

URLLC를 위한 짧은 길이 채널 부호의 성능 분석

조은영*, 주효상*, 이현재*, 장지웅**, 김상호^o

On the Performance of Short Channel Codes for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications

Eunyoung Cho*, Hyosang Ju*, Hyunjae Lee*, Ji-Woong Jang**, Sang-Hyo Kim^o

요약

본 논문에서는 초고신뢰 저지연 통신을 위한 다양한 짧은 채널 부호의 오율 성능 및 복호 복잡도를 분석하였다. 짧은 부호 길이에서 네 가지 채널 부호 및 복호 방법이 갖는 최대 오율 성능을 확인하고 초고신뢰 통신을 위해 각 채널 부호가 적절한지 판단하고 기준 성능을 만족하는 저복잡도 오율 성능을 분석하였다. 그 결과, 부호 길이가 64일 때 ordered statistic decoding으로 복호한 extended Bose-Chaudhuri-Hocquenghem 부호가 우수한 오율 성능과 동시에 경쟁력 있는 복호 복잡도를 가져 타겟 시나리오를 위한 강력한 후보 채널 부호임을 확인하였다. 부호 길이가 128일 때는 연속 제거 리스트 및 순환 중복 검사 연결 연속 제거 리스트 복호한 일반화된 리드-몰러 부호와 극 부호가 오율 성능 및 복호 복잡도 측면에서 우수해 강력한 후보임을 확인하였다.

키워드 : 초고신뢰 저지연 통신, BCH 부호, 극 부호, 리드-몰러 부호, 저밀도 패리티 검사 부호

Key Words : URLLC, BCH Codes, Polar Codes, Reed-Muller Codes, LDPC Codes

ABSTRACT

In this paper, we analyzed the error performance and decoding complexity of various short channel codes for ultra reliable and low-latency communications. We confirmed the maximum error rate performances for four channel codes and also compared low-complexity error rate satisfying reference performance. Consequently, for code length 64, we verified that extended Bose-Chaudhuri-Hocquenghem codes decoded with ordered statistics decoding are the strongest channel code candidates since they acquire not only the best error performance but also competitive decoding complexity simultaneously. For code length 128, generalized Reed-Muller codes and polar codes of successive cancellation list (SCL) and cyclic redundancy check-aided SCL decoding respectively are the powerful channel code candidates, thanks to their prevailing error performance and decoding complexity.

※ 본 연구 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 출연금으로 수행하고 있는 한국전자통신연구원 초정밀 서비스 실현을 위한 On-Time-On-Rate 무선액세스 및 광에지 클라우드 네트워킹 핵심기술 개발[2019-0-00002] 위탁연구과제의 연구결과입니다.

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, airis1994@skku.edu, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, iamshkim@skku.edu, 교수, 중신회원

* Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, {johoo1120, dlgswo77}@skku.edu

** School of Information Technology, Ulsan College, jwjang@uc.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 202005-111-A-RE, Received May 25, 2020; Revised July 21, 2020; Accepted July 27, 2020

1. 서 론

초고신뢰 저지연 통신(ultra reliable and low-latency communications: URLLC)은 3GPP (3rd generation partnership project) 5G (5th generation) 통신의 주요 시나리오로^[1], 엄격한 고신뢰 및 저지연 요구사항을 가지며 공장 자동화, 무인 항공기 등 다양한 서비스의 지원을 목표로 한다^[2]. 특히 초고신뢰 통신은 데이터 전송 시 오류를 최소화하는 동시에 불필요한 재전송을 막아 저지연에 기여할 수 있어 매우 중요하다^[3]. 각 통신 계층에서 고신뢰 통신을 위한 연구가 진행 중이며, 물리 계층에서는 채널부호의 부/복호화 기술 최적화가 필수이다^[3,4]. 특히 미션 크리티컬(mission-critical)한 서비스들이 긴급한 메시지 전달을 위해 짧은 패킷을 사용함에 따라, 수신에서 수백 비트의 짧은 길이에서 우수한 오율 성능을 보장하는 부/복호화 기술이 요구된다^[3-5]. 대표적으로 BCH (Bose- Chaudhuri-Hocquenghem) 부호, 극 부호(polar codes), 저밀도 패리티 검사(low-density parity check: LDPC) 부호 등의 부/복호화 기술 향상이 필요하다^[3,4].

다양한 채널부호의 부/복호화 기술 개발과 함께, 짧은 길이에서 우수한 오율 성능을 갖는 후보 채널부호의 성능 분석을 통해 각 부호 및 복호 방법이 URLLC 시나리오에 적합하지 않아야 한다. 또 복호 복잡도가 URLLC 시나리오에 실용적인지 고려해야 한다^[4].

논문 [4]에 따르면 BCH 부호는 짧은 블록 길이에서 강력한 오류정정 부호이다. 경관정 복호 시 오율 성능이 매우 저하되나, OSD (ordered statistics decoding) 등의 연관정 복호 시 신뢰도가 매우 높기 때문이다^[4]. 반면, 타 복호 방법 대비 복잡도가 매우 높다고 알려져, 다양한 부호 길이 및 부호율에 대해 복호 복잡도를 분석해 볼 필요가 있다. LDPC 부호는 5G 초광대역(enhanced mobile broadband: eMBB) 통신의 데이터용 채널에 채택된 오류정정 부호이다^[5]. 신뢰전파(belief propagation: BP) 복호를 통해 점근적으로 채널 용량에 근접하는 성능을 가지며, 반복복호 횟수(iteration)의 증가에 따라 ML (maximum likelihood) 성능에 근접한다^[7,8]. 짧은 길이에서 타 채널부호와의 오율 성능을 비교해볼 필요가 있다. 또, 극 부호는 짧은 길이에서의 우수한 복호 성능을 기반으로 eMBB 제어용 채널에 채택되어 연구되고 있다^[5,10]. 극 부호는 연속 제거 리스트(successive cancellation list: SCL) 복호의 리스트 크기를 증가시켜 ML 성능에 근접한 오율 성능을 가질 수 있다^[11]. 리드-몰러(Reed-Muller: RM) 부호는 극 부호의 한 형

태로 동일 생성행렬을 사용하며 높은 행 무게 순으로 비트채널을 선택해 극 부호보다 확장된 최소거리를 갖는다^[12,13].

기존에는 여러 채널부호에 대한 성능 분석이 한정적으로 이루어져 왔다. 우선 고신뢰 통신을 위한 저부호율 채널부호의 오율 성능 분석이 부족하다. 특히 BCH 부호를 OSD로 복호 시 부호율 $R=1/2$ 이하의 부호율에서 오율 성능이 얻어진 바가 없고 타 부호와 비교된 바 없다. 또한 다양한 채널부호의 복호 복잡도를 비교한 바가 없다^[4,14-17,19].

본 논문에서는 짧은 길이 및 저부호율에서 다양한 채널부호들의 최대 오율 성능을 통해 초고신뢰 통신에 적합한 후보 채널부호를 확인하였다. 또 기준 성능을 만족하는 저복잡도 오율 성능을 확인하였다. 그 결과, 부호 길이 및 부호율 별 URLLC 시나리오에 적합한 채널부호 후보를 제시한다.

II. 초고신뢰 통신을 위한 부/복호화 기법 및 복호 복잡도

2.1 BCH 부호 및 OSD

2.1.1 BCH 부호

BCH 부호는 Bose, Chaudhuri, 그리고 Hocquenghem에 의해 발명된 부호로 (N, K, t) 로 표현된다^[6]. N 은 부호 길이, K 는 정보 비트 길이, d_{\min} 은 최소거리, 그리고 t ($d_{\min} \geq 2t+1$)는 정정 가능한 오류 개수이다. 군집 오류(burst error) 정정 능력이 좋다고 알려져 있고 수백 비트 이하의 짧은 블록 길이에서 우수한 오율 성능을 가진다. 타 채널 부호보다 큰 최소거리를 가져 우수한 오율 성능을 기대할 수 있으나, 경관정 복호 기반의 Berlekamp-Massey 알고리즘은 경관정에 의한 성능한계를 갖는다^[6]. 한편, 연관정 복호인 OSD로 우수한 오율 성능을 얻을 수 있다^[4]. 또, BCH 부호는 고정된 길이 파라미터를 가지며 확장된 BCH (extended BCH: eBCH) 부호로 길이 호환성(length-compatibility)을 가질 수 있다.

2.1.2 OSD

OSD은 비트 별 신뢰도에 기반해 오류 패턴을 확인하고 오류를 정정하는 연관정 복호 방식이다^[4]. 먼저, 수신 신호 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 의 신뢰도인 로그 우도 비(log likelihood ratio: LLR) $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ 을 내림차순 정렬($\mathbf{r}' = \pi_1(\mathbf{r})$)하고, 각 비트에 대응하는 생성행렬(G_{BCH})의 열을 $\pi_1(G_{\text{BCH}}' = \pi_1(G_{\text{BCH}}))$ 으로 정렬한

다. 또 G_{BCH}' 에서 높은 신뢰도를 갖는 K 개의 열이 선형독립이 되도록 배열($G_{\text{BCH}}'' = \pi_2(G_{\text{BCH}}')$)하고 $\mathbf{r}'' = \pi_2(\mathbf{r}')$ 를 얻는다. 이를 통해 G_{BCH}'' 에 가우스 소거(Gaussian elimination)가 가능해지며 재-부호화(re-encoding) 시 체계적인 생성행렬(G_{sys})을 이용할 수 있다. \mathbf{r}'' 의 왼쪽 K 개 비트를 추출 후 경관정해 크기가 $(K \times 1)$ 인 \mathbf{v}_{est} 를 얻고 K 개 비트 중 i 개 비트 값을 반전(flip)해 $\mathbf{v}_{i,j}^f$ 를 얻는다. 이때 비트는 최대 OSD 차수 m 개만큼 반전시킬 수 있고($0 \leq i \leq m$), i 개 비트 반전 시 $\binom{K}{i}$ 개의 벡터($1 \leq j \leq \binom{K}{i}$)가 있으므로 총 $\sum_{i=0}^m \binom{K}{i}$ 개의 패턴을 고려한다. $\mathbf{v}_{i,j}^f$ 를 재-부호화해 새로운 부호어 $\mathbf{v}_{i,j}^f \cdot G_{\text{sys}} = C_N$ 을 얻을 수 있으며 $\pi_2^{-1}(\pi_1^{-1}(C_N))$ 와 \mathbf{r} 간 유클리디안(Euclidean) 거리가 최소인지 확인하고 최종 부호어를 결정한다. 차수 m 의 증가에 따라 ML 성능에 근접한다.

2.2 LDPC 부호 및 신뢰전파 복호

2.2.1 LDPC 부호

LDPC 부호는 Gallager에 의해 1960년대에 발명되고^[7] 1990년대에 Mackey에 의해 재발견된 선형 블록 부호(linear block code)이다^[8]. 패리티 검사 행렬 (parity check matrix: PCM)은 LDPC 부호를 정의하는 이진 행렬(binary matrix)로, 테너 그래프(Tanner graph)로 표현될 수 있고, PCM의 '1'은 그 숫자가 적다. 테너 그래프는 검사 노드(check node: CN)와 변수 노드(variable node: VN), 그리고 그들을 잇는 엣지(edge)로 이루어진다. 테너 그래프의 엣지는 LDPC 부호가 메시지를 주고 받으며 오류를 정정하는 경로이므로 부호 길이가 길어짐에 따라 엣지의 개수도 상대적으로 증가해 많은 오류 정정 기회를 가질 수 있어 점근적으로 우수한 오율 성능을 가진다. 동시에 타 채널 부호 대비 비교적 낮은 복호 복잡도를 가진다. 이러한 우수성을 기반으로 5G eMBB 데이터용 채널에 채택되어 연구되고 있다^[5].

2.2.2 신뢰전파(belief propagation) 복호

BP 복호는 LDPC 부호의 대표적인 복호 방법으로^[8], CN과 VN이 메시지를 주고받으며 오류를 정정한다. 첫 반복 시, i 번째 VN V_i 에서 j 번째 CN C_j 으로의 메시지 $M_{i,j}$ 는 i 번째 채널 LLR L_i 이다. 이후 C_j 에서 V_i 로 메시지 $E_{j,i} = 2 \tanh^{-1}(\prod_{i \in N(C_j)/i} (\tanh(\frac{M_{i,j}}{2})))$ 를 보내며, $N(C_j)$ 는 C_j 에 연결된 VN의 지수(index) 집합

이다. V_i 에서는 메시지 $Z_i = L_i + \sum_{j \in N(V_i)} E_{j,i}$ 를 경관정하고 PCM과 곱해 신드롬(syndrome)을 확인한다. 다음 반복에서의 $M_{i,j}$ 는 $M_{i,j} = \sum_{j \in N(V_i)/i} E_{j,i}$ 이다. BP 복호는 위 과정을 최대 반복 횟수 I_{max} 동안 반복하며, 신드롬이 영벡터로 얻어지면 오류가 없다고 판단해 반복을 중단한다. BP 복호는 CN의 메시지 업데이트 방식에 따라 합곱 알고리즘(sum product algorithm: SPA)^[7,8]과 최소합 알고리즘(min sum algorithm: MSA)^[9]이 있다. MSA는 SPA보다 복잡도가 낮지만 오율 성능도 저하된다^[7,9]. 이에 정규화된(normalized) MSA, 오프셋 MSA (offset MSA: OMSA) 등 변형된 MSA로 오율 성능을 개선하였고^[18], 짧은 길이에서는 SPA만큼 우수한 오율 성능을 가질 수 있다.

2.3 극/RM 부호 및 연속 제거 리스트 복호

2.3.1 극 부호(polar codes)

Arikan이 발명한 극 부호는 채널 양극화(channel polarization) 현상을 통해 채널 용량을 달성함이 이론적으로 증명되었다^[10]. 채널 양극화는 채널의 합성(combining)과 분리(splitting)로 구성되며 부호 길이 증가에 따라 채널 용량이 0과 1에 수렴하는 N 개의 분리 채널(split channel)을 얻을 수 있다. 이 중 신뢰도가 높은 K 개의 분리 채널에서 정보 비트(information bit)가, 나머지 $(N-K)$ 개의 고정된 분리 채널에서 고정된 값(frozen bit)이 전달된다. 이때 신뢰도에는 Bhattacharyya 파라미터, 채널 용량 등을 이용한다. 각 분리 채널은 생성 행렬 G_N 의 각 행에 대응되고 $G_N = F^{\otimes n}$ 이며 $N = 2^n$ ($n = 1, 2, \dots$), $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $(\cdot)^{\otimes n}$ 은 Kronecker 거듭 제곱이다. 짧은 길이에서 복호 성능이 매우 우수해서 5G eMBB 제어용 채널에 채택되는 등 우수성을 인정받았다^[5].

2.3.2 리드-몰러 부호(Reed-Muller codes)

RM 부호는 극 부호의 한 형태로 동일한 생성행렬 G_N 을 공유하며 K 개의 행을 비트 채널로 선택해 정보 비트를 실어 보낸다. 비트 채널 선택 시, 극 부호와 달리 G_N 각 행의 해밍 무게(Hamming weight)가 최대인 K 개의 행을 선택한다^[12,13]. 생성 행렬의 행 무게는 영벡터를 전송 시 해밍 거리(Hamming distance)를 의미하므로 RM 부호의 최소거리는 극 부호의 최소거리보다 크거나 같게 된다. 확장된 최소거리를 통해 RM 부호는 극 부호보다 우수한 오율 성능을 가질 수

표 1. 채널 부호 별 평균 복호 연산 복잡도 비교
Table 1. Average decoding computational complexity of various channel codes

	eBCH/OSD[14]	LDPC/OMSA[20]	Polar/CA-SCL[20]	GenRM/SCL[20]
Binary Addition	$N\min\{K^2, (N-K)^2\} + K(N-K) + \sum_{i=1}^m \binom{K}{i} i(N-K)$	-	-	-
Real Addition	$N + \sum_{i=1}^m \binom{K}{i} (N-K)$	$(2d_c N_1 + 2(N-K))I_{avg}^L$	$LN\left(\frac{1}{2}\log_2 N + 1\right)$	$LN\left(\frac{1}{2}\log_2 N + 1\right)$
Real Comparison	$N\log N$	$(2d_c - 1)(N-K)I_{avg}^L$	$(K + n_{CRC})(2L)\log_2(2L)$	$K(2L)\log_2(2L)$

있다. 일반화된 RM (generalized RM: GenRM) 부호는 비트 채널 선정을 위한 G_N 내 행 정렬 시, 우선 해밍 무게를 기준으로 정렬하고, 동일 해밍 무게를 가질 때는 극 부호의 생성행렬 설계규칙을 따르도록 한 부호이다.

2.3.3 연속 제거 리스트 복호

연속 제거(successive cancellation: SC) 복호는 극 부호의 발명과 동시에 제안된 순차적 복호 기반의 알고리즘이며¹⁰⁾ 유한 길이 복호 성능이 타 채널 부호 대비 저하된다. 이에 한 개의 리스트를 관리해 복호하는 SC 복호와 달리 L 개의 리스트를 관리하는 SCL 복호가 제안되었다¹¹⁾. SCL 복호는 i 번째 정보비트 u_i 복호 시 u_{i-1} 의 결과를 바탕으로 복호하되 관리하는 리스트 크기가 L 이 될 때까지 u_i 가 0 혹은 1인 두 경우를 모두 고려한다. 리스트 크기가 L 이상이 되면 복호 경로의 확률이 높은 L 개의 경로를 선택하고 나머지 경로는 제거한다. 최종적으로는 L 개의 부호어 중 우도(likelihood)가 가장 높은 부호어를 최종 부호어로 선택한다. 극 부호의 SCL 복호는 오류 마루(error floor)가 발생하는 한계가 있으며, 순환 중복 검사(cyclic redundancy check: CRC) 부호를 연결해 최소 거리를 확장함으로써 CRC 연결 SCL (CRC-aided SCL: CA-SCL) 복호로 극복할 수 있다¹⁹⁾.

2.4 채널 부호의 복호 복잡도

본 항에서는 네 채널 부호의 복호 연산 복잡도를 이론적으로 비교하였다. 표 1은 각 부호의 복호연산 복잡도를 이진 덧셈(binary addition), 실수 덧셈(real addition), 실수 비교(real comparison) 연산 별로 나타낸다. eBCH 부호의 OSD 복호 시 가우시안 소거법과 재-부호화가 높은 복잡도의 주 요인으로 연산량이 가장 많다. LDPC 부호의 OMSA 복호 복잡도는 CN 및 VN에서의 LLR 메시지 계산인 실수 덧셈과 최소

LLR 메시지를 고르는 실수 비교로 이루어진다²⁰⁾. 이때 d_c 와 d_v 는 각각 CN과 VN의 평균 엣지 개수이며 설계한 LDPC 부호의 PCM을 통해 얻을 수 있다. I_{avg}^L 는 평균 반복 횟수로, 목표하는 블록 오류(block error rate: BLER)에서의 평균 반복 횟수를 이용한다. 극 부호와 GenRM 부호는 모두 SCL 복호 기반의 L 개의 경로 메트릭을 계산하는 실수 덧셈과 비교 연산이 있다²⁰⁾. 극 부호의 CA-SCL 복호 시 CRC 비트가 포함된 경로에서 비교 연산이 이루어지므로 GenRM 부호의 SCL 복호와 차이가 있으나, 동일한 부호 길이에서는 리스트 크기가 복잡도를 결정하는 주요 요소이다.

III. 오율 성능 및 복호 복잡도 분석

본 절에서는 URLLC 시나리오의 주요 성능 지표가 신뢰도임에 따라 그림 1과 2에 각 채널 부호 후보의 최적 오율 성능을 보인다. 또 그림 3과 4에서는 최적 오율 성능일 때보다 낮은 복호 복잡도를 가져 기준 성능을 만족하는 복호 성능을, 그림 5와 6에서 복호 복잡도를 보인다. URLLC 서비스에서는 수십에서 수백 비트 수준의 짧은 메시지 전송이 많을 것으로 기대된다²¹⁾. 일반적으로 LDPC 및 터보 부호의 경우, 길이가 길면 반복적인 복호로 최적 성능에 근접할 수 있다고 알려져 있다. 하지만 200 비트 이하의 짧은 길이에서는 복호 방식의 약점으로 인해 기존 부호들의 성능이 제한된다. 따라서 본 논문에서는 200 비트 이하의 $N=64, 128$ 의 짧은 부호 길이에서 다양한 부호 및 복호 알고리즘 간의 비교를 고려하였다. 또 고신뢰 전송을 위해 약 1/6, 1/4, 1/3, 1/2의 저 부호율을 갖도록 부호 길이 $N=64$ 인 경우, $K=10, 16, 24, 30$, $N=128$ 인 경우 $K=22, 29, 43, 64$ 로 실험하였다. 또, LDPC 및 극 부호는 5G 표준에 맞게 부호 설계하였고⁵⁾, 극 부호는

8-비트 CRC를 사용하여 설계하였다. 모의실험 환경으로 BPSK (binary phase shift keying) 변조 및 AWGN (additive white Gaussian noise) 채널을 가정하였다. eBCH 부호는 OSD, 극 부호는 CA-SCL, GenRM 부호는 SCL, LDPC 부호는 OMSA로 복호하였다.

3.1 ML 성능 및 포화 성능 분석

본 항에서는 네 가지 후보 채널 부호 중 URLLC 시나리오에 적합한 채널 부호를 확인하였다. 그림 1과 2는 각각 $N=64, 128$ 에서 eBCH 부호, 극 부호, GenRM 부호의 ML에 근접한 오율 성능, LDPC 부호의 포화 오율 성능을 보이며 이는 각 부호 및 복호의 최적 오율 성능이다. 우선, 그림 1에서 LDPC 부호는 $I_{\max} = 80$ 인 OMSA 복호를 통해 포화 오율 성능을 보인다. 타 채널 부호 대비 $BLER=10^{-3}$ 에서 1dB 이상 크게 저하된 성능을 가진다. 또 GenRM 부호의 SCL 복호는 $L=8$, 극 부호의 CA-SCL 복호는 $L=512$ 일 때 포화 성능을 가지며 이는 ML 성능에 근접하는 성능이다. 극 부호가 GenRM 부호보다 우수한 오율 성능을 가지며 (64, 10)에서 $BLER=10^{-3}$ 일 때 약 0.5dB 우수하고 부호율이 높아질수록 더 큰 차이로 우수한 성능을 가진다. 다만, 극 부호의 포화 성능은 매우 큰 리스트 크기를 요구하므로 실용적인 리스트 크기에서의 오율 성능 비교도 필요하다. eBCH의 OSD 복호시 OSD 차수 $m=3$ 일 때 포화되며 ML에 근접한 성능을 가진다. (64, 10)에서, 극 부호보다 $BLER=10^{-3}$ 기준 약 0.8dB, 10^{-4} 기준 약 1dB 우수하다. (64, 16)에서는 eBCH의 OSD 복호가 $BLER=10^{-3}$ 과 10^{-4} 에서 각각 약 0.3, 0.5dB 우수하다. 신뢰도가 URLLC 시

나리오에서 가장 중요한 성능 지표임에 따라 OSD 복호한 eBCH 부호가 매우 강력한 후보 채널 부호라 판단할 수 있다. 하지만, OSD 차수 증가에 따라 복호 복잡도가 지수적으로 증가하므로 III-2에서 타 채널 부호들과 비슷한 BLER을 갖는 파라미터에 대해 성능 비교하였고, III-3에서는 그 때의 복호 연산 복잡도를 비교 및 분석하였다.

그림 2에서는 네 채널 부호의 최적 성능을 $N=128$ 에서 비교하였다. LDPC 부호의 OMSA 복호는 $I_{\max} = 100$ 으로 설정하여 포화 오율 성능을 얻었으며, 타 부호 대비 크게 저하된 오율 성능을 가져 $N=64$ 에서의 LDPC 부호의 오율 성능과 비슷한 양상을 보인다. 극 부호와 GenRM 부호는 각각 $L=512$ 와 $L=64$ 일 때 ML에 근접한 오율 성능을 가진다. (64, 10), (64, 24), (64, 30)에서 극 부호의 포화 성능이 GenRM의 포화 성능보다 우수하다. (64, 24)일 때 $BLER=10^{-3}$ 에서 극 부호가 GenRM 부호보다 약 0.8dB 우수하다. (64, 16)에서는 두 채널 부호의 오율 성능이 비슷하고 $BLER=10^{-3}$ 이하에서는 GenRM이 더 우수해지는 교차점이 생긴다. $N=64$ 에서와 마찬가지로, 극 부호가 포화 성능을 갖도록 하는 리스트 크기가 매우 크므로 III-2에서 실용적인 리스트 크기를 가질 때의 비슷한 BLER을 관찰하였고, 그때의 복호 복잡도를 III-3에서 비교하였다. eBCH의 OSD 복호시 OSD 차수 $m=5$ 일 때 오율 성능이 포화되며 ML 오율 성능에 근접한 것으로 판단된다. 모든 부호율에서 eBCH의 OSD 오율 성능이 가장 우수하며 특히 (64, 10)일 때 $BLER=10^{-3}, 10^{-4}$ 에서 OSD가 극 부호의 CA-SCL 복호보다 각각 약 0.3, 0.5dB 우수하다.

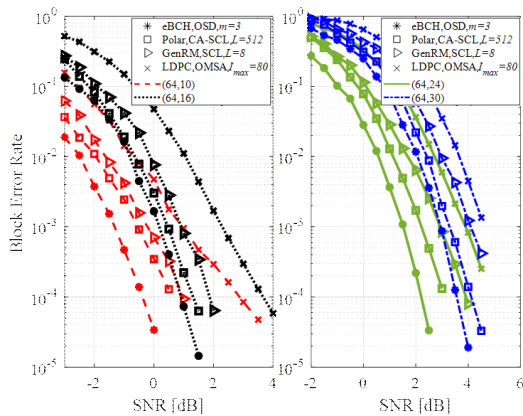


그림 1. $N=64$ 에서 복호알고리즘 별 최적 오율성능
Fig. 1. Optimal error performances of decoding algorithms for $N=64$

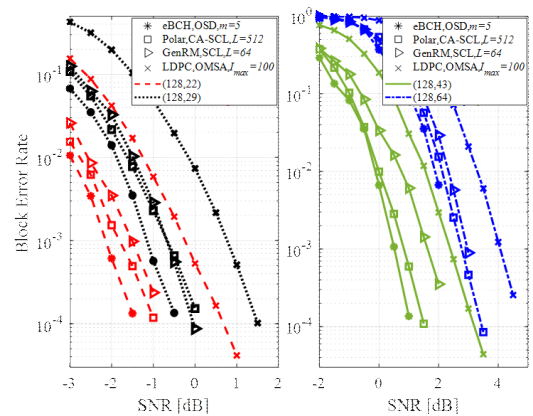


그림 2. $N=128$ 에서 복호알고리즘 별 최적 오율성능
Fig. 2. Optimal error performances of decoding algorithms for $N=128$

URLLC 시나리오가 엄격한 고신뢰 요구사항을 가지므로 네 후보 채널 부호의 중 LDPC 부호를 제외할 때 세 채널 부호가 적절한 후보임을 알 수 있다.

3.2 기준 성능을 만족하는 저복잡도 오율 성능

앞선 실험을 통해 각 채널 부호 및 복호 방식의 최적 오율 성능을 확인하였으며 매우 짧은 길이에서 eBCH 부호, 극 부호, 그리고 GenRM 부호가 적합한 채널 부호임을 알 수 있다. LDPC 부호의 포화 성능은 타 채널 부호의 복호 성능 대비 열세이므로 적합하지 않다고 판단하였다.

따라서 본 항에서는 $N=64, 128$ 일 때 GenRM 부호의 최적 오율 성능과 비교해 기준 성능을 만족하는 eBCH 및 극 부호의 오율 성능을 확인하였다. 기준 성능은 GenRM 부호의 오율 성능보다 우수한 동시에 낮은 복잡도를 갖는 오율 성능을 의미하며 이는 오율 성능과 복잡도의 트레이드-오프(Trade-off)를 확인할 수 있게 한다. 그림 3은 $N=64$ 에서 기준 성능을 만족하는 세 채널 부호의 오율 성능을 보인다. GenRM 부호는 $L=8$ 인 SCL 복호를 통해 ML 성능에 근접하는 오율을 가진다. 8-비트 CRC를 연결해 설계한 극 부호는 $L=32$ 인 CA-SCL 복호 시 GenRM 부호와 비슷한 성능을 보인다. $(64, 10)$ 일 때 $BLER=10^{-4}$ 에서 극 부호가 GenRM 부호보다 약 $0.4dB$ 우수하고 부호율이 커질수록 GenRM 부호 대비 더 큰 성능 이득을 가진다. eBCH는 OSD 복호 시 차수 $m=2$ 로 설정해 비교하였다. $(64, 16), (64, 24)$ 일 때 $BLER=10^{-3}$ 에서 극 부호보다 약 $0.1-0.2dB$ 앞섰고, $(64, 10), (64, 30)$ 일 때 $BLER=10^{-3}$ 에서 eBCH 부호가 극 부호보다 약

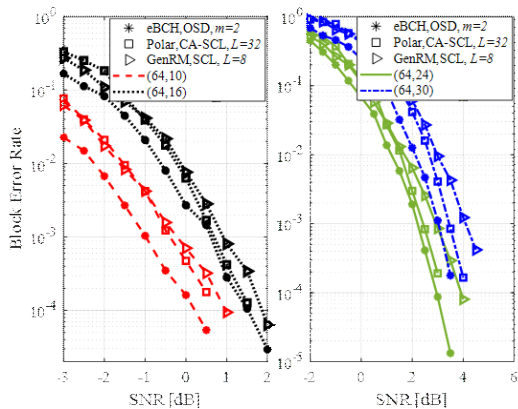


그림 3. $N=64$ 일 때 기준 성능을 만족하는 세 채널 부호의 저 복잡도 오율 성능 비교
Fig. 3. Comparison of low-complexity error performances of three channel codes satisfying reference performance for $N=64$

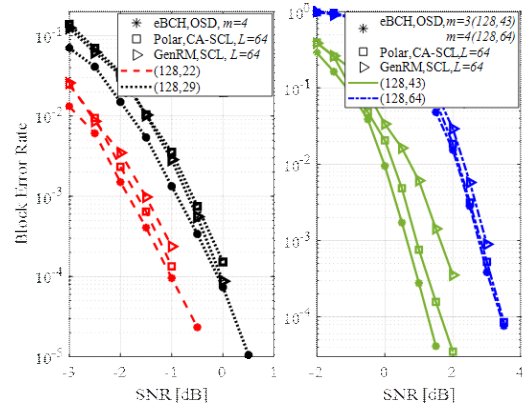


그림 4. $N=128$ 일 때 기준 성능 범위 내 세 채널 부호의 오율 성능 비교
Fig. 4. Comparison of low-complexity error performances of three channel codes satisfying reference performance for $N=128$

$0.5dB$ 우수하다. 기준 성능을 만족하는 부호 및 복호 방법 중 $m=2$ 로 OSD 복호한 eBCH의 OSD가 가장 우수한 오율 성능을 내는 것을 확인하였다.

그림 4는 $N=128$ 에서 기준 성능을 만족하는 세 채널 부호의 오율 성능을 나타낸다. GenRM 부호는 $L=64$ 인 SCL 복호로 ML 성능에 근접한 오율 성능을 보인다. 극 부호도 $L=64$ 일 때 GenRM 부호와 비슷한 오율 성능을 보이는데, $(64, 10), (64, 16), (64, 30)$ 일 때 $BLER=10^{-3}$ 에서 극 부호가 약 $0.1dB$ 우수하다. $(64, 24)$ 일 때 $BLER=10^{-3}$ 일 때 극 부호가 약 $0.6dB$ 우수하다. 동일한 리스트 크기를 가지므로 복호 연산 복잡도가 비슷하며 이를 III-3에서 비교 및 분석하였다. 또, eBCH에 OSD 복호 시 $(128, 22), (128, 29), (128, 43)$ 에서는 OSD 차수 $m=4$ 일 때 타 부호들과 비슷한 오율 성능을 가진다. $(128, 64)$ 에서는 $m=3$ 일 때 도 극 부호와 비슷한 오율 성능을 가진다. III-3에서는 세 채널 부호가 기준 성능을 만족하는 오율 성능을 가질 때의 연산 복잡도를 비교 및 분석하였다.

3.3 기준 성능을 만족하는 복호 연산 복잡도

본 항에서는 eBCH 부호, 극 부호, GenRM 부호의 복호 성능이 기준 성능을 만족할 때의 복호 연산 복잡도를 분석하였다. OSD, CA-SCL, SCL 복호의 복잡도는 III-2에서의 파라미터에 기반해 연었다. LDPC 부호의 복호 복잡도는 III-1에서 보인 포화 성능에서의 파라미터에 기반하며, 이는 타 채널 부호 대비 저하된 오율 성능에 대한 복호 복잡도이다. 따라서 LDPC 부호의 복호 복잡도가 매우 낮아도 오율 성능이 고신뢰 통신에 부합하지 않는다. 또한 OSD 복호

복잡도는 이진 연산과 실수 연산을 0.1:1 (10배)의 무게 비로 연산해 실용성을 고려하였다. 이 무게 비는 실수 연산이 이진 연산의 5배, 10배, 20배, 50배일 때 모두 동일한 복호 복잡도 추이를 갖는 점을 확인하고 선택 및 제시한 비이다.

그림 5는 $N=64$ 에서의 복호 연산 복잡도를 나타내는 그림으로, x 축은 정보비트 길이 K 이고, y 축은 평균 복호 연산 복잡도이다. x 축이 동일한 부호 길이에서의 K 이므로 그래프의 왼쪽일수록 저부호율을 의미한다. 대체로 GenRM 부호의 SCL 복호 복잡도가 가장 낮고, 극 부호의 CA-SCL 복호 복잡도가 가장 높다. 그 사이에 LDPC 부호의 복호 복잡도가 있으며, $BLER=10^{-2}, 10^{-3}$ 에서의 평균 반복 횟수에 기반해 얻었다. LDPC 부호의 복호 복잡도는 타 부호 대비 저하된 오율 성능일 때의 파라미터를 이용했음을 고려해 관찰해야 한다. 한편, eBCH 부호의 OSD 복호는 타 복호 방법과 달리 부호율에 따라 복잡도 우열 관계를 다르게 하므로 주목하였다. (64,10)에서 OSD 복호 복잡도는 OMSA 복호 복잡도보다도 낮고, 극 부호의 CA-SCL 복호 복잡도의 1/5 수준이다. (64,16)에서 OSD는 SCL 및 OMSA 복호 복잡도보다 높은 복잡도를 가지나, 극 부호의 SCL의 1/2 수준의 복호 복잡도를 갖는다. (64,24), (64,30)일 때는 CA-SCL과 비슷한 복호 복잡도를 가지나, 그림 3에서와 같이 극 부호보다 우수한 오율 성능을 가지므로 eBCH의 OSD가 경쟁력 있는 복호 방식이라 판단할 수 있다. OSD는 저부호율에서 특히 낮은 복호 복잡도를 갖는데, 작은 K 중 0부터 m 만큼의 비트를 반전시킨 모든 부호어를 확인하더라도 연산량이 타 채널 부호 대비 높지 않기 때문이다. 기존에는 OSD 복호가 매우 높은 복잡도로

평가절하 되었으나, 본 실험 및 분석을 통해 $N=64$ 이하의 짧은 길이에서 오율 성능이 우수한 동시에 복잡도 측면에서도 경쟁력 있음을 확인하였다. 따라서 짧은 길이 채널 부호가 요구되는 서비스에서, 특히 저부호율에서는 eBCH 부호의 OSD 복호가 매우 적합한 부호 및 복호 방식이라 판단할 수 있다.

그림 6에서는 $N=128$ 에서의 복호 복잡도를 비교하였다. LDPC 부호의 OMSA 복호 복잡도는 타 채널 부호의 복잡도보다 매우 낮지만 III-1에서 확인되었듯, 포화 성능임에도 매우 저하된 오율 성능을 가지므로 신뢰도가 중요한 URLLC 시나리오에서는 한계가 있다. 극 부호는 $L=64$ 인 CA-SCL 복호 시 GenRM 부호의 $L=64$ 인 SCL 복호 시 ML 성능과 비슷한 성능을 가진다. 극 부호의 CA-SCL 복호가 CRC 비트를 고려함에 따라 복호 복잡도의 차이는 있으나 동일한 L 을 가지므로 복호 복잡도가 거의 비슷하다. 또 eBCH의 OSD는 $N=64$ 에서와는 달리 매우 높은 복잡도를 가진다. 그 이유는 부호 길이가 길어지며 저부호율을 갖기 위한 정보 비트 길이 K 도 크고, 타 채널 부호와 비슷한 오율 성능을 갖게 하는 OSD 차수가 3 혹은 4이므로 확인해야 할 부호어 리스트가 매우 많기 때문이다. 따라서 $N=128$ 일 때 연산 복잡도 제한이 엄격한 통신 시스템에서는 극 부호 및 GenRM 부호의 CA-SCL 및 SCL 복호가 더 적합한 부호 및 복호 방법일 것이다. 충분한 연산 복잡도가 허용되고 신뢰성이 매우 중요한 시나리오에서는 eBCH의 OSD를 사용할 수도 있을 것이다.

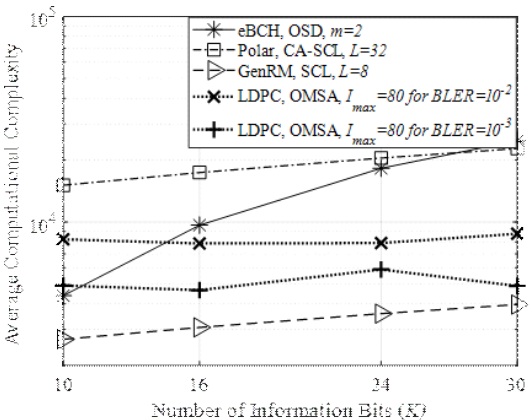


그림 5. $N=64$ 에서 채널 부호 간 복호 연산 복잡도 비교
Fig. 5. Decoding computational complexity comparison of channel codes for $N=64$

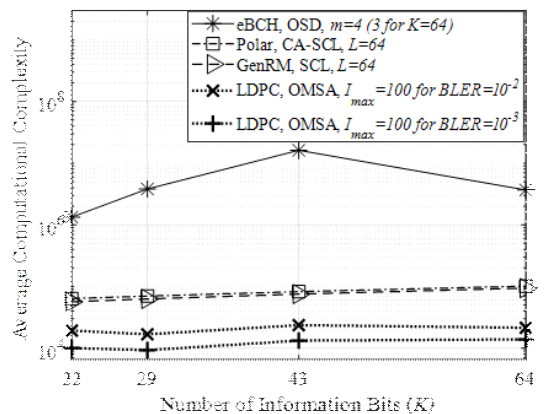


그림 6. $N=128$ 에서 채널 부호 간 복호 연산 복잡도 비교
Fig. 6. Decoding computational complexity comparison of channel codes for $N=128$

IV. 결 론

본 논문에서는 초고신뢰 통신을 위한 짧은 길이 네 가지 후보 채널 부호의 오율 성능과 복호 복잡도를 분석하여 길이에 따라 적합한 채널 부호를 제시하였다. eBCH 부호, 극 부호, GenRM 부호, LDPC 부호를 각각 OSD, CA-SCL, SCL, OMSA로 복호해 최대 오율 성능을 비교하였다. 또 초고신뢰 통신에 적합하다고 판단한 eBCH 부호, 극 부호, GenRM 부호의 기준 성능을 만족하는 저복잡도 오율 성능을 분석하였다. 부호 길이 $N=64$ 에서는 eBCH 부호에 OSD 복호 시 우수한 오율 성능과 경쟁력 있는 낮은 복호 복잡도를 가져 URLLC 시나리오에 적절한 채널 부호 및 복호 방법임을 확인하였다. 또, 부호 길이 $N=128$ 에서는 극 부호와 GenRM 부호의 CA-SCL 및 SCL 복호가 eBCH 부호의 OSD보다 매우 낮은 복호 복잡도를 가져 연산 복잡도가 엄격히 제한된 통신 시나리오에서는 더 적합한 채널 부호 및 복호 방법임을 확인하였다.

References

- [1] M. Series, "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," *Recommendation ITU*, 2083, 2015.
- [2] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) TS22.104, "Service requirements for cyber-physical control automations in vertical domains," Jun. 2019.
- [3] RP-191584, "Physical layer enhancements for NR URLLC," 2019.
- [4] M. Shirvanimoghaddam, et al., "Short block-length codes for ultra-reliable low latency communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 2, pp. 130-137, Dec. 2018.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Multiplexing and channel coding," 3GPP 38.212 V15.2.0, Jun. 2018.
- [6] W. W. Peterson and E. J. Weldon, Jr., *Error-Correcting Codes*, 2nd Ed., Cambridge, MA: MIT Press, 1972.
- [7] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [8] D. J. C. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 3, pp. 399-431, Mar. 1999.
- [9] M. P. C. Fossorier, M. Mihaljevic, and H. Imai, "Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 5, pp. 673-680, May 1999.
- [10] E. Arikan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jun. 2009.
- [11] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, May 2015.
- [12] I. Reed, "A class of multiple-error-correcting codes and the decoding scheme," *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. 4, no. 4, pp. 39-44, Sep. 1954.
- [13] D. E. Muller, "Application of boolean algebra to switching circuit design and to error correction," *IRE Trans. Elec. Comp.*, vol. EC-3, pp. 6-12, Sep. 1954.
- [14] M. P. Fossorier and S. Lin, "Soft-decision decoding of linear block codes based on ordered statistics," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 41, no. 5, pp. 1379-1396, Sep. 1995.
- [15] J. V. Wouterghem, et al., "On performance and complexity of OSD for short error correcting codes in 5G-NR," in *Proc. BalkanCom*, pp. 1-5, Tirana, Jun. 2017.
- [16] M. Sybis, et al., "Channel coding for ultra-reliable low-latency communication in 5G systems," in *Proc. IEEE VTC-Fall*, pp. 1-5, Montreal, Quebec, Canada, Sep. 2016.
- [17] D. Ryu, J. Y. Kim, J.-H. Kim, and S.-H. Kim, "Performance of list decoding of extended-minimum distance polar codes," *J. KICS*, vol. 38, no. 1, pp. 109-117, Jan. 2013.
- [18] J. Chen, et al., "Reduced-complexity decoding of LDPC codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 8, pp. 1288-1299, Aug. 2005.
- [19] K. Niu and K. Chen, "CRC-aided decoding of

polar codes,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 10, Oct. 2012.

- [20] R1-166772, *Performance analysis of polar codes*, Samsung, 3GPP TSG RAN WG1 #86, Gothenburg, Sweden, Aug. 2016.
- [21] R1-167703, *Channel coding scheme for URLLC, mMTC and control channels*, Intel Corporation, 3GPP TSG RAN WG1 #86, Gothenburg, Sweden, Aug. 2016.

조 은 영 (Eunyoung Cho)



2018년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학과 학사
 2018년 2월~현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사과정
 <관심분야> 오류정정부호, 정보이론, LDPC 부호

[ORCID:0000-0002-5996-8898]

주 효 상 (Hyosang Ju)



2017년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학과 학사
 2017년 2월~현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사과정
 <관심분야> 오류정정부호, 정보이론, 극 부호

[ORCID:0000-0002-7808-086X]

이 현 재 (Hyunjae Lee)



2014년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학과 학사
 2020년 7월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사
 <관심분야> 오류정정부호, 부호이론, LDPC 부호, 극 부호

[ORCID:0000-0002-0541-6617]

장 지 웅 (Ji-Woong Jang)



1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
 2006년 2월 : 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사
 2006년 3월~2008년 6월 : 삼성전자 책임연구원
 2008년 8월~2009년 7월 : 박사후 연구원 (UCSD)

2009년 8월~2012년 8월 : LG전자 책임연구원
 2012년 9월~2020년 8월 : 울산과학기술대학교 IT 응용기술학부 조교수

2020년 9월~현재 : 울산과학기술대학교 IT응용기술학부 부교수

<관심분야> 통신공학, 정보이론, 오류정정부호

[ORCID:0000-0002-0023-0733]

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)



1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
 2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
 2004년 2월 : 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사
 2004년 3월~2005년 7월 : 삼성전자 책임연구원

2006년 8월~2007년 8월 박사후 연구원(USC)

2007년 9월~2011년 9월 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

2011년 10월~2017년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부 부교수

2017년 2월~현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
 <관심분야> 오류정정부호, 정보이론, 부호이론, 다중안테나 시스템

[ORCID:0000-0002-0660-5516]