

3차원 영상자료를 이용한 대원사 다층석탑의 보존과학적 평가

전병규*·이찬희*·서만철**

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과

Assessment of Conservation Sciences by 3D Image Data of Multi-storied Stone Pagoda in the Daewonsa Temple, Korea

Byung Kyu Jeon*, Chan Hee Lee* and Mancheol Suh**

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

***Department of Geoenvironmental Science, Kongju National University,
Kongju 314-701, Korea*

1. 서 론

대원사 다층석탑은 1992년 1월 15일에 보물 제1112호로 지정된 석조문화재로서 경남 산청군 삼장면 유평리 21번지에 있다. 이 탑은 2단의 기단 위에 8층의 탑신부를 조성하고 상륜을 장식한 일반형 탑으로 신라 선덕여왕 15년(서기 646년)에 자장율사가 사리를 봉안하기 위해서 건립한 것으로 알려져 있다. 그러나 임진왜란 때 파괴되어 조선 정조 8년(1784년)에 다시 세워 놓은 것으로서, 드물게 남아있는 조선 전기의 석탑이다.

기단의 위층은 이 탑에서 가장 주목되는 부분으로 상층 기단의 각 면에는 두 손을 합장한 공양좌상이 새겨져 있고 네 귀퉁이는 우주 대신 인물상이 배치되어 있는 특이한 형태이다(그림 1A). 탑신의 각 지붕들은 처마가 두껍고 네 귀퉁이에서 들려있으며, 옥개석은 하면에 2단씩 받침이 있고 위에는 각형 1단 피임으로 상부의 탑신석을 받게 하였다. 8층의 옥개석에는 네 귀퉁이에 풍탁이 달려 있고, 상륜부에는 복발과 찰주가 있으며 전체 높이는 6.6 m이다.

이 연구에서는 다층석탑을 대상으로 3D 스캐너를 이용한 정밀영상자료를

획득하여 데이터베이스를 구축하고 각종 프로그램을 응용하여 이 탑의 구조적 안정성을 평가하였다. 또한 Revers Engineering의 과정을 거친 다층석탑의 3차원 영상자료를 이용하여 최소한의 오차로 보존처리를 수행할 수 있는 조건을 제시하였다(그림 1B). 이 연구에서 획득한 영상분석을 바탕으로 부재별 실측과 수평, 수직 변위를 정량화하여 자료를 축적하고 향후의 변화과정을 모니터링하여 이 탑의 원형복원을 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

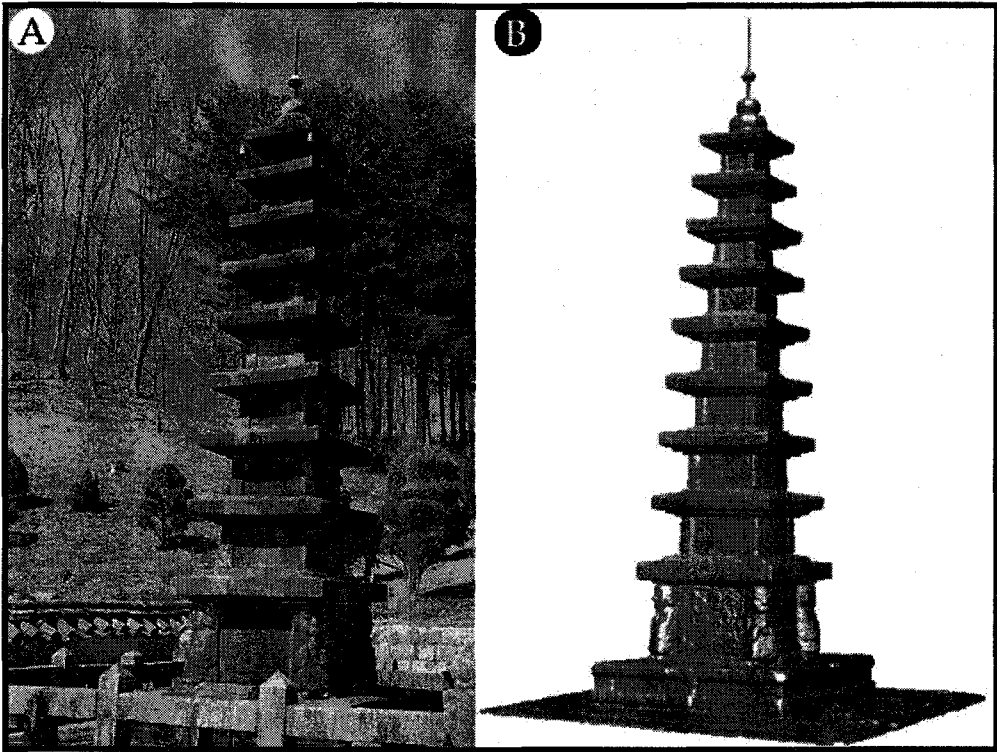


그림 1. 대원사 다층석탑의 현황(A). 대원사 다층석탑의 3차원 영상자료(B).

2. 영상자료의 획득과정

3차원 데이터 형상 획득은 기본적으로 Revers Engineering 기법을 기초로 하고 있다. Revers Engineering이란 도면이 존재하지 않는 대상물을 3차원 형상으로 측정된 후 알맞은 컴퓨터 프로그램 파일로 변환하여 필요에 따라 제품 생산에 연계시키는 과정을 뜻하며, 제품개발에 따른 기간 단축 및 비용절감과 정밀도 향상을 목적으로 주로 제조분야에 사용되고 있다. 이 연구에서 대원사

다층석탑의 3차원 영상자료를 이용하여 대상물의 안정성을 평가하는 것도 Revers Engineering 기법의 한 분야이다.

3차원 영상자료를 획득하는 첫 번째 단계는 레이저 스캐닝 과정으로서 측정하고자 하는 대상물의 크기, 형상 및 표면상태 등을 고려하여 Cyrax-2500을 이용하여 작업하였다. 스캐닝 간격이 좁을수록 정밀한 데이터가 얻어지는 대신 데이터의 양은 커지게 되는 이유로 형상이 복잡한 곳은 정밀하게 측정을 하고 형상이 단순한 곳은 스캐닝 간격을 넓혀 데이터의 크기를 작게 하였다. 대원사 다층석탑에는 가로 5mm, 세로 5mm의 스캐닝 간격으로 작업을 수행하였다. 이렇게 얻어진 데이터는 3차원 좌표 값을 가지는 점군 데이터(point clouds)로 표현된다.

3차원 레이저 스캐너에 의해 저장된 점군 데이터를 Workstation 환경에서 Cyclone 이라는 프로그램으로 1차 변환을 하였다. 그 다음 작업은 Rapidform 프로그램 상에서 이루어진다. 변환된 데이터에는 대상물을 제외한 불필요한 데이터가 포함되어 있는데 이것을 삭제하여 데이터의 양을 축소시켰다. 이러한 과정을 필터링(filtering)이라 한다.

여러 각도에서 2회 이상의 스캐닝 과정이 이루어졌으므로 하나의 결합된 데이터를 나타내기 위해 각각의 위치가 결정되는 레지스터링(registering) 작업을 하였다. 이것은 여러 각도에서 측정된 데이터를 동일한 좌표축으로 정렬시키는 작업으로서 정밀도에 많은 영향을 미친다. 레지스터링 작업에 의해 데이터의 위치가 결정되어 스캐닝한 대상물과 동일한 형태로 표현될 수 있도록 데이터 군으로 제작하였는데 이를 머징(merging)이라 한다. 대상물의 특정한 형상 부분을 기준으로 하는 형상 머지와 대상물에 3개의 기준점을 지정하는 타겟 머지등 두 가지가 있다.

머지 작업까지 완료된 3차원 형상 점군 데이터는 원형 대상물과 동일한 형태로 축적된 점들의 집합체일 뿐 면을 형성하지 못한 상태이다. 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 자료는 형상 확인을 위한 기초 데이터로도 활용 될 수 있다.

삼각면으로 구성된 폴리곤 데이터를 서로 연결하여 1개의 면으로 변환하였는데 이를 표면 모델링 데이터라 한다. 표면 모델링 작업까지 완료가 되면 비로소 원형 대상물과 동일한 형태를 형성할 수 있다. 이 데이터는 CAD file 및

image file로의 적용이 가능하다. 이 CAD file과 image file로부터 실측도를 얻었으며 부재별 높이, 넓이 및 변위를 측정하였다.

3. 영상자료를 이용한 실측

문화재는 기본적으로 요철이 심하고 복잡한 형태를 띠게 마련인데 정확한 실측을 한다는 것은 어려운 일이다. 대원사 다층석탑을 비롯한 석조문화재의 형상은 일정한 함수식으로 표현될 수 있는 제조품과는 다르다. 암석의 물리적 및 기계적 풍화와 생물학적 훼손으로 인하여 불균등한 표면은 어느 지점을 기준으로 측정하는가에 따라 그 값이 다르게 나오기도 한다. 그러나 그런 오차 범위는 불과 mm 단위로 한정지을 수 있을 만큼의 정확성을 갖는다. 기준점 설정에 대한 연구가 많이 진행되면 현재의 형상보존과 훼손상태 파악에 대한 정확한 자료를 제시할 수 있다.

이는 사진자료나 육안 관찰을 통해 기재한 사항보다 정밀하고 전국에 존재하는 방대한 문화재의 데이터베이스 구축에 편리한 자료를 제공해 줄 수 있다. 이 연구에서는 높이에 대한 기준점을 지대석으로 정하였으며, 각 방향에서 바라본 우측 끝 지점을 기준으로 하여 측정하였다(그림 2). 넓이에 대한 기준점은 각 방향에서 바라본 전면에서 측정하였다.

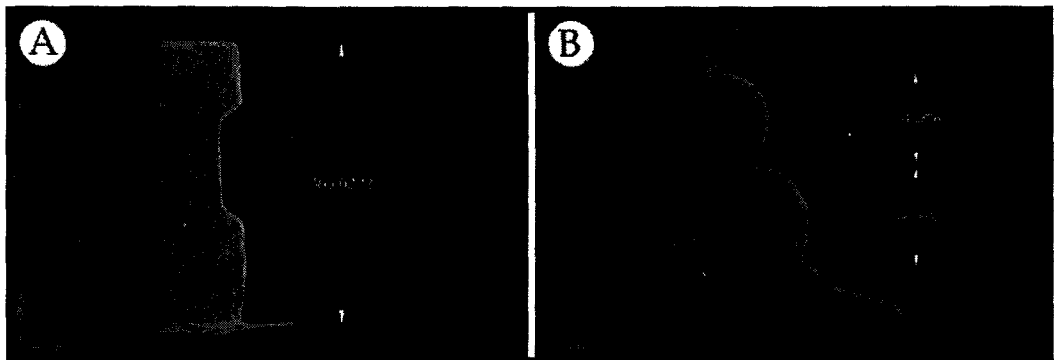


그림 2. 대원사 다층석탑의 부재별 높이 측정 장면. (A) 기단부 지대석, 전면. (B) 상륜부 노반과 복발, 전면.

기단부, 탑신부 및 상륜부의 부재별 높이의 합은 전면 6035.6mm, 좌면 6058.3mm, 후면 5998.1mm, 우면 6046.7mm 이다. 전체 부재를 대상으로 한 높이는

전면 6019.6mm, 좌면 6012.1mm, 후면 6029.1mm, 우면 6044.6mm 이다. 각각 16mm, 46.2mm, 31mm, 2.1mm의 차이가 있다. 이는 부재별 풍화진행 속도와 각 방향의 풍화진행 속도가 다르기 때문이며, 부피팽창과 차별 풍화에 의한 기울임 현상이 원인이라 할 수 있다. 이 다층석탑의 Polygon data와 측정결과를 토대로 그림 3과 같이 평면도를 작성하였다.

4. 구조적 안정성 평가

대원사 다층석탑의 각 방향에 대한 부재별 수평변위를 정량적으로 측정하였다. 절대수평을 기준으로 각 방면 부재의 끝점을 잡아 삼각형 모양을 만들어 각도를 측정하여 식 (4.1)과 같은 계산으로 수평변위를 계산하였다.

$$\text{Distance} = \text{width of materials} \times \tan\theta \quad (4.1)$$

전면의 수평변위를 정량적으로 측정한 결과, 기단부의 수평변위는 절대수평면을 기준으로 지면상에 동쪽으로 하대갑석이 47.64mm 기울어져 있고, 하대갑석과 상대중석에서 동쪽으로 76.47mm의 기울어짐이 있다. 상대중석과 상대갑석에서는 서쪽으로 15.64mm의 기울기가 계산되었다. 탑신부는 전반적으로 수평적으로 안정하나 7층 옥개석과 8층 옥개석이 8.03mm, 8.69mm가 서쪽으로 기울어져 있다.

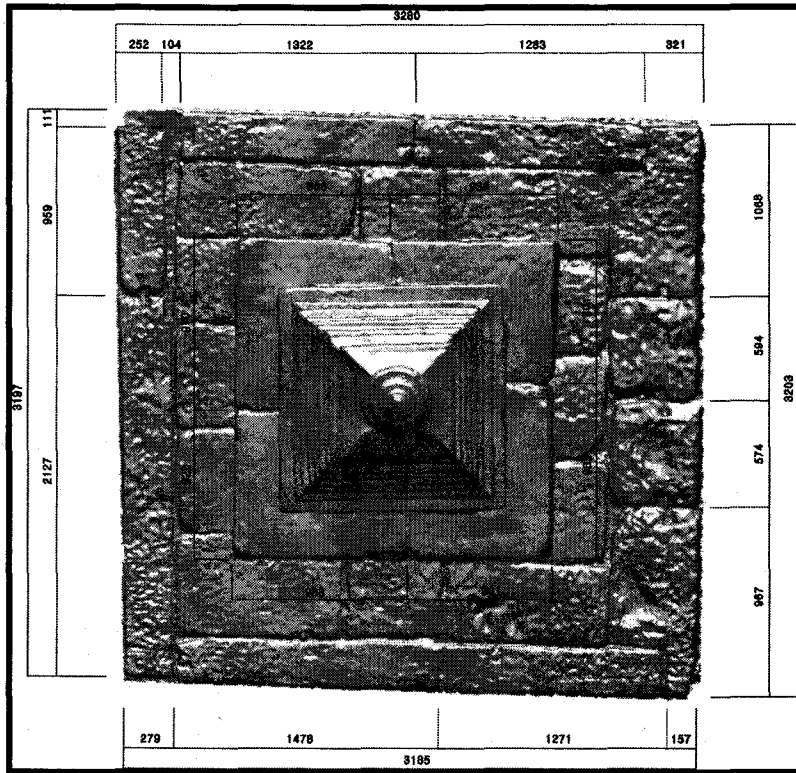


그림 3. 대원사 다층석탑의 3차원 영상자료를 이용한 평면도 작성.

후면은 수평변위가 전면과 같은 방향으로 측정되었다. 기단부의 수평변위는 절대수평면을 기준으로 지면상에 동쪽으로 하대갑석이 30.07mm 기울어져 있고, 하대갑석과 상대중석에서 동쪽으로 70.10mm가 기울어져 있다. 상대중석과 상대갑석에서는 서쪽으로 15.04mm의 기울기가 계산되었다. 탑신부의 수평변위는 전반적으로 안정하나 7층 옥개석과 8층 옥개석에서 11.65mm, 8.65mm의 기울기가 나타났다.

좌측면과 우측면의 수평변위는 기단부에서 안정한 반면, 탑신부에는 아주 많은 수평변위가 발생하고 있다. 좌측면과 우측면 모두 6, 7, 8층 옥개석과 탑신이 불안정하다(그림 4). 그 다음으로 다층석탑의 수직변위를 정량적으로 측정하였다. 기준은 절대 수직으로 하였으며, 각 부재의 수평 중심을 찾아 이를 연결하여 부재별 수직변위를 계산하였다. 수직변위는 식 (4.2)와 같은 방법으로 계산하였다.

$$\text{Distance} = \text{weight of materials} \times \tan\theta \quad (4.2)$$

전면의 수직변위 측정결과, 전반적으로는 절대 수직선상에 대부분의 부재들이 일치하나 8층 탑신석과 8층 옥개석에서 서쪽으로 35.57mm의 큰 수직변위가 측정되었다. 전체 최상단에서는 서쪽으로 37.08mm의 수직변위가 계산되었다. 후면은 수직선상을 기준으로 약간의 동쪽으로 치우침 현상이 보이며 2층 탑신석에서 치우침이 가장 심하고 동쪽으로 39.61mm의 수직변위가 있다.

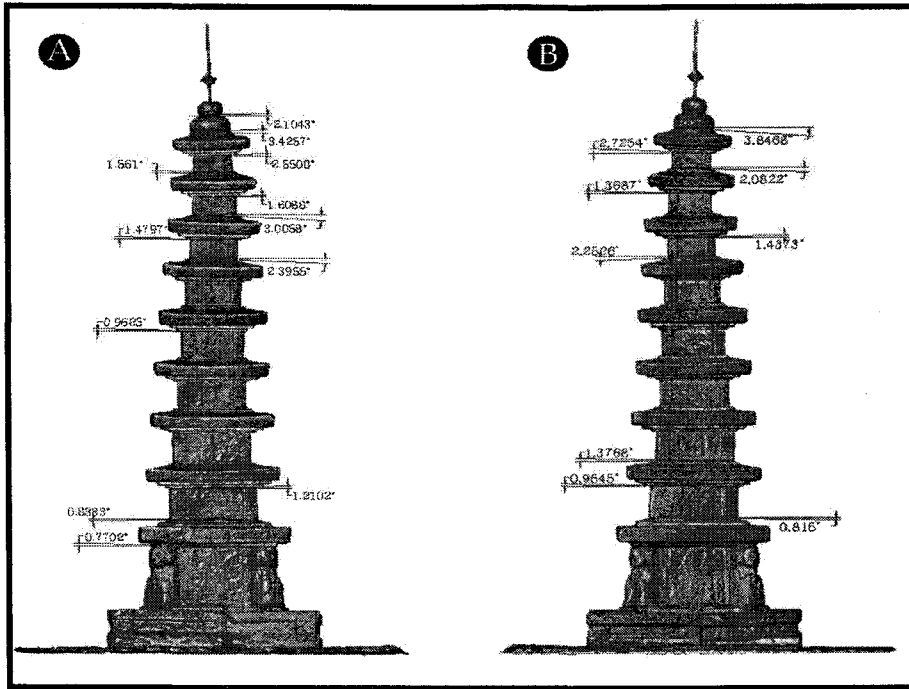


그림 4. 대원사 다층석탑의 수평변위 측정. (A) 좌측면. (B) 우측면.

또한 8층 옥개석은 전면과 같은 방향인 서쪽으로 37.16mm의 큰 수직변위가 계산되었다. 좌측면은 전반적으로 수직선상에 일치하나 5층 탑신석부터 북쪽으로 치우침이 발생되다 7층 옥개석에서 남쪽으로 28.16mm의 수직변위가 측정되었다. 최상단은 북쪽으로 27.87mm의 수직변위가 계산되었다. 우측면은 2층 탑신석부터 북쪽으로 26.64mm의 수직변위가 있고, 노반석에서는 북쪽으로 16.11mm의 수직변위가 나타났다.

평면상에서 바라본 수직, 수평변위 측정결과는 각 방향의 지대석이 전체적인 평면을 이루지 못하고 최고 211mm 정도 왜곡되어 있다. 정사각형의 대각선 상에서 모든 부재의 중심이 어긋나 있으며, 탑신부는 전체적으로 동쪽으로 치

우쳐 있다. 전체적으로 탑신과 옥개석의 연결 부분이 서로 맞지 않아 찰주 최상단과 절대 수평과의 기울기가 전면 (0.3529° , 37.0767mm), 좌면 (0.2656° , 27.8698mm), 우면 (0.3476° , 36.6716mm)으로 측정되었다.

5. 결 론

1. Revers Engineering 기법을 기반으로 3차원 영상자료를 획득하여 이 탑의 구조적 문제점을 평가하였다. 영상획득은 Cyrax-2500을 이용하여 컴퓨터 프로그램 공간상에 XYZ 좌표 값을 갖는 점군 데이터를 생성시켰다.

2. 저장된 점군 데이터로 filtering, registering, merging 작업을 거쳐, 3차원 형상을 확인할 수 있는 근접한 3개의 점이 하나의 삼각형 모양의 면으로 변환하는 polygon data를 얻었다. 또한 polygon data를 하나의 면으로 변환되는 과정을 거친 surface modeling 데이터를 얻었다. 이는 CAD file, image file로의 적용이 가능하여 실측도를 얻어 부재별 높이, 넓이 및 변위를 측정하였다.

3. 기단부의 측정결과, 하대갑석의 높이는 남동측이 상대적으로 낮게 측정되었다. 이는 전면과 후면상에서 각각 동쪽으로의 기울기 측정에서도 나타나듯이 남동쪽으로 경사가 있기 때문이다. 탑신부 측정결과, 기단부에서 측정된 경사도가 수직적으로 회복된 것을 볼 수 있다.

4. 평면상에서는 지대석의 수평변위가 최고 211mm 정도 왜곡되어 있음을 볼 수 있으며 정사각형의 대각선상에서 모든 부재의 중심이 어긋나 있다. 전체적으로 탑신과 옥개석의 연결 부분이 서로 맞지 않아 찰주 최상단과 절대 수평과의 기울기가 전면 (0.3529° , 37.0767mm), 좌면 (0.2656° , 27.8698mm), 우면 (0.3476° , 36.6716mm)으로 계산되었다.