

<원저>

확산텐서영상 팬텀 제작을 위한 식물섬유 재료의 특성에 관한 연구

이정훈

신한대학교 방사선학과

A Study on the Characteristics of Plant Fiber Materials for Diffusion Tensor Imaging Phantom

Jung-Hoon Lee

Department of Radiological Science, Shinhan University

Abstract The purpose of this study was to reconstruct diffusion tensor tractography (DTT) using stem of garlic and asparagus for in vitro phantom of diffusion tensor imaging (DTI), and to compare and evaluate the fractional anisotropy (FA) value and the apparent diffusion coefficient (ADC) value to determine whether it can be used as materials for in vitro phantoms. Among various plant fibers such as stem of garlic, palmae, cotton, asparagus, etc., stem of garlic and asparagus, which are considered to be the most suitable for making phantoms, and whose shape is considered to be the most suitable for making phantoms, were selected and tests were conducted. Holes were made in a plastic bucket at an angle of 0°, 30°, 60°, 90°, and 120°, then tubes were inserted. In the tube, asparagus and stem of garlic were inserted as far in as possible, and the inserted tube was inserted into the center of the heat bathed gelatin to harden. We were able to reproduce DTT images in asparagus and stem of garlic. Fiber tissues of asparagus and stem of garlic did not show complete connectivity, but the reconstructed images of DTT showed good connectivity. The FA values of asparagus in the tubes were 0.198 at 0° (straight), 0.207 at 30°, 0.187 at 60°, 0.231 at 90°, and 0.204 at 120°. In addition, the FA values of stem of garlic in the tubes were 0.235 at 0°, 0.236 at 30°, 0.216 at 60°, 0.218 at 90°, and 0.257 at 120°. The ADC values of asparagus in the tubes were 1.545 at 0°, 1.677 at 30°, 1.629 at 60°, 1.535 at 90°, and 1.725 at 120°. In addition, the ADC values of stem of garlic in the tubes were 1.252 at 0°, 1.396 at 30°, 1.698 at 60°, 1.756 at 90°, and 1.466 at 120°. For the best expressed DTT reconstruction image, it showed the longest connectivity in the straight line as we hypothesized. In addition, when comparing the FA values and ADC values of fiber tissues of stem of garlic and asparagus, FA value was generally higher in stem of garlic and ADC value was slightly higher in asparagus.

Key Words: Magnetic resonance imaging, Diffusion tensor imaging, Quality control, Diffusion tensor tractography, Diffusion tensor Phantom

중심 단어: 자기공명영상, 확산텐서영상, 정도관리, 확산텐서추적도, 확산텐서 팬텀

1. 서 론

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging; MRI)은 연부조직의 우수한 대조도와 혈관의 정보 등을 제공하는 영

상 진단 방법으로[1] 최근에는 Diffusion tensor imaging을 이용하여 Fiber tractography를 이용한 신경섬유다발을 직접 영상으로 확인할 수 있는 방법이다[2]. 확산텐서영상(Diffusion tensor imaging; DTI)은 인간의 뇌에서 물 분자

This work was supported by the Shihan University Research Fund, 2020 and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2020R1G1A101054911).

Corresponding author: Jung-Hoon Lee, Department of Radiological Science, Shinhan University, 95, Hoam-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do, 11644, Republic of Korea / Tel: +82-31-870-3414 / E-mail: bluejeju11@naver.com

Received 10 December 2020; Revised 23 December 2020; Accepted 26 December 2020

Copyright ©2020 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

의 이방성 확산을 측정할 수 있는 자기 공명 영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI) 기술이다[3-4]. 또한 Diffusion tensor tractography(DTT)는 획득된 DTI의 데이터를 재구성해 살아있는 인간 뇌의 신경 섬유를 비 침습적으로 시각화 하는 데 유용한 방법이기도 하다. DTI는 fractional anisotropy(FA)과 같은 이방성 확산의 정량적 값을 제공할 수 있으며, apparent diffusion coefficient(ADC)를 제공한다. FA는 백질의 확산 특성에서 미묘한 변화를 감지할 수 있는 장점을 가지고 있다[5-6]. 이런 DTI의 정보는 정상적인 백질 연결성을 연구하고 다발성 경화증, 뇌졸중, 알츠하이머병 및 정신 분열증과 같은 신경 정신병 상태를 포함한 다양한 형태의 임상 병리학의 신경 기반을 설명하는데 적용하고 있다[7]. 그러나 살아있는 인간 뇌의 신경 섬유를 많은 사람들에게서 동일하고 반복적이게 DTT를 재현하는 것은 어렵다. 이는 사람 개개인 간의 해부학적 차이뿐 아니라 시간이 지남에 따라 신경이 변한다는 사실로 인해 잠재적으로 가변적이기 때문이다[8]. 따라서 반복 측정이 가능한 생체 외 확산 이방성 팬텀은 확산텐서(diffusion tensor; DT) 시퀀스를 검증하거나 뉴런 시스템을 모델링하는 측면에서 필요하다. 이전의 연구들에서 보고된 바에 의하면 FA 측정은 이론적 분석에서 그레디언트 방향과 b-values, 인간 뇌 연구에서 gradient directions의 수, 피험자의 온도 등 다양한 MR 영상 파라미터에 의해 영향을 받는다고 보고했다[9-11]. 따라서 여러 기관에서 사용할 수 있는 표준화된 검사 절차 및 DTI의 기준을 확립할 필요가 있고 DTI에 대한 표준화 팬텀이 필요하다. 인간의 신경은 섬유로 이루어져 있는데 이러한 섬유들은 합성섬유로 된 나일론(nylon), 폴리에스테르(polyester), 레이온(rayon) 등이 있으며 식물 섬유로는 마늘줄(stem of garlic), 야자나무(palme), 목화(cotton), 아스파라거스(asparagus) 등이 있고, 동물 섬유로는 누에고치의 실크(silk)와 같은 섬유들이 존재한다[12-13]. 생체 외 팬텀에 대한 일부 연구는 플라스틱 섬유 또는 레이온 식물 섬유와 같은 인공 재료를 사용하여 연구

를 하였다고 보고하였다[14].

이 연구의 목적은 DTI의 생체 외 팬텀을 위해 마늘줄과 아스파라거스를 이용하여 DTT를 재구성해 보고 FA 값과 ADC 값을 비교 평가하여 생체 외 팬텀의 재료로서 사용 가능한지를 알아보고자 하였다. 마늘줄, 야자나무, 목화, 아스파라거스 등과 같이 다양한 식물 섬유 중에 주변에서 쉽게 접할 수 있고 그 모양이 팬텀을 만들기에 가장 적합하다고 생각되어지는 마늘줄과 아라파라거스를 선택하여 실험을 진행하였다.

II. 대상 및 방법

1. 팬 텀

플라스틱 통에 0°, 30°, 60°, 90°, 120°의 각도로 구멍을 내고 튜브를 삽입하였다. 튜브 안에는 아스파라거스와 마늘 줄을 최대한 삽입하였고, 각 식물섬유들은 빠지지 않도록 고정하였다. 아스파라거스와 마늘줄이 삽입된 튜브는 중탕된 젤라틴 가운데에 삽입하여 굳혔다. 젤라틴의 크기는 가로 23cm, 세로 15cm의 크기였으며, 플라스틱 통 내부에 물을 채워 식물섬유가 삽입된 튜브의 내부에 빈 공간이 없도록 하였다. DTI는 물 분자의 제한된 브라운 운동을 측정하기에 온도의 영향을 받기 때문에[15] 완성된 팬텀은 MRI실 내부의 온도와 충분히 같아질 수 있는 4시간 이상 룬 내부에 보관한 후 스캔을 실시하였다.

2. 데이터 획득

자기 공명 영상은 1.5-Tesla MRI 장비(Intera Achiva Tx 1.5T; Philips MeSigna Excite; GE Yokogawa Medical Systems, Tokyo, Japan)를 사용하였고, 8-채널 위상 배열 두부 코일을 사용하였다. 우리는 single-shot echo planar 시퀀스를 이용하여 32 방향에서 데이터를 획득하였고,

Table 1. Image acquisition parameters for DTI images

| Parameters | DTI images | Parameters | DTI images |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| TR (ms) / TE (ms) | 8324 / 102 | CLEAR | yes |
| FOV (mm) | 224 | SENSE reduction (AP) | 1.5 |
| Matrix | 256 × 256 | Phase-encoding direction | AP |
| Slice thickness (mm) / gap (mm) | 3 / 0 | Fat shift direction | P |
| b-values (s/mm ²) | 800 | Half scan | no |
| Number of average | 1 | Water-fat shift (Pixels) | minimum |
| Diffusion directions | high (32) | number of slices | 45 |

slice thickness 3mm, TR 3000ms, TE 102ms, matrix size 256 X 256, number of slices 45, scan time 7분 25초, b-values 800으로 영상을 획득하였다(Table 1). 또한 높은 신호 대 잡음비(signal to noise; SNR)의 영상을 위하여 3D T1 SAG 강조영상과 2D T2 COR 강조영상을 획득하였다. DT 영상은 일반적으로 신호 대 잡음비가 낮기 때문에 DTT와 FA 값, ADC 값의 정확한 획득을 위하여 3D T1 SAG 강조영상과 2D T2 COR 강조영상을 필립스 콘솔에서 제공하는 소프트웨어를 이용하여 합성하여 분석하였다.

3. 이미지 분석

획득된 DTI 데이터는 필립스 MRI 시스템에서 제공하는 DTI 분석프로그램을 이용하여 DTT를 재구성하였고, DTT의 시행에 따라 파생되어 나오는 FA 값과 ADC 값을 분석하였다. DT 시퀀스로 획득된 데이터는 필립스 사에서 제공하는 'FiberTrack package'를 사용하여 분석하였다. DTT를 위하여 Tracking하고자 하는 부분에 'Select Track Single ROI Fibers'를 적용하고 'Freehand'를 이용하여 재구성 영상을 획득하였다. 팬텀의 시작되는 아래 부분 중에 직선에 가까운 부분에서 트래킹을 시도하였다. 획득된 재구성 영상은 자동으로 눈으로 확인 가능한 전체 섬유들에 대한 Lines, Voxels, FA(fractional anisotropy), ADC(apparent diffusion coefficient), Length가 자동으로 통계처리 되어 나타났다.

III. 결 과

아스파라거스와 마늘종에서 DTT 영상을 재현할 수 있었다(Fig. 1). 또한, 아스파라거스와 마늘종에서 DTT로부터 파생된 FA 값과 ADC 값을 Table 2에 나타냈다.

Fig. 1은 아스파라거스에서의 DTT 재구성 영상으로 직선인 0°에서 가장 긴 섬유의 연결성을 관찰할 수 있었으며 각도가 많이 들어간 튜브에서는 섬유들이 연결성이 부족해 보였다.

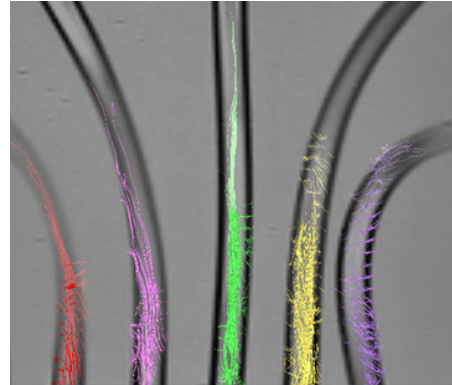


Fig. 1. Diffusion tensor tractography in asparagus phantom

아스파라거스의 FA 값은 0°(직선) 튜브에서 0.198, 30° 0.207, 60° 0.187, 90° 0.231, 120° 0.204로 나타났다. 또한, 마늘종의 FA 값은 0° 튜브에서 0.235, 30° 0.236, 60° 0.216, 90° 0.218, 120° 0.257로 나타났다. 아스파라거스와 마늘종에서의 FA 값은 Fig. 2에 그래프로 나타났다. Fig. 2의 그래프를 살펴보면 90° 튜브를 제외한 대부분의 FA 값은 마늘종에서 더 높게 관찰되었다. 이것은 식물이 신선도에 따라 물의 양이 변화가 있거나 각 식물의 특성상 함유한 수분의 차이를 배제할 수는 없다.

아스파라거스의 ADC 값은 0° 튜브에서 1.545, 30° 1.677, 60° 1.629, 90° 1.535, 120° 1.725로 나타났다. 또한, 마늘종의 ADC 값은 0° 튜브에서 1.252, 30° 1.396, 60° 1.698, 90° 1.756, 120° 1.466으로 나타났다. 아스파라거스와 마늘종에서의 ADC값은 Fig. 3에 그래프로 나타났다.

Table 2. FA and ADC values measured in stem of garlic and asparagus phantoms

| Materials | Angle | FA | ADC |
|----------------|-------|-------------|-------------|
| Stem of garlic | 0 | 0.235±0.175 | 1.252±0.574 |
| | 30 | 0.236±0.167 | 1.396±0.561 |
| | 60 | 0.216±0.131 | 1.698±0.692 |
| | 90 | 0.218±0.133 | 1.756±0.679 |
| | 120 | 0.257±0.184 | 1.466±0.590 |
| Asparagus | 0 | 0.198±0.138 | 1.545±0.532 |
| | 30 | 0.207±0.111 | 1.677±0.575 |
| | 60 | 0.187±0.116 | 1.629±0.530 |
| | 90 | 0.231±0.132 | 1.535±0.514 |
| | 120 | 0.204±0.131 | 1.725±0.729 |

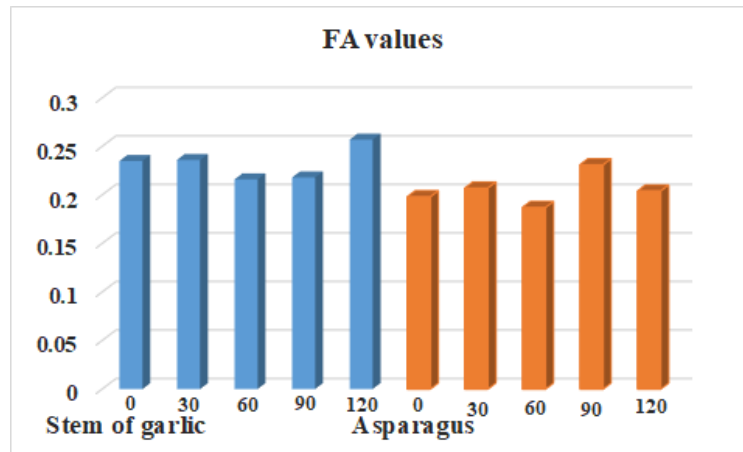


Fig. 2. Comparison of the fractional anisotropy (FA) between stem of garlic and asparagus phantoms

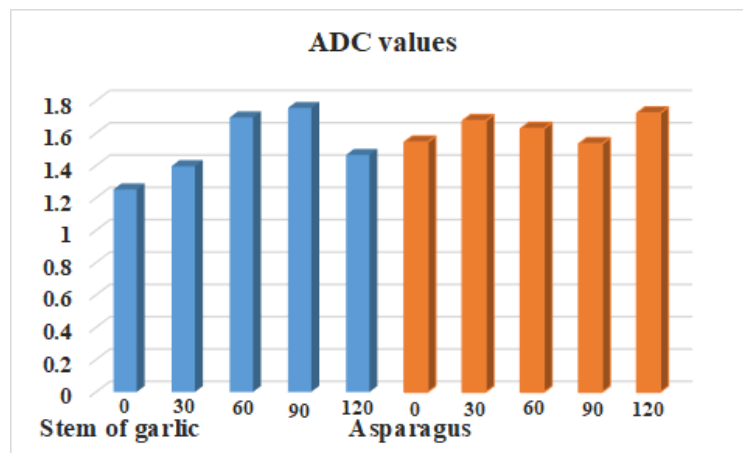


Fig. 3. Comparison of the apparent diffusion coefficient (ADC) between stem of garlic and asparagus phantoms

Fig. 3의 그래프를 살펴보면 60°와 90° 튜브를 제외한 0°, 30°, 120°의 ADC 값은 아스파라거스에서 더 높게 관찰되었다. 60° 튜브에서의 마늘종과 아스파라거스의 ADC 값은 1.698과 1.629로 다른 각도에 비해 차이가 많이 나지 않았다. 따라서 90° 튜브를 제외하면 대부분의 각도에서 아스파라거스가 높게 관찰되었다. 이것은 FA 값이 높게 관찰되는 조직에서 ADC 값이 낮게 나타나는 특성을 그대로 반영한 것이었다.

IV. 고 찰

DTI의 팬텀을 위한 이전 연구들을 살펴보면 쥐의 척수나 원숭이, 랩스터 신경 또는 인간의 사체 두뇌에 대한 연구가 진행되었고[16-18], 플라스틱 모세혈관, 식물 섬유를 이용한 팬텀 연구가 있었다[19-21]. 살아있는 인간의 뇌는 개인별 차이가 발생하게 되며 또한 나이가 들어감에 따라 그 특

성은 변하게 된다[8]. 이에 인간의 사체 두뇌를 포르말린으로 고정한 연구에서는 그 변화가 안정적인 것이라고 예상했지만 장기간 고정된 사체 두뇌에서도 물의 이동성이 계속 감소하여 한계가 있다고 보고하였다[18]. 따라서 쥐나 원숭이, 인간의 두뇌는 연구에 활용하기도 어려울뿐더러 계속 변하는 특성으로 인해 DTI를 위한 정도관리에는 적합하지 않다는 결론을 얻었다. 그래서 우리는 식물에서의 섬유조직을 대안으로 생각하였고 그 중에 쉽게 구입할 수 있고 값이 저렴한 아스파라거스와 마늘종을 연구의 재료로 선정하였다.

아스파라거스와 마늘종의 섬유조직들은 완전한 연결성을 보여주지는 않았지만 DTI의 재구성 영상에서 좋은 연결성을 보여주었다. 또한, 인간의 뇌 섬유는 여러 가지 방향으로 연결성을 보이므로 아스파라거스와 마늘종의 실험에서 각도를 주어 휘어지게 함으로써 DTI 재구성 영상에서의 각도에 따른 변화를 보고자 하였다. 가장 잘 표현된 DTI 재구성 영상은 우리의 생각과 같이 직선에서 가장 긴 연결성을 보

여주었다. 또한, 마늘종과 아스파라거스의 섬유조직의 FA 값과 ADC 값을 비교해 보면 전반적으로 FA 값은 마늘종이 높게 측정되었고 ADC 값은 아스파라거스에서 높게 측정되었다. 하지만 FA 값에서는 90°에서 아스파라거스가 더 높게 나타나는 변수가 있었고 ADC 값에서는 60°와 90°에서 마늘종이 더 높게 나타났다. 60°의 ADC 값은 다른 각도의 값들에 비해 현저한 차이를 보이지는 않았다. 이러한 변수들을 포함한 마늘종과 아스파라거스에서의 FA 값과 ADC 값은 식물의 물 함유량과 같은 식물 고유한 특성들과 신선도에 따라 변할 수 있음을 배제할 수 없었다. 각도가 큰 튜브로 갈수록 FA 값이나 ADC 값이 일정하게 줄어들거나 높지는 않았다. 이 또한 각각의 튜브에 삽입된 마늘종과 아스파라거스의 양을 배제할 수 없다. 우리는 가능한 튜브에 많은 양의 식물섬유를 넣으려고 하였으나 각 식물의 크기나 모양에 영향을 받을 수밖에 없었다. 이것은 마늘종과 아스파라거스가 튜브에 꽉 차지 않음으로써 일정량의 물이 들어갈 수 있으며 또한 식물들의 모양과 크기에 따라 그 특성이 DTT에 영향을 주었을 것이라 생각된다. 이러한 한계점에도 마늘종과 아스파라거스의 식물섬유의 DTT 재구성 영상에서 섬유들의 좋은 연결성을 확인할 수 있었고 또한 FA 값과 ADC 값을 비교 평가할 수 있었다.

본 연구를 진행하면서 식물이라는 특성상 신선도의 문제로 DT 영상에 영향을 줄 수 있다는 것을 알게 되었고 튜브에 들어가는 식물섬유의 양과 식물 고유의 특성과 같은 변수들을 포함한 제한점이 있다는 것을 알 수 있었다. 추후 연구에서는 DTI의 정도관리를 위한 팬텀 재료로서 식물섬유들과 다양한 합성 섬유들에 대한 특성을 비교 평가해 본다면 보다 나은 팬텀 재료에 대한 기준을 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

V. 결 론

이 연구의 목적과 같이 DTI의 생체 외 팬텀을 위해 식물 섬유인 마늘종과 아스파라거스를 이용하여 DTT를 재구성해 영상에서 좋은 연결성을 확인할 수 있었고 두 식물섬유들에서의 FA 값과 ADC 값을 측정하여 비교 평가할 수 있었다. 마늘종과 아스파라거스는 DTI를 위한 생체 외 팬텀의 재료로서 사용 가능하나 식물이라는 특성상 신선도의 문제는 포함된다. 따라서 추후의 연구에서는 식물섬유뿐 아니라 다양한 합성섬유들에서 그 특성을 비교하고 교차 평가해 본다면 DTI의 정도관리를 위한 팬텀을 위한 재료들의 특성을 파악하는데 도움이 되리라 사료된다.

REFERENCES

- [1] Lee JH, Kim SH. Comparative evaluation of north american symptomatic carotid endarterectomy trial and warfarin-aspirin symptomatic intracranial disease methods for measurement of middle cerebral artery stenosis in digital subtraction angiography and magnetic resonance angiography. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2019;42(5): 351-6.
- [2] Lee JH. Evaluation of O-MAR XD technique for reduction of magnetic susceptibility artifact of knee implant. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2018;41(5):413-9.
- [3] Pierpaoli C, Basser PJ. Toward a quantitative assessment of diffusion anisotropy. *Magnetic Resonance in Medicine*. 1996;36(6):893-906.
- [4] Basser PJ, Jones DK. Diffusion-tensor MRI: Theory, experimental design and data analysis—a technical review. *NMR in Biomedicine: An International Journal Devoted to the Development and Application of Magnetic Resonance In Vivo*. 2002;15(78):456-67.
- [5] Werring DJ, Clark CA, Barker GJ, Thompson AJ, Miller DH. Diffusion tensor imaging of lesions and normal-appearing white matter in multiple sclerosis. *Neurology*. 1999;52(8):1626.
- [6] Assaf Y, Pasternak O. Diffusion tensor imaging (DTI)-based white matter mapping in brain research: A review. *Journal of Molecular Neuroscience*. 2008; 34(1):51-61.
- [7] Lichenstein SD, Bishop JH, Verstynen TD, Yeh FC. Diffusion capillary phantom vs. human data: Outcomes for reconstruction methods depend on evaluation medium. *Frontiers in Neuroscience*. 2016;10:407.
- [8] Watanabe M, Aoki S, Masutani Y, Abe O, Hayashi N, Masumoto T, et al. Flexible ex vivo phantoms for validation of diffusion tensor tractography on a clinical scanner. *Radiation Medicine*. 2006;24(9): 605-9.
- [9] Ni H, Kavcic V, Zhu T, Ekholm S, Zhong J. Effects of number of diffusion gradient directions on derived diffusion tensor imaging indices in human brain. *American Journal of Neuroradiology*. 2006;

- 27(8):1776–81.
- [10] Kim SJ, Choi CG, Kim JK, Yun SC, Jahng GH, Jeong HK, et al. Effects of MR parameter changes on the quantification of diffusion anisotropy and apparent diffusion coefficient in diffusion tensor imaging: evaluation using a diffusional anisotropic phantom. *Korean Journal of Radiology*. 2015;16(2):297–303.
- [11] Reischauer C, Staempfli P, Jaermann T, Boesiger P. Construction of a temperature-controlled diffusion phantom for quality control of diffusion measurements. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2009;29(3):692–8.
- [12] Park MH. A study on the phantom for magnetic resonance diffusion tensor imaging: Development of the structure for multi-directional diffusion imaging [master's thesis]. Seoul: Korea University; 2012.
- [13] Lorenz R, Bellemann ME, Hennig J, Il'yasov KA. Anisotropic phantoms for quantitative diffusion tensor imaging and fiber-tracking validation. *Applied Magnetic Resonance*. 2008;33(4):419.
- [14] Perrin M, Poupon C, Rieul B, Leroux P, Constantinesco A, Mangin JF, et al. Validation of q-ball imaging with a diffusion fibre-crossing phantom on a clinical scanner. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2005;360(1457):881–91.
- [15] Reischauer C, Staempfli P, Jaermann T, Boesiger P. Construction of a temperature-controlled diffusion phantom for quality control of diffusion measurements. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2009;29(3):692–8.
- [16] Madi S, Hasan KM, Narayana PA. Diffusion tensor imaging of in vivo and excised rat spinal cord at 7 T with an icosahedral encoding scheme. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. 2005;53(1):118–25.
- [17] Parker GJ, Stephan KE, Barker GJ, Rowe JB, MacManus DG, Wheeler-Kingshott CA, et al. Initial demonstration of in vivo tracing of axonal projections in the macaque brain and comparison with the human brain using diffusion tensor imaging and fast marching tractography. *Neuroimage*. 2002;15(4):797–809.
- [18] Pfefferbaum A, Sullivan EV, Adalsteinsson E, Garrick T, Harper C. Postmortem MR imaging of formalin-fixed human brain. *Neuroimage*. 2004;21(4):1585–95.
- [19] Kunimatsu A, Aoki S, Masutani Y, Abe O, Mori H, Ohtomo K. Three-dimensional white matter tractography by diffusion tensor imaging in ischaemic stroke involving the corticospinal tract. *Neuroradiology*. 2003;45(8):532–5.
- [20] Yamada K, Kizu O, Ito H, Kubota T, Akada W, Goto M, et al. Tractography for arteriovenous malformations near the sensorimotor cortices. *American Journal of Neuroradiology*. 2005;26(3):598–602.
- [21] Aoki S, Iwata NK, Masutani Y, Yoshida M, Abe O, Ugawa Y, et al. Quantitative evaluation of the pyramidal tract segmented by diffusion tensor tractography: Feasibility study in patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Radiation Medicine*. 2005;23(3):195–9.

| 구분 | 성명 | 소속 | 직위 |
|----|-----|-------|-----|
| 단독 | 이정훈 | 신한대학교 | 조교수 |