

대칭형 상지 운동기구를 이용한 손목 운동 시 뇌 활성화 패턴

태기식*(연세대 대학원 의공학과), 김사업(연세대 대학원 의공학과),
송성재(원주대 동력기계과), 이소영(계명대 재활의학과),
박기영(계명대 재활의학과), 손철호(계명대 진단방사선과), 김영호(연세대 의공학부)

Brain Activation During the Wrist Movement Using Symmetrical Upper Limb Motion Trainer

K. S. Tae(Biomedical. Eng. Dept., YSU), S. Y. Kim(Biomedical. Eng. Dept., YSU),
S. J. Song(Mechanical Eng. Dept., NWJU), S. Y. Lee(Rehabilitation Med. Dept., KMU),
G. Y. Park((Rehabilitation Med. Dept., KMU), C. H. Sohn(Diagnostic Rad. Dept, KMU)
Y. H. Kim(Biomedical. Eng. Dept., YSU)

ABSTRACT

We developed a symmetrical upper limb motion trainer for chronic hemiparetic subjects. This trainer enabled the practice of a forearm pronation/supination and wrist flexion/extension. In this study, we have used functional magnetic resonance imaging(fMRI) with the developed symmetrical upper limb motion device, to compare brain activation patterns elicited by flexion/extension wrist movements of control and hemiparetic subject group. In control group, contralateral somatosensory cortex(SMC) and bilateral cerebellum were activated by dominant hand movement(Task 1), while bilateral movements by dominant hand(Task 2) activated the SMC in both cerebral hemispheres and ipsilateral cerebellum. However, in hemiparetic subject group, contralateral supplementary motor area(SMA) was activated by unaffected hand movement(Task 1), while the activation of bilateral movements by unaffected hand(Task 2) showed only SMA in the undamaged hemisphere. This study, demonstrating the ability to accurately measure activation in both sensory and motor cortex, is currently being extended to patients in clinical applications such as the recovery of motor function after stroke.

Key Words : Symmetrical upper limb motion trainer (대칭형 상지 운동기구), Hemiparetic subjects (편마비 환자),
Functional magnetic resonance imaging (기능적 자기공명영상), Brain activation (뇌 활성화)

1. 서론

뇌졸중(stroke)은 주로 60세 이상의 연령층에서 단일 질환으로서는 압, 교통사고와 함께 사망사고에 대한 주요 3대 원인으로 꼽히고 있으며 전문적인 노동력의 소실과 기능 향상을 고려할 때 보건비용 부담이 가장 높은 질환이다⁽¹⁾. 뇌졸중은 아주 드문 경우를 제외하고는 뇌의 한쪽에 병변이 한정되어 나타나므로 전형적으로 뇌손상이 있는 반대편 상하지의 마비와 기능장애를 수반하게 된다⁽²⁾.

뇌졸중에 의한 편마비 환자들의 상지 재활을 위해 일반적으로 물리치료사가 수동적 운동치료를 수행해

야 하나 이는 치료사의 상당한 수고를 요구한다. 이를 해결하기 위하여 마비환자의 잔존 감각을 활용하여 독립운동에 필요한 능력을 습득하고 자연스러운 상지운동의 리듬을 제공할 수 있는 상지 운동 시스템들이 개발되고 있으나, 주로 어깨나 팔꿈치를 다루었다^(3,4). 이러한 훈련시스템 개발과 더불어 편마비 환자의 치료에 따른 인체 기능의 회복메커니즘을 밝히는 것이 필수적이다. 지금까지 물리치료에 의한 결과는 Fugal Meyer(FM), Modified Ashworth Scale(MAS) 등의 운동 지수 평가 방법으로 평가하고 있으나 이러한 방법들은 재활훈련의 결과를 나타낼 뿐 재활과정의 운동기능 회복 메커니즘을 설명하기에는 제한적이

다. 따라서 이러한 회복 메커니즘을 좀 더 확실히 밝혀내고 개선된 치료방법에 접근할 시각적이고 구체적인 자료를 제공할 필요가 있다. 이를 위해 기능적 자기공명 영상장치(Functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI), 양전자방출단층촬영장치(Positron Emission Tomography: PET), 경두개 자기자극법(Transcranial Magnetic Simulation: TMS) 등을 이용하여 환자의 재활훈련 과정에서 나타나는 뇌의 활성화영역 변화를 관찰하고 환자의 뇌 활성화영역이 정상인의 것과 다르다고 보고했으며, 뇌손상으로 인해 마비된 기능이 회복될 때 뇌의 재조직(cortical reorganization)이 일어나는 뇌가소성에 대해 보고했다⁽⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서는 뇌졸중 후 일상생활 동작 수행 시 장애를 유발하는 손목 관절 운동을 위해 건측 손목 관절(unaaffected hand)의 능동적 운동으로 환측 손목 관절(affected hand)의 수동적 운동을 유발하는 대칭형 상지 운동기구를 개발하고 기능적 자기공명 영상을 이용하여 운동 시 뇌 활성화를 관찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

대칭형 기구는 자기공명영상 촬영 시 자계의 영향에 의한 이미지 왜곡을 방지하고 내마모성이 뛰어나고 비자성 재료인 M.C. Nylon을 사용하였다. 기구의 구동부는 원통형 형상의 스피기어(spur gear)를 사용하였으며 module의 크기와 pitch는 사용자가 기어의 회전방향을 바꿀 때 backlash 영향이 없이 운동을 잘 전달하도록 하였으며, 회전 기어의 축과 베어링 사이의 마찰로 발생하는 토크를 견디도록 설계하였다.

기구부는 SolidEdge(Unigraphics solutions, USA)를 사용하여 설계되었다. 자기공명 영상 장치내에서의 실험을 고려하여 기구의 두 손잡이 사이 간격은 180mm, 기구를 연결하는 기어의 중심축간 간격은 60mm, 손잡이의 크기는 손과 접촉하는 봉의 길이 90mm, 기어축으로 부터 운동을 위한 손잡이 중심까지의 거리는 55mm로 설계되었다. 기구의 손잡이는 기구에서 손잡이를 교체하지 않고 손목 굴곡/신전과 전완 회내/회외의 두 가지 운동을 동시에 수행할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 본 기구의 위치에 따른 두 가지 운동 방식을 보여준다.

제작된 대칭형 기구를 이용하여 팔목 운동 시 뇌 활성화 패턴을 관찰하기 위해 기능적 자기공명 영상을 촬영하였다. 본 연구를 위해 대뇌병변이나 정신분열증 경험이 없는 정상 성인 오른손잡이 남자 2

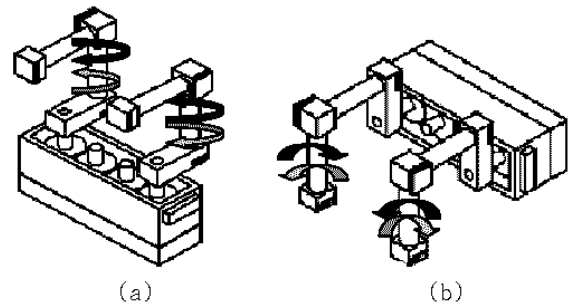


Fig. 1 Concept of symmetric motion system
(a) bilateral wrist extension/flexion,
(b) bilateral forearm supination/pronation

명(28±4세, 70±5kg, 174.5± 0.5cm)과 뇌졸중에 의한 왼쪽 마비를 가지고 있고 손상된 측 상지의 자발적 회복과정이 지났으며 제시된 과제 수행이 가능한 편마비가 발생한지 3년 이상이 되는 만성 뇌졸중 환자 남성 2명(40.5±5세, 65±4kg, 170.2±3cm)을 피검자로 선정하였다(Table 1).

기능적 자기공명영상은 3T MR scanner(GE Medical System, USA)에서 두부코일을 사용하여 single-shot echo planar Imaging(EPI)으로 혈중산소수준의존(Blood Oxygen Level Dependent: BOLD) 기법을 적용하였다. 휴식(rest)시와 활동(active)기에 각각 19개의 횡단면 EPI-BOLD 영상 (TR/TE/ α -1.9sec/40msec/90°, FOV 240mm, matrix 64× 64)을 획득하였다. 해부학적 영상은 고식적 스피인방기법을 사용하여 Talairach의 선을 기준으로 T2 강조영상을 얻었다⁽⁸⁾. 해부학적 영상의 절편수, 절편의 위치와 두께, FOV는 EPI 영상과 동일하게 하여 획득하였다. Fig. 2는 본 연구를 위하여 기능적 자기공명 영상을 촬영하는 모습이다.

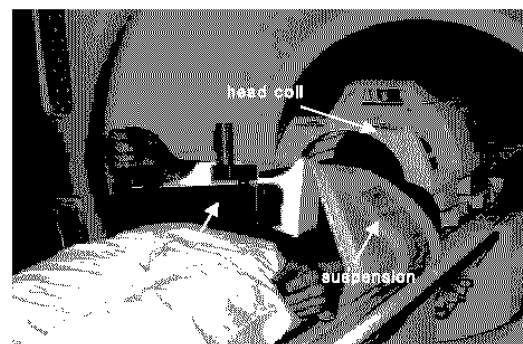


Fig. 2 Experimental set-up for acquisition of fMRI

Table 1 Stroke subjects' clinical characteristics

Subject	Age/Sex	Lesion	Paratic side	Time since stroke(months)	MAS score	FM score
#1	44/M	Hm in Rt. thalamus, BG.	Lt	44	G1+	25
#2	37/M	Hm in Rt. BG .	Lt	36	G1	26

Hm=hemorrhage, BG=basal ganglia, R=right, L=left, FM=Fugal Meyer

모든 피검자들에게 실험을 진행하는 동안에 동일한 과제를 부여하였다. 과제 rest-task-rest-task-rest-task의 순서로 수행되어지며 한 실험 당 소요시간은 블록 당 20초씩 총 2분 동안 진행하였다. 각 피검자에 대하여 두 가지 과제를 수행하였는데, 첫 번째 과제는 피검자의 우세손인 오른손만 손잡이를 잡고 운동하였고(Task 1), 두 번째 경우는 task 시 오른손과 왼손 모두 손잡이를 잡은 채로 오른손만을 움직여 굴곡, 신전을 실시하고 오른손의 움직임에 따라 왼손이 수동적으로 오른손에 대해 대칭적으로 움직이도록 하였다(Task 2). 실험 중에는 rest와 task 시간의 시작과 끝을 알리는 구두 신호만이 주어졌으며 다른 격려나 자극은 배제하였다.

데이터는 관심영역(region of interest)을 감각운동 피질(sensory(S1)-motor(M1), SMC), 전운동영역(premotor area, PMA), 부운동영역(supplementary motor area, SMA), 소뇌(cerebellum)으로 설정하여 SPM99(Wellcome Department of Cognitive Neurology, Oxford, 1998) software를 이용하여 재배열(realignment) 과정을 통해 머리의 움직임을 교정하고 기능적 영상과 해부학적 영상을 상관정립(coregister)하여 공통 좌표로 합성해 주었다. 각 개인의 뇌 형태적 차이를 교정하기 위하여 표준화된 뇌 공간에 template image(Motreal Neurologic Institute)를 사용하여 표준화(normalize) 하였다⁽⁸⁾. 활성화된 뇌 영역은 표준화의 평균치를 구하고 T score에 따라 색채 부호화하여 대조군과 환자군의 그룹별 뇌 지도를 얻었다. rest기와 task기의 뇌 활성화 차이는 ANCOVA로 통계적 검증을 하여 $p < 0.001$ 일 때 유의하게 활성화되고 cluster의 크기의 10화소 이상인 것만을 뇌 지도화에 포함시켰다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 제작된 대칭형 기구를 이용한 기능적 자기공명영상에서의 뇌 활성도를 보여준다.

대조군(a)에서 오른손의 팔목운동만을 수행한 Task 1에서는 활성화 정도의 차이를 보이긴 하지만 대측(contralateral) 운동 영역(precentral gyrus, GPrC), 감각 영역(postcentral gyrus, GPoC), 양측 소뇌(cerebellum)에서 활성화가 나타났다. 오른손의 팔목운동으로 수동적으로 왼손을 움직이게 한 양손 운동 과제인 Task 2에서는 양측 좌우 뇌의 운동 영역(GPrC), 감각영역(GPoC) 및 우측 소뇌에서 활성화가 나타났다(uncorrected $p < .001$). 이는 Debaera 등⁽⁹⁾, Jancke 등⁽¹⁰⁾, Zaman 등⁽¹¹⁾의 양측손 사용 시 나타나는 뇌 활성화 변화와 유사한 결과를 나타낸다.

반면 환자군(b)에서 건측손인 오른손의 팔목운동만을 수행한 Task 1에서는 대측 부운동영역(SMA) 및 동측(ipsilateral)의 소뇌에서 활성화를 보였고 건측손의 팔목운동으로 수동적으로 환측을 움직이게 한 양손 운동과제인 Task 2에서는 Task 1과 같

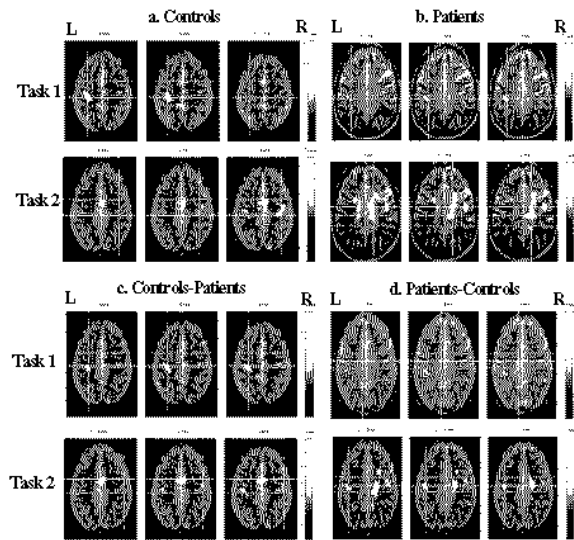


Fig. 3 Brain activation per group and task ($P < 0.001$). Between-group analysis(a,b). Exclusive masking between activation maps of controls and patients(c,d)

이 왼쪽 반구의 부운동영역만 활성화되고 오른쪽 반구에는 활성화된 영역이 없었다(uncorrected $p < .001$).

Fig. 3의 (c), (d)는 각각의 과제에 대해서 대조군 그룹과 환자군의 뇌 활성도를 차감(subtraction)한 결과를 보여준다(uncorrected $p < .001$). c의 Task 1, Task 2에서는 대조군이 환자군에 비해 대측 운동 영역, 감각 영역에서 활성도가 크게 나타남을 알 수 있다. d의 Task 1에서는 환자군이 대조군에 비해 대측 부운동영역이 크게 활성화됨을 알 수 있다. Task 2에서는 환자군이 관심 영역 이외의 활성화도가 크게 발생함을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 각 과제에 대한 뇌 활성화 지도를 보여준다. 대조군과 환자군에서 활성화 영역의 크기를 비교해 보면, 왼쪽 반구에서 오른손만 사용할 때가 양손 사용할 때보다 나타나는 대측의 운동영역이 더 넓은 영역에서 활성도가 관찰되었다. 이는 양손 운동의 경우가 한 손 운동의 경우 보다 운동영역을 적음을 나타낸다. 따라서, 양손 운동은 좌우측 한 손 운동들 두 가지의 합이 아니라, 오히려 덜 활성화시킨 것으로 운동수행상의 부하가 필요 없는 좀 더 자연스러운 운동 상태라고 추측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 건측 손을 이용하여 환측 손의 운동을 할 수 있는 대칭형 상지 재활기구를 제작하고 손의 움직임에 따른 뇌의 활성화 패턴을 관찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 편마비 환자를 위하여 건측손의 운동을 환측손으로 전달하는 기구를 제작하였다. 손목의 굴곡과

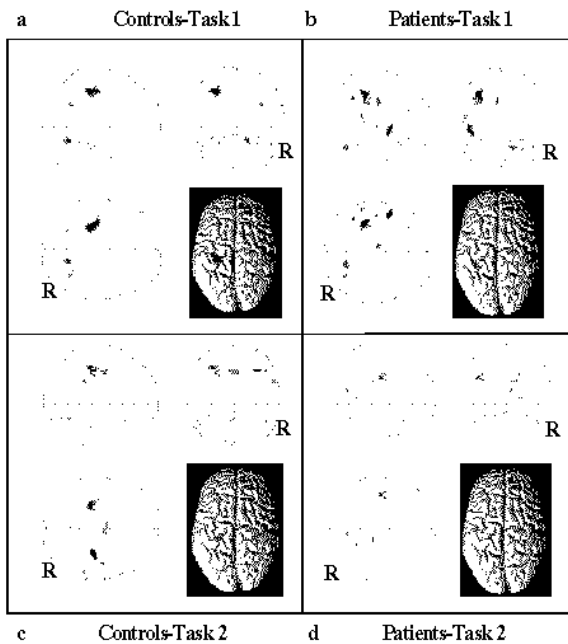


Fig. 4 Statistical parametric maps (SPM) showing the brain activation during two tasks. The patterns of activation related to wrist movement in controls (a,c) and patients with left hemiplegia are projected onto glass brains (lateral, posterior, and superior views; R, right side of the brain). Only the voxels exceeding a threshold of $P < 0.05$

신전, 전완의 회내와 회외 운동이 동시에 가능하도록 하였다.

2. 정상인 2명을 대상으로 개발된 시스템을 적용하여 뇌 활성화를 관찰한 결과 Task 1시에는 대측의 운동영역, 감각영역 및 양측 소뇌에서 활성화가 관찰되고 Task 2에서는 양측 좌우 뇌의 운동 영역, 감각 영역 및 우측 소뇌에서 활성화가 나타났다.

3. 뇌졸중에 의한 편마비 환자 2명을 대상으로 개발된 시스템을 적용하여 뇌 활성화를 관찰한 결과 Task 1에는 대측 부운동영역 및 동측 소뇌에서 활성화를 보였고 Task 2에서는 왼쪽 반구의 부운동영역만 활성화되고 오른쪽 반구에는 활성화 된 영역이 없었다.

본 연구를 통해 편마비 환자의 환측 손목 운동과 정상인의 수동적 손목운동에 대한 대뇌활동을 비교함으로써 뇌손상 이후의 환자에게 본 기구를 적용시켰을 때 물리 치료적 중재로 인한 운동기능 회복 향상과 신경계 재조직화의 기본적 기전을 설명할 수 있으리라 사료된다.

후기

본 연구는 과학기술부, 한국과학재단 지정 연세대학교 의용계측 및 재활공학 연구센터에 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 통계청, 1999년 사망원인별 통계보고서, 2000.
2. Feuerstein, G.Z. and Wang, X., "Animal models of stroke", *Molecular Medicine Today*, Vol. 24, pp. 402-408, 2003.
3. Lum, P.S., Burgar, C.G., and Shor, P.C., "Robot-Assisted Movement Training Compared with Conventional Therapy Techniques for the Rehabilitation of Upper-limb Motor Function after Stroke", *Arch Phys Med Rehabil*, Vol. 83, pp. 952-959, 2002.
4. Krebs, H.I., Hogan, N., Volpe, B.T., Aisen, M.L., Edelman, L., and Diels, C., "Overview of clinical trials with MIT-MANUS", *Technol. Health Care*, Vol. 7, pp.419-423, 1999.
5. Louvinoux, I., Carel, and Pariente, J., "Correlation between cerebral reorganization and motor recovery after subcortical infarcts", *NeuroImage*, Vol. 20, pp. 2166-2180, 2003.
6. Jang, S.H., Kim, Y.H., and Cho, S.H., "Cortical reorganization induced by task-oriented training in chronic hemiplegic stroke patients" *Neuroreport*, Vol. 20, pp. 137-141, 2002.
7. Cramer, S.C., and Bastings, E.P., "Mapping clinically relevant plasticity after stroke", *Neuro-pharmacology*, Vol. 39, pp. 842-851, 2000.
8. Talairach, J., and Tournoux, P., "Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. In: 3-Dimensional proportional system: an approach to cerebral imaging", New York: Theme Medical Publishers, 1988.
9. Debaere, F., Wenderoth, N., and Sunaert, S., "Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task", *Neuropsychologia*, Vol. 42, pp.855-867, 2004.
10. Jancke, L., Peters, M., and Himmelbach, M., "fMRI study of bimanual coordination", *Neuropsychologia*, Vol. 38, pp. 164-174, 2000.
11. Zaman, A., Singh, K. D., Bimson, W. E., and N. Roberts, A., "An fMRI study of brain activation during active and passive finger movement", *Neuroimage*, Vol. 11, S858, 2000.