

<원저>

갑상샘 스캔 정량분석을 통한 갑상샘 섭취율 동시계측법 연구

김정수¹⁾·김근우²⁾¹⁾동남보건대학교 방사선학과·²⁾국립경찰병원 핵의학과

Study of Simultaneous Counting of Thyroid Uptake with Quantitative Analysis of Thyroid Scans

Jung-Soo Kim¹⁾·Geun-Woo Kim²⁾¹⁾Department of Radiological Science, Dongnam Health University²⁾Department of Nuclear Medicine, National Police Hospital

Abstract Thyroid uptake measurements can be subject to measurement errors due to the scoping and positioning of the thyroid gland. To compensate for these limitations, the clinical utility of the thyroid simultaneous counting method as an alternative to thyroid uptake measurement was analyzed and evaluated experimentally through quantitative analysis of images acquired after thyroid scanning. Experimental data were obtained using a Gamma camera (GE infinia), a thyroid uptake system (KOROID 1), and a thyroid neck phantom. Based on the thyroid uptake rate of 1-5% according to the protocol of thyroid scan test ($^{99m}\text{TcO}_4^-$, 370 MBq) in normal results, $^{99m}\text{TcO}_4^-$ was set in the range of 3.7-18.5 MBq (Matrix: 256×256, Scan time: 1 min, collimator: pin hole, phantom-collimator distances: 7 cm). The acquired images were corrected for the attenuation of isotopes due to the set-up time and half-life by applying the Auto Region of interest (ROI) drawing system, and the significance of the experimental results was evaluated by Multiple linear regression analysis (SPSS, ver. 22, IBM). The thyroid uptake rate showed a significant correlation between the dose and the measured counts when using the thyroid uptake system equipment. Meanwhile, the quantitative analysis counts of phantom images using Gamma camera also showed a significant correlation. Thus confirmed that the correlation between these two experiments was statistically significant ($P<0.05$). The simultaneous counting protocol, which indirectly measures thyroid uptake from thyroid scans, is likely to be clinically relevant if complemented by additional studies with different variables in patients with thyroid disease.

Key Words: Thyroid Scan, Thyroid Uptake, Region of Interest, Quantitative Analysis, $^{99m}\text{TcO}_4^-$

중심 단어: 갑상샘스캔, 갑상샘섭취율, 관심영역, 정량분석, $^{99m}\text{TcO}_4^-$

I. 서론

갑상샘 질환을 진단하기 위해 시행하는 주요 핵의학 검사로 갑상샘 스캔과 갑상샘 섭취율 측정이 있다[1]. 갑상샘 스캔은 갑상샘의 해부학적 정보와 생리학적 기능을 정성적, 정량적으로 평가하는 검사로 갑상샘의 위치, 크기, 기능 평

가 및 결절 확인이 가능하며, 갑상샘 치료를 위한 사전검사로 갑상샘을 평가하는데 있어서 중요한 검사이다[2-4]. 갑상샘 스캔은 환자에게 방사성 추적자로 방사성 요오드인 ^{131}I (Iodine)를 경구투여하거나 과산화테크네튬 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ (Pertechnetate)를 정맥주사하는데, 방사성 추적자들은 특정 기관에만 활동적으로 축적되는 특이성을 갖고 있으므로,

This paper is supported by the research fund of Dongnam Health University.

Corresponding author: Geun-Woo Kim, Department of Nuclear Medicine, National Police Hospital, 123, Songyi-ro, Songpa-gu, Seoul-si, 05715, Republic of Korea / Tel: +82-2-3400-1233 / E-mail: kgw1730@police.go.kr

Received 25 September 2023; Revised 06 October 2023; Accepted 12 October 2023

Copyright ©2023 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

갑상샘에 선택적으로 섭취되어 일정 시간 동안 갑상샘에서 방출되는 감마선의 카운트는 곧 갑상샘의 대사기능의 활성도를 반영하는 지표로 이용할 수 있다[5-7]. 갑상샘에서 방출되는 감마선을 수집하기 위해 감마카메라에 바늘구멍형 조준기(Pin-Hole Collimator)를 장착하여 갑상샘 스캔을 시행하면 감마카메라의 내인성 공간분해능보다 우수한 고분해능 갑상샘 영상을 획득할 수 있다[8]. 이를 통해 갑상샘 부위의 전면 영상을 획득할 수 있으며, 수학적으로 재구성하여 단면 영상을 얻기도 한다[9, 10]. 한편 갑상샘 섭취율 측정에는 임상적으로 갑상샘 스캔의 보조수단으로서 시행되는데 섭취율 측정기(Uptake System)를 이용하여 갑상샘이 방사성 추적자를 섭취하는 정도를 측정하는 검사이다[11-13]. 이를 통해 갑상샘의 섭취 기능을 백분율로 환산하여 정량적으로 평가할 수 있다[14]. 갑상샘의 기능이 정상이라면 방사성 추적자는 좌-우 갑상샘에 균등한 방사능으로 나타나지만, 갑상샘 기능 저하증과 갑상샘 기능 항진증의 경우에는 갑상샘 기능 이상으로 갑상샘 섭취율의 결과가 서로 다르게 나타난다[15-17]. 갑상샘 기능 저하증은 갑상샘이 충분한 양의 갑상샘 호르몬을 생성하지 못하는 질환으로 갑상샘이 방사성 추적자를 섭취하는 능력이 감소하기 때문에 정상 갑상샘에 비해 섭취율이 적은 반면 갑상샘 기능 항진증은 상대적으로 섭취율이 높게 나타나며 이에 따라 여러 질환을 동반하게 된다[18-20]. 이와 같이 갑상샘의 기능이 비정상적인 경우 갑상샘 스캔과 갑상샘 섭취율 측정 결과를 비교 분석함으로써 치료 방향을 결정할 수 있으며, 또한 갑상샘 호르몬 합성 장애나 갑상샘염을 평가하여 방사성 요오드 치료용량을 계산하기 위해 시행되기도 한다[21-23]. 이와 같은 두가지의 핵의학 갑상샘 진단 검사는 현재 다수의 의료기관에서 ¹³¹I 보다 ^{99m}TcO₄⁻를 이용하여 시행하고 있는데, 그 이유는 ^{99m}Tc이 물리적 반감기가 6시간으로 8일인 ¹³¹I에 비해 환자의 방사선 피폭선량을 감소시킬 수 있고, 요오드 제한식과 같은 환자의 전처치가 필요없으며, 검사 소요시간도 비교적 짧기 때문이다[24-26].

앞서 기술한 바와 같이 갑상샘 스캔과 갑상샘 섭취율 측정은 서로 다른 정보를 제공하여 갑상샘 진단의 특이도 및 예민도를 개선할 목적으로 하루에 모두 시행하고 있다. 그럼에도 불구하고 ^{99m}TcO₄⁻를 이용한 갑상샘 진단 검사는 갑상샘 스캔과 갑상샘 섭취율 측정 모두 환자에게 정맥주사를 해야 하고 총 검사 소요시간이 증가하게되므로 환자의 만족도가 저하될 수 있다[27]. 이와 같은 갑상샘 진단 검사의 제한점을 극복하기 위해 ^{99m}TcO₄⁻를 한번 정맥주사하여 갑상샘 스캔 검사만 시행한 후, 획득한 영상에 관심영역을 설정하여 정량분석한 결과를 통해 갑상샘 섭취율 측정결과를 예

측할 수 있는 갑상샘 동시계수법의 임상적 가능성을 팬텀 실험을 통해 평가하였다. 두 가지 갑상샘 진단검사 결과의 상관관계를 분석하여 유의미한 결과가 도출된다면 임상에서 갑상샘 스캔만으로 갑상샘 섭취율 측정 검사를 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 대상 및 방법

1. 방사성 추적자 및 팬텀

실험에 사용한 방사성 추적자는 ^{99m}TcO₄⁻으로 검량기(CRC-15R, Capintec, US)를 이용하여 투여 방사능을 측정하였다. ^{99m}TcO₄⁻ 18.5 MBq을 환자에게 정맥주사 후 정상 범위(1-5%) 내에 섭취되었을 때를 가정하여, ^{99m}TcO₄⁻을 185 kBq, 370 kBq, 555 kBq, 740 kBq, 925 kBq의 방사능으로 구분하여 실제 측정된 방사능으로 실험하였다[28]. ^{99m}TcO₄⁻은 6시간의 물리적 반감기에 의해 시간 경과에 따라 방사능의 감쇠가 발생하므로 실험의 정확도와 정량성을 위해 방사능 측정 시간에 따라 보정하였다(Eq. 1)[29]. ^{99m}TcO₄⁻을 주사기로 분주하여 Neck 팬텀(Thyroid Uptake Neck Phantom 043-365, NucleMed, BE)을 이용하여 갑상샘 섭취율을 측정하였으며, ^{99m}TcO₄⁻을 갑상샘 팬텀(Thyroid Phantom 128-340, NucleMed, BE)에 증류수에 희석하여 투여한 후, 갑상샘을 스캔하였다.

$$N = N_0 (1/2)^{t/T} \tag{Eq. 1}$$

N : 현재 방사능
 N₀ : 초기 방사능
 t : 방사성동위원소의 반감기
 T : 소요 시간

2. 갑상샘 섭취율 측정

^{99m}TcO₄⁻을 185 kBq, 370 kBq, 555 kBq, 740 kBq, 925 kBq의 방사능으로 구분하여 실제 측정된 방사능은 각각 203.5 kBq, 370.0 kBq, 573.5 kBq, 777.0 kBq, 943.5 kBq이었다. ^{99m}TcO₄⁻을 주사기로 분주하여 Neck 팬텀에 위치시킨 후 1분 동안 갑상샘 섭취율 측정기(Koroid, Seyoung NDC, Kor)를 이용하여 감마선의 카운트를 측정하였으며, 실험을 통해 ^{99m}TcO₄⁻의 방사능에 따른 감마선 카운트의 선형성을 분석하였다(Table 1, Fig. 1).

Table 1. Experimental conditions of thyroid uptake measurement

Parameter	Experimental conditions
Count time	1 min
Energy	140 keV ± 10
Detector - neck phantom distance	25 cm



Fig. 1. Neck Phantom is designed to simulate a patient's neck. The phantom is constructed of lucite. It has a two part insert that allows counting from a bottle, vial or capsule. A capsule holder is supplied to enable the user to count capsules directly. The phantom's cylinder and carrier have scribelines for accurate alignment. A flat surface on the cylinder allows either vertical or horizontal positioning.

3. 갑상샘 스캔

$^{99m}\text{TcO}_4^-$ 을 3.7 MBq, 7.4 MBq, 11.1 MBq, 14.8 MBq, 18.5 MBq의 방사능으로 구분하여 실제 측정된 방사능은 각각 3.774 MBq, 7.548 MBq, 11.396 MBq, 15.096 MBq, 18.944 MBq이었다. $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 을 주사기로 분주하여 갑상샘 팬텀에 투여한 후 감마카메라(Infinia, GE, US)를 이용하여 갑상샘 영상을 획득하였다[30]. 측정의 재현성을 위해 획득한 영상에 자동 관심영역(Region of Interest, ROI) 설정 기능을 이용하여 감마선의 카운트를 측정하였으며, 실험을 통해 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 의 방사능에 따른 감마선 카운트의 선형성을 분석하였다(Table 2, Fig. 2, 3).

Table 2. Experimental conditions of thyroid scan

Parameter	Experimental conditions
Count time	1 min
Matrix size	256 × 256
Zoom	1.0
Collimator	Low energy, Pin-hole
Energy	140 keV ± 10
Detector - neck phantom distance	25 cm



Fig. 2. Thyroid Phantom permits the precise duplication of clinical conditions by simulating thyroid scans in the 30 to 40 gram range.



Fig. 3. Thyroid scan (pin-hole collimator) uses small amounts of radioactive materials called radiotracers, a special camera and a computer to provide information about your thyroid's size, shape, position and function that is often unattainable using other imaging procedures.

4. 자료 및 통계분석

임상에서 시행하는 갑상샘 섭취율은 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 를 이용할 때 통상적으로 11.1-18.5 MBq의 미량의 방사능을 환자에게 정맥주사하여 측정한다. 이것은 검사의 민감도와 선형성의 진단성능을 위한 것으로 갑상샘 스캔을 시행하기에는 낮은 방사능으로 갑상샘 영상의 질과 검사 소요 시간 등을 고려하였을 때 문제가 될 수 있다. 따라서 환자에게 185-370 MBq의 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 를 재투여한 후 일정 시간 후에 갑상샘을 스캔하고 있다. 이번 연구는 갑상샘 스캔의 정량분석 결과를 통해 갑상샘 섭취율 측정을 대체할 수 있는 가능성을 평가하는 것으로 5회의 갑상샘 섭취율 측정 결과와 갑상샘 스캔 정량분석 결과를 도출하였다. 또한 갑상샘 섭취율 측정

및 갑상샘 스캔 실험을 통해 획득한 카운트 결과의 상관관계를 다중 회귀분석(SPSS, ver. 22, IBM)을 통해 다중상관계수와 유의확률($P(0.05)$)을 기준으로 평가하였다[31, 32].

III. 결과

1. 갑상샘 섭취율 측정 결과

$^{99m}\text{TcO}_4^-$ 을 5회 실제 측정된 방사능은 각각 203.5 kBq, 370.0 kBq, 573.5 kBq, 777.0 kBq, 943.5 kBq이었으며, 이에 따른 시간 보정 방사능은 각각 196.56 kBq, 386.83 kBq, 547.78 kBq, 748.66 kBq, 925.46 kBq이었다. 각각의 방사능에 따라 갑상샘 섭취율 측정기로 측정된 카운트는 17,637에서 84,715까지 나타났다. 백그라운드 카운트는 B-filter로 측정하였을 때 모두 100으로 동일하였으며, 백그라운드 카운트를 보정한 실제 카운트는 17,537에서 84,615로 나타났다. 한편 5회의 갑상샘 섭취율 측정실험 최종 카운트는 각각 89.22, 89.57, 90.43, 90.89, 91.43으로 산출되었다(Table 3).

Table 3. Results of thyroid uptake measurement

Activity (kBq)	185	370	555	740	925
Real activity (kBq)	203.5	370.0	573.5	777.0	943.5
Correction activity (kBq)	196.56	386.83	547.78	748.66	925.46
Counts	17,637	34,748	49,636	68,146	84,715
Back ground counts	100	100	100	100	100
Real counts	17,537	34,648	49,536	68,046	84,615
Final counts [†] (counts/kBq)	89.22	89.57	90.43	90.89	91.43

[†]: $Final\ counts = Real\ counts / Time\ correction\ activity$

2. 갑상샘 스캔 결과

$^{99m}\text{TcO}_4^-$ 을 5회 실제 측정된 방사능은 각각 3,774 MBq, 7,548 MBq, 11,396 MBq, 15,096 MBq, 18,944 MBq이었으며, 이에 따른 시간 보정 방사능은 각각 3,650 MBq, 7,320 MBq, 11,090 MBq, 14,750 MBq, 18,580 MBq이었다. 각각의 방사능에 따라 갑상샘 팬텀을 감마카메라를 통해 측정된 카운트는 8,094에서 43,205까지 나타났다(Fig. 4). B-filter를 이용하여 측정된 백그라운드 카운트는 98에서 218까지 나타났으며, 백그라운드 카운트를 보정한 실제 카운트는 8,435에서 42,987로 나타났다. 한편 5회의 갑상샘 스캔실험 최종 카운트는 각각 2,310, 2,318, 2,320,

2,323, 2,325로 산출되었다(Table 4).

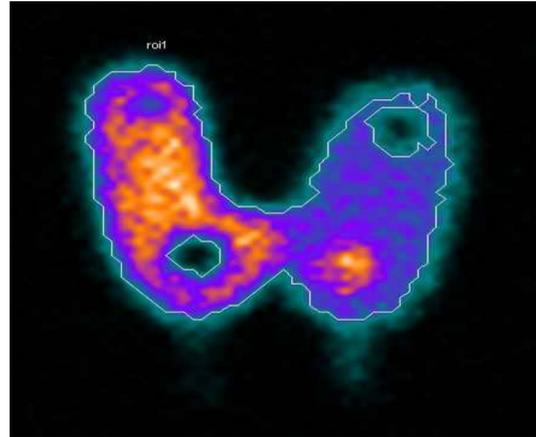


Fig. 4. Experimental data were obtained using a Gamma camera and a thyroid neck phantom, Based on the thyroid uptake rate of 1-5% according to the protocol of thyroid scan in normal results (Matrix: 256×256, Scan time: 1 min, collimator: pin hole, phantom-collimator distances: 7 cm)

Table 4. Results of thyroid scan

Activity (MBq)	3.7	7.4	11.1	14.8	18.5
Real activity (MBq)	3,774	7,548	11,396	15,096	18,944
Correction activity (MBq)	3,650	7,320	11,090	14,750	18,580
ROI counts	8,094	16,969	23,057	34,216	43,205
Back ground counts	98	111	148	168	218
Real counts	8,435	16,858	25,728	34,264	42,987
Final counts [†] (counts/MBq)	2,310	2,318	2,320	2,323	2,325

[†]: $Final\ counts = Real\ counts / Time\ correction\ activity$

3. 자료 및 통계분석 결과

다중회귀분석 결과 다중 상관계수(0.912)와 결정계수(0.913) 및 유의확률($P(0.05)$)은 갑상샘 스캔을 통해 획득한 영상의 관심영역 카운트와 갑상샘 섭취율 측정을 통해 수집한 카운트는 선형적인 관계가 있음을 확인하였다(Fig. 5). 즉 갑상샘 팬텀 등의 방사능과 갑상샘 섭취율 측정의 카운트는 선형관계를 가지고 있으므로, 투여하는 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 의 방사능을 측정된 후 갑상샘 스캔 영상의 정량분석 결과를 통해 정상 범위내에서의 갑상샘 섭취율을 간접적으로 유추할 수 있었다.

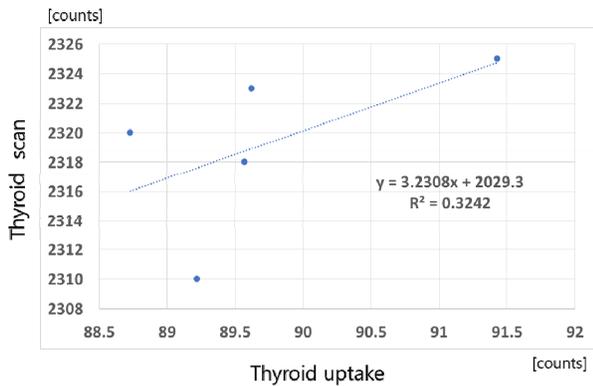


Fig. 5. There is a statistically significant correlation between thyroid uptake results and thyroid scan counts.

IV. 고찰

갑상샘 질환을 진단하는 핵의학 검사방법은 대부분 갑상샘 섭취율 측정 후 갑상샘 스캔을 시행하는 것으로 ^{123}I , ^{131}I 과 같은 방사성 요오드 대신 주로 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 을 추적자로 이용하고 있다[33]. $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 은 방사성 요오드와 다르게 환자에게 두 번의 정맥주사를 해야하고 이에 따라 방사선 피폭이 증가하게 된다[34]. 또한 두 번의 검사를 시행해야 하므로 검사 시간이 길어 환자의 만족도가 저하되는 제한점이 있다. 갑상샘 섭취율 측정은 환자의 갑상샘의 위치를 육안으로 확인하여 섭취율 측정기를 설정하는 과정에서 환자의 특성과 검사 시행자의 주관성으로 결과의 재현성과 정확성이 저하될 수 있다[35]. 그러므로 한 번의 추적자 투여로 갑상샘 섭취율 측정과 갑상샘 스캔을 모두 시행할 수 있다면 이와 같은 제한점을 보완할 수 있다. 이번 연구는 인체가 아닌 갑상샘 팬텀을 대상으로 실험한 것으로 다양한 환자의 갑상샘 크기, 모양, 기능 및 인공물 등의 변수를 반영할 수 없었다[36]. 실험에 사용한 추적자는 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ (140 keV)로 광자의 에너지가 다른 ^{123}I (159 keV), ^{131}I (364 keV)과 같은 방사성 요오드로 실험하였다면 결과는 다르게 분석될 수도 있다. 또한 실험에 선정한 갑상샘 섭취율 기준은 정상범위(1~5%)로 비정상범위에서의 실험결과는 다르게 평가될 수도 있으므로 이번 연구 결과의 재현성과 선형성을 일반화하기에는 제한적일 수 있다[37]. 이와 관련된 선행 연구에 따르면 갑상샘 섭취율 측정은 갑상샘기능 항진증 시에는 증가되고 기능 저하증 시에는 감소되지만 상당수의 환자에서 정상범위와 겹치며, 식사 속에 포함된 요오드의 양, 요오드 대사에 영향을 주는 다른 질환, 요오드 대사에 영향을 주는 다른 질환, 요오드를 포함하는 약제의 사용 등 여러 가지 갑상

샘기능 이외의 인자들에 의해서 영향을 받으므로 갑상샘을 진단할 때 주의가 필요하다. 또한 갑상샘 섭취율 측정은 과거에는 갑상샘기능 평가의 중요한 지표로 활용되었지만 정확한 갑상샘 호르몬의 측정이 가능해지면서 그 이용은 감소되고 있으며 방사성 요오드보다 간편한 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 을 이용한 갑상샘 스캔으로 대체되고 있다[38]. 실험에 사용한 추적자는 방사성 요오드가 아니라 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 로 인체에 갑상샘을 포함하여 침샘, 위점막, 고환등에도 집적하게 되는데 이에 따라 갑상샘 스캔 결과로 갑상샘 섭취율을 정확하게 예측하기에 제한적일 수 있으며, 방사성 요오드를 이용한 실험결과와는 이번 실험과는 다른 양상으로 나타날 수 있다. 따라서 이번 연구를 통해 갑상샘 스캔이 갑상샘 섭취율 측정을 대체할 수 있음을 확실하게 단정할 수 없다. 그럼에도 불구하고 이와 같은 제한점을 보완한 다수의 후속 연구가 진행되어 유의한 결과가 보고된다면 갑상샘 스캔으로 갑상샘 섭취율 측정을 대체할 수 있는 가능성을 향상시킬 것으로 판단되며, 후속 연구를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

V. 결론

이번 연구를 통해 갑상샘 팬텀을 이용한 갑상샘 스캔 영상의 정량 분석한 결과는 정상 갑상샘 섭취율 범위내에서 선형관계가 있음을 확인하였다. 따라서 단순 갑상샘 진단을 위한 갑상샘 스캔을 통해 갑상샘 섭취율을 한정적 범위내에서 간접적으로 도출할 수 있다. 임상 핵의학에 적용하기 위해 여러 제한점을 반영한 추가 연구가 필요하며, 이와 관련된 핵의학 분야에서 기초자료 및 정보제공 측면에서 유용할 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] Ur Rehman HA, Lin CY, Mushtaq Z, Su SF. Performance analysis of machine learning algorithms for thyroid disease. Abdelmoneim Adam Mohamed. Patient Arabian Journal for Science and Engineering. 2021;46:9437-49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05206-x>

[2] Gulec SA, Ahuja S, Avram AM, Bernet VJ, Bourguet P, Draganescu C, et al. A joint statement from the American thyroid association, the european association of nuclear medicine, the European thyroid as-

- sociation, the society of nuclear medicine and molecular imaging on current diagnostic and therapeutic approaches in the management of thyroid cancer. *Thyroid*. 2021;31(7):1009–19. DOI: <https://doi.org/10.1089/thy.2020.0826>
- [3] Tuttle RM, Ahuja S, Avram AM, Bernet VJ, Bourguet P, Daniels GH, et al. Controversies, consensus, and collaboration in the use of I-131 therapy in differentiated thyroid cancer: A joint statement from the American thyroid association, the European Association of Nuclear Medicine, the Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, and the European Thyroid Association. *Thyroid*. 2019;29:461–70. DOI: <https://doi.org/10.1089/thy.2018.0597>
- [4] Cooper DS, Doherty GM, Haugen BR, Kloos RT, Lee SL, Mandel SJ, et al. American thyroid association (ATA) guidelines taskforce on thyroid nodules and differentiated thyroid cancer. Revised American thyroid association management guidelines for patients with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer. *Thyroid*. 2009;19:1167–214. DOI: <https://doi.org/10.1089/thy.2015.0020>
- [5] Li J, Xu Y, Li N, Zuo R, Zhai Y, Chen H. Thyroid hormone disruption by organophosphate esters is mediated by nuclear/membrane thyroid hormone receptors: In vitro, in vivo, and in silico studies. *Environ Sci Technol*. 2022;56(7):4241–50. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05956>
- [6] Liu W, Wang Z, Chen J, Tang W, Wang H. Machine learning model for screening thyroid stimulating hormone receptor agonists based on updated datasets and improved applicability domain metrics. *Chemical Research in Toxicology*. 2023;36(6):947–58. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00074>
- [7] Shao W, Kuhn C, Mayr D, Ditsch N, Kailuweit M, Wolf V, et al. Cytoplasmic and nuclear forms of thyroid hormone receptor β 1 are inversely associated with survival in primary breast cancer. *Int J Mol Sci*. 2020;21(1):330. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21010330>
- [8] Varghese J, Rohren E, Guofan X. Radioiodine imaging and treatment in thyroid disorders. *Neuroimaging Clinics of North America*. 2021;31(3):337–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nic.2021.04.003>
- [9] Taprogge J, Leek F, Schurrat T, Tran-Gia J, Vallot D, Bardi S M, et al. Setting up a quantitative spect imaging network for a European multi-centre dosimetry study of radioiodine treatment for thyroid cancer as part of the MEDIRAD project. *EJNMMI Physics*. 2020;7:61. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40658-020-00332-9>
- [10] Spanu A, Nuvoli S, Marongiu A, Gelo I, Mele L, Madeddu BPG. Neck lymph node metastasis detection in patients with differentiated thyroid carcinoma (DTC) in long-term follow-up: A ^{131}I -SPECT/CT study. *BMC Cancer*. 2020;20:239. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12885-020-06744-1>
- [11] Currie GM, Iqbal B. Remodeling $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -pertechnetate thyroid uptake: Statistical, machine learning, and deep learning approaches. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2022;50(2):143–52. DOI: <https://doi.org/10.2967/jnmt.121.263081>
- [12] Al-Muqbel KM. Utility of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ pertechnetate thyroid scan and uptake in thyrotoxic patients: Jordanian experience. *World Journal of Nuclear Medicine*. 2022;22(1):7–14. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0042-1751053>
- [13] Ohba T, Ishikawa T, Nagai H, Tokonami S, Hasegawa A, Suzuk, G. Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Scientific Reports*. 2020;10(1):3639. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60453-0>
- [14] Mariani G, Tonacchera M, Grosso M, Fiore E, Falchetta P, Montanelli L, et al. The role of nuclear medicine in the clinical management of benign thyroid disorders, part 2: Nodular goiter, hypothyroidism and subacute thyroiditis. *Journal of Nuclear Medicine*. 2020;62(7):886–95. DOI: <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.251504>
- [15] Donohoe KJ, Aloff J, Avram AM, Bennet KG, Giovannella L, Greenspan B, et al. Appropriate use criteria for nuclear medicine in the evaluation and treatment of differentiated thyroid cancer. *Journal of Nuclear Medicine*. 2020;61(3):375–96. DOI: <https://doi.org/10.2967/jnumed.119.240945>

- [16] Alshahrani A, Syed GM, Khan AH, Numani SP, Alnaim A, Alanazi F, et al. Assessment of normal reference values for thyroid uptake of technetium-99m pertechnetate in a Saudi population. *Annals of Saudi Medicine*. 2021;41(2):86-90. DOI: <https://doi.org/10.5144/0256-4947.2021.86>
- [17] Abdelhamed HM, Soliman MSA, Mahmoud AA, Mohamed R, Ali IM, Abdelhai SF. The utility of technetium-99m pertechnetate thyroid scintigraphy assessing thyroid/salivary ratio as an alternative to thyroid uptake percentage in evaluation of thyroid function, with establishing normal reference values of both parameters: Single Egyptian center study. *Nuclear Medicine Communications*. 2022;43(12):1181-7. DOI: <https://doi.org/10.1097/MNM.0000000000001620>
- [18] Bednarczuk T, Brix TH, Schima W, Zettinig G, Kahaly GJ. European thyroid association guidelines for the management of iodine-based contrast media-induced thyroid dysfunction. *European Thyroid Journal*. 2021;10(4):269-84. DOI: <https://doi.org/10.1159/000517175>
- [19] Schenke SA, Kreissl MC, Grunert M, Hach A, Haghghi S, Kandrör T, et al. Distribution of functional status of thyroid nodules and malignancy rates of hyperfunctioning and hypofunctioning thyroid nodules in Germany. *Nuklearmedizin-Nuclear Medicine*. 2022;61(5):376-84. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1856-4052>
- [20] Giovanella L, Avram AM, Ovčariček PP, Clerc J. Thyroid functional and molecular imaging. *La Presse Médicale*. 2022;51(2):104116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2022.104116>
- [21] Verburg FA, Flux G, Giovanella L, van Nostrand D, Muylle K, Luster M. Differentiated thyroid cancer patients potentially benefitting from post-operative I-131 therapy: A review of the literature of the past decade. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2020;47:78-83. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04479-1>
- [22] Kim S, Bang JI, Boo D, Kim B, Choi IY, Ko S, et al. Second primary malignancy risk in thyroid cancer and matched patients with and without radioiodine therapy analysis from the observational health data sciences and informatics. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2022;49(10):3547-56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00259-022-05779-9>
- [23] Baek SM, Ko SJ, Kim CS, Kim JH, Kang SS. A study on ways to optimize the period of hospitalization during high-dose ¹³¹I treatment of the thyroid cancer. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2010;33(3):269-76. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001482815>
- [24] Al-Jabri A, Cooke J, Cournane S, Healy ML. Gender differences in estimating I-131 thyroid uptake from Tc-99m thyroid uptake for benign thyroid disease. *The British Journal of Radiology*. 2021;94(1118):20200700. DOI: <https://doi.org/10.1259/bjr.20200700>
- [25] Rumyantsev PO, Degtyarev MV, Dzeytova DS, Trukhin AA, Slashchuk KY, Sheremeta MS, et al. Thyroid scintigraphy in diagnosis of nodular and diffuse thyroid pathology. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2020;15(4):138-47. DOI: <https://doi.org/10.14341/ket12240>
- [26] Zampella E, Klain M, Pace L, Cuocolo A. PET/CT in the management of differentiated thyroid cancer. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2021;102(9):515-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diii.2021.04.004>
- [27] Al-Esaei AM, Khalil MM, El Shazly RM, Kany AM, Saleh EE, Elmaghraby S. Assessment of radiation exposure dose for nuclear medicine workers from ¹⁸F-FDG, ^{99m}Tc MDP, and ^{99m}Tc. *Current Radiopharmaceuticals*. 2022;15(4):320-26. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874471015666220413114927>
- [28] Naser AM, Zayed AA, Alhourri AN, Juweid ME. Esophageal ^{99m}Tc-pertechnetate uptake mimicking an autonomous thyroid adenoma in a patient with subacute thyroiditis: A case report. *Avicenna Journal of Medicine*. 2020;10(3):125-7. DOI: https://doi.org/10.4103/ajm.ajm_216_19
- [29] Park KH, Kim KH. Comparison of the measured radiation dose rate by the ionization chamber and GM(Geiger-Müller) counter after radioactive io-

- dine therapy in differentiated thyroid cancer patients. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2016;39(4):565–70. DOI: <https://doi.org/10.17946/JRST.2016.39.4.11>
- [30] Narkar RR, Mishra I, Baliarsinha AK, Choudhury AK. Rapid differential diagnosis of thyrotoxicosis using T3/T4 ratio, FT3/FT4 ratio and color doppler of thyroid gland. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*. 2021;25(3):193. DOI: https://doi.org/10.4103/ijem.ijem_137_21
- [31] Serrano B, Amblard R, Beaumont T, Hugonnet F, Dietz M, Berthier F, et al. Quantitative analysis of ^{99m}Tc-pertechnetate thyroid uptake with a large-field CZT gamma camera: Feasibility and comparison between SPECT/CT and planar acquisitions. *EJNMMI Physics*. 2023;10(1):1–16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40658-023-00566-3>
- [32] Jin M, Ahn J, Jo SG, Park J, Jeon MJ, Kim WG, et al. Comparison of ^{99m}Tc pertechnetate thyroid uptake rates by gamma probe and gamma camera methods for differentiating graves' disease and thyroiditis. *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2022:1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13139-021-00734-2>
- [33] Clerc J. Quantification of the thyroid scan (TS) and correlation to multiparametric ultrasounds (MPUS): A textbook case of nuclear molecular imaging. *Medicine Nucléaire*. 2020;44(4):216–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mednuc.2020.07.004>
- [34] Weissinger M, Bares R, Biegner T, Dittmann H. Follicular thyroid carcinoma in a hyperfunctioning thyroid nodule with suspicious sonomorphological features. *Nuklearmedizin–NuclearMedicine*. 2020; 59(6):440–42. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1209-2989>
- [35] Joji K, Atsushi Y, Shigeski H. Discordances between ^{99m}Tc and 131I uptake in two Graves' disease patients JQD. In: Japanese archive of cases conference of clinical nuclear medicine. *Cases Conference of Clinical Nuclear Medicine, NMJ*. 2022:5–9. DOI: https://doi.org/10.32291/nmj.4.0_5
- [36] Sookhaki S, Sina S, Karimipourfard M, Alavi M, Shoushtari FK. Design and fabrication of a pediatric thyroid phantom for use in radio-iodine uptake measurement, image quality control and dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*. 2022;198(4):238–45. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac027>
- [37] Mariani G, Tonacchera M, Grosso M, Fiore E, Falchetta P, Montanelli L, et al. The role of nuclear medicine in the clinical management of benign thyroid disorders, part 2: Nodular goiter, hypothyroidism, and subacute thyroiditis. *Journal of Nuclear Medicine*. 2021;62(7):886–95. DOI: <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.251504>
- [38] Kim WB. Interpretation and treatment of thyroid test results for practitioners. *Korean Journal Medicine*. 2007;73(2):777–84. Retrieved from <https://www.ekjm.org/journal/view.php?number=18218>

구분	성명	소속	직위
제1저자	김정수	동남보건대학교 방사선학과	부교수
교신저자	김근우	국립경철병원 핵의학과	책임 방사선사