

영주가흥리마애삼존불상 지반암석강화를 위한 보존처리방안 연구

도진영, 김수진*, 정기영**

경주대 문화재학부

* 석조문화재보존과학연구회

* 안동대 지질환경과학과

Study of conservation measures for consolidation of ground rock
in Yeongjugaheungnimaesaesamjonbulsang (Buddhist triad statues
carved on rock surface in Gaheung-ri, Yeongju)

Jinyoung Do, Sujin Kim*, Giyoung Chung**

*School of Cultural Assets, Gyeongju University, Hyohyun-dong Gyeongju Gyeongbuk
780-210*

** Stone Conservation Science Laboratory, Banpo Socho Seoul 137-813*

*** Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong University, Andong Gyeongbuk
780-210*

1. 서언

영주가흥리마애삼존불상의 지반암석은 심하게 풍화되어 있어서 암석의 강도가 크게 약화되어 있을 뿐만 아니라 구조적으로도 불안정한 상태에 놓여 있어서 특히 급경사 부위 뿐만 아니라 암반 전체의 안정성이 크게 우려되고 있다. 영주가흥리마애삼존불상(이하 삼존불상)의 지반의 이와 같은 안전 취약성을 해소하여 이를 오랫동안 보존하기 위해서는 구조적 안정화 시공을 해야 할 뿐만 아니라 동시에 암석 재질 강화를 통한 보존처리 시공도 필요하다.

삼존불상의 지반암석의 재질을 강화하고 또 풍화를 방지하기 위해서는 안전 취약부위에 대한 보존처리가 필요하다. 삼존불상 지반암석을 보존처리하기 위해서는 지반암석의 풍화상태와 물성에 대한 연구가 선행되고 그 결과에 따라 보존처리 방안이 수립되어야 한다. 그래서 2003년 여름에 폭우로 인하여 붕락된 암괴 중에서 풍화표면이

잘 보존되어 있는 것 3 개를 선택하여 표면으로부터 내부로 향하여 4 공의 시추를 실시하여 코아를 획득하였으며 이들 시료에 대하여 체계적으로 풍화상태 및 물성을 분석하여 보존처리 방안을 도출하였다.

2. 연구대상 시추코아

연구에 사용된 시추코아는 모두 4 개로서 그 규모는 표1과 같다. 코아번호 C1은 10mm 표면부위의 풍화상태가 심하여 시추 중 낮은 강도로 인하여 파쇄되어 유실되어 이 부위의 분석에 필요한 시료를 얻을 수 없었기 때문에 이에 대한 대체시료를 얻기 위하여 C1에서 30mm 떨어져 있지만 C1과 유사한 풍화양상을 보여주는 지점에서 보조적으로 시추를 실시하여 코아번호 C2를 획득하였다

표1. 연구에 사용된 영주가흥리마애삼존불상 주변암석에서 시추한 코아시료.

시료명	직경	길이
코아번호 A (A-1, A-2, A-3)	52 mm	300 mm (0-100, 100-200, 200-300mm)
코아번호 B (B-1, B-2, B-3)	52 mm	340 mm (0-100, 100-200, 200-300mm)
코아번호 C1 (C1-1, C1-2, C1-3)	52 mm	325 mm (0-100, 100-200, 200-300mm)
코아번호 C2	52 mm	110 mm

3. 실험 내용

시추코아에 대하여 다음과 같은 사항을 분석하였다.

- (1) 풍화 깊이
- (2) 깊이에 따른 암석의 광물조성 변화
- (3) 깊이에 따른 암석의 조직 변화
- (4) 깊이에 따른 암석의 물성 변화
- (5) 깊이에 따른 암석의 수용성 염성분 변화

4. 분석 결과

1) 풍화 깊이

코아 단면에서 볼 수 있듯이 코아의 노출된 표면에 가까운 상위 5cm 정도의 구간은 아래 구간보다 연황색의 색상이 강하고, 균열들이 많이 분포하고 있다. 따라서 표면에 가까울수록 암석은 쉽게 부스러지는 경향이 있으며 벌어진 균열들 사이로 침투한 토양수로부터 침전한 침철석 등의 산화철광물들 때문에 연황색을 띤다. 상위 1cm 구간은 대단히 심하게 풍화되어 있고 2-5cm 간은 심하게 풍화되어 있다.

2) 깊이에 따른 암석의 광물조성 변화

4개의 화강암 코아시료에 대하여 깊이별로 전암분말시료의 XRD 분석을 실시한 결과, 대부분 석영, 사장석, K-장석, 흑운모로 구성되어 있었다. 그러나 코아의 깊이별 체계적인 광물조성의 변화는 관찰되지 않았다. 부분적으로 석영, K-장석, 사장석 회절선 강도의 변화가 관찰되기는 하지만 체계성이 없다. 이는 XRD용 조립질 시료 분말의 대표성을 보증할 만큼 코아로부터 분리한 시료의 크기가 크지 않기 때문이며, 풍화작용으로 인한 양적 변화는 아니다. 국내 화강암 풍화단면의 연구에 의하면, K-장석이나 석영은 거의 풍화작용을 겪지 않는 반면에 사장석과 흑운모는 초기부터 풍화에 비교적 민감한 것으로 알려져 있다. 이번 코아시료의 경우, 사장석과 흑운모의 경우에도 풍화도에 따라 양적인 변화가 크지 않은데 이는 암석의 화학적 풍화가 매우 초기단계에 있음을 지시한다. 그러나 화학적 풍화작용이 초기단계이긴 하지만 균열의 발달과 같은 물리적 풍화작용은 활발히 일어나고 있다. 즉, 코아 단면의 육안관찰과 편광현미경관찰에서 표면층에 가까울수록 균열이 많아지고, 연황색 색상이 강해지는 특성으로 보아 풍화가 진행되고는 있으나, 아직 XRD 분석에서 검출될 정도의 양은 생성되지 않은 듯하다. 즉 풍화산물이 생성되지 않은 것이 아니라 그 양이 작기 때문에 XRD 분석에서 나타나지 않는 것이다. 모달분석에 의하면 암석은 사장석 42vol%, 석영 31vol%, K장석 16vol%, 흑운모 11vol%로 구성되어 있어서 암석학적으로 엄밀히 분류하면 화강섬록암이다.

3) 깊이에 따른 암석의 조직 변화

XRD 분석과 동일한 암석 시편의 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 관찰결과 XRD 분석에서 확인된 바와 같이, 석영, 사장석, K-장석, 흑운모 등이 주요 구성광물이며, K-장석은 주로 정장석과 미사장석이다. 그 외 녹염석이 소량 함유되어 있다. 사장석은 흔히 큰 반정으로 산출된다. 사장석은 부분적으로 열수변질작용에 의

하여 건운모로 변질되어 있으나, K-장석과 석영의 변질작용은 관찰되지 않았다. 흑운모도 부분적으로 녹염석이나 조이사이트로 열수변질되었다. 전체적으로 균열들이 발달되어 있으나 표면 시료일수록 보다 많은 균열들이 발달되어 있으며, 이들의 틈도 보다 많이 벌어져 있다. 석영의 혼한 파동소광현상은 화강암이 상당한 변형작용을 겪었음을 지시한다.

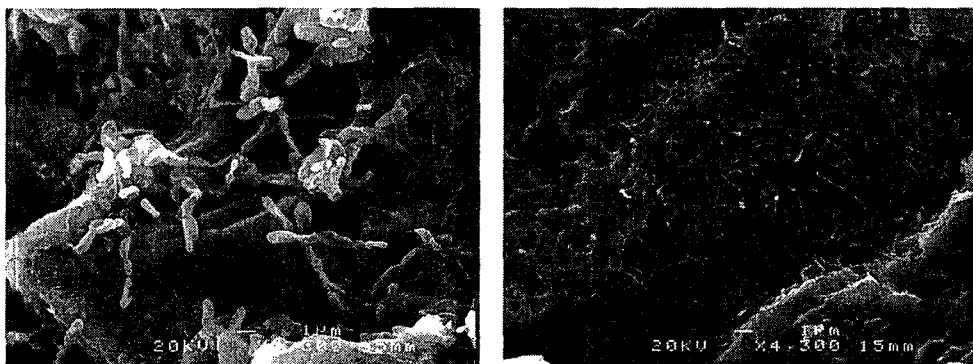
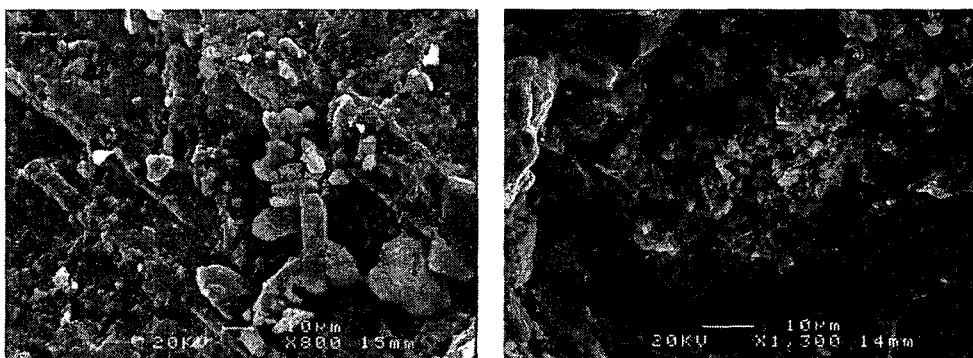


그림 1. 코아 C1의 1 cm 시편에서 장석의 균열을 따라 자라고 있는 토양 미생물들



(a) 건운모로 변질된 사장석

(b) 건운모와 K-장석의 집합체

그림 2. 코아 C1의 30 cm 시편의 전자현미경사진

화강암의 균열들은 화강암이 풍화되기 전에 암석의 변형작용으로 원래 존재하던 것으로, 화강암이 지표 가까이 노출되고 지반의 하중이 감소하면서 벌어진 것으로 판단된다. 이들 균열은 지표수의 주요 침입 통로이자 고령토 등의 이차 광물의 성장 및 토양 미생물체의 번식 장소로서 균열은 코아 표면에 가까울수록 더욱더 벌어지게 된다. 표면의 박리된 시료의 관찰에 의하면 벌어진 틈새로 토양수에 의하여 운반된 연

황색 점토광물들의 집합체들이 침전되어 있고, 사장석의 초기 용식작용이 관찰된다. XRD 분석에서는 풍화기원 이차광물의 존재가 잘 드러나지 않지만, 주사전자현미경(SEM)을 이용한 표면 암석시편의 미시적 관찰에서 육안적으로는 잘 관찰되지 않는 화학적 및 생물학적 풍화작용이 진행되고 있음이 확인된다. 벌어진 광물내 균열을 따라 토양 미생물의 균사들이 자라고 있거나, 광물표면이 고령토질 점토광물로 피복되어 있다. 그러나 비교적 깊은 곳의 신선한 암석시편의 관찰에 의하면 견운모화한 사장석, 신선한 석영, K-장석, 흑운모들이 관찰되었다. 사장석의 견운모화작용은 심부 열수변질작용에 의한 것으로서 풍화작용과는 관계가 없다.

4) 깊이에 따른 암석의 물성 변화

(1) 공극율

암석의 공극율은 DIN 52102 측정법을 따라 측정하였다(그림 4). 삼존불상 주변암석 시료들의 공극율은 5.41-9.30 vol%로 측정되어 시료에 따라 약간의 편차를 보였다. A 시료는 6.57-9.30 vol%, B 시료는 7.42-8.64 vol%, C1 시료는 5.41-5.78 vol% 및 C2 시료는 5.59 vol%를 보임으로서 시료의 채취위치에 따라 공극율의 차이가 나타났다. 코아 시편 자체 내의 깊이에 따른 변화를 살펴보면 안쪽에서보다 표면쪽에서 약간 더 큰 값으로 측정되어, 표면으로부터 10cm 까지 공극이 발달된 것을 알 수 있다. A-1 시료, C1-1 시료는 코아내부의 A-2, A-3, C1-2, C1-3보다 큰 공극율을 보였으나, B-1의 경우는 내부의 B-2, B-3보다 오히려 낮은 공극율을 나타내었다(그림 4).

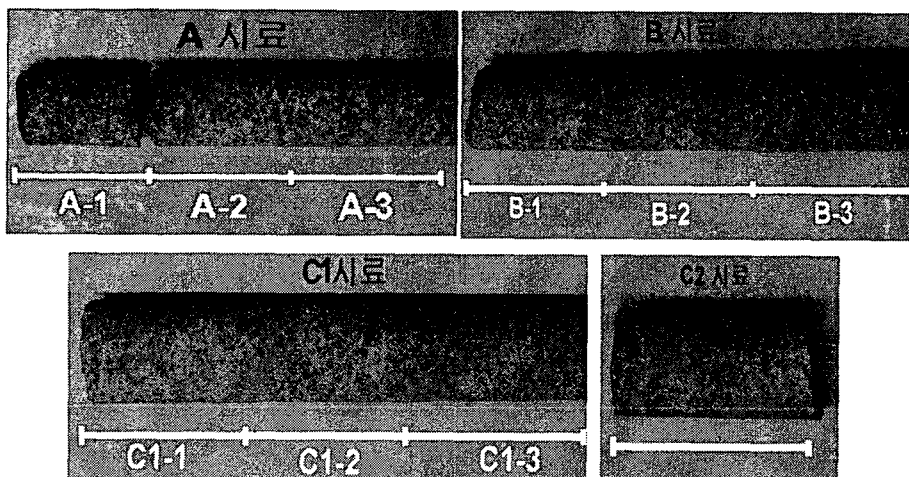


그림 3. 영주가흥리마애삼존불상 시추코아 시료와 물성분석에 이용된 부위

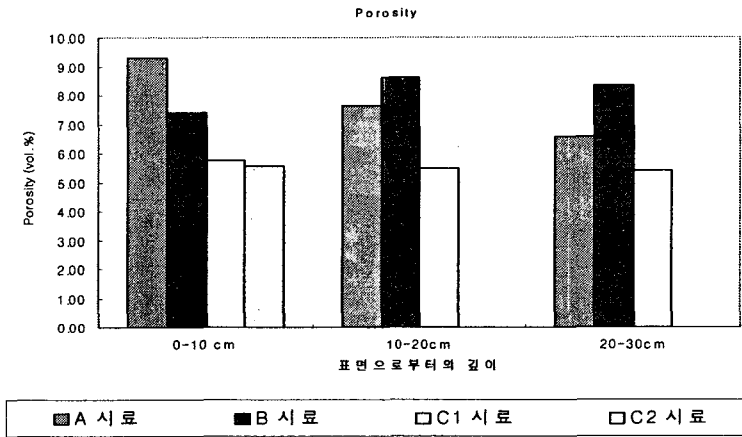


그림 4. 영주가흥리마애삼존불상 시료의 공극율 (vol.%)

B시료는 전체의 공극율이 모두 높게 측정되어, 풍화의 영향이 아닌 암석자체의 성질로 이와 같은 결과를 보인 듯 하다. C1, C2 시료의 인접한 채취위치로 인한 결과인지, 두 코아시료는 전부위를 통해 유사한 공극율을 나타내고 있다.

(2) 물흡수율

① 총물흡수율

총물흡수량은 암석이 총체적으로 물을 함유할 수 있는 양으로, DIN 52103 법에 따라 측정하였다. 측정한 모든 시료는 시료에 따라 약간의 차이는 있지만 1.67-2.80%로, 3% 이하의 총물흡수율을 나타냈다. A시료와 C시료의 깊이에 따른 총물흡수율은 시추코아시료의 내부에서보다 표면에서 높게 나와 위의 공극율의 결과와 유사한 결과를 보이고 있다(그림 5). B시료는 내부부위에서 표면부위보다 높은 총물흡수율을 보였다. 이도 위의 공극율 결과와 유사한 것으로 해석된다. C2 시료는 C1-3, 즉 C1시료의 내부 20-30cm에 이르는 부위의 결과와 더욱 비슷한 값으로 측정되었으나, 전반적으로 C1 시료와 유사한 총물흡수율을 보이고 있다고 할 수 있다.

② 모세관 물흡수량 및 계수[w : 모세관 물흡수계수 $kg/(m^2t^{1/2})$]

삼존불상 주변 암석은 비, 눈, 수증기 등 수분의 흡착, 증발, 모세관 응축에 의해 항

상 습기를 함유하고 있다. 시추코아 시료를 표면으로부터 10cm씩 나눈 후, 그 단면으로부터 흡수되는 수분의 이동 상황을 관찰하였다. 깊이에 따른 모세관물흡수율은 총물흡수율과는 다른 경향을 보이고 있다. 삼존불상 코아시료의 모세관물흡수율을 비교한 그림 6을 살펴보면, 모든 시료에서 풍화된 표면의 모세관을 따라 흡수되는 수분의 양이 내부 10cm, 20cm 표면적을 따라 올라가는 물의 양에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

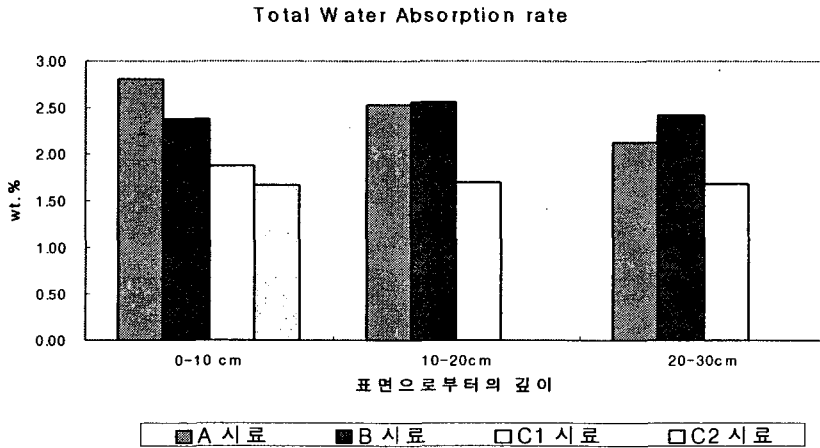


그림 5. 영주가흥리마애삼존불상 시료의 총물흡수율 비교 (wt.%)

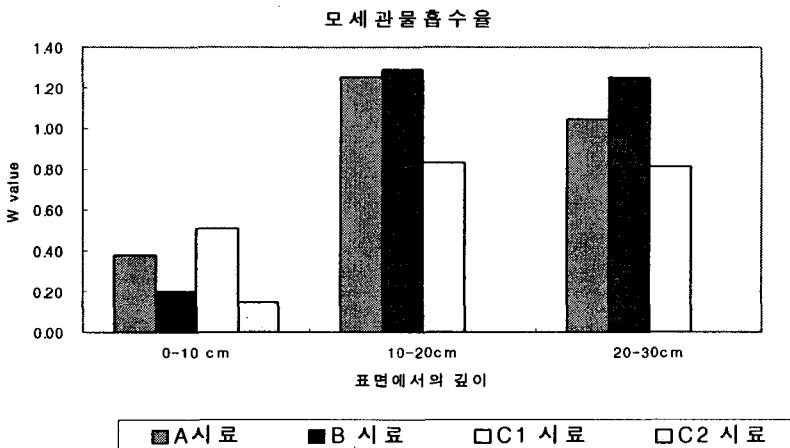


그림 6. 영주가흥리마애삼존불상 코아시료의 모세관물흡수율 비교

이는 자연환경에 드러난 암석표면의 공극이 풍화된 물질이라든지, 미생물 및 먼지 등의 이물질에 의해 막혀 있기 때문에 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 생각되며, 상대적으로 표면에 비해 신선한 코아의 옆면으로 물이 흡수되는 총물흡수량과는 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 특히 A시료의 결과를 살펴보면 높은 총물흡수량을 보인 A-1의 모세관물흡수율은 내부에 비해 3배정도 적은 값을 보여, 표면 근처에 있는 공극이 이물질에 의해 채워져 있음을 알 수 있다. C1-1의 모세관물흡수값이 다른 A-1, B-1, C2에 비해 높게 측정된 것은 풍화된 단면이 1cm 떨어져나간 부위에서 시작했기 때문으로 생각된다. C시료의 모세관물흡수율은 전부위에서 A시료나 B시료에 비해 상대적으로 낮은 값을 보여줌으로서, 물을 흡수할 수 있는 모세관이 잘 형성되어 있지 못한 것으로 생각된다. 육안으로도 이물질이 표면을 덮고 있음이 쉽게 관찰되는 C2시료는 $0.15 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{t}^{1/2})$ 로 측정된 시료 중 가장 작은 모세관물흡수율값을 나타내었다(그림 6). 강수에 의해 암석표면이 젖는 경우, 특히 흘러내리지 못하고 고여 있는 경우에는 오랜시간동안 암석표면의 모세관을 따라 암석의 내부로 수분이 스며들어갈 수 있으며, 내부에 잘 형성된 모세관은 일정한 깊이를 통과한 수분을 암석의 깊은 곳까지 끌어들이게 된다. 이러한 결과는 암석표면의 강화처리시에 매우 신중해야함을 암시한다. 즉 표면에 붓이라든지 스프레이로 도포하여 강화제를 처리할 때에는 표면의 모세관물흡수율이 내부보다 낮음을 고려하여, 표면의 이물질들을 제거한 후 처리하여만 강화제가 내부로 충분히 들어갈 수 있다.

5) 깊이에 따른 암석의 수용성 염성분 변화

일반적으로 풍화된 암석의 표면에는 수용성 염들이 생성되어 있다. 삼존불상과 유사한 주변암석들에서 이들 염에 의한 역학적 풍화 잠재성을 관찰하기 위하여 암석 내에 함유된 염류를 분석하였다. 증류수 50ml에 분말시료 0.25g을 넣고 8시간 동안 방치한 후 용출된 이온은 Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 K^+ 로 시료에 따라 차이는 있지만 대부분 적은 함량(ppm)으로 검출되었다. 음이온의 경우 깊이에 따른 뚜렷한 변화를 보이는 반면, 양이온은 일정한 경향을 보인다고 할 수는 없다. 외부의 이물질의 영향에서 비롯된 음이온에 비해, 암석 자체 구성광물의 용해에 의해 생성될 수 있는 양이온들은 정도의 차이는 있지만 구성광물이 수분에 의해 이온으로 해리되어 나오고 있음을 알 수 있다. 양이온 중 Na^+ , Ca^{2+} , 및 K^+ 의 함량이 Mg^{2+} 에 비해 높게 검출되고 있다. 암석자체가 함유하고 있지 않는 SO_4^{2-} 성분의 변화를 살펴보면, 깊이에 따른 이물질의 영향을 살펴볼 수 있다. 그림 7에는 삼존불상 A시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분을 나타내었다. 음이온 중 SO_4^{2-} 성분은 표면에서부터 2cm 정도까지 높게 검

출되다가 그 다음부터는 급격히 감소되었다. 이로써 양이온과 음이온이 결합하여 형성하는 수용성 염성분은 표면 2cm까지 형성되어 있으며, 측정결과로 조합하여 볼 때 존재 가능한 염은 황산칼슘염(CaSO_4), 황산나트륨(Na_2SO_4)으로 추정할 수 있다.

그림 8에는 삼존불상 B시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분을 나타내었다. A시료와 마찬가지로 음이온 중 SO_4^{2-} 성분은 표면에서 2cm까지만 약간 량 검출되다가 그 다음부터는 급격히 감소되었다. 이로써 양이온과 음이온이 결합하여 형성하는 수용성 염성분은 표면에서 2cm 까지만 형성되어 있으며, 측정결과로 조합하여 볼 때 존재 가능한 염은 황산나트륨(Na_2SO_4)으로 추정할 수 있다.

그림 9에는 삼존불상 C1시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분을 나타내었다. A시료와 마찬가지로 음이온 중 SO_4^{2-} 성분은 표면에서 2cm까지만 약간 량 검출되다가 그 다음부터는 급격히 감소되었다. 이로써 양이온과 음이온이 결합하여 형성하는 수용성 염성분은 표면에서 2cm 까지만 형성되어 있으며, 측정결과로 조합하여 볼 때 존재 가능한 염은 황산나트륨(Na_2SO_4), 황산칼슘염(CaSO_4)으로 추정할 수 있다.

삼존불상 C2시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분은 측정된 다른 시료들과는 달리 표면에서만 의미있는 함량의 음이온이 검출되었다. 양이온은 다른 코아시료들과 마찬가지로 뚜렷한 경향을 보이지 않으며, 그 양도 적다. 양이온과 음이온이 결합하여 형성하는 수용성 염성분은 표면에만 형성되어 있으며, 측정결과로 조합하여 볼 때 존재 가능한 염은 황산나트륨(Na_2SO_4), 황산칼슘염(CaSO_4)으로 추정할 수 있다.

시추 시료들의 깊이에 따른 수용성 염분석 결과, 수용성 염은 암석의 표면과 그 아래 약 2cm 까지만 형성되어 있는 것으로 보이며, 그 아래에는 암석자체에서 해리되어 나온 양이온들이 내부의 깊은 곳에서도 일관성 없이 검출되고 있다.

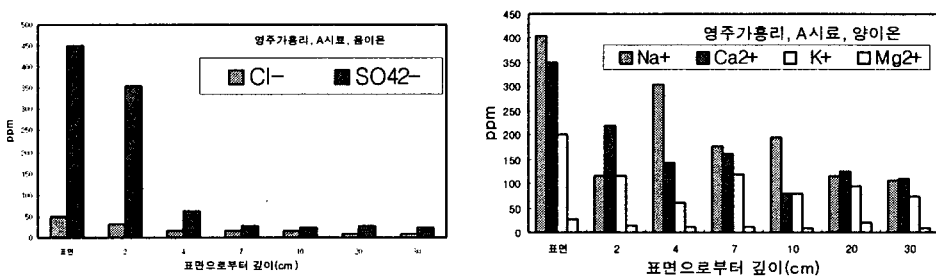


그림 7. 영주가흥리마애삼존불상 A시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분 (ppm).

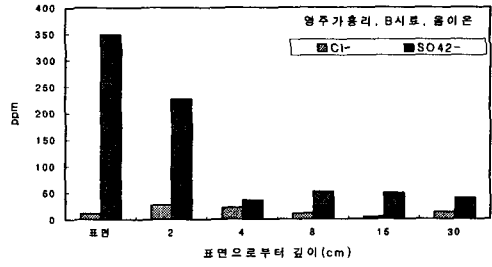
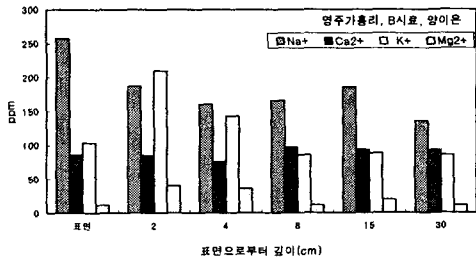


그림 8. 영주가흥리마애삼존불상 B시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분 (ppm).

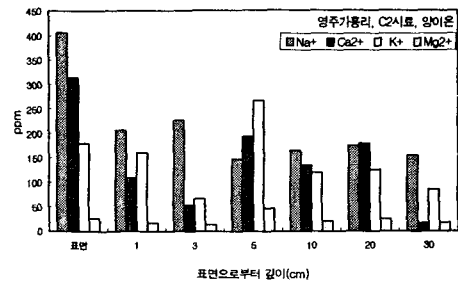
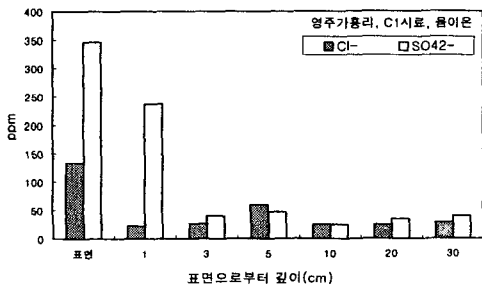


그림 9. 영주가흥리마애삼존불상 C1시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분 (ppm).

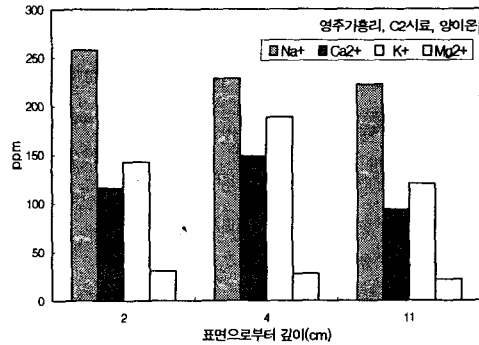
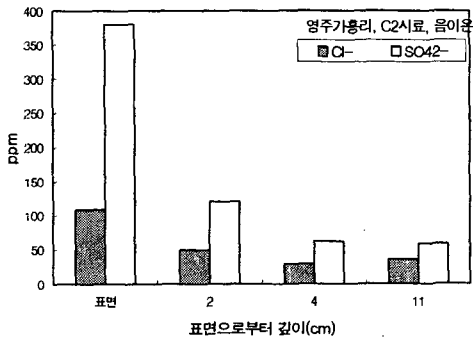


그림 10. 영주가흥리마애삼존불상 C2시료의 깊이에 따른 수용성 이온성분 (ppm).

5. 삼존불상 기반 보존처리 방안

1) 보존처리 대상

삼존불상을 중심으로 그 주변의 돌출 암반으로서 가로 약 10m, 로 약 10m 범위의 불상 및 기반 암석이 보존처리 대상이다.

2) 보존처리 방법

삼존불상 기반암석을 보존처리하는 방법과 그 순서는 다음과 같다.

(1) 세척 및 탈염

암석 표면에 서식하고 있는 지의류, 균류 및 조류뿐만 아니라 낙하분진 등 각종 오염물들을 제거하는 작업이다. 암석이 각종 용해성 대기오염물을 함유하고 있는 경우에는 이를 제거하여야 한다. 용해성 염성분이 암석에 함유되어 있으면 석질강화처리를 하여도 효과가 없을 뿐만 아니라 수년이 지나면 표면 암석물질들이 피각처럼 부풀어 오른다. 세척 시 화학시약을 사용하면 작업은 쉽게 할 수 있지만 장기적으로 보면 오히려 암석의 훼손을 촉진하는 결과를 초래하기 때문에 화학시약을 사용해서는 안 된다.

(2) 기반암석 석질강화 처리

시추코아에 대한 분석자료를 토대로 보존처리 깊이, 석질강화방법과 보존처리 소재가 결정된다. 그러나 강화처리를 하기 전에 반드시 각종 처리제품을 사용하여 강화처리실험을 거쳐 가장 효과가 큰 방법과 강화제를 사용하여 보존처리하면 보존처리가 잘 되는 것은 아니다. 반드시 암석의 성질과 공합이 맞는 처리제를 실험을 통하여 찾아 사용해야 올바른 처리방법이 된다.

(3) 박리 접착 및 균열 충전

박리는 암석의 강도에 맞는 접착제를 사용하여 접합하여야 하며 균열도 암석의 강도를 참작하여 충전하여야 한다.

(4) 발수처리

암석의 광물조성 및 유해 점토광물의 존재 여부를 면밀하게 점검한 후 암석에 적합한 발수처리제를 사용하여 처리해야 한다.

6. 결론

영주가흥리마애삼존불상 암반 보존처리 방안을 수립하기 위하여 시추를 실시하였으며 시추코아에 대하여 풍화상태와 물성에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 암반 보존처리 방안을 도출하였다.

(1) 삼존불상 암반 암석은 흑운모화강암으로 구성되어 있으며 오랫동안 풍화작용을 받아서 표면부위(1cm)는 대단히 심하게 풍화되어(very strongly weathered) 있고 표면 아래쪽 2 - 5 cm 까지 심하게 풍화(strongly weathered)되어 있으며 그 하부의 암석도 강도가 상당히 약화되어 있다.

(2) 삼존불상 및 암반을 오랫동안 보존하기 위해서는 구조안정화 시공뿐만 아니라 지반 암석(10m X 10m)의 강도를 높이기 위하여 강화처리를 실시해야 한다. 강화처리를 하지 않을 경우에는 암석들이 대단히 빠른 속도로 사질화현상(sanding)이 일어나 암반암석뿐만 아니라 삼존불상까지도 크게 훼손될 가능성이 높다. 삼존불상도 이미 사질화현상이 오래전부터 일어나서 그 원형이 크게 훼손되었다.

(3) 삼존불상 암반암석을 강화처리할 경우에는 반드시 금번 실시한 시추코아에 대한 분석자료를 참작하여 각종 보존처리제를 사용하여 강화실험을 거쳐 시공해야 한다. 강화처리시에는 반드시 강화약품이 심하게 풍화된 부위가 강화될 수 있도록 충분한 깊이까지 침투할 수 있는 방법으로 시행해야 된다.