



갑상선결절 영상에서 인공지능의 적용

연세대학교 의과대학 영상의학과교실

곽진영

Application of AI in Thyroid Nodule Imaging

Jin Young Kwak

Department of Radiology, Severance Hospital, Research Institute of Radiological Science, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Thyroid nodules are highly prevalent in the general population, with ultrasonography (US) serving as the primary imaging modality for diagnosis. However, diagnostic accuracy is often limited by operator dependency and interobserver variability. Recent advancements in artificial intelligence (AI) have led to the development of computer-aided diagnosis (CAD) systems, such as AmCAD-UT (AmCad Biomed, Taipei, Taiwan) and S-Detect™ (Samsung Medison Co. Ltd., Seoul, Korea), which aim to support physicians in the interpretation of thyroid US images. This review evaluates the diagnostic performance of these AI tools compared to that of clinicians, and examines the effect of AI assistance on physician accuracy. Although AI generally performs less accurately than experienced radiologists, studies demonstrate that combining physician expertise with AI assistance can improve diagnostic performance. Furthermore, the review explores the potential of self-learning, using large annotated datasets, as complementary educational strategy for clinicians with limited access to traditional one-on-one training. Additionally, the article highlights the importance of appropriate clinical application of AI, cautioning against overreliance in cases where fundamental anatomical knowledge is essential. Finally, the role of AI-driven imaging biomarkers in predicting the prognosis and molecular features of thyroid cancer is discussed, underscoring AI's emerging potential in precision medicine.

Key Words: Thyroid neoplasms, Ultrasonography, Artificial intelligence, Computer-aided diagnosis, Biomarkers, Tumor

서론

갑상선결절은 일반 인구의 최대 68%에서 발견될 정도로 흔한 질환이며,¹⁾ 초음파검사는 그 진단과 평가에 있어 핵심적인 영상기법으로 자리잡고 있다. 그러나 초음파검사는 검사자의 경험과 기술에 크게 의존하여 영상을 얻는 과정에서 판독에 이르기까지 주관성이 강하고 판독자 변이가 높다.²⁻⁵⁾ 최근 의료 인공지능(artificial intelligence; AI)의 급속한 발전과 함께, 초음파 영상 분석 분야에서도 AI가 진단 보조 도구로 활용되고 있다.⁶⁻⁹⁾ 갑상선결절의

초음파 진단에서 활용되는 대표적인 AI 기반 보조 시스템은 AmCad BioMed (대만)에서 개발한 CAD (computer-aided diagnosis)인 AmCAD-UT (AmCad Biomed, Taipei, Taiwan)와 삼성메디슨이 개발한 S-Detect™ (Samsung Medison Co. Ltd., Seoul, Korea)가 있다. 본 종설에서는 갑상선결절 초음파 진단에서 가장 많이 사용되고 연구된 두 가지 상용화된 CADs를 이용한 진단 정확도 및 의사와의 비교 결과를 정리하고, AI를 임상에 적용할 경우 사용자의 주의사항에 대해 고찰하고자 한다.

Received August 16, 2025 / Accepted October 16, 2025

Correspondence: Jin Young Kwak, MD, PhD, Department of Radiology, Severance Hospital, Research Institute of Radiological Science, Yonsei University College of Medicine, 50-1 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

Tel: 82-2-2228-7400, Fax: 82-2-2227-8337, E-mail: docjin@yuhs.ac

Copyright © the Korean Thyroid Association.



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

갑상선결절의 초음파 진단에서 활용되는 대표적인 AI 기반 보조 시스템

AmCAD-UT와 S-Detect™은 공통적으로 진단 정확도 향상을 목표로 하지만, 기술적 구현 방식과 임상 적용 범위, 사용 환경에 있어 몇 가지 중요한 차이점을 가진다. AmCAD-UT는 독립형 소프트웨어로서, 의료용 디지털 영상 및 통신 표준(Digital Imaging and Communications in Medicine) 또는 일반 이미지 형식(BMP, JPEG 등)의 기존 초음파 영상을 사후 분석(post-processing)하는 방식으로 작동한다. 이를 통해 특정 장비에 구애받지 않고 광범위한 영상 데이터를 활용할 수 있다. 그렇지만 실시간 분석은 불가능하다. 반면, S-Detect™는 삼성메디슨의 초음파검사 장비에 통합된 실시간 분석 시스템으로, 검사 도중 의사에게 즉각적인 판단 지원을 제공한다. 그러나 삼성 장비에서만 사용 가능하다는 제한이 있다.

갑상선결절 초음파 영상에서 인공지능의 성적

AI와 의사의 갑상선결절 진단 정확도 비교

AI 기반 두 가지 CAD를 활용한 여러 연구에서는 대부분의 경우 의사의 진단 성적이 AI보다 우수했다(Table 1).¹⁰⁻¹⁹⁾ 그러나 일부 연구에서는 AI가 의사보다 더 나은 진단 성능을 보이기도 했으며,^{11,18)} 의사의 개인 역량이나 경험에 따라 AI보다 진단 성능이 높거나 낮은 경우가 있었다.^{14,17)}

인공지능 도움을 받았을 때 의사 단독과의 진단 성적 비교

앞서 살펴본 의사와 AI의 진단 성능 비교 결과는, AI가 아직 숙련된 임상치의 직관과 경험을 완전히 대체하기는 어렵다는 점을 보여준다. 그러나 실제 임상 현장에서 더 중요한 것은 AI 단독의 성능보다, 의사가 AI의 도움을 받을 때 진단 성능이 향상되는지 여부이다. 앞서 소개한 두 가지 CAD를 활용한 대부분의 연구에서, 의사가 CAD의 도움을 받을 경우 진단 정확도가 향상되는 것으로 나타났다.^{11,17,20,21)} 그러나 일부 연구에서는 CAD 사용이 오히려 진단 성적을 저하시킨 사례도 보고된 바 있다.²²⁾ 따라서 임상 현장에서 AI를 효율적으로 활용할 수 있는 최적의 환경을 조성하려는 노력이 병행되어야 CAD의 진정한 가치가 발휘될 수 있으며 도입 후에도 지속적으로 CAD 성능에 대한 모니터링이 필요하겠다.

인공지능의 임상 적용에 대한 고찰

초음파검사는 시술자 의존성(operator dependency)이 강한 검사로, 검사자의 숙련도, 경험, 기술에 따라 검사 결과의 정확성과 신뢰도가 크게 달라지는 특성을 지닌다. 이러한 시술자 의존성은 병변의 영상을 실시간으로 획득하는 과정과 이를 판독하는 과정 전반에서 나타난다. 검사자가 탐촉자를 직접 조작하며 병변을 찾아야 하기 때문에, 검사자의 숙련도에 따라 병변을 놓칠 가능성이 존재하며, 동일한 병변이라 하더라도 검사자의 판단이나 조작 방식에 따라 획득되는 영상이 상이할 수 있다. 또한, 동일한 영상을 보더라도 검사자마다 해석에 차이가 발생할 수 있어 진단의 일관성이 저하될 수 있다. 이러한 초음파검사의 한계를 보완하기 위해서는 지속적인

Table 1. Comparison of diagnostic performance between AI and doctors

Author	No. of nodules	AI tool	AI	Doctor
Reverter et al. ¹⁰⁾	300	AmCAD-UT	0.72	0.88
Lu et al. ¹¹⁾	234	AmCAD-UT	0.916	0.653
Han et al. ¹²⁾	454	S-Detect™	49.6	58.8
Kim et al. ¹³⁾	218	S-Detect™	73.4	91.7
Wei et al. ¹⁴⁾	204	S-Detect™	77	63.7-84.8
Park et al. ¹⁵⁾	286	S-Detect™	75.9	79.4 (IE) & 90.8 (E)
Xia et al. ¹⁶⁾	180	S-Detect™	67.2	82.2
Chung et al. ¹⁷⁾	165	S-Detect™	88.5	83 (R and F) & 95.8 (E)
Szczepanek-Parulska et al. ¹⁸⁾	133	S-Detect™	85	75.9 (E)
Yoo et al. ¹⁹⁾	117	S-Detect™	84.6	90.6

AI: artificial intelligence, E: experienced, F: fellow, IE: inexperienced, R: resident

교육과 학습을 통한 검사자의 역량 강화가 필요하다. CAD의 도입을 통해 검사자 간 판독 차이를 줄일 수는 있지만, 이는 주로 획득된 영상을 해석하는 단계에 국한되며, 영상 획득 과정에서 발생하는 검사자 간 차이를 보완할 수 있는 CAD는 현재 존재하지 않는다.

현재 다양한 CAD가 개발되고 있으며, 앞으로 더 많은 AI 기반 도구들이 사용될 가능성이 높다. 그러나 이러한 도구들을 활용하더라도 비전문가가 전문가 수준의 진단 역량을 갖추는 것은 여전히 어려운 일이다. CAD의 활용이 증가하는 시대에 AI를 효과적으로 활용하기 위해서는 사용자 본인의 학습과 이해가 필수적이다. 지금까지 널리 받아들여지는 전통적 학습 방식은 경험 많은 의사로부터 개별적으로 지도를 받는 일대일 방식으로, 이는 효과적인 방법으로 알려져 있다.⁴⁾ 이 학습에서 가장 중요한 요소는 교육자의 임상 경험과 교육에 대한 노력이다. 일반적으로 많은 임상 경험은 더 나은 진단 능력과 연관되지만, 반드시 그렇다고 볼 수는 없으며, 교육자가 시간을 내어 지속적으로 교육에 참여하는 데 현실적인 제약이 따르는 경우도 많다. 이에 따라 저자는 충분한 일대일 교육이 어려운 환경에서 피교육자의 자발적인 학습(self-learning)이 진단 성적 향상에 기여할 수 있는지를 평가하고자 하였다. 특히 AI 모델이 대규모의 양질의 데이터를 통해 학습 성능을 향상시키는 점에 착안하여, 동일한 방식이 사람의 학습에도 효과가 있을지를 검증하고자 하였다.^{7,23,24)} 이를 위해 본원에서 개발한 CAD 알고리즘인 SEveRance Artificial intelligence (SERA) 제작에 사용된 약 13,000개의 초음파 영상을 기반으로 세 가지 형태의 학습 연구를 진행하였다. 첫 번째 연구에서는 영상에 대한 최소한의 정보(암 여부만 제공)를 바탕으로 6명의 대학생이 약 13,000개의 영상을 학습하였다.⁷⁾ 사람의 학습은 피로의 영향을 받을 수 있기에, 하루에 약 3,000개 또는 4,560개의 영상을 학습하고 이를 총 세 차례 반복하였으며, 평균 약 30시간이 소요되었다. 그 결과, 반복 학습을 통해 진단 성적이 향상되는 경향이

확인되었다. 다만, 해당 연구에 참여한 학생들은 학습에 대한 직접적인 보상이 없는 상황이었기에, 이로 인해 진단 성적 향상에 한계가 있었을 가능성도 있다. 두 번째 및 세 번째 연구에서는 학습 동기가 있는 전공의를 대상으로 동일한 학습 데이터를 활용하였다.^{23,24)} 학생들과 달리 충분한 시간을 확보하기 어려운 점을 고려하여, 이전 연구에서 진단 성적 향상 효과가 가장 컸던 3,000개의 영상으로 구성된 하나의 데이터 세트를 사용하였다 (Table 2).²⁵⁾ 초음파검사에 일부 경험이 있는 영상의학과 전공의와 경험이 거의 없는 타과 전공의로 나누어 실험을 진행하였다. 비경험자 집단에서는 한 번의 self-learning으로는 성적 향상이 나타나지 않았으나, 세 차례 반복 학습 후 유의미한 진단 성적 향상이 관찰되었다. 반면, 일부 초음파검사 경험이 있는 영상의학과 전공의는 한 번의 self-learning이든 전통적인 일대일 교육이든 비슷한 정도의 진단 성적 향상이 있었다. 학습 시간 측면에서, 영상 한 장을 학습하는 데 약 0.5초가 소요된다고 가정할 때, 3,000개 영상의 학습에는 약 25분, 세 차례 반복 학습 시 약 1시간 30분이 소요되어 비교적 짧은 시간 투자로도 효과적인 학습이 가능함을 시사한다. 전통적 일대일 학습에서는 결절의 진단뿐 아니라 실시간 초음파검사의 기술이나 영상 획득 과정 중 정상 주변 구조물이나 병변에 관한 폭 넓은 지식을 습득할 수 있으므로 자발적 self-learning 방법이 전통적인 일대일 교육을 대체할 수는 없다. 그러나, 교육 여건이 제한된 환경에서는 갑상선 결절 진단에 국한되어서는 피교육자의 진단 역량 향상을 도울 수 있는 보조적 학습 수단으로 활용될 수 있음을 보여주었다.

인공지능을 임상에서 적용할 때 주의사항

갑상선만을 대상으로 초음파검사를 수행한다고 가정할 때, 초음파검사 해부학 자체는 비교적 복잡하지 않다.

Table 2. Comparison of diagnostic accuracy before and after learning, according to the learning method

Learning method	Participating residents	Number of images	Repetitions	Mode	Before learning AUC	After learning AUC	p value
Self-learning	8 non-radiology	3,000	1	Online	0.633	0.647	>0.05
Self-learning	18 radiology	3,000	1	Online	0.700	0.743	<0.001
Self-learning	21 IM	3,000	3	Offline	0.578	0.709	0.016
One-on-one education with an expert radiologist	8 radiology	100-150	-	Offline	0.701	0.735	0.0

AUC: area under the curve, IM: internal medicine

그러나 관찰되는 병변이 실제 갑상선결절인지, 주변의 정상 해부학적 구조물인지, 혹은 갑상선 외부에서 기인한 병변인지를 구분하지 않고서는 정확한 진단을 내리기 어렵다. 따라서 검사자는 갑상선뿐만 아니라 경부의 주변 정상 구조물에 대한 초음파검사 해부지식을 가지고 있어야 올바른 진단이 가능하다.

현재까지 개발된 갑상선결절 진단용 AI는 해당 병변이 '갑상선결절'이라는 전제 하에 진단 결과를 제공한다. 그러나 병변이 실제로는 갑상선결절이 아닐 수 있으며, 경우에 따라 주변의 정상 구조물이거나 갑상선 외부에서 발생한 병변일 수도 있다. 저자가 아는 한, 이러한 경우까지 실시간 초음파검사 상에서 구분해줄 수 있는 CAD는 아직 존재하지 않는다. 이러한 상황에서 사용자가 기본적인 초음파검사 해부학 지식 없이 AI의 결과만을 맹신하고, 예측된 악성 확률이 높다는 이유로 침습적 검사를 시행한다면, 이는 환자에게 불필요한 해를 끼칠 수 있으므로 주의가 필요하다.²⁶⁾ 병변이 갑상선결절이 아닌 경우, CAD의 판단은 의미가 없으며, 병변이 갑상선결절인지 여부는 실시간 초음파검사를 시행하는 검사자의 판단에 달려 있다.

갑상선암 예후 예측 인자로서 인공지능의 가능성

갑상선암의 예후 예측 인자로는 임상적 인자들 외에도, 분자생물학적 또는 영상 기반 바이오마커에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.²⁷⁻³²⁾ 분자 분석은 일반적으로 단일 부위의 조직을 대상으로 수행되며, 이로 인해 샘플링 오류가 발생할 수 있고, 종양 이질성을 정확하게 반영하지 못하는 한계가 있다. 반면 영상 기반 바이오마커는 결절 전체를 반영할 수 있어 분자 바이오마커보다 종양 특성을 더 잘 대표할 수 있을 가능성이 높다.³³⁾

영상 바이오마커 개발은 종양의 표현형이 예후와 관련된다는 가정에서 출발한다. 이 주제는 특히 한국 연구자들 사이에서 활발히 연구되어 왔다.³⁴⁻³⁷⁾ 여러 연구에서 의심스러운 초음파 소견을 보이는 갑상선암이 더 나쁜 예후를 가진다는 결과가 보고되었으며, 이러한 분석은 대부분 기존의 육안 기반 초음파 판독을 통해 수행되었다. 그러나 육안 판독 방식은 객관성과 재현성이 부족하다는 치명적인 한계를 지닌다. 객관적인 라디오믹스 특징이나 AI를 영상 바이오마커로 활용하여 갑상선암 환자의 림프절 전이, 재발, 또는 분자적 특성과 연관성을 보여주었다.²⁸⁻³⁰⁾

오랜 시간 동안 갑상선암에서 관찰되는 특징적인 초

음파 소견이 어떤 분자생물학적 기전에 의해 나타나는지에 대한 의문이 제기되어 왔다. 이에 최근 저자가 참여한 연구팀은 초음파 소견과 분자생물학적 기전 간의 연관성을 분석하였으며, 그 결과 개별적인 의심 초음파 특징들과 AI 분석값이 면역 반응 및 상피-간엽 전이 (epithelial to mesenchymal transition; EMT) 관련 유전자들의 발현 증가와 일관된 연관성을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 영상 바이오마커가 갑상선유두암에서 분자생물학적 특성 및 종양 미세환경을 반영할 수 있음을 입증하였다.³⁸⁾ 또한, 최근 중국 연구팀에서는 딥러닝 기반 라디오믹스 기법을 활용한 deep learning-based radiomics label 지표를 개발하여, 종양 표현형 및 다양한 예후 인자들과의 연관성을 예측한 결과를 보고하였다.²⁷⁾ 이러한 연구 결과들은 향후 영상 바이오마커를 활용한 다양한 예후 예측 및 분자 진단 관련 연구의 가능성을 보여주며, 보다 객관적인 분석을 위한 인공지능의 역할이 점점 더 중요해질 것으로 기대된다.

중심 단어: 갑상선종양, 초음파, 인공지능, 컴퓨터보조진단, 생체표지자.

Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (2021R1A2C2007492).

Conflicts of Interest

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

Orcid

Jin Young Kwak: <https://orcid.org/0000-0002-6212-1495>

References

- 1) Guth S, Theune U, Aberle J, Galach A, Bamberger CM. Very high prevalence of thyroid nodules detected by high frequency (13 MHz) ultrasound examination. *Eur J Clin Invest* 2009; 39(8):699-706.
- 2) Choi SH, Kim EK, Kwak JY, Kim MJ, Son EJ. Interobserver and intraobserver variations in ultrasound assessment of thyroid nodules. *Thyroid* 2010;20(2):167-72.
- 3) Park SH, Kim SJ, Kim EK, Kim MJ, Son EJ, Kwak JY.

- Interobserver agreement in assessing the sonographic and elastographic features of malignant thyroid nodules. AJR Am J Roentgenol* 2009;193(5):W416-23.
- 4) Kim HG, Kwak JY, Kim EK, Choi SH, Moon HJ. *Man to man training: can it help improve the diagnostic performances and interobserver variabilities of thyroid ultrasonography in residents? Eur J Radiol* 2012;81(3):e352-6.
 - 5) Hoang JK, Middleton WD, Farjat AE, Teeffey SA, Abinanti N, Boschini FJ, et al. *Interobserver variability of sonographic features used in the American College of Radiology Thyroid Imaging Reporting and Data System. AJR Am J Roentgenol* 2018;211(1):162-7.
 - 6) Koh J, Lee E, Han K, Kim EK, Son EJ, Sohn YM, et al. *Diagnosis of thyroid nodules on ultrasonography by a deep convolutional neural network. Sci Rep* 2020;10(1):15245.
 - 7) Yoon J, Lee E, Lee HS, Cho S, Son J, Kwon H, et al. *Learnability of thyroid nodule assessment on ultrasonography: using a big data set. Ultrasound Med Biol* 2023;49(12):2581-9.
 - 8) Ha EJ, Lee JH, Lee DH, Moon J, Lee H, Kim YN, et al. *Artificial intelligence model assisting thyroid nodule diagnosis and management: a multicenter diagnostic study. J Clin Endocrinol Metab* 2024;109(2):527-35.
 - 9) He LT, Chen FJ, Zhou DZ, Zhang YX, Li YS, Tang MX, et al. *A comparison of the performances of artificial intelligence system and radiologists in the ultrasound diagnosis of thyroid nodules. Curr Med Imaging* 2022;18(13):1369-77.
 - 10) Reverter JL, Vázquez F, Puig-Domingo M. *Diagnostic performance evaluation of a computer-assisted imaging analysis system for ultrasound risk stratification of thyroid nodules. AJR Am J Roentgenol* 2019;213(1):169-74.
 - 11) Lu Y, Shi XQ, Zhao X, Song D, Li J. *Value of computer software for assisting sonographers in the diagnosis of Thyroid Imaging Reporting and Data System grade 3 and 4 thyroid space-occupying lesions. J Ultrasound Med* 2019;38(12):3291-300.
 - 12) Han M, Ha EJ, Park JH. *Computer-aided diagnostic system for thyroid nodules on ultrasonography: diagnostic performance based on the Thyroid Imaging Reporting and Data System classification and dichotomous outcomes. AJNR Am J Neuroradiol* 2021;42(3):559-65.
 - 13) Kim HL, Ha EJ, Han M. *Real-world performance of computer-aided diagnosis system for thyroid nodules using ultrasonography. Ultrasound Med Biol* 2019;45(10):2672-8.
 - 14) Wei Q, Zeng SE, Wang LP, Yan YJ, Wang T, Xu JW, et al. *The value of S-Detect in improving the diagnostic performance of radiologists for the differential diagnosis of thyroid nodules. Med Ultrason* 2020;22(4):415-23.
 - 15) Park VY, Han K, Seong YK, Park MH, Kim EK, Moon HJ, et al. *Diagnosis of thyroid nodules: performance of a deep learning convolutional neural network model vs. radiologists. Sci Rep* 2019;9(1):17843.
 - 16) Xia S, Yao J, Zhou W, Dong Y, Xu S, Zhou J, et al. *A computer-aided diagnosing system in the evaluation of thyroid nodules-experience in a specialized thyroid center. World J Surg Oncol* 2019;17(1):210.
 - 17) Chung SR, Baek JH, Lee MK, Ahn Y, Choi YJ, Sung TY, et al. *Computer-aided diagnosis system for the evaluation of thyroid nodules on ultrasonography: prospective non-inferiority study according to the experience level of radiologists. Korean J Radiol* 2020;21(3):369-76.
 - 18) Szczepanek-Parulska E, Wolinski K, Dobruch-Sobczak K, Antosik P, Ostalowska A, Krauze A, et al. *S-Detect software vs. EU-TIRADS classification: a dual-center validation of diagnostic performance in differentiation of thyroid nodules. J Clin Med* 2020;9(8):2495.
 - 19) Yoo YJ, Ha EJ, Cho YJ, Kim HL, Han M, Kang SY. *Computer-aided diagnosis of thyroid nodules via ultrasonography: initial clinical experience. Korean J Radiol* 2018;19(4):665-72.
 - 20) Wu MH, Chen KY, Shih SR, Ho MC, Tai HC, Chang KJ, et al. *Multi-reader multi-case study for performance evaluation of high-risk thyroid ultrasound with computer-aided detection. Cancers (Basel)* 2020;12(2):373.
 - 21) Barczyński M, Stopa-Barczyńska M, Wojtczak B, Czarniecka A, Konturek A. *Clinical validation of S-Detect(TM) mode in semi-automated ultrasound classification of thyroid lesions in surgical office. Gland Surg* 2020;9(Suppl 2):S77-85.
 - 22) Jeong EY, Kim HL, Ha EJ, Park SY, Cho YJ, Han M. *Computer-aided diagnosis system for thyroid nodules on ultrasonography: diagnostic performance and reproducibility based on the experience level of operators. Eur Radiol* 2019;29(4):1978-85.
 - 23) Lee SE, Kim HJ, Jung HK, Jung JH, Jeon JH, Lee JH, et al. *Improving the diagnostic performance of inexperienced readers for thyroid nodules through digital self-learning and artificial intelligence assistance. Front Endocrinol (Lausanne)* 2024;15:1372397.
 - 24) Kim D, Hwang YA, Kim Y, Lee HS, Lee E, Lee H, et al. *Enhancing diagnostic accuracy of thyroid nodules: integrating self-learning and artificial intelligence in clinical training. Endocrine* 2025;88(3):766-75.
 - 25) *Thyroid nodule_Training set 1, 갑상선 결절*. YouTube. Published December 11, 2019. Accessed February 1, 2023. <https://youtu.be/HhLw37d-Lxk>
 - 26) Shin I, Kwak JY. *Author reply: factors to consider when interpreting the diagnostic performance of fine-needle aspiration and core-needle biopsy in specific patient population. Yonsei Med J* 2021;62(4):376-7.
 - 27) Li Q, Zhang W, Liao T, Gao Y, Zhang Y, Jin A, et al. *An artificial intelligence-driven preoperative radiomic subtype for predicting the prognosis and treatment response of patients with papillary thyroid carcinoma. Clin Cancer Res* 2025;31(1):139-50.
 - 28) Park VY, Han K, Kim HJ, Lee E, Youk JH, Kim EK, et al. *Radiomics signature for prediction of lateral lymph node metastasis in conventional papillary thyroid carcinoma. PLoS One* 2020;15(1):e0227315.
 - 29) Park VY, Han K, Lee E, Kim EK, Moon HJ, Yoon JH, et al. *Association between radiomics signature and disease-free survival in conventional papillary thyroid carcinoma. Sci Rep* 2019;9(1):4501.
 - 30) Yoon J, Lee E, Koo JS, Yoon JH, Nam KH, Lee J, et al. *Artificial intelligence to predict the BRAFV600E mutation in patients with thyroid cancer. PLoS One* 2020;15(11):e0242806.
 - 31) Yoo SK, Song YS, Lee EK, Hwang J, Kim HH, Jung G, et al. *Integrative analysis of genomic and transcriptomic characteristics associated with progression of aggressive thyroid*

- cancer. *Nat Commun* 2019;10(1):2764.
- 32) Moon S, Song YS, Kim YA, Lim JA, Cho SW, Moon JH, et al. Effects of coexistent BRAF(V600E) and TERT promoter mutations on poor clinical outcomes in papillary thyroid cancer: a meta-analysis. *Thyroid* 2017;27(5):651-60.
- 33) Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data. *Radiology* 2016;278(2):563-77.
- 34) Kwak JY, Kim EK, Kim MJ, Son EJ, Chung WY, Park CS, et al. Papillary microcarcinoma of the thyroid: predicting factors of lateral neck node metastasis. *Ann Surg Oncol* 2009;16(5):1348-55.
- 35) Kim SY, Kwak JY, Kim EK, Yoon JH, Moon HJ. Association of preoperative US features and recurrence in patients with classic papillary thyroid carcinoma. *Radiology* 2015;277(2):574-83.
- 36) Nam SY, Shin JH, Han BK, Ko EY, Ko ES, Hahn SY, et al. Preoperative ultrasonographic features of papillary thyroid carcinoma predict biological behavior. *J Clin Endocrinol Metab* 2013;98(4):1476-82.
- 37) Hahn SY, Shin JH, Oh YL, Kim TH, Lim Y, Choi JS. Role of ultrasound in predicting tumor invasiveness in follicular variant of papillary thyroid carcinoma. *Thyroid* 2017;27(9):1177-84.
- 38) Lee J, Yoon JH, Lee E, Lee HY, Jeong S, Park S, et al. Immune response and mesenchymal transition of papillary thyroid carcinoma reflected in ultrasonography features assessed by radiologists and deep learning. *J Adv Res* 2024;62:219-28.