

Note

<https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.2.135>  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

## 입도 분포 특성을 이용한 동해 남한국대지 시추 퇴적물 중 화산재와 황사의 구분

이홍원<sup>1</sup> · 장준호<sup>2</sup> · 박장준<sup>3\*</sup><sup>1</sup>충남대학교 자연과학대학 해양환경과학과 학부생, <sup>2</sup>충남대학교 자연과학대학 해양환경과학과 대학원생,<sup>3</sup>충남대학교 자연과학대학 해양환경과학과 부교수

# Discrimination of Volcanic Ash and Asian Dust (Hwangsae) in Core Sediments from the South Korea Plateau (East Sea) Using Characteristics of Grain-size Distributions

HONG-WON LEE<sup>1</sup>, JUN-HO JANG<sup>2</sup> AND JANG-JUN BAHK<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Undergraduate Student, Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea\*Corresponding author: [jjbahk@cnu.ac.kr](mailto:jjbahk@cnu.ac.kr)

Editor Ho Kyung Ha

Received 10 March 2021; Revised 15 April 2021; Accepted 19 April 2021

### ABSTRACT

동해 남한국대지 IODP Site U1430 시추 퇴적물 쇄설성 성분의 입도 자료에 대한 구성 성분 분해 결과 황사 입자와 화산재 입자를 대표하는 4개 구성 입도 집단이 구별되었다. 이 중 화산재 입자를 대표하는 2개 구성 입도 집단은 다양한 형태의 세립 및 조립 유리질 샤드들로 이루어져 있으며, 전체 입도 분포에서 0–82% 범위의 비율을 차지하고 있다. 분석된 입도 자료 중 화산재 유입 영향을 받은 자료를 제거하고 황사 입경 변화의 경향을 추출하기 위한 기준으로 화산재 구성 입도 집단 비율 33%가 적절한 것으로 판단된다.

End-member (EM) analysis of grain-size distribution data for detrital fractions of IODP Site U1430 core sediments from the South Korea Plateau (East Sea) identified 4 EMs grain-size populations (EM) which represent either Asian dusts (Hwangsae) or volcanic ashes. The two EMs representing volcanic ashes consist of fine and coarse glass shards with various morphologies and constitute 0–82% of the total grain-size distributions. The 33% mixing percentage of volcanic ash EMs seems appropriate for a cut-off value for discrimination of grain-size data influenced by volcanic ash input from those dominated by Hwangsae.

**Keywords:** End-member analysis, Grain-size data, Volcanic ash, Asian dust, East Sea

## 1. 서론

퇴적물의 입도 분포는 퇴적물의 기원과 퇴적 과정을 지시하는 중요한 퇴적학적 특성으로서 일반적으로 단일한 기원과 퇴적 과정을 거친 퇴적물의 입도 분포는 단일한 모드의 입도 분포 형태를 띠 것으로 가정된다(Weltje and Prins, 2007). 반면 서로 다른 기원이나 퇴적 과정을 거친 퇴적물이 함께 섞여 있을 경우 퇴적물의 입도 분포는 흔히 다중 모드 입도 분포를 보인다. 이와 같은 다중 모드 입도 분포는 단일 모드를 가지는 구성 입도 분포의 합으로 이해할 수 있으며, 다중 모드의 전체 입도 분포 자료에서 개별 구성 입도 분포를 분리하고 각각의 구성비를 구하고자 하는 연구는 다양한 방법을 통해 1970년대부터 지금까지 활발히 수행되고 있다(Clark, 1976; Ashley, 1978; Sheridan *et al.*, 1987). 특히 Weltje(1997)가 제안한 구성 성분 분해법 (End-member modelling algorithm)은 전통적인 곡선 최적화(curve-fitting) 방법과 달리 개별 구성 입도 분포 집단의 개수나

분포 형태에 제한을 두지 않기 때문에 퇴적물의 입도 자료로부터 퇴적물의 기원, 고환경 및 고기후 변화 등 다양한 정보를 유추하는데 널리 활용되어 왔다(Weltje and Prins, 2007; Hamann *et al.*, 2008; Dietze *et al.*, 2012; van Hateren *et al.*, 2018).

중국과 몽골 내륙 사막지역에서 발원하여 동해 및 북서태평양으로 운반되는 풍성입자 즉 황사의 플럭스와 입도는 발원지의 건조도 및 이를 이송하는 바람의 세기에 의해 조절되기 때문에 동아시아 몬순 기후 및 고층 편서풍 변화의 중요한 지시자로 활발히 연구되고 있다(Rea, 1994; Nagashima *et al.*, 2007, 2011; Bahk *et al.*, 2021; Fig. 1). 동해는 중국과 몽골에서 발원한 황사의 이송 경로에 위치하며 북서태평양보다 발원지에 가까이 위치하기 때문에 황사의 이송 변화 양상을 북서태평양에 비해 고해상으로 연구할 수 있는 적합지의 하나이다. 하지만 동해와 같은 대륙 주변부 바다의 경우 쇄설성 반원양성 퇴적물로서 황사 외에 하천 혹은 연안에서 재동된 부유 퇴적물이 유입될 수 있다(Nagashima *et al.*, 2007; Bahk *et al.*, 2021). 또한 동해는 일본 화산 열도 뒤에 위치한 배호상 분지로서 제4기 이후에도 일본 열도 및 울릉도, 독도, 백두산, 등의 화산 활동에 의한 화산재가 빈번히 퇴적된 것으로 알려져 있다(Furuta *et al.*, 1986; Chun *et al.*, 2007; Ikehara, 2015). 따라서 동해의 반원양성 퇴적물에서 과거 황사의 이송 변화 양상을 복원하기 위해서는 황사 입자들과 연안으로부터의 쇄설성 부유 퇴적물 및 화산재 입자를 구별할 수 있어야 한다. 쇄설성 부유 퇴적물과 화산재는 그 기원과 운송 과정이 황사와 전혀 다르기 때문에 입도 분포 자료에 구성 성분 분해법을 적용할 경우 효과적으로 분별이 가능할 것으로 기대된다. 북태평양 중앙 해역 플라이스토세 퇴적물의 경우 쇄설성 성분의 입도 자료에 구성 성분 분해법을 적용하여 중국 기원 황사 입자와 일본 열도 기원 화산재 입자의 상대적 공급 비율의 변화를 효과적으로 복원한 바 있다(Lee *et al.*, 2019).

이 연구는 동해 남한국대지에 위치한 국제지각심부시추사업(International Ocean Discovery Program: IODP) Expedition 346의 U1430 시추 지점에서 획득한 제4기 시추 퇴적물에서 황사의 입도 변화를 복원하기 위한 예비 단계로 황사와 그 외의 쇄설성 입자를 구별하고자 한다. 동해 남한국대지의 제4기 퇴적물은 지화학 성분 및 입도 분포 특성에 대한 기존 연구 결과 한반도 동 주변 대륙으로부터의 부유 쇄설성 입자 유입의 영향이 미미한 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 입도 분포 특성을 이용한 화산재와 황사 입자의 구별에 집중하였다(Anderson *et al.*, 2020; Bahk *et al.*, 2021). 본 연구의 결과는 동해 남한국

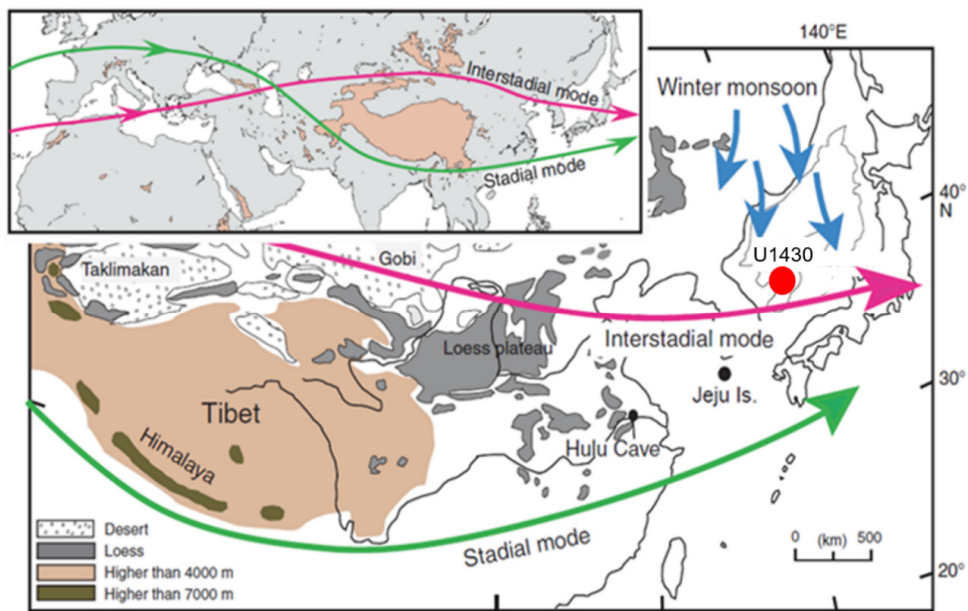


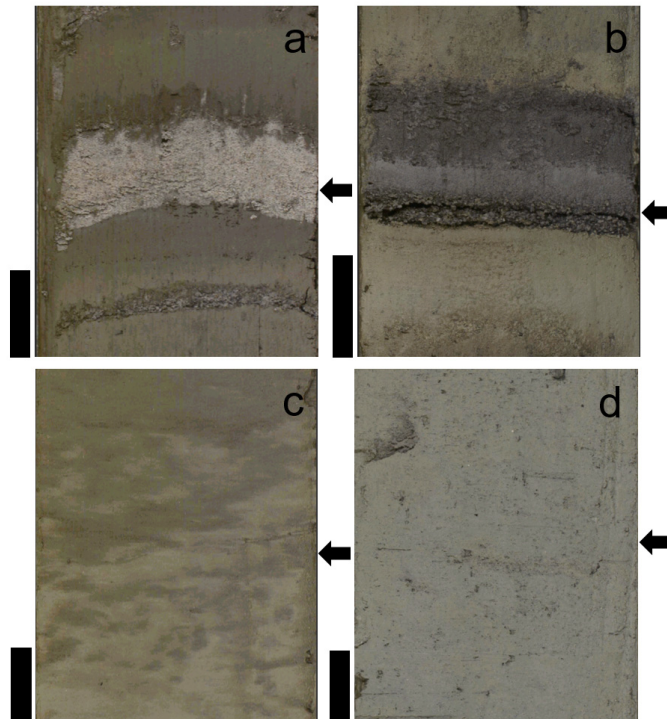
Fig. 1. Location map for the Expedition 346 Site U1430 in the East Sea (red circle). Also shown are westerly jet-stream and winter monsoon which have transported eolian dust from the Asian interior to the East Sea (after Nagashima *et al.*, 2007).

대지뿐만 아니라 동해 일원의 해저 퇴적층에서 화산재 유입 영향의 정도를 입도 분포 특성을 바탕으로 정량적으로 평가하는데 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 동해 남한국대지 북위 131도32.2분, 동경 37도54.16분, 수심 1072 m에서 취득된 IODP Expedition 346의 U1430 시추 퇴적물의 해저면부터 59 m까지 구간에 해당하는 최상부 암상단위 Unit I을 대상으로 하였다(Tada *et al.*, 2015; Fig. 1). Unit I은 점토질 실트, 실트질 점토, 유공층이 풍부하고 규조류를 포함하는 점토질 실트, 인편모류 연니 등의 호층으로 주로 구성되어 있으며, 부서, 스코리아, 유리질 샤드(shard) 등으로 이루어진 뚜렷한 화산재 층이 약 71매 관찰되었다(Tada *et al.*, 2015). Unit I의 연대는 고지자기 및 미고생물 자료에 따르면 약 2.7 Ma 이후 지금까지에 해당한다(Tada *et al.*, 2015). 그리고 Unit I에서는 제4기 동해 심해 퇴적물에서 일반적으로 관찰되는 암층과 명층의 주기적 교호 양상이 나타나는데, 특히 상부 약 43 m구간에서 더욱 빈번하고 뚜렷하다(Tada *et al.*, 2015).

본 연구에서는 남한국대지에서 제4기 쇄설성 입자의 입도 변화를 파악하기 위하여 Unit I에서 약 3 cm 내지 5 cm의 간격으로 총 1421개의 퇴적물 부서료를 채취하였다. 부서료 채취시에 시추 코아의 절개면에서 육안으로 분별이 가능한 뚜렷한 화산재 층은 제외하였다(Fig. 2). 채취한 시료는 동결 건조 후 아게이트 사발에서 가볍게 분쇄하였다. 분쇄된 시료는 고루 섞은 후 다시 50 mg을 분취하여 이를 대상으로 유기물, 탄산염, 오파 등 생물기원 성분을 침출 반응을 통해 순차적으로 제거하였다. 유기물 침출 반응은 15% 과산화수소를 5 ml 주입하여 24시간 반응시킨 후 60°C 항온수조에서 반응이 끝날 때까지 가열시켰으며, 이후 탄산염 침출 반응은 2N 염산 5 ml을 주입한 후 최소 1시간 이상 반응을 시킨 후 반응이 끝나면 증류수 40



**Fig. 2.** Photographs of selected intervals of U1430 core sediments containing visible (a and b) and invisible (c and d) volcanic ash particles. Core depths of the arrows in the right of each image are 46.22 m (a), 34.84 m (b), 27.39 m (c), and 32.98 m (d), respectively. Scale bars are 2 cm long. For grain-size distribution of the 32.98 m sample, see Fig. 3d.

ml을 주입하여 원심분리기를 이용해 2회 세척을 하였다(Jang *et al.*, 2020). 마지막 오팔 침출 반응은 2N 수산화나트륨 40 ml을 주입하여 85°C 항온수조에서 6시간을 반응시킨 후 원심분리기를 이용해 3회 세척하였다(Jang *et al.*, 2020). 입도 분석은 생물기원 성분 제거 후 남은 쇄설성 퇴적물을 대상으로 한국지질자원연구원의 레이저 회절 입도 분석기(Microtrac S3500)을 사용하여 실시하였다.

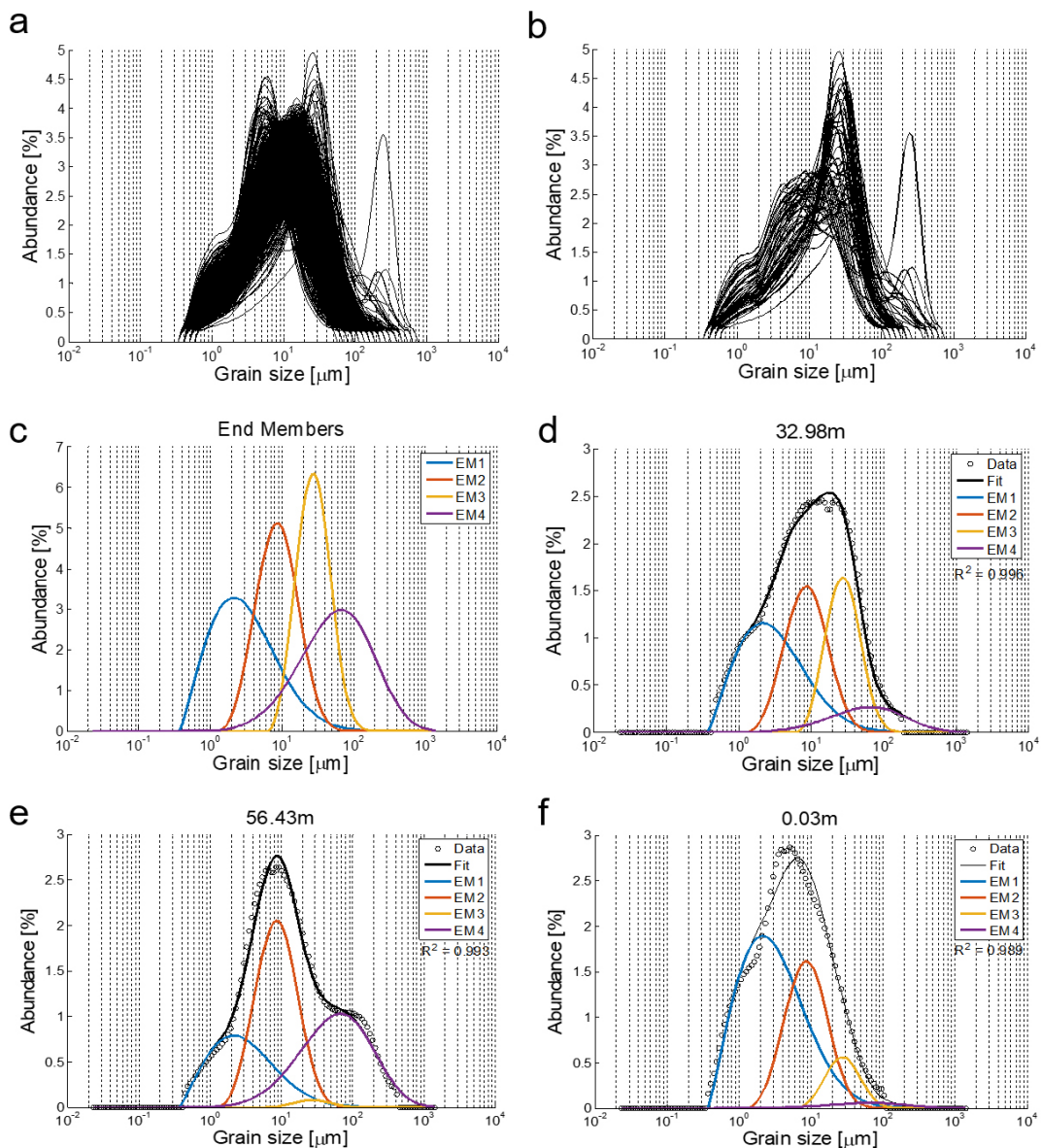
분석된 입도 자료는 AnalySize 소프트웨어를 사용하여 전산 처리를 수행하였다. AnalySize를 이용하면 전체 입도 분포의 형태를 도시하고 평균, 분급도 등 입도 분포 대표 특성 값을 산출할 뿐만 아니라, 입도 분포 자료에 구성 성분 분해법을 적용하여 최적화된 개별 구성 입도 집단의 개수, 분포 형태, 구성비 등을 구할 수 있다(Peterson and Heslop, 2015). 구성 성분 분해법에 의해 분별된 구성 입도 집단 중 화산재를 나타내는 것으로 여겨지는 구성 입도 집단의 비율이 높은 시료를 대상으로 편광 현미경을 이용하여 화산재의 존재 유무와 종류를 관찰하였다. 편광 현미경 관찰은 사질 성분의 경우 동결 건조된 시료를 입도 분석 전처리와 동일한 과정을 거친 후 4φ 체로 체질 후 남은 입자를 관찰하였으며 니질 성분의 경우 건조 시료를 가지고 스미어 슬라이드(smear slide)를 제작하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 토의

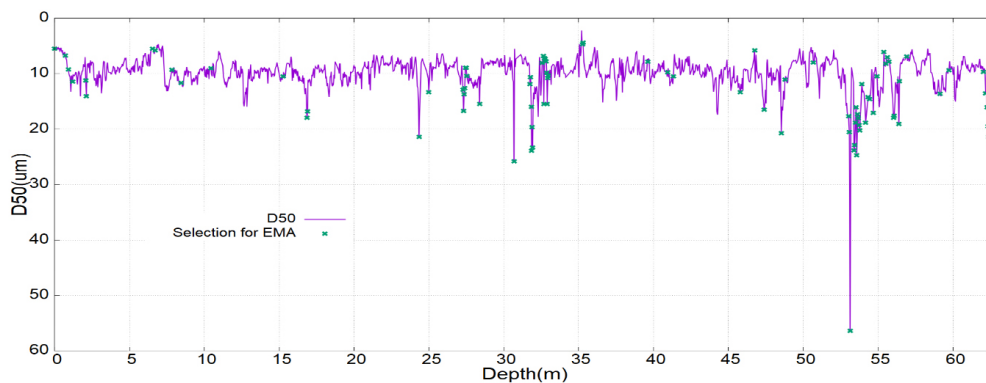
#### 3.1 입도 분포 특성과 구성 입자 집단 분별

입도 분석 결과 U1430 시추 퇴적물로부터 채취된 총 1421개 부시료들의 모래 함량은 46% 이하, 실트는 30–84%, 점토는 8–69%의 함량 범위를 보이며, 중앙 입경은 2–56 μm 범위에 있다(Figs. 3a and 4). 입도 분포 곡선에서 모드는 대부분 9–10 μm 내에서 나타나지만 일부 시료들은 3–4 μm의 세립 모드나, 20–30 μm 혹은 100 μm 이상의 조립 모드를 보이기도 한다(Fig. 3a). 동해 제4기 해저 퇴적물에 광역적으로 분포하는 화산재 입자들은 주로 실트 크기 이상의 유리질 샤드나 부석들로 이루어져 있다(Furuta *et al.*, 1986; Ikehara, 2015; Chun *et al.*, 2007). 부시료 채취시 육안으로 구별되는 뚜렷한 화산재 층은 이미 제외하였기 때문에 20–30 μm 혹은 100 μm 이상의 조립 모드를 보이고, 중앙 입경이 대략 15 μm 이상의 값을 보이는 시료들은 화산재와 황사 입자들이 혼재하는 것으로 추정된다. 이들 화산재와 황사가 혼재하는 것으로 추정되는 시료 54개를 일차 선별한 결과 입도 분포 곡선에서 대부분 이중 모드를 보이는데 세립모드와 조립모드가 뚜렷이 구별되거나, 일부 중첩된 형태로 나타났다(Figs. 3b and 4).

화산재와 황사의 혼재가 추정되는 시료들에서 화산재가 차지하는 비율을 정량적으로 평가하기 위하여 입도 자료에 대한 구성 성분 분해를 실시하였다. 첫 번째 단계에서는 전체 1421개 시료의 입도 자료 중 화산재가 포함된 시료 54개와 그렇지 않은 시료 41개를 선택하여 총 95개의 시료를 대상으로 구성 입도 집단의 수와 분포 형태를 결정하였다(Fig. 4). 그 이유는 구성 성분 분해법에서는 전체 입도 자료의 총 분산도를 가장 잘 설명할 수 있는 최소수의 구성 입도 집단을 구하기 때문에, 화산재 혼재층과 같이 간헐적으로 나타나는 시료의 입도 자료의 경우 통계적으로 가중치가 낮아 중요 구성 입도 집단으로 인식되지 않기 때문이다(Weltje, 1997; Peterson and Heslop, 2015). 구성 성분 분해 결과 총 4개의 구성 입자 집단(EM1-4)이 구분되었으며 이들 4개 구성 입자 집단의 구성 비율을 최적화하면 분석 대상 전체 입도 자료 분산 정도의 약 98%를 설명할 수 있으며, 개별 입도 자료에 대한 최적화 결과 상관계수는 0.578에서 0.999로 나타났다(Figs. 3c-3f). 이들 구성 입자 집단의 중앙 입경은 2.86–61.1 μm의 범위를 보여주고 있으며 EM1이 가장 세립하고 EM4가 가장 조립하다(Table 1, Fig. 3c). 분급도는 EM1과 EM4에서 2.82 μm, 3.16 μm로 불량하였고, EM2와 EM3에서는 1.91 μm, 1.69 μm로 보통인 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 3c; Folk, 1954). 또한 EM1, 2, 3는 양의 왜도값을 가지는 반면 가장 조립한 EM4는 음의 왜도값을 보이고 있다(Table 1, Fig. 3c). 각 구성 입자 집단이 전체 입도 분포에서 차지하는 비율은 EM1 6–94%, EM2 0–66%, EM3 0–68%, EM4 0–82% 범위이다.



**Fig. 3.** (a) Grain-size distributions (GSDs) of all the 1421 samples from U1430 core sediments. (b) GSDs of the 54 selected samples which are suspected to contain ash particles. (c) End-member GSDs deduced from for the 95 selected samples. (d-f) End-member fitting results for selected samples.



**Fig. 4.** Variation of median grain size (D50) in the Unit I of U1430 core sediments. Green marks indicate the 95 samples selected for end-member analysis.

**Table 1.** Grain-size statistics (mode, median, sorting, and skewness) of end-member grain-size distributions for U1430 core sediments

End Members	Mode ( $\mu\text{m}$ )	Median ( $\mu\text{m}$ )	Sorting ( $\mu\text{m}$ )	Skewness
EM1	2.21	2.86	2.82	0.56
EM2	8.86	9.00	1.91	0.07
EM3	29.8	28.9	1.69	0.11
EM4	70.9	61.1	3.16	-0.26

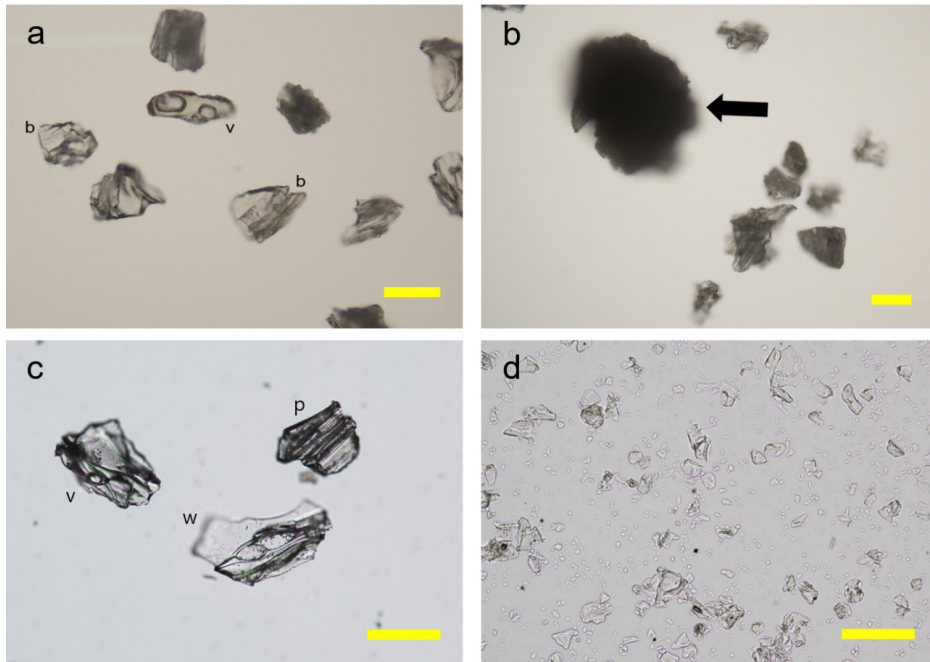
남한국대지의 해저 표층 퇴적물 및 제4기 시추 퇴적물의 쇄설성 성분 입도 특성에 대한 기존 연구 결과에 따르면 한반도 연안으로부터 동쪽으로 약 70 km 이상 떨어진 외해역에서는 연안에서 유입되는 부유 퇴적물의 영향이 미미하며 해저 퇴적물은 화산재를 제외하면 거의 대부분 황사 입자로 구성되어 있다(Bahk *et al.*, 2021). 쇄설성 성분 입도 자료에 대한 구성 성분 분해 결과 남한국대지퇴적물의 황사 입자들은 고층 대기의 편서풍에 의해 이송되는 중앙 입경 3.60  $\mu\text{m}$ 의 세립한 입자 집단과 겨울 북서계절풍에 의해 이송되는 중앙 입경 9.46  $\mu\text{m}$ 의 조립한 입자 집단으로 구성되어 있음이 밝혀졌다(Bahk *et al.*, 2021). 본 연구의 구성 성분 분해 결과 얻어진 EM1과 EM2는 그 입도 분포 특성으로 보아 각각 편서풍에 의한 세립 황사 입자 집단과 북서계절풍에 의한 조립 황사 입자 집단을 나타내는 것으로 해석된다. 한편 EM3 및 EM4는 실트 이상의 크기를 가지는 세립 화산재 입자 집단과 조립 화산재 입자 집단을 나타내는 것으로 여겨지며 이들이 구체적으로 어떤 종류의 화산재 입자를 대표하는지 편광 현미경을 이용하여 살펴보았다.

### 3.2 화산재 입자의 종류

화산재 구성 입자 집단 EM3와 EM4의 구성 비율이 높은 시료에 대한 현미경 관찰 결과, 조립 화산재 구성 입자 집단 EM4에 해당하는 입자들은 주로 다공질 유리질 샤드(vesicular glass fragments), 버블형 샤드(bubble wall shards), 관형태 유리질 입자(subparallel pipe vesicles), 양날개 버블형 샤드(multiwinged bubble wall shards) 등 다양한 형태의 유리질 샤드들로 이루어져 있으며 대부분 입경이 약 65–100  $\mu\text{m}$  범위에 속한다(Figs. 5a-5c). 또한 200  $\mu\text{m}$  이상의 부석질 입자도 드물게 관찰되었다(Fig. 5b). 한편 세립 화산재 구성 입자 집단 EM3에 해당하는 입자들은 주로 온전한 형태를 보이지 않는 유리질 판상 화산재 입자 파편들로 이루어져 있으며 입경은 약 30  $\mu\text{m}$  내외로 관찰되었다(Fig. 5d). 동해 제4기 해저 퇴적물에 광범위하게 분포하는 화산재들 중 주로 버블형 샤드들은 일본 큐슈에 위치한 아소(Aso), 아이라(Aira), 키카이(Kikai) 등 칼데라를 형성하는 대규모 화산의 폭발에 의해 생성되어 이동 퇴적된 것으로 알려져 있으며, 부석질 입자는 울릉도 혹은 백두산 기원의 화산재로 알려져 있다(Furuta *et al.*, 1986; Chun *et al.*, 2007). EM4에 해당하는 화산재 입자들은 이들 화산들의 폭발에 의해 생성된 비교적 조립한 화산재가 공중 낙하(fallout) 과정을 통해 공급되어 해저 퇴적물에 포함된 것으로 해석된다. EM3의 경우는 버블형 샤드를 형성하는 대규모의 화산폭발 과정에서 동시에 형성된 매우 작게 부서진 실트 크기의 세립질 유리질 샤드를 나타내는 것으로 여겨지며, 공중 낙하와 수중 낙하과정에서 입자 크기에 따른 낙하 속도의 차이에 의해 조립질 버블형 샤드와 별개의 입도 집단으로 분류된 것으로 생각된다.

### 3.3 화산재 유입 영향 평가와 제거

화산재 유입의 영향이 의심되는 시료의 입도 분포 형태는 화산재 구성 입자 집단인 EM3와 EM4의 구성 비율에 따라 크게 두가지 형태를 보인다. 첫번째는 EM3의 구성 비율이 우세한 경우로서 EM3의 29.8  $\mu\text{m}$  모드와 EM2의 8.86  $\mu\text{m}$  모드가 중첩되

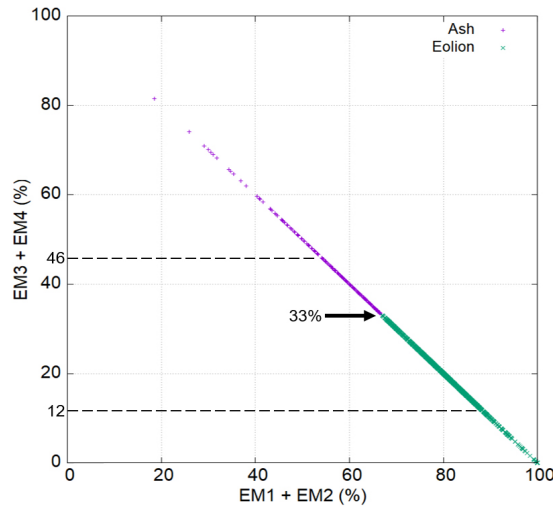


**Fig. 5.** Polarizing microscope images (open nicol) of coarse ash end-member (EM4; a-c) and fine ash end-member (EM3; d). Observed ash types include vesicular glass fragments (v), bubble wall shards (b), subparallel pipe vesicles (p), and multiwinged bubble wall shards (w). Note very coarse pumice shard in (b) (arrow) and fine platy scattered shards in (d). Scale bars are 100  $\mu\text{m}$  long.

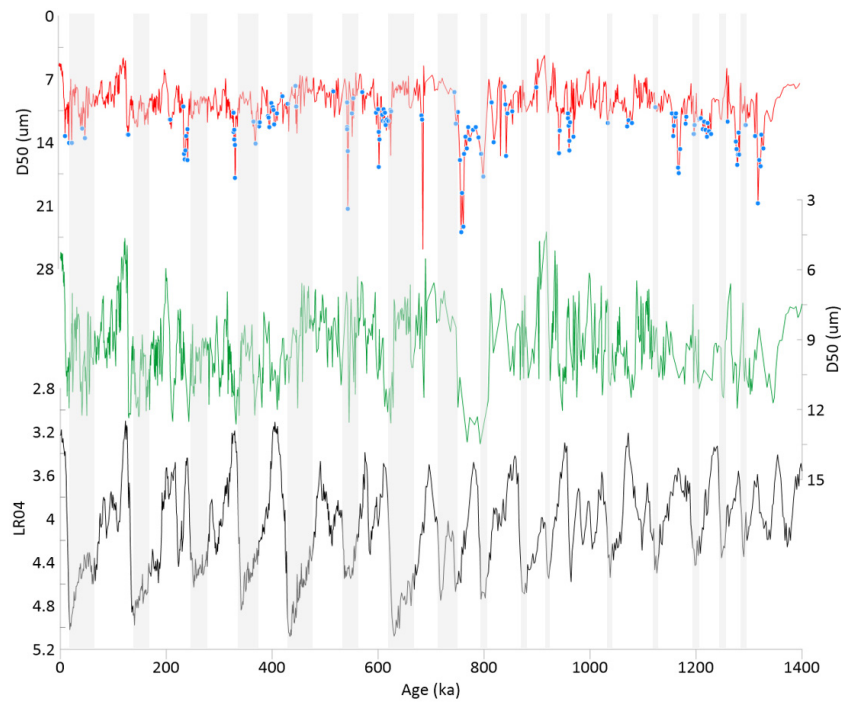
어 그 가운데 약 20  $\mu\text{m}$ 에서 단일한 모드를 가지는 분포 형태를 보인다(Fig. 3d). 두번째는 EM4의 구성 비율이 우세한 경우로서 EM2에 의해 나타나는 8.86  $\mu\text{m}$ 의 세립 모드와 EM4에 의해 나타나는 70.9  $\mu\text{m}$ 의 조립모드가 뚜렷이 구별되는 이중 모드 분포 형태를 보인다(Fig. 3e). 주로 황사 구성 입자 집단인 EM1과 EM2로 이루어진 시료의 경우 세립한 EM1과 조립한 EM2의 구성 비율의 변화에 따라 약 4–10  $\mu\text{m}$  범위의 단일 모드 분포 형태를 보이고 있다(Fig. 3f).

분석 대상인 U1430 시추 퇴적물 전체 1421개 시료에서 화산재 유입 영향을 정량적으로 평가하고자, 제1단계 구성 성분 분해에서 얻어진 4개의 구성 입도 집단의 분포를 모든 시료 각각의 전체 입도 분포에 최적화하여 각 입도 집단의 구성 비율을 구하였다. 그 결과 화산재 구성 입자 집단인 EM3와 EM4의 구성 비율의 합은 0에서 최대 82%까지 변하며, 특히 12에서 46% 범위에서는 거의 연속적인 변화 경향을 보여주고 있다(Fig. 6). 이렇게 화산재의 구성 비율이 특정한 범위에 집중되지 않고 연속적인 변화 양상을 보이는 것은 U1430 시추 퇴적물에서 화산재가 특정 화산의 폭발 시기에 일시적으로 공중 낙하에 의해 직접 유입될 뿐만 아니라, 폭발 시기 이후 바람 및 해류를 통한 이송, 생물 교란 작용에 의한 일반 퇴적물과의 혼합 등 다양한 과정을 거쳐 퇴적되기 때문으로 여겨진다. 전자의 경우 화산재가 비교적 높은 함량을 차지하기 때문에 육안으로도 식별이 가능한 뚜렷한 화산재 층을 이루지만, 후자의 경우 화산재 함량이 낮아 일반 반원양성 퇴적물과의 육안 식별이 거의 불가능하다(Fig. 2). 특히 이처럼 육안 식별이 어려운 화산재와 반원양성 퇴적물의 혼합층에서 화산재 영향 유무를 판별할 수 있는 일관된 화산재 비율 기준이 필요하다.

분석 시료 대부분에서 최소 0.32% 이상의 화산재 구성 입도 집단의 비율이 나타나기 때문에 본 연구에서는 순전히 황사 입자 집단으로만 구성된 퇴적물을 따로 분리하지 않고, 일정 비율 이상의 화산재 구성 입도 집단을 포함할 경우 화산재의 영향이 있는 시료로, 그 나머지는 황사에 의한 영향이 우세한 시료로 판별하고자 하였다. 화산재 영향이 있는 것으로 판단할 컷오프 기준을 설정하기 위해 화산재 구성 입자 집단인 EM3와 EM4의 구성 비율 합이 연속적으로 변화하는 12에서 46% 범위까지 2%씩 임의의 기준값을 설정한 후 그 이상의 화산재 비율을 포함한 시료의 입도 자료를 전체 입도 자료에서 제거하였다.



**Fig. 6.** Plots of mixing percentages of eolian dust end members (EM1+EM2) vs. volcanic ash end members (EM3+EM4). Samples containing more than 33% of volcanic ash end members are defined to be influenced by volcanic ash input.



**Fig. 7.** Temporal variations of the median grain size (D50) before (red) and after (green) removing data from the samples influenced by volcanic ash input (blue marks). LR04 is the marine oxygen isotope stack of Lisiecki and Raymo(2005) with shadings for glacial stages.

다음 Tada *et al.*(2018)에서 제시된 U1430 시추 퇴적물에 대한 연대 설정 모델을 참고하여 화산재 영향 제거 전후 입도 자료에서 약 1,400 ka 이후 중앙입경 값의 시계열 변화를 구한 후, 이를 제4기 빙하기 간빙기 기후 변화의 지시자로 활용되는 LR04 해양 산소 동위원소비 변화 곡선(Lisiecki and Raymo, 2005)과 비교하여 상관관계가 얼마나 향상되는지 살펴보았다 (Fig. 7). 남한국대 제4기 시추 퇴적물에서 약 186 ka 이후의 쇄설성 성분의 입경 변화는 주로 빙하기에 강화된 북서 계절 풍의 영향으로 조립해지는 경향을 보이기 때문에(Bahk *et al.*, 2021), U1430에서 복원된 플라이스토세 입도 변화 기록도 빙하기 간빙기 기후 변화와 유의미한 상관 관계를 보일 것으로 예측된다. 한편, 화산재 컷오프 기준 비율을 너무 낮게 설정할 경우



너무 많은 자료가 제거되어 제거 이후 자료의 시계열 연속성이 불량해지기 때문에 최종 컷오프 비율은 상관관계와 시계열 자료 연속성을 함께 고려하여 33%로 설정하였다. 이 컷오프 비율을 적용한 중앙 입경 변화 자료는 원 자료에 비해 약 15  $\mu\text{m}$  이상의 조립한 중앙 입경 자료가 대부분 제거되었으며, 자료가 제거된 구간에서 LR04 변화 곡선과의 상관성이 전반적으로 향상되었다(Fig. 7).

입도 자료를 바탕으로 한 화산재 제거 결과 황사 기원 쇄설성 성분의 중앙 입경은 해양산소동위원소시기 10, 16 빙하기를 제외하면 대체로 최대 빙하기에 조립한 경향을 보이고 있다(Fig. 7). 하지만 그 외 간빙기 및 전이기 기간에서 중앙 입경의 구체적인 변화 양상은 LR04 산소 동위원소비의 변화 양상과 어긋나는 부분이 많이 나타나며 특히 LR04에 비해 고진폭의 단주기 진동이 자주 나타난다. 그 원인의 하나는 동해의 황사 입경 변화가 천체 주기의 빙하기 간빙기 기후 변화에도 영향을 받지만, 이와 더불어 천년 단위의 Dansgaard-Oeschger (D-O) 주기에도 영향을 받기 때문으로 추측된다. 동해의 후기 제4기 퇴적물에서 황사 입경은 D-O 아빙기 시기 강화된 북서 계절풍 혹은 고층 편서풍대의 남하로 급격하게 조립해지는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(Nagashima *et al.*, 2011; Bahk *et al.*, 2021). 본 연구의 후속 연구에서는 이 연구 결과 도출된 황사 기원 쇄설성 성분의 중앙 입경, 세립 및 조립 황사 구성 입도 집단 EM1, EM2의 비율 변화와 천체 주기 및 D-O 주기 기후 변화와의 상관관계를 더욱 소상히 고찰할 계획이다.

## 4. 요약

동해 남한국대지 U1430 시추 지점의 제4기 퇴적물 쇄설성 성분 입도 자료에 구성 성분 분해법을 적용한 결과 모두 4개의 구성 입도 집단(EM1-4)이 구별되었다. 이 중 중앙 입경이 2.86  $\mu\text{m}$ , 9.00  $\mu\text{m}$ 인 EM1과 EM2는 기 연구 결과에서 밝혀진 고층 편서풍과 북서 계절풍에 의해 운반된 황사 입자들을 대표하는 것으로 해석되었다. 한편 중앙 입경이 28.9  $\mu\text{m}$ , 61.1  $\mu\text{m}$ 인 EM3와 EM4는 다양한 형태의 화산재로 이루어져 있으며 일본 열도의 화산들과 울릉도 독도 등에서 기원한 세립 및 조립질 화산재들을 대표하는 것으로 해석되었다. 화산재 구성 입도 집단인 EM3와 EM4가 전체 입도 분포에서 차지하는 비율은 0에서 최대 86%까지 연속적으로 변하며 거의 모든 시료에서 나타나고 있다. 화산재 영향이 있는 것으로 판단할 컷오프 기준 비율은 화산재 영향이 제거된 전체 입도 자료의 시계열 연속성과 LR04 해양 산소 동위원소비 변화 곡선과의 상관관계 향상 정도를 함께 고려하여 33%로 정하였다. 본 연구 결과 도출된 화산재 영향이 제거된 입도 자료를 바탕으로 황사 입자의 입경 변화와 기후 변화의 상관 관계에 대한 보다 상세한 후속 연구가 수행될 예정이다.

## 사 사

이 연구는 국제해저지각시추사업(International Ocean Discovery Program)의 시료와 자료를 활용하였습니다. 이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌(References)

- Anderson, C.H., R.W. Murray, A.G. Dunlea, L. Giosan, C.W. Kinsley, D. McGee and R. Tada, 2020. Aeolian delivery to Ulleung Basin, Korea (Japan Sea), during development of the East Asian Monsoon through the last 12 Ma. *Geological Magazine*, **157**: 806-817.
- Ashley, G.M., 1978. Interpretation of polymodal sediments. *Journal of Geology*, **86**: 411-421.
- Bahk, J.J., I.K. Um and J.H. Jang, 2021. Lateral sediment transport and late Quaternary changes of eolian sedimentation in the East Sea (Japan Sea). *Journal of Asian Earth Sciences*, **208**: 104672.

- Chun, J.H., D. Cheong, K. Ikehara and S.J. Han, 2007. Age of the SKP-I and SKP-II tephra from the southern East Sea/Japan Sea: Implications for interstadial events recorded in sediment from marine isotope stages 3 and 4. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **247**(1-2): 100-114.
- Clark, M.W., 1976. Some methods for statistical analysis of multimodal distributions and their application to grain-size data. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, **8**: 267-282.
- Dietze, E., K. Hartman, B. Diekmann, J. Ijmker, F. Lehmkuhl, S. Opitz, G. Stauch, B. Wünneman and A. Borchers, 2012. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China. *Sedimentary Geology*, **243-244**: 169-180.
- Folk, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, **62**: 344-359.
- Furuta, T., K. Fujioka and F. Arai, 1986. Widespread submarine tephra around Japan-petrographic and chemical properties. *Marine Geology*, **72**: 125-142.
- Hamann, Y., W. Ehrmann, G. Schmiedl, S. Krüger, J.-B. Stuut and T. Kuhnt, 2008. Sedimentation processes in the Eastern Mediterranean Sea during the Late Glacial and Holocene revealed by end-member modelling of the terrigenous fraction in marine sediments. *Marine Geology*, **248**: 97-114.
- Ikehara, K., 2015. Marine tephra in the Japan Sea sediments as a tool for paleoceanography and paleoclimatology. *Progress in Earth and Planetary Science*, **2**: 36.
- Jang, J.H., J.J. Bahk, E.J. Kim and I.K. Um, 2020. Characteristics and Paleoceanographic Implications of Grain-size Distributions of Biogenic Components in Sediments from the South Korea Plateau (East Sea). *Ocean and Polar Research*, **42**: 249-261.
- Lee, S., I. Seo and K. Hyeong, 2019. Reconstruction of changes in eolian particle deposition across the mid-pleistocene transition in the central part of the North Pacific. *Ocean and Polar Research*, **41**: 275-288.
- Lisiecki, L.E. and M.E.A. Raymo, 2005. Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, **20**: PA1003.
- Nagashima, K., R. Tada, A. Tani, Y. Sun, Y. Isozaki, S. Toyoda and H. Hasegawa, 2011. Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**: 1214-1220.
- Nagashima, K., R. Tada, H. Matsui, T. Irino, A. Tani and A. Toyoda, 2007. Orbital- and millennial-scale variations in Asian dust transport path to the Japan Sea. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **247**: 144-161.
- Paterson, G.A. and D. Heslop, 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **16**: 4494-4506.
- Rea, D.K., 1994. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind. *Reviews of Geophysics* **32**: 159-195, <https://doi.org/10.1029/93RG03257>.
- Sheridan, M.F., K.H. Wohletz and J. Dehn, 1987. Discrimination of grain-size subpopulations in pyroclastic deposits. *Geology*, **15**: 367-370.
- Tada, R., T. Irino, K. Ikehara and the Expedition 346 Scientists, 2018. High-resolution and high-precision correlation of dark and light layers in the Quaternary hemipelagic sediments of the Japan Sea recovered during IODP Expedition 346. *Progress in Earth and Planetary Sciences*, **5**: 19.
- Tada, R., R.W. Murray, C.A. Alvarez Zarikian, and the Expedition 346 Scientists, 2015. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program 346*, College Station, TX.
- van Hateren, J.A., M.A. Prins, and R.T. van Balen, 2018. On the genetically meaningful decomposition of grain-size distributions: A comparison of different end-member modelling algorithms. *Sedimentary Geology*, **375**: 49-71.
- Weltje, G.J., 1997. End-member modelling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, **29**: 503-549.
- Weltje, G.J. and M.A. Prins, 2007. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions. *Sedimentary Geology*, **202**: 409-424.