악력 세기와 뇌파의 상관관계에 관한 연구

Study on the Correlation between Grip Strength and EEG

김 동 은, 박 승 민, 심 귀 보*

(Dong-Eun Kim¹, Seung-Min Park¹, and Kwee-Bo Sim¹)

¹School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

Abstract: The purpose of this study was to identify the correlation between electroencephalography (EEG) and strength, using grip strength. 64-channel EEG data were recorded from five healthy subjects in tasks requiring handgrip contractions of nine levels of MVC (Maximal Voluntary Contraction). We found the ERS (Event-Related Synchronization)/ERD (Event-Related Desynchronization) at the measured EEG data using STFT (Short-Time Fourier Transform) and spectral power in the EEG of each frequency range displayed in the graph. In this paper, we identified that the stronger we contracted, the greater the spectral power was increased in the β , γ wave.

Keywords: EEG, grip strength, BCI, spectral power

I. 서론

인간의 뇌는 약 천억 개 이상의 세포들로 구성되어 있다. 각 뇌세포는 신체의 움직임 제어뿐만 아니라 상상, 기억력 등 전반적으로 인간의 기능에 많은 부분에 관여한다. 이렇게 신체의 기능을 제어할 때 뇌세포 간의 활동으로 전기적신호가 발생하게 되는데 이를 뇌파 (EEG)라 하며, 여러 분야에서 연구되고 있다. EEG는 간질과 같은 병명을 확인하는 등 의료분야에서도 넓게 연구되는 한편, EEG를 이용하여 외부기기를 제어하는 BCI (Brain Computer Interface) 분야에서도 여러 분야로 나뉘어 연구가 진행 중이다. 현재 루게릭병(ALS: Amyotrophic Lateral Sclerosis)과 같이 운동 세포가 사멸하여 뇌의 기능은 정상이지만 신체적인 활동을 할 수 없는 환자들을 위하여 EEG를 이용한 Communication tool이 개발된 바가 있고[1], 일본 도요타사에서는 신체 동작움직임을 수행 시와 움직임을 상상 시 나타나는 EEG 특성인 ERD/ERS 현상을 이용하여 휠체어를 제어한 연구가 소개된 바 있다[2]. 또한, 마비환자를 대상으로 자신의 팔이 아닌 로봇 팔을 제어하여 음료를 마시는 데 성공한 사례가 보고된 바 있다[3]. 본 논문에서는 힘과 EEG의 연관성을 연구하고 이를 응용하여 현재 의료분야에서 사지 마비 또는 신체 일부가 불편한 환자들을 대상으로 움직임 동작제어에 연구초점이 맞춰져 있는 BCI 분야에 힘과 EEG와의 관계를 분석하여 로봇 팔 및 의수와 같은 의료기기를 등을 실제 환자가 원하는 동작 수행을 위한 움직임 동작과 힘에 대한 관계를 동시에 분석 및 적용함으로써 기존의 방법보다 정교한 제어가 가능한 방안을 모색하고자 하였다.

II. 관련 연구

1. EEG 측정 방법 및 주파수별 특성

EEG는 특정 행동이나 상상 시 뇌에서 검출되는 전압을 말하며, 측정 방법에 따라 2가지로 나뉘게 된다. 침습적 방법은 두개골 내의 대뇌 겉질 표면에 직접 전극을 부착하는 방법으로 잡음에 강하고, 비침습적 방법보다 높은 전압을 얻을 수 있다. 비침습적 방법은 두피에 직접 전극을 부착하는 방법으로 잡음에 약하다는 단점이 있지만, 시술이 필요 없어 안전성과 편리성에 이점이 있다.

뇌에서 측정되는 EEG는 일반적으로 주파수범위에 따라 다른 특성이 있으며, 이와 같은 특성을 기반으로 많은 연구가 진행 중이다. 보통 δ , θ , α , β , γ 와 같이 5가지로 나뉘며 다음과 같은 특성을 지닌다. δ (0.5~3Hz) 파는 근육 및 움직임에 의한 잡음에 취약하고 수면 시 많이 나타나는 파형으로 깊은 수면과 관련이 있어 수면파라고도 불리며, 뇌의 이상 상태를 확인할 때도 연구된다. θ (3~8Hz) 파는 얇은 수면이나 졸음 시 나타나고 감정 및 성장 연구에 활용되며, α (8~12Hz) 파는 심신이 안정 및 휴식상태에 나타나고 정신집중 그리고 개안 시에 억제되는 특성이 있다. β (12~30Hz) 파는 신체의 움직임 및 집중 시 나타나며, 불안/긴장파도 연관이 있다. γ (30~50Hz) 파는 각성 및 흥분 시 나타나며, 인지 정보처리 시 활성화 된다[4,5].

2. ERD (Event-Related Desynchronization)/ERS (Event-Related Synchronization)

뇌는 위치에 따라 전두엽(frontal lobe), 두정엽(parietal lobe), 측두엽(temporal lobe), 후두엽(occipital lobe)로 나뉘며, 전두엽과 두정엽 사이에 있는 뇌의 중심부의 운동피질(motor cortex) 지역은 자발적 운동과 관련이 깊어 실제 움직임을 대상으로 하는 연구의 EEG분석에 가장 중요하게 활용된다. 운동피질 영역에서 α 파를 다른 명칭으로 μ 파라고도 하며, 신체 움직임 또는 상상 시 μ 파의 변화를 통해 분석할 수 있다. 운동 피질 지역은 뇌의 중심구(central

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 4, 2013 / revised June 29, 2013 / accepted July 18, 2013

김동은, 박승민, 심귀보: 중앙대학교 전자전기공학과

(jounj@cau.ac.kr/sminpark@cau.ac.kr/kbsim@cau.ac.kr)

※ 본 논문은 한국연구재단 중견연구지원사업(No. 2012-0008726)에서 지원하여 연구하였으며 연구비 지원에 감사드립니다.

sulcus)에 있어 본 논문에서는 편의상 운동피질 지역을 중심(central) 영역이라 정의하였다.

ERD는 동작을 실행하기 전 α 파 영역에서 EEG의 진폭이 감소하는 현상을 말하고, 이와 반대로 ERS는 동작 실행 후 β 파 영역에서 EEG의 진폭이 증가하는 현상을 말한다. ERD/ERS 현상은 운동 상상 시에도 자발적 운동에서와 같은 현상을 보여 이러한 EEG의 특성으로 현재 BCI 분야에서는 이를 이용하여 실제 동작 시 또는 상상 시 나타나는 ERD/ERS 특성으로 휠체어의 방향을 제어하거나 외부기기를 제어하는데 응용하는 연구가 진행되고 있다[6,7].

3. 힘과 EEG 선행연구

힘과 EEG의 관계에 관한 선행 연구로 두 손가락을 이용하여 힘을 가하는 집게(pinch) 힘의 연구에서 강한 힘을 가할 때 γ 파에서 유의미한 증가를 나타낸 연구를 발표한 바 있다[8]. 이러한 연구로 힘과 EEG가 선형적으로 증가한다는 가정으로 프랙탈(fractal dimension) 이론을 적용하여 휴식기와 동작 시 EEG의 선형성을 연구한 사례가 있고[9], EEG의 비선형적인 특성을 고려하여 발산지수(Lyapunov exponent)를 이용한 EEG와 힘 그리고 EEG와 근육 피로 시 EEG의 분석에 관한 연구가 보고되었다[10]. 또한, 손이 아닌 팔꿈치 동작에 가해지는 힘과 관련된 연구에서 중심영역 channel Cz, C3에서 측정된 MRCP (Motor Related Cortical Potential) 이 큰 힘에서 더 큰 전압이 검출되는 결과가 보고되었고[11], 본 연구실의 선행 연구에서 악력의 크기에 따라 3개의 클래스로 나누고, PCA (Principal Component Analysis)와 LDA (Linear Discriminant Analysis)를 이용하여 특징 추출 및 분류를 연구한 바가 있다[12].

이와 같은 EEG의 특성을 분석하고 응용하고자 본 논문에서는 힘과 EEG의 연관성을 확인하고 이를 사지 마비환자나 손, 팔과 같은 국소부위가 불편한 환자를 대상으로 사용자의 EEG로 제어가 가능한 의수 및 보조기구의 정교한 동작 제어를 목적으로 한다. 이에 실험 시 피험자가 약한 힘에서부터 강한 힘을 가할 때의 EEG를 측정하여 분석하였고, 일반적으로 EEG 특성에 따라 주파수별로 분류되는 $\theta, \alpha, \beta, \gamma$ 파의 파워 값 변화를 분석하였다. 대부분의 힘과 EEG와의 연구에서 운동피질 지역에 집중하는 경향이 있었지만, 본 논문에서는 뇌의 측정 영역을 3개 부위 (전두엽, 중심영역, 두정엽)로 나눠 모든 지역에서의 EEG power 값을 비교하였다.

III. 실험

실험은 신체에 이상이 없는 남자 4명과 여자 1명 (25~28세)의 양손을 대상으로 하였다. 피험자는 모두 오른손잡이였으며, 뇌와 관련된 질병 및 신체적 질병은 없었다. 피험자 중 여성을 제외한 남성 피험자는 비슷한 실험에 참가한 경험이 있었다.

1. 실험장비

본 연구에서는 피험자의 정확한 악력 측정을 위해 (주)라비센 사의 디지털 손 악력계 (KS-301, 최대측정 : 90[kg]/198[lb], 측정단위 : 0.1[kg]/0.2[lb], 허용오차 : 0.5[kg]/1[lb])으로 악력을 측정하였고 정밀 Stain Guage Sensor로 악력을

표 1. 측정 전극.

Table 1. Measuring electrodes.

	전극	전극 수
F	F7, F5, F3, F1, Fz, F2, F4, F6, F8, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6	16
C	C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6	14
P	P7, P5, P3, P1, Pz, P2, P4, P6, P8, PO7, PO5, PO3, POz, PO4, PO6, PO8	16
Reference	Fz와 Fpz 중간	1
Ground	M1, M2	2

그림 1. A : 실험사진, B : 디지털 손 악력계, C : 측정 전극 위치 (a): 전두엽, (b): 중심영역 (c): 두정엽.

Fig. 1. A : Experiment Figure, B : Digital hand dynamometer, C : Measurement electrode position (a) : frontal (b) : central (c) : parietal.

측정하고 디지털 LCD (21mm)로 악력을 가할 시 측정된 수치를 실시간으로 확인할 수 있었다.

64channel EEG 장비 (NeuroScan Inc. Synamps2)로 피험자의 EEG를 측정하여 data를 습득하였고, 측정부위는 64개의 channel전극 중 전두엽 (frontal, F), 중심영역 (central, C), 두정엽 (parietal, P)의 총 46개 전극에서 EEG data를 측정하였다. 표 1은 사용된 전극을 나타내었다. Reference는 양쪽 귀의 뒤에 부착하였으며, 그림 1 C의 M1, M2의 위치와 같다.

Ground 전극은 Fz와 Fpz 중간에 있었고, 외부 잡음의 최소화를 위해 차폐가 가능한 쉴드룸에서 실험을 진행하였다. 샘플링 주파수는 250Hz로 설정하였고, 실험 후 분석

Software인 Curry 7에 내장된 기능으로 눈 깜박임 및 돌발적인 파형과 같은 외부 잡음을 최소화하였다.

2. 실험방법

실험은 피험자의 양손을 대상으로 진행하였고, 피험자는 실험 전 측정된 자신의 최대수축 악력 (MVC)을 9개의 등급 [10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%] 으로 나눠 실험에 임하였다. 각 동작의 수축은 양손 모두 5번씩 수행하였고, 근육의 피로를 피하고자 번갈아가며 실험을 진행하였다.

자극으로 청각자극을 사용하였고, 피험자는 청각자극에 맞춰 동작을 수행하였다. 피험자는 왼쪽 beep음 (1,500Hz, duration [200s])이 들릴 때 힘을 수축하였고, 오른쪽 beep음 (500Hz, duration [200s])이 들릴 때 힘을 이완하였다. 피험자는 각 실험 전 자신이 수행할 힘의 수치를 숙지하고 실험에 임하였고, 수축 시 디지털 악력계의 LCD를 응시하며 자신의 악력을 허용오차범위 ($\pm 5\%$) 내에서 힘을 유지할 수 있도록 훈련하였다. 가령, 100kg의 악력을 가할 때 악력계의 LCD를 응시하며 95~105kg 사이의 힘을 유지할 수 있도록 각 실험 전 연습을 통하여 정해진 각 피험자의 오차 악력을 줄일 수 있도록 하였다.

실험은 1 session 당 같은 힘을 5번 수축하였고, 2 session 동안 실험을 진행하였다. 총 85s의 실험 시간 동안 각 동작 사이 휴식기는 10s였으며, 청각자극 후 힘은 5s간 지속하였다. 휴식기와 힘을 가할 시의 data를 비교 분석하기 위해 악력을 가하기 전 2s (R) 와 동작 후 2s 이후 2s (M) 간의 EEG data를 추출하였다. 표 2는 각 피험자의 실험에 사용

그림 2. 실험 타이밍도.

Fig. 2. Timing chart of the experiment.

표 2. 각 피험자의 양손 악력.

Table 2. Grip strength of each subject both hands.

[Unit : kg]

	MVC [Left]								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
H	2.4	4.8	7.2	9.6	12	14.4	16.8	19.2	21.6
K	6.4	12.8	19.2	25.6	32	38.4	44.8	51.2	57.6
M	3.3	6.6	9.9	13.2	16.5	19.8	23.1	26.4	29.7
Y	3.6	7.2	10.8	14.4	17.3	20.9	24.5	28.1	31.9
L	4.1	8.1	12.2	16.3	20.3	24.4	28.5	32.6	40.7
	MVC [Right]								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
H	2.9	5.8	8.7	11.6	14.5	17.4	20.3	23.2	26.1
K	7.1	14.2	21.3	28.4	35.5	42.6	49.7	56.8	63.9
M	3.2	6.4	9.6	12.8	16	19.2	22.4	25.6	28.8
Y	4	8	12	16	20	24	28	32	36
L	4.5	8.9	13.4	17.8	22.3	26.8	31.2	35.7	40.1

된 등급별 악력을 나타내었다.

3. 파워스펙트럼 분석

추출된 EEG raw data를 불필요한 잡음이 섞인 EEG 신호를 제거하고 분석에 필요한 파형별 분석을 위하여 밴드패스 필터를 이용하였다. 근육움직임과 잡음에 취약한 δ 파를 제외한 나머지 4개 대역 [θ (3~8Hz), α (8~12Hz), β (12~30Hz), γ (30~50Hz)]에 대하여 필터링을 한 후 파워스펙트럼 분석을 하였다. 파워스펙트럼 분석은 EEG와 같은 시간에 따라 변하는 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 분류된 파형별 주파수 성분들을 분석하는데 용이한 방법으로 생체 신호분석에 많이 활용되는 방법이다.

IV. 실험 결과

그림 3의 A는 피험자 K의 왼손 9가지 동작 (MVC 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%) 을 대상으로 시간에 따라 변하는 주파수대역 power 값의 변화를 확인하기 위해 46-channel에서 측정된 EEG data에 STFT를 적용한 그림이다. 근육운동 잡음에 취약한 δ 파를 제외한 나머지 영역 (3-50Hz)로 밴드패스 필터를 이용하여 필터링 후 STFT를 적용하였다. 각 동작 전, α 파와 β 파 영역에서 ERD/ERS 현상이 나타남을 확인할 수 있었고, 9개의 동작 중 2개의 동작을 자세히 그림으로 표현하였다. MVC 20% (그림 3 A(a))의 분석결과 왼쪽 청각자극이 들린 이후 약 1초 이내에서 α 파가 감소하는 ERD 현상을 보였고, 이후 β 파가 증가하는 ERS 현상을 확인할 수 있었다. MVC 80% (그림 3 A(b))에서도 이와 같은 ERD/ERS 증감현상을 확인할 수 있었고, 상대적으로 더 강한 힘인 MVC 80%의 β 파와 γ 파 영역에서 더 큰 변화를 확인할 수 있었다. 나머지 4명의 피험자의 EEG data에서도 피험자 K와 비슷한 분석 결과를 확인할 수 있었다.

그림 3의 B는 피험자 K의 오른손 동작 시 EEG 변화를 표현한 그림이다. 자발적 운동과 밀접한 연관이 있는 α , β , γ 파 영역 (8-50Hz)의 변화 분석을 위한 오른손 동작 7가지 (MVC 20, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%)를 비교하였다. 그림에서 보이듯 상대적으로 가장 큰 힘인 MVC 80%에서 가장 많은 변화가 나타났고, 이를 정량적으로 확인하기 위해 운동피질 지역을 측정하는 channel 중 하나인 C5에서 측정된 EEG data의 spectrum power 값을 비교하였다. 2개의 power 값 비교결과 MVC 20% (그림 B(a))보다 상대적으로 더 강한 힘인 MVC 80% (그림 B(b))에서 α , β , γ 파 power 값이 모두 증가하는 양상을 보였다.

그림 4는 피험자별 악력과 EEG의 연관성 확인을 위한 각 피험자의 파형별 변화를 표현한 그래프이다. 분석된 46개의 전극을 대상으로 뇌를 3개 부위로 나누어 전두엽 16개, 중심영역 14개, 두정엽 16개의 channel에서 측정된 data를 특징 data로 사용하였다. 악력과 EEG의 변화를 직접 확인하기 위해 힘을 가할 때 (2s)의 data를 추출하였던 M 상태에서 이전 휴식기 (2s)에서 추출한 R 상태의 평균 power 값을 빼주어 휴식기와 비교하여 악력의 세기와 EEG power 값의 변화를 직접 확인할 수 있었다(M-R). 계산된 power 값의 차이를 log로 변환하여 그래프로 나타내었다. 여성 피

그림 3. A : 4-80Hz에서 피험자 **K**의 왼손 악력변화 시 EEG 변화 STFT 분석 : MVC 20% (a)와 80% (b)의 ERD/ERP현상 비교, B : 8-50Hz에서 피험자 **K**의 오른손 악력변화 시 EEG 변화 STFT 분석 : MVC 20% (a)와 80% (b)의 spectral power 비교.

Fig. 3. A : STFT analysis of EEG and change of the left hand grip level strength in subject **K** : comparison of ERP/ERD at (a) : MVC 20% and (b) : MVC 80%, B : STFT analysis of EEG and change of the right hand grip level strength in subject **K** : comparison of spectral power at (a) : MVC 20% and (b) : MVC 80%.

험자 **H**는 실험 중 MVC 90% 수행과정에서 남성 피험자보다 근육의 무리를 느껴 80%까지의 data만을 분석하였다. 3개의 뇌 측정영역 (F, C, P)에서 5명의 피험자에서 모두 MVC 10%에서 50%까지는 휴식기와 비교 시 큰 변화를 찾을 수 없었으나, 약 MVC 70%의 악력을 가하는 시점부터 5명의 피험자 (**H**, **K**, **M**, **Y**, **L**) 모두에게서 β , γ 파가 휴식기보다 증가하는 양상을 보여주었으며, 특히 MVC 80% 이상에서는 휴식기보다 크게 증가하는 양상을 보였다. 이와 같은 변화는 왼손과 오른손에서 대부분 동일하게 나타났다. 그러나 피험자 5명 모두 θ , α 파에서는 큰 변화를 찾을 수 없었다.

표 3. 뇌의 각 영역에서 γ 파와 다른 파형의 상관관계.

Table 3. Correlation of between γ wave and others in each region (r : correlation coefficient, F : frontal, C : central, P : parietal, L : left, R : right).

		γ vs θ		γ vs α		γ vs β	
		L	R	L	R	L	R
r	F	0.79*	0.53	0.90*	0.86*	0.96*	0.92*
	C	0.82	0.65	0.84*	0.58	0.95*	0.90
	P	0.72*	0.65	0.88*	0.82*	0.97*	0.94*

(* : $p < 0.05$)

그림 4. 전두엽 (F), 중심영역 (C), 두정엽 (P)에서의 각 피험자의 왼손/오른손 동작 시 파형별 평균 EEG power 변화.

Fig. 4. Average EEG power change in frontal (F), central (C), parietal (P) of each subject (H, K, M, Y, L) to left/right task.

표 3은 전체 피험자의 γ 파를 대상으로 나머지 3개 파형 (θ, α, β)과 상관관계를 분석한 표이다. 실험 시 다른 파형들보다 상대적으로 악력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 보인 γ 파를 기준으로 다른 파형과의 상관계수(r)를 각각 나타내고 있다. 분석은 왼손 (L)과 오른손 (R) 그리고 뇌의 3개 영역 (F, C, P)에 대하여 모두 나타내었고, 각 값은 γ 파와의 상관관계를 나타내는 지표이다. 결과적으로 모든 손과 뇌 영역에서 γ 파와 β 파에서 가장 큰 양의 상관관계를 나타내고 있으며, 이는 γ 와 β 파가 선형적인 관계에 있음을 의미한다. 또한, β 와의 비교보다는 낮은 수치였지만 일부 영역 (오른손 중심지역, R-C)을 제외하면 α 파와도 양의 상관관계를 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 θ 와는 다른 파형에 비해 상대적으로 낮은 상관계수(r)를 얻었고 다수 결과에서 유의미한 결과를 얻을 수 없었다.

V. 결론

본 연구는 힘과 EEG의 상관관계에 관하여 확인하고자 각 피험자의 악력을 대상으로 힘에 차등을 두어 동작 시 측정되는 EEG 신호를 분석하였다. STFT 분석에서 인간이 자발적 움직임이나 상상할 때 나타나는 EEG 현상인 ERD/ERS를 확인하였고, 악력에 따라 변하는 EEG 신호를 4개의 주파수 영역으로 각 파형의 power 값의 변화를 비교 분석 하였다. 분석 결과 비교적 강한 힘을 가한 MVC 60% 이상부터 β , γ 파에서 증가하는 양상을 확인할 수 있었다.

이 같은 현상은 피험자 대부분 결과로 뇌의 3개 영역에서 모두 비슷한 양상으로 EEG가 변화하였고, 상관분석으로 β 와 γ 파의 유의미한 선형적인 관계를 확인하였다. 이와 같은 결과는 국소부위인 운동 피질 지역의 변화에 초점이 맞춰져 있는 현재 연구방향에 다른 가능성을 제시하였다.

본 논문에서는 현재 연구되고 있는 HCI (Human Computer Interface) 분야의 EMG (Electromyogram) 신호 응용과 더불어 BCI 분야의 EEG 신호 응용에서 움직임 및 동작상 시 측정된 EEG 변화를 이용한 신호분류 및 응용으로 휠체어의 방향 및 의수 제어와 같은 응용분야에서 본 논문에서 분석한 힘과 EEG의 특성에 대한 뇌의 다른 지역을 변화를 고려한다면 이와 같은 특성을 이용하여 속도 또는 힘 제어와 같은 더욱 정교한 기기 제어가 가능하리라 예상된다[13,14].

REFERENCES

- [1] J. N. Mak, D. J. McFarland, T. M. Vaughan, L. M. McCane, P. Z. Tsui, D. J. Zeitlin, E. W. Seller, and J. R. Wolpaw, "EEG correlation of P300-based BCI (Brain-Computer Interface) performance in people with amyotrophic lateral sclerosis," *Journal of Neural Engineering*, vol. 9, no. 2, 9 pages 026014, Apr. 2012.
- [2] K. W. Choi and A. Cichocki, "Control of a wheelchair by motor imagery in real time," *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAL*, vol. 5326, pp. 330-337, May 2008.
- [3] G. Onose, C. Grozea, A. Anghelescu, C. Daia, C. J. Sinescu, A. V. Ciurea, T. Spircu, A. Mirea, I. Andone, A. Spanu, C. Popescu, A.-S. Mihaescu, S. Fazli, M. Danoczy, and F. Popescu, "On the feasibility of using motor imagery EEG-based brain-computer interface in chronic tetraplegics for assistive robotic arm control: a clinical test and long-term post-trial follow-up," *Spinal Cord*, vol. 50, pp. 599-608, Mar. 2012.
- [4] S. Saeid and J. A. Chamber, *EEG Signal Processing*, John Wiley & Sons Inc, Chichester, 2007.
- [5] J. H. Kang, J. Y. Kim, C. S. Kim, S. O. Song, and Y. S. Choi, *Function Test Neurology*, Korea medical book publisher, Seoul, 2012.
- [6] S. I. Lee, "EEG and left/right directional analysis for brain-computer interface," *Pusan National University*, thesis, Korea, February 2011.
- [7] Y. H. Kim, K. E. Ko, S. M. Park, and K. B. Sim, "Practical use technology for robot control in BCI environment based on Motor Imagery-P300," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 19, no. 3, pp. 227-232, Mar. 2013.
- [8] T. Mima, N. Simpkins, T. Oluwatimilehin, and M. Hallett, "Force level modulates human cortical oscillatory activities," *Neuroscience Letters*, vol. 2075, no. 2, pp. 77-80, 1999.
- [9] J. Z. Liu, Q. Yang, B. Yao, R. W. Brown, and G. H. Yue, "Linear correlation between fractal dimension of EEG signal and handgrip force," *Biological Cybernetics*, vol. 93, no. 2, pp. 131-140, Aug. 2005.
- [10] B. Yao, J. Z. Liu, R. W. Brown, V. Sahgal, and G. H. Yue, "Nonlinear feature of surface EEG showing systematic brain signal adaptations with muscle force and fatigue," *Brain Research*, 1272, pp. 89-98, May 2009.
- [11] V. Siemionow, G. H. Yue, Ranganathan, J. Z. Liu, and V. Sahgal, "Relationship between motor activity-related cortical potential and voluntary muscle activation," *Experimental Brain Research*, vol. 133, no. 3, pp. 303-311, Aug. 2000.
- [12] D. E. Kim, T. J. Lee, S. M. Park, K. E. Ko, and K. B. Sim, "EEG analysis following change in hand grip force level for BCI based robot arm force control," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 23, no. 2, pp. 172-177, Apr. 2013.
- [13] D. C. Lee and Y. J. Choi, "Motion and force estimation system of human fingers," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1014-1020, Oct. 2011.
- [14] T. J. Lee, S. M. Park, and K. B. Sim, "Brain wave characteristic analysis by multi-stimuli with EEG channel grouping based on binary harmony search," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 19, no. 8, pp. 725-730, Aug. 2013.

김 동 은

2013년 한경대학교 전자전기공학부(공학사). 2013년~현재 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 석·박사 통합과정. 관심분야는 Brain-Computer Interface, Pattern Recognition 등.

박 승 민

2010년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2010년~현재 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 석·박사 통합과정. 관심분야는 Brain-Computer Interface, Intention Recognition, Soft Computing 등.

심 귀 보

1984년 중앙대학교 전자공학과(공학사). 1986년 중앙대학교 전자공학과(공학석사). 1990년 The University of Tokyo 전자공학과(공학박사). 1991년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수. 2002년~현재 중앙대학교 중소기업산업협력센터 센터장. 2006년~2007년 한국지능시스템학회 회장. 2007년~2013년 (사)한국산학연합회 부회장 및 서울지역협회 회장. 2009년~2010년 중앙대학교 중앙도서관장 및 박물관장. 2011년~현재 중앙대학교 스마트지능로봇연구센터 센터장. 관심분야는 인공지능, 뇌-컴퓨터 인터페이스, 의도 인식, 감성 인식, 유비쿼터스 지능형로봇, 지능시스템, 컴퓨테이셔널 인텔리전스, 지능형 홈 및 홈 네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅 및 센서 네트워크, 소프트 컴퓨팅(신경망, 퍼지, 진화연산), 다개체 및 자율분산로봇시스템, 인공 면역시스템, 지능형 감시시스템 등. ICROS Fellow.