

# 확산기반 분자통신 채널에서 ISI 완화를 위한 해밍 부호에 관한 연구

정호영\*

## A Study on Hamming Codes for Mitigating ISI on the Diffusion-based Molecular Communication Channel

Ho-Young Cheong\*

**요약** 본 논문에서는 확산기반 분자통신 채널에 존재하는 ISI(inter-symbol interference)를 완화하기 위해 ISI 특성을 채널 복호 알고리즘에 적용한 ISI 해밍부호를 제안하였다. 제안된 채널부호의 비트 오류 성능을 입증하기 위해 ISI가 존재하는 분자통신 채널에서 시뮬레이션을 통해 비트 오류율을 측정하였으며 ISI 분자통신 채널에 적용되고 있는 주요한 채널부호들의 비트 오류 성능을 비교·분석하였다. 시뮬레이션 결과 방사되는 분자 수가 1100개 이하인 경우 본 논문에서 제안한 (8,4) ISI 해밍부호의 비트 오류율이 다른 부호에 비해 가장 우수함을 알 수 있었다. 또한, 방사 분자 수가 1000개 일 때 본 논문에서 제안한 ISI 해밍부호의 복호 기법은 소프트 값만을 활용한 (7,4) 해밍부호에 비해 약  $5.9 \times 10^{-5}$ 의 오류율이 개선되었다. ISI 제거 성능이 우수한 것으로 인정되고 있는 ISI-완화 채널부호와 비교해 보면 방사 분자 수가 크지 않은( $M < 1100$ ) 채널 환경에서는 본 논문에서 제안한 ISI 해밍부호가 가장 유리하고 방사 분자 수가 큰  $M > 1100$ 인 경우에는 ISI-완화 채널부호가 더 유리함을 알 수 있었다.

**Abstract** In this paper, in order to mitigate ISI(inter-symbol interference) in a diffusion-based molecular communication channel, an ISI Hamming code is proposed in which ISI characteristics are applied to a channel decoding algorithm. In order to prove the bit error rate performance of the proposed channel code, the bit error rate performance of the major channel codes applied to the molecular communication channel with ISI was compared and analyzed through simulation. From the simulation results, it can be seen that the bit error rate performance of the ISI Hamming code is the best when the number of radiated molecules is less than or equal to 1100. In addition, when the number of transmitted molecules is  $M=1000$ , the decoding method of the ISI Hamming code proposed in this paper has improved the bit error rate of approximately  $5.9 \times 10^{-5}$  compared to the Hamming code using only soft values. Compared with the ISI-mitigating channel code, which is effective for removing ISI in the molecular communication channel, the ISI Hamming code proposed in this paper is the most advantageous in a channel environment where the number of transmitted molecules is not big ( $M < 1100$ ). And we can see that the ISI-mitigating channel code is more advantageous when the number of transmitted molecules is large( $M > 1100$ ).

**Key Words** : ISI(inter-symbol interference), Diffusion-based Molecular Communication, Hamming Code, ISI-mitigating code, Soft Value

### 1. 서론

최근 바이러스에 의한 감염병의 세계적인 확산과

급격한 노령화에 따른 질병 퇴치 등과 관련된 바이오 산업이 그 어느 때보다도 많은 관심을 받고 있다. 이에

\*Department of Information and Communication Engineering, Namseoul University

Received December 18, 2020

Revised December 18, 2020

Accepted December 23, 2020

따라 생체 시스템에 적용되는 나노 기술에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있으며, 특별히 생체 시스템 내의 통신기술은 미래의 도전 연구 과제 중 하나이다. 정보 전달 매개체로서 생체 내의 분자들을 이용하는 분자통신(molecular communication)은 가장 일반적인 생체 내 통신 방식으로 관심을 받아 왔다[1][2].

통신 신뢰도를 높이기 위해 일반 전파통신 방식에서는 다양한 채널부호 기법에 관한 많은 연구가 진행이 되고 있다. 그러나 분자통신 채널은 일반 전파통신 채널과는 다른 면이 많은데, 에너지원이 제한되어 있고 나노미터급으로 시스템을 구성해야 하는 크기 제약이 있다. 또한 분자들을 정보 전달 매개체로 활용하는 확산기반 분자통신 채널의 경우에는 채널의 메모리가 존재하므로 ISI(inter-symbol interference) 현상을 고려하여야 한다. 따라서 분자 통신 채널에 적용될 채널부호 시스템은 에너지 소모량이 최소화되도록 복잡도가 가능한 한 적어야 하며 ISI를 제거할 수 있는 부호 시스템으로 구성해야 한다.

본 논문에서는 복잡도가 크지 않으면서도 확산기반 분자통신 채널에서 ISI를 완화할 수 있는 Hamming 부호의 복호 방법을 제안하였으며, 제안한 복호 방법에 대해 모의실험을 통하여 비트 오율 성능을 분석하였다.

## 2. 확산기반 분자통신 시스템의 구성

분자들을 정보 전송 매개체로 활용하는 분자통신에서는 송신 단에서 전송할 정보에 따라 분자 수를 조절하여 방사하는데 이 들 분자들은 브라운 운동 형태로 유체를 통해 수신기를 향해 확산이 되어 나간다[2]. 수신기에서는 심벌 구간 동안 수신기에 도착하여 흡수된 분자들을 카운트하여 전송된 정보를 추정한다. 그림 1은 가장 기본적인 형태의 확산기반 분자통신 시스템 모델을 나타낸 것이다. 그림 1에서  $d$ 는 송신기의 중심에서 수신기 중심까지의 거리이고  $r_r$ 은 구형 수신기의 반지름이다.

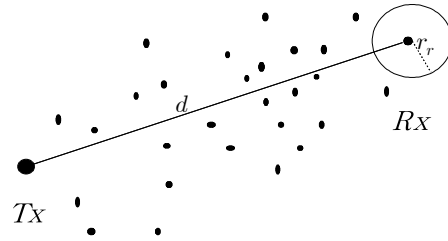


그림 1. 확산기반 분자통신 시스템 모델[6]  
Fig. 1. Diffusion-based Molecular Communication System Model[6]

송신 단에서 방사된 분자들은 수신 단을 향해 브라운 운동 형태로 확산이 되며 시간  $t$ 까지 수신기에 방사된 분자들이 흡수될 확률은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[3]. 식 (1)에서  $D$ 는 유체내에서 분자들의 확산 계수이다[6].

$$F_{hit} = \frac{r_r}{d+r_r} \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (1)$$

송신 단에서 방사된 대부분의 정보 분자들은 심벌 구간 내에 수신기에 흡수되어 정보를 전달하게 되지만 심벌 구간 내에 수신기에 흡수되지 못할 수도 있으며 그 비율은 주로 거리  $d$ 에 의해 결정된다.

본 논문에서는 전송할 정보 값이 1이면  $M$  개의 분자들을 일시에 방사하고 정보 값이 0이면 방사하지 않는 BCSK(binary concentration-based shift keying) 변조 방식을 사용하여 정보를 전송한다고 가정한다. 수신기에서는 매 심벌에 관한 최적의 임계값을 이용하여 정보 심벌을 추정한다[4].

## 3. ISI 완화를 위한 해밍 복호 기법

전송하고자 하는 정보 심벌이 1일 때  $M$  개의 분자들을 방사하고 정보 심벌이 0이면 방사하지 않는 BCSK 변조 방식을 사용할 경우, 송신 단으로부터 방사된 메신저 분자들은 확산기반 분자통신 채널을 통해 수신기로 확산된다. 수신 심벌 구간 동안 수신기에 도착하여 흡수된 분자 수를 카운트한 후 특정 임계값을 넘으면 심벌 1로 추정하고 임계값 이하이면 심벌 0으로 추정한다.

$i$  번째 정보 심벌에 대해 송신 단에서 방사된  $M$

개의 분자들이 브라운 운동을 통해  $i$ 번째 수신 심벌 구간 내에 수신기에 도착하여 흡수되는 경우가 대부분이지만  $(i+1)$  번째 이후의 심벌 구간에 도착하는 분자들도 존재할 것이며 이들로 인해 ISI가 발생한다. 특히, 정보 심벌 1이 두 개 이상 연속된 후 발생하는 정보 심벌 0에는 이전에 연속적으로 방사된 분자들에 의해 ISI 현상이 두드러진다는 사실이 밝혀져 있다[5].

한편, 정보 심벌 1에 대해 방사된  $M$  개의 분자들이 수신기에서 임계값보다 적게 흡수되면 오류가 발생되며 정보 심벌 0에 대해서도 방사된 분자들이 없지만 심벌 구간 전에 방사된 분자들이 뒤늦게 도착하여 심벌 1로 오판을 할 수도 있다. 여기에서 정보를 판정하기 위해 사용한 흡수 분자 수는 일반 전파통신 시스템의 복조기에서 경판정(hard decision)을 위해 사용하는 소프트 값에 해당하며 소프트 값에 채널 정보가 담겨있듯이 수신기에 흡수된 분자 수에도 분자 통신 채널의 정보가 담겨있다[6][7]. 일반 전파통신 시스템의 복조기에서 경판정을 한 후에 소프트 값을 버리듯이 분자통신 시스템의 복조기도 정보 심벌 1과 0을 판정하고 나면 흡수된 분자 수에 담겨있는 채널 정보를 버린다.

[6]에서는 분자통신 복조기의 소프트 값을 경판정 후에 버리지 않고 이를 해밍 복호 과정에 활용하여 오류 성능을 크게 개선한 바 있다. 그러나 [6]의 경우에는 ISI를 고려하지 않은 복호 알고리즘을 제시한 것이며 이 방식을 ISI 현상이 잦은 분자통신 채널에 적용하기 위해서는 ISI 특성을 적용한 채널 복호 기법이 요구된다.

본 논문에서는 확산기반 분자통신 채널의 ISI 특성을 소프트 값을 활용한 해밍 복호기에 적용하여 오류 성능을 추가로 개선하였다. ISI 특성을 적용하기 위해 채널부호 앞에 '0'을 추가하여 전송하고 정보 비트 1이 2개 이상 연속된 경우 이후의 비트에 대한 소프트 값 기여도를 조정하여 복호 함으로써 ISI의 영향을 최소화하였다. 한편, 본 논문에서도 [6]과 같이 한 심벌 구간 동안 카운트된 흡수 분자 수에서 임계치를 뺀 값을 소프트 값으로 부르기로 한다.

본 논문에서 제시하는 ISI 해밍부호는  $(n,k)$  해밍 부호 앞에 '0'을 추가하여  $(n+1,k)$  부호로 만들어 전송 함으로써 ISI 현상을 완화시키고 복호를 할 때는 추가한 '0'을 다시 제거하여  $(n,k)$  해밍부호로 복원시킨 후 소프트 값을 이용한 복호 알고리즘을 적용하여 오류를 정정 함으로써 비트 오류율이 최소화되도록 한다.  $(n+1,k)$  ISI 해밍부호의 복조기에 입력되는 수신 부호를  $\mathbf{r}' = (r_1, r_2, \dots, r_{n+1})$ 이라고 할 때  $r_1$ 은 0이므로 제거한다. 따라서  $r_1$ 을 제거하고 남은 수신 부호  $\mathbf{r} = (r_2, \dots, r_{n+1})$ 이  $(n,k)$  해밍부호에 대한 수신 부호 벡터가 된다.  $i(\geq 2)$  번째 수신 부호 비트 값  $r_i$ 는 복조기에 입력되는 소프트 값(카운트한 흡수 분자 수)에 대해 경판정(hard decision)을 하여 얻은 0 혹은 1의 값이다. 경판정 이전에 소프트 값에 내재되어 있던 정보들은 경판정을 한 후 소프트 값을 버리면 없어지며 이로 인해 비트 오류 성능이 저하된다. 분자통신에서는 임계치가 0이 아니므로 복호 과정에 활용되는  $i$  번째 소프트 값  $q_i$ 는 식 (2)와 같이 표시할 수 있다. 식 (2)에서  $\tau_i$ 는  $i$  번째 심벌에 대한 임계값이다.

$$q_i = |r_i - \tau_i| \quad (2)$$

수신기에 도착하여 흡수된 분자 수가 임계값을 넘어 판정 영역의 반대 위치에 해당하는 값을 갖게 되면 오류가 발생하므로 오류 비트에 해당하는 소프트 값  $q_i$ 는 작은 값을 가질 확률이 크다. 따라서 소프트 값이 지나치게 작으면 오류가 발생했을 확률이 크므로 소프트 값은 오류 비트에 대한 정보를 담고 있다. 기본적으로 해밍 복호는 1개 이하의 오류만을 정정할 수 있으며 2개 이상의 오류 비트는 정정 능력을 벗어난 것으로 간주하여 복호하지 않는다. 그러나 [6]에서는 분자통신 채널의 정보가 내재되어 있는 소프트 값을 복호에 이용할 경우 2개 이상의 오류를 정정하여 비트 오류율을 크게 개선할 수 있음을 보인 바 있다. 소프트 값을 이용한 해밍 부호의 복호 알고리즘에 대한 상세한 사항은 [6]을 참조하기로 한다. [6]의 복호 알고리즘은 분자통신 채널의 특성 중 하나인 ISI 현상을 고려하지

않은 것으로 ISI 특성을 고려하여 복호 알고리즘을 설계할 경우 더 큰 오류 개선 효과를 거둘 수 있다.

분자통신 채널에서 발생하는 ISI는 정보 심벌 1이 두 개 이상 연속된 후 발생하는 정보 심벌 0에 가장 두드러지게 나타난다는 점을[5] 이용하여 다음과 같이 ISI-완화를 위한 해밍 복호 알고리즘을 제안한다.

- 연속된 두 부호에 의해 1 값이 연속되지 않도록 해밍 부호의 첫 번째 위치에 0을 부가한다. 따라서  $(n, k)$  해밍부호는  $(n+1, k)$  ISI 해밍부호가 된다.

- 1이 두 개 이상 연속되고 0 값이 이어지면 0 값의 위치에는 ISI가 발생할 확률이 크므로 0 값에 해당하는 소프트 값의 영향을 감소시키기 위해 소프트 값을 일정한 비율로 줄인다. 이 때 소프트 값을 일정한 비율로 줄이는 값을 ISI scale factor  $\alpha$  ( $\leq 1.0$ )로 부르기로 한다.

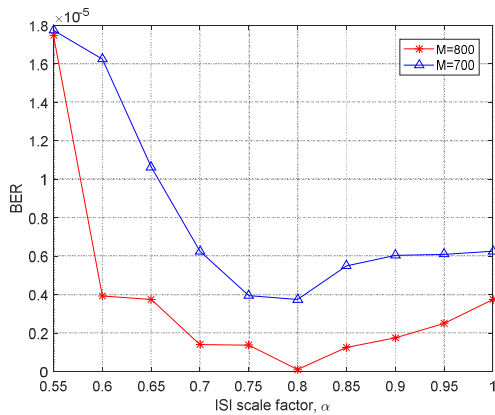


그림 2. ISI scale factor,  $\alpha$ 에 따른 BER  
Fig. 2. BER vs ISI scale factor,  $\alpha$

그림 2는 비트 당 분자 수  $M=700$ 일 때와  $M=800$ 일 경우에 대해 (7,4) 해밍 부호에 0을 부가하여 (8,4) ISI 해밍 부호를 만든 후  $\alpha$ 를 1.0에서 0.5까지 변화시키면서 측정한 제안된 복호 알고리즘의 오류 값을 나타낸 것이다. 그림 2에서  $\alpha=0.8$ 일 때 가장 낮은 BER 값을 얻을 수 있었으며  $\alpha=0.8$ 보다 크거나 작으면 오히려 BER 값이 증가하는 현상을 볼 수

있다. 특히  $\alpha \leq 0.65$  이하이면 ISI를 고려하지 않은 경우( $\alpha=1$ ) 보다도 BER 값이 증가하여 역효과가 남을 알 수 있다. 본 논문에서는 ISI scale factor 값을  $\alpha=0.8$ 로 고정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Algorithm 1은 본 논문에서 제안한 ISI 해밍부호의 복호 알고리즘을 나타낸 것이다.  $s^i$ 는  $i$ 번째 수신된 소프트 값의 시퀀스이며  $r^i$ 는  $s^i$ 에 대해 경판정을 통해 얻은  $(n, k)$  해밍부호의 수신부호 시퀀스이다. 1의 정보 비트가 2개 이상 연속된 경우  $\alpha$  값으로 조정된 소프트 값의 시퀀스를 이용하여 [6]과 동일한 복호 알고리즘을 사용하여  $r^i$ 를 복호 한다.

**Algorithm 1** 제안한 ISI 해밍부호의 복호 알고리즘

- 1:  $s^i = (s_1^i, s_2^i, \dots, s_n^i, s_{n+1}^i)$ , soft-value sequence
- 2: With  $s_1^i = 0$ ,  $r^i = (r_2^i, r_3^i, \dots, r_n^i, r_{n+1}^i)$   
if  $s_l^i > \tau$ ,  $r_l^i = 1$  else  $r_l^i = 0$ , for  $l=2, \dots, n+1$
- 3: if  $r_l^i = 1$  and  $r_{l+1}^i = 1$ ,  $s_{l+2}^i = \alpha s_{l+2}^i$   
for  $l=2, \dots, n-1$ , where  $\alpha$  is ISI scale factor
- 4: Decode  $r^i$  using  $s^i$ , (decoding algorithm in [6])

### 4. 모의실험 및 결과 분석

본 논문에서 제안한 ISI 해밍부호의 오류 성능 개선을 분석하기 위해 분자통신 시스템에서 BCSK 변조 방식을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 본 논문에서 시행한 시뮬레이션 파라미터 들을 표시한 것이다. 송·수신기의 거리는 일반적으로  $5 \sim 10 [\mu m]$ 를 사용하지만 ISI 현상이 두드러지고 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해  $6 [\mu m]$ 를 사용하였다. 분자통신 시스템의 시뮬레이션은 많은 실행시간이 요구되기 때문에 본 논문의 실험 목적을 벗어나지 않는 범위 내에서 시뮬레이션 실행 시간이 최소화되도록 확산 계수값을 정하였다.

채널부호를 사용하지 않고 BCSK 변조만을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션은 MUCIN 시뮬레이터 [8]을 이용하여 실행하였으며, 이를 바탕으로 해밍 부호기 모듈과 복호기 모듈을 추가하여 시뮬레이션을 진행하였다. 부호율이  $R_c$ 인 채널부호를 사용하여

정보 비트를 송신하는 경우 실제 송신되는 정보 비트는 부호율  $R_c$  비율 만큼 줄어든 비트에 해당한다. 본 논문에서는 부호율  $R_c$ 를 정보 비트 수에 반영하여 채널부호에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation Parameters

파라미터	변수	값
확산 계수	$D$	$100[\mu m^2/s]$
송/수신기 거리	$d$	$6[\mu m]$
채널 메모리	$I$	35
심벌 구간	$t_s$	$300[ms]$
방사 분자 수(/bit-1)	$M$	100-2000

그림 3은 ISI가 존재하는 확산기반 분자통신 채널에서 비트 1일 때 방사되는 분자 수  $M$ 에 따른 채널부호들의 오율 성능을 비교하여 나타낸 것이다. 오율 값이 0인 경우는 전송 비트 수가 거의 무한대에 가까워야 하므로 신뢰할 수 없어서 표시하지 않았다.

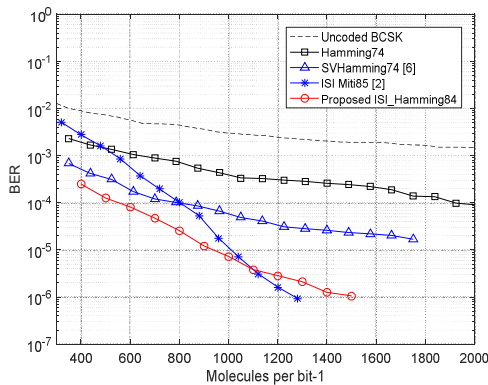


그림 3. 비트 당 분자 수에 대한 비트 오율  
Fig. 3. BER vs. Molecules per bit-1

그림 3에서 점선은 채널부호를 사용하지 않고 BCSK 변조 방식만을 사용할 경우에 대하여 시뮬레이션을 통해 얻은 비트 오율을 나타낸 것으로, 채널 부호를 적용했을 경우의 오율 성능에 대한 기준값으로 사용하기 위해 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사

용한 채널부호는 분자통신 채널에 적용할 채널부호로 처음 권고된 (7,4) 해밍부호, 소프트 값을 활용하여 복호 성능을 개선한 소프트 값을 이용한 (7,4) 해밍 부호[6]와 본 논문에서 제시한 채널부호로 분자통신 채널의 ISI 특성을 고려하여 [6]의 복호 성능을 개선한 (8,4) ISI 해밍 부호의 비트 오율을 비교하여 나타났다. 또한 분자통신 채널에서 ISI 제거를 위해 제시된 채널부호 중 성능이 우수한 것으로 평가되는 (8,5) ISI-완화 채널부호(ISI mitigating channel code)[2]의 오율 성능도 시뮬레이션을 통해 얻은 후 비교·분석하였다.

정보 비트가 1일 때 방사되는 분자 수가  $M=1100$ 개 이하인 경우 본 논문에서 제시한 (8,4) ISI 해밍부호의 비트 오율이 가장 우수하다. 일반적으로 시뮬레이션에 사용하고 있는 방사 분자 수  $M$ 은 약 1000개 정도인데,  $M=1000$ 개 인 경우 본 논문에서 제안한 복호 기법은 소프트 값 만을 활용한 (7,4) 해밍 부호에 비해 약  $5.9062 \times 10^{-5}$ 의 오율이 개선된 것을 볼 수 있다.  $M=1100$ 인 경우 제안된 (8,4) ISI 해밍부호와 (8,5) ISI-완화 채널부호의 비트 오율은 거의 동일하지만 분자 수  $M$ 이 작을수록 제안된 부호의 비트 오율이 더 우수하며 그 격차는 커져  $M=400$ 일 때 약  $2.6 \times 10^{-3}$ 의 차이를 보인다. 한편, (8,5) ISI-완화 채널부호는  $M=1100$ 개 이상의 채널 환경에서 가장 우수한 성능을 보여주고 있으며 방사 분자 수가 증가할수록 비트 오율 값은 급격히 감소함을 볼 수 있다. 따라서 방사 분자 수가 크지 않은( $M < 1100$ ) 채널 환경에서는 본 논문에서 제시한 ISI 해밍부호가 가장 유리하고  $M > 1100$ 인 경우에는 ISI-완화 채널부호를 적용하여 시스템을 구성해야 할 것이다.

## 6. 결론

본 논문에서는 확산기반 분자통신 채널에서 발생하는 ISI 특성을 소프트 값을 활용한 해밍 복호 알고리즘에 적용한 ISI 해밍부호를 제안하였다. 또한 ISI가 존재하는 확산기반 분자통신 채널에서 사용되고 있는 채

널부호들의 오류 성능을 시뮬레이션을 실행하여 분석하였다.

시뮬레이션 결과 방사 분자 수가  $M=1000$ 개 인 경우 본 논문에서 제안한 복호 기법은 소프트 값만을 활용한 (7,4) 해밍 부호에 비해 약  $5.9 \times 10^{-5}$ 의 오류가 개선된 것을 볼 수 있었다. 방사 분자 수가 크지 않은 ( $M < 1100$ ) 채널 환경에서는 본 논문에서 제시한 ISI 해밍부호가 가장 유리하고 방사 분자 수가 큰  $M > 1100$ 인 경우에는 ISI-완화 채널부호가 가장 유리를 알 수 있었다.

향 후 다양한 파라미터를 갖는 분자통신 채널에 대한 성능 분석이 필요하다. 또한, 분자통신 시스템에 대한 시뮬레이션은 많은 시간이 소요되므로 이를 단축할 수 있는 방법에 대한 연구도 요구된다.

### REFERENCES

[1] Po-Jen Shih, Chia-Han Lee, Ping-Cheng Yeh, Kwang-Cheng Chen, "Channel Codes for Reliability Enhancement in Molecular Communication," IEEE Journal on Selected Areas in Communications ( Volume: 31 , Issue: 12 , December 2013 , Vol. 31, Issue 12, pp. 857-867, December 2013.

[2] A. Oguz Kislal, Bayram Cevdet Akdeniz, Changmin Lee, Ali E. Pusane, Tuna Tugcu, Chan-Byong Chae, "ISI-Mitigating Channel Codes for Molecular Communication via Diffusion," IEEE Access, Vol.4, pp. 1-12, 2016.

[3] W. Guo, T. Asyhari, N. Farsad, H. B. Yilmaz, B. Li, A. Eckford, C-B Chae, "Molecular Communications: Channel Model and Physical Layer Techniques," IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 4, pp. 120-127 , 2016.

[4] W. Guo, B. Li, S. Wang, and W. Liu, "Molecular Communications with longitudinal carrier waves: baseband to passband modulation," IEEE Communication Letters, Vol. 19, Issue:9, pp. 1512-1515, Sept. 2015.

[5] B. C. Akdeniz, A. E. Pusane, and T. Tugcu, "Position-based modulation in molecular communications," Nano communication

networks, vol. 16, pp. 60-68, 2018.

[6] Ho-Young Cheong, "A Study on the Decoding of Hamming Codes using Soft Values on the Molecular Communication Channel," The Journal of KIIECT, Vol. 13, No. 5, pp. 338-343, October 2020.

[7] Hoyoung Cheong, "An Improved Decoding Scheme of LCPC Codes," The Journal of KIIECT, Vol. 11, No. 4, pp. 430-435, Aug. 2018.

[8] H. Birkan, Molecular Communication (MUCI) Simulator, <https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46066-molecular-communication-mucin-simulator>

---

### 저자약력

---

정 호 영(Ho-Young Cheong)

[중심회원]



- 1987년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

〈관심분야〉 채널부호, 분자통신