

계수작업시 사상관련전위 및 작업성능에 미치는 조명조건의 영향

임 현 교

충북대학교 공과대학 안전공학과
(1999. 11. 25. 접수 / 1999. 12. 13. 채택)

Effects of Illuminating Condition on ERP and Work Performance during a Counting Task

Hyeon-kyo Lim

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
(Received November 25, 1999 / Accepted December 13, 1999)

Abstract : Work performance and human error are complicated phenomena so that it is very difficult to grasp the true nature of them. However, Event Related Potential (ERP) may give a clue to them because human brain reflects diverse psychophysiological process. In the present study, the possibility of ERP application to the ergonomic area was evaluated in view of grasping error symptoms. For that purpose, the subjects were asked to count specific characters in a random character matrix on a computer monitor, and their ERP was compared with their performance data. Based upon the results, the amplitude of P300 was not so high as that in the case of the Odd Ball tasks, correct response corresponded with stable ERP with high P300 amplitude whereas wrong response did with unstable, fluctuating ERP with low P300 amplitude. Those results coincided with the work performance, and it was concluded that 3-wave fluorescent with illumination level of 800 lux would be recommendable for the counting task in concern. Conclusively, ERP including P300 might supply an objective clue to the problem of human errors in cognitive process.

Key Words : human error, Event Related Potential (ERP), psychophysiology, illumination

1. 서 론

인간은 외부로부터의 자극을 감지하고 식별하여, 해당 정보에 적합한 정보처리과정이나 의사결정과정을 거친 후 발효기에 의해 반응한다. 이러한 과정 어느 곳에서라도 정보처리가 원활히 수행되지 않으면, 결과적으로 인간은 과오를 초래하고 만다. 이와 같이 원활한 작업수행을 방해하는, 의도되지 않은 인간행동을 인적과오 (human error) 라고 하며, 정보처리 상의 수행단계에 따라 1) 감지 및 인식 과오 (input error), 2) 정보처리 과오 (information processing error), 3) 의사결

정 과오 (decision making error), 4) 행동 과오 (output error), 5) 정보교환 과오 (feedback error) 로 나누거나, 학자들에 따라서는 좀 더 간단히 1) 인지·확인과오, 2) 판단·기억과오, 3) 동작·조작과오의 3 단계로 나누기도 한다.

그런데 이러한 인적과오가 원활한 작업수행이나 기업의 생산성 향상에 장애가 된다는 것은 자명한 사실이다. 지난 40여 년간 인적과오에 의해 발생한 항공기 시스템의 고장이나 사고는 약 60~70%, 전자장치의 경우에는 50~70%에 이르며, 시스템 트러블이 임무수행이나 시스템 운영에 치명적 결과를 초래하는 미사일 시스템의 경우에조차 20~53%에 이른다고 한다 [1]. 또, 자동화가 상당히 진전된 화학 플랜트의 경우에도

인간과오에 의한 재해사고가 전체재해의 주류를 이루고 있다고 보고되고 있다 [2]. 이러한 사실은 인간의 판단과 기능이 얼마나 중요하며, 동시에 얼마나 신뢰하기 어려운가를 보여준다. 그러므로 생산성 향상에 기여하는 것을 목적으로 하는 산업인간공학의 연구분야에서, 인간과오의 평가 및 예방은 빼놓을 수 없는 중요연구과제이다. 만일 인간과오를 예방하고, 또 발생한다 하더라도 그 피해를 최소화하기 위해서는, 인간과오나 생산성저하의 징후를 객관적으로 파악하고 그것을 평가하는 것이 선결과제라 할 수 있다.

따라서, 정보처리나 의사결정 등의 인지과정을 심리학적으로 모형화하고, 생리심리학이나 대뇌생리학을 이용하여 객관적으로 이해하려는 노력은 인적과오를 해명하는 데 중요한 단서를 제공할 수 있을 것이다. 왜냐하면, 인간과오란 역시 인간의 정보처리과정에서 발생하는 현상이기 때문이다.

그러므로 본 연구에서는, 작업성능에 영향을 미치는 많은 작업형성요인 (Performance Shaping Factors)들 중 가장 일찍부터 주목을 받아온 조명요인을 대상으로, 그것이 인간과오의 발생과 생산성 저하에 어떤 영향을 미치는가에 대하여 심리생리학적으로 평가하고자 하였다.

2. 연구배경

인적과오는 매우 복잡한 요소와 과정들로 인해 그 분석이 용이하지 않으므로 최초의 시도는 단순한 작업수행시의 자율반응 및 뇌파를 척도로 하는 부활(賦活) 혹은 각성수준에 관한 연구로부터 시도되어 왔다. 입력자극에 대한 각성수준의 변화는 주로 동물실험에 의해 밝혀져 왔는데, 크게는 서서히 변동하는 지속적(tonic) 변화와, 외적자극 등에 의해 급격히 발생하는 일과성(phasic) 변화로 나눌 수 있으며, 특히 최근에 들어서는 후자 중에서도 유발전위 (Evoked Potential) 또는 사상관련전위 (Event Related Potential)를 지표로 하는 주의연구가 급격히 증가하고 있다. 이중 인간과오와 관련된 몇 가지 주요 연구결과들을 살펴보면 다음과 같다.

일찍이 Hernandez Peon et al. [3]은 음(音) 자극에 대하여 출현하는 뇌(腦) 내의 유발전위가 주의를 다른 곳에 기울이게 되면 소멸한다는 것

을 발견하였으며, Haider et al. [4]은 신호검출상황에서 신호를 검출하였을 때와 miss하였을 때의 유발전위가 다르고, 시간경과에 따라 유발전위의 진폭이 차차 저하한다는 사실을 보고하였다.

또한 ERN (Event-Related Negativity) 또는 NE (Error Negativity)라 불리는 현상은 인간이 과오의 검출과 과오의 억제, 즉각적인 보정 (correction), 혹은 과오의 보상 (compensation)에 관계된 사상관련전위로서, 최근 들어 발견되었다 [5]. 일반적으로 이 전위는 피실험자가 과오를 범할 때의 뇌과반응을 동일한 위상으로 가산평균화 (summing average) 시켰을 때 나타나는 음(陰)의 전위로서 진폭은 대체로 $10 \mu V$ 이고, 과오반응에 관련된 EMG 활동의 시작으로부터 약 150 m sec 후에 정점에 이르는 특성을 가지고 있다.

Sheffers et al. [6]도 ERN의 기능적 특성을 이해하기 위하여 몇 가지 실험을 수행하였는데, 그들에 따르면 피실험자들이 CRT 앞에 앉아 변별작업(辨別作業)을 수행하는 경우, 음(陰)의 첨두가 발생하였는데, 이 음성전위는 과오반응의 EMG 활동의 개시로부터 약 160 m sec 후에 정점에 이르렀다고 하였다.

한편, 자극이 주어지는 경우 그것이 시각적 자극이든, 청각적 자극이든 뇌파는 변화한다. 자극에 대해 인간이 인식하고 판단하는 경우 뇌파의 변동에는 자극제시로부터 약 300 msec 후에 팔목할 만한 + 전위가 발생하는데 이를 P300이라고 한다. 이제까지 알려진 바에 따르면, 작업자의 주의수준이 높아짐에 따라 P300의 진폭이 증대하며, 잠재기 (latency)는 제시자극의 난이도에 따라 증가하기 때문에, 자극과 반응에 대한 심리생리학적 설명은 이 현상을 척도로 설명하는 것이 보통이며, 작업의 인지과정을 평가할 수 있는 중요한 단서를 제공한다. 이 요소는 주로 제시자극에 대한 작업자의 주의수준이나 제시자극의 특성을 반영한다고 알려져 있다 [7].

이상과 같이 최근까지 발표된 결과로부터, ERN을 비롯한 사상관련전위들이 인간과오의 검출과정과 관계가 있고, 그 진폭의 변화는 과오검출과정의 어느 정도까지 과오를 인지하였는가 하는 정도를 반영한다고 이해할 수 있다.

특히 이와 관련하여 조명의 영향을 고려해 본다면, 시각적 자극에 의한 대뇌피질 활동의 반응이 달라짐으로써, 사상관련전위의 형태가 달라

질 것이라고 쉽게 짐작할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 사실들을 염두에 두고, 입력정보를 받아들이는 초기 단계, 다시 말해 자극의 인식 및 식별단계에서 인간과오의 징후를 찾아낼 수 있는가를 중심으로 생산현장의 조명조건들이 계수작업 중의 작업자 정보처리과정에 어떠한 생리심리학적 영향을 미치는가를 파악하고, 특히 인간과오의 생리심리학적 징후여부를 발견하고 그 특성을 분석하고자 수행되었다.

3. 실험

실험 작업은 단순한 계수작업으로서, 컴퓨터 화면에 나타난 무작위의 문자행렬 중 특정 문자의 수를 헤아리는 모의검사작업으로 하였다. 왜냐하면 제조업 분야의 업무들, 특히 전기전자분야의 모든 제품은 생산과정이 끝난 후 반드시 검사작업을 거치게 되며, 이 때 조명조건의 적부는 바로 검사작업의 수행도와 출하제품의 불량률에 영향을 주게 되기 때문이다.

제시자극은 5 행 × 10 열의 무작위 문자열이었으며, 작업요구는 그 중에 포함된 특정문자의 수효를 헤아리는 것이었다. 이 때 컴퓨터 모니터와의 거리는 평균 57 cm이었으며, 시각은 수평 각 5.7°, 수직각 3.6°를 유지되도록 하였다. 또한 제시자극 간의 간격은 평균 4 초를 기준으로 무작위 제시되도록 하였으며, 작업은 실험조건 당 2 시간씩 수행되었다.

조명조건은 현재 생산현장에서 많이 사용되고 있는 백열등, 형광등, 삼파장 등, 그리고 나선형 형광등의 4 가지를 이용하였으며, 조도수준은 500, 800, 1100 lux의 3 수준으로 하였다. 이 때 500 lux는 현장조사결과 주로 관측된 조도수준을 나타내며, 1100 lux는 전자기관 등과 같이 세밀한 검사작업시에 추천되고 있는 조도수준이며, 800 lux는 그 중간값을 상징한다. 따라서 결과적으로 4 가지 조명방법과 3 가지 조도수준의 조합에 의해 피실험자 1 인당 총 12 회씩의 실험을 complete block design에 의해 수행하였는데, 실험 전에는 피실험자가 조명조건에 적응하도록 하기 위하여 약 15 분씩 해당 조명조건에서 안정을 취하도록 하였다.

한편 작업 중 작업자의 심리생리학적 반응은 뇌전도 (Electroencephalogram)를 이용하여 측정

하였으며, artifact의 영향을 파악하기 위하여 심전도 (Electrocardiogram)와 안전도 (Electrooculogram)도 측정하였다. 이 때, 뇌전도의 측정부위는 국제규격인 10-20 법에 따라 Fz, Cz, Pz, Oz의 네 부위를 이용하였으며, reference 전극은 linked earlobe, ground 전극은 front head이었다. 이 심리생리학적 신호들을 4~30 Hz의 band pass filter로 filtering한 후, 자극이 주어진 직후부터 약 1 초만에 발생한 뇌파의 반응을 sampling rate 250 Hz의 속도로 정수변환하고 EOG나 ECG 등으로 인한 artifacts를 제거하기 위하여 $\pm 90 \mu V$ 이상의 신호는 제외하고 가산평균법 (summing average method)에 의해 수백 회 이상 가산함으로써 불필요한 소음이나 다른 요인에 의한 영향을 상쇄시킨 후 분석하였다.

실험에 이용된 기기는 뇌파계 (EEG 100B, BIOPAC System, Inc.)와 전용 A/D Converter, D/A Converter (PCL812, Advantech Co.), 그리고 감시용 카메라와 모니터 (Samsung Electronics Co. Ltd.) 등이 사용되었으며, 실험은 온도와 소음을 제어하기 위하여 격리된 밀실을 이용하였다.

실험에는 모두 4 명의 남성 피실험자가 참여하였고, 평균연령은 28 세 (± 2 세) 이었는데, 시력이나 시각기능에는 이상이 없는 대학(원)생들이었다.

4. 결과 및 고찰

실험결과는 작업자의 심리생리학적 반응을 중심으로 그에 해당하는 반응의 적부(適否)와 반응시간으로 나누어 분석하였다.

먼저, 작업수행에 따른 정답률과 오답률의 변화형태는 Fig. 1과 같았다. 정답률에 대한 분산분석결과에 따르면, 통계적으로 유의한 차이는 발견되지 않았으나 ($p < 0.05$), 좀 더 구체적으로는 800 lux의 조도수준일 때가 가장 정답률이 높았다.

그러나 반응시간에 대한 분산분석 결과에 따르면, 조명기구와 조도수준 인자의 주효과가 주목할 만하였으며, 그 중에서도 조도수준 인자의 주효과가 가장 큰 것으로 판단되었고, 교호작용 요인으로서의 조명기구 × 조도수준 인자의 교호작용 (interaction) 이 유효하였다 ($p < 0.05$). 특히, 반응시간은 다소 우열이 바뀌는 경우는 있었으나 3 파장등 (3 wave fluorescent) 하에서의 반응

시간이 비교적 빨랐고, 조도수준의 경우에는 800lux에서의 반응시간이 가장 짧았다. 그러므로 작업수행도를 고려한다면 800 lux 조도수준이

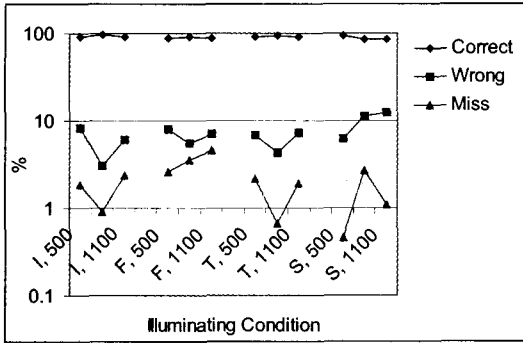


Fig. 1. Work Performance and Errors under Each Illumination Condition

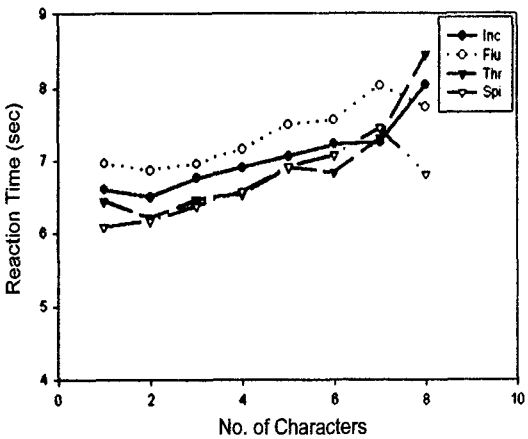


Fig. 2. Reaction Time under 500 lux Condition

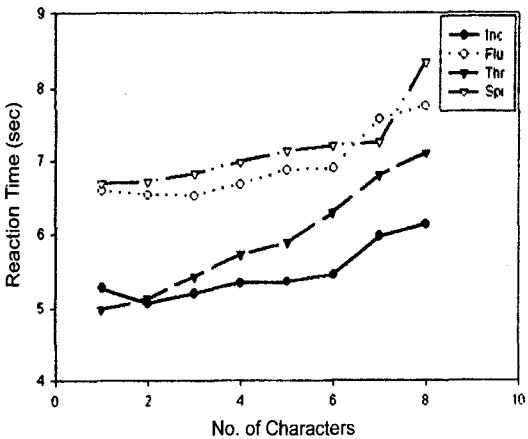


Fig. 3. Reaction Time under 800 lux Condition

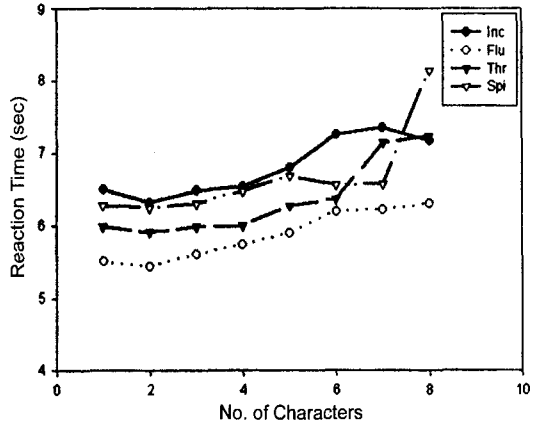


Fig. 4. Reaction Time under 1100 lux Condition

추천할 만하다고 판단되었다. 한편, 조명기구별로 비교해 보았을 때에는 백열등, 형광등, 삼파장등 하에서의 반응시간이 상대적으로 짧았다. 이러한 현상은 모두 통계학적으로는 유의하지 않았을지라도 피실험자들의 심리생리학적 반응을 통해서 쉽게 확인할 수 있었다.

Fig. 5부터 Fig. 16까지의 일련의 그림들은 이와 관련하여 각 조명조건과 조명수준하에서 작업수행결과에 따라 사상관련전위의 형태와 크기가 변화하고 있음을 보여준다. 특히 Fig. 5에서부터 Fig. 7까지는 백열등의 각 조명수준 하에서의 정답반응에 대한 사상관련전위를, Fig. 8에서부터 Fig. 10까지는 백열등의 각 조명수준 하에서의 오답반응에 대한 사상관련전위를, Fig. 11에서부터 Fig. 13까지는 3 파장 형광등의 각 조명수준 하에서의 정답반응에 대한 사상관련전위를, 그

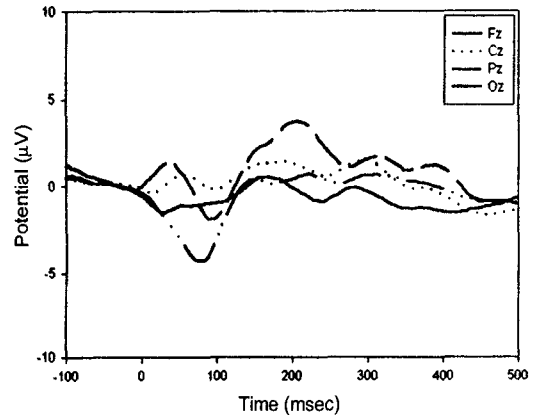


Fig. 5. ERP of Correct Response under Incandescent with 500 lux condition

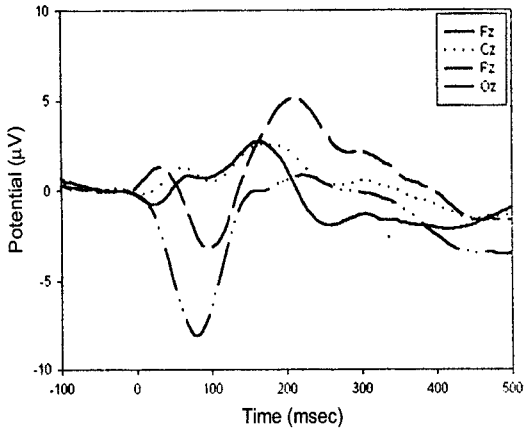


Fig. 6. ERP of Correct Response under Incandescent with 800 lux condition

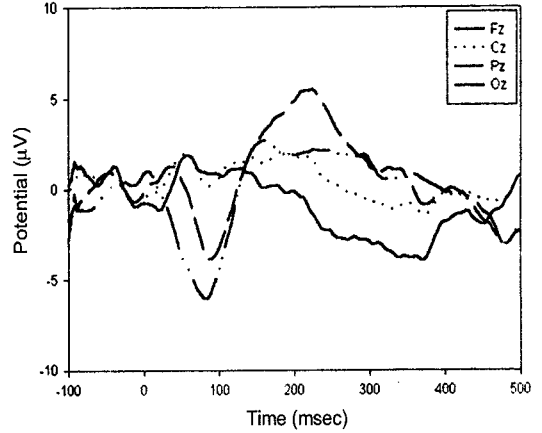


Fig. 9. ERP of Wrong Response under Incandescent with 800 lux condition

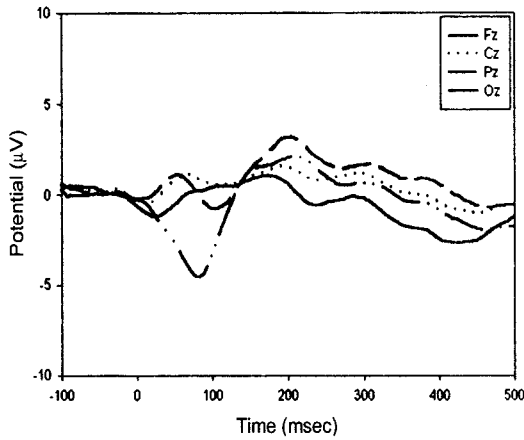


Fig. 7. ERP of Correct Response under Incandescent with 1100 lux condition

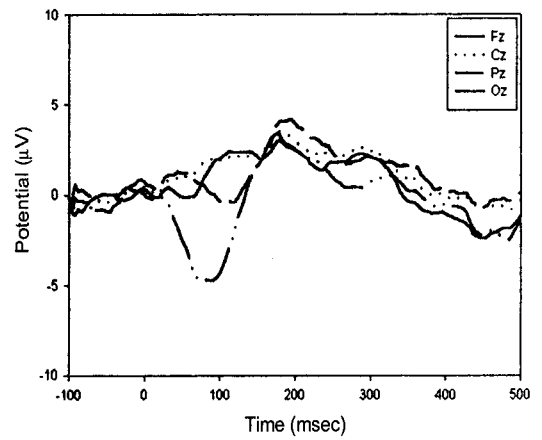


Fig. 10. ERP of Wrong Response under Incandescent with 1100 lux condition

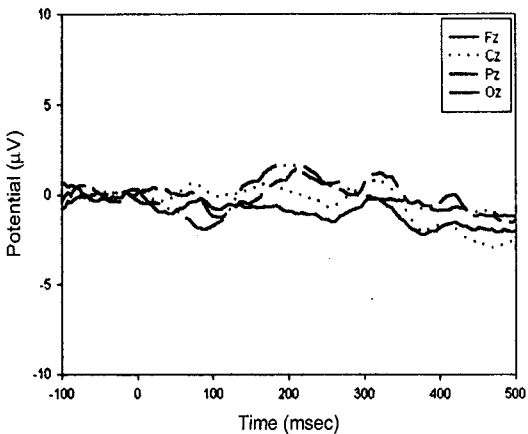


Fig. 8. ERP of Wrong Response under Incandescent with 500 lux condition

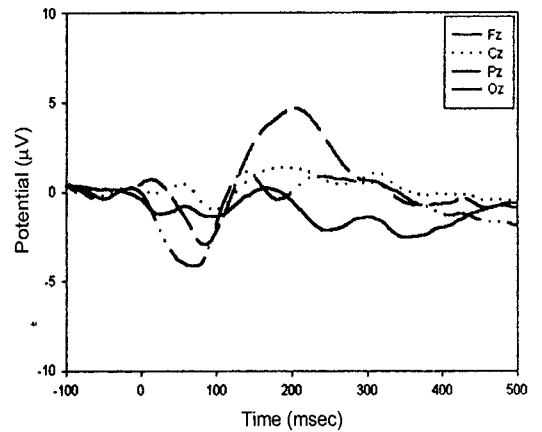


Fig. 11. ERP of Correct Response under 3-wave Fluorescent with 500 lux condition

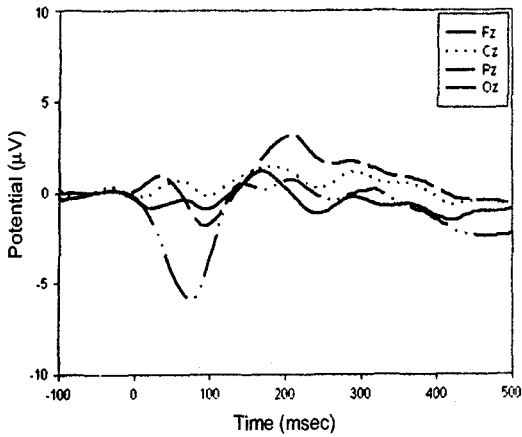


Fig. 12. ERP of Correct Response under 3-wave Fluorescent with 800 lux condition

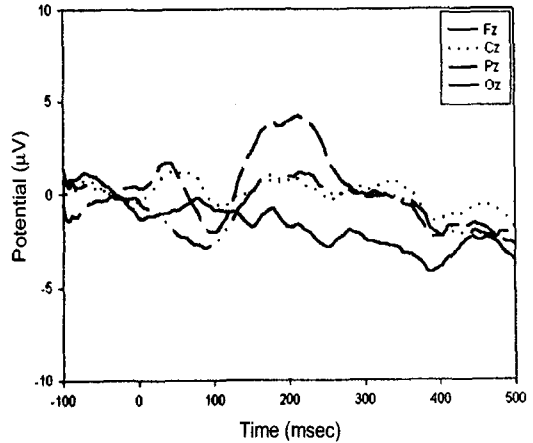


Fig. 14. ERP of Wrong Response under 3-wave Fluorescent with 800 lux condition

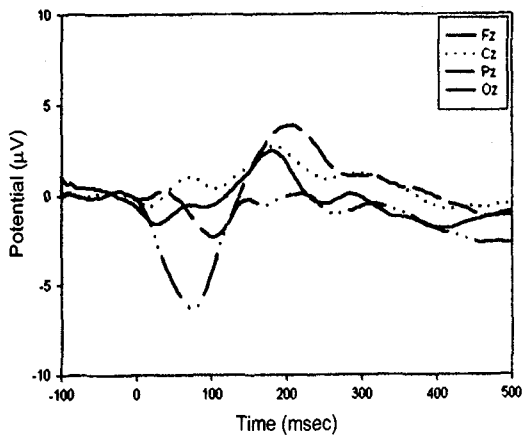


Fig. 13. ERP of Correct Response under 3-wave Fluorescent with 1100 lux condition

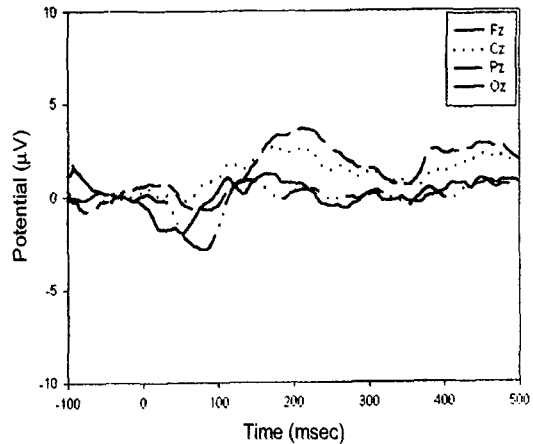


Fig. 15. ERP of Wrong Response under 3-wave Fluorescent with 1100 lux condition

리고 끝으로 Fig. 14에서부터 Fig. 16까지는 3 파장 형광등의 각 조명수준 하에서의 오답반응에 대한 사상관련전위를 나타낸다.

그러나 여기에서 주의하여야 할 점은, 주어진 2 시간 여의 실험진행동안 지정된 동일한 문자를 찾아 헤아리는 작업은 제시자극이 순간 순간 지속적으로 변화하는 Odd Ball Test에 비해 자극의 강도나 난이도가 낮으며, 그 까닭에 P300의 형태가 통상적인 자극-반응간의 실험에서 나타나는 형태에 비해 현저하게 다르다는 점이다. 즉, 원래 P300은 자극제시 후 300 msec 이후부터 450 msec 사이에 나타나는 + 전위중 최대 첨두치를 나타내는 것이지만 [8,9,10], 본 실험에서는 위와 같은 이유 때문에, + 전위가 아닌 첨두의

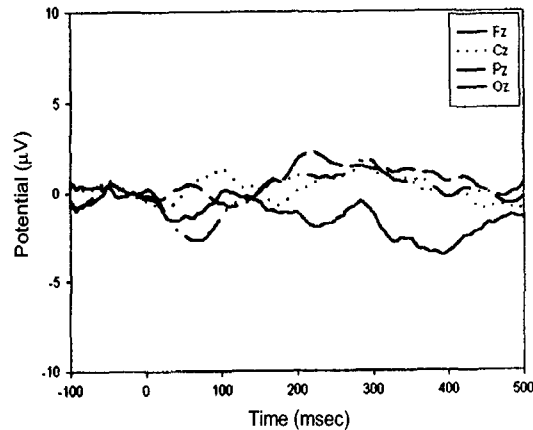


Fig. 16. ERP of Wrong Response under 3-wave Incandescent with 500 lux condition

형태만이 나타나는 경향을 띠고 있는 것이다. 그러므로 본 연구에서는 자극제시 직전 0.1 초간의 뇌파신호를 평균하여 기저선으로 간주하고, 자극제시 후 300 msec 이후부터 450 msec 사이에 나타나는 위로 볼록한 첨두치 (convex peak)를 P300으로 간주하여 분석하였다.

이 분석결과에 따르면, Fig. 17로부터 Fig. 20이 보여주는 바와 같이 전극위치에 관계없이 대체적으로 P300의 진폭은 백열등과 삼파장 등의 경우에, 그리고 조도수준으로 판단한다면 800 lux의 경우에 가장 컸으며, 그 잠재기는 Fig. 21부터 Fig. 24가 보여주는 바와 같이 백열등의 경우에 가장 짧았다. 다시 말해 앞서의 작업수행결과와 비교하여 알 수 있듯이 800 lux의 삼파장 등, 또는 800 lux의 백열등 하에서의 작업수행도가 상

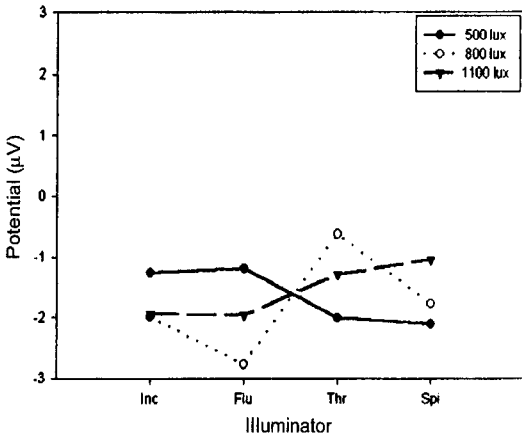


Fig. 17. P300 Amplitude of Correct Response at Fz

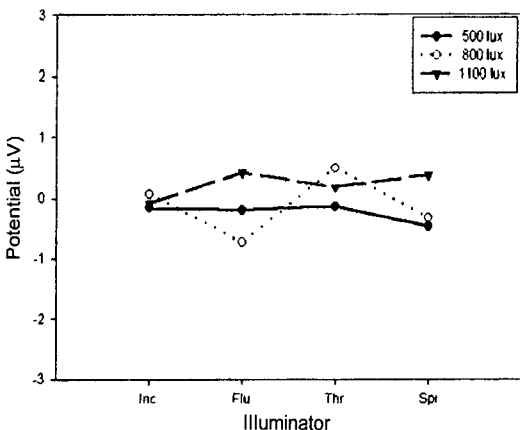


Fig. 18. P300 Amplitude of Correct Response at Cz

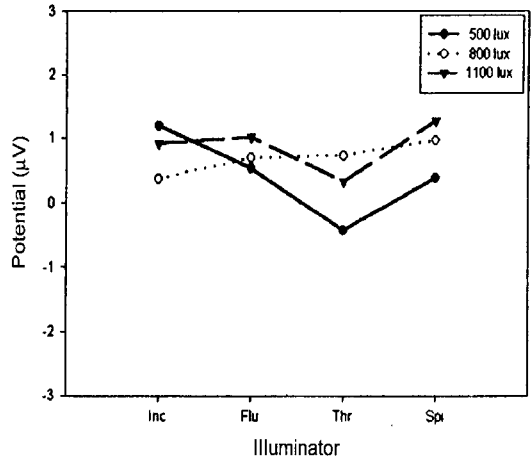


Fig. 19. P300 Amplitude of Correct Response at Pz

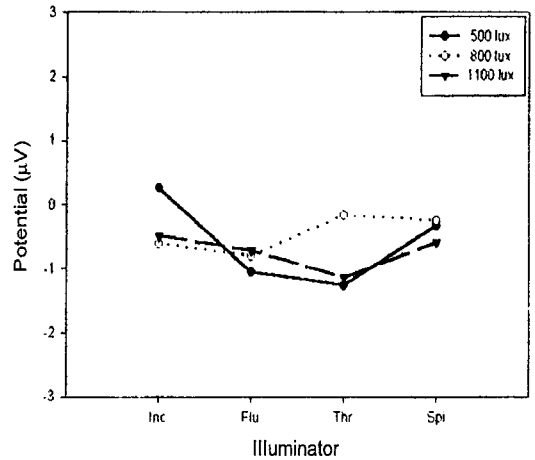


Fig. 20. P300 Amplitude of Correct Response at Oz

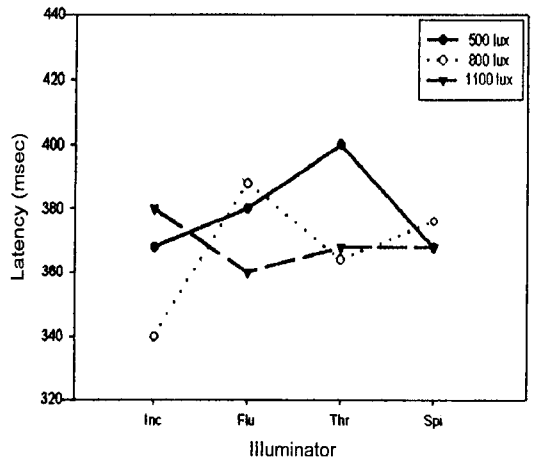


Fig. 21. Latency of P300 at Fz

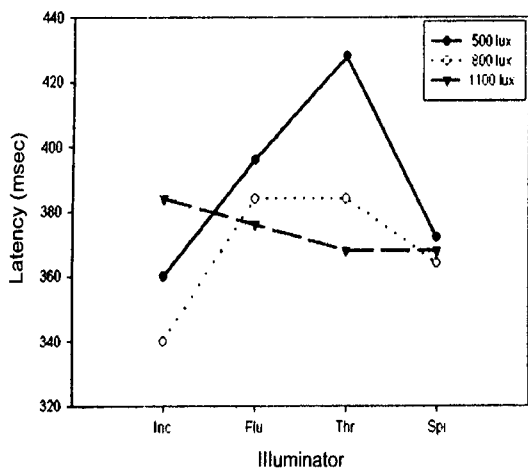


Fig. 22. Latency of P300 at Cz

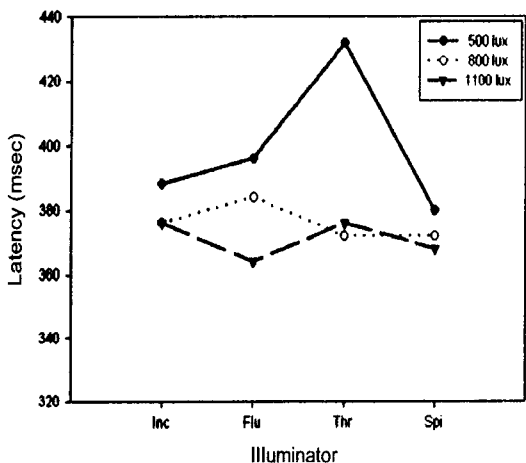


Fig. 23. Latency of P300 at Pz

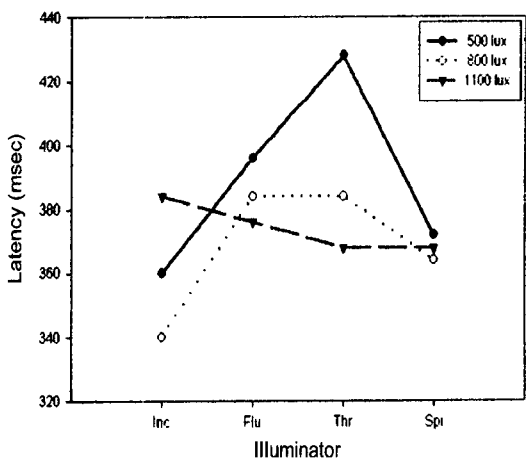


Fig. 24. Latency of P300 at Oz

대적으로 우수하였던 것은 작업자의 인지적 정보처리 상태가 우수하였기 때문임을 보여주는 것이다. 이와 같은 사실을 좀 더 일반적으로 말한다면, 뇌파의 형태가 안정될수록 작업자의 반응도 안정적이라는 것을 알 수 있으며, P300의 뇌파진폭이 클수록 작업에 대응하는 작업자의 주의수준이 높고, 또, 잠재기가 짧을수록 반응시간이 빠르다고 할 수 있을 것이다.

정답반응을 보일 때의 뇌파형태는 가산평균에 의해 비교적 안정된 정형화된 사상관련전위를 보여주지만, 오답반응을 보일 때의 사상관련전위는 그림에서 보는 바와 같이 결코 안정적이지 못하였다. 이것은 정답의 반응횟수가 오답에 비해 절대적으로 많아 가산평균의 효과가 상대적으로 작았기 때문이라고 생각할 수 있으나, 실제로는 반복된 실험에 의해 가산평균에 이용된 자료의 수가 각각 150여 회를 상회하였으므로 자료부족 때문이라고 판단할 수는 없다.

그림에서 알 수 있듯이 사상관련전위의 크기는 Fz나 Oz에 비해 Cz에서 크게 나타났으며, 특히 Pz에서 가장 컸다. 반면 잠재기는 Fz에서 상대적으로 짧았고, 다음은 Oz의 순이었다. 이것은 비록 제시자극이 시각적 자극이기는 하였지만, 작업의 특성이 단일자극에 대한 선택반응을 요구한 것이 아니라 화면전체에 제시된 일련의 문자행렬을 검색하고 비교하는 다른 특성을 지니고 있음을 반영하는 것이라 판단되었다.

5. 결론

이제까지 작업자의 인적과오는 많은 경우 주관적이고 일시적인 현상으로 간주되어 소홀히 다루어지는 경우가 많았다. 그러나 본 연구에서 살펴 본 바와 같이 인적과오나 작업수행도 저하의 이면에는 객관적으로 파악할 수 있는 증거들이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과에 따르면, 사상관련전위가 안정적일 때 작업자의 반응은 안정적이었으며 정답률도 높았다. 반대로 잘못된 반응을 보일 때에는 사상관련전위가 결코 안정적이지 못하였다. 또한 계수작업의 제시자극은 Odd Ball Test에 비해 자극의 강도가 높지 않았으며, 그 때문에 P300의 + 전위도 전반적으로 크지 않고, 침투의 형태만을 나타냈는데, 그 크기는 Pz 부위에서 가장

켰으며, 잠재기는 Fz에서 가장 짧은 것으로 관측되었다. 이러한 생리학적 반응은 작업수행도에 그대로 반영되어 800 lux 조도수준의 삼과장 등이나 백열등 하에서 작업하는 경우가 가장 반응시간이 빠르고 작업수행도도 높았다.

따라서 이들을 종합해 볼 때, 사상관련전위는 작업자의 성패를 판단할 수 있는 객관적 척도로 사용될 수 있음을 보여주었다. 이렇게 작업성능과 관련된 뇌파 특성의 비교는, 숙련자와 초보자, 작업상의 자극의 유효도 등을 파악하는 데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 앞으로 좀 더 복잡한 인지과정을 파악하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 塩見弘, 人間信賴性工学入門, 日科技連, 1996.
- 2) 林喜男, 人間信賴性工学, 海文堂, 1984.
- 3) Hernandez Peon, R., Scherrer, H., & Jouvet, M., Modification of electric activity in cochlear nucleus during attention in unanesthetized cats, *Science*, Vol. 123, pp. 331~332, 1956.
- 4) Haider, M., Spong, P., & Lindsley, D. B., Attention, vigilance, and cortical evoked-potentials in humans, *Science*, Vol. 145, pp. 180~182, 1964.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Cacioppo, J. T., & Tassinary, L. G., Principles of Psychophysiology : Physical, Social, and Inferential Elements, Cambridge University, 1990.
- 8) Jodo, E., & Inoue, K., Effects of Practice on the P300 in a Go/NoGo Task, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 76, pp. 249~257, 1990.
- 9) Magliero, A., Bashore, T. D., Coles, M. G. H., & Donchin, E., On the Dependence of P300 Latency on Stimulus Evaluation Processes, *Psychophysiology*, Vol. 21, No. 2, pp. 171~186, 1984.
- 10) Mecklinger, A., & Ullsperger, P., P3 varies with Stimulus Categorization rather than Probability, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 86, pp. 395~407, 1993.