**REVIEW ARTICLE**

ISSN 2508-190X

**CLL 11**(1):5-15, 2026

www.kslymph.or.kr

# 림프부종 평가에서 MR Lymphangiography의 영상의학적 최신 지견

연세대학교 의과대학 강남세브란스병원 영상의학과

**이홍선**

# Recent Advances in MR Lymphangiography for Lymphedema Evaluation: A Radiologic Perspective

**Hong-Seon Lee, MD, PhD**

*Department of Radiology, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Republic of Korea*

Magnetic resonance lymphangiography (MRL) has emerged as a versatile imaging modality for the comprehensive evaluation of lymphedema. MRL can be performed using two principal approaches: non-contrast MR lymphography (NCMRL), which exploits the inherent long T2 relaxation time of static lymphatic fluid, and contrast-enhanced MR lymphangiography (CE-MRL), which involves interstitial or intranodal injection of gadolinium-based contrast agents. Recent technical advances, including 3T high-resolution imaging, three-dimensional isotropic sequences, Dixon fat suppression, and dynamic contrast-enhanced protocols, have substantially improved image quality, lymphatic vessel conspicuity, and clinical utility. In surgical management, MRL plays a critical role in preoperative planning for lymphaticovenous anastomosis (LVA) and vascularized lymph node transfer (VLNT) by precisely localizing functional lymphatic vessels and evaluating lymphatic dysfunction. This review provides a comprehensive, literature-based overview of MRL techniques, imaging protocols, clinical applications, and recent advances from a radiologic perspective, with detailed tabulation of key studies and their findings.

**Key Words**: Lymphedema · MR Lymphangiography · Lymphatic Imaging · Lymphaticovenous Anastomosis · Preoperative Planning

## 서 론

림프부종은 림프계의 구조적 또는 기능적 손상으로 인한 림프액의 비정상적 축적으로 발생하는 만성 진행성 질환이다. 전 세계적 유병 규모는 진단 기준과 등록 체계의 이질성으로 정확히 산정하기 어렵지만, 기존 문헌에서는 약 1억 4천만–2억 5천만 명이 이환된 것으로 추정되어 왔다[1,2]. 전 세계적으로는 림프사상충증이 중요한 원인이고[3], 고소득 국가에서는 암 치료 관련 이차성 림프부종이 주요 원인이다. 특히 유방암 치료 후 상지 림프부종은 메타분석에서 약 21.4%의 발생률이 보고되었으며[4], 유방암, 부인암 및 비뇨기계암 등 다양한 암종의 생존자에서 삶의 질을 저하시키는 주요 합병증이다[5].

림프부종의 영상의학적 평가는 정확한 진단, 병기 결정, 치

▸ Received: April 29, 2026, ▸ Accepted: May 14, 2026

Address for correspondence: **Hong-Seon Lee,** MD, PhD
Department of Radiology, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, 50-1, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Republic of Korea
Tel: +82-2-2019-3510, Fax: +82-2-3462-5472
E-mail: reanhea55@yuhs.ac

**Table 1.** Summary of major MRL studies on peripheral lymphedema

| Author (Year) | n | Field | MRL Type | Location | Etiology | Key Findings |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Lohrmann (2006) | 10 | 1.5T | CE | LE | Primary & Secondary | First high resolution MRL feasibility study; beaded lymphatic vessels visualized |
| Lohrmann (2007) | 8 (16 limbs) | 1.5T | CE | LE | Primary (advanced) | 100% lymphatic detection; visualized complications in advanced stage |
| Lohrmann (2008) | 8 | 1.5T | CE | LE | Secondary (post-LVA) | Pre/post-op comparison; showed edema decrease and collateral development |
| Notohamiprodjo (2012) | 30 | 3.0T | CE | LE | Secondary | Correlated with lymphoscintigraphy; concordant findings for lymph node enhancement and drainage |
| Crescenzi (2017) | 36 (25 pts+11 ctrl) | 3.0T | NC | UE | BCRL | Noninvasive 10-min protocol; quantitative lymphatic cross-sectional area measurement |
| Mazzei (2017) | 30 | 1.5T | CE | UE/LE | Primary & Secondary | Histologic confirmation of MRL-identified vessels; useful for LVA planning |
| Arrivé (2018) | 121 | 1.5T/3T | NC | LE | Primary | Classification system for primary LE using NCMRL; 187 affected limbs analyzed |
| Bae (2018) | 13 (6 pts+7 vol) | 3.0T | CE | UE | BCRL | MRL superior to lymphoscintigraphy for vessel detection; equivalent for lymph node evaluation |
| Pons (2019) | 82 | 1.5T/3T | CE+ICG | UE/LE | Primary & Secondary | Combined ICG+MRL protocol for LVA; unified patient selection criteria proposed |
| Kim (2020) | 45 | 3.0T | MRI (STIR) | UE | BCRL | MRI staging correlated with clinical circumference measurements; tissue composition quantified |
| Cellina (2021) | 50 | 1.5T | NC | LE | Secondary | Honeycomb pattern, dermal thickening, muscular atrophy correlated with MR grading |
| Soga (2021) | 56 | 1.5T | CE | LE | Primary & Secondary | Collateral pathways (anterolateral, deep, posteromedial) increased with stage; preclinical changes in asymptomatic limbs |
| Soga (2022) | 56 | 1.5T | CE | LE | Primary & Secondary | 7-type MRL staging system proposed; correlated with ISL stage |
| Park (2023) | 138 | 3.0T | NC | UE | BCRL | MRI severity index for surgical method selection (LVA vs LVA+lipo vs LVA+VLNT) |
| Zhang (2024) | 112 (175 limbs) | 3.0T | CE | LE | Secondary | Stage-specific lymphatic morphology patterns; classification by ISL stage |
| Zhu (2025) | 35 | 3.0T | CE+ICG | UE/LE | Secondary | CE-MRL+ICG: 99% accuracy; 12% more vessels vs ICG alone |
| Zhang (2025) | 89 (92 limbs) | 3.0T | CE vs ICG | LE | Secondary | MRL-ICG direct comparison; MRL superior for vessel conspicuity with DBF; ICG better for normal vessels |

CE, contrast-enhanced; NC, non-contrast; LE, lower extremity; UE, upper extremity; BCRL, breast cancer-related lymphedema; DBF, dermal backflow; LVA, lymphaticovenous anastomosis; VLNT, vascularized lymph node transfer; ISL, International Society of Lymphology; STIR, short-tau inversion recovery; ICG, indocyanine green; pts, patients; ctrl, controls; vol, volunteers.

료 방침 수립 및 치료 반응 평가에 필수적이다. 기존의 림프부종 영상 검사로는 림프신티그래피(lymphoscintigraphy)가 표준 검사로 인정받아 왔으나, 공간 해상도가 낮고 방사선 피폭이 있으며 림프관의 세부적인 해부학적 정보를 제공하지 못하는 한계가 있다[6]. Indocyanine green (ICG) lymphography는 실시간 표층 림프관의 관찰이 가능하여 조기 림프부종 진단에서 림프신티그래피보다 우수한 민감도를 보이나[7], 침투 깊이가 1.5-2 cm에 불과하여 심부 림프관 및 림프절의 평가에 제한적이다[8]. 이러한 한계를 극복하기 위해 MR lymphangiography(MRL)가 대안적 영상 기법으로 대두하였다.

Table 2. Technical parameters of MRL protocols

| Parameter | NCMRL (T2-weighted) | CE-MRL Interstitial (T1-weighted) | DCE-MRL Intranodal (T1-weighted) |
|---|---|---|---|
| Sequence | 3D heavily T2w TSE/FSE (SPACE, CUBE, VISTA) | 3D T1w SPGR/VIBE with fat-sat | 3D T1w GRE (time-resolved) |
| TR/TE (ms) | 2000-4000 / 600-800 | 4-8 / 1.5-2.5 | 3-5 / 1-1.5 |
| Fat suppression | SPIR/Dixon | Dixon | Dixon |
| Contrast agent | None | GBCA (gadobutrol, gadodiamide, Gd-BOPTA) | Diluted GBCA (0.2 mL/kg) or ferumoxytol |
| Injection route | N/A | Intracutaneous (interdigital web spaces) | US-guided intranodal (inguinal LN) |
| Field strength | 1.5T or 3T (3T preferred) | 1.5T or 3T | 1.5T or 3T |
| Voxel size (mm) | 1.0×1.0×1.0 (isotropic) | 1.0-2.0×1.0-1.9×1.5-2.0 | 1.0-1.5×1.0-1.5×1.5-3.0 |
| Stations | 2-4 (extremity) | 3-4 (LE), 2-3 (UE) | 1-2 (trunk/central) |
| Dynamic phases | Single acquisition | Pre, 5, 20, 35 min post-injection | Continuous (≈20-25 sec intervals) |
| Total scan time | ≈10-15 min | 50-75 min | 30-45 min |
| Primary target | Edema distribution, proximal lymphatics, thoracic duct | Peripheral lymphatics, drainage dynamics, DBF | Central lymphatics (thoracic duct, cisterna chyli) |
| Strengths | Fully noninvasive; no venous contamination; repeatable | Dynamic flow info; vessel-vein differentiation; LVA planning | Central lymphatic flow dynamics; leak detection |
| Limitations | No dynamic info; difficult in severe edema | Venous contamination; longer exam time | Requires US-guided access; specialized expertise |

TSE, turbo spin-echo; FSE, fast spin-echo; SPGR, spoiled gradient-echo; VIBE, volumetric interpolated breath-hold examination; GBCA, gadolinium-based contrast agent; LE, lower extremity; UE, upper extremity; LN, lymph node; DBF, dermal backflow.

MRL은 방사선 피폭 없이 림프관의 형태학적 및 기능적 정보를 동시에 제공할 수 있는 영상 기법으로, 최근 MRI 기술의 발전과 함께 그 임상적 활용도가 크게 확대되고 있다. 특히 림프정맥문합술(lymphaticovenous anastomosis, LVA)이나 혈관화 림프절 이식술(vascularized lymph node transfer, VLNT) 등 미세수술적 치료법의 발전에 따라, 수술 전 기능적 림프관의 위치와 상태를 정확하게 파악하는 것이 치료 성공률에 핵심적 역할을 하게 되었으며, MRL은 이러한 요구에 부합하는 중요한 보완적 영상 검사로 자리매김하고 있다[9-13].

2021년 Mills 등은 1999년부터 2019년까지의 612편의 문헌에서 43편을 선별하여 MRL의 기술적 측면을 체계적으로 검토하였으며, 58%의 연구가 3.0T에서 수행되었음을 보고하였다[14]. 2024년 Negm 등은 DCE-MRL의 임상적 적용과 하이브리드 중재적 MRI 스위트에서의 실무 개발 경험을 포괄적으로 보고하였다[15]. 이러한 문헌적 근거의 축적과 함께 MRL의 임상적 역할이 점차 명확해지고 있다(Table 1).

본 종설에서는 MRL의 영상 기법, 프로토콜, 임상적 적용 및 최신 발전 동향을 영상의학적 관점에서 포괄적으로 고찰하고, 주요 연구들을 체계적으로 정리하여 제시하고자 한다.

## 본 론

### 1. MRL의 기본 원리와 접근법

MRL은 크게 비조영 MR 림프그래피(non-contrast MR lymphography, NCMRL)와 조영제 사용 MR 림프관조영술(contrast-enhanced MR lymphangiography, CE-MRL)의 두 가지 접근법으로 나뉘며, 조영제 사용 림프관조영술은 피내 주사법(interstitial/intracutaneous injection)과 림프절 내 주사법(intranodal injection)으로 나뉜다(Table 2). 각 방법은 각기 다른 임상적 목적에 따라 상호 보완적으로 활용된다(Fig. 1).

#### 1) 비조영 MR 림프그래피 (NCMRL)

NCMRL은 림프액의 고유한 물리적 특성을 이용하는 방법이다. 림프액은 정적(static) 또는 극히 느린 유속의 수성 액체로, T2 이완시간이 매우 길다는 특성을 가진다. 이를 활용하여

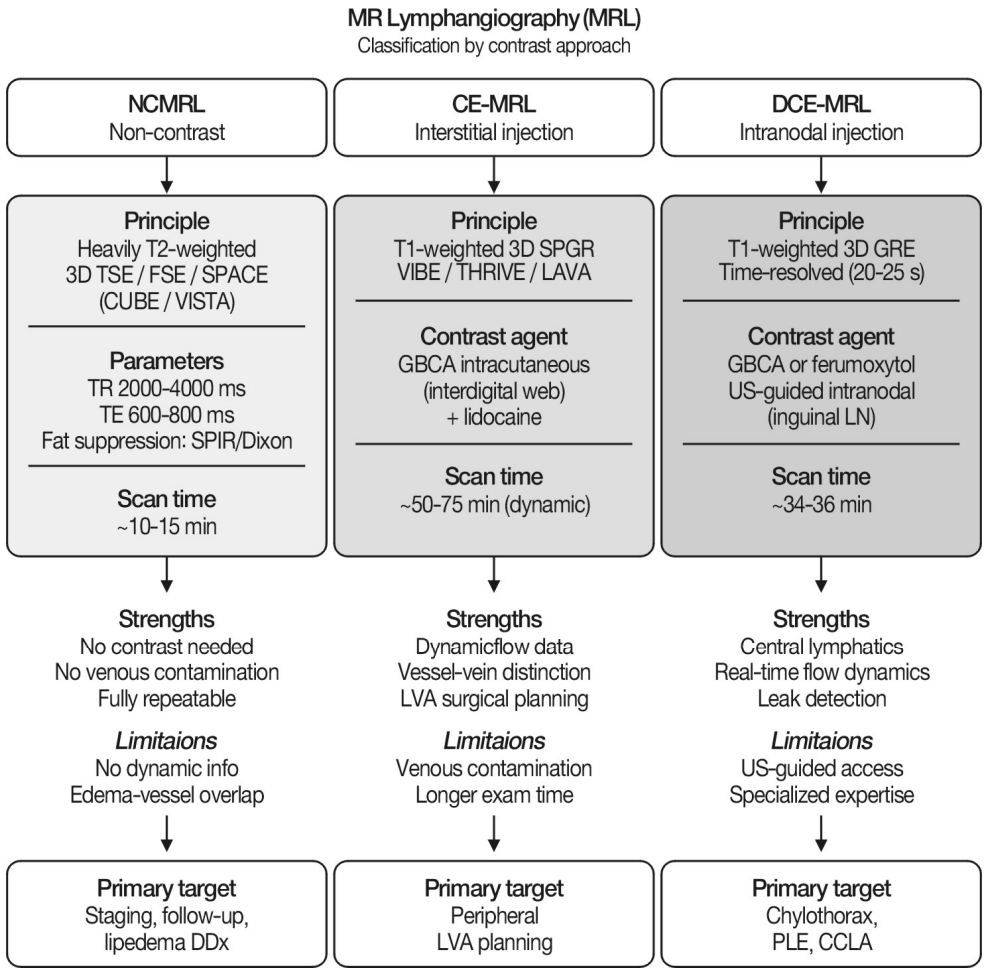



**Fig. 1.** Classification of MR lymphangiography approaches.
MR lymphangiography (MRL) can be broadly classified into non-contrast and contrast-enhanced techniques according to whether a contrast agent is used. Non-contrast MR lymphangiography (NCMRL) uses heavily T2-weighted 3D turbo spin-echo sequences, such as SPACE on Siemens, CUBE on GE, and VISTA on Philips systems, by exploiting the long T2 relaxation time of lymphatic fluid. This technique can be performed without contrast administration within approximately 10-15 minutes. Contrast-enhanced MR lymphangiography (CE-MRL) involves intradermal injection of a gadolinium-based contrast agent into the interdigital web spaces of the hands or feet, followed by dynamic imaging using T1-weighted 3D spoiled gradient-echo sequences. CE-MRL is useful for evaluating peripheral lymphatic drainage pathways and lymphatic function, and for preoperative planning before lymphaticovenous anastomosis. Among contrast-enhanced MRL techniques, dynamic contrast-enhanced MR lymphangiography (DCE-MRL) involves direct intranodal injection of contrast material into inguinal lymph nodes under ultrasound guidance. This technique enables real-time evaluation of flow within the central lymphatic system, including the thoracic duct and cisterna chyli, and is used in the diagnosis of conditions such as chylothorax and protein-losing enteropathy. The advantages, limitations, and major clinical indications of each technique are summarized schematically.

아주 긴 TE를 가진 3D heavily T2-weighted turbo spin-echo (TSE) 시퀀스를 사용하면, 림프액을 포함한 정적 또는 저유속 수분 성분이 상대적으로 강조되고 혈관 내 유속 신호와 주변 조직 신호는 억제된다[8,16]. 조영제 투여가 불필요하여 완전히 비침습적이며, 시간과 비용이 절감된다는 장점이 있다.

3T에서는 높은 intrinsic SNR (signal to noise ratio, 신호

대 잡음 비)과 림프액의 긴 relaxation time 및 저유속 특성을 활용하여 고해상도 NCMRL 획득이 가능하다. Crescenzi 등(2017)은 3T에서 유효 에코시간(effective echo time) 600 ms, 에코열 길이(echo train length) 90으로 설정한 비조영 3D TSE 시퀀스를 개발하여, 유방암 관련 림프부종 환자 25명에서 환측과 건측의 림프관 단면적 차이를 정량적으로 입증하였다[17]. NCMRL은 특히 서혜부(inguinal) 및 장골(iliac) 림프관, 흉관(thoracic duct) 등 근위부 림프관의 시각화에 우수하며, Arrivé 등은 NCMRL을 이용한 원발성 하지 림프부종의 분류 체계를 제시하였다[18]. 또한 정맥 오염(venous contamination)이 발생하지 않는다는 것이 조영 MRL 대비 큰 장점이다[19].

NCMRL의 제한점으로는 림프액의 배액 속도나 시간에 따른 동적 정보를 제공하지 못하며, 부종이 심한 경우 림프관과 주변 부종 액체의 구별이 어려울 수 있다는 점이 있다[8,16]. 그러나 림프관의 특징적인 판막(valve)에 의한 교대성 협착-확장 패턴("beaded" appearance)을 이용하면 정맥과의 구별이 가능하며[9,19], 조영제를 사용하지 않기 때문에 정맥 오염이 발생하지 않는다는 것 또한 장점이다.

### 2) 조영제 사용 MR 림프관조영술 (CE-MRL)

CE-MRL은 가돌리늄 기반 조영제(gadolinium-based contrast agent, GBCA)를 피내 또는 림프절 내에 주입한 후, T1 강조 3D spoiled gradient-echo(SPGR) 시퀀스를 사용하여 림프관을 시각화하는 방법이다. 조영제 투여 경로에 따라 크게 두 가지로 분류된다.

첫째, 피내 주사법(interstitial/intracutaneous injection)은 조영제를 손등 또는 발등의 손가락(발가락) 사이 피부(interdigital web space)에 피내 주사하는 방법이다. 일반적으로 gadobutrol, gadodiamide, gadobenate dimeglumine 등의 세포외액성 조영제가 사용되며, 주사 시 lidocaine을 소량 혼합하여 통증을 경감시킨다[10,20]. Lohrmann 등은 2006년 원발성 및 이차성 림프부종 환자에서 고해상도 MRL의 실현 가능성을 처음 보고하였으며[9], 2007년에는 진행기 원발성 림프부종 환자 8명(16 하지)을 대상으로 gadodiamide 18 mL와 1% mepivacaine hydrochloride 2 mL를 혼합하여 양측 발등의 10개 지점에 피내 주사한 후 3D VIBE 시퀀스를 사용하여 림프관의 "beaded appearance"를 100% 검출하였다[21]. 이 방법은 말초 림프관의 시각화와 배액 동태 평가에 우수하지만, 조영제가 정맥으로도 흡수될 수 있어 정맥 오염이 발생할 수 있다는 제한점이 있다.

둘째, 림프절 내 주사법(intranodal injection)은 조영제를 서혜부 림프절에 직접 주입하는 방법으로, 주로 중심부 림프계(central lymphatics)의 평가에 사용된다. 기관별 프로토콜은 다양하나, 초음파 유도하에 25-28 G 또는 26 G spinal needle을 이용하여 서혜부 림프절 내에 희석된 GBCA를 주입한 뒤 반복적 3D T1 강조 동적 영상을 획득한다. Ahn 등은 26 G spinal needle과 1:1 희석 GBCA 프로토콜을 사용하였다. 이 방법은 유미흉(chylothorax), 유미복수(chylous ascites), 단백소실성 장병증(protein-losing enteropathy) 등 중심부 림프계 이상의 진단과 치료 계획에 특히 유용하다[15,22,23]. Ahn 등(2024)은 2017년부터 2022년까지 림프절 내 DCE-MRL을 시행한 환자들의 경험을 보고하였으며, 검사 시간이 종래 형광투시 림프관조영술의 절반 이하임을 확인하였다[24].

## 2. MRL의 영상 프로토콜

포괄적인 MRL 프로토콜은 일반적으로 두 가지 주요 시퀀스로 구성된다. 첫째는 3D heavily T2-weighted TSE 시퀀스로, 스펙트럼 지방억제를 적용하여 부종의 범위와 분포, 피하조직 변화를 평가한다. 둘째는 조영제 주사 후 3D T1-weighted spoiled gradient-echo(SPGR) 시퀀스로, 지방억제를 적용하여 림프관의 조영제 충전 양상을 영상화한다. 시퀀스의 선택은 장비 제조사와 자장 세기에 따라 다양한 변형이 사용된다.

검사는 일반적으로 3-4단계의 해부학적 영역(station)으로 나누어 수행한다. 하지의 경우 발-발목-종아리, 종아리-무릎, 허벅지-골반부의 3-4개 영역으로, 상지의 경우 손-손목-전완, 팔꿈치-상완-어깨의 2-3개 영역으로 구분한다. 조영제 주사 후 0분, 5분, 20분, 35분 간격으로 반복 영상을 획득하여 시간경과에 따른 림프액의 배액 양상을 평가한다[10,20]. 총 검사 시간은 하지의 경우 약 60-75분, 상지의 경우 약 50분 정도가 소요된다.

최근에는 Dixon 방법을 이용한 수분-지방 분리 기법이 기존의 스펙트럼 지방억제를 대체하여 사용되고 있으며, 이를 통해 보다 균일한 지방억제 효과와 향상된 영상 품질을 얻을

**Table 3.** MRL findings according to ISL clinical stages I–III of lymphedema

| ISL Stage | Lymphatic Morphology | Vessel Distribution | Dermal Backflow | Subcutaneous Changes |
|---|---|---|---|---|
| I (Reversible) | "Scattered beads"; "branch-like" pattern | Preserved main trunks; mild dilation | Mild, focal | Epifascial edema; resolves with elevation |
| II (Irreversible) | "Tree branch"; "capillary-like" pattern | Tortuous, irregular; collaterals present | Moderate, diffuse | Persistent epifascial edema; early fibrosis; honeycomb pattern |
| III (Elephantiasis) | "Capillary" pattern; contrast pooling at foot | Severely disorganized; absent main channels | Extensive | Marked fibrosis; adipose deposition; skin thickening |

ISL, International Society of Lymphology. Adapted from Zhang et al. (2024) [25].

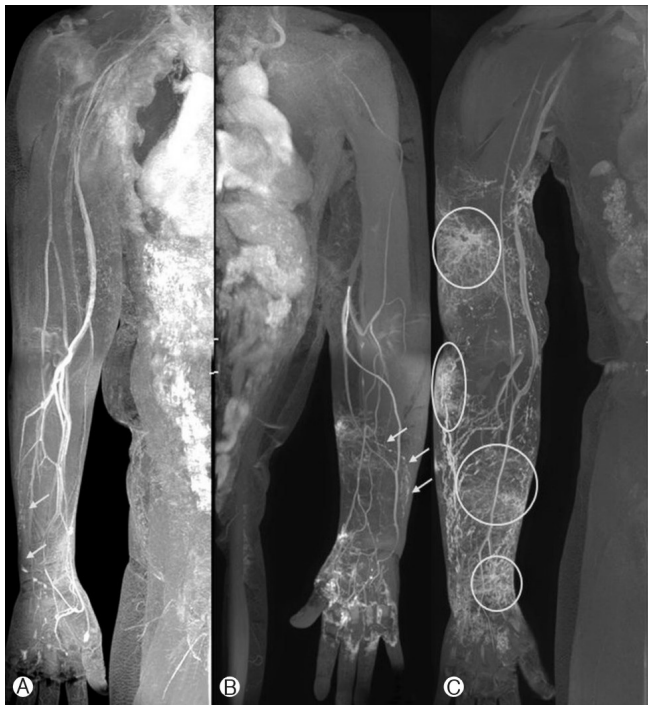



**Fig. 2.** MRL findings of upper-extremity lymphedema according to disease stage.
MR lymphangiography (MRL) provides characteristic imaging findings according to the International Society of Lymphology (ISL) stage of lymphedema. Zhang et al. (2024) analyzed MRL findings in lower-extremity lymphedema and reported stage-dependent morphologic changes of lymphatic vessels, progressing from "scattered beads" and "branch-like" distributions in ISL stage 1, to branch-like or "capillary-like" distributions in ISL stage 2, and finally to a capillary pattern in ISL stage 3. Panels A, B, and C in this figure show representative MRL findings in patients with ISL stage 1, 2, and 3 upper-extremity lymphedema, respectively, after breast cancer surgery. These cases illustrate that patterns similar to those described in lower-extremity lymphedema may also be observed in the upper extremity: a scattered-beads pattern (arrow, A), a branch-like pattern (arrow, B), and a capillary pattern (circle, C). However, direct generalization of these findings to an upper-extremity staging system remains limited.

수 있다. Siemens의 SPACE (Sampling Perfection with Application-optimized Contrasts using different flip angle Evolution), GE의 CUBE, Philips의 VISTA 등 3D T2 강조 등방성 시퀀스는 높은 등방성(isotropic) 해상도를 제공하여 MIP(maximum intensity projection) 및 다평면 재구성(MPR)에 유리하다[15]. 또한 3D SSFP(steady-state free precession) balanced 시퀀스를 T2-weighted 시퀀스 대신 사용하여 정맥계와 부종의 분포를 동시에 평가할 수 있는 프로토콜도 보고되고 있다[10].

## 3. 림프부종 평가에서 MRL의 임상적 적용

MRL의 림프부종 평가에 대한 주요 연구들을 Table 1에 정리하였다. 이들 연구를 기반으로 MRL의 주요 임상적 적용을 다음과 같이 고찰한다.

### 1) 림프부종의 진단 및 병기 평가

MRL은 림프부종의 International Society of Lymphology (ISL) 병기에 따른 특징적 영상 소견을 제공한다(Table 3, Fig. 2). 최근 112명(175개 이환 사지)을 대상으로 한 연구에서, ISL 1기에서는 "scattered beads" 및 "branch-like" 분포의 림프관이 관찰되고, ISL 2기에서는 나뭇가지형 또는 "capillary-like" 분포로 전환되며, ISL 3기에서는 모세혈관형 패턴과 발에서의 조영제 축적이 특징적으로 나타났다[25]. 이러한 병기별 영상 패턴은 치료 방침 결정에 중요한 정보를 제공한다.

Table 4. MRL-related studies for preoperative surgical planning

| Author (Year) | n | Surgery | MRL Role | Key Outcomes |
|---|---|---|---|---|
| Mazzei (2017) | 30 | LVA | Vessel localization; vein differentiation | Histologic confirmation of MRL-identified vessels; lymphatic/vein differentiation possible by temporal enhancement pattern |
| Pons (2019) | 82 | LVA | Combined ICG+MRL protocol | Functional lymphatic vessel identification rate of 96.9% and successful LVA rate of 91.4% at sites with concordant MRL and ICG-L findings |
| Forte (2021, SR) | 334 | LVA | Systematic review (9 studies) | MRL showed higher sensitivity than lymphoscintigraphy for detecting lymphatic abnormalities; concordant MRL and ICG-L findings were associated with a significantly higher likelihood of successful LVA |
| Park (2023) | 138 | LVA/LVA+lipo/VLNT | Surgical method selection by MRI severity index | Stage 1→LVA alone; Stage 2→LVA+liposuction; Stage 3→LVA+VLNT; improved outcomes |
| Zhu (2025) | 35 | LVA | CE-MRL+ICG combined | 99% accuracy of vessel localization; 12% more vessels vs ICG alone; 49% circumference reduction at 4 wks |

LVA, lymphaticovenous anastomosis; VLNT, vascularized lymph node transfer; SR, systematic review; ICG, indocyanine green; CE-MRL, contrast-enhanced MR lymphangiography.

피부역류(dermal backflow, DBF)는 림프부종의 중요한 병리적 지표로, CE-MRL에서 조영제가 정상 림프 배액 경로를 벗어나 피부 방향으로 역류하는 현상이다. DBF의 범위와 정도는 림프부종의 중증도와 상관관계를 보이며, 수술적 치료의 적용 가능성과 예후 예측에 활용될 수 있다. Strobl 등(2012)은 3T MRL에서 국소 DBF가 LVA 수술 부위 선정을 위한 중요한 지표임을 보고하였다[26].

NCMRL 기반의 반정량적 평가 체계(semiquantitative scoring system)도 제안되어 있다. Park 등은 NCMRL의 MRI 중증도 지수(MRI severity index)에 기반하여 환자를 1-3단계로 분류하는 체계를 제시하였으며, 이 분류가 수술법 선택과 수술 결과 예측에 유용함을 입증하였다[27]. Soga 등(2022)은 56명의 하지 림프부종 환자(112개 하지)에서 DBF와 림프관 시각화 패턴을 분석하여 7단계 MRL staging 체계를 제안하였으며, 이 분류는 ISL 임상 병기와 유의한 양의 상관관계를 보였다[28]. 또한 Soga 등(2021)은 동일 코호트에서 전외측(anterolateral), 심부(deep), 후내측(posteromedial) 측부 림프 경로를 분석하여, 측부 순환이 병기 진행에 따라 증가하며 무증상 반대측 사지에서도 전임상적(preclinical) 림프관 이상이 관찰됨을 보고하였다[29]. 이러한 측부 경로의 평가는 LVA 수술 부위 선정과 질환 진행 모니터링에 중요한 임상적 의의를 가진다.

상지 림프부종에서도 MRI 기반 staging이 보고되고 있다. Kim 등(2020)은 상지 이차성 림프부종 환자에서 MRI를 이용한 피하 조직 구성(부종 vs 지방 vs 섬유화)의 정량적 분석이 임상적 둘레 측정과 유의한 상관관계를 보이며, 치료 전략 수립에 도움이 됨을 보고하였다[30]. Cellina 등(2021)은 이차성 하지 림프부종 50명에서 NCMRL의 역할을 평가하여, 벌집 패턴(honeycomb pattern), 피부 비후(dermal thickening), 근육 위축이 MR grading과 유의하게 상관됨을 확인하였다[31].

### 2) 수술 전 계획(Preoperative Planning)

MRL은 LVA 수술 계획에 있어 핵심적인 역할을 담당한다(Table 4). 기능적 림프관의 정확한 위치와 주행 경로를 3차원적으로 파악할 수 있으며, 인접한 정맥과의 관계도 함께 평가할 수 있다. Mazzei 등(2017)은 30명의 림프부종 환자에서 1.5T CE-MRL을 통해 확인된 림프관의 수술 중 조직학적 확인율이 매우 높았음을 보고하였으며, 조영 후 5-20분 사이의 림프관과 정맥의 조영 패턴 차이를 이용하여 두 구조물의 감별이 가능함을 입증하였다[20].

2025년 Zhu 등은 35명의 림프부종 환자에서 CE-MRL과 ICG lymphography를 병용한 결과, ICG 단독 사용 대비 림프관 확인율이 12% 증가하였으며, 수술 중 정확한 림프관 위치 확인율이 99%에 달하였음을 보고하였다. 술 후 4주에 사지 둘레 차이가 14% 개선되었으며, 둘레 감소율은 49%에 달하였다[32]. 2021년 Forte 등의 체계적 문헌고찰에서는 9개 연

구, 334명의 환자를 분석하여 MRL이 림프신티그래피보다 림프관 이상 검출에 높은 민감도를 보이며, MRL과 ICG-L의 결과가 일치할 때 LVA의 성공률이 통계적으로 유의하게 높음을 확인하였다[33].

Park 등(2023)은 138명의 유방암 관련 림프부종 환자에서 NCMRL을 활용하여 수술법을 결정하는 연구를 수행하였다. MRI 중증도 지수에 따라 1단계에서는 LVA 단독, 2단계에서는 LVA+지방흡입, 3단계에서는 LVA+VLNT가 시행되었으며, 각 단계별로 적합한 수술법의 적용이 치료 결과 개선에 기여함을 입증하였다[27]. 이는 MRL이 단순한 해부학적 정보 제공을 넘어 치료 전략 수립에 직접적으로 기여할 수 있음을 보여준다.

#### 3) 치료 반응 평가 및 추적 관찰

MRL은 복합 부종 치료(complex decongestive therapy)나 수술적 치료 후 치료 반응을 객관적으로 평가하는 데 활용될 수 있다. 특히 NCMRL은 방사선 피폭이 없어 반복적인 추적 검사가 가능하며, 피하 부종의 변화와 림프관 형태의 변화를 비교 평가할 수 있다. Lohrmann 등(2008)은 미세림프관 수술을 받은 환자에서 수술 전후 MRL을 비교하여, 수술 후 피하 림프부종의 감소와 측부 림프관(collateral lymphatic vessels)의 발달, 피부역류의 감소를 확인하였다[34].

#### 4) 림프부종과 지방부종의 감별 진단

NCMRL은 림프부종과 지방부종(lipedema)의 감별에 유용한 도구이다. 순수 지방부종(lipoedema)에서는 피하 지방의 균질한 증가만 관찰되고 부종의 증거는 없는 반면, 림프부종(lymphedema)에서는 3D TSE 시퀀스에서 피하에 고신호 영역과 확장된 림프관이 관찰된다. Cellina 등(2019)은 NCMRL이 두 질환의 감별에 효과적이며, 적절한 치료 방침 결정에 기여함을 보고하였다[16].

#### 5) 중심부 림프계 이상의 평가

DCE-MRL은 중심부 림프계의 평가에 있어서도 중요한 역할을 한다. 선천성 림프 유동 이상(congenital lymphatic flow disorders)은 유미흉, 유미복수, 장 림프관확장증, 단백소실성 장병증, 말초 사지 또는 생식기 림프부종 등으로 나타나며, 림프절 내 DCE-MRL을 통해 림프 유동을 동적으로 영상화할 수 있다[23]. Lee 등(2025)은 소아 선천성 림프 유동 이상 환자에서의 DCE-MRL 경험을 보고하면서, 이 기법이 진단과 치료 계획 수립에 중요한 보완적인 도구임을 강조하였다[22].

### 4. 다른 영상 검사와의 비교

Table 5에 주요 림프부종 영상 검사의 비교를 정리하였다. MRL은 림프신티그래피와 비교하여 방사선 피폭이 없고, 향상된 공간 해상도로 림프관의 세밀한 해부학적 구조를 파악할 수 있다. Notohamiprodjo 등(2012)은 3T에서 CE-MRL과 림프신티그래피의 상관관계를 분석하여, 림프절 조영 및 배액 평가에서 두 검사의 일치율이 높음을 보고하였다[13]. Bae 등(2018)은 상지 림프부종 환자에서 3T CE-MRL과 림프신티그래피를 비교한 전향적 연구를 수행하여, MRL이 림프관 변화 검출에 있어 림프신티그래피보다 우수한 성능을 보이며, 액와 림프절 조영 소견 및 림프 배액 평가에서는 두 검사가 동등한 결과를 보였음을 보고하였다[12].

ICG lymphography와 비교하면, MRL은 심부 림프관의 시각화에 우수하고, 전체 사지의 3차원적 해부학적 정보를 제공할 수 있다는 점에서 보완적 역할을 한다. ICG는 피부에서 약 1.5-2 cm 이내의 표층 림프관만 시각화할 수 있어 심부 림프관의 평가에는 제한적인 반면, MRL은 심부 림프관과 림프절의 상태까지 평가할 수 있다. Zhang 등(2025)은 89명(92개 하지)에서 MRL과 ICG lymphography를 직접 비교한 결과, 배액 패턴, 림프관 선명도, DBF의 해부학적 범위 등 주요 평가 항목에서 두 검사 간 우수한 상관관계를 보였으며, DBF가 뚜렷할 때 MRL이 림프관 선명도에서 더 우수한 성능을 보인 반면, 정상 림프관에서는 ICG가 더 좋은 묘사를 제공하였다[35]. 이에 따라 두 검사를 병용하는 프로토콜이 최적의 수술 전 평가 전략으로 제시되고 있다[11,32].

다만 MRL은 검사 시간이 상대적으로 길고, 비용이 높으며, MRI 장비의 가용성에 의존한다는 제한점이 있다. 또한 조영 MRL의 경우 가돌리늄 조영제의 정맥 흡수로 인한 정맥 오염 가능성이 존재한다. 그러나 적절한 주사 기법(피내 주사, 주사 전 주사기를 당겨서 정맥 천자 확인)과 시간 경과에 따른 림프관-정맥 조영 패턴의 차이를 이용하면 대부분의 경우 감별이 가능하다[10,20].

Table 5. Comprehensive comparison of lymphatic imaging techniques

| Feature | Lympho-scintigraphy | ICG Lymphography | NCMRL | CE-MRL (interstitial) | DCE-MRL (intranodal) |
|---|---|---|---|---|---|
| Radiation | Yes | No | No | No | No |
| Contrast agent | Radiotracer (99mTc) | ICG | None | GBCA (intracutaneous) | GBCA or ferumoxytol (intranodal) |
| Spatial resolution | Low | High (superficial) | High | High | High |
| Depth of penetration | Whole-limb/whole-body functional imaging; poor anatomic depth localization unless SPECT/CT is used. | ≤1.5-2 cm | Unlimited (3D) | Unlimited (3D) | Central lymphatics |
| Dynamic flow info | Yes (limited) | Yes (real-time) | No | Yes | Yes (real-time) |
| 3D anatomy | No (planar/SPECT) | No (2D surface) | Yes | Yes | Yes |
| Venous contamination | No | No | No | Possible | Possible |
| Tissue composition | No | No | Yes (edema/fat) | Yes (edema/fat) | Limited |
| Exam time | 2-4 hours | 15-30 min | ≈10-15 min | 50-75 min | 30-45 min |
| LVA planning utility | Low | High (superficial) | Moderate (staging) | High (deep+superficial) | Peripheral LVA planning utility: Low<br>Central lymphatic intervention planning: High |
| Reimbursement (Korea) | Covered | Covered under criteria | Coverage not established | Coverage not established | Coverage not established |

ICG, indocyanine green; NCMRL, non-contrast MR lymphography; CE-MRL, contrast-enhanced MR lymphangiography; DCE-MRL, dynamic contrast-enhanced MR lymphangiography; GBCA, gadolinium-based contrast agent; LVA, lymphaticovenous anastomosis; SPECT, single-photon emission computed tomography.

## 5. 최신 발전 동향과 향후 전망

MRL 분야에서는 여러 기술적 발전이 이루어지고 있다. 첫째, 새로운 조영제의 개발이 진행 중이다. 기존의 가돌리늄 기반 조영제 외에 산화철 기반 조영제(iron oxide-based contrast agent)가 림프계 영상에 적용되고 있으며, 이는 림프계 내에서 더 오래 체류하여 지연영상이 가능하다는 장점이 있다. Chae 등(2024)은 가돌리늄과 산화철 기반 조영제의 림프관 내 약동학을 비교하였다[36]. 동물 모델에서 새로운 림프계 특이적 조영제(INV-001)의 효율성이 보고된 바 있다[37]. 신부전 환자에서는 ferumoxytol을 이용한 DCE-MRL이 대안적 방법으로 보고되고 있다[38].

둘째, AI 기반 영상 분석은 현재 CT 기반 섬유화 정량화[39], ICG lymphography 자동 분석, MRI/radiomics 기반 조직 성분 평가 등에서 가능성이 제시되고 있으며, 향후 MRL에서 림프관 및 부종 조직의 자동 분할로 확장될 수 있다.

셋째, 병기 평가의 표준화가 필요하다. 현재 Soga 등의 7단계 MRL staging[28], Park 등의 MRI severity index[27], Kim 등의 상지 MRI staging[30] 등 다양한 분류 체계가 제안되어 있으나, 국제적으로 통일된 진단 기준과 절단치의 확립이 시급하다. 최근 발표된 MRI 기반 림프부종 평가의 종합 리뷰에서는 비조영 MRL, radiomics, AI 등의 통합이 진단 정확도와 임상적 유용성을 높일 수 있음을 제시하였다[40].

넷째, 한국에서는 현재 MRL이 건강보험 급여 항목에 포함되어 있지 않아 임상 활용에 제한이 있는 상황이며[41], 향후 MRL의 임상적 근거 축적과 함께 정책적 지원이 발전할 필요가 있다.

## 결 론

MRL은 림프부종의 영상의학적 평가에 있어 기존 검사의

한계를 극복할 수 있는 강력한 도구로 자리잡고 있다. NCMRL과 CE-MRL을 적절히 조합하여 활용함으로써 림프부종의 진단, 병기 평가, 수술 전 계획, 치료 반응 평가 및 추적 관찰에 이르기까지 포괄적인 정보를 제공할 수 있다. 특히 미세수술의 발전과 함께 LVA 및 VLNT의 수술 전 계획에 있어 MRL은 중요한 영상 검사로 인식되고 있다. 향후 MRL의 임상적 활용을 극대화하기 위해서는 영상 프로토콜의 표준화, 정량적 평가 기준의 확립, AI 기반 영상 분석 기술의 적용, 그리고 적절한 보험 급여 체계의 구축이 필요하다. 림프부종의 다학제적 관리에 있어 각과 전문의의 적극적인 참여와 협업이 중요하며, MRL의 발전은 이러한 협업의 핵심 기반이 될 것이다.

## REFERENCES


1. Carlson JA. Lymphedema and subclinical lymphostasis (microlymphedema) facilitate cutaneous infection, inflammatory dermatoses, and neoplasia: a locus minoris resistentiae. Clinics in dermatology 2014;32:599-615.
2. Földi M, Földi E, Strößenreuther C, Kubik S. Földi's textbook of lymphology: for physicians and lymphedema therapists. Elsevier Health Sciences; 2012.
3. Asare KK, Adu-Gyamfi CO, Afful P, Abotsi GK, Benyem G, Wilmot D. Lymphatic Filariasis (LF) Elimination: What Is the Current Situation? In: Mosquito-Borne Tropical Diseases: IntechOpen; 2024.
4. DiSipio T, Rye S, Newman B, Hayes S. Incidence of unilateral arm lymphoedema after breast cancer: a systematic review and meta-analysis. Lancet Oncol 2013;14:500-515.
5. Torgbenu E, Luckett T, Buhagiar MA, Chang S, Phillips JL. Prevalence and incidence of cancer related lymphedema in low and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. BMC cancer 2020;20:604.
6. Weissleder H, Weissleder R. Lymphedema: evaluation of qualitative and quantitative lymphoscintigraphy in 238 patients. Radiology 1988;167:729-735.
7. Mihara M, Hara H, Araki J, Kikuchi K, Narushima M, Yamamoto T, et al. Indocyanine green (ICG) lymphography is superior to lymphoscintigraphy for diagnostic imaging of early lymphedema of the upper limbs. PLoS One 2012; 7:e38182.
8. Guerrini S, Gentili F, Mazzei FG, Gennaro P, Volterrani L, Mazzei MA. Magnetic resonance lymphangiography: with or without contrast? Diagn Interv Radiol 2020;26:587-595.
9. Lohrmann C, Foeldi E, Speck O, Langer M. High-resolution MR lymphangiography in patients with primary and secondary lymphedema. AJR Am J Roentgenol 2006;187:556-561.
10. Mazzei FG, Gentili F, Guerrini S, Cioffi Squitieri N, Guerrieri D, Gennaro P, et al. MR Lymphangiography: A Practical Guide to Perform It and a Brief Review of the Literature from a Technical Point of View. Biomed Res Int 2017;2017: 2598358.
11. Pons G, Clavero JA, Alomar X, Rodriguez-Bauza E, Tom LK, Masia J. Preoperative planning of lymphaticovenous anastomosis: The use of magnetic resonance lymphangiography as a complement to indocyanine green lymphography. J Plast Reconstr Aesthet Surg 2019;72:884-891.
12. Bae JS, Yoo RE, Choi SH, Park SO, Chang H, Suh M, et al. Evaluation of lymphedema in upper extremities by MR lymphangiography: Comparison with lymphoscintigraphy. Magn Reson Imaging 2018;49:63-70.
13. Notohamiprodjo M, Weiss M, Baumeister RG, Sommer WH, Helck A, Crispin A, et al. MR lymphangiography at 3.0 T: correlation with lymphoscintigraphy. Radiology 2012;264:78-87.
14. Mills M, van Zanten M, Borri M, Mortimer PS, Gordon K, Ostergaard P, et al. Systematic Review of Magnetic Resonance Lymphangiography From a Technical Perspective. J Magn Reson Imaging 2021;53:1766-1790.
15. Negm AS, Collins JD, Bendel EC, Takahashi E, Knavel Koepsel EM, Gehling KJ, et al. MR Lymphangiography in Lymphatic Disorders: Clinical Applications, Institutional Experience, and Practice Development. Radiographics 2024;44:e230075.
16. Cellina M, Oliva G, Menozzi A, Soresina M, Martinenghi C, Gibelli D. Non-contrast Magnetic Resonance Lymphangiography: an emerging technique for the study of lymphedema. Clin Imaging 2019;53:126-133.
17. Crescenzi R, Donahue PM, Hartley KG, Desai AA, Scott AO, Braxton V, et al. Lymphedema evaluation using noninvasive 3T MR lymphangiography. Journal of Magnetic Resonance Imaging 2017;46:1349-1360.
18. Arrive L, Derhy S, Dahan B, El Mouhadi S, Monnier-Cholley L, Menu Y, et al. Primary lower limb lymphoedema: classification with non-contrast MR lymphography. Eur Radiol 2018;28:291-300.
19. Arrivé L, Chekir H, El Mouhadi S. Noncontrast MR Lymphography: A Noninvasive and Useful Imaging Modality. RadioGraphics 2024;44:e240054.
20. Mazzei MA, Gentili F, Mazzei FG, Gennaro P, Guerrieri D, Nigri A, et al. High-resolution MR lymphangiography for planning lymphaticovenous anastomosis treatment: a single-centre experience. La radiologia medica 2017;122: 918-927.
21. Lohrmann C, Foeldi E, Bartholomä J-P, Langer M. Interstitial MR lymphangiography—a diagnostic imaging method for the evaluation of patients with clinically advanced stages of lymphedema. Acta tropica 2007;104:8-15.

22. Lee S, Hur S, Choi YH, Hwang J-Y, Cheon J-E. MR lymphangiography: congenital lymphatic flow disorders. Investigative Radiology 2025;60:84-94.
23. Chavhan GB, Amaral JG, Temple M, Itkin M. MR lymphangiography in children: technique and potential applications. Radiographics 2017;37:1775-1790.
24. Ahn Y, Koo HJ, Choe J, Chu HH, Yang DH, Kang J-W, et al. Single-center experience with dynamic contrast- enhanced magnetic resonance lymphangiography for diagnosing lymphatic disorders and guiding percutaneous embolization. Journal of Korean Medical Science 2024;39.
25. Zhang M, Xie J, Huang J, Chen Y, Wang J, Yi L, et al. Magnetic resonance lymphography findings across different clinical stages of lower limb lymphedema. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery 2024;96:129-135.
26. Strobl F, Weiss M, Wallmichrath J, Baumeister R, Reiser M, Notohamiprodjo M. MR lymphangiography for assessment of focal dermal backflow for presurgical work-up in patients with peripheral lymphoedema. Handchirurgie, Mikrochirurgie, Plastische Chirurgie: Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft fur Handchirurgie: Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft fur Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefasse: Organ der V... 2012;44:329-333.
27. Park JK-h, Choi N, Beom J, Lim J-Y, Kang Y, Nam S-Y, et al. Utilization of noncontrast magnetic resonance lymphangiography for selection of effective surgical method in breast cancer-related lymphedema. Medicina 2023;59: 1656.
28. Soga S, Onishi F, Mikoshi A, Okuda S, Jinzaki M, Shinmoto H. Lower limb lymphedema staging based on magnetic resonance lymphangiography. Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders 2022;10:445-453. e443.
29. Soga S, Onishi F, Jinzaki M, Mikoshi A, Minabe T, Shinmoto H. Analysis of collateral lymphatic circulation in patients with lower limb lymphedema using magnetic resonance lymphangiography. Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders 2021;9:471-481. e471.
30. Kim G, Smith MP, Donohoe KJ, Johnson AR, Singhal D, Tsai LL. MRI staging of upper extremity secondary lymphedema: correlation with clinical measurements. European radiology 2020;30:4686-4694.
31. Cellina M, Martinenghi C, Panzeri M, Soresina M, Menozzi A, Daniele G, et al. Noncontrast MR lymphography in secondary lower limb lymphedema. Journal of Magnetic Resonance Imaging 2021;53:458-466.
32. Zhu J, Guo Q, Huang Y, Zhu Y, Hou H, Wang N, et al. Clinical value of contrast-enhanced magnetic resonance lymphatic vessel imaging for precise localization of lymphatic vessels in patients with lymphaticovenous anastomosis. J Plast Reconstr Aesthet Surg 2025;105:385-394.
33. Forte AJ, Boczar D, Huayllani MT, Avila FR, Guliyeva G, Lu X, et al. Use of magnetic resonance imaging lymphangiography for preoperative planning in lymphedema surgery: a systematic review. Microsurgery 2021;41:384-390.
34. Lohrmann C, Felmerer G, Foeldi E, Bartholomä J-P, Langer M. MR lymphangiography for the assessment of the lymphatic system in patients undergoing microsurgical reconstructions of lymphatic vessels. Microvascular research 2008;76:42-45.
35. Zhang M, Yi L, Liu C, Huang J, Chen Y, Wang J, et al. Magnetic resonance lymphangiography: Correlation with indocyanine green lymphangiography in lower limb lymphedema. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery 2025;109:60-67.
36. Chae YJ, Kim KW, Kim M-h, Woo C-W, Kim S-T, Kim J-w, et al. Comparison of the Pharmacokinetics of Gadolinium-Based and Iron Oxide-Based Contrast Agents inside the Lymphatic Structure using Magnetic Resonance Lymphangiography. Molecular Imaging and Biology 2024;26:638-648.
37. Jang JS, Kim N, Kim M-H, Lee D-W, Kim J-w, Shin T-H, et al. Analysis on efficacy of magnetic resonance lymphangiography using INV-001 in healthy beagle dogs. Scientific Reports 2024;14:10502.
38. Yekeler E, Krishnamurthy G, Smith CL, Escobar FA, Pinto E, Rapp JB, et al. Dynamic contrast-enhanced MR lymphangiography: feasibility of using ferumoxytol in patients with chronic kidney disease. European Radiology 2022;32: 2564-2571.
39. Son H, Lee S, Kim K, Koo K-i, Hwang CH. Deep learning-based quantitative estimation of lymphedema-induced fibrosis using three-dimensional computed tomography images. Scientific Reports 2022;12:15371.
40. Ren X, Li L. Magnetic resonance imaging in lymphedema: Opportunities, challenges, and future perspectives. Magnetic Resonance Imaging 2025:110461.
41. Yang E. Current Challenges and Future Directions in Lymphedema Diagnosis and Staging. CLL 2025:58-62.