

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.905>

JCCT 2022-11-112

## BCG 신호 최적화를 통한 주행중 운전자 수면 상태 분류에 관한 연구

### A Study On The Classification Of Driver's Sleep State While Driving Through BCG Signal Optimization

박진수\*, 정지성\*\*, 양철승\*\* 이정기\*\*

**Jin Su Park\*, Ji Seong Jeong\*\*, Chul Seung Yang\*\*, Jeong Gi Lee\*\***

**요약** 졸음운전은 교통사고 발생률을 높이고 사망사고로 이어지기 때문에 많은 사회적 관심이 필요하다. 졸음운전으로 인한 사고 건수는 매년 증가하고 있다. 따라서 전 세계적으로 이 문제를 해결하기 위해 다양한 생체신호 측정을 위한 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는 그 중에 비접촉 방식의 생체신호 분석에 중점을 두고 있다. 주행중인 차량에서는 엔진, 타이어, 차체 진동 등 다양한 노이즈가 발생한다. 압전센서로 주행중인 차량에서 운전자의 심박수와 호흡수를 측정하기 위해 차량 진동을 완충할 수 있는 센서 플레이트를 설계했고 차량에서 발생하는 노이즈를 줄일 수 있었다. 또한 압전센서의 신호 기반 CNN-LSTM 앙상블 학습 기법으로 모델을 추출하여 운전자가 수면중인지 아닌지 분류하는 시스템을 개발했다. 수면 상태를 학습시키기 위해 30초마다 피험자의 생체 신호를 획득하였고, 797개의 데이터를 비교 분석하였다.

**주요어** : BCG, 압전센서, 신호처리, 졸음감지, LSTM, RNN, CNN

**Abstract** Drowsy driving requires a lot of social attention because it increases the incidence of traffic accidents and leads to fatal accidents. The number of accidents caused by drowsy driving is increasing every year. Therefore, in order to solve this problem all over the world, research for measuring various biosignals is being conducted. Among them, this paper focuses on non-contact biosignal analysis. Various noises such as engine, tire, and body vibrations are generated in a running vehicle. To measure the driver's heart rate and respiration rate in a driving vehicle with a piezoelectric sensor, a sensor plate that can cushion vehicle vibrations was designed and noise generated from the vehicle was reduced. In addition, we developed a system for classifying whether the driver is sleeping or not by extracting the model using the CNN-LSTM ensemble learning technique based on the signal of the piezoelectric sensor. In order to learn the sleep state, the subject's biosignals were acquired every 30 seconds, and 797 pieces of data were comparatively analyzed.

**Key words** : BCG, Piezoelectric Sensor, Signal Processing, Drowsiness Detection, LSTM, RNN, CNN

\*정회원, 한국전자기술연구원 스마트가전혁신지원센터 (제1저자) Received: October 21, 2022 / Revised: November 3, 2022

\*\*정회원, 한국전자기술연구원 스마트가전혁신지원센터

(참여저자)

접수일: 2022년 10월 21일, 수정완료일: 2022년 11월 3일

게재확정일: 2022년 11월 8일

Accepted: November 8, 2022

\*Corresponding Author: hmfl1436@naver.com

Smart Appliances Innovation Support Center, Korea Electronics  
Technology Institute, Korea

## I. 서론

전세계적인 시장에서 스마트카, e-모빌리티 등 차세대 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다[1-4]. 이러한 전기 자동차(EV)는 소비자에게 많은 편리한 기능을 제공한다. 그 중 가장 중요한 요소는 안전을 위한 기능이다. 세계보건기구(WHO)의 통계에 따르면 매년 약 130만 명이 도로 교통사고로 사망한다[5]. 따라서 교통사고를 줄이기 위한 사람의 졸음 감지 시스템이 필요하다. 전 세계적으로 많은 연구자들이 졸음운전을 감지하는 시스템에 대한 연구를 수행하고 있다[6-8]. 운전자의 생체 신호를 측정하기 위해서는 핸들에 센서를 부착하여 심박수나 스트레스를 분석하거나 카메라를 이용하여 눈, 눈꺼풀, 동공의 움직임을 모니터링하는 기술이 주로 사용되었다. 최근에는 레이더를 이용한 비접촉 운전자의 생체 신호 모니터링 기술도 연구되고 있다[9]. 그러나 이들 방법은 대부분 피드포워드(feed-forward) 방식이기 때문에 환경이 변하면 정확도가 크게 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은 비접촉 생체 신호 측정 방법 중 BCG(ballistocardiogram)를 이용한 운전자 모니터링 시스템이다. 심박수를 측정하는 기술로 심장 부근에 전극을 부착하여 심장의 전기적 신호의 변화를 측정하는 심전도(ECG) 신호와 유사한 특성을 보인다[10]. BCG방식은 비접촉식으로 별도의 측정장치를 피부에 부착하지 않고도 측정이 가능하다. 우리는 BCG 기반으로 생체 신호를 측정하기 위한 선행 연구를 수행했다[11]. 생체신호 측정 기술은 대부분 모션 아티팩트에 민감한 아날로그 신호들이기 때문에 신호대 잡음비를 높이는 신호 처리 기술이 필수적이다.[12-15]. 본 논문에서는 차량 주행중 발생하는 진동 노이즈를 완화하기 위해 센서에 부착하는 플레이트를 설계하여 차량 주행 상태에서의 모션 아티팩트를 감소시켰다. 그리고 최종 목표인 졸음을 감지하기 위해 LSTM-RNN 기반 학습 알고리즘을 통해 기상과 수면을 분류하는 시스템을 개발했다. 다른 센서보다 저렴한 압전 센서를 사용하여 저비용 고효율의 시스템으로 UWB, ECG 등의 다른 방식의 생체신호 측정 시스템에 비해 기술 보급화 및 상용화에 유리하다.

## II. 생체신호 측정 시스템

### 1. 생체신호 측정 시스템 구성

심전도는 심박수, 호흡수와 같은 생체 신호를 측정하기 위한 가장 보편화된 방법이다. 그러나 이 방법은 차량 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다. 여러 채널의 전극을 피험자의 피부에 부착해야 해서 사용자의 불편함에 서비스화 하기 어렵다. 따라서 압전센서를 사용하여 심탄도를 측정하는 방법을 제안한다. 그림 1.에서 제안하는 시스템의 구성도를 볼 수 있다.

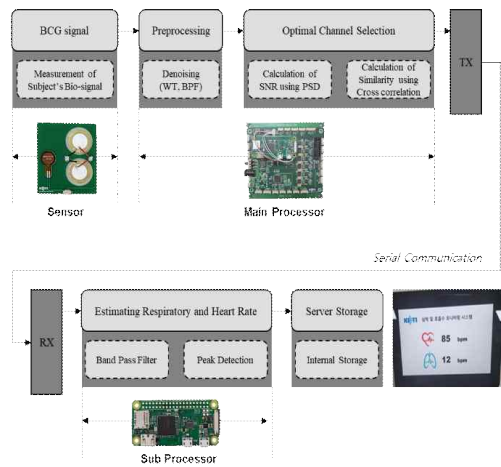


그림 1. 제안된 시스템 구성도  
Figure 1. The configuration of proposed system

우선, 운전자가 카시트에 앉으면 센서 부분에서 6채널 BCG 센서가 생체 신호를 측정한다. 두 번째로 메인 프로세서는 심박수와 호흡수 대역을 제외한 주변 주파수를 모두 차단하기 위해 0.1~30Hz 주파수 대역의 BPF(Band Pass Filter)를 수행한다. 세 번째로 서버 프로세서는 최적의 채널을 선택하기 위해 PSD(Power Spectral Density)를 사용하여 6개 채널 중 신호 대 잡음비(SNR)가 가장 높은 2개의 채널을 선택하여 최적의 신호를 추출하는 프로세스를 수행한다. 선택된 2개 채널의 BCG 신호는 교차상관관계(Cross-correlation)를 통해 사람의 이상적인 BCG 신호와 가장 유사한 1개의 채널을 선택한다. 이렇게 6개의 채널 중 가장 좋은 품질의 BCG 신호를 측정 추출하는 것이 본 시스템의 목적이다. 하지만 차량 주행중에 미세한 생체신호를 증폭시켜 신호처리를 하게 되면 원치 않게 신호보다 더 큰

노이즈가 발생할 때가 많다. 그렇게 되면 원하는 신호를 얻지 못 하는 경우가 발생하여 이를 완화시켜주기 위한 보조 장치가 필요하다.

## 2. 센서 플레이트 설계

그림 2.와와 같이 실제 차량에서 BCG 신호를 측정하는 실험을 수행했다. 발생하는 차량 주행중 노이즈를 감소시키기 위해 센서에 충격을 완화할 수 있는 패턴 구조를 설계하고 센서를 받칠 수 있도록 플레이트 형태로 제작하였다.

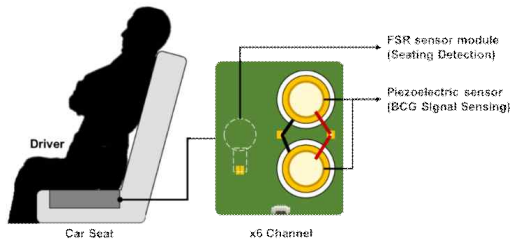


그림 2. 운전자 BCG 측정 구성도  
 Figure 2. Driver BCG Measurement Diagram

그림 3.은 차량이 정차했을 때 측정된 BCG 신호이다. 따라서 압전 센서의 노이즈를 감소시킬 수 있는 매체를 연구하였다. 센서 아래에 허니컴 모양의 판을 놓았습니다. 허니컴 재료는 수직 압력에 대한 완충 역할을 한다[16].

허니콤 구조의 상태 방정식은 다음 수식 (1)과 같다.

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = cy'(t) + ky(t) \quad (1)$$

여기서  $x(t)$ 는 응답 변위이고  $y(t)$ 는 가진(진동) 변위이다. 그리고  $m$ 은 허니컴판의 질량,  $c$ 는 점성 감쇠 계수,  $k$ 는 강성 계수이다.

허니컴 소재의 진동 전달율은 다음 수식 (2), (3)과 같다.

$$T_r = \frac{fft[x''(t)]}{fft[y''(t)]} \quad (2)$$

$$T_r = \frac{fft[x(t)]}{fft[y(t)]} = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (3)$$

여기서 기호  $fft$ 는 푸리에 변환을 나타내고  $\lambda$ 는 주파수 비율이다.

그림 3.은 허니컴 구조의 센서 플레이트를 사용한 BCG 신호와 센서 플레이트를 사용하지 않은 BCG 신호를 비교한 결과를 보여준다. 센서 플레이트를 사용할 때 압전 센서는 그림 3의 (a)와 같이 안정적인 BCG 신호가 출력된다. 하지만 센서 플레이트를 사용하지 않은 경우의 신호는 그림 3의 (b)와 같이 노이즈가 발생한다.

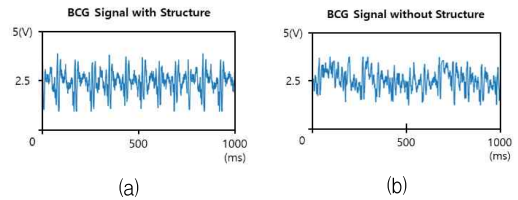


그림 3. BCG 신호 비교 (a) 허니컴 플레이트 사용 (b) 허니컴 플레이트 미사용  
 Figure 3. BCG signal comparison (a) with Honeycomb plate (b) without Honeycomb plate

## 3. 센서 플레이트 검증 실험

제안된 허니컴 구조 플레이트의 성능을 검증하기 위해 센서에 플레이트를 적용하기 전과 후의 심박수, 호흡수 측정 정확도를 비교하였다. 다채널 압전센서를 사용하여 심박수와 호흡수를 추정했다[17]. 실험 환경은 그림 2.와 같으나 정확도 검증을 위해 병원에서 사용하는 심전도(ECG)기반 심박수, 호흡수 측정 장비를 사용했다. 이 장비는 2등급 의료기기 인증을 받았으며 모델명은 BPM-1200이다. 본 실험에서는 심박수와 호흡수를 20회 측정한다. 기준 장비의 정확도를 100%라고 가정하고, 제안된 허니컴 구조와 구조가 없는 상태로 심박수와 호흡수 정확도를 계산했다. 결과는 표 1과 같다.

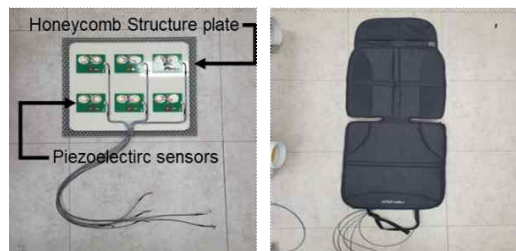


그림 4. 센서 플레이트 실제 사진  
 Figure 4. Sensor plate of the proposed structure

표 1. 압전 센서 아래 허니컴 구조를 배치하기 전(a) 및 후(b) 생체 신호 측정 정확도 비교

Table 1. Comparison of bio-signal measurement accuracy before(a) and after(b) placed honeycomb structure under piezoelectric sensors

(a) No Structure		
	Heart rate Accuracy (%)	Respiratory rate Accuracy (%)
Lower part (cushion)	82.42	80.76
Upper part (backrest)	81.75	86.32
Average	82.09	83.54
(b) Honeycomb Structure Placed		
	Heart rate Accuracy (%)	Respiratory rate Accuracy (%)
Lower part (cushion)	89.64	84.28
Upper part (backrest)	87.34	94.46
Average	88.49	88.37

### III. 졸음 감지 시스템

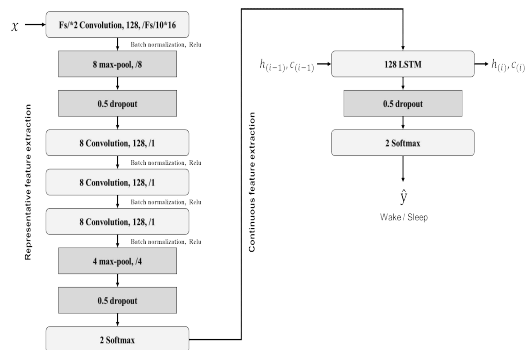
수면다원검사에도 포함되는 뇌파검사(EEG)는 대상이 잠을 자고 있는지 여부를 결정하는 가장 정확한 항목표준이다. 따라서 뇌파를 이용한 수면 감지 시스템이 많이 연구되고 있다[18-20]. 그러나 이러한 방식은 구동 시스템에 적용하기에는 매우 불편하다. 여러 채널의 진폭이 운전자의 두피에 닿아야 하기 때문에 측정이 불편하다. 또한 EEG는 신호가 매우 작기 때문에 노이즈에 취약하다. 따라서 제안된 시스템을 기반으로 운전자의 졸음 감지를 위해 뇌파 기반 수면 분류 데이터를 라벨링하여 BCG 신호를 훈련시켰다.

이 연구의 목적은 지도 학습을 통해 수면 상태를 BCG 신호로만 분류하는 것이다. 다음과 같이 데이터를 획득하고 레이블링하는 과정을 수행했다. 실험 설정은 그림 2와 동일하지만 EEG 방식의 기준 장비가 추가된 대[21]. 피험자의 뇌파를 측정하여 수면 여부를 분류할 수 있다. EEG 기준 장치의 수면 단계는 압전센서로 측정된 BCG 신호와 동기화시켰다. 그리고 분류된 수면 상태 데이터를 BCG 신호에 레이블링했다.

수면 단계는 EEG, EMG 및 EOG와 같은 다양한 유형의 생체 신호 파형의 규칙성을 확인하여 정의된다.

이와 같이 파형의 특징점을 추출하는 것이 중요하기 때문에 CNN을 사용했다. 또한, 현재의 수면 단계를 정의할 때에는 이전에 분류된 수면 단계의 영향을 받는다. 따라서 수면 분류 시스템에는 이전 정보도 기억할 수 있는 LSTM이 필요하다. 결론적으로 우리는 파형의 특징점 추출에 특화된 CNN과 이전 정보를 기억하는 LSTM을 모두 활용하도록 CNN-LSTM 앙상블 알고리즘을 설계했다.

그림 5는 학습 알고리즘 순서도이다. Wake/Sleep 분류 모델로 CNN과 RNN(LSTM)의 조합으로 구성된다. CNN 부분의 경우 로컬 특징을 추출하는 데 사용된다. RNN(LSTM)의 경우 이전 분류 정보를 반영하기 위해 사용된다. 모델은 총 3층의 구조로 구성되어 있으며 학습 과정에서 과적합을 방지하기 위한 풀링과 드롭아웃을 사용했다. 최종적으로 LSTM을 사용하여 수면상태인지 깨어있는 상태인지 두 가지 범주로 분류한다.



예시그림

그림 5. 학습 알고리즘 순서도  
Figure 5. Learning Algorithm Flowchart

마지막으로 CNN-LSTM 앙상블 알고리즘을 통해 추출된 모델이 수면 상태를 얼마나 잘 분류하는지 확인하기 위해 피드포워드 방식 알고리즘의 분류 정확도를 비교했다. AI Method는 우리가 제안한 시스템이고 그 Feedforward 방식은 HRV의 LF/HF 비율에 따라 임계값을 설정하여 수면을 감지하는 시스템이다[6]. 표 2.는 이 두 가지 방법으로 신호를 분류한 결과이다. F1-Score는 표 3.에 표기되어 있다. 표 3.의 F1-Score 열에 따르면 AI 방식의 f1-score는 피드포워드 방법보다 0.13 만큼 더 정확하다.

표 2. Feedforward 방법과 AI 방법의 Confusion Matrix 비교  
 Table 2. Confusion Matrix Comparison of Feedforward Method and AI Method

Confusion matrix		Feedforward Method		AI Method	
		Wake	Sleep	Wake	Sleep
Ref. Device	Wake	39	58	41	25
	Sleep	21	679	5	726

표 3. Feedforward 방법과 AI 방법의 F-1 Score 비교  
 Table 3. F-1 Score Comparison of Feedforward Method and AI Method

		Recall	Precision	F1-Score
Feedforward Method	Wake	0.4	0.65	-
	Sleep	0.97	0.92	-
	Average	0.69	0.79	0.74
AI Method	Wake	0.62	0.89	-
	Sleep	0.99	0.97	-
	Average	0.81	0.93	0.87

#### IV. 결 론

첫번째로, 본 연구에서 제안한 시스템은 ECG보다 편리한 환경에서 운전자의 생체신호를 측정하였다. 그 결과 제안된 BCG 방식의 시스템은 ECG 방식의 시스템보다 정확도가 떨어지지만 운전자를 구속하지 않고 생체 신호를 측정할 수 있었다.

두번째로, 압전센서 아래에 허니컴 구조의 센서 플랫폼을 설치하여 차량의 진동소음을 감소시켰다. 측정 결과, 표면 구조의 변화에 따라 외부 노이즈가 필터링됨을 알 수 있었다. 또한 원하는 신호의 전달 특성이 향상되었다. 따라서 전체 시스템의 측정 성능이 향상됨을 볼 수 있었다. 향후 추가적인 시스템 모델링, 구조해석, 진동특성해석, 시뮬레이션 등을 통해 차량 환경별 최적의 표면 구조를 찾기 위한 연구가 필요하다.

마지막으로 압전센서를 기반으로 BCG 신호를 이용하여 운전자의 수면 여부를 분류하는 AI 알고리즘을 개발했다. 이 방법은 신호처리를 기반으로 설계된 Feed forward 방식보다 정확함을 보여주었다. 하지만 다른 AI 시스템과 비교해본 실험 내용이 부족하여 추가적인

연구를 통해 다른 AI 기반 학습 기법들과 비교하고 가속화를 통해 성능을 향상시킬 예정이다[22]. 또한, 본 시스템을 기반으로 표정을 통한 감정 모니터링[23], 주행중 집중 향상을 위한 AR/VR 등 인포테인먼트 분야로 확대할 예정이다.

#### References

- [1] IEA, "Global EV Outlook 2021: Accelerating ambitions despite the pandemic"(www.iea.org)
- [2] Y. Sim, S. J. Moon, & J. Y. Lee, "A Study on Korean Sentiment Analysis Rate Using Neural Network and Ensemble Combination", International Journal of Advanced Culture Technology, Vol. 9, No. 4, pp 268-273, 2021.
- [3] Srivathsa, C. R., Dhanasekhar, S., & Trilok, J., "IOT Based Smart Solutions For EV (Doctoral dissertation)", CMR Institute of Technology, Bangalore, 2020.
- [4] Rahim, M. A., Rahman, M. A., Rahman, M. M., Asyhari, A. T., Bhuiyan, M. Z. A., & Ramasamy, D., "Evolution of IoT-enabled connectivity and applications in automotive industry: A review", Vehicular Communications, Vol. 27, pp 100285, 2021. DOI:10.1016/j.vehcom.2020.100285
- [5] World Health Organization, "Global status report on road safety 2018" (www.who.int)
- [6] Chowdhury, M. E., El Beheri, S. H., Albardawil, M. N., Moustafa, A. K. M. N., Halabi, O., & Kiranyaz, M. S., "Driver drowsiness detection study using heart rate variability analysis in virtual reality environment", In Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings Volume Issue 3, Vol. 2018, No. 3, pp ICTPD1132., 2018.
- [7] Vicente, J., Laguna, P., Bartra, A., & Bailón, R., "Drowsiness detection using heart rate variability", Medical & biological engineering & computing, Vol. 54, No. 6, pp 927-937, 2016.
- [8] Ramzan, M., Khan, H. U., Awan, S. M., Ismail, A., Ilyas, M., & Mahmood, A., "A survey on state-of-the-art drowsiness detection techniques", IEEE Access, Vol. 7, pp 61904-61919, 2019. DOI: 10.1109/access.2019.2914373
- [9] Yun, Y., Lee, J., Kim, J., & Kim, Y., "Detection scheme of heart and respiration signals for a driver of car with a doppler radar", Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 16, No. 1, pp 87-95, 2020.

- [10]Min J. H., Lee J. W., Kim K. H., “A Basic Study on Realtime Estimating Respiration of Ballistocardiogram in Non-Invasive Way Using Finite Impulse Response Filter”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), Vol. 68, No. 7, pp 879-883, 2019.
- [11]Yang, C., Ku, G. W., Lee, J. G., & Kim, K., “Improving the Accuracy of Biosignal Analysis Using BCG by Applying a Signal-to-Noise Ratio and Similarity-Based Channel Selection Algorithm”, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 16, No. 2, pp 1043-1050, 2021.
- [12]Achten, H., & Rojer, G., “Heart rate analysis using BCG: Determining the heart rate with an under the mattress sensor”, Delft University of Technology, 2020.
- [13]Ma, Y., Tian, F., Zhao, Q., & Hu, B., “Design and application of mental fatigue detection system using non-contact ECG and BCG measurement”, In 2018 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), pp 1508-1513, 2018.
- [14]Hafiz, M. A., Hashem, A. M., Khan, A. A. S., Rashid, M. H., & Faruqui, M. A. K., “Implementation of non-contact bed embedded ballistocardiogram signal measurement and valvular disease detection from this BCG signal”, International Journal of Medical Engineering and Informatics, Vol. 13, No. 4, pp 289-296, 2021.
- [15]Janjua, G., Guldenring, D., Finlay, D., & McLaughlin, J., “Wireless chest wearable vital sign monitoring platform for hypertension”, In 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp 821-824, 2017.
- [16]Guo, Y., & Zhang, J., “Shock absorbing characteristics and vibration transmissibility of honeycomb paperboard”, Shock and Vibration, Vol. 11, No. 5-6, pp 521-531, 2004.
- [17]Yang, C., Ku, G. W., Lee, J. G., & Kim, K., “Improving the Accuracy of Biosignal Analysis Using BCG by Applying a Signal-to-Noise Ratio and Similarity-Based Channel Selection Algorithm”, Journal of Electrical Engineering & Technology 16.2, p.1043-1050, 2021.
- [18]Van Hal, B., Rhodes, S., Dunne, B., & Bossemeyer, R., “Low-cost EEG-based sleep detection”, In 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp 4571-4574, 2014.
- [19]Lal, S. K., Craig, A., Boord, P., Kirkup, L., & Nguyen, H., “Development of an algorithm for an EEG-based driver fatigue countermeasure”, Journal of safety Research, Vol. 34, No. 3, pp 321-328, 2003., DOI:10.1016/S0022-4375(03)00027-6
- [20]Kweon, Y. S., Kwak, H. G., Shin, G. H., & Lee, M., “Automatic micro-sleep detection under car-driving simulation environment using night-sleep EEG”, In 2021 9th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI), pp. 1-6, 2021.
- [21]Dreem Deadband (<https://dreem.com/>)
- [22]Choi Se Jin, “A Method for accelerating training of Convolutional Neural Network”, The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 3, no.4, pp. 171-175, 2017. DOI:10.17703/JCCT.2017.3.4.171
- [23]YuJeong Sim, Seok-Jae Moon, Jong-Youg Lee “A Study on Korean Sentiment Analysis Rate Using Neural Network and Ensemble Combination”, International Journal of Advanced Culture Technology, Vol.9 No.4 , pp.268, 2021.

※ 본 연구는 국토교통부의 국토교통기술사업  
 화지원사업의 연구비지원에 의해 수행되었  
 음. [과제명 : 비접촉 생체정보 측정기능이  
 포함된 스마트 디퓨저 기반 거주자 맞춤형  
 Home-HAS(Health, Air, Safety) 서비스  
 개발] [과제번호 : 21TBIP-C161696-01]