



광통신용 FEC 기술의 현황과 전망

이한호 (인하대학교)

I. 서론

지난 20년간 광통신분야는 놀라운 성장속도로 발전해 왔다. 1996년에 최초로 1Tb/s 전송기술이 시범을 보인 이후, 2001년에는 10Tb/s까지 전송기술이 성공하기에 이르렀다. 이러한 지속적인 기술발전은 광학기술의 발전을 토대로 이어 나갈 수 있었지만, 이전 기술보다 혁신적이고 획기적인 변화를 가져온 큰 기술이 있었으니, 그것이 바로 순방향 에러정정(Forward Error Correction: FEC)기술이다. 비록 FEC가 새로운 기술은 아니지만 광통신분야에 있어서는 진보적인 방향으로 발전하도록 이끈 핵심 기술임에는 의심할 여지가 없다¹⁾.

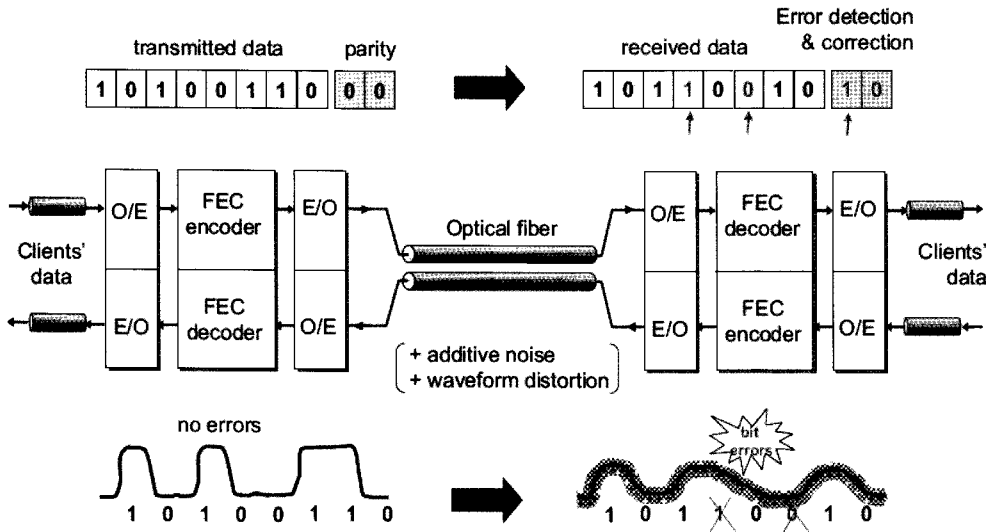
FEC기술의 역사는 1940년대 말로 거슬러 올라간다. 수학자 리처드 웨슬리 해밍(Richard Wesley Hamming)은 벨연구소(Bell Lab.)에 있을 당시 스스로 데이터의 에러를 검출하고 정정할 수 있는 해밍부호(Hamming code)를 고안하였다. 이 부호는 패리티 검사(Parity Check)등 보통의 에러 검출 코드들이 에러를 찾지만 가능하던 것을 정정까지 가능하도록 개선한 것으로 대부분의 전자 통신장비에 적용되어 데이터의 신

뢰도를 높이는 데 사용되었다. 또 1948년에 C. E. Shannon이 “A Mathematical Theory of Communication”이란 논문을 발표하면서 부터 정보에 대해 수학적인 정의를 할 수 있게 되었으며, 이러한 수학적 분석을 바탕으로 하여 그 후, 많은 사람들이 정보를 효율적으로 표현하는 방법과 정보를 안정적으로 저장/복원 및 송·수신 하는 방법에 대한 체계적인 연구가 시작되었다. 이러한 노력들이 현재의 디지털 정보통신 시대를 가능하게 한 원동력이다²⁾.

본고는 현재 관심이 고조되고 있는 이런 광통신용 FEC 기술에 대한 전반적인 현황과 그 전망에 대해 알아보고자 한다. 본고의 구성은 제 II절에서 이해를 돕기 위해 광통신용 FEC의 전반적인 개요에 대해 알아보고, 제 III절에서 광통신용 FEC의 기술 동향을, 그리고 마지막으로 제 IV절에서 향후 전망에 대해 살펴본다.

II. 광통신용 FEC 개요

FEC는 부호화된 블록에 있는 부호심벌의 수(n)와 부호화될 데이터 심벌의 수(k), 즉 (n, k) 의 쌍



〈그림 1〉 FEC를 사용하는 광통신 시스템의 구성도

으로 표현할 수 있다. 기본적으로 FEC 인코딩(Encoding)은 데이터 심벌을 입력받아 잉여 심벌을 생성하고 결합하여 최종적으로 코드워드를 생성한다. 송신단에서 코드율은 $R=1/r$ 에 의하여 결정된다. 여기서 r 은 k/n 으로써 부호율이다. 수신단은 데이터를 확인하여 에러감지능과 디코딩 과정을 거치는 에러정정 임무를 수행한다.

1950~1960년대에는 순회부호(Cyclic code), BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) 부호, 리드-솔로몬(Reed-Solomon: RS) 부호, 리드-멀러(Reed-Muller) 부호, 콘볼루션(Convolution) 부호 등 여러 종류의 부호 방법에 대한 기본 개념들이 확립되었다. 1960~1970년대에 들어서면서 BCH, RS부호의 디코딩에 사용되는 벌리캄프-마시(Berlekamp-Messy) 알고리즘, 유클리드(Euclid) 알고리즘과, 콘볼루션 부호의 디코딩에 사용되는 유명한 비터비(Viterbi) 알고리즘 등 많은 유용한 알고리즘들이 개발되었다. 이러한 수

많은 노력들에 힘입어 FEC기술은 디지털 유/무선 통신, 위성통신분야에 이르기까지 적용 가능하게 되었다. 그러나 FEC기술은 오랫동안 광통신 시스템분야에서 그 중요성을 인정받지 못했었다. 그 이유는 무선/위성통신에서는 일반적으로 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 비트 에러율(Bit Error Rate:BER)을 보이는 반면 광통신은 채널 특성상 그 자체로도 $10^{-9} \sim 10^{-15}$ 의 BER을 보이는 높은 성능을 갖고 있었기 때문이다.

〈그림 1〉은 기본적인 FEC기반 광통신 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 송신 데이터는 FEC 인코더를 통하여 부호화 되고, 광섬유(Optical fiber) 케이블을 따라 전송 되면서 채널 잡음과 신호의 왜곡이 발생하게 된다. 이렇게 에러가 포함되어 전달된 데이터는 FEC 디코더를 거치면서 정정 능력범위 내에서 에러를 정정한 후 최종적으로 수신측에 전달된다.

III. 광통신용 FEC 기술 동향

광통신 분야에서 FEC기술이 보편적으로 사용되기 시작한 것은 1990년대 초 해저 광통신 시스템에 적용되기 시작하면서 부터이다. 이때 사용된 FEC기술을 1세대로 구분 할 수 있다. 잘 알려진 블록부호의 일종인 BCH 부호는 해저 광케이블 시스템의 전송 실험에 의해 그 성능이 검증되었고, 이후 RS(255,239)부호가 국제통신연합(ITU-T G.975, G709)에 의해 채택되어 많은 응용 분야에 널리 사용되고 있다.

이후 Wavelength-Division Multiplexing(WDM) 기술의 등장으로 1세대 FEC보다 더욱 성능이 뛰어난 FEC기술을 찾기 시작하였고, 그 후 몇 년 간 연접 부호와 같은 더 효율적이면서 성능이 좋은 여러 형태의 FEC기술이 개발되었다. 이러한 기술이 2세대 FEC기술로 분류된다. 인터리빙/반복(Interleaving/Iteration) 기반의 디코딩 기술이 연접(Concatenated) 부호 방식과 함께 에러 정정 능력을 개선시키기 위해 사용된

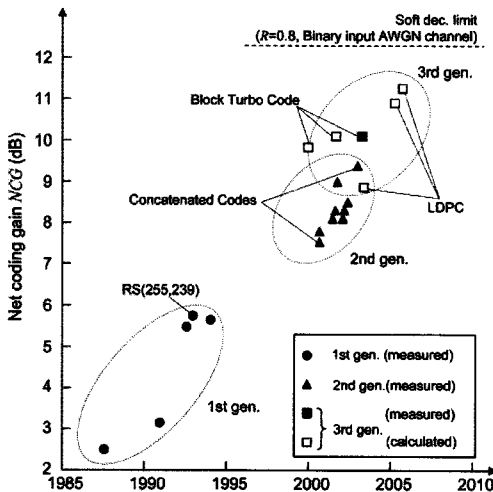
다. 오늘날에는 10dB의 NCG(Net Coding Gain)를 얻을 수 있는 성능 좋은 FEC 기술에 관심이 집중되고 있으며 LDPC(low-density parity check) 부호, 터보 부호(Turbo code)와 같은 FEC가 새로운 고성능 광통신 시스템에 적용할 FEC의 후보로 주목받고 있다.

<그림 2>는 각 세대별 광통신 시스템에서 사용되는 FEC기술을 보여주는 그래프이다. 1세대 FEC기술은 1987년~1993년대의 기술로 볼 수 있으며 대표적으로 RS(255,239) 부호를 꼽을 수 있다. 위 RS 부호는 0.93(7% 잉여율)의 부호율, 5.8dB의 NCG의 성능을 갖는다. 2세대 FEC기술은 2000년~2004년대의 기술로 가장 좋은 성능의 연접부호는 0.8 (20%의 잉여율)의 부호율, 9.4dB의 NCG의 특성을 갖는다. 이후 터보 부호와 LDPC부호의 등장으로 차세대 광통신용 FEC 기술에 대한 관심이 집중되기 시작했다. 이 두 가지 FEC 기술은 10dB 이상의 NCG 특성을 갖으면서 비용 효율적인 측면이 있어서 강력한 FEC 기술의 후보로 많이 연구 되고 있으며, 이들을 제 3세대 FEC라 칭하고 있다.

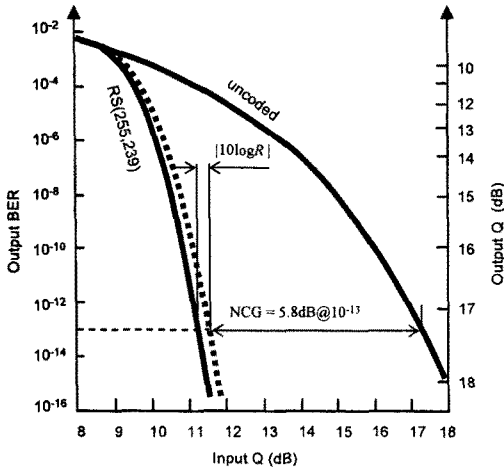
광통신 시스템이 발달함에 따라 함께 발전해 온 FEC 기술에 대해서 각 세대별로 그 특징과 성능에 대해 자세히 살펴해보도록 한다.

1. 1세대 FEC

1990년대 초 광통신분야에 처음 FEC기술이 적용된 것은 무중계 해저 케이블 시스템을 구축하면서 부터이다. 10%의 잉여율을 갖는 BCH (167,151)부호가 565Mb/s급 전송 시스템 설계에 적용되었고, 또한 RS부호 2.5Gb/s 전송율을 갖는 357Km 무중계 시스템에 사용되기 시작하였다. 최초로 FEC 기술을 사용한 두 시스템은 수



(그림 2) 광통신 시스템용 FEC기술의 발전 추이



<그림 3> RS(255,238)의 에러정정 성능과 NCG

신단의 BER 성능을 향상 시켰다. 가장 주목해야 할 1세대 FEC는 RS 부호이다. RS 부호는 RS(n,k) 형태로 표현하며 n은 부호어 전체 심벌의 수이고 k는 정보를 담고 있는 데이터 심벌의 수이다. 각 심벌은 8비트로 구성되며 부호어중에서 t ($t=(n-k)/2$)개의 심벌까지 에러를 정정할 수 있는 능력을 지녔다.

특히 RS(255,239) 부호는 ITU-T G.975에 의해 채택되면서부터 장거리 통신 시스템에서 광범위하게 사용되기 시작하였다. 부호어는 239개의 데이터 심벌과 16개의 잉여 심벌을 함께 전송한다. RS(255,239)부호에서 255개의 심벌로 구성된 코드워드는 8개까지 에러심벌을 정정할 수 있다. <그림 3>은 RS(255,239)부호의 에러정정 성능을 NCG의 관점에서 FEC를 적용하지 않은 경우와 비교하여 입력/출력의 BER 성능 특성을 보여 준다. RS(255,239)부호를 사용했을 경우 부호되지 않고 전송된 데이터에 비해 약 10^{-13} 의 BER에서 5.8dB의 NCG을 갖는 것을 알 수 있다.

지금까지 알아본 1세대 FEC기술과 RS(255,239)부호를 사용하여 1996년 태평양횡단 및 대

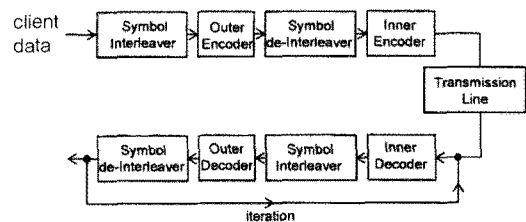
서양 케이블 구축 작업에서 7000Km의 거리를 5Gb/s로 데이터를 보내는 것이 가능해 졌다.

2. 2세대 FEC

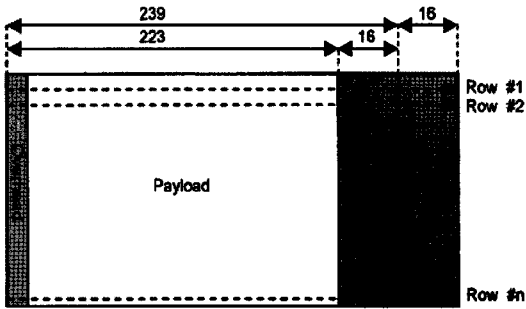
1990년대 중반 WDM기술이 확립되면서 더욱 성능 좋은 FEC에 대한 연구가 시작 되었다. WDM 환경에서는 다중화 된 파장의 수에 비례하여 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio:SNR)가 증가하기 때문에 연접부호와 경판정(Hard Decision) 디코딩을 기반으로 하는 성능이 뛰어난 FEC기술이 절실히 필요했다. 이렇게 해서 개발된 더욱 강력해진 FEC들을 2세대 FEC로 분류할 수 있으며, 2세대 FEC를 Super FEC 또는 Enhanced FEC라고 부르기도 한다. <그림 4>에서 연접부호 형식의 2세대 FEC의 구조가 어떻게 구성되어 있는지를 잘 보여주고 있다.

송신할 데이터는 인터리빙된 후에 외부 인코더(Outer Encoder)를 통하여 부호화 된다. 부호화된 데이터는 다시 디인터리빙(de-Interleaving)된 후 내부 복호기(Inner Encoder)로 한번 더 부호화 과정을 거친다. 반대로 수신된 데이터는 내부 디코더에 의해 복호되고 인터리빙을 거쳐서 외부 복호기에 의해 최종적으로 복호된다.

광통신 시스템에서 2세대 FEC기술로서 처음 시도된 방법은 반복 복호기술을 토대로 한 연접



<그림 4> 연접부호의 구성도



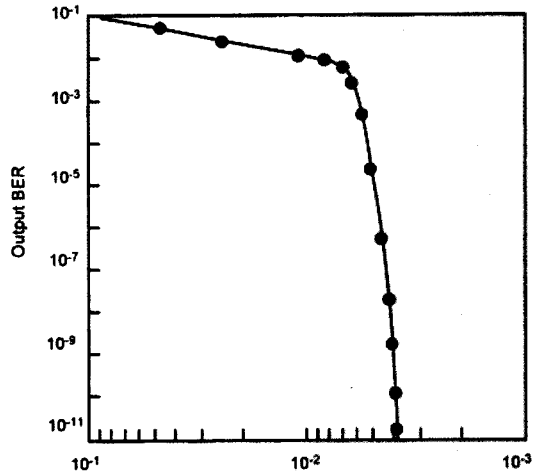
<그림 5> 연접 RS(239,223)+RS(255,239)의 프레임 구조

RS(Concatenated RS)부호 방식이었다. 이를 처음으로 제안한 Ait Sab은 22% 잉여율에 2번의 반복 복호를 거치는 RS(255,239)+RS(255,223)의 연접부호를 고안하였다. 이 연접부호는 약 8.4dB의 NCG 성능을 보였다. 또 다른 예로는 20.8%의 잉여율을 갖는 RS(248,232)+RS(144,128)의 연접 부호가 제안되었고 10^{-12} 의 BER에서 7.8dB의 NCG를 보였다.

해저 전송 시스템에서도 연접부호가 사용되기 시작하였으며, RS(255,239)+콘볼루션 자기 직교 부호(Convolutional Self-Orthogonal Code: CSOC) 방법의 FEC는 25% 잉여율에, 10^{-12} 의 BER에서 8dB NCG의 성능을 보였다^[4].

<그림 5>에서 볼 수 있듯이 연접 RS 부호를 이용한 2세대 FEC가 발전되어 나왔다. 프레임 구조는 16개의 RS(239,223)와 16개의 RS(225,239)를 연접하여 구성된다. 첫 번째 열은 FEC가 위치하고, 정보를 담은 222개의 열, 다음 16개열은 RS(239,223), 마지막 16개의 열은 RS(255,239)로 구성으로 되어 있으며 전체 잉여율은 14.2%가 필요로 했다.

<그림 6>은 RS(239,223)+RS(255,239)의 에러 정정 성능을 보여주고 있다. 10^{-11} 의 BER에서 7.5dB의 NCG 성능은 실험을 통해 얻은 결과이



<그림 6> RS(239,223) + RS(255,239)의 에러정정 성능

고, 14.2%의 적은 잉여율은 고주파 전송라인의 비선형성 영향을 회피하기에 충분하다.

이렇듯 2세대 FEC 칩들은 8dB보다 더 좋은 NCG를 갖고 있으며 10Gb/s급의 전송 시스템에 상용화되고 있다. 또한 최근 들어 Ait Sab은 40Gb/s 전송을 위해 적은 잉여율을 갖는 강력한 FEC를 발표하였다. BCH 부호는 입력BER 영역에서 RS부호보다 더 좋은 성능을 보이기 때문에 BCH(1020,988) 부호를 연접하여 사용하고, 1020비트 중에서 3개의 에러 비트까지 정정이 가능하다. 시뮬레이션을 통하여 6.7%의 잉여율, 10^{-13} 의 BER에서 8.5dB의 NCG를 보이는 것을 확인할 수 있고, RS(255,239)부호와 비교하여 2.7dB 정도 더 나은 NCG 성능을 가지고 있다.

아래에서 보이는 바와 같이 여러 유형의 2세대 FEC들이 ITU-T G975.1에서 표준화가 되었다^[5].

- RS(255,239) + CSOC($n_0/k_0 = 7/6, j=8$)
- BCH(3860,3824) + BCH(2040,1930)
- RS(1023, 1007) + BCH(2047,1952)

- RS(19011855) + extended Hamming product code(512, 502) × (510,500)
- two orthogonally 연결 BCH code
- two interleaved extended BCH(1020, 988)

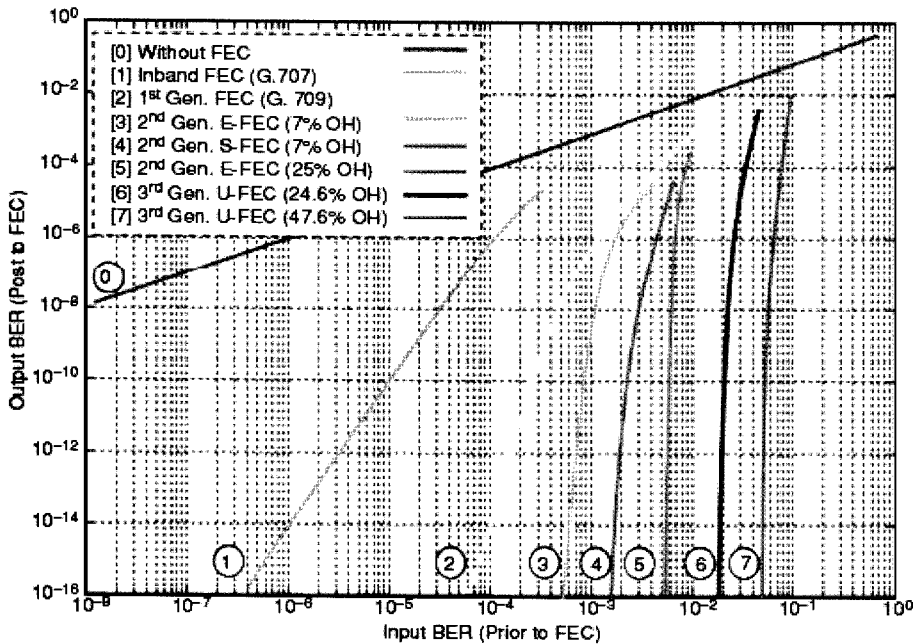
3. 3세대 FEC

2000년대 초, 상업적으로 설치된 케이블의 전송능력은 테라비트급으로 향상되어 2세대 FEC는 대용량 전송시스템에 적합하지 않게 되었다. 비록 테라비트급 시스템의 초기 구축에 초광대역 광증폭기(Ultra-wide band optical amplifier), 복합 광채널 이퀄라이저, 고성능 광케이블 등 초기 비용이 많이 드는 광기술이 사용됨으로써 고성능 FEC에 대한 요구가 조금 늦어진 하였지만, 2세대 보다 더 좋은 성능 즉, 10dB 이상의 NCG를 가지는 더 좋은 FEC기술에

대한 관심이 집중되기 시작하였다.

2세대 FEC보다 더욱 성능이 좋고 연판정(Soft Decision) 디코딩에 기반을 둔 FEC기술을 3세대 FEC로 분류할 수 있다. 이전의 1,2세대 FEC는 경판정 디코딩 방법에 기초를 두고 있지만, 이러한 3세대 FEC는 연판정 디코딩 과정을 거쳐 6.3dB의 입력을 예리 없이 정정할 수 있는 유력한 기술 중에 하나이다.

연판정 디코딩 기술을 사용한 FEC가 P_{uc}외의 여러 연구원들에 의해 처음으로 시도 되었으며, RS부호와 비터비 콘볼루션 부호를 연결하여 사용하는 방식이 적용 되었다. 결과는 2.5Gb/s, 1.3dB의 NCG 성능을 보이나 잉여율의 오버헤드가 113%나 차지하는 문제점이 있었다. 10Gb/s 이상급 광통신 시스템에 적용을 하려면 잉여율의 오버헤드가 25%를 넘지 않는 것이 바람직하다⁶⁾. 이에 대한 대안으로써 연판정 방법을 이용



〈그림 7〉 각 세대별 FEC의 성능 발전

한 터보 부호가 집중적으로 연구되기 시작했다.

터보부호는 통신채널에서 발생하는 에러를 최소화하고자 하는 요구와 함께 샤논의 한계(Shannon Limit)에 근접하는 우수한 성능을 보이는 부호를 찾으려는 많은 노력에 의한 결과이다. 여러 좋은 부호기법들이 연구되어 왔으나 복잡도가 낮으면서 효과적으로 복호할 수 있는 방법을 찾아내는 것이 쉽지 않았다. 이런 면에 있어서 Berrou에 의해 제시된 터보 코드는 획기적인 성능을 보임으로써 많은 관심을 불러 일으켰고 또한 페이딩(Fading) 채널 상에서도 신뢰를 보장하는 강력한 부호기법으로 사용되기 시작했다⁷⁾.

터보 부호가 수백 MHz 전송율의 무선통신 분야에서 그 탁월한 성능이 검증됨에 따라 10Gb/s 급 광통신 분야에도 적용하기 시작하였다. 터보 부호는 크게 2가지로 분류 할 수 있다. 터보 콘볼루션 부호(Turbo Convolution Code:TCC)와 블록 터보 부호(Block Turbo Code:BTC)이다. 이 두 가지 모두 연접부호 보다 뛰어난 성능향상을 보인다. 일반적으로 TCC는 BTC보다 낮은 부호율에서 더 효과적인 정정능력을 보여주지만 반대로 BTC는 높은 부호율에서 천공(Puncturing) 없이 더 좋은 성능을 보이며 또한 낮은 하드웨어 복잡도를 갖추고 있어서 전력소비와 비용면에서 효과를 볼 수 있다⁸⁾.

Ait Sab는 광통신시스템에서 BTC의 성능계산을 처음으로 시도하였다. BTC를 이용하여 25%보다 더 적은 오버헤드, 10dB의 NCG 성능을 내기까지 수많은 시뮬레이션을 해보았지만 실험이 성공하지는 못하였다. 그 이유는 집적회로로 10Gb/s급의 연관정 회로를 설계하는 것이 쉬운 일이 아니기 때문이다.

연구의 방향이 40Gb/s의 전송 기술로 초점이 모아짐에 따라 잉여율 감소와 낮은 복잡도가 절

실히 필요하므로 잠정적 해결책으로 LDPC(Low Density Parity Check)부호에 집중하게 되었다. LDPC 부호는 1962년 Gallager가 MIT 박사학위 논문을 발표하면서 처음으로 제안되었는데 구현이 쉽지 않아서 사용되지 못하고 점점 잊혀 가고 있었다. 그러나 1996년 후 Mackay와 Neal이 이를 재발견 한 후 반복복호 방법을 사용하여 복잡도가 크게 증가하지 않는 특성 및 생성방법에 대한 연구가 활기를 띠게 되면서 채널부호 기술들 중에서 가장 앞선 기술로 자리매김하게 되었다.

다른 채널 부호 기술과 비교하여 LDPC부호가 갖는 가장 큰 장점은 고속 데이터 전송에 필요한 높은 부호율에서 탁월한 성능을 보인다는 점이다. 터보 부호가 높은 부호율을 얻기 위해 천공을 해서 성능이 저하되는 것과 비교해 볼 때 LDPC 부호가 선호되는 가장 큰 이유라 할 수 있다. 수년 전부터 LDPC부호는 Djordjevic에 의해 광통신 분야에서 사용하기 위한 연구가 활성화가 되기 시작했다⁹⁾.

LDPC부호 역시 연관정 방법에 기초를 두고 있고, 터보부호와 비슷한 성능을 보일 수 있는 잠재력이 충분히 있기 때문에 3세대 FEC로 분류 할 수 있다. 물론 40Gb/s 시스템에서 BTC보다 저비용 효과를 원했지만 많은 반복복호 과정이 필요하기 때문에 아직 실제 40Gb/s 광통신분야에 적용하기에는 미흡한 점이 있지만 지속적으로 주목해 볼만한 기술이다.

IV. 향후 전망

<그림 7>은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)환경에서 세대별로 여러 종류 FEC의 성능을 측정해 본 결과이다. 이 그래프를 통해서

세대별로 FEC기술이 발전함에 따라 확실한 성능 향상을 가져 오는 것을 확인 할 수 있다^{[10][11]}.

100G 이더넷 표준화는 IEEE P802.3ba 40, 100Gb/s 이더넷 워킹 그룹을 통해 근거리 네트워크 표준화로 2011년 목표로 진행 중이며, ITU-T에서는 OTN(Optical Transport Network)의 표준화 작업을 하고 있다. 특히 802.3ba 그룹에서는 2009년 3월까지 40Gb/s 및 100Gb/s 이더넷 표준에 대한 첫 번째 제안을 마련할 예정이다. 이에 관련 업체들은 경기 침체와 기술적인 문제에 불구하고 40, 100Gb/s 이더넷 시스템 구현에 많은 노력을 기울이고 있는 중이다. 그 예로서 NetLogic Microsystems사는 PHY칩을 구현하여 100Gb/s급 전송 시스템의 데모를 시연하였다.

40, 100Gb/s의 이더넷 표준화 활동이 활발히 진행되고 표준안이 점점 가닥을 잡아감에 따라 차세대 FEC에 대한 논의도 활발히 진행 중이다. 높은 BER을 얻기 위해서 가장 주목 받고 있는 FEC기술 역시 연접 부호방식에 기반을 두고 있다. 하지만 기존의 방식과 다른 점은 경관정 기반의 FEC와 연관정 기반의 FEC의 연접부호 방식을 적용 하려고 노력하고 있다는 것이다. 현재 많은 시행착오를 거쳐 가며 여러 좋은 FEC 구조가 제안되고 있지만 가장 유력한 후보는 기존 많이 사용되어 오던 RS와 BCH부호 기반의 경관정 FEC 기술과 연관정 기반의 LDPC 부호를 동시에 사용하는 방법이다. 이 두 가지 FEC기술이 접목되면 서로의 장점을 살려 높은 NCG를 갖는 차세대 FEC기술로 손색이 없을 것으로 전망 하고 있다.

참고문헌

- [1] T. Mizuochi, "Recent Progress in Forward Error Correction for Optical Communication Systems," IEICE TRANS. Communication, Vol. E88-B, No.5, pp. 1934~1946, May 2005.
- [2] T. Mizuochi, "Recent Progress in Forward Error Correction and Its Interplay With Transmission Impairments," IEEE Journal of Selected Topic In Quantum Electronics, Vol. 12, No.4, pp.544~554 July/August 2006.
- [3] G. D. Forney, Concatenated Codes, The MIT Press, Cambridge,MA, 1996.
- [4] K. Seki, K. Mikami, A. Katayama, S. Suzuki, N. Shinohara, and M. Nakabayashi, "Single-chip FEC codec using a concatenated BCH code for 10Gbps LH optical transmission systems," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf., pp. 279-282, 2003.
- [5] "Forward Error Correction for high bit-rate DWDM Submarine Systems," Telecommunication Standardization Section, International Telecom. Union, ITU-T Recommendation G.975.1, Dec. 2004.
- [6] A. Puc, F. Kerfoot, A. Simons, and D.L. Wilson, "Concatenated FEC experiment over 5000Km long straight line WDM test bed," Proc. Optical Fiber Commun. Conf. and Exposition(OFC'99), paper ThQ6, San Diego, CA, Feb.1999.
- [7] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo codes," IEEE Trans. Commun., vol. 44, pp. 1261-1271, Oct. 1996.
- [8] T. Mizuochi, Y. Miyata, T. Kobayashi, K.

Ouchi, K. Kuno, K. Kubo, K. Shimizu, H. Tagami, H. Yoshida, H. Fujita, M. Akita, and K. Motoshima, "FEC based on block turbo code with 3-bit soft-Decision for 10Gb/s optical communication systems," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 10, pp. 376-386, Mar. 04.

- [9] I. B. Djordjevic, M. Cvijetic, L. Xu, and T. Wang, "Using LDPC-Coded Modulation and Coherent Detection for Ultra Highspeed Optical Transmission," Jour. of Lightwave technology, pp. 3619-3625, Nov. 2007.
- [10] A. Tychopoulos, O. Koufopavlou and I. Tomkos, "A Tutorial Overview on the Evolution of Architectures and the Future Prospects of Outband and Inband FEC for Optical Communications," IEEE Circuits & Devices Magazine, pp. 79~86, Nov/Dec. 2006.
- [11] A. Tychopoulos and O. Koufopavlou, "In-band coding technique to promptly enhance SDH/SONET fiber-optic channels with FEC capabilities," Eur. Trans. Telecomm, vol. 15, pp. 117-133, Apr. 2004.

자기소개



이 한 호

1993년 2월 충북대학교 전자공학과 학사
 1996년 6월 University of Minnesota, Dept. of Electrical and Computer Engr., 석사
 2000년 4월 University of Minnesota, Dept. of Electrical and Computer Engr., 박사
 2000년 4월 ~ 2002년 8월 Lucent Technologies, Member of Technical Staff
 2000년 8월 ~ 2004년 8월 University of Connecticut, Dept. of Electrical and Computer Engr., 조교수
 2004년 8월 ~ 현재 인하대학교 정보통신공학부 부교수

주관심분야 : 통신용 집적회로 및 SoC 설계