석조문화유산의 형상분석을 위한 3차원 디지털복원과 표면심도 모델링: 해운대 석각을 중심으로

조영훈 | 이찬희¹

공주대학교 문화재보존과학과

Three-dimensional Digital Restoration and Surface Depth Modeling for Shape Analysis of Stone Cultural Heritage: Haeundae Stone Inscription

Young Hoon Jo | Chan Hee Lee¹

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

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

초 록 이 연구에서는 해운대 석각을 대상으로 3차원 레이저 스캐닝 시스템을 적용하여 디지털복원 및 표면심도 모델링을 수행하였다. 먼저 석각의 3차원 디지털복원은 광대역 및 정밀 스캐너를 이용하여 점군 데이터를 획득하였고, 정합, 병합, 필터링, 폴리곤 메쉬, 도면화 작업 순으로 진행하였다. 특히 정밀 스캐닝 폴리곤은 광대역 폴리곤에 비해 글자의 필획, 음각깊이 및 선명도 등이 매우 뛰어났다. 표면심도 모델링은 폴리곤 분리, 기준축 설정, 기준점 선정, 등고선도 맵핑 및 폴리곤 병합을 통해 완성하였으며, 사진과 폴리곤 이미지에 비해 글자의 상대적 음각깊이(5~17mm)와 윤곽이 매우 뚜렷하게 나타났다. 광대역 및 정밀 스캐닝을 병합한 디지털복원 기술을 통해 석각의 전체 형태와 미세형상을 신속하고 정확하게 복원하였고, 표면심도 모델링은 육안과 사진으로 불분명했던 부분을 가시적으로 표현해주었다. 앞으로 정기적인 모니터링을 통해 석각의 다양한 손상과 시간에 따른 주변 환경 변화를 수치적으로 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

중심어: 석조문화유산, 해운대 석각, 형상분석, 3차원 디지털복원, 표면심도 모델링

ABSTRACT This study was focused on digital restoration and surface depth modeling applying the three-dimensional laser scanning system of the Haeundae Stone Inscription. Firstly, the three-dimensional digital restoration carried out acquiring of point cloud using wide range and precision scanner, thereafter registering, merging, filtering, polygon mesh and surveyed map drawing. In particular, stroke of letters, inscribed depth and definition appearing the precision scanning polygon was outstanding compared with ones of the wide range polygon. The surface depth modeling completed through separation from polygon, establishment of datum axis, selection of datum point, contour mapping and polygon merging. Also, relative inscribed depth (5~17mm) and outline by the depth modeling was well-defined compared with photograph and polygon image of the inscription stone. The digital restoration technology merging wide range and precision scanning restored the total and detailed shape of the Stone Inscription quickly and accurately. In addition, the surface depth modeling visibly showed unclear parts from naked eye and photograph. In the future, various deteriorations and surrounding environ-

ment change of the Stone Inscription will be numerically analyze by periodic monitoring.

Key Word: Stone cultural heritage, Haeundae Stone Inscription, Shape analysis, Three-dimensional digital restoration, Surface depth modeling

1. 서 론

최근까지 문화유산의 분석과 관리를 위한 자료는 엄격한 양식을 갖춘 문서나 2차원 도면으로 기록 및 보존되어 왔다. 그러나 이와 같은 자료들은 대상물에 대한 다각적인 분석이 어려우며 자료의 갱신이나 보존에 있어 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어 발전을 근간으로 3차원 레이저 스캐닝 시스템과 수치영상 분석기술이 개발되고 있다.

이 기술은 처리과정의 단순화 및 자동화를 이룰 수 있고, 문화유산 복원을 위한 정밀 수치자료의 수정 및 영구보존이 가능하다¹. 또한 비용, 인력 및 시간을 감축할 수 있으며, 신속하고 효율적인 3차원 도면화를 가능하게 한다. 이로 인해 제조업을 시작으로 의료 및 그래픽 분야에 널리 활용되고 있으며, 최근에는 문화유산의 디지털복원^{2,3,4}, 손상도 진단^{5,6} 및 구조안정성 평가^{7,8,9}에도 적용되고 있다.

그러나 문화유산의 3차원 영상분석은 다른 분야에 비해 아직까지 초기단계이며, 이차적 응용기술은 조영훈과 이찬희(2009; 2011), Egglezos *et al.*(2008), Kersten *et al.*(2008) 등에 의해 일부 시도된 바 있으나 전체적으로 많은 연구를 필요로 한다⁵⁻⁹. 특히 암각화, 비석 및 석각처럼 세부분양과 글자가 음각되어 있는 문화유산들은 영구보존을 위한 기록화와 디지털 자료 축적이 시급하다. 또한 자연적 풍화와 인위적 훼손에 의해 지속적으로 손상되기 때문에 현재 상태를 3차원적으로 도면화하여 보존상태를 모니터링해야 한다.

따라서 이 연구에서는 3차원 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 부산 해운대 석각의 디지털복원 및 정밀 실측도면을 완성하였다. 또한 석각에 음각되어 있는 글자에 대해 표면심도 모델링을 실시하여 2차원적인 도면에 3차원 수치정보를 표현하였다. 이 결과는 석각의 제작기법을 파악하고 보존상태에 대한 변화과정을 비교분석할 수 있는 중요한 자료가 될 것이다.

2. 연구대상 및 영상분석 시스템

2.1. 연구대상

부산 해운대 석각(시도기념물 제45호)은 동백섬 내에 자리한 작은 바위 윗면에 새겨진 ‘해운대(海雲臺)’라는 글자이다(Figure 1A). 이 석각은 통일신라 후기의 학자였던 고운 최치원 선생이 가야산으로 향하던 도중 주변의 자연경관이 너무도 아름다워 돌을 쌓아 대를 만든 후 바다와 구름, 달과 산을 음미하면서 이 바위에 글자를 새긴 것으로 전해진다. 그러나 이 석각에 새겨진 ‘海雲臺’라는 각자가 최치원 선생이 직접 쓴 글이라고 할 만한 확실한 기록은 없는 상태이다¹⁰.

해운대 석각의 서체학적 특징을 살펴보면, 자체(字體)는 해서이며, 서체(書體)는 구양순체이다. 이 글자는 전반적으로 박락이 심하여 글자의 필획이 선명하지 않고, ‘臺’자는 이체자로 원래 ‘吉’이었으나 ‘其’의 결구를 취하였으며, 암축세의 두 점도 수평이 아닌 것이 특이하다(Figure

Figure 1. Occurrences of Haeundae Stone Inscription. (A) Location of Haeundae Stone Inscription. Panoramic (B) and side view (C) of Haeundae Stone Inscription.

Table 1. Specification of the 3D scanners.

Scanner	Wide range scanner		Precision scanner	
Model	HDS-3000		Vivid 910	Vivid 9i
Measurement method	Time of flight		Triangulation light block	
Range	300m		0.6 ~ 2.5m	0.6 ~ 1.0m(Standard) 0.5 ~ 2.5m(Extended)
Laser type	Class 3R		Class 2R(IEC 60825-1)	
Accuracy	Position : 6mm Distance : 4mm		±0.05mm	
Precision	2mm		±0.008mm	

1B). 전체적으로 석각의 옆과 상부 뒷모습은 괴상암체를 이루고 있으나 글자가 음각된 면부터 일정한 방향으로 층상구조를 보이고 있다(Figure 1C). 이 층의 주향은 N12°E이며 경사는 60°SE이다.

2.2. 사용장비 및 프로그램

석조문화유산의 디지털복원을 위한 3차원 스캐너는 측정원리에 따라 주행시간법(time-of-flight; TOF)과 광삼각법(triangulation)으로 구분된다. 이중 주행시간법은 레이저를 대상체에 주사한 다음 반사되어 돌아오는 레이저를 수신하고 이때 발생한 시간차를 이용하여 거리를 측정하는 방법이다. 이 방법은 먼 거리를 측정할 수 있어 광대역 스캐너에 주로 이용되며 측정시간도 상당히 단축되는 장점이 있다¹². 또한 광삼각법은 대상체 표면에 레이저 점이나 선으로 투영된 것을 하나 또는 그 이상의 CCD 카메라로 측정위치를 기록하는 방식이다. 정밀도가 높은 장점이 있으나 측정시간이 오래 걸리고 직사광선에 노출될 경우 데이터의 오류가 발생하는 단점이 있다¹¹.

따라서 이 연구에서는 이러한 두 가지 방식 스캐너를 동시에 활용하여 해운대 석각의 디지털복원을 수행하였다. 먼저 주행시간방식의 광대역스캐너(Leica; HDS-3000 Scanstation)는 석각의 전체적인 외형을 복원하는데 이용하였고, 광삼각법의 정밀스캐너(Konica Minolta; Vivid 910과 9i)는 석각의 글자와 같이 미세한 형태를 복원하는데 사용하였다. 각 기기의 제원은 Table 1과 같다.

한편 이 연구에 사용된 데이터처리 소프트웨어는 크게 Cyclone, Geomagic Studio, RapidForm 및 AutoCAD이다. 이중 Cyclone은 광대역 스캐너를 제어하고 점군 데이터(point cloud)를 정합 및 병합하는 프로그램이고, Geomagic Studio는 Cyclone에서 처리된 병합 모델을 폴리곤 모델로

변환하는 프로그램이다.

또한 RapidForm은 정밀스캐너의 점 데이터 획득부터 폴리곤 생성까지 통합적인 기능을 제공하며, 특히 표면심도 모델링과 같은 다양한 후처리 작업에도 활용되었다. 마지막으로 AutoCAD는 3차원 이미지를 통한 도면작성과 단면분석에 이용되었다. 이처럼 다양한 프로그램이 사용된 이유는 단일 프로그램만으로 완벽한 3차원 형상을 재현하기 미흡하기 때문이다.

3. 3차원 디지털복원

3.1. 레이저 스캐닝

석조문화유산의 3차원 영상분석 과정은 크게 현장에서 실시하는 레이저 스캐닝과 실내에서 수행하는 프로그래밍 작업으로 나눌 수 있다. 이중 첫 번째 단계는 현장 레이저 스캐닝 과정으로, 이 단계에서 가장 중요한 것은 대상 석조 문화재에 적합한 3차원 스캐너의 선택과 스캐닝 조건을 설정하는 것이다. 형상이 복잡한 곳은 스캐닝 밀도를 높게 하여 정밀도를 높여주고 형상이 단순한 곳은 밀도를 낮게 하여 데이터의 크기를 작게 해야 한다. 또한 레이저 광선이 도달하지 못하는 지점은 형상을 완벽히 복원할 수 없으므로 획득한 두 셀 간의 특징점이 세 지점 이상 나올 수 있도록 중첩영역을 계산하여 스캐닝해야 한다⁹.

해운대 석각의 3차원 레이저 스캐닝은 일반 건축물이나 발굴현장에서 주로 사용되는 광대역 스캐너와 소형 제품과 유물 등에 적용되는 정밀 스캐너를 함께 사용하였다. 석각이 존재하는 암반 전체의 디지털복원뿐만 아니라 각 글자의 미세 형상과 음각깊이를 그대로 재현해야하기 때문이다. 이중 광대역 스캐너(주간)는 가로 4mm, 세로 6mm의 밀도로 석각의 전체적인 전경을(Figure 2A), 정밀 스캐너

(야간)는 0.008mm의 간격으로 글자의 세부형태를 스캐닝하였다(Figure 2B). 이처럼 광대역 및 정밀 스캐너를 동시에 활용하는 것은 소요시간이 긴 단점이 있지만 정밀도를 높여 데이터의 왜곡을 막을 수 있는 장점이 있다.

3.2. 프로그래밍

3차원 스캐너로 현장에서 획득한 점군 데이터는 대상 석조 문화유산의 3차원적 형태에 대한 정보만을 제공한다. 따라서 디지털복원과 표면심도 모델링과 같은 이차적 활용을 위해서는 실내 프로그래밍이 반드시 필요하다. 이러한 점군 데이터의 후처리 방법에 대해서는 이미 다수의 연구가 진행되었으며^{12,13}, 특히 광대역 스캐닝 데이터의 후처리 과정은 조영훈과 이찬희(2009)에 의해 상세히 보고된 바 있다. 따라서 이 연구

에서는 광대역 데이터의 후처리 과정에 대한 내용은 생략하고, 정밀 스캐닝 데이터의 후처리 과정에 대해서만 설명하겠다.

먼저 Figure 3A를 보면 정밀스캐너의 점군 데이터는 스캐너의 원점을 기준으로 좌표값이 형성되기 때문에 각 셀(shell)마다 중첩된 형태로 표시되는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 정합하기 위해 두 개의 셀을 선택하고 세 점 이상의 공통지점을 찾아 좌표상의 위치를 정렬하였다(Figure 3B). 이때 최적의 정합을 위해 평면보다 구멍이나 곡률이 있는 지점을 선정하였으며, 자동정합 기능을 사용하여 각 셀 간의 오차를 최소화하였다(Figure 3C). Figure 3D를 보면, 중첩영역의 정합 오차는 0.1mm 이하에 집중 분포하는 것으로 보아 정합이 아주 잘 된 것을 알 수 있다.

정합이 완료된 셀들은 다음 단계로 병합을 실시하였다. 이 병합은 프로그램 상에 크게 Surface Merge와 Volume

Figure 2. Laser scanning for Haeundae Stone Inscription in the field. Pictures showing the wide range scanning (A) and the precision scanning in the night time (B).

Figure 3. Three-dimensional modeling processes of the precision scanning for digital restoration of Haeundae Stone Inscription. (A) Point cloud. (B) Intersection selection for the registering. (C) Completion of the registering. (D) Error analysis for the registering reliability. Letter parts completed by wide range scanning (E) and precision scanning (F).

Merge의 두 가지 방법이 있다. 이중 Surface Merge는 중첩된 영역에서 불필요한 메쉬를 제거하고 경계 부분의 메쉬를 하나의 셀로 합치는 방식이다. 또한 Volume Merge는 균일한 크기의 3차원 격자구조와 두 셀에 포함된 점군 데이터의 좌표 정보를 이용하여 새로운 셀을 생성하는 방식이다. 주로 정합상태와 폴리곤의 품질이 좋지 않은 경우 비교적 양호한 폴리곤을 얻을 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 정밀스캐너로 획득한 점군 데이터가 충분하고 정합상태가 매우 양호하여 Surface Merge 방식을 이용하여 최종 폴리곤 메쉬 모델을 완성하였다. 완성된 해운대 석각의 정밀 스캐닝 폴리곤을 살펴보면 광대역 스캐닝 폴리곤에 비해 글자의 필획, 음각깊이 및 선명도 등이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다(Figure 3E, 3F). 따라서 해운대 석각의 최종 폴리곤 모델은 광대역 및 정밀 폴리곤 모델의 대응점을 지정하고 하나의 폴리곤으로 병합하여 완성하였다.

3.3. 3차원 디지털복원

해운대 석각은 가로 2,196mm, 세로 2,557mm 크기의 압반에 ‘海雲臺’라는 글자가 종서방향으로 음각되어 있으며(Figure 4A, 4B), ‘雲’자와 ‘臺’자는 ‘海’자를 기준으로 약 19° 정도 기울어져 있다(Figure 4C). 이중 ‘海’자는 가로 301mm, 세로 346mm의 크기로 면적은 302cm², 둘레는 3,081mm이다. 현재 ‘海’자의 삼수변에 해당하는 산수세(散水勢)의 첫 점이 박락되었고, ‘冊’의 주변으로 박락이 발생하여 필획

이 완전하지 못한 상태이다. ‘雲’자는 가로 312mm, 세로 316mm로 글자 면적은 277cm², 글자 둘레는 3,097mm이다. 이 ‘雲’자의 첫 가로획과 배사점(拜四點)의 네 점 역시 음각된 글자 주위로 모두 박락되어 현재로서 정확한 형태를 알아보기 어려운 상태이다(Figure 3D).

‘臺’자는 가로 301mm, 세로 373mm이고, 글자 면적 262cm², 글자 둘레 3,332mm이다. 이 ‘臺’자는 앞의 ‘海’와 ‘雲’에 비해 전반적으로 보존상태가 양호한 편이지만 ‘其’의 좌측과 우측에 일부 박락이 관찰된다. 3차원 디지털복원 결과를 이용하여 각 글자의 물리적 손상도를 정량적으로 평가한 결과, ‘海’자는 42.0%, ‘雲’자는 48.2%, ‘臺’자는 25.2%가 원형에 비해 손상이 발생한 것으로 나타났다. 평균 훼손율은 38.1%로 산출되었다.

4. 표면심도 모델링

4.1. 모델링 과정

석조문화유산의 사진 및 정밀 실측도면은 평면 또는 입면도 상의 치수에 치중하여 2차원적인 형태와 정보를 제공한다. 그러나 해운대 석각과 같이 글자의 세부형태가 음각되어 있는 석조문화유산은 이러한 2차원적인 자료들을 통해 표면심도와 형태를 파악할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 표면심도 모델링을 실시하여 2차원적인 도면에 깊이에 대한 3차원 수치정보를 표현하였고, 이를 다시 1차원적인

Figure 4. Three-dimensional image restoration of Haeundae Stone Inscription. (A, B) Three-dimensional polygon model. (C) Two-dimensional surveyed map. (D) Detailed surveyed map for each letter.

Table 2. Surface depth results of each letter of Haeundae Stone Inscription.

(Unit: mm)

Spots	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean
海	14	12	10	11	7	10	12	9	7	10
雲	12	12	9	6	5	9	5	9	14	9
臺	17	8	6	10	10	10	9	6	6	9

Figure 5. Processes of three-dimensional surface depth modeling.

단면선으로 추출하여 음각형태에 대한 도면화를 수행하였다. 전체적인 모델링 과정은 다음과 같다(Figure 5).

먼저 앞에서 완성한 석각의 3차원 폴리곤 모델에서 각 글자의 폴리곤 모델을 별도로 분리하였다. 그런 다음 기준 축이 될 표면을 X, Y, Z축 중 한 개의 축에 평행하게 일치시키고, 프로그램 상의 등고선 기능을 이용하여 각 글자별로 맵핑하였다. 이때 맵핑은 기준축에 평행한 최고점과 최저점을 기준으로 자동으로 시행되기 때문에 폴리곤 모델의 형태와 노이즈에 영향을 받을 수 있다.

따라서 이 연구에서는 인위적으로 기준점을 지정하고 깊이 스케일을 조절하였다. 즉, 석각 표면으로부터 글자가 음각되기 시작하는 지점을 최고점으로 지정하고, 글자가 가장 깊게 새겨진 지점을 최저점으로 선정하였다. 이와 같이 최저 및 최고점 지정이 완료되면 기준점을 중심으로 다시 등고선도를 작성하고, 이를 폴리곤과 병합하여 최종 모델링을 완료하였다.

4.2. 표면심도 산출 및 모델링

해운대 석각의 표면심도 모델링은 각 글자별로 비교적 원형이 잘 남아있는 9지점을 대상으로 실시하였으며, 표면

심도에 대한 정량적 수치데이터는 글자의 단면선을 기준으로 산출하였다. 먼저 각 글자의 표면심도 모델링 결과를 살펴보면 사진과 폴리곤 이미지에 비해 글자의 상대적 음각깊이와 윤곽이 매우 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 이 모델링 결과를 통해 글자의 물리적 손상 부위도 확연히 구분되었다(Figure 6).

표면심도 모델링 및 단면선 작성을 통해 각 글자별 음각깊이를 정량적으로 산출한 결과, ‘海’ 자는 7~14mm 사이의 범위를 보이면서 평균 10mm로 산출되었다. 또한 ‘雲’ 자는 최소 5mm부터 최대 14mm로 평균 9mm의 음각깊이를 보였고, ‘臺’ 자는 6mm에서 17mm의 매우 넓은 범위에서 평균 9mm를 나타냈다. 전반적으로 세 글자 모두 평균 음각깊이는 거의 유사하였으나 글자의 세부지점별 음각깊이는 큰 차이를 나타냈다.

특히 ‘海’ 자는 음각깊이가 제일 작은 5번 지점과 가장 큰 1번 지점의 수치가 약 2배 정도의 차이를 보였고, ‘雲’ 자는 얇게 음각된 5번 및 7번 지점과 깊게 음각된 9번 지점이 약 3배 정도의 차이를 나타냈다. 또한 ‘臺’ 자도 앞의 ‘雲’ 자와 유사하게 표면심도가 가장 작은 지점(3번, 8번, 9번)과 큰 지점(1번)이 약 3배의 차이가 있음이 확인되었다. 이를 통해 해운대 석각은 제작 당시 일정한 깊이로 새기기

Figure 6. Measurement spots and contour maps of the surface depth modeling for Haeundae Stone Inscription.

보다 각 글자의 서체학적 특징에 따라 다양한 깊이로 음각한 것을 알 수 있다. 이와 같은 표면심도 모델링은 해운대 석각의 현재 상태를 정밀 디지털 데이터로 변환하여 제작 기법을 파악하는데 매우 유용하였다. 앞으로 정기적인 스캐닝을 통해 손상정도를 비교할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 해운대 석각의 디지털복원은 광대역 및 정밀 스캐너를 이용하여 점군 데이터를 획득한 다음 정합, 병합, 필터링, 폴리곤 메쉬, 도면화 작업 순으로 진행하였다. 특히 정밀 스캐닝 폴리곤은 광대역 폴리곤에 비해 글자의 필획, 음각깊이 및 선명도 등이 매우 뛰어났다.

2. 디지털복원 결과, 해운대 석각은 가로 2,196mm, 세로 2,557mm 크기의 압반에 ‘海雲臺’라는 글자가 종서방향으로 음각되어 있으며, ‘雲’자와 ‘臺’자는 ‘海’자를 기준으로 약 19° 정도 기울어져 있다. 각 글자는 가로 301~312mm, 세로 316~373mm의 크기로 ‘海’자는 42.0%, ‘雲’자는 48.2%, ‘臺’자는 25.2%가 원형에 비해 손상된 것으로 나타났다.
3. 표면심도 모델링은 글자의 음각깊이와 같은 3차원 수치 정보를 2차원적인 도면에 표현하는 응용기술로서 각 글자의 폴리곤을 분리한 다음 기준축을 설정하고, 최저 및 최고점을 중심으로 등고선도를 맵핑하여 완성하였다. 특히 심도 모델링 결과는 사진과 폴리곤 이미지에 비해 글자의 상대적 음각깊이와 윤곽이 매우 뚜렷하게 나타났다.
4. 각 글자의 음각깊이를 산출한 결과, ‘海’자는 7~14mm 사이의 범위를 보이면서 평균 10mm로 산출되었고, ‘雲’자는 최소 5mm부터 최대 14mm로 평균 9mm의 음각깊이를 보였다. ‘臺’자는 6mm에서 17mm의 매우 넓은 범위에서 평균 9mm를 나타냈다. 전반적으로 세부지점별 음각깊이가 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 각 글자의 서체학적 특징에 따라 다양한 깊이로 음각한 것을 알 수 있다.
5. 광대역 및 정밀 스캐닝을 병합한 디지털복원 기술을 통해 석각의 전체 형태와 미세형상을 신속하고 정확하게 복원하였고, 표면심도 모델링은 육안과 사진으로 불분명했던 부분을 가시적으로 표현해주었다. 앞으로 정기적인 모니터링과 스캐닝을 통해 석각의 자연적 및 인위적 손상과 시간에 따른 주변 환경 변화를 수치적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 2009년도 일반연구지원사업(2009-0072902)과 학문후속세대양성사업(355-2011-1-C00001)의 지원을 받아 수행된 연구임을 명기하며, 위 기관의 행정 및 재정적 지원에 감사한다. 또한 해운대 석각의 서체학적 특징과 글자의 복원과정을 지도해주신 손환일 선생님께 깊이 감사드린다.

참고문헌

1. 임영빈, 이국무, 배상호, "문화재 보존을 위한 정밀 3차원 모니터링". *한국형상공간정보학회논문집*, 7, p65-74, (1999).
2. 김영원, 전병환, "3차원 형상정보 처리기술을 이용한 환두대주의 디지털 원형복원". *한국콘텐츠학회논문지*, 5, p133-140, (2005).
3. Fontana, R., Greco, M., Materazzi, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Rocchini, C., and Scopigno, R., "Three-dimensional modeling of statues: the Minerva of Arezzo". *Journal of Cultural Heritage*, 1, p301-313, (2000).
4. Remondino, I., El-Hakim, S., Baltsavias, E., Picard, M., Grammatikopoulos, L., "Image-based 3D modeling of the erechteion, Acropolis of Athens". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, p1083-1092, (2008).
5. 조영훈, 이찬희, "석조문화유산의 손상지도 제작방법과 표면 및 3차원 손상을 평가기법". *보존과학회지*, 27, p251-260, (2011).
6. Kersten, T.P., Lindstaedt, M., Vogt, B., "Preserve the past for the future terrestrial laser scanning for the documentation and deformation analysis of Easter Island's Moai". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, p271-278, (2008).
7. 전병규, 이찬희, 서만철, "3차원 영상분석을 이용한 대원사다층석탑의 안정성 평가". *보존과학회지*, 22, p31-42, (2008).
8. 조영훈, 이찬희, "석조문화재 디지털복원 및 구조안정성 평가를 위한 3차원 영상분석: 마곡사오층석탑". *보존과학회지*, 25, p115-130, (2009).
9. Egglezos, D., Moullou, D., Mavromati, D., "Geostructural analysis of the Athenian Acropolis walk based on terrestrial laser scanning data". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, p1093-1100, (2008).
10. 부산광역시, "*부산의 문화재*". 부산광역시 문화예술과, p186-187, (2006).
11. Boehler, W., Heinz, G. and Marbs, A., "The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording". *Surveying*, 28, p289-295, (2002).
12. 권선욱, "레이저 스캐닝 기술과 BIM 기술을 이용한 형상정보 획득기술의 건설산업 적용". *건축*, 53, p31-38, (2009).
13. Tsakiri, M., Ioannidis, C. and Carty, A., "Laser scanning issues for the geometrical recording of a complex statue". *In 6th Conference 'Optical 3-D Measurement Techniques'*, Switzerland, p1-8, (2003).