



Review Article

한국 치위생학과 방사선 촬영 실습 환경의 비판적 고찰과 통제된 상호실습을 위한 정량적 근거: 이중 법체계와 선량학적 분석을 중심으로

김선집^{ID}

단국대학교 보건과학대학 치위생학과

Critical review of the radiographic practicum environment in Korean dental hygiene programs and a quantitative framework for controlled intersubject practice: focusing on the dual legal framework and dosimetric analysis

Seon-Jip Kim^{ID}

Department of Dental Hygiene, College of Health Science, Dankook University

Corresponding author: Seon-Jip Kim, Department of Dental Hygiene, College of Health Science, Dankook University, 119 Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan 31116, Republic of Korea. Tel: +82-41-550-1497, E-mail: seonjip@dankook.ac.kr

Abstract

Objectives: In this review, the dual legal framework governing the radiographic practicum in Korean dental hygiene education is analyzed, a quantitative safety range is derived for intersubject practice, and policy directions are proposed. **Methods:** A critical narrative review was performed by integrating an analysis of Korean statutes, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) dosimetric framework, the 2024 Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA) diagnostic reference level guidelines, and international comparisons. **Results:** Student radiography of human subjects is restricted, not by an explicit statute, but by an administrative interpretation combining the Medical Service Technologists Act and the Nuclear Safety Act. The 2024 Enforcement Rule Appendix 1 widens this regulatory gap by phasing in a mandatory clinical practicum, while practical restrictions on student radiography remain unchanged. Using published dose-area product-to-effective-dose conversion coefficients with the 2024 KDCA diagnostic reference levels, the estimated effective dose for one adult mandibular molar periapical exposure was 3–6 μSv ; within an operational reference level of 100 $\mu\text{Sv}/\text{year}$ (10% of the public limit), approximately 20 exposures per student per year fall within a quantitatively reviewable range. Mannequin and virtual reality simulators retain inherent limitations that intersubject practice may complement. **Conclusions:** Within the conservative operational benchmark proposed here, quantitative guidelines permitting controlled intersubject practice may support the minimum clinical competency of new dental hygienists, informing future discussion on statutory amendments and curricular integration.

Keywords: Dental education, Dental hygienists, Dental radiography, Radiation dosage, Radiation protection

주요어: 치과교육, 치과위생사, 치과방사선촬영, 방사선량, 방사선방호

서론

치과 방사선 촬영은 치과 진단의 핵심 보조 수단이다[1,2]. 「의료기사 등에 관한 법률」 시행령 별표1은 치과위생사의 업무 중 하나로 보건기관 또는 의료기관에서 수행하는 구내 진단용 방사선 촬영을 명시하고 있다[3]. 치과위생사는 방사선 관계 종사 직종 가운데 방사선사, 의사, 치과의사 다음으로 방사선 발생 장치 사용 빈도와 직무피폭이 높은 직종이며[4], 일선 치과의료기관에서 구내 방사선 촬영의 실질적 주체이다[5].

치과 방사선 검사에서 환자가 받는 유효선량은 검사 종류와 촬영 조건에 따라 달라지며, 촬영 실패로 인한 재촬영은 그만큼의 피폭을 추가로 발생시킨다[6]. 이러한 관점에서 치위생학과 단계의 방사선 촬영 숙련도 확보는 단순한 교육의 문제를 넘어 ALARA(as low as reasonably achievable) 원칙의 사회적 구현 측면에서도 검토될 수 있는 주제이다. 다만 학생 단계의 술기 부족이 임상 단계의 재촬영 증가와 환자 누적 피폭 증가로 이어진다는 인과관계는 개념적 가설이며, 이에 대한 정량적 검증은 향후 연구가 필요하다.

그러나 국내 치위생학과 학생은 「원자력안전법」 시행령 제2조에 따라 방사선관리구역 수시출입자 또는 일반인으로 분류되며, 그 결과 학생이 인체에 진단용 방사선을 직접 조사하는 행위가 사실상 제한된다[7]. 이에 따라 학생들은 마네킨(팬텀) 위주의 실습으로 졸업하고, 환자에 대한 실제 촬영은 임상 현장에서 처음 시작하는 구조이다. 이러한 구조적 한계는 일찍이 Ahn and Kim [8]이 K대학 치위생과 학생 285명을 대상으로 한 분석에서 명시적으로 지적되었다. 해당 연구는 학생들의 정확한 해부학적 구조물 판독, 필름 위치법, 각 촬영법의 기술 숙달을 위해 “학교 내 구강방사선 실습 시 숙달의 경지에 도달할 수 있을 정도의 반복적 상호실습이 필요하다”고 결론지었다.

그러나 이 권고가 제기된 이후, 국내 학계의 후속 대응은 주로 대안적 교육 매체 개발과 효과 평가의 방향으로 전개되었다. Lee et al. [9]은 시나리오 기반 가상현실(virtual reality, VR) 시뮬레이션을 통한 치위생 학생 구내 방사선 촬영 술기 교육의 효과를 검증하였으며, Gu and Lee [10], Im and Lee [11], Im et al. [12]은 가상현실 및 증강현실(augmented reality, AR) 기반 시뮬레이터를 개발하여 법적 제약을 우회하고자 하였다. Bozia et al. [13]은 26개국 치과위생사 협회를 대상으로 한 국제 비교 단면조사를 통해 치과위생사 방사선 업무 범위의 국가 간 차이를 보고하였다. 그러나 이러한 인접 연구들의 축적에도 불구하고, 학생 단계 상호실습 도입의 가능성을 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 방호 원칙과 정량적 선량학에 기반하여 체계적으로 분석한 종설은 상대적으로 드물게 보고되어 왔으며, 본 주제에 대한 학술적 검토와 임상·교육 현실 사이의 간격이 상당하다.

이 학계 공백 사이에 정책 환경이 근본적으로 변화하였다. 2024년 11월 28일 신설된 「의료기사 등에 관한 법률」 시행규칙 별표1은 치과위생사 현장실습과목 이수율 국가시험 응시 요건으로 의무화하고, 최소 이수시간을 320시간으로 명시하였다[14,15]. 다만 부칙 경과조치에 따라 이 요건은 단계적으로 시행된다. 2025년 3월 1일부터 2027년 2월 28일까지의 졸업자는 최소 이수시간의 25% 이상(80시간), 2027년 3월 1일부터 2028년 2월 29일까지의 졸업자는 50% 이상(160시간), 2028년 3월 1일 이후 졸업자는 100% 이상(320시간)의 현장실습을 이수해야 하며[14], 시행규칙 별표1 비고 제4호는 현장실습 장소를 “교내가 아닌 의료기관, 보건소 등 의료기사·안경사의 업무 현장”으로 한정하여 교내 마네킨 또는 가상현실 실습 시간은 산정에서 제외된다[14]. 미이수자는 국가시험 응시 자체가 불가능하다. 결과적으로 단계적으로 확대되는 의무 환자 대면 시간 동안 학생들은 현행 행정 해석상 인체 방사선 조사는 수행할 수 없는 상태로 진료 현장에 노출되어야 한다. 즉 환자 대면은 의무화되는 반면 핵심 술기에 대한 통제된 인체 노출 학습은 제한되는 제도적 간극이 발생하였으며, 이 간극은 2028년 3월 1일 이후 320시간 전면 적용 시점에서 그 영향이 가장 커진다.

한편 현행 학생 단계 인체 노출 제한 정책은 그 자체로 정당한 근거를 가진다. ALARA 원칙에 따라 의학적으로 정당화되지 않은 모든 방사선 노출은 최소화되어야 하며, 진단적 필요성이 없는 학생 단계 노출은 이 원칙의 직접적 적용 대상에 해당한다. 학생 피검자가 교수자·동료 학생과의 위계 관계 하에 있어 자발적 동의의 진정성 확보가 어려울 수 있다는 윤리적 고려, 그리고 의료기관의 법적 책임 문제 또한 학생 단계 노출에 대한 신중한 접근을 정당화해 온 요소이다. 이러한 제한 정책의 정당한 근거를 인정하면서도, 면허 취득 후 즉시 환자 진료에 투입되어야 하는 신규 치과위생사의 최소 임상 술기 양성 필요성과의 균형을 정량적·과학적으로 어떻게 확보할 것인가에 대한 학술적 검토를 시도한다. 즉, 방사선 노출의 위험성에 대한 경각심과 노출량의 최소화가 중요한 원칙이나, 면허 취득 후 즉시 임상 현장에 투입되어 환자에게 진단용 방사선 촬영을 시행해야 하는 신규 치과위생사가 충분한 술기 역량을 갖추도록 보장하는 것 또한 환자 안전의 핵심 축이다. 본 종설의 목적은 다음과 같다. 첫째, 국내 치위생학과 방사선 촬영 실습 환경을 규율하는 이원적 법체계(「의료기사 등에 관한 법률」·「의료법」 대 「원자력안전법」)의 구조와 그 해석상 모순을 분석한다. 둘째, ICRP 60에서 103으로의 권고 전환에 따른 조직가중계수 변화, 면적선량(dose-area product, DAP)에서 유효선량으로의 환산, 2024년 질병관리청 진단참고수준(diagnostic reference level, DRL) 가이드라인에 기반하여 학생 상호실습의 정량적 안전범위를 도출한다. 셋째, 마네킨 및 가상현실/증강현실 시뮬레이터의 한계와 통제된 상호실습의 단계적 도입 방안을 제시한다. 이상의 분석을 토대로, 방사선 안전의 정량적 한계 내에서 치과위생사의 핵심 술기 역량을 양성할 수 있는 가이드라인 골격과 「의료기사 등에 관

한 법률」·「원자력안전법」 시행령에 관한 잠재적 정책 함의를 함께 논의한다. 본 종설은 그동안 이어져 온 학계의 정량적 공백을 선량학과 법리 분석으로 보완하는 것을 핵심 기여로 한다.

본론

1. 한국 치위생학과 방사선 촬영 실습의 이원적 법체제

1) 「의료기사 등에 관한 법률」 및 「의료법」 체계

「의료기사 등에 관한 법률」(이하 의료기사법) 제2조는 치과위생사를 “치아 및 구강질환의 예방과 위생 관리 등”의 업무를 담당하는 의료기사로 규정한다[15]. 동법 시행령 제2조는 의료기사등의 구체적 업무범위를 별표1에 위임하고 있으며, 별표1 제6호는 치과위생사의 업무 중 하나로 “보건기관 또는 의료기관에서 수행하는 구내 진단용 방사선 촬영”을 명시한다[3].

이로부터 두 가지 법리적 사실이 도출된다. 첫째, 치과위생사의 방사선 촬영 권한은 구내 촬영에 한정되며 파노라마, 콘빔CT(cone beam computed tomography, CBCT), 측방두부규격 등 구외 촬영은 명시적으로 포함되지 않는다. 둘째, 그 권한은 “보건기관 또는 의료기관”이라는 장소적 요건 하에서만 행사될 수 있다. 한편 촬영에 사용되는 진단용 방사선 발생장치 자체의 설치·운영 요건은 별표1이 아니라 「의료법」 체계에서 별도로 규율되므로, 치과위생사의 구내 촬영 업무는 두 법령의 요건이 함께 충족되는 조건에서 적법하게 수행된다.

「의료법」 제37조 제1항은 진단용 방사선 발생장치를 설치·운영하려는 의료기관에 대하여 신고 의무와 보건복지부령으로 정하는 안전관리 기준에 맞는 설치·운영 의무를 부과하며, 그 위임에 따른 보건복지부령 「진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙」이 안전관리기준의 구체적 내용을 규정한다[16,17]. 동 규칙은 의료기관의 방사선 발생장치 설치 신고, 정기 검사, 방사선관계종사자의 피폭선량 측정 및 관리, 안전관리책임자 선임 의무 등을 포함한다[18].

2) 「원자력안전법」 체계

한편, 보건계열 대학교에서 교육 및 실습 목적으로 사용되는 방사선 발생장치는 「의료법」이 아닌 「원자력안전법」 체계의 적용을 받는다[7]. 이는 발생장치의 사용 목적이 의료 진단이 아닌 교육이기 때문이며, 의료법은 “의료기관 또는 보건기관”에서의 사용을 전제로 하기 때문이다.

「원자력안전법」 시행령 제2조 및 별표1은 방사선 피폭 관련 인적 분류와 연간 유효선량 한도를 규정한다[7]. 방사선작업종사자는 직무상 방사선 또는 방사선 발생장치를 취급하거나 관리하는 자로서 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv의 유효선량 한도를 적용받고, 수시출입자는 방사선관리구역에 출입하나 작업종사자에 해당하지 않는 자로 연 6 mSv의 유효선량 한도가 적용되어 방사선작업종사자와 일반인의 중간 범주에 해당하며, 일반인은 위 두 분류에 해당하지 않는 자로 연 1 mSv의 유효선량 한도가 적용된다. 자연방사선(국내 연평균 약 3 mSv)과 의료피폭은 한도 산정에서 제외된다.

3) 이중 법체제의 해석상 모순

치위생학과 학생의 법적 지위에 대한 해석은 다음과 같이 갈라진다. 학생을 방사선작업종사자로 분류할 경우 별도의 신규교육·정기교육·건강검진 이수가 요구되며[19], 학생 신분으로 이러한 등록을 일괄적으로 수행하기는 실무상 어렵다. 수시출입자로 분류하는 경우에도 「원자력안전법」 시행령상 기본교육 또는 직장교육이 실시될 수 있으며 개인선량 관리가 수반된다. 결과적으로 대부분의 치위생학과는 학생을 일반인으로 분류하여 운영하고 있으며, 이 분류 하에서는 학생이 인체에 방사선을 조사하는 행위가 사실상 불가능하다.

주목할 점은, 「의료기사 등에 관한 법률」, 「의료법」, 「원자력안전법」 어느 조항도 “학생의 인체 방사선 조사”를 명시적으로 금지하고 있지 않다는 사실이다. 오히려 의료기사법 제9조 제1항은 무면허자의 업무를 금지하면서도, 단서에서 “대학등에서 취득하려는 면허에 상응하는 교육과정을 이수하기 위하여 실습 중에 있는 사람의 실습에 필요한 경우”를 명시적 예외로 규정하고 있다[15]. 즉 학생 실습에 대한 법률 차원의 예외는 이미 존재하며, 쟁점은 이 예외가 구내 진단용 방사선 촬영 실습에 어떠한 범위와 조건으로 적용되는지가 시행령 별표1의 장소적 요건 및 「원자력안전법」 체계와의 관계에서 명확히 정립되어 있지 않다는 점이다. 실질적 제한의 근거는 관계 법령의 종합 해석과 안전관리 관행이 복합적으로 작용한 결과로 형성되어 왔는데, 그 주요 축은 방사선 촬영 권한이 “면허 취득자”에게 한정된다고 보는 해석과, 학생이 「원자력안전법」상 일반인으로 분류될 경우 연간 1 mSv 한도 내에서만 피폭이 허용되며 교육 목적의 비진단적 피폭에 대한 별도의 선량 기준이 마련되어 있지 않다는 해석으로 정리된다[19].

이러한 해석 구조는 학생 단계 임상 술기 교육의 본질적 필요성과 일정한 간격이 있다. 치과위생사 임상 술기 중 등각촬영법을 포함한 구내 진단용 방사선 촬영은 졸업 후 즉시 환자에게 시행해야 하는 핵심 기본 술기 중 하나이며[20], 신규 졸업자의 임상 적응에 인체 대상 촬영 경험 이 도움이 될 수 있다는 점도 함께 보고된다[8]. 해석 구조와 임상 술기 교육의 본질적 필요성 사이의 간격은 정책적 재검토가 학술적으로 논의 될 수 있는 영역으로 보인다.

4) 2024년 시행규칙 별표1 신설에 따른 제도적 간극의 심화

2024년 11월 28일 신설된 「의료기사 등에 관한 법률」 시행규칙 별표1은 학생 실습 환경의 제도적 간극을 새로운 차원에서 심화시켰다[14]. 이는 의료기사법 제4조 제1항 제1호 본문 및 같은 조 제2항 제1호 응시자격 요건 개정의 위임 규정으로[15], 국가시험 응시자격을 “학위 취득”에서 “학위 취득 및 현장실습과목 이수”로 변경하면서 최소 이수시간을 320시간으로 명시하였다.

현장실습 이수는 국가시험 응시자격의 절대 요건으로, 미이수자는 응시 자체가 불가능하며 합격 후 사후 발견 시 취소된다[14,15]. 또한 별표 1 비고 제4호는 실습 장소를 “교내가 아닌 의료기관, 보건소 등 의료기사·안경사의 업무 현장”으로 한정하여 교내 마네킨 및 가상현실 실습은 이수시간 산정에서 제외된다[14]. 반면 시행규칙은 양적 시간만 규정할 뿐 사전 술기 준비도, 실습의 질적 표준, 핵심 술기별 시간 배분 등의 질적 기준은 제시하지 않으며, 학생의 인체 방사선 조사에 관한 행정 해석 역시 시행규칙 신설 이후에도 변경되지 않았다.

그 결과 학생은 면허 취득 이전에 의무적으로 환자 진료 현장에 노출되어야 하나, 동시에 핵심 술기에 대한 통제된 인체 대상 실습은 제한되어 학습 효과가 관찰과 보조에 머무는 경우가 많다. 면허 취득 직후 첫 임상 환경에서 인체 대상 촬영을 처음으로 수행하게 되며, 이 시점의 미숙련은 환자 재촬영 가능성 증가로 이어질 수 있다. 즉 학생 단계의 노출 제한이 환자 단계의 위험으로 전치될 가능성이 제기되는 구조이며, 본 종설은 이 간극의 완화에 기여할 수 있는 학술적 근거를 ICRP 방호 원칙과 정량적 선량학에서 도출하고자 한다.

2. 방사선방호의 선량학적 이론 기반

1) 선량학적 양의 위계

방사선 선량을 표현하는 양은 측정 지점과 생물학적 효과를 반영하는 정도에 따라 위계를 형성한다[21]. 진단용 X선 영역에서 사용되는 주요 양은 다음과 같다. 공기커마(air kerma, K_a ; 단위 mGy)는 X선원에서 방출되는 방사선이 단위 질량의 공기 매질에 전달한 운동에너지의 합으로 정의되며, X선 장치의 출력 측정에 사용된다. 면적선량(단위 mGy·cm²)은 공기커마와 조사면적의 곱으로, 치과 영상의학에서 환자 피폭선량 관련 리를 위한 일차적 측정 지표로 사용된다[21,22]. 입사표면선량(단위 mGy)은 X선이 환자 피부 표면에 입사하는 시점의 흡수선량을 나타낸다.

장기 흡수선량(absorbed dose, D_T ; 단위 mGy)은 특정 조직 또는 장기 T에 흡수된 평균 에너지를 단위 질량으로 나눈 값이다. 등가선량(equivalent dose, H_T ; 단위 mSv)은 D_T 에 방사선가중계수(radiation weighting factor, w_R)를 곱하여 산출한다. 진단용 X선의 경우 광자 방사선이므로 $w_R=1$ 이며, 따라서 H_T 의 수치는 D_T 와 동일하지만 단위는 mSv로 표현된다[21].

유효선량(E ; 단위 mSv)은 인체 전체의 확률적 위험을 종합하여 단일 양으로 표현하는 방호량으로, 다음 식에 따라 계산된다[21].

$$E = \sum w_T \times H_T$$

여기서 w_T 는 조직가중계수로, 각 조직의 방사선 민감도에 따라 ICRP가 부여한다.

2) ICRP 60에서 ICRP 103으로의 권고 전환과 치과 유효선량의 상향 조정

1991년 발표된 ICRP Publication 60 [23]과 2007년 발표된 ICRP Publication 103 [21]은 조직가중계수의 구체적 값을 일부 개정하였다. 치과 영역에 직접적 영향을 미치는 주요 변화는 다음과 같다<Table 1>.

주요 변화로, 타액선이 ICRP 103에서 처음으로 명시적 조직으로 분리되어 조직가중계수 0.01이 부여되었으며, ICRP 60에서는 타액선에 별도의 조직가중계수가 부여되지 않았고 지정 잔여조직 목록에도 포함되지 않았다[21,23]. 잔여조직의 구성 항목은 14개로 확대되었고 잔여조직의 합산 가중치는 0.05에서 0.12로 증가하였으며 구강 점막이 잔여조직에 명시적으로 포함되었다[21]. 갑상선과 식도의 조직가중계수는 모두 0.05에서 0.04로 변경되었다.

치과 방사선 촬영은 타액선, 갑상선, 구강 점막, 식도 등 두경부 조직이 모두 촬영 영역에 포함된다는 특성을 갖는다. 결과적으로 ICRP 103을 적용할 경우 동일 검사에 대한 유효선량 추정치가 ICRP 60 대비 상향 조정되는 효과가 나타난다. Ludlow et al. [6]은 인체등가 팬텀 실험을 통해 일반적인 치과 방사선 검사의 유효선량 추정치가 2007년 ICRP 권고를 적용할 경우 1990년 권고를 적용한 값보다 검사 프로토콜에 따라 32~422% 높게 산출됨을 보고하였다. 본 종설에서는 보수적 추정을 위해 ICRP 103 체계에 기반하여 산출된 유효선량 문헌값을 안전범위 도출의 기준 추정치로 우선 참조한다.

Table 1. Comparison of tissue weighting factors (w_T) between ICRP Publications 60 and 103 for dental-relevant tissues

Tissue	ICRP 60 (1991)	ICRP 103 (2007)	Clinical implication
Salivary glands	Not separately weighted	0.01	New explicit weighting; increases dental dose estimate
Thyroid	0.05	0.04	Slight reduction; minor effect on dental dose
Esophagus	0.05	0.04	Slight reduction
Red bone marrow	0.12	0.12	Unchanged
Brain	Included in remainder	0.01	New explicit weighting
Remainder tissues (incl. oral mucosa)	0.05	0.12	Increase from 0.05 to 0.12; expansion of remainder list
Skin	0.01	0.01	Unchanged

ICRP: International Commission on Radiological Protection; w_T : tissue weighting factor. Adapted from ICRP Publications 60 [23] and 103 [21].

3) 확률적 효과와 결정적 효과

방사선의 생물학적 효과는 결정적 효과와 확률적 효과로 구분된다[21,24]. 결정적 효과는 일정 역치 이상의 선량에서 손상 세포 수에 비례하여 발생되며, 피부 홍반(약 2 Gy 이상), 백내장(약 0.5 Gy 이상), 급성 방사선 증후군 등이 포함된다. 진단용 치과 X선 검사 1회의 부위 흡수선량은 수 mGy 이하 수준으로, 결정적 효과 역치에서 두 자리 수 이상 이격되어 있다.

확률적 효과는 발암 및 유전적 영향을 포함하며, 역치 없이 선량에 비례하여 발생 확률이 증가한다고 가정하는 선형무역치(linear no-threshold, LNT) 모델에 기반하여 평가된다[21]. 다만 LNT는 100 mSv 이하 저선량 영역에서 직접적 역학적 증거가 부족하다는 점이 UNSCEAR 보고서[25] 및 BEIR VII 보고서[26]에서 지속적으로 명시되어 왔다. 본 종설에서 다루는 학생 상호실습 선량 범위(<100 μ Sv)는 자연방사선의 일상적 변동 폭(국내 지역별 차이 수백 μ Sv) 이내이다.

4) ICRP 3대 방사선방호 원칙의 학생 교육 적용

ICRP는 방사선방호의 기본 원칙으로 정당화, 최적화, 선량한도의 3대 원칙을 제시한다[21]. 정당화 원칙은 모든 피폭이 그로 인한 편익이 위험을 초과해야 함을 요구한다. 학생 교육 목적 피폭의 경우, 그 편익은 단순히 학생 개인의 학습 효과에 국한되지 않는다. 미숙련 졸업자가 임상에서 환자에게 가할 잠재적 재촬영 피폭을 회피하는 사회적 편익까지 포함된다는 점에서, 학생 단계의 통제된 피폭이 졸업 후 환자 누적 피폭의 감소에 기여할 가능성은 정당화의 한 근거로 논의될 수 있다[6,27].

최적화 원칙은 사회적·경제적 요인을 고려한 합리적 범위 내에서 피폭을 최소화할 것을 요구한다. 학생 상호실습의 경우 직사각형 콜리메이션, 디지털 센서, 갑상선 차폐, 횡수 제한 등을 통한 최적화가 적용될 수 있다[28].

선량한도 원칙은 직업·일반인별 절대상한을 정한다. 본 종설의 핵심 정량 제한인 100 μ Sv/년 운영 권고치는 다음의 4단계 도출 과정에 근거한다. 먼저, ICRP Publication 103과 「원자력안전법」 시행령 별표1에 따른 일반인 연간 유효선량한도는 1 mSv이며, 이는 법적·규제적 상한으로 초과 시 법령 위반에 해당한다. 이에 비해 본 종설이 제안하는 운영 권고치는 규제 한도가 아니라 교육 환경에서의 실무 운영 기준으로 설정되는 권고 수준이며, 그 자체로 법적 구속력을 갖지 않는다. 다음으로 ICRP Publication 103은 의생명연구에 참여하는 자원자의 피폭을 의료 피폭 범주에서 별도로 다루며, Table 8에서 해당 연구가 갖는 사회적 편익 수준에 따라 <0.1 mSv, 0.1-1 mSv, 1-10 mSv, >10 mSv의 선량 제약치 범위를 제시한다[21]. 다만 이 값들은 연간 한도가 아니라 해당 연구 참여에 따른 피폭을 대상으로 하는 제약치이며, 학생 상호실습에 직접 적용되도록 마련된 기준도 아니다. 그럼에도 학생 상호실습이 진단적 적응증 없이 시행되는 교육 목적 노출이라는 점, 피험자에 대한 직접적 임상 편익이 제한적이라는 점, 교수자·동료 학생과의 위계 관계 하에서 이루어진다는 점을 고려하면, 이 체계에서 가장 낮은 편익 범주에 대응하는 수준을 참조하는 것이 타당하다. 또한 ICRP Publication 113 [29]은 보건의료 분야 종사자와 학생을 대상으로 체계적인 방사선방호 교육·훈련의 필요성을 강조하며, 향후 실제 임상에서 수행할 역할에 부합하는 실무 중심의 훈련을 권고한다. 이상의 논의를 토대로 본 종설은 일반인 연간 유효선량한도의 10%인 100 μ Sv/년을 학생 상호실습의 운영 권고치로 채택한다. 다만 이 값은 ICRP가 학생 상호실습에 대해 직접 권고한 선량 제약치가 아니라, ICRP의 정당화·최적화 원칙과 위 선량 제약치 체계에서 가장 낮은 편익 범주의 상한에 해당하는 0.1 mSv(100 μ Sv)를 참조하여 본 종설이 설정한 예시적 운영 기준이다. 일반인 한도의 10%라는 비율은 직업적 선량 제약치 설정에서 통상 채택되는 보수적 마진과도 부합한다. 본 권고치는 규제 한도가 아닌 운영 차원의 권고이므로, 기관별 위험·편익 평가와 운영 여건에 따라 조정 가능한 출발점으로 기능한다.

3. 현행 실습 환경의 한계

1) 마네킨(팬텀) 실습의 현실적 한계

마네킨 실습은 학생이 방사선을 인체에 조사하지 않고도 촬영 술기를 연습할 수 있는 핵심 대안이다. 표준화된 해부학적 기준점을 활용한 수직각·수평각의 기하학적 학습, 반복 촬영을 통한 술기 자동화, 영상 수용체의 구내 위치 설정 연습 측면에서 마네킨은 유용한 학습 매체이다.

한편 최근에는 마네킨 실습의 한계를 보완하기 위한 대안으로 디지털 시뮬레이션 기반 방사선 촬영 교육이 의미 있는 발전을 이루어 왔다. 가상현실 환경에서의 헤드마운트 디스플레이와 입체 시각화 기술의 성숙, 햅틱 피드백 기반 촉각 시뮬레이션의 정밀도 향상, 안구 추적 기반 학습자 시선 분석 등은 종래의 마네킨 기반 훈련을 보완하는 새로운 교육 양식을 가능하게 한다. 이러한 기술적 기반은 학습자가 방사선 노출 부담 없이 반복 학습을 수행할 수 있게 하며, 표준화된 학습 시나리오 제공을 통해 학습자 간 교육 경험의 편차를 줄일 수 있다. 학습자의 손 움직임, 각도 선택, 노출 시간 등을 정량 데이터로 수집하여 객관적 술기 평가를 시도할 수 있는 점, 디지털 환경에 익숙한 학습자 세대와의 적합성이 높은 점도 디지털 시뮬레이션의 교육적 장점에 해당한다.

그러나 이러한 기술적 발전에도 불구하고, 마네킨 실습은 실제 임상 환경을 충분히 재현하는 데에는 여전히 일정한 한계를 가진다. 해부학적 변이의 부재가 우선 지적된다. 실제 환자에서 관찰되는 구개궁 깊이의 다양성, 구개용기와 하악용기의 존재 여부, 설측 점막의 두께 차이, 협측 외사선의 돌출 정도 등은 표준화된 마네킨에서 재현되지 않는다[8]. 이러한 해부학적 변이는 영상 수용체의 위치 설정과 직접 관련되며, Ahn and Kim [8]의 연구에서 학생들이 어려움을 호소한 “필름 위치 부적절”(35.1%) 및 “파트너의 동통호소”(평행촬영법 시 42.8%) 등의 술기 실수와 직접 연결된다.

환자 응대 학습 또한 마네킨에서 충분히 이루어지기 어렵다. 실제 임상에서 학생은 환자의 구역반사, 호흡 동작, 두려움 표현, 동통 호소를 실시간으로 관찰하고 대응해야 한다. 마네킨은 이러한 환자 행동을 시뮬레이션할 수 없으며, 결과적으로 임상 진입 시 “환자 응대 학습”이 새로 시작되는 비효율이 발생한다[8].

술자 자세 및 환자 두부 위치의 동적 보정 학습도 제약된다. 실제 환자의 두부는 호흡과 무의식적 미세 운동, 자세 변화에 따라 미세하게 움직이며, 술자는 이를 실시간으로 보정해야 한다. 마네킨에서는 두부가 고정되어 있어 이러한 동적 보정 학습이 불가능하다.

인체 조직의 X선 감쇠 특성도 완전히 재현되기 어렵다. 마네킨의 두부는 보통 플라스틱 또는 합성수지로 구성되며, 일부 고급 인체모사 팬텀이 폴리메틸메타크릴레이트(polymethyl methacrylate)나 골 등가물질을 사용하더라도, 실제 인체의 뼈, 근육, 점막, 지방의 복합적 X선 감쇠 패턴을 완전히 재현하기는 어렵다[30]. 결과적으로 마네킨 영상에서 학습한 영상의 톤·대조도와 실제 임상 영상 간에 차이가 발생한다.

종합하면 마네킨 실습은 기하학적 술기(각도, 위치)의 반복 학습에는 효과적이며, 최근 발전한 디지털 시뮬레이션 기술은 이러한 교육 효과를 더욱 보완하고 확장할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 그러나 실제 임상 환경의 핵심 변수인 해부학적 변이, 환자 행동, 동적 보정, 영상 특성은 여전히 충분히 재현되지 못하고 있다. 이러한 점에서 디지털 시뮬레이션 역시 교육적으로 중요한 역할을 수행하지만, 실제 환자 대상 술기를 완전히 대체하기에는 한계가 있으며, 이에 대해서는 다음 절에서 보다 구체적으로 논의하고자 한다.

2) VR 및 AR 시뮬레이터의 한계

가상현실 및 증강현실 기반 시뮬레이터는 법적 제약을 우회하면서 반복 학습을 가능하게 하는 새로운 대안으로 주목받고 있다[10-12,31]. Gu and Lee[10]는 AR 시뮬레이터가 학생의 학습 흥미도, 자아효능감, 학습몰입도, 실습만족도를 유의하게 향상시킨다고 보고하였다. Im과 Lee[11]는 등각촬영법을 위한 가상현실 시뮬레이터(virtual reality simulator, VRS)를 개발하여 학생이 가상의 치과 방사선실에서 19단계 촬영 과정을 수행할 수 있도록 하였다. Im et al. [12]은 360° VR 영상 기반 교육 매체의 학습 만족도가 대조군 대비 유의하게 높음을 보고하였다.

그러나 현재 개발된 VR 및 AR 시뮬레이터에는 다음과 같은 현재 기술 수준의 한계가 존재한다. 촉각 피드백의 한계가 우선 지적된다. 실제 구내 촬영에서는 필름 또는 센서가 점막에 접촉하는 압력, 환자가 자가 손가락으로 센서를 고정할 때의 압력, 조사통을 환자 안면에 위치시킬 때의 미세한 접촉 저항 등 다양한 촉각 정보가 필수적이다. 현재 상용 VR 컨트롤러는 단순 진동 피드백 수준에 머무르며, 임상 술기의 핵심인 미세 압력감과 저항감을 재현하지 못한다[11,32].

인터페이스 자유도의 한계도 존재한다. 시뮬레이터는 사전에 설계된 시나리오와 단계별 흐름을 따르도록 프로그래밍되어 있으며, 실제 임상에서 발생하는 다양한 변수와 환자의 갑작스러운 움직임, 술자의 의도하지 않은 자세 변경, 비전형적 해부학적 구조와의 조우에 대한 즉흥적 대응 학습이 제한적이다. Im and Lee [11]가 개발한 19단계 시뮬레이터에서도 “사용자가 정확한 동작을 수행해야 다음 단계로 넘어가는 버튼이 활성화”되는 선형적 구조가 채택되었으며, 이는 학습 초기 단계에는 유용하지만 임상상의 비선형적 상황 대응 학습에는 제한이 있다.

영상 판독과 술기 수행의 분리 역시 한계로 거론된다. VR 시뮬레이터에서는 술기 수행을 시뮬레이션할 수 있으나, 실제 촬영된 영상의 판독은 별도의 학습 모듈에서 진행되거나 사전에 준비된 임상 영상 라이브러리에서 무작위로 제공된다[11]. 임상에서는 촬영-즉시 판독-재촬영 결정의 통합적 사고가 요구되지만, 시뮬레이터에서는 이 흐름이 구조적으로 분절된다.

학습 만족도와 실제 임상 술기 간의 전이성 검증이 부족하다는 점도 있다. Im and Lee [11] 본인 연구의 결론에서도 “학습자 피드백 평가 및 교육 효과성 평가 등 VRS의 유효성을 검증하기 위한 추가적 연구가 필요하다”고 명시되어 있다. 국외 사례로 Alsufyani et al. [31]은 치과대학생을 대상으로 한 VR 기반 파노라마 방사선 해부학 학습 시뮬레이터의 단기 학습 효과를 보고한 바 있으나, 이러한 연구도 술기 시뮬레이션이 아닌 해부학 인식 학습에 한정된 효과만을 검증한 것이다. 저자가 확인한 범위에서 VR 시뮬레이터의 인체 촬영 술기 전이성을 무작위대조시험으로 검증한 연구는 아직 보고되지 않은 것으로 보이며, 이 부분의 근거는 제한적이다.

종합하면 마네킨, VR, AR 등 어느 단일 매체도 실제 환자 대상 임상 술기를 완전히 대체할 수 없다는 점이 학술적으로 일관되게 나타난다. 따라서 임상 실습 진입 이전 단계에 통제된 상호실습을 통한 인체 대상 경험이 학습 연속성 확보에 유용할 수 있다.

4. 정량적 안전범위의 도출

1) 2024년 국가 진단참고수준의 적용

2024년 3월 질병관리청은 국가 차원의 치과촬영 진단참고수준 가이드라인을 발표하였다[22]. DRL은 환자 피폭선량 분포 중 75 백분위수에 해당하는 값을 권고선량으로 설정·권고하며, 의료가관이 이 값을 초과하는 경우 촬영 조건의 최적화를 권고한다. 2024년 발표된 국내 치과촬영 DRL의 주요 값은 다음과 같다<Table 2>.

구내 치근단촬영의 경우 성인 하악 대구치 48 mGy·cm²(DAP), 소아 하악 대구치 31 mGy·cm²로 설정되었다. 파노라마촬영의 경우 성인 354 mGy·cm², 소아 224 mGy·cm²이다. CBCT 촬영의 경우 성인 상악 제1대구치 임플란트 진단용 1,856 mGy·cm², 소아 상악 전치부 과잉치 위치 평가용 1,350 mGy·cm²로 설정되었다[22].

Table 2. 2024 Korean national diagnostic reference levels for dental imaging and estimated effective doses

Examination	Patient group	DRL (mGy·cm ²)	Estimated E (μSv)*
Intraoral periapical (mandibular molar)	Adult	48	3-6
Intraoral periapical (mandibular molar)	Pediatric	31	2-4
Panoramic	Adult	354	18-28
Panoramic	Pediatric	224	11-18
CBCT (maxillary 1st molar, implant)	Adult	1,856	37-1,114
CBCT (maxillary anterior, mesiodens)	Pediatric	1,350	27-810

*Estimated effective dose calculated from DRL × DAP-to-effective-dose conversion coefficients (intraoral: 0.07-0.13 μSv/(mGy·cm²); panoramic: 0.05-0.08 μSv/(mGy·cm²); CBCT: 0.02-0.6 μSv/(mGy·cm²))[6,27,28,33,34]. CBCT: cone beam computed tomography; DAP: dose-area product; DRL: diagnostic reference level; E: effective dose; KDCA: Korea Disease Control and Prevention Agency. Source DRLs from KDCA [22].

2) DAP에서 유효선량으로의 환산

DAP를 유효선량으로 변환하기 위한 환산계수는 검사 종류, 촬영 부위, 환자 연령에 따라 달라진다. 국내외 문헌에 보고된 대표적 환산계수는 다음과 같다.

구내 치근단촬영의 경우 디지털 센서와 직사각형 콜리메이션을 적용한 조건에서 약 0.07-0.13 μSv/(mGy·cm²) 범위가 보고된다[6,27]. 파노라마촬영의 경우 약 0.05-0.08 μSv/(mGy·cm²)가 보고된다[6,28]. CBCT의 경우 시야(field of view, FOV)의 크기, 회전 각도, 환자 위치에 따라 약 0.02-0.6 μSv/(mGy·cm²)의 넓은 범위를 보인다[33,34].

이 환산계수를 2024 KDCA DRL 값에 적용하면 다음과 같은 유효선량 추정치가 도출된다. 구내 치근단 1매: 약 3-6 μSv(48 mGy·cm² × 0.07-0.13). 파노라마 1회: 약 18-28 μSv(354 mGy·cm² × 0.05-0.08). CBCT 1회: 약 37-1,114 μSv(1,856 mGy·cm² × 0.02-0.6). CBCT 추정치는 Ludlow et al.의 다국가 메타분석[35]에서 보고된 large FOV 46-1,073 μSv, medium FOV 9-560 μSv, small FOV 5-652 μSv 범위 및 Pauwels et al. [34]의 SEDENTEXCT(Safety and Efficacy of a New and Emerging Dental X-ray Modality) 컨소시엄 다기관 측정 결과(14 개 기기에서 약 20배의 선량 편차)와 일치한다.

3) 일상 방사선 노출과의 비교

위 추정치를 일상적 방사선 노출과 비교하면 다음과 같다<Table 3>. 자연방사선 국내 연평균은 약 3,000 μSv (3 mSv) 수준이며, 흉부 X선 후 전방향 촬영 1매는 약 20 μSv , 대서양 횡단 비행 1회는 약 50 μSv , 흉부 컴퓨터단층촬영(computed tomography) 1회는 약 7,000 μSv 로 보고된 다[36]. 즉 구내 치근단 1매(3-6 μSv)는 흉부 X선 1매의 약 1/4-1/3 수준이며, 비행 1시간의 우주방사선 노출량(약 5 μSv)에 해당한다.

Table 3. Comparison of effective doses from dental radiography with everyday radiation exposures

Source of exposure	Effective dose (μSv)	Reference
Annual natural background radiation	~3,000	[25]
Chest CT (single examination)	~7,000	[36]
Dental CBCT (FOV-dependent)	37-1,114	[22,34]
Transatlantic flight (one-way)	~50	[36]
Dental panoramic radiograph	18-28	[22,28]
Chest X-ray (PA, single)	~20	[36]
Dental intraoral periapical (single)	3-6	[22,27]

CT: computed tomography; CBCT: cone beam computed tomography; FOV: field of view; PA: posteroanterior.

4) 학생 상호실습 안전범위 시나리오

「원자력안전법」 상 일반인의 연간 유효선량 한도는 1 mSv(1,000 μSv)이다. 이를 기준으로 적용하면 학생이 1년간 받을 수 있는 이론적 최대 촬영 횟수는 <Table 4>와 같다. 구내 치근단 촬영은 1,000 $\mu\text{Sv} \div 5 \mu\text{Sv}/\text{매}$ 로 약 200매/년, 파노라마 촬영은 1,000 $\mu\text{Sv} \div 23 \mu\text{Sv}/\text{회}$ 로 약 43 회/년에 해당한다. 그러나 교육 목적의 방사선 노출에는 ALARA 원칙에 따른 충분한 안전 여유를 확보할 필요가 있다. 이에 일반인 연간 유효 선량 한도의 10%에 해당하는 100 $\mu\text{Sv}/\text{년}$ 을 학생 상호실습의 운영 기준으로 제안한다. 이는 ICRP가 학생 상호실습에 대해 직접 권고한 수치가 아니라, ICRP의 정당화·최적화 원칙과 일반인 연간 선량한도를 참조하여 본 종설이 설정한 보수적 운영 기준이다.

Table 4. Quantitative safety range scenarios for student intersubject radiographic practice

Scenario	Annual ceiling ($\mu\text{Sv}/\text{year}$)	Periapical/year (5 μSv each)	Panoramic/year (23 μSv each)
Public dose limit (100% of 1 mSv)	1,000	~200	~43
Proposed operational reference level (ORL; 10% of public limit)	100	~20	~4-5*
Conservative reference level (3% of public limit)	30	~6	~1*

*Panoramic radiography is outside the legal scope of dental hygienists' practice in Korea [3] and should be excluded from student intersubject practice. The bolded row represents the conservative operational reference level proposed in this review; it is not a dose limit recommended by ICRP Publication 113 [29]. ICRP: International Commission on Radiological Protection; ORL: operational reference level.

이 기준을 적용하면 학생 1인당 구내 치근단 촬영 가능 횟수는 100 $\mu\text{Sv}/\text{년} \div 5 \mu\text{Sv}/\text{매}$ 로 약 20매/년(학기당 약 10매)으로 산출된다. 이 횟수는 Ahn and Kim [8]이 분석한 7가지 구내 촬영법(등각촬영, 평행촬영, 교익촬영, 교합촬영 등)에 대해 1인당 2-3매씩 배분하여 핵심 술기 경험 기회를 제공할 수 있는 수준이다. 본 추정치는 구내 치근단 촬영의 유효선량 범위인 3-6 μSv 의 중앙값(약 5 μSv)을 기준으로 산출하였다. 이에 따라 보수적 가정(6 $\mu\text{Sv}/\text{노출}$)에서는 약 17매, 낙관적 가정(3 $\mu\text{Sv}/\text{노출}$)에서는 약 33매까지 산출될 수 있으며, 보다 보수적인 안전 마진을 적용하여 일반인 연간 선량한도의 3%(30 $\mu\text{Sv}/\text{년}$)를 기준으로 설정할 경우에는 약 6매/년으로 감소한다. 따라서 약 20매는 절대적인 기준이 아니라 평균적인 조건을 가정한 예시적 권고치이며, 실제 기관에서 제도를 도입할 경우에는 자체 선량 측정 결과와 교육 환경을 반영하여 적절한 보정이 이루어질 필요가 있다. 이와 같이 보다 보수적인 기준을 적용하더라도 교육적 목적을 달성하는 데 필요한 최소한의 실습 기회는 확보될 수 있으며, 이에 따른 누적 유효선량 역시 일반인 선량한도보다 충분히 낮은 수준으로 유지된다.

이를 선량 측면에서 살펴보면, 학생의 연간 누적 유효선량은 약 20매 $\times$ 5 μSv = 100 μSv 로 「원자력안전법」 상 일반인의 연간 유효선량 한도(1,000 μSv)의 10% 수준이며, 2년간의 임상실습 기간 전체를 기준으로 한 누적 선량은 약 200 μSv 가 된다. 한편, 파노라마 촬영은 치과위생사의 법정 업무 범위 외에 해당하므로[3], 학생 상호실습 대상에서는 제외할 것을 권고한다.

5) 선량 저감 조치

위 시나리오는 표준 촬영 조건을 가정하였으나, 적절한 방호 조치를 적용할 경우 동일한 실습 횟수에서도 유효선량을 효과적으로 저감할 수 있다. 직사각형 콜리메이션(rectangular collimation)은 환자 유효선량을 약 30-50% 감소시키며[28], 디지털 구강내 영상 수용체는 높은 감도로 인해 기존 필름 기반 방사선 촬영보다 짧은 노출시간을 사용할 수 있으며, 약 50-80%의 환자 선량 감소가 보고되어 있다[37]. 또한 갑상선 차폐는 갑상선 등가선량을 약 50% 감소시키며, 유효선량에 미치는 영향은 제한적이지만 갑상선의 방사선 민감도를 고려할 때 임상적 의의가 있다[27]. 이러한 방호 조치를 함께 적용하는 것은 학생 1인당 누적 유효선량을 최소화하는 데 기여할 수 있다.

종합하면, 학생 1인당 연간 약 20매 이내의 통제된 구내 치근단 상호실습은 일반인 연간 선량한도의 10%인 100 μ Sv/년 운영 기준 이내에서 수행 가능하며, 추가 방호 조치를 적용할 경우 동일한 횟수에서의 누적 선량은 이보다 더 낮아진다. 이는 사전에 설정된 안전 기준 내에서 환자에게 진단용 방사선을 시행하는 치과위생사의 최소 술기 역량을 체계적으로 습득하고 검증하기 위한 교육 전략의 하나로 고려될 수 있다.

이러한 접근은 방사선 노출 최소화라는 원칙과 치과위생사의 핵심 술기 습득이라는 임상교육적 요구를 함께 고려할 수 있는 기반을 제공한다. 따라서 현행의 일률적인 노출 제한 운영 방식에 더하여, 제시한 범위 내에서 통제된 상호실습을 허용하는 새로운 가이드라인의 수립 가능성은 학술적으로 검토될 수 있다. 다만 약 20매는 평균적인 촬영 조건을 기반으로 산출한 예시적 추정치이며, 실제 제도 도입 시에는 기관별 장비 특성, 촬영 환경 및 선량 측정 결과를 반영한 추가적인 보정이 함께 이루어질 필요가 있다.

6) 통제된 상호실습 운영 가이드라인(안)

위 분석을 종합하여 다음의 통제된 상호실습 가이드라인을 제안한다<Table 5>. 적용 대상은 치위생학과 재학생 중 구강악안면방사선학 이론 과목을 이수하고 마네킨 실습을 완료한 학생으로 한정한다. 학생 1인당 연간 누적 상호실습 횟수는 구내 치근단 20매 이하(운영 권고치 100 μ Sv/년 기준)로 제한한다. 적용 조건은 (1) 디지털 센서 사용, (2) 직사각형 콜리메이션 적용, (3) 갑상선 차폐, (4) 납 방어복 착용, (5) 개인선량계 부착, (6) 기관 심의위원회(institutional review board, IRB) 또는 이에 준하는 윤리심의 절차의 사전 검토, (7) 학생 서면동의 및 임신·임신 가능성 사전 확인이다. 모니터링 절차로는 각 학기 종료 시 학생별 누적 선량 기록과 보고가 포함된다.

Table 5. Proposed operational guideline for controlled intersubject radiographic practice

Component	Specification
Eligible students	Dental hygiene students who have completed coursework in oral and maxillofacial radiology and manikin-based radiographic training
Examination type	Intraoral periapical only (panoramic and CBCT excluded)
Annual cumulative limit	≤ 20 periapical exposures per student per year (operational reference level 100 μ Sv/year)
Equipment requirements	Digital sensor (CMOS or CCD); rectangular collimation
Personal protective measures	Lead apron and thyroid shield for the subject; personal dosimeter (TLD or OSL) for both operator and subject
Ethical safeguards	Institutional IRB approval or equivalent ethics review; written informed consent; prior screening for pregnancy or possibility of pregnancy
Monitoring and reporting	Per-semester cumulative dose record per student; institutional reporting to the radiation safety officer

CBCT: cone beam computed tomography; CMOS: complementary metal-oxide-semiconductor; CCD: charge-coupled device; TLD: thermoluminescent dosimeter; OSL: optically stimulated luminescence; IRB: institutional review board.

5. 국제 비교와 정책 제언

1) 국제 비교

Bozia et al. [13]이 International Dental Journal에 게재한 worldwide 종설은 International Federation of Dental Hygienists와 European Dental Hygienists Federation 회원 31개국 중 26개국 치과위생사 협회를 대상으로 수행한 구조화된 설문조사 결과를 보고하였다. 조사에 따르면 78%의 국가에서 치과위생사가 합법적으로 구내 방사선 촬영을 수행할 수 있었으며, 42%의 국가에서는 치과 의사의 사전 의뢰가 요구되었다. 또한 46%의 국가에서는 치과위생사가 방사선 영상에 근거한 진단을 내릴 수 없었고, 27%의 국가에서만 독립적으로 방사선 장비를 보유할 수 있는 것으로 나타났다.

이러한 국제적 현황은 국가마다 세부 규제에 차이가 있음을 보여준다. 미국의 Commission on Dental Accreditation 인증 기준과 일본 후생노동성의 치과위생사 양성 지침은 감독 하 임상 경험을 통한 술기 습득을 전제로 한 교육과정을 요구하고 있다[38,39]. 영국에서는 General Dental Council Standards for Education이 치과위생사·치과치료사의 임상 술기 역량을 졸업 시점의 필수 역량으로 요구하며[40], Ionising Radiation (Medical Exposure) Regulations 2017 Regulation 17 및 Schedule 3은 충분한 사전 훈련을 받은 자격자(practitioner 또는 operator)의 적격 감독 아래 노출이 이루어지도록 규정하고 있다[41]. 캐나다에서는 Federation of Dental Hygiene Regulators of Canada, Canadian Dental Hygienists Association, Commission on Dental Accreditation of Canada 및 National Dental Hygiene Certification Board가 공동 발간한 Entry-to-practice Canadian competencies for dental hygienists (2021)가 G.1.8 항에서 “Obtain radiographs as needed”를 졸업 시점의 필수 진입 역량으로 제시하고 있다[42]. 호주에서는 Australian Dental Council의 2022 개정 역량(2023년 7월 1일 시행)에 따라 등록 치과위생사가 별도 면허 없이 구내 X선 촬영을 수행할 수 있으며, 특히 Queensland Radiation Safety Act 1999는 승인된 교육과정 또는 임상 훈련의 감독 아래 학생 치과진료자가 구내 X선 장비를 사용할 수 있는 면허 간주(deemed licence) 제도를 인정하고 있다[43]. 다만 이들 사례는 두 층위로 구분하여 해석할 필요가 있다. 졸업 시점의 방사선 촬영 역량을 요구하는 교육기준과, 학생이 실제로 X선 장비를 사용하는 행위를 법적으로 허용하는 규제는 서로 다른 문제이며, 전자가 곧 후자를 의미하지는 않는다. 본 종설이 확인한 범위에서 학생의 X선 장비 사용을 명시적으로 허용한 규정은 호주 Queensland의 사례가 가장 분명하다.

이들 국가의 사례는 제도적 세부 내용에 차이가 있으나, 적절한 교육과 감독을 전제로 졸업 이전 단계에서 방사선 촬영 역량을 습득하도록 하는 방향을 공유한다는 점에서 참고가 된다. 이러한 점에 비추어 볼 때, 한국의 학생 단계 상호실습 제한 정책 역시 국제 사례와의 비교를 통해 향후 정책적·교육적 측면에서 추가적인 검토가 이루어질 필요가 있다.

2) 정책 제언

본고의 정책 제언은 환자 안전과 임상교육의 균형을 기본 원칙으로 한다. 학생 단계의 통제된 상호실습은 방호 원칙을 전제로 하며, 사전에 설정된 안전 기준 내에서 최소한의 임상 술기 역량을 확보하기 위한 교육 방안이다. 앞서 제시한 학생 1인당 연간 100 μ Sv 이내(구내 치근단 약 20매)의 운영 기준은 통제된 상호실습을 위한 예시적 기준으로 제안한 것이다. 이러한 관점에서 다음과 같은 정책 방향을 검토할 수 있다.

첫째, 「의료기사 등에 관한 법률」 시행령 별표1에 교육 목적 실습과 관련된 명시적 조항을 마련하는 방안을 검토할 수 있다. 예를 들어, “치과위생사 양성 교육기관에서 기관 IRB 또는 이에 준하는 윤리심의 절차의 사전 검토와 서면 동의를 거쳐 시행되는 구내 진단용 방사선 촬영 실습은 본 호의 업무 범위에 준하는 행위로 본다.”와 같은 문안을 고려할 수 있다.

둘째, 「원자력안전법」 시행령 제2조의 인적 분류에 교육 목적 수시출입자와 같은 별도 범주를 신설하고, 운영 기준을 일반인 연간 선량한도의 10%(100 μ Sv/년) 수준으로 설정하는 방안을 검토할 수 있다. 이러한 접근은 의료인과 학생에 대한 방사선방호 교육·훈련을 강조하는 ICRP Publication 113 [29]의 기본 방향과도 정합적이다.

셋째, 한국치위생학교육평가원의 교육과정 인증 기준에 방사선 실습의 시간, 방법 및 안전관리에 관한 표준 항목을 포함하는 방안을 고려할 수 있다. 「의료기사 등에 관한 법률」 시행규칙 별표1에 따른 현장실습은 2025년 3월 1일 이후 졸업자부터 단계적으로 적용되며, 2028년 3월 1일 이후 졸업자부터 최소 이수시간 100%(320시간)가 전면 적용된다[14,15]. 또한 현장실습을 이수하지 않은 경우 국가시험에 응시할 수 없다. 반면 시행규칙 별표1은 현장실습 시간은 규정하고 있으나, 환자 대면 이전에 필요한 술기 준비 기준은 제시하지 않는다. 따라서 교육과정 인증 기준에 사전 상호실습 모듈을 포함하여 학생의 술기 준비도를 체계적으로 관리하는 방안은 단계적 제도 시행의 실효성을 높일 수 있는 하나의 대안이 될 수 있다.

3) 한계 및 후속 연구 제언

본고는 비판적 문헌고찰에 기반하였으며, 전국 치위생학과 실습 환경 실태조사나 인체 모사 팬텀 기반 직접 선량 측정과 같은 일차 실증자료는 포함하지 않았다. DAP를 유효선량으로 환산하는 과정에는 환산계수 선택에 따른 불확실성이 존재하며, 보수적 추정을 위해 ICRP 103 체계에 기반하여 산출된 환산계수를 적용하였으나 환산계수 자체에 약 $\pm 30\%$ 의 불확실성이 내재한다[34]. 또한 학생의 임신 또는 임신 가능성, 개인별 방사선 민감도, 누적 의료폭력 이력 등 개별 위험요인은 안전범위 산출에 반영하지 못하였다.

향후에는 인체 모사 팬텀과 개인선량계를 활용한 실제 교육 환경의 직접 선량 측정을 통해 제시한 안전 기준을 검증할 필요가 있다. 또한 통제된 상호실습이 학생의 술기 향상과 누적 노출에 미치는 영향을 평가하는 다기관 연구와, 술기 숙련도와 인체 노출 횟수의 관계, 제한한 가이드라인의 장기적 안전성, 이해당사자 수용성 및 법적 효력을 검증하는 종단 연구도 함께 이루어질 필요가 있다. 이러한 연구는 제한한 가이드라인의 타당성을 검증하고, 치위생학 방사선 교육의 안전성과 교육 효과에 대한 근거를 제공할 것으로 기대된다.

결론

본고는 학생 단계의 통제된 상호실습에 대한 법적·교육적 쟁점을 검토하고, 방사선 방호 원칙을 전제로 한 정량적 운영 기준과 제도적 적용 가능성을 제안하였다. 제시한 학생 1인당 연간 100 μ Sv 이내(구내 치근단 약 20매)의 운영 범위는 최소한의 임상 술기 역량을 확보하기 위한 제안 기준으로 활용될 수 있다. 다만 이는 평균적인 조건에 기반한 학술적 제안으로, 실제 적용을 위해서는 직접 선량 측정과 다기관 실증 연구를 통한 추가 검증이 필요하다.

Notes

Author contributions

The author fully participated in the work performed and documented truthfully.

Conflicts of interest

The author declared no conflict of interest.

Funding

None.

Ethical statement

This study is a literature-based review that did not involve human participants or animals; therefore, institutional review board approval was not required.

Data availability

Data sharing is not applicable to this article, as no new data were created or analyzed in this study.

Acknowledgments

None.

Use of artificial intelligence (AI) tools and software

OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.5, accessed May 2026), [Large Language Model (LLM)], <https://chatgpt.com/>.

The AI tool was used solely to improve the clarity, readability, grammar, sentence structure, and overall organization of the manuscript. It was not used for study design, data collection, statistical analysis, interpretation of results, or generation of scientific conclusions. All scientific content, analyses, interpretations, and the final manuscript were prepared and verified by the author.

References

1. Berghuis G, Cosyn J, De Bruyn H, Hommez G, Dierens M, Christiaens V. A controlled study on the diagnostic accuracy of panoramic and peri-apical radiography for detecting furcation involvement. *BMC Oral Health* 2021;21:115. <https://doi.org/10.1186/s12903-021-01460-z>
2. Vandenberghe B, Jacobs R, Yang J. Diagnostic validity (or acuity) of 2D CCD versus 3D CBCT-images for assessing periodontal breakdown. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007;104(3):395–401. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2007.03.012>

3. Ministry of Government Legislation. Enforcement decree of the medical service technologists, etc. act, appendix 1 [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 Jan 05]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9D%98%EB%A3%8C%EA%B8%B0%EC%82%AC%EB%93%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9>
4. Seong KJ, Kong CG, Dong KR. A study on the management of radiation workers' exposure dose. *J Radiat Ind* 2020;14(3):273–85. <http://doi.org/10.23042/radin.2020.14.3.273>
5. Shin GS, Kim YH, Lee BR, Kim SY, Lee GW, Park CS, et al. The actual state and the utilization for dental radiography in Korea. *J Radiol Sci Technol* 2010;33(2):109–20.
6. Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, White SC. Patient risk related to common dental radiographic examinations: the impact of 2007 International Commission on Radiological Protection recommendations regarding dose calculation. *J Am Dent Assoc* 2008;139(9):1237–43. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2008.0339>
7. Ministry of Government Legislation. Enforcement decree of the nuclear safety act, article 2 and appendix 1 (dose limits) [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 Apr 17]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9B%90%EC%9E%90%EB%A0%A5%EC%95%88%EC%A0%84%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9>
8. Ahn GS, Kim HJ. Analysis of oral radiography practice. *J Korean Soc Dent Hyg* 2011;11(5):783–90.
9. Lee B, Mun S, Noh H, Han S, Kang J, Kim H, et al. Effectiveness of scenario-based dental hygiene education using virtual reality: intraoral radiography training. *Eur J Dent Educ* 2026;30(3):842–52. <https://doi.org/10.1111/eje.70039>
10. Gu JY, Lee JG. Effects of a new clinical training simulator for dental radiography using augmented reality on self-efficacy, interest in learning, flow, and practice satisfaction. *J Digit Contents Soc* 2018;19(9):1811–7. <http://doi.org/10.9728/dcs.2018.19.9.1811>
11. Im JE, Lee JG. Development of a virtual reality simulator for bisecting angle technique: focusing on the maxillary central incisor. *J Digit Contents Soc* 2023;24(10):2433–41. <https://doi.org/10.9728/dcs.2023.24.10.2433>
12. Im JE, Gu JY, Lim EJ, Lee JG. Virtual reality technology using a 360° video: development and evaluation of an educational tool for intraoral radiography using the bisecting angle technique. *Virtual Real* 2023;27(4):3599–612. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00803-1>
13. Bozia M, Berkhout E, van der Weijden F, Slot DE. Worldwide review of dental hygienists' extended scope of practice in radiology. *Int Dent J* 2022;72(3):373–80. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2021.05.010>
14. Ministry of Government Legislation. Enforcement rule of the medical service technologists, etc. act, appendix 1 (newly established Nov 28, 2024) [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 Apr 30]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9D%98%EB%A3%8C%EA%B8%B0%EC%82%AC%EB%93%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99>
15. Ministry of Government Legislation. Medical service technologists, etc. act, articles 2, 4, and 9 [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 May 20]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9D%98%EB%A3%8C%EA%B8%B0%EC%82%AC%EB%93%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0>
16. Ministry of Government Legislation. Medical service act, article 37 [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 Apr 23]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%9D%98%EB%A3%8C%EB%B2%95>
17. Ministry of Government Legislation. Rules on the safety management of diagnostic radiation devices [Internet]. Korean Law Information Center [cited 2026 Apr 23]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%A7%84%EB%8B%A8%EC%9A%A9%EB%B0%A9%EC%82%AC%EC%84%A0%EB%B0%9C%EC%83%9D%EC%9E%A5%EC%B9%98%EC%9D%98%EC%95%88%EC%A0%84%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%B9%99>
18. Ko JK, Jeon YR, Han EO, Cho PK, Kim YM. Comparison of the legislation applicable to compare the use of diagnostic radiation devices. *J Radiol Sci Technol* 2015;38(3):277–86.
19. Lee TH, Song YJ. The scope of radiation safety manager in the Medical Service Act—focus on dentists and dental hygienists. *Law Policy Rev* 2015;21(2):291–321. <https://doi.org/10.36727/jjlp.21.2.201508.012>
20. Chae SH, Noh HJ, Jeong GW, Kim HN, Maeng HM, Cho YS, et al. Research on dental hygienists' clinical skill proficiency in core dental hygiene competency. *J Korean Soc Dent Hyg* 2016;16(5):651–60. <https://doi.org/10.13065/jksdh.2016.16.05.651>
21. International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann ICRP* 2007;37(2–4):1–332. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
22. Korea Disease Control and Prevention Agency. Diagnostic reference level guidelines 2024: dental imaging (intraoral, panoramic, CBCT). Publication No. 11-1790387-000995-01. Cheongju: Korea Disease Control and Prevention Agency. 2024: 11–25.

23. International Commission on Radiological Protection. 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann ICRP 1991;21(1-3):1-201.
24. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in cone beam computed tomography (CBCT). ICRP Publication 129. Ann ICRP 2015;44(1):9-127. <https://doi.org/10.1177/0146645315575485>
25. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report. Volume I. New York: United Nations. 2010: 339-79.
26. National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Washington DC: National Academies Press; 2006: 65-99. <https://doi.org/10.17226/11340>
27. Johnson KB, Ludlow JB, Mauriello SM, Platin E. Reducing the risk of intraoral radiographic imaging with collimation and thyroid shielding. Gen Dent 2014;62(4):34-40.
28. European Commission. Radiation protection 136: European guidelines on radiation protection in dental radiology. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2004: 16-33.
29. International Commission on Radiological Protection. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. Ann ICRP 2009;39(5):7-68. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.01.002>
30. DeWerd LA, Kissick M. The phantoms of medical and health physics: devices for research and development. New York: Springer; 2013: 225-84.
31. Alsufyani N, Alnamlah S, Mutaieb S, Alageel R, AlQarni M, Bukhari A, et al. Virtual reality simulation of panoramic radiographic anatomy for dental students. J Dent Educ 2023;87(8):1200-9. <https://doi.org/10.1002/jdd.13240>
32. Dzyuba N, Jandu J, Yates J, Kushnerev E. Virtual and augmented reality in dental education: the good, the bad and the better. Eur J Dent Educ 2025;29(3):497-515. <https://doi.org/10.1111/eje.12871>
33. International Commission on Radiological Protection. Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP Publication 135. Ann ICRP 2017;46(1):1-144. <https://doi.org/10.1177/0146645317717209>
34. Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A, et al. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. Eur J Radiol 2012;81(2):267-71. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2010.11.028>
35. Ludlow JB, Timothy R, Walker C, Hunter R, Benavides E, Samuelson DB, et al. Effective dose of dental CBCT—a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units. Dentomaxillofac Radiol 2015;44(1):20140197. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20140197>
36. Mettler FA Jr, Huda W, Yoshizumi TT, Mahesh M. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog. Radiology 2008;248(1):254-63. <https://doi.org/10.1148/radiol.2481071451>
37. Lurie AG. Doses, benefits, safety, and risks in oral and maxillofacial diagnostic imaging. Health Phys 2019;116(2):163-9. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001030>
38. Commission on Dental Accreditation. Accreditation standards for dental hygiene education programs. Chicago: American Dental Association. 2022: 32-6.
39. Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan. Guidelines for dental hygienist training facility guidance. Notification No. Iseihatsu 0331 No. 61 [Internet]. MHLW; 2015 Mar 31 [cited 2026 Apr 23]. Available from: https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00tc3138&dataType=1&pageNo=1
40. General Dental Council. Standards for education [Internet]. London: GDC; 2025 [cited 2026 Apr 23]. Available from: <https://www.gdc-uk.org/docs/default-source/about-us/gdc-standards-for-education-september-2025.pdf>
41. The Ionising Radiation (Medical Exposure) Regulations 2017, regulation 17 and schedule 3 [Internet]. UK Legislation [cited 2026 Apr 23]. Available from: <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2017/1322/contents/made>
42. Canadian Dental Hygienists Association, Federation of Dental Hygiene Regulators of Canada, Commission on Dental Accreditation of Canada, National Dental Hygiene Certification Board. Entry-to-practice Canadian competencies for dental hygienists. Ottawa: CDHA. 2021: 14.
43. Queensland Health. Radiation safety – dental use licence: student supervised activities [Internet]. Queensland Government [cited 2026 Jun 17]. Available from: <https://www.health.qld.gov.au/system-governance/licences/radiation-licensing/apply/licences/dental/use>