

유선 케이블 모뎀의 FEC 성능평가

정희원 이창재*, 김경덕**, 김기윤, 최형진***

Error Performance Analysis of a FEC for the Cable Modem

Chang-jae Lee* *Regular Member*, Kyung-duck Kim**, Ki-yun Kim, Hyung-jin Choi***

Regular Members

요 약

본 논문에서는 미국의 유선 케이블 모뎀 규격인 MCNS(Multimedia Cable Network System) DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specification)를 만족하는 하향 채널의 64/256-QAM 수신부 FEC(Forward Error Correction)를 분석하였다. FEC는 기본적으로 RS(Reed-Solomon) 계층과 TCM(Trellis Coded Modulation) 계층으로 구분되며, 여기에 추가적으로 interleaving과 randomizer 계층들이 결합되어 있다. AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경에서의 BER(Bit Error Rate) 성능평가를 통해 수신부 연관정 비터비 복호기(soft Viterbi decoder)의 추적 깊이(trace-back depth)와 양자화 레벨(quantization level)의 크기에 따라 부호화 이득이 변함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, Forward Error Correction(FEC) that is satisfied with ITU-T Recommendation J.83, Annex B(North American Data Over Cable Service Interface Specifications(DOCSIS) for Multimedia Cable Network System(MCNS)) is analyzed. The FEC consist of Reed-Solomon(RS) layer, interleaving layer, randomization layer, and trellis coded modulation(TCM) layer. The effects of quantization of input symbol and of trace-back depth in the Viterbi decoder are simulated over AWGN channels.

1. 서론

QAM 변조 기법은 정해진 대역폭 내에서 고속의 데이터 전송이 가능한 대역 효율적인 디지털 변조 방식으로 최근 많은 통신 시스템에 적용되고 있다^[1]. 특히 미국의 케이블 모뎀 규격인 MCNS DOCSIS에서는 상향채널에서 QPSK 및 16-QAM 방식을, 하향채널에서는 케이블 네트워크를 통한 고속의 동화상 및 데이터 서비스를 수행하기 위해 64-QAM 및 256-QAM 변조방식을 채택하였다^[2].

광섬유를 비롯한 케이블 채널은 주로 대역 제한된 선형 채널로서 AWGN과 채널 간섭 왜곡 특성

을 갖는다^[3]. 따라서 케이블 모뎀 시스템을 구현하는데 있어서, 대역폭 효율이 우수한 QAM 변조방식을 사용하는 것과 우수한 에러 정정능력을 갖고 있으면서 실제 구현에 또한 어렵지 않은 연접부호를 사용하는 것은 매우 적합하다고 할 수 있다.

본 논문에서 고려하고 있는 하향 채널 FEC는 연접부호(concatenated coding)로 구성된다. 외부 부호로는 하나의 RS 블록에서 3 개의 연속된 에러를 정정할 수 있는 RS(128, 127, 7) 부호를 사용하며, 내부 부호로는 ITU-T J.83 권고안의 Annex B 규격을 만족하는 TCM(Trellis Coded Modulation)을 사용한다^[4]. 그러나 현재까지의 참고문헌 조사 결과

* 한빛전자통신(주) 중앙연구소(inmroba2@hotmail.com)

** (주)애니데이터넷 (kkduck@anydata.net)

*** 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 통신시스템 연구실 (kykim@ece.skku.ac.kr, hjchoi@ece.skku.ac.kr)

논문번호 : 010148-0620, 접수일자 : 2001년 6월 20일

* 본 논문은 시스템집적반도체기술개발사업의 일환으로 하이닉스반도체(주)의 위탁과제인 "통합 유선 케이블용 모뎀 알고리즘 및 Chip 설계기술 개발" 결과 중 일부임.

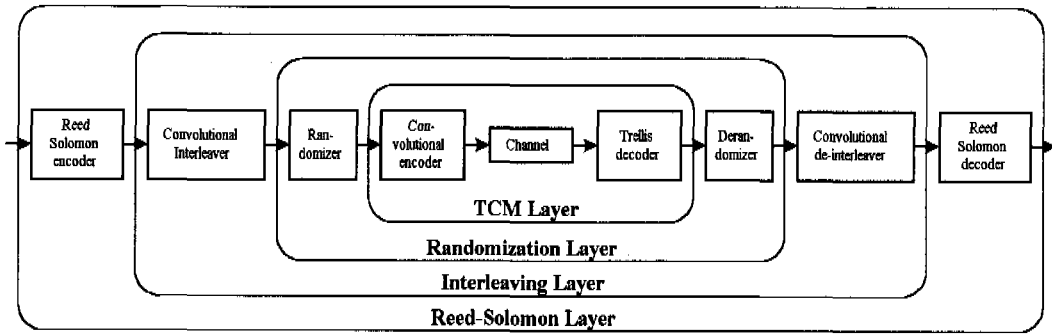


그림 1. FEC의 구조

케이블 모뎀의 FEC부에 대한 체계적인 설계와 성능평가를 보인 논문을 찾아보기 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 ITU-T J.83 권고안의 Annex B의 규격을 바탕으로 64-QAM은 물론 상세 설계가 나와있지 않은 256-QAM까지 설계하여 FEC로 인한 성능 이득을 가늠할 수 있도록 하였다.

논문은 다음과 같이 구성되었다. 2 장에서는 RS, TCM을 포함하는 하향채널 MCNS 케이블 모뎀용 FEC 규격의 Annex B를 분석하였다. 3 장에서는 FEC를 적용한 64-QAM, 256-QAM 시스템의 BER 성능을 연관정 비터비 복호기를 사용하여 수행하였다. 그리고 4 장에서 결론을 맺는다.

II. Annex B - 규격분석

하향채널 케이블 모뎀은 기본적으로 64-QAM 변조방식을 사용하고, 신호의 전송속도와 주파수 대역은 북미에서 사용 중인 6 MHz NTSC 채널대역에 최적화 되어 있다. 그리고 FEC (Forward Error Correction)를 다음의 4 가지 과정으로 처리하고 있다. 1) Reed-Solomon (RS) coding은 RS 블록 안에서 3 심볼 에러를 정정하고, 2) 인터리빙(interleaving)은 심볼을 분산시켜 연접 심볼 에러가 RS 복호기로 입력되는 것을 방지한다. 3) 효과적인 QAM 동기 복조를 위해 데이터 심볼은 randomizer를 통과하고, 마지막으로 4) convolutional coding은 random 채널에 의한 bit 에러를 정정한다. 그림 1에 FEC의 구성을 나타내었다. RS 부호화를 외부부호로, TCM을 내부부호로 사용한 연접부호 형태이다. 그림 1의 RS, 인터리빙, 그리고 randomization 계층에 대한 분석은 ITU-T J.83 권고안의 Annex B 규격을 참조하였고, 본 논문에서는 별도로 설명하지 않았다^[4].

1. TCM(Trellis Coded Modulator)

연접부호의 내부 부호로 사용되는 TCM은 대역폭과 심볼 전송률을 증가시키지 않으면서 심볼 성좌점을 증가시켜 부호이득을 얻는 기법으로 Ungerboeck에 의해 제안되었다^{[5][7]}. 64-QAM에 대한 TCM 블록도를 그림 2에 나타내었다. TCM의 입력은 4 개의 7-bit RS 심볼, 총 28-bit 단위로 구성되며, 각각은 상위 20-bit와 하위 8-bit로 구분된다. 상위 20-bit는 부호화 과정을 거치지 않으며, 하위 8-bit는 4/5 punctured convolutional encoder에 의해 10-bit으로 코딩된다. 따라서 최종 출력은 성좌도에서 5 개의 6-bit QAM 심볼로 사상된다.

Differential precoder는 90° rotationally invariant trellis 부호화를 수행함으로써 채널에 의해 발생할 수 있는 위상 회전의 영향을 감소시킨다. 일련의 다항식으로 구성되었으며, 이것에 의해 송신기는 위상의 절대값이 아닌 입력 bit간의 위상변화 정보를 전송하게 된다.

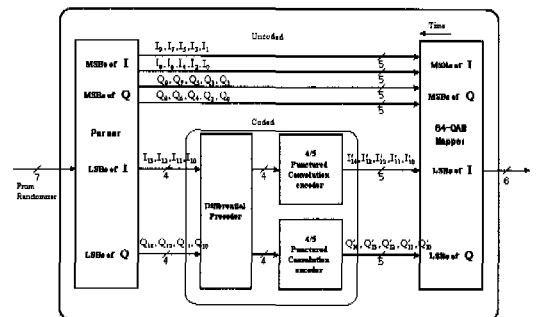


그림 2. TC(Trellis Coded) 64-QAM 변조기.

Punctured convolutional encoder는 부호화율이 1/2 인 16 상태 non-systematic 부호기로 생성식은

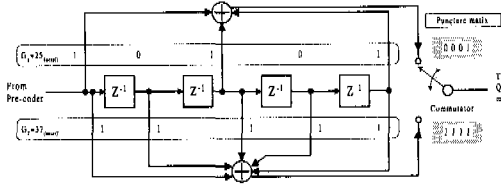


그림 3. Punctured 2진 길쌈 부호기.

$G_1 = 010\ 101$, $G_2 = 011\ 111$ 이다. TDL(tapped delay line)에 나타난 각각의 입력 bit에 대해서 두 bit(G_2 다음에 G_1)는 각각의 생성다항식에 따라 연속적으로 출력한다. 각각의 trellis 그룹에서 4 개의 입력 bit는 8 개의 부호화된 bit를 발생시킨다. 부호기의 출력은 0001 1111인 puncture matrix에서 ("0"은 전송하지 않고, "1"은 전송하는 것을 표시한다), puncturing 되어 직렬로 전송된다. Puncture matrix를 사용하여 1/2이던 부호율이 4/5 가 된다. Punctured 부호기의 내부 구성은 그림 3과 같다. 이

길쌈 부호기는 4 개의 상태값을 갖는다. 따라서 부호기의 trellis는 $2^4=16$ 개의 상태를 갖게된다. 그림 4에 그림 3의 TCM 부호기의 punctured trellis 도를 나타내었다.

그림 4에서 실선은 부호기의 입력 비트가 0 인 경우이고, 점선은 입력 비트가 1 인 경우이다. 그림 2의 TC 64-QAM 복조기는 1 개의 coded bit에 대

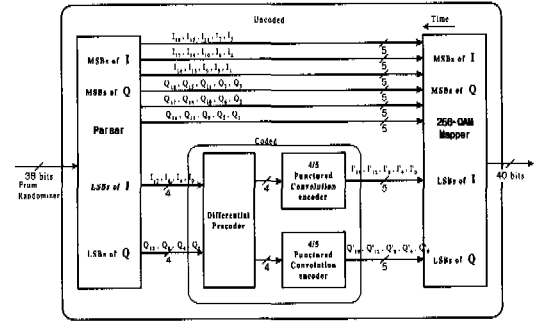


그림 5. TC 256-QAM 변조기.

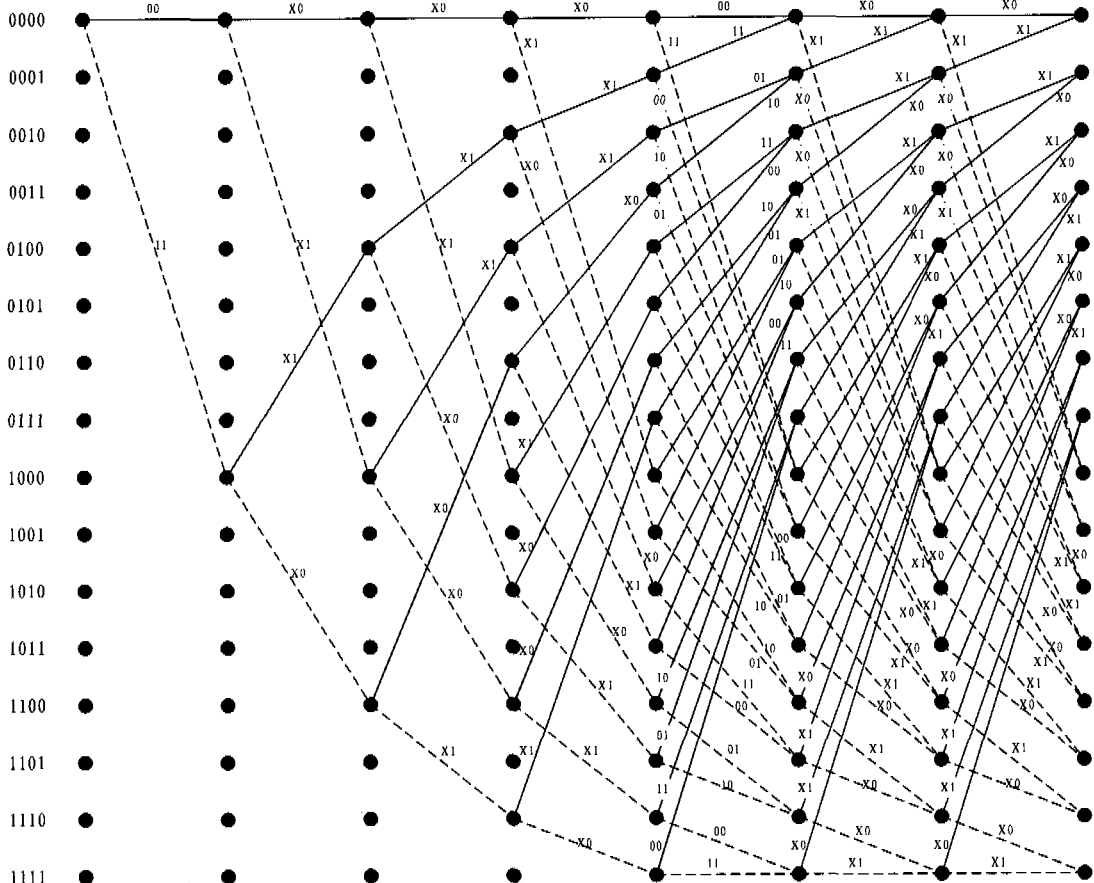


그림 4. TCM 부호기의 punctured trellis도

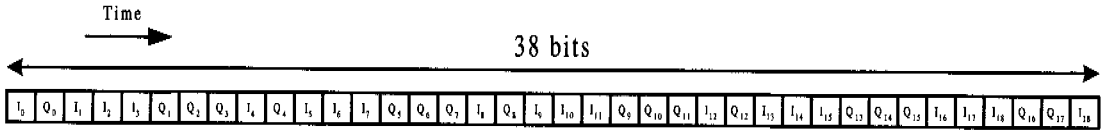


그림 6. TC 256-QAM 변조기 입력 trellis 그룹.

해 2 개의 uncoded bit를 갖게 되므로 실제에 있어 그림 4의 모든 branch는 $4(=2^2)$ 개의 parallel transition을 갖게 된다.

최종적으로 punctured 길쌈 부호기의 출력신호는 rotationally phase invariant 64-QAM 성좌도의 심볼로 사상된다.

2. TC 256QAM 변조기 구조

Annex B에서 연구방향으로 설정하였던 TC 256-QAM 변조기는 그림 5와 같고, 이것은 앞에서 살펴본 TC 64-QAM 변조기의 I, Q에 uncoded 1-bit 이 각각 추가된 구조이다. TC 256-QAM 변조기의 입력에 대한 정의는 그림 6과 같고 총 38-bit 단위로 입력된다. 변조기내의 differential precoder와 4/5 punctured 길쌈 부호기의 구조는 모두 TC 64-QAM의 그것과 동일하다. 따라서 부호기에 대한 trellis도 는 그림 4와 동일하다.

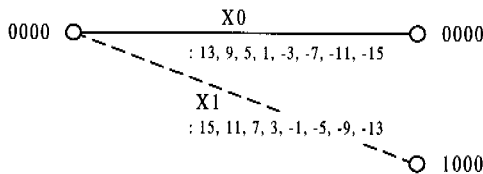


그림 7. TC 256-QAM trellis의 parallel transition.

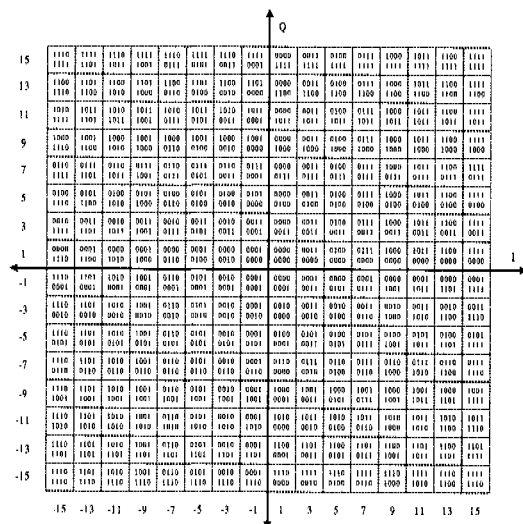


그림 8. 256-QAM 성좌도.

한 가지 TC 64-QAM 변조기와 다른 점은, uncoded bit이 1-bit 증가하였기 때문에 trellis에서 parallel transition의 개수가 64-QAM에서는 4 개였는데, 256-QAM은 $8(=2^3)$ 개가 된다. 이것을 그림 7에 나타내었다.

부호기의 출력신호는 256-QAM 성좌도의 심볼로 사상되는데, 그림 8에 rotationally phase invariant 256-QAM에 대한 성좌도를 나타내었다.

부호기의 출력신호는 256-QAM 성좌도의 심볼로 사상되는데, 그림 8에 rotationally phase invariant 256-QAM에 대한 성좌도를 나타내었다.

III. FEC 성능평가

1. 외부 부호 성능평가

외부 부호인 Reed Solomon 부호는 GF(128)상에서 (128, 122) 확장 부호(extended codes)를 사용하고, RS 블록당 3 개의 심볼오류를 정정할 수 있다. 64-QAM과 256-QAM에 모두 동일한 RS 부호가 사용되나 프레임 구조는 다르다. 그림 9에 BER 성능곡선을 나타내었다. RS (127, 122), RS (127,

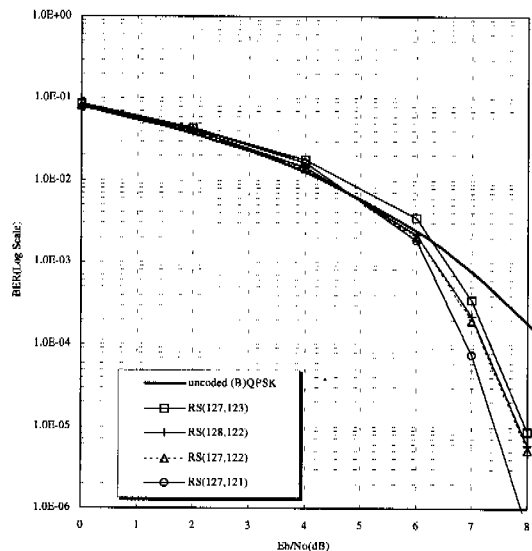


그림 9. RS 부호의 성능.

123) 및 RS (127, 121) 부호의 BER 성능곡선을 비교대상으로 도시하였다. 그림 9에서 RS (128, 122) BER 성능은 RS (127, 122) 부호에 단지 확장 패리티만 추가시킨 성능으로 추가 패리티에 대해서는 어떤 복호 과정도 행하지 않은 결과이다. 성능개선이 일어나는 이유는 단지 부호율이 다소 감소하여 패리티 심볼수가 1 개 증가하였기 때문이다. 즉, RS (127, 122) 부호를 단순히 백-오프(back-off) 시킨 결과이다. 또한 RS (127, 122)와 RS (127, 123)은 오류정정능력이 같은 관계로 BER 성능이 거의 유사하며 앞서 설명한 바와 마찬가지로 성능개선이 일어난다.

그림 10과 표 1은 RS (128, 122) 부호에서 검출되는 오류의 비율을 나타낸 것이다. RS (127, 119) 및 RS (127, 123)은 비교대상으로 도시하였다.

2. Interleaving 성능평가

채널 상에서 128 심볼에 걸쳐 연접오류가 발생했다고 가정하면 BER 성능은 그림 11과 같다. 이것은 인터리빙 깊이가 128 인 경우로 최대의 연접 오류가 발생하는 경우를 가정했을 때의 결과이다. 인터리빙을 사용하지 않은 경우 error-floor가 생기며 convolutional 인터리빙을 사용한 경우 waterfall-like BER 성능곡선을 보인다. 또한 AWGN에서의 RS (128, 122) 부호의 BER 성능 곡선을 비교대상으로 도시하였다.

그림 12는 64-QAM, 256-QAM 변조방식에서 RS (128, 122) 부호 및 convolutional 인터리빙에 대한

표 1. Eb/No에 따른 검출되는 오류의 비율 [%].

Eb/No [dB]	RS(127,119)	RS(128,122)	RS(127,123)
0	50.2	47.9	46.5
2	30.1	27.1	26.0
4	14.0	10.8	10.5
6	3.70	3.21	2.45
8	0.21	0.19	0.17
10	0.0049	0.0045	0.0036

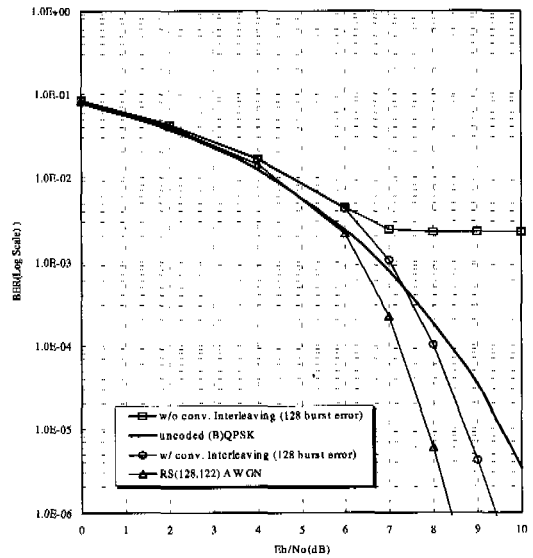


그림 11. 128 심볼 burst error에 대한 BER 성능.

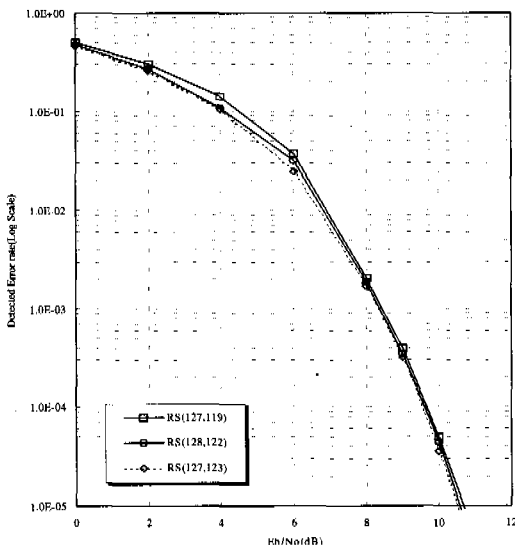


그림 10. 오류정정능력에 대한 오류 검출율.

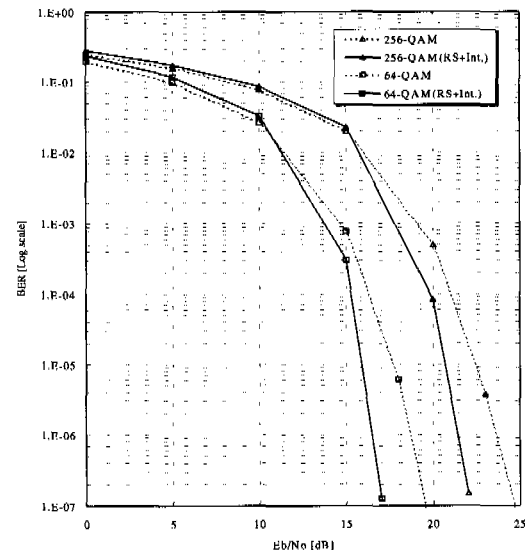


그림 12. 64/256-QAM에서 RS + 인터리빙의 BER 성능.

BER 성능평가이다. 그림에서 64-QAM 및 256-QAM 방식에서의 부호화 이득은 BER = 10^{-4} 에서 각각 2 dB, 2.5 dB 수준이다.

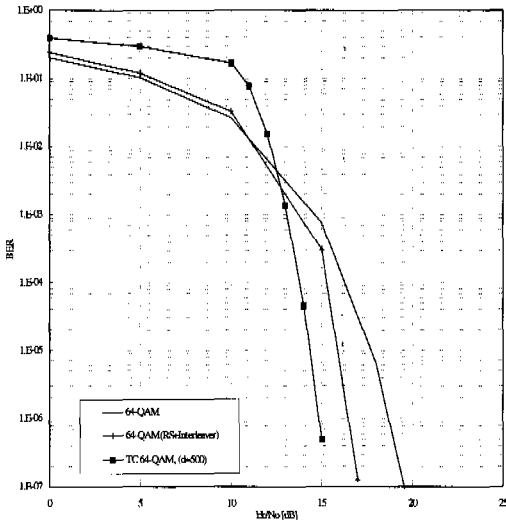
3. TCM 성능평가

64/256-QAM에서 TCM의 BER 성능평가를 수행하였다. 모든 성능평가는 무한 양자화 레벨을 가정하였다. 성능평가를 통해 연판정 비터비 복호기의 truncation(=trace back) depth(d) 크기가 증가함에 따라 BER 성능의 향상과, 동일한 trace back depth의 복호기에서도 Eb/No의 크기에 따라 BER이 크게

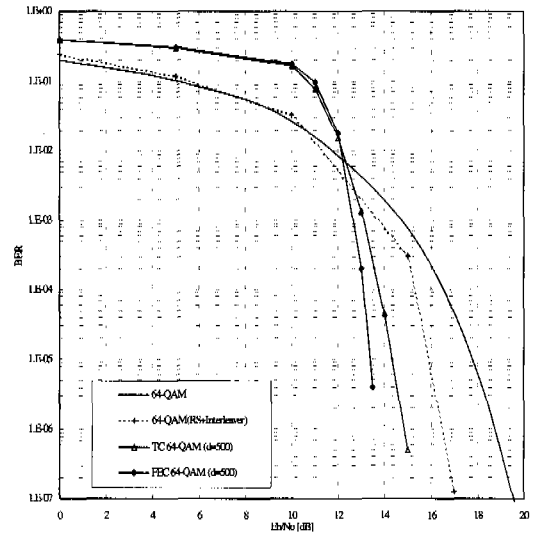
차이 남을 확인할 수 있다. 이것은 낮은 Eb/No에서 복호기가 잘못된 복호경로를 설정할 수 있기 때문이다. 그림 13(a), (b)는 AWGN 환경에 대한 64/256-QAM 시스템의 외부 부호(RS)와 내부 부호(TCM, $d=500$)의 BER 성능을 각각 비교한 것으로, 낮은 Eb/No에서는 RS 부호의 성능이 우수하고 높은 Eb/No에서는 TCM의 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

3. FEC 성능평가

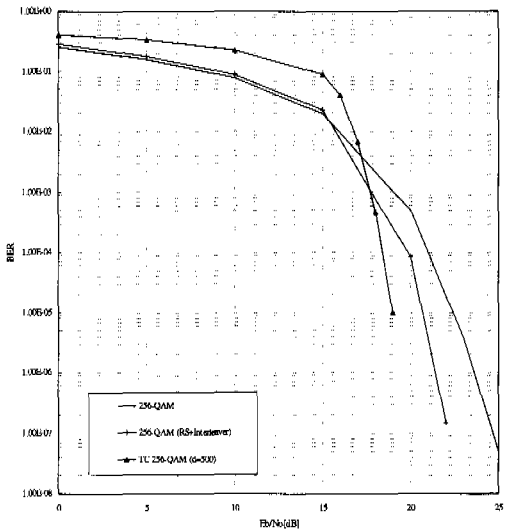
본 절에서는 앞에서 살펴본 내부 부호 RS(128, 122,7)와 외부(TCM) 부호, randomizer, 인터리버를 모두 결합한 FEC 구조의 성능평가를 수행하였다.



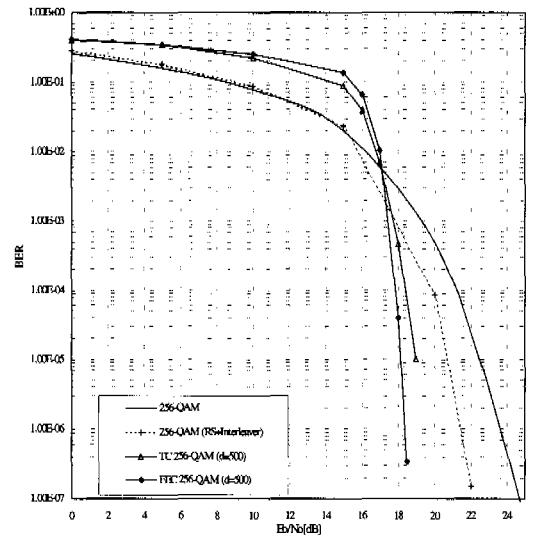
(a) 64-QAM



(a) 64-QAM



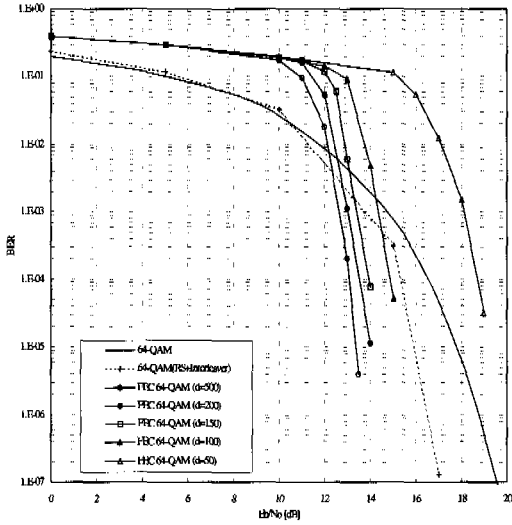
(b) 256-QAM



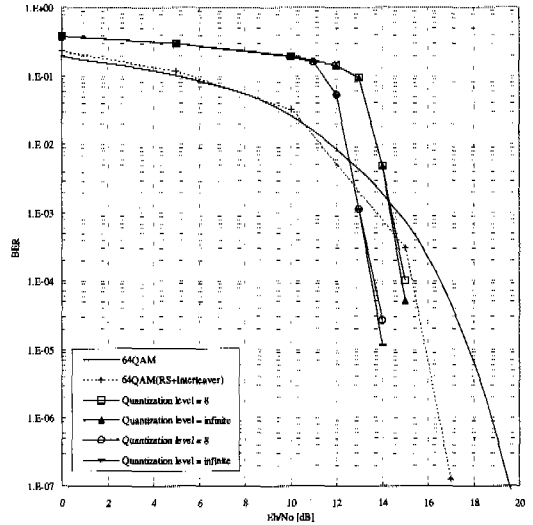
(b) 256-QAM

그림 13. 64/256-QAM에서 RS+Interleaver와 TCM의 BER 성능비교

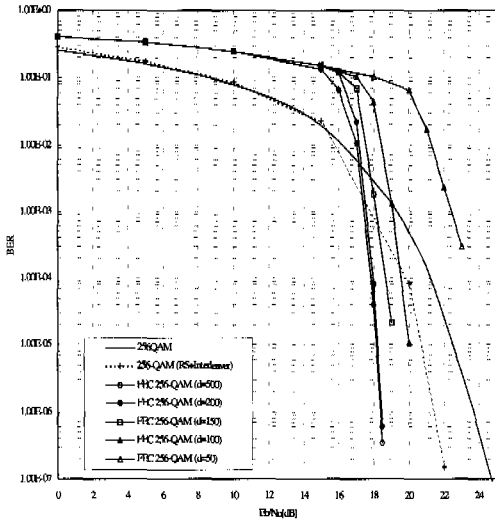
그림 14. FEC 성능평가, $d = 500$.



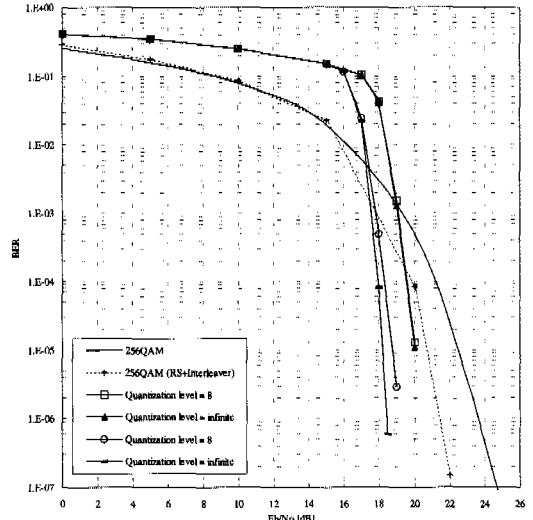
(a) 64-QAM



(a) 64-QAM



(b) 256-QAM



(b) 256-QAM

그림 15. Trace back depth (d)의 크기에 따른 FEC 성능평가.

그림 16. 양자화 레벨에 따른 FEC 성능평가, $d = 200, 100$.

그림 14(a), (b)는 각각 64/256-QAM FEC ($d = 500$)의 BER 성능평가이다. 두 경우 모두 BER = 10^{-6} 에서 약 $E_b/N_0 = 5.5$ dB의 부호화 이득이 발생하였다.

그림 15(a), (b)는 연관성 비터비 복호기의 trace back depth ($d = 500, 200, 150, 100, 50$)에 따른 FEC의 성능평가이다. 그림에서 부호화 이득의 크기는 trace back depth의 크기에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그러나 이 값을 무한히 크게 할 수는 없으므로 보통의 punctured 길쌈부호의 경우에는 본

래의 $1/n$ 부호(mother code)보다 trace back depth 값을 크게 주어야 trace back depth에 의한 BER 성능열화를 피할 수 있다. 일반적으로 3/4, 7/8, 그리고 13/14의 부호율에 대해 각각 60, 100, 160 정도를 사용한다^[8].

TCM에서는 uncoded bit에 의한 추가적인 BER 성능열화가 발생할 수 있다. 따라서 TCM 복호기의 trace back depth는 일반적인 punctured 길쌈 부호 복호기의 경우보다 큰 값을 선택한다. 그림 15(a), (b)를 통해 적어도 $d = 100$ 이상의 값을 고려해야

만 연접 부호에 의한 부호화 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

지금까지는 무한개의 양자화 레벨을 가정한 연판정 비터비 복호기에 대한 성능평가를 수행하였다. 그러나 실제 구현하는데 있어서 무한개의 양자화 레벨은 구현이 불가능하므로 입력신호를 일정한 레벨로 양자화 하는 것이 필요하다. 일반적으로 8 레벨 이상의 양자화를 할 경우 무한 양자화에 비해 약 0.25 dB의 부호화 이득 감소가 발생하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 그림 16(a), (b)에 이것에 대한 성능평가를 나타내었다. 그림 15의 성능평가 결과를 반영하여 복호기의 trace back depth는 200과 100으로 가정하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 MCNS DOCSIS 규격을 기반으로 한 통합 유선 케이블 모뎀의 하향 채널용 FEC를 설계하여 성능평가를 수행하였다.

RS 코딩은 연접 부호(concatenated code)의 외부 부호로서 GF(27)상의 심볼을 부호어로 갖는 RS (128, 122) 부호를 고려하였다. 이 부호는 오류정정 능력이 2 인 RS (127, 122) 부호에 기반을 둔 부호로 추가의 패리티를 생성하여 부호장을 128심볼로 확장한(extended) 부호이다. 이 부호의 BER 및 오류 검출 성능은 이미 잘 알려진 RS (127, 121) 부호와 RS (127, 123) 부호의 중간 정도이다. 또한 convolutional 인터리빙을 사용함으로써 메모리 채널상의 연접오류 또는 주기적인 간섭에 내성을 갖도록 하였다. 64-QAM 및 256-QAM 변조방식에서의 RS (128, 122) 부호 및 인터리빙이 결합된 부호 구조의 BER 성능을 AWGN 채널에서 도시하였다. 두 부호구조의 부호화 이득은 BER = 10^{-4} 에서 각각 2 dB, 2.5 dB 수준이다.

연접 부호의 내부 부호인 TCM은 대역폭과 심볼 전송률을 증가시키지 않으면서 부호화 이득을 얻을 수 있는 특징을 갖고 있다. 아울러 낮은 Eb/No 환경에서는 연판정 비터비 복호기의 잘못된 동작으로 인하여 BER 성능이 uncoded 보다 나쁘지만, 높은 Eb/No 환경에서는 급격하게 성능이 향상되는 특징을 갖고 있다. 그러나 연접오류에 매우 약한 특성을 갖고 있기 때문에 단독으로 사용하기보다는 연접오류에 강한 RS 부호, 인터리버 등과 함께 연접하여 많이 사용한다. 연판정 비터비 복호기의 trace back depth(d)가 500 인 조건에서의 성능평가에서

TC64-QAM, TC256-QAM 변조기는 BER = 10^{-6} 에서 Eb/No \cong 5.5 dB의 부호화 이득을 얻을 수 있었다.

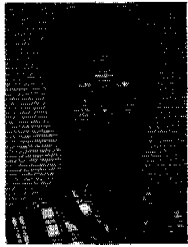
마지막으로 연접 부호로 구성된 FEC에 대한 BER 성능평가와 실제 복호기를 구현하는데 필요한 복호기의 trace back depth 크기와 양자화 레벨의 결정을 위한 BER 성능평가를 수행하였다. 본 논문은 케이블 모뎀의 FEC부 추가후의 성능과 설계방법을 제시함으로써 케이블 모뎀 시스템 설계에 많은 도움이 될 것으로 사료되며 향후 케이블 모뎀 채널 특성의 모델링 및 기 설계된 케이블 모뎀과의 연동 성능평가가 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] W. T. Webb and L. Hanzo, *Modern Quadrature Amplitude Modulation*, IEEE Press and Pentech Press, 1994.
- [2] Data-Over-Cable Service Interface Specifications, *Radio Frequency Interface Specification*, SP-RFI v1.1-101-990311.
- [3] S. Kapoor, V. P. Telang, J. D. Mills, and M. G. Makhija, "Mitigating impulse noise over HFC network for telephony-over-cable," in Proc. *GLOBECOM'95*, vol. 2, pp. 967~971, 1995.
- [4] ITU-T J.83 Recommendation J.83, Oct., 1995.
- [5] B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communications and Storage*, Prentice-Hall, 1995.
- [6] S. Lin and J. D. Costello Jr., *Error Control Coding : Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
- [7] P. Sweeney, *Error Control Coding : An Introduction*, Prentice-Hall, 1991.
- [8] B. Sklar, *Digital Communications : Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1988.
- [9] S. B. Wicker, and V. K. Bhargava, *Reed-Solomon Codes and Their Applications*, IEEE Press, 1994.

이 창 재(Chang-Jae Lee)

정회원



1999년 2월 : 성균관대학교
전자공학과 졸업(공학사)
2001년 2월 : 성균관대학교
대학원 전기전자 및
컴퓨터공학부 졸업
(공학석사)

2001년 3월~현재 : 한빛전자통신(주) 중앙연구소 연
구원

<주관심 분야> 모델 알고리즘, 부호화 기술, 하드웨
어설계, Layer2-4 설계 기술 등

김 경 덕(Kyoung-duck Kim)

정회원

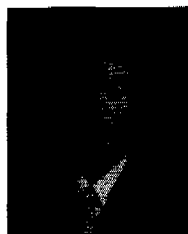


1999년 2월 : 성균관대학교
전자공학과 졸업(공학사)
2001년 2월 : 성균관대학교
대학원 전기전자 및 컴퓨
터공학부 졸업(공학석사)
2001년~현재 : (주)애니데이터넷
연구원

<주관심 분야> 위성통신, 이동통신, Home Network-
ing 및 동기화 기술을 포함한 모델 기술과
부호화 기술 등

김 기 윤(Ki-yun Kim)

정회원



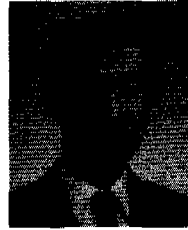
1997년 2월 : 성균관대학교
전자공학과 졸업(공학사)
1999년 2월 : 성균관대학교
대학원 전기전자 및 컴퓨터
공학부 졸업(공학석사)

1999년 3월~현재 : 성균관대학교 대학원 전기전자
및 컴퓨터 공학부 박사과정

<주관심 분야> OFDM 송수신 관련 모델 설계, 케
이블 모델, 디지털 신호처리, IMT-2000,
위성통신 등

최 형 진(Hyung-jin Choi)

정회원



1974년 2월 : 서울대학교
전자공학과 졸업(공학사)
1976년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과 졸업
(공학석사)

1976년 3월~1979년 7월 : 주식회사 금성사 중앙연
구소 기정(과장급) 연구원

1979년 9월~1982년 12월 : 미국 University of
Southern California 전기공학과 졸업
(공학박사)

1982년 10월~1989년 2월 : 미국 LinCom Corp.
책임 연구원

1989년 3월~현재 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨
터 공학부(정교수)

<주관심 분야> 디지털통신, 무선통신, 이동통신,
위성통신 및 동기화 기술을 포함한 모델
기술 등