

The Analysis of Gamma Oscillation and Phase-Synchronization for Memory Retrieval Tasks

Sung-Phil Kim¹, Seong-Hyeon Choe¹, Hyun Taek Kim², and Seung-Hwan Lee³
Barin and Cognitive Engineering¹ & Department of Psychology², Korea University
Department of Neuropsychiatry³, Inje University
spkim@korea.ac.kr

Abstract

The previous investigations of electroencephalogram (EEG) activity in the memory retrieval tasks demonstrated that event-related potentials (ERP) during recollection showed different durations and the peak levels from those without recollection. However, it has been unknown that recollection in memory retrieval also modulates high-frequency brain rhythms as well as establishes large-scale synchronization across different cortical areas. In this study, we examined the spectral components of the EEG signals, especially the gamma bands (20-80Hz), measured during the memory retrieval tasks. Specifically, we focused on two major spectral components: first, we evaluated the temporal patterns of the power spectral density before and after the onset of the memory retrieval task; second, we estimated phase synchrony between all possible pairs of EEG channels to evaluate large-scale synchronization. Fourteen healthy subjects performed the memory retrieval task in the virtual reality environment where they selected whether or not the present item was seen in the previous training period. When the subjects viewed the unseen items, the middle gamma power (40-60Hz) appeared to increase 200-500ms after stimulus onset while the low gamma power (20Hz) was suppressed all the way through the post-stimulus period 150ms after onset. The degree of phase synchronization in this low gamma level, however, increased when the subjects fetched the item from memory. This suggests that phase synchrony analysis might reveal different aspects of the memory retrieval process than the gamma power, providing additional information to the inference on the brain dynamics during memory retrieval.

서 론

현대 과학의 주요 특징 중의 하나가 학문 간의 벽을 허무는 학문의 발전 경향이며, 그 대표적인 예가 종합적 학문인 인지과학의 발전이라고 할 수 있다 (이정모, 1996). 예를 들면, 현대 인지과학의 많은 연구들은 기존 인지기능에 대한 신경생리학적 연구를 위해 뇌파도 (electroencephalogram, EEG) 분석 방법을 사용해오고 있다. 뇌파도에 대한 분석방법 중 가장 대표적인 방법은 자극관련전위(Event-Related Potentials)인데, 이는 사람이나 동물의 뇌에서 연속적인 뇌 신호에서의 전위크기가 자극 후 변화를 보일 때 자극과 관련된 정보를 나타내는 것으로 간주하여 분석하는 방법이다.

자극관련전위 (ERP)는 사람이나 동물의 인지나 사고에 대한 정보를 담고 있는 신호의 한 형태이지만 이러한 신호특성은 시간에 국한된 정보만을 얻게 된다는 한계가 있다.

이에 반해, 최근에는 시간에 대한 분석뿐만 아니라 주파수 (frequency) 성분 에 대한 신호 분석도 활발히 진행되고 있다. 특히, 뇌 신호의 여러 종류 중 감마 영역의 뇌 신호 (주파수 20-80Hz, 각성 시에 발생)에서 나타나는 뇌에서의 인지적 기능에 대한 진동의 반응을 시간에 따른 파워 스펙트럼의 변화를 통해 분석한다. 이와 더불어 위상 영역에서의 분석도 지난 약 10년 동안 연구되어 왔다. 주파수 및 위상에서의 분석은 기존의 분석법에서 제공하지 않는

추가적인 뇌 신호 정보를 나타낼 수 있는데, 그 중 위상 동기화 (phase synchrony) 방법은 뇌 신호가 측정되는 각 채널 간의 동기화 정도를 통해 개별적 채널 분석으로는 관찰할 수 없는 뇌의 동적 현상을 나타낼 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 시간-주파수, 위상 분석을 이용하여 14명의 피험자에 대한 실제와 같은 3-D 가상현실에서의 기억 회복 실험을 수행하고 이러한 기억과정을 통해 뇌의 고주파수 동적 변화가 어떻게 일어나는지 관찰한다.

연구대상 및 방법

연구대상

피험자는 연령 및 교육수준이 비슷한 14명의 정상인 (평균나이, 29.2 ± 6.8 ; 5명의 남성, 9명의 여성)으로 구성되었다. 알코올이나 약물중독의 경험이 있거나, 기질적 정신장애 (organic mental illness) 혹은 정신적 장애 (mental impairment), 뇌 손상의 경험, 그리고 최근에 심각한 질병을 가진 사람은 제외되었다. 실험을 하기 전에, 피험자들은 Schizotypal Personality Questionnaire (SPQ), Auditory hallucination scale, Beck Depression Inventory (BDI), 그리고 State and Trait Anxiety Inventory (STAI)를 수행하였다.

자극 및 실험설명

본 연구에서는 빔 프로젝터나 Head Mounted Display (HMD)를 이용한 3-D 가상환경으로 자극이 제시되었고, 실험 과정은 크게 네비게이션 회기와 인출 회기로 구성되었다.

네비게이션 회기에서는 피험자가 실험자가 정한 순서와 시간에 따라 도서관, 사무실, 회의실, 휴게실의 4가지 장소와 그 장소에 놓여 있는 가전제품 및 사무용품 등을 보면서 가상환경을 네비게이

션 하였다. 각 네비게이션 회기는 평균 10분 정도가 소요되었다.

인출 회기에서는 피험자가 뇌파를 측정하면서 네비게이션 회기 동안 방문했던 장소와 그 장소에 놓인 물체가 일치하는지에 대해 반응을 하였다. 이 때 보여지는 자극은 세가지로 분류되는데,

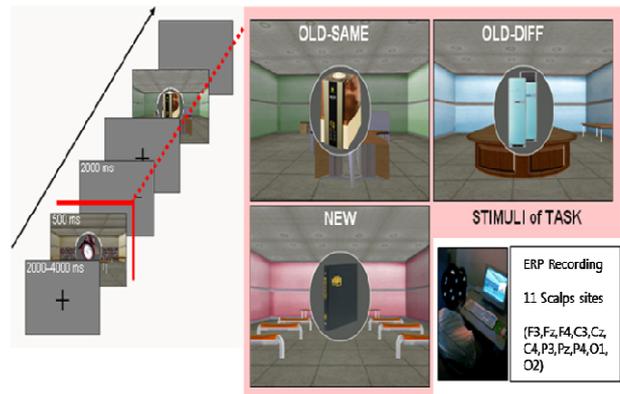


그림 1. 실험에 쓰인 자극 및 실험

네비게이션 동안 방문했던 장소와 물체가 일치하는 Old-Same items (60개), 네비게이션 동안 방문했던 장소와 놓여있는 물체가 일치하지 않는 Old-Different items (60개), 그리고 네비게이션 중에 한번도 제시되지 않았던 물체를 새롭게 제시하는 New items (60개)이다. 본 연구에서는 3종류의 자극 중 Old-Same과 New에 대해서만 뇌 신호 분석을 하였다. 모든 자극은 각각 500ms 동안 무선적으로 제시되며, 피험자는 자극 제시 후 2000ms 이내에 보여진 물체가 네비게이션 동안 방문했던 장소와 일치하는지에 대해 키보드로 반응하였다. 각 인출 회기는 20분 정도가 소요되었다. 뇌파는 64 channel NeuroScan SyncAmp64 장비를 사용하여 측정되었다. 이 때, 이 중 두 채널은 눈 깜빡임과 근육운동을 나타내는 채널로 잡음을 제거하는 데 사용되었다. 뇌 신호를 측정하기 위한 전극 캡 착용 시간을 모두 고려한 총 실험 시간은 45분 정도 소요되었다.

시간-주파수 스펙트럼 분석법

뇌 신호의 대부분은 전 시간 영역에 걸쳐 있고 비주기적이다. 단위 자극-반응 실험에서 얻은 뇌 신호 전체를 푸리에 급수로 표현하게 되면 비주기적 함수의 스펙트럼 계산에 대한 오류 가능성이 커지고 시간에 따른 각 주파수 영역별 변화 측정도 어려워진다. 이를 위해 뇌 신호를 충분히 작은 시간 간격으로 나누고 각 간격에서 개별적으로 푸리에 변환을 해주게 되면 시간에 따른 주파수 변화를 추적할 수 있게 된다 (단시간 푸리에 변환: Short-Time Fourier Transform).

본 연구에서는 뇌 신호를 윈도우 사이즈가 192ms (Rodriguez *et al.* 2006)이고 샘플링 값이 256Hz인 단시간 푸리에 변환을 하여 뇌 신호를 각 윈도우에 따른 주파수 성분으로 나타내어 주었다. 이로부터 각 윈도우에서의 주파수 영역 별 파워 값을 계산하여 시간에 따른 변화량을 분석하기 위해 Spectrogram을 구하였다.

z-변환

시간-주파수 스펙트럼 결과로부터 자극 전후의 변화치를 얻기 위해 z-변환을 이용하였다. 단시간 푸리에 변환을 통해 구한 주파수별 신호파워 결과로부터 자극이 제시되기 전까지 구간 (-200ms~0ms)에서의 각 주파수 별 평균과 분산을 먼저 구했다. 이 평균과 분산을 이용해 전체 구간 (-200ms ~ 2000ms) 의 주파수 신호 파워를 z-score로 변환하여 자극 후 신호가 자극 전에 비해 얼마나 증가 또는 감소하였는지를 나타내었다.

위상 동기화 분석

뇌 신호의 위상 성분을 구하고 동기화 정도를 구하기 위해서 Phase Locking Value (PLV)를 계산

하였다 (Varela *et al.* 1999). 세부 과정은 아래와 같다.

1. 각 뇌 신호를 밴드패스 필터로 통과시켜 뇌 신호의 특정 주파수 성분만 추출한다.
2. Wavelet 함수와 Convolution하여 뇌 신호를 크기와 위상 성분으로 분리한 후, 두 채널간의 위상차이를 계산하여 준다.
3. 계산된 위상 차의 값을 단위실험 (Trial) 별로 구하고 2차 평면에 벡터로 나타낸다.
4. 모든 단위실험으로부터 벡터 합을 구한 뒤 전체 단위 개수(Number of trials)로 나누어 준다. 만약 두 채널 간 동기화가 전혀 없으면 이 값은 0이 되고 동기화가 온전히 이루어지면 1의 값을 가지게 된다.
5. 각 시간 샘플 별로 1-4 과정을 반복하여 시간에 따른 PLV 값을 계산한다.

결 과

자극에 대한 채널의 변화에 따른 반응

Old-Same 자극과 New 자극에 대한 뇌 신호 반응에 대해 ERP 기반 뇌 신호 분석에서 뚜렷한 차이를 보이는 4개 채널 (Pz, Poz, Fz, Cz)을 먼저 선별하였다. 이 채널에서 기록된 뇌 신호로부터 시간-주파수 스펙트럼을 분석하였다. New 자극에 대한 반응 신호를 분석한 결과 저대역 감마파 (20Hz) 부근에서 신호 파워가 감소함을 볼 수 있었다. 또한 중대역 감마파 (40-60Hz 부근)에서 신호 파워가 증가하였다. (그림 2.) 이러한 특징은 그림 3. 에서 보는 것처럼 전체 62개 채널로부터의 평균값을 각 자극에 대해 비교하였을 때 더욱 뚜렷이 나타났다.

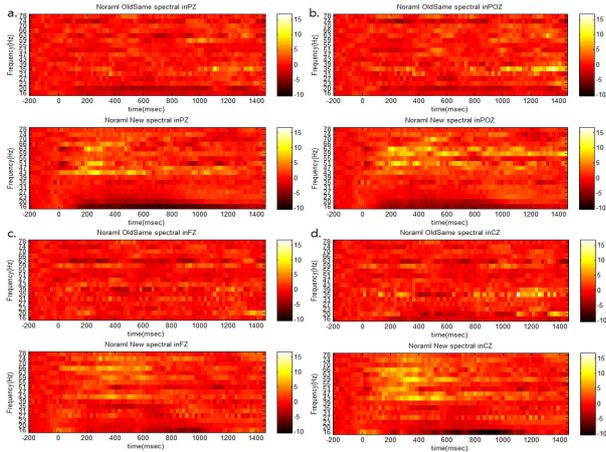


그림 2. 4개 채널(Pz, Poz, Fz, Cz)에서의 스펙트럼 차이

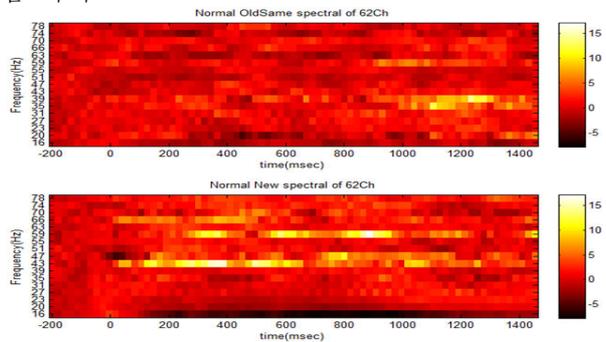


그림 3. 62채널에서의 스펙트럼 평균 값

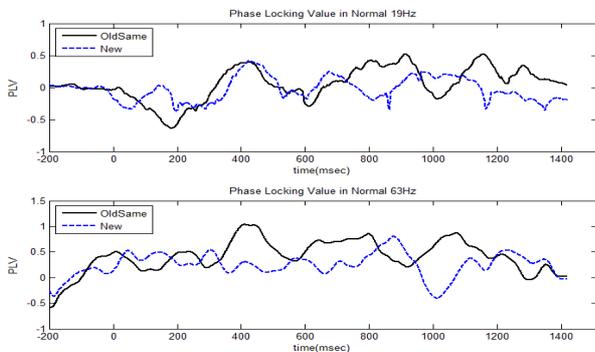


그림 4. 19Hz, 63Hz에서의 Old-Same과 New 자극 사이의 PLV 값의 변화

Phase Locking Value

시간-주파수 스펙트럼 분석에서 자극 별로 두드러진 차이를 보였던 19Hz와 63Hz에 대해 위상동기화 분석을 시행하였다. 전체 62개 채널 중 뇌 전반적인 구역을 포함할 수 있는 11개의 대표 채널들 (F3, F4, Fz, C3, C4, Cz, P3, P4, Pz,

O1, O2)을 선별하여 모든 가능한 채널 쌍 (channel pair) 간 위상동기화값 (PLV)을 구했다. 구해진 위상동기화값의 전체 평균을 구하여 z-변환을 한 결과로부터 위상동기의 시간적 흐름을 자극 별로 나타내었다 (그림 4). 그림 4에서 볼 수 있듯이 위의 주파수 분석 결과와는 대조적으로 Old-Same 자극에 대해 동기화가 더 강하게 나타남을 관측할 수 있었다. 또한 19Hz 대역에서, 자극 제시 후 200ms 정도의 간격을 두고 비 동기화가 강하게 나타나는데 이러한 현상은 Old-Same 자극에 대해서만 보이는 흥미로운 현상이었다.

결론

본 연구에서 다른 분석 결과는 기존의 시간영역에서의 분석과 다른 결과를 보여준다. 또한 시간-주파수와 위상도 서로 다른 양상을 보인다. 아직까지는 새로운 분석방법을 통해 뇌 신호가 Old-Same과 New 자극에 대해 다른 특징을 보인다는 정도의 결과만 현 연구에서 제시되지만, 향후 인지적 가설모델을 바탕으로 통계적 분석을 통해 위상 동기화 정도를 실제 측정 채널 사이에서 효과적으로 표현할 수 있을 것으로 사료된다. 이를 통해 구체적으로 어느 채널 간 동기화가 유의미하게 일어나며 행동 데이터 간 관련성은 어떤지 분석할 예정이다. 더 나아가, 같은 실험을 정상인과 정신분열환자 두 그룹간 시행하였을 때 뇌 신호 반응의 차이도 향후 연구의 중요한 과제 중 하나이다.

참고문헌

이정모, 인지심리학의 제 문제 (I): 인지과학적 연 관, pp. 27- 54, (1996).

Hoffman, R.E., & McGlashan, T.H. Using a speech perception neural network simulation to

explore normal neurodevelopment and hallucinated 'voice' in schizophrenia. *Progress in brain research*. 121:311-325. (1999).

Lachaux J.P., Rodriguez E., Martinerie J., and Varela F.J. Measuring Phase Synchrony in Brain Signals, *Human Brain Mapping*, 8:194-208 (1999).

Uhlhaas P.J., and Rodriguez E. Dysfunctional Long-Range Coordination of Neural Activity during Gestalt Perception in Schizophrenia. *Journal of Neuroscience*. 26(31):8168-8175. (2006).