

뇌파와 심전도 분석을 기반으로 한 온열환경 및 조도가 재실자의 업무에 미치는 영향

Effect of Thermal Environment and Illuminance on the Occupants Works based on the
Electroencephalogram and Electrocardiogram Analysis

김형선* · 임재현** · 김형태*** · 김형식**** · 곽원택**** · 김진호****†
Hyung-Sun Kim* · Jae-Hyun Lim** · Hyoung-Tae Kim*** · Hyoung-Sik Kim**** ·
Won-Tack Kuwak**** · Jin Ho Kim****†

*그린 에너지 기술연구소
*Green Energy Technology Research Center

**공주대학교 컴퓨터공학부
**Department of Computer Science and Engineering, Kongju National University

***한국가스공사 연구개발원 신에너지기술연구센터
***Department of Industrial and System Engineering, Kongju National University

****공주대학교 산업시스템공학과
****Department of Industrial and System Engineering, Kongju National University

Abstract

This research analyzed biosignals associated with the change of emotion from lighting felt by the occupants and task type under various indoor thermal environments and illuminance, and examined the biosignals' impacts on work. To this end, the indoor thermal environment was constructed on the basis of PMV (predicted mean vote) index value, and various indoor environments were created by changing the brightness of LED stands. In this manner, a variety of indoor environments were constructed, and experiments were carried out. This research evaluates the sensibility response to lighting through a questionnaire survey in the given environment and incorporates different types of error searches. In this way, changes were analyzed by measuring electroencephalogram (EEG) and electrocardiograms (ECG). As a result, all biosignals on the task type showed significant differences from the thermal environment change. When PMV index value was 0.8 (temperature: 25 °C, humidity: 50 %), concentration and attention were the most activated. However, the biosignals did not show significant differences from the

* 이 논문은 2009년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0093825). 또한, 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20131020400850).

† 교신저자 : 김진호 (공주대학교 산업시스템공학과)

E-mail: kjh@kongju.ac.kr

TEL: 041-521-9434

FAX: 041-521-9431

illuminance change. Concentration on an occupant's work capability was confirmed to be closely related to the thermal environment. As for the subjective emotional response to lighting, the occupants felt comfort as illuminance was lower, while they felt discomfort as illuminance was higher. However, there were no significant differences from the thermal environment change.

Key words: PMV index, Illuminance, Sensibility for lighting, Electroencephalogram, Electrocardiogram

요약

본 연구에서는 다양한 실내 온열환경 및 조도에서 재실자가 느끼는 조명에 대한 감성의 변화와 작업의 종류에 따라 생체신호를 분석하여 업무에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 하였다. 이를 위해 실내 온열환경은 PMV(predicted mean vote) 지표 값을 기반으로 환경을 구성하였고, 조명환경은 LED광원을 이용한 스탠드를 통해 조명의 밝기에 변화를 주어 다양한 실내 환경을 구성하고 실험을 진행하였다. 주어진 환경에서 설문지를 통해 조명에 대한 감성을 평가하고 종류가 다른 오류검색수정 작업을 진행하면서 뇌파와 심전도를 측정하여 변화를 분석하였다. 그 결과, 작업의 종류에 대한 모든 생체신호는 온열환경의 변화와 유의적인 차이를 보였으며, PMV 지표 값이 0.8(온도: 25 °C, 습도: 50 %)일 경우 집중력 및 주의력이 가장 활성화 되었다. 하지만, 조도의 변화에는 대체적으로 유의적인 차이는 보이지 않았다. 따라서 재실자의 업무 능력에 미치는 집중력은 온열환경과 밀접함을 확인할 수 있다. 또한, 조명에 대한 주관적인 감성은 조도가 낮을수록 편안함을 느꼈으며, 조도가 높을수록 불편함을 느꼈다. 하지만 온열환경의 변화에는 유의적인 차이가 없었다.

주제어: PMV 지표, 조도, 조명감성, 뇌파, 심전도

1. 서론

최근 실내 공간의 기능이 더욱 세분화되면서 각각의 공간마다 특성에 맞는 쾌적한 물리적 환경을 제공해 주어야 할 필요성이 강조되고 있으며, 물리적인 실내 환경에 있어서 인간에게 쾌적한 환경을 조성하는 요인 중 하나가 조명이라고 할 수 있다. 최근에는 단순히 정량적인 밝기만을 제공하던 과거의 조명에서 인간의 정서적인 측면을 고려한 조명계획 및 연구가 이루어지고 있다. 특히, 인간의 생활 및 업무 패턴이 다양해지면서 주간에 행해졌던 스포츠, 쇼핑, 각종 이벤트 등의 활동이 야간에도 활발히 이루어지면서 이에 맞는 적합한 조명 환경을 제공해야 한다. 이렇듯 물리적 환경 요소들이 어떻게 구성되느냐의 특성이 인간에게 쾌적한 환경을 조성함에 있어 중요한 부분임은 틀림없다(Kim, 2013). 그렇지만 다양한 물리적 환경 요소들의 특성을 내포하고 있는 실내 환경 그 자체가 중요하다고 보다는, 실내 활동을 하게 될 인간이 과연 그 실내 환경을 적절하다고 판단할 것인지가 더 중요하다고 볼 수 있다.

인간이 실내 활동을 하면서 쾌적함을 느끼는 기준 및

평가에 대한 연구들은 다양한 방면에서 연구들이 진행되고 있다. Kim 등(2013)은 재실자가 지각하는 주관적 쾌적성이 쾌적한 실내 환경 조성을 위해서 PMV(predicted mean vote) 지표 값을 보완해 줄 수 있을지의 여부를 살펴보고 있다. 이들은 실내 환경에서 산출된 PMV 지표 값과 재실자가 Likert 형태로 응답한 지각된 쾌적성과의 관계를 살펴보았으나, 두 값 간의 유의미한 관계가 나타나지 않았다. 한편, Kim 등(2011)은 PMV 지표 값과 인간의 심리/생리적 반응과의 관계를 살펴봄으로써 인간의 측정된 심리/생리적 반응이 PMV 지표 값을 보완할 수 있을지를 알아보았다. 이들은 인간의 심리적 반응으로서 2차원 정서모델에서 활용되는 Valence와 Arousal 값을 사용하였으며, 인간의 생리적 반응으로는 가장 기본적 생리 측정치인 심박률(heart rate; HR)을 사용하였다. 그러나 이들 역시도 PMV 지표 값의 변화 방향과 일관된 심리/생리적 반응이 나타나지 않음을 확인하였다. 하지만, 이러한 연구들은 PMV 지표에 인간이 반응하는 결과에만 집중하여 연구가 진행되었다.

인간의 생체신호를 이용한 연구는 의학, 공학이나 심리학 등에서도 많은 연구가 진행되고 있으며, 인간의

생체신호 중에서도 뇌파 및 심전도에 관한 연구가 많다. 그중에서도 인간이 일처리 과정에 있어 중요한 주의집중력과 관련하여 뇌파와 심전도에 관한 연구들이 빠르게 진행되고 있다. 뇌파 중에서 알파파와 저베타 대역의 중간과정인 주의집중을 나타내는 12-15Hz의 SMR파의 발현에 대한 연구를 하였다(Yu, 2009; Shim, 2009). 또한, 졸음이 오는 상태를 나타내는 4-8Hz 대역의 세타파의 활성도와 주의 집중을 나타내는 12-15Hz의 SMR파 활성도의 비율로 주의집중을 분석하거나(Park et al., 2010), 세타파와 SMR파의 활성도 및 각성을 나타내는 중베타의 활성도 비율을 분석하기도 하였다(Jang et al., 2008; Lee et al., 2009). Hwang 등(2012) 및 Kim 등(2005)은 뇌파와 심전도의 분석을 통해 사용자의 집중도 및 감정 상태를 인식할 수 있는 바이오피드백 인터페이스에 관한 연구를 하였다. 이러한 업무처리를 위한 주의집중력과 관련된 생체신호를 실시간으로 측정하고 분석하여 재실자의 상태를 분석한다면 쾌적한 업무 환경을 구성하는데 활용할 수 있을 것이다.

이에 따라, 본 연구에서는 PMV 지표 값을 기준으로 쾌/불쾌적인 실내 환경을 4가지 형태로 구분하고, LED스탠드를 이용해 조도를 3단계의 밝기를 구분하여 총 12가지의 각기 다른 실내 환경을 구성하였다. 이렇게 구성된 실내 환경에서 피험자가 느끼는 조명에 대한 주관적인 감성을 분석하고, 오류검색수정 문제를 풀이하면서 변화되는 뇌파와 심전도의 생체신호를 측정 및 분석하여 실내 환경의 변화가 각각의 작업에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 하였다.

2. 관련연구 및 이론

2.1. 뇌파(Electroencephalogram; EEG)

뇌파란, 뇌의 전기적인 활동을 머리 표면에 부착한 전극을 통해 비침습적으로 측정된 전기신호이다. 각 주파수 대역의 종류 및 뇌의 활동에 대한 내용은 표 1과 같다. 뇌파신호의 분석에는 주기가 아닌 주파수가 널리 사용되고 있으며, 그 중에서 알파파와 베타파는 사람의 심리적 안정과 긴장 상태가 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 알파파는 심리적 완화 상태로 눈을 감을 때 발생하고 베타파는 경계, 각성, 문제풀이, 집중할 때 발

생하며 파형이 빠르면서 크기가 작은 특성을 가지고 있다. 사용자의 뇌파를 측정하고 이들 밴드에서 뇌파를 분석하면 집중하고 있는 상태인지 아닌지를 파악할 수 있다(Kim et al., 2005). 또한, 뇌파 중에서 알파파 대역과 저베타파 대역의 중간과정인 12-15Hz의 SMR(Sensory motor rhythm)파는 의식이 휴식 상태에서 활동 상태로 변화하는 과정으로 적절히 안정된 상태에서 각성과 주의집중력을 유지할 때 발현되며 긴장하거나 스트레스를 받지 않는 상태에서 집중하여 문제를 해결하는 상태에서 나타난다(Sterman, 1977).

Table 1. Comparison of EEG Band

Band	Frequency Band	Brain Activity
Delta(δ)	< 4Hz	deep sleep
Theta(θ)	4-8Hz	drowsiness, meditation
Alpha(α)	8-13Hz	mental and physical stability
Beta(β)	13-30Hz	anxiety, tension, stress
Gamma(γ)	30Hz <	extreme arousal and excitement

뇌파의 분석법에는 시간분석, 주파수 분석, 시간-주파수 분석, 비선형 동역학 분석, 통계적 모델링, 시공간 분석, 유발 전위 분석 등이 있다(Ryu et al., 2001). 다양한 분석방법 중 개인 편차를 제거할 수 있는 상대 파워 스펙트럼 분석법은 대표적인 뇌파 분석법으로, μV 단위로 측정된 뇌파를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 실시해 주파수 대역 별로 데이터를 정렬 및 분석하는 방법이다(Regan, 1989).

본 연구에서는 환경의 변화와 작업의 종류에 따라 피험자의 뇌파를 측정하고 피험자의 상태를 정량적으로 파악하기 위해 파워 스펙트럼 분석법 중에서 상대 파워 분석법을 이용하였다.

2.2. 심전도(Electrocardiogram; ECG)

심전도란, 어떠한 근육이 수축할 때에는 탈분극(depolarization)이라는 전기적 변화현상이 체 표면에서 감지되게 된다(Jang et al, 2010). 이와 같이 검출된 심전도 신호는 심방 수축상황(P)과 심실의 수축상황(QRST)이라는 이름으로 불리며, 이들의 간격, 형태,

주기 등이 심전도 신호 해석의 중요한 요소로 사용되어 진다. 심전도 검사는 일반적으로 심근의 이상이나 심실비대, 심장내의 전기적 흥분 부위의 이동, 흥분전도의 이상 등을 임상적으로 긴장의 기능을 검사하는 중요한 수단이다(Kim et al., 2010).

그림 1은 일반적인 심전도 파형을 나타내며, P는 심방의 수축, QRS는 심실의 수축, T는 심실의 이완을 의미한다.

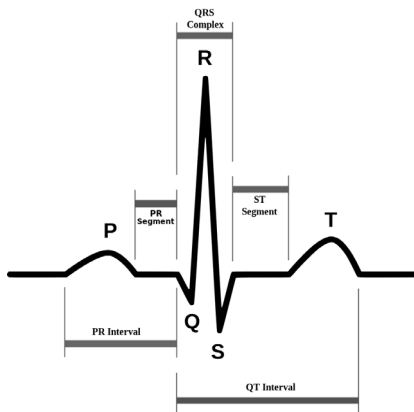


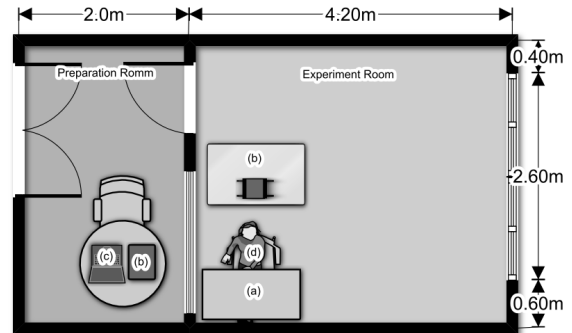
Figure 55. Typical ECG Wave

본 연구에서는 환경의 변화와 작업의 종류에 따라 측정된 심전도의 R-R 간격의 변화를 분석하여 자율신경계를 구성하는 교감/부교감 신경계의 활성양상을 파악하고자 한다. 이러한 교감/부교감 활성도는 신체의 스트레스 상태를 잘 반영하는 민감한 변수 중의 하나로 알려져 있다(Yun et al., 2010).

3. 연구 방법

3.1. 실험 조건

본 연구의 실험은 공주대학교 내에 위치한 냉난방이 가능한 에너지 환경 실험실에서 이루어졌다. 실험을 위한 공간은 6.2m × 3.6m × 2.5m(W×D×H)의 크기이며, 태양광원의 유입은 모든 창에 암막을 설치하여 차단하였다. 온열환경을 구성하기 위해 보일러 및 에어컨을 통해 변화를 주었으며, 가습기를 설치하여 정해진 습도를 유지하였다. 실험공간에 대한 구조는 그림 2에 나타나 있으며, 준비실과 실험실에 대한 환경 조건은 표 2와 같다.



(a) lighting (b),(c) bio-signal measurement device
(d) subject

Figure 56. Floor Plan of the Experiment Room

Table 2. Environment Condition of Experiment Space

Room	PMV Value	Temperature (°C)	Humidity (%)	Clothing
Preparation Room	0.5	22	50 ± 10	1 ± 0.2
Experiment Room	-0.6	17		
	0.0	21		
	0.8	25		
	1.5	29		

준비실은 피험자가 실험실로 이동하기 전에 환경을 적응하기 위한 곳으로 PMV 지표 값 0 인 상태로 환경을 구성하였으며, 뇌파측정을 위한 실험데이터 수집 공간으로도 활용되었다. 실험실은 피험자가 국부 조명에만 영향을 받을 수 있도록 창가와 멀리 위치한 곳에서 실험을 진행하였고, 뇌파측정의 정확성을 높이기 위해 뇌파측정과 관련된 장비들 및 실험진행자는 준비실에서 데이터를 수집하였다. 온열환경은 17℃부터 4℃씩 변화를 주어 최대 29℃까지 총 4단계의 온열 변화를 주었고, 상대 습도는 50±10 %를 유지하였으며, 착의량은 예상온열감에서 정의된 값을 통해 1±0.2 값을 유지하였다. 실내의 온습도 측정은 KEM사의 AM-101 장치를 이용해 실내의 중심부 1.2 높이에서 측정하였다.

실험에 사용된 조명은 LED광원을 이용한 (주)프리즘사의 LED스탠드 engoth-8100 모델을 사용하였다. 지면으로부터 42cm 높이에서 조사되는 조도는 100 lx-1100 lx이며, 색온도는 5000K로 고정된 제품이다. 본 연구의 실험에서 LED광원을 통해 조사되는 조도

는 400 lx, 700 lx, 1000 lx의 세 가지 밝기만을 사용하였다. LED조명의 색온도 및 조도를 측정은 KM 사의 CL-200A를 이용하여 책상지면에서 측정하였다.

실험에 참여하는 피험자는 공주대학교 홈페이지의 게시판을 이용해 공고하였으며 신체적, 정신적으로 건강한 대학교 재학생 남자 9명(나이 23.22±0.97), 여자 9명(나이 21.89±0.93)을 선정하였다. 이들은 뇌 이상, 간질, 알코올 중독 등의 신경정신계 질환 병력이 없었으며, 시력(교정시력 포함)은 모두 정상이었다. 또한 사전에 실험에 대한 모든 교육을 실시하였으며, 실험 하루 전에는 알코올, 카페인 음료 등 인지 기능에 영향을 주는 음식은 피하도록 하였다.

3.2. 실험 도구

3.2.1. 조명에 대한 감성 설문지

본 연구에서는 실내 환경의 변화에 따른 조명감성 측정을 위해 피시험자가 실험공간에 착석 후 LED스탠드의 조도를 400 lx, 700 lx, 1000 lx의 3가지 밝기 중 무작위로 제시하고 그림 3과 같은 설문지(Jee et al., 2011)를 통해서 조명에 대한 주관적인 느낌을 체크하도록 하였다.

※ 밝기가 다른 4가지 각각의 조명과 비교하여 현재 설치된 LED 조명의 밝기에서 작업을 진행한 후 느낌을 묻는 문제입니다. 해당되는 곳에 V 하세요.

		5	4	3	2	1	
		매우	약간	중간	약간	매우	
1	느낌이 좋다.						느낌이 나쁘다.
2	정감 있다.						정감 없다.
3	안정감 있다.						안정감 없다.
4	눈이 편안하다.						눈이 불편하다.
5	긴장감 해소된다.						긴장감 생긴다.
6	공부할 기분이 든다.						공부할 기분이 안 든다.
7	의욕이 생긴다.						의욕이 안 생긴다.
8	명상이 잘된다.						명상이 안 된다.
9	피로감 적다.						피로감 많다.
10	집중이 잘된다.						집중이 잘 안된다.

Figure 3. Lighting-Sensibility Questionnaire

3.2.2. 작업에 대한 평가 도구

본 연구에서는 다양한 업무의 형태를 표현하기 위해 3가지 오류검색수정 평가도구를 사용하였다. 오류검색수정 평가도구는 한국표준과학연구원에서 개발한 'data 오류검색수정 task'를 이용하여 학생들의 수준에 맞도록 수정하였다. 모두 3종류의 오류검색수정

평가도구를 개발하였다.

- (1) 숫자오류검색 : 숫자를 비교 검색하여 찾는 방법으로 A4용지에 좌우 2단으로 구성하였으며, 각각 10칸, 30열로 3자리 숫자로 구성하였다. 틀린 숫자의 수는 무작위로 40개 제시하였다.
- (2) 문자오류검색 : 문자를 비교 검색하여 찾는 방법으로 A4용지에 좌우 2단으로 구성하였으며, 각각 20칸, 25열로 구성하였다. 틀린 글자의 수는 무작위로 40개 제시하였다.
- (3) 연산오류검색 : 사칙연산의 내용을 검토하여 오류 내용을 찾아내는 방법으로 A4용지에 4행 40단으로 1자리 숫자의 연산으로 구성하였다. 틀린 연산의 수는 무작위로 40개 제시하였다.

3.2.3. 생체신호계측 시스템

본 연구에서는 재실자의 생체신호인 뇌파와 심전도를 측정하기 위해서는 그림 4와 같이 (주)LAXTHA사의 PolyG-I 장비와 TeleScan 3.09 프로그램을 이용하여 측정하였다. 또한 피험자의 뇌파 및 심전도 데이터 수집에 미치는 외부영향을 최소화하기 위해 실험공간과 측정을 위한 공간을 나누어 실험을 진행하였다.



Figure 58. PolyG-I System

뇌파 측정은 그림 5와 같이 국제 10/20전극 배치법(Jasper, 1958)에 따라 전전두엽인 F_{p1}, F_{p2}에 전극을 부착하고 A2의 귀밑을 기준으로 한 단극유도법을 통해 측정하였다. 본 실험에서는 피험자가 오류검색수정 작업을 진행시 양팔의 움직임으로 인한 잡파(Artifacts)를 최소화하기 위해 피험자에게 최대한의 행동영역범위와 움직임에 대한 주의를 주었고 또한 뇌파분석 시 이와 같은 행동에 대한 움직임은 보통 뇌파의 1~2 Hz 대역에 반영될 수 있어 4 Hz 이하의 뇌파대역은

사용하지 않았습니다.

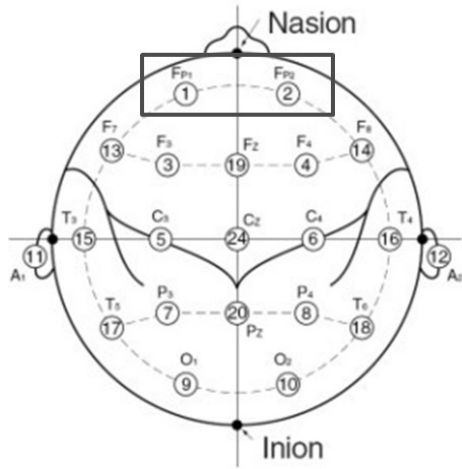


Figure 59. International 10/20 Electrode Batch Method and Electrode Position

본 실험을 통해 측정된 뇌파 데이터는 전체 영역에 대한 해당영역의 진동성분이 출현한 상대적인 비율을 나타내는 값을 상대파워(Relative Power) 분석법(1)을 통해 결과를 분석하였다.

$$\text{상대파워} = \frac{x_{power}}{\theta_{power} + \alpha_{power} + \beta_{power} + \gamma_{power}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{power} &= \theta, \alpha, \beta, \gamma, smr \text{ 파}(4-50Hz) \\ \theta_{power} &= \theta \text{ 파}(4-8Hz) & \alpha_{power} &= \alpha \text{ 파}(8-13Hz) \\ \beta_{power} &= \beta \text{ 파}(13-30Hz) & \gamma_{power} &= \gamma \text{ 파}(30-50Hz) \end{aligned}$$

심전도 측정은 그림 6과 같이 양쪽 쇄골 끝의 밑에 부착하였고, 접지전극은 왼쪽 귀 밑에 부착하였다. 사용된 전극은 뇌파 측정 시 사용된 동일한 모델의 스텝전극과 3M 사의 Ag-Agcl 전극을 이용해 측정하였다.

본 실험을 통해 측정된 심전도 데이터는 RRV(RR Interval Variability) 파형을 추출한 후 FFT(Fast Fourier Transform)으로 파워스펙트럼 화하여 Norm LF(1), Norm HF(2) 등의 변수를 분석하였다.

$$\text{Norm LF} = \frac{LF}{LF+HF} \quad (1)$$

$$\text{Norm HF} = \frac{HF}{LF+HF} \quad (2)$$

LF(Low Frequency, 0.04-0.15Hz) : 교감신경
HF(High Frequency, 0.15-0.4Hz) : 부교감신경

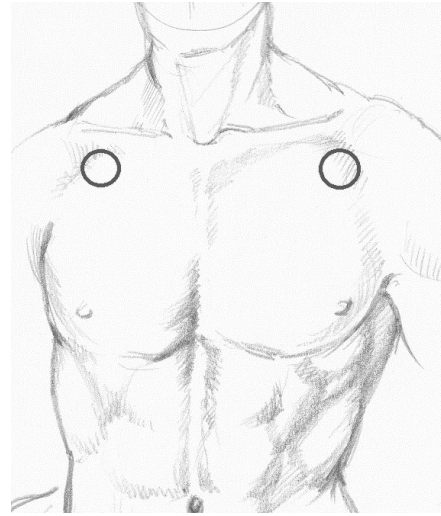


Figure 60. ECG Electrode Position

3.3. 실험 방법

이번 실험에서는 일차단위 인자가 하나인 단일분할법(split-plot design)으로 실험을 실시하였다. 그 절차는 아래의 그림 7과 같다. 이 실험에서는 4개의 PMV 조건 중에서 하나를 임의로 선택한 후에, 3개의 LED 조건을 바꾸어 조명감성 설문지 작성 후 오류검색수정 작업을 시켜 그에 따른 뇌파와 심전도를 측정하였다. 이때 LED 조건의 순서는 무작위로 선택된다. 여기서 PMV 조건은 $PMV=-0.6 \pm 0.1$, $PMV=0.0 \pm 0.1$, $PMV=0.8 \pm 0.1$, $PMV=1.5 \pm 0.1$ (온도 $17 \pm 1 \sim 29 \pm 1$ °C, 습도 50 ± 10 %)이며, LED 조건은 각각 400 lx, 700 lx, 1000 lx이다.

한 피험자에 대하여 모든 처리조합에서 실험이 끝나면 다른 피험자에 대하여 실험을 실시하였다.

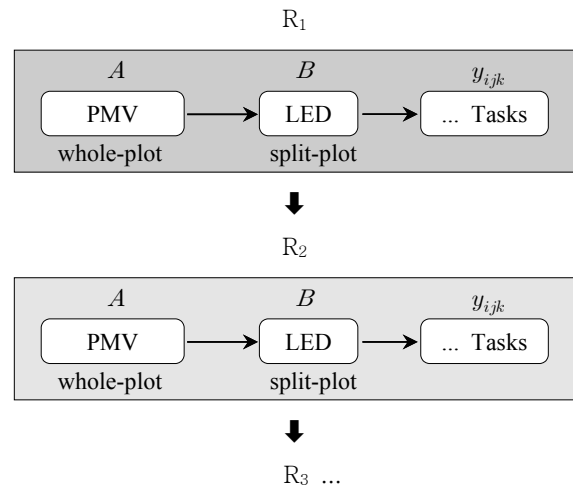


Figure 7. Experimental Procedure of Split-plot Design

이와 같은 단일분할법에서 A 와 피험자 R 을 1차 단위 인자, B 는 2차 단위 인자가 된다. 이에 대한 구조식은 다음 식(1)과 같다.

$$y_{ijk} = \underbrace{\mu + r_k + a_i + e_{(1)ik}}_{1차단위} + \underbrace{b_j + (ab)_{ij} + e_{(2)ijk}}_{2차단위} \quad (1)$$

오류검색수정을 통한 구체적인 실험절차는 실내환경 적응 및 전극부착(10분)→빛 순응 및 조명감성평가지 작성(5분)→오류검색수정 작업 및 생체신호 측정(20분)→암 순응(5분)→빛 순응 및 조명감성평가지 작성(5분)→오류검색수정 작업 및 생체신호 측정(20분)→암 순응(5분)→빛 순응 및 조명감성평가지 작성(5분)→오류검색수정 작업 및 생체신호 측정(20분)→전극제거 및 정리(5분) 순으로 피험자 1명을 기준으로 평균 1시간 40분 정도였다.

4. 연구 결과

본 실험의 PMV 기반 온열환경과 조명환경은 극한의 환경을 제외하고 일상생활 환경에서 크게 벗어나지 않도록 실험 환경을 구성하였으며, 유의 수준($p < 0.2$)으로 책정하여 결과를 분석 및 도출하였다.

4.1. 뇌파 분석

PMV 기반 온열환경과 조명환경의 변화에 대한 뇌파는 3가지 작업(숫자오류검색, 문자오류검색, 연산오류검색)을 구간으로 나누어 각각 측정하였다. 측정된 데이터는 상대 SMR 분석을 통해 피험자의 각성상태 및 이완 정도를 통해 집중력과 관련된 데이터를 추출하였고 추출된 데이터는 단일분할법에 의한 분산분석 실시하였다.

- (1) 숫자오류검색 : F_{p1} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.093$)가 있는 것으로 나타났다. 또한, LED 간에도 유의적인 차이($p < 0.093$)가 있었다. 그러나 PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.444$).

Table 3. Result of ANOVA on Number Error correction Task of EEG(F_{p1})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.0290	17	0.0017	17.99	0.000
PMV	0.0007	3	0.0002	2.62	0.061
Error($e_{(1)}$)	0.0048	51	0.0001	3.69	0.000
LED	0.0001	2	0.0001	2.41	0.093
PMV*LED	0.0001	6	0.0000	0.98	0.444
Error($e_{(2)}$)	0.0034	136	0.0000		
Total	0.0381	215			

F_{p2} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.115$)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이($p < 0.683$)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.862$).

Table 4. Result of ANOVA on Number Error correction Task of EEG(F_{p2})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.0328	17	0.0020	19.23	0.000
PMV	0.0006	3	0.0002	2.08	0.115
Error($e_{(1)}$)	0.0051	51	0.0001	3.53	0.000
LED	0.0000	2	0.0001	0.38	0.683
PMV*LED	0.0001	6	0.0000	0.42	0.862
Error($e_{(2)}$)	0.0039	136	0.0000		
Total	0.0425	215			

- (2) 문자오류검색 : F_{p1} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.083$)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이($p < 0.982$)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.846$).

Table 5. Result of ANOVA on Letter Error correction Task of EEG(F_{p1})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.030	17	0.0017	18.53	0.000
PMV	0.0007	3	0.0002	2.35	0.083
Error($e_{(1)}$)	0.0048	51	0.0001	5.14	0.000
LED	0.0000	2	0.0000	0.02	0.982
PMV*LED	0.0000	6	0.0000	0.45	0.846
Error($e_{(2)}$)	0.0025	136	0.0000		
Total	0.0380	215			

F_{p2} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.115$)가 있는 것으로 나타났다. 또한, LED 간에도 유의적인 차이($p < 0.112$)가 있었다. 그러나 PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.495$).

Table 6. Result of ANOVA on Letter Error correction Task of EEG(F_{p2})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.0379	17	0.0022	24.65	0.000
PMV	0.0006	3	0.0002	2.07	0.115
Error($e_{(1)}$)	0.0046	51	0.0001	4.58	0.000
LED	0.0001	2	0.0000	2.23	0.112
PMV*LED	0.0001	6	0.0000	0.90	0.495
Error($e_{(2)}$)	0.0027	136	0.0000		
Total	0.0460	215			

(3) 연산오류검색 : F_{p1} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.018$)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이($p < 0.882$)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.664$).

Table 7. Result of ANOVA on Arithmetic Error correction Task of EEG(F_{p1})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.0358	17	0.0021	13.39	0.000
PMV	0.0017	3	0.0006	3.65	0.018
Error($e_{(1)}$)	0.0080	51	0.0002	5.01	0.000
LED	0.0000	2	0.0000	0.13	0.882
PMV*LED	0.0001	6	0.0000	0.68	0.664
Error($e_{(2)}$)	0.0043	136	0.0000		
Total	0.0499	215			

F_{p2} (상대 SMR)의 분산분석결과 피험자간의 유의적인 평균차이($p < 0.000$)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이($p < 0.123$)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이($p < 0.403$)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다($p < 0.328$).

Table 8. Result of ANOVA on Arithmetic Error correction Task of EEG(F_{p2})

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	0.0339	17	0.0020	18.73	0.000
PMV	0.0006	3	0.0002	2.02	0.123
Error($e_{(1)}$)	0.0054	51	0.0001	3.74	0.000
LED	0.0001	2	0.0000	0.91	0.403
PMV*LED	0.0002	6	0.0000	1.17	0.328
Error($e_{(2)}$)	0.0039	136	0.0000		
Total	0.0441	215			

상대 SMR 분석법을 통해 뇌파(F_{p1} , F_{p2})를 각각 분석한 결과 온열환경의 경우 모든 조건에서 유의적인 차이를 보였으며, 조명환경의 경우 F_{p1} 에서 숫자오류 검색 작업, F_{p2} 에서 문자오류 검색 작업만 유의적인 차이를 보였다. 또한 온열환경과 조명환경의 교호작용은 모든 조건에서 유의적인 차이를 보이지 않았다.

다음 그림은 상대 SMR 분석법을 통해 수집된 뇌파 데이터를 분석한 평균 결과를 그래프로 나타낸 것으로 그림 8에는 F_{p1} , 그림 9에는 F_{p2} 에 대한 결과를 각각 나타내었다.

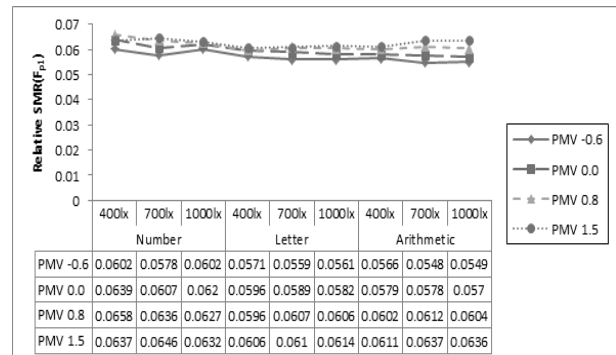


Figure 8. Result of Average on EEG(F_{p1})

뇌파(F_{p1})의 각성 및 집중력에 대한 분석결과에서 숫자오류검색작업은 PMV 0.8, 700 lx에서 문자오류 검색작업은 PMV 1.5, 1000 lx에서 적합하였으며 연산오류 검색작업은 PMV 1.5, 700 lx에서 적합한 것으로 나타났다.

뇌파(F_{p2})의 각성 및 집중력에 대한 분석결과에서 숫자오류검색작업은 PMV 0.8, 400 lx에서 문자오류 검색작업은 PMV 0.8, 700 lx에서 적합하였으며 연산오류 검색작업은 PMV 1.5, 700 lx에서 적합한 것으로 나

타났다. 본 실험을 통해 분석한 뇌파(F_{p1} , F_{p2})의 주파수영역은 주의집중력과 관련이 깊은 영역대로서 업무 환경과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

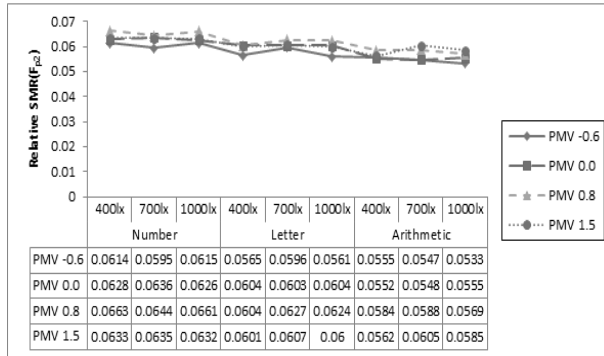


Figure 9. Result of Average on EEG(F_{p2})

4.2. 심전도 분석

PMV 기반 온열환경과 조명환경의 변화에 대한 심전도는 3가지 작업(숫자오류검색, 문자오류검색, 연산오류검색)을 구간으로 나누어 각각 측정하였다. 하지만 데이터 측정과정에서 잡파가 심한 3명을 제외한 15명의 데이터를 분석하였다. 측정된 데이터는 Norm LF, Norm HF 분석을 통해 피험자의 긴장상태 및 각성과 이완에 관련된 데이터를 추출하였고 추출된 데이터는 단일분할법에 의한 분산분석 실시하였다.

- (1) 숫자오류검색 : Norm LF, Norm HF의 분산분석 결과 피험자간의 유의적인 평균차이(p 값=0.000)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이(p 값=0.003)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이(p 값=0.854)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다(p 값=0.809).

Table 9. Result of ANOVA on Number Error correction Task of ECG(Norm LF, Norm HF)

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	4.2316	14	0.3022	9.82	0.000
PMV	0.5087	3	0.1695	5.51	0.003
Error($e_{(1)}$)	1.2933	42	0.0307	3.79	0.000
LED	0.0025	2	0.0012	0.16	0.854
PMV*LED	0.0242	6	0.004	0.50	0.809
Error($e_{(2)}$)	0.9102	112	0.0081		
Total	6.9705	179			

- (2) 문자오류검색 : Norm LF, Norm HF의 분산분석 결과 피험자간의 유의적인 평균차이(p 값=0.000)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이(p 값=0.041)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이(p 값=0.352)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다(p 값=0.944).

Table 10. Result of ANOVA on Letter Error correction Task of ECG(Norm LF, Norm HF)

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	3.0144	14	0.2153	11.51	0.000
PMV	0.1682	3	0.0561	3.00	0.041
Error($e_{(1)}$)	0.7853	42	0.0187	0.35	0.110
LED	0.0292	2	0.0146	1.05	0.352
PMV*LED	0.0235	6	0.0039	0.28	0.944
Error($e_{(2)}$)	1.5533	112	0.0138		
Total	5.5739	179			

- (3) 연산오류검색 : Norm LF, Norm HF의 분산분석 결과 피험자간의 유의적인 평균차이(p 값=0.000)가 있었으며, PMV 간에도 유의적인 차이(p 값=0.172)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 LED 간에는 유의적인 차이(p 값=0.408)가 없었으며, PMV와 LED의 교호작용에도 유의적인 차이가 나타나지 않았다(p 값=0.943).

Table 11. Result of ANOVA on Arithmetic Error correction Task of ECG(Norm LF, Norm HF)

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	2.6916	14	0.19226	9.00	0.000
PMV	0.1120	3	0.03734	1.75	0.172
Error($e_{(1)}$)	0.8975	42	0.0213	1.68	0.017
LED	0.0230	2	0.0115	0.90	0.408
PMV*LED	0.0217	6	0.0036	0.28	0.943
Error($e_{(2)}$)	1.4258	112	0.0127		
Total	5.1716	179			

Norm LF과 Norm HF 분석법을 통해 심전도를 분석한 결과 온열환경의 경우 모든 조건에서 유의적인 차이를 보였으며, 조명환경 및 온열환경과 조명환경의 교호작용은 모든 조건에서 유의적인 차이를 보이지 않았다.

그림 10은 Norm LF 분석법을 통해 심전도를 분석한 평균 결과를 그래프로 나타낸 것 이며, 그림 11은 Norm LF분석법을 통해 심전도를 분석한 평균 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

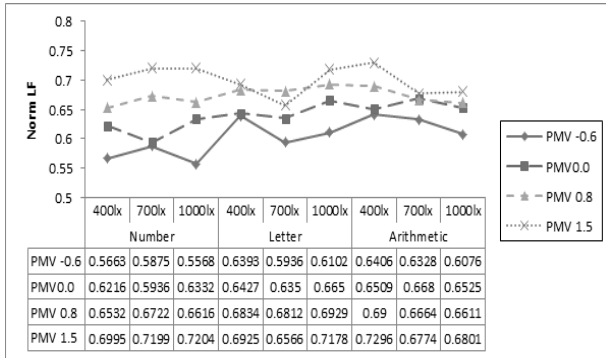


Figure 10. Result of Average on ECG(Norm LF)

심전도(Norm LF)의 각성 및 긴장상태에 대한 분석 결과에서 숫자오류검색작업은 PMV 1.5, 1000 lx에서 문자오류검색작업은 PMV 1.5, 1000 lx에서 적합하였으며 연산오류검색작업은 PMV 1.5, 400 lx에서 적합한 것으로 나타났다.

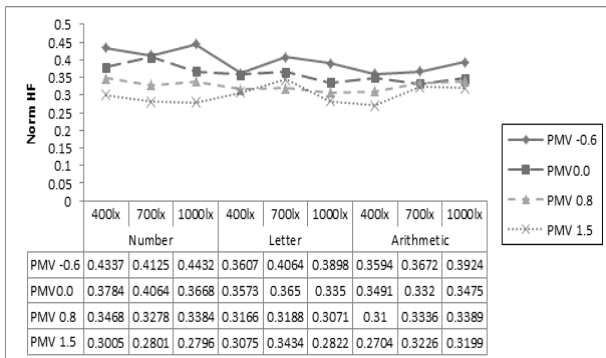


Figure 11. Result of Average on ECG(Norm HF)

심전도(Norm HF)의 이완에 대한 분석결과에서 숫자오류검색작업은 PMV 1.5, 1000 lx에서 문자오류검색작업은 PMV 1.5, 1000 lx에서 적합하였으며 연산오류검색작업은 PMV 1.5, 400 lx에서 적합한 것으로 나타났다. 본 실험을 통해서 분석한 심전도 데이터를 기반으로 업무환경에 영향을 주는 스트레스에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4.3. 조명감성 분석

PMV 기반 온열환경과 조명환경의 변화에 대한 조명감성평가의 분산분석표 결과는 표 12와 같다. 분산 분석결과를 살펴보면 피험자 간에 유의적인 평균차이(p값=0.000)가 있었으며, LED 간에도 유의적인 차이(p값=0.000)가 있는 것으로 나타났다. 그러나 PMV 간에는 유의적인 평균차이는 나타나지 않았다(p값=0.727). 또한 PMV와 LED의 교호작용도 존재하지 않는 것으로 나타났다(p값=0.299).

Table 12. Result of ANOVA on Lighting Sensibility

Source	SS	DF	MS	F	P
Subject	1584.37	17	93.20	3.41	0.000
PMV	35.94	3	11.98	0.44	0.727
Error(e ₍₁₎)	1394.64	51	27.35	1.07	0.327
LED	451.36	2	225.68	8.83	0.000
PMV*LED	187.38	6	31.23	1.22	0.299
Error(e ₍₂₎)	3477.26	136	25.57		
Total	7130.96	215			

그림 12는 조명감성 평가 결과에 대한 평균값을 그래프로 나타낸 것이다.

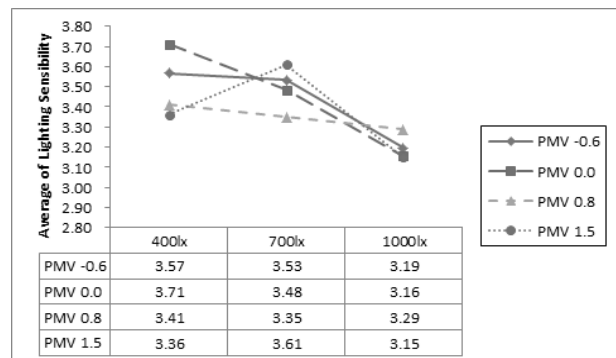


Figure 12. Average of Lighting Sensibility Questionnaire

PMV 1.5의 700 lx 경우를 제외하면 400 lx에서 1000 lx로 조명의 조도가 증가할수록 순차적으로 피험자들은 조명감성에 대한 불편함을 느끼는 것을 확인되었다. 또한, PMV 0.8의 경우에는 다른 PMV 환경에 비해 조도변화에 따른 조명감성의 편차가 적음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 PMV 지표 값에 근거한 쾌적 및 불쾌적인 온열환경과 LED광원의 밝기를 달리하여 재실자의 조명에 대한 주관적인 감성과 작업의 종류에 따라 반응하는 생체신호를 분석하여 실내 업무환경의 최적 조건을 찾고자 하였다. 이를 위해 PMV 지표 값에 따라 -0.6, 0.0, 0.8, 1.5의 4가지의 온열환경을 구성하고, LED광원의 밝기에 따라 조도를 400 lx, 700 lx, 1000 lx로 조명환경을 구성하여 총 12가지의 실내 환경을 구성하였다. 구성된 환경에서 실험 참가자들을 대상으로 조명에 대한 주관적인 설문 평가와 작업의 종류에 따른 뇌파와 심전도를 측정하고 그 데이터를 분석하였다.

작업의 종류에 대한 사람의 작업 능력을 평가하기 위해 생체신호를 측정 및 분석한 결과 모든 뇌파와 심전도 데이터는 PMV 지표 기반의 온열환경과는 유의적인 차이를 보였으며, LED광원의 밝기에 대해서는 몇몇 작업들만 유의적인 차이를 보였다. 또한, PMV와 LED 두 요소의 교호작용에는 모두 유의적인 차이를 보이지 않았다. 이러한 분산분석 결과를 토대로 작업의 종류에 대한 최적의 실내 환경 조건은 다음과 같았다.

- (1) 숫자오류검색 : 뇌파(Fp1)은 PMV 0.8, 700 lx에서 뇌파(Fp2)는 PMV 0.8, 400 lx에서 적합하였으며, 심전도는 PMV 1.5, 1000 lx에서 적합한 것으로 나타났다.
- (2) 문자오류검색 : 뇌파(Fp1)은 PMV 1.5, 1000 lx에서 뇌파(Fp2)는 PMV 0.8, 700 lx에서 적합하였으며, 심전도는 PMV 1.5, 1000 lx에서 적합한 것으로 나타났다.
- (3) 연산오류검색 : 뇌파(Fp1)은 PMV 1.5, 700 lx에서 뇌파(Fp2)는 PMV 1.5, 700 lx에서 적합하였으며, 심전도는 PMV 1.5, 400 lx에서 적합한 것으로 나타났다.

본 연구의 실험분석 결과 재실자의 업무처리에 영향을 미치는 각성 및 주의집중력은 실내온도가 비교적 높은 환경에서 활성화됨을 알 수 있었으나, 조명의 밝기는 환경에 따라 다양한 결과를 나타내고 있어 명확한 결과를 제기할 수 없었다. 이를 통해 업무에 영

향을 미치는 최적의 실내환경을 구성하는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서 조명환경이 주의집중력과는 유의적인 차이를 보이지 않았지만, 조명 특성 중에서 밝기에 해당하는 조도만을 조건으로 비교했다는 제한점이 있다. 이로 인해 조명환경이 작업에 영향을 미칠 수 있는 부분을 명확하게 제기할 수는 없다. 그렇지만 조명의 특성 중 조도는 업무에 미치는 영향이 적음을 확인하였으며, 추후 조명광원의 특성 중에서 업무에 영향을 미치는 요소를 추출하여 비교하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

- Hwang, G. Y., Shin, D. K., Shin D. I. (2012). "Design of Biofeedback Interface using Biomedical Signal Analysis", *International Journal of Information Technology & Computer Science*, 7(2), 104-113.
- Jang, S. W., Lee, H. C. (2008). "The Effect of Musical Genre on Mental Focusing", *Proceeding of the Korean Psychological Association*, 262-263.
- Jang, W. S., Kim, N. H., Kim, E. S., Jeon, D. K. (2010). "A Design of Real-Time QRS Detection in Physio-Module for Echocardiography", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, 47(3), 40-47.
- Jasper, J. J. (1958). "The ten-twenty electrode system of the international federation", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Jee, S. D., Kim. C. B. (2011). "Object Evaluation of Learning Performance according to the Color Temperature of LED Illumination", *Journal of the Korean Institute of Educational Facilities*, 18(2), 425-433.
- Lee, C. H., Kwon, J. W., Kim, K. D., Hong, J. E., Shin, D. S., Lee, D. H. (2009). "A Study on EEG based Concentration Transmission and Brain Computer Interface Application", *Korean Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 46(2), 41-46.

- Kim, B. (2013). "The characteristics of the learning performance according to the indoor temperature of the learning environment and the color of the learning materials", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(2), 681-687.
- Kim, J. H., Min, Y. K., & Kim, B. (2013). "Is the PMV index an indicator of human thermal comfort sensation?", *International Journal of Smart Home*, 7(1), 27-34.
- Kim, B., Min, Y. K., Min, B. C., & Kim, J. H. (2011). "Effects of thermal environmental factors on behavioral responses of the selective attention mechanism", *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 13(5B), 2523-2533.
- Kim, T. H., Kim, S. W., Ryu, C. H., Yun, B. J., Kim, J. H., Choi, B. J., Park, K. H. (2010). "ECG Signal Compression using Feature Points based on Curvature", *Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems*, 20(5), 624-630.
- Kim, J. S., Kim, H. K., Jeong, H., Kim, K. H., Im, S. H., Son, W. H. (2005). "Human-Computer Interface Based on Bio-Signal", *Electronics and Telecommunications Trends*, 20(4), 67-81.
- Park, S. S., Hu, H., Lee, W. S. (2010). "A Study on Physiological Signal Changes Due to Distraction in Simulated Driving", *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(1), 55-59.
- Regan, D. (1989). "Human Brain Electrophysiology: Evoked Potentials and Evoked Magnetic Fields in Science and Medicine", Elsevier, New York.
- Ryu, C. S., Song, Y. S., Kim, M. J., Shin, S. C. (2001). "Brain-Computer Interface Technology Trends", *Weekly Technology Trends, National IT Industry Promotion Agency*, 1-28.
- Shim, J. Y. (2009). "Influences of Applying Brain Education Program on Concentration and Prefrontal EEG Activation of Elementary Students", *2009 International Brain Education Association Academic Seminar*, 25-45.
- Sterman, M. B. (1977). "Sensorimotor EEG operant conditioning: Experimental and clinical effects", *Pavlovian Journal of Biological Sciences*, 12(2), 63-92.
- Yu, S. J. (2009). "The Effects of Sensory Motot Program on Change of Electroencephalogram(EEG) and Concentration of Attention for Mental Retarded Students", *Journal of Korean Society of Adapted Physical Activity and Exercise*, 17(1), 198-205.
- Yun, S. J., Pack, S. H. (2010). "The effect of yoga training on graphical presentation physical fitness and heart rate variability in middle-aged women", *Journal of the Korean Society for Aesthetics and Cosmetology*, 8(3), 125-133.

원고접수: 2014.06.19

수정접수: 2014.08.06

게재확정: 2014.09.04