

영상분석기법에 의한 문화재의 정밀 수치자료 획득과 공간분석

- 성덕대왕신종에 대해 -

The Spatial Analysis and Acquisition of Precision digital data due to
Cultural Properties using the Photogrammetry

강 준 목 * 배 연 성 ** 배 상 호 *** 이 성 순 ****
Kang, Joon-Mook Bae, Yeoung-Sung Bae, Sang-Ho Lee, Seung-Son

要 旨

문화재의 정밀 기하학적 수치자료의 획득과 분석체계는 전통문화를 영구 보존하고 복원한다는 측면에서 매우 중요하다. 본 연구는 문화재의 효율적 관리를 위한 기법을 제시하고자 통일신라시대의 대표적인 범종인 성덕대왕신종에 대한 정밀 3차원 수치자료를 구축하고 각 문양에 대한 기하학적 형상분석을 다양하게 시도한 것이다. 다른 구조물에 비해 취급과 정밀실측이 곤란한 문화재에 대해 정확한 3차원 수치자료의 효율적인 취득과 그 분석방법을 제시하므로써 문화재의 안전진단은 물론 고고학 및 미술사 등의 관련연구에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ABSTRACT

The acquisition and analysis system of accurate geometrical digital data is very important in side of maintaining the traditional culture for the preservation of cultural properties. This study is on the construction and shape analysis of precise digital data to manage more successfully using the CRP method and 3D Mono Mobile System. Also, this study could acquise 3D geometrical digital data, make such various space analysis as section, projection, and calculation of bias, area and volume and modeling by rendering technique on the misterious bell of great king of SungDuck, one of the greatest bells in periods of Tongll Silla. So, We suggest utilization of image analysis method to safety diagnosis for the maintenance of cultural properties, archeological and artistic research.

* 충남대학교 토목공학과 교수

** 충청전문대 토목공학과 조교수

*** 충남대학교 토목공학과 박사수료

**** 충남대학교 토목공학과 박사과정

1. 서론

우리나라의 범종은 청아한 소리와 뛰어난 조형미를 갖추고 있으며, 종에 아로 새겨진 아름다운 문양 그리고 쇳물로 부어낸 주조기술이 한데 어울려진 불교미술의 결정체이다. 특히, 통일신라시대에 조성된 범종은 그 우수성이 일찍이 세계적으로 인정받아 학술용어로 “한국종”이라 일컫고 있다.⁶⁾

성덕대왕신종은 신라 혜공왕 7년에 제작된 통일신라시대의 대표적인 범종으로 UNESCO에 등록할 만큼 그 보존가치가 매우 높다. 그러나, 1200년 이상의 역사와 신비로움을 간직하여 온 신종에 최근 균열과 탁음 등 많은 문제점이 제시되고 있어 그 대책마련이 시급한 실정이다. 그러므로, 현 신종의 보존상태를 정확한 수치자료로 표현하기 위한 정밀 기하학적 실측 자료의 획득과 분석체계는 중요한 의미를 지니고 있다.⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾

본 연구에서는 성덕대왕신종(φ:2.2m×h:3.7m)에 대해 동일좌표체계를 구축하고 영상을 취득하여 영상분석기법에 의한 정밀 3차원 위치측정과 기하학적 형상 해석을 수행하고자 하였다. 종신과 당좌, 비천상, 유곽, 용뉴, 상대, 하대의 신종표면 문양에 대한 28개 모델을 해석하여 3D 수치자료를 구축한 후, Bursa-Walf 3차원 좌표변환 방법을 이용하여 각 모델들을 동일좌표계의 일체 구조물로 표현하였다. 신종에 대한 다양한 형상분석을 위해 3차원 모델(TIN)을 생성하여 베이스 맵을 구축하고 단면, 면·체적, 편위 및 원형형상 등의 기하학적 형상분석과 3차원 투시도, 평면투영도, 등고선도 및 모델링 등의 시각적 분석을 수행하였다.

이로서, 본 연구결과는 신종에 관한 음향분석연구, 주조기법고찰, 미술사연구 등에 기초자료로 활용가능할 것이며, 문화재 보존을 위한 안전진단을 비롯하여 고고학적 연구 및 미술사 연구 등에도 영상매체를 이용한 분석기법이 널리 활용될 수 있을 것이다. 그림 1.1은 연구 수행 과정을 간략히 도식화한 것이다.

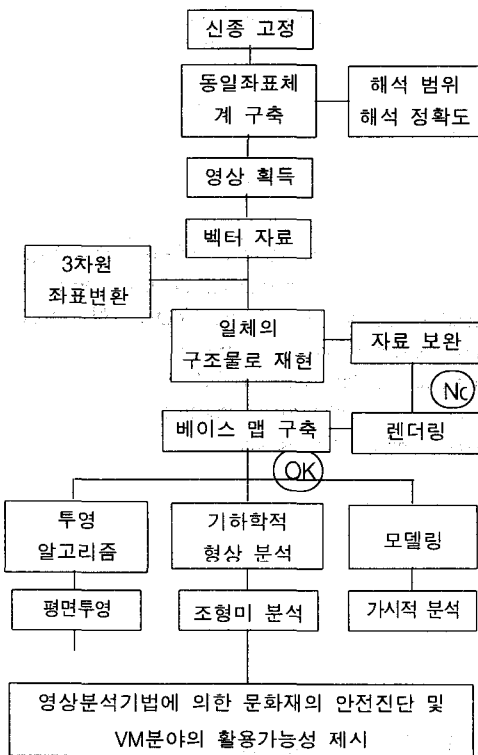


그림 1.1 연구수행 흐름도

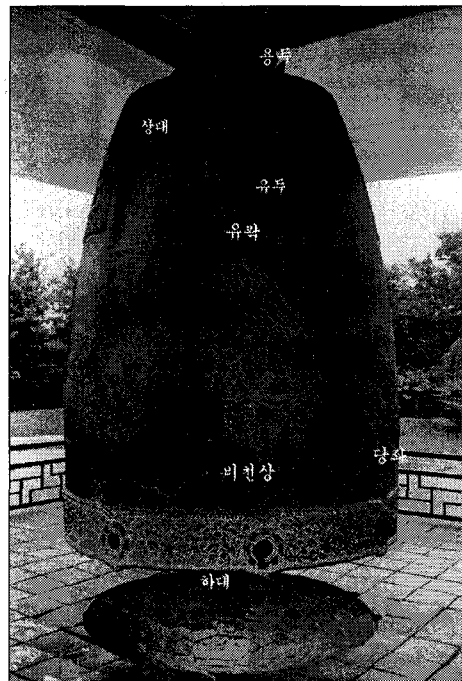


그림 2.1 성덕대왕신종 전경

2. 영상획득

신종과 그 표면에 주조된 여러 문양들에 대한 정밀 3차원 위치측정 및 수치자료의 분석을 위해 영상매체를 이용한 분석기법을 이용하였다.¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾ 보다 정밀한 벡터자료를 얻기 위해 문양별 세부 촬영계획을 세워 종신 4모델, 당좌 2모델, 비천상, 유곽 각 4모델, 상부평면 4모델, 상대 2모델, 용뉴 8모델로, 총 28 모델을 취득하였다. 표 2.1은 정밀 문양분석을 위한 세부 촬영계획을 나타낸 것이다.

신종과 같이 규모가 크고 취급이 어려운 대상물에 대해 필름을 기초로 한 영상분석기법(film-based photogrammetry)을 적용하여 정밀한 벡터자료를 추출하기 위해서는 정확한 촬영계획에 따른 영상획득이 중요하다.¹⁾²⁾⁴⁾ 그림 2.1는 성덕대왕신종의 전경을 나타낸 것으로 모델 중심부와 외곽부간에 많은 시차 발생과 더불어 기선고도비의 증가에 따라 해석 범위가 크게 감소하는 특징을 갖고 있다.

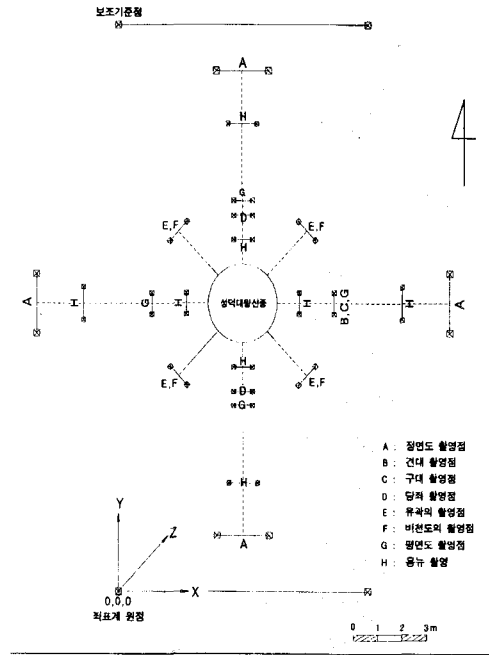


그림 3.1 촬영 계획도

표 2.1 세부촬영 계획도

문양	촬영방향	촬영거리 (m)	촬영고 (m)	중복도 (%)	촬영기선장 (m)	초점거리 (mm)	모델크기 (m)
종신	N, S, E, W	5.50	1.30	60	2.54	100.6	1.92 × 2.52
당좌	N, S	1.40	1.25		0.64	106.85	0.52 × 0.52
상대	E	1.80	3.00		0.83	105.04	0.30 × 1.40
하대			0.30		0.64		0.40 × 1.00
유곽	NE, SE, NW, SW	1.80	2.00		0.83	105.04	1.11 × 0.74
비천상			1.35		0.83		0.65 × 1.06
용뉴	N, S, E, W	4.00	3.7	80	0.92	100.6	0.96 × 0.66
	N, S, E, W	0.70	4.7		0.30	35	0.50 × 0.35
상부평면	N, S, E, W	1.80	4.71	60	0.83	105.04	1.50 × 1.50

특히, 용뉴와 같이 기복이 심하고 형상이 매우 복잡한 부분에서 부적절한 시차가 발생하지 않도록 심도와 해석범위를 고려한 촬영방법 결정하여 해석에 적합한 영상을 취득하였다.¹⁰⁾¹¹⁾¹⁵⁾ 본 연구에서는 모델에 대해 f-stop과 셔터속도를 8~22와 1/60~1/8로 변화시켜 영상을 취득하였다.

3. 좌표계 설정 및 기준점 측량

성덕대왕신종에 대한 정밀 수치자료의 기하학적 영상분석과 수치도면 작성을 위해 신종 내·외측 표면에 대해 동일좌표체계를 구축하였다. 그리고 대상물의 움직임에 따른 image motion을 없애기 위해 하대부근

의 4방향에 강선(φ5mm wire)을 거치시키고 균형적인 힘(tension)을 가하여 바람 등의 자연적 요인에 의한 신종의 움직임을 배제시켜 정적상태를 유지하였다. 그리고, 그림 3.1과 같이 범종 남측에 좌표계의 원점(0,0,0)을 두고 동쪽을 +X축, 북쪽을 +Y축, 높이방향을 Z축으로 한 직각좌표계를 설정하였다.

신종 내·외부의 4개방향에 대한 단면분석을 실시하기 위해 신종 내부의 남-북, 동-서, 남동-북서, 남서-북동 방향의 표면에 연직으로 단면분석용 띠 타겟을 부착하고 동일좌표체계의 3차원좌표성곽을 획득하였다. 또한, 영상해석을 위한 모델당 기준점을 6점씩, 총 28model에 대해 140여점을 배치하여 동일좌표계의 기준점 성곽을 취득하였다.



그림 4.1 TIN 모델

4. 베이스 맵

영상획득 당시와 동일한 기하학적 조건을 재현하여 입체 영상내 모든 요소들을 벡터 형태의 수치자료로 구축하기 위한 변환과정을 거쳐 신종에 대한 3차원 수치자료를 구축하였다.¹⁾²⁾

도화좌표계는 사진좌표계와 다르며 촬영방향과 대상물의 기하학적 위치관계로 인하여 일체의 구조물로 표현되지 않는다. 그러므로, 본 연구에서는 MSPM

Bursa-Walf 3차원 좌표 변환방법을 이용하여 각 모델의 도화성곽을 기준점을 변환점으로 사용하여 동일좌표계로 표현하였다. 각 모델들은 점과 선의 벡터 성분으로 구성하고 .dgn 파일로 저장하여 베이스 맵 구축에 이용하였다. MSM(MGE terrain modeler)모듈을 이용하여 개개 문양에 대한 3차원 모델(TIN)을 생성하여 신종의 기하학적 형상분석을 위한 자료기반을 구축하였다. 그림 4.1는 신종의 남동측 표면에 주조된 비천상의 벡터자료를 토대로 생성한 TIN을 나타낸 것이다. 신종 전체에 대한 TIN을 생성하기 위해서는 대용량의 메모리가 필요하므로 본 연구에서는 문양별로 TIN을 생성한 후, 이를 reference file로 사용하였다.

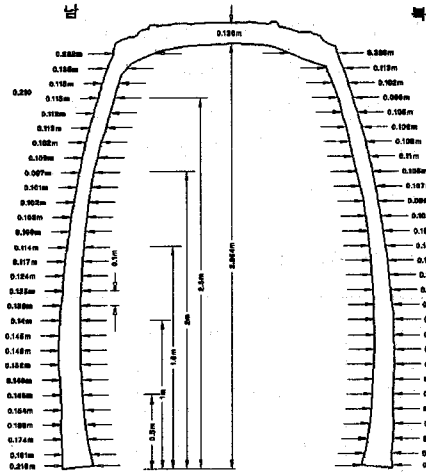


그림 5.1 신종 단면분석

5. 수치데이터 분석

측정 당시(1996.8)의 범종은 수평위치로 부터 북측 방향이 남측방향에 비해 상대적으로 +5cm정도 상향되어 고정된 상태이었던 때문에, 본 연구에서는 구축한 벡터자료를 3차원 회전 변환하여 이를 보정한 후 공간분석을 수행하였다. 각 문양들에 대한 3차원 모델을 베이스 맵(base map)으로 이용하여 단면, 면·체적, 3차원 투시도, 투영 등의 기하학적 위치분석과 형상분석, 그리고 렌더링 기법에 의한 시각적 분석을 수행하였다.

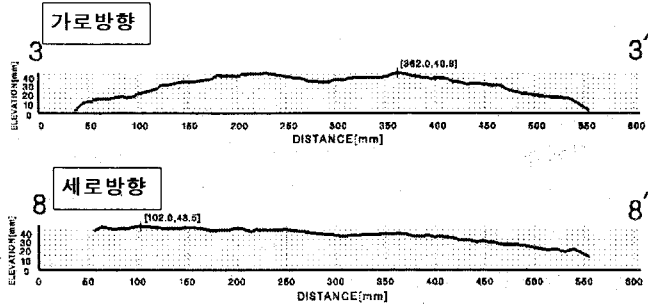
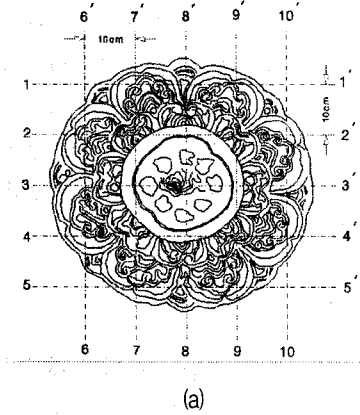


그림 5.2 당좌 단면분석

5.1 단면분석

신중에 대한 3차원 모델을 이용하여 4개 방향(남-북, 동-서, 남동-북서, 남서-북동)에 대한 단면 분석을 수행하였다. 그림 5.1은 남-북방향의 단면을 상방향 10cm 간격으로 두께를 분석한 결과로서, 종 하단으로부터 2.5m정도 상방향에 위치한 단면이 두께가 가장 얇았으며 당좌가 있는 1.25m 정도의 상방향 단면이 가장 두껍게 구조되었음을 알 수 있었다. 전체적으로는 0.1m~0.15m정도의 균일한 단면두께를 유지하고 있다. 중심라인을 기준으로 좌우 단면이 대칭형상을 이루고 있으며 정밀한 구조틀에 의해 구조되었음을 추정할 수 있다. 그림 5.2은 북측방향에 위치한 당좌를 가로와 세로방향 각 20cm 간격으로 단면분석한 결과이다. 가로방향(3-3'단면)으로는 좌우 단면이 대칭형상을 보이나, 세로방향(8-8'단면)의 단면분석 결과에서는 비대칭의 단면형상을 보였다. 이는 종신 외부표면이 그림 5.1와 같은 형상이기 때문에 기울어져 분석된 것이나, 당좌의 형상만을 고려해 보면 세로방향의 단면도 대칭형상을 이루고 있음을 알 수 있었다.

5.2 면·체적 분석

3차원 수치자료를 2차원으로 변환하여 XY 평면상의 점유 공간(면적)과 수치지형모델(DTM)에서의 차를 계산하여 대상표면에 점유되는 공간의 크기인 체

표 5.1 신중의 체적

단위: m^3

구역	북동 (NE)	남서 (SW)	북서 (NW)	남동 (SE)	Σ
체적	0.51698	0.51356	0.46467	0.43908	1.93429

표 5.2 비천상, 당좌, 유곽, 용뉴의 면·체적

문양	분석 방향	체적	표면적	투영면적
		(m^3)	(m^2)	(m^2)
비천상	NE	0.0013949	0.47642	0.44546
	NW	0.0014391	0.44146	0.43392
	SE	0.0014274	0.45747	0.44209
	SW	0.0013813	0.48600	0.43924
당좌	N	0.0002836	0.20891	0.20196
	S	0.0003189	0.21295	0.20526
유곽	NE	0.001699	0.80258	0.70378
	NW	0.001774	0.76477	0.69409
	SE	0.001740	0.73317	0.69279
	SW	0.001741	0.77961	0.71506
용뉴		0.0344894		

적을 계산하였다. 표 5.1은 범중의 중심으로부터 90°씩 회전하여 해석범주를 4개 방향으로 나누어 체적을 계산한 결과로서, 북동과 남서방향의 체적이 북서와 남동방향의 체적에 비해 다소 큰 수치를 보였다. 이는

북동-남서방향이 북서-남동방향에 비해 신종의 단면 두께가 상대적으로 좀 더 두껍게 구조된 요인으로부터 발생한 것이다. 표 5.2은 당좌, 비천상, 유곽, 유두에 대한 표면적(Model Surface Area), 투영면적(Planar Surface Area), 체적(Volume)을 각각 계산한 결과로써, 범종의 무게와 함께 구조물의 재료와 단위중량의 산출요소로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 산출한 범종의 총 체적은 $1.97 m^3$ 정도이고 성덕대왕신종 종합 정밀 조사 당시(1997.7) 측정된 무게는 18.9t이었다(CAS社). 이로부터 추정되는 합금의 비중은 $9.5t/m^3$ 정도이며, 일반적인 합금의 비중치($6.5\sim 13t/m^3$)내의 값이다. 구조물의 재질을 정확히 알 수 있다면 보다 더 정확한 무게를 추산할 수 있을 것이다.

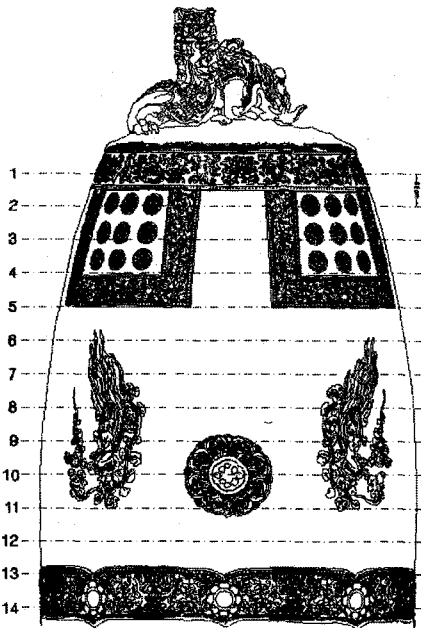
5.3 문양분석

신종 표면의 남측과 북측 방향에 구조되어 있는 두 당좌 중심간의 기하학적 위치관계를 비교하여 본 결과 당좌중심간 수평방향의 편차는 0.8cm정도, 수직방

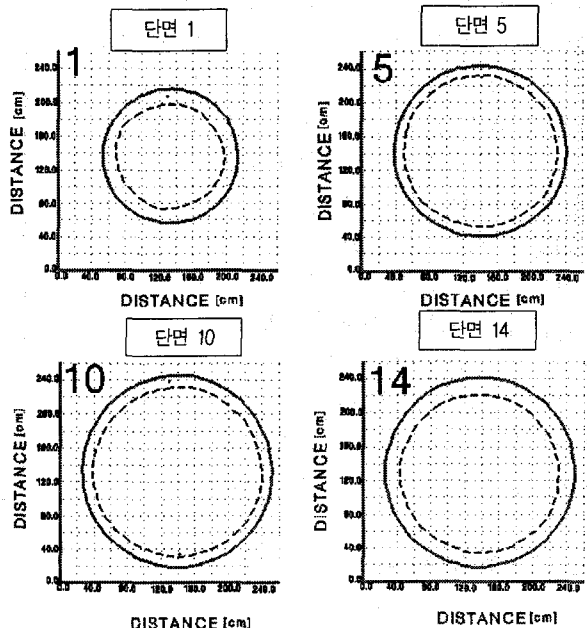
향의 편차는 0.5cm정도로써 측정오차를 고려하면 매우 정확한 위치에 구조되었음을 알 수 있다. 유사한 형상의 비천상을 중첩(NW와 SE, NE와 SW)시켜 본 결과, 형상이나 크기는 유사하였으나, 구조된 위치가 부분적으로 다소 상이함을 보였다. 이로서, 비천상을 형성하기 위해 여러 개의 구조 틀을 조합하여 사용한 것으로 해석할 수 있다.

5.4 원형형상 분석

종신의 원형형상 분석을 위해 상대적으로 하대까지 20cm간격으로 14개 구간에 대해 횡방향 단면분석을 실시하였다. 그림 5.3(a)는 종신의 횡방향 단면분석 위치를 나타낸 것이며 그림 5.3(b)는 원점을 동일시하여 각 단면의 상대적 위치와 형상을 분석한 결과이다. 14개 단면중 4개 단면의 분석결과를 보면, 상대(단면1)로부터 유곽하부(단면5), 당좌(단면10), 하대(단면14)에 이르기까지 내·외부의 단면형상과 두께가 다소 상이함을 알 수 있었으며, 단면의 두께가 가장 얇은 유곽하부에 비해 상대적으 당좌부위는 1.6배 정도 큰 원형



(a)



(b)

그림 5.3 횡단면 분석

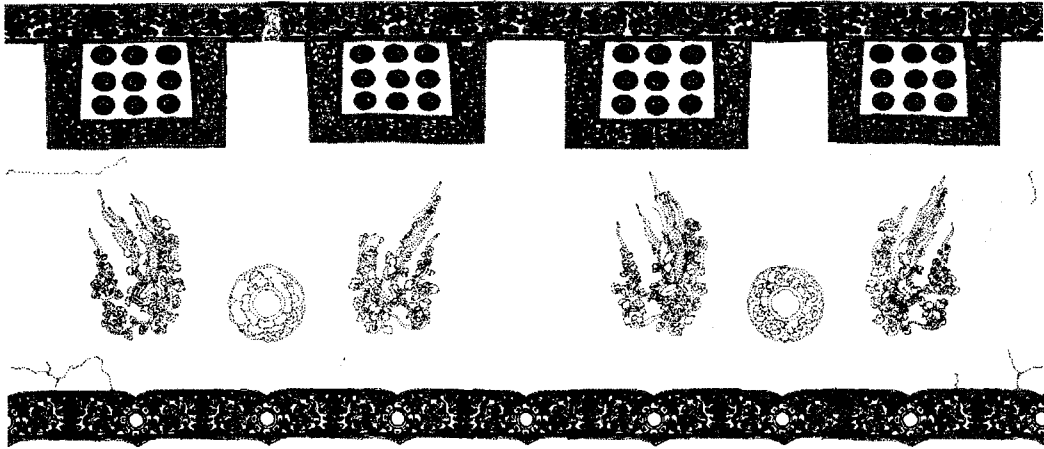


그림 5.4 평면 투영도

형상을 보였다. 그리고, 상부측 내부 단면양상은 하부측 내부 단면양상에 비해 원형형상이 다소 일그러져 있음을 알 수 있으며, 이는 주조시 내부 틀로 사용된 것으로 추정되고 있는 흠더미가 쇳물을 부을 당시 일그러져 발생한 형상으로 사료된다.

5.5 3차원 투시도

각 문양들에 대한 벡터성분의 도화성과를 동일좌표 체계로 투영변환하여 일체의 구조물로 표현하고 전체 형상의 가시적 분석효과를 더하기 위해 투시도를 완성하였다. 다양한 방향에서의 투시도 분석과 더불어 뷰(view)의 방향을 10° 씩 선회시켜 이미지를 저장하여 정밀 수치자료를 이용한 동영상 분석도 실시하였다.

5.6 평면 투영도

범종 표면에 대한 2차원 평면 투영분석을 실시하고자, 종의 하단을 기준으로 종 둘레의 방향을 X축, 높이방향을 Y축으로 하여 투영 변환하였다. 각 문양의 상대적 위치 및 형상을 평면도에서 비교할 수 있으므로, 조형미 분석과 미술사연구에 기초분석자료로 활용

될 것으로 사료된다. 투영점들은 TIN의 절점들로써, 이 점들의 3차원 좌표를 2차원 투영변환하였다. TIN 절점의 좌표성과를 .TXT 파일로 저장하고, 이를 데이터 파일로 이용하여 .dgn 파일을 완성하므로써 그림 5.4와 같은 평면투영도를 작성할 수 있었다. 그림 5.5는 2차원 평면투영을 위한 변환 알고리즘을 나타낸 것이다.

```

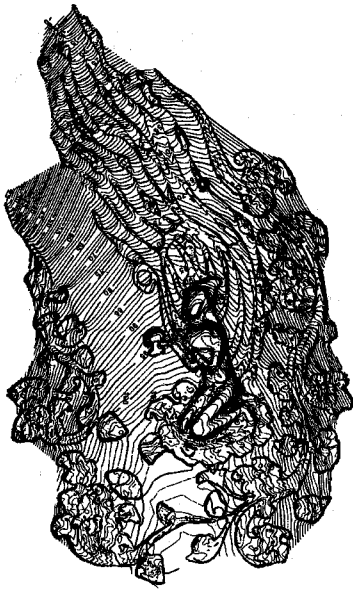
main()
{
  Definition of Parameter
  Definition of File
  /* Input the 3D Coord. of TIN peak */
  /* Definition of Projection Radius */
  /* Definition of Scale */
  /* 3D Spatial Coord.
     => 2D Planar Transformation */
  {
    if ( ) x=pairadius*atan(y/x)/pi*180;
           y=Z;
  }
  /* Store the 2D Transformation Coord. */
  /* Display the Image */
}
    
```

그림 5.5 평면투영 변환

5.7 등고선

종의 소리는 양각의 문양과 관련이 있어 유곽내 유두는 종의 소리를 조절하도록 사용되었다. 타종시 맞부딪히는 당좌의 위치에 따라 종소리가 다르기 때문에 정밀 음향분석을 위해서는 문양의 부분별 형상과 더불어 상대적인 높이값을 알 수 있는 분석자료가 요구되었다.

이를 위해 본 연구에서는 삼각형 구조의 TIN 모델을 베이스 맵으로 활용하여 문양에 대한 등고선도를 작성하였다. 그림 5.6은 MSM(MGE terrain modeler) 프로그램을 이용하여 비천상에 대한 1mm 등고선도를 작도한 결과로서, 문화재의 미술사 연구와 음향분석을 위한 기초자료로 제공할 수 있었다.



단위 : mm

그림 5.6 등고선도(비천상)

5.8 모델링

많은 양의 데이터 처리를 통한 모델링의 수행을 위해 GIS 시스템을 사용하였다. 모델링의 기법은 컴퓨터 그래픽 기술을 이용한 시각화를 통해 다분석을 돕는다. 모델링의 기법은 그리드 모델, 등고선도, 렌더링

으로 구분할 수 있다. 기존의 그리드모델 또는 등고선도로 3차원 모델링을 표현하였으나, 컴퓨터의 발달로 최근에는 렌더링에 의한 모델링을 수행한다. 그림 5.7과 그림 5.8는 실제 비취지는 신종의 질감을 살리기 위해 그림 파일로 저장한 신종의 색깔과 질감을 비천상과 당좌에 가하여 렌더링을 수행한 결과이다.



그림 5.7 모델링(비천상)

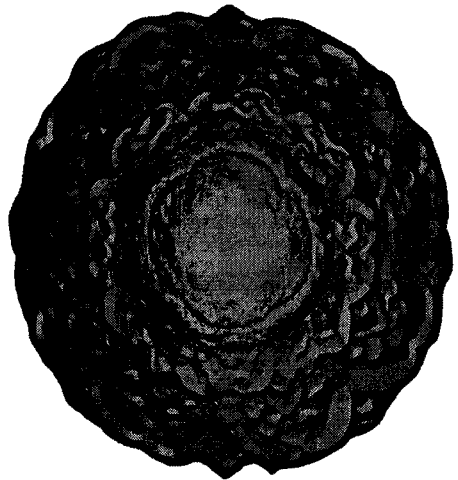


그림 5.8 모델링(당좌)

6. 결 론

1. 영상분석기법을 이용한 정밀 3차원 수치자료의 효율적인 획득과 분석체계는 다양한 형상의 기하학적 위치관계 및 정량적 분석을 가능하게 한다.
2. 영상분석에 의해 정밀수치자료를 획득하고 3차원 모델(TIN)을 구축하므로써, 단면, 면·체적, 문양, 형상 등의 공간분석을 보다 과학적으로 수행할 수 있었다.
3. 성덕대왕신종에 대한 정밀 기하학적 위치분석과 평면투영도, 3차원 투시도, 모델링 등의 형상분석과 시각분석을 수행하므로써, 범종에 관한 음향분석연구, 주조기법고찰 등에 활용 가능한 기초자료를 제공할 수 있었다.
4. 영상분석기법을 이용한 수치자료의 획득과 분석 체계는 공간적 분석이 요구되는 문화재에 대해 다양한 형상분석 및 조형미분석을 할 수 있었으므로, 향후 문화재의 보존복원에 그 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

1. 강준목, 윤희천, 배상호, “수치정보에 의한 문화재의 공간분석”, 한국측지학회, Vol.14, No.2, 1996.
2. 강준목, 서만철, 배상호, 이성순, “문화재 보존을 위한 수치자료 구축과 분석”, 한국지형공간정보학회, 제5권, 제2호, pp.55~63, 1997. 12.
3. “무령왕릉 발굴 보고서”, 문화공보부, 문화재, 관리국, 1973.
4. 배연성, “비측정용 카메라에 의한 원형구조물의 정밀측정에 관한 연구”, 충남대학교 석사학위논문, 1990.
5. “송산리 고분군의 현황과 보존대책”, 충청남도 공주시 공주대학교 기초과학연구소, 1997.
6. “신라의 신비”, 통도사 성보박물관, 1994.
7. 왕릉탐사를 위한 기초조사② 공주의 역사와 문화, 공주대학교 박물관 충청남도 공주시, 1995.
8. 유복모, 강인준, 정항식, 송인성, “사진측량에 의한 백제석탑의 조형미에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제5권, 제1호, 1985
9. 유복모, 최철순, 오이균, “사진측량에 의한 우리 나라 주요 석탑의 시대별 조형미 분석”, 한국측지학회지, 제10권, 제12호, pp.73-81, 1992.
10. 이진덕, “다중 근접사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석” 충남대학교 박사학위논문, 1992.
11. Youssef I. Abdel-Aziz, “Accuracy of the Normal Case of Close-Range Photogrammetry”, PE&RS, vol.48, No.2, pp.207-213, 1982.
12. Hottier. P, “Accuracy of Close-Range Analytical Restitution : Practical Experiment and prediction”, PE&RS, vol.42, No.3 pp.345-375, 1976.
13. Sarah Dennelt, Hans Muessig, “Archaeological Application for Close-Range Photogrammetry”, ACSM-ASP46th annual convention, technical paper, pp.335-341, 1980.
14. Anne Gisiger, Eben S. Cooper, Yew Yuan, W. Fredrick Limp, “Development and Implementation of a Rapid Low-Cost Photogrammetric Data Archival System for Artifact and Osteological Inventory”, National Center for Preservation Rechnology and Training Report, 1996
15. Pierre Grussenmeyer, Franck Perdrizet, “Archeological Photogrammetry with Small Format Cameras”, ISPRS, vol.31, part B5, pp.200-204, 1996
16. Pierre Grussenmeyer, Mathieu Koehi, “Architectural Photogrammetry with the Tiphon software towards Digital Documentation in the Field”, ISPRS, vol.32, part B5, pp.549-556, 1998
17. YEU Bock-Mo, KIM Won-Dae, KIM Yong Il, RYU Yeon, “Cultural Assets Preservation

강준목 · 배연성 · 배상호 · 이성순

Using Digital Photogrammetry Methods " ,ISPRS,vol.31,part B5,pp.610-615,1996