

## 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구

이창섭<sup>1\*</sup> · 조태진<sup>2</sup> · 이상배<sup>3</sup> · 원경식<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(주)동해이엔지, <sup>2</sup>부경대학교 환경탐사공학과, <sup>3</sup>부경대학교 응용지질학과, <sup>4</sup>지오텍컨설턴트(주)

### A Study of Weathering Characteristic of Baeknokdam Trachyte in Jeju Island

Chang-Sup Lee<sup>1\*</sup>, Tae-Chin Cho<sup>2</sup>, Sang-Bae Lee<sup>3</sup>, and Kyung-Sik Won<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Donghae Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup>Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

<sup>3</sup>Dept. of Applied Geology, Pukyong National University

<sup>4</sup>Geotech Consultant Co., Ltd.

한라산 정상부의 백록담 암체는 백록담조면현무암이 분포하는 동측구역과 한라산조면암이 분포하는 서측구역으로 구분된다. 백록담에서 진행되는 풍화, 암벽붕괴, 낙반은 전반적으로 백록담 서측구역에 분포하는 한라산 조면암의 풍화작용과 밀접한 연관성을 가지며, 동측구역에서는 개별 암석 블록들의 국지적 붕락현상이 발생한다. 본 연구에서는 한라산조면암 분포지역의 지질학적 및 지형학적 특성을 조사하였으며, 풍화단계별로 조면암 시료를 채취하여 편광현미경분석, X-선 회절분석, 전자현미경관찰, 지화학분석, 공학적 물성시험 등을 수행하였다. 실험결과에 의거하여 한라산조면암의 광물·암석학적 특성변화, 화학적 특성변화와 물리적 특성변화를 분석하였으며, 백록담을 구성하는 조면암체의 풍화특성과 원인을 조사하여 풍화 메커니즘을 고찰하였다.

**주요어** : 백록담, 조면암, 기계적 풍화작용, 풍화 메커니즘

Baeknokdam rock mass at the crest of Halla mountain is composed of Baeknokdam trachybasalt in the eastern region and Hallasan trachyte in the western region. On-going weathering, rockfall and collapse of Baeknokdam wall rock are closely linked to the weathering of trachyte distributed in the western region of Baeknokdam, though within the restricted area of eastern region trachybasalt blocks has been naturally formed and may be rolled down. In this study geology and topography of Baeknokdam area has been investigated. Also, specimens of Hallasan trachyte exhibiting the different stages of weathering process has been collected and polarization microscope analysis, X-ray diffraction analysis, electronic microscope analysis, geochemical analysis and experiments for detecting engineering properties have been conducted. Based on the results of these experiments variations of mineralogical-petrographical characteristics of trachyte together with chemical and physical properties with respect to the degree of weathering have been analyzed. Weathering mechanism of Baeknokdam trachyte has been delineated by investigating the environmental cause of weathering and the peculiar features of weathered rock mass.

**Key words** : Baeknokdam, trachyte, mechanical weathering, weathering mechanism

## 서 론

제주도는 대한해협의 남서단에 위치하며, 평면도상에서 장축은 약 74 km, 단축은 약 32 km의 타원형으로, 해발고도 1,950 m의 한라산을 중심으로 원추형의 단면

을 보여준다(Fig. 1). 제주도의 지질에 관한 연구는 Haraguchi(1930) 이후 김옥준 외(1965), 농업진흥공사(1971), 원종관(1975), 윤선(1995), 박기화 외(1998, 2000) 등에 의해 수행되었으며, 백록담의 지질은 박기화 외(2000), 고정선 외(2003), 윤선 외(2005) 등에 의해 수행되었다.

\*Corresponding author: donglcs@chol.com

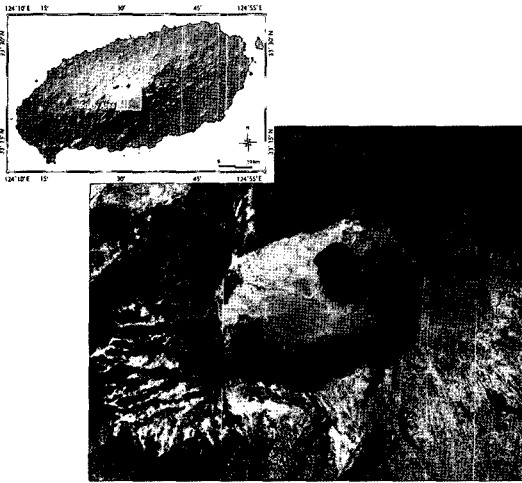


Fig. 1. Photograph of Baeknokdam area.

한라산 정상에는 산정분화구 형상의 호수인 백록담이 위치하고 있으며, 이 분화구로부터 한라산체를 형성한 많은 용암들이 분출한 것으로 알려져 있다(원종관, 1975; Lee, 1982; 박기화 외, 2000; 고정선 외, 2003). 그러나 한라산은 백록담으로부터 분출한 용암들이 쌓여서 형성된 성층화산이 아니라 상승하는 마그마에 의하여 돔(dome)상으로 융기되어 이루어진 돔상 용기산체이며, 백록담은 화산폭발에 의하여 형성된 분화구가 아니고, 용기산체의 정상이 함몰되어 형성된 함몰구라는 연구결과가 발표되었다(윤선, 2005).

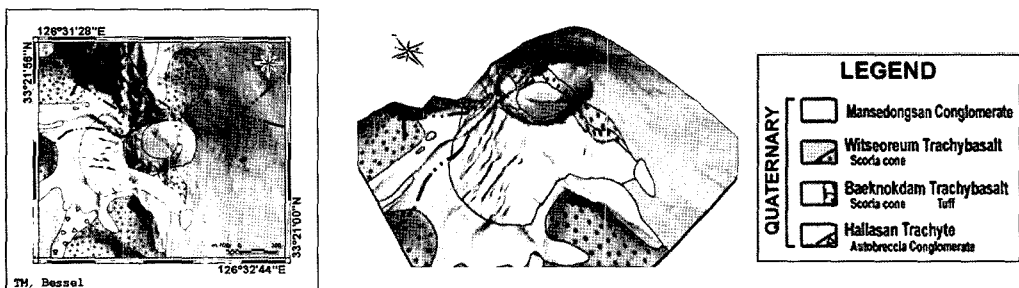
백록담 일대는 기반암의 풍화, 붕괴, 낙반 등에 의해 훼손이 가속화 되어 지형변화가 초래되고 있으며, 특히 북서벽, 서벽 및 남서벽의 훼손상태가 심각한 수준에 이르고 있다(고정선, 2003). 제주도(2000)의 조사 자료에 의하면 백록담을 포함하는 한라산 정상 일대의 훼손 면적은 한라산 국립공원내 전체 훼손면적 225,870의

17.9%인 40,320로 지속적인 복구 및 관리에도 불구하고 훼손이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 백록담의 훼손은 궁극적으로는 백록담을 이루고 있는 토양침식과 기반암의 훼손 결과로서, 기반암의 풍화와 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다. 백록담에서 풍화가 급속하게 진행되고 심한 지형기복을 보여주는 곳은 조면암의 분포지로서, 조면암에 대한 암석, 광물학적 연구는 Won *et al.*(1986), 장광화 외(1977, 1999) 등에 의해 수행되었으나, 풍화의 원인이나 특성에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 백록담을 구성하는 암석 중 가장 풍화가 진행되어 암벽의 안정성에 큰 영향을 미치는 한라산 조면암을 대상으로 풍화단계별 시료를 조면암의 광물학적 변화를 고찰하기 위하여 편광현미경과 전자현미경 관찰을 실시하였으며, 풍화에 따른 시료의 화학조성 변화와 풍화지수를 산정하기 위해 X선 형광분석을 실시하였고 변질광물의 존재여부 및 종류를 확인하기 위하여 X선 회절분석을 실시하였다. 또한 비중, 흡수율, 공극율, 탄성파속도, 일축압축강도, 점하중강도, 압열인장강도 등 총 8개의 물성을 측정하고 풍화에 따른 암석의 공학적 특성변화를 고찰하였다. 이러한 광물학적, 화학적, 공학적 연구결과를 바탕으로 백록담을 구성하는 주암체인 조면암의 풍화특성과 원인을 고찰하고 물성저하 및 붕락 매커니즘을 규명하였다.

### 백록담의 지질 및 지형

백록담 및 주변일대를 구성하는 지질은 하위로 부터 상위로 신생대 제4기의 한라산조면암, 백록담조면현무암(스코리아층 협재), 만세동산역암으로 구성된다(Fig. 2). 한라산조면암은 용암 돔으로 알려져 있으며, 백록담을 구성하는 암석 중 가장 풍화가 진행되어 나타나며 회백



(a) 2-D map

(b) 3-D map

Fig. 2. Geologic map around the summit of Mt. Halla.

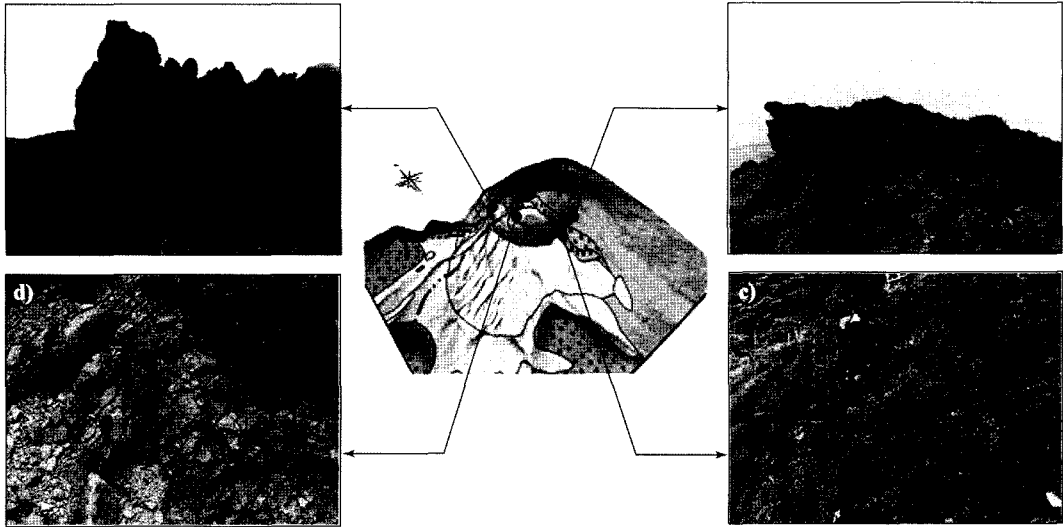
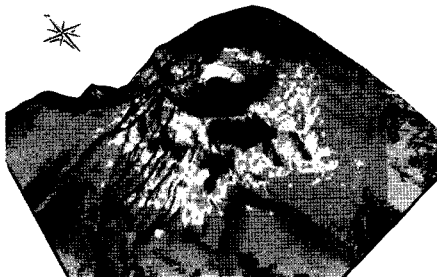


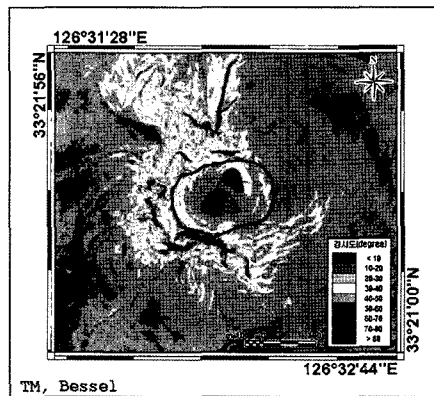
Fig. 3. Outcrops around the summit of Mt. Halla.

회갈색을 띠고 수직절리가 특징적으로 발달한다. 백색의 알칼리 장석이 반정 또는 취반을 이루며 부분적으로 산화된 흑색의 각섬석이 산점된다(Fig. 3(a)). 백록담조면현무암은 백록담분화구에서 분출한 용암으로, 풍화에 대한 저항성이 강하여 신선한 상태로 노출되며 산체의 동측에서 하위층을 얇게 피복하여 분포한다. 용암의 두께는 동쪽 능선에서 2~3 m, 화구벽의 외측사면에서는 0.2~0.3 m의 두께를 보여준다(Fig. 3(b)). 조면현무암의 하부에는 스코리아층이 협재되는데 스코리아층은 동쪽 화구벽의 하단부와 북쪽 관음사 등산로 정상부에 분포하고 있으며, 용암류에 의해 피복되어 산점 분포한다(Fig. 3(c)). 만세동산역암은 한라산조면암의 서측 절벽 아래 일대에 분포하고 있다. 역의 대부분은 한라산조면

암으로 구성되고 현무암 및 스코리아를 포함하며, 한라산조면암체에 가까운 곳에 분포하는 것은 백록담 정상부에서 떨어져 나온 애추성 역암으로 판단된다(Fig. 3(d)). 백록담은 해발고도 1950 m인 한라산 정상의 원형 함몰구를 포함한 일대의 지역을 지칭하며, 백록담의 지형은 분포하는 암종별로 현저한 차이를 보여준다. 한라산조면암의 분포지역인 서측사면 구간은 조면암의 풍화에 의해 급경사를 이루고 심한 지형기복을 보여주는 반면, 백록담조면현무암, 스코리아 및 만세동산역암이 분포하는 동측사면은 완경사의 완만한 지형기복을 보이며, 풍화나 암반붕락에 대해 비교적 안정한 상태를 유지하고 있다(Fig. 4). 백록담일대에 분포하는 암석들은 암종별로 차별화된



(a) 2D-map

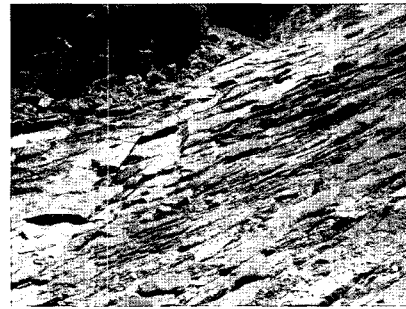


(b) 3D-map

Fig. 4. Slope map of the Baekrokdam.



(a) Outcrop of weathered trachyte (b) Topographic relief by weathering along the vertical joints



(c) Exfoliation in trachyte

(d) Sheeting joints in trachyte

Fig. 5. Types of rock weathering around Baeknokdam area.

풍화특성을 나타낸다. 한라산조면암은 한라산 정상을 구성하는 암석 중 가장 풍화가 진행되어 전체적으로 심한 풍화(highly weathered)에서 풍화 잔류토(residual soil)까지의 풍화등급을 보인다(Fig. 5(a)). 용암 돔(lava dome) 형성시의 냉각에 의한 수직절리가 현저하게 발달하며, 수직절리를 따라 풍화가 진행되어 돌출지형을 형성하고 있다(Fig. 5(b)). 지표면에서는 박리(exfoliation) 현상이 현저하고(Fig. 5(c)), 층상절리(sheeting joint)가 발달되어 있다(Fig. 5(d)). 암석표면으로부터 분리된 판상의 암괴는 경사면을 따라 이동하여 하부에 집적되어 애추를 형성한다. 백록담조면현무암은 치밀한 암회색의 암석으로, 풍화도는 약간풍화(slightly weathered) 단계이며, 풍화에 대한 저항성이 강하여 백록담 동측부에서 돌출지형을 형성하고 있다(Fig. 3(b)). 백록담조면현무암 하부에 협재되는 스크리아층은 다공성의 자색을 띠는 보통풍화(moderately weathered) 단계의 암석으로 지표면은 요철이 심하고 부분적으로 소 암괴로 분리되어 분포하며, 백록담정상부의 일부 구역에 국한되어 분포하므로 분포 면적이 협소하다. 만세동산역암은 백록담일대를 구성하는 암석 중 가장 후기에 형성된 준고결 상태의 퇴적암으로

서 역의 대부분은 한라산조면암으로 구성되고 백록담 내부의 저지에 분포되어 있다.

### 시료채취 및 분석

한라산 정상의 백록담을 구성하는 암석 중에서 가장 풍화가 진행되어 암벽 안정성에 큰 영향을 끼치는 한라산조면암의 붕괴양상과 풍화 매커니즘을 규명하기 위하여 Irfan(1978)의 6단계 풍화분류기준에 의거하여 암석의 풍화등급을 결정하고 시료를 채취하였다(Fig. 6). 조사지역에 분포하는 조면암은 심한 풍화(highly weathered, HW) 등급의 암석에서부터 완전 풍화(completely weathered, CW) 등급, 풍화잔류토(residual soil, RS)까지의 3단계 풍화산물로 분포한다. 주로 심한 풍화(HW) 등급의 암석이 우세하게 분포하며, 신선한 암석(fresh, F)-보통 풍화(moderately weathered, MW) 단계의 암석은 분포하지 않는다.

채취된 시료는 심한 풍화(HW) 등급의 시료 5개, 완전 풍화(CW) 등급의 시료 1개, 잔류토(RS) 시료 1개 등 총 7개이다. HW 등급의 시료는 블록시료로부터 박편

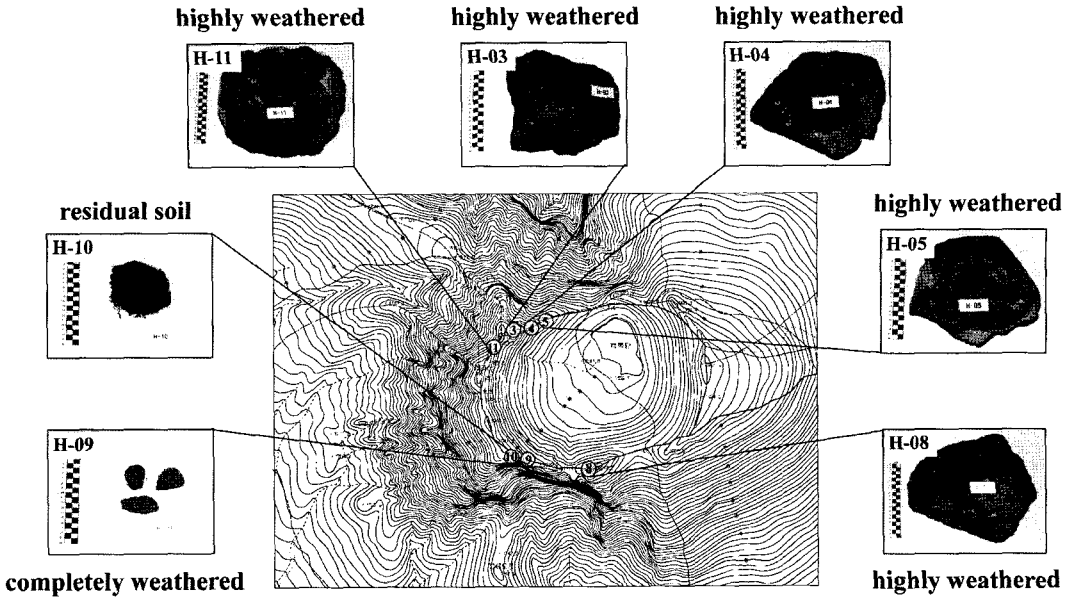


Fig. 6. Sampling sites of study area.

을 제작하였고 CW 등급의 시료는 경화제에 침수시켜 경화시킨 후 박편을 제작하였다.

한라산조면암의 제반 공학적 특성을 분석하기 위하여 HW 등급의 블록시료로부터 코아시료(10×5 cm)를 제작하고 ISRM(1981) 규정에 의거 물성시험을 실시하였다. 시험항목은 비중, 흡수율, 공극율, 탄성과 속도, 일축압축강도, 점하중 강도, 압열인장강도 등으로 물성시험결과로 부터 풍화에 따른 한라산조면암의 공학적인 물성 변화를 파악하였다. 시험시 탄성과 속도측정은 Sonic viewer-SX(model: 5251B)을 이용하였고, 일축압축시험은 국내에서 제작된 최대 200톤 하중용량의 STC US-200 시스템에서 수행되었다. 이 시험기는 변위 및 하중제어가 가능한 서보제어시스템(servo-controlled system)을 갖추고 있으며, 본 연구에서는 하중제어 조건에서 수행되었다. 압열인장시험과 점하중시험은 STC US-200에서 지그(jig)를 제작하여 수행하였다.

풍화에 따른 광물의 변질과 점토광물의 형성, 미세균열의 발달 등을 확인하기 위하여 전자현미경(SEM) 기능과 WDS(wavelength dispersive spectrometer)가 장착된 CAMECA SX-100 Electron Microprobe를 사용하여 HW, CW등급의 연마편 시료와 HW, CW, RS 등급의 분말시료를 대상으로 BSE(Backscatter electron) 영상을 획득하였다. WDS분석은 K, Na, Ca, Mg, Fe, Si, Al을 대상으로 수행하였다. 채취된 시료의 화학성분

과 풍화에 따른 화학조성의 변화를 파악하기 위하여 주성분원소에 대한 화학분석(X-선 형광분석, XRF)을 실시하였으며, 분석항목은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LOI 등 11개이다. 풍화에 따른 변질광물, 특히 점토광물의 형성여부와 종류를 파악하기 위하여 X-선회절분석(XRD)을 실시하였으며, 자연상태, 에칠렌글리콜 처리, 가열처리 시료를 대상으로 수행하였다.

### 분석결과 및 고찰

#### 광물·암석학적 특성변화

한라산조면암의 풍화에 따른 광물암석학적인 변화를 고찰하기 위하여 전자현미경(SEM)과 편광현미경 관찰을 수행하였다. 조면암의 구성 광물은 사장석, 알칼리장석, 휘석이며 편광현미경하에서 반상조직(porphyrific texture)과 조면암질 조직(trachytic texture)을 나타낸다. 반정으로 다양한 크기의 사장석과 알칼리장석이 나타난다. 사장석은 주로 자형 및 반자형의 반정으로부터 산출되며, 알바이트 쌍정 및 누대구조를 보인다. 사장석의 중심부 혹은 연변부가 약하게 변질되었으며, 불규칙한 형태의 균열이 관찰된다. 석기(groundmass)는 래스상의 알칼리장석으로 구성되고 전형적인 조면암질 조직을 보여준다. 유색광물로서는 휘석이 대부분이며, 미세균열이 발

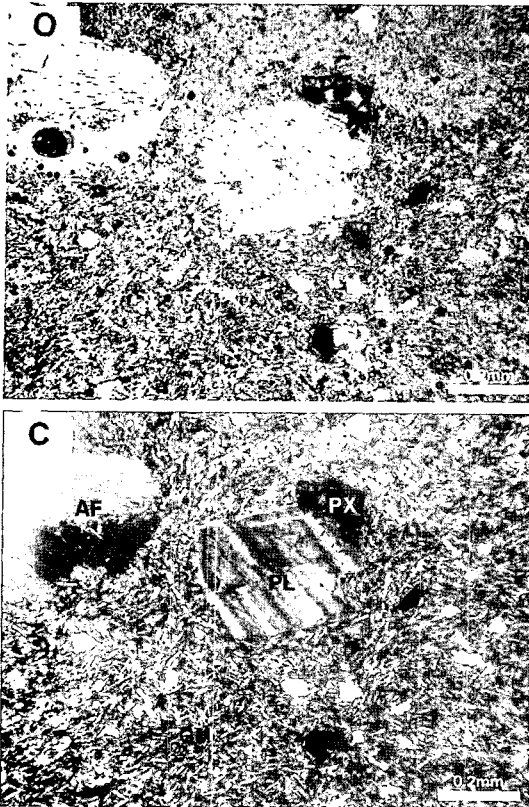


Fig. 7. Microphotographs of highly weathered trachyte in H-04 site. O: open nicol, C: cross nicol. AF: alkali feldspar, PL: plasioclase, PX: pyroxene.

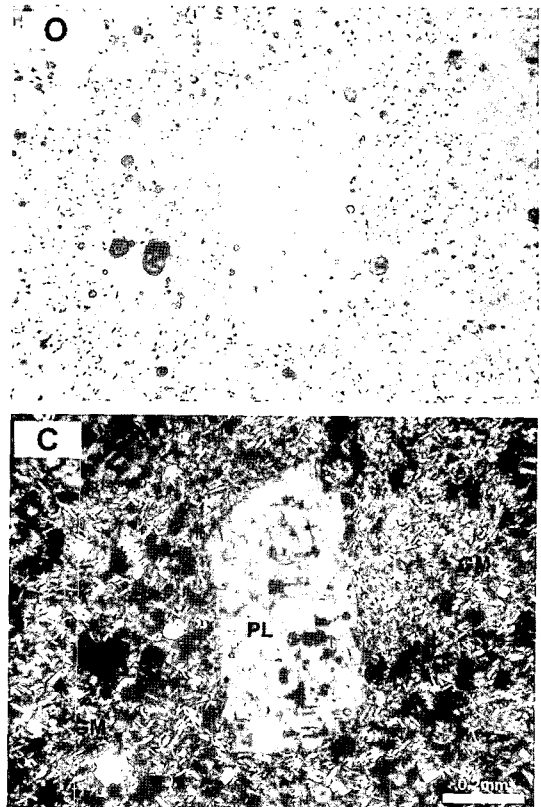


Fig. 8. Microphotographs of completely weathered trachyte in H-09 site.

달하고 있다(Fig. 7, 8).

### 심하게 풍화된 암석

편광현미경 및 전자현미경 관찰결과 석기내에는 미세 균열 및 공동이 발달하며 석기를 구성하는 래스상의 알칼리장석들은 대체로 뚜렷한 입자형태를 유지하고 있다(Fig. 9). WDS 분석에 의하면 K, Na 성분은 알칼리장석 입자의 내부와 외부에서 뚜렷한 변화를 보여주지 않으며, 미세균열 및 공동 주변에서도 K, Na의 성분변화가 거의 확인되지 않는다. 이는 풍화에 따른 K, Na 성분의 용탈이 미미함을 의미한다. 반정으로 나타나는 알칼리장석, 사장석, 휘석 내에 불규칙한 균열과 공동이 관찰되나 뚜렷한 입자형태와 경계를 유지하고 있다. WDS 분석에 의하면 반정의 입자 경계와 균열 및 공동 주변에서 K, Na 성분 변화가 거의 확인되지 않는다. 석기와 반정 내에는 불규칙한 균열과 열린 공극이 관찰되나 화학적 풍화작용에 의한 용해공극(solution pore and channel)

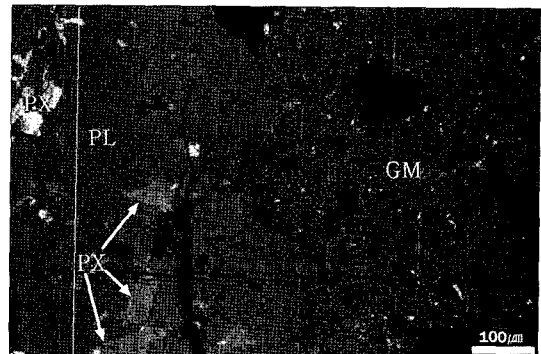


Fig. 9. BSE image of highly weathered trachyte in H-05 site. PL: plasioclase, PX: pyroxene, GM: groundmass.

의 형성을 지시할 수 있는 뚜렷한 증거인 점토광물이나 2차광물의 충전 등이 거의 관찰되지 않는다(Fig. 10).

전자현미경으로 장석입자 표면을 관찰한 결과 아주 미약한 표면박리 현상이 일어나고 있으나 원래의 장석 결정 구조를 잘 유지하고 있다(Fig. 11). 풍화된 암석의 장석표면에 일반적으로 피복되는 미세한 고령토 박편들

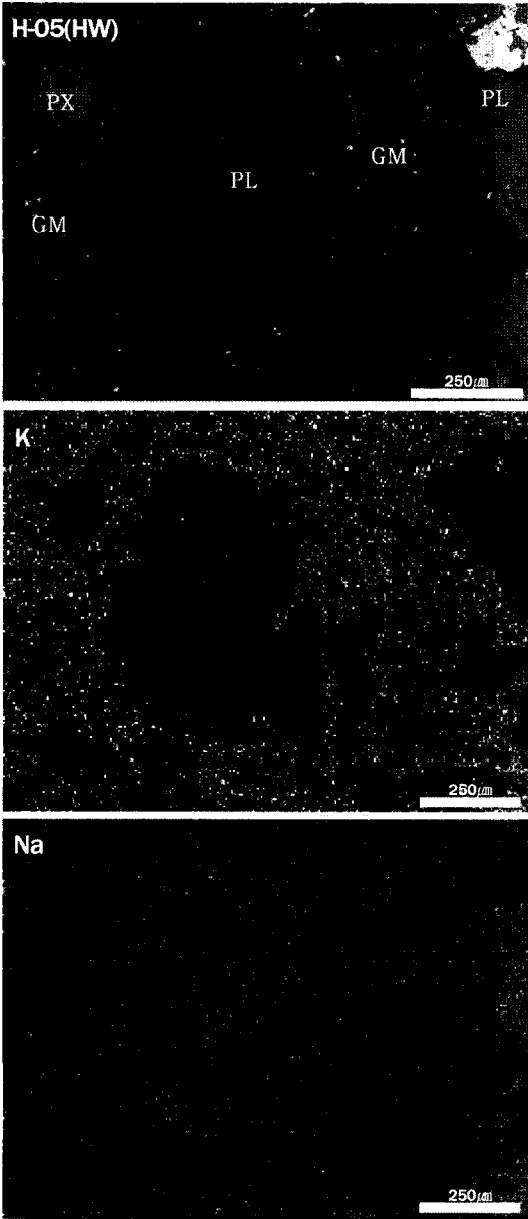


Fig. 10. BSE images and WDS map of highly weathered trachyte in H-05 site (x280).

이 조사지역의 시료에서는 거의 관찰되지 않으며, 이와 같은 현상은 화학적 풍화작용의 진행정도가 매우 미미함을 지시한다.

**완전히 풍화된 암석**

편광현미경 및 전자현미경 관찰 결과 석기 내에는 심한 풍화단계보다 상대적으로 많은 미세균열과 공동이 관

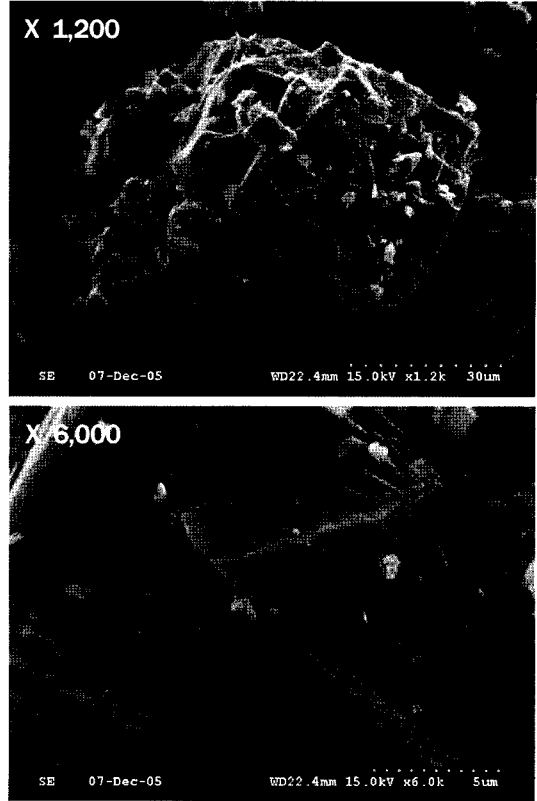


Fig. 11. SE images of highly weathered trachyte in H-05 site.

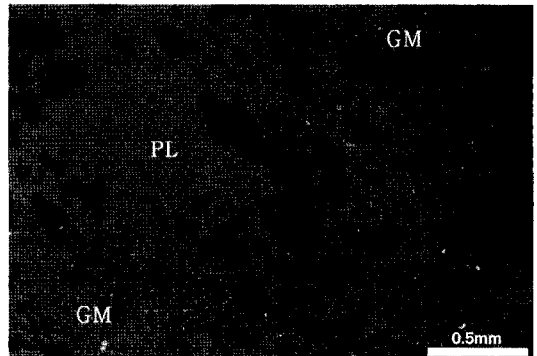


Fig. 12. BSE image of completely weathered trachyte in H-09 site.

찰된다. 석기를 구성하고 있는 알칼리장석의 분포가 심한 풍화단계에서 보다 느슨하게 분포하나 래스상의 알칼리장석들은 여전히 뚜렷하고 입자형태를 유지하고 있다(Fig. 12).

WDS 분석결과 K, Na 성분은 입자내부와 외각부에서 뚜렷한 변화를 보이지 않으며, 이는 풍화에 따른 K, Na

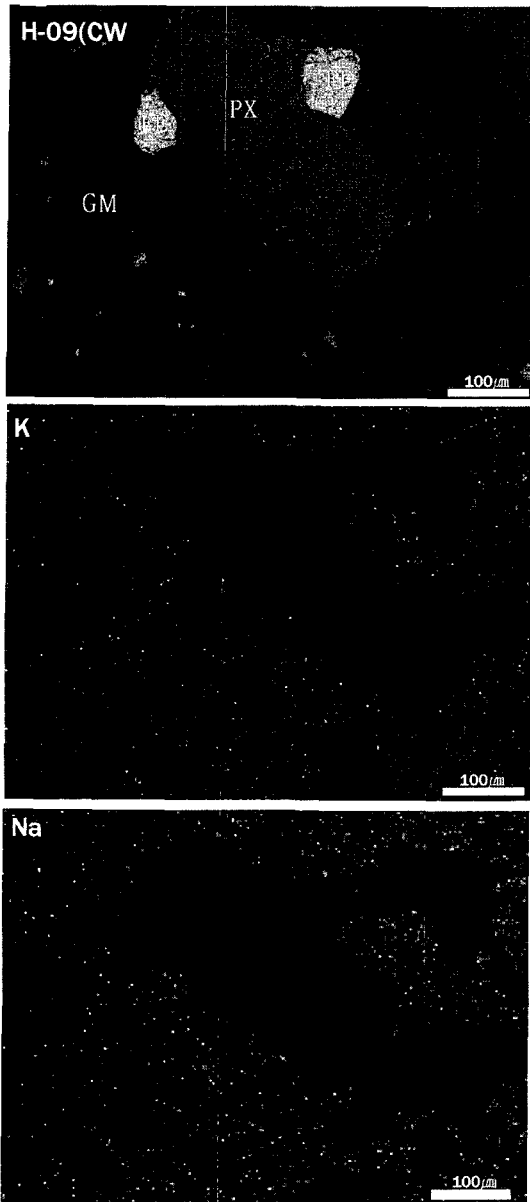


Fig. 13. BSE image and WDS maps of Pyroxene in H-09 site (X810). FE: iron oxides.

성분의 용탈이 미미함을 의미한다. 알칼리장석, 사장석 및 휘석의 반정내에 불규칙한 균열과 미세공동이 관찰되나 여전히 뚜렷한 입자의 형태와 경계를 유지하고 있으며, 균열과 공동내에는 이차변질 광물이나 점토광물이 형성되지 않고 있으며 균열의 틈도 여전히 좁은 상태이다. WDS 분석결과 반정의 입자경계, 균열 및 공동 부근에서 K, Na 등의 성분변화가 뚜렷하게 확인되지 않

는다(Fig. 13).

반정으로 나타나는 사장석, 알칼리장석 및 휘석에는 심한 풍화단계에서 보다 더욱 많은 불규칙한 균열과 미세공동이 관찰되나, 여전히 입자경계는 뚜렷하다. 입자의 경계, 균열 및 공동 부근에서 장석반정의 성분 변화가 거의 확인되지 않으며 이차변질 광물이나 점토광물이 형성되어 있지 않다(Fig. 13). 이는 화학적 풍화작용이 본 단계에서도 미미하게 진행되고 있음을 지시한다.

장석입자의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과 장석은 여전히 원래의 결정상태를 잘 유지하고 있다. 장석표면에서의 표면 박리는 심한풍화(HW) 단계에서 보다 더욱 현저하지만 화학적 풍화산물인 고령석 등 점토광물의 박편은 거의 관찰되지 않으며(Fig. 14), 이는 본 단계에서도 화학적풍화작용이 미약하게 진행되고 있음을 의미한다.

#### 풍화잔류토

풍화잔류토에 대한 전자현미경 관찰결과 장석의 결정

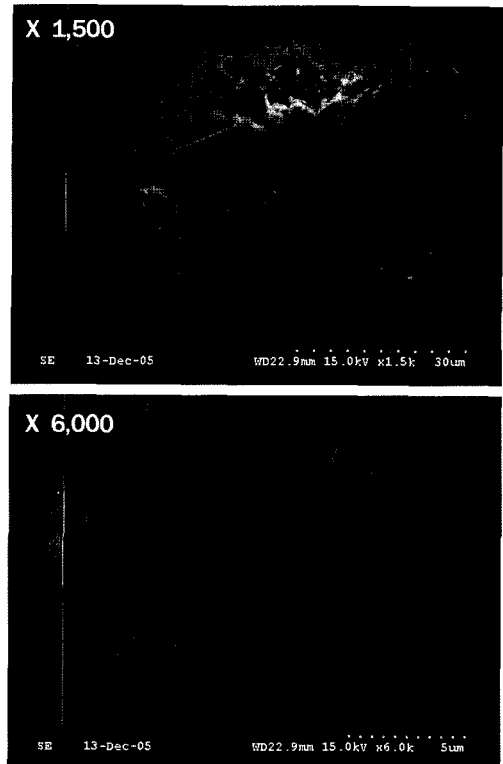


Fig. 14. SE images of completely weathered trachyte in H-09 site.



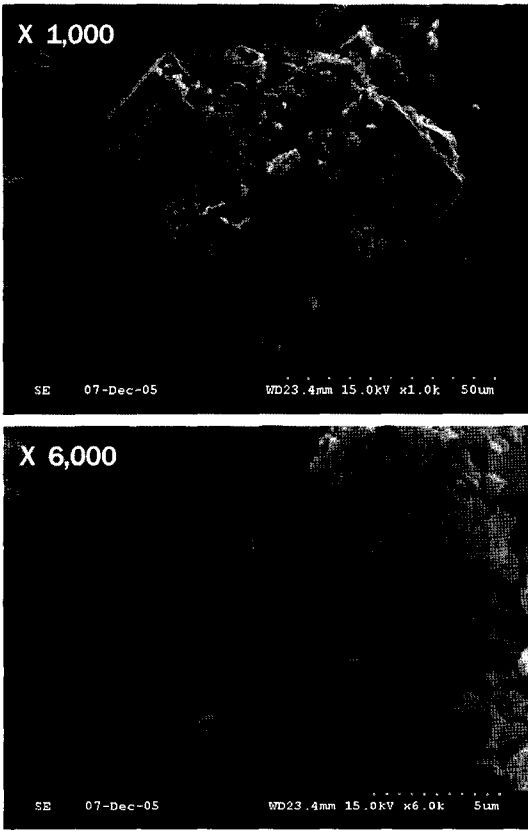


Fig. 15. SE images of Residual soil in H-10 site.

에서 현저한 표면바리 현상이 진행되고 있으며, 표면이 거칠고 결정정도 파괴되어 있다. 장석의 표면과 벽개면을 따라 풍화가 진행되어 많은 양의 박편이 형성되어 장석표면에 피복되어 있으나, 이들은 대부분 K와 Na 성분이 소량 용탈된 장석의 파편으로 고령석 등 점토광물로 보이는 박편은 거의 관찰되지 않는다(Fig. 15).

**물리적 특성변화**

백록담 정상부에서 풍화단계별로 채취한 한라산조면암을 대상으로 비중( $G_s$ ), 흡수율( $A$ ), 공극율( $n$ ), 탄성과 속도( $V_p, V_s$ ), 일축압축강도( $UCS$ ), 점하중강도( $I_{s(50)}$ ), 압열인장강도( $S$ ) 등 총 8개 물성을 측정하여, 풍화에 따른 물성변화를 고찰하였다. 물성시험은 시료성형이 가능한 HW 등급의 5개 시료(H-03, H-04, H-05, H-08, H-11)를 대상으로 수행하였다. 육안으로 5개의 HW 등급 시료를 풍화도에 따라 등급화 하는 것은 불가능하므로, 일반적으로 공학적 풍화지수로 가장 신뢰성이 높게 평가된 흡수율과 공극율(이창섭, 2005)을 이용하여 일차적으

로 상대적인 풍화도를 결정하였다. 흡수율과 공극률에 의해 결정된 풍화도는 풍화도가 상대적으로 낮은 시료에서 높은 시료의 순으로 H-04, H-03, H-05, H-11, H-08이다.

HW 등급의 한라산조면암의 비중은 1.856~2.117(평균: 2.041)의 범위를 보이며, 풍화가 진전됨에 따라 일정하게 감소되는 경향을 보여준다(Fig. 16, Table 1). 흡수율은 광물 입자간의 공극, 광물의 벽개면, 광물 내의 미세 균열 등에 의해 흡수되는 모든 수분의 함량이 측정되며 풍화단계에 따라 8.283~14.727%(평균: 10.233%) 범위에서 풍화가 진전됨에 따라 뚜렷한 증가추세를 보여준다. 공극율은 시료전체의 체적에 대한 공극의 비를 백분율로 표시하며, 흡수율과 함께 풍화에 밀접하게 연관되는 물성치로 17.486~27.051%(평균: 20.555%)의 범위를 보인다. 공극율의 증가는 풍화에 의한 미세균열 및 공극의 증가로 설명될 수 있으며, 풍화진전에 따라 흡수율과 비슷한 증가경향을 보여주므로 풍화정도를 지시하는 유용한 풍화지수로 사용될 수 있다. 암석의 탄성과 속도( $V_p, V_s$ )는 암석내부의 결합이나 공학적 성질의 약화와 밀접하게 관련되며, 일반적으로 암석이 치밀하고 신선할수록 탄성과 속도가 빠른 것으로 알려져 있다. 실험결과 P-파 속도( $V_p$ )는 1,758~2,344 m/sec (평균: 2,021 m/sec), S-파 속도( $V_s$ )는 1,427~1,992 m/sec (평균: 1,611 m/sec)의 범위를 보여주며, 풍화가 진전되면서 시료의 탄성과 속도가 감소한다. 일축압축강도는 구성광물의 강도와 입자간의 결합력 등에 영향을 받는다. 실험결과 일축압축강도의 범위는 10.514~29.131 MPa(평균: 20.99 MPa)이며, 풍화진전에 따른 강도 저하는 미세균열 및 공극의 증가에 기인하는 것으로 해석된다. 점하중강도와 압열인장강도도 풍화진전에 따른 감소 경향을 나타낸다. 점하중강도는 0.021~0.291 Pa(평균: 0.123 MPa), 압열인장강도는 1.952~2.430 MPa(평균: 2.228 MPa) 범위에서 풍화진전에 따라 감소한다(Fig. 16, Table 1).

**화학적 특성변화**

풍화과정에서 화학성분의 거동은 여러 연구자들에 의해 논의되어 왔다. Gupta and Rao(2001)는 인도의 화강암에 대한 풍화연구에서 주성분 원소의 이동도를  $Na > Ca > K > Mn > Mg > Si > Fe > Al > Ti$ 의 순서로 제시하였으며, 일반적으로 Na, K, Ca는 이동도가 큰 원소로 Al, Ti, Si 등은 이동도가 낮은 원소로 알려져 있다. 풍화단계별로 한라산조면암의 주성분 원소의 변화와 이동도를 확인하기 위해 HW, CW, RS 등급

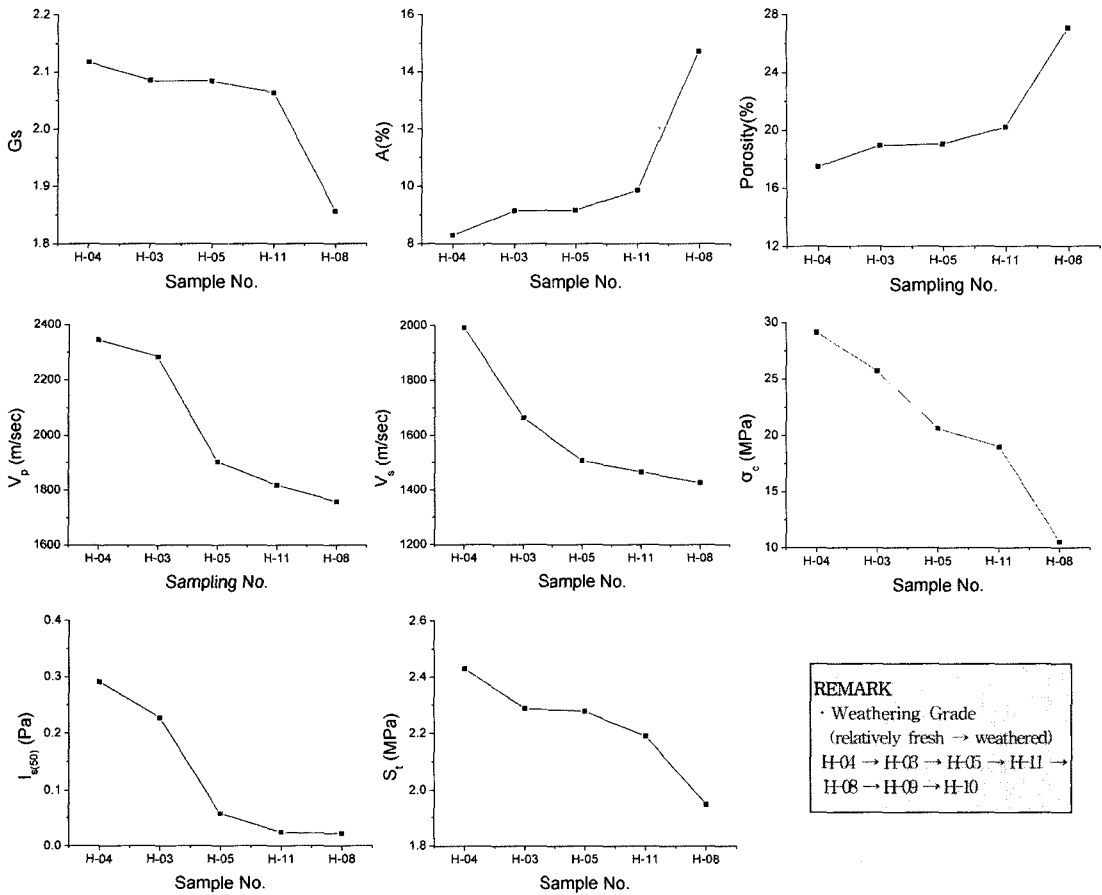


Fig. 16. Variation of physical index properties with respect to the different weathering grades of HW samples.

Table 1. Physical properties of highly weathered Hallasan trachyte in the study area.

Sample No.	Gs	A (%)	n (%)	V <sub>p</sub> (m/sec)	V <sub>s</sub> (m/sec)	UCS (MPa)	I <sub>s(50)</sub> (Pa)	S <sub>t</sub> (MPa)
H-04	2.117	8.283	17.486	2,344	1,992	29.131	0.291	2.430
H-03	2.085	9.141	18.963	2,283	1,665	25.708	0.227	2.289
H-05	2.084	9.160	19.057	1,902	1,508	20.601	0.057	2.279
H-11	2.063	9.856	20.218	1,818	1,465	18.996	0.023	2.191
H-08	1.856	14.727	27.051	1,758	1,427	10.514	0.021	1.952

의 시료에 대한 X-선 형광분석(XRF)을 실시하여 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LOI 등 11개 성분을 분석하였다(Table 2).

채취된 시료중에서 H-03, H-04, H-05, H-08, H-11 시료는 HW 등급의 시료이며, H-09 시료는 CW 등급, H-10 시료는 RS 등급이다. HW 등급 시료의 상대적인 풍화도는 흡수율과 공극율을 포함한 물성시험 결과에 의거하여 결정하였으며, 상대적으로 풍화도가 낮은 시료에서 높은 시료의 순서는 H-04H-03H-05H-11H-08이다.

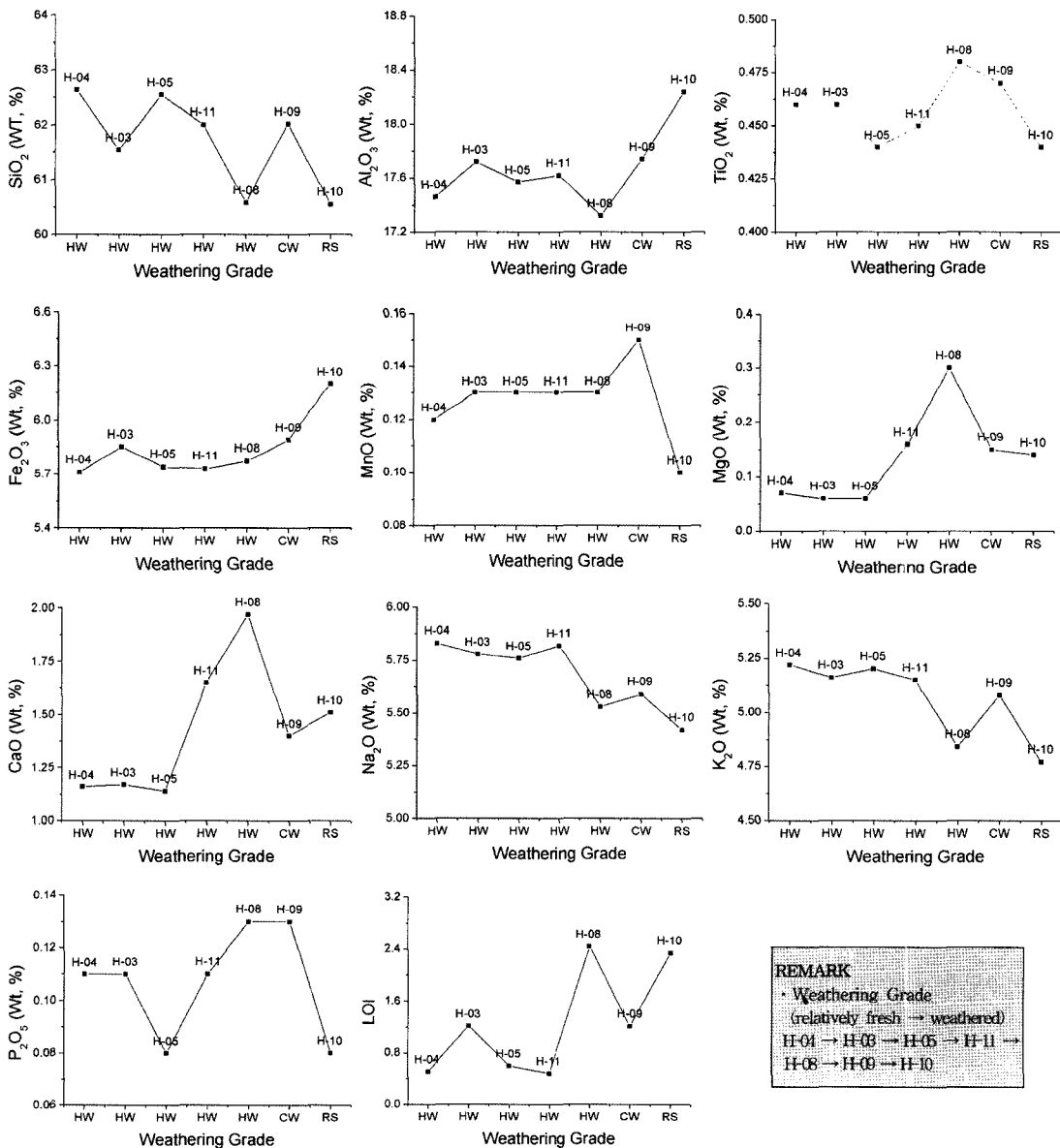
XRF 분석결과 주성분 원소의 함량은 풍화도에 따라 일정한 증감의 경향을 보여주지 않고 불규칙적이다. 일반적으로 풍화도에 따라 뚜렷한 증가 또는 감소 경향을 보여주는 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO, LOI 등도 조사지역의 경우에는 일정한 증감의 경향이 없이 불규칙한 변화를 보여준다(Fig. 17).

한라산조면암을 구성하는 주성분 광물은 알칼리장석, 사장석, 휘석 등이다. 일반적으로 화학적 풍화작용이 진행되면 장석의 풍화에 의해 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO 등의 성

**Table 2.** Weight percent of major elements in Hallasan trachyte.

(wt. %)

Weathering grade	Sample No.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
HW	H-03	61.54	17.72	0.46	5.85	0.13	0.06	1.17	5.78	5.16	0.11	1.22	99.21
HW	H-04	62.64	17.46	0.46	5.71	0.12	0.07	1.16	5.83	5.22	0.11	0.51	99.29
HW	H-05	62.55	17.57	0.44	5.74	0.13	0.06	1.14	5.76	5.20	0.08	0.60	99.27
HW	H-11	62.00	17.62	0.45	5.73	0.13	0.16	1.65	5.82	5.15	0.11	0.48	99.29
HW	H-08	60.58	17.32	0.48	5.77	0.13	0.30	1.97	5.53	4.84	0.13	2.44	99.51
CW	H-09	62.02	17.74	0.47	5.89	0.15	0.15	1.40	5.59	5.08	0.13	1.21	99.83
RS	H-10	60.55	18.24	0.44	6.20	0.10	0.14	1.51	5.42	4.77	0.08	2.34	99.81



**Fig. 17.** Variation of weight percent of major elements in Hallasan trachyte.

분은 일정한 감소경향을 보여주며, Mg, Fe 등은 휘석의 풍화에 의해 풍화 초기단계에서는 감소되다가 풍화작용 후기단계에서 유기물이 풍부한 점토광물이 이를 흡수함에 따라 증가하게 된다. 그러나 한라산조면암에서는 이러한 일반적인 경향을 보이지 않고 불규칙적인 변화를 보여준다(Fig. 17). 이와같은 결과는 조사지역에서 현재 진행되는 풍화작용이 화학적 풍화작용보다는 다른 원인에 기인되었음을 의미하며, 전자현미경 관찰결과, 풍화진전에 따른 2차 변질광물이나 점토광물이 거의 관찰되지 않는 점도 이러한 사실을 입증한다.

### 화학적 풍화지수

암석의 화학적 풍화작용이 진행되는 경우 용탈, 가수분해, 수화작용 등이 진행되며 암석 내에 새로운 광물이 형성됨에 따라 화학조성이 변화한다. 암석의 화학적 풍화정도를 정량적으로 기술하기 위하여 조암광물 중에서 풍화에 대한 안정도가 높은 성분과 이동성이 큰 성분을 이용하여 다양한 화학적 풍화지수가 제안되었다. 기존에 제안된 화학적 풍화지수(WPI 및 PI(Reiche, 1943), RR(Ruxton, 1968), VR(Vogt, 1927), WP(Parker, 1970),  $\beta$ (Rocha-Filho et al., 1985), AKN 및 ACN(Harnois and Moore, 1988), Si-Ti Index(Javaverdena and Izawa, 1994),  $I_{mob}$ (Irfan, 1994), CIA(Nesbitt and Young, 1982), CIW(Harnois and Moore, 1988), CWI(Sueoka, 1989), LOI(Sueoka et al., 1985))들을 이용하여 조사지역에 분포하는 한라산조면암의 화학적 풍화작용에 대해 고찰하였다. HW 등급의 5개 시료와 CW 및 RS 등급의 2개 시료를 사용하였으며, 5개 HW 등급 시료에 대해서는 물성시험결과에 의한 상대적 풍화도를 적용하였다. 화학적 풍화지수를 산정한 결과 HW 등급의 5개 시료에서 풍화도 진전에 따른 풍화지수의 일정한 증가 또는 감소 경향은 나타나지 않고 있다(Fig. 18). 특히, 풍화정도를 잘 반영하는 것으로 알려진 CWI, CIW, ACN, WPI, CIA 및 LOI 등도 풍화진행에 따라 화학적 풍화지수의 일정한 변화 경향을 보여주지 않는다. HW~RS 등급의 전체시료에 대한 화학적 풍화지수 역시 풍화진행에 따라 일정한 경향을 보여주지 않는다. 이러한 결과로 볼 때 백록담 일원의 한라산조면암에 대한 화학적 풍화지수의 적용성은 매우 낮은 것으로 판단되며, 이는 연구지역 조면암의 풍화작용 진행 과정에서 화학적 풍화의 영향이 매우 미약함을 것을 의미한다.

## 풍화 메커니즘

### X-선회절분석

풍화에 따른 광물조성의 변화와 새로운 광물의 형성을 확인하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 점토 광물의 조성을 검토하기 위하여 시료를 분쇄한 후 증류수에 분산시켜 원심분리를 이용한 침강법으로 2  $\mu\text{m}$  이하의 점토분을 분리시킨 후 정방위 시편을 제작하여 X-선 회절분석을 수행하였다. 분석시 Geigerflex 2301 X-선 분말회절 장치를 사용하였으며,  $\text{CuK}\alpha$ 선과 Ni-filter에 의한 X-선을 사용하였다. 측정조건은 전압 30 kV, 전류 15 mA, scan speed 2°/2 $\theta$ /min, 시정수 1 sec, slit 1°~0.3 mm~1° 측정하였다. 2  $\mu\text{m}$  이하의 점토분 내에 포함된 점토광물은 에칠렌글리콜 처리 및 가열처리 등을 통하여 식별하였으며, 가열처리는 550°C에서 1시간 가열하였다.

X-선 회절분석 결과에 의하면 한라산조면암의 주 구성 광물은 장석과 휘석이며 소량의 크리스토팔라이트가 포함된다(Fig. 19). 풍화가 진전됨에 따라 광물의 조성비는 거의 변화를 보여주지 않으며 HW 등급의 시료에서 나타나는 회절선의 위치와 강도는 CW 및 RS 등급의 시료에서도 거의 일정하다. HW 등급 시료에서 장석과 휘석의 화학적 풍화산물로 나타나는 점토광물이 확인되지 않으며, CW 등급 시료와 RS 등급에 속하는 시료에서도 점토광물은 확인되지 않는다(Fig. 19, 20). 일반적으로 화학적 풍화작용이 진행될 때 장석의 풍화에 의해 점토광물이 형성되는데, 장석을 다량 포함하는 한라산조면암의 풍화시료에서 점토광물이 확인되지 않는 것은, 화학적 풍화지수 산출 결과에 의해 입증된 바와 같이, 연구지역에서 화학적 풍화작용이 미약하게 진행되었음을 의미한다.

### 풍화 메커니즘

한라산 백록담을 구성하는 주요 암체인 한라산조면암은 상승하는 마그마가 굳어져 형성된 용암 돔(lava dome)이다. 용암 돔의 외각부는 냉각에 의해 냉각절리(cooling joint) 특히, 수직 절리가 발달하여 절리면을 따라 쪼개짐이 발생하게 된다(Fisher, 1979). 용암 돔인 한라산 조면암의 K-Ar 전암연령은 0.025±0.008 Ma(Won et al., 1986)과 0.07±0.01 Ma(Tamanyu, 1990)로 보고되어 있다. 용암 돔의 관입시기를 0.025±0.008 Ma~0.07

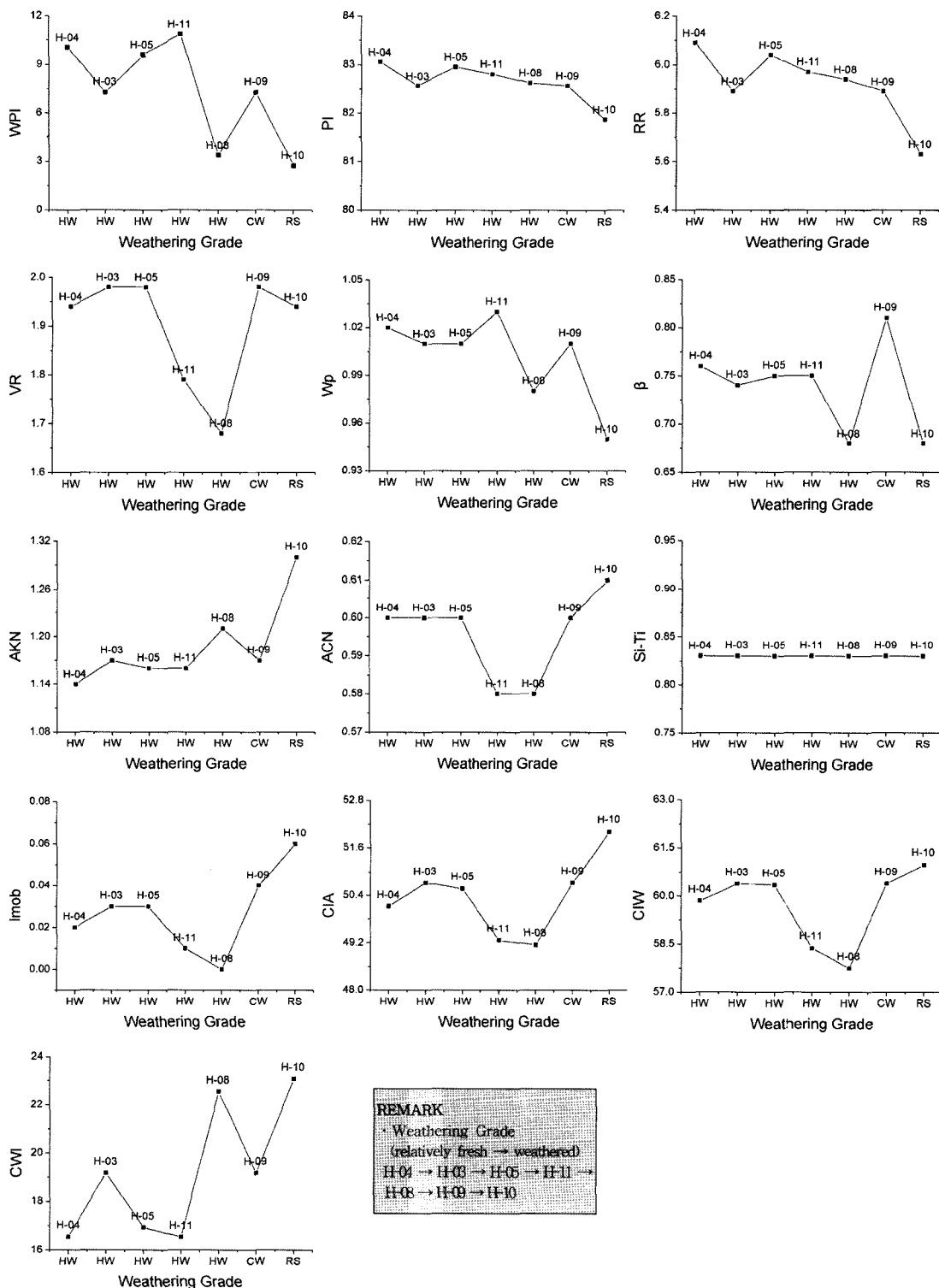


Fig. 18. Variation of chemical weathering indices with weathering grades in study area.

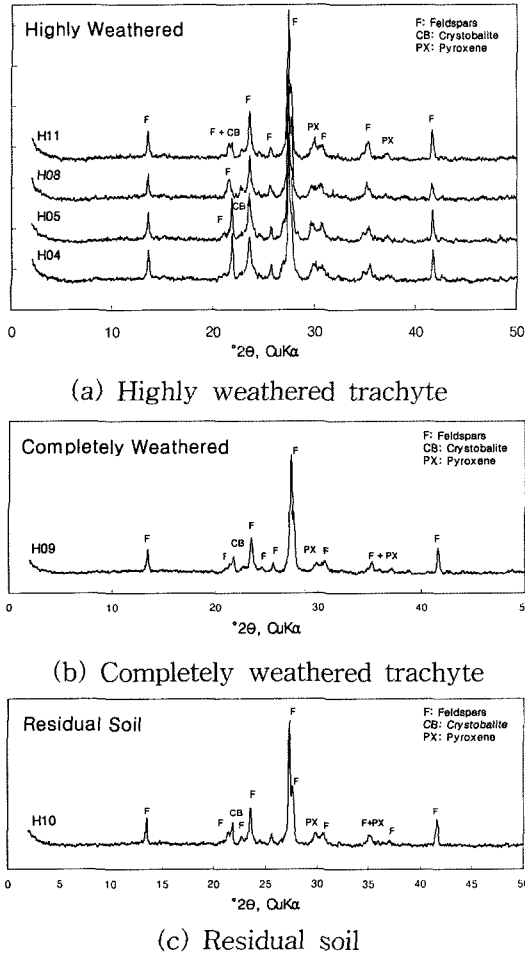


Fig. 19. X-ray diffraction patterns of weathered trachytes and residual soil.

±0.01 Ma로 고려할 때 한라산조면암은 플라이스토세 후기의 Wisconsin 빙하기에 형성된 것으로 판단된다. 백록담 일원의 기후조건은 식생분포에서 알 수 있듯이 냉대림이 분포되는 지역이며, 한라산조면암의 분포지역은 빙하기와 홀로세 이후의 후빙기를 거쳐 현재까지 냉대기 후대에 위치하고 있는 것으로 사료된다. 빙하지역 및 냉대지역의 경우 지표는 연중 결빙과 해빙작용이 반복된다. 해빙에 의하여 수분이 암석의 공극이나 균열면을 채우고 있다가 다시 결빙되면 부피의 증가로 인하여 암석 표면으로 부터 동파(frost splitting)현상이 발생되며, 기존의 균열면에 내재된 수분의 결빙에 의하여 암석이 쪼개어지는 동결쪼개기작용(frost wedging)도 진행된다. 암석의 틈에 내재된 수분이 동결될 때에는 결빙구조가 6각형인 빙정 즉, 암석의 광물들과는 성질이 다른 이질결정

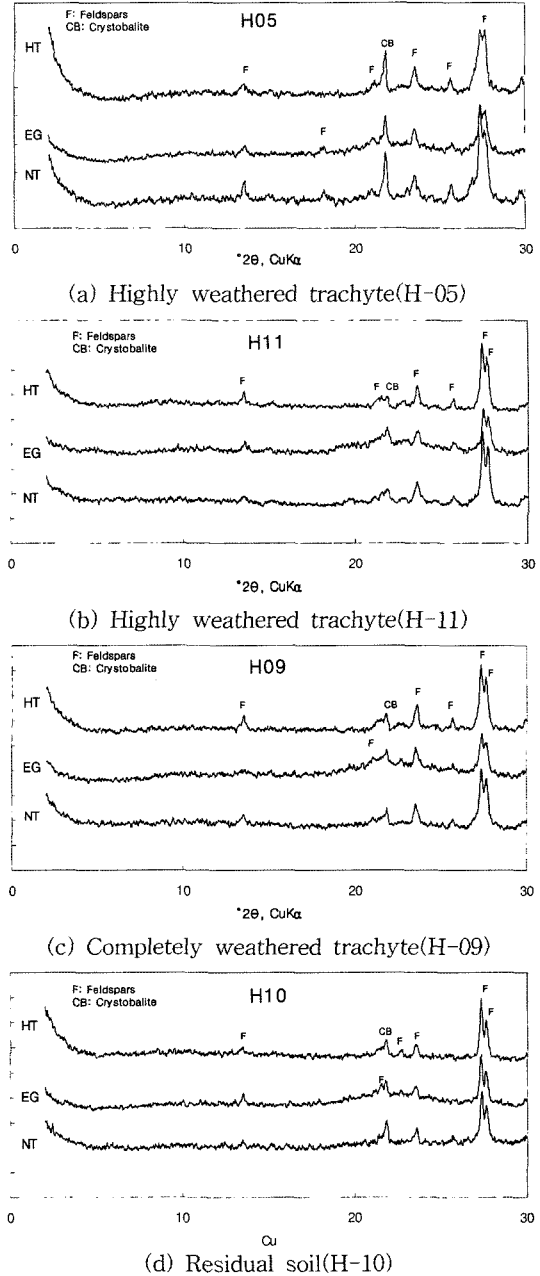


Fig. 20. X-ray diffraction patterns of clay fraction collected from weathered trachytes and residual soil. NT: not treated, EG: treated with ethylene glycol, HT: heat treated at 550°.

체가 형성됨과 동시에 약 9%의 부피증가로 인해 파괴가 가속화된다. 연구지역인 백록담의 한라산조면암에서도 용암담의 외각부에 형성된 냉각절리(cooling joint)가 동파작용과 동결쪼개기작용에 의해 파괴되어 돌출지형과

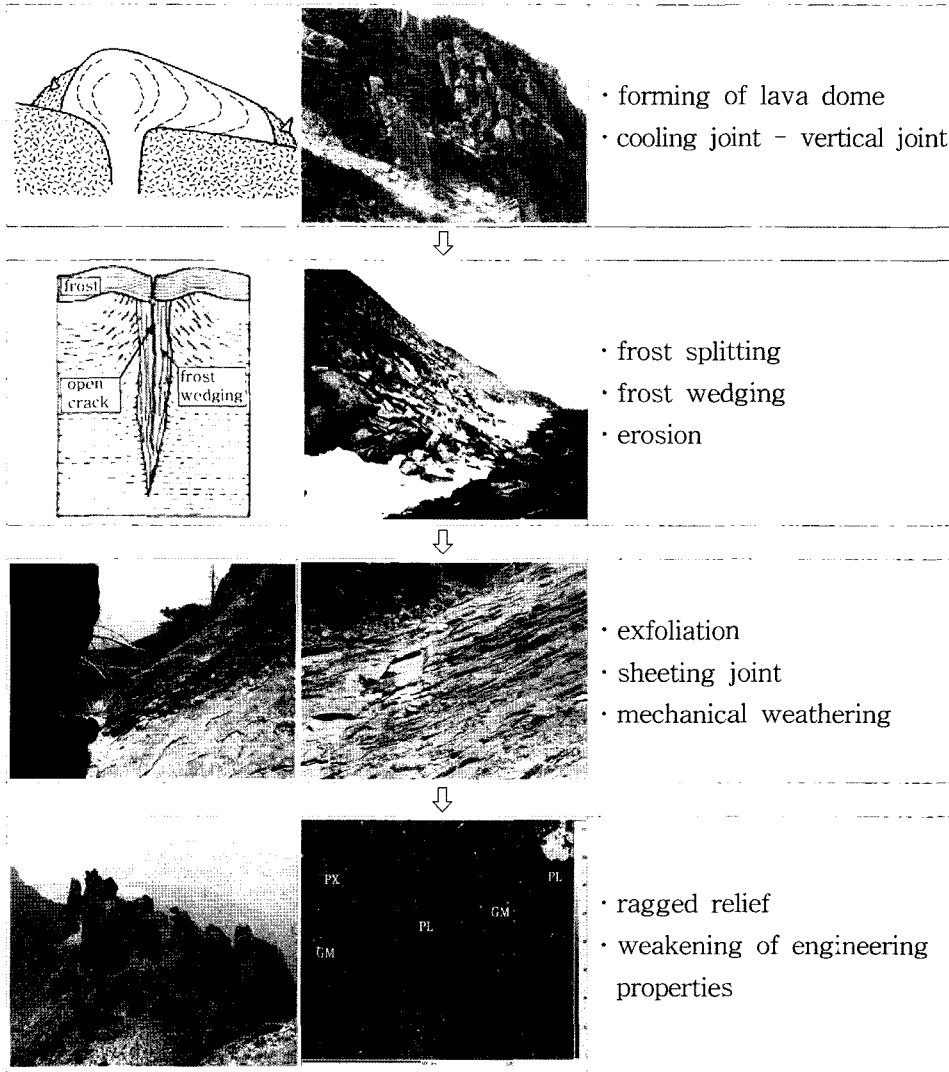


Fig. 21. Weathering mechanism of Baeknokdam trachyte.

지형의 요철 현상을 초래하였을 것으로 판단되며, 냉대 기후인 한라산의 기후조건에서 동결해빙작용이 활발하게 진행되고 암석의 기계적 풍화작용이 연중 지속적으로 진행되어 암석의 약화와 암반의 붕괴를 초래한 것으로 판단된다(Fig. 21).

**결 론**

백록담에서의 암벽붕괴는 한라산 정상인 백록담 일원에서 광범위하게 진행 중으로 백록담 일원에 넓게 분포하는 한라산조면암의 풍화와 밀접한 연관성을 갖는다.

한라산조면암은 신선한 암석(F)상태로는 분포하지 않으며 심한풍화(HW) 등급의 암석에서 풍화잔류토(RS)까지의 풍화가 진전된 암석이 분포한다. 조면암은 수직절리 및 층상절리의 발달과 박리로 인해 심한 지형기복 및 요철과 돌출된 지형을 형성하고 있으며, 풍화작용과 절리에 의해 암벽붕괴가 진행 중이다. 조면암은 플라이스토세 후기의 Wisconsin 빙하기에 형성된 이래 빙하기후와 백록담의 고도에 기인된 냉대기후 조건하에서 기계적 풍화작용에 의해 현재의 풍화상태와 지형을 형성하였으며 화학적 풍화작용은 미미하게 진행된 것으로 확인되었다. 조면암 용암 돔 형성시에 냉각절리인 수직절

리가 발달하고 전형적인 기계적 풍화작용인 동결썩기작용(frost wedging)과 동파(frost splitting)에 의해 암석이 파괴, 분리되고 돌출지형이 형성되며, 층상절리의 발달과 박리, 기계적 풍화작용에 의한 미세균열 및 공극의 발달 등으로 암석이 약화되어 조면암 분포지에서 암벽 붕괴가 지속적으로 진행 중으로, 연구지역에서 기계적 풍화작용이 가장 중요한 풍화 매커니즘으로 작용하고 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 고정선, 윤성호, 강순석, 2003, 제주도 한라산 백록담 분화구 일대 화산암류의 암석학적 연구, 암석학회지, Vol.12, no.1, pp.1-15.
- 김옥준, 손치무, 이대성, 이상만, 윤선, 남기영, 김영준, 홍충식, 1965, 제주도 지하수탐색지질조사보고서, 건설부 (주)한국지하자원조사소, 178p.
- 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수보고서, 농업진흥공사, 381p.
- 박기화, 이병주, 조동룡, 김정찬, 이승열, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 장영욱, 장영남, 손병국, 전희영, 김용욱, 2000, 서귀포하회리도폭(1:50,000 축척) 지질보고서, 제주도한국자원연구소, 290p.
- 박기화, 이병주, 조동룡, 김정찬, 이승열, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 김유봉, 1998, 제주 애월도폭(1:50,000 축척) 지질보고서, 제주도 한국자원연구소, 290p.
- 원중관, 1975, 제주도의 형성과정과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 응용과학연구소 이학논집, Vol.1, pp.7-42.
- 윤선, 1995, 제주도 형성사, 제주도, 제98호, pp.148-164.
- 윤선, 현원학, 정차연, 2005, 제주도 한라산의 지질, 지질학회지, 제41권 4호, pp.481-497.
- 이창섭, 2005, 화강암의 풍화 특성과 물성변화에 대한 연구, 부경대학교 공학박사학위논문, 228p.
- 제주도, 2000, 한라산 기초조사 보호관리 계획수립, 제주도, 268p.
- Fisher, R.V., 1979, Magma and Volcanic Rocks, Geology, 260p.
- Gupta, A.S, Rao, K.S., 2001, Weathering indices and their applicability for crystalline rocks, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol.60, No.3, pp.201-221.
- Haraguchi, K., 1930, Jeju Volcanic Island. Professor Ogawa's Sixtieth Birthday Memorial Volume, pp.595-649, geologic map. (in Japanese, titles translated).
- Harnois, L., Moore J.M., 1988, Geochemistry and origin of the Ore Chimney Formation, a transported paleo-oregolith in the Grenville Province of Southern Ontario, Canada, Chemical. Geology, Vol.69, pp.267-289.
- Irfan. T.Y., Dearman. W.R., 1978, Engineering classification and index properties of a weathered granite, Bulletin of Engineering Geology, Vol.11, pp.233-244.
- Irfan. T.Y., 1994, Aggregate properties and resources of granitic rocks for use in concrete in Hong Kong. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, Vol.27, No.1, pp.25-38.
- ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.15, pp.319-368.
- ISRM, 1981, Rock characterization, testing and monitoring; ISRM suggested method. Pergamon Press, Oxford. UK.
- Jayawardena U de S, Izawa E., 1994, A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka, Engineering. Geology, Vol.36, pp.303-310.
- Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea. The science reports of the Tohoku University, Series III, Vol.15, pp.177-256.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, Nature, Vol.229, pp.715-717.
- Parker A., 1970, An index of weathering for silicate rocks. Geological Magazine, Vol.10, pp.501-504.
- Reiche, P., 1943, Graphic representation of chemical weathering. Journal of Sedimentary Petrology, Vol.13, pp.58-68.
- Rocha-Filho, P., Antunes, F.S. & Falcao, M.F.G, 1985, Quantitative influence of the weathering degree upon the mechanical properties of a young gneiss residual soil. Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical and Saprolitic Soils, Brasilia, Vol.1, pp.281-294.
- Ruxton, B.P., 1968, Measures of the degree of chemical weathering of rocks. Journal of Geology, Vol.76, pp.518-527.
- Suoeka, T., 1988, Identification and classification of granite residual soils using chemical weathering index, in Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore, Vol.1, pp.55-61.
- Suoeka, T., Lee, I.K., Hiramatsu, M. & Imamura, S., 1985, Geomechanical properties and engineering classification for decomposed granite soils in Kaduna district, Nigeria. Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasilia, Vol.1, pp.175-186.
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Volcanics, Korea. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 41, pp.527-537.
- Vogt, T., 1927, Sulitjelma feltets geologiog petrografi, Norges geologiske undersøkelse 121, 560p.
- Won, C.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. J. Korea Inst.



**이창섭**

(주)동해이엔지

616-841 부산광역시 북구 금곡동 1880-5 해성빌딩 4층

Tel: 051-338-5636

Fax: 051-338-9414

E-mail: donglcs@chol.com

**이상배**

부경대학교 응용지질학과

608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

Tel: 051-620-6240

Fax: 051-627-2956

E-mail: leesb@pknu.ac.kr

**조태진**

부경대학교 환경탐사공학과

608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

Tel: 051-620-6238

Fax: 051-627-2956

E-mail: chotc@pknu.ac.kr

**원경식**

지오택컨설팅(주)

435-776 경기도 군포시 당정동 522 SK벤티움 102동  
804호

Tel: 031-436-0836

Fax: 031-436-0875

E-mail: geoinfo@geoinfo.co.kr