

# 자율신경활성도의 지표로서의 동공크기 변이율 -자세변화, 졸음, 인지과제 실험으로부터

이정찬, 김지은, 박경모

경희대학교 전자정보대학 동서의료공학과

(Received November 20, 2006. Accepted December 20, 2006)

## Pupil Size Variability as an Index of Autonomic Activity - from the Experiments of Posture, Sleepiness and Cognitive Task

Jeung-Chan Lee, Ji-Eun Kim, Kyung-Mo Park

Dept. of Biomedical Engineering, KyungHee University, Korea

### Abstract

This paper sought to investigate pupil size variability, pupil size parameters in terms of time domain and frequency domain, the autonomic activity change induced by posture change, degree of sleepiness and cognitive task (math task). With a specially designed pupil image acquisition system in the dark room, these three kinds of experiments were performed to induce a dominant state of sympathetic or parasympathetic activation. Electrocardiogram and pupil size were measured in all the experiments.

Based on three experiments, we calculated heart rate variability. In the pupil size analysis, we calculated the mean and standard deviation of pupil size (in time domain), and proposed several frequency bands that exhibit different autonomic activation between different sessions. The results indicate that in terms of heart rate variability, posture change exhibited significant differences but not between sleepiness level, or between cognitive task. Pupil sizes differed only during the postures. And we found some frequency bands that correlated with autonomic activation in each experiment. While heart rate variability reflects posture change that need cardiac control, pupil size variability reflects not only posture induced autonomic activation but sleepiness and cognitive load, which is processed in the brain, in time and frequency domain parameter.

**Key words :** pupil size variability, pupil image acquisition system, autonomic nervous system.

### 1. INTRODUCTION

동공이 자율신경계의 활성화를 반영한다는 사실은 이미 널리 알려진 것이고, 일부 영역에서는 질병의 진단에서도 사용하고 있다 [1]. 동공과 관련되어 가장 널리 임상적으로 사용되는 지표는 '동공 빛 반사 (papillary light reflex; PLR)'이다. 이는 외부의 강한 빛 자극에 의한 동공의 크기변화를 바탕으로 일련의 반사 경로 (동공 - 망막 - 시신경 - 시상 - Edinger Westphal 핵 - 동공 괄약근)를 포함한 중뇌 수준에서의 질병유무를 판단하는 방법이다

[2, 3]. 하지만 연속적으로 측정을 하기 힘들며 쉽게 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 같은 맥락에서 의미있는 영상자극 (사진이나 그림)을 통해 짧은 시간 동안의 인지과제와 관련된 자율신경계의 활성도를 예측하고자 하는 시도도 진행되고 있다 [4, 5].

기존에 동공을 관찰하기 위해 사용하고 있는 시스템은 크게 두 종류가 있는데, 하나는 eye-tracking system이고 다른 하나는 pupillometer이다. 전자는 동공의 크기보다는 시선을 중요시하는 시스템으로 정확한 동공의 크기는 계산해 주지 못한다. 후자는 동공의 크기는 정확히 측정해 주지만 연속적인 측정이 불가능하고, 측정 과정에서 대상에 심리적인 영향을 줄 수 있다. 동공의 크기는 자율신경계의 활성도를 민감하게 반영하기 때문에 동공크기를 정확하게 계산해야 하고 피험자는 동공크기를 측정하는 시스템이나 측정하는 과정에서 큰 영향을 받지 않아야 한다 (측정을 인지하지 못하는 것이 가장 좋다).

본 연구는 보건복지부 한방치료기술연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임 (0405-OI00-0815-0002)

Corresponding Author : Kyung-Mo Park, O.M.D.  
Dept. of Biomedical Engineering, KyungHee University, 1  
Seochun, Kihung, Yongin, Kyungki, Korea  
Tel : +82-31-201-2979 / Fax : +82-31-202-4993  
E-mail : saenim@khu.ac.kr

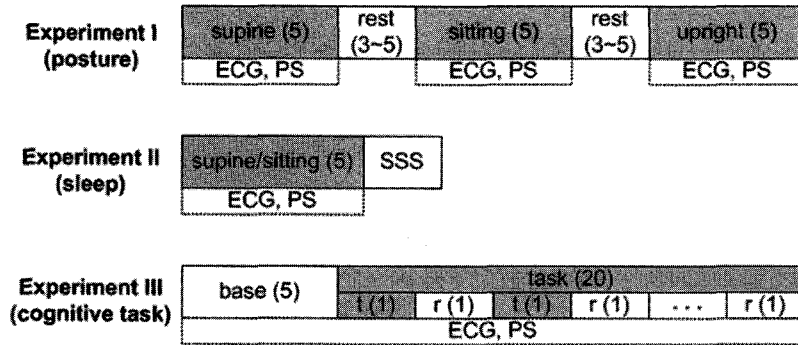


그림 1. 자세, 졸음, 인지과제 실험의 프로토콜, ( ): 측정시간(분), ECG: 심전도, PS: 동공크기, SSS: Stanford Sleepiness Scale[12], t: 인지과제 수행기간, r: 휴식기간  
**Fig. 1.** Experimental protocols of three experiments, ( ): measurement time in minute, ECG: electrocardiogram, PS: pupil size, SSS: Stanford Sleepiness Scale [12], t: task period, r: rest period.

동공의 연속적인 움직임으로부터 자율신경계의 활성도를 예측하려는 시도는 이전에도 여러 연구가 진행되었다. 예를 들어 동공이 커졌다 작아졌다를 반복하면서 점차로 그 크기가 작아지는 경우에 (졸림이나 피로에 의한 [6]) 부교감신경계가 활성화되었다고 보고하고 있고, 이런 움직임은 냉자극에 의해 유발된 진통기전에 의해 부교감신경계가 활성화된 경우에도 확인할 수 있다 [7]. 하지만 동공 빛 반사 이외의 연구들에서는 결과를 보고하는 수준의 연구는 흔히 있지만 [6, 7], 체계적인 방법으로 동공의 움직임과 관련된 지표를 찾으려는 시도는 보고된 바 없다.

따라서 본 논문에서는 연속적으로 측정이 가능한 비침습적인 시스템 [8]을 이용해서 동공의 크기와 변화양상 (주파수)을 확인하고 (동공변이율; pupil size variability, PSV), 일련의 자율신경계의 활성도변화와 관련된 실험을 분석함으로써 자율신경계의 활성도와 동공크기의 변화에 대한 체계적인 접근을 시도하고자 한다.

이러한 연구는 동공크기의 움직임특성을 확인하는 목적뿐만 아니라 간편하고 정확한 자율신경계의 활성도를 예측하는 지표로서

쉽게 사용되도록 하는데 목적이 있다.

## II. METHODS

자율신경계의 활성 정도와 동공의 크기변화 사이의 관계를 살펴 보기 위하여 자율신경계에 영향을 준다고 알려진 세 종류의 실험을 진행하였다. 자발적인 자율신경계의 활성도에 변화를 유발하기 위해 우리는 (1) 자세변화 [9, 15], (2) 졸음/피곤함 [6, 18], (3) 인지과제 [10, 11]의 실험을 수행하였으며, 그 프로토콜은 Fig. 1과 같다.

### 실험 I: 자세변화에 의한 자율신경계의 활성도 변화 유발

15명의 건강한 피험자 (남자 14명, 여자 1명, 24.5±2.4 세)를 대상으로 세 종류의 자세변화에 따른 자율신경계 활성도를 예측하는 실험을 수행했다. 이 실험은 외부의 빛에 의한 동공의 크기변화를 최소화하고자 암실에서 수행되었다 (Fig. 2, [8]). 이 곳은 내부의 환경을 일정하게 유지하고 (평균온도: of 24-25°C, 내부 조명: 0.1 lux), 외부의 영향 (소음 등)을 최소화 하고자 설계된 공간이다. 모

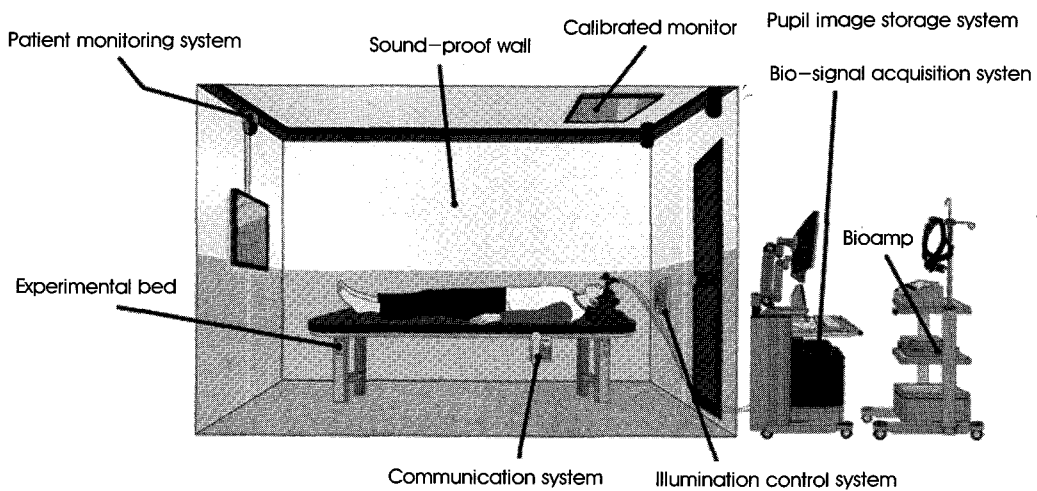


그림 2. 실험환경 (암실 및 측정 시스템, 경희대학교 APBP실험실)  
**Fig. 2.** Experimental environment (dark room and measurement system, APBP Lab. KyungHee Univ.)

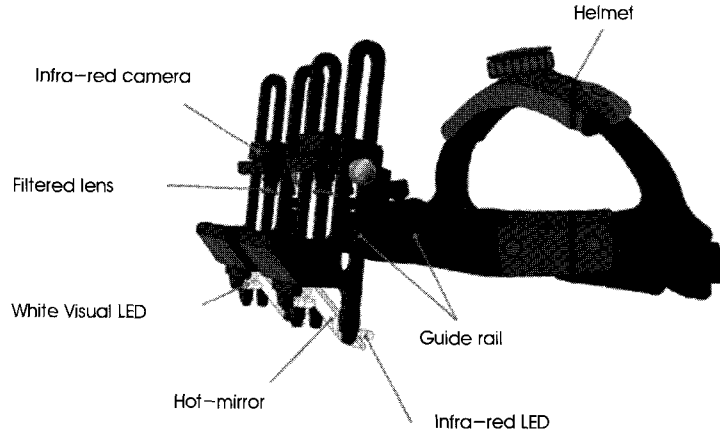


그림 3. 동공영상 획득시스템 (경희대학교 APBP실험실)  
 Fig. 3. Pupil image acquisition system (APBP Lab. KyungHee Univ.)

든 피험자는 실험자의 지시에 따라 세가지 특정한 자세를 취하게 된다. 피험자가 취하게 되는 자세는 누운 자세, 앉은 자세, 선 자세이며, 각 자세는 5분 동안 유지하도록 하였다. 세 자세는 일정한 간격을 두고 연속적으로 요구되며 전체 실험시간은 약 25분이다.

**실험 II : 졸음 정도에 따른 자율신경계의 활성화도 변화 유발**

10명의 건강한 피험자 (남자 10명, 24.3±2.0세)를 대상으로 두 종류의 자세변화(누운 자세, 앉은 자세)에 대한 2회의 반복실험을 수행하였다. 각 실험은 5분간 진행되며 하루에 한 종류의 자세를 취하도록 하였다. 실험은 암실에서 아무런 자극도 제시하지 않은 채 시선을 고정할 수 있는 'u' 모양의 target을 암실 내의 모니터 (Fig. 2)에 제시한 상태로 진행되었다. 그리고 각 실험이 끝난 후 졸음 설문지에 졸음 정도를 평가하였다 (Stanford Sleepiness Scale; SSS, [12]). 졸음의 정도는 8점 척도이며 각 점수에는 그 점수에 해당하는 예가 함께 표시되어 있다 (1점: vital and awake, 4점: foggy, 6점: sleepy, fighting sleep, 8점: asleep).

**실험 III : 인지과제에 의한 자율신경계의 활성화도 변화 유발**

9명의 건강한 피험자 (남자 5명, 여자 4명, 25.2±2.3세)를 대상으로 25분간의 인지과제 실험을 수행하였다 (Fig. 2). 실험은 초기 5분간의 인지과제를 수행하지 않는 대조구간과 이후 20분 동안 진행되는 (두 자릿수 덧셈, 뺄셈) 인지과제 수행 구간으로 구분되어 연속적으로 진행되었다. 20분간 진행되는 인지과제 수행구간은 1분간 5문제를 푸는 구간과 이후의 1분 동안 문제를 풀지 않고 다음 문제를 기다리는 구간이 반복되어 구성된다. 문제는 사전 녹음된 음성으로 프로토콜에 맞게 제시되었다. 이 경우에도 피험자의 시선고정을 돕기 위하여 'u' 모양의 target을 제시하였다.

**A. 측정 지표**

세 실험 모두 각 자극에 의해 유발된 자율신경계의 활성화도의 양상을 확인하기 위하여 두 종류의 자율신경활성도 예측 지표를 사용하였다. 하나는 기준에 널리 사용되고 있는 지표인 heart rate

variability (HRV)이고, 다른 하나는 본 논문에서 제안하고자 하는 동공크기변화 (pupil size variability; PSV)이다. 이 두 종류의 지표를 계산하기 위해 모든 실험에서 심전도와 동공의 크기를 측정하고 (Fig. 1), 분석하였다.

심전도는 ECG module (AD Instruments, Powerlab/800, Australia)을 이용하여 측정하였다. 데이터는 초당 1000개의 sample을 획득하도록 설정하였다. 5분 동안 얻어진 심전도 데이터는 컴퓨터에 저장된 후에 실험을 마치고 분석 (r-peak detection, interpolation and Fourier transform)하였다. 이때 사용한 HRV의 지표는 LF%, HF%, ratio, heart rate이다.

동공의 영상을 획득하기 위한 시스템은 본 연구실에서 제작한 것을 사용하였다 (Fig. 3). 이 시스템에 의해 획득된 동공영상은 컴퓨터에 이미지파일로 저장되며, 동공크기 추정 알고리즘을 통하여 시간정보를 포함한 동공크기 데이터로 재구성된다 [13, 14].

**B. 분석 방법**

심박변이율 (heart rate variability; HRV)의 분석은 세 종류의 실험 모두 앞에서 언급한 LF%, HF%, ratio와 heart rate를 계산하여 [15, 16] 각 실험의 자극간에 차이가 있는지 t-test를 통해 수행하였다. 실험 I의 경우, 실험에 참가한 15명 모두 세 종류의 자세에서 얻어진 심전도 데이터를 바탕으로 분석하였다. 실험 II의 경우는 SSS (Stanford Sleepiness Scale)점수를 기준으로 깨어있는 그룹 (1점)과 졸음을 호소한 그룹 (4점 이상)을 구분하여 비교하였다. 이때, 깨어있다고 응답한 경우의 데이터는 11개이고, 졸음을 호소한 경우의 데이터는 5개이다. 실험 III의 경우에 아무런 자극이 없는 base의 5분과, 인지과제를 수행하는 초기 5분의 데이터를 바탕으로 분석을 수행하였다.

동공크기의 분석은 크게 시간영역의 데이터와 주파수영역의 데이터를 나누어 자세하게 하였다. 시간영역에서는 전체 분석구간의 양상을 그래프로 파악하였고, 이때 평균 동공크기와 동공크기의 표준편차를 계산하였고 통계분석 (t-test)하였다. 평균 동공의 크기 직관적으로 가장 쉽게 자율신경계의 활성화도를 예측할 수 있는

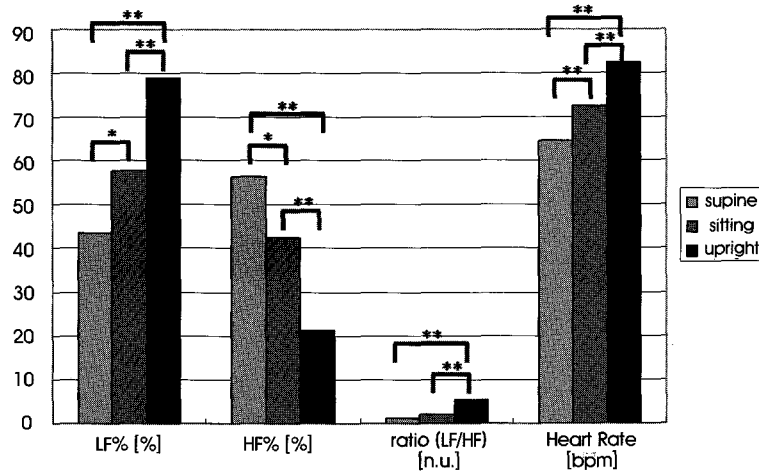


그림 4. 실험 1 (자세변화)의 심박변이율 (HRV) 결과 (\*:p<0.01, \*\*:p<0.005)  
 Fig. 4. Heart rate variability (HRV) of Experiment I (posture) (\*: p<0.01, \*\*: p<0.005)

지표이고, 동공크기의 표준편차 역시 비교적 쉽게 자율신경계의 활성도를 예측하는데 사용할 수 있다 [6]. 주파수 영역에서는 세 실험의 각 조건에 대해 동공크기를 1초 평균 데이터로 재구성하여 주파수 분석하였다. 이때 주파수 분석에 사용한 데이터는 평균값을 제거한 후 사용되었다. 그 이유는 주파수 분석의 경우, 동공크기의 절대적인 값에 다른 지표들의 값이 영향을 받기 때문이다. 그리고 각 실험에서 각각의 조건을 구분할 수 있는 영역 (band)을 제안하고, 전체 PSD의 Total power와 각 band의 PSD의 합 (energy of band)을 계산하고 통계적으로 분석하였다.

실험 I과 II에 사용한 데이터는 5분 동안의 데이터로, 심박변이율 분석에서 사용한 데이터 그룹과 동일하다. 즉 실험 I에서는 자세변화실험에 참가한 15명의 각 자세에서의 동공크기를 분석하였고, 실험 II에서는 SSS 점수를 기준으로 선택된 데이터가 분석에 사용되었다. 하지만 실험 III의 분석에서 사용한 동공의 데이터는

심박변이율에서 분석한 데이터와는 약간 다르다. 이 경우는 인지과제가 제시되기 전의 5분 동안의 기간과, 인지과제가 진행중인 20분 동안의 데이터를 재구성하여 분석하였다. 20분 동안 진행되는 인지과제수행 구간은 앞에서 언급한 바와 같이 1분 동안 문제를 푸는 시간과 1분 동안 다음 문제를 기다리거나 준비하는 시간이 반복되어 구성된다. 실험 III의 분석에서는 인지과제 기간 중 문제를 준비하는 1분의 데이터들을 모아서 인지과제가 진행되기 이전의 5분의 데이터를 1분 간격으로 재구성한 것과 비교하였다. 실제로 문제를 푸는 구간이 아니라 문제를 기다리거나 준비하는 시간을 비교 대상으로 삼은 가장 큰 이유는 실험에서 사용한 인지과제의 난이도를 정량화하지 못했기 때문이다. 하지만 문제를 푸는 구간이 아니라 하더라도, 계속 인지과제가 진행중인 상태이기 때문에 인지과제에 의해 간접적으로 자율신경계의 활성도가 변화하였다고 생각하였다.

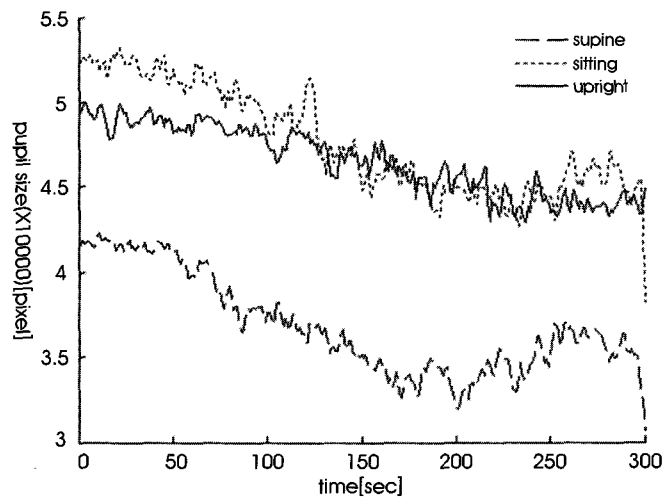


그림 5. 각 자세에서의 평균 동공크기 (grand mean)  
 Fig. 5. Grand mean pupil size of each posture during 5 minutes (the figure shows group mean profile)

표 1. 자세에 따른 동공크기의 평균, 표준편차 및 t-test 결과 (\*\*:p<0.00005, pxl: pixel)

Table 1. Mean, standard deviation and t-test p-value of pupil size (\*\*: p<0.00005, pxl: pixel)

Exp. I(posture)	mean pupil size [pxl]	std. pupil size [pxl]	t-test conditions(paired)	p value of mean size	p value of std. size
supine	36806.27	5103.47	supine Vs. sitting	0.000 **	0.876
sitting	47651.53	5018.53	supine Vs. upright	0.000 **	0.076
upright	46522.00	3831.53	sitting Vs. upright	0.494	0.159

표 2. 자세에 따른 동공크기의 주파수영역에서의 total power (T.P.)와 제안하는 주파수 영역 (A, B와 C), (\*:p<0.05)

Table 2. Total power (T.P.) and proposed frequency band (A, B and C) energy in frequency domain of pupil size (\*: p<0.05)

Exp. I (posture)	mean energy [s <sup>2</sup> /Hz]			p value of t-test		
	supine(sup.)	sitting(sit.)	upright(ubr.)	sup./sit.	sup./upr.	sit./upr.
T.P.	40309405	44648765	34199363	0.372	0.263	0.129
band A	4643401	5283901	3440992	0.386	0.137	0.061
band B	405391	375815	238744	0.068	0.016 *	0.044 *
band C	4719050	6695797	4779905	0.007 *	0.942	0.082

그리고 앞서 각 실험으로부터 제안된 band들에 자율신경계의 활성화도와 관련된 정보를 대입하여 전반적인 동공움직임 양상을 파악하고자 하였다. 즉 세 종류의 실험에서 제안된 band들이 교감신경계가 활성화되었을 때와 부교감신경계가 활성화되었을 경우로 재구성 되어 전반적인 동공의 움직임 특성을 확인하였다. 이 분석을 통해 다른 종류의 실험임에도 부교감신경계와 교감신경계의 활성화도를 반영하는 대역이 비슷한지, 아니면 실험에 사용한 자극의 종류에 따라 다른지의 경향을 확인할 수 있다.

누운 경우보다 서거나 앉은 경우가 교감신경계의 활성화도가 크며, 앉은 경우보다도 서있는 경우가 교감신경계의 활성화도가 큰 것을 확인할 수 있다. 동공의 크기에서도 위의 경향을 관찰할 수 있었다 (Fig. 5, Table 1.). 누운 자세에서의 동공크기가 앉거나 선 자세에서의 것보다 유의하게 작음을 확인할 수 있다. 즉 누운 자세가 다른 자세보다 부교감신경계를 활성화 시키고, 따라서 동공의 크기도 작아짐을 알 수 있다. 동공크기의 표준편차의 경우, 통계적인 유의성은 높지 않지만 누운 경우가 앉거나 선 경우보다 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 다시 말하면 누워있는 경우의 동공의 크기변화가 다른 자세에서보다 크다는 것을 의미하고, 이는 동공의 크기 이외에 자율신경계의 활성화도를 예측하는데 움직임의 정보를 사용할 수 있다는 방증이 될 수 있다. 동공의 경우, 부교감신경계가 활성화되면 동공이 커졌다 작아졌다를 반복하며 전체적으로 작아지는 다른 연

### III. RESULTS

#### A. 분석결과 - 실험 I

Fig. 4에서 보는 바와 같이 심박변이율의 지표가 자세변화에 의해 유발된 자율신경계의 변화를 모든 지표에서 보여주고 있다. 즉

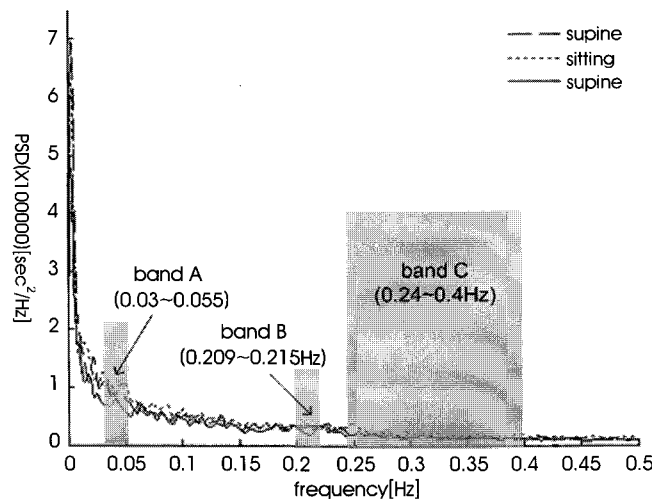


그림 6. 실험 1 (자세변화)의 동공크기의 평균 파워스펙트럼 및 제안하는 주파수 영역

Fig. 6. The grand mean of Power Spectrum Density (PSD) of pupil size (Experiment I; posture) (Each band shows proposed band for analysis)

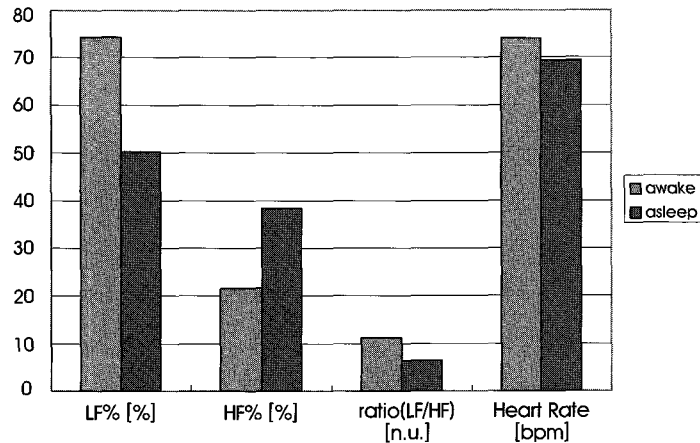


그림 7. 실험 2 (졸음)의 심박변이율 (HRV) 결과 (통계적 유의성 없음)  
 Fig. 7. Heart rate variability (HRV) of Experiment II (sleep) (no significant difference)

구들과 비슷한 결과이다 [6, 7].

앞에서 언급한 동공의 움직임 정보를 보다 자세하게 관찰하기 위하여, 각 주파수 대역에 대해 통계분석을 수행하여 비교적 세 자세에 따라 차이를 보이는 세 구간을 정의하였다 (Fig. 6). 그리고 동공크기의 주파수 영역의 지표 (total power; TP, energy of band A~C) 들을 분석한 결과 (Table 2), 몇 가지 흥미로운 점을 확인할 수 있었다. Table 1에서는 통계적으로는 유의하지 않지만 누운 자세에서의 동공크기의 표준편차가 가장 컸다. 따라서 주파수 영역에서의 total power도 누운 자세의 데이터에서 가장 큰 값을 보일 것이라 생각했지만, 의외로 앉은 자세에서의 데이터가 가장 큰 경향을 보였다 (하지만 통계적인 유의성은 없었다). 통계적으로 세 자세에 의해 유발된 자율신경계의 활성화도 차이를 보여주는 구간은 band B와 band C였다. Band B는 누운 자세와 앉은 자세에서는 크게 다르지 않지만 서있는 자세와는 의미있는 차이를

보였다 (앉거나 누운 경우 값이 증가하였다). Band C는 band B에서 구분할 수 없었던 누운 자세와 앉은 자세를 구분해 주었다. 이 대역은 앉은 자세에서 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 band A는 이러한 차이를 보이지 않았다. 따라서 제한한 band B는 부교감 신경계의 활성도를 반영하며, band C는 교감신경계의 활성도를 반영한다고 생각할 수 있다.

**B. 분석결과 - 실험 II**

졸린 정도에 따른 자율신경계의 활성화도의 차이를 심박변이율에 서는 어떤 지표에서도 확인할 수 없었다(Fig. 7). 하지만 졸린 상태가 깨어있는 상태보다 부교감신경계의 활성화도가 증가한 경향은 확인할 수 있었다. 동공의 크기나 표준편차에서도 통계적으로 유의한 차이를 확인할 수는 없었지만, 심박변이율의 결과와 마찬가지로, 졸린 상태에서 부교감 신경계가 활성화되었음을 짐작할 수 있

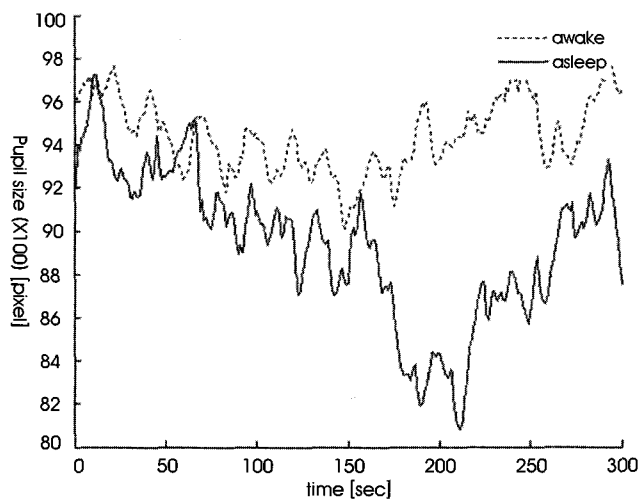


그림 8. 졸림의 정도에 따른 5분간의 평균 동공크기 (grand mean)  
 Fig. 8. Grand mean pupil size of awake and asleep cases during 5 minutes (the figure shows group mean profile)

표 3. 졸림정도에 따른 동공크기의 평균, 표준편차 및 t-test 결과 (통계적 유의성 없음, pxl: pixel)

Table 3. Mean, standard deviation and t-test p-value of pupil size (no significance, pxl: pixel)

Exp. II (sleep)	mean pupil size [pxl]	std. pupil size [pxl]	t-test conditions (unpaired, n=11, 5)	p value of mean size	p value of std. size
awake	9439.36	536.55	awake Vs. asleep	0.85	0.18
asleep	8938.20	673.00			

표 4. 졸림정도에 따른 동공크기의 주파수영역에서의 total power (T.P.)와 제안하는 주파수 영역 (D, E와 F), (\*: p<0.05)

Table 4. Total power (T.P.) and proposed frequency band (D, E and F) energy in frequency domain of pupil size. (\*: p<0.05)

Exp. II (sleep)	mean energy [s <sup>2</sup> /Hz]		p value of t-test awake Vs. asleep
	awake	asleep	
T.P.	3953504	4743863	0.22
band D	49322	77607	0.0400 *
band E	31820	75511	0.0100 *
band F	12553	18461	0.0200 *

다. 즉 깨어있을 때는 동공의 크기가 크고 시간의 흐름에 따라 크기의 변화가 졸린 경우보다 심하지 않다. 졸린 경우 부교감신경계가 활성화되는 경향은 확인할 수 있다. 동공의 경우, 졸린 상태에서의 동공의 움직임이 너무 커서 통계적인 유의성을 낮춘 것 같다.

이 실험도 마찬가지로 세 영역의 band를 찾아 (Fig. 9) 각 영역에서의 주파수 영역 지표를 계산하였다 (Table 4). Total power에서는 통계적인 유의성을 확인할 수 없었지만 (졸린 경우의 값이 깨어있는 경우보다 큰 경향을 보인다), 제안한 나머지 세 band에서는 차이를 확인할 수 있었다. 즉 0.012~0.013Hz, 0.094~0.098Hz, 0.159~0.162Hz 대역에서 깨어있는 경우와 졸린 경우의 차이를 보였으며, 주파수 영역의 신호는 세 band 모두 졸린 상태에서 큰 값을 보였다. 이 결과로부터 위의 대역은 적어도 졸린 경우의 부교감신경계의 활성도를 반영하는 영역이라고 생각할 수 있다.

C. 분석결과 - 실험 III

인지과제를 수행하기 전의 5분과 인지과제를 수행하기 시작한 초기 5분의 차이를 심박변이율에서는 확인할 수 없었다. 일반적인

로 인지과제에 의해 교감신경계가 활성화 되는 것으로 알려져 있지만 Fig 10에서는 이러한 경향을 찾아 볼 수 없었다. 통계적으로 의미있는 수준은 아니지만 심박수가 약간 증가한 것은 조금이나마 심장의 움직임과 인지과제 사이에 관련이 있음을 짐작하게 할 수는 있지만 충분한 차이를 보이지 않았다.

동공의 크기는 과제를 수행한 후 쉬는 동안과 과제를 수행하지 않았던 동안에서 의미있는 차이를 보이지 않았다 (Table 5.). 다만 과제 수행 중 쉬는 동안이 과제를 수행하지 않는 동안 보다 동공의 크기가 큰 경향은 확인할 수 있었고, 이를 바탕으로 인지과제가 교감신경계의 활성도를 증가시키며 이러한 경향이 동공에 미약하나마 드러나는 것이라고 생각할 수 있다. 여기서 흥미로운 점은 동공 크기의 표준편차에서 통계적으로 의미있는 차이를 보이는 것인데, 이전의 실험들에서 얻었던 경향과는 다른 경향을 확인할 수 있었다. 즉 앞의 실험에서는 통계적인 증거는 많지 않지만 부교감신경계가 활성화되는 경우에 동공의 움직임이 활발해서 표준편차가 큰 경향을 관찰할 수 있었다. 하지만 이 경우는 과제를 진행하고 나서 잠시 쉬는 동안의 동공크기가 과제를 수행하지 않았을 때의 것보다

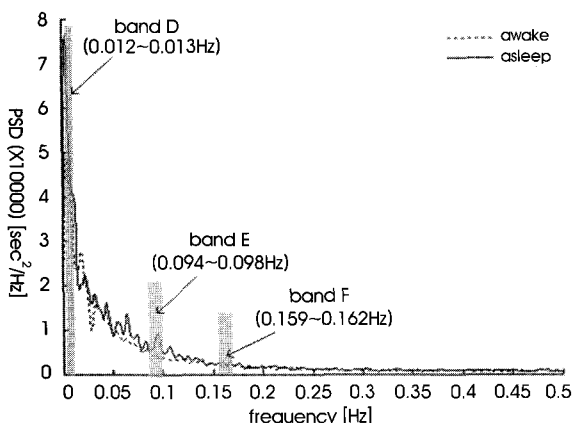


그림 9. 실험 2 (졸음)의 동공크기의 평균 파워스펙트럼 및 제안하는 주파수 영역  
Fig. 9. The grand mean of Power Spectrum Density (PSD) of pupil size (Experiment II; sleep) (Each band shows proposed band for analysis)

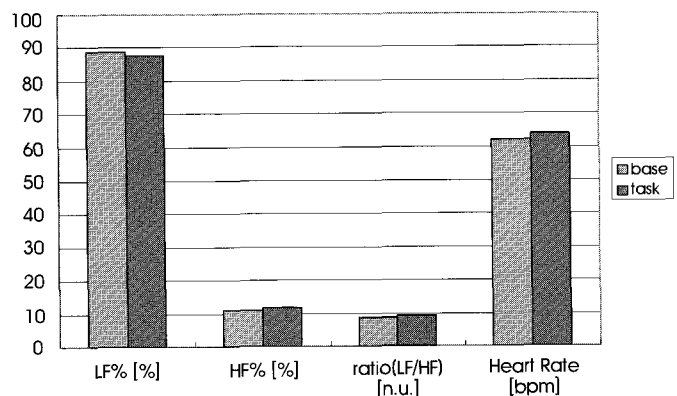


그림 10. 실험 3 (인지과제)의 심박변이율 (HRV) 결과 (통계적 유의성 없음)  
Fig. 10. Heart rate variability (HRV) of Experiment III (cognitive task) (no significant difference)

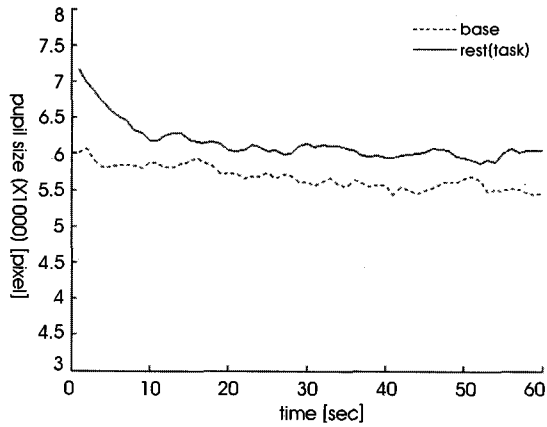


그림 11. 인지과제 유무에 따른 1분간의 평균 동공크기 (grand mean)  
**Fig. 11.** Grand mean pupil size of base and rest of task during 1 minute (the figure shows group mean profile)

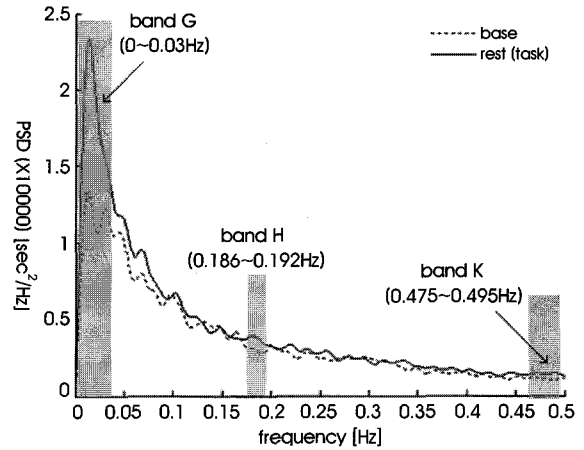


그림 12. 실험3(인지과제)의 동공크기의 평균 파워스펙트럼 및 제안하는 주파수영역  
**Fig. 12.** The grand mean of Power Spectrum Density (PSD) of pupil size (Experiment III; cognitive task) (Each band shows proposed band for analysis)

움직임이 컸다는 것이다. 가정대로 인지과제가 교감신경계의 활성을 유발하고 그 결과가 동공에도 드러난다면, 동공크기의 표준편차는 반대가 되어야 할 것으로 생각되지만 결과는 그렇지 않았다.

주파수 영역에서 동공의 움직임을 확인해보면 (Fig. 12, Table

6) 동공크기의 표준편차 (Table 5)와 같은 양상을 확인할 수 있다. 즉 과제 중의 쉬는 구간이 과제를 수행하지 않고 있는 구간보다 동공의 움직임이 활발하며 그 결과는 total power를 증가시키고, 제안한 세 band에서 모두 큰 값을 보였다. 이 결과는 인지과제에 의

표 5. 인지과제 유무에 따른 동공크기의 평균, 표준편차 및 t-test 결과 (\*: p<0.005, pxl: pixel)

Table 5. Mean, standard deviation and t-test p-value of pupil size (\*: p<0.005, pxl: pixel)

Exp. III (task)	mean pupil size [pxl]	std. pupil size [pxl]	t-test conditions (unpaired, n=45, 90)	p value of mean size	p value of std. size
base	5672.6	699.13	base Vs. rest (task)	0.23	0.001 *
rest (task)	6148.1	914.63			

표 6. 인지과제 유무에 따른 동공크기의 주파수영역에서의 total power (T.P.)와 제안하는 주파수 영역 (G, H와K). (\*: p<0.05, \*\*: p<0.01, \*\*\*: p<0.005, \*\*\*\*: p<0.0005)

Table 6. Total power (T.P.) and proposed frequency band (G, H and K) energy in frequency domain of pupil size. (\*: p<0.05, \*\*: p<0.01, \*\*\*: p<0.005, \*\*\*\*: p<0.0005)

Exp. III (task)	mean energy [s²/Hz]		p value of ttest	
	base	rest (task)	base Vs. rest (task)	
T.P.	3820368	4595794	0.009	**
band G	624593	1036138	0.0001	****
band H	34026	43984	0.027	*
band K	44263	59573	0.001	***

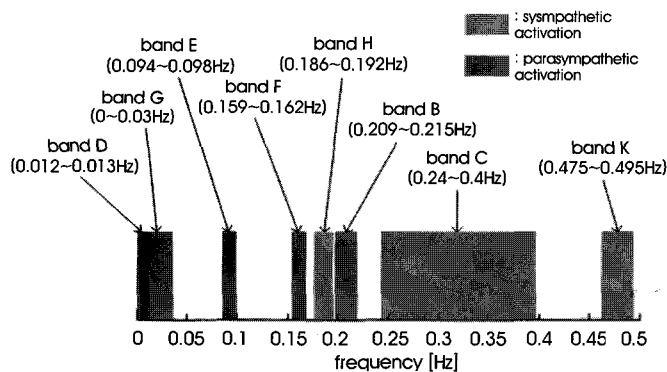


그림 13. 자율신경계의 활성에 따른 차이를 보이는 동공크기 변화의 주파수대역 분포

Fig. 13. Entire band distribution shows significant discrimination between autonomic activities (So, band A was skipped)



해 유발된 교감신경계의 활성이 동공의 크기를 약간 크게 만들고, 움직임 역시 활발하게 한다는 것을 의미한다.

앞의 세 실험으로부터 얻어진 각각의 band와 결과에 의해 해석 가능한 교감신경계와 부교감신경계의 활성양상을 정리하면 Fig. 13과 같다. 서로 상충되는 결과를 보이는 영역 (band D and band G)이 발견되지만, 공통적으로 일치하는 영역을 관찰할 수는 없었다.

#### IV. DISSCUSION

본 논문에는 자율신경계의 활성도에 영향을 준다고 알려진 자세 변화, 졸음, 인지과제의 실험을 수행하여 변화된 자율신경계의 활성양상을 동공의 크기와 움직임의 정보 (동공변이율; PSV)에서 관찰가능한지 확인하였다. 이러한 시도는 이미 동공의 크기가 자율신경계의 활성정도를 반영한다는 연구들 [4, 5, 10, 11]이 있음에도 불구하고, 동공 빛 반사 (pupillary light reflex; PLR) 이외의 연구에서 동공의 크기정보에서 지표를 선정하여 체계적으로 분석한 성과는 없었기 때문에 동공변이율과 관련된 지표를 찾는 것을 목표로 행해졌다.

심박변이율은 심장의 박동 간격 (beat-to-beat interval) 정보를 이용하여 시간 영역에서는 평균 심박수 및 박동 간격의 표준편차를 계산하고 주파수 영역에서는 0.04Hz, 0.15Hz, 0.4Hz를 기준으로 지표를 정해서 자율신경계의 활성정도를 예측하는데 널리 사용되고 있다. 본 논문의 자세변화의 실험에서는 기존의 심박변이율에서 일반적으로 보고되던 결과 [15]와 동일하게 누워있는 자세에서는 부교감신경계의 활성도가 교감신경계의 것보다 우세하고, 앉거나 서있는 경우는 교감신경계의 활성도가 우세함을 확인할 수 있었다. 하지만 심박변이율은 졸음에 의해 유발된 부교감신경계의 활성정도는 보여주지 못했다. 또한 인지과제에 의해 활성화된 교감신경계의 활성정도도 관찰할 수 없었다. 자세변화는 심혈관계의 요구에 따라 특이적으로 심장의 움직임(박동)의 양상에 변화를 가져오지만, 졸음이나 간단한 인지과제는 심혈관계와 직접적인 연관이 없기 때문일 것이다. 만약 극도로 긴장하고 있는 상태와 졸리는 상태를 비교하거나, 문제의 난이도를 어렵게 하면 심박변이율에서도 각 자극에 의한 자율신경계의 활성도의 차이를 확인할 수 있을지도 모른다. 다만 중요한 것은 일반적으로 사용하는 심박변이율이라는 지표가 심혈관계와 관련된 자극에는 민감하게 반응하겠지만, 그렇지 않은 경우에는 좋은 결과를 보이지 않을 것이라는 점이다.

동공의 크기에서는 앞의 세 실험에서 공통적으로 교감신경계가 활성화되면 동공의 크기가 커지고, 크기의 변화는 비교적 일정하게 유지되는 양상을 확인할 수 있었다. 그리고 부교감신경계가 활성화되면 동공의 크기가 작아지면서 그 크기의 변화가 큰 것도 관찰할 수 있었다. 자세변화나 졸음 정도에 따른 동공크기의 표준편차의 경우, 부교감신경계가 활성화될 때 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 받아들여지던 사실과 일치하는 결과였다. 하지만 인지과제의 경우, 교감신경계가 활성화됨에도 불구하고

고 동공크기의 표준 편차 값이 그렇지 않은 경우보다 큰 점은 흥미로운 결과이다. 그리고 동공크기의 주파수 특성으로부터 세 실험 모두 각각 교감신경계 또는 부교감신경계의 활성을 반영하는 주파수 영역을 제안하고 평가하였다. 실험 I (자세변화)에서 제안한 영역 중에서, band B(0.209-0.215Hz)는 부교감신경계의 활성도를 반영하며, band C(0.24~0.4Hz)는 교감신경계의 활성도를 반영하는 것을 관찰할 수 있었다. 교감신경계가 동공의 고주파 움직임과 관련이 있다는 것을 의미하는 것이다. 실험 II (졸음)의 경우는 제안한 세 대역에 걸리지 않은 경우와 걸린 경우의 동공의 움직임에서 차이를 확인할 수 있었다. 제안한 band D (0.012~0.013Hz), band E (0.094~0.098Hz), band F (0.159~0.162Hz)에서 모두 걸린 경우의 값이 컸으며, 이 결과는 위의 세 band가 부교감신경계의 활성정도를 반영한다는 것을 의미한다. 실험 III (인지 과제)의 실험에서는 제안한 세 영역인 band G (0~0.03Hz), band H (0.186~0.192Hz), band K (0.475~0.495Hz)에서 모두 인지과제시에 큰 값을 보였다. 따라서 이 세 대역은 교감신경계의 활성과 관련되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

세 종류의 실험에서의 일반적인 양상을 확인하기 위해 각 band에 의미를 부여한 후 (교감활성 반영, 부교감활성 반영) 분포를 도시한 결과에서는 저주파 대역 (band D; 0.012~0.013Hz)에서 상반되는 의미로 해석했던 영역이 겹치는 것을 확인할 수 있었다. 부교감신경계의 활성과 관련된 부분은 주로 0.23Hz 이하의 영역에 분포하고, 교감신경계의 활성과 관련된 부분은 주로 (상대적으로) 고주파 부분에 많이 분포했다. 이러한 전반적인 양상은 확인할 수 있었지만 공통적으로 설명 가능한, 즉 다른 실험들에서 같은 의미를 가진 서로 겹치는 영역이 존재하는 영역을 찾지는 못했다.

결과적으로 이분법적으로 교감신경계가 활성화되는가 아니면 부교감신경계가 활성화되는가를 기준으로 볼 것이 아니라, 각각의 자극자체의 속성을 파악하는 것이 중요할 것이다. 자세변화에서의 교감활성, 인지과제에서의 교감활성은 중추수준에서도 관련된 영역이 다르듯, 어쩌면 심장이나 동공으로부터의 정보도 각각의 자극이나 조건에 따라 반영하는 정도에 차이가 있을 수 있을 것이다. 따라서 포괄적인 기준의 교감신경계 활성과 부교감신경계 활성에 대한 일반적인 접근을 시도하면서도, 개별적인 자극이 가지는 특징을 파악하며 여러 방향으로 접근을 시도하는 일이 필요하다. 결과를 바탕으로 요컨대, 심장의 움직임 정보로부터 기인한 심박변이율 지표는 자세변화에서는 잘 작동하는 것처럼 보였지만, 졸림이나 인지과제의 경우에는 그렇지 못했다. 이는 자세변화에 따른 심장의 심혈관계 측면에서 유발된 움직임의 차이가 졸음과 인지과제가 있을 때의 것보다 민감하게 반영하지 못한다는 뜻이다. 자세에 따른 심혈관계의 보상작용에는 심장이 밀접하게 관련되어 있겠지만, 졸음이나 인지과제의 상황은 주로 대뇌 수준에서의 활동들을 보여주기 때문인 것 같다. 한편, 동공크기로부터의 정보는 부교감신경계와 교감신경계가 다른 방식으로 제공된다 [16]. 즉 동공괄약근은 중뇌수준의 Edinger-Westphal 핵으로부터 신경 지배를 받아 부교감신경계의 활성도를 반영하지만, 동공산대근은

시상하부의 교감중추로부터 흉추부위의 교감신경절 (sympathetic chain)에 도달한 후 다시 연결하여 교감신경계의 활성화 정도를 반영한다. 앞에서 언급한 교감신경절 (sympathetic chain)은 동공산대근 뿐만 아니라, 심장 등 다른 장기의 공통적인 교감활성 채널이다. 따라서 동공의 크기가 커지는 경우는 동공과 관련된 중추의 활성화 이외에도 동공과 직접적으로 관계는 없지만, 교감신경절을 공유해서 사용하는 다른 장기들의 반응이 간접적으로 드러난다고 볼 수 있다. 즉 졸림과 인지과제의 경우는 동공에 간접적으로 영향을 줄 수 있는 말초의 영향보다 대뇌수준의 부교감신경계와 교감신경계의 활성을 양상이 직접적으로 드러났다고 생각할 수 있다. 위의 실험에서 심박변이율에는 차이가 없는 것이 증거가 될 수 있을 것이다. 또한 자세변화의 경우, 실제로 자세변화에 의해 대뇌 수준에서 동공에 교감신경계의 활성정보를 전달하기보다는 심혈관계의 보상작용에서 기인한 (자세에 따른 혈압 상승, 심박수 증가 등) 교감신경계의 활성정보가 교감신경절을 거쳐 동공에 간접적으로 전달된 것 같다. 그렇기 때문에 이때 자세에 따른 동공의 크기의 차이를 관찰할 수 있었다.

즉 심혈관계의 반응으로부터 정보를 제공하는 심박변이율 지표는 주로 말초 (정확히 말하면 심혈관계) 수준의 차이를 주로 반영하지만, 동공의 경우는 부교감신경계와 교감신경계는 대뇌수준 (졸음, 인지과제)과 말초수준 (자세변화)의 정보를 반영한다고 생각할 수 있다. 하지만 각 자극에 따른 자율신경계의 활성 양상이 서로 다르기 때문에 동공의 크기로부터 이들을 구분해 내는 것은 비교적 쉬운 일은 아니다.

앞서 이야기 했듯이, 교감신경계 활성화와 부교감신경계 활성화에 대해 전반적으로 접근하면서도 개별적인 자극이 가지는 특징을 파악해서 각각 접근하는 일도 필요하다.

### A. 한계

실험 I의 자세변화 실험은 한 명의 피험자가 약 25분에 걸쳐 세 종류의 자세에 대해 정해진 순서에 따라 순차적으로 측정하는 방식으로 진행되었다. 그런데 이는 각 자세의 순서가 무작위화 되지 않았던 문제가 있다.

실험 II의 경우, 측정된 졸음의 정도는 5분간의 느낌을 하나의 수치로 표현한 것이어서 시간정보가 포함되어 있지 않아 문제가 되었다. 졸음 정도를 체크하는 간격을 조밀하게 하고 관찰시간을 늘릴 필요가 있다.

토론에서 언급한 바와 같이 동공의 크기는 대체로 인지과제의 난이도와 상관성이 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 실험 III에서는 난이도의 차이에 대한 동공의 움직임에 대한 체계적인 연구는 아직 진행되지 않았다. 따라서 실제로 난이도에 따른 차이가 있는지, 있다면 어떤지 분명하게 알지 못했다. 그리고 주파수 분석의 경우, 현재 1Hz로 샘플링 (1초간의 평균값을 사용)하여 분석하고 있지만 그 이상의 주파수 대역에서는 동공크기에 대한 정보가 들어 있지 않다. 그러나 1Hz 이상의 주파수 대역의 파워스펙트럼이 아주 작은 크기를 나타내기 때문에 본 논문과 같이 비교적 작은 피험자 수를 채택한 경우는 유의한 분석을 하기 어려워 제외하였다.

여러 실험에 의한 동공크기 변화뿐만 아니라 동공크기 변화 자체의 속성을 합리적으로 이야기할 수 있어야 할 것이다.

또한 동공의 영상으로부터 계산된 동공크기에 계산상의 오차정도가 반영되어 있을 수 있다. 예를 들면, 눈을 깜빡이는 순간의 동공 크기의 보간이나 동공 크기의 추산을 위한 fitting 과정에서 동공의 크기를 실제보다 더 크거나 작게 계산한 경우가 있을 수 있다. 이는 분석 알고리즘의 정확성을 높여서 해결해야 할 것이다.

그리고 심박변이율의 초기연구와 같이 교감신경이나 부교감신경을 특정한 수준에서 차단한 후의 동공의 반응을 살피는 등의 보다 적극적인 시험이 필요할 수도 있다. 이런 방법을 통해 교감신경계나 부교감신경계 중 어느 하나가 우세한 경우와 서로 경쟁하는 경우 등에서의 동공의 반응양상을 확인하고, 동공변이율 지표를 보다 더 체계화하는데 사용할 수 있을 것이다.

## V. CONCLUSION

본 논문에서 우리는 자율신경계의 활성화도에 영향을 미치는 것으로 알려진 세 종류의 실험 (자세변화, 졸음, 인지과제)으로부터 동공변이율 지표를 제안하고자 하였으며, 이미 알려진 지표인 심박변이율을 참고하였다.

- 1) 심박변이율은 자세변화에 의한 자율신경계의 활성화도의 차이를 유의한 수준에서 ( $p < 0.01$ ) 반영하였다. 하지만 졸음과 인지과제의 경우는 차이를 관찰하지 못했다.
- 2) 동공의 크기는 세 실험 모두 교감신경계가 활성화됨에 따라 동공이 커지는 경향을 보였다. 자세변화와 졸음실험의 결과, 동공크기의 표준편차에서는 부교감신경계의 활성화도가 증가하는 경우 큰 값을 보였다. 하지만 인지과제의 경우는 예상과 달리 교감신경계의 활성화도가 증가하는 경우에 큰 값을 보였다.
- 3) 동공크기의 움직임으로부터 각 실험에서 차이를 기술할 수 있는 주파수 대역을 제안하였고, 해당 대역에 대한 의미 (교감활성 혹은 부교감활성)를 부여하였다. 각각의 실험에서의 의미있는 대역을 확인할 수 있었지만 세 실험에서 공통된 부분은 찾을 수 없었다.
- 4) 심박변이율은 말초수준의 심혈관계의 활성화 (자세변화)과 깊이 관련되어있고, 동공크기로부터의 정보는 대뇌수준 (졸음, 인지과제)과 말초수준 (자세변화)을 동시에 반영하는 지표인 것으로 보인다.

결론적으로 동공크기의 평균과 표준편차 정보에서는 비교적 일관성 있는 (자세변화, 졸음 실험) 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 이보다 복잡한 동공의 움직임과 관련된 주파수 영역의 정보에서는 공통된 영역을 분명히 보여주지는 못했다. 실제로 동공이 자극의 종류와 관계없이 비슷한 양상으로 동작하는지, 자극에 따라 약간씩 다른 방식으로 동작하는지에 대한 연구가 필요할 것이다.

## REFERENCES

- [1] H. Wilhelm, "Neuro-ophthalmology of pupillary function - practical guidelines," *J Neurol.*, vol. 245, pp.573-583, 1998.
- [2] F. Fotiou, K.N. Fountoulakis, M. Tsolaki, A. Goulas, A. Palikaras, "Changes in pupil reaction to light in Alzheimer's disease patients: a preliminary report," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 37, pp.111-120, 2000.
- [3] M. Kojima, T. Shioiri, T. Hosoki, H. Kitamura, T. Bando, T. Someya, "Pupillary light reflex in panic disorder - A trial using audiovisual stimulation," *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci.*, vol. 254, pp.242-244, 2004.
- [4] G.J. Siegle, S.R. Steinhauer, M.E. Thase, "Pupillary assessment and computational modeling of the Stroop task in depression," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 52, pp.63-76, 2004.
- [5] S.P. Verney, E. Granholm, D.P. Dionisio, "Pupillary responses and processing resources on the visual backward masking task," *Psychophysiology*, vol. 38, pp.76-83, 2001.
- [6] H. Wilhelm, H. Ludtke, B. Wilhelm, "Pupillographic sleepiness testing in hypersomniacs and normals," *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol.*, vol. 236, pp.725-729, 1998.
- [7] C. Tassorelli, G. Miceli, V. Osipova, F. Rossi, G. Nappi, "Pupillary and cardiovascular responses to the cold-pressor test," *Journal of the Autonomic Nervous System*, vol. 55, pp.45-49, 1995.
- [8] J.C. Lee, J.E. Kim, K.M. Park, "Development of a pupil size Monitoring System for Autonomic Activity Estimation," *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, Seoul, Korea, Aug. 2006.
- [9] J.M. Ravits, "AAEM minimonograph #48: autonomic nervous system testing," *Muscle & Nerve*, vol. 20, no. 8, pp.919-937, 1997.
- [10] S.R. Steinhauer, R. Condray, A. Kasperek, "Cognitive modulation of midbrain function: task-induced reduction of the pupillary light reflex," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 39, pp.21-30, 2000.
- [11] E. Granholm, R.F. Asarnow, A.J. Sarkin, K.L. Dykes, "Pupillary responses index cognitive resource limitations," *Psychophysiology*, vol. 33, pp.457-461, 1996.
- [12] E. Hoddes, V. Zarcone, H. Smythe, R. Phillips, W.C. Dement, "Quantification of sleepiness: a new approach," *Psychophysiology*, vol. 10, pp.431-436, 1973.
- [13] J.E. Kim, K.M. Park, G. Khang, "A method for size estimation of amorphous pupil in 3-dimensional geometry," in *Proc. 26<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS*, San Francisco, USA, Sept. 2004, pp.1451-1454.
- [14] J.E. Kim, K.M. Park, "An image processing method for improved pupil size estimation accuracy," in *Proc. 25<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Cancun, Mexico, Sept. 2003, pp.720-723.
- [15] U.R. Acharya, N. Kannathal, M.H. Lee, L.M. Yi, "Study of heart rate variability signals at sitting and lying postures," *Journal of bodywork and Movement Therapies*, vol. 9, pp.134-141, 2005.
- [16] Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology, "Heart Rate Variability," *Eur Heart J.*, vol. 17, pp.354-381, 1997.
- [17] Guyton, Hall, *Textbook of Medical Physiology (10<sup>th</sup>)*, Pennsylvania, USA, W.B. SAUNDERS COMPANY, 2000, pp. 599.
- [18] K. Jiao, Z. Li, M. Chen, "Effect of different vibration frequencies on heart rate variability and driving fatigue in healthy drivers," *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 77, pp.205-212, 2004.