

기능성 근적외선 분광기를 이용한 전전두엽 영역에서의 사건 기반 뇌활성 특이 신호의 추출

論 文

58-1-33

Functional Near-Infrared Spectroscopy Extracts EROS in the Prefrontal Cortex

姜 縞 烈* · 方 聖 根** · 宋 誠 縞*** · 李 殷 珠†
(Ho-Yul Kang · Sung-Keun Baang · Seong-Ho Song · Unjoo Lee)

Abstract - In this study event-related optical signals were extracted from the prefrontal cortexes using functional near infrared spectroscopy while subjects were carrying out 2-back working memory tasks. Four events such as start, yes, no, and error were considered based on the onsets of the stimulus, positive true responses, positive false responses, and negative responses in the 2-back working memory task, respectively. The optical signals recorded were analyzed by peri-event histograms and power spectrum distributions. The results showed specific characteristics of the event-related optical neuronal signals and an opened possibility of an application to control a non-invasive brain-computer interface system or an object of a virtual reality.

Key Words : Brain-Computer Interface, FNIRS, Prefrontal Cortex, EROS(Event-related optical signal)

1. 서 론

근적외선 분광기 (NIRS: Near Infrared Spectroscopy)는 800nm에서 2500nm 사이의 근적외선 영역에서 특정 분자나 이온의 특정 파장에 대한 반사, 흡광 및 산란 계수 등의 변화를 이용한 시료의 화학적 성분 분석에 널리 사용되어 왔다. 의학적으로는 뇌기능에 따른 뇌혈류 내 산화헤모글로빈과 탈산화헤모글로빈의 분포의 변화를 이용하여 혈류 내의 산소포화도 (oximetry), 혈류량, 혈류 내 당도, 에너지 대사량 등의 측정을 위한 용도로 주로 사용되어 오고 있으며 또한 영유아의 뇌기능 분석에 활용되어 오고 있다[1]. 최근에는 근적외선 분광기가 비침습적이기 때문에 인체에 적용 가능하고 시스템이 간편하며 사용 상 제약이 상대적으로 적은 등의 장점 때문에 영유아 뿐 아니라 성인을 대상으로 하는 기능적 뇌 영상 장치로서의 응용 가능성이 크게 시사되고 있으며 우울증, 정신분열증, 알츠하이머 병, 뇌졸중 등의 진단과 치료를 위한 연구와 뇌의 인지 기능을 규명하기 위한 다양한 시도가 진행되고 있다[2,3]. 또한 이를 이용한 광(optical) 뇌-컴퓨터 접속 시스템 개발을 위한 연구도 가속화되고 있다[4].

현재 근적외선을 이용하여 추출할 수 있는 뇌신경 세포의 활동성 신호는 반응 시간에 따라 slow signal과 fast signal의 두 가지 형태로 알려져 있다. slow signal은 수 초 단위의 반응시간을 가지는 것으로서 주로 헤모글로빈 신호와 밀

접한 연관이 있다. 즉 국부적인 뇌의 활성화에 의해 해당 영역의 산화 헤모글로빈의 농도 증가와 탈산화 헤모글로빈의 농도 감소가 일어나게 되는 데, 650nm와 950nm 사이의 근적외선 영역에서의 산화 헤모글로빈과 탈산화 헤모글로빈의 흡수율 차이를 이용하여 추출해 낼 수 있는 신호이다. 이 신호는 기능적 자기 공명 영상 (fMRI) 장치에서의 BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) 신호와 밀접한 관련이 있다[5]. 근적외선 분광기는 공간분해능이 fMRI에 비해 상대적으로 낮은 단점을 가지고 있으나 시스템이 간편하고 움직임에 대한 제한이 없으므로 임상적으로 거동이 불편한 환자나 상시적 관찰이 필요한 환자에게 fMRI를 대체할 뇌기능 영상 장치로서의 중요성은 상당히 크며 하버드 대학의 Biomedical Imaging 센터를 비롯한 많은 선진 연구팀에 의해 활발한 연구가 진행되고 있다. Slow signal로는 뇌기능에 따라 활성화 되는 영역에 대한 정보만을 얻을 수 있기 때문에 이를 이용하여 뇌기능의 구체적인 메카니즘을 규명하거나 실시간 뇌-컴퓨터 접속 시스템을 구현하기에는 한계가 있다. 반면, fast signal은 수 밀리 초 단위의 반응시간을 가지는 신호로서 뇌신경세포의 전기화학적 활성화로 인한 신경세포막 주변의 이온 농도 변화와 이에 따른 광학적인 특성 변화, 즉 굴절율의 변화, 산란계수의 변화 등으로 인한 신호이며 실시간 신경세포 활동 신호와 밀접한 관련이 있다. 최근 Rensselaer Polytechnic Institute의 Yazici그룹을 중심으로 fast signal을 추출하여 뇌기능 영상 시스템을 구현하기 위한 시도가 진행되어 오고 있으나 신호의 크기가 아주 작고 slow signal에 중첩되어 측정되기 때문에 SNR를 증가시켜야 하는 문제가 우선적으로 해결해야 할 과제이다 [6]. 또한 현재까지 추출되어진 fast signal의 반응시간은 300ms 정도의 레벨로서 실시간 뇌-컴퓨터 접속 시스템에 응용하기 위해서는 좀 더 빠른 반응시간을 가지는 fast signal의 추출이 필요하다.

* 非 會 員 : 翰 林 大 電 子 工 學 科 碩 士 課 程

** 非 會 員 : 翰 林 大 電 子 工 學 科 副 教 授 · 工 博

*** 正 會 員 : 翰 林 大 電 子 工 學 科 教 授 · 工 博

† 교신저자, 正會員 : 翰 林 大 電 子 工 學 科 助 教 授 · 工 博

E-mail : ejlee@hallym.ac.kr

接受日字 : 2008年 12月 1日

最終完了 : 2008年 12月 17日

본 논문은 기존의 slow signal에 내재되어 있는 잡음 신호의 영향이나 fast signal의 반응시간에 대한 제약을 배제하고 뇌-컴퓨터 접속 시스템의 제어에 활용할 수 있도록 slow signal이나 fast signal이 아닌 뇌활성 신호의 사건 기반 특이 신호를 추출하는 것을 목적으로 한다. 우선 일차적으로 피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하는 동안 전전두엽 영역으로부터 뇌혈류역학 신호로서 산화해모글로빈과 탈산화해모글로빈의 농도를 multi-distance method와 Beer-Lambert Law를 사용하여 구하였다. 그리고 산화해모글로빈과 탈산화해모글로빈의 농도의 사건 기반 특이성을 peri-event histogram과 전력스펙트럼의 분포로부터 추출하였다. 결과적으로 2-back 작업기억 테스트에 있어서 자극 신호가 주어진 시점을 전후로 전전두엽 영역으로부터 기록되는 뇌혈류역학 신호의 특이적인 변화를 관찰할 수 있었으며 사건에 따라 뚜렷이 구별되는 전력 스펙트럼 분포를 구할 수 있었다. 본 논문의 결과는 근적외선 분광기를 이용하여 비침습적으로 뇌활성 신호의 사건 기반 특이성 추출의 가능성을 크게 시사하고 있으며 이는 뇌-컴퓨터 접속 시스템의 제어 뿐 아니라 가상공간 객체 제어에도 크게 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 및 방법

2.1 기능성 근적외선 분광기

본 연구에서 사용한 기능성 근적외선 분광기는 ISS Inc. (Campaign, IL USA)에서 제작한 Imagent로서 주파수도 메인에서 690nm와 830nm의 광을 110MHz의 주파수로 진폭 변조하여 출력하는 레이저 다이오드 (평균 전력 약 10 mW)를 광원으로 사용하고 photomultiplier tube (PMT)를 광검출기로 사용한다. 이 때 광검출기의 신호는 110.005 MHz의 주파수로 변조하고 5KHz 신호를 검출한다. 시간에 따라 광원으로부터 출력되는 근적외선의 세기는 아래 식(1)과 같다.

$$I_0 = I_{DC_0} + I_{AC_0} \sin(2\pi ft - \phi_0) \quad (1)$$

여기서 I_0 는 광원의 세기의 초기값, I_{DC_0} 와 I_{AC_0} 는 각각 광원의 세기의 직류성분과 교류성분의 크기, f , ϕ_0 , 그리고 t 는 각각 변조주파수, 초기 광원의 위상, 그리고 시간을 나타낸다. 광원, 피실험자의 두피, 그리고 광검출기 사이의 광신호의 전달은 직경 0.4μm인 광섬유에 의해 이루어진다. 생체 조직에서의 빛의 전파는 매질 내에서의 흡수계수, 산란계수, 및 굴절계수에 의해 좌우된다. 빛의 굴절 계수 (refractive index)는 매질 내에서의 빛의 속도를 결정한다.

2.2 광프로브

광프로브는 네 개의 690nm 광원, 네 개의 830nm 광원 그리고 하나의 광검출기로 구성하였다. 그림 1에 보여주고 있는 바와 같이 하나의 690nm 광원과 하나의 830nm 광원

이 한 쌍을 이루고 4개 광원 쌍들과 하나의 광검출기를 1.5cm의 간격으로 일렬로 배치하였다.

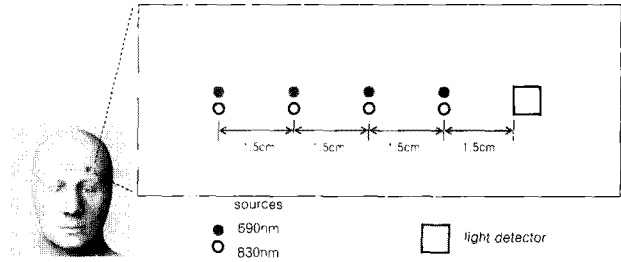


그림 1 광프로브 배치도

Fig. 1 Layout of the optical probes

2.3 Multi-distance method

흡수계수 μ_a 와 산란계수 μ_s 를 구하기 위해 본 연구에서는 Multi-distance method를 적용하였다[7]. 매질에 입사한 빛의 평균 강도 I_{DC} , 변조 진폭 I_{AC} , 그리고 위상차 ϕ 의 거리 r 에 따른 기울기는 다음 식 (2), (3)과 같다.

$$\frac{d\phi}{dr} = (\mu_a/D)^{1/2} [1 + (w/\mu_a\nu)^2]^{1/4} \sin[\tan^{-1}(w/\mu_a\nu)/2] \quad (2)$$

$$\frac{d(\ln(r^2 I_{AC}))}{dr} = -(\mu_a/D)^{1/2} [1 + (w/\mu_a\nu)^2]^{1/4} \cos[\tan^{-1}(w/\mu_a\nu)/2] \quad (3)$$

여기서 $D = (2(\mu_a + \mu_s))^{-1}$ 는 광확산계수, w 는 변조 각주파수, ν 는 매질 내에서의 광속이다. 식 (2)과 (3)을 이용하면 흡수계수 μ_a 와 산란계수 μ_s 는 다음 식 (4)와 (5)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_a = \frac{w}{2\nu} \left(\frac{\partial_r \phi}{\partial_r \ln[r^2 I_{AC}]} - \frac{\partial_r \ln[r^2 I_{AC}]}{\partial_r \phi} \right) \quad (4)$$

$$\mu_s = \frac{((\partial_r \ln[r^2 I_{AC}])^2 - (\partial_r \phi)^2)}{3\mu_a} - \mu_a \quad (5)$$

여기서 $\partial_r \ln[r^2 I_{AC}]$ 와 $\partial_r \phi$ 는 각각 거리 r 에 대한 변조 진폭과 위상차의 기울기들이다. Multi-distance method는 광원 전력, 광검출기의 감도 등 근적외선 분광기 자체 노이즈에 민감하지 않는 것이 장점이다.

2.4 Beer-Lambert Law

뇌활성 특이 신호를 추출하기 위해 본 연구에서는 뇌혈류

역학 파라미터인 산화헤모글로빈(HbO₂)과 탈산화헤모글로빈(Hb)의 농도를 계산하기 위해 Beer-Lambert Law를 이용하였다. 동질성(homogeneous)이고 산란현상을 무시할 수 있는(non-scattering) 두께 d 의 매질에 입사하여 매질을 투과한 후의 강도 I_d 는 식 (6)과 같다.

$$I_d = I_0 e^{-\mu_a d} \quad (6)$$

여기서 $\mu_a [mm^{-1}]$ 는 매질의 파장 λ 에 대한 흡수계수이다. 통상적으로 광밀도(OD: Optical density) 단위로 측정되는 흡광도 A 는 식 (7)으로 정의되는데 이는 빛 흡수물질에 빛을 투과시키면 빛의 일부가 흡수되어 투과광의 강도는 입사광의 강도보다 감소하는데, 이때 투과광의 강도가 감소하는 정도는 빛 흡수물질의 농도 $C[molar]$, 흡수물질의 비흡광계수 $\epsilon [molar^{-1}mm^{-1}]$, 그리고 입사광과 투사광 사이 이동거리 d 에 비례한다.

$$A = \epsilon \cdot C \cdot d = \log_{10}(I_0/I_d) \quad (7)$$

흡수물질의 수가 여럿인 경우, 즉 혈액의 경우 물, 산화헤모글로빈, 탈산화헤모글로빈 등의 흡수물질들을 포함하는 경우에 대하여 식 (7)은 다음의 식 (8)와 같이 확장이 될 수 있고 이를 자연로그를 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A(\lambda) = \sum_n \epsilon_n(\lambda) [C_n] d = \log_{10}(I_0/I_d) \quad (8)$$

$$- \sum_n \alpha_n(\lambda) [C_n] d = \log_e(I_d/I_0) \quad (9)$$

여기서 α 는 비흡광계수로서 $\epsilon \log_e 10$ 이다. 빛의 산란은 매질 내 산란물질과의 상호작용에 의해 빛의 방향이 바뀌는 현상으로서 산란물질의 크기, 빛의 파장 그리고 매질의 산란계수에 의존하며 투과광과 입사광사이의 관계는 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_d = I_0 e^{-\mu_s d} \quad (10)$$

여기서 $\mu_s [mm^{-1}]$ 는 매질의 파장 λ 에 대한 산란계수이다. Multi-distance method를 이용하여 구한 광학계수 μ_a , μ_s 와 Beer-Lambert Law를 이용하여 혈류 내 산화헤모글로빈의 농도 $[HbO_2]$, 탈산화헤모글로빈의 농도 $[Hb]$ 그리고 산소포화도(cerebral oxygen saturation) $[StO_2]$ 는 각각 식 (11), (12) 그리고 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[HbO_2] = \frac{\epsilon_{Hb}(\lambda_2)\mu_a(\lambda_1) - \epsilon_{Hb}(\lambda_1)\mu_a(\lambda_2)}{\epsilon_{Hb}(\lambda_2)\epsilon_{HbO_2}(\lambda_1) - \epsilon_{Hb}(\lambda_1)\epsilon_{HbO_2}(\lambda_2)} \quad (11)$$

$$[Hb] = \frac{\epsilon_{HbO_2}(\lambda_2)\mu_a(\lambda_1) - \epsilon_{HbO_2}(\lambda_1)\mu_a(\lambda_2)}{\epsilon_{HbO_2}(\lambda_2)\epsilon_{Hb}(\lambda_1) - \epsilon_{HbO_2}(\lambda_1)\epsilon_{Hb}(\lambda_2)} \quad (12)$$

$$[StO_2] = \frac{[HbO_2]}{[HbO_2] + [Hb]} \quad (13)$$

2.5 실험과정

6명(남 4명, 여 2명)의 자원자들을 대상으로 2-back 작업기억(working memory) 테스트를 수행하게 하면서 전전두엽 영역(PFC: Prefrontal Cortex)의 뇌활성 신호를 Imagent(ISS Inc. Campaign, IL USA)를 이용하여 측정하였다. 자원자들은 모두 오른손잡이(right-handed)였고, 평균 연령은 22.6(±1)이었다. 2-back 작업기억 테스트는 임의 순서로 하나씩 디스플레이되는 자극신호와 동일한 자극신호가 2-back의 시점에 디스플레이될 때의 자극신호를 타겟신호로 설정한다. 2-back 작업기억 테스트에 있어서 자극신호(stimulus signal)로는 컴퓨터 모니터(17인치) 중앙에 임의 순서로 디스플레이되는 영문 알파벳(대 소문자 구분하지 않음)으로 설정하였다. 영문 알파벳이 디스플레이 되는 창의 가로와 세로의 길이는 2cm 내지 6cm 사이 1cm 간격으로 5개의 단계로 크기 조절이 가능하도록 하였으며, 실험에 참여할 자원자들에 대하여 사전 테스트를 수행한 결과 모두에게 가장 적합한 크기의 단계인 5cm로 고정하였다. 피실험자는 자극신호가 디스플레이되는 컴퓨터 모니터 앞 약 30 내지 50cm 떨어진 거리로부터 정면으로 모니터를 응시하도록 하였다. 총 512개의 자극신호에 대하여 자극신호가 주어지는 구간은 500ms, 자극신호의 주기는 1500ms이었으며 처음 자극신호가 주어지기 전 2500ms 동안 2-back 테스트 시작을 알리는 초기화면을 디스플레이하였다. 피실험자의 자극신호에 대한 반응을 위해 자극신호가 디스플레이되는 화면 아래 중앙으로부터 같은 거리 떨어진 오른쪽에는 'yes' 버튼을 왼쪽에는 'no' 버튼을 설정하고 키보드 키를 이용하여 버튼 제어가 가능하도록 하였다. 피실험자가 올바른 2-back 작업기억 테스트 수행을 위해서 타겟신호에 대하여 'yes' 버튼을 그렇지 않은 신호에 대하여 'no' 버튼을 클릭하도록 하였다. 모든 실험은 외부 빛이 차단된 상태에서 진행되었으나 모니터 등 주변환경으로부터 광검출기에 입력되는 광원의 영향과 초기 광원 신호의 크기에 따른 영향을 최대한 배제할 수 있도록 팬텀(phantom)을 이용한 보정(calibration)과정을 수행하였다.

2.6 데이터 분석

광검출기에서 검출한 근적외선의 평균 강도 I_{DC} , 변조 진폭 I_{AC} , 그리고 위상차 ϕ 등의 측정 데이터에 대하여 광원과 광검출기 사이 거리 r 에 따른 기울기를 계산하고 multi-distance method를 적용하여 식 (3)과 (4)로부터 광파장 690nm, 830nm 각각에 대한 흡수계수 μ_a 와 산란계수 μ_s 를 계산하였다. 기울기는 광원과 광검출기 사이 거리가 1.5, 3.0, 4.5, 6.0cm인 경우의 측정 데이터에 대하여 선형회귀분석(linear regression analysis, $R^2 \geq 0.95$) 방법으로 계산하였다. 피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하

는 동안 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 를 식 (11)과 (12)를 이용하여 구하였다. 2-back 작업기억 테스트 수행 중 피실험자의 자극신호에 대한 반응을 start, error, yes, no 네 가지 사건(event)로 분류하고 각 사건에 대한 peri-event 히스토그램을 0.2s 시간 간격으로 구하여 사건 기반 전전두엽 영역의 뇌활성 특이 신호의 패턴을 분석하였다. 여기서 사건 start는 자극신호가 주어지는 시점, 사건 yes는 피실험자가 'yes' 버튼을 클릭하는 시점, 사건 no는 피실험자가 'no' 버튼을 클릭하는 시점 그리고 사건 error는 피실험자의 반응이 타겟과 일치하지 않는 경우 'yes' 버튼 혹은 'no' 버튼을 클릭하는 시점을 기준으로 하였다.

3. 결 과

그림 2는 파장 690nm와 830nm에 대하여 각각 거리 r 에 대한 변조 진폭과 위상차의 기울기 $\partial_r \ln[r^2 I_{AC}]$ 와 $\partial_r \phi$ 를 측정된 데이터로부터 계산하여 구한 것이다.

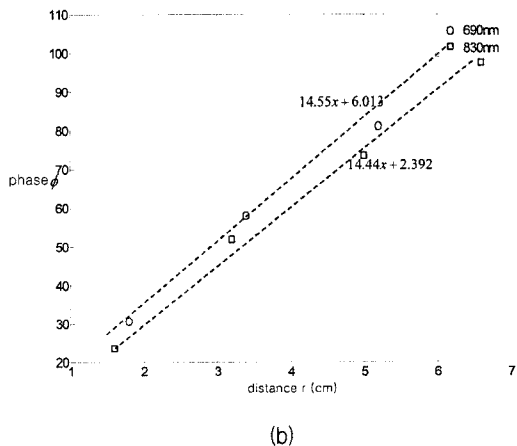
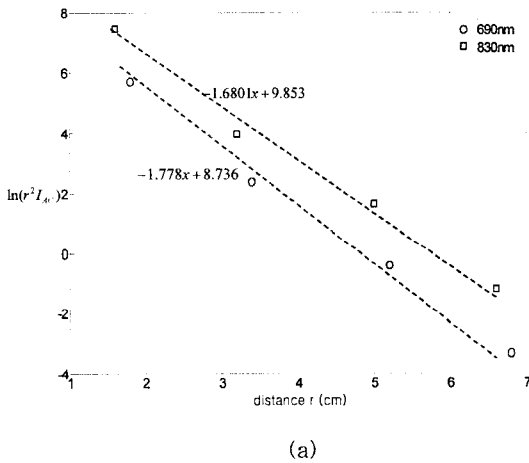


그림 2 거리 r 에 대한 변조 진폭과 위상차의 기울기
Fig. 2 Slopes of the amplitude and the phase of the modulated signal

그림 3은 거리 r 에 대한 변조 진폭과 위상차의 기울기 $\partial_r \ln[r^2 I_{AC}]$ 와 $\partial_r \phi$ 에 대하여 광학계수 μ_a 와 μ_s 를 식 (4)와 (5)로부터 구한 것이다.

그림 4는 피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하는 동안 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 를 식 (11)과 (12)를 이용하여 구한 결과의 그래프이다.

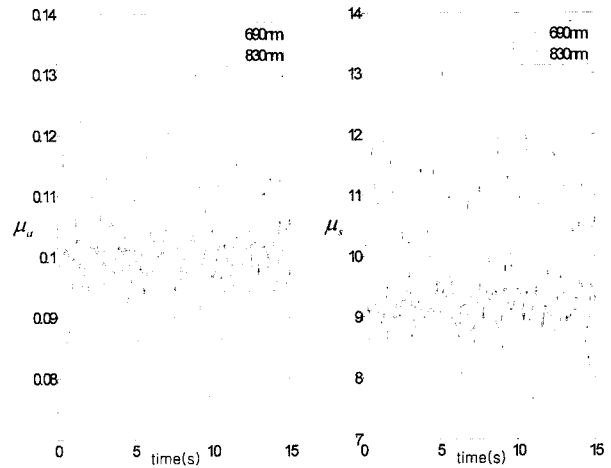


그림 3 Multi-distance method를 이용하여 구한 광학계수 μ_a 와 μ_s
Fig. 3 Optical coefficients μ_a and μ_s estimated by multi-distance method

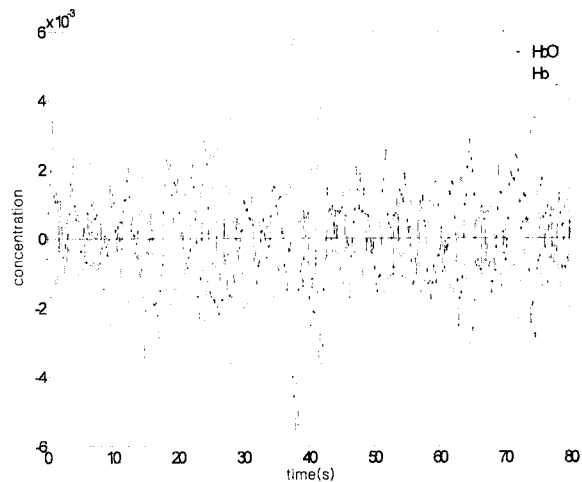


그림 4 작업기억 수행과정 동안의 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$
Fig. 4 Densities of oxy-hemoglobin and deoxy-hemoglobin in the region of the prefrontal cortex during the 2-back task trials

그림 5는 피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하는 동안 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 의 변화의 peri-event histogram을 사건 start에 대하여 도시한 것이다. 그림으로부터 자극 신호가 주어지는 시점(time=0)을 기준으로 산화헤모글로빈의 농도 $[HbO_2]$ 는 감소하였고 탈산화헤모글로빈의 농도 $[Hb]$ 는 상대적으로 증가하였으며 결과적으로 산화헤모글로빈의 농도와 탈산화 헤모글로빈의 농도를 합한 전체 혈류량 ($Hb+HbO_2$)의 변화가 큰 폭으로 증가하였다가 감소하였음을 알 수 있다. 이는 피실험자의 뇌활성도가 자극신호가 주어지기 이전에 이미 증가함을 단적으로 보여주는 결과이다.

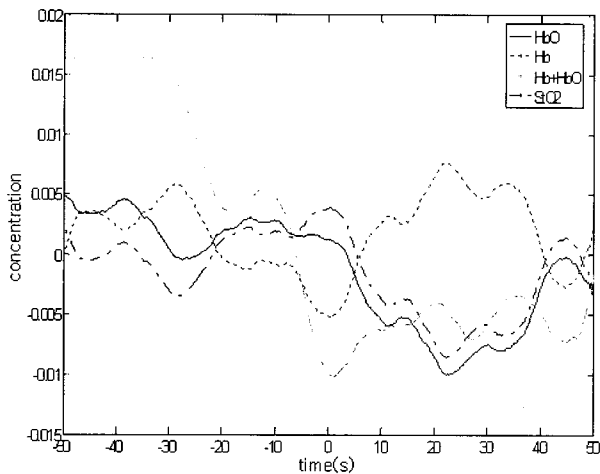
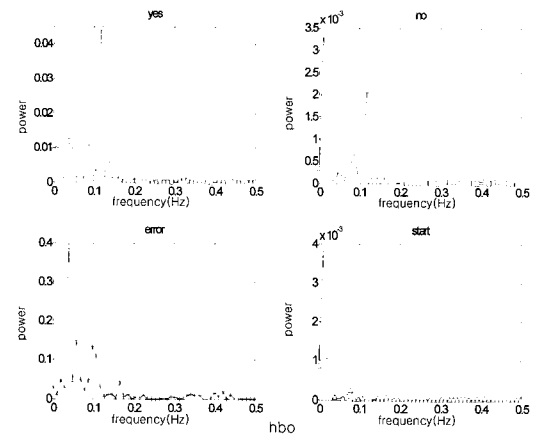


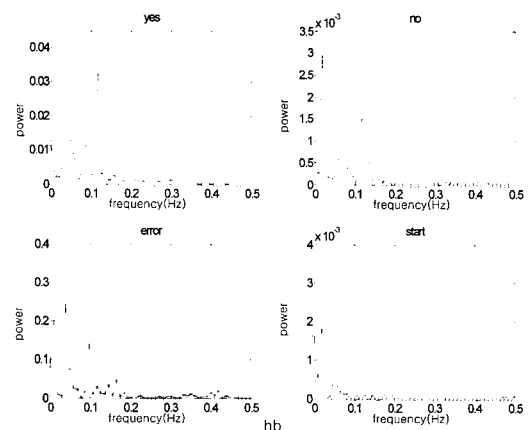
그림 5 작업기억 수행과정 동안 사건 start에 대한 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 변화의 perievent histogram

Fig. 5 Perievent histogram of the variations in the densities of oxy-hemoglobin and deoxy-hemoglobin in the region of the prefrontal cortex for event start during the 2-back task trials

그림 6은 피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하는 동안 사건 yes, no, error 그리고 start 각각에 대하여 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 의 변화의 전력 스펙트럼을 도시한 것이다. 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 은 모두 사건에 따라 서로 다른 주파수 영역에서 최대 전력값을 보여주고 있으며 특히 사건 no의 경우($HbO_2:0.0195$, $Hb:0.0293$) 약간의 변이가 발생한 것을 제외하고 각 사건은 동일한 주파수(yes: 0.127, error:0.0488, start:0.0293)에서 최대 전력값을 보여주고 있다. 이는 전전두엽 영역으로부터 기록되는 뇌활성 신호의 사건 기반 특이성을 크게 시사하고 있으며 또한 뇌-컴퓨터 접속 시스템의 제어나 가상공간 객체 제어에의 활용 가능성을 시사하고 있는 것이다.



(a)



(b)

그림 6 (a) 작업기억 수행과정 동안 사건 yes, no, error, start 각각에 대한 전전두엽 영역의 뇌혈류역학 파라미터인 산화헤모글로빈 농도 $[HbO_2]$ 와 (b)탈산화헤모글로빈 농도 $[Hb]$ 변화의 power spectrum distributions

Fig. 6 (a) power spectrum distributions of the variations in the densities of oxy-hemoglobin and (b) deoxy-hemoglobin in the region of the prefrontal cortex for events yes, no, error, and start during the 2-back task trials

4. 결론

피실험자가 2-back 작업기억 테스트를 수행하는 동안 전전두엽 영역으로부터 뇌혈류역학 신호로서 산화헤모글로빈과 탈산화헤모글로빈의 농도를 multi-distance method와 Beer-Lambert Law를 사용하여 구하였다. 그리고 산화헤모글로빈과 탈산화헤모글로빈의 농도의 사건 기반 특이성을 peri-event histogram과 전력스펙트럼의 분포로부터 추출하였다. 결과적으로 2-back 작업기억 테스트에 있어서 자극신호가 주어진 시점을 전후로 전전두엽 영역으로부터 기록되는 뇌혈류역학 신호의 특이적인 변화를 관찰할 수 있었으며 사건에 따라 뚜렷이 구별되는 전력 스펙트럼 분포를 구할

수 있었다. 본 논문은 기존의 slow signal에 내재되어 있는 잠음 신호의 영향이나 fast signal의 반응시간에 대한 제약을 배제하고 뇌-컴퓨터 접속 시스템의 제어에 활용할 수 있도록 slow signal이나 fast signal이 아닌 뇌활성 신호의 사건 기반 특이 신호를 추출하였다. 결과적으로 근적외선 분광기를 이용하여 비침습적으로 뇌활성 신호의 사건 기반 특이성 추출의 가능성을 크게 시사하였으며 이는 뇌-컴퓨터 접속 시스템의 제어 뿐 아니라 가상공간 객체 제어에도 크게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 누리사업 GOAL-NURI와 학술진흥재단 KRF-2006-531-H00003, KRF-2007-531-H00003의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Enrico Gratton, Sergio Fantini, Maria Angela Franceschini, Gabriele Gratton and Monica Fabiani, "Measurements of scattering and absorption changes in muscle and brain," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 352, pp. 727-735, 1997.

[2] Enrico Gratton, Vladislav Toronov, Ursula Wolf, and Andrew Webb, "Measurement of brain activity by near-infrared light," *Journal of Biomedical Optics* 10(1), 011008, 2005.

[3] Maria . Angela Franceschini and David A. Boas, "Noninvasive measurement of neuronal activity with near-infrared optical imaging," *NeuroImage* 21, pp. 372- 386, 2004.

[4] Shirley M Coyle, Tomas Eward2 and Charles M Markham, "Brain-computer interface using a simplified functional near-infrared spectroscopy system," *J. Neural Eng.* 4 , pp. 219-226, 2007.

[5] Gabriele Gratton, Monica Fabiani, Paul M. Corballis, Donald C. Hood, Marsha R. Goodman-Wood, Joy Hirsch, Karl Kim, David Friedman, and Enrico Gratton, "Fast and Localized Event-Related Optical Signals (EROS) in the Human Occipital Cortex: Comparisons with the Visual Evoked Potential and fMRI," *NeuroImage* 6, pp. 168-180, 1997.

[6] I.-Y. Son, M. Guhe, W. Gray, B. Yazici, and M. J. Schoelles, "Human performance assessment using fnir," In *Proceedings of SPIE*, 2005.

[7] Brian W. Pogue, Keith D. Paulsen, Chris Abele and Howard Kaufman, "Calibration of near-infrared frequency domain tissue spectroscopy for absolute absorption coefficient quantitation in neonatal head-simulating phantoms," *Journal of Biomedical Optics* 5(2), pp. 185- 193 2000.

저 자 소 개



강 호 열 (姜 鎭 烈)

1981년 02월 06일생. 2008년 한림대 전자공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정



방 성 근 (方 聖 根)

1962년 07월 01일생. 1985년 서울대 원자핵학과 졸업. 1996년 미국 UCLA 전기공학과 졸업(공학). 2002년~현재 한림대 전자공학과 부교수



송 성 호 (宋 誠 鎭)

1964년 10월 02일생. 1987년 서울대 공대 졸업. 1995년 서울대 공대 졸업(공학). 1996년~현재 한림대 전자공학과 교수



이 은 주 (李 殷 珠)

1961년 08월 19일생. 1983년 경북대 전자공학과 졸업. 1995년 미국 UMCP 전기공학과 졸업(공학). 2000년~현재 한림대 전자공학과 조교수