

한국인 자뼈의 3차원 체적 분석을 이용한 성별판별 연구

심윤택¹, 이 진², 김혜정¹, 노병윤¹, 서인수¹, 이낙원¹,
최창운¹, 김영우¹

¹국립과학수사연구원 광주과학수사연구소 법의학과, ²한양대학교 의과대학 해부·세포생물학교실

Sex Estimation Using Three-Dimensional Volumetric Analysis of the Korean Ulna

Yun Taek Shim¹, Jin Lee², Hye-Jeong Kim¹, Byung-Yoon Roh¹, In-Soo Seo¹,
Nak-Won Lee¹, Chang-Un Choi¹, YeongWoo Kim¹

¹*Division of Forensic Medicine, National Forensic Service Gwangju Institute*

²*Department of Anatomy and Cell Biology, College of Medicine, The Hanyang University of Korea*

Abstract : Sex estimation is an essential step in forensic identification, and various skeletal elements have been studied because human remains are often recovered in fragmented conditions. The ulna is frequently preserved and exhibits sexual dimorphism; however, most previous studies have relied on two-dimensional osteometric methods that may not sufficiently reflect the complex three-dimensional morphology of the bone. Therefore, this study aimed to establish and validate sex estimation equations using three-dimensional volumetric analysis of the Korean ulna based on computed tomography (CT) images. A total of 1,200 CT scans of Korean adult ulnae without pathological deformities or fractures were analyzed. The ulnae were reconstructed into three-dimensional models, and the maximum length and regional volumes of the olecranon, mid-shaft, and distal regions were measured. Logistic regression analysis was performed using 1,000 samples to derive sex estimation equations, and the remaining 200 samples were used for validation. Significant sex differences were observed in all measured regions ($p < 0.05$), and high inter-observer reliability was confirmed with low %TEM values. In the validation dataset ($n = 200$), sex estimation based on maximum length correctly classified 82.0% of right ulnae and 84.0% of left ulnae. In comparison, sex estimation based on three-dimensional volumetric measurements of the olecranon, mid-shaft, and distal regions yielded higher classification accuracies of 90.5% and 90.0% for the right and left ulnae, respectively. In particular, volumetric analysis of the mid-shaft region demonstrated markedly improved sex estimation accuracy compared with conventional two-dimensional osteometric methods. These findings suggest that three-dimensional volumetric analysis more effectively reflects the morphological characteristics

This work was supported by the National Forensic Service (NFS2026MED03), Ministry of Interior and Safety, Republic of Korea.

저자(들)는 '의학논문 출판윤리 가이드라인'을 준수합니다.

저자(들)는 이 연구와 관련하여 이해관계가 없음을 밝힙니다.

Received: May 13, 2026; **Revised:** June 15, 2026; **Accepted:** June 18, 2026

Correspondence to: 심윤택 (국립과학수사연구원 광주과학수사연구소 법의학과) **E-mail:** rino333@korea.kr

and sexual dimorphism of the ulna than traditional linear measurements. This study provides population-specific standards for sex estimation in Koreans and may contribute to forensic anthropology and personal identification in medico-legal contexts.

Keywords : Forensic Anthropology, Metric method, Sex Characteristics, Tomography, Ulna

서 론

방사선 영상은 법의인류학에서 비침습적 도구로서 중요한 역할을 하며, 사후 컴퓨터단층촬영(post-mortem computed tomography, PMCT)을 통해 사망 전후 손상의 분석 뿐만 아니라 생물학적 프로파일링, 병리적 상태 확인, 골격 외상 평가 등에 활용되고 있다[1-3]. 특히 CT는 조직 손상 없이 내부 구조 분석이 가능하고 3차원 재구성과 반복 분석이 가능하다는 장점을 가지며[2,4], 이러한 특성으로 인해 법의학 및 관련 분야에서 일상적으로 활용되는 핵심 도구로 자리 잡고 있다[1,3,5].

성별판별은 개인 식별 과정에서 가장 기본적인 단계로, 연령, 신장, 체중 등 다른 생물학적 특성과 밀접한 관련이 있다[6]. 골격 요소 중에서는 두개골과 골반이 뚜렷한 성적 이형성을 보여 가장 높은 정확도를 제공하는 것으로 알려져 있다[7]. 그러나, 실제 법의학적 상황에서는 산악 지형에서의 추락, 교통사고 후 시신 유기, 동물에 의한 훼손 등 다양한 환경적 및 상황적 요인으로 인해 유해가 파손되거나 분절된 상태로 발견되는 경우가 많다[8,9]. 또한, 두개골과 골반 역시 부분적이거나 심하게 손상된 상태로 발견되는 경우가 빈번하여 성별판별의 정확도가 저하될 수 있다[10,11]. 따라서 이러한 주요 골격을 사용할 수 없는 경우를 대비하여, 다양한 단일 골 또는 복수 골을 활용한 성별판별 방법의 개발이 필요하다[12].

긴 뼈는 비교적 보존 상태가 양호하고 측정이 용이하다는 특성으로 인해 계측적 성별판별에 널리 활용되어 왔다. 또한 긴 뼈의 길이 측정은 신장 추정 및 성별 예측을 위한 회귀식 적용에 유용한 지표로 알려져 있으며[13], 단일 뼈 또는 몇몇 긴 뼈들의 조합을 통해 더욱 정확한 성별판별이 이루어질 수 있다[14]. 자뼈(Ulna)는 비교적 온전한 상태로 발견되는 경우가 많으며, 길이를 비교한 2차원적 계측 방식에서 뚜렷한 성적 이형성이 나타나 법의인류학 분야에서 성별 추정의 신뢰성 있는 지표로 활용되고 있다[15]. 그러나, 뼈의 크기와 비율은 인구집단에 따라 차이를 보이며, 이러한 차이는 계측 기반 성별판별 방법의 정확도에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 신뢰성 있는 성별판

별을 위해서는 인구집단 특이적인 기준의 확립이 중요하다[16-18].

자뼈는 곡선과 곡면을 포함하는 불규칙한 입체 구조를 가지는 3차원적 골격으로, 시각적으로 명확한 성적 이형성이 존재함에도 이를 정량적으로 반영할 수 있는 계측 방법을 적용하기에는 한계가 있다[19]. 이에 따라 기존 자뼈 연구에서는 주로 길이, 너비, 깊이, 둘레와 같은 2차원적 계측치가 활용되어 왔으나[20,21], 이러한 방법은 복잡한 3차원 형태를 충분히 반영하지 못할 수 있다. 최근에는 골의 형태 정보를 보다 포괄적으로 반영할 수 있는 체적(Volume)과 같은 3차원적 계측의 중요성이 제기되고 있으나[22,23], 자뼈를 대상으로 한 체적 기반 성별판별 연구는 여전히 제한적이며, 특히 한국인을 대상으로 한 CT 기반 연구는 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 한국인 자뼈 CT 영상을 3차원으로 재구성하여 2차원적 계측방식인 위팔뼈의 최대길이(Maximum length)와 3차원적 계측방식인 체적(Volume)을 이용하여 성별판별 함수를 도출하고, 성별판별의 유효성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구는 국립과학수사연구원 서울과학수사연구소에서 법의부검을 진행한 한국인 시신의 CT 영상 중 자뼈의 파손 혹은 기형적 이상이 없는 20대 이상 성인 자뼈 1,200건을 대상으로 진행하였다. 연구에 사용된 시신의 개인정보 및 성별 비율은 감정인에게 비공개로 진행하였으며, 본 연구는 국립수사연구원 생명윤리위원회에서 승인(2023-03-HR)되었고, 사전동의(informed consent) 면제대상으로 인정되어 사전동의는 요구되지 않았다. 1,200건의 연구 대상은 702건의 남성 영상과 498건의 여성 영상으로 평균 연령은 남성 53.9세, 여성 48.8세이었다. Meric method 방정식 도출에 활용한 1,000건의 자뼈 영상은 남성 604건, 여성 396건이었으며 평균 연령은 남성 53.21세, 여성 48.70세이었다. 유효성 검증에 활용한 200건의 머리뼈 영

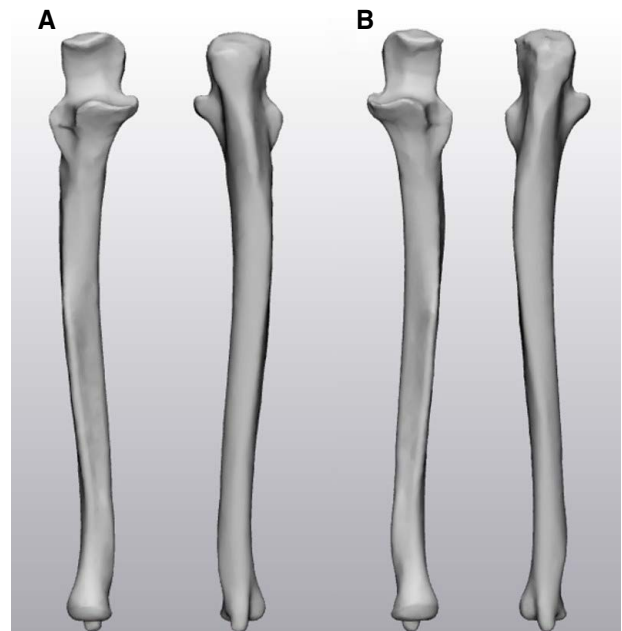
Table 1. Descriptive statistics of object's age

Sex	200 Images		1,000 Images	
	N	Mean $\pm$ sd (years)	N	Mean $\pm$ sd (years)
Male	98	58.16 $\pm$ 15.14	604	53.21 $\pm$ 15.33
Female	102	49.19 $\pm$ 17.62	396	48.70 $\pm$ 15.85
Total	200	53.59 $\pm$ 17.2	1,000	51.42 $\pm$ 15.69

sd, standard deviation

상은 남성 102건, 여성 98건이었으며 평균 연령은 남성 58.16세, 여성 49.19세였다(Table 1).

1,200건의 CT 영상을 촬영하기 위해서 사용된 장비는 법의학 감정을 위하여 사용 중인 PMCT (SOMATOM AS+, Simens Healthcare, Erlangen, Germany) 장비로서, 촬영방법은 Shim [22] 등의 방법에 따라 Whole body scan으로 진행하였다. PMCT 검사로 얻어진 DICOM 파일은 MIMICS 25.0 (Materialise's Interactive Medical Image Control System, Materialise NV, Leuven, Bilgium) 프로그램을 이용하여 226~3071 HU (Hounsfield Units) 범위의 역치값으로 자뼈의 Image를 추출하고, 양쪽 자뼈의 내부 빈 공간을 채워서 Computer Aided Design (CAD)로 변환하였다(Fig. 1). 변환된 모든 자뼈 영상들은 3-matic 17.0 (Materialise's Interactive Medical Image Control System, Materialise NV, Leuven, Bilgium)을 이용하여 자뼈의 최대길이(Maximum length)와 각 부위의 체적(Volume)을 측정할 수 있게 자뼈의 최대길이를 기준으로 축을 설정하였다. 자뼈의 측정은 팔꿈치부위(Olecranon region), 중간부위(Mid-shaft region), 먼쪽부위(Distal region)로 구분하여 측정하였으며, 각 부위의 측정범위의 기준을 설정하기 위해 자뼈의 최대길이를 측정하였다. 이후, 팔꿈치부위(Olecranon region)의 측정범위는 자뼈의 팔꿈치 위 꼭지점에서부터 먼쪽부위로 자뼈 최대길이의 25%에 해당하는 체적을 측정하였고, 먼쪽부위(Distal region)의 측정범위는 자뼈의 먼쪽끝부터 팔꿈치부위로 자뼈 최대길이의 10%에 해당하는 체적을 측정하였다. 중간부위(Mid-shaft region)의 측정범위는 자뼈 최대길이의 50%를 기준으로 팔꿈치부위 쪽으로 10%, 먼쪽부위 쪽으로 10%를 포함하여 자뼈 최대길이의 총 20%에 해당하는 체적을 측정범위로 설정하였다(Fig. 2). 1,000건의 영상을 모두 3-matic 17.0 (Materialise's Interactive Medical Image Control System, Materialise NV, Leuven, Bilgium)을 이용해 오른쪽과 왼쪽 자뼈로 나누어 측정범위를 기준으로 체적을 계측하였다. 최종 성별판별은 오른쪽 자뼈와 왼쪽 자뼈 각각 세 부위 중 두 부위 이상 남성일 경우 남성으로, 두 부위 이상 여성

**Fig. 1.** Three-dimensional reconstruction model used for metric estimation: A. Anterior & posterior plane of right ulna; B. Anterior & posterior plane of left ulna.

일 경우 여성으로 판별하였다.

성별판별을 한 200건의 영상은 2명의 연구자가 자뼈 각 부위의 체적을 계측하였고, 측정자 간 신뢰도는 TEM (Technical Error of Measurement)을 산출하여 평가하였으며, 교차검증(cross-validation)은 수행하지 않았다(Table 2). 1,000건의 CT 영상을 이용하여 독립표본 t-검정(independent t-test)을 이용하여 성별에 따른 차이를 분석하였고, 좌·우 자뼈 간 차이는 대응표본 t-검정(paired t-test)을 사용하여 평가하였다(Table 3). 또한, 로지스틱 회귀분석(logistic regression analysis)을 수행하였으며, 이를 바탕으로 성별판별 방정식을 도출하였다(Table 4). 성별판별은 로지스틱 회귀분석을 통해 도출된 회귀식을 이용하여 수행하였다. 각 회귀식에서 p 는 남성일 예측확률(predicted probability)을 의미하며, $\text{logit}(p) = \alpha + \beta X$ 로 계산하였다. 이후 예측확률은 $p = e^{\text{logit}(p)} / [1 + e^{\text{logit}(p)}]$ 식을 이용하여 산출하였으며, 예측확률이 0.5 이상인 경우 남성, 0.5 미만인 경우 여성으로 분류하였다.

결 과

본 연구에서는 한국인의 자뼈를 3차원으로 재구성한 총 1,200건의 자료를 이용하여, 자뼈의 최대길이와 최대길이

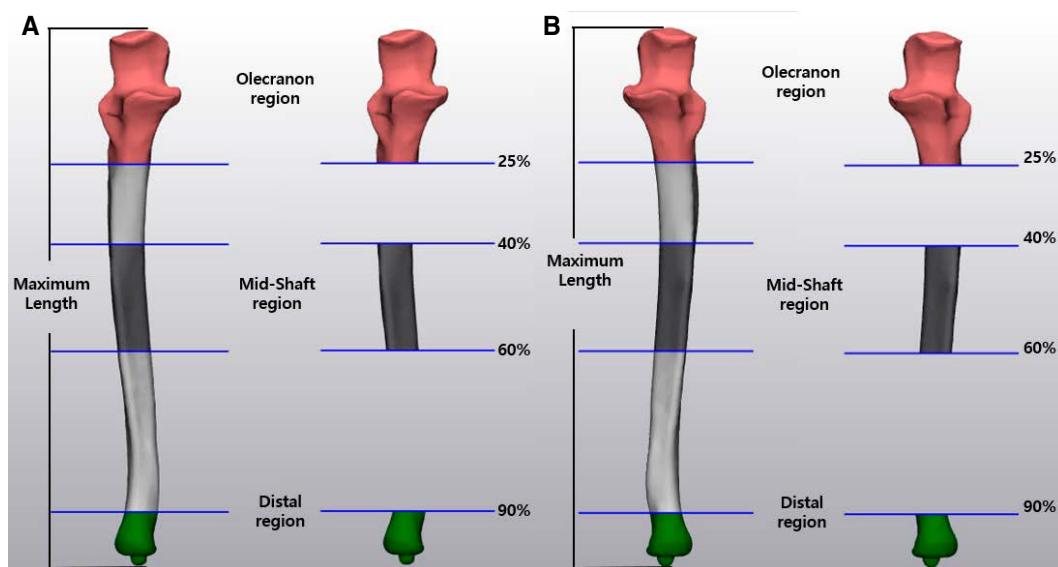


Fig. 2. The right (A) and left (B) ulna volume measurement range of three regions.

Table 2. Intra-observer reliability statistics by each region

		N	Absolute mean difference	TEM	%TEM	R
Right ulna	Olecranon region	200	17.5	38.332	0.056	1.0
	Mid-shaft region	200	18.3	42.063	0.078	1.0
	Distal region	200	10.6	30.492	0.112	1.0
	Maximum length	200	0.008	0.014	0.006	1.0
Left ulna	Olecranon region	200	15.3	37.356	0.055	1.0
	Mid-shaft region	200	14.6	32.060	0.059	1.0
	Distal region	200	20.2	43.434	0.161	1.0
	Maximum length	200	0.009	0.016	0.006	1.0

에 대한 각 부위별 %체적을 측정하였다. 그 결과, 모든 측정 구간에서 성별에 따른 차이가 통계적으로 유의하게 나타났으며, 오른쪽과 왼쪽 자뼈의 차이 역시 유의한 차이가 나타났다(Table 3).

성별판별 방정식을 개발하기 위해 1,000건의 CT 영상을 이용하여 로지스틱 회귀분석을 수행하였으며(Table 4), 이를 통해 성별판별을 위한 회귀식을 도출하였다(Table 5). 이후 도출된 모든 회귀식의 타당성을 검증하기 위해 나머지 200건의 표본을 이용하여 분석을 수행하였다(Table 6).

1. 측정자 간 신뢰도(Technical Error of Measurement; TEM)

본 연구에서는 측정의 일관성과 신뢰도를 확보하기 위

해 측정자 간 일치도(inter-observer agreement)를 정량적으로 평가하였다. 두 명의 독립된 측정자(측정자 1, 측정자 2)가 정의된 모든 해부학적 영역에서 반복 측정하였으며, 결과를 비교하였다. 측정자 간 신뢰도는 절대 평균 차이, 기술적 측정 오차(Technical Error of Measurement, TEM), 상대적 TEM (%TEM), 신뢰도 계수(R)를 기준으로 평가하였다.

분석 결과, 모든 측정 영역에서 측정자 간 높은 일치도가 확인되었다. 절대 평균 차이는 0.008~20.2 단위 범위였으며, TEM 값은 0.014~43.434 단위로 나타났다. 상대적 TEM 값은 0.006~0.161% 범위로 확인되어 전반적으로 매우 낮은 측정 오차를 보였다. 또한, 모든 영역에서 신뢰도 계수(R)는 1.000에 근접하게 나타나 매우 높은 측정 재현성과 측정자 간 일치도를 확인할 수 있었다.

Table 3. Descriptive statistics of the right and left ulna and subregions

	No	Male				Female				P
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	
Right ulna	Olecranon region	12,517mm	12,046.52	45,510.12	125,897	54,540.43	8,516.10	30,622.84	91,999.35	
	Mid-shaft region	63,891.47	10,045.18	5,641.22	100,717.9	43,632.33	6,812.87	24,498.34	73,599.51	
	Distal region	32,012.82	4,832.25	18,203.35	50,356.76	223,05.30	10,249.28	12,251.73	214,187	
	Maximum length	254.66	16.74	220.36	525.65	233.60	12.11	196.34	276.3	
										.001
Left ulna	Olecranon region	79,178.61	12,140.18	49,506.51	12,5497.7	541,01.99	8,690.40	29,235.83	98,230.49	
	Mid-shaft region	63,190.89	9,926.96	26,080.27	100,398.4	43,231.11	7,000.27	23,388.76	78,584.34	
	Distal region	31,686.21	5,024.85	19,805.46	63,150.91	21,714.73	3,795.17	11,693.67	52,516.81	
	Maximum length	252.66	13.84	122	295.07	231.45	16.28	23.94	279.31	
	No	Right Humerus				Left Humerus				P
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	
Right humerus	Olecranon region	69,916.21	16,474.99	30,622.84	125,896.99	69,248.27	16,412.84	29,235.83	125,497.74	.001
	Mid-shaft region	55,868.85	13,323.91	5,641.220	100,717.88	55,286.82	13,200.09	23,388.76	100,398.41	.001
	Distal region	28,168.64	8,842.63	12,251.73	214,187.01	27,737.50	6,688.90	11,693.67	63,150.91	.037
	Maximum length	246.32	18.26	196.34	525.65	244.26	18.11	23.94	295.07	.001

Table 4. Logistic regression analysis of the ulna volume

		B	S.E.	Wald	Degrees of freedom	Significance probability <i>p</i> -value (<i>p</i>)	Exp (B)	95% confidence interval about EXP (B)	
								Lower	Upper
Right ulna	Olecranon region	.00023	.000	247.846	1	.000	1.000	1.000	1.000
	Constant	-15.034	.962	244.193	1	.000	.000		
	Mid-shaft region	.00027	.000	256.568	1	.000	1.000	1.000	1.000
	Constant	-13.893	.875	252.031	1	.000	.000		
	Distal region	.00042	.000	278.362	1	.000	1.000	1.000	1.000
	Constant	-10.604	.648	267.689	1	.000	.000		
	Maximum length	.133	.008	256.731	1	.000	1.142	1.124	1.161
	Constant	-31.950	2.011	252.371	1	.000	.000		
Left ulna	Olecranon region	.00023	.000	247.691	1	.000	1.000	1.000	1.000
	Constant	-14.333	.916	244.746	1	.000	.000		
	Mid-shaft region	.00027	.000	253.108	1	.000	1.000	1.000	1.000
	Constant	-13.559	.858	249.493	1	.000	.000		
	Distal region	.00054	.000	255.081	1	.000	1.001	1.000	1.001
	Constant	-13.504	.852	251.195	1	.000	.000		
	Maximum length	.121	.008	249.940	1	.000	1.129	1.112	1.146
	Constant	-28.976	1.851	245.149	1	.000	.000		

EXP(B), exponentiated regression coefficient; interpreted as the odds ratio

Table 5. Logistic regression equations and classification criteria for sex estimation using the ulna

Measurement regions		Discrimination equation	Predicted probability	Sectioning point
Right ulna	Olecranon region	Logit(p) = -15.034 + 0.00024 × RUOR	$p = e^{\text{logit}(p)} / [1 + e^{\text{logit}(p)}]$	Male: $p \geq 0.5$; Female: $p < 0.5$
	Mid-shaft region	Logit(p) = -13.893 + 0.00027 × RUMSR		
	Distal region	Logit(p) = -10.604 + 0.00042 × RUDR		
	Maximum length	Logit(p) = -31.950 + 0.13288 × RUML		
Left ulna	Olecranon region	Logit(p) = -14.333 + 0.00023 × LUOR		
	Mid-shaft region	Logit(p) = -13.559 + 0.00027 × LUHMSR		
	Distal region	Logit(p) = -13.504 + 0.00054 × LUDR		
	Maximum length	Logit(p) = -28.976 + 0.12144 × LUML		

RUOR, right ulna olecranon region; RUMSR, right ulna mid-shaft region; RUDR, right ulna distal region; RUML, right ulna maximum length; LUOR, Left ulna olecranon region; LUMSR, left ulna mid-shaft region; LUDR, left ulna distal region; LUML, left ulna maximum length; p, predicted probability of being male.

2. 최대길이(Maximum Length)

자뼈의 최대길이는 성별 간 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 좌우 간에는 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 최대길이를 이용한 성별판별 정확도는 오른쪽 경우 성별판별은 일치가 164건(82%), 불일치가 36건(18%)이었으며, 여성은 102건 중 75건(73.5%), 남성은 98건 중 89건(90.8%)의 일치율을 보였다. 왼쪽 자뼈의 경우, 성별일

치가 168건(84%), 불일치가 32건(16%)이었으며, 여성은 102건 중 78건(76.5%), 남성은 98건 중 90건(91.8%)의 일치율을 보였다(Table 6).

3. % 구간 체적(% Volume)

오른쪽 자뼈의 경우, 팔꿈치부위, 중간부위, 먼쪽부위 모두 성별일치가 181건(90.5%), 불일치가 19건(9.5%)이었

Table 6. Sex consistency of three region in right and left ulna

	Right ulna									
	Olecranon region		Mid-Shaft region		Distal region		Sex estimation		Maximum length	
	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match
Male (N=98)	94 (95.9%)	4 (4.1%)	94 (95.9%)	4 (4.1%)	94 (95.9%)	4 (4.1%)	94 (95.9%)	4 (4.1%)	89 (90.8%)	9 (9.2%)
Female (N=102)	87 (85.3%)	15 (14.7%)	87 (85.3%)	15 (14.7%)	87 (85.3%)	15 (14.7%)	87 (85.3%)	15 (14.7%)	75 (73.5%)	27 (26.5%)
Total (N=200)	181 (90.5%)	19 (9.5%)	181 (90.5%)	20 (10%)	181 (90.5%)	19 (9.5%)	181 (90.5%)	19 (9.5%)	164 (82.0%)	36 (18.0%)
<i>p</i>	<0.05									
	Left ulna									
	Olecranon region		Mid-Shaft region		Distal region		Sex estimation		Maximum length	
	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match	Match	Mis match
Male (N=98)	95 (96.9%)	3 (3.1%)	95 (96.9%)	3 (3.1%)	95 (96.9%)	3 (3.1%)	95 (96.9%)	3 (3.1%)	90 (91.8%)	8 (8.2%)
Female (N=102)	85 (83.3%)	17 (16.7%)	85 (83.3%)	17 (16.7%)	85 (83.3%)	17 (16.7%)	85 (83.3%)	17 (16.7%)	78 (76.5%)	24 (23.5%)
Total (N=200)	180 (90%)	20 (10%)	180 (90%)	20 (10%)	180 (90%)	20 (10%)	180 (90%)	20 (10%)	171 (85.5%)	29 (14.5%)
<i>p</i>	<0.05									

다. 성별로 나누어 보았을 경우, 팔꿈치부위, 중간부위, 먼쪽부위 모두 여성은 102건 중 87건(85.3%), 남성은 98건 중 94건(95.9%)의 일치율을 보였다. 최종성별판별에서도 성별일치가 181건(90.5%), 불일치가 19건(9.5%)이었으며, 여성이 102건 중 87건(85.3%), 남성은 98건 중 94건(95.9%)의 일치율을 보였다.

왼쪽 자뼈의 경우도, 팔꿈치부위, 중간부위, 먼쪽부위 모두 성별일치가 180건(90.0%), 불일치가 20건(10%)이었다. 성별로 나누어 보았을 경우, 팔꿈치부위, 중간부위, 먼쪽부위 모두 여성은 102건 중 85건(83.3%), 남성은 98건 중 95건(96.9%)의 일치율을 보였다. 최종성별판별에서도 성별일치가 180건(90.0%), 불일치가 20건(10%)이었으며, 여성이 102건 중 85건(83.3%), 남성은 98건 중 95건(96.9%)의 일치율을 보였다(Table 6).

오른쪽과 왼쪽 자뼈의 % 구간 체적 측정 방법은 세 부위 모두 높은 성별 추정 확도(90~90.5%)를 나타냈으나, 계측 분석한 모든 영역에서 여성의 분류 정확도가 남성보다 약 10~13% 낮은 경향이 나타났다. 반면, 최대길이를 사용한 2차원적 계측방법은 가장 낮은 정확도(82~84%)를 보였

으며, 여성의 분류 정확도가 남성보다 약 15~16% 낮은 경향이 나타났다.

고 찰

본 연구는 한국인의 자뼈를 대상으로 CT 영상을 촬영한 후 3차원 영상으로 재구성하여 팔꿈치부위(Olecranon region), 중간부위(Mid-shaft region), 먼쪽부위(Distal region)의 체적을 계측하고, 이를 이용한 성별판별 방정식을 도출하여 그 유효성을 검증하고자 하였다.

본 연구에서 수행한 측정자 간 신뢰도 분석 결과, 적용된 계측 방법은 높은 수준의 일관성과 재현성을 나타냈다(Table 2). 절대 평균 오차와 %TEM 값이 전반적으로 매우 낮게 나타났으며, 특히 모든 측정 부위에서 %TEM 값이 대부분 0.02% 이하로 확인되어 계측 기준점의 식별이 안정적으로 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 사용한 3차원 영상 기반 체적 계측 방법이 높은 신뢰성을 확보하고 있으며, 도출된 성별판별 결과 또한 충분한

타당성을 가진다는 점을 뒷받침한다.

본 연구에서는 자뼈의 모든 부위에서 성별 간 유의한 차이가 나타났으며, 좌·우 자뼈 간에도 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다(Table 3). 이러한 성별 차이는 사춘기 동안 나타나는 성호르몬의 영향에 기인하는 것으로 사료된다. 남성의 경우 테스토스테론이 근육 발달을 촉진하고 뼈에 가해지는 기계적 부하를 증가시켜 보다 견고하고 두꺼운 골격 구조를 형성하는 반면, 여성의 에스트로겐은 골 성숙을 상대적으로 조기에 유도하여 뼈 길이와 크기가 제한되는 경향을 나타내기 때문이다[24,25]. 또한 오른쪽 자뼈의 계측값이 왼쪽보다 유의하게 크게 나타난 것은 한국 사회에서 나타나는 오른손 우세(right-handedness) 경향과 관련이 있는 것으로 보인다. 이는 성장기 동안 반복적인 우측 상지 사용이 자뼈의 형태와 체적 변화에 영향을 미친 결과로 사료되며, 어린 시절부터 오른손 사용이 일반화되어 있는 사회·문화적 특성과도 관련이 있는 것으로 생각된다[26,27].

자뼈는 계측방법 성별판별에 유용하게 이용되는 뼈이며, 실제 법의학적 상황에서는 자뼈의 한쪽만 수습되는 경우가 많기 때문에 좌·우 각각에 적용 가능한 성별판별 기준을 마련하는 것이 중요하다. 또한, 인구집단에 따라 형태적 차이가 존재하기 때문에 각 인구집단에 적합한 성별판별 기법이 필요하다. 기존 선행연구들[28-32]에서는 다양한 인구집단의 자뼈를 대상으로 팔꿈치부위, 중간부위, 먼쪽부위에 대한 2차원적 계측을 이용하여 성별판별을 수행하였으며, 각 인구집단에 따라 다양한 성별판별 정확도를 보고하였다.

Banyeh 등[28]은 가나 성인 191명을 대상으로 자뼈의 체표 계측 길이를 이용한 성별판별 연구를 수행하였으며, 76.3%의 성별일치율을 보고하였다. Barrier 등[29]은 현대 남아프리카 흑인 400명의 자뼈를 분석한 결과, 자뼈 몸통 최소직경이 가장 우수한 단일 성별판별 변수로 나타났으며, 성별일치율은 남성 84%, 여성 86%이었다고 보고하였다. 반면 팔꿈치 최대너비 단독 변수의 성별일치율은 남성 76%, 여성 83%로 나타났다. 또한 연구자들은 남아프리카 흑인 집단의 성적 이형성이 서구 집단에 비해 상대적으로 낮다고 해석하였으며, 해당 인구집단에 특화된 성별판별 기준의 필요성을 강조하였다.

Celbis 등[30]은 터키인 시신 표본 127구를 대상으로 우측 자뼈 최대길이를 이용한 성별판별을 수행하였으며, 자뼈 최대길이 단독 변수만으로 91.3% (남성 88.8%, 여성 95.7%)의 높은 성별일치율을 보고하였다. Issa 등[31]은 이집트 성인 시신 122구를 대상으로 자뼈 최대길이를 이용한 성별판별을 수행한 결과, 92.3% (남성 95.3%, 여

성 89.2%)의 높은 성별일치율을 나타냈다고 보고하였으며, 자뼈가 골반이나 대퇴골과 같은 주요 골격이 손상된 상황에서 유용한 대체 지표가 될 수 있다고 하였다. 또한 Zapico 등[32]은 유럽계 미국인 및 라틴아메리카인 집단의 팔뼈 계측 연구에서 자뼈 팔꿈치 최소너비(Ulna Minimum Breadth of Olecranon)가 가장 우수한 성별판별 변수라고 보고하였다. 자뼈 팔꿈치 최소너비 단독 사용 시 유럽계 미국인 집단에서는 91.3%, 라틴아메리카 집단에서는 82.4%의 성별일치율을 나타냈으며, 특히 부분 유골(fragmentary remains) 상황에서 높은 활용 가능성이 있다고 제시하였다.

한국인을 대상으로 한 Lee 등[21]의 연구를 살펴보면, 오른쪽 자뼈를 대상으로 최대길이와 몸통최소둘레를 분석한 결과, 최대길이는 전체 81.5% (남성 83.7%, 여성 77.1%), 몸통최소둘레는 전체 71.2% (남성 70.4%, 여성 72.9%)의 성별일치율을 나타냈다고 보고하였다. 본 연구에서 오른쪽 자뼈의 2차원적 계측방식인 최대길이의 성별일치율은 전체 82% (남성 90.8%, 여성 73.5%)로 나타나 Lee 등[21]의 연구 결과와 유사한 경향을 보였다. 그러나, 3차원적 계측방식을 적용한 결과, Lee 등[21]의 몸통최소둘레에 해당하는 중간부위의 성별일치율은 전체 90.5% (남성 95.9%, 여성 85.3%)로 나타나 약 19% 향상된 결과를 보였다. 왼쪽 자뼈의 경우 최대길이는 전체 85.5% (남성 91.8%, 여성 76.5%), 중간부위는 전체 90% (남성 96.9%, 여성 83.3%)의 성별일치율을 나타내어 오른쪽 자뼈의 결과와 유사한 경향을 보였다. 또한, 본 연구에서 오른쪽 자뼈와 왼쪽 자뼈의 세 부위의 성별판별 정확도가 동일하게 나타났으며, 이는 각 부위별 체적이 서로 높은 상관성을 나타냈기 때문으로 사료된다. Lee 등[21]의 연구에서는 한국인 자뼈 최대길이의 성별판별 정확도가 여성보다 남성에서 높게 나타났으며, 본 연구에서도 남성의 성별판별 정확도가 여성보다 높게 나타났다. 이러한 남녀 간 성별판별 정확도의 차이는 한국인 집단에서 나타나는 형태학적 특성과 성적 이형성의 양상과 관련이 있는 것으로 사료된다. Kim 등[33]은 한국인의 머리뼈를 다른 인구집단의 두개골과 비교하였을 때, 한국인 남성의 머리뼈는 유럽인 남성보다 상대적으로 작고, 한국인 여성의 머리뼈는 일본인 및 인도인 여성보다 크게 나타난다고 보고하였다. Lee 등[21]의 연구에서도 한국인 남성의 자뼈 계측값이 다른 인구집단의 남성보다 상대적으로 작게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 본 연구에서 여성보다 남성의 성별판별 정확도가 상대적으로 높게 나타난 이유는 한국인 집단에서 나타나는 성적 이형성의 양상과 형태학적 변이의 특성에 기인한 결과로 사료된다. 그러

나, 불규칙한 곡선과 복잡한 표면 구조를 가지는 자뼈 몸통부위를 비교해 보면, Lee 등[21]의 2차원적 계측 연구에서는 여성의 성별판별 정확도가 남성보다 높게 나타난 반면, 본 연구의 3차원 체적 분석에서는 남성의 성별판별 정확도가 여성보다 높게 나타났다. 이러한 차이는 계측 방법의 차이에 따른 결과로 사료되며, 3차원 체적 분석이 자뼈 몸통부위의 입체적 형태학적 특성과 성적 이형성을 보다 효과적으로 반영하였기 때문으로 생각된다.

인간의 뼈는 불규칙한 곡선과 복잡한 표면을 지닌 3차원 구조물이기 때문에, 길이·너비·직경 등을 이용한 2차원적 계측 방식만으로는 이러한 공간적 정보를 충분히 반영하기 어렵다. Moore 등[34]은 현대 콜롬비아 집단의 사후 뼈대 계측 연구에서 자뼈 최대길이, 가로직경 및 생리적 길이를 이용하여 성별판별을 수행하였으며, 자뼈 최대길이 단독 사용 시 78.5%의 성별일치율을 나타냈으나, 최대길이와 가로직경을 함께 사용한 다변량 판별함수에서는 89.9%의 높은 성별일치율을 보고하였다. 또한 Mall 등[35]은 현대 중부 유럽 집단의 팔뼈를 대상으로 자뼈 최대길이, 팔꿈치부위 너비 및 먼쪽부위 너비를 분석한 결과, 자뼈 최대길이 단독 변수는 87.05%, 전체 변수 조합에서는 90.58%의 성별일치율을 나타냈다고 하였다. 이러한 결과는 긴뼈의 성별판별 시 단편적인 계측 값만을 이용하기보다 다양한 형태학적 정보를 함께 반영할 경우 성별판별 정확도를 더욱 향상시킬 수 있음을 의미하며, 이는 Kranioti 등[36]과 López-Lázaro 등[37]의 연구 결과와도 일치한다.

또한, Liu 등[38]은 3차원 영상 기반 계측이 반복 측정을 보다 정밀하게 수행할 수 있으며, 이를 통해 구축된 성별판별식은 해당 인구집단의 특성을 보다 잘 반영할 수 있다고 보고하였다. 이러한 관점에서 본 연구는 한국인 자뼈의 3차원 영상을 이용하여 각 부위의 체적을 분석함으로써 골격의 입체적 형태학적 특성을 반영하고자 하였으며, 그 결과 좌·우 모든 부위에서 약 90~90.5%의 높은 성별 일치율을 나타냈다. 이러한 결과는 인구집단 특이적인 3차원 기반 성별판별 방법이 한국인 유골의 법의학적 개인식별에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사하는 결과라 사료된다.

결론적으로, 본 연구는 한국인 자뼈의 CT 영상을 3차원으로 재구성하여 최대길이와 각 부위의 체적을 분석하고, 이를 이용한 성별판별 방정식을 도출하여 그 유효성을 검증하고자 하였다. 연구 결과, 자뼈의 모든 계측 부위에서 성별 간 유의한 차이가 나타났으며, 3차원 체적 기반 계측 방법은 기존의 2차원적 최대길이 계측 방식보다 높은 성별판별 정확도를 보였다. 특히 중간부위의 체적 분석은 약 90~90.5%의 높은 성별일치율을 나타내어 자뼈의 입체적

형태학적 특성과 성적 이형성을 효과적으로 반영할 수 있음을 확인하였다.

그러나, 본 연구는 손상이 없는 온전한 자뼈만을 대상으로 수행되었으며, 교차검증(cross-validation)을 시행하지 않았다는 한계가 있다. 따라서 향후 부분 손상 자뼈 및 다양한 인구집단을 대상으로 한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 그럼에도, 본 연구는 한국인을 대상으로 한 인구집단 특이적인 3차원 기반 성별판별 기준을 제시하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 법의학적 개인식별 및 법의인류학 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Ozdoba C, Schroth G, et al. Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: Virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)-a feasibility study. *Forensic Sci Int.* 2003;132:133-41.
2. Roberts ISD, Benamore RE, Benbow EW, Lee SH, Harris JN, Jackson A, et al. Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: a validation study. *Lancet.* 2012;379:136-42.
3. Grabherr S, Egger C, Vilarino R, Campana L, Jotterand M, Dedouit F. Modern post-mortem imaging: an update on recent developments. *Forensic Sci Res.* 2017;2:52-64.
4. Kim DI, Lee UY, Park SO, Kwak DS, Han SH. Identification using frontal sinus by three-dimensional reconstruction from computed tomography. *J Forensic Sci.* 2013;58:5-12.
5. Ampanozi G, Hatch GM, Flach PM, Thali MJ, Ruder TD. Post-mortem CT: review of current status and future directions. *Forensic Sci Med Pathol.* 2017;13:52-64.
6. Dereli AK, Zeybek V, Sagtas E, Yaman O. Sex determination with morphological characteristics of the skull by using 3D modeling techniques in computerized tomography. *Forensic Sci Med Pathol.* 2018;14:450-9.
7. Scheuer L. Application of osteology to forensic medicine. *Clin Anat.* 2002;15:297-312.
8. Knight B, Saukko P. Knight's forensic pathology. 3rd ed. London: Arnold; 2004. pp. 106-17.
9. El-Najjar M, McWilliams K. Forensic anthropology. 1st ed. Springfield: Charles C Thomas; 1978. p. 87.
10. Sinha P, Tamrakar AK, Kafle D, Bhandari R. Sex determination using mastoid process. *Asian J Med Sci.* 2015;6:93-5.
11. Jaja BN, Ajua CO, Didia BC. Mastoid triangle for sex determination in adult Nigerian population: A validation study. *J*

- Forensic Sci. 2013;58:1575-8.
12. Albanese J. A method for estimating sex using the clavicle, humerus, radius, and ulna. *J Forensic Sci.* 2013;58:1413-9.
 13. Linda L, Klepinger R. *Fundamentals of forensic anthropology*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006. p. 53.
 14. Sakaue K. Sexual determination of long bones in recent Japanese. *Anthropol Sci.* 2004;112:75-81.
 15. Koterova A, Velemínska J, Dobisíková M, Brůžek J. Disregarding population specificity: its influence on the sex assessment methods from the tibia. *Int J Legal Med.* 2017;131:251-61.
 16. Bidmos MA, Mazenganya P. Accuracies of discriminant function equations for sex estimation using long bones of upper extremities. *Int J Legal Med.* 2020;134:1439-49.
 17. Kiskira C, Eliopoulos C, Vanna V, Manolis SK. Biometric sex assessment from the femur and tibia in a modern Greek population. *Leg Med (Tokyo).* 2022;59:102126.
 18. Marques S, Pinto C, Ferreira MT, Garcia S, Curate F. Sex estimation from the fibula and tibia: a study in three Portuguese reference collections. *Forensic Sci.* 2025;5:2.
 19. Walker PL. Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *Am J Phys Anthropol.* 2008;136:39-50.
 20. Maass P, Friedling LJ. Sex and ancestry variation in ulna morphology in an adult South African cadaveric sample. *Transl Res Anat.* 2024;36:100306.
 21. Lee JH, Kim YS, Lee UY, Park DK, Han SH. Sex determination using upper limb bones in Korean populations. *Anat Cell Biol.* 2014;47:196-201.
 22. Shim YT, Jeong YH, Aum N, Ha HI, Choi M, Hyun JY, et al. A new metric method for sex estimation using three-dimensional imaging of the nuchal crest. *Anat Cell Biol.* 2024;57:535-42.
 23. Jeong YH, Koo HN, Kim YS, Lee B, Kim S, Shim YT. Using 3D images of Korean's mastoid process to estimate sex: a metric study. *Forensic Imaging.* 2022;31:200527.
 24. Mokoena P, Bidmos MA, Mazenganya P. Development of discriminant functions to estimate sex in upper limb bones for mixed ancestry South Africans. *Sci Justice.* 2019;59:660-6.
 25. Rissech C, Schaefer M, Malgosa A. Development of the femur-implications for age and sex determination. *Forensic Sci Int.* 2008;180:1-9.
 26. Jung HS. A survey of inconveniences and injuries experienced by the left-handed people from using right-handed products. *J Korean Soc Occup Ther.* 2009;17:1-13. Korean.
 27. Kim SI, Kim WS, Cho GJ. The type of handedness and correlation analysis of handedness assessment items on university students in Korea. *Korean J Phys Anthropol.* 2008;21:245-53. Korean.
 28. Banyeh M, Abdulai AR, Shittu SO, Osei EO, Poku EO, Komla AA. Sex and height estimation using percutaneous ulna and tibia length in a Ghanaian population: new data and a test of published equations. *Forensic Sci Int Rep.* 2022;6:100284.
 29. Barrier ILO, L'Abbé EN. Sex determination from the radius and ulna in a modern South African sample. *Forensic Sci Int.* 2008;179:85.e1-7.
 30. Celbis O, Agritmis H. Estimation of stature and determination of sex from radial and ulnar bone lengths in a Turkish corpse sample. *Forensic Sci Int.* 2006;158:135-9.
 31. Issa SY, Khanfour AA, Kharoshah MA. A model for stature estimation and sex prediction using percutaneous ulnar and radial lengths in autopsied adult Egyptians. *Egypt J Forensic Sci.* 2016;6:84-9.
 32. Zapico SC, Adserias-Garriga J. Estimation of sex based on postcranial elements in European American and Latin American populations. *J Forensic Leg Med.* 2021;77:102098.
 33. Kim DI, Lee UY, Han SH. Sex determination using three-dimensional image of skull in Korean: metric study by discriminant function analysis. *Korean J Phys Anthropol.* 2015;28:103-8. Korean.
 34. Moore G, DiGangi EA, Niño Ruíz FP, Hidalgo Davila OJ, Sanabria Medina C. Metric sex estimation from the postcranial skeleton for the Colombian population. *Forensic Sci Int.* 2016;262:286.e1-8.
 35. Mall G, Hubig M, Büttner A, Kuznik J, Penning R, Graw M. Sex determination and estimation of stature from the long bones of the arm. *Forensic Sci Int.* 2001;117:23-30.
 36. Kranioti ED, Bastir M, Sánchez-Meseguer A, Rosas A. A geometric-morphometric study of the Cretan humerus for sex identification. *Forensic Sci Int.* 2009;189:111.e1-8.
 37. López-Lázaro S, Pérez-Fernández A, Alemán I, Botella MC. Sex estimation of the humerus: a geometric morphometric analysis in an adult sample. *Leg Med (Tokyo).* 2022;47:101773.
 38. Liu Y, Han Q, Yin W, Zhang K, Jin X. Sex determination from talus in Chinese population by three-dimensional measurement approach. *Leg Med (Tokyo).* 2020;44:101647.

간추림 : 성별판별은 법의학적 개인 식별 과정에서 필수적인 단계이며, 실제 법의학적 상황에서는 유해가 분절된 상태로 발견되는 경우가 많아 다양한 골격 요소를 이용한 연구가 수행되어 왔다. 자뼈는 비교적 잘 보존되며 뚜렷한 성적 이형성을 나타내는 뼈이지만, 기존 연구들은 대부분 2차원적 계측 방법에 의존하여 자뼈의 복잡한 3차원 형태학적 특성을 충분히 반영하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 컴퓨터단층촬영(computed tomography, CT) 영상을 기반으로 한국인 자뼈의 3차원 체적 분석을 이용한 성별판별 방정식을 개발하고 그 유효성을 검증하고자 하였다. 연구 대상은 병적 변형이나 골절이 없는 한국인 성인 자뼈 CT 영상 1,200건이었으며, 이를 3차원 모델로 재구성한 후 최대길이와 팔꿈치부위(olecranon region), 중간부위(mid-shaft region), 말단부위(distal region)의 체적을 측정하였다. 성별판별 방정식 도출을 위해 1,000건의 자료를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 수행하였으며, 나머지 200건의 자료를 이용하여 유효성을 검증하였다. 분석 결과, 모든 계측 부위에서 성별에 따른 유의한 차이가 나타났으며($p < 0.05$), 낮은 %TEM 값을 통해 높은 측정자 간 신뢰도가 확인되었다. 유효성 검증 표본($n=200$)에서 최대길이를 이용한 성별판별 정확도는 오른쪽 자뼈 82.0%, 왼쪽 자뼈 84.0%로 나타났다. 반면, 팔꿈치부위, 중간부위 및 말단부위의 3차원 체적 계측치를 이용한 성별판별 정확도는 오른쪽 자뼈 90.5%, 왼쪽 자뼈 90.0%로 나타나 더 높은 정확도를 보였다. 특히, 중간부위의 체적 분석은 기존의 2차원적 계측 방법보다 현저히 향상된 성별판별 정확도를 나타냈다. 이러한 결과는 3차원 체적 분석이 기존의 선형 계측 방법보다 자뼈의 형태학적 특성과 성적 이형성을 보다 효과적으로 반영할 수 있음을 시사한다. 본 연구는 한국인을 대상으로 한 인구집단 특이적 성별판별 기준을 제시하였으며, 향후 법의인류학 및 법의학적 개인 식별 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

찾아보기 낱말 : 법의인류학, 계측법, 성적 이형성, 컴퓨터단층촬영, 자뼈(Ulna)