<Manuscript template updated Dec 23, 2013>

Title

Neural Activation in the Somatosensory Cortex by Electro Tactile Stimulation of the fingers: A Human fMRI Study

Subtitle

Neural Activation in the Somatosensory Cortex by Electro Tactile Stimulation

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to investigate 1) somatotopic arrangement of the second and third finger in SI area 2) difference of neural activation in the SI area produced by stimulation with different frequencies 3) correlation between the strength of tactile perception by different stimulus intensity and the level of brain activation measurable by means of fMRI.

Background: Somatosensory can obtain the information of enviromental sitimuli about "whrere"(e.g., on the left parm), "what"(e.g., a book or a dog), and "how"(e.g., scrub gently or scrub roughly) to organism. However, compared to visual sense, the neural mechanism underlying the processing of specific electrotactile stimulus is still unknown.

Method: 10 right-handed subjects participated in this study. Non-painful electrotactile stimuli were delivered to two different finger tips of right hand. Functional brain images were collected from 3.0T MRI using the single-shot EPI method. The scanning parameters were as follows: TR and TE were 3000, 35ms, respectively, flip angle 60, FOV 24 x 24cm, matrix size 64 x 64, slice thickness 4mm (no gap). SPM5 was used to analyze the fMRI data.

Results: Significant activations produced by the stimulation were found in the SI, SII, the subcentral gyrus, the precentral gyrus, and the insula. In all participants statistically significant activation was observed in the contralateral SI area and the bilateral SⅡ areas by the stimulation on the fingers but ipsilaterally dominant. The SI area representing the second finger generally located in the more lateral and inferior side than that of the third finger across all the subjects. But no difference in brain area was found for the stimulation of the fingers by different frequencies. And two typical patterns were observed on the relationship between the perceived psychological intensity and the amount of voxels in the primary sensory cortex during the stimulation.

Conclusion: It was possible to discriminate the representation sites in the SI by electrotactile stimulation of digit2 and digit3. But we could not find the differences of the brain areas according to different stimulation frequencies from 3 to 300Hz.

Application: The results of the study can provide a deeper understanding of somatosensory and offer the information for tactile display for blinds.

Keywords

Electrotactile stimulation, Frequency, Functional magnetic resonance imaging, Somatosensory area

1. Introduction

촉각 이란 피부감각을 통해 사물에 대한 가장 기본적인 정보를 획득하고 판단내리는 중요한 일차적 감각의 하나이다. 즉 촉각은 피부에 작용하는 물리적 자극을 감지하는 감각기능이며, 이를 세분하면 압각, 마찰감각, 위치감각등으로 세분할 수 있다. 이런 감각들을 받아들이고 통합 하여 인간은 주변 환경 및 대상을 식별하게 되며, 더 나아가 정서적으로 쾌함, 불쾌함등으로 사물을 판단하고 평가하게 된다. 이러한 사물에 대한 정서적 평가는 구매의사결정 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에 산업장면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 이렇듯 최근 촉각의 중요성에 부각됨에 따라 촉감을 응용하여 robot 개발과 임상의학 등에서 활용할 수 있는 촉감 인식 및 구현 기술을 개발하려는 시도가 증가하고 있다. 이러한 촉감 구현기술을 개발하기 위해선 무엇보다 촉각의 매커니즘 규명이 필수적 이므로 최근까지 촉각에 대한 신경망 및 psychophysics function에 관한 연구가 이루어지고 있다. 특히, 1990년대 이후 뇌영상 기술의 발달로 뇌 영역의 활성화를 효과적이고 과학적으로 분석하여 가시화 할 수 있게 됨에 따라(Ogawa et al., 1992) 뇌 영상 기술을 이용하여 촉각자극의 제시 위치와 물리적 특성에 따른 대뇌 매커니즘을 규명하고자 한 연구가 진행되고 있다.

Kurth et al.(1998)은 20명의 피험자에게 2, 5번째 손가락에 전기자극을 제시하였다. 개인분석 결과, 5번째 손가락과 비교하여 2번째 손가락의 활성화 부위가 좀더 아래쪽, 바깥쪽(inferior & lateral)에 위치함을 밝혔다. Boakye et al.(2000)은 fMRI를 이용하여 주파수의 차이에 따른 somatosensory area의 활성화 pattern을 알아보고자 하였다. 5명의 피험자에겐 5.1hz의 전기자극이 제시되었고, 다른 5명의 피험자에게는 50hz의 전기자극이 제시되었다. 집단분석 결과 일차체 감각피질(SI area), 이차체 감각피질(SII area), parietal perculum, insula, frontal cortex, supplementary motor area, posterior parietal cortices(BA7,40)의 영역이 활성화 되었다. 자극 주파수의 차이 비교 결과, SI영역과 SII영역에서 5.1hz와 50hz의 대뇌 피질 영역의 활성화(volumes of cortical activation)에 차이가 없었다. Francis et al.(2000)은 8명 피험자에겐 2,5번째 손가락에 80Hz의 진동자극을, 4명의 피험자에겐 2번째 손가락에 30Hz와 80Hz의 진동자극을 제시하였다. 그 결과, SI 영역, SII 영역, subcentral gyrus, precentral gyrus, posterior insula, posterior parietal region, posterior cingulate영역이 활성화되었고, 일차 체 감각 영역에서 2번째 손가락을 표상하는 피질영역이 5번째 손가락의 표상영역보다 외측에 위치한 것으로 나타났다. 그리고 주파수에 따른 활성화 영역의 크기에 유의한 차이가 없었다. Harrington과 Hunter(2001)는 자극의 주파수에 따른 somatosensory cortex의 차이, 즉 대뇌 피질 영역에서 Meissner와 Pacinian 수용기의 차이를 규명하고자 하였다. 이를 위해 vibrotactile buzzer을 이용하여 7명 피험자의 세손가락(1,2,3)에 non-painful한 자극을 제시하였는데, 35Hz, 150Hz의 자극이 각 손가락에 19.2s동안 제시되었다(5번 반복). SI영역의 분석 결과, 7명의 피험자중 3명에서 35Hz의 자극제시에는 BA1,2,3이 활성화되었고, 150hz의 자극 제시에는 BA1,2만이

활성화되었다. SII영역 분석은 150Hz의 자극 제시 후 활성화 되는 피질 영역과 35Hz자극 제시 후 활성화 되는 피질 영역이 겹쳐(overapping)졌다(Harrington and Hunter, 2001).
이렇듯 최근에는 fMRI 를 이용해 자극 주파수의 대뇌 매커니즘을 규명하려는 연구가 다수 있었지만, 이 선행 연구들은 대부분 저주파와 고주파의 차이비교로서 두 종류의 주파수 자극만을 사용한 것이 대부분이였으므로 주파수에 따른 대뇌 활성화 매커니즘을 규명하는 데에는 한계가 있었다. 하지만 본 연구에서는 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 150 Hz, 300 Hz와 같이 저주파부터 고주파까지 주파수를 다양하게 제시할 수 있는 paradigm 을 만들어 선행연구들에서 수행하지 못한 자극의 유형과 크기 변수뿐만 아니라 다르게 제시된 자극 주파수에 따른 영향도 살펴볼 수 있을 것으로 기대한다.
또한 환자들의 뇌를 전기자극 하여 얻어진 감각인체 모형(homunculus)을 이미징 기법을 이용하여 검증하고자 한다. 이전의 선행 연구들도 각 손가락에 대응하는 체 감각 피질영역의 차이를 규명하고자 하였으나, 기존의 연구들은 대부분 2 번째와 5 번째 손가락에 대응하는 영역의 차이를 밝히고자 하였다. 본 연구에서는 2 번째와 3 번째 손가락, 즉 근접하게 위치한 손가락에서도 대응하는 대뇌 피질 영역의 구분이 가능한지를 살펴보고자 한다.
또한 심리 데이터와 대뇌피질 반응의 상관관계를 분석함으로써 정신-생리학적 관계를 규명하고자 한다. 자극 주파수에 의한 활성화의 차이를 연구하는 초기의 연구들은 주로 SI 영역에 주로 초점을 맞췄다. 본 연구에서도 선행연구들을 바탕으로 SI 영역에 초점을 맞추어 ROI(Region of interest: 관심영역)분석을 할 것이다. 본 연구에서는 촉각제시에 의한 대뇌 피질의 반응 매커니즘을 확인하고 심리적 촉감과의 관계를 규명하고자 한다. 이를 위해서 외부자극의 역학적 특성, 이에 따른 심리적 지각, 그리고 대뇌 피질 반응 간의 관계를 밝힘으로써, 이들 간의 함수관계를 발견하고자 한다.
즉, 본 연구에서는 전기 자극을 사용하여 첫째, 각기 다른 영역에서 제시된 촉각자극에 따른 뇌 활성화 영역의 차이를 밝히고, 둘째 촉각자극의 빈도에 의해 체 감각 피질 상에서 어떠한 반응을 보이는가를 규명하고 셋째, 심리적인 지각과 이에 따른 체 감각 피질 반응간의 관계를 밝히고자 한다.

2. Method

2.1 Subjects

충남대학교에 재학중인 12 명의 학부생이 실험에 참여하였다. 이 학생들은 모두 여학생이었으며, 오른손잡이 학생들이었다. 나이의 분포는 만 19 세에서 25 세까지 였으며, 두부외상이나 정신질환의 병력이 없고 촉각을 느끼는데 크게 어려움이 없는 학생들이었다. 본 연구에서는 피험자를 모두 여학생으로만 한정하였는데, 이는 성별에 따라 촉 감각에 대한 민감성이나 통증 유무와 관련된 변산성이 크기 때문이다. 참가자 모두에게 실험에 관한 전반적인 사항들을 설명하였고, 실험 참여에 대한 동의를 구하였다. 모든 실험 절차는 Institutional Review Committee 의 규정을 준수하였다.

2.2 Electrotactile stimuli

본 연구에서는 촉각자극을 제시하기 위하여 실생활에서 사용되는 저주파 치료기를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 저주파 치료기는 3-300Hz사이의 주파수를 다양하게 제시하게 되어있고, 물리적 강도를 1-8까지 조절하는 것이 가능하였다. 본 연구의 목적은 자극제시 주파수에 따른 뇌 활성화 반응의 차이를 보고자 하였으므로 자극의 강도는 모든 주파수에 따라 동일하게 제시하고자 하였으며, 이를 위한 적절한 자극 강도를 찾기 위해 30명을 대상으로 하여 예비실험을 실시하였다. 즉, 물리적 자극강도(1-8)에서 제시되었을 때 자극이 느껴지는 지, 300Hz의 자극이 각각의 물리적 자극강도(1-8)에서 제시되었을 때 통증의 유무를 측정하였다. 그 결과, 낮은 주파수(3Hz)에서 물리적 강도가 약한 자극(2 이하)이 제시되었을 때 모든 피험자자 자극 제시를 인지하지 못했고, 물리적 강도가 4인 자극이 제시되었을 때 피험자의 93.3%가 자극 제시를 인지하였다. 높은 주파수(300Hz)에서 물리적 강도가 강한 자극(7이상)이 제시되었을 때 모든 피험자가 통증과 불쾌감을 느꼈고, 물리적 강도가 4인 자극이 제시되었을 때 피험자의 10%가, 물리적 강도가 5인 자극이 제시 되었을 때 피험자의 56.6%가 통증이 유발된다고 하였다. 이 예비실험을 통해 자극인지가 가능하면서도 통증을 유발시키지 않는 적절한 물리적 강도로써 본 실험에서 사용될 물리적 강도를 4.5로 선정하였다. 기존의 선행연구에서 제시된 자극의 주파수가 한정적이였다는 제한점을 보완하고, 저주파와 고주파자극의 차이를 비교하기 위해 본 연구에서는 3Hz, 10Hz, 30Hz, 100Hz, 300Hz와 같이 저주파에서 고주파까지 주파수를 다양하게 제시할 수 있도록 패러다임을 구성하였다. 또한 2번째와 5번째 손가락에 대응하는 대뇌 피질 영역의 차이를 밝힌 선행연구들을 바탕으로 본 연구에서는 근접하게 위치한 손가락에서도 대응하는 대뇌 피질 영역의 구분이 가능한지 알아보기 위해 2번째와 3번째 손가락에 각각 자극을 제시하였다.

2.3 Experimental procedures and stimuli paradigm

실험참여자는 손가락에 전극을 부착하는 동안 실험실 내에서 적응 시간을 가지면서 실험 지시문을 읽고 실험에 대한 지시사항을 숙지하도록 안내받았다. 머리 흔들림으로 인한 노이즈 발생 방지를 위해 촬영 시 머리를 움직이지 말라는 지시사항이 주어졌다. 그 후, fMRI안에서 약 10분가량의 shimming작업을 통해 전교련(anterior comissure), 후교련(posterior commissure) line을 맞춘 뒤, 약 10분가량(모조영상 3장-9초, 30초 block 5개-5분)의 실험을 실시하였다. 그 후, 약 15분가량 T1이미지를 얻었다(Figure 1). 실험 자극 paradigm은 Boxcar design으로 두 session(2번째, 3번째 손가락)으로 구성되어있으며(Figure 2), 각 session은 10개의 block으로 이루어졌다. 각 block에는 통제자극과 촉각자극(3, 10, 30, 100, 300Hz)이 15초 동안 번갈아가며 제시되었다. 주어진 주파수에 따른 촉각자극의 순서는 각 피험자에게 random하게 제시하였다. fMRI안에서의 실험이 끝나면, 실험참여자들은 다섯 개 주파수 자극에 대한 심리적 강도를 평가하였다. 실험은 이러한 과정으로 매번 동일한 조건하에서 각 피험자에게 실시되었다.

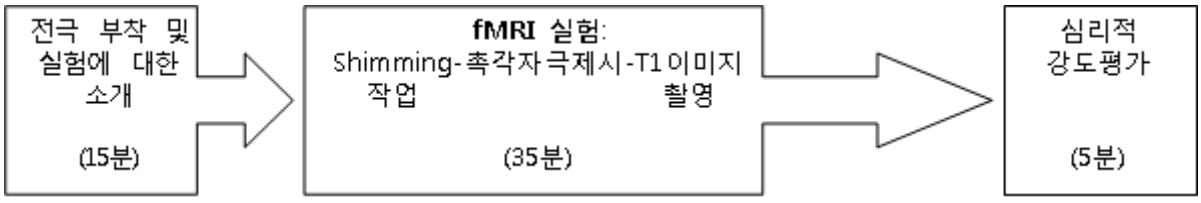

Figure 1. Experimental procedures

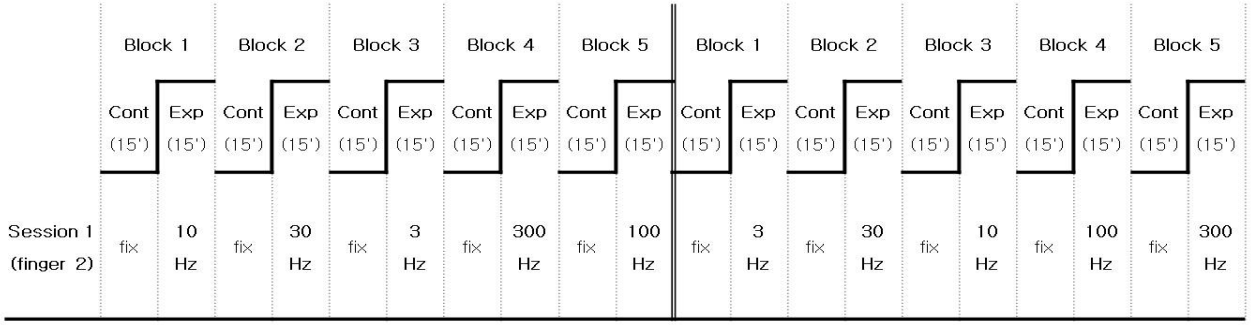

Figure 2. The example of stimuli paradigm

2.4 Psychological data acquisition

실험참여자는 fMRI 실험이 끝난 후, 제시된 촉각 자극 세트가 얼마나 강했는가의 정도를 평가하기 위해 심리적 강도 평가 척도를 작성하였다. 촉각을 어느 정도로 느꼈는지를 평가하기 위해 '거의 느껴지지 않았다(1점)'에서 '매우 강하게 느껴졌다(5점)'의 5점 척도로 평정하도록 구성되었다.

2.5 MRI data acquisition and Analysis

영상획득은 카이스트 fMRI 센터에 설치된 ISOL 3.0T Forte를 사용하였으며, 실험참여자가 손가락 부착된 전극을 통해 제시되는 촉각적 자극을 느끼며 과제를 수행하는 동안 EPI-BOLD(Echo Planner Imaging Blood Oxygen Level Dependent)기법을 사용하여 영상을 획득하였다. 기타 조건은 다음과 같다. TR 3000, TE 35msec, slice thickness 4mm no gap, 35 slices, 64×64 Matrix, FOV 24cm×24cm, flip angle 60°. 각 실험 session당 총체적(volume)영상은 300초 동안 모조(dummy) 영상 3개를 포함하여 103개(phases)를 얻었다. 해부학적 뇌 영상은 T1 강조영상을 수집하였다(TR/TE 3000/35msec, slice thickness 1mm no gap, 256×256 Matrix, FOV 24cm×24cm, flip angle 60°).

fMRI 자료는 SPM 99 소프트웨어(Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)를 사용하여 이미지 획득 시간에 대한 보정을 나타내는 slice timing, 머리 움직임 보정을 위한 motion-corretion, 해부학적 이미지와 기능적 이미지를 정합시키기 위한 coregistration 와 개인의 뇌를 표준 뇌(Montreal Neurologic Institute, MNI)로 정합시키기 위한 normalization, 이후 8mm Isotrophic Gaussian Kernel 을 이용한 smoothing 단계를 거쳐 최종적으로 분석되었다. 이러한 전처리 과정 중 2 명의 피험자의 뇌 영상데이터는 움직임이 커서 사용될 수 없었다. 나머지 10 명의 피험자로부터 나온 데이터를 대상으로 general linear model 을 통해 각 조건에서 통계적으로 의미 있게 활성화된 뇌 영역을 찾은 후, 감산법(substraction)을 사용하여 기저조건보다 유의하게 활성화가 크게 나타난 자극제시 시점에서의 신경망의 활성화를 밝혔다. 뇌기능지도에서 확인된 영역좌표는 MNI 좌표에서 Talairach-Tournoux system 을 사용하여 뇌 영역을 확인하였다

3. Results

3.1 Brain activation by stimulation of fingers

총 12 명의 피험자 중 뇌 영상 신호에 영향을 미칠 만큼 머리 움직임이 심했던 피험자 2 명은 뇌 영상 분석 시 제외되었다. 개인 분석 결과, 10 명의 피험자 모두 대측 SI 영역(좌반구의 brodmann area 1,2,3)이 활성화되었고, 이 중 네 명의 피험자는 양측 SI 영역이 활성화되었다. 10 명의 피험자 모두 양측 S2 영역(왼 반구와 오른 반구의 이차 체 감각 피질 영역, brodmann area 40)이 활성화되었다. 손가락에 자극이 제시될 때의 집단분석 결과, 대측의 일차 체 감각 영역이 활성화되었다. 체 감각 영역 이외의 활성화 영역은 Bilateral Inferior Frontal Gyrus, bilateral Middle Frontal Gyrus, Right Insula, Left Inferior Parietal Lobule 이었다(Figure 3).

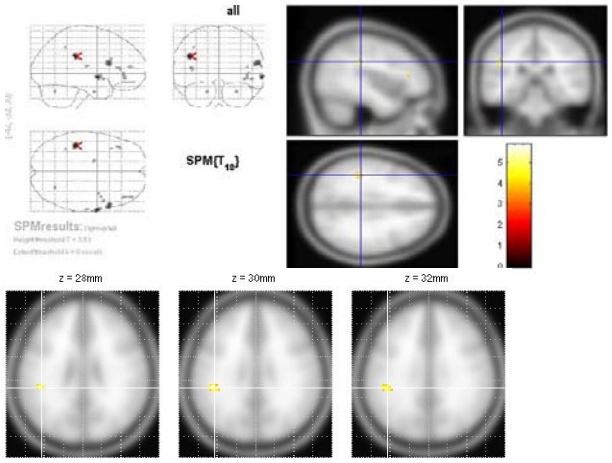

Figure 3. Brain activation by group analysis

3.2 Brain activation with different frequencies

좌측 S1영역을 관심 뇌 영역(region of interest, ROI)으로 지정하여, 주파수에 따라 활성화 영역 간 위치 차이를 비교하였다. 집단분석의 결과를 통해, 활성화 된 SI영역 중 가장 큰 Z점수를 갖는 voxel의 좌표와 Z-score를 Table 1에 정리하였다(p< .001, uncorrected).

Table 1. Montreal Neurological Institute (MNI) coordinates of cortical areas activated by stimuli of each frequency

	Talairach coordinate			Z-score
	X mm	Y mm	Z mm	
3	-40	-32	30	4.3
10	-48	-22	34	4.5
30	-32	-42	56	3.93
100	-50	-34	44	5.89

300	-56	-32	52	4.5

다음 그림은 각각의 자극제시와 기저상태의 대비조건에서 활성화 되는 S1영역을 나타낸 것이다(Figure 4). 집단분석결과, 각 주파수에 따른 활성화 영역 내 가장 큰 Z점수를 갖는 voxel의 위치에는 차이가 있었으나, 활성화 다발(cluster)이 전반적으로 겹치는(overapping)되는 부위가 많았다.

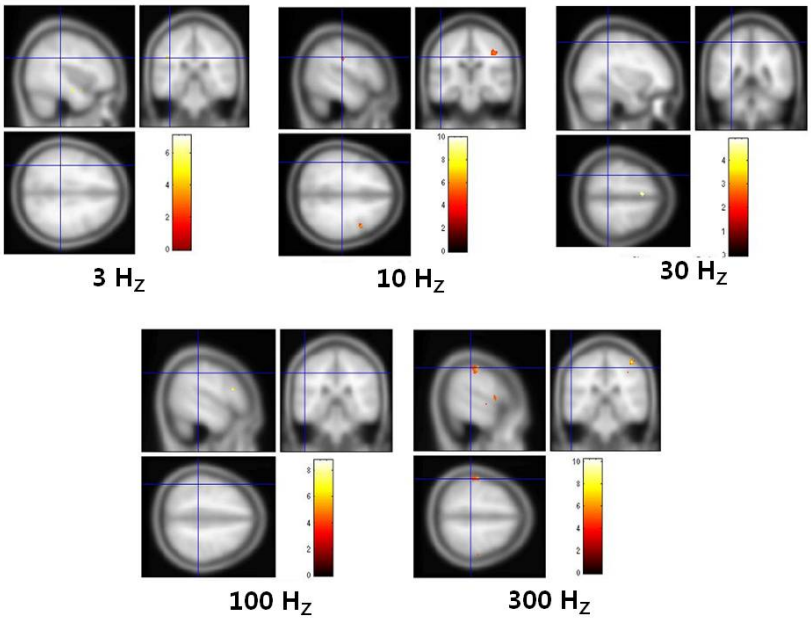

Figure 4. Brain activations with different frequencies (3Hz, 10Hz, 30Hz, 100Hz, 300Hz)

3.3 Brain activation area by stimulation of two different fingers

10명의 피험자 모두, 2번째 손가락에 대응하는 뇌 영역과 3번째 손가락에 대응하는 뇌 영역의 위치가 다르게 나타났다(Table 2). 다음 그림은 한 피험자의 SI영역 내 활성화를 보여준 것이다(Figure 5). 10명의 피험자 중 7명에서 2번째 손가락을 표상하는 체 감각 피질영역이 3번째 손가락을 표상하는 체 감각 피질영역보다 외측(lateral), 아래쪽(inferior)에 위치한 것으로 나타났다.

Table 2. Montreal Neurological Institute (MNI) coordinates of different finger representation

피험자	2 번째 손가락			3 번째 손가락		
	X mm	Y mm	Z mm	X mm	Y mm	Z mm
1	-55.3	-35.5	52.8	-19.4	-31.7	53.6
2	-63.6	-27.9	45.5	-53.7	-27.9	47.2
3	-43.1	-31.7	52.8	-40.0	-30.1	58.2
4	-18.7	-53.4	56.7	-49.9	-52.9	50.6

5	-37.7	-21.4	55.1	-65.9	-33.6	43.7
6	-49.9	-13.4	49	-49.2	-15.7	56.7
7	-47.6	-36.7	48.3	-35.4	-51.9	53.6
8	-31.7	-39.4	50.0	-35.5	-45.0	51.9
9	-58.3	-23.7	46.0	-37.7	-31.7	45.2
10	-56.8	-23.7	47.4	-45.3	-26.3	49.0

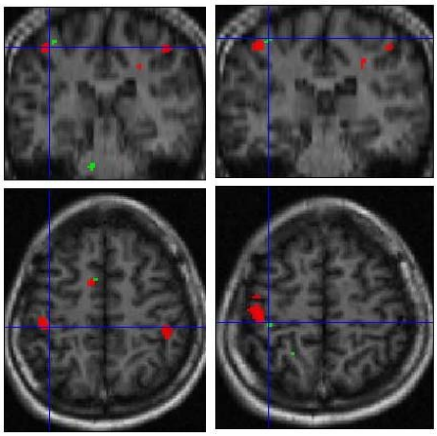

Figure 5. The example of brain activation by stimulation of two different fingers (Red: second finger, Green: third finger)

3.4. Voxel size by stimulation of different frequencies

주파수에 따라 활성화되는 뇌 영역의 크기를 확인하기 위하여, SI영역내 통계적으로 의미 있게 활성화된 voxel수를 계산하였다. 각 개인별 주파수에 따라 활성화되는 voxel수에 대한 반응 패턴을 Figure 6에 제시하였다. 주파수가 높아짐에 따라 활성화된 voxel수의 반응 패턴은 일관된 형태로 나타나지 않았으며, 개인차가 큰 것으로 나타났다.

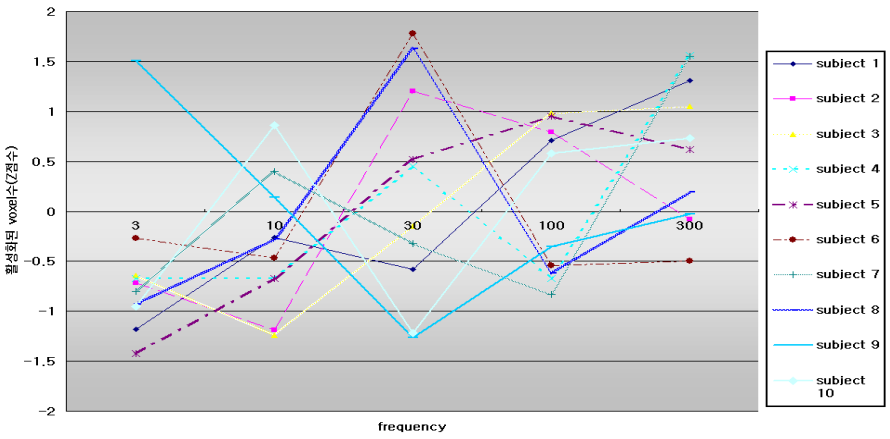

Figure 6. Activation pattern in the SI area by different frequencies by individuals

3.5. The relationship between the perceived intensity and brain activation

각 개인별로 주파수에 대한 심리적 평가강도와 활성화된 voxel 수의 반응 패턴이 유사한 형태로 나타났다(figure 7). 자극이 제시되는 동안 지각된 심리적 강도와 일차 체 감각 피질에서 활성화 된 voxel 수 간에 전형적인 두 가지 패턴의 관계가 관찰되었다(figure 7). 매우 흥미롭게도, 패턴에 관계없이 자극을 강하게 지각할수록 실제로 SI 영역의 활성화가 증가하였으며, 강한 정적 상관을 확인할 수 있었다(t=2.58, p < 0.05, r= 0.71).

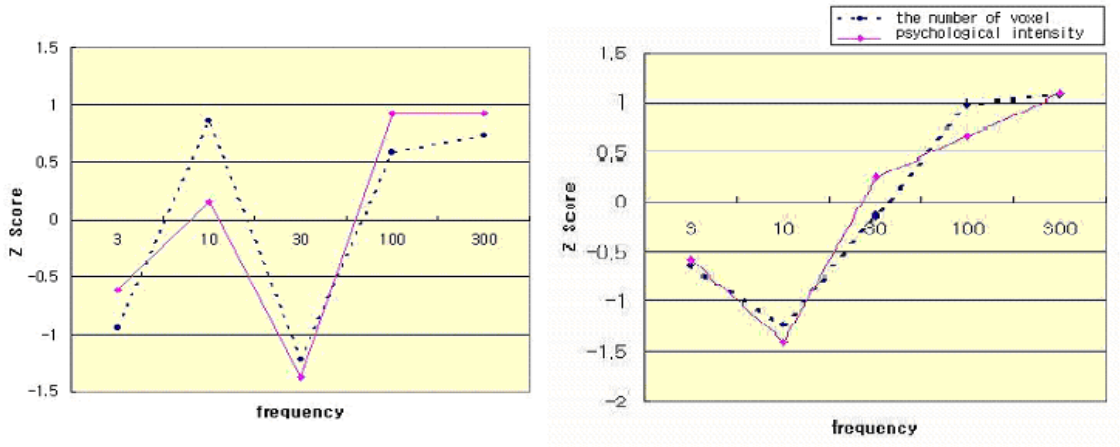

Figure 7. Two typical patterns for the relationship between the perceived intensity and brain activation (x axis represents stimulation frequencies, exponentially described).

4. Conclusion

집단분석의 결과는 촉각자극이 대측의 일차 체 감각 영역, 양측의 이차 체 감각 영역을 활성화 시킨다는 다른 이미징 연구 결과들과 일치한다(Boakye et al., 2000; Francis et al., 2000; Kurth et al., 1988). 체 감각 영역 이외의 활성화 영역은 Bilateral Inferior Frontal Gyrus, Bilateral Middle Frontal Gyrus, Right Insula, Left

Inferior Parietal Lobule 로 최근 neuroimaging 기법을 이용한 선행연구의 결과와 거의 일치한다(Burton et al., 1993; Disbrow et al., 2000; Gelnar et al., 1998; Ledburg et al., 1995; Polonara et al., 1999; Reed et al., 1998; Ruben et al., 2001). 또한 S1 영역을 ROI 영역으로 지정하여 주파수의 크기에 따라 뇌의 활성화 된 위치의 차이를 집단 분석한 결과, 활성화 다발(cluster)이 전반적으로 겹치는(overapping)되는 부위가 많았고, 개인에 따라 위치 차이가 일관되게 나타나지 않았다. 이는 Boakye et al.(2000)의 연구 결과와 부분적으로 일치하며, 주파수의 크기와 활성화 위치와의 관련성은 없을 것으로 예측할 수 있다.

또한 연구 결과는 2 번째 손가락을 표상하는 체 감각 피질영역이 3 번째 손가락을 표상하는 체 감각 피질영역보다 외측(lateral), 아래쪽(inferior)에 위치한 것으로 나타났다. 이는 뇌종양환자의 뇌를 직접 전기 자극하여 만들어진 homonculus 와 일치하며, fMRI 를 통해 2 번째와 5 번째 손가락에 대응하는 대뇌 피질 영역의 위치차이를 규명하려는 Francis et al.(2000)의 연구 결과와도 유사하다.

자극의 주파수가 달리 제시될 때의 대뇌 피질의 활성화를 알아보기 위하여, 피험자가 수동적으로 자극을 받는 동안 자극의 물리적 강도가 변화함에 따라 나타나는 뇌 반응이 측정되었다. 각 개인별 주파수에 따른 활성화 반응 패턴도 일관성 있는 결과가 나타나지 않았으며, 개인차가 컸다.

감각 피질 영역의 활성화는 자극의 물리적 특성 보다는 아니라 개인이 지각하는 심리적인 요인이 크게 작용할 것이라고 가정하고 심리적 평가강도와 활성화된 voxel 수의 반응패턴을 검증하였다. 그 결과 피험자 간 심리적 반응 패턴이나 중추신경계 반응 패턴이 일치하는 것은 아니였지만, 각 피험자 내에 심리적 반응 패턴과 뇌 활성화 패턴의 형태가 유사하게 나왔다. 이는 뇌의 활성화가 자극의 물리적 특성보다 개인이 지각하는 심리적이고 인지적인 요인과 더 큰 관련이 있음을 시사한다.

본 연구의 제한점은 실험 참여자의 수가 너무 적었다는 것이다. 연구 결과 2 번째 손가락과 3 번째 손가락을 표상하는 체 감각 영역의 위치 구분이 가능하였지만, 10 명의 피험자를 대상으로 얻어진 결과를 일반화 시키는 데는 어려움이 있다. 따라서 후속 연구에서는 사례수를 늘려 일반화 시키는 작업이 필요하다. 또한 개인별로 일관된 중추 신경계 반응 패턴을 보이지 않았을 뿐 아니라, 한 개인내 에서도 활성화된 voxel 수의 차이가 컸는데, 아마도 이는 연구에서 사용된 fMRI 기계의 불안정한 상태로 인해 신호(signal)와 잡음(noise)을 잘 구분하지 못한 것에서 비롯 된 것으로 보인다. 따라서 추후 연구에서는 각 개인 내에서 나타나는 물리적, 심리적 강도에 따른 중추신경계 반응의 일관성을 밝혀 반응 패턴의 일반화 작업에 안정성을 확보하는 것이 필요하다. 또한 Francis et al.(2000)과 Harrington and Hunter(2001)의 선행연구는 모두 촉각 자극기를 개발하여 이용하였는데, 본 연구에서는 선행연구에서 사용되었던 것처럼 촉각 자극기를 사용할 수 없어서 "저주파치료기"를 대신 사용하여 각 주파수에 따라 자극을 제시하였다. 따라서 제시된 촉각자극의 물리적 특성-힘(N), 제시영역의 크기(cm2)등을 통제하지 못하였다. 본 실험 후에도 계속적인 연구를 위해서는 선행연구에서와 같이 촉각 자극기를 개발하는 일이 필요한 것으로 간주된다.

이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 촉각 자극의 제시된 위치와 크기에 따른 대뇌 피질 활성화 매커니즘을 규명하고 또한 촉감각의 대뇌 활성화 반응이 제시된 자극의 물리적인 크기보다 심리적이고 인지적인 요인과 상관이 있음을 밝혔다. 이러한 촉감의 뇌 신경망 규명에 관한 기초 연구는 촉감 인식 및 구현 기술 및 인공 neuroinformatics 기술분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

This work was funded by grants from Korean Federation of Science and Technology Societies (No. NRF-2006-2005087).

References

Boakye, M., Huckins, S.C., Szeverenyi, N.M., Taskey, B.I. and Hodge Jr, C.J., Functional magnetic resonance imaging of somatosensory cortex activity produced by electrical stimulation of the median nerve or tactile stimulation of the index finger, *Journal of neurosurgery*, 93(5), 774-783, 2000.

Burton, H., Videen, T. and Raichle, M., Tactile-vibration-activated foci in insular and parietal-opercular cortex studied with positron emission tomography: mapping the second somatosensory area in humans, *Somatosensory & motor research*, 10(3), 297-308, 1993.

Disbrow, E., Roberts, T., Poeppel, D. and Krubitzer, L., Evidence for interhemispheric processing of inputs from the hands in human S2 and PV, *Journal of Neurophysiology*, 85(5), 2236-2244, 2001.

Francis, S., Kelly, E., Bowtell, R., Dunseath, W., Folger, S. and McGlone, F., fMRI of the responses to vibratory stimulation of digit tips, *Neuroimage*, 11(3), 188-202, 2000.

Gelnar, P.A., Krauss, B.R., Szeverenyi, N.M. and Apkarian, A.V., Fingertip representation in the human somatosensory cortex: an fMRI study, *Neuroimage*, 7(4), 261-283, 1998.

Harrington, G.S. and Downs III, H., FMRI mapping of the somatosensory cortex with vibratory stimuli: Is there a dependency on stimulus frequency?, *Brain research*, 897(1), 188-192, 2001.

Kurth, R., Villringer, K., Mackert, B.M., Schwiemann, J., Braun, J., Curio, G., Villringer, A. and Wolf, K.J., fMRI assessment of somatotopy in human Brodmann area 3b by electrical finger stimulation, *Neuroreport*, 9 (2), 207-209, 1998.

Ledberg, A., O'Sullivan, B.T., Kinomura, S. and Roland, P.E., Somatosensory activations of the parietal operculum of man. A PET study, *European Journal of Neuroscience*, 7(9), 1934-1941, 1995.

Ogawa, S., Tank, D.W., Menon, R., Ellermann, J.M., Kim, S.G., Merkle, H. and Ugurbil, K., Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(13), 5951-5955, 1992.

Polonara, G., Fabri, M., Manzoni, T. and Salvolini, U., Localization of the first and second somatosensory areas in the human cerebral cortex with functional MR imaging, *American Journal of Neuroradiology,* 20(2), 199-205, 1999.

Reed, C.L., Shoham, S. and Halgren, E., Neural substrates of tactile object recognition: an fMRI study, *Human brain mapping,* 21(4), 236-246, 2004.

Ruben, J., Schwiemann, J., Deuchert, M., Meyer, R., Krause, T., Curio, G., Villringer, K., Kurth, R. and Villringer, A., Somatotopic organization of human secondary somatosensory cortex, *Cerebral Cortex,* 11(5), 463-473, 2001.