

# 이진 대칭 소실 채널에서 RS, 터보 및 저밀도 패리티 검사 부호의 성능 분석

정회원 임형택\*, 박명중\*, 강석근\*\*, 종신회원 주언경\*°

## Performance Analysis of RS, Turbo and LDPC Code in the Binary Symmetric Erasure Channel

Hyung Taek Lim\*, Myung Jong Park\*\*, Seog Geun Kang\*\*\* *Regular Members*,  
Eon Kyeong Joo\*° *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 이진 대칭 소실 채널에서 RS 부호, 터보부호 및 저밀도 패리티 검사부호의 성능을 비교 분석한다. RS 부호는 심벌 단위로 복호가 이루어지므로 평균 소실 길이가 짧아지면 소실 심벌 수가 증가하여 매우 심각한 성능열화를 보인다. 하지만 소실 길이가 길어지면 소실 심벌 수가 감소하여 오류 성능이 크게 개선된다. 이와는 달리 터보부호는 소실 길이가 증가하면 메시지와 연관된 정보를 가진 다수의 심벌들이 함께 소실되므로 반복 복호를 수행하더라도 성능이 개선되지 않는다. 저밀도 패리티 검사부호는 평균 소실 길이가 변하더라도 현격한 오류 성능의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 저밀도 패리티 검사부호의 복호과정에서 발생하는 가상 인터리빙 효과에 의한 것으로 분석된다. 이로 인하여 이 부호는 RS 부호나 터보부호에 비하여 훨씬 우수한 소실 복호 성능을 보인다.

**Key Words** : RS code, turbo code, LDPC code, erasure decoding, binary symmetric erasure channel.

### ABSTRACT

In this paper, performance of RS (Reed-Solomon), turbo and LDPC (low density parity check) code in the binary symmetric erasure channel is investigated. When the average erasure length is reduced, the frequency of short erasures is increased. The RS code shows serious performance degradation in such an environment since decoding is carried out symbol-by-symbol. As the erasure length is increased, however, the RS code shows much improved error performance. On the other hand, the message and corresponding parity symbols of the turbo code can be erased at the same time for the long erasures. Accordingly, iterative decoding of the turbo code can not improve error performance any more for such a long erasure. The LDPC code shows little difference in error performance with respect to the variation of the average erasure length due to the virtual interleaving effect. As a result, the LDPC code has much better erasure decoding performance than the RS and turbo code.

### 1. 서 론

일반적으로 채널에서 다른 신호의 간섭이나 수신기의 일시적인 고장 등으로 인해 전송된 심벌이 모

※ 본 연구의 일부는 BK21 지원사업의 결과임. 또한 일부는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 결과임(NIPA-2009-C1090-0904-0001).

\* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (htlim@ee.knu.ac.kr, ekjoo@ee.knu.ac.kr), \*\* 한국전파진흥원(kromp@nate.com)

\*\*\* 경상대학교 전기전자공학부 (sgkang@gnu.ac.kr), (°: 교신 저자)

논문번호 : KICS2009-10-449, 접수일자 : 2009년 10월 7일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 10일

호하게 수신되었을 때 심벌이 소실된 것으로 간주한다. 소실 채널(erasure channel)에서 가능한 출력 심벌은 입력 심벌과 소실 심벌로 구성된다. 채널에서 소실이 발생하면 수신 단에서는 입력 심벌이 아닌 새로운 심벌이 수신되므로 소실 심벌의 위치를 알 수 있다. 따라서 소실 복호는 알려진 소실 위치의 소실된 심벌 값을 찾는 것이다.

소실 복호에 관한 기존의 연구는 주로 네트워크 계층에서 소실만 존재하는 채널을 대상으로 이루어졌다<sup>11</sup>. 네트워크 계층에서는 데이터와 제어 신호로 구성된 패킷 단위로 전송이 이루어진다. 그리고 수신 패킷의 데이터 부분에 대한 순환잉여검사(cyclic redundancy check)를 수행하여 패킷 소실에 대한 판정이 이루어진다. 따라서 네트워크 계층에서 발생하는 패킷 소실과 심벌 단위로 신호가 전송되는 물리 계층의 심벌 소실은 현저한 차이가 있다.

네트워크 계층과 달리 물리 계층에서는 소실과 잡음에 의한 오류가 동시에 존재하는 경향이 있다. 또한 물리 계층에서 소실은 특성상 여러 심벌 구간 동안 집중적으로 발생하는 연접성이 있다<sup>12</sup>. 이러한 이유로 기존의 연구들에서는 연접오류 정정 능력이 우수한 RS 부호(Reed-Solomon code; RS code)가 소실과 오류가 동시에 존재하는 물리 계층에서 주로 사용되었다<sup>13</sup>. 하지만 최근 반복복호를 통해 샤논 한계(Shannon limit)에 근접하는 성능을 보이는 터보부호(turbo code)<sup>14</sup>와 저밀도 패리티 검사부호(low density parity check; LDPC)<sup>15</sup> 역시 일부 소실 채널 환경에서 소실 복호에 적용이 가능한 것으로 보고된 바 있다<sup>11,16</sup>. 이러한 부호들에서는 복호에 사용하는 소실 심벌에 대한 로그 우도비(log-likelihood ratio; LLR)나 수신된 심벌이 0 또는 1일 확률을 일정한 값으로 설정함으로써 복호 알고리즘의 수정 없이 소실 복호가 가능하다.

물리 계층에서 소실 복호에 관련된 대부분의 기존 연구들은 각 부호들의 성능 개선 방안을 주로 다루고 있다<sup>3,17,18</sup>. 하지만 RS 부호와 같이 기존에 사용되는 부호와 최근 주목받고 있는 터보부호 그리고 저밀도 패리티 검사부호의 성능에 대한 상대적인 비교 분석은 매우 미흡하다. 또한 소실의 연접성은 발생한 소실의 지속 시간과 관련이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 오류와 소실이 함께 존재하는 이진 대칭 소실 채널에서 서로 다른 소실 길이에 따른 RS, 터보 및 저밀도 패리티 검사부호의 성능을 비교 분석하고자 한다. 여기서는 우선 터보부호와 저밀도 패리티 검사부호에서 소실 복호를 위한

로그 우도비와 소실 심벌의 초기 확률을 설정하는 방법을 설명한다. 그리고 동일한 소실율에서 평균 소실 길이의 변화에 따른 채널부호의 소실 복호 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이은 제 2장에서는 이진 대칭 소실 채널과 이에 따른 소실 길이 및 소실 간격에 대한 수학적인 모델을 소개한다. 그리고 제 3장에서는 소실 복호를 위한 채널부호와 각 부호의 파라미터 설정 방법을 설명한다. 제 4장에서는 비교대상 채널부호의 설계 변수와 모의 실험을 위한 척도 그리고 이들을 이용한 모의실험 결과를 제시한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 함께 본 연구의 결과에 기반을 둔 추가 연구방향을 제시한다.

## II. 이진 대칭 소실 채널

광통신이나 전력선 통신시스템 등과 같은 채널에서는 물리 계층에서 심벌의 소실이 빈번하게 발생한다<sup>9,10</sup>. 광통신시스템에서는 광섬유를 통하여 전송되는 신호가 산란이나 흡수, 분산 등에 의하여 왜곡되어 경관정의 임계치에 가깝게 수신되는 현상이 발생한다. 이와 같이 임계치 근처의 일정 구간 내의 값으로 수신된 심벌은 경관정을 하지 않고 소실 심벌로 판정한다. 여기서 심벌을 소실로 판정하는 구간을 소실 구역(erasure zone)<sup>9</sup>이라고 하며, 따라서 소실 확률은 소실 구역의 크기에 따라 결정된다.

전력선 통신시스템에서는 심벌의 값을 구분하기 어려운 정도의 충격성 잡음(impulsive noise)이 발생할 수 있다<sup>10</sup>. 이러한 충격성 잡음이 더해진 심벌은 소실로 판단되므로 소실 확률은 충격성 잡음의 발생 간격과 지속 시간에 의하여 결정되고 이들은 서로 독립적이다. 여기서 발생 간격은 소실과 소실 사이의 간격에 해당되고 지속 시간은 소실 길이에 해당한다.

오류와 소실이 동시에 존재하는 채널은 이진 대칭 소실 채널(binary symmetric erasure channel; BSEC)로 나타낼 수 있다. 이 채널에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 송신 심벌의 집합이  $\{0,1\}$ 일 때 수신 심벌의 집합은 소실 심벌  $E$ 가 추가되어  $\{0,1,E\}$ 가 된다. 여기서  $p_E$ 는 소실이 발생할 확률이고  $p_e$ 는 심벌 오류 확률을 각각 나타낸다.

소실의 연접성을 고려하면 소실 확률뿐만 아니라 소실 간격(inter-erasure interval)과 소실 길이(erasure length)도 시스템 해석을 위한 중요한 척도이다.

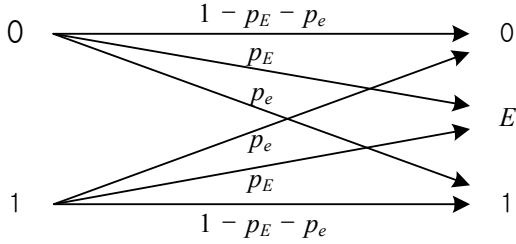


그림 1. 이진 대칭 소실 채널  
Fig. 1. A binary symmetric erasure channel

동일한 소실율에서도 소실 길이 혹은 간격에 따라서 다른 심볼 소실의 패턴을 보여줄 수 있기 때문이다. 소실 간격  $L_E$ 는 현재 소실이 발생된 순간부터 다음 소실이 발생되기까지의 심볼 수로 정의되고 소실 길이  $L_E$ 는 소실이 발생했을 때 연속적으로 소실되는 심볼 수이다. 그리고 소실율(erasure rate)  $R_E$ 는 전체 전송된 심볼 수에 대해 소실로 판정된 심볼 수의 비를 나타낸다.

채널에서의 소실 길이와 소실 간격은 서로 독립적이며 각각은 지수 확률 분포의 형태를 가진다<sup>[11]</sup>. 평균값이  $1/\lambda$ 인 지수 확률 분포함수에 대한 누적 분포함수는 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (1)$$

여기서  $F(x)$ 를 다음과 같이  $u$ 라고 두면

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} = u \quad (2)$$

$u$ 의 범위는  $[0,1]$ 사이의 값이 된다. 이를  $x$ 에 관하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = -\ln(1-u)/\lambda. \quad (3)$$

따라서  $[0,1]$ 의 범위를 가지는 균일 확률변수  $u$ 를 이용하여 생성된  $x$ 는 평균이  $1/\lambda$ 인 지수 분포를 가진다. 그러므로 평균 소실 길이  $\bar{L}_E$ 를  $1/\lambda_1$ 로, 평균 소실 간격  $\bar{I}_E$ 를  $1/\lambda_2$ 로 가정하면 채널에서 실제적인 소실 길이  $L_E$ 와 소실 간격  $I_E$ 는

$$L_E = -\ln(1-u_1)/\lambda_1, \quad (4)$$

$$I_E = -\ln(1-u_2)/\lambda_2 \quad (5)$$

으로 구할 수 있다.

### III. 채널 부호에 따른 소실 복호

소실과 오류가 공존하는 전송환경에서 RS 부호는 소실 복호를 위하여 가장 널리 이용되는 채널부호이다. 이 부호는 연접오류 정정 능력이 우수할 뿐만 아니라 정정 가능한 오류의 수보다 2배 많은 소실을 복원할 수 있다. 이와 함께 최근에는 터보부호와 저밀도 패리티 검사부호도 소실 복호에 적용 가능한 것으로 보고된 바 있다<sup>[11],[6],[8]</sup>.

RS 부호를 이용한 소실 복호에서는 먼저 소실 심벌의 위치에 0의 값을 넣는다<sup>[12]</sup>. RS 부호는 복호의 마지막 단계에서 구해진 복원값을 수신된 소실 심벌에 더하여 복원한다. 그러므로 소실 심벌에 0이 아닌 다른 값이 있으면 복원값을 더했을 때 올바른 심벌로 복원되지 않는다. 이 때 소실이 아니라 실제 수신된 신호가 0으로 판정된 심벌은 소실 심벌과 달리 복호기에서 소실 위치로 판단하지 않는다. 소실 심벌을 0으로 설정한 다음 Berlekamp-Messy 알고리즘을 통해 오류의 위치를 파악한다<sup>[12]</sup>. 그리고 파악된 오류의 위치와 알고 있는 소실의 위치를 이용하여 오류 평가 방정식(error evaluation equation)을 통해 오류와 소실의 올바른 값을 구한다<sup>[12]</sup>. 마지막으로 구해진 값을 소실 위치의 수신 심벌에 더함으로써 소실 심벌을 복원하고 오류 심벌은 정정한다.

터보부호는 (6)과 같이 표현되는 수신 심벌의 로그 우도비를 복호에 사용한다<sup>[4]</sup>.

$$L_e(y_k) = \ln \left[ \frac{p(x_k = 1|y_k)}{p(x_k = 0|y_k)} \right], \quad (6)$$

여기서  $p(x_k = 1|y_k)$ 는  $k$ 번째 수신된 심벌이  $y_k$ 일 때 전송된 심벌  $x_k$ 가 1일 확률을 나타내고  $p(x_k = 0|y_k)$ 는  $x_k$ 가 0일 확률을 나타낸다. 그림 1에 나타난 바와 같이 이진 대칭 소실 채널에서 1인 심벌이 소실될 확률과 0인 심벌이 소실될 확률은 동일하다. 즉, 수신 단에서 소실로 판단된 심벌이 1일 확률과 0일 확률도 동일하므로 소실 심벌의 초기 로그 우도비는

$$L_e(y_k) = \ln \left[ \frac{p(x_k = 1|y_k)}{p(x_k = 0|y_k)} \right] = 0 \quad (7)$$

이 된다. 이와 같이 소실 심벌의 초기 로그 우도비를 0으로 정하면 터보부호를 위한 기존의 오류정정 복호 방식은 수정 없이 소실 복호에도 적용할 수 있다.

저밀도 패리티 검사부호도 기존의 복호방식인 합곱 알고리즘(sum-product algorithm)<sup>[5]</sup>을 이용하여 소실 복호가 가능하다. 합곱 알고리즘의 초기화 단계에서 수신 심벌  $y_k$ 가 1일 초기 확률  $p_k^1$ 은 다음과 같다<sup>[13]</sup>.

$$p_k^1 = \frac{1}{1 + e^{-y_k/\sigma^2}}, \quad (8)$$

여기서  $\sigma^2$ 은 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise; AWGN)의 분산(variance)을 나타낸다. 따라서 수신된 심벌이 0일 확률은 다음과 같다.

$$p_k^0 = 1 - p_k^1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{-y_k/\sigma^2}}. \quad (9)$$

이진 대칭 소실 채널에서 소실 심벌이 1 혹은 0일 확률은 동일하므로 저밀도 패리티 검사부호를 이용하는 소실 복호에서는 소실 심벌의 초기 확률을 0.5로 정한다.

#### IV. 모의실험 및 분석

##### 4.1 모의실험 환경

RS 부호, 터보부호 및 저밀도 패리티 검사부호의 오류 및 소실 복호 성능 비교를 위한 대상으로 전력선 통신을 이용하는 홈네트워크 시스템<sup>[11]</sup>을 사용하였다. 일반적인 홈네트워크 시스템에서는 0.1~1 Mbps의 데이터 전송률에서 충격성 잡음의 평균 지속시간은 16.59 $\mu$ s로 알려져 있다<sup>[10]</sup>. 이를 데이터 전송률에 따른 평균 소실 길이로 환산하면 1.659~16.59비트가 된다. 또한 전체 전송 시간 가운데 소실이 발생하는 비율을 나타내는 소실율은 충격성 잡음의 비율에 따라 0.01~0.4정도이다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 이 범위 가운데 소실에 의한 성능저하가 가장 클 것으로 예상되는 0.4를 적용한다.

평균 소실 간격  $\bar{L}_E$ 는 이론적으로 평균 소실 길이와 소실율의 비에 의하여 정해진다. 하지만 소실율에 따라 계산된 소실 길이보다 소실 간격이 작으면 소실이 중첩될 수 있으며, 이로 인하여 미리 정해진

소실율에 비하여 실제 발생된 소실의 비율이 작아질 수 있다. 따라서 미리 정해진 소실율을 유지하기 위해서는 평균 소실 길이에 따라 계산된 간격보다 더 큰 소실 간격을 사용하는 것이 바람직하다. 이에 따라 1.659~16.59비트의 소실 길이에서 0.4의 소실율을 맞추기 위하여 실험적으로 구한 소실 간격은 표 1과 같다.

표 1. 평균 소실 길이에 따른 평균 소실 간격  
Table 1. The average inter-erasure interval according to the average erasure length

$\bar{L}_E$ [bits]	1.659	4.148	8.295	16.59
$\bar{I}_E$ [bits]	5.258	10.15	18.29	35.58

모의실험을 위한 채널부호의 설계 변수는 표 2와 같다. 일반적으로 홈네트워크에서는 약 2000비트 길이의 부호어를 사용하므로 RS 부호는 이와 가장 가까운 부호어의 길이를 가지는 부호율이 1/5인 (255, 51)부호를 사용한다. 여기서는 51개의 메시지 심벌에 패리티 심벌을 더한 255개의 부호어 심벌이 생성되고, 각 심벌은 8비트로 구성되므로 RS 부호의 길이는 2040비트가 된다. 동일한 조건에서 세 부호의 비교를 위해 터보와 저밀도 패리티 검사부호도 RS 부호와 같은 부호어 길이 및 부호율을 가지도록 한다. RS 부호의 원시 다항식(primitive polynomial)은 DVB-H(digital video broadcasting-handheld), DVB-S(satellite) 등에서 일반적으로 사용되는  $(x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1)$ 을 사용한다.

터보 부호의 생성 다항식(generating polynomial)은 (12, 15, 17)<sub>8</sub>을 사용한다. 그리고 터보부호의 오류정정 능력을 결정하는 최소 자유 길이(minimum free distance)를 크게 만들기 위한 내부 인터리버로

표 2. 오류정정 부호의 매개 변수  
Table 2. Parameters for the error correcting codes

RS 부호	원시 다항식	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
터보 부호	생성 다항식	(12, 15, 17) <sub>8</sub>
	내부 인터리버	프라임 인터리버
	최대반복복호횟수	10
저밀도 패리티 검사 부호	검사 행렬 (1의 분포)	비균일 (0.3×2/0.6×3/0.1×7)
	검사 행렬 크기	1632×2040
	최대반복복호횟수	200

프라이머 인터리버를 사용한다<sup>[14]</sup>. 이에 비하여 저밀도 패리티 검사부호는 패리티 검사행렬에서 1의 위치가 비균일(irregular)하고 랜덤할 때 더욱 우수한 성능을 나타낸다<sup>[15]</sup>. 따라서 본 논문에서는 Mackay의  $(0.3 \times 2 / 0.6 \times 3 / 0.1 \times 7)$  무게 분포<sup>[16]</sup>를 가지는  $1632 \times 2040$  크기의 비균일 랜덤 패리티 검사행렬을 사용한다. 여기서  $(0.3 \times 2 / 0.6 \times 3 / 0.1 \times 7)$ 은 1이 2개 있는 열이 30%, 3개 있는 열이 60%, 7개 있는 열이 70% 분포함을 의미한다. 일반적인 터보부호의 최대 반복복호 횟수는 5~8회<sup>[17]</sup>이고, 저밀도 패리티 검사부호의 경우는 150회<sup>[18]</sup> 정도임을 고려하여 본 논문에서는 이보다 충분히 많은 반복복호가 수행되도록 10회와 200회로 각각 정하였다. 그리고 변조 방식으로는 2진 위상편이키잉(binary phase shift keying; BPSK)을 사용한다.

#### 4.2 평균 소실길이에 따른 채널부호의 성능

##### 4.2.1 RS 부호

평균 소실 길이에 따른 RS 부호의 비트오율(bit error rate; BER)을 그림 2에 나타내었다. 여기서 신호 대 잡음비(signal-to-noise power ratio; SNR)의 척도로는 비트에너지와 잡음 전력 스펙트럼 밀도의 비를 나타내는  $E_b/N_0$ 를 사용하였다.

소실 길이가 1.659에서 16.59까지 증가됨에 따라 RS 부호의 오류 성능이 현저히 개선되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 소실 길이가 가장 짧은 1.659의 경우 신호 대 잡음비를 증가시켜도 성능이 전혀 개선되지 않는다. 이는 소실율이 일정하므로 평균 소실 길이가 줄어들면 소실 심벌의 발생 빈도가 증가

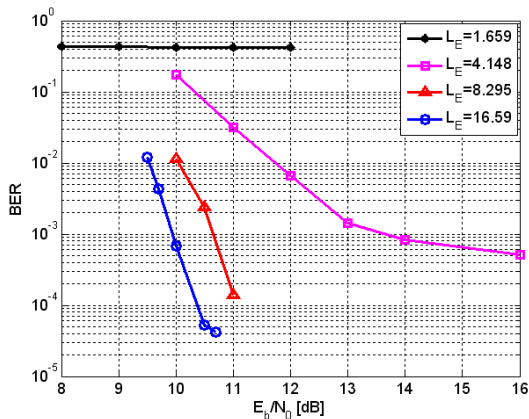


그림 2. 평균 소실 길이에 따른 RS 부호의 성능  
Fig. 2. Performance of RS code according to the average erasure length

되어 RS 부호의 오류정정 능력을 벗어나기 때문인 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여  $E_b/N_0$ 가 10dB일 때 평균 소실 길이에 따라 실험적으로 획득한 평균 오류 심벌의 수  $\bar{N}_e$ 와 평균 소실 심벌의 수  $\bar{N}_E$ 를 바탕으로 복호에 필요한 평균 다항식의 수  $\bar{N}_T = (2\bar{N}_e + \bar{N}_E)$ 를 구하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 평균소실길이에 따른 오류와 소실심벌의 수  
Table 3. The number of errors and erasure symbols according to the average erasure length

$\bar{L}_E$	$\bar{N}_e$	$\bar{N}_E$	$\bar{N}_T$
1.659	6.8	214.8	228.4
4.148	12.9	178.4	204.4
8.295	17.5	151.0	185.9
16.590	21.4	127.7	170.6

평균적인 오류 심벌 수는 평균 소실 길이가 감소됨에 따라 21.4개에서 6.8개로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 평균 소실 심벌의 수는 소실 길이가 감소됨에 따라 127.7개에서 214.8개로 68% 이상 증가한다. 또한 소실 길이가 1.659인 경우 228개보다 많은 다항식이 복호에 필요한 것으로 나타났다. 이는 패리티 심벌의 수인 204개 보다 크므로  $\bar{L}_E=1.659$ 인 경우에는 RS(255,51) 부호의 복원 능력을 벗어난다. 이로 인하여 RS 부호의 오류 성능은 신호 대 잡음비를 증가시켜도 전혀 개선되지 않는다. 따라서 RS 부호는 평균 소실 길이가 상대적으로 긴 소실 채널에 적합한 채널부호인 것으로 판단된다.

##### 4.2.2 터보부호

소실 길이에 따른 터보부호의 오류 성능을 그림 3에 나타내었다. 터보부호는 RS 부호와는 반대로 평균 소실 길이가 짧아질수록 복호 성능이 현저히 개선된다. 이는 터보부호의 기반이 되는 길쌈부호의 특징에 기인하는 것으로 분석된다. 길쌈부호는 하나의 메시지를 부호화하면 구속 길이(constraint length)만큼의 패리티 비트가 생성된다. 따라서 전송 채널의 소실 길이가 길어지면 메시지 비트와 연관된 패리티 비트들이 함께 소실될 가능성이 증가한다. 이 경우 수신기에서 반복복호를 수행하더라도 소실 비트의 로그 우도비는 개선되지 않고 초기값인 0으로 고정된다. 따라서 터보부호의 특징인 반복복호에 의

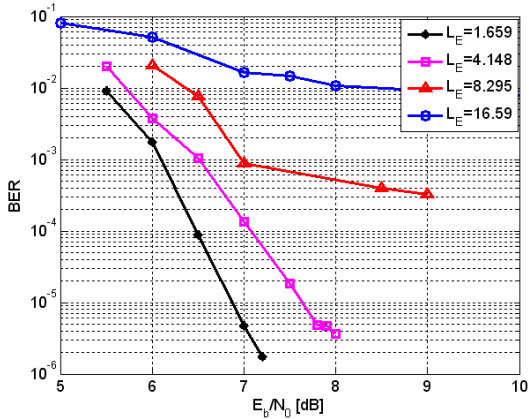


그림 3. 평균 소실 길이에 따른 터보부호 성능.  
Fig. 3. Performance of turbo code according to the average erasure length.

한 성능 개선 효과가 사라진다. 최대 반복복호 횟수에 도달할 때까지 로그 우도비의 변화가 없는 비트 수를 평균 소실 길이에 따라 구하여 표 4에 나타내었다. 여기서  $R_z$ 는 전체 비트에 대한 최대 반복복호 횟수까지 로그 우도비가 0으로 남아있는 비트 수의 비이다. 평균 소실 길이가 증가함에 따라 로그 우도비의 변화가 없는 비트 수도 증가함을 확인할 수 있다. 이로 인하여  $E_b/N_0$ 를 증가시켜도 성능이 거의 개선되지 않는 오류 마루(error floor) 현상이 발생하는 것을 그림 3에서 확인할 수 있다. 이는 신호 대 잡음비가 낮은 영역에서는 반복복호에 따라 오류가 정정되는 효과가 있으나 신호 대 잡음비 높아지면 잡음에 의한 비트 오류는 반복복호에 의하여 정정되지만 소실 비트의 복원은 거의 이루어지지 않는 것으로 해석된다. 따라서 터보부호는 길이가 짧은 소실이 자주 발생하는 환경에 적합한 것으로 판단된다.

표 4. 평균 소실 길이에 따른  $R_z$ .  
Table 4.  $R_z$  according to the average erasure length.

$\bar{L}_E$	4.148	8.295	16.590
$R_z$	83/40800000 ( $2.03 \times 10^{-6}$ )	131/816000 ( $1.61 \times 10^{-4}$ )	3605/408000 ( $8.83 \times 10^{-3}$ )

4.2.3 저밀도 패리티 검사부호

평균 소실 길이의 변화에 따른 저밀도 패리티 검사부호의 오류 성능은 그림 4에 나타내었다. RS 부호나 터보부호와 달리 이 부호는 평균 소실 길이가 변하더라도 오류 성능의 현격한 차이가 발생되지

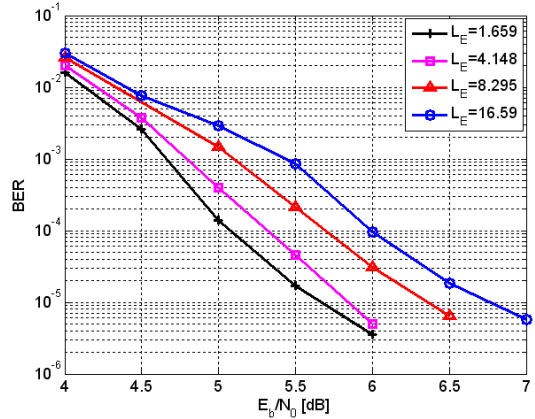


그림 4. 평균 소실 길이에 따른 저밀도 패리티 검사부호의 성능.  
Fig. 4. Performance of LDPC code according to the average erasure length.

않는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 신호 대 잡음비가 증가됨에 따라 계속하여 오류 성능이 향상된다. 이는 저밀도 패리티 검사부호의 복호과정에서 발생하는 가상 인터리빙 효과<sup>19)</sup> 때문인 것으로 분석된다. 이 부호의 복호 방식인 합-곱 알고리즘에서는 서로 연관된 메시지 비트와 체크 비트 사이에 정보 교환이 지속적으로 이루어진다. 이로 인하여 소실 길이가 길어지더라도 복호 과정에서 소실의 연접 현상이 사라지는 인터리빙 효과가 발생한다. 따라서 다른 부호들의 복호에서 발생하는 오류 마루 현상이 나타나지 않고  $E_b/N_0$ 가 증가됨에 따라 성능이 계속하여 개선되는 것으로 판단된다.

4.3 평균 소실 길이에 따른 세 부호의 성능 비교

채널의 평균 소실 길이를 1.659~16.59로 변화시키면서 구한 RS, 터보 및 저밀도 패리티 검사부호의 상대적인 성능을 그림 5~8에서 비교하였다. 여기서 소실율은 0.4로 모두 동일하다.

소실 길이가 비교적 짧은 1.659와 4.148인 경우 터보부호와 저밀도 패리티 검사부호는 약 5.5~7.5 dB에서 비트오율이  $10^{-5}$ 에 도달한다. 이에 비하여 RS 부호는 각각 약  $4 \times 10^{-1}$ 과  $5 \times 10^{-4}$ 의 높은 비트오율에서  $E_b/N_0$ 가 증가하더라도 성능이 개선되지 않는 현상이 나타난다. 이는 앞의 분석에서 예상된 바와 같이 소실율이 동일한 경우 평균 소실 길이가 짧을수록 소실 심벌의 수가 증가하여 RS 부호의 복호 성능이 현저히 저하되기 때문이다.

평균 소실 길이가 8.295와 16.59로 증가되면 소실 심벌의 수가 감소하므로 RS 부호의 복호 성능이

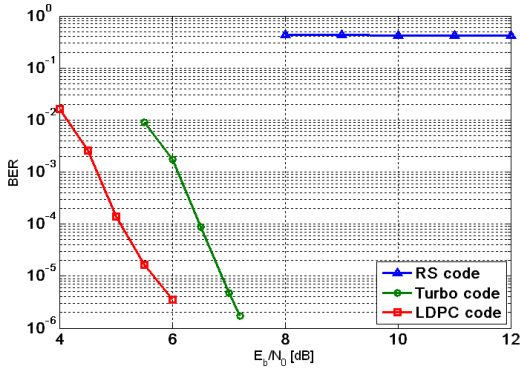


그림 5.  $\bar{L}_E=1.659$  일 때 성능비교  
Fig. 5. Performance comparison at  $\bar{L}_E=1.659$

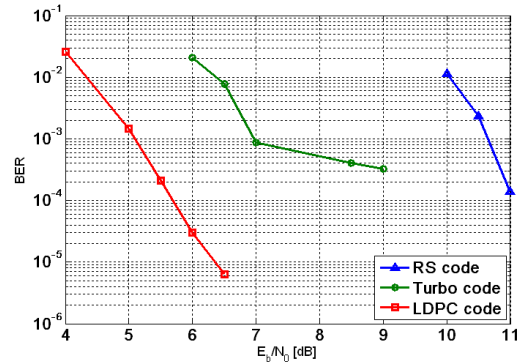


그림 7.  $\bar{L}_E=8.295$  일 때 성능비교  
Fig. 7. Performance comparison at  $\bar{L}_E=8.295$

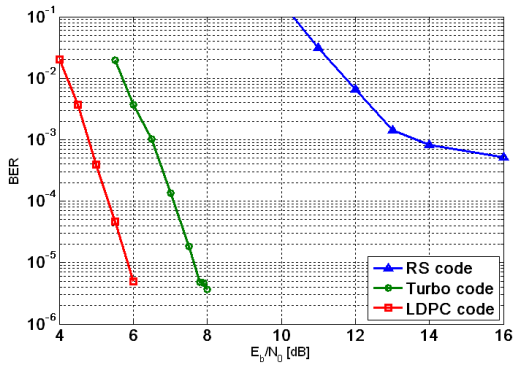


그림 6.  $\bar{L}_E=4.148$  일 때 성능비교  
Fig. 6. Performance comparison at  $\bar{L}_E=4.148$

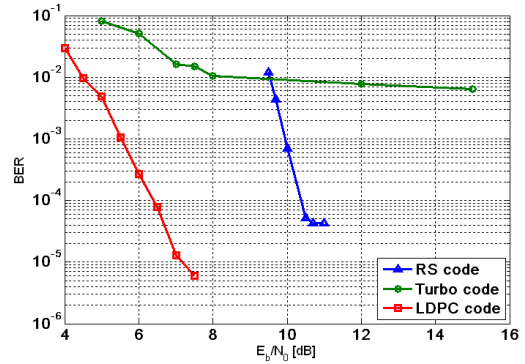


그림 8.  $\bar{L}_E=16.59$  일 때 성능비교  
Fig. 8. Performance comparison at  $\bar{L}_E=16.59$

크게 개선되는 것을 그림 7과 8을 통하여 확인할 수 있다. 이에 비하여 터보부호는 그림 5와 6에 비하여 심각하게 오류 성능이 떨어진다.  $\bar{L}_E=8.295$ 인 경우 터보부호의 성능은  $3 \times 10^{-4}$  근처에서 거의 정체된다. 따라서  $E_b/N_0=11\text{dB}$  근처에서 터보부호와 RS 부호의 오류 성능이 역전될 것으로 예상된다. 이는 그림 8에서 명확히 입증된다.  $\bar{L}_E=16.59$ 인 경우 약 9.5dB 이상에서 더 이상 성능 개선이 이루어지지 않는 터보부호보다 RS 부호의 비트오율이 더 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 터보부호가 길쌈부호기를 사용하므로 평균 소실 길이가 길어지면 메시지 비트와 연관된 패리티 비트가 함께 소실되어 복원이 불가능한 경우가 발생하기 때문이다. 이는 그림 7과 8에 보인 것처럼 터보부호에서 나타나는 오류 마루 현상의 원인이 된다.

한편, 저밀도 패리티 검사부호의 복호에서는 임

의로 연결된 메시지 비트와 체크 비트 사이에 정보 교환이 이루어지므로 가상 인터리빙 효과가 발생한다. 이로 인하여 연접된 소실이 분산되는 효과가 있으므로 성능이 심각하게 저하되는 현상이 발생하지 않는다. 그 결과 저밀도 패리티 검사부호는 평균 소실 길이가 가장 짧은 1.659일 때  $10^{-5}$ 의 비트오율 기준에서 터보부호에 비하여 약 1dB정도의 이득이 있다. 또한 평균 소실 길이가 가장 긴 16.59인 경우에도  $10^{-4}$ 의 비트오율 기준에서 RS 부호보다 약 4~5dB의 이득이 있다.

부호 별로 보았을 때 RS 부호는 소실 길이가 길어지면 터보부호보다 우수한 성능을 나타낸다. 하지만 소실 길이가 짧은 환경에서는 RS 부호가 가장 열악한 성능을 보인다. 이에 비하여 터보부호는 소실 길이가 비교적 짧은 환경에서는 저밀도 패리티 검사부호와 함께 우수한 성능을 보이지만 소실 길이가 길어지면 오류 마루 현상이 발생되어 세 부호



가운데 가장 나쁜 성능을 보인다. 이들에 비하여 저밀도 패리티 검사부호는 가상 인터리빙 효과로 인하여 소실 길이가 변하더라도 신호 대 잡음비의 증가에 따라 지속적으로 성능 개선이 이루어진다. 따라서 본 논문에서 고려한 환경에서는 저밀도 패리티 검사부호가 가장 우수한 오류 성능을 보인다.

### V. 결 론

이진 대칭 소실 채널에서 소실의 영향은 단순히 발생 확률에 의해 결정되는 것이 아니라 소실 간격 및 소실 길이에 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 일정한 소실율에서 소실 길이를 달리하여 RS, 터보 및 저밀도 패리티 검사부호의 오류 성능을 모의실험을 통해 비교 분석하였다. 모의실험은 소실에 의한 성능 저하가 클 것으로 예상되는 0.4의 소실율에 대하여 수행하였다. 그 결과 심벌 단위로 복호가 이루어지는 RS 부호는 평균 소실 길이가 짧아지면 소실 심벌의 수가 증가하여 매우 심각한 성능 열화를 보인다. 하지만 소실 길이가 길어지면 소실 심벌의 수는 감소되어 복호 성능이 향상된다. 이와는 달리 터보부호는 소실 길이가 증가되면 하나의 메시지 심벌과 연관된 다수의 심벌들이 모두 소실될 수 있으므로 반복복호를 수행하더라도 성능이 향상되지 않는 현상이 발생한다. 따라서 터보부호는 평균 소실 길이가 짧은 전송 환경에 효과적인 것으로 분석된다. 이에 비하여 복호 과정에서 가상 인터리빙 효과에 의하여 소실 심벌의 연집화 현상이 완화되는 저밀도 패리티 검사부호는 평균 소실 길이에 관계 없이 항상 우수한 복호 성능을 보인다.

본 논문에서는 소실율이 40%에 이르는 소실 채널을 대상으로 실험 결과를 비교 분석하였다. 하지만 소실율이 적은 경우 터보부호와 RS 부호의 소실 복호 능력은 달라질 수 있을 것으로 예상된다. 또한 채널의 소실 원인과 특성이 달라지는 경우에도 채널부호의 소실 복호 능력의 변화가 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 본 논문의 실험 환경보다 더욱 다양한 채널 환경과 매개 변수가 적용된 소실 채널에 대한 추가적인 실험과 분석이 필요한 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] E. Rosnes and O. Ytrehus, "Finite-length analysis of turbo decoding on the binary erasure

channel," *Proc. IEEE ISIT'05*, Adelaide, Australia, pp.1246-1250, Sep. 2005.

[2] G. C. Glain, C. Marco, C. Franco, and G. Roberto, "Channel coding for future space missions: New requirements and trends," *Proc. IEEE*, Vol.95, No.11, pp.2157-2170, Nov. 2007.

[3] Y. W. Chang, J. H. Jeng, and T. K. Truong, "An efficient Euclidean algorithm for Reed-Solomon code to correct both errors and erasures," *Proc. IEEE PACRIM'03*, Victoria, Canada, pp.895-898, Aug. 2003.

[4] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo codes," *Proc. IEEE ICC'93*, Geneva, Switzerland, pp.1064-1070, May 1993.

[5] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Inform. Theory*, Vol.8, No. 1, pp.21-28, Jan. 1962.

[6] C. Di, D. Proietti, I. E. Telatar, T. J. Richardson, and R. L. Urbanke, "Finite-length analysis of low-density parity-check codes on the binary erasure channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.48, No.6 pp.1570-1579, June 2002,

[7] F. Babich and F. Vatta, "Robust, efficient and balanced (REB) rate-compatible puncturing schemes for hybrid ARQ algorithms using turbo codes," *Proc. IEEE ICC'06*, Istanbul, Turkey, pp.1154-1159, June 2006.

[8] N. Miladinovic and M. P. C. Fossorier, "Generalized LDPC codes and generalized stopping sets," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.56, No.2, pp.201-212, Feb. 2008.

[9] B. Xei, Y. L. Guan, J. Chen, C. Lu, and Z. Li, "Application of erasure decoding in fiber optical systems with FEC," *Proc. IEEE LEOS Summer Topical Meetings*, San Diego, CA, pp. 171 - 172, July 2005.

[10] E. P. Guillen, J. J. López, and C. Y. Barahona, "Throughput analysis over power line communication channel in an electric noisy scenario," *Proc. WASET'08*, Heidelberg, Germany, pp.206-212, Sep. 2008.

[11] H. L. Liu and B. H. Zhang, "The couple technology of distribution high-speed carrier communication," *Proc. IEEE ICPST'02*,



Kunming, China, pp.1312-1315, Oct. 2002.

[12] G. C. Clark, Jr. and J. B. Cain, *Error-correcting Coding for Digital Communications*, New York: Plenum, 1982.

[13] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative decoding of binary block and convolutional codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.42, No.2, pp.429-445, Mar. 1996.

[14] A. Shibutani, H. Suda, and Y. Yamao, "The performances of W-CDMA mobile radio with turbo codes using prime interleaver," *Proc. VTC 2000*, Tokyo, Japan, pp.946-950, May 2000.

[15] T. J. Richardson, M. A. Shokrollahi, and R. L. Urbanke, "Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, No.2, pp. 619-637, Feb. 2001.

[16] D. J. C. MacKay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes," *Electron. Lett.*, Vol.33, No.6, pp.457-458, Mar. 1997.

[17] S. Benedetto and G. Montorsi, "Unveiling turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.42, No.2, pp.409-428, Mar. 1996.

[18] Z. Juntan, W. Yige, M. P. C. Fossorier, and J. S. Yedidia, "Iterative decoding with replicas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.53, No.5, pp. 1644-1663, May 2007.

[19] J. Hou, P. H. Siegel, and L. B. Milstein, "Performance analysis and code optimization of low density parity-check codes on Rayleigh fading channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.19, No.5, pp.924-934, May 2001.

**임형택 (Hyung-taek Lim)**

정회원



2004년 8월 경북대학교 전자전기공학부 학사  
 2006년 8월 경북대학교 전자공학 석사  
 2006년 8월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

<관심분야> 오류정정부호, 네트워크부호

**박명종 (Myung-jong Park)**

정회원



2007년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 학사  
 2009년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사  
 <관심분야> 오류정정부호, 전력통신시스템

**강석근 (Seog Geun Kang)**

정회원



1988년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
 1993년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 석사  
 1999년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 박사  
 1993년~1994년 국방과학연구소 연구원

2000년~2003년 National University of Singapore, Research Fellow

2003년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수

2003년~현재 경상대학교 공학연구원 책임연구원

<관심분야> 디지털통신, 무선통신, 오류정정부호, 디지털신호처리, 통계적신호처리

주 언 경 (Eon Kyeong Joo)

중신회원



1976년 2월 서울대학교 전자공  
학과 학사

1984년 Ohio State University  
전기공학과 석사

1987년 Ohio State University  
전기공학과 박사

1976년~1979년 해군 통신전  
자 기술장교

1979년~1982년 한국과학기술원 연구원

1987년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수  
<관심분야> 디지털통신시스템, 부호이론, 디지털신  
호처리