

리간드-수용체 결합을 이용한 농도 진폭 편이(CASK) 기반 CEMC 분자 통신기술 연구

김수진*, 정성윤^o

A Study on the CEMC Molecular Communication Scheme Based on Concentration Amplitude Shift Keying(CASK) Using Ligand-Receptor Binding Process(LRBP)

Su-Jin Kim*, Sung-Yoon Jung^o

요약

분자 통신(Molecular Communication) 기법은 전자파(Electro-Magnetic wave)를 사용하는 기존 통신 시스템을 대체하여 새롭게 주목받고 있는 통신 시스템이다. 분자 통신은 생물학적으로 영감을 받은 통신 패러다임으로 대부분 전파가 화학 신호로 구동되고 생체 적합적이기에 에너지가 거의 필요하지 않다. 또한, 기존 통신에서 사용하기 힘든 매체 (ex. 인체, 수중, 해상, 동굴 등)에 대체기술로 사용할 수 있어 혁신적인 기술 발전을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 자유 확산(free-diffusion) 공간에서 분자 농도의 양을 정보 입자로 하는 농도 진폭 편이(Concentration Amplitude Shift Keying ; CASK) 기술을 기반으로 하여 농도 인코딩 분자 통신시스템에 리간드-수용체 결합 과정을 활용한 분자 통신기법을 제안하며, 모의실험을 통하여 CASK 방식을 중·장거리에 사용하는 것이 분자 통신에 유리함을 확인하였다.

키워드 : 분자 통신, 농도 인코딩, 심볼 간 간섭, 리간드-수용체 결합 과정, 농도 진폭 편이 방식

Key Words : Molecular Communication, Concentration Encoding, Inter-symbol Interference, LRBP (Ligand-Receptor Binding Process), CASK(Concentration Amplitude Shift Keying)

ABSTRACT

Molecular Communication is a new communication system that can substitute conventional communication using Electro-Magnetic (EM) waves. Molecular communication is a biologically inspired communication paradigm that requires little energy by using chemical signals and its biocompatibility. In addition, it can be used as a substitute technology for media that are difficult to use in conventional communication (ex. human body, underwater, marine, cave, etc.), which can result in innovative technological development. In this paper, we propose a Concentration-Encoded Molecular Communication (CEMC) based on CASK (Concentration Amplitude Shift Keying) scheme, which uses the amount of molecular concentration as information particles, with Ligand-Receptor Binding Process (LRBP). From simulation we found that it is better to use the proposed CASK based CEMC system from mid to long distance range communications.

* 본 연구는 경북지역 풍력에너지 클러스터 인재양성사업(2021400000010)의 지원 및 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF-2018R1A2B6002204)의 지원을 받아 수행되었습니다.

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

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

논문번호 : 202206-120-C-RN, Received June 16, 2022; Revised August 5, 2022; Accepted August 11, 2022

I. 서 론

1.1 분자 통신 개요

4차 산업 혁명이 태동하게 되면서 통신 기술은 여러 방향으로 발전하고 있다. 그중에서 특히 분자를 사용한 분자 통신은 기존의 통신 기술을 대체하는 기술 중 하나로 통신계의 새로운 패러다임으로써 새로운 혁신 기술로 부상하고 있다. 전자기파를 정보 전달자로 사용하는 전자기 (EM) 통신과는 다르게 분자 통신은 자연에서 영감을 받아 화학적 성질을 가진 최소 단위 입자로 정의되는 분자를 통해 정보를 전달하는 통신 시스템이다¹⁻⁵⁾. 빛의 속도로 움직이는 EM 통신은 전송 속도가 빠르며, 분자 통신은 전송 속도가 상대적으로 느려 분자 메시지를 전파하는데 외부 영향을 받을 수 있다. 하지만 대부분의 분자 통신 전파는 화학적으로 구동되며 생체 적합적이기 때문에 생체 및 전파를 하는데 배터리, 전자기 유도 등과 같은 외부 에너지가 거의 필요하지 않다. 결과적으로 분자 통신은 전력 소비가 적으며, 인체나 유기체 등 전자기파를 사용하기 힘든 매체에서 사용할 수 있어 의료, 자연, 해상 등 다양한 분야에 응용하여 혁신적인 기술 발전을 기대할 수 있다. 예를 들어, 바다를 통해 전파가 장거리로 이동하게 된다면 해수의 염도가 전도도를 유발하여 고주파수에서 전자기 신호의 급격한 감쇠를 초래할 수 있다⁵⁾. 그러나, 정보 분자는 거리에 따라 빠르게 에너지를 잃지 않기 때문에 수중 혹은 해상에서 분자 통신을 적용한다면 해상 풍력발전 등의 분야에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 전자기 통신은 전력 소비 및 트랜시버의 크기와 복잡성 및 기타 구성요소로 인해 소형화 기술 발전에 한계가 있다. 이러한 점에서 분자 통신은 나노 네트워크로 이루어진 통신망으로 구성되어 더 복잡한 작업을 수행할 수 있으며, 나노미터 크기(nm)의 송신기(TN : Transmitter Nanomachine)와 수신기(RN : Receiver Nanomachine)로 구축할 수 있다. 따라서 이를 통해 소형화 발전에도 크게 기여할 수 있다. 또한, 분자 통신은 선(wire)의 유무에 따라 분류할 수 있다⁵⁾. 유선(wired) 분자 통신에는 분자 모터를 이용한 통신⁶⁾, 무선(wireless) 분자 통신은 박테리아를 기반으로 한 분자 통신⁷⁾, 페로몬 신호 통신⁸⁾, 칼슘 통신⁹⁾, 확산 통신¹⁰⁻¹²⁾ 등이 있다. 본 논문에서 사용하는 확산 방식은 분자 통신에서 가장 널리 활용되는 통신 방식이다.

분자 통신에서 가장 초기에 제안된 기술인 농도 편이 방식(Concentration Shift Keying ; CSK)은 수신된 정보 분자의 농도가 신호의 진폭으로 사용되는 기

술이다. 각 심볼 슬롯의 시작에서 비트 신호가 “0”이면 분자가 전송되지 않고 비트 신호가 “1” 이면 분자가 방출되어 전송된다. 채널을 통과하여 수신된 신호가 임계값보다 크면 “1”, 작으면 “0”으로 검출한다. 이 기술을 이용하여 농도 인코딩 신호 검출을 가능하게 하였고¹²⁾, 논문 [13]에서는 알코올 분자를 CSK에 적용하여 송신기로 알코올 분자를 공기 중으로 확산시키고 수신기에서 분자의 농도를 받는 통신 실험을 성공시키며, 분자를 이용한 통신 시스템을 최초로 구현하였다. 이를 확장하여 [14]에서는 CSK 기술에 확률적인 화학 동역학(Stochastic chemical kinetics)을 고려하여 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 결합하여 RN에서 전송된 신호를 감지하는 수신기를 개발하였다. 하지만 이러한 방식은 심볼 간 간섭(Inter Symbol Interference; ISI) 영향을 많이 받는 단점이 있다¹²⁾. 이를 보완하기 위해서 [15]에서는 분자 농도의 위치를 정보로 하는 농도 위치 편이 방식(Concentration Position Shift Keying ; CPSK) 방식을 사용하여 간섭 영향을 줄이도록 하였다. 하지만 분자 농도의 위치를 정보로 하는 기술은 거리에 따라 채널의 지연 확산(delay spread) 정도가 변하는 분자 통신의 채널 특성으로 인해 노이즈가 없어도 분자의 위치가 어긋나게 됨으로써 에러가 검출되며, 기존 전자기파 기반 통신 채널과는 다른 심볼 간 간섭 특성을 보인다. 반대로 분자 농도의 양을 정보 입자로 사용하면 ISI의 영향을 더 받는 대신 거리에 따른 채널 지연 확산 변이 영향을 덜 받게 된다. 따라서 두 영향에 대한 각 성능을 비교 분석하여 어느 영향이 분자 통신에 큰 영향을 미치는지 확인하기 위해 기존 통신 방법에서 활용되는 펄스 진폭 변조(Pulse Amplitude Modulation ; PAM) 방식을 도입하고자 한다. 이와 같은 방식은 분자 농도의 양을 정보 입자로 활용하여 정보를 전달할 수 있으며 간단한 프로세스로 이루어져 있어 구현이 쉽고, 분자 농도의 양을 신호의 진폭으로 사용하였기 때문에 채널의 지연 확산 변이 영향을 덜 받게 된다. 본 논문에서는 이를 농도 진폭 편이 방식 (Concentration Amplitude Shift Keying ; CASK)이라 지칭한다.

따라서 본 논문에서는 자유-확산(free- diffusion) 분자 통신을 기반으로 자유 공간(free-space)에서 분자의 농도를 정보 입자로 하는 농도 진폭 편이 방식(Concentration Amplitude Shift Keying)에 기반한 농도 인코딩 분자 통신(Concentration Encoded Molecular Communication ; CEMC) 시스템에 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding

Process ; LRBP)을 수신단(RN)에 활용한 분자 통신 기법을 제안하고 본 방식의 효용성에 대해서 검토한다. 또한, 농도 위치 편이 방식(Concentration Position Shift Keying)과의 비교를 통하여 ISI의 영향과 채널 지연 확산 편이 영향에 대한 모의실험 결과를 보이고 이를 통해 분자 통신에 더 효율적인 방식에 대하여 고찰하도록 한다.

1.2 리간드-수용체 결합 과정(LRBP)

그림 1과 같이 송신단(TN)에서 방출된 분자가 채널을 따라 이동하게 되어 수신단(RN)에 도달하게 되면 수신단의 수용체와 충돌이 일어나게 되는데 이때 충돌 분자는 리간드(ligand) 분자이다. 이 충돌 분자와 수용체가 화학적인 반응을 일으켜 극히 작은 화학적 펄스가 생성되고, 수신된 분자의 농도를 감지한다. 이 과정을 리간드-수용체 결합 과정이라 한다. 수용체와 충돌된 분자들은 매체 중에서 제거되지 않고 매체에

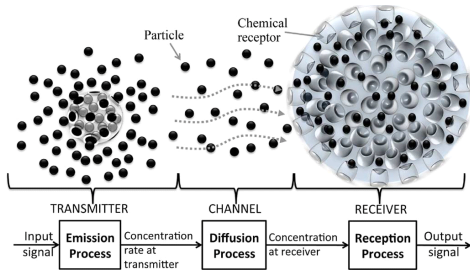


그림 1. 리간드 수용체 결합 과정을 이용한 분자 통신 블록도[16]
Fig. 1. Block diagram of Ligand-Receptor Binding Process

그대로 남게 되는데 이것이 노이즈를 발생시키는 잔류 분자(residual molecules)가 된다. 이러한 LRBP 과정을 통해 수신단(RN)에서 전송된 신호를 감지한다 [14-16].

II. 본 론

2.1 제안된 시스템 모델

2.1.1 제안된 시스템 전체 블록도

그림 2는 본 논문에서 제안하는 농도 진폭 편이 방식(Concentration Amplitude Shift Keying ; CASK)에 리간드-수용체 결합 과정(Ligand Receptor Binding Process ; LRBP)을 수신단과 결합한 농도 인코딩 분자 통신(Concentration - Encoded Molecular Communication ; CEMC) 시스템의 블록도를 보여주며, 그림 2와 같이 TN과 RN이라는 한 쌍의 나노 머신으로 구성된다. TN에서는 CASK 변조 방식을 사용하여 입력 데이터에 따라 농도의 양을 조절하여 펄스(농도)를 생성한다. TN에서 방출된 신호는 채널을 통과하고, 이때 채널은 공기를 통해 이동하며 외부 환경으로부터 받은 열에너지로 인해 분자가 무작위(random)로 움직이며 용매 분자(solvent molecule)와의 충돌로 인한 확산을 통해 전달된다. RN에 도달하게 되면 LRBP 과정을 통해 확산된 분자의 농도($U(r,t)$)는 매 분자가 방출되는 구간마다 반응하는 확률값인 N_j 로 변환되며 이 값을 확인하여 인접한 두

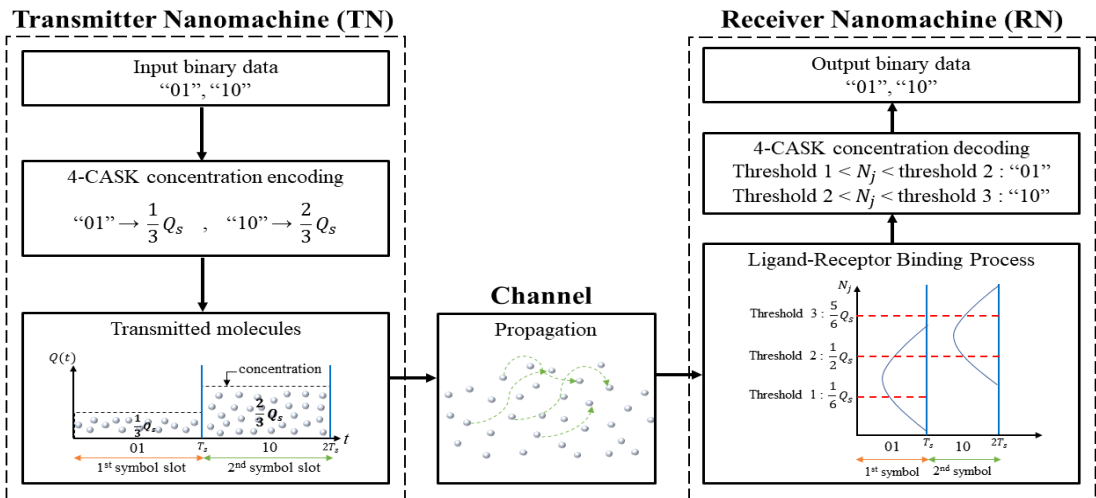


그림 2. 농도 진폭 편이 방식을 이용한 확산 기반 농도 인코딩 분자 통신 블록도
Fig. 2. Block diagram of Concentration-Encoded Molecular Communication System based on Concentration Amplitude Shift Keying Scheme in Molecular Diffusion Channel

수신 값들 사이의 평균값을 사용하여 임계값 (Threshold)을 설정할 수 있으며, 이를 사용하여 최종 출력 데이터를 얻게 된다.

2.1.2 농도 진폭 편이 방식(CASK) 송신과정

M-ary CASK 방식을 이용하여 송신기에서 전송되는 신호 $Q(t)$ 는 수식 (1)로 표현할 수 있다.

$$Q(t) = \left(\frac{m-1}{M-1}\right) \cdot Q_s, (m-1)T_s \leq t \leq mT_s \tag{1}$$

이때 $m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$, M 은 한 심볼당 표현 가능한 레벨의 개수이며, Q_s 는 심볼 당 분자 농도의 양을 나타내며, $Q_s = \log_2(M) \cdot Q_b$ 로 표현할 수 있다. 이때 Q_b 는 비트 당 분자 농도의 양을 의미한다. T_s 는 분자가 방출되는 시간을 의미하며 총 분자가 전송되는 시간은 T_{tx} 이며 본 논문에서는 $T_{tx} = T_s$ 이다. (1)을 수식적으로 다시 표현하면 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(t) = \left(\frac{m-1}{M-1}\right) Q_s \sum_{j=-\infty}^{\infty} p(t-jT_s) \tag{2}$$

이때 $p(t)$ 함수는 분자가 방출되는 시간 T_s 만큼 농도를 형성하는 정규화된 펄스 형성 함수(normalized pulse shaping function)이다. 그림 3은 8-ary CASK에서의 이진 비트(binary-bit) 신호인 “000”부터 “011” bits를 순서대로 보냈을 때 전송 신호 $Q(t)$ 의 모습을 예로 보여준다.

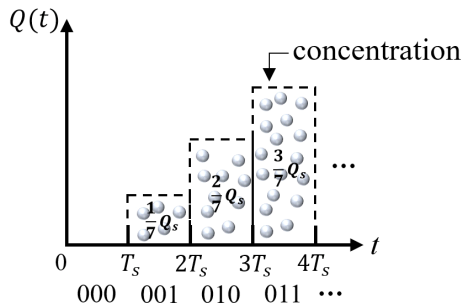


그림 3. “000”부터 “011” bits 신호를 8-ary CASK 방식으로 전송 시 $Q(t)$
 Fig. 3. $Q(t)$ when transmitting signal from “000” to “011” bits signal using 8-ary CASK

2.1.3 채널 양자 응답(CQR)

분자 통신 구성요소 중 채널을 모델링 하는 것이 가장 중요하다. 분자 통신에서는 기존 전자기(EM) 통신에서 시간에 따라 변화하는 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response ; CIR) 모델과 유사한 채널 양자 응답(Channel Quantum Response ; CQR)을 새로운 채널 모델을 제시하여 자유 확산 채널을 개발하였다^[6]. 이 채널을 기반으로 본 논문에서는 공기에서 자유 확산(free diffusion)을 기반으로 하는 채널을 구성하였다. [17]에서 제안하는 방정식을 이용하여 다음과 같이 채널을 구성할 수 있다.

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

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

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

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

2.1.4 농도 진폭 편이 방식(CASK) 수신 과정

그림 1에서 나타난 바와 같이 RN에 전달된 분자는 RN의 수용체(receptor)와 충돌하게 되어 화학반응이 일어나게 되면 각 화학반응은 정보를 전달하기 위해 극도로 작은 화학 신호를 생성한다. 수용체는 성향 함수(propensity function)에 따라 반응하며 RN은 농도 신호를 감지한다^[14,15].

$j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 일 때 분자가 방출되는 구간 $[(j-1)T_s, jT_s]$ 동안 반응하는 확률을 N_j , 평균을 μ_j , 분산을 σ_j^2 라 하였을 때 $N_j \sim N(\mu_j, \sigma_j^2)$ 와 같은 정규 분포로 나타낼 수 있고, 이때 평균과 분산은 (5)와 같이 나타내어진다.

$$\mu_j = \sigma_j^2 = \int_{(j-1)T_s}^{jT_s} a(U(r,t)) dt \tag{5}$$

이때 $a(U(r,t))dt$ 를 리간드 분자와 수용체 사이에 일어난 반응의 확률이라 하며, $a(U(r,t))$ 를 propensity function이라 한다^{[4],[5]}.

이렇게 RN에서 매 T_s 시간 동안 LRBP를 통하여 반응하는 확률값들을 구하게 되면, CASK를 통해 전송된 신호에 대한 검출을 위한 임계값은 채널을 안다 고 가정하고 모의실험 과정을 통해 도출한다.

2.2 모의실험

본 모의실험에서는 M이 4인 4-ary CASK에서 공기 중 자유 확산을 하는 CEMC 시스템을 가정한다. 모의실험을 위해 표 1과 같은 매개변수(parameter) 값을 사용하였다. 분자 통신의 채널 특성을 확인하기 위해 그림 4와 같이 $T_s = 5$ 일 때 거리 r 에 따른 채널 $C(t)$ 을 도식화하였다. 각 거리에 따른 최댓값을 점선으로 그려보았을 때 점점 뒤로 퍼지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 분자 통신의 채널이 기존 통신과는 다른 거리에 따른 지연 확산 변이 특성을 보임을 알 수 있다.

표 1. 모의실험에 사용한 파라미터
Table 1. The simulation parameters

파라미터	값
데이터 개수	1×10^5
거리(r)	1-10 [cm]
확산 상수(D)	0.43 [cm^2/s]
분자 방출 시간(T_s)	5,10,20,30 [s]
비트 당 분자 농도의 양(Q_b)	1

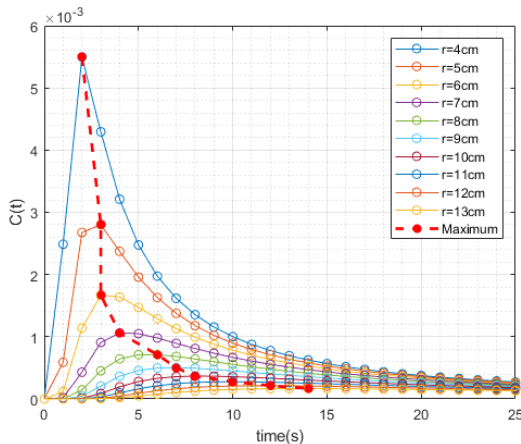


그림 4. T_s 일 때 r 에 따른 정규화된 채널
Fig. 4. Comparison of normalized channel $C(t)$ according to r

본 모의실험에서 사용한 지표는 심볼 오류 확률(Symbol Error Rate ; SER)와 달성 가능한 데이터 속도(Achievable Data Rate ; ADR)이다. 본 논문은 비트가 아닌 심볼 단위로 데이터를 전송하였기에 성능 평가를 위해 SER 지표를 사용하였다. 또한, 심볼 단위로 평가하였기에 M에 따른 CASK의 성능을 정확하게 평가할 수 없다. 따라서 데이터의 전송량을 알 수 있으며 에러 확률값을 고려한 ADR 지표를 사용하였다.

그림 5에 에 따른 SER 비교를 보여준다. 우선, TN과 RN 사이의 거리가 멀어짐에 따라 공기 중에 손실되는 분자의 양이 많아져 에러율이 증가하였다. 또한, 분자의 방출시간인 T_s 가 증가함에 따라 ISI의 영향을 줄어들어 에러율이 감소하였음을 알 수 있었다. 따라서 분자 통신에서 에러율을 감소하기 위해서는 분자의 방출시간을 늘리는 것이 유리하게 작용할 수 있다.

그림 6은 $M=4$ 인 4-ary CASK와 4-ary CPSPK^[15]의 T_s 에 따른 심볼 오류 확률(SER) 성능 비교를 보여준다. 특징적인 점은 거리가 짧을수록 CPSPK의 에러가 작고 거리가 증가함에 따라 CASK의 에러율이 감소함을 알 수 있다. CPSPK는 분자 농도의 위치를 활용하는 방식으로서 분자 통신 채널 특성인 거리에 따른 지연 확산 증가에 의한 영향을 상대적으로 CASK보다 크게 받게 된다. 따라서 거리가 가까울 때는 채널의 지연 확산 증가 영향을 많이 받지 않으므로 위치 기반 수신방식인 CPSPK의 성능이 좋다. 하지만, 거리가 멀어질 때는 상대적으로 지연 확산 증가로 인한 영향을 크게 받아 CPSPK의 성능이 떨어지고 CASK가 분자 통신에 유리함을 확인할 수 있었다. 따라서 증장거

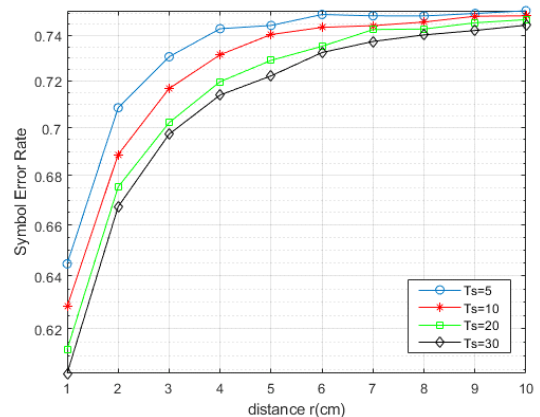


그림 5. T_s 에 따른 심볼 오류 확률(SER)
Fig. 5. Comparison of symbol error rate according to symbol interval T_s

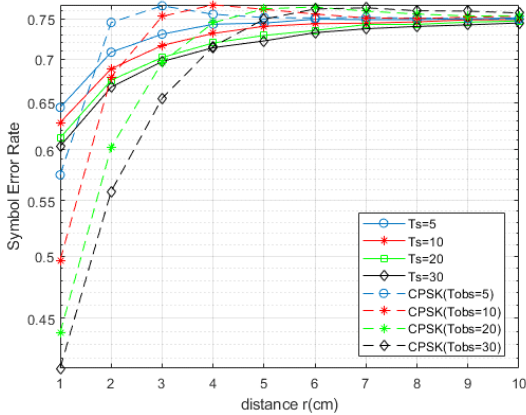


그림 6. T_s 에 따른 심볼 오류 확률(SER) 성능 비교
 Fig. 6. Comparison of symbol error rate performance according to symbol interval T_s

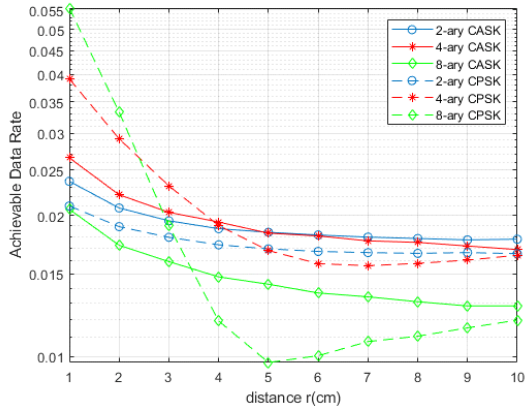


그림 7. M 에 따른 달성 가능한 데이터 속도(ADR) 성능 비교
 Fig. 7. Comparison of achievable data rate performance according to modulation order M

리에서는 CASK를 사용하는 것이 분자 통신에 유리함을 확인할 수 있었다.

그림 7은 M 에 따른 각 CASK와 CPSK의 달성 가능한 데이터 속도(Achievable Data Rate ; ADR) 성능 비교를 보여준다. 우선, 앞서 보인 결과와 동일하게 거리가 짧을 때는 CPSK의 성능이 더 좋음을 알 수 있다($M \geq 4$). 하지만, CASK는 CPSK에 비해 안정적인 곡선을 보인다. 따라서 거리가 짧을 때는 CPSK, 중 장거리일 때는 CASK를 사용하는 것이 분자 통신에 유리함을 알 수 있었다. 전체적으로 CASK를 사용할 때 거리가 증가하여도 데이터 전송량의 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한, CASK와 CPSK 모두 $M=4$ 일 때 통신 성능이 전반적으로 가장 좋음을 알 수 있었다.

III. 결론

분자 통신은 자연에 영감을 받아 분자를 정보 전달자로 사용하는 통신으로서 전자기 통신을 대체하는 기술 중 하나로 연구되고 있다. 분자 통신은 필연적으로 속도는 느리지만 대부분 전파가 화학적 구동이며서 에너지 소비가 적고 나노 네트워크로 구성되어 소형화 발전에도 크게 기여할 수 있다.

본 논문에서는 농도 진폭 편이 방식 (CASK) 기반 농도 인코딩 분자 통신(CEMC)에 리간드-수용체 결합 과정(LRBP)을 수신단(RN)에 결합한 분자 통신을 제안하고 구현하여 모의실험을 통하여 그 특징을 확인하였다. 분자 농도의 진폭을 정보 입자로 하여 기존 분자 통신이 가지고 있는 채널 지연 확산 변이 영향을 줄이도록 송신 신호를 기반으로 자유 공간 속에서 자유 확산을 통해 신호가 이동하는 채널 양자 응답(CQR)과 LRBP를 수신단에 결합하여 신호를 감지하는 수신기 모델을 제안하였다. 모의실험 결과 송신기와 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 공기 중에 손실되는 분자의 양이 증가함에 따라 에러율이 증가하였고, 같은 양의 분자를 송신하더라도 최대한 긴 시간을 통해 분자를 보내는 것이 에러율을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 기존의 농도 위치 편이 방식(CPSK)과 비교하였을 때 송신기와 수신기의 사이가 짧을수록 CPSK를 적용하고 중 장거리일 때 CASK를 사용하는 것이 분자 통신에 유리함을 확인하였다. 추가로, 두 변조 방식 모두 $M=4$ 인 경우에 분자 통신에 가장 적합함을 확인하였다.

References

- [1] T. Nakano, A. W. Eckford, and T. Haraguchi, *Molecular Communication*, 1st Ed., Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013. (<https://doi.org/10.1017/CBO9781139149693>)
- [2] T. Suda, M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, A. Enomoto, S. Hiyama, and Y. Moritani, "Exploratory research on molecular communication between nanomachines," in *Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO)*, Late Breaking Papers, vol. 25. Citeseer, p. 29, 2005.
- [3] I. F. Akyildiz, F. Brunetti, and C. Blazquez, "Nanonetworks: A new communication paradigm," *Comput. Netw.*, vol. 52, no. 12, pp.

- 2260-2279, Aug. 2008.
(<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.001>)
- [4] D. Bi, et al., “A survey of molecular communication in cell biology: Establishing a new hierarchy for interdisciplinary applications,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 23, no. 3, pp. 1494-1545, Mar. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/comst.2021.3066117>)
- [5] N. Farsad, H. Birkan, Yilmaz, 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, 2016.
(<https://doi.org/10.1109/comst.2016.2527741>)
- [6] S. Hiyama, Y. Moritani, T. Suda, T. Shima, and K. Sutoh, “An autonomous molecular transport system using dnas and motor proteins in molecular communication,” in *Proc. 2nd ICST Int. Conf. Bio-Inspired Models Netw., Inf. Comput. Syst. (BIONETICS)*, 2007.
(<https://doi.org/10.1109/bimnics.2007.4610099>)
- [7] L. C. Cobo and I. F. Akyildiz, “Bacteria-based communication in nanonetworks,” *Nano. Commu. Netw.*, vol. 1, no. 4, pp. 244-256, Dec. 2010.
(<https://doi.org/10.1016/j.nancom.2010.12.002>)
- [8] 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.
(<https://doi.org/10.1109/tnb.2016.2628047>)
- [9] M. T. Barros, “Ca²⁺-signaling-based molecular communication systems: Design and future research directions,” *Nano. Commu. Netw.*, vol. 11, pp. 103-113, Mar. 2017.
(<https://doi.org/10.1016/j.nancom.2017.02.001>)
- [10] 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.
(<https://doi.org/10.1109/tit.2012.2219496>)
- [11] 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.
(<https://doi.org/10.1109/comst.2020.3048099>)
- [12] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and B. Özerman, “Energy model for communication via diffusion in nanonetworks,” *Nano Commun. Netw.*, vol. 1, no. 2, pp. 86-95, Jun. 2010.
(<https://doi.org/10.1016/j.nancom.2010.07.002>)
- [13] 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.
(<https://doi.org/10.1109/jsac.2014.2367662>)
- [14] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, “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, 2014.
(<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.005>)
- [15] S. Kim and S.-Y. Jung, “A study on the CEMC molecular communication scheme based on pulse position modulation in free diffusion space,” *J. KICS*, vol. 46, no. 10, pp. 1683-1689, Jul. 2021.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.10.1683>)
- [16] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, “Noise analysis in ligand-binding reception for molecular communication in nanonetworks,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 9, pp. 4168-4182, Sep. 2011.
(<https://doi.org/10.1109/tsp.2011.2159497>)
- [17] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, “Characterization of molecular communication channel for nanoscale networks.” in *Biosignals*, p. 327, 2010.
(<https://doi.org/10.5220/0002757303270332>)

김수진 (Su-Jin Kim)



2020년 8월 : 영남대학교 전자
공학과 졸업

2022년 2월 : 영남대학교 전자
공학과 석사 졸업

2022년~현재 : 영남대학교 전자
공학과 박사과정

<관심분야> 디지털 신호처리,
이동통신, 나노통신 및 분자통신 등

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

정성윤 (Sung-Yoon Jung)



2000년 : 고려대학교 전기전자
전파 공학부 졸업

2000년~2002년 : 한국과학기술
원 전자 전산학과 석사학위
취득

2002년~2006년 : 한국과학기술
원 전자 전산학과 박사학위
취득

2006년~2009년 : 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2009년~2014년 : LED-IT 융합산업화 연구센터 부센
터장(2012) 및 분과장

2009년~현재 : 영남대학교 전자공학과 교수

<관심분야> ICT융합통신, 에너지 전달형 무선 광통
신, 카메라통신, 디스플레이 통신(DFC), 나노통신
및 분자통신

[ORCID:0000-0002-1775-7144]