

Evaluation of Waist Pressure Using Electroencephalogram(EEG) Signal

김 동 준[†] · 우 승 진^{*}
(Dong-Jun Kim, Seung-Jin Woo)

Abstract - This paper presents a waist pressure evaluation method in human sensibility using a electroencephalogram(EEG) signal. For this objective, a size-controllable waist-belt is used. First of all, EEG signals for relaxed state are acquired. Then, the waist-belt of the subject is tightened about 90% of normal state. After a few minutes, the belt of the subject is released. Some necessary preprocessing is performed on the acquired signals, Linear Prediction (LP) coefficients are utilized as the feature parameters extracting the characteristics of EEG signal, and a multi-layer neural network is used for indicating the state of body pressure. The results of the method showed 77.2% of coincidence with body pressure states. This may be compromising results for ssubject-independent sensibility evaluation using EEG signal.

Key Words : Human sensibility evaluation, Waist pressure, Electroencephalogram(EEG), Neural network.

1. 서 론

감성 평가 기술은 혈압, 심전도, 맥박, 피부온도, 뇌파 등 생체 신호를 이용하는 방법과 설문에 의한 주관 평가 방법으로 크게 구분할 수 있다. 보통 일반인을 대상으로 하여 비교적 빠른 시간에 간편하게 평가하는 데에는 주관 평가 방법이 편리하여 많이 이용되고 있다. 하지만, 피검자 스스로도 자신의 감성을 판단하기 어려운 미묘한 때에는 생체 신호를 같이 이용하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수도 있을 것이다. 또한 말이나 글을 쓸 수 없는 유아나 장애인, 환자 등의 감성 상태는 관찰만으로 판단하기에는 어려움이 클 것이다. 이 때 이용되는 생체 신호 중에서는 뇌파가 많이 이용되는데, 이는 뇌파가 두뇌 활동에 대한 정보를 가장 많이 포함하고 있을 것으로 기대되기 때문이다. 그러나 뇌파는 다양한 뇌의 활동으로 인하여 신호의 특성이 매우 복잡하며, 개인차이는 물론이고, 동일인일지라도 기분, 날씨 등 여러 주위 환경 등에 따라 신호의 통계적 특성이 매우 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 이런 복잡한 뇌파 신호에서 원하는 정보를 정확하게 얻어내기에는 상당한 어려움이 따르고, 이것이 뇌파를 이용한 감성공학 연구에서 큰 장애물로 남아 있다. 그러나 실험과 신호처리 과정을 세심하게 설계하여 효과적으로 원하는 정보를 얻어낼 수만 있다면, 인간의 정신적 활동,

감성 및 심리적 상태에 대한 근사한 추정도 가능할 것이다.

뇌파와 감성 또는 감정간의 연구를 살펴 보면, Davidson은 긍정적 감성과 부정적 감성에 따라 머리 앞쪽의 좌우 뇌파의 전력이 비대칭적으로 나타난다는 것을 입증하였다[1]. Dawson은 유아의 감정 표현 형태는 전두엽(frontal lobe)의 뇌파 활동성의 비대칭성과 관련이 있다는 것을 보고하였고, Yoshida는 앞쪽 2채널 뇌파의 α 파 fluctuation을 이용하여 쾌적성과 정신적 각성도와와의 상관관계를 연구하였다[2]. 또한 Musha 등은 10채널 뇌파의 FFT(fast Fourier transform) 스펙트럼에서 θ , α , β 대역의 상호상관 계수(cross-correlation coefficients)를 특징 파라미터로 이용하여 4가지 감정으로 하여 선형적으로 매핑하는 ESAM(emotion spectrum analysis method)이란 방법을 개발하여 감정을 정량화한 연구를 발표하였다[3]. 그리고 Anderson 등은 가운데와 뒤쪽의 6채널 뇌파를 AR(auto-regressive) 모델링하여 수학 연산, 편지 쓰기 등의 5가지 정신적 작업을 분류하는 연구를 발표하였다[4]. 이러한 연구들은 나름대로의 성과를 거두었으나, 뇌파의 개인차가 너무 크고 변화가 심하여 한계를 포함하고 있다. 임재중 등은 사람의 손바닥에 거친 자극을 주었을 때 20~30 Hz 대역에서 우세한 에너지 분포가 관찰 되는 것을 보고하였다[5].

본 연구에서는 피검자들로부터 의자에 앉은 자세에서의 안정 상태, 허리 압박 직후 상태, 허리 압박 해제 직후의 상태의 뇌파를 이용하여 각 상태별로 뇌파 신호의 특징을 확인하고자 하였다. 이를 위해 데이터 전처리 과정을 거친 후, 6차의 선형 예측기 계수를 추출하여 각 상태별 특징 파라미터로 사용하였고, 다층 퍼셉트론 신경회로망을 적용하여 각 상태별 평가가 가능한 알고리즘을 개발하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 청주대 공대 전자정보공학부 교수 · 공박
E-mail : djkim@cju.ac.kr

^{*} 정 회 원 : 청주대 공대 전자정보공학부 박사과정
접수일자 : 2011년 5월 13일
최종완료 : 2011년 5월 20일

2. 뇌파 신호처리

2.1 뇌파 신호 전처리 과정

뇌파의 수집 시 가장 먼저 고려해야 할 것은 아티팩트 (artifact)의 제거이다. 전원 잡음과 직류 성분뿐만 아니라, 뇌파의 경우는 눈 깜박임 제거가 필수적이다. 아래 그림 1은 전처리 과정을 블록선도로 나타낸 것이다.

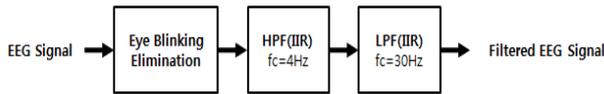


그림 1 뇌파 전처리 과정 블록선도
Fig. 1 Block diagram of EEG preprocessing

눈 깜박임의 경우는 뇌파 신호에 비해 진폭이 매우 큰 특징이 있다는 점을 착안하여 문턱값을 이용한 검출 알고리즘을 개발하였다. 읽어 들인 뇌파 데이터 전체의 평균값을 구한 다음, 평균값의 4배를 문턱값으로 설정하였다. 눈 깜박임의 검출을 위해서는 뇌파 데이터를 전부 절대값으로 취한 뒤, 현재 포인트를 기준으로 뒤로 2 포인트에서의 기울기가 +, 앞으로 2 포인트에서의 기울기가 -인 지점을 찾는다. 그런 뒤, 그 피크값과 문턱값을 비교하여 피크값이 문턱값보다 크면 눈 깜박임 신호로, 작으면 순수 뇌파 신호로 간주하였다. 그리고 나서 눈 깜박임 신호가 끝나는 지점을 찾기 위해 눈 깜박임 피크 지점에서부터 부호가 두 번 바뀌는 지점을 찾는다. 이 위치를 눈 깜박임 신호의 끝으로 볼 수 있지만, 뒤에 남아 있는 영향을 고려하여 눈 깜박임 신호의 평균 구간인 32 포인트를 더 건너뛴 지점을 새로운 뇌파 처리를 위한 시작점으로 설정하였다.

전원 잡음과 직류 성분 및 본 연구와 관련 없는 뇌파의 주파수 대역 제거를 위해서는 4Hz의 차단주파수를 갖는 고역통과필터(high pass filter, HPF)를 4차 IIR 형태로 구성하였고, 고주파 잡음을 제거하기 위하여 차단주파수 30Hz의 저역통과필터(low pass filter, LPF)를 4차 IIR로 구현하여 사용하였다. 필터의 차수는 크기 특성을 관찰하여 계산의 효율성과 성능을 고려하여 4차로 설정하였다. 식 (1)은 설계된 고역통과필터의 전달함수이고, 그림 2는 이 전달함수의 크기 특성을 나타내고 있다. 식 (2)는 구현된 저역통과필터의 전달함수를 나타내고 있으며, 그림 3은 이 전달함수의 크기 특성을 나타내고 있다.

$$H(z) = \frac{z^{-2} - 2z^{-1} + 1}{0.842z^{-2} - 1.981z^{-1} + 1.177} \cdot \frac{z^{-2} - 2z^{-1} + 1}{0.914z^{-2} - 1.981z^{-1} + 1.105} \quad (1)$$

$$H(z) = \frac{0.821(z^{-2} - 2z^{-1} + 1)}{0.281z^{-2} - 0.357z^{-1} + 3.362} \cdot \frac{0.821(z^{-2} - 2z^{-1} + 1)}{0.915z^{-2} - 0.357z^{-1} + 2.728} \quad (2)$$

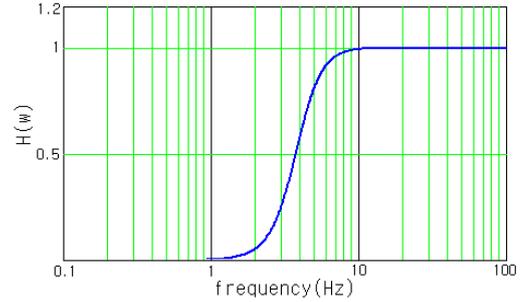


그림 2 디지털 HPF의 크기 특성
Fig. 2 Magnitude responses of the digital HPF

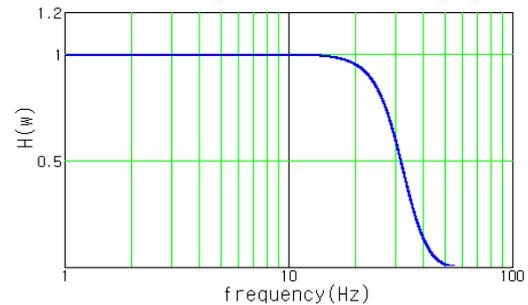


그림 3 디지털 LPF의 크기 특성
Fig. 3 Magnitude responses of the digital LPF

2.2 뇌파 신호의 특징 파라미터 추출

본 연구에서는 일반적인 생체 시스템의 동작이 비선형적이라는 점은 알지만 선형 모델링으로도 분석 차수를 높게 설정하면 그와 근사한 결과를 얻을 수 있다는 점에 착안하여, 뇌파 신호의 특징 파라미터를 추출하기 위하여 선형 예측기 계수를 사용하였으며, 이를 뇌파 신호의 AR 모델로서 모델링하여 특징 파라미터를 추출하였다. 이 모델은 z-변환 형태로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(z) = E(z) \frac{1}{A(z)} \quad (3)$$

이는 전극 합성 모델(all-pole synthesis model)로 볼 수 있고, 역필터 $A(z)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^M a_i z^{-i}, \quad a_0 = 1 \quad (4)$$

선형예측기 계수는 현재 신호를 이전 신호들의 선형결합으로 나타낸 값에 예측된 샘플들간의 오차를 최소 제곱 기준을 적용하여 선형예측 분석으로 구한다.

$$e(n) = s(n) - \hat{s}(n) \quad (5)$$

$$\hat{s}(n) = - \sum_{i=1}^M a_i s(n-i) \quad (6)$$

여기서, 현재 신호 sample은 $s(n)$, 예측된 sample은 $\hat{s}(n)$, 예측 오차(prediction error)는 $e(n)$ 이며, $-a_i (i=1,2,\dots,M)$ 는 선형 예측기 계수이다. 최소 제곱의 방법은 블록 추정이나 회귀적 추정에 의해 공식화되고, 블록 추정에서는 입력 데이터가 어느 정도의 안정성(stationarity)이 있다고 보는 길이의 블록 단위로 처리되며, 회귀적 추정에서는 매개변수가 매 샘플마다 갱신된다. 본 연구에서는 선형 예측 분석을 위하여 블록 추정의 일종인 6차의 Burg 알고리즘을 이용하였다 [5][6].

3. 감성평가 기술

3.1 압박감 평가를 위한 신경회로망 설계

본 연구에서는 뇌파의 특징 파라미터를 이용하여 각 상태별 평가를 위한 다층 퍼셉트론 신경회로망(Multi-layer Perceptron Neural Network)을 설계하여 사용하였다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 신경회로망을 나타낸 것이고, 학습 알고리즘은 다층 퍼셉트론의 학습에 효과적으로 적용되어 오던 오차 역전파(error back propagation) 알고리즘을 이용하였다. 이용한 신경회로망은 입력층(input layer), 출력층(output layer), 그리고 은닉층(hidden layer)을 갖는 3층 구조이다. 뇌파 신호로부터 추출된 6차의 선형 예측기 계수를 신경회로망의 입력부를 위한 특징 벡터로 사용한다. 입력층에서 파라미터들이 입력으로 들어오면, 은닉층은 뉴런의 입출력 패턴간의 관계를 추출하는데 관여하며, 분류 내지 예측 성능의 최적화를 위해 그 수를 실험적으로 조정하여 최적화하는데, 본 연구에서는 시그모이드(Sigmoid) 함수를 적용하여 많은 수렴성 실험 결과를 토대로 가장 좋은 검출 성능을 보이는 60개를 은닉층의 노드 수로 결정하였다. 그리고 입력층에 대응하는 출력 변수로 구성된 출력층의 노드 수를 3개로 구성하여 안정, 압박 직후, 압박 해제 직후 상태로 나누어 출력하게 된다. 그리고, 역전파 학습 알고리즘의 학습 과정은 다음과 같다. 입력층의 각 노드에 입력 값을 주면, 이 값들은 각 노드에 변환되어 은닉층에 전달되고 마지막으로 출력층에서 값을 출력하게 된다. 이 출력값과 기대값을 비교하여 차이를 줄여 나가는 방식으로 연결 강도를 조정하고, 상위층에서 역전파하여 하위층에서 이를 근거로 다시 은닉층의 연결 강도를 조정해 나간다.

3.2 압박감 평가 알고리즘

뇌파의 경우는 같은 사람의 뇌파라 할지라도 실험 당일의 건강, 기분, 심리 상태, 그리고 주위 환경 등의 조건에 따라 신호의 특성이 크게 변할 수 있다. 한 개의 기준 템플릿만으로는 성능의 결과가 좋지 않을 뿐만 아니라, 패턴 인식이 거의 불가능할 것이고, 여러 사람들의 상태를 평가하기는 더욱 힘들다. 그래서 본 연구에서는 이런 단점들을 보완할 수 있는 다중 템플릿 방법을 개발하여 사용하였다. 이것은 다수의 피검자들로부터 수집된 뇌파 데이터를 이용하여 기준 템플릿을 여러 개로 구성한 후, 피검자의 상태를 평가할 때에는

구성된 기준 템플릿들 중에서 입력되는 테스트 데이터와 가장 근사한 기준 템플릿을 선택하여 실험 피검자의 상태를 평가하였으며, 단 피검자 자신의 템플릿은 제외하였다. 그림 5는 다중 템플릿 방법의 블록도를 나타낸 것이다.

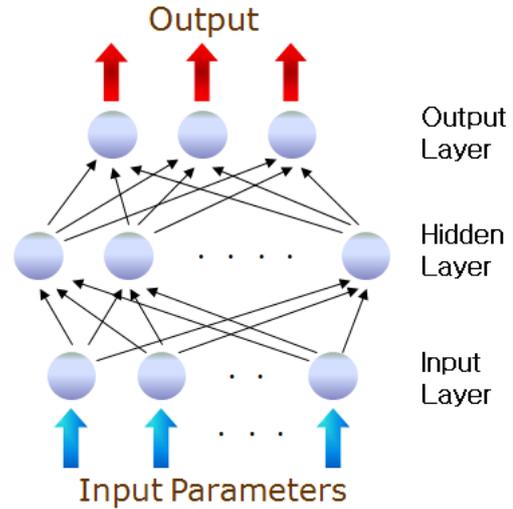


그림 4 압박감 평가에 사용된 신경회로망(다층 퍼셉트론)
Fig. 4 Multi-layer perceptron neural network for a waist pressure evaluation

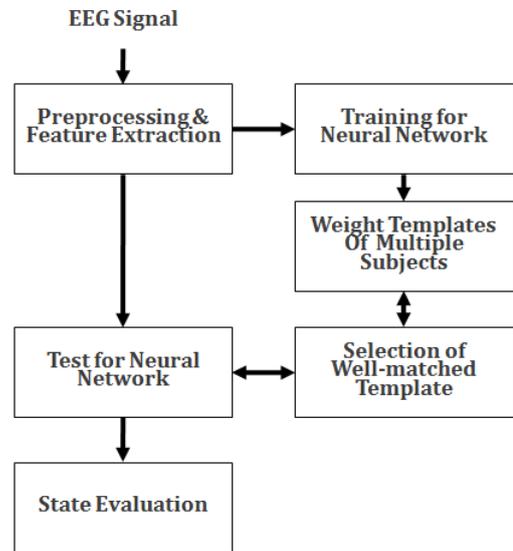


그림 5 다중 템플릿 방법
Fig. 5 Multiple templates method

준비 단계에서는 다수의 피검자들을 선정한 후에 그들로부터 얻은 뇌파 신호의 전처리와 파라미터 추출 과정을 거친 후, 신경회로망을 이용하여 그들을 각각 학습시켜 이로부터 생성되는 기준 템플릿을 구성한다. 그리고, 테스트 단계에서는 제시한 task에 따른 감성 상태의 뇌파를 이용하여 준비 단계에서 구성된 여러 개의 기준 템플릿들을 검색한 후, 안정 상태의 뇌파를 이용하여 가장 근사한 성능을 나타내는 기준 템플릿을 선택하여 실험 피검자의 기준 템플릿으로 활

용하게 된다. 마지막으로 신경회로망의 출력 곡선을 분석하여 상태 평가를 한다.

4. 실험 및 결과

뇌파 데이터 수집 시스템은 전극 캡(electro-cap), EEG 증폭기, A/D 변환기, PC로 구성되어 있으며, 수집용 소프트웨어의 실제 구현은 Visual C++ 6.0을 사용하였다. 전극 캡은 미국 Electro-cap International사의 20채널 전극 캡을 사용하였고, EEG 증폭기는 (주)정상테크노사의 32채널용 증폭기를 사용하였다.

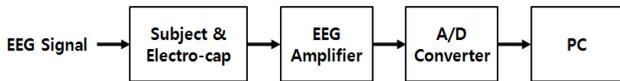


그림 6 뇌파 데이터 수집 시스템
Fig. 6 Composition of EEG recording system

USB 포트용 A/D 변환기는 미국 Data Translation사의 DT-9804를 사용하였다. 피검자의 두피로부터 전극 캡을 통해 검출된 뇌파는 이득 약 2000의 EEG 증폭기로 증폭되고, 증폭된 뇌파는 128Hz의 샘플링 주파수와 12bit의 해상도로 A/D 변환되고, 변환된 신호는 노트북이나 데스크탑 PC에 의해서 처리된다. 전극의 위치는 국제 표준 전극 배치법에 따라 16채널(Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6)을 선택하여 이용하였고, 오른쪽 컷볼(A2)을 기준 전극으로 하였다. 뇌파 데이터 수집은 20대의 건강한 남자 대학생 10명을 대상으로 각 피검자마다 약 4~5일에 한번씩 총 3회의 동일한 실험으로 진행하였다. 뇌파 수집은 대학 교수의 연구실에서 실험실 환경조건에 적합한 온도(23~26℃)와 습도(50~65%)를 조성한 상태에서 이루어졌으며, 수집에 앞서 약 10분간 피검자들은 관찰자로부터 수집 중에 움직임과 눈 깜박임을 최소화할 것 등의 실험 지시 사항을 들으면서 실험실 적응시간을 가졌다.

그림 7은 상태 유도도를 하는 방법을 나타낸 것이다.

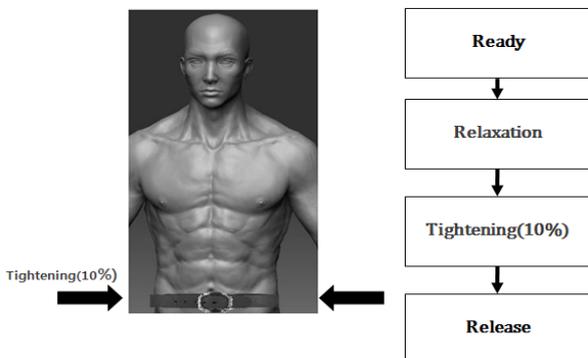
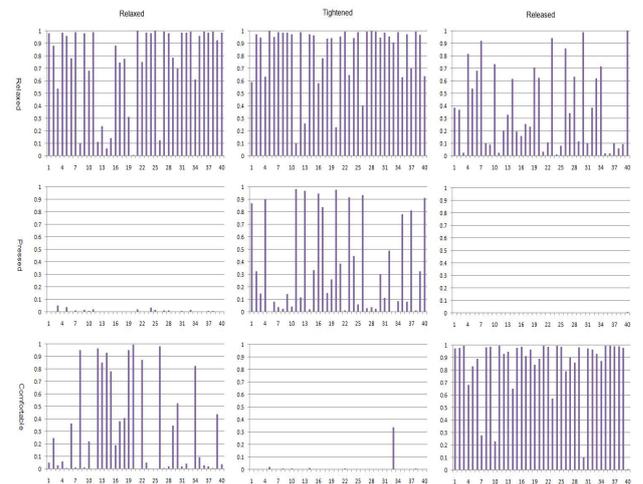


그림 7 상태 유도 방법
Fig. 7 Method of evoking mental states

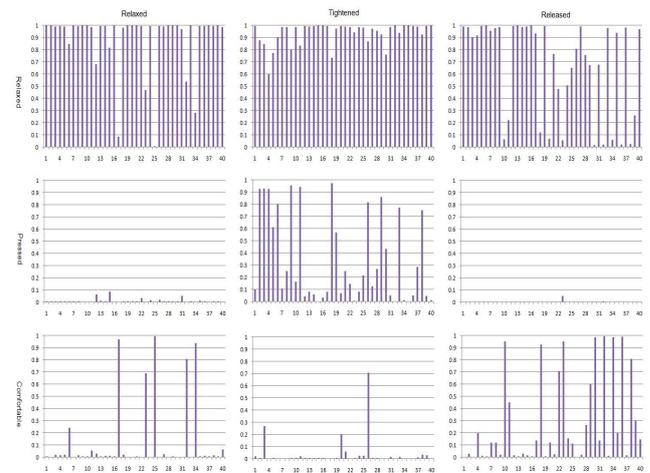
뇌파 수집은 앉은 상태에서는 편안한 의자(쇼파)에 앉은 상태에서 최대한 긴장을 풀게 한 후, 안정 상태를 최대한 유

도한 상태에서 허리 압박 1회를 가하여 7~8분 동안 실험하였고 허리 압박은 약 2분 정도로 했으며, 강도는 피검자 허리 둘레의 10% 가량을 압박하였다. 뇌파 수집 동안 피검자들이 안정 상태로 몰입되었을 때 오른손의 새끼 손가락을 살짝 움직여서 표시하면, 관찰자에게는 그 시각을 체크하도록 하였다. 실험 데이터로는 피검자 10명으로부터 3회씩 수집 뇌파 데이터(앉은 자세: 10명×3회×압박 1회=30개)로 앉은 자세에서 허리 압박전의 안정상태와 허리 압박을 시작한 지점과 허리 압박을 푼 바로 직후의 각각의 지점에서, 그 지점을 기준으로 뒤로 40초 구간의 데이터를 사용하였으며, 처음 허리 압박을 가하여 시작한 지점과 허리 압박을 푼 바로 직후의 각각의 지점에서, 그 지점을 기준으로 뒤로 40초 구간의 데이터를 사용하였다.

수집한 각 피검자의 뇌파신호를 전처리 후, 신경 회로망을 이용하여 학습시킨 후 다중 템플릿 방법으로 각 상태별 평가를 하였는데, 이 때 피검자가 자신의 학습된 데이터를 이용하지 못하게 하여 피검자 독립적인 실험을 하였다. 그 결과를 그림 8과 표 1에 나타내었다.



(a) 피검자 JAW



(b) 피검자 CJM

그림 8 각 상태별 결과의 출력 파형
Fig. 8 Graphical representation of state evaluation

표 1 EEG의 상태별 인식률 (%)

Table 1 Cognition of classified state using EEG (%)

Subject	Relaxed	Pressured	Comfortable	Average
MYS	94.00	65.67	55.50	71.72
WSJ	90.17	82.33	56.00	76.17
LHM	77.00	78.00	60.50	71.83
LKJ	83.17	96.00	75.33	84.83
JYS	95.00	73.83	64.33	77.72
CJM	91.67	87.00	64.33	81.00
JMS	84.67	60.67	50.33	65.22
CYB	93.67	84.83	53.50	77.33
CSH	96.00	90.50	91.00	92.50
JAW	98.50	90.25	33.50	74.08
Average	90.38	80.91	60.43	77.24

그림 8에서 가장 상단의 성분이 Relaxed이고, 중단이 Pressured, 하단이 Comfortable이다. 그림 8을 살펴보면 피검자 JAW의 경우는 각 상태별 특성이 분명히 나타나는 것을 볼 수가 있는데, 처음 Relaxed의 값이 다량 나타나다가 압박 직후에 Pressured의 값이 다량 검출된 것을 볼 수 있고, 다시 Released 되었을 때에는 Comfortable의 값이 크게 나타나는 것을 쉽게 알 수 있었다. 다음 피검자 CJM 역시, 앞의 JAW와 같이 각 상태별로 특성이 나타났다. 그런데, 자세히 보면 전체적으로 각 상태별 출력 파형이 다소 Relaxed 쪽으로 치우치는 경향이 있는데, 이것은 기준 템플릿을 선정할 때 Relaxed의 뇌파를 기준으로 하여 가장 근사한 기준 템플릿을 선택하기 때문이다.

표 1은 전체적인 피검자들의 각 상태별 인식률을 나타낸 것인데, 피검자 독립형 실험이어서인지 피검자 별로 많은 차이를 보였다. 피검자 MYS의 경우를 보면 Relaxed는 94%로 높은 반면 Pressured와 Comfortable은 각각 65.67%, 55.5%로 상대적으로 인식률이 많이 떨어졌고, 피검자 LKJ의 경우는 Relaxed의 인식률은 83.17%인데 비해 Pressured는 96%로 상대적으로 높은 인식률을 보였다. 물론, CSH처럼 전반적으로 높은 인식률을 보이는 피검자도 있었지만, JAW처럼 어느 한 상태에서는 인식률이 현저히 떨어지는 피검자도 있었다.

5. 결 론

본 연구는 피검자들로부터 의자에 앉은 자세에서의 안정 상태, 허리 압박 직후 상태, 허리 압박 해제 직후의 상태의 뇌파를 이용하여 각 상태별로 뇌파 신호의 특징을 확인하고자 하였다. 이를 위해 데이터 전처리 과정을 거친 후, 6차의 선형 예측기 계수를 추출하여 각 상태별 특징 파라미터로 사용하였고, 다층 퍼셉트론 신경회로망을 적용하여 각 상태

별 평가가 가능한 알고리즘을 개발하였다. 그리하여, 각 상태별 인식률로 역시 템플릿 결정의 기준이 되는 Relaxed가 90.38%로 가장 인식률이 좋았고, 압박 직후인 Pressured가 80.91%로 그 다음, 압박 해제 직후인 Comfortable이 60.43%로 가장 낮은 인식률을 보였다. 또한 최종적으로 Average 77.24%의 성능을 확인하였다. Comfortable의 상대적으로 가장 떨어지는 것은 Relaxed와 Comfortable의 상태 값들의 성격이 비슷하여, Comfortable의 값들이 Relaxed로 옮겨져서 나타나는 현상으로 생각된다. 피검자들의 독립적 실험으로도 어느 정도의 높은 성능이 있다는 것을 확인하였고, 보다 많은 데이터를 가지고 학습을 시킨다면 보다 높은 성능을 기대하여 볼 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Davidson, "Anterior cerebral asymmetry and the nature of emotion", *Brain and Cognition*, vol. 20, pp. 125-151, 1992.
- [2] T. Yoshida, "The estimation of mental stress by 1/f frequency fluctuation of EEG", *Brain topography*, pp.771-777, 1998.
- [3] T. Musha, Y. Terasaki, H. A. Haque, and G. A. Ivanisky, "Feature extraction from EEGs associated with emotions", *Intl. Sympo. Artif. Life Robotics (Invited Paper)*, vol.1, pp.15-19, 1997.
- [4] C. W. Anderson and Z. Sijercic, "Classification of EEG signals from four subjects during five mental tasks", In *Solving Engineering Problems with Neural Networks : Proceedings of the Conference on Engineering Applications in Neural Networks(EANN)*, pp.407-414, 1996.
- [5] 임재중, 손진훈, 강대임, "뇌파의 시간-주파수 분석을 통한 피부감성평가", 97한국감성과학회 연차학술대회 논문집, 1997 Nov., 1997, pp.90-93.
- [6] 이상한, 김동준, "성격 그룹의 템플릿을 이용한 뇌파의 감성 평가 기술에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, pp. 2801-2803, 2003.
- [7] J. D. Markel and A. H. Gray, Jr., *Linear prediction of Speech*, Springer-Verlag · Berlin Heidelberg · New York, 1980.
- [8] S. J. Orfanidis, *Optimum Signal Processing : An Introduction*, 2nd ed., Macmillan Publishing Co., 1988.
- [9] C. W. Anderson, "Effects of variations in neural network topology and output averaging on the discrimination of mental tasks from spontaneous electroencephalogram", *Journal of Intelligent system*, vol. 11, no. 4, pp. 423-431. 1997.

저 자 소 개



김 동 준 (金 東 浚)

1963년 4월 14일 생. 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 청주대학교 이공대학 전자정보공학부 교수

Tel : 043-229-8460

Fax : 043-229-8460

E-mail : djkim@cju.ac.kr



우 승 진

2004년 청주대 전자정보공학부 졸업.
2006년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사).
2006년~현재 동 대학원 전자공학과 박사 과정

Tel : 043-229-8460

Fax : 043-229-8460