

2009년 봄철 황사 단일 입자의 광물학 및 혼합상태

Single-Particle Mineralogy and Mixing State of Asian Dust, Spring, 2009

정 기 영(Gi Young Jeong)¹ · 최 호 정(Ho-Jeong Choi)² · 권 석 기(Seok-Ki Kwon)^{3,*}

¹안동대학교 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)
²경북과학고등학교
(Kyeongbuk Science High School, Yongheung-dong 418-1, Pohang 791-811, Korea)
³한국지질자원연구원
(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 2009년 3월 17일 채집된 황사 총서료(TSP)의 개별 입자에 대하여, 고분해 주사전자현미경 및 에너지분산 X선 분광분석을 이용한 광물학적 특성 및 혼합상태 분석을 실시하였다. 황사 입자들 중, 석영, 사장석, K-장석, 각섬석, 흑운모, 백운모, 녹니석, 방해석 등은 비교적 조립질 입자로 산출되며, 이들 입자는 얇은 극미립 일라이트질 점토광물 층으로 피복되어 있다. 극미립 점토광물 입자들은 또한 개별 점토 덩어리를 형성한다. 조립질 방해석 외에 나노섬유 방해석들이 개별적으로 또는 집합체로 큰 입자를 피복하거나 점토광물과 함께 덩어리를 형성한다. 입자의 주 광물에 따라 광물학적 분류를 실시하고 빈도를 구하였다. 이번 TSP의 단일입자 광물학적 특성 및 혼합상태는 기존의 PM₁₀ 분석 결과와 거의 차이가 없었다.

주요어 : 황사, 주사전자현미경, 혼합상태, 석영, 사장석, 점토광물, 방해석

ABSTRACT : The mineralogy and mixing state were investigated by the high resolution scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray analysis on particles of the total suspended solid (TSP) samples collected during the Asian dust event, spring, 2009. Relatively large particles were dominated by quartz, plagioclase, K-feldspar, amphibole, biotite, muscovite, chlorite, and calcite. Clay minerals usually occur as thin coatings on the coarse minerals or as aggregates. Calcite nanofibers are often admixed with clay platelets in the clay coatings and aggregates. Dust particles were classified on the basis of their main minerals. The single-particle mineralogy and mixing state of the TSP sample are consistent with those of PM₁₀ samples in previous studies.

Key words : Asian dust, scanning electron microscopy, mineralogy, mixing state, clay mineral, calcite

서 론

황사는 봄철 아시아 내륙 건조지역에서 발생하

여 한반도에 영향을 미치는 기상 현상으로서, 시각적 경험이기 때문에 일반인과 전문가들 사이에 관심이 매우 높고, 따라서 여러 분야에서 많은 연구들이 수행되고 있다(김영성, 2011). 그러나 황사의

*교신저자: ksk@kigam.re.kr

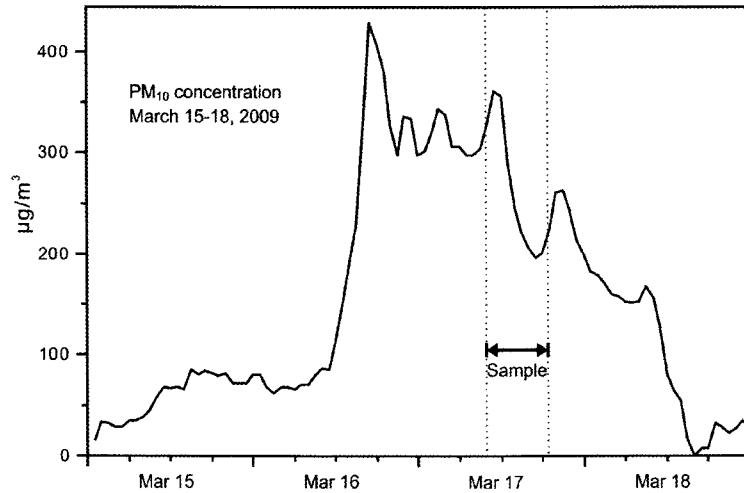


Fig. 1. Variation of PM₁₀ concentration hourly measured in Andong from March 15 to March 18, 2009. The database of Korea Meteorological Administration (<http://www.kma.go.kr>).

발생, 이동, 예측 등의 기상학적 연구나 유·무기 화학조성 분석 등의 거시적 연구에 비하면, 황사 개별입자의 광물학적 특성이나 혼합상태는 잘 연구되지 않고 있다. 황사 개별 입자의 광물학적 특성과 혼합상태는 대기 개스의 반응, 구름 응결핵, 태양광의 반사나 흡수 등에서 광물 먼지의 역할을 평가할 때 매우 중요한 요소이다. 비교적 상세한 황사의 광물학적 연구로서 Jeong and Chun (2006) 및 Jeong (2008) 등의 연구가 있다. 그러나 이 연구들에서 사용한 시료들은 PM₁₀ (< 10 µm)이어서, 이들이 발견한 특성이 황사의 일반적 특성인지 전 시료(total suspended solid, TSP)를 대상으로 확인할 필요가 있다. 10 µm 이상 크기의 입자 시료는 장거리 이동 황사가 아닌 국지성 입자들이 많이 혼합되어 있어서, PM₁₀ 시료가 황사의 특성을 대표한다고 알려져 있다(전영신 외, 1999, 2003; Chun *et al.*, 2001). 본 연구에서는 2009년 3월 16~18일 관찰된 황사 시기에 채집된 TSP 시료를 대상으로 고분해 주사전자현미경(SEM)을 활용한 미형태학적 및 미광물학적 연구 결과를 제시하고 그 의미에 대하여 토의하고자 한다.

2009년 황사 발생 개황

2009년 황사는 안동지역에서 3월 16일, 4월 25일 두 차례 관측되었다. 황사는 중국 서북부 건조 지역에서 발생하여, 대체로 2일 후에 한반도 상공

을 통과하였다. 3월 16일 나타난 황사는 18일 오전까지 비교적 오랫동안 지속되었다(그림 1). 인공 위성 영상에서 3월 16일 황사는 비교적 폭이 넓고 동서로 긴 띠를 이루며 중부지방을 통과하며, 저기압 구름을 뒤따라 이동하였다(그림 2).

시료 및 방법

황사 시료는 2009년 3월 17일 09시부터 8시간 동안 Tisch TSP 고용량 시료 채취기로 안동대학교 자연과학 1호관 건물의 서측 난간(고도 5 m)에서 채취하였다. 사용한 필터는 Whatman 41번 셀룰로스 필터였다. 시료 채취와 함께 기상 상황 및 황사의 이동 상황을 기상청 홈페이지의 황사센터에서 모니터링하였다.

황사 입자들의 광물구성, 형태, 표면조직, 집합상태를 관찰하기 위하여 Oxford 에너지분산X선분광기(EDS)가 부착된 JEOL JSM 6300 및 JEOL JSM 6700F 주사전자현미경(SEM)으로 황사 입자들의 이차전자상을 관찰하였다. 황사 입자의 광물 구성은 화학조성과 형태를 근거로 Jeong (2008)에 따라 결정하였다.

결 과

TSP 필터의 SEM 및 EDS 분석에 의하면 황사 입자는 석영, K-장석, 사장석, 극미립 점토광물 집

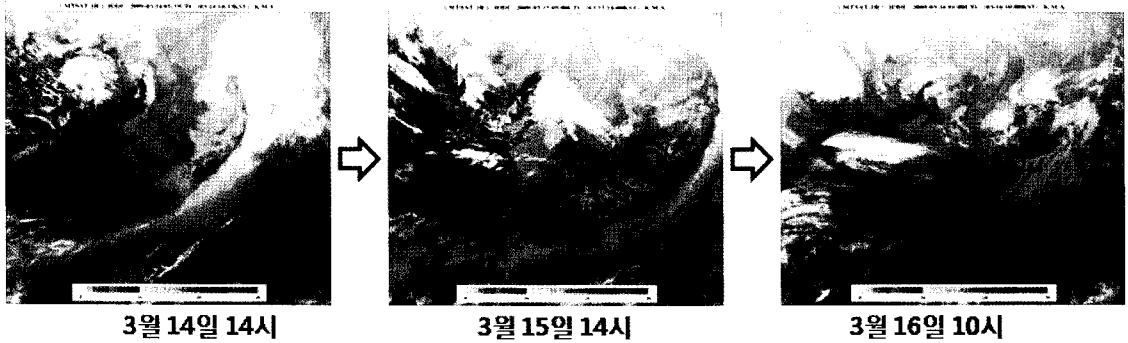


Fig. 2. Asian dust image on March 16, 2009 (MTSAT-IR). Korea Meteorological Administration (<http://www.kma.go.kr>).

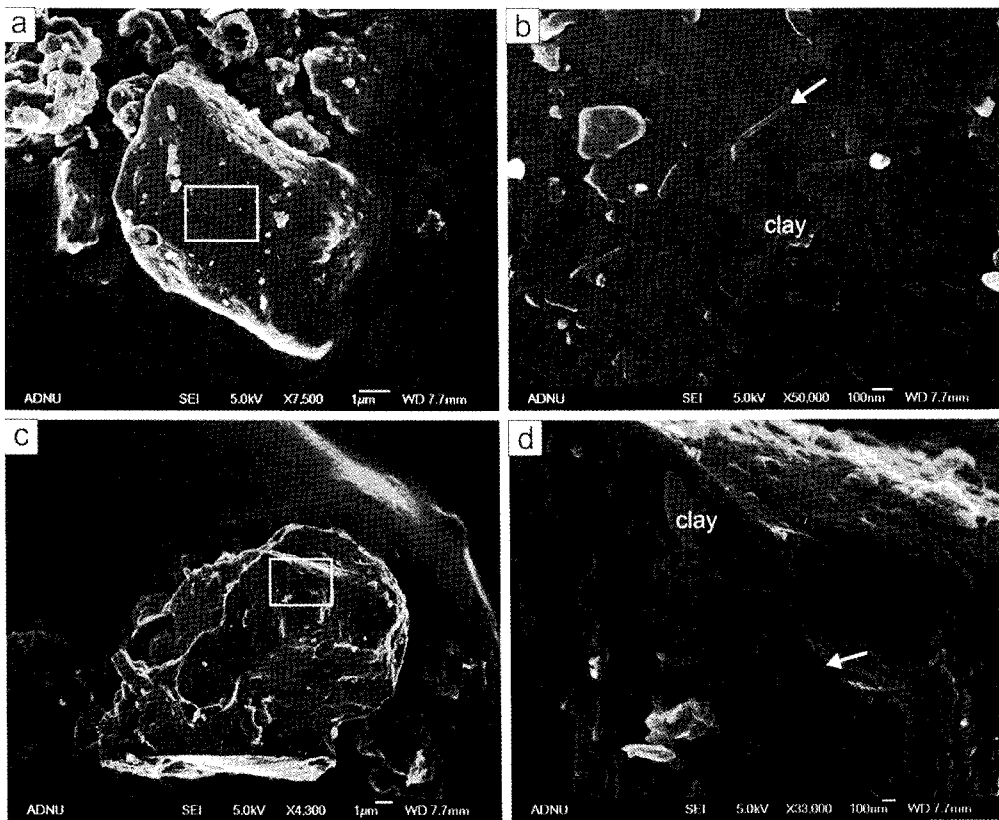


Fig. 3. SEM images of quartz in Asian dust. Right images were magnified from the boxes in left images. (a), (b) Subrounded quartz grain coated with thin layers of submicron irregular platelets of clay minerals and minor calcite nanofibers (arrow). (c), (d) Angular quartz grain coated with submicron irregular platelets of clay minerals and calcite nanofibers (arrow).

합체 등의 광물 입자들로 구성되어 있으나, 일부 식물 화분 또는 파편으로 생각되는 입자나 흑색 탄소 또는 구형 비회입자 등의 대기오염 물질도

함유되어 있다. 여기서는 광물 입자를 중심으로 기술한다.

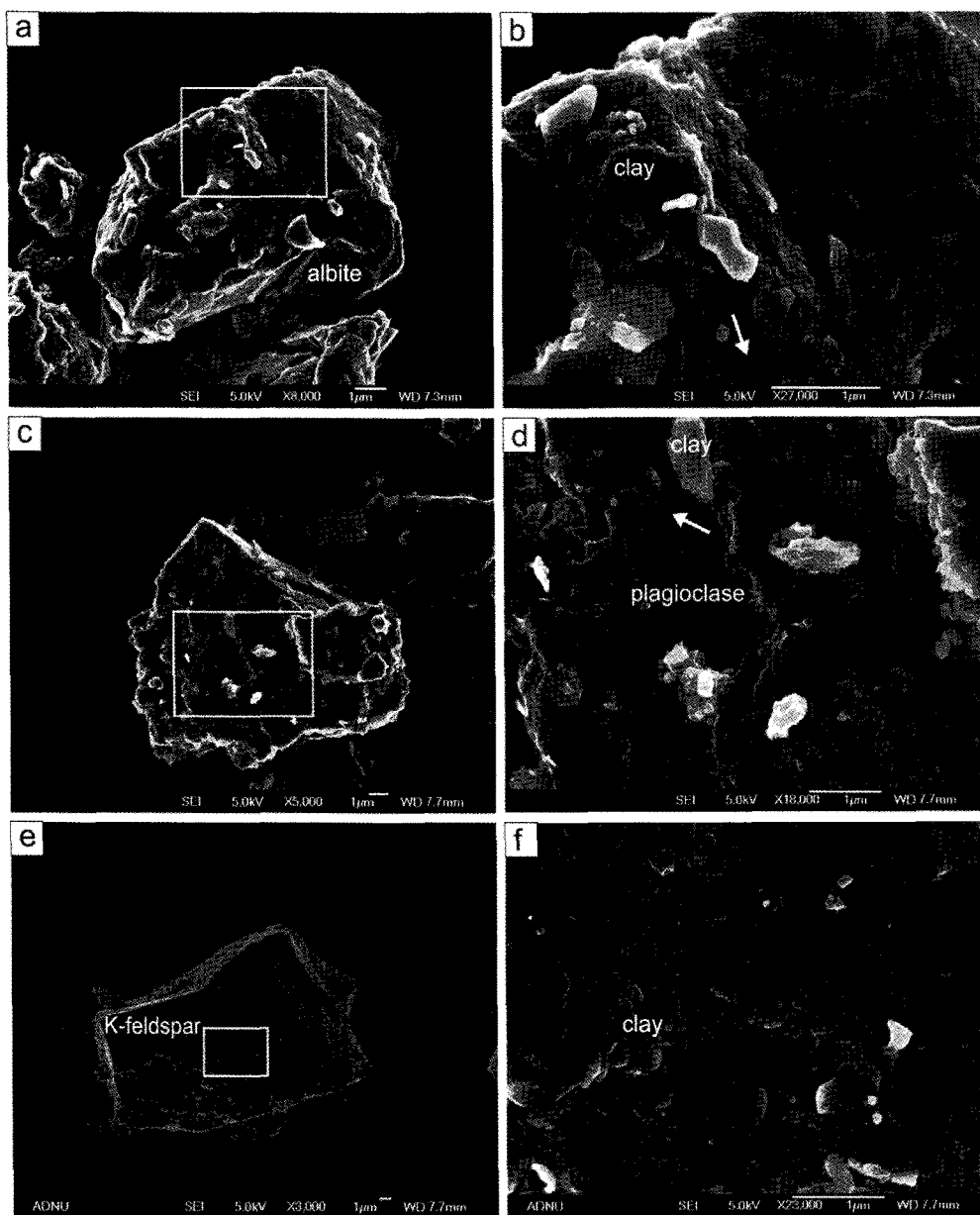


Fig. 4. SEM images of feldspars in Asian dust. (a), (b) Angular albite grain coated with thin layers of submicron irregular platelets of clay minerals and calcite nanofibers (arrow). (c), (d) Angular Ca-Na plagioclase with some coatings of submicron particles of clay minerals and calcite nanofiber (arrow). (e), (f) Angular K-feldspar coated with thin layers of submicron platelets of clay minerals.

규산염 광물

석영은 입자 모서리의 원마도(roundness)가 양호(그림 3a) 또는 불량(그림 3c)하며, 형태가 대체로

불규칙하여, 구형도(sphericity)가 높은 입자는 거의 없었다. 높은 원마도와 구형도는 사막 등 건조 지역의 풍성 모래 입자의 일반적 특징이지만, 실트나 그 이하의 입자들은 모래에 비하여 원마도나 구

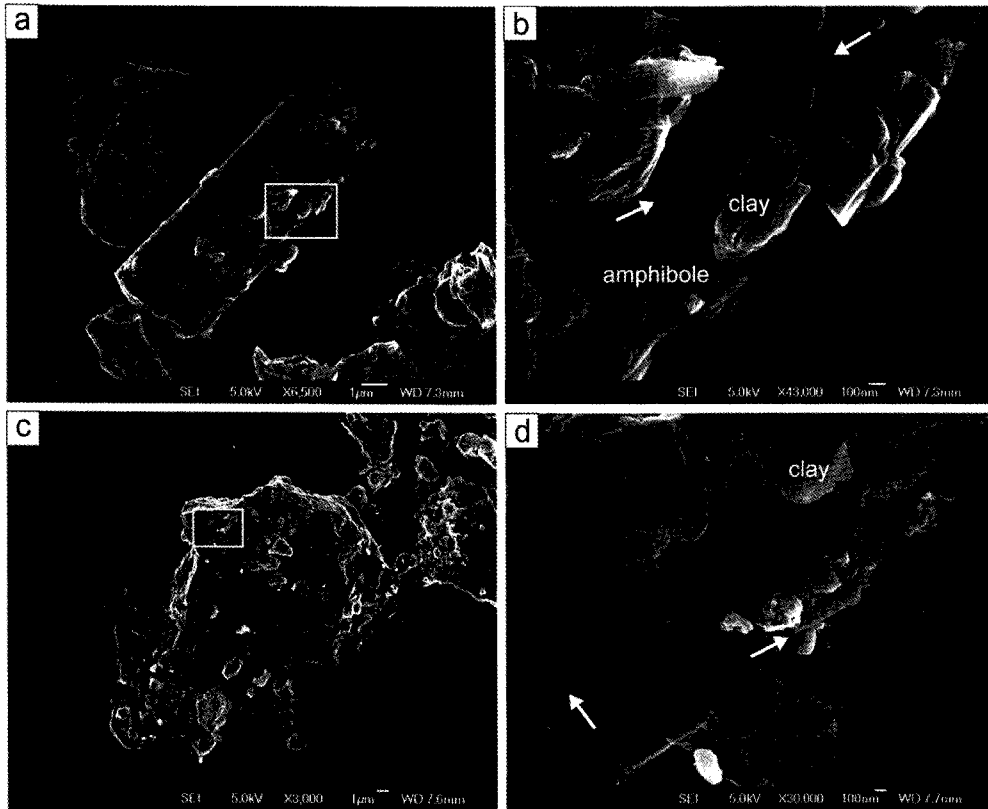


Fig. 5. SEM images of amphibole and zoisite grains in Asian dust. (a), (b) Columnar amphibole grain with adhered clay platelets and calcite nanofibers (arrows). (c), (d) Subangular zoisite grain with thin layers of submicron platelets of clay minerals and calcite nanofibers (arrows).

형도가 낮다(Jeong, 2008). 이들 석영 입자의 확대 관찰에 의하면 극미립 판상 점토광물들이 얇은 층으로 피복되어 있으며, 나노섬유 방해석(Jeong and Chun, 2006; 정기영, 2007)이 점토광물과 함께 산출된다(그림 3b, 3d).

사장석 입자는 대부분 원마도와 구형도가 모두 불량하다(그림 4a, 4c). 이는 아마도 양호한 벽계 때문에 풍성과정에서 깨진 면들이 계속 노출되기 때문일 것으로 추측된다. 사장석 표면도 부분적으로 또는 완전히 극미립 판상 점토광물과 소량의 나노 방해석으로 피복되어 있다(그림 4b, 4d). 황사 퇴적물이라 할 수 있는 중국 퇴스의 광물학적 연구(Jeong *et al.*, 2008, 2011)에 의하면 사장석은 대부분 화학적으로 Na가 풍부한 유형에 속한다. EDS 분석에 의하면 황사의 사장석도 대부분 Na가 풍부한 유형이며, 형태적 차이는 없다.

K-장석은 사장석과 마찬가지로 원마도와 구형도

가 대체로 불량하며(그림 4c), 표면은 판상 점토 입자들로 치밀하게 피복되어 있다(그림 4f).

그 외 각섬석(그림 5a), 휘석, 조이사이트(그림 5c), 흑운모(그림 6a), 녹니석(그림 6c), 백운모(그림 6e) 등이 관찰되었다. 이들 입자들도 모두 부분적으로 판상 점토 입자(그림 5b, 5d, 6b, 6d, 6f)와 나노 섬유방해석들(그림 5b, 5d, 6b, 6d)로 피복되어 있다.

점토 광물은 석영(그림 3), 장석(그림 4) 등의 표면을 피복하지만 또한 점토광물의 집합체를 형성한다(그림 7). 황사의 점토광물은 투과전자현미경 분석에 의하면 일라이트-스멕타이트 계열의 점토 광물이 대부분이지만, 케올리나이트도 확인된 바 있다(Jeong, 2008). 참고로 황사 퇴적물인 중국 퇴스(loess)의 점토 광물 정량분석(Jeong *et al.*, 2008, 2011)에 의하면, 점토 크기 입자들은 일라이트, 일라이트-스멕타이트 혼합층, 스멕타이트의 함이 90%

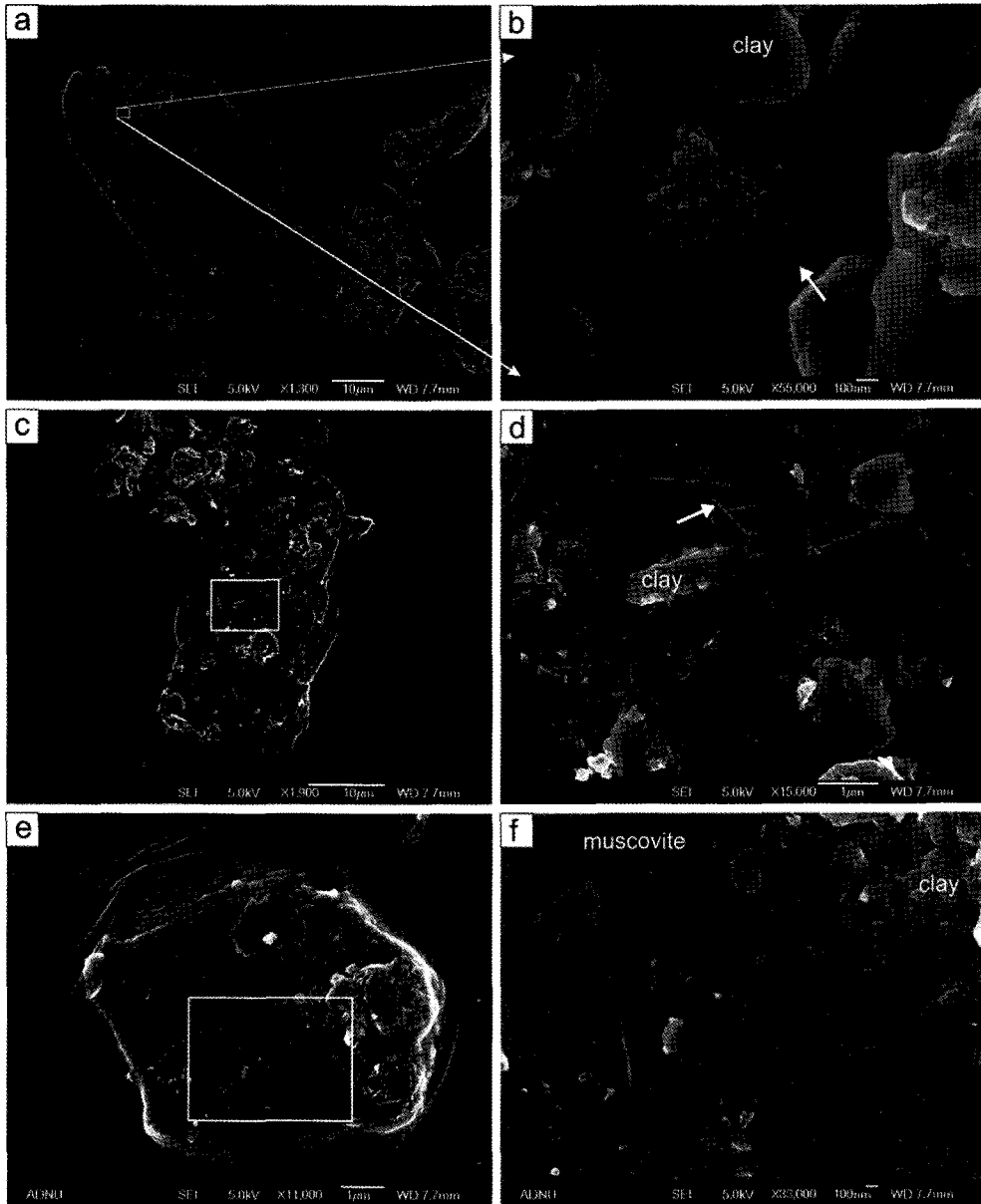


Fig. 6. Platy particles of micas and chlorite in Asian dust. (a), (b) Biotite grain with the calcite-nanofiber overgrowth (arrow). (c), (d) Chlorite grain with the coatings of submicron platelets of clay minerals and calcite nanofibers (arrows). (e), (f) Muscovite grain with thin coatings of fine platelets of clay minerals.

내외이고, 그 외 녹니석과 캐올리나이트가 10% 내외로 함유되어 있다. 이들 점토광물집합체에는 흔히 나노섬유 방해석들이 혼합되어 있다(그림 7d). 점토광물이 단일 광물종의 집합체로 산출되지는 않지만, 캐올리나이트는 드물게 단일 집합체를 형성한다(그림 8).

탄산염 및 황산염 광물

방해석은 조립질 입자와 나노섬유 방해석으로 구분된다. 중국 퇴스 연구(Jeong and Chun, 2006; 정기영, 2007; Jeong, 2008; Jeong *et al.*, 2008, 2011)에 의하면 조립질 방해석은 대부분 암석기원

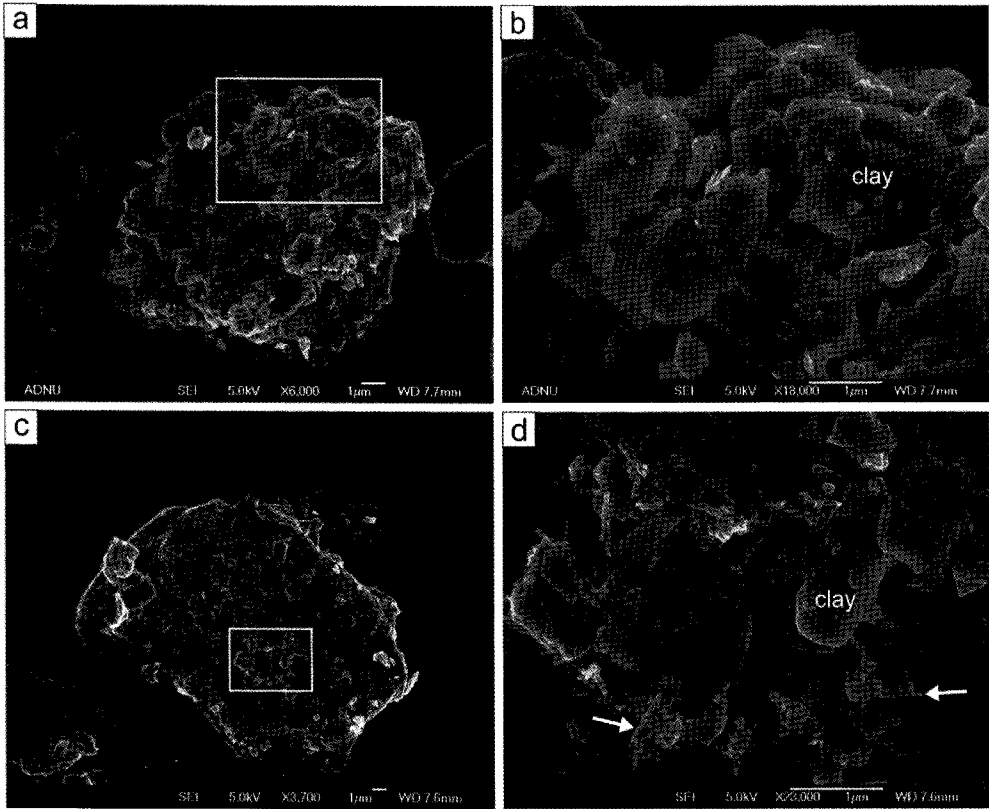


Fig. 7. SEM images of the particles of clay aggregate in Asian dust. (a), (b) Aggregate of illitic clay minerals. (c), (d) Aggregates of illitic clay minerals and calcite nanofibers (arrows).

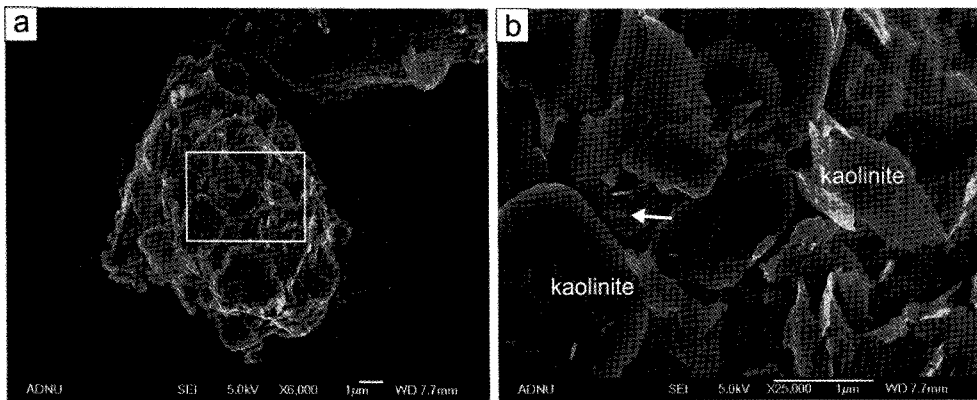


Fig. 8. Aggregates of kaolinite and nanofiber calcite (arrow). Right image was magnified from the box in left image.

의 쇄설성이며, 나노섬유 방해석은 공극수의 증발 과정에서 자생적으로 생성되었다. 조립질 방해석(그림 9a, 9c)은 대체로 불규칙한 형태이며 표면이 부분적으로 점토광물로 피복되어 있거나(그림 9b).

부분적으로 표면에 용식 구멍들이 관찰되기도 한다(그림 9d). 나노섬유의 너비가 불과 30~50 nm이며, 집합체를 이루거나(그림 6b, 9c, 9f), 분산되어 산출한다(그림 3b, 5d, 6b, 6d, 6f, 7d).

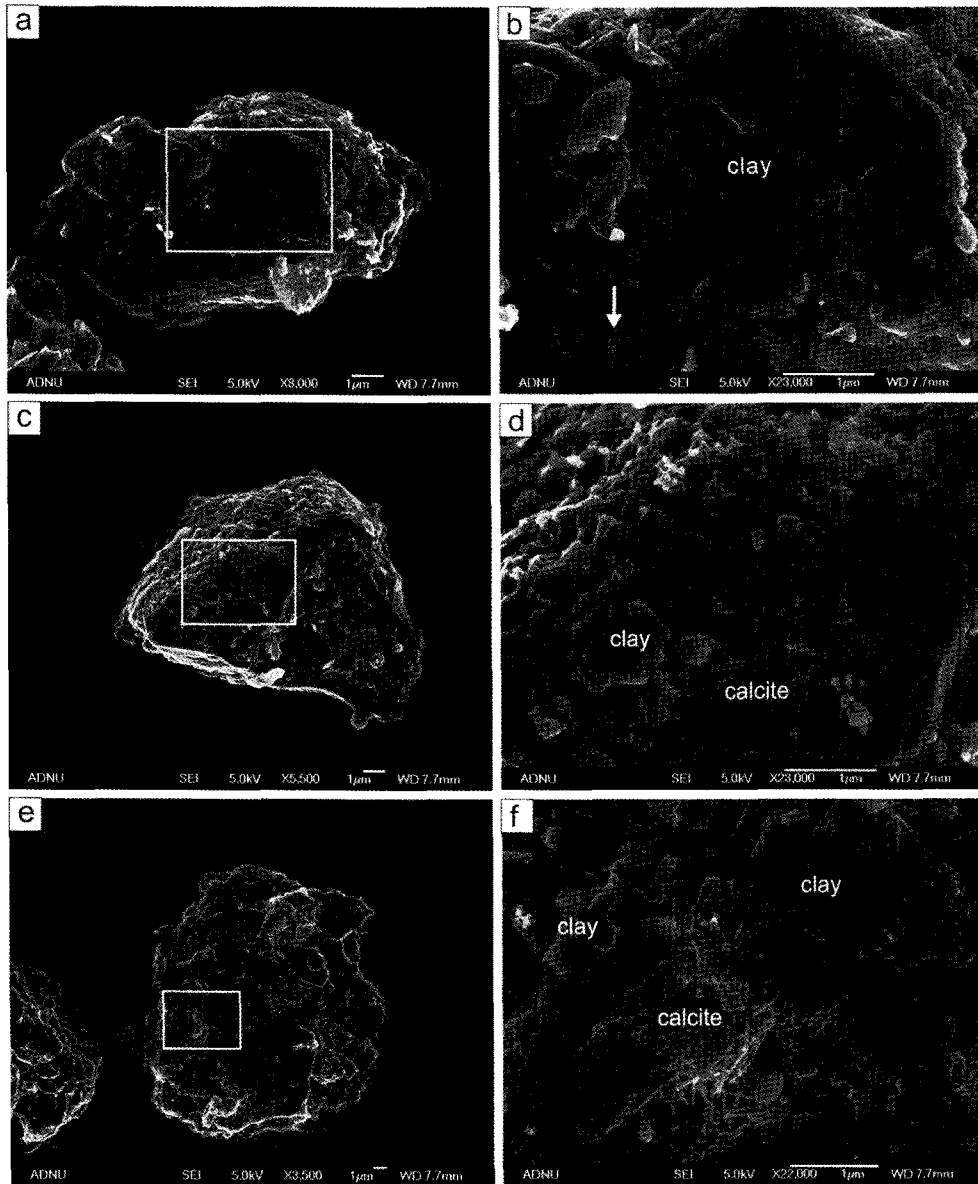


Fig. 9. Calcite particles in Asian dust. (a), (b) Detrital calcite grain derived from carbonate rock with the very thin coatings of submicron platelets of clay minerals and calcite nanofibers (arrow). (c), (d) Detrital calcite grain showing dissolution pits. (e), (f) Calcite nanofibers admixed with illitic clay minerals.

백운석은 암석기원의 쇄설성이며, 표면에 점토광물이 피복되어 있다(그림 10). 중국 퇴사의 광물학적 분석에 의하면 백운석은 흔히 쇄설성 방해석과 한 입자내에서 산출되어 방해석과 함께 암석기원의 쇄설성 광물로 해석된 바 있다(Jeong *et al.*, 2008, 2011).

석고는 자형 탁상 결정의 집합체로 산출된다(그림 11). 석고는 중국 건조지역 퇴사에서 지하수의

증발로 생성된 결핵체로 산출된다(Jeong and Lee, 2010; Jeong *et al.*, 2011).

광물개수비

황사입자의 주요 광물을 기준으로 460개 입자를 분류하여 개수비를 구하였다. 입자 중에서 점토광

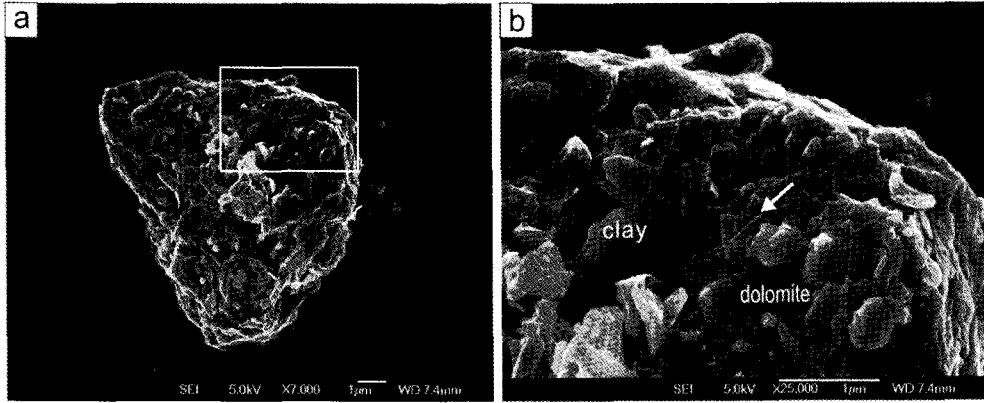


Fig. 10. Dolomite with clay coatings and calcite nanofiber (arrow). Right image was magnified from the box in the left image.

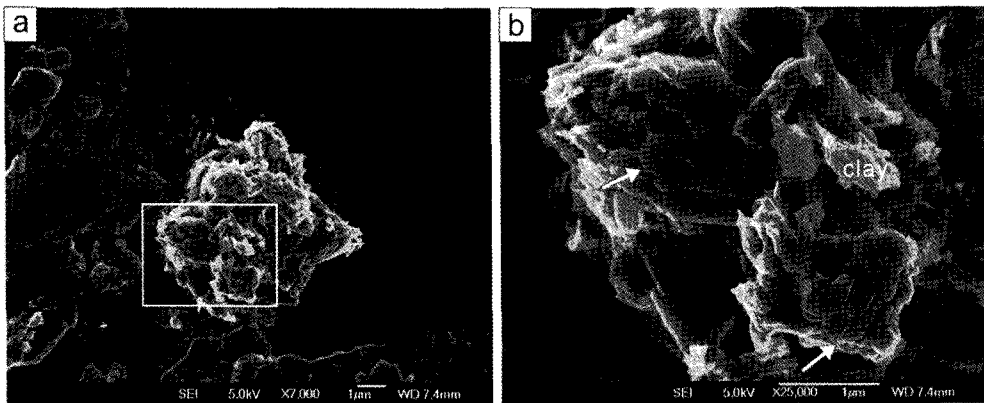


Fig. 11. Tabular crystals of gypsum (arrow) admixed with clay minerals.

물 집합체의 함량이 38%로 가장 높았다. 그리고 석영(19%), 사장석(13%), 방해석(11%)이 주요 광물로 함유되어 있었으며, 그 외 K-장석(3%), 백운석(2%), 각섬석(1%), 조이사이트(1%), 녹니석(3%), 캐올리나이트(3%), 백운모(3%), 흑운모(2%), 석고(1%) 등이 함유되어 있었다. 휘석, 산화철, 산화티탄 등은 460개 중에서 1~2개만 계수되었다. 총상규산염 광물 입자의 총합은 49%였다.

토 의

2009년 3월 17일 황사 TSP 시료와 Jeong (2008)의 2003~2005년 사이에 채취된 8개 PM₁₀ 시료의 평균 광물구성비를 비교한 결과, 구성비의 큰 차이는 발견되지 않았다. 총상규산염 입자의 합이 3

월 17일 TSP에서 49%이고, 8개 PM₁₀ 시료의 평균이 51±4%여서 오차범위 내에서 동일하다. 주요 비층상 규산염광물인 석영, 사장석, 방해석, K-장석의 빈도 순서도 일치하며, 빈도값의 차이도 작다. TSP 시료에는 직경 10 µm 이상인 입자들이 혼하고, PM₁₀ 시료는 10 µm보다 작은 입자들로 구성되어 있다. 만약 입자 크기별로 광물구성비의 차이가 있다면, TSP 시료에서 석영이나 사장석 등의 비율은 점토광물 집합체들이 우세한 총상 규산염 광물보다 높아야 할 것으로 예상된다. 그러나 SEM 분석에 의하면 점토광물 집합체들도 10 µm보다 큰 입자들이 흔히 관찰되므로 TSP와 PM₁₀ 사이에 광물구성비의 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 물론 발원지에서 모래와 실트 간의 광물조성에는 큰 차이가 있다(Jeong, 2008). 그러나 장거리

Table 1. Number abundance of Asian dust particles depending on their predominant mineral

Minerals	2009-03-17 (TSP)		Jeong (2008) ^c (PM ₁₀)
	Number	%	%
Quartz	88	19	24 ± 2
Plagioclase	58	13	11 ± 1
K-feldspar	12	3	5 ± 2
Calcite ^a	50	11	7 ± 2
Dolomite	9	2	- ^d
Amphibole	4	1	1 ± 0
Pyroxene	1	0	-
Zoisite	4	1	-
Fe oxides	2	0	1 ± 0
Ti oxides	1	0	1 ± 1
(Total phyllosilicates)	(232)	(49)	(51 ± 4)
Clay aggregate ^b	178	38	45 ± 4
Chlorite	16	3	1 ± 1
Kaolinite	16	3	2 ± 1
Muscovite	15	3	2 ± 0
Biotite	7	2	-
Gypsum	3	1	1 ± 1
Total	464	100%	100%

^aDetrital calcite or aggregates of nanosized calcite.

^bMostly illite, illite-smectite, and smectite often mixed with nanosized calcite.

^cAverage of 8 PM₁₀ samples collected between 2003~2005. Standard deviations in parenthesis.

^dNot determined.

이동 황사에서 TSP와 PM₁₀ 사이 입도 분포 차이는 광물구성비의 유의한 변화를 야기할 정도는 아닌 것으로 보인다.

SEM 분석 상에서 관찰되는 TSP 황사시료 입자들의 일반 형태는 얇은 극미립 점토광물층으로 피복된 석영, 장석 등의 큰 입자들이거나 점토광물들의 덩어리이다. 이와 같은 특징은 Jeong (2008)이 PM₁₀에서 관찰한 특징들과 같다. 또한 국내 토양에서 발견되지 않는 나노섬유 방해석이 점토광물과 함께 10 μm보다 훨씬 큰 입자들을 피복하고 있어서, 이들 큰 입자들이 Chun *et al.* (2001)이 주장한 바와 같이 국지성 입자가 아니라 장거리 이동한 황사 입자임을 지시한다. 향후 국내 토양을 대상으로 인공적으로 발생시킨 먼지의 광물입자를 대상으로 형태학적 및 광물학적 특성을 비교 분석할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원 연구원의 기본사업인 ‘지구·행성진화추적 원천지질기술개발’ 과제의 일환으로 수행되었다. 건설적인 의견을 제시해준 심사위원님들께 감사함을 드린다.

참고문헌

- 김영성 (2011) 황사의 대기환경영향. 한국대기환경학회지, 27, 255-271.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999) 황사시 서울과 안면도에서 관측된 에어로솔의 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15, 575-586.
- 전영신, 임주연, 최병철 (2003) 황사현상과 연무현상에 따른 서울의 봄철 에어로솔 특성. 한국기상학회지, 39, 459-474.
- 정기영 (2007) 중국 퇴스의 나노 방해석. 한국광물학회지, 20, 255-260.
- Chun, Y., Boo, K.-O., Kim, J., Park, S.-U., and Lee, M. (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. Journal of Geophysical Research, 106(D16), 18461-18469.
- Jeong, G.Y. (2008) The bulk and single-particle mineralogy of Asian dust and a comparison with its source soil. Journal of Geophysical Research-Atmosphere 113, D02208, doi:10.1029/2007JD008606.
- Jeong, G.Y. and Chun, Y. (2006) Nanofiber calcite in Asian dust and its atmospheric roles. Geophysical Research Letters 33, L24802, doi:10.1029/2006GL028280.
- Jeong, G.Y. and Lee, K.S. (2010) A mineral tracer toward high-resolution dust provenance on the Chinese Loess Plateau: SEM, TEM, and sulfur isotopes of sulfate inclusions in biotite. American Mineralogist, 95, 64-72.
- Jeong, G.Y., Hillier, S., and Kemp, R.A. (2008) Quantitative bulk and single-particle mineralogy of a thick Chinese loess-paleosol section: implications for loess provenance and weathering. Quaternary Science Reviews, 27, 1271-1287.
- Jeong, G.Y., Hillier, S., and Kemp, R.A. (2011) Changes in mineralogy of loess-paleosol sections across the Chinese Loess Plateau. Quaternary Research, 75, 245-255.

접수일(2011년 9월 9일), 수정일(1차 : 2011년 9월 24일), 게재확정일(2011년 9월 24일)