

# 석조기념물의 훼손상태 진단 - 현장조사 및 실험실 연구

베른드 휘츠너\*

**요 약** 석조기념물은 세계문화유산의 중요한 부분을 차지한다. 문화유산의 회복 불가능한 손실위험과 동조하여 증가하는 석조기념물의 훼손에 대한 인식으로 인하여 기념물 보존에 대해 많은 노력이 세계적으로 이루어지게 하였다. 석조문화재 훼손에 대한 완벽한 상태파악, 해석 및 평가를 위해서는 의미있는 훼손상태 진단이 필요하다. 석조기념물의 훼손상태 진단에 현장연구는 중요한 기여를 한다. 석조물의 훼손 도면제작 방법은 석재훼손에 대한 현장연구에 있어서 검증된 비파괴법이다. 이 방법은 모든 종류의 석재형태와 석조기념물에 대해 객관적, 재생적으로 적용될 수 있다. 석재 훼손상태의 정확한 기재, 문서화 및 정량적 평가를 위한 풍화형태, 훼손범주 및 훼손지수의 이용에 대하여 설명하고자한다. 나아가 현장측정과 올바른 시료채취법이 논의된다. 실험실에서의 광범위한 분석 방법과 다양한 유형의 인공풍화실험은 부가적으로 석조기념물의 현대적인 훼손상태 진단에 기여하게 된다.

## KEYWORDS

자연석, 석조기념물, 훼손상태 진단, 현장조사, 기념물 도면제작, 풍화형태, 석재 훼손상태 평가, 훼손범주, 훼손지수, 현장측정, 시료채취, 실험실 분석, 암석성질, 인공풍화실험

---

\* 아헨 공대, 지질학 연구소, “자연석과 풍화” 연구그룹,  
빌르너스트라세. 2, D-52062, 아헨, 독일

## 1. 검증, 진단 및 처리과정

자연적으로 건조된 기념물에 있어서 풍화훼손의 놀라운 증가와 그리고 가까운 장래에 문화유산의 많은 부분이 부분적으로 또는 완전히 훼손될 수 있다는 위험은 지속 가능한 기념물 보존절차에 따른 즉각적인 대책을 필요로 한다(그림 1).



그림 1. 풍화훼손현상,  
무덤궁전(Palace Tomb).  
페트라/요르단.  
퇴적암 기반암에 각인된 기념물.

자연석의 재질특성과 풍화작용에 대한 심오한 지식뿐 아니라 이런 풍화작용을 유발하고 통제하는 풍화요인과 풍화과정에 대한 지식이 필요하다. 고차원적인 과학지식은 효과적이고 경제적인 보호대책을 세우는데 중요한 기반이 된다. 지속 가능한 기념물 보존대책으로 널리 인정되고 있는 체계적인 접근방법은 검증, 진단 및 처리과정이라는 세가지 중요한 상호 의존적 역할로 구분할 수 있다 (그림 2).



그림 2. 검증, 진단 및 처리과정.

검증은 기념물과 그 역사에 관련된 모든 가능한 정보, 데이터 및 문서를 수집, 편집하고 평가하는 것이다. 완벽한 검증이 되기 위해서는 기념물 동정, 위치, 예술사적 기술, 사례사(case history) 및 주위 환경과 같은 모든 중요한 측면이 고려되어야만 한다 (그림 3). 검증을 통하여 수집된 정보는 기념물 상황과 훼손상태를 이해를 위하여 일차적으로 중요한 자료이다.

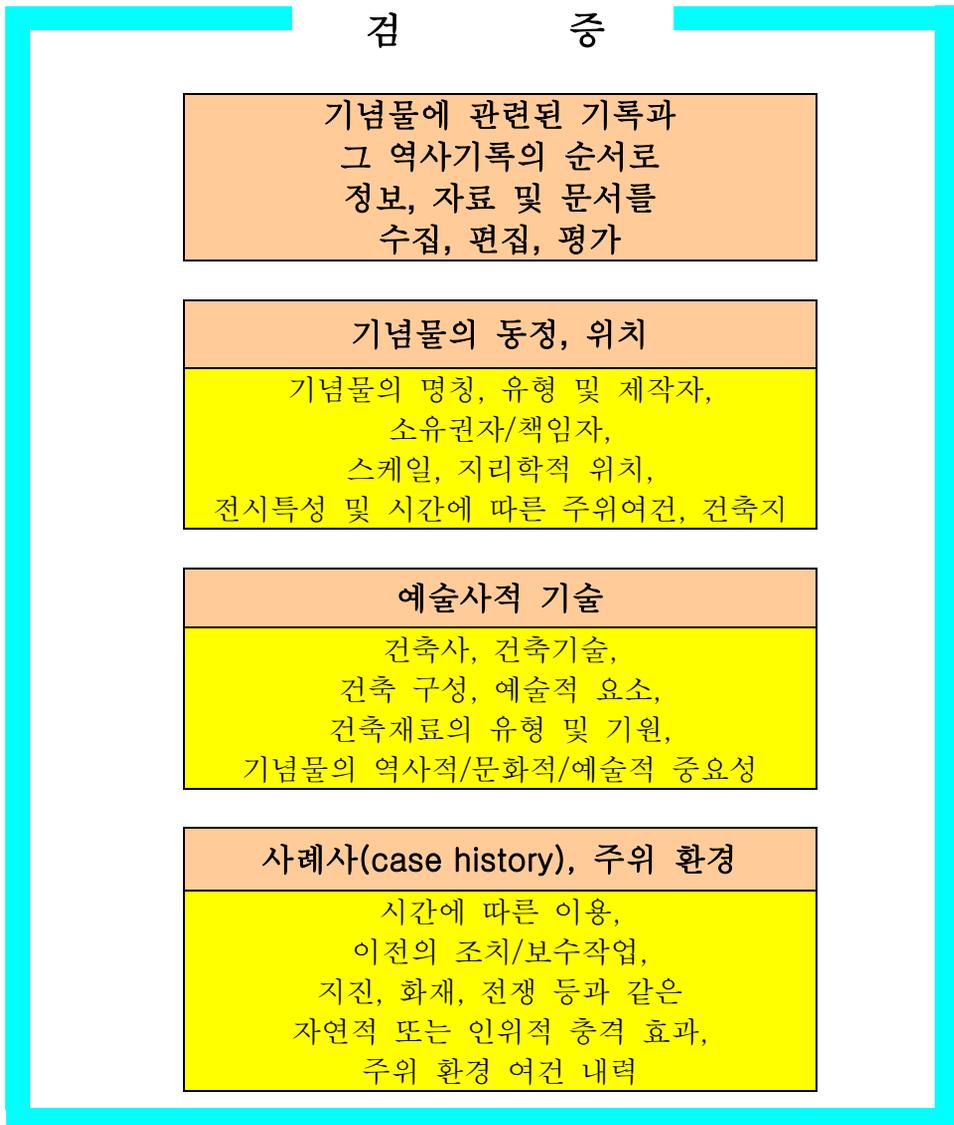


그림 3. 기념물의 검증.

검증 다음에는 당연히 진단이 뒤따른다. 여기서 지질학자, 화학자, 건축가 및 공학자들의 학제간 연구가 요구된다. 진단의 총괄적인 목표는 석재 훼손과 석재 손상상태를 분석, 정량화, 해석 및 평가하는 것으로서 이때에는 풍화요인, 풍화과정, 풍화특징과 또한 석재유형, 기념물 특성 및 시간 요소를 고려해야 한다. 동시에 진단방법의 최적화가 중요한 과학적 목표이다. 정밀한 진단은 지속 가능한 기념물 보존대책의 토대이다.

과학적 진단의 상세한 목적은 다음과 같다 .

- 암석의 특징파악,
- 암석변질의 특징파악과 정량화,
- 풍화특성의 특징파악과 정량화 - 풍화형태, 풍화단면, 풍화산물,
- 비가시적인 석재 훼손의 초기 감지,
- 풍화요인에 관한 정보,
- 풍화과정에 관한 정보,
- 풍화진행/풍화속도의 특징파악과 정량화,
- 암석 훼손상태의 정량적 평가,
- 암석질의 평가, 내구성 석재의 선택,
- 파손 예측, 위험 예측,
- 보존대책의 필요/긴급성에 대한 정보,
- 적절한 보존대책 추천.

보존조치에 이어 반복적 진단활동은 보존조치에 대한 통제/검증, 더 나아가 새로운 훼손방지, 장기적인 감시와 기념물 보존을 용이하게 한다.

아헨 공과대학 지질학 연구소의 “자연석과 풍화” 연구그룹에서 적용하고 있는 숙지된 진단방법은 현장조사, 실험실 분석 및 인공풍화실험이라는 세가지 중요한 진단활동을 결합한 것이다 (그림 4). 이 세가지 보완적인 진단방법의 적용과 그리고 결과에 대한 연계적인 평가는 본질적으로 석조기념물에 대한 완벽하고 신뢰할 수 있는 훼손상태 진단에 기여한다.

이러한 체계적인 접근은 프랑스, 스페인, 이태리, 말타, 터키, 그리스, 이집트(카이로), 요르단, 브라질 및 칠레 등 많은 지역에 있는 역사적인 석조기념물에 매우 성공적으로 적용되어왔다. 현장조사, 실험실 분석과 인공풍화실험에 관해서는 2-5 장에서 자세히 서술된다.



그림 4. 진단.

검증과 진단을 토대로 효과적이고 경제적인 치료절차가 제시되고 계산될 수 있다. 그러나 주의 깊은 시험적인 적용이 보존대책의 최종적 실행에 선행되어야 한다. 예방, 세척, 탈염, 보수, 대체, 표면보호, 보호 시설 또는 재배치와 같은 중요한 치료 및 예방적 보존조치들이 그림 5에 제시되어 있다. 보존조치의 효과성은 정기적인 기념물 관찰의 틀에서 측정되어야 한다.

## 치 료 절 차

<b>구상, 계산, 시험적용, 보존대책의 실행</b>
<b>즉각적인 예방 대책</b> 느슨해진 암석파편의 재고정, 예비경화처리
<b>세 척</b> 수세, 기계적 세척, 화학적 세척, 생물학적 세척, 레이저 세척
<b>탈 염</b>
<b>암 석 보 수</b> 암석의 접합, 몰타르 수리, 균열충진
<b>암 석 대 체</b>
<b>표 면 보 호</b> 경 화 처 리 석회수 기법, 유기고분자, 알콕시실레인, 에폭시수지, 아크릴, 아크릴 전체침투
<b>표 면 코팅</b> 애벌 회칠, 표면 그라우팅, 도포
<b>방 수 처 리</b> 실레인, 실록산, 실리콘
<b>반응억제제 처 리</b> 반응억제제, 결정성장억제제
<b>생물체 서식조절</b> 바이오사이드
<b>구 조 보 강</b> 그라우트 주입, 아교, 접합용 못(dowels), 이음새 매꾸기
<b>보 호 시 설</b>
<b>석조기념물의 실내 이전</b>
<b>통제/검증, 장기적인 관찰, 석조기념물의 유지 관리</b>

그림 5. 치료절차 (e.g. ASHURST & ASHURST 1988, CROCI 1998, PRICE 1996, PETZET 1999).

## 2. 진 단

기념물의 석재 훼손상태에 대한 체계적 조사는 반드시 석재 훼손 상태를 다양한 스케일로 고려해야 한다. 근본적으로는 가시적인 훼손과 비가시적 훼손으로 구별할 수 있다. VILES 등에 의하면, 나노 스케일(mm), 마이크로 스케일(mm ~ cm), 메소 스케일(cm ~ m) 및 매크로 스케일(전 벽면 또는 건물)로 석재 훼손을 세분할 수 있다. 나노 스케일은 비가시적 석재 훼손에 해당하는데 반하여, 마이크로 스케일, 메소 스케일과 매크로 스케일은 가시적 석재 훼손에 해당한다.

진 단			
석재 훼손의 스케일			
규 모	파라미터	관련학문	
비가시적 훼손	나노 스케일 < mm	석재의 성질, 구성성분, 조직, 공극률, 강도의 변화	지질 과학, 재료공학, 화학, 물리학, 미생물학
가시적 훼손	마이크로 스케일 mm ~ cm	변색, 질량유실, 미세형태	
	메소 스케일 cm ~ m	훼손현상, 풍화형태	
	매크로 스케일 전벽면 전기념물	구조안정성, 미적 외관	구조공학, 건축학

그림 6. 석재 훼손의 스케일 (modified from VILES et al. 1997).

각각의 스케일에 대하여 석재 훼손에 대한 일련의 적절한 파라미터와 조사방법이 있다. 나노 스케일, 마이크로 스케일, 메소 스케일 및 매크로 스케일을 연계하여 석조물의 훼손을 완벽하게 평가하기 위해서는, 과학자(지질과학, 재료과학, 화학, 물리학, 미생물학), 공학자 및 건축가들 간의 학제적인 협력이 요구된다.

현장조사, 실험실 분석과 인공풍화실험/실외노출시험을 결합하여 이루어진 진단법은 석재 훼손의 나노 스케일, 마이크로 스케일 및 메소 스케일에 초점이 맞추어져 있다(그림 7). 현장조사는 메소 스케일에서 마이크로 스케일의 석재 훼손에 대한 정보를 얻기 위해서 적용된다. 실험실 분석은 마이크로 스케일과 나노 스케일의 석재 훼손에 대한 정보를 제공한다. 인공풍화실험과 실외노출시험은 실험실 분석과 현장조사와의 연계성을 통해, 메소 스케일, 마이크로 스케일 및 나노 스케일의 석재 훼손에 대한 평가에 더욱 많은 기여를 한다. 매크로 스케일의 석재 훼손에 대한 평가는 구조 공학자와 건축가의 과제가 될 것이다.

## 진 단

석재 훼손의 스케일 - 조사				
스케일	조 사			
나노 스케일 < mm	실험실 분석			실외노출 시험  인공풍화 시험
마이크로 스케일 mm ~ cm	현장 조사		측정	
메조 스케일 cm ~ m	기념물 도면제작			

그림 7. 석재 훼손의 스케일 - 조사.

### 3. 현장조사

현장조사는 기념물 도면제작(3.1.), 현장측정(3.2.)과 시료채취 (3.3.)라는 특정한 활동으로 구성된다. 기념물 도면제작은 정확한 기록, 문서화 그리고 암석유형과 훼손현상의 평가를 위해 적용된다. 현장측정은 암석유형의 특징과악과 훼손상태에 대한 보완적인 정량적 정보를 제공할 수 있다. 기념물 도면제작으로부터 얻어진 결과를 바탕으로 현장측정이 잘 이루어질 수 있다. 기념물 도면제작과 현장측정은 근본적으로 실험실 분석을 위한 시료채취의 최적화에 기여한다.

#### 3.1. 기념물 도면제작(Monument mapping)

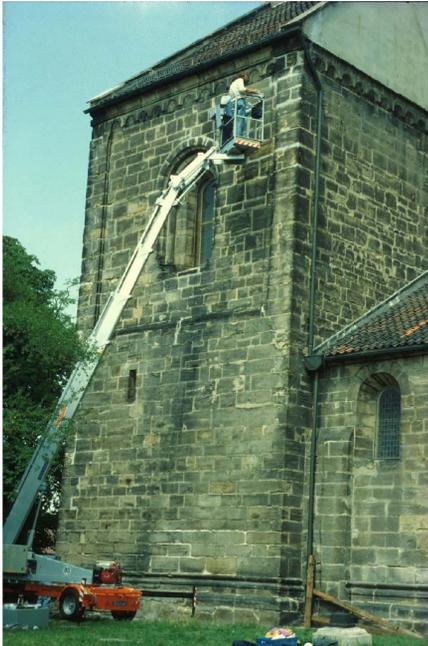
많은 역사적인 석조기념물은 자연 풍화작용, 공해의 영향, 불충분한 관리와 이용, 불안정한 재료의 사용 또는 부적절한 보존의 결과로 심각한 훼손을 겪어 왔다. 석재 훼손상태의 특징과악, 해석 및 평가 그리고 효과적이고 경제적인 보존방안에 대한 계획과 수행을 위해 상세한 진단이 요구된다. 석재 훼손의 요인, 과정 및 특성에 대한 정확한 정보는 훼손상태 진단과 그리고 과학적이고 실용적인 문제 해결에 최적의 요건이 될 것이다. 경험적으로 볼 때 석재 훼손의 요인과 과정에 대한 직접적인 조사는 매우 어렵고 많은 시간과 경비가 소요된다. 빈번히 있는 일이지만 이러한 작업의 결과는 불충분하고 불만족스러운 경우가 많다. 훼손특성, 특히 훼손현상, 훼손단면 및 훼손산물에 대한 조사는 가장 적절한 접근법이다. 훼손특성에 대한 정확한 지식을 통해 석재 훼손의 요인과 과정에 대한 정보를 이끌어낼 수 있으며 또한 적절한 보완적 연구를 제시하고 선정할 수 있게 된다 (e.g. FITZNER, HEINRICHS & VOLKER 1997b; HEINRICHS & FITZNER 2000).

기념물 도면제작 방법은 독일의 연구 파트너에 의해서 암석유형과 훼손현상의 정확한 기록, 문서화와 평가를 위한 비파괴법으로 개발되어 왔다(e.g. FITZNER & HEINRICHS 1998a and 1998b; FITZNER, HEINRICHS & KOWNATZKI 1995; FITZNER, HEINRICHS & KOWNATZKI 1997; FITZNER, HEINRICHS & VOLKER 1997b; FITZNER & KOWNATZKI 1997, HEINRICHS & FITZNER 1999, KOWNATZKI 1997; FITZNER & HEINRICHS 2002).

기념물 도면제작은 모든 석재유형과 그리고 조각물에서 건물의 벽면 또는 건물 전체에 이르기까지 모든 석조물에 적용될 수 있다. 이러한 도면제작 방법은 국제적으로 인정을 받고 있으며 특히 다음과 같은 사항에 기여하는 숙련된 방법으로서 입증되고 있다:

- 석재 훼손의 과학적 지식의 향상,
- 정밀한 훼손상태 진단,
- 위험성 예측,
- 위험성 관리,
- 지속 가능한 기념물 보존대책.

현재 기념물 도면제작은 암석유형, 훼손현상의 형태와 분포에 따라 정확하게 그리고 재생적으로 석재 표면 전체를 기술하고 평가할 수 있는 유일한 방법이다. 세부적인 기념물 도면제작을 위해서는 조사 부위로의 접근이 필수적이다 (그림 8).



고가사다리를 이용한 도면제작



건축용 비계를 이용한 도면제작



카낙사원의 도면제작, 룩소/이집트

그림 8 . 기념물 도면제작.

기념물 도면제작에는 두가지 양식이 구별될 수 있다: 암석학적 도면과 풍화형태 도면. “풍화형태”란 용어는 “훼손현상”과 동의어이며 메소 스케일에(cm~m) 있어서의 가시적인 석재 훼손을 가리킨다.

다음에서는 도면제작 과정과 컴퓨터로 향상시킨 데이터 처리와 평가의 과정이 그림 9에 제시된 도식에 따라 설명된다.



그림 9. 기념물 도면제작, 데이터 처리 및 평가 (FITZNER, HEINRICHS & LA BOUCHARDIERE 2002).

## 도면제작 절차와 데이터 처리

조사 영역의 평면도와 그리고 암석유형과 풍화형태의 분류 방안은 기념물 도면제작에 필수적이다. 이들 분류 방안에 근거하여, 조사 영역에 있는 모든 암석형태와 풍화유형이 기념물 도면제작 과정에 자세하게 기록되고 규정된 기호로 도면에 기록된다. 다양한 풍화형태 부위 또는 특정 풍화형태의 다양한 강도를 가진 부위가 정확히 기재되는 것이다. 도면제작 정보의 적절한 처리, 도해 및 평가를 위해서 VIA(Virtual Image Analyser)라는 컴퓨터 프로그램이 “자연석과 풍화” 연구그룹에 의해서 개발되었다.

데이터 처리의 기본적인 단계들은 다음과 같다:

- 모든 구별되는 부위가 기재된 기념물 평면도의 디지털화,
- 전부위의 수치화 및 면적 측정 평가,
- 규정된 기호를 이용한 도면 정보의 통합(정보화일 I).

디지털 평면도와 정보화일 I 은 다음에 설명되는 도해와 정량적 평가의 토대가 된다. 도면제작 정보의 컴퓨터 처리는 갖가지 다양한 도해와 신뢰할 수 있는 정량적 평가를 용이하게 한다.

풍화형태는 개별적 훼손현상의 유형과 강도에 따라 상세한 기술을 하는데 이용되는 반면에, 훼손범주와 훼손지수는 훼손상태 평가를 위한 실질적인 도구로서 또한 위험성 예측과 위험성 관리에 크게 기여하는 것으로 자리잡아 왔다 (그림 10). 규정된 방안에 근거해서, 모든 풍화형태는 “그 강도의 범위를 고려해서” 훼손범주와 연관된다(정보화일 II). 여기서 여섯 개의 훼손범주가 정해진다: 0 : 가시적 훼손 없음, 1 : 매우 경미한 훼손상태, 2 : 경미한 훼손상태, 3 : 보통의 훼손상태, 4 : 심각한 훼손상태, 5 : 매우 심각한 훼손상태. 이들 훼손범주는 도면에 표시되고 정량적으로 평가된다.

훼손범주의 정량적 평가를 기초로 하여 훼손상태의 종합적인 정량화와 평가를 위한 훼손지수가 계산된다. 이런 방식으로 훼손지수는 가시적 석재 훼손상태의 특징파악, 평가, 정량화 및 등급에 대한 일관적이고도 설득력 있는 연구를 완성시킨다.

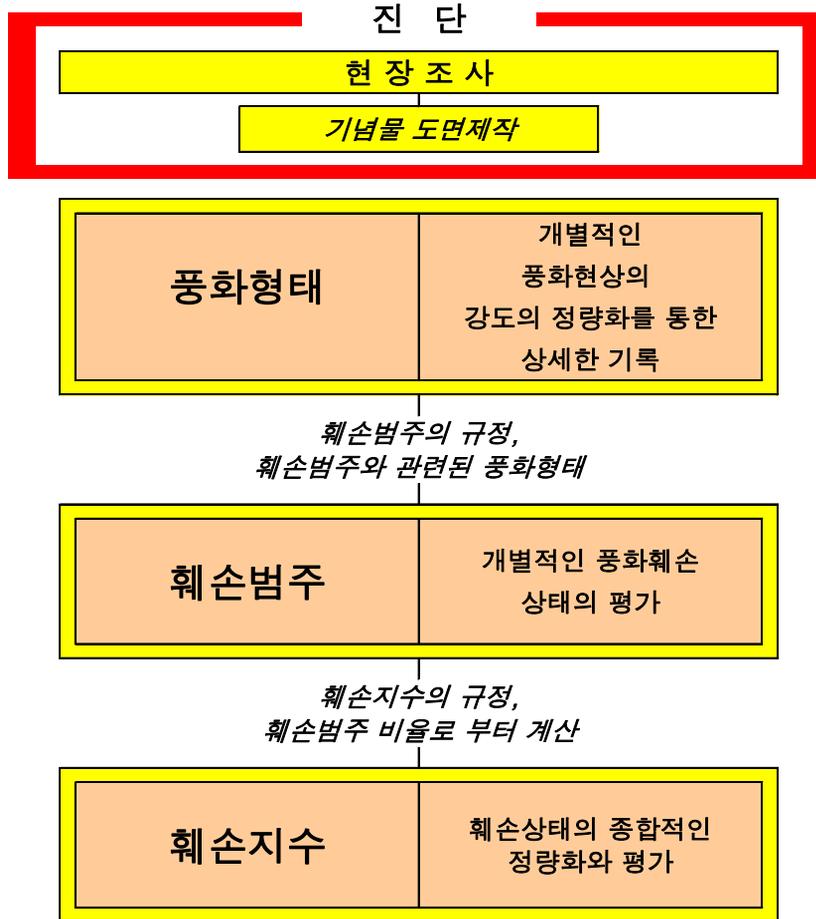


그림 10. 풍화형태 - 훼손범주 - 훼손지수  
(FITZNER, HEINRICHS & LA BOUCHARDIERE 2002).

### 암석학적 도면제작

암석학적 도면제작 양식은 기념물에 나타난 모든 암석유형에 대한 조사, 동정, 암석학적 특징과약과 기록으로 구성된다. 잘 확립되어 있는 암석학적 분류방법이 암석유형을 기술하는데 사용된다. 이때, 원 석재와 과거 복구작업 때 사용된 석재는 구별되어야 한다. 암석유형의 분류방법에 따라 조사 영역의 암석들이 암석별로 도면화되어 암석유형들의 분포가 자료화된다. 이것은 암석유형과 훼손상태와의 모든 상관 관계의 대비뿐만 아니라 적절한 시료채취에도 중요하다. 암석유형은 정량적으로 측정되며 암석유형의 분포는 암석학적 도면에 표시된다.

## 풍화형태의 분류와 도면제작

석조기념물의 풍화형태는 풍화요인 간의 상호작용에 의해 시작되고 변화되는 풍화과정의 가시적 결과이다. “풍화형태”라는 용어는 메소 스케일 (cm ~ m)에서의 가시적인 석재 훼손에 적용된다. 몇가지 풍화 형태의 예를 그림 11에서 볼 수 있다.



균열



벌집형 풍화



굽힘, 인위발생적



파손이탈, 괴상파손



박리유실에서 기인된 표면유실풍화  
입상분해



석재구조에 의한 풍화훼손  
(bedding)

그림 11. 풍화형태 (실예).

풍화형태에 대한 객관적이고도 재생적인 서술 그리고 기록과 문서화를 위해서는 풍화형태의 정확한 분류방법이 필요하다. 이러한 분류방법은 다양한 암석형태와 환경을 고려하여 세계적으로 수많은 기념물에 대한 연구를 기초로해서 개발되었다.

개념 규정, 강도 분류를 위한 적절한 파라미터 및 사진을 갖춘 완벽한 풍화형태 분류법이 Fitzner, Heinrichs 와 Kownstzki(1995)에 의해 발표되었다. 이 분류법은 국제적으로 폭 넓게 인정을 받고 있으며, 그 최신 내용이 Fitzner 와 Heinrichs(2002)에 의해 발표되었다. 이 분류법의 위계도를 그림 12 에서 볼 수 있다. 최상위 레벨 (I)은 4 가지 풍화형태 그룹으로 구성되어 있다:

- 그룹 1 - 석재 유실,
- 그룹 2 - 변색/침적,
- 그룹 3 - 이탈,
- 그룹 4 - 균열/변형.

레벨 II 에서는 각 그룹이 주 풍화형태로 구분된다. 레벨 III 에서는 몇몇의 주 풍화형태가 개별 풍화형태들로 더욱 세분화된다. 분류법의 가장 세분화된 레벨 IV 에서는 개별 풍화형태가 강도에 따라 더욱 세분화된다. 여기서 풍화형태의 기록과 도면제작 정보의 컴퓨터 처리를 위해 기호들이 사용된다. 분류법의 레벨 IV 에서의 기호는 풍화형태에 대해서는 문자로 그리고 풍화형태의 강도에 대해서는 숫자로 구성된다.

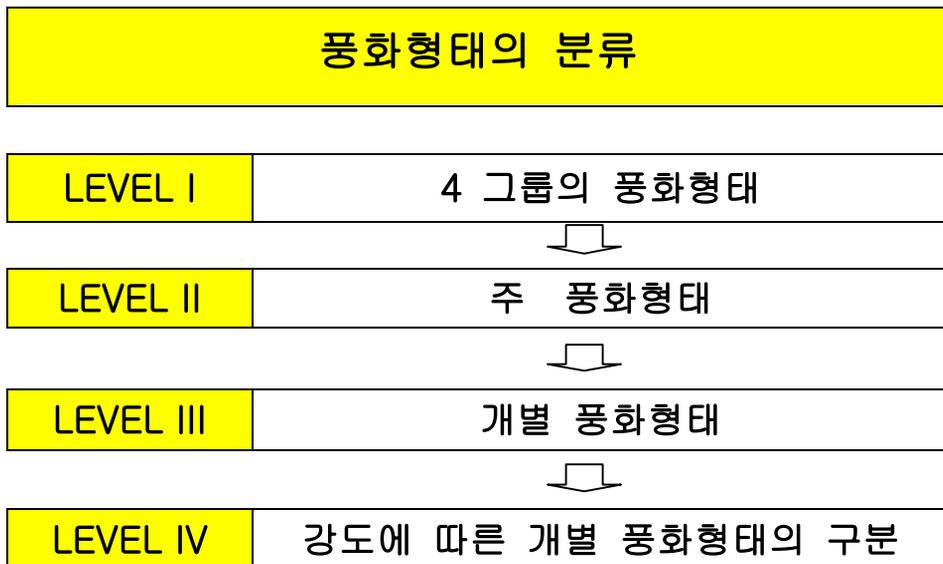


그림 12. 풍화형태의 분류법- 구조.

풍화형태의 이러한 기초적 분류법은 특정 암석형태 또는 기념물 구성물을 고려할 때 더욱 상세히 할 수 있다. 상세히 한다는 것은 개별 풍화형태의 개념 규정과 특히 풍화형태의 적절한 강도 분류와 관련이 있다. 강도 분류는 조사중인 기념물에서 측정된 강도의 범위를 고려하여 조정되어야 한다. 분류법의 한 부분이 그림 13에 제시되어 있다.

LEVEL I - 풍화형태 그룹					
그룹 I: "석재 유실"					
LEVEL II 주 풍화형태		LEVEL III 개별 풍화형태		LEVEL IV 강도에 따라 차별화된 개별 풍화형태	
Relief (요철 풍화)	R	<b>원형/공동형</b> 가장 자리의 원형화 또는 공동에 의한 요철. 오목 또는 볼록 형태.	Ro	요철 깊이에 따른 강도분류 (cm)	Ro1 Ro2 etc.
		<b>벌집형 풍화</b> 벌집형태의 요철. 벌집에상당하는 모양.	Ra		Ra1 Ra2 etc.
		<b>석재구조에 기인한 요철</b> 구조적 특성 (bedding, banding etc.)에서 기인한 요철. 자주 줄무늬 모양	tR		tR1 tR2 etc.
		<b>석재구성요소의 풍화</b> 풍화에 민감한 석재 구성요소 중에서 (점토, 진흙 etc.) 선택적인 풍화에 기인한 요철. 구멍형태.	Rk		강도 1: <0.5 강도 2: 0.5 - 1 강도 3: 1 - 3 강도 4: 3 - 5 강도 5: 5 - 10 강도 6: 10 - 25 강도 7: >25 Rk1 Rk2 etc.
		<b>석재구성요소의 이탈</b> 선택적인 풍화에 의하여 치밀한 암석성분이 (pebbles, concretions) 돌출하는 형태의 요철	Rh		Rh1 Rh2 etc.
		<b>인위적인 영향의 요철</b> 긁음과 같은 형태의 요철.	aR		aR1 aR2 etc.

그림 13. 풍화형태의 분류법 - 부분.

기념물 도면제작 과정에서 기재된 모든 풍화형태는 도면에 그려지고 컴퓨터 자료 처리로 정량적으로 평가된다. 풍화형태를 “석재 유실”, “침적”, “이탈” 및 “균열/변형” 이라는 4 가지 풍화형태 그룹에 따라 도면에 도해하는 것은 매우 적절한 도해양식으로 밝혀졌다.

풍화형태의 도해와 정량적 평가는 다음 사항에 대한 정보를 제공한다:

- 특징적인 풍화형태,
- 풍화형태 간의 상호관계 (특히 석재 유실, 현재의 석재의 이탈과 침적과 관련된),
- 풍화형태의 분포/분대,
- 풍화형태의 생성 순서,
- 풍화진행, 풍화속도,
- 암석의 품질, 풍화민감도,
- 암석 훼손의 원인과 과정.

이들 정보는 특정한 암석유형과 그리고 위치, 지형적 배치 또는 방향과 같은 기념물의 입지 특성에 따라 더욱 상세히 될 수 있다. 결과들을 다른 모드로 변환 가능한 가에 따라, 암석유형, 기념물 특징, 주위 환경과 시대 등 특징적인 풍화형태를 상술하는 것은 평가의 중요한 한 단계이다. 이것은 이 분야에 현대적 연구의 중요한 하나의 대상이 되어온 풍화 모델의 개발에 기여하고 있다.

풍화형태의 평가는 이외에도 기념물 보존조치에 있어서 보존처리의 적합성에 대한 일차적 역할을 한다. 예를 들어, 석재 유실의 특징적인 모든 풍화형태에 대한 정보는 석재 수리, 석재 대체 또는 구조적 강화와 같은 보존조치의 적합성에 관한 최초의 평가를 가능하게 한다. 침적의 특징적인 모든 풍화형태에 대한 정보는 세척이나 또는 탈염과 같은 보존조치의 적합성을 평가하는데 기여한다. 석재의 이탈로 설명되는 모든 풍화형태에 대한 정보는 이탈된 석재부위의 고정, 석재처리 또는 표면 코팅과 같은 보존조치의 적합성을 평가하는데 기여한다.

도면제작 결과를 바탕으로 석재 훼손상태, 풍화단면 및 풍화산물의 특징파악과 정량화를 위한 보완적 현장측정과 시료채취가 잘 이루어 질 수 있다.

## 훼손범주

풍화형태는 유형과 강도에 따라 석재 훼손현상을 정확히 기술하는데 사용된다. 훼손범주는 개별 훼손상태들을 비교, 평가하기 위해 확립되었다 (FITZER & HEINRICHS 2002, FITZNER; HEINRICHS & LA BOUCHARDIERE 2002). 6 개의 훼손범주가 규정되었다 (그림 14).



## 훼손범주의 규정

0	가시적 훼손 없음
I	매우 미약한 훼손상태
II	약한 훼손상태
III	보통의 훼손상태
IV	심각한 훼손상태
V	매우 심각한 훼손상태

그림 14. 훼손범주의 규정.

규정된 방안에 따르면, 모든 풍화형태는 훼손범주와 관련되어 있다. “풍화형태-훼손범주”의 대비방안은 풍화형태와 그 강도, “훼손된 석재부분-석조물 구성요소의 전부위”의 비율, 구조적 요소의 기능뿐만 아니라 석재요소의 역사적, 예술적 가치를 반드시 고려해야 한다(그림 15). “풍화형태-훼손범주”의 적절한 대비방법 개발에는 기념물 진단과 보존에 참여하는 모든 전문가들의 협력이 요구된다.

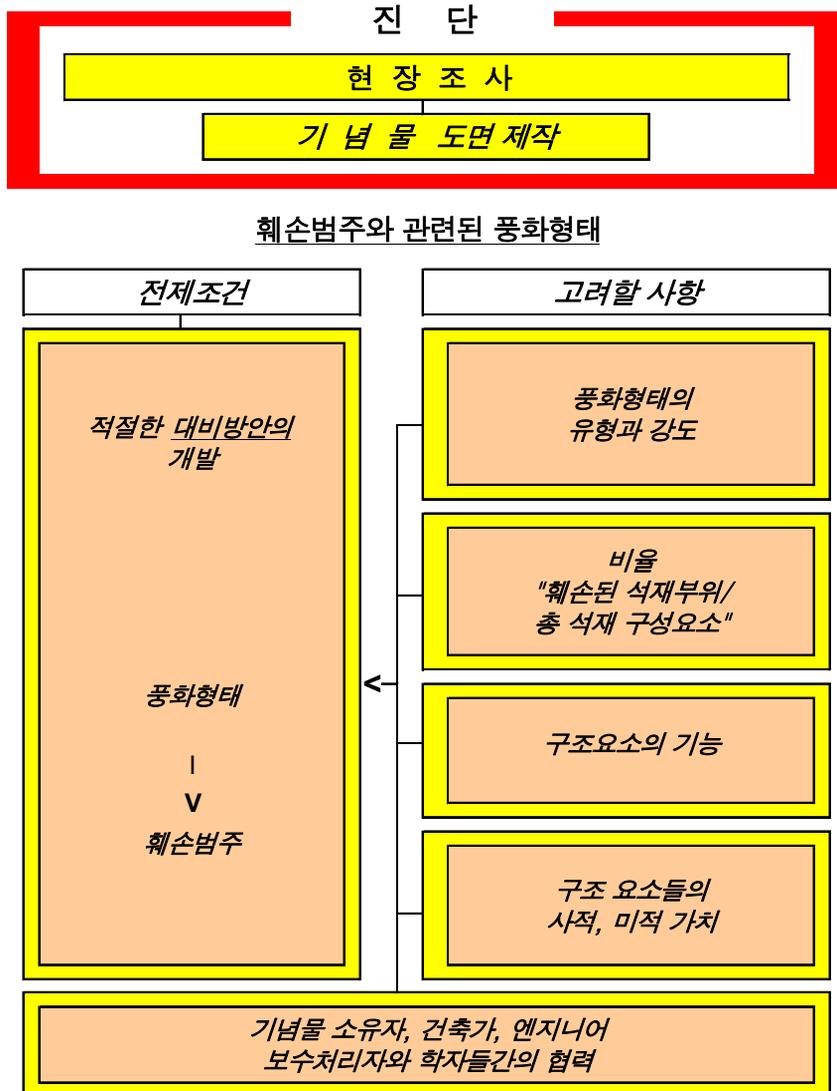


그림 15. 훼손범주와 관련된 풍화형태 - 고려해야 할 사항.

## 훼손지수

훼손지수는 훼손범주의 비율로부터 계산된다(FITZNER, HEINRICHS & LA BOUCHARDIERE 2002; FITZNER & HEINRICHS 2002). 선형 훼손지수와 진행성 훼손지수가 있다 (그림 16). 훼손지수는 0 에서 5.0 까지의 범위를 가지고 있다. 계산 모드에 의하면 선형 훼손지수는 평균적 훼손범주에 해당하는 반면에, 진행성 훼손지수는 높은 훼손범주의 비율을 강조한다. 선형 훼손지수와 진행성 훼손지수의 차이는 보다 높은 훼손 범주의 비율이 증가함에 따라 커진다. 따라서 다음과 같은 연관성이 나타난다:  
즉, 진행성 훼손지수  $\geq$  선형 훼손지수.



그림 16. FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D. (2002)에 의한 훼손지수 계산법.

그림 17 에서는 훼손지수의 대상이 제시되고 있다. 훼손지수의 이용은 전체 기념물 또는 기념물의 단일 구조물에 나타난 석재 훼손의 과학적 정량화와 평가를 보증한다. 훼손지수는 다양한 기념물 또는 기념물의 부분에 대한 비교와 등급을 정하는 것을 가능하게 한다.

훼손지수의 이용은 특히 암석재질 저하에 대한 민감성의 측면에서 근본적으로 석재를 평가하고 비교하는데 공헌한다. 이를 통해 위험성 평가와 위험성 관리가 향상된다. 훼손지수는 보존조치의 필요함과 시급함을 가리키며, 훼손범주는 보존조치가 이루어져야 하는 기념물의 부분들을 밝혀준다. 풍화형태는 보존조치의 적절한 유형을 추론하는데 반드시 고려되어야 한다. 훼손범주와 특히 훼손지수는 신뢰할 수 있는 보존조치에 대한 판단과 입증을 위하여 매우 실용적인 도구이다. 장기 조사와 유지의 구도에서 이루어지는 기념물의 정기적인 재평가를 위해서 풍화형태, 훼손범주와 훼손지수의 적용은 중요하다.

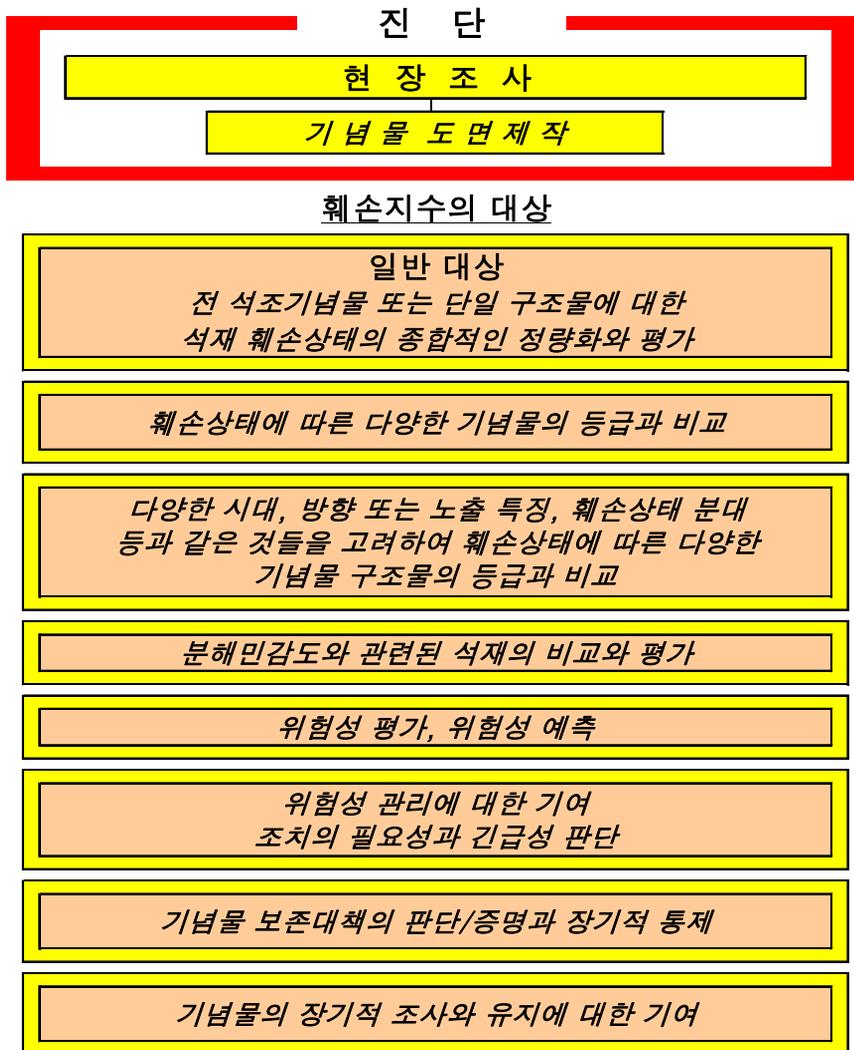


그림 17. 훼손지수의 대상.

풍화형태, 훼손범주와 훼손지수의 이용은 석조기념물에 대한 적절한 훼손상태 진단과 검증된 기념물 보존조치에 대한 첨단 접근법으로, 그리고 또 결정적인 기여를 하는 것으로 생각된다. 풍화형태를 훼손범주와 훼손지수와 연계시키는 일관된 전략은 다음과 같은 최종사용자에게 중요하며 추천하는 바이다:

- 기념물 보존정책과 보존전략의 계획과 결정에 참여한 기관, 기념물 권위자 또는 권리자,
- 건축가, 엔지니어, 보존처리자, 보존학자, 컨설턴트, 프로젝트 관리자, 건설회사와 같은 훼손상태 진단과 기념물 보존수행에 관련된 계약자.

### 3.2. 현장측정

현장측정은 석재와 풍화 특성에 대한 중요한 보완적인 정보를 제공한다. 이는 시료채취 또는 제거에 따른 어떠한 변화도 일으키지 않으면서도 석재 구조에 대한 조사를 현재 조건에서 가능하게 한다. 최근 수십년 간 다양한 측정방법이 개발되었으며, 이 중에는 종종 타 분야에서 도입하여 석조기념물에 적용되도록 수정되어 왔다.

그림 18 은 바로 자주 적용된 방법들의 목록이다. 이들은 표면측정, 음향법(acoustic methodes), 전자기법(electromagnetic methods), 지전기법(geo-electric methods), 물흡수법, 강도시험법, 시추방법 및 화학조사 방법들로 구분될 수 있다. 실행 양식들은 비파괴적, 경미하게 파괴적인 것 그리고 파괴적인 것으로 분류되는데, 비파괴적인 것들이 보다 선호되어야 한다. 장비, 작업 절차와 비용들을 고려할 때, 소요경비는 크게 변화될 수 있다. 대부분의 방법들은 작은 점부위(spot)로만 측정되며 석재 구조의 매우 한정된 부분에 대한 정보만을 제공한다. 따라서 신뢰할 수 있고 대표할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 해당 기념물에 있어 특정 영역의 선정과 충분한 횡수의 측정이 요구된다. 매우 타당한 현장측정 방법 몇가지를 아래에 간단하게 설명하겠다.

# 진 단

## 현 장 조 사

### 측 정

방법 그룹	방법	요소	가법	경비
표면 측정	단면측정 거칠기측정	요철	비파괴	낮음 ~ 중간
	사진측량법	요철, 형태		높음
	레이저-광학법	변형		높음
	균열측정	균열 특징		낮음
음향법	초음파 측정	경계면	비파괴	중간
전자기법	방사선법	수분함량 공극, 포획물	비파괴	매우 낮음
	다중사진측량	분광학적인 특징		중간
	적외선-열 그래피	표면온도		중간
	레이더	경계면		중간
지전기법	전기저항 측정	수분함량 염분함량	비파괴 약간 파괴	중간
물흡수법	물흡수 측정	흡착 용량	비파괴	낮음
강도측정법	인장강도 시험	접착장력 강도	파괴	중간
	드릴링저항 측정	강도	약간 파괴	중간
	반발강도 측정		비파괴	낮음
	침투강도 측정		비파괴	낮음
시추 조사	앤도스코피		구조, 조직	약한 비파괴
	방사선법	수분함량		
화학적 방법	색도시험	미생물의 활동	비파괴	낮음
	호흡시험			

그림 18. 현장조사 (예. NAPPI & CÔTE 1997, KOWNATZKI 1997).

초음파 측정법은 석재유형과 풍화상태의 특징 파악에 적절한 비파괴적인 음향법(acoustic method)이다(그림 19). 투과 모드에 의한 초음파 측정법은 특히 자연석, 예를 들어 기둥, 지주(pillars), 벽기둥 (pilasters), 석판 (slabs), 조각 장식 등에 성공적으로 적용될 수 있다. 초음파 속도는 투과 시간과 측정되는 거리로부터 계산된다. 초음파 측정결과는 현상적 연구(석재유형 구분, 석재의 이방성, 풍화상태 등)로부터 얻어지는 결과의 보완, 입증과 정량화에 중요할 수 있다.

초음파 측정법은 또한 석재의 갈라진 틈에 대한 기하학적 정보를 얻는데 이용될 수도 있다. 더욱이 이미 존재하던 거시적 암석 재질 저하 현상도 이를 통해 탐지 될 수 있다(예 : 입상분해, 미세균열 등). 초음파 속도의 분류방법은 훼손정도를 평가하기 위해 개별 석재유형에 따라 개발 될 수 있다. 초음파 측정은 석재 구조의 장기적 관찰에 매우 적합하며 또한 보존방안, 특히 보존처리의 효과성에 대한 정보를 얻는데 성공적으로 적용할 수 있다. 석재 구조에 대한 초음파 토모그래피는 현대 과학의 관심사 중의 하나이다.

적외선-열 분석법(IR-thermography)은 전자기적 방법이다. 석재의 열에서 유도된 적외선 복사에너지가 이를 통해 기록되며 표면의 온도 변화가 감지된다. 표면 온도 측정은 큰 규모의 석재 구조에서도 가능하다. 석재에 대한 온도작용의 결과는 석재유형, 풍화상태와 노출특성의 정보를 얻는데 기여한다. 풍화훼손은 비정상적 온도에 의해서 인지될 수 있다. 적외선-열 분석법으로 얻어지는 결과는 또한 높은 습도에 의하여 영향을 받는 표면 영역을 지적해준다.

물흡수 측정법은 모세관물흡수, 시간에 따른 수분의 침투 깊이의 정량화 및 수분의 이동 특성 조사에 사용된다(그림 20). 여기서 얻어지는 결과는 부가적으로 석재 공극의 성질과 표면 상태에 대한 정보를 제공한다. 석재와 풍화상태는 이를 통해 특징이 파악되고 비교된다.



그림 19. 초음파 측정.



그림 20. 카르스텐 관에 의한 물흡수 측정.

물흡수 측정 시 매우 자주 사용되는 간단한 비파괴적 방법은 카르스텐 관 방법이다. 물흡수 측정은 또한 석재처리, 특히 방수처리의 효과성 연구에 매우 적합하다.

드릴링저항성 측정과 반발강도 측정은 역학적인 석재특성의 정보를 얻기 위해 현장에서 자주 적용된다. 드릴링저항성 측정법은 드릴링 깊이와 드릴링 시간 간의 비율을 기록하는 현대적인 경미한 파괴법이다 (그림 21). 휴대용 드릴링 장비를 통한 드릴링 작업은 일정한 압력, 에너지 공급 및 회전 속도로 수행된다. 석재 강도의 지표로서 드릴링 강도에 대한 드릴링 저항성이 계산된다.

코아단면은 드릴링 깊이 대 드릴링저항성의 특징파악에 사용된다. 드릴링저항성 측정으로 얻어진 결과는 석재유형의 비교, 풍화단면의 특성 및 풍화형태와 풍화단면 간의 대비 등에 대한 정량적 정보를 보증한다. 또한 부가적으로 실험실 분석에 필요한 드릴링 분말이 수집될 수 있다.

슈미트 해머 시험을 통한 반발경도 측정법은 석재의 역학적 특성에 대한 정보를 수집하는데 있어 가장 인기있는 현장측정 방법이다(그림 22). 막대피스톤이 석재 표면을 때리면 질량이 반발하는 경향이 있다. 반발되는 정도는 에너지 흡수와 대비되는데, 에너지 흡수는 석재의 경도에 의존한다. 석재 경도를 암석의 강도에 대비시키기 위한 시도가 이루어졌다. 이 결과로 석재유형의 특징파악과 비교는 물론 약화된 석재상태에 대한 정량적 정보를 얻게된다.

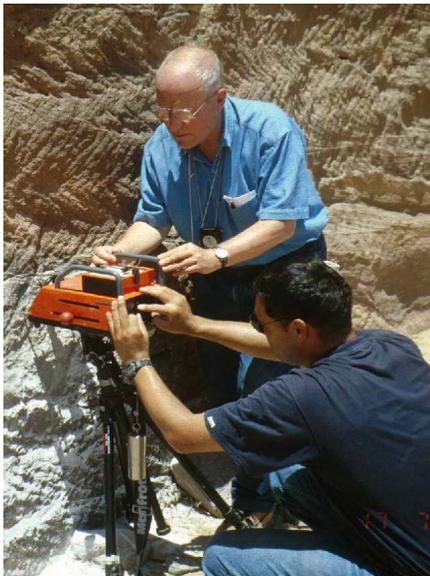


그림 21. 드릴링저항성 측정.

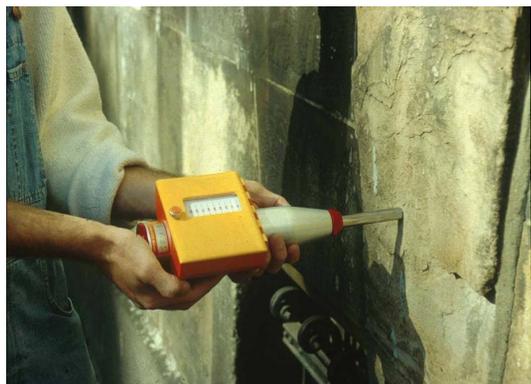


그림 22. 슈미트 해머에 의한 반발경도 측정.

### 3.3. 시료채취

완벽한 진단구도에서는 풍화되지 않은 부위, 풍화된 부위 및 처리된 석재의 시료가 다음과 같은 순서로 실험실에서의 연구를 위하여 필요하다:

- 석재의 특징파악과 분류,
- 풍화에 의한 석재변질의 특징파악, 정량화 및 평가,
- 풍화산물의 동정과 정량화,
- 석재 재질의 평가,
- 석재 처리 효과성의 특징파악과 평가.

실험실 분석, 인공풍화실험 또는 실외노출시험에 사용되는 신선한 석재는 관련된 채석장에서 채취되어야 한다. 특히 역사적인 기념물에서 풍화되었거나 또는 처리된 석재의 시료채취 시에는 어떠한 부가적인 훼손도 최소화 될 수 있도록 아주 조심스럽게 이루어져야만 한다. 시료의 수와 양은 규정된 과학적이고도 실제적 문제들을 체계적으로 접근하여 만족스럽게 해결될 수 있도록 결정되어야 한다. 오늘날에는 많은 분석 기술에 있어 소량의 석재만이 필요하다. 선행된 현장연구에서 얻어진 결과에 근거해서, 대표성 있는 시료채취가 잘 이루어질 수 있으며 또한 그 양도 필요한 정도로 축소될 수 있다. 시료채취의 정확한 문서화도 요구된다.



그림 23. 기념물과 채석장에서의 시료채취.

#### 4. 실험실 분석

장구한 시간의 복잡한 지질역사는 매우 다양한 석재유형과 그리고 석재특성에 두드러진 다양성을 가져왔다(그림 24). 건축 자재로 사용된 모든 자연 석재는 자연적 또는 인위적으로 초래된 풍화과정에 의해 영향을 받는다. 풍화과정은 다시 석재특성의 변화를 가져온다. 풍화로 인한 석재 특성과 그 변형에 대한 정확한 연구결과는 완벽한 진단을 위하여 매우 중요한 부분이며 효과적인 기념물 보존대책에 가장 중요한 것이다.



사암

화강암

석회암

그림 24. 이집트 고지대에 있는 역사적 기념물들에서의 전형적인 암석유형.

육안적 특성, 광물조성, 지화학 조성, 미세조직상의 특징, 공극률 성질, 수분 성질, 역학적 성질 및 열적 성질과 같은 석재특성들은 현대적 분석방법으로 연구된다(그림 25). 구성요소의 조성과 공간-기하학적 배열은 기본적인 석재특성을 대표하는데, 이들 특성들은 수분, 역학적 또는 열적 성질과 같은 보다 세부적인 특성들을 조절한다. 매우 다양한 방법들이 석재특성 분석을 위해 개발되어왔다. 따라서 적절한 방법 그리고 각각의 경우에 적절한 방법의 조합을 선정하는 것이 아주 중요하며, 이는 규정된 과학적이고 실제적 문제를 해결하는데 가장 효과적인 접근을 보증하는 것이다.

# 진 단

## 실험실 분석

요 소	분 석 절 차
<p style="text-align: center;"><b>육안적 특징</b> 색, 광택, 거시조직, 거시구조</p>	<p style="text-align: center;">돋보기, 쌍안현미경, 색도표, 색측정계, 반사도측정기</p>
<p style="text-align: center;"><b>광물조성</b></p>	<p style="text-align: center;">광학현미경법, X-선 회절법(XRD)</p>
<p style="text-align: center;"><b>지화학 성분</b> 화합물, 원소성분, 미량성분, 용해염, 음이온/양이온, pH-값, 유기물</p>	<p style="text-align: center;">습식분석, 에너지분산 X-선 분석기를 부착한 주사전자현미경법 (SEM / EDX), X-선형광분석법 (XRF), 현미분석법, 원자흡광분석법 (AAS), 원자흡출분석법 (AES), 이온크로마토그래피 (IC), 질량분석법(MS), 열분석법</p>
<p style="text-align: center;"><b>미세조직</b> 입자모양, 입자크기, 입자크기분포, 입자접촉상태, 매트릭스/바탕/교결물, 재결정, 인터그로스/오버그로스, 광물의 배열/광물의 방향, 불균일, 이방성, 경계면, 미세열극, 미세형태, 거칠기</p>	<p style="text-align: center;">이미지 분석기를 부착한 광학현미경법, 주사전자현미경법(SEM), 현미토모그래피, 초음파측정, 거칠기측정기, 퍼토미터, 레이저-광학 측정</p>
<p style="text-align: center;"><b>공극성질</b> 밀도, 공극률, 공극크기, 공극크기분포, 공극표면</p>	<p style="text-align: center;">피크노미터, 이미지 분석기를 부착한 광학현미경법, 주사전자현미경법(SEM), 수은-공극측정계, 가스흡착법, BET-방법, X-선 미세단층촬영법</p>
<p style="text-align: center;"><b>수분과 관련된 성질</b> 물 흡수/탈수, 포화지수, 투수성, 수분흡수용량, 등온 수증기 흡수, 수증기투과성 수분흡수 팽창-수축/팽창</p>	<p style="text-align: center;">질량변화 무게측정 (침수, 모세관 젖음, 흡수 / 탈수, 증발), 건조 cup / 습식 cup 방법, 길이변화 측정 / 딜라토미터 / 팽창계이지</p>
<p style="text-align: center;"><b>역학적 성질</b> 압축강도, 인장 강도, 구부림강도, 전단강도, 탄성계수, 응력변형 관계, 건조-젖음 강도 비율, 정적/ 동적 경도, 마찰 / 뒹음 저항성</p>	<p style="text-align: center;">다양한 표준강도 시험법 인장강도시험, 초음파 측정, 굽음 / 자국 / 반발 / 충돌강도 시험, (슈미트 해머, sclerometer),</p>
<p style="text-align: center;"><b>열적 성질</b> 열전도성, 열용량, 열저항성, 열팽창-수축/팽창</p>	<p style="text-align: center;">드릴링저항 측정, 그라인딩 휠 법 핫 플래이트법, 핫박스법, 길이변화 측정 / 딜라토미터/팽창면적</p>

그림 25. 실험실 분석.

## 육안적 특성

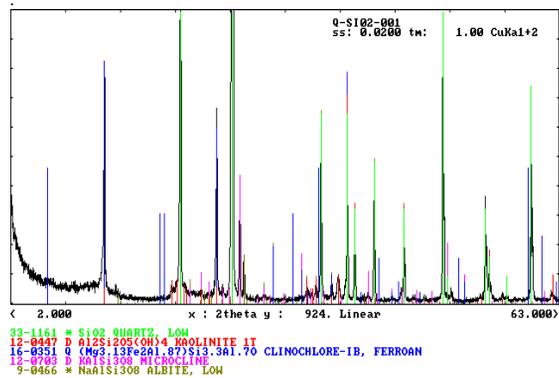
이 분석의 제 1 단계는 색, 광택, 육안으로 식별 가능한 광물 성분 및 거시조직/거시구조 특징과 같은 거시적 범주에 따른 석재의 정확한 기술과 문서화로 이루어진다. 색도계 (예. MUNSELL 색도계)는 석재의 색을 객관적으로 규정하는데 매우 빈번하게 사용된다. 색의 상술과 측정에 대한 상세한 정보는 URLAND(1999)에 의해 소개되어 있다. 손돋보기 또는 쌍안현미경 같은 표준 도구는 거시조직/거시구조 특징을 기술하기 위해 사용된다. 이들 거시적 특성에 근거해서 석재들은 상위의 암석그룹에 지정될 수 있는 것이다.

## 광물 조성

X-선 회절분석법(XRD)은 광물 조성을 밝히는 대표적인 고전적 방법이며 더욱이 풍화, 특히 점토광물과 새로이 생성된 광물의 동정에 가장 효과적인 방법이다(그림 26). 분석에 필요한 암석의 양이 적다는 것은 이 방법이 갖는 또 다른 무시할 수 없는 장점이다.



X-선 회절분석기



X-선 회절패턴, 사암.

그림 26. X-선 회절분석 (XRD).

박편 분석법은 광물 조성 확인에 추가적으로 기여하며 특히 광물 조성을 정량화에 표준 방법으로 적용되고 있다. 이들 조성을 통해 석재는 잘 설정된 표준 암석 분류 도식에 따라 암석학적으로 분류된다. 게다가 광물의 변질, 용해, 분해 및 풍화에 따른 새로운 광물의 형성도 기술된다.

## 지화학 조성

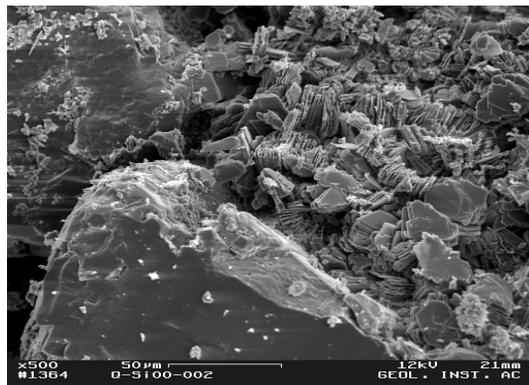
지화학 조성에 대한 정보는 석재의 특징파악과 분류 및 석재변질에 대한 기재와 정량화에 기여한다. 지화학 자료는 암석성인의 규명에 매우 중요하다. 지화학 자료를 자연 석재의 성인을 동정하고 검증하는데 „지문(fingerprint)“으로 사용하는 시도들이 있어왔다. 더욱 지화학적 분석은 석재에 대한 환경적 영향에 대한 정보(오염물, 새로이 생성된 광물/염분, 유기물질 등)를 위하여 중요하다. X-선 형광분석법(XRF), 현미분석, 원자흡수분광광도법(AAS)과 원자발광분광법(AES)은 지화학 성분의 정확한 측정에 중요한 분석법들이다. 염분은 주로 습식화학분석법, 이온크로마토그래피(IC) 와 포토메트릭 방법을 통해 분석된다.

## 미세조직상의 특성

미세조직상의 특성은 풍화작용과 자연석의 내구성을 결정하는데 매우 중요하다. 구성 요소의 형태, 크기, 접촉상태, 배열/방향과 재결정화, 성분들 인터그로스/오버그로스 뿐 아니라 불균일성, 이방성, 경계면 또는 미세형태는 자연석의 미세조직상의 특성을 파악하는 요인들이다. 석재의 성인과 풍화에 대한 석재의 민감성은 이들 특성들로부터 추정된다. 이미지 분석시스템을 갖춘 광학현미경분석법과 주사전자현미경분석법 (그림 27)은 대표적인 미세조직 연구법이다.



주사전자현미경.



주사전자현미경 사진. 사암. 석영입자 사이의 자생적 캐올리나이트 더미.

그림 27. 주사전자현미경 분석법 (SEM).

미세단층촬영, 초음파 측정법, 거칠기 측정법 및 레이저-광학 측정법은 미세조직의 평가에 보완적인 방법으로서 적용될 수 있다.

## 공극률 특성

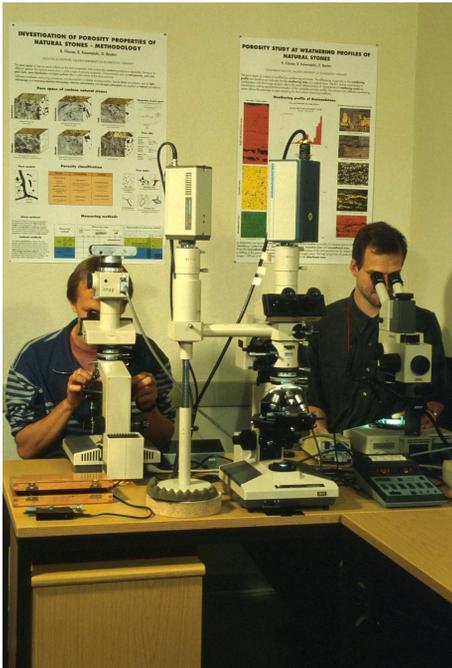
공극률은 자연석재의 질과 풍화작용을 결정적으로 규제한다. 물리적, 화학적, 생물학적 풍화과정은 주로 공극공간에서 진행되며 동시에 공극률 특성들을 변화시킨다. 총공극률, 공극크기, 공극크기 분포와 공극표면과 같은 공극률 특성에 대한 정확한 지식은 다음과 사항에 있어 매우 중요하다:

- 석재 특징과악,
- 기체상과 액체상의 이동과정에 대한 모델링,
- 석재의 내구성 평가,
- 자연석재의 풍화작용에 대한 해석 및 예측,
- 석재 훼손상태의 정량화 및 평가,
- 석재처리의 효과성에 대한 평가.

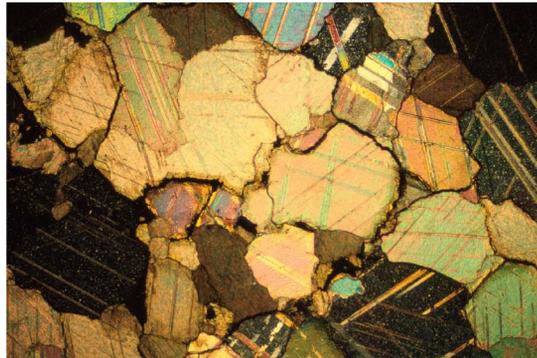
아헨 공대의 “자연석과 풍화” 연구그룹은 실제적인 공극률 특성의 평가, 공극모델의 개발 및 공극률 특성과 자연석의 풍화작용 간의 상관관계를 평가하는데 장기간의 경험을 가지고 있다. 이 경험을 통하여 매우 복잡한 공극률 특성이 하나의 분석 방법으로 만족스럽게 결정 될 수 없음이 밝혀졌다. 분석에 활용되는 다양한 직, 간접적인 방법의 연계적용만이 신뢰할 수 있고 실제적인 공극률 특성을 보증할 수 있다 (Fitzner 1994, Borelli 1999).

공극률 특성에 대한 연계평가에 4 가지 보완적인 방법을 계속해서 간단하게 기술한다. 박편 분석법과 주사전자현미경 분석법은 공극공간의 직접적인 문서화와 측정을 가능하게 하는 방법이며, 수은공극측정법과 질소흡착법은 간접적인 방법들이다. 대부분의 간접적인 방법들을 통해서 공극공간(예. 수은공극측정법)에서의 액상의 유입과 유출작용 또는 공극 표면에서의 가스의 흡착(예. 질소흡착법)이 측정된다. 이 때 얻어지는 측정 결과를 통해 공극률 데이터가 계산된다.

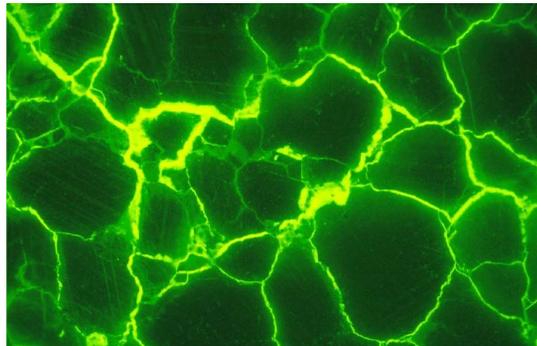
박편 분석법은 공극률 조사의 전통적인 직접적인 방법이다(그림 28). 이 방법에서 측정의 하한적 한계는 현미경의 분해능 한계에 달려 있다 (통상체계: 약 4 미크론). 이미지분석기의 부가적인 사용은 공극률, 공극 크기와 공극형태에 대한 통계적 평가를 상당히 향상시킨다. 이미지분석기로 측정할 때 공극 공간의 완전한 가시성이 요구된다. 이것은 유색의 물질이나 UV-형광 수지로 석재를 함침시킴으로서 이루어질 수 있다.



투과광학현미경.



박편. 대리암



UV-광에서의 함침박편상, 공극(황색).

그림 28. 이미지분석기를 부착한 투과광학현미경.

0.001 $\mu\text{m}$  까지의 분해능 한계를 갖는 공극률 연구는 주사전자현미경 분석법을 통해 가능하다. 공극의 구조 및 공간적인 분포는 이러한 방법에 의해서 정확히 기술될 수 있는 반면에, 공극률의 통계적 정보는 고배율에 따른 매우 작은 시료 부위로 인해 제한적이다. 따라서 상당히 많은 수의 부위가 조사되어야 할 것이다.

수은공극측정법은 공극률 연구에 있어 가장 빈번하게 적용되는 간접적 측정방법이다 (그림 29). 이 방법을 통해 - 다른 모든 측정방법과는 상반되게 - 자연 석재에서 발생하는 공극 크기의 전범위가 대부분 연구될 수 있다. 압력에 따른 수은 유입의 원칙에 따라 반경 0.0019 에서 200  $\mu\text{m}$  까지의 공극이 측정될 수 있다. 최소 반경 0.0019 $\mu\text{m}$  의 공극은 4000 bar 의 압력에 상응하는데, 이 압력세기는 통상체계에서 최대 압력을 가리킨다. 수은공극측정법으로부터 얻어지는 측정결과는 통과에 필요한 압력과 공극크기 사이의 비례성에 근거하여 총공극률, 밀도, 평균 공극 반경, 공극크기분포 (공극크기 순서!)와 공극 표면에 대한 계산을 가능하게 한다.

공극 표면 영역, 공극 부피 및 측정 범위 0.001 에서 0.1 $\mu\text{m}$  까지의 공극반경 분포는 질소흡착법에 의해 규정될 수 있다(그림 30). 이들 공극률 데이터는 다공성 재질에 의해 등온적으로 흡수된 가스의 양으로부터 계산될 수 있다. 이 방법은 미세공극 분석에 최상의 결과를 제공하는 것으로 알려졌다.



그림 29. 수은공극측정기.



그림 30. 질소흡착분석기.

박편 분석법/이미지 분석법, 주사전자현미경법, 수은공극측정법 및 질소흡착법의 측정범위는 부분적으로 중복된다. 이 점은 사실적인 공극률 데이터를 얻기 위하여 결과들을 비교와 연계 평가에 있어 아주 중요하다.

## 수분 성질

풍화과정은 물과 연관되어 있다. 자연 석재의 수분 성질은 석재의 공극률 특성에 의해 규제된다. 자연석재의 물흡수와 탈수, 물수송과 이동 및 함수팽창은 중요한 수분 과정이다. 수분 성질에 대한 지식은 석재의 특징 파악, 풍화상태 뿐 아니라 석재 처리와 효과적인 보호장치(agents)의 디자인에 있어 중요하다.

국가적, 국제적인 제규범이 물흡수/탈수, 포화계수, 수분투수성, 함수 용량, 등은 수증기흡수성 또는 수증기투과성과 같은 수분성질 연구를 위하여 잘 확립되어 있다. 자연석의 수분흡수 수축/팽창은 딜라토메터, 팽창면적 측정기나 또 다른 길이변화 측정기구에 의해 측정된다. 높게 팽창하는 점토광물과 특정 염광물들은 석재 훼손 메커니즘으로서 높은 수분 흡수팽창을 일으킬 수 있다.

## 역학적 성질

석재 풍화는 강도/경도의 저하와 연관되어 있다(입자분해, 결합 물질의 유실, 균열 등). 강도/경도와 변형성질에 대한 정보는 부수적으로 석재 훼손상태의 특징파악과 정량화를 용이하게 한다. 역학적 성질의 결과들을 통합함으로써 석재 life cycle 분석과 석재 내구성의 평가 뿐 아니라 자연 석재의 풍화 작용에 관한 모델의 추론을 쉽게 한다.

대부분의 표준강도시험법은 파괴적이라는 점이 고려되어야 한다. 이들은 많은 양의 석재와 크기가 큰 시료를 필요로 한다. 이에 대한 대안으로서, 비파괴적 또는 극소 파괴적 방법(초음파 측정법, 다양한 형태의 경도측정법, 드릴링저항성 측정법)은 강도의 척도로서 초음파 속도 또는 경도에 대한 측정결과를 제공할 수 있다. 이러한 대안적인 방법들은 역사적인 구성 재료의 조사에 더 적합하며 보다 상세한 연구를 위한 석재의 재사용을 가능하게 한다.

## 열적 성질

석재의 온도 변화에 대한 반응과 적응성은 열분석에 의해 파악된다. 풍화요인으로서 온도를 평가하는 것은 중요하다.

핫플레이트와 열상자법(hot box), 딜라토메타, 팽창면적 측정기 또는 다른 길이변화 측정장치들은 열전도성, 열용량, 열저항성 또는 열팽창과 같은 열적 특성을 측정하는데 사용된다.

## 5. 인공풍화실험 및 실외노출시험

가속화된 인공풍화실험과 실외노출시험의 주 목적은 석재 훼손 메커니즘과 과정을 밝히는 것이다(Mirwald & Brueggerhoff 1997). 이것은 다음과 같은 연구에 기여한다:

- 풍화 모델의 개발,
- 풍화진행과정의 특징파악과 정량화,
- 석재의 질/견고성의 평가,
- 대체 석재로서의 적절한 자연석재의 선택,
- 석재 처리 효율성 평가.

그림 31에서는 인공풍화실험과 실외노출시험 과정들이 시험의 유형, 시험 파라미터, 평가 기준에 따라 열거되어 있다. 인공풍화실험과 실외노출연구의 큰 장점은 동일한 조건 하에서 다양한 물질들을 비교할 수 있다는 것이다 (예. Fitzner & Kalde 1991). 모든 유형의 실험에는 석재의 초기 성질에 대한 철저한 기술, 외부 요소의 정량화 그리고 석재에 나타나는 모든 변화의 기록이 결과의 신뢰성 있는 해석의 토대로서 요구된다.

실외노출시험과 비교할 때, 실내(chamber)에서 이루어지는 인공풍화실험은 시간의 단축과 요소의 통제가 가능하다는 이점이 있다. 표준 인공풍화실험의 몇몇 규범들은 국가적이고 국제적인 기관들에 의해서 설정되어 왔다 (Rielm, Astm, Din, Astm, Vdi, Normal etc.).

## 진 단

### 인공 풍화실험 및 실외 노출 시험

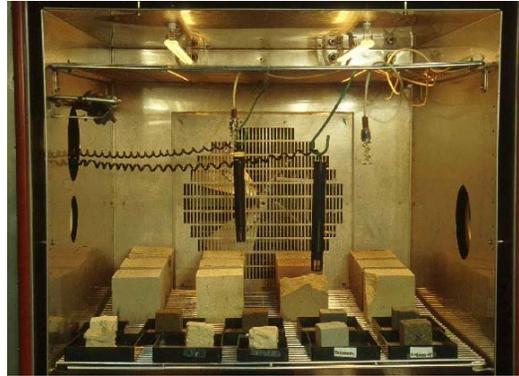
인공 시험 유형	시험 요소	평가 기준
<b>물리적 인공풍화실험</b>		
온도 변화 시험	온도 구배 반복 횟수	육안 검사, 질량 변화, 구조 변화
염결정 시험	염, 농도, 포화 기간, 반복 횟수	
결빙-해빙 반복 시험	수분 포화, 결빙 기간, 반복 횟수	
염/결빙-해빙 반복 결함 시험	염분 종류, 농도, 염분 공급, 포화 기간, 결빙 기간, 반복 횟수	
<b>화학적 인공풍화실험</b>		
공기 오염 시험	가스 (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> ), 농도, 반복 횟수	육안 검사, 질량 변화, 변질 산물
광 시험	UV- 파장, 발광 강도 반복 횟수	육안 검사, 빛 안정성
<b>생물학적 인공풍화실험</b>		
생물체 감수성 시험	기후 조건 유기물 조합	육안 검사, 생체막/용해, 새로운 생성
<b>물리적, 화학적, 생물학적 풍화의 결합</b>		
<b>자연현상과 흡사한 시험</b>		
결합된 시험	염, 농도 포화 기간, 온도 구배 상대 습도, 안개, 비, 바람, 조사, 반복 횟수	육안 검사 질량 변화 구조 변화 변질 산물
<b>실외노출시험</b>		
다른 환경의 시험장	자연적인 환경	육안 검사, 질량 변화, 구조 변화 변질 산물

그림 31. 인공 풍화 실험 및 실외 노출 시험.

자연적으로 일어나는 다양한 풍화요인의 복잡한 상호작용과 시너지 효과가 실내에서 행해지는 가속인공풍화실험을 통해서 모두 다 연구될 수 없지만, 실험결과와 기념물에서 관찰되는 풍화현상 간의 대비를 함으로서 석재 악화를 통제하는 주 요인과 과정들을 동정하고 파악하게 한다. 가속인공풍화실험은 풍화과정 연구에 중요한 도구이다(그림 32). 또한 석재 처리의 효율성과 석재 내구성을 평가하는데에도 이 방법은 매우 적절하다.



인공풍화실험기.



인공풍화실험.



30 회 결빙-해빙 사이클 전과 후의 사암시료.

그림 32. 가속인공풍화실험.

실외노출시험은 장기적인 연구로서, 석재 시료를 자연적인 기후요소와 환경요소에 노출시키는 것이다(그림 33). 실외노출시험은 다음과 같은 과학적이고 실제적인 목적에 기여한다:

- 석재유형, 풍화요인 및 시간에 따른 풍화 메카니즘과 과정,  
    풍화현상과 풍화훼손상태의 분류와 정량적인 평가,
- 석재의 성질과 주위 환경의 영향을 고려한 임계적 수준의 동정,
- 석재 훼손상태의 시작, 선-거시적(pre-macroscopic) 및  
    초기상태의 정량화와 설명,
- 석재처리 효과성의 평가,
- 기념물 보존대책 전략의 고안.



독일 뒤이스부르크의 시험장.  
시료모양 (“아스테릭스”)은 기념물에서 발생할 수 있는 것과 같은 노출특징을 모방하였다.



독일 아헨의 시험장.

그림 33. 실외노출시험.

## 6. 결론

석조기념물의 풍화훼손에 대한 특성파악, 해석, 평가 및 예측을 위해서는 훼손상태에 대한 정확한 진단이 요구되며, 이것은 지속 가능한 기념물의 보존대책에 절대적이다. 기념물 도면제작 방법은 풍화훼손 상태

의 평가와 현장연구에 현대적인 과학적 방법으로서 개발되어 왔으며, 완벽하고 신뢰할 수 있는 훼손상태 진단을 위하여 크게 기여하였다. 이 방법은 국제적으로 넓게 인정을 받아 세계적으로 수 많은 기념물에 성공적으로 적용되었다. 이 방법에 따른 풍화형태, 훼손범주와 훼손지수의 사용은 석조기념물에 발생하는 풍화훼손의 특성과약, 정량적 평가, 등급 평가에 보편화된 전략일 뿐 아니라, 적절하고 경제적인 기념물 보존대책을 유도하는데 중요한 토대이다. 풍화훼손상태의 평가는 암석학적 도면제작과 풍화형태의 도면제작에 근거해서 이루어진다. 풍화형태의 자세한 분류법은 풍화현상을 객관적이고 재생적으로 기술, 기록하는데 필수적인 것이 되었다. 훼손범주는 개별 훼손상태의 평가에 사용되고 훼손지수는 석조기념물에 발생한 풍화훼손을 결론적으로 정량화하고 평가하는데 매우 실용적인 도구로서 도입되었다. 기념물 보존대책의 실제 수행에 기념물 지도제작을 통해 얻어지는 결과들은 효과적이고 경제적인 기념물 보존 방법을 추출, 시험/적용 및 실행함에 큰 기여를 한다. 도면제작 방법은 비용 대비 고이익을 보증하며 현장연구와 결과평가에 드는 비용은 효율적이고 경제적인 보존방법을 통해 상각된다. 이 방법에 따른 풍화형태, 훼손범주, 훼손지수의 사용은 또한 보존대책의 조정/검증에 그리고 기념물의 장기적 조사와 관리라는 구도에서 이루어지는 정기적인 재평가를 위하여 매우 적절한 전략이다.

현장측정은 석재와 풍화 특성에 대한 중요하고 보완적인 정량적 정보를 제공한다. 이것은 또한 시료채취 또는 제거에 따른 어떤 변화에도 상관없이 석재 구조를 조사할 수 있게 한다. 완벽한 훼손상태 진단의 구도에서, 풍화되지 않은 암석, 풍화된 암석 및 처리된 암석들이 실험실 분석, 인공풍화실험 및 실외노출실험을 위해 필요하다. 시료채취는 선행된 현장 조사에 근거해서 잘 수행될 수 있으며 또한 필요한 정도로 축소될 수 있다. 육안적 특성, 광물조성, 지화학 조성, 미세조직상의 특성, 공극률 성질, 수분 성질, 역학적 성질 및 열적 성질과 같은 특징적인 석재의 성질은 현대적인 분석방법으로 연구된다. 이러한 석재 분석을 위해 많은 다양한 방법들이 개발되었다. 따라서 우선, 규정된 과학적이고 실제적인 문제들을 해결하는데 가장 효율적인 접근법을 보증하는 타당한 방법과 각각의 경우, 방법 간의 적절한 연계를 설정하는 것이 중요하다.

공극률 성질은 자연 석재의 질과 풍화작용을 결정적으로 통제한다. 그래서 총공극률, 공극크기 분포, 공극표면과 같은 공극률 특성에 대한 정확한 지식이 매우 중요하다. 자연석의 매우 복잡한 공극률 성질은 하나의 분석방법으로는 만족스럽게 밝혀질 수 없다는 것을 경험이 보여 주고 있다. 단지 최적으로 활용되는 다양한 직간접적인 방법들의 연계 적용을 통해서만 공극률 성질을 매우 신뢰성 있고 실질적으로 파악할 수 있다. 인공풍화실험과 실외노출연구는 풍화모델의 개발, 풍화진행과정의 특징 파악과 정량화, 석재의 질/내구성 평가, 석재 교체 시 적절한 자연 석재의

선정, 석재 처리(법)의 효율성 평가를 용이하게 한다.

현장조사와 실험실 연구에 일관되게 기초한 평가전략은 기념물 보존 정책과 전략의 계획과 결정에 관계하는 해당조직, 기관, 기념물 권위자, 소유주 뿐 아니라 훼손상태 진단과 기념물 보존실행에 관계하는 건축가, 엔지니어, 보존처리자, 전문가, 프로젝트 매니저 또는 실행 회사에게도 추천될 수 있다.

## 7. 참고문헌

- ASHURST, J. & ASHURST, N. (1988). Stone masonry.- Practical Building Conservation. English Heritage Technical Handbook, Vol. 1, Gower Technical Press, England.
- BORELLI, E. (1999): Porosity.- Conservation of Architectural Heritage – Historic Structures and Materials, ARC Laboratory Handbook, ICCROM, Rome, Italy.
- CROCI, G. (1998): The conservation and structural restoration of architectural heritage.- Advances in Architecture Series, Computational Mechanics Publications, Southampton, United Kingdom.
- FITZNER, B. (1994): Porosity properties and weathering behaviour of natural stones – methodology and examples.- Proceedings of the C.U.M. 2<sup>nd</sup> Course “Stone materials in monuments: diagnosis and conservation”, Crete (Greece), 24.-30.05.1993: 43-54, Community of Mediterranean Universities C.U.M., University School of Monument Conservation, Bari (Italy).
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (1998a): Damage diagnosis at natural stone monuments – mapping and measurements.- Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Congress on Restoration of Buildings and Architectural Heritage, La Habana - Cuba, 13.-17.07.1998: 170-172, Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio, CICOP, Spain.
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (1998b): Evaluation of the weathering state of natural stones by monument mapping.- In Sulovsky, P. & Zeman, J. (ed.): Proceedings of the conference ENVIWEATH 96 “Environmental aspects of weathering processes”, Brno - Czech Republic, 1-3 December 1996: 55-64, Brno/Czech Republic.
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (2002): Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices.- In Prikryl, R. & Viles,

- H.A. (ed.): Understanding and managing stone decay, Proceedings of the International Conference “Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET)”, May 7-11, 2001, Prachov Rocks – Czech Republic, Karolinum Press, Charles University, Prague.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & KOWNATZKI, R. (1995): Weathering forms – classification and mapping. Verwitterungsformen – Klassifizierung und Kartierung.- In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I: 41-88, Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & KOWNATZKI, R. (1997): Weathering forms at natural stone monuments – classification, mapping and evaluation.- International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 3, No. 2: 105-124, Aedificatio Verlag, Freiburg / Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D. (2002): Damage index for stone monuments.- In Galan, E. & Zezza, F. (ed.): Protection and conservation of the cultural heritage of the Mediterranean cities, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain, 5-8 April 2000: 315-326, Swets & Zeitlinger, Lisse, Netherlands.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & VOLKER, M. (1997a): Model for salt weathering at Maltese Globigerina limestones.- In Zezza, F. (ed.): Proceedings of the E.C. Research Workshop “Origin, mechanisms and effects of salts on degradation of monuments in marine and continental environment“, March 25-27, 1996, Bari (Italy), 333-344, C.U.M. University School of Monument Conservation, Bari.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & VOLKER, M. (1997b): Monument mapping – a contribution to monument preservation.- In Zezza, F. (ed.): Proceedings of the E.C. Research Workshop “Origin, mechanisms and effects of salts on degradation of monuments in marine and continental environment“, March 25-27, 1996, Bari (Italy), 347-355, C.U.M. University School of Monument Conservation, Bari.
- FITZNER, B. & KALDE, M. (1991): Simulation of frost-thaw cycle and salt weathering – nature adapted material tests.- In Auger, F. (ed.): Proceedings of the International Symposium „The Deterioration of Building Materials“, La Rochelle, 12-14 June 1991: 103-114, Laboratoire de Construction Civile et Maritime, Université de Poitiers – I.U.T., La Rochelle, France.

- FITZNER, B. & KOWNATZKI, R. (1997): Erfahrungen mit der Kartierung von Verwitterungsformen an Natursteinbauwerken. – In: Leschnik, W. & Venzmer, H. (ed.): Bauwerksdiagnostik und Qualitätsbewertung, WTA-Schriftenreihe, Heft 13, 157-172, Aedificatio Verlag, Freiburg / Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- HEINRICHS, K. & FITZNER, B. (1999): Comprehensive characterization and rating of weathering state at monuments carved from bedrocks in Petra/Jordan – weathering forms, damage categories and damage index.- Annual of the Department of Antiquities of Jordan, XLIII: 321-351, Amman.
- HEINRICHS, K. & FITZNER, B. (2000): Deterioration of rock monuments in Petra/Jordan.- Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Deterioration and Conservation of Stone, 19-24 June 2000, Venice – Italy, Volume 2: 53-61, Elsevier, Amsterdam.
- KOWNATZKI, R. (1997): Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren.- Dissertation RWTH Aachen, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 22, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen.
- MIRWALD, P. W. & BRÜGGERHOFF, S. (1997): Requirements for and interpretation of accelerated and field testing.- In Baer, N. S. & Snethlage, R. (ed.): Report of the Dahlem Workshop on “Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures”, Berlin, March 3-8, 1996: 255-268, John Wiley & Sons Ltd.
- NAPPI, A. & CÔTE, P. (1997): Non-destructive test methods applicable to historic stone structures.- In Baer, N. S. & Snethlage, R. (ed.): Report of the Dahlem Workshop on “Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures”, Berlin, March 3-8, 1996: 151-166, John Wiley & Sons Ltd.
- PETZET, M. (1999): Principles of monument conservation.- ICOMOS Journals of the German National Committee, XXX, Lipp Verlag, München.
- PRICE, C. A. (1996): Stone conservation – an overview of current research.- Research in Conservation Series, Getty Conservation Institute, USA.
- URLAND, A. (1999): Colour – specification and measurement.- Conservation of Architectural Heritage – Historic Structures and Materials, ARC Laboratory Handbook, ICCROM, Rome, Italy.
- VILES, H. A., CAMUFFO, D., FITZ, S., FITZNER, B. LINDQVIST, O., LIVINGSTON, R. A., MARAVELLAKI, P. V., SABBIONI, C. &

WARSCHEID, T. (1997): Group report: What is the state of our knowledge of the mechanisms of deterioration and how good are our estimations of rates of deterioration?- In Baer, N. S. & Snethlage, R. (ed.): Report of the Dahlem Workshop on "Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures", Berlin, March 3-8, 1996: 95-112, John Wiley & Sons Ltd.