



치아에 대한 방사성 탄소동위원소 분석을 통한 백골화 골격의 출생연도 추정

박종필¹ · 최승규²

¹연세대학교 의과대학 법의학과
²국립과학수사연구원
서울과학수사연구소 법의학과

Birth Year Estimation of Skeletal Remains by Radiocarbon Dating for Teeth

Jong-Pil Park¹, Seung Gyu Choi²

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

Identifying remains is an important role of forensic medicine. For identification, 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 conducted radiocarbon analysis on teeth and aimed to develop a formula to estimate the birth year. Fifteen autopsy cases from the National Forensic Service, from December 2014 to December 2020, with known birth year were selected for inclusion. For each case, dentin of the first molar in mandible was taken, radiocarbon analysis was carried out and the corresponding estimated birth year were calculated using the bomb peak curve. The differences between the birth year and the teeth year were determined and analyzed on the influence of variables. A formula for estimating the birth year was developed and the applicability of the formula was determined. The difference between the birth year and the teeth year was 2.6 years on average for cases born before 1963, and 5.7 years for those born after 1963. The estimation formula of birth year was as follows: (Before 1963) Birth year=0.565×(Tooth year)-0.446×(Age)+875.001, (After 1963) Birth year=Tooth year-5.7. This study is meaningful in that it reduced the error by using only the first molars of the lower jaw as a sample, and presented an estimation formula of birth year that can be applied in practice through radiocarbon analysis of teeth.

Key Words: Radiometric dating; Forensic anthropology, Tooth; Birth year

Received: October 31, 2022
Revised: November 15, 2022
Accepted: November 18, 2022

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

서론

백골화 골격에 대한 법의학적 감정은 법의 실무에서 드물지 않게 이루어지고 있으며, 간혹 사회적인 관심을 끌기도 한다.

우리나라에서 법의부검을 총괄하고 있는 국립과학수사연구원의 보고에 따르면 백골화된 상태로 의뢰되는 부검건이 최근 점차 증가하여 2017년에는 145건에 이르렀다(Table 1) [1-6]. 백골화 골격에 대한 감정은 크게 사인규명과 신원확인

Table 1. Decomposition and skeletonization among unknown cause of death

	Year					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
No. of decomposition	236	211	176	403	607	754
No. of skeletonization	55	47	58	88	135	145

으로 구분할 수 있으며, 이 중 사인규명을 위한 감정은 부패 및 백골화로 인한 제약으로 골절 여부 등 손상에 대한 판정과 약독물 분석 정도에 국한된다. 신원확인을 위해서는 현재 법의인류학 감정, 법치의학 감정 및 유전자형 분석 등이 실무에 활용되고 있으며, 법의인류학 감정을 통해 성별, 키 등에 대한 정보를 얻고, 법치의학 감정을 통해 연령에 대한 정보를 얻으며, 유전자 검사를 통해 성별에 대한 정보를 얻고, 대조대상자가 있는 경우 동일한 여부에 대한 판정을 시행하고 있다. 여기에 더하여 백골화 골격에 대한 연대추정을 하고자 하는 연구가 진행 중이다.

연대추정이란 변사자의 출생연도 및 사망연도를 추정하는 것으로서, 신원불상자 중 우선순위로 삼을 대상자를 좁히거나 수사 여부를 결정하는 참고자료로 활용될 수 있어 수사실무상으로는 유용한 정보가 될 것이다. 기존에 연대추정을 위한 방법으로 여러 가지가 제시되었지만 실무에 적용될 수 있는 방법은 아직 개발되지 못했다. 그런데 최근 들어 방사성 탄소동위원소 분석을 이용한 연대추정법이 제안되어 여러 연구가 진행 중이며, 일부 사항이 보완된다면 실무에 적용 가능한 수준에 이르고 있다[7,8].

동위원소(isotope)란 원자핵을 이루는 중성자(neutron)의 수는 다르지만 양성자(proton)의 수는 같아서 원자번호는 같고 화학적 성질도 같은 원소를 부르는 말이다. 이 중 양성자와 중성자의 조합이 안정적이면 안정 동위원소라고 하고, 불안정하면 방사성 동위원소라고 구분한다. 탄소는 원자핵에 양성자 6개와 중성자 6개로 질량수가 12인 ^{12}C 가 가장 기본이며, 질량수 13(양성자 6개, 중성자 7개)인 ^{13}C 가 안정 동위원소이고, 질량수가 14(양성자 6개, 중성자 8개)인 ^{14}C 는 방사성 동위원소이며, radiocarbon 또는 modern carbon이라고 불린다. ^{14}C 는 자연계에서 ^{12}C 및 ^{13}C 에 비해 극히 적은 비율로 존재하며, 5730년의 반감기에 따라 베타 붕괴(beta-decay)를 통해 ^{14}N 로 변환된다. 한편 자연계에 존재하는 탄소 원자는 주로 이산화탄소의 형태로 식물의 광합성에 이용되어 식물과 이를 에너지원으로 이용하는 동물의 체내에서 대사가 되며, 공기 중의 탄소동위원소 비율이 그 시기 및 지역의 생물에도 동일하게 반영된다. 따라서 특정 유기화합물에 대해 탄소 동위원소의 비율을 조사하면 그 유기화합물이 형성된 시기를 추정할 수 있게 된다[7,8].

탄소동위원소 분석을 이용한 연대추정 방법은 1940년대

에 개발되어 주로 고고학 분야에서 오래된 유물에 대해 연대를 추정하는데 이용되어 왔다. 인체 유골의 경우에도 고대의 것으로 추정되는 유골에 대해서는 적용이 가능하지만, 100년 이내의 유골에 대해서는 큰 오차로 인해 유용성이 떨어져 수사실무에 적용하기에는 부적절한 상황이었다. 그런데 1950년대 이후에 원폭 실험에 의해 ^{14}C 의 대기중 농도가 전세계적으로 현저하게 증가되었고, 핵확산금지조약(Nuclear Non-Proliferation Treaty)으로 인해 1963년 이후에 이의 양이 일정한 비율로 감소하고 있다는 사실(bomb peak curve)이 알려지면서 이러한 현상을 이용하여 명품 그림의 진위 검사, 포도주의 생산년도 추정 등의 검사에 적용하게 되었는데, 같은 맥락으로 유골에 대해 이를 적용해 보려는 연구가 시행되고 있었다[7,8].

Bomb peak curve를 활용해서 법의학적인 문제해결에 적용하고자 하는 연구는 1980년대 말 처음 시작되어[9] 점차 활성화되고 있다. 아직까지 보편화된 검사법으로 정착되지는 않았으나, 대한민국의 경우 6.25전쟁을 비롯한 역사적인 사건과 관련된 것으로 추정되는 인체 골격에 대한 감별이 필요한 경우가 종종 발생되고 있으며, 일상적으로 이루어지는 부검업무에서도 백골화 골격이 발견된 경우 신원확인을 위해 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되어 수사상의 요구가 증가하고 있는 상황이다. 백골화 골격의 경우 일반적으로 치아와 뼈에 대한 분석을 통해 연대 추정을 하게 되는데, 치아를 통해 출생연도를 추정하고, 뼈를 통해 사망연도를 추정할 수 있다. 치아의 경우 영구치가 나면 사망할 때까지 존재하게 되는데, 아래턱 첫째 큰어금니의 경우 임신 중에 태아에서부터 발생이 시작되어 6세경 영구치 중 가장 먼저 맹출(eruption)되며, 9-10세경 뿌리부분이 완성되면서 성장이 종료된다[10]. 따라서 치아에 대한 방사성 탄소동위원소 분석을 통해 얻은 결과값으로부터 출생연도를 추정할 수 있다. 하지만 정확한 출생연도를 추정하기 위해서는 보완되어야 할 점들이 남아 있어 실무에 적용하기는 어려운 상황이다.

본 연구는 치아에 대한 탄소동위원소분석을 통해 백골화 골격의 출생연도를 추정을 하는 것을 목적으로 한다. 출생연도 추정에 영향을 줄 수 있는 변수들에 대한 분석을 시행하고, 이를 통해 출생연도를 추정하는 공식을 개발하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구는 2014년 12월부터 2015년 10월까지 국립과학수사 연구원에서 시행된 부검 증례들을 대상으로 하였다. 출생연도가 정확히 확인된 백골화 골격이나 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, 출생연도, 지역, 사망원인, 부패 정도 등에 대한 정보를 수집하였다.

1. 시료의 채취

각각의 증례에 대해 아래턱 첫째큰어금니를 채취하였다, 채취한 치아는 치아절편기를 이용하여 0.3 cm 두께의 절편을 만들고 이 중 상아질(dentin) 부위를 채취하여 분석에 활용하였다(Fig. 1).

2. 시료의 전처리

시료에 대해 콜라젠 추출법을 적용하여 전처리하였다[11,12]. 얻어진 상아질 부위를 마노유발(agate mortar)을 이용하여 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 한번 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 맞춘다. 비커를 가열하여 용액의 온도를 70°C로 유지한 채 12시

간 동안 가열하여 젤라틴으로 만든다. 가열이 끝나면 2.7 µm fiber filter를 이용하여 1차 시료를 거른다. 필터를 통과한 용액을 모아 Centriprep (Merck Millipore Co., Darmstadt, Germany) 필터로 분자량 범위로 분리해 낸다. 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 잘 감싼 다음 원소분석기(elemental analyzer)에 넣어 연소하였다. 연소하여 얻은 이산화탄소 중 254 torr (1.192 mg)를 자동 환원장치로 처리하여 흑연으로 만들었다[13]. 환원반응 회수율은 90% 이상이었다. 제작된 흑연을 알루미늄 펠렛에 넣고 가압하여 펠렛 표적을 만들었다.

4. AMS 분석 및 달력연대 환산

위의 표적을 가속화 질량분석기(accelerator mass spectrometer, AMS)로 분석하여 ¹⁴C의 비율(percent modern carbon, pMC)을 측정하였다. pMC값을 이용한 탄소연대 추정을 위해서 1950년 이전으로 추정된 경우 IntCal20을 이용하고, 1950년 이후인 경우 한국지질자원연구원에서 자체 개발한 Cheeseburger 프로그램(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea)을 이용하여 연대를 추정하였다

5. 증례 추가

여기에 더하여 2016년부터 2020년 사이에 감정 목적으로 분석이 시행되었던 증례 중 감정 후 신원이 확인되어 정확한 출



Fig. 1. Sampling of teeth.

생연도를 알게 된 증례들을 분석에 포함시켰다. 이들 증례 역시 이제까지와 동일한 과정을 통해 분석이 시행되었다.

6. 자료의 선택

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

7. 통계분석 및 추정식 개발

출생연도와 치아연도 사이의 차이가 연령, 성별, 출생연도, 사망원인 및 부패 정도 등의 변수에 영향을 받는지에 대해 통계분석을 시행하였다. 출생연도는 1963년 이전과 이후로 구분하였고, 사망원인은 손상, 질식, 불명으로 구분하였으며, 부패 정도는 완전白骨화, 부분白骨화 및 부패가 안된 상태로 구분하여 분석하였다. 그리고 이상의 결과를 토대로 통계적으로 유용하다고 검증된 변수를 이용하여 출생연도 추정식을 구하고, 유용성을 평가하였다. 통계분석은 IBM SPSS version 26 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하였다.

결 과

총 15건의 부검 증례가 분석에 포함되었다. 이 중 13건은 2015년에 시행된 부검 증례들이고, 2건은 이후에 추가된 증례들이다. 평균 연령은 46.8세이고, 16세부터 75세까지 분포하였다. 성별은 남성이 11명, 여성이 4명이었다. 출생연도는 1900년부터 1999년까지 분포하였고, 1950년 이전이 2명, 1950년부터 1963년 사이가 7명, 1963년 이후가 6명이었다. 사망원인은 다발성 손상이 5건, 의사가 3건, 교사가 2건, 불명인 경우가 5건이었다. 시체의 부패 정도는 완전白骨화가 5건, 부분白骨화가 4건, 부패되지 않은 경우가 6건이었다. 이상의 내용은 Table 2에 정리하여 제시하였다. 이들에 대한 ^{14}C 분석 결과 및 이를 이용한 연대추정 결과는 Table 3과 같다.

1. 변수 분석

1950년 이전 출생자를 제외한 나머지 증례에 대해 출생연도와 치아연도 사이의 차이에 영향을 주는 인자에 대해 분석하였다(Table 4). 연령의 경우 출생연도와 치아연도 사이의 차이에 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 1963년 이전 출생자와 1963년 이후 출생자를 구분하여 비교한 결과 1963년 이전에 출생한 경우가 1963년 이후 출생자에 비해 출생연도와 치아연도 사이의 차이가 적은 것으로 나타났고, 두 그룹 사이에 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다. 그밖에 성별, 사망원인 및 부패 정도는 출

Table 2. Basic information of cases

No.	Age (yr)	Sex	Birth year	Residence	COD	Decomposition degree
1	29	Male	1981	Busan	Ligature strangulation	Complete skeletonization
2	50	Male	1960	Busan	Ligature strangulation	Complete skeletonization
3	51	Female	1900	Yangpyeong	Unknown	Complete skeletonization
4	43	Male	1972	Gimpo	Multiple injuries due to fall	Fresh
5	53	Female	1962	Ansan	Unknown	Partial skeletonization
6	54	Male	1961	Incheon	Hanging	Partial skeletonization
7	16	Male	1999	Wonju	Multiple injuries due to TA	Fresh
8	24	Male	1990	Chungju	Hanging	Partial skeletonization
9	56	Male	1958	Eumseong	Multiple injuries due to TA	Fresh
10	22	Male	1993	Yangpyeong	Multiple injuries due to TA	Fresh
11	58	Male	1957	Gangneung	Multiple injuries due to fall	Fresh
12	59	Male	1956	Gunpo	Hanging	Partial skeletonization
13	61	Male	1953	Cheonan	Unknown	Fresh
14	51	Female	1967	Incheon	Unknown	Complete skeletonization
15	75	Female	1944	Paju	Unknown	Complete skeletonization

COD, cause of death; TA, traffic accident.

Table 3. Results of radiocarbon analysis

No.	Age (yr)	Sex	Birth year	BP year	pMC (%)	2σ Calender year range (AD)	Tooth year range	Tooth year
1	29	Male	1981	-1360±40	118.4±0.56	1958.5 or 1987.5-1988.5	1987.5-1988.5	1988
2	50	Male	1960	-3390±30	152.6±0.65	1962.5 or 1970.5-1971.5	1962.5	1962.5
3	51	Female	1900	120±40	98.48±0.45	1674-1766, 1774-1776 or 1799-1943	<1950	-
4	43	Male	1972	-2500±30	136.6±0.59	1962.5 or 1975.5-1976.5	1975.5-1976.5	1976
5	53	Female	1962	-3330±30	151.4±0.62	1962.5 or 1970.5-1971.5	1962.5	1962.5
6	54	Male	1961	-3430±30	153.4±0.61	1962.5 or 1969.5-1971.5	1962.5	1962.5
7	16	Male	1999	-540±40	107±0.48	1956.5-1957.5 or 2001.5-2005.5	2001.5-2005.5	2003.5
8	24	Male	1990	-840±30	111±0.40	1957.5 or 1995.5-1998.5	1995.5-1998.5	1997
9	56	Male	1958	-2030±40	128.8±0.58	1959.5-1961.5 or 1979.5-1981.5	1959.5 or 1961.5	1960.5
10	22	Male	1993	-710±30	109.2±0.43	1957.5 or 1997.5-2000.5	1997.5-2000.5	1999
11	58	Male	1957	-3170±30	148.4±0.57	1962.5 or 1971.5-1972.5	1962.5	1962.5
12	59	Male	1956	-940±30	112.4±0.44	1957.5-1958.5 or 1993.5-1996.5	1957.5-1958.5	1958
13	61	Male	1953	-560±30	107.2±0.39	1956.5-1957.5, 2001.5-2002.5 or 2004.5	1956.5-1957.5	1957
14	51	Female	1967	-2942±24	144.2±0.43	1962.5 or 1972.5-1973.5	1972.5-1973.5	1973
15	75	Female	1944	124±32	98.47±0.39	1675-1744, 1750-1765 or 1799-1942	<1950	-

BP, before present; pMC, percent modern carbon.

Table 4. Variables analysis on difference between birth year and teeth year

Variable	No.	Mean±SD	P-value
Age (yr)	13		0.033
Sex			
Male	11	4.2±2.0	0.577
Female	2	3.3±3.9	
Birth year			
<1963	7	2.6±1.7	0.003
>1963	6	5.7±1.3	
COD			
Trauma	5	4.5±1.4	0.838
Strangulation	5	4.0±2.8	
Unknown	3	3.5±2.9	
Decomposition status			
Complete skeletonization	3	5.2±2.4	0.320
Partial skeletonization	4	2.8±2.9	
Fresh	6	4.4±2.1	

SD, standard deviation; COD, cause of death.

P-value for age was determined with use of Pearson correlation (correlation coefficient=-0.592).

P-values for sex and birth year were 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.

생연도와 치아연도 사이의 차이에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

2. 추정식 개발 및 평가

이상의 내용을 바탕으로 추정식 후보를 제시하고, 평가하였다. 출생연도 추정식은 1963년 이전과 이후로 구분하여 모형을 만들었고, 앞서 변수에 대한 분석에서 연령이 음의 상관관계를 가진다는 점을 고려하여 연령과 치아연도를 독립변수로 하는 다중선형회귀분석을 이용한 식(추정식 1), 치아연도만을 독립변수로 하는 단순선형회귀분석식(추정식 2) 그리고 단순히 치아연도에서 출생연도와 치아연도 사이의 차이 평균을 뺀 식(추정식 3) 이상 세가지를 비교하였다. 추정식에 관한 내용은 Table 5에 제시하였다.

추정식 1:

$$(1963\text{년 이전}) \text{ 출생연도} = 0.565 \times (\text{치아 연도}) - 0.446 \times (\text{연령}) + 875.001$$

$$(1963\text{년 이후}) \text{ 출생연도} = 0.917 \times (\text{치아 연도}) - 0.065 \times (\text{연령}) + 160.651$$

추정식 2:

$$(1963\text{년 이전}) \text{ 출생연도} = 1.126 \times (\text{치아 연도}) - 250.321$$

$$(1963\text{년 이후}) \text{ 출생연도} = 0.985 \times (\text{치아 연도}) + 23.810$$

추정식 3:

$$(1963\text{년 이전}) \text{ 출생연도} = \text{치아 연도} - 2.6$$

$$(1963\text{년 이후}) \text{ 출생연도} = \text{치아 연도} - 5.7$$

Table 5. Estimation formulas by multivariate analysis and evaluation of their usefulness

Year	Formula	Variable	β	P-value	VIF	R-square	Adjusted R-square	Root MSE
<1963	Birth year formula 1	Constant	875.001	0.357		0.843	0.764	1.168
		Age	-0.446	0.167	2.626			
		Tooth year	0.565	0.252	2.626			
	Birth year formula 2	Constant	-250.321	0.693		0.731	0.678	1.626
		Tooth year	1.126	0.014	1.000			
		Birth year formula 3						
>1963	Birth year formula 1	Constant	160.651	0.825		0.990	0.984	1.338
		Age	-0.065	0.849	34.618			
		Tooth year	0.917	0.069	34.618			
	Birth year formula 2	Constant	23.810	0.819		0.990	0.988	1.167
		Tooth year	0.985	<0.001	1.000			
		Birth year formula 3						

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

1963년 이전의 경우 추정식 1이 추정식 2에 비해 수정된 R제곱값이 0.764로 높게 나왔고, 내부검증(internal validation)을 위해 시행한 평균제곱오차(mean squared error)값이 세가지 추정식 중 추정식 1에서 가장 작은 점 등으로 추정식 1이 우수한 추정식인 것으로 판정하였다. 1963년 이후의 경우 세가지 추정식 모두 의미 있는 결과를 보여주었으나, 추정식 3이 평균제곱오차값이 가장 작아 가장 우수한 추정식인 것으로 판정하였다.

고찰

기존에 연구들 중 치아에 대한 방사성 동위원소분석 시 본 연구와 같이 상아질을 이용한 경우도 있으나[14], 보다 많은 경우에서 법랑질(enamel)을 이용하여 분석을 시행하였다[15-17]. 법랑질은 치아의 발달 단계 초기에 생성되어 사망시까지 변하지 않고 유지되는 조직으로 출생연도 추정에 적합한 시료이다. 대략 2.5 내지 3세경 생성이 완성된 후 평생 유지되고, 구성성분의 96%가 무기질이고, 나머지 4%가 유기질 및 수분이어서 단단하고 안정적이다[10]. 그러나 치아의 표면에 위치하므로 외부환경의 영향을 받기 쉽고, 치아 당 존재하는 양이 적으며, 그중에서도 분석에 필요한 유기질의 비율이 적어 분석이 어려운 단점이 있다. 이에 비해 상아질은 법랑질에 비해 상대적으로 늦은 시기에 생성된다. 아래턱 첫째큰어금니의 경우 임신 20주부터 발생이 시작되어 6세경 맹출되고, 9-10세경 완성된다고 알려져 있으며[10], 따라서 상아질의 생성도 이 시기까지 지속될 것으로 추정된다. 그러나 상아질은 법랑질과 시멘트질(cementum)에 의해 둘러싸여 외부환경으로부터 보호될 수 있고, 치아 중 차지하는 부피가 법랑질에 비해 크며, 구성성분 중 무기질 70%, 유기질 20% 및 수

분 10%로 유기질의 비율이 상대적으로 높아 분석이 용이한 장점을 가지고 있다. 감정의 신뢰도를 높이기 반복실험을 해야 하고, 경우에 따라서는 추가 검증이 필요한 법의학 분석의 특수성을 고려하였을 때 시료의 양은 시료의 적절성을 판정함에 있어 중요한 기준이 될 수 있고, 상아질은 이와 같은 법의학 감정에 활용될 수 있는 장점을 가지고 있다고 판단하여 본 연구에서는 상아질을 이용하였다. 또한 치아별 발생에 따른 차이가 있음을 고려하여 오차를 줄이고자 영구치 중 가장 먼저 생성되는 아래턱 첫째큰어금니를 대상으로 분석을 시행하였으며, 그 결과를 이용한 추정식을 개발하고자 하였다.

방사성 탄소동위원소 분석을 이용한 연대추정은 1950년 대부터 활발해진 핵실험에 의해 가능해졌다. 따라서 1950년 이전의 사망자인 경우 정확한 연대추정에 제약이 있다. 다만 1950년 이전이라고 판단할 수 있어 수사상 의미는 없지는 않겠다. 보다 정확히 bomb peak curve가 사용되는 시점은 pMC가 100% 이상인 1955년 이후부터이며, 1954년까지는 pMC값이 100%보다 작아 그 이전 결과들과 명확히 구분되지 않는다. 다만 치아를 통해 특정되는 pMC값은 출생시부터 치아 생성이 완성된 시점까지의 총합의 결과이므로 대략 1950년 이후 출생자라면 정확한 출생연도 추정이 가능할 것이다. 본 연구에서 1950년 이전으로 결과가 나온 경우가 총 2 증례가 있었고, 각각 1900년과 1944년에 출생한 경우였다. 정확히 몇 년도 출생부터 출생연도 추정이 가능할 지에 대해서는 향후 추가적인 연구를 통해서 확인할 필요가 있겠다.

본 연구에서 출생연도와 치아연도의 차이가 연령과 음의 상관관계를 보이는 것이 확인되었다(Table 4). 그런데 이는 실제로 음성의 상관관계를 보인다고보다는 bomb peak curve의 특성에 기인한 것으로 생각된다. 샘플 수가 적은 상

황에서 1963년 이전에 출생한 증례들의 경우 pMC값이 증가하다가 감소하는 bomb peak curve의 특성으로 인해 출생연도와 치아연도의 차이가 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다. 치아가 생성되는 동안 pMC가 일정하게 증가하거나 일정하게 감소하는 경우에 비해 생성기간 동안 pMC가 증가하다가 감소하는 경우에는 출생시의 pMC값과 치아생성 기간 동안의 pMC 변화가 축적된 결과인 치아의 pMC값 사이에 차이가 줄어들게 되며, 이를 통해 추정된 연도의 차이도 줄어들게 된다. 연구시점의 특성상 고령인 증례는 1963년 이전에 출생하여 pMC값이 증가하다가 감소하는 시점에 치아가 발생하였고, 젊은 연령인 증례는 1963년 이후에 pMC값이 지속적으로 감소하는 시점에 출생하였기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 생각된다. 이에 대해서는 출생연도를 1963년 이전과 이후로 구분하여 두 집단을 비교한 분석에서 1963년 이전에는 출생연도와 치아연도 사이에 평균 2.6년의 차이를 보인 반면, 1963년 이후에는 평균 5.7년의 차이를 보였고, 통계적으로도 유의한 차이를 보여 검증이 가능하였다. 이를 근거로 추정식을 개발하는 과정에서 1963년 이전과 1963년 이후로 구분하여 진행하였다. 1963년 이전인 경우도 1940년대 중반부터 1950년 초반까지 pMC값이 꾸준히 증가하는 구간을 별도로 구분하여 추정식을 만든다면 보다 정교한 추정식을 개발할 수 있겠으나 본 연구에서는 증례의 부족으로 인해 이 구간에 대해 별도의 추정식을 제시하지는 못했다.

본 연구에서 검증을 통해 제시한 추정식은 다음과 같다.

(1963년 이전) 출생연도=0.565×(치아 연도)-0.446×(연령)+875.001

(1963년 이후) 출생연도=치아 연도-5.7

상기 추정식을 제시한 근거는 결과 부분에 소개한 바와 같으며, 1963년 이전의 경우 연령과 치아연도를 이용한 다중회귀식이 가장 오차가 적었고, 1963년 이후의 경우 출생연도와 치아연도 사이의 평균을 이용한 추정식이 가장 의미있는 것으로 확인되었다(Table 5). 1963년 이전 추정식의 경우 수정된 R제곱값이 0.764로 설명력이 높은 추정식은 아닌 것으로 생각된다. 또한 추정식에 연령 변수가 포함된 부분이 연령이나 성별에 영향을 받지 않는 치아의 발생과정을 고려하였을 때 오해의 소지를 만들 여지가 있어 보인다. 다만, 상기 추정식에서 연령의 의미는 연령에 따라 치아 발생과정에 차이가 있다는 의미는 아니며, bomb peak curve의 특성을 반영하기 위해 고안된 변수로 의미를 이해해야 할 것이다. 그리고 주어진 상황상 연령에 대한 정보가 없는 경우에는 1963년 이전에도 연령 변수 없이 출생연도를 추정할 수 있는 추정식 3(출생연도=치아 연도-2.6)을 차선택으로 적용해 볼 수 있을 것이다.

본 연구의 결과와는 별개로 실무에서 해결되어야 할 문제는 치아에 대한 분석 결과가 bomb peak curve의 특성상

1963년을 기준으로 1963년 이전과 1963년 이후로 두 구간의 추정연대가 제시되었을 때 어느 구간을 선택하여 추정식에 대입할 지에 대한 판정이 필요하다는 부분이다. 현재는 실무에서 치아분석 결과를 이용해 출생연도를 추정할 때 납다리뼈에 대한 분석을 통해 사망연도를 추정하고 여기에 법치의학 감정을 통한 연령추정 결과를 적용해서 이에 부합하는 치아 추정연도를 선택하는 방법을 사용하고 있는데 1963년에 가까운 두 개의 추정연도가 제시된다면 이 중 어느 것을 선택해야 할지에 대해 명확한 기준이 없는 상황이다. 이 문제는 본 연구에서 사용한 아래턱 첫째큰어금니보다 발생이 늦은 것으로 알려진 다른 치아의 상아질을 함께 분석하여 그 결과를 비교하거나 동일한 치아에서 법랑질을 별도로 분석하여 결과를 비교함으로써 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 15건의 증례에서 치아에 대한 방사성 탄소 동위원소 분석을 시행하였고 이 중 13건을 이용하여 변수에 대한 분석 및 추정식을 개발하였다. 시료의 수가 적은 한계점을 가지고 있지만, 법의학적 감정에 유용한 상아질을 분석 대상으로 하였고, 특히 치아 종류별 오차를 줄이기 위해 아래턱 첫째큰어금니만을 선택하여 분석한 점은 본 연구의 의의라고 할 수 있겠다. 향후 추가적인 연구를 통해 보다 정확성이 높은 추정식을 개발하고 실무에 적용할 수 있기를 기대한다.

ORCID: Jong-Pil Park: <https://orcid.org/0000-0002-6525-3012>; Seung Gyu Choi: <https://orcid.org/0000-0002-1846-4669>

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). 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), and Nak Eun Chung.

References

1. Na JY, Park JP, Park HJ, et al. The statistical analysis on legal autopsy performed in Korea during 2012 year. Korean J Leg Med

- 2013;37:198-207.
2. Jang SJ, Park JP, Choi BH, et al. The statistical analysis on legal autopsy performed in Korea during 2013 year. *Korean J Leg Med* 2014;38:145-54.
 3. Jang JS, Jang SJ, Choi BH, et al. A statistical analysis of legal autopsies performed in Korea in 2014. *Korean J Leg Med* 2015;39:99-108.
 4. Park JH, Na JY, Lee BW, et al. A statistical analysis on forensic autopsies performed in Korea in 2015. *Korean J Leg Med* 2016;40:104-18.
 5. Park JH, Na JY, Lee BW, et al. A statistical analysis on forensic autopsies performed in Korea in 2016. *Korean J Leg Med* 2018;42:8-21.
 6. Park JH, Na JY, Lee BW, et al. A statistical analysis on forensic autopsies performed in Korea in 2017. *Korean J Leg Med* 2018;42:111-25.
 7. Ubelaker DH. Radiocarbon analysis of human remains: a review of forensic applications. *J Forensic Sci* 2014;59:1466-72.
 8. 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.
 9. Taylor RE, Suchey JM, Payen LA, et al. The use of radiocarbon (^{14}C) to identify human skeletal materials of forensic science interest. *J Forensic Sci* 1989;34:1196-205.
 10. Korean Academy of Pediatric Dentistry. Textbook of pediatric dentistry. 5th ed. Seoul: Yenang; 2014.
 11. Kim K, Hong W, Park J, et al. Development of radiocarbon dating methods for modern bone collagenization. *Radiocarbon* 2010;52:1657-9.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Nakamura T, Kojima S, Ohta T, et al. Application of AMS ^{14}C measurements to criminal investigations. *J Radioanal Nuclear Chem* 2007;272:327-32.
 15. Spalding KL, Buchholz BA, Bergman LE, et al. Forensics: age written in teeth by nuclear tests. *Nature* 2005;437:333-4.
 16. Buchholz BA, Spalding KL. Year of birth determination using radiocarbon dating of dental enamel. *Surf Interface Anal* 2010;42:398-401.
 17. Saitoh H, Moriya T, Takeyama M, et al. Estimation of birth year by radiocarbon dating of tooth enamel: approach to obtaining enamel powder. *J Forensic Leg Med* 2019;62:97-102.