

진주성 축석루 성곽지반의 풍화특성과 사면안정성 평가

조영훈 | 이명성 | 이선명 | 이찬희¹

공주대학교 문화재보존과학과

Weathering Properties and Slope Stability Evaluations of Bedrock under the Chokseongnu Pavilion, Jinjuseong Fortress, Korea

Jo Young-hoon | Lee Myeong-seong | Lee Sun-myung | Lee Chan-hee¹

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author : 041)850-8543, chanlee@kongju.ac.kr

초록 진주성 축석루의 성곽지반은 진주층의 사암을 기반암으로 암갈색 내지 담회색의 미사암과 암회색 셰일이 호층을 이루며 축석문 쪽으로 경사진 층리가 발달되어 있다. 이 지반에는 크고 작은 수직 및 수평절리가 발달되어 있으며 풍화와 침식작용에 의해 여굴이 발생되어 있다. 또한 불연속면의 발달에 의한 누수현상과 셰일층의 세면화, 수목 근압에 의한 균열 및 절리가 나타나 있다. 이 성곽지반의 구성암석 중 물리적으로는 셰일층이 화학적으로는 미사암층이 풍화에 민감하게 나타났으며, 공통적으로 기반암인 사암이 풍화에 가장 민감한 특징을 보였다. 성곽지반의 사면안정성 평가 결과, 이 암반사면은 평면파괴에 안정하나 국부적으로 소규모의 쉼기파괴 가능성을 갖고 있으며 사면 전체적으로 전도파괴에 불안정성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 이 성곽지반은 연약지반 개량공법을 통한 지반강도를 증대시키고 석조문화재용 강화제 등을 이용한 표면강화처리를 실시해야 할 것이다. 또한 최소한의 경관을 유지할 수 있는 수목 이외에는 제거해야하며 수분침투를 막을 수 있는 차수대책 및 배수시설이 필요할 것이다.

중심어 : 진주층, 풍화, 침식, 사면안정, 수분침투

ABSTRACT The bedrock beneath the Chokseongnu pavilion consists of sandstone with alternate dark-gray to light-brown siltstone and dark-gray shale of the Jinju Formation, where bedding is well developed toward the Chokseongmun gate. Large to small joints and overbreak from the erosion weathering have been developed in the bedrock. Besides, water leakage from development of discontinuity planes, fragmentation of shale, crack and joint by tree roots are observed on the bedrock. While shale and siltstone showed high sensitivity in physical and chemical weathering, respectively, sandstone indicated the highest weathering sensitivity in both. As the results of structural stability analysis, the whole bedrock has high instability in wedge failures, and especially section No. II slope is more instable than section No. I. Therefore, it is necessary for the bedrock to be strengthened by improvement method for soft foundations and the surface reinforcement. The trees causing mechanical collapse of the bedrock should be also removed and a water flow prevention measure or a water exhaust are required.

Key word : Jinju Formation, weathering, erosion, slope stability, water flow

1. 서론

진주성은 사적 제118호로 지정된 조선시대 성으로 진주의 역사와 문화가 집약되어 있는 성지이다. 특히 남강변 성곽지반 위의 축석루는 역사적 및 문화적 가치가 높아 경남문화재자료 제8호로 지정되어 있다. 그러나 현재 축석루를 받치고 있는 성곽지반은 구성암석의 파손 및 박리와 박락으로 인해 재질이 약해져 성곽지반으로서의 기능을 상실해 가고 있다. 또한 암반 전체에 걸쳐 발달되어 있는 균열 및 절리와 누수에 의한 파쇄대가 밀집 분포하여 구조적인 문제도 나타나고 있다.

일반적으로 야외에 노출되어 있는 석조문화재는 주변 환경에 의해 풍화속도가 달라진다. 따라서 수분이 적고 생물의 영향이 적은 곳에서는 풍화속도도 느려진다. 오랜 시간 수분에 직접적으로 노출되어 있는 축석루 성곽지반은 물리화학적 및 생물학적 풍화로 인해 두터운 풍화대가 형성되어 있다. 이미 여러 차례 보수와 정비가 수행되었으나 현재까지도 성곽지반은 남강쪽으로 기울어지는 등 많은 훼손이 발생하고 있다.

이와 같이 훼손이 급격히 진행되고 있는 상황에서 빠른 시일 내에 축석루 성곽지반에 대한 과학적 및 공학적 정밀진단이 시급하게 요구되었으며, 이를 근거로 적합한 보존대책이 강구되어야 할 것으로 지적되었다. 우리나라에서 암반사면에 조성된 문화재를 대상으로 보존과학적 연구가 진행된 것은 최근의 일이다.¹⁻³ 그러나 아직 초기

단계이며 성곽지반과 같은 문화재의 지반에까지 적용한 사례가 없으므로 심도 있는 많은 연구가 필요하다. 이 연구에서는 축석루 성곽지반의 정확한 암석학적 풍화특성과 훼손 상태를 파악하였으며, 성곽지반에 발달된 불연속면의 거동특성을 검토하였다. 이를 바탕으로 축석루 성곽지반의 보강 및 보수를 위한 보존과학적 방안을 제시하였다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

진주성은 행정구역상 경상남도 진주시 본성동과 남성동에 걸쳐 분포한다. 또한 도심을 가로질러 흐르고 있는 남강변에 위치하며, 성의 전체면적은 173,036m²이고 성벽둘레는 1,700m인 석성이다. 이 연구의 대상은 진주성의 축석문에서 축석루 사이 약 50m 구간의 성곽지반이다(Figure 1). 이 성곽지반은 남강이 흐르고 있는 남쪽을 향해 있으며 전구간에 걸쳐 여장이 설치되어 있다. 또한 의암바위와 의암사적비 부근의 사면에는 장방형의 자연석을 이용한 석축이 쌓여져 있고 그 위에는 난쟁이 조릿대가 식재되어 있다. 한편 축석문 주변의 사면에는 다듬지 않은 자연석을 그대로 쌓아올렸다.

이 성곽지반 사면은 사암층을 기반암으로 미사암층과



Figure 1. Field occurrences and states of bedrock under the Chokseongnu pavilion.

세일층이 일정한 높이로 호층을 이루고 있다. 특히 호층을 이루고 있는 성곽지반은 축석문 쪽으로 경사진 층리가 발달되어 있으며, 사면 상단면에는 성곽지반에 뿌리를 둔 큰 수목들이 조성되어 있다. 이 성곽지반 단면은 거의 수직에 가까우며 남강쪽으로 급경사를 이루고 있어 구조적으로 매우 불안정한 모습을 하고 있다. 또한 균열 및 절리대를 따라 누수가 심하며 이로 인해 형성된 수분 유지대를 중심으로 변색 등의 다양한 훼손이 관찰된다(Figure 1). 사암층으로 구성된 기반암은 사교하는 큰 절리가 발달되어 있으며 세일층에서 박락되어 떨어져 나온 작은 세일편들이 덮고 있다.

2.2. 연구방법

이 연구를 위해 우선 풍화상태에 따라 조사지역을 크게 3개 구역으로 나누어 정밀 야외조사를 실시하였으며, 각각의 사암 및 미사암층과 세일층 주변에 분포하는 탈락된 암편으로 분석용 시료를 채취하였다. 또한 성곽지반 표면암석과의 물성 비교를 위해 성곽 안쪽에서 지반 시추조사를 실시하였다(Figure 2). 각 구성재질의 암석학적 연구를 위해 각각의 층별로 전암대자율을 측정하였

다. 측정기기는 10^{-5} SI 단위의 측정 한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 이용하였으며, 대자율의 단위는 10^{-3} SI unit로 표기하였다.

이 성곽지반을 구성하는 암석의 광물학적 및 조직적 특징을 관찰하기 위해 편광현미경을 관찰하였고, 광물종과 풍화에 따른 생성광물과 오염물의 조직을 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. 여기에 사용된 편광현미경은 자동계수기(mechanical counter)가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경이고, 주사전자현미경은 Oxford사의 에너지분산형 성분분석기(EDX Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM 6335이다. 또한 조암광물의 조성을 동정하기 위해 Rigaku제 D/Max-IIIB X-선 회절분석기를 이용하였다. 여기에 사용된 X-선은 $CuK\alpha$ 에 조건은 40kV, 100mA이다.

한편 채취한 시료의 물성을 조사하기위해 한국산업규격인 KS F2518에 명시된 방법으로 겉보기 비중과 흡수율을 측정하였으며, 사용된 기기는 비중측정기 GX-13과 디지털저울 GX-200이다. 암석의 전암 주성분 화학 조성을 통한 화학적 풍화지수를 알아보기 위해 X-선 형광분석기(XRF)를 이용하였으며, 일부원소에 대하여 유

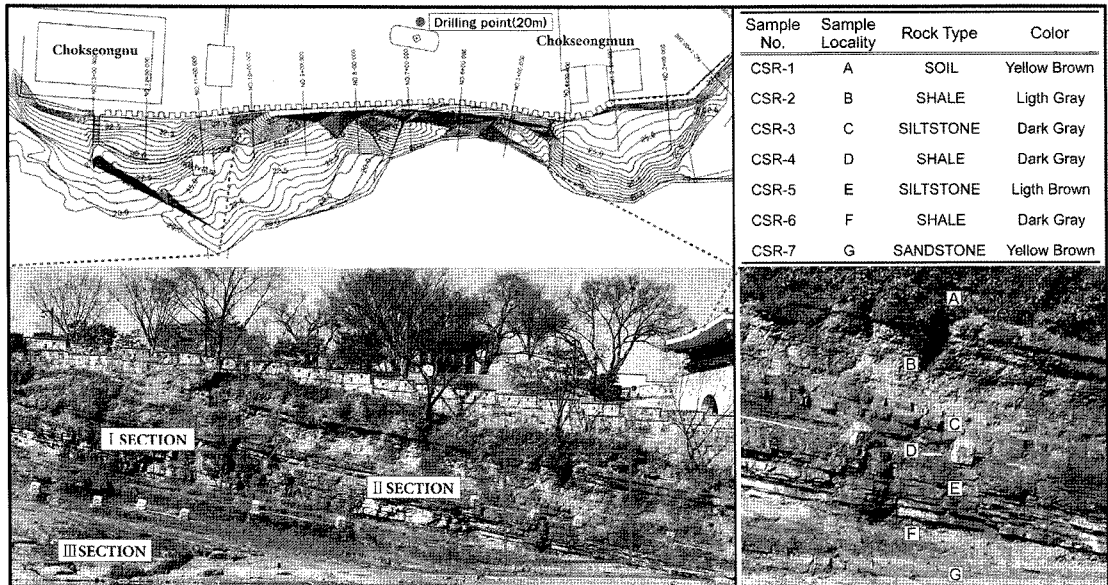


Figure 2. Detail investigated area and sampling schemes of bedrock under the Chokseongnu pavilion.

도결합 플라즈마 분광분석기(ICP-AES, ICP-MS) 및 중성자 방사화분석기(INAA)가 이용되었다. 또한 3개 구역에 대해 클리노미터를 이용하여 사면에 발달한 불연 속면의 주향과 경사를 측정하였고, 이를 WINDOW용 DIPS 프로그램으로 도시화하여 안정성을 해석하였다.

3. 구성재질의 특성

3.1. 암석학적 특징

진주성의 주변지질은 경상남북도에 분포하는 중생대 경성누층군의 낙동층군에 속하는 마동층 및 진주층과 제 4기의 충적층으로 이루어져 있다. 이 성의 서쪽으로는 남북으로 길게 마동층이 분포하고 이를 진주층이 정합으로 덮고 있다. 이들 상부로 충적층이 동쪽에서 중앙으로 확장하며 부정형으로 분포하고 있다. 축석루 일대의 조사지역은 충적층으로 피복되어 있는 진주층의 구성암석으로 형성되어 있다.

진주층의 구성암석은 담회색 내지 회녹색 장석질 사암과 녹회색 내지 회색의 사질 셰일, 또는 미사암 등이며 부분적으로 흑색 셰일이 협재하고 있다. 이 층의 하부는 담회색 장석질 사암이 우세하고 상부는 사질 셰일과 셰일이 우세하다. 녹회색 내지 회색의 사질 셰일이 특징적이며 층리를 따라 쉽게 박리박락되는 현상을 보여준다. 또한 흑색 셰일은 세편으로 파쇄되는 기계적 풍화 양상을 보인다.⁴

축석루 성곽지반을 구성하고 있는 암석은 암회색 내지 담갈색의 사암 및 미사암과 암회색의 셰일이다. 이 사암과 미사암 및 셰일은 교호하여 호층구조를 이루고 있다. 미사암층에는 크고 작은 균열이 발달하고 있으며 셰일층은 대부분 풍화와 침식작용에 의하여 여굴이 발생되어 있다(Figure 2). 또한 기반암을 이루고 있는 두꺼운 사암층도 크고 작은 수직 및 수평절리들이 사교하고 있어 지반의 불안정을 야기하고 있다.

시추코아를 통해 확인한 성곽지반 내부의 암상적 특징을 보면, 지표로부터 0.5m 심도까지는 충적층으로 이루어져 있고 하부 1.8m까지는 셰일이 부스러진 형태로 산출되는 풍화암이 분포하고 있다. 또한 심도 14.0m까지는 연암층인 셰일과 미사암이 점이적으로 변하면서 호

층을 이루고 있으며 20.0m까지는 보통암인 사암층으로 구성되어 있다. 파쇄대는 심도 1.8m~14.0m의 연암층에서 전 구간에 걸쳐 나타나며, 특히 심도 3.5m~11.0m 사이 지층에서 파쇄가 심하여 코아 산출상태가 불량하였다. 사암층에서도 일부 심한 파쇄부분이 나타나기도 한다.

3.2. 전암대자율

전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로서 외부자기장에 대한 자화강도를 의미한다. 이 대자율은 주로 암석에 함유된 불투명 광물로 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량과 정의 상관관계를 가지며 이를 통해 자철석을 함유한 암석의 광역적 분포를 파악할 수 있다. 일반적으로 1.256을 기준으로 이보다 높은 경우는 자철석 계열로, 낮은 경우는 티탄철석 계열의 암석으로 구분한다.⁵

이 대자율을 이용한 석조문화재 재질의 원산지 해석 및 석기와 토기의 산지추정에 관한 연구도 활발히 진행

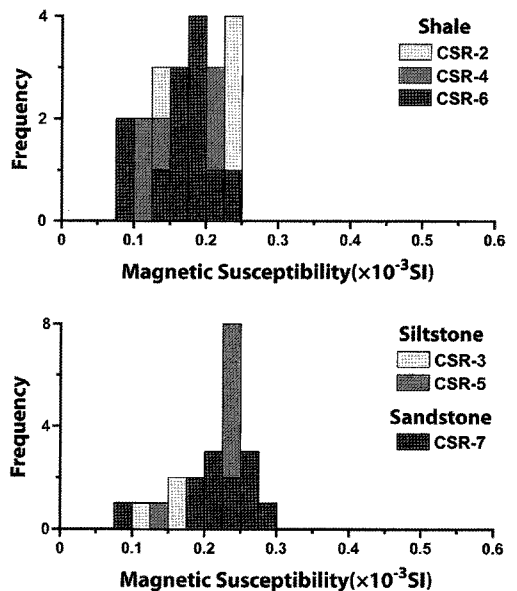


Figure 3. Diagrams showing magnetic susceptibilities of bedrock.

되고 있다.^{6~8} 특히 축석루 성곽지반과 같은 쇄설성 퇴적암의 경우, 일반적인 자성광물은 자철석으로 퇴적작용이 일어나기 이전에 이미 열잔류자화나 화학잔류자화를 획득하고 있다. 그러므로 이러한 입자들에 기록된 자화의 자기적 안정성은 퇴적과정과는 무관하고 각 입자의 성분과 크기에 관련이 있다.⁹

대자율 측정은 사암 및 미사암층과 셰일층에 각각 12 회씩 총 72회에 걸쳐 실시되었다. 이 결과, 사암 및 미사암층의 대자율 값의 범위는 $0.10 \sim 0.29 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 평균 0.22의 값을, 셰일층은 $0.10 \sim 0.25$ 로 평균 $0.18 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 유사하게 측정되었다. 그러나 각각의 층별로 평균값을 비교해보면 사암 및 미사암층과 셰일층에서도 미세한 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 점토의 구성비가 다르기 때문이라고 판단되며, 즉 점토의 구성비가 낮은 사암 및 미사암층이 셰일보다 높은 대자율 값을 보인다(Figure 3).

3.3. 광물학적 및 조직적 특징

모든 퇴적암 연구에 있어서 가장 기본이 되며 필수적

인 방법이 정밀 육안관찰에 의한 기재적 특징의 파악과 편광현미경을 이용한 암석의 조직 관찰이다. 쇄설성 퇴적암의 경우, 편광현미경 관찰을 통하여 입도 분석을 할 수 있고 암석 조성의 관찰 결과로부터 퇴적물의 공급지를 파악할 수 있으며 퇴적된 이후의 속성과 역사를 이해할 수 있다.

축석루 성곽지반을 구성하는 사암 및 미사암과 셰일의 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 분석결과, 구성광물로는 등립질 입상조직을 갖는 석영과 장석, 운모 등이 관찰되었다. 이중 셰일은 점토질 기질과 미정질 석영 및 극미립의 탄질물질들이 교호하여 미세엽층리를 이루고 있다(Figure 4A). 미사암은 세립의 석영과 변질된 장석 및 암편 등이 운모와 함께 미약한 엽층리를 형성하였다(Figure 4B). 또한 사암은 조립의 석영과 변질된 장석 등으로 이루어져 있으며 입자 사이를 세립의 점토광물과 운모질 기질 및 탄질물 등이 채우고 있다(Figure 4C).

주사전자현미경(SEM) 관찰에서는 전반적으로 미세한 기공과 조암광물의 변질로 인하여 생성된 점토광물이 관찰되었다. 특히 셰일에서는 미세엽리를 따라 발달된

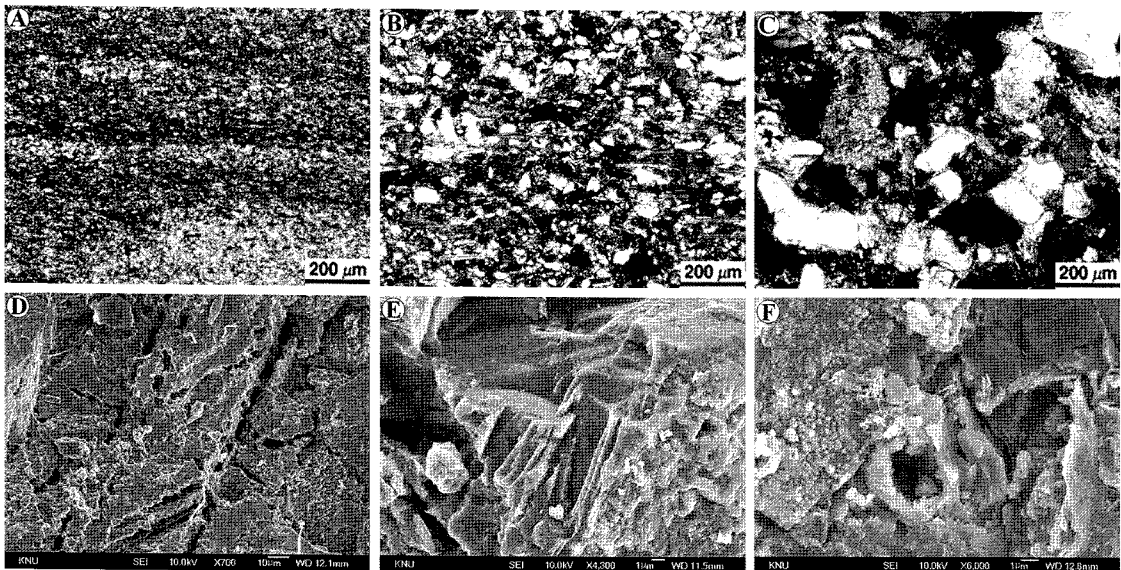


Figure 4. Mineralogical and micro-textural characteristics of bedrock under the Chokseongnu pavilion. (A) Shale of lamination with quartz-mica layers and carboniferous layers. (B) Siltstone with lamination along mica and quartz layers. (C) Sandstone consisting of coarse-grained quartz, altered feldspar and micaceous matrix. (D) Cleavage and micropore developed along micro-foliation of shale. (E, F) Sandstone showing eroded surface of feldspars and covered with authigenic clay minerals.

벽개면과 암석내 공극의 산출상태를 확인할 수 있었고 (Figure 4D), 사암에서는 사장석의 불규칙한 용식조직과 공극내에서 자생하면서 재결정된 고령석이 관찰되었다(Figure 4E, 4F). X-선 회절분석 결과에서는 석영, 정장석, 사장석 및 운모가 각각의 시료에서 공통적으로 검출되었으며 일부 풍화를 많이 받은 시료에서는 방해석과 녹니석이 동정되었다.

3.4. 물리적 및 화학적 특징

암석의 물성은 암석의 고유 성질 중 화학적 변화를 동반하지 않는 것을 의미하며, 암석을 조성하고 있는 광물의 종류, 교결물질, 결합상태에 따라 좌우된다. 암석의 물성평가에 사용되는 기본적인 중요한 방법에는 비중 및 흡수율 등이 있다. 이 연구에서는 한국산업규격인 KS F2518에 나온 석재의 흡수율 및 비중시험 방법에 따라 측정하였다.¹⁰ 시료는 성곽지반에서 채취한 표면시료와 시추코아에서 각각 시료번호당 3개씩 준비하였다. 시추코아 시료는 치수 2cm의 정육면체 형태로 일정하게 만들었으며, 현장에서 직접 채취한 표면시료는 크기가 작고 일정치 않아 시추코아 시료보다는 작으나 규칙적인

형태로 공시체를 제작하여 겉보기 비중과 흡수율을 측정하였다.

측정 결과, 전체적으로 겉보기 비중과 흡수율은 부의 상관관계를 보였다. 또한 세일층이 미사암층보다 물성이 취약하였으며, 특히 기반암인 사암이 가장 취약한 것으로 나타났다. 이는 남강과 바로 접해있는 환경적 요인으로 다른 암석에 비해 풍화가 많이 되어 광물조직이 느슨해졌기 때문으로 판단된다. 전체적인 물성에서는 표면시료가 코아시료보다 넓은 범위를 보이며 낮은 것을 알 수 있었다(Figure 5). 따라서 축석루 성곽지반을 구성하는 표면 암석은 자연환경에 그대로 노출되어 있어 물리적 특성이 취약해졌으며 상대적으로 풍화가 더 빨리 진행되고 있음을 지시한다.

화학적 풍화에 의해 암석과 광물중의 원소는 천천히 용탈되며, 용탈되는 양과 속도는 원소에 따라 달라진다. 이를 이용해 이동성이 큰 화학종(알칼리금속, 알칼리토금속)과 이동성이 작은 화학종(TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)과의 비를 계산함으로써 풍화의 정도를 산출할 수 있다¹¹. 축석루 지반 암석의 지구화학적 특징을 살펴보기 위해 채취한 암석시료에서 전암 화학분석을 실시하였다. 이를 통해 주성분원소의 함량을 측정하고 구성성분의 변화를

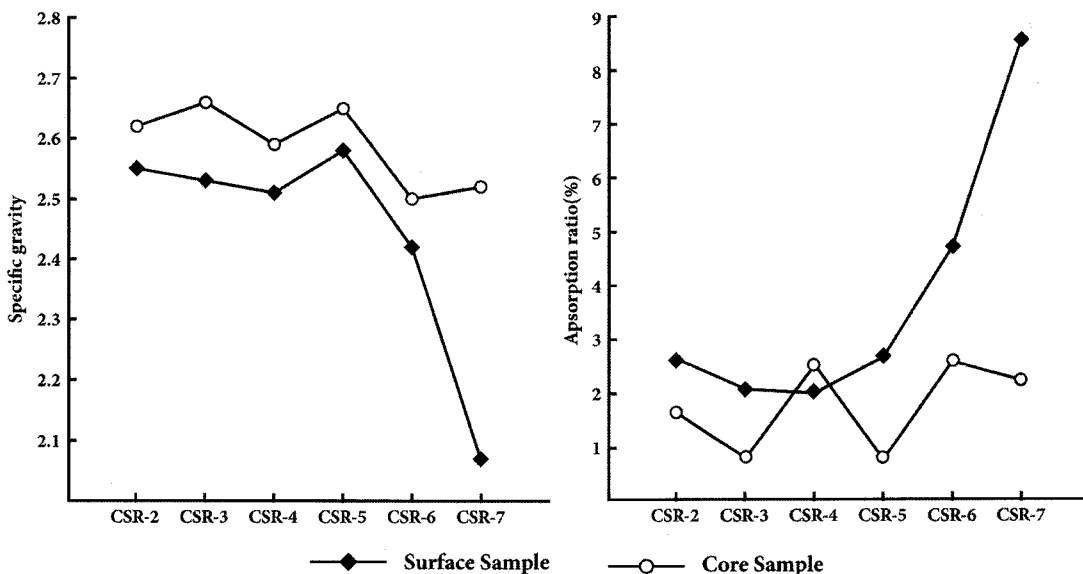


Figure 5. Specific gravity and absorption ratio on the surface samples and the core samples of bedrocks.

Table 1. Contents of major elements and weathering index of the bedrock under the Chokseongnu pavilion

No.	CSR-1	CSR-2	CSR-3	CSR-4	CSR-5	CSR-6	CSR-7	Mean ¹⁾	Mean ²⁾
SiO ₂	63.51	52.03	69.19	53.41	65.38	48.63	75.58	51.36	70.05
Al ₂ O ₃	15.60	11.78	11.78	16.82	11.55	15.31	10.40	14.64	11.24
Fe ₂ O ₃ *	4.47	5.20	4.25	4.92	6.39	6.40	3.70	5.51	4.78
MnO	0.09	0.08	0.09	0.03	0.16	0.06	0.03	0.06	0.09
MgO	1.37	2.92	2.29	3.01	2.84	3.38	0.96	3.10	2.03
CaO	0.93	9.5	1.90	5.06	2.23	6.90	0.20	7.15	1.44
Na ₂ O	0.97	0.93	2.37	0.64	1.95	0.49	2.67	0.69	2.33
K ₂ O	3.08	2.61	1.89	4.33	1.76	3.63	1.63	3.52	1.76
TiO ₂	0.63	0.66	0.58	0.77	0.57	0.73	0.31	0.72	0.49
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.18	0.20	0.18	0.20	0.13	0.19	0.16
LOI**	8.14	12.80	5.46	10.99	7.22	12.88	3.93	12.22	5.54
Total	98.97	98.70	99.98	100.20	100.20	98.63	99.53	99.18	99.90
CIA ¹⁾	70.21	35.26	55.62	52.96	55.75	46.98	61.47	45.07	57.61
WPI ²⁾	-26.27	-32.64	-10.65	-29.60	-17.09	-36.63	-8.85	-32.96	-12.20
SAR ³⁾	6.91	7.49	9.97	5.39	9.60	5.39	12.33	6.09	10.63
PI ⁴⁾	84.84	84.71	88.52	81.23	87.15	80.23	90.69	82.06	88.79
STI ⁵⁾	83.57	83.01	85.99	80.39	85.67	80.23	89.34	81.21	87.00
WP ⁶⁾	41.67	63.82	49.06	63.73	46.34	63.10	41.81	63.55	45.74

Mean¹⁾: average value of pelitic rocks, Mean²⁾: average value of sandy rocks. Fe₂O₃*: as total FeO, LOI**: loss-on-ignition, CIA¹⁾: chemical index of alteration by Nesbitt and Young (1982), WPI²⁾: weathering potential index of Reiche (1943), SAR³⁾: silica-alumina ratio by Ruxton (1968), PI⁴⁾: product index of Ruxton (1968), STI⁵⁾: silica-titania index of Jayaverdena and Izawa (1994), WP⁶⁾: weathering parker index of Parker (1970).

비교 분석하여 화학적 풍화가 어느 정도 진행되었는가를 예측하였다.

Table 1은 축석루 성곽지반을 구성하는 쇄설성 퇴적암의 주성분원소 함량으로 SiO₂는 사암 및 미사암이 65.38~75.58 wt%, 셰일이 48.63~53.41 wt%의 값을 보였다. Al₂O₃는 사암 및 미사암이 10.40~11.78 wt%, 셰일이 11.78~16.82 wt%로 시료마다 미세한 차이는 있으나 모두 일반적인 사암 및 미사암과 셰일이 갖는 함량 범위를 나타내었다. 이를 근거로 여러 연구자들에 의해 다양하게 제시된 각각의 화학적 풍화지수를 산출해보았다.^{12~16} 이 결과, 풍화지수는 전체적으로 사암 및 미사암이 셰일보다 높은 값을 나타내었고, 특히 기반암인 사암에서 가장 높은 풍화지수가 나타났다. 이 중 김영수 등¹⁷에 의해 퇴적암의 풍화지수로 잘 알려진 CIA와 WP 변화를 보면, 전체적인 풍화경향이 거의 일치하고 있으며 상대적으로 상부에 있는 셰일층이 화학적 풍화에 덜 민감한 것을 알 수 있다(Figure 6). 또한 이를 토대로 흡수율과의 상관관계를 나타내 보면, 사암 및 미사암은 일정한 경향을 보이고 있으나 상대적으로 물리적 풍화가

심한 셰일에서는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다(Figure 7).

이 축석루 성곽지반의 물리적 및 화학적 풍화특성을 종합해보면, 높이에 따른 풍화등급은 부의 상관관계를 보였고, 공통적으로 기반암인 사암이 풍화에 가장 민감하게 나타났다. 또한 구성암석별 물리적 특성에서는 셰일이, 화학적 특성에서는 미사암이 풍화에 민감한 특성을 보였다. 이는 일반적인 풍화환경에 노출된 퇴적암의 경우와 유사한 것이나 연구지역의 퇴적암은 좁은 범위내에서 셰일과 사암이 호층을 이루고 있기 때문에 상대적 풍화도가 극심하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 풍화상태 진단

4.1. 사면안정성 평가

사면의 암괴가 중력에 의한 평형상태를 유지하지 못하면 암반의 활동력이 저항력보다 커져서 유동이 시작된다

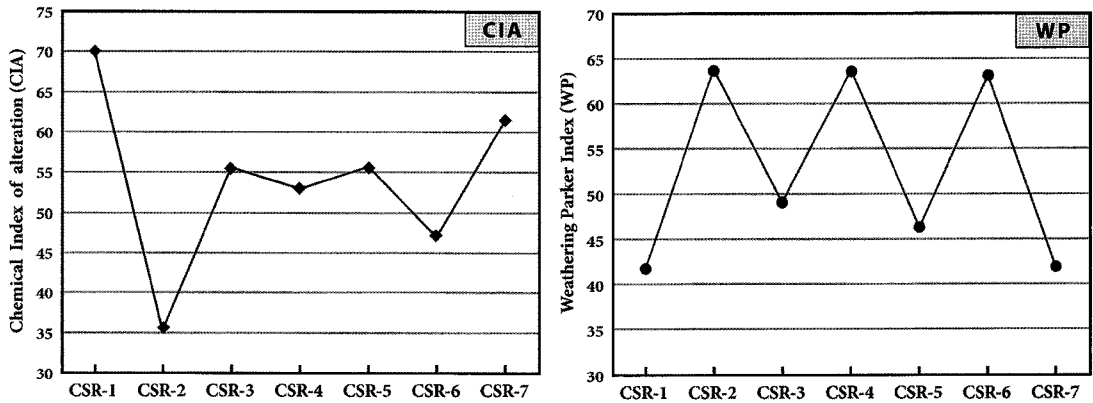


Figure 6. Diagrams showing chemical index of alteration and weathering parker index of bedrock.

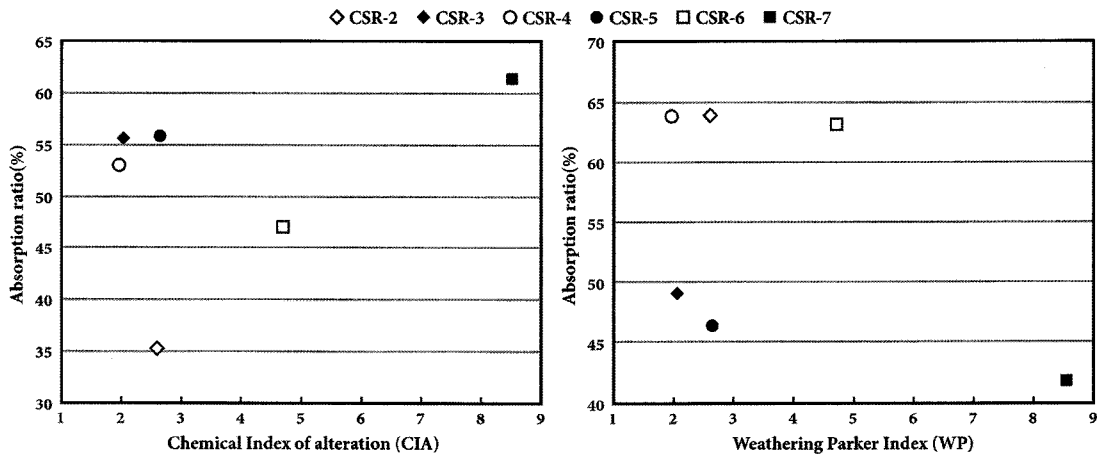


Figure 7. Diagrams showing relationship between weathering indices and absorption ratio of bedrock.

다. 이는 암반이 지니고 있는 고유의 안정각과 마찰각 사이의 상호관련성 및 지질공학적 특성들이 주변 환경의 영향을 받아 복합적으로 작용하면서 발생하는 것이다. 또한 암반 사면의 파괴 형태는 암석의 강도에 의한 것보다는 균열, 절리, 층리 등과 같은 불연속면의 역학적 특성에 크게 영향을 받으며, 특히 가장 취약한 불연속면의 주향과 경사에 따라 파괴 형태가 결정된다.

대표적인 암반 사면의 파괴형태는 원호파괴(circle failure), 평면파괴(plane failure), 썩기파괴(wedge failure), 전도파괴(toppling failure)의 4가지로 구분된

다. 원호파괴는 암석에 뚜렷한 구조적인 특징이 없고 파쇄 정도가 매우 심한 암석이나 토층에서 발생하며, 평면파괴는 점판암과 같은 연장성이 긴 불연속면에서 발생한다. 또한 썩기파괴는 불연속면이 두 개 이상 교차하는 곳에서 발생하며 전도파괴는 경사면에 대하여 반대의 경사를 갖는 암반에서 흔히 볼 수 있다.

이 성곽지반은 사면의 암석 종류에 따라 절리 발달 정도와 풍화되는 정도가 다르다. 사면의 미사암층은 수직 절리와 층리인 수평절리가 교차하면서 괴상의 암괴들로 분리되어 파쇄대를 형성하고 있다. 세일층은 판상의 작

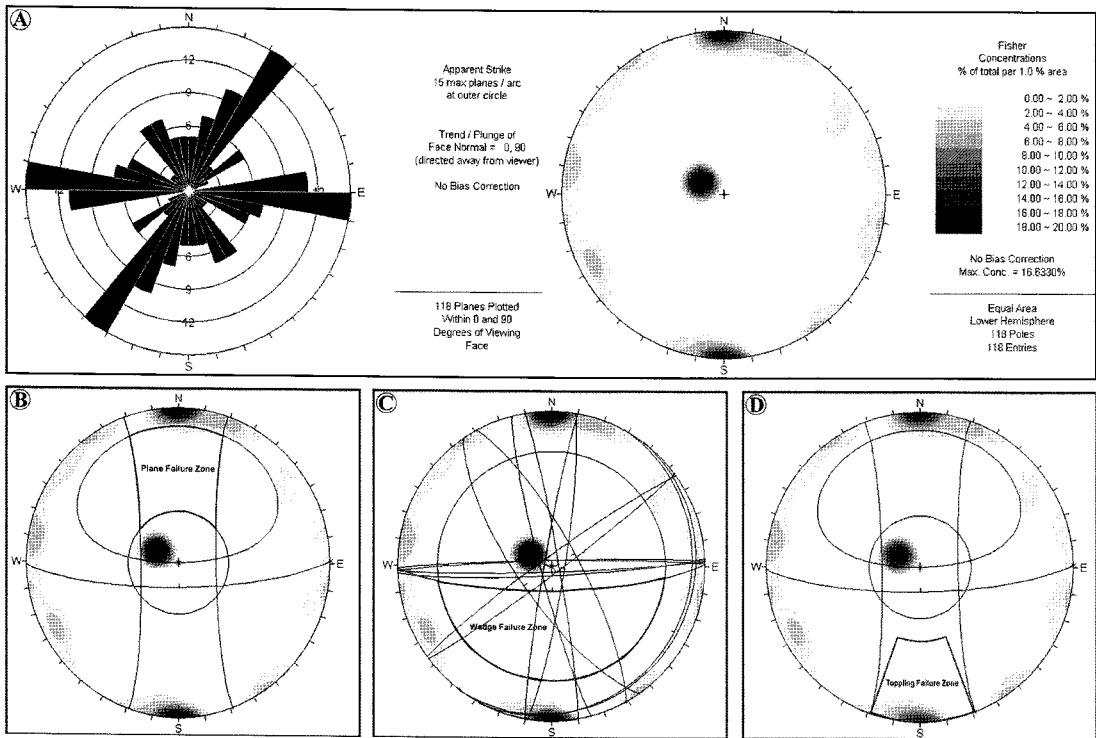


Figure 8. Synthetic analysis of behaviors for discontinuity systems. (A) Rose diagram and stereo-net plotted on lineament systems of bedrock. (B) Diagram showing possible fields of planer failures. (C) Diagram showing possible field of wedge failures. (D) Diagram showing possible field of toppling failures.

은 암편으로 탈락되는 미세 파쇄작용이 아주 심하다. 특히 사면의 상부 토층과 인접한 세일부분은 차별풍화와 침식작용에 의해 서서히 여굴을 발생하여 사면 상부의 불안정성을 가중시킨다.

따라서 암반 사면의 안정성을 평가하고 불안정 요인을 밝히기 위해 사면을 대상으로 정밀 야외조사를 실시하였다. 앞에서 제시한 바와 같이 3개 구역으로 구분하여 불연속면의 주향과 경사를 측정하였다. 각 영역에 대해서 층리와 균열 및 절리 등의 다양한 불연속면의 주향과 경사 총 118개를 측정하였고, 이들의 평사투영해석을 위해 WINDOW용 프로그램인 DIPS를 이용하여 사면의 안정성을 검토하였다.

측정 결과, 전체 사면에 발달한 대부분의 불연속면은 N30~40° E와 N80~90° W의 주향을 가지며 거의 수직과 수평에 가까운 경사를 갖는 절리계가 다양한 분포를 보였다(Figure 8A). 특히 N30~40° E의 주향은 암반사면의 층리방향으로 이는 사면을 구성하는 암석의 퇴적암

적 특징을 나타내는 것이다. 이 암반사면의 주향은 N89° E, 경사는 77° SE로 사면에 발달한 불연속면의 분포도인 평사투영도에 파괴유형별 안정성을 검토하고자 사암과 세일의 일반적인 마찰각 27°를 이용하였으며¹⁸ 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴의 위험지역을 도시하였다(Figure 8B, 8C, 8D).

도시한 결과, 전체 암반사면은 평면파괴에 있어서 안정하고 국부적으로 소규모 쉐기파괴의 가능성을 갖고 있으며, 사면 전체적으로 전도파괴에 있어 높은 불안정성을 보이는 것으로 판단된다. 또한 전체 암반사면을 세분하여 구역별 사면 안정성을 평가하였으며 비교적 안정한 III구역은 제외하였다. 이 결과, I구역에 분포하는 대부분의 불연속면이 갖는 응력방향은 N30~40° E를 보이고 II구역은 N30~40° E와 N80~90°를 보이는 등, 두 구역간의 절리계 발달 및 분포밀도에는 차이가 있었다. 이를 각각의 구역에 대해 파괴유형별 안정성을 검토하여 비교하였다. 이 결과, I구역에서는 평면파괴와 전도파

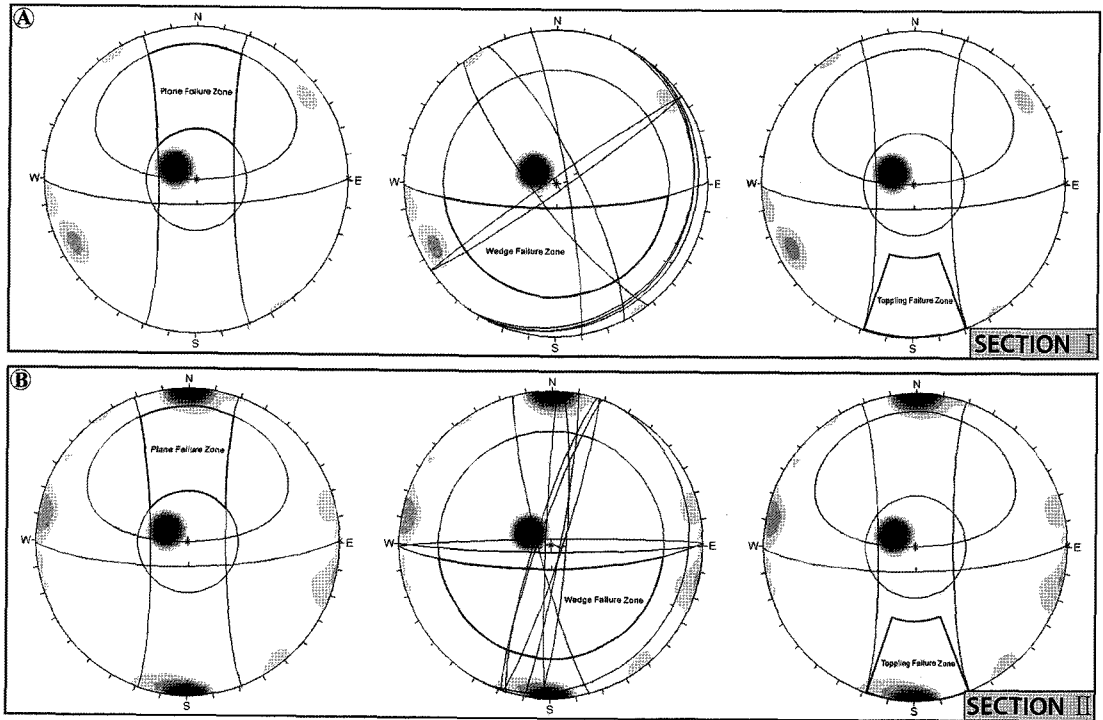


Figure 9. Sectional analysis for structural stability of bedrock shown in Fig. 2. (A) Section No. I : Diagram showing possible fields of planer failures, wedge failures and toppling failures. (B) Section No. II : Diagram showing possible fields of planer failures, wedge failures and toppling failures.

파괴에 대해 안정하고 국부적으로 소규모의 썩기파괴가 나타났으며(Figure 9A), II 구역은 썩기파괴와 진도파괴의 가능성이 매우 높은 것으로 추정된다(Figure 9B).

이는 I 구역보다 II 구역 사면의 불안정성을 지지하는 것이다. II 구역에 발달된 많은 누수대와 사면에 분포하는 암석의 차별적 풍화상태의 심화 및 상부 토양층에 분포하는 거대 수목의 근압에 의한 절리계의 발달이 II 구역 사면의 불안정성을 촉진시킨 것으로 보인다. 특히 II 구역의 썩기파괴 영역에 도시된 대부분의 절리들은 상부 수목에 의한 것으로 이를 뒷받침한다. 앞의 평사투영 해석결과를 종합하면, 암반사면은 전체적으로 진도파괴에 있어 불안정하며 사면의 두 영역 중에서도 II 구역 사면이 더 불안정한 상태로 평가되었다.

4.2. 기계적 풍화와 훼손

축석루 성곽지반은 퇴적암이 형성된 이후 대기 중에

노출되어 주변의 환경적 변화에 따른 수축 및 팽창으로 균열이 형성되고 균열 내로 흘러든 강수 및 기타 퇴적물의 파괴작용에 의해 암석 내부 불연속면이 더욱 발달하였다. 또한 이 공극 및 균열면에 강수와 토사가 충전되어 식물생장을 촉진시켜 풍화와 훼손을 가속시키고 있다. 특히 전면에 남강을 끼고 있어 수분과의 접촉 시간이 많아 풍화속도를 더욱 촉진시키고 있다.

현재 이 성곽지반에 나타나는 기계적 및 물리적 훼손은 전반적으로 모든 곳에서 관찰되고 있다. 암반사면의 미사암층과 셰일층에는 층리의 수직방향으로 파쇄대가 발달하여 층리면을 따라 쪼개지는 현상이 현저히 나타나고 있으며, 이로 인해 구조적으로 매우 불안정한 상태에 놓여있다(Figure 10A). 특히 호층을 이루는 미사암층과 셰일층에서는 아래쪽보다 위쪽이 돌출되어 있어 전체적인 형태 변형이 우려되고 심각한 경우 붕괴마저 초래될 수 있다(Figure 10B). 또한 암석과 암반 내에 발달한 균열과 절리는 일정한 방향성을 가지고 있으며, 셰일층은

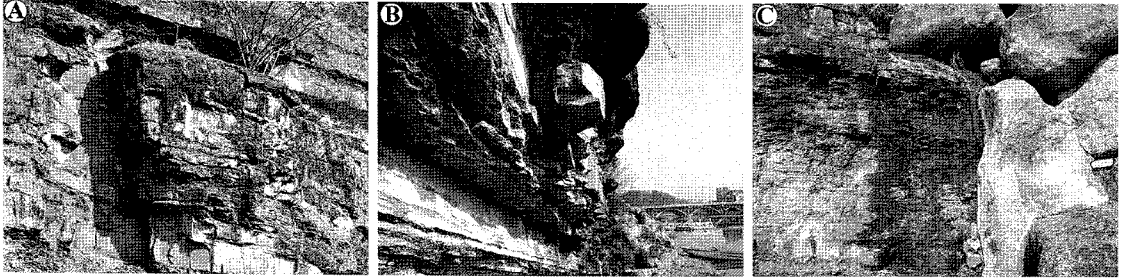


Figure 10. Mechanical weathering states of bedrock under the Chokseongnu pavilion. (A) Shattered zone with perpendicular cracks to the bedding plane. (B) Upper part of the bedrock is protruded from the slope. (C) Permeation and leakage of water along the bedding planes and joints.

작은 충격에도 조각으로 쉽게 부서져 세편화 되었고 박리와 박락이 수반되어 필연적으로 결실이 발생하였다.

축석루 성곽지반에서 문제가 되는 것 중에 또 다른 하나는 수분 침투 및 누수현상이다. 이는 성곽지반 내부 불연속면을 따라 상부의 강수가 유입되어 표면의 약화를 발생시킬 수 있다(Figure 10C). 수분은 암석과 반응하여 광물들을 풍화시키고, 토양에 들어 있던 염분들이 물

에 녹아서 함께 상승하다가 건조되어 염 광물들이 정출될 때 박리를 발생시킨다. 수분이 침투된 부위에는 동시에 습기로 인하여 생물들이 왕성하게 성장한다¹⁹.

이 암반 사면의 상부 토양에서는 거대한 수목 뿌리에 의한 근압으로 균열 및 절리 발달을 가중시키고 있으며, 강수에 의해 수목의 근조직을 중심으로 토양과 암석이 유실되어 사면의 불안정성을 고조시키는 것은 물론이고

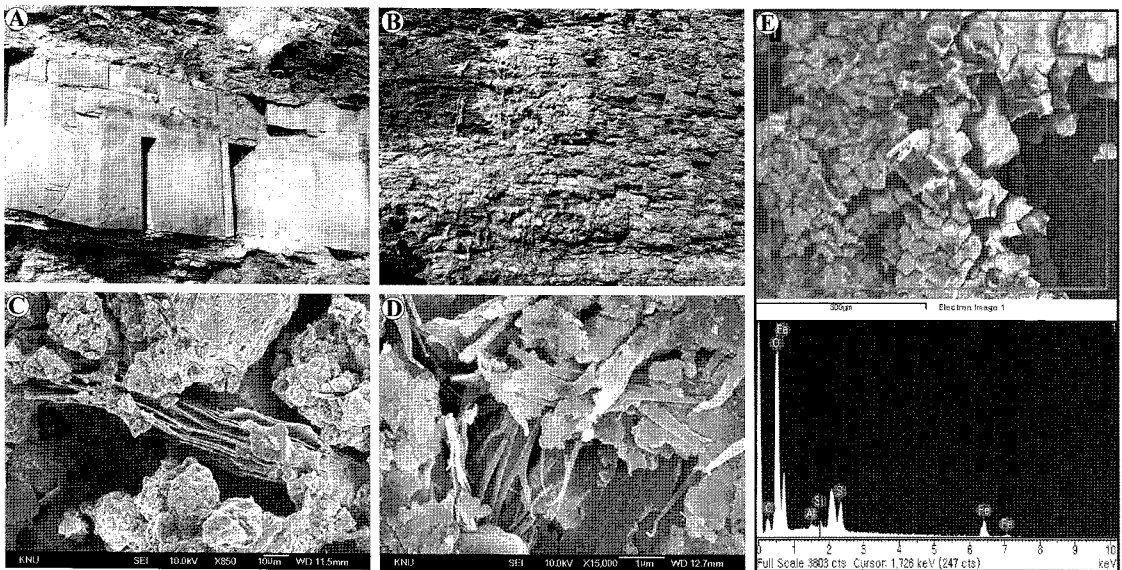


Figure 11. Weathering state of bedrock by secondary pollutants. (A) Brown discoloration by upper part soil and iron hydroxides. (B) Contaminants adhered to the surface of bedrock. (C) Chloritized brittle biotite along the cleavage. (D) Authigenic kaolinite and halloysite distributed in boundaries between quartz and feldspars. (E) Scanning electron microphotograph of reddish brown contaminants and SEM-EDS result.

낙석까지도 야기하고 있다. 또한 일부 미사암층에는 관람객의 각서와 낙서로 인한 인위적인 훼손과 손상이 심각한 실정이다.

4.3. 이차오염물에 의한 훼손

석조문화재의 이차오염물에 의한 훼손은 주로 암석의 화학반응 또는 미세한 토양이나 먼지와 같은 오염물이 피복되어 발생한다. 이러한 훼손은 석조문화재의 미관을 해칠 뿐만 아니라 구성석재의 성분, 성질 및 조직의 변화를 일으킨다. 이와 같은 작용에 영향을 미치는 주요인은 물이며 이외에도 구성광물의 종류와 조직, 기후 등이 있다. 또한 최근에 대기오염 물질의 증가에 따른 산성비는 구성광물의 용해와 화학반응 속도를 증가시켜 훼손을 가속화시키고 있다.²⁰

이러한 이차오염물에 의한 축석루 성곽지반의 훼손상태를 살펴보면, 거의 전면에 미세토양이 침적되어 있고 오랜 동안 비, 바람, 눈, 안개 등에 의해 심하게 풍화를 받아 이미 원암의 색깔과 조직을 확인하기 어려운 상태이다. 이는 암석의 화학적 풍화 뿐만 아니라 성곽지반 상부의 토양이 강수를 따라 표면으로 유동하면서 미세한 토양입자가 침전되어 나타나는 현상으로 판단된다(Figure 11A). 특히 갈색 및 흑색 변색, 백화현상은 누수가 심한 곳의 수분 유지대를 중심으로 나타나고 있다. 또한 대기 중의 유기 및 무기 전성 침전물이 부유하다가 암석 표면에 흡착 또는 침착되어 나타나는 침전물도 관찰할 수 있다(Figure 11B).

이를 좀 더 자세히 알아보기 위해 이차오염물에 의해

표면이 변질된 암석을 주사전자현미경으로 관찰해 보았다. 이 결과, 미사암 및 사암에서는 사장석의 풍화에 의해 생성된 고령석과 흑운모의 벽개면을 따라 생성된 녹니석이 관찰되었으며 석영의 입간을 따라 고령석과 할로이사이트가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다(Figure 11C, 11D). 세일에서는 사장석의 표면을 따라 이차적으로 생성된 용식조직과 재결정의 고령석이 관찰되었으며 표면에는 비정질 철산화 물질이 착색된 것을 볼 수 있다. 변색이 관찰되는 시료에 대해 EDS 분석을 실시하였다. 이 결과 갈색 및 흑색변색은 주로 철과 망간이 영향을 미치며, 백화현상은 칼슘의 높은 함량에 의해 발생하는 것을 알 수 있었다(Figure 11E).

4.4. 생물학적 오염과 훼손

주변환경 요인의 변화로 일어나는 석조문화재의 물리·화학적 훼손은 항상 생물학적인 훼손을 동반한다. 육안으로는 쉽게 관찰되지 않으므로 무시되는 경우가 많으나, 물리·화학적 훼손이 진행될 때 미생물에 의한 훼손이 함께 진행되고 있는 것이다.^{21,22} 축석루 성곽지반은 전체적으로 다양한 생물종의 서식이 관찰되며 생물학적 풍화가 심각한 상태이다. 이는 전면에 있는 남강의 영향을 받아 항상 습한 환경이 유지되며 수분의 증발산이 매우 불량한 것이 원인이다.

이 성곽지반에서 가장 큰 문제가 되는 생물학적 훼손은 상부 토양에 분포하는 수목의 뿌리이다(Figure 12A). 수목의 뿌리는 성장하면서 암석과 광물의 벽개면을 넓혀가며 암석의 물리적 풍화에 기여한다. 이러한 수



Figure 12. Biological weathering and a scanning electron microphotograph of bedrock under the Chokseongnu pavilion. (A) Structural deformation of bedrock by tree roots pressure. (B) Bryophyte appeared moisture-retentive area. (C) Rock damaged by hypha of lichens and roots observed under the SEM.

목 뿌리에 의한 근압은 성곽지반 자체에 물리적인 힘을 주어 균열 및 대규모 절리를 발생시키고, 이로 인해 상부 토양이 유실되어 구조적인 불안정을 야기하고 있다.

또한 수분 유지대를 중심으로 조류 및 지의류, 선태류와 같은 미생물과 초본식물에 의한 풍화도 상당히 진행되어 있다(Figure 12B). 지의류는 주로 암흑색을 띠는 고착지의류가 관찰되며 이러한 곳은 암석의 박리현상과 함께 광물학적 및 화학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어져 나온다. 그리고 부분적으로 균집을 이루며 녹조류가 관찰되고 누수가 심한 지역에는 선태류가 자생하기도 한다.

이러한 생물학적 오염이 진행된 시료를 주사전자현미경으로 관찰해보았다. 이 결과, 표면에는 점토광물과 함께 구조류가 관찰되며, 지의류와 같은 미생물의 균사체와 뿌리조직에 의해 암석이 미세하게 파쇄되고 있는 것을 볼 수 있다(Figure 12C). 따라서 축석루 성곽지반은 사면안정성, 기계적 및 화학적 풍화와 생물학적 훼손이 가중된 상태로서 시급히 안정화 방안과 보강대책이 마련되어야 할 것이다.

5. 고찰 및 보존방안

축석루 성곽지반은 수평의 층리와 수직의 절리 및 균열이 사면 전반에 걸쳐 발달되어 있다. 사면의 미사암층은 암괴형태의 파쇄대를 형성하였고, 상대적으로 연암인 셰일층은 박락으로 인한 암반의 파쇄와 침식으로 인해 여굴이 발생하였다. 또한 구성암석의 이차오염물에 의한 훼손, 거대한 수목에 의한 물리적 및 생물학적 풍화, 수분침투 및 배수불량이 발생하고 있어 성곽지반 사면의 불안정성을 가중시키고 있다. 특히 사면안정성 평가와 풍화상태 진단 결과, 파쇄대 및 셰일층의 여굴이 집중되어 있는 II구역의 사면이 I구역 사면보다 불안정한 것을 알 수 있었다. 따라서 성곽지반의 풍화특성은 구역별로 정도가 다르므로 이에 따른 적절한 보존방안이 수립되어야 할 것이다. 그 방안으로는 기초암반 보강, 사면보강, 표면 강화처리, 사이트환경 개선이 있다.

우선 기초암반 및 사면보강 방안을 위해서는 1차적으로 연약지반 개량공법을 적용하여 절리면이나 균열대를 채워 지반강도를 증대시켜야 한다. 이때 풍화의 요인인

우수, 지표수, 지하수의 유입을 통제하고 유동을 억제하여 풍화를 감소시키고 안정성을 도모할 수 있는 것을 목적으로 해야한다. 표면강화처리는 석조문화재 강화처리에 많이 사용되고 있는 강화제를 이용하는 방법과 다양한 지질공학적 보강방법을 활용할 수 있다. 이들 중 현재 암반사면에 많이 적용되고 있는 방법은 지질공학적 방법이지만 축석루 성곽지반과 같이 미관을 중시하는 문화재의 경우에는 아직 적합한 사례가 없다. 또한 석조문화재용 강화제도 암반사면 강화처리에 적합한 사례가 없어 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

그러나 강화제를 이용하여 표면을 강화하기 위해서는 훼손이 심한 부위에 대하여 집착 등의 필요한 처리를 사전에 실시 할 필요가 있다. 예를 들면, 미세 균열부위는 점성이 낮은 강화제로 처리하고 절리 및 균열부위는 레진 몰탈을 사용하는 것이 바람직하다. 또한 지의류, 선태류 등의 유기오염물과 먼지, 피각물질 등의 무기오염물을 세정한 다음 도포법 등을 통해 표면의 강화처리를 실시해야 한다. 이에 대한 종합적인 내용과 문제점은 이미 많은 연구를 통해 보고된 바 있다.^{23~26}

축석루 성곽지반의 사이트 환경에서 가장 문제가 되는 것은 성곽지반 상부 토양에 분포하는 수목의 뿌리이다. 이러한 수목의 뿌리는 앞에서도 언급했듯이 성장하면서 성곽지반의 물리적 풍화에 기여하여 균열 및 절리를 발생시키고 결국에는 구조적 문제를 야기한다. 따라서 이러한 구조적인 문제점을 해결하기 위한 가장 좋은 방법은 수목의 성장을 억제하거나 제거하는 방안일 것이다. 하지만 수목의 성장을 억제하는 것은 현실적으로 거의 불가능한 일이다. 또한 상부의 모든 수목을 제거하는 것은 문화재의 미관상 좋지 않을 뿐만 아니라 시민정서에도 악영향을 줄 수 있는 문제점이 있다. 따라서 최소한의 경관을 유지할 수 있는 수목을 제외하고 완전히 제거하는 방안이 가장 좋을 것으로 판단된다. 이때 구조적으로 가장 문제가 되는 수목을 중심으로 제거해야 하는 것이 바람직하다.

이 성곽지반의 지속적인 수분침투 및 배수불량의 영향은 성곽지반의 안정성에 상당한 위협을 초래하므로 현 상태에서 보강이 불가피할 것으로 판단된다. 따라서 성곽지반으로의 강우 및 지하수 침투를 막는 차수대책이 시급하다. 그 방안으로는 그라우팅을 통한 차수시설 뿐만 아니라 수분을 원활하게 배수시킬 수 있는 유도 배수

시설이 필요하다. 이때 사전에 지하수 이동경로 및 유입 상황에 대한 정보를 정확히 파악해야 한다. 배수로 시공 후에는 항상 청결한 상태가 유지될 수 있도록 관리에도 많은 관심을 가져야 하며, 지하수의 변화를 모니터링 할 수 있는 시스템을 설치해야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

1. 축석루 성곽지반에는 층리가 발달된 사암층을 기반으로 암갈색 및 담회색의 미사암층과 암흑색 세일층이 교호하고 있다. 미사암층은 크고 작은 균열이 발달하며 세일층은 차별풍화로 인한 파쇄와 침식작용에 의해 여굴이 발생되었다. 또한 사암 및 미사암에서는 변질된 장석의 용식조각이 관찰되고 세일에서는 미세 엽리를 따라 발달된 공극과 점토광물이 나타났다.
2. 이 성곽지반의 물리적 특성에서는 세일층이 화학적 특성에서는 미사암층이 풍화에 민감한 것으로 나타났으며, 공통적으로 기반암인 사암이 풍화에 가장 민감한 것으로 평가되었다. 또한 성곽지반 높이에 따른 풍화등급은 부의 상관관계를 보였고, 표면시료가 코아 시료보다 낮은 물리적 특성을 나타내었다.
3. 이 성곽지반의 사면안정성 평가 결과, 전체 암반사면은 전도파괴에 있어 높은 불안정성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 성곽지반 사면이 남강쪽으로 기울고 있음을 지시하는 중요한 자료이다. 또한 III 구역을 제외한 구역별 평가에서는 I 구역보다는 II 구역 사면이 높은 불안정성을 보이는 것으로 평가되었다.
4. 이 성곽지반은 수직방향의 파쇄대가 발달하고 있으며, 내부 불연속면의 발달로 인한 누수현상과 세일층의 세편화, 거대한 수목 뿌리에 의해 균열 및 절리가 발생되고 있다. 또한 수분 유지대를 중심으로 원암의 색깔과 조직의 변색 및 생물학적 오염도 심각하다. 특히 파쇄대 및 세일층의 여굴과 수목의 근암에 의한 절리계의 발달이 심각한 II 구역의 사면이 상당히 불량한 상태이다.
5. 이 성곽지반의 보존방안으로는 연약지반 개량공법을 적용하여 지반강도를 증대시키고, 석조문화재용 강화제 또는 다양한 지질공학적 방법으로 표면강화처리를 실시해야 한다. 또한 최소한의 경관을 유지할 수 있는

수목 이외에는 제거해야하며 수분침투를 막을 수 있는 차수대책 및 배수시설이 필요할 것이다.

참고문헌

1. C.H. Lee, M.S. Lee, Y.T. Kim and J. Kim, "Deterioration assessment and conservation of a Heavily Degraded Korean Stone Buddha from the Ninth Century". *Studies in Conservation*, 51, 305-316 (2006).
2. 이찬희, 이명성, 서만철, "영주 가흥리 마애삼존불상의 풍화특성과 불연속면의 안정성 해석". *지질학회지*, 41, 401-413 (2005).
3. 이선명, 이찬희, 최석원, 윤석봉, "서산마애삼존불상의 훼손상태 및 불연속면의 거동특성". *보존과학회지*, 19, 85-98 (2006).
4. 김옥준, 윤선, "진주도폭 지질보고서(1:50,000)". 국립지질조사소 (1969).
5. S. Ishihara, "Granitoid series and mineralization in the circum-pacific phanerozoic granitic belts". *Resource Geology*, 48, 219-224 (1998).
6. E. Uchida, Y. Ogawa, V. Maeda and T. Nakagawa, "Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia". *Engineering Geology*, 55, 101-112 (1999).
7. 양희재, 이찬희, 최석원, 이명성, "익산 미륵사지석탑 구성부재의 암석학적 특징과 석재의 원산지 해석". *지질학회지*, 42, 293-306 (2006).
8. C.H. Lee, S.W. Choi, H.M. Lee and M.S. Lee, "Archaeological implication of lithic artifacts from the Unjeonri Bronze Age site, Cheonan, Republic of Korea". *Journal of Archaeological Science*, 33, 335-348.
9. 도성재, 김광호, "고지자기학". *마르케*, 116 (1999).
10. 국가표준종합정보센터, "석재의 흡수율 및 비중시험". <http://www.standard.go.kr/> (2006).
11. 김성국, 이선갑, 류호정, 김춘식, 김인수, "화강암 분포 지역에서 화학적 풍화변질지수와 풍화 등급의 비교". *한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회*, 268

- (2004).
12. H.W. Nesbitt and G.M. Young, "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites". *Nature*, 299, 715-717 (1982).
 13. P. Reiche, "Graphic representation of chemical weathering". *Journal of Sedimentary Petrology*, 13, 58-68 (1943).
 14. B.P. Ruxton, "Measures of the degree of chemical weathering of rocks". *Journal of Geology*, 5, 518-527 (1968).
 15. U.S. Jayaverdena and E. Izawa, "A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka". *Engineering Geology*, 36, 303-310 (1994).
 16. A. Paker, "An index of weathering for silicate rocks". *Geology Magazine*, 501-504 (1970).
 17. 김영수, 허노영, 정우섭, 예대호, 이재호, "풍화에 의한 퇴적암의 물리-화학적 변화". *한국지반환경공학회 논문집*, 3, 49-60 (2002).
 18. 이송, 이규환, 채점식, "사면의 설계와 시공". *예문사*, 139 (2002).
 19. 한국문화재보존과학회, "석조문화재 보존관리 연구". *문화재청*, 95 (2002).
 20. 김지영, "경주석빙고의 정량적 훼손도 평가와 미기상환경 분석". *공주대학교 석사학위논문*, 132 (2006).
 21. 김병호, 이용희, "석조문화재의 보존". *보존과학연구*, 12, 171-190 (1991).
 22. 이호봉, 1992, "문화재의 생물열화 방제, 훈증처리를 중심으로". *보존과학연구*, 13, 82-98 (1992).
 23. C.H. Lee, S.W. Choi and M. Suh, M. "Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea". *Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 63-77 (2003).
 24. 이찬희, 이명성, "우리나라 석조문화유산의 현황과 보존방안". *구조물안전진단학회지*, 9, 13-21 (2005).
 25. 이명성, 정민호, 정영동, 이찬희, "경주 서악리 삼층 석탑의 훼손상태 및 보존처리". *보존과학회지*, 18, 63-74 (2006).
 26. 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희, "석조문화재 발수경화제 시험연구(I)". *보존과학연구*, 20, 155-173 (2006).