

넙다리뼈에 대한 방사성 탄소동위원소 분석을 통한 백골화 골격의 사망연도 추정

이효진¹ · 최승규² · 박종필³

¹연세대학교 의과대학

²국립과학수사연구원

서울과학수사연구소 법의학과

³연세대학교 의과대학 법의학과

Death Year Estimation of Skeletal Remains by Radiocarbon Dating of Femur

Hyojin Lee¹, Seung Gyu Choi², Jong-Pil Park³

¹Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea, ²Division of Forensic Medicine, National Forensic Service Seoul Institute, Seoul, Korea, ³Department of Forensic Medicine, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

The identification for skeletal remains is one of roles of forensic medicine. For this purpose, dating, i.e., estimating the birth year and death year is expected as useful, however has not yet been practically applied. A dating method using radiocarbon analysis was recently introduced and related studies have been reported. In this study, we tried to confirm the applicability of radiocarbon dating for the identification of skeletal remains and to develop formulas to estimate the death year. Thirty-four autopsy cases from the National Forensic Service, from December 2014 to July 2022, with known death year were selected for inclusion. For each case, two samples were taken: the spongy bone of the femur head, and the compact bone of the femur midshaft. For each sample, radiocarbon analysis was carried out and the corresponding femur year were calculated using the bomb peak curve. The differences between the femur year and the death year were determined and analyzed on the influence of variables. A formula for estimating the death year was developed and the applicability of the formula was determined. The results showed that the difference between death year and femur head year was 14.2 years on average. In male, the difference between death year and femur head year increased with age, however, it did not show any difference according to age in female. The estimation formula of death year was as follows: (In male) Death year=0.993×(Femur head year)+0.288×(Age)+15.061, (In female) Death year=0.769×(Femur head year)−0.218×(Age)+489.676. The formula for male had relatively high explanatory power (adjusted R²=0.710), however, the formula for female had low explanatory power (adjusted R²=0.588). This study is meaningful because it is the largest single study of its kind, to date, and uses specific and identical skeleton (femur head/femur midshaft) to increase the accuracy of the death year estimation. We expect that the results of this study will be supplemented through additional research in the future.

Key Words: Radiometric dating; Forensic anthropology, Femur; Death year

Received: October 31, 2023
Revised: November 21, 2023
Accepted: November 23, 2023

Correspondence to

Jong-Pil Park

Department of Forensic Medicine,
Yonsei University College
of Medicine, 50-1 Yonsei-ro,
Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea
Tel: +82-2-2228-2482
Fax: +82-2-362-0860
E-mail: parkjp@yuhs.ac

서 론

백골화 골격에 대한 법의부검은 점차 증가하고 있으며, 변사자의 사망원인을 밝히는 일 뿐만 아니라 신원확인에도 중요한 역할을 하고 있다[1]. 성별 추정, 연령 추정, 신장 추정 등 신원확인을 위해 도움이 될 수 있는 기존의 감정기법에 더하여 변사자의 출생연도와 사망연도를 추정하는 연대추정법이 제안되어 왔으며, 최근 방사성 탄소동위원소 분석을 이용한 연대추정은 이전의 연대추정법들에 비해 정확도가 높아 실무에 적용될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다[2,3].

방사성 탄소동위원소란 질량수가 14 (양성자 6, 중성자 8)인 탄소원자(^{14}C)를 말하며, modern carbon이라고도 불린다. ^{14}C 는 본래 자연계에 극미량이 존재하고 반감기에 따라 감소하는데 1950년대 전후로 핵무기 개발이 시작되며 기존에 비해 높은 농도로 증가했다가 1963년 핵확산금지조약 이후 그 농도가 감소하여 현재에 이르고 있으며, 이와 같은 변화를 기록한 bomb peak curve를 이용함으로써 비교적 정확한 연대추정이 가능하게 되었다[2,3].

방사성 탄소동위원소를 이용한 연대추정시 출생연도는 주로 치아에 대한 분석결과를 이용하고, 사망연도는 골격에 대한 분석결과를 이용한다. 혈액이나 머리카락과 같이 짧은 주기로 재생되는 인체조직을 이용하면 보다 사망연도에 가까운 분석결과를 얻을 수 있지만, 실제로 연대추정이 필요한 경우는 대부분 연조직이 남아 있지 않은 백골화 상태인 경우가 많아 골격에 대한 연구가 우선적으로 필요하다[4-6].

성인의 경우 전체적인 골격의 부피는 일정하지만, 이는 골 형성(bone formation)과 골 흡수(bone absorption)가 균형을 이루기 때문이며, 매년 약 10% 정도의 골 기질(bone matrix)이 새롭게 대체된다[7]. 새롭게 형성된 골 기질의 비율을 순환율(turnover rate)이라고 하며, 순환율은 연령, 성별 및 골격의 종류에 따라 달라진다. 일반적으로 골 형성은 연령이 증가함에 따라 감소하며, 여성의 경우 폐경기가 되면 에스트로겐에 의해 억제되던 interleukin-1, tumor necrosis factor, macrophage colony-stimulating factor, interleukin-6 등 파골세포(osteoclast)를 활성화시키는 사이토카인이 증가하여 골 흡수가 증가하게 된다. 뼈의 종류와 관련해서 해면뼈(sponge bone)는 치밀뼈(compact bone)에 비해 짧은 순환율을 가지며, 따라서 넙다리뼈 머리부위나 척추 몸통부위 같은 해면뼈의 분석 결과를 이용한 추정연도가 넙다리뼈 몸통부위 같은 치밀뼈를 이용한 추정연도에 비해 변사자의 실제 사망연도에 가깝다고 알려져 있다[8,9]. Manolagas와 Jilka [10]는 해면뼈는 매년 약 25% 정도가 새로운 골 기질로 대체되는 반면, 치밀뼈는 약 3% 정도만 대체된다고 보고하였고, Leggett [11]는 해면뼈의 경우 단위면적당 조골세포(osteoblast)와 파골세포의 밀도가 치밀뼈에 비

해 높기 때문에 보다 빠른 순환율을 보인다고 보고하였다. 이와 같은 특징은 두 가지 종류의 골격에 대해 분석을 시행한 후 그 결과를 비교함으로써 bomb peak curve상 1963년을 기준으로 그 이전과 이후 중 어느 쪽의 결과값을 채택해야 할지를 결정하는 데 도움이 된다. 인체의 여러 골격 중 넙다리뼈의 머리부위는 해면뼈이고, 몸통부위는 치밀뼈이므로 한 골격에서 두 가지 종류의 뼈를 모두 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으며, 이로 인해 방사성 탄소동위원소 분석에 널리 사용되고 있다.

저자들은 이전 논문에서 치아에 대한 탄소동위원소 분석을 통해 백골화 골격의 출생연도를 추정하는 연구 결과를 보고한 바 있으며[1,12]. 이번 연구에서는 넙다리뼈에 대한 탄소동위원소 분석을 통해 백골화 골격의 사망연도를 추정하는 것을 목적으로 한다. 사망연도 추정에 영향을 줄 수 있는 변수들에 대한 분석을 시행하고, 이를 통해 사망연도를 추정하는 공식을 개발하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구는 2014년 12월부터 2015년 10월까지와 2021년 2월부터 2022년 7월까지 국립과학수사 연구원에서 시행된 부검 증례들을 대상으로 하였다. 백골화 상태로 의뢰된 증례와 추락이나 교통사고로 사망해 손상이 심한 증례 중 시료 채취를 위해 추가적인 절개가 필요하지 않은 경우를 연구에 포함시켰다. 연구의 대상이 된 증례에 대해서는 부검의뢰서 및 부검감정서를 검토하여 변사자의 연령, 성별, 사망연도, 지역, 사망원인, 부패 정도 등에 대한 정보를 수집하였다. 본 연구는 사인 규명을 목적으로 부검시 수집된 인체유래물을 이용한 후향적 연구이며, 연구기간 중 2021년 2월부터 2022년 7월까지 시행된 연구의 경우 국립과학수사연구원 기관생명윤리위원회에서 심의되고 서면동의면제 승인(과제승인번호 906-220421-BR-002-01)을 받아 진행하였다.

1. 시료의 채취

각각의 증례에 대해 넙다리뼈 머리부위와 몸통부위를 채취하였다. 넙다리뼈 머리부위의 경우 해면뼈 조직을 얻기 위해 표면의 얇은 치밀뼈층을 전기톱을 이용하여 벗겨낸 후 목부위(femur neck)에서 절단하여 넙다리뼈 머리를 분리하였고, 이 중 절반을 시료로 채취하였다. 넙다리뼈 몸통부위의 경우 치밀뼈 조직을 얻기 위해 넙다리뼈 몸통의 가운데부위를 톱으로 절단한 후 내강의 표면을 메스를 이용하여 긁어내어 시료를 채취하였다(Fig. 1). 이는 골격의 건조 정도와 관계없이 동일하게 적용되었다.



Fig. 1. Sampling of femur.

2. 시료의 전처리

시료에 대해 콜라겐 추출법을 적용하여 전처리하였다[13,14]. 표면의 불순물을 제거하기 위해 0.5 M 염산에 시료를 담갔다 가 꺼내고 탈이온수로 세척하고, 오븐에서 60°C로 2시간 동안 건조시켰다. 건조된 뼈 시료는 마노유발(agate mortar)을 이용하여 1-2 mm 크기의 분말로 만들었다. 이어서 100 mL의 비커에 분말시료 600 mg 정도와 0.5 M의 염산을 넣고 1시간 동안 자석 막대로 저어준 다음, 증류수로 3차례 세척하여 중화하였다. 여기에 0.1 M 수산화나트륨 용액을 가하고 다시 1시간 동안 자석막대로 저어준 다음, 증류수로 3차례 세척하여 중화하였다. 다시 한 번 0.5 M 염산을 넣고 1시간 동안 자석막대로 저어준 다음, 증류수로 세척하여 중화하는 과정을 반복하였다. 이상의 처리가 끝난 시료를 100 mL 비커에 넣고 증류수 40 mL를 가한 다음, 0.1 M 염산을 이용하여 용액의 pH를 3으로 맞추었다. 비커를 가열하여 용액의 온도를 70°C로 유지한 채 12시간 동안 가열하여 젤라틴으로 만들었다. 가열이 끝나면 2.7 µm fiber filter를 이용하여 1차 시료를 걸렀다. 필터를 통과한 용액을 모아 Centriprep (Merck Millipore Co., Darmstadt, Germany) 필터로 분자량 범위

별로 분리해 냈다. 분리된 시료들 중 3만 dalton 이상의 것들을 모아 동결 건조기로 건조하여 환원(reduction) 반응에 이용하였다

3. 환원 및 가속화 질량분석기 표적 제작

시료의 탄소성분을 이산화탄소로 변환하기 위하여 고순도 산소 환경에서 연소하였다. 주석 포일에 시료를 넣고 포일을 감싼 다음 원소분석기(elemental analyzer)에 넣어 연소하였다. 연소하여 얻은 이산화탄소 중 254 torr (1.192 mg)를 자동 환원장치로 처리하여 흑연으로 만들었다[15]. 환원반응 회수율은 90% 이상이었다. 제작된 흑연을 알루미늄 펠렛에 넣고 가압하여 펠렛 표적을 만들었다.

4. Accelerator mass spectrometer 분석 및 달력연대 환산

위의 표적을 가속화 질량분석기(accelerator mass spectrometer)로 분석하여 ^{14}C 의 비율(percent modern carbon, pMC)을 측정하였다. pMC값을 이용한 탄소연대 추정을 위해서 1950년 이전으로 추정된 경우 IntCal20을 이

용하고, 1950년 이후인 경우 한국지질 자원연구원에서 자체 개발한 Cheeseburger 프로그램(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea)을 이용하여 연대를 추정하였다.

5. 자료의 선택

각각의 시료에 대하여 두 개의 추정연도 범위가 주어졌고, 두 가지 중 실제 사망연도에 가까운 추정연도 범위를 선택하였다. 분석결과가 1950년 이전으로 나온 경우($pMC < 100$)는 사망연도를 특정할 수 없기 때문에 통계분석에서 제외하였다. 각 시료에 대해 선택된 추정연도 범위는 통계처리를 위해서 주어진 범위의 중위수를 해당 시료의 납다리뼈 연도로 채택하였다.

6. 통계분석 및 추정식 개발

사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이의 차이 및 납다리뼈 머리 연도와 납다리뼈 몸통 연도 사이의 차이가 연령, 성별, 사망원인 및 부패 정도 등의 변수에 영향을 받는지에 대해 통계분석을 시행하였다. 사망원인은 손상, 질식, 기타 및 불명으로 구분하였으며, 부패 정도는 완전 백골화, 부분 백골화 및 부패가 안된 상태로 구분하여 분석하였다. 연령에 대해서는 피어슨 상관분석(Pearson correlation), 성별에 대해서는 독립표본 T 검정(two-sample t-test), 사망원인 및 부패 정도에 대해서는 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였다. 그리고 이상의 결과를 토대로 통계적으로 유용하다고 검증된 변수를 이용하여 선형회귀분석을 시행한 사망연도 추정식을 구하고, 유용성을 평가하였다. 통계분석은 IBM SPSS version 27 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하였다.

결 과

총 34건의 부검 증례가 분석에 포함되었다. 이 중 20건은 2014년 12월부터 2015년 10월까지 시행된 부검 증례들이고, 14건은 2021년 2월부터 2022년 7월까지 시행된 부검 증례들이다. 평균 연령은 54.1세이고, 16세부터 87세까지 분포하였다. 성별은 남성이 24명, 여성이 10명이었다. 남성 연령의 평균은 49.3세이고, 표준편차는 14.4세이며, 16세부터 73세까지 분포하였고, 여성 연령의 평균은 65.5세이고, 표준편차는 15.4세이며, 47세부터 87세까지 분포하였다. 사망연도는 1951년부터 2022년까지 분포하였다. 사망원인은 다발성 손상이 11건, 의사가 8건, 교사가 2건, 의사가 1건, 불명인 경우가 12건이었다. 시체의 부패 정도는 완전 백골화가 7건, 부분 백골화가 18건, 부패되지 않은 경우가 9건이었다. 분석 시

료는 31건에서 납다리뼈 머리부위와 몸통부위를 모두 채취하였고, 3건에서는 납다리뼈 머리부위만 채취가 가능하였다. 이상의 내용은 Table 1에 정리하여 제시하였다. 각 증례별 방사성 탄소동위원소 분석결과 및 이를 이용한 연대추정 결과는 Table 2와 같다. 사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이 차이의 평균은 14.2년이고, 1년부터 28.5년까지 분포하였다.

1. 변수 분석

납다리뼈 머리 연도가 1950년 이전인 1증례를 제외한 33증례에 대해 사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이의 차이에 영향을 주는 인자에 대해 분석하였다(Table 3). 연령의 경우 전체 증례를 대상으로 분석하였을 때 사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이의 차이에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 남성만을 대상으로 분석한 결과 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있는 것으로 확인되었다. 그밖에 성별, 사망원인 및 부패 정도는 사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이의 차이에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

2. 납다리뼈 머리부위와 납다리뼈 몸통부위 사이의 비교

납다리뼈 머리부위와 몸통부위 모두 분석이 시행된 31증례 중 분석결과가 모두 1950년 이전으로 나와 비교가 불가능한 1증례를 제외하고, 나머지 30증례에 대해 두 시료의 연도를 비교하였다. 30건 중 26건의 경우 납다리뼈 머리부위 연도가 납다리뼈 몸통부위 연도에 비해 실제 사망연도에 가깝게 나타났으나, 4건의 경우에는 납다리뼈 몸통부위 연도가 사망연도에 가깝게 나타났다. 납다리뼈 머리 연도와 납다리뼈 몸통 연도 사이 차이의 평균은 9.6년이고, 0.5년부터 20.5년까지 분포하였다. 납다리뼈 머리 연도와 납다리뼈 몸통 연도 사이의 차이에 영향을 주는 인자를 확인하기 위해 분석을 시행한 결과 연령의 경우 전체 증례를 대상으로 분석하였을 때 납다리뼈 머리 연도와 납다리뼈 몸통 연도 사이의 차이에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 남성만을 대상으로 분석한 결과 통계적으로 유의한 양의 상관관계(correlation coefficient=0.541, $P=0.011$)가 있는 것으로 확인되었고, 그밖에 성별, 사망원인 및 부패 정도는 사망연도와 납다리뼈 머리 연도 사이의 차이에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

3. 추정식 개발 및 평가

현재까지 수집된 자료를 이용하여 변사자의 사망연도 추정식을 개발하고자 하였다. 변수 분석 결과를 참고하여 남성과 여성을 구분하여 모형을 만들었고, 납다리뼈 머리 연도와 연령

Table 1. Basic information of cases

No.	Age (yr)	Sex	Death year	Residence	COD	Decomposition status
1	29	Male	2011	Busan	Ligature strangulation	Complete skeletonization
2	50	Male	2010	Busan	Ligature strangulation	Complete skeletonization
3	65	Male	1966	Yangpyeong	Unknown	Complete skeletonization
4	51	Female	1951	Yangpyeong	Unknown	Complete skeletonization
5	87	Female	2015	Wonju	Multiple injuries due to TA	Fresh
6	43	Male	2015	Gimpo	Multiple injuries due to fall	Fresh
7	53	Female	2015	Ansan	Unknown	Partial skeletonization
8	49	Male	2015	Incheon	Hanging	Partial skeletonization
9	54	Male	2015	Incheon	Hanging	Partial skeletonization
10	73	Male	2015	Chungju	Unknown	Partial skeletonization
11	57	Male	2015	Yeongwol	Multiple injuries due to TA	Fresh
12	16	Male	2015	Wonju	Multiple injuries due to TA	Fresh
13	43	Male	2015	Donghae	Unknown	Partial skeletonization
14	47	Female	2015	Chuncheon	Multiple injuries due to fall	Fresh
15	87	Female	2015	Yongin	Multiple injuries due to TA	Fresh
16	24	Male	2015	Chungju	Hanging	Partial skeletonization
17	56	Male	2015	Eumseong	Multiple injuries due to TA	Fresh
18	22	Male	2015	Yangpyeong	Multiple injuries due to TA	Fresh
19	58	Male	2015	Gangneung	Multiple injuries due to fall	Fresh
20	59	Male	2015	Gunpo	Hanging	Partial skeletonization
21	79	Female	1992	Seoul	Unknown	Partial skeletonization
22	51	Female	2019	Incheon	Unknown	Partial skeletonization
23	75	Female	2020	Paju	Unknown	Partial skeletonization
24	35	Male	2021	Suwon	Unknown	Partial skeletonization
25	54	Male	2021	Seoul	Multiple injuries due to fall	Partial skeletonization
26	50	Male	2020	Incheon	Hanging	Complete skeletonization
27	61	Female	2021	Seoul	Multiple injuries due to fall	Complete skeletonization
28	61	Male	2021	Incheon	Unknown	Partial skeletonization
29	51	Male	2021	Taebaek	Hanging	Partial skeletonization
30	59	Male	2019	Daegu	Hanging	Complete skeletonization
31	59	Male	2021	Busan	Drowning	Partial skeletonization
32	57	Male	2020	Pohang	Unknown	Partial skeletonization
33	64	Female	2017	Daegu	Unknown	Complete skeletonization
34	59	Male	2022	Incheon	Hanging	Partial skeletonization

COD, cause of death; TA, traffic accident.

을 독립변수로 하는 다중선형회귀분석을 이용한 식(추정식 1), 넓다리뼈 머리 연도만을 독립변수로 하는 단순선형회귀분석식(추정식 2), 그리고 단순히 넓다리뼈 머리 연도에서 사망 연도와 넓다리뼈 머리 연도 사이 차이 평균을 더한 식(추정식 3) 이상 세가지를 비교하였다. 추정식에 관한 내용은 Table 4에 제시하였다.

추정식 1:
(남성) 사망연도=0.993×(넓다리뼈 머리 연도)+0.288×(연령)+15.061

(여성) 사망연도=0.769×(넓다리뼈 머리 연도)-0.218×(연령)+489.676

추정식 2:
(남성) 사망연도=0.795×(넓다리뼈 머리 연도)+423.908

Table 2. Results of radiocarbon analysis

No.	Sample	BP year	pMC (%)	2σ Calender year range (AD)	Femur year range	Femur year
1	Femur head	-590±40	107.65±0.51	1956.5–1957.5, 1999.5–2002.5 or 2004.5–2004.5	1999.5–2002.5 or 2004.5	2002
	Femur midshaft	-780±40	110.23±0.52	1957.5 or 1996.5–1999.5	1996.5–1999.5	1998
2	Femur head	-1040±40	113.81±0.52	1957.5–1958.5 or 1991.5–1994.5	1991.5–1994.5	1993
	Femur midshaft	-2030±40	128.70±0.57	1959.5, 1961.5 or 1979.5–1981.5	1979.5–1981.5	1980.5
3	Femur head	-1290±40	117.46±0.54	1958.5 or 1987.5–1989.5	1958.5	1958.5
	Femur midshaft	120±40	98.47±0.46	1548–1651, 1665–1708, 1712–1752, 1758–1791 or 1795–1950	<1950	–
4	Femur head	210±40	97.46±0.50	1506–1520, 1534–1549, 1556–1597, 1622–1907 or 1917–1950	<1950	–
	Femur midshaft	120±40	98.57±0.47	1642–1651, 1665–1708, 1712–1752, 1758–1791 or 1795–1949	<1950	–
5	Femur head	-440±40	105.60±0.48	1956.5 or 2002.5–2008.5	2002.5–2008.5	2005.5
	Femur midshaft	-660±40	108.62±0.50	1956.5–1957.5 or 1998.5–2001.5	1998.5–2001.5	2000
6	Femur head	-700±40	109.16±0.49	1957.5 or 1997.5–2000.5	1997.5–2000.5	1999
	Femur midshaft	-1230±40	116.51±0.51	1958.5 or 1987.5–1990.5	1987.5–1990.5	1989
7	Femur head	-690±40	108.92±0.49	1957.5 or 1998.5–2001.5	1998.5–2001.5	2000
	Femur midshaft	-1210±40	116.24±0.54	1958.5 or 1988.5–1991.5	1988.5–1991.5	1990
8	Femur head	-410±40	105.20±0.49	1956.5 or 2003.5–2010.5	2003.5–2010.5	2007
	Femur midshaft	-1250±40	116.78±0.52	1958.5 or 1987.5–1990.5	1987.5–1990.5	1989
9	Femur head	-460±40	105.95±0.49	1956.5, 2002.5–2006.5 or AD 2008.5	2002.5–2006.5 or 2008.5	2005.5
	Femur midshaft	-940±40	112.35±0.52	1957.5–1958.5 or 1993.5–1996.5	1993.5–1996.5	1995
10	Femur head	-630±40	108.20±0.50	1956.5–1957.5 or 1999.5–2002.5	1999.5–2002.5	2001
	Femur midshaft	-950±40	112.49±0.52	1957.5–1958.5 or 1993.5–1996.5	1993.5–1996.5	1995
11	Femur head	-770±40	110.01±0.52	1957.5 or 1996.5–1999.5	1996.5–1999.5	1998
	Femur midshaft	-1290±40	117.35±0.54	1958.5 or 1987.5–1990.5	1987.5–1990.5	1989
12	Femur head	-180±40	102.31±0.49	1955.5–1956.5 or 2012.5–2015.5	2012.5–2015.5	2014
	Femur midshaft	-240±40	103.03±0.47	1955.5–1956.5, 2009.5–2013.5 or 2015.5	2009.5–2013.5 or 2015.5	2012.5
13	Femur head	-660±30	108.51±0.44	1956.5–1957.5 or 1999.5–2001.5	1999.5–2001.5	2000.5
	Femur midshaft	-1040±30	113.76±0.45	1957.5–1958.5 or 1991.5–1994.5	1991.5–1994.5	1993
14	Femur head	-810±30	110.67±0.42	1957.5 or 1996.5–1998.5	1996.5–1998.5	1997.5
	Femur midshaft	-790±30	110.39±0.42	1957.5 or 1996.5–1999.5	1996.5–1999.5	1998
15	Femur head	-450±30	105.70±0.41	1956.5, 2002.5–2006.5 or 2008.5	2002.5–2006.5 or 2008.5	2005.5
	Femur midshaft	-530±30	106.79±0.40	1956.5 or 2001.5–2005.5	2001.5–2005.5	2003.5
16	Femur head	-290±30	103.73±0.42	1955.5–1956.5 or 2007.5–2012.5	2007.5–2012.5	2010
	Femur midshaft	-480±30	106.13±0.42	1956.5 or 2002.5–2005.5	2002.5–2005.5	2004
17	Femur head	-420±30	105.35±0.43	1956.5 or 2003.5–2008.5	2003.5–2008.5	2006
	Femur midshaft	-960±30	112.73±0.45	1957.5–1958.5 or 1992.5–1995.5	1992.5–1995.5	1994
18	Femur head	-400±30	105.05±0.40	1956.5, 2003.5 or 2005.5–2010.5	2003.5 or 2005.5–2010.5	2007
	Femur midshaft	-440±30	105.69±0.40	1956.5, 2002.5–2006.5 or 2008.5	2002.5–2006.5 or 2008.5	2005.5
19	Femur head	-700±30	109.07±0.42	1957.5 or 1998.5–2000.5	1998.5–2000.5	1999.5
	Femur midshaft	-1700±30	123.62±0.48	1958.5–1959.5, 1961.5 or 1982.5–1983.5	1982.5–1983.5	1983
20	Femur head	-910±30	112.00±0.43	1957.5 or 1994.5–1996.5	1994.5–1996.5	1995.5
	Femur midshaft	-2650±30	139.05±0.53	1962.5 or 1974.5–1975.5	1974.5–1975.5	1975

Continued

Table 2. Continued

No.	Sample	BP year	pMC (%)	2σ Calender year range (AD)	Femur year range	Femur year
21	Femur head	-1580±29	121.73±0.44	1958.5-1961.5 or 1983.5-1985.5	1983.5-1985.5	1984.5
	Femur midshaft	-1331±31	118.02±0.45	1958.5 or 1987.5-1988.5	1987.5-1988.5	1988
22	Femur head	-412±26	105.26±0.34	1956.5, 2003.5 or 2005.5-2008.5	2003.5 or 2005.5-2008.5	2006
	Femur midshaft	-1333±25	118.04±0.36	1958.5 or 1987.5-1988.5	1987.5-1988.5	1988
23	Femur head	-252±26	103.18±0.33	1955.5-1956.5 or 2011.5-2013.5	2011.5-2013.5	2012.5
	Femur midshaft	-521±27	106.70±0.35	1956.5 or 2001.5-2005.5	2001.5-2005.5	2003.5
24	Femur head	-243±26	103.07±0.34	1955.5-1956.5 or 2011.5-2013.5	2011.5-2013.5	2012.5
	Femur midshaft	-571±32	107.36±0.42	1956.5-1957.5, 2000.5-2002.5 or 2004.5	2000.5-2002.5 or 2004.5	2002.5
25	Femur head	-481±27	106.17±0.36	1956.5 or 2002.5-2005.5	2002.5-2005.5	2004
26	Femur head	-534±28	106.87±0.37	1956.5 or 2001.5-2005.5	2001.5-2005.5	2003.5
	Femur midshaft	-1297±26	117.52±0.38	1958.5 or 1987.5-1989.5	1987.5-1989.5	1988.5
27	Femur head	-524±28	106.75±0.37	1956.5 or 2001.5-2005.5	2001.5-2005.5	2003.5
	Femur midshaft	-633±28	108.20±0.38	1956.5-1957.5 or 1999.5-2001.5	1999.5-2001.5	2000.5
28	Femur head	-723±27	109.42±0.37	1957.5 or 1997.5-1999.5	1997.5-1999.5	1998.5
	Femur midshaft	-1942±26	127.35±0.42	1958.5-1959.5, 1961.5 or 1980.5-1981.5	1980.5-1981.5	1981
29	Femur head	-367±32	104.67±0.41	1956.5 or 2005.5-2011.5	2005.5-2011.5	2008.5
	Femur midshaft	-1056±30	114.06±0.43	1958.5 or 1991.5-1993.5	1991.5-1993.5	1992.5
30	Femur head	-1180±29	115.83±0.41	1958.5 or 1989.5-1991.5	1989.5-1991.5	1990.5
	Femur midshaft	-793±30	110.38±0.41	1957.5 or 1996.5-1999.5	1996.5-1999.5	1998
31	Femur head	-402±30	105.13±0.39	1956.5, 2003.5 or 2005.5-2010.5	2003.5 or 2005.5-2010.5	2007
	Femur midshaft	-1490±29	120.38±0.43	1958.5, 1961.5 or 1984.5-1987.5	1984.5-1987.5	1986
32	Femur head	-991±31	113.13±0.43	1957.5-1958.5 or 1992.5-1995.5	1992.5-1995.5	1994
33	Femur head	-1207±32	116.22±0.47	1958.5 or 1988.5-1991.5	1988.5-1991.5	1990
34	Femur head	-931±32	112.29±0.44	1957.5-1958.5 or 1993.5-1996.5	1993.5-1996.5	1995
	Femur midshaft	-743±33	109.70±0.45	1957.5 or 1997.5-1999.5	1997.5-1999.5	1998.5

BP, before present; pMC, percent modern carbon.

(여성) 사망연도=0.735×(넙다리뼈 머리 연도)+544.180

추정식 3:

(남성) 사망연도=넙다리뼈 머리 연도+14.3

(여성) 사망연도=넙다리뼈 머리 연도+13.8

남성의 경우 추정식 1이 수정된 R제곱값이 0.710으로 추정식 2에 비해 크고, 내부검증(internal validation)을 위해 시행한 평균제곱오차값(mean squared error)이 5.57년으로 세가지 추정식 중 가장 적어 세가지 추정식 중 추정식 1이 가장 우수한 추정식인 것으로 판정하였다. 여성의 경우도 추정식 1이 수정된 R제곱값이 0.588로 추정식 2에 비해 크고, 내부검증을 위해 시행한 평균제곱오차값이 4.64년으로 세가지 추정식 중 가장 적어 세가지 추정식 중 추정식 1이 가장 우수한 추정식인 것으로 판정하였다.

고찰

방사성 탄소동위원소 분석을 이용한 연대추정은 1950년대부터 활발해진 핵실험에 의해 가능해졌다. 따라서 1950년 이전의 사망자인 경우 정확한 연대추정에 제약이 있다. 다만 1950년 이전의 사망자로 판정할 수 있다면 현시점에서 수사기관에 주된 관심사건은 아닐 수 있다는 점에서 의미가 없지는 않겠다. 1950년 이후인지를 판정하는 기준은 pMC가 100% 이상인 경우인데 실제로는 1954년까지는 pMC 값이 100%보다 적어 1950년 이전 결과들과 명확히 구분되지 않는다. 또한 사망연도가 1954년 이후라도 1954년과 가까운 시점에 사망을 하였다면 1950년 이전으로 오인될 여지가 있다는 점을 유의해야 한다. 본 연구에서도 1950년 이전으로 결과가 나온 경우가 총 2증례가 있었다. 증례 3번의 경우 1901년에 태어나 1966년에 사망한 경우로 넙다리뼈 머리의 결

과값은 1950년 이후로 나왔으나 넓다리뼈 몸통의 결과값은 1950년 이전으로 나와 정확한 연도를 확정할 수 없었다. 그런데 이 경우는 넓다리뼈 머리의 결과값 2가지 1958-1959년과 1986-1990년 중 한가지를 선택해야 하는 상황에서 넓다

리뼈 몸통의 결과가 1950년 이전인 점을 이용하여 넓다리뼈 머리의 결과로 1958-1959년을 선택할 수 있어 넓다리뼈 몸통의 분석 결과가 연대추정에 도움이 되었다. 증례 4번의 경우 1900년에 태어나서 1951년에 사망한 경우로서 치아, 넓다리뼈 머리 및 넓다리뼈 몸통의 결과값이 모두 1950년 이전으로 나왔다. 이 경우 사망연도가 1951년이지만 분석결과를 통해서는 이를 추정할 수 없었다. 이는 넓다리뼈 머리의 결과가 1950년 이전으로 나오더라도 실제 사망연도는 1950년 이후일 수 있음을 보여주는 사례였다. 향후 실제 사망연도가 1950년 이후이지만 방사성 탄소동위원소 분석 결과 이를 예측할 수 없는 연도가 몇 년까지인지에 대해 추가적인 연구가 필요하겠다.

넓다리뼈의 분석을 통한 사망연도의 추정은 넓다리뼈 머리 부위가 해면뼈이고 넓다리뼈 몸통부위가 치밀뼈인 점으로부터 넓다리뼈 머리부위의 순환율이 높으니 사망연도에 보다 가까울 것이라는 사실을 전제로 이루어진다. 본 연구에서 넓다리뼈 머리와 몸통이 함께 분석된 경우는 31건이었으며 이 중 모두 1950년 이전의 결과로 나온 한건을 제외한 30건 중 26건은 이와 같은 전제를 만족시켰다. 그러나 4증례(No. 14, No. 21, No. 30, No. 34)의 경우 넓다리뼈 몸통의 추정연도가 넓다리뼈 머리의 추정연도에 비해 사망연도에 가까운 예외상황을 보여주었고, 이는 적지 않은 비율이므로 실무에 적용할 때 충분히 고려되어야 할 결과라고 생각된다. 넓다리뼈 몸통 연도가 사망연도에 더 가깝게 나온 4증례의 경우 2증례는 남성이고, 나머지 2증례는 여성이며, 40대 1명, 50대 2명 및 70대 1명으로 성별과 연령에서 별다른 특징을 보이지 않았다. 육안소견상 두 증례에서는 시랍화가 관찰되었으나, 나

Table 3. Variables analysis on difference between death year and femur head year

Variable	No.	Mean±SD	P-value
Age (yr)	33		0.157
Age (yr) in male	24		0.002
Sex			
Male	24	14.3±7.0	0.849
Female	9	13.8±6.3	
COD			
Trauma	11	12.5±5.4	0.615
Strangulation	10	15.3±8.0	
Others and unknown	12	14.8±7.0	
Decomposition status			
Complete skeletonization	7	17.6±8.0	0.200
Partial skeltonization	17	14.2±6.5	
Feresh	9	11.4±5.5	

P-value for age was determined with use of Pearson correlation.
 P-value for age in male was determined with use of Pearson correlation (correlation coefficient=0.600).
 P-value for sex was determined with use of the two-sample t-test.
 P-values for COD and decomposition status were determined with use of the one-way ANOVA.
 SD, standard deviation; COD, cause of death.

Table 4. Estimation formulas by multivariate analysis and evaluation of their usefulness

Sex	Variable	β	P-value	VIF	R-square	Adjusted R-square	Root MSE
Male							
Death year formula 1	Constant	15.061	0.955		0.735	0.710	5.57
	Age	0.288	0.008	1.361			
	Femur head year	0.993	<0.001	1.361			
Death year formula 2	Constant	423.908	0.118		0.628	0.611	6.52
	Femur head year	0.795	<0.001	1.000			
Death year formula 3							6.86
Female							
Death year formula 1	Constant	489.676	0.322		0.691	0.588	4.64
	Age	-0.218	0.141	1.008			
	Femur head year	0.769	0.015	1.008			
Death year formula 2	Constant	544.180	0.322		0.542	0.477	5.56
	Femur head year	0.735	0.024	1.000			
Death year formula 3							5.96

VIF, variance inflation factor; MSE, mean squared error.

머지 증례에서는 관찰되지 않았으며, 그밖에 부검소견상 이들을 다른 증례들과 구분할 만한 특징을 확인하지 못하였다. 다만, 이들 증례들의 경우 넙다리뼈 머리 연도와 넙다리뼈 몸통 연도 사이 차이의 평균이 3.75년이고, 0.5년에서 7.5년까지 분포하며, 이는 넙다리뼈 머리 연도가 사망연도에 가까운 증례들(평균 10.5년)과 비교하여 독립표본 T검정상 통계적으로 유의한 차이가 있음($P=0.039$)을 확인하였다. 이는 넙다리뼈 몸통 연도가 사망연도에 가까운 경우들의 연령이 40대 이상임을 고려하면 보다 의미있는 소견이라고 생각된다. 따라서 향후 40대 이상의 나이임에도 넙다리뼈 머리 연도와 넙다리뼈 몸통 연도 사이의 차이가 적다면 넙다리뼈 머리 연도에 비해 넙다리뼈 몸통 연도가 실제 사망연도에 가까울 수도 있음을 염두에 두고 결과를 해석해야 할 것으로 생각된다.

넙다리뼈 머리부위를 이용한 사망연도의 추정은 출생연도 추정과 비교한다면 넙다리뼈 머리 추정연도와 사망연도 사이의 차이가 커서 그만큼 오차도 클 여지가 있으며, 연령 및 성별 변수에 대한 고려도 필요해 추정식 개발에 어려움이 있다. Ubelaker 등의 연구[16]에서도 확인되었지만 연령이 증가할수록 골격의 순환율은 감소하므로 사망연도와 넙다리뼈 머리 추정연도 사이의 차이도 커지며, 여성의 경우 폐경기에 에스트로겐 감소의 영향으로 파골세포의 활동이 증가하면 같은 나이의 남성에 비해 골격의 순환율이 증가할 수 있으므로 이와 같은 변수를 추정식에도 반영하여야 할 것이다. 본 연구에서 남성의 경우 연령이 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 그러나 성별이 영향을 미치는 바에 대해서는 직접적으로 제시하지 못하였다. Table 5에서는 본 연구에 포함된 증례들을 연령 및 성별에 따라 구분하고, 각각의 그룹별로 사망연도와 넙다리뼈 머리 연도 사이의 차이를 제시하였다. 성별이 분석 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 기전을 고려한다면 대략 50-60대 정도까지는 남녀 간의 차이가 없다가 그 이후의 시

기부터 남성에 비해 여성의 경우 사망연도와 넙다리뼈 머리 연도 사이의 차이가 줄어들 것으로 예상된다. 그러나 본 연구에서는 이와 같은 차이를 확인할 만큼 충분한 증례에 대한 분석이 이루어지지 못하였으며, 향후 다수의 증례가 모인다면 그 영향을 확인할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 구해진 추정식은 성별을 구분하여 제시하였고, 연령 변수를 추정식에 반영하여 구해졌으나, 향후 보다 많은 증례가 모인다면 50대 남성, 60대 여성과 같이 연령 및 성별로 구분하여 각 그룹별 추정식을 개발하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구의 주요 목적 중 하나는 실무에 적용 가능한 추정식을 구하는 것이었는데 추정식을 구하기 위해 자료를 처리하는 과정에서 전제가 된 부분들에 의해 발생할 수 있는 오차가 있다. 첫번째는 월별 차이에 의한 오차로서 같은 연도라도 1월과 12월 간의 차이는 사실상 1년에 해당하게 된다. 본 연구에서 각각의 증례들에 대한 사망연도 뿐만 아니라 월일 정보도 수집되었으나 추정식을 구하는 과정에서 이를 반영하지는 않았다. 이는 실무적으로는 월일에 대한 정보가 주어지지 않을 것이므로 월일을 반영하지 않고 자료를 처리하는 것이 적절하다고 판단하였기 때문이다. 그러나 이로 인해 오차가 발생할 수 있다는 점에 대해서는 염두에 두어야겠다. 두번째는 본 연구의 대상이 된 증례들의 사망연도에 대한 정보가 수사를 통해 확인된 내용이라는 점이다. 신뢰할 만한 내용을 바탕으로 자료가 수집되었으나, 일부 증례의 경우에는 직접 목격된 것이 아니고, 정황 증거를 통해 자료가 수집되기도 하여 1-2년 정도의 오차가 있을 가능성이 있다. 참고로 관련 정보를 확인하기 어려운 증례들은 분석이 이루어졌더라도 연구에 포함시키지 않았다.

이와 같은 전제 조건 하에서 사망연도 추정식을 제시하였으며, 결과적으로 변수자가 남성인 경우 24증례가 포함되었고, 0.710으로 비교적 높은 수정된 R제곱값이 확인되었으며, 평균제곱오차는 5.57년인 점으로 어느 정도 실무에 도움이 될 만한 추정식이라고 생각된다. 이에 비해 여성인 경우 평균제곱오차는 4.64년으로 적었지만, 9증례만이 포함되었고, 0.588의 낮은 수정된 R제곱값을 보여 실무에 적용하기에는 제약이 있을 것으로 생각된다. 앞서 언급한 바와 같이 여성의 경우 폐경기 이후의 호르몬 변화로 인한 영향을 받을 것으로 예상되며, 이를 선형회귀식을 이용하는 사망연도 추정식으로 예측하기에는 제약이 있을 것이다. 따라서 향후 50대 이상의 증례를 추가하여 연령 및 성별에 따라 그룹을 만들고 각각의 그룹에 대한 추정식을 개발하여 활용해야 할 것으로 생각된다.

이와 같은 한계점들에도 불구하고, 본 연구는 방사성 탄소 동위원소 분석을 이용한 연대추정 연구 중 단일 연구로서 가장 많은 시료가 분석되었으며, 특히 시료에 따른 부위별 오차를 줄이기 위해 넙다리뼈만을 선택하여 분석한 점에서 의

Table 5. Difference between death year and femur head year by age and sex

Age (yr)	Male		Female	
	No.	Mean±SD	No.	Mean±SD
10-19	1	1.0	0	-
20-29	3	7.3±2.1	0	-
30-39	1	8.5	0	-
40-49	3	12.8±4.3	1	17.5
50-59	13	17.6±6.2	2	14.0±1.4
60-69	2	15.0±10.6	2	22.3±6.7
70-79	1	14.0	2	7.5±0.0
80-89	0	-	2	9.5±0.0
Total	24	14.3±7.0	9	13.8±6.3

SD, standard deviation.

의가 있다고 생각된다. 향후 넙다리뼈에 대한 추가적인 연구를 통해 보다 정확성이 높은 추정식을 개발하고 실무에 적용할 수 있기를 기대하고, 다른 한편으로는 넙다리뼈가 존재하지 않는 경우를 대비해서 다른 골격을 활용한 추정식 개발이나 넙다리뼈와 다른 골격과의 비교 등에 대해서도 연구가 진행될 수 있었으면 한다.

ORCID: Hyojin Lee: <https://orcid.org/0009-0003-3311-5111>; Seung Gyu Choi: <https://orcid.org/0000-0002-1846-4669>; Jong-Pil Park: <https://orcid.org/0000-0002-6525-3012>

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This research was supported by a grant for Development of Scientific Investigation funded by the National Forensic Service (2015-Forensic Medicine-01 & 2022-Forensic Medicine-03). We would like to acknowledge and thank the investigators from all participating institutions: National Forensic Service (Won-Joon Lee, Eui-Joo Kim, Jeong Uk Seo, Chang Un Choi), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (Wan Hong, Kyu-Joon Park, Yongjin Park), Kiha Kim and Nak Eun Chung.

References

1. Park JP, Choi SG. Birth year estimation of skeletal remains by radiocarbon dating for teeth. *Korean J Leg Med* 2022;46:114-21.
2. Ubelaker DH. Radiocarbon analysis of human remains: a review of forensic applications. *J Forensic Sci* 2014;59:1466-72.
3. Johnstone-Belford EC, Blau S. A review of bomb pulse dating and its use in the investigation of unidentified human remains. *J Forensic Sci* 2020;65:676-85.
4. Wild EM, Arlamovsky KA, Golser R, et al. 14C dating with the bomb peak: an application to forensic medicine. *Nucl Instrum and Methods Phys Res B* 2000;172:944-50.
5. Santos GM, De La Torre HA, Boudin M, et al. Improved radiocarbon analyses of modern human hair to determine the year-of-death by cross-flow nanofiltered amino acids: common contaminants, implications for isotopic analysis, and recommendations. *Rapid Commun Mass Spectrom* 2015;29:1765-73.
6. Garrido-Varas CE, Ubelaker DH, Intriago-Leiva MA. The use of radiocarbon analysis in a Chilean human rights commingled case. In: *The 65th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences XIX*; 2013 Feb 18-23; Washington, DC, USA. p. 425-6.
7. Horvai A. Bones, joints, and soft tissue tumors. In: Kumar V, Abbas AK, Aster JC, eds. *Robbins and Cotran pathologic basis of disease*. 9th ed. Philadelphia, PA: Saunders/Elsevier; 2015. p. 1197-204.
8. Hedges RE, Clement JG, Thomas CD, et al. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *Am J Phys Anthropol* 2007;133:808-16.
9. Ubelaker DH, Buchholz BA, Stewart JE. Analysis of artificial radiocarbon in different skeletal and dental tissue types to evaluate date of death. *J Forensic Sci* 2006;51:484-8.
10. Manolagas SC, Jilka RL. Bone marrow, cytokines, and bone remodeling. Emerging insights into the pathophysiology of osteoporosis. *N Engl J Med* 1995;332:305-11.
11. Leggett RW. A biokinetic model for carbon dioxide and bicarbonate. *Radiat Prot Dosimetry* 2004;108:203-13.
12. Park JP. Letter to the editor regarding the article "birth year estimation of skeletal remains by radiocarbon dating for teeth." *Korean J Leg Med* 2023;47:31-3.
13. Kim KJ, Hong W, Park JH, et al. Development of radiocarbon dating methods for modern bone collagenization. *Radiocarbon* 2010;52:1657-9.
14. Kim KJ, Hong W, Park JH, et al. Development of radiocarbon dating method for degraded bone samples from Korean archaeological sites. *Radiocarbon* 2011;53:129-35.
15. Hong W, Park JH, Kim KJ, et al. Establishment of chemical preparation methods and development of an automated reduction system for AMS sample preparation at KIGAM. *Radiocarbon* 2010;52:1277-87.
16. Ubelaker DH, Thomas C, Olson JE. The impact of age at death on the lag time of radiocarbon values in human bone. *Forensic Sci Int* 2015;251:56-60.