

피부전기 활동과 fuzzy 추론에 의한 각성도의 평가

Evaluation of arousal level by EDA and Fuzzy inference

°김 연 호*, 고 한 우*, 유 준**

* 한국표준과학연구원 (Tel:+82-42-868-5252, Fax:+82-42-868-5047, E-mail:hwko@krissol.kriss.re.kr)

** 충남대학교 전자공학과 (Tel:+82-42-821-5669)

Abstracts

This paper describes the arousal measurement and the control system using fuzzy logic to prevent drowsy driving. Sugeno's method was used for fuzzy inference in this study. Membership function and rule base were determined from the modified arousal level criteria. The output of fuzzy inference tracked well the change of subject's arousal level. When IRI(Inter-SIR interval) was under the 60sec, maximum output of three step warning method was medium sound, but that of fuzzy logic system was changed from medium to big. Furthermore, the output of the fuzzy inference was highly correlated with Nz($r=0.99$). Therefore, the fuzzy inference method for evaluation and the control of arousal will be more effective at real driving situation than three step warning method.

Key words : Fuzzy logic, Arousal, Drowsiness, Electrodermal activity.

1. 서 론

자동차 기술개발에 있어서 최근 안전부분에 대한 관심이 높아지고 있고 프랑스의 교통사고 방지대책부의 통계 자료에 의하면 피로와 졸음에 의한 교통사고가 전체 사고율의 25%-27%를 차지하고 있다[9]. 이러한 교통사고를 방지하고자 우리나라에서도 각성도 측정 및 평가방법에 관한 연구가 진행중이지만 운전자를 구속하지 않으면서 각성도 관련신호를 정확히 검출할 수 있는 센서 및 측정방법의 개발이 어렵기 때문에 신뢰성 있고 실용화가 가능한 각성상태 측정에는 이르지 못하고 있다[4-6,9].

저자들은 지금까지 피부전기활동(Electrodermal Activity:EDA)의 하나인 피부임피던스변화(Skin Impedance Change: SIC)신호의 교류성분에 해당하는 피부임피던스 반사(Skin Impedance Response: SIR)와 전체적인 피부임피던스 변화를 나타내는 피부임피던스 수준(Skin Impedance Level: SIL)을 측정하여 각성단계를 각성, 졸림, 수면의 3단계로 나누어 각성상태 평가 및 제어 기준을 만들고 이를 기준으로 small, medium, big의 3단계의 경고음을 주어 각성상태를 제어하였다[4-6]. 이러한 제어방법은 저각성 초기에는 효과적일 수 있으나 연속적으로 변화하는 각성상태를 더욱 자세하게 평가 및 제어하기에는 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 SIL 평가지표(Nz)와 SIR 발현간격(IRI)을 fuzzy 추론의 input parameter로 설정하고 Nz와 IRI의 영역별 분석을 통하여 각성상태 평가 및 제어 기준을 재 수정하였다. 이를 기준으로 if-then 형식의 fuzzy law을 결정하였으며 이 law의 타당성을 simulation으로 확인하고 기존의 3단계 경고음 발생 방법과의 차이점 및 수면 실험중의 피검자의 각성상태와 비교분석 하였다.

2. 각성도 측정 시스템구성과 평가기준

본 연구에서는 그림 1과 같은 측정 시스템을 구성하고 교류통전법에 의한 피부임피던스변화를 측정하여 각성도를 평가하였다[5]. 각성도 측정요소로 Nz와 IRI를 이용하였으며, Nz는 피검자의 임피던스 수준인 SIL이 갖는 개인간의 차이를 없애고 SIL

평가지표의 일반화를 위하여 피검자에게 전극을 부착 시킨 후 5분간의 안정화 시간을 둔 후 3분간의 SIL 값을 측정하여 평균한 값을 기저 임피던스(Basal Impedance:BI)로 하고, 이를 기준으로 측정값을 정규화 시킨 값이며, IRI는 인접 SIR간의 발현 간격(Inter-SIR Interval: IRI)이다[4-6].

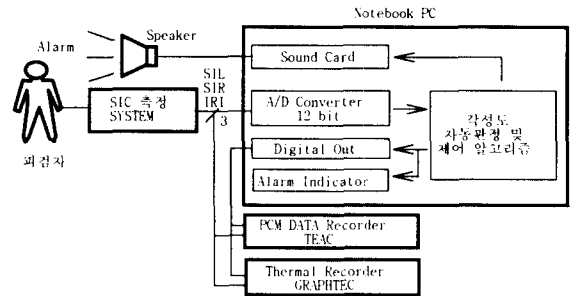


그림 1. 각성도 측정 및 제어 system block 선도.

Fig. 1. Block diagram of arousal measurement and control system.

표 1. SIR 간격 및 SIL 지표에 따른 각성도 평가 및 제어 기준.

Table 1. Arousal level criteria depending on SIR interval and SIL index.

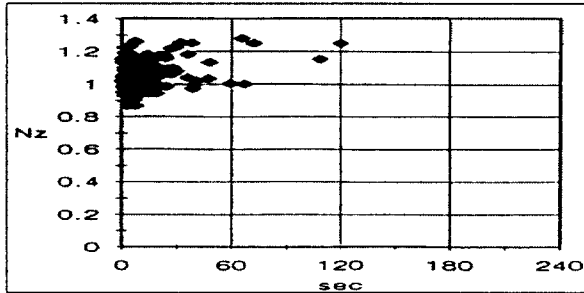
IRI(sec) \ Nz	Nz		
	1.2 < Nz < 1.5	1.5 < Nz < 2.0	2.0 < Nz
IRI < 60	Small	Small	Medium
60 < IRI < 90	Small	Medium	Big
90 < IRI	Medium	Big	Big

30인의 피검자(23세-43세)에 대하여 뇌파와 SIC를 동시에 측정한 수면실험 결과 각성수준 변화에 따른 Nz와 IRI의 상관관계 분석 및 비 정의의 영역의 분석을 통하여 각성수준의 변화를 표 1과 같이 각성, 졸림, 수면의 3단계로 평가할 수 있었으며, 표 1은 실험 초기의 피검자의 각성수준이 정상적인 상태를 기준으로 한

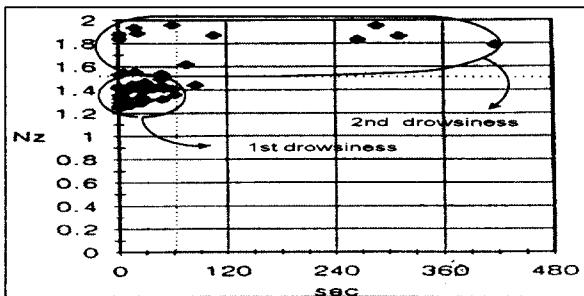
것이며 Small은 졸림 초기, Medium은 졸림, Big은 매우 졸린 상태에 대한 각각의 경고음의 종류를 나타낸다[4,5].

3. 각성상태에 따른 Nz와 IRI의 영역별 분석

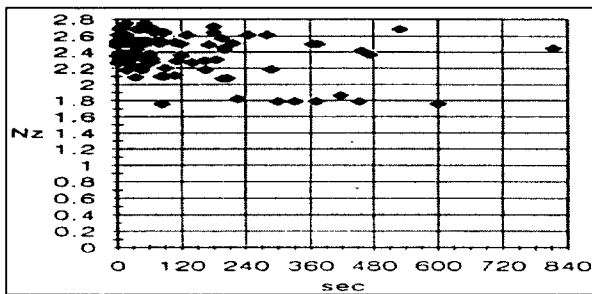
그림 3은 4인의 피검자에 대한 실험결과인 총 945개의 data 쌍을 각성, 졸림, 수면 영역으로 나누어 분류한 data의 분포도이다.



(a). arousal state



(b). drowsiness state



(c). sleep state

그림 2. 각성단계에 따른 영역별 Nz와 IRI의 상관 분포도.
Fig. 2. Distribution map of Nz-IRI depending on arousal state.

그림 2(a)의 각성상태 일 때 Nz는 대부분 1.2 이하이며 IRI는 대부분 60초 미만이고 그림 2(b)의 졸림 영역은 data의 분포형태가 크게 두 가지로 나누어짐을 볼 수 있다. 첫 번째 졸림 영역은 Nz가 1.2에서 1.5 사이이며 이때 IRI는 대부분 60초 이하이고, 두 번째 졸림 영역은 Nz가 1.5 이상이며 IRI가 60초 이상의 넓은 분포를 가진다. 그림 2(c)는 수면 영역이며 전체적으로 Nz는 대부분 2.0 이상에서 분포하고 IRI는 대부분이 60초 이상으로 길다. 위의 신호로부터 각성상태가 저하됨에 따라 Nz와 IRI는 모두 증가하고 특히 IRI의 60초 이하의 영역은 각성상태의 변화에 상관없이 IRI가 발생됨을 볼 수 있다. 따라서 이러한 결과를 표 1의

각성도 평가 및 제어기준에 적용하여 표 2와 같이 수정하였다.

표 2. 수정된 각성도 평가 및 제어 기준.

Table 2. Modified arousal level criteria.

IRI(sec) \ Nz	Nz		
	1.2 < Nz < 1.5	1.5 < Nz < 2.0	2.0 < Nz
IRI < 60	Small	Medium	Big
60 < IRI < 90	Medium	Medium	Big
90 < IRI	Medium	Big	Big

4. 각성도 제어를 위한 fuzzy 추론방법

퍼지집합은 애매함을 수학적으로 접근하는 새로운 방식이며, members가 집합에 속해 있는 정도를 0과 1사이의 값으로 나타내는 것이다. 퍼지집합의 표현 식은 식(1)과 같고 A는 퍼지집합, μ_A 는 원소 x가 A에 소속하는 정도를 나타낸 것이다[1,7,8].

$$\mu_A(x) = [0, 1] \quad \text{식(1)}$$

$$A = (x, \mu_A(x) \mid x \in X)$$

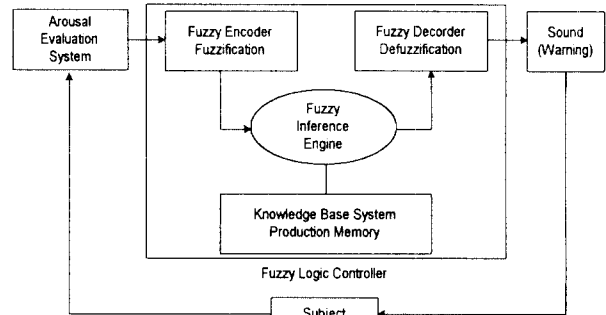


그림 3. 각성 제어를 위한 퍼지제어시스템의 블록선도.
Fig. 2. Block diagram of fuzzy system for arousal control.

그림 3은 각성상태 평가를 위한 퍼지제어시스템의 기본 구조이다. 퍼지엔코더는 퍼지제어의 프로그램을 위한 인터페이스로 퍼지화 작업을 하고, 규칙기반 시스템은 if_then 형식의 전건부(입력변수의 조건)와 후건부(출력변수의 결과)로 나타내며, 이것을 바탕으로 퍼지 추론부에서 추론을, 그리고 퍼지 디코더를 통하여 퍼지 추론결과를 프로세스의 제어에 맞도록 수치 변환하는 작업, 즉 퍼지변수를 crisp한 실제값으로 defuzzification하게 된다. 이 값은 피검자에게 자극을 주고 각성평가 시스템으로부터 각성 정도를 판별한 후 측정된 생리신호의 값을 퍼지제어 시스템의 입력으로 다시 보낸다[8].

본 연구에서는 운전자 상태를 실시간으로 프로세싱하여 제어하는 것이 목표 이므로 processing 속도가 빠른 장점을 가지며 결론부가 조건부 변수의 선형식으로 구성되는 방법인 Sugeno 추론방법을 이용하였다. 먼저 fuzzy 제어시스템의 조건부의 입력으로 Nz와 IRI에 식(2)와 같은 삼각형 형태의 귀속함수를 사용하여 퍼지화 하였으며 이때의 입력 Nz의 멤버십함수는 Arousal=[0 0 1.2], Small=[1.2 1.35 1.5], Medium=[1.2 1.5 2.0], Big=[1.5 2.0 2.0], IRI는 Small=[0 0 60], Medium=[60 75 90], Big=[90 100 100]이고, 결론부의 출력(beep)에서는 constant 퍼지수를 이용하여 Good=0, Small=2, Medium=5, Big=10의 값을 갖는 fuzzy

singleton으로 퍼지화하여 추론하였다. 그림 4는 각각의 멤버쉽 함수를 나타낸 것이다.

$$A=[a_1, a_2, a_3]$$

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 0 & x < a_1 \\ &= \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x < a_2 \\ &= \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & a_2 \leq x < a_3 \\ &= 0 & a_3 \leq x \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

(단, a_1, a_2, a_3 은 상수)

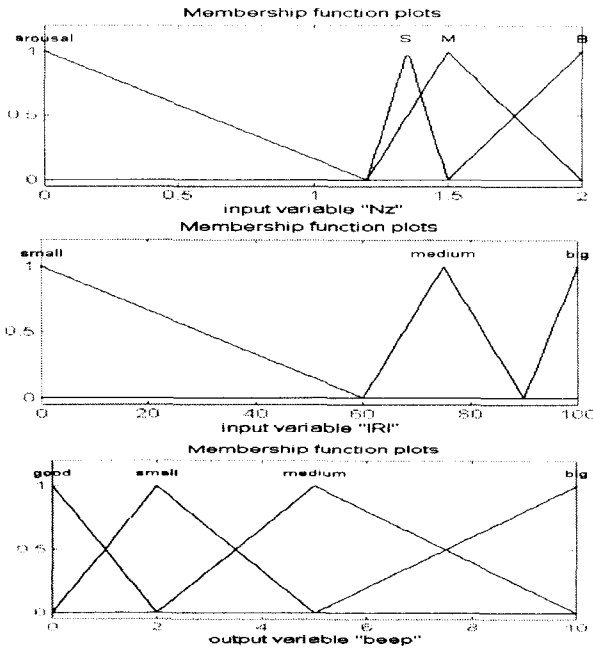


그림 4. 멤버쉽 함수.
Fig. 4. Membership function.

Fuzzy 추론을 위한 control law는 표 2의 기준과 정상상태 일때를 포함한 10가지의 law로 아래와 같이 구성 하였다.

- R₁ : If Nz is A_{Nz} then beep is G_{beep}.
 - R₂ : If Nz is S_{Nz} and IRI is S_{IRI} then beep is S_{beep}.
 - R₃ : If Nz is S_{Nz} and IRI is M_{IRI} then beep is M_{beep}.
 - R₄ : If Nz is S_{Nz} and IRI is B_{IRI} then beep is M_{beep}.
 - R₅ : If Nz is M_{Nz} and IRI is S_{IRI} then beep is M_{beep}.
 - R₆ : If Nz is M_{Nz} and IRI is M_{IRI} then beep is M_{beep}.
 - R₇ : If Nz is M_{Nz} and IRI is B_{IRI} then beep is B_{beep}.
 - R₈ : If Nz is B_{Nz} and IRI is S_{IRI} then beep is B_{beep}.
 - R₉ : If Nz is B_{Nz} and IRI is M_{IRI} then beep is B_{beep}.
 - R₁₀ : If Nz is B_{Nz} and IRI is B_{IRI} then beep is B_{beep}.
- (단, A:Arousal, G:Good, S:Small, M:Medium, B:Big.)

S_{Nz}, M_{Nz}, B_{Nz}와 S_{IRI}, M_{IRI}, B_{IRI} 및 S_{beep}, M_{beep}, B_{beep}은 각각 Nz, IRI, beep의 membership function이다. 여기에 Sugeno 방법을 적용하면, 피검자로부터 측정된 입력값 $Nz=Nz^0$ and $IRI=IRI^0$ 에 대한 조건부의 적합도 α 는

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_{Nz}(Nz^0), & \alpha_2 &= S_{Nz}(Nz^0) \wedge S_{IRI}(IRI^0), \\ \alpha_3 &= S_{Nz}(Nz^0) \wedge M_{IRI}(IRI^0), & \alpha_4 &= S_{Nz}(Nz^0) \wedge B_{IRI}(IRI^0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= M_{Nz}(Nz^0) \wedge S_{IRI}(IRI^0), & \alpha_6 &= M_{Nz}(Nz^0) \wedge M_{IRI}(IRI^0), \\ \alpha_7 &= M_{Nz}(Nz^0) \wedge B_{IRI}(IRI^0), & \alpha_8 &= B_{Nz}(Nz^0) \wedge S_{IRI}(IRI^0), \\ \alpha_9 &= B_{Nz}(Nz^0) \wedge M_{IRI}(IRI^0), & \alpha_{10} &= B_{Nz}(Nz^0) \wedge B_{IRI}(IRI^0). \end{aligned}$$

(단, \wedge 은 minimum operation).

가 되며, 전체 추론결과 Beep⁰은 각각의 적합도와 출력 멤버쉽 함수의 곱으로부터 얻은 출력값에 대한 하중평균으로 식(3)에 의하여 crisp한 값을 구할 수 있다[1,7,8].

$$\begin{aligned} Beep^0 &= \frac{\alpha_1 G_{beep} + \alpha_2 S_{beep} + \alpha_3 M_{beep} + \alpha_4 M_{beep} + \alpha_5 M_{beep} + \dots + \alpha_{10} B_{beep}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{10}} \\ &= \frac{2a_2 + 5a_3 + 5a_4 + 10a_5 + \dots + 10a_{10}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{10}} \end{aligned} \quad \text{식(3)}$$

(단, Good(G_{beep}):0, Small(S_{beep}):2, Medium(M_{beep}):5, Big(B_{beep}):10)

이렇게 얻어진 전체추론결과는 경고음의 level정도를 나타내며 크기 및 주파수 등으로 구현할 예정이다.

5. 실험 및 결과 고찰

본 실험에서는 자극이 없었을 때의 실험 data와 performance test 실험을 수행하면서 얻은 피검자의 data를 입력으로 하고 그림 4의 멤버쉽 함수를 이용하여 Matlab의 fuzzy toolbox를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 또한 실험시 기록한 피검자의 주관적 각성상태와 비교분석 하였고 IRI가 60초 이하일 경우의 Nz의 변화에 대한 fuzzy 시스템 출력값의 상관계수를 비교하였다.

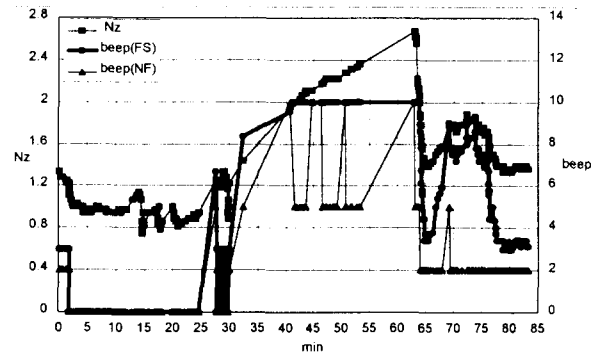


그림 5. 수면실험 결과(경고음 없음).
Fig. 5. Result of sleepiness test (no warning sound).

그림 5는 무자극 상태의 수면실험 결과로 Nz와 IRI, 그리고 이것을 이용한 3단계 경고음 각성제어 시스템으로 얻어진 결과 (beep(NF))와 fuzzy 시스템으로 얻은 결과(beep(FS))를 동시에 나타낸 결과이다. 당시 피검자는 실험 시작후 20분까지 각성상태를 유지하도록 하였고 30초경부터 졸리다고 하였다. 뇌파분석 결과 40분경에 수면의 입면기에 들어갔으며 이때 움직임이 있었고 63분경에 잠을 깬으나 완전히 깨지 못하여 65분 이후 다시 졸리다고 하였다. 먼저 표 1을 기준으로한 기존의 3단계 경고음 발생 방법을 적용하였을 때의 출력 beep(NF)을 보면, 초기 각성상태에서는 경고음 발생이 없다(단 실험시작 직후 3분은 제외: 전극의 안정화) 피검자가 졸리다고한 27분경부터 경고음(Small)이 울렸고 40분까지 각성상태가 저하됨에 따라 경고음의 level도 Small에서 Medium, Big으로 변화하였다. 그러나 40분 이후 피검자의 움직임으로 인하여 60초 이하의 IRI가 다량 발생하자 Nz값

이 증가하고 각성저하가 일어남에도 불구하고 경고음이 Medium으로 발생되었고 65분 이후 다시 졸기 시작했을 때 한 번의 Medium이외에는 모두 Small 경고음을 발생하였다. 표 2를 기준으로 한 fuzzy 시스템을 이용하였을 경우(beep(FS)) 전반적으로 피검자의 각성저하에 따라 민감하게 변화하였으며, 특히 수면영역에서 IRI의 발생에 상관없이 Big의 경고음을 발생하였고 다시 졸기 시작한 65분 이후에도 저각성상태로 인한 Nz의 증가를 추종하면서 경고음이 변화하는 결과를 얻을 수 있었다.

한 결과는 Nz의 변화와 유사한 형태로 변화된 경고음이 발생되고 특히 Nz가 2.0이상인 부분인 수면 직전 영역에서 최고의 경고음을 연속하여 출력하게 된다. 그림 6(b)의 피검자B에서도 같은 결과를 볼 수 있으며 각각의 fuzzy 시스템으로부터 나온 출력값과 Nz와의 연관성을 알아보기 위하여 경고음이 발생된 부분부터 수면직전의 상태까지 상관계수를 비교한 결과 그림 6(a)는 0.991, 그림 6(b)는 0.995의 높은 상관성을 가짐을 알 수 있었다.

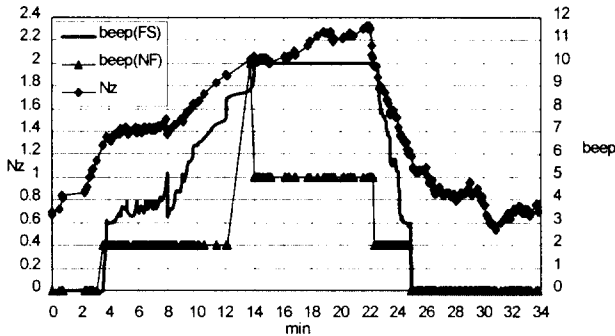
6. 결 론

기존의 각성상태에 따른 3단계 제어방법은 각성상태가 변화되는 영역의 제어가 힘들고, 실차실험시 60초 이하의 많은 IRI가 발생하는 경우에는 경고음이 최고 Medium이므로 적절한 각성제어가 어렵다. 그러나 fuzzy 이론을 적용하였을 경우 기존의 3단계 제어방법에 비하여 경고음 출력이 상대적으로 컸으며 각성변화를 잘 추종하여 각성제어에 효과적이었다. 특히, 실차실험시 발생될 수 있는 60초 이하의 IRI발생 영역에서 Medium부터 Big까지의 다양한 경고음을 발생할 수 있었고 이때의 Nz변화와 fuzzy를 적용한 경고음 출력의 상관계수를 비교한 결과 0.99이상의 값을 가지므로 실차에 적용할 경우 각성제어에 큰 효과를 기대할 수 있었다.

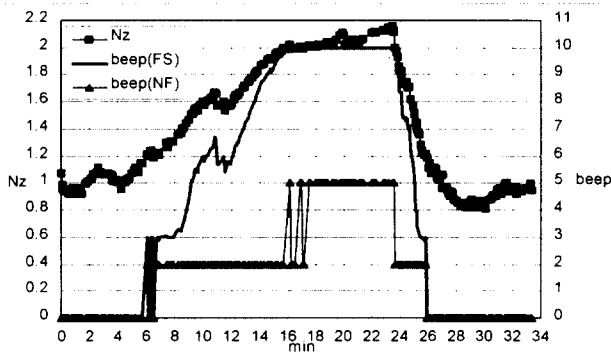
앞으로 fuzzy simulation한 data를 바탕으로 실차에 적용할 수 있는 시스템의 구성과 fuzzy를 이용한 결과값을 운전자가 직접 관찰 할 수 있는 monitoring 시스템개발 및 각성효과를 일으키기 위한 parameter들과 fuzzy 출력값과의 효과적인 제시방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1]. J-S. Roger Jang Ned Gulley, THE MATH WORKS, "Fuzzy logic TOOLBOX", pp. 2.53-2.58.
- [2]. Nimi, y, Watanabe, T. and Hori, T., "Skin potential activities as a function of stage of sleep", *J. Physiol. Soc. Japan*, 30, 231- 244, 1968.
- [3]. Y. Yamamoto, T. Yamamoto, "The characteristics of galvanic skin reflex in low awake level and their application to measurement of sleep", *T. IEE Japan*, vol. 108-c, no. 7, pp. 457-463, 1988.
- [4]. 고한우, 이완규, 김연호, "피부 전기활동용 이용한 휴대형 각성도 측정 및 제어 시스템", *센서학회지*, vol. 5, no. 3, pp. 55-64, 1996.
- [5]. 고한우, 김연호, "각성도 제어를 위한 평가기준의 설정 및 경고음의 효과 분석", *의공학회지*, vol. 18, no. 1, pp. 79-85, 1997.
- [6]. 고한우, 이완규, "피부 임피던스 변화를 이용한 각성도 측정 시스템", *센서학회지*, vol. 4, no. 3, pp. 30-36, 1995.
- [7]. 이광형, 오길록, 홍릉과학출판사, "퍼지이론 및 응용II", pp. 5.64 - 5.66. 1991.
- [8]. 강 훈, "fuzzy control 이론 및 연구동향", *전자공학회지*, vol. 22, no. 11, pp. 1263-1272. 1995.
- [9]. 이상국, "운전자 감시 제어와 교통안전도 향상연구동향", *제어, 자동화, 시스템공학 학회지*, vol. 2, no. 1, pp. 37-44, 1996.



(a). subject A



(b). subject B

그림 6. Performance test 수행시의 수면실험 결과.
Fig. 6. Result of sleepiness test during performance test.

그림 6은 performance test를 수행하면서 측정된 피검자의 수면실험 data에 적용한 결과이며 그림 5와 같은 방법으로 나타내었다. 그림 6의 data는 전반적으로 60초 이하의 IRI값을 갖는 특징을 보인다. 이것은 졸린 상태에서도 performance test를 수행해야 하는 실험 조건에 의하여 피검자가 심리, 생리적으로 불안정하므로 각성이 저하될수록 전체적인 피부임피던스 변화를 나타내는 Nz는 증가하나 심리적, 생리적 상태에 매우 민감하게 변화하는 IRI는 작은 값을 갖게된다. 본 연구중 이미 발표된 실차실험 결과에서도 저각성상태 임에도 불구하고 계속 운전 하고자 하는 의지로 인하여 저각성상태가 되더라도 IRI가 대부분 60초 이하에서 발생되었다. 따라서 이 data는 실차 실험시와 유사한 경우의 data로 간주되어질 수 있다. 그림 6의 data에 표 1을 기준으로 한 기존의 방법을 적용한 결과(beep(NF))와 fuzzy 시스템을 이용한 결과(beep(FS))를 비교하면 그림 6(a)는 초기 저각성단계인 Nz가 1.2 이상, IRI가 60초 이하인 값에서 두 방법 모두 Small(2)의 경고음을 발생하고 4분 후부터 Nz는 증가하나 IRI가 60초 이하이므로 기존의 방법으로는 12분 까지 각성상태의 변화에 상관없이 계속하여 Small(2)의 경고음만을 발생하게된다. 또한 14분 후부터 Nz가 2.0 이상임에도 불구하고 60초 이하의 IRI에 의해 Medium(5)의 출력을 갖는다. 그러나 fuzzy논리를 이용