

심박변동 신호의 시-주파수 분석을 이용한 스트레스 분석에 관한 연구

성홍모¹, 이주성², 김원식³, 이현숙⁴, 윤영로², 신태민²

¹식품의약품안전청 의약품안전국 의료기기관리과

²연세대학교 보건과학대학 의공학부

³한국표준과학연구원 환경안전계측센터 생활계측그룹

⁴상지대학교 이공과대학 컴퓨터전자물리학과

(2004년 8월 31일 접수, 2004년 12월 10일 채택)

The Analysis of Mental Stress using Time-Frequency Analysis of Heart Rate Variability Signal

Seong Hong Mo¹, Lee Joo Sung², Kim Wuon Shik³, Lee Hyun Sook⁴,
Yoon Young Ro², Shin Tae Min²

¹Korea Food&Drug Administration, Pharmaceutical Safety Bureau, Medical Devices Surveillance Division

²Yonsei University, College of Health Science, Department of Biomedical Engineering

³Human Life Measurement Group, Center for Environment & Safety Measurement,

Korea Research Institute of Standards and Science

⁴Sangji University, College of Science and Engineering, Department of Computer & Electronic Physics

(Received August 31, 2004. Accepted December 10, 2004)

요약 : FFT 나 AR 방법에 기초해서 파워스펙트럼을 구하는 방법은 생체신호와 같이 시간에 따라 그 특성이 빠르게 변화하는 신호에는 적합하지 않다. 반면, 시-주파수 방법은 시간에 따라 특성이 변하는 신호를 분석하기에 유용한 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 시-주파수 분석방법을 이용하여 시-주파수 영역에서 심박변동신호를 분석하는 방법을 연구하였다. 여러 종류의 시-주파수 커널 함수들 중에서 심박변동 신호에 적합한 방법을 찾기 위해서 모의 HRV 신호를 이용하였다. HRV 모의신호를 이용하여 커널 함수들의 시간-주파수 분해 능력과 교차성분계 능력에 대한 평가를 하였고 시-주파수 영역에서 심박변동신호의 주파수 성분들을 추출해 내는 방법들을 제시하였다. 17명의 피험자들을 대상으로 동전쌍기 실험을 3분씩 시행하여 심전도 실험을 측정한 다음 이를 심박변동 신호로 재구성하여 분석하였다. 실험결과 피험자들에게 가해진 정신적 스트레스는 교감신경을 활성화 시켜 LF/HF 증가의 원인이 되는 것으로 나타났다. 실험수행능력에 따라 두 그룹으로 나누어 관찰하였는데 스트레스를 많이 받는 그룹이 그렇지 않은 경우에 비해 작업능력이 떨어짐을 알 수 있었다.

Abstract : Conventional power spectrum methods based on FFT, AR method are not appropriate for analyzing biomedical signals whose spectral characteristics change rapidly. On the other hand, time-frequency analysis has more desirable characteristics of a time-varying spectrum. In this study, we investigated the spectral components of heart rate variability(HRV) in time-frequency domain using time frequency analysis methods. In the various time-frequency kernels functions, we studied the suitable kernels for the analysis of HRV using synthetic HRV signals. First, we evaluated the time/frequency resolution and cross term reduction of various kernel functions. Then, from the instantaneous frequency, obtained from time-frequency distribution, the method extracting frequency components of HRV was proposed. Subjects were 17 healthy young men. A coin-stacking task was used to induce mental stress. For each subjects, the experiment time was 3 minutes. Electrocardiogram, measured during the experiment, was analyzed after converted to HRV signal. In the results, emotional stress of subjects produced an increase in sympathetic activity. Sympathetic activation was responsible for the significant increase in the LF/HF ratio. Subjects were divided into two groups with task ability. Subjects who have higher mental stress have lack of task ability.

Key words : Time-frequency analysis, Mental stress, Heart rate variability

본 연구는 "심전도의 HRV와 Time-Frequency 분석을 이용한 스트레스 표준화 연구" 제목으로 한국표준과학연구원의 2003년도 기본사업으로 시행한 연합협동 연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

통신저자 : 윤영로, (220-842) 강원도 원주시 흥업면

연세대학교 의료기기테크노타워 201호

Tel. 033-760-2440 Fax. 033-763-4050

E-mail. yoon@dragon.yonsei.ac.kr

서론

인체에 가해지는 스트레스는 인체의 신진대사에 변화를 가져오게 되며 이는 호르몬이나 심혈관계의 비정상적인 변화로 나타나게 된다. 여러 연구들에서 스트레스의 의한 신체의 변화를 연구하였다. Heiko 등의 연구에서는 수학연산과 같은 스트레스를 부여할 때에 심박동수, 혈압 등의 변

화와 같이 심혈관계에 영향을 미침을 보였으며 심혈관 질환이 있는 환자의 경우 정상인에 비해서 더 많은 영향을 받다고 발표하였다[1-3]. Gerra 는 노르에피네프린, 에피네프린 등과 같은 호르몬과 혈압, 심박동율을 동시에 측정하여 이들의 연관성을 분석하였으며 호르몬과 같이 인체의 변화를 직접적으로 나타내는 지표들이 혈압, 심박동수와 같은 간접지표와 연관됨을 밝혔다[4].

표 1. HRV 신호의 주파수 성분

Table 1. Frequency components of HRV Signal

주파수 성분	주파수 영역	기전
Low Frequency(LF)	0.01 ~ 0.08Hz	교감 신경의 활동을 주로 나타내며 정서적 스트레스시에 활동양이 증가함.
Mid Frequency(MF)	0.08 ~ 0.15Hz	교감/부교감 신경 모두의 활동 부교감 신경활동이 더 우세함.
High Frequency(HF)	0.15 ~ 0.4Hz	여러 가지 서로 다른 기전들의 혼합이나 주로 부교감 신경에 의한 활동을 나타내며 정서적 안정시에 활동양이 증가함.

외부 자극에 대한 인체의 즉각적인 반응은 자율신경계의 변화로 나타나게 되는데 이를 비관혈적인 방법을 알아 보기 위해서 심박변동신호(heart rate variability: HRV)에 대한 연구들이 행해져 왔다. HRV 신호는 각종 심혈관계 질환의 예측 등에도 널리 사용되지는 신호로 통계적 변화만으로는 자율신경계의 변화를 자세히 알아 볼 수 없으므로 주파수 분석에서 나타나는 성분들의 변화로 자율신경계의 교감/부교감 신경의 활동정도를 알아보게 된다. HRV 신호를 주파수 영역에서 분석할 때에는 그림 1에서와 같이 보통 세 개(LF, MF, HF) 또는 두 개(LF, HF) 주파수 영역의 적분값과 LF/HF와 MF/(LF+HF)와 같은 주파수 영역의 비를 구해서 자율신경계의 활동을 관찰하게 된다. 표1에 HRV 신호의 각 주파수 성분에 대한 설명을 하였다. Sloan 은 24시간 홀터 데이터를 이용해서 사용자의 생활습성과 HRV신호의 주파수 성분들의 변화를 관찰하여 사용자가 정신적인 집중을 요하는 시간이나 외부환경으로의 자극을 받을 때는 LF 성분이 증가하여 LF/HF 값이 증가함을 보였다. Rollin 등의 연구에서는 감정상태의 변화를 유발한 다음 짧은 시간동안의(5분) HRV신호를 측정하여 그 변화를 관찰하였는데 나쁜 감정상태에서는 LF/HF 값이 증가하고 좋은 감정상태에서는 MF/(LF+HF) 값이 증가한다고 발표하였다[5-6].

그림1에서의 같은 주파수 영역에서의 HRV 신호해석은 전체 시간에 대한 주파수 성분 정보를 보는 것으로 특정 시간대에 발생하는 변화를 감지할 수 없다는 단점이 있다. HRV 신호는 시간에 그 특성이 변화하는 불안정(non-stationary) 신호이므로 시간에 따른 주파수성분의 변화를 정확히 알기 위해 시간-주파수 정보를 동시에 관찰할 수 있는 시-주파수 분석방법을 이용하는 연구들이 행해져 왔다[7-9]. 이에 본 연구에서는 인위적으로 스트레스를 부과한 다음 측정된 심전도를 HRV 신호로 재구성한 후 시-주파수 분석방법을 적용하였다. HRV의 시-주파수 영역에 대한 정보를 얻어낸 후 각 시간대에서 HRV 신호의 주파수 성분을 계산하고 스트레스에 대한 심혈관계의 변화에 대해 살펴보았다.

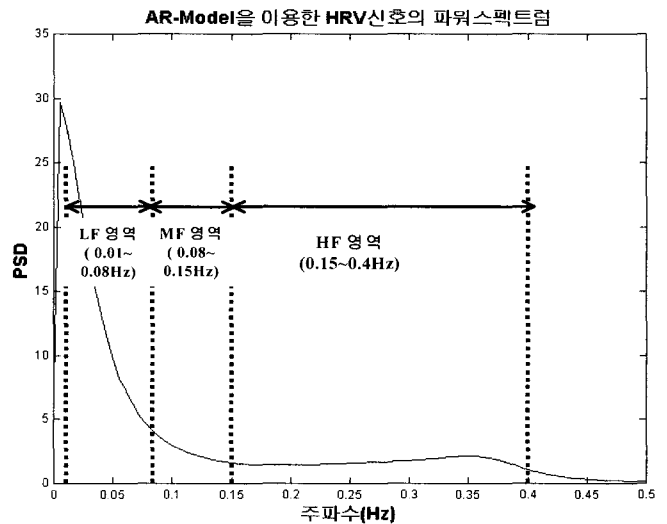


그림 1. HRV신호의 주파수 성분
Fig. 1. Frequency components of HRV signal

실험 방법

1. 시-주파수 분석 방법

생체신호는 시간에 따라 스펙트럼이 변하는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 갖는 신호의 푸리에 변환은 전체 시간에 대한 정보를 가지고 있을 뿐 특정 시간에서의 신호의 특성에 대한 정보를 제공하지 못한다. 시-주파수 분석방법은 시간정보와 주파수 정보를 동시에 제공하므로 생체신호 처리에 적합하다.

Short Time Fourier Transform(STFT)은 최초로 제안된 시-주파수 분석방법으로 그림 2에서처럼 신호 $x(t)$ 에 대해 이동창(moving window: $h(t)$)을 이용하여 신호를 분할한 다음 푸리에 변환을 취하여 그 시간대에 대한 신호의 주파수 정보를 얻는다. STFT는 윈도우 함수에 따라 그 결과가

다르게 나타나므로 신호에 대한 집중도(concentration)가 약하다는 단점이 있다. Wigner-Ville distribution(WVD)은 식(1)과 같이 표현된다. WVD는 선형적으로 변화하는 신호에 대해서 시간-주파수 공간에서의 높은 에너지 집중도를 나타내는 장점을 가지고 있으나 신호가 여러 개의 성분의 조합으로 이루어져 있을 때 실제신호에는 존재하지 않는 교차간섭성분(cross-term interference)이 나타나게 된다. 식(2)에서 WVD_{x_1} , WVD_{x_2} 는 자기성분(auto-term)으로 우리가 보고자 하는 신호성분이고 $2Re\{WVD_{x_1, x_2}(t, \omega)\}$ 항이 교차성분(cross-term)으로 제거해야 하는 노이즈 성분에 해당한다.

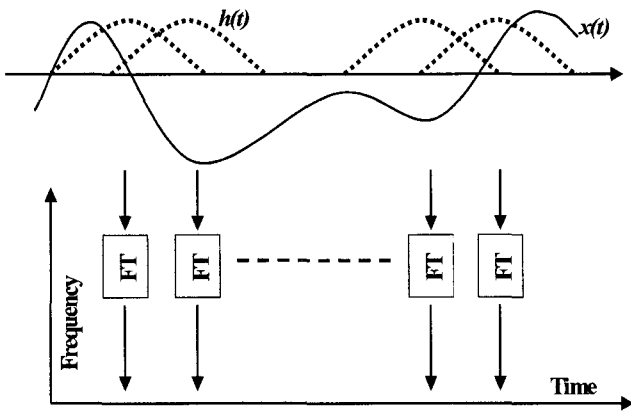


그림 2. Short time Fourier transform
Fig. 2. Short time Fourier transform

$$WVD(t, \omega) = \int \left(x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right) e^{j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

$$WVD_x(t, \omega) = WVD_{x_1}(t, \omega) + WVD_{x_2}(t, \omega) + 2Re\{WVD_{x_1, x_2}(t, \omega)\} \quad (2)$$

교차성분을 제거하기 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었으며 Cohen은 이를 일반화하여 Cohen's class 로 정리하였다. Cohen's class는 식(3)와 같이 정의된다.

$$C(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint M(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau\omega} d\theta d\tau \quad (3)$$

여기서 $M(\theta, \tau)$ 는 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} M(\theta, \tau) &= \phi(\theta, \tau) \int s^*\left(\mu - \frac{\tau}{2}\right) s\left(\mu + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta\mu} d\mu \\ &= \phi(\theta, \tau) A(\theta, \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)의 $\phi(\theta, \tau)$ 는 교차성분을 제거하기 사용되는 커널함수, $A(\theta, \tau)$ 는 자기성분의 적분항이다. 자기성분을 크게 하고 교차성분을 작게 하는 역할을 하는 다양한 커널들이 연구되어졌으며 이를 표2에 정리하였다[10-12].

표 2. 시-주파수 분석에 이용되는 커널함수들.

Table 2. Some time frequency distribution and their kernels.

이름	커널함수
General Class	$\phi(\theta, \tau)$
Wigner-Ville	1
Rihaczek	$e^{j\theta\tau/2}$
Choi-Williams	$e^{-\theta^2\tau^2/\sigma}$
Smoothed Pseudo WVD	$\phi_h(\tau) G(\nu)$
Cone kernel	$g(\tau) \tau \text{sinc}(\pi\tau\nu)$
Adaptive Optimal Kernel	$\Phi(\gamma, \phi) = \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\sigma(\phi)}\right)$

2. HRV 모의신호

시-주파수 분석에 사용되는 여러 가지 커널함수 중에서 HRV 신호에 적합한 방법을 선택하기 위해서 HRV 신호를 사용하여 성능을 평가하였다. 모의 HRV 신호는 Simone가 제안한 세 가지 합성신호를 이용해서 평가하였다. 각 신호는 HRV 성분을 모사한 것으로 여기에 주파수 성분의 변화를 추가하여 HRV신호의 변동에 대한 평가가 가능하다[13].

- 1) 그림 3(a)는 사인파 위상변조를 가진 신호이다. 호흡에 의한 정상심전도(respiratory sinus arrhythmia: RSA)의 주파수 변화를 나타낸 것으로 식(5)와 같다.

$$x_1(k) = 100 \cos\left\{ \frac{2\pi k}{4} - 10\pi \cos\left(\frac{2\pi k}{256}\right) \right\} \quad (5)$$

- 2) 그림 3(b)는 짧은 시간동안의 RSA 신호를 나타낸 것이며 식(6)과 같다.

$$x_2(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } k = 0, \dots, 63 \\ 100 \cos\left\{ \frac{2\pi k}{4} \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{k-28}{56}\right) \right] \right\} & \text{if } k = 64, \dots, 119 \\ 0 & \text{if } k = 120, \dots, 183 \end{cases} \quad (6)$$

- 3) 그림 3(c)는 두 가지 성분의 신호로 첫 번째 항은 HRV 신호의 LF 대역에 선형주파수 변조성분을 추가하였고 두 번째 항은 HF 대역을 나타낸 것으로 사인파 변조 성분을 가지고 있다.

$$\begin{aligned} x_3(k) &= 20 \cos\left\{ 2\pi f_1 \left[k + \frac{512 - k^2}{1000} \right] \right\} \\ &+ 25 \cos\left\{ 2\pi f_2 \left[k + 10 \cos\left(\frac{2\pi k}{500}\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

with $f_1 = 0.1$ and $f_2 = 0.25$

이렇게 만들어진 모의 HRV신호를 가지고 다음의 방법들을 이용하여 시-주파수 방법의 HRV 신호 분석능력을 평

가, 선택한 후 측정된 HRV신호에 적용하였다.

- 1) Short Time Fourier Transform(STFT)
- 2) Wigner Ville Distribution(WVD)
- 3) Smoothed Pseudo Wigner Ville Distribution(SPWVD)
- 4) Choi-Williams Distribution(CWD)

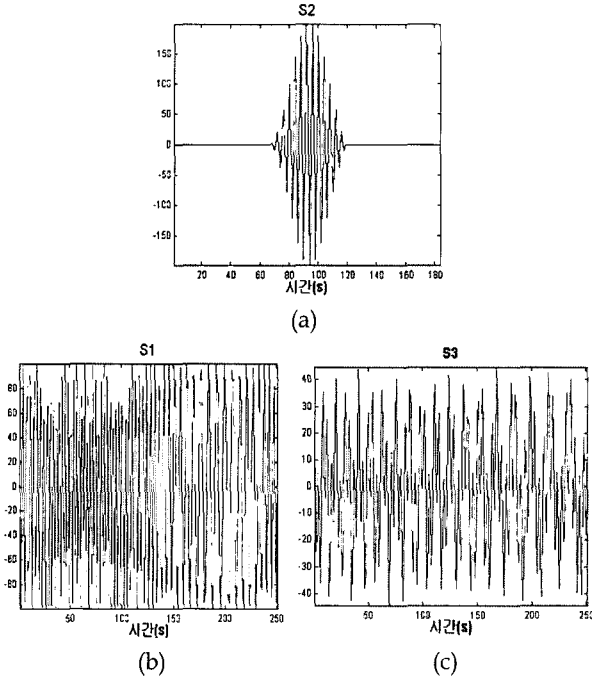


그림 3. 시-주파수 분석함수 커널 비교를 사용된 HRV 모의 신호
Fig. 3. The synthetic signals for the time frequency kernel test

3. 데이터 측정 및 심박변동신호 추출

본 연구에서는 동전 쌓기 작업을 이용하여 피험자에게 정신적인 스트레스를 인위적으로 부과하였다. 동전 쌓기 작업은 본 연구진에 의해 개발된 것으로 비교적 짧은 시간 안에 스트레스를 유발할 수 있으며 시간의 변화에 따른 스트레스 상태의 구분을 짓기가 용이하다는 장점을 가지고 있다[14].

20대의 남성 17명을 대상으로 실험을 하였다. 실험장소는 전자파 차폐실에서 시행하였고 실내온도를 18℃를 유지하였다. 데이터 측정 장비로는 BioPac사의 MP100을 사용하였으며 샘플링율은 1kHz, 분해능은 12bit로 하였다. 측정된 데이터는 PC로 전송되어 저장한 다음 분석하였다.

실험 전에 피험자에게 생체 신호측정에 필요한 전극들을 부착하였고 탁자 위에 5개를 한 무더기로 하여 쌓은 10원짜리 동전 25무더기를 준비하였다. 피험자는 30초 동안의 안정기를 갖은 후 동전을 한번에 한 무더기씩만 이동시키는 작업을 수행하도록 하였다. 실험 중에는 일체의 대화를 금지 하였으며 자신의 생체신호 데이터를 보지 못하도록 하였다. 그림4는 전체적인 스트레스 유발 프로토콜을 나타냈다. 피험자들은 실험의 초기 30초 동안에는 휴식을 취하고 그 이후부터 동전을 이동시켜 쌓아 올라갔다. 90초의 제한시간 내에 준비된 모든 동전들을 한 지점에 무너뜨

리지 않고 쌓아올리도록 요구하고 실험자는 피험자에게 10초마다 남은 시간을 육성으로 알려주었다. 측정된 심전도 신호는 Okada가 제안한 QRS detection filter를 이용하여 RR 간격으로 재구성 한 후에 cubic interpolation을 적용하여 5Hz down sampling을 하였다[15].

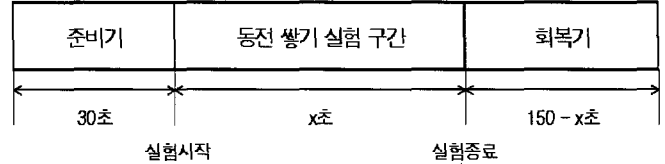
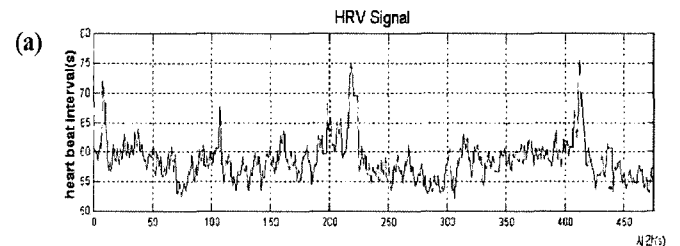


그림 4. 전체 실험 과정
Fig. 4. Experimental procedure

4. 시-주파수 방법을 이용한 HRV 파라미터 추출

그림5에서는 HRV신호의 분석 예를 보인 것이다. 그림 5(a)의 HRV 신호를 기존의 FFT나 AR을 이용해서 구한 그림 5(c), (d)의 경우 전체 시간에 대한 신호의 주파수 정보만 얻을 수 있는 것에 반해 그림 5(b)에서는 x축이 시간, y축이 주파수, z축의 명암은 스펙트럼 밀도를(power spectrum density: PSD) 나타내므로 각 시간대에서 신호의 주파수 분포를 관찰할 수가 있게 된다. 그림 5(b)를 삼차원 영역에서 보인 것이 그림 6(a)이다. 여기서 특정 주파수의 시간에 대한 변화를 보고자 한다면 각 주파수에 대한 시간의 단면을 구해야 하고 이를 시간-스트립(time-strip)이라 한다. 반면, 특정 시간에서의 주파수 스펙트럼의 분포를 보고자 한다면 시간에 대한 주파수축에서의 단면을 구하게 되고 이는 주파수-스트립(frequency strip)이라 한다[16].

본 연구에서는 스트레스 유발 시 나타나는 HRV의 주파수 대역의 변화를 보고자 하였으므로 그림 6(b)와 같이 전체실험 시간대에서 주파수 스트립을 구한 후 그림 6(c)와 같은 각각의 단면에서 주파수 영역(LF, MF, HF)에 대한 적분값과 자율신경계의 활동을 보여주는 LF/HF, MF/(LF+HF) 등을 구하였다. 각 피험자들의 실험종료 시점이 서로 다르기 때문에 실험구간동안의 데이터 길이를 90초가 되도록 샘플링율을 재조정된 다음 실험전후의 상태와 비교해 보기 위해서 그 앞뒤로 휴식기 데이터 30초와 회복기 데이터 10초를 삽입하여 데이터를 재구성하였다. 최종 분석에 사용된 데이터 포맷은 그림7과 같은 형태를 갖게 된다.



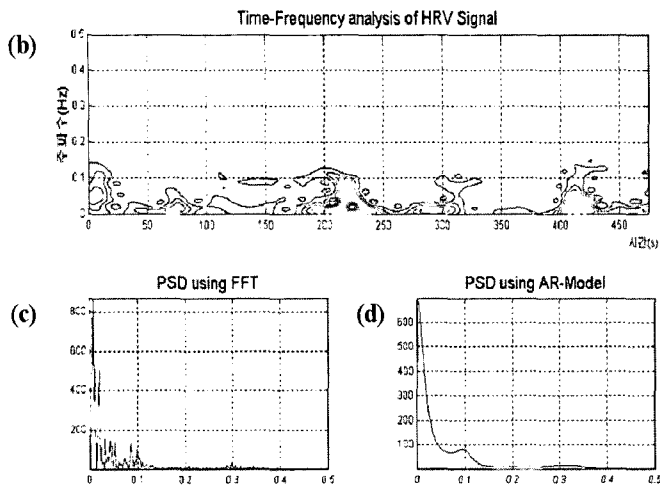


그림 5. HRV 신호 분석방법들
 (a) HRV 신호,
 (b) 시-주파수 분석을 한 HRV 신호,
 (c) FFT를 이용한 HRV 주파수 분석,
 (d) AR 모델을 이용한 HRV의 파워스펙트럼.

Fig. 5. Analysis methods of HRV signal
 (a) HRV Signal,
 (b) Time-Frequency Analysis of HRV Signal,
 (c) FFT result of HRV signal,
 (d) Power spectrum of HRV using AR-model

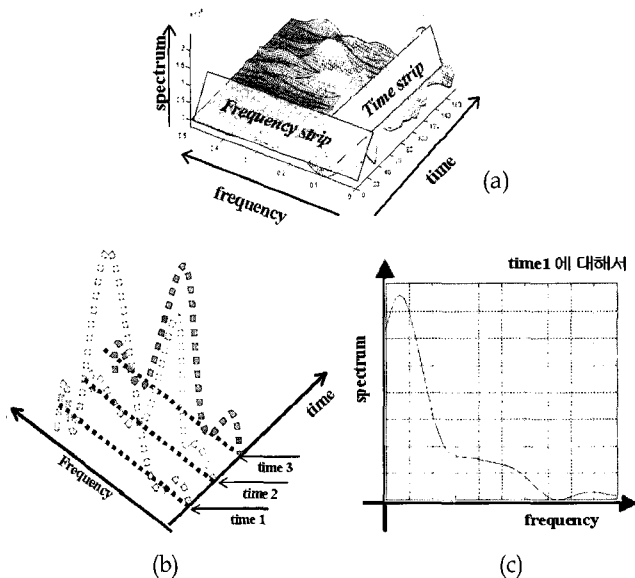


그림 6. 시간-주파수 영역에서의 시간-주파수 스트립
 (a) HRV 신호의 시간-주파수 분포
 (b) HRV 시간-주파수 분포에서 각 시간대의 주파수 분포
 (c) 주파수 스트립에서의 스펙트럼 분포

Fig. 6. Time, frequency-strip from Time-Frequency distribution of HRV signal

- (a) Time-frequency distribution of HRV signal
- (b) Frequency strip at each time
- (c) Instantaneous spectral density at time 1

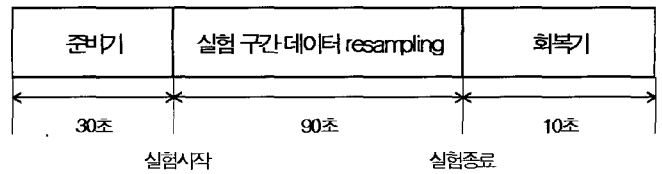


그림 7. 재구성된 데이터 포맷
 Fig. 7. Reconstruction data format

실험결과 및 고찰

1. 모의신호 실험결과

그림 8에서는 여러 가지 시-주파수 방법들을 비교하기 위해서 그림4에 나타낸 모의 HRV 신호에 적용한 결과를 나타내었다. 그림 8(b)~(e)은 네 종류의 시-주파수 분석방법을 이용하여 분석한 HRV 모의 신호의 시-주파수 영역에서 분석결과이다. 각각의 그림에서 x축은 시간, y축은 주파수, z축의 명암은 스펙트럼 밀도를 나타낸다. WVD에서는 교차간섭현상으로 생기는 노이즈들로 인해서 신호의 특성이 제대로 보여 지지 않는 반면, SPWVD, CWD에서는 이러한 교차성분을 제거하는 커널함수가 사용되어 노이즈들이 제거됨으로 주파수 변화의 특성이 잘 나타남을 볼 수 있다.

x1(k) 신호는 k=64에서 가장 높은 주파수 값(0.372Hz)을 갖게 되는데 이를 이용하여 주파수 분해능(frequency resolution)에 대한 평가를 하였다. 그림9(b)~(e)는 시-주파수 영역에서 특정시간대(64s)의 주파수 스트립을 보여준다. x1신호는 64s에서 0.372Hz값을 가지는데 이를 얼마나 정확하게 표현하는지를 그림에서 알 수 있다. STFT에 비해서 WVD, SPWVD, CWD가 보다 정확하게 주파수 성분을 표현하고 있으나 WV의 경우에는 교차간섭현상으로 인한 노이즈 성분으로 인해 정확한 성분의 감지가 어려운 단점이 있음을 알 수 있다. SPWVD와 CWD 방법이 다른 방법들에 비해서 우수한 주파수 분해능을 보였다.

그림10은 x2(k) 신호의 시간 스트립(f=0.25Hz)을 구한 것으로 시-주파수 방법들의 시간-분해능(time resolution)과 짧은 시간의 신호 검출에 대한 효율성을 평가하였다. STFT의 경우 Cohen's class에 속한 다른 시-주파수 함수들에 비해서 퍼짐이 있어서 주파수 성분의 정확한 시간대를 표현하지 못했으며 나머지 다른 방법들은 거의 비슷한 수준의 시간 분해능 성능을 보였다.

마지막으로 x3(k)는 두 개의 주파수 변조성분으로 구성되어 있으며 시-주파수 공간에서 계산되어진 파워스펙트럼을 이용하여 교차성분의 양을 측정하였다. 교차성분의 양은 전체 파워스펙트럼에 대한 음의 파워스펙트럼의 값의 비로 나타내며 표3에 각 시-주파수 분석방법에 대한 교차성분비를 나타내었다. WVD방법은 교차성분을 제거하지 않고 그대로 통과시키므로 가장 많은 교차성분을 가지고 있었으며 CWD의 경우가 가장 우수한 교차성분 제거능력을 가지고 있다.

시-주파수 분석방법의 결정에는 시간 분해능, 주파수 분해능, 교차성분 제거능력 등을 고려하게 되는데 HRV 모의 신호를 이용해 실험한 결과 SPWVD, CWD 방법이 우수한

성능을 나타내었다. 교차성분제거 능력이나 분해능 면에서 CWD 방법이 다소 우수한 결과를 보이거나 계산속도에 있어서 CWD 방법은 지수함수를 커널로 사용하기 때문에 느린 단점을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 SPWVD 방법을 이용하여 HRV 신호를 분석하였다.

표 3. 각 시-주파수 분석방법에 대한 교차성분의 양
Table 3. The amount of cross-term of time-frequency analysis method

	WVD	SPWVD	CWD
Cross term reduction(P_{neg} %)	46%	12%	6%

2. 스트레스 부여시의 HRV 신호결과

그림11은 동전쌍기 실험을 하는 동안에 측정된 HRV 신호에서 각 주파수 성분들을 시-주파수 분석방법을 이용하여 구한 피험자 한명에 대한 결과이다. 그림11(a)~(c)는 LF, MF, HF 성분이고 (d),(e)는 각 주파수 값으로 구한 LF/HF, MF/(LF+HF) 값이다. 각 그림에서 x축은 시간, y 축은 각 주파수 성분 영역에서의 적분값이다. 모든 피험자들에게서 HRV신호의 각 주파수 성분값을 구한 다음 그림 8의 데이터 포맷으로 재구성하였다.

작업에 의한 정신적 스트레스를 가장 잘 대변하는 성분은 HRV의 LF/HF 라는 기존의 연구결과에 따라 본 연구에서도 시-주파수 분석방법을 통해 얻어진 결과에서 LF/HF 값을 가지고 동전 쌍기에 따른 정신적 스트레스의 변화를 살펴보았다. 그림 12는 전체 피험자들의 평균값으로 실험하는 동안의 LF/HF 비의 변화를 보여준다. 실험시작을 전후로 가장 높은 값을 보였으며 실험이 진행되는 동안 감소하다가 종료하는 시점에서 다시 증가하는 모양을 보였다.

실험구간 동안에 느끼는 긴장도와 실험수행 능력과의 연관성을 알아보기 위해서 동전이 무너지는 평균시간을 기준으로 두 그룹으로 나누어 LF/HF 값의 차이를 알아보았다. 그림 13에서 실선은 평균시간 이상의 실험수행 능력을 보인 그룹의 LF/HF 값의 변화를 나타낸 것이고 점선은 그 이하의 수행 능력을 보인 사람들의 변화를 나타낸 것이다. 수행능력이 낮은 그룹의 값이 높은 그룹에 비해서 실험이 진행되는 동안 높은 수준의 값을 유지하고 있었다. 이는 상대적으로 높은 수준의 스트레스를 받았던 것을 의미한다고 볼 수 있을 것이다.

결 론

본 연구에서는 시-주파수 분석방법을 이용하여 HRV 신호의 주파수 성분변화를 분석하였다. 기존의 파워스펙트럼 분석방법들을 이용하는 경우 신호를 짧은 구간으로 분할하는 과정이 필요하게 되므로 단시간동안 발생하는 인체의 변화를 감지하기에 어렵다는 단점이 있다. 반면 본 연구에서 제안한 시-주파수 분석방법을 이용하면 신호를 분할하는 과정 없이 모든 시간대에 대한 주파수 스펙트럼 분포를 구할 수 있으므로 순간적으로 변화하는 주파수 성분의 변화를 감지하기가 용이하다는 장점을 가지게 된다.

최근에도 여러 연구들에서 새로운 시-주파수 커널함수들이 소개되고 있으나 본 연구에서는 제한적으로 네 가지 종류를 선택하여 HRV 모의신호에 적용하여 그 결과를 보았다. 본 연구에서 제안한 성능 평가방법을 적용하면 다른 시-주파수 분석방법들에 대한 성능평가도 가능할 것이다.

모의 HRV 신호에 적용한 결과를 바탕으로 SPWVD 방법을 선택하였고 동전쌍기 실험을 실시하여 측정된 HRV 신호에 적용하였다. 시-주파수 영역에서 HRV의 성분들을 추출한 다음 LF/HF 값을 가지고 그 변화를 살펴보았는데 실험시작과 동전이 무너지는 시점의 긴장도를 잘 대변해주는 것을 알 수 있었다. 실험수행능력을 기준으로 두 그룹으로 나누어 본 결과에서 수행능력이 낮은 사람들은 높은 사람들에게 비해서 LF/HF 값이 높은 수준을 유지하고 있었으며 이는 스트레스를 많이 받는 사람들의 경우 작업능력의 저하가 올 수 있음을 의미한다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Heiko Schoder, Daniel H. Silverman, Roxana Campsi, Harold Karpman, Michael E Phelps, Heinrich R. Schelbert, Johannes Czernin, "Effects of Mental Stress on Myocardial Blood Flow and Vasomotion in Patients with Coronary Artery Disease", The Journal of Nuclear Medicine, vol.41, no.1, pp11-16, 2000
2. Willem J. Kop, John S.Gottdiener, Stephan M Patterson, David S. Krantz, "Relationship between left ventricular mass and hemodynamic response to physical and physical stress", Journal of Psychosomatic Research, vol.48, pp79-88, 2000
3. Jean Pierre Fauvel, Catherine Cerutti, Pierre Quelin, Maurice Laville, "Mental Stress-Induced Increase in Blood Pressure IS Not Related to Baroreflex Sensitivity in Middle-Aged Healthy Men", Hypertension, vol.35, pp887-891, 2000
4. G.Gerra, A.Zaimovic, U.Zambelli, M.Timpano, N.Reali, "Neuroendocrine Responses to Psychological Stress in Adolescents with Anxiety Disorder", Neuropsychophysiology, vol.42, pp82-92, 2000
5. Rollin McCraty, Mike Atkinson, William A. Tiller, Glen Rein, Alan D. Watkins, "The Effects of Emotions on Short-Term Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability", The American Journal of Cardiology, vol.76, pp1089-1093, 1995
6. Sloan RP, Shapiro PA, Bagiella E, Boni SM, Paik M, Bigger JT Jr, Steinman RC, Gorman JM., "Effect of mental stress throughout the day on cardiac autonomic control", Biological Psychology, vol.27, no.2, pp89-99, 1994
7. Bianchi AM, Mainardi L, Petrucci E, Signorini MG, Mainardi M, Cerutti S, "Time-variant power spectrum analysis for the detection of transient episodes in HRV signal", IEEE Trans Biomed Eng., pp136-144, vol.40, no.2, 1993
8. F.Claria, M.Vallverdu, R.Baranowski, L.Chojnowska, "Time-Frequency Analysis of RT and RR Variability to

- Stratify Hypertropic Cardiomyopathy Patients*", Computer and Biomedical Research, vol.33, pp416-430, 2000
9. Hsiao Lung Chan, Jiunn Lee Chin, Chao Chen Du, Chien Ping Wu, "Time Frequency distribution of Heart Rate Variability below 0.05Hz by Wigner-Ville Spectral Analysis in Congestive Heart Failure Patients", Med. Eng. Phys., vol.19, no.6, pp581-587, 1997
 10. L.Cohen, "Time-frequency distributions-a review", Proc. IEEE, vol.77, No.7, pp941-981, 1989
 11. Shie Qaian, Dapang Chen, "Joint Time-Frequency Analysis", IEEE Signal Processing Magazine, March, pp52-67, 1999
 12. Franz Hlawatch, Thulasinath G. Manickam, Rudiger L. Urbanke, William Jones, "Smoothed pseudo Wigner distribution, Chio-Williams distribution, and Cone-kernel representation, Ambiguity domain analysis and experimental comparison", Signal Processing, vol.43, pp149-168, 1995
 13. Simone Pola, Alberto Macerata, Michele Emdin, "Estimation of the Power Spectral Density in Nonstationary Cardiovascular Time Series: Assessing the Role of the TFR", IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol.43, no.1, pp46-59, 1996
 14. A.Sul, J.Shin, C.Lee, Y.Yoon, "Evaluation of Stress Reactivity and Recovery using Biosignals and Fuzzy Theory", vol.20, no.3, Proceeding of the 20th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 1998
 15. Masahito Okada, "A Digital Filter for the QRS Complex Detection", IEEE Transaction On Biomedical Engineering, vol.26, no.12, pp700-703, 1979
 16. S.H.Lee, S.O.Hwang, Y.R.Yoon, "Detection of Ventricular Fibrillation using Time frequency Analysis", J.Biomed.Eng.Res., vol.20, no.6, pp561~571, 1999