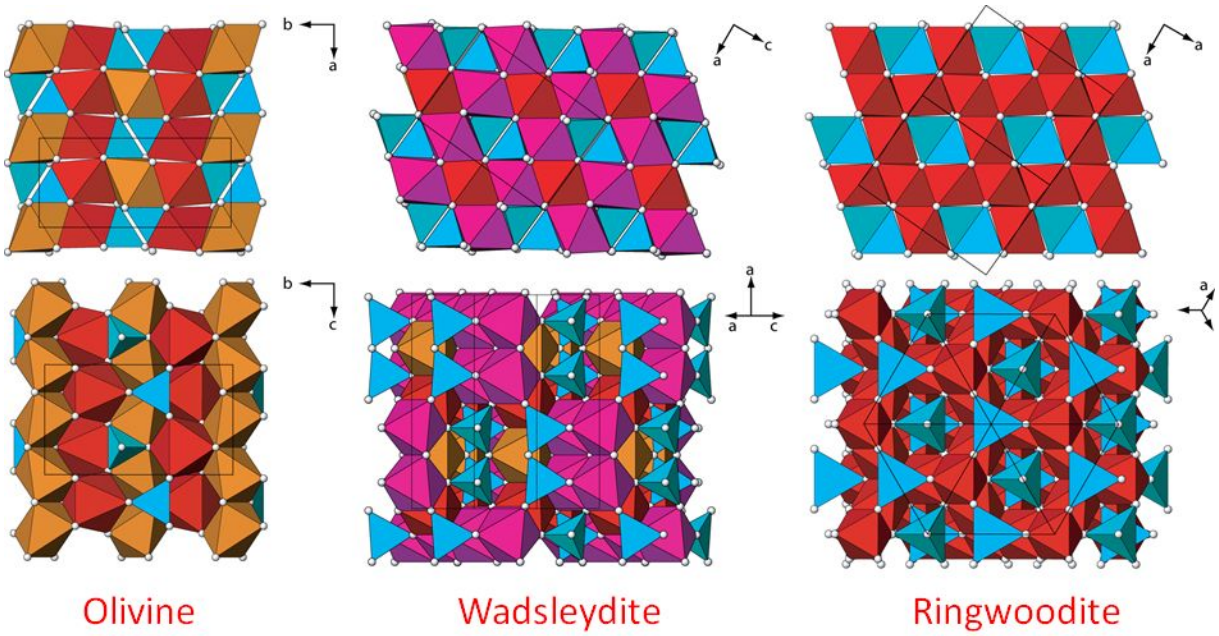


그림 1. Spinel의 구조

KOPRI 극지연구소

Spinel의 자화특성 규명을 통한 행성 진화 연구는 최근 지구 행성과학분야에서 각광받는 첨단 연구주제이다. Spinel의 기본 구조는 32개의 산소와 24개의 양이온(Cation)을 포함한다(그림 1). 이 가운데 크기가 상대적으로 큰 양이온들은 팔면체 형태인 octahedral 배열을 보이고, 크기가 상대적으로 작은 양이온들은 사면체 형태인 tetrahedral 배열을 보인다. 이렇게 각기 다른 양이온의 배열 조합이 spinel의 다양한 조합으로 존재한다(그림 2). 이로인해 화학적으로는 유사하지만 물리적으로 결정구조가 상이한 spinel 광물이 지질학적 시료에 분포하게 된다. 예를 들어 화성암의 기원이 되는 마그마의 성분이나 광물 조성과 같은 지제구조학적 변화는 매우 다양한 spinel 조합의 생성을 유발한다. 또한 압력 조건을 결정하는 암석 생성의 깊이와 응력의 분포와 같은 지구물리학적 요인은 spinel 조합의 이차적인 변질을 좌우한다. 따라서 spinel의 물리/화학적인 특성 연구는 지체구조학적 진화 규명에 주요 정량적 지시자로 활용 가능하다.

Spinel의 자화특성을 규명하는 것은 spinel의 물리/화학적인 특성 연구에 있어 가장 기본이 되는 연구이다. 지구에서 뿐만 아니라 지구 외부 기원의 spinel을 대상으로 한 자화특성 연구는 형성 이후의 태양계 내 행성 (planet) 및 위성 (satellite), 그리고 태양계 내에 널리 분포하는 소행성 (aesteroid)의 기원 및 진화 연구의 실마리를 제공하는 중요한 역할을 한다. 실례로 1970년대 미항공우주국은 Apollo 탐사에서 얻어진 시료에 대한 정밀 암석/광물학적 분석

을 실시하기 이전에 자화특성 연구를 선행하였다 (e.g., Fuller, 1974). 이는 자화특성 연구가 비교적 신속/간단하며 고해상도의 연구 결과를 양산하고, 더불어 물리/화학적인 특성을 동시에 결정한다는 학문 자체의 장점 때문이다. 이러한 근본적인 학문적 유리함은 거의 모든 우주탐사를 위해 사용되는 인공위성에 기초적인 자화특성 연구 장비가 우선적으로 장착되도록 하는 기준으로 정착되게 된다. Spinel의 자화특성 및 광물판독은 spinel을 내재한 지질학적 시료에 대한 연구의 초석을 다지는 가장 기본적인 연구로, 암권의 물리/화학적인 진화 경로를 정량적으로 해석하는데 큰 도움이 된다. 따라서 Pangea 분리 이후 남극대륙을 포함하는 주변 암권의 열적 및 시/공간적 발달 과정과 지질/지구물리학적 진화에 관한 정보를 정량적으로 제시하기 위해서 spinel에 대한 자화 특성 연구가 기본이 된다.

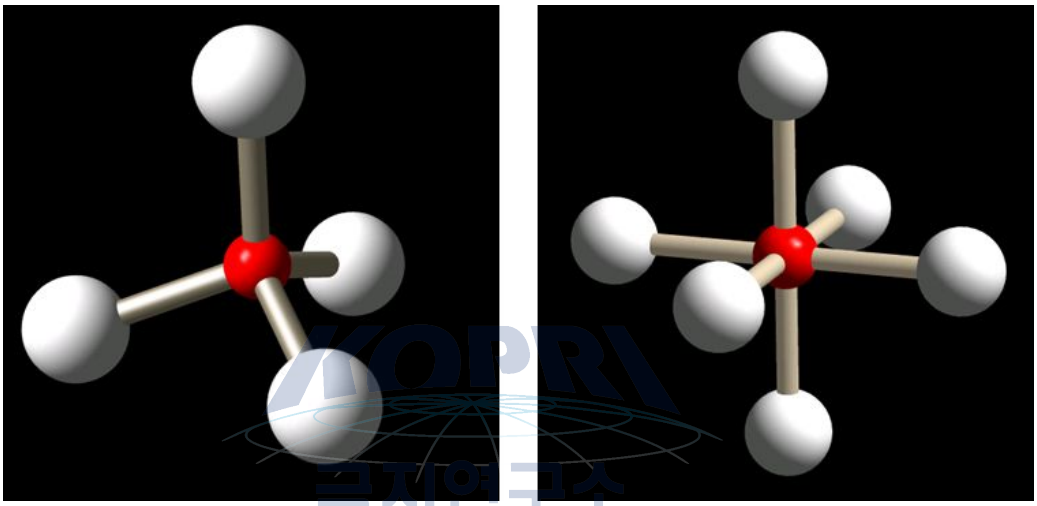


그림 2. Silica Tetrahedron(좌)과 Silica Octahedron(우) 구조. 흰색: 산소; 적색: 규소.

모두가 인정하는 중요한 연구의 방법임에도 불구하고, 남극대륙의 spinel에 대한 자화특성 연구는 예상외로 희귀하다. 실제 고위도 지역에서 spinel을 대상으로 이루어진 자화특성 연구 자체가 매우 드문 현실이다. 이는 고위도 지역에 분포하는 지질학적 시료 채취 지역이 오지에 해당되거나 시료 채취 자체가 불가능한 보호구역에 해당되기 때문이다. 또한 고위도에서는 정향 시료의 획득이 나침반의 오작동으로 인해 어렵다는 단점이 있다. 실례로 남위 60도 이상의 고위도에서 수행된 고지자기 (paleomagnetism) 연구는 단 5회 뿐이며, 그나마도 제한된 분출용암만을 대상으로 수행되었다 (Mankinen and Cox, 1988; Baraldo et al., 2003; Tauxe et al., 2004; Lawrence et al., 2009; Poblete et al., 2011). 그러나 이들 연구는 해당 화산암류의 지자기 방향 변화 해석에만 중점을 두었고, spinel의 형성 및 성인에 관한 자화특성 연구는 배제하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

과거에는 암석에 함유된 spinel의 평균적인 자화 기여도가 측정되었지만, 최근 분석 기술 및 장비의 발달과 통계적인 해석 방법의 진화로 단일 Spinel 광물 연구가 시도되고 있다. 위와 같은 발전으로 최근 연구에서는 개개의 결정 혹은 이와 비견될 정도로 매우 작은 미시적 규모에서 spinel 분포 연구가 시도되고 있다. 이런 일련의 연구를 통해 지구형 화성기원 (terrestrial igneous origin) Fe-Ti-spinel (Dunlop and Prevot, 1982), 지구형 화성기원 Mg-spinel (O'Neill et al., 1992), 지구형 퇴적기원 (terrestrial sedimentary origin) Mn-spinel (Hounslow, 1996), 지구형 화성기원 Cr-spinel (Yu et al., 2001), 지구형 화성기원 Fe-spinel (Yu et al., 2002), 지구형 변성기원 (terrestrial metamorphic origin) Fe-spinel (Titus et al., 2002), 화성운석내재 (Martian meteorite) Cr-Fe-Ti spinel (Yu and Gee, 2005), 미분화운석내재 (undifferentiated chondrite) Fe-Ni spinel (Yu et al., 2009)등이 판명되었다.

지구의 최상부에 해당하는 암권에 존재하는 화성기원(igneous origin) Fe-Ti-spinel은 대부분 심성암(plutonic rocks)과 일부 화산암(volcanic rocks)에 존재하며, spinel 결정의 직경이 거의 100 μm 이상으로 정형의 팔면체 형태를 보인다. 지구형 화성기원 Fe-Ti-spinel이 존재하는 지역은 대부분 대륙 내부로 fracture가 적은, 지체구조학적으로 안전한고 지구물리학적 탐사가 용이한 지역에서 흔히 관찰된다. 반면 지구형 화성기원 Cr-spinel은 섭입대의 화산암에서만 관찰되고 spinel 결정의 직경이 10 μm 이하이며 심부 기원의 magma에서 기인된다. 화성운석내재 (Martian meteorite) spinel은 지구형 spinel과 달리 Cr, Fe, Ti가 모두 섞여 있다. 최근 특정 spinel의 존재를 지구물리학적 측정 자료인 자력 이상(magnetic anomalies)과 대비시키려는 시도가 선진국에서 시도되고 있으나, 아직 명확한 상관관계가 공인된 자료의 형태로 제시되지 못하고 있다.

일부 선진국의 연구 수행능력에 비해 현재 국내연구 기관의 기술개발 현황은 매우 미진한 상태이다. 최근에 개발된 국제공인 분석 및 해석 방법을 적용한 논문이 전무하다. 결과적으로 국내에서 주도적으로 수행된 연구결과는 일부만이 국제적인 기여도가 상대적으로 낮은 국제학술지나 국내등재지 정도에 이따금 보고될 뿐이다. 국제공인 수준이라 여겨지는 SCI 논문 실적으로 비교한다면 국내 연구 기관의 연구 수준은 위에 언급한 세계 최고 선진국 연구기관 대비 5% 수준 혹은 그 이하이다. Spinel의 자화특성 규명 연구를 독자적으로 수행할 장비를 완벽히 갖춘 선진국의 실험실 보유기관은 미국의 Scripps Institution of Oceanography, Massachusetts Institute of Technology, University of Minnesota, 프랑스의 Institut de Physique du Globe de Paris, 중국 Chinese Academy of Science의 해양지질/지구물리 연구소 (Center of Marine Geology and Geophysics), 캐나다의 University of Toronto, 일본의 Kochi Core Center의 7곳이다. 이들 7개 연구 기관은 5종 이상의 자화특성 규명 실험 기기를 보유하여 외부 실험실의 도움 없이 독자적인 연구를 완수할 능력을 보유한다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발목표

연구개발의 목표를 도식화하면 아래와 같다.

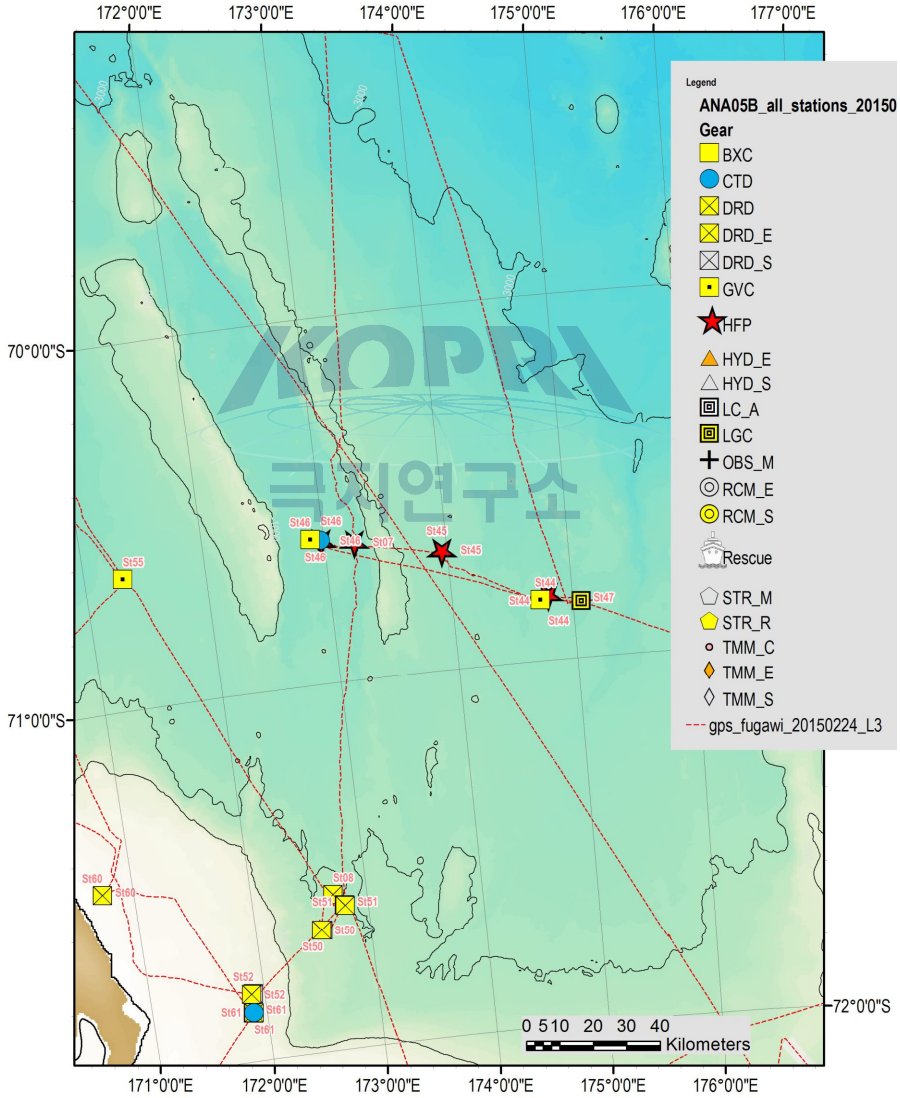
목표	실험	내용
해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적	Specimen separation	시추코어로부터 3 cm 간격으로 퇴적물을 추출하여 정육면체형 1인치 표준 시편 제작
	Mass determination	시편무게보정을 위한 무게 측정
	Magnetic susceptibility measurements	표준 시편에 대한 대자율(Magnetic susceptibility) 측정
해양퇴적물의 잔류자화를 기록하는 광물 판독	Alternating-field demagnetization	Alternating-field demagnetization을 사용한 시료의 자화안정도 측정
	Viscosity index	각 방향별 Natural remanent magnetization(NRM)을 비교하여 점성도 측정
	Thermal treatment	시료의 자화안정도 측정
	Mineral identification using microscopy	현미경관찰을 통한 광물 판독

KOPRI 극지연구소

3-2. 연구수행 실험 요약

○ Locations of sample core

RC15-GC44는 남위 70.8325도 동경 174.7324도의 수심 2392미터에서 채취한 596 cm의 시추코어이다. RC15-GC46는 남위 70.6019도 동경 172.8930도의 수심 2434미터에서 채취한 666 cm의 시추코어이다.



○ Alternating-field Demagnetization of Natural Remanent Magnetization

해양퇴적물 시추코어에서 퇴적물을 추출하여 표준 시편의 형태인 1인치 퇴적물큐브시편을 제작한다. 각 시편들의 자연잔류자화를 자력계를 이용하여 측정한다. 암석에 기록된 점성잔류자화(viscous remanent magnetization) 혹은 2차잔류자화(secondary remanent magnetization)를 제거하기 위하여 모든 시편에 대하여 단계별 교류소자 실험(stepwise alternating-field demagnetization)을 교류소자기를 이용하여 수행한 후, 각 단계별 잔류자화를 측정한다. 또한 비자기이력자화의 이방성을 정량적으로 규명하여 비자기이력자화(anhysteretic remanent magnetization)의 이방성이 대자율이방성(anisotropy of magnetic susceptibility)과 유사한 결과를 나타내는 지를 확인한다. 만약, 실험 결과가 일치하지 않으면, 비자기이력자화의 이방성과 대자율이방성 실험에서 자기장에 반응한 광물의 분포가 상이함을 감지한다.

○ Magnetic Hysteresis Analysis

교류소자와 비자기이력자화 실험을 완료한 후, 전자석 및 자력계를 이용하여 상온에서 단계별 여러 강도의 자기장 내에서 등온잔류자화 획득 실험(acquisition of saturation isothermal remanent magnetization)을 수행하여, 자성광물의 종류 등의 특성을 규명한다. 진동시료자력계를 이용하여 대표 시료들의 자기이력특성(magnetic hysteresis)을 측정하여, 잔류자화를 기록하는 자성 광물의 종류(mineral identification), 입자크기(granulometry), 자기 안정성(magnetic stability) 등의 특성을 규명한다.

KOPRI 극지연구소

○ Mineral Identification

이전 단계에서 사용했던 모든 시료를 수집하여 이들을 대상으로 연마편(thin sections)을 제작한 후, 광석 현미경을 이용하여 자성 광물을 관찰함으로써 자성 광물의 종류, 입자크기 및 변질 상태를 규명한다. 또한, 미세한 자성 광물의 확인, 주변 광물과의 공생관계 및 변질상태 규명을 위하여 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy) 관찰도 병행할 것이다. 좀 더 정량적인 성분 분석을 위해 전자탐침미세분석기(Electron Probe Micro Analyzer) 분석도 병행할 것이다.

○ Thermal Demagnetization of Natural Remanent Magnetization

대표적인 암석시편들의 자연잔류자화를 자력계(magnetometer)를 이용하여 측정한다. 암석에 기록된 점성잔류자화 혹은 2차잔류자화를 제거하기 위하여 모든 시편에 대하여 단계별 열소자 실험(stepwise thermal demagnetization)을 열소자기를 이용하여 수행한 후, 각 단계별 잔류자화를 측정한다. 단계별 열소자는 국제적으로 통용되는 최소 12단계 이상의 온도 구간에서 수행한다.

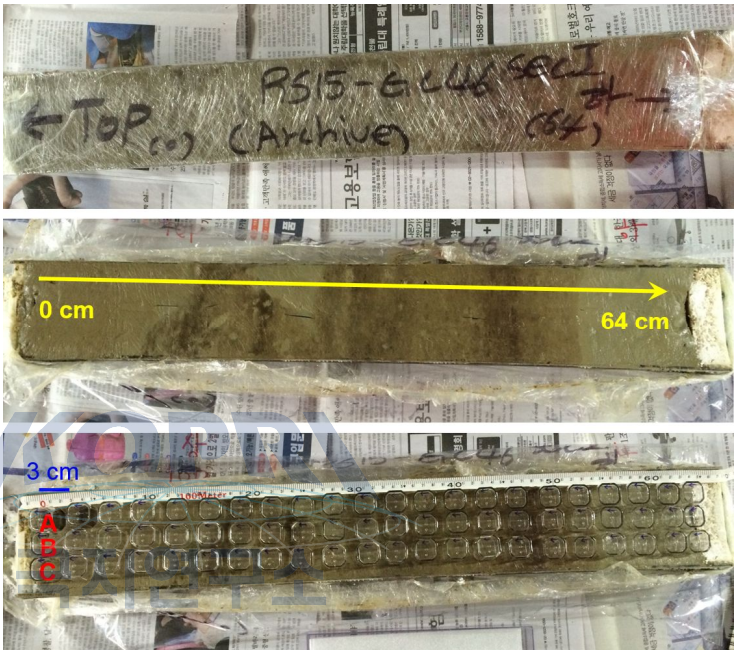
○ Thermomagnetic Curves

다양한 암상을 구성하는 상이한 광물 조성으로 인해 발생할 수 있는 암석의 석리(rock fabric)를 판별하기 위해 대자율이방성을 측정한다 (Gattaccecca et al., 2003). 대자율이방성 측정은 암석 내에 존재하는 자화를 왜곡시키거나 광물의 변질을 유발할 우려가 전혀 없기에, 전 시료를 대상으로 수행한다. 이전 실험에 사용되지 않은 새로운 시료를 고온 대자율 측정기를 이용하여 잔류자화를 기록하는 자성 광물의 자기상실온도(큐리온도, Curie point)를 측정한다. 이를 토대로 자성 광물의 종류 및 온도 변화에 따른 자성 광물의 변질 상태를 규명한다.

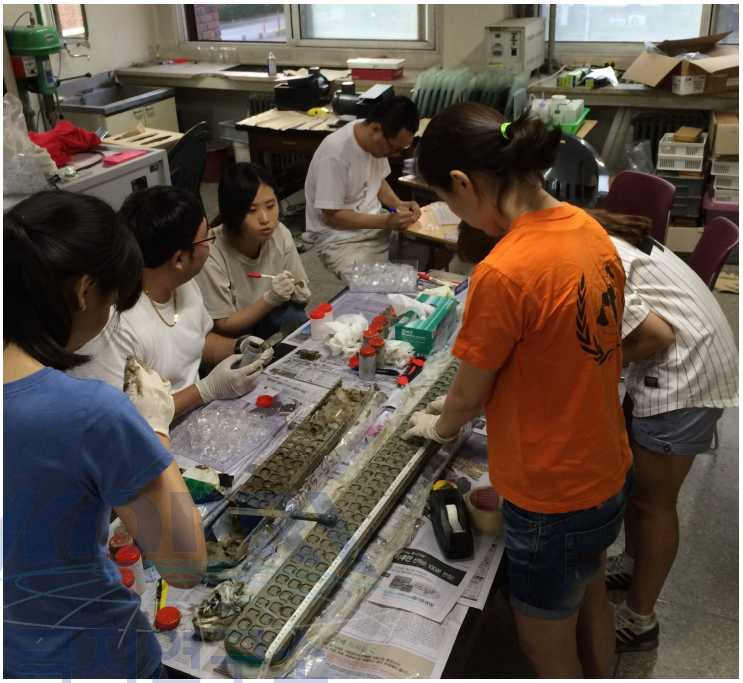
KOPRI
극지연구소

3-3. 연구결과

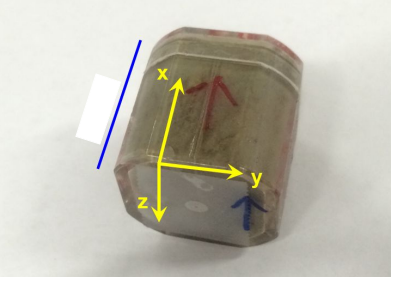
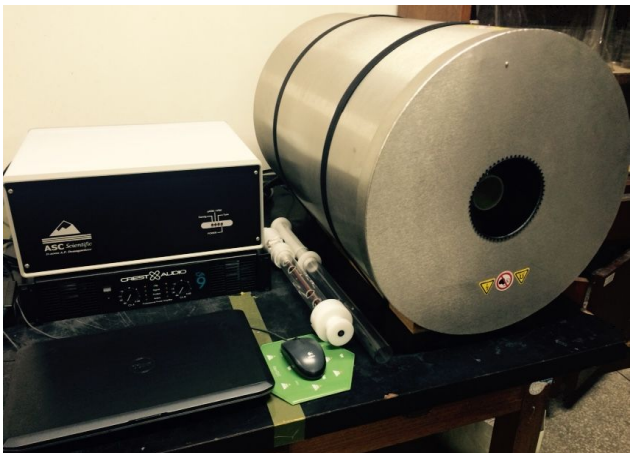
○ 해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적

연구내용	연 구 결 과
Specimen separation	 시추코어로부터 퇴적물을 분리하여 정육면체형 표준시편 제작 표준 시편 규격: 2.54 cm × 2.54 cm × 2.54 cm

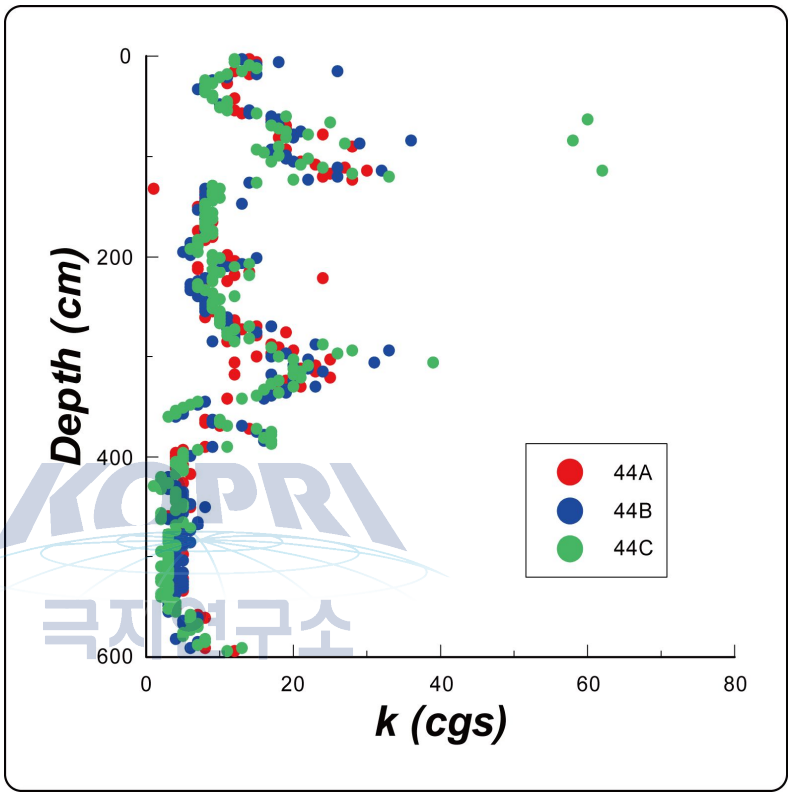
○ 해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적

연구내용	연 구 결 과
Specimen separation	 시추코어로부터 퇴적물을 분리하여 정육면체형 표준시편 제작 표준 시편 규격: 2.54 cm × 2.54 cm × 2.54 cm

○ 해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적

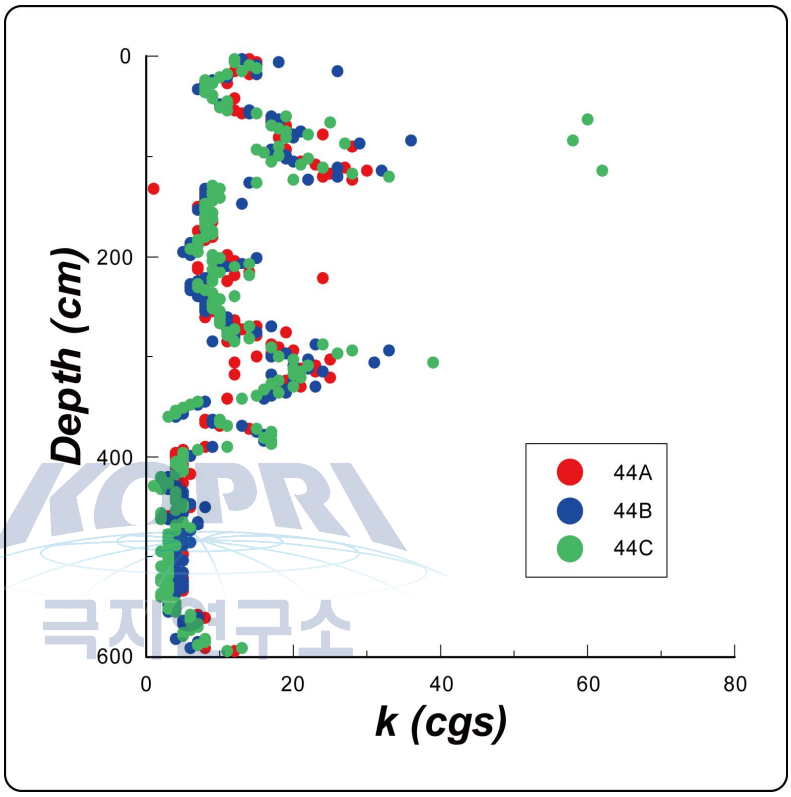
연구내용	연 구 결 과
Mass determination & Images of instruments used in the present study	 Sediment core specimen (2.54 cm × 2.54 cm × 2.54 cm) Spinner magnetometer  Alternating-field demagnetizer

○ 해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물의 깊이에 따른 magnetic susceptibility 변화 측정	RS15-GC44  해저퇴적물 코어 S15-GC44의 깊이에 따른 대자율 변화 측정 k : Magnetic susceptibility

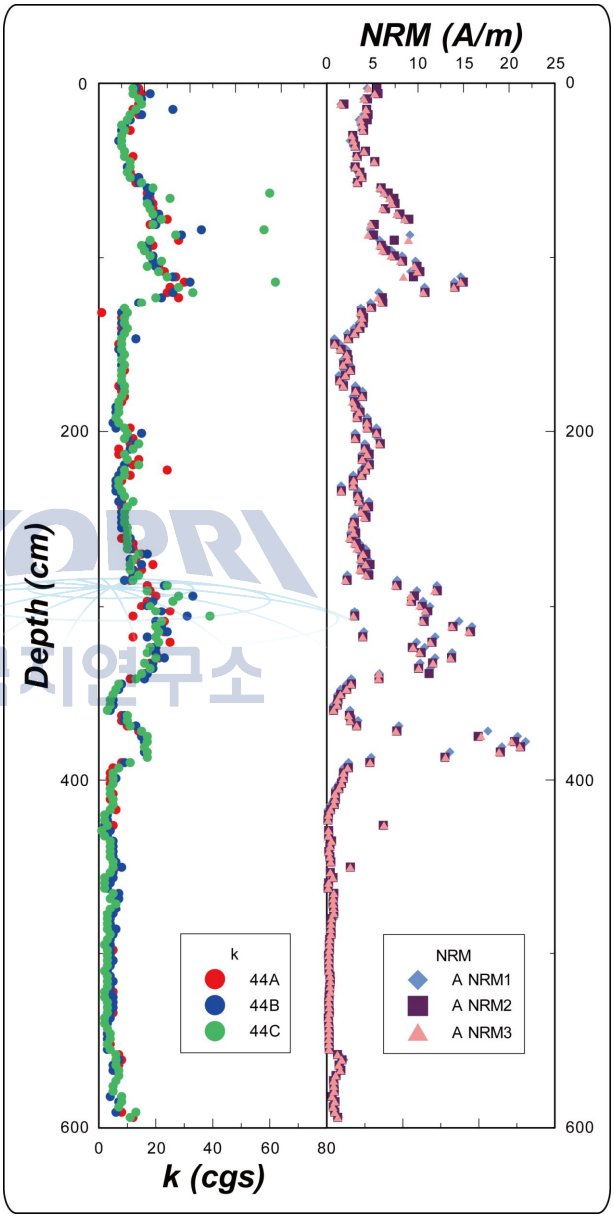
KOPRI 극지연구소

○ 해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적

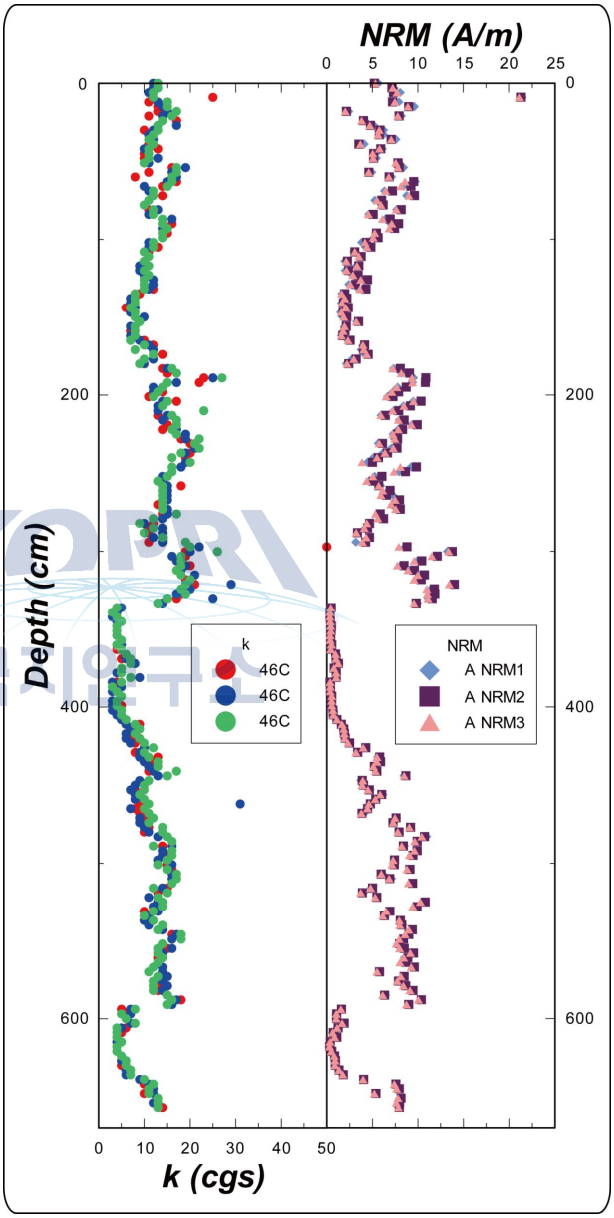
연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물의 깊이에 따른 magnetic susceptibility 변화 측정	RS15-GC46  해저퇴적물 코어 S15-GC46의 깊이에 따른 대자율 변화 측정 *k*: Magnetic susceptibility

KOPRI 극지연구소

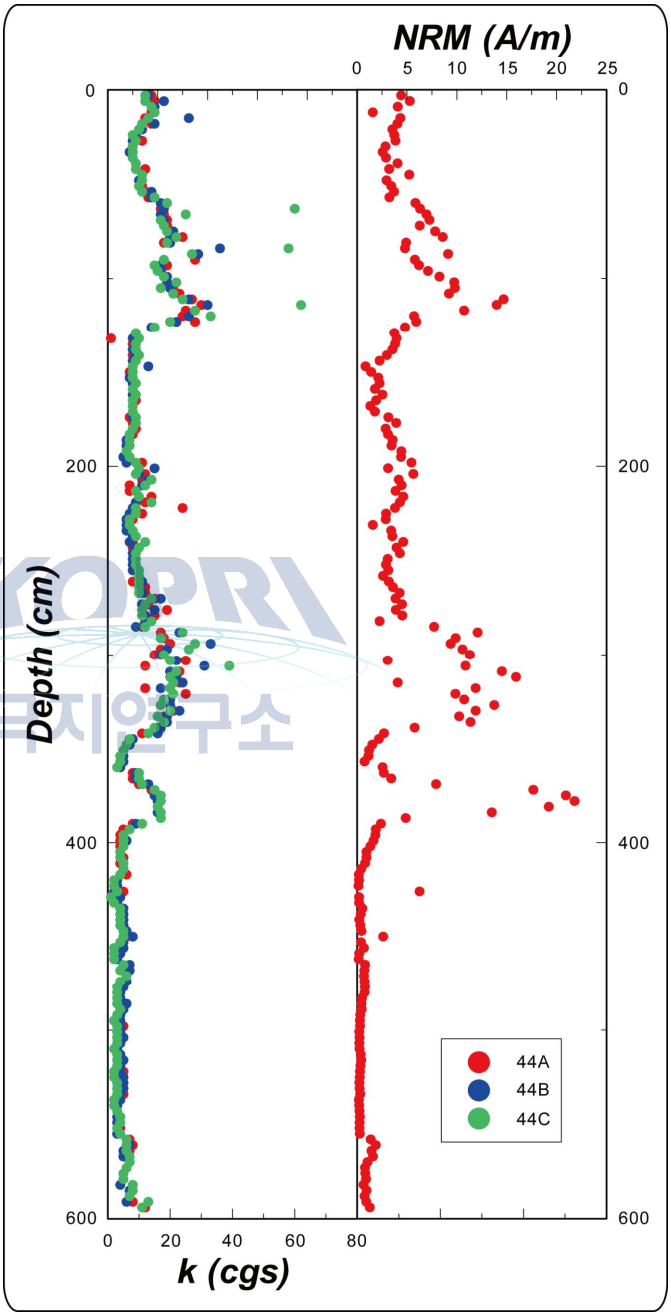
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC44  해저퇴적물 시료의 대자율과 3축 NRM *k*: Magnetic susceptibility NRM: Natural remanent magnetization (1: x축을 위로, 2: x축을 아래로, 3: 무작위)

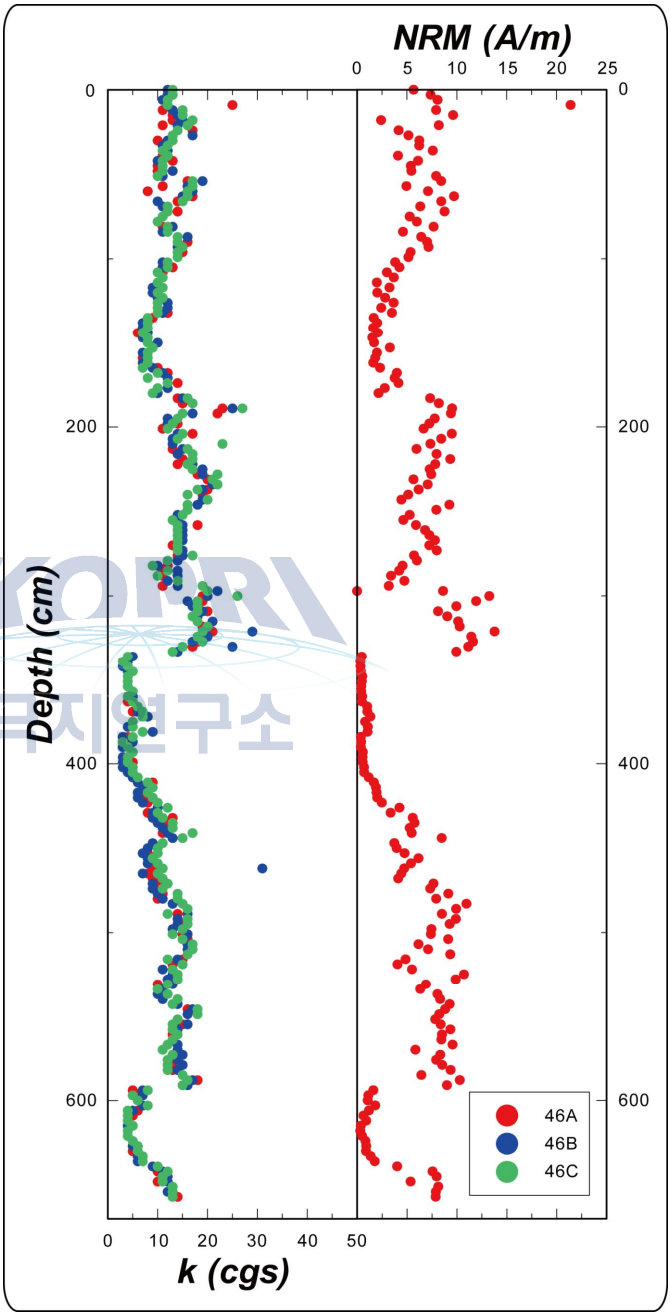
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC46  해저퇴적물 시료의 대자율과 3축 NRM *k*: Magnetic susceptibility NRM: Natural remanent magnetization (1: x축을 위로, 2: x축을 아래로, 3: 무작위)

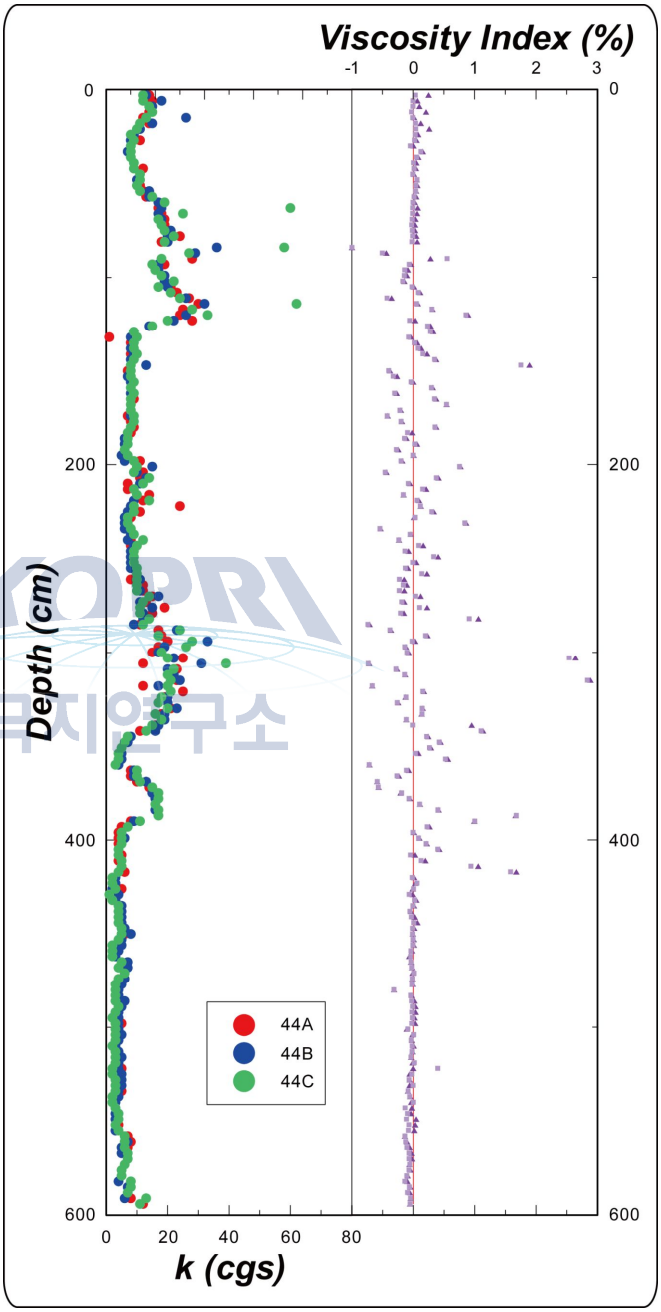
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC44  해저퇴적물 시료의 대자율과 NRM *k*: Magnetic susceptibility NRM: Natural remanent magnetization

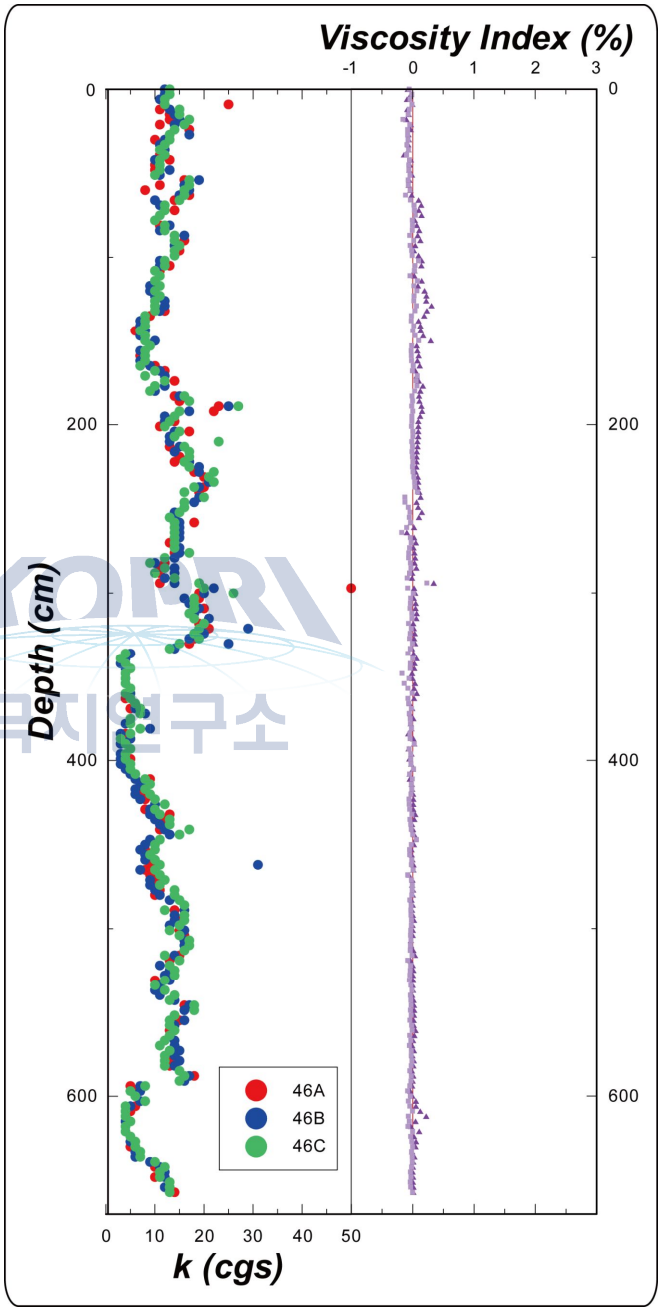
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC46  해저퇴적물 시료의 대자율과 NRM *k*: Magnetic susceptibility NRM: Natural remanent magnetization

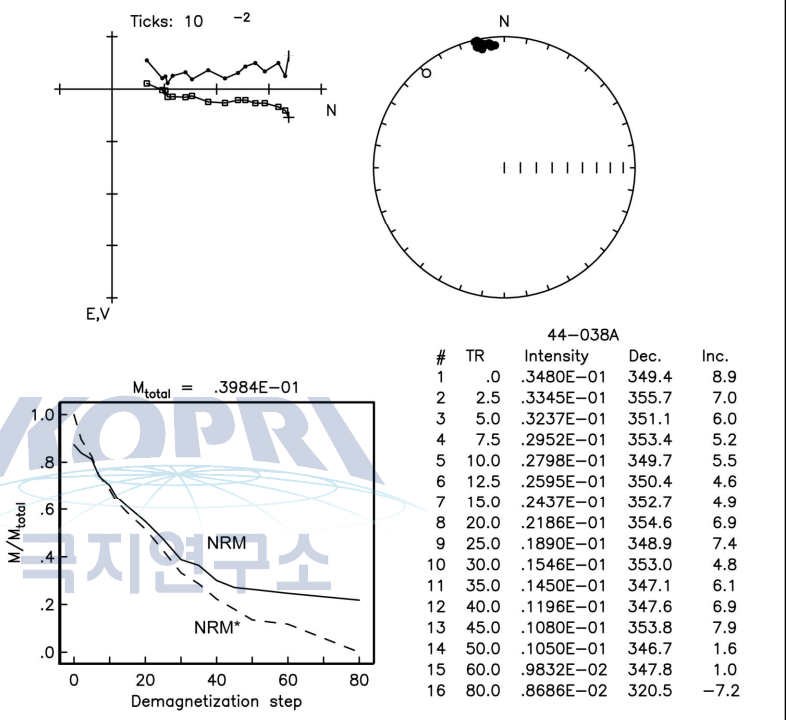
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC44  해저퇴적물 시료의 대자율과 점성도 *k*: Magnetic susceptibility

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

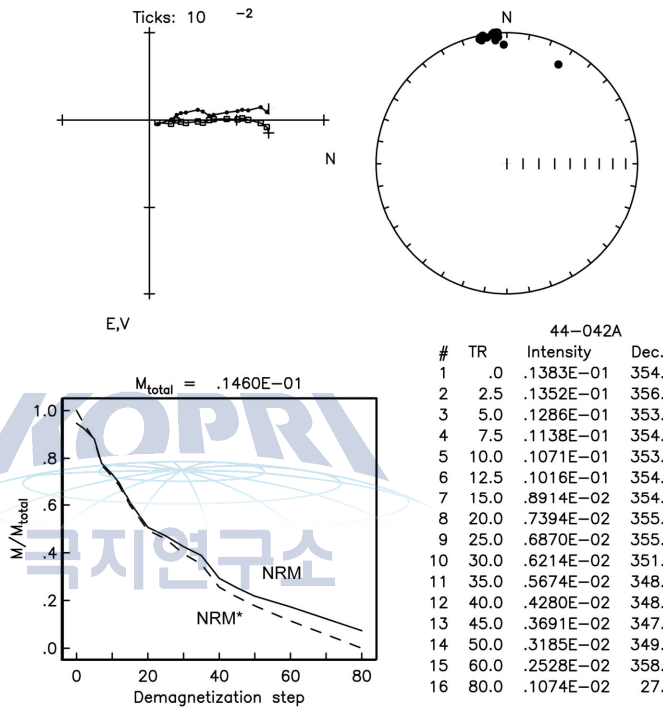
연구내용	연 구 결 과
해양퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RS15-GC46  해저퇴적물 시료의 대자율과 NRM *k*: Magnetic susceptibility

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
Demagnetization을 사용한 시료의 자화안정도 측정	RC15-GC44-038A (Large magnetic susceptibility, k=30)  44-038A #　TR　Intensity　Dec.　Inc. 1　.0　.3480E-01　349.4　8.9 2　2.5　.3345E-01　355.7　7.0 3　5.0　.3237E-01　351.1　6.0 4　7.5　.2952E-01　353.4　5.2 5　10.0　.2798E-01　349.7　5.5 6　12.5　.2595E-01　350.4　4.6 7　15.0　.2437E-01　352.7　4.9 8　20.0　.2186E-01　354.6　6.9 9　25.0　.1890E-01　348.9　7.4 10　30.0　.1546E-01　353.0　4.8 11　35.0　.1450E-01　347.1　6.1 12　40.0　.1196E-01　347.6　6.9 13　45.0　.1080E-01　353.8　7.9 14　50.0　.1050E-01　346.7　1.6 15　60.0　.9832E-02　347.8　1.0 16　80.0　.8686E-02　320.5　-7.2 해저퇴적물 시료의 안정적인 자화 분리 NRM: Natural remanent magnetization (raw data) NRM*: Natural remanent magnetization (extrapolated)

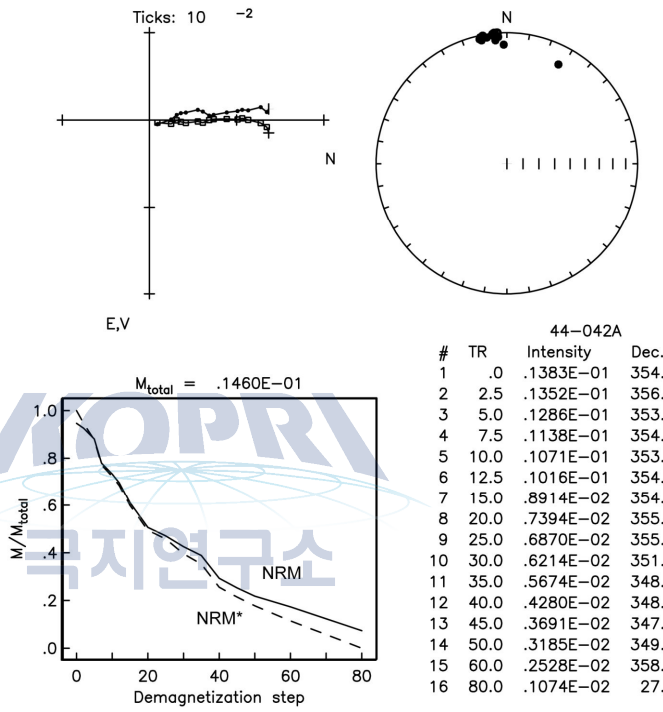
KOPRI 극지연구소

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
Demagnetization을 사용한 시료의 자화안정도 측정	RC15-GC44-042A (Medium magnetic susceptibility, k=15)  44-042A \# TR Intensity Dec. Inc. 1 .0 .1383E-01 354.7 6.1 2 2.5 .1352E-01 356.1 3.4 3 5.0 .1286E-01 353.4 1.5 4 7.5 .1138E-01 354.4 -.1 5 10.0 .1071E-01 353.7 -1.1 6 12.5 .1016E-01 354.2 -.4 7 15.0 .8914E-02 354.4 -.8 8 20.0 .7394E-02 355.4 -.8 9 25.0 .6870E-02 355.7 .0 10 30.0 .6214E-02 351.0 2.8 11 35.0 .5674E-02 348.1 1.6 12 40.0 .4280E-02 348.4 4.4 13 45.0 .3691E-02 347.6 3.1 14 50.0 .3185E-02 349.3 .5 15 60.0 .2528E-02 358.5 10.0 16 80.0 .1074E-02 27.5 15.7 해저퇴적물 시료의 안정적인 자화 분리 NRM: Natural remanent magnetization (raw data) NRM*: Natural remanent magnetization (extrapolated)

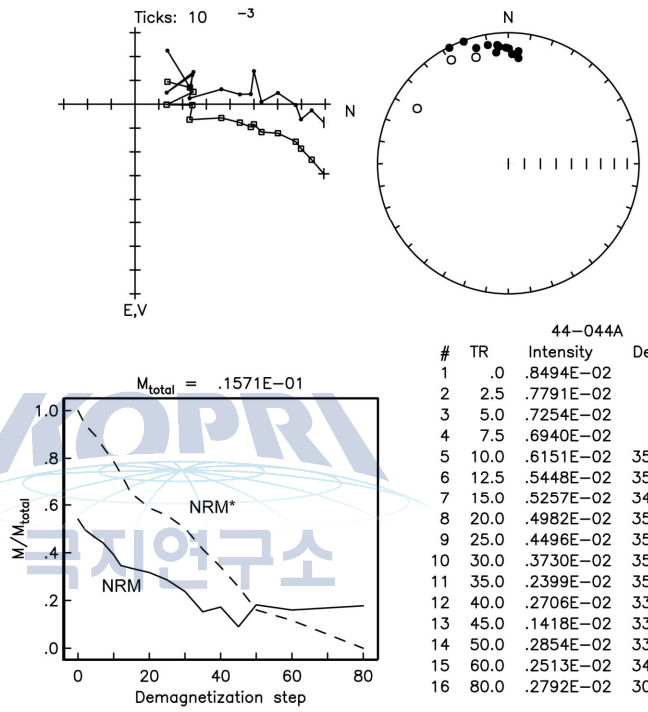
KOPRI 극지연구소

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

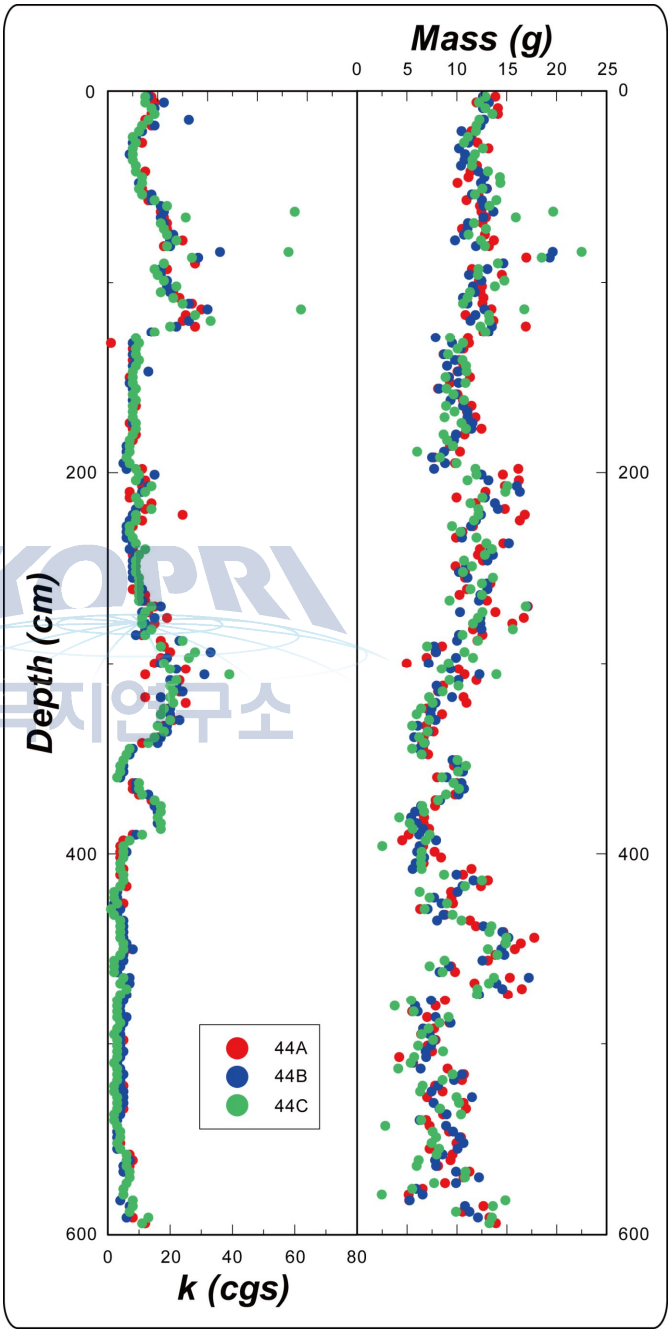
연구내용	연 구 결 과
Demagnetization을 사용한 시료의 자화안정도 측정	RC15-GC44-100A (Medium magnetic susceptibility, k=15)  44-042A \# TR Intensity Dec. Inc. 1 .0 .1383E-01 354.7 6.1 2 2.5 .1352E-01 356.1 3.4 3 5.0 .1286E-01 353.4 1.5 4 7.5 .1138E-01 354.4 -.1 5 10.0 .1071E-01 353.7 -1.1 6 12.5 .1016E-01 354.2 -.4 7 15.0 .8914E-02 354.4 -.8 8 20.0 .7394E-02 355.4 -.8 9 25.0 .6870E-02 355.7 .0 10 30.0 .6214E-02 351.0 2.8 11 35.0 .5674E-02 348.1 1.6 12 40.0 .4280E-02 348.4 4.4 13 45.0 .3691E-02 347.6 3.1 14 50.0 .3185E-02 349.3 .5 15 60.0 .2528E-02 358.5 10.0 16 80.0 .1074E-02 27.5 15.7 해저퇴적물 시료의 안정적인 자화 분리 NRM: Natural remanent magnetization (raw data) NRM*: Natural remanent magnetization (extrapolated)

KOPRI 극지연구소

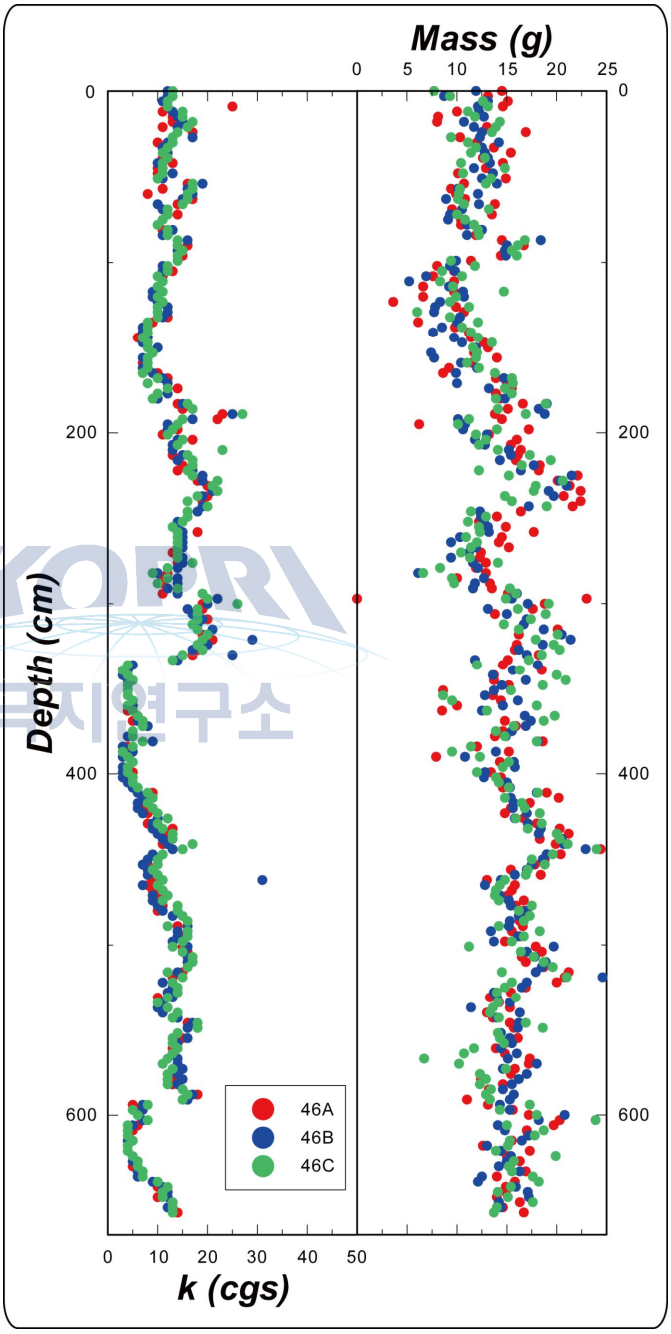
○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
Demagnetization을 사용한 시료의 자화안정도 측정	RC15-GC44-044A (Small magnetic susceptibility, k=1)  44-044A \# TR Intensity Dec. Inc. 1 .0 .8494E-02 5.5 20.1 2 2.5 .7791E-02 2.0 17.4 3 5.0 .7254E-02 5.2 14.9 4 7.5 .6940E-02 .3 13.1 5 10.0 .6151E-02 355.5 11.4 6 12.5 .5448E-02 358.9 12.4 7 15.0 .5257E-02 344.5 9.2 8 20.0 .4982E-02 355.0 11.1 9 25.0 .4496E-02 354.7 9.9 10 30.0 .3730E-02 350.2 8.9 11 35.0 .2399E-02 353.8 15.7 12 40.0 .2706E-02 333.0 .8 13 45.0 .1418E-02 339.9 .8 14 50.0 .2854E-02 331.2 -10.5 15 60.0 .2513E-02 343.1 -16.2 16 80.0 .2792E-02 301.2 -19.7 해저퇴적물 시료의 안정적인 자화 분리 NRM: Natural remanent magnetization (raw data) NRM*: Natural remanent magnetization (extrapolated)

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해저퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RC15-GC44  해저퇴적물 시료의 대자율과 질량 대비 k: Magnetic susceptibility

○ 해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독

연구내용	연 구 결 과
해저퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교	RC15-GC46  해저퇴적물 시료의 대자율과 질량 대비 k: Magnetic susceptibility

제 4 장 연구개발달성도 및 대외기여도

4-1. 연구 목표 달성도

정성적 연구 목표 달성도를 요약하면 아래 표와 같다.

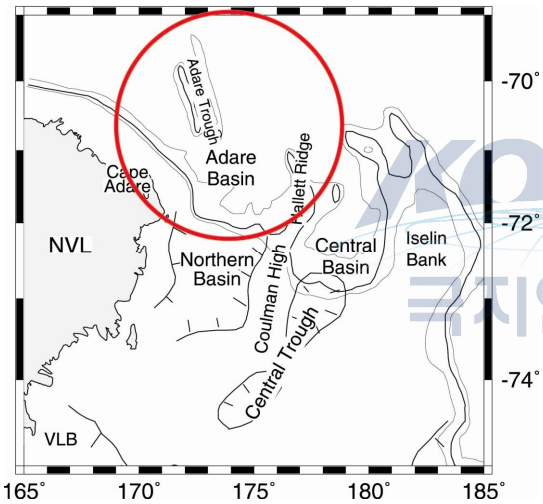
성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
해양퇴적물이 기록하는 잔류자화의 방향 변화 추적	Specimen separation	1. Sediment extraction 2. Cube specimens	1. 퇴적물 추출 2. 표준시편 제작
	Mass determination	1. Mass observation 2. Net mass determinatiob	1. 시편 무게 측정 2. 시편 무게 보정
	Magnetic susceptibility measurements	1. Magnetic susceptibility measurements 2. Unit conversion	1. 시편 대자율 측정 2. 대자율 단위 보정
해양퇴적물의 안정적인 잔류자화를 기록하는 광물 판독	Alternating-field demagnetization	1. Stepwise alternating-field demagnetization 2. Data analysis using vector plots 3. Natural remanent magnetization (NRM) extrapolation	1. 단계별 소자 수행 2. 벡터 성분분석법 적용 3. 자연잔류자화 복원
	Viscosity index	1. Viscosity index observation 2. Magnetic stability estimation	1. 단계별 소자 수행 2. 벡터 성분 분석법 적용 3. 자연잔류자화 복원
	Thermal treatment	1. Stepwise thermal demagnetization 2. Data analysis using vector plots 3. Natural remanent magnetization (NRM) extrapolation	1. 단계별 소자 2. 벡터 성분분석법 적용 3. 자연잔류자화 복원
	Mineral identification using microscopy	1. Imaging magnetic minerals 2. Energy dispersive spectra (EDS) analysis	1. 자성광물 관찰 2. EDS 분석

KOPRI 극지연구소

4-2. 대외기여도

1970년대부터 선진국에서 시작된 남극에 대한 지자기학적 연구는 상술한 세 가지 문제를 풀어내려 노력하고 있다. 특히, 소위 국제적으로 과학 강국이라 공인받는 대한미국을 포함하는 선진국 대열의 국가들은 서로 국력을 과시하듯 극지 사업에 정렬적으로 참여하고 있다. 특히 대한민국은 남극의 세종기지와 장보고기지를 발판으로 극지과학 연구의 새로운 지평을 열어가고 있다.

현재까지의 연구 결과를 토대로 가장 최근에 존재하였던 초대륙 Pangea는 약 2억 3천만년부터 대륙의 분리가 시작되었다. Pangea의 분리가 시작된 이래 남극 대륙의 지체구조학적 위치 변화에 대한 연구는 매우 희귀하다 (Mankinen and Cox, 1988; Baraldo et al., 2003; Tauxe et al., 2004; Lawrence et al., 2009; Poblete et al., 2011). 특히 남극은 상대적으로 Pangea의 분리 과정에서 판의 절대적인 이동이 매우 빈약했던 대륙이라 여겨진다. 왜 이런 현상이 유독 남극에 기록되었는지는 아직까지 해답의 실마리조차 제시되지 못한 상태이다.



위와같이 지구조 진화의 중요한 위치를 차지하는 남극을 포함하는 극지의 지층이나 암상이 많이 연구되지 못한 두 가지 큰 이유가 있다. 첫째, 접근의 용이성과 고비용 때문에 활발한 연구가 수행되기에는 많은 제약이 따른다. 둘째, 고위도에서 형성된 암석이나 퇴적물의 자화 (磁化, Magnetization) 방향이 수직으로 기록되므로 횡적인 암상의 변화가 유발하는 자화의 변화를 야외에서 감지해내기 어렵다.

금번 연구과제의 궁극적인 목표는 그간 지리적 난해함으로 인해 팡게아 복원에 크게 기여하지 못한 남극주변부를 국제 공인 수준의 고해상도 자료로 포함시키는 데 있다. 이를 위해 획득한 퇴적물이나 암석시편의 자기특성을 규명하여 해양지각의 생성 및 냉각 변질에 관한 1차적일 정보를 수집한다. 이를 토대로 Tertiary 진화사의 기록을 간직한 Adare Trough의 지수조적 진화를 유추해볼 수 있다. 혹시라도 추가적으로 얻어지는 남극주변부의 자화특성도 검토한 후, 현대적인 올바른 실험 과정을 거친 자료에 포함시킨다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

가. 학술적 파급효과

지질학 연구가 가능한 시료 가운데 고위도에서 형성된 시료들은 상대적으로 매우 큰 60도 이상의 복각을 내재한다. 이런 고복각 시료의 경우, 일반적인 방법을 이용한 Geomagnetism 연구가 까다롭다. 복각이 클 경우 시료와 자기장의 방향을 3차원적으로 조절하여 자료의 해상도를 증진시켜야 한다. 남극의 경우 해양암권이 생성되는 삼중점(triple junction)의 진화 과정에서 Tertiary 이후 발달한 동남극(East Antarctica)과 서남극(West Antarctica)지괴의 개별적인 진화사 정립의 난제가 과학계의 관심사로 대두되고 있다. 이에 금번 연구가 남극판 주변부에 발달한 중앙해령의 지구조적 진화과정 규명에 일조하리라 기대한다.

나. 경제적 파급효과

시료채취의 난해도와 제반비용 문제로 인해, 그간 남극 주변부 연구는 서구선진국의 독보적인 전유물이었다. 그러나 경제력과 국력이 신장한 대한민국이 남극대륙내부에 장보고기지를 건설하며 혁신적이고 독립적인 연구/해석 방법으로 남극주변부 진화사를 규명하고 그 결과가 국제적인 인정을 받으면 국제 지구행성과학 분야에서 기술적으로 매우 선도적인 역할이 기대된다. 극지연구는 과학계가 미뤄온 난제로 모든 연구결과는 국제적으로 공개하여 지구진화사를 널리 알리는 목적으로 사용되어야 한다. 따라서 직접적인 경제/산업적인 기대효과는 미미하리라 판단된다.

KOPRI 극지연구소

제 6 장 참고문헌

Baraldo, A., A. E. Rapalini, H. Bohnel, and M. Mena (2003) Paleomagnetic study of Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica, Geophysical Journal International, 153, 333-343, doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01881.x.

Besse, J., and V. Courtillot (1991) Revised and synthetic polar wander paths of the African, Eurasian, North American, and Indian plates and true polar wander since 200 Ma, Journal of Geophysical Research, 96, 4029-4050.

Besse, J., and V. Courtillot (2002) Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr, Journal of Geophysical Research, 107, doi:10.1029/2000JB000050.

DeMets, C., and R. G. Gordon (1990) Current plate motions, Geophysical Journal International, 101, 425-478.

DeMets, C., R. G. Gordon, and D. F. Argus (2010) Geologically current plate motions, Geophysical Journal International, 181, 1-80.

Dunlop, D. J., and M. Prevot (1982) Magnetic properties and opaque mineralogy of drilled submarine intrusive rocks, Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, 69, 763-802.

Fuller, M. (1974) Lunar magnetism, Reviews of Geophysics and Spacephysics, 12,23-70.

Gattaccecca, J., P. Rochette, and M. Bouot-Denise (2003) Magnetic properties of a freshly fallen LL ordinary chondrite: the Bensour meteorite, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 140, 343-358.

Hounslow, M. W. (1996) Ferrimagnetic Cr and Mn spinels in sediments: residual magentic minerals after diagenetic dissolution, Geophysical Research Letters, 23, 2823-2826.

Kreemer, C., W. E., Holt, and A. J. Haines (2003) An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, Geophysical Journal International, 154, 8-34.

Lawrence, K. P., L. Tauxe, H. Staudigel, C. G. Constable, A. Koppers, W. McIntosh, and C. L. Johnson (2009) Paleomagnetic field properties at high southern latitude, Geochemistry Geophysics Geosystems, 10, Q01005, doi:10.1029/2008GC002072.

Mankinen, E. A., and A. Cox (1988) Paleomagnetic investigation of some volcanic rocks from the McMurdo volcanic province, Antarctica, Journal of Geophysical Research, 93, 11,599-11,612, doi:10.1029/JB093iB10p11599.

Muller, D. M., J. Y. Royer, and L. A. Lawver (1993) Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks, Geology, 21, 275-278.

McElhinny, M. W., and W. E. Senanayake (1982) Variations in the geomagnetic dipole. 1. The past 50,000 years, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 34, 39-51.

O'Neill, H. S. C., H. Annersten, D. Virgo (1992) The temperature dependence of the cation

distribution in magnesioferrite ($MgFe_2O_4$) from powder XRD structural refinements and Mossbauer spectroscopy, American Mineralogist, 77, 725-740.

Poblete, F., C. Arriagada, P. Roperck, N. Astudillo, F. H. Allamand, S. Kraus, J. Le Roux (2011) Paleomagnetism and tectonics of the South Shetland Islands and the northern Antarctic Peninsula, Earth and Planetary Science Letters, 302, 299-313.

Prevot, M., E. Mattern, P. Camps, and M. Daignieres (2000) Evidence for a 20 tilting of the Earth's rotation axis 110 million years ago, Earth and Planetary Science Letters, 179, 517-528.

Sager, W. W., and S. Pringle (1988) Mid-Cretaceous to Early Tertiary apparent polar wander path of the Pacific plate, Journal of Geophysical Research, 93, 11,753-11,771.

Schneider, D. A., and D. V. Kent (1990) The time-averaged paleomagnetic field, Reviews of Geophysics, 28, 71-96.

Tarduno, J. A., and A. Y. Smirnov (2001) Stability of the Earth with respect to the spin axis for the last 130 million years, Earth and Planetary Science Letters, 184, 549-553.

Tarduno, J. A., R. D. Cottrell, M. K. Watkeys, A. Hofmann, P. V. Doubrovine, E. E. Mamajek, D. Liu, D. Sibeck, L. P. Neukirch, and Y. Usui (2010) Geodynamo, Solar wind, and Magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago, Science, 327, 1238-1240.

Tauxe, L., P. Gans, and E. A. Mankinen (2004) Paleomagnetism and $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages from volcanics extruded during the Matuyama and Brunhes chrons near McMurdo Sound, Antarctica, Geochemistry Geophysics Geosystems, 5, Q06H12, doi:10.1029/2003GC000656.

Titus, S. J., H. Fossen, R. B. Pedersen, J. L. Vigneresse, and B. Tikoff (2002) Formation of a pull-apart structure during post-orogenic faulting, Leka Ophiolite, Norway, Tectonophysics, 354, 101-119.

Van der Voo, R. (1990) Phanerozoic paleomagnetic poles from Europe and North America and comparisons with continental reconstructions, Reviews of Geophysics, 28, 167-206.

Van der Voo, R., and T. H. Torsvik (2001) Evidence for late Paleozoic and Mesozoic non-dipole fields provides an explanation for the Pangea reconstruction problems, Earth and Planetary Science Letters, 187, 71-81.

Yu, Y., D. J. Dunlop, O. Ozdemir, and H. Ueno (2001) Magnetic properties of Kurokami pumices from Mt. Sakurajima, Japan, Earth and Planetary Science Letters, 192, 439-446.

Yu, Y.,D. J. Dunlop, and O. Ozdemir (2002) Partial anhysteretic remanent magnetization in magnetite 1. Additivity, Journal of Geophysical Research, 107(B10), 2244, doi: 10.1029/2001JB001249, 2002.

Yu, Y., and J. S. Gee (2005) Spinel in Martian meteorite SaU 008: Implications for Martian magnetism, Earth and Planetary Science Letters, 232, 287-294, 2005.

Yu, Y., S.-J. Doh, W. Kim, and K. Min (2009) Ancient stable magnetism of the Richardton H5 chondrite, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 177, 12-18.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과 보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

KOPRI 극지연구소