

남극 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 미량원소

박병권 · 윤호일

한국해양연구소 극지연구센터

Trace Elements in Sediments of Admiralty Bay and Bransfield Strait, Antarctica

Byong-Kwon Park and Ho Il Yoon

*Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

요약: 이 연구에서는 남극 South Shetland 열도에 위치한 Admiralty 만과 전형적 배호분지인 Bransfield 해협의 이질퇴적물에 함유되어 있는 미량원소와 희토류원소들의 함량과 분포형태를 연구하여, 두 분지 퇴적물의 기원암을 밝히고자 하였다. 분석시에는 유도결합 플라즈마 질량분석기를 사용하였다.

퇴적물에 함유되어 있는 미량원소 전체 함량은 두 분지 사이에 큰 차이가 없으나 Bransfield 해협 퇴적물에서는 Admiralty 만 퇴적물에 비해 미량원소별 함량이 분산되어 있다. 희토류원소의 함량을 chondrite 값에 표준화한 분포형태에서는 두 분지퇴적물이 공히 분별작용을 받아 경희토류 원소들이 중희토류 원소들에 비해 증가되어 있다. 또한 NASC 값에 표준화한 분포형태에서는 두 분지퇴적물에 공히 경희토류 원소들이 중희토류 원소들에 비해 감소되어 있다. Chondrite값에 표준화한 분포형태에서는 두 지역 퇴적물들 공히 약간씩 부의 이상을 보이고, NASC값에 표준화한 분포형태에서는 두 지역 퇴적물들 공히 Ce은 부의 이상을 Eu은 정의 이상을 보인다.

미량원소와 희토류원소들의 함량, 원소간 비율 및 분포형태로 보아 두 분지 퇴적물들은 맨틀 혹은 하부 대륙지각과 상부 대륙지각 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다. 또한 La-Th-Sc 성분으로 보아 두 분지 퇴적물 성분은 능동적 대륙연변부 퇴적물 성분의 범위에 속하며, 전체 대륙지각 평균성분과 대양저 산맥 현무암의 평균성분 사이에 놓인다. 따라서 두 분지 퇴적물의 지화학적 성분은 지질시대가 오래되지 않고 마그마의 분화작용을 받지 않은 호상열도와 분화작용을 받은 호상열도의 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다. 궁극적으로 두 분지 퇴적물의 기원암은 맨틀에 기원한 마그마가 지각을 관입하여 기존의 지각 구성물질과 동화, 혼합 혹은 재용융되어 만들어진 마그마 화성작용의 산물로 해석된다.

주요어: 미량원소, 희토류 원소, 유도결합 프라즈마 질량분석기, Admiralty 만, Bransfield 해협

ABSTRACT: To investigate the origin of the argillaceous sediments of Admiralty Bay and Bransfield Strait and the distribution pattern of both trace earth elements of the sediments, twenty seven sediment samples from two piston cores collected from the two basins were analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer.

Total amounts of trace and rare earth elements of the sediments from the two basins are almost same, but the abundances of each elements are slightly scattered in Bransfield Strait compared to Admiralty Bay. The amounts of each trace element are also varied in the two basins, except for rare earth elements. All the sediments are normally fractionated and enriched in light rare earth elements, showing negative Ce and Eu anomalies in the chondrite-normalized patterns, whereas in the NASC-normalized patterns the sediments are depleted in light rare earth elements showing negative Ce and positive Eu anomalies.

The results of abundances, ratios of elements and chondrite-normalized pattern of trace and rare earth elements indicate that the composition of the argillaceous sediments in the basins is admixture of mantle or lower continental crust and upper continental crust. The La-Th-Sc relationships also show that the argillaceous sediments are plotted to the area of active continental margin sediments as well as the area between the bulk continental crust and mid-oceanic ridge, indicating that the sediments are composed of the mixture of young undifferentiated and differentiated (intracrustal) arc materials. As a result, the origin of the sediments appears to be related to the processes of assimilation, mixing and remelting of the crustal material due to the continental magmatism derived from the partial melting of mantle.

Key words: trace and rare earth elements, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Admiralty Bay, Bransfield Strait

서 론

쇄설성 퇴적물의 기원(provenance)에 관한 연구는 퇴적학 연구의 중요한 부분이다. 전통적으로 퇴적물의 기원에 관한 연구는 퇴적물의 조직(texture), 암석 및 광물의 분류 등의 방법을 사용해 왔다. 최근에는 정밀한 분석기기가 개발되어 퇴적물의 미량원소 및 동위원소 성분비의 연구를 통해 쇄설성 퇴적물의 기원을 밝힐 수 있게 되었다. 또한 퇴적물의 지화학적 조성으로부터 상부 대륙지각의 성분을 추적할 수 있으며 대륙지각의 형성과 진화에 관한 정보도 얻을 수 있다(Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1990).

해저 퇴적물은 대륙지각이 장기간 풍화, 침식을 받아 생성되고 해저로 운반되어 형성된다. 이 과정에서 퇴적작용은 장기간 지표면에 노출된 대륙지각을 풍화 침식하게 되므로 대륙지각 성분을 균등하게 연도록 분배하는 역할을 하게 된다. 따라서 지질시대에 따른 퇴적물 화학조성의 연속적인 변화는 상부 대륙지각의 화학조성의 변화를 반영한다. 특히 해저 퇴적물 중 저탁류암은 대륙지각의 풍화, 침식 작용의 산물인 쇄설성 퇴적물이 단시간에 다량 운반 퇴적된 것으로 많은 양의 이질 퇴적물(argillaceous sediments)이 포함되어 있다. 이질 퇴적물은 오랜 지질시대에 걸쳐 형성된 퇴적물 중 양적으로 가장 많이 산출된다. 또한 이질 퇴적물은 지표면의 여러 종류의 암석들이 장기간 풍화되고 수차례에 걸쳐 재순환과정

을 거친 산물로서 다른 종류의 퇴적물보다 대륙지각 성분을 잘 대표한다. 그리고 이질 퇴적물에는 미량원소와 희토류 원소들이 다른 퇴적물에 비해 다량 함유되어 있어서 상부 대륙지각의 진화를 지화학적으로 연구하는데 좋은 대상물이라 할 수 있다.

대륙연변부는 대륙지각과 해양지각이 만나는 곳으로 대륙지각에 새로운 물질이 첨가되고 조성이 변하는 곳이다. 대륙연변부에는 많은 해양퇴적물이 섭입(subduction)되어 대륙지각 하부로 이동되고 부분적으로 용융되어 새로운 마그마를 생성시켜 대륙지각 성분을 변화시킬 뿐 아니라 많은 지각운동이 일어나는 능동적 연변부(active margin)와 대륙지각 성분이 점진적으로 해양지각 성분으로 변화하는 수동적 연변부(passive margin)가 있다. 능동적 연변부에는 화산 활동과 마그마 작용이 활발하여 새로운 화성암들이 생성되고 주변 해양분지에도 비교적 새로운 지각구성 물질이 풍화 침식 운반되어 퇴적된다. 반면에 수동적 연변부 해저에서는 넓은 지역에 걸쳐 장기간 노출되어 있던 비교적 오래된 지각물질이 풍화 침식되어 퇴적된다. 따라서 대륙지각의 진화를 연구하기 위해서는 능동적인 연변부와 수동적 연변부 주변의 해저퇴적물의 조성을 비교 연구하여야 한다.

지화학적 조성을 통하여 퇴적물의 기원을 알기 위해서는 그 원소가 풍화 침식 운반 퇴적 및 축적작용을 받으면서 일어나는 화학적 변화를 먼저 알아야 한다. 이러한 변화는 매우 복잡하여 자세하게 구분하기 어려우나 희토류 원소, Th, Sc 등

의 몇몇 원소들은 해수에 용해되지 않으며 주로 쇄설성 기원의 퇴적물 성분과 함께 운반 퇴적된다. 이들 원소들은 속성작용과 변성작용에 매우 강하며 Zr, Hf 및 Sm과 같은 중광물에 의해 조절되는 분별작용에도 영향을 덜 받는다. 희토류는 La에서 Lu까지의 원소들로 지화학적 거동이 서로 유사하여 퇴적작용에서 지화학적 환경변화를 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 경희토류 원소(LREE)와 중희토류 원소(HREE)의 분포 형태, Eu과 다른 3가의 희토류 원소와의 차이 등이 화성암 분화작용과 밀접한 관계가 있으며, 이러한 특성은 쇄설성 퇴적물에 잘 보존되어 있어서 쇄설성 퇴적물의 기원연구에 활용되고 있다 (Taylor and McLennan, McLennan et al., 1990; McLennan and Hemming, 1992).

이 연구에서는 남극대륙과 태평양판의 상호작용으로 South Shetland 해구를 따라 형성된 South Shetland 열도와 남극반도가 열개(rifting)되어 형성된 Bransfield 해협의 이질 퇴적물과 South Shetland 열도중의 하나인 King George 섬에 발달한 Admiralty 만의 이질 퇴적물을 지화학적으로 분석하여 퇴적물과 기원암과의 관계를 규명하고자 한다. 그리고 해구-호상열도에서 생성되는 새로운 대륙지각 구성물질의 미량원소와 희토류 원소의 분포형태를 파악하고 기존의 대륙지각 진화에 관한 지화학적 자료들과 비교 검토하고자 한다.

South Shetland 열도의 지체구조

South Shetland 열도는 서남쪽의 Smith 섬으로부터 동북쪽의 Elephant 섬과 Clarence 섬에 이르는 열도를 지칭하며 남극반도에서 북동 방향으로 약 100 Km 떨어져 위치하고 있다. South Shetland 열도는 남동쪽에 Bransfield 해협이 위치하고, 북서쪽에 South Shetland 해구가 그리고 북쪽에 전환 단층이 발달한 대륙판(continental plate) 위에 놓여 있다(Fig. 1). King George 섬을 위시한 South Shetland 열도의 대부분 섬들은 주라기 말에서 백악기 초에 남서 방향으로 형성되기 시작하여 제3기에 와서는 현재의 모습을 갖추게 되었다 (Hobbs, 1968; Smellie, 1983; Smellie et al., 1984).

South Shetland 해구는 남극반도 주변 중 태평

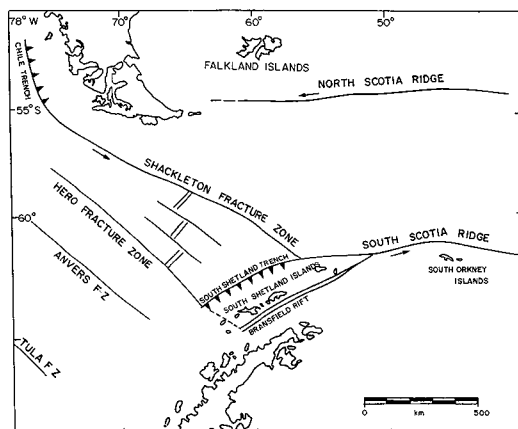


Fig. 1. Simplified tectonic map of the South Shetland Islands compiled from Craddock (1981) and British Antarctic Survey (1985).

양 연안에 존재하였던 섭입대의 남은 부분이다. South Shetland 해구는 남극판과 태평양판 사이에 존재하였던 Phoenix 판의 지속적인 확장축 이동으로 해구와 충돌하여 소멸되면서 그 일부가 Hero Fracture Zone 북동쪽에 남아 있는 것이다(Herron and Tucholke, 1976; Barker 1982; Larter and Barker, 1991).

South Shetland 해구에서의 섭입작용에 관해서는 Barker and Dalziel(1983)은 아직도 계속되고 있는 것으로, 그리고 Forsyth(1975)와 GRAPE Team (1990)은 섭입작용은 정지되었고 다만 과거 섭입작용의 잔여 활동으로 Bransfield 해협에 화산활동이 있을 뿐이라고 하였다. 반면 Larter and Barker(1991)은 Bransfield 해협에 섭입작용이 아직 계속되고 있다고 주장하기도 한다. 결국 이 지역에서의 섭입의 연속성 문제는 이후 더 논의가 이루어져야 할 것이다.

신생대 중기에서 말기 사이 South Shetland 해구에서 섭입작용이 멈추면서 Scotia 해협의 지각확장이 시작되었으며 이때 South Shetland 열도와 남극반도의 판내 확장 지각운동(intra-plate tensional tectonics)에 의해 Bransfield 해협이 형성되었다(Hawkes, 1961; Barker, 1982; Parra et al., 1984; Pelayo and Wiens, 1986). 그 결과 South Shetland 열도는 남극반도로부터 북동쪽으로 약 65 km 이동되었으며, South Orkney 군도는 북동쪽으로 이

으로 이동되어 Powell 분지를 형성하였다. 최초의 열개 작용은 올리고세 말부터 마이오세 초까지(22-26 Ma BP) 계속되었다(Birkenmajer, 1992). South Shetland 열도가 남극반도에서 분리되면서 지각 확장축에 따라 alkali 성분의 화산암으로 구성된 Deception 섬, Penguin 섬, Bridgeman 섬이 형성되었다(Ferran, 1982; Parra et al., 1983). 이러한 alkali 계열 화산활동은 마이오세 이후 현재까지 남미대륙을 위시하여 Scotia 해 남극반도, Marie Byrd Land, Northern Victoria Land, Bailey Islands, New Zealand을 잇는 매우 긴 화산대를 이루고 있다.

Bransfield 분지에는 Bransfield 열곡이 발달되어 있다. 이 열곡은 200만년된 것으로(Weaver et al., 1982; Gonzalez-Ferran, 1991) 넓이가 5-15 km에 이르며 이 열곡의 축선을 따라 아직 지진이 발생하고 축선상에 위치하고 있는 섬들에서 화산 활동이 계속되고 있는 것으로 보아 아직 열개작용이 계속되는 것으로 보인다. 이 열곡은 대체로 0.25-0.75 cm/y의 속도로 지난 200만년간 확장된 것으로 보인다(Gonzalez-Ferran, 1991).

일반지질

남극 대륙과 South Shetland 열도 대부분의 지역은 두꺼운 빙하로 덮혀 있기 때문에 충분한 지질조사가 수행되기 어려우나 지금까지 조사된 바에 의하면 다음과 같은 사실들을 종합할 수 있다. South Shetland 열도의 Livingston 섬에는 선캄브리아기의 편암과 변성퇴적암으로 구성된 기반암 위에 Gondwana 대륙 조산운동 기간에 형성된 이암 및 사암류로 구성된 퇴적암층과 현무암, 화산쇄설암 및 퇴적암층이 혼합되어 산출되는 지층 등이 분포한다(Hobbs, 1968; Dalziel, 1969). 기반암을 구성하고 있는 편암과 변성퇴적암은 Livingston 섬 이외에도 Smith, Elephant 및 Clarence 섬에 분포하는데, 주로 청색 편암과 천매암 등으로 구성되어 있고 지역에 따라 변성처트와 변성반려암 등이 협재되어 산출된다(Smellie et al., 1984). 이 변성암류에 대한 암석학적 연구에 의하면 South Shetland 열도의 해구 쪽에는 저온고압형의 변성대가 발달되어 있으며, 남극 반도에는 고온저압형의 변성대가 발달되어 있다(Smellie

and Clarkson, 1975; Dalziel, 1982). 이 한쌍의 변성대(paired metamorphic belt)는 해양판의 섭입작용(subduction)과 관련된 해구-호상열도에서의 지각운동의 전형적인 증거이며, 이러한 변성대 위치로 보아 섭입작용은 서쪽에서 동쪽으로 진행되었다고 해석된다.

South Shetland 열도의 지질은 주로 고생대 말부터 신생대까지의 지각운동과 화산작용의 결과로 형성되었다. 주라기 중기에는 Gondwana 대륙이 분리되면서 태평양판이 남극대륙판으로 섭입되기 시작하였으며 이때 calc-alkali성분의 화성암이 South Shetland 열도에 넓게 산출되었다. 주라기 말부터 백악기 초까지 일부지역에 해성층이 형성되고, 그 위에 육성 화산암질 사암과 일부 역암층이 퇴적되었다. 백악기 초에는 용암과 응회암의 분출이 있었고 백악기 말에는 용암의 분출과 다양한 화성암체의 관입이 있었다(Smellie et al., 1984).

제3기 화산암들은 South Shetland 열도의 중간에 위치하고 있는 King George 섬에 넓게 분포하는데 주로 백악기 말에서 제3기 초의 tholeiite와 calc-alkali의 중간 조성을 보이는 현무암질 또는 안산암질의 용암과 그 사이에 협재된 화산쇄설암으로 구성되어 있다(Barbieri et al., 1989; Lee et al., 1990; Birkenmajer et al., 1991). King George 섬 서부에는 팔레오세에서 에오세의 Fildes 층이 발달하고, 동부에는 에오세에서 올리고세의 Hennequin 층이 발달한다. King George 섬에 분포하는 화성암체의 K-Ar 연대측정 자료에 의하면 Fildes 반도의 화산암체는 53-61Ma(Paleocene-Eocene)이고, Barton 반도의 화산암과 관입암체는 36-49Ma(Eocene-Early Oligocene)이다(Park, 1989). Fildes 층은 주로 tholeiite 조성의 현무암으로 구성되어 있다(Lee et al., 1993). 그러나 Jwa et al.(1992)은 Fildes 층은 tholeiite와 calc-alkali의 중간 조성을 보이며 King George 섬의 북서측에 위치하면서 Fildes 층 후에 형성된 Great Wall 층이 전형적인 tholeiite 조성을 보인다고 하였다. Admiralty 만 동측 Krakow Block에 산출되는 Lions Rump 층(Birkenmajer, 1983)은 Hennequin 층과 같이 tholeiite와 calc-alkali 중간 조성을, 그리고 Penguin 섬에 산출되는 Penguin 층(Birkenmajer,

1983)은 alkali 계열의 조성을 보이는데, 이 층에는 마그마의 분화초기에 농집되는 경향이 있는 원소들(Mg, Ti, Cr, Ni, Co 등)이 상대적으로 다량 함유되어 있다(Lee et al., 1993). 또한 Barton 반도에 산출되는 화산쇄설물들은 tholeiite와 calc-alkali의 중간조성을 그리고 화강암류들은 calc-alkali 조성을 갖고 있다(Jwa et al., 1992).

제4기에 형성된 Deception 섬, Penguin 섬, Bridgeman 섬은 주로 유리질 화산 쇄설암과 용암으로 구성되어 있으며 이들은 주로 강한 alkali 조성을 갖고 있다(Hawkes, 1861; Smellie et al., 1984; Birkenmajer et al., 1991; Jwa and Park, 1991). 이러한 암석들은 섭입작용이 끝나고 South Shetland 열도의 배호분지내에 판내 확장 지각운동(intra-plate tensional tectonics)이 시작되면서 형성된 것으로 해석된다(Fisk, 1990).

연구재료 및 분석방법

이 연구는 대한민국 남극 하계연구단(1991년)에 의해 채취된 2개의 시추 퇴적물 시료가 사용되었다(Fig. 2). 한 시추시료(core S-3)는 King George 섬 Admiralty 만 입구의 수심 457 m 해역에서 채취하였으며 퇴적물의 길이는 457 cm이다. 퇴적물은 대체로 회색이며 괴상의 사질 실트(sandy silt)로 구성되며 평균입도는 6.0 ϕ 내외이다(Park et al., 1992). 퇴적물은 전반적으로 mottling구조를 많이 보이며 크기 2 mm에서 수 cm에 달하는 암편이 산재해 있다. 다른 시추시료(core S-15)는 South Shetland 분지 중앙부의 수심 1220 m 해역에서 채취하였으며 퇴적물의 길이는 557 cm이다. 이 시추지점은 최근까지 활화산작용이 있는 Deception 섬에서 남서쪽으로 60 km 떨어져 있다. 퇴적물은 주로 검은 색을 띠고 있으나 다양한 모양의 mottling구조가 발달되어 있는 것이 특징이다. 전체적으로 퇴적물의 평균 입도는 7.0 ϕ 내외이고 대략 20%의 사질 퇴적물이 혼합되어 있는 사질 이질(snady mud) 퇴적물로 구성되어 있다. 간혹 수 cm 미만의 두께를 갖는 사질 층이 협재되어 있다.

이 연구를 위해 각 시추시료의 표층부터 40 cm 간격으로 0.1 g의 퇴적물을 채취하여 지화학 분석에 사용하였다. 채취한 시료를 오븐에서 약 90°C

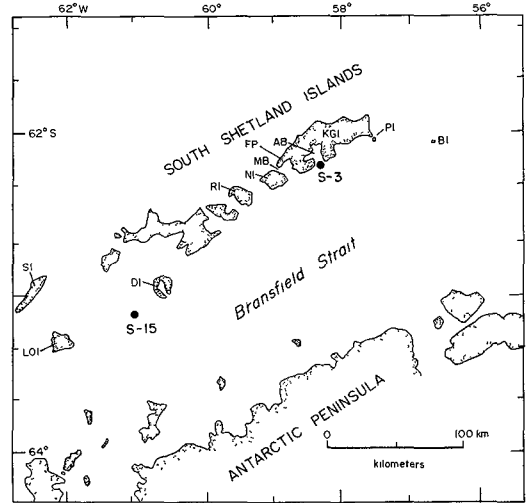


Fig. 2. Location map of core sediments from Admiralty Bay and Bransfield Strait. SI, Smith Island; LOI, Low Island; DI, Deception Island; RI, Robert Island; NI, Nelson Island; MB, Maxwell Bay; FP, Fildes Peninsula; AB, Admiralty Bay; KGI, King George Island; PI, Penguin Island; BI, Bridgeman Island.

로 10시간 건조시키고 마노 재질 절구에서 곱게 빻아 시료를 균질화시켰다. 시료 0.1 g을 산분해용 테플론 용기에 넣고 초순수 200 μ l로 가루 시료를 적신 다음 5 ml의 혼합산(질산:불산:과염소산=4:4:1)을 넣고 용기의 뚜껑을 토크 렌치로 닫는다. 가열판 위에 이 용기를 올려 놓고 약 12시간 동안 180-200°C로 가열하여 시료를 산 분해한다. 용기 아래 부분을 찬물로 식힌 다음 뚜껑을 열고 가열판에서 시약을 건조 직전까지 날려 보낸다. 5 ml의 혼합산을 증발시키는데 4-5시간 걸렸으며 건조 후 과염소산 2 ml를 추가하여 약 10시간동안 2차 산분해를 하여 1차 산분해에서 남은 불용성 광물을 용해하였다. 과염소산을 증발시킨 후 유기물이 많은 시료에는 과염소산을 몇 방울 더 넣어 증발시키면서 분해하였다. 1% 질산 용액으로 용기벽을 씻어주고 가열건조한 후 이 용액으로 테플론 용기를 세번 이상 씻어 폴리에스테렌 병에 넣고 50 g이 되게끔 희석하였다. 공 시료는 산분해에 사용한 산 용액을 증발시켜 얻었으며 분석 시 보정하였다.

미량원소와 희토류 원소는 기초과학지원센터의

유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS: VG PQLL Plus model)를 이용하여 분석하였다. 분석 전에 기기의 감도를 전 질량범위에 걸쳐 최적화하고 기기내부에서 산화물이 적게 발생되도록 Nebulizer 가스흐름을 최소화하였다. 시료분석 동안 기기감도는 Be이 0.2×10^6 cps/ppm이고 U은 5×10^6 cps/ppm이었다. 기기 감도의 시간에 따른 변화나 시료 matrix에 의한 감도 변화는 In과 Tl 표준용액을 공 시료와 시료에 같은 농도로 주입하여 보정하였다.

결과 및 토의

<미량원소 함량>

Admiralty만과 Bransfield 해협에서 채취한 2개 시추퇴적물의 미량원소 분석결과는 Table 1-4에서 보는 바와 같다. 희토류원소의 함량은 Admiralty 만 퇴적물에서 105.6-114.0 ppm의 값을 보이고 평균함량은 109.8 ppm이다. 반면, Bransfield 해협 퇴적물에는 87.4-107.6 ppm이고 평균 함량은 96.3 ppm이다. 두 지역내의 희토류원소의 평균 총합량은 대체로 유사하나 Admiralty 만 퇴적물이 Bransfield 해협 퇴적물보다 약 12% 높다. 두 지역 사이의 경희토류 원소는 12-16%의 차이를 보이며, 중희토류 원소는 Lu를 제외하고는 5% 미만의 차이를 보인다. 전위 금속원소 Sc, Cr, Co, Ni, Cu, Zn의 평균 함량은 대체로 20-150 ppm으로 유사한 분포를 보이며, 이 원소들은 Admiralty 만에 비해 Bransfield 해협 퇴적물에 최고 65%까지 더 많이 함유되어 있다. Low field strength 원소들인 Rb, Sr, Cs, Ba, Pb들은 원소별 평균함량 차이가 크며, 특히 Sr은 Admiralty 만 퇴적물의 534 ppm에 비해 Bransfield 해협 퇴적물에는 285 ppm 함유되어 있다. High field strength 원소인 Sc, Y, Zr, Nb, Hf, Pb, Th, U들은 원소별 평균함량의 차이가 크며 Nb를 제외한 타 원소들은 Bransfield 해협보다 Admiralty 만 퇴적물에 더 많이 함유되어 있다. 그외에 Be, Ta, Sm, Sb 원소들은 두 지역 공히 소량 함유되어 있다.

<미량원소 분포>

Admiralty 만 퇴적물에 함유되어 있는 희토류원소 함량을 chondrite 값(Taylor and McLennan, 1985)에 표준화한 것(Table 5)을 그림으로 표시하

였다(Fig. 3). 또한 NASC(North America Shale Composition)값(Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984)에 표준화한 값(Table 6)도 그림으로 표시하였다(Fig. 4). Chondrite 값에 표준화한 분포형태에서 보는바와 같이 희토류 원소들은 분별작용(fractionation)을 받았으며 경희토류 원소들은 중희토류 원소들에 비해 증가되어 있다. 경희토류 원소인 La(38.70)에서 Gb(18.68)까지는 비교적 완만한 경사를 갖고 감소하며 중희토류 원소인 Tb(14.58)에서 Lu(13.08)까지는 거의 수평선을 이루고 있다. 이 중 Ce와 Eu은 부의 이상을 보여주며 Ce/Ce* 값은 0.85이고 Eu/Eu* 값은 0.87이다. NASC값에 표준화한 분포형태에서는 경희토류 원소들이 중희토류 원소들에 비해 감소되어 있다(Fig. 4). 경희토류 원소인 La(0.53)에서 Sm(0.98)까지는 감소된 값에서 서서히 증가하여 1의 값에 달하고 중희토류 원소인 Em(1.35)에서 Lu(1.02)까지는 거의 수평직선이다. 여기에서도 Ce은 부의 이상을 그리고 Eu은 정의 이상을 보여주고 있다.

Bransfield 해협 퇴적물에 함유되어 있는 희토류원소들의 함량을 chondrite 값에 표준화하여 표시한 희토류원소 분포형태를 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 또한 NASC 값에 표준화한 희토류원소 분포형태는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 희토류 원소들은 분별작용을 받았으며 경희토류 원소들은 중희토류 원소들에 비해 증가되어 있다. 경희토류 원소들은 La(32.83)에서 Gd(17.29)까지는 비교적 급경한 경사를 갖고 감소하며 중희토류 원소들은 Gd(17.29)에서 Lu(9.79)까지는 대단히 완만한 경사를 갖고 감소한다. 이 중 Ce와 Eu은 부의 이상을 보여주며 Ce/Ce* 값은 0.85이고 Eu/Eu* 값은 0.84이다. NASC 값에 표준화한 분포형태에서 경희토류 원소인 La(0.47)에서 Sm(0.82)까지는 NASC 값에 비해 감소되어 있으며 중희토류 원소인 Eu(1.15)에서 Lu(0.84)에 비해서도 감소된 형태를 보여 준다. 이러한 Bransfield 해협 퇴적물의 분포형태는 대체로 Admiralty 만 퇴적물과 유사하나 Bransfield 해협 퇴적물내 희토류 원소의 분포형태는 퇴적물시료에 따라 비교적 분산되어 있다. Ce와 Eu은 Admiralty 만과 같아 Ce은 부의 이상을, Eu은 정의 이상을 보여 주고 있다.

Table 1. Rare earth element data (in ppm) for sediments (S-3) from Admiralty Bay.

Depth(cm) Elements	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	Min	Max	Avg
La	17.8	16.8	17.5	16.4	18	17.7	17.1	17.5	16	16.5	17	17	16.0	18.0	17.1
Ce	35.8	34.2	35	34	35.9	35	35.1	34.6	31.7	33.3	33.2	34.3	32.7	35.9	34.4
Pr	5.36	5.23	5.41	5.08	5.34	5.26	5.38	5.27	5.19	5.19	5.08	5.53	5.08	5.53	5.28
Nd	25.9	24.8	25.1	24.3	25.1	25.9	25	25.1	23.1	24.2	24	24.4	23.1	25.9	24.7
Sm	5.89	5.34	5.63	5.55	5.42	5.62	5.83	5.5	5.54	5.33	5.84	5.78	5.33	5.89	5.61
Eu	1.70	1.68	1.73	1.64	1.70	1.63	1.66	1.70	1.67	1.69	1.66	1.62	1.62	1.72	1.67
Gd	6.35	5.98	6.76	6.13	6.34	6.12	6.47	6.07	6.12	5.95	5.93	5.98	5.93	6.76	6.18
Tb	0.88	0.83	0.85	0.83	0.86	0.87	0.92	0.87	0.89	0.83	0.88	0.87	0.83	0.91	0.86
Dy	5.62	5.41	5.58	5.05	5.32	5.82	5.43	5.15	5.62	5.13	5.58	5.54	5.05	5.82	5.44
Ho	1.16	1.17	1.26	1.00	1.09	1.18	1.08	1.27	1.22	1.07	1.13	1.12	1.00	1.27	1.15
Er	3.39	3.26	3.10	3.10	3.25	3.12	3.41	3.12	3.28	3.33	3.36	3.16	3.20	3.41	3.24
Tm	0.50	0.47	0.48	0.46	0.48	0.45	0.45	0.48	0.47	0.43	0.49	0.47	0.43	0.50	0.47
Yb	3.19	3.16	3.04	3.03	3.03	3.08	3.23	3.18	3.34	3.05	3.26	2.98	2.98	3.34	3.13
Lu	0.05	0.05	0.05	0.49	0.44	0.45	0.48	0.52	0.48	0.48	0.49	0.49	0.44	0.52	0.49
Sum(REE)	114	109	112	107	112	112	112	110	106	106	108	109	106	114	110
La/Yb	5.58	5.32	5.76	5.41	5.94	5.75	5/29	5.50	4.79	0.41	5.51	5.70	4.79	5.49	5.47
La(N)/Yb(N)	3.77	3.59	3.89	3.66	4.01	3.88	3.58	3.72	3.24	3.66	3.52	3.85	3.24	4.01	3.70
La(N)/Sm(N)	1.90	1.98	1.96	1.86	2.09	1.98	1.85	2.00	1.82	1.95	1.83	1.85	1.82	2.09	1.92
Gd(N)/Yb(N)	1.61	1.53	1.80	1.63	1.70	1.61	1.62	1.55	1.49	1.58	1.47	1.63	1.47	1.80	1.60
Eu/Eu*	0.85	0.91	0.86	0.86	0.89	0.85	0.83	0.90	0.88	0.92	0.86	0.84	0.83	0.92	0.87
Ba/La	17.5	18.0	17.9	18.0	17.0	17.3	18.0	17.3	18.3	17.9	16.8	17.0	16.8	18.3	17.6
Sr/Nd	20.8	20.7	20.6	22.1	21.8	20.3	22.2	21.5	23.6	22.5	22.4	20.9	20.3	23.6	21.6
Sm/Nd	0.23	0.22	0.22	0.23	0.22	0.22	0.23	0.22	0.24	0.22	0.24	0.24	0.22	0.24	0.23
Ce/Ce*	0.85	0.87	0.85	0.88	0.85	0.84	0.87	0.84	0.86	0.86	0.82	0.85	0.82	0.88	0.85

Table 2. Rare earth element data (in ppm) for sediments (S-15) from Bransfield Strait.

Depth(cm) Elements	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	Min	Max	Avg
La	15.1	14.7	14.5	13.5	14.6	13.8	16.3	15.7	15.5	16.9	14.3	14.6	15.2	14.4	15.6	13.5	16.9	15.0
Ce	30.6	29.7	27.9	27.1	28.9	27.7	32.6	30.7	31	32.1	28.2	29.9	30.5	28.7	20.9	27.1	32.6	29.8
Pr	4.45	4.29	4.12	4.17	4.39	4.19	4.98	4.68	4.72	5.11	4.44	4.57	4.63	4.33	4.68	4.12	5.11	4.52
Nd	21.1	19.9	19.6	18.5	20.5	19.2	22.8	21.3	21.1	22.6	19.9	19.7	21.2	21.1	21.9	18.5	22.8	20.7
Sm	4.48	4.63	4.21	4.22	4.45	4.25	5.6	4.53	4.58	5.64	4.69	4.83	4.53	4.46	5.17	4.21	5.64	4.68
Eu	1.51	1.39	2.29	1.36	1.43	1.22	1.60	1.44	1.47	1.60	1.39	1.39	1.41	1.47	1.48	1.22	1.60	1.43
Gd	5.88	5.64	4.98	5.12	5.58	5.30	6.91	6.00	5.43	6.53	5.90	5.69	5.64	6.14	5.82	4.98	6.91	5.77
Tb	0.89	0.84	0.75	0.80	0.94	0.68	0.95	0.92	0.91	0.96	0.79	0.88	0.86	0.87	0.98	0.68	0.98	0.87
Dy	5.71	5.10	4.57	5.27	5.41	5.03	5.91	5.67	5.28	6.04	5.22	5.25	5.12	5.53	5.73	4.57	6.04	5.39
Ho	1.07	1.09	1.10	1.07	1.14	0.99	1.28	1.24	1.12	1.31	1.15	1.22	1.16	1.14	1.33	0.99	1.33	1.16
Er	3.10	3.16	2.91	3.07	3.25	2.65	3.03	3.32	3.20	3.72	3.17	3.24	3.07	3.24	3.76	2.65	4.03	3.26
Tm	0.46	0.41	0.45	0.38	0.44	0.42	0.54	0.46	0.42	0.54	0.45	0.46	0.42	0.50	0.51	0.38	0.54	0.46
Yb	2.99	2.66	2.52	2.52	2.66	2.71	3.66	3.19	2.94	3.25	2.83	2.94	2.73	2.85	4.16	2.52	4.16	2.97
Lu	0.37	0.44	0.36	0.33	0.36	0.37	0.49	0.43	0.37	0.47	0.36	0.40	0.38	0.44	0.46	0.33	0.49	0.40
Sum(REE)	98	94	89	87	94	89	108	100	98	107	93	95	97	95	102	87	108	96
La/Yb	5.05	5.53	5.75	5.36	5.49	5.09	4.45	4.92	5.27	5.20	5.05	4.97	5.57	5.05	3.75	3.75	3.75	5.10
La(N)/Yb(N)	3.41	373	3.89	3.62	3.71	3.44	3.01	3.33	3.56	3.51	3.41	3.36	3.76	3.41	6.53	2.53	3.89	3.45
La(N)/Sm(N)	2.12	2.00	2.17	2.01	2.07	2.04	1.83	2.18	2.13	1.89	1.92	1.90	2.11	22.03	1.90	1.83	2.18	2.02
Gd(N)/Yb(N)	1.59	1.72	1.60	1.65	1.70	1.59	1.53	1.52	1.50	1.63	1.69	1.57	1.67	1.75	1.13	1.13	1.75	1.59
Eu/Eu*	0.90	0.83	0.86	0.89	0.88	0.78	0.79	0.84	0.90	0.81	0.80	0.81	0.85	0.86	0.82	0.78	0.90	0.84
Ba/La	22.7	23.8	22.0	23.5	23.4	22.4	23.4	23.0	23.1	23.2	23.3	23.9	23.0	23.4	23.1	22.0	23.9	23.1
Sr/Nd	13.6	14.5	13.9	14.0	13.8	13.3	13.6	13.2	13.3	13.5	13.8	13.9	13.7	13.4	15.4	13.2	15.4	13.8
Sm/Nd	0.21	0.23	0.21	0.23	0.22	0.22	0.25	0.21	0.22	0.25	0.24	0.25	0.21	0.21	0.24	0.21	0.25	0.23
Ce/Ce*	0.87	0.86	0.83	0.86	0.85	0.86	0.84	0.84	0.86	0.80	0.84	0.87	0.86	0.85	0.84	0.80	0.87	0.85

Table 3. Other trace element data (in ppm) from sediments (S-3) from Admiralty Bay.

Depth(cm) Elements	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	Min	Max	Avg
Sc	42.0	40.3	39.9	39.0	39.5	39.3	38.7	40.5	40.0	38.0	36.9	36.6	36.6	42.0	39.2
Cr	86	80	74	81	76	89	89	86	84	86	78	78	74	89	82
Co	26.9	25.4	23.2	25.2	24.8	26.5	25.7	24.6	25.3	24.9	25.2	23.8	23.2	26.9	25.1
Ni	26.1	24.2	23.6	23.4	23.9	25.9	26.1	24.1	24.3	2.42	23.8	22.2	22.2	26.1	24.3
Cu	68.2	62.9	64.6	65.0	66.0	69.2	69.1	68.2	64.9	59.7	63.3	60.2	59.7	69.2	65.1
Zn	120	114	120	113	109	122	114	124	116	110	110	109	109	124	115
Ni/Co	0.97	0.95	1.02	0.93	0.96	0.98	1.01	0.98	0.96	0.97	0.95	0.93	0.93	1.02	0.97
La/Sc	0.42	0.42	0.44	0.42	0.46	0.45	0.44	0.43	0.40	0.43	0.46	0.46	0.40	0.46	0.44
Li	37.1	37.5	36.2	33.9	31.6	39.0	40.9	40.2	33.2	30.1	28.3	30.8	28.3	40.9	34.9
Be	1.46	0.66	1.38	1.40	1.96	1.51	0.87	1.69	1.85	0.88	0.93	1.25	0.7	2.0	1.3
Rb	41.1	41.4	40.8	41.0	41.4	41.3	41.4	41.3	38.6	36.3	36.7	38.9	36.3	41.4	40.0
Sr	538	514	516	538	546	526	554	539	544	546	538	510	510	554	534
Y	29.7	29.5	29.5	28.4	28.2	28.3	28.5	28.1	28.7	26.8	28.0	27.7	26.8	29.7	28.4
Zr	131	124	126	128	123	128	127	131	129	121	127	125	121	131	127
Nb	4.89	4.76	5.13	4.73	4.46	4.89	4.86	4.89	4.60	4.41	4.95	5.04	4.41	5.13	4.80
Cs	2.17	2.22	2.22	2.27	2.40	2.13	2.23	1.97	2.12	1.97	2.05	2.16	1.97	2.40	2.16
Ba	312	302	314	296	306	307	308	304	294	296	285	288	285	314	301
Hf	3.89	3.45	3.59	3.55	3.67	3.80	3.41	4.07	3.70	3.52	4.09	3.58	3.41	4.09	3.69
Ta	1.26	1.23	1.10	0.97	1.15	1.10	1.03	1.25	0.99	1.14	1.33	1.14	0.97	1.33	1.14
Zr/Hf	33.8	36.0	35.1	36.0	33.6	33.7	37.2	32.3	34.8	34.5	31.1	35.0	31.1	37.2	34.4
Yb/Hf	0.82	0.92	0.85	0.85	0.83	0.81	0.95	0.78	0.90	0.87	0.80	0.83	0.78	0.95	0.85
Sn	1.12	1.18	1.22	1.08	1.15	1.13	1.23	1.19	1.12	1.07	1.24	1.36	1.07	1.36	1.17
Sb	0.40	0.34	0.37	0.45	0.39	0.43	0.46	0.48	0.33	0.35	0.32	0.41	0.3	0.5	0.4
Pb	14.3	13.3	13.5	13.4	13.5	24.6	25.1	17.5	16.1	16.3	14.5	15.9	13.3	25.1	16.5
Th	5.84	5.17	5.51	5.36	5.34	5.69	5.21	5.18	5.47	4.89	4.70	5.50	4.70	5.84	5.32
U	2.08	2.69	2.30	2.60	2.86	2.58	2.35	2.56	2.31	2.59	3.00	2.86	2.08	3.00	2.57
Th/U	2.80	1.92	2.39	2.06	1.87	2.20	2.22	2.03	2.37	1.89	1.57	1.92	1.57	2.80	2.10
La/Th	3.05	3.25	3.18	3.06	3.37	3.11	3.28	3.38	2.93	3.37	3.62	3.09	2.93	3.62	3.22
Th/Sc	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.15	0.13	0.15	0.14

Table 4. Other trace element data (in ppm) for sediments (S-15) from Bransfield Strait.

Depth(cm) Elements	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	Min	Max	Avg
Sc	32.9	33.4	28.9	30.9	32.8	28.9	41.6	31.7	29.7	41.1	29.1	28.4	28.7	28.0	39.4	28.0	41.6	32.4
Cr	98	100	90	96	100	90	124	99	94	123	94	90	89	86	104	86	124	99
Co	23.6	23.5	21.4	22.5	23.8	22.6	28.8	24.3	22.9	27.8	23.6	22.7	23.5	21.8	25.9	21.4	28.8	23.9
Ni	39.8	41.5	37.7	39.6	44.2	34.8	45.7	38.7	40.1	43.7	37.8	39.5	38.2	34.7	40.8	34.7	45.7	40.1
Cu	54.7	57.4	53.9	49.7	53.2	32.9	66.9	55.7	54.8	64.3	54.8	53.7	54.7	47.7	62.7	47.7	66.9	55.8
Zn	258	148	138	142	146	140	152	144	144	151	139	140	141	135	148	135	258	151
Ni/Co	1.69	1.77	1.76	1.76	1.86	1.72	1.59	1.59	1.75	1.58	1.60	1.74	1.62	1.59	1.57	1.57	1.86	1.68
La/Sc	0.46	0.44	0.50	0.44	0.44	0.48	0.39	0.50	0.52	0.41	0.49	0.51	0.53	0.51	0.40	0.39	0.53	0.47
Li	39.4	44.2	37.7	37.4	39.3	34.8	48.1	37.6	41.0	42.2	31.3	36.2	33.3	36.1	46.4	31.3	48.1	39.0
Be	1.24	1.71	1.04	1.38	1.31	0.63	1.90	1.32	1.61	0.44	1.39	1.67	1.06	1.10	1.67	0.4	1.9	1.3
Rb	43.1	42.7	40.0	38.8	41.2	39.8	50.7	44.5	44.9	50.1	37.3	40.8	41.1	31.7	50.2	36.7	50.7	42.8
Sr	288	288	272	259	276	256	310	281	280	304	275	274	289	282	338	256	338	285
Y	32.7	31.8	27.2	29.5	32.2	27.3	34.7	32.1	30.0	34.2	29.9	30.9	29.8	30.7	32.9	27.2	34.2	31.0
Zr	88	84	105	83	91	78	89	111	85	103	89	91	94	87	102	78	111	92
Nb	7.45	6.89	6.62	6.61	6.59	6.01	7.82	7.26	6.68	7.61	2.52	6.84	6.97	6.41	7.44	6.01	7.81	6.91
Cs	1.85	1.95	1.92	1.77	1.95	1.80	2.35	2.08	2.14	2.03	1.85	2.04	1.98	1.93	2.33	1.77	2.35	2.00
Ba	343	351	319	317	342	310	382	360	359	393	333	349	349	337	360	310	393	347
Hf	2.13	2.09	2.23	1.99	2.28	2.18	2.68	2.53	1.99	2.47	1.13	2.27	2.26	2.01	2.92	1.99	2.92	2.28
Ta	2.98	1.70	1.66	1.79	1.67	1.45	2.38	1.93	1.87	1.73	1.74	1.81	1.89	1.93	1.51	1.45	2.98	1.87
Zr/Hf	41.1	40.3	37.0	41.8	40.1	35.9	33.1	43.8	42.5	41.8	41.9	40.1	41.7	43.2	34.9	34.1	47.0	40.6
Yb/Hf	1.40	1.27	1.13	1.26	1.17	1.25	1.36	2.26	1.48	1.32	1.34	1.30	2.21	1.42	1.42	1.13	1.48	1.30
Sm	1.53	1.31	1.30	1.13	1.52	1.29	1.36	1.49	1.29	1.59	1.27	1.23	1.53	1.28	1.69	1.13	1.69	1.38
Sb	0.49	0.48	0.55	0.48	0.60	0.42	0.59	0.44	0.53	0.54	0.47	0.51	0.58	0.53	0.55	0.4	0.6	0.5
Pb	21.9	8.9	9.5	8.5	8.4	8.2	13.6	9.0	9.3	22.6	8.5	8.6	8.9	8.3	14.7	8.2	22.6	11.3
Th	3.63	3.30	3.77	3.25	3.34	3.31	5.47	3.79	3.89	5.45	3.26	3.61	3.62	3.28	5.65	3.25	5.65	3.91
U	1.63	2.16	2.45	1.88	2.18	2.07	3.82	2.68	2.34	3.01	2.70	2.37	1.96	1.91	3.43	1.63	3.82	2.44
Th/U	2.23	1.52	1.53	1.73	1.53	1560	1.43	1.42	1.66	1.81	1.21	1.53	1.85	1.72	1.65	1.21	2.23	1.63
La/Th	4.16	4.46	3.85	4.15	4.37	4.17	2.98	4.14	3.99	3.10	4.39	4.04	4.20	4.39	2.76	2.76	4.46	3.94
Th/Lc	0.11	0.10	0.13	0.11	0.10	0.11	0.13	0.12	0.13	0.13	0.11	0.13	0.13	0.12	0.14	0.10	0.14	0.12

Table 5. Chondrite-normalized rare earth element values for sediments (S-3) from Admiralty Bay.

Elements Depth(cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0	48.5	37.4	39.1	36.4	25.5	19.5	20.8	15.1	14.8	13.6	13.6	14.0	12.9	13.0
40	45.8	35.7	38.2	34.9	23.1	19.3	19.5	14.4	14.2	13.7	13.1	13.1	12.7	13.1
80	47.7	36.6	39.5	35.3	24.4	19.9	22.1	14.6	14.6	14.8	12.4	13.3	12.3	13.2
120	44.7	35.5	37.1	34.2	24.0	18.8	20.1	14.2	13.3	11.7	12.4	12.9	12.2	12.9
160	49.0	37.5	39.0	35.3	23.5	19.5	20.7	14.9	14.0	12.8	13.1	13.4	12.2	11.5
200	48.2	36.6	38.4	36.4	24.3	18.7	20.0	15.0	15.3	13.9	12.5	12.6	12.4	11.8
240	46.6	36.7	39.3	35.2	25.2	19.1	21.1	15.9	14.3	12.7	13.7	12.7	13.0	12.6
280	47.7	36.2	38.5	35.3	23.8	19.5	19.8	15.0	13.5	14.9	12.5	13.6	12.8	13.5
320	43.6	34.2	37.9	32.5	24.0	19.2	20.0	15.4	14.8	14.3	13.2	13.3	13.5	12.7
360	45.0	34.8	37.9	34.0	23.1	19.4	19.4	14.3	13.5	12.5	13.4	12.1	12.3	12.7
400	46.3	34.7	37.1	33.8	25.3	19.1	19.4	15.1	14.6	13.3	13.5	13.7	13.1	13.0
440	46.3	35.8	40.4	34.3	25.0	18.6	19.5	15.1	14.5	13.2	12.7	13.2	12.0	12.9

Table 6. Chondrite-normalized rare earth element values for sediments (S-15) from bransfield Strait.

Elements Depth(cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0	41.1	32.0	32.5	29.7	19.4	17.4	19.2	15.4	15.0	12.6	12.4	12.8	12.1	9.8
40	40.1	31.0	31.3	28.0	20.0	15.9	18.4	14.6	13.4	12.7	12.7	11.4	10.7	11.6
80	39.5	29.2	30.1	28.6	18.2	14.8	16.3	12.9	12.0	13.0	11.7	12.5	10.2	9.4
120	36.8	28.3	30.4	26.0	18.3	15.6	16.7	13.8	13.8	12.5	12.3	10.7	10.2	8.7
160	39.8	30.2	32.0	28.3	19.3	16.4	18.2	16.1	14.2	13.4	13.0	12.2	10.7	9.5
200	37.6	28.9	30.6	27.0	18.4	14.0	17.3	11.7	13.2	11.7	10.7	11.7	10.9	9.8
240	44.4	34.1	36.4	32.1	24.2	18.4	22.6	16.3	15.5	15.0	16.2	15.2	14.8	12.8
280	42.8	32.1	34.2	30.0	19.6	16.5	19.6	15.8	14.9	14.5	13.3	12.8	12.9	11.2
320	42.2	32.4	34.5	29.7	19.8	16.9	17.8	15.6	13.9	13.2	12.9	11.9	11.9	9.6
360	46.0	33.5	37.3	31.8	24.4	18.4	21.3	16.5	15.9	15.4	14.9	15.3	13.1	12.2
400	39.0	29.5	32.4	28.0	20.3	15.9	19.3	13.6	13.7	13.5	12.7	12.7	11.4	9.4
440	39.8	31.2	33.4	27.7	20.9	15.9	18.6	15.2	13.8	14.3	13.0	12.9	11.9	10.4
480	41.4	31.9	33.8	29.8	19.6	16.2	18.4	14.9	13.4	13.6	12.3	11.7	11.0	10.0
520	39.2	30.0	31.6	29.7	19.3	16.9	20.1	14.9	14.5	13.4	13.0	13.9	11.5	11.4
560	42.5	32.3	34.2	30.8	22.4	17.0	19.0	16.9	15.0	15.6	15.1	14.2	16.8	12.0

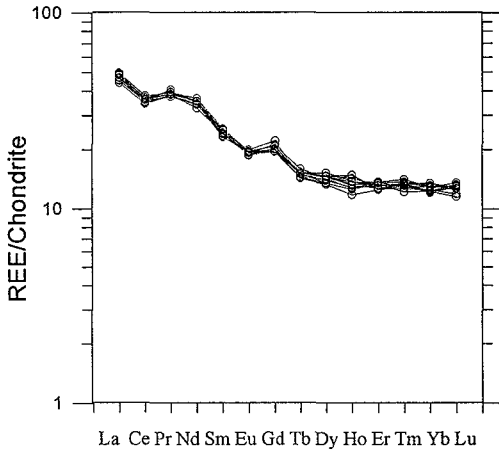


Fig. 3. Chondrite-normalized rare earth element diagram for sediments (S-3) from Admiralty Bay.

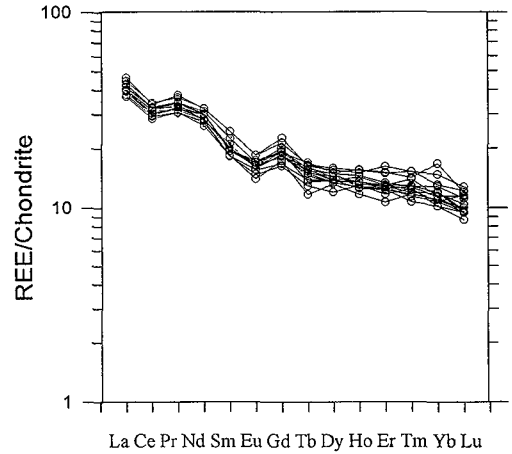


Fig. 5. Chondrite-normalized rare earth element diagram for sediments (S-15) from Bransfield Strait.

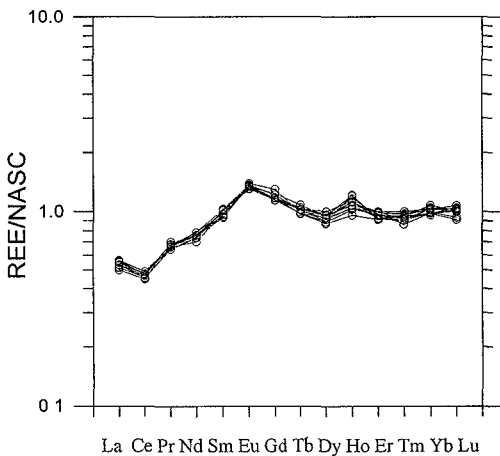


Fig. 4. North America Shale Composite-normalized rare earth element diagram for sediments (S-3) from Admiralty Bay.

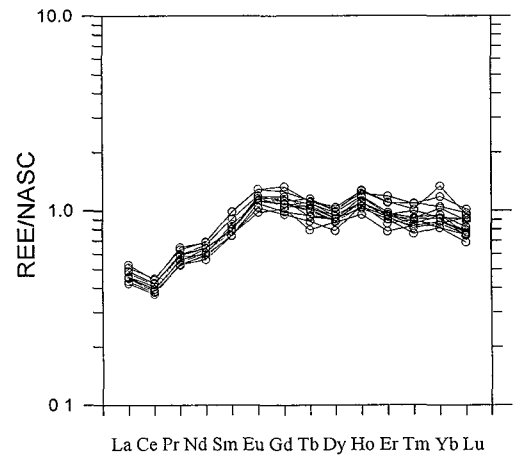


Fig. 6. North America Shale Composite-normalized rare earth element diagram for sediments (S-15) from Bransfield Strait.

해양 퇴적물내에 함유되어 있는 희토류 원소의 분포형태는 주로 기원암의 종류와 지화학적 특성, 풍화의 형태, 운반시 퇴적물의 분급작용 그리고 속성작용의 영향을 받는다(Nesbitt et al., 1960). 그러나 이 연구결과(Table 1-4), 각 원소의 수직변화는 무시할 정도다. 이것은 기본적으로 희토류 원소의 분포형태는 다른 퇴적과정의 요인보다 기원암과의 관계가 더 중요함을 암시한다. 기원암의 종류에 따라 퇴적과정 중 퇴적물의 입자분포가 달라지고 주요 구성광물과 중광물의

종류와 양의 차이가 생겨서 퇴적물내 희토류 원소의 양이 다르게 된다. 일반적으로 사질 퇴적물은 이질 퇴적물에 비해 경희토류 원소들이 감소되어 있다고 하나(McLennan et al., 1990), 희토류 원소는 점토질 퇴적물에 흡착 이동되기 때문에 이질 퇴적물내 희토류원소의 분포형태는 퇴적물 전체의 평균치와 유사하다고 한다(Taylor, 1964, 1977, 1979; Taylor and McLennan, 1981; haskin and Paster, 1979; Gromet et al., 1984; Condie, 1991,

Table 7. North America Shale Composite-normalized rare earth element values for sediments (S-3) from Admiralty Bay.

Elements Depth(cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0	0.56	0.49	1.68	1.78	1.03	1.37	1.22	1.03	0.97	1.12	1.00	1.00	1.03	1.04
40	0.53	0.47	0.66	0.75	0.94	1.35	1.15	0.98	0.93	1.13	0.96	0.93	1.02	1.04
80	0.55	0.48	0.68	0.76	0.99	1.40	1.30	1.00	0.96	1.21	0.91	0.95	0.98	1.05
120	0.51	0.47	0.64	0.74	0.97	1.32	1.18	0.97	0.87	0.96	0.91	0.92	0.98	1.03
160	0.56	0.49	0.68	0.76	0.95	1.37	1.22	1.01	0.92	1.05	0.96	0.95	0.98	0.91
200	0.55	0.48	0.67	0.78	0.99	1.31	1.18	1.02	1.00	1.13	0.92	0.90	0.99	0.94
240	0.53	0.48	0.68	0.76	1.02	1.34	1.24	1.08	0.94	1.04	1.00	0.91	1.04	1.00
280	0.55	0.47	0.67	0.76	0.96	1.37	1.17	1.02	0.89	1.22	0.92	0.97	1.03	1.08
320	0.50	0.45	0.66	0.70	0.97	1.35	1.18	1.05	0.97	1.17	0.96	0.94	1.08	1.01
360	0.52	0.46	0.66	0.73	0.94	1.36	1.14	0.98	0.89	1.03	0.98	0.86	0.98	1.00
400	0.53	0.45	0.64	0.73	1.02	1.34	1.14	1.03	0.96	1.09	0.99	0.97	1.05	1.03
440	0.53	0.47	0.70	0.74	1.01	1.31	1.15	1.03	0.96	1.08	0.93	0.94	0.96	1.02

Table 8. North America Shale Composite-normalized rare earth element values for sediments (S-15) from Bransfield Strait.

Elements Depth(cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0	0.47	0.42	0.56	0.64	0.79	1.22	1.13	1.05	0.98	1.03	0.91	0.91	0.96	0.78
40	0.46	0.41	0.54	0.60	0.81	1.12	1.08	0.99	0.88	1.04	0.93	0.81	0.86	0.92
80	0.45	0.38	0.52	0.59	0.74	1.04	0.96	0.88	0.79	1.06	0.86	0.89	0.81	0.75
120	0.42	0.37	0.53	0.56	0.74	1.09	0.98	0.94	0.91	1.03	0.90	0.76	0.81	0.69
160	0.46	0.40	0.56	0.61	0.78	1.15	1.07	1.10	0.93	1.10	0.96	0.87	0.86	0.75
200	0.43	0.38	0.53	0.58	0.75	0.98	1.02	0.80	0.87	0.95	0.78	0.83	0.87	0.78
240	0.51	0.45	0.63	0.69	0.98	1.29	1.33	1.11	1.02	1.23	1.19	1.08	1.18	1.02
280	0.49	0.42	0.59	0.65	0.79	1.16	1.15	1.08	0.98	1.19	0.98	0.91	0.95	0.89
320	0.48	0.42	0.60	0.64	0.80	1.19	1.05	1.06	0.91	1.08	0.94	0.85	0.95	0.76
360	0.53	0.44	0.65	0.68	0.99	1.29	1.26	1.12	1.04	1.26	1.09	1.09	1.05	0.97
400	0.45	0.39	0.56	0.60	0.82	1.12	1.09	1.04	0.91	1.17	0.95	0.92	0.95	0.83
440	0.46	0.41	0.58	0.60	0.85	1.12	1.098	1.04	0.91	1.17	0.95	0.92	0.95	0.83
480	0.48	0.42	0.59	0.64	0.79	1.14	1.08	1.01	0.88	1.11	0.90	0.83	0.88	0.79
520	0.45	0.39	0.55	0.64	0.78	1.19	1.18	1.02	0.95	1.10	0.95	0.99	0.92	0.91
560	0.49	0.42	0.59	0.66	0.91	1.19	1.12	1.16	0.99	1.28	1.11	1.01	1.34	0.95

McLennan and Taylor, 1991). 퇴적물의 희토류원소 분포형태는 퇴적물의 기원암의 특성을 간직하고 있으므로 이 연구 퇴적물의 희토류원소 분포형태는 일차적으로 South Shetland 열도를 구성하고 있는 심성암과 화산암의 영향을 받게 된다. 화성암들의 이러한 특성은 마그마의 분화작용과 밀접한 관계가 있다. 마그마로부터 광물이 정출될 때 초기에는 잔여 마그마내에 중희토류 원소들이 경희토류 원소들에 비해 많이 감소되고 시간이 경과함에 따라 경희토류 원소들은 증가하게 된다.

Taylor and McLennan(1985)에 의하면 경희토류 원소들의 양은 해양지각내에 가장 적고 primitive 맨틀, 하부 대륙지각, 전 대륙지각의 평균값, 상부 대륙지각 순으로 증가하고 있다. 따라서 이번 연구 퇴적물의 희토류원소 함량을 NASC 값에 표준화한 분포형태에서 경희토류 원소들이 감소되어 있는 것은 이 퇴적물들의 기원암이 상부 대륙지각보다는 하부 대륙지각과, 맨틀 혹은 해양지각과 연관이 있음을 알려 준다. 왜냐하면 NASC의 값은 전 대륙지각의 평균 값과 유사하기 때문이다. Johnson et al.(1988)에 의하면 남대서양과 남서 인도양에서 채취한 peridotite의 주 구성 광물인 clinopyroxene의 희토류원소 분포형태는 경희토류 원소들이 감소되어 있다. 이러한 경희토류 원소의 감소 현상은 MORB(Mid-Oceanic Ridge Basalt)의 특징으로 알려져 있다(Patchett, 1989). 또한 MORB의 일종인 Iceland 현무암의 희토류원소 분포형태에서도 경희토류 원소들이 감소되어 있다(Humphris et al., 1978). 따라서 본 연구 퇴적물의 희토류원소들의 분포형태에 근거한 퇴적물의 기원암은 주로 대륙지각의 특성과 해양지각의 특성을 동시에 보이는 South Shetland 열도의 암석이라고 해석된다.

퇴적물의 기원암은 풍화 침식 과정에서 희토류 원소별로 감소 혹은 증가되는 것으로 알려져 있다. 예를 들면 화강섬록암이 풍화작용을 받으면 표층의 산성 토양수 영향으로 풍화대의 중희토류 원소들이 우선적으로 용탈되어 하부로 이동하게 되므로 풍화대에는 중희토류 원소들이 감소되고 경희토류 원소들이 증가된다고 한다(Nesbitt, 1979). 또한, 풍화물이 유수에 의해 운반될 때

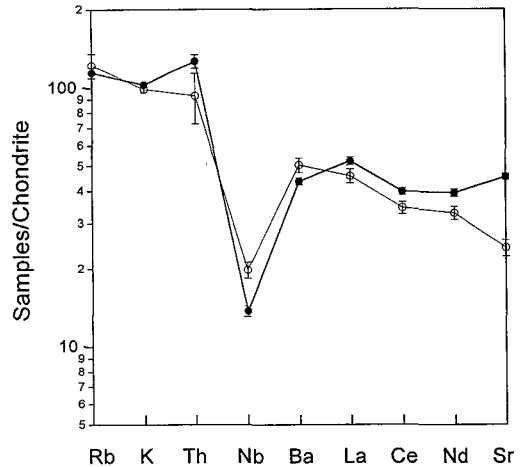


Fig. 7. Chondrite-normalized incompatible element diagram for the sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (pen circle).

희토류원소들이 유수에 용해되는 경우는 극소량에 불과하다고 한다(Martin and Maybeck, 1979). 희토류원소들이 용해된 상태로 해양으로 운반되면 대부분은 halmyrolytic process의 영향을 받아 자생광물을 형성하게 된다. 그러나 남극 환경에서는 기계적 풍화작용이 우세하여 희토류원소들이 쇄설성 퇴적물에서 분리되어 토양수에 용해 운반되는 양은 아주 극소수에 불과하다고 할 수 있다.

희토류원소 이외의 미량원소 중 비공생(incompatible)의 특성이 강한 Rb, Th, Nb, Ba, Sr와 희토류원소중 La, Ce, Nd 그리고 K의 함량을 chondrite 값에 표준화하여 분포형태를 도시하였다(Fig. 7). 그 결과는 남반구에 위치한 화산섬과 세계 도처의 호상열도에서 산출되는 현무암을 분석하여 만든 미량원소의 분포형태(Dupuy et al., 1988)와 유사하였다. 다만 Rb, K, Th, Nb, Sr은 함량의 차가 있었고 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물에 함유되어 있는 Sr의 양은 차이가 컸다.

<Ce>

Ce 함량과 Ce/Ce* 값은 Admiralty 만에서 각각 평균 34.43 ppm과 0.85이고, Bransfield 해협에서 평균 29.77 ppm과 0.85이다. 이 연구에서 Ce/Ce*의 값은 다음과 같은 공식에 의해 계산되었다(Piper, 1974).

$$\text{Ce/Ce}^* = 5 \text{ Ce}_N / (4 \text{ La}_N + \text{Sm}_N).$$

Ce*는 chondrite로 표준화한 희토류 원소 분포 형태에서 기대되는 Ce*값을 의미하며 공식의 N 표시는 chondrite로 표준화한 것을 의미한다.

일반적으로 전체 대륙지각의 Ce의 평균함량은 33 ppm이고, 상부 대륙지각은 평균 64 ppm 함유되어 있다. 현생의 수동적 대륙연변부 이질 퇴적물에서는 Ce의 함량이 58.5-82.7 ppm이고, 능동적 대륙연변부 배호분지에서는 18.1-78.3 ppm이다 (McLennan et al., 1990). 따라서 본 조사지역 퇴적물의 Ce함량은 상부 대륙지각의 평균값 보다 작고 전체 지각의 평균값과 유사하며 능동적 대륙연변부 퇴적물의 Ce함량과 유사하다. 이렇게 볼 때 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 기원암은 하부 대륙지각 내지 맨틀과 연관이 있는 것으로 해석된다.

이 연구 대상인 퇴적물의 희토류원소의 분포형태 (Figs 3-6)에서 보는 바와 같이 chondrite와 NASC값에 표준화한 각각의 경우 Ce은 부(negative)의 이상을 보여주며 Ce/Ce*값은 0.85이다. 이 값은 현생의 대륙연변부 배호분지의 이질퇴적물의 Ce/Ce*값보다 약간 낮으며 (Fig. 8), 서태평양의 해저퇴적물 중 화산재의 Ce/Ce*값(0.83-0.90)이나 Mariana 열도 용암의 Ce/Ce*값(0.81)과 유사한 값이다 (Auv, 1992). 퇴적물내 Ce의 이상은 Ce³⁺이 산화 환경하에서 Ce⁴⁺로 산화되어 다른 성분과 함께 침전되기 때문에 발생한다 (Wang et al., 1986; Toyoda, et al., 1990). Ce⁴⁺는 불용성의 특성을 보이며 흔히 해양에서는 Mn-Fe oxyhydroxides로 침전하게 된다.

현재의 해수중의 Ce은 부의 이상을 보여준다 (Me Barr et al., 1985; Elderfield, 1988). Ce-이상을 형성하는 Ce⁴⁺은 화성암이 형성되는 과정에서는 형성되지 않는다. 따라서 대부분의 화성암에서 Ce-이상은 해수와 작용하거나 해저 퇴적물과의 관계에서 형성된다 (Lin, 1992). South Shetland 열도의 화성암체들이 Ce-이상을 보여주는 것도 (Birkenmajer et al., 1991) 해양지각을 구성하고 있는 맨틀 상부층이 대륙지각 밑으로 섭입될 때 해저에서 변질된 현무암질 암석들이나 퇴적물이 동화(assimilation)된 결과로 보인다. 따라서 이 연

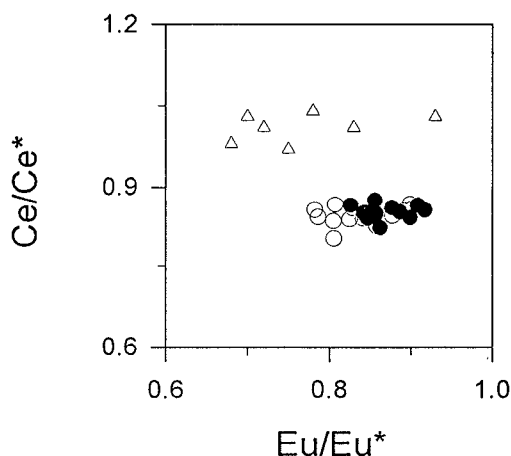


Fig. 8. Plot of Ce/Ce* versus Eu/Eu* for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

구 퇴적물들이 부의 이상을 보여 주는 것은 기원암인 South Shetland 열도의 화성암들이 본래 지니고 있는 Ce-이상의 특성과 기원암들이 퇴적과정에서 해수의 영향을 받아 현재의 부의 이상값을 형성한 것으로 해석된다.

〈Eu〉

Eu의 함량과 Eu/Eu*값은 Admiralty 만에서 평균 1.67 ppm과 0.87이고, Bransfield 해협에서는 평균 1.43 ppm과, 0.84이다. 이 연구에서 Eu/Eu*값은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$\text{Eu/Eu}^* = \text{Eu}_N / [(\text{Sm}_N) + (\text{Gd}_N)]^{1/2}$$

Eu*는 chondrite로 표준화한 희토류원소 분포 형태에서 기대되는 Eu값을 의미하며 공식의 N 표시는 chondrite로 표준화한 것을 의미한다.

전체 대륙지각내 Eu의 평균함량은 1.1 ppm이고 상부 지각내에는 평균 0.88 ppm 함유되어 있다. 현생의 수동적 대륙연변부 이질 퇴적물의 Eu함량은 0.91-1.29 ppm이고 Eu/Eu*값은 0.60-0.74인 반면, 능동적 대륙연변부 배호분지에서는 Eu함량은 0.85-1.25 ppm이고 Eu/Eu*값은 0.68-0.93이다. 이 연구 퇴적물의 Eu함량은 상부 대륙지각 및 전체 지각이나 현생의 대륙연변부 이질 퇴적물의 값보

다 높다. Eu함유량으로 볼 때 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 기원암은 하부대륙지각 내지 맨틀과 연관된 것으로 해석된다. 이 연구 대상 퇴적물내 희토류원소의 분포형태(Figs 3-6)에서 보면 chondrite와 NASC값으로 표준화한 각각의 경우 Eu는 부의 이상을 보이며 Eu/Eu^* 값은 각각 0.87과 0.84이다. 따라서 이 값은 현생의 대륙연변부 배호분지 이질퇴적물의 값인 0.69-0.93, 심해저 쇄설성 퇴적물의 값인 0.65-1.0(McLennan and Taylor, 1991)과 서태평양 퇴적물의 값인 0.69-0.93(Lin, 1992)내에 있고 서태평양 퇴적물의 화산재와 Mariana 열도 용암의 값인 0.92-0.93(Lin, 1992)보다는 약간 낮은 값을 보여준다. 따라서 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 Eu/Eu^* 값은 현생의 대륙연변부 배호분지의 이질퇴적물 및 심해 퇴적물과 유사하다(Fig. 8).

Eu는 +3가로 이루어져 있는 다른 희토류원소들과 달리 환원환경 하에서는 +2가로 존재한다. 이러한 특성은 Sr과 유사하다. 마그마에서 Eu^{2+} 은 사장석의 Ca^{2+} 를 치환하며 사장석이 정출될 때 Eu^{2+} 도 함께 사장석 성분의 일부로 정출되어 잔류 마그마에는 Eu- 이상이 형성된다. 따라서 Eu- 이상은 기원암의 마그마가 지각내(intracrustal) 용융작용을 거쳤음을 의미한다(McLennan and Taylor, 1991). 그러나 Ca-사장석은 10 Kb 압력 이내 즉 지하 40 km 깊이 내에서만 안정하다. 따라서 Eu의 이상은 암석의 생성 깊이와 지각의 분화과정에 관한 정보를 제공하며 맨틀 기원과 지각내부(intracrustal) 기원을 구분할 수 있게 한다. 이러한 화성암의 Eu- 이상은 퇴적과정을 거쳐 퇴적물의 특성을 이루게 된다. 따라서 퇴적물의 Eu- 이상은 퇴적물의 기원암이 Ca-사장석의 분별작용을 수반한 지각내부 분화작용(intracrustal differentiation)을 거쳤음을 의미한다. 이 연구 퇴적물의 Eu- 이상은 퇴적물의 기원암이 사장석의 분별작용을 수반하는 지각내부의 분화작용을 거친 암석임을 의미한다. 이는 대륙 연변부에서 대륙지각이 지각운동과 퇴적작용을 통해 진화되며, 지각내부 분화작용은 지각의 성분을 변화시키고 있음을 알 수 있다.

〈Sm〉

Sm의 함량과 Sm/Nd의 값은 Admiralty 만 퇴적

물에서는 각각 평균 5.61 ppm과 0.23이고 Bransfield 해협에서는 평균 4.68 ppm과 0.23이다. Sm은 희토류원소 중 중간에 위치하는 원소이며 분석시 Sm의 값은 정확도와 정밀도가 높으며 Ce와 Eu와 달리 환경에 따라 민감하게 변화하지 않기 때문에 Sm은 희토류원소들의 특성을 대표하고 있다.

전체 대륙지각의 평균 Sm함량과 Sm/Nd값은 3.5 ppm과 0.32이고, 상부대륙지각에서는 평균 4.5 ppm과 0.17이다(Taylor and McLennan, 1985). 현생의 수동적 대륙 연변부의 이질 퇴적물의 Sm함량은 4.87-5.07 ppm이고, 능동적 대륙연변부 배호분지에서는 5.35-6.12 ppm이다(McLennan et al., 1990). Dupuy et al.(1988)에 의하면 남반구 화산섬의 현무암 내에는 Sm이 대개 4-16 ppm 함유되어 있다. 이 연구 퇴적물의 평균 Sm함량은 전체 대륙지각과 상부 대륙지각의 평균 함량보다 높으며 현생의 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물의 함량과 유사하다. 또한 Sm/Nd값은 전체 대륙지각의 평균값보다 낮고 상부 대륙지각의 값보다 높다. 따라서 Admiralty 만과 Bransfield 해협퇴적물의 기원암은 Sm의 평균함량으로 보아서는 정확하지 않으나, Sm/Nd의 값으로 보아 하부 대륙지각과 상부 대륙지각이 혼합된 성분과 연관이 있는 것으로 해석된다. 또한 이 값들은 현생의 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물과 화산섬의 현무암의 값과 유사하다.

그동안 학자들(Goldstein et al., 1984; Dia et al., 1990)은 지질 시대에 따라 Sm/Nd의 값이 변화하는지 여부를 연구하였으나 부정적인 결론을 얻었으며, 대륙지각 상부에서도 값의 변화가 거의 없는 것으로 보고되고 있다. 또한 현생의 수동적 대륙연변부 퇴적물의 Sm/Nd값은 대체로 일정하고 능동적 대륙연변부 퇴적물들의 전체적인 평균값은 수동적인 대륙연변부 퇴적물과 유사한 값을 보이지만, 그 값들이 많이 분산되어 있고 간혹 높은 값을 보여주고 있다(McLennan et al., 1990; McLennan and Taylor, 1991). 따라서 퇴적물의 Sm/Nd값의 차이는 기원암을 형성하는 마그마의 분화작용 정도에 달려 있는 것으로 해석된다(McLennan and Hemming, 1992). 왜냐하면 잔류(residual) 맨틀에는 Sm/Nd값이 높고 대륙지각 물

질은 낮은 값을 갖고 있기 때문이다.

〈La와 Yb〉

La 및 Yb의 함량과 $(La/Yb)_N$ 값은 Admiralty 만 퇴적물은 평균 17.11 ppm, 3.13 ppm과 3.70이고, Bransfield 해협 퇴적물은 14.98 ppm, 2.97 ppm과 3.45이다. La와 Yb의 평균함량은 전체 대륙지각에서 16 ppm과 2.2 ppm이고(Taylor and McLennan, 1985), 상부 대륙지각에서는 30 ppm과 2.2 ppm이다(Taylor and McLennan, 1981). 시생대 이후 쇄설성 세립 퇴적물의 $(La/Yb)_N$ 값은 9.2이다. 현생의 능동적 대륙연변부 이질 퇴적물의 La와 Yb 함량은 각각 23.3-40.2 ppm과 1.67-2.95 ppm이고, $(La/Yb)_N$ 값은 5.84-16.3이다(McLennan et al., 1990). 또한 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물에 La와 Yb함량은 7.22-34.11 ppm과 2.08-3.15 ppm이고 $(La/Yb)_N$ 값은 2.11-9.07이다. 따라서 Admiralty 만과 Bransfield 해협 이질 퇴적물의 La 함량은 상부 대륙지각과 전체 대륙지각의 평균값과 유사하다. 이것은 이 연구 퇴적물의 기원암이 하부 대륙지각 내지 해양지각의 성분과 연관이 있는 것으로 해석된다. 또한 현생의 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물과 유사한 La와 Yb의 함량과 $(La/Yb)_N$ 값을 보여주고 있다.

〈Gd〉

Gd 함량과 $(Gd/Yb)_N$ 값은 Admiralty 만 퇴적물에서는 평균 6.18 ppm과 1.60이고, Bransfield 해협에서는 5.77 ppm과 1.59이다. 전체 대륙지각에 함유되어 있는 Gd의 평균함량은 3.3 ppm이고 상부 대륙지각에는 3.8 ppm이다. 여러 학자들(McLennan, 1989; McLennan and Taylor, 1991; McLennan and Hemming, 1992)에 의하면 능동적 대륙 연변부에 형성된 시생대 퇴적암의 기원암은 중희토류 원소들이 감소된 결과로 $(Gd/Yb)_N$ 값은 2.0보다 큰 값을 보여주며, Eu/Eu^* 값은 0.85 이상을 유지한다(Fig. 9). 그러나 시생대 이후 퇴적층의 $(Gd/Yb)_N$ 값은 대체로 1.0-2.0이다. 또한 현생의 수동적 대륙 연변부의 이질 퇴적물에서는 그 값이 1.39-1.70인 반면, 능동적 대륙연변부 배호분지에서는 1.03-1.31이다(Fig. 9).

지질 시대별로 $(Gd/Yb)_N$ 값이 변하는 것은 시간이 지남에 따라 퇴적층의 기원암의 성분변화가 있었음을 의미한다. 이는 지질 시대에 따라 맨틀

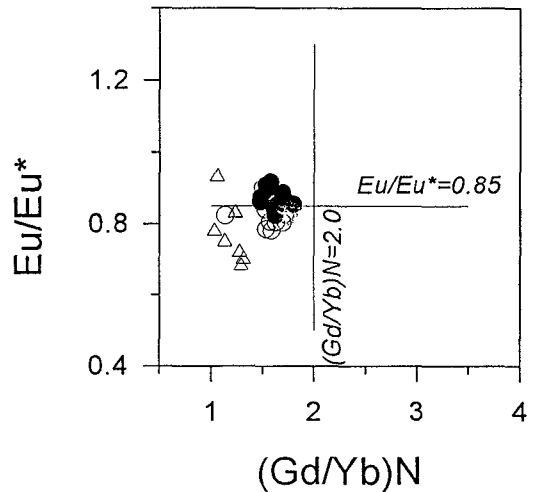


Fig. 9. Plot of Eu/Eu^* versus $(Gd/Yb)_N$ for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

자체의 성분변화나 대륙지각이 형성될 때 성분변화가 있었던 것으로 해석된다. 마그마에서 중희토류 원소들이 비교적 많이 농집되어 있는 석류석이 정출될 때는 잔여 마그마에는 Yb의 양이 감소되게 된다. 따라서 잔류 마그마에는 $(Gd/Yb)_N$ 값이 높아지고 이때 형성되는 암석은 $(Gd/Yb)_N$ 값이 높은 특성을 갖게 된다. 일반적으로 석류석의 정출작용은 상당히 깊은 곳에서 일어나므로 위에 언급한 값들이 석류석의 정출작용과 연관되었다면 이 연구 퇴적물의 기원암은 아마도 맨틀 기원으로 해석된다. 또한 퇴적물의 Gd 함량이 대륙지각의 평균값보다 높은 것은 퇴적물의 기원암은 초기 분화작용과 연관된 성분이라고 해석된다.

〈Th과 U〉

Th 및 U의 함량과 Th/U값은 Admiralty 만 퇴적물에서 평균 5.32 ppm, 2.57 ppm과 2.10이고 Bransfield 해협에서는 평균 3.92 ppm, 2.44 ppm과 1.63이다(Figs 10 and 11). 전체 대륙지각에는 Th는 평균 3.5 ppm, U는 0.91 ppm 함유되어 있고 Th/U값은 3.8이다. 상부 대륙지각에는 Th는 평균 10.7 ppm, U는 2.8 ppm 함유되어 있고 Th/U값은

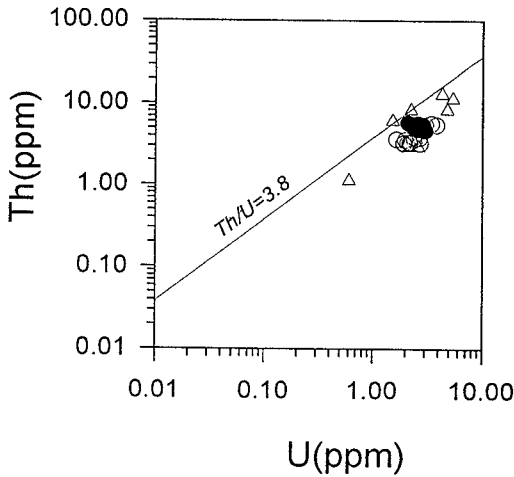


Fig. 10. Plot of Th versus U for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

3.8이다. 현생의 수동적 대륙연변부 이질 퇴적물의 Th값은 6.55-8.87 ppm, U는 1.30-1.90 ppm, Th/U값은 3.45-6.82이다. 또한 능동적 대륙 연변부의 배호분지 이질 퇴적물에는 Th값은 1.12-12.9 ppm, U는 0.62-5.34 ppm, Th/U값은 1.13-4.02이다(McLennan et al., 1990)(Fig. 11). 이것은 연구 퇴적물의 기원암이 하부 대륙지각과 연관이 있거나 혹은 상부 대륙지각 물질과 하부 대륙지각 물질들이 혼합된 결과로 해석된다.

Th는 열을 발생하는 원소이며 현생 대륙지각 내의 열 발생 원소들의 비는 대부분 일정한 값을 보여 주며 Th/U의 값은 3.8이다. 이 값에 비하면 이 연구 퇴적물은 낮은 Th/U값을 보이고 있다. Fig. 12에서는 이 연구 퇴적물의 Th/U와 Eu/Eu* 값의 분포와 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물의 값들을 보여 주고 있다. 시생대 지각 구성물질의 Th/U의 평균값은 4.0이며, 능동적 대륙연변부 퇴적물들의 값은 1.0-4.0으로 비교적 낮은 값을 보이고 있다. U는 지표면의 산화환경에서는 불용성의 U^{4+} 이 가용성의 U^{6+} 으로 전환되어 퇴적물에서 이탈하게 된다. 따라서 퇴적물내 Th/U값이 3.0 이상일 때는 퇴적작용의 영향으로 해석되고, 기원암의 본래 특성은 변질 되었다고

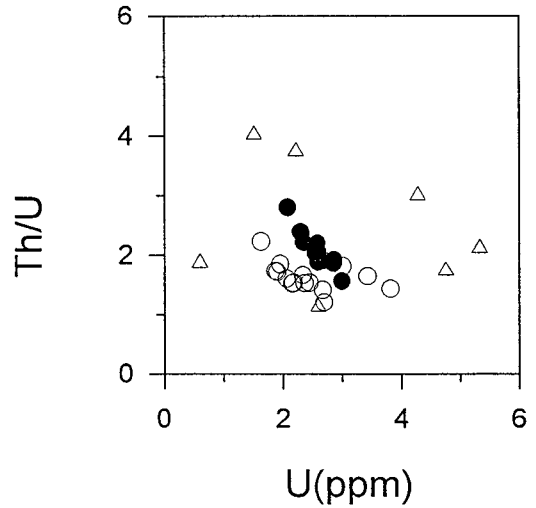


Fig. 11. Plot of Th/U versus U for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

할 수 있다(McLennan et al., 1990; McLennan and Taylor, 1991).

저탁류암들의 Th/U의 값은 일반적으로 낮기 때문에 기원암의 특성을 비교적 잘 나타낸다(McLennan et al., 1990; McLennan and Hemming, 1992). 현생의 능동적 대륙연변부 저탁류암들은 대개 1.0-6.0의 분산된 Th/U값을 보이고 있다. 또한 호상열도의 구성암석과 해양지각을 구성하고 있는 현무암들은 낮은 Th/U값을 보여 주고 있다. 이렇게 낮은 값은 맨틀에서 지각구성 물질이 추출될 때 Th를 포함한 low field strength 원소들이 감소되고, 잔류 마그마에서 호상열도나 해양지각을 구성하는 현무암들이 형성된 것으로 해석된다. 따라서 이 연구 퇴적물의 기원암도 맨틀로부터 유래한 마그마 작용에 의해 형성되는 현무암질 암석과 연관된 것으로 해석된다.

La/Th의 값은 Admiralty 만 퇴적물에서는 3.22이고 Bransfield 해협에서는 3.94이다. La는 맨틀(0.55 ppm), 해양지각(3.7 ppm), 하부 대륙지각(11 ppm), 상부대륙(30 ppm)순으로 평균함량이 증가하고, La/Th의 평균값은 맨틀에서 8.6, 해양지각에 17, 하부 대륙지각에서 11, 상부대륙지각에서 2.8을 보여준다(McLennan et al., 1990; Taylor

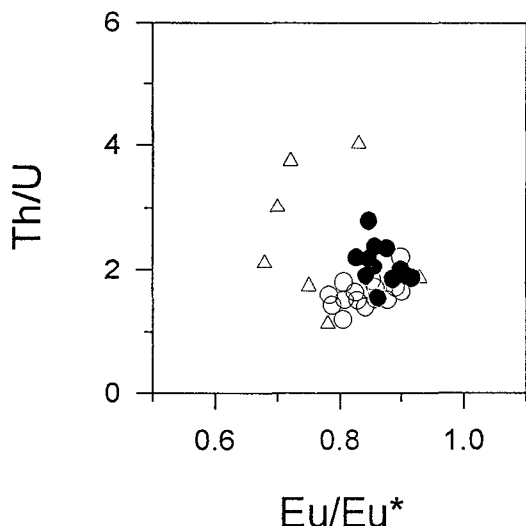


Fig. 12. Plot of Th/U versus Eu/Eu* for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

and McLennan, 1985). 현생의 수동적 대륙연변부 퇴적물에서는 La/Th값이 3.89-4.67이고 능동적 대륙연변부의 배호분지에서는 2.45-6.45이다 (McLennan et al., 1990). 또한 호상열도를 구성하고 있는 현무암의 La/Th값은 9.1이다 (Dupuy et al., 1988). Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 La함량과 La/Th값은 하부 대륙지각과 상부 대륙지각 사이의 값을 보여 주며 또한 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물의 값과 유사하다.

〈Sc〉

Sc의 함량과 Th/Sc값은 Admiralty 만과 퇴적물에서 평균 39.2 ppm과 0.14이고 Bransfield 해협에서는 평균 32.4 ppm과 0.21이다. Sc의 함량은 맨틀에 13 ppm, 해양지각에 38 ppm, 상부 대륙지각에 11 ppm, 그리고 전체 대륙지각의 평균값은 30 ppm이다 (Taylor and McLennan, 1985). Th/Sc값은 맨틀에서 0.005, 해양지각에서 0.006, 하부 대륙지각에서 0.03, 상부 대륙지각에서 0.97이고 전 대륙지각의 평균값은 0.12이다 (Taylor and McLennan, 1985). 현생의 수동적 대륙연변부 이질 퇴적물에서 Sc 함량은 4.8-17 ppm이고 Th/Sc값은

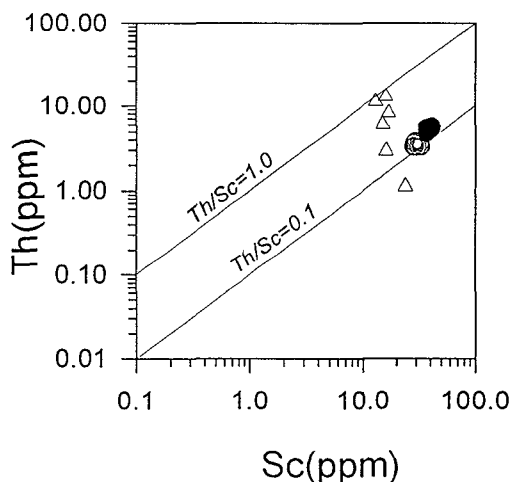


Fig. 13. Plot of Th versus Sc for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

0.66-0.99인 반면 능동적 대륙연변부 중 배호분지 이질 퇴적물에는 Sc함량이 11-24 ppm이고 Th/Sc값은 0.005-0.87이다 (McLennan et al., 1990). Fig. 13은 본 연구의 대상 퇴적물의 Sc 및 Th함량과 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물의 값들을 보여 주고 있다. Th/Sc값의 0.1은 하부 대륙지각을 그리고 1.0은 상부 대륙지각의 값을 표시하고 있다.

Sc원소는 아주 작은 이온반경 ($IR=0.87\text{\AA}$ for 8CN)을 가지고 있으며 희토류 원소나 Th과 다른 특성을 갖고 있다. Sc는 마그마의 정출작용시 가장 공생(compatible)이 가능한 원소이다. 예를 들면 휘록암이 마그마에서 초기에 정출될 때 Sc도 광물성분의 일부를 이룬다. 따라서 Th/Sc와 La/Sc는 마그마의 분리과정 중 가장 민감한 지시자로 알려져 있다. 그러나 퇴적과정 중에서는 Sc는 희토류원소들 및 Th과는 동일한 특성을 보여 주고 있어서 퇴적물의 Sc의 평균함량은 기원암의 특성으로 해석되고 있다.

이 연구의 대상인 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 기원암은 Sc의 함량으로 볼 때 해양지각과 하부 대륙지각의 성분과 유사하고, Th/Sc값은 하부 대륙지각과 상부 대륙지각의 중간 값

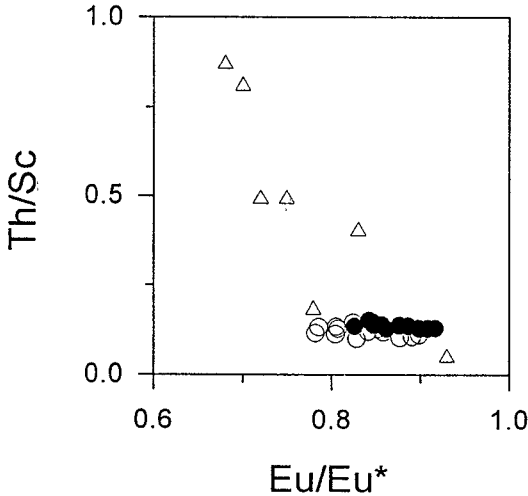


Fig. 14. Plot of Th/Sc versus Eu/Eu* for recent sediments from Admiralty Bay (closed circle) and Bransfield Strait (open circle). Also shown are ratios for recent argillaceous sediments from back-arc basin (triangle) (from McLennan, et al., 1990).

으로 전체 대륙지각의 평균값과 유사하다. 또한 현생의 능동적 대륙 연변부 배호분지의 이질 퇴적물의 값과 유사하다. Fig. 14는 이 연구대상 퇴적물의 Th/Sc값과 Eu/Eu*값과 능동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물의 값들을 보여주고 있다.

La/Sc 값은 Admiralty 만 퇴적물에는 평균 0.44 이고, Bransfield 해협에서는 0.47이다. La/Sc의 값은 맨틀에서 0.042, 해양지각 0.10, 하부 대륙지각에서는 0.31, 상부 대륙지각에서 2.7이고 전체 대륙지각의 평균값은 0.53이다(Taylor and McLennan, 1985). 현생의 능동적 대륙연변부의 배호분지에서는 0.30-2.6이다(McLennan, et al., 1990). 따라서 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 La/Sc값은 하부 대륙지각 보다는 크고 상부 대륙지각보다는 훨씬 작은 값이며, 전체 대륙지각 평균값보다 약간 적다. 또한 현생의 능동적 대륙연변부의 배호분지 이질 퇴적물의 값과 유사하다.

〈Cr, Ni, Co, Ba〉

Cr, Ni, Co, Ba 함량은 Admiralty 만 퇴적물에는 평균 82 ppm, 24 ppm, 25ppm, 301 ppm 함유되어 있고, Bransfield 해협에는 98 ppm, 40 ppm, 24

ppm, 327 ppm 함유되어 있다. 상부 대륙지각 중에 Cr은 35 ppm, Ni은 20 ppm, Co는 10 ppm, Ba은 550 ppm이 함유되어 있고, 전체 대륙지각에 Cr은 185 ppm, Ni은 105 ppm, Co는 29 ppm 그리고 Ba은 250 ppm이 함유되어 있다(Taylor and McLennan, 1985). 현생의 수동적 대륙 연변부 이질 퇴적물에는 Cr이 27-132 ppm, Ni은 32-102 ppm, Co는 11-30 ppm, Ba은 454-1363 ppm 함유되어 있고, 능동적 대륙연변부 배호분지에는 Cr이 29-174 ppm, Ni은 26-127 ppm, Co는 11-34 ppm, Ba은 120-1100 ppm 함유되어 있다. 이 원소들은 시생대 변성 퇴적물에 다량 함유되어 있으며, 지질시대가 젊어짐에 따라 퇴적물내 원소들의 함량은 감소한다(Taylor and McLennan, 1985; Gibbs et al., 1986; Condie and Wornkiewicz, 1990; McLennan et al., 1990). 이 연구 퇴적물의 기원암은 Cr, Ni, Co, Ba 함량과 원소의 특성을 고려해 볼 때 주로 하부 대륙지각과 상부 대륙지각 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다.

Cr, Ni, Co원소들은 전위 금속원소로서 규산염 광물의 격자내에 있는 Fe, Mg과 치환하는 특성을 갖고 있다. 또 이 원소들은 마그마의 초기 정출 광물과 포획물내에 다량 함유되어 있으며 화강암류보다는 초 염기성암에 수배 정도 더 농축되어 있다(Bowen, 1979). Ba은 주로 장석과 운모내에 함유되어 있으며, 퇴적물내 Ba의 양은 퇴적물의 크기에 영향을 받는 경향이 있기 때문에 세립질 보다는 조립질 입자에 더 많이 함유되어 있다(Bowen, 1979).

〈Hf와 Zr〉

Hf와 Zr의 함량과 Zr/Hf값은 Admiralty 만 퇴적물에서 3.69 ppm과 126.7 ppm, 34.4이고 Bransfield 해협에서 2.28 ppm, 92.0 ppm과 40.6이다. 상부 대륙지각에는 Hf이 5.8 ppm, Zr이 190 ppm 함유되어 있으며, 전체 대륙지각의 평균값은 Hf이 3.0 ppm, Zr이 100 ppm이다. 현생의 수동적 대륙연변부 배호분지 이질 퇴적물에는 Hf이 3.23-4.96 ppm, Zr은 99-203 ppm 함유되어 있고 Zr/Hf값은 29-34.7이다. 현생의 능동적 대륙연변부 중 배호분지에서는 Hf가 3.45-4.96 ppm, Zr은 131-157 ppm 함유되어 있고 Zr/Hf값은 27.8-38.2이다. Hf는 희토류원소는 아니나 맨틀이 용융될 때 희토류원소

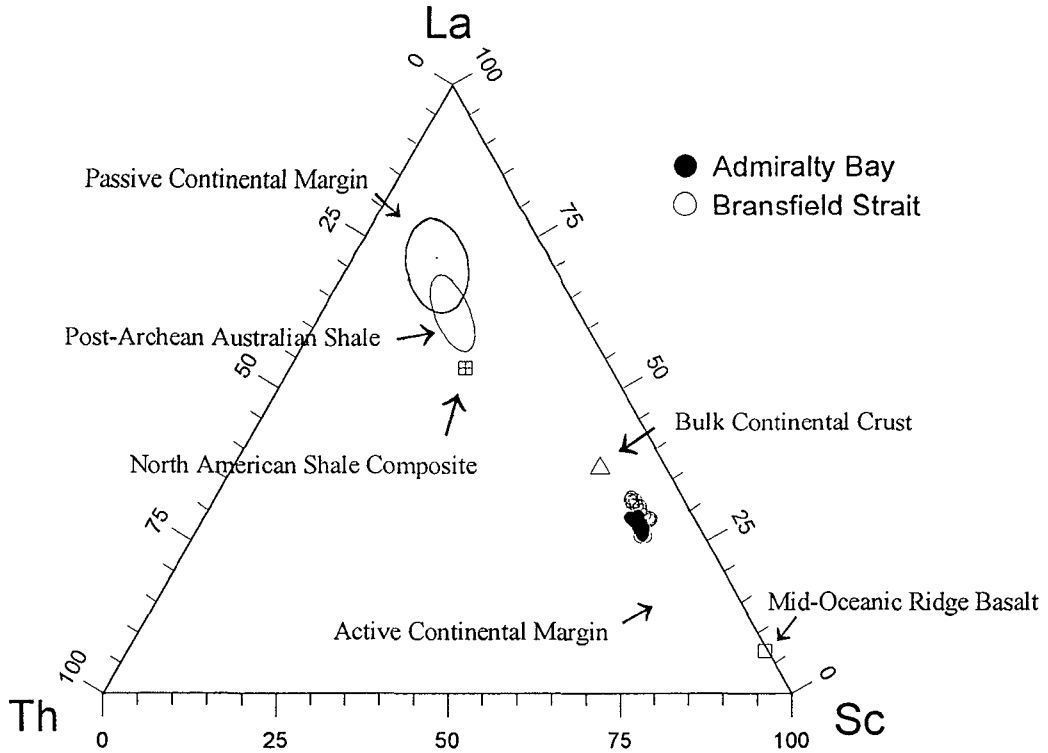


Fig. 15. Tertiary plots of La-Th-Sc for recent sediments from Admiralty Bay and Bransfield Strait. Also shown are typical compositions of potential sources (from Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1990)

의 Nd와 Sm 사이에 위치하는 자연에 존재하지 않는 원소의 특성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다(Patchett et al., 1981; Hofmann, 1988). Zr은 화강암질 암석의 중요한 증광물의 하나인 저어콘의 중요 성분이다. Hf와 Zr의 함량과 Zr/Hf의 값으로 보아서 이 연구 퇴적물의 기원암은 상부 대륙지각보다는 하부 대륙지각의 특성을 보이고 있으며, 현생의 능동적 대륙연변부의 배호분지 이질 퇴적물과 유사하다.

〈La-Th-Sc〉

La, Th, Sc원소들은 희토류원소 중에서도 비교적 비이동성(immobile) 특성을 가지고 있다. 따라서 지질시대와 지체구조적 특성에 따라 비교적 일정한 비율을 유지하는 특성을 지니기 때문에 기원암 연구에 유용하다. Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 성분을 La-Th-Sc삼각도에 표시하였다(Fig. 15). 이 그림은 여러 연구결과(Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1990; Girty et

al., 1993)들을 종합 정리하여 만들었으며 현생의 수동적 대륙연변부 퇴적물, PAAS(Post-Archean Australian shale)성분, NASC의 평균값, 능동적 대륙연변부 퇴적물, 해양저 산맥 현무암의 평균, 전체 대륙지각의 평균 값들을 표시하였다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물은 능동적 대륙연변부 퇴적물의 범위에 속하며, 전체 대륙지각 성분과 대양저산맥 현무암의 성분 사이에 속하는 것으로 해석된다.

〈기원암〉

현생 이질 퇴적물 기원을 크게 4개 성분으로 구분할 수 있다(McLennan et al., 1990). 첫째, 고기상부 대륙지각(old upper continental crust); 둘째, 지질시대가 오래되지 않고 분화작용이 없었던 호상열도(young undifferentiated arc); 셋째, 지질시대가 오래되지 않고 분화작용을 받은 호상열도(young differentiated or intracrustal arc); 넷째, 대양저 산맥 현무암(mid-ocean ridge basalt)다.

이 연구의 대상인 Admiralty 만과 Bransfield 해협 퇴적물의 지화학적 특성, 즉 NASC와 chondrite 값에 표준화한 희토류원소들의 분포형태, Ce의 이상, Eu의 이상, 희토류원소들의 함량, 기타 미량원소들의 함량들로 보아 지질시대가 오래되지 않고 분화작용이 없었던 호상열도와 분화작용을 받은 호상열도 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다. 또한 South Shethland 열도와 특히 King George 섬의 지질은 대부분 신생대 제3기의 심성암과 화산암으로 구성되어 있고 Bransfield 해협에는 최근까지 화산활동이 있었던 deception 섬 등이 위치하고 있어서 열곡(rifting) 작용과 관련된 현무암질 쇄설물들이 이번 연구 대상 퇴적물 성분의 일부를 구성하고 있다. 이러한 호상열도를 구성하고 있는 암석들은 앞에서 언급한 바와 같이 주로 하부 대륙지각의 특성을 가진 물질에 상부 대륙지각 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다.

결 론

첫째, 희토류 원소의 총함량은 Admiralty 만 퇴적물에는 105.6-114.0 ppm 함유되어 있으며(평균 함량: 109.8 ppm), Bransfield 해협 퇴적물에는 87.4-107.6 ppm 함유되어 있다(평균 함량: 96.3 ppm). 미량원소와 희토류 원소들의 함량은 시추 퇴적물의 깊이에 따른 수직변화는 없었으며, 전위 금속원소, low field strength 원소, high field strength 원소와 기타 원소들의 평균함량은 원소별로 차이가 많았다.

둘째, 희토류원소의 함량을 chondrite 값에 표준화한 분포형태에서는 경희토류 원소들은 중희토류 원소들에 비해 증가되어 있다. 경희토류 원소인 La(38.70)에서 Gd(18.68)까지는 완만한 경사로 감소하고 중희토류 원소인 Tb(14.58)에서 Lu(13.08)까지는 거의 수평 직선이다. NASC 값에 표준화한 분포형태에서는 경희토류 원소들이 중희토류 원소들에 비해 감소되어 있다. 경희토류 원소인 La(0.53)에서 Sm(0.98)까지는 감소된 값에서 서서히 증가하여 1의 값에 도달하고 중희토류 원소인 Em(1.35)에서 Lu(1.02)까지는 거의 수평 직선이다.

셋째, chondrite 값에 표준화한 분포형태에서 Ce/Ce* 값은 두 분지 퇴적물에서 공히 0.85였으며, Eu/Eu* 값은 0.84와 0.87로서 Ce와 Eu는 약간씩 부(negative)의 이상을 보이고, NASC 값에 표준화한 분포형태에서는 두 분지 공히 Ce는 부의 이상을 그리고 Eu는 정의 이상을 보여준다.

넷째, 희토류원소의 일부와 타 미량원소들의 함량을 chondrite 값에 표준화한 분포형태, 희토류원소의 분포형태, Ce와 Eu의 함량, Ce/Ce* 값과 Eu/Eu* 값, Sm을 위시한 La, Gd, Yb, Th, U, Sc, Cr, Ni, Co, Ba, Hf, Zr의 함량과 원소간 비율로 볼 때, 두 분지 퇴적물의 기원암 성분은 맨틀 혹은 하부 대륙지각과 상부 대륙지각 성분이 혼합되어 있는 것으로 해석된다.

다섯째, La-Th-Sc 삼각도에 기존의 연구결과들과 이 연구결과를 도시하여 본 결과 두 분지 퇴적물은 능동적 대륙 연변부 퇴적물 성분의 범위에 속하며, 전체 대륙지각 성분과 대양저 산맥 현무암의 성분 사이에 있다.

여섯째, 두 분지 퇴적물의 성분은 지질시대가 오래되지 않고 마그마의 분화작용을 받지 않은 호상열도와 분화작용을 받은 호상열도의 성분이 혼합되어 있으며, 궁극적으로 두 분지 퇴적물의 기원암은 맨틀에 기원한 마그마가 지각을 관입하여 기존의 지각 구성물질과 동화, 혼합 혹은 재용융되어 만들어진 마그마의 화성활동의 산물로 해석된다.

사 사

이 논문을 위해 시료분석을 해 주신 기초과학지원센터의 박은주 박사에게 감사하며, 자료정리를 위해 힘써 주신 최만식 연구원에게도 감사드린다. 본 논문을 읽고 건설적인 의견을 주신 극지연구센터의 이중익 박사에게 감사드린다.

참고문헌

- Barbieri M., Birkenmajer K., Delitala M.C., Fracalanci L., Narebski W., Nicoletti M., Peccerillo A., Petrucciani C., Todaro M.L., Tolomeo L. and Trudu C. 1989. Preliminary petrological, geochemical and Sr isotopic investigation on the Mesozoic to Cenozoic magmatism of King George

- Island, South Shetland (West Antarctica). *Mineralogica et Petrographica acta*. **32**: 37-49.
- Barker P.F. 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *Journal of Geological Society London*. **139**: 787-801.
- Barker P.F. and Dalziel I.W.D. 1983. Progress in geodynamics in the Scotia Arc region. *American Geophysical Union, Geodynamic Series*. **9**: 137-170.
- Birkenmajer K. 1983. Late Cenozoic phases of block faulting on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Terre*. **30**: 21-32.
- Birkenmajer K. 1992. Evolution of the Bransfield Basin and Rift, West Antarctica. In: Yoshida Y., Kaminuma K. and Shiraishi K., eds. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, TERRAPUB, Tokyo. 405-410.
- Birkenmajer K., Francalanci L. and Peccerillo A. 1991. Petrological and geochemical constraints on the genesis of Mesozoic-Cenozoic magmatism of King George Island, South Shetland Island, Antarctica. *Antarctic Science*. **3**: 293-308.
- Bowen H.J.M. 1979. *Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, London. 333 p.
- British Antarctic Survey 1985. *Tectonic Map of the Scotia Arc 1:3000000 BAS (Misc.) 3*. Cambridge; British Antarctic Survey.
- Condie K.C. 1991. Another look at rare earth elements in shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **55**: 2527-2531.
- Condie K.C. and Wronkiewicz D.A. 1990. The growth ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth and Planetary Science Letters*. **97**: 256-267.
- Craddock C. 1981. *Plate-Tectonic Map of the Circum-Pacific Region, Antarctica Sheet, 1:10000000*. Tula; American Association of Petroleum Geologists.
- Dalziel I.W.D. 1969. Structural studies in the Scotia arc: Livingston Island. *Antarctic Journal of United States*. **4**: 137.
- Dalziel I.W.D. 1982. The early (pre-middle Jurassic) history of the Scotia arc region: A review and progress report. In: Craddock C. ed. *Antarctic Geoscience*. Madison, Univ. Wisconsin. 111-126.
- De Barr H.J.W., Bacon M.P., Brewer P.G. and Bruland K.W. 1985. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **49**: 1943-1960.
- Dia A., Dupre B., Gariepy C. and Allegre C.J. 1990. Sm-Nd and trace element characterization of shales from the Abitibi Belt, Labrador Trough, and Appalachian Belt: Consequences for crustal evolution through time. *Canadian Journal of Earth Science*. **27**: 756-766.
- Dupuy C., Barszczus H.G., Liotard J.M. and Dostal J. 1988. Trace element evidence for the origin of ocean island basalts: an example from the Austral Island (French Polynesia). *Contrib. Min. Petrol.* **98**: 293-302.
- Elderfield H. 1988. The oceanic chemistry of rare earth elements. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. **A325**: 105-126.
- Ferran G.O. 1982. The Antarctic Cenozoic volcanic provinces and their implications in plate tectonic processes. In: Carddock C. ed., *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison. 687-694.
- Fisk M.R. 1990. Volcanism in the Bransfield Strait rift, Antarctica. *Journal of South American Earth Science* **3**: 91-101.
- Forsyth D.W. 1975. Fault plane solutions and tectonics of the South Atlantic and Scotia Sea. *Journal of Geophysical Research*. **80**: 1429-1443.
- Gibbs A.K., Montgomery C.W., O'Day P.A. and Erslev E.A. 1986. The Archean-Proterozoic transition, evidence from the geochemistry of metasedimentary rocks of Guyana and Montana. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **50**: 2125-2141.
- Girty G.H., Hanson A.D., Yoshinobu A.S., Knaack C. and Johnson D. 1993. Provenance of Paleozoic mudstones in a contact metamorphic aureole determined by rare earth element, Th, and Sc analyses, Sierra Nevada, California. *Geology*. **21**: 363-366.
- Goldstein S.L., O'Nions R.K. and Hamilton P.J. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters*. **70**: 221-236.
- Gonzalez-Ferran O. 1991. The Bransfield rift and its active volcanism. In: Thomson M.R.A., et al., ed. *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge, Cambridge Univ. Press. 505-509.
- GRAPE Team 1990. Preliminary result of seismic reflection investigations and associated geophysical studies in the area of Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*. **2**: 223-234.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A. and Korotev R.L. 1984. The "North American shale composite", its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **48**: 2469-2482.
- Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A. and Wildman T.R. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Ahrens L.H., ed. *Origin and Distribution of Elements*. Pergamon, New York. 889-912.
- Haskin L.A. and Paster T.P. 1979. Geochemistry and mineralogy of the rare earths. In: Gschneider K.A. and Eyring L. eds., *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. North-Holland Press, Amsterdam. 1-77.
- Hawkes D.D. 1961. The geology of the South Shetland Island, I. The petrology of King George Island. *Falkland Island Dependencies Survey Scientific Reports*. 26. 28 p.

- Herron E.M. and Tucholke B.E. 1976. Sea floor magnetic pattern and basement structure in the southeastern Pacific. Initial Report Deep Sea Drilling Project, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 35 p.
- Hobbs G.J. 1968. The geology of the South Shetland Islands, IV. The geology of the Livingston Island. British Antarctic Survey Scientific Reports. **47**: 34 p.
- Hofmann A.W. 1988. Chemical differentiation of earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*. **79**: 33-45.
- Humphris S.E., Morrison M.A. and Thompson R.N. 1978. Influence of rock crystallization history upon subsequent Lanthanide mobility during hydrothermal alteration of basalts. *Chemical Geology*. **23**: 125-137.
- Johnson K.T.M., Dick H.J.B. and Shimizu N. 1988. Trace element composition of diopsides in abyssal peridotites: implications for generation of mid-ocean ridge basalts. *EOS Trans. American Geophysical Union*. **69**: 1516.
- Jwa Y.J. and Park B.K. 1991. Geochemical comparisons on the volcanic rocks in the Antarctic Peninsula, the South Shetland Islands and Southern South America. *Korean Journal of Polar Research*. **2**: 135-143.
- Jwa Y.J., Park B.K. and Kim Y. 1992. Geochronology and geochemistry of the igneous rocks from Barton and Fildes Peninsulas, King George Island: A Review. In: Yoshida T., Kaminuma K. and Shiraishi K., eds. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, TERRAPUB, Tokyo. 439-442.
- Larter R.D. and Barker P.F. 1991. Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a Young subduction plate. *Journal of Geophysical Research*. **96**: 19583-19607.
- Lee J.I., Choi S.H., Jwa Y.J. and Choe M.Y. 1993. Petrogenesis of igneous rocks in the Admiralty Bay, King George Island. In: *The Research on Natural Environments and Resources of Antarctica*, KORDI, BSPN 00183-604-7, 81-103.
- Lee M.S., Park B.K., Nam S.H. and Jwa Y.J. 1990. Tectonics of the South Shetland Islands and geology of King George Island: A Review. *Journal of Oceanological Society of Korea*. **25**: 74-83.
- Lin P.N. 1992. Trace element and isotopic characteristics of western Pacific pelagic sediments: Implication for the petrogenesis of Mariana Arc magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **56**: 1641-1654.
- Martin J.M. and Meybeck M. 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world river. *Marine Chemistry*. **7**: 173-206.
- McLennan S.M. 1989. Rare earth element in sedimentary rocks, influence of provenance and sedimentary processes. *Rev. Mineral. (Min. Soc. America)* **21**: 169-200.
- McLennan S.M. and Hemming S. 1992. Samarium/Neodymium elemental and isotopic systematics in sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **56**: 887-898.
- McLennan S.M. and Taylor S.R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology* **99**: 1-21.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch H.T. and Maynard J.B. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep sea turbidites, crustal evolution and plate tectonic association. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **54**: 2015-2050.
- Nesbitt H.W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Science*. **279**: 206-210.
- Nesbitt H.W., MacRae N.D. and Kronberg B.I. 1990. Amazon deep-sea fan muds: light REE enriched products of extreme chemical weathering. *Earth and Planetary Science Letters*. **100**: 118-123.
- Park B.K. 1989. Potassium-Argon radiometric ages of volcanic and plutonic rocks from the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Journal of Geological Society of Korea*. **25**: 495-497.
- Park B.K., Choe M.Y., Chang S.K., Chung D.K., Shin D.H., Park J.K., Joo Y. and Kang C.Y. 1992. Sedimentological and geotechnical properties of the sediments in the Bransfield Strait, Antarctica. *Korea Ocean Research and Development Institute Open File Report BSPG 00169-5-485-7*. 89-135.
- Parra J.C., Ferran G.O. and Bannister J.P. 1984. Aeromagnetic survey over the South Shetland Islands, Bransfield Strait, and part of the Antarctic Peninsula, *Revista Peninsula. Bulletin of British Antarctic Survey*. **43**: 49-58.
- Patchett P.J. 1989. Radiogenic isotope geochemistry of rare earth elements. In: Lipin B.R. and Mckay G.A., eds. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy*. **21**, Min. Soc. America. 25-44.
- Patchett P.J., Kouvo O., Hedge C.E. and Tatsumoto M. 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from HF isotopes. *Contrib. Mineral. Petrol.* **78**: 279-297.
- Playo A.M. and Wiens D.A. 1986. Seismotectonics of the western Scotia Sea region (abstract). *EOS Transactions, American Geophysical Union*. **67**: 1239.
- Piper D.Z. 1974. Rare earth elements in sedimentary cycle: a summary. *Chemical Geology*. **14**: 285-304.
- Smellie J.L. 1983. Syn-plutonic origin and Tertiary age for the (?) Precambrian False Bay Schists of Livingston Island, South Shetland Island. *British Antarctic Survey, Bulletin*. **52**: 21-32.
- Smellie J.L. and Clarkson P.D. 1975. Evidence for pre-Jurassic subduction in Western Antarctica. *Nature*. **258**: 701-702.

- Smellie J.L., Pankhurst R.J., Thomson M.R.A. and Davies R. E.S. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. British Antarctic Survey, Scientific Reports. **87**: 85 p.
- Taylor S.R. 1964. Abundance of chemical element in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **28**: 1273-1285.
- Taylor S.R. 1977. Island arc models and the composition of continental crust. American Geophysical Union, Maurice Ewing Series. **1**: 325-335.
- Taylor S.R. 1979. Chemical composition and evolution of continental crust: the rare earth element evidence. In: McElhinny M.W., ed. *The Earth: Its Origin, Sturcture and Evolution*. Academic Press, New York. 353-376.
- Taylor S.R. and McLennan S.M. 1981. The composition and evolution of cont of the continental crust rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Phil. Trans. Roy. Soc. London. A* **301**: 381-399.
- Taylor S.R. and McLennan S.M. 1985. *The Continental Crust, its Composition and Evolution*. Blackwell. 312 p.
- Taylor S.R. and McLennan S.M. 1988. The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry. In: Gschneider K.A. Jr. and Eyring L., eds. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. V. II, Amsterdam, Elsevier. 485-578.
- Toyoda K., Nakamura Y. and Masuda A. 1990. Rare earth elements of pelagic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **54**: 1093-1103.
- Wang Y.L., Liu Y.G. and Schmidt R.A. 1986. Rare earth element geochemistry of South Atlantic deep sea sediments, Ce anomaly change at 54 my. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **50**: 1337-1355.
- Weaver S.D., Saunders A.D. and Tarney J. 1982. Mesozoic-Cenozoic volcanism in the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula, geochemical nature and plate tectonic significants. In: Craddock c., ed. *Antarctic Geoscience*, Madison, Univ. Wisconsin Press. 265-273.