

정상인에서 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상 합성기법을 이용한 피질척수로의 위치에 따른 정량적 분석

장성호¹ · 홍지현² · 변우목³ · 황창호⁴ · 양동석⁴

목적 : 기능적 뇌 자기공명영상 (fMRI)과 확산텐서영상(DTI) 합성기법을 이용하여 피질척수로의 여러 부위에서 정량적 특성을 연구하고자 하였다.

대상 및 방법 : 신경학적 이상이 없는 정상인 10명 (남: 8, 여: 2, 평균연령: 30세, 연령분포 : 22 -38세)을 대상으로 하였다. fMRI는 1.5T를 이용하였으며, 손의 쥐기 · 펴기를 수행하였다. fMRI와 확산텐서섬유로(DTT)의 합성이 가능한 DtiStudio 프로그램을 이용하여 피질척수로를 3차원 영상화하였다. 이때, 시작 관심영역은 2차원 분할 비등방성(fractional anisotropy, FA) 색지도(color map)에서 fMRI의 운동 수행 시 활성화부위가 가장 많은 곳으로, 목표 관심영역은 하부 전방 뇌교의 피질척수 부위로 설정하였다. 정량적 분석을 위하여 관심영역을 부채살부터 연수까지 좌우 각각 5곳에 설정하여 분할 비등방성과 현성 확산계수(ADC)를 측정하였다.

결과 : 모든 대상자는 fMRI에서 일차 감각운동 영역이 주로 활성화되었다. 확산텐서 영상에서 피질척수로의 경로는 일차 감각운동 영역부터 연수까지 주행하였다. 피질척수로의 FA 값은 모든 대상자에서 중뇌와 내측 섬유띠의 후지가 타 부위보다 높았다.

결론 : fMRI와 DTT의 합성기법은 피질척수로 상태의 3차원 영상화 및 각 부위에서 FA와 ADC 값을 이용한 정량적 분석이 가능하였다. 앞으로, fMRI와 DTT 합성기법은 뇌손상 환자에서 피질척수로의 명확한 상태를 연구하는 데 유용하게 이용될 것으로 사료된다.

서 론

피질척수로는 운동조절기능의 주요한 경로로서 손의 미세 동작 기능수행을 위하여 반드시 필요하다(1-4). 그러므로 뇌손상 후 피질척수로에 대한 정확한 평가는 운동신경 기능의 회복 여부를 예측하고 재활치료의 계획을 세우는 데 매우 중요하다

운동신경기능의 회복기전을 연구하는 방법으로 이전에는 양전자방출 단층촬영(positron emission tomography), 기능적

뇌 자기공명영상(fMRI), 경두부 자기자극(transcranial magnetic stimulation)등이 이용되어 왔으나, 피질척수로의 상태를 입체적으로 영상화 및 정량화하는 데는 제한점이 있었다(5-7). 한편, 최근 뇌 연구에서 활용되기 시작한 확산텐서 영상은 물의 확산능에 의하여 결정되는 뇌백질의 구조(architecture)와 보존정도(integrity)를 비침습적으로 영상화하는 방법이다(8-11). 뇌백질 내부는 물분자의 확산이 신경섬유가 배열된 방향으로 움직이는 비등방성 확산(anisotropic diffusion)이 일어나며(12), 이 성질을 이용한 확산텐서 영상은

대한자기공명의과학회지 13:40-46(2009)

¹영남대학교 의과대학 재활의학교실

²대구대학교 재활과학대학원

³영남대학교 의과대학 영상의학교실

⁴울산대학교 의과대학 울산대병원 재활의학교실

접 수 : 2008년 9월 15일, 수 정 : 2008년 12월 28일, 채 택 : 2009년 3월 20일

본 연구는 2008년도 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 이루어졌음(KRF-2008-314-E00173).

통신저자 : 양동석, (682-714) 울산광역시 동구 전하동 290-3, 울산대학교 의과대학 울산대병원 재활의학교실
Tel. (052) 250-7210 Fax. (052) 250-7211 E-mail: fnew1@hanmail.net

장성호 외

피질척수로의 상태를 분할 비등방성 (fractional anisotropy, FA), 현성확산 계수(apparent diffusion coefficient, ADC) 등의 정량적 수치로 나타낼 수 있다(13).

확산텐서영상을 이용한 피질척수로는 연구자의 관심영역 (region of interest, ROI) 설정에 의하여 해부학적 연결성인 신경섬유의 구조와 보존 정도를 3차원 영상화할 수 있으며, 이에 대한 신뢰도와 재현성은 이전 연구에서 검증되었다(14, 15). 그러나 확산텐서 영상의 시작 ROI가 대뇌 피질인 경우 피질의 분할 비등방성은 작고 편차가 많은 특성으로 인하여 피질척수로의 구현에 문제점으로 지적되고 있다(16). 이에 비하여 기능적 뇌 자기공명영상은 대뇌피질 하 영역의 변화를 설명하는데 제한이 있지만, 대뇌피질 영역에서 기능적 연결성을 객관적으로 영상화하는 방법이며 매우 좋은 해상도를 보여주는 장점이 있다(7). 또한, 기능적 뇌 자기공명영상에서 활성화된 대뇌피질 영역은 피질척수로의 주요 섬유다발을 반영하며, 이를 시작 ROI로 설정하면 피질과 피질 하에서 매우 정확하게 피질척수로를 영상화할 수 있다(9).

그러므로, 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법은 뇌 연구에서 매우 유용한 영역이나, 사용 방법 및 과정상의 복잡성 등으로 인하여 피질척수로에 대한 체계적인 시도가 진행된 바 없으므로, 본 연구는 정상 성인을 대상으로 피질척수로를 3차원 영상화 후 각 부위별로 정량적 분석을 시도 하였다.

연구대상 및 방법

1) 연구대상

연구 대상자는 과거 병력상 신경학적 증상이 없고, 에딘버그 손잡이 검사(17)에서 오른손이 우성으로 판명된 10명의 정상 성인(남자 8명, 여자 2명, 평균 연령 29.5 ± 5.7 세)을 대상으로 하였다. 모든 대상자는 실험에 앞서, 연구의 목적과 방법에 대하여 충분히 이해하였으며 자발적 동의 후, 실험에 참가하였다.

2) 기능적 뇌 자기공명영상

대상자들은 눈을 감은 채 앙와위로 누워 검사를 시행하였으며, 몸의 움직임으로 인한 영향을 최소화하기 위해 고정 기구를 사용해 전완을 내전상태로 유지하였다. 20초간의 운동기와 20초간의 휴식기를 반복하였으며, 운동기에는 메트로놈을 이용하여 1Hz의 빈도로 수지의 쥐기와 펴기 동작을 반복하였고 각각의 휴식기와 운동기를 3회(총60) 반복하였다. 혈액산소수준의존(blood oxygenation level dependent, BOLD) fMRI 영상은 1.5 T MR 기기(Philips Gyroscan Intera system)에서 두부코일을 사용하여 경사자장 방향 EPI 기법을 적용하였다 (TR/TE = 2 sec/6 ms, FOV 210 mm, matrix 64×64, slice thickness 5 mm). 모든 영상은 전교련과 후교련을 연결한 선(AC-PC line)에 평행이 되도록 경축면(transaxial)으로 얻었으며, 해부학적 영상은 T1 강조영상을 얻었다 (13 axial, slice thickness 5 mm, matrix 128×128, FOV 210 mm).

기능적 자기공명영상은 1인당 총 780개의 영상을 획득하였다. 기능적 자기공명영상 자료는 MATLAB (Mathwork INC., Natick, MA, U.S.A.)에서 SPM-99 software (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)을 이용해 분석하였다. 휴식기와 운동기의 뇌 활성화 차이는 통계적 검증을 통해 $p < 0.001$ (uncorrected)일 때 의미 있게 활성화된 부위로 간주하였다.

3) 확산텐서영상 획득

본 연구에서는 Synergy-L Sensitivity Endocoding (SENSE) 두부코일을 장착한 1.5T MR 기기 (Philips Gyroscan Intera system)를 사용하였다. 영상 기법은 180° 무선주파수 진동(radio frequency pulse) 전 후의 두 확산-민감 변화도로 single-shot spin echo EPI를 사용하였고, 자동 조정장치 교정(navigator echo-phase correction)은 동작 교정장치(motion correction)로 채택되었다. 영상 범위는 전교련-후교련 연결선에 평행하게 60개의 인접하는 절편영상을 획득하였다. 영상촬영조건은 확산강조 경사자장의 방향수 32방향, Matrix 128×128, field of view = 221×221 mm², TR/TE/FA 10,726 ms/76 ms/90°, EPI factor=67, b-value = 1000 s/mm², NEX=1, thickness = 2.3 mm로 하였다.

4) 기능적 자기공명 영상과 확산텐서영상의 합성에 의한 피질척수로 재구성

기능적 자기공명 영상에서 활성화된 영역을 확산텐서영상으로 합성이 가능한 프로그램인 DtiStudio, version 1.02 software (H. Jiang, S. Mori Department of Radiology, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, U.S.A.)에 포함된(18), fiber assignment continuous tracking 알고리즘을 이용하여(19), 피질척수로를 3차원으로 재구성하였다. 피질척수로는 2차원 분할 비등방성 색지도에서 적색(X component, 좌-우), 녹색(Y component, 전-후), 청색(Z component, 상-하)으로 각각 할당되었다. 2차원 분할 비등방성 색지도에서 시작 ROI는 기능적 자기공명영상에서 손 운동에 의해 활성화된 대뇌피질의 일차 감각운동 영역을 중심으로 설정하였으며, 목표 ROI는 하부 뇌교의 앞쪽 청색부위(blue portion)로 설정하였고, 양측 ROI를 모두 통과하는 뇌 백질 섬유만 재구성 되도록 하였다. 이때 섬유로의 역치는 분할 비등방성과 각의 종료(angle termination)에서 각각 0.2와 70°였다.

5) 확산텐서영상에 의한 피질척수로의 경로에 따른 정량적 평가

DtiStudio 확산텐서영상에서 좌우 피질척수로의 부채살, 내막 후지, 중뇌, 뇌교, 연수에서 각각의 ROI를 설정한 후 분할 비등방성과 현상 확산계수 값을 구하였다.

6) 통계분석 방법

본 연구에서 수집된 자료는 SPSS version 15.0 for window를 이용하여, 대상자의 나이 및 성별의 분포에 대한 자료는 평균과 표준편차를 이용한 기술통계를 실시하였다. 또한 분할 비등방성 및 현성 확산계수를 종속변수로 설정하여, 이에 대한 각 부위별 좌우 측의 차이와 좌측 및 우측에서의 부위에 따른 각 종속변수의 차이를 일원배치분산 분석(one way ANOVA)을 실시하였고, 사후 분석은 bonferroni를 통해 검증하였다. 통계적 유의 수준으로 $p < 0.001$ 로 설정하였다.

연구 결과

1) 기능적 뇌 자기공명 영상

모든 대상자는 기능적 자기공명 영상과 DtiStudio 확산텐서 영상에서 일측 손의 운동 시 반대 측 대뇌피질의 일차 감각운동 영역을 중심으로 활성화가 보였다 (Fig. 1a).

2) 확산텐서영상

피질척수로는 확산텐서영상에서 3차원적으로 재구성되었으

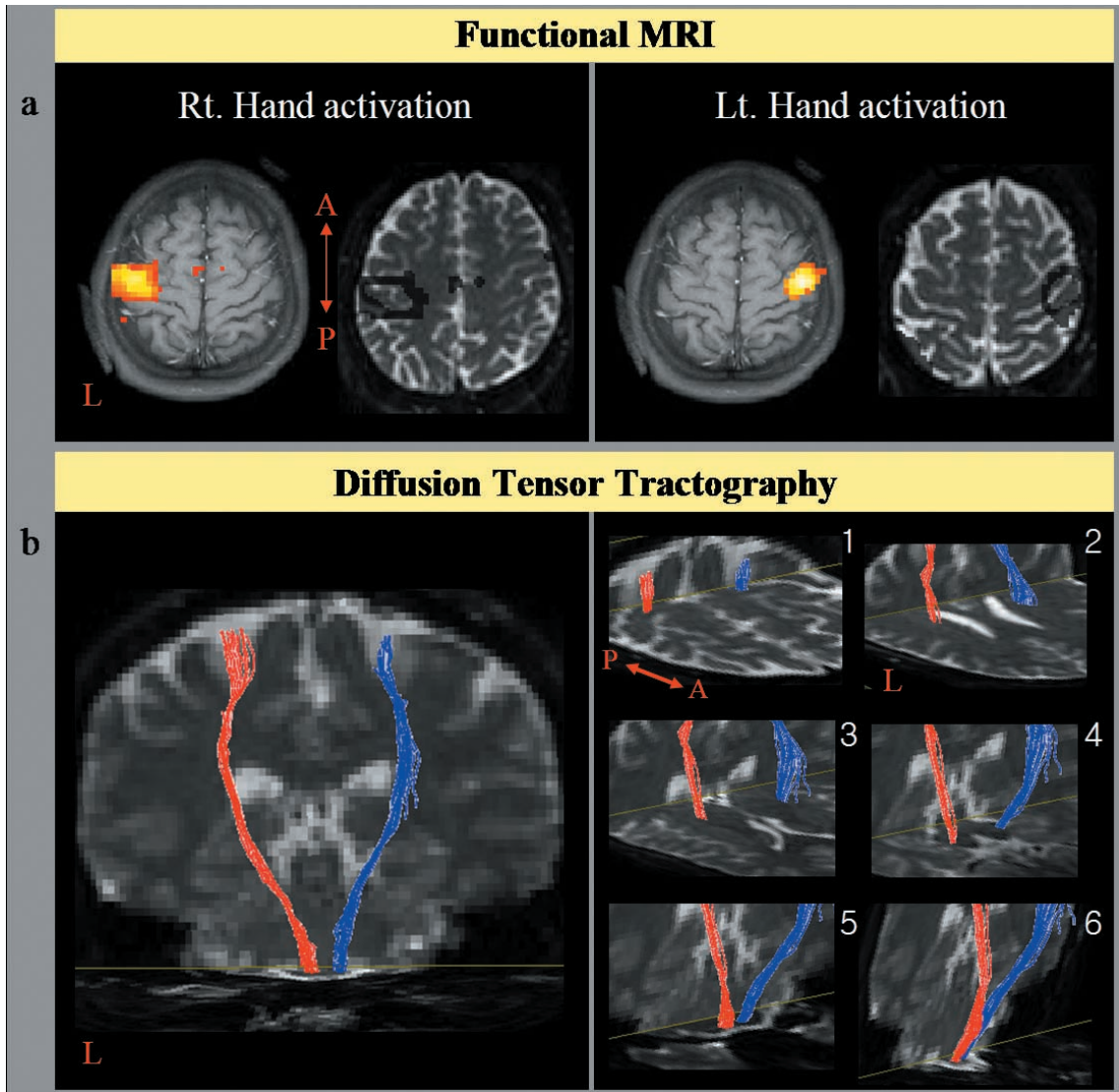


Fig. 1. fMRI showed that the contralateral SM1 became activated during a right or left movement (a). fMRI co-registered to DTI on 2-D FA color map showed an image pattern similar to fMRI. All 3D-DTT on a coronal view and axial view showed that the CSTs originated from SM1 and ran to the medulla along the known pathway of the CST (b). We have drawn five ROIs for the measurement of FA and ADC along the corona radiata down to the medulla (from (b)-2 to (b)-6).

Red color: right corticospinal tract, Blue color: Left corticospinal tract
SM1 : primary sensorimotor cortex, CST: corticospinal tract

Table 1. Quantitative FA and ADC Analysis of the CST at the Multiple Levels

Region of Interest	FA		ADC	
	Right	Left	Right	Left
Medulla	0.56±0.14	0.54±0.09	0.16±0.03	0.16±0.03
Pons	0.60±0.07	0.57±0.06	0.12±0.01	0.13±0.01
Midbrain	0.71±0.07	0.75±0.05	0.15±0.02	0.14±0.02
PLIC	0.67±0.06	0.70±0.05	0.14±0.01	0.13±0.01
CR	0.58±0.06	0.61±0.07	0.12±0.04	0.11±0.04

Values are mean ± standard deviation.

FA: Fractional Anisotropy, ADC: Apparent Diffusion Coefficient.

CST: corticospinal tract

PLIC: posterior limb of internal capsule, CR: corona radiata,

ADC × 10⁻³ (mm²/s)

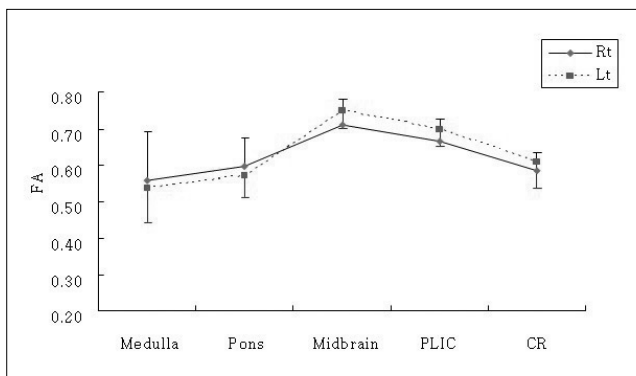


Fig. 2. FA value of the CST was the highest in the midbrain level at both sides, in contrast with the lowest in the medulla level. In statistical analysis, at the right side, FA value of the midbrain level was significantly increased in comparison with that of the medulla level. At the left side, FA value of the PLIC level was significantly higher than that of the CR and the medulla level.

Values are mean ± standard deviation.

FA: Fractional Anisotropy, CST: corticospinal tract

PLIC: posterior limb of internal capsule,

CR: corona radiata,

Rt: right corticospinal tract

Lt: left corticospinal tract

p < 0.001 was considered as statistically significant.

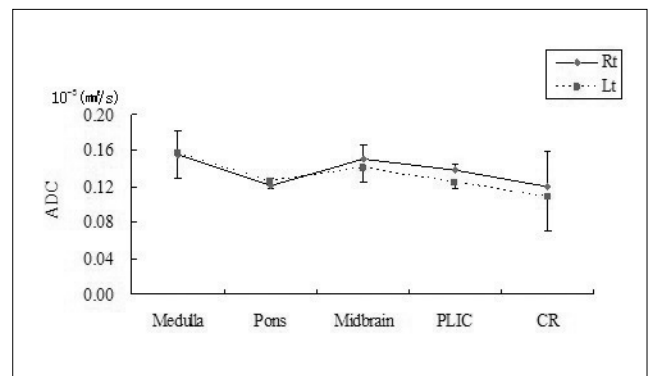


Fig. 3. ADC value of the CST was the highest in the medulla level at both sides, in contrast with the lowest in the CR level. In statistical analysis, at the left side, ADC value of the medulla was significantly higher than that of the CR level. At the right side, statistical significance of ADC was not observed at the multiple levels.

Values are mean ± standard deviation.

ADC: Apparent Diffusion Coefficient, CST: corticospinal tract

PLIC: posterior limb of internal capsule, CR: corona radiata

Rt: right corticospinal tract

Lt: left corticospinal tract

p < 0.001 was considered as statistically significant.

며, 일차 감각운동 영역에서 부채살의 후방 영역, 내막 후지, 전방 중뇌의 중간 영역, 전방 뇌교, 전방 연수를 통과하였다 (Fig. 1b).

3) 피질척수로의 정량적 분석

분할 비등방성은 좌우 중뇌에서 각각 0.71±0.07, 0.75±0.05로 가장 높았고, 다음은 좌우 내막 후지의 순이었으며, 그리고 좌우 연수에서 각각 0.56±0.14, 0.54±0.10로 가장 낮았다. 부위에 따른 통계학적 유의성을 살펴 본 결과 우측 피질척

수로는 중뇌가 연수에 비하여 높았으며, 좌측 피질척수로는 중뇌가 연수, 뇌교, 부채살에 비하여 그리고 내막 후지가 연수와 뇌교에 비하여 높았다 (Fig. 2).

현성 확산계수(×10⁻³ (mm²/s))는 좌우 연수에서 동일하게 0.16±0.03, 0.16±0.03으로 가장 높았으며, 좌우 부채살이 0.12±0.04, 0.11±0.04로 가장 낮았다. 통계학적 유의성은 우측 피질척수로의 부위 내에서 없었으며, 좌측 피질척수로는 연수가 부채살에 비해 유의하게 높았다 (Fig. 3). 피질척수로의 각 구간에서 좌우 비교에 따른 분할 비등방성과 현성 확산계수

값의 통계학적 유의성은 없었다 ($p > 0.001$).

피질척수로의 각 부위에서 정량화된 분할 비등방성과 현성 확산계수 값은 Table 1과 같았다 (Table 1).

고 찰

본 연구는 정상인에서 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법을 이용하여 피질척수로를 3차원 영상화하였으며, 기존의 확산텐서영상에서 구현된 피질척수로와 비교하여 모양과 주행경로가 일치하는 것을 확인하였다. 피질척수로의 부위에 따른 정량적 분석을 통하여 좌우의 중뇌와 내막 후지가 다른 부위보다 분할 비등방성이 높은 결과를 얻었다.

확산텐서영상을 이용한 정상 피질척수로에 대한 부위별 최초의 정량적 연구는 Virta 등(20)이 연령, 성별, 좌우에 따라 대뇌각, 뇌교, 연수에서 분할 비등방성, 현성 확산계수, 주요 확산력을 제시하였다. 그 결과 분할 비등방성은 대뇌각이 가장 높았으며 연수, 뇌교 순으로, 성별과 좌우에 따른 차이는 없었지만 낮은 연령군이 높은 연령군보다 대뇌각에서 유의하게 높은 것으로 보고하였다. 그 후 Stieltjes 등(15)은 뇌간의 연수, 뇌교, 중뇌에서 피질척수로, 내측 섬유띠와 소뇌각에 대한 정량적 분석으로 피질척수로의 분할 비등방성은 중뇌의 값은 Virta 등과 일치하였으나, 중뇌, 뇌교에서는 다른 결과를 보고 하였다. 또한, 미만성 척삭손상으로 인한 피질척수로의 국소병변 또는 근위척성 척삭경화증 환자군과 정상군에서 연수부터 부채살까지 포함한 정량적 분석이 시행된 바 있다(21-23). 상기 결과에서 정상군의 분할 비등방성은 내막 후지와 중뇌에서 0.65~0.67와 0.65~0.75로, 각각 0.45~0.55와 0.30~0.56의 값을 보인 뇌교와 연수보다 높았으며, 현성 확산계수는 다양하게 제시되었다. 한편, 본 연구를 통해 최초로 시도된 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법을 이용한 피질척수로의 부위별에 따른 정량적 분석에서, 분할 비등방성은 좌우의 내막 후지와 중뇌에서 각각 0.67~0.70과 0.71~0.75로 부채살, 뇌교, 연수와 비교하여 높게 나타났는데, 이는 기존의 연구 결과와 거의 일치하는 것으로 본 연구방법과 결과에 대한 정확성과 신뢰도를 뒷받침하고 있다.

한편, 사람을 대상으로 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법을 이용하여 일차 운동피질과 이와 관련된 영역의 연결성은 Guye 등(24)이 fast marching 알고리즘 방식으로 최초로 3차원적으로 재구성하였다. 이후 시각기능은 Toosy 등(25)이 후방시각 경로인 시방사(optic radiation)를 영상화하면서 시방사 섬유로의 분할 비등방성이 기능적 뇌 자기공명영상의 활성도를 유의하게 반영함을 보였고, Upadhyay 등(26)은 청각기능이 청각피질에서 거울상 대칭 음조성 기질화(mirror symmetric tonotopic organization)는 서로 떨어져 있는 2개의 고주파 영역과 이를 중간에서 연결하는 1개의 저주파 영역으로 구성되며, 2개의 고주파 영역을 연결하는 섬유로보다 고주파와 저주파를 연결하는 섬유로의 수가 많다는 것을 증

명하였다. 기억기능은 Takahashi 등(27)이 좌측 배측 전전두 피질(dorsolateral prefrontal cortex)과 좌측 등측 전전두 피질(ventrolateral prefrontal cortex)에서 기억과 관련된 영역이 각각 좌측 측두엽과 연결되는 두 가지 기능적·해부학적 경로를 fiber assignment continuous tracking과 tensor deflection 알고리즘을 동시에 이용하여(28), 영상화하는데 성공하였다.

피질척수로에 대한 합성기법 연구는 Hendler 등(29)이 뇌종양환자에서 종양에 의한 피질척수로의 침범여부와 운동·감각 영역에서 기능의 보존여부를 확인하였고, 수술범위 및 예후를 예측하는 데 도움될 수 있다고 보고 하였다. 또한 피질척수로의 체성배열에 대한 연구는 내막 후지에서 손에 해당되는 신경섬유가 발에 해당되는 신경섬유보다 전외측에 위치함을 밝힌 바 있다(31). 특히, 2007년 Cherubini 등(30)은 외상성 뇌손상 후 운동기능이 회복된 환자와 정상군의 피질척수로 연결성을 probabilistic fiber tracking 알고리즘을 이용하여 비교함으로써 운동신경망 양상의 차이를 확인하여 합성기법이 뇌 가소성의 기전 연구에 적용될 수 있음을 제시하였으며, 이때 사용한 probabilistic fiber tracking 알고리즘이 다른 알고리즘보다 기능적 뇌 자기공명영상의 활성영역을 보다 특이하게 잘 반영될 수 있음을 강조하였다.

한편, 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법을 이용한 기존 피질척수로의 영상화는, 중뇌 이하에서 내측 섬유띠와 소뇌각과의 구분에 제한이 있었으며, 단수 ROI로 이용되는 경우가 많았다. 이에 본 연구방법은 기능적 뇌 자기공명영상에서 손의 운동에 의하여 활성화된 일차 감각운동 영역을 시작 ROI로, 목표 ROI는 이미 공통으로 지나가는 경로만을 취하여 뇌교 아래인 연수까지 주행하는 피질척수로를 명확하게 3차원 영상화하였으며, 이전 해부학적 및 영상학적 경로와 일치하였다. 따라서 본 연구결과는 피질과 피질 하 영역에서 피질척수로의 상태 및 변화를 3차원적으로 연구하는 데 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 피질척수로의 부위별 분할 비등방성에 대한 측정은 피질척수로의 미세한 손상 확인 및 운동신경 회복 전후 피질척수로의 변화를 정량적 평가하는데 객관적 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 본 연구의 한계점으로 피질척수로의 일차 감각운동 영역을 중심으로 시작 ROI로 국한함으로써 보조 운동 영역(supplementary motor area)과 전운동 영역(premotor cortex)에서 기원된 피질척수로를 파악하는 데 제한이 있다. 앞으로 기능적 뇌 자기공명영상에서 활성화된 대뇌피질의 성질을 보다 잘 반영할 수 있는 probabilistic fiber tracking 알고리즘과의 비교 연구가 고려되어야 할 것으로 보인다.

결 론

본 저자들은 기능적 뇌 자기공명영상과 확산텐서영상의 합성기법을 이용하여 피질척수로의 기능적 연결성과 해부학적 연결

성을 3차원적으로 재구성하였으며, 정량적 분석을 통해 부위에 따른 분할 비등방성과 현성 확산계수 값의 차이를 확인하였다. 본 연구의 결과는 앞으로 뇌손상 후 피질척수로의 손상 정도와 뇌가소성에 의한 운동신경 회복기전의 정확한 평가 및 추적 연구에 도움 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Davidoff RA. The pyramidal tract. *Neurology* 1990;40:332-339.
2. Martin JH. The corticospinal system: from development to motor control. *Neuroscientist* 2005;11:161-173.
3. Wiesendanger M. Pyramidal tract function and the clinical "pyramidal syndrome". *Hum Neurobiol* 1984;2:227-234.
4. Ahn YH, Ahn SH, Kim H, Hong JH, Jang SH. Can stroke patients walk after complete lateral corticospinal tract injury of the affected hemisphere? *Neuroreport* 2006;17:987-990.
5. Chollet F, DiPiero V, Wise RJ, Brooks DJ, Dolan RJ, Frackowiak RS. The functional anatomy of motor recovery after stroke in humans: a study with positron emission tomography. *Ann Neurol* 1991;29:63-71.
6. Macdonell RA, Jackson GD, Curatolo JM, et al. Motor cortex localization using functional MRI and transcranial magnetic stimulation. *Neurology* 1999;53:1462-1467.
7. Cramer SC. Changes in motor system function and recovery after stroke. *Restor Neurol Neurosci* 2004;22:231-238.
8. Basser PJ, Pierpaoli C. Microstructural and physiological features of tissues elucidated by quantitative-diffusion-tensor MRI. *J Magn Reson B* 1996;111:209-219.
9. Mori S, Crain BJ, Chacko VP, van Zijl PC. Three-dimensional tracking of axonal projections in the brain by magnetic resonance imaging. *Ann Neurol* 1999;45:265-269.
10. Ronen I, Ugurbil K, Kim DS. How does DWI correlate with white matter structures? *Magn Reson Med* 2005;54:317-323.
11. Conturo TE, Lori NF, Cull TS, et al. Tracking neuronal fiber pathways in the living human brain. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1999;96:10422-10427.
12. Chenevert TL, Brunberg JA, Pipe JG. Anisotropic diffusion in human white matter: demonstration with MR techniques in vivo. *Radiology* 1990;177:401-405.
13. Pierpaoli C, Jezzard P, Basser PJ, Barnett A, Di Chiro G. Diffusion tensor MR imaging of the human brain. *Radiology* 1996;201:637-648.
14. Ciccarelli O, Parker GJ, Toosy AT, et al. From diffusion tractography to quantitative white matter tract measures: a reproducibility study. *Neuroimage* 2003;18:348-359.
15. Stieltjes B, Kaufmann WE, van Zijl PC, et al. Diffusion tensor imaging and axonal tracking in the human brainstem. *Neuroimage* 2001;14:723-735.
16. Kunitatsu A, Aoki S, Masutani Y, et al. The optimal trackability threshold of fractional anisotropy for diffusion tensor tractography of the corticospinal tract. *Magn Reson Med Sci* 2004;3:11-17.
17. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97-113.
18. Jiang H, van Zijl PC, Kim J, Pearlson GD, Mori S. DtiStudio: resource program for diffusion tensor computation and fiber bundle tracking. *Comput Methods Programs Biomed* 2006;81:106-116.
19. Parker GJ, Wheeler-Kingshott CA, Barker GJ. Estimating distributed anatomical connectivity using fast marching methods and diffusion tensor imaging. *IEEE Trans Med Imaging* 2002;21:505-512.
20. Virda A, Barnett A, Pierpaoli C. Visualizing and characterizing white matter fiber structure and architecture in the human pyramidal tract using diffusion tensor MRI. *Magn Reson Imaging* 1999;17:1121-1133.
21. Toosy AT, Werring DJ, Orrell RW, et al. Diffusion tensor imaging detects corticospinal tract involvement at multiple levels in amyotrophic lateral sclerosis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2003;74:1250-1257.
22. Ahn YH, Kim SH, Han BS, et al. Focal lesions of the corticospinal tract demonstrated by diffusion tensor imaging in patients with diffuse axonal injury. *NeuroRehabilitation* 2006;21:239-243.
23. Wong JC, Concha L, Beaulieu C, Johnston W, Allen PS, Kalra S. Spatial profiling of the corticospinal tract in amyotrophic lateral sclerosis using diffusion tensor imaging. *J Neuroimaging* 2007;17:234-240.
24. Guye M, Parker GJ, Symms M, et al. Combined functional MRI and tractography to demonstrate the connectivity of the human primary motor cortex in vivo. *Neuroimage* 2003;19:1349-1360.
25. Toosy AT, Ciccarelli O, Parker GJ, Wheeler-Kingshott CA, Miller DH, Thompson AJ. Characterizing function-structure relationships in the human visual system with functional MRI and diffusion tensor imaging. *Neuroimage* 2004;21:1452-1463.
26. Upadhyay J, Ducros M, Knaus TA, et al. Function and Connectivity in Human Primary Auditory Cortex: A Combined fMRI and DTI Study at 3 Tesla. *Cereb Cortex* 2007;17:2420-2432.
27. Takahashi E, Ohki K, Kim DS. Diffusion tensor studies dissociated two fronto-temporal pathways in the human memory system. *Neuroimage* 2007;34:827-838.
28. Lazar M, Weinstein DM, Tsuruda JS, et al. White matter tractography using diffusion tensor deflection. *Hum Brain Mapp* 2003;18:306-321.
29. Hendler T, Pianka P, Sigal M, et al. Delineating gray and white matter involvement in brain lesions: three-dimensional alignment of functional magnetic resonance and diffusion-tensor imaging. *J Neurosurg* 2003;99:1018-1027.
30. Cherubini A, Luccichenti G, Peran P, et al. Multimodal fMRI tractography in normal subjects and in clinically recovered traumatic brain injury patients. *Neuroimage* 2007;34:1331-1341.
31. Ino T, Nakai R, Azuma T, Yamamoto T, Tsutsumi S, Fukuyama H. Somatotopy of corticospinal tract in the internal capsule shown by functional MRI and diffusion tensor images. *Neuroreport* 2007;18:665-668.

Quantitative Evaluation of the Corticospinal Tract Segmented by Using Co-registered Functional MRI and Diffusion Tensor Tractography

Sung Ho Jang¹, Ji Heon Hong², Woo Mok Byun³, Chang Ho Hwang⁴, Dong Seok Yang⁴

¹Department of Physical Medicine and Rehabilitation, College of Medicine, Yeungnam University

²Department of Rehabilitation Science, Taegu University

³Department of Diagnostic Radiology, College of Medicine, Yeungnam University

⁴Department of Physical Medicine and Rehabilitation Medicine, Ulsan University Hospital
College of Medicine, Ulsan University

Purpose : The purpose of this study was to investigate the quantitative evaluation of the corticospinal tract (CST) at the multiple levels by using functional MRI (fMRI) co-registered to diffusion tensor tractography (DTT).

Materials and Methods : Ten normal subjects without any history of neurological disorder participated in this study. fMRI was performed at 1.5 T MR scanner using hand grasp-release movement paradigm. DTT was performed by using DtiStudio on the basis of fiber assignment continuous tracking algorithm (FACT). The seed region of interest (ROI) was drawn in the area of maximum fMRI activation during the motor task of hand grasp-release movement on a 2-D fractional anisotropy (FA) color map, and the target ROI was drawn in the corticospinal portion of anterior lower pons. We have drawn five ROIs for the measurement of FA and apparent diffusion coefficient (ADC) along the corona radiata (CR) down to the medulla.

Results : The contralateral primary sensorimotor cortex (SM1) was mainly found to be activated in all subjects. DTT showed that tracts originated from SM1 and ran to the medulla along the known pathway of the CST. In all subjects, FA values of the CST were higher at the level of the midbrain and posterior limb of internal capsule (PLIC) than the level of others.

Conclusion : Our study showed that co-registered fMRI and DTT has elucidated the state of CST on 3-D and analyzed the quantitative values of FA and ADC at the multiple levels. We conclude that co-registered fMRI and DTT may be applied as a useful tool for clarifying and investigating the state of CST in the patients with brain injury.

Index words : Functional MRI
Diffusion tensor tractography
Corticospinal tract

Address reprint requests to : Dong Seok Yang, M.D., Department of Physical Medicine and Rehabilitation Medicine, Ulsan University Hospital College of Medicine, Ulsan University, 290-3 Jeonha-dong, Dong-gu, Ulsan 682-714, Korea.
Tel. 82-52-250-7210 Fax. 82-52-250-7211 E-mail: fnew1@hanmail.net