

3D계측장비를 이용한 법의 · 과학적 활용 (I)

- 인체골격의 영상보존과 사건 현장에 대한 감정기법 개발 -

정낙은¹ · 구형남¹ · 강현무¹
이상섭¹ · 박혜진² · 김형중²
이경락² · 정익조² · 김대열²
김달원² · 임상범² · 이새보미²
한한수³ · 이 중³ · 김준석³
문기웅³ · 김병현³ · 조건우⁴
김진표⁵ · 김의수⁵ · 김성호⁶
서인수⁶ · 박대균⁷ · 정재광⁷
김이석⁸ · 최승규⁸ · 이우영⁹
이 훈¹⁰ · 김채근¹⁰ · 이인수¹¹
강 훈¹² · 김원섭¹² · 김동규¹²
김동수¹³ · 최진형¹³ · 박동일¹⁴
최홍순¹⁴ · 김시로¹⁵ · 허용석¹⁶

¹국립과학수사연구원
집단사망자관리단

²국립과학수사연구원 법의학과

³국립과학수사연구원 문서영상과

⁴국립과학수사연구원 교통공학과

⁵국립과학수사연구원 물리분석과

⁶국립과학수사연구원 중부분원
법의학과

⁷순천향대학교 의과대학
해부학교실

⁸이화여자대학교 의과대학
해부학교실

⁹가톨릭대학교 의과대학
응용해부연구소

¹⁰항공철도사고 조사위원회

¹¹대한지적공사 지적연구원

¹²오엠에이(주)

¹³디앤에스(주)

¹⁴드림티앤에스(주)

¹⁵위프코(주)

¹⁶엠비에스피(주)

접 수 : 2012년 4월 19일

게재승인 : 2012년 5월 10일

책임저자 : 정낙은

(158-707) 서울시 양천구 신원동 지양로

139 국립과학수사연구원 법의학부 법의학과

전화 : (02) 2600-4800

FAX : (02) 2600-4626

E-mail : nechung@korea.kr

Application of 3D Surface Scanners in Forensic Science and Medicine (I)

- Digital Storage of Human Skeletons and Development of Appraisal Methods for Incident Scenes -

Nak-Eun Chung¹, Hyung-Nam Koo¹, Hyun-Moo Kang¹, Sang-Seob Lee¹,
Hye-Jin Park², Hyung-Joong Kim², Kyung-Rak Lee², Ik-Jo Chung²,
Dae-Yeol Kim², Dal-Won Kim², Sang-Beom Lim², Saebomi Lee², Han-Soo Han³,
Jung Lee³, Jun-Suk Kim³, Ki-Woong Moon³, Byong-Hyun Kim³, Kyun-Woo Cho⁴,
Jin-Pyeo Kim⁵, Yeo-Soo Kim⁵, Sung-Ho Kim⁶, In-Soo Seo⁶, Dae-Kyun Park⁷,
Jae-Kwang Chung⁷, Yi-Suk Kim⁸, Seong-Kyu Choi⁸, U-Young Lee⁹, Hoon Lee¹⁰,
Chae-Keun Kim¹⁰, In-Soo Lee¹¹, Hoon Kang¹², Won-Seob Kim¹², Dong-Kyu Kim¹²,
Dong-Soo Kim¹³, Hyeong-Jin Choi¹³, Dong-Il Park¹⁴, Hong-Soon Choi¹⁴,
Si-Ro Kim¹⁵, Yong-Seok Heo¹⁶

¹Korea Disaster Victim Identification, National Forensic Service, Seoul, Korea

²Division of Forensic Medicine, National Forensic Service, Seoul, Korea

³Division of Questioned Document, National Forensic Service, Seoul, Korea

⁴Division of Traffic Engineering, National Forensic Service, Seoul, Korea

⁵Division of Physical Analysis, National Forensic Service, Seoul, Korea

⁶Division of Forensic Medicine, the Central District Office of National Forensic Service,
Daejeon, Korea

⁷Department of Anatomy, College of Medicine, Soonchunhyang University, Cheonan, Korea

⁸Department of Anatomy, Ewha Womans University School of Medicine, Seoul, Korea

⁹Department of Anatomy/Catholic Institute for Applied Anatomy, College of Medicine, Catholic
University, Seoul, Korea

¹⁰Aviation and Railway Accident Investigation Board, Seoul, Korea

¹¹Cadastral Research Institute of Korea Cadastral Survey Corporation, Seoul, Korea

¹²Opto Mechanical Associate Co., Daejeon, Korea

¹³Dimension & Solution Co., Daejeon, Korea

¹⁴Dream Technology & Solution Co., Seongnam, Korea

¹⁵Wipco Co., Seongnam, Korea

¹⁶Multimedia Business & System Provider Co. Seoul, Korea

The aim of this project was to use 3D scanning data collected at incident scenes and various evidence to 1) develop surveying methods based on 3D data consisting of overall and detailed scene evidence, captured by long-range and micro-scanner, which can be shared by personnel working in different fields such as forensic medicine, video analysis, physical analysis, traffic engineering, and fire investigation; 2) create digital storage for human skeletons and set the foundation for virtual anthropology; and 3) improve the credibility of 3D evidence by virtual remodeling and simulation of incident scenes and evidence to provide a basis for advanced and high-tech scientific investigation.

Two complete skeletons of male and female were scanned using 3D micro-scan-

ner. Each bone was successfully reproduced and assembled in virtual space. In addition, recreating evidence scheduled for invasive examination by creating RP (rapid prototype) was possible. These outcomes could play an important role in setting up the new field of virtual anthropology.

Case-specific surveying methods were developed through analysis of 3D scanning data collected by long-range surface scanners at the scenes of vehicular accidents, falls, shootings, and violent crimes. A technique and recording method was also developed for detecting forged seals by micro-scanning the pressure exerted on the seal.

Appraisal methods developed in this project could be utilized to secure 3D data of human skeletal remains and incident scenes, create a standard for application, and increase objectivity, reproducibility, and accuracy of scanning methods. We plan to develop case-specific 3D data analysis techniques to improve the credibility of analysis at the NFS and to establish a 3D data collection and analysis team.

Key words : 3D scanner, modeling, simulation, virtual anthropology, rapid prototype

서 론

사건현장에서 각종 증거자료를 확보하고 3차원 영상을 이용하여 과정을 객관화하고 표준화함으로써 감정기법의 재현도 및 정확도를 높이고 대외적인 신뢰도를 향상시키며, 각종 범죄 및 재난·재해에서 첨단과학수사의 기틀을 마련하고, 국민 참여재판, 공판중심주의 증거력 확보, 법률시장의 개방화 등과 같은 변화하는 환경에 효과적으로 대응하기 위해 3D 영상분석 방법의 도입이 필요하다. 수치사진계측(digital photogrammetry)은 전산기술의 발달과 더불어 그 적용범위를 넓혀가고 있으며,¹⁻³⁾ 특히 3차원 스캐너의 정밀도가 향상되고 스캔속도가 매우 빨라짐에 따라 범죄수사 분야에도 활용이 증가되고 있다. 교통사고 분석분야에서는 사고현장을 3차원 영상화하고 파손된 차량을 스캔하여 역학적 해석의 기초데이터로 이용되고 있으며,⁴⁾ 폭발 현장이나 건물, 다리 등의 붕괴사고에서는 사고 전후의 3차원 데이터를 이용하여 폭발, 붕괴 과정 등에 원인에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 법의학분야에서 자동차와 인체 상체의 비교,⁵⁾ 또는 피부, 부드러운 조직의 상흔 뿐 아니라 뼈의 부상과 그것을 유발했을 가능성이 있는 도구와의 비교시험에 사용하고 있고,⁶⁻⁸⁾ 영상분석분야에서는 CCTV에 촬영된 인물의 신장계측,⁹⁾ CCTV에 촬영된 자동차의 속도추정, 2차원 얼굴과 3차원 얼굴 비교^{10,11)} 등 여러 분야에서 3차원 영상분석 기법이 사용되고 있다. 오래 경과된 매장지의 발굴과정이나 야외에 방치되어 신원을 확인할 수 없는 백골화 시신에 대한 감정과정은 증거물에 대한 계측은 물론 검사 후 물리적으로 복원이 불가능한 파괴검사를 통하여 신원확인을 위한 각종검사가 필수적인데, 증거물의 보전을 위해서는 파괴검사 전 3D 영상 분석기법을 활용하여 디지털 영상증거물로 복원하는 과정이 필요하다.¹²⁾

연구자들은 첨단 3차원 계측 장비를 사용하여 1) 각종 사건·사고에서 고품질의 현장 증거 자료 및 백골화된 인체증거물 대한 3D 영상을 확보하고, 2) 법의인류학적 분석 방법을 고

려한 3D 영상 인체증거물을 복원하여 가상인류학(virtual anthropology)이라는 신 개념 분야에 대한 기초 작업을 완성할 뿐 아니라 3) 사건현장의 영상 증거물에 대한 3차원 재구성 및 시뮬레이션을 통해서 법적증거물의 신뢰성을 향상시킴으로써 첨단 과학 수사에 기틀을 마련하고자 한다.

연구개요 및 과정

이번 연구과정은 사건 현장의 증거자료의 확보와 3차원 영상복원을 이용하여 새로운 감정기법을 도입하고, 백골화 시신 및 표준 인체골격에 대한 3D 계측 및 분석을 시도하여 첨단 과학수사의 기틀을 마련하고자 계획하였다. 연구팀은 국립과학수사연구원(이하 국과수라 칭함)의 관련부서(집단사망사물관리단, 법의학과, 문서영상과, 교통공학과, 물리분석과, 중부분원 등)와 유관기관(항공철도사고 조사위원회, 대한지적공사 지적연구원) 3개 의과대학(순천향대학교 및 이화대학의 의과대학 해부학교실, 카톨릭 의과대학 응용해부학 연구소) 및 유관 기업(Opto Mechanical Associate, Dimension & Solution, Dream T&S, Wipco, Multimedia Business & System Provider)의 기술 전문가들이 공동으로 참여하였으며, 2010년도 제1년차 연구과정은 1) 인체골격의 영상보존 및 2) 사건 현장 및 증거물에 대한 감정기법 개발의 2부분으로 나뉘어 진행되었다.

1. 인체골격의 영상보존

인체골격의 3차원 스캔 자료 확보하기 위해 GOM사의 ATOS II 마이크로스캐너를 사용하여 인체골격을 촬영한 후, 확보된 3D 스캔 자료를 이용하여 인체골격에 대한 3차원 모델을 제작하고, 골격을 독립개체로 추출하여 일부 골격에 대한 쾌속조형물(rapid prototype)을 제작하고, 인체 골격에 대한 계측항목을 선정하여 3차원 계측과 실제 계측 값의 차이에 대한 예비조사를 시행하였다.

진행과정은 1) 성인 남, 녀 골격을 준비하고, 2) 골격에 예비적인 코딩을 부여하여 분류하고, 3) ATOS II을 이용하여 전신 골격을 스캐닝하여 모델링하고, 4) 예비 코딩의 문제점을 수정하여 새로운 코딩 시스템을 도입하고 골격 파일을 재분류한 후, 골격 파일의 배열을 시도하였는데, 예비 시도 후에, 여러 차례의 조정을 거쳐 최종적인 전신골격의 배열을 확정하였다. 5) 골격 및 해당 골격의 영상 파일에 대하여 수기 및 디지털 계측을 시도하였고, 6) 골격 재구성 과정에 대한 시범용 및 전문가용 동영상 제작한 후에, 7) 일부 골격에 대한 쾌속조형물을 제작하고, 모든 과정의 결과를 종합하였다(Fig. 1).

2. 사건현장 및 증거물에 대한 감정기법 개발

사건 현장에서 각종 증거물 및 현장 상태를 중·장거리 광대역 3D스캐너(Leica사 HDS 6100, Riegl사 VZ 400)를 이용하여 3차원 영상을 확보하고, GOM사의 ATOS II 마이크로스캐너를 이용하여 특정범위(인체골격, 차량, 화재발화지점, 소규모 물체 등)에 대한 정밀 3차원영상을 확보한 후, 관련 3차원 영상을 합쳐서 재구성함으로써 법의부검, 영상분석, 물리분석, 교통, 화재 감정의 기초 데이터로 활용하고, 각종 사건사고의 상황을 재현하고 감정기법의 개발 가능성을 구현하였다. 진행 과정은 예비조사 후, 자유로 교통사고, garden 5 IRIS 현장 재현 및 사건 분석, 삼척, 인천대교 교통사고, 김포공항 헬기 추락 사고(가정) 등에 대한 측정을 시행하였고, 취합된 자료들을 분석하고 일부의 자료에서 가상현실을 제작하고 그 결과를 종합하였다.

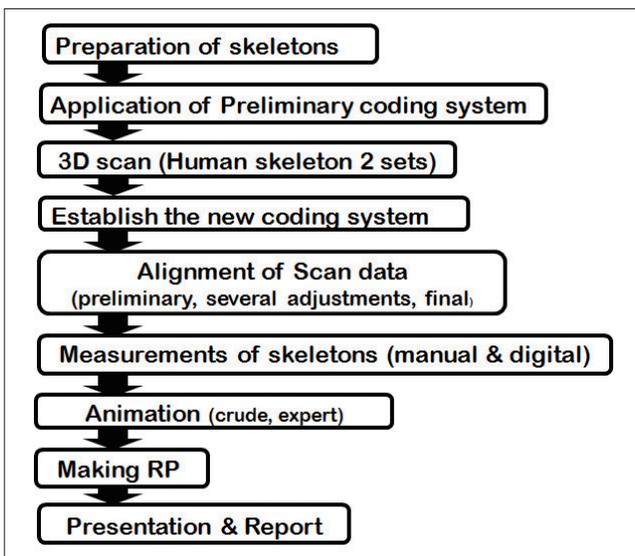


Fig. 1. Process for digital storage of human skeletons.

연구 내용 및 결과

1. 인체골격의 영상보존

가. 실제 뼈표본 획득

골격은 가톨릭의과대학 응용해부연구소에 보관중인 남, 녀 각 1구의 골격 표본을 이용하였다. 남자골격은 사망 당시 나이 91세이며, 목뿔뼈, 갈비뼈 일부가 없고 빗장뼈에 절단 흔적이 외에 모든 뼈가 존재하였으며, 고령으로 인해 오른쪽 불기뼈와 엉치뼈가 유합된 소견과 척추뼈에서 퇴행성 변화로 인한 뼈침이 다수 존재하였다. 여자골격은 사망 당시 나이 43세이며, 목뿔뼈, 왼쪽 발꿈치뼈, 오른쪽 목말뼈가 없는 상태였다.

나. 인체골격에 대한 3차원 표면스캔

획득한 남녀 골격에 대하여 ATOS II 마이크로스캐너를 이용하여 표면 스캔을 시행하고, 남녀 각각의 골격에서 부족한 부분의 골격은 반대편 골격의 영상이 있는 경우 거울 영상(mirror image)를 생성하여 보완하였으며, 촬영된 3차원 뼈모델은 범용 3차원 모델 파일인 STL(stereolithography)로 저장하였다.

다. 뼈 종류에 대한 코딩시스템 개발 및 적용

디지털 자료 구축(예: 3차원 뼈 모델의 파일명)을 위해 뼈 목록 작성에 필요한 새로운 코딩시스템을 고안하고 3차원 영상 파일에 적용하였다.

코딩시스템의 구조(Fig. 2)

- 1) 기본형식: 2자리 숫자 + 약어(뼈 이름) + 위치
- 2) 첫째숫자: 0 몸통뼈대 (axial skeleton), 1 팔뼈대 (upper limb), 2 다리뼈대 (lower limb)
- 3) 둘째숫자: 1 왼쪽 (left side), 2 오른쪽 (right side)
- 4) 약어(뼈 이름): 해부학용어에 맞추어 1,3,4글자로 약칭

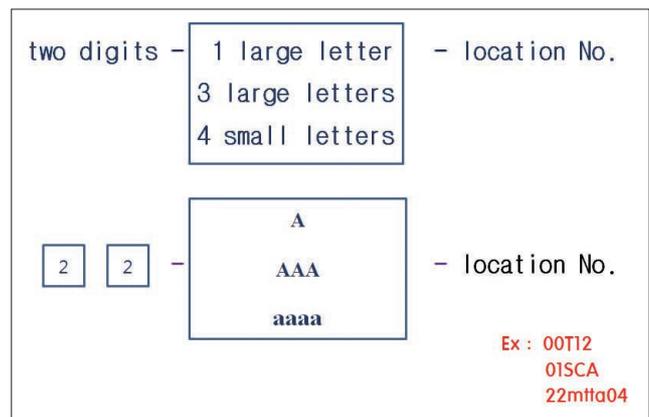


Fig. 2. Basic structure of the new code.

의 복합분류도(Fig. 3)이다.

마. 실제 계측 및 3차원 계측

각종 유골에 대한 실제적인 계측을 3차원 계측으로 대체할 수 있는 지에 대한 이론적 근거 마련하기 위해 시행하였으며, 전신 골격에 대한 계측 항목으로 미국법과학회(American Academy of Forensic Sciences)의 체질인류학 분과에서 제시한 항목들을 사용하였다.¹³⁻¹⁵⁾ 취득한 뼈모델의 STL파일을 Materialise사의 Mimics version 12.0로 불러들여 3차 계측을 수행 하였으며, 실제 계측에서 사용하는 표지점 및 수평면을 3차원 계측에 적용시키기 위해 계측 방법을 새로이 고안하여 보았다. 실제 계측과 3차원 계측의 정확한 비교는 아직까지 기술적인 어려움이 있어 추가적인 방법의 개발이 필요하여¹⁶⁻¹⁸⁾ 3차원 계측의 이론적 근거를 위해 뼈 종류마다의 표지점, 기준축, 기준평면에 대한 정의를 재고하고 그 기준을 다음 연구 사업에서 제시하기로 하였다.

바. 골격의 재구성과 애니메이션 제작

남녀 각각의 뼈 모델이 한 사람의 골격에 맞도록 해부학적



Fig. 4. Reconstruction of modeled skeletons and making animation.



Fig. 5. Examples of rapid prototypes of skeletons : 1. right Femur, 2. right Humerus, 3. Atlas (C1)

위치에 정렬시키고자 하였는데, 3차원 공간상에서 뼈 종류에 따라 표준화된 해부학적 위치 정보는 정립된 바 없으므로, 각각의 위치정렬을 수동으로 작업하였고, 뼈 위치 정렬의 과정을 애니메이션으로 제작하였으며(Fig. 4), 뼈마다의 위치정보를 구체화함으로써 자동 정렬의 가능성을 제시하였다.

사. 쾌속조형물(Rapid Prototype) 제작

파괴검사 전에 백골화 골격에 대해 3차원 영상증거물을 확보한 후에 증거물이 훼손 되었다더라도 복원이 필요할 경우를 대비하여, 3차원 영상증거물을 이용한 쾌속조형물의 제작을 시도하였다. 경부, 상완골, 골반골, 대퇴골, 손목뼈, 손허리뼈, 발목뼈, 발허리뼈 등에 대하여 원형, 50% 축소형, 2배 확대형 등, 총 41점의 쾌속조형물을 제작하였다(Fig. 5). 또한 증거물 재현 목적만이 아니라 확대와 축소의 과정을 추가하여 교육이나 홍보를 위한 보조적인 조형물 제작의 가능성도 확인하였다.

2. 사건현장 및 증거물에 대한 감정기법 개발

가. 3D계측장비를 이용한 교통사고 분석

교통사고 현장을 촬영한 2차원적인 사진 만으로는 현장 전체를 종합적으로 파악하고 유기적으로 연결하여 분석하는 데 큰 어려움이 있으며, 사고 현장은 시간이 경과됨에 따라 변형되어 여러 번의 현장 감식 기회를 제공하지 않을 수 있다. 따라서 사건 현장에 대한 3차원 스캔은 측정 대상의 3차원 시각화를 통해 현장에 대한 이해도를 높일 뿐만 아니라 정확한 좌표 정보에 의한 시뮬레이션을 용이하게 할 수 있어 향후 활용범위가 넓어질 것으로 예상된다(Fig. 6).

1) 경주 관광버스 추락사고

국과수에서는 증거리 스캐너인 Leica사의 HDS 6100 기종을 구입하고 각종 테스트를 진행하고 있었으며, ‘경주 관광버스 추락사고’ 현장에서 스캐너를 이용한 3차원 영상분석법을 국과수 최초로 적용하게 되었다. 경상북도 경주 지역에서 관광

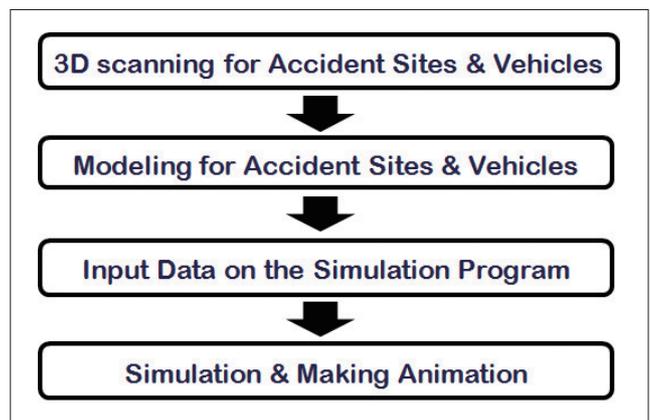


Fig. 6. Basic process of 3D scan & simulation on traffic accidents.

버스가 추락하여 31명의 사상자(18명 사망)가 발생하였는데, 정확한 사고원인을 밝히기 위하여 약 120 m 정도 범위의 사고 현장을 3차원 스캐너를 사용하여 도로구조와 지형 등을 촬영하였는데, 20 m 가량 거리만이 안정적으로 자료를 확보할 수 있어, 120 m의 사고 현장을 약 50회 가량 측정하여 3차원 영상을 확보할 수 있었다. 이런 자료를 바탕으로 당시 상황을 재구성한 뒤 차량감식결과와 비교하여 사고현장의 재현과 사고 상황 시뮬레이션을 제작하여 사고 상황을 재구성함으로써 광대역 스캐너를 이용한 검사법의 효용성을 객관적으로 증명할 수 있었다(Fig. 7).

2) 강변북로 교통사고

'강변북로에서 차량이 중앙 분리대를 충격하여 파손된 분리대의 일부가 반대방향에서 진행하던 차량과 충돌하여 탑승자가 사망한 사건'이 발생되었다. 3차원 영상 측정은 국과수가 보유하고 있는 HDS 6100과 드림티엔에스로부터 지원받은 VZ 400 기종을 사용하였다. VZ 400은 200 m 이상의 거리를 측정할 수 있는 기종으로서 중앙분리대 충격부위 및 주변의 사고현장에 대해 6곳을 정하여 측정하였고, HDS 6100은 유효 측정거리를 감안하여 도로 양변의 2곳을 정하여 측정하였다. 현장은 교통 통행량이 많은 곳이므로, 이곳을 측정하기 위해서는 장비의 거리 처리 능력 뿐 아니라 매우 신속한 측정 속도가

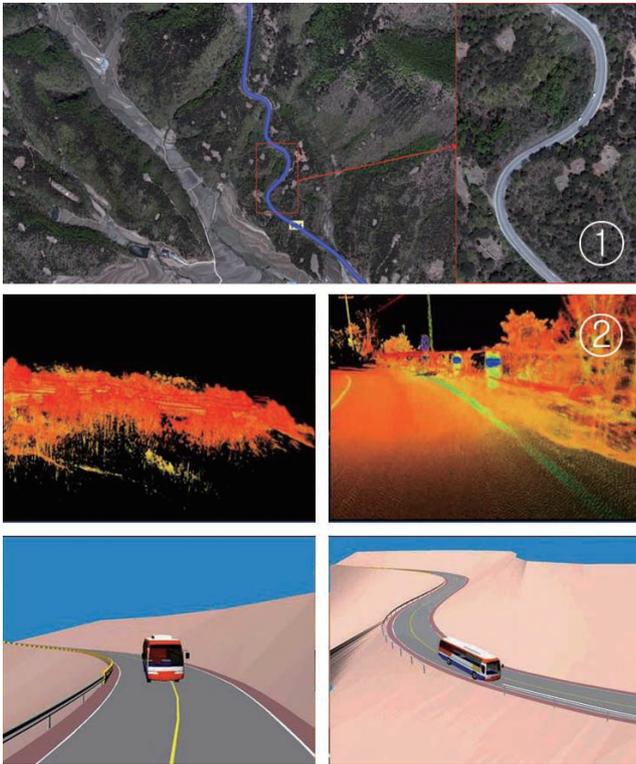


Fig. 7. Analysis of Gyeongju Tourist Bus Crash.

- ① aerial photography of crash site
- ② scanning, modelling, simulation & animation for crash

필요하다. 서울시는 Seoul TOPIS (Transport Operation and Information Service, <http://topis.seoul.go.kr>)를 운영하면서 서울의 모든 도로에 대한 관리 및 통제권한을 갖고 있는데, 강변북로 교통사고와 관련해서 조사팀은 TOPIS로부터 4분의 통제권한을 위임받고 관할 경찰서에 협조하여 자유로를 통제할 수 있었고, ① 한쪽의 6개 차로를 전면 통제하여 3분 40초 만에 원하는 현장을 측정하고, ② 같은 방향 2개차선의 부분 통제와, ③ 반대편에서의 측정 과정 등을 거쳐 사건 현장의 3차원 영상을 확보하는 과정을 마치게 되었다.

현장에서 장비를 이용하여 측정한 3차원 스캐닝 자료를 바탕으로 사건현장의 점군 자료(point cloud data) 및 색맵핑(color mapping) 자료를 완성하고, 사건 현장의 구조물을 모델링한 후, 사고 상황 시뮬레이션을 작성하였다(Fig. 8).

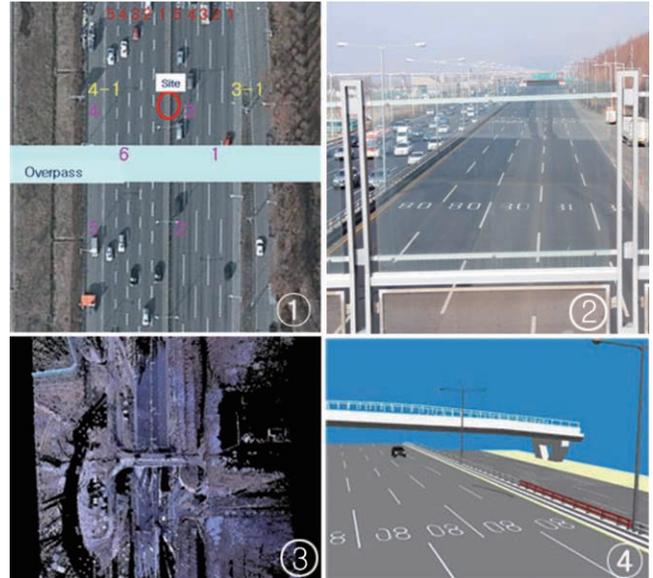


Fig. 8. Analysis of Traffic Accident at Gangbyeon Expressway.

- ① Locations of Scanner : 1-6 for VZ 400, 3-1, 4-1 for HDS 6100
- ② Traffic Control for scanning
- ③ Registration & Point Cloud data
- ④ Simulation

3) 삼척 시외버스 추락 및 인천대교 다중 충돌사고

삼척 시외버스 추락사고 및 인천대교 다중 충돌사고도 같은 방법으로 3차원 영상 측정과 시뮬레이션을 작성하여 사고 원인에 대한 객관적인 분석 자료를 제공하였다.

나. 사건현장 3차원 재구성

1) 실·내외 토막 살인사건 재구성(마네킹 재현)

마네킹을 사용하여 토막 살인의 현장을 재현하고 실내 및 실외에서 중·장거리 스캐너를 사용하여 사건 현장을 측정하고, 분리된 일부 골격과 두개골을 실내에서 ATOS II 마이크로스

캐너를 이용하여 측정한 후에, 다른 방법으로 측정된 두 종류의 데이터가 통합될 수 있는지 여부를 조사하였다. 실내 및 실외의 분리마네킹에 대한 복합 3D 스캔 데이터를 작성하여 보니, 데이터의 등록(registration), 모델링 및 동영상 제작 과정이 아직까지는 일반화 할 수 있는 수준에는 못 미치더라도, 실질적인 활용 가능성을 확신하게 되었다(Figs. 9, 10).

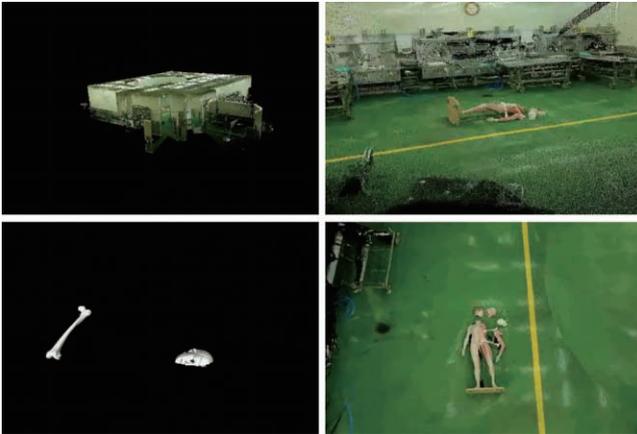


Fig. 9. Reconstruction of indoor case (supposition of murder).



Fig. 10. Reconstruction of outdoor case (supposition of murder).

2) 총격사건 재구성

3차원 영상 측정을 빈번해지는 국제행사와 테러에 대비한 경호 업무에 적용할 수 있다고 생각하여, 인기리에 종영된 드라마 ‘아이리스’의 총격사건을 재구성하기로 하였다. 법의학 분야에서는 요인이 저격된 상황을 가정하면 총격이 가해진 시선에 대해 부검을 통하여 치명적인 손상과 탄도의 방향 등을 조사하고, 피격되기 전의 사진이나 비디오를 참고하여 주변 구조물의 어디에서 총격이 가해졌는지를 분석할 수는 있다. 그러나 이런 과정을 3차원 스캐너를 이용하면 보다 쉽고 정확한 방법으로 분석할 수 있을 뿐 아니라, 예방적인 차원에서 저격을 가할 수 있는 위치를 미리 선점하거나 요인을 대피시킬 수 있

는 탈출 경로를 3차원 영상 속에서 시현이 가능하다.

IRIS 촬영 장소는 서울 문정동 소재의 garden5 로서 여러 채의 건물이 둘러싸인 광장이 주 촬영 장소로 사용되었다. 상황 재현은 요인 위치에 마네킹을 배치하고 총기에 의해 저격을 받는 상황과 폭파에 의해 시신, 관련 유류품 및 주변 구조물이 조각으로 파괴되는 상황을 가정하였다. 측정은 중거리 스캐너인 HDS 6100과 장거리 스캐너인 VZ 400 기종을 복합하여 운영하였고, 실내에서는 마이크로스캐너인 ATOS II를 이용하여 마네킹과 소형 증거물을 측정하였다. 이런 과정을 거쳐 Garden 5 현장을 재구성하여 점군자료와 색맵핑을 제작하고, 3차원 스캔데이터를 근거로 건물 모형을 모델링하고, ATOS 뷰어를 활용하여 모델링된 자료로부터 여러 가지 형태의 분석 및 전환 자료를 추출한 후, 저격 사건의 가상현실 애니메이션을 제작하였다(Fig. 11).

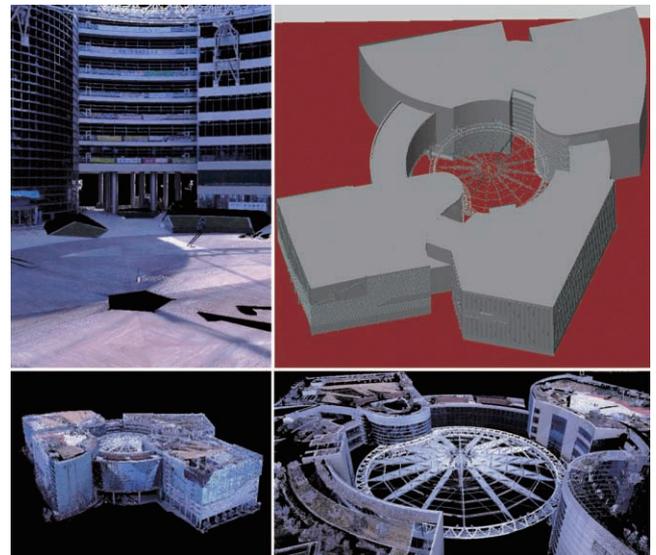


Fig. 11. 3D modeling for Garden 5 Complex.

3) 항공기(헬기) 추락사고 재구성

3차원 스캐너를 이용한 영상 분석법을 확립하기 위해서는 국과수가 보유하고 있는 기종만으로는 한계가 있어, 미세스캐너 및 중·장거리 3D scanner로 구성되는 복합 시스템을 구축하기로 하고, 국내에서 시판되고 있는 모든 중·장거리 3D 스캐너의 성능을 비교 조사하여 국과수의 실정에 알맞은 기종들을 선별하였다. 또한 많은 비용이 들어가는 복합 시스템을 국과수 단독으로만 활용하는 것은 불합리 하다고 생각하여 항공·철도사고 조사위원회 및 대한지적공사와 국가 기관 간에 장비 공동 활용 방안을 모색하게 되었다. 이런 취지로 항공·철도사고 조사위원회의 도움아래 ‘김포공항 BMT (bench marking test) 계획’을 시행하게 되었다.

광대역 스캔시스템 BMT 계획은 국과수, 항공철도사고조사위원회, 대한지적공사가 공동으로 추진하였으며, 객관성을 유

지하기 위하여 민간 업체 중 미세스캐너를 전문으로 공급하는 OMA사가 참여하여 측정되는 데이터의 분석을 담당하였다. 장소는 김포공항 내 관할구역 중, 헬기착륙장을 측정 지역으로 설정하였다. 예비 조사를 거쳐 선별한 기종은 Leica C 10 과 HDS 6100 및 Riegl VZ 400 이었으며, 정확도 및 정밀도, 측정 속도, 후처리 과정, 편의성 등을 평가 기준으로 정하였다(Fig. 12).

(1) 계획 1은 거리별 반사 목표물 조사 과정으로 대한지적공사에서 제공되는 표준화된 반사율판(18% 및 90%)을 거치대에 부착하고 기준점으로부터 100 m, 150 m, 200 m 떨어진 위치에 배치하고 5회 반복 측정하여 자료를 획득하는 것으로 하였다.

(2) 계획 2는 동일 형상 물체의 거리에 따른 변화를 파악하기 위하여 공항 내 이동차량(Dolly)을 활용하여 기준점으로부터 100 m, 150 m, 200 m 떨어진 위치에 배치하고 5회 반복 측정하여 자료를 획득하는 것으로 하였다. 처음 계획은 300 m, 400 m, 500 m에 Dolly를 배치하고 측정할 예정이었으나 공항의 이착륙 관계로 시행하지 못하고 VZ 400 기종의 경우 약 400 m 및 500 m 위치에 있는 헬기 목표물을 추가로 측정하였다

(3) 계획 3은 헬기 1대가 공항 내 추락한 것으로 가정하고 헬기 중심의 반경 100 m 이내에 6곳의 위치를 지정하여 측정하고, 헬기 꼬리 부분만 모델링 하는 것으로 합의하였고, 차량 탑재 및 GPS 장착 등의 기능적 평가는 참여한 회사 간의 형평이 맞지 않아 시행하지 않았다. 한편, 계획 1-3의 측정시간은 총 4시간 이내로 정하였다.

(4) 모든 과정에서 취득된 자료를 이용하여 분석하는 것을 원칙으로 하였고, 사고현장 재현과정에서 헬기 꼬리부분의 모델링은 측정 후 실내로 이동하여 전산작업이 가능한 시점에서 5시간 이내에 제작하는 것으로 정하였다.

김포공항 내에서 측정한 자료를 근거로 제작된 3차원 점군

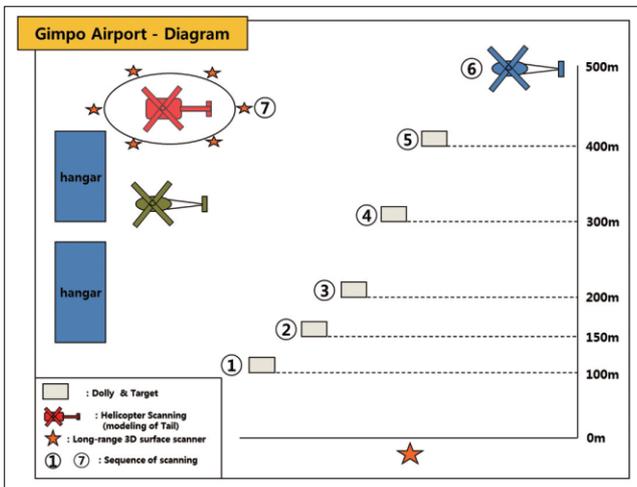


Fig. 12. Diagram of BMT project at Kimpo international airport.

자료 및 색맵핑을 근거로 반경 500 m 정도의 사고현장에서 3차원 영상의 재현이 가능하고, 산재된 증거물에 대한 3차원 영상증거의 확보가 가능하였으며, 이런 검사법이 항공기 추락현장에서 매우 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확신하게 되었다 (Fig. 13). 그러나 참여한 각 팀 간에 모델링한 결과물에 약간의 차이가 있는데, 이는 회사의 주 업무 영역에 따라 모델링 과정에서 차이를 보일 수 있어 전문가 그룹 간에도 결과물에 차이가 발생할 수 있어 표준화에 대한 필요성을 인식하게 되었다.

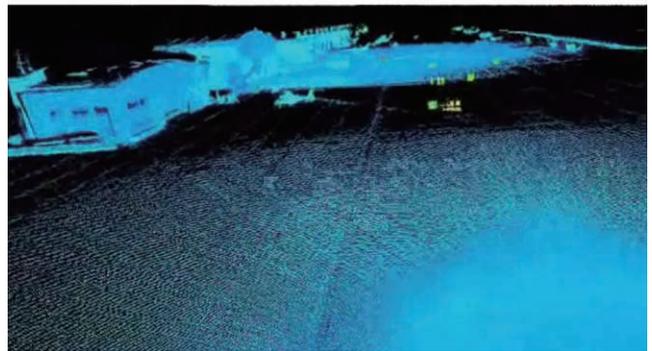
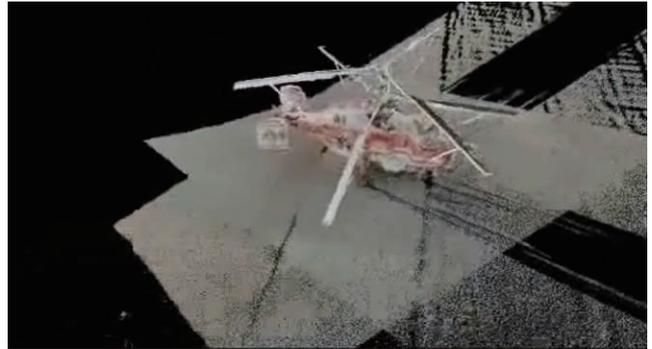


Fig. 13. Color mapping & point cloud data (supposition of helicopter crash).

다. 3D측장비를 이용한 소형 증거물 분석

1) 위조도장 판독

인장이라는 것은 자기 성명 또는 관명을 인장 면에 조각한 것이고, 인영은 인장에 인주를 묻혀 압연한 흔적을 말한다. 한국에서는 중요한 법률행위에서 인영이 필수적이므로 이를 위조하는 범죄 또한 날로 늘어나고 있다. 인장의 위조를 위한 하나의 방법으로 인영 전사 수법이 있는데, 이를 분석하기 위해서는 현미경을 이용하여 용지면과 인획의 변형 상태를 조사하거나, 형광이나 적외선 검사법 등을 이용하여 전사 매체물에 대한 검사를 시행하며, 일반 종이에 전사한 경우 화학적 방법을 사용하기도 하나 검출이 어렵고 증거물의 훼손 우려가 있어 실제적으로 시행하기가 곤란한 경우도 많다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 3차원 계측을 이용해서 인영의 날인 압력(압

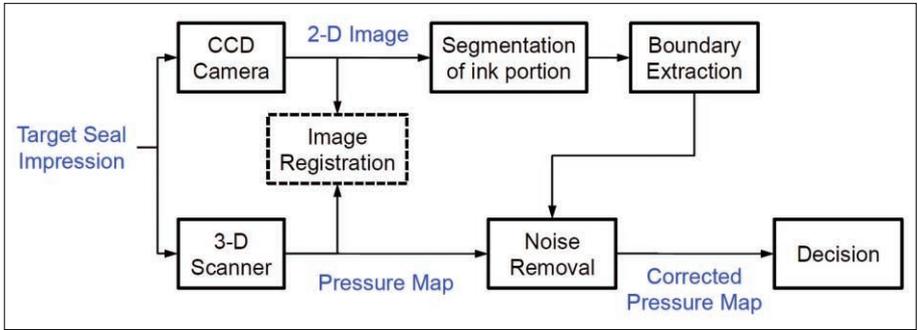


Fig. 14. The Proposed process of detecting transcribed seal Impression.

력흔)을 검출하여 인영의 진위여부를 검출할 수 있는 판독방법을 실험하였다.

인영 진위여부를 검출하는 단계는 위조 판독 대상이 되는 인영 이미지에 대해 2차원적 이미지를 획득하는 단계, 위조 판독 대상이 되는 인영 이미지에 대해 3차원적 이미지를 획득하는 단계, 2차원적 이미지와 3차원 이미지를 정합시키는 단계, 2차원적 이미지에서 인주영역을 분리하는 단계, 3차원적 이미지에서 인주영역을 포함하는 날인 압력 영역을 분리하는 단계, 2차원적 이미지와 3차원적 이미지의 인주영역을 정합시켜 특성값을 연산하여 진위여부를 검출하는 단계로 구분된다(Fig. 14).

3차원 이미지의 획득 및 분석은 GOM사의 ATOS II 기종을 사용하였으며, 3차원 이미지의 깊이 정보를 가색상(pseudo-color)으로 나타내었으며, 짙은 부분은 깊이가 깊은 부분이고, 밝은 부분은 깊이가 낮은 부분에 해당한다. 종이에 날인된 흔

적에 대한 계측 결과는 약 15 um 깊이의 흔적이 계측되었다(Fig. 15). 이러한 결과로 보아 경험을 바탕으로 한 주관적 판단이 우세한 인영감정분야에 있어서 객관적 수치를 통한 통계적 해석에 대한 기준을 제공함으로써 법과학적 인영감정에 큰 도움이 될 수 있다고 판단하였다.

2) 신장계측

신장을 계측하기 위해 촬영 대상 지역의 특징점을 결정하고 그 점들을 이용해 공간과 영상과의 상관관계를 구하고 3차원 가상자를 생성하여 신장을 계측하는 방법이 사용되고 있으며, 캘리브레이션을 위해서 이동형 기준자를 실제 촬영현장의 4군데 이상의 장소에 놓은 후 촬영된 영상을 이용하나, 카메라 위치나 자세가 변경된 경우 적용할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 경우 3차원 스캐너를 사용하게 되면 사건현장의 3차원 좌표를 알 수 있으므로 캘리브레이션이 가능하다. 실제 사건현장에 3차원 스캐너(HDS 6100)를 이용하여 신장을 계측하여 기존의 방법과 비교하여 보았다.

CCTV에 촬영된 영상은 저가의 카메라 렌즈를 사용하기 때문에 기본적으로 렌즈 왜곡을 포함한 이미지가 저장된다. 정확

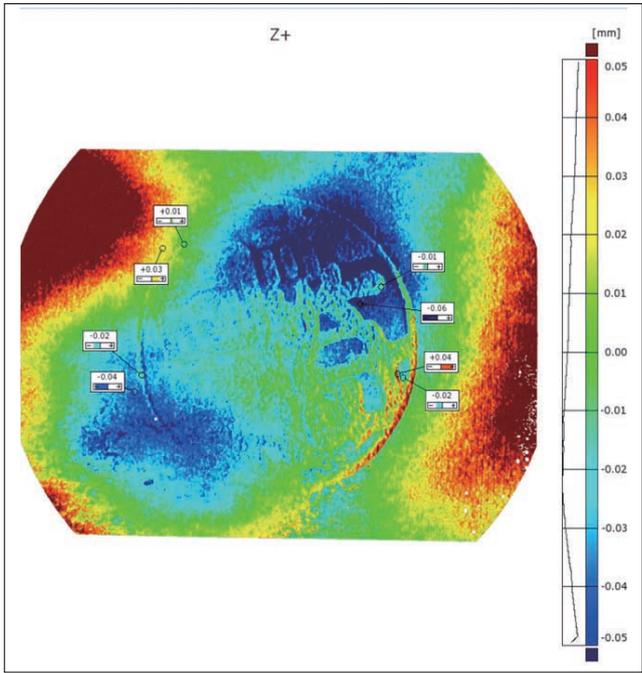


Fig. 15. Measurement of the 3D information of a seal impression : Pressure trace map of a seal impression in pseudo color.

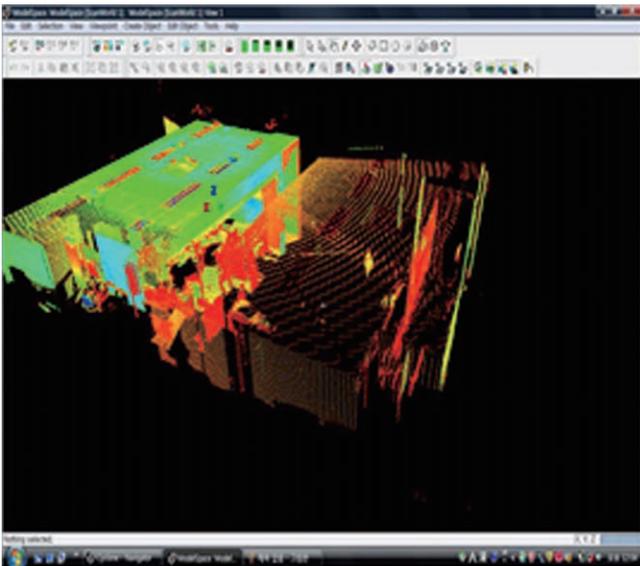


Fig. 16. 3D modeling for the shooting place of CCTV.



Fig. 17. Making the reference rulers in a shooting place of CCTV.

한 계측을 위해서는 렌즈왜곡을 교정한 후 3차원 가상공간에 이미지를 중첩투영 하여야 한다(Figs. 16, 17). 카메라 위치가 변동된 경우뿐만 아니라 특징점의 선택 및 캘리브레이션 과정에서 중·장거리 레이저 스캐너를 이용한 3차원 영상분석 기법이 효과적임을 확인하였다.

3) 물체의 동일성 비교

영상에 있는 물체와 실제 물체에 대한 동일성 여부를 판독할 때, 실제 촬영된 영상과 같은 각도, 위치, 화각 등을 동일하게 카메라로 다시 촬영하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 2차원적 비교는 동일 평면의 경우 투영변환을 통해 가능하지만, 동일 평면이 아닌 다른 부분의 영상은 왜곡되어 결과물을 명확하



Fig. 18. Project and compare with 2D photographs in 3D space.



Fig. 19. Comparison with the pattern of lime powder in 3D space.

게 이해하기가 어려운 경우가 많다. 이럴 때 실제 물체를 3차원으로 취득하여 비교하면 일반인에게도 명확히 이해될 수 있는 결과를 도출 할 수 있다. 2010년 3월 발생한 부산 여중생 납치/사망사건에서 각기 다른 날짜에 촬영된 2장의 현장 사진에서 시신 유기에 사용된 석회가루가 담겨 있는 대야에 대해 동일한 상태 여부에 대하여 의뢰가 되었다. 연구팀은 의뢰된 건에 대해 중거리 스캐너(HDS 6100)와 마이크로스캐너(ATOS II)를 이용하여 분석하였다(Figs. 18, 19).

현장의 3차원 영상을 2종류의 2차원 사진과 모두 위치적으로 매칭되어 대야의 위치가 변동되지 않았음을 확인하였고, 용기에 대한 3차원 영상에 2종류의 2차원 사진을 각각 매칭하여 동일한 각도에서 비교함으로써 석회가루의 패턴에 변화가 없었음을 확인하였다.

고 찰

법의·과학영역에서 3차원 스캐너의 활용이 점차 늘어나고 있는 추세에 있으며,¹⁾ 관련분야의 감정 업무를 개발하고 선도하기 위해, 3차원 스캐너를 이용하여 인체골격에 대한 3차원 측정을 토대로 인체골격 재구성하였고 대형 사고현장을 스캔하여 3차원 영상 분석 기법을 개발하고 위조 인영을 판별여부와 CCTV에 촬영된 인물의 신장계측, 영상에 촬영된 물체의 동일성 비교 등에 대한 실험을 하였다. 이러한 과정 속에서 국과수에서 기존에 보유하고 있던 ATOS II의 미세스캐너는 5 m 이내의 증거물에 대한 측정에 매우 유용하며, 새로 구입한 중거리 스캐너인 HDS 6100은 50 m 이내의 현장에 대한 측정에 유용한 것으로 알려져 있으나 실제적으로 실험을 하여보니 안정적인 유효 거리는 약 20 m 가량으로 나타났다. 시간을 다투는 현장의 특성상 보다 먼 거리의 3차원 형상을 획득할 수 있는, 추가적인 기종의 필요성이 대두되었다. 또한 시행착오를 거쳐 3차원 스캐너를 이용한 취득한 영상증거물은 다양한 검사에 활용할 수 있다는 것이 증명되었으나, 이를 전담할 수 있는 3차원 영상분석팀이 별도로 운영될 필요성이 대두되었다.

따라서 이번 연구를 진행한 결과 다음과 같은 주요한 2가지 제안을 하게 되었다. 첫째 제안은 마이크로, 중거리 및 장거리

스캐너의 복합시스템을 구축해야 한다는 것이다. 즉, 1) 장거리 스캐너를 신규 구입하고, 2) 기존 보유된 마이크로 및 중거리 스캐너의 활용을 증대시켜야 하며, 3) 마이크로, 중거리 및 장거리 스캐너의 복합 운영시스템을 확립시켜야 하겠고, 4) 또한 국과수가 많은 예산을 들여 복합시스템을 구축하고 활용할 수 있다면, 이러한 시스템을 국과수 단독으로만 사용할 것이 아니라, 유사한 기능을 하는 국가 기관 간 장비 공동 활용 방안을 마련하여 복합시스템의 운영 효율을 높여, 양질의 검사결과는 물론 국가 예산의 사용 효율을 높여 대국민 서비스를 개선할 수 있는 길을 열어야 하겠다. 둘째 제안으로서 3D 영상분석팀을 별도로 구성해야 한다는 것이다. 3차원 영상증거물을 활용하는 분야는 매우 다양하므로 3차원 영상측정은 어느 한 분야의 전문분야가 아니라, 모든 부서가 협조하여 이루어져 한다. 따라서 각 부서가 별도로 측정, 계측, 등록, 모델링 및 시뮬레이션 등의 과정을 처음부터 모두 담당할 것이 아니라, 3차원 영상 증거물의 측정 및 분석을 위한 별도의 팀을 운영하여 이들로 하여금 관련분야의 감정에 필요한 3차원 영상증거물의 공급을 전담시키고 이를 활용하는 관련분야에서 감정기법을 개발한다면, 보다 효과적으로 운영될 수 있을 것이다. 또한 이러한 3D 영상분석팀을 구성하려는 기관은 염두에 두어야 할 사안이다. 고가의 장비를 구입하면 감정 기법이 원활하게 확립될 것으로 예상하나, 장비 뿐 만이 아니라 이에 수반되는 응용 소프트웨어의 비용이 장비 못지않게 소요되는 점을 감안하지 못하면 효과적인 기능을 발휘할 수 없으며, 장비와 소프트웨어를 갖추었다 하더라도 이를 활용하며 관리하는 효과적인 운영시스템이 없다면, 이러한 검사법을 활성화하는 데에 많은 문제점이 발생되게 된다. 고가의 3차원 스캐너 장비를 구입했던 많은 기관들에서 장비를 제대로 활용하지 못하고, 장비를 판매한 회사에게 재차 용역사업을 발주하는 경우가 종종 발생하게 되는데, 이는 3차원 영상분석팀 구성의 필요성을 제대로 인식하지 못해서 발생하는 문제라 생각한다. 따라서 3차원 영상분석 기법을 개발하려는 해당기관은 3D 영상분석팀을 도입하여 효과적으로 운영하려는 의지가 있어야 할 것이다.

인체골격에 대한 3차원 영상증거물의 확보 과정을 진행하면서 인류학, 고고학, 의학, 공학 등 여러 분야에서 다양한 활용방안이 대두되었다. 사건 현장이나 발굴현장에서 수집된 수많은 인체 증거물에 대한 계측과 분석만이 아니라, 3차원 영상증거물에 대하여 보다 정확하고 편리한 디지털 계측기법을 개발하여야 하겠다. 수많은 유골을 보관할 수 있는 장소의 현실적인 제약을 영상보존 방법으로 대체할 수 있을 것이며, 미세스캐너, 중·장거리 스캐너의 복합시스템을 활용하면 유물이나 유적 현장에 대한 3차원 재구성을 통한 영상 보존이 가능할 것이다. 또한 새로운 코딩 시스템을 이용한 인체골격의 재구성과정은 IT 기술을 융합한 교육은 물론 전자책의 제작이 가능하고 뼈와 관련된 질환, 손상 또는 역학적 분석의 모델링과 시뮬레이션 등 의학적으로 많은 활용의 길이 열릴 것으로 예측되고

있다.⁴⁻⁶⁾ 이번 '인체골격 증거의 영상보존'의 연구결과로 미루어, 1) 디지털 증거물에 대한 계측의 자동화 및 표준화가 가능하고, 2) 사이버 공간상에서 증거물의 재구성 및 재현이 가능하고, 3) 쾌속 조형물을 이용한 증거물의 재현이 가능하므로, 차후 골격 증거물 보관 방법의 변화가 필요할 것이며, 가상인류학 분야의 많은 변화가 있을 것으로 예상되고, 사이버 박물관, 사이버 교육, 공학부품의 재구성 등 인류학, 고고학, 의학, 공학 등 여러 분야에서 다양한 활용이 가능할 것으로 기대된다.

연구계획의 초기에 계획했던 전신골격의 3차원 영상증거물의 확보와 재구성 과정을 실현하고 나니, 더 많은 과제들에 대해 연구가 필요하게 되었다. 즉, 1) 자동화 측정기기 개발, 2) 자동 분석 소프트웨어 개발, 3) 교육용 시스템 개발, 4) 유골 활용분야 개발을 통하여 발굴현장에 좀 더 편하게 응용할 수 있는 방법과 5) 사이버 증거물의 법적 근거를 확보하여 관련분야를 활성화 하는 방안, 6) 인체 골격 뿐 만이 아니라 다른 증거물(유류품, 동물골격, 기계부품 등)에도 적용할 수 있는 범용시스템의 개발 등 앞으로 많은 일이 추가로 필요할 것이다.

따라서 다음 연구계획에는 현장에서 보다 편리하게 증거물을 거치하고 3차원 스캐닝을 할 수 있는 반자동 측정 장치를 개발하려한다. 이러한 개발 장치가 효과를 나타내기 위해서는 모델링 시스템이 또한 개선되어야 한다. 인체골격에 대한 모델링 시스템의 입력방식으로는 3차원 표면스캔 방식이 있고, CT와 MRI 같은 촬영 영상을 이용한 방식이 있는데, 현재는 CT 촬영 영상을 이용한 모델링 방식이 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 발굴현장의 모든 골격에 대해서 CT 촬영을 할 수 없을 뿐만 아니라, CT 영상을 이용한 모델링은 원하는 정도의 해상도를 보장할 수 없으므로, 3차원 표면스캔 방식을 활용한 모델링 시스템의 추가적인 개발이 필요하다. 또한 실물에 대한 인류학 측면의 측정 위치나 과정을 정의한 후에 제작된 3차원 영상증거물을 입력하면 정의에 따라 자동으로 다수의 측정이 가능한 소프트웨어의 개발(multi-measurement of 3D evidences)^{17, 18)}이 필수적이다. 이런 과정 속에서 CT & MRI 분야에서 기존에 상용화된 프로그램에 대한 평가를 통해 보다 효율적인 소프트웨어의 개발이 이루어져야 하겠다.

3차원 영상증거물을 해부학적 위치에 따라 재구성하는 과정은 매우 어려운 과정인데, 이를 보다 편리하게 진행할 수 있는 방법을 개발해야만 이번 연구결과와 과정을 보편화 할 수 있다고 생각한다. 기본적인 개념으로는 일정범위를 갖는 좌표 구간을 정하고 이곳에 새롭게 코딩된 증거물을 배열한 후, 재차 수정하는 과정(일명 : range box alignment & adjust)이 가능할 것이며, CT & MRI에서 이용되는 소프트웨어를 이용하여 표준 피사체의 적용 범위를 설정하고 활용하면 가능한 방법이 있을 것이라고 기대해 본다.

사건 현장에서 발견되는 유골이 전부 온전히 보존되어 있을 것이라고 기대해서는 않된다. 따라서 부분 골격에 대한 분류과

정이 필요하게 되는데, 육안 및 해부학적인 지식을 기반으로 하는 방법은 현장에 전문가가 상주하고 있어야 하는 어려움이 있으며, 추가적인 법인류학적인 검사를 위해,¹³⁻¹⁵⁾ 검체 준비 및 재분류의 과정과 같은 복잡한 과정을 거치게 된다. 이러한 문제점을 일부라도 개선하기 위하여 부분 골격에 대해서도 어느 골격의 일부인가를 판단해 줄 수 있는 인공지능 골격 확인시스템의 개발도 생각해 볼 수 있다.

애니메이션을 통한 연구결과의 제작은 최종 단계에서 매우 효과적인 전달 매체가 될 수 있다. 비록, 이번 연구에서는 1구의 전신골격을 재구성하는 과정을 제작하였으나 집단매장 유골에 대해서는 현장의 특성상 1) 산개된 지역의 여러 사람인 경우, 2) 중첩된 여러 사람의 경우 등의 다수의 골격을 재구성하는 과정과 3) 민간인, 군인 등 다양한 의복 및 문화 형태를 포함하는 애니메이션 제작에 필요한 다기능 모듈 (multi-function animation module)을 개발할 필요가 있다. 3D 인체골격을 활용한 교육시스템의 개발은 많은 분야에서 열려있다고 본다. 사람뼈대 자료를 공개출처(open source)로 제공할 수 있고, 신원확인 전문가 교육, 사이버 고고학, 뼈대 발굴 시뮬레이션, 의료관련 전공자 실시간 정보 활용, 미술해부학, 베타 모형제작, 범죄현장 실무자 교육 등, 그 활용 분야가 다양하게 열릴 것이다.

3차원 스캐너를 이용하여 사건현장 및 소형 증거물에 대한 3차원 영상증거물을 획득한 후, 이를 여러 분야의 감정과정에 활용할 수 있는데, 이 검사법은 다음과 같은 유리한 점이 있다. 1) 사건 현장의 증거 확보과정에서 발생하는 시간적 제한에 효과적으로 대처할 수 있는 방안이 될 수 있으며, 2) 사건 현장에서 누락될 수 있는 잠재적 증거 소건을 보관하고 재현 할 수 있어(crime scene sketch), 3) 모든 사건, 사고의 현장 정보를 갖춘 사이버 증거물의 확보가 가능하다. 4) 또한 시간적, 공간적 여유를 갖고 사이버 공간상에서 자료를 분석할 수 있고, 필요에 따라 다른 형태의 자료 형식으로 전환(예; Autocad 2D)이 가능해서 자료의 활용도를 극대화 할 수 있으며, 5) 3차원 영상 자료를 바탕으로 하는 가상 현장, 가상 인류학, 가상 박물관 등을 구성할 수 있어, 6) 사건과 관련된 증거물의 신뢰성을 높이고 관련 기관의 위상의 정립 및 홍보 효과가 크다고 보겠다. 따라서 3차원 스캐너를 이용한 검사법은 현재 초기 단계이나 계속해서 연구를 진행하여 확고한 검사법으로 추진해 나감으로써 첨단 과학수사의 기틀을 마련하여야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Chen F, Brown GM, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical method. *Opt Eng* 2000;39:10-22.
2. Wang YF, Cheng DI. Three-dimensional shape construction and recognition by fusing intensity and structured

- lighting. *J Pattern Rec Soc* 1992;25:1411-25.
3. O' Neill M, Denos M. Automated system for coarse-to-fine pyramidal area correlation stereo matching. *Image and Vision Comput* 1996;14:220-36.
4. Buck U, Naether S, Braun M, et al. Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: With high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation. *Forensic Sci Int* 2007;170:20-8.
5. Bruchweilera W, Brauna M, Dirnhoferb R, Thali MJ. Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process. *Forensic Sci Int* 2003;132:130-8.
6. Thali MJ, Braunb M, Markwaldera H, et al. Bite mark documentation and analysis: the forensic 3D/CAD supported photogrammetry approach. *Forensic Sci Int* 2003;135:115-21.
7. Lee J, Lee ED, Tark HO, et al. Study of photogrammetric comparison method of patterned injuries using 3D CAD program. *Korean J Leg Med* 2004;28:32-7.
8. Yang KM, Chung NE, Hong SW, et al. Preliminary research for applying appraisal techniques to evaluate the cause of skin injury. *Korean J Leg Med* 2008;32:105-10.
9. Lee J, Lee ED, Tark HO, Hwang JW, Yoon DY. Efficient height measurement method of surveillance camera image. *Forensic Sci Int* 2008;177:17-23.
10. Yoshino M, Taniguchia M, Imaizumia K, et al. A new retrieval system for a database of 3D facial images. *Forensic Sci Int* 2005;148: 113-20.
11. Ross AH, Williams S. Testing repeatability and error of coordinate landmark data acquired from crania. *J Forensic Sci* 2008;53:782-5.
12. Choi JY, Choi JH, Kim NK, et al. Analysis of errors in medical rapid prototyping models. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2002;31:23-32.
13. Buikstra JE, Ublelaker DH. Standards for data collection from human skeletal remains. 3rd ed. Arkansas: Archeological Survey; 1997. p. 67-84.
14. Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data. Cambridge: Cambridge University Press; 1991. p. 63-6.
15. Slice DE. Modern morphometrics in physical anthropology. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers; 2005. p. 8-10.
16. Rohr K. Fundamental limits in 3D landmark localization. *Inf Process Med Imaging* 2005;19:286-98.
17. Forsberg A, Kullberg J, Agartz I, Ahlstrom H, Johansson L, Henriksson KM. Landmark-based software for anatomical measurements: a precision study. *Clin Anat* 2009;22:456-62.
18. Subburaj K, Ravi B, Agarwal M. Automated identification of anatomical landmarks on 3D bone models reconstructed from CT scan images. *Comput Med Imaging Graph* 2009;33:359-68.