

## 연결형 최소대역폭 2진 오류제어선로부호의 성능 개선

正會員 金貞九\*, 李壽寅\*, 朱彦熨\*

### On Performance Improvement of a Cascaded Minimum Bandwidth Binary Error Control Line Code

Jeong Goo Kim\*, Soo In Lee, Eon Kyeong Joo\* Regular Members

#### 要 約

고속 디지털 통신 시스템에서 효율적이고 신뢰성 있는 통신을 위한 부호로는 오류제어부호와 선로부호가 있다. 일반적으로 전송 채널은 오류제어부호와 선로부호의 특성을 동시에 요구한다. 이런 요구사항을 만족시키기 위해서 오류제어 부호 기법과 선로부호 기법을 연결한 부호기법이 사용된다. 그러나 연결형 오류제어선로부호는 수신단에서 선로복호가 오류제어복호에 선행하므로, 오류제어 능력이 현저히 저하될 수 있다. 본 논문에서는 연결형 최소대역폭 2진 오류제어 선로부호의 오류제어 성능을 분석하고, 성능저하를 줄일 수 있는 방안을 제안하였다. 제안된 방법으로 구성된 부호는 기존방법의 문제점을 해결할 수 있기 때문에, 훨씬 향상된 오류제어 성능을 보였다.

#### ABSTRACT

In the high speed digital communication systems, there are two coding schemes, error control codes and line codes, which provide efficient and reliable communication. Generally, transmission channels require both line coding and error control coding characteristics simultaneously. To satisfy this requirement, the cascaded scheme of error control coding and line coding techniques has been used. However the error control capability of this cascaded error control line code can be degraded because line decoding precedes error correction at receiver. In this paper, error performance of a cascaded minimum-bandwidth binary error control line code is analyzed, and a possible solution to reduce its performance degradation is proposed. Because the proposed scheme can solve drawback of the conventional scheme, it is shown to have more improved error control capability.

\*경북대학교 전자공학과

Dept. of Electronics, Kyungpook National Univ.

論文番號 : 94314

接受日字 : 1994年 11月 11日

## I. 서 론

최근에 광통신 등과 같은 고속의 통신 매체가 발달함에 따라 전송부호(transmission code)에 대한 관심이 고조되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 전송부호는 오류제어부호(error control code)<sup>(4,5)</sup>와 선로부호(line code)<sup>(6)</sup>로 크게 나눌 수 있다. 오류제어부호는 여분의 비트와 대수의 기하학적 구조를 이용하여 채널상의 오류를 쉽게 검출하거나, 정정할 수 있도록 하여 신뢰성 있는 통신을 가능하게 한다. 대표적인 블록 오류제어부호로는 Hamming 부호, BCH 부호 등이 있다. 선로부호는 디지털 데이터를 전송선로를 통해 전달할 때 원천 데이터를 선로의 전달특성에 맞추거나 수신측의 원활한 동기재생을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 성질들을 만족시켜야 한다. 첫째, 동기재생을 쉽게 하기 위한 유한연속장 성질, 둘째, 전달매체의 전력 스펙트럼 특성과 부합하기 위한 무직류 성질, 셋째, 안정된 최소대역폭 조건을 위한 Nyquist 주파수의 전력 스펙트럼이 0인 성질 등이다. 그리고 최근에 광통신이 발달함에 따라 광소자의 비선형에 적합한 2진 선로부호가 주목을 받고 있다.

일반적으로 통신 시스템에서 효율적이고 신뢰성 있는 통신을 위해서는 전술한 오류제어부호의 특성과 선로부호의 특성이 동시에 요구되어지며, 이 경우 전통적으로 전송부호는 외부 부호(outer code)로 오류제어부호를 사용하고 내부 부호(inner code)로 선로부호를 사용한 연결형 오류제어선로부호(cascaded error control line code: ECLC)<sup>(2)</sup>가 사용된다. 이 때 연결형 ECLC의 복호는 부호화 과정의 역으로 먼저 선로복호를 행한 후 오류제어복호를 행하게 되는데, 이 때 채널 상에 오류가 존재하면 선로부호의 복호과정은 오류의 수, 형태 등에 영향을 미친다. 이러한 영향으로 말미암아 오류제어부호로 제어 가능한 채널오류가 제어 불가능한 오류의 형태로 바뀔 수 있고, 이 경우 연결형 ECLC의 오류제어 능력은 현저히 저하된다.

본 논문에서는 오류제어부호에 최근 활발히 연구되어지고 있는 최소대역폭 2진(minimum-bandwidth binary: MB) 선로부호<sup>(7-10)</sup>를 연결한 MB-ECLC의 오류제어 성능을 선로부호의 채널오류 형태에 따른 복호 오류형태를 통하여 분석하고, 성능저하를 줄일 수 있는 방안을 제안한다. 그리고 제안된 방법으로 구성된 MB-ECLC의 오류제어 성능을 기존의 방법으로 구성된

MB-ECLC의 오류제어 성능과 비교 분석한다.

## II. 최소대역폭 2진 선로부호

2진 선로부호는 부호어 내의 0과 1의 수를 적절히 조절하여 전송되는 부호열에서 전력 스펙트럼의 직류성분 제거, 저주파성분의 억압 및 줄 길이를 유한하게 한다. 그리고 안정된 최소대역폭 성질을 위해서 Nyquist 주파수의 전력이 0이 되도록 한다<sup>(11)</sup>.

선로부호의 특성을 나타내기 위해서 흔히 고려되는 파라메타는 최대 줄 길이(maximum runlength), 최대 축적 디지털 합(maximum running digital sum) 및 최대 축적 교번 디지털 합(maximum running alternating digital sum) 등이 있다. 줄 길이는 전송되는 부호열에서 동일 부호의 연속을 나타내며, 줄 길이의 제한은 수신 측의 동기를 용이하게 할뿐만 아니라 저주파 성분의 억압에도 도움을 준다. 그리고 논리적 부호 집합 {0, 1}을 물리적 부호 집합 {-1, 1}로 대치할 때, 무직류 성질은 최대 축적 디지털 합  $D_{MAX}$ 가 유한한 값을 가짐으로써 즉, 모든  $n$ 에 대해 다음 식을 만족함으로써 보장된다<sup>(12)</sup>.

$$D_{MAX} = \text{MAX}_n \left| \sum_{i=1}^n b_i \right| < \infty, b_i = -1 \text{ or } 1 \quad (1)$$

여기서  $b_i$ 는 전송 부호열에서  $i$ 번째 비트를 나타낸다. 비슷하게 Nyquist 주파수에서의 전력이 0이 되기 위해서는 최대 축적 교번 디지털 합  $A_{MAX}$ 가 모든  $n$ 에 대해 다음 식을 만족해야 한다<sup>(13)</sup>.

$$A_{MAX} = \text{MAX}_n \left| \sum_{i=1}^n (-1)^i b_i \right| < \infty, b_i = -1 \text{ or } 1 \quad (2)$$

이러한 성질을 모두 만족시키는 선로부호로는 DC- and Nyquist-free 부호<sup>(10)</sup>, MB 부호<sup>(7-9)</sup> 등이 있는데, 본 논문에서는 보다 일반적인 MB 부호에 대해서만 언급하기로 한다. 표 1과 2는 MB 부호 중 부호율이 가장 우수한 MB34 부호의 부호책과 복호책이다<sup>(7)</sup>.

최대 축적 디지털 합이 제한된 선로부호의 전력 스펙트럼은 Cariolaro와 Tronca의 알고리즘에 의하여 구하여질 수 있다<sup>(14)</sup>. 그림 1은 MB 부호의 전력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 MB 부호는 직류 성분과 Nyquist 주파수 성분이 없음을 알 수 있다.

표 1. MB34 부호의 부호책.  
Table 1. Code book for MB34 code.

| 입력 데이터 | 출력부호/다음 상태 |         |         |         |
|--------|------------|---------|---------|---------|
|        | S1         | S2      | S3      | S4      |
| 000    | 0110/S1    | 0110/S2 | 0110/S3 | 0110/S4 |
| 001    | 1110/S2    | 0001/S1 | 0001/S4 | 1110/S3 |
| 010    | 1100/S1    | 1100/S2 | 1100/S3 | 1100/S4 |
| 011    | 1101/S4    | 1101/S3 | 0010/S2 | 0010/S1 |
| 100    | 1001/S1    | 1001/S2 | 1001/S3 | 1001/S4 |
| 101    | 1011/S2    | 0100/S1 | 0100/S4 | 1011/S3 |
| 110    | 0011/S1    | 0011/S2 | 0011/S3 | 0011/S4 |
| 111    | 0111/S4    | 0111/S3 | 1000/S2 | 1000/S1 |

표 2. MB34 부호의 복호책.  
Table 2. Decoding book for MB34 code.

| 수신부호      | 복호 데이터 |
|-----------|--------|
| 0110      | 000    |
| 1110,0001 | 001    |
| 1100      | 010    |
| 1101,0010 | 011    |
| 1001      | 100    |
| 1011,0100 | 101    |
| 0011      | 110    |
| 0111,1000 | 111    |

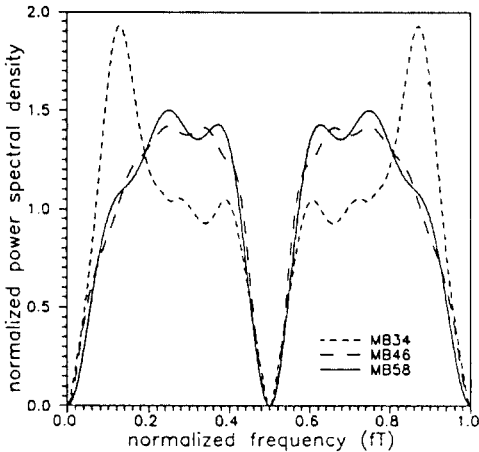


그림 1. MB 부호의 전력 스펙트럼.  
Fig. 1. Power spectrum of MB line codes.

### Ⅲ. MB-ECLC의 오류제어 성능

통신 시스템에서 효율적이고 신뢰성 있는 통신을 위해서 오류제어부호와 선로부호가 동시에 요구되어질 때, 일반적으로 그림 2에서 나타낸 것과 같이 외부부호로 오류제어부호를 사용하고 내부부호로 선로부호를 사용하는 연결형 MB-ECLC를 전송부호로 사용한다.

그림 2에서 채널에서 오류가 발생하면, 그 오류는 선로복호기에 영향을 미치게 되고, 또 그 영향은 오류제어복호기에 영향을 미치게 된다. 그러므로 연결형 MB-ECLC의 오류제어성능은 오류제어부호의 성능 뿐만 아니라 선로부호의 복호형태에 의해서도 결정되어 진다.

이러한 연결형 MB-ECLC의 오류제어성능을 구하기 위해서는 채널오류의 형태에 따라 선로부호의 복호비트 오류형태와 그에 따른 오류제어부호의 복호비트오율이 동시에 고려되어야 한다.

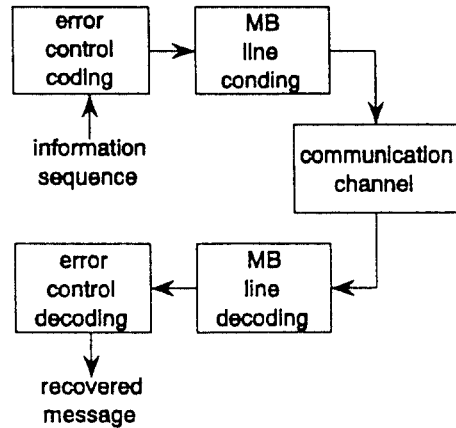


그림 2. 연결형 MB-ECLC의 블록 다이어그램.  
Fig. 2. Block diagram of a cascaded MB-ECLC.

그림 3은 오류제어부호로 Hamming (7,4) 부호를 사용했을 때, MB34 선로복호어와 오류제어부호의 매핑을 나타내었다. 그림에서 H는 Hamming (7,4) 부호의 블록을 나타내고 M은 MB34 부호의 블록을 나타낸다. 즉 H1은 Hamming 부호화된 첫번째 7비트 부호어를 나타내고, 그 중 M1은 MB34 부호화될 첫번째 3비트를 나타낸다.

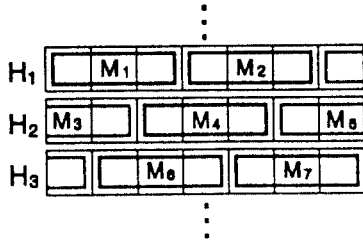


그림 3. MB34 부호와 Hamming (7,4) 부호의 매핑.  
Fig. 3. Mapping of the MB34 code and the Hamming (7,4) code.

계산과정의 편의를 위해서 MB34 선로복호어 오류형태와 오류형태에 따른 오울을 표 3과 같이 정의하자. 오류형태에서 0은 복호후 오류없는 비트, 1은 오류가 생긴 비트, 그리고 x는 무관(don't care)비트를 나타낸다. 즉 오류형태가 001이면 선로복호후 첫번째와 두번째 비트에서는 오류가 발생되지 않고 세번째 비트에서만 오류가 발생되었음을 나타낸다.

표 3. 오류형태의 표기 및 오류형태에 따른 오울의 표기.  
Table 3. Notation of error pattern and error probability according to error pattern.

|      |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |     |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----|
| 오류형태 | 000       | 001       | 010       | 00x       | 01x       | x00       | x01       | 0xx       | 1xx       | x0x        | x1x        | xx0        | xx1 |
| 표 기  | ep1       | ep2       | ep3       | ep4       | ep5       | ep6       | ep7       | ep8       | ep9       | ep10       | ep11       | ep12       |     |
| 오울표기 | $P_{ep1}$ | $P_{ep2}$ | $P_{ep3}$ | $P_{ep4}$ | $P_{ep5}$ | $P_{ep6}$ | $P_{ep7}$ | $P_{ep8}$ | $P_{ep9}$ | $P_{ep10}$ | $P_{ep11}$ | $P_{ep12}$ |     |

Hamming (7,4) 부호는 1 비트의 오류정정능력이 있으므로, 그림 3에서 H1 블록이 오류없이 복호 되기 위해서는 M1, M2 블록과 M3 블록의 첫 번째 비트에서 모두 오류가 없든지 하나의 오류만 존재하여야 한다. 그러므로 첫번째 Hamming 부호의 블록 H1의 복호부호어오울  $P_{cwe,H1}$ 는 표 3의 오울표기를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{cwe,H1} = 1 - \{P_{ep1}^2 P_{ep7} + P_{ep2} P_{ep1} P_{ep7} + P_{ep1} P_{ep2} P_{ep7} + P_{ep1}^2 P_{ep8}\} \quad (3)$$

비슷하게 H2, H3 블록의 복호부호어오울  $P_{cwe,H2}$ ,  $P_{cwe,H3}$ 는 식 (4), (5)와 같이된다.\*

$$P_{cwe,H2} = 1 - \{P_{ep5} P_{ep1} P_{ep3} + P_{ep5} P_{ep1} P_{ep3} + P_{ep5} P_{ep2} P_{ep3} + P_{ep5} P_{ep1} P_{ep4}\} \quad (4)$$

$$P_{cwe,H3} = 1 - \{P_{ep11} P_{ep1}^2 + P_{ep12} P_{ep1}^2 + P_{ep11} P_{ep2} P_{ep1} + P_{ep11} P_{ep1} P_{ep2}\} \quad (5)$$

그리고 4번째 Hamming 부호의 블록 H4에 대해서는 H1과 동일하고, 이하 H5는 H2, H6는 H3와 동일하다. 그러므로 기존의 MB-ECLC의 평균 복호부호어오울  $P_{cwe,con}$ 은 MB34 부호와 Hamming(7,4) 부호의 조합인 경우 식 (3), (4), (5)의 평균이 되어 다음 식 (6)과 같이 되고, 오류제어복호기에서 잘못 복호된 부호어의 전체 정보비트중 오류비트의 비가 평균적으로 1/2이라고 가정하면<sup>(15)</sup> 복호비트오울  $P_{re,con}$ 는 식 (7)과 같이 된다.

$$P_{re,con} = \frac{P_{cwe,H1} + P_{cwe,H2} + P_{cwe,H3}}{3} \quad (6)$$

$$P_{re,con} = \frac{1}{2} P_{cwe,con} \quad (7)$$

식 (7)을 구하기 위해서는 선로복호어 오류형태에 따른 오울  $P_{epk}(k=1, 2, \dots, 12)$ 가 먼저 구해져야 하는데, 이는 선로복호과정의 완전 검사를 통하여 구할 수 있다. 표 4는 완전 검사를 통한 MB34 부호의 정보어와 블록당 채널오류비트 수에 따른 주어진 복호오류형태 발생의 경우의 수  $N_{epk}(m, j)$ 와 오류검출 경우의 수  $N_{det}(m, j)$ 를 상태에 따른 평균으로 나타내었다. 여기서 m은 정보어의 10진 표기이고, j는 채널상에서의 오류비트 수를 나타낸다. 표 4에서, 예를 들어 정보어가 000(m=0)이고 이에 대한 선로부호어(상태에 관계없이 모두 0110)에서 발생한 오류비트 수가 2개(j=2) 일때 복호정보어가 001, 010, 또는 100중 하나(오류형태 ep2)가 될 경우의 수는 1이고, 표 2의 수신부호중 어디에도 해당되지 않아서 오류가 검출될 경우의 수는 4이다.

표 4에 의해 정보어 m이 주어졌을 때 평균 오류검출 확률  $P_{det}(m)$ 은 식 (8)과 같이 표현할 수 있고, 오류가 검출되었을 때 재전송을 요구한다면 선로복호어 오류형태에 따른 평균 오울  $P_{epk}$ 는 식 (9)와 같이된다.\*

표 4. 정보어와 채널오류비트 수에 따른 주어진 복호오류형태 발생의 경우의 수.

Table. 4. Average number of occurrences for a given error pattern according to information word and number of channel bit errors.

| 정보어  | 오류형태 | ep1 | ep2 | ep3 | ep4 | ep5 | ep6 | ep7 | ep8 | ep9 | ep10 | ep11 | ep12 | det |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|
| 000. | 0    | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0    | 1    | 0    | 0   |
|      | 1    | 0   | 1   | 1   | 2   | 0   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    | 0    | 4    | 0   |
| 010. | 2    | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 2   | 1   | 1   | 0   | 2    | 2    | 0    | 4   |
|      | 3    | 0   | 1   | 1   | 2   | 0   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    | 0    | 4    | 0   |
| 110. | 4    | 0   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0    | 1    | 0    | 0   |
|      | 0    | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0    | 1    | 0    | 0   |
| 001. | 1    | 0   | 1/2 | 1/2 | 1   | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    | 0    | 2    | 2   |
|      | 2    | 0   | 4   | 0   | 4   | 2   | 4   | 2   | 4   | 2   | 4    | 6    | 0    | 0   |
| 101. | 3    | 0   | 1/2 | 1/2 | 1   | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    | 0    | 2    | 2   |
|      | 4    | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 1   | 0    | 1    | 0    | 0   |

$$P_{det}(m) = \sum_{j=0}^4 N_{det}(m, j) P_{ce}^j (1 - P_{ce})^{4-j} \quad (8)$$

$$P_{epk} = \frac{1}{8} \sum_{m=0}^7 \sum_{j=0}^4 \frac{N_{det}(m, j) P_{ce}^j (1 - P_{ce})^{4-j}}{1 - P_{det}(m)} \quad (9)$$

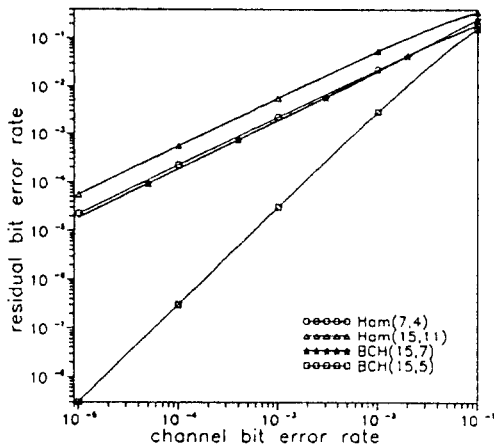


그림 4. MB34 부호를 사용한 기존의 연결형 MB-ECLC의 복호 비트오율.  
Fig. 4. Residual bit error rate of the conventional cascaded MB-ECLCs using the MB34 code.

여기서  $m, j$  그리고  $P_{ce}$ 는 각각 정보어, 채널오류 수 그리고 채널오율이다.

그림 4는 선로부호로 MB34 부호를 사용한 MB-ECLC의 복호비트오율을 나타낸 것이다. 그림에서 오류 제어 능력이 비교적 우수한 BCH(15,5) 부호를 제외한 나머지 오류제어부호를 사용한 경우에는 복호비트오율이 오히려 채널오율보다 높은 값을 가진다. 이는 발생 빈도가 높은 오류제어부호로 정정 가능한 채널상의 산발오류가 선로복호기를 통과면서 정정 불가능한 연접오류로 바뀌는 경우가 발생하기 때문이다.

#### IV. 제안된 연결형 MB-ECLC

기존의 연결형 MB-ECLC의 문제점은 채널상의 산발오류가 선로복호과정에서 연접오류로 바뀌는데 있다. 연접오류는 일반적으로 교삼(interleaving) 기법으로 해결할 수 있다. 그러므로 송신 측에서 오류

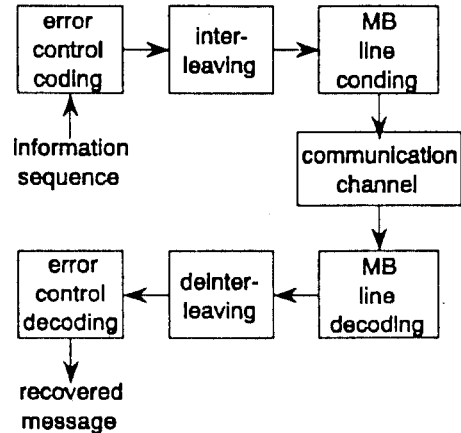


그림 5. 제안된 연결형 MB-ECLC의 블록 다이어그램.  
Fig. 5. Block diagram of the proposed cascaded MB-ECLC.

제어부호어를 교삼한 후 선로부호화 하고, 반대로 수신 측에서는 선로복호어를 역교삼(deinterleaving)하고 나서 오류제어복호를 행함으로써 기존의 연결형 MB-ECLC에서 생기는 성능상의 문제점을 방지할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 해당하는 시스템을 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 부호장이  $n$  비트인 오류제어부호에 대한

교삼은 n 블록의 선로부호를 사용해서 이룩할 수 있다. 그림 6은 MB34 부호와 Hamming (7,4) 부호를 사용한 MB-ECLC의 교삼과정과 역교삼과정을 보여준다. 즉 그림 6의 (a)에서 오류제어부호화된 3개의 블록 H1, H2, H3의 첫번째 비트들은 선로부호화된 첫번째 3개의 비트로 이용된다. 따라서 Hamming (7,4) 부호화된 3개의 블록은 7 블록으로 선로부호화 된다. 역으로 복호화 과정에서 선로복호화된 7개의 블록은 그림 6의 (b)에서와 같이 3개의 오류제어복호대상 블록으로 사용된다.

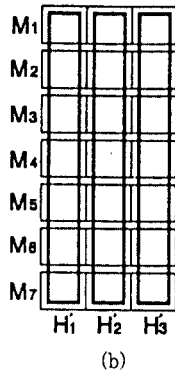
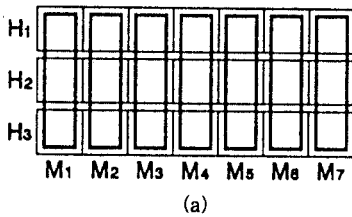


그림 6. 제안된 부호의 (a) 교삼과정과 (b) 역교삼과정  
Fig. 6. (a) Interleaving and (b) deinterleaving procedure of proposed code.

그림 6의 (b)에서 H1' 블록이 오류없이 복호 되는 경우는 H1' 블록에서 오류가 없거나 하나의 오류가 발생한 경우이다. 그러므로 H1' 블록의 복호부호어오률  $P_{cwe\_H1'}$ 는 표 3의 표기를 이용하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{cwe\_H1'} = 1 - (P_{ep1}^7 + 7P_{ep1}^6 P_{ep2}) \quad (10)$$

비슷하게 H2' 블록과 H3' 블록의 복호부호어오률  $P_{cwe\_H2'}$ ,

$P_{cwe\_H3'}$ 는 각각 식 (11)과 (12)와 같이된다.

$$P_{cwe\_H2'} = 1 - (P_{ep2}^7 + 7P_{ep2}^6 P_{ep1}) \quad (11)$$

$$P_{cwe\_H3'} = 1 - (P_{ep1}^7 + 7P_{ep1}^6 P_{ep2}) \quad (12)$$

그러므로 제안된 연결형 MB-ECLC의 복호비트오률  $P_{re\_pro}$ 는 MB34 부호와 Hamming (7,4) 부호를 사용한 경우 식 (7)과 비슷하게 다음과 같이된다.

$$P_{re\_pro} = \frac{1}{2} \frac{P_{cwe\_H1'} + P_{cwe\_H2'} + P_{cwe\_H3'}}{3} \quad (13)$$

그림 7은 MB34 부호를 사용한 제안된 MB-ECLC의 복호비트오율을 나타낸 것이다.

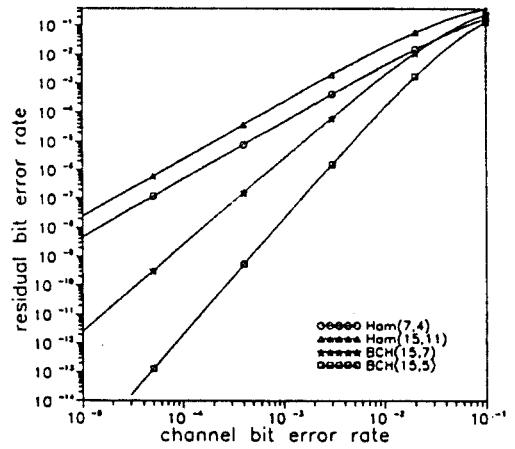


그림 7. 제안된 부호의 복호비트오율.  
Fig. 7. Residual bit error rate of the proposed code.

### V. 계산결과 및 고찰

계산결과를 분석하기 위하여 사용된 연결형 MB-ECLC는 선로부호로 MB34, MB46, MB58 부호를 사용하였고, 오류제어부호는 비교적 간단한 형태인 1 비트의 오류를 정정할 수 있는 Hamming (7,4)와 Hamming (15,11) 부호, 또한 각각 2 비트, 3 비트의 오류를 정정할 수 있는 BCH (15,7), BCH (15,5) 부호를 사용하였다.

그 중 한 예로서 그림 8은 오류제어부호로 BCH (15, 5) 부호를 사용하고 선로부호로 MB34와 MB46을 사용한 경우의 복호비트오율을 나타낸 것이다. 제안된 부호의 오류제어능력이 기존의 부호에 비해 훨씬 우수함을 알 수 있다. 그외 다른 오류제어부호 및 선로부호의 결합에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 그림에서 기존 부호의 복호비트오율을 살펴보면, 선로부호로 MB46 부호를 사용한 경우보다 MB34를 사용한 경우가 리던던시(redundancy)가 적음에도 불구하고 복호비트오율이 낮게 나타난다. 이는 채널상에서 하나의 오류제어부호어 블록 중 한 블록의 선로부호어에서 1비트의 오류가 발생했을 때, MB34 부호의 경우 선로복호어에 3비트 이하의 오류만 발생하고 이것이 BCH (15, 5)복호기로 들어가면 BCH (15, 5) 부호는 3비트의 오류를 정정할 수 있으므로 모든 오류가 정정된다. 그러나 MB46 선로복호어에서는 최대 4비트의 오류가 발생할 수 있으므로 이 경우 모든 오류를 정정할 수는 없기 때문이다. 따라서 기존의 연결형 MB-ECLC의 경우에는 부호어의 길이 및 오류정정능력에 따라 적절한 선로부호 및 오류제어부호의 조합이 있음을 알 수 있다.

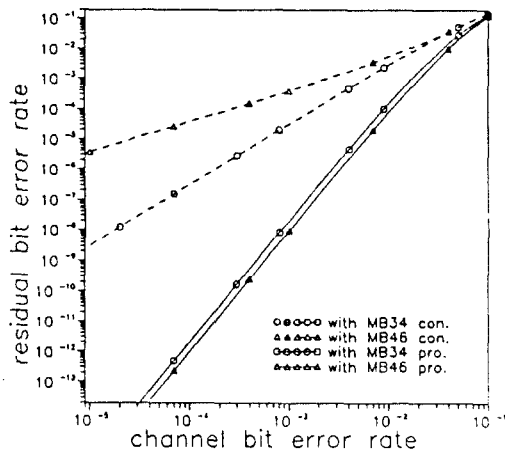


그림 8. BCH (15, 5) 부호를 사용한 연결형 MB-ECLC의 복호비트오율 비교.  
Fig 8. Comparison of residual bit error rate of cascade MB-ECLCs using BCH (15, 5) code.

또한 채널의 오율이  $10^{-4}$  일 때, 선로부호 및 오류제어부호 각각의 조합에 대한 복호비트오율을 표 5에 나타내었다. 표에서 빈칸은 BCH (15, 7) 및 BCH (15, 5) 부호가 오류정정능력이 우수하고 게다가 MB58 부호가

우수한 오류검출 능력을 가지고 있어 계산과정에서의 절단오차(round-off error)때문에 계산할 수 없었던 경우이다.

표 5. 복호오율의 비교  $P_{ce} = 10^{-4}$   
Table 5. Comparison of residual bit error rate( $P_{ce} = 10^{-4}$ )

| ECC<br>Line code |               | Hamming<br>(7, 4)      | BCH(15, 11)            | BCH(15, 7)            | BCH(15, 5)             |
|------------------|---------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| MB34             | $P_{re\ con}$ | $2.25 \times 10^{-4}$  | $5.62 \times 10^{-4}$  | $1.88 \times 10^{-4}$ | $3.09 \times 10^{-7}$  |
|                  | $P_{re\ pro}$ | $4.72 \times 10^{-7}$  | $2.36 \times 10^{-4}$  | $2.55 \times 10^{-9}$ | $2.07 \times 10^{-11}$ |
| MB46             | $P_{re\ con}$ | $1.84 \times 10^{-4}$  | $4.22 \times 10^{-4}$  | $1.64 \times 10^{-4}$ | $3.77 \times 10^{-5}$  |
|                  | $P_{re\ pro}$ | $3.53 \times 10^{-7}$  | $1.76 \times 10^{-4}$  | $1.52 \times 10^{-9}$ | $9.42 \times 10^{-13}$ |
| MB58             | $P_{re\ con}$ | $3.54 \times 10^{-4}$  | $9.00 \times 10^{-4}$  | $3.75 \times 10^{-4}$ | $1.13 \times 10^{-8}$  |
|                  | $P_{re\ pro}$ | $1.52 \times 10^{-14}$ | $6.81 \times 10^{-14}$ |                       |                        |

표 5에서 모든 경우의 조합에 대해 제안된 연결형 MB-ECLC의 복호비트오율은 기존의 부호의 경우보다 훨씬 낮게 나타난다. 즉, MB34 부호를 사용하는 경우, 제안된 부호의 복호비트오율은 기존의 경우에 비해 Hamming (7, 4) 부호를 사용하는 경우 약 1/500로 줄어들고, 그외 Hamming (15, 11), BCH (15, 7), BCH (15, 5)에 대해서도 각각 약 1/240, 1/70000, 1/150000로 줄어든다. 또한 오류제어부호의 종류에 따른 성능향상의 정도를 살펴보면, 오류제어능력이 우수한 부호일수록 성능향상이 더 크게 나타난다. 이는 기존의 연결형 MB-ECLC는 오류제어부호를 연결하여 사용하여도 사용하지 않은 경우에 비해 오류제어능력의 개선이 미미하거나 오히려 나빠지기 때문이다.

### Ⅶ. 결 론

외부부호로 오류제어부호를 사용하고 내부부호로 선로부호를 사용하는 연결형 MB-ECLC에서 선로복호 과정은 채널오류의 형태에 영향을 미칠 수 있고, 이러한 영향은 오류제어능력을 현저히 저하시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 선로부호의 복호과정을 정보어, 채널오류수 및 선로복호어의 오류형태를 통하여 분석하였고, 이를 이용하여 연결형 MB-ECLC의 복호비트오율을 계산하였다. 그 결과 선로복호기는 채널 상에서의 산발오류를 연집오류화 시키는 경향을 보였다. 이러한 연집오류는 오류제어부호의 오류제어능력을 벗어나게 되어 오류제어능력이 현저히 저하되는 결과를 초래하였다.

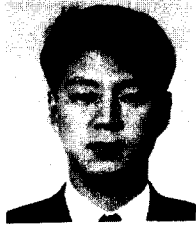
또한 본 논문에서는 선로복호기의 오류연집화 문제를 교섭 기법으로 해결하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 구성된 연결형 MB-ECLC의 오류제어 능력은 선로복호 과정에서 연집된 오류가 역교섭에 의하여 분산되어 기존의 방법에 의한 부호의 오류제어 능력에 비해 상당히 우수함을 보였다. 예를 들어 MB34 부호를 사용한 기존의 연결형 MB-ECLC의 복호비트오율과 비교했을 때, 채널오율이  $10^{-4}$ 에서 오류제어부호의 종류에 따라 제안된 부호의 복호비트오율은 약  $1/240 \sim 1/150000$ 로 감소하였다.

이상에서 살펴보았듯이, 본 논문에서는 기존의 부호에 비해 오류제어능력이 우수한 연결형 MB-ECLC에 대해서 조사, 연구되었지만 앞으로는 부호율과 오류제어능력을 더 개선하기 위하여 오류제어능력과 최소대역폭 선로부호 특성을 동시에 가지는 결합형 MB-ECLC에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. K. A. Schouhamer Immink, *Coding techniques for digital recorders*, Prentice-Hall, New York, 1991.
2. P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Modulation and coding for information storage," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 29, no. 12, pp. 68-86, Dec. 1991.
3. D. J. Morris, *Pulse code formats for fiber optical data communication: Basic principles and applications*, Marcel Dekker, New York, 1983.
4. S. Lin and D. J. Costello, *Error control coding: Fundamentals and applications*, Prentice-Hall, New Jersey, 1983.
5. R. E. Blahut, *Theory and Practice of error control codes*, Addison-Wesley, Mass., 1983.
6. H. Kobayashi, "A survey of coding schemes for transmission or recording of digital data," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1087-1100, Dec. 1971.
7. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of a minimum bandwidth binary line code MB34," *J. KITE*, vol. 29-A, no. 8, pp. 621-628, Aug. 1992.
8. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of binary line code MB46," *J. KICS*, vol. 17, no. 9, pp. 963-970, Sep. 1992.
9. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of a memoryless minimum bandwidth binary line code MB58," *J. KICS*, vol. 17, no. 10, pp. 1074-1080, Dec. 1992.
10. L. J. Fredrickson, "On the Shannon capacity of DC- and Nyquist-free codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-37, no. 3, pp. 918-923, May 1991.
11. D. Y. Kim and J. K. Kim, "A condition for stable minimum bandwidth line codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 2, pp. 152-157, Feb. 1985.
12. J. Justesten, "Information rates and power spectra of digital codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-28, no. 3, pp. 457-472, May 1982.
13. B. H. Marcus and P. H. Siegel, "On the spectral nulls at rational submultiples of the symbol frequency," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-33, no. 4, pp. 557-568, Jul. 1987.
14. G. L. Cariolaro and G. P. Tronca, "Spectra of block coded digital signals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-22, no. 10, pp. 1555-1564, Oct. 1974.
15. A. Kokkos, J. O'Reilly, A. Popplewell, and S. Williams, "Evaluation of a class of error control line codes: an error performance perspective," *IEE Proc.-I*, vol. 139, no. 2, pp. 128-132, Apr. 1992.





**金 貞 九 (Jeong Goo Kim) 정희원**

1964년 11월 3일생

1988년 2월 : 경북대학교 공과대학  
전자공학과 졸업(공학  
사)

1991년 2월 : 경북대학교 대학원 전  
자공학과 졸업(공학석  
사)

1991년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정  
재학

1995년 3월~현재 : 밀양산업대학교 정보통신공학과 재직(전임  
강사)

\* 주 관심분야 : Coding Theory, Digital Signal  
Transmission, Mobile Communication

**李 壽 寅 (Soo In Lee)**

정희원

1962년 2월 16일생

1985년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)

1989년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1990년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1990년 2월~현재 : 한국전자통신연구소 위성통신기술연구단  
선임연구원

\* 주 관심분야 : 위성통신, 부호이론 등



**朱 彦 嬰 (Eon Kyeong Joo) 정희원**

1954년 1월 19일생

1976년 : 서울대학교 공과대학 전자  
공학과 졸업(공학사)

1984년 : 미국 Ohio State Univ.  
전기공학과 졸업(M.S.)

1976년~1979년 : 해군 통신전자 기  
술장교

1979년~1982년 : 한국과학기술원 연구원

1987년~현재 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 재직(부교수)

\* 주 관심분야 : Digital Communication Systems, Coding  
and Decoding, Digital Signal Transmission  
and Reception