2024년 춘계학술발표대회 : 대학생부문

개별 재실자의 수면 중 생리적 반응을 고려한 난방 제어 방안
- 웨어러블 센서를 이용한 HRV, HR 데이터의 적용을 중심으로 -

Heating Control Strategies by Considering the Physiological Response of Individual Occupants during Nocturnal Sleeping
- In Case of HRV and HR Data from Wearable Sensors -

○배 지 원* 강 승 아* 임 재 한**
Bae, Ji-Won Kang, Seung-Ah Lim, Jae-Han

Abstract

Recently, smart building technologies such as sensors, data communication systems, and the Internet of Things (IoT) have been integrated to offer various conveniences to users. Specifically, a wide range of wearable sensors continuously monitor vital signs like heart rate, heart rate variability, and skin temperature to manage health. This study involves measuring the heart rate and heart rate variability of individual occupant using wearable sensors. These measurements are utilized to assess the difference of sleeping time and non-sleeping time, which in turn inform a strategy for controlling the heating system's room-opening mechanism in apartment complexes. For this purpose, we recorded the heart rate and heart rate variability of individuals under different daily activity conditions and observed changes in physiological data during the heating system's operation while the subjects were asleep.

키워드 : 개별 재실자 쾌적 모델, 난방 제어, 공동 주택, 심박변이도, 심장박동수
Keywords : Personal occupant comfort model, Heating control, Apartment building, Heart rate variability, Heart rate

1. 서론

현재 국내 공동주택의 난방방식으로 주로 지역 난방과 개별 난방이 적용되고 있다. 지역 난방은 열병합 발전소에서 공급된 열을 이용해 건물의 기계실에서 외기온에 따라 공급온수온도가 1차적으로 제어되고, 세대의 실온제어기에 의해 온수분배기에서 각 실별로 공급되는 온수유량이 제어되는 방식이다. 반면 개별 난방은 세대의 실온제어기에서 보일러의 공급온수온도가 설정되고, 온수분배기에서 각 실별로 공급되는 온수유량이 제어되는 방식이다. 최근에는 거주자가 스마트폰 앱이나 컴퓨터에서 원격으로 냉난방 장치를 제어하는 자동화 시스템이 등장하였으며, 난방에너지를 절약하고 쾌적한 실내 환경을 유지하기 위해 거주자별로 생활 패턴을 고려하여 운전 스케줄이나 운전 모드를 설정하여 실온이나 공급온수온도 등을 제어하고 있다.

인간은 적어도 1/3에 해당하는 시간을 수면에 사용하며 이러한 수면은 인간이 신체적, 정신적 건강을 유지하고 업무의 생산성을 높이는데 있어 매우 중요한 역할을 한다(Widasari, 2018). 그러나 수면에 대한 연구는 주로 임상적 측면에 관심이 모아져 왔으며, 실내온도와 수면단계의 관계에 대한 연구는 다수 수행되어 왔으나 이는 재실자에 적절한 실내 온도를 제어하는 연구로서 미흡하다(이낙범, 2000). 또한 지금까지 대부분 국내외 복사난방시스템의 제어 연구에서는 실온제어기에서 설정 실온을 일정하게 유지하는 것을 가정한다. 최근 지어지는 국내 제로에너지 공동주택은 겨울철 난방부하가 크지 않아서 야간에 개별 재실자의 쾌적한 숙면을 위해 주로 난방시스템을 운전하기 때문에, 스마트 공동주택에서 난방에너지 절약 및 쾌적한 실내 환경 유지를 위해서는 개별 재실자의 생리적 특성을 반영한 난방제어 방안에 대한 연구가 필요하다.

최근 센서, 통신, 사물인터넷 등의 첨단기술이 스마트 빌딩에 접목되어 사용자에게 여러 편의를 제공하고 있다. 특히, 다양한 웨어러블 센서는 사용자의 건강관리를 위해 심박수, 심박변이도, 피부온도 등을 지속적으로 모니터링 한다. 본 연구에서는 웨어러블 센서를 이용하여 개별 재실자의 심장박동수 및 심박변이도를 측정하고, 이를 이용하여 수면의 수준을 파악함으로써 공동주택 난방시스템의 개실제어에 방안을 도출하고자 한다. 이를 위해 일상 생활 속의 다양한 활동 조건에서 인체의 심장박동수와 심박변이도를 측정하고, 수면 중 해당 생리적 데이터에서 어떤 변화가 나타나는지 파악하였다.

* 이화여대 건축도시시스템공학 학사과정
** 이화여대 건축도시시스템공학 교수, 공학박사
(Corresponding author : Department of Architectural and Urban Systems Engineering, Ewha Womans University, limit0@ewha.ac.kr)
본 연구는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(중견연구자지원사업)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : NRF-2024R1A2C2007911).

2. 수면 과정에서 인체의 생리적 변화

2.1 수면 단계별 인체의 생리적 변화

인체는 24시간의 일주기로 반복되는 수면(sleep)-각성(wakefulness) 리듬이 있으며 수면-각성 리듬에 따라 주기적으로 생리적 변화가 나타난다. 인체가 일상 생활 속에서 올바르게 기능하기 위해서는 야간 수면(Nocturnal Sleep)이 매우 중요하다. 우리 몸은 야간 수면 시간동안 피로에서 회복하고 항상성을 유지하며, 성장 활동을 지속하게 된다. 야간 수면은 주기적인 신체 리듬에도 영향을 미쳐서 주간 활동에도 영향을 미칠 뿐만 아니라 비만, 삶의 질, 심지어 사망률까지 건강상의 악영향을 초래한다. 수면 단계는 크게 REM(Rapid Eye Movement)수면과 NREM(Non-REM)수면으로 구분된다. REM수면은 급속 안구 운동과 낮은 근긴장도 상태를 포함하는 단계이며 NREM수면은 얕은 수면 상태인 N1과 N2, 깊은 수면 상태인 N3로 구성되는 단계이다(Tobaldini, 2013).

보통 아침에 기상해서 더 이상 졸리지 않고 정신이 맑은 상태로 상쾌한 기분이 들고, 깨어있는 동안 저절로 잠에 빠지지 않는 정도로 잠을 잔 경우에 수면의 질이 좋다고 간주한다. 수면의 질이나 충분한 수면 시간은 유전적인 요인을 포함하여 개인별로 크게 다르게 나타난다. 일반적으로 우리의 인체는 건강한 수면의 질을 유지하기 위해 대뇌를 중심으로 호르몬을 분비하고 신경망을 통해 신경전달물질을 분비한다. 수면이 시작하면 자율신경계에 의해 각 수면 단계별로 심혈관계통이 조절된다. 자율신경계(ANS, Autonomic Nervous System)는 교감신경(SNS, Sympathetic Nervous System)과 부교감신경(PNS, Parasympathetic Nervous System)의 복잡한 조절 과정으로 구성된다. 이를 통해 심혈관계통이 조절되어 심박수, 심박변이도, 혈압, 체온 등에 영향을 미친다. 야간 수면에서는 부교감신경이 활성화되고 교감신경이 저하되어 심박수를 느리게 하고 혈압을 낮춰 신체를 휴식 상태로 유도한다(Baharav, 1995). 그리고 인체의 에너지 소비를 줄여 체온을 낮추고, 스트레스 호르몬인 노르에피네프린과 에피네프린의 분비를 감소시켜 신체를 회복시킨다.

수면 단계에 따라 심부온도, 피부온도, 체온 조절 반응, 심장박동수, 뇌파, 혈압 등이 유의미하게 변화한다. 예를 들어, 심부온도의 경우 수면 중 낮은 신진대사율로 인해 수면이 진행될수록 점차 낮아지며 피부온도는 약간 높게 유지된다. 또한 REM 수면에서는 NREM 수면이나 각성 상태와 달리 땀 발생률과 발한량이 감소하여 주위 온도에 따라 체온이 변한다. 이에 기존 연구에서는 수면 패턴을 분석하기 위해 센서를 이용하여 EEG, EOG, EMG, ECG 등 인체의 다양한 생리적 신호를 측정하고 있다(Radha, 2019).

2.2 HR과 HRV의 개념 및 분석 방법

심장박동수(HR, Heart Rate)는 일반적으로 1분당 심장박동수를 의미하며 맥박수라 불리기도 한다. 심박변이도(Heart Rate Variability, HRV)는 심장박동의 시간 간격의 변동성을 나타내는 지표이다. 의학적으로 HRV는 자율신경계의 활동과 심장의 건강 상태를 평가하는 데 주로 사용되며 활동 수준이나 휴식 조건, 스트레스 등에 따라서도 변할 수 있다. HRV는 심혈관계통이 환경 변화에 적응하는 능력을 반영한다. 일반적으로 HRV가 높을수록 심장 박동 간 시간 간격이 불규칙하다는 의미이고 건강한 심혈관계통과 균형된 신경조절 중추를 갖춘 것으로 본다. 최근 웨어러블 센서의 활용이 늘어나면서 HRV는 심장 건강이나 스트레스 관리, 운동 효과 등을 평가하는데 널리 활용되고 있다. 또한 온열 환경의 변화에 따라 인체의 열적 스트레스가 달라져 유의미한 HRV의 변화가 나타나기 때문에 건축환경설비분야에서도 실내외 온열 환경에 따른 HRV의 특성에 대한 연구가 진행되고 있다(임재한, 2021).

HR과 HRV는 웨어러블 센서를 이용하여 다음과 같은 단계로 측정 분석될 수 있다.

- 심박 데이터 수집 : HRV를 분석하기 위해서 심전도(ECG) 데이터나 심장박동간격(R-R 데이터)을 측정하는 장비를 사용하여 원시 데이터를 수집한다. R-R 간격은 심전도 파동의 최대치인 R-peak값을 기준으로 그 간격을 수치화한 값이다. 일반적으로 웨어러블 센서에서는 R-R 데이터를 지속적으로 모니터링할 수 있다.
- 데이터 전처리 : 수집된 데이터는 정제되고 전처리된다. 잘못된 수집된 데이터를 제거하고 데이터를 정규화하여 HRV 분석에 용이하게 한다.
- HR, HRV 데이터 분석 : HR은 분당 심장박동수(bpm)로서 R-R 데이터를 기준으로 단위시간에 대해 단순히 계산된다. HRV는 시간 영역 분석 방법과 주파수 영역 분석이 있다. 시간 영역 분석은 심장박동의 시간 간격을 직접 분석하는 것이다. 주파수 영역 분석은 주파수 변화에 따른 심장박동의 변동성을 분석하는 것이다. 표 1과 같이 각 영역별로 다양한 변수가 산출된다.
- 결과 해석 : 일반적으로 분석된 HR, HRV 데이터를 해석하여 개인의 건강 상태나 신경계의 균형도를 평가한다. 이를 통해 심혈관 질환, 스트레스, 휴식 상태 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 본 연구는 일상생활에서 인체의 생리적인 신호로서 HR과 HRV를 분석함으로써, 야간 수면 중 심장박동 조절 방식을 이해하고, 건강한 거주자를 대상으로 주간의 활동 조건과 야간 수면 단계 동안에서의 변동 특성을 파악해 보고자 하였다.

표 1 다양한 HRV 변수

Parameters	
RMSSD	Root mean square of successive RR interval differences
SDNN	Standard deviation of NN(between normal R-peaks)
VLF,LF,HF [ms^2]	Absolute powers of VLF(Very Low Frequency), LF(Low Frequency), HF(High Frequency) bands
LF,HF [-]	Power of LF, HF bands in normalized units LF[-] = LF[ms^2] / (total power[ms^2]-VLF[ms^2])x100% HF[-] = HF[ms^2] / (total power[ms^2]-VLF[ms^2])x100%
LF/HF ratio	Ratio between LF and HF band power, an index to assess the balance between SNS and PNS

3. 실험 계획

3.1 실험 조건 및 기간

본 연구에서는 1명의 여성 피험자(만 22세, 161cm, 56kg)를 대상으로 4일간 피험자 실험을 진행하였다. 피험자의 HRV를 측정하기 위해 피험자가 일상적인 생활 과정에서 가슴 스트랩형 웨어러블센서(Polar H10 센서)를 착용하고 생활하도록 하였으며, 피험자가 주간에는 어떤 실내외 활동을 했는지를 기록하도록 하였다. 실험을 진행하는 동안 원만한 야간 수면을 위해 취침 전(오후 10시 이후)에는 술(알코올)이나 커피(카페인)를 마시지 않고 흡연을 삼가도록 권고하였다. 모든 피험자에게는 약물 사용 이력이나 질병에 대한 설문을 진행하여 의학적, 정신적 장애나 약물 복용 여부를 확인하였다. HRV 측정에 앞서 피험자들을 대상으로 나이나 체중, 몸무게 등을 조사 및 측정하였으며, 생활 습관(예: 흡연, 커피 마시기, 운동)에 대한 설문을 진행하였다.

본 연구에서는 피험자 실험에서 Polar H10를 이용하여 HR과 R-R 간격 데이터를 수집하였다. Kubios 프로그램을 이용하여 수집된 데이터를 시간영역과 주파수영역에 대해 각각 분석하였다. HRV값은 주간 활동 조건과 야간 수면 조건으로 나누어 각각 동일하게 5분 간격으로 분석했다. 시간 영역 분석에서는 Mean HR값과 RMSSD를, 주파수 영역 분석에서는 LF power, HF power, 그리고 교감신경과 부교감신경 간의 균형을 나타내는 LF/HF ratio를 분석했다. 그리고 실험기간동안 HR과 HRV를 측정하면서 동시에 피험자 주변의 온열환경조건을 파악하기 위해 온습도 로거(Testo 175H1)를 이용하여 지속적으로 온습도 조건을 모니터링하였다. 온습도 데이터는 Testo사의 Comsoft Basic 프로그램을 이용하여 분석하였다.

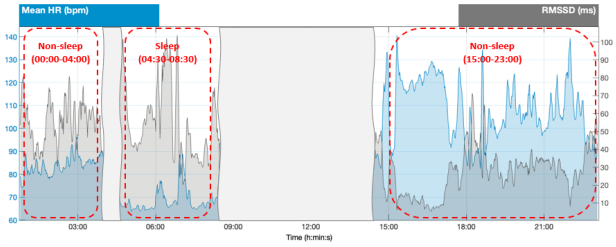
3.2 수면의 질 평가

PSQI(Pittsburg sleep quality index)는 주관적인 수면의 질(subjective sleep quality), 수면 잠복기(sleep latency), 수면 지속 시간(sleep duration), 습관적 수면 효율(habitual sleep efficiency), 수면 장애(sleep disturbances), 수면제 사용 여부(use of sleeping medication), 주간 기능 장애(daytime dysfunction) 등 7가지 범주에서 19개로 구성된다. 7개의 구성 요소 점수와 1개의 종합 점수를 산출하여 수면의 질을 평가할 수 있으며 0~4점은 정상상태, 5~10점은 숙면을 취하지 못하는 상태, 11~21점은 수면 장애로 판단한다. 본 연구에서는 1일 단위로 수면의 질을 평가하였기 때문에 하루 전날에 대한 질문지에 대해 피험자가 매일 기상한 직후 각 설문 항목을 직접 기록하도록 하였으며, 이를 기반으로 전반적인 수면의 질을 평가하였다.

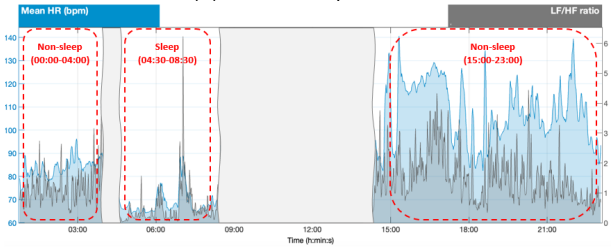
4. 실험 결과

본 연구에서는 4일간 측정한 HR, HRV 데이터를 기초로 하여 일상 조건(non-sleep condition)과 취침 조건(sleep condition)에 대해 통계 분포가 유의미하게 차이가 나타나는지를 분석하였다. 이를 위해 측정 데이터 수를 기초로 하여 하루씩 누적하여 1일 데이터(D1), 2일 데이터(D2), 3일 데이터(3D), 4일 데이터(4D)의 총 4가지 데이터셋을 토대로 각 변수별(Mean RR, Mean HR, RMSSD, LF, HF 및 LF/HF ratio)로 ANOVA 분석과 T-검정을 실시하였다.

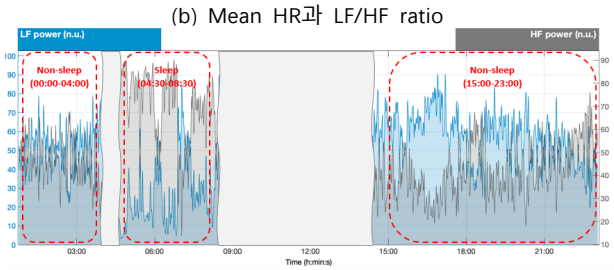
그림 1과 같이 저녁 취침 시간동안에 비해 실내외 활동 조건에서는 각 변수별가 크게 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. 표 2와 같이 실험일별로 온습도 조건은 각각 20-22℃, 40~50% 내외로 유사하게 나타났다. 반면 표 3과 같이 각 변수별로 평균과 표준편차는 크게 차이가 나타남을 알 수 있다. 표 4, 표 5와 같이 누적한 데이터셋의 크기에 따라 4가지 경우의 R-sq 및 평균, 표준편차가 다르게 나타남을 알 수 있다. 24시간 심박 변이도(HRV)를 분석하면 일반적으로 평균 R-R 간격의 표준편차가 야간에는 다소 증가하는 것으로 나타난다. ANOVA 분석 결과, Mean RR, Mean HR, RMSSD, LF, HF 및 LF/HF ratio의 모든 변수에서 P-Value는 0으로서 유의미한 차이가 나타남을 확인할 수 있었다.(α = 0.05)



(a) Mean HR과 RMSSD



(b) Mean HR과 LF/HF ratio



(c) LF power와 HF power
그림 1 하루 동안 HRV 변화

표 2 실험기간 구간별 평균 온도, 평균 습도, PSQI 점수

		Temperature (℃)	RH (%)	PSQI Score
1st Day	ST	21.6	42.3	8
	NST	20.3	34.1	-
2nd Day	ST	21.6	40.0	4
	NST	22.1	40.4	-
3rd Day	ST	21.8	46.5	9
	NST	19.7	41.3	-
4th Day	ST	20.5	50.3	9
	NST	21.3	47.4	-

표 3 HR, HRV의 평균값(Avg), 표준편차(SD)

		Mean RR (ms)		Mean HR (beats/min)		RMSSD (ms)		LF (-)		HF (-)		LF/HF ratio	
		Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
1st day	ST	863.4	69.8	70.0	6.2	56.4	21.6	29.9	19.3	70.1	19.3	0.6	0.7
	NST	554.6	77.3	110.2	14.4	23.6	14.8	60.6	12.9	39.4	12.9	1.8	0.9
2nd day	ST	919.4	30.4	65.3	2.2	68.7	12.8	22.6	12.8	77.3	12.8	0.3	0.3
	NST	740.4	57.5	81.5	6.3	46.1	18.1	52.9	15.4	47.1	15.4	1.4	0.8
3rd day	ST	960.7	46.4	62.7	3.3	76.1	17.5	18.7	12.5	81.2	12.5	0.3	0.3
	NST	623.4	59.4	97.1	9.1	41.4	13.9	56.4	11.8	43.5	11.8	1.5	0.8
4th day	ST	931.4	27.4	64.5	1.9	91.4	18.4	23.5	13.3	76.4	13.3	0.4	0.3
	NST	796.6	60.3	75.7	5.5	57.2	7.7	52.7	13.0	47.3	13.0	1.3	0.5

표 4 HR, HRV의 R-sq

	Mean RR (ms)	Mean HR (beats/min)	RMSSD (ms)	LF (-)	HF (-)	LF/HF ratio
D1	81.75	77.04	44.28	47.20	47.24	35.83
D2	65.11	55.03	34.75	48.39	48.40	36.87
D3	73.29	63.96	39.06	55.16	55.19	41.12
D4	68.11	58.17	37.51	55.13	55.16	41.37

표 5 HR, HRV의 평균(Mean), 표준편차(SD)

		Mean RR (ms)		Mean HR (beats/min)		RMSSD (ms)		LF (-)		HF (-)		LF/HF ratio	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
D1	ST	863.4	69.8	69.98	6.2	56.4	21.6	29.9	19.3	70.1	19.3	0.603	0.711
	NST	554.6	77.3	110.1	14.4	23.6	14.8	60.6	12.9	39.4	12.8	1.808	0.906
D2	ST	887.7	62.5	67.96	5.38	61.7	19.2	26.7	17.1	73.2	17.1	0.486	0.577
	NST	635	116	97.7	18.3	33.4	19.8	57.2	14.5	42.7	14.5	1.607	0.869
D3	ST	912.4	67	66.15	5.39	66.6	19.8	24	16.1	75.9	16.1	0.414	0.505
	NST	631	100	97.5	15.8	36.1	18.3	57	13.6	43	13.6	1.567	0.84
D4	ST	914.8	63.7	65.94	5.11	69.7	21.3	24	15.7	76	15.7	0.406	0.484
	NST	652	110	94.8	16.6	38.8	18.7	56.4	13.6	43.5	13.5	1.527	0.813

5. 결론

본 연구에서는 일상 생활 속의 다양한 활동 조건에서 인체의 심장박동수와 심박변이도를 측정하여, 수면 중 생리적 데이터에서 어떤 변화가 나타나는지 파악하였다.

심박변이도의 스펙트럼 분석을 이용하여 수면을 감지하고 피드백 메커니즘을 적용하여 주변 온도를 변경하는 자동화된 알고리즘을 개발하고자 하였다.

일반적으로 취침 시에는 실내 온도를 조금 낮게 설정하는 것이 바람직하다. 대부분의 재실자들은 취침할 때 실내 온도가 너무 높으면 잠이 들기 어렵다고 느낀다. 보통 18~21℃ 정도가 적절하다. 최근 실온조절기에서 시간별로 설정온도를 조절할 수 있으며, 이를 활용하여 취침 시간에는 웨어러블 센서에서 인체의 생리적 반응을 고려하여 설정온도를 낮추고, 일어날 시간에는 다시 올리는 것이 가능하다. 편안한 수면을 위해서는 실내 온도 외에도 습도는 물론 실내공기질도 건강하고 쾌적하게 유지해야 한다. 또한 개개인의 신체 상태에 따라 온열환경 조건을 다르게 제어하는 것이 필요하다. 즉 취침 중에 더 낮은 온도를 선호하는 경우도 있으나, 더 높은 온도를 선호하는 경우도 있다. 그러므로 실내 냉난방설비를 운전함에 있어서 개별 재실자의 생리적 변화를 고려한 적정 온도 조건을 도출하는 것이 필요하다. 취침 시 난방 온도를 제어할 때는 개별 재실자의 쾌적과 건강을 고려하여 적절한 온도를 설정하는 것이 중요하다.

본 연구를 통해 쾌적한 수면 방법과 수면 효율성을 향상시킬 수 있는 있을 것이다. 또한 설정 실온을 낮게 유지함으로써 난방에너지 소비도 줄일 수 있을 것이다.

최근에는 의학적으로 자율신경계의 이상 활동을 연구하기 위해 HRV 일주기 변화 분석에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 각 수면 단계에서의 HRV에 관한 데이터는 다소 부족하다. 이러한 연구는 심박변이도 특성을 바탕으로 자율신경계의 활동이나 수면의 단계를 이해하는데 매우 중요하다. 야간 수면 중 심박 변이도(HRV)의 변화에 대한 연구는 최근까지 지속적으로 진행되고 있다. 심장박동수(HR)는 야간 수면 중에 전반적으로 감소하며, 전반적인 패턴은 일주기의 심부온도, 수면 단계, 신체 움직임 및 각성 등에 영향을 받는다. NREM 수면단계에서는 부교감신경이 더욱 활성화되어 심혈관계통이 안정화되고, REM 수면단계에서는 교감신경계의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.

참고문헌

1. 이낙범, 임재중, 금종수, 이구형, 최호선. (2000). 생리신호 분석을 이용한 실내온열환경에서의 수면 쾌적성 평가. 한국감성과학회, 감성과학, 3(2), 75-84.
2. 임재한. (2021). 재실자 온열쾌적평가에서 인체의 생리적 반응을 고려한 심박변이도 측정 및 분석 방법 비교 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 41(3), 79-89.
3. Baharav, A., Kotagal, S., Gibbons, V., Rubin B. K., Pratt, G., Karin, J., & Akselrod, S. (1995). Fluctuations in automatic nervous activity during sleep displayed by power spectrum analysis of heart rate variability. Neurology, 45(6), 1183-1187.
4. Buysse, D. J., Reynolds, C. F., Charles, F., Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh sleep quality index: a new instrument for psychiatric practice and research. Psychiatry Research, 28 (2), 193–213.
5. Tobaldini, E, Nobili, L, Strada, S, Casali, KR, Braghiroli, A, & Montano, N. (2013). Heart rate variability in normal and pathological sleep. Frontiers in physiology, 4, 294.
6. Radha, M., Fonseca, P., Moreau, A., Ross, M., Cerny, A., Anderer, P., Long, X., Aarts, R.M. (2019) Sleep stage classification from heart-rate variability using long short-term memory neural networks. Scientific Report, 9(1), 14149.
7. Widasari, E. R., Tanno, K., & Tamura, H. (2018). Automatic Sleep Stage Detection Based on HRV Spectrum Analysis, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Miyazaki, Japan, 869-874.