



## 양성 갑상선 결절의 고주파절제술: 이비인후과 의사를 위한 최신 지견

박하나로 · 이민주

성균관대학교 의과대학 삼성창원병원 이비인후과학교실

### Radiofrequency Ablation for Benign Thyroid Nodules: Updates for Otolaryngologists

Hanaro Park, Minju Lee

Department of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, Samsung Changwon Hospital, Sungkyunkwan University School of Medicine, Changwon, Korea

#### ABSTRACT

Radiofrequency ablation (RFA) has emerged as a well-established minimally invasive alternative to surgery for benign and autonomously functioning thyroid nodules. Over the past two decades, accumulated evidence from systematic reviews, meta-analyses, and long-term cohort studies has demonstrated that RFA achieves substantial and durable volume reduction, with reported volume reduction ratios of approximately 70%–80% at 12 months, 90% at 5 years, and up to 94% beyond 10 years, while maintaining an excellent safety profile with overall complication rates of 2%–3% and permanent major complications below 1%. The procedure preserves thyroid function, eliminates the need for general anesthesia, avoids visible cervical scarring, and enables rapid return to daily activities. Successful outcomes depend on patient selection based on cytologic confirmation of benignity and clinically meaningful symptoms or cosmetic concerns, comprehensive pre-procedural evaluation including ultrasonography and laryngoscopic assessment of vocal cord function, and skilled application of standardized techniques such as the trans-isthmic approach, moving-shot technique, vascular ablation, and hydrodissection. Long-term surveillance is essential, as approximately 12% of nodules demonstrate regrowth and a small proportion of patients ultimately require delayed surgery, often for newly developed lesions rather than treatment failure. Recognized complications including voice change, nodule rupture, and hematoma can be minimized through careful technique and timely management. Otolaryngologists are uniquely positioned to contribute to multidisciplinary RFA practice through their expertise in head and neck anatomy, laryngeal evaluation, and surgical management of complications. This review summarizes current evidence and practical considerations to support safe and effective thyroid RFA in otolaryngologic practice.

**KEY WORDS:** Radiofrequency ablation; Thyroid nodule; Recurrent laryngeal nerve injuries; Hematoma.

#### 서론

갑상선 결절은 임상 진료 현장에서 흔히 마주치는 병변으로

촉진을 통해 발견되는 비율은 성인의 4%–7% 수준에 불과하나, 고해상도 초음파 기기의 보편화와 건강검진 활성화로 인해 그 진단 빈도가 증가하여 최근 국내 성인 인구의 30%–40%

Received: May 2, 2026 / Revised: June 5, 2026 / Accepted: June 11, 2026

Corresponding author: Hanaro Park, Department of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, Samsung Changwon Hospital, Sungkyunkwan University School of Medicine, Changwon 51353, Korea

Tel: +82-55-233-5420, Fax: +82-55-233-5441, E-mail: naronaro@skku.edu

Copyright © 2026. The Busan, Ulsan, Gyeongnam Branch of Korean Society of Otolaryngology-Head and Neck Surgery.

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.

에 달하는 유병률을 보이고 있다.<sup>1,2)</sup> 우연히 발견된 결절의 대다수는 임상적 위험도가 낮은 양성(benign) 병변으로 확인되며, 이들은 대개 성장 속도가 완만하고 생명에 직접적인 위협을 가하지 않으므로, 정기적인 초음파 추적 관찰을 시행하는 것이 표준 관리 지침으로 통용된다.<sup>1,3-5)</sup>

그러나 추적 관찰 중 병변의 부피가 팽창하여 주변의 기도나 식도를 점진적으로 압박할 경우, 환자는 연하곤란, 호흡 불편감, 경부 이물감 및 통증과 같은 증상을 겪게 되며 이는 일상생활의 심각한 지장으로 이어질 수 있다.<sup>6-8)</sup> 종괴가 경부 외부로 두드러져 미용적 결함이 동반될 때에도 삶의 질 개선을 위한 적극적인 치료가 요구된다.<sup>3,8)</sup> 이와는 별개로 뇌하수체의 생리적 제어를 벗어나 갑상선 호르몬을 독자적으로 과다 합성하는 자율기능성 갑상선결절(autonomously functioning thyroid nodule, AFTN)은 현성 혹은 불현성 갑상선중독증(thyrotoxicosis)을 촉발한다. 이는 심혈관계 합병증과 골밀도 감소의 직접적 원인으로 작용하므로, 교란된 내분비 기능의 정상화를 목표로 하는 근원적인 치료가 필수적이다.<sup>1,9,10)</sup>

전통적으로 이러한 유증상 양성 결절 및 AFTN의 치료를 위해 외과적 절제술이나 방사성 동위원소 치료가 주된 선택지로 활용되어 왔다.<sup>6,11)</sup> 그렇지만 환자의 부담을 줄이고 정상 갑상선 실질을 온전히 보존하고자 하는 최소침습적 접근법에 대한 임상적 수요는 꾸준히 존재하였다.<sup>12,13)</sup> 이에 초음파 유도하 고주파절제술(radiofrequency ablation, RFA)이 비수술적 대안으로 제시되었다.<sup>8,14)</sup> 교류 전류가 유도하는 조직 내 마찰열을 이용해 병변을 소작하는 이 기법은, 결절의 부피 축소를 통한 압박 증상 해소가 가능하고, AFTN 환자의 호르몬 분비를 정상화하는 데에도 임상적 효용성을 입증해 왔다.<sup>6,8,15)</sup>

국내에서는 2002년에 처음 시도된 이래 2007년 신의료기술로 인정받으면서 임상 적용이 확산되었고<sup>6,16)</sup> 대한갑상선영상의학회(Korean Society of Thyroid Radiology, KSThR)가 2009년 세계 최초로 갑상선 RFA 진료 권고안을 제정하였으며, 2012년 · 2017년에 걸쳐 두 차례 개정한 바 있다.<sup>17,18)</sup> 뒤이어 2020년 유럽갑상선학회(European Thyroid Association, ETA)<sup>19)</sup> 2021년 아시아종양절제학회(Asian Conference on Tumor Ablation, ACTA) 연합<sup>3,20)</sup> 그리고 2022년 미국두경부외과학회(American Head and Neck Society, AHNS)가 주도한 국제 다학제 합의문<sup>14)</sup>이 연이어 공표되면서, RFA는 적절한 환자군에서 외과적 수술을 대체할 수 있는 표준 치료로 받아들여졌다.

본 종설에서는 축적된 최신 지견들을 바탕으로 갑상선 양성 결절 및 AFTN에 대한 RFA의 임상적 당위성, 시술 전 다각적

평가부터 해부학적 보존을 위한 술기, 장기적 치료 성적과 재성장 관리 전략, 그리고 합병증에 대해 폭넓게 고찰하여 RFA 치료의 학술적 기반을 제공하고자 한다.<sup>3,17)</sup>

## 적응증 및 환자 선정

### 적응 대상 환자

양성 비기능성 갑상선 결절은 대부분 무증상이나, 환자가 연하곤란, 이물감, 경부 통증, 기침, 호흡 곤란 등 압박 증상이나 미용적 문제를 호소하면 치료 적응 대상으로 선정한다.<sup>3)</sup> 결절 크기에 대한 일률적 기준은 없으며, 임상적은 환자의 목둘레, 결절 위치, 자각 증상 정도를 종합하여 시술을 결정한다.<sup>3,6,17)</sup> 다만 2017년 KSThR과 이탈리아 권고안은 증상을 동반하며 점진적으로 자라는 2 cm 이상 결절을 일반적 치료 대상으로 제시하고 있으며, 일부 유럽 지침은 20 mL 이상 거대 결절을 적응증으로 규정한다.<sup>3,17)</sup> 단, 갑상선 협부(isthmus) 결절은 2 cm 미만이라도 육안으로 쉽게 관찰되거나 만져지므로 더 작은 크기에서도 시술을 시행할 수 있다.<sup>6)</sup> 추적 관찰 6개월 이내에 부피가 20% 이상 증가하는 결절도 상대적 적응증에 포함된다.<sup>3,17)</sup> 시술 전후 치료 효과를 객관적으로 비교하기 위해 임상적은 압박 증상을 0-10점 시각아날로그척도(visual analog scale)로 측정하고, 미용 점수를 4단계(1: 비축지, 2: 만져지나 육안상 정상, 3: 연하 시에만 관찰, 4: 육안으로 확인함)로 기록한다.<sup>3,17,21)</sup>

이러한 비독성 양성 결절에 시술을 적용하려면 세포병리 또는 조직병리 검사에서 병변이 양성임을 먼저 확인해야 한다. 임상적은 위음성 가능성을 배제하기 위해 초음파 유도하 세침흡인세포검사(ultrasound-guided fine-needle aspiration, US-FNA) 또는 중심부바늘생검(core needle biopsy, CNB)을 시행하여 최소 2회 이상 양성(Bethesda category II) 판정을 확보한다.<sup>1,3,17)</sup> 예외적으로 K-TIRADS(Korean Thyroid Imaging Reporting and Data System) 2, ACR TR(American College of Radiology Thyroid Imaging Reporting and Data System)-1, EU-TIRADS(European Thyroid Imaging Reporting And Data System) 2에 해당하는 전형적 양성 소견(등에코 해면상 결절, 혜성꼬리허상을 동반한 부분낭성 결절)을 보이거나, 갑상선 스캔에서 열결절(hot nodule)로 진단한 AFTN은 1회 조직검사 양성 결과만으로 시술을 진행할 수 있다.<sup>3,14)</sup>

AFTN의 1차 치료는 오랫동안 방사성요오드 치료와 수술이었으나, 정상 갑상선 실질을 온전히 보존하기를 원하거나 방

사전 피폭에 거부감이 있는 환자에게 RFA는 훌륭한 대안으로 기능한다.<sup>9,14</sup> 또한 RFA는 방사성요오드 치료나 수술을 거부하거나 시행할 수 없는 환자, 그 가운데서도 단일 독성 또는 사전독성 결절을 가진 가임기 여성에서 합리적인 선택지가 될 수 있다.<sup>3,4</sup> 시술자는 호르몬을 자율적으로 과다 분비하는 병변을 소작하여 갑상선중독증을 치료하고 정상 내분비 기능을 회복시킨다.<sup>1,9</sup> AFTN은 단 1회 세포검사로 양성 진단을 내릴 수 있으나, 드물게 악성 종양이 자율기능성을 띠는 경우를 감별하기 위해 의심스러운 초음파 소견을 면밀히 평가하여야 한다.<sup>3,17</sup> 항갑상선과산화효소 항체(anti-thyroid peroxidase antibody, anti-TPO)나 항갑상선글로불린 항체가 양성인 환자는 시술 후 일시적 또는 영구적 갑상선기능저하증을 겪을 위험이 높으므로, 항체 검사를 시행하고 위험성을 환자에게 명확히 고지하여야 한다.<sup>3,6,11,22</sup> 시술 시 정상 실질 보존을 위해 안전 경계를 남기는 비독성 결절과 달리, 시술자는 AFTN 결절의 변연부 전체를 빠짐없이 소작하여 기능 정상화를 유도한다.<sup>3,17</sup>

### 상대적인 금기

RFA는 전신마취를 요하지 않는 덜 침습적인 술기이며, 금기 사항은 비교적 적은 편이다. 그러나 해부학적 특수성이나 기저 질환에 따라 합병증 발생 위험이 시술의 이득을 상회하는 상황을 명확히 식별해야 한다.

무엇보다 악성 가능성을 완전히 배제하지 못한 결절들은 시술 대상에서 제외되어야 한다. 세포검사서 여포종양(follicular neoplasm, Bethesda IV)이나 의미 불명의 비정형 세포(atypia of undetermined significance/follicular lesion of undetermined significance, AUS/FLUS, Bethesda III)를 확인한 결절에 RFA를 시행하면, 조직이 비가역적으로 괴사되기 때문에 향후 수술 시 병리 조직학적 최종 진단 근거를 훼손할 수 있다.<sup>3,11</sup> 또한 시술 부위의 광범위한 섬유화는 추후 구제 수술 시 피막 및 신경 박리를 방해하여 반회후두신경 마비와 부갑상선 손상 위험을 높일 수 있으므로, 진단이 불확실한 회색 지대 결절은 원칙적으로 진단적 절제술을 시행하여야 한다.<sup>8</sup> 최근 분자프로파일링 검사에서 양성을 보인 일부 Bethesda III 결절에 RFA를 적용한 연구가 있으나, 이를 아직 보편적 지침으로 수용하지 않는다.<sup>4</sup>

시술자가 가장 주의해야 하는 기저 질환은 반대측 성대 마비이다. 시술 중 발생하는 열 전도로 치료 측 반회후두신경(recurrent laryngeal nerve, RLN)마저 손상당하면, 환자는 양측성 성대 마비와 급성 기도 폐쇄라는 치명적 응급 상황을 겪을 수 있다.<sup>11,14</sup> 의사는 이를 예방하기 위해 시술 전후 이비

인후과 전문의를 통한 후두내시경 검사를 시행하여 양측 성대 가동성을 반드시 평가한다.

결절이 흉곽 내부로 자라난 흉골하 갑상선종(substernal goiter) 역시 시술 시 각별히 주의한다. 쇄골, 흉골, 폐의 공기가 초음파 음향장을 차단하면 시술자는 바늘 궤적과 소작 범위를 실시간으로 모니터링하지 못한다. 이는 불완전 소작의 확률을 높이며, 흉곽 내 혈관 손상 위험을 높이고 출혈 시 물리적 압박 지혈이 매우 어렵기 때문에, 이러한 경우 시야 확보가 용이한 외과적 절제술을 우선 고려한다.<sup>6,17</sup> 다발성 갑상선종이나 미만성 가결절성 변화를 동반한 환자는 증상을 유발하는 책임 결절을 특정하기 어려워 치료 효과가 제한적이다. 임상 의는 면밀한 초음파 평가를 거쳐 표적 결절을 신중히 선택하여야 한다.<sup>4</sup>

## 시술 전 평가

### 임상 및 혈액 검사

시술자는 환자의 기저 질환과 전반적인 전신 상태를 객관적으로 파악하기 위해 시술 전 일반 혈액 검사와 더불어 혈액 응고 검사를 시행한다.<sup>3,17</sup> 시술 중 발생 가능한 출혈 합병증을 예방하고자 프로트롬빈 시간과 혈소판 수치 등 주요 응고 지표가 필수적으로 확인되어야 한다.<sup>17</sup> 항혈전제를 복용 중인 환자에서 심혈관계 악화 위험도와 수술적 출혈 가능성을 저울질하여 적절한 약제 중단 일정을 조절하는데, 통상적으로 아스피린과 클로피도그렐은 시술 7-10일 전, 와파린은 3-5일 전, 헤파린류는 종류에 따라 4-24시간 전에 투약을 중단한다.<sup>3,19</sup> 시술 후 출혈 징후가 없다면 와파린은 당일 저녁, 헤파린은 2-6시간 뒤, 기타 항혈소판제는 다음 날부터 투약을 안전하게 재개할 수 있다.<sup>3</sup> 갑상선 기능 평가를 위해 일반적인 혈청 갑상선자극호르몬(thyroid-stimulating hormone, TSH) 및 유리 티록신(free thyroxine, free T4)이 기본적으로 측정되며, 기저 기능 이상 소견 시 자가면역항체 검사를 시행해야 한다.<sup>3,4,17</sup> 기능성 결절이 임상적으로 강하게 의심될 때, 자율적인 호르몬 분비능을 입증하기 위한 갑상선 스캔 검사가 진단 수단으로 추가 시행될 수 있다.<sup>3</sup> anti-TPO 양성 결과가 시술 후 영구적 기능저하의 위험인자임을 인지하고, 사전에 환자에게 그 의미를 명확히 고지한다.<sup>4,22</sup> 일부 진료 권고안에서는 수질암의 선제적 감별을 위한 혈청 칼시토닌 측정도 시술 전 기본 평가 항목으로 함께 권유하고 있다.<sup>17</sup> 시술 당일에는 응급 상황에 대비한 제세동기 등 필수 응급 세트가 시술실 내부에 구비되어야 하며, 환자의 혈압과 심전도를 지속적으로 모니터

링하여 고혈압이나 서맥, 미주신경반응 등 돌발적인 생체 징후의 변화를 포착할 수 있어야 한다.<sup>17,23,24)</sup>

### 초음파 및 영상학적 평가

시술 전 고해상도 초음파 검사를 통해 표적 결절의 물리적 특성을 분석하고 주변 해부학적 구조물과의 관계를 입체적으로 파악해야 한다.<sup>3,17)</sup> 초음파 영상에서 결절의 직교하는 세 지름을 측정하여 타원체 부피 공식( $V = \pi abc / 6$ )으로 기저 부피를 산출할 수 있으며, 내부 혈류 양상과 동측 경부 림프절 등을 함께 평가하여야 한다.<sup>3,17)</sup> 결절 내 석회화 형태, 과혈관성 여부, 양성 성분의 분포와 비율 등은 시술 기법과 전극 크기를 선택하는 과정에 직접적으로 반영된다.<sup>6)</sup> 결절의 횡단면 폭과 인접 구조까지의 거리는 0.38에서 1.5 cm에 이르는 활성 팁의 길이를 결정짓는 가장 직접적인 지표로 활용된다.<sup>6)</sup> 양성 비율이 높거나 혈류가 풍부한 결절에서는 열흡수효과가 크기 때문에 통상적으로 다소 긴 활성 팁과 상대적으로 높은 출력력이 요구된다.<sup>6)</sup> 양성 성분이 병변 내부에 과도하게 포함된 혼합형 결절의 경우, 시술자는 고주파 열절제술에 앞서 내부 낭액을 흡인하는 에탄올 절제술을 선행할 수 있다.<sup>17)</sup> 정밀한 도플러 초음파를 이용하여 결절 주변 혈류를 확인함으로써 영양동맥 위치를 파악하고, 동맥 우선 소작 전략을 사전에 수립한다.<sup>3,6,25)</sup> 안전한 진입 경로를 확보하기 위해 표적 병변과 환자의 기도, 식도, 주요 경부 동정맥 및 부갑상선 간의 공간적 인접성이 세밀하게 평가되어야 한다.<sup>6,17)</sup> 술자가 결절의 위치 편중과 초음파 탐촉자 압박에 따른 물리적 유동성을 미리 확인하는 과정은 자연스러운 전극 삽입 경로를 설계하는 데 큰 도움이 된다.<sup>6)</sup> 음성 기능과 직결된 RLN이 주로 주행하는 기관 식도주 주변의 위험 삼각지대를 초음파상 명확히 감별하여 비가역적인 신경 손상을 예방해야 하며<sup>11,14)</sup> 중간목교감신경절은 초음파에서 일부만 확인되나, 술자가 인접 신경 가지의 주행을 살펴보면 식별이 수월해져 드문 합병증인 호너증후군을 효과적으로 방지할 수 있다.<sup>11,26)</sup> 조영증강 초음파(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)는 RFA 전후 결절의 혈류 변화와 잔존 생존 조직을 가시화할 수 있는 비교적 새로운 도구로, 완전 소작 여부 판정과 재생장 초기 예측에서 유용성이 보고되었지만, 비용, 보험 적용, 일부 침습성 등의 실질적 제약 때문에 모든 기관에서 일상적으로 활용되고 있지는 않으며, 시술자의 판단에 따라 선택적으로 적용된다.<sup>3,27)</sup>

### 이비인후과적 후두내시경 평가

시술 과정에서 발생 가능한 증중 기도 합병증을 방지하기

위해 전후로 후두내시경을 시행하여 양측 성대 가동성을 평가한다.<sup>11,14)</sup> 환자 본인이 미세한 음성 변화를 인지하지 못하더라도, 기저에 무증상 편측 성대 마비가 존재하는지 내시경 검사로 반드시 확인되어야 한다.<sup>14)</sup> 2022년 AHNS 합의문은 모든 환자에서 객관적 기저 성대 기록을 남기는 것이 향후 합병증 판정에 결정적임을 강조하였다.<sup>14)</sup> 이전에 갑상선 또는 경부 수술을 받은 적이 있는 환자에서도 시술 전 후두내시경을 필수적으로 시행해야 한다.<sup>3)</sup> 최근 시술 중 굴절성 후두내시경(flexible laryngoscopy)을 함께 활용하여 성대 운동을 직접 관찰하는 사례가 보고되고 있는데, 양측 결절을 한 번에 다루는 경우나 큰 결절로 인해 진정 상태에서 시술해야 하는 경우 RLN 손상의 조기 인지에 도움이 될 수 있다.<sup>14)</sup> 기저에 편측 성대 마비가 있는 환자에게 시술을 진행할 때, 시술자는 반대측 신경마저 손상될 경우 초래될 양측성 성대 마비와 기도 폐쇄 위험성을 명확히 고지한다.<sup>11,14)</sup> 잠재적인 해부학적 위험 인자는 영상 및 내시경 평가를 통해 감별되며, 상대적 금기 환자는 객관적 기준에 따라 치료 선상에서 제외된다.<sup>11,17)</sup> 시술 종료 직후 성대의 움직임은 다시 한번 객관적으로 평가하여 열전도로 인한 신경의 기능 이상 유무를 조기에 진단하고 즉각적인 후속 조치를 마련한다.<sup>14,17)</sup> 시술 전후에 수행되는 성대 평가는 단순한 음성 합병증 추적을 넘어, 호흡기계 합병증을 선제적으로 예방하고 임상 진료의 책임 소재를 규명하는 필수 절차로 활용된다.<sup>11,14)</sup>

## 시술 방법 및 술기

### 시술 전 준비와 마취

시술 당일 환자는 4-6시간의 금식을 유지하여야 하고 정맥로를 사전에 확보하여야 한다.<sup>17)</sup> 시술자는 환자를 양와위로 눕히고 목 아래에 베개를 받쳐 경부를 충분히 신전 시킴으로써 전극 바늘 삽입을 위한 최적화된 초음파 시야를 안전하게 확보한다.<sup>24)</sup> 이후 양측 허벅지 피부 표면에 접지 패드를 부착한다.<sup>3)</sup>

시술은 원칙적으로 국소마취 하에 진행한다. 전신마취나 깊은 진정은 RLN 손상이나 기관 손상 같은 주요 합병증의 조기 인지를 늦추기 때문에 권장되지 않는다.<sup>3,23,24,28)</sup> 다만 극심한 불안을 호소하는 환자나 특수한 임상 상황에서는 의식 하 진정이 선택적으로 고려될 수 있다.<sup>21,29)</sup> 마취 시 초음파 유도하에 25-27 G 바늘로 1%-2% 리도카인을 전경부 피하조직에 주입한 뒤 락타이드와 감각신경이 위치한 갑상선 피막의 사이 공간으로 마취액을 추가 투여한다.<sup>24)</sup> 이 과정에서 락타이드와 갑상선 실질이 물리적으로 분리되며 국소 마취제가 피막을 따라

고르게 분포하는 형태가 초음파 영상으로 실시간 확인된다.<sup>24)</sup> 바늘 진입 시 전경정맥과 피막 정맥총 및 상감상선동맥의 해부학적 주행을 도플러 초음파로 면밀히 식별하여 불필요한 혈관 손상과 출혈을 회피한다.<sup>23)</sup> 바늘 끝이 피막 주위 공간에 도달했음을 확인한 후 주입하여 마취액이 띠근육 내부로 스며들어 통증 제어 효과가 감소하는 현상을 선제적으로 방지한다.<sup>28)</sup> RLN이 지나가는 기관식도구 주변 조직에 리도카인이 직접 침윤될 경우 일시적인 성대 마비와 음성 변화가 유발될 수 있으므로 해당 구역의 주입은 배제된다.<sup>29)</sup>

## 시술법

RFA 시행 시 전극 바늘을 병변 반대쪽 피부에서 삽입하여 종양의 협부를 관통시킨 뒤 외측 표적 결절로 진입시키는 경협부 접근법(trans-isthmic approach)을 표준 경로로 채택한다.<sup>3,8,24,28)</sup> 이 경우 전극이 정상 실질을 관통하므로 환자가 연하 운동이나 발성을 유지하더라도 전극 끝의 위치를 안정적으로 고정할 수 있다.<sup>23)</sup> RFA 과정 중 발생하는 고온의 괴사 물질이나 미세 출혈이 전극의 진입 궤적을 타고 갑상선 피막 외부로 누출되는 부작용 역시 방지된다.<sup>24)</sup> 시술 중 초음파 횡단면 영상에서 전극의 전체 주행을 직시하며 바늘 끝을 위험 삼각지대 반대편 외측으로 조작하여 비가역적인 RLN 마비와 장기 손상을 예방한다.<sup>30,31)</sup> 경협부 접근법을 통한 진입 경로를 설계할 때는 안전한 궤적 설계를 위해 상감상선동맥과 전경정맥 및 피막 정맥총의 위치를 사전에 파악하여 전극 진입에 따른 의인성 혈관 손상을 선제적으로 최소화한다.<sup>23)</sup> 종축 지름이 큰 결절을 소작할 때에는 병변의 수직적 중간 지점을 겨냥하여 전극을 진입시키는 방식이 상하단 구역을 연속적으로 치료하는 데 훨씬 효율적이다.<sup>23)</sup> 결절 위치에 따라 횡단면에서 협부의 정상 조직을 통과하기 어려울 수 있는데, 이 경우 사선으로 진입 경로를 설정하면 정상 조직을 통과하여 결절에 도달할 수 있다.<sup>23)</sup> 혈류가 풍부하거나 주요 구조물에 인접하여 소작이 까다로운 고위험 구역은 조작 반경을 넓히기 위해 가급적 결절을 전극 진입의 반대편에 배치하는 전략이 권장된다.<sup>23)</sup> 치료 도중 필요에 따라 전극을 피하층으로 후퇴시킨 뒤 갑상선 실질 내부나 띠근육 외측을 따라 진입 각도를 유연하게 변경하여 미치로 부위로 재진입하는 술기를 활용할 수 있다.<sup>23)</sup>

갑상선 결절은 전극 위치를 고정하고 RFA를 시행하는 경우 주요 장기 손상이 생겨 합병증이 유발되기 때문에 결절 내부를 여러 개의 가상 구획으로 세분화하여 순차적으로 소작하는 무빙샷 기법(moving-shot technique)을 기본 술기로 적용한다.<sup>3,23)</sup> 시술자는 표적 병변의 가장 깊고 후방에 위치한 구역부

터 시술을 개시한다.<sup>24,29)</sup> 열절제로 파생된 미세 기포가 초음파의 후방 음향장을 차단하여 시야 확보를 방해하므로 심부에서 표면 방향으로 체계적인 조직 절제가 진행되어야 한다.<sup>23)</sup> 특정 구역의 초음파 에코가 뚜렷하게 증가하면 전극을 피부 표면 쪽으로 서서히 후퇴시키고 인접한 미치로 영역으로 방향을 전환하여 잔여 종양 조직을 연속적으로 시술한다.<sup>3)</sup> 해부학적 위치에 따라 소작 단위의 면적을 탄력적으로 조절하는데 신경 등 주요 구조물과 인접한 변연부에서는 단위를 작게 분할하고 중앙부에서는 상대적으로 넓게 설정한다.<sup>21,23)</sup> 분할된 소작 단위의 체적이 작게 설정될수록 에너지를 인가하는 시간도 짧게 통제되어야 한다.<sup>23)</sup> 출력을 가한 직후 전극 팁 주변 실질에 구름 형태의 고에코 기포가 충분히 형성되면 열절제가 완료된 것으로 판단하고 다음 미소작 단위로 바늘을 이동시킨다.<sup>23)</sup> 임상 경험이 풍부한 시술자는 전력을 유지한 채 다수 구획을 연속 소작하지만 초보자는 한두 개 단위만 처리한 뒤 출력을 끄고 바늘을 재배치하는 단계적 방식이 권장된다.<sup>23)</sup> 단일 횡단면이 고에코로 모두 전환되면 인접 단면으로 전극을 세밀하게 옮겨 동일한 소작 절차를 반복하며 깊은 후방에서 얇은 전방으로 바늘을 점진적으로 후퇴시킨다.<sup>23,29)</sup> 초음파 영상으로 확인되는 종양의 윤곽을 따라가며 소작을 전개하여 치료 경계면의 잔여 조직이 최소화되고 장기적인 병변의 재성장이 효과적으로 차단되게 한다.<sup>32)</sup>

혈류가 풍부하게 관찰되는 과혈관성 결절에서는 순환 혈액이 열을 앗아가는 열 침식 효과(heat sink effect)를 통제하고 변연부 재성장을 최소화하기 위해 혈관 소작 기법(vascular ablation technique)을 사용한다.<sup>3,23)</sup> 시술자는 도플러 초음파를 가동하여 표적 병변 내부로 직접 유입되는 영양 동맥의 기시부와 결절 윤곽을 감싸며 배출되는 변연 정맥의 주행 경로를 탐색한다.<sup>25)</sup> 종양 실질 소작에 앞서 파악된 유입 동맥을 전극으로 가열하여 내부 혈류망을 선제적으로 차단함으로써 상대적으로 낮은 고주파 출력만으로도 조직의 광범위한 허혈성 괴사를 유도할 수 있다.<sup>23)</sup> 표재성에 위치한 전방 영양 동맥을 먼저 소작할 경우 발생한 기포가 후방 심부 조직의 시야를 가릴 수 있으므로 바늘의 접근 순서와 궤적을 해부학적 구조에 맞게 조율한다.<sup>23)</sup> 피막을 벗어나 외부로 주행하는 동맥을 직접 가열하면 파열 및 출혈 위험이 있으므로 시술자는 혈관 소작의 범위를 안전이 확보된 협부 실질 내부로 한정한다.<sup>29)</sup> 변연부 정맥 소작은 결절 가장자리에서 배출되는 정맥망을 표적으로 삼아 잔존 조직의 대사를 억제하고 괴사를 유도하는 술기이다.<sup>6,31)</sup> 이 기법을 적용하는 경우 심부 출혈이 억제되고 정상 실질과 소작 대상 병변 간의 열치료 경계가 명료하게

분리된다.<sup>24)</sup> 종양 경계에 형성된 미세 혈관망의 소작은 소작되지 않은 잔여 세포가 혈관 경로를 타고 다시 증식하는 생물학적 기전을 차단할 수 있어 장기적 치료 성공 가능성을 높인다.<sup>23,24)</sup> 다만 정맥을 동맥보다 먼저 소작할 경우 배수 경로가 막힌 내부에 울혈성 부종이 발생하여 통증이 유발되므로 동맥 차단을 정맥 소작보다 선행하여 수행한다.<sup>23)</sup>

표적 결절이 기도나 식도 및 RLN 등 핵심 장기와 맞닿아 열 손상 위험이 높을 경우 물리적인 안전 간극을 확보하는 수압 박리법(hydrodissection)이 병행된다.<sup>30,31)</sup> 시술자는 고해상도 초음파 유도하에 결절 피막과 보호 대상 장기 사이의 틈새로 바늘을 진입시킨 뒤 수액을 주입하여 완충 구역을 형성한다.<sup>24)</sup> 생리식염수는 이온 성분으로 인해 전류를 주변으로 확산시킬 우려가 크며 조직 흡수 속도도 빨라 공간 분리 효과가 조기에 소실되므로 절연 수액으로 채택되지 않고, 주로 등삼투압 비이온성 액체인 5% 포도당 수용액(dextrose 5% in water, D5W)을 수압 박리의 표준 절연 물질로 사용한다.<sup>3,23,30)</sup> 주입된 D5W는 고온의 열 전도를 억제하는 단열 장벽으로 작용하여 인접 장기의 온도가 임계치 이상으로 상승하는 상황을 방어한다.<sup>23,30)</sup> 시간이 경과함에 따라 수압 장벽이 점차 체내로 흡수되어 얇아질 수 있으므로 유지된 바늘을 통해 수액을 주기적으로 점적 보충하여 일정한 절연 두께를 시술 종료 시점까지 유지한다.<sup>24,31)</sup> 시술자는 수액 주입의 해부학적 접근 경로를 전외측, 기관전, 위험 삼각, 후방 접근법 등으로 세분화하여 결절의 구체적인 위치와 환자의 기저 질환 특성에 따라 최적의 궤적을 선택한다.<sup>23)</sup> 전외측 접근법으로 액체를 주입할 경우 갑상선의 전면과 측후방 구획이 동시에 박리되며 한 연구에서 환자의 시술 중 통증도 유의하게 줄어든다는 사실이 보고된 바 있다.<sup>33)</sup> 기관전 접근(pre-tracheal approach)은 기관 앞에서 협부를 관통해 기관 앞 공간으로 바늘을 진입시켜 기관과 갑상선을 분리시키는 방법이다.<sup>23)</sup> 위험 삼각 접근(danger triangle approach)은 협부에서 기관 옆을 따라 RLN이 위치한 기관식도구 부근까지 바늘을 진입시키는 형태이며, 후방 접근(posterior approach)은 외측에서 경동정맥의 뒤를 통해 갑상선 후방으로 바늘을 보내는 방식이다.<sup>23)</sup>

## 장기적 치료 성적 및 재생장 관리 전략

### 단기 및 장기 부피 감소율

갑상선 양성 결절에 RFA를 시행하면 시술 직후 첫 1주 안에는 소작에 따른 염증성 부종으로 인해 오히려 결절 부피가 0%~20% 정도 늘어날 수 있으며, 이후 열에 의한 조직의 응

고 괴사와 체내 대식세포 탐식 작용을 거쳐 병변의 부피가 지속적으로 축소된다.<sup>3,24)</sup> 초음파 추적 관찰 시 시술자는 시술 1개월 후부터 결절 부피 감소를 관찰하며, 6개월 시점에는 기저 부피 대비 50%~80% 수준의 단기 감소율을 산출한다.<sup>3)</sup> 1년 시점의 부피감소율(volume reduction ratio, VRR)은 Monpeyssen 등이 시행한 체계적 문헌고찰에서 56%~93% 범위로 보고되었고,<sup>25)</sup> 다른 메타분석에서는 VRR이 6개월 64.5%, 12개월 76.9%, 36개월 92.2%까지 확인되었다.<sup>4)</sup> 북미 3개 기관에서 620개 결절을 대상으로 한 다기관 전향 연구에서도 12개월 시점 중위 VRR이 70.9%(IQR 52.9%~86.6%), 치료 성공률(VRR ≥50%)이 78.4%인 반면 합병증 발생율은 3.2%였다.<sup>34)</sup> 국내 연구에서는 421명의 환자, 456개 결절을 중위 90개월간 추적한 결과 평균 VRR이 2년 시점에 81%, 5년에 90%, 10년 이후 94%라는 결과가 발표되었으며<sup>35)</sup> 또 다른 단일 기관 연구에서는 267개 결절을 대상으로 RFA를 시행한 결과 5년·10년 시점 VRR이 각각 97.4%, 96.9%로 측정되었으며, 단일 세션군과 다회 세션군 사이에 최종 VRR 차이는 통계적으로 유의하지 않았다는 결과가 보고되었다.<sup>36)</sup>

결절의 체적이 단계적으로 줄어들어 따라 환자가 호소하던 경부 연하 곤란, 이물감 등의 압박 증상과 표면의 외형적 용기 변형이 호전된다.<sup>3,24)</sup> 치료 성적에는 기저 결절의 크기, 고형 성분의 비율, 혈관 분포 양상, 단위 부피당 투여 에너지양 등이 종합적으로 영향을 미친다.<sup>3,23)</sup> 치료 전 표적 결절의 초기 기저 부피가 작을수록 시술 후 부피 감소율이 더 높았는데<sup>24)</sup> 한 북미 다기관 연구에서 부피 20 mL 초과 결절은 12개월 시점 VRR이 50%에 미치지 못할 위험이 유의하게 증가하였고<sup>34)</sup> 10년 코호트에서도 20 mL 이상 결절의 장기 재생장 위험은 10 mL 미만 결절에 비해 2.3배에 달하였다(HR 2.315, 95% CI 1.183~4.530, p=0.014).<sup>35)</sup> 기저 부피가 20 mL 이상인 거대 결절은 단일 시술만으로 전체 종양 구획에 에너지를 균일하게 전달하기 어려워 1회 시술만으로는 부피 감소율이 제한된다.<sup>3,24)</sup> 또한 남성 또는 혼합성 결절은 열전도가 비교적 균일하게 이루어져 고형 결절보다 빠르고 큰 부피 감소를 보이는 경향을 보였다.<sup>4,37)</sup> 100% 고형 결절의 평균 VRR이 약 67% 수준에 머무르는 데 비해, 남성 성분이 우세한 결절에서는 87% 이상까지 올라가기도 한다.<sup>37)</sup> Russell 등이 시행한 전향 연구에서는 미세낭성 스폰지양 결절의 VRR이 76%로 가장 높았고, 고형 결절은 67% 수준이었다.<sup>34)</sup>

단위 부피당 전달 에너지(J/mL) 역시 치료 효과에 영향을 주는 변수이다. Noel 등이 발표한 연구에 따르면 756, 1,311, 2,109 J/mL에서 12개월 50% VRR 달성률이 각각 50%,

75%, 99%로 나타나, 단위 부피당 전달 에너지가 충분할수록 유의하게 좋은 치료 결과가 달성됨을 보여주었다.<sup>4)</sup> 특히 혈류가 다량 분포하는 과혈관성 결절은 순환 혈액이 열을 흡수하는 작용을 하기 때문에 국소 소작 효율이 낮아진다.<sup>23,25)</sup> 이러한 효과를 제어하기 위해 시술자는 동맥 우선 소작 기법을 초기 단계에 병행하거나 단위 부피당 전달 에너지의 출력을 조절하여야 한다.<sup>23)</sup>

### 자율기능성 갑상선결절의 기능적 치료 성적

AFTN에서는 부피 감소만이 아니라 갑상선 기능 정상화 여부가 치료 성공의 척도가 된다.<sup>38,39)</sup> 열절제로 파괴된 기능성 결절 조직은 자체적인 갑상선 호르몬 합성 기능을 상실하므로 시술 후 혈청 내분비 지표가 단계적으로 안정화되는 임상적 경과를 보인다.<sup>39)</sup> Lee 등이 발표한 연구에 따르면 AFTN 환자에 RFA를 시행한 이후 혈청 TSH 및 유리 티록신 수치가 기준 범위로 회복되는 비율을 70%~80% 수준으로 보고한다.<sup>38,39)</sup> Noel 등이 발표한 체계적 문헌고찰에서는 1년 시점 TSH 정상화율이 41%~57% 범위로 제시되었고, 부피 10 mL 미만의 단일 AFTN에서는 함갑상선제 중단율이 74%~86%라고 발표하였다.<sup>4)</sup> 또한 초기 기저 부피가 15 mL 이하인 결절은 단일 RFA 시술만으로 내분비 기능 정상화 상태에 도달하는 비율이 거대 결절에 비해 상대적으로 높게 산출되었다.<sup>38,39)</sup> 다만 15~20 mL를 넘어서는 대용량 AFTN이나 다발성 AFTN에서는 단일 세션으로 충분한 정상화를 기대하기 어렵다.<sup>4)</sup> 초기 부피가 20 mL를 초과하는 대형 결절에서 단일 시술만으로 기능성 조직을 통제하기 어려울 경우 다단계 방식의 분할 소작이 진료 일정에 계획된다.<sup>3,31)</sup> 2021년 아시아 태스크포스 권고안에서는 결절 크기와 무관하게 RFA를 고려할 수 있되, 단일 세션 성공이 어려울 것으로 예측되는 결절(대용량, 다발성 등)에서는 방사성요오드 치료를 우선 검토할 것을 제안하였다.<sup>3)</sup>

정상 실질 보존을 위해 가장자리 경계를 남기는 비기능성 결절과 달리 시술자는 피막에 인접한 변연부를 포함한 전체 종양 조직 구획을 소작 표적으로 지정한다.<sup>3,24)</sup> 병변 가장자리에 생존 조직이 남겨질 경우 해당 부위에서 호르몬 합성 및 분비 대사가 유지되어 현성 또는 불현성 상태의 갑상선중독증이 해소되지 않거나 추후 재발한다.<sup>3)</sup> anti-TPO 양성이거나 기저 하시모토 갑상선염이 있는 환자에서는 RFA 후 영구적 갑상선 기능저하가 발생할 수 있으므로, 시술 전 위험 인자 평가와 환자 고지가 빠짐없이 이루어져야 한다.<sup>24)</sup> AFTN 환자의 추적은 1·3·6·12개월 시점에 TSH, free T4, 트리요오드티로닌 (triiodothyronine, T3) 측정과 필요시 갑상선 스캔을 포함하

며, 추가 치료 결정 또한 영상 소견이 아닌 혈청 TSH 수치를 핵심 기준으로 삼는다.<sup>24)</sup>

### 재성장의 정의와 위험 인자

RFA 후 결절의 부피가 감소하다가 일정 시점 이후 세포 분열을 재개하여 병변 체적이 다시 팽창하는 경과를 재성장 (regrowth)으로 분류하는데,<sup>3)</sup> 추적 관찰 기간 동안 측정된 대상 결절의 총 부피가 시술 후 기록된 최소 부피 대비 50% 이상 증가한 형태학적 변화가 병변 재성장의 임상적 기준으로 정의된다.<sup>3,24)</sup> Xiaoyin 등이 발표한 결과에 따르면 시술 후 1~5년이 경과하는 시점 사이에 5%~20% 비율의 환자군에서 표적 결절 부피의 임상적 재성장이 보고된다.<sup>24)</sup> Park 등의 10년 코호트 연구에서는 전체 456개 결절 가운데 53개(12%)에서 재성장이 확인되었으며, 평균적으로 약 4년 시점에 발생하였다.<sup>35)</sup> 반면 Sim 등이 시행한 39.4개월 증위 추적 연구에서는 재성장 비율이 24.1%로 좀 더 높았고, 생존 부피 50% 이상 증가까지 포함하면 57.4%까지 늘어났다.<sup>40)</sup> 결절의 재성장은 무엇보다 고주파 에너지가 도달하지 않은 가장자리 변연부의 생존 조직에서 기원하여 세포 증식을 전개한다.<sup>32)</sup> 갑상선 결절의 장기적 부피 재성장을 유발하는 주된 위험 인자로는 시술 전 종양의 초기 기저 부피와 피막 가장자리를 감싸며 주행하는 변연부 혈류망이 지목된다.<sup>23,24)</sup> 그 가운데서도 해부학적 위험 삼각지대나 RLN 주행 궤적에 인접하여 신경 마비 회피 목적으로 열 소작을 배제한 변연부 구역에서 주로 잔여 종양 조직의 체적 증식이 관찰된다.<sup>31,32)</sup> 불완전하게 차단된 변연부 배수 정맥망과 결절 유입 동맥은 살아남은 잔여 결절 세포에 산소와 영양분을 지속적으로 공급하여 이차적인 종양 체적 확장을 유도하게 된다.<sup>23,25)</sup> 이를 초기에 포착하기 위한 도구로 조영증강 초음파를 이용한 잔존생존비(residual vital ratio, RVR) 측정이 유용하며, RVR이 높게 기록될수록 향후 재성장 발생 확률이 비례하여 상승한다.<sup>27)</sup> 수압 박리법과 동맥 우선 소작 술기가 변연부 생존 조직 비율을 낮추고 주변 혈류 유입을 제어함으로써 병변의 재성장 발생률을 하향 조절하는 것으로 알려져 있다.<sup>24)</sup>

### 추가 치료의 적응

정기적인 초음파 추적 관찰 중 결절의 객관적인 재성장이 확인되거나 환자가 호소하던 물리적 압박 증상이 소실되지 않고 잔존할 경우 RFA 추가 시술을 대안으로 고려한다.<sup>3,24)</sup> 권고안이 제시하는 추가 치료의 적응은 (1) 변연부 재성장(최소 부피 대비 50% 이상 증가), (2) 12개월 VRR 50% 미만, (3) 증

상 또는 미용 문제의 불완전 해소나 재발 등 세 가지로 정리된다.<sup>3,24</sup> 추적 중 결절 내 혈류 신호가 새로 출현하거나 부피가 증가하는 경우에도 추가 소작을 신중히 고려할 필요가 있다.<sup>3,24</sup> 1차 시술 이후 조직 응고 괴사에 의한 부피 감소율이 정체기에 도달하고 임상 증상이 남아있다면 변연부 잔여 생존 조직 구역을 표적으로 삼아 2차 소작을 후속적으로 수행할 수 있다.<sup>3,24</sup> AFTN 환자에서는 시술 종료 후에도 혈청 내분비 지표가 정상화되지 않으면 호르몬을 분비하는 잔여 종양 조직을 영상으로 추적하여 소작 표적으로 삼는다.<sup>38,39</sup> 다발성 결절 환자에서 표적 결절 소작 이후에도 경부 증상이 지속되면 인접한 다른 결절의 형태적 성장이 원인으로 분석되어 추가 소작 대상 병변으로 편입된다.<sup>7)</sup>

추가 RFA는 기술적으로 첫 시술보다 까다로운 편이다. 이미 처리된 부위의 괴사 조직은 단단해지고 섬유화되어 전극 이동이 쉽지 않으며, 새로 다루어야 할 영역은 흔히 첫 시술에서 보존되었던 변연부, 즉 주변 중요 구조와 가장 가까운 부위에 위치한다.<sup>9)</sup> 시술자는 2차 치료 시 이전 1차 시술로 인해 피막 외곽에 발생한 전경부 띠근육의 섬유화 및 조직 유착 정도를 파악하여 전극 바늘의 진입 궤적과 통과 경로를 수정한다.<sup>23,28)</sup> 다회 소작을 거친 잔여 결절은 내부 조직의 열성 섬유화가 진행되어 바늘 진입 시 물리적 저항감을 유발하며 열에너지 확산 패턴이 초기 시술 환경의 예측 수치와 상이하게 나타날 수 있으므로 주의한다.<sup>23)</sup> 시술 시기로는 1차 시술로 인한 조직의 응고 괴사 및 체내 대식세포 흡수 과정이 안정화되는 6개월에서 1년 이상의 경과 시간 이후 시점을 추가 치료의 적응기로 설정한다.<sup>3,24)</sup> 동일 병변에 대한 반복 소작은 결절의 누적 부피 감소율을 향상시키나 인접 구조물의 섬유성 유착 부작용 발생 빈도 역시 증가하므로 치료 이득을 비교하여 시행 여부를 결정하여야 한다.<sup>3,24)</sup>

### 지연 수술과 추적 관찰

RFA 시행 후 환자의 전신 상태 및 표적 결절의 부피 변화 추이를 영상으로 평가하기 위해 시술 후 정기적인 초음파 추적 관찰이 수행된다.<sup>3)</sup> KSThR 권고안이 제시하는 표준 추적 일정은 1-2개월, 6개월, 12개월, 그리고 이후 6-12개월 간격이다.<sup>3,24)</sup> 설정된 시기마다 초음파 검사와 증상 평가를 병행하며 시술 후 1년이 경과하여 종양 내부 괴사 상태가 안정화된 것으로 확인되면 통상적으로 1년 주기로 관찰 간격을 연장한다.<sup>3,24)</sup> 정기적인 검사 과정에서 부피 변화율을 산출하고 종양 에코 패턴의 변동 및 잔류 혈류 신호 유무를 도플러 영상으로 점검한다.<sup>24)</sup> AFTN을 보유하거나 자가면역항체 양성 소견이

보고된 환자군은 내분비 기능 변동을 파악하기 위해 초음파 추적 시점에 갑상선 기능 검사를 병행하여 시행한다.<sup>3,26)</sup> 관찰 기간 중 종양 결절이 지속적으로 재성장하거나 다회의 반복적인 소작 시술로도 압박 증상이 조절되지 않는 상황에서는 외과적 지연 수술(delayed surgery)을 대안으로 고려한다.<sup>14)</sup> 추적 영상에서 새로운 미세석회화 병변의 출현이나 침윤성 결절 경계 형성과 같이 악성화를 의심할 구조적 변화가 포착되면 근치적 목적의 외과적 절제 수술 경로로 전환한다.<sup>3)</sup> 거대 결절이 흉곽 내부 공간으로 하강하여 흉골하 종양 형태를 띠거나 전극 바늘 접근이 제한적인 위치로 병변이 변형된 사례 역시 지연 절제 수술의 외과적 적응 대상에 포함된다.<sup>14,24)</sup> RFA 결과로 유발된 전경부 띠근육과 갑상선 피막 외측의 섬유화 반응 및 조직 유착 현상은 수술 과정에서 구조물 간의 해부학적 박리 난이도를 비례하여 상승시킨다.<sup>14)</sup> 또한 피막 주위 섬유화 조직은 RLN이나 부갑상선의 보존을 방해하여 수술 후 합병증 발생률에 영향을 미치므로 수술 시 주의를 기울여야 한다.<sup>14,30)</sup>

## 주요 합병증

### 음성 변화와 반회후두신경 손상

음성 변화는 갑상선 RFA에서 가장 빈번하게 보고되는 중대 합병증으로, 일시적 음성 변화는 0.86%-1.45%, 영구적 음성 변화는 0.17%-0.2%의 빈도로 집계된다.<sup>7,11,22)</sup> Chung 등이 발표한 메타분석 결과를 보면 주요 합병증 가운데 음성 변화가 차지하는 비중이 가장 크며, 발생 사례 대부분이 RLN 손상에 기인한다.<sup>22)</sup> 손상 기전은 크게 세 가지로 구분된다. 우선 전극에서 발생한 열이 신경에 직접 전달되는 열손상이 첫 번째이고, 두 번째는 소작 부위 주변에 형성된 부종이나 혈종이 신경을 견인하거나 압박하면서 일으키는 이차적 손상이며, 세 번째는 리도카인이 신경 주변으로 침윤되어 발생하는 일시적 마취성 손상이다.<sup>11,22)</sup> 결절이 갑상선 후내측, 곧 기관식도구에 인접한 위험 삼각 영역에 자리잡고 있을 때 손상 위험이 가장 커진다는 점은 여러 보고에서 일관되게 지적되어 왔다.<sup>6,11)</sup>

예방 전략은 다층적이다. 우선 위험 삼각 영역에서는 완전한 소작보다 안전성을 우선하는 저소작(under-treatment)을 표준으로 삼는다.<sup>6,31)</sup> 무빙샷 기법을 통해 전극 팁의 위치를 끊임없이 바꾸어 한 부위에 열이 누적되지 않도록 하며<sup>6,41)</sup> 경협부 접근법으로 전극 전장을 실시간 가시화하면서 신경 영역과의 거리를 모니터링한다.<sup>6,31)</sup> 수압 박리법으로 결절과 신경 사이에 D5W를 주입해 물리적·열적 장벽을 형성하는 것 또한 중요한 보호 수단이며<sup>6,33)</sup> 전극과 신경 간 최소 3 mm 이상의

거리를 유지하는 것이 권장 기준이다.<sup>22)</sup>

이비인후과 의사가 시술 중 직접적으로 기여할 수 있는 영역은 시술 중 실시간 음성 모니터링이다. 국소마취 상태에서 환자와 지속적으로 대화하며 음성 변화를 조기에 감지하고, 의식 증상이 있다면 즉시 소작을 중단하는 것이 기본이다.<sup>6,14)</sup> 일부 센터에서는 시술 중 굴절성 후두내시경을 활용해 성대 운동을 직접 관찰하기도 한다.<sup>14)</sup> 음성 변화가 발생하면 차가운 D5W를 RLN 주변에 즉시 주입하는 “구조 수압 박리”가 효과적인 대처법이다. 국내 연구에서는 이 방법으로 시술 중 음성 변화 환자의 상당수가 즉시 회복됨이 확인되었다.<sup>42,43)</sup> 시술 후에 음성 변화가 지속된다면 후두내시경 평가를 즉각 시행하여 성대 마비의 유무·정도를 객관적으로 문서화해야 하며, 대부분 1-3개월 안에 자연 회복되지만 지속된다면 이비인후과에 의한 음성치로나 성대주입술이 필요할 수 있다.<sup>11,22)</sup>

### 출혈 및 혈종

RFA 시술과 관련된 혈관성 합병증은 발생 시점과 임상 양상에 따라 시술 중 발현되는 미만성 갑상선 출혈과 시술 후에 형성되는 혈종으로 나누어 살펴볼 만하다. 두 양상 모두 갑상선과 그 주변에 풍부하게 분포한 혈관(전경정맥, 피막 주위 정맥총, 상갑상선동맥)을 마취 바늘 또는 전극이 통과하는 과정에서 비롯되며, 보고되는 빈도는 0.9%-2.1% 범위이다.<sup>7,11)</sup>

### 시술 중 미만성 갑상선 출혈

시술 도중에 갑작스러운 음성 변화, 심한 경부 통증, 목이 짓눌리는 듯한 압박감을 동시에 호소하는 양상을 보인다.<sup>11)</sup> 특히 음성 변화가 신경에 대한 직접적 열손상이 아니라, 인접 부위에 형성된 혈종이 RLN을 견인·압박하면서 발생하므로 시술 중 음성 이상이 출혈했다고 해서 즉시 신경 손상으로 단정하기보다, 미만성 출혈에 의한 압박 가능성도 함께 고려할 필요가 있다.<sup>11)</sup>

출혈이 의심되는 순간 소작을 곧바로 중단하고, 경부에 가벼운 압박을 가해 지혈을 유도한다. 동시에 초음파로 출혈원 혈관이 식별되면, 해당 혈관에 대한 직접 소작이 효과적인 처치가 될 수 있다.<sup>30,40)</sup> 출혈이 신경 인접 부위에서 발생한 경우 일시적인 음성 변화가 동반될 수 있지만, 혈종이 흡수되는 과정에서 대부분 회복된다.<sup>40)</sup>

예방을 위해서는 도플러 초음파로 피막 주위 혈관과 전경정맥의 위치를 사전에 면밀하게 파악한 뒤, 이들 혈관을 우회할 수 있는 진입 경로를 설계해야 한다.<sup>30,40)</sup> 18 G 이하의 가는 전극이 굵은 전극에 비해 혈관 손상과 출혈성 후유증의 위험을

의미 있게 낮춘다는 점도 일관되게 발표되어 왔다.<sup>30,44)</sup> 영양동맥 우선 소작은 미만성 출혈 발생 가능성을 저하시킬 수 있어 시술 초기에 주요 동맥을 의도적으로 폐쇄해 두면 시술 중 갑작스러운 출혈 위험과 결절 내 출혈을 함께 낮출 수 있다.<sup>6,31)</sup>

### 시술 후 혈종

시술 후 혈종은 0.9%-2.1%의 빈도로 보고되며<sup>7,11)</sup> 발생 위치에 따라 세 가지 형태로 분류된다. 갑상선 주변(perithyroidal) 혈종, 피막하(subcapsular) 혈종, 결절 내(intranodular) 혈종이 그것이다.<sup>18)</sup> 원인은 본질적으로 동일한데, 전경정맥이나 피막 주위 혈관의 손상이 가장 흔한 원인이다.<sup>18)</sup> 그러나 발생 시점은 다양해서, 대부분 시술 종료 직후에 확인되지만 전극 삽입 시점에 갑작스럽게 경부 혈종이 형성되어 시술 자체를 즉시 중단해야 했던 경우도 보고된다.<sup>11)</sup> 임상적으로는 초음파상 저에코 혹은 혼합에코의 집합으로 즉각 식별되며, 환자는 경부 압박감이나 가벼운 통증 정도를 호소하는 것이 일반적이다.<sup>7,11)</sup>

대부분의 혈종은 보존적 치료만으로 해소된다. 출혈이 확인되면 일단 소작을 중단하고 경부에 5-10분간 가벼운 압박을 가해 지혈을 유도한다. 이 경우 혈종은 시간이 지나면서 자연적으로 흡수되며, 1-2주 안에 완전히 사라지는 것이 보통이다.<sup>18,19)</sup> 혈종이 너무 크거나 환자의 불편감이 두드러지는 경우, 혹은 전극 진입 경로를 따라 피부로 혈액이 새어 나오는 경우에는 시술을 잠시 중단하고 경부 압박 후 재개 여부를 신중히 가늠해야 한다.<sup>6)</sup> 매우 드문 일이지만, 다량의 급성 출혈이 기도를 압박해 호흡 곤란이나 질식으로 이어지는 경우도 보고되었다.<sup>6,11)</sup> 이러한 응급 상황에서는 이비인후과에 의한 즉각적인 기도 확보와 외과적 감압이 요구된다.<sup>14)</sup>

혈종 예방의 기본 원리는 미만성 출혈의 그것과 다르지 않다. 시술자는 피막 주위 혈관과 전경정맥의 위치를 미리 정밀하게 검토해야 한다.<sup>30)</sup> 또한 시술 전 항응고제·항혈소판제의 관리를 시행하고 조절되지 않은 고혈압을 미리 안정화시키는 일은 출혈 예방에 도움을 줄 수 있다.<sup>3,11)</sup>

### 결절 파열

결절 파열은 다른 갑상선 치료법에서는 드물고 RFA에서 비교적 특징적으로 나타나는 합병증으로, 보고된 빈도는 0.19%-2.5%로 드문 편이다.<sup>7,11,45)</sup> 전형적 양상은 시술 후 수 주에서 수 개월(평균 54.8±43일, 범위 9-60일)이 지난 시점에 갑작스러운 경부 통증과 부종이 나타나는 것이다.<sup>7,45)</sup> 환자는 흔히 심한 연하통을 호소하고, 경부 압통과 열감이 확인된다.<sup>11,45)</sup> 기전상으로 볼 때 파열은 갑상선 피막의 점진적 약화

에서 비롯되는 현상으로, 갑상선 내부의 액체 성분이 외부로 빠져나오면서 증상을 유발한다.<sup>6,11)</sup> 파열 위험이 있는 결절은 초음파상 시간이 지남에 따라 점진적으로 크기가 줄어드는 양상을 보이다가 특정 시점에서 파열이 일어난다.<sup>11)</sup>

원인적 측면에서 결절 내 출혈의 출처는 (1) 종양 내 미세혈관에서의 누출, (2) 환자 본인의 과혈관성, (3) 종양 벽과 갑상선 피막 자체의 찢어짐, (4) 시술 후 마사지나 과도한 경부 움직임 등 네 가지 가능성이 제시되어 왔다.<sup>11,45)</sup> 그러므로 파열의 위험 인자로 자주 지목되는 것들은 시술 후 치료 부위를 만지거나 마사지하는 행위, 급격한 경부 움직임, 그리고 초기 부피 4.5 cm 이상의 큰 결절 등이다.<sup>7,45)</sup> 따라서 시술 후 환자에게는 (1) 시술 부위를 만지거나 마사지하지 말 것, (2) 목에 무리한 압박이나 회전 운동을 가하지 말 것, (3) 무거운 물건을 들거나 격렬한 운동을 1-2주간 피할 것 등을 구체적으로 안내해 두어야 한다.<sup>6,45)</sup> 영상의학적으로 결절 파열은 대체로 세 유형으로 분류된다. 가장 흔한 것은 전방 피막 파열로 전체의 83%(25/30)를 차지하며, 이외에 후방 피막 파열, 그리고 실질 내 파열로 이어지는 피막하 파열이 있다.<sup>45)</sup>

파열에 대한 치료는 파열의 규모와 합병 양상에 따라 단계적으로 접근한다. 작은 파열은 진통제와 항생제, 경과 관찰만으로도 자연 호전되는 경우가 많다.<sup>11)</sup> 그러나 통계적으로 보면 침습적 처치가 요구된 비율이 약 45%(15/33)에 이르렀다는 보고도 존재하므로, 보존적 치료에만 의존하기보다는 임상 경과를 면밀히 추적해야 한다.<sup>11,45)</sup> 4.5 cm 이상의 큰 결절에서 파열이 발생한 경우 초기부터 침습적 중재를 우선적으로 검토하는 편이 권장되며<sup>11,45)</sup> 그보다 작은 결절에서는 보존적 치료를 먼저 시도해 보고 반응이 미흡하거나 농양으로 진행할 경우 영상 유도 배액 또는 수술적 배액으로 옮겨 가는 단계적 전략이 제시된다.<sup>11,45)</sup>

결절 파열과 임상 양상이 비슷하지만 본질이 다른 합병증으로 가성낭성변화(pseudocystic transformation, colliquation)가 보고되고 있기 때문에 진단 시 주의하여야 한다.<sup>11)</sup> 가성낭성변화는 갑상선 실질 내 액체가 경부 근막으로 누출되는 현상으로, 시술 후 약 3주 시점에 통증과 갑작스러운 경부 부종을 보이며 발현된다.<sup>11,45)</sup> 빈도는 0.3%~4.9% 범위로 보고되지만<sup>11)</sup> 시술 후 갑상선 결절의 정상적인 변화(저에코, 비균질 양성, 비규칙 경계)와 가성낭성변화의 초음파 소견이 서로 겹치는 부분이 있어 진단이 어려운 측면이 있다.<sup>11)</sup> 치료로는 경구 코르티코스테로이드 요법에 비교적 잘 반응하는 것이 일반적이다.<sup>11,45)</sup>

## 갑상선 기능 이상

RFA 후 갑상선 기능 변화는 크게 일시적 갑상선독증과 영구적 갑상선기능저하증으로 나뉜다. 일시적 갑상선독증은 소작 과정에서 결절 내 갑상선호르몬이 혈중으로 방출되며 발생하며, 대다수 환자에서는 증상이 경미하거나 없고 1-2개월 안에 정상화된다.<sup>11,22)</sup> 두근거림, 열감, 체중 감소 등이 흔한 증상이며, 증상이 심한 경우 베타차단제로 조절할 수 있다.<sup>11)</sup> 기저 갑상선기능항진증이 있는 환자에서는 시술 전후 갑상선독증의 악화 위험이 커지므로 다학제 협진이 필요하다.<sup>3,30)</sup>

영구적 갑상선기능저하증은 더 드물다고 알려져 있다. 1,459명의 환자를 분석한 대규모 연구에서 단 1례(0.07%)에서만 영구적 기능저하증이 보고되었는데, 이 환자의 시술 전후 검사 자료를 들여다보면 anti-TPO 항체가 명확히 상승되어 있어 기저 자가면역성 갑상선염의 진행이 결정적 배경이었음을 시사한다.<sup>11)</sup> 한쪽 갑상선 전체가 소작된 AFTN 환자에서도 드물게 영구 기능저하가 관찰된다는 점도 주의해야 한다.<sup>30)</sup> 그러므로 RFA를 계획하는 환자에게 갑상선 자가항체 검사를 포함한 시술 전 갑상선 기능 평가를 시행해야 하며, anti-TPO 또는 항갑상선글로불린 항체가 양성으로 확인되면 시술 후 영구 기능저하의 가능성을 사전에 환자에게 충분히 안내해야 한다.<sup>11,22)</sup>

기저 갑상선 기능이 정상인 환자에서 한 엽의 결절만 RFA한 경우뿐 아니라 양측 결절에 대한 RFA, 그리고 반대측 절제술 병력이 있는 환자에서 반대측에 RFA를 시행한 경우에도 대부분 갑상선 기능이 잘 보존되는 것으로 알려져 있다.<sup>46,47)</sup> Hong 등이 시행한 국내 연구에서는 양측 양성 결절에 대한 RFA 후 갑상선 기능 보존률이 95%를 상회하였고<sup>46)</sup> 반대측 절제 병력이 있는 환자에서도 RFA 후 장기간 의미 있는 기능 저하가 없다는 것이 보고되었다.<sup>47)</sup> 추적 중 갑상선기능검사는 적어도 첫 추적(1-2개월)에서는 시행하고, 자가항체 양성 환자에서는 이보다 빈번한 모니터링이 권장된다.<sup>11,17)</sup>

## 경미한 합병증과 부작용

통증은 시술 중과 시술 직후 가장 흔한 증상으로, 보고 빈도는 0.8%~15.7%에 달한다.<sup>11,22)</sup> 환자는 치료 부위에 직접적인 통증을 호소할 뿐만 아니라, 치아·턱·귀·어깨·가슴 등으로 방사되는 연관통을 보고하기도 한다.<sup>11)</sup> 통증의 양상이 단순하지만은 않다는 점도 짚어 둘 만하다. 대다수의 경우 고주파 출력을 잠시 낮추거나 시술을 일시 중단하면 빠르게 해소되며, 시술 후 통증 또한 1-2일 안에 자연 소실되지만<sup>6,22)</sup> 통증이 장기화되는 드문 사례를 염두에 두고 시술을 시행하여야 한다.<sup>11)</sup>

발열은 0.3%~6%의 빈도로 보고되며, 대개 38℃ 안팎까지

일시적으로 상승했다가 시술 후 24-36시간 이내에 자연 해소된다.<sup>11)</sup> 한 보고에 따르면 발열을 보인 5명 모두에서 별도의 약물 처치 없이도 정상 체온으로 회복되었다.<sup>11)</sup>

부종은 약 1.0%에서 발생하며, 전극 삽입 부위 주변의 경미한 부종이 가장 흔한 양상이다.<sup>11)</sup> 대부분 24시간 이내에 자연 호전되고, 일부에서는 베타메타손 1.5 mg 단회 투여로 부종이 비교적 빠르게 가라앉는다.<sup>11)</sup>

피부 화상은 0.27% 빈도로 보고되며, 대다수가 전극 진입 부위의 1도 화상으로 7-10일 안에 자연 회복된다.<sup>11,22)</sup> 그렇지만 드물게 전층 화상이 발생해 3주에 걸쳐 치유되며 반흔을 남긴 사례도 존재하므로 전극 진입 시 피부와의 접촉을 최소화하고 접지 패드를 필수적으로 부착해야 한다.<sup>11)</sup> 임신 중인 환자나 심박조율기 등 전기적 심장 장치를 가진 환자에서는 양극성(bipolar) 전극 사용이 화상 위험과 전기적 간섭을 동시에 줄이는 데 도움이 된다.<sup>3,11)</sup>

오심·구토는 0.62%에서 발생하지만 대부분 1-2일 안에 호전되며, 일부 환자에서는 항구토제 사용이 필요할 수 있다.<sup>11,22)</sup> 기침은 1.26%에서 나타나며, 주로 기관에 인접한 결절을 조작할 때 유발된다.<sup>11,31)</sup> 기침 발작이 일어나는 경우 전극을 기관에서 약간 후퇴시키거나 짧은 활성 팁을 사용하고 출력을 낮추면 조절이 가능하다.<sup>31)</sup>

미주신경반응은 0.34%에서 관찰되며, 서맥, 저혈압, 발한, 오심, 호흡곤란, 때로는 구토와 의식 저하의 형태로 나타난다.<sup>11,22)</sup> 대부분 24시간 이내에 후유증 없이 회복되며 시술을 일시 중단하거나 또는 다리 거상만으로 10분 이내에 해소되는 경우가 많다. 불안, 통증, 또는 미주신경 인접 결절의 자극이 흔한 유발 요인이다.<sup>11)</sup>

일시적 고혈압은 0.46%에서 발생하며, 갑상선호르몬 방출 또는 통증과 연관된 것으로 추정되고 기저 고혈압이 있는 환자에서 나타나는 것으로 보고되었다.<sup>11)</sup> 그러므로 조절되지 않은 고혈압이 있는 환자, 즉 고혈압 응급 상태에 가까운 환자는 혈압이 충분히 안정화되기 전에는 RFA를 미루는 편이 안전하다.<sup>11)</sup> KSThR 권고안 또한 시술 중 지속적 혈압 모니터링을 권장하고 있다.<sup>11,17)</sup>

## 결론

갑상선 RFA는 양성 및 자율기능성 결절 치료에 있어 수술을 대체하여 증상을 해소하고 기능을 보존하는 안전한 최소침습적 표준 치료로 자리 잡았다. 성공적 시술과 합병증 예방을 위해서는 엄격한 환자 선정과 초음파 및 후두내시경을 통한 철

저한 사전 평가가 필수적이다. 아울러 경협부 접근법, 무빙샷, 수압 박리법 등 핵심 술기의 숙련된 적용이 요구된다. 임상적으론 장기적인 재성장 가능성을 염두에 두고 체계적인 추적 관찰을 시행하며, 환자 맞춤형 전략을 수립함으로써 안전하고 완성도 높은 진료를 제공하며, 무엇보다 이비인후과 의사는 두경부 해부학적 전문성, 후두내시경 평가 능력, 합병증에 대한 외과적 대응력이라는 고유한 강점을 바탕으로 갑상선 RFA 시행에 있어 핵심적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다.

## Acknowledgements

Not applicable.

## Funding Information

Not applicable.

## Conflicts of Interest

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

## ORCID

Hanaro Park, <https://orcid.org/0000-0001-6804-0760>

Minju Lee, <https://orcid.org/0009-0007-8061-8167>

## Author Contribution

Conceptualization: Park H.

Investigation: Park H, Lee M.

Writing - original draft: Park H.

Writing - review & editing: Park H, Lee M.

## Ethics Approval

Not applicable.

## References

1. Park YJ, Lee EK, Song YS, Kang SH, Koo BS, Kim SW, et al. Korean Thyroid Association management guidelines for patients with thyroid nodules 2024. *Int J Thyroidol* 2024;17(1):208-44.
2. Moon JH, Hyun MK, Lee JY, Shim JI, Kim TH, Choi HS, et al. Prevalence of thyroid nodules and their associated clinical parameters: a large-scale, multi-

- center-based health checkup study. *Korean J Intern Med* 2018;33(4):753-62.
3. Ha EJ, Baek JH, Che Y, Chou YH, Fukunari N, Kim J, et al. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: recommendations from the Asian Conference on Tumor Ablation Task Force. *Ultrasonography* 2021;40(1):75-82.
  4. Noel JE, Sinclair CF. Radiofrequency ablation for benign thyroid nodules. *J Clin Endocrinol Metab* 2024;109(1):e12-7.
  5. Gharib H, Papini E, Garber JR, Duick DS, Harrell RM, Hegedus L, et al. American Association of Clinical Endocrinologists, American College of Endocrinology, and Associazione Medici Endocrinologi medical guidelines for clinical practice for the diagnosis and management of thyroid nodules - 2016 update appendix. *Endocr Pract* 2016;22(Suppl 1):1-60.
  6. Sung JY. Effective and safe application of radiofrequency ablation for benign thyroid nodules. *J Korean Soc Radiol* 2023;84(5):985-98.
  7. Baek JH, Lee JH, Sung JY, Bae JI, Kim KT, Sim J, et al. Complications encountered in the treatment of benign thyroid nodules with US-guided radiofrequency ablation: a multicenter study. *Radiology* 2012;262(1):335-42.
  8. Han Z, Shen X, Wang R. Perspective in radiofrequency ablation for benign thyroid nodules: a perspective. *Medicine* 2025;104(50):e44748.
  9. Sung JY, Baek JH, Jung SL, Kim J, Kim KS, Lee D, et al. Radiofrequency ablation for autonomously functioning thyroid nodules: a multicenter study. *Thyroid* 2015;25(1):112-7.
  10. Ross DS, Burch HB, Cooper DS, Greenlee MC, Laurberg P, Maia AL, et al. 2016 American Thyroid Association guidelines for diagnosis and management of hyperthyroidism and other causes of thyrotoxicosis. *Thyroid* 2016;26(10):1343-421.
  11. Issa PP, Cironi K, Rezvani L, Kandil E. Radiofrequency ablation of thyroid nodules: a clinical review of treatment complications. *Gland Surg* 2024;13(1):77-86.
  12. Sim JS, Baek JH. Long-term outcomes following thermal ablation of benign thyroid nodules as an alternative to surgery: the importance of controlling regrowth. *Endocrinol Metab* 2019;34(2):117-23.
  13. Lim H, Lee MK, Choi MS, Cho W, Park JS, Sim JS, et al. Comparative efficacy and safety of radiofrequency ablation and microwave ablation in benign thyroid nodule treatment: a systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol* 2025;35(2):612-23.
  14. Orloff LA, Noel JE, Stack BC Jr, Russell MD, Angelos P, Baek JH, et al. Radiofrequency ablation and related ultrasound-guided ablation technologies for treatment of benign and malignant thyroid disease: an international multidisciplinary consensus statement of the American Head and Neck Society Endocrine Surgery Section with the Asia Pacific Society of Thyroid Surgery, Associazione Medici Endocrinologi, British Association of Endocrine and Thyroid Surgeons, European Thyroid Association, Italian Society of Endocrine Surgery Units, Korean Society of Thyroid Radiology, Latin American Thyroid Society, and Thyroid Nodules Therapies Association. *Head Neck* 2022;44(3):633-60.
  15. Chu KF, Dupuy DE. Thermal ablation of tumours: biological mechanisms and advances in therapy. *Nat Rev Cancer* 2014;14(3):199-208.
  16. Ahn HS, Jung SL, Baek JH, Sung JY, Kim J. Training of radiofrequency ablation for thyroid nodules in Korea: current and future perspective. *J Korean Soc Radiol* 2023;84(5):1009-16.
  17. Kim J, Baek JH, Lim HK, Ahn HS, Baek SM, Choi YJ, et al. 2017 Thyroid radiofrequency ablation guideline: Korean Society of Thyroid Radiology. *Korean J Radiol* 2018;19(4):632-55.
  18. Kim J, Baek JH, Lim HK, Na DG. Summary of the 2017 thyroid radiofrequency ablation guideline and comparison with the 2012 guideline. *Ultrasonography* 2019;38(2):125-34.
  19. Kim J, Baek JH, Lim HK, Na DG. Summary of the 2017 thyroid radiofrequency ablation guideline and comparison with the 2012 guideline. *Ultrasonography* 2019;38(2):125-34.
  20. Ha EJ, Baek JH, Che Y, Chou YH, Fukunari N, Kim

- JH, et al. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: recommendations from the Asian Conference on Tumor Ablation Task Force – secondary publication. *J Med Ultrasound* 2021;29(2):77-83.
21. Lui MS, Patel KN. Current guidelines for the application of radiofrequency ablation for thyroid nodules: a narrative review. *Gland Surg* 2024;13(1):59-69.
  22. Chung SR, Suh CH, Baek JH, Park HS, Choi YJ, Lee JH. Safety of radiofrequency ablation of benign thyroid nodules and recurrent thyroid cancers: a systematic review and meta-analysis. *Int J Hyperth* 2017;33(8):920-30.
  23. Deandrea M, Sung JY, Limone P, Mormile A, Garino F, Ragazzoni F, et al. Efficacy and safety of radiofrequency ablation versus observation for nonfunctioning benign thyroid nodules: a randomized controlled international collaborative trial. *Thyroid* 2015;25(8):890-6.
  24. Xiaoyin T, Ping L, Dan C, Min D, Jiachang C, Tao W, et al. Risk assessment and hydrodissection technique for radiofrequency ablation of thyroid benign nodules. *J Cancer* 2018;9(17):3058-66.
  25. Monpeyssen H, Alamri A, Ben Hamou A. Long-term results of ultrasound-guided radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: state of the art and future perspectives—a systematic review. *Front Endocrinol* 2021;12:622996.
  26. Shin JE, Baek JH, Ha EJ, Choi YJ, Choi WJ, Lee JH. Ultrasound features of middle cervical sympathetic ganglion. *Clin J Pain* 2015;31(10):909-13.
  27. Yan L, Luo Y, Xie F, Zhang M, Xiao J. Residual vital ratio: predicting regrowth after radiofrequency ablation for benign thyroid nodules. *Int J Hyperth* 2020;37(1):1139-48.
  28. Cesareo R, Manfrini S, Pasqualini V, Ambrogi C, Sanson G, Gallo A, et al. Laser ablation versus radiofrequency ablation for thyroid nodules: 12-month results of a randomized trial (LARA II Study). *J Clin Endocrinol Metab* 2021;106(6):1692-701.
  29. Kuo EJ, Oh A, Hu Y, McManus CM, Lee JA, Kuo JH. If the price is right: cost-effectiveness of radiofrequency ablation versus thyroidectomy in the treatment of benign thyroid nodules. *Surgery* 2023;173(1):201-6.
  30. Javid M, Mirdamadi A, Sheida F, Nayak SS, Borkar R, Hegde R, et al. Efficacy of radiofrequency ablation in autonomous functioning thyroid nodules: a comprehensive systematic review and meta-analysis. *Acad Radiol* 2024;31(12):4843-55.
  31. Park HS, Baek JH, Park AW, Chung SR, Choi YJ, Lee JH. Thyroid radiofrequency ablation: updates on innovative devices and techniques. *Korean J Radiol* 2017;18(4):615-23.
  32. Cesareo R, Pacella CM, Pasqualini V, Campagna G, Iozzino M, Gallo A, et al. Laser ablation versus radiofrequency ablation for benign non-functioning thyroid nodules: six-month results of a randomized, parallel, open-label, trial (LARA trial). *Thyroid* 2020;30(6):847-56.
  33. Jeong SY, Baek JH, Chung SR, Choi YJ, Chung KW, Kim TY, et al. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: the value of anterolateral hydrodissection. *Ultrasonography* 2023;42(3):432-9.
  34. Russell JO, Desai DD, Noel JE, Hussein M, Toraih E, Seo S, et al. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: a prospective, multi-institutional North American experience. *Surgery* 2024;175(1):139-45.
  35. Park SI, Baek JH, Lee DH, Chung SR, Song DE, Kim WG, et al. Radiofrequency ablation for the treatment of benign thyroid nodules: 10-year experience. *Thyroid* 2024;34(8):990-8.
  36. Shin JH, Seo M, Lee MK, Jung SL. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: 10-year follow-up results from a single center. *Korean J Radiol* 2025;26(2):193-203.
  37. Muhammad H, Santhanam P, Russell JO. Radiofrequency ablation and thyroid nodules: updated systematic review. *Endocrine* 2021;72(3):619-32.
  38. Durante C, Grani G, Lamartina L, Filetti S, Mandel SJ, Cooper DS. The diagnosis and management of thyroid nodules: a review. *JAMA* 2018;319(9):914-24.
  39. Lee AKF, Hui T, Yeung ZWC, Wong EWY, Chan JYK, Lau EHL. Radiofrequency ablation compared to surgery for thyroid nodules: a case for office

- based treatment. *Laryngoscope Investig Otolaryngol* 2024;9(3):e1276.
40. Sim JS, Baek JH, Lee J, Cho W, Jung SI. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules: depicting early sign of regrowth by calculating vital volume. *Int J Hyperth* 2017;33(8):905-10.
  41. Ha EJ, Baek JH, Lee JH. Moving-shot versus fixed electrode techniques for radiofrequency ablation: comparison in an *ex-vivo* bovine liver tissue model. *Korean J Radiol* 2014;15(6):836-43.
  42. Chung SR, Baek JH, Choi YJ, Lee JH. Management strategy for nerve damage during radiofrequency ablation of thyroid nodules. *Int J Hyperth* 2019;36(1):203-9.
  43. Lee MK, Baek JH, Chung SR, Choi YJ, Lee YM, Kim TY, et al. Effectiveness of injecting cold 5% dextrose into patients with nerve damage symptoms during thyroid radiofrequency ablation. *Endocrinol Metab* 2020;35(2):407-15.
  44. Shah M, McManus C. The role of radiofrequency ablation in benign and malignant thyroid nodules. *Surg Clin N Am* 2024;104(4):779-89.
  45. Chung SR, Baek JH, Sung JY, Ryu JH, Jung SL. Revisiting rupture of benign thyroid nodules after radiofrequency ablation: various types and imaging features. *Endocrinol Metab* 2019;34(4):415-21.
  46. Hong MJ, Baek JH, Choi YJ, Lee JH, Lim HK, Shong YK, et al. Radiofrequency ablation is a thyroid function-preserving treatment for patients with bilateral benign thyroid nodules. *J Vasc Interv Radiol* 2015;26(1):55-61.
  47. Ha EJ, Baek JH, Lee JH, Sung JY, Lee D, Kim JK, et al. Radiofrequency ablation of benign thyroid nodules does not affect thyroid function in patients with previous lobectomy. *Thyroid* 2013;23(3):289-93.