

법의인류학분야 활용을 위한 사후전산화단층촬영영상 기반 위턱굴 부피 자동 계산 심층학습 모델 개발

이경수¹, Izzati Lia Wilda¹, 김예지¹, 문인경¹, 조병두^{1,2}, 윤용수^{1,2}

¹동서대학교 일반대학원 융합방사선학과, ²동서대학교 방사선학과

Development of Deep Learning-based Model for Automatic Calculation of Maxillary Sinus Volume Using Post-mortem Computed Tomography in Forensic Anthropology

Kyeongsu Lee¹, Izzati Lia Wilda¹, Yeji Kim¹, Ingyeong Mun¹, Byungdu Jo^{1,2}, Yongsu Yoon^{1,2}

¹Department of Multidisciplinary Radiological Sciences, Graduate School of Dongseo University

²Department of Radiological Sciences, Dongseo University

Abstract : Sex estimation is a key procedure in the forensic identification process, and skeletal-based assessment is primarily performed using sexual dimorphism observed in the pelvis and skull. The paranasal sinuses, including the maxillary sinus, are located within the facial bones and tend to remain relatively well-preserved after death. Due to their substantial anatomical variability among individuals, their potential use as an auxiliary indicator in forensic identification has been suggested. This study aimed to determine whether differences in sex and laterality exist by automatically segmenting the maxillary sinus and calculating its volume using a U-Net-based deep learning model applied to 70 Korean postmortem computed tomography scans. As a result, the U-Net model demonstrated overall high segmentation performance (0.8921 ± 0.019). The maxillary sinus volumes calculated by the model showed no statistically significant differences between sexes or between the left and right sides, which is consistent with findings reported in previous studies. This study demonstrates the feasibility of deep learning-based morphological analysis of the maxillary sinus. In the future, by generating a large training dataset using both ante-mortem and postmortem computed tomography images with the proposed model, it is expected that a three-dimensional CNN-based system for sex and age estimation may be developed, potentially achieving superior performance compared with existing approaches.

Keywords : Post-mortem CT, Maxillary sinus, Deep learning, Morphological analysis, Personal identification

이 논문은 2025년도 동서대학교 “Dongseo Cluster Project (type 2)”의 지원에 의해 이루어진 것(DSU-20250003)입니다. 또한 연구에 사용된 인체 데이터는 한국과학기술정보연구원(KISTI)과 가톨릭대학교 의과대학 응용해부연구소가 공동으로 생산한 데이터임을 밝히며 데이터 제공에 감사를 드립니다.

저자(들)는 ‘의학논문 출판윤리 가이드라인’을 준수합니다.

저자(들)는 이 연구와 관련하여 이해관계가 없음을 밝힙니다.

Received: December 4, 2025; **Revised:** December 26, 2025; **Accepted:** December 29, 2025

Correspondence to: 윤용수 (동서대학교 일반대학원 융합방사선학과, 동서대학교 방사선학과)

E-mail: ysyoon@office.dongseo.ac.kr

서 론

확인되지 않은 개인의 신원을 분석하는 것은 인간의 해부학 및 인류학적 정보를 활용해 현대 사회공동체에서 법률적으로 중요한 법의학적 과제, 범죄와 관련된 사건을 해결하는 데 중요한 측면을 담당하고 있다. 다양한 신원 확인 방법 가운데 성별 추정 은 일반적이면서도 가장 많이 활용되는 방법으로, 특히 골반이나 두개골에서 드러나는 형태적 특징 비교와 계측 지표를 이용하는 것이 효과적인 방법으로 보고되었다[1,2]. 성별 추정에는 여러 해부학적 구조물에서 드러나는 성적 이형성(Sexual dimorphism)을 활용하는데, 이는 남녀 간 신체적, 형태적 및 해부학적 차이가 나타나는 현상으로, 이를 정량적으로 분석해 신원미상자의 성별을 추정하는 데 활용할 수 있다[3]. 이러한 성별 추정 방법이 이미 확립되어 있음에도 불구하고, 실제 화재 사고, 재해 현장 등에서 발견되는 신원 미상 유골이 손상되는 사례에서는 기존 성별 추정의 정확도가 제한될 수 있다는 한계가 잇따른다[4]. 따라서 성적 이형성이 드러나는 타 해부학적 구조물을 정량적으로 분석해 기존의 방식을 보조적으로 지원할 수 있는 시스템의 필요성이 증가하고 있다.

코결굴은 얼굴뼈 내부에 공기가 충만한 공간으로, 성장 과정에서 점차 확장되어 얼굴뼈 내에서 자리를 잡는다[5]. 이로 인해 사후에도 그 형태가 잘 보존되는 특성이 있다[6]. 코결굴의 크기·형태·배열·비대칭성과 같은 형태적 특성은 개인마다 상이하며[5,7], 일란성 쌍둥이에서도 동일하지 않다는 보고가 있다[8]. 이러한 형태학적 다양성은 개인 식별에 유효한 생체 지표로서 코결굴이 지니는 잠재력을 뒷받침한다[9]. 코결굴은 안면골 내부에 위치해 육안 상으로 관찰이 어려웠지만, 영상의학 기술의 발달과 함께 등장한 컴퓨터 단층촬영(Computed Tomography, CT)을 이용한 비침습적인 분석이 가능해 코결굴 내부를 정량적으로 관찰하는 것이 용이해졌다[10].

위턱굴은 코결굴 중에서 가장 넓은 부피를 가지고 있으며, 위턱뼈에 의해 경계가 명확하여 형태적인 식별이 용이한 구조물이다[6,9]. 출생 이후 성장에 따라 약 20세까지 부피가 증가하고 이후 30세 전후부터 서서히 감소하는 경향이 보고되었다[11]. 성별에 따라 위턱굴의 높이, 길이, 너비 등의 계측 지표에서 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다[6,12]. 하지만 여러 선행연구에서는 위턱굴 내 측정 가능한 지표(크기, 높이, 폭 등)에 의존하였으며[13], 관찰자마다 기준점이나 측정 방법이 상이해 측정 의존성이 높은 한계가 존재하였다[11,13,14]. 언급된 여러 선행연구의 한계를 고려해, 위턱굴의 단순 계측 지표에만 의존하기보

다는 형태학적 특징을 함께 분석할 수 있는 기술적 접근이 필요하다.

법의인류학적 신원확인 과정은 다수의 해부학적 지표를 종합적으로 분석해야 하므로 상당한 시간과 전문 인력이 요구된다. 특히 국내 법의인류학 전문 인력의 제한으로 인해 기존 인력의 업무 부담이 지속적으로 증가하는 실정이다. 이러한 상황에서 심층학습 기반 영상분석 기법은 대규모 영상 데이터를 사전에 학습함으로써 반복적이고 시간 소모적인 분석 과정을 효율적으로 보조할 수 있는 잠재력을 지닌다. 또한, 성별 추정과 같은 해부학적 판단 과정에서 심층학습 모델은 객관적인 정량 정보를 제공함으로써 신뢰도를 보조적으로 지원하는 도구로 활용될 수 있다.

따라서 본 연구는 법의인류학적 활용 가능성을 평가하고자, 사후전산화단층촬영(post-mortem computed tomography, PMCT) 영상을 활용한 심층학습 기반 위턱굴 분할 모델을 구축하고 그 성능을 검증하는 것을 주된 목적으로 하였다. 특히 위턱굴 영역의 자동 분할 성능을 확인함으로써, 심층학습 모델이 법의인류학적 영상 분석에서 활용 가능한 도구가 될 수 있는지를 평가하고자 하였다. 아울러, 모델을 통해 추출된 위턱굴 부피 정보를 바탕으로 남녀 및 좌우측 간 부피 차이를 검토하고자 하였고, 선행연구 결과의 비교를 통해 심층학습 기반 분석 결과의 해석 가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상

본 연구에서는 한국과학기술정보연구원(Korea Institute of Science and Technology Information, KISTI)이 주관하는 한국인 인체 데이터 구축 사업(Digital Korean)을 통해 한국인 시신 70중례(남성 35례, 여성 35례, 평균 연령 51.94 ± 9.49 세)를 사용하였다. 모든 사례는 검증된 시신들을 전산화단층촬영장치(Hitachi, Pronto Single-slice CT, Japan)를 이용해 기록한 영상으로, PMCT의 특성상 전신 프로토콜로 촬영되었다. 수집된 모든 데이터는 Slice thickness 1 mm, Matrix Size는 512×512 pixels, pixel spacing은 0.8 mm^2 및 0.9 mm^2 의 DICOM 파일로 저장되어 있다. 본 연구에서는 전체 영상 중 위턱굴이 포함된 두개골 부위 횡단면 영상을 총 2,969장을 수집하였다.

2. 데이터 전처리

모든 영상은 사후 상태에서 촬영된 기증자 인체 데이터로, 다수의 사례에서 사후 경직에 의한 머리의 회전이 관

찰되었다. 이러한 회전은 경추 관절의 가동 범위에 따라 3차원적으로 다양한 양상으로 나타났다. 위턱굴 내부 형태를 정량적으로 관찰하고, 인공지능 모델의 학습 성능을 향상시키기 위해서 임상의 머리 CT 검사 프로토콜과 동일한 수준의 가로면이 보이도록 3차원 보정을 실시하였다[15]. PMCT 영상 간 머리 자세 차이에 따른 회전 오차를 보정하고 공통 좌표계로 재정렬하기 위해 해부학적 기준점 기반의 rigid transformation 방법을 적용하였다. 구체적으로 각 사례의 횡단면 영상에서 5개의 기준점(NS: nasal septum, IOP: internal occipital protuberance, right TP: tympanic plate, left TP, right OCO: outer canthus of the orbit)을 지정하고, 이들 기준점의 3차원 좌표를 이용하여 머리의 회전 및 평행 이동 변환을 수행하였다. 해당 보정 알고리즘은 대응되는 기준점 간 거리 차이를 최소화하는 방식으로 최적의 회전 행렬과 이동 벡터를 산출하며, 영상의 형태를 변형하지 않고 머리 자세만을 보정하였다. 해부학적으로 NS와 IOP 간 수직 정렬 상태와, right TP와 left TP 간 수평 정렬 상태를 기준으로 머리 회전 보정이 적절하게 이뤄졌는지 확인하였고, 실제 임상 영상 촬영 단면과 다른 일부 경우에는 수동으로 미세 조정을 실시하였다. 영상에서 NS를 제외한 나머지 기준점은 뼈 구조에 해당하므로, HU (hounsfield unit)가 1000 이상인 경우에만 채택하는 기준을 적용해 기준점 설정의 일관성을 확보하고자 하였다.

인공지능 모델에 학습을 위한 전처리과정으로서, 영상의 불필요한 영역을 제거하고자 512×512 pixels에서 256×256 pixels로 Crop을 수행하였다. 위턱굴은 영역의 분할을 위해 초기에는 bone window setting을 적용하였으나, 위턱굴 내 액체가 가득 찬 경우 또는 이물질이 존재하는 경우 위턱뼈-위턱굴 간의 대조도가 감소하여 경계 설정에 어려움이 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 위턱굴 내 경계 인식 정확도를 고려하여 brain window setting (WL: 40, WW: 100)을 적용하였다. 모든 프로그래밍은 Python 3.9.19 Version, 사용된 라이브러리는 Pytorch를 활용하였다.

위턱굴 영역의 정확한 분할을 위해 웹 기반의 오픈 소스 라벨링 도구인 CVAT (Computer Vision Annotation Tool, Palo Alto, California, USA)을 사용하여 방사선사 면허를 가진 4명의 관찰자가 수동으로 위턱굴 영역 라벨링을 수행하였다. 라벨링 과정에서 관찰자 간 차이를 최소화하기 위해, 라벨링 수행 이전에 위턱굴의 해부학적 범위와 경계 설정 기준에 대해 사전 교육을 실시하여 라벨링 기준을 표준화하였다. 관찰자 간 측정 오차를 최소화하기 위해, 라벨링 실시 중 일정 간격으로 4인의 라벨링 결과를 취합, 동일 기준으로 수정하는 과정을 거쳤다. 특히 일부 사례에서 위턱굴 내부에 액체 잔존 또는 위턱굴 입구(otium) 부

위에서 경계 설정에 어려움이 있었다. 위턱굴은 해부학적으로 위턱뼈 내에 형성된 공동(cavity)이라는 점에 근거하여, 위턱굴을 둘러싸고 있는 위턱뼈의 골성 경계(bony boundary)를 기준으로 라벨링을 수행하였다. 골성 경계의 판단은 CT 영상에서 관찰되는 HU (hounsfield unit) 값을 함께 참고하였다. 구체적으로, 위턱뼈의 평균 HU 값은 약 1000 이상, 위턱굴 내강에 존재하는 공기의 경우 HU 값은 약 -200, 액체가 잔류하는 경우 약 70으로 나타났다. 이처럼 물질의 밀도차에 기반한 HU 값의 차이를 기준으로, 위턱굴 내부 공간과 이를 둘러싸는 위턱뼈의 경계를 구분하였다. 이를 통해 위턱뼈의 골성 경계를 기준으로 위턱굴 영역의 일관된 라벨링을 수행하고자 하였다.

3. 심층학습 모델

전처리가 완료된 위턱굴 영상의 자동 분할을 위해 Deep U-Net [16] 기반 심층학습 모델을 적용하였다. Deep U-Net은 인코더와 디코더로 구성되어 있으며, 인코더에서는 convolution과 pooling 연산을 통해 영상의 주요 특징을 추출하고, 디코더에서는 up sampling과 skip connection을 통해 공간적 해상도를 복원하면서 세부 구조 정보를 반영한다(Fig. 1). 구체적으로, 인코더 단계에서 사용된 Conv 3×3 (convolution 3×3) 연산은 입력 영상으로부터 국소적인 특징을 추출하며, ReLU (rectified linear unit) 활성화 함수는 모델의 학습 효율 향상과 안정적인 학습을 지원한다. Max pooling 2×2는 추출된 특징 맵의 공간 해상도를 감소시켜 중요한 특징을 유지하면서, 학습에 필요한 계산량을 줄이는 역할을 한다. 디코더 단계에서는 Up-conv 2×2 (Up-convolution 2×2)를 통해 특징 맵의 해상도를 증가시키고, 이 과정에서 인코더 단계의 대응되는 특징 맵을 copy and crop 방식으로 결합해 위치 정보와 세부 구조를 효과적으로 복원한다. 마지막 conv 1×1 (convolution 1×1) 연산을 통해 각 pixel 위치의 특징 벡터를 클래스 수에 맞게 변환하여 최종 분할 결과를 생성한다.

위턱굴 분할 모델의 데이터 구성은 Train 6: Validation 2: Test 2의 비율로 구성되어 있다. 해당 구성에서 특정 데이터의 편향적 선택에 의한 모델의 과적합을 방지하고, 모든 PMCT 데이터를 동일한 방법으로 교차 검증하고자 K-fold Validation 기법을 적용하였다. 본 연구에서는 5-fold 교차 검증을 통해 총 70 사례를 5개의 fold로 나눠 1 fold당 14 사례씩 분배하였다.

4. 분할 모델 성능 평가

의료영상 분할 단계에서는 모델의 예측 결과와 실제 정

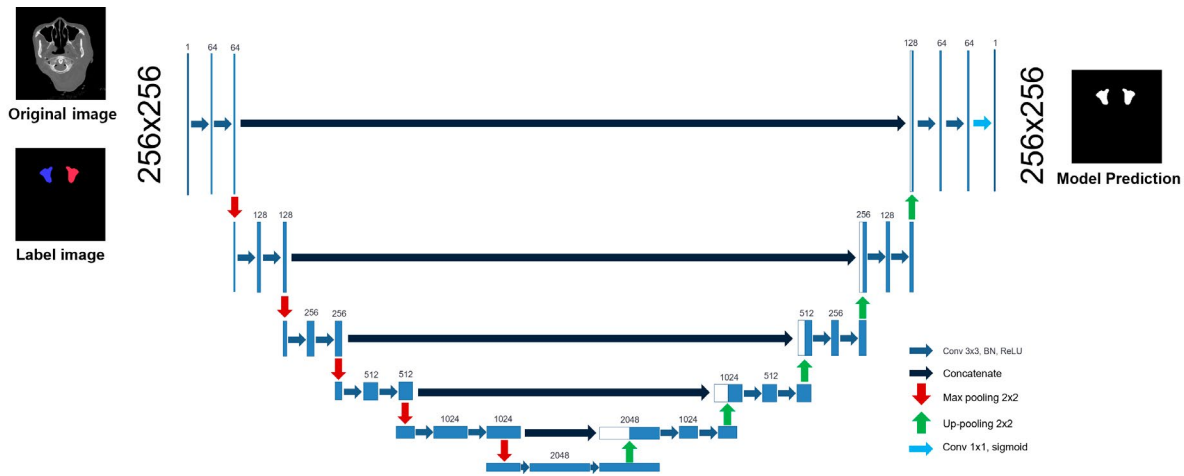


Fig. 1. The scheme of U-Net architecture used for maxillary sinus region segmentation in this study.

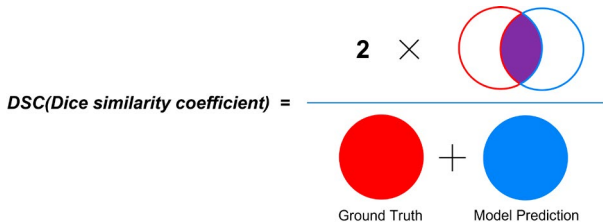


Fig. 2. Illustration of the concept of Dice similarity coefficient (DSC).

답 간의 유사도를 정량적으로 평가하기 위해 Dice similarity coefficient (DSC)를 사용하였다. DSC는 본 연구에서 라벨링을 통해 수집된 실제 위턱골 영역과 모델이 예측한 위턱골 영역의 겹치는 정도를 측정해 중첩 정도를 0에서 1 사이의 값으로 나타내도록 했다.

$$DSC = \frac{2 \times |A \cap B|}{|A| + |B|} \quad (1)$$

식 (1)에서 DSC가 도출되는 공식을 나타내었다(A: 실제 위턱골 영역, B: 모델이 예측한 위턱골 영역). DSC 값이 1에 가까울수록 모델의 예측이 실제와 높은 일치도를 의미한다(Fig. 2).

5. 위턱골 Volume 측정

실제 수집된 위턱골 부피의 정량적인 측정을 통해 남녀 간, 그리고 좌우측 간의 위턱골 부피의 차이가 있는지를 확인하고자 하였다.

위턱골 부피 분석에 있어 사례 간 pixel spacing 차이가 존재하였으나, 본 연구의 최종 분석에서는 voxel 간격을

등방성으로 맞추기 위한 resampling 과정은 적용하지 않았다. 대신 각 사례별 DICOM 메타데이터에 포함된 pixel spacing과 slice thickness를 기반으로 개별 voxel의 실제 물리적 부피를 산출 및 기록하였고, 위턱골 영역에 해당하는 모든 voxel의 부피를 합산하여 위턱골 전체 부피를 계산하고자 하였다.

이를 위해 라벨링된 위턱골 영상을 바탕으로 pixel 단위의 영역을 계측하였으며, 라벨이 지정된 pixel은 1로 인식하고, 라벨이 지정되지 않은 background는 0으로 인식해 이진화하였다. 이후 영상의 voxel size 및 matrix size 등의 정보를 반영 후, 작성된 알고리즘을 이용해 위턱골 내부 부피를 산출하였다.

결 과

1. Deep U-Net을 활용한 위턱골 분할 성능

총 70 사례의 위턱골을 심층학습 기반 분할 모델 Deep U-Net을 통해 위턱골 영역의 분할을 수행하였고, 모델의 예측 성능에 따른 결괏값은 0.8921 ± 0.019 로 나타났다. Fig. 3에는 결과 중 특히 DSC가 가장 높았던 유사도를 보여준 사례와 가장 낮았던 유사도를 보여준 사례를 나타내었다. DSC가 가장 높았던 사례에서는, 위턱골 내 잔류 액체가 존재하거나 미세한 경계 구조에서도 실제 정답과 유사한 수준의 예측 결과를 보였다. 반대로 DSC가 가장 저조한 사례에서는 위턱골의 최상단 및 최하단 단면에서 위턱골의 영역이 미세하여 식별에 한계가 있고, 주변 조직과 경계가 모호해지면서 성능이 저하된 것으로 확인되었다.

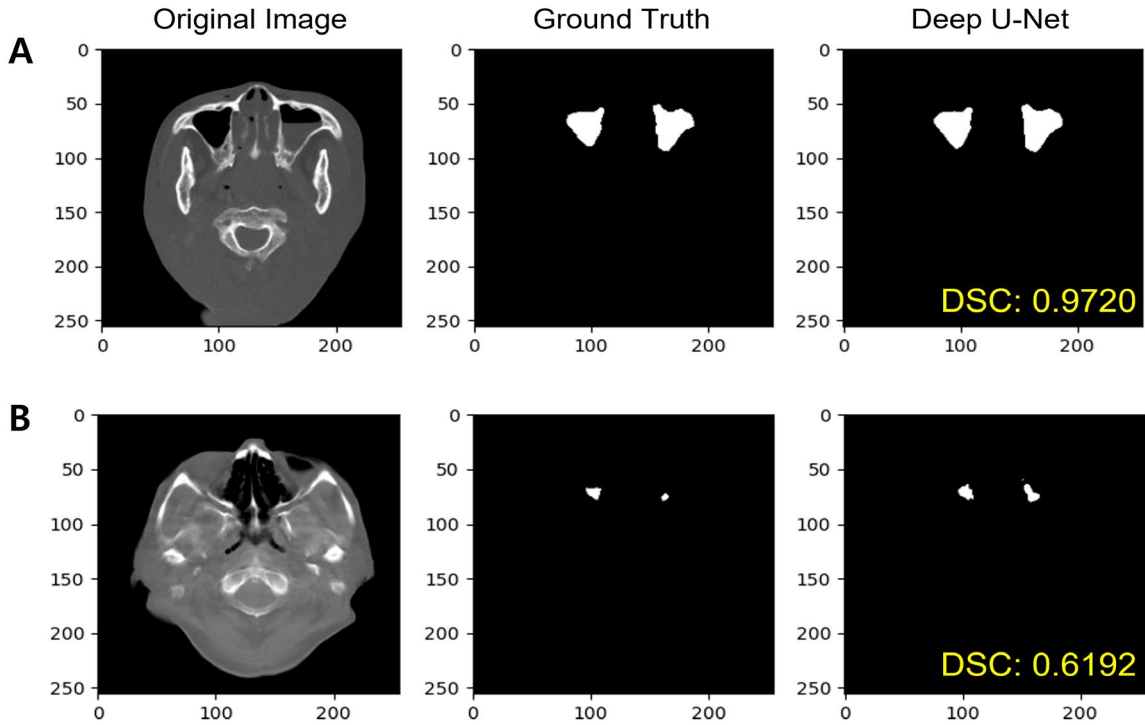


Fig. 3. Maxillary sinus segmentation results (A) The highest DSC case, (B) The lowest DSC case.

2. 위턱골 Volume 값 및 통계분석

수집된 남녀 각 35사례의 위턱골을 대상으로 부피를 측정하였으며, 전체 위턱골 부피의 평균과 표준편차 데이터의 분포는 Fig. 4에서 나타내었다. 남성의 평균 위턱골 부피($20.22 \pm 7.12 \text{ cm}^3$)와 여성의 평균 위턱골 부피($17.58 \pm 7.71 \text{ cm}^3$)를 비교했을 때 남성의 위턱골 부피가 여성보다 더 큰 것으로 나타났다. 남녀 간 위턱골 부피에 대해서 정규성 검정을 위해 Shapiro-wilk 검정을 실시한 결과, 남성의 전체 위턱골 부피는 정규성을 만족하지 못했다 ($p < 0.05, p = 0.009$). 여성의 전체 위턱골 부피는 정규성을 만족하는 것으로 나타났다 ($p > 0.05, p = 0.764$). 이에 따라 두 집단 간의 유의미한 차이를 검증하기 위해 비모수 검정인 Mann-Whitney U-test를 실시하였다. 분석 결과, 남성과 여성의 전체 위턱골 부피 간에는 유의미한 차이가 나타나지 않았음을 확인하였다 ($p = 0.372$). 즉, 남녀 간 위턱골 전체 부피는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다 ($p > 0.05$).

추가로, 동일하게 수집된 전체 70사례에서 남녀 구분 없이 위턱골의 좌측과 우측의 부피에 대해서도 측정을 실시하여 해당 값의 평균과 표준편차에 대한 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 위턱골 좌측의 평균 부피($9.63 \pm 3.84 \text{ cm}^3$)는 우측의 평균 부피($9.27 \pm 3.76 \text{ cm}^3$)보다 상대적으로 더 큰

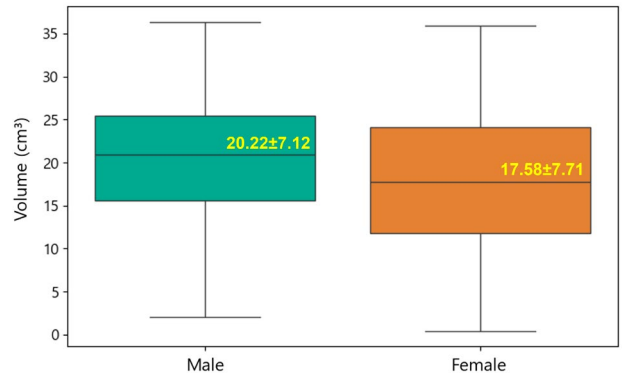


Fig. 4. Comparison of maxillary sinus volume between male and female calculated by proposed model in this study.

것으로 나타났다. 위턱골의 좌측과 우측에 대해 정규성 검정을 위해 Shapiro-wilk 검정을 시행한 결과, 좌측 위턱골에서는 정규성을 따르지 않았고 ($p = 0.008$), 마찬가지로 우측에서도 정규성을 따르지 않았다 ($p = 0.016$). 전체 위턱골의 좌측과 우측 부피 간의 유의미성을 확인하고자 Mann-Whitney U-test 결과 유의미한 차이는 확인되지 않았다 ($p = 0.424$). 즉, 위턱골의 좌측과 우측 간 전체 부피 역시 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다 ($p > 0.05$).

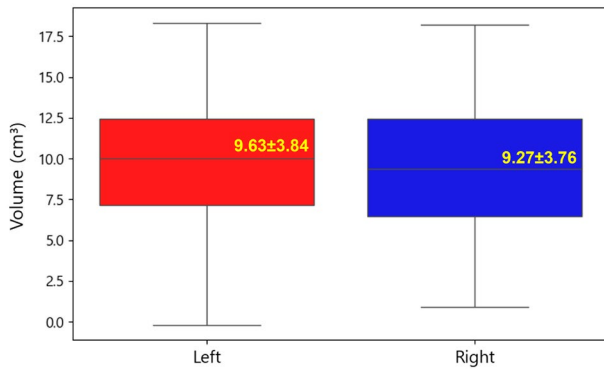


Fig. 5. Comparison of maxillary sinus volume between left and right calculated by proposed model in this study.

고찰

위턱골은 개인 간 변이가 크고 해부학적으로 안정적인 구조를 지녀 법의학 및 인류학 분야에서 계측에 유용한 구조물로 활용되고 있다. 본 연구에서는 PMCT 영상 기반의 심층학습 분할 모델을 적용해 위턱골의 형태학적 특성을 정량적으로 관찰하고, 모델이 예측한 위턱골 부피에서 통계적 유의성을 확인하고자 하였다.

Deep U-Net 기반의 위턱골 분할 모델은 전반적으로 높은 수준의 분할 정확도를 보여, 위턱골의 형태학적 구조를 효과적으로 인식할 수 있음을 확인하였다. DSC가 높은 사례에서는 위턱골 내부 잔류 액체가 존재하여도 이를 위턱골 영역으로 올바르게 인식했고, 위턱골 내부 모서리의 분할에서도 정답과 가깝게 나타내었다. 이를 통해 모델이 위턱골 내부 밀도 차이와 복잡한 해부학적 구조에서도 경계를 안정적으로 식별할 수 있었음을 시사한다. 반면 DSC가 낮은 사례에서는 위턱골의 최상단 및 최하단 부분의 단면에서 위턱골이 매우 작아지거나, 주변 구조와의 경계가 불명확해져 모델의 예측 정확도가 저하되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 영상 단면의 낮은 해상도에 의해 위턱뼈-위턱골 간의 불분명한 경계 구조와 인접 조직과의 밀도가 유사해져 모델의 분할 성능에 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.

남성과 여성 간의 전체 위턱골 부피를 비교한 결과, 남성의 평균 위턱골 부피 ($20.22 \pm 7.12 \text{ cm}^3$)가 여성의 평균 위턱골 부피 ($17.58 \pm 7.71 \text{ cm}^3$)보다 상대적으로 더 넓은 것이 확인되었으나, 통계적으로 유의미한 차이는 없었다 ($p=0.372$). Güleç et al.에서는 남성의 우측 위턱골 부피는 $14.227 \pm 4.669 \text{ cm}^3$, 여성에서 $12.559 \pm 3.773 \text{ cm}^3$ 으로 나타났지만 통계적으로 유의미하지 않았고 ($p=0.060$), 남성의 좌측 위턱골 부피는 $14.396 \pm 5.654 \text{ cm}^3$, 여성에서

는 $12.493 \pm 3.768 \text{ cm}^3$ 로 여성보다 남성에서 위턱골 부피가 상대적으로 더 컸으나 통계적으로 유의미하지 않았다고 보고하였다 ($p=0.094$) [17].

성별의 구분 없이 위턱골의 좌측과 우측 간의 비교 결과, 좌측 위턱골의 평균 부피 ($9.63 \pm 3.84 \text{ cm}^3$)는 우측 위턱골의 평균 부피 ($9.27 \pm 3.76 \text{ cm}^3$)보다 상대적으로 더 크게 나타났으나, 위턱골 좌측-우측 간 부피 차이는 통계적으로 유의미한 차이가 나지 않았다. Dinç et al.에서는 남녀 평균 좌측 위턱골 부피는 $15.381 \pm 4.41 \text{ cm}^3$ 이고 우측 위턱골 부피가 $15.448 \pm 4.45 \text{ cm}^3$ 으로 나타났고, 좌측-우측 간 위턱골 부피는 통계적으로 유의미한 차이가 나지 않는다고 보고되었다 ($p=0.648$) [18]. Muthukumaravel et al.에서는 남성의 우측 위턱골 부피는 $15.16 \pm 0.45 \text{ cm}^3$, 좌측 위턱골 부피는 $15.15 \pm 0.46 \text{ cm}^3$ 로 나타나 남성에서 위턱골의 좌측-우측 사이 부피 차이는 유의하지 않았고 ($p=0.896$), 여성의 우측 위턱골 부피는 $12.65 \pm 1.61 \text{ cm}^3$, 좌측 위턱골 부피는 $12.90 \pm 1.27 \text{ cm}^3$ 로 여성에서도 위턱골의 좌측-우측 간 부피 차이는 유의하지 않음을 보고하였다 ($p=0.232$) [19]. 본 연구에서도 비슷한 경향을 나타내었으며, 따라서 이는 본 연구에서 개발한 위턱골 부피 자동 분할 심층학습 모델이 높은 Dice 계수뿐만 아니라 법의인류학적 선행연구와도 일치하는 것을 보임으로써 향후 활용 가능성을 시사하였다.

위턱골은 형태적으로 개인 간의 해부학적 다양성이 크기 때문에 [5,7], 본 연구에서 사용된 데이터는 성별에 의한 차이보다 개인의 형태적 변이에 더 큰 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 일부 선행연구에서는 위턱골의 높이, 폭, 길이 등 특정 계측 지표를 이용해 성별에 따른 유의한 차이를 보고하였으나 [20], 본 연구에서는 단편적으로 전체 부피만을 이용해 분석하였으므로 국소적인 형태의 차이가 평균화되었을 가능성이 있다. 또한, 본 연구의 대상은 대부분 40~60대 성인으로 구성되어 있어, 연령대에 따른 위턱골의 퇴행 변화로 인해 성별 차이가 희석되었을 가능성도 고려되며 [21,22], 질병에 의해서 위턱골 형태 및 부피 변화의 가능성이 있다 [23]. 그리고 모든 사례는 단일 기관에서 수집되었고, 대상 수가 제한적이었으며, 연령 분포가 중년층에 집중되어 있어, 성별 및 연령 간의 복합적인 상호작용을 충분히 반영하기에 한계가 있다.

본 연구에서 위턱골의 크기 관련 지표들은 평균적으로 남성에서 더 큰 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 성별 차이는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 위턱골의 단일 계측 지표만으로는 성별을 명확히 구분하기 어렵다는 점을 시사한다. 본 연구에서 적용한 심층학습 모델은 향후 위턱골의 전체 부피뿐만 아니라 형태, 경계, 공간적 분포 등 복

합적인 영상 특징을 동시에 학습할 수 있으며, 이러한 특징들은 단순한 계측값에서 포착되지 않는 성별 관련 정보를 포함할 가능성이 있다. 따라서 본 연구 결과는 위턱골 단일 계측 지표만으로는 성별 구분에 한계가 있음을 보여주는 동시에, 이러한 한계를 보완하기 위한 도구로서 심층 학습 기반 영상 분석의 필요성을 뒷받침한다.

더 나아가, 위턱골의 형태 분석은 법의인류학 실무현장에서 생전 영상(ante-mortem CT)과 PMCT 간 영상을 비교해 개인식별을 지원하는 사례가 있으며, 완전한 골격 표본이 확보되지 않았을 때에도 3차원 영상 기반의 위턱골 측정으로 유사도 비교, 집단 내 변이 평가 등의 목적으로 적용되고 있으며[24], 특히 위턱골 기반 식별은 단독으로 높은 정확도를 보장하기보다는 다양한 법의학적 증거(골격 측정값, 치아 기록, 유전자 데이터 등)와 함께 사용될 때 그 유용성이 더욱 향상되는 것으로 보고되고 있다[25].

다만 다수 기존 연구들은 대부분 2차원 계측에 기반하여 분석을 수행하였으며, 실제 3차원 형태를 정량적으로 분석하는 것은 시간적, 기술적 문제로 인해 널리 도입되지 않았다. 그러나 최근 인공지능기술의 확산으로, 법의학 분야에서는 신원확인 및 사인구명 보조를 위해 심층학습 모델이 활발하게 적용되고 있다. 특히 부검 전 시행되는 사후전산화단층촬영을 활용하여, 성별 추정 및 연령 추정과 관련된 연구들이 많이 발표되고 있다[26,27].

따라서 본 연구에서 개발한 모델을 활용하여, 최근 널리 도입되고 있는 PMCT 데이터 및 의료기관에서 촬영된 의무기록인 AMCT 데이터에서 위턱골을 자동 추출하여, 심층학습 모델 학습에 필요한 데이터를 대량으로 확보, 성별 추정 및 연령추정, 개인식별 등의 성능을 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 기존의 수동 지표들 및 영상 단면 기반의 2차원적 형태 정보를 넘어, 3차원적인 부피 및 형태 정보를 심층학습 모델에 학습시킴으로써 기존에 확인된 지표 외에 새로운 지표 발견 및 더 높은 성능을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 사후전산화단층촬영 영상을 이용하여 심층학습 기반 위턱골 자동 분할 및 부피 계산 모델을 구축하고, 그 성능과 분석 결과를 검토하였다. 제안된 Deep U-Net 기반 모델은 위턱골 영역을 안정적으로 분할하였으며, 이를 통해 산출된 위턱골 부피는 성별 및 좌우 간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 위턱골 부피에 대한 기존 선행연구와 유사한 경향을 나타내

며, 본 연구에서 적용한 자동 분할 기법이 사후 CT 영상의 형태학적 분석에 적용 가능성을 시사한다. 향후 대상 수와 분석 변수를 확대한 추가 연구를 통해, 본 기법의 법의인류학적 활용 가능성에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Spradley MK, Jantz RL. Sex estimation in forensic anthropology: skull versus postcranial elements. *J Forensic Sci.* 2011;56:289-96.
2. Fisher B, Mitteroecker P. Allometry and Sexual Dimorphism in the Human Pelvis. *Anat Rec.* 2017;300:698-705.
3. Spradley MK, Metric Methods for the Biological Profile in Forensic Anthropology: Sex, Ancestry, and Stature. *Acad Forensic Pathol.* 2016;6:391-99.
4. Barreiro MB, Cunha E, Almeida M, Ferreira MT. Low-intensity burning effects on human skeletal remains: Insights from a case study. *Egypt J Forensic Sci.* 2025;15:60.
5. Iturralde-Garrote A, Sanz JL, Forner L, Melo M, Puig-Herberos C. Volumetric Change of the Paranasal Sinuses with Age: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2023;12:3355.
6. Christoloukas N, Mitsea A, Rontogianni A, Angelopoulos C. Gender Determination Based on CBCT Maxillary Sinus Analysis: A Systematic Review. *Diagnostics (Basel).* 2023;13:3536.
7. Papadopoulou AM, Bakogiannis N, Skrapari I, Bakoyianis C. Anatomical Variations of the Cavities and Paranasal Sinuses: A Systematic Review. *Cureus.* 2021;13:e12727.
8. AI Hatmi AS, AI Ajmi E, Albalushi H, AI Lawati M, Sirasanagandla SR. Anatomical variations of the frontal sinus: A computed tomography-based study. *F1000Res.* 2023;12:71.
9. Fajarwati WR, Menik P, Mindya Y, Nurtami S, Bambang S. Measurements of sex-related differences in maxillary sinus and mandibular canal characteristic using cone beam computed tomography. *Foren Imag.* 2020;21:200371.
10. Patil SA, Aditya A, Kalyanpur K, Kore A, Evaluation of Sexual Dimorphism of Maxillary Sinus from Morphometric Measurements using Cone Beam Computed Tomography (CBCT) A Cross Sectional Study. *J Indian Acad Oral Med Radiol.* 2023;35:412-16.
11. Tanaka LEB, Franco A, Abib RF, Manhaes-Junior LRC, Lopes SLPS. Age- and sex-related changes of the volume of maxillary sinuses quantified via cone beam computed tomography. *Res Soc Dev.* 2021;10:e312101422220.
12. Prabhat M, Rai S, Kaur M, Prabhat K, Bhatnagar P, Panjwani S. Computed tomography based forensic gender determination by measuring the size and volume of the maxillary

- sinuses. *J Forensic Dent Sci.* 2016;8:40-6.
13. Sahlstand-Johnson P, Jannert M, Strobeck A, Abul-Kasim K. Computed tomography measurements of different dimension of maxillary and frontal sinuses. *BMC Med Imaging* 2011;11:8.
 14. Przysańska A, Kulczyk T, Rewekant A, Sroka A, Jończyk-Potoczna K, Lorkiewicz-Muszyńska D, et al. Introducing a simple method of maxillary sinus volume assessment based on linear dimensions. *Ann Anat.* 2018;215:47-51.
 15. Kawazoe Y, Morishita J, Matsunobu Y, Okumura M, Shin S, Usumoto Y, Ikeda N. A simple method for semi-automatic readjustment for positioning in post-mortem head computed tomography imaging. *J Forens Radiol Imaging.* 2019;16:57-64.
 16. Ronneberger O, Fischer P, Brox T, U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *MICCAI* 2015. Springer. 2015;234-41.
 17. Güleç M, Aktop Ö. Three-dimensional volumetric analysis of the maxillary sinus. *Folia Morphol.* 2020;79:563-74.
 18. Dinç K, İçöz D. Maxillary sinus volume changes in individuals with different craniofacial skeletal patterns: CBCT study. *BMC Oral Health.* 2024;24:1516.
 19. Muthukumaravel N, Manjunath KY. Gender differences in the maxillary sinus volume: a study using computed tomography scans of a sample of Tamil Nadu population. *Natl J Clin Anat.* 2016;5:138-42.
 20. Urooge A, Patil BA, Sexual Dimorphism of Maxillary Sinus: A Morphometric Analysis using Cone Beam Computed Tomography. *J Clin Diagn Res.* 2017;11:ZC67-ZC70.
 21. Sharan A, Madjar D. Maxillary sinus pneumatization following extraction: a radopgraphic study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2008;23:48-56.
 22. Levi I, Halperin-Sternfeld M, Zigdon-Giladi H, Machei EE, Horwitz J. Dimensional changes of the alveolar ridge in the posterior maxilla and sinus pnematization following teeth extraction. *J Mol Clin Med.* 2018;1:93-8.
 23. Cho SH, Kim TH, Kim KR, Lee JM, Lee DK, Kim JH, et al. Factors for Maxillary Sinus Volume and Craniofacial Anatomical Features in Adults With Chronic Rhinosinusitis. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.* 2010;136:610-5.
 24. Runge T. The Use of Maxillary Sinus Imaging as a Tool in Human Identification. Doctoral dissertation, Liverpool John Moores University; 2023.
 25. Christoloukas N, Mitsea A, Rontogianni A, Angelopoulos C. Gender Determination Based on CBCT Maxillary Sinus Analysis: A Systematic Review. *Diagnostics.* 2023;13:3536.
 26. Seo T, Yoon Y, Kim Y, Usumoto Y, Eto N, Sadamatsu Y, et al. Sex estimation using skull silhouette images from post-mortem computed tomography by deep learning. *Sci Rep.* 2024;14:22689.
 27. Fukuta M, Kato C, Biwasaka H, Usui A, Horita T, Kanno S, et al. Sex estimation of the pelvis by deep learning of two-dimensional depth images generated from homologous models of three-dimensional computed tomography images. *Forensic Sci Int.* 2020;2:100129.

간추림 : 성별 추정은 법의학적 신원 확인 과정에서 핵심적인 절차로, 뼈를 활용한 추정은 주로 골반과 두개골에서 나타나는 성적 이형성을 기반으로 수행된다. 위턱골을 포함한 코결골은 안면골 내부에 위치하여 사후에도 형태가 비교적 잘 보존되며, 개인 간 해부학적 다양성이 크기 때문에 보조적인 신원 확인 지표로서 활용 가능성이 제기되고 있다. 본 연구는 한국인 사후전산화단층촬영 70사례를 대상으로 U-Net 기반 심층학습 모델을 활용해 위턱골을 자동 분할하고, 위턱골 부피를 계산해 성별 및 좌우간 차이가 있는지를 확인하고자 했다. 그 결과로 U-Net 모델은 전반적으로 높은 정확도의 분할 성능(0.8921±0.019)을 보였다. 모델의 예측에 의해 출력된 위턱골의 부피는 성별 간, 좌우 간 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았으며, 이는 선행연구와 유사한 결과를 나타낸다. 본 연구는 심층학습 기반 위턱골 형태 분석의 가능성을 제시하였으며, 향후 본 모델을 활용한 생전 및 사후전산화단층영상 데이터를 활용한 대량의 학습 데이터를 작성함으로써 3차원 CNN 모델을 제작 성별 및 연령 추정모델을 작성, 기존의 성능을 뛰어넘는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

찾아보기 낱말 : 사후전산화단층촬영, 위턱골, 심층학습, 신원확인, 법의인류학