

피부자극에 의해 유발되는 뇌파의 Time-Frequency 분석

여형석, 오상훈, 임재중, 손진훈*
인제대학교 보건대학 의용공학과
충남대학교 사회과학대학 심리학과*

Time-Frequency Analysis of EEGs Evoked by Tactile Stimulation

H.S.Yeo, S.H.Oh, J.J.Im, J.H.Sohn*

Department of Biomedical Engineering, College of Health Sciences, Inje University
Department of Psychology, College of Social Science, Chungnam University*

Abstract

This study was performed to characterize the physiological signal prior to develop an algorithm which quantifies EEGs evoked by tactile stimulation. The experiment was devised with four experimental conditions, which were control and two levels of pressures in tactile sensation. Twenty subjects were used to obtain EEGs while applying tactile stimulation using two types of textiles, soft towel and sand paper, to the right hand of each subject. EEGs were acquired for 20 seconds, and each trial was repeated five times randomly at the different levels of stimulus intensities. The index, S_n , was obtained by calculating the ratio of energy distribution in the time-frequency plot for each scored psychological state of the subject. The results showed that dominant aspects of the EEG signals have their maximal frequencies concentrated at a lower ranges for the resting and pleasant state, while the spectral energies were distributed to higher frequency ranges when subjects experience an unpleasant emotion.

서론

인간은 환경으로부터 주어지는 다양한 형태의 자극에 노출되어져 있으며 자극의 특성에 따른 감성의 변화를 경험한다. 특정 자극에 대한 신체상의 변화나 정신적인 변화를 알 수 있다면 그러한 감성변화에 관련된 정보를 토대로 인간에게 친화감을 주는 제품을 개발하거나 더욱 쾌적한 생활환경을 제시하여 줄 수 있을 것이다. 이렇듯 감성데이터와 관련한 요소들을 알아내기 위해서는 자율신경계의 작용에 의해 일어나는 감성 변화를 충분히 반영할 만한 생리심리학적 신

호의 분석이 용이하게 이루어져만 한다.¹⁾²⁾

또한, 급변하는 생리신호로부터 유의한 정보를 얻기 위하여 이에 합당한 데이터 분석 작업도 절실히 요구되어진다. 이를 위한 여러 가지의 신호분석방법 중에서 웨이브렛 변환(wavelet transformation)을 이용한 신호처리 기법은 신호를 time-frequency 영역으로 국소화시키는데 우수한 특성을 가지고 있으므로 유용한 기법으로 쓰이고 있다.³⁾⁴⁾⁵⁾ 따라서, EEG상의 변화추이를 잘 반영하도록 time-frequency 국소화 과정을 가장 적절히 접목시킨다면 이를 통하여 피검자의 생리심리학적 상태를 대변하는 정량적인 지수값들이 정의되어 질 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 time-frequency 분석기법을 이용하여 촉각자극에 의해 유발되는 EEG 변화의 특징적인 경향을 관찰하여 이를 지수값으로 나타냄으로써 촉각자극에 대한 EEG를 정량적으로 특징화 시키고자 하는 것이다. 즉, 본 연구는 EEG 파형상의 변화추이 분석이 피검자의 심리상태 변화로 간주될 만한 중요한 정보를 제공한다는 가정하에 수행되어진 다.

실험 방법

실험설계

본 연구는 20세~28세 성인 남녀(20명)의 오른쪽 손바닥부위를 대상으로 실험을 실시하였다. 자극 조건은 크게 무자극시와 자극시의 경우로 구분되며 자극 시에는 피검자의 손바닥에 재질의 표면이 접촉될 때의 압력의 강도를 크게 두 단계로 나누어 제시하였다.

실험 장치와 실험과정에 대한 전반적인 모식도가 그림 1에 나타나 있다. 자극기는 스테핑 모터를 원통형 회전판에 연결하였으며, 모터의 제어는 E-board

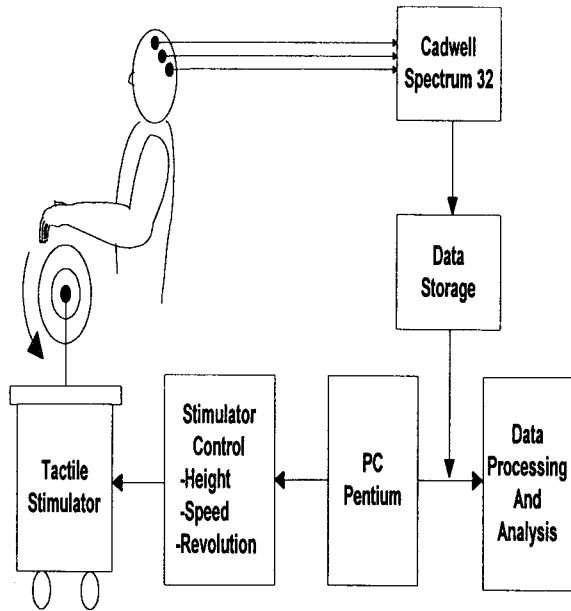


그림 1. 실험 방법 및 장치의 전체 모식도.
Fig. 1. Equipment setup for the experiment.

를 사용하여 회전 속도와 시간을 PC상에서 제어할 수 있도록 설계하였다. 그리고 촉각제시용 재질은 부드러운 천과 거친 사포를 사용하였으며, 자극은 무작위순으로 총 5회에 걸쳐 반복 수행하였다.

뇌파의 검출에는 Cadwell Spectrum32를 사용하였으며, 10/20 시스템을 기준하여 F_z, C_z, P_z 의 전극부위로부터 204.8Hz의 샘플링 주파수로 20초 동안의 뇌파를 수집하였다. 수집된 EEG파형은 Matlab에서 구동되는 wavelet toolbox를 사용하여 분석하였으며, 최종적으로 각 실험조건에 대한 지수(index)를 계산하여 통계적 유의성을 검증하였다.

Time-frequency 분석

기존의 연구들에 있어 수행되어온 생리신호의 분석 기법들을 보면 단지 시간영역에서의 신호들을 푸리에 변환 또는 고조파(harmonic)분석하여 주파수영역 상에 그 주파수 성분의 진폭이나 전력값으로 나타냄으로써 신호의 특징점을 검출하는 방법을 취하여 왔다. 그러나, 이들은 기본적인 조건으로 신호의 주기적인 성질이 전제되어야 한다. 따라서, 푸리에 변환을 이용한 분석기법들은 뇌파신호에서 발생할 수 있는 돌발적인 신호성분들(transient components)을 가지는 nonstationary한 신호를 분석하기에는 그다지 바람직하지 못한 접근 방법이라 하겠다. 이러한 분석 기법들과 비교할 때 웨이블릿변환을 이용한 time-frequency 분석은 생리신호에 대한 정보를 시간축상과 주파수축상에서 동시에 제공하고 있으며 nonstationary하며 transient한 신호를 분석함에 있어서 유리한 점들을 보이고 있다. 웨이블릿변환을 이

용한 time-frequency 분석은 웨이블릿이라는 제한된 길이의 주기적인 함수들을 포함하는 모웨이브렛함수(mother wavelet function)를 시간축을 따라 확장과 축소를 반복수행하여 이동하면서 convolution을 취해 주었을 때 관측하고자 하는 임의의 신호와 기저웨이블릿 원형함수가 직교조건을 만족하는 곳에서 이에 해당되는 주파수 성분을 검출하는 분석기법을 일컫는다. 즉, 기저 웨이블릿함수는 아래의 식 (1)에 정의된다.

$$h_{a, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t - \tau}{a}\right), \quad (1)$$

여기에서 a 는 scaling factor로서 $a > 1$ 일 때 기저 웨이블릿 $h(t)$ 가 확장되며 $a < 1$ 일 때는 축소하게 된다. 그리고, τ 는 시간축을 따라 기저웨이블릿 $h(t)$ 를 천이시키는 translating factor이다. 이렇게 모웨이브렛함수는 기저함수 $h(t)$ 의 크기를 조정하거나 시간축상에서 천이를 시킴으로써 생성되는 크기함수와 웨이블릿함수로 이루어져 있다. 이 때 모웨이브렛함수 함수 $h(t)$ 는 기본적으로 주기성을 가지고 있어야 하며 그 주기성은 시간축을 따라 이동하면서 시간 t 가 무한히 커지면 영(zero)의 값에 가까워진다. Mallat 과 Zhang은 time-frequency atoms를 적절히 선택하여 시간평면과 주파수평면으로 신호를 분해해 내는 matching pursuit 기법을 소개하고 있다.⁶⁾ 즉,

$$h_I(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t - \tau}{a}\right) e^{j\xi t}, \quad (2)$$

여기에 ξ 는 주파수 변조를 의미하고, 주어진 신호의 파형을 a, ξ, τ 변수들로 표현되는 시간-주파수 인자로 분해할 수 있다. 인자의 조합은 식(3)과 같이 정의되어지는 함수 $f(t)$ 를 만족시켜주도록 적절히 선택되어야 한다.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n h_{I_n}(t), \quad (3)$$

계수 a_n 은 $f(t)$ 의 정보를 반영하며 $h_{I_n}(t)$ 에 의해 결정되며, $I_n = (a_n, \xi_n, \tau_n)$ 으로 정의된다. 그리고 이 식은 주어진 시간-주파수 성분 h_I 로부터 주파수 성분 f 를 확장시킴으로써 scale factor를 계산할 수 있으며 이 크기인자와 반비례관계에 있는 주파수 변수의 한계성을 해결 할 수 있다. 또한, 식 (3)은 아래의 식(4)에 정의된 에너지 변환방정식에 의하여 에너지 밀도로서 보여질 수 있다.

$$\|f\|^2 = \sum_{n=0}^{m-1} |\langle R^n f, h_{I_n} \rangle|^2 + \|R^m f\|^2 \quad (4)$$

여기에서 $R^n f$ 는 n 차 잔류항이다.

Durka와 Blinowska는 여러형태의 파형을 가지고서 수행하는 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 그들은 time-frequency 국소화 작업을 통하여 EEG 수면파와 흡사한 Gabor 함수들을 쉽게 구분하였다. 예를 들면 EEG 신호의 spikes는 수직방향의 선모양으로, 그리고 EEG 수면파는 원형모양으로 변형되어 나타나는 것과 같이 EEG 신호의 각성분들이 time-frequency map상에서 다양한 형태로서 특징화 되어질 수 있음을 발표하였다.⁷⁾ 즉, 피검자가 다양한 형태의 촉각자극에 노출되었을 때 EEG 파형은 피검자의 정서상태를 반영하는 특정 형태의 파형으로서 변화를 보일 것이며 EEG 신호상의 이러한 변화들은 식(4)에 의한 time-frequency 에너지분포도에서 관찰할 수 있게 된다.

변수 추출

Time-frequency 에너지분포도는 주파수 대역에 대한 세로축과 시간에 대한 가로축으로 구성되어 있다. 이러한 에너지분포도에서 계산되는 각 주파수 대역에서의 총에너지는 식(5)에 의해 얻어진다.

$$P_B = \int |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (5)$$

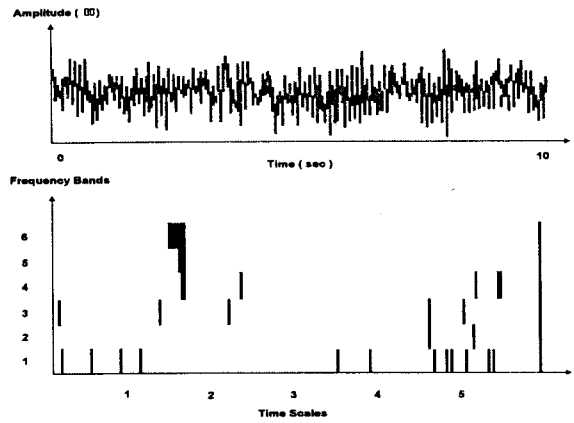
여기에서 $H(\omega)$ 는 $h(t)$ 를 푸리에 변환시킨 것이며 이것은 각 주파수 대역에 대하여 계산되어진다. 에너지 분포도를 구성하는 time-frequency cell상의 에너지 변화율은 식(6)의 $S_n(t, f)$ 지수로서 계산되었다. 그리고,

$$S_n(t, f) = \frac{P_{C(t, f)}}{P_B}, \quad (6)$$

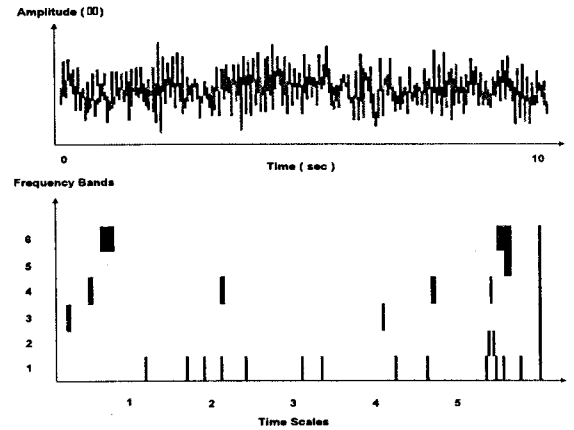
이 때 $P_{C(t, f)}$ 는 시간 t 와 주파수 f 로 지정된 cell 내부에 편중되어있는 에너지를 나타내고, P_B 는 선택된 셀 내부의 전 영역에 분포된 총에너지를 의미한다. 에너지 분포도는 30Hz범위의 주파수축을 5Hz 간격으로 6등분 하고 20초범위의 시간축을 2초간격으로 10등분함으로써 피검자의 심리적 상태에 상응하여 $S_n(t, f)$ 지수로서 계산되어진 총 60개의 시간-주파수 cell로 구성되어 있다.

결과 및 토의

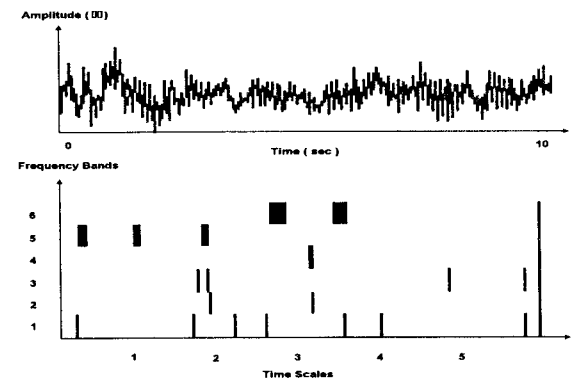
그림 2에는 무자극시의 EEG파형과 자극(거친 촉각 자극과 부드러운 촉각 자극)시 EEG파형이 time-frequency 에너지분포도와 함께 나타나 있다. 그림 2(a)의 에너지 분포도에서는 전체적으로 시간-주파수 에너지가 저주파수대역에 걸쳐 우세한 경향을 보이며 처음 4초 동안 20Hz에서 30Hz의 주파수 대역에서의 에너지 성분을 관찰할 수 있다. 마찬가지로



(a) 무자극시의 EEG파형과 에너지 분포



(b) 부드러운 자극시 EEG파형의 에너지 분포



(c) 거친 자극시 EEG파형의 에너지 분포

그림 2. 자극조건에 따른 EEG 파형의 에너지 분포.

Fig. 2. Time-frequency energy distribution of the EEG waveform following different stimulus conditions.

지로, 그림 2(b)에서는 피검자에게 부드러운 촉각 자극을 제시하였을 경우 훨씬 낮은 주파수 대역에서 에너지가 우세한 경향이 보여진다. 한편, 그림 2(c)에서와 같이 거친 촉각자극이 피검자에게 제시되었을 때는 처음 4초 동안의 20Hz에서 25Hz의 주파수 대역과 25Hz에서 30Hz의 주파수 대역에서 우세한 에너지 분포가 쉽게 대별된다. 이것은 피검자가 자극에 노출되었을 때 EEG파형의 전개특성이 변화를 보이기는 했으나 단지 몇 초 동안에만 관찰될 수 있는 변화임을 암시하며 피검자의 자극에 대한 적응(adaption)과정에서 기인하는 현상이라 볼 수 있겠다.

Time-frequency 에너지분포도의 각 cell에 대한 지수들은 피검자의 정서 상태가 normal한 경우의 $S_n(N)$, 쾌한 경우 $S_n(P)$, 불쾌한 경우의 $S_n(U)$ 로서 각각 분류되어 졌다. 표 1은 20-25Hz의 다섯 번째 주파수 대역과 25Hz-30Hz의 여섯 번째 주파수 대역에 대한 S_n 지수를 요약한 것이다. 이 값들은 선택된 주파수 대역에 대한 각 cell에서의 집중되어져 보이는 에너지의 비율로서 계산되어 졌다. 시간축이 20초 동안의 전체 EEG 파형중 절반에 해당하는 처음 10초동안에 대하여 정의되어져 있으므로 S_n 지수의 최대치는 50을 기준으로 하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 지수값은 거친 촉각자극상태에서 훨씬 높은 값을 보이고 있다. 특히, C15, C25, C35와 C26, C36, C46에서는 30보다 높은 값을 보이고 있다. 그리고, 지수값들에 대하여 t-test를 적용시킴으로써 실험 조건들간의 유의한 상이성이 보여지는 지를 비교하였는데, 그 결과 상기의 cell들은 촉각자극이 다른 각각의 실험조건들 간에 유의한 상이성을 보였다.

결 론

본 연구에서 수행된 시간-주파수 에너지 분포도를 이용한 EEG 신호의 특성화 작업은 피검자의 심리상태를 분류하는 알고리즘 수립에 유용한 기초 자료로서 쓰일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 극단적으로 촉각자극을 대표할 수 있는 부드러운 재질의 천과 거친 재질의 사포를 자극 조건으로서 제시하고자 한다면 시간-주파수 에너지 분포도상에는 더욱 정교한 주파수 대역과 시간대역이 적용되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] C.E. Chapman, "Active versus Passive Touch : factors influencing the transmission of somatosensory signals to primary somatosensory cortex," *Cad. J. Physio-Pharmacol.*, 72(5), pp.558-70, 1994.

표.1. 시간이 일정할 때 (a) 다섯번째 주파수 대역에서 계산된 S_n 지수. (b) 여섯번째 주파수 대역에서 계산되어진 S_n 지수.

Table 1. Calculated indices for the (a) 5th frequency bands. (b) 6th frequency bands while time scales hold constant.

(a) 1에서 5까지의 time scale(10초)에서의 다섯 번째 주파수 대역에 대한 지수값

	C15	C25	C35	C45	C55
$S_n(N)$	14.5	11.7	12.0	21.3	21.9
$S_n(P)$	11.1	21.5	16.9	15.8	22.8*
$S_n(U)$	43.6*	43.4*	32.5*	30.2*	22.3

(b) 1에서 5까지 time scale(10초)에서의 여섯 번째 주파수 대역에 대한 지수값

	C16	C26	C36	C46	C56
$S_n(N)$	18.4	25.9*	20.1	11.8	10.9
$S_n(P)$	31.3*	19.6*	15.3	11.8	28.8*
$S_n(U)$	23.0*	35.2*	45.4*	30.1*	22.2*

[2] M.Akay, "Wavelets in Biomedical Engineering," *Annals of Biomedical Engineering*, 23, pp.531-542, 1995.
 [3] S.J. Schiff, A. Aldroubi, M. Unser and S. Sato, "Fast wavelet transformation of EEG," *Electroencephal. and Clinical Neurophysiology*, 91, pp.442-55, 1994.
 [4] S.G. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuit with Frequency Dictionaries," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, 41, pp.397-415, 1993.
 [5] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," *Comm. Pure Appl. Math*, 41, pp.909-996, 1988.
 [6] S. G. Mallat, "A theory of multiresolution signal decomposition : the wavelet representation," *IEEE Trans. Patt. Anal., Machine Intell.*, 11, pp.674-693, 1989.
 [7] P.J. Durka and K.J. Brinowska, "Analysis of EEG Transients by Means of Matching Pursuit," *Annals of Biomedical Engineering*, 23, pp.608-11, 1995.