라오스 밧푸 주사원의 보존현황과 석재의 초음파 물성 및 구조적 변형특성

이찬희¹ | 신호철* | 한두루

공주대학교 문화재보존학과, *백제문화원 대전광역시문화재돌봄사업단

Ultrasonic Properties on Building Stones, Characteristics of Structural Deformation and Conservation States of the Sanctuary in Wat Phou Temple of Champasak, Lao PDR

Chan Hee Lee¹ | Hyo Cheol Shin* | Doo Roo Han

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 32588, Korea

*Daejeon Cultural Heritage Project Agency, Baekje Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34205, Korea

¹Corresponding Author: chanlee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

초 록 라오스 ‘참파삭 문화경관 내 밧푸 사원과 고대주거지’ 유적은 2001년 유네스코 세계문화유산으로 등재되었다. 현재 밧푸 주사원의 상부구조는 대부분 붕괴되어 있다. 또한 다양한 손상이 진행되고 있어 과학적이고 체계적인 진단을 통한 보존관리가 필요하다. 주사원은 사암과 벽돌을 주요 부재로 사용했으며, 균열과 탈락, 박리, 이격 등의 물리적 손상과 지의류, 선탄류, 초본식물 등의 생물학적 손상이 심하다. 주사원의 석재를 대상으로 초음파 속도를 측정하여 물성을 평가한 결과, 주사원 동측면 사암의 풍화도지수는 0.10~0.74(평균 0.36)로 산출되어 중간풍화단계(MW)를 나타냈다. 남측면과 북측면은 평균 0.30와 0.32의 풍화도지수를 보여 상대적으로 높은 물성을 보였다. 주사원 기단의 경사도 분석 결과, 남측면 4번 지점이 5°W의 경사를 나타내 가장 큰 기울기를 보였으며, 이는 지반의 불안정에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 상대적 수준측량 및 과거 측량도면을 검토할 때 주사원은 평지가 아닌 일정한 경사를 가진 지반에 자리한 것을 확인하였다. 남측면의 지반이 북측면에 비해 1.51° 더 기울어져 있는 것으로 보아 구조안정성에 영향을 미칠 것으로 보인다. 이격거리 분석 결과, 남측면 부재의 주요 이격은 평균 159.5 mm로 가장 큰 범위를 보이며, 상부로 올라갈수록 폭이 증가하여 가장 넓은 곳은 평균 328.3 mm를 나타냈다. 이와 같은 이격은 하부 지반의 부등침하에 따라 발생한 것으로 판단된다. 밧푸 주사원은 부분적으로 붕괴와 물리적 손상이 진행되어 건물의 구조안정성에 대한 지속적인 보존관리가 필요한 상태이다.

중심어: 밧푸, 사암, 초음파 속도, 경사도 분석, 구조안정성

ABSTRACT The ‘Wat Phou and Associated Ancient Settlements within the Champasak Cultural Landscape’ of Laos was designated as a UNESCO World Cultural Heritage in 2001. The uppermost structure of the Sanctuary in Wat Phou has been destroyed and being variably damaged, maintenance is required through scientific and systematic diagnosis. The Sanctuary of Wat Phou was constructed mainly using sandstones and bricks. There are physical damages including fracture, break out, exfoliation and interval as well as biological damages by lichen, mosses and weeds. According to the ultrasonic velocity measurement and property evaluation of the sandstones of the Sanctuary in Wat Phou, weathering index of the

eastern side sandstones is 0.10 to 0.74 (mean 0.36), showing MW grade. Southern and northern side sandstones have relatively higher properties with average weathering indices of 0.30 and 0.32. The results of slope analysis of the Sanctuary, indicated that the 4th spot in the southern side has the largest slope of 5°W, seemingly due to the unstable ground around the Sanctuary. Based on the relative level measurement and past drawings, the Sanctuary is verified to have been located on ground with a certain slope rather than flatland. The ground of the southern side is inclined 1.51° more than that of the northern side, which will affect the structural stability of the temple. The interval width of the selected southern spot is the largest with an average width of 159.5 mm, and the largest width is 328.3 mm at the top, since the width increases above rather than below, seemingly due to the unequal subsidence of the ground. Constant maintenance for conservation is required for the structural stability of the Sanctuary in Wat Phou, which was partly collapsed and has also suffered physical damage.

Key Words: Wat Phou, Sandstone, Ultrasonic velocity, Slope analysis, Structural stability

1. 서 언

세계문화유산은 인류를 위해 보호되어야 할 현저한 보편적 가치가 있다고 인정되어 유네스코 세계문화유산 일람에 등록된 문화재를 지칭한다. 동남아시아의 세계문화유산은 크메르 왕국과 관련된 것들이 대표적이며 캄보디아 앙코르, 태국 피마이, 라오스 밋푸, 베트남 미썬 등이 세계적으로 잘 알려져 있어 수많은 관광객과 연구자들이 방문하는 곳이다. 라오스 ‘참파삭(Champasak) 문화경관 내 밋푸 사원과 고대주거지’도 초기 크메르 유적으로 세계문화유산에 등재되었다.

라오스의 면적은 약 236,000 km²로 우리나라의 2.4배 정도이며 남북의 길이가 약 965 km로 남북으로 긴 형태이다(Figure 1A). 라오스는 북서쪽으로는 미얀마, 서쪽으로는 태국, 남쪽으로는 캄보디아, 동쪽으로는 베트남, 북쪽으로는 중국과 국경을 접하고 있다. 국토의 80%가 산악지대와 고원으로 북서지역이 높고 남쪽으로 내려올수록 낮아지는 북고남저의 지형적 특징을 갖는다.

밋푸 유적이 있는 참파삭주는 라오스의 남서부 지역이다(Figure 1B). 주도는 팍세(Pakse)로 메콩강과 세돈강의 합류 지점에 있다. 참파삭은 라오스의 정치적 및 경제적 중심지로 앙코르 문명의 영향을 받은 고대 사원들이 남아 있다. 수도 비엔티안에서 팍세까지는 약 610 km이며, 13번 도로를 따라 남쪽으로 이어지는 길에 불리캅싸이, 캄무안, 사반나켓, 살라반 등을 경로한다. 2001년 세계문화유산에 등재된 ‘참파삭 문화지역 내 밋푸사원과 고대 주거지’는 북위 14°44'N, 동경 105°42'E 지점에 있다. 유적의 동쪽으로는 메콩강이 흐르고, 중심부에 밋푸 사원군이 있으며 남

쪽으로 약 1 km 지점에 홍낭시다 유적이 위치한다.

크메르 왕국의 앙코르유적은 프랑스, 미국, 독일, 일본, 이탈리아 등 선진국들이 유적의 보존과 관리를 위해 연구를 파견하는 등 문화유산관련 과학기술원조의 대표적인 수원지이다. 라오스의 밋푸 유적도 프랑스, 일본, 이탈리아 및 인도가 오랜 기간 동안 복원사업을 진행하고 있는 포스트 앙코르유적으로서 관심의 대상이다. 최근 크메르 왕국의 석조유적에 대한 보존과학적 연구로는 Hosono *et al.*(2006), Heiner *et al.*(2010), Federico and Sokrithy(2012), Uchida *et al.*(2012), Federico and Janet(2013), Uchida and Shimoda(2013) 등의 보고가 있다. 한국에서도 세계유산 보존복원 계획 및 기록화 등 관련 연구가 수행되었으며(Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2012; 2013, Lee and Jo, 2016), 밋푸 주 사원의 석재에 대한 보존과학적 연구도 보고된 바 있다(Shin, 2014).

한국은 그간 사회봉사, 교육, 경제협력 분야를 중심으로 추진하던 공적개발원조(ODA)를 문화유산 분야까지 확대하여 동남아시아의 세계문화유산 보존에 참여하고 있다(Lee *et al.*, 2012). 이는 선진국에서 주도적으로 해오던 세계유산 보존에 대한 우리의 참여기회를 확대하고 저개발국 사업에 선도적인 역할과 우위를 선점할 수 있는 기회를 제공할 것이다. 따라서 한국의 문화유산 보존기술을 해외에 이전함으로써 국제화 및 선진화를 유도할 수 있을 뿐 아니라, 대외원조를 확대할 수 있는 계기가 될 것이다.

밋푸 주사원은 현재 상부구조가 무너져 있으며, 물리적 및 생물학적 손상이 진행 중인 상태로서 과학적이고 체계적인 진단을 통한 보존관리가 필요한 상황이다. 따라서 이 연구에서는 라오스 남서부 참파삭주의 푸카오산 자락에

Figure 1. Location map of the study area. (A) Laos in Indochina Peninsula, (B) Detailed study area of Wat Phou temple in Champasak.

위치한 밧푸 주사원을 대상으로 현재의 상태를 파악하고 구성부재에 대한 초음파 물성측정과 구조적 변형특성을 고찰하였다. 이 결과는 라오스 세계문화유산의 체계적이고 과학적인 보존관리를 위한 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구지역 및 대상

동남아시아는 크게 인도차이나반도와 말레이제도로 구성되며, 동서양을 오가는 길목에 있어 해상교통의 요충지이다. 라오스는 인도차이나반도의 내륙국이며, 정식명칭은 라오인민민주공화국(Lao People's Democratic Republic; Lao PDR)이다. 라오스에는 동남아시아의 젓줄이라고 불

리는 메콩강이 북부에서는 태국과의 국경선을 따라 흐르고 있으며 라오스 남부에서 참파삭주로 들어오고 연구지역을 지나 남쪽의 캄보디아로 흘러나간다. 밧푸 주사원은 세계문화유산 구역인 참파삭 문화경관지구내에 위치한다 (Figure 2A).

밧푸 유적군은 10~14세기에 건립한 것으로 추정하고 있으며, 인문학적 양식과 건축 특성으로 볼 때 앙코르 유적을 세운 크메르 문명의 산물로 보고 있다(Figure 2B~2E). 구당서(舊唐書)에는 크메르(첸라; Chenla)족은 남부의 수진랍(水眞臘)과 북부의 육진랍(陸眞臘)으로 분열되어 있다는 언급이 있다. 이 중 육진랍이 현재 라오스 남부지역의 삼림과 평원이 복합되어 있는 지역을 가리키며, 이 연구지역이 포함된다.

이 지역은 참파족의 영향권에도 있었으며 참파족의 유명한 문화유산인 미션유적과 양식적인 면에서 유사하다.

따라서 이 지역의 문화와 양식은 10~14세기 동남아시아의 전반적인 문화양식으로 판단되며, 이들 민족의 흥망성쇠보다 힌두신앙이 바탕이 되어 종교적 이념에 따른 건축문화가 발전한 것으로 해석하고 있다(Choi, 2006; Mary Somers Heidhues, 2012).

‘참파삭 문화경관 내 밧푸 사원과 고대주거지’ 유적군의 총면적은 약 390 km²로 동쪽으로는 메콩강의 일부와 북서쪽의 푸카오산 일대를 포함한다. 선행한 현황조사 및 기록화 연구(Lee *et al.*, 2012; 2013)에 의하면, 이 유적은 관리체계에 따라 총 4개의 구역으로 구분되는데, 가장 넓은 구역을 포괄하는 구역 1은 구역 2, 3, 4를 포함하며 문화유적과 경관보호구역으로 이루어져 있다. 구역 2는 주변의 환경보존구역, 구역 3은 고고연구지역, 구역 4는 유구가 있는 기념물관리구역이다(Figure 2A). 이 연구의 대상인 밧푸 사원은 구역 4에 포함된다(Figure 2B, 2C).

2.2. 연구방법

이 연구를 위해 밧푸 주사원의 보존현황과 손상유형을 파악하고, 석재의 산출상태를 기재하였다. 주사원의 도면은 1989년 UNESCO와 UNDP의 밧푸 보존프로젝트에서 작성한 도면을 제공받아 조사 및 연구에 활용하였다. 이 연구에서는 주로 밧푸 주사원의 석재에 대한 초음파 속도를 이용한 물성평가와 주사원에 나타난 부재들의 구조적 변형을 해석하기 위해 기울기, 지반경사 및 부재의 변위 등을 분석하였다.

주사원을 구성하는 사암의 물성평가를 위해 Proceq사의 Pundit Lab을 사용하였다. 이 초음파 측정기기는 20~500 kHz의 주파수 범위를 갖고 있으며, 펄스 도달시간은 0.1~9,999 μ s로 오차범위는 ± 0.1 μ s이다. 초음파 측정을 위한 탐촉자는 끝이 뾰족한 Proceq사 P/N 325 40 170-B를

Figure 2. Location and distribution showing representative remains of Wat Phou and Associated Ancient Settlements within the Champasak Cultural Landscape of World Cultural Heritage in Laos. (A) Distribution map around the Wat Phou, (B) Front of the Sanctuary in Wat Phou, (C) Back of the Sanctuary in Wat Phou, (D) Front of Hong Nang Sida, (E) Back of Hong Nang Sida.

이용하였다. 이는 암석과 같이 표면의 거칠기가 다양하고 불균질한 매질을 잘 통과하는 특징이 있어 석조문화유산을 구성하는 암석의 물성진단에 유용하다.

한편 초음파 측정에서 일반적으로 사용하는 접촉매질은 초음파 속도의 정밀도에 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 또한 접촉매질은 석재의 변색 또는 이차오염 등의 손상을 야기할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 Lee and Jo(2017)가 입증한 엘라스토머 커버를 사용하여 접촉으로 인한 손상을 최소화하였다. 초음파 측정방법은 밧푸 주사원에 적용이 유리한 간접전달방법을 사용하였고 탐촉자 간의 거리는 20 cm로 고정하였다.

한편 밧푸 주사원 건물의 기단부 경사도를 측정하여 건물의 안정성을 평가하였고, 측정에는 클리노미터를 사용하였다. 또한 주사원 지반의 경사를 상대적 수준측량과 과거 측량도면을 이용하여 분석하였다. 주사원의 남측면과

북측면에 크게 발달한 부재의 이격거리를 측정하기 위해 두 구역을 선정하여 이격 폭을 측정하였으며, 측정은 버니어캘리퍼스를 사용하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 보존현황 및 손상유형

3.1.1. 보존현황

참파삭 문화경관의 주요 유적지로는 푸카오산, 밧푸 사원군, 홍낭시다 및 고대길, 따오타오사원, 고대도시, 토모사원, 비문, 기타 유적군 등이 있다. 특히 밧푸 사원군과 홍낭시다 구역을 연결하는 고대길에 많은 수의 고대건축물이 밀집되어 있다(Figure 2A). 현재 고대도시는 흔적만 남아있을 뿐이며 건축물의 형태를 확인할 수 있는 유적은 밧

Figure 3. General status of Wat Phou and associated remains. (A) Sanctuary in Wat Phou, (B) Hong Nang Sida, (C) Thao Tao, (D) Phou Kao Mountain and access road of Wat Phou, (E) Management Office of Wat Phou, (F) Unstable rock mass at the back yard in the Sanctuary of Wat Phou, (G) Appearance of drain around the Sanctuary in Wat Phou, (H) Northern Palace in Wat Phou, (I) Southern Palace in Wat Phou.

푸 주사원과 궁전들, 파오타오, 토모, 오우몽누아, 홍낭시다 유적 등이 있다(Figure 3).

이 세계문화유산은 힌두문화의 크메르 유적 및 각종 불교적 요소들이 추가적으로 연계되어 절묘한 조화를 이루고 있다. 이 유적들은 19세기에 프랑스 여행가에 의해 세상에 알려졌다. 당시 밧푸 유적은 건축물의 상부구조가 붕괴되어 있는 상태로 방치되어 있었다고 전하며, 17세기경 발생한 대지진을 원인으로 추정하였다. 또한 메콩강과 푸카오산 사이에 방대한 규모로 세워진 자연과 인간의 훌륭한 복합체로서 뛰어난 예술성 및 건축기술을 보여주며, 인간의 강한 종교적 신념과 현신을 잘 표현하고 있다(UNESCO World Heritage Center, 2001).

밧푸 주사원은 밧푸 유적이 시작되는 인공호수를 지나 난간중심석이 늘어선 담도, 남-북쪽 궁전 및 각종 기념물을 거쳐 푸카오산 중하단의 기념물관리구역의 끝에 위치한다(Figure 3). 이 유적은 건립에서 현재에 이르기까지

많은 역사를 보내왔으나 명확한 기록은 미흡한 실정이다. 현재 밧푸 사원 일대에는 홍낭시다, 파오타오(Figure 3A, 3B, 3C), 토모, 오우몽누아 등 총 5개의 사원과 셰스트라푸라(Shestrapura)와 링가푸라(Lingapura), 푸카오산(Figure 3D) 등으로 이루어진 고대도시로 구성되어 있다.

밧푸 유적은 1991년부터 매년 지속적으로 프랑스와 이탈리아 정부로부터 원조를 받아 유적의 정비, 관리, 보존, 발굴, 실측 등의 사업을 수행하였다(UNESCO World Heritage Center, 2001). 또한 1996년부터 1998년까지 3년간 유네스코 일본신탁기금을 통해 학술연구, 보존사업, 관리 및 시설 건축을 하였으며(Figure 3E), 일본 민간기관을 통한 인력 양성사업도 있었다. 등재 이후 프랑스, 일본, 인도, 이탈리아를 중심으로 보존사업을 다수 진행하였으며, 밧푸 주사원도 이 시기에 조사가 수행되었다.

이 때 주사원 후방에 있던 담반이 지반공학적으로 불안정하고(Figure 3F), 강우 시 빗물이 대량으로 주사원에 유

Figure 4. Deterioration status and forms of the Sanctuary in Wat Phou. (A) Frontal (eastern) view of Wat Phou. Various physical damages as fractures (B), break outs (C), scalings (D), and granular degradations (E). Rock surfaces covered by various biological contaminants as white lichen (F), yellow green lichen (G), mosses (H), and weeds (I), respectively.

입되어 재해 가능성이 제기되었으며, 이에 따른 주사원 하부 사면의 토양유실 문제가 제기되었다(UNESCO World Heritage Center, 2001). 따라서 일본은 2001년부터 2002년에 걸쳐 지반을 안정화하고 배수시설을 설치하여 강수의 우회배수를 유도하였고, 주사원과 주변에 대한 조사를 지원하였다(Figure 3G). 최근 인도에서는 밧푸의 북쪽 궁전을 보수하고 있다(Figure 3H).

현존하는 밧푸 주사원 관련자료는 2005년부터 2012년까지 남쪽 궁전의 보수를 완료한 프랑스 연구팀(Figure 3I)과 일본의 연구팀이 조사한 것이 부분적으로 남아있다. 이는 주사원의 인문학적 조사와 대략적인 실측 작업이 전부일 뿐 복원을 위한 면밀한 과학적 조사는 미진한 상태이다. 따라서 주사원 구성부재의 재질특성 및 손상도 진단을 수행하고 데이터베이스를 구축하는 것은 주사원의 보존관리를 위한 기초자료로서 매우 중요하다. 또한 우리의 문화재 보존과학기술을 적용하여 밧푸 주사원의 손상도 진단을 수행하는 것은 차후 라오스 세계문화유산의 체계적이고 과학적인 보존관리를 위한 중요한 과정이기도 하다.

3.1.2. 손상유형

밧푸 주사원은 심한 구조적 변형과 함께 상부구조가 거의 붕괴되어 있다(Figure 4A). 이 연구에서는 사원의 구성부재에 대한 유형별 손상상태를 간단히 살펴보았으며, 종합적 손상도 평가는 별도로 보고할 것이다. 물리적 손상유형으로는 균열, 탈락, 박리, 이격 등이 현저하다. 균열은 부재손상의 주요 요인으로 발생원인에 따라 구조상, 박리상 및 미세균열의 형태로 나타난다. 밧푸 주사원 석재의 균열은 조적식 부재들 간에 하중에 의한 구조상 균열 및 퇴적암의 특성상 나타나는 박리상 균열이 혼재한다(Figure 4B).

탈락은 많은 부재에서 나타나는 파손 및 마모의 일종으로 원부재가 박리, 마모 혹은 붕괴되어 부재간의 마찰에 의해 암편이 떨어져 나간 것이다. 밧푸 주사원은 원형을 유지하지 못하고 있으며 탈락의 원인은 과거 지진 등에 의한 구조적 변형과정에 영향을 받았을 것으로 추정된다. 원인은 불분명하나 부재의 부분적 유실부분도 탈락으로 볼 수 있다(Figure 4C, 4E).

박리는 암석이 층리면을 따라 얇게 쪼개지는 현상으로, 퇴적암의 결합에 따라 발달했을 가능성이 높다. 박리를 일으키는 중요한 요인은 수분 및 염에 의한 수축-팽창이 있으며, 밧푸 주사원은 라오스의 기후와 석재의 특성이 박리발생에 영향을 준 것으로 보인다. 박락은 박리를 따라 탈락하

는 현상이나, 불명확한 경우가 많아 탈락으로 기재하였다(Figure 4D, 4E).

화학적 손상은 구성암석이 가수분해, 산화, 환원, 이온교환, 용해 등 물-암석 반응에 의해 분해되는 현상으로, 생성이후 안정한 상태로 변환되는 과정이다. 밧푸 주사원의 물리적 손상유형 중 박리 및 박락을 일으키는 요인으로 화학반응이 관여한 것으로 추정되나 이에 따른 변색 등 외형적으로 구분할 수 있는 유형이 없으므로 이 연구에서는 생략하였다.

생물학적 손상은 조류, 지의류 등 하등식물 또는 초본식물과 고등식물이 군집하여 암석의 풍화를 촉진시키거나 착색을 일으켜 손상을 일으키는 현상이다. 밧푸 주사원의 경우 주변에 생물이 자랄 수 있는 좋은 조건을 갖추었으나 예초작업을 하는 등의 주기적인 관리가 되고 있는 것으로 보인다. 그러나 주사원의 부재 곳곳에는 지의류 및 선태류 등이 확인되며 일부 부재와 부재사이에서는 초본식물이 자생하는 것을 볼 수 있다(Figure 4F~4I).

3.2. 초음파 물성평가

3.2.1. 초음파 측정

암석에 대한 초음파 측정은 초음파가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하여 암석의 강도, 균열 심도 및 내부결함 등을 조사하는 비파괴시험으로 석조문화재의 물성평가를 위해 국내외에서 널리 활용하고 있다. 그러나 초음파속도는 측정방법, 표면외측, 암석의 이방성, 측정자의 경험과 같은 여러 요인에 따라 신뢰도가 좌우되는 단점이 있어, 이를 정량화 및 체계화하고자 다양한 연구가 수행되어 왔다(Suh *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2009; Jo and Lee, 2015; Lee and Jo, 2017).

특히 Lee and Jo(2017)는 다양한 초음파 측정조건에 따른 교차검증을 실시하였으며, 이 결과를 바탕으로 석조문화유산의 초음파 측정에 적합한 다양한 측정조건 및 물성평가 기법을 제시하였다. 이 연구에서는 Lee *et al.*(2009), Jo and Lee(2015), Lee and Jo(2017)가 제시한 초음파 측정조건을 적용하여 밧푸 주사원 석재의 상대적 물성진단 및 평가를 수행하였다.

밧푸 주사원을 구성하고 있는 사암은 퇴적암으로 생성 당시의 층리를 가지고 있다. 이 층리는 초음파속도에 영향을 미치며 정확한 물성평가의 저해요인이다. 그러나 이 사암은 대부분 입상으로 산출되며 비교적 균질하고 단위부

재에 따른 차이가 거의 없어 초음파속도의 해석에는 특별한 문제가 없다. 이렇게 측정된 속도를 직접법으로 환산하여 물성평가를 수행하였으며 이에 따른 보정계수를 구하기 위해 직접전달방법이 가능한 주변의 신선한 사암에서 20회 측정하여 보정계수를 산출하였다. 이 결과에 따라 밧푸 주사원 사암의 보정계수를 1.15로 정하였다. 이 초음파

속도는 밧푸 사원을 구성하는 풍화된 사암에 대한 상대적인 값으로 중요한 의미가 있다.

3.2.2. 물성평가

밧푸 주사원 석재의 초음파 측정은 동측면에서 367지점, 남측면에서 332지점, 북측면에서 348지점 등 총 1,047 지점에서 수행하였다. 측정된 초음파 도달시간을 이미 잘 알려진 수식과 보정계수를 적용하여 초음파 속도 및 풍화도지수(K)로 간단히 요약하면 Table 1과 같다. 주사원의 서측면은 전면이 벽돌로 구성되어 있어 제외하였으며, 이외 육안으로는 관찰되며 도면에도 표현되어 있으나 초음파속도를 측정하기에 접근이 불가능한 지점은 측정에서 제외하였다.

측정결과는 2D 모델링을 통해 다양한 색을 이용하여 위치별 물성 취약부위를 거시적으로 알아볼 수 있도록 처리하여 각각의 실측도면에 지도화 하였다. 이 결과는 Figure 5~7에 제시하였으며, 각 방위별 초음파속도의 분포범위를 쉽게 파악할 수 있게 그래프를 작성하였다(Figure 8).

주사원 동측면 석재의 초음파 측정결과, 821~2,805 m/s의 속도 분포를 보였으며 평균은 1,981 m/s로 산출되었다

Table 1. Summary of ultrasonic measurement for rock properties of the Sanctuary in Wat Phou

		Direction		
		East	South	North
Rock type		Sandstone		
Frequency		367	332	348
Ultrasonic velocity (m/s)	Max	2,805	3,108	2,674
	Min	821	1,045	1,353
	Mean	1,981	2,165	2,107
	S.D.	339	225	221
K	Max	0.74	0.66	0.56
	Min	0.10	0.00	0.14
	Mean	0.36	0.30	0.32
	S.D.	0.11	0.07	0.07

Figure 5. Two dimensional contour map using ultrasonic velocity for rock properties on the Sanctuary of Eastern Side in Wat Phou.

(Table 1). 주로 중상부가 상대적으로 높은 초음파속도 영역대를 보였으며 정면의 출입구와 하부가 상대적으로 낮은 초음파속도 영역을 나타냈다(Figure 5). 남측면 석재의

초음파 속도는 1,045~3,108 m/s의 분포와 평균 2,165 m/s를 나타냈다(Table 1, Figure 6). 주로 창틀 주변의 물성이 높게 평가되었으며 하부로 갈수록 저속도대의 영역이

Figure 6. Two dimensional contour map using ultrasonic velocity for rock properties on the Sanctuary of Southern Side in Wat Phou.

분포한다. 특히 주실의 벽돌구조와 연결되는 하부 석재에서 초음파속도가 낮게 검출되었다.

북측면 모든 석재의 초음파속도는 최소 1,353 m/s, 최대

2,674 m/s, 평균 2,107 m/s로 산출되었다(Table 1). 이를 2D로 모델링한 결과, 전실로 들어가는 입구 좌측하단에 높은 초음파속도 영역대가 확인되며 특별히 취약한 영역대

Northern Side-1

Northern Side-2

Figure 7. Two dimensional contour map using ultrasonic velocity for rock properties on the Sanctuary of Northern Side in Wat Phou.

는 나타나지 않았다(Figure 7). 방위별 초음파속도를 비교한 결과, 동측면이 상대적으로 낮은 평균 초음파속도 값이 나타났으며, 남측면과 북측면은 평균 2,000 m/s 이상의 초음파속도가 산출되었다.

한편 상대적인 비교 및 풍화등급 산정을 위해 Iliev(1966)는 초음파속도에 따른 암석의 풍화정도를 구분하여 풍화도지수(K)를 제안하였다. 풍화도지수는 신선한 암석과 풍화된 암석의 초음파속도 차이를 기준으로 풍화정도에 따라 K 값이 일정하게 증가하여, 이를 바탕으로 암석의 풍화등급을 설정할 수 있다. 또한 초음파속도의 빈도그래프를 작성하여 주요 속도대를 파악하고 풍화도지수를 사용하여 밋푸 주사원 구성암석의 방위별 상대적 풍화도지수와 풍화등급분포를 도시하였다(Table 1, Figure 8).

이 결과, 밋푸 주사원 동측면의 풍화도지수는 0.10 ~ 0.74의 범위로 나타났으며, 0.36의 평균 풍화도지수가 산출되어 중간 풍화단계(MW; moderately weathered)에 도시되었다. 남측면과 북측면의 평균 풍화도지수는 각각 0.30과 0.32로 동측면보다 상대적으로 높은 지수를 보였으

나 중간풍화단계(MW)에 해당하여, 석재의 전반적인 물성은 양호한 것으로 해석할 수 있다.

3.3. 지반경사 분석

3.3.1. 현황

건축물이 기울어져 있다는 것은 구조적으로 안정하지 못하다는 것을 의미한다. 이는 건축물의 구조적 문제에 따라 발생하기도 하지만 지반침하 등 하부구조의 불안정성에서 기인하는 경우도 많아 종합적으로 검토되어야 한다. 밋푸 주사원은 푸카오산 자락의 하단부에 사암과 벽돌을 주재료로 쌓아올린 건축물이다.

지반이 불안정한 사면에 많은 양의 석재가 쌓여있어 하중을 받는 것이라면 주사원의 지반은 계속적인 부등침하가 발생할 것이다. 건축 당시 지반다짐 여부와 기법은 발굴조사가 이루어지지 않아 확인할 수 없지만, 현재 육안으로 확인되는 지반은 부등침하와 불균형으로 인해 주사원의 기반은 수평에 어긋나 있고 상부구조도 매우 불안정한 상태이다.

또한 기후 및 환경적 특성에 따라 우기와 건기가 반복되어 우수의 지반유입에 대한 문제점도 갖고 있다. 과거 일본 연구팀에서 주사원 주변에 배수로를 설치했지만 우기에 직접적으로 주사원 지반에 스며드는 빗물의 양은 상당하여, 지반의 침식과 약화를 가져왔다. 밋푸 주사원은 캄보디아 앙코르유적의 타 프롬 사원과 같이 큰 수목에 의한 직접적인 피해는 없지만 주변에 많은 초본식물이 성장하여 직간접적으로 영향을 미치고 있다.

주사원 내부에는 붕괴와 기울음을 제어하기 위한 목재 프레임이 여러 군데에 설치되어 있으나, 심하게 손상된 것이 많아 임시방편에 불과하며 사원이 언제 무너져 내리더라도 이상하지 않은 상태라고 할 수 있다. 위의 복합적 상태가 지속되고 충격 등 외적 요인이 발생한다면 향후 주사원의 구조안정성에 좋지 않은 영향을 미칠 것이다.

3.3.2. 방법 및 결과

밋푸 주사원의 하부구조에 대한 변형을 검토하기 위해 장방향인 남측면과 북측면의 최하부 1층 기반을 기준으로 클리노미터를 이용하여 각각 23지점씩 경사도를 측정하였다. 그러나 주실의 벽돌로 조적된 부분은 전실의 기반과 달리 측정이 용이하지 않아 제외하였다. 또한 지반경사를 파악하기 위하여 현장에서 레이저기기와 수평계를 활용하여 수준측량을 수행하였다. 이 결과를 1989년에 프랑스 연구

Figure 8. Distribution showing ultrasonic velocity and weathering coefficients of rock properties for the Sanctuary in Wat Phou.

여 가장 큰 경사로 확인되었다. 또한 2번 지점에서 3°E의 경사를 보여 동쪽으로 가장 큰 경사를 나타냈다. 따라서 남측면의 좌측부분이 우측에 비해 상대적으로 불안정한 경사도를 갖는 것을 알 수 있다.

북측면에서는 1번~5번지점에서 1°E~3°E의 경사로 동쪽으로의 경사가 확인되며, 남측면 좌측의 반대편인 북측면 우측에서 3°W의 경사를 보이며 반대면과 비슷한 경사

Figure 10. Result of relative leveling of ground positions for the Sanctuary in Wat Phou.

가 측정되었다. 이와 같이 기단석의 경사방향이 조금씩 다른 것은 밋푸 주사원 지반의 부등침하와 같은 불안정에서 기인한 것으로 판단된다.

주사원 지반의 경사를 확인하기 위해 상대적인 수준측량을 실시하였으며, 석재로 이루어진 남측면(B-B')과 북측면(A-A')의 양측 지반을 대상으로 수행하였다(Figure 10). 이 결과, 북측면(A-A')은 직선거리 2,296 cm, 높이가 9.0 cm로 측정되었고 경사는 0.22°로 나타났다. 남측면(B-B')은 직선거리 2,270 cm, 높이가 68.5 cm로 측정되었으며, 경사는 1.73°로 확인되었다. 이를 토대로 볼 때, 남측면의 지반경사가 북측면에 비해 1.51° 더 기울었음을 보인다. 이 차이는 주사원의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

한편 1989년 프랑스 연구팀이 측량한 등고선 도면을 이용하여 밋푸 주사원 양측면 지반의 경사를 분석하였다(Figure 11). 이 결과, 주사원 북측면과 남측면의 지반경사는 유사한 경향이 나타났다. 그러나 배후 사면의 경사를 제외한 주사원 건축물만을 대상으로 할 때, 남측면은 서쪽에서 동쪽으로 가며 약 3.23 m의 고도차가 있으며 사원의 중심영역에서 가장 큰 낙차가 있다. 북측면에서는 약 0.98 m의 고도차만 발생하였으며 낙차는 완만하게 변한 것을 볼 수 있다(Figure 11).

이와 같이 주사원의 길이방향으로 양측면의 지반경사가 다르고 고도차이도 심한 것은 건축 이후 구조적 변형이 있었던 것을 지시하는 것이다. 이는 부등침하가 원인으로 지반의 고도 차이를 유발했으며 서로 다른 경사와 주사

Figure 11. Analytical result of altitude plotted on the survey map of French team (1989) around the Sanctuary in Wat Phou.

원 기반부의 변형을 야기한 것으로 해석된다. 등고선 그래프를 보면 주사원의 원지반은 평지가 아닌 일정한 경사를 가졌던 것을 알 수 있으나, 현지점에서 주사원 초축 이후의 변형량을 추정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 향후 지반의 토성분석 등을 통해 정밀한 검토가 필요할 것이다.

3.4. 부재변위 분석

3.4.1. 대상 및 방법

변위는 부재와 부재사이의 간격이 변형되어 비정상적으로 넓어지는 현상으로, 이는 지반에 의한 영향 또는 건물의 구조적 불안정에 따라 일어나는 기계적 변형이다. 밧푸 주사원을 비롯한 동남아시아의 고대 석조건축물들은 사람을 가공하여 부재간 이음매를 빈틈없이 축조하였으며, 이

기법은 석재와 석재간의 압축하중과 마찰력에 의해 지탱하여 건축물 전체를 하나의 구조처럼 안정적으로 유지하는 특성을 가지고 있다. 그러나 기후환경, 지반침하 및 부재간 응력 등 복합적 요인에 의해 손상과 변형이 진행되어 이격이 발생하였다. 적절한 보수가 없다면 이는 점차 가속되어 한계에 이르러 붕괴될 것이다.

이 연구에서는 이격으로 인한 밧푸 주사원의 구조안정성을 평가하기 위해 부재사이의 이격 폭을 분석하였다. 측정은 남측면과 북측면에서 지반의 불안정으로 인해 발생한 것으로 판단되는 범위를 대상으로 측정하였다. 선정된 2곳은 주사원의 남측면과 북측면 일부 구역이다(Figure 12). 이 부분의 지반과 기반부는 육안으로도 불안정한 것을 볼 수 있다(Figure 9~11). 부재의 이격 폭 측정은 폭의 하부·중앙부·상부를 각각 측정하여 평균값을 산출하였

Figure 12. Measuring points and displacement width within rock properties for the Sanctuary in Wat Phou.

Table 2. Measurements of displacement width (mm) within rock properties for the Sanctuary in Wat Phou. Numbers are the same as those of Figure 12 and 13

Area	No.	Lower	Middle	Upper	Mean	Area	No.	Lower	Middle	Upper	Mean
South (main)	1	14.0	17.0	19.0	16.7	North (main)	1	52.4	50.1	51.8	51.4
	2	42.3	22.2	35.3	31.7		2	52.5	50.3	53.1	52.0
	3	48.5	48.2	49.2	48.6		3	24.5	10.9	7.8	14.4
	4	54.9	57.2	60.1	57.4		4	30.2	62.4	86.7	68.4
	5	93.9	104.1	114.6	104.2		5	55.6	39.3	45.5	46.8
	6	119.3	133.4	142.5	131.7		6	12.1	11.4	7.3	10.3
	7	132.0	136.2	153.8	142.6		7	46.4	47.9	53.3	49.2
	8	295.0	305.0	300.0	307.5		8	25.4	24.1	22.1	23.9
	9	300.0	308.0	315.0	307.7		9	87.2	87.4	91.9	88.8
	10	295.0	308.0	325.0	309.3		10	87.1	87.4	86.4	87.0
	11	317.0	328.0	340.0	328.3		11	38.5	41.1	36.4	38.7
	12	-	128.0	-	128.0		12	42.4	40.9	43.6	42.3
South (rest)	1	6.9	10.5	17.4	11.6	North (rest)	13	58.3	58.0	56.9	57.7
	2	29.5	13.7	16.4	19.9		1	10.0	19.8	9.4	13.1
	3	13.0	10.4	3.3	8.9		2	14.4	12.2	8.4	11.7
	4	10.9	9.5	8.5	9.6		3	19.4	17.5	16.7	17.9
	5	14.2	20.8	19.9	18.3		4	23.5	20.8	20.4	21.6
	6	20.6	19.0	17.2	18.9		5	35.5	33.6	32.3	33.8
	7	4.5	6.0	9.6	6.7		6	40.4	40.1	42.1	40.9
	8	5.2	5.5	5.6	5.4		7	3.3	28.9	39.2	23.8
	9	13.4	13.3	12.9	13.2		8	6.6	8.3	13.0	9.3
	10	21.8	27.3	37.5	28.9		9	5.4	6.3	4.8	5.5
	11	17.0	16.7	14.9	16.2		10	23.1	20.9	22.1	22.0
	12	24.1	21.1	20.4	21.9		11	14.3	4.2	4.9	7.8
	13	10.4	11.9	13.0	11.8		12	16.2	12.5	14.0	14.2
	14	34.2	28.5	27.2	30.0		13	12.9	13.8	16.3	14.3
	15	20.4	20.2	20.6	20.4		14	19.2	12.3	10.4	14.0
	16	12.5	12.5	10.0	11.7		15	13.2	14.5	15.7	14.5
	17	41.6	40.5	40.6	40.9		16	15.1	14.8	16.9	15.6
	18	6.4	8.2	10.3	8.3		17	11.8	11.4	11.0	11.4
	19	18.9	18.4	19.9	19.1		18	15.5	16.7	21.4	17.9
	20	19.2	16.5	43.9	26.5		19	13.0	14.0	25.0	17.3
	21	48.6	45.8	47.4	47.3		20	15.7	12.4	14.4	14.2
	22	19.6	20.2	22.1	20.6		21	29.5	22.6	25.3	22.3
	23	31.0	31.0	29.0	30.3						
	24	32.0	18.0	27.0	25.7						
	25	-	38.0	-	38.0						

다. 또한 사다리를 이용하여 측정하였기 때문에 손이 닿는 범위 내에서 측정한 값이다.

이격 측정은 선정범위 내에서 측정할 수 있는 주요 이격 부분(주황색)과 이에 수반된 기타 이격부분(파란색)의 두 그룹으로 나누어서 분석하였다(Figure 12). 주요 이격부분은 지반의 영향을 직접적으로 받은 것으로 판단되는 부분이며, 상부로 갈수록 이격 폭이 넓어지는 것으로 나타났다.

주요 이격에 수반된 기타 이격부분은 주요 이격의 좌우에서 측정이 가능한 것을 대상으로 하였다.

3.4.2. 분석결과

밧푸 주사원 부재의 이격 폭 측정은 남측면과 북측면 중 이격이 상당히 진행되었다고 판단되는 두 지점을 선정하여, 주요 이격은 각각 12지점과 13지점을 측정하였으며 기

타 이격은 각각 25지점과 21지점을 측정하였다(Figure 12). 남측면의 주요 이격은 아래에서 위로 올라갈수록 폭이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 1번 지점의 이격과 11지점의 평균 이격 폭의 차는 321 mm로 편차가 크다(Table 2, Figure 13). 북측면도 위로 올라갈수록 이격 폭이 증가하는 경향을 보이기는 했으나, 남측면에 비해 큰 폭의 증가는 보이지 않았다(Table 2, Figure 13).

평균 이격 폭은 남측면과 북측면이 각각 159.5 mm와 48.5 mm로 확인되었으며 남측면이 북측면에 비해 약 3배

큰 값을 나타냈다. 기타 이격 폭을 살펴보면 남측면은 5.4~47.3 mm의 범위를 보이며, 평균 20.2 mm의 값을 나타낸다. 북측면은 5.5~40.9 mm의 범위를 보이며 평균은 17.2 mm를 보였다. 남측면의 기타 이격은 주요 이격과 마찬가지로 아래에서 위로 올라갈수록 평균 폭의 값이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 남측면이 북측면에 비해 다소 높은 값을 보였다(Table 2, Figure 13). 이는 변형의 메커니즘을 해석할 수 있는 중요한 자료로 차후에 상세하게 검토할 것이다.

Figure 13. Diagram showing average displacement width within rock properties for the Sanctuary in Wat Phou. Numbers are the same as those of Figure 12 and Table 2.

이상의 결과를 종합하면, 밧푸 주사원 남측면의 이격은 상당히 진행되었으며, 이격으로 인해 차후 주사원의 구조 안정성에 문제가 발생할 것으로 판단된다. 지반의 경사도 분석 결과와 종합하면, 남측면의 지반이 북측면보다 더 침하되어 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 앞서 분석한 건물 및 지반경사 분석과 더불어 향후 정기적인 모니터링은 필수적이다. 이를 통해 전체적인 변위와 변형메커니즘을 파악한다면 밧푸 주사원의 보존관리에 중요한 자료가 될 것이다.

4. 고찰 및 결론

라오스 ‘참파삭 문화경관 내 밧푸 사원과 고대주거지’ 유적은 프랑스, 일본, 인도, 이탈리아 등 선진 보존과학기술 보유국의 원조사업을 거쳐 유적의 일부에 대한 복원과 보수가 이루어졌으나 체계적이고 장기적인 보존관리를 위한 과학적 연구는 미진한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 밧푸 주사원에 대한 현황과 석재의 물성분석 및 구조적 변형 특성을 검토하였다.

밧푸 주사원은 사암과 벽돌로 구성되어 있으며, 6세기경 목조건축으로 초축되었으나 9세기경 화재로 소실되고 그 위에 벽돌로 먼저 지은 후에 사암과 벽돌을 혼용하여 중건한 것으로 알려져 있다. 주사원은 현재 상부구조가 대부분 무너져 있으며, 다양한 손상이 진행되고 있어 과학적이고 체계적인 진단을 통한 보존관리가 필요하다. 주요 손상 유형은 균열과 탈락, 박리, 이격 등의 물리적 손상과 지의류, 선태류, 초본식물 등의 생물학적 손상이다.

주사원의 석재를 대상으로 초음파 측정을 실시하여 구성암석의 상대적 물성을 평가한 결과, 동측면의 풍화도지수는 0.10~0.74(평균 0.36)를 보여 중간풍화단계(MW)를 나타냈다. 실제 부재의 강도는 건축 재료로서 상당부분 유지하고 있는 것으로 판단된다. 남측면과 북측면은 평균 0.30과 0.32 풍화도지수를 보여 상대적으로 높은 물성을 보였다. 동측면 석재에서는 부분적으로 심한 풍화단계를 보이는 것도 있어 남·북측면에 비해 상대적으로 낮은 물성을 보였다. 이는 주사원의 위치와 배치에 따른 입지적인 요인에 의한 물성 저하와 환경적 요인 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

밧푸 주사원의 지반과 기단의 경사도를 측정한 결과, 남측면의 좌측 4번지점이 5°W의 경사를 나타내어 다른 부재에 비해 상대적으로 높은 경사도를 보였다. 상대적 수준측

량과 1989년 측량된 도면을 통해 주사원 주변의 지반경사를 검토한 결과, 주사원은 평지가 아닌 일정한 경사를 가진 지반에 자리한 것으로 해석되었다. 한편 남측면 지반의 경사가 북측면에 비해 1.51° 더 기운 것으로 나타나며, 이 차이는 장기적으로 주사원의 구조안정성에 영향을 줄 것으로 판단된다.

또한 주사원의 부재사이에 발생한 이격을 정밀 분석하였다. 남측면과 북측면에서 가장 심각하다고 판단되는 범위를 측정하였으며, 남측면과 북측면 주요 이격의 평균 폭은 각각 159.5 mm와 48.5 mm로 확인되어 남측면의 주요 이격이 약 3배 더 넓어져 있음을 보였다. 이는 하부 지반의 부등침하에 따른 불안정에서 기인한 것으로 판단된다. 밧푸 주사원의 지반안정성에 대한 정확한 분석을 위해 비파괴지반탐사가 필요하며, 주사원의 주변 및 기반하부에 대한 발굴조사가 이루어져야 할 것이다. 또한 경사도 분석과 더불어 이격 폭에 대한 정기적인 모니터링이 요구된다.

라오스는 건기와 우기로 나뉘는 열대몬순기후에 속하여 이에 따른 환경인자는 암석의 풍화를 가속화 시킬 수 있다. 특히 주변에 수목이 많고 사면에 위치한 밧푸 주사원은 생물학적 손상이 심각하며 관광객에 대한 관리는 부분적으로 이루어지고 있으나 대상에 대한 직접적인 관리는 미흡한 것으로 보인다. 따라서 장기적으로 안정적 보존을 위해 마스터 플랜을 바탕으로 보존 및 관리체계가 가동되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 개발도상국 과학기술지원사업(NRF-2012K1A3A9A01027743) 연구의 일부임을 명기하며, 재정적 및 행정적 지원에 깊이 감사한다. 이 논문은 신효철의 이학석사학위 청구논문의 일부를 수정하고 재해석하여 공저한 것임을 밝힌다.

REFERENCES

- Choi, B.U., 2006, History of Southeast Asia : Traditional Age. Daehan Textbook Co. Ltd., 42-56. (in Korean)
- Federico, C. and Janet, G., 2013, Nature and provenance of the sandstone used for Bayon style sculptures produced during the reign of Jayavarman VII. Journal of

- Archaeological Science, 40, 723-734.
- Federico, C. and Sokrithy, I., 2012, Khmer sandstone quarries of Kulen Mountain and Koh Ker: a petrographic and geochemical study. *Journal of Archaeological Science*, 39, 1455-1466.
- Heiner, S., Stephan, P., Esther, P. and Hans, L., 2010, Sandstone weathering in tropical climate: Results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia. *Engineering Geology*, 115, 182-192.
- Hosono, T., Uchida, E., Suda, C., Ueno, A. and Nakagawa, T., 2006, Salt weathering of sandstone at the Angkor monuments, Cambodia: identification of the origins of salts using sulfur and strontium isotopes. *Journal of Archaeological Science*, 33, 1541-1551.
- Iliev, I.G., 1966, An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physical-mechanical properties. *Proceedings of the International Congress on Rock Mechanics*, 1, 109-114.
- Jo, Y.H. and Lee, C.H., 2015, A study on selection of ultrasonic transducer and contact material for surface irregularities of stone cultural heritage. *Journal of Conservation Science*, 31, 267-278. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.C., Lee, C.H. and Kim, J.Y., 2007, Material characteristics and deterioration degree of the Angkor Monuments in Cambodia. *Science and Engineering of Cultural Heritage*, 6, 91-106. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H. and Jo, Y.H., 2016, Stone Heritage of the Republic of Korea. In: Kato, S., Reedman, A., Shimazaki, Y., Uchida, T., Ngoc, N.T.M., Surinkum, A. (eds), *Stone Heritage of East and Southeast Asia, CCOP*, 79-103.
- Lee, C.H. and Jo, Y.H., 2017, Correlation and correction factor between direct and indirect methods for the ultrasonic measurement of stone samples. *Environmental Earth Sciences*, 76, 477(1-12).
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Chun, Y.G., 2009, Establishment of ultrasonic measurement and correlations of direct-indirect method for weathering evaluation of stone cultural heritage. *Journal of Conservation Science*, 25, 233-244. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Kim, J., Kim, H.B., Park, K.S., Baik, J.C., Suh, Y.I., Yang, Y.S., Jo, Y.H., Cho, W.C., Choi, B.U., Choi, S.E., Han, B.I. and Hong, S.G., 2012, Fundamental Investigation on the Khmer Historic Sites in South East Asia and Preliminary Master Plan for Restoration of Laos World Heritage Site. *Research Report of Korea Cultural Heritage Foundation*, 1-255. (in Korean)
- Lee, C.H., Kim, J., Jo, Y.H., Thongsa, S., Han, D.R., Yu, J.H., Rhyu, K.S. and Shin, H.C., 2013, Scientific Database Building for Cultural Heritage of Laos using Nondestructive Precise Diagnosis and Digital Technology. *Research Reports of Science and Technology Support for Developing Countries*, National Research Foundation of Korea, 1-234. (in Korean with English abstract)
- Mary Somers Heidhues, 2012, *Southeast asia: A Concise History*. 14-66.
- Shin, H.C., 2014, Deterioration diagnosis and material characteristics for construction properties in main Sanctuary of Vat Phou temple in Champasak, Lao PDR. MS Thesis in Kongju National University, 1-105. (in Korean with English abstract)
- Suh, M., Song, I. and Choi, H., 2012, The structural safety diagnosis of Dabo Pagoda of Bulkuk Temple using analyses of ultrasonic wave velocity. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 5, 199-209.
- Uchida, E., Shimoda, I., Takubo, Y. and Toyouchi, K., 2012, Moisture content measurement and surface water absorption test in the inner gallery of Bayon for the conservation of the bas-relief. *Journal of Archaeological Science*, 39, 1420-1435.
- Uchida, E. and Shimoda, I., 2013, Quarries and transportation routes of Angkor monument sandstone blocks. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1158-1164.
- UNESCO World Heritage Center, 2001, WHC Nomination Documentation No. 481 Wat Phou (Laos).
-