

인간과오 유발 상황에서 뇌파 상대파워 특성의 변화

임 현 교

충북대학교 안전공학과

(2008. 4. 24. 접수 / 2008. 6. 12. 채택)

Variation of Relative Power Characteristics in EEG while Inducing Human Errors

Hyeon-Kyo Lim

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received April 24, 2008 / Accepted June 12, 2008)

Abstract : Electroencephalogram(EEG) would be the most objective psychophysiological research technique on human errors though few research has been taken yet. This study aimed to get characteristics of human error while committing simple Odd-Ball tasks by utilizing the power spectrum technique of EEG data. Each experiment was composed of 3 tasks with different rules, and three young undergraduate students participated in this study as paid subjects. The result showed that subject and the interaction of subject and task factors were statistically significant on variation of power of α and β bands which implied there would exist groups with homogeneity in their response. And though the variation of band powers due to task factors were not so great as to get statistical significance, it implied that the task requiring decoding process would be more strange to human beings than the task merely requiring psychological recall process.

Key Words : human error, Odd-Ball task, spectral analysis, EEG, recall, decoding

1. 연구 필요성 및 목적

많은 재해의 원인이 되는 인간과오를 예방하고, 또 발생한다 하더라도 그 피해를 최소화하기 위해서는, 인간과오나 생산성 저하의 징후를 객관적으로 파악하고 평가하는 것이 선결과제라 할 수 있다. 이제까지 인간과오는, 주관적이고 심리적이라는 특성 때문에 일회성(一回性)이라고 간주되어 왔다. 특히 인간의 정보처리과정 중 어느 과정에서 과오가 발생하는지가 본인 이외에는 이해하기 곤란하여 과오예방을 위한 대책의 수립과 시행에 별다른 효과를 보여주지 못하였다.

그러나, 최근 대뇌생리학을 비롯한 심리생리학적 분석기법의 비약적 발달은 인간과오의 메커니즘을 파악하는 실마리를 제공하여 왔다. 이 중 특히 뇌파는 인간의 심리적 상태를 파악할 수 있는 대표적인 방법으로, 橋本¹⁾는 이 점에 착안하여, 인간의 여러 가지 행동과 뇌파를 면밀히 분석하여 그 관계를 정

리하였다. 그의 연구에 따라 α 파(8~13Hz)는 안정파, β 파(13~30Hz)는 활동파인 반면, θ 파(4~8Hz)와 δ 파(0~4Hz)는 의식 수준의 저하를 나타내는 파형으로 알려져 왔다.

이 때, 뇌의 한 부분에서 녹취되는 뇌파는 단순히 한 가지 파형만 있는 것이 아니라, 순간 순간 여러 가지 주파수의 파형이 중첩되어 존재한다. 즉, 뇌파는 매우 느리게 진동하는 성분으로부터 아주 빠르게 진동하는 성분에 이르기까지 그 진동 주파수에 따라 몇 가지 진동 성분들의 합으로 가정될 수 있다.

따라서, 실제로는 측정된 뇌파 속에 여러 가지 성분들 중에서 특정한 영역의 각 진동 성분이 얼마만큼의 비중을 차지하고 있는지 정량적으로 파악하는 것도 연구 방법의 하나일 것이다. 결과적으로 전체 파워 중에서 해당 영역의 파워(band power)가 어느 정도의 점유율을 차지하며, 그 변화는 어떠한가를 파악하고자 하는 것이다. 이러한 연구방법은 감성 공학 분야에서는 간혹 시도되고 있지만, 인간 공학 분야에서는 아직 보고된 바 없다.

본 연구는 뇌파의 밴드 파워를 수단으로 하여, Odd-Ball 직무를 수행하는 동안 발생하는 정답 반응과 인간과오의 특이성을 찾고, 반응에 따른 변화를 확인하고자 수행되었다.

2. 선행 연구 동향

이제까지 인간과오에 대한 생리심리학적 연구는 거의 수행된 바가 없으며, 다만 인간의 주의와 관련하여 사상유발전위에 관한 형태로 주로 수행되었다. 즉, 입력자극에 대한 인간의 각성수준의 변화는 서서히 변동하는 지속적(tonic) 변화와, 외적자극 등에 의해 급격히 발생하는 일과성(phasic) 변화로 나눌 수 있는데, 최근까지도 일과성 변화 중 유발전위 (Evoked Potential) 또는 사상관련전위 (Event Related Potential)를 지표로 하는 주의연구가 급격히 증가하여 왔다.

특히, Haider et al.(1964)은 신호검출상황에서 신호를 검출하였을 때와 신호를 검출하지 못하였을 때(miss)의 유발전위가 다르고, 시간경과에 따라 유발전위의 진폭이 차차 저하한다는 사실을 보고하였다²⁾.

이후, 연구자들의 실험 트릭에 의하여 여러 가지 사상관련전위가 발견되었는데, 그 중에서도 인간과오와 관련하여 가장 주목할 만한 것은 P300이었다. 이것은 자극제시로부터 약 300 msec 후에 사상관련전위에 나타나는 팔목할 만한 양(+) 전위를 말하는데, 이 성분은 작업자의 주의수준이 높아짐에 따라 진폭이 증대하며, 잠재기(latency)는 제시자극의 난이도에 따라 증가하기 때문에 작업의 인지 과정을 평가할 수 있는 중요한 단서를 제공한다 (Cacioppo et al., 1990)³⁾고 알려져 있어, 많은 연구자들이 P300을 방법론으로 하여 인간의 인지과정에 대하여 연구해 왔다.

이러한 연구 성과 중 인간과오와 관련된 것으로는 사상관련전위 중 ERN(error-related negativity) 또는 NE(error negativity)라 불리는 현상을 들 수 있다^{4,5)}. 이것은 인간이 과오의 검출(detection)과 과오의 억제(inhibition), 즉각적인 보정(correction), 혹은 과오의 보상(compensation)에 관계된 사상관련전위로서(Falkenstein et al, 1991), 피실험자가 과오를 범할 때의 뇌파반응을 같은 위상으로 가산평균화시켰을 때 나타나는 음(-)의 전위로서 진폭은 대체로 10 μ V이고, 과오반응에 관련된 EMG 활동의 시작으로 부터 약 150msec 후에 정점에 이른다⁶⁾.

그러나, 이러한 방법들은 모두 가산평균법(summing average)을 활용하지 않으면 신호를 볼 수 없는데, 인간의 과오는 매우 드문 사상이기 때문에 엄선된 파형을 보기까지 많은 노력을 요한다^{7,8)}. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자 순간적인 자극 제시와 과업 수행, 그리고 과오에 따르는 뇌파의 순간적인 변화보다는 과오를 유발하기 쉬운 과업 특성과 뇌파 변화 특성에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

3. 연구 내용 및 방법

실험 작업은 컴퓨터 화면에 나타난 반응 여부를 제시하는 사각형 안에, 반응 방향을 가키리는 Odd Ball 과업 세 가지를 무작위로 수행토록 하여 인간과오를 단순화시켰다. 이 중 과업 1은 직사각형 안에 제시된 화살표의 방향대로 반응하는 직무이었으며, 과업 2는 직사각형 안에 제시된 영문자 J와 F의 상징적 방향에 따라 반응하는 직무, 그리고 과업 3은 직사각형 안에 제시된 화살표의 방향과는 반대로 반응하는 직무이었다. 이 때, 어떤 과업이든 세로로 긴 직사각형은 제시 자극에 반응(Go)하라는 지시를 나타내며, 가로로 긴 직사각형은 제시 자극에 반응하지 말라(No-Go)는 지시이었다. 또한, 자극 사이에는 약 2초간의 간격이 삽입되었다.

작업에는 3명의 20대 초반의 남자 대학생이 유급 피실험자로 참여하였는데, 피실험자는 3가지 과업 모두를 각각 다른 날 같은 시각에 수행하도록 하였으며, 한 가지 과업당 반복횟수는 1,200회, 수행시간은 약 2시간씩 소요되었다.

과업 수행중 작업자의 생리학적 반응은 (주)락싸(LAXTHA)의 PolyG 시스템(모델명 PolyG-I)을 이용하여 Fz, Cz, Pz의 3곳에서 얻어지는 뇌파를 250 Hz의 주파수로 샘플링하였는데, 분석에는 가장 선명한 Fz에서의 신호만을 활용하였다. 뇌파 신호는 4~50Hz의 band pass filter로 필터링(filtering)하여 수면파와 관계된 δ 파를 제외시키고, θ 파(4~8Hz), α 파(8~13Hz), β 파(13~30Hz), γ 파(30~50Hz) 성분만을 추출하였다.

피실험자의 반응은 과오의 경우 그 수가 절대적으로 적어 모두 분석에 활용하였으며, 올바른 반응의 경우에는 총 수행 시간 2시간을 각각 10분 간격으로 나누어 각 10분당 1회씩을 샘플링하여 분석 데이터 수의 균형을 맞추는 한편 혹시라도 있을 시간 경과에 따른 변화를 반영하고자 하였다.

4. 결과 및 분석

뇌파 데이터를 파워 스펙트럼(power spectrum)으로 분석하는 경우 각 주파수 대역에 속하는 파워를 절대 파워(Absolute power)라고 부르는 반면, 전체 주파수 영역의 파워에 대한 해당 영역 주파수대 성분 파워의 비를 상대 파워(Relative power)라고 한다. 또한, 필터링된 주파수 영역의 파워에 대한 해당 영역 주파수대 성분 파워의 비를 대역 대비 파워(Band-to-Band Power)라고 한다.

실험 결과를 분석함에 있어서 초점이 맞춰진 것은 각 주파수 대역의 뇌파가 갖는 파워이었다. 절대 파워에 대한 다변량 분산분석(Multivariate Analysis of Variance; MANOVA) 결과에 따르면 피실험자, 과업 종류, 반응 유형 등 영향 요인의 1차 영향은 물론, 2차 교호작용과 3차 교호작용 모두 유의하였다($p < 0.05$).

그러나, 뇌파 분석은 불과 10 μ V에 불과한 작은 파형을 다루는 작업으로, 잡음의 영향이 과대평가하기 쉬운 절대값을 가지고 분석하는 것보다는 각 파형이 갖는 특성을 염두에 두고 밴드 파워로 분석하는 것이 보통이다. 본 연구에서도 이같은 이유로 필터링된 4~50Hz의 뇌파 중 인간의 의식과 관계 깊은 α 파, β 파, θ 파에 초점을 맞추어 진행하였다. 그 결과, Table 1은 α 파, β 파, θ 파의 파워 합에 대한 α 파 파워의 비(이하 α 파워비)와 α 파, β 파, θ 파의 파워 합에 대한 β 파 파워의 비(이하 β 파워비)를 대상으로, Wilky의 λ 통계량을 구하는 다변량 분산분석을 실시한 결과이다.

이 표에 따르면, 통상적인 절편은 제외하고라도, 피실험자에 의한 1차 요인과 피실험자 \times 과업의 교호작용을 나타내는 2차 요인이 통계적으로 유의함을 알 수 있다.

Table 1. Multivariate tests of significance - Wilkys' Lambda(λ)

Effect	Value	F	Hypo df	Error df	Sig.
Intercepts	.571	171.991	2	457	.000
Subject	.976	2.804	4	914	.025
Task	.992	.876	4	914	.478
Response	.986	.662	10	914	.760
Subject \times Task	.943	3.408	8	914	.001
Subject \times Response	.963	1.245	14	914	.237
Task \times Response	.959	1.378	14	914	.157
Subject \times Task \times Response	.969	1.026	14	914	.424

Table 2. Test of effects within-cells

Factor	Dep. Variable	Type III Sum of Squares	df	MSE	F	Sig.
Corrected Model	alpha_p	1.499	34	.044	2.032	.001
	beta_p	3.020	34	.089	2.283	.000
Intercepts	alpha_p	1.715	1	1.715	79.060	.000
	beta_p	7.435	1	7.435	191.061	.000
Subject	alpha_p	.029	2	.015	.671	.512
	beta_p	.410	2	.205	5.263	.005
Task	alpha_p	.010	2	.005	.220	.802
	beta_p	.121	2	.061	1.555	.212
Response	alpha_p	.069	5	.014	.636	.672
	beta_p	.120	5	.024	.618	.686
Subject \times Task	alpha_p	.428	4	.107	4.938	.001
	beta_p	.226	4	.056	1.451	.216
Subject \times Response	alpha_p	.206	7	.029	1.359	.221
	beta_p	.337	7	.048	1.235	.282
Task \times Response	alpha_p	.255	7	.036	1.681	.111
	beta_p	.375	7	.054	1.378	.212
Subject \times Task \times Response	alpha_p	.277	7	.040	1.827	.080
	beta_p	.068	7	.010	.251	.972
Error	alpha_p	9.934	458	.022		
	beta_p	17.822	458	.039		
Sum	alpha_p	26.564	493			
	beta_p	102.869	493			
Corrected Sum	alpha_p	11.432	492			
	beta_p	20.842	492			

이 결과를 개체-간 효과 분석을 통하여 심층 분석한 결과가 Table 2이다.

이 결과에 따르면 피실험자 요인의 경우에는 특히 β 파가, 그리고 피실험자 \times 과업이라는 교호작용의 경우에는 α 파의 영향이 두드러짐을 알 수 있는데, 이는 Duncan의 방법을 이용하여 사후 검정(Post Hoc Test)을 한 Table 3을 보면 그 원인을 알 수 있다. 즉, α 파의 경우에도, β 파의 경우에도, 뇌파 특성상 피실험자 1,2는 하나의 그룹으로 이해될 수 있으며, 피실험자 3은 이질성을 갖는 집단이기 때문이다. 실제로 Fig. 1에는 그 값들의 유사성이 도시되어 있다.

한편, Table 1에서 피실험자의 반응 특성에 따라 α 파워비와 β 파워비가 통계적으로 유의할 만큼 차가 있다고 보기는 곤란하다고 하였으나, 그 값들의 변화를 비교하면 Fig. 2와 같다. 그림에서 각각의 반응 유형은 다음과 같다. 즉, 1) 유형 1은 반응해

Table 3. Duncan's test on homogeneity among subjects
(a) α power ratio

Subject	N	Group	
		1	2
3	151	.1476	
1	192		.1850
2	150		.1904
sig. prob.		1.000	.742

(b) β power ratio

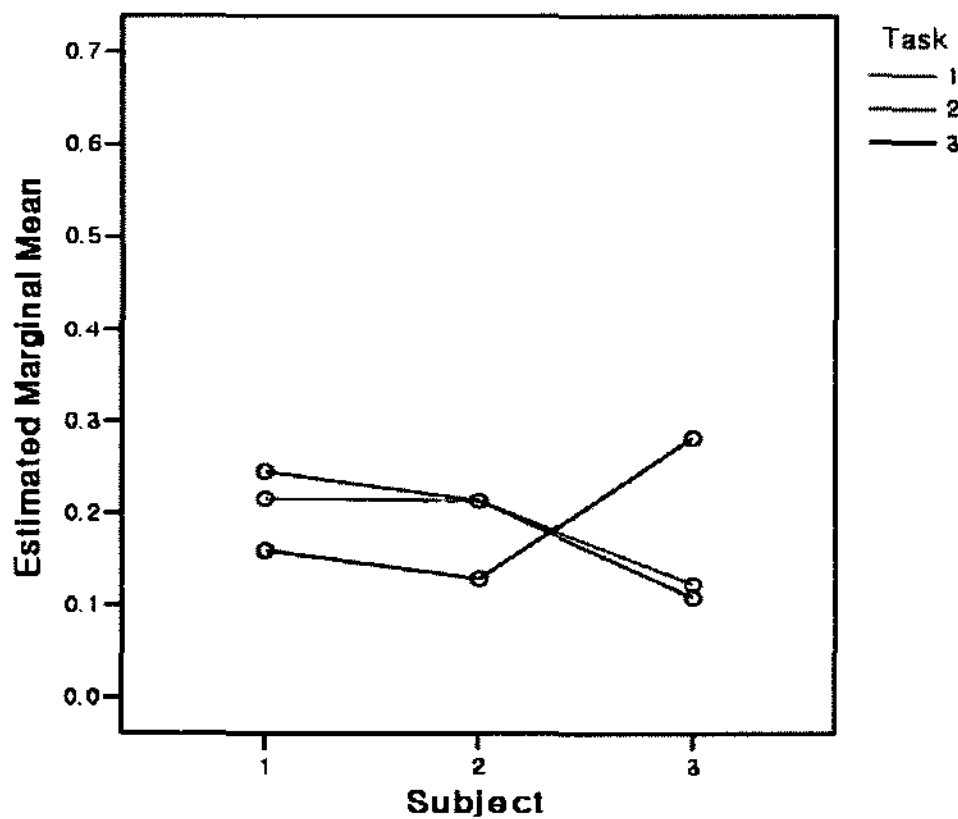
Subject	N	Group	
		1	2
1	192	.3660	
2	150	.4078	
3	151		.4613
sig. prob.		.057	1.000

($\alpha = 0.05$)

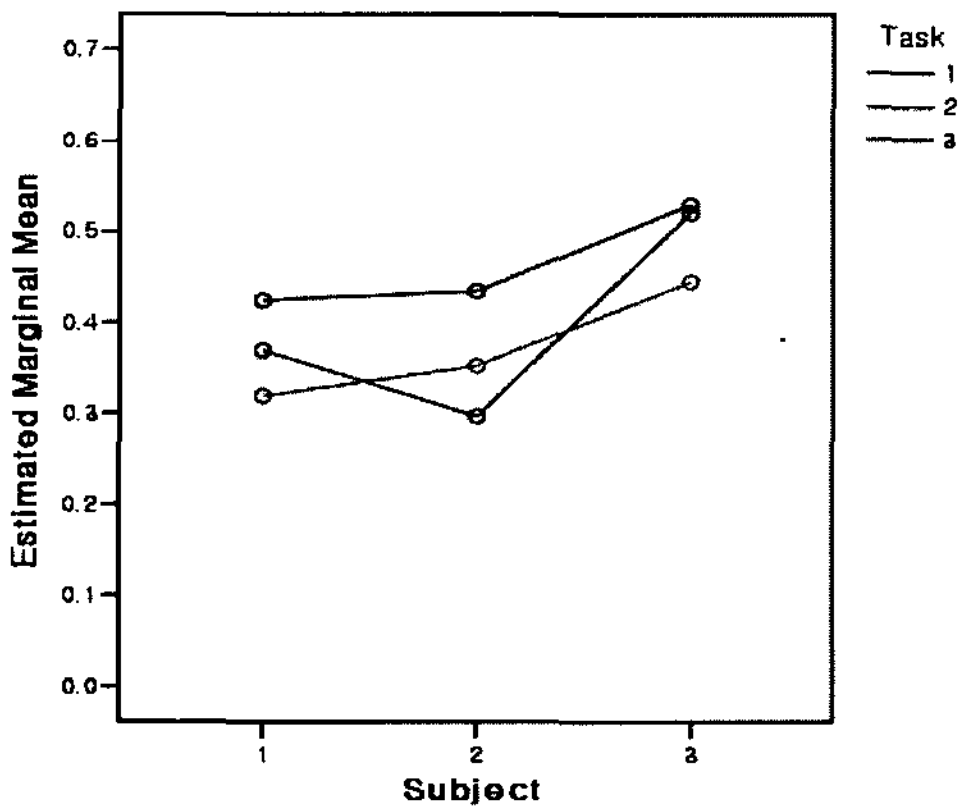
야 할 때 올바른 방향으로 반응한 정반응(correct hit response), 2) 유형 2는 반응하지 말아야 할 때 반응하지 않은 정반응(correct no response), 3) 유형 3은

반응해야 할 때 반응하지 않은 과오(miss), 4) 유형 4는 반응하지 않아야 할 때 바른 방향으로 반응한 과오(ipsi-lateral false alarm), 5) 유형 5는 반응하지 않아야 할 때 반대 방향으로 반응한 과오(contra-lateral false alarm), 그리고 6) 유형 6은 반응해야 할 때 반대 방향으로 반응한 과오(contra-lateral hit error)를 나타낸다.

그림에서 보듯이 반응 1, 2의 올바른 반응의 경우에는 큰 변화가 나타나지 않았고, 반응 3의 miss의 경우에도 각 파형의 파워비는 반응 1, 2의 그것과 큰 차이가 보이지 않았다. 그러나, 반응 4와 같이 반응하지 않아야 할 때 반응을 할 때나, 반응 6의 경우와 같이 반응해야 할 때 반대 방향으로 반응하는 경우에는 반응 1, 2, 3과는 다른 변화를 나타냈으며, 특히 반응 5와 같이 반응 여부와 방향까지 모두 과오를 저지른 경우에는 피실험자 각자 변화 패턴은 달랐으나 반응 1, 2, 3에 비하여 상당한 차이를 나타냈다.

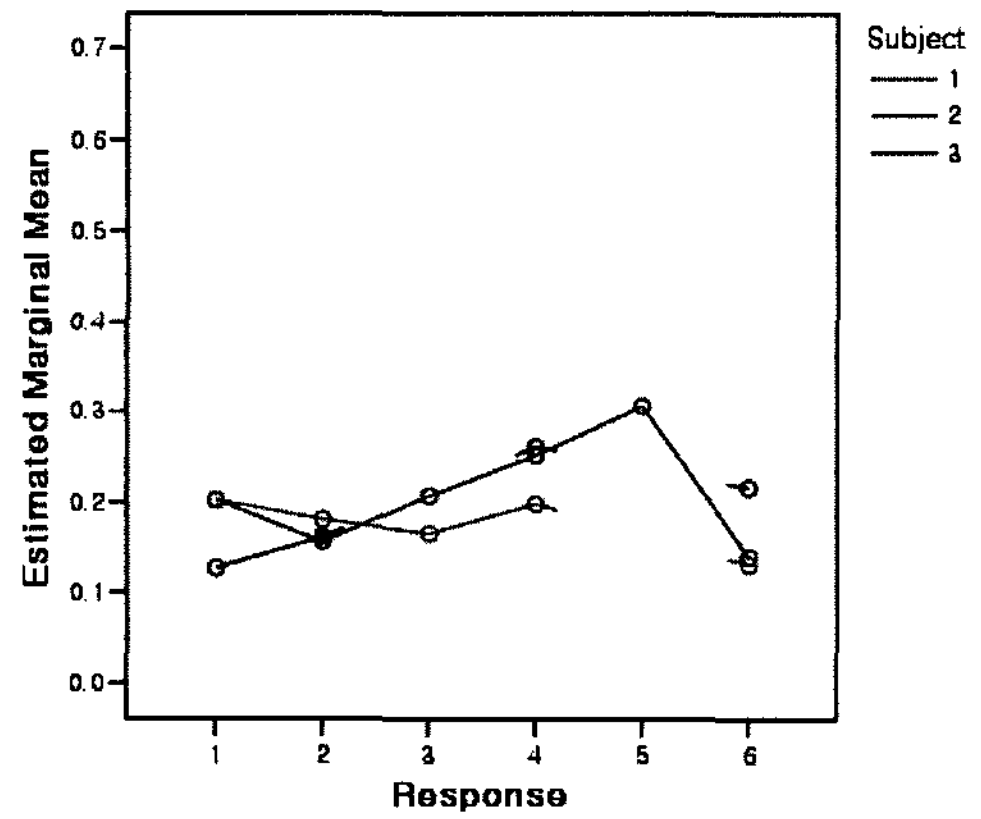


(a) α power ratio

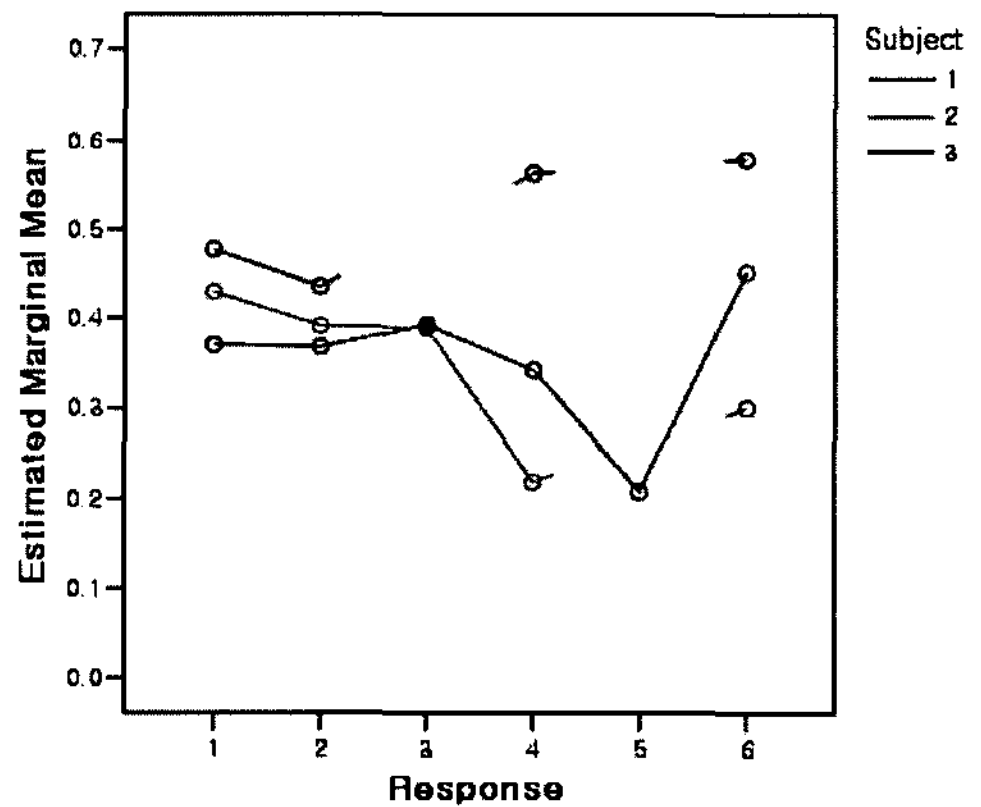


(b) β power ratio

Fig. 1. Estimated Marginal Means for Subject X Task.



(a) α power ratio



(b) β power ratio

Fig. 2. Estimated Marginal Means for Response X Subject.

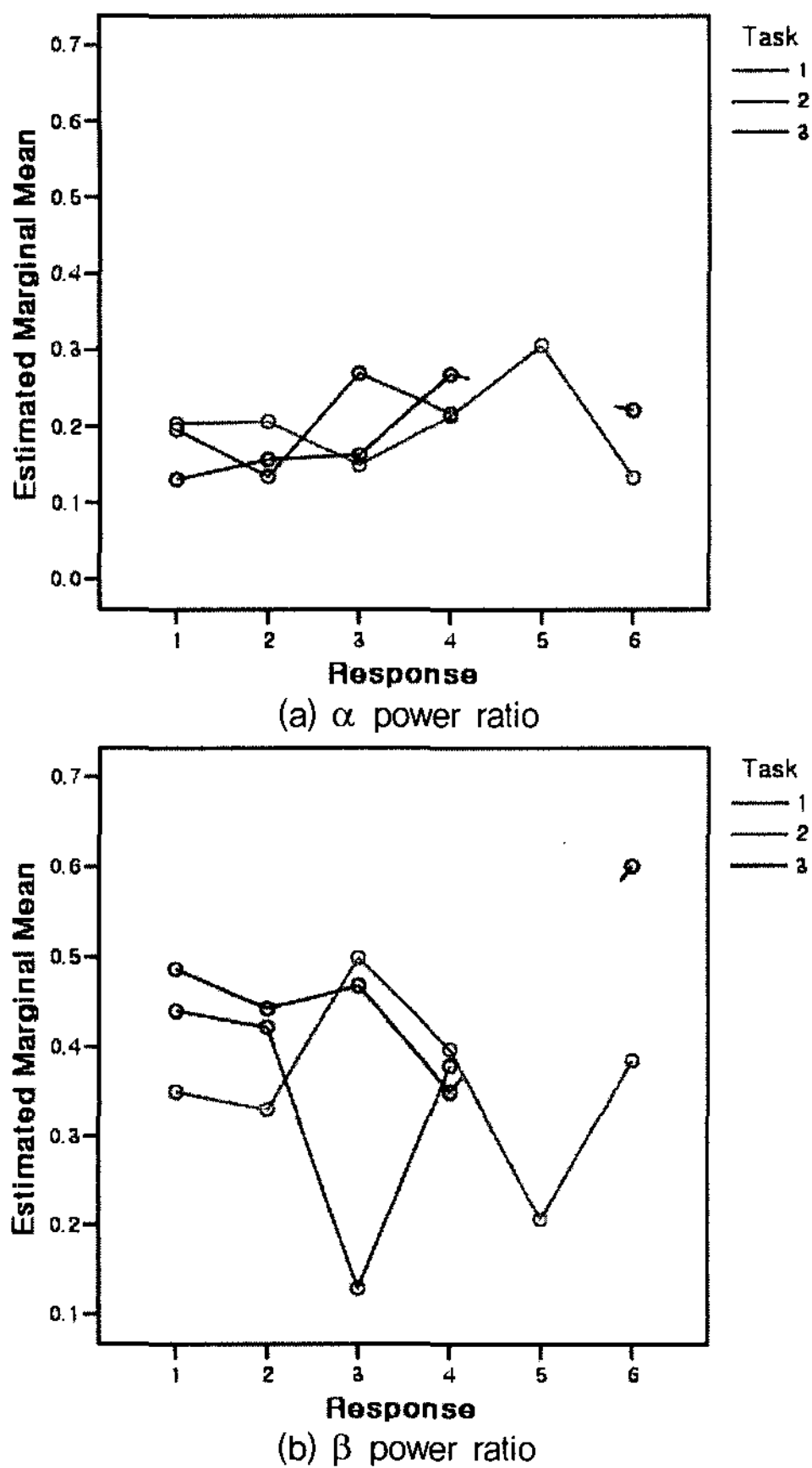


Fig. 3. Estimated Marginal Means for Response X Task.

Table 1에서 과업 자체의 영향이 통계적으로 유의할 만한 정도까지는 아니라고 하였으나, Fig. 3에서 보는 바와 같이 과업에 따라 밴드 파워비가 변화하는 것을 알 수 있는데, 이는 과업의 난이도를 반영하는 것이다. 즉, 과업 1은 단순한 화살표의 방향을 따라 반응할 것인가 반응하지 않을 것인가만을 결정하면 되는 작업이지만, 과업 2는 단일 영문자 'F'와 'J'가 갖는 상징성에 따라 반응 방향을 판단해야 하는 디코딩(decoding) 과정이 내재되어야 하는 작업이고, 과업 3은 화살표의 방향과 반대 방향으로 반응해야 한다는 반응 규칙을 심리학적으로 상기(recall)해 내는 과정이 추가되기 때문이다.

이러한 특성은 Table 4의 Tukey's Studentized Range (HSD) test 결과를 보면 알 수 있다. 이 결과에 따르면, α 파워비를 근거로 할 때 과업 1과 과업2, 혹은 과업 1과 과업 3의 차이는 단언할 수 없지만, 과업 2와 과업 3의 차이는 유의하며($p=0.004 < 0.05$), β 파워비를 근거로 할 때 과업 1과 과업 3은 같은 성격을 지닌 과업이라 이해될 수 있는 반면 과업 2는 이

Table 4. Tukey's Studentized Range(HSD) test on Tasks

Dep. Var.	(I) Task	(J) Task	Mean diff. (I-J)	Std. Error	Sig. Prob.	95% CI	
						Lower	Upper
alpha_p	1	2	-.032	.016	.110	-.070	.005
		3	.020	.016	.418	-.018	.050
	2	1	.032	.016	.110	-.005	.070
		3	.053*	.016	.004	.014	.092
	3	1	-.020	.016	.418	-.059	.018
		2	-.053*	.016	.004	-.092	-.014
beta_p	1	2	.085*	.022	.000	.035	.136
		3	-.039	.022	.170	-.090	.012
	2	1	-.085*	.022	.000	-.136	-.035
		3	-.125	.022	.000	-.176	-.073
	3	1	.039	.022	.170	-.012	.090
		2	.125*	.022	.000	.073	.176

(*) significant at $\alpha = 0.05$

질적인 성격을 갖는다고 말할 수 있다($p=0.000$).

더 깊은 연구가 진행되어야 하겠지만 현재로서 말하자면 이같은 결과는, 반응 규칙을 상기하여야 하는 과업 3의 특성이, 영문자의 의미를 디코딩하는 작업보다는 더 낫설기 때문이라고 판단되며, 마찬가지로 Fig. 3(b)에서 과업 1의 반응이 특이할 만큼 변화하는 것은 과업의 성격상 자극이 피실험자에게 너무나 친숙한 화살표에 의하여 제시된 까닭이라 생각된다. 따라서, Fig. 2에서의 밴드 파워비의 변화 역시 반응의 난이도를 반영하는 결과로 이해되는 것이 마땅할 것이다.

5. 결론

본 연구는 이상과 같이 뇌파의 밴드파워비를 근거로 과업을 수행하는 피실험자들의 생리심리학적 반응과 작업 수행 결과를 비교하였다. 그 결과를 종합하면, 뇌파의 밴드 파워비에 영향을 미치는 요인으로는 피실험자 요인과 피실험자 X 과업의 교호작용 요인이 제기되었으며 전자는 β 파워비에, 그리고 후자는 α 파워비에 더 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 이는 피실험자의 특성상 과업에 반응하는 패턴이 동질적인 집단이 존재함을 시사하였다.

과업에 따른 뇌파 파워비의 변화는 통계적으로 유의할 만큼 크지는 않았으나, 과업의 특성에 따라 각각 다른 패턴을 보여, 과업의 난이도나 성격의 변화에 따른 인간의 과오 반응을 연구하는 데 있어서 실마리를 보여 주었다. 본 연구에서 제시한 3가지

과제는 피실험자들의 뇌파 파워비를 근거로 할 때 영문자를 디코딩하는 작업이, 반응 규칙을 상기하여야 하지만 화살표를 이용하는 작업보다 더 낮설어 이질적인 반응을 초래하였다. 따라서, 반응 유형에 따른 뇌파 파워비의 변화 역시 반응의 난이도를 반영하는 결과로 이해되어야 한다고 판단되었다.

본 연구에서 충분히 완성되지 못한 과업의 난이도에 따른 개개인의 뇌파 비교는, 추후 과업 난이도 지수의 개발을 전제로 제시 자극의 시각적 혹은 청각적 특성과 아울러 검토될 계획이다.

감사의 글 : 이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2006).

참고문헌

- 1) 橋本邦衛, 安全人間工學, 中央勞働災害 防止協會, 1984.
- 2) Haider M., Spong P., and Lindsley D.B., "Attention, vigilance, and cortical evoked-potentials in humans", *Science*, Vol. 145, pp. 180~182, 1964.
- 3) Cacioppo J.T., and Tassinary L.G., *Principles of Psychophysiology : Physical, Social, and Inferential Elements*, Cambridge University, 1990.
- 4) Hohnsbein J., Falkenstein M., Hoormann J., Blanke L., "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.
- 5) Sheffers M.K., Coles M.G., Bernstein P., Gehring W.J., Donchin E., "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.
- 6) Falkenstein M., Hohnsbein J., Hoormann J., Blanke L., "Effects of crossmodal divided attention on late ERP components II. Error processing in choice reaction tasks", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 78, pp. 447~455, 1991.
- 7) 임현교, 인간과오의 심리생리적 징후와 작업 수행도, 한국산업안전학회 춘계 학술논문발표회, pp. 260~263, 2000.
- 8) 임현교, 계수작업시 사상관련전위 및 작업성능에 미치는 조명조건의 영향, 한국산업안전학회지, 제 15권, 제1호, pp. 167~175, 2000.