

연산 스트레스에 대한 감성 측정을 위한 생리 파라미터 추출에 대한 연구

하은호, 김동윤*, 박광훈**, 임영훈***, 고한우****, 김동선*, 김승태**
연세대학교 통계학과, *연세대학교 의용전자공학과,
연세대학교 전산학과, *세명대학교 전기전자공학부,
****한국표준과학연구원

A Study on the Extraction of Biosignal Parameters for the Computational Stress

E. H. Ha, D. Y. Kim*, G. H. Park**, Y. H. Lim***, H. W. Ko****, D. S. Kim*, S. T. Kim**

Dept. of Statistics, Yonsei Univ.

*Dept. of Biomedical Engineering, Yonsei Univ.

**Dept. of Computer Science, Yonsei Univ.

***Dept. of Electricity & Electronics, Semyung Univ.

****Korea Research Institute of Standard and Science

본 논문에서는 45명의 남자 대학생들에게 연산을 수행하게 한 후, 연산스트레스를 측정하기 위한 생리 파라미터의 추출에 대하여 연구하였다. 파라미터를 추출하기 위해서 1) 정규분포화를 위한 변환 2) 상관관계를 통해 상호관련성이 높은 파라미터를 조사 3) 휴식기간과 연산작업간의 파라미터의 값 비교를 통한 파라미터 표준화 4) 각 파라미터에 대해서 반복측정자료의 분산분석법을 통하여 검정함으로써 통계적으로 유의적인 차이가 있는 파라미터를 선정하였다. 위와 같은 절차를 통하여 연산스트레스의 지수화에 필요한 생리 파라미터로 Heart Rate, HRV의 LF/HF, HRV의 MF/(LF+HF), Return Map의 분산, Mean Temperature, GSR-Mean과 호흡수가 최종적으로 선정되었다

1. 서론

과학 기술의 발달은 환경과 인간과의 상호 관계를 인간이 환경에 순응하는 피동적 관계에서 인간이 환경을 인간에게 적합하도록 바꾸려는 능동적 관계

로 변화시키는데 많은 기여를 하였다. 이런 관점에서 향후 더욱 가속화될 과학 기술의 발달은 인간의 생활 양식을 보다 인간 중심으로 바꾸어 놓을 것으로 예상된다. 이 경우 인간에게 알맞은 최적의 환경을 제공하기 위해서 환경으로부터 인간에게 전달

되는 많은 자극을 최적화 할 수 있는 공학적 시스템이 필요하게 되며 이러한 시스템은 자극에 대한 정보를 인간이 어떻게 받아들이고 그에 대응하는 생리 반응이나 행동 양식의 결과를 데이터화함으로써 가능할 것이다.

환경으로부터 인간에게 전달되는 자극을 정량적이고 정성적으로 계량화하는데 필요한 전제조건은 자극이 인간의 심리적, 생리적 변화에 어떤 작용을 하는지 알아내어 자극과 생리적 반응 사이의 연관 관계를 밝히는 것이다. 이제까지 알려진 바에 의하면 일반적으로 스트레스에 대해 인간의 자율 신경계 (autonomic nervous system)가 관여하여 스트레스로부터 신체의 내부 환경을 보호하려는 기전 즉, 항상성(homeostasis)이 주목되어 왔으며 그에 따라 자극에 대한 반응의 측정을 자율 신경계의 활성화도 (activity)로 측정하여 왔다.

본 논문에서는 연산작업에 따르는 연산스트레스에 대한 생리신호를 측정하여 연산작업에 따르는 스트레스의 지수화를 위한 적절한 연산작업을 구성하였다. 그리고, 연산작업의 조건과 연산작업의 난이도에 따른 생리파라미터의 특성을 비교함으로써 연산 스트레스를 지수화 할 수 있는 파라미터를 구성하였다.

2. 연산스트레스 실험방법

실험대상: 실험은 20대의 건강한 남자대학생 45명을 대상으로 이루어졌다. 먼저 피험자가 실험실에 도착하면 실험에 대한 자세한 안내 및 소개를 설명하여 실험에 대한 불안감을 제거하고 참여 동기를 부여하여 실험에 적극적으로 참여하도록 유도하였다. 그리고, 피험자가 충분히 휴식을 취한 뒤에 전극을 부착하고 불안 평가 설문지를 작성하도록 하여 피험자의 생체신호를 확인하여 이상 유무를 확인하였다. 본 연구에서는 불안평가점수가 대다수의 피험자와 동떨어진 2명의 자료를 제외하고 43명의 자료를 대상으로 분석하였다.

실험도구: 본 연구에서는 그림 1과 같은 연산게임을 이용하여 연산작업에 따른 생리신호의 변화를 측정하였다. 연산게임은 0부터 9까지의 한 자리 숫자를 더하는 것으로 다섯 단계의 난이도(연산레벨로 표현)를 가지고 있다. 각 레벨은 20개의 문제를 가지며 각 문제 당 소요되는 시간은 4초로 각 레벨에 소

요되는 시간은 80초이다.

레벨 1: 두 개의 숫자를 더한다.

레벨 2: 세 개의 숫자를 더한다.

레벨 3: 네 개의 숫자를 더한다.

레벨 4: 다섯 개의 숫자를 더한다.

레벨 5: 여섯 개의 숫자를 더한다.

입력장치로는 조이스틱 패드의 “맞음”과 “틀림” 두 개의 버튼을 사용하였다. 게임은 실험 진행자의 제어 컴퓨터에 의해 원격으로 시작되며 AcqKnowledge 프로그램의 “Start” 버튼의 메시지를 Hooking하여 게임의 시작과 신호의 획득이 동기화 되도록 하였다.

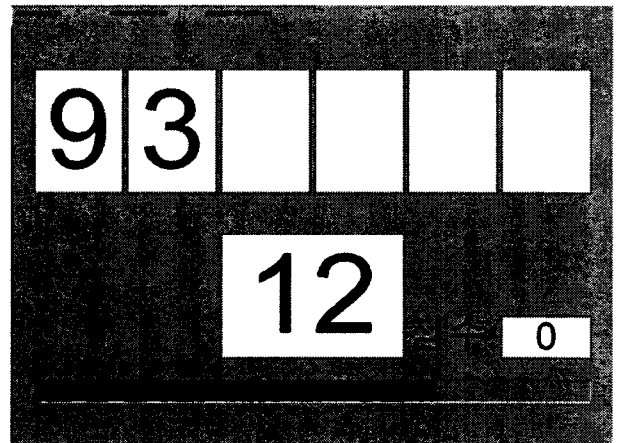


그림 1. 연산게임 화면

실험장치 및 측정부위: 생체신호의 획득은 BIOPAC사의 MP100 System과 AcqKnowledge 소프트웨어를 사용하였다. 모든 생리신호의 sampling rate는 1000Hz/sec로 설정하였고 생리신호에 사용된 전극과 전극부위는 표 1과 같다.

표 1. 전극 부위

신호	부위
electrocardiogram(ECG)	LA, RA, RF
galvanic skin resistant(GSR)	왼손의 중지 및 약지
respiration(RSP)	코끝
photoplethymograph(PPG)	왼손의 검지
temperature	코끝

실험절차: 본 연구에는 다음과 같은 실험절차(표 2 참조)를 거쳐서 피험자의 생리신호를 측정하였다.

1. 안정상태(BASELINE): 최초 60초는 편안한 휴식상태에서 생체신호를 측정하여 다음 단계의 연산작업에서 얻게 될 생체신호의 기준치를 마련하였다.

2. 연산작업(TASK I): 실험에 참여한 피험자를 랜덤하게 선택된 연산레벨에 해당하는 연산작업을 수행하게 하면서 80초간의 생리신호를 측정하고 수행한 연산작업에 대한 연산점수(0점 - 20점)도 조사하였다. 연구자는 사전에 준비한 난수표의 난수를 사용하여 실험에 참여한 피험자를 연산레벨에 랜덤하게 배치함으로써 연산 레벨 외의 다른 요인이 생리신호에 영향을 끼치지 않도록 하여 연산레벨에 대한 효과를 비교할 수 있도록 하였다. 그리고, 피험자와 실험을 측정하는 실험자가 사전에 어떤 연산을 받게 될지를 알 수 없도록 하는 이중눈가림방법(double blinding method)을 사용하여 실험자와 피험자의 편의(bias)가 없도록 실험을 설계하여 생리신호를 측정하였다. 그리고, 연산작업이 끝난 후에 피험자가 수행한 연산작업의 난이도를 5단계로 주관적으로 평가하게 하였다.

3. 휴식상태(REST): 피험자들은 자신에게 부여된 연산레벨의 연산작업을 마친 후에 3분간 휴식을 취하면서 연산작업후의 생리신호를 측정하여 연산작업전의 안정상태와 비교할 수 있도록 하고 다음 단계의 연산작업에서 얻게 되는 생체신호에 대한 기준치로 사용되도록 하였다.

4. 반복연산작업(TASK II): 일반적으로 사람들은 자신에게 부여된 작업을 반복적으로 수행하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 사람들이 반복적인 작업을 할 때에 받게 되는 생리신호를 관찰하고자 피험자들에게 TASK I에 부여된 동일한 연산레벨에 해당하는 연산작업을 반복하게 하면서 생체신호를 측정하였다. 반복연산작업에 대한 연산점수(0점 - 20점)를 조사하고 연산작업이 끝난 후에 피험자가 수행한 연산작업의 난이도를 5단계로 주관적으로 평가하게 하였다.

5. 연산작업후 휴식상태(POST): 연산작업이 끝난 후에 5분간 휴식을 취하면서 생체신호를 측정함으로써

연산작업후의 생리적인 변화의 특성을 살펴보았다. 연산작업전의 안정상태의 생리신호와 비교함으로써 본 연구에 사용된 작업이 단기적인 스트레스를 발생하는가를 알아볼 수 있도록 하였다.

표 2. 실험 순서

실험 단계	작업 내용	소요 시간	누적 시간	설명
1	BASELINE	60초	60초	휴식상태
2	TASK I	80초	140초	랜덤하게 선정된 레벨에 대한 연산작업
3	REST	180초	320초	연산작업후 휴식상태
4	TASK II	80초	400초	TASK I의 반복연산작업
5	POST	300초	700초	반복연산작업 후 휴식상태

3. 연산레벨의 결정

본 연구에서 연구자가 사전에 제시한 연산작업의 난이도(연산레벨 1부터 5)에 대한 타당성을 알아보기 위하여 연구자가 제시한 연산레벨과 피험자가 연산작업을 하면서 느끼는 연산작업의 난이도에 대한 일치도를 알아보기 위해서 연구자가 제시한 연산레벨과 피험자의 주관적인 평가에 의한 난이도간의 상관관계수의 값을 조사하였다. TASK I에서는 상관관계수가 0.823(p-value=0.0)이고 TASK II에서는 0.790(p-value=0.0)으로 상당히 높아서 연구자가 생각하는 연산작업의 난이도와 피험자가 주관적으로 느끼는 연산작업의 난이도가 상당히 일치함을 확인할 수 있었다. 그리고, 피험자가 TASK I에서 얻은 연산점수와 TASK II에서 얻은 연산점수간의 상관관계수는 0.843(p-value=0.00)으로 피험자들이 TASK I과 TASK II에서 받은 연산점수도 상당히 일치하였다.

그림 2를 보면 반복연산작업(TASK II)에 대한 평균 연산점수는 연산작업(TASK I)에 대한 평균연산점수보다 높으므로 피험자들은 동일한 연산작업을 반복함에 따라 학습효과가 나타나서 연산작업에 적응하고 있음을 알 수 있다. 그리고 연산레벨이 커짐에 따라 TASK I과 TASK II에 관계없이 연산점수는

낮아지므로 본 연구에서 사용된 연산작업이 적당한 난이도를 제공함을 알 수 있다.

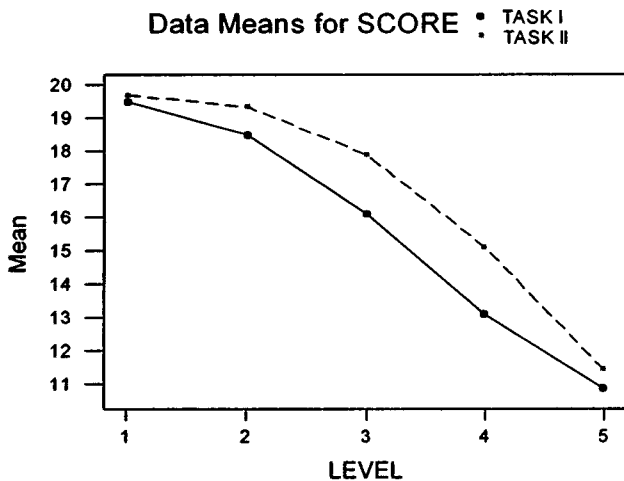


그림 2. 작업형태와 연산레벨에 대한 평균연산점수

작업형태(TASK I, TASK II)와 연산레벨(레벨 1, 2, 3, 4, 5)에 따라서 연산점수가 유의적인 차이를 나타내는 것을 반복측정자료에 대한 분산분석법을 이용하여 통계적으로 분석하여 보았다[1][2][3]. 피험자들은 연산작업을 반복함에 따라 TASK II의 평균 연산점수(16.65)가 TASK I의 평균연산점수(15.58)보다 통계적으로 유의(p-value=0.004)하게 높게 나와서 피험자들은 동일한 연산작업을 반복함으로써 본 연구에 사용된 연산작업에 적응하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 연산점수는 연산레벨에 따라 TASK I과 TASK II에서 모두 통계적으로 유의한 차이를 보이므로(p-value=0.00) Tukey의 다중비교법을 사용하여 유의적인 차이가 있는 연산레벨 1, 3, 5만을 사용하여 연산스트레스를 측정하는 연산작업을 구성하였다.

그림 2를 보면 TASK II에서의 연산점수는 TASK I에서의 연산점수에 비해서 크게 높게 나타나지 않는데 이는 레벨 5의 연산작업은 반복을 하더라도 상당히 어려운 작업으로 판단되므로 본 연구에서 사용되는 레벨 5의 연산작업은 상당히 강한 스트레스를 유발시킬 것으로 보여진다. 지금부터는 연산레벨 1, 3, 5를 각각 레벨 L(Low), M(Middle), H(High)로 표기하도록 하겠다.

4. 실험결과

4.1 파라미터의 추출

본 연구에서는 피험자로부터 측정된 생리신호로부터 다음과 같은 파라미터를 추출하였다.

1. ECG : 일반적으로 심박(heart rate; HR)은 인체의 항상성(homeostasis)을 유지하려는 자율신경계에 의해 끊임없이 변화하며 심박변화율(heart rate variability; HRV)은 심방에 분포하는 자율신경계의 활동을 간접적으로 반영한다[4]. 심전도는 1000Hz/sec의 고해상도로 측정하여 R파를 검출하고 이것을 다시 4Hz로 Resample하여 heart rate variability(HRV) 신호를 구간별로 획득하였다. HRV로부터 AR 스펙트럼을 구하여 low frequency(LF), mid frequency(MF), high frequency(HF)를 구하였고 또한 회귀도(return map, RM)의 2차원 분산을 구하였다[5]. 이들로부터 HR, LF/HF, MF/(LF+HF), RM을 구하였다.

2. SKT : 자율신경계의 변화에 의해 피부의 땀샘과 모세관이 변화하고 이것은 피부 온도의 변화를 초래한다. 피부 말초의 체온은 자율신경계의 변화에 민감하게 변화하는 것으로 알려져 있다. 피부 온도를 측정하여 온도의 평균(TMEAN), 분산(TVAR), 중앙값(TMEDIAN), 최소값(TMIN), 최대값(TMAX)을 구하였다.

3. PPG : 혈류량의 변화를 측정하는 것으로 심혈관계와 내분비계등의 복합적인 원인에 기인한다. 생체 카오스의 대표적 신호로 잘 알려져 있다[6]. 카오스를 정량적으로 측정하기 위한 많은 방법들이 있으나 상관차원과 같은 경우 계산 시간이 길어 실시간 처리가 현재의 기술로는 불가능하므로 리아프노프 지수(Lyapunov Exponents; LE)[7]를 구하여 사용하였다.

4. GSR : 피부저항을 측정한 것으로 자극 후 약 2초 후에 발생한다. 자율신경계의 변화에 의해 피부의 땀샘과 모세관이 변화하고 이것은 피부저항에 극적인 변화를 초래한다. 피부저항의 평균(GSMEAN)과 중앙값(GSMEDIAN)을 구하였다.

5. RSP : 호흡수는 CYCLE로 표기하겠다.

측정된 각 파라미터의 분포가 정규분포를 따르지 않을 때 적절한 변환을 사용하여 분포를 정규화 하였

다. 조사된 파라미터들 중에서 LF/HF, MF/(LF+HF), RM, LE들에 대해서는 log 변환을 취하는 것이 좋은 것으로 조사되었다. 그리고, 상관계수를 사용하여 파라미터들간의 관련성을 조사하여 관련성이 높은 파라미터들 중에서 대표적인 파라미터(SKT에서는 TMEAN, GSR에서는 GSMEAN)만을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 최종적인 파라미터는 1) HR 2) $\log(LF/HF)$ 3) $\log(MF/(LF+HF))$ 4) $\log(RM)$ 5) TMEAN 6) $\log(LE)$ 7) GSMEAN 8) CYCLE 이다.

4.2 연산스트레스에 따른 생리신호의 특성 비교

본 연구에 사용된 연산스트레스의 모형이 작업조건(BASELINE vs TASK I, REST vs TASK II, BASELINE vs POST)에 따라 생리신호에 변화를 일으키는 가를 알아보기 위하여 앞 절에서 선정된 파라미터를 사용하여 알아보았다. 그림 3은 작업조건에 따른 호흡수(CYCLE)인데 연산스트레스를 받을 때(TASK I, TASK II를 수행할 때)의 호흡수는 연산스트레스를 받지 않을 때(BASELINE, REST, POST)에 비해서 높은 수치를 보여주고 있으며 연산스트레스를 받지 않는 조건에서는 호흡수에 차이를 보이지 않고 있다.

본 연구에서 조사된 모든 파라미터에 대해서 작업조건에 따른 파라미터의 차이에 대하여 통계적 검정을 하였다. POST에서의 파라미터의 값들은 HR을 제외하고는 BASELINE의 파라미터의 값들과 유의적인 차이가 없이 기저선 수준으로 회복되었다. 따라서, 본 연구에서 사용된 연산스트레스모형은 단기적인 스트레스를 유발하는 모형으로 판단된다. 파라미터 HR, $\log(LF/HF)$, $\log(MF/(LF+HF))$, TMEAN, CYCLE의 값은 TASK I에서의 값과 BASELINE에서의 값과 통계적으로 유의한 차이를 보여 주었고 이 파라미터들은 또한 TASK II와 REST에서 유의한 차이를 보여주었다. 따라서, 이들 파라미터들은 연산스트레스의 유무를 판단하는데 유용한 파라미터로 사용할 수 있을 것이다.

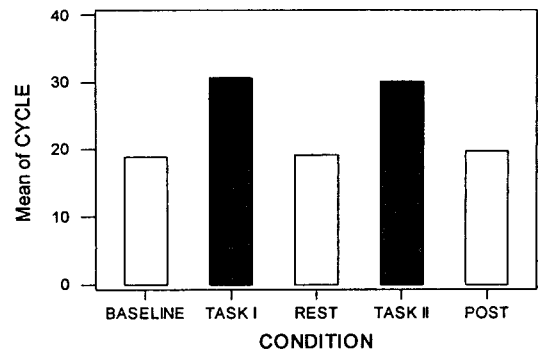


그림 3. 작업조건에 따른 파라미터 CYCLE의 값

4.3 연산레벨에 따른 연산스트레스의 차이

본 절에서는 연산레벨(L, M, H)과 연산작업상태(TASK I, TASK II)에 따라서 연산스트레스에 어떠한 변화가 있는 가를 살펴보기 위해서 파라미터의 값을 연산작업상태전의 기준값(TASK I에서는 BASELINE, TASK II에서는 REST)을 사용하여 파라미터의 값을 표준화하였다. 연산레벨과 연산작업상태에 대한 교호작용은 모든 파라미터에 대해서 없는 것으로 밝혀졌다. TASK I의 파라미터의 값은 TASK II의 파라미터의 값과 유의적인 차이가 없었다. 그리고, 연산레벨에 따라 대부분의 파라미터(HR, $\log(LF/HF)$, $\log(MF/(LF+HF))$, $\log(RM)$, TMEAN, GSMEAN)는 유의적인 차이를 보여 주었다. 따라서, 파라미터의 변화는 연산작업상태(TASK I vs TASK II)보다는 연산레벨(레벨 L, M, H)에 의해서 결정된다는 것이다. 이러한 사실은 사람들이 어떤 작업을 하면서 측정되는 파라미터의 값(스트레스의 강도)은 작업상태가 아니라 작업의 난이도에 의해서 결정되는 것으로 판단된다. 즉, 처음으로 접하게 되는 작업(본 연구에서는 TASK I의 연산작업)에 대한 스트레스와 동일한 작업을 반복(본 연구에서는 TASK II의 연산작업)하게 될 때 받게 되는 스트레스와는 차이가 없고 스트레스의 차이는 작업의 난이도(본 연구에서는 연산레벨 L, M, H)에 의해서 결정되는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 20대의 건강한 남자대학생 45명을 대상으로 작업조건(안정상태, 연산작업상태, 휴식상태, 반복연산작업상태, 연산 작업후 안정상태)과 연산레벨(연산작업의 난이도)에 따른 생리신호의 측정

을 위한 실험 프로토콜을 제안하고 측정된 생리신호에 대한 분석을 하였다. 먼저 연구자가 사전에 제시한 연산레벨에 대한 타당성을 분석하여 연산작업에 따르는 스트레스의 지수화를 위한 적절한 연산작업을 구성하였다. 측정된 생리신호의 파라미터에 대해서 통계적으로 분석하여 작업조건과 연산레벨에 영향을 주는 파라미터를 선정하였다. 연산작업시의 파라미터는 안정상태의 파라미터와 유의적인 차이를 나타내어 연구에 사용된 연산작업이 생리신호의 변화를 발생시키는 것으로 밝혀졌고 연산작업후의 안정상태에서 측정된 대부분의 파라미터의 값이 연산작업전의 안정상태의 파라미터와 통계적으로 유의적인 차이가 없어서 본 연구에 사용된 연산작업은 단기적인 스트레스를 유발하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서 선정된 대부분의 파라미터의 값은 연산레벨에 따라 차이가 나타났다. 따라서, 본 연구에서 선정된 파라미터는 연산스트레스를 지수화하는데 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 박용규, 송혜향(1991), 반복측정자료의 분산분석법, 자유아카데미, 서울.
- [2] Anderson, T.W.(1958) An Introduction to Multivariate Statistical Analysis, John Wiley, NY.
- [3] Mauchly, J. W.(1940), Significance Test for Sphericity of a Normal n-variate Distribution, Annals of Mathematical Statistics, 11, 204-209.
- [4] Otto Rompelman, Ben J. Ten Voorde, "Analysis of Heart Rate Variability", Advances in Processing and Pattern Analysis of Biological Signals, Inbar Plenum Press, New York, pp.225~235, 1996.
- [5] T. Bieberle, A. Bolz, M. Schaldach, "Characterization of Heart Rate Variability using a nonlinear model", 1995 IEEE Engineering in Medicine & Biology Conference, 1995
- [6] 이병채, 이명호, "생체 카오스의 비선형 시계열 데이터 분석에 관한 연구", 의용생체공학회지, 제15권, 제3호, pp.379-386, 1994
- [7] Alan Wolf et. al., "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series", Physica 16D, pp.285-317, 1985.