



심혈관질환 고자장 자기공명영상

김 영 진* | 연세대학교 의과대학 영상의학과

High field strength magnetic resonance imaging of cardiovascular diseases

Young Jin Kim, MD*

Department of Radiology, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

* Corresponding author: Young Jin Kim, E-mail: dryj@yuhs.ac

Received October 28, 2010 Accepted November 12, 2010

Abstract

Given the continuous advances in the hardware and software of magnetic resonance imaging (MRI), cardiac MRI has come to be a routine imaging modality in clinical settings for evaluating both cardiac function and anatomy in various cardiovascular diseases. Recently, 3 tesla (T) MRI has become available and has demonstrated advantages over 1.5T in a broad range of clinical applications although some technical challenges still remain. This review will focus on the potential advantages and limitations of 3T cardiac MRI and its current clinical applications.

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

서론

소아 및 성인 심장질환의 영상방법으로 심초음파가 널리 관련하게 이용되어 왔지만 심초음파는 음향창(acoustic window)에 따른 제한 및 우심실의 평가가 어려운 점 등의 한계점을 가지고 있다. 최근 10여 년 동안 1.5 tesla (T) 장비를 이용한 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI)이 cine영상, 스핀에코영상, 일차통과관류영상, 지연기 심근조영영상 등 다양한 sequence를 이용하여 여러 종류의 심장질환을 자세하고 포괄적으로 평가할 수 있게 되면서 MRI는 심초음파에 부가적 또는 독립적인 중요한 영상방법으로 자리잡았다.

3T MRI는 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)

의 증가, T1조영제의 T1감소효과 증대 등의 효과로 인해 1.5T보다 우수한 영상의 질을 제공하므로 이미 여러 장기의 영상에 널리 사용되고 있지만, 고자장으로 인한 artifact의 증가 및 specific absorption rate (SAR) 제한 등의 문제점 때문에 심장에서는 아직 널리 이용되지 못하고 있다. 이는 심장MRI에서 가장 많이 사용하는 기본 sequence인 cine영상(balanced steady-state free precession, bSSFP)이 off-resonance artifact 등에 의해 1.5T에서 얻은 cine영상보다 질이 떨어지는 문제점 때문이라고 할 수 있다. 이번 중설에서는 3T MRI의 일반적 특성이 영상에 미치는 영향을 간단히 살펴보고, 심장영상에서 자주 사용되는 sequence들이 3T에서 어떤 장단점을 보이는지, 그리고 현재 임상적 이용이 어느 정도 가능한지에 대해 다루고자 한다.

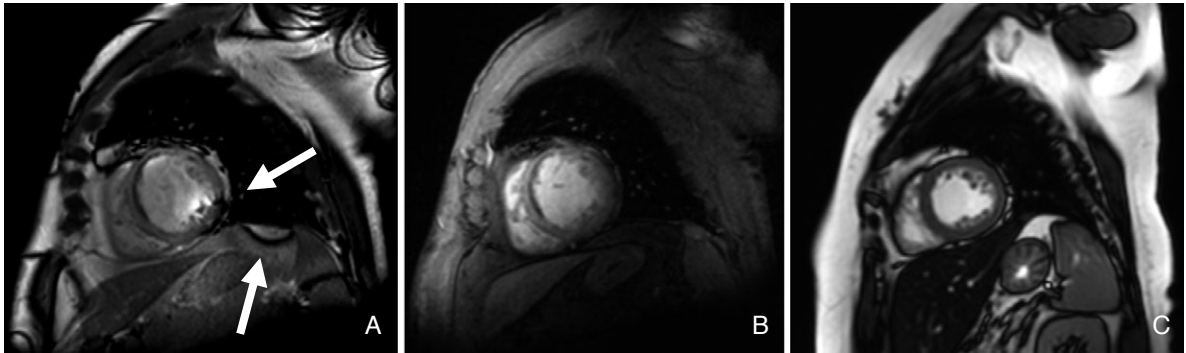


Figure 1. Short axis cine images acquired at 3 tesla magnetic resonance imaging. (A) Balanced steady-state free-precession (bSSFP) cine image shows dark-band artifact (arrows) caused by B_0 inhomogeneity, especially in the lateral and inferior wall of the left ventricle at the heart-lung interface. (B) Spoiled gradient echo sequence image obtained from the same patient in (A) demonstrates no such dark-band artifact though contrast between myocardium and ventricular cavity is somewhat low compared to bSSFP cine image. (C) bSSFP cine image obtained from another patient with local shimming and 32 channel cardiac coil shows excellent image quality without dark-band artifact.

심장 MRI에서 3T의 장점

SNR의 증가는 3T MRI에서 얻을 수 있는 최고의 장점이라고 할 수 있다. 이론적으로 신호강도는 자기장(B_0)의 제곱에 비례하고, 잡음은 B_0 에 비례하므로 1.5T와 비교하여 3T MRI는 B_1 field 불균일이나 artifact 등 다른 요인들을 감안하더라도 SNR 측면에서 강점을 가지고 있다고 할 수 있다[1]. 이러한 SNR증가효과는 1.5T MRI에서 상대적으로 SNR이 만족스럽지 못했던 자기공명(magnetic resonance, MR) 관상동맥조영술이나 심근관류영상 등에서 장점으로 작용할 수 있다.

또한 빠르게 영상을 획득하기 위한 목적으로 사용하는 parallel 영상기법이 1.5T에서는 SNR의 감소 때문에 사용에 제한이 있었으나 parallel 영상기법에 의한 SNR 감소를 3T의 SNR 증가효과가 보완해줄 수 있기 때문에 심박수가 매우 빠른 소아환자의 영상이나 약물부하 영상을 가능하게 해줄 수 있다[2]. 한편, parallel 영상기법을 이용하면 echo train length를 줄일 수 있어서 고자장으로 인한 $T2^*$ artifact (relaxation-related blurring)가 감소하므로 전반적인 영상의 질을 높일 수 있으며, phase-encoding step을 줄일 수 있어 체내에 radiofrequency (RF) 에너지가 축적되어 발생하는 문제점을 극복할 수 있다[3].

심장 MRI에서 3T의 제한점

1. Radiofrequency 에너지의 축적

SAR는 B_0 의 제곱에 비례하여 증가하므로 3T에서는 최대 flip angle과 최소 repetition time (TR)이 제한되어 bSSFP 영상이나 고속스핀에코 영상 등을 얻는 데에 단점으로 작용하게 된다. SAR로 인한 제한을 극복하는 방법으로는 parallel 영상기법을 사용하거나, bSSFP 등 일부 sequence에서는 flip angle을 줄이는 방법도 사용할 수 있다.

2. 자장의 불균일성(B_0 field inhomogeneity)

3T를 이용한 심장영상에서 가장 문제가 되는 것이 자장의 불균일성과 $T2^*$ susceptibility 효과이며, 이로 인해 부분적으로 신호가 감소하거나 dark band artifact가 나타나게 된다(Figure 1A). 자장의 세기가 증가하면 불균일성도 비례하여 증가하게 되어 스핀의 dephasing이 더 빨라지게 되는데, 그러면 그 부분의 신호가 소실되는 현상이 나타나게 된다. 이러한 현상은 조직이 구조적으로 불균일할 경우, 예를 들어 심장과 폐의 경계부위나 폐에서 폐조직과 공기의 경계면 같은 부위에서 특히 심한 artifact를 만들게 된다.

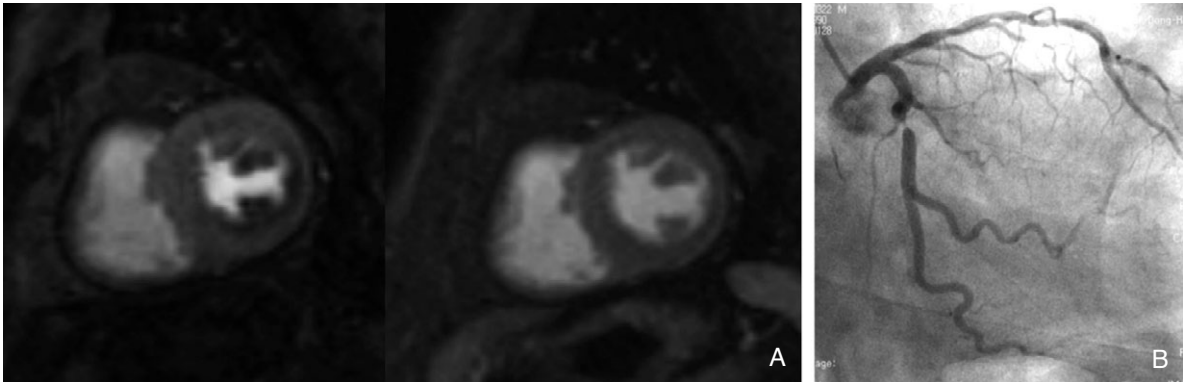


Figure 2. First-pass perfusion image acquired at 3 tesla magnetic resonance imaging (MRI). A 74 year-old man with typical angina underwent stress perfusion MRI. First-pass perfusion MRI during adenosine stress (A) shows subendocardial perfusion defect at the lateral and inferior wall of the left ventricle while perfusion image at resting state (B) demonstrates no perfusion defect. Coronary angiography revealed critical stenosis at the middle segment of the left circumflex artery.

3. Radiofrequency 불균일성(B_1 field inhomogeneity)

RF 펄스의 파장은 주파수가 커질수록 짧아지게 되므로 3T에서는 RF 펄스의 파장이 인체의 크기와 유사하게 짧아지게 되는데 이럴 경우, RF 펄스의 불균일성이 유발되어 부분적으로 flip angle이 달라지게 되므로 영상의 신호가 일부는 밝게 일부는 어둡게 나타나는 artifact가 생기게 된다. 이러한 유전체 효과(dielectric effect)로 인한 artifact를 줄이기 위한 방법으로 B_1 에 민감하지 않은 RF 펄스를 사용하거나, dielectric pad를 사용하는 방법, multitransmit 코일을 사용하는 방법 등이 있다[4-5].

3T를 이용한 심장 MRI

1. Cine영상

최근 심장의 cine 영상을 위해 가장 많이 사용하는 sequence는 bSSFP 방법인데, 이 sequence는 심장영상에 이용하는 다른 sequence와 달리 3T에서의 영상이 1.5T 영상과 비슷하거나 약간 떨어지는 것으로 알려져 있다. 그 이유는 고자장으로 인해 SNR과 contrast to noise ratio (CNR)가 증가하지만 영상의 질을 저하시키는 “dark band” artifact가 나타나기 때문이다(Figure 1A). 이러한 artifact 때문에 일부 연구자들은 bSSFP가 아닌 spoiled gradient echo sequence를 사용하는 것을 권장하기도 한

다(Figure 1B)[6]. bSSFP sequence에서 dark band artifact를 줄이기 위해서 여러 가지 방법이 사용될 수 있는데 먼저 TR을 가능한 한 짧게 하여 dark band를 심장에서 멀리 떨어지게 하는 방법이 있다. 또 다른 방법은 second order shimming을 이용하여 심장에서의 B_0 inhomogeneity를 최소화시키거나, “frequency scout” 등의 기법을 이용하여 dark band가 심장의 바깥쪽으로 사라지는 frequency를 선택하여 영상을 얻는 방법이 있다[7-10]. 최근에는 발전된 shimming 기법과 parallel 영상을 접목하여 1.5T의 영상에 필적할 만한 영상을 얻을 수 있게 되었다(Figure 1C).

2. 심근관류영상(Myocardial perfusion imaging)

이미 1.5T MRI를 이용하여 약물부하 심근관류MRI는 관상동맥질환을 진단하는데 있어서 기존의 핵의학검사보다 더 높은 정확도를 보인다고 보고되었다. 하지만 1차 통과 관류영상(first pass perfusion)은 영상획득시간이 짧아야 하기 때문에 비교적 낮은 공간해상도를 이용하여 영상을 얻어야만 했으며 이에 따르는 partial volume artifact나 심근 내막쪽의 dark rim artifact가 문제점이었다. 관류영상은 3T를 이용하는 것이 도움을 받는 대표적인 sequence로서 SNR과 CNR이 증가하고 dark rim artifact가 감소하는 효과가 있으며, 또한 진단적 정확도도 더 높다고 보고되기도 했다(Figure 2)[11].

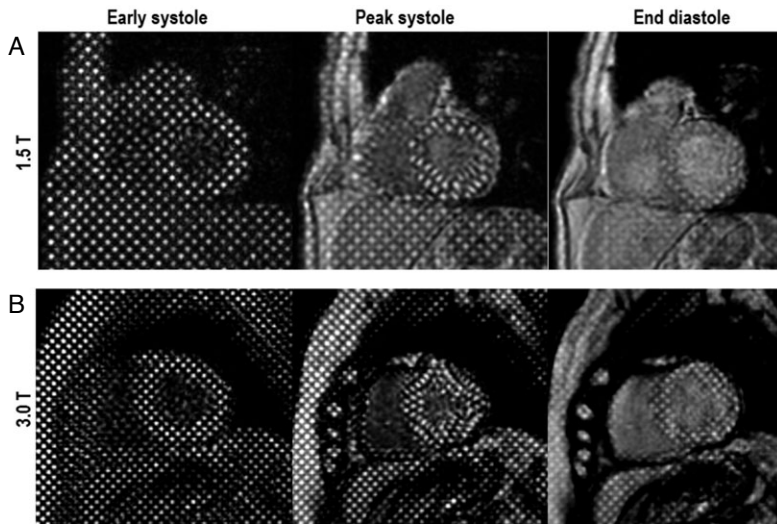


Figure 3. Myocardial tagging images acquired at 1.5 tesla (T) (A) and 3T (B). Due to the prolonged T1 relaxation time of the myocardium, fading of the myocardial tags is reduced at 3T as evident in the end diastolic image.

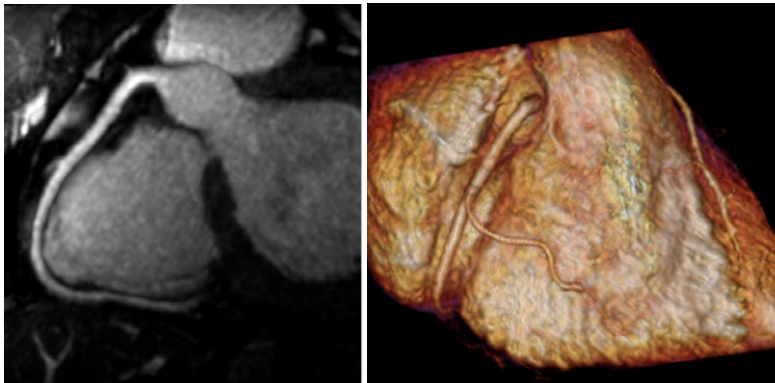


Figure 4. Whole-heart coronary magnetic resonance angiography acquired from a healthy volunteer at 3 tesla with T2 preparation and navigator respiratory gating after gadolinium contrast agent injection.

3. 지연기 조영증강영상(Delayed enhancement imaging: viability imaging)

가돌리늄 조영제를 이용한 심근의 지연기 조영증강영상은 심근경색이나 섬유화를 평가하기 위해 최근 들어 널리 이용되고 있다. 3T에서 얻을 수 있는 높은 SNR은 지연기 조영증강영상에서 강력한 장점이 될 수 있는데 이는 영상의 질을 좋게 할 수 있고, 한편으로는 조영제의 양을 줄일 수도 있기 때문이다. 또한 공간해상도의 증가로 정상심근과 이상

심근의 구별이 보다 명확해져서 부정맥의 유발부위가 될 수 있는 경색주변부(perinfarct zone)에 대한 평가가 1.5T에 비해 용이하다는 점도 장점이 될 수 있다[8].

4. 심근 tagging MRI

심근의 tagging MRI는 영상면에 수직방향으로 RF prepulse를 주어서 심근에 검은 선이나 격자모양이 나타나도록 표시시키는 방법으로 심근의 국소적 기능을 정량적으로 평가하기 위해 이용된다[12]. 초기에는 1.5T에서 segmented k-space gradient echo with spatial modulation of magnetization (SPAMM)기법이 사용되었으나, tag line이 확장기 말에 소실되기 때문에 확장기 심실기능(diastolic function)을 평가하기가 어려운 단점이 있었다 (Figure 3). 이를 해결하기 위해서 서로 반대되는 saturation prepulse를 적용한 SPAMM영상을 두 번 얻어서 subtraction하는 기법인 complementary SPAMM방법을 사용하기도 한다[13].

Tagging MRI는 3T에서 영상의 질이 좋아진다고 보고되고 있는데, 이는 SNR과 CNR이 높아지기 때문이기도 하지만, 그보다는 고자장에서 T1 증가

효과가 더 큰 이유이다. 즉, 고자장에서는 종자화(longitudinal relaxation)의 회복이 늦어져서 확장기까지 tag이 지속될 수 있기 때문이다(Figure 3). 1.5T와 3T에서의 tagging MRI영상을 비교한 최근 한 연구에서는 3T에서 1.5T보다 SNR이 35%, CNR이 80% 증가한다고 보고하였다[14].

5. MR 관상동맥조영술(Coronary MR angiography, MRA)

3T MRI를 이용한 관상동맥 MRA는 1.5T에 비해 SNR과

CNR이 증가한다고 보고되었으나, 1.5T에 비해 진단적 정확도가 증가한다는 보고는 아직 없다[15-16]. 하지만 최근 들어 소개되고 있는 보다 발전된 shimming 방법이나, 최적화된 T2 preparation pulse, parallel 영상기법들이 적용된다면 3T 영상에서 좋은 결과를 기대할 수 있을 것이다 (Figure 4). 최근에는 computed tomography (CT) 기술의 급격한 발전으로 인해 비침습적 관상동맥영상방법으로 CT가 중요한 위치를 차지하고 있으며, 관상동맥 MRA와 CT의 정확도를 비교한 한 연구에서 CT의 정확도가 MRA보다 더 높은 것으로 보고되기도 하였다[17-18]. 하지만 CT는 여전히 석회화된 혈관의 내강을 평가하는데 한계가 있고 방사선 노출이라는 문제점을 가지고 있으므로, multichannel receiver coil과 조영증강 whole-heart 기법 등을 이용한 3T MRA기법을 이용하면 보다 높은 정확도로 CT와 상호보완적으로 사용될 수 있으리라 기대한다.

6. MR spectroscopy (MRS)

심장에서는 ^{31}P MRS를 이용하여 고에너지 인산대사나 creatine kinase반응을 평가할 수 있으며, ^1H MRS를 이용하면 심근의 triglyceride 양을 측정할 수 있다고 보고되어 있다. 하지만 임상적으로 심장MRS의 이용은 제한적인데 이는 평가하고자 하는 대사물질의 농도가 매우 낮아 촬영시간이 매우 길기 때문이다. 하지만 3T MRI에서는 SNR이 증가하고 spectral dispersion이 증가하기 때문에 심장에서의 MRS의 적용이 좀 더 용이해졌다고 할 수 있다.

결론

3T MRI는 심장영상에서 대부분의 sequence가 1.5T와 비교하여 좀 더 우수하거나 비슷한 영상의 질을 제공하며 특히 SNR이 낮아서 문제가 되었던 심근관류영상이나 지연기조영증강영상, tagging sequence 등에서 도움이 된다. 또한 parallel imaging과 발전된 shimming algorithm의 접목은 영상 질의 개선과 촬영시간의 감소에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어: 자기공명영상; 고자장; 심혈관 질환; 3 테슬라

REFERENCES

1. Wen H, Denison TJ, Singerman RW, Balaban RS. The intrinsic signal-to-noise ratio in human cardiac imaging at 1.5, 3, and 4T. *J Magn Reson* 1997; 125: 65-71.
2. Wiesinger F, Boesiger P, Pruessmann KP. Electrodynamics and ultimate SNR in parallel MR imaging. *Magn Reson Med* 2004; 52: 376-390.
3. Bammer R, Schoenberg SO. Current concepts and advances in clinical parallel magnetic resonance imaging. *Top Magn Reson Imaging* 2004; 15: 129-158.
4. Hays AG, Schär M, Kelle S. Clinical applications for cardiovascular magnetic resonance imaging at 3 tesla. *Curr Cardiol Rev* 2009; 5: 237-242.
5. Lohan DG, Saleh R, Tomasian A, Krishnam M, Finn JP. Current status of 3-T cardiovascular magnetic resonance imaging. *Top Magn Reson Imaging* 2008; 19: 3-13.
6. Tyler DJ, Hudsmith LE, Petersen SE, Francis JM, Weale P, Neubauer S, Clarke K, Robson MD. Cardiac cine MR-imaging at 3T: FLASH vs SSFP. *J Cardiovasc Magn Reson* 2006; 8: 709-715.
7. Deshpande VS, Shea SM, Li D. Artifact reduction in true-FISP imaging of the coronary arteries by adjusting imaging frequency. *Magn Reson Med* 2003; 49: 803-809.
8. Wieben O, Francois C, Reeder SB. Cardiac MRI of ischemic heart disease at 3 T: potential and challenges. *Eur J Radiol* 2008; 65: 15-28.
9. Nael K, Fenchel M, Saleh R, Finn JP. Cardiac MR imaging: new advances and role of 3T. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2007; 15: 291-300.
10. Fenchel M, Kramer U, Nael K, Miller S. Cardiac magnetic resonance imaging at 3.0 T. *Top Magn Reson Imaging* 2007; 18: 95-104.
11. Cheng AS, Pegg TJ, Karamitsos TD, Searle N, Jerosch-Herold M, Choudhury RP, Banning AP, Neubauer S, Robson MD, Selvanayagam JB. Cardiovascular magnetic resonance perfusion imaging at 3-tesla for the detection of coronary artery disease: a comparison with 1.5-tesla. *J Am Coll Cardiol* 2007; 49: 2440-2449.
12. Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, Yang A, Shapiro EP. Human heart: tagging with MR imaging: a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 1988; 169: 59-63.
13. Fischer SE, McKinnon GC, Maier SE, Boesiger P. Improved myocardial tagging contrast. *Magn Reson Med* 1993; 30: 191-200.
14. Kramer U, Deshpande V, Fenchel M, Klumpp B, Laub G, Finn JP, Claussen CD, Miller S. Cardiac MR tagging: optimization of sequence parameters and comparison at 1.5 T and 3.0 T in a volunteer study. *Rofo* 2006; 178: 515-524.
15. Yang Q, Li K, Liu X, Bi X, Liu Z, An J, Zhang A, Jerecic R, Li D.

Contrast-enhanced whole-heart coronary magnetic resonance angiography at 3.0-T: a comparative study with X-ray angiography in a single center. *J Am Coll Cardiol* 2009; 54: 69-76.

16. Sommer T, Hackenbroch M, Hofer U, Schmiedel A, Willinek WA, Flacke S, Gieseke J, Träber F, Fimmers R, Litt H, Schild H. Coronary MR angiography at 3.0 T versus that at 1.5 T: initial results in patients suspected of having coronary artery disease. *Radiology* 2005; 234: 718-725.
17. Maintz D, Ozgun M, Hoffmeier A, Quante M, Fischbach R, Manning WJ, Heindel W, Botnar RM. Whole-heart coronary

magnetic resonance angiography: value for the detection of coronary artery stenoses in comparison to multislice computed tomography angiography. *Acta Radiol* 2007; 48: 967-973.

18. Pouleur AC, le Polain de Waroux JB, Kefer J, Pasquet A, Vanoverschelde JL, Gerber BL. Direct comparison of whole-heart navigator-gated magnetic resonance coronary angiography and 40-and 64-slice multidetector row computed tomography to detect the coronary artery stenosis in patients scheduled for conventional coronary angiography. *Circ Cardiovasc Imaging* 2008; 1: 114-121.



Peer Reviewers' Commentary

최근 고자장 MRI의 발전과 이의 임상응용이 활발하게 이루어지고 있는 시점에서 본 논문은 3T 고자장 심장 MRI의 임상응용을 위한 기본적인 지식과 심장 MRI에서의 3T 고자장의 장점과 제한점, 그리고 해결방안에 관해 구체적으로 소개하였다. 즉 3T 고자장 심장 MRI는 cine영상에서 발생하는 dark band artifact로 인해 기술적인 어려움을 겪어왔으나 parallel imaging과 shimming기법의 사용 등을 통해 1.5T와 비교하여 좀 더 우수하거나 비슷한 영상의 질을 제공하며 특히 SNR이 낮아서 문제가 되었던 심근관류영상이나 지연조영증강영상, tagging sequence 등에서 우수한 영상의 질을 제공한다고 기술하였다. 그러나 1.5T와 비교해서 3T 고자장 MRI의 임상적 우월성에 대해서는 좀 더 많은 데이터의 축적과 해석이 필요하다고 생각한다. 다만 3T 고자장 MRI는 혈관벽 영상이나 수축기말 영상 등에 대한 새로운 접근이 가능하며, 혈관벽 영상은 동맥경화의 조기진단 및 병태생리학적 이해를 증진하고, 위험인자 평가 및 치료효과 추적에 필요한 plaque composition의 평가가 가능하므로 이를 이용한 향후 연구가 주목된다.

[정리: 편집위원회]