

# 손목터널증후군 초음파 진단의 최신 지견

연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 재활의학연구소

이 상 철

## Recent Advances in the Ultrasound Diagnosis of Carpal Tunnel Syndrome

Sang Chul Lee, M.D., Ph.D.

Department of Rehabilitation Medicine and Research Institute, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Carpal tunnel syndrome (CTS) is the most common entrapment neuropathy of the upper extremity. While nerve conduction studies (NCS) have traditionally been the gold standard for diagnosis, high-resolution ultrasound has emerged as a powerful, non-invasive, and cost-effective alternative. This review provides a comprehensive overview of the latest advances in the ultrasound diagnosis of CTS. The review begins with an evaluation of B-mode ultrasound, focusing on the cross-sectional area (CSA) of the median nerve as the most robust diagnostic parameter, while also discussing its limitations, such as the variability of cutoff values. We then explore the incremental diagnostic value of advanced functional techniques. Doppler ultrasound provides insights into nerve vascularity, and elastography offers a quantitative measure of nerve stiffness, which has shown superiority over CSA in grading disease severity. Dynamic ultrasound and speckle tracking assess nerve mobility, directly visualizing the pathomechanical aspects of entrapment. Finally, we discuss the transformative potential of artificial intelligence (AI) and radiomics, which can extract sub-perceptual features from ultrasound images to enhance diagnostic accuracy, objectivity, and reproducibility, particularly in mild or equivocal cases. (Clinical Pain 2025;24:100-105)

**Key Words:** Ultrasound, Carpal tunnel syndrome, Median nerve, Cross-sectional area, Artificial intelligence

### 서 론

손목터널증후군(carpal tunnel syndrome, CTS)은 상지에 서 발생하는 가장 흔한 압박성 신경병증으로, 손목터널(carpal tunnel)을 통과하는 정중신경(median nerve)이 압박되어 발생한다.<sup>1</sup> 손목터널증후군은 손가락의 감각 이상, 저림, 통증 및 무지구근(thenar muscle)의 위축과 약화를 유발하여 환자의 삶의 질을 저하시키고 상당한 사회경제적 부담을 초래한다.<sup>2</sup> 병태생리학적으로 손목터널 내의 압력이 비정상적으로 증가하면 정중신경에 대한 기계적 압박이 가해지고, 이는 신경의 미세혈관 순환 장애를 일으켜 부종과 허혈을 유발한다. 이러한 상태가 만성화되면 신경 내 섬유화, 탈수초화(demyelination), 그리고 축삭 손상(axonal damage)과 같은 비가역적 변화로 진행될 수 있다.<sup>3</sup>

전통적으로 손목터널증후군의 진단은 특징적인 병력 청취와 이학적 검사(Tinel's sign, Phalen's test 등)를 통해 이루어지며, 신경전도검사(nerve conduction study, NCS)를 통해 확진하는 과정을 거친다.<sup>4</sup> 신경전도검사는 정중신경의 기능적 상태를 평가하는 객관적인 검사로, 현재까지 진단의 표준(gold standard)으로 인정받고 있다. 그러나 신경전도검사는 침습적이고 환자에게 통증과 불편감을 유발하며, 검사 비용이 상대적으로 높다는 단점이 있다.<sup>5</sup> 더욱 중요한 한계점은 임상적으로 손목터널증후군이 강력히 의심되는 환자 중 일부에서 정상 소견, 즉 위음성 결과를 보일 수 있다는 점이다.<sup>3</sup> 이러한 진단적 공백은 임상에게 치료 방향 결정에 어려움을 야기했으며, 이에 따라 비침습적이면서도 신경의 구조적 이상을 직접 시각화할 수 있는 진단 도구의 필요성이 대두되었다.

이러한 배경 속에서 고해상도 초음파는 손목터널증후군 진단의 강력한 대안으로 부상했다. 초음파는 비침습적이고 방사선 노출이 없으며, 비용 효율적일 뿐만 아니라 실시간으로 신경과 주변 구조물의 동적 평가가 가능하다는 장점을 가진다.<sup>6</sup> 초기에는 신경의 형태학적 변화를 평가하는 데 국한되었으나, 기술의 발전에 따라 도플러(Doppler), 탄성 초음파(elastography), 동적 초음파(dynamic ultrasound) 등 신경의 기능적, 생체역학적 특성까지 평가할 수 있는 다차

<https://doi.org/10.35827/cp.2025.24.2.100>

접수일: 2025년 7월 9일, 수정일: 2025년 8월 1일,

게재승인일: 2025년 8월 8일

책임저자: 이상철, 서울시 서대문구 연세로 50-1

☎ 03722, 연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 재활의학연구소

Tel: 02-2228-3711, Fax: 02-2227-8341

E-mail: bettertomo@yuhs.ac

원적 진단 도구로 진화하였다.<sup>6</sup> 따라서 본 종설의 목적은 손목터널증후군 진단에 있어 초음파의 역할에 대한 최신 지견을 종합적으로 고찰하는 것이다. 전통적인 B-모드(brightness-mode) 초음파의 형태학적 평가 기준부터 도플러, 탄성초음파, 동적 초음파와 같은 최신 기능적 평가 기법의 원리와 임상적 유용성을 체계적으로 분석하고, 나아가 인공지능(artificial intelligence, AI) 기반 라디오믹스(radiomics) 기술의 미래 전망까지 살펴본다. 임상 현장에서의 올바른 적용과 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

## 본 론

### 1. B-모드 초음파를 이용한 형태학적 평가

B-모드 초음파는 정중신경의 크기, 모양, 에코 특성 등 해부학적 구조를 평가하는 가장 기본적이고 핵심적인 방법이다.

**1) 표준 검사 기법 및 해부학적 지표:** 손목터널증후군의 초음파 검사는 일반적으로 12~14 MHz 이상의 고주파수 선형 탐촉자(high-frequency linear transducer)를 사용하여 수행된다.<sup>2</sup> 환자는 팔을 편안하게 테이블 위에 올려놓고 손목은 중립 위치 또는 약간 신전된 상태를 유지한다. 검사는 정중신경의 장축 및 단축 영상을 모두 얻으며, 주요 해부학적 지표인 콩알뼈(pisiform), 손배뼈(scaphoid), 갈고리뼈(hamate)를 기준으로 손목터널의 입구(inlet), 중간(mid-tunnel), 출구(outlet)를 순차적으로 관찰한다.<sup>7</sup>

**2) 핵심 정량 지표: 정중신경 단면적:** 정중신경 단면적(cross-sectional area, CSA)은 손목터널증후군 진단에서 가장 널리 연구되고 임상적으로 검증된 단일 지표이다.<sup>2</sup> 측정치는 주로 압박이 가장 심하게 일어나는 부위인 손목터널 입구, 즉 콩알뼈와 손배뼈 부위에서 수행된다. 신경의 단축 영상에서 신경집(epineurium)의 고에코 경계를 따라 면적을 측정한다.<sup>8</sup> 손목터널증후군 환자에서는 압박 부위의 근위부에서 신경 부종으로 인해 단면적이 증가하는 소견이 특징적으로 관찰된다.<sup>9</sup> 그러나 단면적의 진단적 절단값(cutoff value)은 연구마다 상당한 차이를 보인다. 여러 문헌을 종합하면 절단값은 8.5 mm<sup>2</sup>에서 12.6 mm<sup>2</sup>까지 매우 넓은 범위에 걸쳐 보고된다.<sup>2</sup> 이러한 차이는 연구 대상 집단의 인종, 성별, 나이, 체질량지수(body mass index, BMI)와 같은 인구학적 특성과 사용된 초음파 장비의 성능, 측정 프로토콜의 미세한 차이 등에서 기인하는 것으로 분석된다. 단일의 보편적인 절단값을 임상에 일괄적으로 적용하는 것의 어려움은 초음파 진단의 한계점으로 지적되어 왔으며, 이는 개별 환자의 해부학적 변이를 보정하고 진단 정확도를 높이기 위한 추가적인 지표 개발의 필요성을 시사하였다. 여러 메타분석을 종합해 볼 때, 단면적의 진단 성능은

우수한 편으로, 한 연구에서는 통합 민감도 77.6%, 특이도 86.8%를 보고하였다.<sup>2</sup> 또 다른 메타분석에서는 9~10.5 mm<sup>2</sup>의 절단값을 사용할 때 가장 높은 진단 성능을 보인다고 제시하였다.<sup>8</sup>

**3) 보조 지표 및 정성적 소견:** 단면적의 변동성을 보완하고 진단 정확도를 높이기 위해 여러 보조 지표와 정성적 소견이 활용된다.

- 편평률(flattening ratio): 손목터널 내 가장 좁은 부위(주로 갈고리뼈 수준)에서 신경이 압박되어 납작해지는 정도를 평가하는 지표로, 신경의 장경을 단경으로 나누어 계산한다. 편평률 증가는 신경 압박을 시사하는 소견이다.<sup>10</sup>

- 손목-전완 단면적 비율(wrist-to-forearm ratio, WFR): 이 지표는 환자 개인의 고유한 신경 크기 차이를 보정하기 위해 고안되었다. 손목터널 입구에서 측정된 단면적과 압박의 영향이 없는 전완부(보통 손목 주름에서 12 cm 근위부)에서 측정된 단면적을 비교한다. Klausner 등<sup>2</sup>의 연구에 따르면, 두 부위의 단면적 차이( $\Delta$ CSA)가 2 mm<sup>2</sup>를 초과할 경우, 민감도 99%, 특이도 100%라는 매우 높은 진단 정확도를 보였다. 이는 단일 단면적 측정의 한계를 극복할 수 있는 강력한 보조 지표임을 시사한다.

- 정성적 소견: 정량적 측정 외에도, 신경의 전반적인 저에코성(hypoechoogenicity) 변화, 신경집의 불분명함, 신경 부종, 그리고 압력 증가로 인해 굽힘근지지띠(flexor retinaculum)가 손바닥 쪽으로 볼록하게 튀어나오는 용기(palmar bowing) 소견 등은 손목터널증후군을 지지하는 중요한 정성적 단서가 된다.<sup>6</sup>

### 2. 신경전도검사와의 비교 및 임상적 역할

초음파가 손목터널증후군 진단에 널리 사용되면서 기존의 표준 검사인 신경전도검사와의 관계 정립은 중요한 임상적 과제가 되었다.

**1) 진단 정확도 비교 분석:** 초음파와 신경전도검사의 진단 정확도를 직접 비교한 연구 결과는 다소 일관되지 않은 경향을 보인다. 일부 연구에서는 초음파가 신경전도검사와 대등한 수준의 진단 정확도를 보인다고 보고하였고, 심지어 초기 검사로 초음파를 고려해야 한다고 주장하기도 했다.<sup>5,11</sup> 반면, 다른 연구에서는 신경전도검사가 초음파보다 더 높은 민감도를 가진다고 결론 내렸다.<sup>12</sup> 이러한 불일치를 해소하기 위한 메타분석 연구들은 보다 명확한 통찰을 제공한다. 한 대규모 메타분석에 따르면, 초음파의 통합 민감도는 80%, 특이도는 90%였으며, 신경전도검사 및 근전도 검사의 통합 민감도는 89%, 특이도는 77%로 나타났다.<sup>3</sup> 이 결과는 신경전도검사가 신경 기능 저하를 감지하는 데 약간 더 민감할 수 있는 반면, 초음파는 구조적 이상을 바탕으로 손목터널증후군이 아닌 경우를 배제하는 데 약간

더 특이적일 수 있음을 시사한다. 즉, 두 검사는 서로 다른 측면을 평가하며, 어느 한쪽이 절대적으로 우월하다고 보기 어렵다.

**2) 상호 보완적 관계와 임상적 유용성:** 따라서 초음파와 신경전도검사는 경쟁 관계가 아닌 상호 보완적 관계로 이해하는 것이 타당하다. 신경전도검사가 신경 신호의 전도 속도와 진폭을 통해 신경의 기능적 상태를 평가한다면, 초음파는 신경의 크기, 모양, 주변 구조물과의 관계 등 구조적 상태를 평가한다. 이러한 상호 보완성은 임상 현장에서 초음파의 다각적인 역할을 규정한다.

• 1차 선별 검사: 초음파는 비침습성, 신속성, 낮은 비용 덕분에 손목터널증후군이 의심되는 환자에서 이상적인 1차 선별 검사로 활용될 수 있다.<sup>1</sup> 초음파에서 명확한 양성 소견이 관찰되고 임상 증상과 일치하면 추가적인 침습적 검사 없이 진단하고 치료를 시작할 수 있다. 반면, 초음파 소견이 정상이거나 모호할 경우 신경전도검사를 시행하여 기능적 평가를 보장하는 단계적 접근이 가능하다.<sup>12</sup>

• 구조적 원인 감별: 초음파의 가장 독보적인 장점은 신경전도검사로는 절대 확인할 수 없는 구조적 이상을 직접 시각화하는 능력에 있다. 손목터널 내 공간을 차지하는 병변, 예를 들어 결절종(ganglion cyst), 지방종(lipoma), 신경초종(schwannoma)과 같은 종양이나, 굴곡건의 건초염(tenosynovitis), 지속성 정중동맥(persistent median artery), 분지된 정중신경(bifid median nerve)과 같은 해부학적 변이 등은 초음파를 통해 명확히 감별할 수 있다.<sup>13</sup> 이는 치료 계획 수립에 결정적인 정보를 제공한다.

• 신경전도검사 음성 손목터널증후군 환자에서의 진단: 초음파의 임상적 가치가 가장 빛을 발하는 영역 중 하나는 임상적으로 전형적인 손목터널증후군 증상을 호소하지만 신경전도검사 결과가 정상으로 나오는 환자군이다. 한 후향적 연구에 따르면, 임상적으로 진단된 손목터널증후군 환자 중 신경전도검사가 정상이었던 군에서 대조군에 비해 통계적으로 유의미한 단면적 증가( $10.1 \pm 2.1 \text{ mm}^2$ )가 관찰되었다.<sup>14</sup> 이는 신경전도검사가 초기 또는 경미한 축삭 손상이나 탈수초화를 감지하지 못하는 경우에도, 초음파는 신경 부종과 같은 구조적 변화를 포착하여 객관적인 진단 근거를 제공할 수 있음을 의미한다. 이처럼 초음파는 신경전도검사의 진단적 한계를 보완하는 중요한 역할을 수행한다.

결론적으로, 임상적 의심 정도에 따라 진단 전략을 수립하는 것이 중요하다. 증상이 명확하고 구조적 이상 감별이 필요할 때 초음파를 우선적으로 시행하고, 진단이 불명확하거나 수술 전 신경의 기능적 상태에 대한 정밀한 평가가 필요할 때 신경전도검사를 활용하는 유연한 접근법이 가장 효과적이다.

### 3. 최신 기능적 초음파 기법의 적용

초음파 기술의 발전은 단순한 형태학적 평가를 넘어 정중신경의 기능적, 생체역학적 상태를 평가하는 새로운 지평을 열었다. 이는 손목터널증후군의 복잡한 병태생리를 보다 심층적으로 이해하고 진단 정확도를 높이는 데 기여하고 있다.

**1) 도플러 초음파: 신경 내 혈류 평가:** 손목터널증후군의 병태생리에는 신경 압박으로 인한 정맥 울혈과 동맥 허혈, 그리고 이로 인한 허혈-재관류 손상(ischemia-reperfusion injury)이 중요한 역할을 한다. 이러한 과정은 신경 내 미세혈관의 증식, 즉 혈관신생(neovascularization)을 유발할 수 있다.<sup>15</sup> 파워도플러(power Doppler) 및 컬러도플러(color Doppler) 초음파는 이러한 미세 혈류의 증가(hypervascularization)를 비침습적으로 시각화하고 정량화할 수 있는 기법이다.<sup>16</sup> 여러 연구에서 손목터널증후군 환자의 정중신경 내에서 비정상적인 혈류 신호가 유의하게 증가함이 보고되었다. 신경 내 혈류 증가는 손목터널증후군 진단에 있어 매우 높은 특이도(89~100%)를 보이는 소견으로, 양성으로 판정될 경우 손목터널증후군 진단의 확실성을 크게 높여준다.<sup>17</sup> 또한, 신경 내 혈류 신호의 강도는 단면적 증가와 함께 손목터널증후군의 전기생리학적 중증도와 유의한 양의 상관관계를 보여, 질병의 심각도를 평가하는 데에도 유용한 정보를 제공한다.<sup>18</sup> 그러나 도플러 신호의 민감도는 연구에 따라 2.2%에서 93.4%까지 매우 넓은 편차를 보여, 모든 손목터널증후군 환자에서 나타나는 소견은 아니다.<sup>16</sup> 따라서 도플러 초음파는 손목터널증후군을 배제하기 위한 선별 검사로는 부적합하지만, 다른 소견과 함께 진단을 확정하는 강력한 보조 도구로서의 가치가 크다.

**2) 탄성초음파: 신경 경직도 평가:** 만성적인 압박과 부종, 그리고 이차적인 염증 반응과 섬유화는 정중신경의 조직학적 구성을 변화시켜 생체역학적 특성, 즉 경직도(stiffness)를 증가시킨다. 초음파 탄성초음파는 이러한 조직의 경직도를 비침습적으로 측정하여 정량화하는 혁신적인 기술이다. 주로 변형 탄성초음파(strain elastography, SE)와 전단파 탄성초음파(shear wave elastography, SWE) 두 가지 방식이 사용된다. 다수의 연구와 메타분석을 통해 손목터널증후군 환자의 정중신경이 건강한 대조군에 비해 통계적으로 유의하게 더 단단하다는 사실이 일관되게 입증되었다.<sup>19</sup> 탄성초음파의 진정한 가치는 단순 진단을 넘어 질병의 중증도를 평가하는 데 있다. 단면적은 경증과 중등도 손목터널증후군을 구별하는 데 한계가 있는 반면, 탄성초음파, 특히 전단파 탄성초음파로 측정된 전단파 속도(m/s)나 영률(kPa)은 질병의 전기생리학적 중증도와 강한 상관관계를 보이며, 경증, 중등도, 중증 손목터널증후군을 효과적으로

구별할 수 있는 능력을 보여주었다.<sup>20,21</sup> 최근에는 한 걸음 더 나아가, 손목을 45도 굴곡시키는 것과 같은 동적 부하를 가하면서 진단과 탄성초음파를 측정할 경우, 중립위에서 측정했을 때보다 손목터널증후군 중증도에 따른 신경 경직도 차이가 더욱 뚜렷해져 진단적 변별력이 향상된다는 연구 결과가 발표되었다.<sup>21</sup> 이는 탄성초음파가 정적인 상태뿐만 아니라 기능적인 상태에서의 신경 생체역학 변화까지 포착할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 보여준다.

**3) 동적 초음파 및 스펙클 트래킹: 신경 이동성 평가:** 손목터널증후군의 핵심 병태생리 중 하나는 압박과 염증으로 인해 정중신경이 주변의 굴곡근이나 지지띠와 유착되어 정상적인 이동성(mobility)을 상실하는 것이다.<sup>10</sup> 동적 초음파는 환자가 손가락이나 손목을 능동적으로 움직이는 동안 정중신경이 손목터널 내에서 어떻게 미끄러지는지를 실시간으로 관찰하는 기법이다. 최근에는 스펙클 트래킹(speckle tracking)이라는 정교한 기술이 도입되어 신경의 미세한 움직임을 정량적으로 분석할 수 있게 되었다.<sup>6</sup> 스펙클 트래킹은 초음파 B-모드 영상에 나타나는 고유의 미세한 점 패턴(speckle)을 프레임별로 추적하여 조직의 이동 거리, 속도, 변형률 등을 계산하는 알고리즘이다.<sup>22</sup> 연구에 따르면, 손목터널증후군 환자는 정상 대조군에 비해 손가락을 굽히고 펼 때 정중신경의 종적 및 횡적 이동성이 유의하게 감소하며, 이러한 이동성 감소 정도는 질병의 중증도와도 관련이 있는 것으로 나타났다.<sup>22</sup> 이 기법은 손목터널증후군의 운동역학적 측면을 직접 평가함으로써 병태생리에 대한 깊은 이해를 제공하고 새로운 진단 지표로서의 가능성을 열어주고 있다. 이처럼 최신 기능적 초음파 기법들은 단면적이라는 단일 형태학적 지표의 한계를 넘어, 신경의 혈류, 경직도, 이동성이라는 다차원적인 정보를 제공한다. 이는 손목터널증후군을 ‘크기가 커진 신경’이 아니라 ‘혈류가 증가하고, 단단해졌으며, 움직임이 제한된 신경’으로 종합적으로 평가하는 패러다임의 전환을 의미하며, 진단의 정밀성을 한 차원 높이고 있다.

Table 1<sup>10,16-18,21-23</sup>은 지금까지 다룬 다양한 초음파 검사 특징을 정리한 것이다.

#### 4. 미래 전망: 인공지능과 라디오믹스(radiomics)

초음파 진단 기술의 다음 단계는 인공지능, 특히 기계 학습과 라디오믹스의 접목에서 찾을 수 있다. 이는 앞서 논의된 초음파 진단의 여러 한계점, 즉 측정의 변동성, 검사자의 의존성, 복잡한 다중 매개변수 해석의 어려움을 근본적으로 해결할 잠재력을 지닌다.

**1) 초음파 라디오믹스의 개념과 잠재력:** 라디오믹스는 초음파와 같은 의료 영상에서 인간의 눈으로는 정성적으로 인지하기 어려운 방대한 양의 정량적 특징을 컴퓨터 알고리즘을 통해 자동으로 추출하고 분석하는 기술이다.<sup>24</sup> 여기에는 영상의 강도, 모양, 질감(texture) 등 수백에서 수천 개에 이르는 고차원 데이터가 포함된다. 이 데이터를 기계 학습 또는 딥러닝 모델에 입력하여 훈련시키면, 모델은 질병의 유무를 진단하고, 중증도를 분류하며, 나아가 치료 반응이나 예후를 예측하는 정교한 패턴을 학습하게 된다.<sup>25</sup>

**2) 진단 성능 향상에 대한 최신 연구 결과:** 단면적 측정에서 초음파 라디오믹스를 적용한 최근 연구들은 매우 고무적인 결과를 보여주고 있다. 한 체계적 문헌고찰 및 메타분석에 따르면, 라디오믹스 모델은 영상의학과 의사의 육안 평가나 전통적인 단면적 측정보다 손목터널증후군을 진단하는데 월등히 높은 정확도를 보였다. 해당 분석에서 라디오믹스 모델은 통합 민감도 88%, 특이도 88%를 기록한 반면, 영상의학자의 평가는 민감도 78%, 특이도 72%에 그쳤다.<sup>24</sup> 라디오믹스의 진정한 잠재력은 진단이 어려운 경계선상의 환자군에서 드러난다. 단면적 값이 정상 범위에 포함되어 전통적인 초음파 검사로는 놓치기 쉬운 경증 손목터널증후군 환자들을 식별하는 데 라디오믹스 모델이 뛰어난 성능을 보였다는 연구 결과는 주목할 만하다.<sup>26</sup> 이는 라디오믹스가 신경의 크기 변화뿐만 아니라, 눈에 보이지 않는 미세한 질감 변화와 같은 초기 병리학적 변화를 감지할 수 있음을 시사한다. 더 나아가, 일부 연구에서는 라디오믹스 모델이 단면적을 직접 측정하지 않고 초음파 이미지 자체만으로도 손목터널증후군을 정확하게 진단할 수 있음을 보여주

**Table 1.** Diagnostic Ultrasound Techniques for Carpal Tunnel Syndrome

Technique	Primary measurement	Primary use case	Sensitivity	Specificity	References
Power Doppler ultrasound	Intranerve blood flow signal (presence/absence)	Confirmatory diagnosis	2.2 ~ 93.4%,	89 ~ 100%,	16-18
Shear wave elastography (SWE)	Shear wave velocity (m/s) or Young's modulus (kPa)	Severity grading	80 ~ 88%	76 ~ 87%	21,23
Dynamic ultrasound/speckle tracking	Nerve displacement (mm) or strain	Pathophysiology elucidation, mobility assessment	Various	Various	10,22

었다.<sup>26</sup> 이는 검사자가 수동으로 신경 경계를 설정하는 과정에서 발생하는 측정 오차와 검사자 간의 편차를 원천적으로 제거할 수 있음을 의미한다. 결과적으로 라디오믹스는 손목터널증후군 초음파 진단의 객관성, 재현성, 그리고 정확성을 획기적으로 향상시켜, 전문가 수준의 진단을 보다 보편적으로 제공할 수 있는 길을 열어줄 것으로 기대된다. 이는 검사자의 역할이 ‘측정 및 해석자’에서 인공지능 기반 진단 시스템의 ‘감독 및 검증자’로 전환되는 패러다임의 변화를 예고한다.

## 결 론

손목터널증후군 진단 분야에서 고해상도 초음파는 지난 수십 년간 괄목할 만한 발전을 거듭하며, 단순한 보조 진단 도구를 넘어 임상 현장의 핵심적인 진단 수단으로 확고히 자리 잡았다. B-모드 초음파를 이용한 정중신경 단면적 측정은 여전히 손목터널증후군을 스크리닝하고 진단하는 데 있어 가장 기본적이고 강력한 지표이다. 그러나 진단 절단값의 변동성, 검사자 의존성, 그리고 질병의 중증도를 정밀하게 평가하는 데에는 명백한 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 도입된 도플러, 탄성초음파, 동적 초음파와 같은 최신 기능적 기법들은 진단의 패러다임을 바꾸고 있다. 이 기술들은 신경의 혈류, 경직도, 이동성과 같은 복합적인 병태생리학적 변화를 직접적이고 정량적으로 평가함으로써, 특히 질병의 중증도를 객관적으로 등급화하고 해부학적 변이가 동반된 복잡한 사례를 평가하는 데 있어 진단적 가치를 크게 향상시켰다. 궁극적으로, 인공지능 기반의 라디오믹스는 초음파 영상에 내재된 방대한 정보를 최대한 활용하여 진단의 객관성, 정확성, 재현성을 한 단계 더 끌어올릴 차세대 기술로 부상하고 있다. 라디오믹스는 인간의 시각적 인지를 뛰어넘는 미세한 패턴 분석을 통해 진단의 정밀도를 높이고, 검사자 간의 편차를 줄여 진단의 표준화를 이끌 것으로 전망된다.

향후 연구는 이러한 최신 기법들의 표준화된 프로토콜을 확립하고, 대규모 전향적 연구를 통해 임상적 유용성을 검증하며, 나아가 치료 반응 모니터링 및 예후 예측 도구로서의 가능성을 탐구하는 방향으로 나아가야 할 것이다. 이러한 노력을 통해 초음파는 손목터널증후군 환자에게 더욱 정확하고, 빠르며, 환자 중심적인 의료 서비스를 제공하는 데 핵심적인 역할을 수행할 것이다.

## REFERENCES

1. Fowler JR, Gaughan JP, Ilyas AM. The sensitivity and specificity of ultrasound for the diagnosis of carpal tunnel syndrome: a meta-analysis. *Clin Orthop Relat Res* 2011;469:1089-94.
2. Chen YT, Williams L, Zak MJ, Fredericson M. Review of ultrasonography in the diagnosis of carpal tunnel syndrome and a proposed scanning protocol. *J Ultrasound Med* 2016;35:2311-24.
3. Zaki HA, Shaban E, Salem W, Bilal F, Fayed M, Hendy M, et al. A comparative analysis between ultrasound and electromyographic and nerve conduction studies in diagnosing carpal tunnel syndrome (CTS): a systematic review and meta-analysis. *Cureus* 2022;14:e30476.
4. Saggarr SK, Thaman RG, Mohan G, Kumar D. Mapping neurophysiological patterns in carpal tunnel syndrome: correlations with Tinel's and Phalen's Signs. *Cureus* 2024;16:e58168.
5. Drakopoulos D, Mitsiokapa E, Karamanis E, Kontogeorgakos V, Mavrogenis AF. Ultrasonography provides a diagnosis similar to that of nerve conduction studies for carpal tunnel syndrome. *Orthopedics* 2019;42:e460-4.
6. Yoshii Y, Zhao C, Amadio PC. Recent Advances in ultrasound diagnosis of carpal tunnel syndrome. *Diagnostics (Basel)* 2020;10:596.
7. Fu T, Cao M, Liu F, Zhu J, Ye D, Feng X, et al. Carpal tunnel syndrome assessment with ultrasonography: value of inlet-to-outlet median nerve area ratio in patients versus healthy volunteers. *PLoS One* 2015;10:e0116777.
8. Lin TY, Chang KV, Wu WT, Özçakar L. Ultrasonography for the diagnosis of carpal tunnel syndrome: an umbrella review. *J Neurol* 2022;269:4663-75.
9. Erickson M, Lawrence M, Lucado A. The role of diagnostic ultrasound in the examination of carpal tunnel syndrome: an update and systematic review. *J Hand Ther* 2022;35:215-25.
10. Kuo TT, Lee MR, Liao YY, Chen JP, Hsu YW, Yeh CK. Assessment of median nerve mobility by ultrasound dynamic imaging for diagnosing carpal tunnel syndrome. *PLoS One* 2016;11:e0147051.
11. Wong SM, Griffith JF, Hui AC, Lo SK, Fu M, Wong KS. Carpal tunnel syndrome: diagnostic usefulness of sonography. *Radiology* 2004;232:93-9.
12. Pastare D, Therimadasamy AK, Lee E, Wilder-Smith EP. Sonography versus nerve conduction studies in patients referred with a clinical diagnosis of carpal tunnel syndrome. *J Clin Ultrasound* 2009;37:389-93.
13. Beekman R, Visser LH. Sonography in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: a critical review of the literature. *Muscle Nerve* 2003;27:26-33.
14. Chen J, Fowler JR. Ultrasound findings in patients with normal nerve conduction despite clinical signs and symptoms consistent with carpal tunnel syndrome. *Plast Reconstr Surg*

- 2022;150:e1025-32.
15. DeJaco C, Stradner M, Zauner D, Seel W, Simmet NE, Klammer A, et al. Ultrasound for diagnosis of carpal tunnel syndrome: comparison of different methods to determine median nerve volume and value of power Doppler sonography. *Ann Rheum Dis* 2013;72:1934-9.
  16. Kutlar N, Bayrak AO, Bayrak İK, Canbaz S, Türker H. Diagnosing carpal tunnel syndrome with Doppler ultrasonography: a comparison of ultrasonographic measurements and electrophysiological severity. *Neurol Res* 2017;39:126-32.
  17. Landau AJ, Parameswaran P, Fresco R, Simon L, Dy CJ, Brogan DM. Systematic review of the use of power Doppler ultrasound in the imaging of peripheral nerve compression neuropathy. *Plast Reconstr Surg* 2022;149:e48-56.
  18. Mallouhi A, Pülzl P, Trieb T, Piza H, Bodner G. Predictors of carpal tunnel syndrome: accuracy of gray-scale and color Doppler sonography. *AJR Am J Roentgenol* 2006;186:1240-5.
  19. Orman G, Ozben S, Huseyinoglu N, Duymus M, Orman KG. Ultrasound elastographic evaluation in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: initial findings. *Ultrasound Med Biol* 2013;39:1184-9.
  20. Lin CP, Chen IJ, Chang KV, Wu WT, Özçakar L. Utility of Ultrasound elastography in evaluation of carpal tunnel syndrome: a systematic review and meta-analysis. *Ultrasound Med Biol* 2019;45:2855-65.
  21. Zou Q, Guo X, Ni X, Chen X, Xu C, Yin Y, et al. Ultrasound-based grading of carpal tunnel syndrome: a comparative study of cross-sectional area and shear wave elastography at different wrist joint angles. *Br J Radiol* 2025;98:58-67.
  22. Snoj Ž, Omejec G, Javh J, Umek N. Ultrasound speckle tracking method based on gradient optical flow to quantify small longitudinal displacement, shear and longitudinal strain in peripheral nerves. *Ultrasound Med Biol* 2025;51:280-7.
  23. Martikkala L, Pemmari A, Himanen SL, Mäkelä K. Median nerve shear wave elastography is associated with the neurophysiological severity of carpal tunnel syndrome. *J Ultrasound Med* 2024;43:1253-63.
  24. Wu WT, Lin CY, Shu YC, Shen PC, Lin TY, Chang KV, et al. The potential of ultrasound radiomics in carpal tunnel syndrome diagnosis: a systematic review and meta-analysis. *Diagnostics (Basel)* 2023;13:3280.
  25. Lyu S, Zhang Y, Zhang M, Jiang M, Yu J, Zhu J, et al. Ultrasound-based radiomics in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: the influence of regions of interest delineation method on mode. *J Clin Ultrasound* 2023;51:498-506.
  26. Lyu S, Zhang Y, Zhang M, Zhu J, Yu J, Zhang B, et al. The application of ultrasound image-based radiomics in the diagnosis of mild carpal tunnel syndrome. *J Ultrasound Med* 2023;42:1499-508.