

한국심해환경연구(KODES) 지역 주상 퇴적물중 금속 및 희토류원소의 지구화학적 특성

정희수 · 박승현 · 김동선 · 최만식¹ · 이경용
한국해양연구소 심해저사업단, 기초과학지원연구소 동위원소분석실

Geochemistry of Heavy Metals and Rare Earth Elements in Core Sediments from the Korea Deep-Sea Environmental Study (KODES)-96 Area, Northeast Equatorial Pacific

HOI-SOO JUNG, SUNG-HYUN PARK, DONGSEON KIM, MAN-SIK CHOI¹
AND KYEONG-YOUNG LEE

Deep-sea Resources Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O.Box 29, 425-600, Korea
¹Isotope Lab., Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea

심해저 퇴적물중 금속과 희토류 원소의 수직 함량변화 및 변화의 원인을 구명하기 위해 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대(Clarion-Clipperton fracture zone) 중남부에 위치한 한국심해환경연구(Korea Deep-sea Environmental Study, KODES) 지역에서 박스코어러(box corer)를 이용해 18개의 주상시료를 채취했다. KODES 지역 퇴적층은 색상변화에 따라 갈색의 Unit I, 연갈색의 Unit II, 흑(갈)색의 Unit III로 분류된다. Unit I은 Unit II에 비해 높은 Ni/Cu비를 가지고, Unit III는 Unit I, II에 비해 현저히 높은 금속함량을 보인다. Unit II는 지화학적 자료에 근거하여 상부의 Unit IIa 층과 하부의 Unit IIb 층으로 세분될 수 있는데, Unit IIb 층은 Unit IIa 층에 비해 높은 구리 및 3+REEs/NASC 비(또는 큰 음의 Ce 이상치) 등의 특징을 보인다. Unit III는 흑갈색의 상부 Unit IIIa 층과 흑색의 하부 Unit IIIb 층으로 세분되는데, Unit IIIb 층은 Unit IIIa 층에 비해 망간, 철 함량이 높다. 연구지역이 속한 태평양 지판의 확장속도와 방향 그리고 약 11-30 Ma인 Unit III의 연령을 고려할 때 Unit IIIb 층은 동태평양 균열대(East Pacific Rise, EPR) 그리고 적도와 근접한 위치에서 퇴적된 것으로 계산된다. 흑색인 Unit IIIb 층의 높은 망간, 철 함량은 EPR에서 기원한 화산기원의 철, 망간 등을 공급받아 나타난 결과로 보인다. 한편, Unit III는 물론이고 Unit IIb 역시 적도 고생산대의 영향권에 있었고, 따라서 해수중 풍부한 유기체들과 함께 구리, 희토류 원소 등도 Unit IIb, III 층으로 많이 공급되었을 것이다. 퇴적물로 공급된 이들 구리 및 희토류 원소들은 유기물이 분해됨에 따라 스멕타이트 그리고 어류 잔해물(fish bone debris) 등에 잔류한 것으로 보인다. 즉 KODES 지역 주상 퇴적물에서 나타나는 구리 및 희토류 원소의 수직 함량변화는 연구지역이 제3기 말 시기에 적도 고생산대를 지나는 동안 많은 유기물을 공급받아서 초래된 결과로 사료된다.

To study the vertical variation of heavy metal and Rare Earth Element (REE) contents in deep-sea sediments, eighteen cores were sampled from the Korea Deep-sea Environmental Study (KODES)-96 area in the C-C zone (Clarion-Clipperton fracture zone), northeast equatorial Pacific. Sediment columns can be divided into three units based on sediment colors and geochemical characters; uppermost Unit I with brown color, middle Unit II with pale brown color and smaller Ni/Cu ratio than the ratio in Unit I, and lowermost Unit III with dark (brown) colors and higher contents of Mn, Ni, Cu, and REEs than those in Unit I and II. Unit II can be divided more into two layers of upper Unit IIa and lower Unit IIb. Unit IIb is characterized by high contents of Cu, 3+REEs (REEs except Ce), smectite, and severely deteriorated fossil tests. Unit III can also be divided into two units; upper Unit IIIa with dark brown color, and lower Unit IIIb with black color and enriched Mn and Fe. The KODES area was located near from the East Pacific Rise (EPR) When Unit III Sediments were deposited, considering the hiatus between Unit II and III (Quaternary-Tertiary boundary) and the spreading rate (10 cm/yr) and direction (north southern west) of the Pacific plate from the EPR. High contents of Mn and Fe in Unit IIIb may be related with hydrothermal influence from the EPR. Meanwhile, Unit IIb (about 2~3 Ma) and Unit III (11~30 Ma) layers were probably formed near (or under) the equatorial high productivity zone, and accordingly received a lot of organic materials. As a result, Cu and 3+REEs, closely associated with organic materials, are enriched in smectite and/or Ca-P composites (fish bone debris, biogenic apatite) after decomposition and reprecipitation on the sea floor. Higher contents of Cu and 3+REEs in Unit IIb and III are suggested to be the result of abundant supply of organic substances in the equatorial high productivity zone.

서 론

화학적 풍화과정을 통해 암석에서 유리되는 희토류 원소(rare earth element, REE)는 원소간 거동의 유사성 때문에 퇴적물 기원과 퇴적환경을 잘 반영할 뿐 아니라 해양 수계와 해저 퇴적층을 거치는 지구순환 과정에서 직면한 화학적 또는 생화학적 환경 요인을 반영할 수도 있는 까닭에 관심의 대상이 되어 왔다(Elderfield and Greaves, 1982). 이러한 관심에도 불구하고 희토류 원소를 분석하는 것은 까다로운 일이어서 이들에 관한 연구에는 많은 어려움이 있었지만(Fleet, 1984) 최근 유도결합 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)의 발달로 분석이 용이해져 활발한 연구가 진행중이다.

원자번호 57의 La에서 71의 Lu까지 15개 원소로 구성된 희토류 원소 군은 각 원소간 물리·화학적 특성이 유사하지만 Ce, Eu 등은 다른 희토류 원소들과 상이한 거동을 보이기도 한다. 이는 희토류 원소들이 통상 +3가에서 가장 안정한 산화상태(oxidation state)를 유지하지만, Ce과 Eu는 각각 산화 및 환원 환경에서 +4가와 +2가로 쉽게 변화하는 점에 기인한다. 한편 일반적으로 원자번호가 큰 즉 무거운 희토류 원소일수록 결합력이 증가하여 해수중에서 더 강한 용존화합물을 형성하고 따라서 체류시간(residence time)이 긴 특성도 있다(Goldberg *et al.*, 1963). 강물이나 해수중에서 HREE(heavy rare earth element)와 LREE(light rare earth element)가 이들의 중간위치 원소보다 좀 더 높은 농도를 지니는 원인은 LREE의 경우 지각중 함량이 높기 때문에 풍화산물중 절대량도 많아 초래된 결과이고, HREE의 경우 액상에서 결합체를 잘 형성하여 해수에서 안정한 까닭이다(Fleet, 1984).

해양환경에서 희토류 원소에 관해 잘 알려진 분포특성중 하나가 수심에 따른 농도의 변화다. Ce을 제외하면 해수중 희토류 원소의 농도는 수심에 따라 증가하고 무거운 원소일수록 그 증가폭이 크다. 이러한 현상 또한 무거운 HREE일수록 상대적으로 해수중 체류시간이 길기 때문이다(Elderfield *et al.*, 1981a; DeBaar *et al.*, 1983). 한편, 해수중 수심에 따라 농도 변화를 보이지 않는 Ce은 산화환경에서 +3가의 산화상태보다 더 불용성인 +4가의 고체 산화물로 쉽게 변화되고 따라서 다른 +3가의 희토류 원소보다 좀 더 빨리 침전·제거되므로 용존산소가 풍부한 해수중 Ce 이상치(Ce anomaly)는 음의 값을 보이는 반면 심해저면 망간단괴중 이상치는 양의 값을 나타낸다(Fleet, 1984).

최근 희토류 원소에 관해 논의되는 사항중 하나가 해양 퇴적물에서 이들의 함량을 조절하는 가장 중요한 요인이 무엇인지를 구명하는 것이다(Murray *et al.*, 1991). Ce을 제외한 희토류 원소(trivalency REEs, 3+REEs)가 속성작용을 받아 퇴적층에서 재동원 후 해저면으로 이동·침적되고 그 결과 퇴적물과 속성기원 망간단괴중 3+REEs 함량이 서로 상반되게 나타난다는 보고(Elderfield *et al.*, 1981a, 1981b), 주상시료 깊이에 따른 Ce 이상치의 증가(또는 3+REEs 함량의 증가) 원인이 속성작용 결과라는 보고(Murray *et al.*, 1991), 또는 공극수중 희토류 원소의 농도가 산화-환원 지수에 따라 변화한다는 보고(Elderfield and Sholkovitz, 1987) 등은 퇴적물중 희토류 원소 함량이 속성작용에 의해 크게 변화될 수 있음을 시사한다. 반면, 태평양 퇴적물

에서 나타나는 큰 음의 Ce 이상치가 어류잔해물(fish bone debris, biogenic apatite)에 나타나는 강한 음의 이상치 때문이라는 보고(Toyoda *et al.*, 1990) 등은 희토류 원소의 함량특성이 퇴적물 조성에 따라서도 변화될 수 있음을 의미한다.

연구가 수행된 한국심해환경연구(Korea Deep-sea Environment Study, KODES) 지역의 주상 퇴적물은 해수에서 성장한 생물체, 자생 및 육성기원의 점토광물, 수성 또는 속성기원의 망간산화물 등으로 복잡하게 구성되어 있다(해양부, 1996). 이러한 주상 퇴적물 조성은 연구지역이 동태평양 균열대(East Pacific Rise, EPR)에서 생성된 이후 해저 지판의 확장이동에 따라 현재의 위치로 오는 기간 동안 기록된 고해양환경 변화의 역사를 필연적으로 반영하고 있을 것이다. 본 연구에서는 KODES 지역 주상 퇴적물중 금속과 희토류 원소의 수직 함량변화 특성 및 변화의 원인을 고해양학적 관점에서 구명하고자 한다.

지역개관

북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대(Clarion-Clipperton fracture zone, C-C 지역) 사이에 위치한 정방형의 연구지역 즉 KODES 지역은 저층 충격실험(Benthic Impact Experiment, BIE) 장소 선별을 목적으로 조사된 지역이다. KODES 지역은 한국심해연구(Korea Deep Ocean Study, KODOS) 지역중 기존 자료에 의거해 높은 망간단괴 부존 밀도를 지니고 평탄한 지형을 이루며 가능한 탄산질 연니가 출현하지 않을 것으로 예측되는 지역으로 선정되었다. 한편 우리나라는 심해저 망간단괴 개발광구를 획득한 이후 우리나라 광구 유지를 위해 유엔이 우리나라에 부여한 여러가지 의무사항을 준수해야 하는데, BIE는 이러한 의무사항중 하나인 심해환경연구를 위해 제시된 것으로, 채광에 대비한 환경영향평가를 위해 고안된 종합 모의실험이다.

연구지역은 1996년 5월~1996년 6월에 걸쳐 조사되었고, 131°10'~133°50' W, 9°50'~10°30' N 사이에 위치하며(Fig. 1), 이들 지역은 C-C 지역중 남쪽의 클리퍼튼 균열대에 보다 근접해 있다. 연구지역은 약 4,900 m의 수심을 보이고, 수심은 연구지역 동부에서 서부로 가면서 전반적으로 깊어진다(Fig. 1). 한편 연구지역 약 2,500 km 동쪽에는 EPR이 존재하고, 연구지역 북쪽에는 클라리온 균열대(Clarion fracture zone)가 그리고 남쪽에는 이와 평행한 방향으로 클리퍼튼 균열대(Clipperton fracture zone)가 위치한다.

C-C 지역 전반에는 본 연구지역을 중심으로 북쪽에는 규질연니가 그리고 남쪽에는 석회질연니가 분포하는 것으로 보고된다(Horn *et al.*, 1973). 그러나 연구지역 주상 퇴적물의 퇴적상은 규질 퇴적물(siliceous sediment)이 지배적이긴 하나 북쪽에 위치한 정점 9, 10, 11, 21에서는 탄산질 퇴적물도 출현한다(Fig. 2). 탄산질 퇴적물은 매우 고화되어 있고, 상부 표층은 대부분 갈색의 규질 퇴적물로 덮여있다. 규질 퇴적물은 대부분 규질파편, 점토광물(주로 자생의 Fe-rich smectite와 육성기원의 illite), 장석류, 철-망간 산화물 또는 미세망간단괴(micronodule) 등으로 구성되어 있다(해양부, 1996).

망간단괴는 남서-북동 방향의 대각선 중심 지역에서 대부분 5 kg/m² 이상의 높은 부존밀도를 보이지만, 북서 지역과 남동

시료채취 및 분석방법

시료채취

탐사는 한국해양연구소 소속의 온누리 호를 이용·수행되었고, 25개 정점에서 18개 주상시료를 박스코어러(box corer)를 사용·채취하였다. 먼저 채취된 박스코어의 상층수를 사이펀을 이용해 천천히 제거한 후, 퇴적물 표층에 대한 사진을 촬영하고, 퇴적층이 교란되지 않도록 망간단괴를 조심스럽게 회수하였다. 그런 후 박스코어러의 한쪽 면을 해체하여 25×50×2 cm 크기의 퇴적물 슬랩을 획득하고, 깊이에 따른 색상변화 및 생물 교란작용 등에 관해 자세히 기술한 후 냉장실에 보관하였다. 슬랩을 채취하고 남은 박스코어 시료에서 미리 정해진 깊이별로 50 ml 폴리에틸렌 병(polyethylene bottle)에 화학 분석용 부시료(subsample)를 채취한 후 파라필름(parafilm)으로 병 뚜껑을 밀봉하여 냉장실에 보관하였다.

분석방법

채취된 화학 분석용 부시료를 90°C 이하의 건조로(oven)에서 24시간 이상 건조시킨 후, 마노유발(agate mortar)에서 분말화하여 200 mesh의 나일론 체(seive)를 통과시켰다. 퇴적물 분말 시료를 90°C 이하에서 12시간 이상 건조시킨 후 건조통 안에서 냉각시키고, 이를 테플론 용기(teflon vessel)에 0.50 g씩 평량해 넣었다. 여기에 각각 4 ml, 6 ml, 3 ml의 불산(HF), 질산(HNO₃), 과염소산(HClO₄) 원액을 가한 후 뚜껑을 잠그고, 후드(fume hood) 내에 설치된 가열판 위에서 175°C 이하로 12시간 이상 가열한 후 다시 뚜껑을 열어 용해된 퇴적물이 거의 마를 때까지 가열시켰다(Yamashige *et al.*, 1989). 용해가 종료된 시료는 30 ml의 1 N 질산 용액으로 20분 이상 용출(elution)시킨 후 적절히 희석하여 VG Element 사가 제작한 PLASMA TRACE 모델의 고분해능 유도결합 플라즈마 질량분석기(High Resolution Inductively Coupled Plasma mass spectrometer, HR-ICP-MS)를 이용·분석하였다.

결과 및 고찰

퇴적물 깊이에 따른 금속 및 희토류 원소의 수직 분포 특성

총 18개 정점에서 획득된 희토류 함량 자료는 North American Shale Composite(NASC)중 희토류 함량으로 표준화(normalization)하였다(Fig. 3; Henderson, 1984). Dy는 분석이 되었음에도 불구하고 NASC 자료가 확보되지 않아 도표상에서 제외시켰다. Ho 자료는 기기상 예기치 않은 간섭현상으로 자료가 이상치를 나타내는 경우가 수 차례 있었고 이러한 자료는 도표상에서 제거하였다(Fig. 3). 각 정점별 퇴적물 색상 변화, 방산층 관찰 결과, 입도분포 변화, 금속 및 희토류 원소, 스멕타이트(smectite) 함량 변화 등은 해양부(1996)에 자세히 기술되어 있다.

각 정점의 퇴적물은 깊이에 따라 색상이 다른 세 종류의 층으로 구분되는데, 즉 갈색(brown; 10YR 4/4; Munsell, 1988)의 상부층(Unit I), 밝은 갈색(pale brown; 10YR 6/4-6/6)의 중간층(Unit II), 그리고 흑갈색(dark brown; 10YR 4/3-3/3)의 하부층(Unit III)으로 구분된다. 색상변화의 깊이는 정점별로 일정치 않

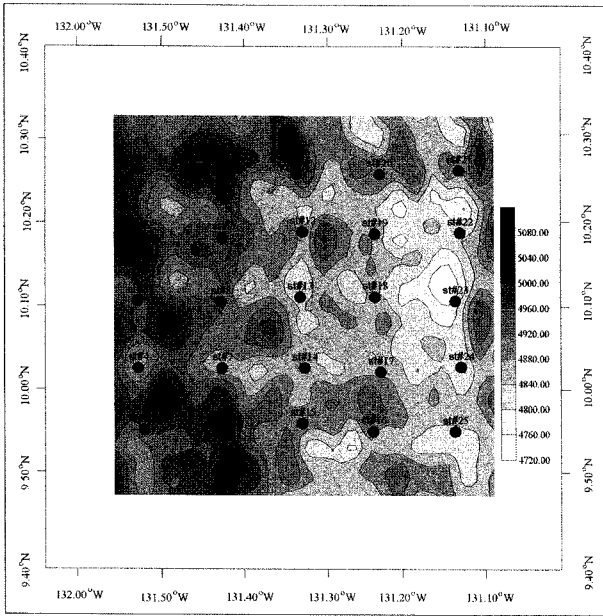


Fig. 1. Bathymetric chart marked with sampling sites in the KODES-96 area.

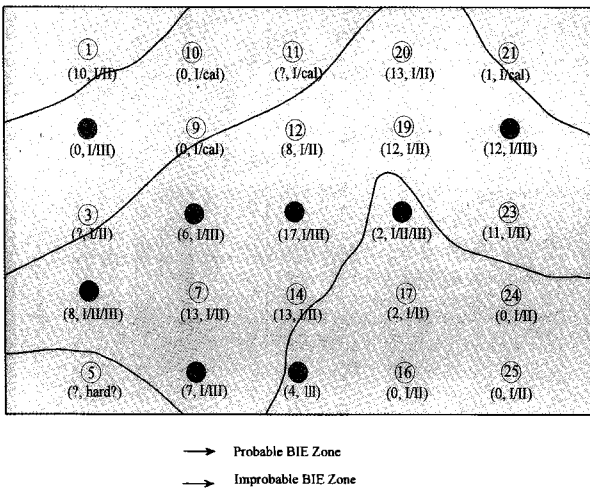


Fig. 2. Summary of sediment units and manganese nodule abundances at each sampling site in the KODES-96 area. Probable BIE (benthic impact experiment) zone is the area with abundant manganese nodules and smooth morphology and without calcareous sediments.
 Index: ①-Station number (a, I/II)
 a-Manganese nodule abundance (kg/m²)
 I/II-Sediment units in upper and lower layers in box core sediments (I: Brown colored soft sediments with high water contents or lower shear strength, II: Pale brown colored sediments with moderates shear strength, III: Dark brown colored sediments with very high shear strength, cal: Calcareous ooze layer with high shear strength).

지역에서는 부존밀도가 대부분 5 kg/m² 이하로 낮다(Fig. 2). 이 지역 망간단괴는 주로 직경 2~4 cm 크기를 지니고 타원 또는 쉘반 형태를 가지며 거친 면과 매끈한 면이 혼재된 표면조직 또는 거친 표면조직을 보이는 경우가 빈번하다(해양부, 1996).

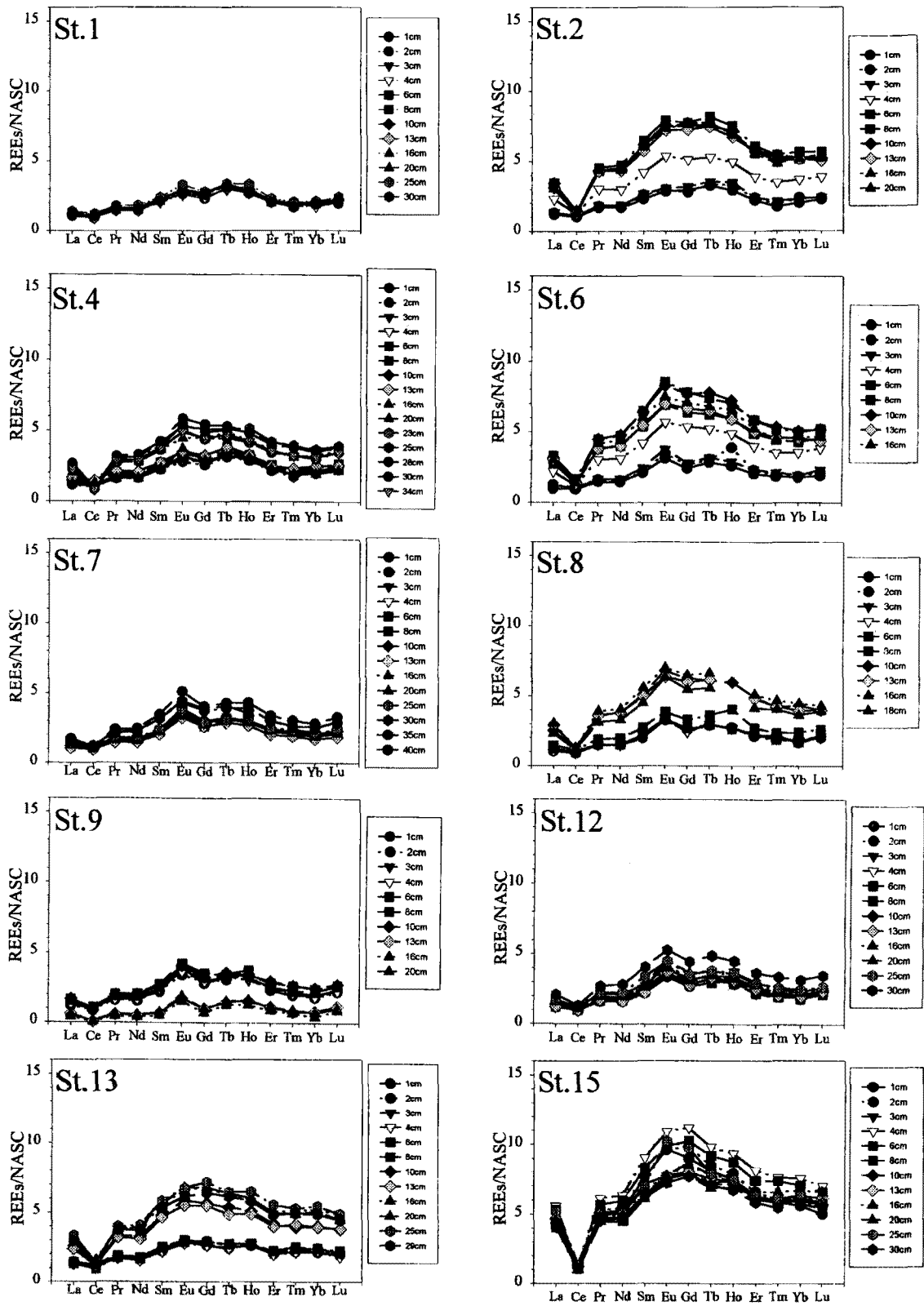


Fig. 3. Plots of rare earth element contents in box core sediments after normalized with North American Shale Composites (NASC) at each sampling sites in the KODES-96 area.

으며, 정점에 따라 세 종류의 Unit가 모두 나타나는 경우도 있고 두가지 Unit만 나타나는 경우도 있다(Fig. 2). 색상변화에 따라

퇴적물중 금속 함량, 미세망간단과 함량, 점토광물의 함량비, 그리고 퇴적물 연령 등이 규칙적으로 변화한다(해양부, 1996).

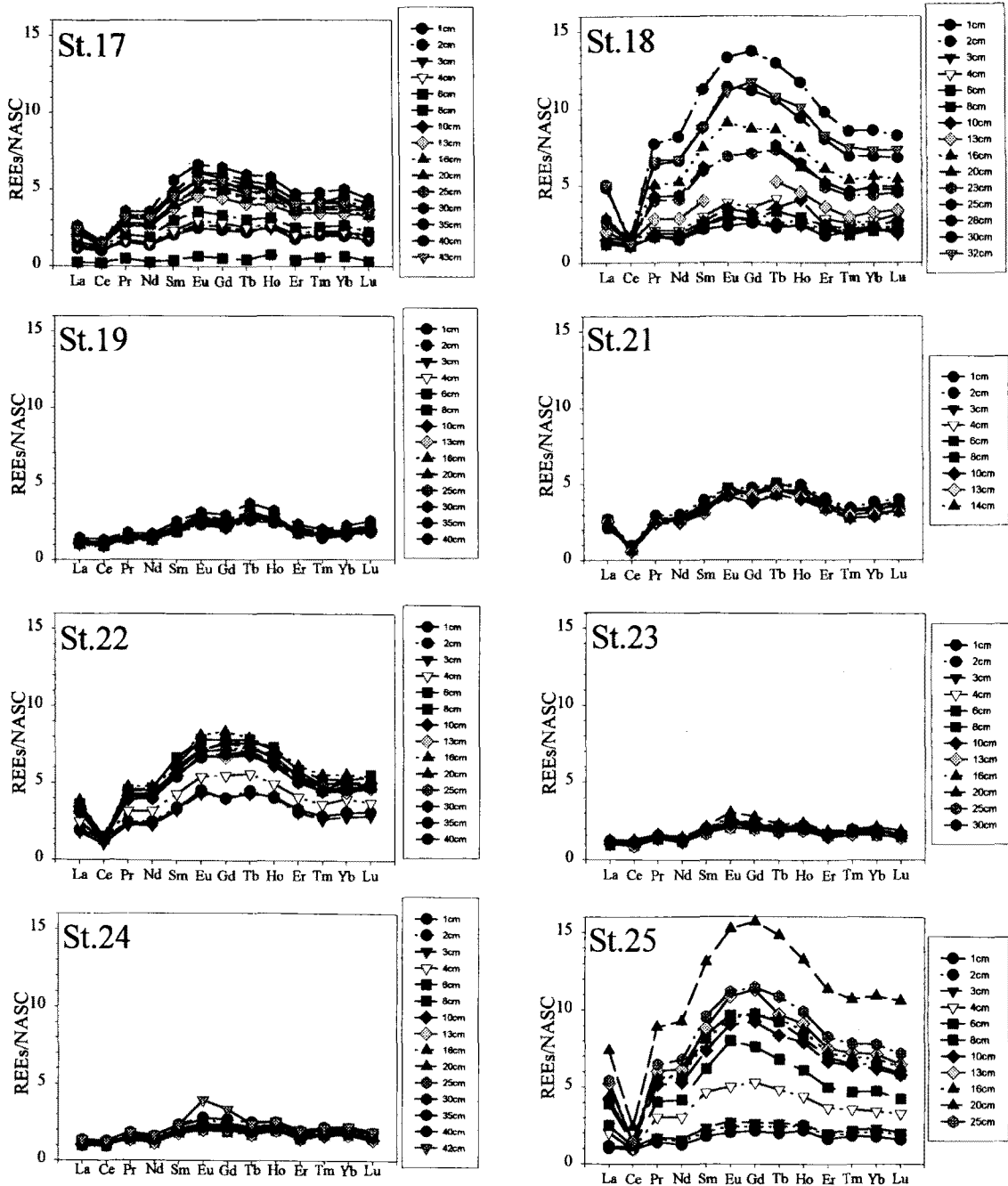


Fig. 3. Continued.

Unit I의 특징은 망간과 니켈 함량이 Unit II에 비해 2배 이상 높은 점이다. 이는 Unit I의 색상이 Unit II에 비해 어두운 것과 유관한 것으로 보이는데, 즉 Unit I의 어두운 색상이 Unit I에 비교적 많은 흑색의 망간산화물에 기인한 것으로 보고된다(해양부, 1996). 한 예로 Unit III의 색상은 Unit I, II에 비해 뚜렷이 어두운데, 이는 Unit III중 미세망간단과 함량이 높기 때문으로 보고되며(정 등, 1991; 정, 1994), 그 결과 Unit III에는 망간, 니켈 등 금속함량이 높다. 한편 Unit I 퇴적물중 방산층은 보존이 양호하며 제4기 중의 출현이 빈번하고 함수량이 높다.

Unit II는 Unit I에 비해 밝은 색상을 지니며 망간과 니켈 함량

이 낮다. 반면 구리 함량은 Unit I에 비해 50% 이상 증가된 경향을 보인다. 따라서 Unit I, II를 구분 짓는 요인은 색상과 더불어 퇴적물중 Ni/Cu 비인데, 즉 Unit II의 Ni/Cu 비는 Unit I의 그것에 비해 낮은 값을 보인다. 한편 Unit II 퇴적물중 방산층은 Unit I에 비해 매우 부식되어 있고, 연령이 오랜 제3기중 출현이 빈번해지며, 함수량이 70% 정도로 감소한다.

Unit III는 Unit I, II와는 전혀 다른 특징을 보이는데, 즉 흑색을 띄고, 망간, 구리, 니켈 등의 함량이 Unit I, II에 비해 수 배 이상 현저히 높으며, 방산층 종조성 등에 근거 제3기 층으로 구분된다(해양부, 1996; Jung et al., 1997). 이 층은 Unit A, B중

Unit B 층에 해당되며, 높은 망간 산화물 입자, 어류 잔해물 및 스�멕타이트 입자, 그리고 높은 스�멕타이트 및 금속 함량 등의 특징을 지닌다. 특히 KODOS-95 주상시료중 Unit III에서는 연령이 오랜 퇴적물에서 관찰되는 자생 기원의 클리노틸로라이트 (clinoptilolite)가 관찰되었으며, 이는 KONOD-83 자료와 유사한 결과다(Aoki, 1974; Han *et al.*, 1987; 통상산업부, 1995).

종합적으로 연구지역 퇴적층은 크게 Unit I, II, III로 구분될 수 있고, 연갈색의 Unit I은 흑갈색의 Unit II에 비해 높은 Ni/Cu 비를 보인다. Unit III은 흑색으로 Unit I, II에 비해 현저히 높은 금속 함량을 보이는데, 흑갈색의 Unit IIIa 층과 흑색의 Unit IIIb 층으로 뚜렷이 구분된다(Table 1, Fig. 4). Unit IIIb 층은 Unit IIIa 층에 비해 현저히 높은 망간 및 철 함량을 지니고 (Table 1, Fig. 4, 해양부, 1996), 정점 4, 18의 Unit IIIb 층 색상이 검은 이유는 이러한 망간과 철의 함량 차이에 기인한 것으로 보인다. 층서적으로는 정점 4에서 Unit IIb 상부에 Unit IIIa가 약간 나타나는 사실, 그리고 Unit IIIa에서는 올리고세-마이오세에 살았던 방산충이 간간히 출현하는 반면 Unit IIIb에서는 이러한 종들이 전혀 출현하지 않는 점(해양부, 1996) 등으로 미루어 판단할 때 Unit IIIb가 Unit IIIa 보다는 하부 퇴적물로 보인다. 한편 Unit II는 색상에 의한 구분은 불가능하지만 지화학적 자료에 근거하여 상부의 Unit IIa 층과 하부의 Unit IIb 층으로 구분될 수 있다. 즉 앞에서 기술된 바와 같이 Unit IIb 층은 Unit IIa 층에 비해 높은 구리 및 3+REEs/NASC 비(또는 큰 음의 Ce 이상치)를 지니고, 방산충의 용해도 증가(spicule 또는 spine의 출현 빈도 급증) 및 입도분포의 변화(unimodal 패턴에서 bimodal 패턴으로 변화), 스�멕타이트의 높은 함량 등의 특징을 지닌다(해양부, 1996).

퇴적물 깊이에 따른 금속 및 3+REEs 함량 변화의 고해양학적 고찰

퇴적물중 Ce은 3+REEs와 다른 행동양상을 보이기 때문에 Ce 이상치는 기존의 많은 연구에서 중요한 지표로 사용되어 왔다(Elderfield and Greaves, 1982; Fleet, 1984). 특히 해양환경에서 Ce은 3+REEs에 비해 쉽게 산화되고 주요 운반자는 금속산화물이며, 따라서 철 수산화물 또는 생물기원 아파타이트 (biogenic apatite)가 주요 운반자인 3+REEs와는 수층 거동 및 퇴적물중 속성작용 등 많은 측면에서 상이하다(Elderfield *et al.*, 1981b; Fleet, 1984).

연구지역 퇴적물중 Ce 이상치는 다음과 같은 식을 이용해 구했다(Toyoda *et al.*, 1990).

$$\text{The degree of Ce anomaly} = 5\text{Ce}_n / (4\text{La}_n + \text{Sm}_n)$$

여기서 n은 NASC(North American Shale Composite) 값으로 표준화(normalized) 된 것을 의미한다. 이 값이 1 보다 클 경우는 양의 Ce 이상치, 1 보다 작을 경우는 음의 Ce 이상치를 나타낸다. 특히 이 값이 0.5 이하로 작을 경우는 강한 음의 Ce 이상치 입을, 또는 표준화된 La, Pr, Sm 값에 비해 표준화된 Ce 값이 훨씬 작음을, 또는 Fig. 3의 정점 25에 나타난 원소별 분포도에 나타난 바와 같이 깊은 Ce 계곡을 지녔음을 의미한다. 한편, 연구지역 퇴적물중 3+REEs의 함량은 Unit 별로 크게 변화하지만

Table 1. Summary of sediment characters at each unit defined on the basis of sediment colors and geochemical characteristics of box core sediments in the KODES-96 area.

St. No.	Depth (cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Ni/Cu -	
St. 1	1	0.21	3.75	111	204	358	136	0.57	
	2	0.21	4.33	113	229	371	134	0.62	
	3	0.20	3.96	109	164	344	127	0.48	
	4	0.19	3.97	116	165	348	132	0.47	
	6	0.19	4.23	117	196	352	131	0.56	
	8	0.12	4.26	96	119	306	133	0.39	
	10	0.11	4.44	85	146	324	129	0.45	
	13	0.06	4.32	76	42	285	130	0.15	
	16	0.04	4.39	61	60	290	127	0.21	
	20	0.05	4.38	75	68	303	127	0.22	
St. 2	25	0.04	4.76	63	63	347	126	0.18	
	30	0.05	4.20	64	65	339	126	0.19	
	1	0.32	4.06	138	282	454	145	0.62	
	2	0.35	4.41	141	311	487	146	0.64	
	3	0.33	4.41	147	316	459	149	0.69	
	4	0.49	4.68	187	639	710	186	0.90	
	6	0.64	5.21	209	891	933	207	0.96	
	8	0.75	5.15	218	1020	978	211	1.04	
	10	0.63	5.27	202	756	780	194	0.97	
	13	0.59	4.85	208	788	792	200	0.99	
St. 4	16	0.57	4.87	204	768	778	199	0.99	
	20	0.53	4.82	205	698	680	199	1.03	
	1	0.26	4.18	123	371	401	133	0.92	
	2	0.24	3.99	116	335	403	132	0.83	
	3	0.23	4.21	121	334	383	140	0.87	
	4	0.24	4.32	122	306	391	131	0.78	
	6	0.18	4.40	110	277	402	134	0.69	
	8	0.12	5.25	86	218	367	130	0.59	
	10	0.09	4.99	90	205	347	137	0.59	
	13	0.04	5.96	58	151	353	133	0.43	
St. 4	16	0.05	6.33	51	136	472	154	0.29	
	20	0.25	4.33	123	324	409	131	0.79	
	22.5	0.71	7.17	195	333	948	197	0.35	
	25	0.50	6.82	146	230	838	188	0.27	
	27.5	0.82	6.40	213	368	958	194	0.38	
	30	1.09	7.69	216	498	1043	206	0.48	
	34	1.22	7.19	141	577	984	224	0.59	
	St. 6	2	0.25	4.09	182	292	385	131	0.76
		3	0.27	4.32	192	343	425	136	0.81
		4	0.25	4.22	187	353	430	137	0.82
6		0.25	4.76	205	322	564	156	0.57	
8		0.20	5.26	223	287	653	168	0.44	
10		0.36	6.36	207	400	764	171	0.52	
13		0.26	4.97	267	344	803	180	0.43	
16		0.25	4.99	298	323	712	181	0.45	
20		0.33	5.18	297	399	723	172	0.55	
St. 7		1	0.25	4.57	176	282	395	143	0.71
	2	0.24	4.63	174	242	383	138	0.63	
	3	0.23	4.35	170	225	375	132	0.60	
	4	0.22	4.85	179	235	385	138	0.61	
	6	0.20	4.37	165	244	376	135	0.65	
8	0.12	4.70	139	158	334	129	0.47		

Table 1. Continued.

St. No.	Depth (cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Ni/Cu -
St. 7	10	0.06	4.57	120	98	321	135	0.31
	13	0.04	3.95	114	60	282	129	0.21
	16	0.03	4.49	90	98	311	128	0.32
	20	0.04	4.80	119	120	342	130	0.35
	25	0.04	5.06	115	79	319	124	0.25
	30	0.12	4.35	207	123	656	142	0.19
	35	0.16	4.51	259	161	647	155	0.25
	40	0.18	4.61	270	196	629	161	0.31
St. 8	1	0.26	3.94	182	338	386	125	0.87
	2	0.25	4.03	176	353	384	127	0.92
	3	0.25	4.01	182	305	392	126	0.78
	4	0.24	4.16	177	311	379	129	0.82
	6	0.21	4.14	195	266	343	127	0.77
	8	0.25	4.89	322	386	402	147	0.96
	10	0.44	4.68	289	616	745	179	0.83
	13	0.51	4.67	257	727	772	186	0.94
	16	0.47	5.12	259	756	665	198	1.14
18	0.47	4.69	270	705	746	183	0.94	
St. 9	1	0.27	4.14	214	339	393	132	0.86
	2	0.26	3.83	214	296	379	127	0.78
	3	0.21	4.53	236	250	387	141	0.65
	4	0.25	3.95	221	263	369	137	0.71
	6	0.25	4.65	237	291	411	154	0.71
	8	0.24	4.63	243	318	411	157	0.77
	10	0.23	4.24	196	221	291	146	0.57
	13	0.14	0.96	65	86	180	44	0.48
	16	0.10	0.63	41	70	110	37	0.64
	20	0.14	1.09	45	74	102	37	0.73
St. 12	1	0.23	4.14	214	270	369	126	0.73
	2	0.22	4.09	207	276	382	128	0.72
	3	0.23	4.22	210	292	387	128	0.75
	4	0.24	5.07	216	297	369	125	0.80
	6	0.20	4.01	221	267	379	133	0.71
	8	0.16	4.07	203	198	342	125	0.58
	10	0.16	4.83	181	186	324	129	0.58
	13	0.10	4.38	168	134	307	120	0.44
	16	0.05	4.78	133	100	272	113	0.37
	20	0.04	4.73	126	99	303	137	0.33
	25	0.02	4.79	102	80	332	129	0.24
	30	0.03	5.50	126	61	392	140	0.16
St. 13	1	0.28	4.55	233	419	430	132	0.98
	2	0.27	4.79	238	402	395	134	1.02
	3	0.2	4.58	226	391	401	140	0.98
	4	0.23	4.77	232	384	392	135	0.98
	6	0.26	5.22	235	371	382	140	0.97
	8	0.29	4.16	239	449	414	134	1.08
	10	0.23	4.78	269	424	772	176	0.55
	13	0.30	4.99	269	586	826	179	0.71
	16	1.18	5.87	405	1486	1425	222	1.04
	20	1.07	5.37	298	1516	1238	250	1.22
	25	1.01	5.48	275	1442	957	237	1.51
29	0.81	4.78	277	1236	816	226	1.52	
St. 15	1	1.16	6.12	378	1680	1560	252	1.08

Table 1. Continued.

St. No.	Depth (cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Ni/Cu -
St. 15	2	0.81	6.46	358	1076	1136	239	0.95
	3	1.00	6.39	323	1380	1320	234	1.05
	4	1.41	7.88	345	1671	1492	257	1.12
	6	0.90	7.47	315	1127	1068	231	1.06
	8	0.85	6.59	259	1084	963	223	1.13
	10	0.94	6.46	251	1076	956	221	1.13
	13	0.87	7.35	215	1255	897	227	1.40
	16	1.17	7.38	222	1080	960	246	1.13
	20	1.11	7.46	154	1244	829	243	1.50
	25	1.11	8.68	173	1372	835	262	1.64
30	0.94	8.37	148	1069	713	238	1.50	
St. 17	1	0.20	4.00	151	363	424	139	0.86
	2	0.19	4.26	151	302	423	139	0.71
	3	0.22	4.31	173	299	478	150	0.63
	4	0.21	4.65	179	298	477	155	0.63
	6	0.03	0.81	30	120	120	30	1.00
	8	0.17	5.11	173	299	537	167	0.56
	10	0.06	6.00	113	299	1195	215	0.25
	13	0.04	5.58	108	240	779	192	0.31
	16	0.01	5.12	96	240	1018	216	0.24
	20	0.01	5.36	101	298	1012	214	0.29
St. 18	25	0.01	5.31	96	300	959	222	0.31
	30	0.01	6.26	89	298	954	215	0.31
	35	0.01	5.20	78	239	956	203	0.25
	40	0.04	5.48	96	240	898	198	0.27
	43	0.11	5.16	133	241	905	187	0.27
	1	0.22	4.31	232	334	392	221	0.85
	2	0.24	4.18	226	381	410	135	0.93
	3	0.20	4.27	218	265	361	130	0.74
	4	0.26	5.69	217	306	374	133	0.82
	6	0.19	4.56	213	220	338	128	0.65
St. 19	8	0.18	4.61	203	264	345	126	0.76
	10	0.07	4.92	135	146	366	142	0.40
	13	0.11	5.29	152	250	747	151	0.33
	16	0.07	6.46	82	129	997	170	0.13
	20	0.11	5.26	106	71	836	172	0.08
	22.5	0.15	5.31	129	145	773	164	0.19
	25	0.43	5.31	257	195	967	175	0.20
	27.5	1.51	7.24	569	563	1254	199	0.45
	30	1.17	6.07	622	678	1152	206	0.59
	32	1.85	6.25	832	1011	1286	215	0.79
St. 19	1	0.23	4.34	169	301	422	145	0.71
	2	0.21	4.29	173	358	417	149	0.86
	3	0.19	3.95	150	300	419	132	0.71
	4	0.22	4.32	186	360	420	150	0.86
	6	0.20	4.82	167	298	417	143	0.71
	8	0.16	4.13	162	239	359	138	0.67
	10	0.09	4.22	144	180	359	144	0.50
	13	0.05	4.15	126	180	301	132	0.60
	16	0.03	3.93	119	119	298	131	0.40
	20	0.04	4.94	132	120	359	144	0.33
25	0.03	4.69	96	180	360	138	0.50	
30	0.02	4.54	107	178	356	136	0.50	
35	0.04	4.30	147	183	366	134	0.50	
40	0.03	4.51	102	180	361	126	0.50	

Table 1. Continued.

St. No.	Depth (cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Ni/Cu -	
St. 21	1	0.58	5.13	245	626	790	184	0.79	
	2	0.71	5.40	257	875	968	215	0.90	
	3	0.58	4.88	192	653	750	189	0.87	
	4	0.67	5.19	184	786	889	209	0.88	
	6	0.68	5.06	178	776	859	214	0.90	
	8	0.67	5.42	150	706	777	205	0.91	
	10	0.69	4.80	123	762	807	226	0.94	
	13	0.62	4.95	58	675	738	81	0.92	
	14	0.19	1.51	113	212	208	209	1.02	
	St. 22	1	0.40	6.71	209	511	575	150	0.89
		2	0.41	6.35	216	491	575	154	0.85
		3	0.35	5.34	218	480	574	150	0.84
		4	0.31	6.06	234	410	610	161	0.67
		6	0.36	8.23	247	370	707	172	0.52
8		0.58	6.84	347	680	916	193	0.74	
10		0.66	6.38	304	776	931	198	0.83	
13		0.66	5.84	283	718	858	199	0.84	
16		0.88	7.58	266	1016	967	213	1.05	
20		0.79	6.20	264	985	833	214	1.18	
25		0.63	6.42	271	985	810	200	1.22	
30		0.60	6.49	286	1002	824	204	1.22	
35		0.55	6.61	269	905	819	194	1.11	
40		0.46	6.05	265	827	788	184	1.05	
St. 23	1	0.25	5.43	186	369	424	138	0.87	
	2	0.22	5.53	174	320	382	130	0.84	
	3	0.21	5.20	165	319	370	126	0.86	
	4	0.20	5.03	180	320	376	130	0.85	
	6	0.21	5.08	172	361	388	132	0.93	
	8	0.17	5.07	169	311	341	130	0.91	
	10	0.17	5.76	167	296	368	138	0.80	
	13	0.07	5.11	147	192	286	131	0.67	
	16	0.04	5.88	131	195	301	125	0.65	
	20	0.04	6.65	121	163	317	129	0.51	
	25	0.02	5.69	84	128	322	129	0.40	
	30	0.02	5.62	111	167	327	127	0.51	
	St. 24	1	0.12	5.77	133	186	334	116	0.56
		2	0.11	5.33	134	205	321	122	0.64
3		0.10	5.08	131	229	320	121	0.72	
4		0.13	6.58	130	259	370	119	0.70	
6		0.07	5.33	139	190	329	130	0.58	
8		0.09	4.91	129	229	327	133	0.70	
10		0.04	5.37	100	143	285	125	0.50	
13		0.02	4.86	78	134	260	99	0.52	
16		0.02	5.49	75	56	282	128	0.20	
20		0.03	5.69	76	93	278	116	0.33	
25		0.01	5.68	90	129	308	129	0.42	
30		0.00	5.91	84	180	337	130	0.53	
35		0.00	5.88	88	145	352	139	0.41	
40		0.00	5.98	81	131	364	131	0.36	
42	0.00	5.84	76	117	365	134	0.32		
St. 25	1	0.16	4.65	150	282	359	121	0.79	
	2	0.19	5.28	161	279	405	133	0.69	
	3	0.20	5.79	159	301	400	128	0.75	
	4	0.08	6.04	112	260	987	170	0.26	

Table 1. Continued.

St. No.	Depth (cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Ni/Cu -
St. 25	6	0.03	7.28	74	232	1154	192	0.20
	8	0.01	8.73	47	146	1102	190	0.13
	10	0.00	7.95	55	155	898	186	0.17
	13	0.01	8.89	51	136	1084	188	0.13
	16	0.01	8.54	41	149	1005	188	0.15
	20	0.05	12.87	45	168	938	185	0.18
25	0.10	9.56	44	143	872	205	0.16	

Ce은 Unit와 무관하게 거의 일정한 값을 나타낸다(Fig. 3). 따라서 Ce 이상치 변화는 3+REEs의 함량 변화를 대표할 수 있고, 본 연구에서는 Ce 이상치 변화를 전체적인 3+REEs 함량 변화의 지표로 선택했다.

생물체 잔해가 주요 구성성분인 연구지역 퇴적물중 음의 Ce 이상치(Fig. 5)는 수성기원 성분을 상당량 함유한 망간단괴 등 금속산화물에서 흔히 나타나는 양의 Ce 이상치와 밀접한 관계를 지닌다. 즉 해수중에서 형성된 Ce 산화물은 해저면으로 신속히 공급되어 망간단괴 형성 등에 기여하고 따라서 망간단괴는 통상 양의 Ce 이상치를 보인다(Haskin et al., 1968). 반면 해수중 Ce은 산화되어 해저면으로 신속히 제거되고 그 결과 해수중 Ce 농도는 감소하며, 따라서 Ce 농도가 낮은 해수중에서 성장한 규질 또는 탄산질 생물체는 음의 Ce 이상치를 지닌 상태로 해저면에 퇴적된다. 태평양이나 대서양 해수중 회토류가 대부분 음의 이상치를 보이는 보고(DeBaar et al., 1985), 또는 C-C 지역의 방산층이 풍부한 규질 연니 또는 탄산질 유공충층 회토류 원소 분포가 음의 이상치를 보인다는 보고 등은 이러한 생각을 뒷받침한다(Elderfield et al., 1981b).

퇴적물 깊이 또는 퇴적상에 따른 회토류 원소의 함량 차이에도 불구하고 연구지역 퇴적물중 회토류 원소들 사이에는 높은 상관관계가 나타나고, 예외적으로 Ce의 경우는 다른 회토류 원소와 낮은 상관관계를 보인다(Fig. 6). 이러한 결과는 3+REEs들의 거동이 유사함을 의미하며, 이는 3+REEs가 자연계에서 +3가의 동일한 산화상태를 유지하기 때문에 초래된 결과다. Ce이 La 등과 낮은 상관관계를 보이는 원인은 앞에서 언급된 바와 같이 이 원소가 3+REEs와 달리 자연계에서 통상 +4가 상태로 안정하고, 따라서 산소가 풍부한 수계에서는 3+REEs에 비해 쉽게 산화되어 해저면으로 신속히 제거된다는 사실과 유관하다. 한편 Eu은 통상 +2가의 산화상태를 유지하여 다른 회토류 원소와 거동이 상이하다는 연구결과가 있지만(Elderfield and Greaves, 1982; Fleet, 1984), La-Eu간 높은 상관관계(r=0.90)를 고려할 때 본 연구에서는 이러한 상이성을 예측하기 어렵다(Fig. 6).

연구지역 모든 정점의 Unit I중 Ce 이상치는 0.5~1의 값을 보인다(Fig. 5). Unit II는 정점 1, 4, 7, 12, 17, 18, 19, 23, 24, 25에 나타나는데, Unit I과 유사하게 대부분 0.5~1을 나타낸다. 그러나 정점 4(23~25 cm), 정점 6(6 cm-), 정점 7(30 cm-), 정점 17(10 cm-), 정점 18(13~25 cm), 정점 25(4 cm-) 즉 Unit IIb 층은 Unit II 층임에도 불구하고 Ce 이상치가 0.5 이하로 매우 작게 나타난다(Fig. 5, 해양부, 1996). 또한 이 층에서는 특이하게 망간, 니켈

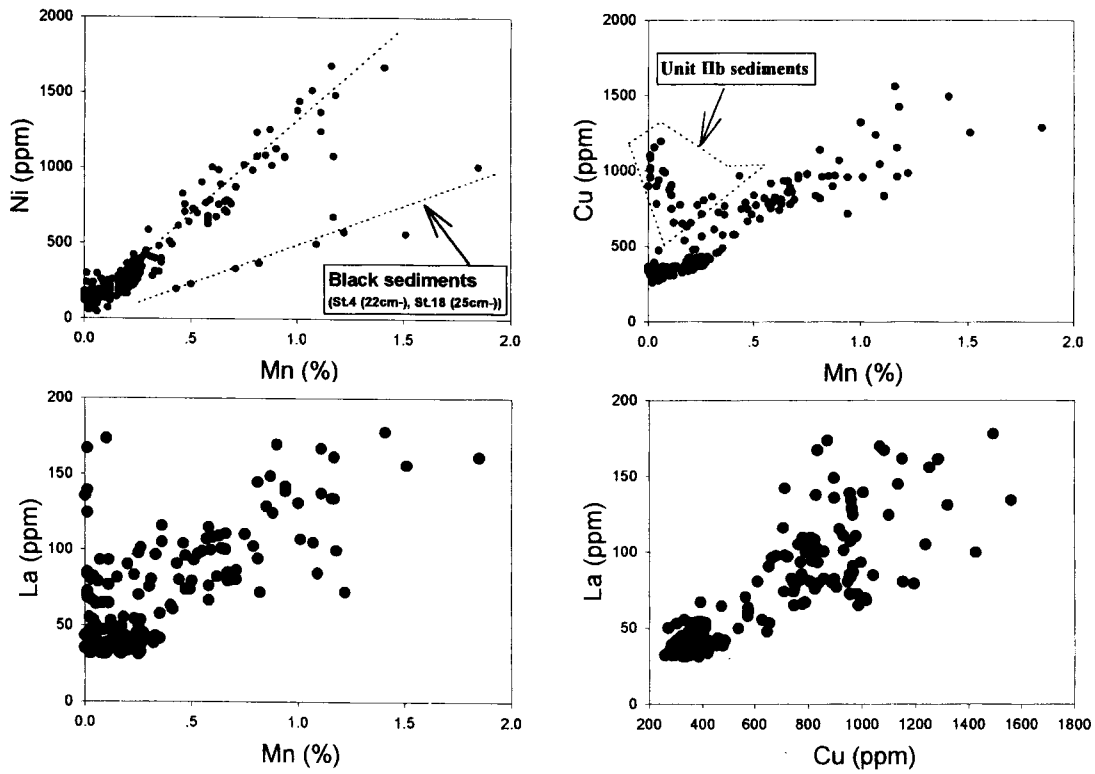


Fig. 4. Pair diagrams between Mn and Ni, Mn and Cu, Mn and La, Cu and La of box core sediments in the KODES-96 area.

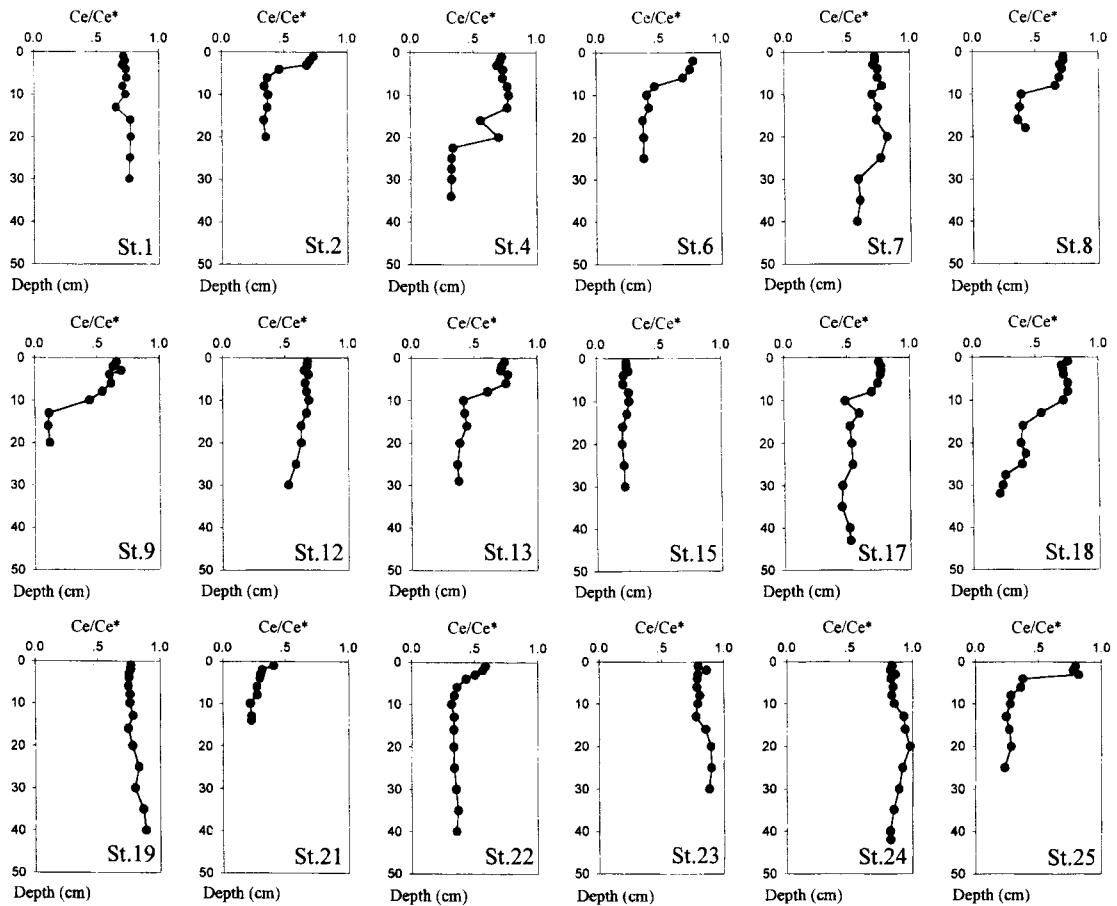


Fig. 5. Depth profiles of ce anomalies (Ce/Ce^*) of box core sediments at each sampling sites in the KODES-96 area.

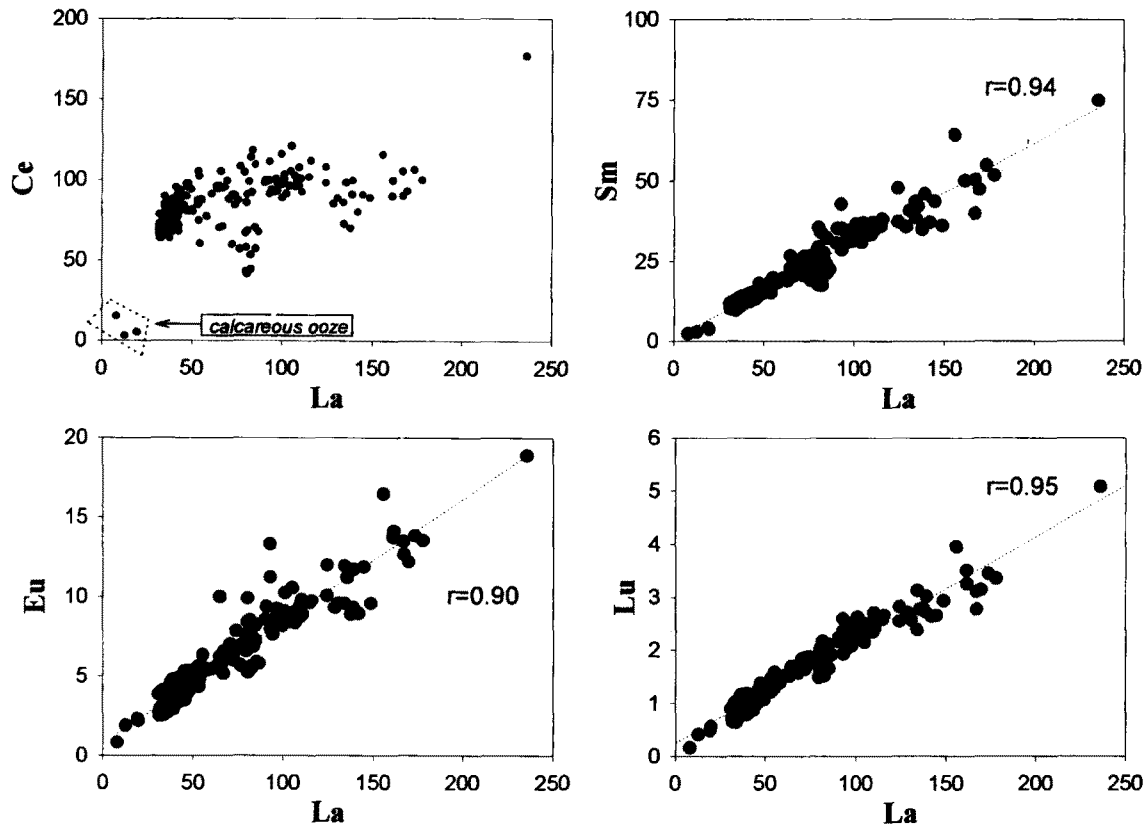


Fig. 6. Pair diagrams between La and Ce, Sm, Eu, Lu of box core sediments in the KODES-96 area.

의 함량이 낮은데도 불구하고 구리가 600 ppm 이상으로 높다 (Table 1; 해양부, 1996). 이러한 양상은 Mn-Cu, REEs-Cu, 그리고 Ce/Ce*-La(Sm, Cu)간 상관관계도에 잘 나타난다(Figs. 4, 7). 정점 4, 8, 13, 15, 18, 22에서는 Unit III가 나타나는데, 여기에서는 공통적으로 0.5 이하의 낮은 Ce 이상치가 나타난다(Fig. 5). Unit IIb, III 층에서 3+REEs 함량이 높은 원인은 이들 층에 3+REEs가 농축된 Ca-P 화합물이 높기 때문이다. 이러한 사실과 유사한 결과는 이미 여러 논문에서 보고되었으며(Elderfield *et al.*, 1981b; Fleet, 1984; Toyoda *et al.*, 1990), 인근의 KODOS-95 지역에서 Unit I, II에 비해 Unit III 퇴적물중 3+REEs의 함량이 현저히 높게 나타나는 원인이 스�멕타이트 또는 미세방간단괴중 높은 3+REEs 함량의 영향보다는 높은 희토류 원소 함량을 지닌 어류 잔해물 영향을 받아 나타난 결과로 보고된 바 있다(통상산업부, 1995). 한편, 열수작용의 영향을 받은 퇴적물중 희토류 원소 함량의 증가는 배제될 수 있다(Fleet, 1984; Ruhlin and Owen, 1986; Owen and Olivarez, 1988).

연구지역 Unit IIb 층에서 구리와 3+REEs가 높게 나타나는 현상은 이들의 공급 기원이 서로 유관함을 시사한다. 태평양 전반 퇴적물중 구리 함량이 높은 퇴적물에서도 P₂O₅ 함량은 높게 나타난다(Toyoda and Masuda, 1990). 또한 일반적으로 Sr-Ca-P₂O₅ 간 상관관계가 높은 점(Toyoda *et al.*, 1990; Toyoda and Masuda, 1990) 그리고 인근 연구지역(KODOS-95 지역) 퇴적물중 Sr과 구리 함량간 상관관계가 높게 나타나는 점(통상산업부, 1995) 등은 구리와 Ca-P 화합물 그리고 3+REEs 간에 어떤 밀접

한 상관관계가 있을 수 있음을 암시한다. 한편 구리는 유기물과 높은 상관성을 가지는 원소로 통상 알려져 있는데(Chester, 1990), 본 연구지역에서는 Unit I에 비해 심도가 깊은 Unit II 퇴적물중 유기물 함량은 작다(해양부, 1996). 따라서 높은 구리 함량이 퇴적물중 유기물 함량과 유관하다고 생각하기는 어렵다.

Unit II와 Unit III 사이에 나타나는 퇴적결층을 제3기 말과 제4기 초 사이 시기에 형성된 것이라 하고(정, 1994; Jung *et al.*, 1997; 해양부, 1996) 이 시기를 대략 3.3~11 Ma라고 할 때(Kennet, 1982; Halbach, 1988), 희토류 원소의 함량변화가 크게 나타나는 Unit IIb 층의 퇴적시기는 대략 2~3 Ma 그리고 Unit III층은 대략 11 Ma 보다는 이전 시기에 퇴적된 것으로 추측할 수 있다. 한편 연구지역 태평양 지판의 확장방향은 대략 북남서(0~40 Ma) 또는 북북서(40~70 Ma)진 방향이고 확장속도는 약 10 cm/yr로 일정하다(Kennet, 1982). 따라서 Unit IIb, III 층이 위치한 지점은 현재보다 각각 200~300 km, 1,100 km 남동동 방향에 위치했으므로 EPR과는 약 2,700 km(8°N, 128°W) 그리고 1,900 km(5~6°N, 114~116°W) 떨어진 위치에 있었던 것으로 계산된다. 위와 같은 지판의 확장 속도를 고려할 때 EPR과 3,000 km 떨어진 연구지역 퇴적물은 30 Ma 즉 올리고세 중기 이후에 퇴적된 것으로 계산되므로 Unit III 층은 대략 11~30 Ma 동안 쌓인 것이라 할 수 있다.

북태평양에서 ITCZ(inter-tropical convergence zone) 및 적도 반류(equatorial counter current)가 대략 0~10°N인 점을 고려할 때 Unit IIb 층이 퇴적된 위치는 적도 고생산대에 근접해 있었으며, Unit III는 퇴적될 시기에 적도 고생산역 상에 위치하고

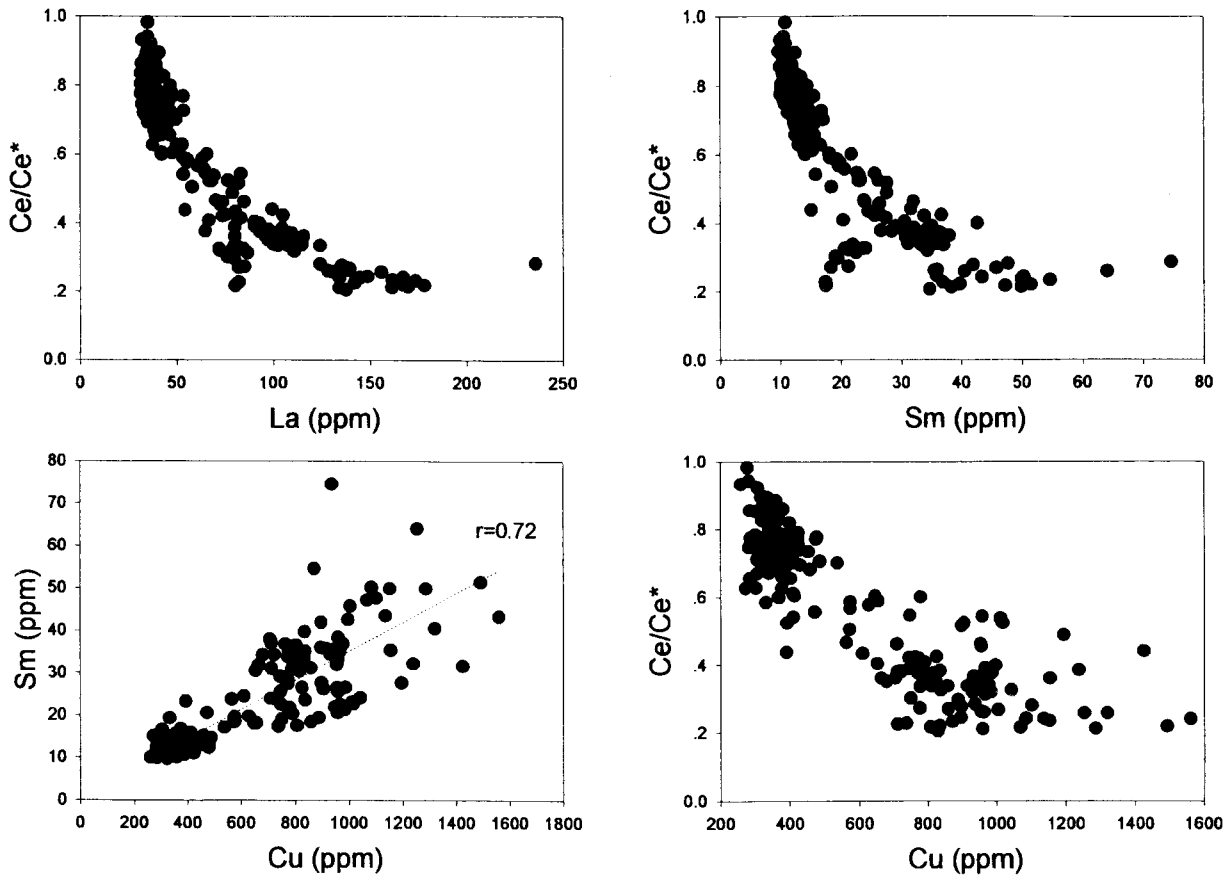


Fig. 7. Pair diagrams between La and Ce/Ce*, Sm and Ce/Ce*, Cu and Sm, Cu and Ce/Ce* of box core sediments in the KODES-96 area.

EPR과도 상당히 가까운 곳에 위치했었을 것이다. 한편 마이오세 중기에는 태평양 수층 생산성이 높았던 것으로 보고된다 (van Andel *et al.*, 1975; Hein *et al.*, 1978; Kennet, 1982). 또한 Unit II, III간 퇴적결층이 형성된 마이오세 말 - 플라이오세 시기에는 지구 기후의 급랭과 남극 저층수 흐름의 강화에 따른 퇴적결층의 형성 및 활발한 기상 유동과 이에 따른 높은 해수중 생산력 등이 보고되어 있다(Savin, 1975; Leinen and Stakes, 1979; Jung *et al.*, 1997). 한편 연구지역 서쪽에 위치한 140°E에서 퇴적물 트랩을 이용해 관측된 현재의 적도 고생산대는 적도에서 5°N 지역까지 거의 일정한 높은 생산력을 유지하며 분포한다 (Honjo *et al.*, 1995). 따라서 적도 고생산대가 동쪽으로 가면서 남북으로 확장되는 점(Koblentz-Mishke, 1965), 과거의 생산력이 높았던 점, 그리고 Honjo *et al.*(1995)의 보고에는 6~8°N 지역의 자료가 없는 점 등을 고려할 때 Unit IIb, III가 퇴적된 시기에는 이들 상부 수층의 생산력이 높았던 것으로 생각된다.

일반적으로 높은 생산력은 해수중 많은 부유 생물이 분포했음을 의미하고, 이들 생물체들은 유기체와 친화성이 강한 구리, 희토류 원소 등과 함께 해저면으로 퇴적되었을 것이다. 유기물이 분해됨에 따라 퇴적물중 구리도 분해되어 공급수로 확산되고 결국 망간단괴로 이동침적되거나, 또는 Unit IIb, III 층에서 특히 높은 함량을 보이는 스�멕타이트 등 판상 점토광물 모서리의 음 전하와 결합하여 퇴적물에 잔류했을 가능성이 있다. DOMES A, B, C의 전 지역에서 채취된 퇴적물에 대한 연

구 결과 망간, 니켈, 코발트 등의 함량이 KODES 지역 Unit I, II에서의 함량들과 유사하지만 구리는 1,000~1,500 ppm으로 매우 높는데(Hein *et al.*, 1979), 이러한 사실은 구리와 스�멕타이트의 결합 가능성을 뒷받침한다. 한편 유기물은 분해되어 퇴적층에서 사라졌지만 용해에 강하고 또한 3+REEs, Ca-P 화합물 등이 농축되어 있는 생물체 잔해들은 퇴적층에 잔류한 것으로 보인다. 따라서 연구지역 주상 퇴적물에 나타나는 구리 및 희토류 원소의 함량변화는 연구지역이 제3기 말 시기에 적도 고생산대를 지나는 동안 많은 유기물 공급과 유관한 것으로 생각된다.

Unit III 하부층에 나타나는 높은 망간, 철 함량의 흑색 퇴적층은 EPR과 근접한 곳에서 퇴적된 것으로 화산 기원 물질을 공급 받아서 나타난 결과로 보인다. 특히 EPR과 1,900 km 보다 가까운 거리에서 형성된 것으로 보이는 Unit IIIb에서 Mn과 Fe는 각각 1%, 7% 이상의 높은 값을 보이는데, EPR과 약 1,100 km 떨어져 있고 열수작용을 받은 태평양 코아 퇴적물중 Mn과 Fe가 각각 2%, 10%인 점을 고려할 때(Ruhlin and Owen, 1986), Unit IIIb중 이러한 높은 값은 열수작용을 받았음을 시사한다.

결론

연구지역이 속한 태평양 지판의 확장 속도 및 방향을 고려할 때 연구지역 퇴적물은 30 Ma 이후에 퇴적되었고, 따라서 11~30

Ma의 연령을 가진 Unit III는 EPR 그리고 적도지역과 가까운 위치 특히 Unit IIIb 층은 EPR과 가까운 위치에서 퇴적되었다. Unit IIb 또한 적도 고생산대의 영향을 받았을 것으로 계산되고, 결국 해수중 많은 유기체들은 이들과 친화성이 강한 구리, 희토류 원소 등과 함께 해저면으로 퇴적되었을 것으로 생각된다. 유기물이 분해됨에 따라 퇴적물중 구리도 분해되어 퇴적층에 잔존하거나 해저면으로 이동하였고, 용해에 강하고 3+REEs이 농축되어 있는(또는 강한 음의 Ce 이상치를 지닌) 생물체 잔해 즉 Ca-P 화합물들은 퇴적층에 잔류했을 것으로 보인다.

즉 연구지역 주상 퇴적물에서 나타나는 구리 및 희토류 원소의 함량변화는 연구지역이 제 3기 말 시기에 적도 고생산대를 지나는 동안 많은 유기물을 공급 받아 나타난 결과이고, Unit III 하부층에 나타나는 높은 망간, 철 함량의 흑색 퇴적층은 EPR에서 공급된 화산 기원의 철, 망간 등을 공급 받아 초래된 결과로 사료된다.

사 사

본 연구를 위해 분석 및 자료정리를 도와준 김경홍, 고영탁, 김현섭 연구원, 그리고 탐사 및 시료채취 과정에서 도움을 준 현정호 박사님과 지상범 선임연구원께 감사를 드립니다. 이 연구는 해양수산부의 '96 심해저 광물자원탐사 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 과기처, 1991. 태평양 심해저 광물자원 개발 연구. 과기처. BSPG 00118-369-5.
- 상공자원부, 1994. 심해저 광물자원 탐사 용역 보고서. 상공자원부
- 통상산업부, 1995. 심해저 광물자원 탐사 용역 보고서. 통상산업부
- 정희수, 강정극, 정갑식, 신동혁, 1991. KODOS-89 지역 표층의 황색 퇴적물과 그 하부 갈색 퇴적물의 지구화학적 특성. 한국해양학회지, **26**: 193-203.
- 정희수, 1994. 북동 태평양 KODOS 지역 퇴적물과 공급수 및 망간 단괴의 지구화학적 특성. 서울대학교 이학박사 학위논문.
- 해양부, 1996. 심해저 광물자원 탐사 용역 보고서. 해양부
- Aoki, S., N. Kohyama and T. Sudo, 1974. An iron-rich montmorillonite in a sediment core from the northeastern Pacific. *Deep-Sea Res.*, **21**: 865-875.
- Chester, R, 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman.
- DeBaar, H.J., M.P. Bacon and P.G. Brewer, 1983. Rare earth distributions with a positive Ce anomaly in the western north Atlantic ocean. *Nature*, **301**: 324-327.
- DeBarr, H.J., M.P. Bacon and P.G. Brewer, 1985. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**: 1943-1959.
- Elderfield, H., C.J. Hawkesworth, M.J. Greaves and S.E. Calvert, 1981a. Rare earth element zonation in Pacific ferromanganese nodules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 1231-1234.
- Elderfield, H., C.J. Hawkesworth, M.J. Greaves and S.E. Calvert, 1981b. Rare earth element geochemistry of oceanic ferromanganese nodules and associated sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 513-528.
- Elderfield, H., and M.J. Greaves, 1982. Rare earth elements in seawater. *Nature*, **296**: 214-219.
- Elderfield, H. and E.R. Sholkovitz, 1987. Rare earth elements in the pore waters of reducing nearshore sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **82**: 280-288.
- Fleet, A.J., 1984. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. In: Rare Earth Element Geochemistry. edited by P. Henderson, Elsevier.
- Goldberg, E.D., M. Koide, R.A. Schmitt and R.H. Smith, 1963. Rare earth distributions in the marine environment. *J. Geophys. Res.*, **68**: 4209-4217.
- Han, S.J., K.S. Jeong and D.H. Shin, 1987. Minerals in the core sediments from the KONOD-1 area; Northeastern equatorial Pacific. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**: 119-129.
- Halbach, P., G. Friedrich and U. Stackelberg, 1988. The Manganese Nodule Belt of the Pacific Ocean. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 254pp.
- Haskin, L.A., M.A. Haskin, F.A. Frey, K.A. Collins, C.R. Keedy and M.A. Haskin, 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Origin and Distribution of the Elements. edited by L.H. Ahrens, Pergamon, Oxford.
- Hein, J.R., D.W. Scholl and J. Miller, 1978. Episodes of Aleutian ridge explosive volcanism. *Science*, **199**: 137-141.
- Hein, J.R., H.W. Yeh and E. Alexander, 1979. Origin of iron-rich montmorillonite from the manganese nodule belt of the north equatorial Pacific. *Clays and Clay Min.*, **27**: 185-194.
- Honjo, S., J. Dymond, R. Collier and S.J. Manganini, 1995. Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Res.*, **42**: 831-870.
- Horn, D.R., B.N. Horn and M.N. Delach, 1973. Copper and Nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. In: The Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for the Exploration. edited by M. Morgenstein, Valdivia manganese exploration group, Univ. of Hawaii and IDOE/NSF, Honolulu.
- Jung, Hoi-Soo, C.B. Lee, K.S. Jeong and J.K. Kang, 1997. Geochemical and mineralogical properties in two-color core sediments from the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, NE equatorial Pacific. *Mar. Geol.*, (in press).
- Kennett, J., 1982. Marine Geology. Prentice-Hall, Inc..
- Koblentz-Mishke, O.I., 1965. Primary production in the Pacific. *Oceanologia*, **5**: 104-116.
- Leinen, M. and D. Stakes, 1979. Metal accumulation rates in the central equatorial Pacific during Cenozoic time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **90**: 357-375.
- Munsell, 1988. Soil Color Chart. McBeth Div., Kolmorgen Corp., Mayland.
- Murray, R.W., M.R.B. Brink, H.J. Brumsack, D.C. Gerlach and G.P. Russ III, 1991. Rare earth elements in Japan sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce*: Results from ODP Leg 127. *Geo-*

- chim. Cosmochim. Acta*, **55**: 2453-2466.
- Owen, R.M. and A.M. Olivarez, 1988. Geochemistry of rare earth elements in Pacific hydrothermal sediments. *Mar. Chem.*, **25**: 183-196.
- Ruhlin, D.E. and R.M. Owen, 1986. The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise: Examination of a seawater scavenging mechanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**: 393-400.
- Savin, S.M., 1975. Tertiary marine paleotemperatures. *Geol. Soc. Am. Bull.* **86**: 1499-1510.
- Toyoda, K., Y. Nakamura and A. Masuda, 1990. Rare earth elements of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**: 1093-1103.
- Toyoda, K. and A. Masuda, 1990. Sedimentary environments and chemical composition of Pacific Pelagic sediments. *Chem. Geol.*, **88**: 127-141.
- Van Andel, T.J., G.R. Heath and T.C. Moor, Jr., 1975. Cenozoic tectonics, sedimentation and paleoceanography of the central equatorial Pacific. *Geol. Soc. Am. Memoir*, 143.
- Yamashige, T., M. Yamamoto and H. Sunahara, 1989. Comparison of decomposition methods for the analysis of atmospheric particulates by atomic absorption spectrometry. *Analyst*, **114**: 1071-1077.