

경주 남산 마애불 암석의 물리적 특성연구

- '경주배리윤을곡마애불좌상' 을 중심으로 -

| 송치영 · 한민수 · 이장준 · 전병규

경주 남산 마애불 암석의 물리적 특성연구

- ‘경주배리윤을곡마애불좌상’ 을 중심으로 -

Petrological Studies of the Buddha Image Carved on Rock Surface at the Gyeongju Namsan Area, Korea
- A Case Study of the Seated Buddha Image Carved on Rock Surface of Yuneulgok in Bae-ri, Gyeongju -

송치영 · 한민수 · 이장준 · 전병규
 Song Chi-young, Han Min-su, Lee Jang-jon, Jun Byung-kyu

〈ABSTRACT〉

The Seated Buddha image carved on rock surface of Yuneulgok in Bae-ri, Gyeongju constituted of alkali feldspar granite. There is surface weathering by abrasion, exfoliation and break out.

As a result various experiment was carried out testing rock material property to quantitatively grade weathering.

Besides, this study is focused on properties of rock and correlation between things. Additionally, comparison of chemical properties to nondestructive weathering grade in the buddha image carved on rock.

This result utilized on important resource for scientific conservation system compared with weathering appearance.

I. 서 언

이 연구의 목적은 석조문화재의 풍화상태를 비교적 정량적으로 접근하고자 물리적 특성을 고찰하는데 있다. 그동안 풍화에 대한 연구는 화학적 풍화의 관점에서 많이 연구되어 왔으나, 암석의 물리적 상호작용에 관한 연구는 미비한 실정이다. 그러므로 암석의 특성을 결정짓는 기본 물성과 강도 변화, 파장과파의 상관성 등을 명확히 규명하여 화학적 풍화와의 상관성을 분석해 보고자 한다.

연구대상으로 지정한 마애불은 암벽이나 거대한 바위 면에 부조 또는 선각 기법을 사용하여 불교의 주제나 내용을 형상화한 것으로 마애불의 특성상 기반암의 암상을 반영하기 때문에 다른 요인에 의한 풍화양상비교에 좋은 대조군을 형성할 수 있다. 따라서 동일한 위치의 암체가 거의 같은 풍화작용을 받는다는 가정 하에 마애불 주변 암석에 대한 분석을 통해 정량적인 자료를 얻고자 이를 연구 대상으로 지정하였다.

대체적으로 남산지역에 만들어진 유적은 남산 일대의 지질 및 풍화특성이 고려되어 이루어진 것으로 이는 남산이 천년신라의 석산으로 사용되었을 가능성을 시사하고 있다. 실제로 남산 지역에 산재되어 있는 문화재는 일부 지역을 제외하고 모두 제자리 기원, 즉 남산 지역의 알칼리화강암으로 이루어져 있다는 것을 확인하였다(경주남산, 2004).

따라서 이 가운데 경상북도 유형문화재 195호로 지정되어 있는 경주배리윤을곡마애불좌상(慶州拜里潤乙谷磨崖佛坐像)을 대상으로 하였다. 이 마애불좌상은 ‘ㄱ’자로 꺾인 암벽에 3구의 여래좌상을 새긴 불상으로 정밀한 조사연구를 진행하는데 적합한 지형적 조건을 지니고 있으며, 물리·화학적, 생물학적인 풍화양상이 다양하게 산출되어 암석의 풍화특성을 규명하는데 적합하다고 판단하였다.

II. 현황 및 연구방법

1. 현황

경주의 남쪽에 자리잡은 남산(468m)은 삼국시대부터 통일신라 말까지 약 300년 동안 불상과 탑이 조성되었으므로 남산의 불상만 가지고도 신라 조각사의 흐름을 엿볼 수 있을 정도이다. 따라서 1985년엔 이 지역의 전반적인 중요성이 인정되어 사적 제 311호로 지정된 바 있다. 남산에 위치한 마애불 가운데, 보물로는 경주남산 불곡석불좌상(198호), 경주남산 탑곡마애조상군(201호), 경주남산 칠불암 마애석불(200호), 경주남산 신선암마애보살반가상(199호), 용장사지 마애여래좌상(913호) 등과 시도 지정문화재로는 삼릉계곡 마애석가여래좌상(158호), 경주배리윤을곡마애불좌상(195호) 등이 주요 조사대상으로 선정되었다 (Photo 1).

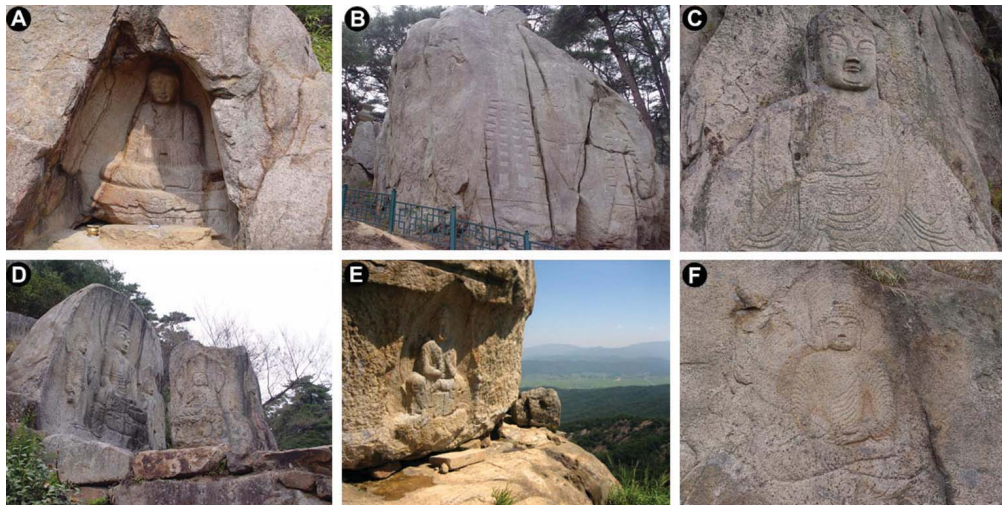


Photo 1. Present condition of Buddha Image Carved on Rock Surface of Gyeongju Namsan. (A) Seated Stone Buddha Statue at Bulgok of Namsan. (B) Buddhist Image Carved on Rock Surface at Tapgok of Namsan. (C) Seated Seokgayeorae Image Carved on Rock Surface in Samneung Valley. (D) Seated Buddha Image Carved on Rock Surface near Chilbulam at Namsan. (E) Seated Buddha Image Carved on Rock Surface near Sinsunam at Namsan. (F) Seated Yeorae Image Carved on Rock Surface at Yongjangsa site.

남산의 윤을곡에 위치한 경주배리윤을곡마애불좌상은 남향으로 2체, 서향으로 1체의 부처님이 새겨져 있다. 높이 3m, 너비 6m 가량 되는 바위 면이 ㄱ자형을 이루는데, 넓은 면이 2.5m로 남향하였고, 좁은 면은 90cm로 서향하였다 (Photo 2A).

서향한 불상은 돌을 새김으로 새겨져 있으며, 3불 가운데 가장 조각솜씨가 떨어진다. 신체는 사각형으로 평평하고 양감이 없으며, 광배의 일부와 대좌 또한 생략하였다. 또한 광배 테두리 안에 네 개의 화불을 부조로 새겨 넣은 것이 특징적이다. 광배는 중앙불과 마찬가지로 테두리가 굵은 띠로 도드라지게 새겨져 있다. 손가락은 세세하게 표현되지 않았지만 왼손에는 약합을 들고 있는 것으로 보여 과거불인 약사여래로 생각된다 (Photo 2B).

남향한 암반의 중앙 본존불은 연꽃대좌 위에 굵은 광배를 등지고 결가부좌로 앉아 있다. 얼굴은 다소 완강한 느낌을 주지만, 눈을 가늘게 뜨고 입에는 미소를 띠고 있어 대체로 부드러운 인상이다. 오른손은 마멸이 심해 불확실하지만 설법하는 시무외인의 수인으로 생각되며, 왼손은 무릎에 걸쳐 땅을 가리키는 항마촉지인의 수인을 취하고 있어 석가불로 생각된다. 두광과 신광이 연결된 광배의 모양으

로 보아 신라 하대 마애불의 대표적인 예라 하겠다 (Photo 2C).

중앙불의 오른쪽에 새겨진 불좌상은 본존불보다 약간작고 위축되게 표현하였으며, 제작당시의 영향인지 풍화로 인한 마모인지 알 수 없지만 오른쪽 눈은 깊게 패여 있다. 왼손은 배 위에 연꽃봉우리로 생각되는 보주를 들고 있고, 오른손은 무릎에 얹어 손가락을 살짝 구부리고 있어 미륵불의 형식을 띤 것으로 생각된다 (Photo 2D). 저자에 따라서 약함을 들고 있는 약사불로 표현하는 경우도 있다.

본존불 왼쪽 어깨 부근에 “太和乙卯九年”이라는 명문으로 흥덕왕 10년(835년)이 조성시기임을 알려주는 중요한 단서가 되고 있었으나, 현재는 마모가 심하여 ‘九年’이라는 글씨가 흐릿하게 보일 뿐이다 (Photo 2E). 또한 마애불은 서향한 암괴와 남향한 암괴가 서로 분리되어 독립된 개체임을 확인할 수 있었다 (Photo 2F). 이는 본래 분리되었던 암반인지 세월의 흐름으로 서서히 분리가 된 것인지 정확한 자료는 찾을 수 없었다. 즉 이 삼존불은 약사불, 석가불, 미륵불로 이루어진 과거, 현재, 미래의 삼세불(三世佛)이라고 생각된다 (최성은, 2004).

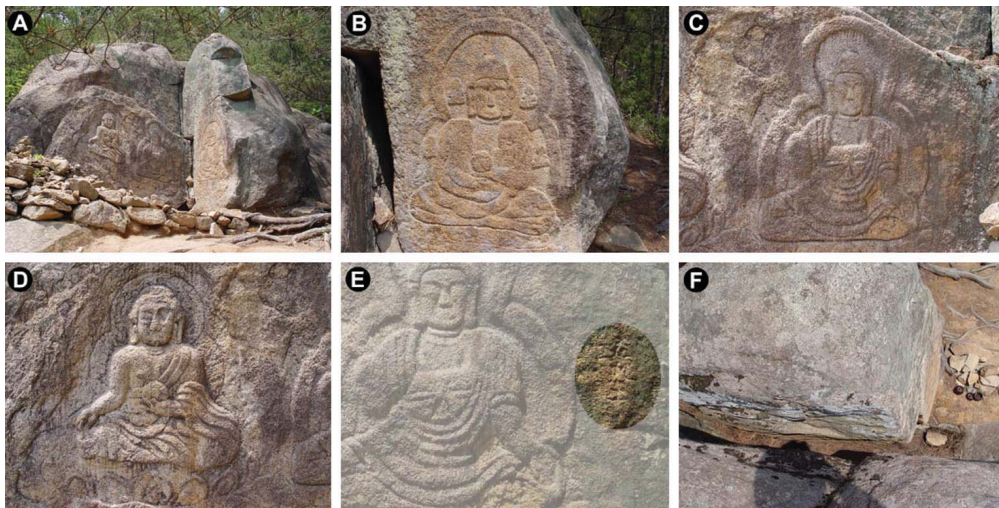


Photo 2. (A) The present field occurrence southern frontal view of Seated Buddha Image Carved on Rock Surface of Yuneulgok in Bae-ri. (B) Southwestern view of Buddha Image. (C·D) Southeastern view of Buddha Image. (E) Photograph show letter image of “潤乙卯九年”. (F) Back side image of rock base.

현황조사와 함께 훼손도의 상태를 조사하기 위해 간단하게 표준화한 방법으로 훼손도를 표현하였다. 풍화훼손지도는 문화재의 보존 상태에 대한 중요 자료로 활용되며 일반적인 조사 방법론으로 자

리 잡고 있어, 향후 DB 구축이 마련되어야 할 것이다. 훼손유형은 크게 균열, 박리박락, 천공, 변색 및 생물군으로 분류하였고, 각 훼손별 점유율도 산출하였다(Fig. 1).

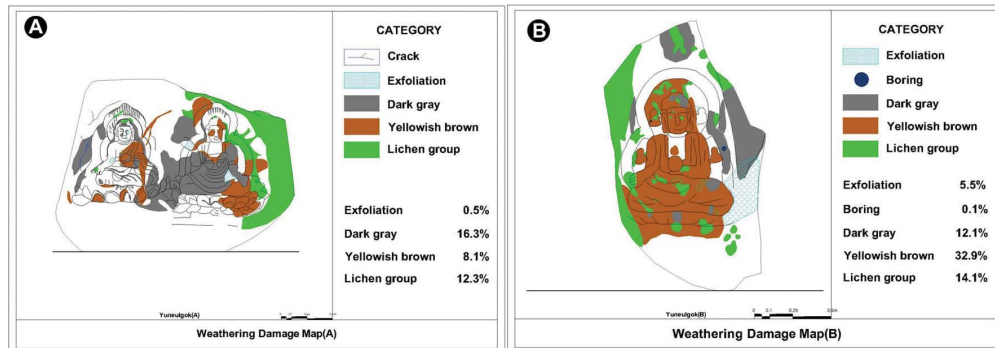


Fig. 1. Weathering damage map

2. 지형 및 지질

경주는 경상북도 동남쪽에 경도 129° 31', 위도 35° 39' 상에 위치하고 있으며, 동쪽의 토함산(745m), 서쪽의 선도산(380m), 남쪽의 남산(494m), 북쪽의 소금강산(280m)으로 둘러싸여있다. 이 가운데 남산은 경주의 남쪽 낮은 구릉성 산지로 형산강과 남천 사이의 침식사면 사이에 남북으로 길게 자리잡고 있다. 남북 길이 약 8km, 동서 폭 약 4km이고, 금오산(468m)과 고위산(494m) 능선으로 구성되어 있으며, 전체적으로 서고동저, 남고북저의 형태를 보인다 (Fig. 2).

이 지역의 지질을 살펴보면, 백악기의 대구층과 이를 관입한 각섬석흑운모화강섬록암, 흑운모화강암과 알칼리장석화강암, 제 3기 화산암과 충적층으로 구성된다. 경주지역은 남산화강암체와 토함산화강암체로 크게 구분되는데, 연구지역이 속한 남산 화강암체는 경주시 남쪽 남산(471m)에서 마석산(451.1m)을 지나 외동읍 모화리에 이르는 연장 약 20km, 폭 3~5km의 암주이다. 북부는 담홍색을 띠는 알칼리장석화강암, 남부는 알칼리장석화강암~흑운모화강암으로 구성되며, 동쪽은 I-형의 토함산화강암체와 분리된다 (윤성효, 황인호 1990). 시료를 채취한 지점의 암석은 경주배리운을곡마애불 좌상과도 같은 지질분포를 보이는 것을 확인하였다 (Fig. 2).

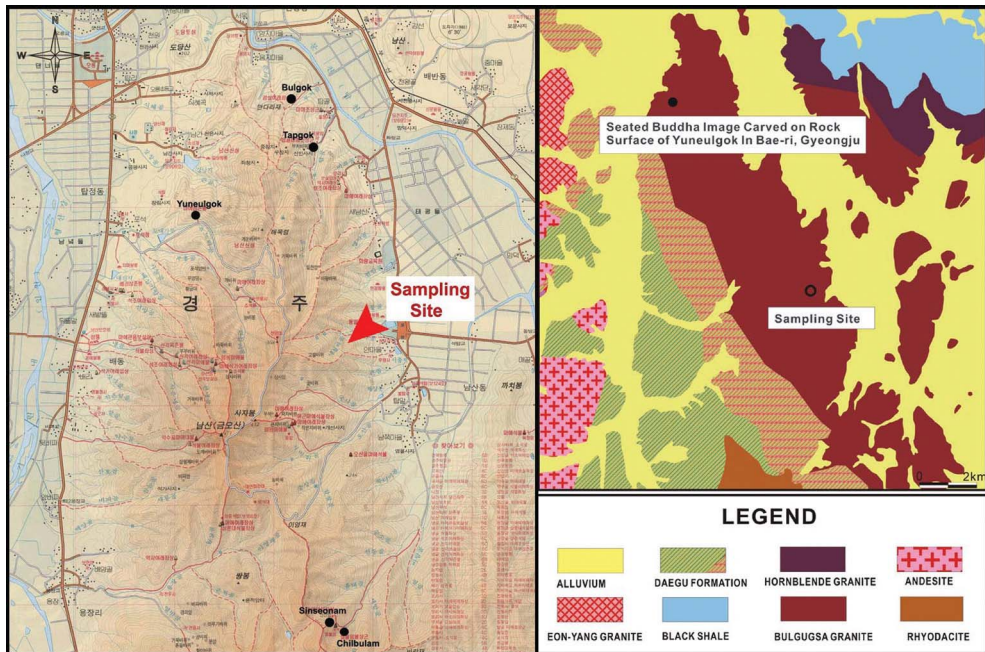


Fig. 2. Location map and geological map of Gyeongju Namsan site.

3. 연구방법

경주 남산에 위치한 마애불의 암석학적인 진단과 풍화훼손평가를 위해 육안관찰을 비롯한 정성 및 정량분석을 실시하였다. 대기환경과 암석에 따른 차별적 풍화가 마애불에 미치는 훼손도와 어떤 상관성이 있는지 암반의 탈락된 시편을 수습하여 화학적 및 물리학적 연구를 시도하였으며, 육안관찰에 의한 풍화훼손지도도 작성하였다. 암반의 반정량적 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위해 실체 및 편광현미경을 사용하였고, 조암광물 동정을 위한 X-선 회절분석기의 전압과 전류 조건은 각각 $CuK\alpha$ 40kV, 30mA이다.

현재의 마애불 풍화상태를 진단하기 위해 풍화훼손지도를 작성하고, Autodesk사의 AutoCAD 2006 프로그램에 의해 훼손면적을 산출하였다. 이에 사용된 Layer는 25개, 풍화양상에 사용된 hatch는 5개이다.

암석의 성인적 해석을 위해 KT-6 (Pocket Susceptibility Meter) 모델의 전압대자율 계측기기를 이용하였고, 지화학분석에 사용된 기기는 X-선 형광분석기(XRF; RIX2100 Model), 유도결합 아르

곤 플라즈마 질량분석기(ICP-AES, ICP-MS), 중성자 활성분석기(INAA)이다. 마애불과 동일한 의상시료에 대해서는 KS규격에 따라 기본물성을 측정하고 ISRM을 근거로 강원대학교에 시료를 의뢰하여 탄성과 속도 및 파괴강도를 측정하였다.

Ⅲ. 경주배리윤을곡마애불좌상의 암석 및 광물학적 특성

1. 암석학적 특징

경주배리윤을곡마애불좌상이 위치한 포석계는 알칼리장석화강암 분포지역으로 우백질의 중립질 또는 조립질 화강암이 나타난다. 타 화강암에 비해 사장석이 적고, 각섬석이 다량 함유되었으며, 미문상 조직과 정동구조가 국부적으로 발달하였다. 표면에서 암맥 및 절리, 균열대가 분포하며 이를 따라 곳

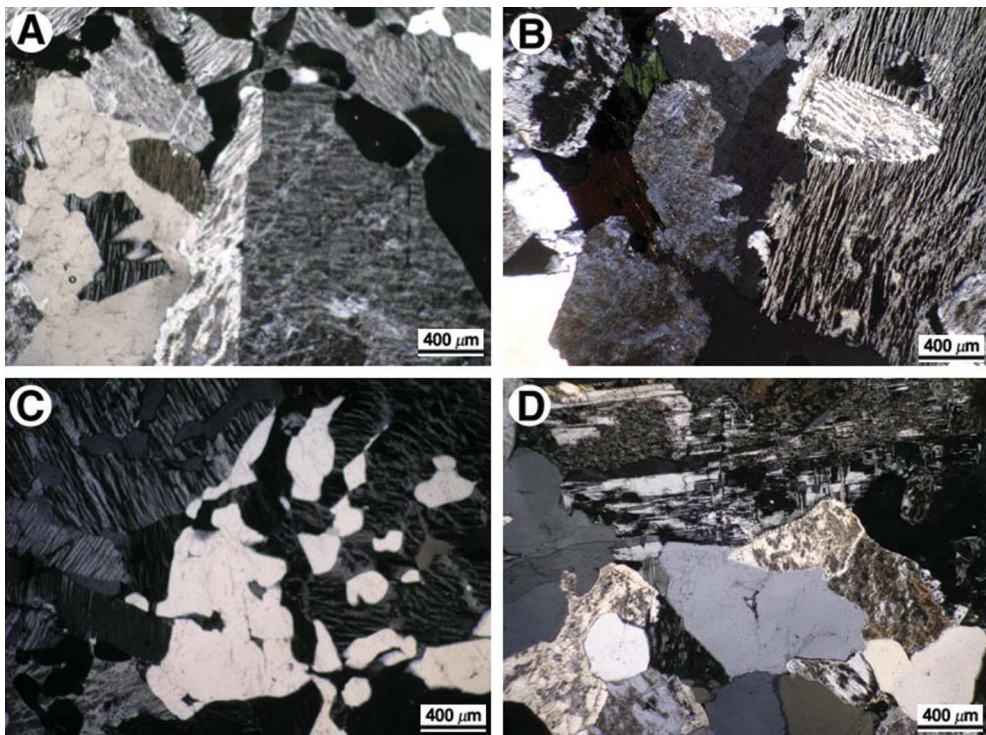


Photo 3. Microphotographs showing rock samples of the alkali-feldspar granite in Namsan.

곳에 갈철석이 침전되어 붉은 얼룩이 나타나기도 한다 (경주남산, 2004). 이 화강암의 구성광물은 주로 알칼리장석, 석영, 펄사이트, 사장석, 흑운모, 각섬석 등이며, 부수적으로 저어콘, 인회석, 자철석 등의 광물이다 (Lee *et al.*, 1995).

편광 현미경 관찰 결과 역시, 경주남산의 석영, 장석, 각섬석 등의 주요광물과 불투명광물인 자철석 등이 함유되어 있는 것을 확인하였다. 알칼리장석이 대부분을 차지하며 쌍정이 발달하였고, 풍화의 영향으로 변질된 펄사이트 광물이 큰 결정으로 곳곳에서 관찰된다. 석영은 파동소광을 하며, 사장석은 풍화로 인해 세리사이트화된 모습이 관찰된다. 흑운모는 녹색에서 갈색에 이르는 다색성을 보이며, 자철석을 포함하고 있는 것도 보인다. 주로 타형이고, 직소광을 한다 (Photo 3).

전암대자율(Magnetic susceptibility)은 외부자기장에 대한 자화강도를 의미하며, 암석학 연구의 한 수단으로 활용되고 있다. 암석에 함유된 불투명 광물로 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량과 정의 상관관계를 가지므로 이를 통해 자철석계열(Magnetite-series)과 티탄철석 계열(Ilmenite-series)을 확인할 수 있다 (Lindsley *et al.*, 1966; Ishihara 1979; Gastil *et al.*, 1966).

이를 이용하여 암석들의 유사성을 최소한으로 접근할 수 있으므로 최근 성인적 환경과 암석학적 동질성을 규명하여 석조유물의 산지추정에도 적용되고 있다 (Uchida *et al.*, 1998; 좌용주 외, 2000; Lee *et al.*, 2003; 2005;).

알칼리장석화강암은 가장 낮은 자화강도와 대자율 값을 보여 상대적으로 자철석 함량이 결핍되어 있음을 알 수 있다 (김인수, 1997). 대부분의 마애불은 평균 $0.17 \sim 0.84 (\times 10^{-3} \text{SI})$ 의 값을, 경주배리 윤을곡마애불좌상은 $0.37 (\times 10^{-3} \text{SI})$ 의 평균값을 보여 전형적인 티탄철석계열 알칼리장석화강암이라는 것을 확인하였다. 그러나 실험에 사용된 암석의 대자율은 평균 $2.45 (\times 10^{-3} \text{SI})$ 의 값으로 다소 높은 값을 지시하는데 (Fig. 3), 경주남산화강암의 대자율 분포대가 $0.25 \sim 6.0$ 의 다소 넓은 분포대를 가지기 때문에, 마애불과 시료로 사용된 암석의 성인이 다르다고는 할 수 없고, 마그마 고결 당시의 산화·환원 환경의 차이라고 생각할 수 있다.

경주남산 화강암 시료와 남산 일원의 석조문화재인 삼릉계곡 마애석가여래좌상, 탑곡마애조상군에서 탈락된 미세시료를 대상으로 X-선 회절분석을 실시하였다 (Fig. 4). 그 결과, 대표적인 광물조성은 석영, 미사장석, 조장석 등이며, 모든 시료에서 구성광물의 함량비는 다소 차이가 있으나 거의 동일한 광물조성을 갖는 것으로 나타났다.

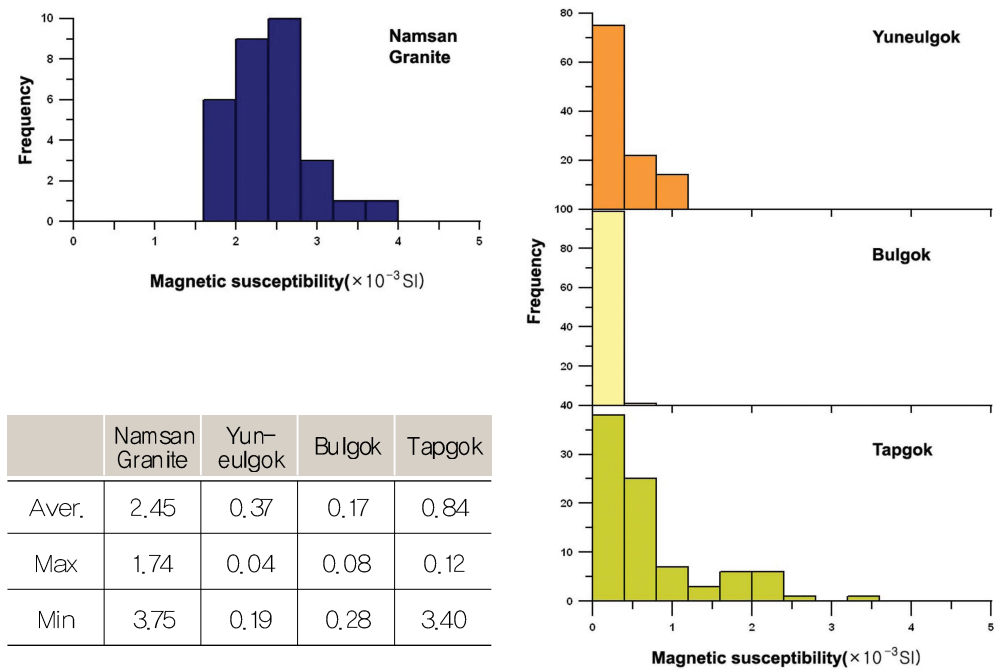


Fig. 3. Diagram showing the Namsan granite magnetic susceptibility.

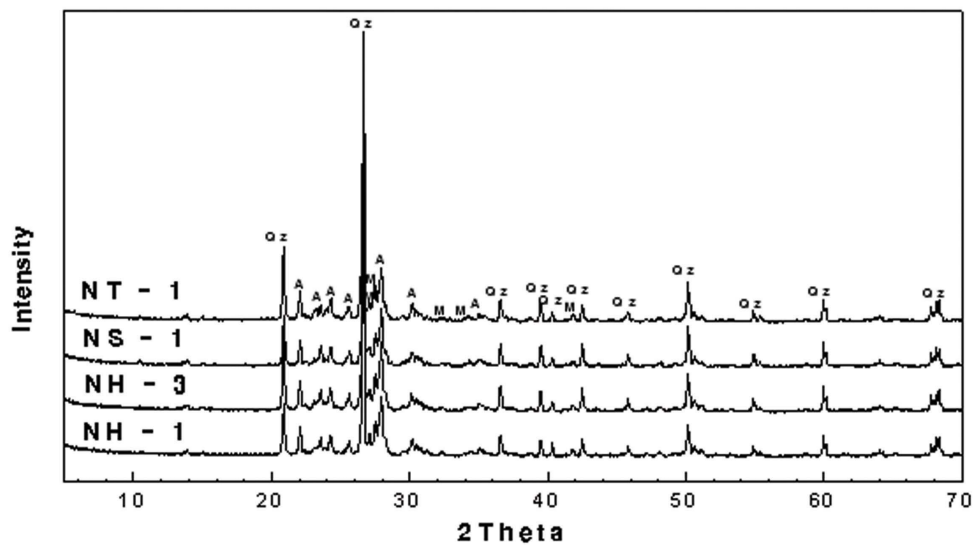


Fig. 4. X-ray diffraction patterns showing host rocks. (Qz : Quartz, M: Microcline, A: Albite)

2. 지구화학적 특징

물성실험에 이용된 의상시료 3점(NH-1, NH-2, NH-3)을 분석하고, 경주남산 석조문화재를 구성하는 암석과의 동질성을 입증하기 위하여 경주남산불곡석불좌상(NB-1), 경주남산탐곡마애조상군(NT-1), 경주배리운을곡마애불좌상(NY-1) 등 각 세 구에서 암편을 채취하여 지구화학적 거동특성을 비교하였다 (Table 1).

주성분에 대한 각각의 조성은 일반적인 화성암의 평균함량(Nockolds and Allen, 1954)으로 표준화하였고 (Fig. 5A), 미량성분은 Govindaraju (Fig. 5B), 희토류원소는 Boynton 이 제시한 운석의 초생치로 표준화하였다. 흔적 화석의 일종인 콘드라이트 운석은 용융이나 분화가 일어나지 않은 태양계 초기 물질의 상태를 가장 잘 보존하고 있어 이에 함유된 희토류 원소의 양은 지구 생성시의 초생값으로 표준역할을 하기 때문이다 (Fig. 5C). 주성분, 미량원소 중 선택된 호정 및 불호정원소 (Compatible · Incompatible elements)에 대해서도 원시의 맨틀조성(Pearce, 1983)으로 표준화하여 거동특성을 검토하였다 (Fig. 5D). 호정과 불호정성의 동일한 경향은 같은 분화과정을 겪은 한 암체임을 시사하는 결정적인 증거이다. 분석 결과, 물성실험 시료와 경주남산에 위치한 문화재와는 주성분, 미량, 희토류 원소들의 거동특성이 비슷한 경향을 보였고, 호정 및 불호정원소의 거동특성 역시 동일하여 같은 분화과정을 겪은 동일암석임을 입증하는 결과이다.

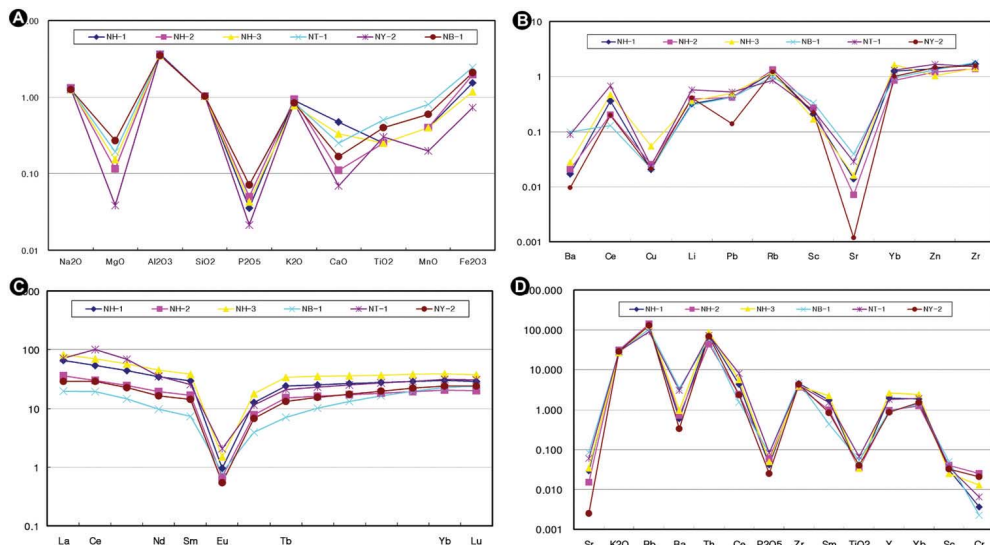


Fig. 5. Diagram showing normalized major element patterns by standard granite.(NH-1, NH-2, NH-3 : Gyeongju Namsan alkali-feldspar granite, NB-1 : Seated Stone Buddha Statue at Bulgok of Namsan, NT-1 : Buddhist Image Carved on Rock Surface at Tapgok of Namsan.)

Table 1. Contents of major (wt.%), minor and rare earth elements (ppm) of the Buddha Monuments in Gyeongju Namsan.

	Namsan Granite			Buddha Monument		
	NH-1	NH-2	NH-3	NT-1	NY-2	NB-1
Na ₂ O	4.61	4.65	4.41	4.40	4.49	4.42
MgO	0.03	0.03	0.04	0.05	0.01	0.07
Al ₂ O ₃	13.60	13.56	13.17	13.23	13.41	13.18
SiO ₂	76.09	75.31	75.67	75.18	75.44	75.99
P ₂ O ₅	0.005	0.007	0.006	0.010	0.003	0.010
K ₂ O	4.62	4.77	3.97	4.36	4.31	4.28
CaO	0.34	0.08	0.24	0.18	0.05	0.12
TiO ₂	0.05	0.05	0.05	0.10	0.06	0.08
MnO	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03
Fe ₂ O ₃	1.20	1.53	0.92	1.91	0.57	1.64
LOI	0.43	0.38	0.34	0.22	0.43	0.31
Sum	101.00	100.01	98.84	99.68	98.78	100.13
Ba	11.9	14.5	19.5	61.7	6.7	69.8
Mg	122	71.9	111	231.0	30.5	281
Mn	123.5	116.7	158.3	268.0	36.2	179.7
Sr	3.6	1.8	4.1	7.2	0.3	10.0
Ti	221	238	220	500	273	368
Cr	0.92	6.34	3.25	1.63	5.18	0.56
Li	16.67	20.07	18.81	29.91	21.16	15.78
P	21.7	29.4	25.2	44.0	11.5	43.2
S	161	150	238	115	154	172
Zr	414.7	336.4	352.4	374.5	389.9	438.4
Co	131	141	157	104	113	126
Ni	0.64	0.64	1.07	0.69	0.43	0.67
Cu	0.64	0.78	1.70	0.74	0.65	0.66
Zn	98.1	85.3	73.2	118	103	95.2
Pb	16.6	16.2	19.4	20.3	5.41	16.2
Rb	254	286	259	182	259	210

	Namsan Granite			Buddha Monument		
	NH-1	NH-2	NH-3	NT-1	NY-2	NB-1
Y	58.7	28.6	79.5	54.4	25.7	27.6
Sn	7.21	7.02	6.47	5.08	7.20	5.83
Sb	0.20	0.20	0.17	0.53	0.13	0.19
Cs	2.35	1.71	1.66	1.14	1.30	1.95
La	20.3	11.2	25.6	21.9	9.01	6.15
Ce	43.1	24.3	56.1	81.3	23.5	15.5
Nd	20.8	11.6	26.9	21.2	9.79	5.80
Sm	5.70	3.25	7.46	5.01	2.77	1.43
Eu	0.07	0.05	0.11	0.15	0.04	0.06
Tb	1.14	0.71	1.61	0.99	0.62	0.33
Yb	6.26	4.25	8.14	6.51	5.06	4.74
Lu	0.93	0.65	1.20	0.98	0.78	0.77

IV. 재질의 물성 및 풍화도 진단

연구대상인 마애불은 그 특성 상 높고 낮은 돌을 새김이나 선각기법으로 조성하여 역사학적 및 미술사학적 특징을 전달해야 하므로 특히 풍화의 영향이 적어야 한다. 앞서 풍화훼손지도를 작성하여 훼손도에 대한 평가도 시도하였지만, 육안등급으로 제한되므로 좀 더 구체적인 정량평가를 위해 화학적 지수와 물리적 풍화등급을 알아보고자 한다.

1. 화학적 풍화지수

마애불을 이루는 암석과 경주남산 화강암의 화학적 풍화지수(CIA; chemical index of alteration)와 풍화잠재지수(WPI; weathering potential index)는 Table 2 와 같다.

화학적 풍화지수는 복합적인 훼손요인이 상호작용을 통해 구성성분을 파괴하므로 화강암류 암석에

대해 풍화등급을 결정짓는 지수로 활용될 수 있다. 이는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 것으로 50을 기준으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다 (Nesbitt and Young, 1954).

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

풍화잠재지수는 광물이나 암석이 풍화작용에 대한 민감성 정도를 표현한 것으로 물을 제외하고, 전체 물수에 대한 알칼리와 알칼리토류의 몰%로 나타낸다. 신선한 암석이 풍화를 받아 변질광물이 생겨나면서 양이온의 함량이 줄고, 수산화물의 함량이 증가하는 것에 착안되어 만들어진 이 지수는 0의 값을 기준으로 음의 값이 양의 값보다 화학적 풍화작용에 민감하다는 것을 의미한다 (남기상, 1993).

$$WPI = [(CaO + Na_2O + K_2O + MgO - H_2O) / (SiO_2 + (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + CaO + Na_2O + K_2O))]$$

경주남산의 화강암과 마애불을 이루는 화강암은 모두 CIA가 약 50.74~52.48, WPI가 약 6.32~7.23로 산출되어 현재 풍화가 진행된 상태이나, 풍화잠재능력은 크지 않다는 사실을 확인하였다 (Table 2).

Table 2. Chemical Index of Alteration and Weathering Potential Index of granite.

	Namsan Granite			Buddha Monument		
	NH-1	NH-2	NH-3	NT-1	NY-2	NB-1
CIA	50.74	51.14	52.35	51.85	52.48	52.09
WPI	6.92	7.00	6.59	7.23	6.32	6.78

2. 물리적 풍화지수

석조문화재 구성암석의 비파괴적 훼손진단방법은 많이 시도되고 있지만, 직접 재질의 풍화정도 평가나 풍화에 따른 강도특성 규명 실험 등은 성형을 해야 한다는 단점이 있어 불가능하였다. 그러므로 마애불과 같은 암체에서 채취된 시료를 대상으로 입방체를 제작하여 물리적 성질을 파악하고 이를 기초로 공학적 물성을 예측하려 한다. 측정된 물성은 비중, 흡수율, 공극률, 압축강도, 인장강도, 탄성파

속도, 탄성계수 및 포아송비, Slake durability 이다.

경주남산의 마애불에 사용된 알칼리장석화강암이 어느 정도의 풍화특성을 지닌 암석인지 고려하기 위하여 풍화도 분류기준과 비교하였다. 암석 물성의 분류 기준으로 밀도는 강승철(1985), 흡수율은 Irfan과 Dearman(1978)이 제안한 값을 따르고, P파속도와 풍화도지수는 Illiev(1967), 압축강도는 IAEG Anon(1979), Slake durability는 Gamble의 강도 분류기준을 채택하였다. 그 결과 5단계로 분류되었으며, 이들 간의 상호연관성을 살펴보고자 한다 (Table 3).

Table 3. Classification of weathering degrees according to standard value.

	Density	Water Absorption (%)	P-Wave Velocity (m/s)	κ (Weathering coefficient)	Uni. Comp. Strength (MPa)
Fresh (F)	> 2.60	< 0.2	> 5000	0	> 230
Slightly Weathered (SW)	> 2.53	0.2~1.0	5000~4000	0~0.2	> 120
Moderately Weathered (MW)	> 2.49	1.0~2.0	4000~3000	0.2~0.4	> 50
Highly Weathered (HW)	> 2.00	2.0~10	3000~2000	0.4~0.6	> 15
Completely Weathered (CW)	< 2.00	> 10	< 2000	0.6~1.0	< 15

남산에서 채취한 알칼리장석화강암 20개를 대상으로 기본 물성을 측정하고, 파괴강도 측정은 각 5개로 한정하여 일축압축강도와 인장강도, 탄성파속도 및 포아송비, 탄성계수 등을 측정하였다.

암석의 비중은 시료의 중량과 동일체적의 물의 질량과의 비로서 겉보기 비중을 의미한다. 경주남산 화강암의 평균 비중은 2.54로서 일반적인 화강암의 비중에 크게 벗어나지 않으며, 이는 Table 3에서 비교된 바에 따르면 약간 풍화된 암석(SW)에 해당된다.

흡수율은 시료 내 수분이 침투하여 포화상태일 때의 함유수분의 중량(wt.%)의 백분율을 말하는 것으로, 시료 내에 존재하는 공극과 밀접한 관계를 가진다. 따라서 시료 내 입자 간 공극, 미세균열 등에 흡수되는 모든 수분의 함량이 측정되어 시료의 역학적 성질 중 가장 우선적으로 고려되어야 할 기초 물성이다. 따라서 이는 공극률과 정의 상관관계, 비중과 부의 상관관계, 비중과 부의 상관관계를 가진다. 흡수율은 평균 1.38%를 기록하여 보통 풍화된 암석(MW)에 해당된다.

공극률은 시료의 전 공극의 체적과 공극을 포함한 전체 적과의 백분율이다. 풍화가 심화될수록 차별적으로 형성된 조암광물의 용식구조에 의해 그 범위와 평균값이 뚜렷이 증가한다. 알칼리장석화강암의 평균 공극률은 3.50%로 비중과는 부의 상관관계를, 흡수율과는 뚜렷한 정의 상관관계를 가져 공극률이 클수록 함수 능력이 증가한다는 사실을 확인할 수 있다.

탄성과 속도는 물성에 관한 중요한 정보 요소 중의 하나로서, 암석입자자체의 성질과 내부의 불연속면 분포 및 입자 결합상태를 간접적으로 반영하므로 물질의 변형특성은 물질내부로 전파되는 초음파 속도에 의해 결정될 수 있다 (Kolsky, H., 1953). P파와 S파 속도는 각각 평균 2371.54m/s, 1604.53m/s를 기록하였으므로 Table 3의 풍화등급표에 적용해보았을 때, 심한 풍화가 진행된 4등급(HW)에 해당하였다. 이는 다른 물성에 비해 풍화율이 다소 높게 나타났는데, 이는 암석 내부의 입자간 공극이나 미세균열 등에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

강도 값으로 산출되는 탄성계수는 외력작용에 대한 석재의 변화도를 나타내는 것으로 풍화가 진행됨에 따라 감소하며, 포와송비는 공시체에 압축응력을 가할 때 신장률에 대한 수축률의 비로서 풍화가 심화되면서 증가한다.

파괴가 수반되는 일축압축강도와 간접인장강도는 각각 5개의 시편만을 이용하여 실험하였는데 그 결과, 일축압축강도는 약 121.77~148.63 MPa 로 건설표준품셈에서 암석의 강도로써 구분하였을 때, 보통암(Ⅲ등급)에서 경암(Ⅱ등급)에 해당하는 암석임을 알 수 있다. 또한 간접인장강도는 5.1~6.4 MPa를 기록하였는데, 신선한 암석의 간접인장강도가 약 5.3~8.5 MPa의 범위를 나타낸다고 보았을 때, 본 시험편의 결과 값은 비교적 신선한 암석에 해당함을 확인하였다.

Slaking durability는 암석이 건조 상태에서 일정한 강도와 결합력을 유지하고 있다가 물과 접촉하게 되면 급격한 풍화가 가속되고, 입자가 분해되는 양상을 의미한다. 이는 모암으로부터 입자가 분

Table 4. Gamble's slake durability classification (Goodman, 1980).

Group Name	% Retained after One 10-min Cycle (Dry Weight Basis)	% Retained after Two 10-min Cycle (Dry Weight Basis)
Very high durability	>99	>98
High durability	98~99	95~98
Medium high durability	95~98	85~95
Medium durability	85~95	60~85
Low durability	60~85	30~60
Very low durability	< 60	< 30
Namsan Granite	99.17	99.60

해되는 과정이 기계적 풍화의 의미와 잘 부합되어 외기에 노출된 암석의 풍화를 설명하는데 중요한 요소이다. 암석의 내구성은 밀도에 비례하고, 함수비에 반비례한다. 경주 남산 알칼리장석화강암의 경우, 99.17~99.60의 비교적 높은 내구성을 지니는 암석으로 평가할 수 있다 (Table 4).

Table 5는 경주남산 알칼리장석화강암 물성의 평균과 최고, 최저값을 정리한 표이며, 이를 바탕으로 Fig 6, box plot으로 도시하였다.

Table 5. Physical properties of the Namsan alkali-feldspar granite.

	Specific Gravity	Porosity (%)	Water Absorption (%)	Ultrasonic Velocity (m/s)		Uni. Comp. Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
				P wave	S wave				
Average	2.54	3.50	1.38	2371.54	1604.53	135.64	5.8	34.48	0.27
Max	2.55	3.89	1.54	2551.65	1728.47	148.63	6.4	45.74	0.37
Min	2.54	3.13	1.23	2193.31	1381.73	121.77	5.1	28.10	0.20

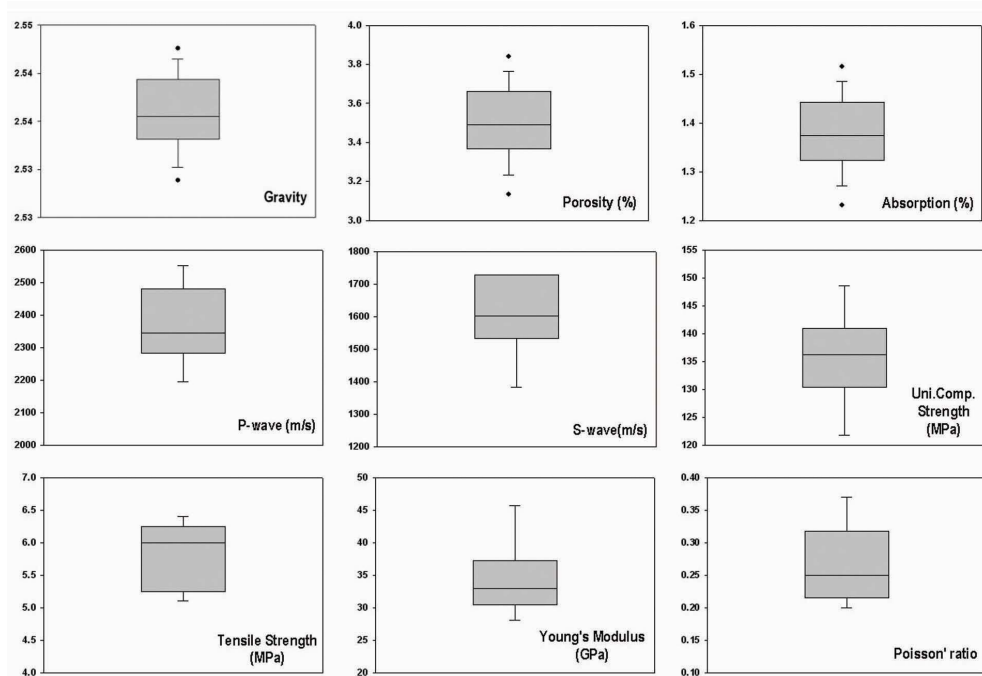


Fig. 6. Physical properties are showed on box plot. (A) Porosity(%), (B) Absorption(%) (C) Compressed Strength(MPa), (D) P-wave velocity(m/s) (E) Poisson's ratio (F) Young' modulus(GPa)

알칼리장석화강암의 물리적·역학적 특성들 간의 연관성을 규명하기 위해 상관계수를 구하였다. Table 6은 물성 요소 각각에 의해 계산된 물리적 상관도를 나타내는 표로써, 빨간 글씨는 부의 상관관계를, 파란글씨는 정의 상관관계를 의미하며, 1에 가까울수록 상관도가 높다고 평가할 수 있다. 공극률과 흡수율은 비중과 비교하였을 때 비교적 높은 부의 상관도(-0.87)를 보이며, 압축강도와는 조금 낮은 부의 상관도(-0.62)를 보인다. 포와송비는 압축강도 및 P-wave 와 미약하나마 정의 상관관계를 보인다.

Table 6. Physical correlation table of calculated to proportional factors
(Red : (-) correlation, Blue : (+) correlation).

	Specific Gravity	Porosity (%)	Absorption (%)	P-wave (m/s)	S-wave (m/s)	Compressed Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Specific Gravity	1.00	-0.86	-0.87	0.34	0.30	0.32	0.14	-0.17
Porosity (%)		1.00	1.00	-0.50	-0.44	-0.62	-0.12	-0.32
Absorption (%)			1.00	-0.49	-0.43	-0.61	-0.12	-0.30
P-wave				1.00	0.93	0.11	-0.48	0.58
S-wave					1.00	-0.01	-0.27	0.49
Compressed Strength (MPa)						1.00	0.28	0.68
Young's Modulus (GPa)							1.00	-0.28
Poisson's Ratio								1.00

V. 결론

1. 경주시 남산에 분포하는 마애불 가운데 경주배리윤을곡마애불좌상을 대상으로 풍화훼손지도를 작성하여 훼손도를 정밀조사한 결과, 마애불 2구가 새겨진 암반은 물리적 풍화 0.5%, 변색 24.4%, 생물학적 피해 12.3% 범위를 보이며, 마애불 1구가 새겨진 암반은 물리적 풍화 5.6%, 변색 45.0%, 생물학적 피해 14.1% 범위를 보인다.
2. 경주 남산의 알칼리장석화강암은 그 지역의 마애불과 비교하였을 때, 동일한 광물 형태를 보이며, 전암대자율과 지구화학적 특성 또한 일치하는 결과를 나타내었다.
3. 화학적 풍화지수(CIA)는 약 50.74~52.48, 풍화잠재지수(WPI)는 약 6.32~7.23로 산출되어 현재 풍화가 진행된 상태이나, 풍화잠재능력은 크지 않다는 사실을 확인하였다.
4. 물리적 풍화등급을 살펴보기 위해 비중, 공극률, 흡수율, 탄성파, 일축압축강도, 인장강도, Slake durability 등을 구하였을 때, 육안등급과 비슷한 2~3등급의 보통 풍화된 암석(MW)에 해당하였다. 그러나 탄성파속도는 4등급의 비교적 심한 풍화등급에 해당되어 풍화에 가장 민감하게 반응하는 물성이었다.
5. 암석의 물성간의 상관성을 나타내었을 때, 공극률과 흡수율, 비중이 비교적 높은 상관도를 보였다.

참고문헌

1. 강승철 등, 1985, 풍화화강암의 물리적, 암석학적 및 지구화학적 특성. 대한광산학회지, 22권 5호, 339~352.
2. 김영택, 이찬희, 이명성, 2005, 부여 정립사지 오층석탑의 보존과학적 풍화훼손도 평가. 자원환경지질 38, 675~687.
3. 남기상, 1975, 전북 전주지역 화강암 및 남산지역 화강암의 풍화에 따른 화학조성의 변화와 주요 원소의 상대적 이동. 광산지질 8권 4호, 211~222.
4. 2004, 경주문화재연구소, 경주시, 경주남산 정밀학술조사보고서.
5. 김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김정진, 백인성, 1997, 경주-울산일원에 대한 지역지질 특성 연구: 울산단층주변 화강암류의 전류자기와 대자율. 자원환경지질학회지, 31~43.
6. 이부경, 1990, 韓國産 花崗巖類 石材의 耐久性과 關聯된 指示物性의 特性研究. 尙志大 論文集 第11輯.
7. 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20권 1호, 80~95.
8. 이태호, 이정화, 한국의 마애불. 2002, 도서출판 다른세상, 104~109.
9. 최성은, 2004, 석불 · 마애불. 예경, 194~197.
10. 홍세선, 2004, 국내 중생대 화강암의 대자율 특성과 화학조성, 암석학회지.
11. Anon, 1979, Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Bull. Inst. Ass. Eng. Geol., No19, 364~371.
12. Deer & et al., 1966, Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Tect. Rep. No. AFWL-TR, 65~116.
13. Irfan & et al., 1978, Engineering Classification and index properties of weathered granite. Bull. Unst. Ass. Eng.Geol., No.17, 79~90.
14. Kolsky H., 1953, Stress waves in solids Clarendon Press, Oxford, 211.