

# HRV의 전력스펙트럼 분석에 관한 연구

정성진, 정기삼, 신건수, \*이병채, 이명호  
연세대학교 공과대학 전기공학과  
\*삼성종합기술원

## A Study on the Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability

S. J. Chung, K. S. Jeong, K. S. Shin, B. C. Lee, J. Ahn, J. S. Chun, and M. H. Lee  
Department of Electrical Engineering, Yonsei University  
\*Samsung Advanced Institute of Technology

### ABSTRACT

In this paper, we compare three methods to obtain PSD of HRV - FFT, AR modeling, and residual integration. Using these methods we speculate the balances of the LF and HF powers of HRV at 0°, 45°, 90° tilt levels of head-up tilt table for young and healthy 24 men. R peaks are located at the highest point of QRS complex detected from modified spacial velocity algorithm. In general FFT is the most fast way to obtain PSD but PSD from FFT has too many peaks and valleys. AR PSD can show frequency of ANS activity effectively but LF component of PSD is often invisible due to interference of VLF power. The residual integration method that decomposes the AR PSD is very efficient way to extract LF component. Applying the above three methods to HRV we can visualize the trend of PSD variations along tilt levels.

### 1. 서론

심박간격은 인체의 항상성을 유지하려는 자율신경계에 의해 변화한다. HRV(Heart Rate Variability)는 이 심박간격을 연속적으로 기록한 것으로써 심장을 제어하는 자율신경계(ANS: Autonomic Nervous System)의 활동을 직접적으로 반영한다. HRV의 전력스펙트럼 분석은 자율신경계의 두 가지 상반된 매카니즘인 교감신경과 부교감신경의 작용을 정량적으로 평가할 수 있는 효과적인 방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 HRV의 PSD(power spectral density)를 분석하는 방법으로 FFT에 의한 PSD, AR 모델에 의한 PSD, AR PSD를 유수적분법에 의해 분해하는 방법의 세 가지 방법을 사용하였다. 위 세 가지의 방법을 정상인을 대상으로 head-up tilt 테이블을 사용하여 0°, 45°, 90°의 경사도를 주어 그에 따른 직립스트레스(orthostatic stress)의 양을 변화시키며 HRV의 전력스펙트럼을 측정하였다. 직립스트레스가 작을 경우 심혈관계는 심폐수용기

(cardiopulmonary receptor) 반사에 지배적인 영향을 받고 직립스트레스가 클 경우에는 심폐수용기 반사뿐만 아니라 압력수용기 반사의 영향도 크게 받게 된다. 압력수용기 반사는 심장의 교감신경을 자극하며 반대로 미주신경은 억제한다. 각 신경계는 반응의 속도가 다르므로 신경계의 활동에 따른 심박간격은 여러 주기의 신호에 의해 제어된다. 따라서 HRV의 PSD에는 각 신경계의 활동을 반영하는 주파수 대역이 존재하게 된다. 본 연구에서는 이들 주파수 대역의 전력을 분석하여 신경계를 평가할 수 있는 방법들을 비교하고 HRV의 PSD의 특성을 관찰하였다.

### 2. HRV의 획득

그림 1은 본 연구에서 사용한 HRV의 획득 과정이다.

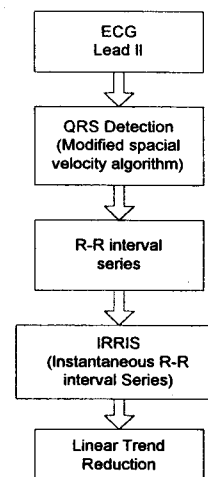


그림 1 HRV의 획득 과정  
Fig. 1 Flow Diagram of HRV Acquisition

#### (1) QRS의 검출

HRV는 심박간격을 연속적으로 기록한 것이므로 HRV를 얻기 위해서는 먼저 심장의 박동시점을 찾아 내어야 한다. 본 연구에서의 QRS검출은 위상학적 2

차원 시간지연 좌표계 맵핑을 이용한 수정된 공간속도(spacial velocity) 알고리즘을 심전도 신호의 Lead II 하나에 적용하여 검출하였다.

심전도 신호를 지연시간 20ms의 2차원 시간지연 좌표계에 맵핑하면 그림 2와 같이 QRS 컴플렉스에서 가장 큰 궤적을 그린다. 따라서 QRS의 폭에서 맵핑 지연시간을 뺀 값보다 작은 일정한 시간  $\delta$  만큼의 차이를 가진 궤적상의 두 점 사이의 거리를 측정하면 QRS 컴플렉스에서 가장 큰 값을 가진다. 맵핑 지연시간을  $\tau$  라 하면 시간  $\delta$  만큼 떨어져 있는 맵핑공간상의 두 점의 거리는 다음의 식(1) 과 같이 나타난다.

$$|\vec{v}(t, \tau, \delta)| = \sqrt{((e(t) - e(t + \delta))^2 + (e(t + \tau) - e(t + \tau + \delta))^2)} \quad (1)$$

위의  $|\vec{v}(t, \tau, \delta)|$ 은 일정한 시간간격  $\delta$ 를 가지는 두 점에서의 공간속도의 합이 된다. QRS의 검출은  $|\vec{v}(t, \tau, \delta)|$ 의 크기가 일정한 문턱치를 넘는 지점을 QRS의 위치로 산정하여 검출한다. 심전도의 크기는 개인에 따라 많은 차이를 보이므로 맵핑공간상의 궤적의 변위는 각 심전도 데이터에 따라 그 크기가 다르다. 따라서 각 심전도 데이터에 대하여 문턱치를 적절히 바꾸어 적용해야한다. 본 연구에서는 심전도 데이터의 첫 2초간의 최대값과 최소값의 차이를 QRS의 크기로 가정하여 이 크기의 60%를 문턱치로 설정하였으며  $\delta = 25ms$ 를 사용하였다.

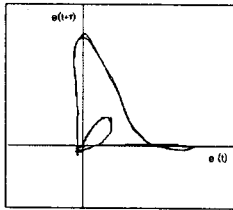


그림 2 위상공간 상에 맵핑된 심전도 신호  
Fig. 2 Topological Mapped ECG signal

(2) 순간R-R간격시리즈의 획득

R-R간격을 연속적으로 기록한 데이터는 등시간간격(evenly spaced)데이터가 아니므로 주파수 분석에 사용될 수 없으므로 본 연구에서는 식(2)를 이용하여 4Hz로 R-R간격 시계열을 재샘플링 하여 순간R-R간격시리즈(Instantaneous R-R interval series)를 구하고 이를 주파수 분석을 위한 HRV로 사용하였다.

$$IRRIS(n) = RR(k) \quad (2)$$

$$t_k \leq n\Delta T \leq t_{k+1}, (n, k = 1, 2, \dots)$$

(3) 선형성분의 제거

PSD의 계산에 사용되는 각각의 순간R-R간격시리즈의 구획들은 그 구획의 길이 보다 더 긴 주기를 가지는 저주파 성분을 포함하고 있으며 이러한 저주파 성분을 선형성분이라 부른다. 선형경향은 전력스펙트럼상의 저주파 대역에서 중첩을 일으켜 스펙트럼의 왜곡을 일으킨다. 본 연구의 스펙트럼분석은 초저주파 대역의 신호를 반영하지 않는 짧은 시간(4분16초)

에 대한 분석을 목적으로 하므로 선형성분으로 나타나는 초저주파 성분은 의미를 가지지 못한다. 따라서 HRV는 전력스펙트럼을 구하기 이전에 전처리 과정으로 선형성분의 제거를 거친다. 본 연구에서는 일차 선형근사화에 의해 HRV의 선형성분을 제거하였다.

2. 전력스펙트럼 분석

(1) HRV의 전력스펙트럼 특성

HRV의 전력스펙트럼은 ANS의 각기 다른 신경계의 활동을 반영하는 세 개의 피크점을 가지며 본 연구에서 사용한 주파수 구분은 다음의 표 1과 같다.

표 1 HRV의 주기성분과 신경계와의 관계  
Table 1 Harmonic components of HRV and relative ANS

주기성분	주파수 대역	관계 신경계
VLF (very low freq.)	0.002 - 0.09 Hz	온도조절, 혈관운동, 레닌-엔지오텐신
LF (low freq.)	0.05 - 0.15 Hz	압력수용기 반사, 혈압조절계
HF (high freq.)	0.15Hz 이상	호흡계 (부교감신경)

(2) 실험 프로토콜의 설정

본 연구에서는 head-up tilt 테이블을 이용하여 24명의 정상인에 대한 직립스트레스의 변화에 따른 HRV의 변화를 관찰하였다. 본 연구에서 사용한 실험의 프로토콜은 표 2에 따라 경사도를 달리하며 40분간 연속적으로 심전도신호를 측정하였다.

본 연구에서는 교감신경의 압력수용기 반사, 혈압조절계에 의해 나타나는 LF성분과 부교감신경에 의한 HF성분을 비교하였다. 이중 HF성분의 스펙트럼 분포는 호흡주파수에 크게 의존한다. 따라서 호흡이 불규칙적일 경우 HF성분의 분포가 광범위해지며 그에 따라서는 LF성분과 겹치는 현상이 발생하므로 본 연구에서는 HF성분이 일정한 주파수대역에서 나타나도록 피검자가 4초에 한 번 호흡을 하도록 하여 HF성분의 피크치가 0.25Hz에서 나타나도록 하였다.

표 2 실험에 사용한 tilt 경사도 프로토콜  
Table 2 Tilt level protocol used in test

step	1	2	3	4	5	6	7	8
경사도(°)	0	0	45	45	90	90	0	0
비 고	각 step별 시간 : 5분, 호흡 : 4 Hz							

(3) 전력스펙트럼 획득

표 2의 총 8개의 step에서 특히 0도에서 45도, 45도에서 90도, 90도에서 0도로 tilt table의 각이 변화할 때에는 ANS활동의 균형에 변화가 일어나며 이는 HRV에서 과도적인 파형으로 나타난다. 본 연구에서는 5분 구획의 데이터 중 과도구간을 제외한 44초 이후의 1024개의 샘플에 대하여 PSD를 구했다.

## HRV의 전력스펙트럼 분석에 관한 연구

본 연구에서의 PSD는 FFT와 Burg's method를 이용한 30차의 AR모델에 의해 구하였다. 구한 AR 모델에서 각 주기성분의 추출하기 위해 유수적분(residual integration)을 이용하여 스펙트럼을 분해(decomposition)하였다. 그림 2에서 본 연구의 전력스펙트럼 획득과정을 보였다.

차수 P의 AR 프로세스는 식(3)의 방정식을 만족하는 시계열이다.

$$u(n) + a_1(n-1) + \dots + a_p(n-M) = v(n) \quad (3)$$

식(3)에서  $a_1, a_2, \dots, a_p$ 를 차수 P의 AR파라미터라고 하며 이들 값을 구하여 신호의 특성함수를 추정할 수 있다. Burg's method의 AR파라미터의 추정과정은 식(4)를 P번 반복한다.

$$a_p = \begin{bmatrix} a_{p-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \hat{k}_p \begin{bmatrix} 0 \\ a_{p-1}^* \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{\epsilon_p}^2 = (1 - |\hat{k}_p|^2) \sigma_{\epsilon_{p-1}}^2 \quad (4)$$

$$\hat{k}_p = \frac{-\sum_{n=p}^{N-1} f_{m-1}(n) g_{m-1}^*(n-1)}{\frac{1}{2} \sum_{n=p}^{N-1} [ |f_{m-1}(n)|^2 + |g_{m-1}(n-1)|^2 ]}$$

$f_{m-1}$  : forward error

$g_{m-1}$  : backward error

$p = 1, 2, \dots, P$

식(4)로부터 얻어진 AR파라미터로부터 전력스펙트럼을 구하는 식(5)를 얻을 수 있다.

$$S(\omega) = \frac{\sigma_{\epsilon_p}^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p \hat{a}_p(k) \exp(-j\omega k) \right|^2} \quad (5)$$

(4) 유수적분법에 의한 스펙트럼의 분해

FFT에 의한 HRV의 PSD는 각 주파수에 나타나는 전력밀도가 정확한 수치를 나타낸다. 그러나 FFT에 의한 PSD는 LF, HF 등의 성분이 가지고 있는 전력이 어떤 주파수를 중심으로 분포하는지를 나타내 주지 못하는 단점이 있다. 반면 AR모델에 의한 PSD는 추정에 의한 오차가 발생하지만 구해진 스펙트럼으로부터 LF, HF성분을 쉽게 구분해 낼 수 있다는 장점이 있다. 그러나 AR모델에 의한 PSD에서는 큰 파워를 가지는 VLF 성분이 LF성분에 중첩되어 상대적으로 파워의 크기가 작은 LF성분을 구별할 수 없는 경우가 많다. 본 연구에서는 유수에 의한 적분을 사용한 스펙트럼의 분해를 통해 LF성분을 추출해 내었다.

유수적분법은 AR모델로 구한 주어진 신호에 대한 근사적 모델로부터 모델의 극점(pole)들을 구하고 구해낸 각각의 극점에 의한 스펙트럼을 구하여 스펙트

럼을 분해하는 방법이다.

WSS (wide sense stationary) 신호에 대한 Wiener-Khinchine 관계식에 AR모델의 PSD함수를 대입하면 자기상관함수를 구하는 식 (4)를 얻는다.

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} \frac{\sigma^2}{A(z)A(z^{-1})} z^{k-1} dz \quad (4)$$

식(4)에서  $z_i$ 를 AR모델  $A(z)$ 의 근이라 하면  $z_i$ 는 companion 행렬로부터 구해낼 수 있다.  $z_i$ 는 항상 단위원 안에 존재하며 단순극점이 된다.  $z_i$ 에 대한 자기상관함수를  $R_i(k)$ 라 하면  $R_i(k)$ 는 단순극점에 대한 유수정리를 이용하여 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$R_i(k) = \frac{\sigma^2 z_i^{k+p-1}}{A'(z_i)A_1(z_i) + A(z_i)A_1'(z_i)}$$

$$A(z) = 1 + a_1z + \dots + a_pz^p \quad (6)$$

$$A_1(z) = a_p + a_{p-1}z + \dots + z^p$$

$z_i$ 에 의한 PSD는  $R_i(k)$ 를 푸리에 변환하여 피리오도그램(periodogram)을 구하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 1024개의 샘플에 대한 AR모델을 구하여  $R_i(k)$ 를 1024 샘플 FFT로 피리오도그램을 구하도록 하였다.

(5) 전력스펙트럼의 정규화

얻어진 전력스펙트럼은 피검자에 따라 절대치가 크게 다르다. 본 연구에서는 tilt table의 경사도 변화에 따른 LF성분과 HF성분의 비를 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 스펙트럼을 통해 LF, HF의 비의 변화 추이를 확인할 수 있도록 PSD를 정규화하였다. 본 연구에서는 VLF를 제외한 0.05Hz에서 0.5Hz까지의 PSD를 적분한 값으로 얻어진 PSD를 나누어 정규화하였다. 정규화를 거친 스펙트럼은 LF성분과 HF성분의 총량에 대한 비로 정규화되므로 LF성분과 HF성분의 균형의 변화를 뚜렷이 나타내준다.

## 4. 실험 및 결과

본 연구에서는 24명의 정상인을 피검자로 하여 표 2의 프로토콜에 따라 실험하였다. 그림 3은 각 step에서의 선형성분을 제거한 HRV를 보였다. step 1,2와 7,8에서 고주파 성분을 많이 포함하고 있음을 볼 수 있다. 그림 4,5은 정규화된 PSD를 보였다. 그림에서 직립스트레스가 없는 step 1,2,7,8에서는 HF성분이 우세하고 직립스트레스가 점차 커지는 step 3,4,5,6에서는 HF성분이 감소한 반면 LF성분은 커짐을 볼 수 있다.

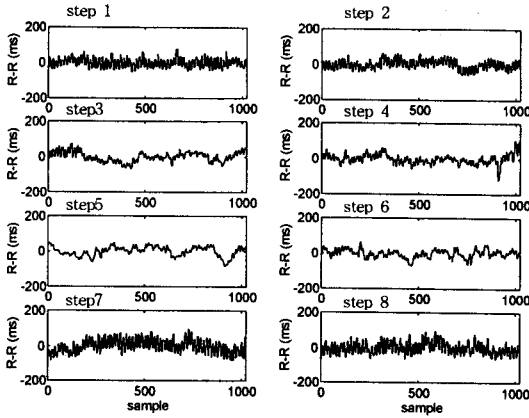
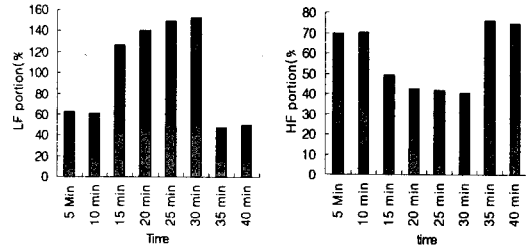


그림 3 선형성분을 제거한 HRV  
Fig. 3 Linear trend reduced HRV

직립스트레스가 커짐에 따라 LF의 비율은 증가하고 HF의 비율은 감소함을 알 수 있다.



(a) LF 비율 (b) HF 비율

그림 7 step별 LF, HF 성분의 비  
Fig. 7 LF, HF portion of each step

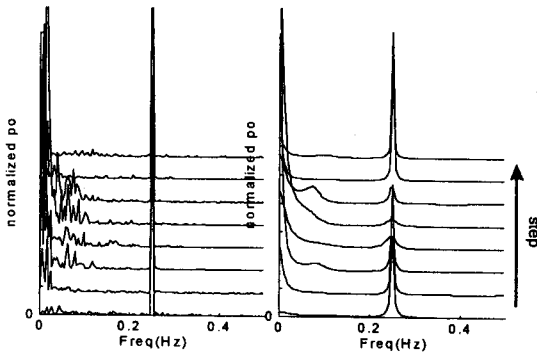


그림 4 FFT로 구한 PSD 그림 5 AR PSD  
Fig. 4 PSD from FFT Fig. 5 AR PSD

5. 결 론

직립스트레스의 증가는 교감신경의 활동비를 상대적으로 증가시켜 HRV의 PSD에서 LF성분의 비를 증가시키고 반대로 직립스트레스의 감소는 부교감신경의 활동비를 상대적으로 증가시켜 HF성분의 비를 증가시킨다.

FFT에 의한 PSD의 계산은 연산이 빠르지만 각 주기 성분의 중심 주파수를 뚜렷이 보여주지 못한다. AR모델을 통해 각 주기 성분을 구별할 수 있으며 유수적분에 의한 AR PSD의 분해를 통해 VLF성분이 중첩되어 있는 LF성분을 추출할 수 있다.

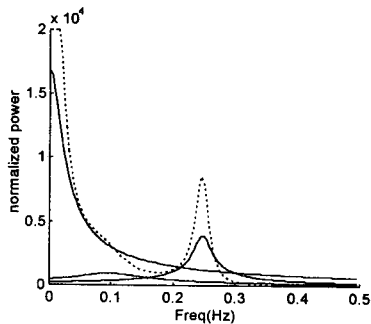


그림 6 AR PSD의 분해  
Fig. 6 Decomposition of AR PSD

참고문헌

- [1]S.Akselrod, D.Gordon, F.A.Ubel, D.C.Shannon, A.C.Barger, R.J.Cohen, "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control", science, vol. 213, pp.220-222, 1981
- [2]M.J.Cowan, "Measurement of heart rate variability", Western journal of nursing research, Vol.17, No.1, pp.33-45, 1995
- [3]정석현, 이정환, 이병채, 이명호, "시간 지연 2차원 좌표계를 이용한 실시간 QRS 검출에 관한 연구", 대한의용생체공학회 추계학술대회 논문집, Vol.17, No.2, pp. 277-280, 1995
- [4]W.A.Tiller, R.McCraty, M.Atkinson, "Cardiac Coherence: A new noninvasive measure of autonomic nervous system order", Alternative therapies in health and medicine, Vol.2, No.1, pp.52-65, 1996
- [5]S.Mukai, J.Hayano, "Heart rate and blood pressure variabilities during graded head-up tilt", J.l of app. physio., Vol.78, No.1, pp.212-216, 1995

그림 5의 AR PSD에서 step4의 경우 LF성분이 VLF성분에 가려서 LF성분을 구분하기가 힘들다. 그림 6은 그림 5의 step4에 대하여 유수적분에 의해 AR PSD를 분해한 그림이다. 그림5에서는 보이지 않던 LF성분을 그림 6에서는 0.1Hz 근방의 피크를 가지는 스펙트럼으로 확인할 수 있다.

그림7은 24명의 정상인의 HRV의 PSD를 FFT로 구여 얻은 step별 PSD의 LF, HF 비의 통계치이다.