한국광물학회지 제 17 권 제 1 호 (2004년 3월)
J. Miner. Soc. Korea, 17(1), 23-35 (March, 2004)

주기적으로 침수되는 퇴적암의 풍화특성

Weathering Characteristics of Sedimentary Rocks Affected by Periodical Submerging

이 석 훈 (Seok-Hoon Lee)[1,*] · 김 수 진 (Soo Jin Kim)[2]

[1]서울대학교 지구환경과학부
(School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)
[2]한국기초과학지원연구원 나노환경연구부
(Division of Nano Material and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-806, Korea)

요약 : 울산시 사연댐 상류에 위치하여 주기적으로 침수되는 퇴적암의 풍화특징을 연구하였다. 현장조사, 전자현미분석기, X-선 회절분석기 및 X-선 형광분석기를 이용하여 암석의 풍화조직 및 광물의 조성변화 조사를 통해 주기적으로 침수되는 암석의 기계적 및 화학적 풍화양상을 연구하였다. 수장암석의 풍화작용은 퇴적층리와 수직방향으로 발달한 파쇄대 및 균열과 박리현상과 같은 기계적 풍화작용이 현저하다. 이러한 물리적인 풍화현상은 물과 암석과의 접촉면적을 넓혀 화학적 풍화작용을 가속화시킨 결과 풍화대와 약풍화대에서 석영을 제외한 거의 모든 광물이 용해작용 또는 변질작용을 받았으며, 특히, 탄산염광물의 용해작용이 현저하여 약풍화대에서 조차 방해석이 완전히 용해되어 빈 공간으로 남아있다. 그러나 점토광물과 같은 이차광물의 형성은 미약한 특징을 보인다.

이 지역의 암석은 일정기간 동안 물에 잠긴 상태로 유지되고, 동결과 해빙이 반복됨으로써 물리적 풍화작용이 상대적으로 빠르게 진행되어 물의 침투가 용이한 투수성 구조를 형성하였고, 그 결과 탄산염광물의 용해작용이 급속하게 일어났다. 자유로운 물의 순환으로 인하여 용해된 원소들이 점토광물과 같은 풍화광물로 침전되지 않고 용탈됨으로써 암석조직이 이완되어 풍화작용이 가속되었다. 퇴적암중 풍화에 극히 약한 탄산염광물의 높은 함량이 강한 화학적 풍화작용의 주요인으로 보인다.

주요어 : 수장암, 풍화대, 방해석, 용해작용, 풍화광물

ABSTRACT : The weathering characteristics of periodically submerged sedimentary rocks in the Sayeon dam, Ulsan was examined by field work, electron probe micro-analysis, X-ray diffraction, and X-ray fluorescence spectrometry. Analysis of fracture zone and exfoliation showed the submerged sedimentary rocks have undergone severe mechanical weathering. Mechanical weathering in the water-rock interface accelerated chemical weathering, such as dissolution and alteration of the most of minerals except for quartz in the weathering zone. The dissolution of carbonates specially calcite, is remarkable creating the cavities, whereas formation of minerals including clay minerals is not active.

*교신저자: shlee@kbsi.re.kr

The sedimentary rocks have been periodically submerged for a certain period of time, and have repeated freezing and thawing. This mechanical weathering favored infiltration, which accelerated mineral dissolution. The high content of easily soluble carbonate of the sedimentary rocks is likely the major cause of intense chemical weathering. The dissolved elements within the infiltrated water interrupted the occurrence of clay and weathering minerals, and expend fractures by infiltrated water accelerated weathering process.

Key words : submerged sedimentary rocks, weathering zone, calcite, dissolution, weathering mineral

서 론

암석의 풍화작용에는 다른 요인들이 영향을 주지만 일반적으로 물의 역할이 지배적이다. 암석-물 반응에 의한 용해작용으로 광물입자간의 결합력이 약화되고, 동절기에 유입된 물의 결빙에 의한 결정화작용으로 부피팽창이 일어나 물리적 풍화작용이 가속된다. 따라서 물의 함량과 암석 내에서 머무를 수 있는 시간 등에 따라 풍화작용의 양상이 달라지며, 암석 및 광물의 이러한 일반적인 풍화양상은 Eswaran and Bin (1978), Harris *et al.* (1985), Drever (1988), Jeong and Kim (1993), 이석훈과 김수진(2000, 2001) 등에 의해 연구되어 왔다. 그러나 주기적으로 일정한 기간동안 침수되는 조건 하에서의 풍화작용은 강수나 지하수의 침투에 의한 풍화작용과는 다른 양상을 나타낼 것으로 예상되지만 연구결과가 보고된 적이 없다.

울산시 언양면 대곡리 대곡천가에 위치한 반구대 암각화는 1971년에 처음 발견되었지만 이미 울산시의 공업용수 및 식수 공급을 위해 사연댐이 건설된 후였다. 댐이 건설되기 전에는 암각화 주변의 지형학적 특성(상부 암반이 2~4 m 전방으로 돌출되어 강우 시에 빗물의 유입을 막아 주었음)으로 인해 자연훼손이 지연되어 비교적 잘 보존되었으나, 댐 건설 후 상류에 위치한 암각화 암석은 년 중 8개월 정도 침수된다. 댐의 수위에 따라 침수 및 건조가 반복되면서 비교적 짧은 시간동안 주변 암석은 물론이고 암각화 암석 상당부분이 마손 되었다. 따라서 현재 진행 중인 암각화암석의 풍화상태를 정확하게 규명함으로써 훼손진행을 지연시키거나 막을 수 있는 방안이 제시될 수 있을 것이다. 그러나 조사대상이 보존되어야 할 석조유물로써 인위적인 훼손을 가할 수 없기 때문에, 암각화가 새겨진 퇴적암과 인접해 있는 동일조건의 퇴적암석을 대상으로 풍화상태를 연구해야만 한다. 따라서 이 연구는 일정기간동안 침수되는 암석의 물리화학적 풍화상태를 침수되지 않는 암석의 풍화상태와 비교분석하여 침수에 따른 풍화양상을 규명하고, 풍화작용의 진행 메커니즘을 밝혀 암각화 암석의 훼손원인을 규명하고자 한다.

시료채취 및 연구방법

강수기에 침수되는 암석시료의 채취를 위해 갈수기를 택해 수차례에 걸쳐 현장 조사를 실시하였다. 대상암석을 댐의 만수위 면을 기준으로 그 상부인 비수장암석과 주기적으로 침수되는 하부 수장암석으로 구분하고, 물에 잠겨 있는 시간을 고려하여 일정한 간격으로 시료를 채취하였다. 또한 대상 암석이 퇴적암이어서 암상의 차이에 따른 풍화특성을 조사하고자 시료채취 시 육안 상으로 구별되는 암상을 선택하였다. 시료는 수장암석 16개, 비수장암석 18개를 채취하였으며, 암석의 유사성을 고려하여 수장암석 10개, 비수장암석 8개를 분석에 이용하였다.

암석의 조직, 구성광물의 조성 및 풍화양상을 조사하고자 채취한 시료를 층리의 상하 방향으로 구분하여 절단하였다. 절단한 암석의 단면을 연마 처리하여 육안 상의 풍화양상을 조사하였다. 암편 내에서 풍화도의 차이를 보이는 부분을 재 절단하여 고무 용기에 넣고 에폭시수지를 주입하여 고착시킨 상태에서 진공을 유지한 체 2일에 걸쳐 충분히 경화시킨 다음 연마박편을 제작하였다.

구성광물의 화학조성을 분석하기 위해 전자현미분석(Electron Probe Micro Analysis)을 실시하였다. 전자빔에 의한 시료의 손상을 줄이기 위해 가속전압/빔전류 조건을 15 kV/10 nA로 설정하여 분석하였으며, 방해석의 분석에는 전자빔의 크기를 10 μm로 설정하였다. 광물의 미

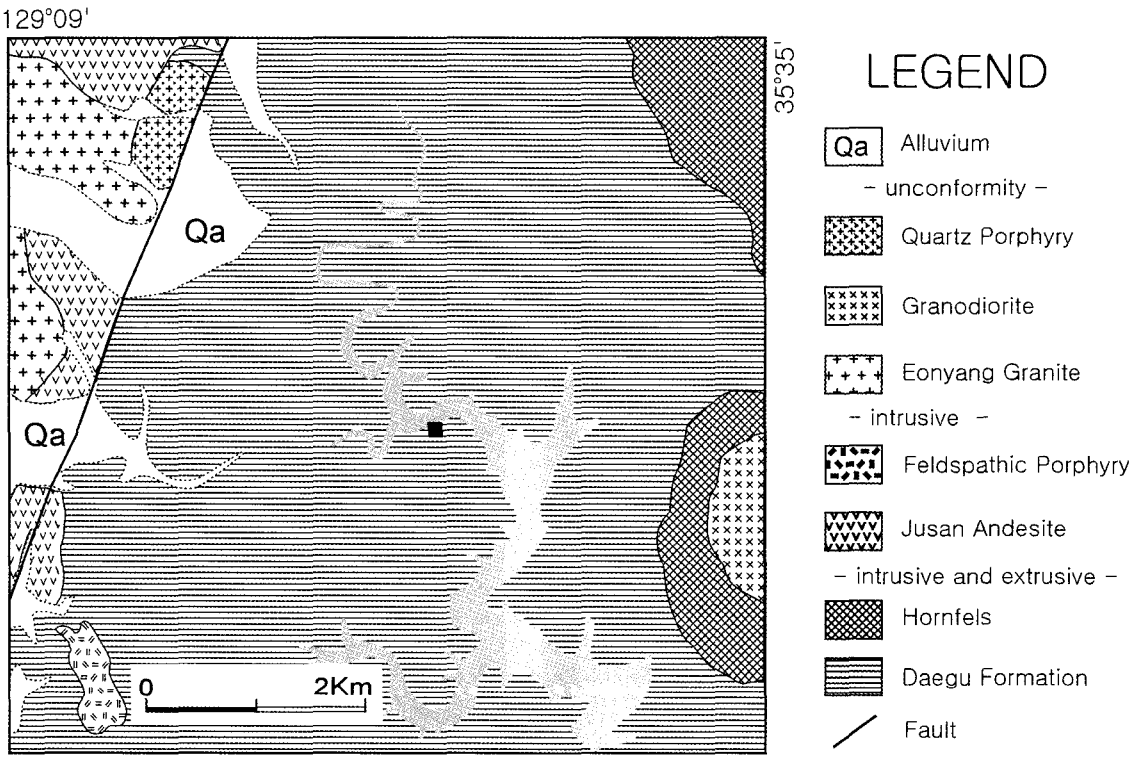

Fig. 1. Geological map around Sayeon Dam. ■ : Bangudae Petroglyph.

세조직 및 원소변화에 따른 조직변화를 후방산란전자영상으로 관찰하였으며, 일정 규모의 영역에서 잔류광물의 함량 및 분포를 조사하기 위해 Na, K, Ca와 Si에 대한 X-선 mapping을 실시하여 비교적 풍화작용을 받지 않은 암석과 풍화작용이 진행된 암석의 광물분포를 규명하였다. 분석에는 한국기초과학지원연구원 대전 본원에 있는 전자현미분석기(프랑스 CAMECA사의 모델 SX-51)를 사용하였다.

채취한 시편의 일부를 일정한 크기로 파쇄한 후 아게이트 유발에서 15 μm 이하로 분쇄하여 분말시료를 만들었다. 무방향성 시편을 만들어 X-선 회절분석(네덜란드 Philips사의 모델 X'pert MPD)을 실시하여 암석의 구성광물과 변질광물의 동정 및 풍화도에 따른 조성광물의 함량변화를 조사하였다. 또한 암석의 화학조성 및 풍화에 따른 원소의 거동을 조사하고자 분말시료로 유리비드를 제작하여 X-선 형광분석(네덜란드 Philips사의 모델 PW1480)을 실시하였으며, 한국기초과학지원연구원 서울분소에 있는 장비를 사용하였다.

지질 및 지형

연구대상 암석은 백악기 경상계 신라통의 소위 대구층(이윤종과 이인기, 1972)으로 명명된 퇴적암이며, 주변에는 이를 관입한 화성암류가 분포한다. 사연댐이 위치하는 퇴적암을 중심으로 왼쪽에 N20°E 방향의 양산단층이 발달해 있으며, 이를 경계로 왼쪽에는 신라통의 주산안산암질암과 경상계 불국사통의 언양화강암이 분포하고, 단층 오른쪽에는 퇴적암으로 구성된 신라통의 대구층이 넓게 분포한다. 대구층 오른쪽에는 불국사통의 화강섬록암이 관입하고 있으며, 관입암 주변에는 열 변성작용에 의해 도너츠 모양의 호온펠스가 발달되어 있다(Fig. 1). 대구층은 녹회색 내지 암회색의 사암, 실트스톤 및 셰일과 자색의 셰일로 구성되어 있고, 셰일이 호층을 이루고 있거나 이암 및 사암이 협재되어 있으며, 대체로 층리가 발달해 있다.

만수위 위치의 암석은 암회색의 셰일이 주 구성 암석으로 극미립의 입자들이 층리면을 따라 일정한 방향성을 유지하며 발달하고, 수층의 사

암이 협재되어있다. 곳에 따라 열 변질작용에 의해 혼온펠스화하여 경도가 큰 괴상의 암상을 보이고 있으나 주변으로의 연장성은 약하다. 갈수기에만 공기 중에 노출되는 최하부층은 녹회색 또는 청회색의 세일로 층리가 매우 뚜렷하며, 수 개의 사암층이 협재되어 있어 표면에서 큰 입자의 방해석이 용해되어 차별침식에 따른 vermiform의 요철을 보여준다. 만수위 지점의 상부층은 미립의 세일층이 자색을 띄며 발달해 있고, 층리면을 따라 수 mm 크기의 능철석이 일정한 간격으로 배열되어 있어 암회색을 띄는 곳이 있다. 또한 층리면에 평행하게 방해석 맥이 발달하고 있다. 수~수십 cm 두께로 협재되어 있는 사암에는 단일광물 보다는 미립의 여러 광물들이 섞여 있는 작은 암편들이 포획체로 관찰되기도 한다.

대상 암석은 대곡천 중상류에 위치하고 있으나, 사연댐의 저수로 인해 연중 약 8개월 정도 물에 잠기는 침수지역에 있다. 저수지 건너편에 위치하고, 10 m 높이의 절벽 하단에 위치하고 있어 결빙기 이외는 사람의 접근이 용이하지 않아 현재 인위적인 훼손은 거의 받지 않았다. 또한 절벽 상부에서 산 능선까지는 나무와 풀이 자라고 있으나 침수 위치에서는 고등식물이 서식하지 않으며, 저수량이 만수위 때 수성식물이 암석 표면에서 자란 흔적이 남아있다.

결과 및 토의

암석의 광물학적 특성

X-선 회절분석에 의하면 각 층의 암석은 다소의 조성차이는 있지만 전반적으로 석영, 알바이트, 정장석, 운모, 녹니석 및 방해석으로 구성되어 있으며(Fig. 2), 인회석, 저어콘 및 방연석이 미량광물로 관찰된다. 광물입자들 사이를 채우고 있는 기질은 주로 극미립의 방해석, 알바이트 및 석영으로 이루어져 있다.

장석은 주로 알칼리장석인 정장석(Or 조성비가 95% 이상)과 알바이트(Ab 조성비가 97% 이상)가 반자형 또는 타형으로 관찰되지만 Ab의 조성비가 30%에 이르는 알칼리 장석이 산출되기도 한다. 사장석은 흔하지 않지만 Ca의 몰비가 20% 내외인 올리고클래이스 사장석이 관찰된다. 알바이트는 개별 입자로 관찰되기도 하지만 방해석을 둘러싸고 있는 형태로 흔히 관찰된다(Fig. 3A). 암석 내에서 사장석을 포함한 알바이트의 함량은 16~25%이나 40%가까이 함유되어 있는 암석층(S19)도 있으며, 정장석은 10~23% 함유되어 있다. 알바이트는 암석 전체에 비교적 균질하게 분포하는데 비해 정장석은 불균질성이 크고, 비수장암에서 상대적으로 그 함량이 적다(김수진 외 2003).

층상광물로는 운모와 녹니석이 관찰된다. X-선 회절분석결과 12~25% 함유된 흑운모와 백운모는 대부분 층리 방향으로 배열되어 있으며, 비수장암석층에 비해 수장암석층, 특히 박리현상을 보이는 암석층(BG1)에 다량 함유되어 있다. 운모의 크기는 길이 방향으로 200 μm까지 다양하며, 곳에 따라 녹니석으로의 변질되어 있다. 백운모는 팔면체의 Al이 상당량의 Fe와 Mg에 의해 치환되어있다. 녹니석은 연녹색 또는 청회색을 띄는 암석층에서는 9% 이하의 함량을 보이며, 사면체에서 Si의 함량이 6몰 이하이고 팔면체에서의 Mg이 6몰 이하인 반면에 자색의 암석층에서는 10% 이상 함유되어 있으며 Si가 6몰 이상 Mg이 7몰 이상 함유되는 조성상의 차이를 보인다(김수진 외, 2003).

탄산염광물의 산출은 대부분 결정질의 개별 입자로 산출되나, 알바이트(Fig. 3A) 또는 국부적으로 운모와 녹니석에 의해 둘러싸여 있는 결정질 포유물로 산출되며(Fig. 3B), 광물 입자들 간의 공간을 채우는 교질물로, 그리고 방해석 맥으로 산출된다. 탄산염광물은 8~21%로 다양한 함량을 보이며 산출되고 암석 전반에 걸쳐 균질하게 분포하고 있으나 비수장암석의 경우 층리방향 또는 수직방향으로 관입한 방해석 맥의 영향으로 50% 내외의 함량을 보이기도 한다. 세일에서 방해석 입자들의 크기는 평균 50 μm 내외이나, 100 μm 이상인 경우도 종종 관찰되며, 사암에서는 1~3 mm까지의 크기로 분포되어있다. 주요 탄산염광물은 순수한 방해석($CaCO_3$)의 산출이 대부분이지만, 국부적으로 Mg이 45%까지 치환한 경우도 있으며 MnO의 함량이 1.0 wt%까지 함유되어 있는 특징을 보인다. 능철석($FeCO_3$)은 1~2 mm의 큰 입자들이 국부적으로 농집되어 산출되며, 암편의 내부에서조차 풍화되어 동심원상의 변질양상을 보인다.

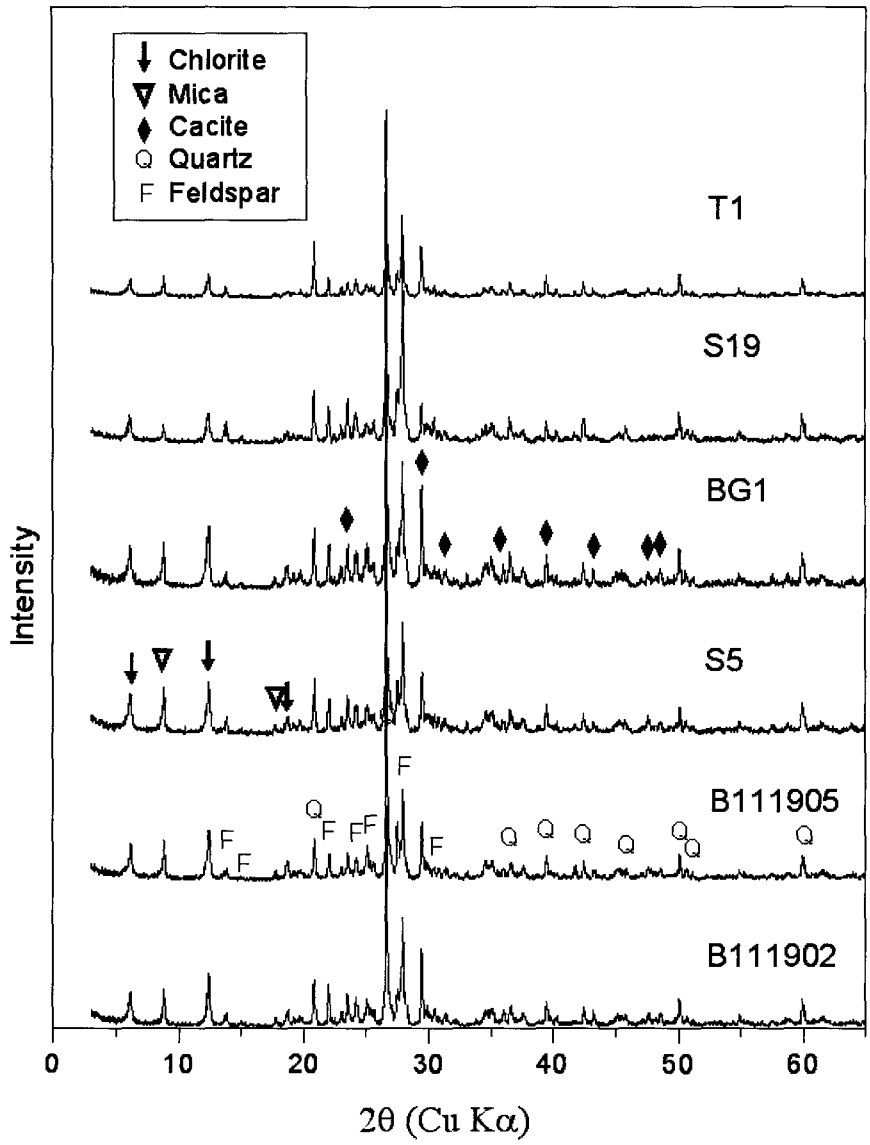

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of periodically submerged rocks (randomly oriented). T1 and S19 are non submerged rock samples.

물리적 풍화양상

수장암석에서는 비수장암석과는 달리 뚜렷한 물리적 풍화현상을 보인다. 수장암석에서는 층리의 수직방향으로 파쇄대가 발달하고, 층리면을 따라 쪼개지는 현상이 현저하며(Fig. 4A), 뚜렷한 박리현상을 보이고 있고(Fig. 4B), 암석은 작은 암편들로 파쇄되어 있다. 또한 암편 내에서도 일정한 방향성을 가진 균열이 많아 작은 충격에도 보다 작은 암석조각으로 쉽게 부수어진다. 수장암석 중에 협재되어 있는 사암층은 수 mm 크기의 방해석을 상당량 포함하고 있어 풍화에 강한 석영 및 장석이 많은 부분과 차별풍화작용에 의해 vermiform의 풍화조직을 보여준다(Fig. 4C). 그러나 호온펠스화 되어있는 암석에서는 비교적 풍화정도가 상대적으로 약하다(Fig. 4D). 이는 이 암석들이 호온펠스화로 경도가 커지고, 암석의 밀도가 증가하여 물이 암석

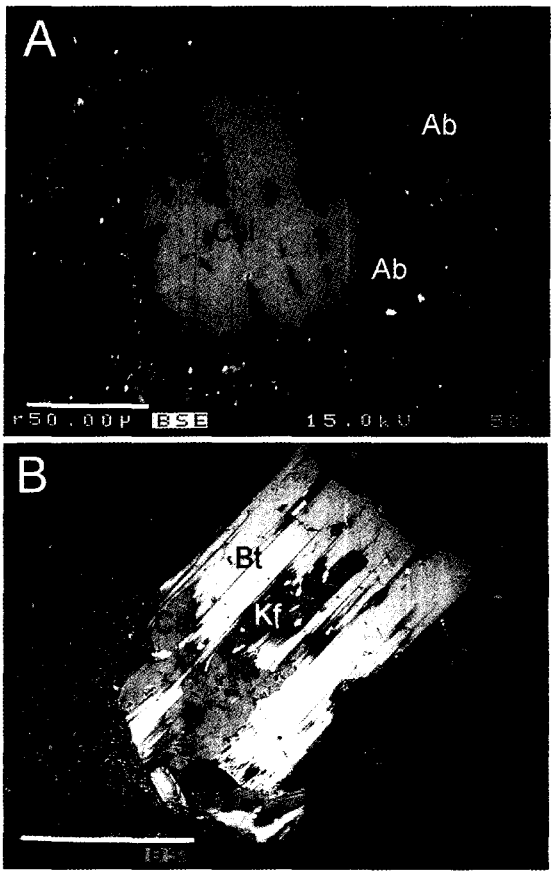

Fig. 3. Backscattered electron images of calcite. (A) Calcite grain (Cal) surrounded by albite (Ab); (B) Calcite (Cal) occurred together with biotite (bt) and orthoclase (Kf).

내로 침투하는 것을 막아 상대적으로 기계적인 풍화작용의 진행을 지연시킨 결과로 보이며, 다른 암석층에서의 극심한 물리적인 풍화작용이 물의 침투가 가능하게 한 암석조직의 특징에 기인한 것임을 시사한다.

비수장암석에서도 파쇄 현상이 관찰되지만 수장암석으로부터 시작된 파쇄대의 연장이거나 국부적으로 나타나는 현상이며, 층리 방향으로의 쪼개짐 현상은 일부에서 관찰된다. 암석은 대체로 괴상의 형태를 유지하고 있으며, 드물게 나타나는 암편 내에서도 균열이 극히 제한적이어서 수장암석과 구별되는 기계적 풍화양상을 보여준다. 사질세일로 이루어진 층에서 차별 풍화양상이 관찰되나, 요철의 규모가 사암층에 비해 작다.

암석의 풍화조직

암석의 풍화상태는 암편의 단면에서 보다 뚜렷하게 관찰된다. 수장암석은 암편의 내부로부터 외부로 가면서 자색 → 담갈색 → 갈색(Fig. 5A) 및 청회색 → 담갈색 → 갈색으로 변질되어 가는 전형적인 풍화조직을 보이며 풍화정도를 달리하는 풍화각을 형성하고 있다. 풍화되지 않은 내부는 조직이 치밀한데 비해 변질된 외부에서는 조직이 엉성하고 변색되어 있어 육안으로도 쉽게 구별된다. 풍화작용이 진행되면서 암석의 색이 변색되는 것은 일부 광물의 용해작용 및 변질작용으로, 구성광물의 조성이 변하여 빛의 산란현상이 달라진 결과이다. 변색 정도에 따른 풍화정도를 비풍화대(UW: 청회색 또는 자색), 약풍화대(WT: 담갈색) 및 풍화대(VW: 갈색)로 3단계로 구분하여 풍화심도를 측정한 결과 풍화되지 않은 비풍화대를 기준으로 약풍화대에 비해 풍화영역이 3배정도 더 넓다. 이러한 현상은 암석이 물에 수장되어 있는 동안 암편 내에 있는 작은 균열이나 열극을 따라 외곽으로부터 내부로 물의 유입이 자유로워 광물의 용해작용 및 원소의 이동과 같은 화학적 풍화작용이 빠르게 진행된 결과로 보인다. 풍화가 진행되지 않은 암편의 내부에서조차도 함유되어있던 탄산염광물이 작은 열극을 따라 침투된 물에 의해 주변의 다른 광물 보다 먼저 풍화작용을 받아 탄산염광물 주변을 따라 동심원상으로 변색된 풍화조직을 보여주고 있다.

후방산란전자영상에서 관찰되는 수장암석의 풍화조직은 보다 치밀한 광물간의 조직을 보여주는 비풍화대, 비교적 작은 입자들의 용해조직을 보여주는 약풍화대 그리고 심하게 풍화작용을 받아 큰 입자들이 용해되어 조직이 엉성해진 풍화영역이 뚜렷하게 구별된다(Fig. 6A). 또한 상대적으로 풍화작용에 약한 방해석의 입자가 큰 암석에선 비풍화대와 풍화대에 매우 인접해 있는 조직을 보여주고(Fig. 6B) 있어 상대적으로 급속하게 풍화작용이 진행되었음을 시사한다. 저 배율의 사진 상에서 매우 치밀하게 보이는 비풍화대도 입자사이를 충진하고 있는 미세한 교질물 입자들이 용해된 흔적이 보인다. 약풍화대에서 조직이 엉성해지는 것은 풍화에 약한 방해석이 용해되어 빠져나가 광물간의 결합력이 약해짐으로써 주변에 있던 다른 광물들이 떨어

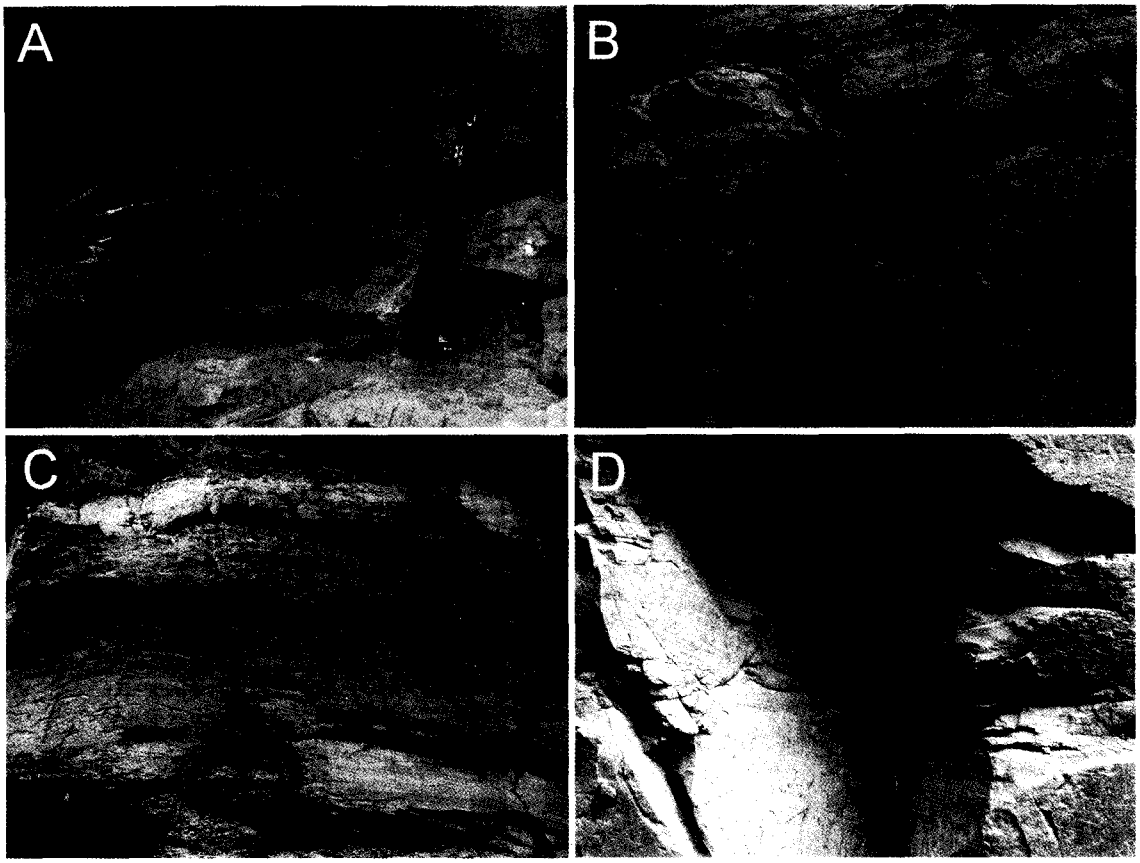

Fig. 4. Photographs of rock texture by mechanical weathering. (A) Mechanical weathering observed on the relatively high calcite composition rock; (B) Exfoliation of rock in the rock with high content of clay minerals; (C) Vermiform texture in the rock with large calcite grains; (D) Weathering texture on the hornfels rock.

져 나가 빈 공동으로 남아있기 때문이다. 풍화영역에서 입자로 또는 기질에 미립으로 있던 탄산염 광물은 대부분 용해되어 빈 공간으로 남아있으나, K-장석과 알바이트는 아직 용해되지 않고 그 경계 면이 부드럽게 유지되고 있다(Fig. 6C). 극심한 풍화작용을 받은 풍화영역에서는 탄산염광물이 완전히 용해되어 없어지고, 알바이트도 가장자리를 따라 일부 용해작용이 일어나 매우 불규칙한 경계면을 보인다(Fig. 6D). 그러나 정장석은 여전히 용해되지 않고 원형을 유지한 채 남아있다.

비수장암에서도 풍화정도는 다르지만 3단계의 동일한 풍화조직을 보이며, 청회색(UW) → 진갈색(WT) →담갈색(VW)의 순으로 풍화작용의 진행정도에 따라 변색되어있다(Fig. 5B). 다만 비풍화대에 대한 약풍화대의 비율이 크고, 반대로 풍화영역이 매우 좁은 풍화각을 형성하고 있어 수장암과 구별되는 풍화양상을 보인다. 또한 풍화대에서 보이는 동심원상의 담갈색 부분 역시 함유되어 있던 능철석(탄산철: $FeCO_3$)이 풍화되어 그 주변에 침철석(수산화철: FeOOH)을 형성한 결과이다. 비수장암석에 보이는 이러한 양상은 암석의 구성광물 조성의 차이보다는, 풍화작용에 영향을 주는 물이 강수에 의해서만 공급이 됨으로 물의 결빙 및 해빙에 따른 파쇄작용의 영향이 적었으며, 암편 내에 균열이나 공극을 형성하기 어려워 암석 내부로 물의 이동이 상대적으로 제한되어 깊이 침투하지 못한 결과로 보인다. 따라서 물에 의한 화학적 풍화작용은 암편의 외곽 일부영역에 한정되었다. 그러나

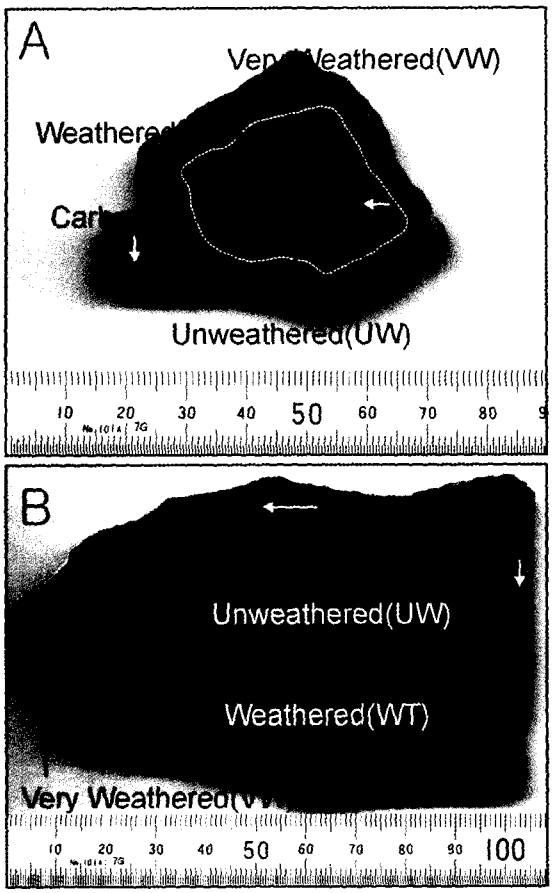

Fig. 5. Photographs of rock fragment sections showing remarkable weathering zone. (A) Periodically submerged rock fragment showing unweathered (dark brown), weathered (light brown) and very weathered zone (brown) from interior; (B) Non submerged rock fragment showing unweathered (bluish gray), weathered (pale brown) and very weathered zone (brown) from interior.

비 수장암석에서 전체적인 화학적 풍화작용을 유도하기에는 물의 영향이 적었지만, 작은 균열틈을 따라 암편 내부로 침투한 물이 고결물질로 있던 미립의 방해석을 용해시킬 정도의 영향을 준 것으로 보인다.

화학적 풍화작용

암석의 화학적 풍화작용 특징은 수장암석 및 비 수장암석에서 각 풍화영역에 대한 화학분석 결과를 비교하면 보다 뚜렷해진다. 각 영역에 대한 주 원소의 X-선 형광분석 결과를 Table I에 나타냈다.

수장암석에서 전체적인 화학조성은 비풍화대(L-UW)와는 뚜렷한 차이를 보이면서 약풍화대(L-WT)와 풍화대(L-VW)에서는 비슷한 값을 보여주고 있다. 이는 육안상의 약풍화대에서 이미 비교적 쉽게 일어날 수 있는 화학적 변화가 충분히 진행되었음을 시사한다. 가장 현저한 원소의 변화는 Ca의 급격한 감소로 이미 약풍화대에서 방해석이 모두 용해되었음을 나타내며, 잔류하고 있는 Ca은 국부적으로 용해되지 않은 사장석의 조성에 기인한 것으로 보인다. 풍화영역에서 2~3%대의 작열감량(Loss on ignition)은 이 영역에서 층상광물이 완전히 풍화되지 않고 잔류하고 있음을 시사한다.

비수장암석의 화학조성은 Ca을 많이 함유하고 있어 상대적으로 방해석이 많이 함유되어 있음을 알 수 있는데, 풍화도에 따른 화학조성의 변화는 중심(H-UW: 비풍화대)에서 외곽으로 가면서 점이적인 변화를 보이고 있다. 특히 Ca의 함량이 서서히 감소하고 있어 적어도 약풍화대(H-WT)에서 방해석의 용해작용이 점진적으로 일어나고 있음을 시사하며, 풍화대(H-VW)에서만 심각한 방해석의 용해작용이 있었음을 알 수 있다. 풍화대에서의 작열감량이 잔류하고 있는 Ca 함량과 비교해 높아 이 영역에서도 아직 상당량의 층상광물이 잔류하고 있음을 시사한다.

Table 1은 특정원소의 변화에 따라 상대적인 원소조성비를 나타내고 있어, 풍화정도에 따른 원소의 함량변화를 나타내기가 어렵다. 따라서 풍화대에서 원소의 농도변화를 검토하기 위해서는 비풍화대에서의 원소농도를 기준으로 그 변화를 관찰해야 한다. 일반적으로 풍화작용에서 Al은 거의 거동을 하지 않은 것으로 알려져 있어(Nesbitt and Young, 1982), 이 원소를 기준으로 다음 식에 의해 원소의 변화량을 검토하였다. 즉,

$$\%change = [(원소/Al2O_3)_{시료}/(원소/Al2O_3)_{모암} - 1] \times 100$$

여기서 %change는 원소의 변화량을 나타내며, 원소는 변화량을 측정하고자 하는 원소의 농도이다. 계산된 원소의 함량변화를 Fig. 7에 나타내었다.

수장암석에서 Ca은 약풍화대에서 이미 90%

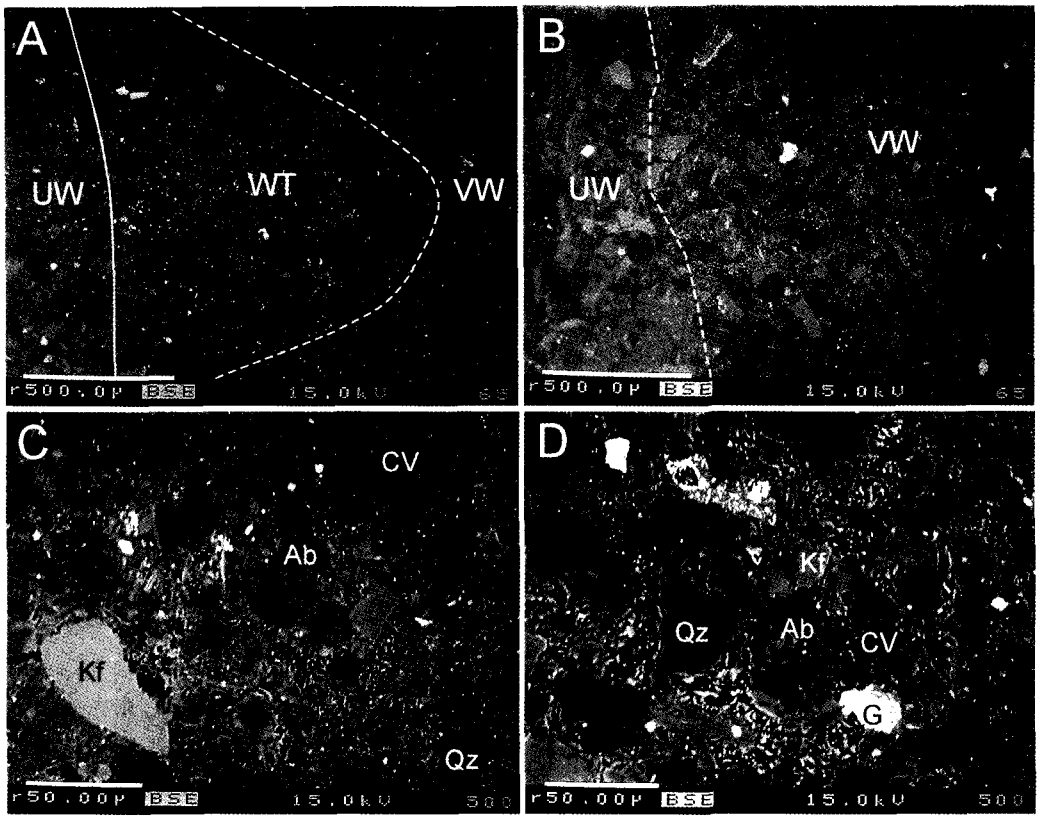

Fig. 6. Backscattered electron images showing weatheriang textures of submerged rock. (A) Weathering texture of low carbonate rock (B111901); (B) Weathering texture of rock with large calcite grain (B111902); (C) Texture of weathering area; (D) Texture of very weathered area. Kf = orthoclase; Ab = albite; Qz = quartz; G = goethite; CV = cavity by dissolution of minerals.

Table 1. Chemical analyses of each weathering zone on the water burial and non water burial rock fragments (wt.%)

	L-UW	L-WT	L-VW	H-UW	H-WT	H-VW
SiO_2	55.83	65.17	65.02	39.39	49.65	61.39
Al_2O_3	12.90	14.52	14.28	8.25	11.03	13.03
TiO_2	0.56	0.65	0.62	0.25	0.39	0.57
Fe_2O_3*	4.87	5.20	5.34	2.59	3.99	5.67
MnO	0.16	0.26	0.18	0.34	0.23	0.43
MgO	4.09	3.71	3.42	3.30	3.82	3.56
CaO	7.18	0.51	0.49	22.04	13.06	1.70
K_2O	2.92	3.14	3.14	1.16	1.81	3.23
Na_2O	3.14	3.98	3.94	2.59	3.09	3.75
P_2O_5	0.22	0.23	0.22	0.17	0.20	0.25
L.O.I.	7.81	2.45	2.90	19.50	12.42	7.30
Total	99.17	99.82	99.54	99.47	99.68	99.89

L-UW: unweathered zone of submerged rock (B111901), L-WT: weathered zone
L-VW: very weathered zone, H-UW: unweathered zone of non submerged rock (S19)
H-WT: weathered zone, H-VW: very weathered zone
*Fe content as total Fe_2O_3

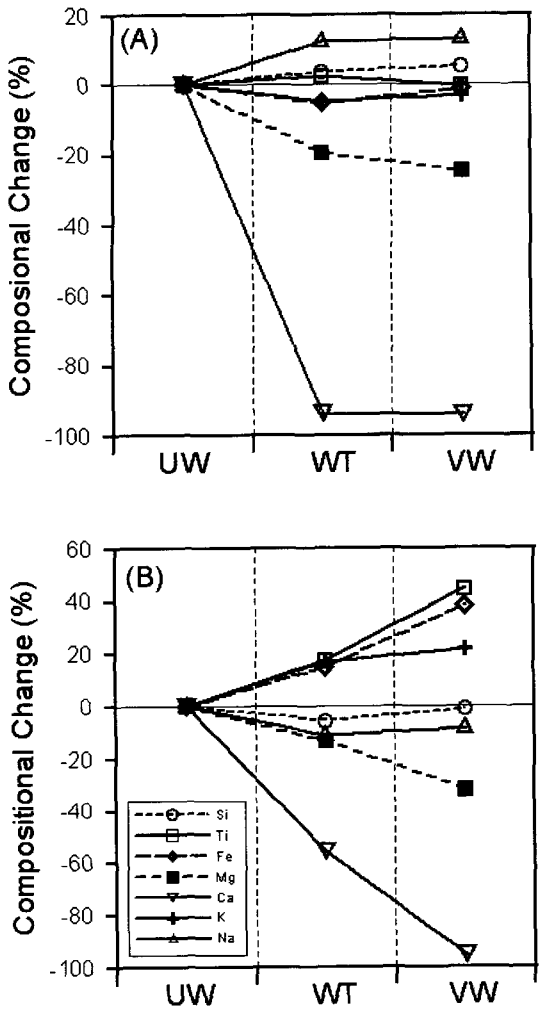

Fig. 7. Compositional Change of major elements on each weathering zone. (A) Water submerged; (B) Non submerged rock.

이상이 손실되었으며, Mg도 20% 정도 감소하였다. Mg은 방해석에서 Ca을 치환하고 있던 것으로 방해석과 함께 용해되어 용탈된 것으로 보인다(Fig. 7A). 반대로 Na과 Si가 약간 증가한 것으로 보이는데, 이는 일반적인 화학적 풍화특성(Eswaran and Bin, 1978)과 다른 양상이다. 제한된 영역에서 진행되고 있는 풍화작용의 결과로 고려하면 Na과 Si가 원소이동에 의해 증가되었다고 보기 어려우며, 광물조성의 불균질성에 기인한 것으로 해석하는 것이 타당하다. 이러한 현상은 K의 경우도 비슷한데, 운모의 변질작용에도 불구하고 상대적으로 손실량이 적게 나타나는 것은 역시 운모와 알칼리장석 함량의 불균질성에 기인한 것으로 보인다. 그 외 Ti, Fe는 거의 변화가 없이 일정한 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 일반적인 풍화작용의 진행결과보다 우선해서 물의 유입에 따른 특정광물의 선택적인 용해작용이 선행된 결과로 보이며, 수장암석에서 보여주는 화학적 풍화특징이다.

비수장암석에서는 수장암석과 약간 다른 원소거동을 보인다. 물론 Ca이 감소하는 경향성은 같지만, 약풍화대(H-WT)에서 완전히 손실되는 것이 아니라 60% 정도 감소하고, 풍화대(H-VW)에서 95% 이상 손실이 일어났다(Fig. 7B). Mg 역시 13.3%, 31.6%로 Ca과 같은 감소경향을 보이는 것으로 보아 이 원소 역시 방해석에서 Ca을 치환하고 있던 것이 함께 용해작용에 의해 용탈된 것으로 보인다. 수장암석에서와 달리 Si와 Na가 각각 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 수장암석에서처럼 급격하게 특정광물에 대해서만 선택적으로 용해작용이 일어난 것이 아니라, 풍화작용이 진행되면서 사장석과 알바이트 장석에서도 서서히 풍화작용을 받아 용해되고 있음을 보여주며, 일반적인 암석의 풍화경향성을 따르고 있다(이석훈과 김수진, 2001). 또한 Ti과 Fe의 함량도 풍화도가 증가함에 따라 증가하는 것이 관찰되는데 이것은 충상광물의 풍화작용에 기인한 것보다는 탄산염광물의 용해작용에 따라 용탈되지 않고 그 위치 또는 주변에서 침철석과 같은 이차광물을 형성한 채 잔류하고 있는 결과이다.

광물 조성의 변화

풍화작용이 진행되면서 물과의 반응에 의해 광물들이 용해되거나 새로운 이차광물이 형성된다. 이러한 광물조성의 변화를 조사하기 위해 수장암석과 비수장암석에 대한 각 풍화영역별로 X-선 회절분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 풍화되지 않은 수장암(L-UW) 및 비수장암(H-UW) 모두에서 석영, 장석, 운모, 녹니석 및 방해석이 주 구성광물로 함유되어 있으나 각각의 함량에는 다소 차이를 보이며, 비 수장암석에는 방해석이 50% 이상 함유되어 있다. 또한 풍화작용이 진행됨에 따라 구성광물 피크의 강도변화 양상에서도 차이를 보인다. 수장암석의 약풍화대(L-WT)에서 이미 방해석의 피크

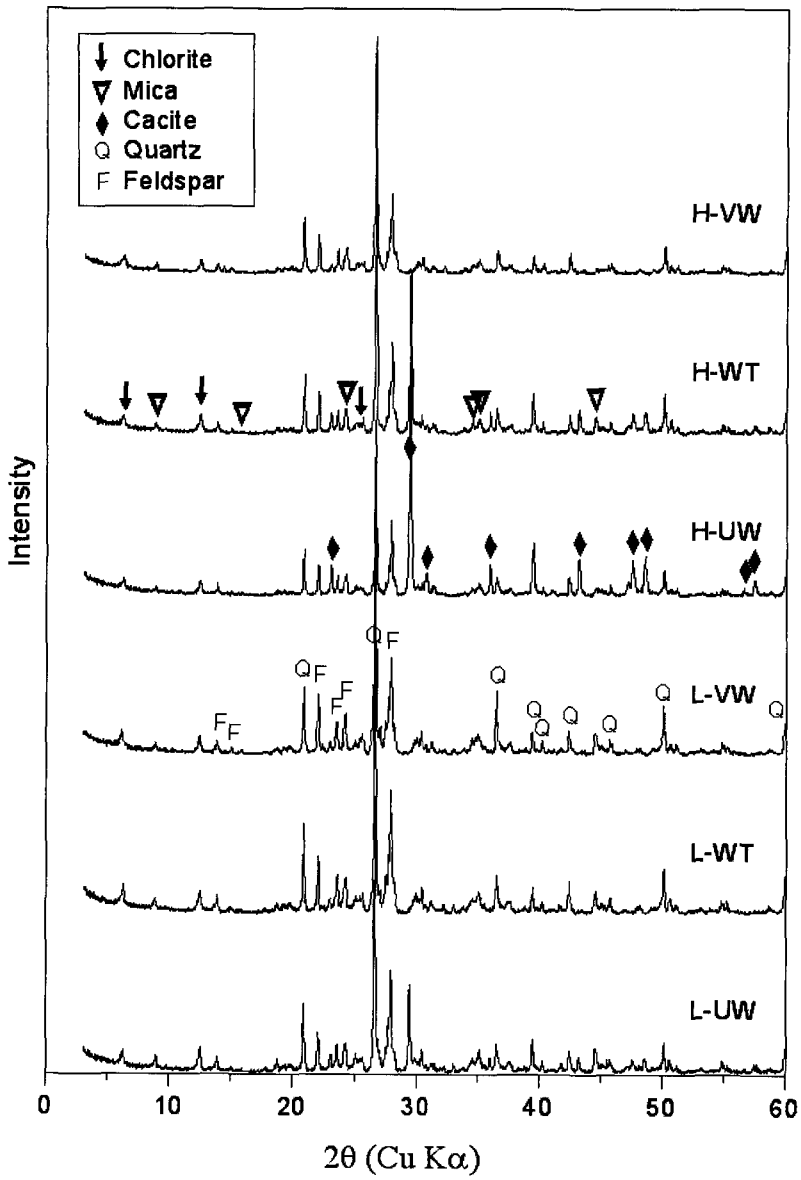

Fig. 8. XRD patterns of each weathering zone on the submerged rock (L) and non submerged rock (H).

(3.04 Å)가 거의 보이지 않고 있는 반면에 비수장암석의 약풍화대(H-WT)에서는 방해석의 피크 강도가 감소되긴 하였지만 아직 뚜렷한 크기로 남아있어 상당량의 방해석이 용해되지 않고 잔류하고 있음을 보여준다.

각 풍화 영역별 광물조성의 변화를 규명하기 위해 X-선 회절분석 결과를 기초로 한 각 시료에서 주 구성 광물들의 함량을 Table 2에 나타냈다. 암석의 화학분석 결과(Table 1)로 이미 예측한 바와 같이 수장암석은 21.2%의 방해석 함량이 약풍화대(L-WT)에서 0.7%로 감소하였으며, 이 값은 풍화대(L-VW)에서 같은 함량으로 이미 용해 가능한 거의 모든 방해석이 용해되었음을 시사한다. 반대로 비수장암석에서는 상대적으로 방해석 함량(56%)이 높았음에도 불구하고 약풍화대(H-WT)에서 38.2%가 잔류하고 있음을 나

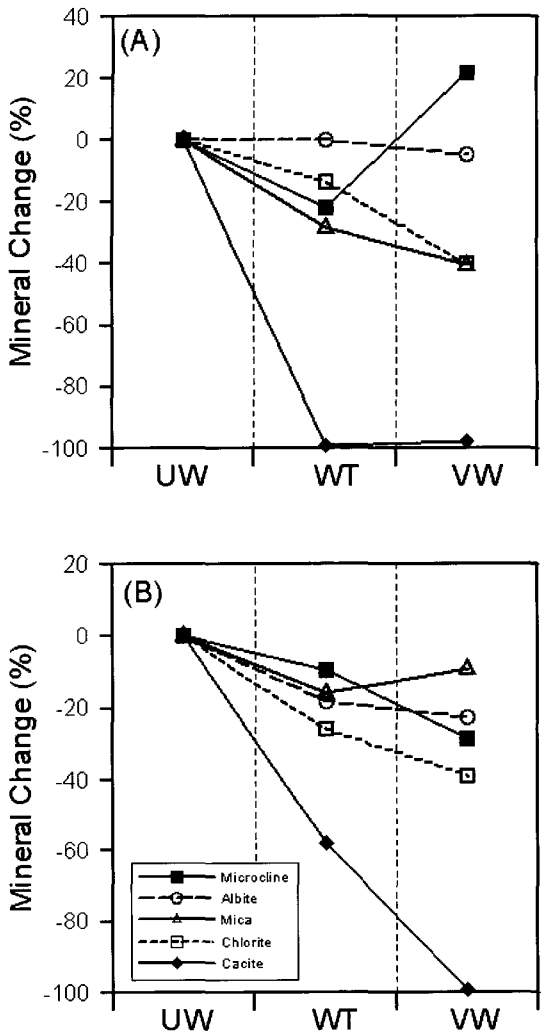

Fig. 9. Change of mineral composition on each weathering zone. (A) Submerged rock; (B) Non submerged rock.

타내며, 풍화영역(H-VW)에 가서야 1.1%가 잔류하여 대부분의 방해석이 용해되었음을 나타낸다. 다른 조암 광물들은 풍화작용이 진행되면서 증가한 것처럼 보이지만 방해석의 감소에 따른 상대적인 평가에 기인한 것이지 실제 함량이 증가한 것은 아니다. 따라서 광물학적(화학적) 풍화작용을 받지 않은 것으로 고려되는 석영을 기준으로 각 광물의 함량변화를 평가하여 Fig. 9에 나타냈다. 풍화작용이 진행됨에 따라 모든 광물들의 함량이 감소하는 경향을 보이고 있지만 그 양상에 있어서는 다소의 차이를 보인다.

Table 2. Mineral composition of each weathering zone based on the XRD analyses

	L-UW	L-WT	L-VW	H-UW	H-WT	H-VW
Albite	25.2	34.2	33.4	16.5	21.9	34.8
Orthoclase	10.5	13.9	17.7	5.8	7.6	10.3
Mica*	13.2	12.8	10.7	5.4	7.5	13.6
Chlorite	7.0	7.3	5.7	3.9	4.7	6.5
Calcite	21.2	0.7	0.7	56.0	38.2	1.1
Quartz	23.0	31.0	31.8	12.4	20.1	33.8
Sum	100.1	99.9	100.0	100.0	100.0	100.1

Symbols are same as a table 1.
*Mica includes biotite and muscovite

수장암석에서는 방해석 다음으로 운모 및 녹니석과 같은 층상광물이 용해작용을 심하게 받았으며, 풍화대(L-VW)에서 그 함량이 40%까지 감소했다. 반면에 장석의 함량은 비교적 완만한 감소경향을 보인다. 비수장암석에서는 방해석의 함량 감소가 가장 현저하지만 약풍화대(H- WT)에서 감소율이 60% 이하이며, 최 외곽의 매우 좁은 풍화대(H-VW)에서는 99% 이상 감소 하였다. 층상광물 및 장석광물의 함량 변화는 점이적인 양상을 보이고 있어 전형적인 광물의 풍화경향을 따르고 있다. 다만 수장암석에서의 정장석과 비수장암석에서의 녹니석의 함량이 경향성에서 다소 벗어나는데 이는 각 영역별 광물조성의 불균질성에 기인한 것으로 보인다.

결 론

연간 8개월 정도 침수되는 퇴적암의 풍화특징은 층리와 수직방향으로 파쇄현상 및 균열이 발달하고 뚜렷한 박리현상을 나타낸다. 이러한 물리적인 풍화현상은 물과 암석과의 접촉면적을 넓혀 화학적 풍화작용을 가속화시킨 결과 석영을 제외한 거의 모든 광물이 용해작용 또는 변질작용을 받아 약풍화대와 풍화대로 구분되는 풍화각의 발달을 초래하였다. 특히, 탄산염광물의 용해작용이 현저하여 약풍화대에서 조차 방해석이 완전히 용해되어 빈 공간으로 남아있으며, 이차광물의 형성은 미약하다.

이 지역의 암석은 일정기간 동안 물에 잠긴 상태로 유지되고, 동결과 해빙이 반복됨으로써 물리적 풍화작용이 상대적으로 빠르게 진행되어

물의 침투가 용이한 조직을 형성하였고, 이 공간을 따라 유입되는 물에 의해 용해작용이 급속하게 일어났다. 또한 구성광물 중 풍화에 극히 약한 탄산염광물의 함량이 높아 화학적 풍화작용이 가속화된 것으로 보이며, 자유로운 물의 이동으로 인해 용해된 원소들이 대부분 용탈되어 점토광물과 같은 풍화광물의 형성을 저해하여 암석의 조직을 이완시킴으로써 풍화작용을 가속화시켰다.

사 사

이 논문에 대하여 아낌없는 의견과 조언을 주신 충북대학교 안중호 교수님과 안동대학교 정기영 교수님께 감사드린다.

참 고 문 헌

김수진, 민경희, 최병렬, 김진홍, 이석훈, 장석환, 도진영 (2003) 반구대 암각화 보존대책 연구. 울산광역시, p275

이석훈, 김수진 (2000) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 의한 광물조성의 변화. 한국광물학회지, 13, 121-137.

이석훈, 김수진 (2001) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동. 한국광물학회지, 14, 39-51.

이윤종, 이인기 (1972) 울산도폭 지질조사보고서 (1:50,000) 한국동력자원연구소.

Drever, J.I. (1988) *The geochemistry of natural waters*. 2nd Ed. Prentice Hall Inc. U.S.A., pp437.

Eswaran, H. and Bin, W.c. (1978) A study of a deep weathering profile on granite in peninsula Malaysia: III. alteration of feldspar. Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 154-158.

Harris W.G., Zelazny, L.W., Barker, J.C. and Martens, D.C. (1985) Biotite kaolinization in Verginia Piedmont soils: I. Extent, profile trends, and grain morphological effect. Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 1290-1297.

Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1993) Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by wethering of anorthosite in the Sancheongarea, Korea, Clays Clay Miner. 41, 56-65.

Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, Nature, 299, 715-717.

2004년 2월 19일 원고접수, 2004년 3월 6일 게재승인.