

# 손실 전송 선로를 가진 Chua 회로에서의 카오스 비밀 통신에 관한 연구

정회원 배영철\*, 고재호\*\*, 유창원\*\*, 홍대승\*\*, 임화영\*\*\*

## A Study on Chaotic Secure Communication of Chua's Circuit with Lossy Transmission Line

Young Chul Bae\*, Jae-Ho Ko\*\*, Chang-Wan Ryu\*\*, Dae-Seung Hong\*\*, Hwa-Yeong Yim\*\*\*  
Regular Members

### 요약

본 논문에서는 손실 전송선로를 가진 Chua 회로에서의 카오스 동기화 방법 및 비밀 통신 방법에 대하여 연구하였다. 두 개의 동일한 Chua 회로에 전송 선로를 두어 손실 전송선로를 구성한 후 송신부와 전송선로 사이는 구동 결합 동기 이론을, 전송선로와 수신부 사이는 결합 동기 이론을 적용한 동기화 방법을 제시하였으며, 이 동기화된 회로에 비밀 통신 방법을 적용하여 송신부에서 가산기에 의한 정보 신호와 카오스 신호를 합성하고 수신부에서 정보 신호와 카오스 신호를 분리하는 복조 방법을 제시하였으며, 선로 중간에서 정보 신호를 도청한 것과 수신부에서 복원된 신호를 비교하여 비밀 통신의 성능을 검증하였다. 또한 송수신부의 각각의 파라미터(키신호)가 불일치하는 경우의 복조 성능을 알아보았다.

### ABSTRACT

In this paper, a transmitter and a receiver using two identical Chua's circuits are proposed and a wire secure communications are investigated.

A secure communication method in which the desired information signal is synthesized with the chaos signal created by the Chua's circuit is proposed and information signal is demodulated also using the Chua's circuit.

The proposed method is synthesizing the desired information with the chaos circuit by adding the information signal to the chaos signal in the wire transmission system.

After transmitting the synthesized signal through the wire transmission system, it is confirmed the feasibility of the secure communication from result of demodulated signals and recovered wire tapped signals.

### I. 서론

최근에 카오스 현상에 대한 관심이 물리학, 화학, 생물학, 의학 및 공학 등에서 높아지고 있으며 이에 대한 응용이 활발하게 진행되고 있다.<sup>[1-5]</sup> 또한 간단한 전기 및 전자 회로를 구성하여 카오스를 생성

하는 논문이 다수 발표되고 있으며<sup>[6-8]</sup> 이를 대표하는 것으로 Chua 회로를 들 수 있다.<sup>[9-10]</sup>

Chua 회로는 매우 단순한 자율 3차계 시스템으로 가역적(reciprocal)이며 1개의 비선형 소자인 3구분 선형 저항(3-segment piecewise-linear resistor)과

\* 여수 대학교 전기 및 반도체 공학과

\*\* 광운 대학교 제어계측 공학과

\*\*\* 광운 대학교 제어계측 공학과, 광운대 신기술 연구소

논문번호 : 98462-1020, 접수일자 : 1998년 10월 20일

4개의 선형 소자 ( $R, L, C_1, C_2$ )로 구성되는 발진 회로이다.

카오스 비밀 통신을 위해서는 카오스 동기화가 선행되어야 하며 Chua 회로를 이용하여 카오스 동기화를 구현하고자 하는 노력이 계속되고 있으며 몇몇 관심있는 발표도 나오고 있다.<sup>[11-14]</sup>

카오스 동기화 방법은 결합 동기 이론<sup>[13]</sup>, 구동 동기 이론<sup>[11]</sup>이 제시되어 있으나 결합 동기의 경우 단순히 결합 저항을 연결하여 동기화를 이루며 구동 동기 이론은 구동부(송신부)와 응답부(수신부)가 안정하지 않으면 구동이 되지 않고 실제 전송 선로에 적용하기 어려운 문제점이 있으며 비밀 통신 연구로는 카오스 신호에 정보 신호를 합성하는 방법이 제시되어 있으나 이는 정보 신호가 카오스 신호에 비하여 매우 작아야하며, 전송 선로의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 유선 선로의 동기화 및 비밀 통신에 쉽게 적용할 수 있는 손실 전송 선로를 가진 회로의 동기화 방법을 구동-결합 동기와 결합 동기 방식을 써서 새로이 제시하고 Pspice로 구현해 보았다.

본 논문에서는 손실 전송 선로를 대상으로 가산기를 이용하여 정보 신호와 카오스 신호를 합성하였으며 Chua 회로의 파라미터  $C_1, C_2, L, G, m_0, m_1$ 를 키값으로 카오스 신호를 송신부에서 수신부로 전송하고 수신부에서 정보 신호와 카오스 신호를 분리하는 복조 방법을 제시하였다. 또한 비밀 통신의 안정성 확인을 위해 선로 중간에서 도청한 경우와 송수신부의 미소한 파라미터 변화에 의한 복조 결과를 비교하여 파라미터 불일치(키값 불일치)에 의한 비밀 통신의 안정성을 평가하였다.

II. Chua 회로(9)

저항, 콘덴서, 인덕터로 구성된 자율 회로(autonomous circuit)가 카오스 현상을 나타내기 위해서는 적어도 하나의 비선형 소자와 하나의 국소적 능동(locally active) 저항 및 3개의 에너지 저장 소자를 가져야 한다.<sup>[9]</sup> Chua 회로는 이 조건을 만족하는 가장 간단한 회로이다.

Chua 회로는 매우 단순한 자율, 3차계 시스템으로 가역성(reciprocal)의 성질을 가지며 1개의 비선형 소자인 3구분 선형 저항(3-segment piecewise-linear resistor) 과 4개의 선형소자( $R, L, C_1, C_2$ )

로 구성되는 발진회로이다.

Matsumoto에 의해 제안된 Chua 회로<sup>[9]</sup>를 그림1에 나타냈으며 상태방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

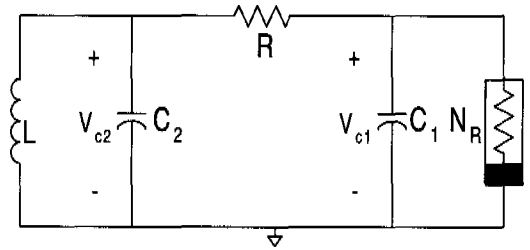


그림 1. Chua 회로

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dv_{c_1}}{dt} &= G(v_{c_1} - v_{c_2}) - g(v_R) \\
 C_2 \frac{dv_{c_2}}{dt} &= G(v_{c_1} - v_{c_2}) + i_L \\
 L \frac{di_L}{dt} &= -v_{c_2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서  $v_{c_1}, v_{c_2}$ 는 각각 콘덴서  $C_1, C_2$ 의 양단 전압,  $i_L$ 은 인덕터  $L$ 에 흐르는 전류,  $G=1/R$ ,  $g(\cdot)$ 는 비선형 저항으로써 식 2와 같이 표현되는 3구분 선형 함수(3-segment piecewise-linear function)이며 그림 2에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 g(v_R) &= m_0 v_R + \frac{1}{2} (m_1 - m_0) \\
 &\quad * [|v_R + B_p| - |v_R - B_p|]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서  $m_0$ 는 외부 영역의 기울기,  $m_1$ 은 내부 영역의 기울기,  $\pm B_p$ 는 break-point이다.

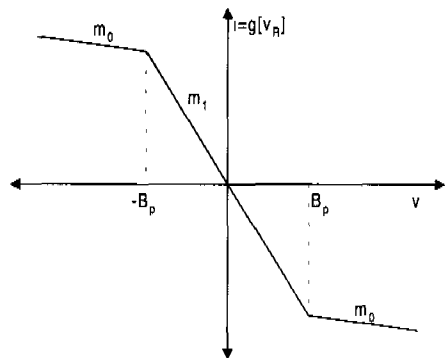


그림 2. 비선형 저항 특성

### III. 손실 전송선로를 가진 Chua 회로에서의 카오스 비밀 통신

카오스 신호에 정보 신호를 합성하여 송신하는 카오스 비밀 통신은 복조가 어려워 높은 보안성을 유지할 수 있어서 그 필요성이 증대되고 있다<sup>[3]</sup>. 이것은 송신부에서 잡음과 같은 불규칙한 카오스 신호에 정보 신호를 실어서 보내고 수신부에서 정보 신호를 분리하는 통신 방법이다. 정보신호가 카오스 신호보다 월등히 큰 경우가 아니면 통신 신호는 카오스 신호가 주류를 이룰 것이며 일반적인 필터링이나 복조 방법으로 정보 신호 분리가 불가능하므로 수준 높은 비밀 통신 수단이 될 수 있다.

이러한 비밀 통신 연구로 카오스 신호에 정보 신호를 합성하는 방법<sup>[45]</sup>이 제시되었으나 정현파 정보 신호를 인가하고 있어서 특정 주파수 특성에 한정되어 있으며 정보신호가 카오스 신호에 비하여 너무 작고 전송선로의 영향을 고려하지 않고 있어서 활용화에 미흡한 점이 있다.

분포정수를 가진 유선 선로의 통신에서의 카오스 비밀 통신 회로를 그림 3에 나타내었다. 송신부에서 카오스 신호와 정보 신호의 합성은 가산기를 이용하였으며 선로 중간에 신호 도청을 가정하고 이로 인한 수신 신호의 크기를 보상하기 위한 증폭 회로로 구성하였다. 송신부와 손실 전송선로는 구동 결합 동기 방법을, 손실 전송선로와 수신부는 결합 동기 방법을 써서 동기화를 이루었으며 수신부에서 결합 저항과 병렬로 콘덴서를 연결하여 불필요 신호를 제거하는 회로를 구성하였다.

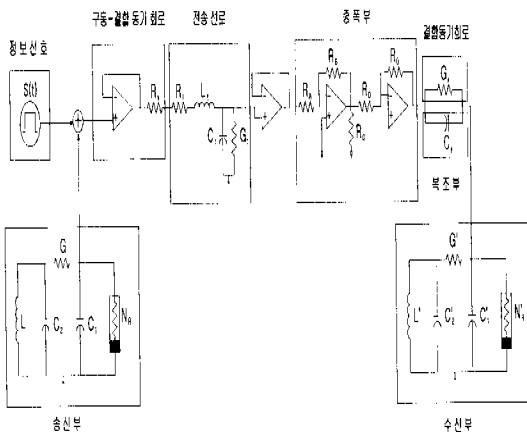


그림 3. 유선 선로의 카오스 비밀 통신 회로

그림 3 회로의 상태 방정식은 다음과 같다.

송신부의 상태 방정식

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{c_1}}{dt} &= G(v_{c_2} - v_{c_1}) - g(v_{c_1}) \\ C_2 \frac{dv_{c_2}}{dt} &= G(v_{c_1} - v_{c_2}) + i_i \\ L \frac{di_L}{dt} &= -v_{c_1} \end{aligned} \quad (3)$$

손실 전송선로의 상태방정식

$$\begin{aligned} L_t \frac{di_{L_t}}{dt} &= v_{c_1} - (R_t + R_x)i_{L_t} - v_{c_1} + S(t) \\ C_t \frac{dv_{c_t}}{dt} &= i_{L_t} - (G_0 + G_d)v_{c_t} \end{aligned} \quad (4)$$

증폭부 및 결합 저항부의 상태방정식

$$\begin{aligned} C_y \frac{dv_{c_y}}{dt} &= -\frac{R_B}{R_A R_D} v_{c_t} - G_y v_{c_y} \\ C_1 \frac{dv_{c_1'}}{dt} &= G(v_{c_2'} - v_{c_1'}) - g(v_{c_1'}) - \frac{R_B}{R_A R_D} v_{c_t} \end{aligned} \quad (5)$$

수신부의 상태방정식

$$\begin{aligned} C_1' \frac{dv_{c_1'}}{dt} &= G'(v_{c_2'} - v_{c_1'}) - g'(v_{c_1}') + G_y(v_{c_t} - v_{c_1}') \\ C_2' \frac{dv_{c_2'}}{dt} &= G'(v_{c_1'} - v_{c_2}') + i_L' \\ L' \frac{di_{L'}}{dt} &= -v_{c_2'} \end{aligned} \quad (6)$$

$v_x = v_{c_1} - v_{c_1'}$ ,  $v_y = v_{c_2} - v_{c_2'}$ ,  $i_z = i_L - i_{L'}$ 라 정의하고 식(3), 식(4), 식(5), 식(6)에서 차 시스템(Difference System)을 구하면 식(7)과 같이 5차 시스템으로 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_x}{dt} &= G(v_y - v_x) - S_t v_x + G_y(v_{c_1'} - v_{c_1}) \\ C_2 \frac{dv_y}{dt} &= G(v_x - v_y) + i_z \\ L \frac{di_z}{dt} &= -v_y \\ C_t \frac{dv_{c_t}}{dt} &= i_{L_t} + (G_0 + G_d)v_{c_t} \end{aligned} \quad (7)$$

$$L_t \frac{di_{L_t}}{dt} = v_{c_1} - v_{c_1} - (R_x + R_d)i_{L_t} + S(t)$$

식(7)에서 차 시스템은 시간이 지남에 따라 0으로 수렴해가는, 즉  $\lim_{t \rightarrow \infty} |v_x| = \lim_{t \rightarrow \infty} |v_y| = \lim_{t \rightarrow \infty} |i_z| = 0$ 가 되면 동기화가 이루어지는 것이다.

식 (7)을 상태방정식 꼴로 고치고

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{(G+S_i)}{C_1} v_x + \frac{G}{C_1} v_y + \frac{G_y}{C_1} (v_{c_1}' - v_{c_1}) \\ \frac{dv_y}{dt} &= \frac{G}{C_2} v_x - \frac{G}{C_2} v_y + \frac{1}{C_2} i_z \\ \frac{di_z}{dt} &= -\frac{1}{L} v_z \\ \frac{dv_{c_1}}{dt} &= \frac{(G_0+G_d)}{C_t} v_{c_1} + \frac{1}{C_t} i_{L_t} \\ \frac{di_{L_t}}{dt} &= -\frac{R_t+R_x}{L_t} i_{L_t} + \frac{1}{L_t} (v_{c_1} - v_{c_1}) + \frac{1}{L_t} S(t) \end{aligned} \tag{8}$$

간략화하기 위해

$$\begin{aligned} x_5 &= i_{L_t}, \quad u = v_{c_1}' - v_{c_1} \\ x_1 &= v_x, \quad x_2 = v_y, \quad x_3 = i_z, \quad x_4 = v_{c_1}, \quad = v_{c_1} - v_{c_1} \end{aligned}$$

라 놓고 정리하면 식(9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{(G+S_i)}{C_1} x_1 + \frac{G}{C_1} x_2 + \frac{G_y}{C_1} u \\ \dot{x}_2 &= \frac{G}{C_2} x_1 - \frac{G}{C_2} x_2 + \frac{1}{C_2} x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{L} x_2 \\ \dot{x}_4 &= \frac{(G_t+G_0)}{C_t} x_4 + \frac{1}{C_t} x_5 \\ \dot{x}_5 &= -\frac{R_t+R_x}{L_t} x_5 + \frac{1}{L_t} u + \frac{1}{L_t} S(t) \end{aligned} \tag{9}$$

이를 행렬로 나타내면 식(10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(G+S_i)}{C_1} & \frac{G}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{G}{C_2} & -\frac{G}{C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G_t+G_0}{C_t} & \frac{1}{C_t} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_t+R_x+1}{L_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_t} S(t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

식 (10)에  $L, L' = 18mH, R_x = 780\Omega, C_1, C_1' = 10mH, G_y = 0.01\Omega, G_t = 1.5\mu\Omega, C_2, C_2' = 100mH, R_t = 89.7\Omega, R, R' = 1.74K\Omega, L_t = 0.04H$  로 놓고 식(10)의 시스템이 안정하기 위한 조건의 값

$R_x = 780[\Omega], G_y = 0.005[\Omega], C_y = 1[\mu F]$ 으로 구하였으며 정보 신호로는 크기  $-400[mV] \sim +400[mV]$ , 주기  $5[ms]$ 의 구형파를 인가하여 비밀 통신 상태를 비교하였다.

반송파인 송신부의  $v_{c_1}$  전압 파형을 그림 4에 나타내었으며

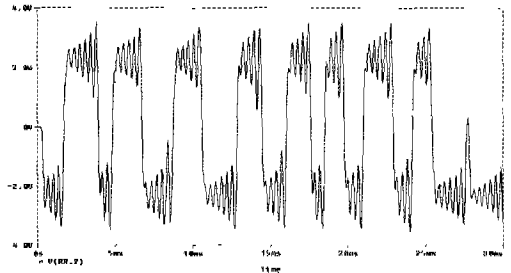


그림 4. 반송파 신호(송신부 신호)

수신부에서 동기화된  $v_{c_1}'$ 의 전압 파형을 그림 5에 나타내었다.

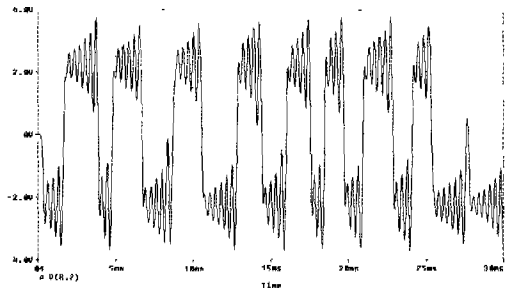


그림 5. 수신부의 카오스 신호

그림 4와 5에서 송신 신호와 수신 신호가 같은 형태를 이루고 있어서 동기화 현상이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 6에 수신단의 결합 저항에 흐르는 전류 신호의 검출에 의해 복조된 결과를 나타내었다. 복조된 신호는 필터링을 하기 전의 신호로 전송선로 특성에 의한 잡음이 있으며 어느 정도 구형파에 가까운 신호를 복원되었음을 알 수 있다.

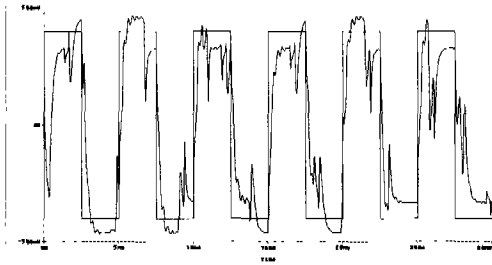


그림 6. 필터링하기 전의 복원 신호

그림 6의 신호를 3[kHz]의 차단 주파수를 가진 저역 통과 필터를 이용하여 필터링한 결과를 그림 7에 나타내었다. 필터링 결과 구형파 형태로 어느 정도 복원 할 수 있었으나 전송선로의 L, C에 의한 동기화의 영향 때문에 복조 성능이 우수하지 않음을 알 수 있다.

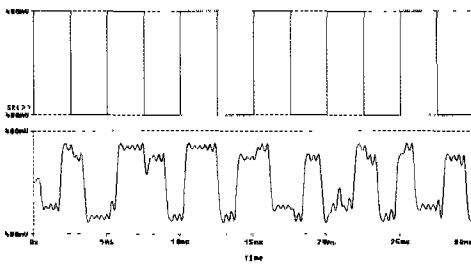


그림 7. 정보 신호와 필터링한 후의 복원 신호

그림 7에서 보는 바와 같이 손실 전송 선로를 이용한 카오스 암호 통신은 전송선로의 L, C에 의한 시간 지연이 있는 동기화 때문에 수신단에서 완전한 정보 신호를 복원할 수 없었으나 신호의 크기와 주파수 제한을 둔 디지털 정보 신호의 비밀 통신에 충분히 적용할 수 있겠다.

#### IV. 카오스 비밀 통신에서의 안전성 검토

##### 4.1 선로 중간에서 도청하였을 때의 안전성

본 연구에서는 선로 중간에서 공격자 또는 침입자가 공격한다는 도청을 가정하여 카오스 신호와 정보 신호가 합성된 신호를 도청하고 이를 필터링 기법으로 필터링하여 정보 신호와 도청된 필터링 신호를 비교함으로써 비밀 통신의 안전성을 확인하였다. 선로 중간에서 도청하여 측정된 신호를 그림

8에 나타내었으며 구형파인 정보 신호와 월등히 다른 모양을 보이고 있어서 도청의 의미가 없음을 알 수 있으며 따라서 안전성이 보장된다.

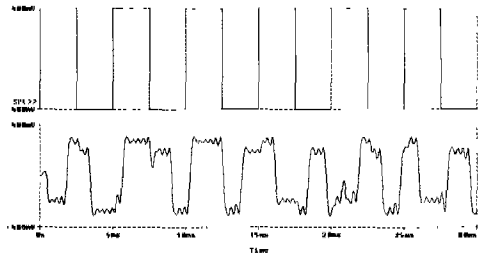


그림 8. 선로 중간에서 도청한 신호

##### 4.2 키 신호(Chua 회로에서 각 소자의 파라미터값) 불일치에 의한 안전성 평가

카오스 회로는 초기치에 민감한 조건 때문에 동일한 2개의 카오스 회로에서 동기화를 이루는 것이 어려운 것으로 알려져 있다.

Chua 회로에서는 파라미터 값이  $C_1, C_2, L, G, m_0, m_1$  을 가지며 두개의 동일한 회로를 구성하여 비밀 통신에 이용하고자 할 때는 이들 파라미터 값이 모두 일치해야만 동기화를 이룰 수 있다. 만약 이들 파라미터 값 중 하나라도 미소하게라도 불일치 한다면 동기화를 이룰 수 없으며 아울러 비밀 통신도 불가능하다. 본 연구에서는 이 파라미터 값을 키 신호로 이용하여 6개의 파라미터 값이 미소하게 불일치 한 경우의 비밀 통신 결과를 나타내었다.

그림 9는  $C_1$  파라미터 값이 송신부에서 10nF, 수신부에서 9.9nF의 미소하게 불일치 한 경우의 복원 결과를 나타내었다.

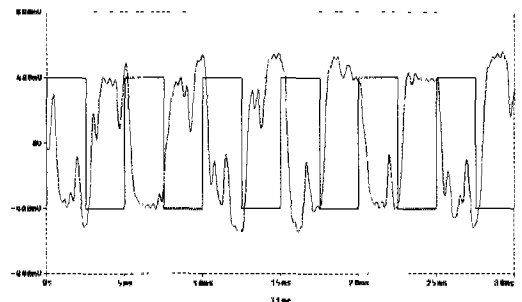


그림 9. 파라미터 송신측  $C_1=10nF$ , 수신측  $C_1=9.9nF$  일 때의 복원 결과

그림 9에서 보듯이 키 값이 약간 불일치 하는 경우에 그림 7과의 결과와 다르게 나타남을 알 수 있다. 이 결과 선로 중간에서 송수신기와 동일한 Chua 회로를 이용하여 공격한다 할지라도 6개의 파라미터 값을 송수신부의 키값에 의해 랜덤하게 변경한다면 도청은 불가능하며 공격자에 대한 안전성 즉 키를 모르고 공격하는 경우의 안전성을 확보할 수 있다.

실제 다른 파라미터보다 비선형 저항의 기울기인  $m_0, m_1$ 은 아주 미소하게 변하여도 큰 효과를 낼 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 전송선로를 가진 Chua 회로에서의 카오스 비밀 통신 방법에 대하여 연구하였다. 두 개의 동일한 Chua 회로에 전송 선로를 두어 손실 전송로를 구성한 후 송신부와 전송선로부 사이는 구동결합 동기 이론을 전송선로와 수신부 사이는 결합 동기 이론을 적용한 동기화 방법을 제시하였으며, 송신부에서 가산기를 이용하여 정보 신호와 카오스 신호를 합성하고 수신부에서 이들 신호를 분리하는 비밀 통신을 행하고 그 안정성을 평가하였다. 앞으로 디지털 방식에 의한 동기화와 실제 전송로의 적용에 대한 비밀 통신의 질적인 향상이 과제로 남는다.

### 참고 문헌

[1] 배영철, “카오스의 응용” 전자저널, pp.110-112. 1993.1.20.  
 [2] 배영철, 임화영, “주기적 외력을 인가한 Bonhoeffer-Van der Pol 오실레이터 모델에서의 카오스 현상 해석에 관한 연구” 한국통신학회논문지, 20권 11호, pp. 2991-3000, 1995.  
 [3] T. S. Parker and L. O. Chua, “Chaos: A Tutorial for Engineers” Proc. IEEE, vol 75, no. 8, pp. 982-1008. 1987.  
 [4] 合原一幸, “바이오 카오스 정보와 그 공학적 응용” 電子工業月報, 제34권, 1호, pp. 30-39, 1993.  
 [5] 제임스 글레리크 “CHAOS: Making A New Science” 동문사.  
 [6] M. Kuramitsu and K. I. Mori, “A simple

Electric Circuit Generating chaos” Technical Report IEICE, NLP 93 - 68, pp. 31-38, 1994.  
 [7] Y. Ueda and N. Akamatsu, “Chaotically Transitional phenomena, in the Forced Negative-Resistance Oscillator” IEEE Trans. Circuit and Systems, vol. CAS-28, pp. 217-224, 1981.  
 [8] 고재호, 배영철, 임화영, “주기적 외력을 인가한 Bonhoeffer - Van der Pol 오실레이터 모델에서의 카오스 현상 해석에 관한 연구”, 1995 제어계측연구회 학술발표회 논문집, pp. 100 - 102, 1995.  
 [9] T. Matsumoto, “A chaotic attractor from Chua’s circuit” IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-31, no. 12, pp. 1055-1058, 1984.  
 [10] G. O. Zhong and F. Ayrom, “Experimental confirmation of chaos from Chua’s circuit”, Int. J. Circuit Theory and Applications, vol. 13, no. 1, pp. 93-98, 1985.  
 [11] L. M. Pecora and T. L. Carroll “Synchronization in Chaotic System” Phy. Rev. Lett., vol. 64, no. 8, pp. 821-824, 1990.  
 [12] M. Itoh, H. Murakami and L. O. Chua, “Communication System Via Chaotic Modulations” IEICE. Trans. Fundamenrtals. vol. E77-A, no. 6, pp. 1000-1005, 1994.  
 [13] L. O. Chua, M. Itoh, L. Kocarev, and K. Eckert, “Chaos Synchronization in Chua’s Circuit” J. Circuit. Systems and Computers, vol. 3, no. 1, pp. 93-108, 1993.  
 [14] R. He, P. G. Vaidya, “ Analysis and Synthesis of Synchronous Periodic and Chaotic Systems” Phys. Rev. A, vol. 6, no. 12. pp. 7387-7392. 1992.  
 [15] L. Kocarev, U. Parlitz. “Generalized Synchronization, Predictability, and Equivalence of Unidirectionally Coupled Dynamical System” Phys. Rev. Lett. vol. 76, no. 11, pp. 1816-1819, 1996.  
 [16] 배영철 “전송 선로를 가진 Chua 회로에서의 카오스 동기화 및 암호화 통신” 광운대학교 박사 학위 논문, 1997.

