Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 18, No. 1 1999.4

생체신호와 퍼지이론을 이용한 스트레스 평가에 관한 연구

Estimation of Stress Status Using Bio-signals and Fuzzy Theory

신재우* · 윤영로* · 박세진**

ABSTRACT

There have been many questionnaires, catecholeamins analysis and bio-signal analysis to analyze human stress condition through out the years, and especially researches in bio-signal analysis have been actively increasing. The purpose of our research is quantitative analysis of stress with synthesis of bio-signals. The stress status was estimated using the bio-signals and fuzzy theory which combines these signals and physiological knowledge. Stress was estimated by a 'coin-stacking' experiment with two type-relax and stress status. To do the experiment EMG, respiration, periphery temperature, heart rate and skin conductances were used to evaluate human stress stages. The system was tested to 10 healthy persons and achieved a template of a stress progress and stress variations were classified to 4 steps by continuous or rising status of stress progress.

* 연세대학교 의용전자공학과
** 한국표준과학 연구원, 인간공학 그룹
'본 연구는 97년 한국표준과학연구원 시행 연 · 학협동연구사업에 의해 수행되었음'

1. 서 론

Hans Selye 에 의하면 스트레스란 각종 환경적·정신적 요인에 의해 생성된 요구(demand)에 따른 실제적인 신체의 비특이성 반응을 말한다. 과거에는 주로 신체적 스트레스에 시달려 왔으나 현대에 와서는 정신적 스트레스에 의해 각종 질환이 발생하고 있으며 앞으로도 이러한 스트레스는 더욱 증가할 전망이다. 따라서 이러한 스트레스를 경감시키고자 하는 연구들이 진행되고 있고 이를 위해 객관적이고 정량적으로 스트레스를 평가하는 방법이 먼저 연구되어야 한다.

스트레스 상태에 대한 평가는 다양한 실험방법과 분석에 의해 시도되고 있다. 설문조사, 타액의 신경 호르몬 분석법(Arakelov 등, 1995), 생체 신호 분석 등의 연구가 진행 되어왔으며 특히 생체 신호 분석을 통한 스트레스 평가 연구가 활발히 진행되어 스트레스 자극으로 나타나는 목소리의 음성 분석을 통한 평가법, 피부 저항 측정에 의한 평가법, 뇌파 측정에 의한 분석법 등이 소개되었다. 그러나 생체의 복잡한 기전에 의해 형성되는 스트레스 반응을 한 종류의 생체신호만을 가지고 평가하는 것은 평가 결과에 있어서 신뢰도를 확보하기 어렵다.

본 연구에서는 생체 신호들의 종합적인 분석으로 스트레스에 대한 평가 기법을 개발하고자 하며 이를 위해 5가지의 생체 신호(근전도, 호흡, 말초체온, 심박율, 피부 전도도) 의 반응을 이용하여 coin-stacking 실험을 통해 퍼지 이론으로 스트레스 상태를 추론·평가하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1 퍼지 모델

퍼지이론은 인간의 판단이나 감성과 같이 애매성을 포함한 판단 알고리즘을 IF-THEN 형식으로 표현하고 퍼지 추론을 이용하여 정량화 시키는 방법으로 추출된 파라미터의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나 얻어지는 정보가 부정확·불확실한 경우에 기존의 판단 알고리즘보다 우수한 평가 결과를 나타낸다.

자각적 지식은 퍼지 IF-THEN 규칙으로 표현함으로써 퍼지 시스템을 구성할 수 있고, 무의식적 지식은 조작자에게 조작을 시행하도록 하여 입력과 출력 변수를 측정하여 얻어진 입력-출력 집합을 IF-THEN 규칙으로 변환하여 시스템을 구성할 수 있다(Li-Xin Wang, 1997). 스트레스의 경우 의도적인 조작의 실행이 어렵고 정신·주관에 의한 작용에 의존하는 성격 때문에 본 연구에서는 스트레스 상태의 반응으로써 나타나는 객관화된 생체 신호를 이용하여 생리학적 지식 기반을 IF-THEN 규칙으로 퍼지 시스템을 구성하고 스트레스의 정도를 추론하도록 하였다.

비퍼지화(defuzzification) 방법으로는 최대값 선택법(max criterion), 최대값 평균법(max of maxima method : MOM), 무게중심법(center of gravity method : COG) 등이 있어서 입력으로부터 추론되어진 퍼지 집합을 비퍼지값으로 변환시켜준다. 퍼지 시스템의 성능에 영향을 미치는 요소가 많으므로 어느 비퍼지화 방법이 좋다고 일반적으로 말하기 어려우나, Braae와 Rutherford(1978)는

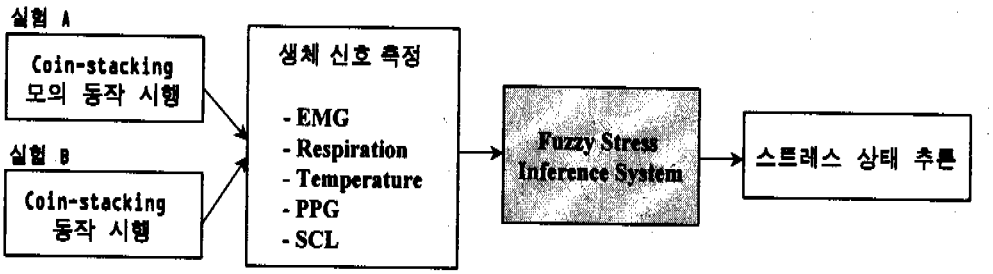

그림 1. 실험 및 분석의 전체 구성

COG가 MOM 보다 우수하다는 결론을 얻었고 COG를 채택한 시스템이 MOM을 채택한 시스템보다 mean square error가 작다고 알려져 있다 (R.M. Tong, 1978). 본 연구에서 사용된 COG 방법의 ZCOA는 추론된 집합 C′의 비퍼지값을 나타내며 다음의 식을 통해 구해진다.

$$Z_{COA}=\frac{\int_Z \mu_A(z) z\ dz}{\int_Z \mu_A(z)\ dz} \qquad (1)$$

2.2 실험 방법

스트레스를 평가하기 위해 coin-stacking 방법을 제안하였으며 이 방법의 장점은 다음과 같다.

① 비교적 짧은 시간 안에 스트레스 상태를 유발시킬 수 있다.

② 주관에 의해 스트레스 정도를 느끼는 개인차가 적다.

③ 시간의 변화에 따른 스트레스 상태의 변화의 단계를 구분짓기 용이하다.

피검자에 대한 실험은 실험 A와 실험 B로 나뉘어 시행된다. 먼저 실험 A를 하게 되는데 이는 coin-stacking 모의 동작 시행으로써 동전을 쌓지는 않고 동전을 들어 쌓을 위치에 가져다 놓는 동작이다. 이는 coin-stacking 동작 자체로 인해 발생할 수 있는 기본 신호(base signal)의 변화를 측정하기 위한 것으로 실제 쌓는 실험 B에 대한 대조군 실험이다. 10명(20대 남6, 여4)의 피검자를 대상으로 하였으며 처음에 실험 A를 시행하여 생체신호를 측정하고 3분간 휴식을 취한후 실험 B를 시행하여 신호를 수집한 후 두 데이터를 퍼지 추론하였다. 전체적인 실험의 구성과 순서는 그림 1과 같다.

2.3 스트레스 추론 시스템

스트레스 상태의 평가를 위한 입력 생체 신호 5가지와 그 부착 위치는 다음과 같다.

① EMG - 전두근(frontalis muscle)의 긴장 정도를 검출하기 위한 것으로 bipolar 전극을 양 눈썹 위에 부착시키고 그 중앙점을 reference 지점으로 설정

② Respiration (호흡계) - 호흡율을 검출

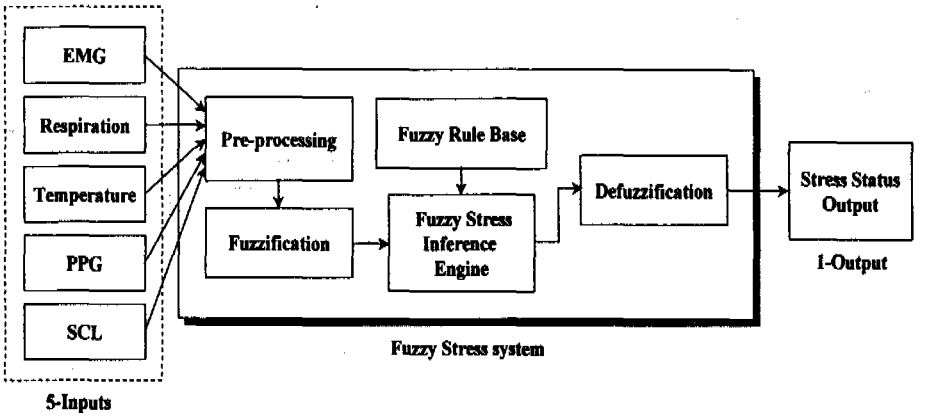

그림 2. 퍼지 스트레스 추론 · 평가 시스템

하기 위한 것으로 피검자에게 전극 부착으로 인한 스트레스를 최대한 줄이기 위해 nasal passage에 써미스터(thermistor)를 부착하여 호흡을 검출

③ Temperature (체온계) - 손가락 끝에 부착하여 말초체온을 검출

④ PPG (Photoplethysmograph, 맥파계) - 심박율을 검출하기 위하여 엄지 손가락에 적외선 센서를 부착

⑤ SCL (Skin Conductance Level) - 왼손 약지와 검지손가락에 전극을 부착하여 피부 전도도를 검출 별도로 제작된 생체신호 검출 시스템을 통하여 12bit, 120samples/sec로 수집된 5가지의 생체 신호들은 그림 2와 같이 구성된 퍼지 추론 시스템에 의해 스트레스 상태의 정도를 종합적으로 추론 · 분석되었다.

먼저 pre-processing 과정을 통하여 다음과 같은 신호처리를 수행하였다.

- 고주파 노이즈 제거
- 호흡 파형으로부터 분당 호흡율 검출
- PPG로부터 심박율(heart-rate) 검출
- 신호값의 초기화(initialization)

여기서 신호값의 초기화는 EMG를 제외한 나머지 4가지의 신호에 대해서 적용되는 처리 과정으로서 실험 A와 실험 B의 실행 시 처음 몇 초 동안은 동작을 하지 않은 채로 이완 상태에 있게 하도록 지시하는데 이 때 검출된 신호 각각의 초기값을 0으로 초기화시키는 것이다. 이렇게 함으로써 피검자마다 각기 다른 초기 상태(호흡율, 온도, 심박율, 피부 전도도)를 같게 하여 퍼지 추론 엔진으로의 입력시에는 실험 진행에 따른 스트레스 변화 상태만이 입력되록 하였다.

퍼지 추론 시스템에 사용된 소속 함수들은 그림 3과 같으며 IF-THEN 추론 규칙은 다음과 같이 설정하였다.

① If (EMG is VS) or (RespR is VS) or (HR is VS) or (SCL is VS) then (Stress is VS)

② If (EMG is S) or (RespR is S) or (HR is S) or (SCL is S) then (Stress is S)

③ If (EMG is M) or (RespR is M) or (HR i

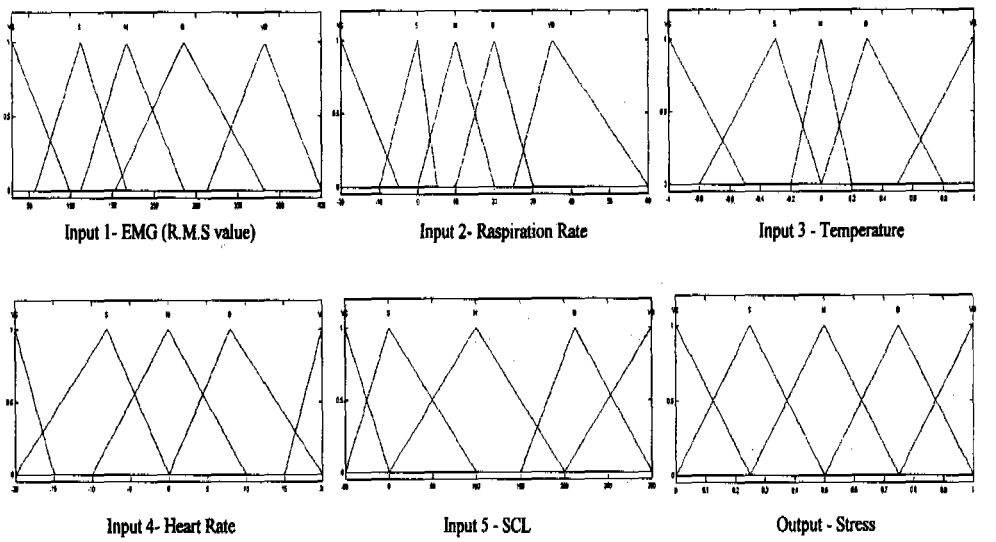

그림 3. 스트레스 평가를 위한 입·출력 소속함수

s M) or (SCL is M) then (Stress is M)

④ If (EMG is B) or (RespR is B) or (HR is B) or (SCL is B) then (Stress is B)

⑤ If (EMG is VB) or (RespR is VB) or (HR is VB) or (SCL is VB) then (Stress is VB)

⑥ If (Temp is VS) then (Stress is VB)

⑦ If (Temp is S) then (Stress is B)

⑧ If (Temp is M) then (Stress is M)

⑨ If (Temp is B) then (Stress is S)

⑩ If (Temp is VB) then (Stress is VS)

여기서 언어변수의 값은 VS(very small), S(small), M (medium), B (big), VB (very big) 의 5가지로 구분하였으며, 삼각형 (triangular) 모양의 소속함수를 사용하였고 최종적인 스트레스 상태의 평가값은 0~1까지로 추론되어 0에서 1로 갈수록 스트레스의 정도가 큼을 의미한다. 추론 규칙은 다음과 같은 스트레스의 증가에 대한 생리적 반응을 바탕으로 작성되었다.

- 맥박과 혈압의 증가(근육, 뇌, 심장에 더 많은 피를 보낼수 있도록)
- 호흡이 빨라짐(더많은 산소를 얻기 위하여)
- 근육이 긴장(행동을 할 준비)하여 전두근의 근전도 레벨을 상승
- 땀샘 분비의 증가로 피부 전도도 증가
- 뇌, 심장, 근육으로 가는 혈류는 증가 (위험을 대비한 중요한 장기들) 하고 피부, 소화기관, 신장, 간으로 가는 혈류가 감소(위험시기에 가장 적게 요구되 는 곳)하여 말초체온 하강 또한 이러한 입출력 관계를 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 여기서는 말초체온과 피부 전도도의 관계만을 나타내었다.

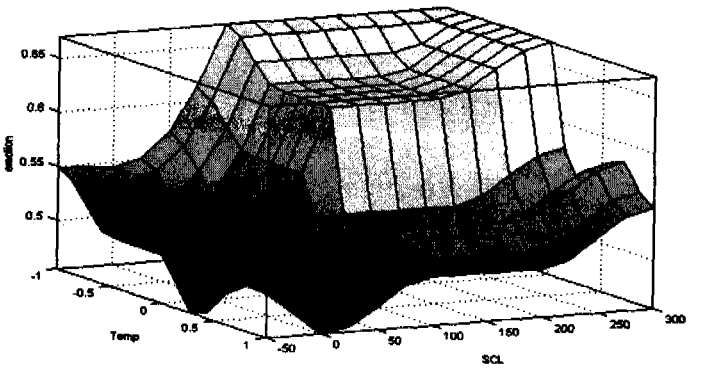

그림 4. 퍼지 입력과 출력 변수 사이의 관계

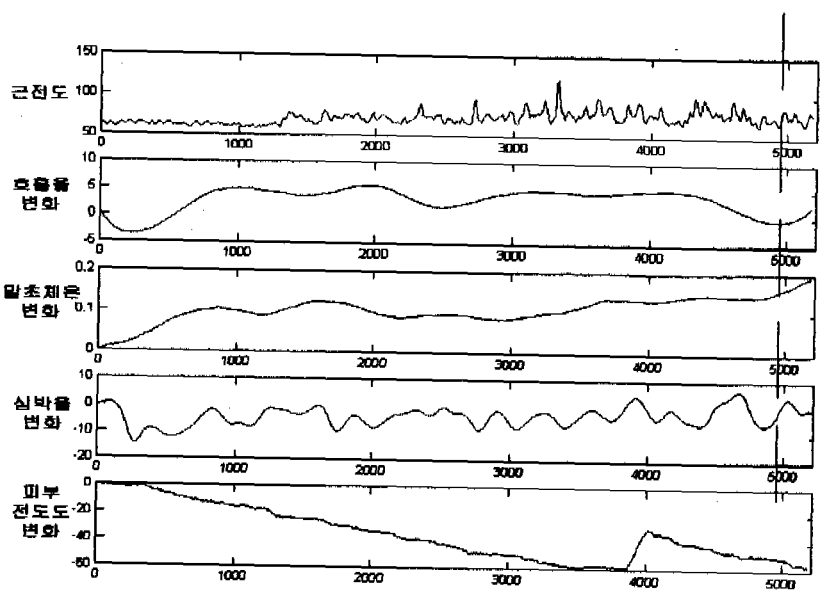

그림 5. 실험 A를 통해 얻어진 생체신호

3. 실험 결과 및 분석

다음의 그림 5~8은 10명 중 한 명의 피검자로부터 얻은 결과이다.

그림 5의 실험 결과 실험 A의 coin-stacking 모의 동작 시행에서는 모의 동작을 시작한 이후로 근전도, 말초체온, 심박율의 증가와 호흡율, 피부 전도도의 감소를 보였는데, 이는 스트레스 상태에 의한 변화가 아니라

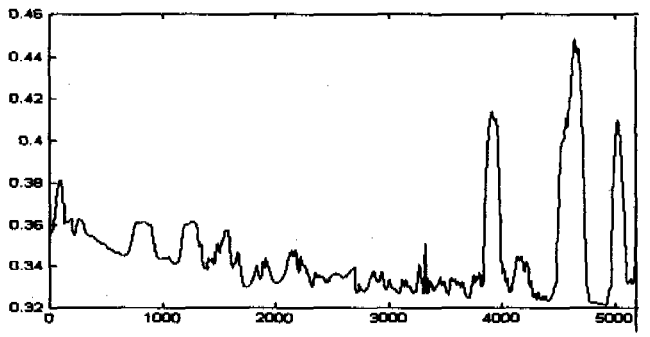

그림 6. 그림 5의 신호로부터 추론된 스트레스 평가 결과

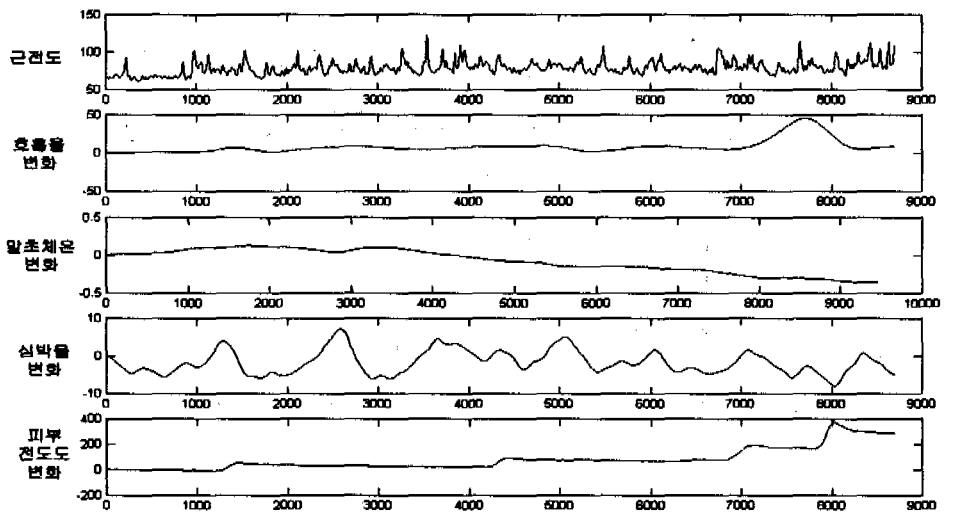

그림 7. 실험 B를 통해 얻어진 생체신호

coin-stacking 동작차체로 인한 변화이다. 그림 6의 스트레스 추론 결과를 보면 시간이 지남에 따라 점차 긴장도가 감소하다가 갑자기 큰 폭으로 긴장도가 상승하였는데 이는 피부 전도도와 심박율의 증가로 인한 것인데 이 경우 긴장도의 급상승은 피검자의 지나친 팔 움직임에 의한 것으로 그 피크 값을 보면 스트레스 레벨이 0.5를 넘지 못하고 있다. 이것은 팔 움직임등 외부 작용에 의한 영향이 스트레스 평가에 반영되기는 했으나 0.5를 넘지 못하도록 적은 영향을 주게 된 것은 말초체온의 증가와 피부 전도도의 감소 때문이라고 할 수 있는데 이는 피검자의 심리적 스트레스 상태가 이완 상태임을 알려주고 있어서 스트레스의 전

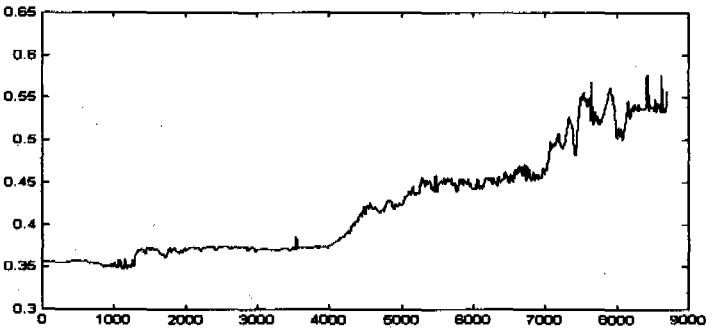

그림 8. 그림 7의 신호로부터 추론·평가되어진 긴장도 결과값

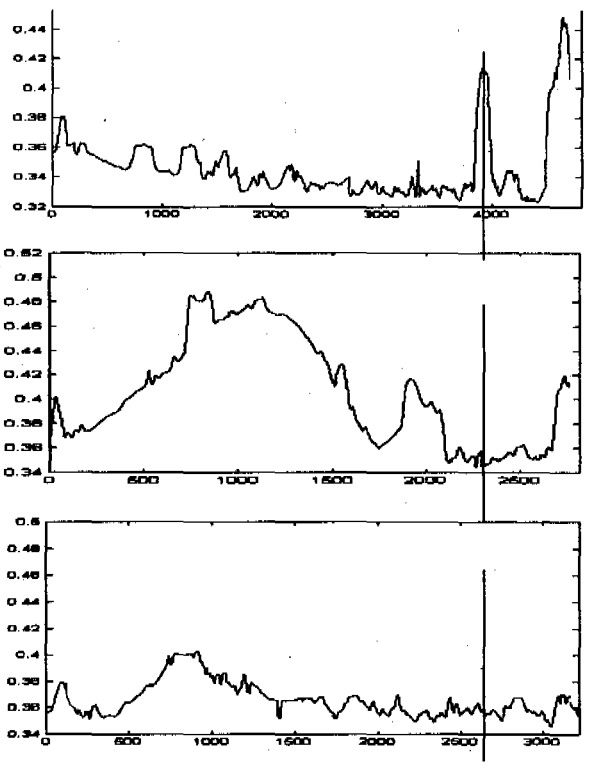

그림 9. 3명의 피검자로부터 얻어진 실험 A의 스트레스 평가

체적인 경향은 감소하고 있음을 알 수 있다.

다음의 그림 7, 8은 실험 B에 의한 결과이다.

그림 8에서 coin-stacking을 시작한 위치는 1000(x축 참조)이다. 근전도의 전체적 상승, 호흡율의 증가, 말초체온의 감소, 피부 전

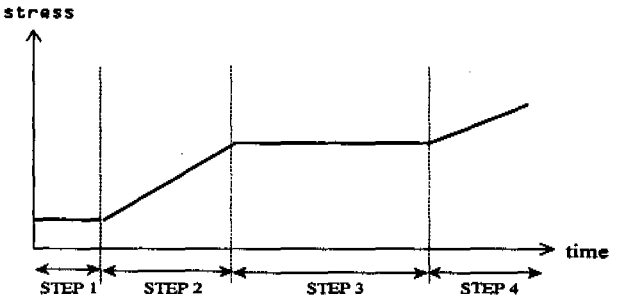

그림 21. 스트레스 상태 진행 템플릿

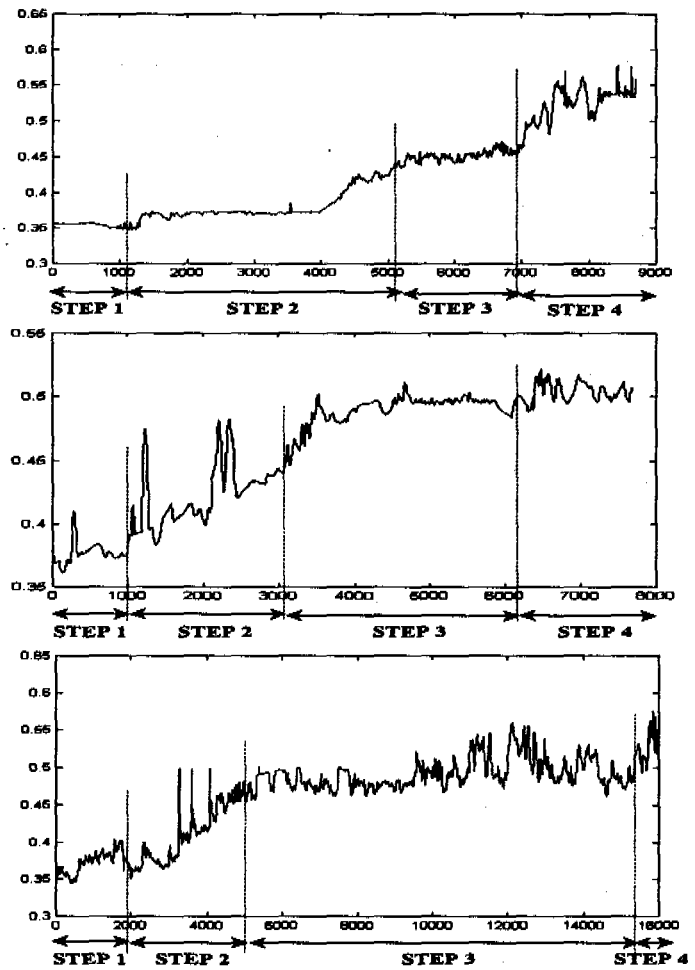

그림 10. 3명의 피검자로부터 얻어진 실험 B의 스트레스 평가

도도의 증가를 나타냈다. 이는 심리적 긴장 상태로 인해 전두근의 긴장과 혈관 수축으로 인한 말초체온의 감소, 땀샘 분비의 증가로 인한 피부 전도도의 상승 때문이다. 이러한 생체 신호의 변화로 인해 피검자는 지속적으로 스트레스 상태가 증가하고 있음을 알 수 있다.

다음의 그림 9, 10은 피검자 3명으로부터 추론·평가된 실험 A와 B의 스트레스의 변화를 나타낸다.

그림 10을 통하여 coin-stacking 작업에 대한 스트레스 단계를 지속·상승 상태에 따라 임의로 다음과 같이 4단계로 구분하였다.

STEP 1 (이완 단계) : 아무런 동작도 행하지 않는 휴지(resting)기

STEP 2 (긴장 초기 상승 단계) : coin-stacking을 시작 하면서 스트레스 상태가 상승

STEP 3 (긴장 지속 단계) : coin-stacking 높이가 높아지면서 상승된 스트레스 상태가 지속

STEP 4 (긴장 최고조 단계) : 쌓았던 동전이 무너지는 순간 스트레스가 최고조에 도달

위의 결과를 바탕으로 다음의 그림 11과 같은 스트레스 상태 진행의 템플릿(template)을 얻을 수 있다.

4. 결 론

스트레스는 신체적으로 피로, 두통, 불면증, 근육통/경직, 심계항진, 흉부 통증, 복부 통증, 구역, 전율, 사지 냉감 등의 반응으로 나타나고 이는 사회적, 경제적으로 적지 않은 간접적 손실을 가져온다. 따라서 스트레스를 측정하고 평가하기 위한 방법이 필요하고 본 연구에서는 스트레스 상태의 평가를 위해 5가지의 생체 신호를 이용한 스트레스를 퍼지 이론으로 추론·평가하였다. 이를 통해 상호간의 생리 현상을 고려한 지식 기반의 종합적인 분석이 가능하였으며 이와 같은 다변수적 접근 방법은 한 두 가지의 파라미터로 스트레스를 평가하는 방법의 단점을 개선할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 coin-stacking이란 특정 스트레스 상황에 대해서만 실험·분석된 것이므로 다른 종류의 스트레스 작업들에 대한 상태 진행 템플릿은 서로 다르게 나타날 것이다. 따라서 각 스트레스 작업들에 대한 생체신호 반응을 지식기반으로 구축하여 퍼지 추론 시스템을 구현한다면 여러 작업들에 대해 스트레스 진행 템플릿을 얻을 수 있을 것이다.

피검자에 따라 피부 전도도의 상태, 스트레스에 대한 주관적 판단과 반응의 개인차가 존재하므로 심리 상태, 신체적 조건 등에 따라 생체신호 반응이 조금씩 차이를 나타낸다. 따라서 개인차와 설문지 조사법과 같은 주관적 판단법을 퍼지 추론 엔진에 반영하고 실제 스트레스 업무 상황에서의 데이터 수집과 데이터베이스화에 대한 연구가 이루어진다면 스트레스 상태를 더욱 정확하게 측정해 내는 실시간 스트레스 모니터 및 스트레스 경감을 위한 바이오피이드백(biofeedback) 시스템으로의 응용이 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] M. Braae and D. A. Rutherford, "Fuzzy relations in a control setting", Kybernets, Vol. 7, No. 3, pp. 185-188, 1978

[2] R. M. Tong, "Synthesis of fuzzy models for industrial processes", Int. Gen. Syst., Vol. 4, pp. 143-162, 1978

[3] Li-Xin Wang, "A course in fuzzy systems and control", Prentice-Hall, pp. 150-180, 1997

[4] Chin-Teng Lin, C. S. George Lee, "Neural fuzzy systems", Prentice-Hall, pp. 131- 160, 1996

[5] J. -S. R. Jang, C. -T. Sun, E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and soft computing", Prentice-Hall, pp. 73-89, 1997

[6] Jhon L. Andreassi, "Psychophysiology : Human Behavior and Physiological Response Third Edition", Lawrence Erlbaum Associate, pp. 155-280, 1995

[7] Ned Gulley, J. S. Roger Jang, "Fuzzy Logig Toolbox for use with MATLAB", pp. 50-160, 1995

[8] Sherman Luciano, "Human Physiology the mechanisms of body function sixth edition", McGraw-Hill, pp. 890-1290, 1993

[9] Rosenzweig Leiman, "생리심리학", 교육출판사, pp. 510-522, 1995

[10] Earl Cox, "Fuzzy Systems Handbooks", AP, pp. 480-491, 1995

[11] Arakelov G., Svergun O., Fedorovskaya E., Zhdanova G., "Stress Induced by a Threat Increases Catecholeamins Contents in Human Saliva", 1995

[12] 윤영창, 황익근, "Biofeedback에 의한 피부온도 상승에 관한 예비연구", 신경정신의학, 23:363-367, 1984

[13] 정도언, 이주호, "근전도 바이오피이드백을 이용한 불안장애 환자 및 정상인의 근육긴장도에 관한 비교연구", 신경정신의학, 26(2):210, 1987

[14] 채 석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 청문각, pp.247-251, 1995