

# 운현궁수조의 손상평가와 초음파 속도를 이용한 풍화도 및 균열심도 측정

전유근\* | 이찬희\*<sup>1</sup> | 조성남\* | 조영훈\* | 박기정\*\* | 양필승\*\*

\*공주대학교 문화재보존과학과, \*\*서울역사박물관 보존처리과

## Measurement of Crack Depth and Weathering Degree Using Ultrasonic Velocity and Deterioration Evaluation of the Unhyungung Stone Water Container

Yu Gun Chun\* | Chan Hee Lee\*<sup>1</sup> | Seung Nam Jo\* | Yeong Hoon Jo\* | Gi Jung Park\*\* | Pil Seung Yang\*\*

\*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

\*\*Department of Conservation Science, Seoul Museum of History, Seoul, 110-062, Korea

\*<sup>1</sup>Corresponding Author : chanlee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

**초 록** 서울역사박물관에서 소장하고 있는 운현궁 석조수조의 재질은 미세층리와 여러 조의 점토질 세맥이 발달된 석회질 대리암이다. 이 수조에는 전면에 걸쳐 균열이 나타나며 흑색변색이 심하여 보존처리가 필수적이다. 수조에서 나타나는 수평 및 수직방향의 균열은 상대적으로 결합력이 낮은 층리부분과 세맥이 형성된 곳에 집중적으로 발달되어 있다. 수조 표면을 변색시킨 물질은 유기물의 침착과 고사로 인해 발생한 탄소성분으로 밝혀졌다. 초음파 측정결과, 운현궁수조를 구성하는 암석의 물성은 약한풍화단계(SW)로 나타났으나 전체적인 표면 풍화는 구성광물의 입상분해가 발생할 정도로 심각하다. 또한 이 수조의 안정성에 가장 큰 위협요인인 33조에 달하는 균열의 깊이는 석조의 최대 두께인 60mm를 완전히 관통한 것도 있으며, 최소깊이는 9mm로 산출되었다. 점토질 세맥을 따라 발생한 균열층에는 수조의 외벽과 내벽을 관통한 개방형 균열도 있으며, 층리를 따라 생성된 균열은 대부분 20~30mm의 심도를 나타내었다. 이 결과는 운현궁수조의 장기적인 보존관리에 중요한 자료로 활용될 것이다.

**중심어** : 운현궁수조, 석회질 대리암, 표면변색, 균열, 초음파 측정

**ABSTRACT** The Unhyungung Water Container in the possession of the Seoul Museum of History in Korea is consisted of a calcareous marble developed laminated bedding and numerous argillaceous veinlets. This monument should need to conservation treatment because of black discoloration and seriously numerous cracks. Vertical and horizontal cracks in the monument are developed following stratification and argillaceous veinlets that are relatively low coherence between the rock materials. We have proved that the material inducing discoloration on the surface is carbon which is formed by deposited organic matters. As the result of the ultrasonic measurements, although highly surface weathering degree, the physical properties of the Unhyungung Water Container is confirmed slightly weathered state. The depths of cracks in the monument are calculated at maximum 60mm in some cracks completely penetrating into the wall and at minimum 9mm in the other crack. The cracks, developed following veinlet, are revealed that there penetrate from an outer wall to an inside wall for the monument. And most depths of cracks, developed following stratification, are calculated 20 to 30mm. This result will offer a significant data for conservation of the Unhyungung Water Container.

**Key Word** : Unhyungung Water Container, Calcareous marble, Surface discoloration, Crack, Ultrasonic measurement

## 1. 서론

대부분의 석조문화재는 지표환경에 무방비 상태로 노출되어 있어 물리적 및 화학적 풍화작용을 비롯한 다양한 훼손요인들이 복합적으로 작용하여 표면풍화가 심각한 상태이다. 최근 석조문화재에 대한 체계적인 보존시스템을 확립하기 위해 구성암석의 재질특성을 바탕으로 풍화훼손도 진단을 통해 손상요인을 규명하는 보존과학적 연구가 수행되어져 왔으며 상당한 진전을 보이고 있다<sup>1,2,3,4,5</sup>. 그러나 석조문화재에 나타나는 다양한 훼손요인 중에서 구조적 불안정을 유발하는 균열에 대한 생성메커니즘의 규명과 발달상태에 대한 정량적 평가에 관한 연구는 거의 이루어 지지 않았다.

운현궁수조는 조선 제26대 고종황제의 잠저이며 흥선대원군의 사저인 운현궁에서 실제 사용되었던 것으로 알려져 있는 석조유물이나, 현재는 서울역사박물관에 이관되어 관리를 받고있다. 이 수조는 예술성과 작품성이 뛰어나에도 불구하고 비지정 문화재이며 체계적인 보존관리가 이루어지지 않아 전면에 걸쳐 암흑색으로 변색되어 있다. 또한 임상분해와 수평 및 수직 균열이 발달하여 구조적 안정성에 대한 문제점이 제기되었다. 따라서 서울역사박물관에서는 이 수조의 보존처리와 영구적인 관리를 계획하고 있다.

이 연구에서는 체계적인 보존관리를 위한 기초적 자료를 획득하기 위하여 운현궁수조에 대한 정밀 실측을 실시하였다. 또한 구성암석의 재질특성을 분석하고 요인별 훼손상태를 정밀 진단하여 재질에 따른 풍화특성을 규명하였다. 이를 바탕으로 종합손상지도를 작성하여 훼손 유형의 분포양상을 파악하였다. 한편 초음파 전달속도 측정을 통해 구성암석의 물성 및 훼손에 의한 풍화등급과 균열의 심도를 신출하였다. 이 연구결과는 운현궁수조의 체계적인 보존관리 시스템 확립에 중요한 자료로 활용될 것이다. 또한 석조문화재에 발달된 각종 균열의 심도 측정에 유용한 정보를 제공할 것이다.

## 2. 현황 및 연구방법

### 2.1. 현황

운현궁은 사적 제257호로서 조선 제26대 임금인 고종의 잠저이며 흥선대원군의 사저이다. 여기는 대원군의 정치활동 근거지로서 한국 근대사를 대표하는 유서 깊은 유적이다. 서울특별시 종로구 운니동에 위치한 운현궁은 서울의 중심이었던 경복궁의 서쪽에 자리하고 있다. 이 운현궁에 있던 수조는 보존처리를 위해 현재 서울역사박

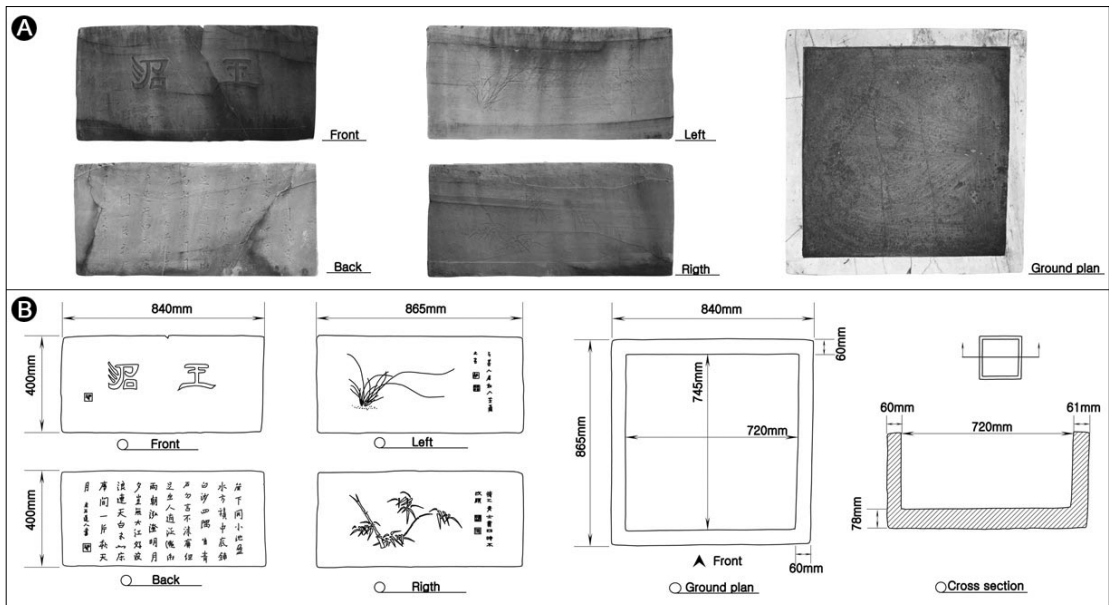


Figure 1. Appearance and detailed survey map of the Unhyurgung Water Container.

물관에서 관리하고 있다.

운현궁수조 전면의 폭은 840mm, 측면의 폭은 865mm로 거의 정방형의 형태이다. 전체 높이는 400mm, 내부 높이는 322mm이며 벽의 두께는 60mm이다. 전면과 후면에는 명문이 음각으로 조각되어 있으며, 좌면에는 난이, 우면에는 대나무가 음각으로 조각되어 있다. 이 수조의 재질은 석회질 대리암으로 이루어져 있으며, 현재 수조의 표면은 구성광물의 입상분해와 함께 전체적으로 흑색 변색 및 균열이 심각한 상태이다 (Figure 1A, 1B).

## 2.2. 연구방법

이 연구를 위해 운현궁수조의 재질특성 분석과 풍화작용에 따른 훼손현상에 관한 정밀 조사를 실시하였다. 또한 실내연구를 위해 수조로부터 탈락된 5mm 크기의 암편을 수습하였다. 수조를 구성하는 암석의 광물조성을 분석하기 위해 X-선 회절분석을 실시하였으며, 사용된 기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIb이다. 사용된 X-선은  $\text{CuK}\alpha$ 이며 양극의 가속 전압 및 필라멘트의 전류는 각각 40kV와 40mA이다.

또한 구성암석의 반정량적인 광물 조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성을 관찰하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 여기에는 자동계수기(mechanical counter)가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경이 이용되었다. 수습된 암석의 미세조직 및 광물종, 풍화에 따른 오염물의 산출상태를 관찰하기 위해 Oxford사의 에너지분산형 성분분석기(EDX Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM 6335F를 이용하여 시료를 백금으로 코팅한 후 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다.

운현궁수조의 풍화 및 훼손상태에 대한 종합적인 진단을 위해서 크게 물리적 훼손, 표면오염 및 변색으로 구분하여 훼손상태를 정밀진단 하였다. 또한 실측도면을 바탕으로 각 요인별 훼손상태를 종합하여 훼손지도를 작성하였다. 훼손도면의 작성에 사용된 프로그램은 2D그래픽 전문응용프로그램인 Adobe Illustrator CS2이다.

구성암석의 풍화도 및 균열심도를 정량적으로 산출하기 위해 비파괴 진단기법 중 하나인 초음파탐사를 실시하였다. 탐사에서는 건전부와 균열부로 나누어 측정된 초음

파 속도 값은 각각의 실측도에 투영하여 전체적인 풍화도를 파악하였다. 여기에 사용된 초음파 탐상기는 CNS FARNELL사의 Model PUNDIT PLUS이며, 초음파 속도를 수조에 투영하기 위해 WINDOWS용 SUFFER 프로그램을 이용하였다.

## 3. 재료학적 특성

운현궁수조는 유백색의 세립질 내지 중립질을 갖는 석회질 대리암으로 구성되어 있으며 전면에 걸쳐 암흑색으로 변색되어 있다. 수조에는 퇴적기원의 석회질 대리암임을 지시하는 미세층리가 발달되어 있으며, 점토질 세맥이 다수 나타난다(Figure 2A, 2B). 또한 광역변성작용을 받으면서 생성된 생흔의 교란 흔적이 부분적으로 관찰된다(Figure 2C).

이 암석들의 반정량적인 광물조성과 광물학적 조직을 밝히고자 수조에서 탈락된 미세시편으로 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 운현궁수조를 구성하는 암석은 희미한 엽리와 함께 치밀한 괴상조직을 이루고 있다. 다색성을 보이는 탄산염광물이 주요 구성광물이며, 한 방향으로 배열된 백운모와 미세 엽리를 이루어 길게 신장된 변형조직을 보인다(Figure 2D).

이 암석의 X-선 회절분석 결과, 조암광물을 이루는 탄산염광물로는 방해석( $\text{CaCO}_3$ ), 백운석( $\text{CaMgCO}_3$ ), 앵커라이트( $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{CO}_3$ ) 및 브루사이트( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )가 검출되었다(Figure 3). 방해석 및 백운석과 유질동상인 앵커라이트(ankerite)는 결정구조와 화학성분은 다르지만 대리암을 구성하는 주요 탄산염광물이다. 브루사이트(brucite)는 주로 석회암질암의 변성작용에서 산출되는 이차광물이다. 주사전자현미경 관찰 결과, 운모류는 판상조직을 보이며 밀집 분포하고, 탄산염광물들은 능면상 조직을 이루며 정연하게 배열된 벽개면을 보여준다(Figure 2E, 2F).

## 4. 풍화 및 손상도 평가

운현궁수조의 풍화 및 손상도를 파악하기 위한 기초 단계로 수조에 나타나는 물리적 훼손과 표면오염에 대해 정

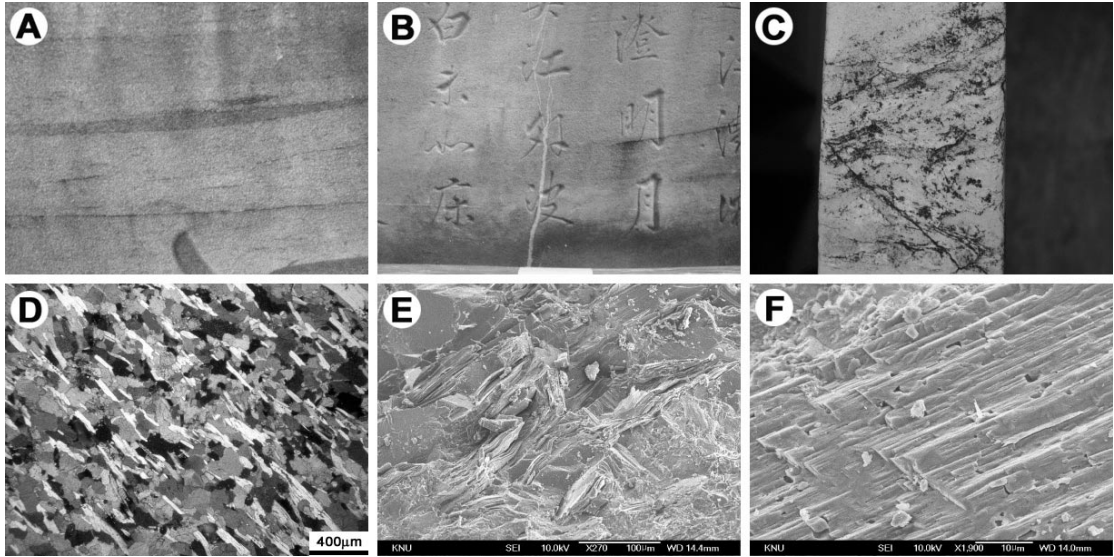


Figure 2. Lithology and mineralogical characteristics of the Urhyungung Water Container. (A) Light grey lamination bedded calcareous marl. (B) Chinese lettered massive marble developed argillaceous veirlet. (C) Irregular disturbed bedding formed by metamorphism of host rock. (D) Carbonate minerals and micas are alternately lamination texture of the host rock. (E) Mica-rich part shows a play texture. (F) Carbonate minerals showing rhombedral habits.

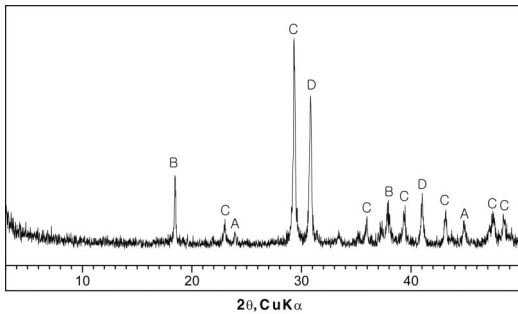


Figure 3. X-ray power diffraction patterns for host rock of the Urhyungung Water Container. B: Brucite, C: Calcite, A: Arkerite, D: Dolomite.

밀 훼손지도를 작성하였다(Figure 4). 물리적 풍화는 균열, 박리박락, 탈락으로 범례를 정하였고, 수조에 나타나는 점토질 세막은 균열과의 상호 연관성을 파악하기 위하여 훼손지도에 삽입하여 도면화 하였다. 표면오염은 농도를 달리하며 나타나는 흑색변색을 담흑색 변색과 암흑색 변색으로 구분하여 범례를 정하고 훼손지도를 작성하였다. 요인별로 작성된 훼손지도에는 풍화유형에 따른 사진도 함께 제시하였다.

#### 4.1. 물리적 풍화

암석의 물리적 풍화는 큰 화학적 변화없이 자연적 또는 인위적으로 발생된 균열, 박리박락, 탈락, 입상분해 및 표면요철 등의 기계적 또는 물리적 풍화현상을 말한다. 고온고압하에서 생성되는 암석은 지표의 대기환경에 노출 되는 과정에서 압력이 점점 제거되어 상대적으로 팽창하면서 많은 공극과 불연속면이 생성되며 암석의 풍화작용을 야기한다. 이와 같은 현상은 암석의 물성 변화를 일으키고 기계적 풍화작용의 반복에 의해 박리와 박락이 발생되며 균열 및 절리로 발전되어 석조문화재의 구조적 불안정을 야기한다<sup>6</sup>.

일련의 자연적 풍화과정을 통해 물을 저장하는 용도로 쓰인 운현공수조는 표면이 매우 취약해진 상태로 보이며, 전체적으로 많은 균열이 발생하였다(Figure 4). 특히 균열은 수조에서 나타나는 가장 심각한 물리적 훼손양상으로 이에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 이 수조에 생성된 균열은 수평 및 수직방향으로 발생하였으며, 총 33개(전면 10개, 후면 9개, 좌면 8개, 우면 6개)의 균열이 전면에 걸쳐 발생하여 안정성을 위협하고 있다(Table 1).

이 수조에 발생한 균열의 길이는 비교적 넓은 범위를 보이나, 대부분 500mm 이하의 길이를 갖는다. 이중에서 최장 균열은 좌측면에 생성된 수평균열로서 745mm이다(Table 1, Figure 5A). 균열방향은 구성암석의 층리와

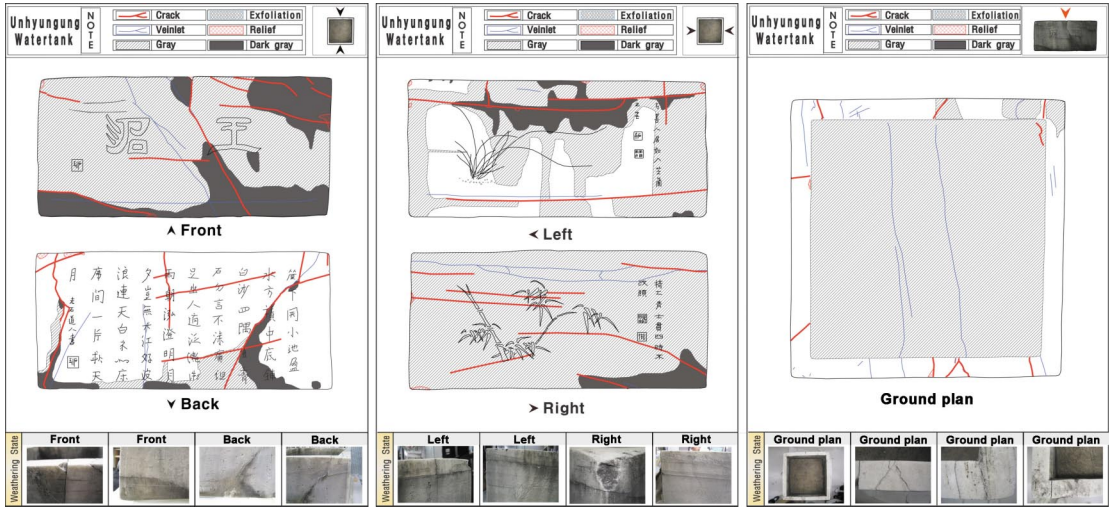


Figure 4. Synthetic deterioration map of the Urhyungung Water Container.

동일한 방향인 170~180°에서 가장 높은 빈도를 보이고 있으며, 대부분의 균열들은 이와 유사한 범위의 각도를 형성하며 주로 수평방향으로 나타난다.

반면 수직(80~94°) 및 경사방향(120~159°, 47°)의 균열은 암석에 발달하는 점토질 세맥을 따라 나타나고 있다(Table 1, Figure 5B). 이는 조암광물들의 결합력이 다른 곳에 비해 상대적으로 낮은 부분을 따라 나타나는 것이다. 따라서 이 균열들은 수조를 구성하고 있는 재질의 물리적 특성을 그대로 반영하고 있음을 지시하는 것이다.

#### 4.2. 화학적 풍화와 변색

고온고압의 환경에서 생성된 암석 또는 광물이 지표환경에 노출되면 이들은 새로운 환경에 적합한 형태를 유지하기 위하여 화학적 변화를 일으킨다. 이와 같은 작용은 근본적으로 물과의 반응을 통해 이루어지며 산화작용, 수화작용, 가수분해작용, 환원작용, 탄산화작용, 킬레이트화작용 등 환경변화에 따라 복합적으로 작용한다<sup>3)</sup>.

운현궁수조는 전체적으로 담흑색 및 암흑색으로 변색되어 있다. 암흑색을 띠는 곳은 수조 내부에서는 전반적

Table 1. Representative cracks within host rock of the Urhyungung Water Container.

No.	Front		Back		Left		Right	
	length (mm)	angle (°)	length (mm)	angle (°)	length (mm)	angle (°)	length (mm)	angle (°)
1	97	168	89	80	633	177	429	176
2	331	169	471	47	74	94	327	176
3	433	120	421	85	448	2	181	178
4	320	171	349	12	745	2	245	175
5	21	162	348	11	40	92	560	168
6	118	159	150	22	80	91	110	179
7	196	164	219	94	-	-	237	12
8	30	134	48	14	-	-	153	165
9	68	154	34	89	-	-	-	-
10	231	178	-	-	-	-	-	-

Numbers are the same as those of Figure 8.

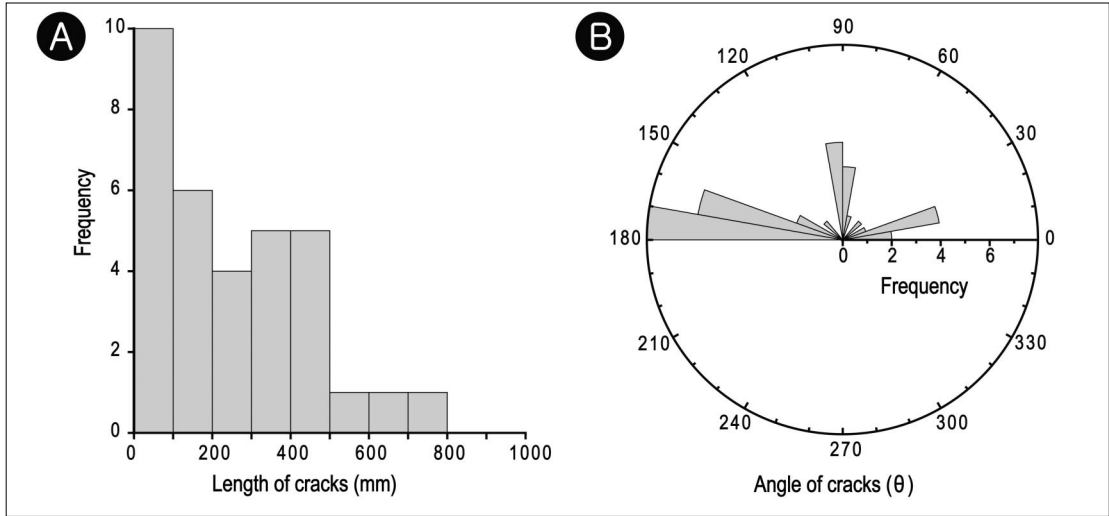


Figure 5. Diagrams showing crack properties within host rock of the Unhyungung Water Container. (A) Histogram shows distribution of the crack length. (B) Rose diagram shows distribution of the crack angle.

으로 모두 나타나고, 수조 외부는 저장되었던 물이 새어 나오던 균열의 아래 부분에 집중적으로 분포한다(Figure 4). 표면변색의 원인을 규명하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 관찰 및 EDS 분석을 실시하였다. 분석 결과, 수조의 표면에서 생물상이 검출되었으며(Figure 6A), 이 오염물질의 성분중에서 탄소(C)가 21.01wt.%나 검출되었다(Figure 6B, 6C).

주사전자현미경 분석을 위해 시료를 백금(Pt)으로 피복하였다. 따라서 이 오염물질이 유현공수조를 구성하는 석회질 대리암의 주성분인 CaCO<sub>3</sub>에서 기인한 것이 아니라, 외부에서 유입된 생물질의 고사체에서 생성된 탄소성분으로 인하여 발생한 것임을 지시한다. 흑색변색은 물을 저장하던 수조표면에 유기물이 침착되면서 변색이 발생한

것으로 판단되며, 이들이 고사되어 탄소만 남아 킬레이트화 된 것으로 해석할 수 있다. 또한 이 수조가 서울 시내에 장기간 존속하면서 배기gas와 같은 환경오염원에 노출되어 흑색 변색을 야기하였을 가능성도 제기된다.

## 5. 초음파 측정

### 5.1. 측정기법

유현공수조의 훼손도 진단과 보존방안 수립의 일환으로 재질의 물성을 파악하기 위해 초음파탐상기를 이용하여 초음파 속도를 측정하였다. 초음파는 암석의 물성을

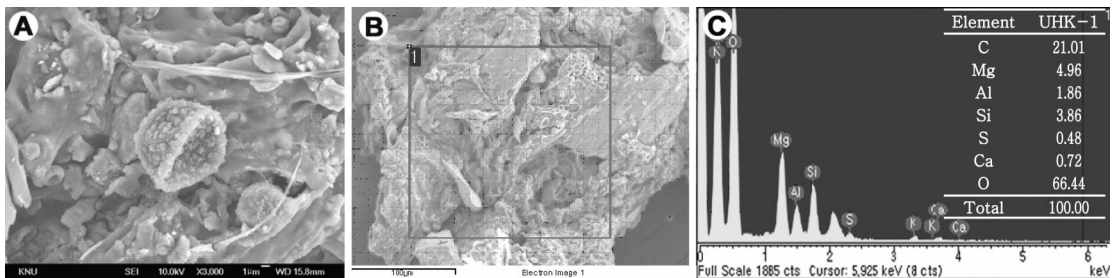


Figure 6. SEM images and SEM-EDS result of the materials inducing discoloration part on the surface of the host rock. (A) Organic matters detected in rear surface of the black discoloration part. (B) SEM-EDS area of the black discoloration part. (C) SEM-EDS result shows highly detected carbon contents.

파악하는데 필요한 수단으로 암석역학 분야에서는 초음파 전달속도를 통하여 매질의 강도 및 풍화도지수를 분석하는데 사용되어져 왔다. 초음파 속도는 암석의 탄성계수 및 밀도와 밀접한 관계가 있으며, 같은 암석에서도 공극률 및 미세균열의 발달 정도에 따라 다르다. 이러한 원리를 이용하여 암석의 물성 및 풍화정도를 산출해 낼 수 있으며 석조문화재의 부재별 안정성을 평가하는데도 이용할 수 있다.

초음파 측정은 CNS Farnell에서 제조된 PUNDIT PLUS를 이용하여 직접전달 방식과 간접전달 방식을 적용하여 측정하였다. 초음파 속도를 측정할 때 발진자와 수신자 사이의 거리에 따라 속도가 달라지는 경우가 있다. 이는 발진자와 수신자의 위치가 부정확하기 때문이며, 또한 초음파의 속도가 매질의 표면보다 내부에서 더 빨리 전달되기 때문이다. 간접법에 의한 측정위치별 초음파 속도와 전자간 측정거리별 직접법속도와 간접법속도의 비를 고려할 때 최소 20cm 이상의 측정 거리를 가져야 한다.

따라서 이번 탐사에서는 초음파 파장의 전달이 안정적으로 전달되는 측정거리인 20cm의 간격으로 측정하였다. 또한 측정의 신뢰도를 높이기 위하여 한 부재에 대하여 여러 지점을 측정하였고, 동일지점에 대하여 발진자와 수신자를 교대로 측정하여 그 평균값을 초음파시험 속도로 계산하였다. 탐촉자는 불균질한 암석 내에서 초음파의 투과성이 높고, 감쇄가 적은 54 kHz의 주파수를 가진 접촉부위가 뾰족한 탐촉자를 이용하였다. 간접전달 방식과 뾰족한 탐촉자를 사용하여 발생한 오차는 조영훈(2007)이 제시한 보정계수를 적용하여 보정하였다.

동일 광물에서 초음파 속도는 일정하지만 광물조성이 같더라도 이차적으로 발생한 미세균열의 발달정도 및 풍화정도에 따라 초음파 속도가 달라진다. 또한 암석내의 공극이 커질수록 초음파 속도는 낮아진다. 이러한 원리를 이용하여 Iliev(1967)는 풍화단계를 5단계로 구분하고 신선한 암석과 풍화된 암석의 초음파속도의 변화비율에 기초하여 풍화단계별로 지수 값의 범위를 제안하였다. Iliev(1967)에 의한 암석의 풍화도지수(coefficient of weathering, k)와 초음파 속도와의 관계는 아래의 식과 같다. 여기에서  $V_u$ 는 신선한 암석의 P파 전달속도이며  $V_w$ 는 풍화된 암석의 P파 전달속도를 나타낸다.

$$k = \frac{V_u - V_w}{V_u} \quad (1)$$

암석에서 초음파 탐사를 통하여 균열심도를 측정하는 방법은 매질 특성상 정확한 측정시점을 판정하는 기준이 모호한 경우가 대부분이다. 따라서 절대시간을 측정하기 보다는 균열이 없는 부위와 균열이 존재하는 부위에서의 탐사결과를 비교함으로써 상대적인 시간차를 통한 균열깊이를 추정하는 To-Tc법이 많이 사용된다<sup>7,10</sup>.

암석의 표면으로부터 수직한 결함이 존재하는 경우, 균열을 중심으로 같은 거리에 양쪽으로 두 탐촉자를 배치하여 측정한다. 발진자에서 발생한 초음파가 균열의 끝부분에 도달하게 되면 초음파는 회절하여 구면파로 전파하며 반대편에 놓인 수신자에 도착하게 된다(Figure 7). 이때 초음파의 도달시간은 균열의 깊이(D)와 탐촉자간 측정거리(L)에 의하여 결정되게 된다. 균열부를 회절하여 도달한 초음파 도달시간 Tc는 식(2)와 같다.

$$T_c = \frac{\sqrt{L^2 + 4D^2}}{V_p} \quad (2)$$

또한 균열이 존재하지 않는 부위에서의 초음파 도달시간 To는 식(3)과 같다.

$$T_o = \frac{L}{V_p} \quad (3)$$

따라서 균열의 깊이 D는 식(4)를 통해 구할 수 있다.

$$D = \frac{L}{2} \sqrt{(T_c/T_o)^2 - 1} \quad (4)$$

여기서 D는 표면으로부터의 균열깊이(mm), L은 탐촉자 사이의 측정거리(mm)이다. Tc는 균열부의 초음파 도달시간( $\mu s$ )이며 To는 건전부의 초음파 도달시간( $\mu s$ )이고 Vp는 암석에서의 종파 음속(m/s)이다.

## 5.2. 표면속도 모델링

위와 같은 초음파 탐사방법을 적용하여 윤현궁수조를 구성하는 암석의 물성을 파악하고 이를 근거로 풍화도지수 및 균열심도를 산출하여 수조의 훼손도를 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여 총 154 지점(전면 32 지점, 후면

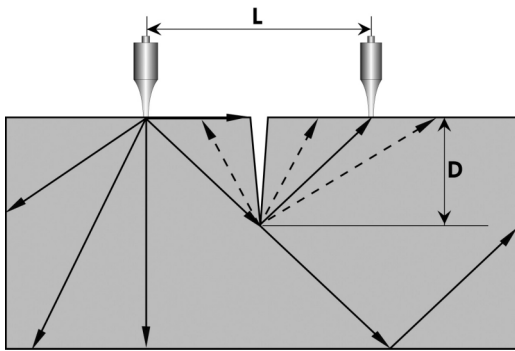


Figure 7. Measurement model for crack depth using ultrasonic survey.

31 지점, 좌면 26지점, 우면 31 지점, 평면 34지점)에서 초음파 전달속도를 측정하였다. 이 구조는 전면에 걸쳐 균열 및 세맥이 발달해있기 때문에 초음파 측정을 통해 암석의 풍화정도를 정확히 파악하기 위하여 균열 및 세맥을 포함하지 않는 부분과 포함하는 부분으로 나누어 측정하였다. 이 결과에 따라 초음파 속도의 분포영역을 정밀하게 나타내기 위해 2D 모델링을 실시하였다(Figure 8).

이를 토대로 Iliev(1967)가 제시한 풍화도 지수 관계식을 통하여 각 측정별 풍화등급을 산정하였다. 이 결과, 균열대를 포함하지 않는 부분에서의 초음파 속도는 3,764~5,254%(평균: 4,489%)의 범위를 나타냈다. 각 방위별로는 전면에서 3,764~4,320%(평균: 4,173

%) , 후면은 4,116~4,300%(평균: 4,211%), 좌면은 4,261~5,618%(평균: 4,858%), 우면에서는 4,153~5,319%(평균: 4,319%)로 나타났다. 따라서 전체적으로 표면 변색 및 균열이 발달해 있지만 운현궁수조를 구성하는 암석의 물성은 약한풍화단계(SW; slightly weathered)로 비교적 신선한 것으로 판단된다(Table 2). 그러나 균열이 발달한 부위에서는 200~500%의 범위를 보이는 등  $k=0$ 에 가까운 치명적인 약점을 가지고 있기도 했다.

### 5.3. 균열심도 측정

운현궁수조의 전면에 걸쳐 발생한 균열의 심도를 파악하기 위해 To-Tc법을 적용하였다. 적용대상 균열은 수조에 발달한 33개의 다양한 균열 중 건전부와 균열부의 측정이 용이하고, 훼손도 평가시 심각해 보이는 19개의 균열을 선택하였다. 균열의 초음파 측정지점은 측정 대상 균열을 4등분하여 각 균열 당 4 지점을 수조의 가장자리에서 내부방향으로 측정하였다(Figure 9).

균열부위의 초음파 속도는 280~4,071%로 넓은 범위의 분포를 보였다(Table 2). 이를 균열부위의 초음파 속도에 가장 인접한 건전부의 초음파 속도를 적용하여 균열의 심도를 산출한 결과, 균열의 깊이는 최대 155mm, 최소 9mm로 계산되었다(Figure 9). 운현궁수조의 외벽 두

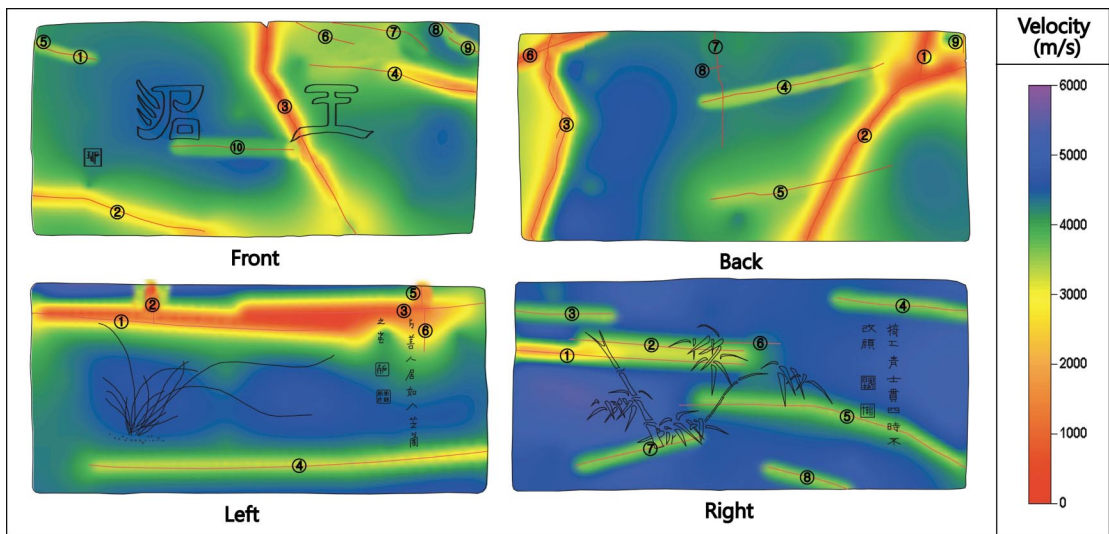


Figure 8. Result of 2D modeling contour map of ultrasonic velocity for the Unhyungung Water Container.



Table 2. Result of measured ultrasonic velocity for the Unhyungung Water Container.

Area	Velocity	Front	Back	Left	Right
Fresh Area	Min(%)	3,764	4,116	4,153	4,216
	Max(%)	4,320	4,300	5,319	5,618
	Mean(%)	4,173	4,211	4,319	4,858
	k	0.17(SW)	0.16(SW)	0.14(SW)	0.03(SW)
Cracked Area	Min(%)	466	280	466	1,694
	Max(%)	3,396	4,071	3,173	3,520
	Mean(%)	2,310	1,932	1,618	3,162

께가 60mm인 점을 감안할 때, 60mm 이상으로 신출된 영역이 나타날 수는 없다. 이는 수조의 외벽과 내벽을 관통해 발달한 개방형의 균열에 파장이 통과되는 과정 중 공기층을 통과하는 동안 산란되어 느리게 균열을 통과하였기 때문으로 해석된다.

초음파 탐사를 통해 신출된 개방형 균열의 영역과 수조에서 발생한 개방형 균열의 발달상황을 정밀관찰을 통해 비교한 결과, 거의 유사한 분포를 보였다. 따라서 초음파

탐사를 통해 60mm 이상으로 신출된 균열 깊이는 육안으로는 확인이 불분명하나 수조의 외벽과 내벽을 완전히 관통한 개방형의 균열이 발달해 있다고 판단할 수 있는 근거가 된다. 또한 균열 깊이의 측정값이 높아질수록 상대적으로 균열의 폭이 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

운현궁수조에 발생한 60mm 이상의 균열 심도를 갖는 것으로 신출된 균열은 점토질 세맥을 따라 발생하였으며, 방위별로는 전면 2개, 후면, 3개, 좌면 3개로 나타났다. 또한 20~30mm의 심도를 나타내는 다수의 균열은 수조에서 나타나는 층리부분을 따라 발생하였다. 이는 운현궁수조의 암석학적 특징과 부합되는 결과이며, 점토질 세맥과 암석과의 결합력이 층리부분의 결합력보다 더 낮은 것으로 판단된다.

또한 대부분 균열의 심도는 수조의 가장자리에서 내부로 들어갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 균열이 수조의 가장자리에서 발생하여 내부로 진행된 것을 의미하며, 이 균열들은 외부의 충격 및 물리화학적 작용으로 더욱 진행될 수 있을 것으로 추정된다. 따라서 이 균열부위에 대한 적극적인 보존처리가 요구된다.

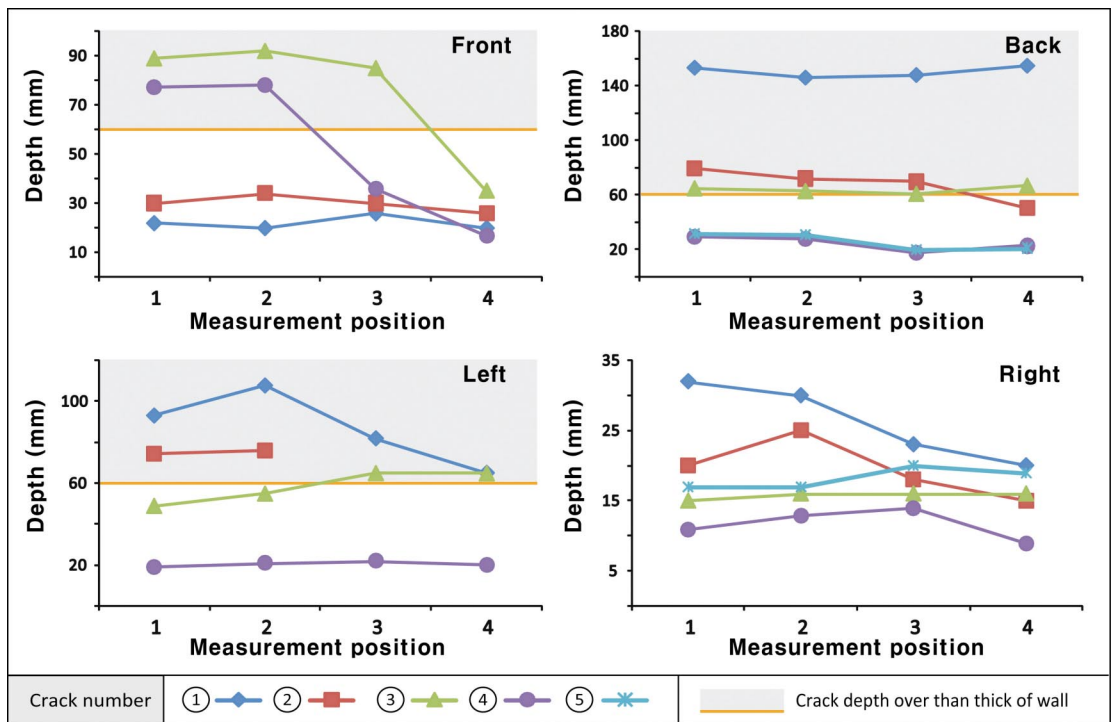


Figure 9. Depth of crack on the direction for the Urhyungung Water Container.

## 6. 보존과학적 고찰

운현궁수조와 같은 석회암질 암석에 대한 오염물 세정 방법에는 크게 건식세정, 스팀 세정, 블라스팅(blasting), 소도구를 이용한 세정 등 물리적인 방법과 계면활성제나 산성계열의 용제, 알카리계열의 용제 및 유기용제 등의 화학용제를 이용한 화학적 방법을 들 수 있다. 그러나 운현궁수조의 전면에 발생한 흑색변색은 수조를 구성하는 암석에 탄소가 칼레이트화 되면서 완전히 고착되어 있으며 화학반응에 민감한 석회질 대리암으로 구성되어 있어 일반적인 물리적 및 화학적 방법으로는 제거가 어려울 것으로 보인다.

운현궁수조의 구성암석과 동일 종류의 석회질 대리암으로 구성된 경천사십층석탑 보존처리의 경우, 세정을 위해 레이저 기술을 도입하여 성공적으로 오염물을 제거하였다. 레이저 세정시스템은 기존의 대표적인 방법인 미소마모법 및 화학적 용제를 이용한 기계적 또는 화학적 방법과는 달리 레이저의 단색성을 이용하여 오염물질만의 선택적 제거가 가능하고, 매우 짧은 레이저 펄스를 사용하므로 정밀한 오염층 제거가 가능하다.

또한 비접촉식이므로 원부재 표면에 영향을 주지 않고 접촉 마모를 발생시키지 않는 동시에 레이저에 의한 고온 효과로 표면에 존재하는 유기물 박멸에 의한 표면살균 효과도 있다<sup>1</sup>. 따라서 운현궁수조에 나타난 흑색 오염물을 제거하기 위한 방법으로는 충분한 임상실험과 성공적인 사례를 고려할 때, 레이저를 사용한 세정방법이 적합할 것으로 판단된다. 그러나 원암의 조직과 조성을 훼손하지 않는 범위 내에서 습식세정의 적용도 가능할 것으로 보인다. 이에 대해서는 보존처리 연구에서 상세히 보고하고자 한다.

석조문화재의 보강 및 접착에 이용되는 대표적인 수지에는 비닐계 고분자 화합물, 이크릴계 수지, 실리콘계 수지, 폴리에스테르계 및 에폭시 수지가 있다. 이 중에서 현재 야외 석조문화재 접합에 사용되는 수지는 에폭시 수지가 일반적이다. 또한 황변현상, 접합강도 및 물성에 관한 연구결과로 볼 때, 운현궁수조에 발생한 균열의 접합에 사용할 수 있는 수지는 요구되는 접합 강도를 충족하면서 비교적 황변현상이 적은 저점도 에폭시수지가 적합할 것이다. 여기에 동일 종류의 석분을 혼합하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다<sup>12,13</sup>.

초음파를 이용한 균열 깊이 측정결과, 균열 끝부분의 최저 깊이가 9~20mm인 점을 감안할 때, 수조를 구성하는 암석의 내부에서 미세균열이 더욱 왕성하게 진행되었을 가능성이 높다. 따라서 각각의 미세균열에 수지를 효과적으로 침투시키기 위해서는 저점도의 수지만을 충전시킨 후 일정한 간격으로 시간을 조절하며 동일 종류의 석분을 혼합한 수지를 이용하여 마감하는 것이 필요할 것이다. 전체적인 수지의 농도와 배합비율 및 시간조절은 간단한 임상실험으로 최적의 조건을 찾을 수 있을 것이다. 균열부위의 충전에는 얇은 부분에서 깊어지는 부분으로 수행하는 것이 좋을 것으로 보인다.

## 7. 결론

1. 운현궁수조는 탄산염광물의 미세 엽층리와 점토질 세맥이 다수 발달한 유백색의 세립질 내지 중립질을 갖는 석회질 대리암으로 구성되어 있다. 이 수조에 나타나는 물리적 훼손양상은 전면에 걸쳐 발달한 수평 및 수직방향의 균열이다. 균열은 상대적으로 결합력이 낮은 층리부분과 세맥이 잘 발달된 부분에서 나타내며 수조의 암석학적 특성을 반영한다.

2. 풍화 및 훼손현상에 따른 물성을 살펴보기 위해 초음파 탐사를 실시한 결과, 운현궁수조는 평균 4.489%의 초음파 속도를 보여 암석의 물성은 약한풍화단계(SW)로 나타났다. 이는 수조를 구성하는 암석이 육안적 손상등급과는 달리 비교적 신선한 것을 의미한다. 이 수조의 전면에서 나타나는 흑색 변색은 물을 저장하던 수조표면에 유기물이 침착되고, 이들이 고사되어 탄소만 남아 칼레이트화되면서 흑색변색이 발생한 것으로 판단된다.

3. 초음파를 이용하여 균열의 심도를 산출한 결과, 수조를 구성하는 암석의 세맥을 따라 발생한 균열들은 육안 관찰과는 달리 외벽에서 내벽까지 진행된 완전한 개방형 균열로 나타났다. 또한 층리부분을 따라 발생한 균열들은 20~30mm의 심도를 갖는 것으로 나타났다. 이 균열들은 앞으로 더욱 진행될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

4. 운현궁수조에서 나타난 훼손의 원인은 원암석의 특성과 수분이며, 물이 구성암석과 물리화학적으로 반응하여 변색 및 균열을 야기한 것으로 판단된다. 따라서 수조의 재질특성을 고려하여 적합한 보존처리가 이루어져야

할 것이며, 전시 및 보존관리에 있어 가능한 한 수분과의 직접적인 접촉은 피해야 할 것이다.

## 사 사

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-313-C00001)과 일부 서울역사박물관의 조사 연구 사업으로 수행되었음을 명기하며, 각 기관의 지원에 깊이 감사드린다.

## 참고문헌

1. 김영택, 이찬희, 이명성, “부여정림사지 오층석탑의 보존과학적 풍화훼손도 평가.” *자원환경지질*, 38, p 675-687 (2005).
2. 박맹언, 성규열, “화강암질 석조문화재의 풍화반응경로 특성과 보존에 대한 제언.” *한국광물학회지*, 18, p83-92 (2005).
3. Lee, C.H., Lee, M.S, Kim, Y.T. and Kim, J., “Deterioration assessment and conservation of a heavily degraded Korea stone Buddha from the 9th century.” *Studies in Conservation*, 51, p 305-316 (2006).
4. Fitzner, B., Heinrichs, K., and Bouchardiere, D.L., “The Bangudae petroglyph in Ulsan, Korea: studies on weathering damage and risk prognosis.” *Environmental Geology*, 46, p504-526, (2004).
5. 이명성, “경주 불국사 및 감은사지 석탑의 재질특성과 보존과학적 손상 평가.” *공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 이학박사학위논문*, p288 (2007).
6. 이선명, 이명성, 이찬희, 전유근, 조성남, “한성 칠장사 벽응대사비의 재료학적 특성과 훼손도 평가.” *문화재과학기술*, 7, p75-89 (2008).
7. 임홍철, 김연수, 이상균, 송영철, “초음파를 이용한 콘크리트 시편의 피복두께 이하에 위치한 균열깊이 탐사.” *한국구조물진단학회*, 6, p181-188 (2002).
8. 조영훈, 노태균, 전유근, 조성남, 이찬희, “석조문화재 적용을 위한 초음파 탐사의 신뢰도 검증.” *한국문화재보존과학회 추계학술대회 논문집*, 26, p83-84 (2007).
9. Iliev, I.G., “An attempt to measure the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties.” *Proceedings of the First International Congress, International Society of Rock Mechanics, Lisbon*, 1, p109-114 (1967).
10. 김연수, 임홍철, “초음파 시간전파법을 이용한 콘크리트 시편의 균열깊이 탐사.” *대한건축학회 학술발표논문집*, 22, p119-122 (2002).
11. 이종명, “문화재 복원을 위한 레이저 세정 기술.” *보존과학회지*, 10, p10-20 (2001).
12. 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, “석조문화재 예폭수수지 개발 시험연구.” *국립문화재연구소, 보존과학연구*, 20, p139-155 (1999).
13. 조연태, 김창석, 강대일, 이명희, “회암사지 선각왕사비 보존처리.” *회암사지 선각왕사비 보존, 국립문화재연구소*, p11-41 (2001).