

# 15세 미만 아동을 대상으로 한 집중상태에서 EEG 신호와 HRV의 상관관계 분석\*

An analysis of correlation between EEG signal and HRV during attentional status with children under 15 years

최우진\*\* · 이충기\*\*\* · 유선국\*\*†

Woo-Jin Choi\*\* · Chug-Ki Lee\*\*\* · Sun-Kook Yoo\*\*†

연세대학교 의과대학 의과학과\*\*

Brain Korea 21 Project for Medical Science, Yonsei University\*\*

연세대학교 생체공학협동과정\*\*\*

Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University\*\*\*

## Abstract

This paper illustrates the inter-relationship between the theta/alpha ratio of the EEG signal and multiple HRV related parameters associated with the cardiovascular system response during event-related stimuli. Both EEG and PPG signals were simultaneously recorded in 21 healthy subjects. All subjects had their attention focused on the CNT program for nine minutes. Time-frequency analysis was applied to the EEG and PPG signals. The theta/alpha ratio was extracted from the EEG results, and the HRV features, including beat interval(1), SDNN(2), RMSSD(3), NN50(4), LF(5), HF(6), and LF/HF(7), were extracted from the PPG. Through multiple linear regression, the relationship ( $R^2$ ) between the multiple combined features and the theta/alpha rhythm was identified.

As a result, the combinations of  $R^2$  ( $R^2=0.253$ ; seven dimensions) and the theta/alpha ratio indicated a higher inter-relationship value than those of other combinations. The combinations of features that were greater than three dimensions, based on {SDNN(2), HF(6)}, generally showed higher  $R^2$  value. We demonstrate that the high dimensional combinations had a higher correlation than did the low dimensional combinations.

**Keywords** : HRV, EEG, Attention

## 요약

본 연구에서는 집중력 시에 통상적인 방법으로 사용되는 EEG 신호의 theta/alpha 값과 심박변이도(HRV) 변수들의 상관관계를 분석하기 위함이다. 각 주파수 대역에 따른 EEG 신호의 파형과 자율신경계 변화를 연구한 논문들을 바탕으로, 본 연구에서는 집중상태에 따른 theta파의 변화와 alpha파의 신호를 분석하여 theta/alpha 값으로 증추신경계 변화를 평가하였다. 또한 자율신경계에서 생리학적 변화는 HRV 변수들(beat interval, SDNN, RMSSD, NN50, LF, HF, LF/HF)로 평가/해석하였다. 실험방법은 신경 인지 검사 프로그램인 CNT 4.0을

\* 이 논문은 지식경제부와 한국 산업기술 진흥원의 전략 기술인력 양성사업으로 수행된 결과이고, 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0026833).

† 교신저자 : 유선국 (연세대학교 의과대학 의과학과)

E-mail : sunkyoo@yuhs.ac

TEL : 02-2228-1919

FAX : 02-363-9923

이용하여 21명의 건강한 피험자들의 청각 집중력 테스트를 수행하였고, EEG 신호와 PPG 신호를 분석하였다. EEG로부터 추출한  $\theta/\alpha$ 값과 PPG로부터 추출한 HRV변수들은 중다회귀분석을 이용하여 각각의 조합에 따른 두 지표간의 상관관계를 평가하였다.  $\theta/\alpha$ 와 심혈관계의 변수들의 상호연관성은 {SDNN(2), HF(6)} 변수가 포함된 3차원 이상의 조합에서 상대적으로 유효하게 나타났다. 결과적으로 고차원 HRV 변수 조합이 저차원 조합보다  $\theta/\alpha$ 와 상대적으로 높은 상관관계( $R^2=0.253$ ; 7차원)를 나타내었고, 통계적 유의성 ( $p<0.05$ )을 만족하였다.

주제어 : 심박변이도, 집중력, 뇌전도

## 1. 서론

최근 감성과 인지에 대한 정량적 연구는 서로 분리되어 독립적으로 해석되는 것이 아니라, 상호 통합적인 관점에서 감성상태에 따른 인지상태가 평가되고, 역으로 인지상황에 따른 감성상태 추정이 상호 보완적으로 해석하는 추세이다(Dennis, 2010).

인지 상태에 따른 기존연구들의 평가 방법에는 외부 환경에 대한 집중 상황을 유발하고 중추 신경계의 대표적인 활동인 대뇌피질의 전기적신호의 유발정도(event-related potential), 자발적 뇌전도 신호에 대한 주파수 분석(스펙트럼 분석), 그리고 자율신경계의 활동 변화에 따른 통계적 유의성을 나타낸 연구가 있다(Klimesch, 1999; Kubota et al., 2001).

집중상태에서 감성반응이 평가된 연구에 따르면, 긍정적(positive)자극기반에 집중상태 유발과 부정적(negative)자극 기반에 대해서 두정부(Cz)유발의 차이를 나타내었다(Dennis, 2010). 또한 감성유발에 의한 주파수 분석결과 감성상태의 종류에 따른 좌우 대뇌의 전두엽에서 alpha 파형의 비대칭성을 보고 한 연구가 있다(Hagemann et al., 2003).

외부사건유발 자극에 의해 집중력이 유발되면 우리 몸의 중추 신경계와 자율 신경계에서 변화가 생긴다(Galbraith et al., 2001). 자율 신경계에서는 심혈관계 활동과 관련된 교감 신경계와 부교감 신경계의 길항 작용이 발생하여 혈압, 심박동, 심박변이도 등의 변화를 유발시킨다(Kubota et al., 2001). 그 중 심박변이도(heart rate variability: HRV)는 심박동의 피크간격 변화를 분석하여 자율 신경계 시스템의 변화 정도를 평가할 수 있는 결정적인 요소이다(Malik, 1996).

뇌파기반의 연구들과 자율신경계 기반의 연구들의 두드러진 차이점은 측정전극의 위치의 차이로써, 간편 측정이 가능한 HRV평가와 측정이 까다로운 뇌파기반의 평가인 것이다. 뇌파기반의 연구는 집중정도

를 평가하는데 높은 정확성을 나타내지만 측정이 까다로운 점이 단점으로 작용한다. 그러므로 HRV 특징의 조합이 뇌파기반의 집중력 추정과 높은 상관관계를 나타낸다면 간편한 측정만으로도 집중정도를 추정할 수 있는 평가 지표로 활용될 가능성이 있다.

하지만, 집중을 하는 동안 집중도에 따라 생리학적 변화를 복합적으로 해석하는 연구는 현재까지 미비한 상태이다(Golcheikine & Aftanas, 2001; Miyake et al., 2009).

특히 학령기 아동에 대한 학습능력의 관심이 증가함에 따라 주의집중력에 대한 관심이 증대되고 있고, 주의 집중력 부족 현상은 일차적인 학습능력 저하의 원인이 되기도 한다. 예를 들어, 주의 집중이 부족한 아동은 작은 자극에도 주의 집중력이 떨어지고 산만해져서 과잉행동장애(attention deficit hyperactivity disorder: ADHD)나 정서불안과 같은 문제가 나타난다(이재신 등, 2009). 따라서 본 연구는 15세 미만 아동의 주의 집중능력과 관련하여 EEG신호와 HRV의 상관관계를 분석하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

사건 유발자극에 의한 집중 상태 분석은 뇌의 정중선(mid-line)위치에서 세타파(4-7.5Hz)변화와 알파파(7.5-12Hz)변화로 확인할 수 있다(Sauseng, 2005). 그 중에서도 알파파는 평상시 뇌파 중 약 50%를 차지하고, 긴장이나 불안, 스트레스 상황과 밀접한 관련이 있다(이재신 등, 2009). 또한 Klimesch(1999)는 외부 자극에 의한 단기집중도 평가 실험에서 세타리듬의 증가 및 알파리듬의 감소를 확인하였다. 그 이유는 알파리듬이 인지수행능력보다는 생리학적 응답에 더 큰 영향을 끼치기 때문이라고 보고했다. 따라서 세타파와 알파파의 비율은 사건유발자극에 의한 집중도 평가에 있어서 뇌파(electro-encephalography: EEG) 신호의 중

요한 지표가 될 수 있다(Anatoly et al., 1998).

심장의 심혈관 자율 조절기능을 평가하기 위해 본 연구에서는 맥파(photoplethysmography: PPG)를 이용하여 HRV분석을 수행하였다. PPG 신호로부터 추출되는 HRV 변수들의 종류는 beat interval(평균 심박수), SDNN (standard deviation of all NN intervals:심박표준편차), RMSSD (the square root of the mean squared differences of successive NN intervals: 심박동 사이의 연속되는 차이 값들의 RMS값), NN50 (the number of interval differences of successive NN intervals greater than 50ms:순간 심박 수의 전 값과의 차이가 50ms이상 차이나는 값), LF (low frequency), HF (high frequency), LF/HF (ratio low/high frequency) 등이 있다.

beat interval은 평균 심박 수를 의미한다. SDNN은 자율신경계를 구성하는 교감신경과 부교감신경이 HRV에 영향을 미치는 정도를 반영하고, 심박동에서 저주파 변이를 반영하여 순간적으로 빠르게 변하는 심박율은 나타내지만 느린 변화의 대부분은 나타내지 못한다(Goldberger, 1996). RMSSD는 스트레스와 같은 질환과 밀접한 연관이 있는 변수이며 이 값이 높아지면 부교감신경이 활성화되었음을 의미한다. NN50은 순간 심박 수의 전 값과의 차이가 50ms이상 차이나는 값의 차이를 나타낸다. LF(0.04~0.14Hz)와 HF(0.14~0.4Hz)는 각각 교감신경 및 부교감신경의 변화와 관련 있다. HF는 RSA(respiratory sinus arrhythmia: 호흡에 의해 발생된 심박의 변이)를 반영하고, 자율신경계의 활성화와 관련되어 인체의 감정변화를 측정 시에도 주요한 요소가 된다. 또한 HF는 호흡 유형(pattern)과 거의 일치하다는 연구결과가 보고되었다(Gyurak & Ayduk, 2008). LF/HF는 자율신경계의 균형을 나타내는 지표가 된다.

HRV변수들은 생리학적으로 정신적 상태의 변화에 따른 교감 신경계와 부교감 신경의 변화로 설명된다(Yu et al., 2009). 교감 신경계가 집중 상태에서 의미 있는 변화를 보이는 반면, 부교감 신경계는 휴식상태와 안정된 상태에서 활발하게 활동한다. 따라서 본 연구에서는 두뇌의 전기적 전위 활동(뉴런들의 전기적 활동)과 심혈관계 시스템에서 심근의 수축과 이완에 의한 혈류량의 동적 변화 활동을 확인하고, 선형회귀 분석을 통해 EEG 신호의 변수와 HRV 변수에 대한 정량적 해석(quantitative analysis)을 시도하였다.

본 연구는 집중 시, 집중의 정도를 평가할 수 있는 EEG 신호와 HRV의 상관관계를 파악하며, PPG를 이

용한 변수들을 집중력 판단의 지표로 선정하였다. 그리고 EEG 신호와의 상관관계여부에 따라 HRV의 변수들 중 어느 변수의 조합이 높은 상관계수를 나타내는 지 분석하고자 한다.

### 3. 연구 방법

#### 3.1. 피험자

실험은 심혈관계 및 신경계 질환이 없고 병력이 없는 건강한 학생들(남자 12명, 여자 9명)이며 총 21명을 대상으로 진행하였다. 어린이들의 평균연령은 11세이며, 연령 범위는 10~14세로 초등학교 3학년부터 중학교 1학년이었다. 피험자 모집은 대전의 전자통신연구원(ETRI) 게시판을 이용하였다. 모든 피험자들은 외부자극에 의한 집중력 유발 실험을 수행하였고, 모든 실험은 전자통신연구원에서 진행되었다. 실험에 참가한 피험자들은 실험 전에 서면에 동의하였다.

#### 3.2. 실험 프로토콜과 데이터 취득

생체 신호는 2채널 증폭기(Biopac MP150 TM)를 통하여 측정되었고, 샘플링은 1000Hz로 디지털화하였다. 2채널 중 한 채널은 EEG신호를 획득하였고, mid-line의 Cz, 오른쪽 컷볼(기준전극)과 이마(집지전극)에 전도성 젤을 이용하여 GRASS전극을 부착하였다. 다른 한 채널에서는 PPG신호를 획득하였고, 빛을 투과시키는 센서를 이용하여 손가락에 부착시켜서 측정하였다(Lynda & Michael, 2005). 선행연구에서, Klimesch(1999)는 Cz영역에서의 알파리듬이 다른 영역과 비교해 볼 때 명확히 관찰될 수 있다고 보고하였다. EEG 신호의 고주파 필터는 0.5Hz로, 저주파 필터는 100Hz로 설정하였다. 또한 실험이 진행되는 동안 60Hz 노치필터를 사용하여 생체신호획득 과정에서 전원 잡음을 제거하였다. PPG 신호의 고주파 필터는 0.05Hz, 저주파 필터는 10Hz로 설정하였다.

주의 집중력을 유발시키는 외부 자극은 병원에서 통상적으로 사용되는 CNT 4.0(computerized neuropsychological test:전산화신경인지 검사) 프로그램을 사용하였다(Jinsung et al., 2003). CNT 4.0 프로그램 중, 본 연구에서 사용한 청력 테스트는 CPT의 한 종류이다. CPT (continuous performance test: 연속수행검사)의 기본적인 패러다임은 간헐적으로 목표자극 혹은 관련

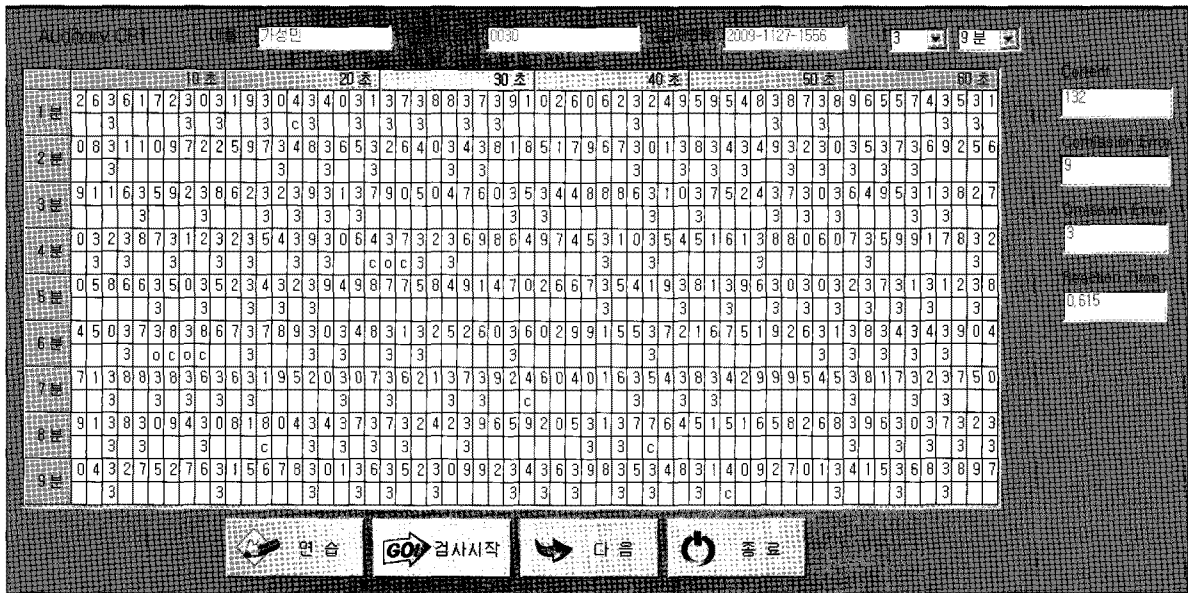


그림 1. CNT4.0의 청각자극 유발실험

자극들에 대한 선택적 주의력을 측정가능하게 한다. 따라서 CPT 프로그램은 목표자극 혹은 목표패턴을 지속적으로 변화시키면서 빠르게 제시하는 것으로, 검사를 수행하는 데 소요되는 시간은 검사마다 차이가 있지만 주의력을 측정하는데 충분하도록 고안되었다(심제명 등, 2007; 구분훈과 배대석, 2006). 그림 1에서 제시된 화면은 실제 CNT 4.0 프로그램을 이용하여 청력CPT 검사를 모니터링 한 것이다. 오른 편에 Correct와 Comission Error, Omission Error, Reaction Time이 각각 표시되었다. Correct는 9분 동안 진행된 검사에서의 피험자가 맞춘 개수로 집중력의 정도를 나타내는 지표가 된다. Comission Error는 '3'이 아닌 곳에서 반응을 보였을 때 비 표적 자극에 반응한 개수를 나타내며, 충동성과 탈 억제를 측정하는 지표가 된다. Omission Error는 '3'인 곳에서 피험자가 표적 자극에 반응하지 않음을 의미하므로 부주의 정도를 측정하는 지표가 된다. 마지막으로 Reaction Time은 표적 자극에 정확하게 반응하는 데 걸리는 시간으로 피험자의 집중력의 정도를 나타내는 지표들 중 하나이다.

실험 과정은 그림 2에서와 같이 실험 전에 피험자의 기본정보를 얻기 위한 설문지 응답 시간과 EEG와 ECG전극을 부착하고 PPG센서(sensor)를 손가락에 부착하기 위한 시간(15분)이 소요된다. 피험자들은 인지능력검사를 수행하기 전에 눈을 뜬 상태에서 Bach의 'G선상의 아리아'를 5분 동안 감상한다. 이것은 외부 자극에 의한 집중 실험 전, 안정 상태(resting)를 유지

시켜 실험에 대한 거부감을 없애기 위함이다. 안정 상태에서도 피험자의 생체신호는 측정된다. 안정 상태가 종료된 후, 설문지에 현재 상태에 대한 감정척도를 표시하도록 권유했다. 설문지 작성이 끝나면 CNT4.0 프로그램을 실행하여 총 9분 동안 청각 자극을 유발시켜 주의집중력에 따른 생체신호의 변화를 측정한다. CNT 4.0의 청각 자극 유발 실험에서는 1~9까지 숫자가 무선 적으로 헤드셋을 통해 주어지며, 숫자 '3'이 들릴 때마다 키보드의 스페이스바(space bar)를 눌러서 반응하도록 하였다. 총 9분 동안의 주의 집중력 유발 실험이 종료되면, 실험에 대한 점수를 기록하고 그림 3과 같이 주관적인 감정에 대한 설문평가를 반복 시행하였다.

집중력 유발 실험 전/후 느끼는 피험자 감정(positive-negative)을 5단계 척도(2; positive~-2; negative)로 나누어 평가한 결과 CNT측정 전/후 평균과 표준편차는 0.875±0.478에서 0.333±0.966으로 감소하였다(p < 0.004). 이것은 집중력 유발 실험(전/후)이 감정에 영향을 끼칠 수 있음을 나타낸다.

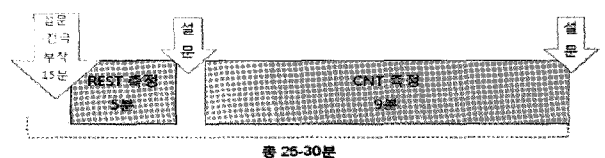


그림 2. 실험프로토콜 시스템 구성

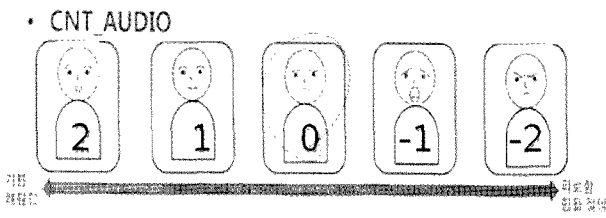


그림 3. 실험 전/후 자기 설문 평가

표 1. 대응표본 t검정을 이용한 집중 전/후 감정변화 (N=21)

	평균	표준편차	$p$
실험 전	0.857	0.478	0.004**
실험 후	0.333	0.966	

\*\* $p < .01$

### 3.3. 데이터 특징 추출과 선형 회귀 법

EEG 신호와 PPG 신호는 시분할 길이를 3분으로 고정시켰다. 집중력 상태는 실험 프로토콜에 따라 총 9분 동안 측정되었으며 3분의 시분할 구간으로 3개의 독립적인 시분할 구간을 구성하고 값을 추출하였다. 외부로부터 주어지는 잡음신호는 제거했다. EEG주파수 분석은 푸리에 변환(fourier transform)을 이용했고, theta 파(4~7.5Hz)와 alpha 파(7.5~12Hz)의 스펙트럼 파워(spectral power)의 상대적인 비율을 집중 시 판단 척도로 사용했다(Stam, 2000; Sauseng et al., 2005).

PPG 센서로부터 얻는 신호는 심장의 수축/이완 활동 정도뿐만 아니라 심장 수축에 의한 혈압을 반영한다. PPG신호의 피크간격으로부터 추출된 HRV 변수는 시간 대역 변수(beat interval, SDNN, RMSSD, NN50)와 주파수 대역 변수(LF;0.04~0.14Hz, HF; 0.14~0.4Hz, LF/HF비율)로 나뉜다. 주파수 대역 분석에서는 FFT(fast fourier transform)를 이용하여 각각의 파워스펙트럼 밀도에 따라서 교감신경과 부교감신경의 활성 정도를 확인할 수 있다(Nitzanyx et al., 1998).

총 21명으로부터 얻은 생체신호 데이터를 행렬로 나타내어 행(raw)은 21개의 샘플이고, 열(column)은 7차원(dimension)으로 구성된 HRV 변수들을 나타냈다. 9분의 집중유발구간을 3분의 시분할 길이로 나누고 21명의 실험자가 참여했기 때문에 가능한 샘플 수는 총 63(21×3)개가 된다.

PPG에서 추출한 7차원의 변수 값들 중 선택된 변수는 관찰데이터  $x_i$ 로 사용되었고, EEG로부터 추출

된 theta/alpha 값은 각각의 변수 값들을 비교하기 위한 기준 값  $y_i$ 로 사용되었다. 중다회귀분석(multiple linear regression)은 식 (1)과 같다.  $\beta$  값을 구하기 위해 least mean square 기반의 일반적인 선형 모델링 방법을 사용했고 식 (2)와 같다(Peter E, 1996).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (1)$$

$$\beta = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (X_i^T X_i + \epsilon I)^{-1} X_i^T Y_i \quad (2)$$

$X_i$  is the dataset.  $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\}$

$\beta$  is the coefficient of linear regression.

$$\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k\}$$

$Y_i$  is the theta / alpha feature.

$i$  is the number of samples.

$k$  is a set depending on the feature dimension and feature selection.

## 4. 결과

중추신경계에서 추출된 EEG값과 심혈관계에서 추출된 HRV의 각 변수들의 상관관계를 비교하기 위해 본 연구에서는 기준 값인 EEG의 theta/alpha를 이용하여 선형 회귀 법에 따라 1차원부터 7차원까지 데이터 셋을 구성하고 결정계수  $R^2$ 의 평균값을 관찰한 결과,  $R^2$ 는 낮은 차원보다 높은 차원에서 높았다.  $R^2$  값은 고차원으로 갈수록 HRV의 7개의 변수들 {beat-interval(1), SDNN(2), RMSSD(3), NN50(4), LF(5), HF(6), LF/HF(7)}과 유의미한 상관관계가 있다는 것을 결론으로 도출할 수 있었다.

표 2-6은 각각의 차원에서  $R^2$ 를 비교하여 어느 변수가 좀 더 의미 있는 변수인가를 나타낸다. 또한  $R^2$  값은 각 변수를 중심으로 수평 축과 수직 축이 교차되는 위치에 값들로 기록했다. 모든 조합 중  $R^2$ 가 기록되어 있는 위치는 서로 독립적이며 같은 조합으로 겹치는 부분은 ‘-’로 표현했다. 그 결과, 모든 변수 조합에 대한  $R^2$  값은 0.253\* ( $p < 0.05$ )을 기록했다.

표 2는 HRV의 변수 7개 중 6개의 나타낼 수 있는 모든 조합 가지 수( ${}_7C_6=7$ 개)를 선형 회귀 법을 통해 도출한 결과이다. 6개의 변수 조합에 대한 모든 경우

표 2. 선형 회귀 법에 따른 6차원에서의  $R^2$  값(수평축과 수직축이 교차하는 부분에서  $R^2$  값이 평균(0.209)을 초과할 경우 회색으로 강조하였다.)

1	1	1	1	1	1	2
2	2	2	2	2	3	3
3	3	3	3	4	4	4
4	4	4	5	5	5	5
5	5	6	6	6	6	6
6	7	7	7	7	7	7
.208*	.151	.232*	.232*	.227*	.178	.239*

\* $p < .05$

의  $R^2$  평균값은 0.209로 나타났다. 평균값을 기준으로 각 조합으로 나타낸  $R^2$  값을 비교하였을 때, {2,3,4,5,6,7} 조합은 최대  $R^2$  값(0.239)을 나타냈다.  $R^2$ 의 평균값보다 작은 값들의 조합은 { $R^2=0.151$ ; 1,2,3,4,5,6}, { $R^2=0.178$ ; 1,3,4,5,6,7}을 나타냈다. {2,3,4,5,6,7} 조합과 {1,3,4,5,6,7}을 비교해봤을 때 Beat-interval(1)의 값은  $R^2$  값을 나타내는데 있어서 유효한 변수가 아님을 알 수 있다.

표 3은 5개의 조합이 나타낼 수 있는 모든 경우 ( ${}_7C_5=21$ 개)의  $R^2$  값들을 보여준다. 모든 조합들에 대한  $R^2$ 의 평균값은 0.175이고, 평균값보다 큰  $R^2$  값에 대해 표 2와 마찬가지로 회색으로 강조 하였으며,

표 3. 선형 회귀 법에 따른 5차원에서의  $R^2$  값(수평축 과 수직축이 교차하는 부분에서  $R^2$  값이 평균(0.175)를 초과할 경우 회색으로 강조하였다.)

	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4
	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	4	4	4	5	5
	4	4	4	5	5	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6
	5	6	7	6	7	7	6	7	7	7	6	7	7	7	7
1	.150	.207*	.129	.196*	.144	.216*	.183*	.139	.208*	.195*	.134	.103	.161	.152	.176*
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.197*	.143	.215*	.216*	.226**
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.176*

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$

표 4. 선형 회귀 법에 따른 4차원에서의  $R^2$  값(수평축과 수직축이 교차하는 부분에서  $R^2$  값이 평균(0.145)을 초과할 경우 회색으로 강조하였다.)

	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	
	4	5	6	7	5	6	7	6	7	7	
1	.068	.144	.196*	.125	.137	.183*	.118	.164*	.182*	.127	
	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	
	4	4	4	5	5	6	5	5	6	6	
	5	6	7	6	7	7	6	7	7	7	
1	.099	.133	.084	.119	.140	.092	.133	.100	.159*	.152*	
2	.142	.197*	.119	.184*	.135	.198*	.183*	.138	.205**	.195*	
3	-	-	-	-	-	-	.134	.101	.158*	.150*	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.170*	

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$

SDNN(2)과 HF(6)가 모두 포함된 조합들은 상대적으로 평균이상의 상관관계를 나타냈다. SDNN(2)과 HF(6)가 제외된  $\{R^2=0.103; 1,3,4,5,7\}$ 조합은 최저  $R^2$  값을 기록하였다.

표 4는 4개의 조합이 나타낼 수 있는 모든 경우 ( ${}_7C_4=35$ 개)의  $R^2$ 값을 보여주고 있다.  $R^2$ 의 평균값은 0.145로서 상위 차원의 조합 평균값  $\{avg({}_7C_6)=0.209, avg({}_7C_5)=0.175\}$ 보다 낮았다.  $\{1,2,5,7\}$ 조합을 제외한  $R^2$ 값들의 공통적인 변수는 HF(6)이고, HF(6)가 포함된 조합이 상대적으로 높은  $R^2$ 값을 나타냈다.

$R^2$ 는  $\{R^2=0.205; 2,4,6,7\}$ 조합에서 가장 높았다. 또한  $\{R^2=0.197; 2,3,4,6\}$ ,  $\{R^2=0.198; 2,3,6,7\}$ ,  $\{R^2=0.195; 2,5,6,7\}$ 조합이 상대적으로 높게 나타났다. 5차원에서와 마찬가지로 SDNN(2)과 HF(6)가 제외된  $\{R^2=0.084; 1,3,4,7\}$ 조합이 최저  $R^2$  값을 기록했다.

표 5는 3개 조합의 모든 가지 수( ${}_7C_3=21$ 개)로 표 4의 결과를 뒷받침해 주고 있다.  $R^2$ 의 평균값은 0.117을 기록했고, HF(6)는  $\{1,2,5\}, \{2,3,5\}, \{2,4,5\}, \{2,5,7\}$ 조합을 제외한 조합(평균  $R^2$ 값을 초과하는 조합)에 모두 포함되었다.  $R^2$ 는  $\{R^2= 0.184; 2,3,6\}$ 조합에서 가장 높았고,  $\{R^2= 0.052; 1,3,4\}$ 조합에서 최저  $R^2$  값을 기록했다.

표 6은 2개 이하의 조합을 의미하고  $R^2$ 의 평균값은 상위차원들과 비교해서 최저  $R^2$  0.088을 기록했다. EEG 신호의 theta/alpha 을 기준으로 HRV 의 각 변수들에 대한 2차원 조합은 상대적으로 상관성이 없다는 것을 나타냈다.

표 7은 3차원 이상에서  $R^2$  값의 평균값( ${}_7C_6=0.209, {}_7C_5=0.175, {}_7C_4=0.145, {}_7C_3=0.117$ )보다 높은 값을 나타내는 부분들 중 제외된 변수들의 개수를 합한 결과이다. 각 변수들에 대해서 수직으로 개수를 합한 값들

표 5. 선형 회귀 법에 따른 3차원에서의  $R^2$  값(수평축 과 수직축이 교차하는 부분에서  $R^2$  값이 평균(0.117)을 초과할 경우 회색으로 강조하였다.)

	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6
	3	4	5	6	7	4	5	6	7	5	6	7	6	7	7
1	.066	.067	.126*	.163*	.110	.052	.089	.118	.077	.096	.131*	.081	.119	.091	.140*
2	-	-	-	-	-	.038	.135*	.184**	.114	.137*	.183**	.116	.164*	.126*	.181**
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.098	.133*	.082	.118	.090	.137*
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.129*	.094	.151*
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.148*

\* $p<.05$  \*\* $p<.01$

표 6. 선형 회귀 법에 따른 2차원에서의  $R^2$  값(수평축 과 수직축이 교차하는 부분에서  $R^2$  값이 평균(0.088)을 초과할 경우 회색으로 강조하였다.)

	2	3	4	5	6	7
1	.064	.048	.048	.088	.118*	.075
2	-	.036	.023	.125*	.163**	.108*
3	-	-	.035	.088	.117*	.074
4	-	-	-	.091	.129*	.073
5	-	-	-	-	.116*	.086
6	-	-	-	-	-	.134*

\* $p<.05$  \*\* $p<.01$

표 7. 평균  $R^2$  값보다 큰 조합에서 제외된 변수들의 개수

	Counted values for excluded feature							
	1	2	3	4	5	6	7	
$R^2$ of 6dim	1	0	1	1	1	0	0	$R^2 > 0.209$
$R^2$ of 5dim	5	2	5	4	4	0	4	$R^2 > 0.175$
$R^2$ of 4dim	9	5	11	9	7	1	6	$R^2 > 0.145$
$R^2$ of 3dim	13	10	13	13	10	4	13	$R^2 > 0.117$
SUM	28	17	30	27	22	5	23	-

dim: dimension

(SUM)은 중추 신경계의 활동을 대변하는 EEG 신호의 theta/alpha 값과 심혈관계 시스템을 대변하는 변수 조합간의 상관관계 여부를 나타낸다. 즉 SUM이 작은 변수일수록,  $R^2$  값을 결정하기 위한 중요한 변수가 됨을 표 7을 통해 확인할 수 있다.

## 5. 고찰 및 결론

본 연구는 주의 집중력 실험 시, EEG 신호로부터 추출된 theta/alpha 값과 심혈관계를 나타내는 HRV의 변수들 사이의 상호연관성을 평가하기 위함이다. theta/alpha 값과 HRV의 변수들 간의 상호연관성을 나타내기 위해 특징 추출 과정을 통해 얻은 변수 값들은 선형 회귀 법을 사용하여 적합성 평가를 수행하였다. 본 연구에서 시행된 실험 결과는 외부자극으로 인한 집중력 유발 시 세타파가 증가하고, 알파파는 감소한다는 Klimesch(1999)의 논문 내용에 근거한다. theta/alpha와 심혈관계의 변수들의 상호연관성은 SDNN(2), HF(6)가 포함된 3차원 이상의 조합에서 상대적으로 유효하게 나타났다.

시간 대역에서 추출된 SDNN(2)은 생리학적 변화를 나타내는 다른 시간영역 변수들보다 자율신경계에서의 변화와 상대적으로 더 높은 연관성을 나타내고, 심혈관계에서의 심장 박동에 대한 변화 정도를 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다. 하지만 수초 동안 발생하는 심박의 변화는 더 작은 변화들에 의해 모호해지기 때문에 SDNN(2)은 역동적인 심박동의 미묘한 변화를 감지하지 못한다(Goldberger, 1996; Peng et al., 1998). HF(6)는 주파수 영역에서 추출되며 외부자극에 따른 호흡패턴과 밀접한 관련이 있다. HF(6)는 표7에서와 같이 고차원(5,6차원)에서 평균  $R^2$  값보다 초과하는 범위 조합에 포함되었다. 이것은 HF(6)가 다른 변수들보다 상관계수에 미치는 영향이 큰 지표임을 암시한다. 하지만, 주파수 분석에서 주파수 분해능을 만족시키기 위해서 수분이상의 생체신호 데이터가 확보되어야 한다. 그러므로 HF(6)은 인지적인 변화에 따른 순간적인 심박동의 변화를 감지하는데 한계가 있다. 결론적으로 SDNN(2)과 HF(6)은 RMSSD(3), NN50(4), LF(5), LF/HF(7)와 결합할 때 EEG 신호와 통계적으로 유의한 상관관계를 나타낼 수 있었다. 따라서 HRV 변수들에 대한 분석은 뇌의 전기적 전위로 인한 심혈관계 작용을 판단하는 지표로 활용 가능하고, 회귀 방법

에 적용되는 입력 벡터의 차수가 올라갈수록 심혈관계 시스템과 EEG의 활동의  $R^2$ 가 높아졌다.

표 7을 참조하여 상관 계수에 큰 영향을 주는 순서로 변수를 정렬하면 HF(6) >> SDNN(2) > LF(5) > LF/HF(7) > NN50 (4) > beat-interval(1) > RMSSD(3)로 나타낼 수 있다. 위 결과를 바탕으로 RMSSD(3)은  $R^2$  값에 가장 영향을 적게 미치는 feature로 간주될 수 있으며, 표 7에서도 이를 뒷받침하고 있다.

중추신경계의 활동을 대변하는 EEG의 스펙트럼 변화와 HRV변수들의 관계는 두 신경계의 활동과 상관관계를 대변하는 중요한 인자들이다. 인간의 감정과 정서에도 인지기능에 대한 평가와 통합하여 분석되고 있는 추세이고, 실생활에서도 감성과 인지상태가 밀접한 관련이 있다는 것은 일반적으로 인정되고 있다. 실제로 전두엽에서의 알파파 불균형(중추신경관점)과 심박 및 호흡수의 증감(자율신경관점)을 통해 감정을 역 추정하는 연구가 진행되고 있다(Hagemann et al., 2003; Miskovic & Schmidt, 2010). 하지만 위 연구에서는 추이만 보여줄 뿐, 구체적인 특징들의 반응에 대한 뚜렷한 상관관계를 제시하지 못했다.

또한 EEG는 신호추정의 까다로움과 움직임에 제한이 있기 때문에, 인지나 감성상태를 간접적으로 평가할 수 있는 대체가능한 HRV 기반의 연구결과는 앞으로 감성인식 분야뿐만 아니라 교육, 보건 및 게임 산업에 적용될 수 있는 근본적인 평가 지표로서 활용 가능할 것이다.

추후 연구방향으로는 HRV차원증가와 상관관계 분석연구를 뒷받침할 만한 통계적 유의성 검증뿐만 아니라 추가실험을 통해 데이터 샘플을 확보하여 보다 신뢰 있는 결과도출에 주력할 것이다.

## 참고문헌

- 구본훈, 배대석 (2006). ADHD 진단을 위한 전산화 신경인지 기능검사의 유용성. *생물치료정신의학*, 12(1), 39-49.
- 심제명, 김환희, 이용석 (2007). 전산화 신경인지기능 프로그램(COMCOG, CNT)을 이용한 뇌졸중 환자의 기억력과 주의력 증진효과. *대한물리치료학회지*, 19(4), 25-32.
- 이재신, 정주현, 김지현, 이경자, 송현미, 전병진, 이지연 (2009). 색안경이 아동의 주의집중력에 미치는 영향에 관한 연구. *대한작업치료학회지*, 17(2),



- 91-104.
- Anatoly, B., Meir N., Boris, K., & David, L. (1998). The variability of the photo-plethysmographic signal - a potential method for the evaluation of the autonomic nervous system. *Physiological Measurement*, *19*(1), 93-102.
- Dennis, T.A. (2010). Neurophysiological for child emotion regulation from the perspective of emotion-cognition integration: current directions and future challenges. *Developmental Neuropsychology*, *35*(2), 212-230.
- Galbraith, G. C., Buranahirun, C. E., Kang, J., Ramos, O. V., & Lunde, S. E. (2001). Individual differences in autonomic activity affects brainstem auditory frequency-following response amplitude in humans. *Neuroscience Letters*, *283*(3), 201-4.
- Goldberger, A. L. (1996). Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet*, *347*(9011), 1312-1314.
- Golocheikine, S. A., & Aftanas, L. I. (2001). Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: high-resolution EEG investigation of meditation. *Neuroscience Letters*, *310*(1), 57-60.
- Gyurak, A., & Ayduk, O. (2008). Resting respiratory sinus arrhythmia buffers against rejection sensitivity via emotion control. *Emotion*, *8*(4), 458-467.
- Hagemann, D., Waldstein, S. R., & Thayer, J.F. (2003). Central and autonomic nervous system integration in emotion. *Brain and cognition*, *52*(1), 79-87.
- Jinsung, K., Jongbum, L., Wanseok, K., Hyounjin, S., Daiseg, B., & Hyelin, L. (2003). The Validity and Reliability of Computerized Neurocognitive Function Test in the Elementary School Child. *Korean Psychosomatic Society*, *11*(2), 97-117.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, *29*(2-3), 169-195.
- Kubota, Y., Sato, W., Toichi, M., Murai, T., Okada, T., Hayashi, A., & Sengoku, A. (2001). Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure. *Cognitive Brain Research*, *11*(2), 281-287.
- Lynda, T., & Michael, T. (2005). Neurofeedback Intervention for Adults with ADHD. *Journal of Adult Development*, *12*(2-3), 123-130.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability : Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation* *93*, 1043-1065.
- Miskovic, V., & Schmidt, L. A. (2010). Frontal brain electrical asymmetry and cardiac vagal tone predict biased attention to social threat. *International Journal of Psychophysiology*, *75*(3), 332-338.
- Miyake, S., Yamada, S., Shoji, T., Takae, Y., Kuge, N., & Yamamura, T. (2009). Physiological responses to workload change. A test or retest examination. *Applied Ergonomics* *40*(6), 987-996.
- Nitzanyx, M., Babchenko, A., Khanokh, B., & Landau, D. (1998). The variability of the photoplethysmographic signal - a potential method for the evaluation of the autonomic nervous system. *Physiological Measurement*, *19*(1), 93 - 102.
- Peter, E. H., Richard, O. D., & David, G. S. (1996). *Pattern Classification, 2nd edition ed.* Wiley-Interscience.
- Ristimae, T., Makikallio, T. H., Airaksinen, K. E., Peng, C. K., Goldberger, A. L., & Huikuri, H. V. (1998). Heart rate dynamics in patients with stable angina pectoris and utility of fractal and complexity measures. *The American Journal of Cardiology*, *81*(1), 27-31.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Schabus, M., & Doppelmayr, M. (2005). Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive function. *International Journal of Psychophysiology*, *57*(2), 97-103.
- Stam, C. (2000). Brain dynamics in theta and alpha frequency bands and working memory performance in humans. *Neuroscience Letters*, *286*(2), 115-118.
- Yu, X., Zhang, J., Xie D., & Zhang, C. (2009). Relationship between scalp potential and autonomic nervous activity during a mental arithmetic task.

*Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 146(1-2),  
81-86.

원고접수 : 11.04.20

수정접수 : 11.05.16

게재확정 : 11.05.25