Proceedings, the 10th Anniversary Conference and the 14th National Meeting of the Korean Society of Conservation Science for Cultural Properties (November 9, 2001)

고대 채석장 부지의 시료를 이용한 석조문화재 내구성 평가

박형동 · 신기혜 · M. Aboushook*
서울대학교 지구환경시스템공학부
**Faculty of Engineering, Al-Azhar University, Cairo, Egypt*

Assessment of Durability of Stone Monument Using Specimens from Old Stone Quarry

Hyeong Dong Park, Gi Hye Shin and M. Aboushook
School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Shinlim-dong, Kwanak-gu, Seoul, 151-742, KOREA
Faculty of Engineering, Al-Azhar University, Cairo, EGYPT

요 약

본 연구에서는 이집트의 피라밋, 스핑크스를 대상으로 현지풍화상태를 조사하고 이에 대한 장기적인 내구성을 분석하기 위해 동일 암석층인 카이로의 모카탐 채석장에서 시료를 채취하였다. 시료의 성분을 분석한 결과 기자지역의 석회암과 동일한 구성을 보여 향후 내구성 평가 실험에 적합한 것으로 나타났다. 인공풍화 실험 전후의 물성 변화를 통해 정량적 내구성을 측정하고 채색된 암석 표면에서 나타나는 풍화상태를 이미지 처리를 통해 분석함으로 석회암의 공학적 내구성을 효과적으로 분석 가능할 것으로 판단된다.

This study mainly reports preliminary results from site investigation of the Great Pyramids and Sphinx in Egypt and sampling works where conducted in the same limestone beds in Mokattam quarry in Cairo. Analyses of composition of samples showed similar result to those of limestone in Giza and thus such samples can be easily used for further experimental work without disturbing real monuments. Future work will be concentrated on the change of engineering properties of samples before and after artificial weathering and the change of digital image acquired from the colored surface of monuments.

1. 서 론

석조문화재의 내구성 평가는 문화재의 특성상 원 재료를 그대로 이용하여 파괴실험을 통한 물성측정이 제한되고 있다. 따라서 비파괴기법을 이용하여 상호관계를 추정하는 기법이 널리 쓰이고 있으며 석조문화재의 경우 탄성파속도 측정법, 열적외선을 이용한 이미징기법이 활용되고 있다. 이러한 비파괴 기법의 경우에도 물성과의 상호관계를 파악하기 위한 비교시료가 필요하며, 비교시료의 물성측정을 통해 관계식을 파악할 수 있다. 비교시료는 석조문화재의 떨어져 나간 조각을 활용하는 경우도 있으나 이는 극히 제한적으로만 가능하다. 물성측정을 위한 충분한 양의 시료를 확보하기 위해서는 유사풍화등급을 보이며 현 석조문화재의 재료암석이 채석된 고대채석장을 이용할 수 있다.

본 연구에서는 널리 알려진 이집트 기자지역의 피라밋, 스핑크스와 관련된 카이로의 모카탐 채석장에서 석회암 시료를 채취하여 물성을 측정하고 이를 통해 내구성을 정량적으로 평가하는 기법을 소개한다. 물성평가에서는 공극률, 비중, 투수계수, 탄성파속도, 강도, 풍화내구성 등의 항목을 중심으로 상호관계를 해석하고, 인공풍화환경에 노출된 시간경과에 따른 내구성의 변화를 정량적으로 파악한다. 피라밋, 스핑크스의 현재 풍화상태 및 영상분석 결과와 연관하여 종합적인 장기적 안정성 및 내구성 해석을 시도하는 것이 본 연구의 최종목표이며 본 연구에서는 실험시료 채취를 위한 사전 단계로서 2001년 6월 실시한 현지 지역 조사와 현지 풍화상태의 분석 기초결과를 우선 보고한다.

2. 피라밋 지역 현장지역 조사와 풍화 분석

현재까지 이집트에 남아 있는 피라밋은 90여개에 이르며 이 중 카이로의 기자지역에 위치한 쿠프왕의 피라밋(BC 2500 년경 제 4 왕조 것으로 추정) 등이 관광객에게 널리 알려져 있다(Weeks, 1971). 또한 카이로 근교의 사카라 지역에 위치한 계단식 피라밋인 Zoser's Pyramid(BC 2600 년경 제 3 왕조 것으로 추정)이 더 오래된 것으로 알려져 있다(Hodges, 1989). 사카라 지역의 계단식 피라밋은 제작연대가 더 오래되어 풍화나 구조적 불안정성이 아주 심각한 상태로 남아 있다. 이에 비해 기자 지역의 피라밋은 상대적으로는 안정한 구조이나 개별 석회암 블록들은 풍화가 심하게 발달된 경우가 흔하게 발견된다.

피라밋에 사용된 암석은 내부에 일부 사용된 화강암류 암석, 그리고, 나머지를 대부분 구성하고 있는 석회암으로 나뉜다. 따라서 피라밋 외부의 풍화현상 문제는 석회암에 집중되고 있다. 이 석회암은 흔히 "Nummulitic sandy limestone"으로 소개되는 것으로(Hughes, 1988; Purton & Brasier, 1999), 내부에 Nummulite화석을 포함하고 있다(그림 1).

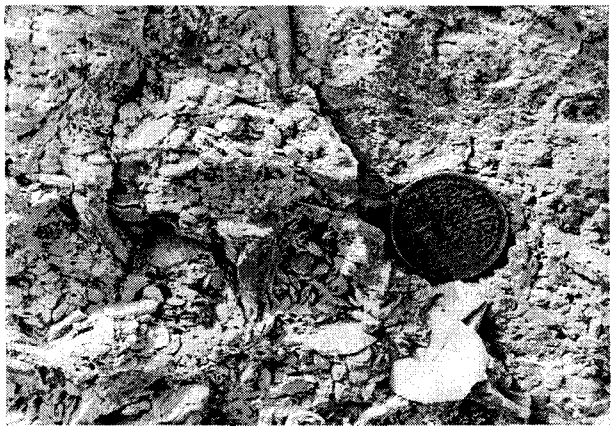

그림 1. 피라밋을 구성하는 석회암에 존재하는 화석 Nummulite

이 석회암층은 기자지역에서 나일계곡 방향(즉, 남동 방향)으로 5-10° 정도로 완만하게 경사진 Upper Mokattam limestone에 해당되며, 스핑크스가 제작된 지층이기도 하다. 이 석회암층은 카이로 동쪽의 모카탐 지역에까지 연장되어 있어 당시 사용된 암석과 동일한 석회암이 모카탐채석장에서 채석되어 카이로 내의 주요한 건축물에도 광범위하게 사용되었다.

피라밋에 사용된 이 석회암은 얕은 노란색을 띠며, 두께가 얇은 층리가 발달되어 이회암(Marl)과도 교대층을 이루고 있다. 피라밋을 구성하고 있는 석회암 중 풍화가 심한 곳은 주로 이회암질 석회암으로 관찰된다. 따라서 피라밋의 외부 풍화는 방향에 따른 차이보다는 구성성분에 따른 풍화도의 차이가 크게 나타나고 있다. 피라밋의 건설공정에 따라 동일시기에 채취된 동일 암층이 비슷한 위치에 놓인 것으로 추정하여 볼 때, 피라밋 4면의 풍화는 주로 이회암질 석회암에서 더 강하게 나타나는 것으로 판단된다.

기자 지역의 피라밋 주위에 있는 스핑크스의 경우에는 현지 지층에 직접 작업한 것으로 이 역시 풍화의 영향을 강하게 받아 왔다. 스핑크스는 현재의 풍화 상태로 볼 때 3 등분하여 암석과 연관을 시키고 있다(Dixon & Reader, 2001). 상대적으로 풍화가 적은 머리부위는 다른 암석을 조각하여 설치한 것으로 추정되고 있다(그림 2). 어깨 하부의 부분(그림 2의 B)이 풍화를 가장 심하게 받은 상태로 이 부분은 두께가 얇은 층리가 발달되어 있으며 모카탐지역 석회암에 해당된다. 현재까지 심각한 풍화문제로 인해 수차례에 걸쳐 보수공사가 시행되었으나 여전히 풍화작용으로 인한 문제가 발생하고 있어 더 체계적인 연구가 필요하다.

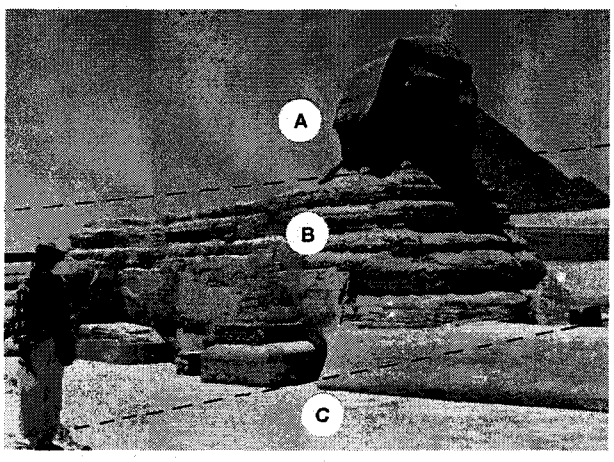

그림 2. 스핑크스의 부위별 풍화도 차이

3. 채석장 지역의 시료채취와 물성평가

이집트에서 석회암이 채석된 대표적인 곳은 카이로 지역, Maasara지역, Deir el-Bersha지역, Abydos지역 등을 들 수 있다(Malek, 1993). 피라밋이나 스핑크스 건설에 사용된 것과 동일한 암석층이 카이로 지역에 광범위하게 분포되고 있으며 과거부터 건설에 사용된 암석이 카이로 동부의 모카탐 채석장에서 채취되었다. 이 채석장은 현재는 더 이상 채석작업이 이루어지지 않고 있으며 시료를 충분히 확보할 수 있는 곳이다. 채석장의 일부 지역은 소규모 단층, 절리 등에 의한 불안정한 상태를 보이고 있다. 현장조사 결과 기자지역에서와 같이 이회암질 석회암과 석회암이 교대층을 이루는 곳도 상부에서 발견되며, 하부로 갈수록 석회암이 더 우세하게 분포하고 있다. 피라밋에 사용된 석회암의 경우에도 구성성분이 단일하지 않아 이회암질 석회암, 석회암의 형태로 나타나므로 모카탐 채석장에서도 각 종류에 대해 시료를 채취하였다.

현재까지 보고된 바에 따르면 피라밋 또는 스핑크스의 부서진 조각이나 기자지역의 구 채석장 시료를 이용하여 풍화상태나 공극의 발달 상태를 파악하는 연구가 진행되었으며(Gauri *et al.*, 1988), 전반적인 안정성과 풍화를 고려한 연구도 있었다(Tanimoto *et al.*, 1993). 풍화작용으로 인한 암석내구성의 정량적인 변화에 관한 연구는 극히 제한적으로 비교적 최근에 와서 시도되고 있다(Aboushook *et al.*, 1999).

채취된 석회암 시료에 대한 XRF, XRD를 통한 성분분석 결과 기존 연구 사례와 같이 방해석이 90%를 넘는 광물조성을 나타내었다. 따라서 피라밋이나 스핑크스에 사용된 것과 비슷한 석회암으로 간주하여 향후 실험에 적합한 것으로 판단하였다. 실험은 기본물성 파악과

시간경과에 따른 (즉, 인공풍화에 의한) 물성변화 파악으로 구분된다. 기본물성에는 비중, 공극률, 투수계수, 흡수율, 강도, 탄성파 속도 등이 포함되며, 인공풍화를 거친뒤 이러한 기본물성의 변화를 관찰하여 풍화과정을 분석하고 그에 따른 정량적 효과를 분석한다. 인공풍화 실험의 특성상 최소 수개월에서 수년에 이르는 실험과정이 요구된다. 인공풍화 실험조건 설정에 필요한 현지 기후조건은 기상데이터를 중심으로 분석하여 활용할 예정이다.

이를 통해 분석된 물성변화와 풍화의 상호관계를 해석하여 이집트의 각종 석회암 문화재의 풍화진단과 보존작업에 활용할 표준자료를 구축하고자 한다. 특히 채색된 암석 표면의 보존과 진단에 활용하기 위해 디지털 영상의 획득과 처리를 통한 분석작업을 병행하고 있다.

4. 결 론

이집트 기자지역의 피라밋과 스핑크스의 내구성 및 공학적 안정성을 분석하기 위해 유사한 석회암 시료를 카이로 동부의 모카탐 채석장에서 채취하였다. 시료의 성분 분석 결과 과거 연구에 직접 이용된 시료와 유사한 것으로 확인되어 향후 체계적인 물성측정과 인공풍화 실험에 적합한 것으로 판단되었다. 또한 현지 모카탐 채석장의 조사 결과 스핑크스와 동일한 암석층으로 구성되어 있고 일부에서 이회암질 석회암도 나타나는 바 이를 시료에 포함시키게 되었다. 기자지역 피라밋의 4면 관찰 결과 이회암질 석회암에서 풍화가 더 강하게 나타나는 것으로 관찰되어 이에 대한 인공풍화와 석회암에 대한 인공풍화 실험 결과의 비교가 필수적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구 과제 (과제번호: 20016-312-01-2) 연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

Aboushook, M., Wakizaka, Y., and Shinagawa, S., 1999, Environmental impact on the durability of some Egyptian and Japanese limestones, Proc. the 9th ISRM Congress, Paris, France, Vol.2, p. 991-996.

Dixon, J. and Reader, C., 2001, The riddle of the Sphinx-one geological solution, Geoscientist, Vol.11, No.7, The Geological Society of London, p. 4-6.

Gauri, K.L., Chowdhur, A.N., Kulshreshtha, N.P., Punuru, A.R., 1988, Geologic features and

the durability of limestones at the Sphinx, Proc. Int. Sympo. Engineering geology of ancient works, monuments and historical sites, Balkema, p. 723-729.

Hodges, P., 1989, How the Pyramids were built, Aris & Philips Ltd., England, p. 53-64.

Hughes, R., 1988, Observations on the recent stone block failure of the Great Egyptian Sphinx monument, Proc. Int. Sympo. Engineering geology of ancient works, monuments and historical sites, Balkema, p. 2025-2029.

Malek, J., 1993, Cradles of civilization: Egypt, Lehnert & Landrock, Cairo, Egypt, p. 22-23.

Purton, L. and Brasier, M., 1999, Riddle of the Sphinx, Geoscientist, Vol. 9, No. 10, The Geological Society of London, p. 8.

Tanimoto, C., Yoshimura, S., Kondo, J., 1993, Long term stability of the underground cavern for the Pharaoh and the deterioration of the Great Sphinx, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No.7, p. 1545-1551.

Weeks, J., 1971, The Pyramids, Cambridge University Press, p. 3-41.