

익산 왕궁리오층석탑의 풍화훼손도 및 무기오염종의 정량분석과 부재의 산지해석

송치영^{*.1} · 이찬희^{**} · 김지영^{**}

^{*.1}국립문화재연구소 보존과학연구실, ^{**}공주대학교 문화재보존과학과

Quantitative Analysis of Deterioration State, Inorganic Contaminants and Provenance Interpretation for Rock Properties of the Five-storied Wanggoongri Stone Pagoda, Iksan, Korea

Chi Young Song^{*.1}, Chan Hee Lee^{**}, Jiyoung Kim^{**}

^{*.1}*Division of Conservation Sciences, National Research Institute for Cultural Heritages,
Daejeon 305-380, Korea*

^{**}*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University,
Kongju 314-701, Korea*

1. 서 론

익산 왕궁리오층석탑(국보 제289호)은 고려초기의 대표적인 백제계 석탑의 하나로써 표면부재는 총 111매의 화강암질암으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 구성재질과 유기 및 무기오염종 분석을 위해 암석학적, 광물학적 및 지구화학적 정밀조사가 수행되었다. 또한 이 석탑이 나타내는 정량적 풍화등급 평가 뿐 아니라 부재의 공급지 해석을 통해 보존과학 측면의 보수와 복원에 관한 과학적 자료로 제시하고자 한다.

이 석탑은 대기환경 등의 풍화요인에 노출되어, 암석구성 성분의 용해에 의한 변색, 생물오염 물질의 피복과 불연속면의 차별침식, 부재의 파손이탈 등 훼손이 심각한 수준이다(그림 1). 따라서 구성부재의 암석학적 특징과 광물학적 공생관계, 풍화작용의 정확한 메커니즘을 밝히고자 대자율 측정을 비롯하여 편광현미경, 주사전자현미경 관찰 등 정밀진단을 실시하였다. 또한 X-선 회절분석과 정량적 화학분석을 통해 광물 및 지구화학적 특성을 검토하였다. 이는 동일 암종을 갖는 주변 산지의 암석과도 비교를 통해 향후 대체석 확보를 위한 공급지 해석의 근거자료로 제시하였다.

종합적 손상평가를 위한 훼손도면의 작성은 2D 그래픽 전문 응용프로그램 Adobe Illustrator를 이용하였으며, 풍화 유형별로 구분된 도면은 Auto CAD를 이용하여 훼손 점유율을 산출하였다. 부재 표면에 침착된 수용성 무기오염물질을 규명하고자 토양공정시험법에 의거하여 채수된 시료는 물리적 특성과 양이온 및 음이온에 대해 각각 정량분석을 실시하였으며 세정효과를 검토하였다.

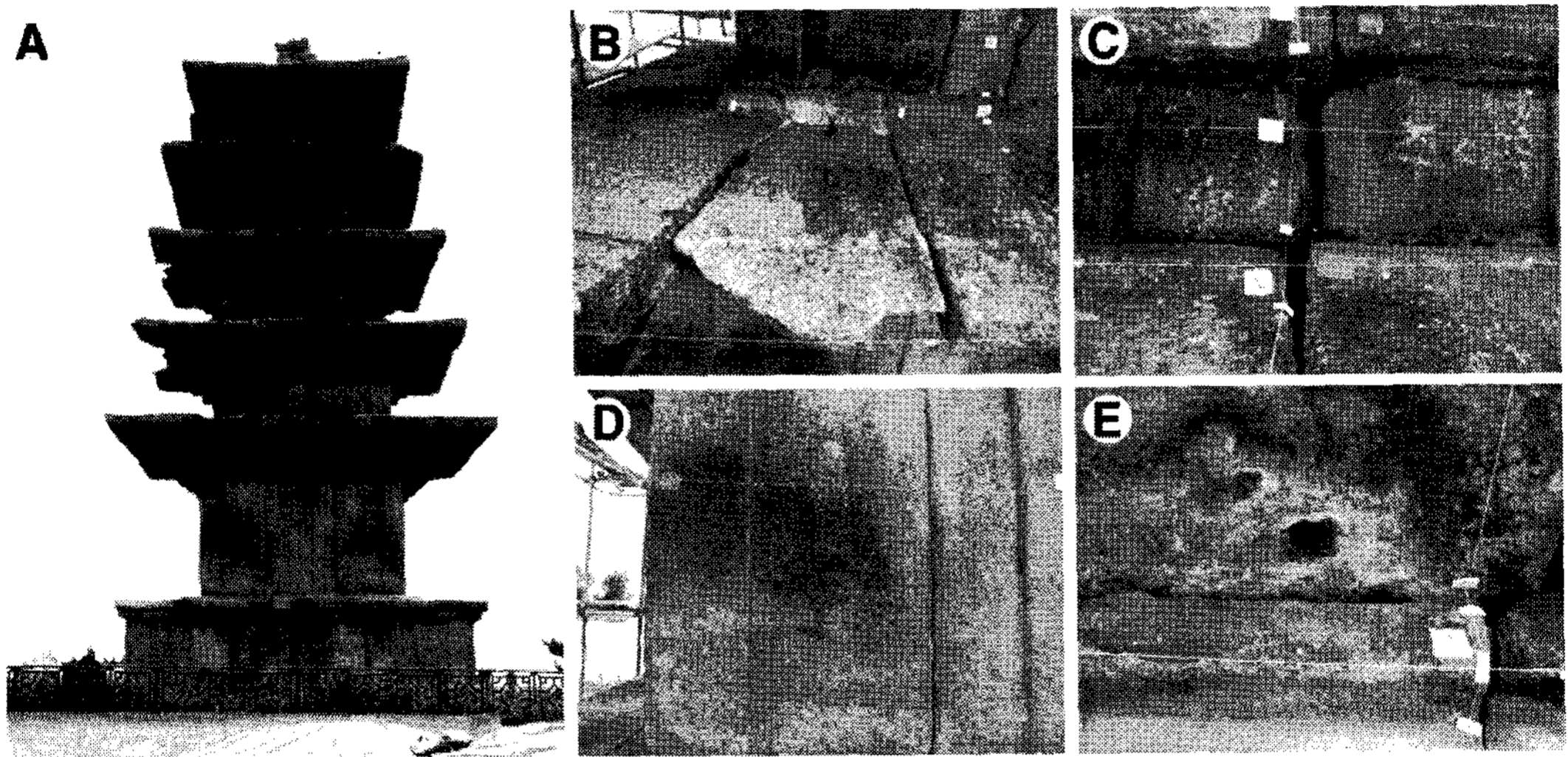


그림 1. 왕궁리오층석탑의 현황(A). 부재의 물리적 손상과 구조적 불균형을 보여주는 사진(B, C). 암흑색과 회백색 표면오염 물질의 산출상태(D, E).

2. 암석학적 특성과 훼손도 평가

왕궁리오층석탑은 중립질 흑운모화강암으로 구성되어 있으며, 도피의 위험으로 해체 보수를 실시한 기단부는 화강섬록암으로 대체되었다. 원부재와 신부재의 주요 조암광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 각섬석 등으로 암석학적 및 광물학적 특징이 유사하였다. 전암대자율 측정결과, 원석재인 흑운모화강암은 평균 $3.18 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$, 신석재인 화강섬록암은 평균 $4.09 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 대자율 분포를 보였다. 화학적 풍화지수는 원석재가 51.33, 신석재가 49.67의 값을 나타내 교체석재로 사용된 암석에 비해 원석재가 상대적으로 더 높은 풍화작용을 받은 것으로 나타났다.

이 석탑의 정량적 손상도 평가를 위해 물리적 풍화요소, 화학적 변색요소 및 생물

학적 침해정도에 대한 훼손지도를 작성하였다(그림 2). 탑의 방위와 층위에 따라 암석학적, 물리화학적, 생물학적, 구조적 및 인위적인 풍화와 훼손상태를 중심으로 각각을 기호화하여 표현하였고, 이를 종합하여 각각의 풍화요소에 따른 점유면적을 수치화하여 훼손상태에 대한 정량적 평가가 이루어졌다.

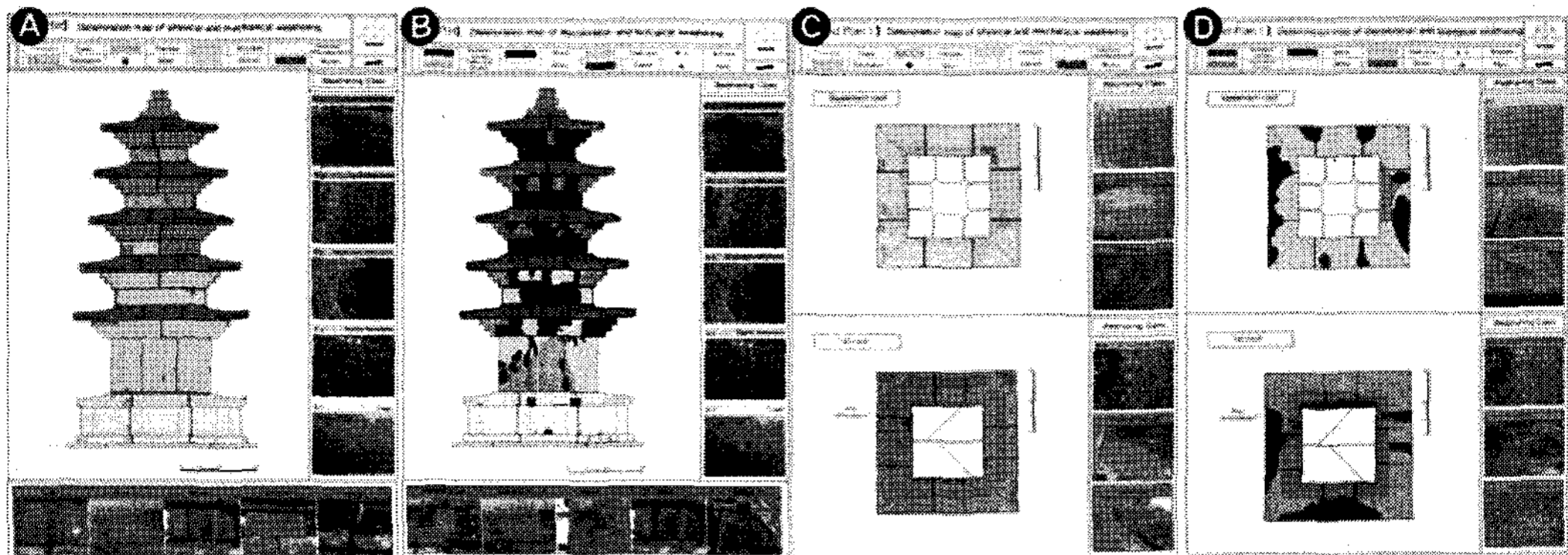


그림 2. 왕궁리오층석탑의 종합 훼손지도. 남쪽면에 나타난 물리적 손상과 변색에 관한 훼손지도(A, B). 물리적 손상과 변색 훼손지도의 평면도(C, D).

이를 방위와 높이에 따라 살펴보면, 서측면에서 물리적 풍화와 변색의 정도가 가장 심하며, 탑의 상부로 갈수록 손상 점유율이 높아지는 것으로 나타났다. 풍화등급의 정량화를 목적으로 구성부재의 물성을 측정하여 화학적 풍화지수와 상관성 분석을 실시한 결과, 물성변화와 화학적 풍화지수와는 명확한 상관도가 나타났다. 초음파속도를 이용한 부재의 물성탐사는 기단부와 1층 탑신의 44부재를 대상으로 총 1,192지점에서 측정하였으며, 평균 1914.5%를 기록하였다. 이를 암석의 풍화도 지수로 산출한 결과, 0.617로 암반의 풍화도 분류기준인 CW 단계에 해당하였다.

이 석탑의 부재표면에 나타나는 무기오염종 규명을 위해 SEM-EDS를 이용한 표면분석과 오염종의 용출실험을 수행하였다. 흑색과 백색 오염물 시료는 중성수 부근에서 집중 유리되어, 증류수의 사용이 이온용출에 더욱 효과적임을 입증하였다. 적갈색 오염물 시료는 pH 값이 염기성으로 갈수록 대부분의 이온 검출량이 감소하며, 황갈색 오염물 시료는 pH 6.0 부근에서 용해도가 높았으나, Si, Cu, Co, Pb, Ti 이온들은 pH 5.0 용매제에서 용출함량이 증가하였다. 시간에 따른 세정실험 결과, 반응시간과 함께 용출함량이 대체로 감소하는 경향을 보인다.

3. 부재의 산지해석

이 석탑 구성암석의 산지해석을 위해 지질학적 및 암석학적 조사를 실시한 결과, 시대산과 미륵산에서 왕궁리석탑과 거의 동일한 암석학적 특징을 갖는 중립질 흑운모 화강암을 확인하였다. 시대산과 미륵산의 전암대자율은 평균 4.90, 3.73으로 측정되어 이 석탑과 유사한 결과를 보였으며, 지구화학적 거동특성을 분석하여 표준화된 원소의 상대적 증감과 진화경향에 따른 동일 기원의 유무를 평가하였다.

이 결과, 주성분, 미량 및 희토류 원소들의 거동특성이 거의 유사함을 입증하였다. 이는 이들 암석이 거의 동일한 지질학적 과정에 의해 생성된 것임을 지시하는 것이다. 이 중에서 지리적으로 가장 가까운 반경 4.2km에 위치하는 시대산의 지질조사를 실시한 결과(그림 3), 기반암에는 석재공급이 유리하도록 절리가 발달되었고, 산지의 고도가 낮으며 경사도가 완만한 특징을 지니고 있다. 또한 노두에서는 뚜렷한 채석흔적을 확인할 수 있었다. 따라서 시대산 일대가 왕궁리석탑의 채석산지였을 가능성이 아주 높다.

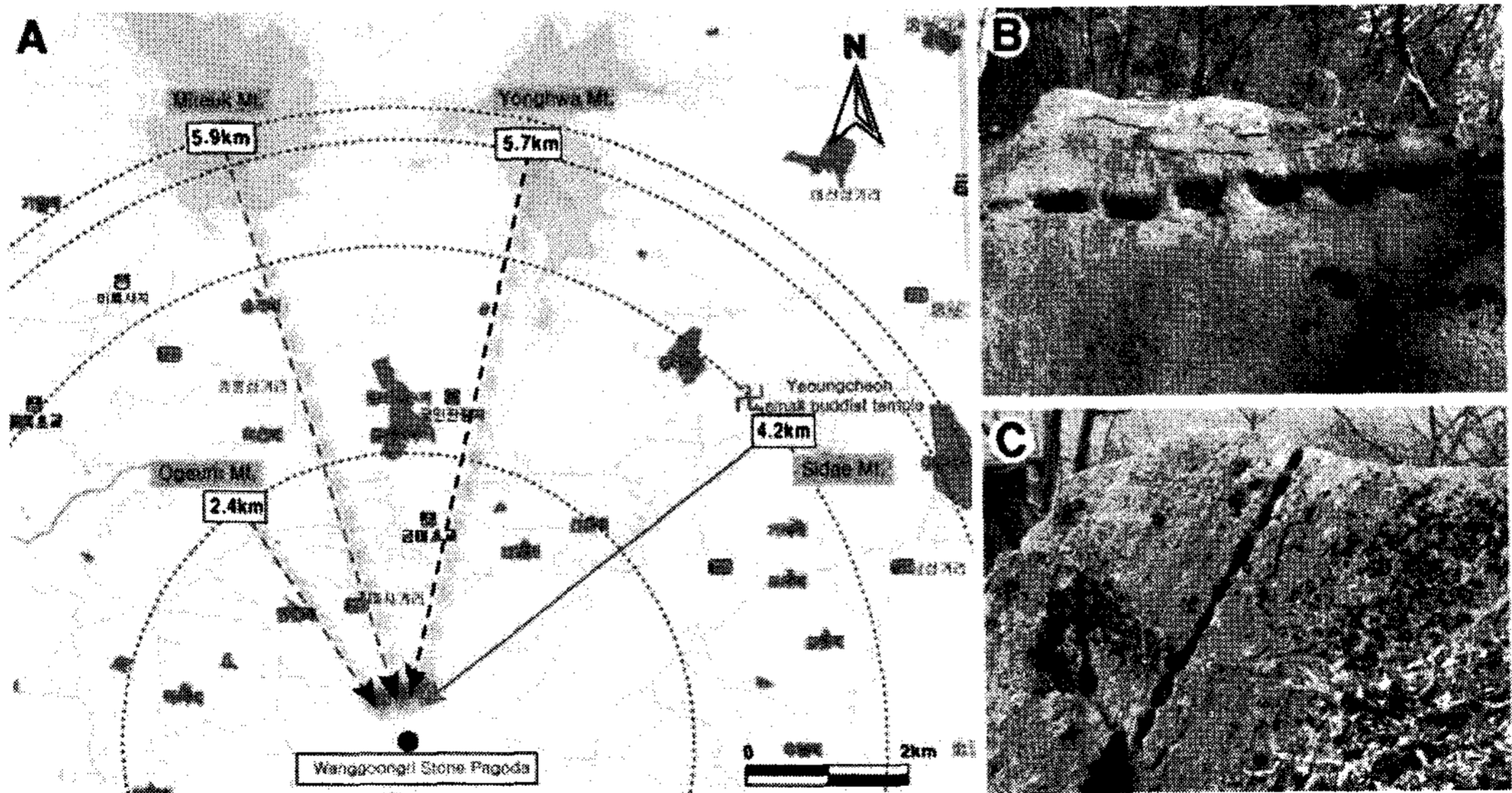


그림 3. 왕궁리오층석탑의 위치와 추정 채석산지의 지리적 분포도(A). 시대산의 기반암에서 관찰되는 고기 채석장의 절취흔적(B, C).

4. 결 론

1. 이 석탑의 탑신부 구성암석은 흑운모화강암이며 기반부는 화강섬록암으로 대체되었다. 이들 부재는 자철석계열의 암석으로 화학적 풍화지수와 잠재지수는 각각 51.33과 12.12이다.

2. 이 석탑의 물리적 풍화현상은 미세균열 및 층상균열과 입상분해, 박리박락, 부재 탈락, 마모, 부재간 이격이 대표적으로 관찰되었다. 표면변색은 황갈색, 흑색, 적갈색, 녹색, 암회색, 백색의 순으로 피복율이 높다. 서측면에서 물리적 풍화와 변색의 훼손점유율이 크며, 이는 4, 5층에서 두드러진다.

3. 석재의 비중, 흡수율, 초음파속도 등의 물성을 측정된 결과, 일반화강암이 가지는 물성보다 낮은 수치를 기록하였고, 이는 풍화로 인한 부재의 차별적 풍화가 높이에 따라 각기 다른 훼손결과로 나타났다. 또한 물리적 풍화와 화학적 풍화지수가 일치함을 입증하였다.

4. 용매제를 이용한 교반실험 결과, 대부분의 표면 오염물은 중성수 부근에서 집중 유리되어, 증류수의 사용이 이온용출에 더욱 효과적임을 입증하였다. 이를 바탕으로 세정효과를 살펴본 결과, 반응시간과 함께 용출함량이 대체로 감소하는 경향을 보여 초기 30분에서 1시간 이내에 세정을 실시하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

5. 이 석탑 부재의 산지해석을 위해 지질조사를 실시한 결과, 시대산과 미륵산에서 거의 동일한 암석학적 특징을 갖는 중립질 흑운모화강암을 확인할 수 있었다. 이들은 또한 지구과학적 거동특성이 동일하였으며, 노두에서는 채석 흔적이 많이 나타난다.