

Artificial intelligence in diagnostic and laboratory dentistry: Current applications and future perspectives

진단검사치의학 분야에서 인공지능 기술의 활용과 미래

Yeon-Hee Lee 

Editor-in-Chief, Korean Academy of Laboratory & Diagnostic Dentistry, Seoul, Korea

ABSTRACT

This review comprehensively examines the current status, clinical applicability, and future directions of artificial intelligence (AI) in diagnostic and laboratory dentistry. Dental AI primarily utilizes deep learning models based on radiographic and histopathological images to assist in diagnosis of conditions including dental caries, periodontal disease, periapical lesions, implant-related assessments, temporomandibular disorders, and oral squamous cell carcinoma (OSCC), enhancing diagnostic sensitivity and specificity. Recently, AI applications have expanded to salivary and blood biomarker analyses, integrating inflammatory cytokines (IL-1 β , TNF- α , MMP-8), OSCC-related proteins (CYFRA 21-1, SCC-Ag, p53), salivary microbiome profiles, and blood-based indicators such as C-reactive protein, HbA1c, and bone metabolism markers, enabling predictive and personalized diagnostic modeling. The potential use of large language models (LLMs) has garnered attention, offering capabilities for analyzing electronic health records and clinical text data to support diagnosis, recommend treatment strategies, and assist in patient counseling and education. In the United States, several dental AI platforms, including Pearl Inc.'s Second Opinion[®], have received FDA 510(k) clearance and are entering clinical practice, while in Korea, commercialization is progressing through Ministry of Food and Drug Safety approvals. Nevertheless, challenges remain, including insufficient data standardization, limited multi-institutional datasets, legal and ethical considerations, and integration with clinical workflows. To address these issues, multi-institutional prospective validation, development of generalizable models, multimodal AI research, and implementation of explainable AI are necessary. Overall, dental AI is evolving beyond image interpretation toward a multimodal clinical decision support system that integrates imaging, biomarkers, clinical information, and LLMs to support personalized diagnostics and treatment planning after validation.. (*J Korean Dent Assoc 2026; 64(5): 174-183*)

Key words : Dentistry; Diagnosis; Clinical Laboratory Techniques; Artificial Intelligence; Deep Learning; Large Language Models

서론

최근 의료 분야에서는 인공지능(artificial intelligence, AI) 기술의 발전으로 진단 및 치료 의사결정 과정에 큰 변화가 일어나고 있다. AI는 인간의 인지 능력을 모방하여 학습, 추론,

문제 해결, 의사결정 등을 수행할 수 있는 컴퓨터 시스템 또는 소프트웨어 기술로 정의되며, 대규모 데이터를 기반으로 복잡한 패턴을 인식하고 예측과 분류를 수행할 수 있다¹⁾. 딥러닝(deep learning), 강화학습(reinforcement learning), 자연어 처리(natural language processing) 등 다양한 기법을 통해 AI는 의료 영상 판독, 바이오마커 분석, 임상 데이터 통합, 치료 전략 추천 등 여러 분야에서 활용되며, 진단 정확도 향상과 임상 의사결정 지원에 중요한 역할을 한다^{2,3)}.

특히 진단검사치의학(diagnostic and laboratory dentistry-

*Corresponding author: Prof. Yeon-Hee Lee
Editor-in-Chief, Korean Academy of Laboratory & Diagnostic Dentistry, 372 Hangang-daero, Yongsan-gu, Seoul 04323, Korea
Tel: +82-2-958-9454, E-mail: omod0209@gmail.com

ry)은 환자의 구강 및 전신 건강 상태를 평가하기 위해 방사선 영상, 임상지표, 생체신호, 타액·혈액 기반 생화학적·분자생물학적 바이오마커, 조직병리학적 검사 등 다양한 데이터를 종합적으로 분석하는 치의학 분야이다. 이러한 복합적 데이터 분석 과정은 AI 기술이 특히 효과적으로 활용될 수 있는 영역으로 평가된다⁴⁾. 최근 딥러닝 기반 영상 분석 기술을 활용하여 치과 방사선영상에서 우식증, 치주질환, 치근단 병소, 턱관절장애 등의 병변을 자동 탐지하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부 시스템은 이미 임상 환경에서 사용되고 있다⁵⁻⁸⁾.

따라서 본 논문에서는 치과 AI가 기존의 영상 판독 중심 기술에서 벗어나, 바이오마커, 임상정보, 전자의무기록 및 대규모 언어 모델(large language model, LLM)을 통합하는 멀티모달(multimodal) 임상 의사결정 지원 시스템으로 발전하고 있는 흐름을 살펴보고자 한다. 이를 위해 진단검사치의학 분야에서 AI 기술의 현재 활용 현황을 살펴보고, 미국 식품의약국(Food and Drug Administration, FDA)에서 승인된 대표적 AI 기반 치과 진단 소프트웨어의 특징을 정리하며, 한국에서의 연구 동향과 향후 발전 방향을 고찰하고자 한다.

치과 진단 분야에서의 인공지능 기술

치과 진단 분야에서 AI는 주로 영상 및 이미지 기반 분석을 중심으로 활용되며, 딥러닝 기반 모델이 가장 널리 사용된다⁹⁾. 특히 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)은 이미지의 공간적 패턴과 특징을 자동으로 추출할 수 있어, 방사선 영상이나 조직병리 이미지의 병변 탐지에 탁월한 강점을 가진다¹⁰⁾. 이러한 정교한 분석 역량을 바탕으로 AI의 적용 범위는 더욱 확대되어, 현재 치아우식증, 치주질환, 치근단 병소와 같은 다빈도 질환뿐만 아니라 임플란트 분석, 턱관절장애 및 구강암의 보조 진단 등 치의학의 전 방위적 영역에서 활발히 활용되고 있다¹¹⁻¹⁴⁾.

치아우식증 진단에서는 교익방사선사진을 활용하여 초기 우식 병변을 탐지하고, 충치의 위치와 깊이를 분류하며 치아 단면별 우식 가능성을 평가한다^{15,16)}. 최근 연구에서는 딥러닝 모델이 미세 우식 병변까지 탐지 가능하도록 학습되어 임상에서의 조기 진단을 보조할 수 있음을 보여주었다¹⁷⁾. 다만 금속 수복물 주변이나 중첩된 치아 구조에서는 탐지 정확도가 낮고, 서로 다른 방사선 장비와 촬영 조건에 대한 일반화가 아직 완전하지 않다¹⁸⁾.

치주질환 진단에서는 파노라마 및 치근단방사선영상에서 치조골 높이를 자동 측정하고, 골소실 패턴을 분석하여 치주염 단계와 중증도를 평가할 수 있다. 일부 AI 모델은 치아별 골 소실 정도를 정량화하여 장기 추적 관리에도 활용 가능하다. 그러나 골밀도나 골 패턴이 환자별로 크게 다르거나, 2D영상만으로는 골 소실 깊이와 형태를 완전히 재현하기 어려운 점은 여전히 한계로 지적된다^{19,20)}.

치근단 병소 탐지에서는 치근단방사선사진과 콘빔CT 영상에서 방사선 투과상을 자동 탐지하고, 병소의 위치, 크기, 형태를 분류하며 증식성 또는 비증식성 병소를 구분하는 연구가 활발하다. 특히 콘빔CT 기반 3D 모델은 복합 치아 구조 및 주변 해부학적 구조까지 고려해 병소를 정밀하게 평가할 수 있는 가능성을 보여준다²¹⁾. 그러나 초기 미세 병소 탐지 민감도가 낮고, 콘빔CT에서 금속 아티팩트가 발생하면 성능이 저하될 수 있다는 한계가 존재한다^{22,23)}.

임플란트 및 임플란트 주위 질환 진단에서는 AI가 임플란트 위치를 자동 식별하고 주변 골 결손과 골융합 상태를 평가하는 데 활용된다. 일부 연구에서는 다중 스캔 영상과 기계학습 기반 모델을 결합하여 임플란트 안정성과 주변 골 소실 정도를 정량적으로 분석할 수 있음을 보여주었다^{24,25)}. 하지만 임플란트 종류, 재료, 각도 등 다양한 변수와 3D 영상 해상도 제한으로 인한 세밀한 골 결손 탐지의 어려움은 여전히 해결 과제로 남아 있다.

턱관절장애 진단에서도 AI 활용이 확대되고 있다. 자기공명 영상 기반 딥러닝을 활용하여 턱관절 내 삼출액(effusion)을 자동 탐지하는 모델이 개발되었다^{7,26)}. 환자의 임상 정보를 함께 입력할 경우 진단 정확도가 향상되는 경향이 관찰되었으며, 모델은 턱관절 영상에서 병변 위치를 추정하고 시각화하여 전문가 판독과 유사한 성능을 보였다. 또한 전신 골스캔(bone scintigraphy) 기반 CNN 모델을 이용한 연구에서는 턱관절 골관절염 진단에서 높은 정확도를 보였으나, 단일 영상만으로 질환 예측에는 한계가 있었다²⁷⁾. 이러한 연구는 고해상도 영상 기반 패턴 인식과 임상 정보 결합(multimodal AI)의 중요성을 강조하며, 향후 다기관 및 전향적 검증 연구가 필요하다.

구강암, 특히 구강편평세포암(oral squamous cell carcinoma, OSCC) 진단에서도 AI 기술이 주목받고 있다. 임상 사진, 의료 영상, 조직병리 이미지를 기반으로 한 딥러닝 모델은 조기 병변 탐지, 병변 경계 설정, 조직학적 분류, 침윤 깊이 추정 등에서 임상 수준의 성능을 보여준다. 임상 허 사진을 활용해

정상, 설염, OSCC를 분류하는 모델을 개발하여 조기 진단 가능성을 제시하였다²⁸. 다수 연구에서 OSCC 진단에서 딥러닝 알고리즘이 전통적인 머신러닝보다 높은 민감도와 특이도를 보임이 보고되었다^{29,30}. 다만 대부분 연구가 후향적 단일 기관 데이터 기반으로, 외부 검증이나 다기관 데이터를 통한 일반화 성능 확인이 필요하며, 임상 데이터와 조직병리학 데이터를 결합한 멀티모달 연구가 향후 발전 과제로 남아 있다.

이처럼 치과 AI 기술은 다양한 질환의 진단 정확성과 일관성을 향상시키는 유용한 도구로 활용될 수 있지만, 대부분의 연구가 특정 영상이나 단일 질환 중심으로 진행되고 있어, 다양한 환자군과 장비를 포괄하는 범용 모델 개발은 아직 초기 단계에 머물러 있다.

타액 및 혈액 기반 바이오마커 분석에서의 인공지능 적용

진단검사치의학 분야에서 타액과 혈액 기반 바이오마커 분석은 AI 적용이 확대되고 있는 중요한 영역이다. 타액은 단백질, 효소, 면역글로블린, 대사물, 미생물 DNA 등 다양한 바이오마커를 포함하고 있어 구강 및 전신 건강 평가를 위한 비침습적 매체로 활용될 수 있다^{31,32}. AI 알고리즘은 예를 들어, 치주 질환 예측에서는 IL-1 β , TNF- α , MMP-8 등의 염증 관련 사이토카인, OSCC 조기 탐지에서는 CYFRA 21-1, SCC-Ag, p53 돌연변이 단백질과 같은 단백질 및 유전자 마커, 우식증 위험 평가에서는 타액 내 글루코오스, pH, 유산균 및 Streptococcus mutans 농도 등을 분석하는 데 활용된다^{33,34}. 혈액 기반

AI 연구에서는 C-반응단백(CRP), 혈청 알부민, HbA1c, 칼슘·인·호르몬 수치 등 전신 염증과 골 대사 관련 지표를 분석하여 치주질환 진행 위험, 골 소실 정도, 전신질환과 구강 건강 간 상관관계를 평가한다^{35,36}. 또한 AI는 다중 오믹스(multi-omics) 데이터를 통합하여, 개별 바이오마커 간의 복잡한 상관관계와 미세한 패턴을 학습함으로써 기존 통계적 분석만으로는 확인하기 어려운 질환 예측 모델을 제공할 수 있다^{37,38}. 현재까지 대부분 연구가 탐색적 또는 단일 기관 기반으로 진행되었으나, AI 기반 타액·혈액 분석은 개인 맞춤형, 비침습적, 예측적 진단 도구로서 치과 임상 진단과 치료 계획 수립에 활용될 가능성을 보여주고 있다. 향후 영상, 임상 정보와 결합한 멀티모달 AI 접근과 연계될 경우 진단 정확도와 예측력이 크게 향상될 것으로 기대된다.

연구 트렌드 및 분야 분포

치과 AI 연구는 지난 10년간 급격히 증가하고 있으며, 2015년부터 2025년까지 발표된 논문 수를 분석하면 전반적인 상승 추세를 확인할 수 있다³⁹⁻⁴¹. 초기 연구는 주로 치아우식증과 치주질환 진단을 중심으로 이루어졌으나, 최근에는 콘빔CT 기반 치근단 병소 탐지, 임플란트 위치 및 주변 골 분석, 턱관절 장애 평가, 구강암 보조 진단 등 다양한 분야로 확대되고 있다.

Table 1에 나타난 연구 분야 분포를 보면, 전체 연구 중 치아우식증과 치주질환이 약 40~50%를 차지하며, 치근단 병소 및 임플란트 관련 연구가 약 20%, 턱관절 질환과 구강암 진단 관

Table 1. Distribution of research fields in artificial intelligence applications in dentistry³⁹⁾

Research Field	Representative AI Applications	Approximate Proportion
Oral radiology / imaging	Caries detection, periapical lesion detection, periodontal bone loss analysis, tooth segmentation	~48%
Implantology and surgical planning	Implant planning, implant detection, peri-implant bone loss analysis	~32%
Orthodontics	Cephalometric landmark detection, growth prediction, treatment planning	~7%
Periodontology	Periodontal disease prediction, bone loss staging	~5%
Oral and maxillofacial surgery	Lesion detection, surgical navigation	~4%
Other diagnostic applications	Oral cancer detection, microbiome analysis, digital pathology	~4%

Note: AI research in dentistry has primarily focused on radiographic image analysis, with a large proportion of studies dedicated to imaging-based diagnostic applications, such as caries detection, periodontal bone loss evaluation, and periapical lesion detection. In contrast, AI applications in orthodontics, oral and maxillofacial surgery, and other diagnostic domains remain in the early stages of development.

련 연구가 각각 10~15% 정도를 차지한다³⁹⁾. 이러한 분포는 임상 수요와 영상 데이터 접근성에 따른 연구 집중도를 반영한다. 예를 들어, 치아우식증과 치주질환은 방사선영상 데이터가 상대적으로 풍부하고 표준화되어 있어 AI 모델 학습이 용이하며, 초기 연구에서도 높은 성과를 보였다⁴²⁾. 반면, 턱관절장애나 구강암 분야는 고해상도 자기공명영상, 조직병리학 이미지 등 복합적 데이터를 필요로 하고, 질환 발생률이 상대적으로 낮아 학습 데이터 확보와 일반화에 한계가 존재한다^{28,43,44)}.

논문 수 추세를 보면, 2015년 이후 치과 AI 연구는 연평균 약 15-20% 수준으로 증가하였으며, 특히 2020년 이후 COVID-19 팬데믹으로 원격 진단 및 디지털 영상 활용 연구가 확대되면서 연간 논문 수가 급증하였다⁴⁵⁾. 최근 2~3년간은 딥러닝을 중심으로 한 멀티모달 데이터 기반 AI 모델, 즉 영상과 임상 정보, 조직병리학 데이터를 동시에 활용하는 연구가 증가하는 경향을 보이고 있다⁴⁶⁾. 이는 단일 영상 기반 모델의 한계를 극복하고, 턱관절장애나 구강암과 같이 복합적 병태를 가진 질환에서 진단 정확도를 높이는 전략으로 평가된다.

이와 같은 연구 트렌드는 치과 AI가 단순 영상 판독을 넘어, 임상적 진단 의사결정을 보조하고 치료 계획 수립에 활용될 수 있는 잠재력을 보여준다. 그러나 여전히 대부분의 연구가 단일 기관, 후향적 데이터 기반으로 진행되고 있으며, 다양한 환자군과 장비를 포괄하는 범용 AI 모델 개발, FDA 승인 등 임상 상용화 단계까지는 아직 많은 과제가 남아 있다.

치과 AI 진단 정확도 비교

치과 AI 진단 모델은 치아우식증, 치주질환, 치근단 병소, 턱관절장애, 구강암 등 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있다 (Table 2). 치아우식증 진단에서는 교익방사선사진을 이용한 CNN 기반 딥러닝 모델이 초기 병변 탐지와 치아 단면별 우식 가능성 평가에서 높은 민감도와 특이도(각각 약 0.85-0.92, 0.80-0.88)를 보여 조기 진단을 보조할 수 있다^{16,28,47,48)}. 그러나 금속 수복물 주변이나 작은 미세 병변에서는 탐지 성능이 떨어지고, 다양한 영상 장비와 촬영 조건에 대한 일반화가 필요하다.

치주질환 진단에서는 파노라마와 치근단방사선영상을 기반으로 CNN·U-Net 계열 모델이 치조골 높이 측정과 골소실 패턴 분석을 수행하여 치주염 단계와 중증도를 평가한다⁴⁹⁻⁵¹⁾. 이러한 모델은 정량적 골소실 평가와 다치아 패턴 분석이 가능하

지만, 골밀도와 골 패턴 차이가 큰 환자에서 정확도가 떨어지며, 2D 영상만으로는 골소실 깊이와 형태를 완전히 재현하기 어렵다는 한계가 있다.

치근단 병소 탐지에서는 콘빔CT와 치근단방사선영상을 활용한 3D CNN 모델이 병소 위치, 크기, 형태 분류와 증식성/비증식성 구분까지 가능하다. 민감도는 0.80-0.89 수준으로 우수하지만, 초기 미세 병소 탐지 민감도는 제한적이며, 콘빔CT 영상에서 금속 아티팩트가 발생하면 성능이 저하될 수 있다⁵²⁻⁵⁴⁾.

턱관절장애 진단에서는 자기공명영상 기반 CNN 딥러닝 모델이 턱관절 내 삼출액 탐지와 턱관절 관절원판의 위치변화, 병변 위치 추정에서 전문가 수준의 성능(area under the curve, AUC 0.84-0.90)을 보였다^{13,27)}. 특히 환자의 임상 정보와 결합한 멀티모달 접근은 진단 민감도와 특이도를 향상시키지만, 턱관절장애는 통증, 기능 이상, 연조직 변화 등 복합적 요소가 병존하는 질환이므로, 다양한 환자군과 다기관 전향적 데이터 기반 검증이 필요하다. 또한 골 스캔을 활용한 턱관절 골관절염 진단 연구에서도 높은 AUC를 보였으나, 영상만으로는 기능적 평가 한계가 존재한다²⁷⁾.

OSCC 진단에서는 임상 사진과 조직병리 이미지를 활용한 CNN/VGGNet 계열 모델이 조기 병변 탐지, 병변 경계 설정, 악성 여부 분류에서 높은 민감도(0.88-0.95)와 특이도(0.85-0.93)를 보였다^{55,56)}. 그러나 대부분 연구가 단일기관 후향적 데이터에 기반하고 있어, 외부 검증과 다양한 환자군 적용이 필요하며, 실제 임상 환경에서의 사용을 위해서는 다기관 전향적 임상시험과 FDA 또는 식약처 인허가가 필수적이다.

이처럼 치과 AI 모델들은 각 질환에서 임상적 진단 정확성과 일관성을 향상시키는 데 기여할 수 있으나, 대부분 단일 영상·단일 병변 중심 연구에 머물러 있다. 따라서 다기관 및 전향적 검증, 다양한 장비와 환자군을 포함한 범용 모델 개발, 영상과 임상 정보를 결합한 멀티모달 AI 연구가 향후 치과 AI 기술의 임상 적용과 상용화를 위해 필요한 핵심 과제로 평가된다.

대규모 언어 모델(LLM)의 활용 형태와 방안

최근 진단검사치의학 분야에서는 전통적인 영상 기반 AI뿐 아니라, 방대한 텍스트 데이터를 학습하여 자연어 이해, 생성, 정보 요약, 의학적 추론을 수행할 수 있는 대규모 언어 모델의 활용 가능성이 주목받고 있다. LLM은 환자의 임상 기록, 전자

Table 2. Comparison of diagnostic accuracy of AI models in dentistry

Disease	AI model / Technique	Data type	Performance metrics	Key features / Limitations
Dental caries	CNN-based deep learning	Bitewing radiographs	Sensitivity 0.85-0.92 Specificity 0.80-0.88	Early caries detection and tooth-level risk assessment. Difficulty detecting lesions near metallic restorations; generalization across different imaging devices needed.
Periodontal disease	CNN / U-Net	Panoramic and periapical radiographs	AUC 0.86-0.91 Accuracy 0.82-0.88	Automated measurement of alveolar bone height and analysis of bone loss patterns. 2D images cannot fully assess depth/shape; accuracy reduced in patients with large bone density variations.
Periapical lesion	3D CNN / Deeplab	CBCT and periapical radiographs	Sensitivity 0.80-0.89 Specificity 0.78-0.86	Lesion location, size, and morphology classification possible. Low sensitivity for small early lesions; performance affected by metallic artifacts in CBCT.
Temporomandibular disorders	CNN-based MRI deep learning	MRI	AUC 0.84-0.90	Automated detection of joint effusion; accuracy improves when combined with clinical data. Single imaging modality cannot fully evaluate function or pain.
Oral squamous cell carcinoma	CNN / VGGNet	Clinical photographs and histopathology	Sensitivity 0.88-0.95 Specificity 0.85-0.93	Early lesion detection and boundary delineation possible. Most studies are retrospective and single-center; external validation required.

Note: AI models in dentistry have demonstrated high diagnostic performance across multiple domains, but limitations include reliance on retrospective or single-center data, challenges in generalization across imaging modalities, and reduced accuracy in complex cases. Future studies should focus on multi-center, prospective validation and multimodal integration. AI: Artificial Intelligence, CNN: Convolutional Neural Network, U-Net: U-Net Neural Network, CBCT: Cone Beam Computed Tomography, MRI: Magnetic Resonance Imaging, AUC: Area Under the Curve, OSCC: Oral Squamous Cell Carcinoma

의무기록(electronic health record, EHR), 치료 내역, 검사 결과 등 다양한 텍스트 정보를 분석하여 질환 위험을 정량적으로 평가하고, 영상 판독 결과와 결합해 진단 보조 정보를 제공할 수 있다^{57,58}). 이를 통해 치주질환과 같은 복합 질환에서 환자의 구강 위생 상태, 치석 관리 기록, 전신 질환 정보를 종합하여 개별 환자 맞춤형 위험 점수를 산출할 수 있다.

또한, LLM은 최신 가이드라인, 학술 논문, 임상 사례를 학습함으로써 치료 옵션을 추천하고, 치과 전문의에게 맞춤형 진단 및 치료 전략을 제시할 수 있다⁵⁹). 이는 특히 복합 질환이나 희귀 사례에서 임상 판단의 일관성을 높이는 데 유용하며, 의사 결정 지원 시스템으로서의 역할을 강화한다. 더 나아가, LLM은 교육 및 환자 상담 도구로도 활용될 수 있다. 학생 교육, 환자 이해도 향상, 치료 계획 설명 등에서 자연어 기반 시뮬레이션, 질의응답, 사례 생성 기능을 제공함으로써 치과 교육과 환자 커뮤니케이션을 보조할 수 있다⁶⁰).

향후 발전 방향은 멀티모달 AI 통합 접근에 있다. 즉, LLM과 딥러닝 기반 영상 분석 모델을 결합하여, 영상에서 추출한 병변 정보와 임상 데이터를 동시에 학습시키면 보다 정밀하고 개인화된 진단 및 치료 전략이 가능할 것이다. 이 과정에서 국가별 의료 데이터 표준화, 개인정보 보호, 임상 검증을 고려한 안전한 학습 데이터 구축이 필수적이다. 이러한 통합적 접근은 단순 정보 검색을 넘어, 실제 임상 환경에서 임상가의 의사결정을 보조하는 신뢰할 수 있는 도구로서 LLM 기반 시스템의 활용 가능성을 높일 것으로 기대된다.

FDA 승인 치과 AI 시스템 및 국내 동향

미국에서는 치과 진단을 보조하는 AI 기반 소프트웨어가 의료기기로서 FDA의 510(k) 승인을 획득하며 임상 적용 단계로 진입하고 있다. 대표적으로 Pearl Inc. (Los Angeles, CA, USA)

Table 3. Representative FDA-cleared artificial intelligence systems for dental radiographic diagnosis.

AI system	Manufacturer	City, country	FDA clearance year	Version / Type	Target imaging	Main diagnostic functions
Overjet Dental AI	Overjet Inc.	Boston, MA, USA	2021	Clinical decision support software	Bitewing, Periapical radiographs	Automated measurement of periodontal bone loss, detection of caries, radiographic annotation
Second Opinion	Pearl Inc.	Los Angeles, CA, USA	2022	Software as a Medical Device (SaMD)	Bitewing, Periapical, Panoramic radiographs	Detection of dental caries, calculus, periodontal bone loss, periapical radiolucency, impacted teeth
Denti.AI Detect	Denti.AI Inc.	Toronto, ON, Canada	2022	AI radiographic detection software	Panoramic and intraoral radiographs	Detection of dental pathologies including caries, periapical lesions, bone loss
Adravisio Perio	Adra Imaging Inc.	San Jose, CA, USA	2023	Periodontal radiographic analysis AI	Bitewing and periapical radiographs	Automated periodontal bone level measurement and periodontal disease assessment

Note: This table summarizes representative artificial intelligence systems for dental radiographic analysis that have been cleared as medical devices by the U.S. FDA. Most of these systems provide automated detection of dental lesions and quantitative analysis of alveolar bone levels from radiographs, functioning as clinical decision support tools to assist dental professionals in diagnosis.

의 Second Opinion® 플랫폼은 2D 방사선 영상뿐만 아니라, 최근 치과용 AI 솔루션 최초로 콘빔CT(3D 치과 영상) 분석 기능에 대한 FDA 승인을 획득하며 그 범위를 확장하였다. 이 시스템은 치아우식, 치조골 흡수, 임플란트 위치 및 해부학적 구조를 자동으로 식별·정량화하여 임상사의 판단을 보조하는 임상 의사결정 지원 역할을 수행한다(Table 3). 이 외에도 Overjet (Boston, MA, USA)과 Denti.AI (Toronto, ON, Canada) 등의 시스템이 FDA 승인을 통해 방사선 판독의 일관성을 높이고 치료 계획의 객관적 근거를 제공하며 실제 임상 현장에 활발히 보급되고 있다.

한편, 한국에서도 AI 기반 치과 의료기기의 인허가 및 상용화 움직임이 매우 가파르게 진행되고 있다. 국내 기업들은 글로벌 시장 경쟁력을 확보하기 위해 FDA 승인과 국내 식품의약품안전처(이하 식약처) 품목허가를 동시에 추진하고 있다.

영상 장비 기반의 AI 통합 솔루션 개발이 한창이다. 국내 최대 치과 영상 장비 기업인 바텍(Vatech, Hwaseong, Korea)은 자사 소프트웨어에 AI 진단 보조 기능을 통합하여 치주 골소실 측정 및 영구치 자동 판독 기능을 제공하고 있으며, 2024년에는 AI 기반의 파노라마 판독 보조 소프트웨어가 식약처 허가를 획득하는 등 장비와 소프트웨어의 일체형 생태계를 구축하고 있다.

독립형 진단 보조 소프트웨어도 약진하고 있다. 큐티티(QTT Co., Busan, Korea)의 '이아포(e.아포)'는 모바일 기반 구강 자

가검진 AI 솔루션으로서 세계 최초로 식약처 의료기기 인허가를 획득하였으며, 공공보건 및 비대면 구강 관리 영역으로 확장 중이다. 또한, 디디에이치(DDH, Seoul, Korea)는 서울대학교치과병원과 협업하여 개발한 AI 기반 교정 진단 지원 솔루션 및 파노라마영상 분석 소프트웨어에 대해 식약처 허가를 획득하고 클라우드 기반의 구독형 서비스를 제공하고 있다.

규제 체계의 선진화와 정부 지원도 이어지고 있다. 식약처는 2024년부터 2025년에 걸쳐 '생성형 AI 기반 의료기기 허가-심사 가이드라인'을 세계 최초로 발표하며, 고도화된 AI 기술이 제도권 내에서 안전하게 임상 적용될 수 있는 법적 기틀을 마련하였다. 특히 인더스마트(Intensmart, Korea) 등 국내 AI 의료기기 기업들이 eGMP 기반 품질관리 시스템을 통해 안전성을 입증하며 품목허가를 획득하는 사례가 늘고 있으며, 이는 국내 치과 AI 제품의 신뢰성을 담보하는 중요한 지표가 되고 있다.

이처럼 미국, 한국 양측에서 AI 기반 진단 보조 소프트웨어의 규제 승인 및 임상 적용 시도가 확대되고 있으며, 치과 영상 진단 영역에서도 추가적인 AI 의료기기 인허가 및 실용화 연구가 활발히 추진되고 있다. 특히 한국은 우수한 디지털 덴티스트리 인프라를 바탕으로 영상 진단뿐만 아니라 생성형 AI를 활용한 환자 상담 및 맞춤형 치료 계획 수립 분야에서도 글로벌 선두 그룹으로 도약하기 위한 활발한 연구와 인허가 절차를 병행하고 있다.

고찰

치과 AI는 현재 영상 판독 보조를 중심으로 발전해 왔으나, 향후에는 영상, 임상정보, 바이오마커 및 텍스트 데이터를 통합하는 멀티모달 의사결정 지원 시스템으로 확장될 것으로 예상된다. 이러한 변화는 진단검사치의학 분야가 단일 검사 결과의 해석을 넘어, 다양한 임상·생물학적 정보를 종합하여 개인 맞춤형 진단과 치료 계획을 지원하는 방향으로 발전하고 있음을 보여준다.

그러나 치과 AI 기술의 임상 적용에는 아직 몇 가지 중요한 한계가 존재한다. 첫째, 데이터 표준화 부족 문제이다. 치과 영상은 촬영 장비, 촬영 각도, 노출 조건, 환자 움직임 등 다양한 요인에 따라 화질과 특징이 달라지며, 이로 인해 AI 모델이 특정 장비나 환경에 과적합(overfitting)되는 경향이 나타난다^{8,61}). 이러한 일반화 문제는 단일 기관 또는 단일 장비 기반 연구에서 특히 두드러지며, 실제 임상 환경에서의 신뢰성 확보를 어렵게 한다.

둘째, 대규모·다기관 데이터 부족이 있다. 현재 대부분의 AI 연구는 후향적 단일기관 데이터를 기반으로 수행되며, 다양한 연령, 성별, 전신질환 상태를 포함한 환자군과 다양한 병변 유형을 포괄하지 못한다^{62,63}). 이러한 제한은 AI 모델의 범용성과 외부 검증 가능성을 저해하며, 임상 적용 시 정확도와 재현성을 낮출 수 있다.

셋째, 법적·윤리적 문제가 존재한다. AI 기반 진단 보조 시스템에서 오류가 발생할 경우, 진단 책임과 의료사고에 대한 책임 소재가 명확하지 않다⁶⁴). 또한, 환자 개인정보를 포함한 대규모 학습 데이터 활용 과정에서 개인정보 보호 및 데이터 사용 동의 문제도 해결해야 한다.

넷째, 임상 워크플로우 통합의 어려움이다. AI 모델이 EMR(electronic medical record), PACS(picture archiving and communication system) 등 기존 시스템과 원활하게 연계되지 않으면, 진료 과정에서 실질적 보조 도구로 활용되기 어렵다⁶⁵). 임상 의사에게 직관적이고 신속한 피드백을 제공할 수 있는 시스템 설계가 필수적이다.

향후 치과 AI 발전 방향은 이러한 한계를 극복하는 데 초점을 맞출 필요가 있다. 먼저, 다기관 협력을 통한 대규모 데이터 구축이 필요하며, 이를 기반으로 AI 모델이 다양한 환자군과 영상 조건에서 안정적인 성능을 발휘하도록 해야 한다. 더욱이, 단순 영상 기반 분석을 넘어 영상, 임상, 분자생물학적 데

이터를 통합한 멀티모달 AI 연구가 필요하다. 이러한 접근은 질병 진단과 예후 예측의 정확도를 향상시키고, 개인 맞춤형 치료 전략 개발에도 기여할 수 있다. 마지막으로, AI 결정 과정을 설명할 수 있는 설명가능 인공지능(explainable AI, XAI) 기술의 개발이 중요하다. XAI는 모델의 판단 근거를 임상 의사가 이해할 수 있도록 제공함으로써 신뢰성을 높이고, 실제 임상 적용에서 의사와 AI 간 협업을 강화할 수 있다.

결론

진단검사치의학 분야에서 AI는 기존 임상 진단의 한계를 보완하고, 진단 정확성과 일관성을 향상시키는 강력한 도구로 자리잡을 잠재력을 가지고 있다. 그러나 현재 연구 대부분이 단일 질환·단일 기관 중심으로 이루어지고 있어, 실제 임상 적용과 상용화를 위해서는 다기관 전향적 검증, 범용 모델 개발, 멀티모달 데이터 통합, 규제 및 임상 워크플로우 연계가 함께 고려되어야 한다. 이러한 통합적 접근을 통해 AI는 단순 보조 도구를 넘어, 안전하고 신뢰할 수 있는 임상 의사결정 지원 시스템으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

Conflicts of Interest: None

References

1. Bajwa J, Munir U, Nori A, Williams B. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. *Future Healthc J* 2021; 8: e188-e194.
2. Fahim YA, Hasani IW, Kabba S, Ragab WM. Artificial intelligence in healthcare and medicine: clinical applications, therapeutic advances, and future perspectives. *Eur J Med Res* 2025; 30: 848.
3. Ligerio M, El Nahhas OS, Aldea M, Kather JN. Artificial intelligence-based biomarkers for treatment decisions in oncology. *Trends Cancer* 2025; 11: 232-244.
4. Najeeb M, Islam S. Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: current trends and future prospects. *BMC Oral Health* 2025; 25: 592.

5. Saber S, Abou El Nasr H, Torky AA, Saif N. Automated assessment of periapical health based on the radiographic periapical index using YOLOv8, YOLOv11, and YOLOv12 one-stage object detection algorithms. *Sci Rep* 2025; 15: 36487.
6. Kim J, Lee HS, Song IS, Jung KH. DeNTNet: deep neural transfer network for the detection of periodontal bone loss using panoramic dental radiographs. *Sci Rep* 2019; 9: 17615.
7. Lee YH, Jeon S, Won JH, Auh QS, Noh YK. Automatic detection and visualization of temporomandibular joint effusion with deep neural network. *Sci Rep* 2024; 14: 18865.
8. Sitaras S, Tsolakis IA, Gelsini M, Tsolakis AI, Schwendicke F, Wolf TG, et al. Applications of artificial intelligence in dental medicine: a critical review. *Int Dent J* 2025; 75: 474-486.
9. Chen W, Dhawan M, Liu J, Ing D, Mehta K, Tran D, Lawrence D, et al. Mapping the use of artificial intelligence-based image analysis for clinical decision-making in dentistry: a scoping review. *Clin Exp Dent Res* 2024; 10: e70035.
10. Sarvamangala DR, Kulkarni RV. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey. *Evol Intell* 2022; 15: 1-22.
11. Ghaffari M, Zhu Y, Shrestha A. A review of advancements of artificial intelligence in dentistry. *Dent Rev* 2024; 4: 100081.
12. Chen YC, Chen MY, Chen TY, Chan ML, Huang YY, Liu YL, et al. Improving dental implant outcomes: CNN-based system accurately measures degree of peri-implantitis damage on periapical film. *Bioengineering (Basel)* 2023; 10: 640.
13. Lee YH, Won JH, Kim S, Auh QS, Noh YK. Advantages of deep learning with convolutional neural network in detecting disc displacement of the temporomandibular joint in magnetic resonance imaging. *Sci Rep* 2022; 12: 11352.
14. Alotaibi G, Awawdeh M, Farook FF, Aljohani M, Aldhafiri RM, Aldhoayan M. Artificial intelligence (AI) diagnostic tools: utilizing a convolutional neural network (CNN) to assess periodontal bone level radiographically—a retrospective study. *BMC Oral Health* 2022; 22: 399.
15. Ayhan B, Ayan E, Karadağ G, Bayraktar Y. Evaluation of caries detection on bitewing radiographs: a comparative analysis of the improved deep learning model and dentist performance. *J Esthet Restor Dent* 2025; 37: 1949-1961.
16. Lee S, Oh SI, Jo J, Kang S, Shin Y, Park JW. Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. *Sci Rep* 2021; 11: 16807.
17. Gonzalez-Valenzuela RE, Mettes P, Loos BG, Marquering H, Berkhout E. Accuracy of deep learning-based AI models for early caries lesion detection: the influence of annotation quality and reference choice. *Clin Oral Investig* 2025; 29: 598.
18. Sabry M, Elbaz M, Alzabni WO. Novel metaheuristic optimized latent diffusion framework for automated oral disease detection in public health screening. *Sci Rep* 2025; 15: 40365.
19. Jundaeng J, Chamchong R, Nithikathkul C. Artificial intelligence-powered innovations in periodontal diagnosis: a new era in dental healthcare. *Front Med Technol* 2025; 6: 1469852.
20. Zhang H, Yuan T, Li T, Du J, Ye M, Jiang Q. A review of tooth AI segmentation on medical data. *Discov Imaging* 2025; 2: 17.
21. Ezhov M, Gusarev M, Golitsyna M, Yates JM, Kushnerev E, Tamimi D, et al. Clinically applicable artificial intelligence system for dental diagnosis with CBCT. *Sci Rep* 2021; 11: 15006.
22. Barros-Costa M, Nascimento EHL, Correia-Dantas IF, Oliveira ML, Freitas DQ. Potential impact of metal crowns at varying distances from a carious lesion on its detection on cone-beam computed tomography scans with several protocols. *Imaging Sci Dent* 2024; 54: 49-56.
23. Chagas MM, Kobayashi-Velasco S, Gimenez T, Cavalcanti MGP. Diagnostic accuracy of imaging examinations for peri-implant bone defects around titanium and zirconium dioxide implants: a systematic review and meta-analysis. *Imaging Sci Dent* 2021; 51: 363-372.
24. Vázquez-Sebrango G, Anitua E, Macía I, Arganda-Carreras I. The role of artificial intelligence in implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2025; 54: 1098-1122.
25. Atieh MA, Shah M, Hakam A, AlAli F, AlSayed S, Tawse-Smith A, et al. Diagnostic accuracy of deep learning models

- in detecting peri-implant marginal bone loss: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 2026; 37: 385-401.
26. Lee YH, Jeon S, Kim DH, Auh QS, Lee JH, Noh YK, et al. Clinical and MRI markers for acute vs chronic temporomandibular disorders using a machine learning and deep neural networks. *Commun Med (Lond)* 2025; 5: 401.
 27. Lee YH, Kim HS, Jeon S, Auh QS, Hong IK, Choi S, et al. Deep learning-based diagnosis of temporomandibular joint osteoarthritis using whole-body bone scans. *iScience* 2025; 28: 114027.
 28. Lee YH, Jeon S, Jung J, Auh QS, Lee JS, Chaurasia A, et al. DCNN models with post-hoc interpretability for the automated detection of glossitis and OSCC on the tongue. *Sci Rep* 2025; 15: 31940.
 29. Al-Rawi N, Sultan A, Rajai B, Shuaeeb H, Alnajjar M, Alketbi M, et al. The effectiveness of artificial intelligence in detection of oral cancer. *Int Dent J* 2022; 72: 436-447.
 30. Nieri M, Serni L, Clauser T, Paoletti C, Franchi L. Diagnosis of oral cancer with deep learning. A comparative test accuracy systematic review. *Oral Dis* 2025; 31: 2368-2381.
 31. Swaathi R, Narayan M, Krishnan R. Salivary biomarkers in cancer: a narrative review. *Oral Oncol Rep* 2024; 10: 100503.
 32. Taba M, Grant MM. Editorial: salivary biomarkers for oral and systemic diseases. *Front Dent Med* 2024; 5: 1429305.
 33. Steigmann L, Maekawa S, Sima C, Travan S, Wang CW, Giannobile WV, et al. Biosensor and lab-on-a-chip biomarker-identifying technologies for oral and periodontal diseases. *Front Pharmacol* 2020; 11: 588480.
 34. Zarasvandi AM, Gerayeli M, Abasi M, Goodarzi M, Ganjezhadeh S, Solhmirzaei R, et al. Electrochemical and optical biosensors for periodontitis detection. *Biochem Biophys Rep* 2025; 45: 102378.
 35. Yan Y, Sharma P, Suvan J, D'Aiuto F. The association of periodontal inflammation and systemic health indicators: a machine learning approach. *J Clin Periodontol* 2025; 52: 1466-1477.
 36. Lamster IB, Pagan M. Periodontal disease and the metabolic syndrome. *Int Dent J* 2017; 67: 67-77.
 37. Hsu CY, Askar S, Alshkarchy SS, Nayak PP, Attabi KAL, Khan MA, et al. AI-driven multi-omics integration in precision oncology: bridging the data deluge to clinical decisions. *Clin Exp Med* 2025; 26: 29.
 38. Wu Y, Xie L. AI-driven multi-omics integration for multi-scale predictive modeling of genotype-environment-phenotype relationships. *Comput Struct Biotechnol J* 2025; 27: 265-277.
 39. Naved N, Adnan S, Umer F. Development trend of artificial intelligence (AI) in dentistry: exploring FDA-cleared dental devices. *BMC Oral Health* 2025; 26: 11.
 40. Lu W, Yu X, Li Y, Cao Y, Chen Y, Hua F, et al. Artificial intelligence-related dental research: bibliometric and altmetric analysis. *Int Dent J* 2025; 75: 166-175.
 41. Zou Z, Guo L. Insights into history and trends of teaching and learning in stomatology education: bibliometric analysis. *JMIR Med Educ* 2025; 11: e66322.
 42. Luke AM, Rezallah NN. Accuracy of artificial intelligence in caries detection: a systematic review and meta-analysis. *Head Face Med* 2025; 21: 24.
 43. Kim SM, Praveen Z, Kim YH, Ko JH, Choi YS, Park JY, et al. Functional profiling of the oral microbiome reveals microbial and oncogenic signatures in never-smoking female patients with oral squamous cell carcinoma. *J Oral Microbiol* 2025; 17: 2594842.
 44. Lee YH, Lee JH, Auh QS, Lee S, Nixdorf D, Chaurasia A, et al. TMD diagnosis using a masked self-supervised tabular transformer. *J Dent Res* 2025; 24: 220345251376974.
 45. Gan Y, Guo J, Zhai J, Huang J. Application of artificial intelligence in education of prosthodontics and implant dentistry: a review. *Adv Med Educ Pract* 2026; 17: 573041.
 46. Simon BD, Ozyoruk KB, Gelikman DG, Harmon SA, Turkbey B. The future of multimodal artificial intelligence models for integrating imaging and clinical metadata: a narrative review. *Diagn Interv Radiol* 2025; 31: 303-312.
 47. Bayraktar Y, Ayan E. Diagnosis of interproximal caries lesions with deep convolutional neural network in digital bitewing radiographs. *Clin Oral Investig* 2022; 26: 623-632.

48. Soni A, Sethy PK, Dewangan AK, Nanthaamornphong A, Behera SK, Devi B, et al. Enhancing oral squamous cell carcinoma detection: a novel approach using improved EfficientNet architecture. *BMC Oral Health* 2024; 24: 601.
49. Chen IH, Lin CH, Lee MK, Chen TE, Lan TH, Chang CM, et al. Convolutional-neural-network-based radiographs evaluation assisting in early diagnosis of the periodontal bone loss via periapical radiograph. *J Dent Sci* 2024; 19: 550-559.
50. Erturk M, Öziç MÜ, Tassoker M. Deep convolutional neural network for automated staging of periodontal bone loss severity on bite-wing radiographs: an Eigen-CAM explainability mapping approach. *J Imaging Inform Med* 2025; 38: 556-575.
51. Tsoromokos N, Parinussa S, Claessen F, Moin DA, Loos BG. Estimation of alveolar bone loss in periodontitis using machine learning. *Int Dent J* 2022; 72: 621-627.
52. Fu WT, Zhu QK, Li N, Wang YQ, Deng SL, Chen HP, et al. Clinically oriented CBCT periapical lesion evaluation via 3D CNN algorithm. *J Dent Res* 2024; 103: 5-12.
53. Li CW, Lin SY, Chou HS, Chen TY, Chen YA, Liu SY, et al. Detection of dental apical lesions using CNNs on periapical radiograph. *Sensors (Basel)* 2021; 21: 7049.
54. Liu J, Liu X, Shao Y, Gao Y, Pan K, Jin C, et al. Periapical lesion detection in periapical radiographs using the latest convolutional neural network ConvNeXt and its integrated models. *Sci Rep* 2024; 14: 25429.
55. Deif MA, Attar H, Amer A, Elhaty IA, Khosravi MR, Solyman AA, et al. Diagnosis of oral squamous cell carcinoma using deep neural networks and binary particle swarm optimization on histopathological images: an AIoMT approach. *Comput Intell Neurosci* 2022; 2022: 6364102.
56. Albalawi E, Thakur A, Ramakrishna MT, Bhatia Khan S, SankaraNarayanan S, Almarri B, et al. Oral squamous cell carcinoma detection using EfficientNet on histopathological images. *Front Med (Lausanne)* 2024; 10: 1349336.
57. Nam Y, Kim DY, Kyung S, Seo J, Song JM, Kwon J, et al. Multimodal large language models in medical imaging: current state and future directions. *Korean J Radiol* 2025; 26: 900-923.
58. Daskalo C, Abu-Ashour W, Tshimula JM, Amoei M, Guadagno E, Poenaru D. Large language models for electronic health records in pediatric and surgical care: a systematic review. *J Pediatr Surg* (in press).
59. Alhazmi N, Alshehri A, BaHamam F, Philip M, Nadeem M, Khanagar S. Can large language models serve as reliable tools for information in dentistry? a systematic review. *Int Dent J* 2025; 75: 100835.
60. Kong M, Fok EH, Yiu CK. A scoping review of large language models in dental education: applications, challenges, and prospects. *Int Dent J* 2025; 75: 103854.
61. Gao S, Wang X, Xia Z, Zhang H, Yu J, Yang F. Artificial intelligence in dentistry: a narrative review of diagnostic and therapeutic applications. *Med Sci Monit* 2025; 31: e946676.
62. Hassan M, Kushniruk A, Borycki E. Barriers to and facilitators of artificial intelligence adoption in health care: scoping review. *JMIR Hum Factors* 2024; 11: e48633.
63. Osonuga A, Osonuga AA, Fidelis SC, Osonuga GC, Juckes J, Olawade DB. Bridging the digital divide: artificial intelligence as a catalyst for health equity in primary care settings. *Int J Med Inform* 2025; 204: 106051.
64. Cestonaro C, Delicati A, Marcante B, Caenazzo L, Tozzo P. Defining medical liability when artificial intelligence is applied on diagnostic algorithms: a systematic review. *Front Med (Lausanne)* 2023; 10: 1305756.
65. Korfiatis P, Kline TL, Meyer HM, Khalid S, Leiner T, Loufek BT, et al. Implementing artificial intelligence algorithms in the radiology workflow: challenges and considerations. *Mayo Clin Proc Digit Health* 2024; 3: 100188.