

수면단계 자동분류를 위한 심박동변이도 분석

Analyzing Heart Rate Variability for Automatic Sleep Stage Classification

김원식*(*[△]***), 김교현** · 박세진* · 신재우*** · 윤영로***

Wuon-Shik Kim*(*[△]***), Kyo-Heon Kim**, Se-Jin Park*, Jae-Woo Shin***, Young-Ro Yoon***

Abstract : Sleep stages have been useful indicator to check a person's comfortableness in a sleep. But the traditional method of scoring sleep stages with polysomnography based on the integrated analysis of the electroencephalogram(EEG), electrooculogram(EOG), electrocardiogram(ECG), and electromyogram(EMG) is too restrictive to take a comfortable sleep for the participants. While the sympathetic nervous system is predominant during a wakefulness, the parasympathetic nervous system is more active during a sleep. Cardiovascular function is controlled by this autonomic nervous system. So, we have interpreted the heart rate variability(HRV) among sleep stages to find a simple method of classifying sleep stages. Six healthy male college students participated, and 12 night sleeps were recorded in this research. Sleep stages based on the "Standard scoring system for sleep stage" were automatically classified with polysomnograph by measuring EEG, EOG, ECG, and EMG(chin and leg) for the six participants during sleeping. To extract only the ECG signals from the polysomnograph and to interpret the HRV, a Sleep Data Acquisition/Analysis System was devised in this research. The power spectrum of HRV was divided into three ranges ; low frequency(LF), medium frequency(MF), and high frequency(HF).

It showed that, the LF/HF ratio of the Stage W(Wakefulness) was 325% higher than that of the Stage 2($p < .05$), 628% higher than that of the Stage 3($p < .001$), and 800% higher than that of the Stage 4($p < .001$). Moreover, this ratio of the Stage 4 was 427% lower than that of the Stage REM(rapid eye movement) ($p < .05$) and 418% lower than that of the Stage 1($p < .05$), respectively. It was observed that the LF/HF ratio decreased monotonously as the sleep stage changes from the Stage W, Stage REM, Stage 1, Stage 2, Stage 3, to Stage 4. While the difference of the MF/(LF+HF) ratio among sleep Stages was not significant, it was higher in the Stage REM and Stage 3 than that of in the other sleep stages in view of descriptive statistic analysis for the sample group.

Key words : Sleep stage, Polysomnography, electrocardiogram(ECG), heart rate variability(HRV), rapid eye movement(REM)

요약 : 수면단계는 수면감을 평가하는 데 있어서 중요한 생리지표로서 사용되어 왔다. 그러나 수면다원검사를 이용한 전통적 수면단계 분류방법은 뇌전도(electroencephalogram : EEG), 안전도(electrooculogram : EOG), 심전도(electrocardiogram : ECG), 근전도(electromyogram : EMG) 등을 종합적으로 측정하므로 수면단계를 비교적 정확히 분류할 수 있지만 피험자에게 심한 구속감을 주는 문제가 있다. 본 연구에서는, 각성상태에서 교감신경계가 지배적인 반면에 수면 중에는 부교감신경계가 더 활동적인 점에 착안하여 수면단계를 간단히 분류할 수 있는 방법을 찾고자 수면단계에 따른 심박동변이도(heart rate variability : HRV)를 분석하였다. 이 실험에는 건강한 대학생 6명이 2일씩 전체 12회의 야간수면에 참여하였다. 수면다원검사 장치를 이용하여 피험자들이 수면을 취하고 있는 동안, EEG, EOG, ECG, EMG(턱 및 다리)를 측정하여 수면단계를 "Standard scoring system for sleep stage"에 따라 자동으로 분류하였다. 그런 뒤, 본 연구를

* 한국표준과학연구원 생활계측그룹, Life Environment Measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science

** 충남대학교 심리학과, Dept. of Psychology, Chungnam National University

*** 연세대학교 보건과학대학 의공학과, Dept. of Medical Engineering, Yonsei University

통하여 제작된 Sleep Data Acquisition/Analysis 시스템을 이용하여 수면다원검사 장치로부터 ECG신호만 추출하여 HRV의 전력스펙트럼을 3개의 영역(저주파수대역(low frequency : LF), 중간주파수대역(medium frequency : MF), 고주파수대역(high frequency : HF))으로 나누어 분석하였다. 단일채널 ECG를 이용하여 수면단계별로 HRV의 LF/HF를 분석한 결과, W(wakefulness)단계가 2단계에 비하여 325% 높게($p < .05$), 3단계에 비하여 628% 높게($p < .001$), 4단계에 비하여 800% 높게($p < .001$) 나타났으며, 4단계는 REM(rapid eye movement)단계에 비하여 427% 낮게($p < .05$), 1단계에 비하여 418% 낮게($p < .05$) 나타났다. 또한 LF/HF가 수면단계에 따라 변화하는 양상은 W, REM, 1, 2, 3, 4단계의 순으로 단조 감소하였다. 한편, 수면단계별 MF/(LF+HF)의 차이는 유의하지 않았으나 표본집단의 기술통계치를 살펴본 바 REM단계와 3단계의 평균치가 가장 높았다.

주요어 : 수면단계, 수면다원검사, 심전도, 심박동변이도, 급속안구운동

1. 서론

수면무호흡증과 같이 수면 중에 발생하는 병을 진단하기 위하여 사용되는 수면다원검사(polysomnography)는 환자의 EEG, EOG, ECG, EMG(턱 및 다리), 혈중 산소농도(O_2 saturation), 호흡, 몸통 움직임 등을 복합적으로 측정한다. 그러나 사실상 환자는 이러한 전극들에 의하여 심하게 구속되므로 정상적인 수면을 취하기가 쉽지 않지만 수면 중에 발생하는 병을 진단하기 위해서는 부득이 이 방법을 사용해왔다. 한편, 환자가 아닌 일반인을 대상으로 수면환경 변화에 따른 수면감 평가를 하는 경우에는, 객관적 생리 지표로서 수면단계의 파악이 중요한데 이러한 수면다원검사 방법으로는 전극들에 의한 심한 구속감 때문에 자연스러운 수면을 취하기가 어려워 수면환경에 의존하는 수면단계의 변화를 측정하기가 용이하지 않다[7-8]. 따라서 자연스러운 수면상태에 따라 변하는 수면단계의 분류에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 측정에 수반되는 구속감을 줄이도록 수면단계와 가장 상관성이 높은 단일채널의 생체신호를 측정하여 수면단계를 분류하는 알고리즘의 개발이 필요하다.

단일채널을 이용한 수면단계분류 연구로는 인공신경망과 유전자알고리즘에 기초하여 단일채널 EEG신호를 이용한 수면단계 분류시스템이 개발되었으나 [6], 신호의 크기가 작아서 측정에 많은 제약이 따르는 단점이 있다. 한편, ECG신호는 생체신호 중에서 가장 크고 측정이 용이하므로 Inbe 등은 단일채널 ECG신호를 이용하여 수면 중 HRV와 수면단계와의 관련성을 연구한 결과, 서파수면단계(slow wave

sleep stages ; 3, 4단계)가 그 이외의 수면단계(REM, 1, 2단계)에 비하여 부교감신경계의 활성도가 증가한 반면에 교감신경계의 활성도는 감소함을 보고하였다 [5]. Bunde 등은 각 수면단계에서 HRV를 분석한 결과 REM단계에서만 W단계에서와 유사한 long-range 상관성을 발견하였는데 그 원인으로서는 REM단계에서의 증가된 뇌 활동이 자율신경계에 영향을 미친 것으로 해석하였다. 반면에 NREM(non REM)단계들에서는 뇌 활동의 영향이 줄어들어서 HRV의 상관성이 거의 발견되지 않았고 HRV가 더욱 random한 양상을 나타낸다고 보고하였다[2]. Fell 등은 수면 중에 측정된 ECG에 비선형해석을 적용함으로써 3, 4단계에 비하여 REM단계 동안 복잡성(complexity)은 감소한 반면에 카오스 특성이 증가하고(HRV의 증가로 비유됨), 1단계에 비하여 REM단계 동안 상관 차원(Correlation dimension) D_2 와 Kolmogorov entropy K_2 가 감소함을 밝혔다[3-4]. 이와 같이 단일채널 ECG신호를 이용한 수면단계분류연구가 다양한 방법으로 시도되고 있으나 수면단계별로 명확한 특징을 추출해 내는 분석알고리즘은 아직 개발하지 못한 실정이다.

본 연구에서는 환자에게 구속감을 최소화시키고 간단히 수면단계를 분류할 수 있는 방법을 개발하기 위하여, 수면다원검사 장치에 의하여 수면단계를 분류한 뒤 이 장치로부터 ECG신호만 추출하여 수면 중 자율신경계의 변화를 가장 잘 반영시키는 것으로 알려져 있는 HRV의 LF/HF와 MF/(LF+HF)를 계산하여 수면단계별로 유의한 차이가 있는지 고찰해보았다.

2. 이론해석

수면은 4단계로 구성된 비급속안구운동(NREM) 수면과 급속안구운동(REM) 수면으로 이루어지는데, 정상적인 성인의 1일 평균수면시간은 대략 7.5시간으로서 NREM 1, 2, 3, 4단계를 거쳐 다시 3, 2단계를 지나 REM단계까지 평균 90분의 주기로 하룻밤 동안 5회 정도 반복한다. NREM 수면시간은 주기가 진행될수록 감소하는 데 반하여 REM 수면시간은 증가하며 정상적인 성인의 하룻밤 수면시간의 약 75%는 NREM 수면시간이며 약 25%는 REM 수면시간이다. NREM 수면은 육체적 회복과 관련이 있는 반면에 REM 수면은 정신적 회복과 관련이 있으며 이 기간동안 대체로 꿈을 꾸는 것으로 알려져 있는데 뇌의 활동은 각성상태와 비슷한 수준이지만 근육의 긴장도는 극도로 떨어지는 것이 특징이다. 또한 수면은 심장동역학을 제어하는 교감과 부교감신경계의 조절과 관련되어 있으며, 수면 중에는 부교감신경계의 활성도가 증가하는 반면에 교감신경계의 활성도는 감소한다[1].

한편, ECG신호의 R-R 간격 변화로부터 HRV를 계산할 수 있는데, 그 전력스펙트럼은 주파수영역에 따라 크게 세 부분(LF(0.01~0.08Hz), MF(0.08~0.15 Hz), HF(0.15~0.5Hz))으로 나눌 수 있다. LF는 교감신경계의 활동을 주로 반영하고 부교감신경계의 활동은 조금 반영하는 반면에 HF는 거의 전적으로 부교감신경계의 활성도를 반영하므로 LF/HF는 교감신경계와 부교감신경계의 균형을 측정하는 지표로 사용되어왔다. MF는 교감과 부교감신경계의 혼합 활성도를 나타내지만 부교감신경계의 활성도를 훨씬 더 많이 반영한다고 알려져 왔다. 또한 감정상태와 HRV의 상관성에대한 연구로서 화가 났을 때와 같은 부정적 감성을 느낄 때는 LF/HF가 증가하는 반면에 감사한 마음을 가질 때와 같은 긍정적 감성을 느낄 때는 MF/(LF+HF)가 증가하며, 특히 후자는 감정상태의 변화와 밀접한 관계를 갖는다는 연구결과가 보고 되었다[9].

이러한 이론적 배경에 기초하여, 본 연구에서는 W 단계에 비하여 수면 4단계와 같이 깊은 수면상태로

갈수록 교감신경계보다 부교감신경계의 활성도가 증가할 것이므로 LF/HF 지표가 감소할 것이고, REM 수면상태에서 꿈을 꾸는 동안 부정적 감성지표로서 LF/HF와 감정변화 및 긍정적 감성지표로서의 MF/(LF+HF)가 증가할 것으로 기대되어 수면단계별 두 가지 지표들의 차이를 조사해보았다.

3. 실험방법

본 연구에서는 수면다원검사 장치(모델 : Medilog SAC847)에 의하여 자동으로 분류된 수면단계에 따라 HRV의 LF/HF와 MF/(LF+HF) 각각의 차이를 조사하기 위하여 건강한 성인남자 6명(20~25세)에 대하여 1인당 2회씩 전체 12회의 야간수면실험을 수행하였다. 수면환경으로서 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$, 배경소음은 20dB(A) 이하로 제어되었으며 불빛은 완전히 차단하였고 피험자가 침대 틀이 없는 매트리스(에이스침대 제품)에서 수면을 취하도록 하였다. 전극을 붙이기 최소한 6시간 전부터 커피, 담배 등을 금지시켰으며 수면실험 기간 중에는 어떠한 약물도 복용하지 말도록 지시하였다. 밤 10시부터 전극을 붙이기 시작하였으며 측정에 혐오감을 갖지 않도록 충분한 설명을 하였다. 밤 11시경에 취침을 시키고 곧바로 측정을 시작하였으며 다음날 피험자가 자연적으로 깨어날 때까지 1회의 수면실험은 평균 6~8시간씩 지속되었다. 수면다원검사 장치를 사용하여 EEG 2채널(C3-A2, C4-A1), EOG 2채널[LOC(left outer canthus)-A2, ROC(right outer canthus)-A1], EMG 2채널(턱, 정강이)과 ECG 1채널로 구성된 전체 7채널의 생리신호를 측정하였으며 이마에는 접지전극을 부착시켰다.

EEG 전극배치(A1, A2, C3, C4)는 “International 10-20 electrode placement system”를 참고하였으며, 수면단계는 “Standard scoring system for sleep stage”에 따라 수면다원검사 장치에 의하여 자동으로 분류되었다[10]. 그런 뒤 수면다원검사 장치에 장착되어있는 아날로그신호 출력단자를 통해 각 수면 단계에 따른 ECG 신호를 10 epochs씩(5분간의 신호 측정치) 본 연구에서 제작한 Sleep data Acquisition/

Analysis System으로 읽어 들여 Matlab ver. 5.3 소프트웨어를 이용하여 HRV를 해석하였다(그림 1). HRV신호는 250Hz로 샘플링 된 ECG 신호의 R-R 간격으로부터 구하였으며 HRV의 전력밀도를 구하기 위하여 AR(autoregressive) 모델을 적용하였고 그 파라미터는 Yule-Walker방법으로 구현하였다. AR모델의 차수는 Akaike information criterion이 최소가 되도록 21로 결정하였다.

측정된 값들의 통계적 해석을 위하여 SPSS window ver. 10을 사용하였으며 데이터들은 One-way ANOVA 방법으로써 연구 참여자 6명에 대하여 각성상태 1단계와 수면상태 5단계를 포함하는 전체 6단계들의 LF/HF와 MF/(LF+HF) 각각에 대한 차이검증을 하였다. 통계적 유의성 기준은 $p < .05$ 수준을 택하였다.

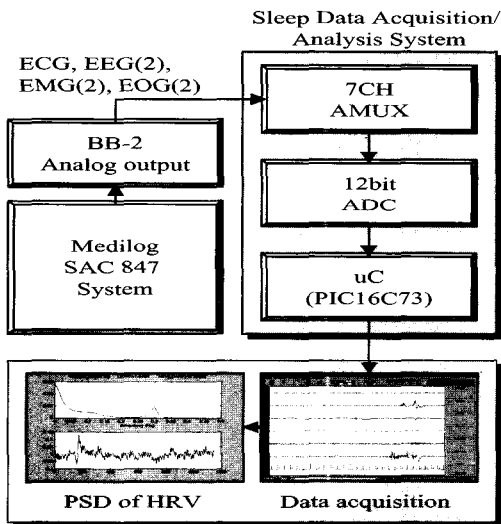


그림 1. 수면다원검사 장치의 아날로그 출력단자를 통해 ECG 신호를 수집하여 HRV를 해석하는 시스템

4. 결과

수면단계에 따른 LF/HF의 차이검증을 실시하기에 앞서, 수면단계별 분산정도에서 큰 차이가 나타나 동변량성(Homogeneity of Variances) 검증을 하였다(표 1의 표준편차 참고). 그 결과 전집(population)에서의 동변량성 가정에 위반되므로 $F(5, 30)=5.12$, $p < .01$ 원 점수 값들을 log변환시켜서, 각 수면단계

들의 LF/HF를 반복측정치로 하는 One-way ANOVA를 실시한 바 수면단계별로 LF/HF가 유의하게 차이가 났다($F(5, 25)=23.21$, $p < .001$). 이러한 차이가 구체적으로 어떤 수면단계들 간에 비롯되었는지를 Turkey 방법으로 사후검정한 결과, W단계가 2단계보다는 325% 높게($p < .05$), 3단계보다는 628% 높게($p < .001$), 4단계보다는 800% 높은 것으로($p < .001$) 나타났으며, 그리고 REM단계가 4단계보다 427% 높게($p < .05$), 1단계가 4단계보다 418% 높은 것으로($p < .05$) 나타났다(표 1, 그림 2). 즉, 저자들이 기대한 바와 같이 교감-부교감 균형지수로서의 LF/HF가 W, REM, 1, 2, 3, 4단계 순으로의 깊은 수면단계로 접어들면서 단조 감소하였다. 한편, 수면단계별 MF/(LF+HF)의 차이에 대해 One-way ANOVA를 실시한 결과 유의한 차이가 없으나($F(5,25)=0.72$, $p > .05$), 표본집단의 기술통계치를 살펴보면 REM단계와 3단계에서 높은 경향을 보였다(표 2).

표 1. 수면단계에 따른 LF/HF의 차이검증 결과

수면단계	평균	표준 편차	자유도	F값	사후검증 (Turkey)
1) W단계	8.8	4.9			
2) REM단계	5.2	3.9			
3) 1단계	4.6	3.2	5/25	23.21***	1) > 4), 5), 6)
4) 2단계	2.7	1.7			6) < 2), 3)
5) 3단계	1.4	0.7			
6) 4단계	1.1	0.6			

*** $p < .001$

표 2. 수면단계에 따른 MF/(LF+HF)의 차이검증 결과

수면단계	평균	표준 편차	자유도	F값
1) W단계	0.11	0.04		
2) REM단계	0.15	0.08		
3) 1단계	0.12	0.01	5/25	0.72
4) 2단계	0.12	0.04		
5) 3단계	0.16	0.07		
6) 4단계	0.14	0.05		

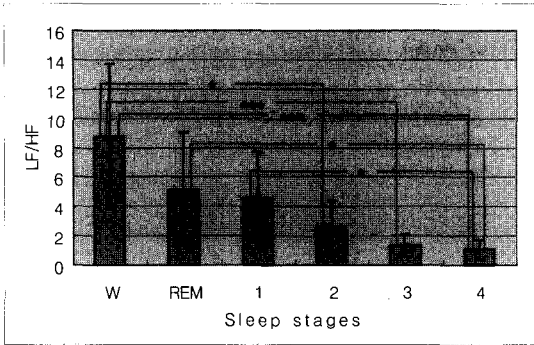


그림 2. 수면단계에 따른 LF/HF 변화(*p<.05, ***p<.001)

5. 고찰

본 연구로부터 단일채널 ECG를 측정하여 HRV의 LF/HF를 분석함으로써 수면 2, 3단계들은 W단계와 고만 분류가 가능하지만 4단계는 W단계뿐만 아니라 REM 및 1단계와도 분류가 가능함을 밝혔다. 즉, W 단계가 2, 3, 4단계보다 유의하게 높은 것으로 나타나 이들 수면단계들 간의 분류가 가능하고, 또한 4단계가 REM 및 1단계보다 유의하게 낮게 나타나 이들 수면단계들 간의 분류도 가능하다. 단일채널 ECG를 이용하여 Inbe 등은 3, 4단계와 그 이외의 수면단계 사이의 차이를, Bunde 등은 W, REM단계와 그 이외의 수면단계 차이를, Fell 등은 REM단계와 1, 3, 4단계의 차이를 분류할 수 있음을 보였다(표 3). 그러나 단일채널 ECG를 사용하여 W단계와 REM단계의 차이, 1단계와 2단계의 차이, 3단계와 4단계의 차이를 분류할 수 있는 지표는 저자들이 조사한 바로는 아직 보고되지 않았다. 그런데 이 중에서 W단계와 REM 단계의 구별은 피험자에게 가장 구속감을 적게 주는 방법으로서 EMG 1채널을 추가시키면 REM수면시의 근육긴장도가 최하로 떨어짐으로 구분이 쉽게 될 것이다. 또한 EMG를 측정하지 않더라도 REM 단계 동안 80%정도 꿈을 꾸며 꿈과 정보처리를 통하여 감정이 조절되므로[11], 이에 따르는 감정변화가 잘 반영되는 MF/(LF+HF) 지표를 포함하여 향상된 신호처리 기술과 정교한 실험설계 방법을 적용하면 REM 단계의 구별이 가능하리라 본다.

본 연구에서 전 집단에 대하여는 유의하지 않으나,

본 실험에 참여한 6명에 대하여는 REM단계와 3단계에서 MF/(LF+HF)가 가장 높게 나타났는데, 이 수면 단계들에 대하여 꿈과 관련한 추가적 연구가 필요하다고 사료된다. 한편, 저자들이 기대한 바와 같이 교감-부교감 균형지수로서의 LF/HF는 W, REM, 1, 2, 3, 4단계 순으로의 깊은 수면단계로 접어들면서 단조 감소하는 양상을 보였다.

표 3. 단일채널 ECG를 이용한 수면단계 분류에 관한 다른 저자들의 연구결과와 비교

Authors	Sleep stages						Methods
	W	REM	1	2	3	4	
Inbe et al. (1996)	>	>	>	>	<	<	HRV 분석
Bunde et al. (2000)	>	>	<	<	<	<	HRV의 자기상관성분석
Fell et al. (2000)		>	<		<	<	ECG에 비선형 해석 적용
Kim et al. (본 연구)	>			<	<	<	HRV 분석

* 각 저자별로 구분할 수 있는 수면단계를 “<”와 “>” 기호로 구분하였음. (예 : Kim et al.은 W단계와 2, 3, 4단계를 구분할 수 있고, 또한 REM 및 1단계를 4단계로부터 구분할 수 있음을 뜻함.)

6. 결론

단일채널 ECG를 이용하여 수면단계별로 HRV의 LF/HF를 분석한 결과 2, 3단계의 값들은 W단계의 값보다 유의하게 작고, 4단계는 W단계뿐만 아니라 REM 및 1단계보다도 유의하게 작으므로 이들 수면 단계간의 분류가 가능하다. 또한 저자들이 기대한 바와 같이 LF/HF는 W, REM, 1, 2, 3, 4단계 순으로의 깊은 수면단계로 접어들면서 단조 감소하였다. 한편, 수면단계에 따른 MF/(LF+HF)는 수면단계별로 유의한 차이가 없지만, 표본집단의 기술통계치를 살펴보면 REM단계와 3단계의 평균치가 가장 높다.

결론적으로, 피험자에게 심한 구속감을 주는 수면 다원검사 장치를 사용하지 않고, 단일채널 ECG로만 측정하더라도 HRV에 비선형해석 등 복합적 분석을 적용하면 1단계와 2단계의 분류, 그리고 3단계와 4단계의 분류를 제외하고는 그 이외의 수면단계들의

분류가 가능하다고 사료된다.

본 연구 결과를 감성공학적 측면에 응용했을 때의 시사점을 찾아본다면, 쾌적한 수면환경을 개발하기 위하여 수면감성 평가시 단일채널의 ECG를 측정하여 HRV를 분석함으로써 수면단계가 정상적인 패턴으로 변하는가를 평가할 수 있다. 이 기술은 사용자에게 구속감을 최소로 하고 간편하며, 생체신호측정에 기반을 둔 객관적이고 정량적인 수면감성평가방법으로서 유용하게 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 이영호(1991), 수면과 뇌, 6-106, 대한교과서 주식회사, 서울.
- [2] Bunde, A., Havlin, S. Peter, J. H., & Voigt, K.(2000), Correlated and Uncorrelated Regions in Heart-Rate Fluctuations during Sleep, Physical Review Letters, 85-17, 3736-3739.
- [3] Fell, J., Mann, K., Roschke, J., & Gopinathan, M. S.(2000), Nonlinear analysis of continuous ECG during sleep I. Reconstruction, Biological Cybernetics, 82-6, 477-483.
- [4] Fell, J., Mann, K., Roschke, J., & Gopinathan, M. S.(2000), Nonlinear analysis of continuous ECG during sleep II. Dynamical measures, Biological Cybernetics, 82-6, 485-491.
- [5] Inbe, H., Michimori, A. M. Kitado, & Mihara, I.(1994), The Relationship Between R-R Interval Fluctuation Indices and Sleep Stage in Normal Human Sleep, Founding congress of the Asian Sleep Research Society, P-120.
- [6] Kim, B. Y., & Park, K. S.(2000), Automatic sleep stage scoring system using genetic algorithms and neural network, Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2, 849-850.
- [7] Kim, W. S., Park, S. J., Shin, J. W., Seong, H. M., Yoon, Y. R., Kim, J. S., Kwon, K. S., & Kim, K. H.(1998), The HRV Features of Sleep Stages in Normal Human Sleep, Proceedings of the Ergonomics Society of Korea, 504-508.
- [8] Kim, W. S., Park, S. J., Shin, J. W., & Yoon, Y. R.(1999), Classification of Sleep Stages using Heart Rate Variability, Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Medical & Biological Engineering, PS-006.
- [9] McCraty, R., Atkinson, M., Tiller, W. A., Rein, G., & Watkins, A. D.(1995), The Effects of Emotions on Short-Term Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability : The American Journal of Cardiology, 76, 1089-1093.
- [10] Rechtschaffen, A., & Kales, A.(1973), A Manual of Standardized Technology, Techniques, and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects, University of California, Los Angeles.
- [11] 민성길(1997), 최신정신의학, 434-450, 일조각, 서울.