

# 시각 자극의 집중에 따른 시간 변화에 대한 뇌 유발전위의 공간 - 주파수간 상관 변화 분석

Spatial - Frequency Analysis of time-varying Coherence using ERP signals  
for attentional visual stimulus

이벽진\* · 유선국\*\*†

ByuckJin Lee\* · Sun-Kook Yoo\*\*†

\*연세대학교 생체공학협동과정

\*Graduate School of Biomedical Engineering, Yonsei University

\*\*연세대학교 의학교실

\*\*Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine

## Abstract

In this study, we analyzed spatial-frequency relationship related brain function for change of the time during attentional visual stimulus through the analysis of Coherence. With experimentation about ERP(Event Related Potential)data, it revealed that change of the phase synchronization between different scalp locations at  $\theta, \alpha$  band. ERP between left and right frontal lobes, between the frontal and central lobes showed the phase synchronization at the P100, N200, ERP between the frontal and occipital lobes showed the phase synchronization at the P300 related information of visual stimulus. Compared to STFT using the window of a fixed length, CWT is able to multi-resolution analysis with the adjustment of parameters of mother wavelet. Thus, coherence results with CWT was found to be effective for analysis of time-varying spatial-frequency relationship in ERP. The phase synchronization for inattentional visual stimulus was not observed.

**Key words** : Coherence, Short-Time Fourier Transform, Continuous Wavelet Transform

## 요약

본 연구에서는 코히어런스 분석을 통하여 시각집중 기간 동안 시간 변화에 대한 뇌기능과 관련된 공간-주파수간 연관관계를 해석하였다. 집중관련 시각자극 실험 데이터를 통해  $\theta$ 와  $\alpha$  대역에서 서로 다른 두피 위치간 위상연관변화를 확인하였다. 좌우 전두엽, 전두엽과 두정엽 간 뇌유발전위는 P100, N200지점에서 위상동조를 보였으며, 전두엽과 후두엽 간 뇌유발전위는 시각 처리 정보가 반영되는 P300지점에서 위상동조를 보였다. 고정된 길이의 창을 이용하는 단구간 푸리에 변환에 비하여 연속 웨이블릿 변환은 모 웨이블릿의 파라미터 조절을 통한 다중해상도 분석이 가능하였다. 따라서 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 결과가 시간 변화에 대한 뇌유발전위의 공간-주파수간 연관관계의 변화를 확인하는데 유효함을 확인하였다. 비 집중 자극

※ 본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No.2010-0026833)의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

† 교신저자 : 유선국 (연세대학교 의과대학 의학교실)

E-mail : sunkyoo@yuhs.ac

TEL : 02-2228-1919

FAX : 02-363-9923

수행에 대해서는 위상동조 현상이 나타나지 않았다.

**주제어** : 코히어런스, 단구간 푸리에 변환, 연속 웨이블릿 변환

## 1. 서론

뇌의 기능에 의한 신경 다발의 동조현상으로 표현되는 뇌파는 특정 주파수로 변조되며 뇌 내부의 같은 기능을 수행하는 기관들은 서로 신경으로 연결되어 동작한다. 따라서 뇌의 기능 및 뇌 부위 간 연결 정도는 뇌의 부위에 따른 주파수 대역의 신경들이 서로 동조되는 현상을 통해 해석할 수 있다.(Varela F et al, 2001)

뇌 기능에 의한 동조현상은 위상 정보를 통해 해석할 수 있으며 뇌 기능은 자발뇌파(spontaneous EEG)보다는 동일한 자극의 반복에 대한 뇌 기능을 나타내는 뇌 유발전위(Event Related Potential)의 해석이 효율적이다. 뇌 유발전위의 시간 변화에 따른 공간 - 주파수간 위상동조현상을 해석은 동기되어 동작하는 서로 다른 채널 간의 뇌파 신호에서 뇌 기능과 관련된 해석의 중요한 척도가 된다. 코히어런스 방법을 이용한 뇌파 분석을 통해 서로 다른 두 채널의 뇌파 신호간의 특정 주파수에 대한 위상동조의 정도에 대한 정보를 얻을 수 있다.(Allefeld C. et al, 2004; Roach et al, 2008) 또한 뇌파 신호의 위상동조에 대한 정보를 통한 임상적용에 대한 연구도 진행되어왔다.(Clarke et al. 2007)

본 연구에서는 뇌 기능에 관련된 서로 다른 뇌 부위의 공간적 위상 동조 특성을 시간 변화에 따라 주파수 대역별로 분석해보고자 한다. 뇌파 신호는 시간에 따라 유동적인(non-stationary) 신호이므로(Özdemir et al, (2005)) 시간 변화에 대한 뇌기능의 변화를 확인하기 위해 단구간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)과 연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform)을 이용하였다. 다중 채널로부터 뇌 유발전위를 측정하고 코히어런스 방법을 이용해 채널 간의 특정 주파수의 위상 동조관계를 분석해봄으로써 시각 자극의 집중에 따른 시간 변화에 대한 공간 - 주파수간 상관관계의 변화를 해석하였다. 해석 시 시간 해상도와 주파수 해상도를 함께 고려해야하므로 이에 따른 결과의 차이를 확인하였으며, 올바른 코히어런스 해석을 위해 파라미터의 변화에 대한 해석 결과의 영향을 함께 확인하였다.

## 2. 뇌유발전위의 시공간-주파수 상관분석

시각 자극의 집중 시 뇌 유발전위의 구성 주파수 성분의 시간적 변화를 분석하기 위해 주파수 분석 방법인 단구간 푸리에변환과 연속 웨이블릿 변환 방법을 이용하였다. 뇌 유발전위의 공간-주파수의 상관 분석을 위해 코히어런스 방법을 이용하였다.

### 2.1 단구간 푸리에 변환

비유동적(Stationary)이라고 가정할 수 있는 짧게 나누어진 시간영역의 신호  $x(t)$ 에 대한 단구간 푸리에 변환을 수행하여 시간-주파수 분포를 확인 할 수 있다.(Kiyimik et al, 2005)

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

여기서  $w(\cdot)$ 은 단구간 푸리에 변환을 위해 적용된 창함수이며  $\tau$ 는 시간 이동 파라미터,  $\omega$ 는 주파수를 나타낸다.

단구간 푸리에 변환은 적용된 창의 크기에 따라 시간과 주파수의 해상도에 영향을 미친다. 짧은 간격의 시간변화에 따른 신호의 주파수 성분의 변화를 확인하기 위해 짧은 길이의 창을 사용할 경우 주파수 분해능은 저하되며, 긴 길이의 창을 사용할 경우 주파수 분해능은 향상되지만, 짧은 간격의 시간변화를 해석하지 못한다. 따라서 단구간 푸리에 변환의 경우 시간-주파수 분해능을 동시에 향상시킬 수 없다.

### 2.2 연속 웨이블릿 변환

연속 웨이블릿 변환은 시간이동과 스케일(주파수의 역수)에 대한 함수인 모웨이블릿 함수와 신호의 상호 연관 계산이다. 모웨이블릿 함수는 시간변위 파라미터와 스케일 파라미터의 조정을 통해 고주파에서는 시간 해상도를 증가시키고, 저주파에서는 주파수 해상도를 향상시켜 단구간 푸리에 변환보다 시간의 변화에 따른 주파수 변화의 동시 해석에 보다 적합하다. 뇌파 신호  $x(t)$ 와 모웨이블릿 함수  $\psi(\cdot)$ 에 대한 연속

웨이블릿 변환은 다음으로 정의된다.(Sang Kwon Lee et al, 2001)

$$CWT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (2)$$

여기서  $\Psi(\cdot)$ 는 켈레 복소수 형태이며,  $\tau$ 는 시간의 변화를 나타내는 시간이동(translation) 변수,  $s$ 는 주파수 변화를 나타내는 스케일을 말하며,  $\frac{1}{\sqrt{s}}$ 는 각 스케일에 대한 웨이블릿 함수의 정규화 계수이다.

본 논문에서는 연속 웨이블릿 변환의 계수를 이용한 뇌파신호의 위상정보를 얻기 위해 복소 웨이블릿 함수인 Morlet 웨이블릿을 이용하였다.

$$\Psi(t) = \pi^{-1/4} e^{j2\pi f_0 t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

여기서 중심 주파수인  $f_0$ 의 값은 분석하고자 하는 신호의 성향이나 사용자의 목적에 따라 바뀔 수 있다.

시간영역에서 모웨이블릿 함수의 확장 및 압축은 스케일 변수에 의해 결정되며, 스케일 변수가 감소할 때 압축된다.

### 2.3 코히어런스를 이용한 위상 연관 해석

시간 변화에 대한 두피의 서로 다른 지점에서 측정된 뇌파 신호 간의 공간 - 주파수간 연관관계의 확인을 위해 코히어런스 방법을 사용하였다.

#### 2.3.1. 상호전력스펙트럼

하나의 함수로 다른 신호의 변화를 예측할 수 있는 경우 실수로 구성된 두 정상성 랜덤프로세스  $x(t)$ 와  $y(t)$ 는 상관관계가 있다고 말할 수 있으며 상호연관 함수  $R_{xy}(\tau)$ 는 다음 수식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] \quad (4)$$

$\tau$ 는 시간지연이며,  $E[\cdot]$ 는 기댓값이다.

높은(1에 가까운) 상호연관의 값은  $x$ 는 0이 아닌 시간 지연으로  $y$ 의 재현을 가능하게 한다.

두 랜덤 프로세스  $x$ 와  $y$ 의 상호전력스펙트럼은 상호연관함수의 푸리에 변환이며, 식(5)와 같이 정의된다.(Carter et al, 1987)

$$S_{xy}(\tau, f) = \sum_{i=1}^N X(\tau, f) Y^*(\tau, f) \quad (5)$$

이것은 특정 주파수  $f$ 에 대한 신호의 복소 푸리에 계수와 나머지 신호의 푸리에 계수의 복소 켈레의 곱의  $N$ 개의 Epoch에 대한 기댓값으로 표현된다.

#### 2.3.2. 코히어런스

코히어런스는 상호전력스펙트럼을 두 신호의 자기 전력스펙트럼으로 정규화 함으로써 계산할 수 있다.

$$MSCoherence(\tau, f) = \frac{|S_{xy}(\tau, f)|^2}{S_{xx}(\tau, f)S_{yy}(\tau, f)} \quad (6)$$

여기서,  $S_{xy}(\cdot)$ 는 두 신호  $x$ 와  $y$ 의 상호전력스펙트럼,  $S_{xx}(\cdot)$ 와  $S_{yy}(\cdot)$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 의 자기전력스펙트럼이다.(Roach et al, 2008; Carter et al, 1987)

따라서, 특정 주파수  $f$ 에 대한 두 신호 사이의 관계는  $f$ 에 대해 대역 통과된 신호 사이의 상관 계수  $x$ 와  $y$ 의 코히어런스를 통해 확인할 수 있다.

연속 웨이블릿 변환에 대한 코히어런스 식은 주파수 변수는 이와 반비례 관계인 스케일 변수에 대한 식으로 정의된다.

#### 2.3.3. 위상과 주파수의 연관

식(5)는 다시 극좌표 형식으로 표현 할 수 있다.

$$X(\tau, f) Y^*(\tau, f) = |X(\tau, f) Y^*(\tau, f)| e^{j(\phi_x(\tau, f) - \phi_y(\tau, f))} \quad (7)$$

$N$ 개의 Epoch에서  $\Delta\phi_{XY}(\tau, f) = \phi_x(\tau, f) - \phi_y(\tau, f)$ 의 값들에 의한 코히어런스 결과를 통해 두 신호의 위상 동조관계를 확인 할 수 있다. 만약 모든 Epoch에 대해  $\Delta\phi$ 의 값이 일정하다면 코히어런스 값은 1이 된다. 따라서 특정 주파수에서 1에 가까운 코히어런스 값은 그 주파수에서 두 신호의 강한 위상 동조를 나타낸다. 반면에 각 Epoch에 대한  $\Delta\phi$ 의 결과가 다를 경우 코히어런스의 값은 그것보다 작은 값을 가진다.(Varela F et al, 2001)

## 3. 코히어런스에 의한 상관 해석 실험

### 3.1. 실험 개요

#### 3.1.1. 피험자

심혈관계 및 신경계 질환 및 병력이 없는 건강한

성인을 대상으로, 총 15명(남성 9명, 여성 6명)에 대해 실험을 진행하였다.(ChungKi Lee, 2011) 피험자의 평균연령은 31세, 범위는 21~41세이다. 피험자는 실험 전 피험자 동의서를 작성하였다.

### 3.1.2. 뇌파 측정

국제 전극 부착시스템인 10-20시스템을 준수하여 4 채널(F3, F4, Cz, Pz)을 측정 하였고, 접지 전극과 기준 전극은 각각 목 뒤 중앙과 귓불에 부착하였다.

### 3.1.3. 실험 설계

시각 자극을 위해 무작위(1,2,3 중 하나)로 세 개의 숫자집합을 구성하여 화면에 나타내고, 피험자에게 나머지 두 개와 다른 하나의 숫자에 해당하는 버튼을 누르게 하였다. 예를 들어, 화면에 “122”로 결합된 숫자집합이 나오게 되면 피험자는 “1”이 적힌 버튼을 누른다. 자극은 약 3초마다 한 번씩 나오며, 각 자극 후 1.5초 뒤에 이미지가 없는 빈 화면에 “+”모양의 자극을 주어 다음 자극에 대한 준비를 하도록 하였다. 실험은 1회, 약 7분 정도 소요되었다. Biopac의 MP100과 EEG100C를 이용하여 다중 채널에서 측정된 신호는 1kHz로 샘플링 되었고 0.5Hz 고대역 통과 필터, 100Hz 저대역 통과 필터, 60Hz 노치필터를 사용하여 뇌파 신호의 필터링을 수행하였다. (ChungKi Lee, 2011) 측정 데이터는 집중 데이터(숫자 자극 시점을 기준으로 자극 전 0.5초, 자극 후 1.0초 동안 1500샘플씩 144Epoch의 데이터)와 비집중 데이터(“+”모양의 자극 시점을 기준으로 자극 전 0.5초, 자극 후 1.0초 동안의 총 1500샘플씩 144Epoch의 데이터)로 재구성 하였다. 각 Epoch의 처음 250ms과 끝250ms 길이를 제거하여 1000ms 기간의 데이터로 재구성한 후, chebyshev type2 IIR 0.5Hz 고역통과필터를 forward-reverse로 구성하여 영위상 필터로 DC-offset을 제거하였다.

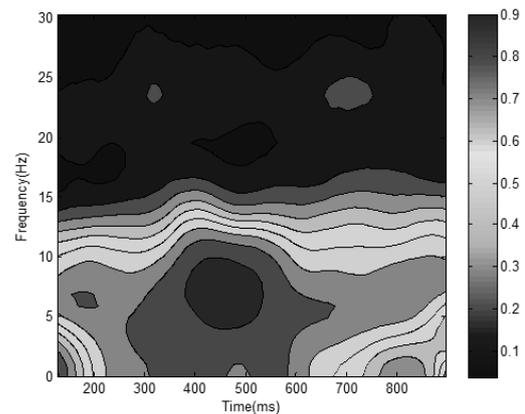
단구간 푸리에 변환을 이용한 코히어런스는 250ms 길이의 해밍창 적용 후 데이터의 한 샘플씩 이동하며 zero-padding 후 1024-길이 FFT를 수행하여 각각의 푸리에 계수를 통해 코히어런스를 계산하였다.

다음으로, 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 계산을 위해서 복소 Morlet 웨이블릿 함수를 이용하였으며 1Hz에서 30Hz까지 1Hz 간격으로 웨이블릿 변환을 수행한 후 코히어런스를 계산하였다.

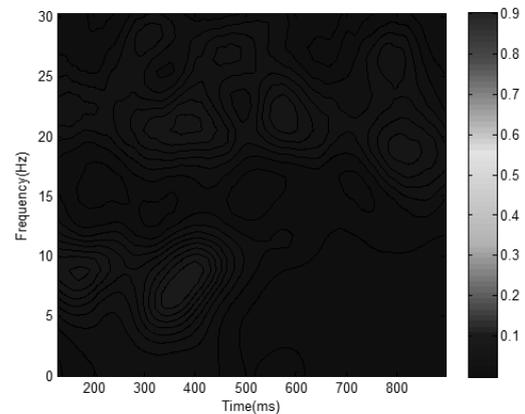
## 3.2. 실험 결과

### 3.2.1. 단구간 푸리에 변환을 이용한 코히어런스

figure 1은 시각자극에 대한 집중 시(figure 1(a)) 와 비 집중 시(figure 1(b)) 좌,우측 전두엽 뇌파 신호에 대한 단구간 푸리에변환의 코히어런스 결과를 나타낸 그림이다.



(a)



(b)

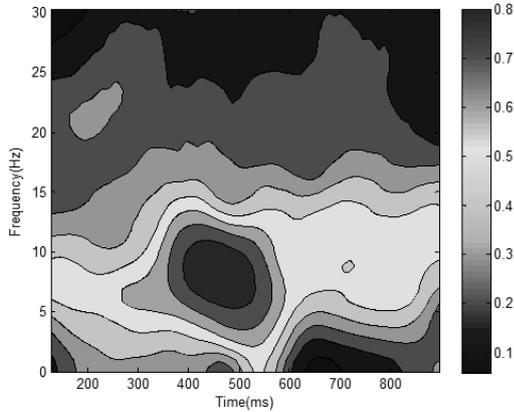
Figure 1. STFT Coherence result of attentional(a) and inattentional(b) visual stimuli at frontal lobes on both sides

집중 데이터에 대한 코히어런스의 경우, 400ms에서 500ms 기간의  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역에서 0.8에서 0.9의 값이 나왔으나, 신호 전체 구간내에서 높은 값이 나왔으며, 이 결과를 통해 위상 동조관계의 변화가 발생한 정확한 시점을 확인 하지 못했다.

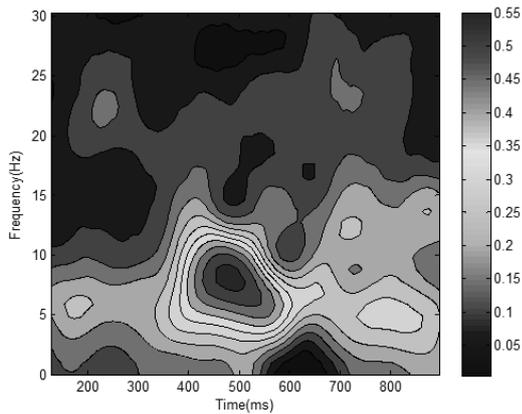
비집중 데이터의 경우 전체 코히어런스 값이 0.1 이하로 실험 기간 동안 위상동조가 발생하지 않았다.

푸리에 변환의 스펙트럴 누설 현상으로 뇌파 구성의 대표적 주파수 영역  $\delta, \theta, \alpha, \beta$  중 하나의 대역에서

만 높은 코히어런스 값이 확인되지 않았으며 결과를 통해 위상동조가 발생하는 정확한 시점과 주파수 대역을 확인하기 어렵다.



(a)



(b)

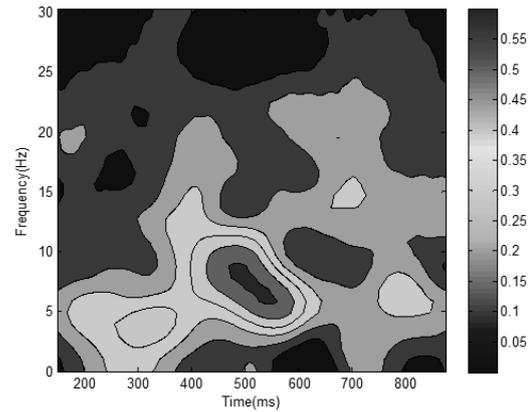
Figure 2. STFT Coherence result of attentional visual stimuli at frontal - central lobes(a) and frontal - occipital lobes(b)

figure 2는 시간 변화에 따른 전두엽과 두정엽 간의 집중 뇌파에 대한 코히어런스 결과(figure 2(a))와 전두엽과 후두엽 간의 집중뇌파에 대한 코히어런스 결과(figure 2(b))를 나타낸 그림이다. 두 결과 역시 400ms에서 500ms 기간에서  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역의 코히어런스 결과가 높게 나왔다. 하지만 figure 1(a)와 달리 400ms 이전 시점과 500ms 이후 시점의 코히어런스 결과는 좌우 전두엽간의 결과보다 평균 0.25만큼 낮았다. 또한, 전두엽과 후두엽 간의 코히어런스 결과는 가장 높은 값이 0.55로 전두엽간의 결과 최고값보다 0.35 낮았다.

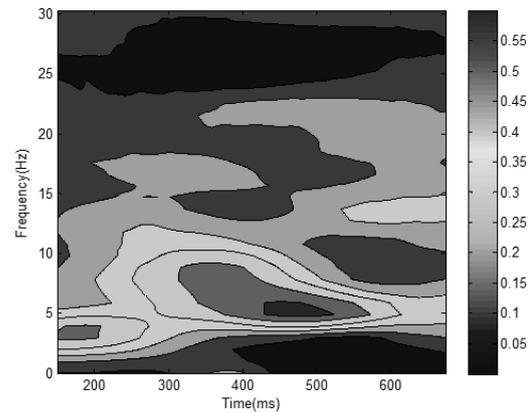
### 3.2.2. 창함수 길이에 따른 코히어런스 결과

단구간 푸리에 변환에서 창함수의 길이에 따라 주

파수 해상도와 시간 해상도는 반비례 관계를 가지며 창함수 길이가 시간 변화에 따른 단구간 푸리에 변환을 이용한 코히어런스 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 전두엽과 후두엽의 뇌파 신호를 창함수 길이를 250ms, 300ms, 500ms로 변경하여 코히어런스 결과를 비교하였다.



(a)



(b)

Figure 3. STFT Coherence result of attentional visual stimuli at frontal - occipital lobes with 300ms window(a) and 500ms window(b)

figure 3(a)는 300ms 길이의 창함수를 적용한 코히어런스 결과 그림이다. 250ms 길이의 창함수를 적용한 코히어런스 결과인 figure 2(b)에 비해 시간해상도는 떨어진 모습이지만 주파수 해상도는 증가하여 스펙트럼 누설 현상이 작아지는 결과를 보였다. 또한 400ms에서 500ms 기간의  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역에서 0.55 이상의 높은 위상동조관계를 나타낸 200ms 길이의 창을 적용한 결과와 달리 450ms에서 600ms 범위의  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역에서 0.55 이상의 위상연관관계가 나타났다.

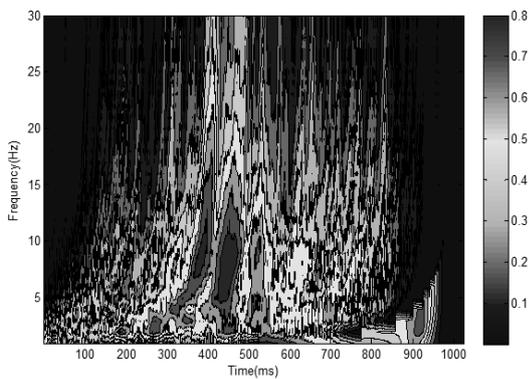
1000ms로 재구성된 실험데이터에서 250ms 지점이

시각 자극 시점이 되며, 시각 자극에 대한 사건유발전 위위의 P100, N200, P300 지점은 각각 350ms, 450ms, 550ms 지점에 해당된다. 300ms 길이의 창함수 적용시 500ms 부근에서 P300 피크가 나타났고 P300 피크에서 시각 정보 처리에 대한 뇌파 신호의 반영이 되므로(Chapman, R. et al, 1964) figure 2(b)결과 보다 신뢰할 수 있는 결과이다.

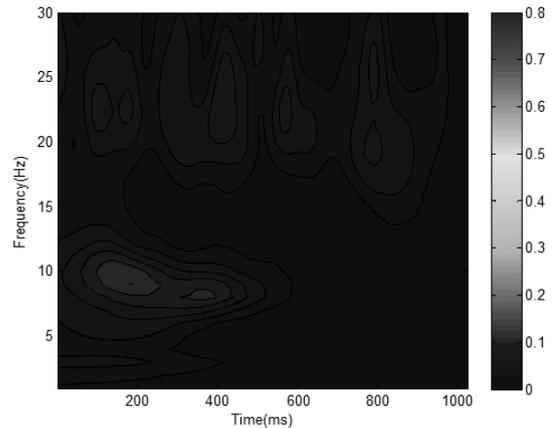
figure 3(b)는 500ms 길이의 창함수를 적용한 코히어런스 결과이며, 1초간의 뇌파 신호의 반을 포함하는 긴 창함수 적용으로 시간 해상도가 감소하여 약 300ms에서 600ms까지 0.50 이상의 코히어런스 결과가 확인되었지만 스펙트럼 누설현상이 감소하였고, 주파수 해상도는 증가하여  $\theta$ 대역에서만 0.55 이상의 위상동조가 나타났다.

**3.2.3. 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스**

figure 4는 시각자극에 대한 집중 시(figure 4(a))와 비 집중 시(figure 4(b)) 좌,우측 전두엽 부위 뇌파 신호에 대한 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 결과를 나타낸 그림이다. 집중 데이터에 대한 코히어런스의 경우, 350ms에서 450ms 기간의  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역에서 0.74 이상의 값이 나왔으며, 신호 전체 구간 내에서 높은 값이 나타난 단구간 푸리에 변환을 이용한 코히어런스 결과(figure 1(a))보다 높은 시간 해상도를 통한 코히어런스 결과를 통해 시간 변화에 대한 뇌기능의 위상연관관계의 변화가 발생한 시점을 단구간 푸리에 변환을 통한 결과 보다 정확하게 확인 할 수 있다. 비 집중 데이터의 경우 단구간 푸리에변환을 이용한 결과(figure 1(b))와 동일한 결과가 확인되었으며, 전체 코히어런스 값이 0.10 이하로 실험 기간 동안 위상동조가 발생하지 않았다.



(a)

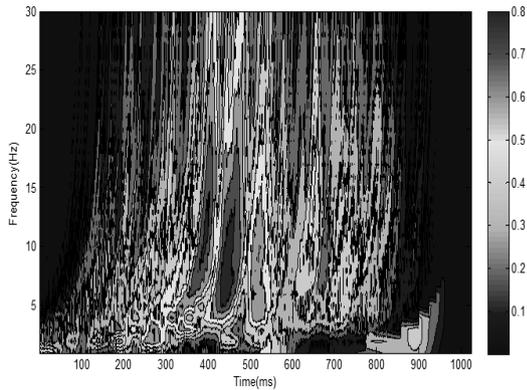


(b)

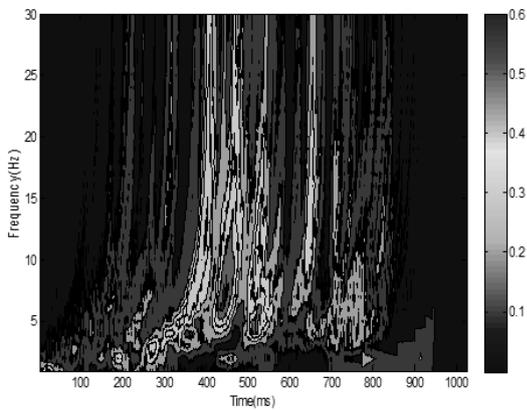
Figure 4. CWT Coherence result of attentional(a) and inattentional(b) visual stimuli at frontal lobes on both sides

figure 5는 시간 변화에 따른 전두엽과 두정엽간의 집중 뇌파에 대한 코히어런스 결과(figure 5(a))와 전두엽과 후두엽간의 집중뇌파에 대한 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 결과(figure 5(b))를 나타낸 그림이다. 두 결과 모두 400ms에서 500ms 기간동안  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역의 코히어런스 결과가 높게 나온 단구간 푸리에 변환을 통한 코히어런스 결과(figure 2)와 달리, 전두엽과 두정엽간의 집중 뇌파에 대한 코히어런스 결과에서는 350ms 부근에서는  $\alpha$ 대역에서 0.78의 값이 나왔고 450ms 부근에서는  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역에서 강한 위상연관관계를 확인 하였다.(Varela F et al, 2001) 반면에, 전두엽과 후두엽간의 집중뇌파에 대한 코히어런스 결과에서는 450ms 부근에서  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역의 0.63의 값이 확인하였고, 500ms 이후 시점에서  $\theta$ 대역의 위상동조관계를 확인하였다. 두 결과에서 350ms, 450ms, 550ms는 각 epoch에 대한 뇌 유발전위의 P100, N200, P300 피크 지점의 위치이며 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 결과에서 위상연관관계는 이 지점에서 확인하였다.(Kuperberg et al, 2011; Andrew, C. et al, 1995)

코히어런스 값의 크기의 경우 단구간 푸리에 변환과 연속 웨이블릿 변환의 차이는 전두엽과 후두엽간의 집중뇌파에 대한 결과의 경우 모두 위상 동조 시점으로 추정되는 코히어런스 값의 크기의 최댓값 자체에는 차이가 0.10미만으로 구별되지 않았지만 시간 해상도의 차이로 웨이블릿 변환에 의한 방법을 통한 코히어런스 결과로 시간변화에 대한 뇌파 신호 간의 위상연관관계의 변화 시점 및 주파수 대역의 확인이 더 유용하였다.



(a)



(b)

Figure 5. CWT Coherence result of attentional visual stimuli at frontal - central lobes(a) and frontal - occipital lobes(b)

### 3.2.4. 시간 변화에 따른 뇌파 신호간 위상동조관계의 변화 해석

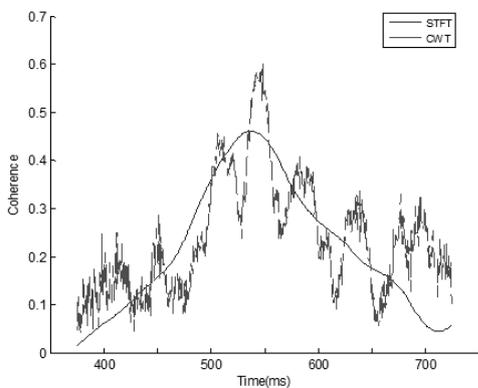


Figure 6. Compare STFT Coherence with jCWT Coherence result of attentional visual stimuli at frontal - occipital lobes

figure 6는 250ms의 해밍창을 적용한 단구간 푸리에 변환과 연속 웨이블릿 변환을 이용한 전두엽과 후두

엽간의 집중뇌파에 대한  $\theta$ 대역의 코히어런스 결과를 비교한 그림이다. 두 결과 모두 550ms 지점에서 피크 값이 확인되지만 시간에 따른 두 뇌파 신호 간 연관 관계의 변화와 정확한 변화시점의 해석은 단구간 푸리에 변환 보다 시간 해상도가 높은 연속 웨이블릿 변환을 이용한 코히어런스 결과를 통해 가능하다. 단구간 푸리에 변환을 이용한 결과의 경우, 코히어런스 결과의 변화가 뇌유발전위의 어느 지점에서 발생하여 뇌유발전위 파형에 영향을 주는지 해석하기 어렵다.

## 4. 결론 및 논의

본 논문에서는 시간 변화에 따른 뇌기능의 공간 주파수간 연관관계의 변화를 코히어런스 방법을 통해 해석하였다. 시간 변화에 따른 주파수 분석을 위해 단구간 푸리에 변환과 연속 웨이블릿 변환을 적용하였으며 단구간 푸리에 변환의 경우 적용된 창함수의 길이에 의한 코히어런스 결과에 차이를 확인하였다.

단구간 푸리에 변환의 코히어런스 결과는 창함수의 길이에 따라 차이가 발생하였으며, 단구간 푸리에 변환 시 분석에 적합한 파라미터의 선택에 대한 이해와 주의가 필요하다.

시각 자극의 집중에 대한 뇌 유발전위의 구성 주파수 성분의 위상 연관관계를 시간적 변화에 대하여 분석 시, 시간 해상도와 주파수 해상도가 서로 반비례하는 단구간 푸리에 변환에 비해 주파수 해상도를 유지하면서 시간 해상도를 향상시킬 수 있는 연속 웨이블릿 변환을 통한 해석 결과가 유의함을 확인하였다.(Klein A et al. 2006)

두 가지 방법 모두 좌우 전두엽, 전두엽과 두정엽 간의 결과는 P100, N200 부근에서  $\theta$ 와  $\alpha$ 대역의 강한 위상 동조관계를 확인하였다. 전두엽과 시각 처리를 담당하는 후두엽 간의 결과에서는 P300 부근에서  $\theta$ 대역에서 강한 위상동조가 확인되었고 앞의 두 결과에 비해 코히어런스의 피크 값은 0.3 차이가 확인되었다. 비 집중 데이터에 대한 채널 간 위상 동조관계는 나타나지 않았고 이를 통해, 시각 자극의 집중 시 뇌 유발전위의 구성 주파수 성분의 시간적 변화를 해석할 수 있다.

본 연구를 바탕으로 앞으로의 연구에서는 단구간 푸리에 변환과 연속 웨이블릿 변환의 파라미터에 대한 결과의 차이를 분석하여 코히어런스 결과에서 더욱 정확한 시간 변화 시점과 주파수에 대한 분석을 진행하고자 한다.

## REFERENCES

- Allefeld, C., & Kurths, J. (2004). An approach to multivariate phase synchronization analysis and its application to event-related potentials. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 14(02), 417-426.
- Andrew, C., & Pfurtscheller, G. (1996). Event-related coherence as a tool for studying dynamic interaction of brain regions. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 98(2), 144-148.
- Carter, G. C. (1987). Coherence and time delay estimation. *Proceedings of the IEEE*, 75(2), 236-255.
- Chapman, R. M., & Bragdon, H. R. (1964). Evoked responses to numerical and non-numerical visual stimuli while problem solving. *Nature*, 203, 1155-1157.
- ChungKi Lee. (2011). Quantitative Analysis of Affective States based on Psycho-physiological Research using Biosignal Processing Technique. *The graduate School, Yonsei University, Seoul, Korea*, 2011.
- Clarke, A. R., Barry, R. J., McCarthy, R., Selikowitz, M., Johnstone, S. J., Hsu, C. I., ... & Croft, R. J. (2007). Coherence in children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder and excess beta activity in their EEG. *Clinical neurophysiology*, 118(7), 1472-1479.
- Kaplan, A. Y., Fingelkurts, A. A., Fingelkurts, A. A., Borisov, S. V., & Darkhovsky, B. S. (2005). Nonstationary nature of the brain activity as revealed by EEG/MEG: Methodological, practical and conceptual challenges. *Signal processing*, 85(11), 2190-2212.
- Kiyımık, M. K., Güler, İ., Dizibüyük, A., & Akın, M. (2005). Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application. *Computers in Biology and Medicine*, 35(7), 603-616.
- Klein, A., Sauer, T., Jedynak, A., & Skrandies, W. (2006). Conventional and wavelet coherence applied to sensory-evoked electrical brain activity. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 53(2), 266-272.
- Kuperberg, G. R., Paczynski, M., & Ditman, T. (2011). Establishing causal coherence across sentences: An ERP study. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(5), 1230-1246.
- Özdemir, A. K., Karakaş, S., Çakmak, E. D., Tüfekçi, D. İ., & Arıkan, O. (2005). Time - frequency component analyser and its application to brain oscillatory activity. *Journal of neuroscience methods*, 145(1), 107-125.
- Roach, B. J., & Mathalon, D. H. (2008). Event-related EEG time-frequency analysis: an overview of measures and an analysis of early gamma band phase locking in schizophrenia. *Schizophrenia bulletin*, 34(5), 907-926.
- Rubin, J. (2000b). The effect of perceived hedonic quality on product appealingness, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 15, 450-462.
- Sang Kwon Lee et al. (2001). Modeling of the Time-frequency Auditory Perception Characteristics Using Continuous Wavelet Transform (연속 웨이브렛 변환을 이용한 청각계의 시간-주파수 인지 특성 모델링). *한국음향학회지*, 20(8), 81-87.
- Shamma, S. A., Elhilali, M., & Micheyl, C. (2011). Temporal coherence and attention in auditory scene analysis. *Trends in neurosciences*, 34(3), 114-123.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nature reviews neuroscience*, 2(4), 229-239.

원고접수: 2013.10.14

수정접수: 2013.12.13

게재확정: 2013.12.30