

석굴암을 이루는 암석의 풍화현상

이상헌

강원대학교 지구과학부, 강원도 춘천시 효자동 200-701

Weathering Phenomena of the Rocks Constituting the Seoggulam

Sang Hun Lee

*Division of Earth Sciences, Kangwon National University,
Hyoja-dong, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, KOREA*

초록 석굴암은 해체, 복원 및 수 차례에 걸친 보수과정을 거쳐 지금에 이르렀다. 현재와 같은 비교적 안정된 환경이 이루어지기 전 까지 오랜 시간에 걸친 자연적인 풍화와 사람에 의한 영향 등에 의해 많은 변화를 겪어 왔다. 석굴암을 이루는 암석은 중립 내지 조립질의 화강섬록암으로 대체로 갈색에서 암갈색에 이르는 풍화면을 보이는데 이는 이 암석의 주구성광물인 장석류의 화학적 풍화에 기인한다. 또한 콘크리트돔이나 균열된 곳에 사용된 시멘트의 풍화물에 의한 표백 및 백화 현상 등에 의해 부분적으로 우백색을 띠거나 때로는 매우 검게 변색되어 있기도 한다. 여러 곳에 크고 작은 균열들이 발달되어 있으며 이는 주로 오랜 풍화작용에 의한 영향과 해체-복원 및 보수 과정중의 충격등에 기인하는 것으로 생각된다. 이러한 일반적인 현상들은 대부분이 현재와 같은 비교적 안정된 환경이 갖추어지기 전에 이루어진 것으로 생각된다. 그러나 앞으로의 더 나은 보전을 위해서는 내부 공기의 온도와 습도, 특히 위치에 따른 상대습도의 지속적인 평형유지, 구조적 균형유지, 그리고 진동 등에 의한 영향을 체계적이고 계속적으로 측정하여 대책을 수립하여야 할 것으로 생각된다.

ABSTRACT The present aspect of the Seoggulam is the result of natural weathering of the rocks and influences by mankind. The rocks constituting the Seoggulam is granodiorite of medium and coarse grains which show brown to dark brown weathered surface resulted mainly from chemical weathering of feldspars. It also shows partly milky white or black colors due to influences by weathering products of cement used in the concrete dome and cracks. There are cracks and crack zones with very small cracks which may be formed by strong weathering and influences of shocks during operations of reconstitution and repair. However, for the better conservation, it must be considered to maintain the balances of temperature and moisture, especially relative moisture in places within the room, structural stability, and the influences of vibration made up by some reasons.

1. 서론

석불사(石佛寺)로 출발한 석굴암은 1200여년 동안 많은 변화를 겪으며 지금에 이르렀다. 풍진뿐만 아니라 시대에 따라 달라지는 사람들의 손길에도 시달림을 받으면서도 아직까지 우리들의 자랑으로 남아 있을 수 있는 것은 참으로 다행이라 아니 할 수 없다. 이미 알려진 바와 같이 석굴암은 일제시대에 들어와 몇 차례의 해체복원(1913~1915), 보수(1917, 1920~1923)를 거치면서 본래의 형태를 알 수 없게 되었을 뿐만 아니라 해방 후에는 본존 불에 끼어 있는 청태 제거를 위하여 뜨거운 증기로 몇 차례에 걸쳐 세척을 하여 본래의 나이와 모습을 잃어버리게 된 것은 안타까운 일이다. 이러한 보존처리에도 불구하고 석굴암 내부에는 침수, 누수 및 이슬 맺힘 현상이 계속되어 습기가 차고 이끼가 발생하여 암석들의 풍화작용은 계속되었다. 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위하여 2회에 걸쳐(1962~1964, 1966년) 보수를 하여 현재의 모습을 갖추게 되어 비교적 안정된 환경을 유지하게 되었다.

이 연구는 상기와 같은 여러 변화 과정을 거치는 동안 진행된 풍화현상을 조사하여 그 원인을 분석하고 이를 바탕으로 앞으로의 더 나은 보전대책을 수립하는데 있어 기초자료를 제시하는데 목적이 있다. 이를 위하여 석굴암을 이루는 암석과 동일한 암상을 나타내는 암석을 석굴암 주위 노두에서 채취하여 암석학적 특징을 분석하였다. 석굴암 내부의 암석의 풍화현상은 육안 관찰이 가능한 높이까지만 주로 이루어 졌으며 원실의 천개를 비롯하여 그 이상의 높이 부위에 대해서는 백화현상과 같은 것에 대하여만 원인을 분석하였다. 채취된 암석은 박편을 제작하여 현미경하에서 구성광물과 조직을 관찰하여 풍화의 특징과 어떠한 연관성을 갖는지를 밝히고자 하였다.

2. 암석의 특징

석굴암을 이루고 있는 암석은 중립 내지 조립질을 나타내는 괴상의 화강암류이다. 대체로 담회색 내지 우백색을 띠나 풍화면은 연갈색 내지 담홍색을 나타낸다. 드물게 세립의 유색광물의 군집으로



Fig. 1. Right 11 face of the main-room: showing the rock phase of coarse texture and rich in biotite.

이루어진 포유물이 산출되기도 한다. 육안관찰에 의하면 석영과 사장석으로 주로 이루어져 있으며 관상의 흑운모가 산출되나 함량이 매우 적다. 이러한 암상은 후기 보수시에 보충된 것으로 생각되는 암석에서 잘 관찰할 수 있다(Fig. 1). 이러한 육안 관찰에 의한 암상의 특징을 나타내는 암석은 석굴암 주위에 노두로 잘 발달되어 있다. 전체적인 암상뿐만 아니라 유색광물 군집의 산출등 석굴암을 이루고 있는 암석과 암상이 매우 유사하다. 유색광

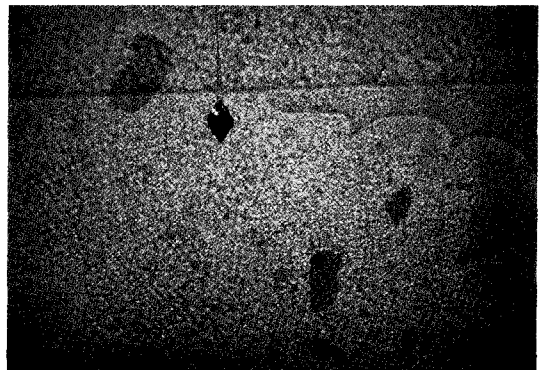


Fig. 2. Support rock of left 1 face of the fore-room; inclusions of mafic mineral aggregates in granodiorite(maybe supplemented later).

물 균집이 포유물로 산출되는 현상은 전실 좌측 1면(아수라)(Fig. 2), 전실 좌측 6면(증장천왕)의 받침석, 원실 우측 1면(대범천) 및 전실 우측 4면(전달바)의 오른쪽 치마 부분 등에서 잘 관찰할 수 있는데 전실 좌측 6면의 것은 상대적으로 신선하여 보수시에 보충한 것으로 생각된다. 석굴암 주위의 여러 개의 노두들은 암색이나 유색광물의 함량에 있어 약간의 차이를 보여 준다. 따라서 이러한 암상을 고려하여 4개의 암석시료를 채취하여 현미경적 관찰을 하였다.

현미경하에서의 관찰에 의하면 주구성광물은 석영, 사장석 및 견운모이며, 흑운모, 정장석과 녹니석이 부구성광물로, 그리고 스피넬, 녹염석, 인회석, 저어콘 및 불투명광물이 소량 수반된다(Table 1). 구성비 분석에 의하면 약 26~33%정도 함유되어 있는 석영은 부분적으로 약간 깨어져 있기도 하며 파동소광을 보이기도 한다. 구성비로 볼 때 40~49% 정도로 가장 많이 함유되어 있는 사장석은 대체로 알바이트 쌍정을 보이거나 칼스바드-알바이트 쌍정을 나타내기도 한다. 또한 대부분의 사장석이 누대구조를 보이는 것이 특징적이다(Fig. 3). 대체로 중간 내지 심하게 견운모화작용을 받았으며(Fig. 4) 일반적으로 결정의 내부에서 더 잘 진행된 양상을 보여 준다. 때로는 누대구조의 경계면을 따라 견운모화작용의 정도가 차이가 있어 개방니콜(open nicol)하에서도 경계를 구분할 수 있다. 부

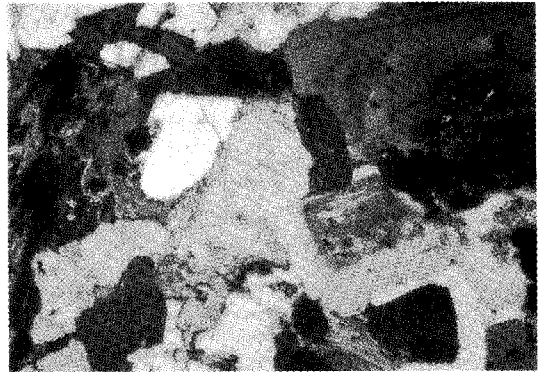


Fig. 3. Microphotograph of granodiorite showing zonal structure of plagioclase(pl) and alteration of biotite(bt) into chlorite(ch) along cleavage.

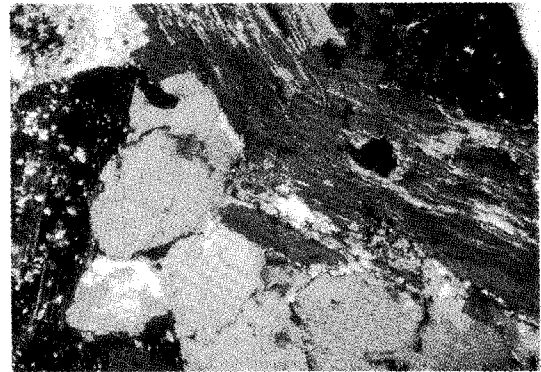


Fig. 4. Microphotograph of granodiorite showing moderately sericitized plagioclase(pl) and alternated occurrence of biotite(bt) and chlorite(ch) due to alteration of biotite along cleavages.

Table 1. Mineral compositions of granodiorite by modal analysis(%)

	S-1	S-2	S-3	S-4
Quartz	30.8	26.0	25.8	33.0
Plagioclase	40.5	43.8	48.5	48.7
Orthoclase	7.1	7.4	5.3	2.8
Biotite	1.2	2.9	1.3	0.3
Muscovite	0.1	0.9	0.2	0.6
Chlorite	5.8	3.9	3.0	4.7
Sericite	13.3	13.3	13.8	8.2
Sphene	0.1	0.5	0.6	1.0
Epidote	tr	tr	tr	tr
Zircon	tr	-	0.2	-
Apatite	-	tr	tr	tr
Opaque mineral	0.6	0.4	0.5	0.5
Total	99.5	99.5	99.5	99.9

분적으로 깨어져 있기도 하며 약하게 파동소광을 보여 주는 것도 있다. 칼스바드 쌍정을 잘 보이는 정장석은 3~7%정도 함유되며 대체로 심하게 견운모화작용을 받았다. 견운모로 심하게 변질된 부분에는 미립의 백운모나 녹니석이, 때로는 매우 드물게 녹염석이 산출되기도 한다.

3%내외의 함량을 보이는 흑운모는 벽개면이 잘 발달된 판상의 결정으로 산출되며 갈색에서 암갈색의 다색성을 나타낸다. 대부분이 부분적으로 녹니석으로 변질된 양상을 보여 주며 이 경우 불투명광물(산화철 광물)이 수반되는 것이 특징이다. 녹니석으로의 변질은 대체로 흑운모의 벽개면을 따라 진행되어 흑운모와 녹니석이 벽개면을 따라 교호하

는 양상을 보여 주기도 한다(Fig. 4). 3~6%정도 함유되는 녹니석은 연녹색에서 녹색의 다색성을 보여 주며 벽개면이 발달되지 않은 불규칙한 형태의 결정 또는 흑운모의 벽개면을 따라 변질된 양상으로 산출된다. 때로는 흑운모의 잔류물을 함유하고 있거나 흑운모의 기상으로 생각되는 양상으로 산출되기도 한다. 이러한 녹니석은 산출상태에 관계없이 적자색의 간섭색을 보여 주는 것이 특징이다. 불투명광물은 흑운모가 녹니석으로 변질된 부분에 또는 녹니석에 수반되어 산출되는 것이 보통이며 흑운모가 매우 심하게 녹니석으로 변질되어 있는 경우 주위에 잘 발달한다. 특히 흑운모가 벽개면을 따라 녹니석으로 변질되어 있는 경우 미립의 불투명광물이 벽개면을 따라 발달되어 있는 것이 보통이다. 매우 드물게 산출되는 스피넬, 인회석과 저어콘은 흑운모나 녹니석내에서 관찰된다.

이들 구성광물중 석영, 알칼리장석, 사장석 함량비에 따라 암석을 분류하면(Fig. 5)² 화강섬록암 내지 토날라이트에 해당됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 경주시 일원의 화강암류에 대한 Lee et al (1995)³의 각섬석-흑운모화강암에 해당되나 각섬석이 산출되지 않는 것이 다르다. 또한 이상헌 (1996)⁴의 경주시 일원에서 채취한 화강암류의 일부의 것과 비슷하다. 이것은 경주시 주위의 화강암

류는 주로 화강섬록암, 화강암, 알칼리화강암상을 나타내는데 석굴암 주위의 암석은 이들중 화강섬록암에 해당됨을 알 수 있다. 이 지역의 화강섬록암류는 K-Ar 및 Rb-Sr 법에 의한 절대연령 측정³에 의하면 47.6~50.0 백만년 사이에 관입한 것으로 생각된다.

3. 풍화현상

석굴암 내부를 이루고 있는 암석들 중 비교적 신선하며 담회색을 나타내는 후기 보수시에 보충된 것으로 생각되는 것을 제외하고는 간혹 암갈색을 보여 주나 거의 갈색의 풍화면을 나타내고 있다. 부분적으로 곱팡이나 이끼의 영향에 의하여 검게 변색되어 있기도 하며 매우 드물게 푸른색을 나타내기도 한다. 비교적 심하게 풍화된 부분은 광물 결정들이 떨어져 나가 표면이 요철되어 있기도 하며 매우 약하게 박리현상이 발달하기도 한다. 암석들의 접촉부에 시멘트나 양회등이 사용된 경우 그 주위는 회계 표백되거나 때로는 검게 변색되어 있기도 하며 백화현상을 나타내기도 한다. 이러한 양상은 특히 감실과 천계 부위에서 잘 관찰되는데 이는 외부 콘크리트등의 시멘트의 풍화에 의한 영향이 아닌가 생각된다. 여러 곳에 수직 또는 대각선으로 균열들이 발달되어 있는데 이 균열을 따라 풍화가 더 진행되어 더 검게 변색된 것들도 관찰할 수 있다.

상기와 같은 풍화현상은 전체적으로 비슷한 양상을 보이고 있으나 대체로 벽면 보다 천장부위가, 그리고 양각된 돌출부분이 더 심한 경향을 나타낸다. 다음에 전실과 비도, 원실, 그리고 본존불(좌대 포함) 별로 풍화양상을 간단히 기술하고자 한다.

3.1. 전실과 비도

전체적으로 매우 심하게 풍화되어 갈색 내지 암갈색을 나타내며 때로는 검게 변색되어 있기도 하다. 암갈색은 전실 우측 1면(기루라), 우측 3면(천)(Fig. 6), 우측 4면(전달바)의 돌출부, 우측 7면(다문천왕), 좌측 2면(전나라)의 두드러진 부분, 좌측 5면(금강)등에서 특히 잘 관찰할 수 있다. 양각된 돌출부위가 검게 변색되어 있기도 하는데 이는 우측 4면(전달바)과 지국천왕(우측 6면)의 귀밀부분

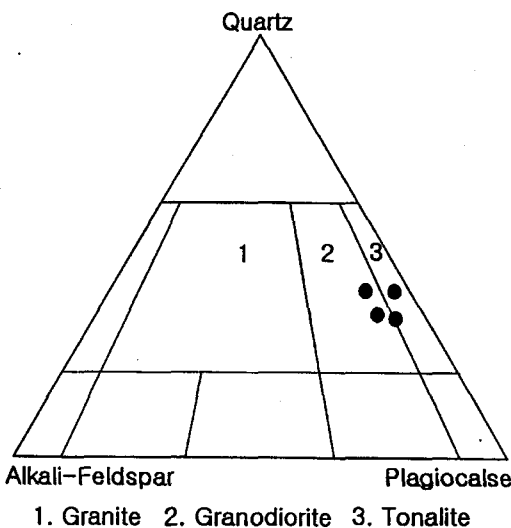


Fig. 5. Classification of granitoid rock based on modal quartz-alkali feldspar-plagioclase system (Streckeisen, 1967).



Fig. 6. Right 3 face of the fore-room; dark brown weathered surface, crack development and high relief surface by weathering.

에서 잘 볼 수 있다. 풍화가 매우 심하여 표면에 요철현상이 특히 잘 발달된 경우는 우측 3면(천)(Fig. 6)과 좌측 2면(견나라)에서 잘 관찰할 수 있다. 암석들에 부분적으로 발달된 균열들이나 부재들 사이의 접촉면 등에는 시멘트등이 접착제로 사용된 것이 많은데, 예를 들면 우측 5면 왼쪽 하부와 기둥사이, 우측 1면의 균열, 우측 3면과 4면 사이, 우측 6면 아래 왼쪽 모서리 부분, 우측 7면의 균열부위, 좌측 1면의 두부 윗부분, 좌측 3면과 4면 사이 등이다. 이중 첫 번째의 경우 주위가 희게 표백되어 있는데 이는 시멘트의 풍화에 의한 영향으로 생각된다.

풍화가 진행됨에 따라 암석내에 잠재되어 있는 양과점질구조(onion structure)와 화성선리구조(igneous lineation)등이 겉으로 나타나는 경우가 있는데 이러한 현상은 우측 3면의 중앙 왼쪽 부위, 좌측 3면 반침석, 좌측 5면의 반침석 및 좌측 6면의 상단 왼쪽 모서리 부분에서 잘 관찰할 수 있다.

3.2. 원실

홍예문을 비롯하여 원실 내부를 이루고 있는 암석들은 전체적으로 갈색에서 암갈색의 풍화면을 보이고 있으나 부분적으로 검게 변색되어 있거나 또는 접착제로 사용한 시멘트의 풍화물의 영향에 의하여 희게 표백되어 있기도 한다. 검게 변색된 현상은 홍예문 좌우측기둥 아래 부분, 홍예문 안쪽 부위 그리고 원실 우측 1면(대범천)의 하부 등에서 잘 관찰할 수 있는데 전자의 경우 사람들에 의한

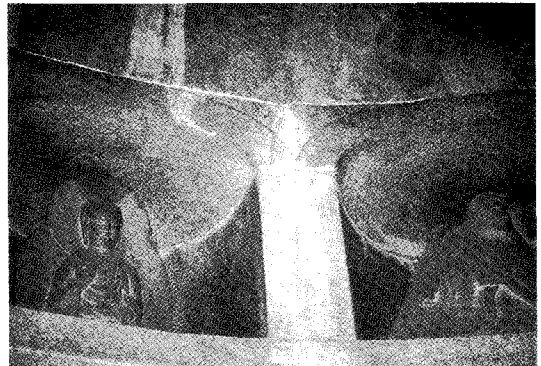


Fig. 7. Left 4 and 5 Gamsil in the main-room; bleaching phenomena by weathering product of cement penetrated along contacts of the rocks from concrete dome.

것으로 생각된다. 홍예문 안쪽 부위는 이끼나 곰팡이 등과 같은 미생물의 영향에 의한 것으로 생각되며 이런 현상은 오른쪽 아래 부위에서 잘 나타나 있다. 두광의 경우 연화문테두리 왼쪽 부분에 검게 변색된 부분이 물이 흘러 내린 것과 비슷하게 변색되어 있으며 연화문의 두드러진 부분은 연갈회색의 풍화면을 보이고 있다.

암석들의 접촉부나 균열된 곳등에 시멘트나 양회를 이용하여 접착한 곳들이 많은데 그 주위는 희게 표백되어 있는 경우가 있다. 홍예문 바깥 부분, 원실 우측 입구 모서리, 원실 우측 7면(라후라)의 오른쪽 거드랑이, 팔꿈치 및 손아래 부분 그리고 원실 좌측 2면(문수보살) 등에서 잘 관찰할 수 있다.

풍화가 진행됨에 따라 잠재되어 있던 양과점질구조나 화성선리구조 같은 것이 박리현상으로 나타나는 경우가 있는데 우측 1면(대범천)과 2면(보현보살)의 반침석, 좌측 7면(아난)과 좌측 3면(목건련) 등에서 관찰할 수 있다. 특히 전자의 경우 박리구조를 따라 약간 떨어져 나가기도 하여 박리현상을 잘 볼 수 있다.

감실 속의 보살상들은 거의 암갈색으로 아래의 다른 부위에 비하여 풍화가 더 심하게 진행하였음을 나타내고 있다. 감실을 이루고 있는 암석들은 접촉면을 중심으로 그 주위가 비교적 넓게 우백색으로 표백되어 있는 경우가 많은데 이는 외부 콘크리트등의 시멘트의 풍화에 의한 영향으로 생각

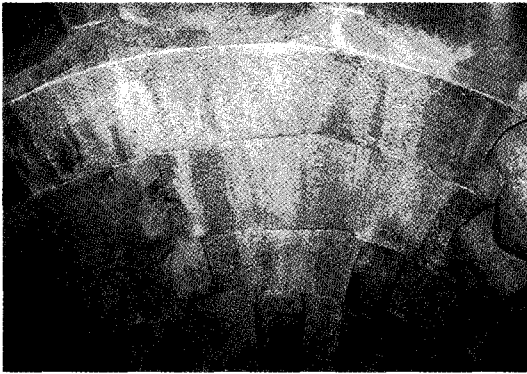


Fig. 8. Roof: dark brown weathered surface and bleaching phenomena.



Fig. 9. Rear of the seat; black color due to influences of cement weathering in the contact.

된다. 이러한 현상은 오른쪽 3, 4, 5감실(미륵보살, 보살상, 보살상), 왼쪽 4, 5감실(지장보살, 유마거사)(Fig. 7)과 천개와의 연결부위에 특히 잘 발달되어 있다. 이와 같은 암석들 사이의 틈과 암석표면의 표백현상은 천개에 있는 암석들 전체(Fig. 8)에 공통적으로 발달한 현상이다.

3.3. 본존불

본존불은 다른 암석들과 다르게 전체적으로 우백색을 나타내고 있는데 이는 수차례에 걸친 세척에 의한 것으로 생각된다. 즉 세척 후 지금까지 풍화작용이 크게 일어나지 않아 우백색을 그대로 유지하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 양화나 시멘트로 접착시킨 부위의 주위는 우백색의 표백현상을 나타내고 있다. 가슴 부위에는 박리현상을 관찰할 수 있는데 이는 세척하기 전에 본존불도 다른

부위의 암석과 같이 비교적 심하게 풍화작용을 받았음을 시사한다.

좌대는 부분적으로 갈색, 회갈색, 또는 검은색 등의 풍화면을 보이고 있는데 이러한 현상은 다른 부위의 암석들과 비슷한 양상이다. 특히 양련 부위의 거의 전체가, 그리고 우주와 중부좌대(양련 아래부분)와의 접촉부는 검게 변색되어 있다. 시멘트로 접착시킨 부분의 주위가 특히 검게 변색된 현상(Fig. 9)을 보이는 곳도 있다.

4. 균열발달양상

전실과 원실 그리고 본존불의 좌대등 많은 곳에 수직, 수평 또는 대각선 방향의 크고 작은 균열들이 발달되어 있다. 이들은 매우 미약하여 자세히 관찰해야 할 정도에서부터 수십 cm에 이르기까지 굵고 길게 형성되어 있다. 때로는 가는 균열들이 모여 균열대(crack zone)를 형성하고 있기도 하며 이 균열을 따라 깨어져 나간 경우도 많다. 수직방향의 큰 균열은 전실 우측 1면 오른쪽 발부분, 전실 좌측 7면(광목천왕) 오른쪽 하부(Fig. 10), 원실 우측 11면(가전연), 3-4 감실 윗부위, 본존불의 오른쪽 엉덩이 부위, 좌대의 복련 정면 우측부 및 양련 좌측 윗부분등에서 잘 관찰할 수 있다. 미세한 균열들이 모여 균열대를 이루고 있는 경우는 전실 우측 2면 마후라가의 왼쪽 종아리 부위, 전실 우측 6면(지국천왕)(1~5 cm의 폭)(Fig. 11), 전실 우측 7면(다문천왕), 전실 좌측 7면(광목



Fig. 10. Left 7 face of the fore-room: large cracks(left and right sides) and crack zone(width 0.5-3.0 cm at right lower part).

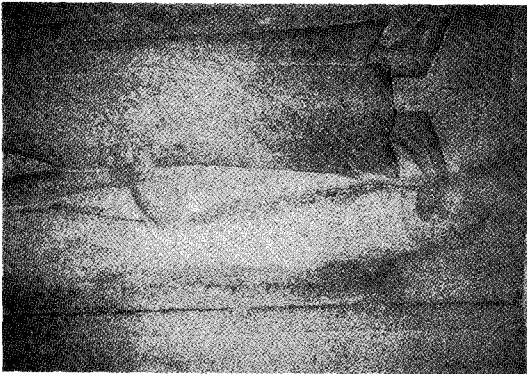


Fig. 11. Right 5 face in the main-room; dark brown weathered surface, vertical cracks and crack zone, black color due to cement weathering.



Fig. 12. Front of the seat; cracks and crack zones.

천왕) (0.5~1 cm 폭의 것과 0.5~3 cm 폭의 것)(Fig. 10), 원실 우측 5면(부루라)(2~6 cm 폭)(Fig. 11), 원실 우측 6면(아라울)(최대 2 cm 폭), 원실 좌측 4면(수보리), 원실 좌측 3면(목건련)의 상부 원쪽 모서리와 중앙 아래 부위, 좌대 정면 면석(2~3 cm 폭)(Fig. 12) 등에서 잘 관찰되어진다. 이러한 균열대는 다른 부위에 비하여 풍화가 더 잘 진행되어 쉽게 광물 알갱이들이 떨어져 나가 표면이 매우 불규칙하거나 이를 따라 부분적으로 깨어져 있기도 하다. 이러한 균열대는 일반적으로 수직으로 또는 비스듬하게 발달되어 있는 것이 보통이다. 전실 좌측 6면(증장천왕)의 아래 부위에는 깨어진 부분을 중심으로 방사상으로 작은 균열들이 발달되어 있는데 이는 충격에 의해 형성된 것으로 생각된다. 전실 좌측 7면(광목천왕)(Fig. 10)의 왼쪽 부위의 윗 부분에 수직방향으로 폭 약 0.5~

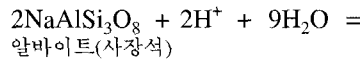
1 cm의 균열대가 발달되어 있는데 아래로 내려오면서 방향이 바뀌어지고 있으며 또한 하부 오른쪽 부위에는 윗 부분에서는 균열대가 발달하나 그 아래의 연장방향에는 매우 큰 균열이 발달된 양상을 보여 이들이 풍화와 하중의 편중에 의한 것임을 시사하는 것이 아닌가 생각된다.

홍예문의 우측 기둥에는 곳에 따라 작은 균열들이 많이 발달되어 있으며 이 균열을 따라 또한 기둥 받침석이나 중간석과의 접촉부에 깨어진 부분이 많아 구조적 불균형을 시사하기도 한다.

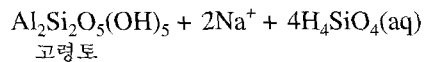
이러한 균열 부분이나 깨어진 부분을 시멘트나 양회로 접착시키거나 충진시킨 경우가 있는데 이 경우 주위는 대체로 검게 변색되거나 희게 표백되어 있는 것이 보통이다.

5. 토의

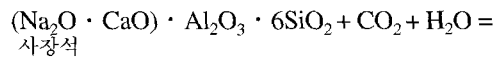
상기한 바와 같이 석굴암 내부의 암석은 여러 풍화현상과 균열발달양상을 보여 주고 있다. 이들의 생성원인은 크게 자연적인 풍화작용과 사람들에 의한 인위적인 영향에 의한 것으로 나눌 수 있다. 전체적으로 암석의 표면이 갈색 내지 암갈색을 띠는 것은 자연적인 풍화작용에 의한 대표적인 현상이다. 이는 화강암류내에 가장 많이 함유되어 있는 장석류의 풍화에 기인한다. 사장석은 H⁺을 함유한 또는 CO₂가 녹아 있는 물과 반응하여 고령토로 변하며 Na⁺ 및 Ca⁺⁺를 유출시킨다.^{5,6} 이의 화학반응식은 다음과 같다.



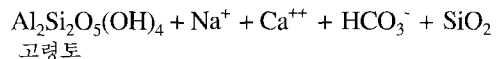
알바이트(사장석)



고령토



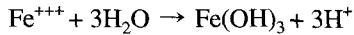
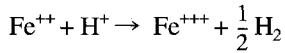
사장석



고령토

이온 상태로 유출된 Na⁺, Ca⁺⁺ 및 HCO₃⁻ 등은 다른 곳으로 이동하고 고령토는 그 자리에 남게 된다. 이러한 과정 중에 장석내에 미량 함유되어 있는 Fe성분이 유리되어져 나와 산소나 물과 반응하여 산화철 또는 수산화철로 변하게 된다. 수산화

철의 형성은 다음과 같다.



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 발달정도에 따라 암석의 표면은 갈색 또는 암갈색을 띠게 된다.

이러한 장석의 화학적 반응에 의한 붕괴에 의해 장석결정내에 미세균열이 발달하게 되고⁵ 그 결과 습기와의 접촉면이 확대되어 반응은 더욱 촉진된다. 이러한 장석의 화학적 풍화는 주위의 석영 입자와의 결합력을 약하게 하여 화학적 화에 강한 석영 입자들을 떨어져 나가게 하는 기계적 풍화를 야기시키며 그 결과 매우 불규칙한 암석 표면을 형성하게 되어 다시 화학적 풍화를 촉진시키는 효과를 가져오게 된다. 따라서 이러한 암석의 자연적인 풍화의 정도는 장석의 함량 정도와 습기의 pH와 CO_2 의 용해정도 및 습기와의 접촉시간에 따라 좌우된다.⁶ 석굴암을 이루는 암석은 앞에서 설명한 바와 같이 장석류가 50%내외로 매우 많이 함유되어 있어(Table 1) 이 암석들의 자연적인 풍화는 주로 장석류의 풍화에 기인함을 알 수 있다.

현재의 석굴암은 외부와 차단되어 있기 때문에 내부의 습기의 특징은 자연적인 대기 조건의 변화보다는 다른 원인에 의하여 영향을 받음을 추정할 수 있다. 이미 알고 있는 바와 같이 석굴암은 전체가 시멘트콘크리트돔에 의하여 밀폐되어 있으며 또한 깨어진 부분이나 석재들의 접촉부 등은 시멘트나 양회등을 이용하여 접착시킨 곳이 많다. 따라서 이들의 풍화에 의한 영향을 고려하지 않을 수 없다. 이것은 시멘트나 양회등이 사용된 부위 주변이 곳에 따라 검게 변색되거나 회색 표백되어 있거나 감실과 천개 부위에서와 같이 콘크리트돔에 가까운 부위에는 매우 심하게 표백되거나 백화현상을 나타내는 것으로부터 알 수 있다. 시멘트를 이루는 주성분인 CaCO_3 가 빗물이나 대기의 물과 반응하여 ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^-$) Ca^{++} 와 HCO_3^- 를 생성시키게 된다. 이 중 HCO_3^- 는 $a\text{CO}_2 = 10^{-2}$ ($T=25^\circ\text{C}$)일 때 pH가 6.4보다 높은 경우 안정하며 낮은 경우는 H_2CO_3 로 다시 가역된다.⁷ 따라서 대기의 습기에 녹아 있던 Ca^{++} 와 HCO_3^- 는 pH의 변화에 따라

다시 CaCO_3 로 암석의 표면에 재침전될 뿐만 아니라 H_2CO_3 는 암석을 이루는 장석류등과 반응하게 되어 풍화를 촉진시키게 된다. CO_2 의 물에의 용해도는 온도에 따라 변화하기 때문에 내부의 부분적인 온도의 차이에 대해서도 고려해야 할 것으로 생각된다. 그러나 현재의 시멘트나 양회에 의한 표백 및 백화현상 등의 대부분이 현재와 같은 환경이 갖추어지기 전에 일어난 것으로 생각되거나 콘크리트 돔의 시멘트의 화학반응물이 석재의 틈 사이를 따라 석굴암 내부로 스며들 수 있기 때문에 현재도 이러한 과정이 진행되고 있을 가능성을 배제할 수는 없을 것으로 생각된다.

암석들에 많이 발달되어 있는 균열들은 크게 볼 때 풍화작용이 보다 심하게 진행된 것과 거의 풍화현상을 보여 주지 않는 것으로 구분되어진다. 전자의 경우 석굴암 전체에 걸쳐 여러 곳에 발달되어 있어 이는 현재와 같은 환경을 이루기 전에 오랜 시간에 걸친 풍화작용과 해체-복원 과정을 거치는 중에 인위적인 충격이나 구조적 불균형 등에 기인한 것으로 생각된다. 또한 그중 많은 부분이 시멘트나 양회 등으로 접착되어 있다. 시멘트나 양회가 사용되어진 경우에도 이에 의한 영향이 없는 것도 많이 있어 접착체가 사용되어진 시기(보수시기)를 지시해주고 있다고 생각된다. 단순히 작은 균열이 발달된 곳이 국부적이지만 관찰되어지는데 이는 풍화작용을 거의 무시할 수 있는 현재와 같은 환경이 갖추어지고 난 뒤 형성된 것이 아닌가 생각된다. 이러한 균열이 부분적인 구조적 불균형⁸에 의한 것인지 또는 현재 장치되어 있는 공기 정화장치의 진동에 의한 것인지 그 원인에 대해서는 정밀측정을 통하여 밝혀질 수 있을 것으로 생각된다.

위에서 살펴본 바와 같은 현재의 암석들의 풍화현상과 균열발달의 원인을 바탕으로 외부 콘크리트 돔의 시멘트의 풍화에 의한 영향의 제거, 석굴암 내부 대기의 조건의 변화를 최소화시킬 수 있는 환경의 조성, 위치에 따른 온도의 차이를 없도록 하여 부분적인 이슬 맺힘의 방지, 습도를 조절하여 곰팡이나 이끼 등의 번식방지, 그리고 정밀측정을 통하여 구조적 불균형이나 진동에 의한 영향 등을 밝히고 이를 최소화시킬 수 있는 방안을 강구하여 보전대책을 수립하여야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

석굴암을 이루는 암석은 담회색 내지 우백색의 중립 내지 조립질의 화강섬록암으로 석굴암 주위에서 채취된 것으로 생각된다. 이 암석의 주구성광물은 석영, 사장석 및 정장석이며 흑운모가 소량 수반된다. 암석은 대체로 갈색에서 암갈색의 풍화면을 보이거나 검게 변색된 곳도 있다. 암석의 풍화는 주로 장석류의 화학적 풍화에 의해 진행되어진 것으로 생각된다. 또한 콘크리트 돔이나 접착제로 사용된 시멘트의 풍화물에 의해 회계 표백되거나 백화현상을 보여 주기도 한다. 이러한 현상은 특히 원실의 감실과 천개 부위에 특히 잘 발달되어 있다. 암석들에 균열들이 많이 발달되어 있는데 이는 풍화에 의한 암석물성의 약화와 해체·보수 과정중의 인위적인 충격이나 구조적 불균형 등에 기인하는 것으로 생각된다. 콘크리트돔과 접착제로 사용된 시멘트의 풍화에 의한 영향의 제거, 풍화를 방지할 수 있는 온도와 습도등 내부 환경의 지속적인 유지, 그리고 구조적 불균형이나 공기정화장치의 진동에 의한 영향을 정밀 측정하여 이를 바탕으로 앞으로의 적절한 보전대책을 수립하여야 할 것으로 생각된다.

7. 감사의 글

석굴암 내부에 대한 조사는 1997년 “문화재의 해”에 대비한 한국방송공사의 석굴암에 대한 특별

기획의 일부로 1996년 11월 7일에서 9일 사이에 이루어졌다. 조사를 할 수 있게 하여준 석굴암의 주지 스님과 한국방송공사의 김형일 PD, 그리고 조사시 도와준 최기주 석사에게 감사를 표하고자 한다.

8. 참고문헌

1. 한국불교연구원, 석굴암(한국의 사찰2), 1993: p 107.
2. A. L. Streckeisen, Classification and nomenclature of igneous rocks, *Neues Jahrb. Mineral. Abhandl.*, **107**, 144-240 (1967).
3. M. J. Lee, J. I. Lee, M. S. Lee, "Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkal granite in the Kyoungju Area", *Korea, J. Geol. Soc. Korea*, **31-6**, 583-607 (1995).
4. 이상현, "감은사지 3층 석탑(동탑)과 나원리 5층 석탑의 암석화 풍화현상의 특징에 대한 연구", *보존과학회지*, **5(1)**, 20-40 (1996).
5. Blum, A.E., Stilling, L.L., Feldspar dissolution kinetics, in *Reviews in Mineralogy*, **31**, 291-352 (1995).
6. 이상현, 국내 석조문화재의 보전대책수립을 위한 지질학적 고찰, *보존과학회지*, **7(1)**, 9-18 (1998).
7. J. I. Drever, *Geochemistry of Natural Waters*, Prentice-Hall Inc., 1982: p388.
8. 이상현, 중원미륵리사지 입상석불 보호석실의 암석의 풍화와 균열의 발달양상, *보존과학회지*, **7(2)**, 68-79 (1998).