

화강암질암의 풍화에 따른 광물학적 변화와 공학적 특성변화

Mineralogical and engineering characteristic changes of
granitic rocks by weathering

이창섭(Chang Sup Lee)

주)동해이엔지(donglcs@chol.com)

1. 서론

본 연구에서는 국내에서 가장 분포면적이 넓은 화강암질암의 분포지를 대상으로 풍화 단계별로 시료를 채취하여 편광현미경 관찰, X선-회절분석, 전자현미경 관찰, 화학분석, 물성시험 등을 실시하였다. 광물학적 연구를 통하여 풍화에 따른 구성광물의 변화와 변질 광물의 생성, 미세균열의 발달, 조직의 변화 등을 관찰하였으며 지구화학적 연구결과를 바탕으로 풍화에 따른 주성분원소의 변화와 이동도를 검토하였다. 풍화단계에 따른 물성치 측정을 통하여서 물성변화를 조사하였고, 광물학적, 화학적, 공학적인 연구를 바탕으로 풍화에 의해 형성되는 2차 광물, 특히 점토광물의 형성 과정을 규명하였으며, 풍화에 따른 공학적 성질 변화와 물성저하의 메카니즘을 규명하였다.

2. 시료채취 및 분석

암석에 대한 풍화단계의 분류는 Irfan(1978)의 분류에 의거하였으며 6개의 연구지역에서 풍화단계별로 6개씩의 블록시료를 채취한 후 시편을 제작하거나 분쇄하는 등 분석에 필요한 가공을 하였다. 제작된 시편을 대상으로 암석의 공학적인 물성변화를 파악하기 위하여 ISRM 및 KS 규정에 의거 물성시험을 실시하였고 제작된 박편을 이용하여 편광현미경 관찰과 모달분석을 실시하여 광물조성을 확인하고 암석을 분류하였다. 각 시료의 화학성분과 풍화에 따른 화학조성의 변화를 파악하기 위하여 주성분 원소에 대한 화학분석을 실시하였으며 풍화작용에 따른 변질광물, 특히 점토광물의 형성여부와 종류를 파악하기 위하여 분말시료에 대한 X-선 회절분석을 실시하였다. F, SW, MW, HW 등급의 박편시료와 전 풍화단계(6 단계)의 분말시료에 대하여 전자현미경 관찰 및 분석을 실시하여 풍화에 따른 광물의 변질과 점토광물의 형성, 미세균열의 형성, 화학성분의 용탈 등을 확인하였다.

3. 분석결과 및 고찰

3-1. 광물학적 특성변화

3-1-1. 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.

3-1-2. Slightly weathered rock

풍화작용의 초기단계에 해당되는 암석으로서, 전체적으로 구성입자들은 치밀하게 맞물려 있으나 미세균열 및 공극이 있음을 알 수 있으며 일라이트가 확인된다. 전체적으로 장석은

변질되어 나타나기 시작하며, 사장석의 변질이 정장석에 비해 상대적으로 현저하다. 특히 장석 내에는 규칙적인 미세균열이 나타나기 시작하는데, 이는 결정의 벽개면을 따라 화학적 풍화작용이 진행됨으로서 그 틈이 벌어져 생성된 미세균열로 생각된다. 이러한 미세 균열을 따라 용액이 침투함으로써 생긴 용해 공극이 간간히 형성되어 있다.

3-1-3. Moderately weathered rock

장석의 변질은 slightly weathered rock에 비해서 현저하며, 입자경계도 뚜렷하게 구분되지 않는다. 전체적으로 구성입자들의 조직은 치밀하지 못하며, 많은 미세균열들과 공동이 뚜렷하게 발달되고 있다. 특히 장석 내에는 벽개면을 따라 규칙적으로 발달하는 미세균열이 현저하게 발달하며 용해공동들이 형성되어 있다. 미세균열의 간격은 slightly weathered 단계에서 보여주는 것보다 넓어져 있으며, 균열로 분리된 장석입자들은 더욱 미세한 입자 크기를 나타내고 있다. 용해공동은 용액에 의한 화학적 풍화작용에 의해 장석이 분해되었음을 뚜렷이 시사하고 있다. 부분적으로 장석입자의 가장자리가 극미세 입자로 분해되어 있으며, 이는 고령석화 되고 있음을 보여주고 있다.

3-1-4. Highly weathered rock

편광현미경 하에서 장석 입자의 경계구분은 거의 곤란하여 장석류는 변질되어 나타난다. 풍화작용이 현저해짐에 따라 미세균열의 밀도가 높아지고 있다. 주 벽개면 및 입자사이의 간격도 현저히 넓어져 있고, 이를 따른 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 용해공동에서 관찰되기도 한다. 화학적 풍화가 계속 진행됨으로 장석이 미세한 박편상의 고령석 입자로 분해되어 나타나기도 한다. 흑운모의 벽개면은 팽창되어 틈이 넓어졌으며, 팽창이 현저해진 부분에서는 부분적으로 변질되어 있다. 흑운모의 부피팽창은 암색 내에서 미세균열을 형성하여 암석의 강도저하로 이어진다.

3-1-5. Completely weathered rock

전자현미경을 통하여 장석 입자의 표면을 관찰한 결과, 풍화작용으로 인하여 결정형이 현저히 파괴되어 나타난다. 표면은 분해되어 거칠어져 있으며, 점토 피복이 현저히 나타난다. 고배율로 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.

3-1-6. 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 있으며, 두터운 clay 피복이 형성되어 있다. 고배율로 관찰하면 고령석 박편들이 약간의 미세 장석 파편들과 함께 다량 관찰된다.

3-2. 화학적 특성변화

분석결과에 의하면 풍화의 강도가 증가함에 따라 Ca, Na의 함량비는 감소하는 반면 LOI는 증가하고 Mn, Mg, Fe, Ti 등은 풍화의 마지막 단계에서 증가하는 경향을 보여준다. Si, Al의 함량비는 거의 변화를 보여주지 않는다. 일반적으로 이동도가 높고 풍화과정에서 감소한다고 알려진 K는 함량비의 변화를 거의 보여주지 않으며, P는 일정한 경향을 나타내지 않는다. 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 잔류토에 포함된 유기물 함량의 영향을 받을 수 있는 것으로 판단된다.

3-3. 물리적 특성변화

풍화작용에 따른 암석의 물리적 특성변화에 대한 연구결과에 의하면 풍화작용이 진전됨에 따라 흡수율, 공극율, 포아송비는 증가하며 비중, 탄성과속도(V_p , V_s), 일축압축강도, 탄성계수는 감소하는 것으로 나타났다. 신선한 암석에서 MW 등급의 암석으로 풍화작용이 진행됨에 따라 공극률이 가장 급격한 변화(263% 증가)를 보여주며, 흡수율도 큰 변화(182% 증가)를 보여준다. 탄성계수(72% 감소)와 탄성과속도(60% 감소) 또한 현저한 변화를 보여주며 일축압축강도(48% 감소)와 포아송비(35% 증가)의 변화율은 이보다 낮고, 비중(3% 감소)은 미약한 변화를 보여준다. 풍화작용에 따른 물리적인 변화는 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. 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.

4. 암석의 풍화 및 물성저하 메카니즘

화강암의 풍화는 장석류와 흑운모의 풍화에 의해 주도적으로 진행되며, 사장석 및 흑운모가 정장석에 비하여 먼저 풍화과정을 겪는다. 풍화의 초기단계는 광물의 분해 및 변질로 특징지어지며, 흑운모, 장석류의 분해·변질에 의해 탈색현상이 나타난다. 특히 흑운모로부터 산화작용에 의해 Fe가 방출되어 벽개, 광물의 가장자리, 입자간의 경계, 미세균열을 따라 철산화물에 의한 착색현상이 나타난다. 풍화의 후기단계는 광물의 용해로 특징지어진다. 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 공극이 형성된다. 용해 공극은 풍화작용이 진전됨에 따라 결합되어 결정 내 미세균열의 밀도를 증가시키며, 그 결과 용해의 영향을 받은 장석의 입자는 약화되고 쉽게 부서져서 원래의 입자보다 작아지게 된다. 또한 흑운모와 장석의 벽개면과 미세균열 등을 따라 새로 형성된 광물들은 흑운모와 장석 등을 팽창시키며, 썩기효과를 유발시켜 인접광물의 분리를 초래케 한다. 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.

5. 결론

경남지역에 분포하는 중생대 백악기의 불국사화강암체 중 현재 암반의 절취 작업이나 채석작업이 진행되는 6개소를 선정하고 풍화에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

풍화진전에 따른 화강암의 화학성분 변화는 풍화에 의해 형성되는 2차 광물, 특히 점토 광물의 종류와 양에 따라 좌우된다.

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 공극율의 현저한 증가를 초래하며 공극율의 변화는 암석의 물성변화와 공학적 성질의 약화를 초래하는 것으로 확인되었다.

풍화작용에 의한 광물학적 연구결과 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.