



Article

## 춘천분지 토양 내 석영입자의 표면미세조직 특성과 의미

신은채, 조경남\*

강원대학교 지질학과

### Surface microtextures of quartz grains in the soil of the Chuncheon Basin

Eun-chaee Shin, Kyoung-nam Jo\*

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: October 25, 2023 / Revised: December 15, 2023 / Accepted: December 18, 2023

\*Corresponding author: +82-33-250-8555 / E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

**요약:** 이 연구에서는 강원도 춘천분지 내에 발달한 춘천화강암 기원 토양을 대상으로 석영입자 표면미세조직(surface microtextures of quartz grains; SMQ)의 특징을 보고하고, 연구지역의 토양화 및 풍화작용을 해석하고자 하였다. 춘천분지 토양 SMQ의 전체적인 특징은 매우 고빈도로 나타나는 angular outline, large/medium/small conchoidal fractures, arcuate/straight steps, upturned plates 등 일부 물리적 표면미세조직과 함께, 속성변질환경 내에서 용해/침전작용 등에 의한 화학적 표면미세조직이 동시에 공존하는 것으로 요약할 수 있다. 이에 더해, breakage blocks와 microsteps 등 동결-용해작용으로 형성되는 것으로 알려져 있는 물리적 미세조직이 다소 우세하게 관찰되는 것이 연구지역 SMQ의 주요 특징 중 하나라고 할 수 있다. 이와 같은 주요 결과는 풍화수준을 지시하는 구성광물의 조합 및 조직적 특징과 함께 SMQ 결과를 종합적으로 고려함으로써 재차 확인된다. 춘천분지 내 토양의 SMQ 분석을 통해 관찰된 물리적 풍화 우세 현상은 토양의 동결-용해작용이 매해 반복적으로 발생할 수 있는 기후 조건에 주로 기인하는 것으로 해석되었다. 결론적으로 춘천분지 내 토양 SMQ는 기후 및 주변 존속 환경을 잘 반영하는 것으로 확인되었으며, 향후 지속적인 한반도의 지역별 SMQ 정보 체계화와 이를 활용한 후속 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 석영, 표면미세조직, 풍화, 춘천, 화강암

**ABSTRACT:** In this study, the surface microtextures of quartz grains (SMQ) in soil originating from the Chuncheon granite, Gangwon-do, were reported, and then its characteristics have been interpreted into the processes of soil formation and weathering. The overall properties of soil SMQ in Chuncheon area include some predominant physical microtextures such as angular outline, large/medium/small conchoidal fractures, arcuate/straight steps, and upturned plates, as well as some chemical microtextures due to dissolution/sedimentation within the diagenetic alteration environments. In addition, one of the main characteristics of the soil SMQ is that physical microtextures well known to be formed through freeze-thaw processes, such as breakage blocks and microsteps. The soil SMQ in the Chuncheon Basin is interpreted to be largely influenced by the surrounding climate and environmental conditions. Considering the textural properties of rock-forming minerals in the soil that indicate the level of weathering, the activity of physical weathering was evaluated to be relatively more dominant than chemical weathering. This dominant phenomenon of physical weathering is likely to be induced by soil freezing-thawing processes which can be occurred repeatedly every year. The results of this study may contribute to the systematization and follow-up researches using SMQ data for various environments in the Korean Peninsula.

**Key words:** quartz, surface microtexture, weathering, Chuncheon, granite

## 1. 서론

토양은 지표층을 이루는 기본 물질이자 생활 환경 및 식량을 제공하는 등 인간을 비롯한 여러 생물체의 생존을 위해 필수적인 자원이다(Sparks *et al.*, 2022). 이에 따라 해외는 물론, 우리나라에서도 복수의 공공기관들이 토양 지도를 제작하여 일반 국민에게 공개하고 있으며, 그 대표적인 예로, 산림청 산림공간정보서비스의 1:5,000 산림입지토양도나 농촌진흥청의 토양환경지도 서비스를 들 수 있다. 토양 지도는 임업과 농업 등에 필요한 정보를 얻거나 산사태 위험도와 같은 지질재해에 의한 피해를 예방하기 위해서도 활용되고 있다(KSIS, 2010).

토양을 구성하는 다양한 물질의 종류는 기반암의 광물 종에 의해 절대적으로 조절되지만, 기후, 식생 및 지형 등 다양한 환경 조건에도 크게 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다. 이들 토양 구성물질 중에서도 석영은 대표적인 조암광물이자 지표에서 가장 흔한 광물로서 거의 모든 토양에 보편적으로 존재한다(Douglas and Platt, 1977; Wilson, 2020). 석영은 다른 광물에 비해 상대적으로 풍화에 강한 특성을 지니는 동시에 입자 주변의 물리화학적 조건이 표면조직에 기록되기 때문에 풍화작용 및 토양 형성 연구의 지시광물(index mineral)로서 사용되어왔다(Power *et al.*, 1990). 또한, 토양 내 석영입자는 지난 약 20여년 간 범지구과학수사 분야에서도 보조적 수단으로서 중요하게 활용되어 왔는데, 이는 이들의 표면조직을 통해 기원지 추적이 가능하다고 평가되었기 때문이다(Bull and Morgan, 2006).

석영입자 표면미세조직(SMQ; surface microtextures of quartz grains) 분석은 Biederman (1962)과, Krinsley and Takahashi (1962)가 처음 제안한 이래로 퇴적학 분야에 성공적으로 활용되어 왔다(Baker, 1976; Culver *et al.*, 1983; Darmody, 1985; Madhavaraju *et al.*, 2022). 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope)이 널리 보급된 이후, SMQ 분석은 비교적 간단한 절차가 되었고, 여러 퇴적학적 해석을 위한 독립적 증거를 제시할 수 있게 되었다(Baker, 1976). 특히, 개별 석영 입자에 대한 정보를 기반으로 풍화작용, 입자 운반체제 및 퇴적환경 등 풍화단계 이후 시료채취 이전까지의 역사를 해석할 수 있다는 점은 이 분석기법만의 장점이라고 할 수 있다. 하지만 이러한 여러 장점들에도 불구하고, 우리나라 환경에서의 체계적인 SMQ 연구는 그동안 거의 이루어지지 못했다. 최근 들어 한탄강 유역 전곡리 선사유적지 퇴적층을 대상으로 SMQ 해석이 성공적으로 적용된 바 있으나(Baek and Jo, 2023), 한반도 전역의 다양한 지표환경에서의 후속 연구를 위해서는 SMQ에 대한 기본적인 이해가 전제되어야 한다. 따라서 이번 연구에서는 한반도 내 토양 및 퇴적물의 SMQ의 체계적인 이

해를 위해 현생 토양 환경에서의 SMQ 특징을 보고하고 석영입자에 기록된 토양화 및 풍화작용의 증거를 확인하고자 한다. 이와 같은 기초적인 연구 목적을 달성하기 위해 토양 침식 및 퇴적물 유입 등의 외부적 요인을 제한할 수 있는 지역을 선정하였으며, 매우 단순한 지형지질학적 조건을 보이는 강원도 춘천 분지 토양을 대상으로 연구를 수행하였다.

## 2. 연구지역

우리나라는 대륙과 해양의 영향을 동시에 받는 중위도의 지리적 특성 때문에 계절의 변화가 매우 뚜렷하다(Lee *et al.*, 2005). 기후에 민감한 식생의 분포를 이용하여 기후를 구분한 Köppen-Geiger 기후 분류에 의하면, 우리나라는 Dwa(하계 고온 대륙성; hot summer continental) 기후에 속해 있어 더운 여름과 춥고 건조한 겨울의 특징을 보인다. 특히, 여름철에는 동아시아 여름몬순과 장마전선의 영향으로 강수량이 집중되는 경향이 보인다(Park *et al.*, 2008). 연구지역인 강원특별자치도 춘천시의 지난 30년간(1991~2020년) 기후 자료를 종합해보면, 최고 기온의 평균값은 31.2°C, 최저 기온의 평균값은 -9.9°C이며, 연평균 기온과 연강수량은 각각 11.4°C, 1341.5 mm이다(그림 1a).

춘천시는 북쪽으로 화천군, 서쪽으로 가평군, 동쪽으로 홍천군과 접해 있고, 전체적으로 지름 약 10 km의 분지 지형을 이루고 있다(그림 1b). 분지 중심부의 평균 고도는 약 115 m로 화강암이 기반암을 이루는 반면, 둘러싼 산지는 평균고도 323 m의 편마암류로 이루어져 있다(Lee, D.S. *et al.*, 1974; Lee, G.R. *et al.*, 2022). 춘천 분지 주변 지역에는 극히 일부 지역에 한해 대리암과 규암 지역이 나타나기도 한다(Park *et al.*, 1974; 그림 1c). 춘천 분지는 외곽부 산지를 이루는 편마암과 분지 내부를 구성하는 화강암의 풍화 저항성 차이로 인한 차별침식의 결과(Kim and Kee, 2016)라는 의견이 지배적이지만, Lee *et al.* (1974)은 춘천 분지의 북서부와 남동부가 각각 고산지형과, 구릉지형이라는 대조적 차이를 보이며 부분적으로 단순한 차별침식 이외의 성인적 차이를 보인다고 언급한 바 있다.

분지 내부를 구성하는 화강암은 중생대 쥐라기 흑운모 화강암이며, 춘천화강암으로 명명된 독립 관입암체이다(Kim *et al.*, 2015). 춘천화강암은 풍화에 약한 특성으로 인해 심하게 침식되어 분지 내부는 대부분 사력토로 이루어져 있고 지표에서 변질 받지 않은 모암을 관찰하기 어렵다(Lee *et al.*, 1974; Lee and Lee, 2011).

시료 채취 지점은 강원대학교 캠퍼스 내에 위치한 교내 림으로, 춘천 분지 내에 남아있는 구릉지이며(Lee *et al.*, 1974; Kim and Kee, 2016), 도심에 위치하고 있으나 아직까지 개발되지 않은 녹지에 해당된다. 또한 시료 채취 지점

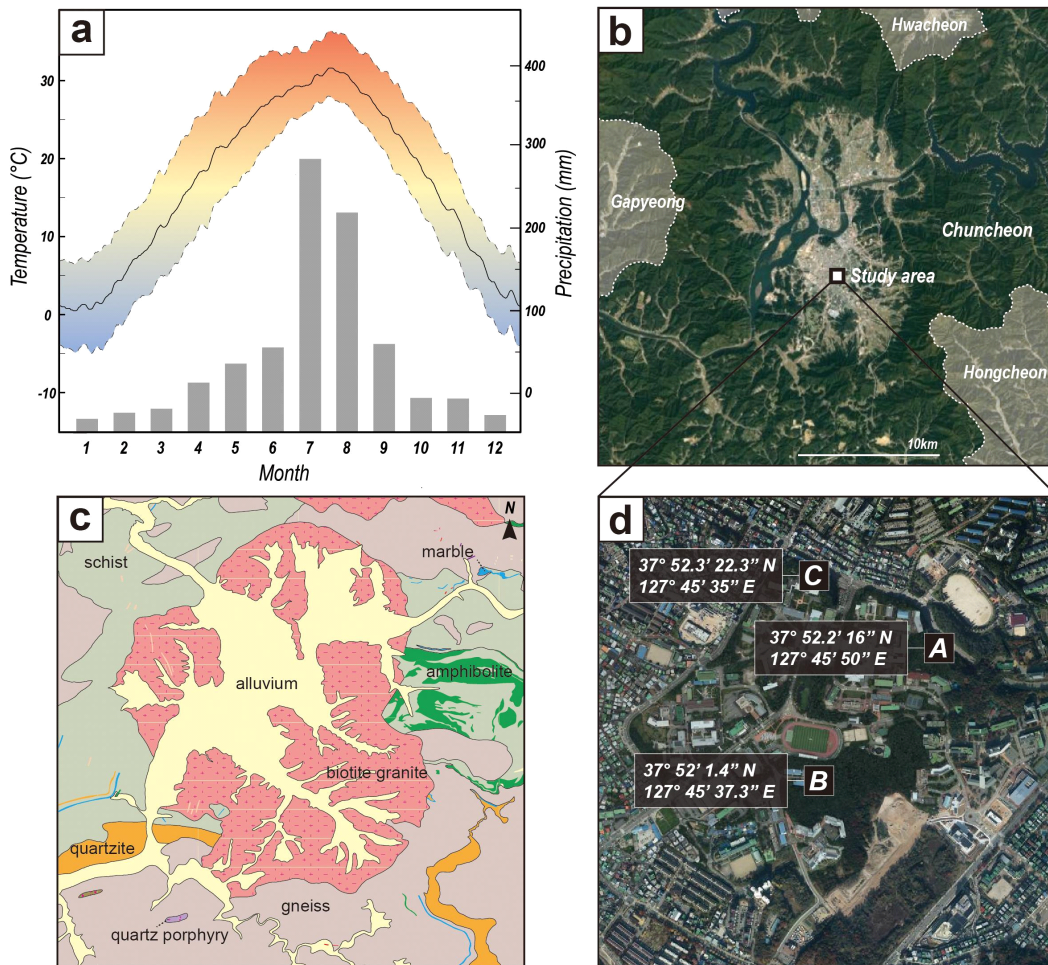
은 하천이나 강과 같은 수계와 연결되어 있지 않아 춘천화강암 외의 주변 암상에 대한 영향을 배제할 수 있다. 이런 점을 고려하여 토양 시료 채취 지점 세 곳을 선정하였다(그림 1d).

1975년 미국 농무부(USDA; United States Department of Agriculture)에서 발표한 토양 분류체계인 ‘Soil Taxonomy’는 토양 생성 발달의 결과인 감식 층위의 유무와 그 종류에 따라 최상위 분류 단위인 12목(order)으로 나누었는데(Soil Survey Staff, 1999), 시료 채취 지점의 토양은 인셉티졸(inceptisol)에 해당한다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 발간한 토양 환경지도에 따르면 인셉티졸은 토양의 층위가 발달하기 시작한 젊은 토양으로, 우리나라 전체 토양 중 약 69.2%를 차지하여 가장 우세하게 발달하는 토양목에 해당한다.

시료 채취 지점의 토양은 Soil Taxonomy에서 규정한 인셉티졸의 6개 아목(suborder)중에서도 Udepts (udic; 토양

수분상)토양에 속한다(그림 2a). Udepts 토양은 매우 넓은 범위의 pH (토양:중류수=1:1 측정기준 4.5-6.0)를 보이는 것으로 알려져 있다. 토양통(Soil series)은 토양 분류법의 최하위 단위로, 심토의 특성이 유사한 집합에 구별하기 쉽도록 이름을 붙인 것이다. 시료 채취 지점 A, B, C는 삼각통(samgag series)으로 불리는 사양토(sandy loam)로 구성되어 있으며, 화강암으로부터 기인한 풍화산물이 그 위에 그대로 쌓이는 잔적층(residual soil)에 해당한다. 따라서 춘천분지 내 평지와 구릉지가 대부분 춘천화강암의 사력토로 이루어져 있다는 점(Lee and Lee, 2011)과 이러한 특성의 토양을 춘천 분지에서 가장 넓게 분포하고 있는 삼각통으로 분류할 수 있다는 점에서 이번 연구의 시료 채취 지점은 춘천 분지 내부 토양으로서 대표성을 보인다고 할 수 있다.

시료 채취 지점의 토양 단면을 살펴보면 최상부에 나뭇잎과 나뭇가지 등 원형을 유지하는 식물 잔해물이 매년 집



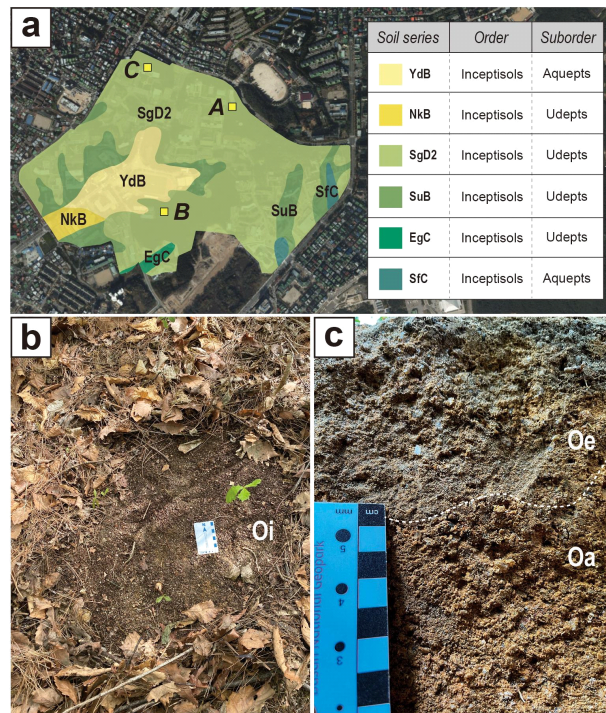
**Fig. 1.** Geological and climatic settings of the study area and sampling locations in the Chuncheon Basin. (a) Daily mean temperature and monthly mean precipitation from 1991 to 2020. Note that minimum and maximum values of daily mean temperatures are superimposed by dashed lines. (b) A satellite image of the Chuncheon Basin. (c) The geological map of the Chuncheon Basin. (d) A close-up image of the location in (b) and 3 soil sampling locations.

적되는 Oi층(L층; USDA, 1999)이 존재하고(그림 2b), 식물 파편의 부식이 진행되면서 색이 어둡게 나타나는 Oe층(F층)과 유기물 소멸로 적색을 띠는 Oa층(H층)이 차례로 관찰된다(그림 2c).

### 3. 연구방법

#### 3.1. 시료채취 및 박편 제작

야외조사 시 육안 상 최대한 인위적 교란이 없는 지점을 선정하고, 토양 단면을 확인하기 위해 Oi층에 해당하는 표층 약 3 cm 두께의 낙엽층을 제거하였다(그림 2b). 시료 채취 지점 A, B, C의 지표로부터 각각 -11 cm, -13 cm, -22 cm 부근에서 토양을 채취하였으며, 채취한 전 시료는 건조시킨 후 표준체를 이용하여 1 mm (0Φ) 이상 2 mm (-1Φ) 미만의 극조립 크기의 모래 입자만 추출하였다. 석영 입자의 인위적 파쇄 및 원조직 훼손 방지를 위해 자동 체질기를 사용하지 않았으며, 에폭시를 이용하여 고화처리(impregnation)를 진행하였다. 절단 후 800과 1200 연마제로만 박편에 힘이 가해지지 않게 연마하였으며, 석영 입자 내 파쇄 구조 유무를 검증하기 위해 석영입자를 포함한 복수의 대조군 박편을 동시 제작 및 관찰하였다.



**Fig. 2.** Soil classifications and images of the study area. (a) Soil classifications of the study area based on Soil Taxonomy from USDA (United States Department of Agriculture). (b) Oi layer observed in the ground surface of a sampling location. (c) A soil profile of a sampling location showing Oe and Oa layers.

#### 3.2. X-선 회절분석

박편과 편광현미경 상에서 광물입자 동정이 힘든 실트 크기 이하의 입자들은 그 조성을 확인하기 위해 X-선 회절분석(XRD; X-ray diffraction)을 실시하였다. 10% 염산을 이용하여 토양 시료 내 탄산염 물질을 제거하였으며, 원심 분리용 튜브(conical tube)에 옮겨 담아 증류수로 3회 이상 반복 세척하였다. 과산화수소수를 이용해서 같은 방식으로 유기물을 제거하였으며, 시료 건조 후 볼밀(ball mill; Spex SamplePrep, 8000D)을 이용하여 분쇄한 뒤, 원형 알루미늄 캐비티 마운트(cavity mount)에 분말 시료를 무작위 배열하였다. 2θ-3-90°의 스캔 범위에 대해 스캔 간격 0.01°, 분당 스캔 속도 10°의 조건으로 분석을 수행하였다. XRD는 강원대학교 내 강원 연계형 융합 이미징 특화센터에서 보유중인 XRD (Rigaku사의 Miniflex 600)를 사용하였다.

#### 3.3. SEM-EDS 분석

SMQ를 파악하기 위해 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope)분석을 실시하였으며, 시료 전처리 방식은 Vos *et al.* (2014)과 Baek and Jo (2023)의 절차를 따랐다. 건조시킨 시료에서 15% 염산을 사용하여 탄산염 광물을 제거하였으며, 증류수로 3회 이상 염산을 세척하고 같은 방식으로 50 g/L tetrasodium pyrophosphate를 이용하여 유기물을 제거하였다. 염산 세척과정과 동일하게 증류수로 3회 이상 세척을 반복한 뒤, 세척된 석영은 실체현미경으로 세척 상태를 재확인하였다. 그 중 30개 이상의 석영 입자를 무작위 선별한 뒤 카본테이프에 부착시켜 COXEM사의 이온코팅기(ion coater; SPT20)를 이용하여 300초, 5 mA 조건에서 Au 코팅을 실시하였다. 이번 연구에서 활용한 SEM은 COXEM사의 CX-200TM 모델이며, 실제 분석 시 관찰목적과 시료 조건에 따라 전자 빔의 크기를 7-10 nm로 조절하면서 100-10,000 배율에서 SE (secondary electron) 이미지 데이터를 획득하였다. 토양 시료라는 점을 감안하여 전처리 전후 모두 관찰하였으며, 그 결과를 상호 비교하였다. 추가적으로, 선별한 입자가 석영임을 검증하고 표면 부착물의 화학성분을 확인하기 위해 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy; EDAX E1091) 분석을 실시하였다. 시료 채취 지점 한 곳당 30개씩 총 90개의 입자를 관찰하였으며, SEM 분석을 위해 소요된 총 시간은 약 36시간 이상이다.

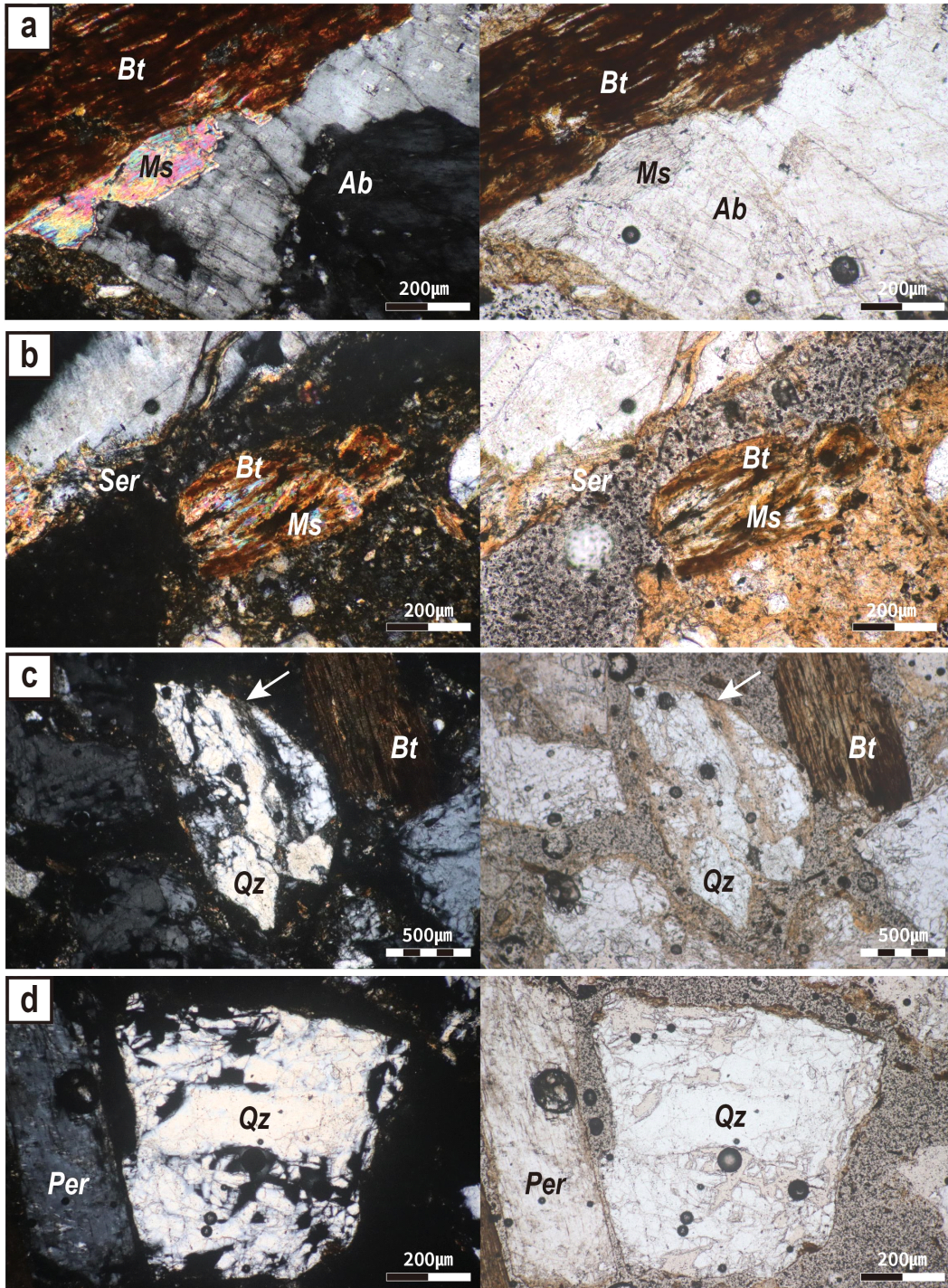
### 4. 연구결과

#### 4.1. 토양 구성광물 입자 및 풍화조직

연구지역의 토양 구성 광물 중 모래 크기의 입자들은 주로 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모, 자철석

으로 구성되며, 이는 기존 1:50,000 춘천 도폭과 1:50,000 내평 도폭 에서 설명하는 춘천화강암의 조암광물과 동일하다(Lee *et al.*, 1974; Park *et al.*, 1974). 하지만 토양으로부터 추출된 석영과, 장석 입자의 테두리를 따라 밝은 갈색의

이질 피복물(clay coating or silt cap)이 관찰되는 차이점이 있다(그림 3c). 사장석은 누대구조를 보이고, 정상석은 퍼싸이트(Perthite)로 산출되는 양상을 보이는데, 화학적 변질을 받아 장석 내부에 강한 권운모화가 진행된 경우도 존



**Fig. 3.** Photomicrographs of sand-sized mineral grains in soil of the Chuncheon Basin. Note that left hand images were produced on cross polarized light and right images are for open polarized light. (a) Biotite, muscovite and albite. (b) Sericite, biotite and muscovite. (c) Quartz and biotite. Arrows indicate mechanical microcracks within a quartz grain. (d) Perthite and quartz.

재한다(그림 3b). 석영 입자는 내부에 많은 미세균열이 존재하며, 이를 따라 입자 일부가 뜯겨져 나간 구조와 세립질 광물입자가 틈을 채운 구조가 관찰된다(그림 3c, 3d). 흑운모는 입자 내 결정면을 따라 백운모가 확인되며, 녹니석으로 부분 변질된 모습을 보이기도 한다(그림 3a, 3b). 정장석은 풍화에 의한 변질 특징이 미미하고 미사장석은 매우 드물게 관찰된다(그림 3a).

박편 및 XRD 패턴으로 확인되는 세립질 광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모, 카올리나이트, 녹니석으로, 기존 연구에서 확인된 춘천화강암의 풍화 이후 광물 조성과 거의 유사하다(Yu *et al.*, 1994). XRD 분석으로 확인되는 광물과 박편상에서 동정 가능한 광물이 거의 일치하지만, XRD 전암분석의 결과에서만 확인할 수 있는 카올리나이트는 주로 사장석 등 장석류와 흑운모의 풍화산물로 보인다(그림 4).

#### 4.2. 토양 SMQ 분석 결과

이번 연구에서는 세 곳의 시료 채취 지점에서 각각 30개의 석영 입자를 선별하여 총 90개의 입자에 대해 SMQ를 분석하였으며, 분석 시 미세조직의 발생 빈도는 무작위로 선택한 30개의 입자를 기준으로 산정하였다. 일부 관찰 빈도가 높은 표면미세조직과 그 특징은 다음과 같다.

먼저 윤곽선 특징(outline)의 경우, C지점 입자 두 개를

제외하고, 세 지점의 88개 석영 입자가 모두 angular outline을 나타내어 거의 모든 입자가 이에 해당한다. 나머지 두 개의 sub-angular outline으로 구분된 입자도 모서리의 마모 정도가 적어 angular에 가까운 특징을 보인다(e.g., Vos *et al.*, 2014; 그림 5a-5d). 그림 5c는 angular outline 석영입자 중 가장 sub-angular outline에 가까운 입자를 대변하며, 그림 5d는 두 개의 sub-angular outline 입자 중 angular outline에 가까운 입자를 나타낸 것이다.

석영 입자에서 가장 흔하게 발견되는 미세조직인 conchoidal fractures는 패각 모양의 파괴면으로, 석영 입자 표면에 강한 충격이나 압력이 가해졌을 때 형성되는 것으로 알려져 있다(Krinsley and Donahue, 1968; Doornkamp, 1974; Cardona *et al.*, 1997; Mahaney, 2002). 일반적으로 크기에 따라 large (>100  $\mu\text{m}$ ; 그림 5e), medium (>100  $\mu\text{m}$ ; 그림 5f), small (<10  $\mu\text{m}$ ) conchoidal fractures로 구분된다. A지점의 large conchoidal fractures의 발생 빈도가 73%, C지점의 large 및 small conchoidal fractures 빈도가 각각 50%와 70%로 나타났다는 점을 제외하면, A, B, C 지점 모두에서 모든 크기의 conchoidal fractures가 75% 이상으로 매우 우세한 것으로 나타났다. 추가적으로, conchoidal fractures 등 입자의 깨짐면 상에 흔히 형성되는 계단형의 미세조직인 arcuate/straight steps가 연구 지역 내 모든 지점에서 80-100%의 빈도로 극히 우세하게 발달해 있다(그

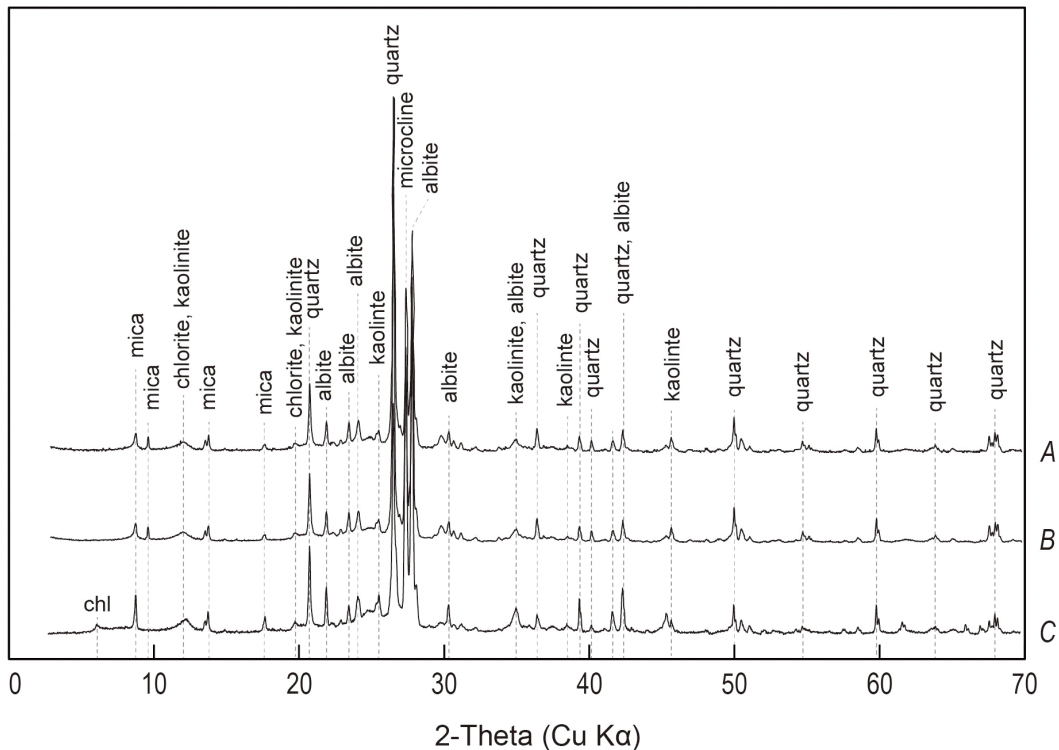
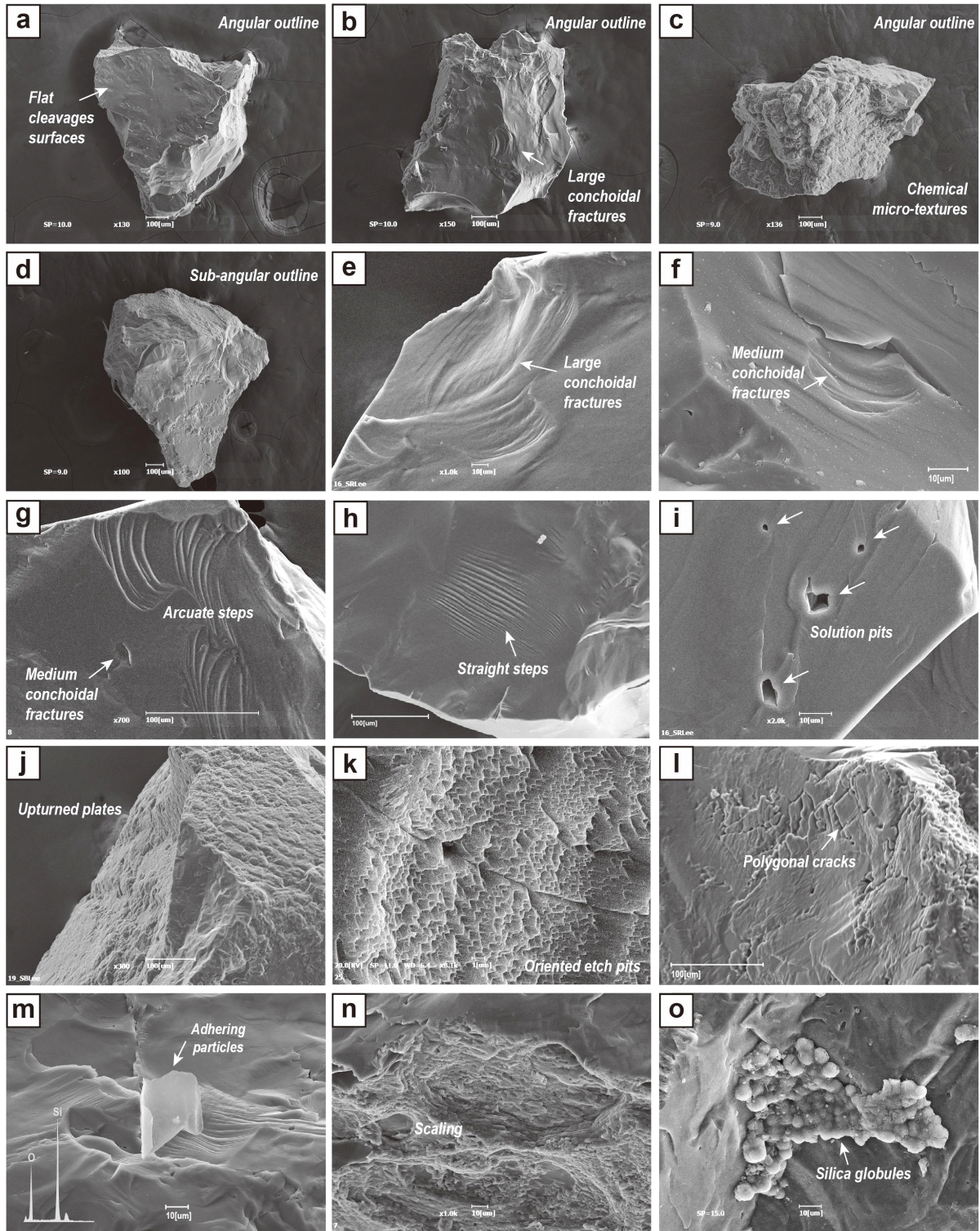


Fig. 4. XRD patterns of bulk soil samples from Location A, B and C.

립 5g, 5h). 이 외에도 upturned plates도 75% 이상의 높은 빈도를 나타내었다.

Solution pits는 A, B, C 지점에서 각각 87%, 73%, 90%로 역시 매우 우세한 발달을 보인다(그림 6). 이 미세조직



**Fig. 5.** Various types of soil SMQ in the Chuncheon Basin. (a-d) outline characteristics. (e-h) conchoidal fractures and arcuate/straight steps. (i) Solution pits. (j) Upturned plates. (k) Oriented etch pits. (l) Polygonal cracks. (m) adhering particles composed of silica materials (the inserted EDS result). (n) Scaling. (o) Silica globules.

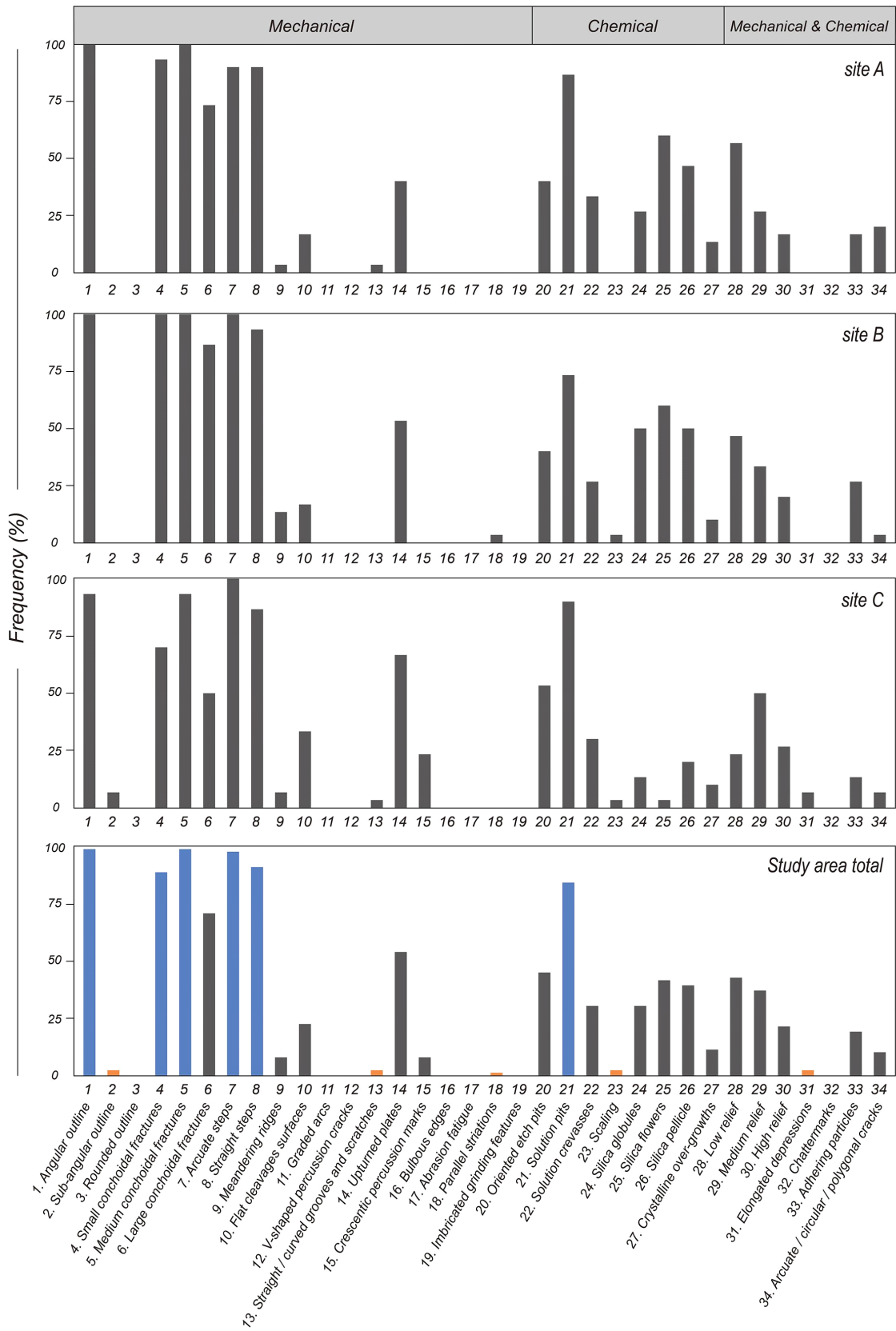


Fig. 6. Abundance diagrams of SMQ results from Location A, B and C. The lowermost diagram shows average occurrences of SMQ from all locations.



은 입자 표면에서 원형 내지 다각형 모양의 작은 구멍으로, 주변에 밝은 테가 보이는 것이 특징이다(Doornkamp, 1974).

춘천분지 토양 내 석영입자에서 관찰 빈도가 매우 우세한 편으로 분류되지는 않았으나, 흔히 속성환경을 지시하는 다양한 표면미세조직들이 다수 관찰되었다. 대표적으로는, oriented etch pits (그림 5k), polygonal cracks (그림 5l), adhering particles (그림 5m), scaling (그림 5n) 등이 있다(Biederman, 1962; Mahaney 2002; Vos *et al.*, 2014). 특히, 연구지역에서 관찰할수 있는 scailing은 입자 외곽부의 피복면이 벗겨지거나 붕괴된 조직을 잘 보여주는 등 타 지역에서 보고된 전형적인 특징을 잘 보존하고 있다(Krinsley and Doornkamp, 1973; Vos *et al.*, 2014). adhering particles는 EDS 분석을 통해 Si (67.74%), O (28.96%)로 이루어진 입자임을 확인하였다. 이들과 함께 규산 성분의 구형 침전물인 silica globules도 관찰되는데, 일반적으로는 0.05-0.25  $\mu\text{m}$  크기인 반면 연구지역에서는 이보다 상대적으로 크게 관찰되어 점차 성장하고 있는 형태를 보여주고 있다(Madhavarafu *et al.*, 2009; Vos *et al.*, 2014; 그림 5o).

종합하면, 춘천분지 토양 내 SMQ의 전체적인 특징은 매우 고빈도로 나타나는 일부 물리적 미세조직과 함께 속성환경 내에서 용해/침전작용 등에 의한 화학적 미세조직이 동시에 관찰되는 것으로 요약된다.

## 5. 토 의

### 5.1. 토양 구성광물의 물리화학적 풍화 수준

암석의 화학적 풍화 속도에 영향을 주는 다양한 요소 중 암종(lithology)은 가장 주요한 요인 중 하나이다(Garrels and Mackenzie, 1971; Bluth and Kump, 1994). 그 중에서도 모암이 화강암일 경우 화학적 풍화 민감도는 광물 종류에 따라 크게 다르게 나타나는데(Sverdrup and Warfvinge, 1995), 일반적인 토양 화학조성 그리고 동일한 온도압력 조건 하에서 화성암 조암광물의 풍화 저항도는 석영 > 백운모 > K장석 > 흑운모 > Na장석 > Ca장석 순이다(Goldich, 1938). 연구지역에서는 사장석과 흑운모에서 화학적 풍화에 의한 변질 흔적이 뚜렷이 관찰되었지만, 사장석의 광학적 특징이 비교적 잘 유지되어 있고, 부분적인 건운모화 외에는 별다른 화학적 변질 특성이 관찰되지 않는다. 이에 반해 정장석과 미사장석(K장석)은 화학적 변질 흔적이 거의 관찰되지 않았다. 이와 같은 관찰 결과는 춘천화강암 풍화 토양의 지화학적 특성에 대한 기존 연구 결과와 넓은 범위에서 부합한다고 볼 수 있다(Kim *et al.*, 2015). 기존 연구에서는 춘천화강암 토양의 주원소 함량을 분석하여 A( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )-CNK( $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )-FM( $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ ) 삼각도에 도시하였고, 춘천화강암 기원 토양의 화학적 풍화

정도는 칼슘과 나트륨의 용탈이 완전히 일어나지 않은 즉, 사장석의 화학적 풍화가 비교적 미약한 수준이라고 평가한 바 있다.

흑운모는 토양에 존재하는 풍화광물의 모광물로서 매우 중요하게 인식된다(Kretzschmar *et al.*, 1997). 흑운모는 풍화 정도에 따라 녹니석, 스�멕타이트, 일라이트, 버미클라이트, 카올리나이트, 킴철석 등 여러 변질상을 나타내게 되는데, 연구지역 토양 내 흑운모는 박편상에서 관찰되는 일부 녹니석화로 그 풍화정도를 확인할 수 있다. 그러나 연구지역 토양물질의 XRD 분석으로 확인되는 카올리나이트 중 일부가 udepts 토양의 매우 강한 산성 조건에 의해 흑운모로부터 생성되었을 가능성도 배제할 수 없다(Wilson, 1966; Kim and Jang, 2006).

연구지역의 석영입자 내부에서는 다수의 미세 균열이 관찰되었으며(그림 3d), 이러한 미세 균열 특징은 반복적인 대조군 시편 확인 검증에 의해 연구지역 토양 내 석영입자에 가해진 물리적 풍화작용에 기인한 것으로 해석된다(Asumadu *et al.*, 1988). 무엇보다, 이 해석은 일부 미세 균열면 사이에서 진행된 화학적 풍화 조직 혹은 입자 외부로부터 공급된 풍화부산물이 채워져 있는 특징을 통해 재확인할 수 있다(그림 3c). 춘천분지 토양의 석영과 장식 입자에서 흔히 관찰할 수 있는 미세 균열의 생성원인으로는 반복적 토양 동결에 의한 결빙압력(cyrostatic pressure)과 이후의 용해로 인한 결과로 해석된다(Brewer, 1968).

Darmody (1985)는 석영입자 표면조직을 통한 풍화수준 분류(weathering classification of quartz grains)를 제안하였으며, 그는 물리적 풍화작용을 지시하는 조직(conchoidal fracture; sharp edges and angular grains; clean and smooth fracture or cleavage faces; high relief; arc-shaped steps)과 화학적 풍화를 지시하는 조직(oriented or random etch pits; hairline crack; subdued edges and rounded grain; precipitation or solution of silica; scaling or surface roughness)을 각각 5개씩 지정한 뒤, 각 입자에 대한 weathering/freshness 비율을 계산함으로써 나누었다(그림 7). 연구지역의 세 지점에서 각각 입자 10개를 선정하여 총 30개의 석영입자를 연구지역 전체의 표본으로 지정한 뒤 적용해보았을 때, 분석한 토양 시료들은 평균적으로 중간 풍화(somewhat weathered)를 받은 것으로 나타났다. 하지만 세 지점을 서로 비교해보면 A와 B지점은 유사한 조합을 보여 서로 유사한 풍화 정도를 나타내지만, C지점은 물리적 풍화작용을 지시하는 조직이 A와 B지점에 비해 더 많이 산출되는 것으로, 비교적 높은 물리적 풍화 수준을 보였다. 이러한 지점별 차이는 지엽적 지형 차이 혹은 기타 토양 풍화에 영향을 미칠 수 있는 식생, 토양 수분, 미세한 암석학적 차이에서 기인했을 수도 있으나, 좀 더 자세한 원인을 규명하기 위해

서는 더 높은 공간적 해상도의 시료채취 및 SMQ 분석이 필요하다.

위와 같은 풍화작용에 대한 해석을 종합하면, 연구지역의 토양은 중간수준 이하의 화학적 풍화 수준을 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 화학적 풍화보다는 동절기 기후환경에 지배된 물리적 풍화작용이 다소 우세한 환경으로 인식된다. Lee *et al.* (2022)은 화강암 침식 분지인 춘천, 원주, 영주, 보은 지역을 대상으로 지표 기복 형성 요인을 비교한 결과, 춘천화강암이 다른 분지에 비해 풍화 저항성이 낮은 장석의 함량이 높기 때문에 지표 삭박 작용이 활발하게 발생하였다고 한 바 있다. 이처럼 인식된 화학적 풍화 수준이 다소 낮다고 하더라도, 이는 춘천분지의 현재 기후환경 조건 하에서 실제 가능한 화학적 풍화 정도를 나타내는 것이 아닌 성숙한 토양 물질 생성 이전 신속한 지표 침식에 기인했을 가능성도 존재하므로 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**5.2. 춘천분지 토양 SMQ에 기록된 동결-용해작용**

이번 연구의 시료채취 지점은 구릉성 산지의 능선부에 해당하는 잔류 녹지로, 토양화에 따라 기반암으로부터 석영 입자의 분리 이후 자유공간 내 물리적 물리적 이동이 거의 없는 전형적인 토양 환경에 속한다. 따라서 석영 입자 표

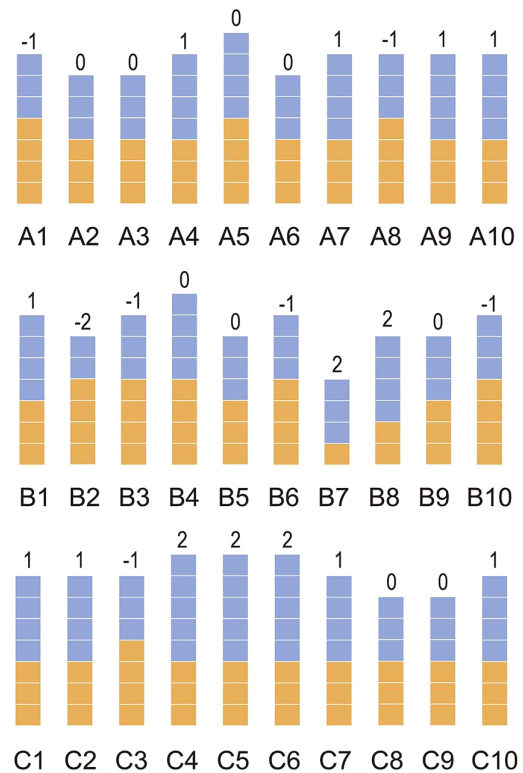
면에 물리적 조직을 형성시킨 주된 원인으로서, 포행이나 동결-용해작용과 같이 운반매체(transportation agents)가 관여하지 않는 환경조건으로 한정할 수 있다. 이러한 작용은 기존 연구에서도 관찰된 바 있는데(Woronko and Hoch, 2011), 석영 입자의 미세 균열 사이로 물이 침투한 뒤 동결되어 균열을 확장시키면서 물리적 미세조직이 발생된다(Lautridou and Ozouf, 1982).

실제로 춘천 지역 토양 시료로부터 관찰한 SMQ에서도 그 동안 동결-용해작용으로 형성되는 것으로 알려져 있는 물리적 미세조직이 우세하게 관찰된다. Woronko and Jamrozý (2016)는 breakage blocks, small conchoidal fractures, surface under scaling, microsteps를 동결-용해작용의 가장 특징적인 조직으로 보고하였다(그림 8). 이들 중 microsteps는 동결-풍화작용을 촉진시킬 수 있는 미세조직 중 하나로, microsteps 내에서 동결-용해작용이 발생하여 30 µm 이내의 conchoidal fractures를 형성시킬 수 있다(그림 8a, 8b). Breakage blocks는 입자-입자 사이 접촉면에서 강한 압력이 작용하여 표면에 압축 파쇄 흔적과 함께 주변에서 미세 파편이 관찰되는 조직을 의미한다. 여기에 더해, solution crevasses (그림 8c), dissolution textures (그림 8e), silica precipitation (그림 8f)과 같은 미세조직의 표면 틈을 따라 물이 침투해 동결 및 부피팽창에 이어 입자표면의 일부분을

Feature	Point value
Conchoidal fractures	1
Sharp edges and angular grains	1
Clean and smooth fracture or cleavage faces	1
High relief	1
Arc-shaped steps	1
Oriented or random etch pits	-1
Hairline cracks	-1
Subdued edges and rounded grain	-1
Precipitation or solution of silica	-1
Scaling or surface roughness	-1

Class	Score
1. Highly weathered	-4, -5
2. Weathered	-2, -3
3. Somewhat weathered	1, 0, -1
4. Slightly weathered	3, 2
5. Essentially unweathered	5, 4



**Fig. 7.** The estimation of the level of chemical weathering from SMQ. Each quartz grain (A1-10; B1-10; C1-10) has been scored by the point values assigned to characterized microtextures for chemical weathering.

분해하기도 하는 것으로 알려져 있다(Woronko and Jamrozý, 2016).

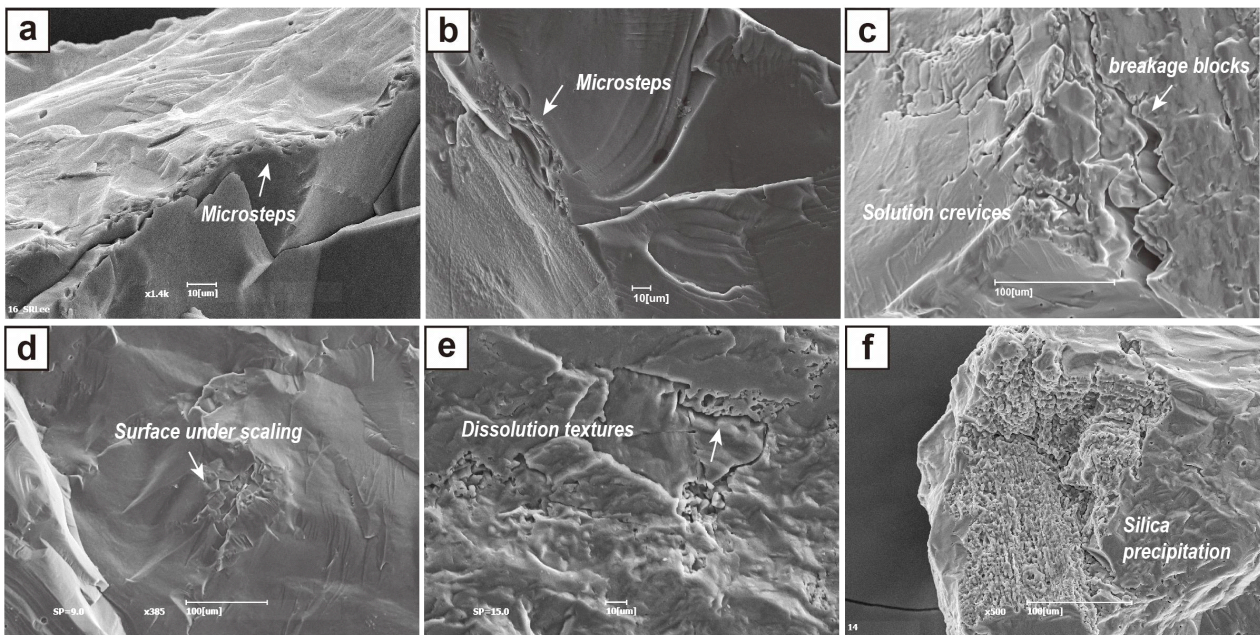
Surface under scaling은 동결-용해의 반복에 의해 형성되기도 하는 조직으로, 이번 연구에서 분석한 토양 시료에서도 흔히 관찰할 수 있다(그림 8d). 이와는 별도로, conchoidal fractures와 angular outline 역시 수십 내지 수백  $\mu\text{m}$  규모의 미세 공간에서의 동결썩기작용에 의해 형성될 수 있는 미세조직들이다(Krinsley and Donahue, 1968; Margolis, 1968; Doornkamp, 1974; Eswaran and Stoops, 1979; Konishchev and Rogov, 1993; Woronko and Hoch, 2011; Woronko, 2016; Woronko and Jamrozý, 2016). Góska and Woronko (2022)는 실험실 내에서 석영 입자에 반복적인 동결-용해를 가하여 medium conchoidal fractures-small conchoidal fractures-breakage blocks의 순차적인 순환을 관찰한 바 있다. 하지만 conchoidal fractures와 angular outline은 거의 모든 퇴적 및 토양 환경에서 부분적으로 형성될 수 있는 다중 기원의 미세조직으로서, 기반암으로부터 석영입자가 분리됨과 동시에 형성되었음을 배제하기 어려운 것도 사실이다(Eswaran and Stoops, 1979).

그러나 운반매체의 관여가 없었을 것으로 판단되는 연구지역의 지형지질학적 조건을 감안하고, breakage blocks와 microsteps 등 SMQ 조합에 의하면 반복적 동결-용해와 관련된 물리적 작용에 의해 형성되었을 가능성이 높다. 실제로, Yang (2011)은 우리나라 기후환경에서 24시간 이내에  $10^\circ\text{C}$  이상 기온이 하강하여 영하에 이르는 겨울철 한파

가 약 2일 정도만 지속되어도 토양 표면으로부터 하부 15 cm 이상 동결될 수 있다고 하였으며, 1981-2010년 동안의 기상청 데이터를 이용하여 평가하면 춘천지역의 결빙횟수가 107회 나타난다고 언급한 바 있다. 또한, 춘천시의 30년(1991-2020년) 최저 기온 평년 값을 보면 11월부터 3월까지 132일 동안  $0^\circ\text{C}$  이하의 기온을 보였고, 그 중 116일 동안  $10^\circ\text{C}$  이상의 기온 하강이 발생하였다(그림 1a). 따라서 연구지역의 기후 조건 역시 동결-용해작용에 의한 SMQ 형성에 매우 유리한 환경을 제공하고 있다고 할 수 있다.

### 5.3. 토양 SMQ 결과의 의미

토양 내 모래 크기의 석영 입자는 다른 광물에 비해 물리·화학적으로 안정한 편이지만, 토양 환경에 따라 용해되거나 물리적으로 변형되기도 하므로 토양 형성 연구의 지시 광물로서 활발히 이용되어 왔다(e.g., Barshad, 1965). 이번 연구에서 분석한 춘천화강암 기원 토양의 석영입자는 다양한 SMQ 특징을 보이고 있다. 분석결과를 요약하면, 높은 빈도(>75%)로 산출된 미세조직은 물리적 작용에 의해 형성되는 것으로 알려져 있는 유형들이 보다 우세한데, 이들은 angular outline, large/medium/small conchoidal fractures, arcuate/straight steps, upturned plates이다. 화학적 작용에 의한 미세조직 중 높은 산출 빈도에 해당하는 것은 solution pits가 유일하다. 물리적 작용과 관련된 SMQ가 매우 우세하게 나타났다는 사실은 앞서 토양 내 존재하는 광물입자의 풍화 정도로부터 간접적으로 추정된 물리적 풍화 우세



**Fig. 8.** The characterized SMQs in soil of the Chuncheon Basin. (a) and (b) microsteps. (c) breakage blocks. (d) surface under scaling. (e) etched and dissolved microtextures. (f) silica precipitation.

현상과 부합하는 결과로 볼 수 있다. 이와 반대로 극히 낮은 빈도(<5%)의 물리적 미세조직으로는 graded arcs, bulbous edges, abrasion fatigue, imbricated grinding features, elongated depressions, chattermarks가 있는데, 이들은 모두 유수 혹은 바람 등 퇴적물 운송 매개수단(transportation agents)에 의해 생성되는 미세조직들로 입자의 자유공간 이동이 거의 없는 연구지역의 지형지질학적 조건을 고려했을 때 주변환경을 잘 대변하는 것으로 볼 수 있다. 이외에도 oriented etch pits와 silica globules 등 용해 및 침전작용에 의한 미세조직이 중간 빈도(25-50%)로 산출되는데, 이러한 결과는 토양환경의 석영입자로서의 특징을 잘 반영하는 결과인 것으로 해석된다.

이 연구의 SMQ 결과를 한반도 타 지역 내지 동아시아 주변 지역으로부터 보고된 연구결과와 비교하기 위해 Kitagawa *et al.* (1994)와 대비하였다. 그 결과, 부산 지역 불국사화강암, 일본 히로시마 지역의 히로시마화강암 그리고 시마네 현 산인화강암 기원 토양에 비해 춘천 지역의 토양 SMQ 결과에서 solution pits와 oriented pits 등 속성환경에서 입자표면의 화학적 부식을 의미하는 SMQ가 낮은 편으로 나타났다. 이러한 차이는 춘천 지역과 비교 대상 지역 사이의 연평균 및 계절적 기온과 강수량에 기인하는 것으로 추정할 수 있다.

또한, Vos *et al.* (2014)이 정리한 SMQ 환경 해석을 참고하면(그림 9), 춘천 지역 토양 SMQ 중 물리적 미세조직의 조합은 빙하환경에서의 물리적 미세조직의 조합과 유사한 경향을 보이는데 반해, 화학적 혹은 물리화학적 미세조직은 속성/변질환경의 미세조직 조합과 유사하게 나타났다. 이와 같은 결과는 이 연구에서 분석한 시료가 속성/변질환경 조건에 놓여 있는 토양 시료라는 점과 지속적으로 동결-용해작용이 반복적으로 발생될 수 있는 기후환경이라

는 점과 부합하는 결과로 볼 수 있다. 따라서 이 연구의 SMQ 결과는 기존 전 세계적인 SMQ 결과 내에서 잘 일치하는 결과로 생각되며, 한반도 내에서의 SMQ 분석을 토대로 동결-용해작용 등 환경해석 및 입자 기원 추적 연구의 가능성을 제시하고 있다.

결론적으로 연구지역의 토양 SMQ는 기후 및 존속 환경에 주요한 지배를 받아 특징적인 미세조직을 나타내는 것으로 보인다. 특히, 토양 풍화수준을 지시하는 구성광물의 조직적 특징과 함께 고려한다면 물리적 풍화의 활성도가 상대적으로 우세한 환경을 지시한다고 할 수 있다. 이러한 물리적 풍화 우세 현상은 토양의 동결-용해작용이 매해 발생될 수 있는 기후 조건에 기인하는 것으로 보인다. 반면, 전형적인 토양의 속성변질조건에 의해 화학적 내지 물리화학적 SMQ를 동시에 기록하는 특징을 나타내는 것으로 판단된다.

### 6. 결론

이 연구는 한반도 내 토양 및 퇴적물 SMQ의 체계적인 이해를 목적으로 강원도 춘천 분지 토양 SMQ를 분석하였다. 모래 크기 이상 입자를 추출하여 풍화조직을 분석한 결과, 연구지역의 토양은 주로 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모, 자철석으로 구성되어 있으며, 이들 중 사장석의 경우 가장자리를 따르는 견운모화 작용과 일부 흑운모로부터 변질된 녹니석을 관찰할 수 있었다. 정장석과 미사장석의 경우 변질조직을 관찰할 수 없었다. 거의 모든 구성광물 입자로부터 미세 균열이 밀도 높게 발달하고 있다는 사실을 통해 물리적 압력이 가해졌음을 확인할 수 있었다. SMQ 분석 결과의 가장 주요한 특징으로 물리적 기원의 미세조직은 동결-용해작용에 의한 SMQ 조합을 두

	Mechanical														Chemical										Mechanical and Chemical									
	1. Angular outline	2. Subangular outline	3. Rounded outline	4. Small conchoidal fractures (<10µm)	5. Medium conchoidal fractures (<100µm)	6. Large conchoidal fractures (>100µm)	7. Arcuate steps	8. Straight steps	9. Meandering ridges	10. Flat cleavage surfaces	11. Graded arcs	12. V-shaped percussion cracks	13. Straight/curved grooves and scratches	14. Upturned plates	15. Crescentic percussion marks	16. Bulbous edges	17. Abrasion fatigue	18. Parallel striations	19. Imbricated grinding features	20. Oriented etch pits	21. Solution pits	22. Solution crevasses	23. Sealing	24. Silica globules	25. Silica flowers	26. Silica pellicle	27. Crystalline overgrowths	28. Low relief	29. Medium relief	30. High relief	31. Elongated depressions	32. Chattermarks	33. Adhering particles	34. Arcuate/circular/polygonal cracks
Glacial	■	-	-	■	■	■	■	■	●	▲	-	●	▲	●	-	-	▲	■	▲	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	■	-	■	▲	-	
Diagenetic/Alteration	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	■	▲	▲	-	-	-	▲	▲
This study (Soil)	■	-	-	■	■	▲	■	■	●	●	-	●	-	▲	●	-	-	-	-	●	■	●	-	●	●	●	●	●	●	●	-	-	●	●

Fig. 9. Environmental interpretation of SMQ. The figure was modified from Vos *et al.* (2014).

렷하게 반영하는데 반해, 화학적 내지 물리화학적 기원의 미세조직은 전형적인 토양 환경을 지시하고 있다는 점이다. 특히, 춘천 지역의 기후적 특성은 연구지역의 토양 SMQ에서 물리적 기원의 미세조직이 우세하게 산출될 수 있도록 작용한 주요 요인이었을 것으로 평가된다. 이 연구의 결과는 춘천분지의 기후지형지질학적 조건에 따라 화강암을 모암으로 하는 풍화 토양의 SMQ 특징을 보여주며, 이는 한반도 내에서도 각 지역 별 조건에 따라 토양 SMQ의 특징이 분별될 수 있는 가능성을 암시한다. 향후 지속적인 SMQ 정보 체계화를 통해 지역 별 차이를 규명해 나간다면 폭넓은 다학제적 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2023년 대한민국 교육부와 한국연구재단 중견연구과제(NRF-2023R1A2C1006352) 지원을 받아 수행되었다. 또한, 이 연구는 부분적으로 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 일환으로 수행되었다(RS-2023-00260267).

### REFERENCES

Asumadu, K., Gilkes, R.J., Armitage, T.M. and Churchward, H.M., 1988, The effects of dchemical weathering on the morphology and strength of quartz grains-an example from SW Australia. *Journal of Soil Science*, 39, 375-383.

Back, S. and Jo, K.N., 2023, Surface microtextures of quartz grains and minor sedimentary components across the Paleolithic Jeongok-ri sediments, Yeoncheon, South Korea. *Journal of Quaternary Science*, 1-17.

Baker, H. W., 1976, Environmental sensitivity of submicroscopic surface textures on quartz sand grains; a statistical evaluation. *Journal of Sedimentary Research*, 46, 871-880.

Barshad, I., 1965, Thermal Analysis Techniques for Mineral Identification and Mineralogical Composition. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 699-742.

Biederman, E.W., 1962, Distinction of shoreline environments in New Jersey. *Journal of Sedimentary Research*, 32, 181-200.

Bluth, G.J.S. and Kump, L.R., 1994, Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 2341-2359.

Brewer, R., 1968, Clay illuviation as a factor in particle-size differentiation in soil profiles. *Transactions of the 9th International Congress on Soil Science*, Angus and Robertson, London, 89-499.

Bull, P.A. and Morgan, R.M., 2006, Sediment Fingerprints: A forensic technique using quartz sand grains. *Science and Justice*, 46, 107-124.

Cardona, J.P.M., Mas, J.M.G., Bellón, A.S., Aguayo, F.L. and Caballero, M.A., 1997, Provenance of multicycle quartz arenites of Pliocene age at Arcos, southwestern Spain. *Sedimentary*

*Geology*, 112, 251-261.

Culver, S.J., Bull, P.A., Campbell, S., Shakesby, R.A. and Whalley, W.B., 1983, Environmental discrimination based on quartz grain surface textures: a statistical investigation. *Sedimentology*, 30, 129-136.

Darmody, R.G., 1985, Weathering assessment of quartz grains: a semiquantitative approach. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1322-1324.

Doornkamp, J.C., 1974, Tropical Weathering and the Ultra-Microscopic Characteristics of Regolith Quartz on Dartmoor. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 56, 73-82.

Douglas, A.D. and Platt, D.W., 1977, Surface Morphology of Quartz and Age of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 641-645.

Eswaran, H. and Stoops, G., 1979, Surface Teztures of Quartz in Tropical Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 420-424.

Garrels, R.M. and Mackenzie, F.T., 1971, Evolution of sedimentary rocks. Norton, New York.

Goldich, S.S., 1938, A Study in Rock-Weathering. *The Journal of Geology*, 46, 17-58.

Górska, M.E. and Woronko, B., 2022, Multi-stage evolution of frost-induced microtextures on the surface of quartz grains - An experimental study. *Permafrost and Periglacial Processes*, 33, 470-489.

Kim, J.J. and Jang, Y.D., 2006, Characterization of Weathering Process in Biotite Gneiss and Granite, Ganghwa Island. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 19, 39-48 (in Korean with English abstract).

Kim, Y.R. and Kee, K.D., 2016, Chemical Weathering Characteristics and CIA of Granitic Grus developed in Chuncheon Basin, Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 23, 71-81 (in Korean with English abstract).

Kim, Y.R., Kee, K.D. and Yang, J.H., 2015, Chemical Weathering Characteristics of Granitic Grus developed in Basin, Southern Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 22, 27-40 (in Korean with English abstract).

Kitagawa, R., Köster, H.M., Hwang, J.Y., Zaikow, V.V. and Udachin, V.N., 1994, Scanning Electron Microscope Examination of Quartz Surface Textures from Kaolinized Granitic Rocks. *Journal of science of the Hiroshima University, Series C, Earth and Planetary sciences*, 10, 159-172.

Konishchev, V.K. and Rogov, V.V., 1993, Investigations of Cryogenic Weathering in Europe and Northern Asia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 4, 49-64.

KSIS (Korea Soil Information System), 2010, Rural Development Administration. <https://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp> (July 19, 2023).

Kretzschmar, R., Robarge, W.P., Amoozegar, A. and Vepraskas, M.J., 1997, Biotite alteration to halloysite and kaolinite in soil-saprolite profiles developed from mica schist and granite gneiss. *Geoderma*, 75, 155-170.

Krinsley, D. and Takahashi, T., 1962, Surface Textures of Sand Grains: An Application of Electron Microscopy. *Science*, 135, 923-925.

Krinsley, D.H. and Donahue, J., 1968, Environmental Interpretation

- of Sand Grain Surface Textures by Electron Microscopy. Geological Society of America Bulletin, 79, 743-748.
- Krinsley, D.H. and Doornkamp, J.C., 1973, Atlas of sand grain surface textures. Univ. Press Cambridge, Cambridge, 91 p.
- Lautridou, J.P. and Ozouf, J.C., 1982, Experimental frost shattering: 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 6, 215-232.
- Lee, D.S., Nam, K.S., Lee, H.Y. and Yang, S.Y., 1974, Geological report of the Chuncheon sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea, 52 p (in Korean).
- Lee, G.R., Park, C.S., Lee, H.B. and Jeong, J.Y., 2022, Analysis on Surface Relief of Granitic Erosional Basin in the Middle Part of the Korean Peninsula -A Case Study on the Chuncheon, Wonju, Yeongju and Boen Basins-. Journal of the Korean Geomorphological Association, 29, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K. and Lee, J.K., 2011, Structural features across a fault zone of the Basin Baehuryeng fault at Chuncheon, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 379-394 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., Heo, I., Lee, K. and Kwon, W.T., 2005, Classification of Local Climatic Regions in Korea. Korean Journal of the Atmospheric Sciences, 41, 983-995 (in Korean with English abstract).
- Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K. and James, R.A., 2022, Microtextures on quartz grains from the Gulf of Mexico and the Mexican Pacific coastal sediments: Implications for sedimentary processes and depositional environment. Journal of Palaeogeography, 11, 256-274.
- Madhavaraju, J., Barragán, J.Y., Juan, C., Hussain, S.M. and Mohan, S.P., 2009, Microtextures on quartz grains in the beach sediments of Puerto Peñasco and Bahia Kino, Gulf of California, Sonora, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 367-379.
- Mahaney, W.C., 2002, Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford University Press, New York, 237 p.
- Margolis, S.V., 1968, Electron microscopy of chemical solution and mechanical abrasion features on quartz sand grains. Sedimentary Geology, 2, 243-356.
- Park, C., Moon, J.Y., Cha, E.J., Yun, W.T. and Choi, Y., 2008, Recent Changes in Summer Precipitation Characteristics over South Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 43, 324-336 (in Korean with English abstract).
- Park, H.I., Jang, K.H., Ji, J.M. and Ko, I.S., 1974, Geological report of the Naepyeong sheet (1:50,000), Geological and Mineral Institute of Korea, 46 p (in Korean).
- Power, T., Smith, B.J. and Whalley, W.B., 1990, Fracture Patterns and Grain Release in Physically Weathered Granitic Rocks. Developments in Soil Science, 19, 545-550.
- Soil Survey Staff, 1999, Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture Handbook, 436.
- Sparks, D.L., Singh, B. and Siebecker, M.G., 2022, Environmental soil chemistry. 2nd ed, Academic Press, San Diego, 449.
- Sverdrup, H. and Warfvinge, P., 1995, Critical loads of acidity for Swedish forest ecosystems. Ecological Bulletins, 44, 75-89.
- Vos, K., Vandenbergh, N. and Elsen, J., 2014, Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. Earth-Science Reviews, 128, 93-104.
- Wilson, M.J., 1966, The weathering of biotite in some Aberdeenshire soils. Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society, 36, 1080-1093.
- Wilson, M.J., 2020, Dissolution and formation of quartz in soil environments: a review. Soil Science Annual, 71, 99-110.
- Woronko, B., 2016, Frost weathering versus glacial grinding in the micromorphology of quartz sand grains: Processes and geological implications. Sedimentary Geology, 335, 103-119.
- Woronko, B. and Hoch, M., 2011, The Development of Frost-weathering Microstructures on Sand-sized Quartz Grains: Examples from Poland and Mongolia. Permafrost and Periglacial Processes, 22, 214-227.
- Woronko, B. and Jamroz, M.P., 2016, Micro-Scale Frost Weathering of Sand-Sized Quartz Grains. Permafrost and Periglacial Processes, 27, 109-122.
- Yang, J.H., 2011, The Effect of a Freeze-Thaw Cycle on Rock Weathering: Laboratory Experiments. Journal of the Korean Geomorphological Association, 18, 21-36 (in Korean with English abstract).
- Yu, J.Y., Choi, I.K. and Kim, H.S., 1994, Geochemical Characteristics of the Surface Water depending on the Bed Rock Types in the Chuncheon Area. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 307-324 (in Korean with English abstract).