

Cubic 비선형 저항에 의한 카오스 발진회로의 스펙트럼

김 남 호*

Spectrums of Chua's Oscillator Circuit with a Cubic Nonlinear Resistor

N. H. Kim

Key words : Chua's oscillator circuit (카오스 발진회로), Bifurcation phenomena (분기현상), Attractor (끌개), Cubic nonlinear resistor (큐빅 비선형 저항)

Abstract

This paper describes implementation and simulation of Chua's oscillator circuits with a cubic nonlinear resistor. The two-terminal nonlinear resistor N_R consists of one Op Amp, two multipliers and five resistors. The Chua's oscillator circuit is implemented with analog electronic devices. Period-1 limit cycle, period-2 limit cycle, period-4 limit cycle and spiral attractor, double-scroll attractor and 2-2 window are observed experimentally from the laboratory model and simulated by computer for the presented model. Comparing the result of experiments and simulations, the spectrums are satisfied.

1. 서 론

오늘날 반도체 기술의 발전으로 컴퓨터의 대중화와 함께 비선형 이론에 발전을 가져오게 되었으며, 특히 70년대 이후 Chaotic 시스템에 대한 관심이 급증하게 되면서 천체물리학, 기상학, 생물학, 화학, 수학, 의학, 사회학, 공학 등을 포함한 과학 전분야에 걸쳐 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 Chaotic 현상은 선형 시스템에서는 존재하지 않으며 비선형 시스템에서만 발견되는 흥미 있는 현상이다. 비선형 시스템에서도 자율동차 시스템에서는 3차이상, 비자율 시스템에서는 2차이

상, discrete-system에서는 차수가 1차이상이면 Chaotic 현상이 발생한다. 이러한 현상을 증명하는 대표적인 것으로 Chua 발진회로가 있다.

Chua 발진회로는 매우 단순한 자율 3차계 시스템이며, 1개의 비선형 소자와 4개의 선형 소자로 구성된 회로이다. Chua 회로의 카오스 어트랙터는 Matsumoto가 컴퓨터 시뮬레이션으로 제시하였으며^{1,2)}, 제시된 Chua 회로의 비선형 저항은 실제 회로 구성 및 시뮬레이션에 있어 시스템을 발산시키는 초기조건이 존재하는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 실험적 모델로 Cubic 비선형 저항을 사용하여 Chua 회로를 구현하였으며, 이 발진회로의 특성을 확인하기 위해 파라메터

* 부경대학교 공과대학 제어계측공학과(원고접수일 : 98년 6월)

변화시 v_{C1} 의 전압파형, $v_{C1} - v_{C2}$ 및 v_{C1} 의 power spectral density를 측정하였다. 또한 이 실험적 모델을 기초로 하여 컴퓨터로 시뮬레이션하였다. 그 결과 분기현상(bifurcation phenomena)인 1주기, 2주기, 4주기의 주기 배증 과정 및 spiral 어트랙터, double - scroll 어트랙터, 주기성 윈도우를 확인하였으며, 각각의 power spectral density는 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하였다. 특히 spiral, double - scroll 어트랙터의 power spectral density는 기준주파수 부근에서 확산됨을 확인하였다.

2. Cubic 비선형 저항에 의한 카오스 발진회로

Matsumoto에 의해 제안된 Chua 발진회로는 그림 1과 같으며, 상태방정식은 다음과 같이 표현된다."

$$\begin{aligned} \frac{dv_{c1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} \{G(v_{c2} - v_{c1}) - f(v_{c1})\} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} &= \frac{1}{C_2} \{G(v_{c1} - v_{c2}) + i_L\} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L} (v_{c2} - R_o i_L) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 G 는 $1/R$ 이고, R_o 는 코일의 저항이며, $f(v_{C1})$ 은 구분 선형 함수(piecewise - linear function)이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(v_{c1}) &= i_R = G_b v_{c1} \\ &+ \frac{1}{2}(G_a - G_b)(|v_{c1} + E| - |v_{c1} - E|) \end{aligned} \quad (2)$$

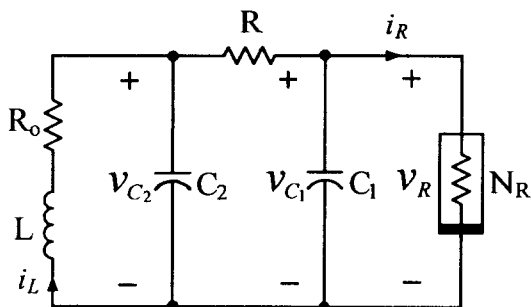


Fig. 1 Chua's Oscillator.

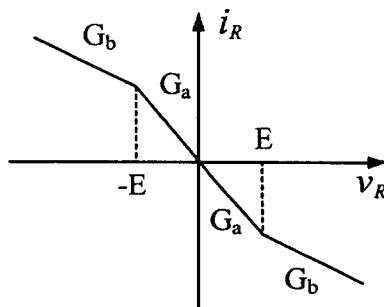


Fig. 2 Typical v - i characteristic of Chua's diode.

여기서 G_a 는 내부 영역의 기울기, G_b 는 외부 영역의 기울기, $\pm E$ 는 Break - point이다.

전형적인 비선형 저항(N_R)의 $v - i$ 특성은 그림 2와 같다.

2.1 Cubic 다항식에 의한 비선형 저항

잘알려진 Chua 회로는 3 구분 선형 저항으로 구성되며¹⁴⁾, 콘덴서의 충전전압과 전력이 증가하여 실제 회로를 구성하는데 다소 문제점이 있고, 또한 시뮬레이션에서 시스템을 발산시키는 초기조건이 존재하므로, 본 논문에서는 Cubic 다항식에 의한 비선형 저항을 사용하여 이 문제를 해결하였다. Cubic 다항식을 실현하는 기본적인 회로는 그림 3과 같이 귀환루프를 가진 승산기로 구성되며, 이 회로의 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W &= \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{S_F} + Z \\ &= \frac{V_1 V_2}{S_F} + V_o \end{aligned} \quad (3)$$

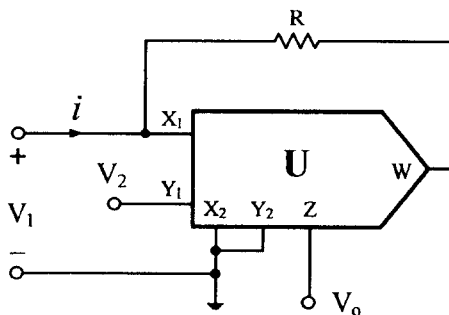


Fig. 3 The multiplier circuit with a feedback loop.

여기서 S_F 는 승산기의 scale factor이며, V_o 는 직류전압이다.

그림 3에서 Kirchhoff's 전압 법칙을 적용하여 전류를 구하면 다음과 같이 된다.

$$i = \frac{1}{R} (V_1 - \frac{V_1 V_2}{S_F} - V_o) \quad (4)$$

여기서 $V_2 = V_1$ 일 때의 전류를 i_1 이라 하고, $V_2 = V_1^2$ 일 때의 전류를 i_2 라 하면 그 값은 다음과 같다.

$$i_1 = \frac{1}{R} (V_1 - \frac{V_1^2}{S_F} - V_o) \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{1}{R} (V_1 - \frac{V_1^3}{S_F} - V_o) \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 더해서 Cubic 다항식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$i = i_1 + i_2 = a_0 + aV_1 + bV_1^2 + cV_1^3 \quad (7)$$

여기서 a_0, a, b, c 는 Cubic 다항식의 계수이며, 다음과 같다.

$$a_0 = -\frac{2V_o}{R}$$

$$b = \frac{2}{R}$$

$$c = -\frac{1}{R} \frac{1}{S_F}$$

$$c = -\frac{1}{R} \frac{1}{S_F} \quad (8)$$

그러므로, Cubic 다항식에 의한 비선형 저항은 그림 4와 같이 구성할 수 있으며, R_1 및 R_2 를 가변하여, Cubic 다항식의 계수인 a_0, a, b, c 를 변화시킬 수 있다.

3.2 Cubic 다항식에 의한 비선형 저항의 구현

Chua 회로에서 비선형 저항의 $v-i$ 특성은 기수대칭 함수이므로, 식(7)의 Cubic 다항식에서 $a_0 = 0, a < 0, b = 0, c > 0$ 로 되어야 한다. 따라서 Chua 회로의 비선형 저항의 방정식은 다음과 같다.

$$f(v_{C1}) = i_R = av_{C1} + cv_{C1}^3 \quad (9)$$

여기서 v_{C1} 은 V_R 과 같다.

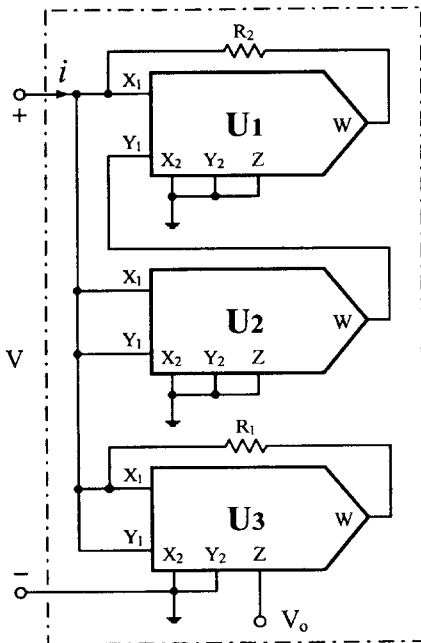


Fig. 4 An implementation of Chua's diode N_R with a cubic nonlinearity.

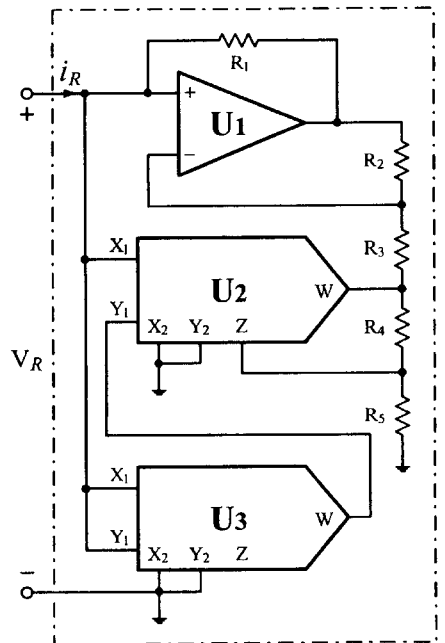


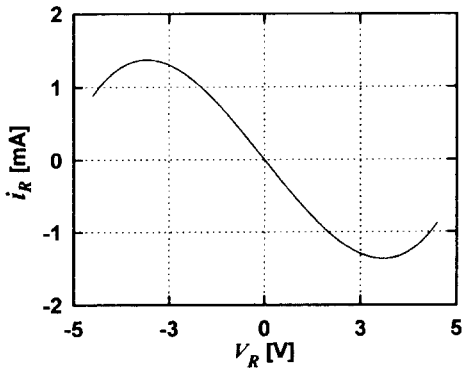
Fig. 5 Practical implementation of Chua's diode N_R with a cubic nonlinearity.

Cubic 다항식에 의한 비선형 저항은 식(9)를 기초로 하여 1개의 연산증폭기와 2개의 승산기 및 5개의 저항으로 그림 5와 같이 구성할 수 있다.

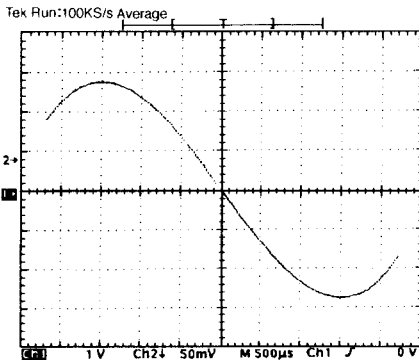
그림 5에서 비선형 저항의 $v-i$ 특성을 구하면 다음과 같다.

$$f(v_{C1}) = \frac{R_2}{R_1 R_3} v_{C1} + \frac{R_4 + R_5}{R_3 R_4} \frac{1}{S_F^2} v_{C1}^3 = a v_{C1} + c v_{C1}^3 \quad (10)$$

본 실험에서는 $a = -667.308[\mu\Omega]$, $c = 23.31[\mu\Omega/V^2]$ 로 하여 비선형 저항회로를 구현하였다. 그리고 식(9)의 Cubic 다항식에 a 와 c 를 대입하여 $v-i$ 특성을 계산한 결과를 그림 5(a)에 나타내었다. 그림 5(b)는 구현한 비선형 저항의 $v-i$ 특성을 측정 한 결과이다.



(a) Calculated.



(b) Measured.

Fig. 6 $v-i$ characteristic of Chua's diode N_R with a cubic nonlinearity.

4. 카오스 발진회로의 구현

카오스 발진회로는 실험적 모델로 그림 5의 Cubic 비선형 저항을 사용하여 그림 1과 같이 구현하였고, 사용된 부품은 다음과 같다.

$$C_1 = 5 [nF], C_2 = 48 [nF] \\ L = 12 [mH], R_o = 36.8 [\Omega]$$

그리고 R 은 $2000[\Omega]$ 의 포텐쇼메터를 사용하였다.

구현한 회로의 성능을 평가하기 위해, 파라미터 (R)를 $2000[\Omega]$ 에서 $0[\Omega]$ 방향으로 가변하면서, v_{C1} 의 전압파형 및 $v_{C1} - v_{C2}$ 의 특성을 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS320)로 관측하였으며, 그때 v_{C1} 의 power spectral density는 측정의 정도를 향상하기 위해 Hanning window를 취하여, 스펙트럼분석기(Advantest R9211A)로 측정하였다.

그 결과, 파라미터가 $1651.7[\Omega]$, $1638.3[\Omega]$, $1630.6[\Omega]$ 일 때 바이퍼케이션 현상인 1주기, 2주기, 4주기의 주기 배증 과정을 확인하였으며, 또한 파라미터가 $1628.6[\Omega]$, $1599.7[\Omega]$, $1565.1[\Omega]$ 일 때 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 윈도우를 확인하였다. 그리고 그림 7(a), 8(a), 9(a)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 10(a), 11(a), 12(a)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 윈도우일 때의 v_{C1} 의 전압파형을 측정 한 것이고, 그림 7(b), 8(b), 9(b)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 10(b), 11(b), 12(b)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 윈도우일 때의 $v_{C1} - v_{C2}$ 의 특성을 측정 한 것이며, 그림 7(c), 8(c), 9(c)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 10(c), 11(c), 12(c)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 윈도우일 때의 v_{C1} 의 power spectral density를 측정 한 것이다.

4. 카오스 발진회로의 시뮬레이션 결과 및 고찰

실험적 모델을 기초로 하여, 식(9)의 Cubic 다항식에 의한 비선형 저항을 사용하여, 그림 1과 같은 카오스 발진회로를 구성하여, 식(1)의 상태방정식

을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 초기 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{C1}(0) &= 0.25 \\ v_{C2}(0) &= 1.0E-3 \\ i_L(0) &= 1.0E-6 \end{aligned}$$

그리고 비선형 저항 및 각 부품의 파라미터를 다음과 같이 하였다.

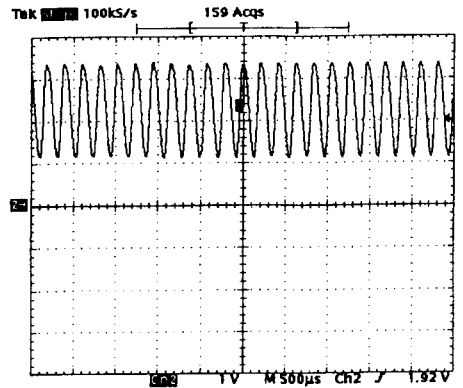
$$\begin{aligned} a &= -667.308[\mu R/s] \\ c &= 23.31[\mu C/s] \\ C_1 &= 5.047[nF], C_2 = 48.221[nF] \\ L &= 12.136[mH], R_0 = 36.8[\Omega] \end{aligned}$$

제시한 회로의 시뮬레이션은 파라미터(R)를 2000[Ω]에서 0[Ω] 방향으로 변화시키면서, v_{C1} 의 전압파형 및 $v_{C1} - v_{C2}$ 의 특성을 시뮬레이션하였고, 그 때의 power spectral density는 v_{C1} 의 전압에, white gaussian noise(평균이 0이고, $\sigma^2 = 0.12$)를 첨가한 후, Hanning window를 취하여¹³⁾, 8192 point의 푸리에 변환(FFT)하여 시뮬레이션하였다.

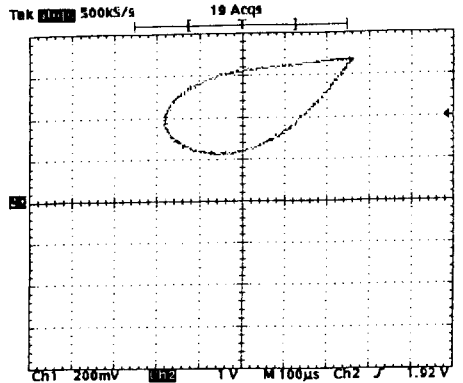
그 결과, 파라미터가 1820[Ω], 1788[Ω], 1778[Ω]일 때 바이퍼케이션 현상인 1주기, 2주기 4주기의 주기 배증 과정을 확인하였으며, 또한 1773[Ω], 1710[Ω], 1640[Ω]일 때 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 원도우를 확인하였다.

그리고 그림 13(a), 14(a), 15(a)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 16(a), 17(a), 18(a)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 원도우일 때의 v_{C1} 의 전압파형을 시뮬레이션한 것이고, 그림 13(b), 14(b), 15(b)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 16(b), 17(b), 18(b)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 원도우일 때의 $v_{C1} - v_{C2}$ 의 특성을 시뮬레이션한 것이며, 그림 13(c), 14(c), 15(c)는 1주기, 2주기, 4주기운동, 그림 16(c), 17(c), 18(c)는 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 2-2 원도우일 때의 v_{C1} 의 power spectral density를 시뮬레이션한 결과이다.

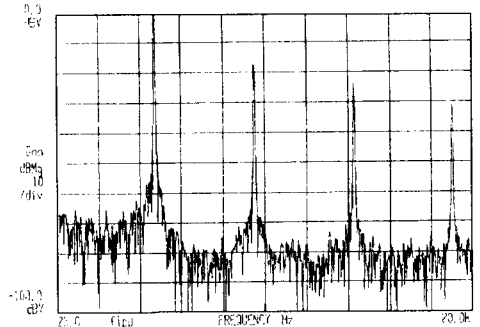
특히 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터의 power spectral density는 그림 16(c), 그림 17(c)와 같으며, 여기서 power spectral density는



(a) Time waveform of v_{C1} .
(Vertical axis v_{C1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t, scale: 500 μ S/div.)

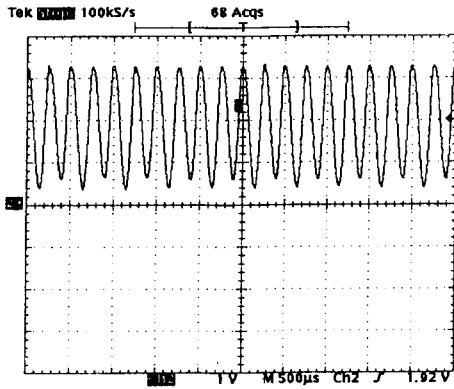


(b) Phase portraits in the $v_{C1} - v_{C2}$.
(Vertical axis v_{C1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C2} , scale: 200 mV/div.)

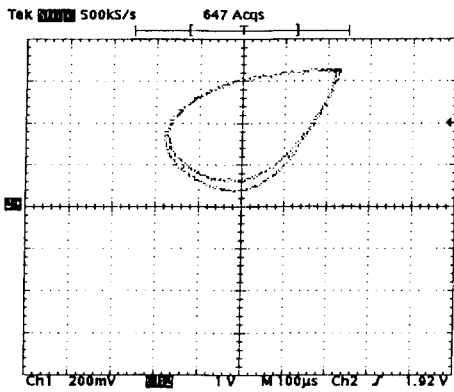


(c) Power spectral density of v_{C1} .

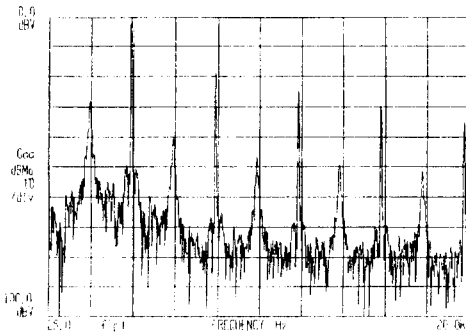
Fig. 7. Measured period - 1 limit cycle.
($R = 1651.7[\Omega]$)



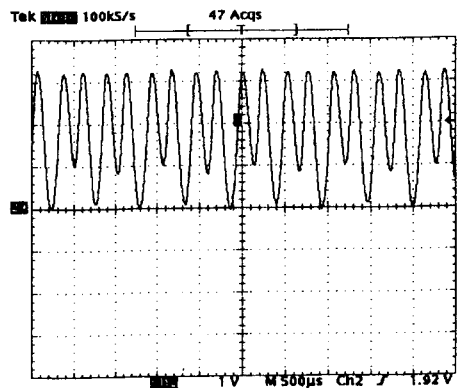
(a) Time waveform of v_{C_1} .
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t, scale: 500 μ S/div.)



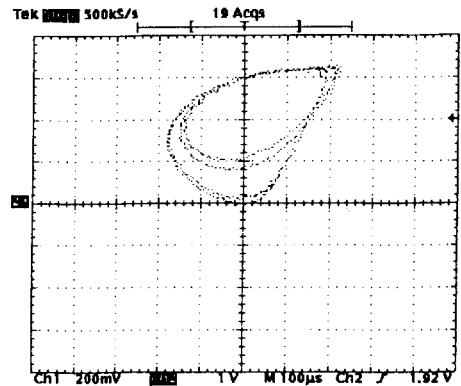
(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C_2} , scale: 200 mV/div.)



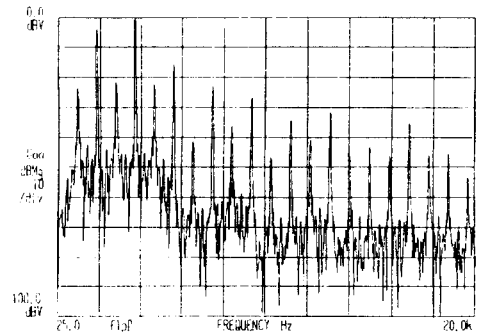
(c) Power spectral density of v_{C_1} .



(a) Time waveform of v_{C_1} .
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t, scale: 500 μ S/div.)



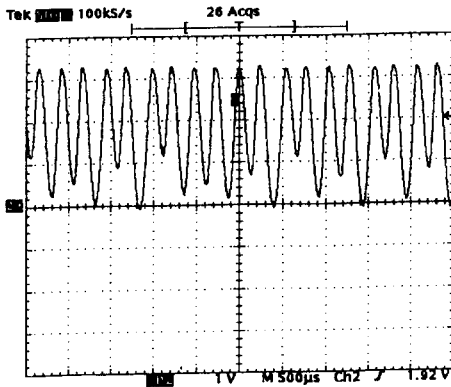
(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C_2} , scale: 200 mV/div.)



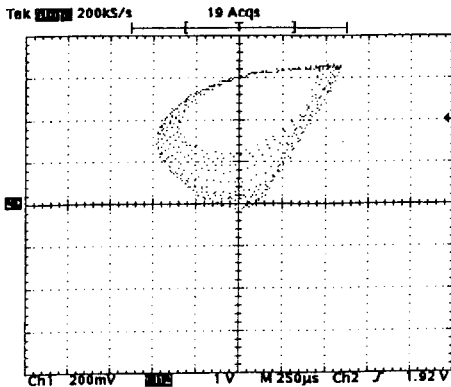
(c) Power spectral density of v_{C_1} .

Fig. 8. Measured period - 2 limit cycle.
($R = 1638.3[\Omega]$)

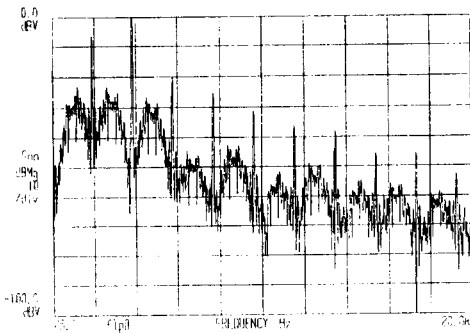
Fig. 9. Measured period - 4 limit cycle.
($R = 1630.6[\Omega]$)



(a) Time waveform of v_{C_1} .
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t, scale: 500 μ S/div.)

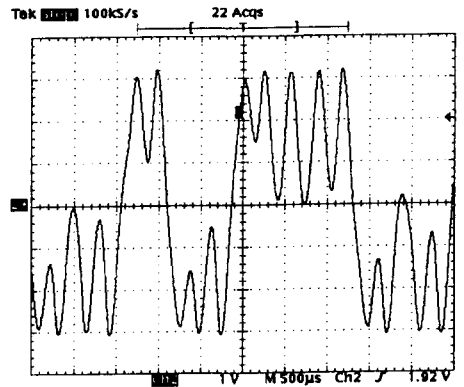


(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C_2} , scale: 200 mV/div.)

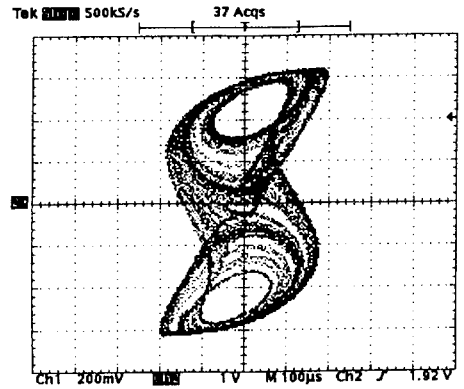


(c) Power spectral density of v_{C_1} .

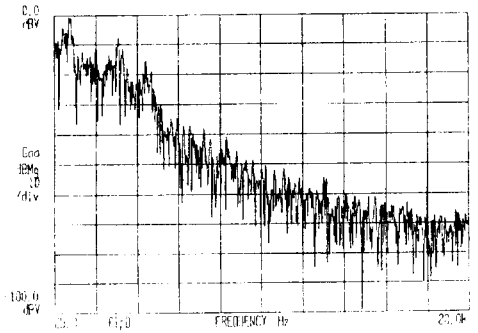
Fig. 10 Measured spiral Chua's attractor.
($R=1628.6[\Omega]$)



(a) Time waveform of v_{C_1} .
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t, scale: 500 μ S/div.)

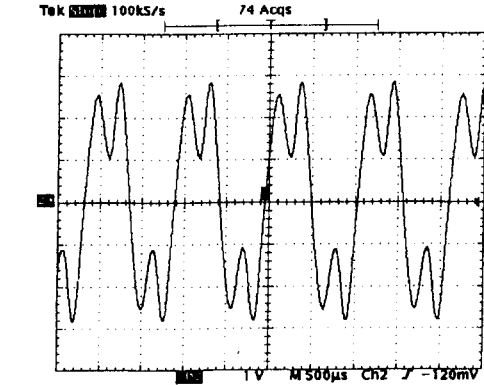


(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C_2} , scale: 200 mV/div.)

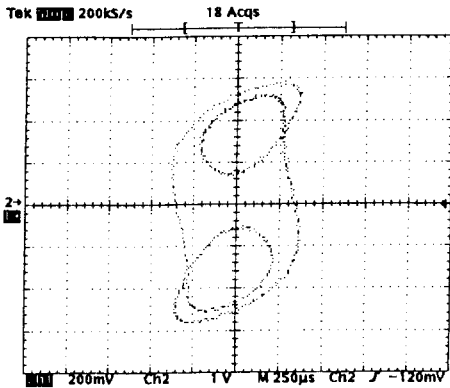


(c) Power spectral density of v_{C_1} .

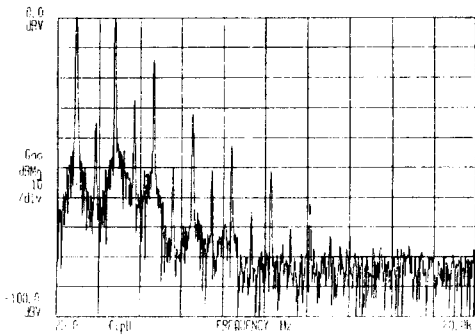
Fig. 11 Measured double - scroll Chua's attractor.
($R=1599.7[\Omega]$)



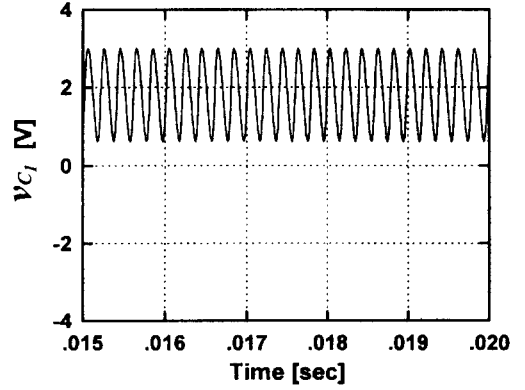
(a) Time waveform of v_{C_1} .
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis t , scale: 500 μ S/div.)



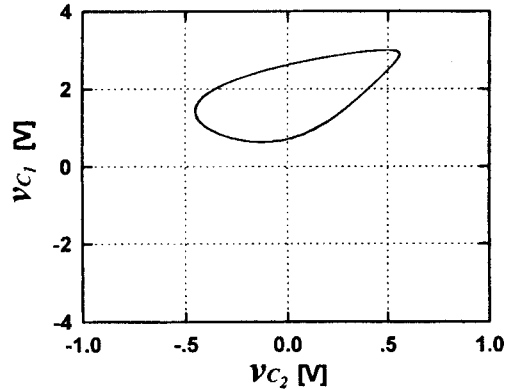
(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.
(Vertical axis v_{C_1} , scale: 1 V/div.
Horizontal axis v_{C_2} , scale: 200 mV/div.)



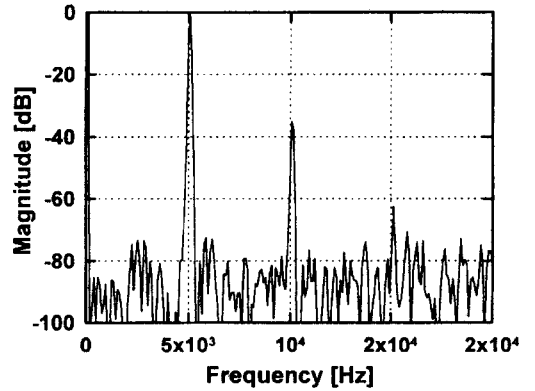
(c) Power spectral density of v_{C_1} .



(a) Time waveform of v_{C_1} .



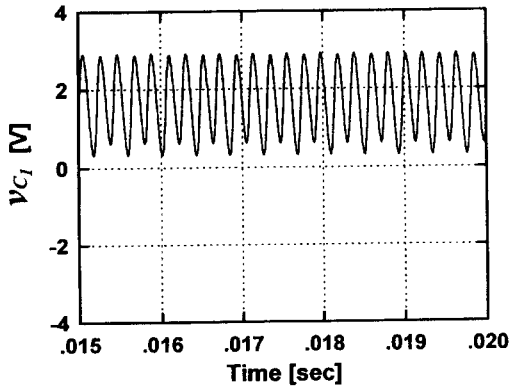
(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.



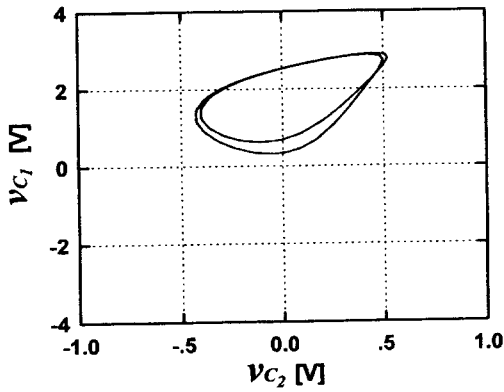
(c) Power spectral density of v_{C_1} .

Fig. 12 Measured 2 – 2 window.
($R=1565.1[\Omega]$)

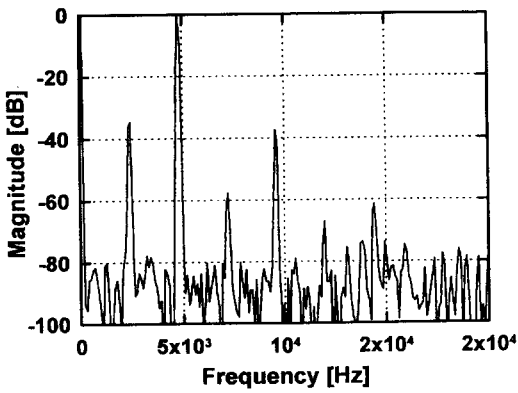
Fig. 13 Simulated period – 1 limit cycle.
($R=1820[\Omega]$)



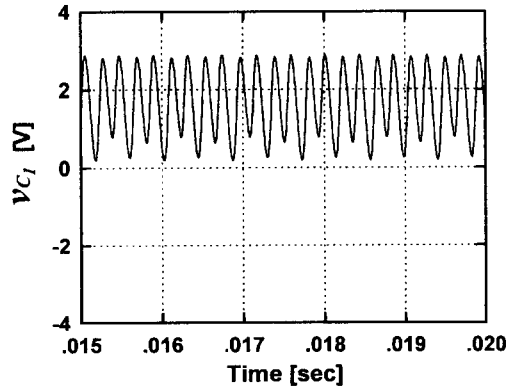
(a) Time waveform of v_{C_1} .



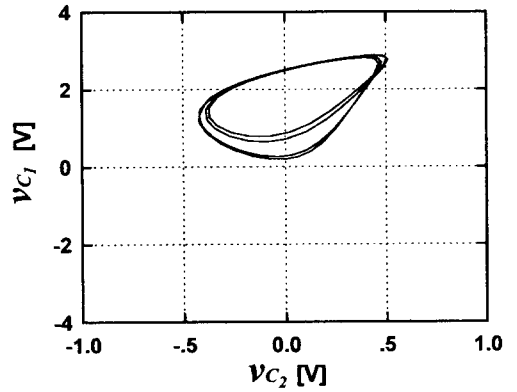
(b) Phase portraits in the $v_{C_1}-v_{C_2}$.



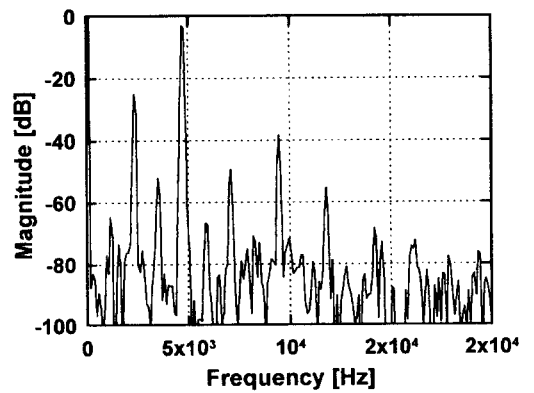
(c) Power spectral density of v_{C_1} .



(a) Time waveform of v_{C_1} .



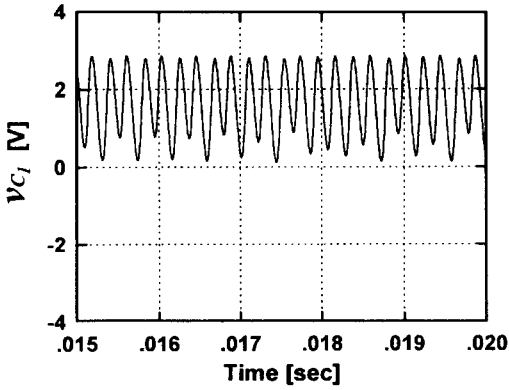
(b) Phase portraits in the $v_{C_1}-v_{C_2}$.



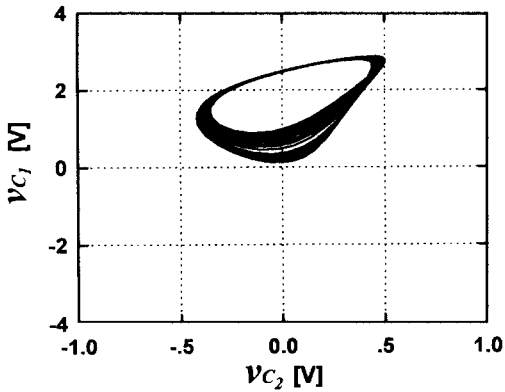
(c) Power spectral density of v_{C_1} .

Fig. 14 Simulated period - 2 limit cycle.
(R= 1788[Ω])

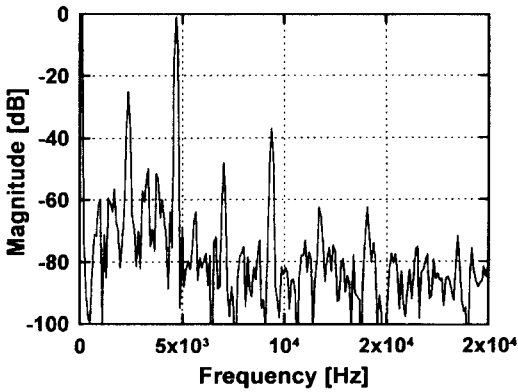
Fig. 15 Simulated period - 4 limit cycle.
(R= 1778[Ω])



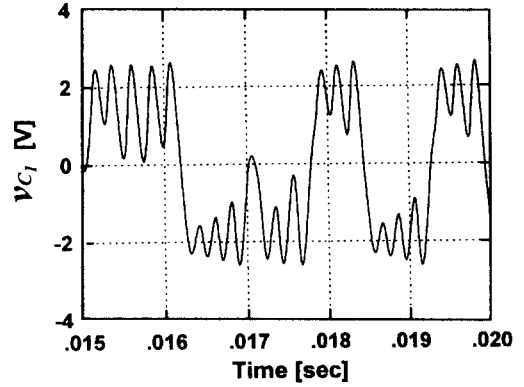
(a) Time waveform of v_{C_1} .



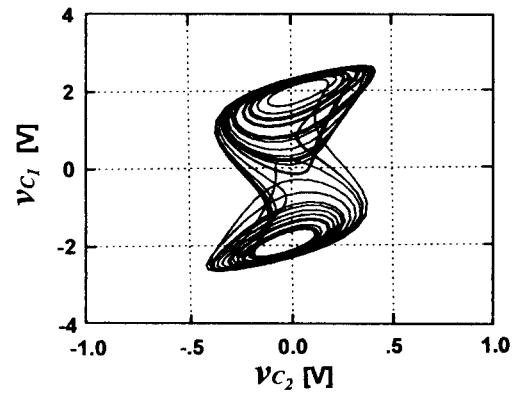
(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.



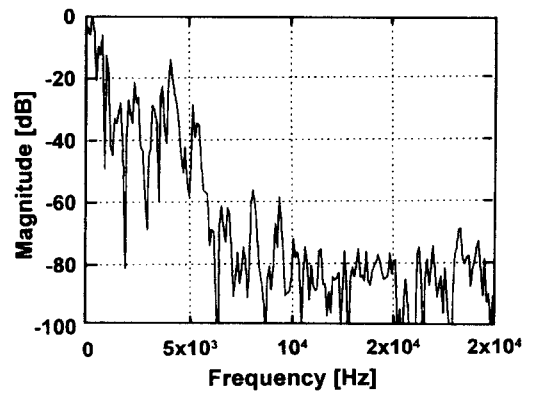
(c) Power spectral density of v_{C_1} .



(a) Time waveform of v_{C_1} .



(b) Phase portraits in the $v_{C_1} - v_{C_2}$.



(c) Power spectral density of v_{C_1} .

Fig. 16 Simulated spiral Chua's attractor.
($R = 1773[\Omega]$)

Fig. 17 Simulated double-scroll Chua's attractor.
($R = 1710[\Omega]$)

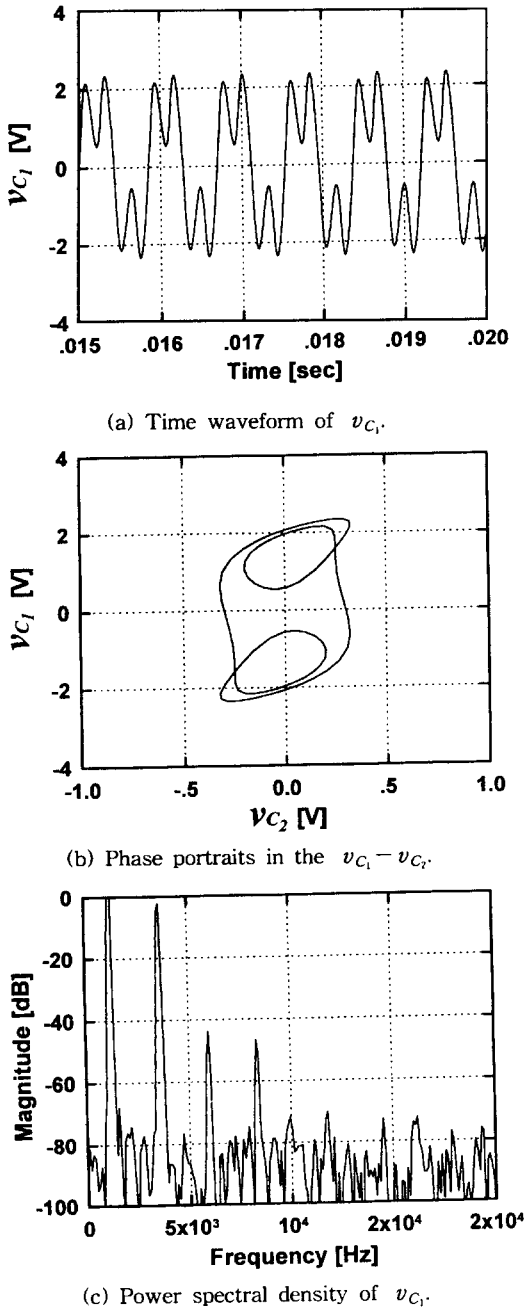


Fig. 18. Simulated 2-2 window.
(R= 1640[Ω])

기준주파수 부근에서 확산됨을 확인하였다.

5. 결 론

Chua 회로의 카오스 어트랙터는 Matsumoto가 컴퓨터 시뮬레이션으로 제시하였지만, 제시된 Chua 회로의 비선형 저항은 실제 회로 구성 및 시뮬레이션에 있어 시스템을 발산시키는 초기조건이 존재하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 실험적 모델로 Cubic 비선형 저항을 1개의 연산증폭기와 2개의 승산기 및 5개의 저항으로 비선형 저항을 구성하여, Chua 발진회로를 구현할 수 있었으며, 이 발진회로의 특성을 확인하기 위해 파라미터 변화시 v_{C1} 의 전압파형과 $v_{C1} - v_{C2}$ 의 특성 및 v_{C1} 의 power spectral density를 측정하였다. 또한 이 실험적 모델을 기초로 하여 컴퓨터로 시뮬레이션을 하였다. 그 결과 분기현상인 1, 2, 4주기의 주기 배증 과정 및 spiral 어트랙터, double-scroll 어트랙터, 주기성 윈도우를 확인하였으며, 구현한 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하였다. 특히 spiral, double-scroll 어트랙터의 power spectral density는 기준주파수 부근에서 확산됨을 확인하였다. 이 Chua 발진회로는 비화 통신 시스템 등에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구논문은 1996년도 부경대학교 기성회 연구비지원으로 연구되었습.

참고문헌

- 1) T. Matsumoto, "A Chaotic Attractor from Chua's Circuit", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-31, no. 12, pp. 1055 - 1058, 1984.
- 2) T. Matsumoto, L. O. Chua, and M. Komuro, "The Double Scroll", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-34, pp. 797 - 818, 1985.
- 3) M. J. OgorZalek, "Chaotic Regions from Double Scroll", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-

- 34, pp. 201 - 203, 1987.
- 4) T. S. Parker, and L. O. Chua, "The Dual Double Scroll Equation", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS - 32, no. 9, pp. 1059 - 1073, 1987.
 - 5) Naohiko Inaba, Shinsaku Mori, "Chaos via Torus Breakdown in a Piecewise Linear Forced Van der Pol Oscillator with a Diode", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 38, no. 4, pp. 398 - 409, 1991.
 - 6) T. L. Carrol and L. M. Pecoro, "Synchronizing Chaotic Circuit", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 38, no. 4, pp. 453 - 456, 1991.
 - 7) Leon O. Chua, Gui nian Lin, "Intermittency in a Piecewise Linear Circuit", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 38, no. 5, pp. 510 - 520, 1991.
 - 8) Robert Lum, Leon O. Chua, "The Identification of General Pseudoreciprocal Vector Fields: IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 39, no. 2, 1992.
 - 9) K. Murali, M. Lakshmanan, "Effect of Sinusoidal Excitation on the Chua's Circuit", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 39, no. 4, pp. 264 - 270, 1992.
 - 10) Fan Zou, Josef A. Nossek, "Bifurcation and Chaos in Cellular Neural Network", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 40, no. 3, pp. 166 - 173, 1993.
 - 11) Herve Dedieu, Michael Peter Kennddy, "Chaos Shift Keying : Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier using Self Synchronizing Chua's Circuit", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 40, no. 10, pp. 634 - 642, 1993.
 - 12) Marco Gotz, Ute Feldmann, Wolfgang Schwarz, "Synthesis of Higher Dimensional Chua Circuits", IEEE Trans. Cricuits Syst. vol. 40. no. 11, pp. 854 - 860, 1993.
 - 13) 김남호 외 1인, "변형된 Hanning Window를 사용한 FIR 디지털 필터에 관한 연구", 부산공업대학교 산업과학기술연구논문집, 제9집, pp. 5 - 11, 1994.
 - 14) 김남호, "5구분 선형 함수에 의한 카오스 발진회로의 스펙트럼", 한국박용기관학회지, 제21권, 제1호, pp. 71 - 81, 1997.

저 자 소 개



김남호(金南鎭)

1984년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업,
1986년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(석사),
1991년 8월 동대학원 전자공학과 졸업(박사),
1992년 3월~현재 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 부교수