

비 집중 · 집중 상태에 따른 청각 유발 전위의 반복 정량 분석

Recurrence Quantification Analysis of Auditory Evoked Related Potential in Inattention and Attention

김혜진* · 유선국***† · 이병채***
Hye-Jin Kim* · Sun-Kook Yoo***† · Byung-Chae Lee***

*연세대학교 생체공학협동과정
*Graduate School of Biomedical Engineering, Yonsei University

**연세대학교 의공학교실
**Department of Medical Engineering, Yonsei University

***용인송담대학교 의료정보과
***Department of Medical Information System, Yong-In Songdam College

Abstract

This study aims to analyze using RQA(Recurrence Quantification Analysis) about difference of electroencephalogram between inattention and attention among nonlinear methods for school age children who need attention. The experiments were conducted by 21 healthy subjects(12 males and 9 females). Inattention state is 500msec before the beginning of the auditory stimuli, attention state is 500msec after the beginning of auditory stimuli. The results of RQA parameters are greater in attention state than inattention state. It showed a statistically difference($p < 0.05$). According to two states, auditory evoked potentials are displayed RP and CRP in diagram form to confirm nonlinear characteristics and The brain dynamics in the attention is more complex than the inattention. It is feasible that the RQA can be useful for the analysis of complex brain dynamics associated during auditory attentional task.

Key words : RQA(Recurrence Quantification Analysis), AEP(Auditory Evoked Potential), Inattention, Attention

요약

본 연구에서는 집중력이 중요한 학령기 아동을 대상으로 ‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’에 대한 뇌파의 차이를 분석하기 위해 비선형 해석 방법의 하나인 반복 정량 분석(Recurrence Quantification Analysis, RQA)을 이용하였다. 건강한 아동 21명(남성 12명, 여성 9명)을 대상으로, 청각 자극이 나오는 시점 전 500msec를 ‘비 집중 상태’ 자극 후 500msec를 ‘집중 상태’로 실험을 진행하였다. 실험결과 반복 정량 분석의 파라미터 값은 ‘비 집중 상태’보다 ‘집중 상태’가 큰 것을 확인하였다($p < 0.05$). 또한, 상태에 따른 유발 전위의 반복계적과 색상 반복계적을 도식화하여 비선형 특성을 확인하였고, ‘비 집중 상태’보다 ‘집중 상태’일 때 뇌가 복잡한 특징을 나

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

† 교신저자 : 유선국 (연세대학교 의과대학 의공학교실)

E-mail : sunkyoo@yuhs.ac

TEL : 02-2228-1919

FAX : 02-363-9923

타내는 것을 알 수 있었다. 본 실험을 통하여 청각 자극에 대한 비 집중·집중 시 뇌의 비선형 특성을 반복 정량 분석을 통해 해석할 가능성을 확인하였다.

주제어 : 반복 정량 분석, 청각 유발 전위, 비 집중, 집중

1. 서론

집중력이란 우리가 무엇을 행하고 있거나, 생각하고 있거나, 읽고 있거나 또는 보고 있는 것을 유지할 수 있는 능력이다(문선모, 2001). 즉 집중력은 마음이나 주의를 집중할 수 있는 힘으로 자신의 생각을 의식적으로 조절하고 모을 수 있는 능력 또는 주의가 좁혀진 상태로 어떤 자극에 대하여 주의가 기울이거나 선택된 자극에 주의를 유지하는 능력이라고 할 수 있다.

특히, 학령기 아동의 집중력은 학습에 영향을 줄 뿐만 아니라 행동, 정서, 또래 관계에도 영향을 미치므로 매우 중요하다. 주의 집중이 부족한 아동은 주의를 기울이는 데 어려움이 있으며 세세한 부분에 부주의하고, 주의를 시키면 짧은 시간은 효과를 보이지만 쉽게 산만해지는 것을 알 수 있다. 따라서 학령기 아동에게 집중력은 반드시 필요한 기초적 능력이다(Rizzo, A. A & Buckwalter, U, 1997).

최근 집중 상태를 판단하는 지표로써 뇌파를 이용한 연구가 진행되고 있다. 뇌파는 뇌 신경세포의 활동에 수반되어 생성되는 전기적 변화를 외부에서 측정하고 기록하는 것이다. 두피 상에서 측정되는 뇌파의 전위 변동은 수 μ V에서 수백 μ V로 매우 낮은 전위를 가지며 일반적으로 두피 상에서 전극을 접촉하여 미세한 전위를 증폭하여 기록한다(윤중수, 2004). 특히 유발 전위(Event-related potentials, ERP)를 이용하여 분석하고 있으며, 특정한 사건과 관련된 일정 시간 동안의 뇌파를 자극 시점에 동기 되어 평균하여 얻어진 파형을 의미한다(임남열, 2008).

하지만 선형 해석 방법인 평균을 이용한 유발 전위 방식은 뇌파가 안정하다는 가정에 따라 계산하지만, 측정된 뇌파는 주위 환경과 잡음 등에 영향을 받아 전체에서 특정 부분을 해석하는 데는 제한적이다. 또한, 유발 전위는 자극 시점과 동기 된 신호를 제외하면 잡음으로 간주하여 순간순간의 변화하는 뇌파의 활동에 대한 의미는 분석하기 어렵다(민병기, 2009). 특히 본 연구의 피험자인 아동의 경우 몸을 들썩이는 등 실험 시 주위 환경에 매우 영향을 받아 변화하는 뇌의 상태에도 영향을 주기 때문에 선형 해석 방법은 자극 후 뇌의 활동에 대한 정보를 주는 측면에서는 한계성이 있다.

선형 해석 방법의 한계점을 극복하기 위하여 카오스를 포함한 비선형 해석 방법을 적용하면 뇌파 신호의 비선형 특징을 분석하여 이전의 선형 해석 방법으로는 확인할 수 없었던 뇌파 신호의 차이를 확인할 수 있다(주은연, 김응수, 박기덕, 최경규, 2001).

본 연구는 집중력이 중요한 학령기 아동을 대상으로 ‘비 집중’ ‘집중’ 상태를 카오스 분석 방법인 반복 정량 분석(Recurrence Quantification Analysis, RQA)를 통하여 두 상태의 차이를 측정하고자 하였다.

2. 본론

2.1. 연구 방법

2.1.1 피험자

피험자는 심혈관계 및 신경계 질환이 없고 병력이 없는 건강한 학생들을 대상으로 진행하였다. 총 21명으로 남자 12명 여자 9명이고, 평균 연령은 11세로 연령범위는 10~14세이다.

피험자 모집은 전자통신연구원(ETRI)의 게시판을 이용하였고 실험 또한 전자통신연구원에서 진행되었다(최우진, 2011). 모든 피험자는 외부 자극인 청각 자극을 통한 집중력 유발 실험을 수행하였고 실험에 참가한 모든 피험자는 실험 전 서면에 동의하였다.

2.1.2 실험 설계

주의 집중력을 유발하는 외부자극은 CNT4.0(Computerized Neuro-physiological Test : 전산화 신경인지 검사)을 사용하였고, 그중에서 연속 수행 검사(Computerize Performance Test, CPT)를 시행하였다. 연속 수행 검사의 기본적인 패러다임은 간헐적으로 제시되는 목표자극 혹은 관련 자극들에 대한 선택적 주의 혹은 경계력을 측정하는 것이다(배대석, 2005). 따라서 CPT 패러다임은 목표 자극 혹은 목표 패턴을 지속적으로 변화시키면서 빠르게 제시하는 것으로 CPT검사를 수행하는데 걸리는 시간은 검사마다 차이가 있지만, 지속적인 주의력을 측정하는데 충분하도록 고안되었다(배대석, 2005). CPT검사

중에서도 본 연구에서는 청각 연속 수행 검사(Auditory CPT)를 사용하였다. 청각 자극은 전문 성우가 0부터 9까지 녹음한 숫자가 일정한 크기로 제시된다. 소리의 경우에는 시각 자극과는 달리 자극 제시 시간을 일정하게 하기도 어렵고 검사자의 필요로 조절할 수 없으므로 ISI 대신 자극 시작으로부터 다음 자극 시작까지의 시간만 고정하였다(배대석, 2005). 사용된 기준 자극 제시 시간 200msec, ISI 800msec, 전체 검사시간은 9분으로 하였다(배대석, 2005). ‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’는 청각 자극이 나오는 시점 전, 후 500msec로 정의하였다.

이 테스트는 스피커를 통해서 녹음된 숫자가 나오면 표적자극인 ‘3’인 숫자가 제시될 때마다 가능한 한 빠르게 반응단추인 스페이스바를 누르게 하여 정반응수(Correct), 누락오류수(Omission error), 오경보오류수(Commission error)를 측정하였다. 정반응은 매 60초 이내 15회가 무작위로 제시되며, 교란 자극들은 각각 5회씩 제시되고 반응시간은 1/100초 단위로 측정되었다.

뇌파는 국제 전극 부착 시스템인 10-20 시스템을 준수하여 정중선의 Cz에 부착하고 기준 전극은 오른쪽 귓볼 접지는 이마에 부착하였다. Biopac의 MP150과 EEG100C를 이용하여 뇌파 신호 계측 및 증폭, 필터링을 하였다.

2.2. 분석 방법

2.2.1. 반복 정량 분석

반복 정량 분석(Recurrence Quantification Analysis, RQA)은 동역학 시스템을 분석하기 위해 사용되는 비선형 데이터 분석 방법의 하나다. 비선형 변수를 구하기 위해서는 시계열이 가지는 매립차원(Embedding dimension)과 시간 지연(Time delay)을 결정하여 벡터 시계열을 재구성하여야 한다. 반복 정량 분석의 장점은 짧고 비 고정된 신호에서도 유용한 정보를 제공할 수 있다는 것이다.

반복 정량 분석은 반복계적(Recurrence Plot, RP) 안에서 작은 규모의 구조에 따라 반복계적이 다르게 나타나는 것을 정량화하기 위해 개발되었다. 반복계적은 동역학 시스템의 위상 공간 궤적의 반복 동작을 시각화시키는 도구이다.

반복계적은 평균 대각선(Line of Identity, LOI)에 평행하거나 수직/수평인 하나의 점과 선으로 대부분 구성되어 있다. 동역학 특성의 변화에 따라 특정한 패턴을 보이며, 서로 다른 궤적의 벡터들이 유사한 변화를 보

일 때 대각선 구조가 나타나지만 동역학 상태가 일정 시간 동안 변화하지 않을 때는 수평선 또는 수직선 구조로 보인다(Webber Jr, C. L., & Zbilut, J. P. 2004).

뇌파는 측정하는 지점에 전극을 위치하고 전위 변화를 기록하는데 이처럼 한 시점에 하나의 수치로 기록된 연속적인 수열을 시계열이라고 한다. 시계열 신호이기 때문에 매립차원과 시간 지연을 결정하여 재구성하면 반복 정량 분석이 가능하다.

$$\vec{x}(i) = (u(i), u(i+r), \dots, u(i+\tau(m-1))) \quad (1)$$

여기서 $u(i)$ 는 시계열 신호, m 은 매립차원, τ 는 시간 지연이다.

RR(Recurrence rate)은 반복계적 안에 반복되는 점으로써 간단하게 측정할 수 있다. (Marwan, N., Carmen Romano, M., Thiel, M., & Kurths, J. 2007).

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} R(i,j) \quad (2)$$

Determinism (DET)는 최소길이(l_{min})의 반복계적에서 대각선 구조를 형성하는 점들의 비율로서 주기신호는 긴 대각선, 카오스 신호인 경우 매우 짧은 대각선, 스토캐스틱(Stochastic) 신호의 경우 대각선이 나타나지 않는다(Webber Jr, C. L., & Zbilut, J. P. 2004).

$P(l)$ 은 대각선의 길이인 l 의 도수 분포이다.

Laminarity (LAM)은 수직선 구조를 형성하는 점들의 비율을 나타낸다(Marwan, N., Carmen Romano, M., Thiel, M., & Kurths, J. 2007)..

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)} \quad (3)$$

$P(v)$ 은 수직선의 길이인 v 의 도수 분포이다.

TT는 동역학 시스템의 laminarity 시간, 즉 얼마나 시스템이 특정한 상태로 남아있는지와 관계있다(Marwan, N., Carmen Romano, M., Thiel, M., & Kurths, J. 2007).

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)} \quad (4)$$

Shannon Entropy의 확률인 ENTR은 시스템 구조의 복잡성을 반영한다. 그러나 엔트로피는 히스토그램 빈수에 민감하게 의존한다(Marwan, N., Carmen Romano, M., Thiel, M., & Kurths, J. 2007).

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l) \tag{5}$$

3. 결과

3.1. 주파수 분석

주파수 분석은 유발 전위에서는 확인할 수 없는 뇌파 각각의 분석이 가능하여 분석 시 자주 쓰이는 방법의 하나다.

‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’의 차이를 알아보기 위해서 프로그래머의 집중 시 뇌파에 대한 선행 연구에서 집중의 파라미터로 사용한 θ 파의 변화를 알아보았다. θ 파는 대뇌 피질에서 발생하여 뇌의 주기억 장치인 해마에 전달되어 이 뇌파를 발생시켰던 상황을 오랫동안 기억하는 역할을 한다. 뿐만 아니라, 주로 고도의 정신을 집중하고 있는 상황에 크게 발생한다(Murugappan, M., Ramachandran, N., & Sazali, Y, 2010). 주파수 분석 결과 ‘비 집중 상태’보다 ‘집중 상태’일 때 파워가 큰 것을 확인하였다(그림 1).

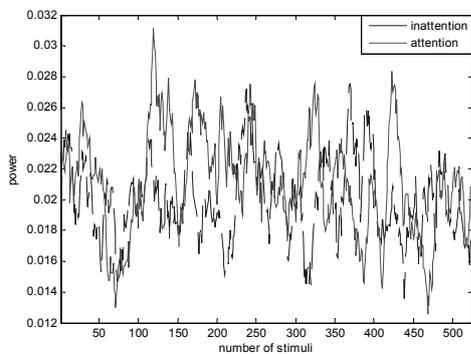


Figure 1. Amplitude of Theta wave in inattention and attention

통계 분석은 Paired T-test를 이용하였고 그 결과 ‘비 집중상태’와 ‘집중상태’의 θ 파는 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다($p < 0.05$)(표 1).

Table 1. Difference of amplitude of Theta between Inattention and attention

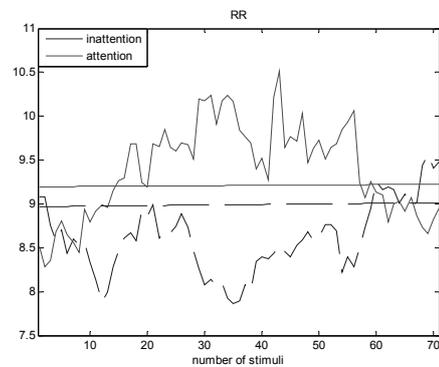
Mean Value	Standard Error	t-Value	Pr > t
0.0013	0.0007	2.04	0.0419

3.2. 반복 정량 분석

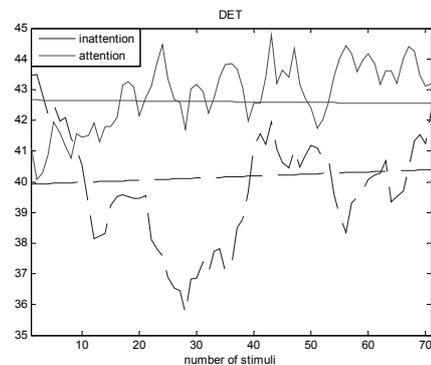
반복 정량 분석은 ‘비 집중상태’와 ‘집중 상태’의 반복 특성의 차이를 비선형적으로 나타내는 것이다.

최적의 매립차원과 시간 지연을 변경하여 얻은 위상 공간 벡터로부터 ‘비 집중상태’와 ‘집중상태’에 대한 반복 정량 분석으로 파라미터(RR, DET, LAM, TT, ENRT, TREND)를 추출한 후 값들을 비교하였다.

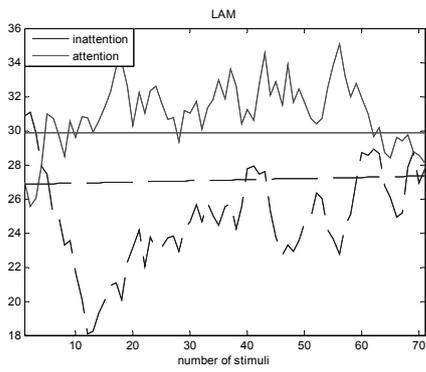
특히, ‘비 집중상태’와 ‘집중상태’에 대한 파라미터의 차이를 알기 위하여 주파수 분석 후 θ 파의 차이가 크게 나는 구간의 값을 비교해 주었는데 그림 2는 반복 정량 분석의 파라미터인 RR, DET, LAM, TT, ENRT를 ‘비 집중상태’와 ‘집중상태’일 때 θ 파의 변화가 가장 큰 구간을 이동 평균한 값과 추세선이다. ‘집중 자극’이 ‘비집중 자극’에 비해 더 많은 반복되는 점, 대각선 구조 점, 수직선 수를 가지는 특성을 가졌다. 반복 정량 분석을 통하여 ‘비 집중 상태’과 ‘집중 상태’에 대한 차이가 있음을 확인할 수 있었고 통계분석을 통하여 ‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’일 때 모든 파라미터에서 유의한 차이를 보임을 확인하였다($p < 0.05$)(표 2).



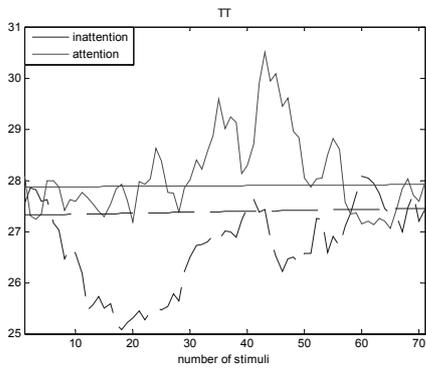
(a) RR



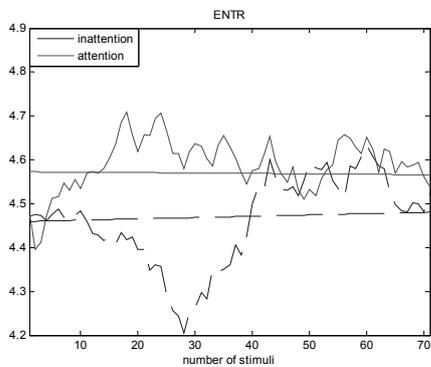
(b) DET



(c) LAM



(d) TT



(e) ENTR

Figure 2. Difference of RQA parameters between inattention and attention

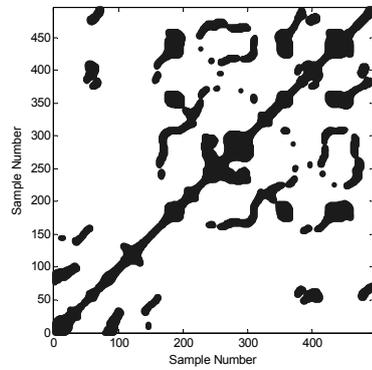
Table 2. Difference of RQA parameters between Inattention and attention

	Inattention		Attention		t	p-value
RR	8.5809	1.9077	9.4103	2.8139	2.06	0.0430
DET	40.0351	7.0581	42.6475	6.8033	2.45	0.0168
LAM	25.5022	13.7513	31.1548	12.6135	2.75	0.0077
TT	26.7000	0.8359	28.0987	0.7988	2.49	0.0150
ENTR	4.4519	0.3051	4.5855	0.3226	2.86	0.0055

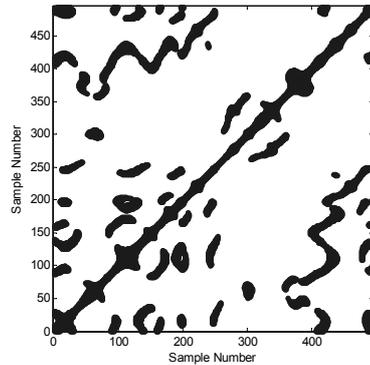
그림 3 ‘비 집중상태’와 ‘집중 상태’ 각 500 샘플에 대하여 동기 된 하나의 자극구간(500msec)의 반복계적 과 색상 반복계적(Colored Recurrence plot, CRP)이다.

반복계적의 패턴은 ‘비 집중상태’에서 단위 정사각형의 크기가 크며 수직선과 대각선의 길이가 긴 것을 보였고 반대로 ‘집중 상태’에서 단위 정사각형의 크기가 작고 불규칙한 형태를 보이고 있다.

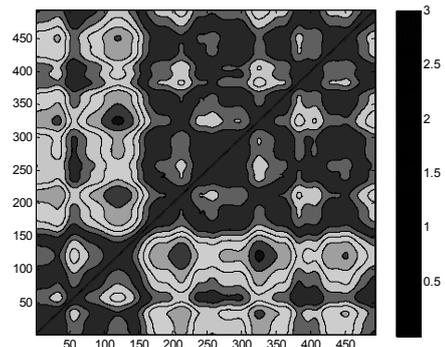
마찬가지로, 색상 반복계적에서도 ‘비 집중 상태’일 때보다 ‘집중 상태’일 때 색 변화가 작은 단위로 일어나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 반복계적과 색상 반복계적을 통하여 ‘비 집중상태’와 ‘집중상태’에서 차이가 나는 것을 알 수 있었다.



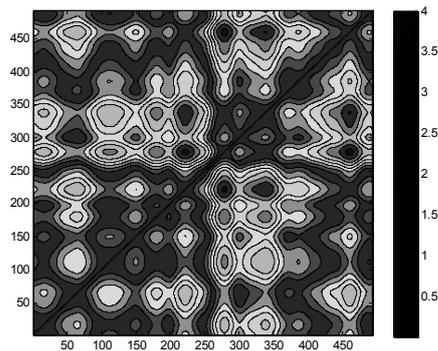
(a) inattentional RP



(b) attentional RP



(c) inattentional CRP



(d) attentional CRP

Figure 3. The RP and CRP of single trial stimulus interval for inattentive state (500msec before the auditory target) and attentive state (500msec after the auditory target)

4. 결론

본 연구에서는 집중력이 중요한 학령기 아동을 대상으로 ‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’에 대한 뇌파의 차이를 비선형 해석 방법의 하나인 반복 정량 분석을 하였다. 선형 분석인 청각 유발 전위를 어린아이들을 대상으로 한 실험환경에서 제대로 유도하기가 어려웠으므로 전반적인 트렌드 분석을 하였다. 반복 정량 분석결과 ‘비 집중 상태’와 ‘집중 상태’에서 파라미터(RR, DET, LAM, TT, ENTR)의 차이가 있음을 확인하였고 통계 분석한 결과 모든 파라미터에서 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 또한, 도식적 표현법을 통해 ‘비 집중 상태’의 뇌는 ‘집중 상태’의 뇌보다 복잡하지 않다는 특징을 보이는 것을 확인하였다.

본 연구를 통하여 청각 자극에 대한 비 집중-집중 시 뇌의 비선형 특성을 반복 정량 분석을 통해 해석하는 유용한 지표가 될 수 있을 것이라 사료된다.

REFERENCES

- Bae, D. S. (2005). *Computerized Neurocognitive Function Test (전산화 신경인지기능 검사의 이해와 해석)*, Seoul: Hana Medical Publishing Company.
- Choi, W. J., Lee, C. K., & Yoo, S. K. (2011). An analysis of correlation between EEG signal and HRV during attentional status with children under 15 years (15세 미만 아동을 대상으로 한 집중상태에서 EEG 신호와 HRV의 상관관계 분석), *Korean Journal of the science of Emotion & sensibility*, 14(2), 269-278.
- Min, B. K. (2009). Spectral analysis of brain oscillatory activity (뇌파의 주파수축 분석법), *Korean Journal of Cognitive Science*, 20(2), 155-181.
- Joo, E. Y., Kim, E. S., Park, K. D., & Choi, K. G. (2001). Spectral and Nonlinear Analysis of EEG in Various Age Groups (뇌파의 연령별 스펙트럼 및 비선형적 분석), *Journal of Korean Society for Clinical Neurophysiology*, 3(1), 31-36.
- Lim, N. Y. (2008). Effects of Intensity and Arousal of Emotional Facial Stimulus on Depressive Student's Negative Cognitive Bias: on ERP study (정서 얼굴 자극의 강도와 각성이 우울경향 학생의 인지적 부적 편향에 미치는 효과: ERP 연구), Department of psychology Graduate School of Chonnam National University, Korea.
- Moon, S. M. (2008). *Memory Concentration (기억력과 집중력 향상 기술)*, Seoul: Wonmisa.
- Murugappan, M., Ramachandran, N., & Sazali, Y. (2010). Classification of human emotion from EEG using discrete wavelet transform, *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 3(4), 390-396
- Rizzo, A. A., Buckwalter, U. (1997). *Psycho-neurophysiological assessment and rehabilitation in virtual environments : Cognitive, clinical, and human factors in advanced human computer interactions*, Amsterdam: IOS Press.
- Webber Jr, C. L., & Zbilut, J. P. (2004). *Reccurrence quantification analysis of non-linear dynamical systems, in Tutorials in contemporary nonlinear methods for behavioral science, Ch.2*, 26-94.
- Yoon, J. S. (2004). *Clinical Electroencephalography (임상 뇌파학)*, Seoul: Korea Medical Book Publishers.

원고접수: 2013.10.14

수정접수: 2010.12.13

게재확정: 2010.12.17