

암반풍화도에 따른 지질공학적 특성 저감효과

이창섭^{1)*}, 조태진²⁾

Effects of Rock Weathering on the Degradation of Engineering Properties

Chang-Sup Lee and Taechin Cho

Abstract Weathering is defined as a process by which surface rock, once formed in the deep ground, is broken down and altered to keep the equilibrium with the ambient environment. In this study granitic rock samples of different weathering grades were collected in the field and the microscopic observation, X-ray diffraction analysis, electron microscopic observation, chemical analysis, and rock property tests were carried out. Formation of secondary minerals, especially clay minerals, by weathering was identified and the mechanism for the change of engineering properties such as rock strength degradation was analyzed. Tunnel model test, Failure behaviour, Shallow tunnel, Unsuproted tunnel length

KeyWords Weathering, Granitic rock, Weathering mechanism, Secondary mineral, Rock strength degradation

초 록 풍화작용은 심부에서 생성된 암석이 지표에서 파괴되고 변질되어 현재의 환경조건과 평형을 이루는 산물을 형성하는 과정이다. 본 연구에서는 국내에서 가장 분포면적이 넓은 화강암질암의 풍화단계별 시료를 채취하여 편광현미경관찰, X-선 회절분석, 전자현미경관찰, 화학분석, 물성시험등을 수행하였다. 실험결과에 의거하여 풍화에 의해 형성되는 2차광물, 특히 점토광물의 형성과정을 확인하였고, 풍화에 따른 암석의 공학적인 성질변화와 물성저하의 메카니즘을 규명하였다.

핵심어 풍화작용, 화강암질암, 풍화 메카니즘, 2차광물, 암석강도저하

1. 서 론

풍화작용은 지표근처의 암석이 파괴되고 변질되어 기권, 수권, 생물권과 거의 평형을 이루는 산물을 형성하는 과정이라고 정의된다(Ollier, 1975). 풍화와 관련된 연구는 조암광물의 풍화에 대한 안정도를 나타내는 광물안정계열의 연구(Goldish, 1938)를 시작으로 하여 암석의 화학조성 변화에 대한 연구, 광물의 변화에 대한 연구와 역학적 성질의 변화에 대한 연구 등이 수행되어왔으며, 조암광물의 조성에 관한 지질학적 연구(Ruxton and Berry, 1957), 암석의 역학적 성질의 변화에 관한 연구(Deere, 1966), 단성파속도 및 역학적 특성을 중심으로 한 각 풍화특성 상호간의 관련성(Hamrol, 1961; Iliiev, 1967) 등에 대한 다양한 연구성과가 보고되어 있다. 풍화정도를 등급화하고 분류하는

작업이 다양하게 시도되었다. 초기의 분류(Hamrol, 1961; Parker, 1970)는 단지 지수로서의 분류체계였으며 Ruxton and Berry(1957), Fookes et al.(1971) 등의 연구는 화성암을 대상으로 시도되었다. Hodder et al.(1991) 등은 변성암 및 퇴적암에 대한 분류체계를 제안하였다. Irfan (1978), Dearman(1976) 등은 기존의 여러 분류체계를 검토하고 이를 야외에서 적용한 후 풍화된 암반 및 암석에 근거하여 공학적 목적으로 사용될 수 있는 분류체계를 발전시켰다. Little(1969)에 의해 최초로 제안이 되고 Dearman(1976)에 의해 수정된 6단계의 풍화 분류체계가 현재 가장 널리 수용되고 있으며, 이러한 분류체계는 국제적인 지반공학 관련단체들(ISRM, 1978; IAEG, 1981; BSI, 1981)에 의해서 수용되었다. 국내에서도 함수율의 변화에 따른 지진파속도의 변화특성에 관한 연구(김영화, 1978), 화강암의 풍화에 따른 각종 지질공학특성변화 연구(김영화, 홍순호, 1990), 중생대화강암의 풍화에 따른 지질공학특성과 기존의 풍화등급분류의 적용에 관한 연구(Lee and De Freitas, 1989)가 수행되었다.

¹⁾ (주)동해이엔지 대표이사

* 교신저자 : dongles@chol.com

접수일 : 2005년 8월 19일

심사 완료일 : 2005년 10월 20일

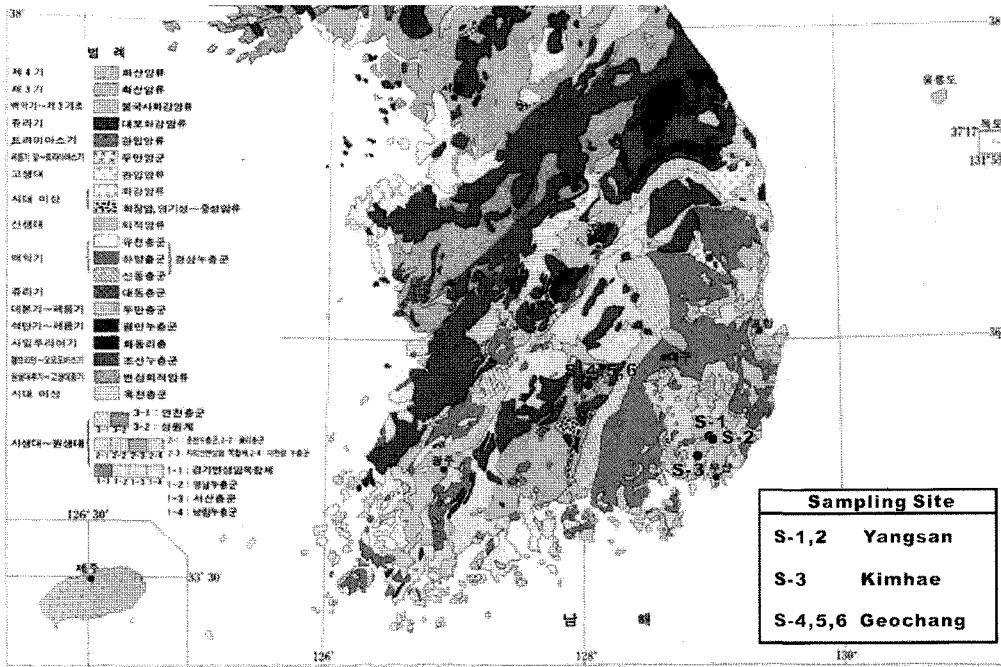


Fig. 1. Geological map of southern part of Korean peninsula and the locations of sampling sites

본 연구에서는 국내에서 가장 분포면적이 넓은 화강암질암의 분포지를 대상으로 풍화 단계별로 시료를 채취하여 편광현미경 관찰, X-선 회절분석, 전자현미경 관찰, 화학분석, 물성시험 등을 실시하였다. 광물학적 연구를 통하여 풍화에 따른 구성광물의 변화와 변질광물의 생성, 미세균열의 발달, 조직의 변화 등을 관찰하였다. 지구화학적 연구결과를 바탕으로 풍화에 따른 주성분원소의 변화와 이동도를 검토하였고, 풍화단계에 따른 물성치를 측정하여 물성변화를 조사하였다. 이상과 같은 광물학적, 화학적, 공학적인 연구결과를 바탕으로 풍화에 의해 형성되는 2차 광물, 특히 점토광물의 형성 과정을 확인하였으며, 풍화에 따른 공학적 성질 변화와 물성저하의 메카니즘을 규명하였다.

2. 연구지역의 지질 및 화강암의 특성

경남지방의 중생대 백악기 불국사화강암체가 분포하는 대표적인 지역 6개소에서 대표적인 풍화단면에서 시료를 채취하여 풍화에 대한 연구를 수행하였다(Fig. 1). 연구대상 암석은 중생대 백악기에 주로 관입한 화성관입체인 불국사관입암체 중에서 화강암질암을 선정하였다. 김해, 양산지역에 분포하는 암석은 경상분지 내에 분포하는 화강암질암이며, 거창지역에 분포하는 암석은

소백산육괴 내에 분포하는 화강암질암이다.

6개 지역에서 채취된 신선한 암석시료를 대상으로 모달분석을 실시하고 IUGS 분류(Streckeisen, 1973)를 실시하였다. 양산지역의 흑운모화강암은 화강암 영역에 도시되었으며, 김해지역 각섬석화강암은 화강섬록암(granodiorite)으로 분류되었다. 거창지역 Site 5에서 채취된 시료는 화강암으로 분류되었으며, Site 4 및 Site 6 지역에서 채취된 시료는 화강섬록암으로 구분되었다(Fig. 2).

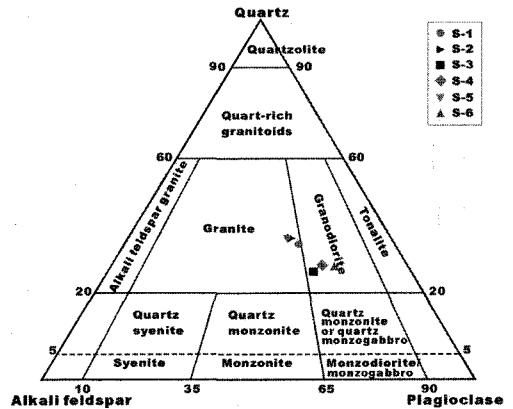


Fig. 2. Classification of granitic rocks in the study area

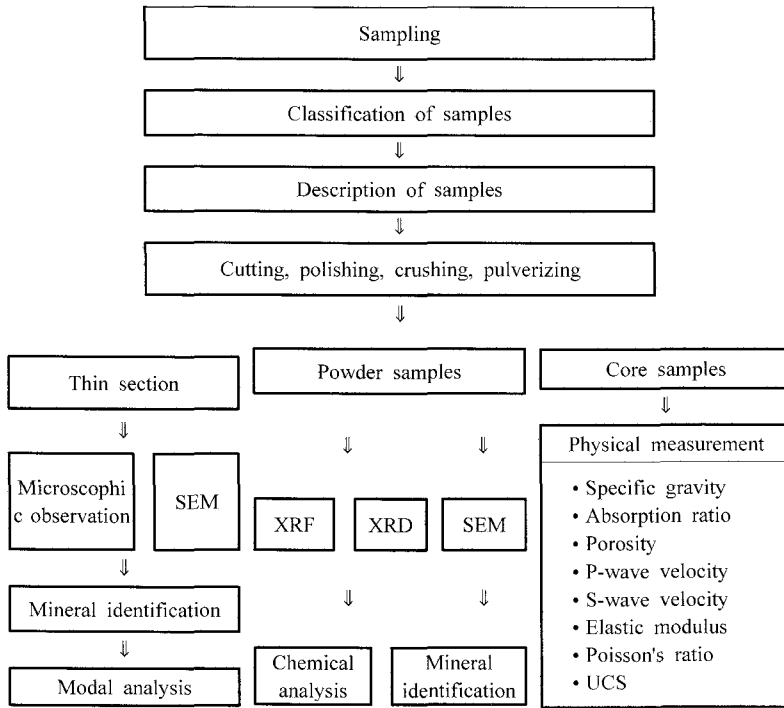


Fig. 3. Flowchart of study procedure

3. 시료채취 및 분석

Irfan(1978)은 풍화의 풍화에 대한 6단계분류기준을 제시하였다. 이 분류법은 육안적인 구분에 의한 풍화도 판별을 가능하게 하며, 신선한 암석에서 잔류토양까지 풍화의 전체 단계를 포함하여 특히 화강암과 같은 심성암에 유용하게 적용된다. Irfan(1978)의 풍화도 분류체계에 의거하여 연구지역에서 풍화단계별로 6개씩의 블록시료를 채취하고 코아시료(10*5 cm)를 제작하였다. 제작된 시편을 대상으로 암석의 공학적인 물성변화를 파악하기 위하여 ISRM(1981) 규정에 의거 물성시험을 실시하였다. 물성시험 항목은 비중, 흡수율, P파 속도, S파 속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 공극률의 8개 항목이다.

풍화진행에 따른 암석의 광물학적 변화를 확인하기 위하여 박편을 제작하였다. 제작된 박편을 이용하여 편광현미경 관찰과 모달분석을 실시하여 광물조성을 확인하였다. 각 시료의 화학성분과 풍화에 따른 화학조성의 변화를 파악하기 위하여 주성분 원소에 대한 화학분석(X-선 형광분석, XRF)을 실시하였으며, 분석대상은 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O,

K₂O, P₂O₅, LOI 등 11개 성분이다. 풍화작용에 따른 변질광물, 특히 점토광물의 형성여부와 종류를 파악하기 위하여 분말시료에 대한 X-선 회절분석(XRD)도 실시하였다.

박편제작이 가능한 신선(fresh, F), 약간풍화(slightly weathered, SW), 보통풍화(moderately weathered, MW), 심한풍화(highly weathered, HW)등 4개 등급의 연마박편시료와 전체 풍화단계(6 단계)의 분말시료를 대상으로 전자현미경 관찰과 WDS 및 EDS에 의한 구성광물 성분분석을 실시하여 풍화에 따른 광물의 변질과 점토광물의 형성, 미세균열의 형성, 화학성분의 용탈 등을 분석하였다. 연마박편을 통한 광물의 미세조직 및 구성광물 성분분석은 전자현미경(SEM)기능과 EDS Energy Dispersive Spectrometer)가 장착된 CAMECA SX-00 Electron Microprobe를 사용하여 분석하였다. 연마박편은 탄소 코팅하였으며, 가속전압 15KV, 100 nA probe current와 1010 μm beam diameter의 조건으로 측정하였다. 전자현미경을 이용하여 Backscatter electron (BSE) image를 구했으며, EDS 점분석(EDS point analysis)과 EDS 면분석(EDS element mapping)을 수행하였다. 암석분말 및 잔류토양 시료의 구성광물 성분분석과 입자

형태의 관찰은 EDS가 장착된 Hitachi S-4200 전자현미경(SEM)을 사용하였으며 시료는 Au로 코팅하였고 가속전압은 15 KV를 사용하였으며, Secondary electron(SE) image를 구했다.

이상과 같은 시료채취·시료제작·분석과정을 Fig.3에 도시하였다.

4. 분석결과 및 고찰

4.1 광물학적 특성변화

4.1.1 신선한 암석(fresh rock)

육안관찰에 의하면 시료 내의 모든 광물은 변질을 받지 않았으며, 암석은 회, 담회, 담홍색을 띤다. 구성광물들의 입자는 아주 치밀하게 맞물려 있다. 장석들은 입자의 윤곽을 잘 보존하고 있고, 착색되지 않은 약간의 미세 균열 및 공극들 만이 나타난다. 전자현미경을 사용하여 장석 입자의 표면을 관찰한 결과 표면에 약간의 박피현상이 발견되기도 하나, 원래의 결정형은 잘 유지되고 있다(Fig. 4-6 참조).

4.1.2 약간 풍화된 암석(slightly weathered rock)

풍화작용의 초기단계에 해당되는 암석이다. 전체적으로 구성입자들은 치밀하게 맞물려 있으나 미세균열 및 공극이 존재하며 일라이트가 확인된다. 장석이 변질되어 나타나기 시작하며, 사장석의 변질이 정장석에 비해

상대적으로 현저하다. 특히 규칙적인 미세균열(structurally controlled microfracture)이 나타나기 시작하는데, 이러한 미세 균열을 따라 용액이 침투함으로써 생긴 용해 공극(solution pit or solution pore)이 간간히 형성되어 있다. 전자현미경을 통하여 장석 입자의 표면을 관찰한 결과 장석 표면에서는 표면 박피가 일어나고 있다. 박편들은 대부분 K와 Na가 용탈되기 시작하고, 초기단계의 미세한 고령석 편(flake)들이 극소량 관찰된다. 흑운모들도 약간의 화학적 풍화양상을 나타내고 있다. 전자현미경 관찰에 의하면 흑운모로부터 Fe가 산화작용에 의해 방출되어 입자경계나 벽개면, 미세균열을 중심으로 암석에 착색되어 나타나며, 흑운모로부터 Fe의 산화물이 형성됨에 따라 흑운모가 팽창하여 미세균열이 발달되기 시작한다(Fig. 4-6 참조).

4.1.3 보통 풍화된 암석(moderately weathered rock)

장석의 변질은 약간 풍화된 암석에 비해서 현저하며, 입자경계도 뚜렷하게 구분되지 않는다. 전체적으로 구성입자들의 조직은 치밀하지 못하며, 많은 미세균열들과 공동이 뚜렷하게 발달되고 있다. 특히 장석 내에는 벽개면을 따라 규칙적으로 발달하는 미세균열들이 현저하며, 용해공동들이 형성되어 있다. 미세균열의 간격은 약간풍화단계에서 보여주는 것보다 넓어져 있으며, 균열로 분리된 장석입자들은 더욱 미세한 입자 크기를 나타내고 있다. 용해공동은 용액에 의한 화학적 풍화작

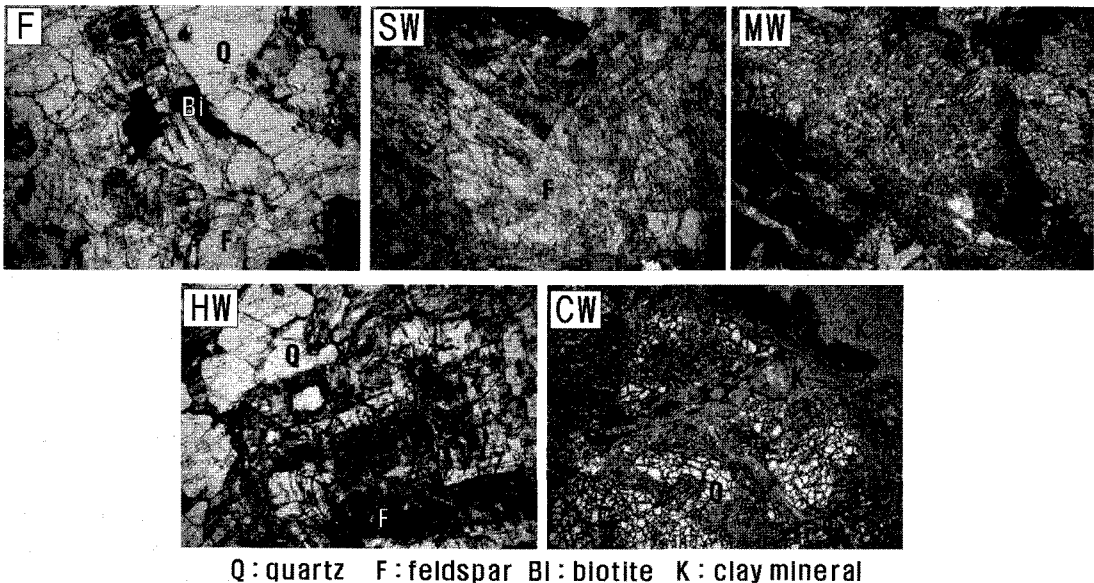


Fig. 4. Microphotographs of granitic rock of different weathering grades. (F) fresh rock, (SW) slightly weathered rock, (MW) moderately weathered rock, (HW) highly weathered rock, (CW) completely weathered rock

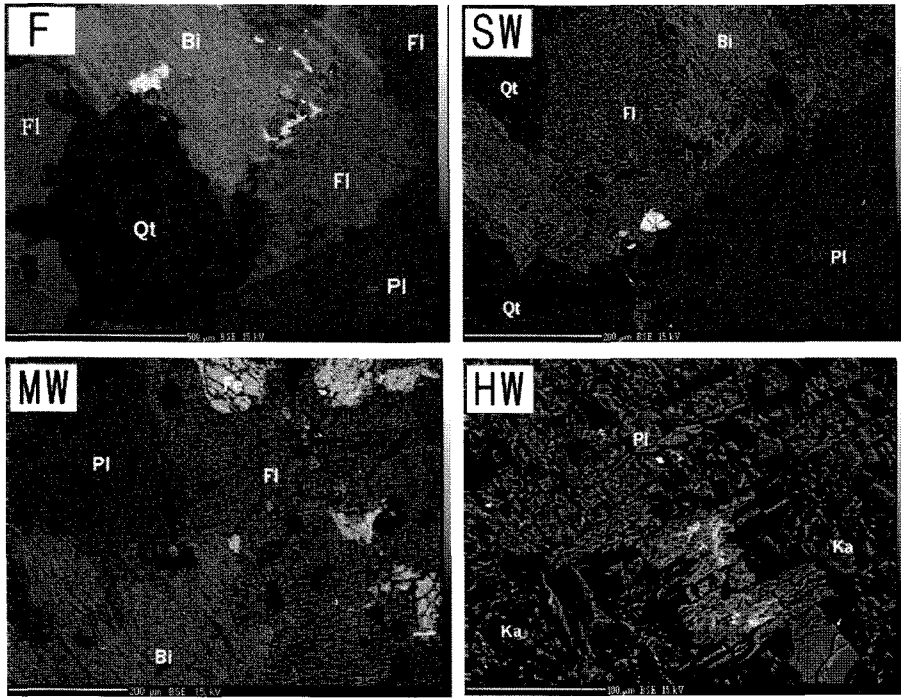


Fig. 5. SEM micrographs of weathered granitic rocks

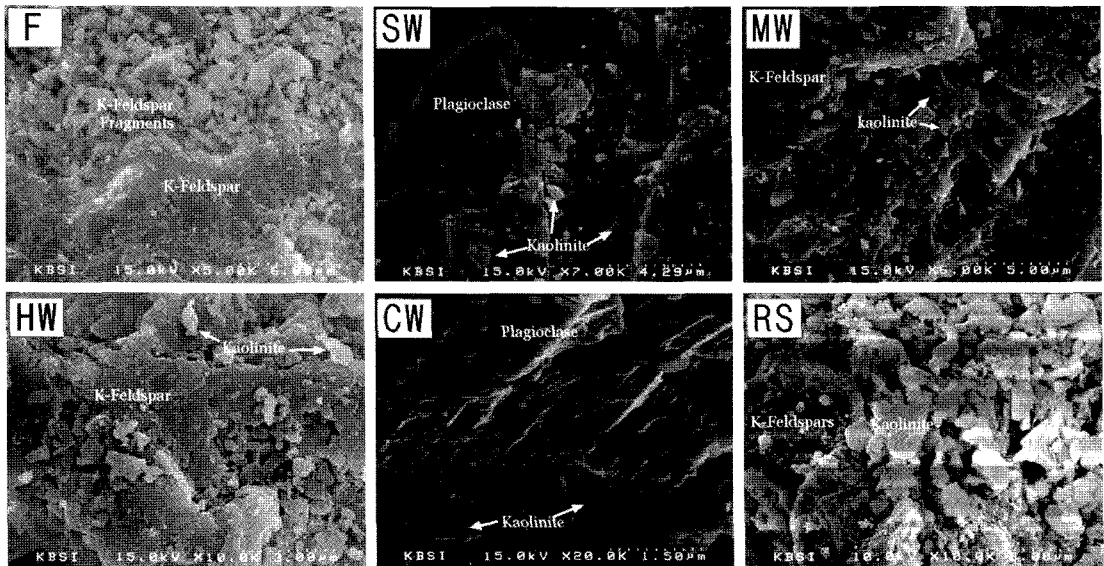


Fig. 6. SEM micrographs of weathered granitic rocks and residual soil(RS)

용에 의해 장석이 분해되었음을 뚜렷이 시사하고 있다. 장석입자의 가장자리가 부분적으로 극미세 입자로 분해되어 있으며, 이는 장석이 고령석화되고 있음을 보여

주고 있다. 흑운모 내의 벽개면도 확장되어 있으며, 철산화물의 용출로 변색되어 나타난다. 장석 입자의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과, 화학적 풍화작용에 의

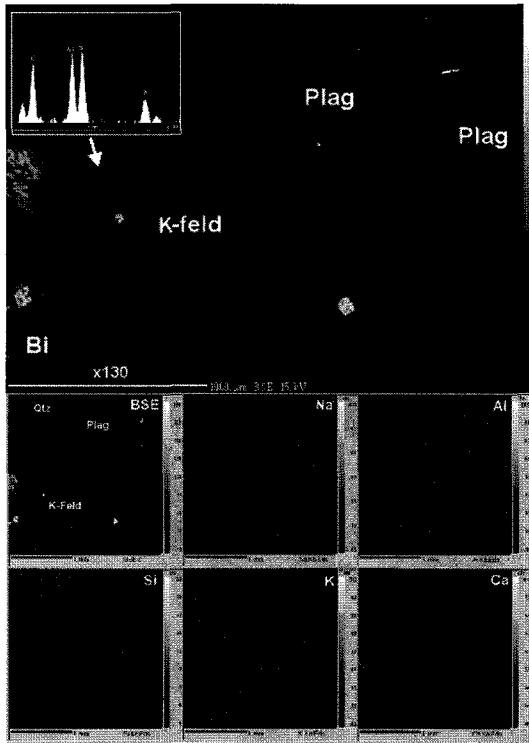


Fig. 7. SEM micrograph, EDS peaks and element maps for unweathered K-feldspar(Plag:plagioclase, K-feld: K-feldspar, Bi: biotite)

해 거칠며, 표면에 미세한 점토들이 피복되어 나타나기도 한다. 고배율($\times 80,000$)로 확인한 결과, 벽개면을 따른 표면의 박피 현상이 현저하며 미세한 고령석 박편(kaolinite flake)들이 박피된 벽개표면에서 나타난다 (Fig. 4-6 참조).

이 단계의 암석에서는 장석으로부터 K와 Na가 현저하게 용탈되어 나타난다. Fig. 7은 풍화되지 않은 K-장석의 후방산란영상(BSE image, back scattered electron image)을 보여주고 있다. EDS 분석과 element map은 풍화되지 않은 K-장석에서 K가 고르게 분포하고 있음을 잘 보여주고 있다. Fig. 8에서는 매우 풍화된 장석에서 K 이온이 용탈된 양상을 보여주고 있다. K-장석 입자의 내부(K-rich zone)에서는 여전히 상당량의 K가 존재하고 있으나, 풍화가 진행되어 K의 용탈이 일어남으로서 입자 가장자리에서 K가 결여되고 있음이 EDS element map 상에서 잘 나타나고 있다. 용탈이 진행된 장석 부분의 EDS peak에서 K가 결여되고 있음이 잘 식별되고 있다.

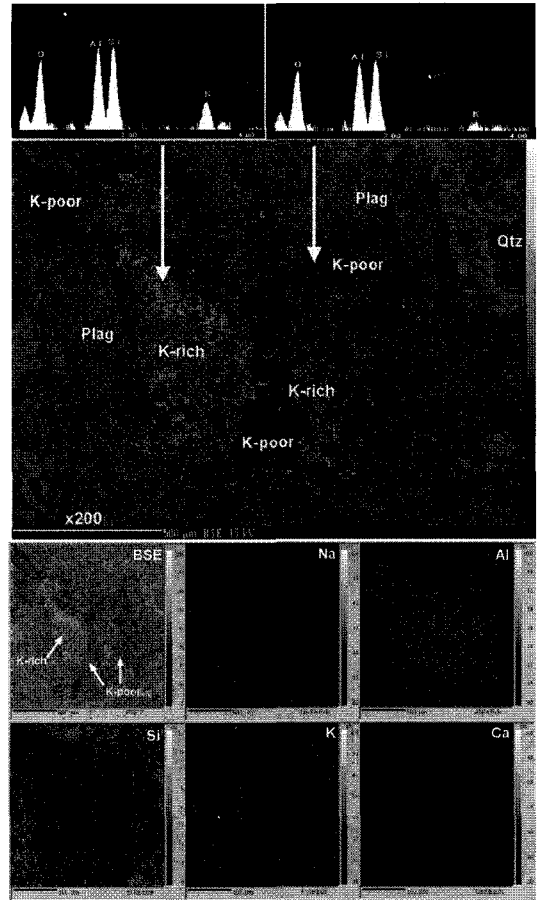


Fig. 8. SEM micrograph, EDS peaks and element maps for highly weathered K-feldspars showing K-deficiency at the margins as a result of leaching during weathering process(Plag: plagioclase, K-poor: relatively K deficient zone in K-feldspar, K-rich: zone in K-feldspar that K was not leached out)

4.1.4 매우 풍화된 암석(highly weathered rock)

편광현미경 하에서 장석 입자의 경계구분은 거의 곤란하며 장석류는 변질되어 나타난다. 풍화작용이 현저해짐에 따라 미세균열의 밀도가 높아지고 있다. 주 벽개면 및 입자사이의 간격도 현저히 넓어져 있고, 이를 따라서 용액의 흐름이 있었음이 관찰된다. 용액은 벽개면을 따라 흘렀을 뿐 만 아니라 불규칙한 형태의 solution channel을 형성하고 있으며, 넓은 용해공동들을 형성하고 있다. 장석 입자들의 크기는 더욱 작아져 나타나며, 미세한 고령석 입자가 박편형으로 미세균열의 틈과 용해공동, solution channel에서 관찰되기도 한다. 화학적 풍화가 계속 진행되어 장석이 미세한 박편

상의 고령석 입자로 분해되어 나타나기도 한다. 흑운모의 벽개면은 팽창되어 틈이 넓어졌으며, 팽창이 현저해진 부분에서는 부분적으로 변질되어 있다. 흑운모의 부피팽창은 암석 내에서 미세균열(microfracture)을 형성하여 암석의 강도저하로 이어진다. 장석 입자의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과, 장석들은 화학적 풍화로 인하여 결정형이 파괴되기 시작하고 장석표면의 점토 피복은 더욱 현저히 나타난다. 고배율($\times 20,000$)로 관찰하면 풍화가 벽개면을 따라 현저히 진행되어 벽개 표면을 따른 박피 현상도 현저하고 다량의 미세한 고령석 박편(kaolinite flake)들이 박피된 벽개 표면에 나타난다(Fig. 4-6 참조).

4.1.5 완전 풍화된 암석(completely weathered rock)

전자현미경을 통하여 장석 입자의 표면을 관찰한 결과, 풍화작용으로 인하여 결정형이 현저히 파괴되어 나타난다. 표면은 분해되어 거칠어져 있으며, 점토 피복이 현저히 나타난다. 고배율($\times 1,000 \sim \times 30,000$)로 관찰하면 벽개 표면을 따른 박피 현상이 현저히 나타나며, 다량의 미세한 고령석 박편(kaolinite flake)들이 박피된 벽개 표면에 장석파편과 구분되어 잘 나타난다. 흑운모는 거의 대부분 변질되어 2차 변질광물을 형성하며, 벽개면을 따라 새로운 광물이 형성되면서 벽개면을 중심으로 팽창한다(Fig. 4-6 참조).

4.1.6 잔류토양(residual soil)

석영과 정장석의 파편을 제외한 1차 광물은 확인되지 않는다. 석영은 작은 입자로 부서져 점토광물 기질 내에 산포되어 나타난다. 현저한 풍화작용의 결과로 장석은 미세한 입자 혹은 입자들의 결집체로 관찰된다. 큰 장석 입자의 결정 윤곽은 희미하며, 표면은 거칠어져 있고 두터운 clay 피복이 형성되어 있다. 고배율($\times 4,000 \sim \times 10,000$)로 관찰하면 고령석 박편(kaolinite flake)들이 약간의 미세 장석 파편들과 함께 다량 관찰된다(Fig. 4-6 참조).

4.2 화학적 특성변화

풍화진행에 의한 주성분원소의 변화와 원소의 이동도를 확인하기 위하여 풍화단계별로 채취된 시료에 대해 X-선 형광분석(XRF)을 통하여 SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , LOI 등 11개 성분을 분석하였다(Table 1). 풍화 강도가 증가함에 따라 Ca 및 Na 함량비는 감소하는 반면 LOI는 증가한다. Mn, Mg, Fe, Ti 등은 풍화의 마지막 단계에서 증가하는 경향을 보여준다. Si, Al의 함량비는 거의 변

화를 보여주지 않는다. 일반적으로 이동도가 높고 풍화 과정에서 감소한다고 알려진 K는 함량비의 변화를 거의 보여주지 않으며, P는 일정한 경향을 나타내지 않는다(Fig. 9).

Na와 Ca의 감소는 사장석의 변질작용과 밀접하게 연관되며, 편광현미경 및 전자현미경에 의한 광물학적 연구결과에 의해서 증명된다. LOI, Ti, Fe의 증가는 2차 광물, 특히 점토광물의 형성과 밀접하게 연관된다. LOI의 경우 RS 등급에서 가장 높은데, 이는 점토광물의 높은 함량비에도 기인하지만 잔류토(residual soil)에 포함된 유기물 함량의 영향을 받을 수 있는 것으로 판단된다.

K는 K-장석(potash-feldspar)을 구성하는 주요한 성분 중의 하나로서 K의 성분변화는 K-장석의 변질과 밀접하게 관련되는 것으로 판단된다. 편광현미경 및 전자현미경 관찰에 의하면 SW 등급에서 K-장석의 미약한 변질이 시작되고, MW 등급에서부터 K-장석의 변질이 본격적으로 진행된다. 전자현미경 관찰 시의 EDS 분석 결과에서도 장석으로부터 K 성분의 용탈을 확인하였다. 결과적으로 MW 단계에서부터 K의 성분은 감소하여야 하나 실제 분석결과에서는 큰 변화를 보이지 않으며, MW 단계와 신선한 암석(모암)에서의 함량이 유사하다. 이는 K를 함유하는 점토광물인 illite의 존재로 설명될 수 있다. 풍화과정에서 K-장석이 점토광물로 변질되나 K-장석으로부터 용탈된 K 이온은 K-함유 점토광물인 illite를 생성시키는데 사용됨으로서 암석 내에서는 전체적으로 K 성분의 함량변화가 초래되지 않는다.

Mg, Fe는 철고토질 광물(ferromagnesian mineral)인 흑운모, 각섬석 등을 구성하는 성분이다. 흑운모, 각섬석 등은 풍화에 취약한 광물이며 풍화초기에 Fe, Mn 이온이 방출되며, 풍화작용의 후기단계에 유기물이 풍부한 점토광물이 이를 흡수한다. 따라서 이러한 이온들은 풍화과정에서 함량이 미약하게 감소 또는 초기 함량을 유지하다가 최종 단계에서 증가하는 경향을 보여준다. Al, Si 등은 이동도가 낮은 원소(immobile element)로 확인되었으며, 이들 원소는 풍화 시 장석류가 점토광물로 변화하는 과정에서 일정한 함량을 계속 유지하기 때문에 해석된다.

이상의 결과들을 종합할 때 Na, Ca의 감소는 1차 광물, 즉 사장석의 파괴에 기인하는 것으로 설명할 수 있다. LOI, Fe, Ti의 증가는 점토광물의 형성에 영향을 받으며, 또한 Mg, Fe의 증가는 철고토질 광물인 흑운모, 각섬석 등의 풍화를 반영하고 있다. 따라서 화학성분의 변화는 풍화단계에 따라 좌우되기 보다는 풍화에 의해 형성되는 2차 광물, 특히 점토광물의 종류와 양에 따라 좌우된다.

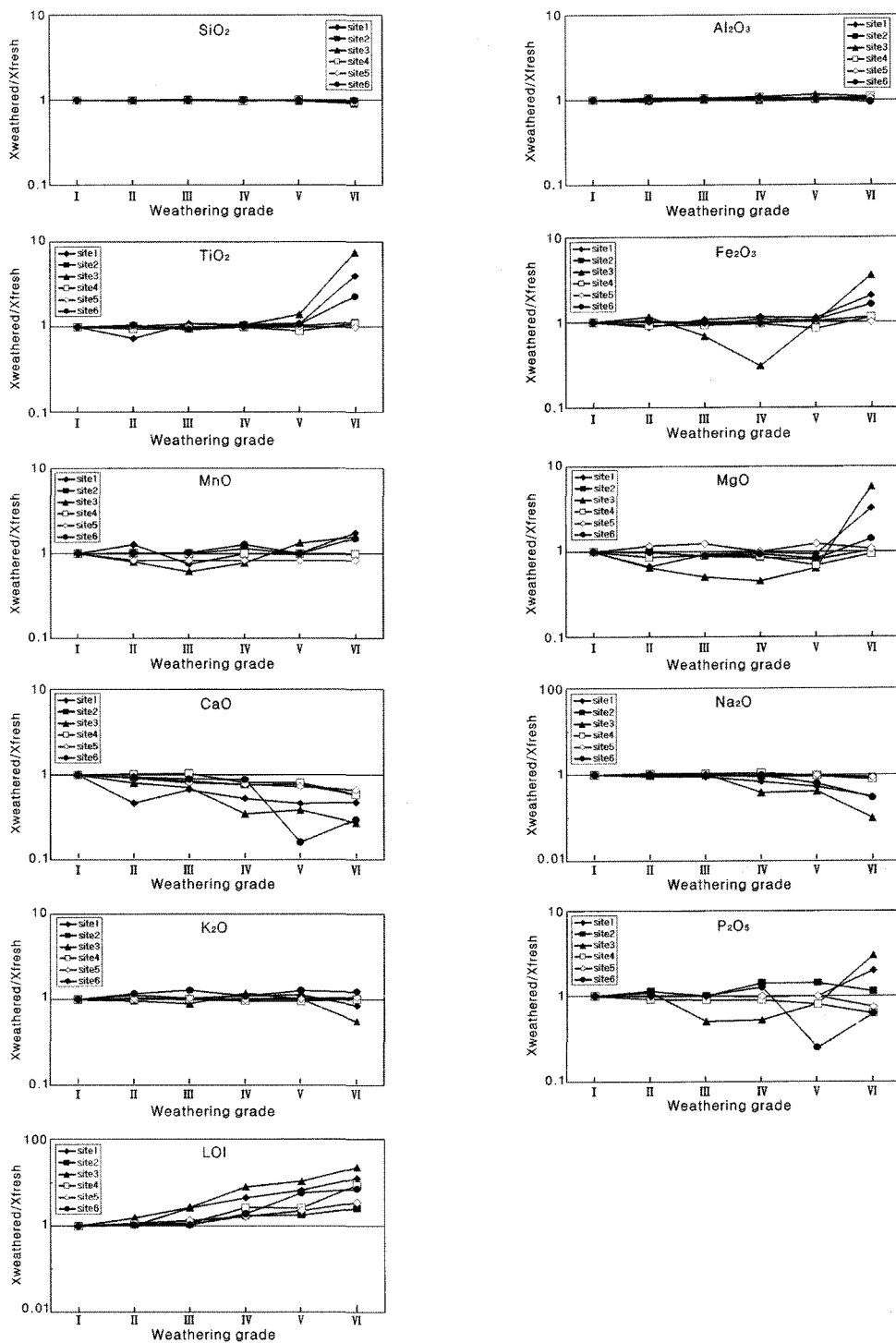


Fig. 9. Parent-normalized weight percent of major oxides with respect to the weathering grades

Table 1. Weight percent of major elements with respect to the weathering grades

Sample No.	Grade	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
S-1-1	F	76.68	12.70	0.11	1.49	0.04	0.15	0.57	4.39	3.83	0.01	0.33	100.30
S-1-2	SW	76.73	12.11	0.08	1.30	0.05	0.10	0.26	4.11	4.25	0.01	0.34	99.34
S-1-3	MW	76.18	13.07	0.12	1.61	0.03	0.14	0.38	3.98	3.95	0.01	0.87	100.34
S-1-4	HW	76.46	13.20	0.12	1.73	0.04	0.15	0.30	3.08	4.25	0.01	1.51	100.85
S-1-5	CW	75.43	13.25	0.12	1.69	0.04	0.14	0.26	2.35	4.28	0.01	2.21	99.78
S-1-6	RS	74.75	13.00	0.44	3.11	0.07	0.49	0.27	1.36	3.29	0.02	4.23	101.03
S-2-1	F	70.60	14.52	0.32	2.99	0.07	0.58	2.02	4.19	3.60	0.07	0.84	99.80
S-2-2	SW	70.94	14.28	0.33	3.17	0.07	0.58	1.86	4.01	3.68	0.08	0.91	99.91
S-2-3	MW	71.64	14.39	0.31	2.81	0.07	0.52	1.71	4.08	3.58	0.07	0.93	100.11
S-2-4	HW	70.98	14.32	0.34	3.25	0.08	0.50	1.54	3.97	3.68	0.10	1.45	100.21
S-2-5	CW	70.63	14.42	0.33	3.08	0.07	0.47	1.56	3.96	3.69	0.10	1.51	99.82
S-2-6	RS	69.70	14.81	0.36	3.48	0.07	0.60	1.16	3.60	3.70	0.08	2.17	99.73
S-3-1	F	77.70	12.77	0.11	1.32	0.03	0.14	0.69	3.91	4.08	0.01	0.30	101.06
S-3-2	SW	76.97	12.93	0.11	1.52	0.02	0.09	0.55	3.99	3.92	0.01	0.46	100.57
S-3-3	MW	77.36	13.14	0.12	0.91	0.02	0.07	0.49	4.06	3.60	0.01	0.79	100.57
S-3-4	HW	76.61	13.48	0.11	0.40	0.02	0.06	0.23	1.51	4.73	0.01	2.36	99.55
S-3-5	CW	74.49	14.67	0.15	1.32	0.04	0.09	0.26	1.62	4.07	0.01	3.21	99.94
S-3-6	RS	70.57	13.56	0.82	4.68	0.05	0.81	0.18	0.38	2.23	0.03	6.79	100.10
S-4-1	F	70.49	15.07	0.35	2.30	0.04	0.68	2.64	3.94	3.03	0.11	0.46	99.11
S-4-2	SW	68.92	15.75	0.33	2.12	0.04	0.58	2.67	4.14	3.02	0.10	0.51	98.18
S-4-3	MW	69.79	15.97	0.34	2.14	0.04	0.62	2.75	4.26	3.06	0.10	0.54	99.61
S-4-4	HW	69.35	16.24	0.35	2.23	0.04	0.60	2.13	4.42	2.95	0.10	1.23	99.64
S-4-5	CW	72.00	15.75	0.32	1.97	0.04	0.48	2.17	3.84	2.94	0.09	1.24	100.84
S-4-6	RS	68.25	16.63	0.39	2.67	0.04	0.65	1.56	3.17	3.08	0.07	4.11	100.62
S-5-1	F	74.54	14.00	0.08	2.02	0.06	0.12	1.16	3.42	4.12	0.04	0.36	99.92
S-5-2	SW	74.14	14.18	0.08	2.05	0.05	0.14	1.06	3.41	4.21	0.04	0.41	99.77
S-5-3	MW	73.96	14.40	0.08	2.03	0.05	0.15	0.93	3.44	4.28	0.04	0.49	99.85
S-5-4	HW	74.53	14.09	0.08	2.03	0.05	0.12	0.90	3.37	4.10	0.04	0.60	99.91
S-5-5	CW	73.64	14.44	0.08	2.09	0.05	0.15	0.84	3.40	4.16	0.04	0.81	99.70
S-5-6	RS	73.94	14.64	0.08	2.05	0.05	0.13	0.77	3.00	4.40	0.03	1.26	100.35
S-6-1	F	72.05	15.51	0.27	1.93	0.04	0.54	2.49	4.48	2.50	0.08	0.63	100.52
S-6-2	SW	70.41	16.12	0.28	1.98	0.04	0.53	2.32	4.52	2.88	0.08	0.65	99.81
S-6-3	MW	70.26	15.89	0.25	1.89	0.04	0.48	2.17	4.33	3.15	0.08	0.66	99.20
S-6-4	HW	70.08	16.13	0.27	1.87	0.05	0.50	2.17	4.32	2.70	0.10	1.20	99.39
S-6-5	CW	71.60	16.09	0.29	2.07	0.04	0.45	0.40	2.84	3.17	0.02	3.65	100.62
S-6-6	RS	71.44	14.65	0.62	3.13	0.06	0.76	0.73	1.33	3.07	0.05	4.45	100.29

4.3 물리적 특성변화

공학적 측면에서 암석으로 분류되는 F, SW, MW 풍화등급 시료를 대상으로 비중, 흡수율, 공극율, 탄성파속도(Vp, Vs), 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비 등 총 8개 물성을 측정하고 풍화단계에 따른 물성변화를 고찰하였다(Table 2 참조). 풍화작용이 진전됨에 따라 흡수율, 공극율, 포아송비는 증가하며 비중, 탄성파속도(Vp, Vs), 일축압축강도, 탄성계수는 감소하는 것으로 나타났다. 신선한 암석에서 MW 등급의 암석으로 풍화작용이 진행됨에 따라 공극률이 가장 급격히 변화되며(263% 증가), 흡수율도 큰 변화(182% 증가)를 보여준

다. 탄성계수(72% 감소)와 탄성파속도(60% 감소)는 풍화진행에 따라 현저하게 저감되며, 일축압축강도(48% 감소)와 포아송비(35% 증가)도 상당수준 변화한다. 비중은 공극율의 급격한 증가에도 불구하고 3단계 풍화등급 간에 3%감소의 미약한 변화를 나타낸다(Fig. 10 참조).

풍화작용에 따른 물리적 특성변화는 광물의 변질, 화학성분의 용탈 및 반응 등에 의한 새로운 광물의 형성과 이에 따른 입자경계의 열림, 결합력의 약화, 광물의 팽창과 응력해방에 따른 미세균열과 공극의 발달 등에 의한 것으로 판단된다. Hamrol(1961), Onodera(1974) 등의 연구에서 보고된 바와 같이 풍화진전에 따른 화학

Table 2. Physical properties of fresh and weathered granitic rocks

Physical Properties	Weathering Grade		
	F	SW	MW
specific gravity	2.58~2.65 (2.62)	2.56~2.60 (2.58)	2.53~2.56 (2.55)
absorption ratio(%)	0.37~0.70 (0.46)	0.80~1.00 (0.89)	1.20~1.40 (1.30)
P-wave velocity (m/sec)	4,220~5,100 (4,570)	2,480~4,120 (3,337)	1,450~2,400 (1,822)
S-wave velocity (m/sec)	2,220~2,610 (2,408)	1,220~2,130 (1,757)	730~1,220 (968)
compressive strength(MPa)	130~165 (143)	105~130 (114)	44~103 (75)
elastic modulus (GPa)	54.0~90.8 (75.7)	30.8~52.0 (41.3)	4.10~32.2 (21.5)
poisson's ratio	0.14~0.19 (0.17)	0.18~0.25 (0.21)	0.19~0.25 (0.23)
porosity(%)	0.81~1.07 (0.96)	2.28~3.08 (2.53)	3.25~4.06 (3.48)

* average

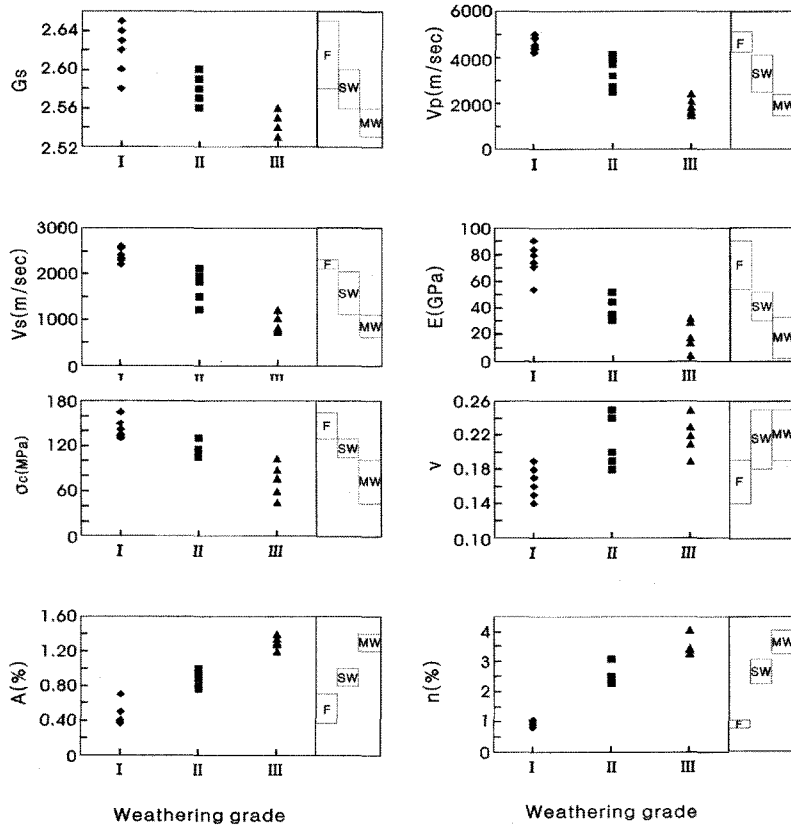


Fig. 10. Variation of physical index properties with respect to the weathering grades of granitic rocks in the study area

성분의 용탈에 의해 공극율이 급격하게 증가되며 암석의 물리적성질 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 고찰된다.

4.4 풍화 메커니즘

4.4.1 풍화에 의한 광물형성모델

풍화에 따른 광물조성의 변화와 새로운 광물의 형성 및 물성변화의 메커니즘을 규명하기 위하여 전자현미경 및 편광현미경 관찰을 수행하였으며 풍화시료에 대한 X-선 회절분석을 실시하여 풍화에 의해 새로 형성되는 광물조성을 파악하였다(Fig. 11). X-선 회절분석 결과에 의하면 석영은 풍화진전에 따른 함량변화를 거의 보여주지 않는다. 풍화에 대한 저항성이 강하므로 잔류토양에서 상대적인 함량이 증가하기도 하며, 전 풍화단계에 걸쳐 회절선의 강도가 크게 나타난다. 정장석은 풍화진전에 따라 함량감소를 보이며, 특히 CW 및 RS 단계에서 함량이 크게 줄어든다. 전자현미경 관찰 결과

에 의하면 정장석은 풍화가 진전됨에 따라 주로 kaolinite로 변질된다. 사장석은 풍화에 따라 가장 현저하게 함량 감소를 보이는 풍화에 매우 민감한 광물이다. 전자현미경 관찰에 의하면 비교적 풍화의 초기 단계에서부터 kaolinite로 분해되는 것으로 확인되었다. 장석류는 풍화가 진행되면서 회절선의 강도가 감소한다. Illite는 열수변질 광물로 판단되는데 초기에는 일라이트(illite)의 상태로 분포하다가 풍화작용이 진전되면서 mica/smectite로 변질되며 풍화가 더욱 심화되면 smectite로 변질되는 것으로 판단된다(Fig. 12). 녹니석(chlorite)은 흑운모의 열수변질 산물로 판단된다. 풍화진전에 따라 hydrous mica, vermiculite로 변질되며, 최종적으로는 kaolinite로 변질되는 것으로 알려져 있다. 따라서 풍화작용이 진행됨에 따라 변질되어 함량이 감소하거나 없어진다.

Kaolinite는 풍화진전에 따라 장석(정장석 및 사장석)으로부터 변질되어 형성되는 광물로서 대부분 장석의 최종 풍화산물이다. 전자현미경 관찰에 의하면 대체로 SW 등급의 암석에서 초기형태의 kaolinite가 소량 형성되기 시작하며, 풍화도가 증가하면서 함량이 증가하고 CW 및 RS 등급의 풍화단계에서 가장 증가한다. X-선 회절분석에서는 높은 풍화등급의 암석과 잔류토양에서 kaolinite의 분포가 확인된다.

Vermiculite는 biotite의 풍화산물이다. Biotite는 풍화가 진전됨에 따라 hydrous mica 또는 vermiculite로 변질되며, 풍화작용이 심화되면 kaolinite로 최종 변질되는 것으로 알려져 있다. Vermiculite는 팽윤성 광물로서 수화 시 팽윤되어 본 광물이 다량 포함된 암반구조물의 안정성을 저감시킬수 있다.

Smectite는 열수변질 광물인 illite의 최종 변질산물이다. 장석으로부터 기원된 열수변질 광물인 illite는 mica/smectite로 변질과정을 거친 후 풍화도가 증가함에 따라 최종적으로 smectite로 변질되는 것으로 판단된다. Smectite도 전형적인 팽윤성 광물로서 수화 시 팽창되어 강도정수를 저감시켜 암반구조물의 안정성을 감소시키는 역할을 한다.

4.4.2 암석의 풍화 및 물성저하 메커니즘

화강암의 풍화는 장석류와 흑운모의 풍화에 의해 주로적으로 진행되며, 사장석 및 흑운모가 정장석에 비하여 먼저 풍화과정을 겪는다. 풍화의 초기단계는 광물의 분해(decomposition) 및 변질(alteration)로 특징지어지며, 흑운모, 장석류의 분해·변질에 의해 탈색현상이 나타난다. 특히 흑운모로부터 산화작용에 의해 Fe가 방출되어 벽개, 광물주변부, 입자 경계, 미세균열을 따라 철

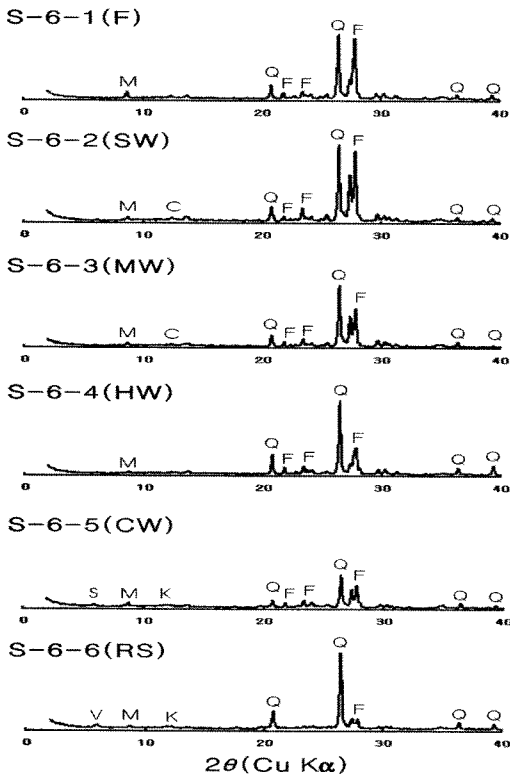


Fig. 11. X-ray diffraction patterns of weathered granitic rocks. (Q: quartz, F: feldspar, H: hornblende, C: chlorite, M: mica, I: illite, V: vermiculite, K: kaolin mineral, S: smectite)

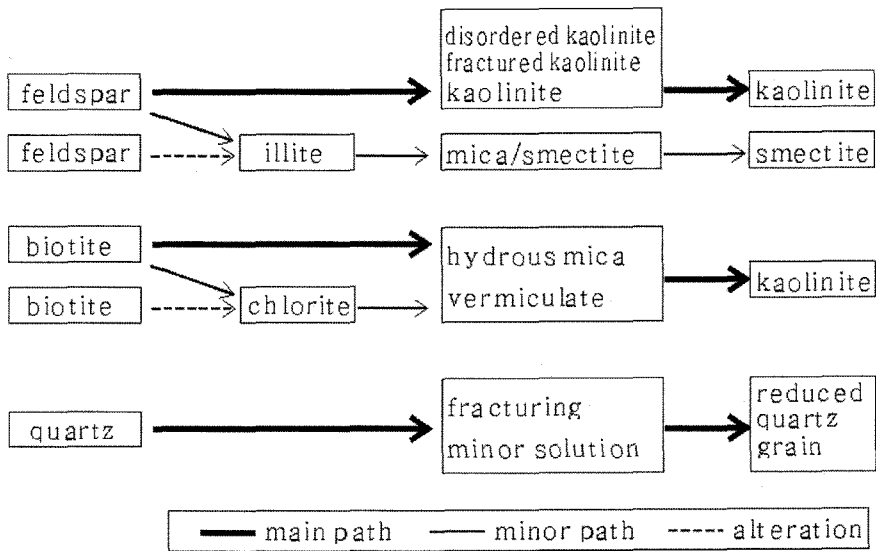


Fig. 12. Mineral formation process of major minerals in granitic rocks under weathering conditions

산화물(iron oxides)에 의한 착색현상이 나타난다. 풍화의 후기단계는 광물의 용해(mineral solution)로 특징지어지며, 흑운모로부터 방출된 Fe 산화물이 침전됨에 따라 흑운모가 팽창하여 미세균열이 발달되기 시작한다.

장석의 경우 결정의 벽개면을 따라 화학적 풍화작용이 진행됨으로써 틈이 벌어져 미세균열을 형성하며, 이러한 미세 균열을 따라 용액이 침투하여 용해 공극(solution pore)이 형성된다. 용해공극은 풍화작용이 진행됨에 따라 결합되어 결정내의 미세균열 밀도를 증가시키며, 그 결과 용해의 영향을 받은 장석입자는 약화되고 쉽게 부서져서 원래의 입자보다 작아지게 된다. 또한 흑운모와 장석의 벽개면과 미세균열 등을 따라 새로 형성된 광물들은 흑운모와 장석 등을 팽창시키며, 쐐기효과(wedge effect)를 유발시켜 인접광물의 분리를 초래한다. 그리고 새로 형성된 점토광물이 입자경계에 충전되거나 침전되면서 미세균열이 더욱 발달하고 입자간의 결합력이 약해진다.

풍화작용에 의해 암석을 구성하는 광물의 변질과 화학성분의 용탈 및 가수분해, 수화 등을 포함하는 화학적 변질작용과 이에 수반되는 2차광물의 형성, 미세균열의 증가, 공극의 열림, 입자간 결합력의 약화는 암석의 물성 변화를 초래하고 암석의 강도저하와 암석의 공학적 성질의 약화를 초래하는 것으로 판단된다. 풍화진전에 따른 공극율의 현저한 변화와 공극율과 다른 물성과의 높은 상관성 등을 고려할 때 화학성분의 용탈에 의한 공극율의 변화가 암석의 물리적 성질변화에 가장

큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

암석의 풍화과정과 물성저하의 원인에 대한 연구결과를 정리하여 Fig. 13에 수록하였다.

5. 결 론

경남지역에 분포하는 중생대 백악기 불국사화강암체의 풍화에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 풍화진전에 따른 화강암의 화학성분 변화는 풍화에 의해 형성되는 2차 광물, 특히 점토광물의 종류와 양에 따라 좌우된다. 화강암의 풍화에 의해 형성되는 2차 광물 중 가장 풍부하게 나타나는 점토광물인 kaolinite는 주로 장석의 풍화 산물로 확인되었다. 2차 변질광물인 일라이트는 mica/smectite 및 smectite로 변질되며, 흑운모와 흑운모의 열수변질 산물인 녹니석은 hydrous mica와 vermiculite 등으로 변질되는 것을 확인하였다. 풍화작용에 의한 새로운 광물형성과 물성변화는 암석 내에 다량 존재하는 정장석, 사장석 등의 장석류와 흑운모 등의 풍화에 의해 주도적으로 진행된다. 풍화작용에 의한 광물의 변질, 화학반응, 이에 수반되는 2차광물의 형성, 미세균열의 증가, 입자간 결합력의 약화는 암석의 물성변화와 공학적 성질의 약화를 초래하는 것으로 확인되었다.

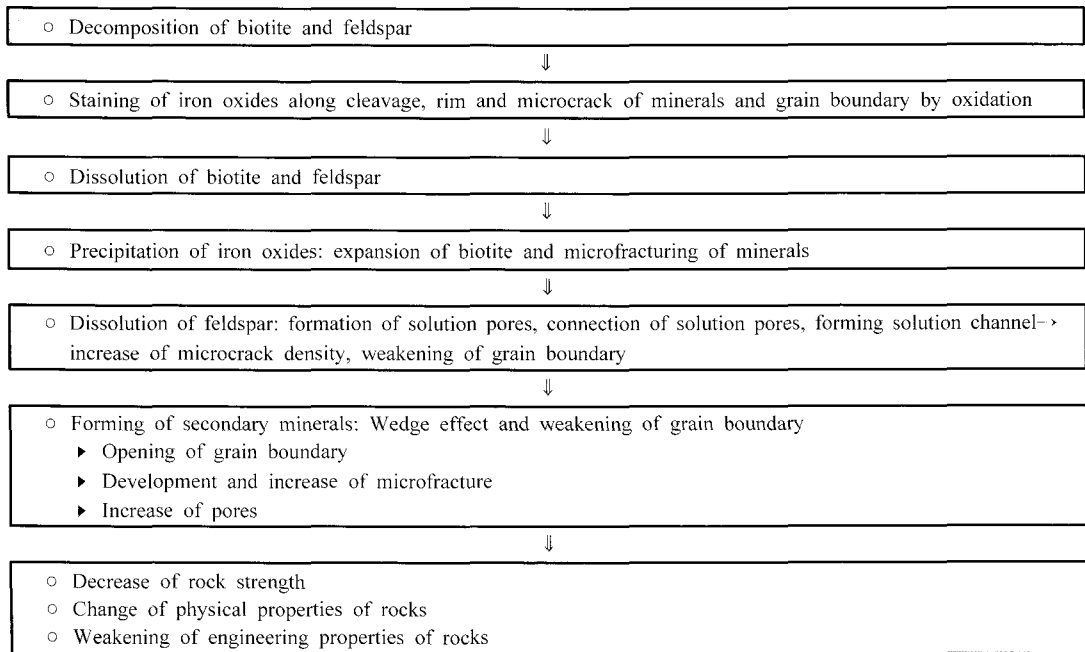


Fig. 13. Mechanism for weakening of rock engineering properties by weathering

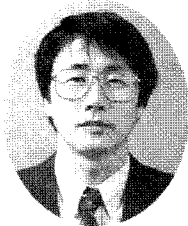
감사의 글

이 논문은 “2003학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 김영화, 1978, 함수율의 변화에 따른 지진파 속도의 변화 특성에 관하여, 서울대학교 석사논문.
- 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 광산지질, 23, pp.221~232.
- BSI (1981). Code of Practice for Site Investigations, BS 5930: 1981. British Standards Institution, London, p.149.
- Deere DU, Miller RP (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Tech Rep AFNL-TR-65-116. Air Force Weapon Laboratory, New Mexico.
- Dearman, W.R. (1976). Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 13, pp.123-127.
- Fookes PG, Dearman WR, Frankin JA (1971). Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. Q. J. Eng. Geol. 4(3): 139-185.
- Hodder APW, Hetherington JR (1991). A quantitative study of the weathering of greywacke. Tech. Note. Eng. Geol. 31: 353-368.
- Hamrol, A. (1961). A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, vol.2, pp 771-774.
- ISRM (1981). Rock characterization, testing and monitoring. In: Brown ET (ed) Suggested methods. Pergamon Press, Oxford.
- Iliev, I.G. (1967). An attempt to measure the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. Proceedings of the First International Congress, International Society of Rock Mechanics, Lisbon, vol. 1, pp.109-114.
- IAEG (1981). Rock and soil descriptions and classification for engineering geological mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 24, pp.235-274.
- Irfan TY, Dearman WR (1978). Engineering classification and index properties of a weathered granite. Bull. Int. Eng. Geol. 11: 233-244.
- Little, A.L. (1969). The engineering classification of residual tropical soils. Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, vol. 1, pp.1-10.
- Lee SG, de Freitas MH (1988). A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. Q. J. Eng. Geol. 22: 31-48.
- Onodera, T.F., Yashinaka, R. & Oda, M. (1974). Wea-

- thering and its relation to mechanical properties of granite. Proceedings of the Third International Congress, International Society of Rock Mechanics, Denver, vol.2, pp 71-78.
16. Ollier, K.M. (1975). Weathering. Longman, London, p.304
17. Parker A (1970). An index of weathering for silicate rocks. Geol. Mag. 107: 501-504.
18. Ruxton, B.P. & Berry, L. (1957). Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. Bulletin of the Geological Society of America, vol 68, pp.1263-1291.
19. Streckeisen, A.L. (1973). Plutonic rocks-classification and nomenclature recommended by the IUGS subcommission of the systematics of igneous rocks. Geotimes. 18: 26-32.



조 태 진

1980년 서울대학교 해양학과 이학사
1986년 University of Wisconsin-Madison MS
1988년 University of Wisconsin-Madison Ph.D

Tel: 051-620-6238
E-mail: chotc@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경탐사공학과 교수



이 창 섭

1981년 부산대학교 지질학과 이학사
1986년 부산대학교 지질학과 이학석사
2005년 부경대학교 지구환경공학과 공학박사

Tel: 051-338-5636
E-mail: donglcs@chol.com
현재 동해ENG(주) 대표이사