

Note

남서태평양 리코후 드리프트 퇴적층의 쇄설성 실트입자 크기의 수직적 변화를 이용한 플라이스토세 후기 심해서안경계해류의 세기 변화

김부근^{1*} · 이영주² · 박유현¹ · 박장준²

¹부산대학교 지구환경시스템학부
(609-735) 부산광역시 금정구 장전동 산30
²한국지질자원연구원 석유해저부
(305-350) 대전광역시 유성구 가정동 31

Late Pleistocene Variation in Intensity of Deep Western Boundary Current from Vertical Change in Size of Terrigenous Silt in the Rekohu Sediment Drift, SW Pacific

B.K. Khim^{1*}, Y.J. Lee², Y.H. Park¹, and J.J. Bahk²

¹*Division of Earth Environmental System, Pusan National University
Busan 609-735, Korea*

²*Petroleum and Marine Resources Division, KIGAM,
Daejeon 305-350, Korea*

Abstract : Hole 1124 of ODP Leg 181 was located in the Rekohu sediment drift off eastern New Zealand in the southwest Pacific Ocean. Mean grain sizes of sortable silt were measured in two drilled cores (1124A and 1124B). Chronostratigraphy of core 1124 was correlated with the well-dated nearby core S931, resulting that the age of core 1124 covers the late Pleistocene spanning about MIS (Marine Isotope Stage) 5. Mean grain size of sortable silt seemed to be relatively large during the glacial period, whereas that of the interglacial period was smaller, although several tephra layers contain some coarse-grained pyroclastic particles. The variation in mean grain size of sortable silt in Rekohu sediment drift during the late Pleistocene indicates that the intensity of Deep Western Boundary Current (DWBC) might have been enhanced during the glacial period as a result of increased production of Antarctic Bottom Water (AABW).

Key words : sortable silt, Deep Western Boundary Current, Rekohu drift, Pleistocene, ODP, SW Pacific

1. 서 론

퇴적물 입자의 크기는 미세한 먼지로부터 거력(boulder)에 이르기까지 매우 다양하다. 퇴적물 입자의 크기를 분석하는 이유는 가장 기초적인 퇴적물의 특성 외에 일반적으로 입도분포는 퇴적물의 퇴적환경을 지시하고, 운반 및 퇴적기구에 대한 정보를 제공하며 퇴적물의 성질에 대한 예

측을 가능하게 해 주기 때문이다(Middleton 1976; Bridge 1981). 유체의 속도와 관련된 입자매개 변수들은 퇴적물을 구성하고 있는 입자들의 분포를 대표하며 특히 모래크기의 입자들의 중요한 퇴적학적 정보를 제공하였다. 퇴적물의 조립한 부분(일반적으로 63 μm 또는 150 μm 이상)은 체(sieve)를 이용하여 매우 정확하게 측정할 수 있기 때문에 천해 해양퇴적물 또는 모래함량이 상당히 많은 사질퇴적물은 퇴적물들 중에서 쉽게 선택되어 연구되었다. 한편, 심해의 쇄설성(lithogenic) 입자들은 대부분 빙하기원

*Corresponding author. E-mail : bkkhim@pusan.ac.kr

또는 화산기원이 주를 이루기 때문에, 반원양성 또는 원양성 퇴적물을 구성하는 모래입자들의 대부분은 생물기원의 퇴적물로 주로 지화학적 연구에 사용된다.

해양환경에서 퇴적물을 침식·운반시키는 유체의 속도 세기 변화와 상응하는 입도의 매개 변수들을 찾아내는 연구는 오랜 기간에 걸쳐 수행되어 왔다. 예를 들어, 전형적인 삼각다이하그램의 조직변수들은 전체적인 분급 상황을 보여주지만, 유체의 세기와는 관계없이 사용된다(예, Folk 1966). 사질입자들로 형성된 퇴적물에서 층리와 같은 퇴적 구조들은 유체의 속도를 예측하는데 이용될 수 있다. 그러나, 유체의 최소속도는 임계침식곡선(critical erosion curve)에서 얻을 수 있으며, 운반기작과 전단응력 값은 입도분포의 형태에서 예측할 수 있다(Middleton 1976; Bridge 1981). 해양환경에서 심층해류의 경우 거의 석영으로 구성된 모래입자를 이동시킬 수는 없지만, 유공층으로 이루어진 모래입자는 운반할 수 있다. 간혹 빠른 유속이 변화하는 기간 동안에 세립한 입자를 운반시키고 모래입자만을 남길 수 있는 퇴적현상을 보여준다. 그러나, 대부분의 심해환경에서 모래입자들은 생물기원의 퇴적물로 구성되기 때문에 이러한 상황은 거의 제한적이어서, 심해환경에서 적용될 수 있는 새로운 입자매개 변수의 필요성이 제기된 바 있다.

입도분석을 고해양학적 연구에 적용하는 가장 중요한 사항은 아마도 입자의 퇴적당시에 우세하였던 해류의 속도와 관련되는 변수를 매우 정확하게 예측하는 것이다. 퇴적물의 입도 가운데 특히 모래크기의 입자들은 운반과 퇴적되는 유속(transporting and depositing flow)의 성질과 매우 밀접한 관계가 있다(Bianchi et al. 1999). Ledbetter (1979)는 처음으로 200 μm 구경을 갖는 Elzone 입자분석기를 이용하여 비탄산염(쇄설성) 실트(4 또는 5.6부터 63 또는 70 μm 까지)의 평균값을 구하는 매개변수를 정의하였다. 그러나, 이러한 매개변수를 이용하여 저층류의 유속과 대비시키기 위해서는 기원지의 역할, 유체형태(eddy or mean flow), 층서대비, 또는 유체속도의 공간적 차이 등 여러 가지 요소들을 입자의 매개변수들과 관련시켜야 했다. 특히, 퇴적물의 실트구간 중에 10 μm 이하의 세립한 부분의 입자들은 일반적으로 점착성결합상태(cohesive fashion)로 퇴적되기 때문에 퇴적 유체의 전단응력과 직접적인 관련이 없다. McCave et al.(1995b)은 북대서양 심층수의 속도 세기를 복원하기 위하여 유속의 수리역학적 과정에 반응하며 심층수의 속도 세기 변화에 가장 밀접하게 관련되는 매개 변수인 sortable silt를 제안하였다. Sortable silt는 쇄설성 실트입자들 가운데 10 μm 에서 63 μm 의 구간의 입자들을 SS라고 표현하며, sortable silt의 무게비를 SS%로 표기하고 sortable silt의 평균입도를 [SS]라고 표현한다. 심해환경에서 이러한 sortable silt는 저층류 유체에

의해 분급되고 퇴적되는 이트들의 퇴적물 공급과 독립적으로 변하기 때문에 높은 sortable silt 평균입도는 심층(저층) 해류의 속도가 상대적으로 빠른 것을 의미한다. 이러한 sortable silt 변수를 북대서양 심층수의 세기 변화에 적용할 수 있는 가장 큰 조건은 북대서양 저층퇴적물은 생규소함량이 미미하기 때문에 유기물과 탄산염을 제거하여 쇄설성 퇴적물 입자들을 용이하게 얻을 수 있기 때문이었다(Manighetti and McCave 1995; McCave et al. 1995a).

이 연구는 남서태평양 뉴질랜드의 동쪽에 위치한 리코후 드리프트 퇴적층(Rekohu Drift Sediment)에서 채취된 ODP Leg 181의 Site 1124의 코아퇴적물에서 쇄설성입자의 sortable silt의 평균입도를 측정하여 플라이스토세 후기 동안 심해서안경계해류(Deep Western Boundary Current)의 세기 변화를 알아보는 것이다. 또한 쇄설성 입자들의 입도분석을 통한 심해 저층해류의 세기 변화에 대한 향후 연구에 적용할 수 있는 새로운 분석 방법을 소개하는 것이다.

2. 연구 지역

뉴질랜드 동쪽에 위치한 남서태평양 지역의 “동뉴질랜드 해양퇴적시스템(Eastern New Zealand Oceanic Sedimentary System; ENZOSS)”에서 관찰되는 뚜렷한 퇴적물의 변화는 주변 지역으로부터 두 가지의 우세한 공급원의 상호작용을 반영하는 것이다(Carter et al. 1999). 첫 번째는 구조적으로 활발히 움직이고 있는 뉴질랜드가 퇴적물의 주요 공급원이며, 두 번째는 아극지역에서 아열대 지방까지의 수괴를 포함한 주변해역들과 이와 관련된 해양전선들이 또 다른 공급원으로 작용한다. 이 두 가지의 상호작용에 의하여 생물기원 유기쇄설물(organic detritus) 공급이 지역적으로 차이를 보이며 퇴적작용에 기여를 한다(Carter et al. 2000). 이러한 공간적인 변화와 더불어 한 가지 더 추가되는 흥미로운 작용이 있다. 이 지역의 퇴적시추코어들은 제4기 후기동안의 생물기원 성분과 육성기원 성분의 비의 변화를 기록하고 있다(예, Nelson et al. 1993). 이러한 시간적으로 변화되는 차이는 기후변화와 이와 관련된 환경변화와 밀접한 관련이 있다.

주로 마이오세와 그보다 더 오래된 시대의 퇴적물로 구성된 250 km 길이의 해령같은 모양의 리코후 드리프트 퇴적층(Rekohu Drift Sediment)은 북섬의 동쪽으로 약 600 km 떨어진 곳에 위치한다(Fig. 1). 약 1,400 km 길이의 히쿠랑지 수로를 따라 대륙주변부로 저탁류를 통해 이동되는 많은 양의 퇴적물들은 카이쿠라 해협(Kaikoura Strait)과 쿡 해협(Cook Strait)으로부터 운반된다(Carter et al. 1996). 이렇게 지속적으로 공급되는 퇴적물들은 히쿠랑지 수로의 입구로 운반되고, 이곳에서 상대적으로 빨라

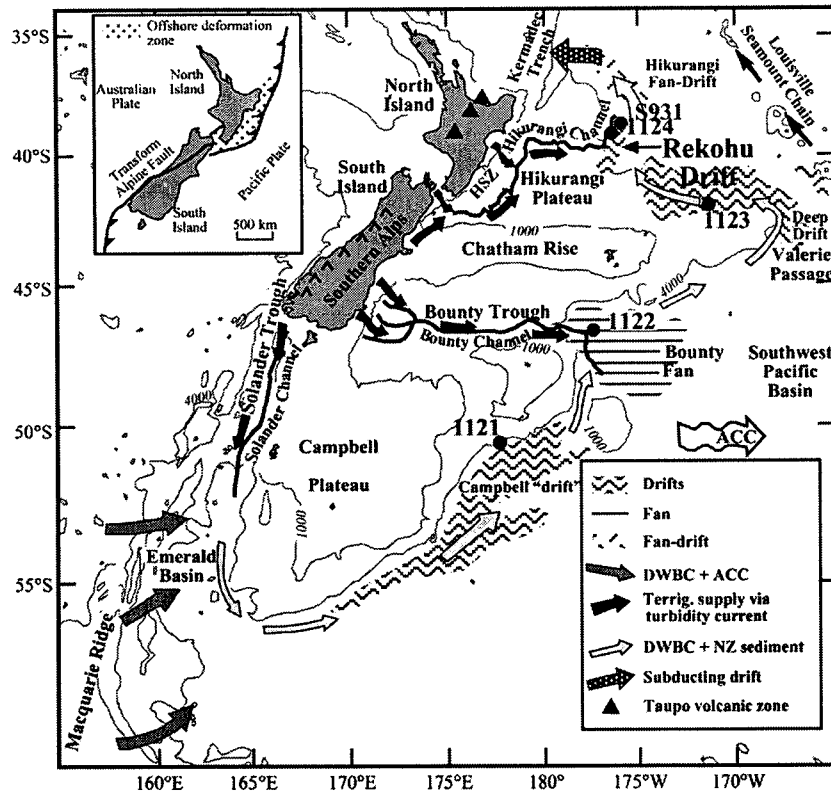


Fig. 1. Bathymetric map of the eastern New Zealand region, Southwest Pacific Ocean, showing the location of all sites drilled during ODP Leg 181, dominant circulation patterns, and distribution of sediment drift system. Depths in meters (after Carter *et al.* 1999).

진 심해서안경계해류에 의하여 해류방향의 300 km 이내에 선상지 형태의 드리프트 퇴적층(fan-drift)이 형성된다(Carter and McCave 1997). 이 드리프트 퇴적층은 화산에 의한 기반해령 위에 형성되었으며, 현재 심해서안경계해류의 방향을 바꾸는 역할을 하며 히쿠랑지 수로(Hikurangi Channel)에 효과적인 제방으로서의 역할을 한다(Carter and McCave 1997). 리코후 드리프트는 남쪽으로는 바운티 해곡과 북쪽으로는 커마데크 해구(Kermadec Trench) 사이에 놓여있기 때문에, 동뉴질랜드 해양퇴적시스템(ENZOSS)에서 '퇴적물 공급-이동-침강이 통합된 지역' 안에 위치하고 있다(Carter *et al.* 1999). 리코후 드리프트 위로 흐르는 남서태평양의 심해서안경계해류는 남극순환류와 분리된 후에 소란더 해곡(Solander Trough)과 바운티 해곡으로 공급되는 퇴적물들을 뉴질랜드 대륙주변부를 따라 북쪽으로 운반하고 있다(Carter and Mitchell 1987; Carter *et al.* 1996).

3. 실험 방법

ODP Leg 181의 Site 1124는 뉴질랜드 북섬의 동쪽

600 km에 위치한 리코후 드리프트 퇴적층에서 시추되었다(Fig. 1). Hole 1124A(39°29.901'S, 176°31.894'W, 3968 m)에서 시추된 코아는 코아상부로 넘친 후에 코아베럴이 채워진 상태로 길이 9.5 m가 채취되었다. 한편, Hole 1124B(39°29.901'S, 176°31.894'W, 3978 m)에서 채취된 코아는 해수 퇴적물의 경계가 잘 보존된 상태로 길이 9.8 m가 회수되었다. 뉴질랜드로부터 많은 양의 육성 쇄설성 퇴적물이 히쿠랑지 수로를 따라 저탁류를 통해 대륙주변부로 운반되지만, 리코후 드리프트 퇴적층의 형성은 심해서안경계해류에 의해서 만들어진다(Joseph *et al.* 2004).

연구지역에서 채취된 코아는 선상에서 심해굴착사업에 필요한 기본 자료들을 측정 한 이후에, 코아 1124A의 Section 1H1W에서 20개의 퇴적물 부시료를 그리고 코아 1124B의 Section 1H1W와 1H2W에서 38개의 퇴적물 부시료를 채취하여 실험실로 운반하였다. 코아 1124A와 코아 1124B의 합성된 깊이를 판정하기 위하여 각각의 코아에서 측정된 대자율(MS)과 GRAPE 등의 자료를 이용하여 측정비교를 통하여 선상에서 시료들의 합성된 깊이를 결정하였다. 그 결과 1124A는 1124B보다 2.32 m 더 깊은 위치로 층위가 비교되었다(Carter *et al.* 1999). 따라서, 이

연구에서는 각각의 코아 1124A와 코아 1124B의 채취된 시료의 mbsf(meters below sea floor) 깊이가 아니라, 코아 1124A와 코아 1124B를 함께 표기한 합성깊이 mcd (meters composite depth)를 이용하여 나타내었다.

저층류의 속도 세기와 관련된 sortable silt는 퇴적물을 구성하는 입자들중에서 쇄설성퇴적물에 한정되기 때문에, 입도분석기를 이용하여 입도를 측정하기 이전에 퇴적물 시료의 전처리가 필수적으로 요구된다. 일반적인 입도분석을 위한 유기물 및 탄산염 제거 외에 생물기원의 생규소 함량을 정확하게 제거하는 것이 매우 중요한 과정이다. 유기물과 탄산염은 과산화수소와 염산을 이용하여 쉽게 제거가 가능하지만, 생규소 함량의 제거를 위해서는 퇴적물 내에 생규소가 거의 없는 상태까지 평형을 이루는 시간을 퇴적물의 양 및 생규소 함량과의 관계로부터 결정해야한다(Mortlock and Froelich 1989). 그러나, 코아 1124A와 1124B의 퇴적물에 포함된 생규소 함량은 매우 적기 때문에 기본적인 생규소함량 측정 방법에 의해 1N NaOH를 사용하여 생규소를 추출하고 제거하였다.

한국지질자원연구원 석유해저자원연구부에서 운영 중인 레이저 회절 입도 분석기(LPA: Laser Diffraction Particle Analyzer)는 Microtrac사의 S3500 모델로서 레이저 분석기 자체와 컴퓨터 운영 시스템, 소량 그리고 대량의 시료를 분석기에 공급해주는 시스템 등이 독립적으로 구성되어 있다(Fig. 2). 이 모델은 하나의 레이저 광을 사용하는 타사 제품들과는 달리 세 개의 레이저 광을 사용하는 독

특한 내부 구성을 가지고 있다. LPA는 퇴적물 입자들이 레이저 빔을 통과할 때 입자 크기에 따라 발생하는 회절 패턴의 차이를 측정하여 입도분포를 산출한다. 이 실험 방법은 자료의 재현성이 매우 뛰어나며, 측정 가능한 입경 범위가 넓고 (0.02-2800 μm), 무엇보다도 비교적 소량(니질 퇴적물의 경우 약 10 mg)의 시료도 분석이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 LPA는 최근 육상의 퇴스층이나 해양 퇴적물 등에서 입도 자료를 이용한 풍성기원, 하성 기원 입자 플럭스의 상대적 유입량을 복원하는 연구 등에 매우 활발하게 사용되고 있다. 하지만 LPA는 측정 원리상 전통적인 피펫방법에 의한 Stokes 입경 자료와 비교할 때 특히 점토 입자들의 함량을 저평가하는 경향이 나타나며, 특히 복모드 입도분포를 가지는 시료의 경우, 자료의 신뢰성에 다소 문제가 있는 것으로 보고되고 있다(Coakley and Syvitski 1991; Milligan and Kranck 1991; Konert and Vandenberghe 1997). 분석된 입도 자료는 GRADISTAT을 이용하여 10-60 μm 의 sortable silt를 선택하여 평균입도(mean grain size)를 계산하였다.

4. 연구 결과 및 토의

코아 1124의 층서를 설정하기 위하여 코아에 보존된 화산재층과 탄산염함량 분석 결과를 이용하여, 코아 1124의 위치에서 매우 가까운 장소에서 층서가 설정된 코아 S931 (39°27.376'S, 176°25.10'W, 4097 m)과 비교하여 연대를

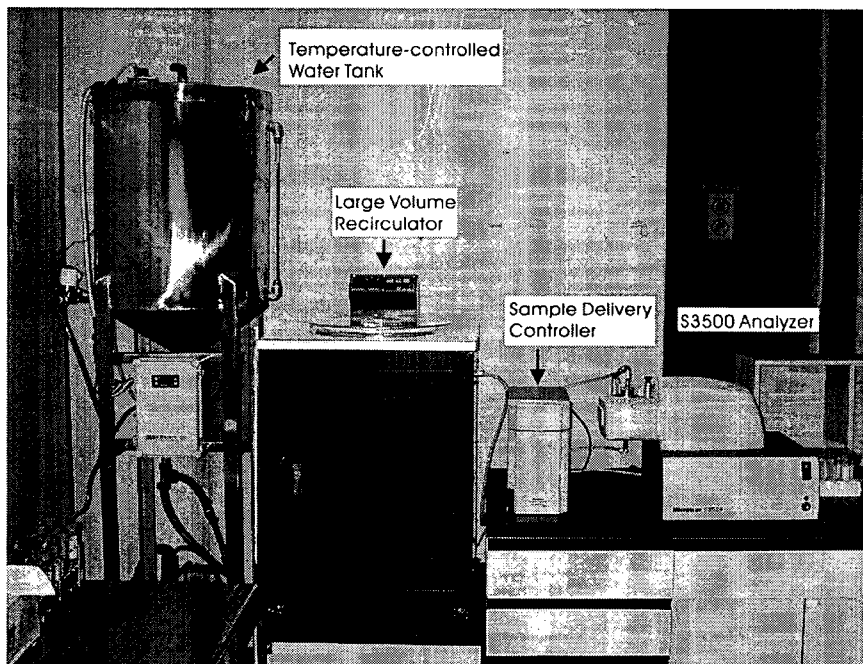


Fig. 2. S3500 laser diffraction particle size analyzer.

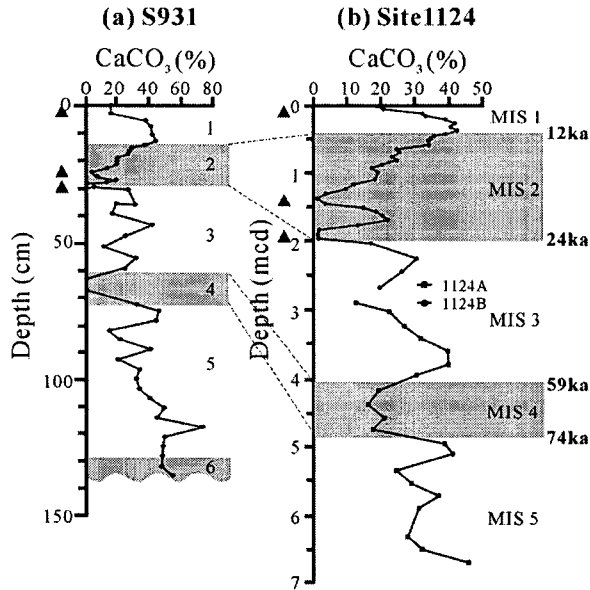


Fig. 3. Stratigraphic correlation between (a) the well-dated core S931 (Carter *et al.* 2000) and (b) core 1124 for the judgement of chronostratigraphy of core 1124. Black triangles marks the tephra layers and the lowest triangle was Kawakawa Tephra (Pillans *et al.* 1993). Note that the unit of depth in core 1124 is mcd.

결정하였다(Fig. 3). 코아들 사이의 탄산염 함량 변화는 매우 잘 일치하고 있다. 화산재가 나타나는 깊이에서는 탄산염 함량이 매우 낮게 측정이 되며, 이러한 위치가 코아 상부에 세 지점에서 매우 동일하게 일치한다(Fig. 3). Carter *et al.*(2000)은 방사성 탄소연대자료, 부유성유공층의 산소동위원소와 화산재를 이용하여 SPECMAP과 비교하여 코아 S931의 층서를 설정하였다. 코아에 보존된 화산재는 Kawakawa Tephra로 명명되고 있으며, 뉴질랜드 북섬의 중앙화산지역에서 유래한 것으로 알려졌다(Pillans *et al.* 1993). 이 화산재층의 연대는 Marine Isotope Stage(MIS) 2-3의 경계에 위치하며, 방사성 탄소연대 22,590 yr BP이며 Calib. 3.0(Stuiver and Reimer 1993)으로 보정된 연대는 26,170 calendar year로 알려졌다. 이 연구에서는 보정된 연대가 아니라 측정된 탄소연대를 이용하였다. 탄산염 함량의 증감의 변화가 두 코아들 사이에서 비교가 가능하기 때문에, 코아 S931에서 설정된 MIS 층서를 바탕으로 코아 1124의 층서를 구분하였다. 코아 1124의 하부는 MIS 5에 해당되어 코아 1124는 적어도 100,000년 정도의 역사를 기록하고 있는 것으로 판단된다. MIS 층서의 경계 연대는 보정된 탄소동위원소 연대가 아닌 측정된 탄소동위원소 연대로 Martinson *et al.*(1987)의 자료를 사용하였다.

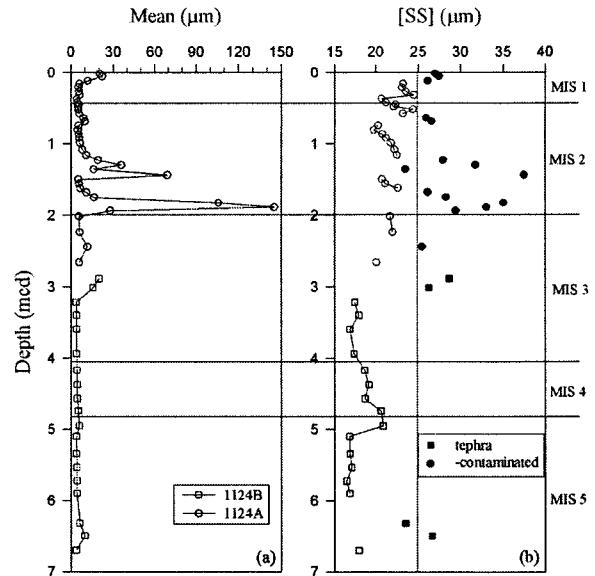


Fig. 4. (a) Downcore variation of mean grain size of only terrigenous particles of core 1124A and 1124B. (b) Downcore variation of mean grain size of sortable silt in the same core. The closed symbols may contain the tephra pyroclastic particles.

코아 1124 퇴적물의 쇄설성 입자들의 평균입도가 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 대부분의 퇴적물의 평균입도는 $15 \mu\text{m}$ 이하이며, 간헐적으로 매우 높게 측정된 평균입도의 퇴적물들은 코아에 협재되어 보존된 화산재층과 일치한다. 따라서, 전체적인 평균입도의 분포로는 심층해류의 수리학적 특성에 대한 정보를 제공할 수 없다. 또한, 이 코아의 경우 협재된 화산재의 화산쇄설성 입자들은 심층해류의 운반에 의한 것들이 아니기 때문에, 적어도 화산재 입자들을 포함하고 있는 깊이의 퇴적물들은 sortable silt를 측정할 때 매우 조심해야 한다. Fig. 4(b)는 1124 코아의 sortable silt의 평균입도를 나타낸다. sortable silt는 측정된 쇄설성 입자들 중에서 $10 \mu\text{m}$ 에서 $63 \mu\text{m}$ 을 추출하여 평균값을 계산한 것이다. 앞서 설명하였듯이, 퇴적물들 중에서 상대적으로 평균입도가 적어도 $25 \mu\text{m}$ 보다 큰 경우에는 아마도 화산재가 포함된 층들의 화산쇄설성 입자들에 의해 영향을 받은 것으로 해석하여 따로 표기하였다. 나머지 퇴적물들의 sortable silt의 평균입도를 살펴보면, 빙하기에 해당되는 MIS 2와 MIS 4의 sortable silt의 평균입도는 약 $23 \mu\text{m}$ 로 간빙기인 MIS 3과 MIS 5의 평균입도인 약 $17 \mu\text{m}$ 보다 높게 측정되었다. 그러나, MIS 1 동안 상대적으로 높게 측정된 sortable silt의 평균값은 의문이 되는 사항이다.

남서태평양의 리코후 드리프트 퇴적층에서 분석된 플라이스토세 후기 퇴적물의 쇄설성 입자의 분석 결과, sortable

silt의 평균값이 간빙기동안 보다 빙하기동안에 증가되었다(Fig. 4). 퇴적물에 포함된 화산재층의 쇄설성 입자들의 영향에 의해 평균입도의 값이 다르게 나타나지만, 이러한 영향을 제거한 상태에서 sortable silt의 평균값은 빙하기-간빙기의 변화를 보여준다. 이러한 변화는 ODP Leg 181의 Site 1123에서 나타난 지난 백 만년간의 빙하기동안 심해서안경계해류와 태평양심층해류의 증가된 세기와 일치한다(Hall et al. 2001). 신제3기와 마이오세 중기의 심해서안경계해류의 변화도 Site 1123과 Site 1124에서 Hall et al.(2003)과 Joseph et al.(2004)에 의해 보고되었다. 연구 지역에서 얻어진 sortable silt의 평균입도의 변화는 빙하기동안 심해서안경계해류의 세기가 증가된 것을 의미하며, 이러한 기작은 아마도 빙하기동안 남극저층수(AABW)의 증가된 형성과 매우 밀접한 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었다. 본 논문을 심사하시고 건설적인 비평을 아끼지 않으신 편집위원과 이희준 박사 그리고 양우현 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- Bianchi, G.G., I.R. Hall, I.N. McCave, and L. Joseph. 1999. Measurement of the sortable silt current speed proxy using the Sedigraph 5100 and Coulter Multisizer II: Precision and accuracy. *Sedimentology*, 46, 1001-1014.
- Bridge, J.S. 1981. Hydraulic interpretation of grain-size distributions using a physical model for bedload transport. *J. Sediment. Petrol.*, 51, 1109-1124.
- Carter, L. and I.N. McCave. 1997. The sedimentary regime beneath the Deep Western Boundary Current inflow to the southwest Pacific Ocean. *J. Sediment. Res.*, 67, 1005-1017.
- Carter, L. and J.S. Mitchell. 1987. Late Quaternary sediment pathways through the deep ocean, east of New Zealand. *Paleoceanography*, 2, 409-422.
- Carter, L., H.L. Neil, and I.N. McCave. 2000. Glacial to interglacial changes in non-carbonate and carbonate accumulation in the SW Pacific Ocean, New Zealand. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 162, 333-356.
- Carter, R.M., L. Carter, and I.N. McCave. 1996. Current controlled sediment deposition from the shelf to the deep ocean: the Cenozoic evolution of circulation through the SW Pacific gateway. *Geol. Rundsch.*, 85, 438-451.
- Carter, R.M., I.N. McCave, C. Richter, L. Carter, and the Shipboard Party. 1999. Proceedings of ODP Initial Report 181, College Station, TX (CD-ROM and <http://www.odp.tamu.edu/publications/181IR>).
- Coakley, J.P. and J.P.M. Syvitski. 1991. SediGraph techniques. p. 129-142. In: *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. ed. by J.P.M. Syvitski. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Folk, R.K. 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6, 73-93.
- Hall, I.R., I.N. McCave, N.J. Shackleton, G.P. Weedon, and S.E. Harris. 2001. Intensified deep Pacific inflow and ventilation in Pleistocene glacial times. *Nature*, 412, 809-812.
- Hall, I.R., I.N. McCave, R. Zahn, L. Carter, P.C. Knutz, and G.P. Weedon. 2003. Paleocurrent reconstruction of the deep Pacific inflow during the middle Miocene: Reflections of East Antarctic Ice Sheet growth. *Paleoceanography*, 18, 1-11.
- Joseph, L.H., D.K. Rea, and B.A. van der Pluijm. 2004. Neogene history of Deep Western Boundary Current at Rekohu sediment drift, Southwest Pacific (ODP Site 1124). *Mar. Geol.*, 205, 185-206.
- Konert, M. and J. Vandenberghe. 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44, 523-535.
- Ledbetter, M.T. 1979. Fluctuations of Antarctic Bottom Water velocity in the Vema Channel during the last 160,000 years. *Mar. Geol.*, 33, 71-89.
- Manighetti, B. and I.N. McCave. 1995. Late glacial and Holocene paleocurrents around Rockall Bank, NE Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 10, 611-626.
- Martinson, D.G., N.G. Pisias, J.D. Hays, J. Imbrie, T.C. Moore, and N.J. Shackleton. 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0-300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Res.*, 27, 1-29.
- McCave, I.N., B. Manighetti, and N.A.S. Beveridge. 1995b. Circulation in the glacial North Atlantic inferred from grain-size measurements. *Nature*, 374, 149-152.
- McCave, I.N., B. Manighetti, and S.G. Robinson. 1995a. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for paleocurrent speed and paleoceanography. *Paleoceanography*, 10, 593-610.
- Middleton, G.V. 1976. Hydraulic interpretation of sand size distribution. *J. Geol.*, 84, 405-426.
- Milligan, T.G. and K. Kranck. 1991. Electroresistance particle size analyzers. p. 109-118. In: *Principles, Methods, and*

- Application of Particle Size Analysis.* ed. by J.P.M. Syvitski. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Mortlock, R.A. and P.N. Froelich. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in marine sediments. *Deep-Sea Res.*, 36, 1415-1426.
- Nelson, C.S., P.J. Cooke, C.H. Hendy, and A.M. Cuthbertson. 1993. Oceanographic and climatic changes over the past 160,000 years at deep sea drilling project site 594 off southeastern New Zealand, southwest Pacific Ocean. *Paleoceanography*, 8, 435-458.
- Pillans, B., M. McGlone, A. Palmer, D. Mildenhall, B. Alloway, and G. Berger. 1993. The Last Glacial Maximum in central and southern North Island, New Zealand: A paleoenvironmental reconstruction using the Kawakawa Tephra Formation as a chronostratigraphic marker. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 101, 283-304.
- Stuiver, M. and P.J. Reimer. 1993. ¹⁴C database and revised Calib. 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.

Received Aug. 16, 2006

Accepted Nov. 13, 2006