

자유 확산 공간에서의 펄스 위치 변조 기반 CEMC 분자 통신기법 연구

김수진*, 정성윤°

A Study on the CEMC Molecular Communication Scheme Based on Pulse Position Modulation in Free Diffusion Space

Su-Jin Kim*, Sung-Yoon Jung°

요 약

본 분자 통신 (Molecular Communication)은 새로운 통신 패러다임으로 전자파(Electro-Magnetic wave)를 이용한 기존 통신을 대체하는 기술 중 하나로 연구되고 있다. 분자 통신은 자연에 영감을 받아, 분자를 전달자로 하여 정보를 전달하며 인체에 무해하고, 기존 통신에서 사용하기 힘든 매체(ex. 인체, 동굴, 수중 등)에서 대체체로서 사용할 수 있다. 본 논문에서는 자유 확산(free-diffusion) 공간에서 농도 인코딩 분자 통신(Concentration-Encoded Molecular Communication ; CEMC) 시스템을 기반으로 하여 분자 농도의 위치를 정보 입자로 하는 펄스 위치 변조 (Pulse Position Modulation ; PPM) 송신 기술에 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 활용한 분자 통신기법을 제안하며, 분자 통신에서 PPM 방식을 활용하였을 때 분자 방출 시간을 늘리는 것이 분자 통신에 유리함을 확인하였다.

키워드 : 분자 통신, 농도 인코딩, 심볼 간 간섭, 리간드-수용체 결합 과정, 펄스 위치 변조

Key Words : Molecular Communication, Concentration Encoding, Inter-symbol Interference, LRBP (Ligand-Receptor Binding Process), PPM(Pulse Position Modulation)

ABSTRACT

Molecular communication is a new communication paradigm and having been studied as one of technologies to substitute traditional communication using Electro-Magnetic (EM) waves. Molecular communication is inspired by nature to convey information using molecules as a carrier, and can be used as a substitute for media that are harmless to the human body and difficult to use EM communication (ex. human body, cave, underwater, etc.). In this paper, we propose a Pulse Position Modulation (PPM) scheme, which uses positions of the molecules' concentration as information particles, with Ligand Receptor Binding Process (LRBP) in Concentration-Encoded Molecular Communication (CEMC) system. From simulations we found that it is better to increase transmission time for enhancing communication performance in PPM based CEMC system.

※ 본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0008473, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행되었습니다.

♦ First Author : Yeungnam University Department of Electronic engineering, suj38@yu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Yeungnam University Department of Electronic engineering, syjung@ynu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202104-080-C-RN, Received April 13, 2021; Revised June 22, 2021; Accepted July 20, 2021

I. 서 론

1.1 분자 통신 개요

분자 통신은 기존의 통신 기술이 아닌 통신의 새로운 패러다임이며 새로운 혁신 기술로 부상하고 있다^[1]. 전자기파를 캐리어로 사용하는 전자기 (EM) 통신과 달리 분자 통신은 화학적 성질을 가진 최소 단위 입자인 분자와 같은 작은 입자를 통해 정보를 전달하는 통신 시스템이다. 빛의 속도로 움직이는 EM 통신보다 속도는 훨씬 느릴 수 있지만, 인체나 수중 등 전자기파를 사용하기 힘든 매체에서 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 분자 통신은 자연과 생명 공학에서 영감을 받은 통신 시스템으로 의료, 자연 응용 분야에 적용하여 혁신적인 기술 발전을 기대할 수 있다. 또한, 전자기 통신은 전력 소비 및 크기 감소 제한 및 기타 구성 요소로 인해 소형화 기술에 한계가 있으나 분자 통신은 나노 네트워크로 구성된 통신망으로 구성되어 있기에 나노미터 크기(nm)의 송신기(TN : Transmitter Nanomachine)와 수신기(RN : Receiver Nanomachine)로 구축할 수 있다. 따라서 소형화 발전에도 크게 기여할 수 있다.

분자 통신에서 가장 많이 사용되는 기술은 농도 편이 방식(Concentration Shift Keying ; CSK)으로서 아날로그 변조에서의 진폭 변조(Amplitude Modulation ; AM), 디지털 변조에서의 진폭 편이 방식(Amplitude Shift Keying ; ASK)과 유사하다. 수신된 정보 분자의 농도가 신호의 진폭으로 사용되는데, 비트 신호가 “1” 이면 진폭의 크기만큼 분자를 방출하고 “0” 이면 분자가 방출되지 않는다. 채널을 통과한 후 주어진 시간 동안 RN에 도착한 농도의 값이 임계값을 초과하면 “1”, 그렇지 않으면 “0”으로 검출하는 기법이다. 하지만 이 방식을 이용한 CEMC 분자 통신 시스템에서는 이전 비트에 수신되고 남은 잔류 분자들이 현재 비트에 영향을 주어 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference ; ISI)이 발생한다^[2]. 이러한 문제를 완화하기 위해 기존 통신 방법에서의 펄스 위치 변조 (Pulse Position Modulation ; PPM) 방식과 같이 분자 농도의 위치를 활용하여 정보를 전달할 수 있다. 이와 같은 방식을 활용하면 수신 신호 검출 시 임계값이 따로 필요 없고 일정한 진폭이 사용되어 간섭의 영향을 상대적으로 덜 받는다. 이러한 PPM 방식은 전력 사용이 효율적이고 수신된 위치에서 고농도 분자를 검출하여 해독하는 간단한 과정으로 구성되어 구현이 용이한 장점이 있다.

본 논문에서는 자유-확산(free-diffusion) 분자 통신

을 기반으로 자유-공간(free-space)에서 분자의 농도를 정보 입자로 하는 농도 인코딩 분자 통신 (Concentration - Encoded Molecular Communication ; CEMC) 시스템을 기반으로 한 펄스 위치 변조 (Pulse Position Modulation ; PPM) 방식에 확률적인 화학 동역학(Stochastic chemical kinetics)을 고려한 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 수신단에 활용한 분자 통신기법을 제안하고 본 방식의 효율성에 대해서 검토한다.

1.2 관련 연구

분자 통신은 거리에 따라 장거리 통신과 단거리 통신으로 구분할 수 있다^[1]. 장거리 통신은 박테리아를 기반으로 한 분자 통신^[3], 페로몬 신호 통신^[4]이 있고, 단거리 통신에는 칼슘 신호 통신^[5]과 확산을 통한 통신이 있다^[6,7]. 그 중 확산 방식이 가장 널리 활용되는 분자 통신 방식이다.

기존 전자기 통신에서 시간에 따라 변화하는 채널 임펄스 응답 (Channel Impulse Response) 모델과 유사하게 분자 통신에서는 채널 양자 응답 (Channel Quantum Response)을 새로운 채널 모델을 제시하여 분자 통신의 자유 확산 채널을 개발하였다^[8]. 이 채널을 기반으로 CSK 기술을 이용한 수신 신호 검출 방식을 개발하여 농도 인코딩 신호(Concentration-Encoded Signal) 검출을 가능하게 하였다. 실제로 CSK 방식을 통해 송신기로 알코올 분자를 뿌리고 확산을 통해 알코올 분자가 수신기로 이동하고 분자의 농도를 받는 통신 실험 사례도 있다^[9].

이를 확장시킨 연구 [10]에서는 CSK 기술에 확률적인 화학 동역학(Stochastic chemical kinetics)을 고려하여 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 새롭게 정의하였다. LRBP 과정을 통해 RN에서 수신된 신호 부분의 노이즈 및 ISI 성분을 분리하여 전송된 신호를 감지하는 최적의 수신기를 개발하였다. 하지만 이러한 방식은 이전 비트에 간섭 영향을 많이 받는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 [11]에서는 CSK가 아닌 분자 농도의 위치를 정보로 하여 간섭 영향을 줄이는 변조 방식의 효율성을 검토하였다.

II. 본 론

2.1 농도 인코딩 분자 통신(CEMC) 모델

분자 통신기법은 자유 확산을 통해 송신기와 수신기 사이를 이동하고 분자의 농도를 인코딩 및 디코딩

한다.

그림 1은 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 고려하지 않고 농도 편이 방식(Concentration Shift Keying ; CSK)을 이용한 확산 기반 농도 인코딩 분자 통신(Concentration-Encoded Molecular Communication ; CEMC)의 가장 기본적인 블록도를 보여준다. CEMC는 그림 1과 같이 송신기(TN)와 수신기(RN)라는 한 쌍의 나노 머신으로 구성된다. 송신기에서는 변조 방식인 CSK를 사용하여 입력 데이터에 진폭의 크기가 Q_s 인 신호(농도)를 생성하며, 생성된 신호가 채널을 통과한다. 이때 채널은 공기, 물, 혈액^[12,13]과 같은 매체에 해당하며 환경으로부터 받은 열에너지 때문에 분자가 무작위 운동(random motion)으로 용매 분자(solvent molecule)와 엄청난 수의 충돌로 인해 확산을 통하여 전달된다. 수신기에 도달한 신호는 확산된 분자의 농도($U(r,t)$)를 확인하여 임계값 (Threshold = $\frac{Q_s}{2}$)을 초과하면 "1", 그렇지 않으면 "0"으로 검출하여 최종 출력 데이터를 얻게 된다.

2.2 제안된 시스템 모델

2.2.1 제안된 시스템 전체 블록도

그림 2는 본 논문에서 제안하는 펄스 위치 변조

(Pulse Position Modulation ; PPM) 방식에 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 수신단에 활용한 농도 인코딩 분자 통신(Concentration - Encoded Molecular Communication ; CEMC) 시스템의 블록도를 보여준다. 송신기에서는 변조 방식인 PPM을 사용하여 입력 데이터에 따라 각 위치에 진폭의 크기가 Q_s 인 펄스(농도)를 생성한다. 생성된 신호가 채널을 통과하여 수신기에 도달하게 되면 수신기 수용체와의 LRBP 과정을 통해 매 분자가 방출되는 구간마다 반응하는 확률(N_j)을 얻게 되며 PPM을 통해 전송된 신호에 대한 검출은 각 위치에서 가장 높은 확률값(즉, 가장 높은 농도값)을 검출하여 최종 출력 데이터를 얻게 된다.

2.2.2 펄스 위치 변조(PPM) 기반 송신 방식

M-ary PPM 방식을 이용하여 송신기(TN)에서 송신되는 신호 $Q(t)$ 는 수식 (1)로 표현할 수 있다.

$$Q(t) = \begin{cases} Q_s & \text{for } (m-1)T_s \leq t \leq mT_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

이때 $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$, Q_s 는 심볼 당 분자 농도의 양을 의미하며, $Q_s = \log_2(M) \cdot Q_b$ 로 나타내어진다. 이때 Q_b 는 비트 당 분자 농도의 양을 의미한다.

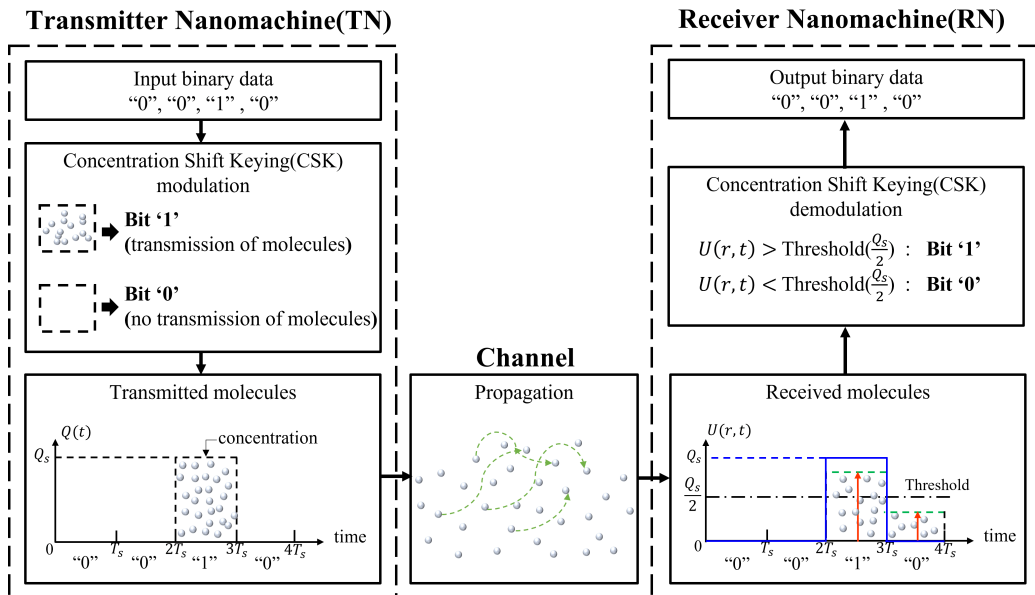


그림 1. 농도 편이 방식을 이용한 확산 기반 농도 인코딩 분자 통신 블록도

Fig. 1. Block diagram of Concentration-Encoded Molecular Communication System using Concentration Shift Keying in Molecular Diffusion Channel.

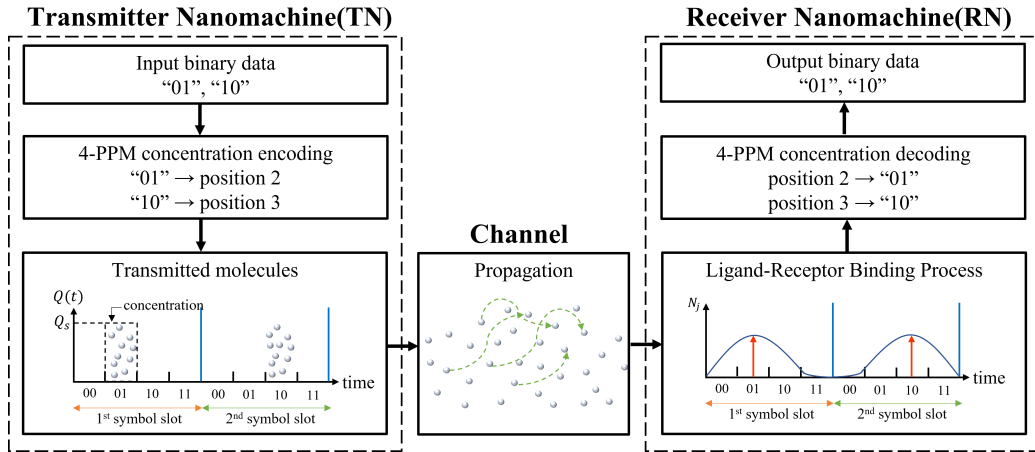


그림 2. 펄스 위치 변조 방식을 이용한 확산 기반 농도 인코딩 분자 통신 블록도
 Fig. 2. Block diagram of Concentration-Encoded Molecular Communication System based on Pulse Position Modulation Scheme in Molecular Diffusion Channel.

T_s 는 총 신호 전송 시간 T_{tx} 중 분자가 방출되는 시간을 의미한다. 따라서 $T_{tx} = M \cdot T_s$ 로 표현할 수 있다. (1)을 수식적으로 다시 표현하면, 다음과 같다.

$$Q(t) = Q_s \sum_{i=-\infty}^{\infty} p(t - iT_{tx} - (m-1)T_s) \quad (2)$$

이때 $p(t)$ 함수는 분자가 방출되는 시간 간격 T_s 만큼 펄스(농도)를 형성하는 정규화된 펄스 형성 함수(normalized pulse shaping function) 이고, $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 에서 m 은 M-ary PPM에서의 위치(position)를 나타낸다. 그림 3은 8-ary PPM에서 이진 비트(binary-bit) 신호인 "011"을 보냈을 때 $Q(t)$ 의 모습을 예로 보여준다.

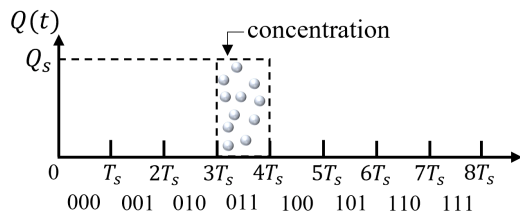


그림 3. "011" bits 신호를 8-ary PPM 방식으로 전송 시 $Q(t)$
 Fig. 3. $Q(t)$ when transmitting "011" bits signal using 8-ary PPM

2.2.3 채널 모델(Channel Model)

분자 통신을 하기 위해서는 채널을 모델링하는 것이 가장 중요하다. 분자를 전달하는 다양한 방법 중에

서 본 논문에서는 공기, 물, 혈액과 같은 매체에서 자유 확산을 기반으로 하는 채널을 구성하였다. [8, 12]에서 제안하는 Bossert 방정식을 이용하여 다음과 같이 채널을 구성할 수 있다.

$$C(t) = \frac{\frac{-r^2}{4Dt}}{(4\pi Dt)^{3/2}} \quad (3)$$

이때 $D(cm^2/s)$ 는 확산 상수로서 본 논문에서는 공기 중에서 확산한다고 가정한다. $r(cm)$ 은 송신기와 수신기 사이의 거리이다. 이 채널 모델을 이용하여 수신기(RN)에 도달한 신호를 $U(r,t)$ 라 한다면 수식 (4)와 같이 나타내어진다.

$$U(r,t) = \int_0^{T_s} \frac{Q(\tau)}{4\pi D(t-\tau)^{3/2}} \cdot e^{\frac{-r^2}{4D(t-\tau)}} d\tau \quad (4)$$

이때 $U(r,t) = Q(t) * C(t)$ 로 정의할 수 있으며, 기호 *은 합성곱 연산자 (Convolution operator)를 의미한다.

2.2.4 리간드-수용체 결합 기반 수신단 모델

자유 확산 중 분자가 수신단(RN)에 도달하게 되면 수신단(RN)의 수용체(receptor)와 충돌이 일어난다. 이 충돌 분자(Ligand 분자)와 수용체가 화학적인 반응을 일으켜 극히 작은 화학적 펄스가 생성되고, 수신된 분자의 농도를 감지한다. 이 과정을 리간드-수용체 결합 과정 (Ligand- Receptor Binding Process ; LRBP)

이라 한다¹⁰⁾. 수용체와 부딪히고 충돌된 분자들은 공기 중에서 제거되지 않고 그대로 남게 되는데 이것이 노이즈를 발생시키는 잔류 분자가 된다. 이러한 LRBP 과정을 통해 수신단에서 수신된 신호의 노이즈 및 ISI 성분을 분리하여 전송된 신호를 감지한다.

Ligand 분자와 RN의 수용체 사이에 화학적 반응의 평균 수를 계산하기 위해서 성향 함수 (propensity function)가 필요하며, propensity function을 통해 LRBP 기반 수신 신호를 모델링 할 수 있다.

$a(U(r,t))dt$ 를 Ligand와 수용체 사이에 일어난 반응의 확률이라고 하였을 때 $a(U(r,t))$ 를 propensity function라 지칭하고 이를 (5)와 같이 수식적으로 표현할 수 있다.

$$a(U(r,t)) = \eta\rho = \eta(RU(r,t)) = \eta RU(r,t) \quad (5)$$

$\eta \cdot dt$ 는 $[t+dt]$ 시간 동안 수용체와 분자가 랜덤하게 반응하는 확률을 의미한다. ρ 는 ligand 분자와 수용체의 쌍이다. 따라서 $\rho = RU(r,t)$ 이며 R 는 RN의 표면에 있는 수용체의 농도를 의미한다. CEMC 과정에서 랜덤한 결과값을 보이는 propensity function을 정확하게 알아내기 어렵기에 2가지 가정을 통해 근사치를 이용한 모델링을 한다¹⁰⁾.

첫 번째로 dt 가 매우 작다고 하였을 때 $a(U(r,t)) \approx a(U(r,t'))$, $\forall t' \in [t, t+dt]$ 라고 가정한다. 즉, 주어진 구간 $[t, dt]$ 안에서 분자끼리 서로 독립적인 존재라고 가정한다. 두 번째로 $[t+dt]$ 구간에서 화학적 반응이 충분히 많이 일어났다고 가정하여 propensity function을 평균과 분산이 같은 정규 분포로 근사화할 수 있다.

즉, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 일 때, 분자가 방출되는 구간 $[(j-1)T_s, jT_s]$ 동안 반응하는 확률을 N_j 라 하고, 평균이 μ_j , 분산이 σ_j^2 라 하였을 때 $N_j \sim N(\mu_j, \sigma_j^2)$ 와 같은 정규 분포로 표현할 수 있으며, 이때 평균과 분산은 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_j &= \int_{(j-1)T_s}^{jT_s} a(U(r,t))dt \\ \sigma_j^2 &= \int_{(j-1)T_s}^{jT_s} a(U(r,t))dt \end{aligned} \quad (6)$$

이렇게 RN에서 매 T_s 시간 동안 LRBP를 통하여 반응하는 확률값들을 구하게 되면, PPM을 통해 전송된 신호에 대한 검출은 각 position에서 가장 높은 확

률값(즉, 가장 높은 농도값)을 검출하면 된다. 따라서 결정된 position 값은 수식 (7)과 같이 표현된다.

$$\hat{m} = \arg \max_{j \in \{1, \dots, M\}} N_j \quad (7)$$

수식 (7)에서 검출된 position \hat{m} 과 전송된 position 인 m 을 비교하여 두 위치가 일치하면 전송된 신호를 제대로 검출한 것으로 간주하고 그렇지 않으면 오류로 간주한다.

2.3 모의실험

M 이 4인 4-ary PPM에서 공기 중 자유 확산을 하는 CEMC 시스템을 가정한다. 우선, 분자 통신의 채널 특성을 보기 위해 그림 4와 같이 $T_s = 5$ 일 때 r 에 따른 채널 $C(t)$ 을 도식화해 보았다. 그림 4를 보았을 때 r 의 값이 커질수록 즉, TN과 RN의 사이가 멀어질수록 도달하는 분자의 양이 점점 줄어들었음을 알 수 있었다. 또한, 거리가 점점 멀어짐에 따라 채널이 뒤로 퍼지는 특성을 보임을 알 수 있다. 이 특성으로 인해 이상적인 위치에서 검출되어야 하는 분자들의 위치가 어긋나게 됨으로써 기존 전자기와 기반 통신 채널과는 다른 심볼 간 간섭 특성을 갖게 된다.

그림 5는 T_s 에 따른 심볼 오류 확률 (Symbol Error Rate ; SER) 비교를 보여준다. 우선, 거리가 멀어짐에 따라 SER이 증가하는 것을 알 수 있었다. 특징적인 점은 같은 농도(양)의 분자를 송신할 경우 분자를 방출하는 시간(T_s)을 늘리는 것이 에러율을 감소시키는 것을 알 수 있는데 이는 앞서 말한 바와 같

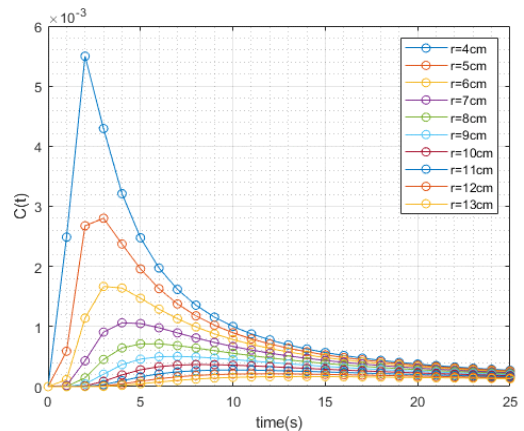


그림 4. r 에 따른 채널 $C(t)$
Fig. 4. Comparison of normalized channel $C(t)$ according to r

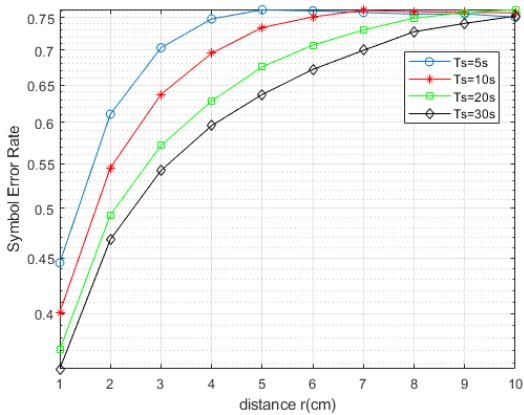


그림 5. T_s 에 따른 심볼 오류 확률(SER)
 Fig. 5. Comparison of SER according to T_s

이 분자 통신의 채널 특성상 거리 변화에 따라 채널이 퍼지는 정도가 달라서 나타나는 현상으로 파악된다. 따라서 같은 양의 분자를 단시간에 보내는 것보다 장시간에 걸쳐 보내는 것이 분자 통신에 유리함을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

분자 통신은 분자를 정보 전달자로 하는 새로운 통신 패러다임으로서, 기존 전자기 (EM) 통신을 대체하는 기술 중 하나로 연구되고 있다. 또한 분자 통신은 나노 네트워크로 구성되어 있으며 자연에 영감을 받아 의료, 자연, 소형화 분야에 혁신적인 발전을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 Pulse Position Modulation (PPM) 기반 Concentration encoded Molecular Communication (CEMC) 시스템에 Ligand-Receptor Binding process (LRBP)를 더한 통신 방법을 새롭게 제안하고 그 특징을 모의실험을 통하여 확인하였다. 분자 농도의 위치를 정보 입자로 한 송신 신호를 기반으로 자유 확산을 통해 신호가 이동하는 채널 모델과 정보 분자와 RN의 수용체 사이에 LRBP를 통하여 노이즈가 섞인 수신기 모델을 구성하였으며, 이 시스템 모델을 이용하여 모의실험 한 결과 송신기와 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 분자가 공기 중에 손실되는 양이 많아지면서 에러율이 증가하였고, 분자가 방출되는 시간이 길수록 에러율이 감소하였음을 확인하였다. 따라서 같은 양의 분자를 송신하더라도 최대한 긴 시간을 통해 분자를 보내는 것이 가장 유리함을 확인하였다.

이러한 기초 연구를 기반으로 향후 다양한 분야에

서 기존 전자기파를 대신하여 분자를 이용한 통신을 다양하게 응용할 수 있게 될 것으로 기대한다.

References

- [1] N. Farsad, H. B. Yilmaz, and A. Eckford, C. B. Chae, and W. Guo, "A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1887-1919, Feb. 2016.
- [2] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and B. Özerman, "Energy model for communication via diffusion in nanonetworks, NanoCommunication networks," *Nano Commun. Netw.*, vol. 1, no. 2, pp. 86-95, June. 2010.
- [3] L. C. Cobo and I. F. Akyildiz, "Bacteria-based communication in nanonetworks," *Nano. Commu. Netw.*, vol. 1, no. 4, pp. 244-256, Dec. 2010.
- [4] B. D. Unluturk and I. F. Akyildiz, "An end-to-end model of plant pheromone channel for long range molecular communication," *IEEE Trans. NanoBiosci.*, vol. 16, no. 1, pp. 11-20, Jan. 2017.
- [5] M. T. Barros, "Ca²⁺-signaling-based molecular communication systems: Design and future research directions," *Nano. Commu. Netw.*, vol. 11, pp. 103-113, Mar. 2017.
- [6] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, I. Demirkol, N. Farsad, and A. Goldsmith, "A survey on modulation techniques in molecular communication via diffusion," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 23, no. 1, pp. 7-28, 2020.
- [7] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "Capacity of a diffusion-based molecular communication system with channel memory and molecular noise," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 2, pp. 942-954, Feb. 2013.
- [8] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. Mouftah, "Characterization of molecular communication channel for nanoscale networks," in *Proc. 3rd Int. Conf. BIOSIGNALS-2010*, pp. 327-332, Valencia, Spain, Jan. 2010.
- [9] N. Farsad, N.-R. Kim, A. W. Eckford, and

C.-B. Chae, "Channel and noise models for nonlinear molecular communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 12, pp. 2392-2401, Dec. 2014.

- [10] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. Moustah, "Strength-based optimum signal detection in concentration -encoded pulse-transmitted OOK molecular communication with stochastic ligand-receptor binding," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 42, pp. 189-209, Mar. 2014.
- [11] S. Kim and S.-Y. Jung, "A study on the molecular communication based on pulse position modulation," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 789-790, 2021.
- [12] M. U. Mahfuz, et al., "On the characterization of binary concentration-encoded molecular communication in nanowetworks," *Nano. Commu. Netw.*, pp. 289-300, Dec. 2010.
- [13] N.-R. Kim, A. Eckford, and C.-B. Chae, "Symbol interval optimization for molecular communication with drift," *IEEE Trans. NanoBiosci.*, vol. 13, no. 3, pp. 223-229, Sep. 2016.

김수진 (Su-Jin Kim)



2020년 8월 : 영남대학교 전자공학과 졸업
 2021년~현재 : 영남대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 디지털 신호처리, 이동통신, 나노통신 및 분자통신 등

[ORCID:0000-0001-8757-934X]

정성윤 (Sung-Yoon Jung)



2000년 : 고려대학교 전기전자전파 공학부 졸업
 2000년~2002년 : 한국과학기술원 전자 전산학과 석사학위 취득
 2002년~2006년 : 한국과학기술원 전자 전산학과 박사학위 취득
 2006년~2009년 : 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2009년~2014년 : LED-IT 융합산업화 연구센터 부센터장(2012) 및 분과장
 2009년~현재 : 영남대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> ICT융합통신, 에너지 전달형 무선 광통신, 카메라통신, 디스플레이 통신(DFC), 나노통신 및 분자통신

[ORCID:0000-0002-1775-7144]