

지식기반 반응 시 인간과오 관련 뇌파 밴드파워의 변화

임현교[†] · 김홍영

충북대학교 안전공학과

(2013. 2. 25. 접수 / 2013. 6. 18. 채택)

Variation of EEG Band Powers Related with Human Errors in Knowledge-based Responses

Hyeon-kyo Lim[†] · Hong-young Kim

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received February 25, 2013 / Accepted June 18, 2013)

Abstract : Problem solving and/or decision making process usually encountered in human living consists of a sequence of human behaviors based upon his/her knowledge. Thus, Rasmussen introduced Skill-Rule-Knowledge paradigm to countermeasure human errors that can occur in Nuclear Power Plants. Unfortunately however, it was not so easy as expected since objective evidence have not been obtainable with conventional research techniques. With the help of EEG band power ratio techniques, this study tried to get psycho-physiological symptoms of human errors, if any, while human beings perform knowledge-based behaviors such as simple arithmetic computations with different difficulty level. A set of simulated works was carried out with a computer station. Four kinds of arithmetic computation tasks were given to 10 health male under-graduate students on different day individually, and during the experiment, EEG and ECG was measured continuously for objective psycho-physiological analysis. According to the results, $\alpha/(\alpha+\beta)$ as well as α/β band power ratio were sensitive to task difficulty level which consistently decreased both. However, any one of them failed to reveal the influence of tasks with different difficulty level in the aspect of task duration time. On the contrary, Heart Rate Variability was more suggestive than expected. To make a conclusion, it can be said that band power of EEG waves will be helpful in not only assessment of work difficulty level but also assessment of workers' skill development if supported by cardiac function such as HRV.

Key Words : human errors, knowledge-based behaviors, psycho-physiological measures, EEG, band powers.

1. 연구목적 및 필요성

인간의 행동은 정보처리와 의사결정의 연속이라고 볼 수 있다. Rasmussen은 이 과정을 3수준의 인간 행동 모델, 즉 기술-규칙-지식 모델(Skill-Rule-Knowledge Model; SRK Model)을 도입하고, 인간의 행동은 과업의 난이도에 따라 서로 다른 인지 수준의 제어 하에 이루어진다고 주장하였다¹⁻³⁾. 이같은 주장을 실증적으로 확인하고자 하는 연구는 많은 연구자들에 의해 시도되어 왔으며 그들은 대부분 심리생리학적 척도를 통하여 인간내부의 인지적 변화를 과학적으로 접근하고자 하였다.

이제까지 인간의 인지적, 정신적 작업부담을 측정하기 위한 생리학적 척도는 크게 분류하여 네 가지로 나누고 있는데 1) 눈의 깜박임 등 눈의 변화를 가지고 측정하는 눈 관련 측정방법(Eye-related measures), 2) 뇌에서 발생하는 미세한 전기적 신호 등을 감지하는 뇌 관련 측정방법(Brain-related measures), 3) 심장의 전기적 신호를 측정하는 심장 관련 측정방법(Heart-related measures), 그리고 4) 기타 측정방법(Other-related measures)이 있다⁴⁾.

이들 중 초기에는 동공반응이나 심박수 등의 1차적인

척도들이 이용되었다. 예를 들어, Beatty는 난이도가 다른 곱셈 암산과업 중의 동공반응을 통하여 암산작업시 난이도가 증가할수록 동공반응의 진폭과 지속기간이 증가함을 보여 주었고⁵⁾, Andreassi는 낱말학습의 난이도와 심박(Heart Rate)의 관계의 관찰을 통하여 난이도가 낮은 경우의 심박이 높다는 사실을 보고하기도 하였다⁶⁾.

그러나, 가장 일반적인 척도로는 뇌파가 주로 이용되어 왔다. 인간과오와 관련된 대표적인 예로는 조파분석(調波分析, harmonic analysis)의 한 방법인 P300을 들 수 있지만⁷⁻⁹⁾, 이 방법은 많은 시간과 노력이 요구되는 가산평균법을 활용하지 않으면 원하는 신호를 얻을 수 없으며, 인간 과오는 매우 드문 사상이기 때문에 엄선된 과형을 보기까지 매우 많은 반복적 실험과 노력을 요한다는 문제점이 있다고 제기된 바 있다¹⁰⁻¹¹⁾.

이러한 문제점을 극복하고자 순간적인 제시 자극에 따른 개별적 뇌파의 변화보다는, 과오를 유발하기 쉬운 과업 특성과 뇌파 변화 특성과의 관계에 대하여 초점이 맞춰진 밴드파워비(Band-to-Band power ratio)를 대안으로 하는 대역파워 분석법(band power analysis)을 제시하고 수행된 연구도 있다¹²⁻¹³⁾.

[†]Corresponding Author: Hyeon-Kyo Lim, Tel : +82-43-261-2462, E-mail : hklim@chungbuk.ac.kr
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 52, Naesudong-ro, Cheongju, Chungbuk 361-763, Korea

본 연구는 이와 같은 대역파워 분석법의 논의 선상에서 난이도가 다른 과업을 수행하는 동안 발생하는 피실험자들의 뇌파 밴드파워비 변화를 심리생리학적 관점에서 분석하여 단순한 산술작업의 난이도 변화가 뇌파 밴드파워비에 영향을 미치는지 확인하고, 해당 밴드파워비를 통하여 정답반응과 오답반응의 특성을 평가하고자 하였다.

2. 인간의 인지특성과 뇌파 밴드파워의 변화

뇌파의 조파분석과는 달리, 주파수 분석을 통하여 인간의 인지 특성을 규명하려는 시도도 꾸준히 있어 왔다. 인간과 오와 관련된 시도로는 개별적 주파수 대역의 절대파워(Absolute power)를 비교한 시도가 눈에 띈다. 대표적인 예로 橋本邦衛는 인간의 여러 가지 행동과 뇌파를 분석하여 인간의 의식수준을 다섯 수준으로 나누고 각 수준에 관련된 인간의 과오 특성을 설명하려고 시도하였고¹⁴⁾, Fairclough 등은 과업 난이도에 따라 후두엽에서 세타(theta, θ) 파의 유의한 차이가 있으며, 다항회귀분석을 통해 학습의 정도를 예측할 수 있음을 제시하였으며¹⁵⁾, Klimesch 등의 연구에서는 난이도가 증가함에 따라 전두엽에서 θ 파, β 파는 증가하나 α 파는 감소함을 보였다¹⁶⁾.

한편, 각 주파수 대역별 파워의 상대적 비율을 나타내는 상대파워(Relative power)나 대역대비파워(Band-to-Band power)로부터 인간의 인지 특성을 설명하려는 노력도 꾸준히 제기되어 왔다. 그 결과, 난이도가 다른 Odd-ball 과업 수행 중의 뇌파측정을 통하여 알파(α), 베타(β), 세타(θ) 파의 파워합에 대한 알파 밴드파워비는 자극과 반응의 양립성 수준에 따라 변화하고, 베타 밴드파워비는 자극의 친숙성 여부에 따라 변화한다며 그 증거로 단순한 기술기반행동과 규칙기반행동의 경우에 나타나는 뇌파 특성도 비교 제시된 바 있다¹⁷⁾. 아울러, 뇌파 밴드파워비에 영향을 미치는 요인으로는 피실험자 요인과, 피실험자×과업 교호작용이 통계적으로 유의하다고도 보고되었다.

그러나, 동일한 특성을 갖는 과업의 경우에는 Rasmussen이 지적한 바와 같이 지식기반행동, 규칙기반행동, 기술기반행동의 변화를 반영하는 척도로는 알파 밴드 파워와 베타 밴드 파워의 상대적 비율이 더 민감한 척도로서의 가능성을 갖고 있다고 하였다^{13,17)}.

본 연구에서는 이 논의를 연장하여 지식기반행동을 하는 경우의 뇌파 반응특성을 파악하고자 하였다. 여기서 말하는 지식기반행동이란 당면한 상황이 인지적 기능에서 보아 익숙하지 않은 경우를 말하며, Goodstein은 이러한 상황을 타개하기 위하여 요구되는 것이 의식적인 문제해결과정이나 지식기반행동이라고 설명하였다¹⁸⁾.

3. 실험 방법

본 연구에서는 컴퓨터를 이용하여 간단한 산술문제를 피실험자에게 제시하고, 사고(思考) 및 판단 과정 중 발생하는 휴면에러로 인한 심리생리적 변화를 관측하였다. 그 내용은 다음과 같다.

3.1. 실험과업

피실험자는 1) 한 자리 숫자 세 개의 덧셈 작업, 2) 한 자리 숫자 두 개와 두 자리 숫자 한 개의 덧셈 작업, 3) 한 자리 숫자 세 개의 곱셈 작업, 4) 한 자리 숫자 두 개와 두 자리 숫자 한 개의 곱셈 작업 등 총 네 가지 과업을 수행하였다. 과업의 일반적인 경험에 따라 두 자리 숫자들의 산술작업이 한 자리 숫자의 산술작업보다 더 어려우며, 곱셈작업이 덧셈작업보다 더 어렵다고 가정한 것이다. 이 때 어느 작업이든 두 자리 숫자의 위치는 무작위로 선정되도록 하였고, 특히 덧셈작업의 경우에는 주어진 숫자들의 마지막 자리 숫자들의 합이 10 이상이 되도록 하여 자릿수 올림이 이루어지도록 하는 한편, 곱셈작업의 경우 역시 주어진 숫자들의 마지막 자리의 숫자들의 곱은 10 이상이 나오도록 하여 논리적인 정보처리 없이 단순 추측으로는 답을 할 수 없도록 하였다.

Fig. 1은 네 가지 과업 중 작업 2)를 수행하는 중 피실험자에게 제시된 실험 중 화면이다. 피실험자는 제시된 문제에 대하여 왼쪽에 제시된 수치들과 오른쪽의 제시된 숫자와의 대소 비교를 한 후, 보기로 주어진 ①, ②, ③에 대응하여 각각 순서대로 ←, ↓, → 세 개의 키보드 화살표 버튼 중 하나를 누르는 것으로 반응하도록 하였는데, 각각의 문제가 화면에 제시된 시간은 덧셈의 경우 4초, 곱셈의 경우 12초로 조정하여 자극이 제시된 시간 이내에 반응하지 못한 경우에는 답을 하지 못한 것으로 간주하여 반응의 종류는 정답(correct response)과 오답(error response) 그리고 시간 내에 답을 누르지 못한 놓침(miss) 등 총 세 가지로 분류하였다. 문제와 문제 사이의 시간 간격은 2초로 조정하였다.

3.2. 실험수행방법

실험은 외부의 소음이나 청각 및 시각정보로부터의 영향을 방지하기 위하여 격리된 실험실(240×230×240 cm) 안에서 실시되었다. 피실험자들은 컴퓨터 전면에 의자에 앉아 오른손으로 키보드를 눌러 과업을 수행하였으며, 화면으로부터 시점까지의 거리는 75 cm 내외를 유지하도록 하였다. 또한 실험이 진행되는 동안 피실험자의 몸의 움직임 등에 의

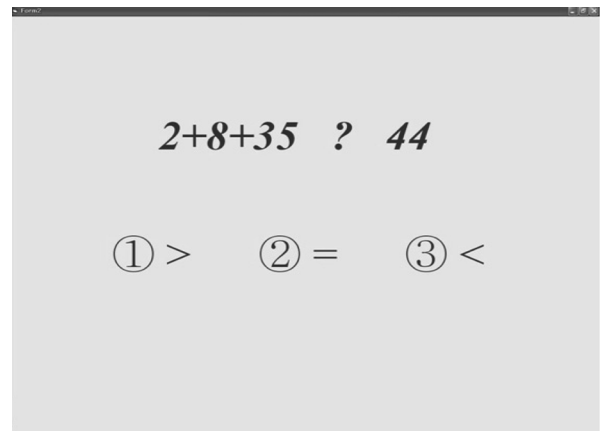


Fig. 1. Experimental Screen for Task 2, Addition with High Difficulty.

한 잡음(noise)을 체크하기 위하여, 카메라를 통해 피실험자의 움직임을 실험자가 관찰하였다.

피실험자는 각각 다른 날 같은 시각에 총 4일에 걸쳐 무작위순으로 네 가지 과업을 수행하였다. 실험시간은 한 가지 과업 당 1시간 동안 수행하였으며 덧셈 작업의 경우에는 약 800개, 곱셈의 경우에는 약 400개의 문제를 풀도록 하였다. 또한, 작업 전후에는 10분간의 휴식을 두어 휴식시의 자료를 얻은 후 작업수행시의 자료와 비교하였다.

3.3. 측정 및 분석

3.3.1. 뇌파

뇌전도의 전극은 국제적 기준인 10/20 시스템의 원칙에 따라 F3(左前頭部), F4(右前頭部), C3(左中心部), C4(右中心部), P3(左頭頂部), P4(右頭頂部), O1(左後頭部), O2(右後頭部) 등 8 곳에 부착하였고, 기준(reference) 전극은 오른쪽 귓볼(earlobe)로 하였으며, 접지(ground) 전극은 이마 정중앙에 위치시켰다. 실험 측정으로 얻어지는 뇌파 신호는 256 Hz의 주파수로 샘플링한 후, 0-50 Hz의 band pass filter로 필터링(filtering)하여 δ 파 (0~4 Hz), θ 파 (4~8 Hz), α 파 (8~13Hz), β 파(13~30 Hz), γ 파 (30~50 Hz) 성분을 추출하였다. 또한, 참고로 심박변이도(Heart Rate Variability) 측정은 심전도(ECG)를 이용하였는데, 전극은 흉골과 겨드랑이 아래쪽에 전극을 부착하였으며, 60-100 Hz의 밴드패스 필터로 필터링하였다.

과업 수행 중 모든 심리생리학적 반응의 측정에는 (주)락싸(LAXTHA)의 PolyG 시스템(모델명 PolyG-I)을 이용하였고, 자료처리에는 역시 (주)락싸(LAXTHA)에서 제공하는 Telescan Ver 2.99 프로그램을 이용하였다.

3.3.2. 자료의 분석

이후 모든 생체신호는 5분 간격으로 나누어 시간 대역별 반응 특성치를 추출하였다. 더욱이 뇌파의 경우에는 미세한 μV 단위의 작은 자료들을 다루는 작업이므로 잡음의 영향을 받을 수 있는 원자료(raw data)를 그대로 사용하지 않고 스펙트럼 분석을 통하여 얻어진 파형 주파수대역별 절대파워를 가지고 상대파워를 구하여 분석 값으로 활용하였다.

가공된 뇌파 상대파워와 HRV 데이터는 모두 SPSS Inc.의 SPSS Ver.18 for Windows 통계프로그램을 사용하여 통계적 검정을 실시하였다.

3.4. 피실험자

실험에는 평균 연령 24.7(± 1.9)세의 20대 남자 대학생 및 대학원생 10명이 유급 피실험자로 참여하였다. 피실험자들은 모두 안경을 착용하였으나, Snellen 시력이 0.6(± 0.2) 이상 이어서 실험에 제시되는 숫자의 인식에는 지장이 없다고 판단되었다.

4. 실험결과

4.1. 과오율과 반응시간

과업별 피실험자들의 과업수행도는 Fig. 2에 보는 바와

같이 예상대로 덧셈1, 덧셈2, 곱셈1, 곱셈2의 순으로 평균 과오율이 증가하였으며, 과오율의 표준편차 역시 이 순서대로 두 배 이상 증가하였다. 정답 반응시간과, 반응을 하지 못한 미스(miss)의 경우를 제외하고 오답 반응한 시간, 그리고 이들의 표준편차도 이러한 경향을 유지하였으며 또한, 오답 반응시의 반응시간이 정답 반응시의 반응시간보다 항상 길다는 점에서는 일관성있는 경향을 나타냈다.

Fig. 3은 이것을 정리한 그림이다. 반응시간이 과업 난이도의 선형적 함수가 아니라고는 하더라도, 적어도 본 연구에서와 같은 단순 산술작업에서는 선형성이 유지된다는 것을 알 수 있다¹⁹⁻²⁰). 그러나, 과업 지속시간 경과에 따른 과오율의 변화는 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$).

4.2. 심리생리학적 척도의 변화

뇌파와 심전도의 데이터를 통하여 다변량 분산분석(Multivariate Analysis of Variance; MANOVA)으로 각 변수들 간의 유의성 및 특이성을 찾고자 하였다. 특히, 그 중

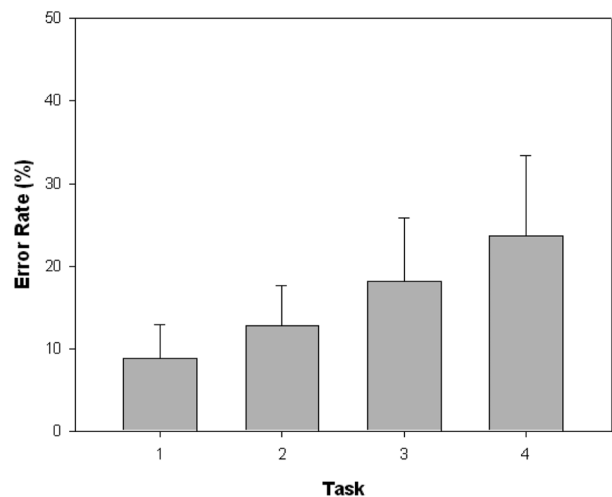


Fig. 2. Variation of error rate by task.

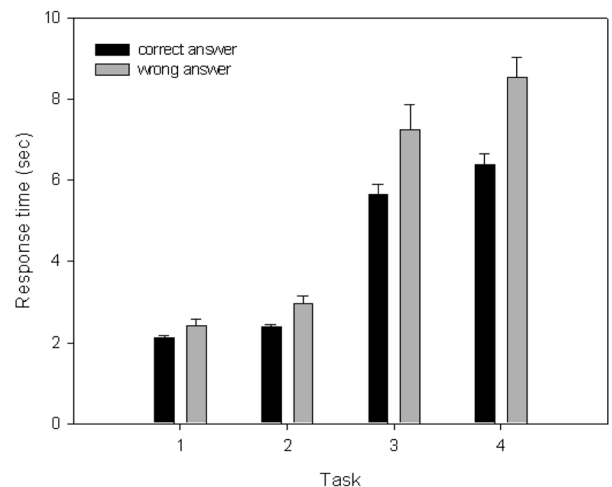


Fig. 3. Variation of response time by task.

에서도 선행연구에서 주의집중과 관련있다고 보고된 뇌파 밴드인 α 파와 β 파를 중심으로 이와 관계있는 α/β , $\alpha/(\alpha+\beta)$, $\alpha/(\alpha+\beta+\theta)$ 등의 특성치를 분석하였다.

4.2.1. α/β 밴드파워비 분석결과

피실험자의 반응, 과업난이도, 채널 등이 α/β 밴드파워비에 영향을 미치는지 다변량분석 (MANOVA)을 실시한 결과에 따르면 Table 1에 보는 바와 같이 경과시간을 제외한 모든 단일변수의 효과와 ‘반응×채널’을 제외한 모든 2차 교호작용이 통계적으로 유의하였다($p<0.05$). 즉, 피실험자, 과업, 반응, 채널의 1차 요인과 해당 요인들의 2차 교호작용이 α/β 밴드파워비에 반영된다는 것을 의미한다. 여기에서 경과시간 요인이 α/β 밴드파워비에 유의하지 않았다는 것은 최소한 본 실험에서와 같은 단시간 동안의 산술작업에서는 학습효과 등의 변화요인에 의한 영향은 크게 나타나지 않았다는 뜻으로 해석될 수 있어, 이후 분석에서 경과시간에 따른 뇌파반응의 추이를 본다는 것은 의미가 없다고 판단, 과업의 종류와 뇌파 상대파워를 비교하는 분석을 진행하였다.

Table 1. Result of MANOVA on α/β band power ratio.

Effect	Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.
Intercept	.175	16205.812	2	6862	.000
elapsed_time	.999	2.120	2	6862	.120
Sub	.544	271.680	18	13724	.000
Task	.945	65.102	6	13724	.000
Resp	.992	26.050	2	6862	.000
Ch	.944	28.511	14	13724	.000
Sub * Task	.860	19.862	54	13724	.000
Sub * Resp	.982	6.892	18	13724	.000
Sub * Ch	.890	6.521	126	13724	.000
Task * Resp	.992	9.278	6	13724	.000
Task * Ch	.981	3.118	42	13724	.000
Resp * Ch	.999	.674	14	13724	.802

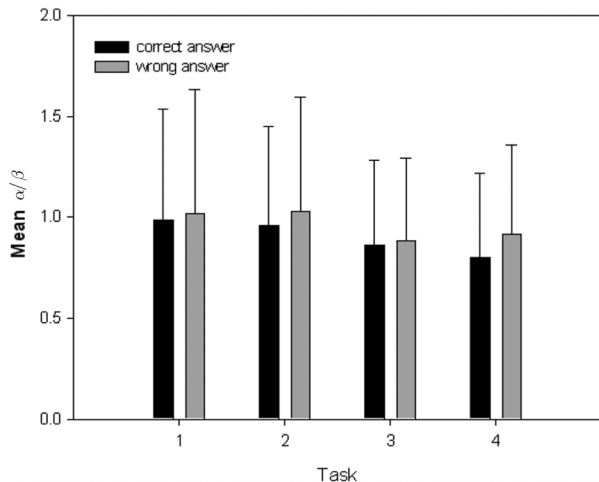


Fig. 4. Variation of α/β band power ratio by task.

Fig. 4는 과업별로 α/β 밴드파워비를 정답과 오답으로 나누어 비교한 것이다. 정답 반응의 경우 덧셈에 비해서는 곱셈과업에서의 α/β 밴드파워비가 작고, 같은 과업에서도 난이도가 높을수록 α/β 밴드파워비가 감소한다는 일관성을 확인할 수 있다. α/β 밴드파워비가 감소하였다는 것은 뇌의 기능이 긍정적으로 작용하여 이완파인 α 파 밴드파워는 감소한 반면, 활성화파인 β 파 밴드파워는 증가하였기 때문이라고 추정될 수 있다.

그러나, 이러한 기능은 오답 반응시에는 원활히 작용하지 못하여 과업의 난이도가 증가하였음에도 불구하고 오히려 α/β 밴드파워비가 증가하였다는 사실을 알 수 있다. 다만, 덧셈과업에 비하여 곱셈과업시의 전체적인 α/β 밴드파워비는 일관성있게 감소하였다는 사실은 주목할 만하다.

두피의 어느 부분에서 특히 변화가 있었는가를 확인하기 위하여 각 전극 채널별 α/β 밴드파워비를 비교한 결과에 따르면 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전두엽에 해당하는 채널 1(F3), 2(F4)와 후두엽에 해당하는 채널 7(O1), 8(O2)을 보면 덧셈작업인 과업 1,2에 비하여 곱셈작업인 과업 3,4시의 α/β 밴드파워가 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 난이도가 다른 산술문제가 시각적으로 제시되는 과업의 경우 다른 부위에 비하여 사고 및 판단 등 반응 선택 기능을 담당하는 전두엽과 시각적 자극에 대한 인지를 담당하는 후두부에 과업 부담이 크게 증가하여 안정파인 α 파의 파워에 비하여 활성화파인 β 파의 파워가 상대적으로 증가하였다는 것을 의미한다. 즉, 해당 부위의 기능이 활발해졌다는 의미이다. 반면, 이에 비하여 체성감각과 운동기능에는 과업 난이도의 변화에 따른 차이가 거의 없기 때문에 이 기능을 담당하는 중심부 및 두정부 채널(C3, C4, P3, P4)에서의 α/β 밴드파워비는 큰 변화를 보이지 않은 것이라고 이해할 수 있다.

그 결과, 전두엽에 해당하는 채널 1과 2 즉 F3, F4에서의 밴드파워가 약간 큰 반면, 후두부로 갈수록 평균 밴드파워비가 증가하여 채널 7과 8 즉 O1, O2에서 가장 큰 값을 보였다. 그러나, 후두부의 변화가 전두부의 변화보다 더 크다고 해서 사고 및 판단기능보다 시각적 자극의 인지 기능

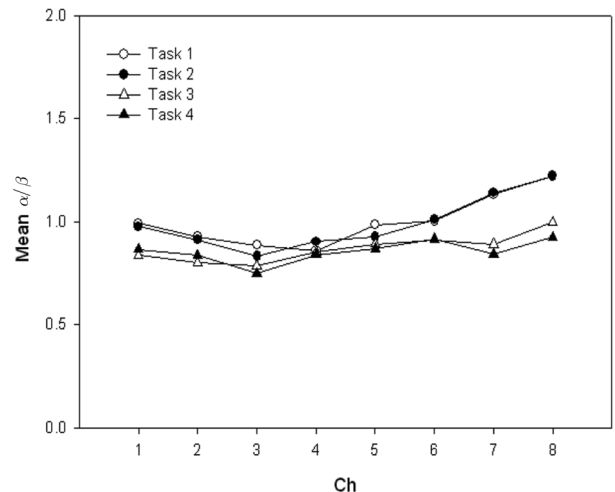


Fig. 5. Variation of α/β band power ratio by electrode locations.

이 더 크게 변화하였다고 단언할 수는 없다는 점에 주의할 필요가 있다. 왜냐하면 본 실험에 이용된 뇌파는 두피에서 측정된 것이기 때문에 심부로부터의 깊이에 영향을 받아 뇌파의 대소가 역전될 수 있기 때문이며²¹⁾, 또한 뇌파는 단일 파형이 아니라 인간의 인지 과정에서 순간 순간 나타나는 파형의 복합체이기 때문이다.

4.2.2. $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비 분석결과

$\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비에 대한 분석결과도 α/β 밴드파워비와 크게 다르지 않았다. 피실험자의 반응, 과업난이도, 채널 등이 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비에 영향을 미치는지 다변량분석(MANOVA)을 통하여 분석한 결과에 따르면 모든 단일변수의 효과와 2차 교호작용 효과가 통계적으로 유의하였다 ($p<0.05$). 즉 피실험자, 과업, 반응, 채널, 반응 등의 요인이 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비에 영향을 준다고 할 수 있다. 다만, 이때에도 가장 영향이 의문시되는 것은 유의성 판단에 영향을 주는 p값이 상대적으로 크게 관측된 1차 요인인 경과시간 ($p=0.015$)과, 2차 요인인 ‘반응×채널’의 교호작용($p=0.034$)이었으나, 통계적 유의성은 인정되었다. 그 원인은 난이도가 높은 과업 4의 영향이 컸다고 생각되며, 이에 대해서는 이후 다시 논하기로 한다.

과업별 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비의 변화는 α/β 밴드파워비의 그것과 크게 다르지 않았다. 즉, 정답 반응의 경우 덧셈에 비해서는 곱셈과업에서의 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비가 작고, 같은 과업에서도 난이도가 높을수록 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비가 감소하였다. 그러나, 오답 반응시에는 오히려 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비가 정답 반응시의 밴드파워비에 비하여 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 작업의 난이도가 증가함에도 불구하고 피실험자의 각성수준과 활성도가 해당 과업의 특성을 따라가지 못하여 발생한 오반응의 결과라고 생각된다.

각 전극 채널별 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비를 비교한 결과 역시 α/β 밴드파워비와 마찬가지로 전두엽에 해당하는 채널 1과 2에서의 밴드파워가 약간 큰 반면, 후두부로 갈수록 평균

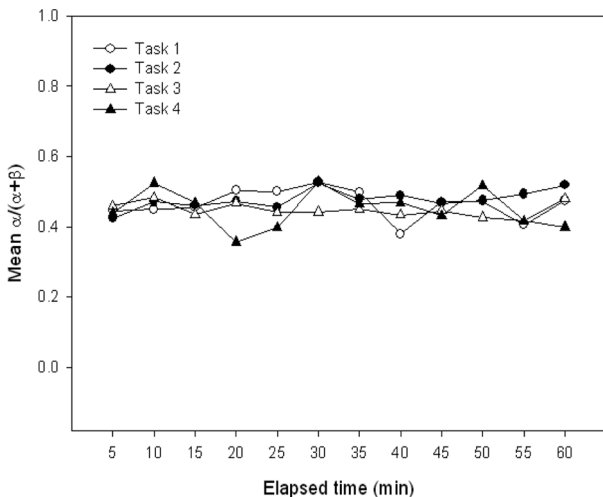


Fig. 6. Variation of $\alpha/(\alpha+\beta)$ band power ratio over elapsed time.

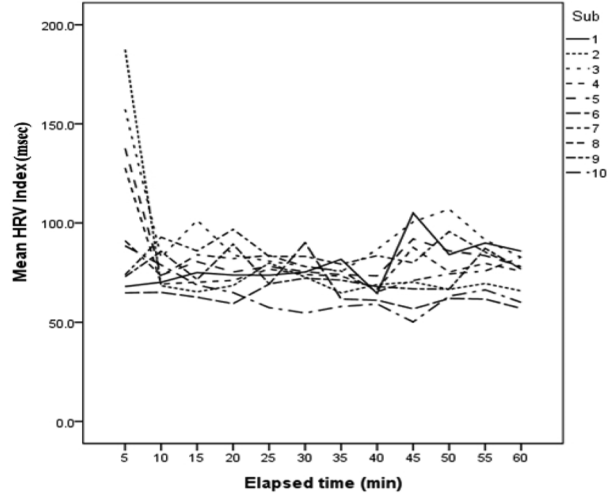


Fig. 7. Variation of HRV over elapsed time by subject.

밴드파워비가 증가하는 경향을 나타냈으나 그 차이는 α/β 밴드파워비만큼 크지 않았다. 이는 단순한 산술 계산에 기인한 차이라고 판단된다. 그러나, 각 전극에서의 밴드파워비는 α/β 밴드파워비의 경우와 마찬가지로 경과 시간에 관계없이 대체로 최초의 대소관계를 유지하였다.

Fig. 6은 시간 경과에 따른 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비의 변화를 과업별로 나타낸 그림이다. 특이한 점으로는 덧셈 과업에 해당하는 과업 1과 2의 경우에는 시간 경과에 따라 큰 변화를 보이지 않았으나 곱셈 과업에 해당하는 과업 3과 4의 경우에는 난이도가 높아질수록 증감을 반복하는 통계적으로 유의한 특이 변화가 관측되었다. 이 점은 Fig. 7에 보는 바와 같이 심박변이도의 변화를 통해서도 쉽게 알 수 있는데, 과업의 지속에 따라 개인차도 나타났다.

Fig. 7은 시간경과에 따른 피실험자들의 심박변이도 변화를 보여주는데, 심박변이도 지표가 안정적이지 못하며, 실험 경과시간에 따라 증감의 변화가 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 일부 피실험자들은 실험 초기의 정신적 이완에 비하여 실험수행에 따라 급격한 긴장을 느끼게 되어 심박변이도가 급격히 감소한 후 증감을 반복해 가는 반면, 반대로 일부 피실험자들은 실험 초기의 긴장에 비하여 실험이 지속될수록 정신적 이완이 일어나 오히려 심박변이도 지표가 증감을 반복하되 점차 증가하는 현상을 나타냈기 때문이다. 결과적으로 이러한 개인차가 종합되어 특히 난이도가 높은 과업에서 발견된 것이라고 판단된다. 따라서, 난이도가 높은 작업일수록 개인이 갖는 정신적 안정성은 주기적으로 변화한다고 볼 수 있기 때문에, 안정된 수준의 작업을 지속하는 것은 곤란하며 인간과오를 저지르기 쉬운 시간적 구간과 그렇지 않은 구간이 불규칙적으로 교번한다는 사실을 시사한다.

5. 결론

본 연구에서는 난이도가 다른 산술 과업을 수행하는

경우 정답반응과 오답반응시 피실험자의 뇌파 척도에 어떠한 현상이 나타나는지 비교 분석하였다. 이것은 Rasmussen이 주장하는 지식기반행동의 특성을 심리생리학적으로 검증하기 위한 것이었는데, 예상대로 과업 난이도가 증가함에 따라 오답율은 증가하였고, 이는 난이도가 높아질수록 인간은 과오를 유발하기 쉬워진다는 경험칙과 일치하였다. 연구 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, α/β 밴드파워비나 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비 모두 과업 난이도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이외에도 밴드파워비는 대체로 피실험자, 반응, 경과시간, 전극의 1차 요인 및 이들의 2차 교호작용의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 다만, 통계적 유의성이 가장 의문시되는 요인은 경과시간 요인으로, 실험에 수행된 과업의 특성상 경과시간에 따른 학습효과를 기대할 수 없었기 때문에 판단되었다.

둘째, 과업의 난이도가 높아질수록 α/β 밴드파워비나 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비가 모두 감소한 반면 반응시간은 증가하였다. 특히 덧셈 과업보다 곱셈 과업에서 난이도 차이에 의한 반응시간의 변화가 크게 나타났는데, 특이한 점은 정답반응 시보다 오답반응시의 반응시간이 더 길었다. 이같은 사실은 에러반응시 뇌의 각성수준이 일시적으로 낮아져 β 밴드파워가 감소하여 올바른 판단을 하지 못한 것이며, 이 결과가 오답반응시의 밴드파워비 증가로 관측된 것이라고 판단된다.

셋째, 시간경과에 따라 과업 난이도가 뇌파에 미치는 영향을 α/β 밴드파워비나 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 밴드파워비를 통하여 확인할 수는 없었다. 특히 과업 난이도가 높은 곱셈 과업에서는 뇌파 밴드파워비의 불안정성이 관측되어, 그 결과 인간의 과오는 발생하기 쉬운 시간적 구간과 그렇지 않은 구간이 교번할 수 있다는 것을 실증적으로 알 수 있었다.

그러나, 넷째, 난이도가 높은 작업일수록 시간에 따른 인간의 정신적 작업부하는 두 가지 형태로 나타남을 심박변이도를 통하여 간접적으로 확인할 수 있었다. 즉, 작업 초기의 높은 정신적 긴장으로부터 시작하여 점차 이완되어 가는 형태와, 반대로 정신적 이완상태로부터 시작하여 점차 상승되어 가는 형태이지만, 양쪽 모두 증감 교번을 반복해가며 감소하거나 증가한다는 사실을 뇌파밴드가 아닌 심박변이도를 통하여 확인하였다.

따라서, 이상을 종합하면 유사한 과업의 상대적인 과오 가능성은 뇌파 대역분석의 밴드파워비에 반영되며, 심박변이도와 같은 추가적인 심기능관련 척도가 추가되면 정확성은 더 향상될 것이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 결과는 작업의 난이도를 비교하는 간접적인 지표로도 활용될 수 있는 가능성을 제시한다.

감사의 글 : “이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2011)”

References

1) C. Billings and E. Cheaney, Information Transfer Problems in

the Aviation System(NASA Technical Paper 1875), Moffett Field, CA: Ames Research Center, 1981.

2) J. Danaher, Human Error in ATC System Operations, Human Factors, Vol. 22, pp. 535-545, 1980.

3) J. Rasmussen, “Skills, Rules, Knowledge, Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-12, pp. 257-266, 1984.

4) J. A. Rehmman, Handbook of Human Performance Measures and Crew Requirements for Flight Research, DOT/FAA/CT-TN 95/49, 1995.

5) J. Beatty, “Task-Evoked Pupillary Response, Processing Load, and the Structure of Processing Resources”. Psychological Bulletin, Vol. 91, pp. 276-292. 1982.

6) J. L. Andreassi, Psychophysiology : Human Behavior and Physiological Response (3rd ed.), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1995.

7) M. Falkenstein, J. Hohnsbein, J. Hoormann and L. Blanke, Effects of Crossmodal Divided Attention on Late ERP Components II. Error Processing in Choice Reaction Tasks, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Vol. 78, p. 447-455, 1991.

8) J. Hohnsbein, M. Falkenstein, J. Hoormann and L. Blanke, “Effects of Crossmodal Divided Attention on late ERP Components I. Simple and Choice Reaction Tasks”, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Vol. 78, pp. 438-446, 1991.

9) M. K. Sheffers, M. G. Coles, P. Bernstein, W. J. Gehring and E. Donchin, “Event-Related Brain Potentials and Error-Related Processing : An Analysis of Incorrect Responses to go and no-go Stimuli”, Psychophysiology, Vol. 33, pp.42-53, 1996.

10) H. K. Lim, “Psychophysiological Symptoms of Human Errors and Work Performance”, Proceedings of the Spring Conference, The Institute of Industrial Safety, pp. 260-263, 2000.

11) H. K. Lim, “Effects of Illuminating Condition on ERP and Work Performance during a Counting Task”, Journal of The Korean Society of Safety, Vol. 15, No. 1, pp. 167-175, 2000.

12) H. K. Lim, “Variation of Relative Power Characteristics in EEG while Inducing Human Errors”, Journal of The Korean Society of Safety, Vol. 23, No. 3, pp. 65-70, 2008.

13) H. K. Lim, “Variation of Psychophysiological Characteristics Related with Human Errors during a Simple Pointing Task”, Journal of The Korean Society of Safety, Vol. 24, No. 3, pp. 71-78, 2009.

14) K. Hashimoto, Safety Ergonomics, Japan Industrial Safety and Health Association, 1984.

15) S. H. Fairclough, L. Venables and A. Tattersall, “The Influence of Task Demand and Learning on the Psychophysiological Response”, International Journal of Psychophysiology, Vol. 56, pp. 171-184, 2005.

16) W. Klimesch, “EEG Alpha and Theta Oscillations Reflect

- Cognitive and Memory Performance: A Review and Analysis”, *Brain Research Reviews*, Vol. 29, pp. 169-195, 1999.
- 17) H. K. Lim, “Influence of Work Difficulty Variation on EEG Characteristics Related with Human Errors”, *Journal of The Korean Society of Safety*, Vol. 25, No. 3, pp. 123-130, 2010.
- 18) L. P. Goodstein, “Discriminative Display Support for Process Operations”, in *Detection and Diagnosis of System Failures* edited by Rasmussen, J., and Rouse, W.B., New York, Plenum Press, pp. 433-449, 1981.
- 19) D. A. Norman, “Categorization of Action Slips”, *Psychological Review*, Vol. 88, pp. 1-15, 1981.
- 20) J. Reason, “Lapses of Attention”, in *Varieties of Attention* edited by Parasuraman R. and Davies D., New York, NY, Academic Press, 1984.
- 21) J. T. Cacioppo and L. G. Tassinari, *Principles of Psycho-physiology : Physical, Social, Inferential elements*, Cambridge University Press, 1990.