울산 반구대암각화의 손상도 및 사면안정성 평가

이찬희¹ | 전유근* | 조영훈 | 서만철**

공주대학교 문화재보존과학과, *국립문화재연구소 보존과학연구실, **공주대학교 지질환경과학과

Evaluation of Slope Stability and Deterioration Degree for Bangudae Petroglyphs in Ulsan, Korea

Chan Hee Lee¹ | Yu Gun Chun* | Young Hoon Jo | Mancheol Suh**

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

*Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

**Department of Geoenvironment Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author: chanlee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

초 록 반구대암각화의 주암면은 열변성을 받아 혼펠스화된 암갈색 셰일이 주류를 이룬다. 이 암석의 표면은 일정 깊이의 풍화층(평균 공극률 25%)을 형성하고 있으며 신선한 면(평균 공극률 0.4%)과 광물조성 및 화학조성의 차이를 보인다. 암각화가 새겨지기 이전부터 현재까지 발생한 주암면의 손상된 영역은 약 23.8%로 산출되었다. 또한 박리가 발생한 면적은 전체면적의 약 1.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 색도측정 결과, 암각화의 주암면은 생물학적 및 화학적 훼손요인에 의해 백색 및 황색도가 증가한 것으로 확인되었다. 암각화 주암면의 초음파속도는 평균 2,582m/s로 측정되었다. 이는 2003년도의 값보다 감소한 것으로, 특히 암각화 하부 영역에서 물성이 감소한 것으로 나타났다. 암각화 암반을 구획하여 사면안정성을 분석한 결과, 1구역과 2구역은 평면, 전도 및 켜기파괴에 의한 위험성이 존재하는 것으로 나타났다. 3구역은 전도파괴의 위험성이 높은 것으로 확인되는 등 암각화 및 주변암반은 구조적으로 불안정성을 갖는 것으로 나타났다. 3차원 영상분석을 통해 암각화 하부에 있는 공동부위를 모델링하였다. 이 자료를 토대로 공동부위의 안정에 적합한 지질공학적 보강공법이 도입된다면 암각화를 보다 효과적으로 보존할 수 있을 것으로 판단된다.

중심어: 반구대암각화, 풍화층, 초음파 속도, 사면안정성, 3차원 영상분석

ABSTRACT The major petroglyphs of Bangudae site were composed mainly of hornfelsed shale. Surface of the rock was formed weathering layer (average porosity 25%) that discriminated mineral and chemical composition against fresh rock (average porosity 0.4%). The lost area of major petroglyphs in the past up images carved to the present was calculated about 23.8%. And occurrence area of exfoliation indicated 1.2% of the whole petroglyphs. As a result of the chromaticity analysis, color of the major petroglyphs was changed brighter and yellower than fresh rock by chemical and biological weathering factors. Average ultrasonic velocity of petroglyphs was measured 2,865m/s. This result indicated that ultrasonic velocity decreased especially bottom of petroglyphs than measured result in 2003 year. The results of the evaluation for slope stability, it identified the possibility of toppling, planar and wedge failure in host rock. The 3D image analysis and modeling data of the cavern obtained for structural reinforcement.

Key Words: Bangudae petroglyphs, Weathering layer, Ultrasonic velocity, Slope stability, 3D image analysis

1. 서론

울산 반구대암각화(국보 제285호)는 우리나라에서 발견된 암각화 중 선사인의 생활상을 엿볼 수 있는 가장 섬세한 암각화이다. 이 암각화는 한반도에 그려진 최초의 바위 그림으로 평가되고 있으며 한국 문화예술의 원형으로 인정받고 있다. 특히 10여종의 고래와 선단을 지어 고래를 잡는 선사인의 모습은 세계적으로도 유례가 없는 것으로 알려져 있으며^{1,2}, 유네스코 세계문화유산 잠정목록으로 등재되어 있다.

반구대암각화는 빗물에 직접적으로 잘 닿지 않는 위치에 있으며 그림이 각인되어 있는 암벽의 구성암석은 조석이 치밀하고 견고하여 상당히 양호한 상태로 잘 보존되어 왔다. 그러나 암각화가 발견되기 6년 전인 1965년에 사연댐이 건설되면서 이 암각화는 매년 약 8개월 동안 사연호에 침수되어왔다. 이와 같이 암각화는 40여년간 침수와 노출을 반복하면서 손상이 심화되고 있는 것으로 알려져 있다³. 따라서 반구대암각화의 장기적인 보존대책을 수립하기 위해 인문학, 자연과학, 공학 등 다양한 분야에서 연구가 수행된 바 있다³⁻¹⁰.

이 연구에서는 선행 연구결과를 보완하고 암각화의 풍화 및 손상도와 사면안정성에 대한 정밀도 높은 분석을 수행하였다. 손상도를 평가하기 위해 암각화의 광물학적 표면풍화 메커니즘을 해석하였으며, 다양한 비파괴 분석기법을 활용하여 손상도를 평가하였다. 또한 암각화의 안정성을 평가하기 위해 사면안정성 분석을 실시하였으며, 3차원 영상분석을 활용하여 주암면 하단 공동부위의 정밀실측 및 3차원적 보강방안을 검토하였다.

2. 연구방법

반구대암각화의 암석학적 풍화상태를 파악하기 위해 암각화 일대를 대상으로 지질조사를 수행하고, 정량분석을 위해 암면 하단부에 탈락되어 있던 암편 중에서 암면의 구성암석과 동일한 산출상태를 보이는 시료를 수집하였다. 수집한 시료를 대상으로 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 사용하여 광물학적 조성 및 조직적 특징을 관찰하였다. 또한 구성암석의 조암광물을 정량분석하기 위해 PHILIPS제 X'pert MPD X-선 회절분석기를 사용하였다. 분석에 사용된 X-선은 CuK α 이며 양극의 가속전압 및 필라멘트의 전류는 각각 40kV와 40mA로 설정하였다.

암각화의 표면손상도를 평가하기 위해 훼손지도작성, 적외선 열화상분석, 색도분석, 초음파속도 측정, P-XRF 분석을 실시하였다. 훼손지도 작성은 현장조사, 고해상도 사진자료 및 3D 스캔 자료를 바탕으로 물리적, 화학적 및 생물학적 훼손 상태로 세분하여 작성하였다. 훼손도면 작성에 사용된 프로그램은 2D그래픽 전문응용 Adobe Illustrator CS3이며 훼손을 산출은 AUTO CAD를 이용하였다. 또한 암면의 손상유형 중 육안으로 확인이 불가능한 내부결함을 탐색하기 위해 적외선 열화상분석을 실시하였다. 적외선 열화상 촬영은 FLIR사의 P640 모델을 이용하였으며, 촬영한 결과를 종합하여 박리가 발생한 부분을 탐색하고 이를 모델링하여 도면화하였다.

암각화 표면의 변색도를 정량적으로 평가하기 위해 Minolta Chroma Meter CR-300을 이용하여 색도분석을 실시하였다. 분석에 사용된 표준 광원은 D65이며 시야각 10°, 분석면적은 100mm로 측정하였다. 또한 암면의 물성을 파악하기 위해 초음파 속도를 측정하고 2003년의 연구자료와 비교 검토하여 훼손상태의 진행여부를 해석하였다. 암각화 구성암석의 표면 오염물 분석 및 풍화심도를 산출하기 위해 Innov-X System의 P-XRF α -6000을 사용하여 정밀분석하였다. 분석은 토양 및 경원소 분석모드로 각각 45초씩 원자번호 15번 이상의 원소에 대해서 수행하였다.

반구대암각화에 나타난 불연속면의 분포특성 및 방향성을 규명하기 위해 암각화가 조각된 암반을 대상으로 불연속면의 주향과 경사를 측정하여 사면의 구조적 안정성을 해석하였다. 사면안정성 해석에는 평사투영해석법을 적용하였으며 이를 위해 Window용 DIPS 프로그램을 이용하였다. 또한 3D 영상분석 자료를 활용하여 암각화 하부에 있는 공동부위를 정밀실측 및 모델링하였다.

3. 사이트환경

반구대암각화의 기반암은 백악기 경상누층군의 소위 대구층으로 명명된 퇴적암이며, 주변에는 이를 관입한 화성암류가 분포한다¹¹. 대구층은 녹회색 내지 암회색의 사암, 실트스톤 및 셰일과 자색의 실트스톤으로 구성되어 있고, 셰일이 호층을 이루고 있거나 이암 및 사암이 협재되어 있으며, 대체로 층리가 있다. 암각화 동쪽으로는 화강섬록암이 관입하면서 열접촉 변성작용을 받은 혼펠스(hornfels)가 원형으로 분포하고 있다. 이 관입의 영향으로 암각화가 조각된 암회색 셰일도 혼펠스화되어 경도가 큰 괴상의 암상

을 보인다¹².

울산 지역의 연평균 기온은 13.9℃, 연평균 강수량은 1,284mm이다. 이를 월평균값으로 살펴볼 때, 1월이 1.9℃, 8월이 25.7℃로써 각각 최저기온과 최고기온을 나타낸다. 또한 1월부터 8월까지의 점차 기온이 상승하다가 8월 이후 다시 하강하는 추세이다. 월평균 강수량은 12월에 24mm로 최소, 8월에 234mm로 최대를 기록하며, 4월~9월에 연강수량의 80%가 집중된다. 월평균 강수량의 월별추이는 기온과 동일한 경향을 보인다.

이와 같이 울산지역의 기온은 평균적으로 영상을 기록하고 있으나, 겨울철에는 일기환경에 따라 대곡천의 강물이 동결되는 현상이 자주 관찰되어 동결-융해작용으로 인한 암각화의 훼손 가능성이 많다. 반구대암각화 표면에서 동결작용이 발생할 수 있는 가능성을 확인하기 위해서 1971년부터 2007년까지 울산지역의 최저온도를 통계분석하였다. 이 결과, 지난 26년간 울산지역에서 0℃ 이하로 떨어지는 날은 총 671일이며, 1월이 352일로 가장 높은 빈도를 나타냈다.

최근까지 반구대암각화의 해발고도는 52~56m로 알려져왔다. 그러나 해발고도에 대한 정확한 정보는 보고된바 없다. 따라서 이 연구에서 정밀 수준측량을 통해 반구대암각화 암면의 정확한 높이를 구하였다. 이 결과, 주암면의 해발고도는 53~57m로 기존에 알려져 있던 높이보다 약 1m 높은 것으로 나타났다(Figure 1).

4. 표면풍화작용

반구대암각화 구성암석의 표면 풍화특성을 파악하기 위해 암각화 일대를 대상으로 지질조사를 실시하였다. 이 결과, 암각화를 구성하고 있는 암석은 전체적으로 암갈색을

띠고 있으며 열변질작용을 받아 혼펠스화 되어 치밀한 조직을 보인다. 문양이 있는 암각화의 표면은 층리가 잘 관찰되지 않고 괴상으로 산출되나 부분적으로 층리를 따라 크고 작은 균열이 발달되어 있다.

암각화의 재질적 특성을 자세히 살펴보기 위해 앞에서 기술한 바와 같이 전석 시료를 수습하였다. 암각화와 동일 지층에 분포하는 암석은 대부분 혼펠스화된 암갈색 셰일이다. 이 암석들은 풍화작용을 받아 표면으로부터 약 2mm 깊이의 풍화대가 형성되어 있으며, 이 풍화층은 미세균열을 따라 암석의 내부까지 진행되어 있다. 반면 반구대암각화 전면의 대곡천에 항상 수장되어 있는 암석을 수습하여 단면을 살펴본 결과, 약 10~20mm의 풍화대가 형성된 것으로 나타났다. 이는 암석이 수분과 접촉하는 시간이 길수록 암석의 풍화가 빠르게 진행된다는 것을 지지하는 증거이다¹⁰.

수습한 암석을 대상으로 풍화에 따른 광물조성 변화, 광물학적 공생관계 및 변성정도를 파악하기 위해 편광현미경으로 관찰하였다. 암각화를 구성하는 암석과 동일한 암갈색 셰일은 담갈색 기질에 미정질의 석영, 정장석, 사장석, 방해석, 녹니석, 운모류 및 불투명 광물들로 구성되어 있다. 반면 풍화된 면은 신선한 면과 뚜렷한 경계를 이루고 있으며 광물의 유실로 인해 기질의 색상은 암회색을 나타낸다. 풍화된 면의 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 녹니석, 운모류 및 불투명 광물들이 주를 이루고 있으나 방해석은 관찰되지 않는다(Figure 2A).

이 암석들의 풍화에 따른 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경을 사용하였다. 관찰 결과, 풍화면과 신선한 면의 경계가 선명하게 나타나며 풍화정도에 따라 공극의 차이를 보였다. 신선한 면의 경우에는 석영, 장석, 방해석 등 주요 광물들이 치밀한 조직(Figure 2B)을 보이는 반면, 풍화된 면에서는 방해석이 용해되어 빠져나간 자리에 많은 공극들이 관찰된다(Figure 2C).

풍화에 따른 광물조성 변화를 정밀분석하기 위해 XRD 정량분석을 실시하였다. 분석에 사용된 시료는 신선한 면과 풍화된 면을 분리하여 제작하였다. 정량 X-선 회절분석 결과, 신선한 면의 광물과 함량은 석영(20.5%), 사장석(28.9%), 정장석(12.5%), 운모류(11.2%), 녹니석(9.9%), 적철석(2.2%), 방해석(15.1%)로 산출되었다. 반면 풍화된 면의 광물함량은 정장석(14.4%), 운모류(11.2%), 녹니석(8.0), 적철석(1.6%)은 신선한 면과 유사한 것으로 나타났으나, 방해석은 2.2%로 상당히 감소하였으며 사장석(37.0%)과 석영(25.6%)은 증가한 것으로 확인되었다(Figure 3).

Figure 1. Leveling measurement of the Bangudae petroglyphs.

이와 같은 암석학적 및 광물학적 풍화작용으로 인해 풍화층과 비풍화층의 경계를 따라 공극률은 많은 차이를 갖는다. 정량적인 물성의 차이를 확인하기 위해 공극률을 측정하였다. 암석의 일반적인 공극률 측정방법은 완전히 건조시킨 후 수분에 장시간 함침시켜 늘어나는 단위부피당 질량수를 측정하는 것이다. 그러나 수습된 시료의 풍화심도는 1~2mm인 점을 감안할 때, 이 방법은 불가능 할 것으로 판단되어 주사전자현미경 관찰을 통해 획득된 후방산란전자영상(BEI) 데이터를 이용하여 표면공극률을 산출하였다.

표면공극률은 주사전자현미경 사진을 토대로 AUTO CAD 프로그램에서 공극이 형성된 영역을 설정한 후 면적을 계산하는 방법으로 산출하였다(Figure 4). 이러한 방법을 통해 산출된 신선한 면의 표면공극률은 0.2~0.6%의 범위를 보이며 평균 0.4%로 나타났다. 반면 풍화된 면의 표면공극률은 24.0~

26.6%의 범위를 나타내며 평균 25.0%로 산출되었다(Table 1).

이와 같이 반구대암각화 주변에 분포하는 암석의 풍화상태로 볼 때, 암각화 암면은 일정한 풍화심도를 갖는 것으로 판단된다. 암각화의 암석학적 및 광물학적 주요 풍화작용은 구성광물 중 방해석이 빠르게 수분과 반응하고 용출되면서 표면에 풍화층을 형성하는 것으로 나타났다. 일부 다른 광물들도 방해석에 비해 천천히 풍화되기는 하지만 표면의 공극을 형성하는데 기여하는 것으로 판단된다.

5. 손상도 평가

5.1. 손상지도 작성

반구대암각화를 구성하는 암석은 자연적, 물리적, 화학

Figure 2. Mineralogical characteristics of host rocks around the Bangudae petroglyphs. (A) Microphotographs showing different color between fresh area and weathered layer. (B) SEM image of fresh area. (C) SEM image of weathered layer.

Figure 3. X-ray powder diffraction patterns showing fresh rocks (B-1, B-2) and weathered rock (BW-1). Q; quartz, P; plagioclase, O; orthoclase, M; mica, Ch; chlorite, Cal; calcite.

적 및 생물학적 풍화가 복합적으로 작용하여 손상이 가속되고 있다. 따라서 암각화에 대한 풍화와 손상을 저감하기 위한 보존대책 마련의 기초단계로 풍화요인별 손상상태를 정밀진단하고 이를 바탕으로 종합손상지도를 작성하였다. 반구대암각화의 손상상태를 요인별로 크게 물리적, 화학적 및 생물학적 손상으로 구분하고 각각의 손상상태에 대해 분포도를 작성하였다. 이를 위해 3D 스캐닝 도면에 사전조사에서 획득한 사진자료를 맵핑하고, 현장조사를 통해 손상유형의 분류와 상태 및 분포를 도면에 기록하였다. 현장조사에서는 가시적인 손상양상에 한하여 물리적 손상은 균열, 탈락 및 박락으로 세분하였다. 표면변색과 생물에 의한 손상은 각각 범례를 정하고 하나의 도면에 손상지도를 작성하였다.

또한 현장에서 작성한 손상지도를 실내에서 고해상도의 정밀사진과 대조하면서 수정 및 보완작업을 실시하여 신뢰도가 높은 손상지도를 완성하였다. 이 손상지도를 토대로 AUTO CAD 프로그램에서 요인별 풍화영역을 설정하고, 각 풍화요소의 실면적 및 점유율을 산출하였다. 이 결과, 반구대암각화 주암면에서 탈락 및 박락의 형태로 표면이 유실된 영역의 면적은 39,027cm²로 산출되었으며, 이는 주암면의 23.8%를 차지하는 것이다(Figure 5).

이는 지질학적 작용에 의해 암면이 현장에 노출된 당시부터 현재까지 유실된 총면적과 점유율을 의미하는 것으로서, 암각화 조성시기 이후에 발생한 것뿐만 아니라 암각화 조성 이전에 형성되어 있던 자연적 손상 및 풍화부분까지도 포함

하는 것이다. 이와 같이 암각화 표면에 발생한 탈락과 박락은 대부분 수평 및 수직의 균열이 교차되는 부분에 집중적으로 분포하고 있다. 따라서 현재 암각화 표면에 유실되어 있는 부분은 암석의 물리적, 화학적인 풍화작용과 함께 균열들에 의한 켜기작용으로 인해 발생하였을 가능성이 있다.

암각화 표면은 생물학적 및 화학적 훼손요인에 의해 전면에 걸쳐 담갈색 또는 백색으로 변색되어 있다(Figure 5). 표면변색 오염물의 산출상태를 정밀하게 살펴보기 위해 주사전자현미경 관찰을 실시한 결과, 암석의 표면에 생성된 공극사이에 다양한 종류의 수증생물이 관찰되었다. 또한 침상형의 침철석과 같은 무기오염물도 관찰되었다. 따라서 향후 암각화를 보존처리하게 될 경우, 육안으로 보이는 표면만이 아닌 공극 내부까지 표면오염물이 침착되어 있는 점을 충분히 고려해야 할 것이다.

5.2. 표면 박리검출

반구대암각화 표면에는 부분적으로 박리가 발생하였다. 일반적으로 박리는 암석 표면에서 수 mm ~ cm 정도 떠돌아 있는 형태로 외부로부터의 충격이나 물리적 및 화학적 풍화작용으로 인해 떨어질 수 있다. 이는 암석의 표면에 얇은 깊이로 문양을 새긴 암각화의 특성을 고려할 때 다른 훼손 유형보다도 위험한 손상요인이다. 그러나 표면에 들어나지 않고 암석의 내부에 형성되어 있는 박리는 정밀관찰을 하더라도 정확히 구별하기에는 많은 어려움이 있다.

Table 1. Results of calculated surface porosity of host rocks around the Bangudae petroglyphs.

Sample	Porosity(%)	Sample	Porosity(%)
Fresh area 1	0.2	Weathered area 1	24.0
Fresh area 2	0.3	Weathered area 2	26.6
Fresh area 3	0.6	Weathered area 3	24.3
Average	0.4	Average	25.0

Figure 4. Calculating method of surface porosity using SEM image.

암각화 내부에 발생되어 있는 박리의 영역을 탐색하기 위해 적외선 열화상분석을 실시하였다. 이는 적외선 영상장치를 이용하여 물체 표면의 열화상을 촬영하고, 온도 분포나 변동사항에 대해 해석시스템을 이용하여 처리하는 방법으로 물체의 내부결함을 비파괴적인 방법으로 파악할 수 있다. 그러나 온도변화가 없는 곳에서 온도분포를 이용하여 결함검출을 실시할 경우는 피측정물 표면에 나타난 결함의 온도변화가 열확산의 영향으로 소실 또는 약화되기 때문에 결함검출의 정밀도와 분해능이 저하되는 경우가 있다. 따라서 박리영역과 신선한 영역의 상대적인 온도 차이를 극대화시키기 위해 약 1분간 미열을 가하고 온도 변화에 대한 화상을 얻었다(Figure 6).

적외선 열화상촬영 당시 반구대암각화의 표면온도는 8~9℃로 측정되었다. 적외선 열화상촬영을 위해 약 1분간 미열로 가열한 후 암각화 표면온도는 촬영지점마다 조

금씩 다르나 대부분 15℃ 내외로 측정되었다. 그러나 박리가 발생한 곳으로 판단되는 영역에서는 약 20℃ 이상까지 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 열분포 특성은 암각화 암석의 열전도율 및 비열과 내부결함으로 인해 발생한 공극의 영향 때문이다. 암석 표면에 열을 가할 경우, 암석에 비해 공기의 비열이 작기 때문에 온도가 상대적으로 빠르게 상승하면서 변화가 나타나게 된다. 또한 냉각과정에서 상대적으로 열전도율이 높은 암석에 잠재되어 있던 열이 내부로 빨리 전달되어 암석내부에 결함이 있는 영역에서 온도가 높게 나타나는 것이다.

따라서 외부로부터 열을 받은 암석의 표면온도가 상대적으로 높게 측정된 영역은 박리가 발생한 것으로 해석할 수 있다. 또한 상용프로그램을 이용하여 Figure 6과 같이 표면온도 분석을 실시함으로써 박리의 형태 및 발생된 면적을 산출하였다. 이와 같은 방법을 통해 34곳의 크고 작은

Figure 5. Comprehensive deterioration map of the major Bangudae petroglyphs.

Figure 6. Confirmed exfoliation areas by infrared thermography.

박리를 확인하였다. 암각화 주암면 내부에 발생된 박리의 면적은 총 2,009cm²로 주암면 전체면적의 1.2%를 차지하였다. 다양한 문양이 수 mm 깊이로 조각되어 있는 반구대암각화는 석탑 및 불상과 같은 대형 건조물 문화재와는 달리 박리가 가장 위험한 훼손유형이다. 따라서 박리가 발생한 영역에 대해서는 집중적인 보존관리가 필요하다.

5.3. 색도분석

반구대암각화의 암면은 생물학적 및 화학적 풍화작용에 의해 표면이 변색되어 있다. 표면변색은 문화재의 미관을 해칠 뿐만 아니라 구성암석의 성분, 성질 및 조직의 변화를 야기할 수 있다. 따라서 암각화가 풍화되면서 발생한 표면 변색도를 정량적으로 평가하기 위해 색도분석을 실시하였다. 색도분석에서 측정된 데이터는 CIE Lab의 색좌표 L^* , a^* , b^* 로 표현하였다. L^* 는 명도, a^* 는 red(+)와 green(-)의 정도, b^* 는 yellow(+)와 blue(-)의 정도를 나타내는 입체좌표이다. CIE Lab 색 공간에서 색은 점으로 표시된다. 이때 이 두 점사이의 입체적 거리를 계산함으로써 색차를 정량적인 수치로 나타낼 수 있다. 암각화 표면의 변색도를 평가하기 위해 신선한 암석의 색도를 기준으로 암각화 표면(161지점)에 대해 측정한 색도를 비교분석 하였다.

암각화 일대에 분포하는 암갈색 세일의 신선한 면을 대상으로 색도를 측정한 결과, L^* 는 28.21~32.10의 범위를 보이며 평균 29.99로 표준편차는 1.22이다. a^* 는 1.10~1.82의 범위를 보이며 평균 1.37, 표준편차 0.22이다. b^* 는 평균 7.22(6.20~8.20, 표준편차 0.50)로 측정되었다. 신선한 면의 모든 색도가 표준편차 1.5 미만인 것으로 볼 때 원암의 색상은 매우 균질한 색도를 갖는 것으로 나타났다(Figure 7). 반

면 암각화 표면의 색도측정 결과를 살펴보면 명도를 나타내는 L^* 는 31.86~65.48의 범위를 나타내며 평균 46.54, 표준편차 5.80로 측정되어 원암의 색상보다 밝은 것으로 나타났다. b^* 역시 8.91~21.49의 범위를 나타내며 평균 14.64, 표준편차 2.14로 측정되어 전반적으로 암각화의 표면은 황색도가 증가하였다. 그러나 a^* 는 평균 0.79, 표준편차 1.27로 원암과 거의 유사한 것으로 확인되었다(Figure 7).

이를 종합하여 신선한 암석의 색도를 기준으로 표면의 변색도를 산출한 결과, 색차 ΔE 는 5.54~36.89의 범위를 보이며 평균 17.26로 산출되었다. 따라서 측정위치에 따라 색차의 차이는 있지만 전체적으로 변색되어 있는 것으로 확인되었다. 반면 표준편차가 5.64로 비교적 낮은 것으로 볼 때 전체적으로 거의 유사한 색상으로 변색된 것으로 해석할 수 있다.

5.4. 초음파속도

반구대암각화를 구성하는 암석의 물성을 파악하기 위해 초음파속도를 측정하였다. 이 연구에 사용한 장비는 초음파의 전달시간을 직접 읽을 수 있어 측정이 빠르지만 파형을 볼 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한 지점에서 0°, 45°, 90°, 135° 방향으로 속도를 측정하고 평균속도를 산정하여 신뢰성을 높였다. 탐사는 암면에 대하여 간접전달방법으로 하였으며 탐촉자 거리는 20cm 이다. 또한 암면 훼손방지를 위하여 건조 접촉매질인 고무찰흙을 이용하였다.

측정방향별 초음파속도 측정결과를 살펴보면, 층리와 수직인 상하방향으로 측정하였을 경우의 평균 초음파속도는 2,367m/s로 방향별 조사에서 가장 낮게 조사되었다. 반면 층리와 수평인 좌우방향으로 측정하였을 경우의 평균

Figure 7. Results of the chromaticity analysis for the major Bangudae petroglyphs and fresh rocks.

초음파속도는 2,886m/s로 방향별 조사에서 가장 높았다. 각 방향별 초음파속도를 종합한 결과, 반구대암각화 주암면의 초음파속도는 875~4,057m/s의 범위를 보이며 평균속도는 2,582m/s로 계산되었다(Figure 8).

Fitzner 외(2004)는 반구대암각화의 평균 초음파속도를 2,865m/s로 보고하였다⁹⁾. 2003년도에 수행된 연구와 측정방법 및 장비의 상이함으로 인해 약간의 오차가 발생할 수 있으나 전반적으로 초음파속도는 감소한 것으로 나타났다. 해발고도에 따른 초음파속도를 2003년도 측정결과와 비교해보면, 암각화의 상부는 대체적으로 유사한 경향을 보이지만 하부는 속도가 상당히 감소한 것으로 확인되었다(Figure 8). 따라서 풍화에 의한 손상을 저감하기 위해서는 암각화의 하부에 대한 보강대책이 필요하다.

5.5. 화학조성 변화

반구대암각화 암면의 화학적 풍화도를 산출하기 위해 P-XRF를 활용하여 비파괴 기법으로 성분분석을 실시하였다. 분석영역은 암각화 총 161지점, 신선한 암석 12지점으로 풍화에 따른 원소의 분포특성을 파악하였다. 분석결과 획득한 모든 데이터를 정리하여 Table 2에 정리하였다. 신선한 암석과 암각화의 표면에 대한 P-XRF 분석결과, Ca와 Sr이 가장 특징적인 경향을 보였다.

풍화를 받지 않은 암석의 Ca는 60,330~71,369ppm의 범위를 보이며 평균 66,615ppm의 함량이 측정되었으나, 암각화 표면의 Ca 함량은 1,425~8,862ppm의 범위를 나타내며 평균 4,389ppm으로 매우 낮게 검출되었다. 또한 Sr도 Ca와 동일한 경향을 보였다. 신선한 암석의 Sr 함량은 평균 936ppm으로 높게 검출된 반면 암각화 표면에서는

185ppm으로 상대적으로 낮게 나타났다. Sr은 Ca와 치환을 잘 이루는 원소로서 방해석에 미량으로 결합되어있는 원소이다(Table 2). 이와 같이 암각화 표면의 Ca와 Sr 함량이 신선한 암석보다 낮은 이유는 표면 풍화작용에서 설명된 바와 같이 물과의 반응으로 인해 방해석이 유실되었기 때문이다. 따라서 Ca 및 Sr 함량이 낮은 부분은 상대적으로 광물학적 풍화가 더욱 진행된 부분이라 할 수 있다(Figure 9).

6. 사면안정성 평가

6.1. 불연속면의 분포특성

반구대암각화가 조각된 암반은 불규칙한 불연속면의 발달로 인하여 크기와 모양이 다양한 수십 개의 암괴들로 분리되어 있다. 불연속면은 암반에 있는 모든 연약면을 총괄적으로 나타내는 것으로, 미세균열부터 절리, 큰 규모의 단층까지 매우 다양하다. 이는 암각화가 조각된 암반의 거동에 영향을 미쳐 구조적 문제점을 야기할 수 있다. 특히 불연속면의 특성 중 가장 중요한 요소의 하나인 방향성은 공간에서의 불연속면 거동을 나타내는 것으로 불안정한 조건이나 과한 변형이 일어날 수 있는 가능성을 지배한다.

따라서 이 연구에서는 불연속면의 분포특성 및 방향성을 알아보기 위해 암각화가 조각된 암반과 암각화 좌측의 불안정한 암반 2면을 대상으로 주향과 경사를 측정하였다(Figure 10). 이때 암각화 암반(1구역)에서는 총 36개의 불연속면을, 암각화 주면에 수직인 암반(2구역)과 평행한 암반(3구역)에서는 각각 11개와 8개의 불연속면을 측정하였다.

불연속면 측정 결과, 1구역의 주향은 대부분 N10~30E와

Figure 8. Results of the ultrasonic velocity measurement for the major Bangudae petroglyphs.

Table 2. Results (ppm) of the P-XRF analysis for the major Bangudae petroglyphs and fresh rocks.

		K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr
Fresh rocks	Average	32,600	66,615	4,131	<LOD	27,685	65	89	936
	Max	34,476	71,369	4,360	<LOD	28,352	73	93	1,002
	Min	31,550	60,330	3,938	<LOD	26,501	52	85	872
	S.D.	768	4,322	137	<LOD	499	6	3	55
Bangudae Petroglyph	Average	28,912	4,389	5,418	3,300	31,305	135	116	185
	Max	41,108	8,862	12,746	12,470	44,403	228	150	932
	Min	15,481	1,425	2,795	<LOD	14,128	55	79	100
	S.D.	4,707	1,205	1,521	2,794	5,911	32	16	113

<LOD; limit of detection, S.D.; standard deviation

Figure 9. Histogram showing Ca and Sr contents in rock surface of the Bangudae petroglyphs and fresh rocks.

N50~60W를 나타냈고, 경사는 대부분 70° 이상으로 NW, NE, SW 방향에서 높은 빈도를 보였다. 2구역은 전체적으로 다양한 절리계가 발달하며 이중 주향은 N70~80W가, 경사는 60~70SW가 상대적으로 높은 빈도를 나타냈다. 특히 37번과 46번 절리는 2구역 암반의 구조적 불안정성의 주원인이며, 35~40번 사이의 절리는 암괴의 탈락을 유발하고 있다. 3구역은 N10~20E의 주향과 2~19NW의 경사각을 갖는 절리계들이 주로 관찰되며, 이중 49번과 54

번 절리는 서로 교차하여 켜기파괴의 가능성을 보인다.

6.2. 사면안정성 분석

반구대암각화가 조각된 암반은 불규칙한 불연속면이 발달되어 있으며, 특히 경사면에 놓여 있는 암괴는 켜기 및 전도의 발생조건을 달리하며 곳곳에서 암괴의 붕락이 현저히 관찰된다. 따라서 이 연구에서는 암반 전면에 걸쳐 측정

Figure 10. Measurement point of strike and dip direction for surface discontinuity of the Bangudae petroglyphs.

된 불연속면의 조사 자료를 근거로 평사투영법을 이용하여 파괴유형 및 가능성을 분석하였다(Figure 11).

이 평사투영법은 사면과 불연속면의 주향, 경사 및 마찰각으로 암반 사면의 안정성을 검토할 수 있는 방법이다. 이는 면의 주향과 경사를 고려하여서 평사투영망인 원안에 불연속면은 한 개의 극점(점)으로, 사면은 한 개의 대원(곡선)으로 각각 표시한다. 또한 평사투영망에 불연속면의 마찰각과 파괴유형별 위험조건들을 기하학적으로 도시한 후에 위험조건들에 부합된 평면파괴, 켜기파괴, 전도파괴의 불안정 지역을 설정하여 파괴조건에 대한 안정성 여부를 판단한다.

우선 암각화의 안정성을 분석하기 위해 각 구역별 전면 방향을 중심으로 기준사면을 설정하였다. 이 중 1구역과 3구역 기준사면은 N78E/90으로, 2구역은 1구역 및 3구역의 기준사면과 거의 수직이면서 상대적으로 저각을 보이는 N3E/63NW로 설정하였다. 또한 암각화 암반의 평면파괴 및 전도파괴에 대한 안정성은 측정된 모든 절리들을 대상으로 실시하였다. 켜기파괴는 각 절리들이 직접적으로 교차하거나 연장선상에 존재하는 경우에 한해서 분석하였다. 특히 파괴위험성 도시를 위한 세일의 마찰각은 최병렬(2002)이 제안한 31° 를 적용하였다⁸.

1구역의 파괴 위험지역을 평사투영도에 도시한 결과,

Figure 11. Results of the distribution for discontinuity planes and slope stability of the Bangudae petroglyphs.

17번 절리가 평면파괴 영역에 도시되었다. 그러나 이 절리는 길이, 이격거리 및 연장성이 뚜렷하지 않은 것으로 보아 암각화의 구조적 영향보다는 소규모 암괴 탈락에 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 전도파괴 영역에 도시된 주암면 원편의 31번과 33번 절리는 절리간격의 확장과 발달 여부에 따라 암괴 탈락 및 암반의 구조적 문제를 유발할 것으로 보인다. 또한 1구역의 켜기파괴는 1+2번 절리군, 3+5번 절리군, 32+34번 절리군이 주요인으로 작용하고 있다. 특히 3+5번 절리군에 의한 거대 암괴 탈락은 암반의 구조적 문제와 직접적인 연관이 있는 것으로 판단된다(Figure 11).

한편 2구역의 사면안정성을 분석한 결과, 40번 절리의 영향을 받는 암괴가 평면파괴의 가능성을 보였고, 육안으로도 매우 위험해 보이는 38번 절리에 인접한 암괴는 전도파괴의 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한 39+40번 절리군과 43+47번 절리군은 켜기파괴의 위험성이 확인되었다. 특히 2구역 암반 우측의 38~40번 절리는 앞의 결과에서도 보여주었듯이 전도 및 켜기파괴의 가능성을 모두 가지고 있어 구조적인 보강이 필요할 것으로 판단된다. 3구역은 평면파괴와 켜기파괴의 위험성은 없으나 49번과 53번 절리에 의한 전도파괴 위험성은 높은 것으로 나타났다.

특히 49번 절리는 이격도가 높은 절리가 발달하고 있어 집중적인 보강이 요구된다(Figure 11).

6.3. 공동부위 모델링

암각화 암반을 대상으로 사면안정성 평가를 적용한 결과, 주암면의 파괴가능성은 낮은 것으로 나타났으나, 주암면의 서측에 형성된 암반은 평면파괴 및 켜기파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 또한 암각화 하부에는 층리와 평행하게 공동이 형성되어 있다. 이 공동으로 인해 주암면 및 주암면 서측에 형성된 암반은 상부의 하중에 따라 암벽의 수평 및 수직 균열이 하부쪽에 집중적으로 발생되어 있다. 절리면의 확장과 구조 불안정성으로 인해 균열이 크게 확장되어 있으며 부분적으로 많은 암편이 탈락되어 있다. 따라서 이 공동부분에 대해서는 암반이 안정을 유지할 수 있도록 구조적 보강이 필요한 것으로 판단된다.

공동부위의 보강을 위해서는 정밀한 실측데이터가 필요하다. 그러나 최근까지의 연구들은 대부분 암각화 주암면을 대상으로 진행되어왔기 때문에 공동부위에 대한 실측자료는 없다. 또한 공동부위는 암각화가 조각되어 있는 암면과는

Figure 12. Result of 3D image modeling for cavern formed bottom of the Bangudae petroglyphs.

달리 입체적인 공간이기 때문에 3D 실측자료가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 3차원 영상분석을 통해 반구대암각화 하부에 발생되어 있는 공동부위를 모델링하여 Figure 12과 같이 도면으로 제시하였다. 이와 같은 자료를 토대로 공동부위에 적합한 보강공법이 도입된다면 보다 효과적으로 반구대암각화를 보존할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결 론

1. 반구대암각화를 구성하는 암석은 열변질작용을 받아 혼펠스화된 암갈색 셰일이 주류를 이룬다. 이 암석은 일정 깊이의 풍화층을 형성하고 있으며 풍화대(평균 공극률 25%)와 신선한 면(평균 공극률 0.4%)은 광물 및 화학조성의 차이를 보인다. 이 풍화층은 구성광물 중 방해석이 암석 내부로 침투한 물과 반응하여 주변의 광물보다 빨리 풍화되고 유실되면서 형성된 것으로 나타났다.

2. 암각화가 새겨지기 이전부터 현재까지 발생한 자연적 풍화와 탈락 및 박락의 형태로 주암면에서 표면이 유실된 영역의 면적은 39,027cm²로 산출되었다. 또한 적외선 열화상분석을 통해 박리를 탐색한 결과, 박리가 발생한 면적은 총 2,009cm²로 주암면 전체면적의 1.2%를 점유하는 것으로 산출되었다.

3. 암각화의 주암면은 생물학적 및 화학적 풍화에 의해 전면에 걸쳐 담갈색으로 변색되어 있다. 신선한 암석을 기준으로 표면의 색도를 측정된 결과, 암각화는 신선한 암석보다 백색 및 황색도가 증가한 것으로 확인되었으며, 색차 ΔE는 5.54~36.89의 범위를 보이며 평균 17.26로 산출되었다.

4. 물성을 측정하기 위해 초음파측정을 실시한 결과, 반구대암각화 주암면의 초음파속도는 875~4,057m/s의 범위를 보이며 평균속도는 2,582m/s로 산출되었다. 이는 2003년도에 측정된 초음파속도보다 전반적으로 감소한 것이며, 특히 암각화 하부 영역에서 상당히 감소한 것으로 나타났다.

5. 반구대암각화의 구성암석은 신선한 암석에 비해 Ca, Sr의 함량이 매우 낮은 것으로 측정되었다. 이는 암석과 물의 교환반응에 의해 구성광물 중 방해석이 유실되었기 때문이다. 따라서 이 원소들의 함량이 낮은 부분은 상대적으로 광물학적 풍화가 더욱 진행된 부분임을 지시하는 것이다.

6. 반구대암각화 암반의 사면안정성 분석결과, 1구역과 2구역은 평면, 전도 및 켜기파괴에 의한 위험성이 존재하

는 것으로 나타났다. 3구역에서는 전도파괴의 위험성이 높은 것으로 확인되었다. 특히 1구역은 31번 절리에 의한 전도파괴와 3+5번 절리군에 의한 켜기파괴, 2구역은 38~40번 절리군에 의한 전도 및 켜기파괴, 3구역은 49번 절리에 의한 전도파괴의 가능성이 있어 암각화 및 주변암반의 구조적 불안정성을 유발하는 것으로 나타났다.

7. 3차원 영상분석을 통해 암각화 주암면 하부에 발생한 공동부위를 모델링하였다. 이 자료를 토대로 공동부위에 적합한 지질공학적 보강공법이 도입된다면 보다 효과적으로 반구대암각화를 보존할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 황수영, 문명대, "반구대". 동국대학교, p243, (1984).
- 문명대, "울산암각화의 발견경위와 연구성과 회고". *울산암각화 발견 30주년기념 암각화국제학술대회 논문집*, 울산광역시, p9-20, (2000).
- 울산광역시, "반구대암각화 보존대책연구 보고서". 울산광역시, p1-275, (2003).
- 국토해양부, "대곡천 하천정비기본계획 재정비 보고서". 국토해양부, (2006).
- 국토해양부, "반구대암각화 보존을 위한 사면담 수위운영 방안 검토". 국토해양부, (2008).
- 울산대학교 박물관, "울산반구대암각화". 울산대학교 박물관 학술연구총서, 6, (2000).
- 이석훈, 김수진, "주기적으로 침수되는 퇴적암의 풍화특성". *한국광물학회지*, 17, p23-35, (2004).
- 최병렬, "반구대 암반사면의 안정성에 관한 연구". *과학교육연구논총*, 18, p57-62, (2002).
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Bouchardiere, D. La., "Bangudae petroglyph in Ulsan, Korea: studies on weathering damage and risk prognosis". *Environmental Geology*, 46, p504-526, (2004).
- 울산광역시, "반구대암각화 암면 보존방안 학술연구". *공주대학교 산학협력단*, p1-261. (2010).
- 이윤중, 이인기, "지질도폭 설명서: 연양도폭(1:50,000)". 국립지질조사소, (1972).
- 황상일, 박경근, 윤순옥, "반구대 암각화의 주기적인 침수와 구성암석의 풍화 특성". *대한지리학회지*, 45, p342-359, (2010).