

온열쾌적감 평가를 위한 생리신호의 분석

최현배, 김동규*, 임재중, 김종수*, 이구형**, 최호선**

인제대학교 의용공학과

부경대학교 냉동공조공학과*

LG 전자**

Analysis of Physiological Signals for Thermal Comfort

H. B. Choi, D. G. Kim*, J. J. Im, J. S. Kum*, K. H. Lee**, H. S. Choi**

Department of Biomedical Engineering, Inje University

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Eng., Pukyung University*

LG Electronics Inc.**

E-mail : jjim@bme.inje.ac.kr

초 록

본 연구에서는 온열환경에 따른 쾌적감을 조사하기 위하여 온열환경을 평가할 수 있는 지표로서 생리신호를 분석하였다. 생리신호로는 인체의 자율신경계에 대한 반응을 나타내는 HRV 변수 및 대뇌의 각성수준을 나타내는 CNV 파형의 변이도를 이용하였다. HRV 스펙트럼분석을 통해 얻어진 HF/LF 변수를 이용하여 주어진 환경하에서 교감 및 부교감 신경의 활동성을 조사하였고, CNV 파형에서는 경고신호가 주어진 뒤 0.5~1초 구간의 면적값을 이용하여 온열환경에 따른 각성수준을 비교하였다. 그 결과, CNV에서는 온열쾌적감과 상관성이 높게 나타나지 않은 반면, HRV 스펙트럼분석에서는 휴지기에 비해 발과 얼굴부위에 대한 HF/LF값이 높은 사실을 통해 교감신경에 비해 부교감신경이 지배적이라는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결과는 발과 얼굴이 주위온도에 따른 인체의 쾌적감을 변화시키는데 있어서 주된 부위임을 나타내며 HRV 스펙트럼분석 및 CNV 파형의 관찰이 온열환경에 대한 쾌적감을 평가하는데 유용한 지표로 사용될 수 있음을 말해준다.

서 론

인체의 열적 쾌적감에 영향을 미치는 6요소는 공기 온도, 방사온도, 기류, 습도, 착의량, 대사량이며 착의량과 대사량은 인간측의 요소라고 볼 때, 그 외의 4요소는 환경조건이 된다. 정상상태하의 온열환경에서는 극한(極寒)에서 혹서(酷暑)까지 있으며, 사람은 그 안에

서 생활하며 체온조절을 하고 있다. 그리고, 추위와 더위는 그 정도가 지나치면 불쾌하게 느끼므로 온열환경에서는 온냉감적으로 덥지도 춥지도 않고 만족을 표명할 수 있는 마음의 상태이면, 이것을 온열적으로 쾌적하다고 한다.¹⁾²⁾

실내온열조건의 변화에 따른 인간의 온냉감, 혹은 쾌적감 등에 관해서는 많은 연구가 수행되어 왔으며, 그 결과들은 냉난방 공조의 설정조건으로서 그리고 실내환경평가의 지표로서 활용되어 왔다. 획일적인 인공환경 아래에서 생활하는 기회가 시간적으로도 공간적으로도 증가하고 있는 현재에 와서는 더더욱 쾌적조건에 대해 면밀히 고찰해 볼 필요가 있다. 지금까지의 쾌적공조수단으로는 fuzzy 제어, 1/f 제어 등이 등장하여 외국에서는 실용화를 위한 시도가 연이어지고 있으며, 이러한 쾌적공조를 위해서는 필수적으로 그에 필요한 쾌적조건 및 범위를 구할 필요가 있는 것이다.

인체는 앉아있는 경우 100W정도에서 움직일 경우 약 1000W까지의 체열이 발생하는 하나의 발열체이다. 또한, 다소 넓은 범위의 추위와 더위로부터 인체를 보호하기 위하여 인체는 체내의 각 기관들을 이용하여 항온을 유지하게 된다. 생명을 유지하는데 중추신경계에서 가장 중요한 부분의 하나인 대뇌의 감각영역에서는 여러 가지 감각들과 함께 온각, 냉각등의 감각혼분이 전달되어진다. 또한, 변연계(limbic system)는 시상하부의 자율기능의 조절, 성감 같은 원시적 감각 및 쾌감과 불쾌감 등의 감정(emotion)의 형성에 중요한 의의를 가지고 있으며, 해마(hippocampus)는 뇌간 망상체와 관련하여 각성 및 주의집중에 이바지한다. 따라서 중추신경계의 반응에 가장 밀접한 관계가 있는 뇌파나 말초신경계의 반응 중 자율신경계에 대한 반응을 나타내는 심전도, 혈압 및 호흡변화 등의 분석을

통해 쾌감 및 불쾌감 정도에 대한 정량적인 감성평가 정보를 얻을 수 있을 것이다.

HRV(heart rate variability)는 자율신경계의 반응을 관찰하는데 있어서 효과적인 지표로 사용되어질 수 있다. 심장은 생체항상성을 유지하기 위해 끊임없이 교감, 부교감 신경의 지배를 받고 있으며, 이러한 사실을 이용하여 교감, 부교감 신경의 균형에 의한 심혈관계통의 변화와 긍정 및 부정자극에 의한 감성평가지표로서 HRV변수를 이용한 연구들이 보고되어지고 있다.³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾ 또한 CNV(contingent negative variation)는 각성제나 진정제와 같은 약물 및 향에 의한 각성도를 연구한 논문들에서 대뇌의 각성수준과 관련이 깊은 것으로 알려져 있다.⁷⁾

본 연구에서는 심전도의 R-R peak간의 시간간격을 FFT함으로써 power spectrum을 관찰하는 HRV 분석 기법 및 경고신호에 의해 유발된 뇌파의 형태가 자극 신호를 기다리는 동안 그 각성수준에 따라 변위되어지는 CNV를 통해 다양한 온열환경하에서 피험자가 느끼는 쾌적감과 생리신호변수 사이의 상관성을 조사하고 그 지표를 세우고자 하였다.

실험 방법

본 연구를 위한 전체적인 시스템의 구성이 그림 1에 나타나 있다. 제시되는 온열환경하에서 polygraph (SAN-EL, polygraph 363)를 통해 출력되는 심전도 신호를 A/D 변환기를 통해 디지털로 변환한 후, 컴퓨터에 저장하는 동시에 기록지로 출력해서 모니터링하였다. 그리고 CNV는 자극과 데이터 수집을 위한 별도의 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다. 실험을 위한 온열조건의 변화가 표 1에 나타나 있다.

표 1. 실험에서 제시되어진 온열환경.

No	실험	부위온도	전체온도/습도
1	Rest 1		29.5°C / 51.1%
2	Foot	23.1 °C	28.9°C / 50.6%
3	Knee	24.2 °C	28.0°C / 55.8%
4	Rest 2		28.7°C / 55.2%
5	Face	26.5 °C	28.8°C / 51.4%
6	Back	25.3 °C	28.3°C / 52.5%
7	Rest 3		28.8°C / 54.4%

데이터 수집

뇌질환이나 심장질환을 가지고 있지 않은 22~24세의 신체 건강한 대학생 중에서 남자 3명, 여자 2명을 포함한 총 5명의 피험자를 대상으로 실험을 실시하였다. HRV 신호를 얻기 위한 Lead I 방식의 심전도신호는 100Hz 저역통과필터를 거친후, 256Hz의 샘플링 주파수로 1min동안 A/D변환되어 별도의 PC에 CNV와는 구별되게 저장되었다.

CNV는 그림 2와 같이 S1(warning signal, 1kHz beep sound)이 피험자가 착용하고 있는 이어폰을 통해 20msec 동안 제시되고 1.7sec후에 S2(stimulus signal, red circle of 5mm in diameter)가 모니터에 나타나게 되며, 이 때 피험자가 S2자극을 인지하면 마우스 버튼을 누르도록 한다. CNV의 경우, C₃-P₃, C_z-P_z, 그리고 C₄-P₄의 세부위에 대한 bipolar 측정을 실시하였다. 이 때 0.3sec의 시정수와 30Hz 저역통과필터를 거친 후 polygraph 기기로부터 출력되어진 신호는, 256Hz의 샘플링 주파수로 2.5sec 동안 30회 반복적으로 A/D 변환되었다. 뇌파는 μV 단위의 아주 미약한 신호이므로 안구전도나 근전도 등의 신호에 의한 간섭이 노이즈로서 크게 작용한다. 따라서, 피험자로 하여금 움직임을 최대한 자제하도록 하였고 뇌파를 기록하는 동시에 안구전도를 기록지에 출력해서 피험자의 눈감박임이 없을 때에 CNV를 기록하였다. 또한, 신호분석시 파형을 관찰하여, CNV를 기록하는 2.5sec동안에 피험자의 눈감박임이 겹쳐지면 신호분석대상에서 제외하였다.

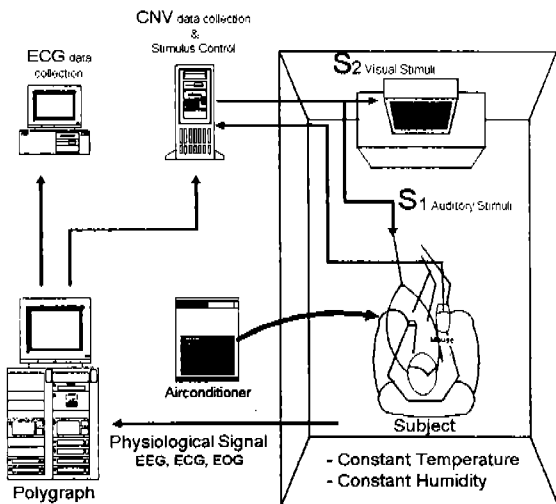


그림 1. 전체 실험 구성도.

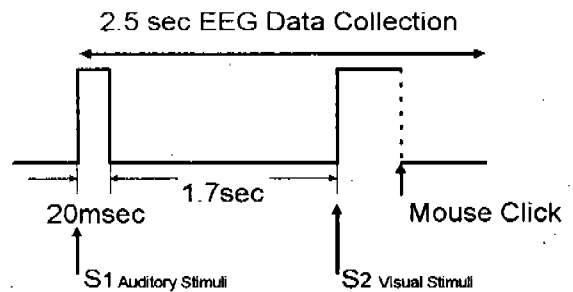


그림 2. CNV 측정을 위한 자극의 제시 및 데이터 검출.

데이터 분석

본 실험에서는 온열환경에 대한 쾌적감을 연구하기 위하여 HRV스펙트럼과 CNV파형의 변화량을 검출, 분석하였다.

HRV (heart rate variability)

HRV 스펙트럼 분석은 심전도신호의 R-R peak 간격을 FFT(fast Fourier transform)함으로 얻을 수 있다. 그림 3(a)에서와 같이 피험자로부터 받은 심전도 raw data로부터 R-R peak 간격을 구하여 파일로 저장한 파형이 그림 3(b)이다. 여기서 그림 3(b)에 나타나는 HRV는 가로축이 R-R interval의 발생순서가 된다. 따라서 주파수 분석을 위해 가로축을 시간축으로 변환하여야 하며, 식(1)을 이용해서 한 눈금의 해상도를 결정하였다.

$$HRV(n) = HR(k), \quad t_k \leq n\Delta T < t_{k+1}, \quad (1)$$

$$(n, k = 0, 1, 2, \dots)$$

여기서 샘플링 주파수는 $f_s = 1/\Delta T$ 가 된다.

이렇게 해서 시간축이 결정된 HRV신호를 FFT한 파형이 그림 3(c)에 나타나 있다. 그림에서 가장 왼쪽에 나타나는 0.04Hz 이하의 peak는 VLF(very low frequency)로서 체온조절 및 혈류조절에 따른 말초 혈관의 긴장도와 관련되어 있다. 두 번째 0.03~0.15Hz 구간에 나타나는 LF(low frequency)는 압수용체 반사, 교감신경 활동성과 관련되어 있으며, 세 번째 보여지는 0.15~0.40Hz 구간의 HF(high frequency)는 호흡주기, 부교감 신경 및 교감신경의 활동성을 반영하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 교감/부교감 신경계 활동의 우세정도를 나타내기 위하여 HF/LF를 변수로 정의하여 각 실험조건에서의 변화량을 관찰하고자 하였다.

CNV (contingent negative variation)

CNV는 일종의 유발전위로서 S1자극이 주어진 직후로부터 S2에 반응할 때까지 파형의 변화추이를 관찰한다. 이 때, CNV는 뇌파와 함께 숨겨져서 나타나므로 중첩되어져 있는 신호들을 평균화(averaging)하면 불규칙적인 파형들은 사라지고 S1과 S2 직후에 나타나는 규칙적인 peak들과 변이정도를 나타내는 상향곡선만 드러나게 된다. 따라서, 본 실험에서는 30회 반복측정한 뇌파 중 안구전도와 같은 노이즈성분을 포함하지 않은 파형을 선별하여 각 부위별로 평균화시켰다. 이러한 과정을 거친 CNV파형은 피험자가 S1자극이후 S2자극을 기대하는 효과와 상관성이 있는 것으로 밝혀져 있으며 피험자의 각성 수준이 높을수록 그림 4에서

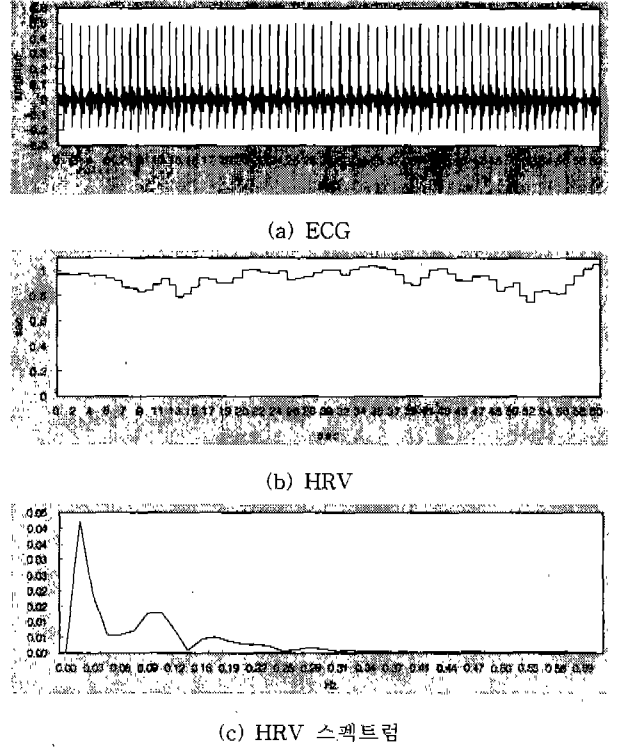


그림 3. 심전도 신호로부터 재구성된 HRV파형 및 스펙트럼.

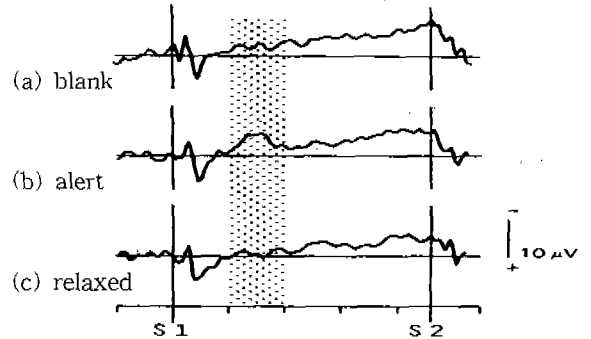


그림 4. 피험자의 각성도에 따른 CNV의 변화.

와 같이 그 변이정도가 크게 나타난다. 따라서, 본 실험에서는 S1자극이후 0.5~1.0sec 구간의 면적값을 변수로 선택한 후, 그 변수값들을 비교함으로써 피험자들의 각성수준을 평가하였다.

결과 및 토의

주어진 온열환경하에서 구해진 다섯명의 피험자들에 대한 평균 HF/LF값들의 비교 그래프가 그림 5에 나타나 있다. 휴지기에 비해 발과 얼굴부위에서는 수치값

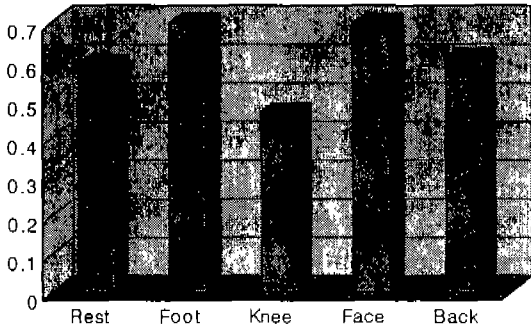


그림 5. 온열환경하의 부위별 평균 HF/LF값의 비교.

이 높게 나타난 반면 무릎부위에서는 오히려 낮게 나타났다. 하지만 목 뒷덜미(back) 부위에서의 수치값은 휴지기때의 수치값과 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. HRV 스펙트럼분석 결과에 비추어 볼 때, 얼굴과 무릎부위에서의 HF/LF 값이 휴지기에 비해 높게 나타난다는 것은 휴지기에서의 피험자가 다소 높은 온도에 처해있다가 얼굴과 발부위에 찬바람을 가함으로써 부위온도가 낮아졌을 때 부교감신경이 교감신경에 비해 지배적으로 활동했다는 사실을 보여준다. 반대로 무릎에서의 HF/LF 값이 휴지기에 비해 낮게 나타난다는 것은 교감신경이 부교감신경에 비해 더 지배적으로 활동했다는 사실을 나타낸다. 현 시점에서 본 연구의 결과에 대해 단정지을 수는 없지만, 냉난방의 영향을 가장 직접적으로 받을 수 있는 발과 얼굴부위로의 적절한 온도 영향이 피험자로 하여금 보다 쾌적함을 느끼게 한다고 생각되어진다. 그리고, 무릎부위로의 냉풍에 의한 교감신경의 자극은 부정적인 반응을 불러일으키는 것으로 사료된다.

그림 6에서는 온열환경에 따른 CNV 파형을 서로 비교하고 있다. 그림에서 빗금쳐진 블록으로 표시한 부분에서의 면적값을 비교해 볼 때, 휴지기에 비해 각 부위별 면적값이 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 그러나 그 변화추세를 살펴보면 발과 얼굴 부위에서는 S2로 진행하면서 파형이 상승하고 있으며, 무릎과 목 뒷덜미 부위에서는 거의 일정한 상태로 유지되고 있음을 볼 수 있다. 이는 앞선 HRV 분석결과와 유사한 경향을 보이는 것으로서 현재까지 정립되어있지 않은 CNV와 감성변화간의 상관성 분석을 위한 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

결론 및 토의

각 실험조건에 대한 HRV 분석에서의 교감/부교감신경의 우세정도는 각 피험자들로부터 얻어지는 주관적인 설문평가 결과와의 상관분석에 의해 그 의미를 찾을 수 있을 것이다. 따라서, 온열감에 대한 형용사 분

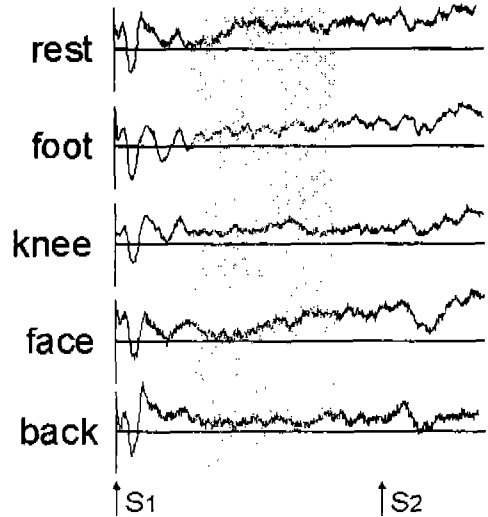


그림 6. 온열환경에 따른 C₄-P₄에서의 부위별 CNV 파형의 비교.

석 등을 통한 주관적인 설문이 체계화되면 HRV 분석 결과에 보다 신뢰성있는 결론을 내릴 수 있을 것이다. 그리고, CNV는 주어진 환경하에서 피험자의 각성도와 관계있는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에서는 온열환경하의 피험자가 쾌적함을 느낄 때 각성도가 클 것이라는 가정을 세운 뒤 실험을 시작하였다. 뇌파를 받아들이는 부위로서 C₃-P₃, C₄-P₄를 선택하여 bipolar로 검출하였으나 일반적으로는 대뇌의 frontal 부위에서 주의력과 각성도를 관찰하는 것으로 알려져 있으므로 각 부위의 절대적인 파형을 보기 위해서 unipolar방식의 실험이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 뇌파는 time constant를 높게 설정할 수록 베이스라인의 변동이 심하게 나타나므로 S1신호가 주어지기전 예비신호로서 0.5~1초간을 함께 검출한 후, 그 값의 평균을 베이스라인으로 설정하여 신호들간의 기준을 맞추어야 할 것이다.

또한, 피험자의 수를 보다 늘여서 실험하게 되면 이러한 실험결과의 정확성을 더욱 향상시킬 것이며, 통계분석을 통한 유의성을 조사하여 보다 객관적인 분석결과를 제시해 줄 것이다. 생리신호는 주어진 환경조건에 대해 반응하는 인체의 많은 정보들을 포함하고 있으며, 그것은 추출된 여러변수들의 종합적인 분석으로 나타내어 질 수 있으므로 연구목적에 부합하는 더욱 세분화된 변수의 추출이 요구되어진다. 그 외에도 SPL(skin potential level)과 같은 인체의 각성수준 및 감성을 평가할 수 있는 다양한 생리신호가 검출되어진다면 본 연구의 결과를 더욱 신뢰성 있게 뒷받침해 줄 것이다. 따라서, 본 실험 결과를 바탕으로 보다 의미있는 변수의 추출 및 상관 분석이 수행된다면 추후 온열쾌적감의 감성평가를 위한 연구가 더욱 활성화 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] P. O Fanger, "Thermal Comfort," McGraw-Hill Book Company, 1972.
- [2] S. Tanabe, "Thermal Comport Requirements in Japan," Waseda University, 1988.
- [3] G. V. Andrep, W. Pascuel, R. Rosser, "Respiratory variations of the heart rate," Proc. R. Soc. Lond. Biol., 119, pp.1191-230, 1936.
- [4] S. Akselrod, D. Gordon, J. B. Madwed, N. C. Snidman, D. C. Shannon, A. Barger, R. J. Cohen. "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative prove of beat-to-beat cardiovascular control," Science Wash. DC, 213, pp.220-222, 1981.
- [5] M. Bootsma, C. A. Swenne, H. H. Van Bolhuis, P. C. Chang, V. M. Cats, A. V. G. Brusckke. "Heart rate and Heart rate variability as indexes of sympathovagal balance," Am. J. Physiol., 226, pp.1565-1571, 1994.
- [6] 오상훈, 황민철, 임재중, "HRV 스펙트럼과 청각 감성과의 연관성에 대한 연구," 대한의용생체공학회 춘계 학술대회논문집, 19권 제1호, pp.176-178, 1997.
- [7] S. V. Toller, G. H. Dodd, "PERFUMERY, the psychology and biology of fragrance," Chapman and Hall, pp.107-120. 1986.