

한국종의 형상 및 합금성분 분석을 위한 제안

Suggestion for Shape Measurement and Alloy Element Analysis of Korean Bells

고선우

전주대학교 미디어정보학부

Sun-Woo Ko(godfriend@hanmail.net)

요약

종의 소리는 형상과 합금 특성에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 정확한 형상데이터 측정 방법과 합금성분 데이터를 획득하기 위한 방법의 개발은 종의 연구 뿐 아니라 체계적인 관리에도 매우 중요하다. 광삼각방식을 적용한 레이저스캐너로 정확도가 높은 종의 형상데이터 획득하기 위한 스캐닝 및 모델링 방법들을 제안하였으며 획득된 3차원 형상데이터를 기반으로 높이, 구경 등 두 점간의 거리 뿐 아니라 곡률, 체적, 두께 등 임의의 데이터를 획득할 수 있는 데이터 구축방법을 제시하였다. 합금성분데이터 분석에서는 기존의 시편 측정방법 대신에 비파괴 측정 방법을 제시함으로써 한국종의 손상 및 부분적인 데이터의 획득이라는 한계를 극복할 수 있도록 하였다. 제안된 방법에 따라 18점의 한국종에 대한 형상 및 합금성분 데이터를 수집하였으며 기존 측정치의 오류를 수정하였다.

■ 중심어 : | 한국종 | 레이저스캐닝 | 형상데이터 | 합금성분데이터 |

Abstract

It is well known that the sound characteristics of Korean bell depend on the shape and the alloy constituents. Development of the methods to acquire exact shape data and alloy constituents of the whole body of the bell is very important for the study and systematic management of Korean bells. The practical scanning and modeling methods to get shape data from optical triangulation laser scanners are proposed. The 3D shape data by the proposed methods can be the basis of diverse measurements such as curvature, volume, thickness and the distance between any two points. A nondestructive alloy constituents measuring method which can overcome the limitations of partial data collection and damages to Korean bells is also suggested to get the whole alloy characteristics. Following the developed methods, the data of the shapes and alloy constituents of 18 Korean bells are collected and the errors of existing measurement data for the shape have been corrected.

■ keyword : | Korean Bell | Laser Scanning | Shape Data | Alloying Constituent Data |

I. 서론

1. 한국종 개요

종이란 소리를 내는 금속제 기구로서 각종 행사, 중

교의식, 시간보도 또는 악기 등으로 사용되었다.

종은 신라시대에 불교의 중요 범구인 범종으로 사용되며 한국만의 독창적인 형식을 가지게 되었으며 한국종으로 별도 구분하여 칭하게 되었다.

* 본 연구는 전주대학교 스마트공간 문화기술공동연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

접수번호 : #101004-002

접수일자 : 2010년 10월 04일

심사완료일 : 2011년 04월 19일

교신저자 : 고선우, e-mail : godfriend@hanmail.net

종의 기본 기능이 소리를 내는 도구임을 감안할 때, 한국종의 정밀데이터란 소리의 특성을 반영하는 데이터를 구축하는 것이라 할 수 있다. 긴 여운과 청아한 한국종의 음향특성은 맥놀이 현상 때문이며 맥놀이는 기하학적 비대칭 형상, 합금성분, 종의 두께, 종의 울림통의 크기 등 여러 요인의 결과임이 알려져 있다[1-3].

한국종의 형상은 [그림 1]과 같은 항아리 모양의 종신과 한 마리의 용으로 표현된 용뉴, 용뉴 뒷부분의 음통, 상대, 하대, 연곽 및 연뢰 그리고 종복에 표현된 비천상과 당좌 등 화려한 장식문양으로 요약할 수 있다.

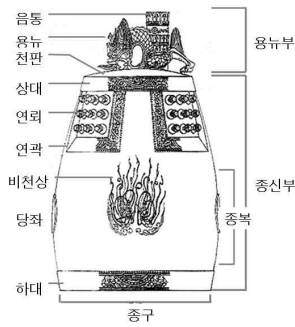


그림 1. 종의 형상과 명칭

2. 기존 구축 데이터의 문제점

문화재로 관리되고 있는 74점의 한국종 중 운천동동종 등 일부 종에 대해 3차원 형상데이터가 구축되었으나 일부 종에 국한되어 있고 대부분의 종은 높이와 직경 데이터만이 관리되고 있는 실정이다. 전체 종의 모양, 용뉴, 음통, 연곽, 연뢰 및 각부의 문양 등 종의 형상 특성을 규정할 수 있는 데이터는 체계적으로 관리되고 있지 않은 실정이다.

[표 1]은 74점의 한국종 중 합금성분을 연구한 9개 종의 합금성분분석 결과를 요약한 것이다[4], [5], [6]. 한국종에 대한 금속특성 연구가 제한적이었던 이유는 시편 확보에 따른 종의 훼손 때문이다. 상대적으로 많은 시료를 시험한 운천동동종도 종구에 편중된 5개 시료를 시험한 결과이며 나머지 종들은 1~2개 시료를 분석한 결과이다. 한국종 제작 방법이 통틀형과 조립식형 2가지가 존재함을 고려할 때 편중된 시료를 통해 획득된

정보를 종 전체로의 특성으로 확대해석은 무리가 따른다.

표 1. 한국종의 합금성분

종명	조성비(%)											
	CU	SN	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Sb	As	Fe	Ca	Al
상원사동종	83.87	13.26	2.12	0.32	0.23							
성덕대왕신종	82.03	13.23	0.27	0.01		0.07				0.52	0.03	0.11
선립원과종	80.2	12.2	-	2.2								
운천동동종	82.2	12.8	1.80	0.06	0.33	0.04	0.02	-	1.44	0.11		
실상사과종	76.07	17.76	0.34	0.21	0.15	0.05	-	0.05	0.15	0.48		
원주출토종	71.02	14.00	2.12	0.01	0.59	0.22		0.21	0.26	0.28		
운천동동종	85.75	10.00	3.13	-	0.60				0.40	0.15		
조선종	80.10	12.20	-	-								
가장고려범종	83.3	13.4	1.4	0.01	< 0.22	0.11	0.01	< 0.19	0.73	0.32		

II. 관련 측정기술

1. 레이저스캐너를 이용한 3차원 계측기술

문화재청은 종의 3차원 정밀계측에 종의 훼손의 방지를 위해 비접촉 3차원 레이저스캐너 또는 광학식 측정장비로 제한하고 있고 데이터 구축기준은 100 μ m 이하의 포인트 간격, 100,000 폴리곤 이상인 전체형상, 세부문양의 획득, 색상데이터의 확보이다[7][8].

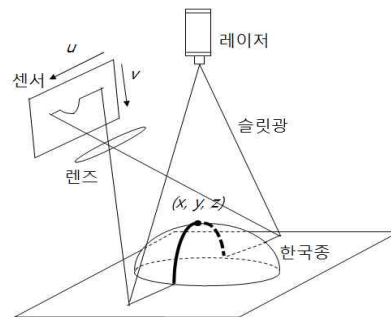


그림 2. 광삼각 측정방법 원리

다양한 광삼각 레이저 스캐너들이 요구기능을 충족하고 있어 문화재 데이터 구축에 활용되고 있다[9].

[그림 2]의 광삼각 측정 원리는 종 표면에 주사된 레이저 슬릿광을 카메라를 통해 포착한 (u, v) 좌표들과

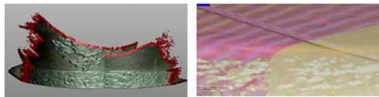
슬릿광과 카메라의 기하학적 관계를 이용해 3차원 좌표 (x, y, z) 들인 점군데이터를 얻는 것이다.

획득된 3차원 점군데이터들은 각 점군데이터를 기준 좌표로 일치시키는 정합과정을 거쳐 하나의 3차원 형상데이터가 구축되고 이를 활용하여 각종 치수를 추출하게 된다.

3차원형상데이터의 정확도에 영향을 미치는 많은 요인들이 [표 2]에 정리되어 있다[10-13]. 적절한 장비 선정으로 대처 가능한 요인도 있지만 환경요인, 한국종의 특성 요인 및 스캐닝 및 모델링 방법에 관련한 요인에 대해서는 적절한 대책이 필요하다. 또한 스캔거리와 정합순서, 스캔각도와 정합순서와 같이 스캔방법에 따라 후속 정합방법이 영향을 받는 복합요인에 대한 이해는 정확도 높은 측정데이터 확보에 매우 중요하다.

표 2. 광삼각 측정방식의 정확도 영향 요인

구분	정확도 영향 요인의 예
대상체	표면 색, 표면 반사율, 대상체 표면 복잡정도
장비특성	슬릿광 변위 크기, 레이저 Spot size
스캐닝	영역의 설정, 거리, 각도, 경로, 중첩구간의 설정
모델링	유효 데이터 영역, 정합 순서, 정합 기준점의 설정
측정환경	노이즈의 개입, 광원의 변화, 진동
치수 추출	측정 기준면의 설정, 활용 소프트웨어
복합요인	스캔거리와 정합순서, 스캔각도와 정합순서



(1) 노이즈와 정합오차 (2) 진동

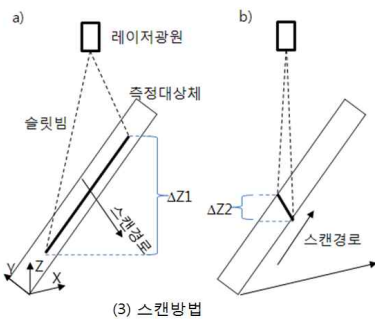


그림 3. 측정 데이터의 왜곡

[그림 3]은 [표 2]의 여러 요인 중 적절한 대응책의 마련이 되지 않았을 때 발생할 수 있는 노이즈에 의한 정합오차([그림 3]의 (1)), 스캔시 진동에 의해 중 표면의 데이터에 왜곡([그림 3]의 (2))의 예이다. [그림 3]의 (3)은 스캐닝 및 경로설계에서 한번에 얻어지는 점군데이터들의 z축 방향의 차이가 적도록 스캔하는 방법 및 스캔경로를 나타낸 것이다[13].

2. 비파괴 합금성분 분석기술

한국종에 대한 연구는 미술사적인 연구와 금속특성 분석을 위한 자연과학적 연구로 진행되어 왔다. 자연과학적 연구는 한국종의 보존관리 뿐 아니라 수리 및 복원에도 중요한 자료로 활용된다.

자연과학적 연구의 가장 기본적인 분야인 한국종의 합금성분 연구에 적용 가능한 비파괴 분석방법인 형광 X선분석법은 한국종에 X선을 조사해 2차적으로 발생하는 형광 X선을 이용해서 한국종을 구성하는 원소를 분석하는 방법이다[14].

표 3. 형광X-선분석 방법 적용시 고려사항

구분	고려사항
대상체	표면 오염, 두께 및 면적
장비특성	측정조건, 측정원소, 측정오차
측정	표준시편에 의한 보정, 측정위치, 측정각도

형광 X선 분석을 통해 정확한 측정치를 얻기 위해서는 측정원소의 범위, 측정오차 등을 고려한 장비선정뿐 아니라 [표 3]에 제시된 측정정확도에 영향을 미치는 여러 요인에 대한 적절한 취급 및 대처 방법이 선행되어야 한다. 한 예로 측정 위치의 오염물은 측정오차를 유발하는 주요 요인으로 알려져 있으며 측정시 조사되는 X선이 측정체와 수직일 때 정확한 측정이 가능하므로 알려져 있다[15].

3. 측정장비 및 측정대상

광삼각 측정방식의 측정 장비로 미놀타사의 Vivid 910레이저 스캐너를 사용하였다. 주요사양은 [표 4]와 같다.

표 4. Vivid910 주요사항

주요항목	사항(Tele 렌즈, Fine 모드)
scan 거리	0.6~1.2m
스캔 방식	Galvanometer mirror 방식
입력 영역	x: 111~463 mm, y:83~347 mm, z:40~500 mm
Accuracy	X : ±0.22 mm, Y : ±0.16 mm, Z : ±0.10 mm
Resolution	±0.008 mm
입력 가능 환경 광	500 lx이하

Vivid 910은 소형이며 이동 및 조작이 용이하다는 장점뿐 아니라 안정된 고품질의 데이터 확보가 가능해 문화재 데이터 구축에 가장 널리 사용되고 있는 장비이다. 스캔된 포인트 데이터들을 3차원 모델링하기 위한 소프트웨어는 RapidForm 2006을 사용하였다.

형광X선분석에는 국립문화재연구소의 검증을 거쳐 이동성이 좋고 정밀 분석이 가능한 Niton사의 XLt 898 장비를 사용하였다. 주요사항은 [표 5]와 같다.

표 5. XLt 898 주요사항

주요특징	사항
분석원리	형광 X선을 반도체 검출기(Si-Pin)로 분석
방사선 발생방법	방사선 발생장치(X-Ray Tube)
분석 가능 원소	Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Hf, Ta, Pt, Au, Pb, Bi, W, As, Br, Hg, 등
방사선 선질	방사선의 선질이 대단히 우수, 세밀한 분석

형상 및 합금성분을 파악하기 위해 [표 6]에 제시된 18점의 한국종을 선정하였다.

표 6. 측정 대상

구분	시대 구분 및 명칭		수량
	고려	조선	
보물	내소사고려동종, 오어사동종	서울보신각종, 보경사서암암동종, 통도사동종	5
지방 유형 및 자료	삼선암고려동종	홍무25년'장흥사명동종, 원효사소정만수사범종, 마곡사동종, 영은사정동범종, 향천사범종, 반룡사동종, 옥천사대종, 선원사동종, 선운사범종, 내장사조선동종, 개암사동종, 실상사동종.	13

III. 한국종 데이터 구축 설계

1. 형상데이터 구축설계

1.1 노이즈 차단 방법

각 점군데이터를 얻는 스캐닝 과정에서 개입된 노이즈는 정합오차의 주요 요인이므로 스캐닝시 노이즈를 차단시킬 수 있는 대책은 매우 중요하다.

노이즈가 발생하는 주요인들은 광원과 스캐닝 주변의 반사체이다[16]. Vivid910의 경우 스캔 환경의 조도가 500lx 이상이면 렌즈를 통해 입력되는 빛의 양이 증가하고 이 중 일부를 레이저 슬릿광으로 인식하여 노이즈가 발생한다. 스캔 작업장에 반사율이 높은 물체가 존재하는 경우도 같은 원인으로 노이즈가 발생할 수 있다.

직간접 빛에 의한 노이즈를 차단하는 방법은 스캔 작업장 주변의 반사체를 정리하고 [그림 4]와 같이 실내의 경우 소등, 실외의 경우 암막을 설치한 후 자연 채광과 같은 색온도(5,000⁰K ~ 5,500⁰K)를 가지는 인공조명 하에서 스캔하는 것이다. 이 방법은 스캔작업 동안 태양광량의 변화로 유발되는 2차 노이즈의 차단에도 효과적이다.



그림 4. 직간접 광원의 차단

1.2 요구정밀도와 점간 거리의 설정

스캔 결과 얻어지는 점군데이터는 [그림 5]와 같이 초점으로부터 멀어질수록 인접한 점들 간의 거리가 멀어지는 현상이 발생하여 초점에서 멀어지는 인접한 두 점 간의 거리에는 $l_{ij} < l_{jk} < l_{km}$ 관계가 성립한다. 구축하는 형상데이터의 요구 해상도가 l 이라고 할 때 측정 포인트의 간격을 l 로 설계하여 군집데이터를 확보하게 되면 인접한 측정 포인트 간의 간격이 l 보다 커지는 많은 포인트들이 존재하게 되어 스캐닝 작업성이 낮아진다.

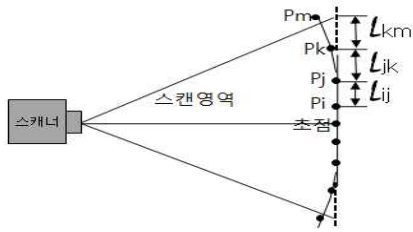


그림 5. 점군데이터의 특징

이러한 문제 해결방법은 점군데이터를 획득하기 위한 스캔설계 단계에서 인접한 측정 포인트 간의 간격을 l 보다 작은 값을 가지는 l_0 로 스캔하여 요구하는 해상도를 만족하는 많은 포인트들을 확보하는 것이다.

1.3 스캔거리 및 각도의 유지 방법

광삼각 측정방식 장비를 이용한 스캐닝과정에서 측정 포인트 간격은 측정각도와 측정거리에 큰 영향을 받는다.

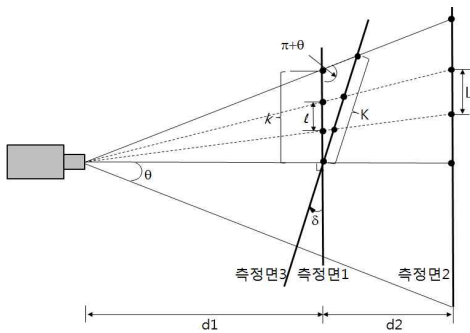


그림 6. 스캔 거리와 각도

한 번에 조사되는 레이저 포인트 수가 n 개이고 조사 각도가 2θ 인 스캐너를 사용한다고 하자. [그림 6]과 같이 요구 해상도 l 을 만족시키는 스캐너와 종간의 거리가 d_1 라고 할 때 측정면까지의 거리가 $d_1 + d_2$ 로 멀어지게 되면 측정면 2에 조사되는 포인트 수는 n 으로 동일하므로 측정면 2의 포인트 간격 L 은 $(d_1 + d_2) / d_1 \times l$ 이 되어 측정 해상도가 낮아지는 문제가 발생하게 된다.

측정면 1이 측정면 3과 같이 δ 만큼 기울게 되면 측정면 3은 포인트 간의 간격이 멀어지는 영역과 간격이 좁

아지는 두 영역으로 나누어진다. 측정면 3에서 포인트 간격이 좁아지는 영역에 대해서는 해상도 l 을 만족하지만 간격이 멀어지는 영역에서는 해상도가 낮아진다.

고품질의 점군데이터를 얻기 위해서는 90도로 스캔하는 정각스캐닝과 스캔 거리를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 정각으로 일정한 거리를 유지하는 방법 중 하나는 스캔영역에 수직으로 스캐너를 고정한 후 [그림 7]과 같이 턴테이블을 돌려가며 스캔하여 일정한 해상도를 보장받는 것이다.

크거나 무거워 턴테이블을 이용할 수 없거나 종각에서 종을 분리할 수 없는 경우에는 거리와 정각 유지에 특히 유의해야 한다.

[그림 8]의 (1)은 스캔 거리가 서로 다른 점군데이터들을 정합하여 오차가 발생한 예이고 [그림 8]의 (2)는 일정 거리와 정각 유지로 정합오차가 최소화된 예이다.



그림 7. 턴테이블을 이용한 스캔 거리 및 각도 유지

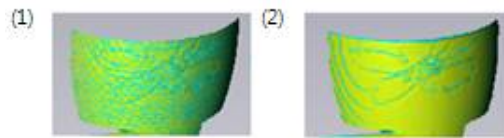


그림 8. 스캔 거리와 각도 차이에 따른 정합오차

1.4 스캔 경로 설계

스캔 경로를 설계하는 목적은 누락 없는 점군데이터의 확보, 정합오차의 최소화 및 작업성의 향상에 있다.

세팅된 스캐너의 위치가 변경되면 [그림 6]을 통해 설명한 오차방지를 위해 매 스캐닝마다 일정 거리 및 정각 확보를 위한 시간과 노력이 소요되게 된다.

턴테이블 이용의 경우, 스캐너를 고정 시킨 후 턴테이블을 회전시키는 것만으로 일정한 거리와 정각이 유지된 인접 점군데이터를 순차적으로 확보할 수 있다.

[그림 9]의 (1)과 같이 턴테이블 회전으로 정해지는 스캔경로로 스캔을 진행하고 360도 스캔이 완결되면 스캐너의 높이를 조정하여 인접한 영역의 점군데이터를 확보한다. [그림 9]의 (3) 용뉴부와 같이 복잡한 형상을 가진 부분은 정각을 유지한 상태에서 턴테이블의 회전으로 점군데이터를 최대한 확보하고 누락 부위에 대한 추가 스캐닝에서는 거리와 정각에 유의하며 스캐닝해야 한다.

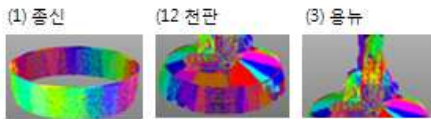


그림 9. 스캔 경로와 정합

1.5 유효데이터 구간의 파악

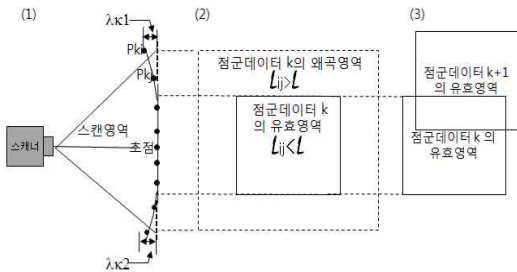


그림 10. 점군데이터의 유효데이터구간과 정합

스캔을 통해 얻은 점군데이터는 [그림 10]의 (1)과 같이 초점에서 멀어질수록 인접한 점들 간의 거리가 멀어지는 현상 뿐 아니라 스캔영역의 끝 부분에서는 데이터 z좌표 값이 실제 값보다 짧게 측정되는 들뜸현상이 나타난다.

[그림 11]의 (1)은 왜곡구간을 제거하지 않은 정합으로 발생한 정합오차를 나타내고 있다. 들뜸현상이 존재하는 데이터 영역을 연속적으로 정합하면 [그림 11]의 (2)와 같이 오차 누적으로 실제 형상보다 내부 쪽으로 말림현상이 나타나 최종 정합에서 마지막 두 점군데이터를 일치시킬 수 없는 문제가 발생하게 된다.

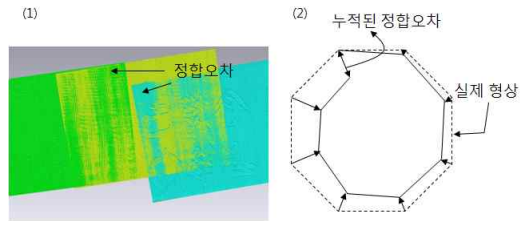


그림 11. 왜곡구간에 의한 정합오차

이러한 문제의 해결방법은 요구 해상도를 l 이라할 때, 인접한 두 포인트 P_i 와 P_j 간의 거리 l_{ij} 가 $l_{ij} < l$ 을 만족하는가에 따라 [그림 10]의 (2)와 같이 유효데이터 영역($l_{ij} < l$)과 왜곡데이터영역($l_{ij} > l$)으로 구분한 후 [그림 10]의 (3)과 같이 왜곡데이터영역을 제거한 후 두 점군데이터를 정합하는 것이다.

1.6 왜곡된 점군데이터의 정합

설계된 거리와 정각을 유지한 스캐닝이 불가능한 영역이 존재하여 왜곡을 감수한 점군데이터를 얻어야 하는 경우가 있다. 즉, 획득된 점군데이터는 (1) 설계거리와 정각이 확보된 점군데이터 (2) 설계거리와 정각이 확보되지 않아 왜곡된 점군데이터 2종류가 존재하게 된다.

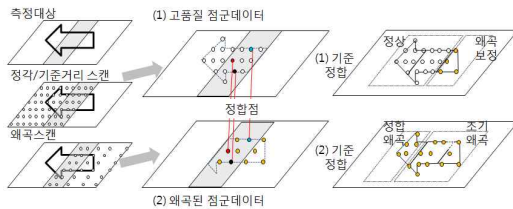


그림 12. 정합방법에 따른 데이터 변화

[그림 12]에서 (1)의 방법에 따라 획득된 점군데이터를 점군데이터 1, (2)의 방법에 따라 획득된 데이터를 점군데이터 2, 그림자 영역을 중첩구간의 데이터라 하자.

[그림 12]에서 점군데이터 1의 모든 포인트들을 점군데이터 2의 좌표를 기준으로 정합하게 되면 고품질 점군데이터 1의 모든 포인트들이 왜곡된 점군데이터 2를 기준으로 변환하게 되어 정합왜곡이 발생한다. 따라서

이러한 경우는 점군데이터 1을 기준으로 점군데이터 2를 정합하여 왜곡을 최소화하여야 한다.

Rapidform 2006의 경우 2번째 지정된 점군데이터가 기준 점군데이터가 되도록 설정되어 있다.

2. 합금성분 분석 설계

2.1 오염의 제거

Niton사의 XLt 898 장비를 이용한 형광X선분석에서 합금특성의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 측정 표면의 오염이다. 데이터 구축 대상인 18개 중의 오염 현황은 [표 7]과 같이 먼지, 흙 및 조류분비물로 확인되었다.

표 7. 대상 종별 오염 현황

구분	증명
먼지	서울보신각종, 내소사고려동종, 마곡사동종, 옥천사대종, 선운사범종, 실상사동종
흙	삼선암고려동종
조류 분비물	서울보신각종



그림 13. 정밀 측정을 위한 오염의 제거

먼지와 흙에 대한 오염원 제거 방법으로는 [그림 13]의 (1)과 같은 에어건을 사용하거나 조류분비물과 같이 오염원 제거가 쉽지 않으면 전문가에 의한 오염원 제거 후 측정하도록 한다.

2.2 측정점의 설계와 측정

한국종의 합금성분 파악은 시대별 주조기술 및 종 제작기술의 연구 등에 매우 중요하다.

종의 각 부위의 합금성분을 파악하기 위해 [그림 14]와 같이 높이와 방향에 따라 측정점을 설계하여 종 각

부위의 합금성분을 파악할 수 있도록 설계하였다. 높이는 용뉴부, 종신의 상단, 중단, 하단 4개의 구간으로 구분하였고 종의 방향을 8개 방향으로 구분하여 종신부에서 24 측정점과 용뉴 및 천판에서 3개 측정점을 정하여 각 종마다 27개 측정점을 선정하였다.

측정장비의 성능유지 방법은 [그림 15]의 성분 1·1/4CR, 1/2MO의 시험편을 이용해 교정하는 것이다. X선이 측정체에 수직으로 조사될 때 측정성능이 가장 우수하므로 측정시 X선을 수직으로 조사하여 측정한다.

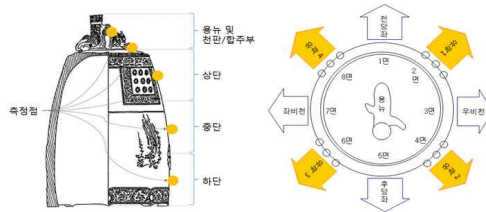


그림 14. 높이별 방향별 측정점



그림 15. 장비교정 시험편과 직각 측정

IV. 형상 측정 및 합금성분 분석

1. 형상 측정

1.1 형상데이터 구축항목

종신의 길이가 675mm라고 알려져 있는 진낙수정출토고려범종을 종의 좌측면과 우측면에서 측정하여 보면 종신길이는 각각 673mm, 676mm이다[17][18]. 종신의 길이는 얼마인가? 이런 문제는 왜 발생하는가?

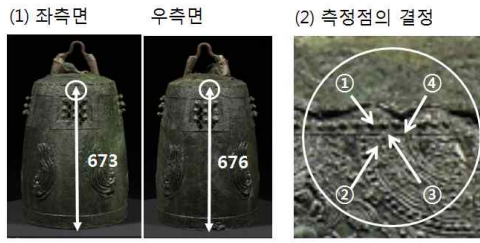


그림 16. 종신 길이 측정의 기준점 설정

측정오차의 가능성을 제외하더라도 (1) 종은 비대칭으로 [그림 16]의 (1)과 같이 각 방향의 치수가 모두 다를 수 있고 (2) 한 방향에서의 측정점도 [그림 16]의 (2)와 같이 명확한 기준이 없으면 측정자마다 다를 수 있다.

한국종의 형상데이터는 [표 8]과 같이 측정점을 정의할 수 있는지 여부와 필요한 측정 횟수에 따라 기본형상과 자유형상으로 구분하고 각 형상의 측정치를 기본형상데이터와 자유형상데이터로 정의한다.

표 8. 측정대상 및 측정치의 용어정의

구분	상세 내용			
형상	기본형상	측정점의 정의가 가능하고 유한개의 측정점으로 형상모사가 가능한 측정대상		
	자유형상	측정점의 정의가 어렵고 형상모사를 위해서는 무한횟수의 측정이 요구되는 측정대상		
데이터	기본형상 데이터	기본형상의 측정치	높이	
			종신	
			종구	외경, 내경
			두께	높이별, 방향별
			단면	높이별, 방향별
	기타			
	자유형상 데이터	자유형상의 측정치	용뉴	
			음통	
			문양	상대, 하대, 연곽, 연뢰, 비천, 당좌
			기타	
명문				
기타				

종의 높이, 종구의 직경, 종신길이, 두께, 단면은 기본형상데이터에 해당하고 용뉴, 음통 및 각부에 나타난 문양은 자유형상데이터에 해당한다.

자유형상데이터는 측정자의 관심에 따라 측정점이

달라 일반적인 치수표현 방법으로 표현할 수 없다는 한계가 있지만 3차원 형상데이터는 매우 조밀하게 측정된 3차원 좌표데이터의 집합이고 측정자가 관심이 있는 영역, 구간 등 자유형상데이터에 대한 치수 및 정보를 추출할 수 있는 기반데이터가 된다. 즉, 종에 대한 수치데이터를 기존의 종의 높이, 종구의 직경에서 다양한 기본형상데이터로 확대할 수 있을 뿐 아니라 자유형상데이터까지도 확대할 수 있어 한국종이 가지는 미학적 특성을 수치데이터로 관리할 수 있게 하는 장점이 있다.

1.2 기본형상데이터의 측정

일반적으로 물체의 높이란 “수평바닥면에서 최고점까지의 길이”로 정의된다. 본 연구의 치수 측정은 3차원 형상데이터를 이용한 측정이라는 특징이 있지만 역시 기준평면의 정의가 있어야 한다. 기준평면의 개념을 포함한 각 기본형상데이터가 [표 9]에 정의되어 있다.

표 9. 기본형상데이터의 정의

		정의
높이		수평정렬된 기준평면과 수평이동한 기준평면이 종과 접하는 점까지의 수직거리
종구	외경	종구 바닥면 점군데이터를 수평정렬된 기준평면에 수직으로 내린 점군데이터의 외부점군데이터로 피팅한 원의 직경
	내경	종구 바닥면 점군데이터를 수평정렬된 기준평면에 수직으로 내린 점군데이터의 내부점군데이터로 피팅한 원의 직경
종신		수평정렬된 기준평면과 수평이동한 기준평면이 접하는 천관 고점까지 수직거리
두께		측정점과 측정점의 접선에 수직인 직선이 만나는 종 내점까지의 거리
단면	수평	수평이동한 기준평면과 만나는 종단면 형상
	수직	기준평면과 수직하는 평면과 만나는 종단면 형상

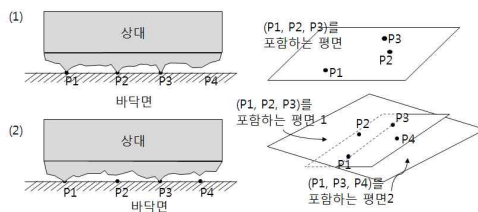


그림 17. 기준평면

[그림 17]의 (1)과 같이 종을 수평바닥에 밀착시켰을

때 종구와 바닥면이 만나는 3점 $P_i, i=1, 2, 3$ 을 포함하는 평면을 기준평면이라고 정의하고 기준평면과 종을 절대좌표로 이동한 상태를 수평정렬 되었다고 정의한다.

[그림 17]의 (2)와 같이 종을 수평바닥에 밀착시켰을 때 수평바닥면과 종구의 상시 접점이 P_1, P_3 2개만 존재하고 종을 한쪽으로 기울였을 때 P_2 와 P_4 가 교대로 접하는 경우 P_1, P_2, P_3 을 포함하는 평면 1과 P_1, P_3, P_4 를 포함하는 평면 2가 존재하게 된다. P_1, P_3 을 포함하고 두 개의 평면과 거리가 최소인 평면을 기준평면으로 정의한다.

기준평면이 정의되면 [그림 18]과 같이 기준평면을 측정하고자하는 측정점까지 수평이동하면서 특정 기본형상에 대한 치수를 측정할 수 있다.

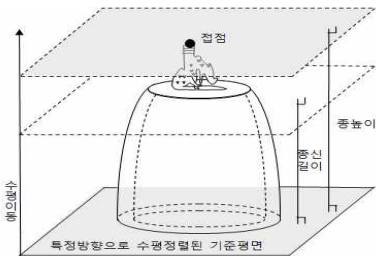


그림 18. 기준평면을 활용한 길이 측정



그림 19. 기준평면 및 수평정렬 방법

3차원 형상데이터를 이용하여 기준평면을 찾아내는 방법은 [그림 19]와 같다. 이러한 방법으로 종의 높이, 종심길이의 높이 관련 치수 뿐 아니라 종의 높이에 관련된 모든 거리를 측정할 수 있다.

종구의 외경은 [그림 20]과 같이 수평정렬된 종바닥면 점군데이터의 각 점들을 기준평면에 수직으로 내린

대응점들의 최고 외곽 데이터만을 이용하여 피팅한 원의 직경이다. 내경도 같은 방법으로 추출한다.

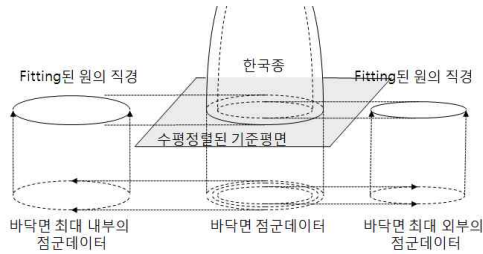


그림 20. 종의 내경과 외경의 추출

종두께는 [그림 21]에서 측정점 P 를 지나는 접선에 수직인 직선방향으로 종의 내면의 점 Q 까지의 거리 \overline{PQ} 로 측정한다.

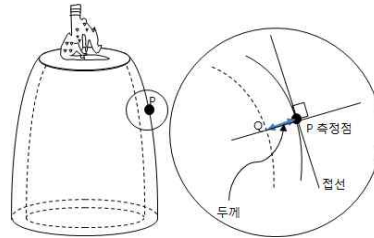


그림 21. 두께의 측정

표 10. 3차원 형상데이터 기반 기본형상데이터의 비교

명칭	측정 항목	길이(cm)		차이 (①-②)	오차율
		3D (①)	기존 (②)		
서울보신각종	높이	367.1	318	49.1	13.38
	외경	223.6	228	-4.4	1.97
보경사서운암동종	높이	55.2	54.3	0.9	1.63
	외경	41.6	42	-0.4	0.96
통도사동종	높이	147.7	144	3.7	2.51
	외경	107.4	107	0.4	0.37
내소사고려동종	높이	104.8	103	1.8	1.72
	외경	67.2	67	0.2	0.30
오어사동종	높이	92.3	96	-3.7	4.01
	외경	56.6	56.5	0.1	0.18
'홍무25년' 장흥사명동종	높이	62.3	60	2.3	3.69
	외경	50	49.5	0.5	1.00
원효사소장만수사범종	높이	86	86	0	-
	외경	64.2	63	1.2	1.87
마곡사동종	높이	105	107	-2	1.90
	외경	75.4	-	-	-

영은사청동범종	높이	73.6	72	1.6	2.17
	외경	46.4	46.5	-0.1	0.22
향천사범종	높이	98.6	-	-	-
	외경	64.8	-	-	-
반룡사동종	높이	49.9	50	-0.1	0.20
	외경	34.8	-	-	-
삼선암고려동종	높이	64.1	65	-0.9	1.40
	외경	37.6	38	-0.4	1.06
옥천사대종	높이	111.9	110	1.9	1.70
	외경	82.4	82.5	-0.1	0.12
선원사동종	높이	65.6	66	-0.4	0.61
	외경	47	47	0	-
선운사범종	높이	126.2	124	-2.2	1.74
	외경	92.8	93	-0.2	0.22
내장사조선동종	높이	72.5	80	-7.5	10.34
	외경	46.6	50	-3.4	7.30
개암사동종	높이	86.3	89	-2.7	3.13
	외경	61.8	62	-0.2	0.32
실상사동종	높이	122.8	123	-0.2	0.16
	외경	89.8	83	6.8	7.57

제안 방법을 이용하여 구축한 18개 종의 기본형상데이터 중 기존 데이터와 비교 가능한 데이터를 [표 10]에 제시하였다. 기존 치수중 보신각종의 높이, 오어사종의 높이, 내장사조선동종의 높이 및 외경, 실상사종의 외경에서 큰 차이를 확인할 수 있었다.

1.3 자유형상데이터의 측정

정합이 완료된 3차원 형상데이터는 매우 조밀하게 분포된 점들로 이루어진 점군데이터로 인접한 점군데이터를 연결하는 다각형으로 구성된 폴리곤으로 변환이 가능하다. [그림 22]는 폴리곤으로 변환된 3차원 형상데이터이다. 측정점의 간격에 따라 [그림 22]의 (3) 또는 (4)와 같이 다른 해상도의 자유형상데이터를 얻게 된다.

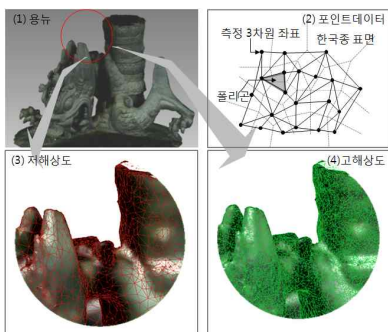


그림 22. 폴리곤 자유형상데이터

[그림 23]은 자유형상인 용뉴의 측정데이터로, RapidForm 2006을 이용하여 3차원 형상데이터로부터 (1)각종 길이, (2)곡률반경, (3)용뉴의 표면적(13,215.81 cm^2)과 체적(17,092.64 cm^3)을 계산한 예이다.

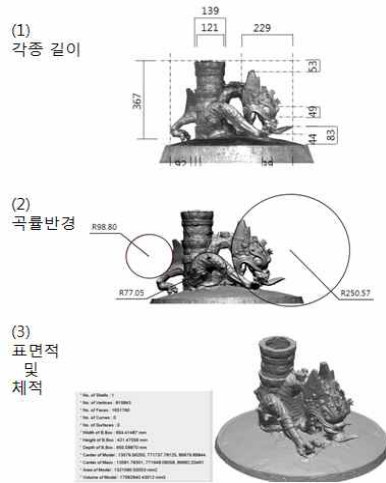


그림 23. 용뉴의 각종 데이터 측정 예

2. 합금성분 분석

18개 종에 대한 주요 원소 함량을 요약한 결과는 [표 11]과 같다.

표 11. 각 종의 합금성분에 따른 특성

명칭	주요 성분 함유비율(%)			
	구리	주석	납	철
서울보신각종	76.01	21.88	0.29	1.40
서운암동종	69.57	10.58	11.58	4.42
통도사동종	67.24	10.91	11.29	7.14
내소사고려동종	55.09	12.96	27.05	2.10
오어사동종	37.94	27.58	19.31	2.09
장흥사명동종	64.45	13.39	18.60	2.83
만수사범종	70.98	9.92	15.85	2.48
마곡사동종	68.77	12.11	15.40	2.86
영은사청동범종	72.57	12.80	10.87	2.98
향천사범종	69.36	10.98	16.09	2.41
반룡사동종	76.06	8.07	9.80	2.62
삼선암고려동종	48.87	45.34	2.28	2.34
옥천사대종	78.50	10.04	5.26	3.09
선원사동종	72.49	13.39	12.24	1.22
선운사범종	81.97	7.46	8.46	1.51
내장사조선동종	62.80	12.09	18.41	2.25
개암사동종	78.64	9.18	9.99	1.30
실상사동종	60.56	13.76	15.18	6.41

V. 결론

본 연구에서는 한국종의 소리특성에 큰 영향을 미치는 형상과 합금성분에 대한 분석 방법을 제시하였다.

형상특성은 광삼각방식 레이저스캐너를 이용하여 3차원 형상데이터를 구축하고 이로부터 각종 수치데이터를 추출하는 과정에서 (1) 스캐닝 및 모델링 단계에서의 정확도 유지 방법 (2) 3차원 형상데이터로부터 기본형상데이터 및 자유형상데이터를 구축하는 방법을 제시하여 한국종의 특징을 체계적이고 수치데이터에 의해 관리할 수 있도록 하였다.

합금성분 분석은 비파괴방식을 이용하여 종 전체의 합금성분 특성을 파악하기 위한 방법을 제시하였다.

제시된 방법에 따라 한국종 18점에 대한 3차원 형상데이터와 합금성분데이터를 구축하여 기존 측정데이터가 없던 종에 대해서는 한국종의 표준측정치로 등록하였으며 기존 측정치의 오류를 수정하였다.

또한 18개 한국종에 대한 3차원 형상데이터를 구축함으로써 각 분야의 연구 자료로써 활용할 수 있도록 하였을 뿐 아니라 해당 종이 훼손되거나 수리가 필요한 경우 이를 기반으로 정밀복원이 가능한 기반을 마련하였다.

18점의 한국종의 종 전체에 대한 합금특성데이터를 구축함으로써 시대별, 조성자별 각 종의 특징을 보다 심도 있게 연구할 수 있는 기반을 마련하였다.

참 고 문 헌

- [1] 정석주, 공창덕, 염영하, “중형셀의 두께변화 및 비대칭효과에 따른 진동 모드 해석에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제10권 제3호, pp.383-391, 1986.
- [2] 이장무, 염영하, “중형구조의 진동특성에 관한 연구”, 한국범종연구회지, 범종 제3권, pp.31-38, 1980.
- [3] 이장무, 전성하, 김석현, 염영하, “한국종의 진동 특성에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제13권 제3호, pp.397-403, 1989.
- [4] 염영하, “신라시대의 범종연구”, 대한금속학회지, 제22권, 제6호, pp.567-570, 1984.
- [5] 김명성, “청주 운천동 출토 동종 자문회의”, 국립청주박물관, 2005.
- [6] 맹선재, “신라범종에 대한 금상학적 연구”, 금속학회지, 제13권 제4호, pp.454-457, 1975.
- [7] 문화재 기록화사업 표준데이터 제작지침, 문화재청, 2010.
- [8] “2007년 중요동산문화재(범종) 기록화 사업 과업 수행내용서”, 문화재청, 2007.
- [9] 권용무, “3차원 디지털 문화재 기술의 최근 동향”, 방송공학지, 제6권, pp.88-97, 2001.
- [10] D. MacKinnon, V. Aitken, and F. Blais, “Review of Measurement Quality Metrics for Range Imaging,” Journal of Electronic Imaging, Vol.17, 2008.
- [11] W. Boehler and A. Marbs, “3D Scanning Instruments,” Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, 2002.
- [12] B. L. Curless, *New Methods for Surface Reconstruction from Range Images*, Ph. D. Dissertation, Stanford University, 1997.
- [13] 홍성균, 김연술, 이회관, 김형찬, 양균의, “레이저 스캐너를 이용한 측정 및 레지스트레이션시 오차 감소에 관한 연구”, 한국정밀공학학회지, 제20권, 4호, pp.197-204, 2003.
- [14] 서정호, “고려시대 청동제은입사대향완의 신례”, 문화사학, 제26호, pp.121-147, 2006.
- [15] 정광용, *문화재 과학적 보존*, 문화재청, 1993.
- [16] 최원호, *Vivid910의 최적 스캔 환경 구축*, 다인디지컬처, 2007.
- [17] 조유전 외 15인, *고려범종*, 국립문화재연구소, 2000.

저 자 소 개

고 선 우(Sun-Woo Ko)

정회원



- 1985년 8월 : 고려대학교 산업공학과(공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 산업공학과(공학석사)
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 산업공학과(공학박사)

▪ 2005년 3월 ~ 현재 : 전주대학교 미디어정보학부 교수

<관심분야> : 문화원형복원, 3D Scanning