

---

# 운동 표상과 관련된 뇌 메커니즘을 알아보기 위한 VR 시스템 개발 및 이를 이용한 fMRI 연구: 예비 실험

## Development of motor representation brain mechanism VR system using fMRI study: A Pilot Study

이원호, Wonho Lee\*, 구정훈, Jeonghun Ku\*\*\*\*, 조상우, SangWoo Cho\*\*, 이형래, HyeongRae Lee\*\*, 한기완, KiWan Han\*\*, 박진식, JinSick Park\*\*, 김재진, JaeJin Kim\*\*\*\*, 김인영, In Young Kim\*\*, 김선일, Sun I. Kim\*\*

---

**요약** 본 연구는 운동 표상에 관한 뇌 메커니즘의 이해를 위해 fMRI를 이용한 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템의 검증에 대해 예비 실험을 시행하였다. fMRI task는 visual feedback을 제공하는 task와 차단하는 task 두 가지의 task로 구성되었다. 실험 결과 visual feedback이 제공되었을 때는 left superior orbital gyrus, bilateral precentral gyrus, left superior occipital gyrus, left supplementary motor area, right thalamus, right postcentral gyrus 그리고 right superior parietal lobule 같은 영역들이 활성화 되었다. Visual feedback이 차단되었을 때는 left precuneus, right middle temporal gyrus, bilateral supplementary motor area, right anterior cingulate cortex, left inferior temporal gyrus, left insula lobe, right superior parietal lobule, bilateral postcentral gyrus 그리고 left precentral gyrus 같은 영역들이 활성화 되었다. 개발된 시스템을 통해서 visual feedback이 차단되었을 경우 운동 표상에 관한 뇌 메커니즘을 알아 볼 수 있었다.

**Abstract** In this study, we developed motor representation brain mechanism system using fMRI and pilot study is performed. fMRI task were composed two tasks, which provided visual feedback and hid visual feedback. Left superior orbital gyrus, bilateral precentral gyrus, left superior occipital gyrus, left supplementary motor area, right thalamus, right postcentral gyrus and right superior parietal lobule activated with visual feedback, Left precuneus, right middle temporal gyrus, bilateral supplementary motor area, right anterior cingulate cortex, left inferior temporal gyrus, left insula lobe, right superior parietal lobule, bilateral postcentral gyrus and left precentral gyrus activated without visual feedback. We could found brain mechanism of motor representation using without visual feedback.

**핵심어:** motor representation, visual feedback, fMRI

---

\*주저자 : 한양대학교 의용생체공학과

\*\*공동저자 : 한양대학교 의용생체공학과

\*\*\*공동저자 : 연세대학교 정신건강병원 행동과학 연구실

\*\*\*\*교신저자 : 한양대학교 의용생체공학과 연구교수; e-mail: kujh@bme.hanyang.ac.kr

## 1. 서론

인체는 다양한 감각기능을 이용하여 인체 외부의 환경을 파악하고 아울러 인체 내부의 상태, 즉 감정이나 인지기능을 통합하여 주어진 상태에서 가장 적절한 동작을 예측 및 행동하게 된다[1]. 그러나 외부 환경의 자극이 차단된 상태에서는 정신 내의 관념의 표상을 가지고 적절한 예측하게 된다[2]. 이러한 정신 내의 관념을 운동 표상(motor representation)이라고 한다[3]. 운동 표상은 일상생활에서 우리의 거의 모든 움직임에서 중요한 역할을 한다. 그러나 뇌 병변 환자의 경우 운동 표상에 문제가 생겨 독립적인 일상생활동작 수행능력을 어렵게 하고 나아가서는 가정, 사회 및 직업 생활의 수행에 중요한 장애 요소가 된다[4]. 기존 연구에 따르면 파킨슨병에 의해서 basal ganglia가 손상된 환자나 parietal, premotor cortex같은 영역에 장애가 발생한 환자들에 의해서 이러한 운동 표상을 하는 과정에서 문제가 발생하여 운동감각과 위치감각의 장애가 발생한다고 알려졌다[5,6,7]. 그러나 아직까지 운동 표상과 연관된 여러 영역들이 어떠한 연결성을 가지고 있는지 정확한 메커니즘은 알려지지 않았다[7]. 따라서 운동 표상의 과정에 문제가 생기는 원인을 알기 위해서는 운동 표상과 관련된 뇌 메커니즘을 이해하는 것이 필요하다. 뇌 메커니즘의 이해를 하려면 피험자에게 운동 표상을 유발할 수 있는 실험 환경이 필요하다. 어떠한 자극에 대한 느낌을 인지하는 것은 뇌가 끊임없이 수신하는 감각 입력 사이의 복잡한 대화에 좌우되기 때문에 운동 표상과 관련된 연구를 위해서는 몸의 움직임에 대한 시각적인 feedback을 차단한다거나, 몸의 움직임과 그에 따른 시각적인 정보의 feedback을 다르게 하는 등 뇌에서 감각의 disintegration을 유발하는 환경의 구현이 필요하다[8]. 이를 위해서 가상현실 기술을 이용하여 visual feedback을 차단하였다. 가상현실 기술은 모든 감각기관의 감각정보를 적절히 통제하는 환경을 피험자에게 제공할 수 있는 기술이기 때문에 단순한 감각의 차단과 허용 뿐 아니라, 신체의 움직임으로 인한 정보와 시각적인 정보 조작 등, 감각 정보의 미세한 조절을 통해서 뇌에서 복잡한

disintegration의 유발이 가능한 장점을 지닌다. 또한 3차원적 운동 환경에서의 복잡한 움직임의 데이터화가 가능하고 실시간 피드백 제공이 가능한 장점을 지닌다. 본 연구에서는 가상현실 기술을 이용하여 운동 표상에 관한 뇌 메커니즘의 이해를 위해 fMRI(functional magnetic resonance imaging)를 이용한 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템의 검증을 위해 예비 실험을 시행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 fMRI를 이용한 운동 표상 관련 뇌 메커니즘 측정 시스템 개발

fMRI 환경에서는 강력한 자기장으로 인해 전자기기의 사용에 제약이 있기 때문에 신체의 행동 특성을 측정하기 위해 마커를 이용하여 신체의 움직임을 tracking하는 시스템을 그림 1과 같이 구축하였다. MR room에서 실시간으로 이미지를 측정 및 제공할 수 있는 MR compatible 카메라를 이용해 손에 부착된 마커의 움직임을 측정하여 손의 움직임에 따른 visual feedback을 MR compatible HMD를 통해서 제공하였다.

운동 표상을 유발하는 task는 그림 2와 같이 간단한 직선 움직임을 이용하여 시작과 도착 지점 사이를 왕복하는 내용으로 구성되었는데, Task 상에서의 커서의 움직임은 피험자의 손에 부착된 마커의 움직임과 동기화하였다. Task의 구성은 visual feedback을 실시간으로 제시하여 운동 표상 없이 목표 지점까지 이동하는 task와 시작 위치만 visual feedback으로 제공하고 목표 지점으로 이동하는 동안에는 visual feedback을 차단하여 피험자가 운동 표상을 이용하여 목표 지점까지 이동하는 두 가지의 task로 구성하였다.

### 2.2. 피험자

개발된 시스템의 검증을 위해 실제 MRI 환경에서 정상인 오른손잡이 1명(나이 28)을 대상으로 예비실험을 시행하였

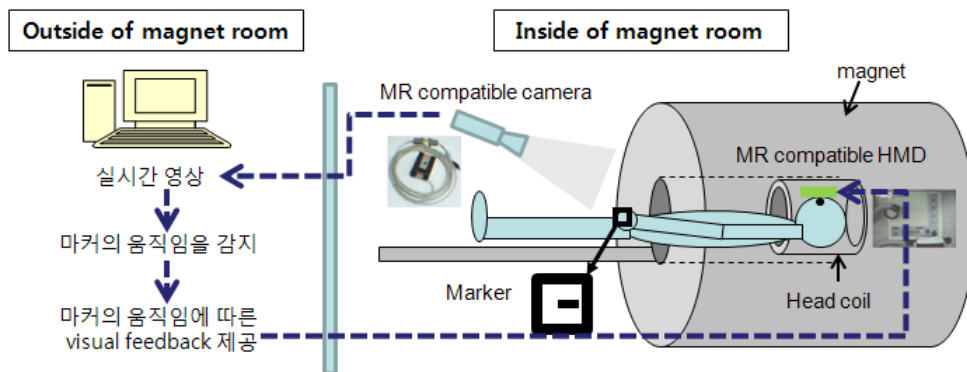


그림 1. 마커인식 기술을 이용한 fMRI 연구 시스템 구성

다.

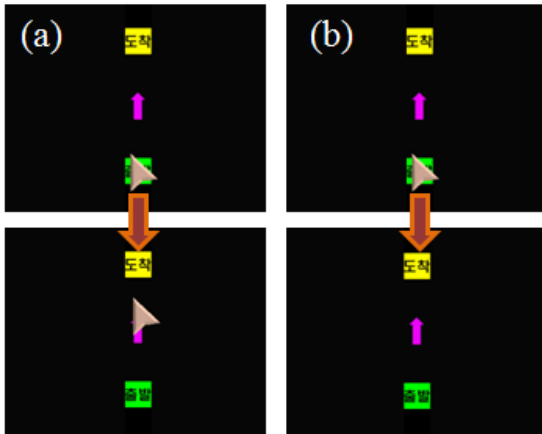


그림 2. 운동 표상을 유발하는 fMRI 실험 task  
(a) visual feedback을 제공하는 task  
(b) visual feedback을 차단하는 task

### 2.3. 데이터 측정

fMRI 촬영은 강남 베드로 병원의 1.5T MRI장비(GE Medical System) 사용하였다. BOLD(blood oxygenation level dependent) 신호는 EPI(echo planar image) sequence (Gradient Echo) 통하여 Axial 방향으로 촬영하였다 (64×64×30 matrix with 3.75×3.75×5-mm spatial resolution, TE: 14.3, TR: 2s, FOV: 240mm, Slice thickness: 5mm, FA=90, # of slices: 30). T1 이미지는 FSPGR(fast spoiled gradient recalled) sequence로 Coronal 방향으로 촬영하였다(256x256x116 matrix with 0.94×0.94×1.50-mm spatial resolution, FOV: 240mm, Thickness: 1.5mm, TR: 8.5s, TE: 1.8s, FA: 12, # of slices: 116). 피험자는 각각 5분 동안 visual feedback이 제공되는 task와 차단되는 task 2가지 task를 수행하였다. Task를 수행하는 동시에 fMRI 측정이 이루어졌다.

### 2.4 데이터 분석

MRI 데이터를 분석하기 위해 AFNI(Analysis of Functional NeuroImages, Ver. 2007\_05\_29\_1644)를 이용하였다. fMRI 신호를 3차원 volume dataset으로 구성하였고, BOLD 신호가 안정되기 전의 처음 5 volume은 제거하였다. 머리의 움직임을 보정해주기 위해 시계열 데이터의 첫 번째 영상을 기준으로 나머지 영상을 정합(registration) 하였다. 튀는 신호는 제거하기 위해 Despike를 이용했고, 피험자마다 다른 fMRI 신호의 baseline을 맞춰주기 위한 시간적 표준화(Temporal Normalization)를 해줬다. Detrend를 이용하여 fMRI 신호의 Linear한 경향을 제거해줬다. 머리의 움직임에 의한 fMRI 신호의 비정상적인 값을 제거해주기 위해서 Low-Pass filter( $0.15(a-1)+0.7(a)+0.15(a+1)$ )를 사용하여 시간적 평활화(Temporal Smoothing)를 하였다. 이미지 데이터를 탈라이라 좌표(Talairach space)로 변환해 주기 위해서 AFNI 소프트웨어에서 같이 제공하는 Montreal Neurological Institute(MNI) N27 template을 사용하여 T1 데이터를 이중선형 보간법(bilinear interpolation)으로 공간적 표준화(Spatial Normalization)를 하였다. EPI 데이터는 표준화(Normalization)한 T1 이미지를 사용하여 2x2x2mm3의 해상도로 이중선형 보간법(bilinear interpolation)으로 공간적 표준화(Spatial Normalization)를 하였다. 공간적 평활화(Spatial Smoothing)는 FWHM(full-width at half maximum)을 8mm로 하여 가우시안 필터(Gaussian filter)를 사용하였다.

전처리(Preprocessing) 후 General Linear Model을 사용한 분석을 통하여 visual feedback이 제공되는 구간과 차단되는 구간에서의 활성화 맵을 얻고  $p < 0.001$ 의 유의수준에서 관련 영역들을 관찰하였다.

### 3. 결과

분석 결과 visual feedback이 제공되는 과제와 차단되는

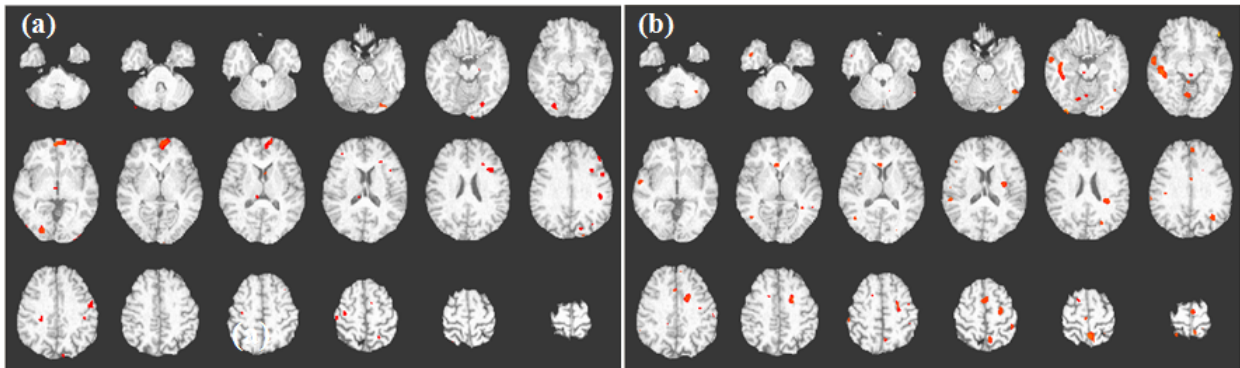


그림 3. visual feedback 제공 여부에 따른 뇌 활성화 영역 ( $p < 0.001$ )  
(a) visual feedback 제공, (b) visual feedback 차단

표 1. visual feedback 제공되었을 때 뇌 활성화 영역 (p<0.001)

Brain region	Volume	Center coordinates			Mean t	Maximum t
		x	y	z		
Left Superior Orbital Gyrus	2600	-11	-59	2	4,1891	5,8619
Right Fusiform Gyrus	792	25	79	-2	4,2443	6,2423
Left Inferior Frontal Gyrus (p. Triangularis)	584	-37	-13	20	3,7922	4,347
Left Linual Gyrus	448	-21	73	-14	3,6543	4,2584
Left Precentral Gyrus	440	-55	1	36	3,6666	4,0745
Right Precentral Gyrus	384	33	17	50	3,7727	4,6497
Left Supra Marginal Gyrus	368	-45	27	30	3,7504	4,3281
Right Cerebelum (VIII)	336	23	63	-42	4,0053	5,1347
Left Cuneus	256	-15	77	32	3,6261	3,986
Right Thalamus	240	11	27	14	3,8703	4,8265
Right Postcentral Gyrus	152	45	25	54	3,831	4,5611
Left SMA	128	-9	3	56	3,7089	4,2395
Left Middle Frontal Gyrus	112	-37	-21	46	3,7443	4,2879
Left Calcarine Gyrus	88	-5	95	-14	3,4948	3,6674
Left Insula Lobe	88	-25	-29	16	3,494	3,6265
Right Middle Frontal Gyrus	80	37	-41	18	3,58	3,8415
Left Superior Occipital Gyrus	80	-19	89	30	3,641	4,0778

표 2. visual feedback 차단되었을 때 뇌 활성화 영역 (p<0.001)

Brain region	Volume	Center coordinates			Mean t	Maximum t
		x	y	z		
Left Precuneus	1992	-5	-53	60	3,9416	5,6529
Left Middle Cingulate Cortex	1968	-15	1	36	3,9158	5,1531
Right Fusiform Gyrus	1880	43	-27	-10	4,2018	6,051
Right Middle Temporal Gyrus	1304	59	-7	-6	4,1053	5,2057
Right SMA	824	3	1	54	3,6489	4,0968
Right Cerebelum (VIII)	800	17	-59	-48	3,8489	5,1025
Left Angular Gyrus	520	-35	-61	28	3,8457	4,5727
Right Anterior Cingulate Cortex	456	3	23	8	3,8679	4,6822
Left Inferior Temporal Gyrus	432	-49	-55	-20	3,6042	3,9528
Left Insula Lobe	416	-29	-33	22	3,948	4,8538
Left Postcentral Gyrus	400	-43	-43	54	3,744	4,417
Left Superior Medial Gyrus	392	-3	45	30	3,7939	4,5587
Right Superior Temporal Gyrus	248	53	-33	16	3,6881	4,2303
Right Inferior Occipital Gyrus	216	33	-87	-12	3,5891	3,8536
Right Inferior Temporal Gyrus	208	45	3	-30	3,6916	4,0433
Left Fusiform Gyrus	208	-23	-79	-16	3,6105	3,9449
Left Superior Occipital Gyrus	208	-21	-69	22	3,5618	3,908
Left SMA	200	-3	-17	66	3,8096	4,4516
Right Middle Cingulate Cortex	160	3	17	34	3,6432	4,2405
Left Inferior Frontal Gyrus (p. Orbitalis)	152	-45	33	-10	3,7571	4,2902
Right Superior Frontal Gyrus	144	17	7	44	3,652	4,0772
Right Superior Parietal Lobule	120	25	-53	66	3,7231	4,3569
Right Supra Marginal Gyrus	96	55	-29	46	3,7001	4,0331
Right Postcentral Gyrus	88	39	-23	30	3,5573	3,7066
Left Precentral Gyrus	88	-43	-5	50	3,6487	3,8976
Right Paracentral Lobule	88	3	-27	58	3,5286	3,7632
Left Middle Temporal Gyrus	80	-53	-43	6	3,4949	3,632
Right Inferior Frontal Gyrus (p. Triangularis)	80	45	27	14	3,4649	3,5537

과제의 뇌영역은 그림 3과 표 1, 2와 같이 나타났다. Visual feedback이 제공되는 task에서는 left superior orbital gyrus, bilateral precentral gyrus, left superior occipital gyrus, left supplementary motor area, right thalamus, right postcentral gyrus, right superior parietal lobule 같은

영역들이 활성화 되었고, visual feedback이 차단된 task에서는 left precuneus, right middle temporal gyrus, bilateral supplementary motor area, right anterior cingulate cortex, left inferior temporal gyrus, left insula lobe, right superior parietal lobule, bilateral postcentral gyrus, left

precentral gyrus 같은 영역들이 활성화 되었다.

#### 4. 결론 및 고찰

이번 연구에서는 운동 표상에 따른 뇌 메커니즘의 이해를 위한 시스템 및 fMRI 실험 task를 개발하였고 개발된 시스템의 검증을 위하여 예비실험을 시행하였다. 예비 실험결과 visual feedback이 제공된 task와 차단된 task에서 발견되는 뇌 영역은 차이가 있었다. Visual feedback이 차단된 task에서 anterior cingulate cortex, parietal cortex를 비롯한 motor cortex 같은 영역들이 더욱 활성화 되었다. 이 중 anterior cingulate cortex의 활성화는 전대뇌동맥 경색 환자에서 표상 무시 증후군이 나타난다는 기존의 연구결과와 비교해 보면 anterior cingulate cortex가 운동 표상과 연관이 있는 영역이라고 할 수 있다[9]. 또한 parietal cortex의 활성화도 이 영역이 손상된 환자에서 운동 표상 능력이 떨어지는 기존의 연구와 경향과 비슷한 경향을 나타낸다[7]. 따라서 개발된 시스템 및 task는 운동 표상의 특성을 반영하는데 적절한 것으로 생각된다. 향후 계획으로는 개발된 시스템으로 임상실험을 진행하여 시스템이 지니고 있는 효과의 타당성과 신뢰도를 검증할 계획이다. 또한, 정상인을 대상으로 운동 표상에 관련되는 뇌 영역을 알아보고 각 영역들이 어떠한 연결성을 가지고 있는지 알아볼 계획이다. 더욱 나아가 일반인과 뇌 손상에 따른 운동 표상 능력이 손상된 환자사이의 뇌 영역 활성화 및 연결성의 차이도 확인해볼 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] Mink JW. "The basal ganglia: focused selection and inhibition of competing motor programs" *Prog Neurobiol*, Vol. 50, pp. 381-425, 1996
- [2] Schwartz RL, Adair JC, Na DL, Williamson DJG, Heilman KM. "Spatial bias: Attentional and intentional influence in normal subjects" *Neurology*, Vol. 48, pp. 234-242, 1997
- [3] Bisiach E, Luzzatti C, Perani D. "Unilateral neglect, representational schema and consciousness" *Brain*, Vol. 102, pp. 609-618, 1979
- [4] Smith DL, Akhtar AJ, Garraway WM. "Proprioception and spatial neglect after stroke" , *Age and Aging*, vol. 12, pp.63-69, 1983.
- [5] Jobst EE, Melnick ME, Byl NN, Dowling GA, Aminoff MJ. "Sensory perception in Parkinson disease" *Arch Neurol*, Vol. 54, pp. 450-454, 1997
- [6] Kaji R, Murase N. "Sensory function of basal ganglia" *Mov Disord*. Vol. 16, pp. 593-594, 2001
- [7] Sirigu A, Duhamel JR, Cohen L, Pillon B, Dubois B, Agid Y. "The mental representation of hand movements after parietal cortex damage" *Science*, 273(5281), pp. 1564-1568, 1996
- [8] Matthew B. "Probing the Neural Basis of Body Ownership", *Science*, 6:305(5685), pp.782-3, Aug 2004.
- [9] Kim JE, Kim TH, Lee, SJ, Oh GS, Baek MJ, Kim SY. "Representational neglect in left anterior cerebral artery infarction", *J Korean Neurol Assoc*, Vol. 23, No. 4, pp. 534-536, 2005