

# 클라우드 IoT를 이용한 뇌-기계 인터페이스 시스템 구현

김훈희\*

부경대학교 컴퓨터공학부 조교수

## Implementation of Brain-machine Interface System using Cloud IoT

Hoon-Hee Kim\*

Assistant Professor, Dept. of Computer Engineering, Pukyong National University

**요약** 뇌-기계 인터페이스는 차세대 인터페이스로서 기기 이용자가 명령을 생각할 때 발생하는 신경세포의 전기적 신호인 뇌파를 해석하여 기기를 조종하는 인터페이스다. 뇌-기계 인터페이스는 다양한 스마트기기 등에 응용될 수 있지만 뇌파 신호를 해석하는 데는 상당량의 계산 프로세스가 필요하다. 따라서 에지(Edge) 형태로 구현된 임베디드 시스템에서는 뇌-기계 인터페이스를 구현하기가 어렵다. 본 연구에서는 사물인터넷 기술을 이용하여 에지에서는 뇌파 측정만을 진행하고 뇌파 데이터의 저장 및 분석은 클라우드 컴퓨팅에서 수행하는 새로운 형태의 뇌-기계 인터페이스 시스템을 제안하였다. 본 시스템은 뇌-기계 인터페이스를 위한 정량 뇌파 분석을 성공적으로 수행하였으며 데이터 송수신 시간 또한 실시간 처리가 가능한 수준을 보였다.

**주제어** : 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 뇌파, 뇌-기계 인터페이스, 실시간, 정량 뇌파

**Abstract** The brain-machine interface(BMI) is a next-generation interface that controls the device by decoding brain waves(also called Electroencephalogram, EEG), EEG is a electrical signal of nerve cell generated when the BMI user thinks of a command. The brain-machine interface can be applied to various smart devices, but complex computational process is required to decode the brain wave signal. Therefore, it is difficult to implement a brain-machine interface in an embedded system implemented in the form of an edge device. In this study, we proposed a new type of brain-machine interface system using IoT technology that only measures EEG at the edge device and stores and analyzes EEG data in the cloud computing. This system successfully performed quantitative EEG analysis for the brain-machine interface, and the whole data transmission time also showed a capable level of real-time processing.

**Key Words** : Internet of Things(IoT); Cloud Computing; Electroencephalogram(EEG); Brain-machine Interface(BMI); Real-time; quantitative EEG(qEEG)

### 1. 서론

디지털 기술과 4차 산업이 발달함에 따라 다양한 스마트기기가 개발되고 있다. 발전된 스마트기기 사용을 위한 새로운 인터페이스 기술 또한 개발되고 있다. 뇌-기계

인터페이스는 기기 사용자의 생각을 다양한 뇌 영상 기법으로 측정하여 사용자의 의도를 디코딩하는 기술이다 [1-3]. 따라서 뇌-기계 인터페이스는 버튼 조작, 스크린 터치, 음성인식같이 인간 신체의 말단을 이용하는 간접적인 인터페이스가 아닌 발전된 형태의 직접적인 차세대

본 논문은 과학치안 공공연구성과 실용화 촉진 시범사업 연구과제(No. 1711174175)로 수행되었음.

\*교신저자 : 김훈희(h2kim@pknu.ac.kr)

접수일 2022년 12월 27일

수정일 2023년 2월 2일

심사완료일 2023년 2월 6일

인터페이스이다.

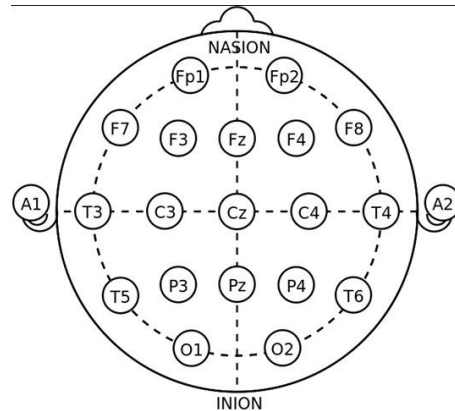
뇌-기계 인터페이스 기술에 가장 많이 이용되는 뇌영상 기법은 뇌파로서 컴퓨터 커서 조작[4], 로봇의 이동 방향 조작[5,6], 드론의 이동 방향 조작[7], 3차원 공간에서의 로봇 팔 조작[8], 감정 상태 파악[9,10], 의료 솔루션[11,12] 등 여러 가지 응용 시스템이 연구되었다. 하지만 뇌파를 이용하는 뇌-기계 인터페이스는 다음과 같은 문제점 때문에 아직은 대중화되기 어렵다. 첫째, 뇌파는 두피 위에서 신경세포의 전기적 활동 신호를 측정하는 비침습적 측정 방법으로 두개골을 통과하며 신호의 강도가 매우 낮아지게 되며 다양한 잡음이 같이 측정된다. 이를 해결하기 위해 계산 복잡도가 높은 다양한 뇌파 분석 기법이 필요로 하다. 둘째, 뇌파는 개인 간의 차이가 매우 커서 같은 작업(task)을 수행한다고 하더라도 뇌-기계 인터페이스 사용자마다 뇌파를 해석하는 디코더 모델을 따로 설계하고 최적화해야 한다.

위와 같은 뇌-기계 인터페이스 시스템 개발의 문제점을 해결하고자 클라우드 컴퓨팅과 사물인터넷을 이용하는 실시간 뇌파 분석 시스템을 제안하고자 한다. 특히 뇌파와 같은 생체신호들은 사물인터넷을 이용하는 다양한 자료수집, 실시간 모니터링 연구가 진행되고 있다 [13,14]. 본 연구에서는 뇌파 측정을 위한 OpenBCI 장비를 사물인터넷으로 이용될 수 있도록 AWS IoT 서비스와 연결하여 뇌-기계 인터페이스를 구성하였다. 또한 AWS의 클라우드 컴퓨팅 자원을 이용하여 실시간으로 복잡도가 높은 뇌파 분석을 수행하고 결과를 사용자에게 피드백할 수 있도록 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 뇌-기계 인터페이스 사용자의 뇌파를 정량 분석한 결과를 실시간으로 출력하였으며 결과적으로 클라우드 컴퓨팅과 사물인터넷을 이용한 뇌-기계 인터페이스 시스템이 다양한 응용 프로그램에서 사용될 수 있음을 보였다.

## 2. 뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT 구현

### 2.1 뇌파 측정 방법

본 연구에서는 사용 편의성이 높은 무선 뇌파 측정 장비인 OpenBCI를 이용하였다. OpenBCI는 16개 전극 채널을 지원하며 샘플링 레이트는 125Hz를 지원한다 (Fig. 1). 본 연구에서는 16채널을 모두 이용하였으면 샘플링 레이트 또한 125Hz로 고정하였다.



[Fig. 1] OpenBCI Channels (10-20 system)

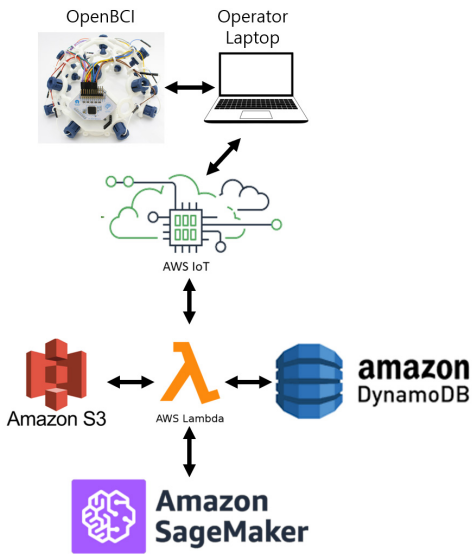
제안하는 시스템을 테스트하기 위해서 동일 성별의 6명의 20대 일반 정상인 피험자를 모집하여 실험을 진행했으며 각각 S0, S1, S2, S3, S4, S5로 명명하였다. 모든 피험자는 이전에 뇌-기계 인터페이스를 경험한 적이 없었으며, 정신질환 병력이 없었으며, 현재 복용하는 약물 또한 없었다.

구현된 시스템 테스트를 위해 10명의 피험자를 대상으로 약 120초 동안의 눈을 감고 휴지상태(resting state)의 뇌파를 측정하였다. 본 연구에서는 피험자의 휴지상태 뇌파를 측정하고, 측정된 데이터는 클라우드 IoT를 이용하여 뇌파를 분석하는 클라우드 계산 서버로 전송하였다. 클라우드 계산 서버에서는 실시간으로 피험자의 정량 뇌파를 분석하여 다시 각 피험자에게 피드백(feedback)하였다.

### 2.2 뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT 구성

본 연구에서 다음과 같은 구성으로 뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT를 구성하였다 (Fig. 2). 뇌파 측정을 위한 OpenBCI는 기기 조종을 위한 오퍼레이터 랩톱(laptop)과 무선 블루투스로 연결되었었다. OpenBCI는 125Hz의 샘플링 레이트와 500ms의 버퍼로 뇌파 데이터를 실시간으로 오퍼레이터 랩톱으로 전달하였다.

랩톱에서 데이터를 분석용 클라우드로 실시간 전달을 하기 위해서 AWS IoT 서비스를 이용하였다. AWS IoT는 Wi-Fi 인터넷을 통해 전달되는 뇌파 데이터를 MQTT(Message Queuing and Telemetry Transport) 프로토콜을 이용하여 실시간으로 AWS(Amazon Web Service)의 각 클라우드 서비스로 전달하였다. MQTT 프로토콜은 AWS IoT에서 제공하는 프로토콜로서 AWS IoT SDK(API)를 통해 프로토콜을 이용할 수 있었다.



[Fig. 2] Cloud IoT Scheme for BMI

AWS IoT로 데이터가 스트리밍되면 서버리스 서비스인 AWS Lambda를 이용하여 뇌파 데이터는 클라우드 스토리지인 Amazon S3에 저장하도록 하였으며 해당 뇌파 데이터의 메타정보(피험자 번호, 측정 일시, 실험 번호)는 클라우드 데이터베이스인 Amazon DynamoDB에 저장되도록 하였다.

그 후 AWS Lambda가 서버리스 형태로 분석용 기계 학습 모델을 실행할 수 있는 Amazon SageMaker 모델의 Endpoint URL을 호출하도록 하였다. Amazon SageMaker 모델은 AWS Lambda 호출 시 같이 넘겨받은 받은 Amazon S3와 Amazon DynamoDB 주소 정보를 이용하여 뇌파 데이터의 정량 분석을 수행하도록 하였다. 정량 분석된 결과는 다시 AWS Lambda로 피드백하여 결과를 Amazon S3와 Amazon DynamoDB에 저장하는 것과 동시에 AWS IoT를 이용하여 오퍼레이터 랩톱으로 전달하도록 하였다. 오퍼레이터 랩톱에서는 뇌파의 정량 분석 결과를 시각화하여 실시간으로 보여주도록 구성하였다.

### 2.3 정량 뇌파(Quantitative electroencephalography, qEEG) 분석

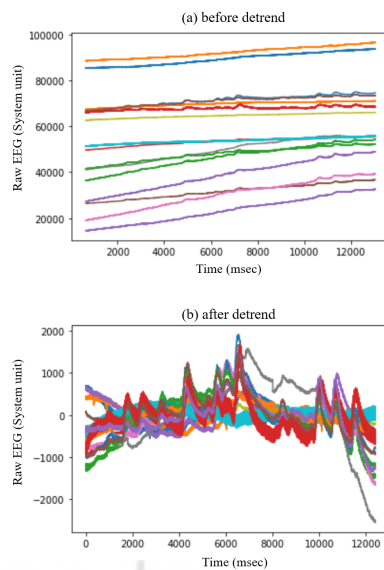
뇌파 데이터는 대표적인 비선형 데이터로서 전처리, 분석 등을 거치지 않고서는 무작위 시계열 데이터처럼 보인다. 따라서 뇌파의 의미를 파악하기 위해서는 정량적인 분석이 필요하다.

뇌파를 정량 분석하기 위해서는 우선 측정 시 발생하는 잡음(noise) 제거하기 위해 추세 제거(detrend)와 주파수 밴드에 따른 필터링 작업이 필요하다. 뇌파는 측정 장비가 실행되는 동안 계속해서 전압이 전극에 쌓여서 측정값이 일정하게 증가하는 경향이 있다. 이를 제거하기 위해 추세 제거 알고리즘을 적용하였다. 또한 인간 뇌파를 분석하기 위해서 유효한 0.5Hz~60Hz 대역의 신호만 밴드 패스 필터(band-pass filter)로 필터링하였으며, 라인 노이즈(line noise)를 제거하기 위해 60Hz 노치 필터(notch filter)를 사용하였다.

또한 뇌파 측정 시 발생하는 신체의 미세한 근육의 움직임 등으로 인한 아티팩트(artifact)를 제거하기 위해 독립 구성 요소 분석(Independent Component Analysis, ICA)을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 자동으로 독립 구성 요소 분석을 수행하는 알고리즘을 이용하여 아티팩트를 제거하였다 [15].

그 후 푸리에 변환을 이용하여 주파수 밴드별로 파워 스펙트럼밀도(power spectral density)를 구하여 델타(delta), 세타(theta), 알파(alpha), 베타(beta), 감마(gamma) 대역의 주파수 파워를 각각 따로 계산하였다. 또한 정량 뇌파 시각화를 위하여 뇌파 몽타주 위에 각각의 주파수 파워를 표시하여 출력하도록 하였다.

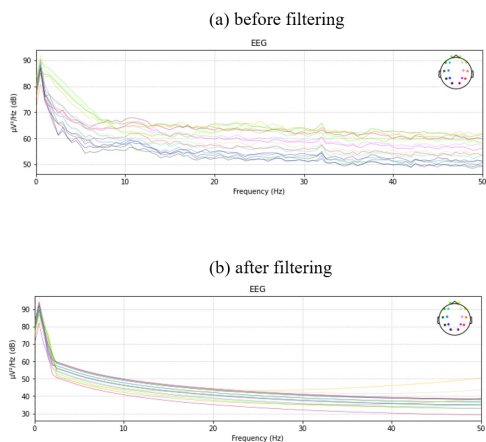
### 3. 뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT 실행 결과



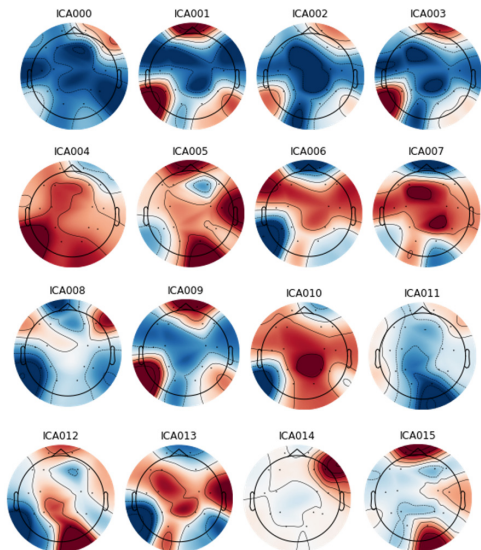
[Fig. 3] Result of Detrend

총 6명의 정량 피험자를 이용하여 구현된 시스템을 테스트해 보았다. 정량 뇌파 분석을 위한 모듈의 실행 결과는 오퍼레이터 랩톱으로 실시간으로 전달되었다. 실시간으로 전달된 정량 뇌파 분석 결과는 오퍼레이터 랩톱에서 시각화하여 뇌-기계 인터페이스 사용자가 결과를 바로 확인할 수 있도록 하였다.

정량 뇌파 분석을 위한 첫 번째 전처리인 추세 제거 전에는 뇌파(EEG) 데이터가 전체적으로 상승하는 추세를 보였지만(Fig. 3(a)), 추세 제거 이후는 상승 추세가 제거되었다. (Fig. 3(b)).



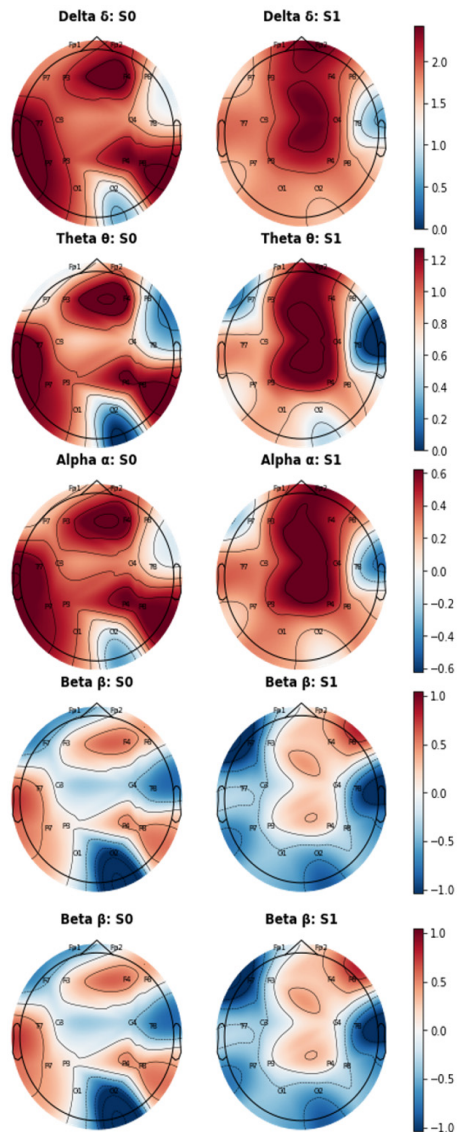
[Fig. 4] Results of Filtering



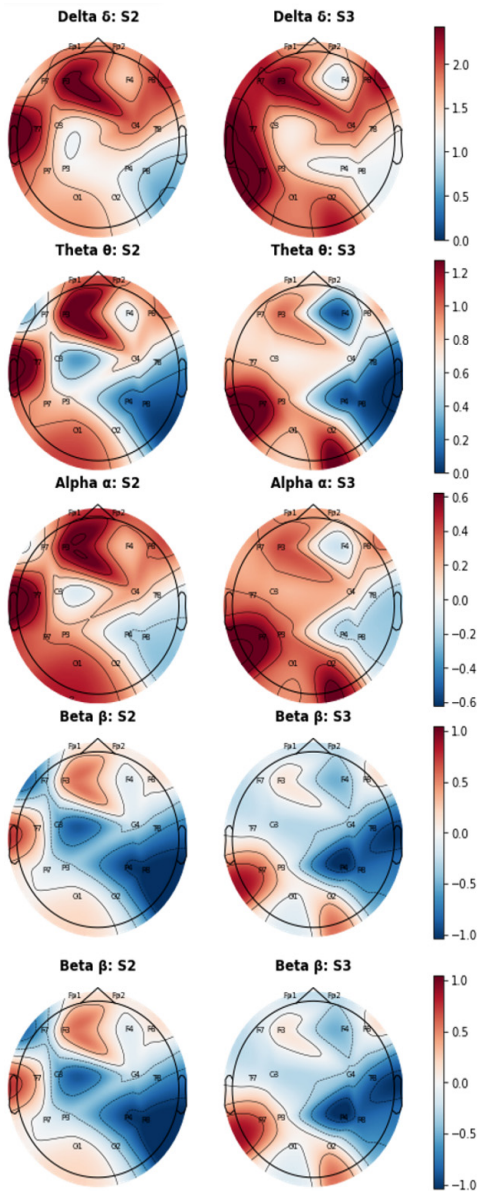
[Fig. 5] Results of ICA

두 번째 전처리 모듈인 주파수 필터를 적용하기 전 뇌파의 파워스펙트럼밀도는 잡음 지터(jitter)를 가지고 있는 형태를 보였지만(Fig. 4(a)) 밴드 패스 필터와 노치 필터를 적용한 후에는 파워스펙트럼밀도에서 잡음 지터가 사라진 것을 확인할 수 있었다. (Fig. 4(b)).

세 번째 전처리 모듈에서는 ICA 분석 결과를 보여주고(Fig. 5) 아티팩트에 해당하는 요소(component)를 자동으로 제거하였다.



[Fig. 6] qEEG Result of Subject 0 and Subject 1

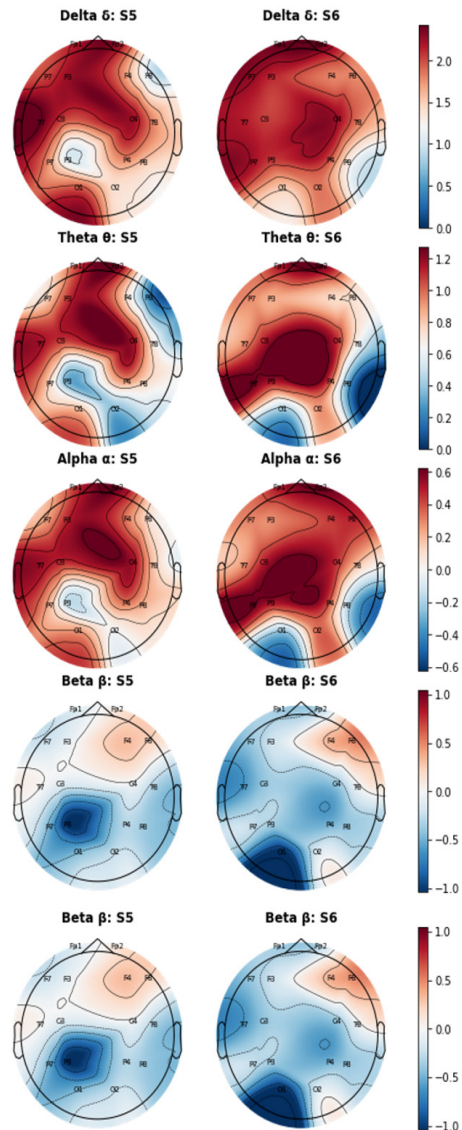


[Fig. 7] qEEG Result of Subject 2 and Subject 3

전처리가 완료된 뇌파 데이터는 주파수 밴드별로 파워 스펙트럼밀도를 구하여 뇌파 몽타주 그림에 결과를 표시하여 정량 뇌파 분석 결과를 한눈에 알아보기 편하게 구현하였다 (Fig. 6-8).

뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT를 이용한 시스템의 네트워크 연결 및 데이터 통신과 클라우드 내의 계산 프로세스 작동 시간 평가를 위하여 3개의 카테고리 시스템의 작동 속도를 측정하였다. 첫 번째로 뇌파 데이터

가 오퍼레이터 랩톱을 통해 AWS IoT로 전달되는 시간 (Edge to Cloud), 두 번째로 클라우드 내에서 뇌파 데이터가 처리되는 계산 프로세스 시간(Cloud Processing), 마지막으로 계산 프로세스가 끝난 결과를 AWS IoT에서 오퍼레이터 랩톱으로 보내는 시간(Cloud to Edge)을 측정하였다 (Table 1). 측정 결과는 총 10번의 트라이얼 (trial)에 대한 평균이며 시스템 전체 수행 평균 시간은 3.46초였다.



[Fig. 8] qEEG Result of Subject 4 and Subject 5

(Table 1) Running Time of BMI - Cloud IoT System  
(unit: second)

| Subject | Edge to Cloud | Cloud Processing | Cloud to Edge | Total |
|---------|---------------|------------------|---------------|-------|
| S0      | 1.37          | 1.01             | 1.24          | 3.62  |
| S1      | 1.36          | 0.5              | 1.24          | 3.1   |
| S2      | 1.22          | 0.94             | 1.32          | 3.48  |
| S3      | 1.31          | 0.99             | 1.25          | 3.56  |
| S4      | 1.20          | 0.88             | 1.30          | 3.38  |
| S5      | 1.31          | 0.99             | 1.31          | 3.61  |
| Mean    | 1.30          | 0.88             | 1.28          | 3.46  |

#### 4. 결론

본 연구에서는 높은 시간 복잡도가 필요한 뇌파 분석을 IoT 기술을 이용하여 클라우드상에서 실시간으로 처리하고 피드백하는 시스템을 설계하여 뇌-기계 인터페이스 기술이 클라우드 IoT에서도 구현할 수 있음을 보였다. 특히 에지(edge)에서는 센서에 해당하는 뇌파 측정 장비만 구동하고 뇌파 데이터의 저장 및 분석은 모두 클라우드에서 처리하는 시스템을 제안하여 낮은 사양의 임베디드 시스템에서도 뇌-기계 인터페이스를 구현할 수 있음을 확인하였다.

뇌파 분석을 위해 필수적으로 필요한 각종 전처리 또한 실시간으로 수행되었으며 정량 뇌파 분석 또한 마찬가지로 실시간으로 결과를 보여주었다. 뇌-기계 인터페이스 - 클라우드 IoT 시스템이 수행되는데 필요한 시간은 평균 3.46초로 본 시스템이 다양한 실시간 애플리케이션에 적용할 수 있음을 보였다.

하지만 뇌-기계 인터페이스를 로컬 시스템에서 작동하도록 설계할 때 네트워크 데이터 통신을 위해 필요한 송신(Edge to Cloud)과 수신(Cloud to Edge) 시간이 소요되지 않으므로 좀 더 실시간 시스템에 적합하게 구현할 수 있다. 이는 네트워크 통신 장비의 한계점으로 볼 수도 있지만 향후 5G망 등 효율적인 통신 프로토콜을 이용할 때 소비되는 시간을 줄일 수 있을 것이라 예상된다. 또한 클라우드 내부에서 소요되는 계산 프로세스는 평균 0.88초가 필요하였다. 이를 개선하기 위해서는 뇌파 분석에 이용되는 모델과 ICA와 같은 계산량이 많이 필요한 전처리 알고리즘의 최적화가 필요할 것으로 보인다. 또한 클라우드를 이용하면 계산에 이용되는 프로세서(processor)의 스펙을 필요에 따라 증량할 수 있으므로 수행 속도의 개선 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 이렇게 네트워크 연결, 모델 구현, 클라우드 프로세서의 최

적화 방법 등을 통해 최종적으로 클라우드 IoT 상에서 시스템 전체 동작 시간이 0.5초 이하가 되는 뇌-기계 인터페이스를 구현되면 즉각적인 반응속도가 필요한 애플리케이션에서도 이용이 가능할 것이다.

본 연구가 실제로 구현되어 제품화되기에는 또 한 가지 문제가 있다. 뇌파 측정 IoT 시스템에 대한 보안인증 등이 필요하다는 것이다. 생체신호에 해당되는 뇌파의 경우 개인정보로서 네트워크상에서 데이터를 송수신할 때 암호화 작업 등 보안인증이 필요로 하다. 특히 의료 뇌파 데이터를 이용하는 애플리케이션의 경우 클라우드 서버가 국내에 있어야 한다는 규정의 한계점 또한 해결하는 방법이 필요할 것이다.

한편 뇌-기계 인터페이스를 클라우드 IoT를 이용하여 구현한 데모 연구는 지금까지 발표되고 있진 않다. 본 연구와 가장 비슷한 개념의 IoT 기기는 인공지능 스피커로서 클라우드 IoT를 이용한 뇌-기계 인터페이스 시스템이 계속 발전하면 새로운 형태의 스마트 인터페이스로서 우리 일상생활에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

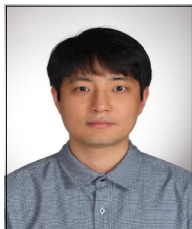
#### REFERENCES

- [1] P. R. Roelfsema, D. Denys, and P. C. Klink, "Mind Reading and Writing: The Future of Neurotechnology," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.22, No.7, pp.598-610, 2018.
- [2] M. A. Lebedev and M. A. L. Nicolelis, "Brain-machine interfaces: past, present and future," *Trends in Neurosciences*, Vol.29, No.9, pp.536-546, 2006.
- [3] F. Lopes da Silva, "EEG and MEG: Relevance to Neuroscience," *Neuron*, Vol.80, No.5, pp.1112-1128, 2013.
- [4] D. J. McFarland, W. A. Sarnacki, and J. R. Wolpaw, "Electroencephalographic(EEG) control of three-dimensional movement," *Journal of Neural Engineering*, Vol.7, No.3, pp.1-9, 2010.
- [5] Y. Chae, J. Jeong, and S. Jo, "Toward brain-actuated humanoid robots: Asynchronous direct control using an EEG-Based BCI," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.28, No.5, pp.1131-1144, 2012.
- [6] K. Volkova, M. A. Lebedev, A. Kaplan, and A. Ossaditchi, "Decoding Movement From Electroencephalographic Activity: A Review," *Frontiers in Neuroinformatics*, Vol.13, pp.1-20, 2019.
- [7] K. Lafleur, K. Cassady, A. Doud, K. Shades, E. Rogin, and B. He, "Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface," *Journal of Neural*

- Engineering, Vol.10, No.4, pp.1-15, 2013.
- [8] H. H. Kim and J. Jeong, "An electrocorticographic decoder for arm movement for brain-machine interface using an echo state network and Gaussian readout," Applied Soft Computing, Vol.117, pp.1-13, 2022.
- [9] O. Al Zoubi, M. Awad, and N. K. Kasabov, "Anytime multipurpose emotion recognition from EEG data using a Liquid State Machine based framework," Artificial Intelligence in Medicine, Vol.86, pp.1-8, 2018.
- [10] L. Bozhkov, P. Koprinkova-Hristova, and P. Georgieva, "Reservoir computing for emotion valence discrimination from EEG signals," Neurocomputing, Vol.231, pp.28-40, 2017.
- [11] H. S. Wi and B. M. Lee, "Classification Method of Sleep Induction Sounds in Sleep Care Service based on Brain Wave," Journal of Korea Multimedia Society, Vol.23, No.11, pp.1406-1417, 2020.
- [12] E. Tidoni, P. Gergondet, G. Fusco, A. Kheddar, and S. M. Aglioti, "The Role of Audio-Visual Feedback in a Thought-Based Control of a Humanoid Robot: A BCI Study in Healthy and Spinal Cord Injured People," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol.25, No.6, pp.772-781, 2017.
- [13] K.H. Kim and K.H. Lee, "A Scheme of Identity Authentication and Anomaly Detection using ECG and Beacon-based Blockchain," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.7, No.3, pp.69-74, 2021.
- [14] J. Y. Kwak, Y. J. Yang, J. K. Lim, S. C. Yoon and T. W. Ahn, "A Study to Improve the Usability of the Smart Sleeping Mask based IoT," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol.8, No.6, pp.27-33, 2022.
- [15] A. Mognon, J. Jovicich, L. Bruzzone and M. Bulatti, "ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features," Psychophysiology, Vol.48, No.2, pp.229-240, 2011.

### 김 훈 희(Hoon-Hee Kim)

[정회원]



- 2019년 8월 : 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 (공학박사)
- 2020년 9월 2~ 2021년 2월 : 주식회사 포엔 CTO
- 2021년 3월 ~ 2022년 8월 : 강남대학교 인공지능융합공학부 조교수

- 2022년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 컴퓨터공학부 조교수

<관심분야>

사물인터넷, 인공지능, 뇌공학, 클라우드 컴퓨팅