

고품질 통신 시스템을 위한 LDPC 부호의 UEP 성능 분석

유석근*, 주언경^o

UEP Effect Analysis of LDPC Codes for High-Quality Communication Systems

Seog Kun Yu*, Eon Kyeong Joo^o

요 약

미래의 고품질 통신 시스템을 위해서는 더욱 강력한 오류제거기법과 메시지 심볼 당 비트수의 증가가 요구되고 있다. 멀티미디어 데이터에서 메시지 비트들은 서로 다른 중요도를 가질 수 있다. 그러므로 이 경우, EEP(equal error protection) 보다는 UEP(unequal error protection)를 사용하는 것이 더 효과적일 수 있다. 그리고 LDPC(low-density parity check) 부호는 Shannon 한계에 근접하는 우수한 성능을 보인다. 따라서 본 논문에서는 고품질 메시지 데이터에 대한 LDPC 부호의 UEP 효과를 분석한다. MSE(mean square error)와 BER(bit error rate)과 심볼당 비트수의 관계를 이론적으로 분석하고 모의실험을 통하여 증명한다. 이를 위하여 전체 메시지비트를 중요도에 따라 두 그룹으로 나눈 후 전체 부호율과 부호어 길이를 고정시키고 각 그룹의 메시지 비트수를 변화시켜가며 모의실험을 통하여 UEP 성능을 나타내었다. 이 결과를 통하여 심볼당 비트수, 전체 메시지비트에서 각 그룹의 비율, 그리고 각 그룹의 보호정도에 따른 LDPC 부호의 UEP 성능을 분석하였다.

Key Words : unequal error protection, low-density parity-check codes, high-quality communication systems, mean square error

ABSTRACT

Powerful error control and increase in the number of bits per symbol should be provided for future high-quality communication systems. Each message bit may have different importance in multimedia data. Hence, UEP(unequal error protection) may be more efficient than EEP(equal error protection) in such cases. And the LDPC(low-density parity-check) code shows near Shannon limit error correcting performance. Therefore, the effect of UEP with LDPC codes is analyzed for high-quality message data in this paper. The relationship among MSE(mean square error), BER(bit error rate) and the number of bits per symbol is analyzed theoretically. Then, total message bits in a symbol are classified into two groups according to importance to prove the relationship by simulation. And the UEP performance is obtained by simulation according to the number of message bits in each group with the constraint of a fixed total code rate and codeword length. As results, the effect of UEP with the LDPC codes is analyzed by MSE according to the number of bits per symbol, the ratio of the message bits, and protection level of the classified groups.

※ 이 논문은 2013년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

♦ 주저자 : 경북대학교 IT 대학 전자공학부, amatess@ee.knu.ac.kr, 정희원

^o 교신저자 : 경북대학교 IT 대학 전자공학부, ekjoo@ee.knu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2013-01-050, 접수일자 : 2013년 1월 18일, 최종논문접수일자 : 2013년 6월 17일

I. 서 론

디지털 멀티미디어 통신 시스템에서 몇몇 비트들은 다른 비트들에 비하여 좀 더 중요하며 오류에 민감한 경우가 있다. 그러므로 비트의 중요도가 각각 다른 시스템의 경우 EEP(equal error protection)를 사용하는 것 보다 UEP를 이용하여 FEC(forward error correction)를 하는 것이 효과적이다^{1,2)}. 그리고 고품질의 서비스를 위하여 심볼당 비트수는 현재 증가하는 추세이다. 예를 들어 CD(compact disk)의 경우 한 심볼당 16비트로 양자화되며 그 보다 우수한 품질의 DVD(digital versatile disk)는 한 심볼당 24비트를 사용한다. 또한 H. 264 AVC(advanced video coding)에서도 고품질의 영상 데이터를 위하여 한 화소당 비트수가 8비트에서 12비트로 확장된 표준을 제정하였다³⁾.

1962년에 Gallager에 의하여 처음 제안된 LDPC(low-density parity-check) 부호⁴⁾는 저밀도 패리티 검사 행렬로 정의⁵⁾되며 반복 복호를 통하여 Shannon 한계에 근접하는 오류성능을 보인다. 이러한 LDPC 부호는 뛰어난 성능에 기인하여 이미 여러 이동통신 시스템의 표준으로 채택되고 있다^{6,7)}. 그러므로 LDPC 부호는 차세대 고품질 통신 시스템을 위한 UEP 방안에 적합할 것으로 기대된다.

최근 LDPC 부호를 이용한 UEP 방안으로는 부호율을 조절하는 방법^{8,9)}과 부분 정규(partially regular) LDPC 부호를 이용한 기법¹⁰⁾이 제안되었다. 천공(puncturing)과 확장(extending)을 이용하여 부호율을 조절하는 방법은 일반적으로 HARQ(hybrid automatic repeat request) 시스템에서 처리량(throughput)의 효율을 증가시키기 위하여 사용된다. 그리고 부분 정규 LDPC 부호는 중요한 비트들의 차수(degree)를 높여 광통신 시스템에서 패킷의 헤더 부분을 페이로드 데이터 부분보다 더 강력히 보호하기 위하여 제안되었다. 하지만 이러한 기존 연구들은 특정 시스템의 최적화에 초점을 맞추고 있어 보호 그룹의 수나 메시지 심볼의 비트수가 바뀌게 될 경우, 제안된 방안이 최적이라고 단정 할 수는 없을 것으로 사료된다. 따라서 앞으로 고품질 데이터에 UEP를 적용하기 위해서는 메시지 심볼의 비트수와 각 비트 그룹의 중요도에 따른 UEP의 영향에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 차세대 고품질 통신 시스템을 대상으로 다양한 심볼당 비트 수에서 LDPC 부호를 사용한 UEP의 영향을 분석한다.

II. UEP 성능척도

일반적으로 EEP의 성능 척도로 사용되는 BER(bit error rate)은 메시지 비트 사이의 중요도 차이에 따른 성능을 표현 할 수 없기 때문에 UEP의 성능 척도로는 적당하지 않다. 따라서 본 논문에서는 MSE(mean square error)를 사용하여 UEP의 성능을 나타내었다. MSE에서 오차(error)는 복호된 메시지 비트와 송신된 메시지 비트의 차로써 비트의 가중치를 포함하도록 하였다. MSE, ϵ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = E[(\hat{S} - S)^2] \tag{1}$$

전송 메시지 심볼은 S, 복호된 심볼은 \hat{S} 로 나타내었다. 만약 이 심볼들이 n비트의 길이를 가진다면 각 심볼은 다음과 같이 표현된다.

$$S = 2^{n-1}b_{n-1} + 2^{n-2}b_{n-2} + \dots + 2^i b_i + \dots + 2b_1 + b_0 \tag{2}$$

$$\hat{S} = 2^{n-1}\hat{b}_{n-1} + 2^{n-2}\hat{b}_{n-2} + \dots + 2^i \hat{b}_i + \dots + 2\hat{b}_1 + \hat{b}_0 \tag{3}$$

b_i 와 \hat{b}_i 는 각 심볼의 i 번째 비트의 값으로 '0' 또는 '1'이며, 2^i 는 그 비트의 가중치로 해당비트의 중요도를 나타낸다. 만약 메시지 비트가 i. i. d(independent and identically distributed)이면 ϵ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \sum_{i=0}^{n-1} \left[2^i E[b_i - b_i] \sum_{j=0, j \neq i}^{n-1} 2^j E[b_j - b_j] \right] + \sum_{i=0}^{n-1} 2^{2i} E[(\hat{b}_i - b_i)^2] \tag{4}$$

여기서 $(\hat{b}_i - b_i)$ 의 값은 다음과 같다.

$$(\hat{b}_i - b_i) = \begin{cases} -1 & (\hat{b}_i = 0 \text{ and } b_i = 1) \\ 0 & (\hat{b}_i = b_i) \\ 1 & (\hat{b}_i = 1 \text{ and } b_i = 0) \end{cases} \tag{5}$$

그리고 $P[\hat{b}_i \neq b_i] = p_{e_i}$ 라면 $E[\hat{b}_i - b_i]$ 는 다음과 같다.

$$E[\hat{b}_i - b_i] = (-1) \cdot p_{e_i} + 0 \cdot (1 - p_{e_i}) + 1 \cdot p_{e_i} = 0 \tag{6}$$

그리고 $E[(\hat{b}_i - b_i)^2]$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$E[(\hat{b}_i - b_i)^2] = 0 \cdot (1 - p_{e_i}) + 1 \cdot p_{e_i} = p_{e_i} \quad (7)$$

그러므로 (6)과 (7)에 의하여 MSE는 아래와 같이 정의된다

$$\epsilon = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{2i} p_{e_i} \quad (8)$$

메시지 비트의 중요도에 따라 보호정도를 달리하기 위하여 전체 메시지 비트를 여러 그룹으로 나눌 수 있다. 다음은 전체 메시지 비트를 MIB(more important bits)와 LIB(less important bits)의 두 그룹으로 나누어 UEP를 적용하였을 때의 MSE를 나타낸다.

$$\epsilon = \left(\sum_{i=k}^{n-1} 2^{2i} \right) p_{e_M} + \left(\sum_{i=0}^{k-1} 2^{2i} \right) p_{e_L} \quad (9)$$

여기서 p_{e_M} 과 p_{e_L} 은 MIB와 LIB 그룹 각각의 BER 이다. 그리고 $\left(\sum_{i=k}^{n-1} 2^{2i} \right)$ 와 $\left(\sum_{i=0}^{k-1} 2^{2i} \right)$ 는 MIB와 LIB 그룹의 각 비트 가중치 제곱합으로 MSE무게(weight)를 나타낸다. 또 k 는 LIB 그룹의 비트 수이다. (9)를 통하여 UEP 성능은 심볼당 비트수, 각 그룹의 비트수와 보호정도에 따라서 분석 할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만, MSE는 심볼당 비트수가 변하면 그 크기가 변한다. 그러므로 본 논문에서는 다음과 같은 정규 MSE를 UEP의 성능척도로 사용한다.

$$\epsilon_N = \frac{\epsilon}{\sum_{i=0}^{n-1} 2^{2i}} \quad (10)$$

III. 모의실험 환경

본 논문에서는 심볼당 비트수를 8에서 32비트까지 다양하게 설정하였으며 메시지비트는 균등 확률변수를 이용하여 생성하였다. 그리고 전체 메시지 비트는 모의실험의 편이성을 위하여 MIB와 LIB 두 그룹으로 나누었다. 또 각 그룹 비트수의 비율에 따른 경향을 파악하기 위하여 MIB와 LIB 그룹의 비율은 1:3, 1:1, 3:1로 선택하였다. 또한 전체 부호어의 길이는

8,192비트이고 전체 부호율은 1/2로 고정한 상태에서 각 그룹을 보호하기 위한 여러 부호율 조합을 사용하였다. 그 중, MIB와 LIB 그룹의 보호정도에 따라 3가지 조합을 선택하여 표 1에 나타내었다. 여기서 R_m 은 MIB의 부호율을, R_l 은 LIB의 부호율을 나타낸다.

일반적으로 LDPC 부호 중에서 우수한 성능을 가진다고 알려진 불균일-랜덤 LDPC 부호를 사용하였다. 사용된 LDPC 부호의 열무게 분포는 $0.3 \times 2 / 0.6 \times 3 / 0.1 \times 7$ 으로 열무게가 2인 것이 30%, 3인 것이 60% 7인 것이 10%로 구성되어 있다. 이렇게 구성된 패리티검사행렬을 PEG(progressive edge-growth) 알고리즘^[11]을 사용하여 최적화하였다. 또한 최대 반복 복호 횟수는 200회로 설정하여 LDPC 부호가 충분한 오류 성능을 발휘하도록 하였다. 그리고 AWGN(additive white Gaussian noise)채널에서 모의실험을 하였다.

표 1. 보호정도에 따른 (R_m, R_l) 조합
Table 1. (R_m, R_l) combinations according to protection level

MIB : LIB	(R_m, R_l)		
1 : 3	(0.250, 0.750)	(0.360, 0.574)	(0.440, 0.524)
1 : 1	(0.460, 0.548)	(0.470, 0.534)	(0.480, 0.522)
3 : 1	(0.460, 0.676)	(0.480, 0.571)	(0.490, .533)

IV. 결과 분석

그림 1은 MIB와 LIB 그룹, 그리고 EEP를 적용하였을 때의 BER 성능을 나타낸다. MIB 그룹의 성능은 왼쪽그림에, LIB 그룹의 성능은 오른쪽 그림에 나타내었다. 그리고 MIB 그룹을 가장 강력히 보호한 조합은 다이아몬드로 표시하였으며 가장 약하게 보호한 조합은 사각형으로 표시하였다.

UEP에 의한 영향은 심볼당 비트 수, MIB와 LIB 그룹의 길이 비율, 그리고 각 그룹의 보호정도에 따라 분석할 수 있다. EEP는 각 비트의 BER이 동일하다. 그림 1에서 1.4dB의 경우, EEP의 BER은 약 3×10^{-6} 으로 나타나므로 EEP의 정규 MSE는

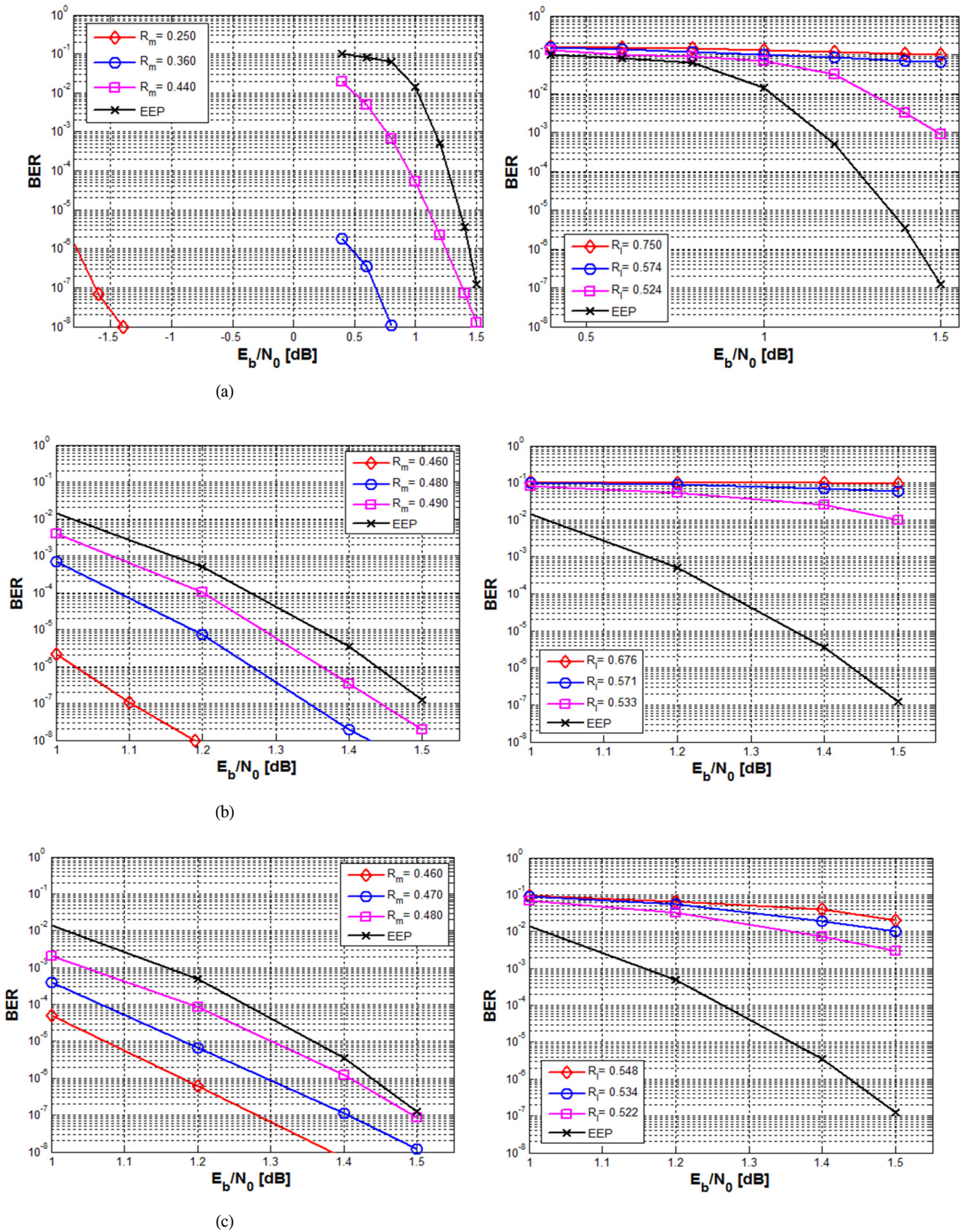


그림 1. EEP와 (MIB, LIB) 조합의 BER 성능

(a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1

Fig. 1. BER of EEP and each combination of (MIB, LIB)

(a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1

수식 (10)에 의하여 약 3×10^{-6} 로 계산된다. 같은 방식으로 각 그룹의 BER을 사용하여 심볼당 비트수에 따른 UEP의 정규 MSE 값을 추정 할 수 있다. 표 2는 한 심볼이 8비트일 경우, MIB와 LIB의 길이 비율이 3:1이고 E_b/N_0 가 1.4dB일 때 각 UEP 조합의 BER 값과 추정된 정규 MSE를 나타낸다. 이 비율에서 MIB 그룹의 MSE무게는 $\left(\sum_{i=2}^7 2^{2i}\right)$ 이므로 21,840이고 LIB의 MSE무게는 $\left(\sum_{i=0}^1 2^{2i}\right)$ 이므로 5이다. 그러므로 (0.460, 0.676) 조합의 MIB 그룹은 BER이 10^{-9} 이하의 아주 작은 값을 가지므로 정규 MSE가 약 9.9×10^{-10} 으로 추정되며, LIB 그룹의 BER은 약 10^{-1} 이므로 정규 MSE가 2.3×10^{-5} 으로 계산된다. 따라서 이 조합의 정규 MSE 값은 약 2.3×10^{-5} 으로 예상 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 (0.480, 0.571) 조합은 약 2.0×10^{-5} , (0.490, 0.533)은 약 7.2×10^{-6} 의 정규 MSE 값을 가질 것으로 추정 할 수 있다. 그러므로 이 경우, EEP가 가장 훌륭한 성능을 보인다.

표 2. 한 심볼이 8비트이고 길이비율이 3:1인 경우 1.4dB에서 정규 MSE 추정값
Table 2. The estimated normalized MSE of 8 bit per symbol at 1.4dB and the ratio of 3:1

UEP scheme	BER		Estimated normalized MSE
	MIB	LIB	
(0.460, 0.676)	under 10^{-9}	10^{-1}	2.3×10^{-5}
(0.480, 0.571)	2×10^{-8}	9×10^{-2}	2.0×10^{-5}
(0.490, 0.533)	4×10^{-7}	3×10^{-2}	7.2×10^{-6}

위 결과를 통하여 만약 MIB 그룹의 MSE무게가 충분히 커지거나 LIB 그룹에서 1.3×10^{-2} 이하의 BER을 얻는다면 UEP가 EEP 보다 나은 성능을 보일 것으로 예상할 수 있다. MIB 그룹의 MSE무게는 비트수를 늘리는 방법으로 간단하게 증가시킬 수 있다. 하지만 LIB 그룹의 BER 성능을 지금보다 개선하는 방법은 제한된 부호율과 부호어 길이 때문에 어려울 것으로 사료된다.

그림 2는 심볼당 비트 수가 8비트이고 그룹의 비율이 3:1일 때 모의실험을 통하여 얻은 정규 MSE 성능이다. 모의실험 결과, E_b/N_0 가 1.4dB일 때 표 2와 동일한 값의 정규 MSE 값을 얻었음을 알 수 있다. 그

리고 그룹의 길이 비율이 1:3, 1:1에서는 MIB의 MSE무게가 3:1보다 더 감소하기 때문에 EEP가 UEP 보다 나은 성능을 보일 것이라는 것도 예상 할 수 있다.

그림 3은 심볼 당 비트수가 16비트일 경우에 UEP와 EEP의 성능을 나타낸다. 비율이 1:3인 경우 MIB의 MSE무게가 아직 충분히 크지 않고 LIB의 BER 성능 때문에 MIB에 의한 이득보다 LIB에 의한 손실이 더 커서 여전히 EEP가 UEP 보다 나은 성능을 보여준다. 하지만 MIB 부분의 MSE무게가 증가함에 따라서 UEP의 성능이 개선되고 있음을 알 수 있다. MIB의 MSE무게가 충분히 증가한 3:1인 경우, 모든 UEP 조합이 EEP 보다 나은 성능을 나타냈다. 이 경우, MIB 그룹에 대한 보호정도가 높아질수록 UEP 성능은 향상되어 (0.460, 0.676) 조합이 가장 우수한 성능을 보였다. 하지만, LIB의 나쁜 BER 성능 때문에 (0.460, 0.676) 조합의 정규 MSE 값은 약 5×10^{-9} 로 수렴하는 결과를 나타낸다.

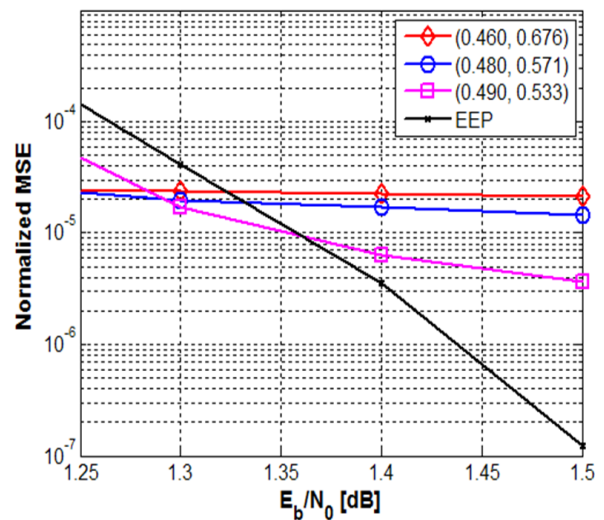


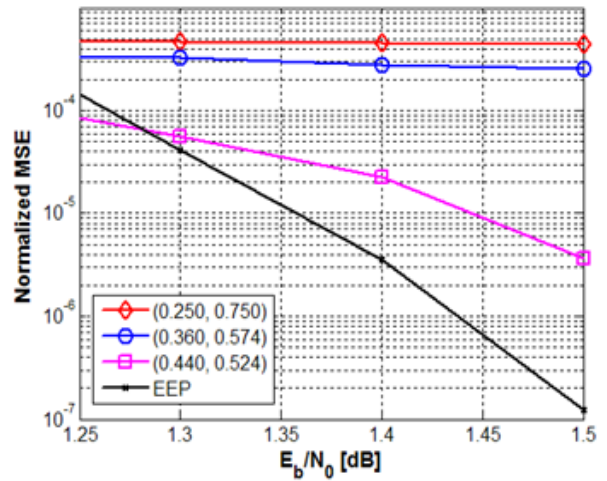
그림 2. 심볼당 비트수 8비트, 그룹 비율 3:1인 경우에 모의 실험을 통하여 얻은 정규 MSE
Fig. 2. Normalized MSE of 8 bits per symbol and the ratio of 3:1 by simulation

따라서 MIB 그룹의 부호율을 0.460 보다 낮게 설정 할 경우, LIB의 부호율이 증가하여 BER 성능이 악화되기 때문에 이 이상으로 UEP의 성능을 향상하는 것은 어려울 것으로 예상된다. 그림 4는 한 심볼이 32비트일 경우의 UEP와 EEP의 정규 MSE 성능을 나타낸다. 전체적인 성능 경향은 앞의 16비트와 유사하다. 그러나 MSB(most significant bit)의 가중치는 2^{15} 에서 2^{31} 으로 크게 증가하면서 상대적으로 MIB의 MSE무게가 LIB보다 많이 증가하였기

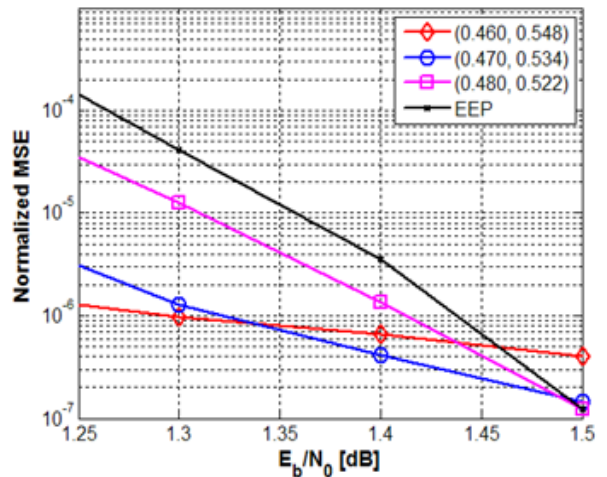
때문에 모든 비율에서 UEP의 성능이 심볼당 비트 수가 16비트인 경우에 비하여 많이 개선되었다. 그러나 여전히 1:3 비율에서는 상대적으로 높은 LIB의 MSE무게와 E_b/N_0 가 높아질수록 증가되는 EEP와 LIB의 BER 성능 격차 때문에 (0.250, 0.750)과 (0.360, 0.574) 조합에서는 E_b/N_0 각각 약 1.42dB와 1.43dB 보다 커질 경우 EEP가 UEP 보다 우수한 성능을 보였다. 그러나 LIB 그룹을 좀 더 강하게 보호한 (0.440, 0.524) 조합에서는 실험한 E_b/N_0 영역에서 UEP가 EEP 보다 우수한 성능을 보였으며, 상대적으로 높은 LIB 그룹의 MSE무게 때문에 LIB 그룹의 보호정도를 조금 더 강하게할 경우, 지금보다 더 나은 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. MIB의 MSE무게가 LIB 보다 충분히 큰 1:1, 3:1 조합에서는 UEP의 성능이 EEP 보다 우수할 뿐만 아니라 MIB의 보호정도가 높아질수록 성능이 개선되는 것을 볼 수 있다. 또 1:1과 3:1 조합에서는 MIB 그룹의 보호정도가 높아질수록 UEP의 성능의 기울기가 더 커짐을 확인 할 수 있다. 따라서 심볼당 비트수가 16비트인 경우와 32비트의 1:3 조합과는 다르게 EEP의 성능과 UEP의 성능이 역전될 가능성 역시 MIB 그룹의 보호정도가 높아질수록 감소하며 특히 3:1에서의 모든 조합은 E_b/N_0 가 증가하더라도 UEP의 성능이 EEP 보다 우수할 것으로 사료된다. 그리고 (0.460, 0.676) 조합의 정규 MSE는 모든 영역에서 EEP에 비해 약 $1/10^5$ 에 지나지 않았다. 따라서 1:1과 3:1의 경우에는 MIB를 현재보다 더 강하게 보호하면 UEP의 성능이 더욱 더 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

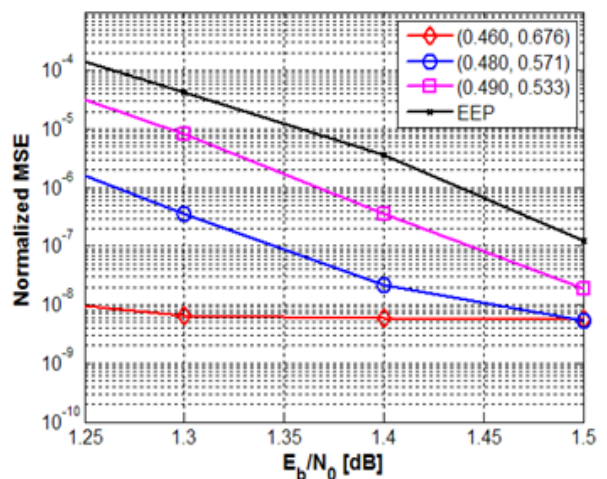
음성 또는 영상 데이터의 경우 EEP 보다는 UEP를 사용하는 방법이 좀 더 효율적일 수 있다. 그리고 고품질의 콘텐츠를 위해서는 심볼당 비트수를 증가시켜야 한다. 또한 LDPC 부호는 반복 복호를 통하여 우수한 오류성능을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 고품질 통신 시스템을 위한 LDPC 부호의 UEP 성능을 분석하였다.



(a)

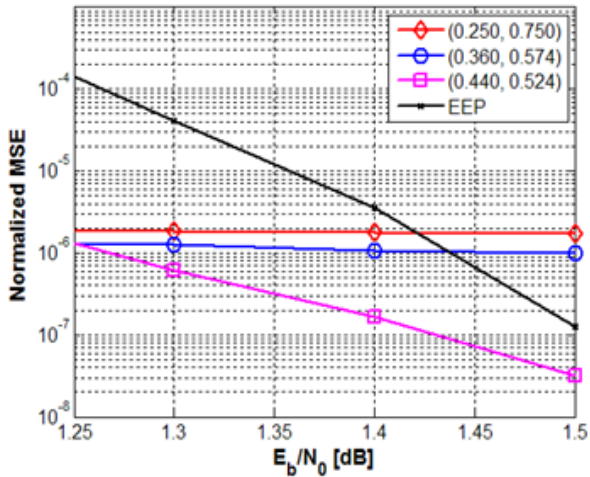


(b)

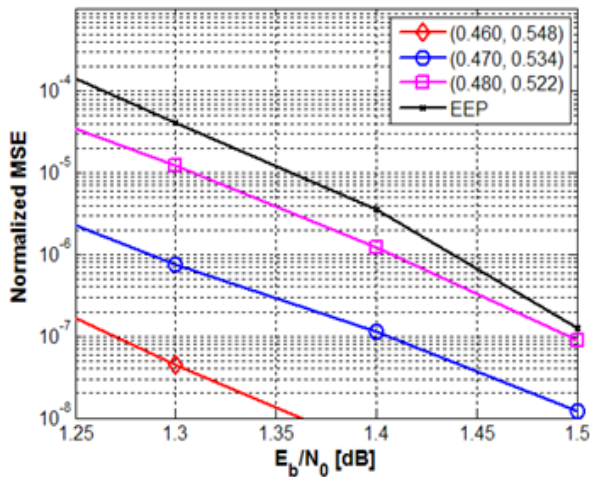


(c)

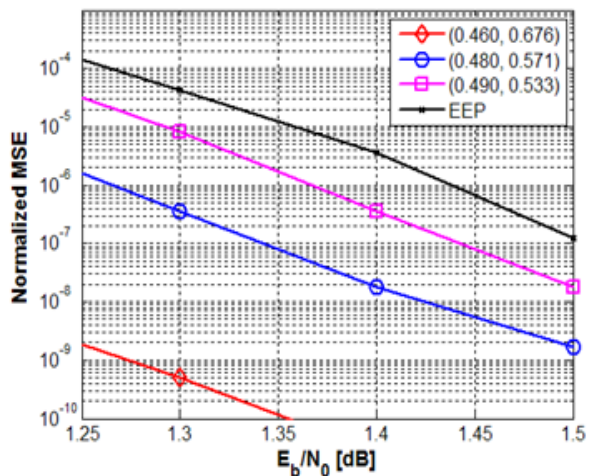
그림 3. 심볼당 비트수 16비트 일 경우, 정규 MSE
 (a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1
 Fig. 3. Normalized MSE of 16 bits per symbol
 (a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1



(a)



(b)



(c)

그림 4. 심볼당 비트수 32비트 일 경우, 정규 MSE
 (a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1
 Fig. 4. Normalized MSE of 32 bits per symbol
 (a) 1:3 (b) 1:1 (c) 3:1

우선 심볼당 비트수, 보호 그룹들간의 비트수 비율, 그리고 각 그룹의 보호정도의 관계를 이용하여 정규 MSE를 정의하였다. 그리고 이 관계를 수식적인 접근과 모의실험을 이용하여 분석하기 위하여 전체 메시지 비트를 간단하게 MIB와 LIB 두 그룹으로 나누었다. 또한 전체 부호어 길이와 부호율을 고정한 상황에서 다양한 부호율 조합을 적용한 경우의 UEP 효과를 정규 MSE를 이용하여 분석하였다.

그 결과, 한 심볼이 8비트로 이루어진 경우 상대적으로 큰 LIB의 MSE무게 때문에 LIB의 나쁜 BER 성능이 UEP 성능에 큰 영향을 주어 EEP 보다 나은 성능을 얻을 수 없었다. 그러므로 UEP의 성능을 향상시키기 위해서는 LIB의 중요도를 줄이거나 BER 성능을 개선시켜야 한다. 심볼의 비트수가 늘어나면 MIB의 중요도가 빠르게 증가하기 때문에 LIB의 중요도를 상대적으로 줄일 수 있다. 하지만 LIB의 BER 성능을 개선시키는 문제는 고정된 전체 부호율과 부호어 길이 때문에 어려웠다. 그러므로 심볼당 비트수를 증가시키거나 혹은 MIB 그룹의 비율을 크게 할수록 LIB의 중요도가 상대적으로 감소하여 UEP의 성능을 개선시킬 수 있다. 예로써 심볼당 비트수가 32비트이고 MIB와 LIB가 3:1의 비율을 가지며 (0.460, 0.676)의 부호율 조합일 경우, UEP의 정규 MSE 값은 EEP의 1/10⁵정도 밖에 되지 않았다. 또한 MIB 그룹을 좀 더 강하게 보호하면 UEP 성능을 더욱 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같이 전체 패리티 비트가 동일한 상황에서 중요도가 다른 메시지 비트를 각각 다른 부호율의 LDPC 부호로 보호하는 경우, 심볼의 비트 수가 증가하고 MIB 그룹의 길이가 길어질수록 UEP의 효과가 증가한다는 것을 확인하였다. 그러므로 LDPC 부호를 이용한 UEP 방안은 심볼당 비트수가 증가하고 있는 차세대 고품질 통신 시스템에 적절할 것으로 사료된다.

References

[1] B. Masnick and J. Wolf, "On linear unequal error protection codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-3, no. 10, pp. 600-607, Oct. 1967.
 [2] I. Bayarino and G. Katsman, "Linear unequal error protection code," *IEEE Trans.*

- Inform. Theory*, vol. IT-27, no. 3, pp. 168-175, Mar. 1981.
- [3] G. J. Sullivan, "Overview of known H.264 / MPEG-4 pt. 10 / AVC deployment plans and status," *ISO/IEC JTC1/SC29/ WG11 and ITU-T SG16 Q.6*, July 2004.
- [4] R. G. Gallager, "Low-density parity-check code," *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [5] ETSI, *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines*, ETSI TS 102 377 v1.1.1, Feb. 2005.
- [6] S. K. Yu, S. G. Kang, and E. K. Joo, "A modified sum-product algorithm for error floor reduction in LDPC codes," *J. KICS*, vol. 35, no. 5, pp. 423-431, May 2010.
- [7] J. Lin, Z. Wang, L. Li, J. Sha, and M. Gao, "Efficient shuffle network architecture and application for WiMAX LDPC decoders," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 56, no. 3, pp. 215-219, Mar. 2009.
- [8] J. Ha, J. Kim, and S. W. McLaughlin, "Rate-compatible puncturing of low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-50, no. 11, pp. 2824-2836, Nov. 2004.
- [9] M. R. Yazdani and A. H. Banihashemi, "On construction of rate-compatible low-density parity-check codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 159-161, Mar. 2004.
- [10] R. Nazanin, P. N. Hossein, and F. Faramarz, "Unequal error protection using partially regular LDPC codes," *IEEE Trans. Commun.* vol. 55, no. 3, pp. 387-391, Mar. 2007.
- [11] X. Hu and D. M. Arnold, "Regular and irregular progressive edge-growth Tanner graphs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, no. 1, pp.386-397, Jan. 2005.

유 석 근 (Seog Kun Yu)

한국통신학회 논문지 제 35권 제 5호 참조

주 언 경 (Eon Kyeong Joo)

한국통신학회 논문지 제 35권 제 5호 참조