

# 조명의 색온도에 따른 작업자의 피로도 평가 (1)

- 주관평가와 ECG 파라미터의 상관관계분석 -

임석기\*, 고한우\*, 양희경\*, 윤용현\*, 김묘향\*\*  
한국표준과학연구원\*, (주)테크녹스기술연구소\*\*

## Evaluation of Fatigue by Lighting color temperature (1)

-Analysis of relation between subjective rating score and ECG parameters-

Suk Ki Lim\*, Han Woo Ko\*, Heui Kyung Yang\*,  
Yong Hyeon Yun\*, Myo Hyang Kim\*\*

Korea Research Institute of Standard and Science\*, Technox R&D Center\*\*

### Abstract

본 연구에서는 2종류의 색온도(4000 K, 2700 K)조건 하에서 작업자의 피로도를 평가하기 위하여 피험자에게 검색작업을 부가하고 주관평가 및 생리신호를 측정하였다. 주관평가는 ME(Magnitude Estimation)법의 설문지를 사용했으며, 생리신호는 ECG, 맥파, 피부전도도, 피부온도, 호흡, 뇌파를 측정하여 그중 ECG신호를 분석하였다. ECG신호 파라미터로서 IBI, BPM, 평균 BPM, LF/HF, CSI, CVI, CV-RR를 분석한 결과, 특히 CSI, CVI, CV-RR가 피로도와 상관관계가 높았다.

Keywords : 색온도(Color temperature), 피로도, 주관평가, CSI, CVI, CV-RR

### 1. 서론

최근의 조명환경은 종래의 명시성(明視性)에서 공간의 용도나 제설자의 행위가 고려되어진 쾌적성(快適性)을 추구하기 위해 계획되어지고 있다. 그러나 조명환경에 대한 쾌적성 평가에 관한 연구는 그 실용적인 면이 강조된 나머지 주관평가가 중심이 된 심리적 연구가 우선되어 왔다. 주관평가의 경우 특별한 장치가 필요치 않다는 점에서 비교적 용이하게 사용할 수 있으나, 평가항목의 선정방법에 따라서 피험자의 개인적인 기호에 차우치거나 재

현성 있는 결과를 얻기 어렵다는 문제점이 지적되고 있다. 이에 대응하여 인간의 심리적인 반응을 객관적으로 평가하는 방법 중에 하나인 생리적 지표측정에 의한 방법은 인간의 심리반응을 객관적으로 측정할 수 있으며, 경시적(輕視的)인 변화도 측정할 수 있다는 장점이 있다[1][2].

본 연구에서는 인간에게 쾌적성을 보장하기 위해 체계적으로 분석, 규명되어야 할 조명광원의 특성 중, 색온도를 실험변수로 설정하여 조명의 색온도에 따른 작업자의 피로도를 평가하기 위하여 주관평가와 6종류의 생리신호를 측정하고 색온도 변화에 따른 상관관계가

높은 생리신호를 추출하고자 한다. 이를 위해 일차적으로 가장 많이 사용되는 ECG신호의 여러 가지 파라미터를 상호비교분석하여 민감도가 높은 지표를 선정하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험조건 및 절차

실험은 한국표준과학연구원내 사무환경 시험평가실(6×7 m)에서 실시하였다. 2종류의 색온도 4000 K, 2700 K의 형광램프를 설치하였으며, 피험자의 상태를 모니터링 하기 위하여 PC용 카메라와 스피커폰을 설치하였다. 조도는 사무실권장조도인 400 lx, 온·습도는 23 ±0.5 °C, 50±5 %R.H로 설정하였다.

피험자는 건강한 대학생 및 대학원생 9명(남6, 여3, 평균연령 24.8세)을 대상으로 하였으며, 작업수행시 색온도에 따른 피로도를 평가하기 위해서 주관평가를 실시하고 동시에 생리신호측정을 하였다.

실험은 표 1과 같은 절차에 의해 각 색온도 별로 실시하였다. 첫 번째 색온도의 실험이 끝난 후 1시간 이상의 휴식시간을 가졌으며, 휴식시간 중에 조명광원을 교체하고, 휴식시간이 지난 후 다른 색온도 하에서 동일한 방법으로 실험을 실시하였다.

표 1. 실험 절차

실험내용	실험설명	주관평가	전극장착	과제연습	순응및휴식	주관평가	과제수행	주관평가	휴식
NO		Q1			R1	Q2	T	Q3	R2
분	10	5	30	10	10	5	40	5	10
생리신호					O		O		O
실험장소	준비실 (기준색온도)				실험실 (설정색온도)				

### 2.2. 수행과제

작업과제는 사무환경에서 일반적인 작업형태인 데이터 검색작업으로 그림 1과 같이 A4 용지에 무작위로 제시된 1행당 15개 문자, 20

행을 비교하여 틀린 문자에 체크하는 작업이다. 틀린 문자수는 장당 5~10 %, 위치는 무작위로 배열되었으며 1set는 15장으로 구성하였다. 피험자는 제한시간 40분 동안 제시된 과제를 가능한 빠르고 정확하게 하도록 교시하였다.



그림 1. 실험에 사용된 Task

### 2.3. 주관평가 및 생리신호측정

조명광원의 색온도 조건이 작업시 피험자의 피로도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험전과 설정 색온도에서의 순응 및 휴식 후, 작업수행 후에 피험자의 정신적 피로, 시각적 피로상태를 각각 0~100사이의 크기로 표현하는 ME(Magnitude Estimation)법으로 설문지를 작성하여 평가하였다.

생리신호는 심신의 활동성과 긴장의 정도 등을 반영할 수 있는 심전도, 피부전도도, 맥파, 피부온도, 호흡, 뇌파를 측정하였다.

## 3. 생리신호분석

본 논문에서는 측정된 생리신호 중 1차적으로 ECG 관련 파라미터 중 피로도와 높은 상관관계를 보여주는 지표를 찾기 위해 순시심박간격(IBI), 순시BPM, 평균BPM, LF/HF, 심장교감지표(CSI: Cardiac Sympathetic Index), 심장미주지표(CVI: Cardiac Vagal Index), 심박변동계수(CV-RR: Coefficient of Variation)

를 분석하였다.

LF/HF는 RR interval을 spline 보간한 후 4Hz로 resample하여 저주파 선형성분을 제거한 후 차수 20인 AR모델을 적용하여 LF(0.01-0.08 Hz), MF(0.08-0.15 Hz), HF(0.15-0.5 Hz)에서 LF/HF비를 구하였다.

그림 2는 피험자의 작업수행 전 RRI 데이터를 k번째를 가로축으로, k+1번째를 세로축으로 plot한 것이다. 회귀직선에 평행한 점분포와 회귀직선에 직각인 점분포 거리의 표준편차의 4배를 각각 L과 T라 하여, 심장교감지표(CSI)와 심장미주지표(CVI)는 식(1)에 의해 구하였다[3].

$$\text{심장교감지표(CSI)} = \frac{L}{T}$$

$$\text{심장미주지표(CVI)} = \log_{10}(L \times T) \quad (1)$$

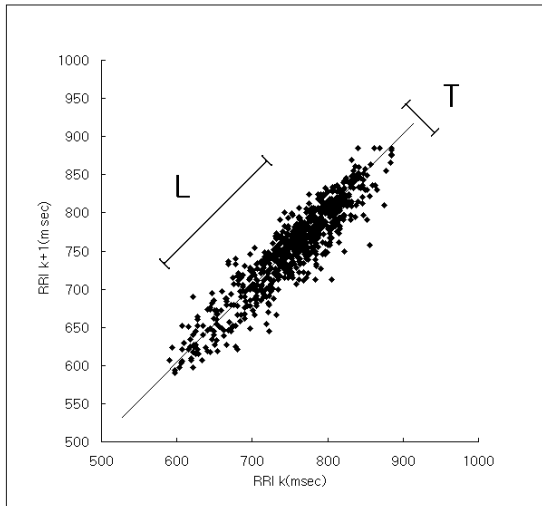


그림 2 작업수행전 RRI의 Lorenz Plot

심박변동계수 CV-RR은 심박간격의 표준편차의 평균에 대한 비율로서 식(2)과 같이 구하였다[3].

$$CV-RR(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (RR_k - \overline{RR})^2}{N}}}{\overline{RR}} \times 100 \quad (2)$$

$\overline{RR}$  : 평균심박간격 N : 전체 데이터 개수

$RR_k$  : k번째 심박간격

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 작업수행도 평가결과

그림 3은 피험자별 작업수행결과의 정답률을 나타낸다. 피험자 7명 중 2명만이 색온도 4000 K에서 작업수행도가 높았으나, 나머지 피험자들은 색온도 2700 K에서 작업수행도가 높았다.

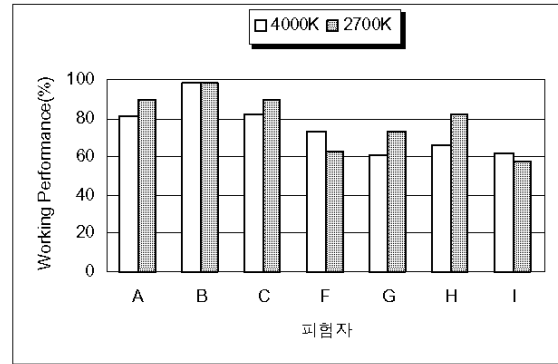


그림 3. 피험자별 작업수행결과

### 4.2. 주관평가 결과

그림 4는 작업수행 전후의 7명의 피험자에 대한 피로도를 평가하여 평균한 결과이다. 피험자 7명 모두 작업수행 후에 정신적 피로 및 시각적 피로가 증가하였다. 특히 색온도 2700 K에서 피로도의 변화가 크게 나타났으며, 정신적 피로보다는 시각적 피로가 크게 나타났다.

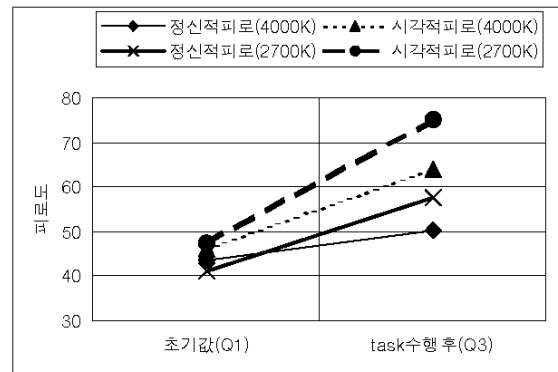


그림 4. 작업수행전후의 평균피로도 변화

### 4.3. 생리신호분석결과

측정된 생체신호 중 심전도 신호를 해석하였다. ECG 신호에서는 RR 간격을 추출한 후 7종류의 파라미터로서 휴식시와 작업수행시의 차이를 비교, 분석하였다. IBI, BPM, 평균 BPM, HF/LF를 분석해 본 결과에서는 색온도 2700 K과 4000 K에서 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 새로운 ECG신호 파라미터 CSI, CVI, CV-RR을 구하여 분석하였다.

표 2. CSI, CVI, CV-RR 계산결과

	색온도	휴식	작업수행
CSI	4000 K	4.03±0.62	3.81±0.79
	2700 K	3.94±1.28	4.05±1.47
CVI	4000 K	4.52±0.32	4.39±0.39
	2700 K	4.58±0.37	4.17±0.13
CV-RR	4000 K	8.41±2.3	7.25±2.09
	2700 K	7.18±0.52	5.76±0.64

표 2는 CSI, CVI, CV-RR(평균±S.D.)을 나타낸 것이다. CSI는 휴식시 4000 K와 2700 K에서는 거의 차이가 없지만, 작업수행시 2700 K에서는 증가하는 반면 4000 K에서는 다소 감소하였다. 그리고, CVI와 CV-RR은 휴식상태에서는 크기를 별차이가 없으나, 작업수행시 4000 K보다 2700 K에서 더 크게 감소하였다.

CSI는 교감신경활동을 반영하는 지표로서, 생체부하를 받을 때 증가하는 것으로 알려져 있다. 여기서 CSI는 주관평가 결과상에서 더 큰 정신적, 시각적 피로를 느낀 것으로 나타난 색온도 2700 K에서 더 활성화된 것을 알 수 있다. 또한 부교감신경활동을 반영하는 지표인 CVI, CV-RR에서는 2700 K보다 4000 K에서 더 큰 값을 나타내며, 2700 K에서 보다 큰 감소 경향을 나타낸 것은 안정된 상태에서 활성화되어 심상활동을 억제하는 역할을 하는 부교감신경활동이 줄어들었음을 알 수 있다. 즉, 교감신경과 부교감신경은 상호길항적 작용을 하므로, 더 큰 피로를 느낀 2700 K에서 교감신경이 활성화되며, 상대적으로 부교감신경의 활동은 억제되어 나타난 것이라 생각할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 2종류의 색온도(4000 K, 2700 K)에서의 작업자의 피로도를 평가하기 위하여 피험자에게 검색작업을 부가하고, 주관평가와 동시에 생리신호를 측정하여 피로도와 높은 상관관계를 보이는 생리신호지표를 찾기 위해 일차적으로 ECG신호 파라미터로서 IBI, BPM, 평균BPM, HF/LF, CSI, CVI, CV-RR의 7종류를 분석하였다. 그 결과, 높은 작업수행도를 나타낸 색온도 2700 K에서는 주관평가의 피로도가 크게 나타났으며, ECG 파라미터 중 CSI, CVI, CV-RR와 상관관계가 높았다.

현 단계에서는 피험자의 숫자가 적으며, 2종류의 색온도 조건에서 생리신호 중 ECG만을 분석한 상태이지만, 이후 더 많은 피험자와 3000 K, 6000 K의 색온도에 대한 실험을 통해 데이터를 받고, ECG 외의 생리신호 또한 병행하여 분석하여 피로도와 보다 높은 상관관계를 가진 지표를 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

\*본 연구는 G-7 감성공학 기반기술개발사업에 의해 지원되었음(2000-J-ES-02-A-01)

### 참고문헌

- [1] 石井 仁, 堀越哲美, “異なる作用温度, 照明レベル, 光源の組み合わせが人體の生理・反應に及ぼす複合的影響”, 日本建築學會系論文集 第517號, pp85-90 (1999)
- [2] 坂上美香, 明石行生, 梅野千繪, 八木昭宏, “作業者の集中度と照明環境との關係について- 周辺の照度/作業エリアの照度の比-, J. Illum. Eng. Inst. Jpn Vol. 81 No. 5 (1997)
- [3] M. Toichi, T. Sugiura, T. Murai & A. Sengoku, “A new method of assessing cardiac autonomic function and its comparison with spectral analysis and coefficient of variation of R-R interval”, J. of the Autonomic Nervous System 62, pp79-84 (1997)