

Article

쿨터카운터(Coulter Counter)를 이용한 극지 눈시료 중
광물성 먼지의 입자크기분포 분석

강정호* · 황희진 · 홍상범 · 허순도

한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26

Particle Size Distribution Analysis of Mineral Dust in Polar Snow Using a
Coulter Counter

Jung-Ho Kang*, Heejin Hwang, Sang Bum Hong, and Soon Do Hur

Korea Polar Research Institute, KIOST
Incheon 406-840, Korea

Abstract : Mineral dust in the polar snow plays an important role both in the climate system of the Earth and in global biogeochemical cycles. Analysis of the concentration and the particle size distribution of mineral dust has been carried out in the snow from the Antarctic surface snow and the Greenland snowpit. Among the various particle size determination techniques, a Multisizer 3 Coulter Counter in a class 100 clean bench counted all particles between 1.1 and 30.0 μm with a 50 μm aperture tube. The aperture tube size, the concentration of electrolytes and the accuracy of the particle size distribution were determined in this study. The number concentrations from the Antarctic surface snow were 81,843 particles mL^{-1} , but those from the Greenland snowpit were 10,666 particles mL^{-1} . In the volume distribution, the distributions of mineral dust in both the Antarctic surface snow and the Greenland snowpit showed lognormal distribution in the size interval 1.1 to 6.0 μm with the mode, 3.562 and 3.836 μm , respectively. The analysis technique using a coulter counter for mineral dust could be used for reconstructing paleoclimates from polar ice cores.

Key words : mineral dust, snow, coulter counter, Antarctica, Greenland

1. 서 론

대기 중에 부유하고 있는 고체 또는 액체 미세입자를 대기 에어로졸(atmospheric aerosol)이라고 한다. 대기 에어로졸은 지각, 해양, 또는 화산활동과 같이 자연적으로 발생하기도 하고, 화석연료의 사용과 같이 인간의 활동에 의해 발생하기도 한다(Pöschl 2005). 대기 에어로졸은 해염을 제외하면 대부분 물에 녹지 않는 불용성 미세입자(insoluble microparticles)로 구성되어 있다(Fischer et al.

2007). 일반적으로 대기 에어로졸 중 지구 기후시스템에 영향을 주는 중요한 요소인 불용성 미세입자를 광물성 먼지(mineral dust)라고 한다(Steffensen 1997). 대기 중 광물성 먼지는 장거리 이동을 통하여 발생원에서 멀리 떨어진 극지방까지 도달한다. 특히, 동아시아의 사막지역에서 발생한 광물성 먼지는 서풍(westerly wind)을 타고 그린란드 지역으로 이동한다(Biscaye et al. 1997; Bory et al. 2003). 극진동(polar vortex)의 강도에 따라 외부에서 극지역으로 유입되는 광물성 먼지의 양이 변화하게 된다(Kahl et al. 1997). 극지역에 도달한 광물성 먼지는 강설(wet deposition) 또는 대기-눈 교환(air-snow exchange)에 의한 건성침적

*Corresponding author. E-mail : jhkang@kopri.re.kr

(dry deposition)에 의해 극지역에 침적된다(Steffensen 1985). 대기에서 내린 눈이 오랜 기간 동안 쌓여 형성된 빙하에서 발견되는 광물성 먼지는 주로 운모, 장석, 점토, 석영, 고령석 등으로 구성된다(Svensson et al. 2000).

육상에서 기원하는 광물성 먼지는 지구 기후시스템에 중요한 역할을 한다. 대기 에어로졸에서 주요 성분인 광물성 먼지는 대기에서 태양 복사에너지를 흡수하거나 산란시키는 일차적인 영향이 있으며, 구름의 형성과 구름양의 조절 및 극지역 표층 눈의 광화학적 특성 변화를 일으키는 이차적인 영향에 의해 지구를 냉각시키는 효과를 가지고 있다(IPCC 2007). 광물성 먼지는 미량 영양염인 철과 같은 미량원소가 흡착되어 있기 때문에 해양 조류의 일차 생산력을 증가시켜 대기 이산화탄소를 감소시키므로 기후 냉각 효과를 나타낸다(Boyd et al. 2000). 대기의 광물성 먼지는 전체적으로 지구온난화를 감소시키는 먼지 피드백(dust feedback) 효과를 가지고 있다. 광물성 먼지의 생성과 대기를 통한 장거리 이동, 그리고 극지역에서의 침적 과정은 지구기후시스템의 상태와 연관되어 있기 때문에 광물성 먼지 순환(dust cycle)을 이해하는 것은 미래 기후 예측을 위한 전 지구적 기후시스템 연구의 중요한 주제로 간주되고 있다(Thompson and Mosley-Thompson 1981; Shao et al. 2011). 특히, 극지 빙하코어로부터 과거 대기의 광물성 먼지 농도를 정확히 복원할 수 있다면 과거 기후변화의 변동성을 이해할 수 있기 때문에 광물성 먼지 농도 연구는 빙하코어 연구의 필수적인 주제가 되고 있다(Fischer et al. 2007; Lambert et al. 2008).

광물성 먼지의 입자크기는 다양한 방법에 의해 측정할 수 있다. 입자크기를 측정하는 방법에는 electrical-sensing zone(ESZ)으로 표현되는 전기저항법과 빛의 감광, 산란, 회절 등의 특성을 이용한 분광학적 방법이 있다(Royer et al. 1983). 분광학적 방법에는 광차폐법(light obscuration, LO), 동적광산란법(dynamic light scattering, DLS), 레이저 회절법(laser diffraction, LD) 등의 원리를 이용하는 분석기기가 개발되어 있다(Driscoll et al. 2001). 빙하코어 연구의 초창기에는 광물성 먼지의 입자크기를 분석하기 위해 전기저항법을 이용한 쿨터카운터(Coulter Counter)와 빛의 산란을 이용한 직각 네펠로미터(right angle nephelometer, 90° light scattering)를 사용하였다(Royer et al. 1983). 광산란법은 입자분포를 분석할 수 없는 반면, 쿨터카운터는 입자크기와 입자분포를 동시에 측정할 수 있기 때문에 광물성 먼지의 입자크기를 측정하는 기본적인 분석법으로 인식되고 있다(Ruth et al. 2008). 분광법 중에서도 최근에 개발된 광차폐법은 단일입자광학측정(single-particle optical sensing) 방식을 적용하여 시료의 전처리과정이 필요없고 입자분포까지 측정할 수 있어서 연속흐름분석(continuous flow analysis) 시스템에 연결하

여 극지 빙하코어를 고해상도로 분석하는 데 사용하고 있다(Ruth et al. 2002).

본 연구의 목적은 쿨터카운터를 이용하여 극지에서 채취한 눈시료에서 광물성 먼지의 입자크기분포(particle size distribution)를 분석하기 위한 최적의 실험조건을 마련하고, 설정된 실험조건에서 실제로 분석한 극지 눈시료 중 광물성 먼지의 입자크기분포의 특성을 파악하는 것이다. 본 연구에서 제시한 분석법은 향후 극지연구소가 남북 극에서 시추한 극지빙하코어의 광물성 먼지의 입자크기분포를 연구하는 기본 분석법으로 활용할 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

시약 및 극지 눈시료

바탕시료와 세척에 사용하는 물은 Milli-Q Advantage와 Q-POD Element(Merck Millipore, USA)를 통해 나온 초순수 물인 Milli-Q water(18.2 MΩ·cm@25°C)를 사용하였다. 시료 용기는 폴리스타이렌(polystyrene) 재질의 25 mL 아큐벳 컵(Accuvette cup)을 사용하였다(Beckman Coulter, USA). 아큐벳 컵은 Milli-Q water로 3회 세척한 후 Class 10 클린벤치(Clean bench)에서 건조하여 사용하였다. 쿨터카운터에 사용하는 전해질 용액은 ISOTON® II를 사용하였다(Beckman Coulter, USA). 시료에 첨가하는 전해질 용액은 20% NaCl 수용액을 직접 제조하여 사용하였다. 20% NaCl 수용액은 20 g NaCl(Aldrich, USA)에 Milli-Q water를 넣어 용해시킨 후 미생물의 생성을 억제하기 위해 1 mL formaldehyde(Aldrich, USA)를 첨가하여 제조한 후, 0.22 μm MCE(mixed cellulose ester) 멤브레인 필터(Merck Millipore, USA)로 미세 입자를 제거하여 사용하였다.

극지 눈시료는 2013년 12월에 동남극 빅토리아랜드(70°41'S, 158°51'E, 2019 m a.s.l.)에서 채취한 1개의 표층 눈시료와 2009년 6월에 그린란드(77°26'N, 51°03'W, 2461 m a.s.l.)에서 채취한 3.2 m 깊이의 주상 눈시료를 사용하였다. 눈시료의 채취는 시료의 오염을 막기 위해 방진복과 장갑을 착용하고 맞바람 방향에서 채취하였다. 표층 눈시료는 미리 세척한 1 L 저밀도폴리에틸렌(Low density polyethylene, LDPE) 병에 담았다. 주상 눈시료는 표층에서부터 연속적으로 70개의 시료를 채취하여 미리 세척한 1 L LDPE 병에 담았다. 시료를 담은 LDPE 병은 미리 세척한 지퍼백으로 이중포장 한 후 아이스박스에 보관하여 운송하였다. 눈시료는 분석하기 전까지 -20°C에서 냉동상태로 보관하였다.

분석기기 및 실험방법

시료 전처리와 시료 분석은 외부 입자에 의한 오염을

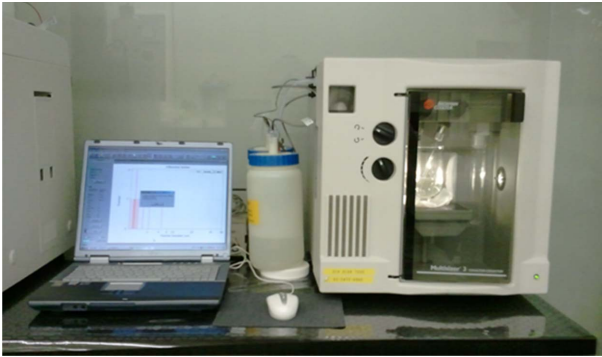


Fig. 1. Multisizer 3 (MS3) Coulter Counter installed on Class 100 Clean Booth in Class 1000 Clean Room in KOPRI

막기 위해 극지연구소의 Class 1000 클린룸(Clean room)의 Class 100 클린벤치 안에서 수행하였다. -20°C 에서 냉동 보관된 1 L LDPE 병을 클린벤치로 옮겨 상온에서 천천히 녹였다. 녹은 눈시료는 잘 흔든 후, 미리 세척한 아큐벳 컵에 10 mL를 옮겨 담아 소분하였다. 시료를 전해질 용액으로 만들기 위해 미리 제조한 20% NaCl 용액을 $0.22\ \mu\text{m}$ Millex-GS 시린지필터(Merck Millipore, USA)를 부착한 주사기로 한 방울씩 첨가하여 시료를 전해질 용액으로 만들었다. 입자크기분포의 측정은 Multisizer 3 (MS3) 쿨터카운터를 사용하였다(Beckman Coulter, USA) (Fig. 1). 입자크기 보정은 NIST 인증표준물질 SRM 1960의 소급성(traceability)을 가지는 라텍스 비드 표준용액인 Coulter CC Size Standard L2, L5, L10 표준용액(Beckman Coulter, USA)을 사용하여 각각 $2\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ 의 입자크기를 보정하였다. 측정하기 전, 아큐벳 컵을 아래위로 교반한 후 쿨터카운터 플랫폼에 넣어 $500\ \mu\text{L}$ 의 시료를 취하여 입자크기분포를 측정하였다. 연속적으로 3회 측정 후 평균값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

쿨터카운터의 원리와 분석조건

Wallace H. Coulter는 1940년대 말 전해질 용액에 분산된 작은 입자의 크기와 분포를 측정하는 원리를 고안하여 초기에는 주로 혈액 중 세포의 개수를 측정하는데 쿨터카운터를 사용하였다(Coulter 1959). 쿨터카운터는 전기저항법의 원리를 이용하여 입자크기분포를 측정한다. 약한 전해질 용액에 분산된 입자가 애퍼처(aperture) 튜브의 작은 구멍을 통과할 때 일정한 전류가 흐르고 있는 두 전극사이의 저항이 증가하여 전류량의 변화가 발생하는 것을 측정하여 입자의 크기와 분포로 변환하는 원리이다. 저항의 변화가 발생하는 애퍼처 튜브 구멍 주변을 일명 electrical-

sensing zone(ESZ)이라고 한다. 쿨터카운터는 입자크기분포를 분석할 때 입자의 굴절률 또는 시료의 색깔에 영향을 받지 않는 장점을 가진다.

쿨터카운터의 분석조건 설정

쿨터카운터는 $0.4\sim 1,200\ \mu\text{m}$ 의 입자크기를 측정할 수 있으며, 측정범위는 애퍼처 튜브 크기에 의해 결정된다. 쿨터카운터는 애퍼처 튜브 크기의 2.0~60.0%에 해당하는 입자크기를 측정할 수 있다. 일반적으로 $50\ \mu\text{m}$ 크기의 애퍼처 튜브를 사용하면 $1.0\sim 30.0\ \mu\text{m}$ 에 해당하는 입자크기 분포를 측정할 수 있다. 일반적인 실험환경에서는 쿨터카운터 자체의 노이즈와 주변 전자기장으로 인한 노이즈의 영향으로 실제로는 2.0% 보다 약간 높은 범위부터 측정이 가능하다. 분석할 수 있는 입자크기를 낮추기 위해 $20\ \mu\text{m}$ 또는 $30\ \mu\text{m}$ 크기의 애퍼처 튜브를 사용하면 노이즈의 영향이 커져 분석범위가 줄어든다. 또한 쿨터카운터를 클린룸 안에 설치하였을 때 주변 전자기장의 영향이 증가하여 노이즈가 2.6%로 높게 발생하여 측정범위가 줄어드는 문제가 나타났다. 노이즈를 줄이기 위해서 클린룸 안에 설치된 쿨터카운터를 클린벤치 안으로 이동하여 설치하고 전류필터를 장착한 전원장치를 사용하여 노이즈를 2.0%까지 낮추어 측정할 수 있는 입자크기를 $1.1\ \mu\text{m}$ 로 낮추었다. 본 실험에서 $50\ \mu\text{m}$ 크기의 애퍼처 튜브를 사용하였을 때 입자크기의 측정범위는 $1.1\sim 30.0\ \mu\text{m}$ 가 되었다.

쿨터카운터의 애퍼처 튜브 크기에 따른 남극 표층 눈시료의 입자크기분포를 Fig. 2에 비교하여 나타내었다. $20\ \mu\text{m}$ 애퍼처 튜브를 사용하였을 때, 노이즈가 3.3%까지 발생하였으며 $0.6\sim 12.0\ \mu\text{m}$ 의 측정범위를 분석할 수 있었다. $50\ \mu\text{m}$ 애퍼처 튜브를 사용할 때는 노이즈가 2.0%로 측정범위는 $1.1\sim 30.0\ \mu\text{m}$ 까지 측정이 가능하였다. $100\ \mu\text{m}$

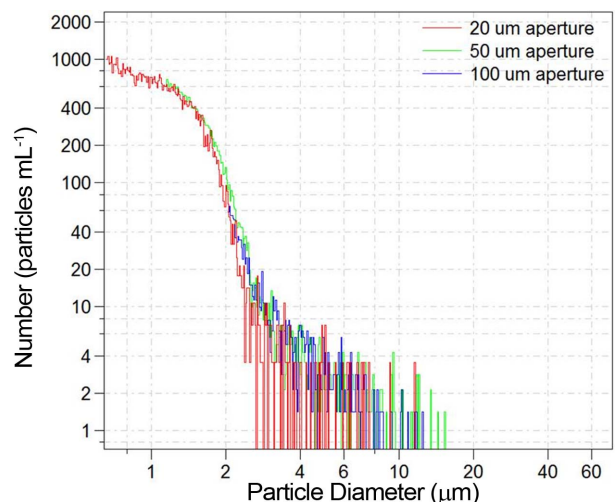


Fig. 2. Particle Size Distribution (Number) of Polar Snow by the different Aperture Tube Size

애퍼처 튜브를 사용하였을 때는 노이즈가 2.0%로 측정범위는 2.0~60.0 μm 의 입자크기분포를 측정하였다. 20 μm 애퍼처 튜브를 사용하면 작은 크기의 입자를 측정할 수 있지만 분석시간이 5배 이상 길어지고 측정할 때 애퍼처 튜브가 자주 막히기 때문에 분석이 원활하지 않았다. 극지 눈시료의 경우 50 μm 크기의 애퍼처 튜브를 사용하였을 때 적절한 분석범위와 원활한 분석을 진행할 수 있었다. 광물성 먼지의 입자크기는 시료의 채취 지역과 시기에 따라 입자크기의 분포가 다르기 때문에 연구 대상과 목적에 맞는 애퍼처 튜브의 크기를 선택할 필요가 있다.

쿨터카운터는 약한 전해질 용액에 분산된 입자의 크기와 분포를 측정한다. 전해질 용액의 농도가 입자크기분포에 미치는 영향은 크게 나타나지 않았다. 전해질 용액의 농도가 입자크기분포의 분석에 미치는 영향을 확인하기 위해 20% NaCl 수용액을 눈시료에 첨가하여 시료를 전해질 용액으로 만들었다(Delmonte et al. 2002). 적절한 전해질 용액의 농도를 정하기 위해 전해질 용액의 농도를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%로 변화시켜 입자크기분포를 확인하였다. 전해질 용액의 농도가 증가함에 따라 입자의 수분포와 부피분포에서 농도가 다소 줄어드는 경향이 나타났으나, 평균 입자크기는 상대표준편차가 수분포에서는 0.8%이고

부피분포에서는 1.6%로 매우 일정한 값을 나타내었다(Wegner 2008). 또한, 전해질 용액의 농도가 1.0%일 때 부피분포에서 입자크기의 평균값(mean), 중간값(median)과 최빈값(mode)이 각각 3.724 μm , 3.259 μm , 4.733 μm 로 가장 근사하게 나타나는 로그정규분포를 나타내었다. 따라서 최종 전해질 용액의 농도는 1.0%로 결정하였다. 시료의 최종 전해질 용액의 농도는 쿨터카운터에 사용하는 전해질 용액 ISOTON II의 농도와 동일하였다.

쿨터카운터를 이용한 광물성 먼지의 분석조건을 기존 문헌에 나타난 극지 빙하코어의 분석조건과 극지 눈시료 분석조건을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 이번 연구의 분석조건은 쿨터카운터에 50 μm 애퍼처 튜브를 사용하고, 전해질 용액의 농도는 1.0%로 사용하는 분석 조건을 설정하였다(Table 1). 이 조건으로 극지 눈시료의 광물성 먼지를 분석할 때 입자크기분포의 재현성은 1.1~10.0 μm 구간에서 수농도와 부피농도는 상대표준편차가 각각 3.6%, 1.8%였다. 수분포의 입자크기의 평균값은 1.68 μm (상대표준편차 0.6%)이고, 부피분포의 입자크기의 평균값은 3.36 μm (상대표준편차 1.8%)로 높은 재현성을 보였다. 쿨터카운터를 이용한 분석법은 분석의 재현성이 높은 장점을 가지며, 입자크기 뿐 아니라 입자분포를 동시에 측정할

Table 1. Comparisons of parameters of Coulter Counter in various studies

	Steffensen JP (1997)	Delmonte B (2002)	Wegner A (2008)	This study
Instrument	MS2	MS2	MS3	MS3
Aperture diameter (μm)	20	50	30	50
Channels (size of bins)	256	256	300	300
Detection range (μm)	0.25~6.0	0.7~20.0	0.6~18.0	1.1~30.0
Electrolyte concentration (%)	2.0	1.0	1.0	1.0
Analytic volume (μL)	500	500	500	500
Analysis cleanliness	Class 100	Class 100	Ambient	Class 100

Table 2. Characteristics of particle size distribution from polar snow and ice cores

	Antarctic surface snow	Greenland snowpit	EPICA Dome C (Delmonte et al. 2002)	GRIP (Steffensen 1997)
Number concentration (particles mL^{-1})	81,843	10,666	2893~216,022	-
Mean (μm)	1.877	2.124	-	-
Median (μm)	1.623	1.852	-	-
Mode (μm)	1.278	1.294	-	-
d_{90}	2.739	3.126	-	-
Volume concentration ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$)	484,400	106,900	4,320~344,960	13,200~3,040,000
Mean (μm)	3.929	5.484	-	-
Median (μm)	3.049	3.871	-	-
Mode (μm)	3.562*	3.836*	1.91~2.08†	0.75~1.01‡
d_{90}	6.945	12.50	-	-
Mass concentration (ng mL^{-1})	1,211	268	10.8~862.4	33~7,600

*Size interval range 1.1~6.0 μm , †Size interval range 0.7~5.0 μm , ‡Size interval range 0.4~2.0 μm

수 있기 때문에 극지방하코어의 입자크기를 측정하는 여러 가지 방법 중에서 가장 기본적인 방법으로 사용되고 있다(Ruth et al. 2008).

남극 표층 눈시료와 그린란드 주상 눈시료 중 광물성 먼지의 입자크기분포

남극 표층 눈시료와 그린란드 주상 눈시료 중 광물성

먼지의 입자크기분포 특성을 정리하여 Table 2에 나타내었다. 입자크기분포는 수분포(number distribution)와 부피 분포(volume distribution)로 구분하였고, 남극 표층 눈시료와 그린란드 주상 눈시료에서 입자크기분포는 입자의 직경과 입자분포를 로그스케일(logarithmic scale)로 변환하여 Fig. 3에 도시하였다. 그린란드 주상 눈시료는 광물성 먼지의 농도가 높게 나타나는 160~175 cm 깊이 구간

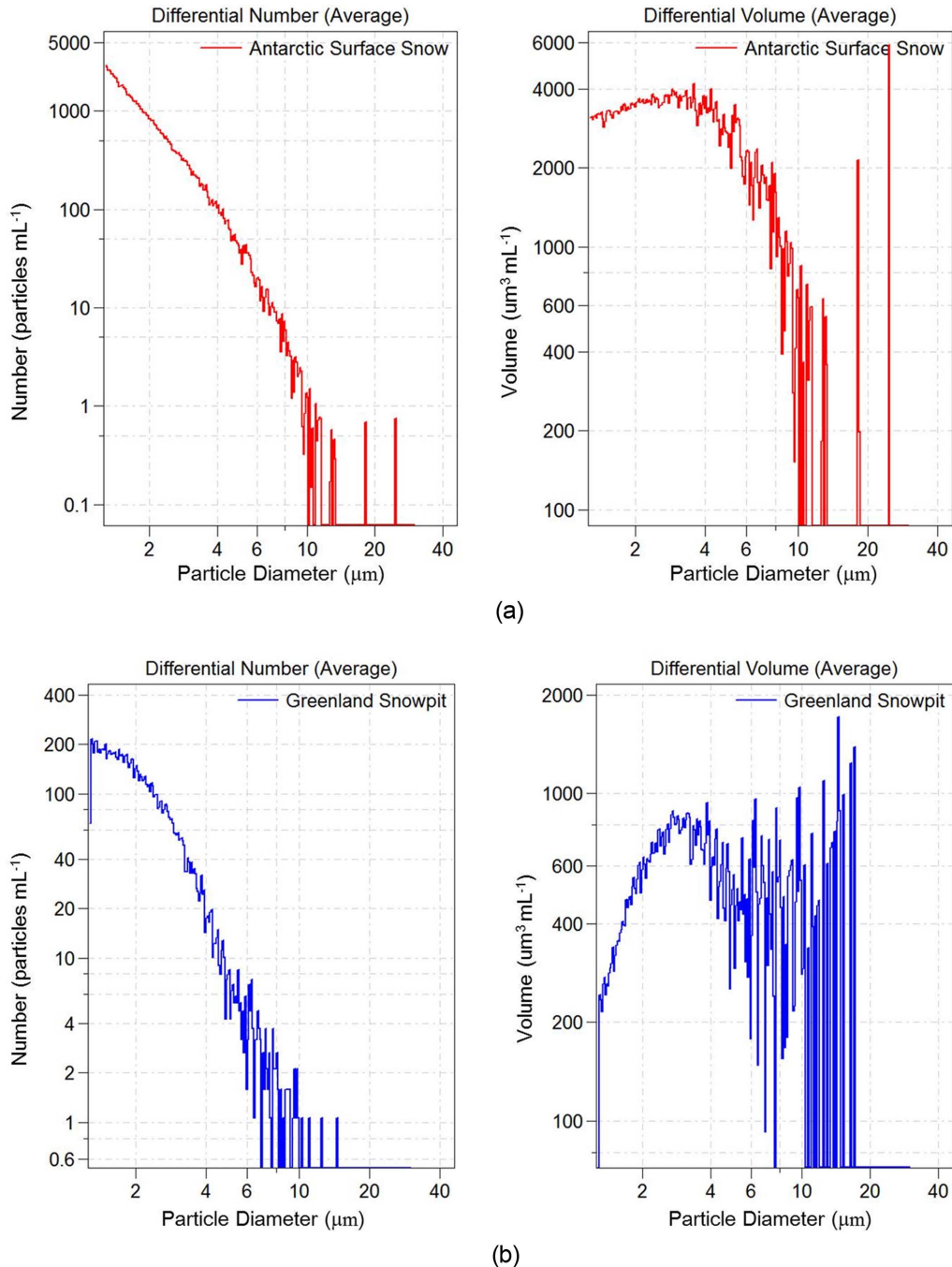


Fig. 3. Characteristics of particle size distributions of (a) Antarctic Surface snow and (b) Greenland snowpit

에 대한 입자크기분포를 나타내었다(극지연구소 2014). 광물성 먼지의 질량은 불용성입자의 평균 밀도인 2.5 g cm^{-3} 를 사용하여 계산하였다(Steffensen 1997).

남극 표층 눈시료는 남극 장보고 기지 북서쪽 500 km에 위치한 빅토리아랜드에서 2013년 12월에 채취한 표층 눈으로 남반구의 봄에서 여름철에 해당한다. 남극 표층 눈시료 중 광물성 먼지의 평균 입자수는 $81,843 \text{ particles mL}^{-1}$ 이었다. 수분포에서 입자크기의 평균값은 $1.877 \mu\text{m}$ 이었고, 중간값과 최빈값은 각각 $1.623 \mu\text{m}$ 과 $1.278 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 광물성 먼지의 90%가 직경 $2.7 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자로 분포하는 특성을 보였다. 남극 표층 눈시료의 평균 입자부피는 $484,400 \mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ 이며, 입자크기의 평균값과 중간값은 각각 $3.772 \mu\text{m}$ 와 $2.906 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 부피분포에서 입자크기가 $6.9 \mu\text{m}$ 이하에서 90% 이상의 입자가 분포하는 특성을 보였다. $10.0 \mu\text{m}$ 크기 이상의 입자를 제외하면 광물성 먼지의 부피분포는 $3.562 \mu\text{m}$ 에서 최빈값을 보이는 로그정규분포를 보였다. 남극 눈시료에서 광물성 먼지의 질량은 $1,211 \text{ ng mL}^{-1}$ 로 나타났다. 남극 EPICA Dome C에서 시추한 빙하코어 중 마지막 최대빙하기(Last Glacial Maximum, LGM)에서 홀로세(Holocene)에 해당하는 $40\sim 580 \text{ m}$ 구간의 광물성 먼지의 입자수는 $2,893\sim 216,022 \text{ particles mL}^{-1}$ 이고, 광물성 먼지의 질량은 $10.8\sim 862.4 \text{ ng mL}^{-1}$ 의 분포를 보였다(Delmonte et al. 2002). 동남극 빅토리아랜드의 표층 눈시료 중 광물성 먼지의 질량은 EPICA Dome C 빙하코어 보다 높게 나타났다. EPICA Dome C 빙하코어와 같이 남극대륙 빙하코어의 광물성 먼지의 주요 발생원은 남반구 대륙에서 발생하여 장거리 대기이동을 통해 침적되기 때문에 장거리 대기이동 중에 입자크기에 따른 분류가 일어나고 제거된다(Delmonte et al. 2004). 동남극 빅토리아랜드 지역은 여름철에 지표면이 노출된 남극대륙의 지각에서 발생한 광물성 먼지가 상대적으로 짧은 거리의 대기이동을 통하여 표층 눈에 침적된 것으로 추정할 수 있다.

그린란드 주상 눈시료에서는 광물성 먼지의 농도가 높게 나타나는 $160\sim 175 \text{ cm}$ 깊이 구간에 대한 입자크기분포의 특성을 파악하였다. 그린란드 주상 눈시료 중 광물성 먼지의 평균 입자수는 $10,666 \text{ particles mL}^{-1}$ 이었고 입자크기의 평균값은 $2.124 \mu\text{m}$ 이었다. 수분포에서 최빈값과 중간값은 각각 $1.294 \mu\text{m}$ 와 $1.852 \mu\text{m}$ 인 분포를 보였다. 입자크기 $3.1 \mu\text{m}$ 이하에서 광물성 먼지의 90%가 분포하였고, 입자크기 $6.0 \mu\text{m}$ 까지 입자수의 99.0%가 분포하는 특성을 보였다. 부피분포에서 평균 입자부피는 $106,900 \mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ 였으며, 입자크기의 평균값과 중간값은 $5.484 \mu\text{m}$ 와 $3.871 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 광물성 먼지의 평균질량은 268 ng mL^{-1} 이었다. 그린란드 주상 눈시료는 입자크기가 $6.0 \mu\text{m}$ 이상에서 1.0%의 입자수가 입자부피를 급격하게 증가시켜

전체적인 입자부피분포를 왜곡하는 결과를 보였다. 부피분포를 입자크기범위 $6.0 \mu\text{m}$ 이하에서 살펴보면 최빈값이 $3.836 \mu\text{m}$ 에서 나타나는 로그정규분포를 확인할 수 있다. 따라서 향후 그린란드 주상 눈시료의 깊이별 광물성 먼지의 변동성을 파악할 때 입자분포는 $6.0 \mu\text{m}$ 이하의 입자범위를 설정하여 특성을 파악할 수 있다. 그린란드 주상 눈시료의 광물성 먼지의 입자크기분포 특성은 입자수 농도는 낮지만, 입자크기가 다소 큰 입자가 분포하는 특성을 보였다. 북극 GRIP(Greenland Ice Core Project)에서 시추한 심부빙하코어 중 LGM에서 최근에 해당하는 표층에서 $1,961 \text{ m}$ 구간의 광물성 먼지의 질량은 $33\sim 7,600 \text{ ng mL}^{-1}$ 의 분포를 보였다(Steffensen 1997). 극지 빙하코어 중 광물성 먼지의 입자크기분포 특성은 최빈값이 $0.7\sim 3.0 \mu\text{m}$ 를 가지는 로그정규분포를 나타내며, 지역이나 기후변화에 따라 입자크기분포의 특성이 다르게 나타나므로, 광물성 먼지의 입자크기분포 특성에 따라 과거 기후변화의 기록을 복원할 수 있다(Delmonte et al. 2002; Ruth et al. 2003). 하지만 광물성 먼지의 입자크기분포에 따른 광물성 먼지의 기원지와 이동경로에 대한 추가적인 연구가 필요하다(Kahl et al. 1997).

4. 결 론

광물성 먼지는 지구 기후시스템에서 중요한 역할을 하기 때문에 광물성 먼지가 극지역의 눈에 침적되는 기록을 정량적으로 정확하게 복원할 필요가 있다. 이를 위해 빙하코어에서 광물성 먼지의 농도를 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 쿨터카운터를 이용하여 대기 중 에어로졸이 침적된 극지 눈시료에서 광물성 먼지의 입자크기와 입자분포를 측정하는 분석법을 확립하였다. 확립된 분석 조건에서 제한된 수의 극지 눈시료만을 분석하였으나, 남극과 그린란드 눈시료에서 광물성 먼지의 입자크기분포 특성을 확인할 수 있었다. 극지 눈시료에서 광물성 먼지의 입자크기분포는 지역과 시기에 따라 다르게 나타나지만, 본 연구에서 확립된 분석법으로 향후 극지 주상 눈시료에서 광물성 먼지의 계절적 변동성을 파악하고, 극지 빙하코어에서 광물성 먼지의 고기후적 주기성을 복원하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 주요 사업 “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명”(PE14010)과 “극한지 빙하시추와 Ice Core Bank 운영을 위한 핵심기술 개발”(PE13070)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구의 실험 전처리와 자료 정리

를 도와준 김초이 연구원과 그린란드 주상눈시료 채취에 도움을 준 정지웅 연구원에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 극지연구소 (2014) 극한지 빙하시추와 Ice Core Bank 운영을 위한 핵심기술개발. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, BSPE13070-037-1, 347 p
- Biscaye PE, Grousset FE, Revel M, Van der Gaast S, Zielinski GA, Vaars A, Kukla G (1997) Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland. *J Geophys Res* **102**:26765-26781
- Boyd PW, Watson AJ, Law CS, Abraham ER, Trull T, Murdoch RB, Dorothee CE, Bowie AR, Buesseler KO, Chang H, Charette M, Croot P, Downing K, Frew R, Gall M, Hadfield M, Hall J, Harvey M, Jameson G, LaRoche J (2000) A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* **407**:695-702
- Bory A, Biscaye PE, Grousset FE (2003) Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in Greenland (NorthGRIP). *Geophys Res Lett* **30**:1167. doi:10.1029/2002GL016446
- Coulter W (1959) Fluid metering apparatus. US. Patent No. 2869078
- Delmonte B, Petit JR, Maggi V (2002) Glacial to Holocene implications of the new 27000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core. *Clim Dyn* **18**:647-660
- Delmonte B, Petit JR, Andersen KK, Basile-Doelsch I, Maggi V, Lipenkov VY (2004) Dust size evidence for opposite regional atmospheric circulation changes over East Antarctica during the last climatic transition. *Clim Dyn* **23**:427-438
- Driscoll D, Etzler F, Barber T, Nehne J, Niemann W, Bistrrian B (2001) Physicochemical assessments of parenteral lipid emulsions: light obscuration versus laser diffraction. *Int J Pharm* **219**:21-37
- Fischer H, Siggaard-Andersen ML, Ruth U, Röthlisberger R, Wolff E (2007) Glacial/interglacial changes in mineral dust and sea-salt in polar ice cores: Sources transport, deposition. *Rev Geophys* **45**:RG1002. doi:10.1029/2005RG000192
- IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- Kahl J, Martinez, Kuhns H, Davidson C, Jaffrezo JL, Harris J (1997) Air mass trajectories to Summit, Greenland: A 44-year climatology and some episodic events. *J Geophys Res* **102**:26861-26875
- Lambert F, Delmonte B, Petit JR, Bigler M, Kaufmann PR, Hutterli MA, Stocker TF, Ruth U, Steffensen JP, Maggi V (2008) Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature* **452**:616-619
- Pöschl U (2005) Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angew Chem* **44**:7520-7540
- Royer A, Angelis M, Petit J (1983) A 30000 year record of physical and optical properties of microparticles from an East Antarctic ice core and implications for paleoclimate reconstruction models. *Clim Change* **5**:381-412
- Ruth U, Wagenbach D, Bigler M, Steffensen JP, Röthlisberger R, Miller H (2002) High-resolution microparticle profiles at NorthGRIP, Greenland: case studies of the calcium-dust relationship. *Ann Glaciol* **35**:237-242
- Ruth U, Wagenbach D, Steffensen JP, Bigler M (2003) Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. *J Geophys Res* **108**:4098-4109
- Ruth U, Barbante C, Bigler M, Delmonte B, Fischer H, Gabrielli P, Gaspari V, Kaufmann P, Lambert F, Maggi V, Marino F, Petit JR, Udisti R, Wagenbach D, Wegner A, Wolff E (2008) Proxies and measurement techniques for mineral dust in Antarctic ice cores. *Environ Sci Technol* **42**:5675-5681
- Shao Y, Iskizuka M, Mikami M, Leys JF (2011) Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *J Geophys Res* **116**:D08203. doi:10.1029/2010JD014527
- Steffensen JP (1985) Microparticles in snow from the South Greenland ice sheet. *Tellus* **37B**:286-295
- Steffensen JP (1997) The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. *J Geophys Res* **102**:26755-26763
- Svensson A, Biscaye P, Grousset F (2000) Characterization of late glacial continental dust in the Greenland Ice Core Project ice core. *J Geophys Res* **105**:4637-4656
- Thompson LG, Mosley-Thompson E (1981) Microparticle concentration variations linked with climatic change: evidence from polar ice. *Science* **246**:812-815
- Wegner A (2008) Sources and transport characteristics of mineral dust in Dronning Maud Land, Antarctica. Ph.D. Thesis, Bremen University, 30 p

국문 참고자료의 영어 표기

English translation/Romanization of references originally written in Korean

Polar Research Institute, BSPE13070-037-1, 347 p (in Korean)

Korea Polar Research Institute (2014) Development of core technology for ice core drilling and ice core bank. Korea

Received Sep. 14, 2014

Revised Oct. 21, 2014

Accepted Nov. 27, 2014