

기능적 자기공명영상 사용유무에 따른 확산텐서영상 분석의 유효성 평가

이동훈^{1,2}, 박지원³, 홍철표¹

¹한국표준과학연구원 미래융합기술본부 의료융합측정표준센터, ²연세대학교 보건과학대학 방사선학과, ³대구가톨릭대학교 보건과학대학 물리치료학과

Evaluation of Quantitative Effectiveness of MR-DTI Analysis with and without Functional MRI

Dong-Hoon Lee^{1,2}, Ji-Won Park³, Cheol-Pyo Hong¹

¹Center for Medical Metrology, Division of Convergence Technology, Korea Research Institute of Standards and Science (KRIS) / Department of Radiological Science, College of Health Science, Yonsei University, ²Department of Physical Therapy, College of Medical Science, Catholic University of Daegu, ³Center for Medical Metrology, Division of Convergence Technology, Korea Research Institute of Standards and Science (KRIS)

Purpose: This study was conducted in order to evaluate the quantitative effectiveness of region of interest (ROI) setting in MR-DTI analysis with and without fMRI activation results.

Methods: Ten right-handed normal volunteers participated in this study. DTI and fMRI datasets for each subject were obtained using a 1.5T MRI system. For neural fiber tracking, ROIs were drawn using two methods: The drawing points were located in the fMRI activation areas or areas randomly selected by users. In this study, the neural fiber tract targeted the corticospinal tract (CST). Quantitative analyses were performed and compared.

The pixel numbers passing through the fiber tract in the individual brain volume were counted. The ratios between the ROI pixel numbers and the extracted fiber pixel numbers, and the ratios between the fiber pixel numbers and the whole-brain pixel numbers were also calculated.

Results: According to our results, extracted CST fiber tract in which the ROI was drawn with fMRI activation areas showed higher distribution than drawing the ROI by users' hands. In addition, the quantitatively measured values represented higher pixel distribution: The counted average pixel numbers were 4553.8 and 1943.3. The average ratios of the ROI areas were 33.87 and 22.52. The average percentages of the individual whole-brain volume numbers were 2.06 and 0.87.

Conclusion: Results of this study appear to indicate that use of this method can allow for more objectives and significant for study of the recovery of neural fiber mechanisms and brain rehabilitation.

Key Words: Quantitative effectiveness, Functional MRI, Diffusion tensor tractography

1. 서론

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI) 시스템은

이용한 인체 대뇌피질 영역에서의 기능과 이와 대응하는 신경섬유로의 위치확인 및 가시화(visualization) 방법은 재활 치료를 통한 신경기전의 회복연구를 위하여 많이 사용되고 있다.¹⁻⁵ 특히, 자기공명영상 기법 중에서 기능적 자기공명영상(functional MRI, fMRI)과 자기공명 확산텐서영상(Diffusion Tensor MRI, DT-MRI) 기법을 이용한 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있다.¹⁻¹⁰

기능적 자기공명영상은 뇌 신경의 활동 정도를 영상화를 위한 신호로서 사용하며 이에 대한 신호를 측정하기 위해서

Received Sep 5, 2013 Revised Oct 2, 2013

Accepted Oct 4, 2013

Corresponding author Cheol-Pyo Hong, dosagehong@kriss.re.kr

Copyright © 2013 The Korea Society of Physical Therapy

This is an Open Access article distribute 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.

정맥혈 내의 탈산소헤모글로빈(deoxyhemoglobin, deoxyHb) 수치의 변화 정도를 이용하는 BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) 기법을 사용한다.^{3,7,11-12} 이는 뇌 신경의 활동성이 증가되는 부분에 대하여 정맥혈 내의 산소 분압이 증가하고 탈산소헤모글로빈의 농도는 감소하는 원리를 기반으로 하며 이를 통해 결과적으로 T2 강조영상에서 증가되는 신호를 나타내게 된다.⁷ 신호 측정을 위하여 운동, 시각, 청각, 체성 감각 등의 활성화를 위한 과제(task)를 사용하며 확인하고자 하는 부분의 뇌 기능의 유도하고 과제와 유기성을 갖는 부분에 대해서 통계적으로 유의한 신호변화를 찾아서 활성 영역을 지도화 한다.

자기공명 확산텐서영상은 인체 두부 내의 백질(white matter) 조직 내부에서의 물 분자의 확산 정도를 이용하여 영상화 하는 방법이다.^{1,5,8-9,13-14} 백질 내부의 물 분자는 신경 섬유가 배열된 방향을 바탕으로 비등방성 확산(anisotropic diffusion)을 하며 이를 영상화에 이용한다. 확산텐서영상은 대뇌의 신경섬유로를 3차원으로 시각화하는 장점이 있으며 이를 통하여 임상적으로 신경섬유로의 위치 정보 및 이상 유무를 파악할 수 있다.¹³⁻¹⁵ 자기공명 확산텐서 영상을 이용하여 신경섬유로를 추출하는 경우에는 해당 신경섬유로가 통과하는 해부학적 위치에 대한 사용자의 관심영역(Region of Interest, ROI) 설정이 필요하다.^{5,13-16} 이때 하나의 부분에 대한 관심영역 설정으로도 신경섬유로의 추출이 가능하지만 더욱 정확한 신경섬유로 추출을 위하여 둘 이상의 관심영역을 설정하여 해당 부분을 동시에 통과하는 신경섬유로를 추출 하는 방법을 사용한다.

일반적으로 많은 연구들에 있어서 신경섬유로가 기시하는 부분에 대해서 시작 관심영역을 설정하고 해당 신경섬유로가 통과하는 부분 중에서 해부학적인 랜드마크(landmark)가 되는 지점에 목표 관심영역을 설정하는 방법을 사용하고 있다.^{5,15,17-19} 신경섬유로의 기시부분에 대한 시작 관심영역 설정은 대뇌 피질 부분에 대해서 사용자가 직접 임의로 영역을 정의하는 방법을 많이 사용했으며, 근래의 많은 연구들에 있어서는 기능적 자기공명영상의 결과를 이용하여 관심영역을 설정하는 방법을 사용하고 있다.²⁰⁻²³ 하지만 두 가지 기법을 통한 영상획득과 융합적인 분석은 영상획득 시간과 과정, 적용방법과 분석의 복잡함 등으로 인하여 임상적인 부분에 있어서 제약이 발생하며 이런 이유들로 인하여 사용빈도가 무작위적이다. 자기공명 확산텐서영상을 통한 신경섬유로 추출에서 기능적 자기공명영상 기법의 결과를 융합하여 사용하는 경우가 더욱 정확도가 높은 결과를 획득할 수 있다고 하

지만 두 가지 기법을 동시에 적용하는 경우에서의 정성적, 정량적인 결과의 유의성 및 신뢰성에 대한 체계적인 접근과 분석이 미비한 실정이므로 이에 대한 접근방법의 정확성 및 신뢰성 주장이 모호하다.

따라서 본 연구에서는 자기공명 확산텐서영상을 이용한 대뇌의 신경섬유로 추출에서 관심영역 설정을 기능적 자기공명영상을 이용한 경우와 개인이 임의로 설정한 결과에 대한 비교연구를 수행하였다. 또한, 각각의 결과들에 대하여 정량적인 분석을 수행하여 사용된 방법의 유의성을 제공하고자 하였으며 향후 인체 내 신경섬유로의 이상유무 진단 및 치료를 통한 재활에 있어서 정확성을 추구하기 위한 접근 방법에 대해서 정량적인 정보를 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 실험은 과거 병력상 신경학적 증상이나 질병이 없고 운동 수행과 관련된 인지적 이상 소견이 없는 정상인 10명 (남자 7명, 평균나이 35.7세, 오른손잡이)을 대상으로 수행하였다. 모든 실험 대상자들은 실험에 앞서 본 연구의 목적 및 방법에 대하여 상세하게 설명을 들었으며 개인들의 자발적 동의 후에 실험에 참가하였다.

2. 데이터 획득

기능적 자기공명영상과 자기공명 확산텐서영상 획득을 위하여 1.5 T 자기공명영상 시스템(Gyrosan Intera, Philips Healthcare, Best, The Netherlands)과 6채널 위상배열 두부 코일을 이용하였다. 영상 데이터 획득을 위한 자기공명영상 펄스열은 single-shot spin echo echo-planar imaging (EPI) 펄스열을 이용하였으며 각각의 데이터 획득을 위한 영상화 파라미터는 다음과 같이 사용되었다. 기능적 자기공명영상: 반복시간(Time of Repetition, TR) = 2,000 ms, 에코 시간 (Time of Echo, TE) = 60ms, 영상 매트릭스 = 64 × 64, 촬영영역 (Field of View, FOV) = 210 mm², 영상 단면두께 = 5 mm, SENSE 감소인자 = 2, 자기공명 확산텐서영상: 반복 시간 = 10,726 ms, 에코시간 = 76 ms, 영상매트릭스 = 128 × 128, 촬영영역 = 221 mm², 영상 단면두께 = 2.3 mm, SENSE 감소 인자 = 2, 확산강조 경사자장 방향수 = 32, b-value = 1,000 s/mm². 기능적 자기공명영상 획득을 위하여 실험 대상 자들은 바로 누운 자세로 1 Hz 주기성을 갖도록 손가락을 구부리게 하는 운동을 하였으며 휴식기와 운동기를 각 21초씩 3번 반복하

도록 하였다.

3. 데이터 처리 및 분석

본 실험을 통해 획득된 기능적 자기공명영상 데이터는 MATLAB (The Mathworks Inc., USA) 환경을 기반으로 사용 되는 SPM2 (Statistical Parametric Mapping 2, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) 프로그램을 이용하였다. 모든 기능적 자기공명 영상은 분석을 위한 전 처리 과정으로서 움직임 보정 과정을 수행하였다. 이후에 기능적 자기공명영상의 분석결과를 자기공명 확산텐서 영상분석 시의 관심영역으로 설정하기 위하여 자기공명 확산강조 경사 장상이 사용되지 않은 확산텐서 영상($b=0$)을 기준으로 기능적 자기공명영상들을 상관정렬 (co-registration) 하였다.^{2,7} 상관정렬된 영상은 8 mm의 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)을 갖는 가우시안 커널(Gaussian Kernel)을 사용하여 각 영상들에 대하여 평활화(smoothing)를 수행하였다.² 휴식기와 운동기 사이의 조건에 해당하는 영상들의 감산과정을 수행하여 BOLD신호의 변화를 획득하였으며 조건간의 비교를 위하여 혈액학 반응함수(Hemodynamic Response Function, HRF)에 대한 선형모델을 사용하였으며, 결과분석에 대한 높이역치(height threshold) 설정은 p 값이 0.05보다 낮은 수준에서 수행하였다.²

자기공명 확산텐서영상 데이터는 Linux 환경을 기반으로 사용되는 FMRIB 소프트웨어 라이브러리4.1 (FSL, Analysis Group, FMRIB, Oxford, UK)을 사용하였다. 자기공명 확산텐서영상 데이터를 이용하여 신경섬유로 분석에 앞서 와전류(eddy current) 및 촬영 중 두부의 움직임으로 인한 영향을 보정하기 위하여 각 개인의 $b=0$ 영상을 기준으로 각 방향별 확산텐서영상들을 상관정렬 하였다. 이때 각 축 방향별로 이동(translation), 회전(rotation), 스케일링(scaling), 전단(shearing)의 총 12개의 파라미터를 갖는 아핀변환(affine transformation)을 사용하였다. 신경섬유로 추출을 위한 조건으로는 스트림라인 샘플 (streamline sample) = 5000, 스텝 길이(step length) = 0.5 mm, 곡률(curvature) = 0.2를 적용하였다. 본 실험을 위하여 재구성된 신경섬유로는 피질척수로(Corticospinal Tract, CST)를 기준으로 하였으며 개인별 데이터 분석에서의 관심영역의 시작 포인트 설정은 두 가지로 구분하여 수행 하였다. 첫 번째의 경우 시작 포인트를 분석된 기능적 자기 공명영상의 결과를 이용하여 활성화 된 부위를 관심영역으로 설정하였으며, 두 번째의 경우 시작 포인트를 임의로 운동피질 영역

에서 손 운동과 관련된 부위를 지정하여 설정하였다. 두 가지 경우 모두 목표 포인트 설정은 하부 뇌교(pons)의 피질척수수가 위치하는 부분을 설정하였으며 개인별로 두 가지의 관심영역을 모두 통과하는 뇌 백질 섬유만 추출하여 신경섬유로를 영상화 하였다. 하부 뇌교의 관심영역 지정은 2차원 비등방성 색지도(Fractional Anisotropy color-map)를 이용하였으며 해당영상은 각 축 방향에 대하여 적색(X축 성분, 좌-우), 녹색(Y축 성분, 전-후), 청색(Z축 성분, 상-하)으로 표현된다.¹

추출된 개인별 신경섬유로를 통한 정량적인 결과분석은 세 가지의 경우로 구분하여 수행하였다. 첫 번째는 두 가지의 관심영역 설정으로 인하여 추출된 피질척수수가 통과하는 영상의 픽셀(pixel) 개수를 표현하는 방법을 사용하였다. 임의로 운동피질 영역을 설정하는 경우에는 각기 다른 개인 분석자 10명이 해당 과정을 수행하여 이에 대한 주관적인 영향을 최소화 하였으며, 이 경우에 대한 결과값은 10번의 결과에 대한 평균값과 표준편차를 통하여 나타내었다. 두 번째 정량적인 분석의 경우는 첫 번째 경우에서 획득한 픽셀 개수를 (1) 기능적 자기공명영상의 활성화 영역의 픽셀개수 (2) 개인이 임의로 지정한 손 운동 영역에 대한 픽셀개수로 나누어서 두 가지의 관심영역 설정에서 발생하는 면적차이를 고려하여 비율로 표현하는 방법을 사용하였다. 세 번째는 첫 번째 경우에서 획득한 픽셀 개수를 개인의 전체 두부 볼륨에 대한 픽셀 개수에 대한 비율로 표현하는 방법을 사용하였다.

III. 결과

자기공명 확산텐서영상을 통하여 피질척수로를 추출한 결과에서 개인이 임의로 설정한 관심영역을 이용한 결과보다 기능적 자기공명영상에서의 손 운동 활성화 영역을 이용한 경우에서의 추출 결과가 시각적으로 조금 높게 나타났다 (Figure 1). 또한 정량적인 평가에 있어서도 관심영역 설정을 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용한 경우가 높은 값을 나타내었다. 모든 대상자에 대하여 개인별로 추출된 피질척수수가 통과하는 픽셀의 개수를 정량화한 결과를 그래프로 나타내었다(Figure 2). 개인별 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용하여 피질척수로를 추출한 결과는 최소 1849 ~ 최대 6994 (평균: 4553.8)의 픽셀 개수를 나타내었으며, 개인이 임의로 관심영역을 설정한 경우에는 최소 1250 ~ 최대 4335 (평균: 1943.3)의 픽셀 개수를 나타내었다. 두 가지 관심영역의 설정방법에 있어서 발생되

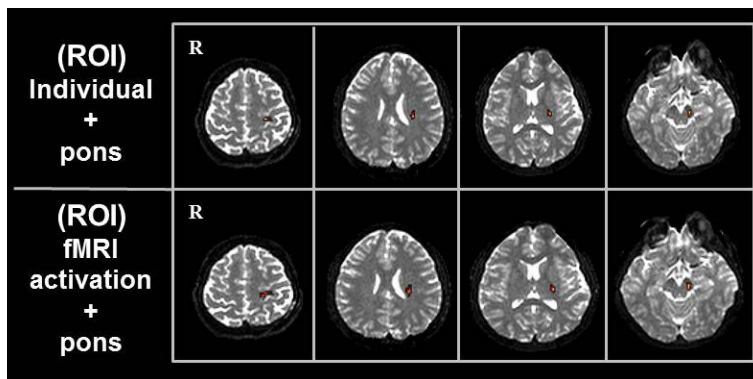


Figure1. The overlaid images for neural fiber tracts named as corticospinal tract (CST) related with hand movement. The extracted fiber tracts in the upper row are reconstructed using randomly selected user-dependent ROI setting, and using fMRI activation areas for ROI setting in the lower row. The fiber tracts are overlaid on the non diffusion-weighted image.

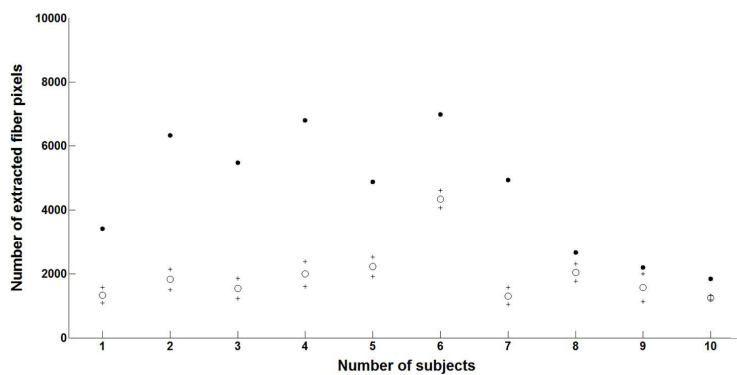


Figure2. Counted pixel numbers for extracted fiber tract in the whole-brain. The black filled circle represented the pixel numbers for fiber tracts that reconstructed using fMRI activation areas. The unfilled circle represented the average pixel numbers that reconstructed using randomly selected ROI setting by users. The cross represented the standard deviation of pixel numbers selected by users.

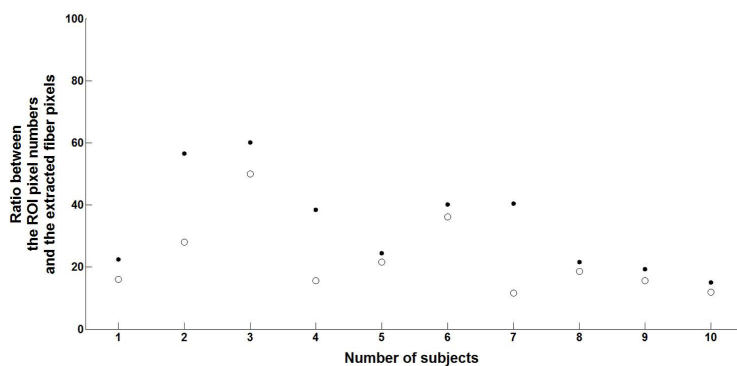


Figure3. Calculated ratio between the ROI pixel numbers and the extracted fiber tract pixels. The black filled circle represented the ratio for using fMRI activation areas. The unfilled circle represented the ratio for using randomly selected ROI setting by users.

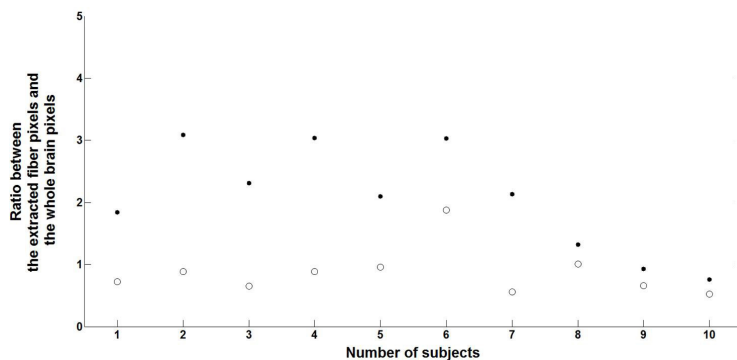


Figure4. Calculated ratio between the whole-brain pixel numbers and the extracted fiber tract pixels. The black filled circle represented the ratio for using activation areas. The unfilled circle represented the ratio for using randomly selected ROI setting by users.

는 면적차이에 대한 비율로 표현한 결과에서도 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용한 방법이 높은 비율로 나타났다(Figure 3). 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용한 결과는 최소 15.03~최대 60.14 (평균: 33.87)의 비율을 나타내었으며, 개인이 임의로 관심영역을 설정한 경우에는 최소 11.56~최대 49.97 (평균: 22.52)의 비율을 나타냈다. 전체 두부에 대한 볼륨의 픽셀개수를 고려하여 나타낸 결과에서도 마찬가지로 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용한 방법이 높은 결과값을 나타내었다(Figure 4). 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 이용한 결과는 최소 0.76~최대 3.09 (평균: 2.06)의 비율을 나타내었으며, 개인이 임의로 관심영역을 설정한 경우에는 최소 0.52~최대 1.88 (평균: 0.87)의 비율을 나타냈다.

IV. 고찰

자기공명 확산텐서영상을 이용하여 환자의 뇌 신경기전 회복 메커니즘 및 예후관찰 등의 연구를 진행함에 있어서 결과의 유의성을 부여하기 위한 중요한 요소 중 하나는 신경섬유로 추출을 위한 관심영역을 어떻게 설정하는가에 대한 것이다. 현재 자기공명 확산텐서영상 기법을 적용하여 진행되는 많은 연구에서 관심영역 설정을 위하여 기능적 자기공명영상 기법을 같이 이용하는 경우가 많다. 기능적 자기공명영상 기법은 뇌의 활성화도에 따른 뇌 혈류량의 미세한 변화를 감지하는 시공간적인 해상도가 우수한 기법이며 이를 이용하여 손상 전후의 회복기전, 인지심리 및 운동학습에 대한 대뇌 활성 영역을 연구하는데 많이 사용된다.^{2,3,7,11} 이를 통한 기능적 자기공명영상의 결과를 반영하여 자기공명 확산텐서영상에서의 신경섬유로 추출을 위한 관심영역 설정을 위한 도구로서 사용을 하게 된다.²⁰⁻²³ 하지만 기능적 자기공명영상 획득에 대한 추가적인 시간적인 소모가 발생하며 이에 따르는 환자의 움직임 등으로 인해서 획득되어지는 자기공명영상에 왜곡이 발생할 가능성이 있다. 또한 기능적 자기공명영상 획득을 위하여 일련의 운동과정이 반드시 필요하며 이를 숙지하고 반복적으로 행하여야 한다는 불편함도 있다. 따라서 단일 연구로서의 접근방법, 즉 기능적 자기공명영상 획득을 통한 대뇌 피질의 활성화 영역을 확인하는 연구와 자기공명 확산텐서영상을 통한 신경섬유로 추적에 관한 연구를 독립적으로 시행한다. 이런 경우에는 자기공명 확산텐서영상의 분석에서 관심영역의 설정시에 대뇌 피질 부분에 사용자가 임의로 영역을 지정하여 추출된 신경섬유

로의 결과와 기능적 자기공명영상을 통한 해당 피질 부분의 활성화 정도를 서로 독립적으로 확인 및 매칭하여 신경기전에 대한 추적연구 및 예후관찰 등을 실시한다.

하지만 현재의 많은 연구들에 있어서 자기공명 확산텐서 영상만을 이용하여 신경섬유로를 추출하는 것은 관심영역의 설정에 대하여 사용자 및 분석자의 임의성이 포함되며 각기 다른 형태의 관심영역 설정으로 인하여 추출된 결과의 정성적이며 정량적인 재현성이 부여되기는 어렵다. 따라서 정확한 연구를 위하여 시간적인 부분을 감안하면서도라도 기능적 자기공명영상의 결과를 결합하여 신경섬유로를 추출하는 방법을 사용하고 있다. 그럼에도 불구하고, 자기공명 확산텐서영상을 이용한 신경섬유로 추출에 있어서 기능적 자기공명영상 결과를 융합하여 사용하는 방법과 그렇지 않은 경우에 대해서는 어느 한쪽의 정확성과 신뢰도를 정량적으로 부여하기는 어렵기 때문에 사용자의 주관적인 판단에 의해서 관심영역이 설정되는 경우도 상당히 많다.

본 연구에서는 자기공명 확산텐서영상을 이용한 대뇌 신경섬유로 추출에서 관심영역 설정을 기능적 자기공명영상을 이용한 경우와 개인이 임의로 설정한 경우에 대한 결과를 정량적인 비교분석을 통해서 정확성 및 융합적인 사용방법에 유의성을 제공하고자 하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 신경섬유로 추출에서 기능적 자기공명영상의 활성화 영역을 관심영역으로 설정하는 경우가 정량적으로 높은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 많은 연구에서 높은 정확도의 연구결과를 추구하기 위하여 기능적 자기공명영상 기법을 사용하던 결과에 본 실험을 통한 정량적인 결과를 보충할 수 있게 됨으로써 해당 방법들에 대한 정확성과 유의성을 뒷받침할 수 있다고 사료된다. 또한 본 연구결과는 앞으로 대뇌 신경의 회복기전 및 재활치료를 위한 평가와 추적연구를 진행함에 있어서 더욱 객관적이고 유의성이 있는 결과를 도출할 수 있는 방법과 근거자료가 될 것으로 생각된다.

추가적으로, 물리치료 분야에서도 운동과 치료를 통한 환자의 회복을 위하여 치료계획 수립 단계에서부터 실제 치료와 추적검사에 이르기까지 자기공명영상 시스템을 이용하여 관찰하는 경우가 많다. 특히 물리치료를 통한 운동기능의 회복과 이를 반영하는 대뇌 신경섬유로의 가소성 관찰 등을 위해서 기능적 자기공명영상과 자기공명 확산텐서영상을 많이 이용한다. 이런 경우에 있어서도 본 연구의 접근 방법과 결과는 정확한 정보를 제공하기 위한 신뢰성을 부여하는 기초연구가 될 수 있으며 환자의 물리치료적

영향과 검증에 제공하는 측면에서도 본 연구는 오류를 최소화 할 수 있는 접근방법의 좋은 근거를 마련해 줄 수 있다.

그러나 본 연구는 기능적 자기공명영상의 결과 추출을 위하여 인체의 운동 행위 중에서 손 운동만을 학습하여 결과를 도출하였으며 이를 이용하여 대뇌 신경섬유로 중에서 피질척수로의 추출을 위한 관심영역 설정만을 시행하였다는 제한점이 있다. 앞으로 피질척수로와 달리 대뇌에서 다른 방향성을 갖는 다양한 종류의 신경섬유로의 추출을 통한 비교연구를 수행하여 정량적인 평가를 도출하는데 있어서 더욱 객관적인 자료를 고려해야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Jang SH, Hong JH, Byun WM, et al, Quantitative evaluation of the corticospinal tract segmented by co-registered functional MRI and diffusion tensor tractography. *J Korean Soc Magn Reson Med*, 2009;13(1):40-6.
- Kim CS, KIM JH, Park MK, et al, Comparison of cortical activation between concentric and eccentric exercise: A pilot fMRI study. *J Kor Soc Phys Ther*, 2010;22(2):25-30.
- Park MC, Bae SS, Lee MY, Change of activation of the supplementary motor area in motor learning: an fMRI case study. *J Kor Soc Phys Ther*, 2011;23(2):85-90.
- Ryoo JW, Cho JM, Choi HC, et al, Functional MRI of language: Difference of its activated areas and lateralization according to the input modality. *J Korean Soc Magn Reson Med*, 2011;15(2):130-8.
- Kwon HG, Hong JH, Kwon YH, et al, Neural tract injuries by penetration of foreign body: A diffusion tensor tractography study. *J Kor Soc Phys Ther*, 2013;25(3):132-5.
- Kim GW, Song JK, Jeong GW, Neuro-anatomical evaluation of human suitability for rural and urban environment by using fMRI. *Korean J Med Phys*, 2011;22(1):18-27.
- Kim YH, Usefulness of functional MRI for the study of brain function. *J Kor Brain Soc*, 2001;1(1):65-76.
- Jun WS, Kim JH, Hong SW, et al, Anisotropy measurement and fiber tracking of the white matter by using diffusion tensor MR imaging: Influence of the number of diffusion-sensitizing gradient direction. *J Korean Soc Magn Reson Med*, 2006;10(1):1-7.
- Kim IS, Chang YM, Kim JH, et al, Image reconstruction of eigenvalue of diffusion principal axis using diffusion tensor imaging. *J Korean Soc Magn Reson Med*, 2007;11(2):110-8.
- Choi JH, Kwon YH, Medial reorganization of primary motor cortex in patient with traumatic brain injury: A fmri case study. *J Kor Soc Phys Ther*, 2005;17(3):421-8.
- Le Bihan D, Karni A, Applications of magnetic resonance imaging to the study of human brain function. *Curr Opin Neurobiol*, 1995;5(2):231-7.
- Ogawa S, Menon RS, Tank DW, et al, Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. A comparison of signal characteristics with a biophysical model. *Biophys J*, 1993;64(3):803-8.
- 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(18):10422-7.
- Pierpaoli C, Jezzard P, Basser PJ, et al, Diffusion tensor MR imaging of the human brain. *Radiology*, 1996;201(3):637-48.
- Mori S, Crain BJ, Chacko VP, et al, Three-dimensional tracking of axonal projections in the brain by magnetic resonance imaging. *Ann Neurol*, 1999;45(2):265-9.
- Jiang H, van Zijl PC, Kim J, et al, DtiStudio: resource program for diffusion tensor computation and fiber bundle tracking. *Comput Methods Programs Biomed*, 2006;81(2):106-16.
- Yeo SS, Seo JP, Kwon YH et al, Precommissural fornix in the human brain: a diffusion tensor tractography study. *Yonsei Med J*, 2013;54(2):315-20.
- Hong JH, Jang SH, Kim OL et al, Neuronal loss in the medial cholinergic pathway from the nucleus basalis of meynert in patients with traumatic axonal injury: a preliminary diffusion tensor imaging study. *J Head Trauma Rehabil*, 2012;27(3):172-6.
- Jang SH, Kim SH, Kim OL, Fornix injury in a patient with diffuse axonal injury. *Arch Neurol*, 2009;66(11):1424-5.
- Staempfli P, Reischauer C, Jaermann T, et al, Combining fMRI and DTI: A framework for exploring the limits of fMRI-guided DTI fiber tracking and for verifying DTI-based fiber tractography results. *NeuroImage*, 2008;39(1):119-26.
- Ke M, Shen H, Fan J, et al, Combining Resting-state fMRI and DTI Analysis for Early-onset Schizophrenia. *Int J Comput Int Sys*, 2009;2(4):375-85.
- Seghier ML, Lazeyras F, Zimine S, et al, Combination of event-related fMRI and diffusion tensor imaging in an infant with perinatal stroke. *Neuroimage*, 2004;21(1):463-72.
- Dijkhuizen RM, van der Marel K, Otte WM, et al, Functional MRI and Diffusion Tensor Imaging of Brain Reorganization After Experimental Stroke. *Transl Stroke Res*, 2012;3(1):36-43.