

# 3차원 영상분석을 이용한 대원사다층석탑의 안정성 평가

전병규 | 이찬희\*<sup>1</sup> | 서만철\*\*

국립문화재연구소 보존과학연구실

\*공주대학교 문화재보존과학과

\*\*공주대학교 지질환경과학과

## Stability Evaluation of Multi-storied Stone Pagoda in the Daewonsa Temple using Three-dimensional Image Analysis

Byung Kyu Jun · Chan Hee Lee\*<sup>1</sup> · Mancheol Suh\*\*

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

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

\*\*Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

<sup>1</sup>Corresponding Author : chanlee@kongju.ac.kr

**초 록** 석조문화재는 설계 도면이 소실된 경우가 많으며 정확한 형태정보가 없어 보존과 원형복원에 큰 어려움이 있다. 최근에 정밀실측과 같이 수치정보를 구축하는 연구가 활발히 진행되고 있지만, 대부분 2차원적으로서 활용도에 한계가 있다. 이를 보완하는 새로운 기법으로 3차원 영상 스캐닝 시스템이 도입되고 있다. 이 연구에서는 대원사다층 석탑을 대상으로 3D 스캐닝을 통하여 3차원 영상분석과 자료를 구축하고 실측도를 작성하였으며, 이를 바탕으로 수평 및 수직 변위를 평가하였다. 부재별 수치를 측정된 결과, 각 방면에서 서로 다른 수치를 보이고 있으며 상하 및 좌우변위가 나타났다. 수평적 상하변위는 좌면과 우면에서 탑신의 상부로 갈수록 컸으며, 수직적 좌우변위는 8층 옥개석이 북서쪽으로 치우쳐 있는 것으로 확인되었다. 이와 같은 변위측정과 평가는 석조문화재의 특성상 불균등한 표면과 프로그램 및 연구자에 따라 약간의 오차는 발생할 수 있다. 앞으로 다양한 실측과 안정성 평가연구가 진행된다면 석조문화재의 원형보존과 훼손상태 파악에 대한 정확한 자료를 제시할 수 있을 것이다.

**중심어:** 3차원 스캐닝 시스템, 3차원 영상분석, 변위측정, 대원사다층석탑

**ABSTRACT** A stone cultural heritage often lacks design drawing and detailed geometric informations, thus it becomes more difficult to conservation and restoration. Even though there is active database of detail shape information and numerical measurement for stone monuments, most of the data is in hard-to-utilize two-dimensional images. The new technology developed to overcome this problem is three-dimensional image scanning system. The multi-storied stone pagoda of the Daewonsa temple was analysed with 3D scanning image data then survey map with orientation displacement was evaluated. The difference of each side became apparent with the members of the stone properties was measured, also horizontal and vertical displacement occurred. Horizontal displacement occurred in increasing severity from left to right and from body section to upper part. The 8th roof stones are leaning toward northwest direction due to lateral displacement. The evaluation and measurement of displacement could cause a little errors due to the characteristics uneven surface of stone monuments, computer program and mistakes from the researcher. In future, more precise measurement and stability studies should be done to suggest that accurate data for conservation and understanding of damage condition can be provided.

**Key Words:** Three-dimensional scanning system, Three-dimensional image analysis, Displacement evaluation, Multi-storied stone pagoda of the Daewonsa temple

## 1. 서론

현존하는 대부분의 석조문화재는 설계도면이 소실되었거나 건조당시부터 도면이 없이 수작업으로 축조하여 실물만 존재하는 경우가 많다. 그러나 이미 손상된 석조문화재의 보존과 원형복원 과정에서 정확한 형태정보와 실측도면이 없는 경우에는 큰 어려움을 겪을 수밖에 없다. 따라서 문화재의 실측과 수치도면 제작에 관한 연구가 다방면으로 진행되고 있지만, 정보를 수집하는 방법에서 아날로그적인 요소가 많으며 대부분 2차원적이다.<sup>1</sup> 이를 보완하는 방법으로 활용도가 높은 디지털 방식의 3차원 스캐너 또는 3차원 스캐닝 시스템이 도입되고 있다. 이는 데이터 활용이 용이하며 다른 프로그램과의 연동이 뛰어난 장점을 가지고 있다.

국내에서는 자동차, 항공 및 토목 등 주로 산업분야에서 이 시스템을 사용하고 있을 뿐, 문화재에 활용한 연구는 아직 미비한 상태이다. 국제적으로는 1997년부터 미국 스탠포드대학에서 진행된 미켈란젤로 프로젝트의 다비드 3차원 영상복원을 기점으로 석조문화재에 대한 3차원 영상자료의 획득과 적용연구가 진행되고 있다.<sup>2,3,4</sup> 최근 우리나라에서도 문화재에 대한 3차원 DB 사업의 일환으로 영상정보 구축에 관심이 커지고 있으며 중요성이 부각되고 있지만 실제적인 연구는 아직 초기 단계로서 많은 연구를 필요로 하고 있다.<sup>5,6</sup>

그러나 석조문화재의 표면은 대부분 함수로 표현하기 어려운 굴곡이 많은 표면으로 구성되어 있어, 전적으로 함수관계와 명령어로 진행되는 영상 프로그램의 메커니즘을 이해한 상태에서 정보의 구축과 손실 및 왜곡이 없도록 수행해야 한다. 따라서 이 연구에서는 3D 영상 스캐

닝 시스템의 높은 정밀도를 이용하여 대원사다층석탑의 형태정보와 부재별 수치정보 획득을 시도하였으며, 데이터 활용을 위한 조건을 제시하였다. 또한 이 자료를 이용하여 이 석탑의 수직적 및 수평적 변위량을 계산하고 전체적인 안정성을 평가하였다. 이 결과는 앞으로 석조문화재의 영상분석과 안정성 평가연구에 중요한 자료가 될 것이다.

## 2. 현황 및 연구방법

### 2.1. 현황

대원사는 경남 산청군 삼장면 유평리 21번지에 있는 참선도량의 하나로서 지리산의 절경과 잘 어우러진 사찰이다. 경내의 사리전 앞에 있는 다층석탑은 1992년 1월 15일에 보물 제1112호로 지정되었으며, 주로 화강암질 편마암으로 조성된 석조문화재로서 2단의 기단 위에 8층의 탑신부를 구성하고 상륜을 장식한 일반형 탑이다. 이 탑은 신라 선덕여왕 15년(서기 646년)에 자장율사가 사리를 봉안하기 위해서 건립한 것으로 알려져 있으며, 임진왜란 때 파괴되자 조선 정조 8년(1784년)에 다시 세워 놓은 것으로서, 드물게 남아있는 조선시대의 석탑이다. 기단의 위층은 이 탑에서 가장 주목되는 부분으로 상층 기단의 각 면에는 두 손을 합장한 공양좌상(사천왕상)이 새겨져 있고 네 귀퉁이는 우주 대신 인물상이 배치되어 있는 특이한 형태이다(Figure 1A).<sup>7</sup>

탑신의 각 지붕들은 처마가 두껍고 네 귀퉁이에서 들려 있으며, 옥개석은 하면에 2단씩 받침이 있고 위에는 각형



Figure 1. (A) Current state of the Daewonsa temple stone pagoda. (B) Stone surface coated with reddish brown discoloration due to oxidation of rock properties. (C) Basement roof stone rejoined using cement adhesion.

1단 괴임으로 상부의 탑신석을 받게 하였다. 8층의 옥개석에는 네 귀퉁이에 풍탁이 달려 있고, 상륜부에는 복발과 찰주가 있으며 높이는 6.6 m이다. 전체적인 체감비율이 뛰어나고 조각은 소박한 편이다. 그러나 건축당시 몇 층을 이루고 있었는지에 대한 확실한 기록이 없어 9층탑 또는 8층탑으로 불리다가 최근에 다층석탑으로 불리게 되었다고 전해진다. 한편 대원사에 보관중인 기록에는 조선 경종 4년에 재건하였고, 1972년에 보수공사와 1988년에 해체복원공사가 있었으며 이때 58과의 사리와 파손된 사리장엄구가 나와 새로 봉안하였다고 한다. 그러나 정확한 보수 및 복원에 관한 기록은 전혀 없다.

사리전을 기준으로 할 때, 이 탑의 정면은 정북방향을 벗어난 N30°E를 향하고 있으며 탑의 4면 모두 정 방위를 벗어나 있다. 이는 사찰 경내의 건물배치 및 주변지형의 방향과 어울려 절묘한 조화를 연출하고 있다. 그러나 이 탑은 구성암석의 산화로 인해 전체적으로 적갈색을 띠고 있고(Figure 1B), 탑의 부재는 박리와 박락이 심하며, 탑신과 옥개석의 일부는 파손되어 시멘트로 접착되어 있는 상태이다(Figure 1C). 이 석탑의 구성재질과 특성 및 보존과학적 문제점은 이미 상세히 연구된 바 있다.<sup>8)</sup>

## 2.2. 연구방법

이 연구에서는 대원사다층석탑에 대하여 3차원 영상자료를 획득 및 분석하고 구조적 변형에 대한 안정성을 평가하였다. 3차원 영상자료 획득은 역공학(reverse engineering)을 응용한 것으로서, 설계 도면이 존재하지 않는 대상물을 3차원 형상으로 받아들이고, 필요에 따라 제품을 개발하거나 생산에 연계하여 사용하던 방법이다. 사용된 장비는 Cyra Technologies, Inc.에서 개발한 Cyrax-2500이다. 이 장비는 석탑과 같은 대형 건축물에 주로 쓰이고 있으며, 비접촉식으로 측정이 가능하다. 데이터는 레이저를 대상물에 주사하여 반사되어 오는 시간을 계산하는 방법(time of flight)으로 3차원적으로 정보를 획득할 수 있다.<sup>9)</sup>

Cyrax-2500은 1초에 1,000 포인트를 발진시키며 10분의 스캐닝 능력은 20,000m<sup>2</sup>/scan(≤6mm 정확도)에서 최대 160,000m<sup>2</sup>/scan이다. 석탑의 크기, 형상 및 표면 상태를 고려하여 가로 5mm, 세로 5mm의 스캐닝 간격으로 작업을 수행하였으며 이는 점군 데이터로 저장이 된

다. 최소 스캐닝 간격은 1mm 미만으로 좀 더 정밀한 자료를 얻을 수 있지만 데이터의 양은 커지게 된다. 따라서 형상이 복잡한 곳은 정밀하게 측정을 하고 단순한 곳은 스캐닝 간격을 넓혀 데이터의 크기를 작게 하였다. 스캐닝 횟수는 기본적으로 하단부 4번, 상단부 4번, 인물상 세부 4번으로 총 12회 실시하였으며, 스캐너의 시야확보가 어려운 부분은 별도로 추가 작업을 하였다.

영상 스캐너 시스템에 저장된 점군 데이터는 Cyrax-2500의 전용 프로그램인 Cyclone으로 1차 변환을 하였으며, INUS Technology Inc.의 Rapidform2004 프로그램을 이용하여 점군 데이터를 3차원 영상자료로 변환하는 과정을 거쳤다. 각 부재의 영상자료 구축과 분석은 Autodesk, Inc.의 AutoCAD2002를 이용하여 실측도로 작성하였으며, 이를 바탕으로 이 석탑의 수평적 및 수직적 구조변형을 분석하였다.

## 3. 영상자료 획득 및 평가

### 3.1. 3차원 영상자료 획득

3차원 영상자료 획득은 장비를 이용한 점군 데이터 확보와 데이터 후처리 과정으로 구분된다. 총 12회에 걸쳐 점군 데이터를 받았으며(Figure 2A), 점군 데이터를 입체형상으로 변환하기 위한 후 처리 과정을 진행하였다

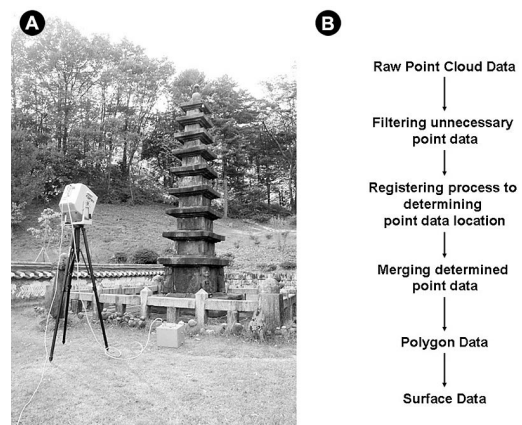


Figure 2. Acquisition of 3D image scanning processes (A) and flow chart of data processing system (B).

(Figure 2B). 모든 스캐닝이 끝난 후, 이미지 정보처리를 위하여 Cyclone 프로그램으로 불러들여 1차 변환을 수행하였다. 이 후의 모든 과정은 Rapidform 프로그램 상에서 이루어진다. 변환된 데이터에는 대상물을 제외한 불필요한 데이터가 포함되어 있는데 이것을 삭제하여 데이터의 양을 축소시켰다. 이러한 과정을 필터링(filtering)이라 한다.

여러 각도로 2회 이상의 스캐닝 과정이 이루어졌으므로 하나의 결합된 데이터를 나타내기 위해 각각의 위치를 결정하는 레지스터링(registering) 과정을 거쳐야 한다. 이는 여러 각도에서 측정된 데이터를 동일한 좌표축으로 정렬시키는 작업으로서 정밀도에 많은 영향을 미친다. 이 레지스터링에 의해 데이터의 위치가 결정되면 스캐닝한 대상물과 동일한 형태로 표현될 수 있도록 데이터 군으로 제작하였는데 이를 머징(merging)이라 한다. 대상물의 특정한 부분을 기준으로 하는 형상 머지와 대상물에 3개의 기준점을 지정하는 타겟 머지(target merge) 등, 두 가지가 있다.

머지과정까지 완료된 3차원 형상 점군 데이터는 원형 대상물과 동일한 형태로 축적된 점들의 집합체일 뿐 면을 형성하지 못한 상태이다(Figure 3A, 3B). 무수히 많은 점들을 3차원 입체 형상으로 완성시키기 위하여 근접한 3개의 점을 각각 삼각면으로 변환시키는 'triangulation 3D'를 적용하였다. 이 과정에서 얻어지는 데이터를 폴리곤 데이터(polygon data)라 하며 폴리곤 데이터 생성이 완료된 정보는 형상 확인을 위한 기초 데이터로도 활용될 수 있다(Figure 3C, 3D).

삼각면으로 구성된 폴리곤 데이터를 서로 연결하여 1개의 면으로 변환하였는데, 이를 서페이스 모델링(surface modeling) 데이터라 한다. 서페이스 모델링 작업까지 완료되면 비로소 원형 대상물과 동일한 형태를 형성할 수 있다. 각각의 데이터는 CAD 및 image 파일로의 저장과 적용이 가능하다. 이 폴리곤 데이터의 CAD와 image 파일로부터 실측도를 얻었으며 부재별 높이, 넓이 및 변위를 측정하여 구조적 안정성을 평가하였다.

### 3.2. 부재별 실측

이 연구에서는 대원사다층석탑을 크게 기단부, 탑신부, 상륜부로 나누어 측정하였다. 그러나 각 부위가 정방위를 벗어나 N30°E를 이루고 있기 때문에 석탑을 기준으로 하여 사리전 쪽을 전면으로 각 방향을 지정하였다. 높이에 대한 기준점은 지대석으로 정하였으며, 각 방향에서 바라본 우측 끝 지점을 기준으로 설정하였다(Figure 4A). 넓이에 대한 기준점은 각 방향에서 바라본 전면으로 정하여 측정하였다. 한편 이 석탑의 세부 부재에 관한 정밀실측의 기준은 Figure 4B, 4C, 4D에서 보는 바와 같다.

이를 기준으로 대원사석탑의 부재별 높이를 정량적으로 측정한 결과는 Table 1과 같다. 기단부의 각 지점에 대한 평균은 하대갑석 346.92mm, 상대중석 631.01mm, 상대갑석 253.82mm이다. 하대갑석은 후면과 우면이 평균보다 각각 16.78mm와 10.47mm가 작다. 상대중석은 전면과 좌면이 평균보다 11.58mm와 6.01mm가 작으며, 상대갑석은 전면과 우면이 각각 11.98mm와 1.51mm씩

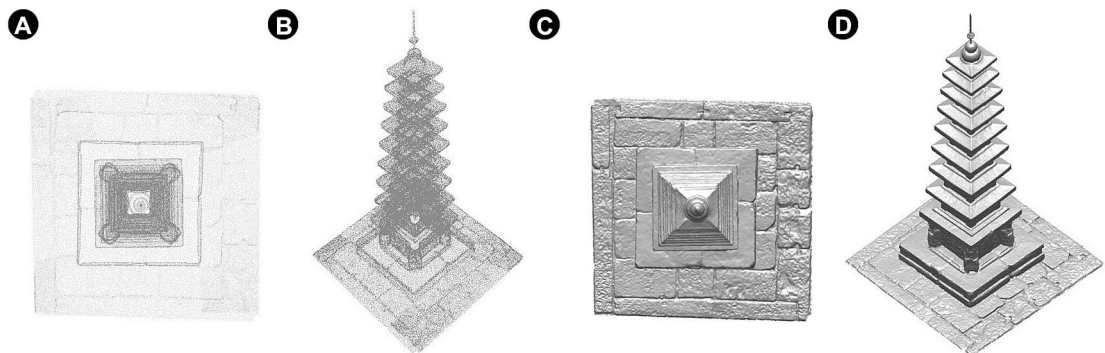


Figure 3. (A, B) 3D scanning point data of the Daewonsa temple stone pagoda using Laser Scanner. (C, D) Polygon data images by triangulation 3D of the Figure A and B.

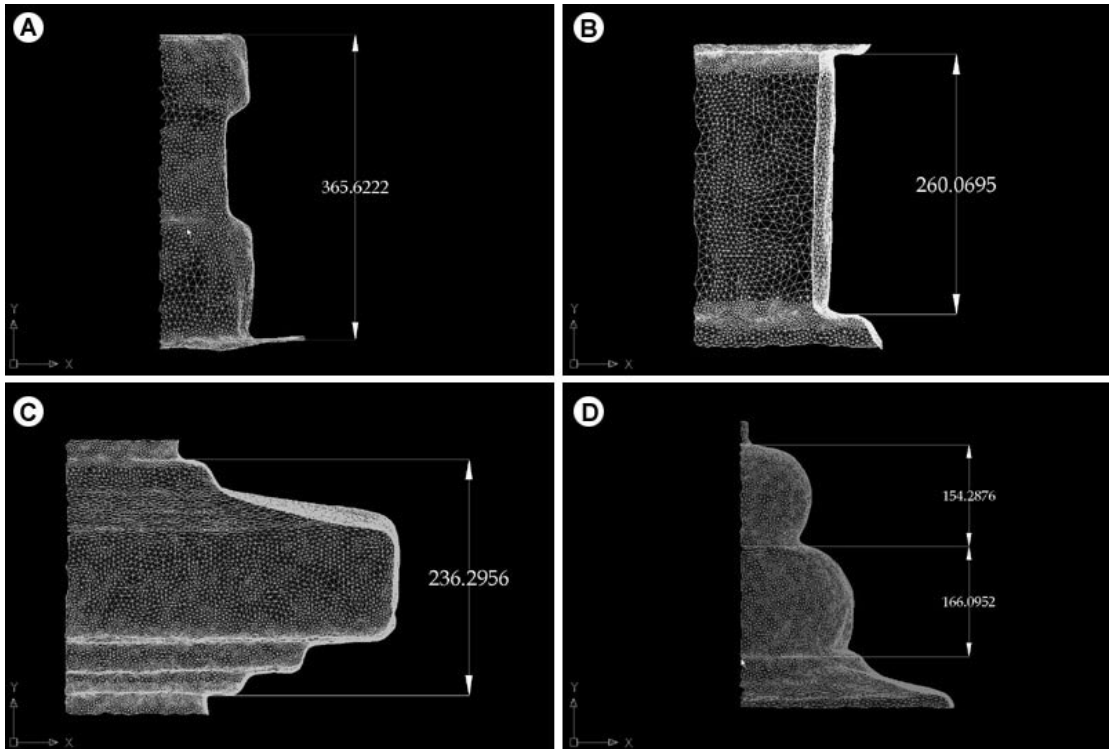


Figure 4. Establishment of standard levels for the Daewonsa temple stone pagoda. (A) Lower basement lever set up basis of basement stone in the frontal part. (B) Body stone fix on the basis of the 3rd main body stone in the frontal part. (C) Roof stone applies on the 3rd roof stone of main body in the frontal part. (D) Lower and middle finial stones are used the uppermost stone of the frontal part.

Table 1. Height measurements (mm) using 3D Laser Scanner of the Daewonsa temple stone pagoda.

Division		Front	Left	Rear	Right	Mean
Lower basement		365.6222	355.4619	330.1409	336.4467	346.92
Upper basement		619.4252	625.0023	640.0290	639.5677	631.01
Upper basement floor		241.8386	257.4885	263.6601	252.3114	253.82
1st body section	1st body	314.8047	320.9367	323.0308	317.3913	319.04
	1st roof	233.6785	234.5917	236.0392	237.1504	235.36
2nd body section	2nd body	291.3146	293.3237	284.1389	294.0636	290.71
	2nd roof	238.6763	238.7818	234.8342	237.3254	237.40
3rd body section	3rd body	262.2424	260.8202	259.8464	262.9007	261.45
	3rd roof	236.2956	233.1120	229.4697	241.5038	235.10
4th body section	4th body	249.1242	240.7610	243.1365	235.9015	242.23
	4th roof	249.4719	253.4653	243.7089	255.3506	250.50
5th body section	5th body	225.5949	230.1720	223.4164	230.3774	227.39
	5th roof	222.4369	209.4994	205.1834	221.2763	214.60
6th body section	6th body	192.1187	197.9095	198.3207	199.8779	197.06
	6th roof	231.1386	232.3889	234.7390	232.2438	232.63
7th body section	7th body	175.3387	192.6640	193.3181	182.2986	185.90
	7th roof	235.5769	235.2664	232.1622	230.8647	233.47
8th body section	8th body	156.8476	161.7764	158.4751	157.3341	158.61
	8th roof	223.7754	222.6258	217.2621	213.0583	219.18
Lower finial		166.0952	157.1358	150.1505	165.5162	159.72
Middle finial		154.2876	154.3918	145.8149	151.2478	151.44
Upper finial		749.8581	750.7560	751.1879	752.7243	751.13

Table 2. Width measurements (mm) using 3D Laser Scanner of the Daewonsa temple stone pagoda.

Division	Front	Left	Rear	Right	Mean
Ground	3,185.2833	3,202.9978	3,280.0006	3,196.5514	3,216.21
Lower cover	1,789.0071	1,783.7905	1,798.1951	1,791.6050	1,790.65
Upper cover	1,261.0346	1,267.4906	1,269.4794	1,268.6318	1,266.66
1st roof	1,112.3070	1,120.9134	1,125.2466	1,124.2597	1,120.68
2nd roof	1,027.3678	1,020.6340	1,031.1928	1,035.8235	1,028.75
3rd roof	958.2099	957.9659	964.7749	959.3030	960.06
4th roof	894.7944	895.5626	903.8721	899.9398	898.54
5th roof	839.7983	838.7485	847.9547	838.1567	841.16
6th roof	769.9013	769.8347	771.5700	767.1732	769.62
7th roof	703.6801	712.7035	706.7059	710.9688	708.51
8th roof	642.8800	643.8382	646.1728	638.2638	642.79
Lower finial	348.2928	345.7594	348.2928	345.7594	347.03
Middle finial	218.8314	215.1823	218.8314	215.1823	217.01
Upper finial	137.4190	138.1656	137.4190	138.1656	137.79

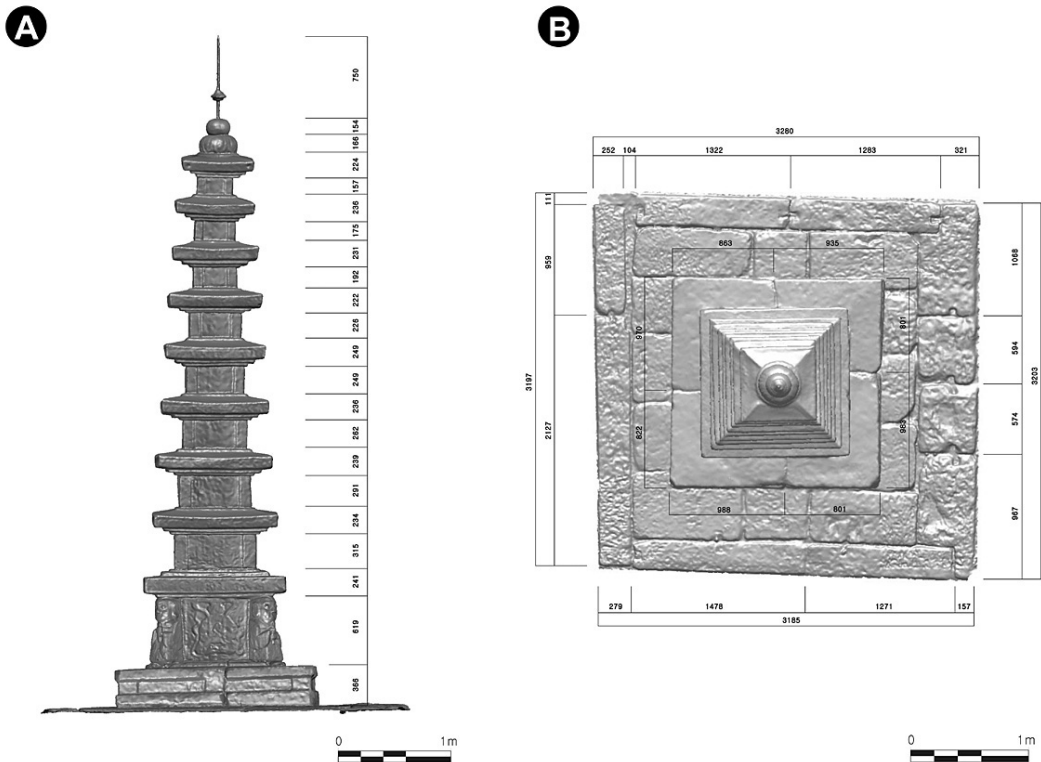


Figure 5. Measured drawing map of the Daewonsa temple stone pagoda using 3D Laser Scanner. (A) Northern part (frontal side). (B) Plan figure.

작은 것으로 나타났다. 탑신부는 전체적으로 평균값과 차이가 있지만 3층 옥개석, 5층 옥개석 및 7층 탑신석에서 큰 편차를 보인다. 평균은 235.10mm, 214.60mm 및 185.90mm이며 최대값 차이는 각각 6.40mm, 9.42mm와

10.56mm이다. 상륜부에서는 노반이 큰 편차를 보이며 최대값 차이는 9.57mm이다.

부재별로 평균값에 대해 차이가 나는 것을 부재별 합에 의한 높이와 모든 부재를 대상으로 한 전체 높이로 산출

해 비교하였다. 기단부, 탑신부 및 상륜부의 부재별 높이의 합은 전면 6035.6mm, 좌면 6058.3mm, 후면 5998.1mm 및 우면 6046.7mm로 계산되었다. 전체 부재를 대상으로 한 높이는 전면 6019.6mm, 좌면 6012.1mm, 후면 6029.1mm 및 우면 6044.6mm 이다. 이는 각각 16mm, 46.2mm, 31mm, 2.1mm의 차이가 있는 것이다. 이는 원래 부재의 수치에 차이가 있었던 것일 수도 있는 것이나, 부재별 풍화진행 속도와 각 방향의 풍화진행 속도가 다르기 때문에 나타나는 차이와 부재의 불균형으로 발생한 기울임 현상이 원인일 수도 있다.<sup>10,11,12</sup>

각 부재의 높이 측정과 동일한 기법을 적용하여, 이 석탑의 부재별 넓이를 정밀 실측하였다(Table 2). 측정결과, 평균값과 크게 차이가 나는 부분은 기단부의 하부지대석으로서 후면이 평균값과 63.79mm의 차이가 있다. 또한 탑신부와 상륜부에서도 전체적으로 모든 부재가 평균값과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 부재별 높이와 넓이 측정결과를 토대로 각 방향의 정면도와 평면도를 작성하였다(Figure 5).

### 3.3. 안정성 평가

이 석탑의 전체적인 수직과 수평적 안정성을 평가하기 위해, 우선 부재 각 지점의 수평에서 상하변위를 측정하였다. 절대수평을 기준으로 각 방면 부재의 끝점을 지정하여 삼각형 모양을 만들어 각도를 측정하고 아래 식(3.3.1)과 같은 계산으로 상하변위를 산출하였다.

$$\text{Distance} = \text{Width of materials} \times \tan\theta \quad (3.3.1)$$

이 석탑 전면의 상하변위를 정량적으로 측정하여 계산한 결과, 기단부는 절대 수평면을 기준으로 하대갑석이 동쪽에서 47.64mm 침하되어 있고, 하대갑석과 상대중석의 경계면 또한 동쪽에서 76.47mm의 침하가 있는 것으로 나타났다. 상대중석과 상대갑석의 경계는 서쪽에서 15.64mm의 침하가 계산되었다. 탑신부는 전반적으로 수평적 상하변위가 안정하나 7층 옥개석과 8층 옥개석에서 각각 서쪽으로 8.03mm와 8.69mm가 침하된 것으로 나타났다(Figure 6A).

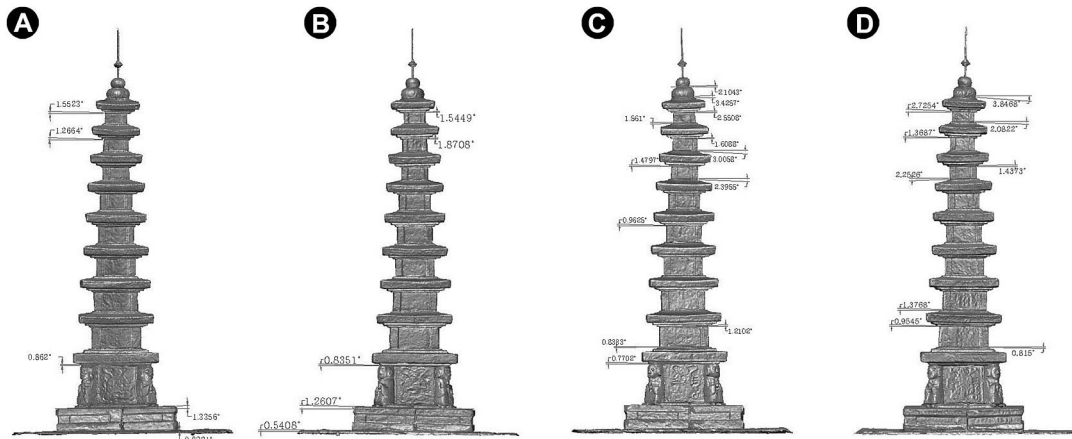


Figure 6. Measurement of horizontal displacement for the Daewonsa temple stone pagoda. (A) Northern (frontal) part, (B) southern (rear) part, (C) western (left) part and (D) eastern (right) part of the pagoda, respectively.

Table 3. Measurement for horizontal displacement (mm) in northern and southern sides of the Daewonsa temple stone pagoda.

Division	Absoluteness horizon-Lower cover	Lower cover- Upper basement	Upper basement- Upper cover	7th body- 7th roof	8th body- 8th roof
North	47.6384	76.4726	15.6360	8.0323	8.6912
South	30.0659	70.0982	15.0376	11.6516	8.6527

Table 4. Measurement for horizontal displacement (mm) in western and eastern sides of the Daewonsa temple stone pagoda.

Direction	Upper basement- Upper cover	Upper cover- 1st body	1st body- 1st roof	1st roof- 2nd body	4th body- 4th roof	5th roof- 6th body	6th body- 6th roof
West	13.7471	10.7442	15.3388	-	8.6289	16.3452	10.0353
East	-	10.5731	12.2507	15.5782	-	15.5105	9.9325
Direction	6th roof- 7th body	7th body- 7th roof	7th roof- 8th body	8th body- 8th roof	8th roof- Lower finial	Lower finial- Middle finial	
West	19.1049	10.1340	8.9310	14.3187	19.9782	6.4763	
East	-	8.5380	11.9291	15.8813	11.9613	-	

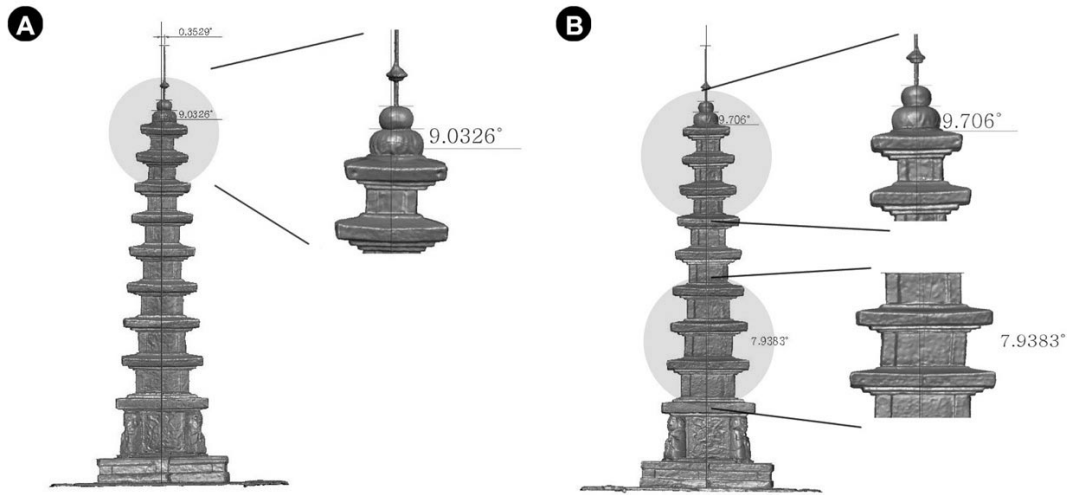


Figure 7. Measurement of vertical displacement for the Daewonsa temple stone pagoda. (A) Northern (frontal) part and (B) southern (rear) part of the pagoda, respectively.

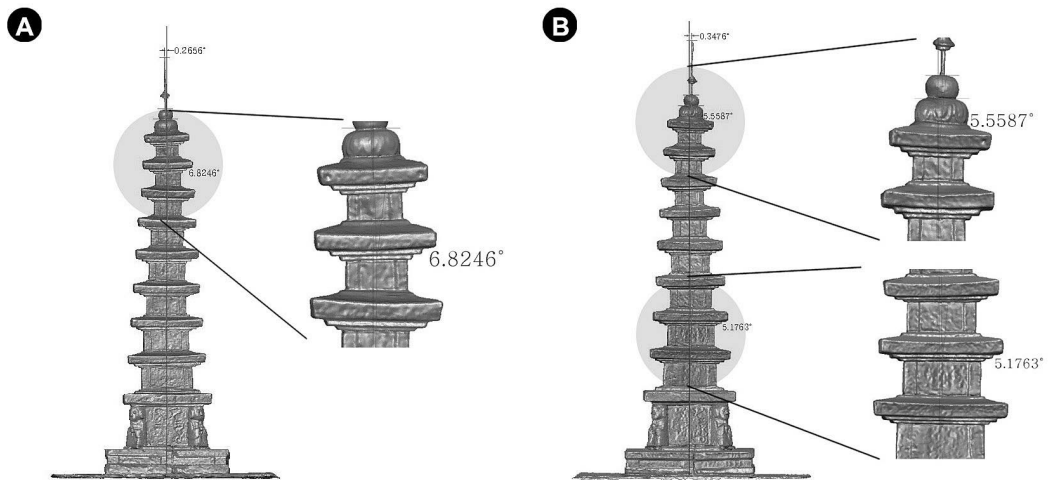


Figure 8. Measurement of vertical displacement for the Daewonsa temple stone pagoda. (A) Western (left) part and (B) Eastern (right) part of the pagoda, respectively.



후면은 전면과 같은 양상을 보이고 있다. 기단부는 절대 수평면을 기준으로 하대갑석이 동쪽에서 30.07mm 침하되어 있고, 하대갑석과 상대중석 경계면도 동쪽에서 70.10mm가 침하되었다. 상대중석과 상대갑석의 경계는 서쪽에서 15.04mm의 침하가 있다. 탑신부의 수평적 상하변위는 전면과 동일하게 7층 옥개석과 8층 옥개석에서 11.65mm, 8.65mm씩 서쪽에서 침하가 있고, 다른 층은 대부분 안정한 것으로 보인다(Figure 6B). Table 3은 전면과 후면의 상하변위에 대한 환산결과로서 부재마다 서로 다른 편차가 발생한 것을 알 수 있다.

이 석탑의 좌측면과 우측면의 수평적 상하변위는 Figure 6C, 6D에서 보는 바와 같이, 전면 및 후면과는 다른 양상을 보였다. 기단부는 안정한 반면, 탑신부에서는 아주 심한 상하변위가 발생하였다. 좌측면과 우측면 모두 6, 7, 8층 옥개석과 탑신이 가장 불안정한 것으로 나타났으며, Table 4에 상하변위에 대한 계산 값을 정리하였다.

한편 이 석탑의 수직적 좌우변위를 정량적으로 측정하여 계산하였다. 기준은 절대 수직선으로 하였으며, 각 부재별로 수평의 중심을 찾고 이를 삼각형 모양으로 연결하여 부재별 좌우변위를 계산하였다. 좌우변위의 계산은 식 (3.3.2)와 같은 방법으로 산출하였다.

$$\text{Distance} = \text{Height of materials} \times \tan\theta \quad (3.3.2)$$

전면의 좌우변위 측정결과, 절대 수직선상을 기준으로 보았을 때 대부분의 부재들은 전반적으로 수직선상에서 크게 벗어나지 않았으나, 8층 탑신석과 8층 옥개석은 서쪽으로 35.57mm의 큰 변위가 나타났다. 하부지대석의 중심점과 탑의 최상단 찰주와의 좌우변위는 서쪽으로 37.08mm 기울어진 것으로 계산되었다(Figure 7A). 후면에서는 수직선상을 기준으로 약간 동쪽으로 치우침 현상이 보이며, 2층 탑신석에서 변위가 가장 심하여 동쪽으로 39.61mm가 중심에서 이동되었다. 또한 8층 옥개석은 수직선을 기준으로 서쪽으로 37.16mm의 큰 변위차가 계산되었다(Figure 7B).

이 석탑의 좌측면은 전반적으로 수직선상에 일치하나, 5층 탑신석부터 북쪽으로 치우침이 발생되어 7층 옥개석에서 남쪽으로 28.16mm의 변위가 나타났다. 또한 하부 지대석의 중심점과 탑의 최상단 찰주와의 좌우변위는 북

Table 5. Measurement for vertical displacement (mm) of the Daewonsa temple stone pagoda.

Division	Position	Angle	Length(mm)	Top of vertical displacement(mm)
North	8th roof	9.0326°	35.5730	37.0767
South	2nd body	7.9363°	39.6110	-
	8th roof	9.7060°	37.1607	-
West	7th roof	6.8246°	28.1562	27.8698
East	2nd body	5.1763°	26.6392	36.5775
	Lower finial	5.5587°	16.1085	-
Plane	North	2.3000°	127.9228	-
	South	1.4638°	83.8161	-
	West	0.6649°	37.1715	-
	East	0.8341°	46.5445	-

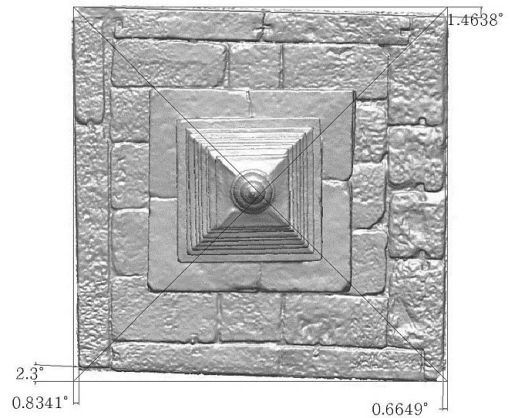


Figure 9. Geometric measurement for horizontal and vertical displacement on the plane figure of the Daewonsa temple stone pagoda.

쪽으로 27.87mm의 차이가 있다(Figure 8A). 우측면은 2층 탑신석부터 북쪽으로 26.64mm의 변위가 발생하였고, 노반석은 북쪽으로 16.11mm가 중심에서 이동된 것으로 계산되었다(Figure 8B). 각 방위에서 나타나는 수직적 좌우변위량은 Table 5에 간략히 정리하였다.

평면상에서 평가한 이 석탑의 상하 및 좌우변위는 각 방위의 지대석이 전체적인 수평면을 이루지 못하고 최고 211mm 정도 왜곡되어 있는 것으로 계산되었다. 지대석에 가상의 정사각형을 두어 대각선으로 작도하였을 때, 이 석탑의 모든 부재는 중심이 어긋나 있으며 탑은 전체적으로 동쪽으로 치우쳐진 것으로 나타났다(Figure 9).

Table 6. Average difference for height (mm) in basement rocks of the Daewonsa temple stone pagoda.

Division	Front(N)	Left(W)	Rear(S)	Right(E)
Low basement	18.7022	8.5419	-16.7791	-10.4733
Upper basement	-11.5848	-6.0077	9.0190	8.5577
Upper basement floor	-11.9814	3.6685	9.8401	-1.5086

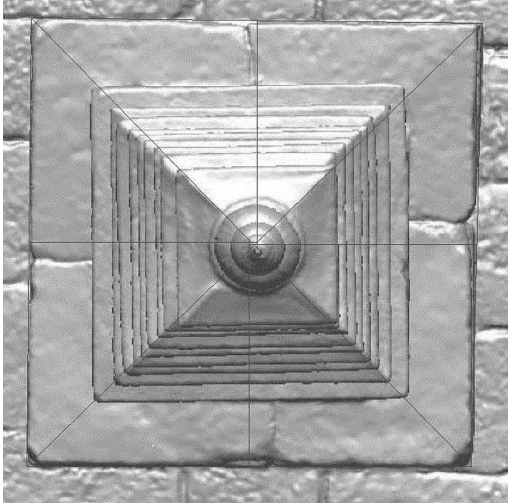


Figure 10. Safety evaluation for distortion degree on the plane figure of the Daewonsa temple stone pagoda using 3D Laser Scanner.

#### 4. 보존과학적 고찰

대원사다층석탑의 3차원 영상정보를 이용한 부재의 변위량 계산과 안정성 평가를 종합해 보면, 기단부 하대감석의 각 방면에서 높이 평균값이 후면과 우면에서 상대적으로 낮았다(Table 6). 이를 절대 수평면을 기준으로 계산한 하대감석 상하변위 측정 결과와 비교하면, 전면에서는 동쪽으로  $0.83^\circ$  (47.64mm)의 침하가 있으며, 후면에서는 동쪽으로  $0.54^\circ$  (30.07mm)의 침하가 발생한 것으로 산출된다. 이는 앞으로 집중하중과 지반약화에 수반되어 이 석탑의 중심이 남동쪽으로 회전 이동할 수 있는 확률이 높다는 것을 지시하는 것이다.<sup>12</sup>

그러나 탑신부가 시작되는 1층 탑신석 하부는 기단부의 침하가 회복되어 수평선과 거의 동일한 선상을 보이고 있다. 상대중석에서 상대감석까지는 후면과 우면에서 평균 이상의 높이 차이가 나타나긴 하나 대체적으로 안정한 상태이다. 전면의 탑신부는 전체적으로 안정한 상태를 유

지하나 8층 옥개석부터 서쪽으로 좌우변이가 측정되어 찰주 최상단과 절대 수직간의 기울기는  $0.35^\circ$  (37.08mm)로 측정되었다. 후면은 탑신부 중심이 전반적으로 동쪽으로 치우쳐져 있으나, 8층 옥개석부터 서쪽으로  $9.71^\circ$  (37.16mm) 정도 중심과 차이가 있어 찰주 최상단과 절대 수직선은 거의 일치하는 것으로 나타났다.

한편 좌면은 전반적으로 수직선상에 위치하나 7층 옥개석부터 북쪽으로 중심축이 이동되어 최상단 기울기는  $0.27^\circ$  (27.87mm)로 측정되었다. 우면은 2층 탑신석부터 북쪽으로 치우침이 발생하였고 노반석도 북쪽으로  $5.56^\circ$  (16.11mm) 정도 중심축이 이동되어, 최상단의 기울기는  $0.35^\circ$  (36.58mm)로 측정되었다. 지대석상에서의 탑신부 위치는 전체적으로 동쪽으로 치우침이 있으며(Figure 9), 상대감석을 중심으로 보아도 동쪽으로 약간의 이동이 발견되나 8층 옥개석은 서쪽으로 많이 치우쳐 있다(Figure 10).

지금까지 대원사다층석탑의 3차원 영상자료를 획득하여 실측도 작성 및 수평과 수직변위에 대한 안정성을 평가를 하였다. 실제 변위 정도는 석탑의 일반적인 구조적 평가를 논하기에는 다소 미약한 정도이지만, 암석은 지속적으로 풍화가 진행된다는 점을 고려할 때, 현시점의 정적 평가로서는 아주 훌륭한 자료라 판단된다. 또한 부재별 높이 및 넓이 측정은 석탑에 별도의 가설물을 설치하지 않고도 실측이 가능하다는 결과를 보여주었다. 이 연구에서 사용된 Cyrax-2500은 광파기의 기능이 없으나 최근의 3D 스캐너에는 광파기가 부착되어 있어 보다 정확한 실측 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

이 기법에 의한 변위 측정은 정적인 상태의 정보로 판단하여 변위의 진행 방향은 가늠할 수 없으나, 현재의 구조와 안정 상태는 평가가 가능하다. 이 석탑의 경우, 수직적 상하변위 중에서 가장 심각한 문제는 8층 옥개석 부분으로서 북서쪽으로 치우쳐 있다. 이는 1988년 해체복원공사 때 발생한 것으로 판단된다. 이는 계속적인 편하중을 발생시켜 탑신석에서 부재 하중에 의한 물리적 파괴 현상을 초래될 수 있는 가능성이 상존하는 것으로서 신속히 바로 잡아야 할 필요가 있다.

대원사다층석탑을 비롯한 석조문화재의 형상은 일정한 함수식으로 표현될 수 있는 제조품과는 다르다. 석탑의 부재는 대부분 암석의 물리화학적 및 기계적 풍화와 생물학적 훼손으로 인하여 불균등한 표면을 가지고 있으며,

미술사적으로 다양하고 복잡한 형태도 나타나고 있다.<sup>13,14,15,16</sup> 따라서 정밀한 3차원 영상자료를 구축 한다는 것은 어려운 일이다. 표면의 마모상태 및 측정하는 연구자에 따라 차이가 있기 때문에 정확한 측정치를 가진 레이저 스캐닝 작업을 요철이 심한 문화재에 적용시켰을 경우 약간의 오차를 수반할 수 있다.

따라서 문화재 특성에 맞는 기계의 선택, 측정환경과 조건, 정보처리 과정의 프로그램 및 연구자의 오류, 자료의 적절한 활용 등은 신중히 고려되어야 한다. 그러나 이 오차범위는 불과 mm 단위로 한정지을 수 있을 만큼의 정확성을 갖고 있기 때문에 앞으로 연구가 많이 진행되면 현재의 형상보존과 훼손상태 파악에 대한 정확한 자료를 제시할 수 있다. 이는 사진자료나 육안관찰을 통해 기재한 사항보다 정밀하고 방대한 문화재의 데이터베이스 구축에 편리한 자료를 제공해 줄 수 있을 뿐만 아니라 보존처리와 원형복원 방안을 세우는데 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

1. 대원사다층석탑의 정면은 N30°E를 향하고 있어 탑의 4면 모두 정방위를 벗어나 있다. 이 석탑의 구성암석은 화강암질 편마암으로 이루어져 있으며, 암석의 표면 산화에 의해 전체적으로 적갈색을 띠고 있다. 또한 이 탑의 부재는 박리와 박락이 심하고 탑신과 옥개석의 일부는 파손되어 시멘트로 접착되어 있는 상태이다.

2. 역공학 기법을 기반으로 3차원 스캐닝 영상정보를 획득하여 이 탑의 변위에 대한 안정성을 평가하였다. 3차원 영상획득을 위해 비접촉식 측정 장치를 이용하여 레이저가 주사되어 돌아오는 시간을 측정하는 방법인 반사시간 계산방식으로 점군 데이터를 생성시켰다.

3. 저장된 점군 데이터로 필터링, 레지스터링 및 머징 과정을 거쳐 3차원 형상을 확인할 수 있는 근접한 3개의 점이 하나의 삼각형 모양의 면으로 변환하는 다변형 자료를 생산하였다. 또한 각각의 다변형 자료를 하나의 면으로 변환되는 과정을 거친 표면 모델링 영상자료를 얻었다. 각각의 자료는 각종 프로그램을 이용하여 영상 및 데이터 파일로의 변환이 가능하다. 이 다변형 정보를 이용하여 석탑의 실측도를 얻었으며 부재별 높이, 넓이 및 변

위를 측정하였다.

4. 이 석탑 기단부의 수직측정 결과, 하대갑석의 각 방면 높이가 후면과 우면에서 상대적으로 낮았다. 이는 전면과 후면 상에서 각각 동쪽으로 나타난 변위량 계산결과와 같이 집중하중과 지반약화가 있을 경우, 탑의 중심이 남동쪽으로 회전할 가능성이 높음을 지시하는 결과이다.

5. 평면상에서는 지대석의 수평변위는 최고 211mm 정도 왜곡되어 있는 것으로 나타났으며, 정사각형의 대각선 상에서 모든 부재의 중심이 어긋나있다. 전체적으로 탑신과 옥개석의 연결 부분이 서로 맞지 않아 찰주 최상단과 절대 수평과의 중심 이동각과 거리는 전면에서 0.35° (37.08mm), 좌면에서 0.27° (27.87mm), 우면에서 0.35° (36.58mm)가 발생한 것으로 평가되었다.

## 사 사

이 연구는 공주대학교 Star Project 지원사업인 ‘문화재 진단보존기술 연구’와 국립문화재연구소 연구개발사업인 ‘석조문화재 손상평가기술 연구’의 일환으로 수행되었음을 명기하며, 각 기관의 행정적 및 재정적 지원에 깊이 감사한다.

## 참고문헌

1. 국립문화재연구소, “전라남도의 석탑 Ⅲ”. 정일사, 371 (2006).
2. Fontana, R., Greco, M., Materazzi, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Rocchini, C. and Scopigno, R., “Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo”. *Journal of Cultural Heritage*, 3, 325-331 (2002).
3. Pedersini, F., Sarti, A. and Tubaro, S., “Automatic Monitoring and 3D reconstruction applied to Cultural Heritage”. *Journal of Cultural heritage*, 1, 301-313 (2000).
4. Pieraccini, M., Guidi, G. and Atzeni, C., “3D digitizing of cultural heritage”. *Journal of Cultural Heritage*, 2, 63-70 (2001).

5. 양희제, 김사덕, 이찬희, 최석원, “익산 미륵사지 석탑의 해체과정과 구성부재의 훼손도 평가”. *보존과학회지*, 16, 77-88 (2004).
6. 이찬희, 이명성, 서만철, “영주 가흥리 마애삼존불상의 풍화특성과 불연속면의 안정성 해석”. *지질학회지*, 41, 401-413 (2005).
7. 문화재청, “문화재 상세정보, 보물 제1112호 대원사 다층석탑”. [www.cha.go.kr](http://www.cha.go.kr), (2007).
8. 이찬희, 서만철, “대원사 다층석탑의 지질학적 및 암석학적 안전진단”. *자원환경지질*, 35, 355-368 (2002).
9. 김기준, 이종선, 성기천, 양재웅, 이후설, “레이저 원리 및 활용”. *대영사*, 412 (1997).
10. Chesworth, W., “Major element geochemistry and the mineralogical evolution of granitic rocks during weathering”. In Ahrens, L.H (ed), Origin and distribution of elements, *Pergamon Press, Oxford*, 305-313 (1971).
11. Fidler, J., “Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment”. *English Heritage Research Transactions*, 2, 1-104 (2002).
12. 채상정, 서만철, “비파괴 탐사를 이용한 무량사오층석탑의 지반안정해석”. *보존과학회지*, 20, 43-54 (2007).
13. Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W., “Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea”. *Environmental Geology*, 47, 547-557 (2005).
14. Lee, C.H. and Yi, J.E., “Weathering damage evaluation of rock properties in the Bunhwangsa temple stone pagoda, Gyeongju, Republic of Korea”. *Environmental Geology*, 52, 1193-1205 (2007).
15. Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J.Y., “Deterioration assessment and conservation of a heavily degraded Korean stone Buddha from the 9th Century”. *Studies in Conservation*, 51, 305-316 (2006).
16. 이명성, 정민호, 정영동, 이찬희, “경주 서악리 삼층석탑의 훼손상태 및 보존처리”. *보존과학회지*, 18, 63-74 (2006).