

論文2000-37CI-5-5

# 카오스 신경망을 위한 CMOS 혼돈 뉴런의 집적회로 구현 및 특성 해석

## (Integrated Circuit Implementation and Characteristic Analysis of a CMOS Chaotic Neuron for Chaotic Neural Networks)

宋 漢 廷 \* , 郭 桂 達 \*\*

(Han Jung Song and Kae Dal Kwack)

### 요 약

0.8 $\mu$ m 단일 폴리 CMOS 집적회로로 구현된 혼돈 뉴런의 동적 응답 특성을 분석하였다. 구현된 CMOS 혼돈 뉴런의 시그모이드 출력함수와 혼돈 발생회로 블록에 대한 일련의 수식 모델을 구하여 혼돈 뉴런의 동적 응답특성, 즉 뉴런 내부상태의 분기도 및 초기값 의존성을 보여주는 리아프노프 지수와 평균 발화율, 시간 및 주파수 응답 등 다양한 특성들을 수치해석적으로 분석하였다. 뿐만 아니라 4개의 시냅스를 지닌 2개의 혼돈 뉴런으로 이루어진 카오스 신경 회로망을 구성하여 시냅스 가중치에 따른 분기도 변화를 구하고 뉴런 네트워크에서의 응용 가능성을 확인하였다. 한편 CMOS 집적회로로 구현된 혼돈 뉴런을  $\pm 2.5V$  전원, 10kHz의 클럭으로 구동시켜 단일 혼돈 뉴런 및 2개의 뉴런으로 이루어진 카오스 신경망에 대한 여러 동적 응답 특성을 측정하여 수치해석 결과와 비교, 분석하였다.

### Abstract

This paper presents an analysis of the dynamical behavior in the chaotic neuron fabricated using 0.8 $\mu$ m single poly CMOS technology. An approximated empirical equation models for the sigmoid output function and chaos generative block of the chaotic neuron are extracted from the measurement data. Then the dynamical responses of the chaotic neuron such as bifurcation diagram, frequency responses, Lyapunov exponent, and average firing rate are calculated with numerical analysis. In addition, we construct the chaotic neural networks which are composed of two chaotic neurons with four synapses and obtain bifurcation diagram according to synaptic weight variation. And results of experiments in the single chaotic neuron and chaotic neural networks by two neurons with the  $\pm 2.5V$  power supply and sampling clock frequency of 10kHz are shown and compared with the simulated results.

\* 正會員, 忠青大學 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Chungcheong College)

\*\* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Hanyang Univ.)

※ 본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 대학부설연구  
구소 과제연구비에 의해서 연구되었음

接受日字:2000年2月23日, 수정완료일:2000年8月25日

## I. 서론

생물학적 신경망을 모방하는 신경회로망에 대한 연구는 1943년 맥컬로크(McCulloch)와 피츠(Pitts)가 처음으로 뉴런(신경세포) 모델을<sup>[1,10]</sup> 제안한 이래 영상처리, 음성인식, 최적화 문제 등 여러 분야에서 광범위하고도 다각적으로 진행되어 왔고, 그 응용 가능성으로 인하여 여전히 주목받는 연구분야가 되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 그동안 역전파 신경망이나 홉펠드 모델 등 다양한 형태의 개선된 신경망 모델이<sup>[3,10]</sup> 등장하였고 최근에는 고성능 신경망 칩이 선보이는 등 한층 더 기대와 관심을 불러 일으키고 있다. 그러나 이러한 최근의 관심과 연구에도 불구하고 대부분의 신경회로망 모델은 여전히 그 본질적 한계를 지니고 있는 것 또한 부인할 수 없는 사실이다. 이러한 원인의 하나로써 신경망의 기본 요소를 이루는 뉴런 자체의 단순 기능성, 즉 생물학적 뉴런(신경세포)의 극히 일부 기능(그림 1 참조)만을 모델화했다는 점을 지적하지 않을 수 없다<sup>[3,4]</sup>. 때문에 좀더 효율적이고 향상된 성능의 신경회로망 구성을 위해서는 생물학적 뉴런의 복잡 다양한 동적 특성 등을 포함하는 뉴런 모델이 절실하다 할 것이다. 최근의 연구에 의하면 실제 뉴런의 경우 평형, 주기, 분기현상 등 복잡한 혼돈(카오스) 현상은 물론 과거의 자극과 관련한 불응성 등 여러 가지 중요한 동적 특성들이 밝혀진 바 있다<sup>[3,4]</sup>. 1990년 일본의 아이하라(Aihara)가 처음으로 카오스 뉴런 모델을<sup>[5]</sup> 발표한 것을 계기로 여러가지 형태의 혼돈(카오스) 뉴런 연구가 진행되고 있고 '스위치드 캐패시터 방식의 전류모드 혼돈 뉴런' 등과 같은 집적회로화는 물론 이를 신경망에 적용한 성과도<sup>[6-9]</sup> 나오고 있으며 앞으로 많은 연구의 여지가 있다 할 것이다. 본 논문에서는 이산시간 전압모드로 동작하는 혼돈 뉴런을 모델화 하여 0.8 $\mu$ m 단일 폴리 CMOS 집적회로로 구현하고 이의 동적 응답 특성을 분석한다. 먼저, 구현된 CMOS 혼돈 뉴런의 시그모이드 출력함수와 혼돈 발생회로 블록에 대한 일련의 수식 모델 유도과정을 보이고 이에 대한 수치해석을 실시하여 뉴런 내부 상태의 분기도 및 초기값 의존성을 보여주는 리아프노프 지수와 평균 발화율, 시간 응답 등 다양한 특성들을 구한다. 더 나아가 4개의 시냅스를 지닌 2개의 혼돈 뉴런으로 이루어진 카오스 신경 회로망을 구성하여 시냅스

가중치에 따른 분기도 변화를 구하고 뉴럴 네트워크에서의 응용 가능성을 확인한다. 한편 CMOS 집적회로로 구현된 혼돈 뉴런을  $\pm 2.5V$  전원, 10kHz의 클럭으로 구동시켜 단일 혼돈 뉴런 및 2개의 뉴런으로 이루어진 카오스 신경망에 대한 여러 동적 응답 특성을 측정하여 수치해석 결과와 비교, 분석하고 결론을 내린다.

## II. 본론

### 1. 혼돈 뉴런 모델의 유도

신경망의 기본 구성요소인 뉴런은 뉴런 몸체(neuron body)와 시냅스(synapse)로 이루어지며 그 기본구조를 그림 1에 나타내었다.

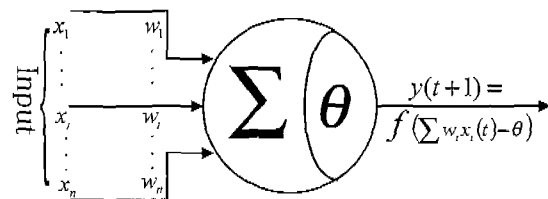


그림 1. 기본적인 뉴런 모델

Fig. 1. Basic neuron model.

$N$ 개의 입력신호  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 에 각각의 시냅스 가중치(연결강도)가  $w_1, w_2, \dots, w_n$ 이고 임계문턱값  $\theta$ 를 갖는 단일 뉴런의 경우 출력  $y$ 는 다음과 같이 표현될 수가 있다<sup>[1]</sup>.

$$x(t+1) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t) - \theta \quad (t=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

$$y(t+1) = f(x(t+1)) \quad (2)$$

다른 뉴런에서의 입력가중합 및 내부 임계문턱값  $\theta$ 에 따라 뉴런의 활동치  $x(t+1)$ 이 정해지고 이 활동치가 출력함수  $f(\cdot)$ 에 따라 변환되어 뉴런의 출력값  $y(t+1)$ 이 얻어진다. 이때 출력함수  $f(\cdot)$ 로는 일반적으로 계단함수(step function)와 시그모이드(sigmoid) 함수를 취하며 초기 맥컬로크-피츠(McCulloch-Pitts)의 뉴런모델이나 로젠블랫(Rosenblatt)의 퍼셉트론 신경망 모델의 경우 계단함수가 사용된 바 있고 최근에는 학습에 필요한 단조증가의 미분가능성을 인하여 역전파 신경망 모델, 홉펠드 모델 등 대부분에 시그모이드 출력함수가 사용되고 있다<sup>[10]</sup>. 그러나 이러한 뉴런 모델들

은 앞서 언급한 바와 같이 실제 뉴런(신경세포)의 여러 가지 특징, 예를 들면 불응성<sup>[3]</sup> 효과나 카오스적 특성 등을 반영하고 있지 못하다. 이에 실제의 뉴런이 가지는 불응성을 고려한 나구모(Nagumo)와 사토(Sato)의 모델은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다<sup>[3,5]</sup>.

$$y(t+1) = f \left\{ \sum_{i=1}^M w_i x_i(t) - \alpha \sum_{d=0}^{\infty} k^d x(t-d) - \theta \right\} \quad (3)$$

(t=0,1,2,...)

식 (3)의 내부 2번째 항  $[\alpha \sum_{d=0}^{\infty} k^d x(t-d)]$ 을 통하여 바로 과거의 상태에 의한 뉴런의 불응성 영향이 시간에 따라 지수함수적으로 감쇠함을 알 수 있다. 이때  $\alpha$  와  $k$ 는 각각 뉴런의 불응성 상수파라메타와 감쇠인자이다. 한편 식 (3)에서 출력함수  $f(\cdot)$ 를 단위 계단 함수에서 미분가능한 연속 시그모이드 함수로 바꾸고 외부입력의 총합을 A(일정)라고 하고 식 (3)의 내부상태  $x(t)$ 와  $x(t+1)$ 에 대하여 차분방정식을 구하여 정리하면 아래와 같은 아이하라(Aihara)의 혼돈 뉴런 수식이 얻어진다.<sup>[3,5]</sup>

$$x(t+1) = k \cdot x(t) - \alpha \cdot g(x(t)) + a \quad (4)$$

$$y(t+1) = f(x(t+1)) \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{x}{\epsilon})} \quad (6)$$

- x(t) : 시간 t에서의 뉴런의 내부상태
- y(t) : 시간 t에서의 뉴런의 출력
- k : 불응성의 시간감쇠 상수
- $\alpha$  : 뉴런의 불응성 상수 파라메타
- a (=A- $\theta$ )(1-k) : 외부입력과 문턱치의 총합
- g : 뉴런의 불응성 상관함수
- f(·) : 시그모이드 출력함수

실제로 카오스 신경망은 이러한 혼돈 단일 뉴런 여러개로 구성되며 내부 피드백 입력과 외부 입력을 고려한 신경회로망 내에서 모델화 하면 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>[3,5]</sup>.

$$y_i(t+1) = f \left\{ \sum_{j=1}^M v_{ij} \sum_{d=0}^{\infty} k^d A_j(t-d) + \sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_{d=0}^{\infty} k^d x_j(t-d) - \alpha \sum_{d=0}^{\infty} k^d x_i(t-d) - \theta_i \right\} \quad (7)$$

단일 뉴런과 마찬가지로 내부상태  $x(t)$ 와  $x(t+1)$ 에 대하여 차분방정식을 구하여 정리하면 i번째 뉴런은 아래의 수식들로 표현되며 그림 2에 그 블록도를 나타내었다.

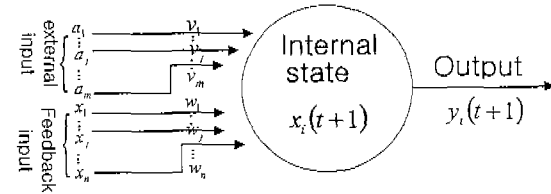


그림 2. 카오스 신경망 내의 뉴런 모델  
Fig. 2. A neuron model as an element of chaotic neural networks.

$$x_i(t+1) = k \cdot x_i(t) - \alpha \cdot g(x_i(t)) + \sum_{j=1}^M v_{ij} A_j(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij} y_j(t) - (1-k) \theta_i \quad (8)$$

$$y_i(t+1) = f(x_i(t+1)) \quad (9)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{x}{\epsilon})} \quad (10)$$

- $A_j(t)$ : j 번째의 외부입력
- $v_{ij}$ : 외부입력  $A_j(t)$ 에서 i 번째 뉴런으로의 시냅스 결합계수
- $w_{ij}$ : j 번째 뉴런에서 i 번째 뉴런으로의 시냅스 결합계수

뉴런의 출력함수와 불응성 파라메타 따른 뉴런 모델을 구분하여 표 1에 정리하였다.

표 1. 뉴런 모델 요약  
Table 1. Summary of various neuron models.

출력 함수	계단함수	시그모이드함수
불응성 파라메타	$f(x) = 1(x \geq 0)$ $0(x < 0)$	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{\epsilon}}}$
$k = \alpha = 0$	맥컬로크-피츠 뉴런모델	이날로그 뉴런모델 (홉펠드, BP 모델)
$k \neq \alpha \neq 0$	Nagumo-Sato 뉴런모델	카오스 뉴런모델

2. 이산시간 전압모드 혼돈 뉴런의 CMOS 집적회로 구현

카오스(혼돈) 뉴런을 구현하기 위하여 본 논문은 혼돈 발생회로 블럭과 시그모이드 출력함수로 구성된, 전압모드로 동작하는 CMOS 혼돈 뉴런을 그림 3과 같이 집적회로로 제작하였다. 그림 3(a)에 나타난 본 논문의 혼돈 뉴런의 블럭도를 분석해 본다. 먼저 혼돈 발생회로<sup>[11]</sup> 블럭을 살펴보면 출력을 입력으로 귀환시키는 지연소자로서 2개의 샘플앤드홀드 회로가 사용되고 혼돈 신호 발생에 충분한 비선형성을 얻기 위하여 비선형함수  $N(\cdot)$  블럭과 더불어 별도의 가산회로를 삽입하였다. 이때 2단 CMOS 구조의 op-amp 6개가 사용되며 2상 클럭에 의해 동작이 된다. 동작원리는 시각  $t$ 에서의 상태 값  $x(t)$ 가 비선형함수  $N(\cdot)$ 와 선형회로의 조합 그리고 외부 입력 전압  $V_a(t)$ 에 의하여 다음 시각  $t+1$ 의 값  $x(t+1)$ 을 결정하고 이 출력  $x(t+1)$ 은 지연회로를 거치면서 이산화된 데이터 형태로 재입력 되어  $x(t)$ 로 된다. 함수  $N(\cdot)$ 가 충분한 비선형성을 가지고 있게 되면 적절한 조건에 따라 주기상태, 준주기 상태, 혼돈상태에 이르게 되며 본 논문의 경우 그림 4(a)에서 보듯이 혼돈상태 발생에 충분한 비선형 전달함수를 보이고 있다. 그림 3(a)로부터 내부상태에 대한 관계식을 유도하면 다음과 같다.

$$x(t+1) = \left( \frac{-R_6}{R_1} \right) \cdot \left( \left( \frac{-R_3}{R_1} \right) \cdot N(x(t)) + \left( \frac{-R_4}{R_2} \right) \cdot x(t) \right) - \left( \frac{R_6}{R_5} \right) \cdot V_a(t) \quad (11)$$

$R_4, R_5, R_6$ 에 고정된 저항을 사용한다고 하면 식 (11)은 다시 아래로 정리될 수 있다.

$$x(t+1) = \left( \frac{R_3}{R_2} \right) \cdot x(t) + \left( \frac{R_3}{R_1} \right) \cdot N(x(t)) - V_a(t) \quad (12)$$

그러므로 식 (12)는 식(4)와 비교해 볼 때  $k = \frac{R_3}{R_2}$ ,

$$g(x) = -N(x), \quad a = \frac{R_3}{R_1}, \quad a = -V_a(t) \text{ 인 단일 혼돈뉴}$$

런의 내부상태 관계식이 된다.

한편 본 논문에서는 혼돈 뉴런의 수치해석을 위하여 불응성 관련함수  $g(\cdot)$ 를 3구분 선형함수로 근사화시켜 아래의 실험식을 얻었다<sup>[11]</sup>.

$$g(x(t)) = \begin{cases} -0.55x(t) - 1.14 & (x(t) \leq -0.3) \\ 5.60x(t) + 0.36 & (-0.3 < x(t) \leq 0.11) \\ 0.76x(t) + 1.07 & (0.11 < x(t)) \end{cases} \quad (13)$$

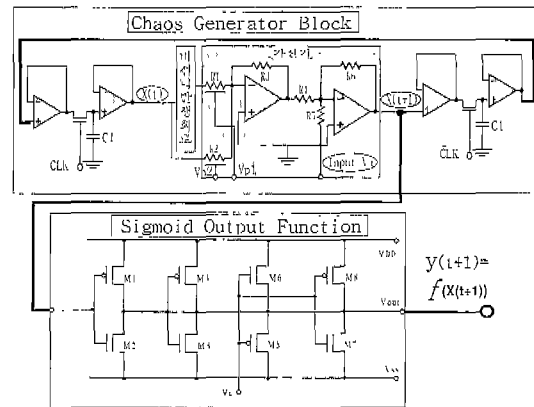
식 (13)을 재정리하고 식 (12)와 연계시키면 본 논문의 단일 혼돈 뉴런은 다음과 같은 일련의 수식으로 최종 정리될 수 있다.

$$x(t+1) = k \cdot x(t) - a \cdot (g(x)) + (-V_a(t)) \quad (14)$$

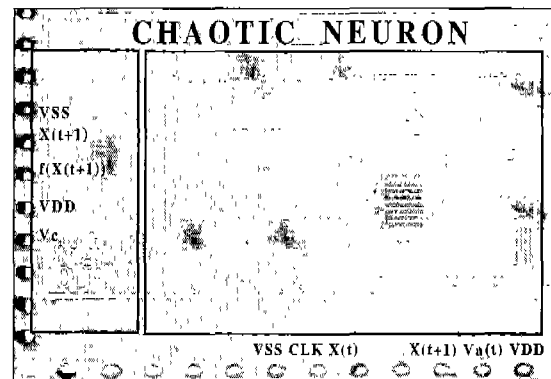
$$g(x(t)) = 0.02 - 0.66x(t) + 3.07|x(t) + 0.25| - 3.18|x(t) - 0.11| \quad (15)$$

$$y(t+1) = f(x(t+1)) \quad (16)$$

$$f(x) = -3 \cdot \left( \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-x}{0.3}\right)} - 0.5 \right) \quad (17)$$



(a) block diagram

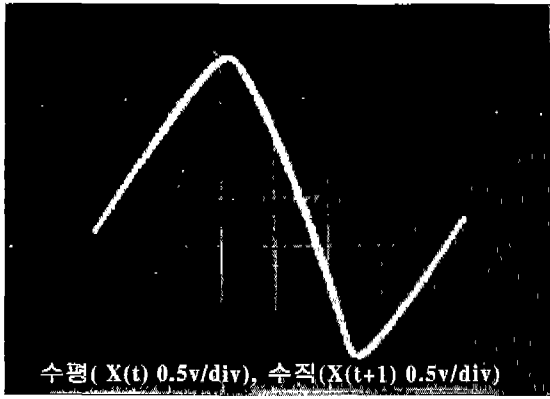


(b) microphotograph

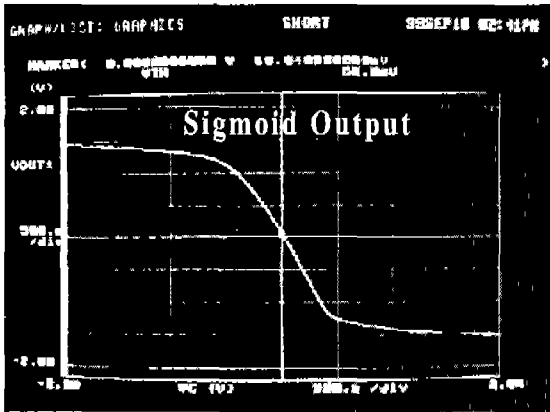
그림 3. 제작된 CMOS 혼돈 뉴런

Fig. 3. Fabricated CMOS chaotic neuron.

이때 함수  $f(\cdot)$ 는 그림 4(b)의 쌍극성 시그모이드 뉴런 출력함수의 측정결과로부터 얻는다.



(a) Transfer curve of the chaos generative circuit



(b) Transfer curve of the sigmoid output function

그림 4. 혼돈 뉴런의 출력함수

Fig. 4. Measured transfer curves for chaotic neuron.

3. 혼돈 뉴런의 상태 분석

본 논문의 집적회로로 구현된 CMOS 혼돈 뉴런의 여러 동적 특성을 분석하기 위하여 식 (14)~(17)에 대하여 수치해석을 실시하였다. 먼저 입력전압  $V_a(t)$ 와 뉴런의 내부상태  $x(t)$ 간의 분기도를 구하였다. 그림 5(a)는  $k=0.5, a=1$ 일 경우의 분기도 및 리아프노프 지수, 평균 흥분율을 계산한 결과이다. 입력전압  $V_a(t)$ 를  $-1.5V$ 에서  $1.5V$ 까지 변화시켰을 때 뉴런의 내부상태  $x(t)$ 가 평형점, 2주기, 3주기, 혼돈상태 등으로 분기됨을 나타내 보이고 있다.  $V_a(t)$  값이  $-1.2V$  미만과  $1.2V$  이상인 경우 특정한 DC 전압 즉, 평형점의 정상 상태 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있고  $V_a(t)$  값이  $-1.2V \sim 1.2V$  사이에서는 간헐적인 주기성을 보이면서 혼돈 상태를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 혼돈 상태의 특징은 임의의 초기점에서 근접 시작한 두 신호

궤적이 시간이 지남에 따라 그 수렴, 발산정도가 지수 함수적인 형태를 띠게 된다는 것이다<sup>[12]</sup>. 이때 초기 미소한 궤적차이를  $d_0$ 라 한다면 시간  $t$ 가 지난 후의 궤적차이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d(t) = d_0 e^{\lambda t} \tag{18}$$

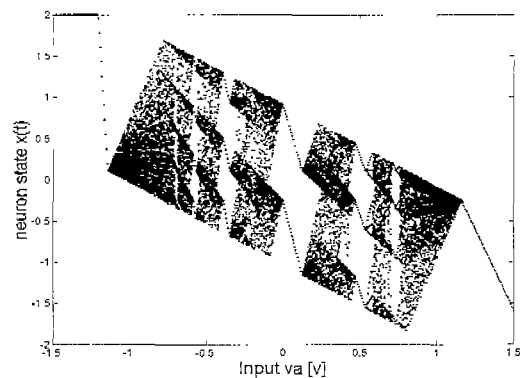
이때의  $\lambda$ 를 리아프노프 지수<sup>[12]</sup>라 부르며 이를 본 논문의 뉴런의 내부상태 분석에 적용하면,

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty, \Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N \ln \left| \frac{\Delta X(t+1)}{\Delta X(t)} \right| \tag{19}$$

$\lambda$  값이 양수이면 궤적차이가 지수적 발산, 즉 혼돈상태를 뜻하고, 음수 또는 0이면 궤적차이가 수렴을 나타내는 주기운동 내지 평형상태를 뜻한다. 본 논문의 식 (14), (15)와 식 (19)로부터 이  $\lambda$  값을 구하여, 상이한 초기값에 따라 두 궤적이 멀어지는 정도로 혼돈상태 여부를 판별하였다. 그림 5(b)의 리아프노프 지수 그래프를 살펴보면 같은 그림 5(a)의 분기도에 나타난 바와 같이 혼돈영역에서는  $\lambda$  값이 양수값을 가지고 평형상태이거나 주기적인 상태일 경우는  $\lambda$  값이 음수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 혼돈 뉴런 내부의 상태를 발화하는 정도는 시간 평균 발화율(average firing rate)로 정의되며 수식은 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$\rho = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N h(x(t)) \tag{20}$$

여기서  $h(x)$ 는 뉴런의 활동전위에 대해서 축색이 가지는 파형정형 함수를 뜻하며  $h(x) = 1(x \geq 0), -1(x < 0)$ 로 한다<sup>[3]</sup>.



(a) bifurcation

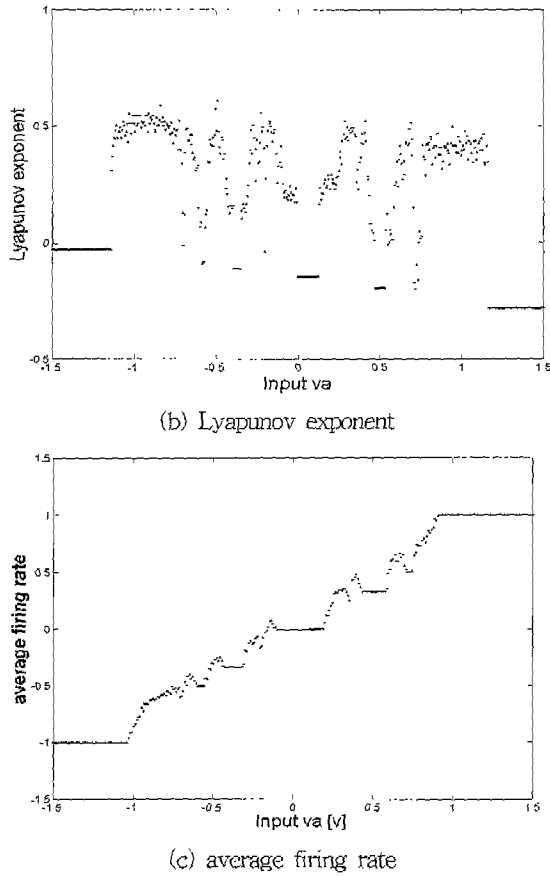


그림 5. 단일 혼돈 뉴런의 응답 특성  
Fig. 5. Response characteristics of the single chaotic neuron.

그림 5(c)의 평균 발화율 그래프를 보면 전체적으로 평형 내지 주기적 상태일 때는 뉴런 내부의 발화 정도가 일정하지만 혼돈영역에서는 불규칙적인 발화특성을 보이고 있다. 다음으로 단일 혼돈 뉴런의 신경회로망 내에서의 응용 가능성을 확인하기 위하여 그림 6과 같이 4개의 시냅스와 2개의 뉴런으로 이루어진 신경회로

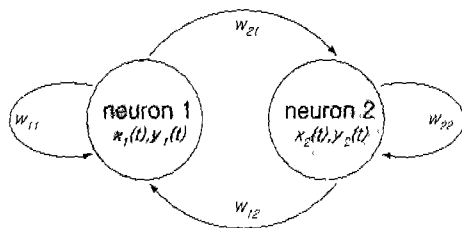


그림 6. 4개의 시냅스를 지닌 2개의 뉴런으로 이루어진 카오스 신경망  
Fig. 6. Chaotic neural network consist of two neurons with four synapses.

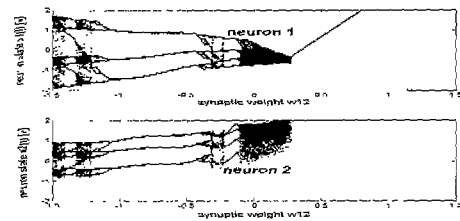
망을 구성하여 학습에 필요한 시냅스 가중치 변화와 뉴런 자체의 귀환성, 다른 뉴런간의 연결성 등을 살펴 보았다.

식 (8)과 식 (14~17) 로부터 모든 외부입력과 문턱치의 합을 각각  $V_{a1}$ 과  $V_{a2}$ 로 놓고 그림 6의 신경회로망에 대한 관련 수식을 구하여 정리하면 아래와 같다.

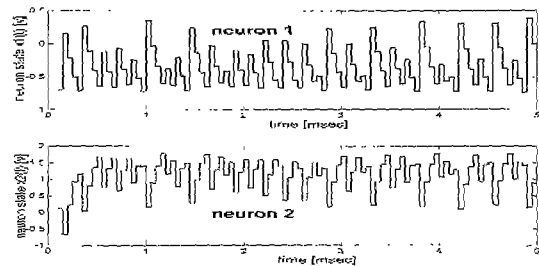
$$y_1(t+1) = f(k \cdot x_1(t) + \alpha \cdot g(x_1(t)) - (V_{a1}(t) + w_{11} y_1(t) + w_{12} y_2(t))) \quad (21)$$

$$y_2(t+1) = f(k \cdot x_2(t) + \alpha \cdot g(x_2(t)) - (V_{a2}(t) + w_{21} y_1(t) + w_{22} y_2(t))) \quad (22)$$

여기에서  $k=0.5, \alpha=1, V_{a1}=V_{a2}=0$ 이라 하고 수치 해석한 2개의 뉴런으로 구성된 카오스 신경망의 응답특성을 그림 7에 나타내었다.



(a) bifurcation ( $w_{11}=-0.5, w_{21}=-0.5, w_{22}=-1$ )



(b) time series

$$(w_{11}=-0.5, w_{12}=-0.1, w_{21}=-0.5, w_{22}=-1)$$

그림 7. 두 뉴런으로 이루어진 카오스 신경망의 응답 특성

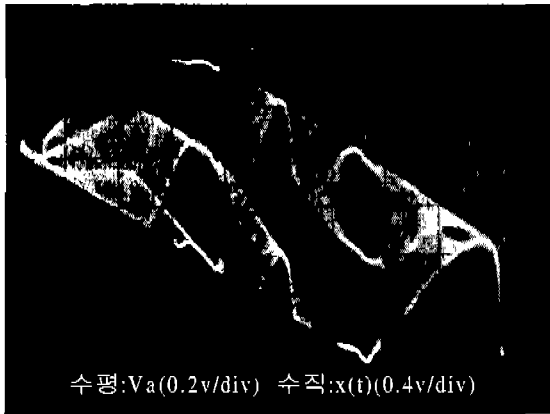
Fig. 7. Response characteristics of the chaotic neural network by two neurons.

그림 7(a)로부터 시냅스 가중치  $w_{12}$ 에 따라 두 개의 뉴런 모두에서 정상적인 혼돈 뉴런의 분기현상이 나타나고 있고 그림 7(b)는 그림 7(a)의  $w_{12}=-0.1$ 일 때의 시간과형으로 두 뉴런 모두 혼돈(카오스) 상태에 있음

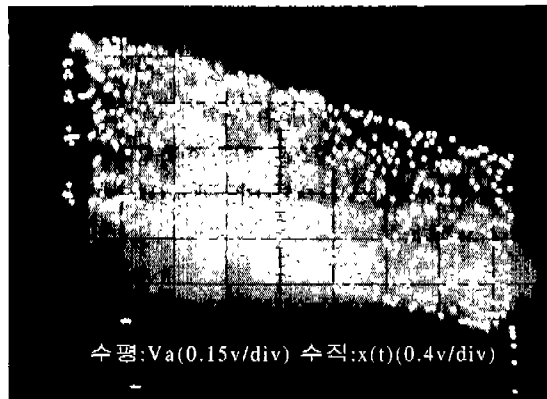
을 알 수 있다. 이로써 본 논문의 혼돈 뉴런은 신경회로망 내에서 유용한 기본요소로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4 구현된 CMOS 혼돈 뉴런의 측정 및 분석

앞 절의 수치해석적 결과를 실험적 측정결과와 비교해 보기 위하여 집적회로로 제작된 CMOS 혼돈 뉴런을  $\pm 2.5V$  전원전압, 10kHz 클럭 주파수로 구동시켜 측정하였다. 그림 8은 혼돈회로의 상태전압  $x(t)$ 를 입력 전압  $V_a(t)$ 에 따라 측정된 분기도 결과이다. 그림 8(a)는  $k=0.5$ 인 경우로 평형점, 2주기, 3주기, 혼돈영역이 모두 형성됨을 알 수 있고 그림 5(a)의 수치해석 결과와 일치함을 보이고 있다. 그림 8(b)는  $k=1$ 일 경우의 분기도로  $-0.6V \sim 0.65V$ 에서 혼돈상태가 발생됨을 보여주고 있다.



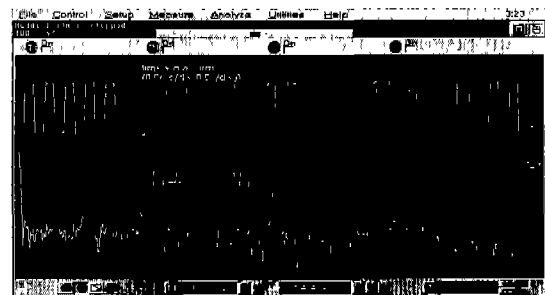
(a)  $k=0.5, \alpha=1$



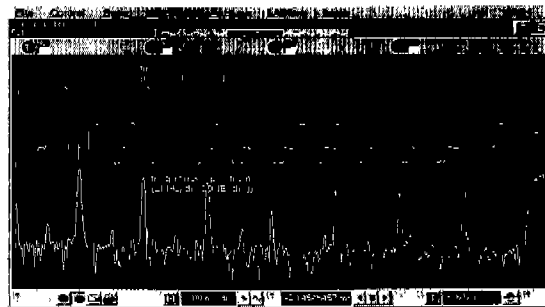
(b)  $k=1, \alpha=1$

그림 8. 단일 혼돈 뉴런의 분기도 측정결과  
Fig. 8. Measured bifurcation diagrams of the single chaotic neuron.

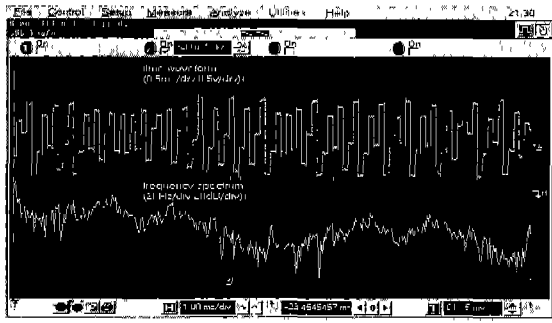
그림 9는  $k=0.5, \alpha=1$  조건하에서 그림 5(a)(또는 그림 8(a))의 분기도내에서 특정한 입력전압  $V_a(t)$ 에 따라 다르게 나타나는 단일 뉴런의 상태전압  $x(t)$ 의 시간파형과 주파수 특성을 측정된 결과이다. 그림 9(a)는  $V_a(t)=0.1V$ 의 DC전압을 인가했을 때의 시간파형과 그에 대한 주파수 특성이다. 10kHz로 구동되는 클럭주파수로 인하여  $x(t)$ 는 0.1ms의 시간간격으로 일정한 전압을 유지하면서 2주기의 구형파 형태를 보이고 있고 이의 주파수 특성 측정결과는 10kHz 클럭 주파수내에 5kHz에서 1개의 피크 스펙트럼이 나타나고 있다. 그림 9(b)는  $V_a(t)=-0.65V$ 일때의 4주기성 상태의 시간파형과 주파수 특성이다. 기본 주파수  $f_1=2.53kHz$ 와 이의 정수배로 나타나는 고조파 성분을 5.06kHz, 7.6kHz에서 볼 수 있다. 10kHz~20kHz사이에서도 기본주파수의 정수배에 해당하는 3개의 고조파 성분들이 나타남을 알 수 있다. 아주 낮은 주파수대역에서의 스펙트럼 성분은 상태  $x(t)$ 의 DC offset 성분을 나타낸다. 그림 9(c)는  $V_a(t)=-0.35V$ 일때의 경우로서 뉴런의 내부상태 전압  $x(t)$ 가 끊임없이 무작위한 이산 전압을 갖게 되는 혼돈상태가 발생되고 있다. 더불어 주파수 성분은 전체적으로 20dB~30dB정도의 전력밀도 상승을 보이며 전 주파수대역에 걸쳐 있음을 확인할 수 있다.



(a) period 2(  $V_a=0.1V$  )



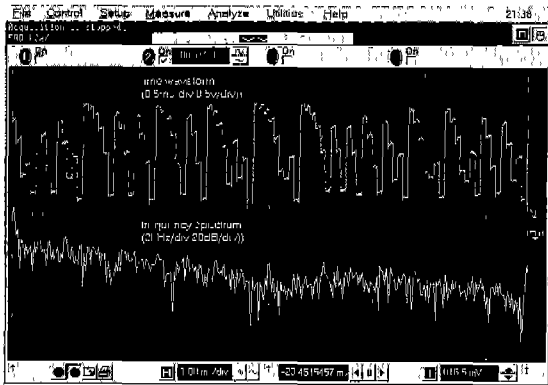
(b) period 4(  $V_a=-0.65V$  )



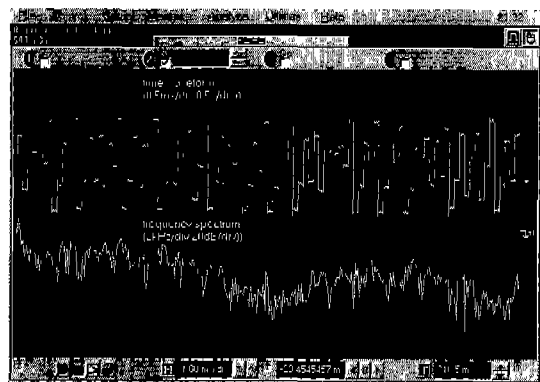
(c) chaotic state(  $V_a=0.35V$  )

그림 9. 단일 혼돈 뉴런의 시간파형 및 주파수 응답 측정결과

Fig. 9. Measured time and frequency responses of the single chaotic neuron.



(a) neuron ① ( $w_{11}=-0.5, w_{12}=-0.1, w_{21}=-0.5, w_{22}=-1$ )



(b) neuron ② ( $w_{11}=-0.5, w_{12}=-0.1, w_{21}=-0.5, w_{22}=-1$ )

그림 10. 카오스 신경망의 시간파형 및 주파수 응답 측정결과

Fig. 10. Measured time series and frequency responses of the chaotic neural network.

다음으로 그림 6의 신경회로망을 구성하여 그림 7(b)와 같은 조건하에서 두 뉴런의 내부 시간파형과 이에 따른 주파수 특성을 측정하였다. 시간파형은 수치해석 결과에서도 예측한 바와 같이 두 뉴런 모두 혼돈상태에 있음을 알 수 있는데 약간의 차이가 나는 것은 혼돈상태의 초기값 민감성에 기인하는 것으로 사료된다. 마찬가지로 주파수 특성도 전 주파수 대역에 걸쳐 존재하는 전형적 혼돈특성을 보이고 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 CMOS 집적회로로 구현된 이산시간 전압모드 혼돈 뉴런의 동작특성을 분석하였다. 실험적으로 제작한 카오스 뉴런내의 혼돈 발생회로 블럭 및 시그모이드 출력 함수 블럭에 대한 수식화를 유도하여 뉴런 내부상태의 분기현상 및 초기값 의존성을 보여주는 리아프노프 지수, 뉴런 출력의 평균발화 여부를 알아보는 평균 발화율 등을 계산하였다. 뿐만 아니라 2개의 혼돈 뉴런으로 뉴런 네트워크를 구성하여 뉴런 시냅스의 가중치 변화에 따른 영향, 다른 뉴런간의 상호 영향등을 분기도와 시간파형 등을 통하여 분석하였다. 한편 집적화 된 혼돈 뉴런을  $\pm 2.5V$  전원, 10kHz의 클럭으로 구동시켜 입력전압에 따른 뉴런 내부상태의 분기도를 측정하였고, 상태변화에 따른 시간파형 측정과 이의 주파수 분석도 실시하여 해석결과와 비교하였다. 한편 2개의 뉴런으로 구성된 네트워크에서 시냅스 변화를 달리하여 시간 및 주파수 특성도 측정하여 카오스 신경망의 기본 뉴런으로서의 가능성을 확인하였다. 본 논문의  $\pm 2.5V$  전원, 수십kHz의 클럭으로 구동되는 집적화 된 혼돈 뉴런은 적절한 전원전압 레벨과 클럭주파수 등을 보완한다면 신경망의 단위 뉴런으로 유용하게 사용되리라 생각되며 앞으로 이를 이용한 다양한 형태의 혼돈 신경회로망에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] 김대수, "신경망 이론과 응용 (I),(II)," 하이테크 정보, 1992  
 [2] 이수영, "신경회로망의 VLSI 구현," 전자공학회지, 제 18 권 제 10호, pp.750-756, 1991



[3] 合原一幸 편저 정호선/여진경 공역, "뇌와 카오스," Ohm사, 1998

[4] 이익수, 여진경, 이경훈, 여지환, 정호선, "카오스 뉴론회로의 구현 및 상호연결에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제 33권 B편 제 2호, pp.131-139, 1996

[5] K. Aihara, T. Takbe, and M. Toyoda, "Chaotic neural networks," *Phys. Lett. A*, vol.144, no.6, pp.333-340, 1990.

[6] Y. Horio and K. Suyama, "Switched-capacitor chaotic neuron for chaotic neural networks," *in Proc. Int. Symp. IEEE ISCAS '93*, pp.1018-1021, 1993.

[7] J.E.Varrientos, "CMOS circuit design of current-mode nonlinear analog signal processing systems(Chaotic Oscillators)," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1997

[8] Charles C. Hsu, et al., "Chaotic Neuron Model and Their VLSI Circuit Implementations," *trans. Neural Networks*, vol.7, no.6, pp.1339-1350, 1996.

[9] Y. Horio and K. Suyama, "Experimental Verification of Signal Transmission Using Synchronized SC Chaotic Neural Networks," *IEEE trans. Circuit and Syst.*, vol.42, no.7, pp.393-395, 1995.

[10] J. M. Zurada, "Introduction to Artificial Neural Systems," PWS Publishing Company 1992.

[11] 송한정 광계달, "전압제어형 카오스회로의 집적 회로 설계 및 구현," 전자공학회 논문지, 제 35권 C편 제 12호, pp.77-84, 1998

[12] G.L.Baker, et al., "Chaotic dynamics an introduction" , Cambridge University Press, 1990

저 자 소 개



宋 漢 廷(正會員)

1963년 2월 2일생, 1986년 2월 한양대학교 전자공학과 공학사, 1988년 2월 한양대학교 대학원 전자공학과 공학석사, 2000년 8월 한양대학교대학원 전자공학과 공학박사 학위취득, 1988년 1월 ~ 1994년 2월 LG반도체

(주) 연구소 선임연구원 근무, 1994년 3월 ~ 현재 홍청대학 전자공학과 조교수, 주관심 분야는 아날로그 집적회로 설계 및 카오스 회로, 반도체 소자 신뢰성 및 Process Integration 등임

郭 桂 達(正會員) 第 34卷 D編 第 7號 參照

한양대학교 전자공학과 교수