

스마트오피스에서 실내 조명환경에 따른 재실자 생체신호 특성 분석 및 업무생산성 예측모델 개발

김태근*, 염동우*, 임세현**, 윤성국^o

Analysis of Occupants' Bio-Signal According to Indoor Lighting Environments and Development of the Productivity Forecasting Model in the Smart Office

Tae-geun Kim*, Dong-woo Yeom*, Se-heon Lim**, Sung-guk Yoon^o

요약

최근 여러 스마트 장치로부터 취득되는 개인 생체 데이터를 활용하여 개인 맞춤형 환경을 구성하려는 수요가 증가하고 있다. 본 논문은 스마트오피스를 환경에서 최적의 업무생산성과 에너지 사용 실내환경 조성을 위한 연구의 일환으로, 실내 조명환경 변화에 따른 재실자의 생체신호를 수집 및 분석하고, 이를 활용하여 기계학습 기반 업무생산성 예측모델을 제안한다. 실제 조명환경에 따른 재실자의 데이터를 수집하기 위하여 애리조나 주립대학교 학생들을 대상으로 실험을 진행하였다. 생체신호 중 동공크기와 심박수를 고려하였고, 실내 조명환경에 따라 동공크기와 심박수가 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한 동공크기와 심박수가 업무생산성과도 상관관계가 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 결정트리 기반의 업무생산성 예측모델을 제안하였고, 트리의 복잡성을 낮추기 위해 제한된 파라미터 범위에서 최적의 성능을 보이는 예측모델을 구성하였다.

키워드 : 조명환경, 생체신호, 업무생산성, 결정트리, 스마트오피스

Key Words : Lighting environment, Bio-signal, Productivity, Decision-tree, Smart office

ABSTRACT

Recently, the need to make a personalized environment using personal bio-signal data from various smart devices has been increasing. To achieve optimal productivity and energy-saving for indoor environments, we conducted a human experiment and analyzed their bio-signal. Based on the results, we proposed machine learning based productivity prediction model. We experimented at Arizona State University to obtain bio-signal at each indoor lighting condition. Among bio-signals, the pupil size and heart rate are selected. We show that pupil size and heart rate highly correlate with indoor lighting environments. Also, pupil size and heart rate correlate with productivity. Based on these results, we propose a decision tree-based productivity prediction model using pupil size and heart rate. The proposed model almost correctly predicts each person's productivity level.

* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1075137).

• First Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea, taegun1520@gmail.com, 학생회원

^o Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea, sgyoon@ssu.ac.kr, 중신회원

* Architecture, The Design School (TDS), Arizona State University (ASU), AZ, USA, dyeom1@asu.edu

** Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea, seheon0223@naver.com

논문번호 : 202207-132-C-RN, Received July 11, 2022; Revised August 24, 2022; Accepted September 1, 2022

I. 서 론

현대인 중 많은 사람이 하루의 약 87%의 시간을 실내에서 소비한다. 이에 따라, 최근 실내 환경 개선에 대한 사람들의 요구가 지속해서 증가하고 있다. 적절하게 구성된 실내 환경은 재실자들의 편안함 및 업무생산성에 향상에 도움을 줄 수 있다는 연구가 다수 진행되었다^{1,2)}. 또한 최근 코로나 팬데믹으로 인해 기존의 업무환경과는 다르게 재택에서 근무하는 것을 선호하는 사람들이 증가하였고, 팬데믹 이후에도 현재의 재택 근무 형태를 유지하는 회사가 늘어나고 있다. 이에 따라, 개개인의 편안함과 업무생산성에 맞춘 최적의 실내 환경을 구성하는 것이 각광받고 있다.

조명환경에 따른 시각적 편안함과 업무생산성에 대한 사전연구는 시각적으로 편안한 밝기는 중간수준의 밝기이고³⁾, 밝은 조명환경일수록 업무생산성이 높게 나타나는 경향이 있음을 실험적으로 증명하였다^{3,4)}.

그러나 기존의 편안하고, 업무생산성이 좋은 실내환경 조성을 위한 연구는 주로 재실자들의 설문^{3,4)}을 기반으로 진행되거나, 개개인의 특성을 고려하지 않은 일반적인 쾌적한 환경을 파악하는 방향⁵⁾으로 진행되었다. 이로 인해, 재실자 중 약 66%가 실내환경에 만족하지 못하는 것으로 조사되었다⁶⁾.

이러한 문제를 보완하기 위한 움직임으로, 최근 인공지능 및 통신 기반의 장치인 스마트워치와 AI 스피커 등 사용하여 냉난방기, 조명 등을 자동으로 제어하는 기법들이 소개되고 있다. 이러한 인공지능 및 무선 통신 기반의 장치들은 심박수나 동공크기 등의 개개인의 데이터를 전송해줌으로 최적의 실내환경 조성에 활용되어 스마트오피스 구현에 적용될 수 있다.

최근 널리 보급되고 있는 여러 스마트 장치들을 통해 개개인의 생체특성 데이터를 사용한 인공지능 기반 실내환경제어 기법에 관한 연구가 다수 진행되고 있다. 해당 연구는 주로 조명환경에 따른 생체신호와 재실자의 만족도를 분석하거나⁶⁻¹¹⁾, 조명환경에 따른 생체신호와 재실자의 업무생산성을 분석한 연구¹²⁻¹⁴⁾로 나눌 수 있다.

실내 조명환경과 생체신호의 관계를 분석한 연구로는 조명환경과 심박수의 상관관계를 분석한 연구^{10,11)}가 있고, 실내 조명환경에 따른 생체신호와 재실자의 만족도를 분석한 연구는 동공크기 변화와 빛 만족도 상관분석 연구⁶⁾, 이에 더하여 조명환경 편안함 정도를 고려한 연구⁷⁾, 동공크기 변화 및 편안함을 업무환경에서 고려한 연구^{8,9)} 등이 있고, 실내 조명환경에 따른 생체신호와 재실자의 업무생산성을 분석한 연구는 개

개인의 기본 동공크기와 인지능력 상관관계 분석연구¹²⁾, 업무 부하에 따른 동공크기 변화연구¹³⁾ 및 밝기와 상관 색온도에 따른 동공크기와 집중력 관계분석연구¹⁴⁾ 등 활발하게 연구되고 있다. 그러나 대부분의 조명 환경과 관련된 연구는 생체신호 중 동공크기만 고려하고 다른 생체신호의 특성은 고려하지 않았고, 업무생산성과의 상관관계만 분석하였다.

본 연구에서는 여러 스마트 장치로부터 수집된 데이터를 활용하여 최적의 업무생산성 및 에너지사용을 고려한 실내환경을 조성하는 연구의 일환으로, 조명환경에 따른 재실자들의 동공크기와 심박수를 측정하고 상관관계를 분석하였다. 추가로 업무생산성을 인지능력 (Operation Span, OSPAN) 테스트를 통해 측정하고 생체신호와의 상관관계를 분석하였다. 이를 통하여 본 연구에서는 생체신호와 업무생산성이 유의미한 상관관계가 있음을 보여주었다. 또한 측정된 데이터를 사용하여 랜덤포레스트(Random Forest) 기반 업무생산성 예측모델을 개발하였고, 입력으로 사용된 변수들의 중요도를 확인하였다.

이후 2장에서는 실험 및 데이터 취득과정을 설명하고, 3장은 취득 데이터의 통계분석 및 상관관계 분석한다. 4장과 5장에서는 랜덤포레스트 기반의 업무생산성 예측모델 및 성능을 도시하고, 결론 및 토의내용은 6장에 기술하는 것으로 본 논문은 마무리된다.

II. 실험 및 데이터 취득

본 연구에서는 실내 조명환경에 따른 생체신호 변화를 기반으로 업무생산성 예측모델을 개발하기 위해 애리조나 주립대학교 학교 학생 24명을 대상으로 실험을 진행하였다(IRB STUDY: 00014074).

실험 조건으로 실내 조명환경의 변화에 따른 생체신호 변화를 확인하기 위하여 실내온도를 22℃로 고정하고 실험을 진행하였다. 실내 조명환경 조건은 일반적인 사무 환경(450lux)을 고려하여 빛의 조명도(lux)를 3단계(150lux, 450lux, 800lux), 상관 색온도(Correlated color temperature, CCT)는 1단계(5200K)로 구성하였다. 실험 참가자는 한 가지 실험 조건에만 노출되도록 설계하였고, 실험 전에 키, 성별, 몸무게, 나이와 같은 참가자의 기본적인 신체정보를 설문 작성하였다. 실험 시에는 동공크기, 심박수를 취득하고, 업무생산성 평가를 위한 OSPAN 테스트를 진행하였다.

본 실험에서 심박수는 시계 형태인 Empatica사의 E4 Wristband¹³⁾를 사용하여 측정하였다. 동공크기는 안경 형태의 측정기가 아닌 바(bar) 타입 측정기(Tobii

사의 EyeTracker 4C^[14])를 모니터 위치에 두어 사용하였다. 실험에 사용된 측정장비의 사진과 사양은 그림 1과 표 1에 도시하였다.

업무생산성 평가에 사용된 OSPAN 테스트는 간단한 연산능력과 암기능력을 평가한다. 테스트가 시작되면 $3+6/2 = 6$ 과 같은 연산문제가 제시되고, 참가자는 해당 연산문제의 정답여부를 선택해야 한다. 참가자의 답변 이후 한 개의 알파벳이 무작위로 약 1초간 등장하여 참가자는 이 알파벳을 기억해야 한다. 이러한 연산문제 후 알파벳 등장의 과정이 1회에서 6회까지 무작위로 진행된 후 참가자는 등장했던 알파벳을 순서대로 입력해야 한다. 참가자마다 연산문제와 연속된 연산문제 개수는 무작위로 나타나지만, 총 문제의 개수는 동일하게 시행되었다. 이후 분석된 OSPAN 점수는 전



그림 1. 실험 측정장비. E4 Wristband(좌측), Tobii EyeTracker 4C(우측)
Fig. 1. Experiment measurement device. E4 Wristband (left), Tobii EyeTracker 4C (right)

표 1. 실험 측정장비 모델 및 세부사양
Table 1. Model and specification of experiment measurement device

용도	모델명	세부사양
동공크기 측정	Tobii EyeTracker 4C	동공 샘플링 비율 : 90Hz
심박수 측정	Empatica E4 Wristband	심박수 샘플링 비율 : 64Hz, 피부전도도 샘플링 비율 : 4Hz

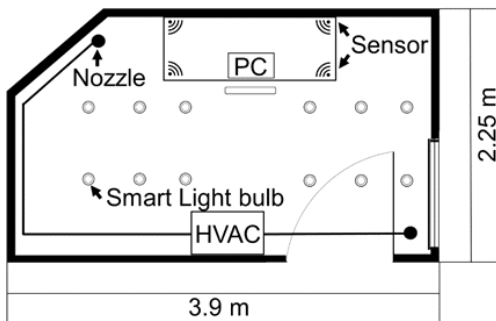


그림 2. 실험실 설계 도면
Fig. 2. Experiment room diagram

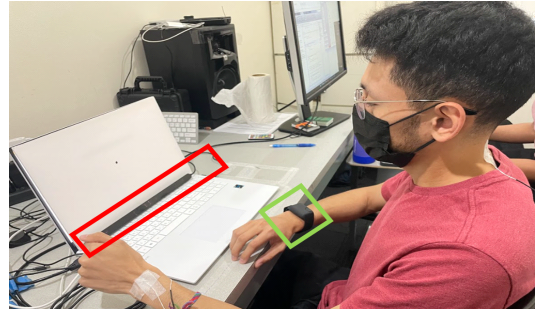


그림 3. 실제 실험사진. Tobii EyeTracker 4C(빨간색 네모), E4 Wristband(녹색 네모)
Fig. 3. Experiment picture example. Tobii EyeTracker 4C (Red box), E4 Wristband (Green box)

체 문제 중 정답을 맞춘 개수로 100점 만점으로 환산하여 계산하였다.

실험 참가 학생은 총 24명으로 각 실험 조건별로 남녀 4명씩 무작위로 배정하여 진행하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 실험환경 도면과 실제 실험진행 사진이다.

III. 측정데이터 분석

3.1 측정데이터 통계 수치 분석

수집된 측정데이터의 분석에는 데이터 기반 시각화 및 통계프로그램인 Minitab과 Microsoft Excel 소프트웨어가 사용되었다. 성별에 따른 조명환경별 생체신호의 차이점을 분석하기 위해 이후 분석에서 남녀참가자를 구분하여 분석하였다.

표 2는 조명환경별 실험 참가자의 통계 값을 보여준다. 조명환경이 밝아짐에 따라 동공크기는 감소하고, 심박수와 OSPAN 점수는 향상하는 것을 확인하였다. 생체신호 중 온도에 관련된 사전연구^[11]에서는 성별에 따라 경향이 다르게 나타났지만, 본 실험의 동공크기와

표 2. 각 조명환경 별 측정데이터 평균 및 표준편차
Table 2. The average and standard deviation of measured data by each lighting condition

조명 환경 (lux)	성별	동공크기 (mm)	심박수 (회/분)	OSPAN 점수
150	남	2.97±0.22	87.36±12.87	74.16±11.16
	여	2.90±0.43	84.19±8.76	83.19±7.29
450	남	2.95±0.20	84.95±12.73	95.30±0.46
	여	2.82±0.42	86.34±10.94	88.17±4.29
800	남	2.73±0.47	89.13±13.58	94.44±1.50
	여	2.37±0.26	96.33±13.89	91.10±4.41

심박수 특성은 남, 여 모두 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다. 실내 조명환경에 따라 동공크기와 심박수는 표준편차가 비슷하게 나타났으나, OSPAN 점수는 가장 어두운 환경인 150 lux에서 남, 여 모두 표준편차가 크게 나타났다. 이는 실내 조명환경이 밝아질수록 업무 생산성이 향상하는 경향이 있지만, 어두운 환경인 150 lux의 경우는 개개인의 선호도가 다르다는 것으로 해석할 수 있다.

3.2 조명환경에 따른 생체신호 및 업무생산성 분석

그림 4는 조명환경별 동공 크기의 변화를 성별에 따라 도시한다. 남녀 참가자 모두 조명환경이 밝아질수록 동공 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이때 실내 조명환경과 동공 크기의 상관계수는 남, 여 각각 $r = -0.499$ (P-value < 0.001), $r = -0.628$ (P-value < 0.001)로 나타났다. 상관계수(r)와 P-value는 아래 수식을 통해 계산하였다. 상관계수는 두 변수 사이의 통계적 관계를 나타내고, -1 에서 +1 사이값을 갖는다. 상관계수가 0에서 멀어질수록 통계적 관계가 있는 것을 의미한다. P-value는 어떠한 표본에서 관측된 값이 실제로 관측된 통계치와 같거나 더 극단적인 확률을 나타내는 값으로, 값이 0.05 미만이면 통계적으로 유의미한 값을 나타낸다고 볼 수 있다^[5].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (1)$$

- n : 데이터 개수
- X, Y : 비교 집단
- \bar{X} : 첫번째 변수에 대한 표본평균
- \bar{Y} : 두번째 변수에 대한 표본평균
- S_x : 첫번째 변수에 대한 표준편차
- S_y : 두번째 변수에 대한 표준편차

$$P\text{-value} = 2P(TS \geq |ts| \mid H_0 \text{ is true}) = 2(1 - cdf(|ts|)) \quad (2)$$

- P : 사건의 확률
- TS : 검정 통계량
- cdf : 귀무가설 하에서 검정 통계량 (TS) 분포의 누적분포함수

그림 5는 실내 조명환경에 따른 심박수의 변화를 성별에 따라 도시한다. 남녀 참가자 모두 실내 조명환경

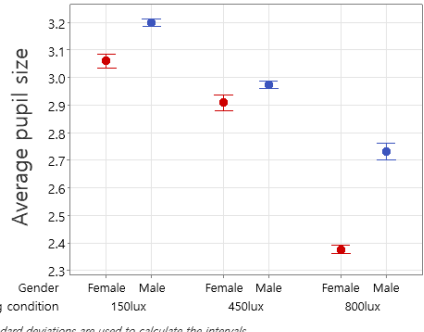


그림 4. 실내 조명환경에 따른 남녀 참가자 동공크기 변화 Fig. 4. Change of the pupil size by indoor lighting environment considering gender

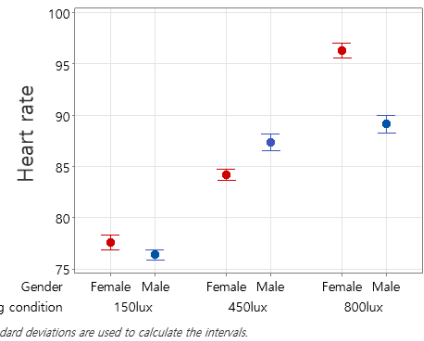


그림 5. 실내 조명환경에 따른 남녀 참가자 심박수 변화 Fig. 5. Change of heart rate by indoor lighting environment considering gender

이 밝아짐에 따라 심박수가 증가하는 것을 확인하였고, 이때의 심박수와 실내 조명환경과의 상관계수는 남, 여 각각 $r = 0.394$ (P-value < 0.001), $r = 0.559$ (P-value < 0.001)로 나타났다.

그림 6은 실내 조명환경에 따른 OSPAN 점수를 성

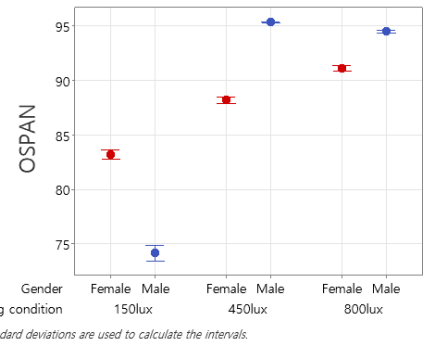


그림 6. 실내 조명환경에 따른 남녀 참가자 OSPAN 점수 변화 Fig. 6. Change of OSPAN performance by indoor lighting environment considering gender

별에 따라 도시하였다. 어두운 실내 조명환경(150lux)를 제외한 일반적인 조명의 실내환경(450lux)과 밝은 조명의 실내환경(800lux)에서는 OSPAN 점수가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 가장 밝은 조명의 실내환경에서 남자 참가자의 평균점수가 중간 밝기의 조명보다 낮게 나타났지만, 이는 약 0.9점 차이로 실험 참가자의 개인차를 고려하면 미비한 값으로 분석된다. 이때 실내 조명환경과 OSPAN 점수와의 상관계수는 남녀 참가자 각각 $r = 0.690$ (P-value < 0.001), $r = 0.512$ (P-value < 0.001)로 나타났다.

실내 조명환경에 따른 동공 크기, 심박수, OSPAN 점수 모두 높은 상관계수와 낮은 P-value를 보여 통계적으로 조명환경과 업무생산성은 유의미한 관계를 갖는 것을 확인하였다.

3.3 동공크기-심박수 변화에 따른 업무생산성 분석

본 장에서는 동공 크기와 심박수의 변화에 따른 업무생산성 점수 변화를 분석하여, 이후 업무생산성 예측에 동공 크기와 심박수가 사용되기 적합한지 분석하였다.

그림 7과 그림 8은 동공 크기 변화에 따른 OSPAN 점수 변화의 회귀곡선과 OSPAN 점수 변화와 심박수의 회귀곡선을 각각 보여준다. 동공 크기와 OSPAN의 상관계수는 남, 여 각각 $r = -0.467$ (P-value < 0.001), $r = -0.444$ (P-value < 0.001)이다. 심박수와 OSPAN의 상관계수는 남, 여 각각 $r = 0.288$ (P-value < 0.001), $r = 0.428$ (P-value < 0.001)로 남자 참가자의 경우 심박수와 OSPAN의 상관계수가 비교적 낮게 나타났으나, 여전히 통계적으로 유의미한 값을 보였다.

그림 5와 그림 8의 결과를 통해 조명환경에 따른 업무생산성 예측에 동공 크기에 더하여 심박수 또한 유의미한 지수인 것을 확인하였다.

그림 9는 동공 크기와 심박수의 변화에 따른

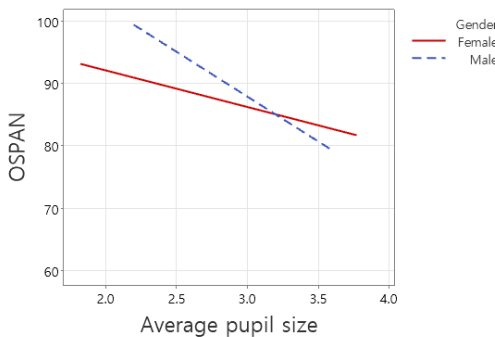


그림 7. 동공크기 변화에 따른 OSPAN 점수 회귀선
Fig. 7. Change of OSPAN performance by pupil size

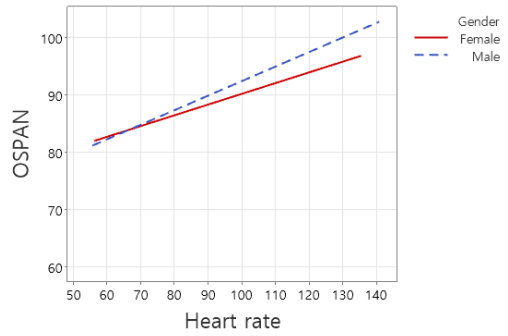


그림 8. 심박수 변화에 따른 OSPAN 점수 회귀선
Fig. 8. Change of OSPAN performance by heart rate

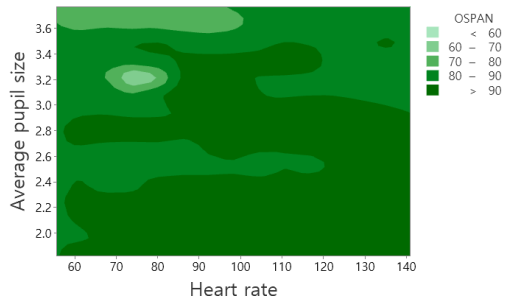


그림 9. 동공크기와 심박수에따른 OSPAN 점수 등고선도
Fig. 9. Counter plot of OSPAN performance considering pupil size and heart rate

OSPAN 점수를 통합적으로 확인하기 위하여 세 가지 지표를 등고선도로 표현하였다. 해당 등고선도는 색이 짙을수록 점수대가 높은 것을 의미한다. 그림 7과 그림 8의 결과처럼 동공 크기가 작고 심박수가 높을수록 높은 OSPAN 점수대의 분포가 넓다는 것을 확인할 수 있다.

위의 실내 조명조건에 따른 동공크기, 심박수와 OSPAN의 경향분석 및 상관관계 분석결과로, 동공크기와 심박수를 업무생산성 예측에 충분히 사용가능함을 확인하였다.

IV. 랜덤포레스트 기반 업무생산성 예측모델

본 장에서는 생체신호와 업무생산성의 유의미한 관계를 통해 랜덤포레스트 기반 업무생산성 예측모델을 제안하고 그 예측 결과를 도시하였다.

4.1 랜덤포레스트(Random Forest) 결정 트리

결정트리(Decision-Tree) 기법은 일반적으로 세세한 가치를 뺏음으로 정확도를 높일 수 있지만, 과적합

(Overfitting) 문제를 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 적절한 가지 수를 찾는 가지치기(Pruning) 방법이 있다. 가지치기를 통해 트리의 깊이를 조절할 수 있지만, 이 방법만으로는 과적합 문제를 효과적으로 다루기 어렵다. 랜덤포레스트는 과적합 문제를 보다 효과적으로 해결하기 위해 제안된 방법으로 여러 개의 무작위의 결정트리를 생성하여 분류를 진행하고, 분류한 결과에서 최적의 결정트리를 찾는 방식이다¹³⁾. 이때의 입력으로 훈련 데이터 중에서 무작위로 부분집합을 만들어 사용하는 Bagging 방식을 사용한다. 또한 여러 개의 결정트리 생성 시, 사용하는 입력변수의 종류도 입력 데이터에서 무작위로 선택한다. 이후 무작위로 선택된 입력을 생성된 여러 개의 결정트리를 통해 분류를 진행한 뒤 투표를 통해서 최적의 트리는 찾아내는 방식이다.

본 연구에서는 OSPAN 점수를 랜덤포레스트 결정트리의 분류표적으로 진행하였다. 위의 분석 결과를 토대로 성별과 생체신호에 따른 OSPAN 점수를 예측하기 위하여 입력변수로는 참가자의 성별, 실내 밝기, 측정된 생체신호인 동공크기와 심박수가 사용되었다.

업무생산성 예측모델의 생체신호의 유무에 따른 성능 비교를 위해 모델을 입력 변수 종류에 따라 성별과 실내 밝기만 사용한 모델, 성별과 생체신호만 사용한 모델, 성별 생체신호, 실내밝기 모두 사용한 모델을 동일 파라미터로 훈련하여 성능을 비교하였다.

제안한 기법은 기본적인 결정트리(Decision Tree)와 인공신경망(Artificial Neural Networks)을 사용한 분류기와 성능을 비교하였다. 결정트리 분류모델은, 동일한 비교를 위해 랜덤포레스트 기법의 최적의 파라미터와 동일하게 설정하였고, 인공신경망 분류모델은 훈련 손실함수와 검증 손실함수가 수렴하는 지점까지 학습하였다.

랜덤포레스트 결정트리는 sk-learn 라이브러리의 RandomForestClassifier를 사용하였고, sk-learn 라이브러리 중 GridSearchCV를 사용하여 분류 정확도가 가장 높게 나타나는 해당 트리의 최적 파라미터를 구하였다. 해당 모델의 파라미터 중 트리의 깊이(max_depth), 최하위 노드의 최소 샘플갯수(min_samples_leaf), 분기에 필요한 최소 샘플의 수(min_samples_split), 생성할 트리의 개수(n_estimators), 최하위 노드의 최대 개수(max_leaf_nodes)를 대상으로 진행하였다. 탐색 범위로 트리의 깊이는 트리의 복잡성을 제한하기 위해 최대 10으로, 최하위 노드의 최소 표본 개수와 분기에 필요한 최소 표본의 수 2로, 최하위 노드의 최대 개수는

표 3. 최적 트리구성 파라미터
Table 3. Optimal Randomforest tree parameter

Parameter	Value
Max_depth	6
Min_samples_leaf	2
Min_samples_split	2
Max_leaf_nodes	15
N_estimators	100

가지의 수를 제한하기 위하여 2부터 15까지 1개 간격으로 설정하였다. 생성할 트리의 개수는 10부터 100까지 10개 간격으로 설정하여 최적의 파라미터를 탐색하였다. 표 3은 탐색된 파라미터를 보여준다.

입력 변수 구성에 따른 성능은 참가자의 성별과 실내밝기를 사용한 모델, 성별과 생체신호를 사용한 모델, 성별, 실내밝기, 생체신호 모두를 사용한 모델을 동일 파라미터로 훈련하여 분류 정확도가 각각 44.30%, 87.65%, 99.52%로 성별, 실내밝기, 생체신호를 모두 사용한 모델이 가장 높게 나타났다. 성별과 실내밝기만을 사용한 모델은 학습 시 분기하기 위한 정보가 매우 적어서 성능이 저조하게 나타난 것으로 분석된다.

최적의 파라미터를 통해 구한 예측기법의 분류 정확도는 결정트리, 인공신경망, 랜덤포레스트 기법 각각 84.87%, 84.26%, 99.52%로 랜덤포레스트, 결정트리, 인공신경망 순으로 나타났다. 인공신경망 모델은 학습 시 내부의 분류기준을 분석하기 어려운 특성(Black-box model)이 있기 때문에, 본 논문에서는 해석이 용이한 트리모델 중 성능이 높은 랜덤포레스트 모델을 사용하였다. 분류정확도는 입력데이터가 학습된 라벨로 올바르게 분류되면 1, 잘못 분류되면 0으로 계산되어 테스트 데이터셋의 평균으로 수식(1)과 같이 계산하였다.

$$Accuracy = \frac{1}{n_{samples}} \sum_{i=0}^{n_{samples}-1} 1(\text{if } \hat{y}_i = y_i) \quad (1)$$

- \hat{y}_i = predicted value of the i -th sample
- y_i = corresponding true value

그림 10은 생성된 랜덤포레스트의 입력 변수의 예측값에 미치는 중요도를 도시하였다. 입력 변수의 중요도는 각 변수가 나누어질 때 불순도(impurity)의 감소분의 평균으로 다음 수식(2)과 같이 계산된다. 이때 불순도는 해당 노드에 목적인 관측치 이외에 다른 관측치가 섞여 있는 정도를 의미한다.

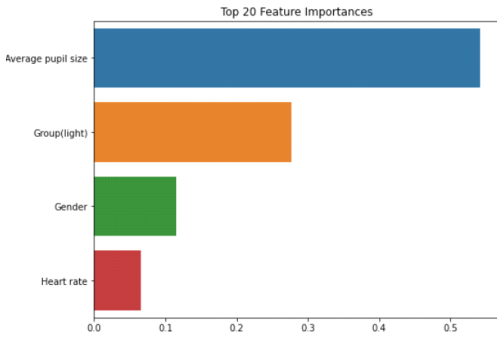


그림 10. 랜덤포레스트 모델의 입력변수 중요도
Fig. 10. Input feature importances of RandomForest model

$$\Delta i(t) = i(t) - \frac{N_{tl}}{N_t} i(t_l) - \frac{N_{tr}}{N_t} i(t_r) \quad (2)$$

· $i(t)$: t 노드의 불순도(impurity)

· N_t : t 노도의 관측치 개수

입력 변수 중요도는 참가자의 동공크기, 실내 밝기, 성별, 심박수 순으로 나타났다. 동공크기에 비해서 심박수가 비교적 적은 중요도를 갖는 것으로 학습한 것을 확인하였다.

V. 결론 및 토의

본 연구는 최적의 업무생산성 및 에너지사용 실내환경 구성연구의 일환으로, 애리조나 주립대학교의 학생들을 대상으로 여러 실내 조명조건에서 재실자의 생체신호를 측정하고 업무생산성을 평가할 수 있는 테스트를 포함한 실험을 진행하였다. 취득한 데이터를 바탕으로 생체신호와 업무생산성과의 관계를 분석하고 랜덤포레스트 기반의 업무생산성 예측모델을 제안하였다. 실내 조명조건이 동공크기 뿐만 아니라 심박수에도 상관관계가 있음을 확인하였고, 동공크기와 심박수가 업무생산성과 상관관계 있음을 보였다. 제안하는 기법은 보편적으로 적용할 수 있도록 성별과 생체신호만을 사용하였고, 결정트리의 구조가 과하게 복잡해지지 않도록 최적의 파라미터를 탐색하여 분류정확도 99.52%를 달성하였다. 본 연구에서 고려된 생체신호인 동공크기와 심박수는 최근 많이 보급된 스마트 장치들을 고려할 때 현실적으로 상용화되어 실내 조명 구성에 사용될 여지가 있다. 본 연구의 업무생산성 예측모델을 바탕으로 향후 연구로 조명 제어를 통한 최적의 업무생산성 환경구성과 이에 최적 에너지 사용환경 구축에 관련한 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] D. J. Yeom and F. Delogu, "Local body skin temperature-driven thermal sensation predictive model for the occupants' optimum productivity," *Building and Environ.*, vol. 204, Oct. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108196>)
- [2] Y. J. An, D. H. Kim, J. H. Lee, and B. J. Lee, "Indoor environment control system utilizing the internet of things," *The J. KIECS*, vol. 12, no. 4, pp. 645-650, 2017. (<https://doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.4.645>)
- [3] Z. Gou, S. S. Y. Lau, and H. Ye, "Visual alliesthesia: The gap between comfortable and stimulating illuminance settings," *Building and Environ.*, vol. 82, pp. 42-49, 2014. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.001>)
- [4] A. U. Viola, et al., "Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality," *Scandinavian J. Work, Environ. & Health*, pp. 297-306, 2008. (<https://www.jstor.org/stable/40967721>)
- [3] R. Yao, B. Li, and J. Liu, "A theoretical adaptive model of thermal comfort - Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)," *Building and Environ.*, vol. 44, no. 10, pp. 2089-2096, 2009. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>)
- [4] G. Ye, C. Yang, Y. Chen, and Y. Li, "A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET*)," *Building and Environ.*, vol. 38, no. 1, pp. 33-34, 2003. ([https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00027-6))
- [5] P. Ricciardi and C. Buratti, "Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions," *Building and Environ.*, vol. 127, pp. 22-23, 2018. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>)
- [6] J. H. Choi, R. Zhu, and A. Johnson, "Human-environment interaction: Potential use of pupil size for visual environmental controls," *ASHRAE-IAQ Proc.*, 2013.

- (<https://www.proquest.com/dissertations-theses/human-environmental-interaction-potential-use/ocview/1637727054/se-2>)
- [7] J. H. Choi and R. Zhu, "Human physiological signal based building environmental controls for visual comfort," *ARCC Conf. Repository*, 2014.
(<https://arcc-journal.org/index.php/repository/article/download/278/215>)
- [8] J. H. Choi and R. Zhu, "Investigation of the potential use of human eye pupil sizes to estimate visual sensations in the workplace environment," *Building and Environ.*, vol. 88, pp. 73-81, 2015.
(<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.025>)
- [9] J. H. Choi, "Investigation of human eye pupil sizes as a measure of visual sensation in the workplace environment with a high lighting colour temperature," *Indoor and Built Environ.*, vol. 26, no. 4, pp. 488-501, 2017.
(<https://doi.org/10.1177/1420326X15626585>)
- [10] F. A. J. L. Scheer, L. J. P. van Doornen, and R. M. Buijs, "Light and diurnal cycle affect human heart rate: Possible role for the circadian pacemaker," *J. Biological Rhythms*, 1999.
(<https://doi.org/10.1177/074873099129000614>)
- [11] K. C. H. J. Smolders, Y. A. W. de Kort, and P. J. M. Cluitmas, "A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures," *Physiology & Behavior*, 2012.
(<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2012.04.028>)
- [12] S. J. Tsukahara and W. E. Randall, "Is baseline pupil size related to cognitive ability? Yes (under proper lighting conditions)," *Cognition*, vol. 211, 2021.
(<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104643>)
- [13] B. Pfleging, D. K. Schmidt, and A. L. Kun, "A modeling relating pupil diameter to mental workload and lighting conditions," in *Proc. 2016 CHI Conf. Human Factors in Comput. Syst.*, 5776-5788, 2016.
(<https://doi.org/10.1145/2858036.2858117>)
- [14] P. J. Slegers, N. M. Moolenaar, M. Galetzka, A. Pruyn, B. E. Sarroukh, and B. Van der Zande, "Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies," *Lighting Res. & Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 159-175, 2013.
(<https://doi.org/10.1177/1477153512446099>)
- [15] C. McCarthy, N. Pradhan, C. Redpath, and A. Adler, "Validation of the Empatica E4 wristband," *2016 IEEE EMBS ISC*, pp 1-4. IEEE, 2016.
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/7508621>)
- [16] <https://help.tobii.com/hc/en-us/articles/213414285-Specifications-for-the-Tobii-Eye-Tracker-4C>
- [17] R. A. Thisted, "What is a P-value?," *Depart. of Statistics and Health Studies*, 1998.
(<https://5y1.org/download/511b90bc1233c516f0f9bd5ab4da67e6.pdf>)
- [18] L. Breiman, "Random Forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, pp. 5-32, 2001.
(<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>)

김 태 근 (Tae-geun Kim)



2020년 2월 : 강원대학교 전기전자공학과 학사
 2020년 3월~현재 : 숭실대학교 전기공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 머신러닝, 딥러닝, 건물에너지관리시스템
 [ORCID:0000-0002-6676-4869]

염 등 우 (Dong-woo Yeom)



2006년 2월: 아주대학교 건축학부 학사
2008년 2월: 아주대학교 건축학부 석사
2014년 2월: 아주대학교 건축학부 박사
2015년 1월~2016년 2월: 캘리포니아 폴리테크닉주립대학교 포모나 박사후 연구원

2016년 4월~2017년 6월: 서던 캘리포니아 대학교 박사후 연구원

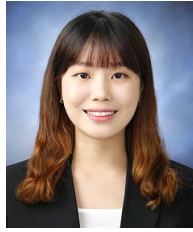
2018년 1월~2020년 6월: 로렌스 공과대학교 건축학과 조교수

2020년 8월~현재: 애리조나 주립대학교 건축전공 조교수

<관심분야> 건물-재실자 융합연구, 실내환경 쾌적도, 지속가능한 건물 디자인(Sustainable Building Design), 건물성능평가

[ORCID:0000-0001-8505-3619]

임 세 현 (Se-heon Lim)



2018년 8월: 송실대학교 전기공학부 학사

2019년 2월~현재: 송실대학교 전기공학과 석박사 통합과정
<관심분야> 머신러닝, 딥러닝, 건물에너지관리시스템

[ORCID:0000-0001-7049-4163]

윤 성 국 (Sung-guk Yoon)



2006년 2월: 서울대학교 전기공학부 학사

2012년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사(석박사통합과정)

2012년 9월~2014년 2월: 서울대학교 박사후 연구원

2014년 3월~현재: 송실대학교 전기공학부 조교수/부교수

<관심분야> 전력 빅데이터 처리, 전력계통 최적 운용, 스마트그리드 통신 네트워크

[ORCID:0000-0002-8987-6628]