



뇌신경질환 고자장 자기공명영상

서 형 석* | 고려대학교 의과대학 안산병원 영상의학과

High field strength magnetic resonance imaging of brain lesion

Hyung Suk Seo, MD*

Department of Radiology, Ansan Hospital, Korea University College of Medicine, Ansan, Korea

* Corresponding author: Hyung Suk Seo, E-mail: seohs@korea.ac.kr

Received November 14, 2010 Accepted November 26, 2010

Abstract

The primary merit of a 3 tesla (T) magnetic resonance (MR) scanner is the increase in the signal-to-noise ratio (SNR). It can offer high spatial and temporal image resolution and its diagnostic potential for brain lesions can be improved at the magnetic strength of 3T. In addition to the increased SNR, strong prolongation of T1 relaxation time at high field MR leads to overall improvements in enhancing lesions versus non-enhancing tissue on contrast-enhanced T1-weighted images and blood versus tissue contrast on time-of-flight MR angiography. Increased chemical shift and susceptibility can improve the spectral resolution in MR spectroscopy and the sensitivities in the micro-hemorrhage detection of gradient echo image, the perfusion change of perfusion MRI, and the blood oxygen level-dependent effect of functional magnetic resonance imaging (fMRI). The short acquisition time of diffusion MRI at 3T can decrease motion artifacts in irritable stroke patients and it can be easier to estimate anisotropy and to increase the efficiency of tractography in diffusion tensor imaging with high numbers of gradient directions. On the other hand, the regulation of the specific absorption rate due to increased radio-frequency energy deposition and the controls for signal loss and increased artifacts at 3T are the main clinical problems. If the drawbacks can be addressed by parallel imaging or pulse sequence changes, 3T MRI can be a useful diagnostic tool and increase the diagnostic accuracy in various brain lesions, such as stroke, trauma, epilepsy, multiple sclerosis, dementia, and brain tumors.

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

서 론

자기공명영상은 컴퓨터 단층 촬영과 함께 뇌신경 질환의 진단에 필수적인 영상진단 도구이다. 특히 자기공명영상의 높은 연부조직 구분 능력에 의해서 큰 뇌종양 질환들뿐만 아니라 작은 탈수초성 질환이나 간질을 일으키는 피질 이형성 증 등의 작고 미세한 뇌신경 질환과 뇌수막염 등의 미만성 뇌신경 질환에 있어서 필수적인 진단 도구로 자리 잡고 있다.

3 tesla (T) 자기공명영상은 기존에 사용되던 1.5T 자기공명영상에 비교하여 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)의 증가라는 커다란 장점을 가지고 있다. 이외에도 늘어난 T1 이완시간, 짧아진 T2/T2* 이완시간, chemical shift와 susceptibility가 증가되는 물리적인 특징을 나타낸다[1-4]. 한편, 높은 공명 주파수의 specific absorption rate는 고자장 자기공명영상의 제한점으로 작용하지만 높은 SNR에 의한 병렬 영상(parallel imaging) 기법 등을 이

© Korean Medical Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

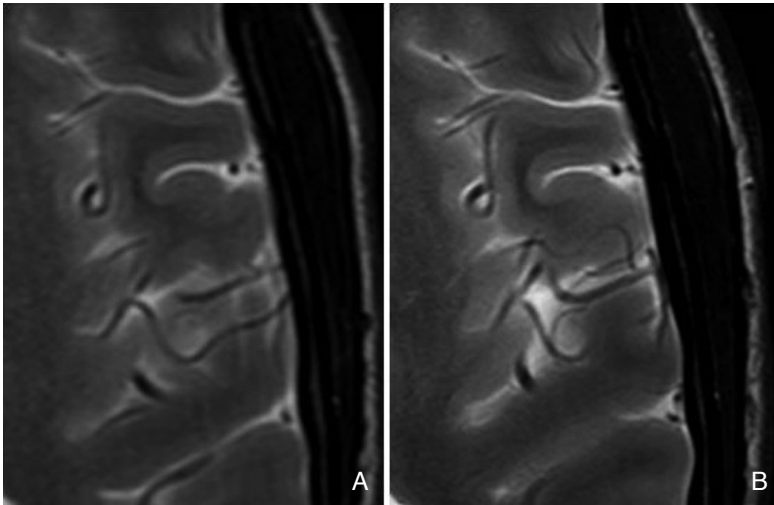


Figure 1. Brain T2-weighted magnetic resonance imaging (MRI) at 1.5 tesla (T) (A) and 3T (B) were performed in about 3.5 minutes of same scan time and 5 mm of same slice thickness. The spatial resolution of brain MRI at 3T could be increased with high signal-to-noise ratio compared to brain MRI at 1.5T. The matrix size of 3T is 0.4x0.5 mm, whereas the matrix size of 1.5T is 0.6x0.8 mm (courtesy of Philips Healthcare Korea).

용하여 극복될 수 있다[5].

3T 자기공명영상에서 나타나는 이러한 물리적 특징은 다양한 방법으로 1.5T 자기공명영상에 비하여 뇌신경 질환의 진단 능력을 향상 시킨다. 3T 자기공명영상의 가장 큰 장점은 증가된 SNR은 공간적 또는 시간적인 분해능을 높이는데 이용되어 T1, T2 강조영상 등의 일반인 영상뿐만 아니라 확산강조영상, 관류영상, magnetic resonance (MR) spectroscopy, fMRI 등의 다양한 기능적 영상의 질을 높인다 (Figure 1). 늘어난 T1 이완시간은 조영 효과를 높이고 MR 혈관촬영에서 주위 조직의 신호를 감소시켜서 혈관을 더욱 선명하게 만든다[1-4,6]. 증가된 susceptibility는 조영제를 이용한 확산영상과 fMRI에서 신호강도를 증가시킨다. 증가된 chemical shift는 MR spectroscopy에서 각 물질간의 분화를 용이하게 한다[1-4].

급성 뇌경색

뇌졸중(stroke)은 서구사회에서 암, 심혈관 질환과 함께 주된 사망원인의 하나이다. 우리나라에서도 2009년 통계

결과에 의하면 암에 이어 두 번째로 높은 사망원인으로 나타나고 고령화 사회가 되면서 발병률은 계속 증가하는 추세이다[7]. 크게 허혈성 뇌졸중과 출혈성 뇌졸중으로 나뉘고, 허혈성 뇌졸중이 전체의 약 80-90%를 차지한다[8]. 허혈성 뇌졸중에서 빠른 진단에 따르는 빠른 치료는 환자의 예후를 결정하는데 매우 중요하다[9,10].

확산강조영상은 급성 뇌경색의 가장 핵심적인 진단 도구로 이용되고 있다. 1.5T와 비교하여 3T에서 확산강조영상은 susceptibility의 증가에 의해서 영상의 왜곡은 증가하였으나 SNR의 증가에 의해서 병변이 더욱 뚜렷하게 나타났다(Figure 2). 뿐만 아니라 1.5T에서 보이지 않았던 병변을

추가해서 찾을 수 있다[11]. 또한 확산강조영상의 b-value는 조직의 확산을 영상에 반영하는 정도를 결정하는 값으로 일반적으로 이용되는 b-value 1,000에 비해 b-value 2,000 또는 3,000으로 높이면 급성 뇌경색 병변이 더욱 뚜렷해지고 새로운 병변을 추가해서 찾을 수도 있다[12,13]. 그러나 b-value가 높아지면 SNR이 감소하게 되는데, 3T 자기공명영상은 높은 b-value에 의해 나타나는 감소된 SNR을 보완할 수 있다.

급성 뇌경색에서 관류영상은 관류가 감소되어 허혈 상태인 뇌실질을 나타낼 수 있다. 확산강조영상에서 나타내는 경색에 빠진 뇌실질과 비교하였을 때 ischemic penumbra를 알 수 있어서 환자의 치료방침을 결정하거나 예후를 예측할 수 있다. 3T 자기공명영상에서는 증가된 susceptibility와 짧은 T2* 이완시간에 의해 조영제를 이용한 관류영상을 더욱 효과적으로 나타낼 수 있으며 반 정도의 조영제를 이용하여 영상을 얻을 수도 있다[14]. MR 혈관촬영은 막히거나 좁아진 혈관을 나타내어 급성 뇌경색을 효과적으로 치료의 방향을 결정하여 이루어질 수 있도록 한다. 3T 자기공명영상의 높아진 혈관 신호와 길어진 T1 이완시

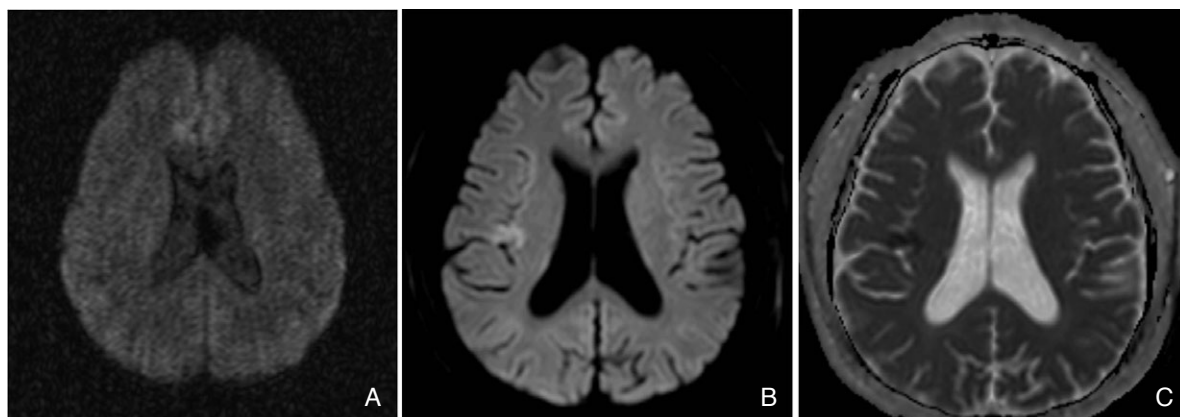


Figure 2. Sixty-six-year-old-male with acute infarction. Diffusion-weighted image (DWI) at 1.5 tesla (T) (A) could not show the acute infarction. However, DWI at 3T (B) shows typical small hyperintense acute infarction at right insula and frontal operculum and apparent diffusion coefficient (ADC) map at 3T (B) shows decreased ADC.

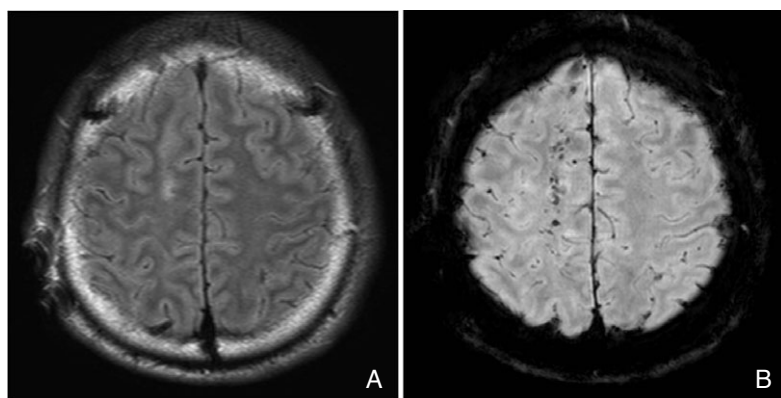


Figure 3. Twenty-four-year-old-male with diffuse axonal injury. Fluid attenuated T2-weighted image at 3 tesla (T) (A) shows small patchy hyperintense edema at the subcortical white matter of right superior frontal gyrus. Susceptibility-weighted image at 3T (B) shows multiple tiny dark microhemorrhage.

좋은 T2 영상에서 더욱 높은 신호로 뚜렷이 나타난다. 이보다도 헤모글로빈에 의해 발생하는 susceptibility 인공물을 나타내는 능력은 더욱 탁월하여 아주 작은 출혈도 발견할 수 있다. 종래에 이용되던 T2* 경사자장영상 (gradient-echo image)에서도 3T 자기공명영상의 강한 susceptibility를 확인할 수 있지만 최근에 사용되고 있는 susceptibility-weighted imaging을 이용하면 출혈에 대한 민감도를 더욱 높일 수 있다(Figure 3)[16]. 또 확산텐서영상(diffusion tensor image,

DTI)을 이용한 tractography는 진단율을 높이는 것뿐만 아니라 손상된 신경을 찾아낼 수 있어서 환자의 치료 방침을 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

DTI)을 이용한 tractography는 진단율을 높이는 것뿐만 아니라 손상된 신경을 찾아낼 수 있어서 환자의 치료 방침을 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

외 상

외상에 의해 발생하는 뇌실질의 일차적 병변은 크게 뇌좌상(cerebral contusion)과 미만성 축색 손상(diffuse axonal injury)으로 나눌 수 있으며, 조직의 부종과 출혈이 병리적 변화로 나타난다[15]. 3T 자기공명영상에서 조직의 부

간질, 다발성 경화증, 신경퇴행성 질환

3T 자기공명영상에서 공간 분해능이 높아지면서 간질을 일으키는 작은 뇌피질의 변화를 찾을 가능성은 더욱 높아졌다. 특히, 간질을 유발하는 주요부위인 측두엽의 해마(hippocampus)의 복잡한 구조를 선명하게 나타내어서 내측 측

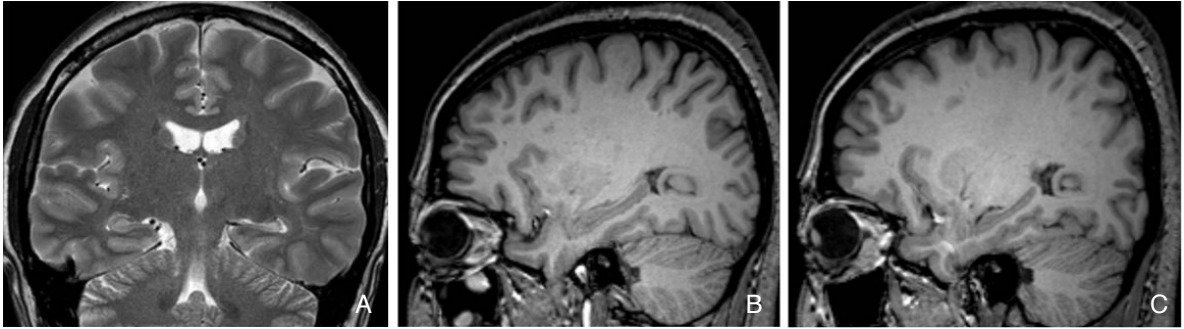


Figure 4. Thirty-nine-year-old-female with left hippocampal sclerosis. Coronal T2-weighted image at 3 tesla (A) shows small and hyperintense left hippocampus. Normal three-layered structure is appeared at normal right hippocampus. Spoiled gradient 3D images show the decreased left hippocampal volume (C) compared with the normal right hippocampal volume (B).

두엽 경화증(mesial temporal sclerosis)의 진단이 더욱 용이해졌다(Figure 4)[17]. 진단의 차이는 측두엽 간질 환자의 수술 치료결과에도 직접적인 영향을 미쳐서 영상적으로 해마의 변화를 확인한 환자에서 훨씬 좋은 예후를 나타내었다[18].

3T 자기공명영상의 높은 신호강도와 공간 분해능으로 인해서 다발성 경화증에서 초기의 작은 탈수초 병변을 찾을 수 있었고, 1.5T에서 보이지 않던 병변이 13-41.6%까지 증가되어 나타났다[19-21]. 알츠하이머병에 의한 치매에서도 역시 뇌의 전반적인 부피 감소 외에도 내측 측두엽이나 posterior cingulate, percutaneous cortex, insula, prefrontal cortex 등의 특정 부위의 부피 감소를 나타낼 수 있다[22-25]. Chemical shift가 증가되면서 증가된 MR spectroscopy의 스펙트럼의 분해능은 강해진 신호강도와 함께 고자장 자기공명영상에서 병변의 정량적인 분석을 가능하게 한다. 다발성 경화증에서는 병변에서 측정된 MR spectroscopy에서 생존 신경의 표시자인 N-acetylaspartate (NAA)의 감소와 교질 세포(glial cells)의 활성화를 나타내는 표시자인 myo-inositol (mIn)의 증가가 소견을 나타내었다[26,27]. 알츠하이머병에서는 NAA 감소와 mIn의 증가 소견이 posterior cingulate, 측두엽과 전두엽 등에서 나타나는데 이러한 소견의 정도는 임상적인 치매의 정도와 상관관계를 나타내었고, 알츠하이머병으로 진행되는 중간단계로 생각되는 경도인지장애(mild cognitive impairment, MCI)에서는 정상과 알츠하이머병의 중간 단계를 보

여서 알츠하이머병의 병의 진행 정도와 조기 진단을 가능하게 할 수 있다[28-30].

fMRI는 oxygenated hemoglobin과 deoxygenated hemoglobin의 paramagnetic 성질의 차를 이용한 blood oxygen level-dependent 기법을 이용하게 되는데 자장의 증가와 함께 paramagnetic 성질의 차이는 더욱 증가하여 3T에서 1.5T에 비하여 더욱 강하고 예민도가 높은 결과를 얻을 수 있다[31]. 알츠하이머병 환자와 MCI 환자에 있어서 기억력과 관계한 fMRI에서 내측 측두엽의 활성이 감소된 것을 관찰할 수 있는데 이것은 내측 측두엽의 신경 손상이나 기능의 감소를 나타낸다[32-34].

뇌 종양

3T 자기공명영상의 증가된 공간 분해능도 뇌종양의 진단에 도움이 되지만 증가된 신호강도와 늘어난 T1 이완시간이 더해져서 강력한 gadolinium 조영제의 효과를 얻을 수 있는데 이것을 이용하여 조영제의 양을 이전 1.5T에서 쓰던 양의 1/2 또는 1/4만 사용하여 1.5T와 비교하여 충분한 조영 효과를 얻을 수 있다[6,14]. 뇌 전이암은 1.5T에서는 조영제의 양을 3배로 늘여서 진단의 민감도를 늘일 수 있었는데 3T에서는 표준양만 사용하더라도 민감도를 증가시킬 수 있으므로 매우 효과적이다[35].

최근 여러 기능성 자기공명영상들이 신경교종의 악성의 정도를 예측하거나 다양한 뇌종양의 감별에 이용되고 있다.

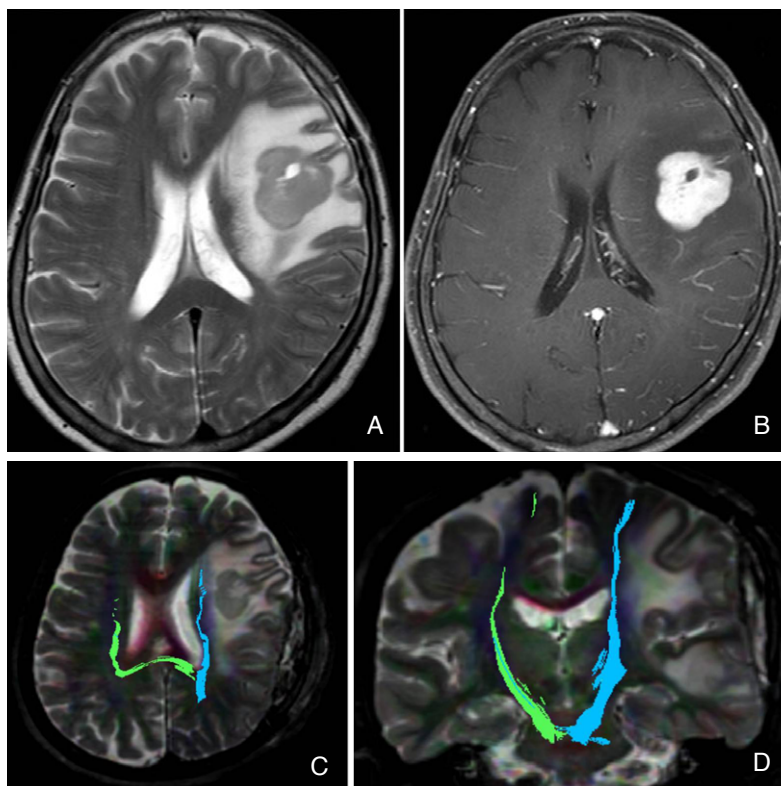


Figure 5. Sixty-six-year-old-female with anaplastic astrocytoma. The left frontal mass is hyperintense on T2-weighted image (A) and well enhanced on contrast-enhanced T1-weighted image (B). The transverse (C) and coronal tractography (D) at 3 tesla show the relationship between the mass and left pyramidal tract. Therefore, they may help to plan the surgical margin.

종양내의 세포밀도는 종양의 악성도를 결정하는 요소의 하나인데, 악성 종양일 수록 세포밀도가 높아서 확산강조영상의 신호강도가 강하게 나타나고 현성확산계수(apparent diffusion coefficient)가 의미 있게 낮게 나타난다[36,37]. 특히, 3T의 강한 신호를 이용한 b-value를 3,000까지 높인 확산강조영상은 신경교종의 악성을 보다 쉽고 정확하게 예측할 수 있었다[38]. 관류강조영상의 relative cerebral blood volume (rCBV)은 종양의 신생혈관형성을 나타내어 악성 신경교종에서 양성에 비하여 증가된 rCBV를 나타낸다[39]. 또 교모세포종(glioblastoma)는 임파선 암(lymphoma)에 비하여 의미 있게 rCBV가 높아서 두 뇌종양의 감별진단과 함께 치료 방침을 결정하는데 큰 영향을 미친다[40]. 3T 자기공명영상은 susceptibility가 증가되어 일반

적인 조영제를 이용한 관류영상이 더욱 정확해질 뿐만 아니라, 높은 신호강도와 T1 이완시간 증가로 인한 주위 조직의 낮아진 신호에 의해 조영제 없이 유입되는 혈류의 스핀 표시를 이용한 관류영상인 동맥 스핀 표시기법(arterial spin labeling)의 임상적인 이용도 가능해졌다[41]. MR spectroscopy는 종양의 대사 물질의 측정이 가능해서 종양의 악성도나 감별진단에 이용되는데 3T 자기공명영상은 높은 SNR과 chemical shift로 인해서 정확한 측정이 가능하다[1].

DTI를 이용한 tractography와 fMRI는 추체로(pyramidal tract)와 같은 신체기능에 필수적인 신경이나 언어 중추인 Broca 부위 등의 위치를 나타내어서 뇌종양 수술이나 방사선 치료 시에 이를 보존할 수 있도록 할 수 있다(Figure 5)[42,43]. 물론 3T 자기공명영상은 1.5T에 비해 높은 신호강도와 susceptibility를 이용하여 정확성을 높일 수 있다.

결론

3T 고자장 장치의 높은 SNR에 의한 공간적 또는 시간적인 분해능을 높이는 큰 장점을 가지고 있어 자기공명영상에 의존도가 높은 뇌신경 질환 진단의 정확성을 높인다. 이 외에도 늘어난 T1 이완시간, 강해진 susceptibility와 chemical shift 등은 다채널 코일에 의한 병렬기법 등을 이용하여 단점을 보완하고 장점을 부각시켜서 더욱 향상된 확산강조영상, 관류영상, MR spectroscopy, fMRI 등은 더욱 정확한 뇌신경 질환의 진단뿐만 아니라 치료 방침이나 예후를 결정하는데 유용한 도구로 사용될 수 있다.

핵심용어: 자기공명영상; 고자장; 뇌질환; 3 테슬라

REFERENCES

- Willinek WA, Kuhl CK. 3.0 T neuroimaging: technical considerations and clinical applications. *Neuroimaging Clin N Am* 2006; 16: 217-228.
- Willinek WA, Schild HH. Clinical advantages of 3.0 T MRI over 1.5 T. *Eur J Radiol* 2008; 65: 2-14.
- Alvarez-Linera J. 3T MRI: advances in brain imaging. *Eur J Radiol* 2008; 67: 415-426.
- DeLano MC, Fisher C. 3T MR imaging of the brain. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2006; 14: 77-88.
- Pruessmann KP. Parallel imaging at high field strength: synergies and joint potential. *Top Magn Reson Imaging* 2004; 15: 237-244.
- Krautmacher C, Willinek WA, Tschampa HJ, Born M, Träber F, Gieseke J, Textor HJ, Schild HH, Kuhl CK. Brain tumors: full- and half-dose contrast-enhanced MR imaging at 3.0 T compared with 1.5 T. Initial Experience. *Radiology* 2005; 237: 1014-1019.
- Causes of death statistics, 2009 [Internet]. Daejeon: Statistics Korea; [cited 2010 Sep 9]. Available from: <http://kostat.go.kr>.
- Hoggard N, Wilkinson ID, Griffiths PD. The imaging of ischaemic stroke. *Clin Radiol* 2001; 56: 171-183.
- Tissue plasminogen activator for acute ischemic stroke. The National Institute of Neurological Disorders and Stroke rt-PA Stroke Study Group. *N Engl J Med* 1995; 333: 1581-1587.
- Hacke W, Kaste M, Fieschi C, Toni D, Lesaffre E, von Kummer R, Boysen G, Bluhmki E, Höxter G, Mahagne MH, Hennerici M; ECASS Study Group. Intravenous thrombolysis with recombinant tissue plasminogen activator for acute hemispheric stroke. The European Cooperative Acute Stroke Study (ECASS). *JAMA* 1995; 274: 1017-1025.
- Kuhl CK, Textor J, Gieseke J, von Falkenhausen M, Gernert S, Urbach H, Schild HH. Acute and subacute ischemic stroke at high-field-strength (3.0-T) diffusion-weighted MR imaging: intraindividual comparative study. *Radiology* 2005; 234: 509-516.
- Kim HJ, Choi CG, Lee DH, Lee JH, Kim SJ, Suh DC. High-b-value diffusion-weighted MR imaging of hyperacute ischemic stroke at 1.5T. *AJNR Am J Neuroradiol* 2005; 26: 208-215.
- Toyoda K, Kitai S, Ida M, Suga S, Aoyagi Y, Fukuda K. Usefulness of high-b-value diffusion-weighted imaging in acute cerebral infarction. *Eur Radiol* 2007; 17: 1212-1220.
- Manka C, Träber F, Gieseke J, Schild HH, Kuhl CK. Three-dimensional dynamic susceptibility-weighted perfusion MR imaging at 3.0 T: feasibility and contrast agent dose. *Radiology* 2005; 234: 869-877.
- Osborn A, Blaser S, Salzman K, Provenzale J, Castillo M, Sutton D, Hedlund G, Ilners A, Harnsberger H, Cooper J. Diagnostic imaging: brain. Salt Lake City (UT): Amirsys; 2004.
- Sehgal V, Delproposto Z, Haacke EM, Tong KA, Wycliffe N, Kido DK, Xu Y, Neelavalli J, Haddar D, Reichenbach JR. Clinical applications of neuroimaging with susceptibility-weighted imaging. *J Magn Reson Imaging* 2005; 22: 439-450.
- Sawaishi Y, Sasaki M, Yano T, Hirayama A, Akabane J, Takada G. A hippocampal lesion detected by high-field 3 tesla magnetic resonance imaging in a patient with temporal lobe epilepsy. *Tohoku J Exp Med* 2005; 205: 287-291.
- Vermathen P, Laxer KD, Schuff N, Matson GB, Weiner MW. Evidence of neuronal injury outside the medial temporal lobe in temporal lobe epilepsy: N-acetylaspartate concentration reductions detected with multisection proton MR spectroscopic imaging-initial experience. *Radiology* 2003; 226: 195-202.
- Wattjes MP, Barkhof F. High field MRI in the diagnosis of multiple sclerosis: high field-high yield? *Neuroradiology* 2009; 51: 279-292.
- Bachmann R, Reilmann R, Schwandt W, Kugel H, Heindel W, Krämer S. FLAIR imaging for multiple sclerosis: a comparative MR study at 1.5 and 3.0 Tesla. *Eur Radiol* 2006; 16: 915-921.
- Kuhl CK, Träber F, Gieseke J, Drahanowsky W, Morakkabati-Spitz N, Willinek W, von Falkenhausen M, Manka C, Schild HH. Whole-body high-field-strength (3.0-T) MR imaging in clinical practice. Part II. Technical considerations and clinical applications. *Radiology* 2008; 247: 16-35.
- Whitwell JL, Przybelski SA, Weigand SD, Knopman DS, Boeve BF, Petersen RC, Jack CR Jr. 3D maps from multiple MRI illustrate changing atrophy patterns as subjects progress from mild cognitive impairment to Alzheimer's disease. *Brain* 2007; 130(Pt 7): 1777-1786.
- Whitwell JL, Petersen RC, Negash S, Weigand SD, Kantarci K, Ivnik RJ, Knopman DS, Boeve BF, Smith GE, Jack CR Jr. Patterns of atrophy differ among specific subtypes of mild cognitive impairment. *Arch Neurol* 2007; 64: 1130-1138.
- Whitwell JL, Jack CR Jr. Neuroimaging in dementia. *Neurol Clin* 2007; 25: 843-857.
- Chételat G, Desgranges B, De La Sayette V, Viader F, Eustache F, Baron JC. Mapping gray matter loss with voxel-based morphometry in mild cognitive impairment. *Neuroreport* 2002; 13: 1939-1943.
- Chard DT, Griffin CM, McLean MA, Kapeller P, Kapoor R, Thompson AJ, Miller DH. Brain metabolite changes in cortical grey and normal-appearing white matter in clinically early relapsing-remitting multiple sclerosis. *Brain* 2002; 125(Pt 10): 2342-2352.
- Dreha-Kulaczewski SF, Helms G, Dechent P, Hofer S, Gärtner J, Frahm J. Serial proton MR spectroscopy and diffusion tensor imaging in infantile Balo's concentric sclerosis. *Neuroradiology* 2009; 51: 113-121.

28. Kantarci K, Jack CR Jr, Xu YC, Campeau NG, O'Brien PC, Smith GE, Ivnik RJ, Boeve BF, Kokmen E, Tangalos EG, Petersen RC. Regional metabolic patterns in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: A 1H MRS study. *Neurology* 2000; 55: 210-217.
29. Kantarci K, Weigand SD, Petersen RC, Boeve BF, Knopman DS, Gunter J, Reyes D, Shiung M, O'Brien PC, Smith GE, Ivnik RJ, Tangalos EG, Jack CR Jr. Longitudinal 1H MRS changes in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging* 2007; 28: 1330-1339.
30. Modrego PJ, Fayed N, Pina MA. Conversion from mild cognitive impairment to probable Alzheimer's disease predicted by brain magnetic resonance spectroscopy. *Am J Psychiatry* 2005; 162: 667-675.
31. Scarabino T, Giannatempo GM, Popolizio T, Tosetti M, d'Alesio V, Esposito F, Di Salle F, Di Costanzo A, Bertolino A, Maggialelli A, Salvolini U. 3.0-T functional brain imaging: a 5-year experience. *Radiol Med* 2007; 112: 97-112.
32. Sperling RA, Bates JF, Chua EF, Cocchiarella AJ, Rentz DM, Rosen BR, Schacter DL, Albert MS. fMRI studies of associative encoding in young and elderly controls and mild Alzheimer's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2003; 74: 44-50.
33. Machulda MM, Ward HA, Borowski B, Gunter JL, Cha RH, O'Brien PC, Petersen RC, Boeve BF, Knopman D, Tang-Wai DF, Ivnik RJ, Smith GE, Tangalos EG, Jack CR Jr. Comparison of memory fMRI response among normal, MCI, and Alzheimer's patients. *Neurology* 2003; 61: 500-506.
34. Johnson SC, Schmitz TW, Moritz CH, Meyerand ME, Rowley HA, Alexander AL, Hansen KW, Gleason CE, Carlsson CM, Ries ML, Asthana S, Chen K, Reiman EM, Alexander GE. Activation of brain regions vulnerable to Alzheimer's disease: the effect of mild cognitive impairment. *Neurobiol Aging* 2006; 27: 1604-1612.
35. Schiff D. Single Brain Metastasis. *Curr Treat Options Neurol* 2001; 3: 89-99.
36. Murakami R, Hirai T, Sugahara T, Fukuoka H, Toya R, Nishimura S, Kitajima M, Okuda T, Nakamura H, Oya N, Kura-tsui J, Yamashita Y. Grading astrocytic tumors by using apparent diffusion coefficient parameters: superiority of a one- versus two-parameter pilot method. *Radiology* 2009; 251: 838-845.
37. Higano S, Yun X, Kumabe T, Watanabe M, Mugikura S, Umetsu A, Sato A, Yamada T, Takahashi S. Malignant astrocytic tumors: clinical importance of apparent diffusion coefficient in prediction of grade and prognosis. *Radiology* 2006; 241: 839-846.
38. Seo HS, Chang KH, Na DG, Kwon BJ, Lee DH. High b-value diffusion (b = 3000 s/mm²) MR imaging in cerebral gliomas at 3T: visual and quantitative comparisons with b = 1000 s/mm². *AJNR Am J Neuroradiol* 2008; 29: 458-463.
39. Law M, Yang S, Babb JS, Knopp EA, Golfinos JG, Zagzag D, Johnson G. Comparison of cerebral blood volume and vascular permeability from dynamic susceptibility contrast-enhanced perfusion MR imaging with glioma grade. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004; 25: 746-755.
40. Calli C, Kitis O, Yuntun N, Yurtseven T, Islekel S, Akalin T. Perfusion and diffusion MR imaging in enhancing malignant cerebral tumors. *Eur J Radiol* 2006; 58: 394-403.
41. Wolf RL, Wang J, Wang S, Melhem ER, O'Rourke DM, Judy KD, Detre JA. Grading of CNS neoplasms using continuous arterial spin labeled perfusion MR imaging at 3 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 2005; 22: 475-482.
42. Benson RR, FitzGerald DB, LeSueur LL, Kennedy DN, Kwong KK, Buchbinder BR, Davis TL, Weisskoff RM, Talavage TM, Logan WJ, Cosgrove GR, Belliveau JW, Rosen BR. Language dominance determined by whole brain functional MRI in patients with brain lesions. *Neurology* 1999; 52: 798-809.
43. Barboriak DP. Imaging of brain tumors with diffusion-weighted and diffusion tensor MR imaging. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2003; 11: 379-401.



Peer Reviewers' Commentary

본 논문은 최근 임상적 활용이 점차 증가되고 있는 3T MRI의 장점을 1.5T MRI와 비교하여 각 뇌질환의 적용에 대하여 기술하고 있다. 이 논문의 의의는 뇌질환 영상에서 3T MRI의 활용과 그 장점을 비전문가도 이해하기 쉽게 설명하고 있는 점이라고 할 수 있겠다.

[정리: 편집위원회]