

연산 작업에 대한 자율 신경계의 반응에 대한 연구*

A Study on the Analysis of Autonomous Nerve System Response for the Computational Task

하은호**, 박광훈***, 김동윤****, 임영훈*****, 고한우*****, 김동선****

Eunho Ha, Gwanghoon Park, Dongyoun Kim,
Younghoon Rim, Hanwoo Ko, Dongsun Kim

요 약 본 연구에서는 20대의 건강한 남자대학생 45명을 대상으로 작업조건(안정상태, 연산작업 상태, 휴식상태, 반복연산작업상태, 연산작업후 안정상태)과 연산레벨(연산작업의 난이도)에 따른 생리신호의 측정용을 위한 실험 프로토콜을 제안하고 측정된 생리신호에 대한 분석을 하였다. 연산작업에 대하여 측정된 파라미터에 대해서 1) 정규분포화를 위한 파라미터의 변환 2) 파라미터간의 상관관계의 조사 3) 연산작업에 대한 파라미터의 표준화 4) 작업조건과 연산레벨에 대한 파라미터의 차이에 대한 유의성검정을 하여 연산스트레스를 평가할 수 있는 파라미터를 추출하였다. 연산작업시의 파라미터는 안정상태의 파라미터와 유의적인 차이를 나타내어 연구에 사용된 연산작업이 생리신호의 변화를 발생시키는 것으로 밝혀졌고 연산작업후의 휴식상태에서 측정된 대부분의 파라미터의 값이 연산작업전의 안정상태의 파라미터와 통계적으로 유의적인 차이가 없어서, 본 연구에 사용된 연산작업은 단기적인 스트레스를 유발하는 것으로 밝혀졌다. 그리고, 동일한 연산레벨에 대한 연산작업을 반복하더라도 파라미터의 값은 처음으로 연산작업을 할 때의 파라미터의 값과 유의적인 차이가 없었다. 그러나, 연산레벨에 따라서는 Heart Rate, HRV의 LF/HF, HRV의 MF/(LF+HF), Return Map의 분산, 코끝의 Mean Temperature, GSR-Mean과 호흡수는 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 이들 파라미터를 사용하면 연산스트레스의 강도를 지수화할 수 있을 것이다.

1. 서론

과학 기술의 발달은 환경과 인간과의 상호 관계를

인간이 환경에 순응하는 피동적 관계에서 인간이 환경을 인간에게 적합하도록 바꾸려는 능동적 관계로 변화시키는데 많은 기여를 하였다. 이런 관점에서 향후 더욱 가속화될 과학 기술의 발달은 인간의 생활 환경을 보다 인간 중심적으로 바꾸어 놓을 것으로 예상된다. 인간 중심적인 환경이란 스트레스가 적게 유발되는 환경, 스트레스가 유발되었을 때 인간이 보다 빨리 회복될 수 있는 환경이다. 인간에게 알맞은 최적의 환경을 제공하기 위해서 환경으로부터 인간에게 전달되는 많은 자극으로부터 발생한 스트레스를 평가

* 본 연구는 과학기술부 G7 감성공학 과제와 연구비 지원을 받아 수행되었음. (과제번호 G17-B-01)
** 연세대학교 통계학과,
Tel : (033)760-2268
E-mail) stzha@dragon.yonsei.ac.kr
*** 연세대학교 전산학과
**** 연세대학교 외공학과
***** 세명대학교 컴퓨터응용물리학과
***** 한국 표준 과학 연구원

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 될지 알 수 없도록 하는 이중눈가림방법(double blinding method)을 사용하여 실험자와 피험자의 편위(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 얻게되는 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)을 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 어떤 형태의 스트레스를 발생하는가를 알아볼 수 있도록 하였다.

〈표 2〉 실험 순서

| 실험 단계 | 작업내용 | 소요 시간 | 누적시간 | 설 명 |
|-------|----------|-------|------|----------------------|
| 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 | 반복연산작업후 휴식상태 |

3. 연산작업의 구성

인간이 자신에게 부여된 작업을 수행하게 되면서 받게 되는 스트레스를 정확하게 측정하기 위해서는 스트레스를 유발하는 작업을 적절하게 구성하여 사람들에게 제시하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 난이도가 어려운 작업을 할수록 사람들이 스트레스를 더 받는다는 전제하에 여러 단계의 난이도를 가지는 연산작업을 구성하였다.

3.1 연산작업의 난이도에 대한 타당성

본 연구에서 연구자가 사전에 제시한 연산작업의 난이도(연산레벨 1 부터 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 상관계수의 값을 조사하였다. TASK I에서는 상관계수가 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 상관계수는 0.843(p-value=0.00)으로 피험자들이 TASK I과 TASK II에서 받은 연산점수도 상당히 일치하였다.

가 없지만 TASK II에서는 유의적인 차이를 보이므로 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 심박에 분포하는 자율신경계의 활동을 간접적으로 반영한다(8). 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(8). 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 내분비계 등의 복합적인 원인에 기인한다. 생체 카오스의 대표적 신호로 잘 알려져 있다 [2]. 카오스를 정량적으로 측정하기 위한 많은 방법들이 있으나 상관차원과 같은 경우 계산 시간이 길어 실시간 처리가 현재의 기술로는 불가능하므로 리아프노프 지수(Lyapunov Exponents:

LE)(9)를 구하여 사용하였다.

4. GSR : 피부저항을 측정된 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 하였다. 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. 따라서, 본 연구에서 사용될 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 작업조건에 따른 생리 파라미터의 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 II을 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 대한 검정의 결과 표 4에 있다. 표 4를 보면 POST에서의 파라미터의 값들은 HR을 제외하고는 BASELINE의 파라미터의 값들과 유의적인 차이가 없이 기저선 수준으로 회복되었다. 따라서, 본 연구에서 사용된 연산스트레스모형은 단기적인 스트레스를 유발하는 모형으로 판단된

하면 다음과 같다.

(표 6) 연산레벨과 연산작업상태에 따른 표준화파라미터 (파라미터에 -diff로 표시)에 대한 검정결과. 표의 값은 검정에 대한 p-value를 나타낸다. *: p < 0.05, **: p < 0.01

| 요인 파라미터 | 연산작업상태 (TASK I, TASK II) | 연산레벨 (L, M, H) | 연산작업상태 와 연산레벨의 교호작용 |
|----------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------|
| HR-diff | 0.886 | 0.009** | 0.310 |
| log(LF/HF)-diff | 0.066 | 0.001** | 0.891 |
| log(MF/(LF+HF))-diff | 0.599 | 0.033* | 0.897 |
| log(RM) | 0.703 | 0.007** | 0.658 |
| TMEAN-diff | 0.017* | 0.007** | 0.585 |
| log(LE) | 0.324 | 0.175 | 0.850 |
| GSMEAN | 0.964 | 0.002** | 0.736 |
| CYCLE-diff | 0.449 | 0.799 | 0.573 |

1) 연산레벨과 연산작업상태에 대한 교호작용은 모든 파라미터에 대해서 없는 것으로 밝혀졌다. 즉, 연산레벨에 따르는 파라미터의 형태는 TASK I과 TASK II에서 통계적으로 같은 형태를 가지고 있는 것으로 분석되었다.

2) TASK I의 파라미터의 값과 TASK II의 파라미터의 값은 유의적인 차이가 없다. TMEAN-diff의 경우에도 p-value의 값이 0.017로 유의수준 1%에서는 유의적인 차이가 없으므로 연산작업상태에 따른 파라미터의 차이는 없다. 즉, 동일한 연산레벨에 대한 연산작업을 반복하더라도 파라미터의 값은 처음으로 연산작업을 할 때의 파라미터의 값과 유의적인 차이가 없었다.

3) 연산레벨에 따라 대부분의 파라미터(HR-diff, log(LF/HF)-diff, log(MF/(LF+HF))-diff, log(RM), TMEAN-diff, GSMEAN)는 유의적인 차이를 보여준다.

따라서, 파라미터의 값은 연산작업상태(TASK I vs TASK II)가 아니라 연산레벨(L, M, H)에 의해서 결정된다. 이러한 사실은 사람들이 어떤 작업을 하면서 측정되는 파라미터의 값은 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.

5. 결론

본 연구에서는 20대의 건강한 남자대학생 45명을 대상으로 작업조건(안정상태, 연산작업상태, 휴식상태, 반복연산작업상태, 연산 작업후 안정상태)과 연산레벨(연산작업의 난이도)에 따른 생리신호의 측정을 위한 실험 프로토콜을 제안하고 측정된 생리신호에 대한 분석을 하였다. 먼저 연구자가 사전에 제시한 다섯단계의 연산레벨에 대한 타당성을 통계적으로 분석하였다. 다섯단계의 연산레벨중에서 레벨 2와 레벨 4의 연산작업은 다른 레벨의 연산작업과 같은 정도의 난이도를 가지는 것으로 판단되어 세단계의 연산레벨(Low, Middle, High)을 가지는 연산작업을 구성하여 electrocardiogram(ECG), galvanic skin resistant(GSR), respiration(RSP), photoplethymograph(PPG), temperature로부터 생리신호를 측정하고 생리파라미터를 구성하였다. 그리고, 1) 정규분포화를 위한 파라미터의 변환 2) 파라미터간의 상관관계 3) 연산작업에 대한 파라미터의 표준화 4) 작업조건과 연산레벨에 대한 파라미터의 차이에 대한 유의성검정을 하여 연산스트레스를 지수화하는데 필요한 적절한 생리파라미터를 추출하였다. 연산작업을 할 때의 파라미터는 안정상태의 파라미터와 유의적인 차이를 나타내어 연구에 사용된 연산작업이 생리신호의 변화를 발생시키는 것으로 밝혀졌고 연산작업후의 안정상태에서 측정된 대부분의 파라미터의 값이 연산작업전의 안정상태의 파라미터와 통계적으로 유