

Evaluation of Mental Fatigue Using Vowel Formant Analysis

Wook Hyun Ha* · Sung Ha Park**†

*Instrumentation and Control Engineering Department, KEPCO E&C

**Department of Industrial and Management Engineering, Hannam University

모음 포먼트 분석을 통한 정신적 피로 평가

하옥현* · 박성하**†

*한국전력기술

**한남대학교

Mental fatigue is inevitable in the workplace. Since mental fatigue can lead to decreased efficiency and critical accidents, it is important to manage mental fatigue from the viewpoint of accident prevention. An experiment was performed to evaluate mental fatigue using the formant frequency analysis of human voices. The experimental task was to mentally add or subtract two one-digit numbers. After completing the tasks with four different levels of mental fatigue, subjects were asked to read Korean vowels and their voices were recorded. Five vowel sounds of “아”, “어”, “오”, “우”, and “이” from the voice recorded were then used to extract formant 1 frequency. Results of separate ANOVAs showed significant main effects of mental fatigue on formant 1 frequencies of all five vowels concerned. However, post-hoc comparisons revealed that formant 1 frequencies of “아” and “어” were most sensitive to mental fatigue level employed in this experiment. Formant 1 frequencies of “아” and “어” significantly decrease as the mental fatigue accumulates. The formant frequency extracted from human voice would be potentially applicable for detecting mental fatigue induced during industrial tasks.

Keywords : Mental Fatigue, Human Voice, Praat, Formant Frequency

1. Introduction

정신적 피로(mental fatigue)는 다양한 유형의 사무 작업, VDT 작업, 관제 작업, 모니터링 작업 등과 같이 지속적인 정보처리 및 의사결정 과정을 수행하는 작업자에게 불가피하게 수반되는 위험 요소이다. 정신적 피로가 누적됨에 따라 인간의 인지처리 능력은 현저히 저하된다. 이러한 피로는 특히 감지와 인지처리, 의사결정, 반응선택 및 조종 행위가 반복되는 업무를 수행하는 작업자에게 위험요소로 작용하여, 결과적으로 작업효율 저하에 따른 생

산성 감소와 함께 극단적으로는 치명적인 인간 오류에 의한 사고를 유발하는 원인이 될 수도 있다. 따라서 작업장의 위험관리 및 안전사고 방지 관점에서 작업자의 정신적 피로를 탐지하고 피로의 수준을 측정하여 관리하는 일은 작업자 개인의 건강관리뿐만 아니라 생산성 향상 및 안전사고 예방을 위해 필수적으로 요구되는 과제이다.

작업자의 정신적 피로 상태를 탐지하거나 정량화하는 방법에는 작업자 자신이 느끼는 피로 정도를 스스로 평가하는 주관적 측정방법 외에도 인간의 생리적 동작인 눈의 깜박임, 눈꺼풀 동작, 동공의 움직임을 이용한 측정방법[2, 13]과 신체의 동작, 머리 동작, 표정의 변화 등을 포함한 행동 자료를 이용한 측정방법[16] 등 많은 객관적 측정방안이 연구되어 왔다.

그 외에도 작업 중 EEG 자료[12], ERP(Event-related

Brain Potential) 자료를 측정하거나[11, 15] 심박수 변동(HRV : Heart Rate Variability)과 같이 인간의 생리적 신호를 측정하여[5] 분석하는 방법이 많이 연구되어 왔다. 예를 들어, Jiao 등은 HRV에 대한 스펙트럼 분석 기법을 이용하여 자동차 운전자의 정신적 피로가 심박수 변동에 미치는 영향을 분석하였다[6, 7, 8, 10]. 이들은 정신적 피로가 누적됨에 따라 HRV의 저주파대역(LF, 0.04-0.15Hz)은 증가하고 고주파대역(HF, 0.15-0.40Hz)은 감소한다는 사실을 입증함으로써 HRV가 인간의 정신적 피로를 예측할 수 있는 지표가 될 수 있음을 제시하였다.

그러나 이와 같은 방법들을 이용하여 정신적 피로 정도를 평가하기 위해서는 작업자가 특정 형태의 생리신호 감지센서 혹은 기타 측정도구들을 착용해야 하기 때문에 불편함을 호소하게 되며, 실제 작업 현장에 적용 시에는 작업자의 사전 인지에 따른 편이된 결과를 초래할 수 있다. 또한 자료를 수집하는 사용자 측면에서도 사용방법이 어렵고 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 자료 수집이 간단하고 쉬우며 작업자의 불편을 최소화할 수 있는 정신적 피로 측정 방법에 대한 연구가 요구되고 있다.

Krajewski et al.[9]은 작업 중 피로가 누적됨에 따라 근육의 긴장이 감소하는 현상이 발생하며, 이러한 근육 긴장 감소는 안면 표정의 변화와 미소의 감소, 인두 및 성도의 이완 등으로 나타날 수 있음을 설명하였다. 또한 체온의 저하와 호흡의 변화에 따라 성도벽과 공기의 마찰 변화가 생길 수 있음을 부연하고 있다. 따라서 피로에 기인한 인간 발성기관의 생리적 변화는 어떤 형태로든 음성의 변화를 초래할 수 있다고 판단된다.

음성에 대한 음향학적인 포먼트 주파수(formant frequency) 분석기법은 인간이 소리를 발성할 때 음성의 특성과 변화의 정도를 예측할 수 있는 수단이 될 수 있다. 포먼트란 음성 스펙트럼의 스펙트럴 피크(spectral peaks)로 정의되며 스펙트로그램에서 진폭의 피크(amplitude peak) 값으로 정량화한다[3, 14, 17]. 여기에서 가장 낮은 주파수를 갖는 포먼트를 제1포먼트(F1), 그 다음을 순서대로 F2, F3 등으로 부르며 인간이 모음을 발성할 때의 음성분석에는 F1과 F2를 주로 사용한다.

Ha et al.[4]은 음성분석 프로그램인 프라트(Praat)를 사용하여 인간 음성의 포먼트 주파수 변화를 분석하는 방법으로 인간의 육체적 피로상태를 탐지하기 위한 실험연구를 수행하였다. 연구 결과, 한국어 모음 중에서 “아”, “어”, “이” 음성에 대한 제1포먼트 주파수가 육체적 피로 수준에 따라 유의하게 변화하는 것을 확인하였다. 특히 “아” 음성은 휴식수준을 포함하여 실험에서 설정한 모든 피로수준 간에서 제1포먼트 주파수의 변화가 유의한 것으로 분석되어, “아” 음성의 제1포먼트 주파수 분석을 통하여 작업자의 육체적 피로 수준을 예측할 수 있음을 보여주었다. 그러나 Ha et al.[4]의 연구는 육체적 피로만을

4단계로 나누어 비교 분석하였기 때문에 정신적 피로가 부과되는 작업환경에 대한 고려가 미비하였다.

본 연구는 정신적 피로에 초점을 맞추고 실험을 진행하였다. 세부적으로는 정신적 피로가 모음을 발성하는 인간의 음성으로부터 추출한 제1포먼트 주파수에 미치는 영향을 분석함으로써, 이를 통하여 정신적 피로의 수준을 탐지하는 방안을 제안한다.

2. Experimental Methods

2.1 Participants

최근 1년 이내에 호흡기를 비롯한 성대 및 후두 질환 병력이 없는 평균 나이 23세의 남성 대학생 8명이 실험에 참여하였다. 피실험자는 실험에 참여하기 전에 본 연구와 관련된 실험의 목적, 내용, 위험성 등에 대해 설명을 들었으며 실험참여에 대한 서면 동의를 하였다.

2.2 Apparatus

실험에는 연산문제지, 음성녹음기(Sony, ICD-SX813)와 17인치 LCD 모니터, 프라트(Praat) 프로그램[1]이 사용되었다.

연산문제지는 피실험자에게 실험에서 정한 정신적 피로수준을 부과하기 위해 사용되었으며, 간단한 덧셈 또는 뺄셈(예 : 5+4 =) 문제들로 구성되었다. LCD 모니터는 실험 중에 피실험자가 발성할 한국어 모음들을 제시하기 위한 시각표시장치이며, 음성녹음기는 피실험자가 발성한 음성들을 녹음하기 위한 장치이다. 음성분석 프로그램인 프라트는 소스코드가 공개된 소프트웨어로써 피실험자들로부터 녹음한 음성으로부터 포먼트 주파수를 추출하기 위해 사용되었으며, 분석을 위해 실험에서 사용된 설정 값은 <Table 1>과 같다[1, 4, 18].

<Table 1> Parameter Setup Values for Formant Analysis Using Praat

Parameter	Function	Setup Value
Time step	The time between the centers of consecutive analysis frames	Default
Maximum formant	The ceiling of the formant search range, in hertz	4,000(Hz)
Window length	The effective duration of the analysis window, in seconds	25(milisecond)
Pre-emphasis from	The +3 dB point for an inverted low-pass filter with a slope of +6 dB/octave. If this value is 50 Hz, then below 50 Hz are not enhanced.	50(Hz)

그 밖에 실험에서 부과한 정신적 피로 네 수준의 차이가 유의하게 조절되었음을 확인하기 위해 6점 스케일(1 : “전혀 피곤하지 않다” ~ 6 : “매우 피곤하다”)로 구성)의 주관적평가 차트와 시각적 점멸융합주파수(Flicker Fusion Frequency) 측정을 위한 피로도측정기(동산통상, FT-501)가 사용되었다. 시각적 점멸융합주파수란 연속되는 자극이 점멸하는 것으로 보이지 않고 연속적으로 느껴지는 주파수로서 정신적 피로가 높을수록 그 수치가 낮아진다.

2.3 Experimental Design

5개의 한국어 모음 “아(A)”, “어(Eo)”, “오(O)”, “우(U)”, “이(I)” 각각에 대하여 4단계의 정신적 피로수준에서 반복 측정을 수행하였다. 종속변수는 피실험자로부터 녹음한 각 모음들을 음성분석 프로그램인 프라트로 분석하여 얻어진 제1포먼트 주파수(F1)이다. 독립변수는 4개 단계의 정신적 피로로써 1단계는 연산 문제를 풀지 않은 휴식 상태(Rest)의 피로수준이며, 2, 3, 4단계는 각기 2,000문항(P2000), 4,000문항(P4000), 6,000문항(P6000)의 연산문제를 계산한 후의 피로수준이다.

그 밖에 정신적 피로 네 수준 간의 차이가 적절히 조절되었는지 확인하기 위해 피로도에 대한 주관적평가와 시각적 점멸융합주파수(Flicker Fusion Frequency)에 대한 자료를 수집하였다.

2.4 Experimental Procedure

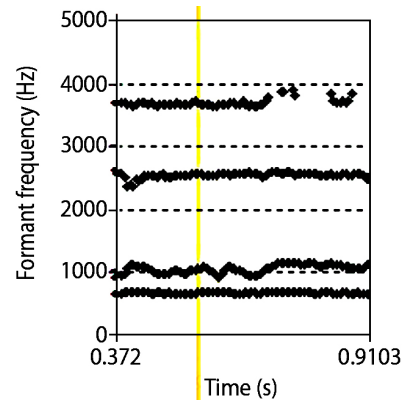
실험참여에 동의한 피실험자에게는 휴식수준 (Rest)에서의 음성분석을 위해 편안한 자세에서 안정을 취하게 한 후에 다섯 가지 모음 “아”, “어”, “오”, “우”, “이”를 무작위의 순서로 제시하여 발성하게 하고 녹음을 실시하였다. 그 후 피실험자들은 위 실험계획에서 설명한 바와 같이 정신적 피로가 부과된 수준(P2000, P4000, P6000) 별로 연산문제 암산을 수행한 후 다섯 가지 모음에 대한 음성 녹음을 실시하였다. 피실험자가 연산문제 계산을 수행할 때에는 계산의 속도뿐만 아니라 정확성도 균등히 중요하다는 지시를 함으로써 계산과정 중에 정신적인 집중이 유지되도록 하였다. 각 피로수준에서의 음성녹음이 종료된 후에는 피로도에 대한 주관적평가와 점멸융합주파수 측정을 수행하였다.

휴식수준(Rest)을 제외한 나머지 세 수준(P2000, P4000, P6000)의 정신적 피로 단계는 무작위의 순서로 부과되었으며, 피로누적에 의한 영향을 최소화하기 위해 각기 다른 날 실험을 실시하였다.

3. Results of Statistical Analysis

휴식수준을 포함한 각 피로수준에서 피실험자가 경험한 주관적평가 자료에 대한 분산분석을 수행한 결과, 주효과가 유의수준 5%에서 유의하였다($F_{3,28} = 83.247, p < 0.0001$). 분산분석 후 Student-Newman-Keuls의 수준 간 평균 비교(Multiple comparisons)를 수행한 결과, 각 정신적 피로 수준에서의 주관적평가의 평균(Rest : 평균 1.500점, P2000 : 평균 3.375점, P3000 : 평균 4.475점, P4000 : 평균 5.500)은 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 실험에서 부과한 정신적 피로 네 수준의 차이가 유의하게 조절되었음을 확인할 수 있다. 점멸융합주파수에 대한 주효과는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으나($F_{3,28} = 1.343, p = 0.2804$), 피로가 누적됨에 따라 점멸융합주파수가 낮아지는 것을 확인하였다(Rest : 평균 40.54Hz, P2000 : 평균 38.93Hz, P3000 : 평균 37.18Hz, P4000 : 평균 36.84Hz).

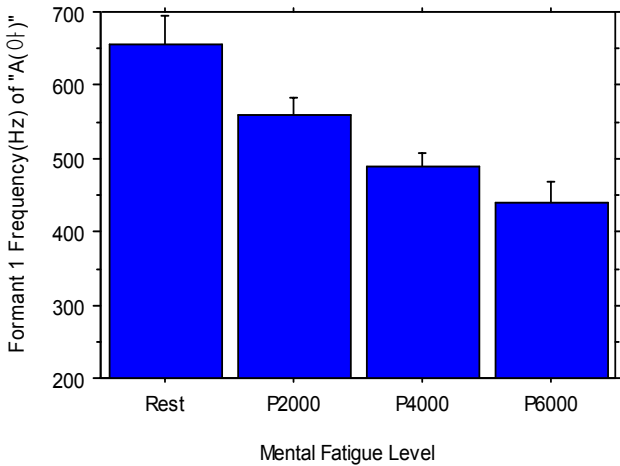
정신적 피로 부하 4수준에서 각각의 모음에 대한 제1포먼트 주파수(F1) 자료에 대하여 통계분석용 소프트웨어 Statview(version 5.0)를 이용한 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 분산분석과 분산분석 후의 수준 간 평균 비교를 위한 통계적 유의수준은 전체적으로 5%로 설정하였다. <Figure 1>은 실험에서 측정된 “아” 음성에 대한 포먼트 주파수 분석의 예를 보여주고 있다.



<Figure 1> An Example of Formant Frequency Contour for “A(A)”(F₁, F₂, F₃, F₄ from the below)

3.1 모음 “아”의 제1포먼트 주파수 분석

“아” 음성의 제1포먼트 주파수 자료에 대한 분산분석을 수행한 결과, 주효과(Main effect)가 유의수준 5%에서 유의한 것으로 분석되어 정신적 피로가 “아” 음성의 제1포먼트 주파수에 영향을 주고 있음을 알 수 있다($F_{3,28} = 85.098, p < 0.0001$). <Figure 2>는 정신적 피로 각 단계



<Figure 2> Mean Formant 1 Frequency of “A(아)” for Each Mental Fatigue Level(Error Bars Indicate Standard Deviation Values)

에서의 제1포먼트 주파수 평균을 비교하여 보여주고 있다. 분산분석 후 Student-Newman-Keuls의 수준 간 평균 비교(Multiple comparisons)를 수행한 결과, 각각의 정신적 피로 수준에서의 제1포먼트 주파수는 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(<Table 2> 참조). 이 결과는 피실험자가 점차 높은 강도의 정신적 피로를 경험하면 모음 “아”를 발성할 때 제1포먼트 주파수가 유의하게 줄어든다는 것을 말해주고 있다.

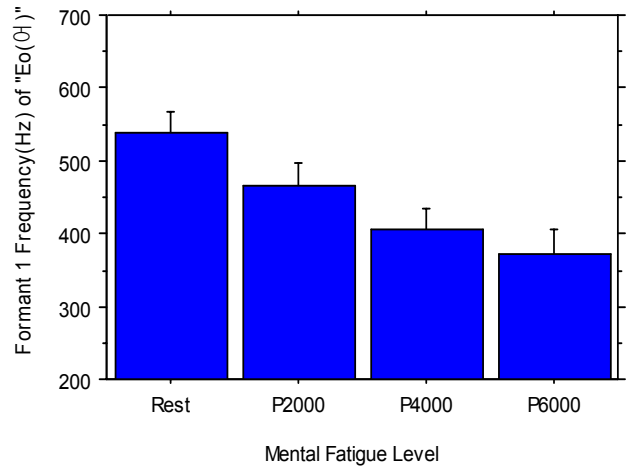
<Table 2> Student-Newman-Keuls Pairwise Multiple Comparisons for “A(아)” (S Indicates that Means are Significantly Different)

	Mean Diff.	Crit. Diff.	
Rest, P2000	94.865	29.546	S
Rest, P4000	165.999	35.692	S
Rest, P6000	216.717	39.325	S
P2000, P4000	71.134	29.546	S
P2000, P6000	121.852	35.692	S
P4000, P6000	50.719	29.546	S

3.2 모음 “어”의 제1포먼트 주파수 분석

모음 “어” 음성의 제1포먼트 주파수에 대한 분산분석 결과에서도 주효과가 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타났다($F_{3,28} = 46.946, p < 0.0001$). <Figure 3>는 정신적 피로 각 수준에서의 제1포먼트 주파수 평균을 비교하여 보여주고 있다.

수준 간 평균 비교 결과 또한 “아” 음성의 결과와 유사하



<Figure 3> Mean Formant 1 Frequency of “Eo(어)” for Each Mental Fatigue Level(Error Bars Indicate Standard Deviation Values)

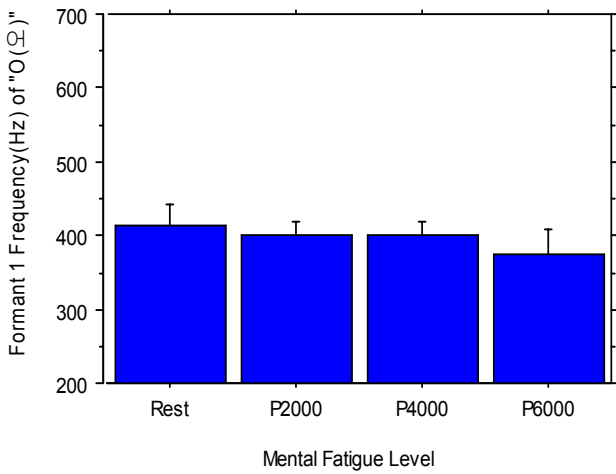
게 각 정신적 피로 수준에서의 제1포먼트 주파수는 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(<Table 3> 참조).

<Table 3> Student-Newman-Keuls pairwise multiple comparisons for “Eo(어)”(S indicates that means are significantly different)

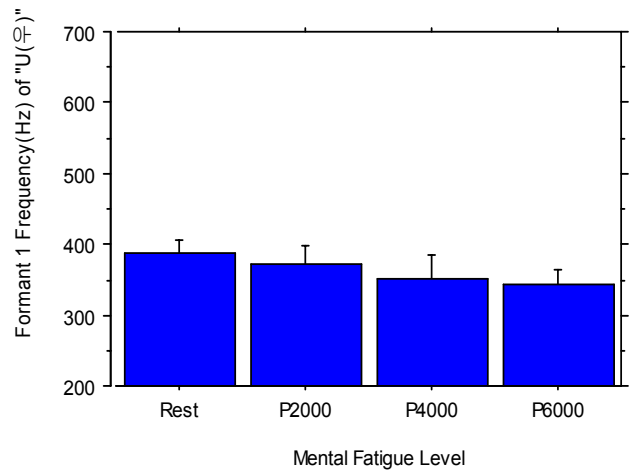
	Mean Diff.	Crit. Diff.	
Rest, P2000	72.219	30.627	S
Rest, P4000	131.913	36.999	S
Rest, P6000	164.533	40.764	S
P2000, P4000	59.694	30.627	S
P2000, P6000	92.314	36.999	S
P4000, P6000	32.620	30.627	S

3.3 모음 "오"의 제1포먼트 주파수 분석

모음 “오” 음성에 대한 분석 결과, 정신적 피로에 대한 주효과가 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타났다($F_{3,28} = 3.728, p = 0.0226$). 그러나 모음 “아”와 “어”와는 다르게 모든 정신적 피로 수준 간에 유의한 차이가 발견되지는 않았다. <Figure 4>에 정신적 피로 각 단계에서의 제1포먼트 주파수 평균이 비교되어 있다. Student-Newman-Keuls의 수준 간 평균 비교를 수행한 결과, Rest 수준과 P6000수준 간 및 P4000수준과 P6000수준 간에서 유의한 차이가 발견되었으며, 그 외의 수준 간(Rest/P2000, Rest/P4000, P2000/P4000, P2000/P6000)에서는 유의한 차이가 발견되지 않았다(<Table 4> 참조).



<Figure 4> Mean Formant 1 Frequency of “O(오)” for Each Mental Fatigue Level(Error Bars Indicate Standard Deviation values)



<Figure 5> Mean Formant 1 Frequency of “U(우)” for Each Mental Fatigue Level(Error Bars Indicate Standard Deviation Values)

<Table 4> Student–Newman–Keuls Pairwise Multiple Comparisons for “O(오)” (S Indicates that Means are Significantly Different)

	Mean Diff.	Crit. Diff.	
Rest, P2000	13.110	25.573	
Rest, P4000	13.110	30.893	
Rest, P6000	41.026	34.037	S
P2000, P4000	0.000	25.573	
P2000, P6000	27.916	30.893	
P4000, P6000	27.916	25.573	S

<Table 5> Student–Newman–Keuls Pairwise Multiple Comparisons for “U(우)” (S Indicates that Means are Significantly Different)

	Mean Diff.	Crit. Diff.	
Rest, P2000	14.304	26.505	
Rest, P4000	35.505	32.020	S
Rest, P6000	43.939	35.279	S
P2000, P4000	21.201	26.505	
P2000, P6000	29.635	32.020	
P4000, P6000	8.434	26.505	

3.4 모음 “우”의 제1포먼트 주파수 분석

모음 “우” 음성에 대한 분석 결과 또한 주효과가 유의 수준 5%에서 유의한 것으로 나타났으나($F_{3,28} = 4.783, p = 0.0082$), 모든 정신적 피로 수준 간에 유의한 차이가 발견되지는 않았다. <Figure 5>에 정신적 피로 각 단계에서의 제1포먼트 주파수 평균이 비교되어 있다. Student-Newman-Keuls의 수준 간 평균 비교를 수행한 결과, Rest 수준과 P4000수준 간 및 Rest 수준과 P6000수준 간에서 유의한 차이가 발견되었으며, 그 외의 수준 간(Rest/P2000, P2000/P4000, P2000/P6000, P4000/P6000)에서는 유의한 차이가 발견되지 않았다(<Table 5> 참조).

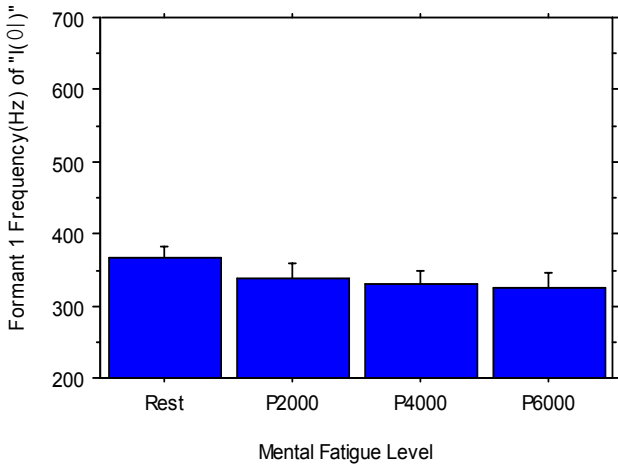
3.5 모음 “이”의 제1포먼트 주파수 분석

모음 “이” 음성에 대한 분석 결과, 정신적 피로에 대한 주효과가 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타났다

($F_{3,28} = 7.363, p = 0.0009$). <Figure 6>에 정신적 피로 각 단계에서의 제1포먼트 주파수 평균이 비교되어 있다. 수준 간 평균 비교 결과를 보면 휴식수준인 Rest 수준과 정신적 피로가 부과된 수준들(P2000, P4000, P6000) 간의 평균은 각각 유의한 차이를 보이고 있지만 나머지 수준 간(P2000/P4000, P2000/P6000, P4000/P6000)에서는 유의한 차이를 보이지 않았다(<Table 6> 참조). 이와 같은 결과는 모음 “이”를 발성하는 경우 정신적 피로를 받은 후에는 휴식상태에 비교하여 제1포먼트 주파수가 유의하게 감소하지만, 점차 강한 피로를 받아도 그 변화는 크지 않음을 말해주고 있다.

4. Discussion and Conclusion

인간이 발성하는 모음들에 대한 제1포먼트 주파수 분석을 이용하여 정신적 피로 수준을 예측하기 위한 실험



<Figure 6> Mean Formant 1 Frequency of “I(OI)” for Each Mental Fatigue Level(Error Bars Indicate Standard Deviation values)

<Table 6> Student–Newman–Keuls Pairwise Multiple Comparisons for “I(OI)” (S Indicates that Means are Significantly Different)

	Mean Diff.	Crit. Diff.	
Rest, P2000	27.033	19.680	S
Rest, P4000	36.790	23.774	S
Rest, P6000	40.965	26.193	S
P2000, P4000	9.757	19.680	
P2000, P6000	13.933	23.774	
P4000, P6000	4.175	19.680	

연구를 수행하였다. 통계적 분석결과, 실험에 포함된 5개의 한국어 모음 “아”, “어”, “오”, “우”, “이” 음성 전부에서 정신적 피로 수준에 따른 제1포먼트 주파수의 변화가 유의하게 나타났다.

Student-Newman-Keuls의 수준 간 평균 비교를 수행한 결과를 보면, 일부 피로수준 사이에서만 유의한 변화가 발견된 “오”, “우”, “이” 음성과는 다르게 “아”와 “어” 음성은 휴식수준을 포함하여 본 실험에서 설정한 모든 피로 수준 간에서 제1포먼트 주파수가 유의하게 변화하였다. 이러한 결과는 “아”와 “어” 음성으로부터 추출한 제1포먼트 주파수를 활용하여 작업자의 정신적 피로상태 및 수준을 예측할 수 있음을 의미한다.

Ha et al.[4]는 육체적 피로 수준에 따른 한국어 모음들의 제1포먼트 주파수 변화를 비교한 연구에서 “아” 음성의 제1포먼트 주파수가 실험에서 설정한 육체적 피로 수준에 따라 유의하게 변화하는 것을 확인하였다. 본 연구와 Ha et al.[4]의 연구결과를 종합해 보면 한국어 모음 중 “아” 음성으로부터 추출한 제1포먼트 주파수는 정신

적 작업환경과 육체적 작업환경 모두에서 피로가 누적됨에 따라 가장 민감하게 변화하는 측정지표가 될 수 있음을 알 수 있다.

포먼트 주파수 추출을 이용한 정신적 피로 측정은 HRV, ERP 등 기존의 생리적 신호를 이용한 측정 방법에 비교하여 유리한 점이 있다. 포먼트 주파수 추출을 위해 음성 자료를 수집하는 일은 녹음장치만을 사용하면 되므로 간단하고 편리하며 인체에 센서 등의 특수한 장비를 설치하는 데 따른 불편함이 최소화 된다. 또한 작업자의 음성은 음성통신 과정 중에(예 : 조종사와 관계탑과의 음성통신) 작업자가 인지하지 못하는 상황에서 녹음이 가능하므로 편의된 결과를 줄일 수 있다는 장점도 있다.

그러나 이와 같은 음성분석을 통한 피로평가 방법이 실용화되기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 일반적으로 인간이 어떠한 특정 작업을 수행할 때의 작업부하는 정신적 또는 육체적 특성 중 어느 한쪽이 강하게 나타날 수는 있지만 이들은 서로 연관 관계가 있으며 완전히 분리하여 구분하는 일은 불가능하다. 산업체에서 대부분의 작업자는 인지 작업과 육체 작업에 의한 복합적인 피로요인에 직면해 있는 것이 일반적이기 때문이다. 본 연구에서는 단순한 연산문제 계산을 정신적 작업부하로 부과하는 방법으로 단순히 정신적 피로를 4단계로 나누어 비교 분석하였다. 향후 산업현장에서 특정 직무군의 남녀 작업자를 대상으로 실제 작업환경에서 부과되는 피로요인에 대한 실험을 통해 보다 실용적인 연구가 수행되길 기대한다.

Acknowledgement

This paper has been supported by 2013 Hannam University Research Fund.

References

- [1] Boersma, P. and Weenink, D., Praat : doing phonetics by computer, Praat Homepage, <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, (retrieved June 20, 2013).
- [2] Caffier, P.P., The Spontaneous Eye-Blink as Sleepiness Indicator in Patients with Obstructive Sleep Apnoea Syndrome-a Pilot Study. *Sleep Medicine*, 2002, Vol. 2, p 155-162.
- [3] Fant, G., Acoustic Theory of Speech Production. Mouton and Co, The Hague, Netherlands, 1960.
- [4] Ha, W., Kim, H., and Park, S., Formant Frequency as a Measure of Physical Fatigue. *Journal of the Ergonomic Society of Korea*, 2013, Vol. 32, No. 1, p 139-144.

- [5] Hartley, L.R., Arnold, P.K., Smythe, G., and Hansen, J., Indicator of Fatigue in Truck Drivers. *Applied Ergonomics*, 1994, Vol. 25, p 143-456.
- [6] Jiao, K., Study on automobile driving fatigue and remission methods. Unpublished doctoral dissertation, Shanghai Jiao Tong University, 2004.
- [7] Jiao, K., Li, Z., Chen, M., Wang, C., and Qi, S., Effect of different vibration frequencies on heart rate variability and driving fatigue in healthy drivers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2004, Vol. 77, p 205-212.
- [8] Jiao, K., Li, Z., Chen, M., and Wang, C., Synthetic effect analysis of heart rate variability and blood pressure variability on driving mental fatigue. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*, 2005, Vol. 22, No. 2, p 343-346.
- [9] Krajewski, J., Wieland, R., and Batliner, A., An Acoustic Framework for Detecting Fatigue in Speech Based Human-Computer-Interaction. In K. Miesenberger et al.(eds), ICCHP '08 Proceedings of the 11th international conference on Computers Helping People with Special Needs, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2008, p 54-61.
- [10] Li, Z., Jiao, K., Chen, M., and Wang, C., Effect of magnitopuncture on sympathetic and parasympathetic nerve activities in healthy drivers-assessment by power spectrum analysis of heart rate variability. *European Journal of Applied Physiology*, 2003, Vol. 88, p 404-410.
- [11] Murata, A., Uetake, A., and Takasawa, Y., Evaluation of Mental fatigue Using Feature Parameter Extracted from Event-related Potential. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 35, 2005, p 761-770.
- [12] Sommer, D., Chen, M., Golz, M., Trunschel, U., and Mandic, D., Fusion of State Space and Frequency Domain Features for Improved Microsleep Detection. In : W. Dutch et al.(Eds.), Int Conf Artificial Neural Networks(ICANN 2005), Springer : Berlin, 2005, p 753-759.
- [13] Stern, J.A., Boyer, D., and Schroeder, D., Blink Rate : A Possible Measure of Fatigue. *Human Factors*, 1994, Vol. 36, p 285-297.
- [14] Titze, I.R., Principles of Voice Production, Prentice Hall, 1994.
- [15] Ullsperger, P., Metz, A.-M., and Gille, H.-G., The P300 Componets of the Event-related Brain Potential and Mental Effort. *Ergonomics*, 1988, Vol. 31, p 1127-2237.
- [16] Vöhringer-Kuhnt, T., Baumgarten, T., Karrer, K., and Briest, S., Wierwille's Method of Driver Drowsiness Evaluation Revisited, Proceeding of International Conference on Traffic and Transport Psychology, 2004.
- [17] Yang, B., A Study of Vowel Formant Variation by Vocal Tract Modification. *Journal of the Korean Society of Speech Sciences*, 1998, Vol. 3, p 83-92.
- [18] Yang, B., Praat Homepage, <http://fonetiks.info/praat/>, (retrieved May 1, 2013).