

저장 장치를 위한 다양한 부호화 기법의 성능 분석

준회원 김형준*, 김성래*, 종신회원 신동준**°

Performance Analysis of Various Coding Schemes for Storage Systems

Hyung-June Kim* *Associate Member*, Sung-Rae Kim* *Regular Member*,
Dong-Joon Shin**° *Lifetime Member*

요 약

메모리 등의 저장 장치는 다양한 전자제품에 널리 이용되면서 높은 메모리 집적도가 요구되고 있으며 멀티 레벨로 데이터를 저장하는 단계에 이르렀다. 그 결과 데이터의 오류율은 더 높아지게 되었다. 본 논문에서 우리는 저장장치의 낮은 오류율을 만족시키기 위하여 통신시스템에서 널리 사용되고 있는 오류정정부호 기법을 적용하였다. 평균 오류율 (BER)이 10^{-5} 또는 5×10^{-6} 인 AWGN 채널에서 4-level cell을 이용한 저장장치에 대하여 목표 부호율 0.99과 목표 오류율 (BER) 10^{-11} 과 10^{-13} 를 만족시킬 수 있는 방법을 알아본다. 높은 부호율에서는 연결부호의 성능이 블록 부호만 사용한 경우보다 좋지 않은 경우도 많으며, 이때 천공을 많이 한 경우에도 성능 열화가 덜한 안쪽 부호를 선정하는 것이 중요함을 확인하였다. 일반적인 feedforward systematic 길쌈 부호를 이용한 연결 부호는 복잡도를 고려하지 않더라도 블록 부호를 단독으로 사용한 경우보다 성능이 좋지 않음을 확인하였고, 높은 부호율에서도 성능이 우수한 천공 길쌈 부호를 만들기 위해서는 RSC 부호를 사용해야 한다는 것을 모의실험 결과를 통해 보여준다.

Key Words : BCH codes, Concatenated codes, Convolutional codes, Error-correcting codes, Storage system

ABSTRACT

Storage devices such as memories are widely used in various electronic products. They require high-density memory and currently the data has been stored in multi-level format, that results in high error rate.

In this paper, we apply error correction schemes that are widely used in communication system to the storage devices for satisfying low bit error rate and high code rate. In AWGN channel with average BER 10^{-5} and 5×10^{-6} , we study error correction schemes for 4-level cell to achieve target code rate 0.99 and target BER 10^{-11} and 10^{-13} , respectively. Since block codes may perform better than the concatenated codes for high code rate, and it is important to use less degraded inner code even when many bits are punctured. The performance of concatenated codes using general feedforward systematic convolutional codes are worse than the block code only scheme. The simulation results show that RSC codes must be used as inner codes to achieve good performance of punctured convolutional codes for high code rate.

* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 부호 및 통신 연구실 (june_23@hanmail.net, ksr0812@ccl.hanyang.ac.kr)(djshin@hanyang.ac.kr)
(°: 교신저자)

논문번호 : KICS2008-05-239, 접수일자 : 2008년 5월 23일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 16일

I. 서 론

메모리 등의 저장 장치는 휴대용 기기를 포함한 다양한 전자제품의 저장 매체로 널리 이용되고 있다. 이에 따라 높은 데이터 용량에 대한 수요가 늘면서, 높은 메모리 집적도를 위하여 멀티레벨로 데이터를 저장하는 단계에 이르렀다^[1]. 메모리 등의 정보 장치는 전하를 충전, 방전하여 전기적으로 ‘1’, ‘0’을 표현한다. 즉, 트랜지스터의 문턱 전압이 기준 전압보다 높을 때는 ‘1’, 낮을 때는 ‘0’을 나타낸다. 메모리 크기가 작아지고 문턱 전압의 마진이 줄어들면서 서로 다른 인접 cell들에 의한 간섭 또는 데이터를 보유하는 과정에서 문턱 전압이 이동할 가능성이 높아지게 되고, 데이터의 오류가 발생할 확률도 높아지게 되었다. 따라서 멀티 레벨로 정보를 저장하는 시스템에서 낮은 오류율을 만족시키기 위한 오류정정기법 연구가 필요하게 되었다.

저장 시스템에 사용되는 오류정정부호 (Error Correcting Code: ECC)는 칩 면적의 overhead를 줄여야 하고 높은 부호율에서 저장 장치의 요구 특성에 맞도록 낮은 오류율을 만족시켜야 한다. 뿐만 아니라 회로의 복잡도를 낮추어 빠른 속도로 쓰기와 읽기를 가능하게 하기 위해서는 사용되는 부호의 복잡도는 가능한 낮아야 한다. 가장 최근에 제안된 ECC 중 하나는 single-level cell 플래쉬 메모리에서 512 정보비트에 패리티가 10비트 추가되는 부호를 적용하여, SER(섹터 당 오류율)을 10^{-4} 에서 10^{-10} 으로 개선시켰다. 이것은 2%의 패리티 비트 (부호율 0.98)로 메모리 셀의 효율성과 저장장치에 적합한 오류율을 달성한 것이다^[1]. 하지만 이 SER을 BER로 환산하면 AWGN 채널에서 비트 오류율 (BER) 1.25×10^{-8} 에 해당하는 매우 좋은 채널이다. 멀티 레벨 셀 메모리에서는 오류율이 증가하기 때문에 이보다 매우 안 좋은 채널을 고려해야 하고 여기에 적합한 강력한 ECC가 필요하다. 우리는 4-level cell을 비트 오류율이 10^{-5} 또는 5×10^{-6} 인 AWGN 채널을 가정한 BPSK 변복조 조건에서 목표 부호율 0.99과 목표 오류율 (BER) 10^{-11} 또는 10^{-13} 을 만족시키는 다양한 ECC에 대하여 알아본다.

목표 부호율을 만족하면서 동시에 목표 오류율을 만족하는 제안된 연결부호화 기법은 길쌈(convolucional) 부호의 일종인 RSC (recursive systematic convolucional)의 좋은 특성 때문에 성능이 좋아지며, 이를 고려한 구체적인 연결부호화 기

법을 제안한다.

본 논문 II장에서는 성능이 우수한 높은 부호율의 다양한 BCH 부호를 알아보고, III장에서는 여러 길쌈 부호의 구조적 특성과 천공된 길쌈 부호에 대해 알아본다. IV장에서는 완전한 인터리빙을 가정하고 다양한 길쌈 부호와 블록 부호 (BCH 부호)를 연결한 연결 부호를 살펴보고 비교적 복잡도가 낮고 성능이 우수한 부호를 제안한다. 마지막 V장에서 결론을 나타내었다.

II. BCH 부호의 성능 분석

이진 BCH 부호의 BER은 다음 식을 이용하여 대략적으로 계산된다^[3]. 여기서 n 는 채널의 평균 오류율, t 는 오류정정 능력, N 은 부호 길이이다.

$$P_B \approx \frac{1}{N} \sum_{i=t+1}^N i \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i} \quad (1)$$

여기서, t 는 최대 t 개의 오류 비트를 수정할 수 있음을 나타내며, 부호의 최소 거리 d_{min} 을 이용하여 아래 식과 같이 구한다.

$$t = \left\lfloor \frac{d_{min} - 1}{2} \right\rfloor \quad (2)$$

목표 BER을 만족하는 BCH부호는 다음과 같이 구한다. 주어진 부호 길이 N 에 대하여 목표 BER을 만족시키는 t 를 구한 후 설계 거리 $d = 2t + 1$ 보다 하나 작은 $d - 1$ 개의 연속된 주파수 $\{m_0, m_0 + 1, \dots, m_0 + d - 2\}$ 와 그들의 conjugate들의 합집합 S 로 BCH 부호의 생성 다항식(Generator Polynomial) $g(X)$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$g(X) = lcm\{\Phi_{m_0}(X), \Phi_{m_0+1}(X), \dots, \Phi_{m_0+d-2}(X)\} \quad (3)$$

여기서, $\Phi_i(X)$ 는 i 번째 주파수와 i 의 conjugate들을 근으로 가지는 최소 다항식(minimal polynomial)이고 lcm 은 최소공배수를 나타낸다. 따라서 주어진 설계 거리 d 에 대하여, m_0 로 어떤 주파수를 선택하느냐에 따라 생성 다항식 $g(X)$ 가 바뀌고 이에 따라서 생성 다항식의 차수(degree) 즉, 부호의 dimension도 바뀌게 된다. 이 때, 생성 다항식의 차수는 $|S|$ 가 된다. BCH 부호의 부호율 k/N 은 다음식을 이용하여 구한다.

$$|S| = N - k \quad (4)$$

주어진 부호 길이 N 에 대하여 오류정정능력 t 가 동일한 경우에는 부호율이 높을수록 좋은 BCH 부호이므로 가장 높은 부호율을 가지는 BCH 부호를 찾기 위해서는 $|S|$ 가 가장 작은 m_0 를 선택하는 것이 좋다. 다시 말하면, BCH 부호의 부호율을 높이기 위해서는 BCH 부호의 생성 다항식 $g(X)$ 의 차수를 최소로 만드는 것이 중요하다. (3) 식에서 $\phi_i(X)$ 는 i 번째 주파수와 그것의 conjugate들을 근으로 가지는 최소 다항식 (cyclotomic coset과 대응됨)을 나타내는데, $g(X)$ 의 차수를 줄이기 위해서는 $\phi_i(X)$ 의 차수를 최소가 되도록 하면 된다. 즉, i 번째 주파수의 conjugate들을 수가 최소가 되게 하면 된다. $GF(q)$ 에서 정의되는 BCH 부호어의 길이 N 을 원시 형태($N=q^m-1$)가 되도록 하면 i 번째 주파수와 그것의 conjugate근의 값이 같아지는 주기가 짧아진다. 여기서 주기는 $\phi_i(X)$ 의 하나의 근의 지수에 q 를 곱해서 conjugate근들을 만들 때, 하나의 근과 conjugate 근이 같을 때까지 q 를 곱하는 횟수를 말하고 그 횟수는 $\phi_i(X)$ 의 서로 다른 근들의 수 (다항식 $\phi_i(X)$ 의 차수)가 된다. 다시 정리하면 $GF(2^m)$ 상에서 정의된 BCH 부호는 부호의 길이 2^m-1 의 형태를 갖는 원시 BCH 부호가 부호율이 높은 좋은 BCH 부호가 되며, 다음이 BCH 부호 생성 다항식 $g(X)$ 의 차수를 최소로 하는 조건이다.

$$r \log_2(N+1) = m, \quad 1 \leq r \leq m \quad (5)$$

본 논문에서는 완전한 랜덤 오류를 가정하였으며, 따라서 비 이진 BCH 부호는 고려하지 않고, $r=1$ 이고 부호의 길이가 2^m-1 인 이진 BCH를 고려한다. 부호의 길이는 복잡도를 고려하여 5000이내로 한정하며, 단축 부호는 고려하지 않았다.

표 1. 목표 BER 10^{-11} 을 위한 채널 오류율 요구량

채널 BER 요구량	부호 길이 (N)	정보 비트수 (k)	N-k	선계 거리 (t)	부호율	부호기 출력 BER
5.00E-08	4095	4083	12	1	0.997	1.02E-11
1.00E-06		4071	24	2	0.994	8.36E-12
6.00E-06		4059	36	3	0.991	1.45E-11

표 2. 목표 BER 10^{-13} 을 위한 채널 오류율 요구량

채널 BER 요구량	부호 길이 (N)	정보 비트수 (k)	N-k	선계 거리 (t)	부호율	부호기 출력 BER
5.00E-09	4095	4083	12	1	0.997	1.02E-13
2.50E-07		4071	24	2	0.994	1.31E-13
2.00E-06		4059	36	3	0.991	1.82E-13

표 1과 2는 각각 목표 BER 10^{-11} 과 10^{-13} 을 달성하기 위하여 요구되는 채널 BER과 부호의 길이가 4095비트인 BCH 부호 파라미터를 보여주고 있다. 표 1과 2에서 목표 부호율 0.99이상을 만족하면서 목표 BER 10^{-11} 과 10^{-13} 을 달성하기 위해서는 AWGN 채널 오류율이 각각 6.00×10^{-6} 과 2.00×10^{-6} 이하가 되어야 하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 채널 BER이 10^{-5} 과 5.00×10^{-6} 인 경우 BCH 부호를 사용하여 목표 부호율과 목표 오류율을 만족시키지 못한다는 것을 알 수 있다.

III. 길쌈 부호의 성능 분석

식 (6)은 길쌈 부호의 BER에 대한 Union Bound이다.

$$P(E) < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} A_d P_d < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} A_d [2\sqrt{p(1-p)}]^d \quad (6)$$

$$P_d = \begin{cases} \sum_{e=(d+1)/2}^d \binom{d}{e} p^e (1-p)^{d-e}, & d \text{ odd} \\ 0.5 \binom{d}{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} + \sum_{e=(d/2)+1}^d \binom{d}{e} p^e (1-p)^{d-e}, & d \text{ even} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 A_d 는 해밍 무게가 d 인 부호어의 수이고, P_d 는 all-zero 경로가 무게가 d 인 경로로 잘못 결정될 확률로 여기서 p 는 각 전송 비트의 오류율이다. 길쌈 부호의 성능은 자유 거리 d_{free} 에 의해 주로 결정되며, 부호 길이에 따라 얻는 부호 이익은 비교적 작다는 것이 알려져 있다^[4]. 자유 거리를 크게 하기 위해서 길쌈 부호의 메모리의 수를 늘려서 트렐리스의 상태의 수를 크게 한다. 이 때, 성능은 좋

아직지만 부호의 복잡도는 지수적으로 증가한다⁴⁾.

일반적으로, 동일한 복잡도에서 천공하지 않은 SC(feedforward systematic convolutional) 부호는 NSC(non-systematic convolutional) 부호보다 나쁜 거리 특성 (즉, d_{free} 가 작음)을 가진다^{4),7)}. RSC 부호의 트렐리스 구조는 NSC 부호와 동일하며, 두 부호는 같은 자유거리를 갖는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 또한, 같은 해밍 무게의 정보 비트 입력에 대해서도 다른 해밍 무게의 부호어를 출력하기 때문에 거리 스펙트럼 (distance spectrum)을 분산시켜 거리가 작은 부호의 수를 줄여서 NSC 부호보다 낮은 SNR과 천공한 경우에 대하여 좋은 특성을 가지고 있다^{4),7)}.

다음의 예는 NSC 부호와 동일한 트렐리스 구조를 가지는 RSC 부호의 예이다. 이 두 부호는 동일한 거리 스펙트럼을 갖지만 천공하는 경우는 서로 다른 특성을 가짐을 다음에 설명한다.

그림 1의 NSC 부호 생성 다항식은 $G(D) = [1+D+D^2 \quad 1+D^2]$ 이고, 그림 2의 RSC 부호 생성 다항식은 $G'(D) = \left[1 \quad \frac{1+D+D^2}{1+D^2}\right]$ 이다. 입력 정보 비트 $m(D) = 1+D+D^4+D^6$ 에 대한 NSC 부호의 부호어는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} c^{(1)}(D) &= m(D)(1+D+D^2) \\ &= 1+D^3+D^4+D^5+D^7+D^8 \\ c^{(2)}(D) &= m(D)(1+D^2) \\ &= 1+D+D^2+D^3+D^4+D^8 \end{aligned} \tag{8}$$

그림 2의 RSC 부호에 $c^{(1)}(D)$ 를 정보 비트로 입력하면 systematic 조건을 만족하면서 식 (8)로 표현된 NSC 부호와 동일한 부호어로 표현된다는 것을 알 수 있다. 이 경우 RSC 부호의 출력 부호어는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c^{(1)}(D) &= m(D) = 1+D^3+D^4+D^5+D^7+D^8 \\ c^{(2)}(D) &= c^{(1)}(D) \frac{(1+D^2)}{(1+D+D^2)} \\ &= c^{(1)}(D) \times \\ &\quad (1+D+D^2+D^4+D^5+D^7+D^8+D^{10}+\dots) \\ &= 1+D+D^2+D^3+D^4+D^8+\dots \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)의 $c^{(2)}(D)$ 는 서로 상쇄되어 식 (8)의 $c^{(2)}(D)$ 와 동일한 값을 가지지만 입력 비트가 생성 다항식의 분모 $1+D+D^2$ 에 의하여 무한대의 출력 비트에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이것은 RSC

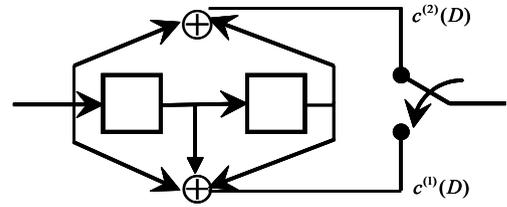


그림 1. NSC 부호기

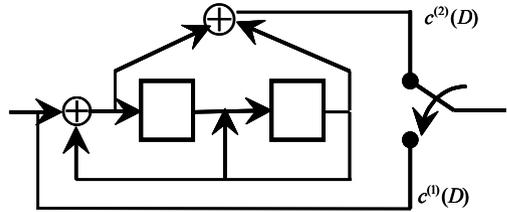


그림 2. RSC 부호기

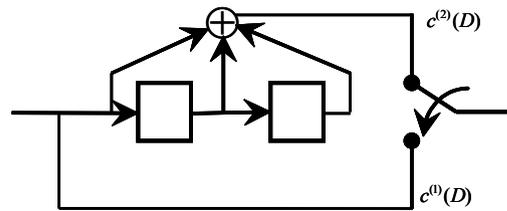


그림 3. SC부호기

부호의 피드백이 있는 구조적 특성 때문이다. 부호어 $c^{(2)}(D)$ 가 생성되는 과정을 보기 위해 식을 전개하면 식 (9)가 된다. 여기서 $c^{(1)}(D)$ 은 서로 동일하고, NSC 부호의 $c^{(2)}(D)$ 는 RSC 부호의 무한급수의 합, 식 (9)의 $c^{(2)}(D)$ 와 같지만 식 (9)의 $c^{(2)}(D)$ 는 시간 지연에 대해서 서로 상관관계가 있고, 서로 값이 상쇄되어 NSC 부호의 $c^{(2)}(D)$ 와 같은 부호어를 출력하는 것을 확인할 수 있다. 즉, RSC 부호에서는 입력 정보 비트 $c^{(1)}(D)$ 가 패리티 $c^{(2)}(D)$ 에 대하여 무한대의 비트까지 영향을 주는 구조인 것을 알 수 있다. 이러한 구조적인 특성 때문에 RSC 부호는 천공을 많이 하는 경우에도 시간 지연된 다른 비트가 복호에 도움을 줄 수 있다. 이 때 부호의 길이와 복호 깊이가 성능에 영향을 줄 수 있고, 시뮬레이션 결과를 통해 천공을 많이 한 부호도 비교적 천공을 덜한 부호의 성능에 근접할 수 있는 것을 확인하였다. 이 때 천공을 많이 할수록 복호 깊이를 크게 해야 하며, 부호의 길이가 길수록 복호 깊이에 대한 성능 개선이 크다. 표 3과 4는 부호의 길이를 늘리고 복호 깊이 (decoding depth)를 크게 하면, 천공

을 더 많이 한 부호율 300/301인 부호의 성능이 덜 천공한 부호율 100/101인 부호의 성능에 근접할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 천공에 사용된 모부호는 부호율 1/2, 구속 장 3인 [8]에서 제시한 생성 다항식을 사용하여 만들었으며, 천공 패턴은 규칙 패턴(regular pattern)을 사용하였다. RSC 부호는 구조적 특성 때문에 천공을 많이 한 부호도 복호 깊이에 따라 성능이 크게 개선될 수 있고, 따라서 천공 부호율에 따라 적합한 복호 깊이를 정하는 것이 천공 부호율을 높이면서 저 복잡도에서 성능이 좋은 RSC 부호를 설계하는 방법이 된다.

이와 같은 RSC 부호의 특성은 높은 부호율과 낮은 복잡도의 부호를 요구하는 저장장치에 적합하며 성능이 우수한 블록 부호와 연결하면 높은 부호율을 만족하면서 성능도 우수할 것으로 예상된다. 아래의 표 3, 5는 천공을 많이 한 부호가 복호 깊이가 큰 경우에 비교적 좋은 성능을 보일 수 있다는 것과 여러 개의 BCH 부호어를 결합하여 하나의 RSC 부호어를 만들 경우에 성능이 좋아짐을 보여준다. 여기서 4095는 BCH 부호의 길이이다.

표 4, 6은 모 부호율 1/2인 [4]에서 제시한 최적의 SC부호를 균등 천공한 부호의 성능 결과이다. 앞에서 간단히 설명하였듯이 NSC 부호는 천공을 많이 한 경우에 구속 장을 벗어나는 비트에 대하여 복호 과정에서 부호어와 정보비트가 매핑되지 않기 때문에 천공 부호율이 높은 경우에는 SC 부호보다 성능이 좋지 못하다. 따라서 천공한 SC 부호와 RSC 부호의 성능을 비교한다. 표 3~6을 보면 어떤 동일한 비교 조건에서도 천공 RSC 부호가 성능이 우수함을 알 수 있다. 더욱이 복호 깊이를 크게 하면 RSC 부호의 성능은 크게 개선되어 SC 부호보다 매우 우수한 성능을 보인다. 하나의 예로 천공 후 부호율이 300/301인 RSC 부호는 복호 깊이를 크게 하면 천공 후 부호율이 100/101인 SC 부호보

표 3. 천공 후 부호율이 300/301인 RSC 부호
(채널 오류율(BER): 10^{-5} , 모 부호율: 1/2, 구속 장: 3)

RSC 부호길이	복호 깊이 (구속 장의 배수)	RSC 복호기 출력 BER
4095×1	× 10	8.25E-06
	× 50	2.36E-06
	× 100	3.71E-07
4095×3	× 10	8.50E-06
	× 50	2.16E-06
	× 100	1.40E-07

표 4. 천공 후 부호율이 300/301인 SC부호
(채널 오류율(BER): 10^{-5} , 모 부호율: 1/2, 구속 장: 3)

RSC 부호길이	복호 깊이 (구속 장의 배수)	RSC 복호기 출력 BER
4095×1	× 10	9.30E-06
	× 50	9.90E-06
	× 100	9.80E-06
4095×3	× 10	1.06E-05
	× 50	1.00E-05
	× 100	1.06E-05

표 5. 천공 후 부호율이 100/101인 RSC 부호
(채널 오류율(BER): 10^{-5} , 모 부호율: 1/2, 구속 장: 3)

RSC 부호길이	복호 깊이 (구속 장의 배수)	RSC 복호기 출력 BER
4095×1	× 10	8.10E-06
	× 30	4.20E-06
	× 50	1.90E-06
4095×3	× 10	7.90E-06
	× 30	3.86E-06
	× 50	1.70E-06

표 6. 천공 후 부호율이 100/101인 SC 부호
(채널 오류율(BER): 10^{-5} , 모 부호율: 1/2, 구속 장: 3)

RSC 부호길이	복호 깊이 (구속 장의 배수)	RSC 복호기 출력 BER
4095×1	× 10	9.20E-06
	× 30	9.80E-06
	× 50	1.07E-05
4095×3	× 10	9.70E-06
	× 30	8.90E-06
	× 50	1.00E-05

다 성능이 우수함을 알 수 있다. 그리고 RSC 부호는 SC부호와 달리 부호 길이 증가에 대한 부호 이득도 있음을 확인하였다.

IV. 연결 부호의 성능 분석

Forney에 의해 처음 제안된 연결 부호는 적당한 복호 복잡도로 Shannon 한계에 근접하는 부호로 알려져 있다[9]. 본 논문에서는 수신기의 soft 값을 이용한 연 판정 복호 과정(soft decision decoding)으로 낮은 SNR에서 성능이 좋은 RSC 부호와 높은 SNR에서 비교적 성능이 좋은 이진 BCH 부호를 연결한 부호를 고려한다[4].

저장 장치에 사용되는 부호는 부호율이 1에 근접하는 높은 부호율을 요구하므로, 패리티 비트의 많은 천공으로 RSC부호의 성능 저하가 발생한다. RSC 부호의 천공 비트의 수가 아주 많으면 연결부호의 성능이 블록 부호를 단독으로 사용한 경우보다 성능이 오히려 나쁜 경우가 있을 수 있다. 특히 NSC, SC 부호는 천공 비트의 수가 많으면 거의 부호 이득이 없거나 NSC 부호는 오히려 부호화 하지 않은 경우보다 성능이 좋지 않을 수도 있다. 이것은 부호기의 피드백 특성이 없기 때문이다. 우리는 3가지의 부호화 기법 중에 BCH 부호와 RSC 부호를 연결한 부호가 비교적 저 복잡도에서 BCH 부호를 단독으로 사용한 경우 또는 SC부호와 BCH 부호를 연결한 부호보다 성능이 우수한 부호화 기법임을 보여준다.

II장과 III장에서 알아 본 높은 부호율에서 성능이 좋은 BCH 부호와 RSC 부호를 연결하여 목표 부호율 0.99 이상에서 목표 BER 10^{-11} 과 10^{-13} 을 만족하는지를 알아본다. 안쪽 부호로 RSC 부호를 사용하였고, 바깥 부호로 II장에서 제시한 단축된 이진 BCH 부호를 사용하였다. 그리고 BCH 부호의 오류 패턴은 완전한 인터리버를 사용하여 랜덤하다고 가정하였다.

표 6과 7은 목표 부호율 0.99을 만족하면서 목표 BER 10^{-11} 과 10^{-13} 을 만족하기 위한 안쪽 부호의 출력 BER 요구량과 실제 RSC 부호의 출력 BER을 보여준다. 연결하여 부호율 0.99이 될 수 있는 표 6과 7의 3가지 조건에서 RSC 부호율 300/301인 경우에 목표 BER을 달성함을 확인할 수 있다. 이것은 RSC 부호의 성능이 수렴하는 복호 깊이 150이상에서만 가능하다. 여러 개의 BCH 부호어를 결합하여 하나의 RSC 부호로 만든다면 보다 좋은 성능을 만족시킬 수도 있을 것으로 예상된다. 즉, III장의 표 3, 4, 5, 6을 통하여 부호의 길이에 대한 부호 이득을 예상할 수 있다.

표 7. 연결부호(BCH + RSC 부호) 파라미터
(채널 BER 10^{-5} , 부호율 0.99, 모 부호율 1/2, 구속 장: 3)

안쪽 부호 출력 BER 요구량	실제 RSC 출력 BER	RSC 부호율	부호 길이 (N)	정보 비트수 (k)	설계 거리 (t)	BCH 부호율	연접부호 부호율	부호기 출력 BER
5.00E-08	3.50E-06	150/151	4095	4083	1	0.997	0.980	3.56E-10
1.00E-06	3.71E-07	300/301		4071	2	0.994	0.980	4.24E-13

표 8. 연결부호 (BCH+ RSC 부호) 파라미터
(채널 BER 5×10^{-6} , 부호율 0.99, 모 부호율 3/4, 구속 장: 7)

안쪽 부호 출력 BER 요구량	실제 RSC 출력 BER	RSC 부호율	부호 길이 (N)	정보 비트수 (k)	설계 거리 (t)	BCH 부호율	연접부호 부호율	부호기 출력 BER
5.00E-09	3.80E-06	150/151	4095	4083	1	0.997	0.990	4.55E-10
2.50E-07	1.47E-07	300/301		4071	2	0.994	0.991	2.66E-14

III장에서도 알아본 바와 같이 RSC 부호는 천공을 많이 한 경우에도 복호 깊이와 부호 길이의 증가 등으로 많은 천공으로 인한 성능열화를 어느 정도 완화시킬 수 있다.

채널이 좋지 않은 경우에는 천공을 많이 한 RSC 부호는 오류를 거의 정정하지 못할 수 있기 때문에 채널에 적합한 다른 연결부호 기법을 고려해야 할 것으로 보인다.

V. 결론

본 논문은 [10]의 연구를 확장시킨 결과를 다루고 있다. II장에서 BCH 부호가 목표 부호율 0.99에서 목표 BER 10^{-11} 또는 10^{-13} 을 만족시키지 못함을 확인하였고, III장에서는 부호율이 높은 경우에 천공된 RSC 부호가 다른 천공된 NSC, SC 부호에 비하여 좋은 성능을 보일 수 있음을 알아보았다. 높은 부호율의 연결부호 설계 시 성능 열화가 적은 천공된 RSC 부호를 설계하는 것이 중요하며, 이때 RSC 부호의 성능은 부호의 길이, 복호 깊이 등이 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이와 같은 RSC 부호의 특성은 천공을 많이 한 경우에도 천공을 덜한 부호의 성능에 근접할 수 있음을 모의 실험을 통하여 확인하였다. 하지만 SC 부호를 안쪽 부호로 사용한 경우에는 많은 천공 비트로 인하여 블록 부호를 단독으로 사용한 경우보다 성능이 좋지 않을 수 있음을 알 수 있었다.

II장과 III장에서 알아본 BCH 부호와 RSC 부호를 연결한 부호를 사용하여 목표 부호율과 목표 BER을 달성하는 것을 IV장의 연결부호 파라미터를 통해 확인하였다. 부호의 길이를 5000비트 이내로 하고, 채널 상태가 비교적 좋은 조건에서는 본 논문에서 제안한 연결 부호화 기법이 비교적 낮은 복잡도에서 높은 부호율과 우수한 성능을 동시에 만족시킬 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] T. Tanzawa, T. Tanaka, K. Takeuchi, R. Shiota, S. Aritome, H. Watanabe, G. Hemink, K. Shimizu, S. Sato, Y. Takeuchi, and K. Ohuchi, "A Compact On-Chip ECC for Low Cost Flash Memories," *IEEE Journal of Solid State Circuit*, Vol.32, No.5, pp.662-669, May 1997.

[2] B. Polianskikh and Z. Zilic, "Induced Error-Correcting Code for 2bit-per-cell Multi-Level DRAM," *Circuits and Systems, MWCAS 2001*, pp.352-355.

[3] J. P. Odenwalder, *Error Control Coding Handbook*, Linkabit Corporation, San Diego, Calif., July 15, 1976.

[4] S. Lin, and D. J. Costello, *Error Control Coding*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2004.

[5] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes," *IEEE ICC'93*, pp.1064-1070, May 1993.

[6] T. K. Moon, *Error Correction Coding*, Wiley, 2005.

[7] M. Kim, "On Systematic Punctured Convolutional Codes," *IEEE Trans. On Commun.*, Vol.45, No.2, pp.133-139, Feb. 1997.

[8] M. Tüchler, and A. Dholakia, "Rate-(N-1)/N Convolutional Codes with Optimal Spectrum," IBM Research Report RZ 3409 (# 93559) 06/28/02.

[9] G. D. Forney, Jr., *Concatenated Codes*, MIT Press, Cambridge, 1966.

[10] 김형준, 김성래, 신동준, "저장 장치를 위한 연결 부호화 기법의 성능 분석", 제18회 통신정보 합동학술대회(JCCI'08), 2008년 4월.

김 형 준 (Hyung-June Kim)

준회원



2004년 8월 홍익대학교 전자전기공학부 학사
 2008년 8월 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사
 <관심분야> 오류정정부호, Constrained codes, 디지털통신

김 성 래 (Sung-Rae Kim)

정회원



2005년 2월 한양대학교 전자전기공학부 학사
 2005년 3월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 오류정정부호, 디지털 통신, 이산 수학

신 동 준 (Dong-Joon Shin)

종신회원



1990년 2월 서울대학교 전자공학과 학사
 1991년 12월 Northwestern University 전기공학과 석사
 1998년 12월 University of Southern California 전기공학과 박사
 1999년 1월~1999년 4월 University of Southern California, Research Associate
 1999년 4월~2000년 8월 Hughes Network Systems, Member of Technical Staff
 2000년 9월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 부교수
 <관심분야> 오류정정부호, 시퀀스, 시공간 부호, OFDM, 정보보호, 이산수학