



근골격질환 고자장 자기공명영상

이 인 숙^{1,2*} · 송 종 운³

¹부산대학교 의학전문대학원 부산대학교병원 영상의학과, ²부산대학교병원 의학연구소, ³인제대학교 해운대백병원 영상의학과

High field strength magnetic resonance imaging of musculoskeletal diseases

In Sook Lee, MD^{1,2*} · Jong Woon Song, MD³

¹Department of Radiology, Pusan National University Hospital, Pusan National University School of Medicine, ²Medical Research Institute, Pusan National University Hospital, ³Department of Radiology, Inje University Haeundae Paik Hospital, Busan, Korea

* Corresponding author: In Sook Lee, E-mail: lis@pusan.ac.kr

Received November 1, 2010 Accepted November 14, 2010

Abstract

Musculoskeletal magnetic resonance imaging (MRI) applications are making the transition rapidly from 1.5 tesla (T) to 3T. The higher signal-to-noise ratio (SNR) that is available with a 3T MRI system allows for greater spatial resolution and provides the potential to improve the diagnostic capability of musculoskeletal MRI. With the use of 3T systems, one can enhance the SNR, spatial resolution, and contrast-to-noise ratio of intrinsic joint structures such as osseous, tendinous, cartilaginous, and ligamentous structures, which makes them more discernable and amenable to proper radiologic assessment. The SNR gain and coil technology advances allow for a smaller voxel-size and parallel imaging, reducing the acquisition time without significant signal loss. Three-dimensional (3D) fast spin echo sequences with isotropic resolution reduce partial volume artifacts through the acquisition of thin continuous sections and enable free 3D-multiplanar-reformatting without loss of image quality. This technique may be a promising method to replace currently used 2D sequences in clinical practice. In addition to current clinical applications, 3T MRI will contribute to the development of new molecular and functional MRI techniques.

Keywords: Magnetic resonance imaging; High field strength; Musculoskeletal diseases; Arthrography; 3 tesla

서 론

최근 몇 년간 3 tesla (T) 자기공명영상 시스템의 급속한 발전으로 근골격계에서 이론적인 적용이 실제적으로 이루어지면서 진단 역량을 향상시켜왔다. 3T에서 유용한 고 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 향상된 영상질을 통해 진단의 정확도를 증가시키기 위한 가능성을 제공하고 스캔시간을 향상시킨다. 이는 좀 더 높은 공간

해상도, 빠른 속도, 혹은 SNR이 부족한(예, 확산영상) 대조도의 최적화, 자장세기에 의존적인 대조 기법(예, T2*)의 형태로 이루어 질 수 있다[1]. 인대와 연골구조물들이 좀 더 자세히 보이고, 지난 몇 년간 애매모호했던 진단들이 좀 더 확신 있게 이루어지게 되었다[2]. 그러나 많은 경우에서 3T의 향상된 영상의 질이 진단적 정확도를 증가시키지는 분명하지 않다. 이전 문헌들에 의하면 무릎의 전방십자인대(anterior cruciate ligament) 혹은 반달연골(meniscus) 열상,

어깨관절의 회전근개(rotator cuff), 관절순(labrum) 혹은 관절낭(joint capsule) 병리의 진단적 정확도가 저자장과 고자장 사이에 차이가 없다고 언급하였다[3-6]. 그러므로 1.5T에서 3T로의 이행으로 인해서 이러한 상황들에 대한 진단적 정확도가 실질적으로 향상될 것 같지는 않다. 그러나 6개의 주요관절 각각에서, 많은 작은 인대와 연골 구조물들이 1.5T의 고식적 비관절조영술의 사용으로는 적절한 평가가 이루어지지 않는다. 3T의 사용으로 이러한 구조물들의 SNR, 공간해상도, 대조대잡음비(contrast-to-noise ratio, CNR)를 강화할 수 있어서, 적절한 영상학적 평가가 이들을 좀 더 구분하게 하고 병적상태의 진단이 향상될 것으로 기대된다[2].

또한 3T의 SNR 증진은 좀 더 작은 복셀크기를 부여하고, 평행획득기법(parallel-acquisition-techniques)들의 통합, 무시할 정도의 신호감소와 어느 정도 유지되는 대조도를 가지면서 영상획득 시간의 감소를 가능하게 한다[7,8]. 그리고 고해상도를 가지는 등방성(isotropic)의 3차원적 터보스핀에코 영상들을 가능하게 한다. 등방성 해상도는 부분용적효과(partial volume effect)를 감소시키고 3개의 주요 해부학적 면과 관심영역의 구조물들을 따라서, 영상질의 감소 없이 자유롭게 3차원적 다면 재형성(3D-multiplanar-reformatting)을 가능하게 한다[9].

기술적 고찰

다른 매개변수들이 일정하다면, 3T는 1.5T에 비해 2배의 SNR을 가질 가능성이 있지만, 실제적으로 SNR의 향상은 2배보다 덜하고, 조직과 펄스 시퀀스에 비례한다[1]. 3T에서 SNR의 잠재적인 증가는 특히 T1의 주파수 의존으로 상쇄된다. 근골격계 조직의 T1은 1.5T에서 3T로 이동할 시 10-30% 정도 증가한다. 1.5T에 상응하는 T1 대조도를 유지하기 위해서는 repetition time (TR)을 증가시키는 것이 필수적이다. T1과 대조적으로 T2 값은 자장세기가 증가할수록 일정하거나 약간 감소된다. T2의 자장 의존도는 조직종류, 펄스 시퀀스, 획득 매개인자들에 영향을 받는다. 3T에서 자장정사를 통한 확산의 영향은 1.5T보다 4배 크다. 결과적으로 자장의 세기가 증가할수록 T2*와 T2 대조도가 일치된다[10].

기본적인 임상적 영상

1. 무릎관절

콜라겐이 풍부한 조직(예, 건, 인대, 반월판)에 대해서, 영상 대조도는 본질적으로 자장세기에 비의존적이고 TR에 거의 영향을 받지 않는 짧은 T2 (-250 μ s)에 의해 극대화된다[11]. 건의 정상유무, 퇴행성 변화 혹은 파열과 같은 진단적 소견들은 짧은 echo time (TE) 혹은 긴 TE 시퀀스들에 의해 구분이 되고, 1.5T와 3T가 비슷하다[1]. 무릎의 자기공명 프로토콜은 고자장에서 평균의 수를 감소시키는 것을 제외하고는 1.5T와 3T에서 거의 동일하다. Kijowski 등[12]은 3T 자기공명영상 영상에서 연골병변, 십자인대 열상, 측부인대 열상, 반달연골 열상, 골수부종을 발견하는데 있어서 3차원 등방성 고속스핀에코영상이 고식적 자기공명영상 프로토콜과 비슷한 진단 성과를 가진다는 결과를 얻었다. T2 강조영상들은 관절연골, 측부인대들, 십자인대들, 골수병변들(골절, 골좌상, 종양)을 평가하는데 사용된다. 시상면의 양성자강조밀도영상은 반달연골을 평가하는 주요 시퀀스이다. 관상면 T1 강조영상은 골수 이상(골절, 골연골병변, 좌상, 종양)을 평가하고 반달연골의 추가적인 평가를 제공하는데 사용된다.

(1) 반달연골(Menisci)

자기공명영상을 이용한 반달연골의 평가는 오랫동안 매우 높은 정확한 시도가 되어왔다. 3T의 도입으로 훨씬 높은 공간해상도와 SNR이 1.5T의 정확도를 개선하기 위해 혹은 최소한 진단적 확신을 향상시키기 위해 효과적으로 사용될 수 있다[2]. Magee와 Williams[13]은 3T 자기공명영상이 반달연골 열상을 발견하는데 있어서 1.5T 혹은 그 이하 자장세기와 비교하여 높은 민감도와 특이도를 가지는 결과를 얻었다. 또한 Ramnath 등[14]은 3T에서 고해상도의 고속스핀에코영상 시퀀스들이 반달연골 열상을 발견하는데 정확도가 높고 신뢰할 만하다고 언급하였다. 반달연골 뿌리 역시 3T 자기공명영상의 중간강조(intermediate-weighted) 터보스핀에코에서 잘 보인다고 하였다(Figure 1)[15].

(2) 십자인대들(Cruciate ligaments)

많은 연구자들이 급성 및 아급성 전방십자인대 파열의 진

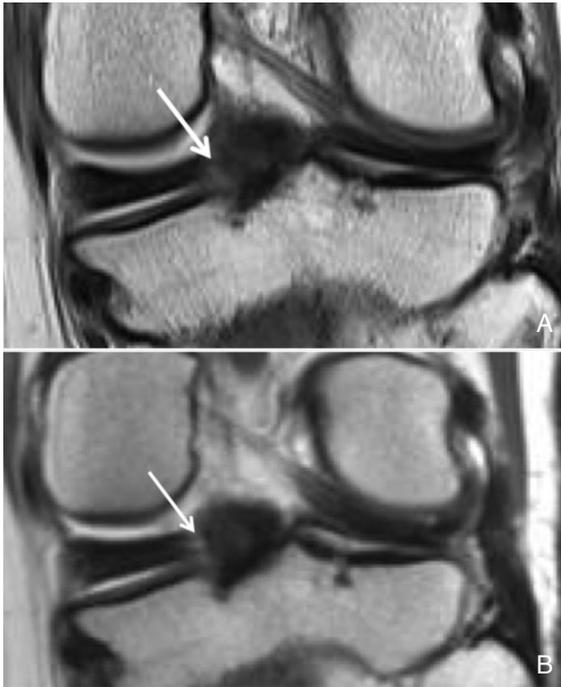


Figure 1. Coronal 3 tesla magnetic resonance images of knee in 69-year-old women show surgically confirmed avulsive tear of posterior root of medial meniscus. 2D coronal intermediate-weighted image (A) shows faint intermediate signal intensity (arrow) in posterior medial meniscal root. However, definitely bandlike area of high signal intensity (arrow) is noted in posterior medial meniscal root on reformatted coronal image of 3D space isotropic intermediate-weighted density (B).

단에 있어서 경이로운 성과를 증명했다[16-18]. 이러한 연구들은 92-100%의 민감도, 85-100%의 특이도, 89-100%의 정확도를 보여주었다. 그러나 전방 및 후방 십자인대의 부분 파열과 만성 파열의 평가는 실망스러웠다[19-21]. 부분 파열의 평가에 대해서, 높은 자장 세기가 1.5T의 낮은 정확도를 극복한다[2]. 혼한 손상은 아니나, 후방십자인대의 파열은 현재의 자장세기에서 잘 평가되고 좀 더 높은 자장 세기로도 추가되는 개선은 없을 것으로 보인다[22].

(3) 관절연골(Articular cartilage)

관절연골의 평가는 사용되는 시퀀스들에 의존하여, 자기 공명영상에서 다양한 성과를 보여주었다[2]. 손상의 정도가 심한 병변에 대한 진단적 정확도는 정도가 낮은 병변에 비해 훨씬 높다[23]. 3T의 향상된 신호강도, CNR, 공간해상



Figure 2. A 37-year-old man with focal cartilage defect and subchondral fracture in lateral tibial plateau. 2D coronal intermediate-weighted image (A) and reformatted coronal image of 3D isotropic intermediate-weighted density sequence (B) of the knee demonstrate focal chondromalacia (arrow) clearly at 3 tesla magnetic resonance imaging.

도로 인해 관절연골의 평가가 개선되었고, 최근 연구에서는 3T에서 연골과 관절액 사이의 훨씬 높은 CNR을 증명하였다(Figure 2)[24]. Schröder 등[25]은 세 가지의 다른 시퀀스들을 이용하여 3T와 1.5T를 비교하였고, 결과는 3T에서 모든 시퀀스에 대해서 연골병변의 발견, SNR, CNR이 훨씬 향상되었음을 보여주었다. Kijowski 등[26]도 무릎관절의 연골병변을 발견하는데 있어서, 3T 프로토콜이 1.5T와 비교하여 훨씬 높은 특이도와 정확도를 가진다고 하였다. 또한 3T 프로토콜이 연골면에 등급을 정하는 것과 연골병변을 등급별로 나누는 것에 훨씬 높은 정확도를 가지나, 연골병변 유무를 판정할 때 1.5T에 비해 관찰시간 일치도는 높지 않다고 보고하였다.

최근에 많은 연구들은 관절염의 조기 인자로써 관절연골의 T2 붕괴 시간의 변화에 초점을 맞추고 있다. T2시간 변화는 다른 연골층에서 기질 성분의 변화뿐 아니라 프로테오글리칸(proteoglycan) 양의 감소, 물 양의 변화, 콜라겐 양의 증가 등 복합적인 요소에 기인한다. 비록 몇몇 연구들은 1.5T를 이용하여 연골의 성공적인 T2 지도화를 증명하였으나, 관절로부터 얻어지는 신호를 증가시키는 능력에 있어서, 고장장세기의 잠재적인 장점을 부정하기 어렵다[2].

(4) 후외각(Posterolateral corner)

3T에서 공간해상도의 현저한 향상은 후외각과 같이 무릎의 좀 더 작은 구조물을 좀 더 잘 평가할 수 있는 기회를 제공한다. 이 중요한 해부학적 복합체는 무릎의 내반과 외전을 방지하고 중요한 전후방 안정화에 기여하는 구조물이다. 전후각의 불안정성은 전방십자인대의 이식재건술의 실패에 기여한다[27]. 그러므로 술전에 이 구조물의 손상 여부를 알아내는 것은 중요하다. 후외각의 구조물들(대퇴이두근, 슬와건, 슬와반달연골 다발[popliteomeniscal fascicles], 슬와비골 인대[popliteofibular ligament], 비측 측부인대, 관상 인대[coronary ligament], 외측 세 번째 관절낭 인대[lateral third midcapsular ligament])는 좀 더 높은 자장의 세기를 가지는 자기공명기기로 좀 더 잘 식별할 수 있을 것이다.

(5) 후내각(Posteromedial corner)

최근 후내각의 구조물들이 정상 무릎의 해부학과 기능에 기여하고, 그들이 전방십자인대의 파열과 재건에 관계하므로 불안정성 양상에 기여하는 면에서 이 구조물들에 집중하고 있다. 이러한 중요 구조물들은 경골의 전내측 아탈구를 방지하여 안정화시키고, 외반력을 방지한다[28]. 후내각의 손상은 전방십자인대의 손상에 잇따라 일어날 것이다[28]. 3T는 이러한 구조물들(내측 반월판의 후각, 반막모양[semimembranosus tendon], 후경사 인대[posterior oblique ligament], 경사진 슬와 인대[oblique popliteal ligament])의 해부학적 식별을 향상시키기 위한 잠재성을 가진다.

2. 고관절

자기공명영상은 무혈성괴사, 일시적인 골수부종, 불충분 골질의 평가를 위한 정확한 검사법이다[29]. 그러나 비구순

과 관절 병변을 평가할 때는 자기공명영상이 효과적이지 못하다. 고관절의 증상들은 무혈성 괴사와 같이 양쪽 고관절에 영향을 줄 수 있는 전신적 과정부터 비구순 이상(labral pathology)과 같은 국소적 고관절 내 이상의 결과로 초래될 수 있다. 이는 전 골반을 포함하는 큰 범위의 해부학적 적용범위를 필요로 한다. 그러므로 중요한 연부조직들을 충분히 보기 위해 고해상도를 유지하면서 큰 영상범위(field of view)를 필요로 하는 수준이 있다. 이는 큰 영상행렬(image matrices)을 필요로 해서 기존의 획득방법으로는 시간이 많이 걸린다[1]. 1.5T에서 좀 더 낮은 SNR과 충분한 영상 질을 유지하기 위한 신호평균의 필요 때문에, 평행 영상 혹은 반 Fourier영상과 같은 기법들이 영상획득 시간을 줄이는 방법이나 비효과적이다. 그러나 3T의 좀 더 높은 SNR은 적당한 시간 내에 큰 영상범위와 고해상도를 가지는 영상을 얻는데 효과적인 평행 영상 혹은 부분적 Fourier 획득 기법들의 사용이 가능하다[1].

3T의 높은 대조영상은 비구순과 연골의 평가에 유용하다. 젊은 성인에서 대퇴골두와 골경의 비정상적인 형태와 전상 비구순 열상과 관절연골의 결함으로 특징지어지는 대퇴관골구 충돌증후군(femoral acetabular impingement)과 노인들의 관절염과 같은 질환의 발견이 증가되고 있다[1]. 새로운 수술적 치료의 발달로 술전 정확한 진단을 필요로 한다. 자기공명 관절조영술은 비구순 열상의 진단에는 높은 정확도(90-95%)를 제공하나 연골 병변을 발견하는 민감도(50-95%)는 다양하다[30]. 일반적으로 고관절 연골에 관한 진단적 정확도는 무릎관절에서 보고된 것보다 상당히 낮다.

큰 영역범위 시퀀스들은 피로골절과 같은 골반을 통해 일어날 수 있는 다른 통증의 원인을 발견할 뿐 아니라 반대측 고관절의 신호를 비교할 수 있게 한다. 지방억제 T2 강조영상들은 골수이상, 점액낭염, 관절 삼출, 비구순 열상, 비구순 주위 낭의 평가를 위해 우선적으로 이용된다. T1 강조영상은 어떠한 관절내 물질뿐 아니라 다른 골수 병변 혹은 골질의 유무를 결정하는데 탁월하다. 또한 근위축이나 근육 종괴를 평가할 수 있다[2].

(1) 연골(Cartilage)

많은 연구자들이 대퇴골두와 비구순을 둘러싸는 얇은 테두리의 연골을 보기가 어려운 이유 때문에, 현재의 자장세



Figure 3. A 22-year-old woman with osteonecrosis of right femoral head and secondary osteoarthritis. Fat-suppressed, coronal intermediate-weighted image at 3 tesla magnetic resonance imaging shows well diffuse irregularity of hyaline cartilage within the hip joint due to secondary osteoarthritis.

기에서 고식적인 자기공명영상으로 고관절의 연골을 평가하는데 다양한 성과를 입증하였다[31]. 3T 자기공명영상은 고관절의 다른 구조물들에 비해 상대적으로 작은 구조물을 평가하기 위해 필요한 신호의 증진과 공간해상도의 증진 때문에 연골의 평가에 적합하다(Figure 3). Rubin 등[32]은 1.5T에서 좀 더 높은 해상력의 영상이 고관절 연골의 선명도를 증진시킴을 발견하였다. 직접적인 자기공명 관절조영술이 고관절 내 질환을 좀 더 잘 보기 위해 추천되어 왔다. 그러나 Keeney 등[33]의 연구에서 보여주듯이 직접적인 자기공명 조영술을 이용해도 연골병변을 발견하는데는 민감도가 47%, 정확도가 67%로 불충분하다.

(2) 비구순(Labrum)

비구순의 병적상황들은 운동선수들뿐 아니라 대퇴비골 충돌증후군, 고관절의 이형성증(developmental dysplasia of hip), 혹은 관절염을 가진 환자들과 지속적인 외상을 가지는 환자들에서 보일 수 있다. Ramnath [2]는 비구순이

3T에서 훨씬 잘 보였고 비구순의 질환을 발견하는데 좀 더 쉬웠다고 언급하고 있다. 직접적인 자기공명 관절조영술이 비구순의 열상을 증명하는데 우월하다는 것은 증명되어왔다[34]. Rubin 등[32]은 고해상도 영상이 높은 공간해상도로 인해 좀 더 자세히, 향상된 선명도로 비구순을 볼 수 있음을 보여주었다(Figure 4).

3. 어깨관절

진단적 정확도 면에서, 자장 세기의 효과를 평가해온 이전 연구들은 회전근개 열상의 평가에서 유의한 영향이 없음을 발견하였다[1]. 극상근의 완전, 부분 열상을 발견하는데 있어서의 민감도와 특이도는, 3T 자기공명영상의 결과가 이전의 1.5T 혹은 그 이하 자장세기를 가지는 자기공명영상의 결과에 필적하였다[35]. 어깨관절 영상은 3T에서 몇 가지 어려움이 있다. 덩치가 큰 환자는 어깨가 자기 구멍(magnet bore)의 가장자리에 가까이 위치하여 보정에 어려움이 있고, 좀 더 큰 영역범위에 대해서 기하학적 왜곡에 의한 인공음영을 유발할 수 있다. 고주파의 균질성결함 때문에 지방억제 기법에 어려움이 있을 수 있다. 이는 화학변위 지방억제를 위한 단일 펄스를 사용함으로써 부분적으로 교정될 수 있다. 3T는 부분적으로 움직임 인공음영에 특히 민감하다. 이는 호흡부전을 가진 환자들에게 심각한 문제가 될 수 있다.

Magee [36]는 고해상도의 고자장세기(3T)에서 자기공명 관절조영술이 고식적 자기공명영상과 비교하여 충분히 추가적인 이득을 주는지를 알아보고, 전방 관절순 열상, 상방 관절순의 전후방향 열상, 극상근 관절면의 부분 열상에 대해서는 자기공명 관절조영술에서 통계학적으로 유의하게 민감도가 증가하는 결과를 얻었다. 극상근의 완전열상과 후방 관절순 열상을 발견하는 민감도는 자기공명 관절조영술에서 고식적 자기공명영상 보다 증가하였으나 통계학적으로 유의하지는 않았다. 즉 자기공명 관절조영술이 관절순을 평가하는데 지속적으로 중요한 역할을 할 것이다. 관상면과 시상면의 T2 강조영상은 극상근을 평가하는데 사용된다. 관상면과 축상 T2 강조영상은 관절순을 평가하는데 사용된다. 관상면과 시상면의 T1 강조영상은 골수이상, 근위축, 충돌증후군을 평가하기 위해 사용된다[2].



Figure 4. A 20-year-old man with healing process of subchondral insufficiency fracture at bilateral femoral heads. Coronal T1 VIBE images of both hip joints demonstrate normal acetabular labrum (arrow) within right hip joint (A) and deformed and detached labrum (arrow) of left hip joint (B).

(I) 회전근개(Rotator cuff)

회전근개는 1.5T 기기에서도 잘 평가되어 왔다. 3T에서

정확도의 향상은 이미 높은 정도의 민감도와 특이도에 미미한 기여를 한다. 일반적으로 3T 자기공명영상에서 회전근개의 완전파열은 명료하게 잘 보인다. 회전근개의 부분파열의 인지력은 1.5T의 고식적 자기공명영상으로는 불충분하다. 비록 3T에서 회전근개의 부분파열의 진단은 대부분의 경우에서 간단하나, 비관절조영술 영상에서 3T의 향상된 SNR에도 불구하고 자기공명 관절조영술은 중요한 진단적 역할을 가진다. 1.5T에서 직접적인 자기공명 관절조영술은 회전근개 하면의 부분열상, 완전열상을 발견하는데 100% 민감도와 특이도를 보였다[37]. 이는 좀 더 높은 자장 세기 시스템이 자기공명 관절조영술을 완전히 대체할 수 없음을 시사한다. 3T의 강조된 공간해상도와 신호강도는 자기공명 관절조영술을 보강할 수 있고, 열상을 볼 수 있는 가능성을 향상시킬 것으로 기대된다(Figure 5).

(2) 관절순과 불안정성(Glenoid labrum and instability)

관절순을 평가할 수 있는 능력은 1.5T에서 전반적으로 낮은 민감도, 약간 높은 특이도를 가지면서 다양하였다. Ramnath [2]는 일시적인 경험에서 관절순의 열상과 병적인 신호는 1.5T 보다 3T로 보기가 훨씬 수월하다고 보았다. 관절순의 병적상태를 발견하기 위해, 1.5T에서는 진단 능력을 향상을 위해서 직접적인 자기공명 관절조영술이 사용되어 왔다. 이러한 연구들[38,39]은 48-100%의 민감도, 69-100%의 특이도, 74-92%의 정확도를 나타내었다. 3T의 향상된 신호강도, CNR, 공간해상도는 자기공명 비관절조영술의 부족함을 향상시켜줄 것으로 기대된다. 1.5T와 저 자장세기(0.2T)와 비교한 이전의 많은 문헌들에 의하면, 고 자장세기에서 SNR의 증진으로 인해 진단의 정확도가 향상됨을 결론 내릴 수 있다[40]. 그러나 3T가 직접 혹은 간접 관절조영술의 필요를 대신할 수 있는지는 분명하지 않고, 자기공명 관절조영술로 인한 관절내 팽창의 이점 때문에 그렇게 될 것 같지 않다.

4. 팔꿈치관절

(1) 측부(곁)인대들(Collateral ligaments)

Timmerman 등[41]은 고식적 자기공명영상으로 척골쪽



Figure 5. A 53-year-old male patient with partial thickness tear of supraspinatus tendon. A focal defect at articular surface of supraspinatus tendon (arrow) was well delineated on post-arthrographic, fat-suppressed coronal T1-weighted image at 3 tesla system.

결인대(ulnar collateral ligament)를 평가하는데 57%의 민감도, 100%의 특이도를 증명하였다. 고해상도의 자기공명영상은 팔꿈치 인대들의 선명도를 향상시킨다고 하였다. 이전의 연구들은 팔꿈치 인대들을 평가하는데, 향상된 공간 해상도와 신호강도를 가지는 3T 영상이 유용하다는 것을 보여 주었다[42]. 팔꿈치의 측부인대들을 완전히 평가하기 위해서는 지속적으로 자기공명 관절조영술에 의존하고 있다. 관상면의 T2강조영상은 측부인대들을 평가하는데 이용된다. 모든 단면의 T2강조영상들은 골절과 종양 같은 골수이상, 골연골질환, 관절내 물질 등을 평가하는데 이용된다. T2 강조영상이 인대의 평가와 병적인 부종을 평가하는데 적합하다.

5. 작은 관절

작은 관절들의 영상을 위한 전용 표면 코일(dedicated surface coils)의 발달로, 3T에서 고해상 영상 발달의 향상이 기대된다. 지금까지의 경험은 3T에서 부가적인 SNR이

1.5T에서 반복적으로 보여주기 어려울 수 있는 중요한 구조물들(예, 손목의 작은 내인성 인대들, 작은 관절주위 미란, 관절연골)의 시각화를 향상시킨다고 제시하고 있다[1]. 3T에서는 1.5T에서 사용되는 삼차원 시퀀스들의 절편두께와 비슷한 이차원 고속 스핀에코 영상들을 얻는 것이 가능하다. 이러한 기법들은 큰 관절들의 건과 인대의 병을 보여주기 위한 신뢰 있는 방법들이고 작은 관절들에서 병의 진단을 향상시킬 것이다.

6. 손목관절

자기공명을 이용한 손목의 평가는 검사의 적응증에 따라, 다양한 성과로 한결같이 사용되어왔다. 많은 임상사들이 손목의 인대를 적절하게 평가하기 위해 지속적으로 고식적인 세구역(tricompartmental) 관절조영술을 추천한다. 고차장세기에서 손목의 자기공명영상은 확실히 진단적 정확도를 향상시킬 것이다. Magee [43]는 손목의 3T 자기공명영상이 내재성 인대들의 열상과 삼각 섬유연골 복합체(triangular fibrocartilage complex) 열상을 발견하는데 민감도가 매우 높다고 결론내렸다. 자기공명 관절조영술의 추가는 인대들의 좀 더 민감한 평가를 가능하게 하나, 미세 천공 때문에 가상성 검사를 초래할 수 있다. Saupe 등[44]은 손목의 일정한 고화질 자기공명영상이 1.5T에서 사용된 비슷한 시퀀스들을 이용하여 3T로 얻어질 수 있음을 경험하였다. 또한 1.5T와 비교하여 3T 자기공명영상이 기존의 스핀에코와 고속 스핀에코 시퀀스들을 이용하여 뼈와 근육 사이, 뼈와 연골 사이의 향상된 CNR을 제공하는 것으로 보인다. 3T 자기공명영상에서 다양한 해부학적 구조물들의 선명도는 1.5T 자기공명영상에 비해 높아 보인다. 관상면 T2 강조영상은 내외재성 인대, 삼각 섬유연골, 골수이상을 평가하는데 사용된다. 모든 면의 T2 강조영상들은 어떠한 연부조직 병변들뿐만 아니라 굵힘과 편근힘줄들을 평가하는데 사용된다. 관상면과 축상면 T1 강조영상은 골수이상을 평가하는데 사용된다.

(1) 삼각섬유연골복합체(Triangular fibrocartilage complex, TFC)

1.5T에서 TFC의 평가는 시행된 검사에 따라 다양한 성과를 가져왔다. Potter 등[45]은 TFC의 고식적인 자기공명영



Figure 6. A 15-year-old girl with wrist pain. Focal discontinuity (arrow) of triangular fibrocartilage is well noted on fat-suppressed coronal intermediate-weighted image of 3 tesla magnetic resonance imaging.

상의 현저한 향상이 고해상도 영상에서 얻어지는(민감도 100%, 특이도 97%) 결과를 얻었고, 이는 고 자장세가 손목의 평가를 보충할 것으로 보인다. Yoshioka 등[46]은 3T에서 특징적으로 향상된 영상질을 입증하였다. Lenk 등[47]은 같은 복셀 크기를 사용하여 1.5T와 비교하여 3T에서 향상된 주관적 영상질을 보여주었다. Saupe 등[44]은 TFC가 같은 해상도를 사용한 1.5T와 비교하여 3T에서 좀 더 잘 보인다는 것을 알아내었다. 그들은 근육, 뼈, 연골의 SNR이 1.5T와 비교하여 3T에서 거의 두 배였음을 보여주었다.

3T의 추가된 공간해상도가 손목의 자기공명 관절조영술의 필요를 제거할 수 있을지는 논쟁의 여지가 있다. 많은 연구들이 자기공명 관절조영술로 민감도 85-97%, 특이도 88-100%의 향상된 TFC 병변 발견을 입증하였다[48]. 몇몇 연구자들은 간접 관절조영술로도 성과를 보여주었다(Figure 6)[49]. 그 저자들은 또한, 고식적인 3T 자기공명 영상에서 발견되지 않았지만, 자기공명 관절조영술에서는 발견되었던 TFC 열상의 예들을 보여주었다. 결론적으로 3T로 유용한 고해상도가 필요한 관절조영술의 수를 감소시킬 수는 있지만 그들을 완전히 대체시킬 수는 없을 것이다.

(2) 주상월상과 월상삼각인대들(Scapholunate and lunotriquetral ligaments)

주상월상인대의 고식적인 자기공명영상 평가는 최대한

민감도 11-69%, 특이도가 34-100%로 실망스러웠다[40,50,51]. 월상삼각인대를 평가할 때도 민감도가 0-36%, 특이도가 81-99%로 성과율이 훨씬 나쁘다[50]. 증강된 SNR과 공간 해상도 때문에, 손목의 내재성 인대들이 3T에서 훨씬 쉽게 보인다고 언급하였다[2]. 결과적으로, 주상월상인대의 진단은 직접 관절조영술로 향상된다. 일부 저자들은 간접 관절조영술로 얼마간의 성과를 보여주었다. 월상삼각인대의 진단을 향상시키는 것은 아직 단정하기 어려운데, 한 보고에서 직접 관절조영술로 민감도가 23-36%, 특이도가 94%였다[51]. 3T에서라도 손목의 내재성 인대들의 평가를 위해서 흔히 자기공명 관절조영술을 사용한다. Lenk 등[47]의 연구들은 손목에서 인대의 병적 상황을 진단하는데 3T 자기공명영상이 현저한 향상을 제공할 것이라는 잘 보여주고 있다.

7. 발목관절

(1) 측부인대들(Collateral ligaments)

후경비골간인대(posterior talofibular ligament)와 종비골간인대(calcaneofibular ligament)를 포함하는 병적 상황의 발견을 증진시키는데, 3T 자기공명영상의 분명한 역할이 있다. Muhle 등[52]은 1.5T 시스템에서 얻어진 8 cm 영역범위, 3-mm 단면두께, 256×256 matrix를 가지는 고해상도 영상이 사체와 비교하여 완벽한 해부학적 해상도를 가지는 내외측 인대들을 나타낼 수 있었다.

(2) 결합인대 복합체(Syndesmotic ligamentous complex)

3T에 의해 제공되는 부가적인 자장세기, 공간해상도, SNR은 결합인대들의 병적 상황을 평가하는데 탁월한 검사 방법이다. T2강조, 양성자강조 시퀀스들은 인대, 건, 연골을 평가하는데 이용된다. T1 강조영상은 골수 이상을 보는데 이용된다.

3T 근골격 자기공명영상의 최근 기법들

관절연골의 평가는 3T로 가장 이득이 될 만한 근골격계 영상의 영역이다. 새로운 연골보호 치료들의 개발과 평가에 대한 관심의 증가로, 조기에 연골손상을 발견할 필요가 있

다. 1.5T에서 연골평가에 처음으로 사용된 시퀀스들은 3차원 지방억제 T1강조 회손기울기에코(spoiled gradient-echo)와 2차원 양성자강조 고속스핀에코 기법들이다[1]. 3D T1강조 기울기에코 기법들의 중요한 장점은 높은 공간 해상력이다. 이는 특히 얇은 단면들이 연골접촉면을 명백하게 그리고 부피 평균화를 최소화하기 위해 필요한 작은 관절들 혹은 곡선의 관절면(예, 대퇴골두)을 평가하는데 중요하다[53]. 1.5T에서는 1-2 mm의 단면 두께와 화소당 200-350 micron의 평면내 해상도를 가지는 영상을 얻는 것이 가능하다. 향상된 SNR에 더하여 연골/물 대조도가 3T에서 더 높아보이고, 이로 인해 연골 접촉면의 윤곽이 좀 더 명확히 보이게 한다. 기울기에코 기법들은 대조도를 향상시키는데 부적절하고 이는 시상면으로 무릎관절연골의 3차원 용적을 얻는데 긴 획득시간(6-10분)을 초래한다. SNR이 적당한 3T의 적용에서 평행 영상기법 혹은 반 Fourier 획득의 사용이 영상 획득시간을 줄일 수 있다(일반적으로 33-50%) [1]. 관절연골, 특히 무릎에서 좀 더 최근의 임상적 평가는 지방억제와 상관없이 양성자강조 고속스핀에코 영상들에 크게 의존해 오고 있다. 이런 기법의 최우선의 장점은 3-4분의 적당한 영상 획득시간과 함께 탁월한 연부조직 대조도이다. 또한 중요한 관절조직들(예, 반달연골, 골수)의 진단적 평가를 가능하게 한다. 이 기법의 중요한 단점은 낮은 공간해상도이다. 그러나 이는 높은 SNR이 좀 더 높은 공간해상도를 가능하게 하는 3T에서는 이러한 제한을 경감시킨다(Figure 2). 3T에서 연골의 임상적 경험이 제한적이긴 하나, 임시 결과들은 국소적 결손의 발견에 있어서 좀 더 높은 자장세기에서 높은 진단적 정확도를 제공한다고 나타낸다.

항정상태 자유세차(steady-state free precession) 시퀀스와 다에코 T2* 시퀀스에 기초를 둔 새로운 기법들이 연골 영상에 제시되고 있다[54,55]. 초기의 결과들은 장래성이 있다고 하지만, 이러한 기법들은 널리 이용되지 않고, 통상적인 임상적 사용에 제한이 있어왔다. 처음 연구들은 양성자강조 영상에 대해서 1.5T와 비교하여 3T에서 연골/뼈, 연골/물 경계면의 CNR이 향상되었음을 보여주었다 [24,53]. 3T에서 진단적 정확도의 작은 향상은 지방억제 회손경사예코에 대해서 관찰되었다. 지방억제 양성자강조 스

핀에코 시퀀스들을 사용할 때는 유의한 장점이 없었다.

임상적인 3T 자기공명영상 발전을 위한 잠재성 있는 영역은 관절염을 가진 환자들의 치료에 있다. 염증성 관절염의 동물 모델에서, 최근 실험적인 연구들은 병의 활동성 인자로서 활액막 대식세포 에서 작은 superparamagnetic iron oxide 입자들의 흡수를 이용하는 가능성을 보여주었다[56,57]. 염증성 관절염에 대해 효과적인 질병-변형 치료의 지속적인 발전으로 장기간 결과의 예측인자가 되는 치료 후 반응의 민감하고, 비침습적인 방법의 발전이 더욱더 요구된다. 많은 새로운 치료법들이 비싸고 강력하게 유해한 부작용을 갖고 있기 때문에 이러한 자기공명영상 기법들은 임상적 치료와 새로운 약의 발견에 중요한 적용증을 가진다.

세포 밖 기질의 생화학과 생물물리학적 특성에 민감한 자기공명영상 기법(예, 연골 T2 지도화, 연골의 지연기 가도리늄 조영증강 자기공명영상)의 적용은 새로운 연골보호 치료의 효능을 평가하기 위해 이용될 수 있는 연골손상의 중요한 영상 표지자로서 연구 중이다[58]. 최근에 이러한 기법들은 운동에 대한 연골 반응의 연구에 적용되고 생체에서 연골의 생물역학의 역할과, 연골 생리에 운동의 효과에 대해서 중요한 정보를 제공하기 위한 잠재성을 가진다.

결론

3T 자기공명영상에서 제공되는 SNR의 증가는 근골격계에서 중대한 임상적 적용들을 가진다. 정상적인 뼈, 건, 연골, 인대 구조물들의 선명도를 입증하고 증강시키기 위한 잠재력이 흥미롭다. 공간해상도를 증가시키기 위해 이러한 추가된 신호강도를 이용하는 것은 다양한 관절에서 우리의 진단 능력을 향상시킬 것이다. 많은 관절내 구조물들은 기존의 1.5T 시스템에서 특히 고식적인 비관절조영술로 여전히 불충분하게 평가되고 이는 3T의 절호의 기회를 유도한다. 무릎, 고관절과 손과 손목의 소관절들의 평가를 위한 3T 자기공명영상의 첫 경험은 긍정적이었으나 다른 관절들에서는 특정목적의 표면코일의 유용성 부족과 인공음영에 대한 3T 자기공명영상의 민감성으로 인해 임상적 발달이 제한적이었다. 그러나 좀 더 높은 자장세기에서, 관절의 내

재성 구조물들의 증강된 SNR, 좀 더 높은 공간해상도, 월등한 CNR 때문에, 3T 자기공명영상은 근골격계에서 광범위하게 진단력을 향상시키기 위한 잠재력을 가지며, 이는 환자의 관리와 치료를 좀 더 좋게 바꾼다. 임상적 적용에 더하여 3T 자기공명영상은 새로운 분자와 기능적 자기공명영상 기법의 발달을 통해 근골격계 질환에서 좀 더 병진 연구를 위해 중요한 역할을 가진다.

핵심용어: 자기공명영상; 고자장; 근골격질환; 관절조영술; 3 테슬라

REFERENCES

- Mosher TJ. Musculoskeletal imaging at 3T: current techniques and future applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2006; 14: 63-76.
- Ramnath RR. 3T MR imaging of the musculoskeletal system (Part II): clinical applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2006; 14: 41-62.
- Kladny B, Glücker K, Swoboda B, Beyer W, Weseloh G. Comparison of low-field (0.2 Tesla) and high-field (1.5 Tesla) magnetic resonance imaging of the knee joint. *Arch Orthop Trauma Surg* 1995; 114: 281-286.
- Cotten A, Delfaut E, Demondion X, Lapéque F, Boukhefifa M, Boutry N, Chastanet P, Gougeon F. MR imaging of the knee at 0.2 and 1.5 T: correlation with surgery. *AJR Am J Roentgenol* 2000; 174: 1093-1097.
- Loew R, Kreitner KF, Runkel M, Zoellner J, Thelen M. MR arthrography of the shoulder: comparison of low-field (0.2 T) vs high-field (1.5 T) imaging. *Eur Radiol* 2000; 10: 989-996.
- Shellock FG, Bert JM, Fritts HM, Gundry CR, Easton R, Crues JV 3rd. Evaluation of the rotator cuff and glenoid labrum using a 0.2-Tesla extremity magnetic resonance (MR) system: MR results compared to surgical findings. *J Magn Reson Imaging* 2001; 14: 763-770.
- Kreitner KF, Romaneehsen B, Krummenauer F, Oberholzer K, Müller LP, Düber C. Fast magnetic resonance imaging of the knee using a parallel acquisition technique (mSENSE): a prospective performance evaluation. *Eur Radiol* 2006; 16: 1659-1666.
- Zuo J, Li X, Banerjee S, Han E, Majumdar S. Parallel imaging of knee cartilage at 3 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 2007; 26: 1001-1009.
- Lichy MP, Wietek BM, Mugler JP 3rd, Horger W, Menzel MI, Anastasiadis A, Siegmann K, Niemeyer T, Königsrainer A, Kiefer B, Schick F, Claussen CD, Schlemmer HP. Magnetic resonance imaging of the body trunk using a single-slab, 3-dimensional, T2-weighted turbo-spin-echo sequence with high sampling efficiency (SPACE) for high spatial resolution imaging: initial clinical experiences. *Invest Radiol* 2005; 40: 754-760.
- Norris DG. High field human imaging. *J Magn Reson Imaging* 2003; 18: 519-529.
- Fullerton GD, Cameron IL, Ord VA. Orientation of tendons in the magnetic field and its effect on T2 relaxation times. *Radiology* 1985; 155: 433-435.
- Kijowski R, Davis KW, Woods MA, Lindstrom MJ, De Smet AA, Gold GE, Busse RF. Knee joint: comprehensive assessment with 3D isotropic resolution fast spin-echo MR imaging: diagnostic performance compared with that of conventional MR imaging at 3.0 T. *Radiology* 2009; 252: 486-495.
- Magee T, Williams D. 3.0-T MRI of meniscal tears. *AJR Am J Roentgenol* 2006; 187: 371-375.
- Ramnath RR, Magee T, Wasudev N, Murrah R. Accuracy of 3-T MRI using fast spin-echo technique to detect meniscal tears of the knee. *AJR Am J Roentgenol* 2006; 187: 221-225.
- Brody JM, Hulstyn MJ, Fleming BC, Tung GA. The meniscal roots: gross anatomic correlation with 3-T MRI findings. *AJR Am J Roentgenol* 2007; 188: W446-W450.
- Ha TP, Li KC, Beaulieu CF, Bergman G, Ch'en IY, Eller DJ, Cheung LP, Herfkens RJ. Anterior cruciate ligament injury: fast spin-echo MR imaging with arthroscopic correlation in 217 examinations. *AJR Am J Roentgenol* 1998; 170: 1215-1219.
- Vellet AD, Lee DH, Munk PL, Hewett L, Eliasziw M, Dunlavy S, Vidito L, Fowler PJ, Miniaci A, Amendola A. Anterior cruciate ligament tear: prospective evaluation of diagnostic accuracy of middle- and high-field-strength MR imaging at 1.5 and 0.5 T. *Radiology* 1995; 197: 826-830.
- Barry KP, Mesgarzadeh M, Triolo J, Moyer R, Tehranzadeh J, Bonakdarpour A. Accuracy of MRI patterns in evaluating anterior cruciate ligament tears. *Skeletal Radiol* 1996; 25: 365-370.
- Umans H, Wimpfheimer O, Haramati N, Applbaum YH, Adler M, Bosco J. Diagnosis of partial tears of the anterior cruciate ligament of the knee: value of MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 1995; 165: 893-897.
- Servant CT, Ramos JP, Thomas NP. The accuracy of magnetic resonance imaging in diagnosing chronic posterior cruciate ligament injury. *Knee* 2004; 11: 265-270.
- Vahey TN, Broome DR, Kayes KJ, Shelbourne KD. Acute and chronic tears of the anterior cruciate ligament: differential features at MR imaging. *Radiology* 1991; 181: 251-253.
- Gross ML, Grover JS, Bassett LW, Seeger LL, Finerman GA. Magnetic resonance imaging of the posterior cruciate ligament: clinical use to improve diagnostic accuracy. *Am J Sports Med* 1992; 20: 732-737.
- Suh JS, Cho JH, Shin KH, Kim SJ. Chondromalacia of the knee: evaluation with a fat-suppression three-dimensional

- SPGR imaging after intravenous contrast injection. *J Magn Reson Imaging* 1996; 6: 884-888.
24. Gold GE, Han E, Stainsby J, Wright G, Brittain J, Beaulieu C. Musculoskeletal MRI at 3.0 T: relaxation times and image contrast. *AJR Am J Roentgenol* 2004; 183: 343-351.
 25. Schröder RJ, Fischbach F, Unterhauser FN, Weiler A, Felix R, Bruhn H. Value of various MR sequences using 1.5 and 3.0 Tesla in analyzing cartilaginous defects of the patella in an animal model. *Rofo* 2004; 176: 1667-1675.
 26. Kijowski R, Blankenbaker DG, Davis KW, Shinki K, Kaplan LD, De Smet AA. Comparison of 1.5-and 3.0-T MR imaging for evaluating the articular cartilage of the knee joint. *Radiology* 2009; 250: 839-848.
 27. Tardieu M, Lazenec JY, Christel P, Brasseur JL, Roger B, Grenier P. Normal and pathological MRI aspects of the posterolateral corner of the knee. *J Radiol* 1995; 76: 605-609.
 28. Sims WF, Jacobson KE. The posteromedial corner of the knee: medial-sided injury patterns revisited. *Am J Sports Med* 2004; 32: 337-345.
 29. Newberg AH, Newman JS. Imaging the painful hip. *Clin Orthop Relat Res* 2003; (406): 19-28.
 30. Mintz DN, Hooper T, Connell D, Buly R, Padgett DE, Potter HG. Magnetic resonance imaging of the hip: detection of labral and chondral abnormalities using noncontrast imaging. *Arthroscopy* 2005; 21: 385-393.
 31. Hodler J, Trudell D, Pathria MN, Resnick D. Width of the articular cartilage of the hip: quantification by using fatsuppression spin-echo MR imaging in cadavers. *AJR Am J Roentgenol* 1992; 159: 351-355.
 32. Rubin SJ, Totterman SM, Meyers SP, Hartley DF. Magnetic resonance imaging of the hip with a pelvic phased-array surface coil: a technical note. *Skeletal Radiol* 1998; 27: 77-82.
 33. Keeney JA, Peelle MW, Jackson J, Rubin D, Maloney WJ, Clohisey JC. Magnetic resonance arthrography versus arthroscopy in the evaluation of articular hip pathology. *Clin Orthop Relat Res* 2004; (429): 163-169.
 34. Leunig M, Podeszwa D, Beck M, Werlen S, Ganz R. Magnetic resonance arthrography of labral disorders in hips with dysplasia and impingement. *Clin Orthop Relat Res* 2004; (418): 74-80.
 35. Magee T, Williams D. 3.0-T MRI of the supraspinatus tendon. *AJR Am J Roentgenol* 2006; 187: 881-886.
 36. Magee T. 3-T MRI of the shoulder: is MR arthrography necessary? *AJR Am J Roentgenol* 2009; 192: 86-92.
 37. Palmer WE, Brown JH, Rosenthal DI. Rotator cuff: evaluation with fat-suppressed MR arthrography. *Radiology* 1993; 188: 683-687.
 38. Bencardino JT, Beltran J, Rosenberg ZS, Rokito A, Schmahmann S, Mota J, Mellado JM, Zuckerman J, Cuomo F, Rose D. Superior labrum anterior-posterior lesions: diagnosis with MR arthrography of the shoulder. *Radiology* 2000; 214: 267-271.
 39. Jee WH, McCauley TR, Katz LD, Matheny JM, Ruwe PA, Daigneault JP. Superior labral anterior posterior (SLAP) lesions of the glenoid labrum: reliability and accuracy of MR arthrography for diagnosis. *Radiology* 2001; 218: 127-132.
 40. Magee T, Shapiro M, Williams D. Comparison of high-field-strength versus low-field-strength MRI of the shoulder. *AJR Am J Roentgenol* 2003; 181: 1211-1215.
 41. Timmerman LA, Schwartz ML, Andrews JR. Preoperative evaluation of the ulnar collateral ligament by magnetic resonance imaging and computed tomography arthrography: evaluation in 25 baseball players with surgical confirmation. *Am J Sports Med* 1994; 22: 26-31.
 42. Carrino JA, Morrison WB, Zou KH, Steffen RT, Snearly WN, Murray PM. Noncontrast MR imaging and MR arthrography of the ulnar collateral ligament of the elbow: prospective evaluation of two-dimensional pulse sequences for detection of complete tears. *Skeletal Radiol* 2001; 30: 625-632.
 43. Magee T. Comparison of 3-T MRI and arthroscopy of intrinsic wrist ligament and TFCC tears. *AJR Am J Roentgenol* 2009; 192: 80-85.
 44. Saupe N, Prüssmann KP, Luechinger R, Bösiger P, Marincek B, Weishaupt D. MR imaging of the wrist: comparison between 1.5-and 3-T MR imaging-preliminary experience. *Radiology* 2005; 234: 256-264.
 45. Potter HG, Asnis-Ernberg L, Weiland AJ, Hotchkiss RN, Peterson MG, McCormack RR Jr. The utility of high-resolution magnetic resonance imaging in the evaluation of the triangular fibrocartilage complex of the wrist. *J Bone Joint Surg Am* 1997; 79: 1675-1684.
 46. Yoshioka H, Ueno T, Tanaka T, Shindo M, Itai Y. High-resolution MR imaging of triangular fibrocartilage complex (TFCC): comparison of microscopy coils and a conventional small surface coil. *Skeletal Radiol* 2003; 32: 575-581.
 47. Lenk S, Ludescher B, Martirosian P, Schick F, Claussen CD, Schlemmer HP. 3.0 T high-resolution MR imaging of carpal ligaments and TFCC. *Rofo* 2004; 176: 664-667.
 48. Schmitt R, Christopoulos G, Meier R, Coblenz G, Fröhner S, Lanz U, Krimmer H. Direct MR arthrography of the wrist in comparison with arthroscopy: a prospective study on 125 patients. *Rofo* 2003; 175: 911-919.
 49. Schweitzer ME, Brahme SK, Hodler J, Hanker GJ, Lynch TP, Flannigan BD, Godzik CA, Resnick D. Chronic wrist pain: spin-echo and short tau inversion recovery MR imaging and conventional and MR arthrography. *Radiology* 1992; 182: 205-211.
 50. Haims AH, Schweitzer ME, Morrison WB, Deely D, Lange RC, Osterman AL, Bednar JM, Taras JS, Culp RW. Internal derangement of the wrist: indirect MR arthrography versus unenhanced MR imaging. *Radiology* 2003; 227: 701-707.



51. Zanetti M, Bräm J, Hodler J. Triangular fibrocartilage and intercarpal ligaments of the wrist: does MR arthrography improve standard MRI? *J Magn Reson Imaging* 1997; 7: 590-594.
52. Muhle C, Frank LR, Rand T, Yeh L, Wong EC, Skaf A, Dantas RW, Haghghi P, Trudell D, Resnick D. Collateral ligaments of the ankle: high-resolution MR imaging with a local gradient coil and anatomic correlation in cadavers. *Radiographics* 1999; 19: 673-683.
53. Kornaat PR, Reeder SB, Koo S, Brittain JH, Yu H, Andriacchi TP, Gold GE. MR imaging of articular cartilage at 1.5T and 3.0T: comparison of SPGR and SSFP sequences. *Osteoarthritis Cartilage* 2005; 13: 338-344.
54. Gold GE, Fuller SE, Hargreaves BA, Stevens KJ, Beaulieu CF. Driven equilibrium magnetic resonance imaging of articular cartilage: initial clinical experience. *J Magn Reson Imaging* 2005; 21: 476-481.
55. Schmid MR, Pfirrmann CW, Koch P, Zanetti M, Kuehn B, Hodler J. Imaging of patellar cartilage with a 2D multiple-echo data image combination sequence. *AJR Am J Roentgenol* 2005; 184: 1744-1748.
56. Dardzinski BJ, Schmithorst VJ, Holland SK, Boivin GP, Imagawa T, Watanabe S, Lewis JM, Hirsch R. MR imaging of murine arthritis using ultrasmall superparamagnetic iron oxide particles. *Magn Reson Imaging* 2001; 19: 1209-1216.
57. Lutz AM, Seemayer C, Corot C, Gay RE, Goepfert K, Michel BA, Marincek B, Gay S, Weishaupt D. Detection of synovial macrophages in an experimental rabbit model of antigen-induced arthritis: ultrasmall superparamagnetic iron oxide-enhanced MR imaging. *Radiology* 2004; 233: 149-157.
58. Mosher TJ, Dardzinski BJ. Cartilage MRI T2 relaxation time mapping: overview and applications. *Semin Musculoskelet Radiol* 2004; 8: 355-368.



Peer Reviewers' Commentary

본 논문은 최근 사용이 증가하고 있는 고자장 3T 자기공명영상의 근골격계 적용에 대해 기존의 1.5T와 비교하여 3T 자기공명영상의 장점과 한계에 대해 상세히 기술하고 있다. 저자의 풍부한 임상 경험을 바탕으로 각 관절 별로 3T 자기공명영상의 유용성과 제한점에 대해 상세히 기술하였으며, 이를 통해 근골격계 질환의 진단, 환자 관리, 치료의 개선 등에 미치는 3T 자기공명영상의 임상적 역할을 포괄적으로 기술하였다. 이같은 임상적 적용 외에도 향후 기능적 자기공명영상 기법의 발달을 통해 근골격계 질환 연구에 중추적 역할을 담당할 것을 기대한다.

[정리: 편집위원회]