

확산기반 분자통신 채널에 효율적인 직렬 연결 부호에 관한 연구

정호영*

A Study on the Efficient Concatenated Code on the Diffusion-based Molecular Communication Channel

Ho-Young Cheong*

요약 본 논문에서는 확산기반 분자통신 채널에서 랜덤오류와 ISI에 의한 오류 모두에 효율적인 직렬연결 부호를 제안하였다. ISI 제거를 위해 설계된 ISI 완화 부호와 랜덤오류에 강한 ISI 해밍부호를 결합하여 직렬연결 부호를 구성하였으며, 시뮬레이션을 통해 오율 성능을 분석하였다. 방사 분자수 $M=1,200$ 이상인 채널 환경의 경우 직렬연결 부호의 오율 성능은 ISI에 강한 ISI 완화부호의 오율 성능을 따라가며, $M=600$ 이하의 채널 환경에서는 랜덤오류에 강한 ISI 해밍부호의 오율 성능을 따라가고 있음을 알 수 있다. $M=600 \sim 1,200$ 의 구간에서 직렬연결 부호는 가장 우수한 오율 성능을 보여주는데 이는 랜덤오류와 ISI에 의한 오류가 병존하는 구간에서 두 오류 모두를 정정할 수 있기 때문인 것으로 분석된다. $M=800$ 이하의 경우 직렬연결 부호와 ISI 완화부호의 오율은 평균적으로 약 1.0×10^{-1} 의 오율 격차를 보여줌을 알 수 있었다.

Abstract In this paper, we propose an efficient concatenated code for both random and ISI errors on diffusion-based molecular communication channels. The proposed concatenated code was constructed by combining the ISI-mitigating code designed for ISI mitigation and the ISI-Hamming code strong against random errors, and the BER(bit error rate) performance was analyzed through simulation. In the case of the above $M=1,200$ channel environment, it was found that the error rate performance of the concatenated code follows the error rate performance of the ISI-mitigating code, which is strong against ISI, and follows the error rate performance of the ISI-Hamming code, which is strong against random errors, in the channel environment below $M=600$. In $M=600 \sim 1,200$, the concatenated code shows the best error rate performance among those of three codes, which is analyzed because it can correct both random errors and errors caused by ISI. In the following cases of below $M=800$, it can be seen that the error rate of the concatenated code and the ISI-mitigating code shows an error rate difference of about 1.0×10^{-1} on average.

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

1. 서론

나노 기술의 발달로 인해 나노 머신을 생체 시스템에 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 생체 내에서 수행하고자 하는 일 들은 하나의 나노 머신

으로 감당할 수 없는 경우가 많은데 이는 나노 머신이 갖는 에너지, 계산 능력 등의 한계 때문이다. 따라서 다수의 나노 머신 들이 서로 협력하여 목표를 달성하게 되며 이때 나노 머신 들 간의 통신은 필수적이다[1]. 생체 내의 통신 중 하나인 분자 통신(molecular

Funding for this paper was provided by Namseoul University year 2021

*Department of Intelligence Information and Communication Engineering, Namseoul University

Received July 18, 2022

Revised July 28, 2022

Accepted August 03, 2022

communication)[2] 에서도 통신 신뢰도를 높이기 위해 오류 정정 부호가 사용되는데 나노 머신의 특성상 복잡도가 지나치게 큰 부/복호기는 사용할 수 없다.

일반적으로 가장 널리 사용되는 분자 통신 채널 모델은 확산기반 분자 통신 채널(diffusion-based molecular communication channel)인데 ISI(inter-symbol interference)가 상존하는 메모리 채널이다[3]. 따라서 확산기반 분자 통신 채널에 적용되는 오류 정정 부호는 ISI에 효율적으로 대처할 수 있어야 하며 대부분의 오류 정정 부호 연구는 ISI로 인한 오류에 대처할 수 있는 부호 시스템에 중점을 두고 있다[1][3]. 그러나 분자 통신 채널에 존재하는 오류는 ISI 오류뿐만 아니라 랜덤 오류도 병존하며 송신 단의 방사 분자 수가 적은 경우에는 오히려 ISI 현상이 많지 않다[2]. 최근 연구된 [2]의 경우에는 방사 분자수가 적은 경우에 지배적으로 발생하는 랜덤오류에는 강하나 방사 분자수가 많은 경우에 지배적으로 발생하는 ISI 오류에는 취약하다. 한편 [3]에서 연구된 ISI 완화 부호는 [2]와 반대로 ISI 오류에는 강하나 랜덤 오류에는 매우 약한 특성을 보여준다. 분자통신 채널에서는 랜덤오류와 ISI 오류가 병존하기 때문에 두 형태의 오류 모두에 효율적으로 대처할 수 있는 부호가 요구된다.

본 논문에서는 확산기반 분자 통신 채널에서 랜덤 오류와 ISI로 인해 발생하는 오류 모두에 효율적으로 대처할 수 있는 오류 정정 부호를 제안하였으며, 모의 실험을 이용해 기존 부호와 본 논문에서 제안한 부호의 오율 성능을 비교·분석하였다.

2. 확산기반 분자통신 채널을 통한 정보 전송

그림 1은 확산기반 분자통신 채널을 통해 정보를 전송하는 과정을 나타낸 것이다. 송신기(Tx)는 수신기(Rx)를 향해 정보가 1일 때 M 개의 분자들을 방사하고 정보가 0이면 방사하지 않는다. 이는 일반 전파 통신의 OOK(On-Off Keying) 변조 방식과 유사하며 분자통신에서는 BCSK(binary concentration-based shift keying) 변조 방식이

라고 한다. 수신기에서는 매 심벌 구간마다 흡수된 분자 수를 카운트한 후 적정 임계치를 기준으로 송신된 정보를 결정한다[4].

송신기에서 방사된 분자들은 브라운 운동 형태로 확산 계수 D 로 확산 되어 수신기를 향해 나가는데 [5], 송신기에서 수신기까지의 거리를 d 로 표시하고 구형 수신기의 반지름을 r_r 이라고 하면 송신기에서 방사된 후 분자들이 시간 t 에 수신기에 흡수될 확률은 식 (1)과 같다[2].

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

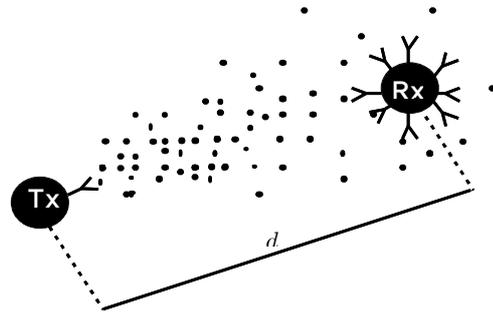


그림 1. 확산기반 분자통신 채널을 통한 정보전송
Fig. 1. Information transmission over the diffusion-based molecular communication channel

송신기에서 방사된 M 개의 정보 분자들은 기대되는 심벌 구간 내에 수신기에 흡수되지 못할 수도 있으며 그 다음 심벌 구간에서 흡수될 수 있는데 ISI 현상의 원인이 된다. M 값이 작으면 ISI 발생은 적을 수밖에 없으며 M 값이 클수록 ISI 현상은 두드러진다.

3. 분자통신 시스템의 오류 정정 부호

분자통신 시스템은 가용 에너지 자원이 적기 때문에 에너지 소비량이 많은 복잡한 부호 시스템을 구성할 수 없다. 그러나 확산기반 분자통신 채널의 특성 상 랜덤오류 뿐만 아니라 ISI에도 대처할 수 있는 정도의 오율 성능을 가져야 한다. 지금까지 분자통신 시스템에 적용되고 있는 오류 정정 부호는

다음과 같이 대별할 수 있다.

- 블록부호(해밍부호, TCH 부호)[2][5][6]
- 콘볼루션 부호[6][7]
- ISI 완화부호[1][3]

본 절에서는 부/복호기의 복잡도 대비 오율 성능이 가장 우수한 것으로 평가되는 2가지 부호 방식, 즉 소프트 값을 이용한 ISI 완화 해밍 부호[2]와 연속된 1 값들이 없는 코드 집합을 이용한 ISI 완화부호[3]에 대해 설명하고 이들의 장점을 결합한 직렬연결 부호를 제안한다.

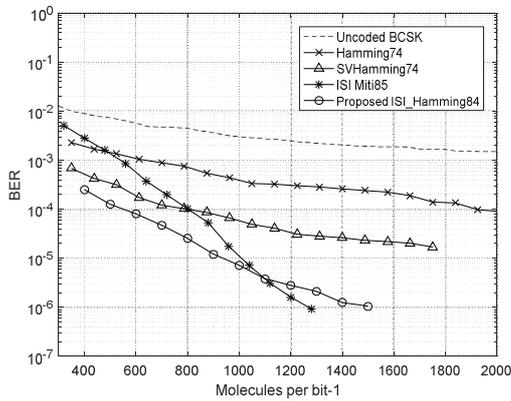


그림 2. 비트 당 분자수에 대한 비트 오율[2]
Fig. 2. BER vs. Molecules per bit-1[2]

그림 2는 ISI가 존재하는 확산기반 분자통신 채널에서 비트 당 방사 분자 수 M 에 따른 채널 부호들의 오율 성능을 비교하여 나타낸 것이다[2]. 그림에서 ISI 완화부호(ISI Miti85)와 ISI 해밍부호(ISI_Hamming84)는 다른 부호들에 비해 오율 성능이 크게 우수함을 알 수 있다. 그러나 두 부호의 오율 성능은 $M=1,100$ 에서 역전되고 있음을 알 수 있는데, 이는 방사 분자 수가 1,100개 이상이 되면 랜덤오류 보다는 ISI에 의한 오류가 지배적이기 때문에 ISI 완화에 중점을 두고 설계된 ISI 완화부호의 오율 성능이 더 우수하다. 반면에 방사 분자 수가 적은 경우 ISI 보다는 랜덤오류가 지배적이므로 랜덤 오류 정정 부호인 ISI 해밍부호의 오율 성능이

더 우수함을 알 수 있다.

본 논문에서는 위와 같은 오율 특성에 착안하여 두 부호의 장점을 결합한 직렬연결 부호를 제안한다. ISI 해밍부호와 ISI 완화부호는 중첩되는 복호과정들이 있고 두 부호의 복호기 복잡도가 작기 때문에 이들을 결합한 직렬연결 부호의 복잡도 또한 콘볼루션 부호나 다른 블록 부호에 비해 크지 않다.

4. 확산기반 분자통신 채널에 적합한 직렬연결 부호

본 절에서는 ISI 완화부호와 소프트 값을 이용한 해밍 부호에 대해 살펴보고 본 논문에서 제안한 직렬연결 부호를 상세히 설명한다.

4.1. ISI 완화부호

정보 1에 대해 M 개의 분자들을 분출하고 정보 0에 대해서는 분자들을 분출하지 않는 BCSK 를 사용할 경우, 정보 비트열이 '110'이면 '0'에 해당하는 정보비트에 ISI 현상이 발생할 가능성이 크다. 즉 i 번째 정보 심벌 '1'에 대해 송신기에서 방사된 M 개의 분자들은 브라운 운동형태로 확산하여 i 번째 수신 심벌 구간에 수신기에 도착하게 되는 경우가 많지만 $(i+1)$ 번째 이후의 심벌 구간에 도착하는 분자들도 존재하여 ISI가 발생한다. 두 개 이상 연속된 정보 비트 1이후에 전송되는 정보 비트 0이 있을 경우 이에 대한 수신 심벌 구간에서는 전에 연속적으로 방사된 분자들 때문에 ISI가 발생한다는 것이 밝혀져 있다[3].

ISI 완화부호는 이러한 점에 착안하여 식 (2)와 같이 연속된 비트 1이 없는 코드 집합을 발생시킨 후 정보 비트열을 부호화하여 ISI에 의한 오류를 정정한다.

$$CW_5 = \begin{bmatrix} 00001 \\ 00010 \\ 00100 \\ 00101 \\ 01000 \\ 01001 \\ 01010 \end{bmatrix} \quad (2)$$

예를 들어, 식 (2)의 각 행에 해당하는 부호들의 특징은 연속된 1이 존재하지 않으며 첫 번째 비트는 항상 0이라는 점이다. 첫 번째 비트가 0인 것은 전 부호의 마지막 비트가 1인 경우 연속된 1이 발생하지 않도록 하기 위한 것이다. 식 (2)의 CW_5 에 속한 부호는 총 7개 이므로 2-비트로 구성된 총 4개의 정보 비트열을 CW_5 부호 4개에 일 대 일 대응시켜 전송할 수 있다. CW_5 에 속한 부호의 길이는 5-비트이므로 CW_5 에 의해 부호화된 부호는 (5,2) 블록 부호로 볼 수 있으며, CW_5 부호 중에서 사용하지 않는 나머지 3개의 부호들은 잉여 부호가 된다.

ISI 완화부호의 복호 과정은 간단하다. i 번째 부호에 해당하는 수신 부호를 $\mathbf{r}^i = (r^{i_1}, r^{i_2}, \dots, r^{i_n})$ 라고 하자. 이때 r^{i_j} 는 수신기에 흡수된 분자 수로 표현되는 i 번째 부호의 j 번째 수신 심벌이다. 임계치 τ_i 에 의해 이진 비트로 복조된 수신 시퀀스를 $\mathbf{z}^i = (z^{i_1}, z^{i_2}, \dots, z^{i_n})$ 라고 하면 우선 첫 번째 비트 $z^{i_0} = 0$ 은 의미가 없으므로 제거하고 $\mathbf{z}^i = (z^{i_2}, \dots, z^{i_n})$ 에 대해 다음과 같은 복호 과정을 실행한다.

Algorithm 1 ISI 완화부호의 복호 알고리즘[3]

- 1: let $l = 2, 3, \dots, n$
 - 2: $mp = \arg \max \mathbf{r}^i$.
 - 3: $z^{i_{mp}} = 1$
 - 4: $z^{i_{mp-1}} \leftarrow 0, z^{i_{mp+1}} \leftarrow 0$
 - 5: if $z^{i_l} = 1$ and $z^{i_{l+1}} = 1$ then $z^{i_{l+1}} \leftarrow 0$
-

4.2. 소프트 값을 이용한 ISI 해밍 부호

신드롬(syndrome) 복호를 하는 해밍 부호(Hamming codes)는 부호 내에 1개의 오류만을 정정할 수 있는 단일 오류 정정 부호이다. 수신 심벌 값과 복조기의 경판정(hard decision)을 위해 사용하는 임계치를 뺀 값을 소프트 값이라고 하는데

소프트 값에는 채널 정보가 담겨 있다. 이러한 소프트 값을 해밍부호의 신드롬 복호에 이용하면 2개의 오류까지 복호할 수 있다[2]. [2]에서는 소프트 값을 이용한 해밍부호를 분자통신에 적용하기 위해 모든 (n, k) 해밍부호의 첫 번째 비트 위치에 0을 추가하여 $(n+1, k)$ 해밍부호를 만든 후 수신단에서 이를 제거하여 복호 함으로서 ISI를 경감시키는 효과를 얻고 있다. 그러나 그림 2에서 분석한 바와 같이 방사 분자 수가 특정 값을 초과한 분자통신 채널에서는 ISI 현상이 심화되어 ISI 완화부호에 비해 오율 성능이 저하됨을 알 수 있다.

소프트 값을 이용한 $(n+1, k)$ ISI 해밍부호의 복호 과정은 다음과 같다. 수신기에 들어오는 수신 부호를 $\mathbf{r}' = (r_1, r_2, \dots, r_{n+1})$ 라고 하면 $r_1 = 0$ 을 먼저 제거한다. r_1 을 제거하고 남은 부호 $\mathbf{r} = (r_2, \dots, r_{n+1})$ 은 (n, k) 해밍부호에 해당하는 수신 부호이다. 수신 부호 값 r_i 는 수신기에 흡수된 분자 수로 경계치 τ_i 와 비교한 후 경판정을 통하여 이진 값으로 변환하여 복조된 이진 비트 시퀀스 $\mathbf{z} = (z_2, \dots, z_{n+1})$ 을 얻는다. 한편, 분자통신에서 복호 과정에 이용되는 i 번째 소프트 값 q_i 는 식 (3)과 같다.

$$q_i = |r_i - \tau_i| \quad (3)$$

Algorithm 2 ISI 해밍부호의 복호 알고리즘[2]

- 1: $\mathbf{q}^i = (q_1^i, q_2^i, \dots, q_n^i, q_{n+1}^i)$
 - 2: With $r_1^i = 0, \mathbf{r}^i = (r_2^i, r_3^i, \dots, r_n^i, r_{n+1}^i)$
if $r_l^i > \tau^i, z_l^i = 1$ else $z_l^i = 0$, for
 $l = 2, \dots, n+1$
 - 3: if $z_l^i = 1$ and $z_{l+1}^i = 1, q_{l+2}^i = \alpha q_{l+1}^i$
for $l = 2, \dots, n-1$, where α is ISI scale factor
or
 - 4: Decode \mathbf{r}^i using \mathbf{q}^i , (decoding algorithm in [2])
-

식 (3)과 같은 소프트 값을 해밍부호의 신드롬 복호에 이용할 경우 부호 내에 발생한 오류를 2개 까지 정정할 수 있으므로 비트 오류를 크게 개선할 수 있다. 그러나 소프트 값을 이용한 ISI 해밍부호는 ISI가 심화되면 효과적으로 대처할 수 없다. Algorithm 2는 소프트 값을 이용한 ISI 해밍부호의 복호 과정을 나타낸 것이다[3].

4.3. 확산기반 분자통신 채널에 효율적인 직렬연결 부호

ISI 완화부호에 사용되는 부호 집합은 부호 개수가 2의 배수가 아니므로 정보비트 열과 부호를 일 대 일로 대응시킬 수 없다. 예를 들어 식 (2)의 CW_5 는 부호 개수가 7개이므로 정보 비트열과 일 대 일로 대응시킬 수 있는 부호는 4개뿐이고 이에 대응되는 것은 2-비트의 길이를 갖는 정보 비트열이므로 결과적으로 (5,2) ISI 완화부호가 된다.

한편 CW_5 에 전영 부호(all-zero code)를 추가하면 부호 개수는 8개가 되어 3-비트의 길이를 갖는 정보 비트열과 일 대 일 대응시킬 수 있다. 전영 부호는 방사 분자 수가 모두 0이 되어 ISI를 유발하지 않으므로 ISI 완화부호의 복호 과정을 거칠 필요가 없다. 전영 부호를 추가한 후 ISI 완화부호를 구성하면 (5,3) ISI 완화부호가 되어 부호율(code rate)을 증가시킬 수 있다. CW_5 에 전일 부호(all-one code)를 추가해도 동일한 결과를 얻을 수 있는데 전일 부호의 경우 '1'값이 4개 연속되므로 ISI 현상은 오히려 '1'을 판정하는데 도움이 되며, 다음 부호의 첫 번째 비트에 ISI 영향을 주지만 제거하는 비트이므로 ISI의 영향을 받지 않는다.

본 논문에서는 CW_5 에 전영 부호를 추가하여 구성할 수 있는 (5,3) ISI 완화부호와 소프트 값을 이용한 ISI 해밍부호를 결합시켜 랜덤 오류와 ISI에 의한 오류 모두에 대처할 수 있는 직렬연결 부호를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 직렬연결 부호는 (5,3) ISI 완화부호의 첫 번째 비트 0을 제외한 4-비트에 대해 (7,4) 해밍 부호를 적용하여 결과적으로 (8,3) 직렬연결 부호를 구성할 수 있다.

(8,3) 직렬연결 부호의 복호 과정은 부호화 과정과 역으로 진행되는데, 우선 첫 번째 비트를 제외한 7-비트에 대해 소프트 값을 이용한 해밍 부호의 신드롬 복호 과정을 적용한다. 이를 통해 4-비트의 복호 비트열을 얻을 수 있으며 2개 이하의 랜덤오류를 모두 정정할 수 있다. 4-비트의 복호 비트와 첫 번째 비트 0을 조합하면 ISI 완화부호를 얻게 되며 ISI 완화부호의 복호 과정을 수행하여 최종 3-비트의 정보 비트열을 얻게 된다.

직렬연결 부호에 사용된 ISI 완화부호를 (n_1, k_1) 이라고 하고 해밍 부호를 (n_2, k_2) 라고 하면 $n = n_1 + (n_2 - k_2)$ 이며 $k = k_1$ 이 된다. 수신기에 흡수된 분자 수로 구성된 i 번 째 수신 부호를 $\mathbf{r}^i = (r_1^i, r_2^i, \dots, r_n^i)$ 라고 하고 이진 값으로 경판정된 i 번 째 수신 부호를 $\mathbf{z}^i = (z_1^i, z_2^i, \dots, z_n^i)$, 소프트 값 시퀀스를 $\mathbf{q}^i = (q_1^i, q_2^i, \dots, q_n^i)$ 로 각각 표시하면 직렬연결 부호의 복호 과정은 Algorithm 3과 같다.

Algorithm 3 직렬연결 부호의 복호 알고리즘

- 1: With $\mathbf{z}^i = (z_2^i, \dots, z_n^i)$ and $\mathbf{q}^i = (q_2^i, \dots, q_n^i)$
- 2: Decode \mathbf{z}^i using \mathbf{q}^i , (decoding algorithm in [2])
- 3: Obtain decoded sequence $\mathbf{z}_{dec}^i = (z_2^i, \dots, z_{k_2}^i)$
- 4: If $\mathbf{z}_{dec}^i = (0, \dots, 0)$ then inf_seq=(0,...,0)
- 5: else go to next steps
- 6: Let $\mathbf{z}^i = (0, z^{i_2}, \dots, z^{i_{n_1}}) = (0, \mathbf{z}_{dec}^i)$
- 7: For $l = 2, 3, \dots, n_1$
- 8: $mp = \arg \max \mathbf{r}^i$.
- 9: $z^{i_{mp}} = 1$
- 10: $z^{i_{mp-1}} \leftarrow 0, z^{i_{mp+1}} \leftarrow 0$
- 11: if $z^{i_l} = 1$ and $z^{i_{l+1}} = 1$ then $z^{i_{l+1}} \leftarrow 0$

4. 모의실험 및 결과 분석

본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 직렬

연결 부호의 오율 성능을 얻었으며, 이 때 변조 방식은 BCSK를 사용하였다. 표 1은 본 논문에서 시행한 시뮬레이션 파라미터 들을 나타낸 것이다. 실험 결과의 정확도를 위해 몬테카를로 모의실험[9]을 하였으며 전송 정보비트 수는 최소 10^7 비트 이상을 사용하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Variable	Value
Diffusion Coefficient	D	$100[\mu\text{m}^2/\text{s}]$
Tx/Rx distance	d	$6[\mu\text{m}]$
Channel memory	I	35
Molecules per bit-1	M	100-2000
Transmitted information bits	N_{inf}	$\geq 10^7$

BCSK 변조를 사용한 기본적인 분자통신 시스템은 MUCIN 시뮬레이터[8]를 이용하였으며, 오류 정정 부호와 복호기 함수를 추가하여 시뮬레이션을 실행하였다. 공정한 비교를 위해 비트 당 분자수 M 을 부호율을 고려하여 조정하였는데, 예를 들어 (8,3) 직렬연결 부호에서 $M = 300$ 일 경우의 오율은 $M = 300 \times (8/3) = 800$ 인 BCSK의 오율과 비교하였다.

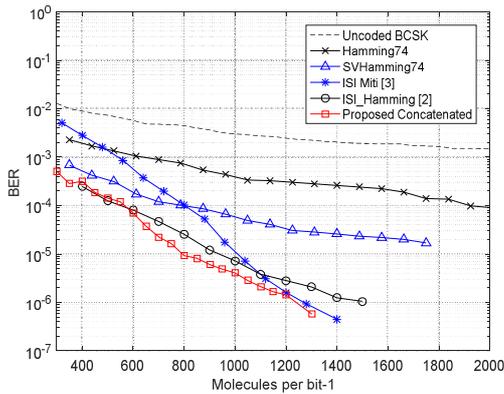


그림 3. 비트 당 분자수에 대한 비트 오율
Fig. 3. BER vs. Molecules per bit-1

그림 3은 ISI가 존재하는 확산기반 분자통신 채널에서 비트 당 분자 수 M 에 따른 여러 가지 부호

들의 오율 성능을 나타낸 것이다. 오율의 신뢰도를 위해 최소 10^7 개 이상의 정보 비트를 전송하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$M = 1,100$ 개 이하의 채널 환경에서는 ISI 해밍 부호의 오율 성능이 ISI 완화부호의 오율 성능보다 더 우수함을 알 수 있는데 M 값이 작아질수록 그 격차는 더 커진다. 이는 M 값이 작을 경우 방사 분자 수가 많지 않아 ISI를 유발할 가능성이 작아지므로 랜덤오류에 강한 ISI 해밍 부호의 오율 성능이 더 우수한 것으로 분석된다.

한편 $M = 1,100$ 이상의 채널 환경에서는 방사 분자수가 많아 ISI가 더 빈번하게 발생하므로 ISI 제거를 위해 설계된 ISI 완화부호의 오율이 더 낮다. M 값이 커질수록 비트 '0'과 '1'에 해당하는 방사 분자수 격차는 커지므로 판정오류가 발생할 확률은 감소하고 연속된 '1'값의 방사 분자들에 의한 ISI가 발생할 가능성이 커진다.

그림 3에서 직렬연결 부호의 오율 성능은 ISI 해밍 부호와 ISI 완화부호의 복호 장점이 결합되어, 랜덤오류와 ISI 오류 모두에 강한 특성을 보여주고 있으며 이는 방사 분자 수와 관계없이 분자통신 채널에서 발생하는 랜덤오류와 ISI 오류 모두에 효율적으로 대처할 수 있음을 알 수 있다.

$M = 1,200$ 이상인 채널 환경의 경우 ISI가 지배하는데 직렬연결 부호의 오율은 ISI에 강한 ISI 완화 부호의 오율 성능을 따라가고 있음을 볼 수 있다. 한편 $M = 600$ 이하의 채널 환경에서는 ISI에 의한 오류보다는 잘못된 판정에 의한 랜덤 오류가 지배하며 직렬연결 부호의 오율은 랜덤 오류에 강한 ISI 해밍부호의 오율 성능을 따라가고 있다. $M = 600 \sim 1,200$ 에서 직렬연결 부호는 가장 우수한 오율 성능을 보여주는데 이는 랜덤 오류와 ISI에 의한 오류가 병존하는 구간이고 두 오류를 모두 정정할 수 있는 직렬연결 부호의 오율 성능이 가장 우수한 것으로 분석된다. $M = 800$ 이하의 경우 직렬 연결 부호와 ISI 완화부호의 오율은 평균적으로 약 1.0×10^{-1} 단위의 오율 격차를 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 랜덤오류와 ISI에 의한 오류 모두에 효율적인 직렬연결 부호를 제안하였다. 직렬연결 부호는 ISI 완화부호에 쓰이는 부호 집합을 해밍 부호와 같은 순환 블록 부호(cyclic block code)에 적용할 수 있도록 변형한 후 두 부호를 결합하여 구성하였다. 시뮬레이션을 수행하여 ISI 완화부호, ISI 해밍 부호 및 본 논문에서 제안한 직렬연결 부호의 오율 성능을 분석하였다.

$M=1,200$ 이상인 채널 환경의 경우 직렬연결 부호의 오율은 ISI에 강한 ISI 완화부호의 오율 성능을 따라가며, $M=600$ 이하의 채널 환경에서는 랜덤오류에 강한 ISI 해밍부호의 오율 성능을 따라가고 있음을 알 수 있었다. $M=600 \sim 1,200$ 에서 직렬연결 부호는 가장 우수한 오율 성능을 보여주고 있는데 이는 랜덤 오류와 ISI에 의한 오류 모두를 정정할 수 있기 때문이다. $M=800$ 이하의 경우 직렬연결 부호와 ISI 완화부호의 오율은 평균적으로 약 1.0×10^{-1} 단위의 오율 격차를 보여줌을 알 수 있었다.

앞으로 나노 기술이 발전될수록 복잡도는 크지만 더 우수한 오율 성능을 갖는 오류 정정 부호를 분자통신 채널에 적용할 수 있을 것으로 예상되므로 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

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] Hoyoung Cheong, "A Study on Hamming Codes for Mitigating ISI on the Diffusion-based Molecular Communication Channel," The Journal of KIIECT, Vol. 14, Issue 1, pp. 1-6, Feb. 2021.

[3] 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.

[4] Mohammad U. Mahfuz, Dimitrios Makrakis, and Hussein T. Mouftah, "Concentration Encoded Molecular Communication: Prospects and Challenges Towards Nanoscale Networks," <http://www.site.uottawa.ca/~mmahf050/>, 2013.

[5] Sofia Figueiredo 1, Nuno Souto 1,2, Francisco Cercas, "Low-Complexity Channel Codes for Reliable Molecular Communication via Diffusion," Sensors, 2022, 22, 41, <https://doi.org/10.3390/s22010041>.

[6] Mark. S. Leeson, Matthew D. Giggins, "Forward Error Correction for Molecular Communications", Nano Communication Networks, 3(2012), pp. 161-167.

[7] William E. Ryan and Shu Lin, Channel Codes, Cambridge University Press, 2009. pp. 152-180.

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

[9] Taehoon Kwon, "Average Data Rate Analysis for Data Exchanging Nodes via Relay by Concurrent Transmission," The Journal of KIIECT, Vol. 11, No 6, pp. 638-644, Dec. 2018.

저자약력

정 호 영 (Ho-Young Cheong)

[중심회원]



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

<관심분야> 채널부호, 분자통신