

단조 작업에 의한 정신 피로의 평가 - 생리신호를 중심으로 -

윤용현* · 고한우* · 김동윤** · 이창미*
한국표준과학연구원*, 연세대학교**

Assesment of Mental Fatigue during Monotous Task

Y.H. Yun*, H.W. Ko*, D.Y. Kim**, C.M. Yi*

Korea Research Institute of Standards and Science*, Yonsei Univ.**

요약 : 단조 작업에 의한 정신적 부하의 평가를 위하여 피험자에게 3자릿수 숫자 3개를 더하는 연산 작업을 수행하게 하였다. 작업 시간이 증가함에 따라 단조감이 증가하도록 실험과정을 설계하였고 수행한 작업이 단조 작업임을 주관적 설문지를 사용하여 증명하였다. 작업 수행시 발생된 부하를 평가하기 위하여 생리신호를 측정하였다.

측정된 생리신호 중 Electrocardiogram, skin-temperature, temperature, respiration을 먼저 분석하였다. 단조 작업을 수행함에 따라 skin-temperature의 증가 경향이 나타났으며, heart rate variability의 power spectrum의 HF성분의 감소와 LF/HF비의 증가 경향이 나타났다. 특히 skin-temperature와 heart rate variability의 power spectrum의 HF성분은 주관적 평가치와 상관관계도 비교적 높게 나타났다.

1. 서론

인간은 하루일과 중 대부분을 생활공간(주거공간, 사무공간)에서 보내게 된다. 따라서 쾌적한 삶, 삶의 질적 향상을 위하여 생활공간을 피로와 스트레스가 적게 유발되는 공간으로 만들어 주는 것은 물론 보다 빨리 피로와 스트레스를 회복시킬 수 있는 공간으로 만들어야 한다. 또한 이러한 생활 공간을 창출하기 위해서는 피로와 스트레스를 정량적으로 평가할 수 있어야 한다.

피로와 스트레스를 정량적으로 평가하기 위한 연구로는 정신적 요소에 의한 영향을 평가하기 위한 신체 조직의 산화도를 측정하는 방법, 안면 피부온도의 차이를 측정하여 평가하는 방법, HRV을 이용한

방법 등이 있으며 육체적 요소에 의한 영향을 평가하기 위해 EMG의 Mean freq., power를 이용한 방법 등의 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

피로와 스트레스는 정신적 요소에 의한 것과, 육체적 요소로 인한 것으로 나눌 수 있으며 현대 사회는 과학기술의 발달로 육체적인 작업들은 점차 사라져가고 정신적인 작업에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 정신적 작업에 대한 피로 스트레스의 측정과 평가의 중요성이 증가하고 있다.

정신적 작업 부하(MWL : Mental Work-load)는 긴장성 작업부하와 단조성 작업부하로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 단조성 작업 부담을 평가하기 위하여 피험자에게 단조감을 유발하도록 하는 작업과 실험 과정을 설계하여 평가하였고, 생리신호를 측정

하여 생리신호와 주관 평가와의 상관관계를 분석하였다.

2. 단조 작업 설계 및 실험

2.1. 실험조건

실험은 한국표준과학원 인간공학그룹 생신신호측정실험실 내에 설치된 chamber(전자파 차폐, 소음 30dB이하, 2,930W×2,570H×4,830D)에서 실시하였으며 실험 당시 온·습도 조건은 25℃, 40%RH이었으며 모든 외부 자극으로부터 피험자를 독립시켰다. 피험자의 상태를 모니터링 하기 위하여 스피커폰과 CCD Camera를 설치하였다.

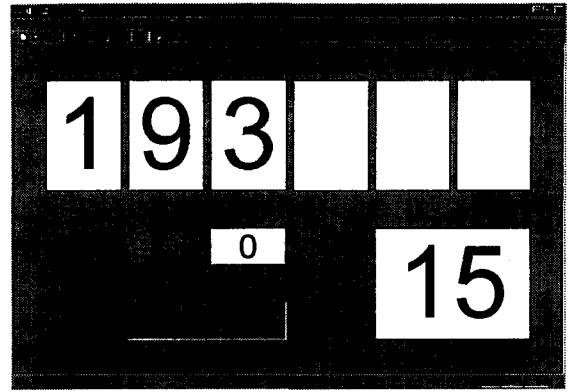
피험자는 과거 정신적 병력이 없고 흡연 습관이 없는 20대 후반(평균나이 : 27.5)의 건강한 여성 8명과 남성 4명을 대상으로 실험을 실시하였으며 실험 전일 8시간이상의 수면과 실험 시작 2시간 이전부터는 금식을 하도록 미리 요구하였다.

2.2. 작업 및 실험 protocol 설계

작업시 단조감을 유발하기 위하여 ISO-10075-2에서 제시하고 있는 지침을 참고하여 작업설계를 하였다[4-5].

작업은 1자리수 숫자 3개를 단순 덧셈하여 그 결과가 화면에 제시된 숫자와 같으면 5초내에 컴퓨터 키보드의 [1]을, 다르면 [2]를 누르도록 하는 연산 작업이다. 이 작업을 10분간 실시하여 총 120문제를 풀게 하였다. 그림 1은 연산 작업화면의 예이다.

표 1에 전체 실험 과정을 나타냈다. 실험 과정은 피험자에게 실험에 관하여 설명하는 부분과 본 실험 부분으로 크게 둘로 나누어져 있다. 피험자가 실험실에 도착하면 먼저 피험자에게 실험의 목적 및 과



(그림 1) 연산 작업화면 예.

(Fig. 1) Example of Arithmetic Task.

정을 설명하고 실험자의 간섭 없이 피험자 독자적으로 실험을 실시하고 피험자는 외부에서 모니터링만 할 수 있도록 충분히 숙지시켰다. 다만 실험 과정 설명 시 전체 작업 횟수를 12회라고 하여 종말 효과를 피하도록 하였다. 단조감을 발생하기 위하여 실험 시작 전에 작업을 미리 충분히 연습 시켜 작업을 수행함으로써 오는 긴장감을 감소시켰고 휴식 없이 작업을 반복함으로써 단조감이 증대되도록 하였다. 본 실험 부분은 초기안정화(R₀), 작업 수행구간(T₁~T₁₀), 후기안정화(R₀)로 구성되었다.

2.3. 데이터 수집

작업의 단조감과 MWL로 인한 피로감을 평가하기 위한 설문지를 개발하였다. 설문지는 긴장, relax, 전반적 활성부문, 의욕감퇴, 주의집중곤란, 각성, 권태감을 평가하기 위한 15개의 질문과 정신적 피로감과 신체적 피로감을 평가하기 위한 2개의 질문으로 전체 17개의 질문으로 구성되었다.

실험시 피험자에게 자신의 주관감에 해당되는 양을 설문지에 그려진 선상에 표기함으로써 data를 획득하였다.

<표 1> 실험 과정

<Table 1> Experimental Procedure.

실험 시간	3분	5분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	10분	3분	5분	3분		
실험 절차	설문지 1	REST 0	설문지 2	TASK 1	설문지 3	TASK 2	설문지 4	TASK 3	설문지 5	TASK 4	설문지 6	TASK 5	설문지 7	TASK 6	설문지 8	TASK 7	설문지 9	TASK 8	설문지 10	TASK 9	설문지 11	TASK 10	설문지 12	REST 1	설문지 13

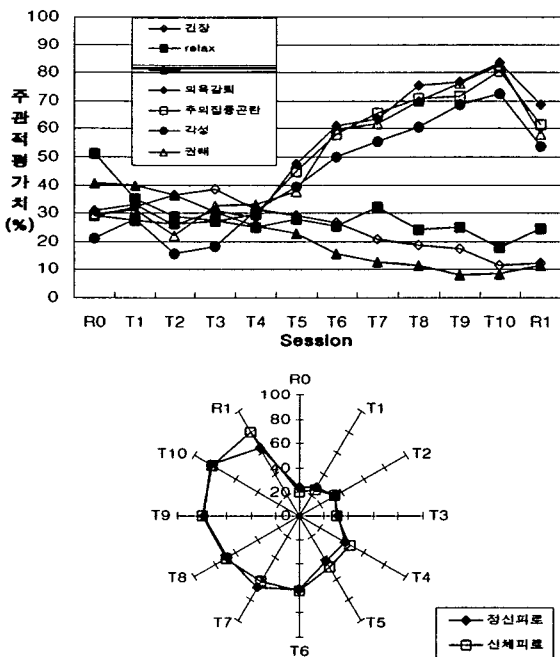
생리신호는 뇌전도(EEG : electroencephalogram), 심전도(ECG : electrocardiogram), 맥파(PPG : photoplethysmogram), 피부온(SKT : skin-temperature)은 Biopac사의 MP-100으로 체온(TEMP : temperature), 호흡(RESP : respiration)은 NEC San-ei Instruments사의 360 Polygraph를 사용하여 초당 1000 Sample을 획득하였다.

EEG의 측정은 international 10-20 system에 따라서 Fp1과 Fp2에서 ECG는 Lead II법을 사용하여 측정하였다. PPG와 SKT는 각각 왼손 검지손가락과 중지 손가락에서 측정하였고, RESP는 코밑에서 TEMP는 이마에 sensor를 부착하여 측정하였다.

본 논문에서는 측정된 생리신호 중 EEG와 PPG를 제외한 나머지 자율신경계의 신호를 먼저 분석하였다.

ECG신호의 분석은 Biopac사의 Software Acq-Knowledge3.5를 사용하여 ECG신호로부터 R-peak를 검출하여 R-R Interval을 구하였다. 이렇게 구한 R-R Interval은 일정 시간 간격의 시계열 data가 아니기 때문에 spline 보간 후 4Hz로 resample하여 순간 R-R Interval을 구하고 저주파 선형성분을 제거하여 주파수 분석에 사용될 수 있게 하였다.

심박변화율(HRV : heart rate variability)의 power spectrum 분석은 교감신경계와 부교감신경계의 활동을 파악하는데 유용하며 본 연구에서는 HRV



(그림 2) 주관적 평가 결과.
(Fig. 2) Result of subjective rating.

power spectrum을 구하는데 적은 data에서도 분해능이 높은 spectrum 추정이 가능한 자기회기(AR : autoregressive)모델을 적용하여 LF(0.01 - 0.08Hz), MF(0.08 - 0.15Hz), HF(0.15 - 0.5Hz) 성분과 LF/HF비를 구하고 초기 안정시(R₀)의 값을 기준으로 기준값으로 각 작업구간에서 구한 LF/HF비를 나누어 식 (1)과 같이 Power Spectrum Balance(PSB)을 구하였다.

$$PSB = \frac{LF_{T_n}/HF_{T_n}}{LF_{R_0}/HF_{R_0}} \quad (1)$$

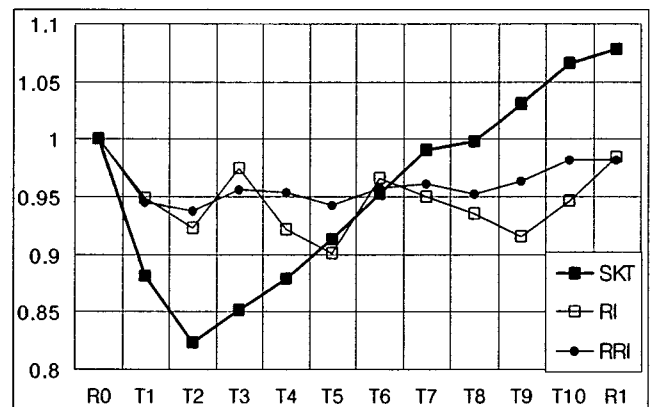
LF_{T_n}, HF_{T_n} : Task시의 power spectrum의 LF, HF 성분.
 LF_{R_0}, HF_{R_0} : 초기안정시(R₀)의 power spectrum의 LF, HF 성분.

다른 생리신호들은 획득된 data를 분당 평균하여 R₀일 때의 평균 data값을 기준으로 정규화 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 피험자들에게 각 작업 구간의 시작 전후로 주관적 평가를 실시하여 작업수행시 느끼는 단조감과 MWL에 의한 피로감에 관한 주관량의 평균값을 나타냈다.

주관적 평가의 결과는 긴장, relax, 전반적 활성부분과 의욕감퇴, 주의집중곤란, 각성, 권태의 크게 두 가지 경향이 드러나고 있다. 긴장감과 relax감의 평가치가 같이 감소한 것은 연산 작업을 휴식 없이 반복 수행함으로써 긴장감은 점차 감소하게 되지만 결코 편안하지 않은 피험자의 심리 상태를 잘 반영한 것으로 이것은 설계한 실험 과정과 작업이 단조작업을 나타내고 있다. 특히 T₄이후 피험자의 단조감이



(그림 3) 생리신호의 작업 구간별 평균변화.
(Fig. 3) Change of biosignals during task.

급격히 증가함에 따라 각성상태의 저하가 나타났으며 의욕감퇴, 주의집중곤란, 권태감의 증가 및 신체피로와 정신피로도 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 설계된 작업은 단조작업의 평가에 적합함을 알 수 있다.

그림 3은 측정된 생리신호의 작업 구간별 평균변화를 나타냈다. SKT신호는 실험이 시작하여 T2까지는 감소 경향을 나타내다가 T2이후 서서히 증가 경향을 나타내는데 이것은 작업 수행 초기 피험자가 받는 task에 의한 작업 스트레스를 반영하고 있기 때문이라고 생각된다. 작업을 수행할수록 피험자는 task에 익숙해지고 이에 따른 단조감이 증가함에 따라서 SKT는 증가 경향을 보였다. 호흡의 간격(RI : respiration interval)과 RRI에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

인간이 정신적 스트레스 등의 정신적 부담을 받게 되면 교감신경이 활성화되고 부교감 신경이 둔화되

는 것으로 알려져 있다.

그림4와 5는 HRV의 power spectrum의 교감신경의 활성도를 나타내는 LF성분과 부교감신경의 활성도를 나타내는 HF성분의 변화를 관찰하기 위하여 PSB와 HF성분을 구하여 작업 수행에 따른 PSB과 HF의 변화를 나타낸다.

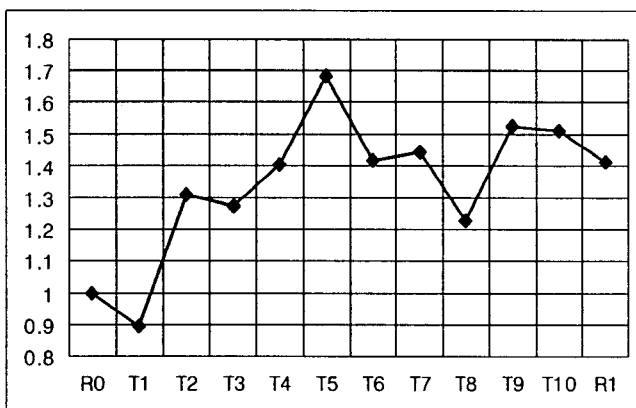
PSB의 값은 R₀일 때 T₁에서 낮게 나타났고 그 외의 구간에서는 R₀와 비교하여 큰 값을 나타내고 있어 피험자가 task를 수행하는 동안 스트레스를 받고 있음을 나타내고 있다. HF성분 또한 R₀에서의 값 보다 감소하고 있다. 이것은 피험자가 작업을 수행하면서 단조 스트레스의 영향으로 자율신경계의 부교감신경의 활동보다 교감신경의 활동이 활발해짐을 나타내고 있다.

표 2는 측정된 생리신호들과 주관적 평가치의 상관관계를 나타냈다. SKT와 HRV의 HF성분은 각각 주관평가의 relax항목과 긴장항목을 제외하고 큰 상

<표 2> 생리신호화 주관적 평가치의 상관관계.

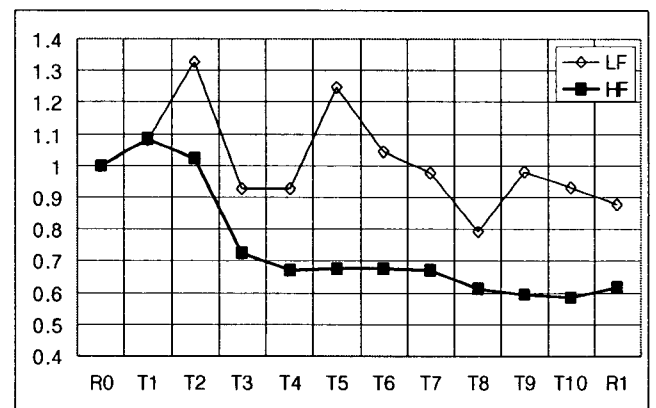
<Table 2> Correlations between Subjective Rating Index and Biosignals.

		긴장	relax	전반적 활성	의욕감퇴	주의집중 곤란	각성	권태	정신피로	신체피로
RRI	Pearson Correlation	-0.521	0.319	-0.160	0.298	0.285	0.258	0.315	0.217	0.200
	Sig. (2-tailed)	0.082	0.312	0.619	0.347	0.368	0.417	0.319	0.498	0.532
RI	Pearson Correlation	-0.059	0.466	0.208	-0.082	-0.119	-0.189	-0.076	-0.210	-0.214
	Sig. (2-tailed)	0.856	0.126	0.515	0.800	0.711	0.555	0.814	0.512	0.504
SKT	Pearson Correlation	-0.948	-0.144	-0.705	0.835	0.819	0.809	0.806	0.748	0.743
	Sig. (2-tailed)	0.000***	0.654	0.010*	0.000***	0.001**	0.001**	0.001**	0.005**	0.005**
LF	Pearson Correlation	0.528	0.206	0.490	-0.482	-0.458	-0.477	-0.548	-0.457	-0.451
	Sig. (2-tailed)	0.077	0.520	0.106	0.112	0.134	0.116	0.065	0.135	0.141
MF	Pearson Correlation	0.435	-0.124	0.260	-0.360	-0.369	-0.383	-0.446	-0.309	-0.226
	Sig. (2-tailed)	0.157	0.700	0.414	0.250	0.237	0.218	0.145	0.328	0.480
HF	Pearson Correlation	0.636	0.712	0.911	-0.739	-0.757	-0.764	-0.754	-0.814	-0.855
	Sig. (2-tailed)	0.026	0.009**	0.000***	0.005**	0.004**	0.003**	0.004**	0.001**	0.000***
LF/HF	Pearson Correlation	-0.367	-0.652	-0.688	0.474	0.522	0.517	0.449	0.606	0.661
	Sig. (2-tailed)	0.241	0.021*	0.013*	0.119	0.081	0.085	0.142	0.036*	0.019*



(그림 4) HRV의 Power spectrum balance.

(Fig 4) PSB during Monotonous Task



(그림 5) HRV의 HF성분과 LF성분의 변화.

(Fig 5) Result of HF and LF component change.

관관계를 나타내었다.

그러나 상관관계가 클 것으로 기대되던 LF/HF는, relax, 전반적 활성, 정신피로, 육체피로에서만 어느 정도의 상관관계를 나타내었으나 보다 정확한 평가법의 확립을 위해서는 앞으로 더 많은 피험자에 대한 실험결과 분석을 필요로 한다. 아직 data의 개수가 충분하지 않아서 모든 주관량을 정확히 예측할 수는 없지만 앞으로 계속 실험을 통한 data를 획득한다면 보다 정확하게 생리량으로서 주관량을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

피로(MWL)를 측정할 수 있는 Task 개발 및 평가를 하였다. 그때 자율 신경계의 생리신호를 측정하여 단조 작업시의 주관감과 상호 상관 관계를 살펴보면 SKT와 HRV의 HF성분, LF/HF의 생리신호 파라미터가 주관적 평가치와 상관관계가 높게 나타나 이들 생리신호가 단조 작업에서 오는 피로/스트레스 감을 평가하는데 적합함을 알 수 있었다. 아직 실험 횟수도 많지 않고 data양도 적어서 정확하게 예측을 할 수는 없지만 추후 data의 양이 많이 확보되고 보다 많은 생리신호와의 상관 관계를 조사한다면 정확한 예측 model을 개발 할 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

- [1] HQL(1999), 인간감각계측응용기술 연구개발 완료 보고회, p25-47.
- [2] 인간 생활공학 연구센터(1999), 인간감각계측 응용기술 project - 연구요약 -.
- [3] Keiko ISHIKAWA, Hirokazu GENNO, Mieko OHSUGA, Takeyoshi KURIHARA, Yasuyuki NISHIO, Maya SUZUKI(1996), Evaluation of mental Stress During a Monotonous Task Using Facial Skin Temperature", 12th Symposium on Human Interface, p349-352, 1996.
- [4] ISO-10075 Ergonomic principles related to mental work-load—General terms and definitions.
- [5] ISO-10075-2 Ergonomic principles related to mental work load—part 2 : Design principles.