

# 구성부호의 연결방법에 따른 직렬연접 길쌈부호의 성능

정희원 배상재\*, 이상훈\*, 주연경\*

## Performance of Serial Concatenated Convolutional Codes according to the Concatenation Methods of Component Codes

Sang Jae Bae\*, Sang Hoon Lee\*, and Eon Kyeong Joo\* *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 AWGN 채널환경에서 직렬연접 길쌈부호(serial concatenated convolutional codes; SCCC)의 세 가지 형태에 대한 성능을 비교 및 분석한다. 모의실험 결과 낮은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; SNR) 영역에서는 첫 번째 형태의 성능이 가장 우수하였다. 그러나 높은 SNR 영역에서는 세 번째 형태의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다. 그리고 첫 번째 형태에서는 SNR과 반복복호 횟수를 증가시키더라도 성능이 더 이상 향상되지 않는 오류마루(error floor)가 발생하였다. 그러나 두 번째와 세 번째 형태는 높은 SNR에서 반복복호를 5회 이상 수행하더라도 성능이 계속 향상되며 오류마루가 나타나지 않았다. 그리고 SNR이 증가할수록 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 BER 성능은 각각의 상위경계(upper bound) 성능에 근접해짐을 알 수 있었다. 또한 자유거리(free distance)가 가장 큰 세 번째 직렬연접 길쌈부호가 세 가지 구조 중에서 가장 우수한 상위경계 성능을 나타내었다.

### ABSTRACT

In this paper, the performance of three types of serial concatenated convolutional codes (SCCC) in AWGN (additive white Gaussian noise) channel is compared and analyzed. As results of simulations, it can be observed that Type I shows the best error performance at lower signal-to-noise ratio (SNR) region. However, Type III shows the best error performance at higher SNR region. It can be also observed the error floor that the performance cannot be improved even though increasing of the number of iterations and SNR at Type I. However, the performance of Type II and Type III are still improved over the five iterations at higher SNR without error floor. And BER performance of three types can be closed to upper bound of three types with increase of SNR. It can be also observed that the upper bound of Type III shows the best performance among the three types due to the greatest free distance.

### 1. 서론

Berrou 등에 의해서 발표된 병렬연접 길쌈부호(parallel concatenated convolutional codes; PCCC)<sup>[1]</sup>는 비교적 간단한 구조를 가지면서도 반복복호에 의해서 매우 우수한 성능을 나타낸다. 병렬연접 길쌈부호에서는 부호기의 인터리버가 커질수록 패리티 비트들 사이의 연관성이 줄어들어 오류성능이 향상된다. 그리고 병렬연접 길쌈부호의 복호기는 각

구성부호기에 대응되는 연판정 출력이 가능한 MAP(maximum a posteriori)<sup>[2-7]</sup> 복호기가 순환적으로 연결된 형태로 구성되므로 복호시 반복복호가 가능하다. 그러므로 병렬연접 길쌈부호의 경우 수만 비트 이상의 큰 크기를 가지는 인터리버를 사용하고 복호시 반복복호를 5회 이상 수행하면  $10^{-5}$ 의 BER에서 거의 Shannon limit에 근접하는 오류성능을 얻을 수 있다<sup>[1],[8]</sup>. 그러나 병렬연접 길쌈부호에는 반복복호 횟수와 SNR을 증가시키더라도 BER이

\* 경북대학교 전자전기공학부(ekjoo@ee.knu.ac.kr)  
논문번호 : K01211-1009, 접수일자 : 2001년 10월 9일

$10^{-5} \sim 10^{-7}$  이하로 낮아지지 않는 오류마루(error floor)가 발생하는 문제점이 있다<sup>[8-12]</sup>.

이러한 병렬연접 길쌈부호의 오류마루를 최소화하기 위하여 직렬연접 길쌈부호(serial concatenated convolutional codes; SCCC)가 Benedetto 등에 의해서 제안되었다<sup>[10]</sup>. 직렬연접 길쌈부호에서는 외부구성부호(outer code)의 정보비트와 패러티비트가 내부구성부호(inner code)로 입력된다. 따라서 직렬연접 길쌈부호의 MAP 복호기에서는 정보비트에 대한 LLR(log likelihood ratio)값뿐만 아니라 패러티비트에 대한 LLR값도 계산되어야 한다<sup>[13]</sup>. 직렬연접 길쌈부호의 구성부호로는 순환 체계적 길쌈부호(recursive systematic convolutional code; RSC code)와 비순환 체계적 길쌈부호(non recursive systematic convolutional code; NRSC code)가 사용된다. 그러므로 직렬연접 길쌈부호에서는 외부구성부호와 내부구성부호의 조합에 따라 그 성능이 달라진다<sup>[10-12]</sup>. 또한 전체 부호율이 동일하더라도 외부구성부호와 내부구성부호의 연결방식과 인터리버 및 각 구성부호의 부호율 조합에 따라 그 성능이 달라진다. 직렬연접 길쌈부호에서 각 구성부호의 조합과 인터리버 및 구성부호의 부호율 조합에 대한 연구는 어느 정도 이루어져 있다<sup>[10-12,14]</sup>. 그러나 직렬연접 길쌈부호의 외부구성부호와 내부구성부호의 연결방식에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 동일한 부호율과 인터리버 크기에서 외부구성부호와 내부구성부호의 연결방식에 따라 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호를 제시하고 그 성능을 비교 및 분석한다. 또한 거리 스펙트럼(distance spectrum)<sup>[15]</sup>의 관점에서 제시된 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호의 성능을 비교 및 분석한다. 그리고 이러한 분석을 통하여 병렬연접 길쌈부호의 단점인 오류마루를 최소화할 수 있는 직렬연접 길쌈부호의 연결방식을 제시한다.

## II. 직렬연접 길쌈부호의 연결방식

직렬연접 길쌈부호에서는 연결방식에 따라 외부구성부호의 정보비트와 패러티비트가 모두 내부구성부호로 입력되거나 외부구성부호의 패러티비트만이 내부구성부호로 입력될 수 있다<sup>[10-13]</sup>. 본 논문에서는 외부구성부호와 내부구성부호의 연결방식에 따라 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호가 제시된다. 제시된 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 부호기에서는 외부 및 내부구성부호로 순환 체계적 길쌈부호가 사용되

고 전체부호율은 1/3이다. 또한 연접오류에 대한 오류정정능력을 향상시키기 위하여 외부구성부호와 내부구성부호 사이에 인터리버(interleaver)가 사용된다. 그리고 제시된 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 복호기 구조는 기본적으로 두 개의 MAP 복호기와 인터리버 및 역인터리버(deinterleaver)로 구성된다.

### 1. 첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호

첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호를 그림 1과 같다. 여기서 I와 I<sup>-1</sup>은 인터리버와 역인터리버를 나타내며, D는 1비트 이동 레지스터(shift register)를 나타낸다. 또한 x<sub>k</sub>와 y<sub>1k</sub> 및 y<sub>2k</sub>는 각각 정보비트와 패러티비트들을 나타내며, d<sub>k</sub>는 복호기의 최종 출력비트를 나타낸다.

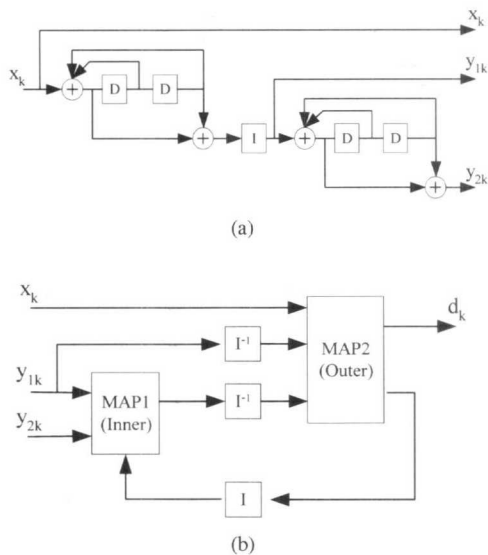


그림 1. 첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호  
(a) 부호기 (b) 복호기

그림에서 보는 바와 같이 첫 번째 형태의 부호기에서는 외부구성부호의 정보비트가 그대로 최종 출력비트로 사용되며, 패러티비트만이 인터리버를 통하여 내부구성부호로 입력된다. 따라서 인터리버의 크기는 외부구성부호의 입력프레임 크기와 동일하다. 복호기에서는 먼저 내부구성부호의 정보비트에 대한 부가정보(extrinsic information)가 MAP1에서 계산되어져 MAP2로 전달된다. 그리고 MAP2에서는 이 값을 이용하여 외부구성부호의 정보비트에 대한 LLR값과 패러티비트에 대한 부가정보를 계산한다. MAP2에서 계산된 패러티비트에 대한 부가정보는 반복복호를 위하여 다시 MAP1으로 케환된다.

2. 두 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호

두 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호는 그림 2와 같다. 여기서  $x'_k$ 는 외부구성부호의 정보비트와 패리티비트가 다중화기(multiplexer; MUX)와 인터리버를 통과한 비트, 즉 내부구성부호의 정보비트를 나타낸다. 그리고  $y'_k$ 는 내부구성부호의 정보비트에 대한 패리티비트를 나타낸다.

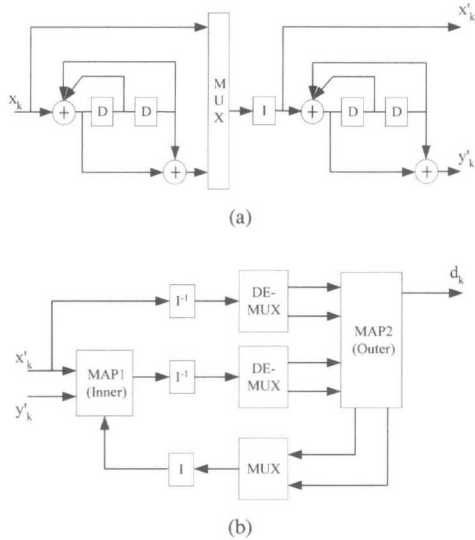


그림 2. 두 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호 (a) 부호기 (b) 복호기

두 번째 구조의 부호기에서는 첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호와는 달리 외부구성부호의 정보비트와 패리티비트가 모두 내부구성부호로 입력된다. 따라서 외부구성부호와 인터리버 사이에 다중화기가 필요하며 인터리버의 크기는 입력프레임 크기의 두 배이다. 그리고 전체부호율을 1/3로 하기 위하여 식 (1)과 같은 평치링 행렬(puncturing matrix)을 사용하여 부호기의 최종 출력비트열에서 한 비트를 제거하였다. 두 번째 형태의 복호기 구조는 첫 번째 형태의 복호기와 유사하지만 다중화기와 역다중화기(demultiplexer; DEMUX)가 부가적으로 더 사용된다. 그리고 반복복호를 위하여 MAP2에서 외부구성부호의 정보비트뿐만 아니라 패리티비트에 대한 부가정보를 계산하여 MAP1으로 캐환한다. 그러므로 두 번째 형태의 구조는 첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호보다 더 복잡하다.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

3. 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호

세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호는 그림 3과 같다. 여기서 역다중화기의 출력인  $x'_{1k}$ 와  $x'_{2k}$ 는 내부구성부호의 정보비트를 나타내며,  $y'_k$ 는 이에 대한 내부구성부호의 패리티비트를 나타낸다.

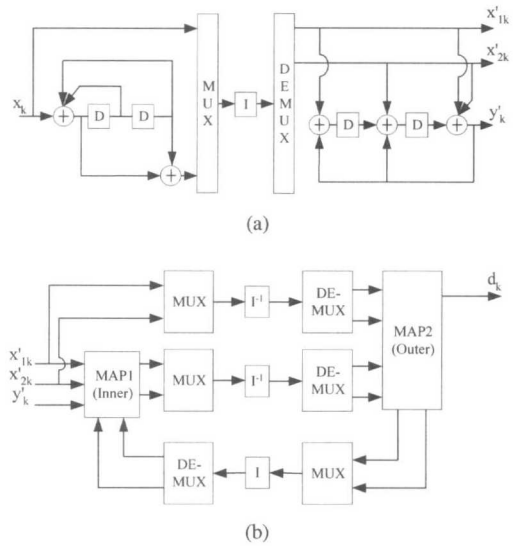


그림 3. 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호 (a) 부호기 (b) 복호기

그림에서 보는 바와 같이 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호에서는 인터리버와 내부구성부호 사이에 역다중화기가 사용된다. 그리고 전체 부호율을 1/3로 하기 위하여 내부구성부호로 부호율이 2/3인 순환체계적 길쌈부호가 사용된다. 인터리버의 크기는 두 번째 형태에서처럼 입력프레임 크기의 두 배가 된다. 세 번째 형태의 복호기 구조는 두 번째 형태의 복호기와 비슷하지만 부호기의 역다중화기로 인하여 다중화기와 역다중화기가 부가적으로 더 사용된다. 따라서 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호가 세 가지 구조 중에서 가장 복잡한 구조를 가진다.

III. 직렬연접 길쌈부호에서의 MAP 복호알고리즘

본 논문에서 제시된 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호에 대한 복호알고리즘은 병렬연접 길쌈부호의 MAP과 거의 동일하다. 그러나 외부 복호기 MAP2에서 정보비트에 대한 LLR값뿐만 아니라 패리티비트에 대한 LLR값도 계산하여야 한다.

외부 복호기 MAP2에서  $k$ 시간의 정보비트  $u_k$ 에

대한 LLR값은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\Lambda(u_k) = \log \frac{P(u_k=1 | \mathbf{r}_1^N)}{P(u_k=0 | \mathbf{r}_1^N)}, \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{r}_1^N$ 은  $\mathbf{r}_1$ 부터  $\mathbf{r}_N$ 까지의 수신된 심볼을 나타낸다. 그리고 순방향 및 역방향 매개변수  $\alpha_k^i(n)$ 과  $\beta_k(m)$ 을 사용하면 식 (2)는 다음과 같이 정리된다.

$$\Lambda(u_k) = \log \frac{\sum_m \alpha_k^1(n) \cdot \beta_k(m)}{\sum_m \alpha_k^0(n) \cdot \beta_k(m)}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_k^i(n) &= P(u_k=i, S_k=n, \mathbf{r}_k^i) \\ &= \sum_n \sum_{l=0}^1 \gamma_k^i(\mathbf{r}_k, m, n) \cdot \alpha_{k-1}^l(m), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \beta_k(m) &= P(\mathbf{r}_{k+1}^N | S_k=m) \\ &= \sum_n \sum_{l=0}^1 \gamma_k^l(\mathbf{r}_{k+1}, n, m) \cdot \beta_{k+1}(n). \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $m$ 과  $n$ 은 이전시간과 현재시간의 상태를 나타내며,  $\gamma_k^i$ 는  $k$ 시간에서 정보비트가  $i$ 일 경우의 상태전이확률을 나타낸다.

한편  $k$ 시간에서 패러티비트  $p_k$ 에 대한 LLR값은 식 (2)와 (3)에서  $u_k$ 대신  $p_k$ 를 대입함으로써 구할 수 있다. 그리고  $p_k$ 에 대한 순방향과 역방향 매개변수는 식 (4), (5)와 동일하다. 그러나 실제 순방향 매개변수  $\alpha_k^i(n)$ 와 역방향 매개변수  $\beta_k(m)$ 의 계산 과정에서는 이전 상태번호를  $p_k$ 에 대한 경로 바꾸어 주어야 한다. 따라서  $p_k$ 에 대한 상태전이확률은  $u_k$ 에 대한 상태전이확률과는 다르게 계산된다.

본 논문에서 구성부호기로 사용한 생성다항식이 [7, 5]이고 메모리가 두 개인 순환 체계적 길쌈부호의 정보비트와 패러티비트에 대한 격자도(trellis diagram)는 그림 4와 같다.

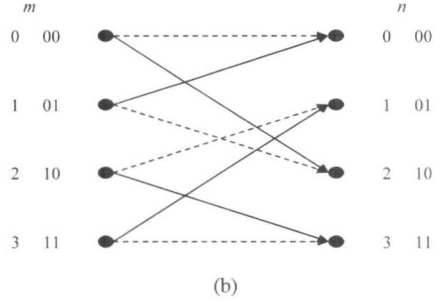
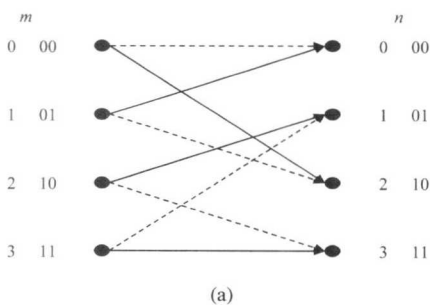


그림 4. 순환 체계적 길쌈부호의 격자도  
(a) 정보비트에 대한 격자도  
(b) 패러티비트에 대한 격자도

여기서 점선과 실선은 입력이 각각 0과 1인 경우의 상태전이(state transition)를 나타낸다. 이 경우  $k$ 시간에서 정보비트 0과 패러티비트 0에 대한 LLR값을 구하기 위하여 계산되는 순방향매개변수  $\alpha_k^0(n)$ 은 식 (6), (7)과 같다.

$u_k = 0$  인 경우의  $\alpha_k^0(n)$

$$\begin{aligned} \alpha_k^0(0) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 0, 0) \cdot \alpha_{k-1}^l(0) \\ \alpha_k^0(1) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 3, 1) \cdot \alpha_{k-1}^l(3) \\ \alpha_k^0(2) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 1, 2) \cdot \alpha_{k-1}^l(1) \\ \alpha_k^0(3) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 2, 3) \cdot \alpha_{k-1}^l(2), \end{aligned} \quad (6)$$

$p_k = 0$  인 경우의  $\alpha_k^0(n)$

$$\begin{aligned} \alpha_k^0(0) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 0, 0) \cdot \alpha_{k-1}^l(0) \\ \alpha_k^0(1) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 2, 1) \cdot \alpha_{k-1}^l(2) \\ \alpha_k^0(2) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 1, 2) \cdot \alpha_{k-1}^l(1) \\ \alpha_k^0(3) &= \sum_{l=0}^1 \gamma_k^0(\mathbf{r}_k, 3, 3) \cdot \alpha_{k-1}^l(3). \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 보는 바와 같이 정보비트와 패러티비트에 대한 순방향 매개변수  $\alpha_k^i(n)$ 의 계산과정에서 이용되는 이전 상태번호가 서로 다를 수 확인할 수 있다. 이것은 외부구성부호에서 입력비트와 그에 대응되는 출력 패러티비트가 반드시 서로 일치하지 않기 때문에 발생한다.

#### IV. 모의실험 결과 및 분석

제시된 세 가지 구조의 직렬연접 길쌈부호에 대한 성능을 비교하기 위하여 AWGN 환경에서 모의

실험을 하였다. 모의실험에서 인터리버는 크기가 1000인 세미랜덤 인터리버<sup>[16]</sup>를 사용하였으며, 전체 부호율은 1/3로 동일하게 하였다.

첫 번째 직렬연접 길쌈부호에 대한 성능은 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 첫 번째 직렬연접 길쌈부호에서는 Eb/No가 2.5 [dB] 이상이 되면 반복복호를 5회 이상 수행하더라도 성능이 더 이상 향상되지 않는 오류마루가 발생한다.

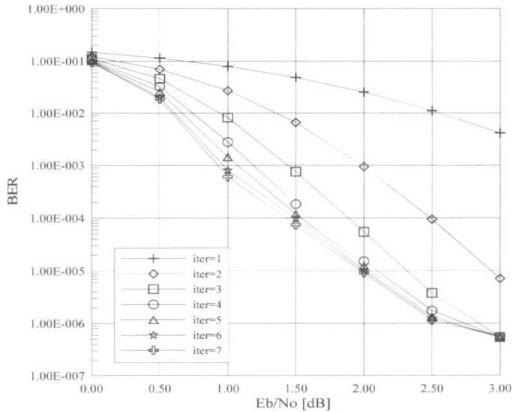


그림 5. 첫 번째 직렬연접 길쌈부호의 비트오율

두 번째 직렬연접 길쌈부호에 대한 성능은 그림 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 두 번째 직렬연접 길쌈부호에서는 첫 번째 구조의 성능과는 달리 높은 Eb/No에서 반복복호를 5회 이상 수행하더라도 오류성능이 계속 향상되며 오류마루가 발생하지 않음을 알 수 있다.

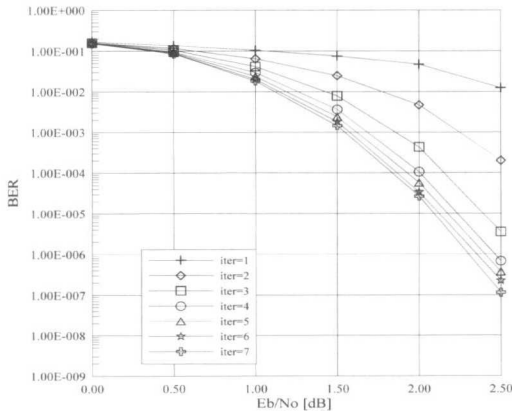


그림 6. 두 번째 직렬연접 길쌈부호의 비트오율

세 번째 직렬연접 길쌈부호에 대한 성능은 그림 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 세 번째 직렬연접 길쌈부호에서도 두 번째 형태의 성능처럼 높은

Eb/No에서 반복복호를 5회 이상 수행하더라도 오류 성능이 계속 향상되며 오류마루가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 Eb/No가 증가함에 따라 세 번째 직렬연접 길쌈부호의 성능향상 폭이 두 번째 직렬연접 길쌈부호보다 더 증가함을 알 수 있다.

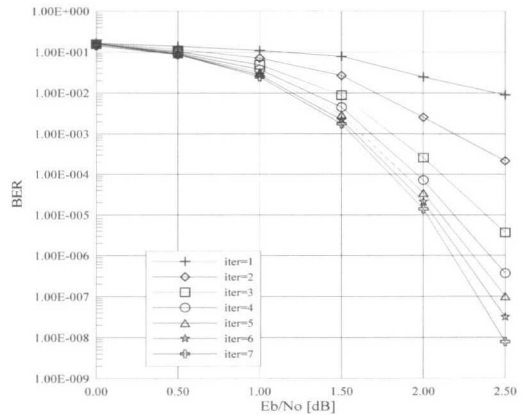


그림 7. 세 번째 직렬연접 길쌈부호의 비트오율

반복복호 횟수가 7회인 경우, 특정한 비트오율을 얻기 위해서 요구되는 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호에 대한 Eb/No는 표 1과 같다.

표 1. 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 성능 비교

BER	Type I [dB]	Type II [dB]	Type III [dB]
$10^{-3}$	0.90	1.55	1.60
$10^{-4}$	1.40	1.80	1.80
$10^{-5}$	2.00	2.10	2.05
$10^{-6}$	2.55	2.30	2.20

표에서 보는 바와 같이 낮은 신호 대 잡음비 영역에서는 상대적으로 가장 간단한 첫 번째 구조의 성능이 가장 우수하다. 그러나 높은 신호 대 잡음비 영역에서는 상대적으로 복잡한 구조를 가지는 세 번째와 두 번째 직렬연접 길쌈부호의 성능이 우수해짐을 알 수 있다.

AWGN 환경에서 세 가지 구조의 직렬연접 길쌈부호에 대한 상위경계(upper bound) 성능을 비교 및 분석하기 위하여 상위경계의 매개변수로 사용되는 최소거리(minimum distance)와 거리 스펙트럼을 모의실험을 통하여 구하였다.

일반적으로 길쌈부호에서 최소거리는 다음 식과 같이 정의되며, 이를 자유거리(free distance)라고 한다<sup>[17]</sup>.

$$d_{\min} = d_{free} = \min_{v \neq v'} [d_H(v, v')] \quad (8)$$

여기서  $d_{\min}$  과  $d_{free}$  는 최소거리와 자유거리를 나타내며,  $v$  는 출력부호어(codeword)를 나타낸다. 그리고  $d_H(v, v')$  는 출력부호어  $v$  와  $v'$  에 대한 해밍거리(Hamming distance)를 나타낸다. 길쌈부호에서는 식 (8)과 같은 자유거리를 부호기의 전달함수를 사용하여 구할 수 있다<sup>[17]</sup>. 그러나 병렬연접 길쌈부호나 직렬연접 길쌈부호 등과 같은 연접부호에서는 인터리버의 크기와 종류에 따라 최소거리가 다르기 때문에 모의실험을 통하여 자유거리와 거리 스펙트럼을 구한다<sup>[15],[18]</sup>.

제시된 세 가지 구조의 직렬연접 길쌈부호에 대한 자유거리와 거리스펙트럼을 구하기 위하여 사용된 인터리버 크기는 모의실험에 소요되는 시간을 고려하여 500으로 하였다. 전체 부호율이  $R$ 이고 인터리버 크기가  $N$ 인 병렬연접 길쌈부호에 대한 비트오율 상위경계는 다음과 같다<sup>[8],[14],[18],[19]</sup>.

$$P_b \leq \sum_{w=1}^N \sum_{d=d_{min}}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{w}{N} A_{w,d} Q\left(\sqrt{d \frac{RE_b}{N_o}}\right) \quad (9)$$

여기서

$$Q(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (10)$$

이며  $d$ 와  $w$ 는 출력부호어와 입력정보어의 해밍가중치(Hamming weight)이고  $A_{w,d}$ 는 가중치가  $w$ 인 입력정보어에 의해서 생성되는 가중치가  $d$ 인 출력부호어의 수를 나타낸다. 식 (9)를 이용하여 외부구성부호와 내부구성부호의 부호율이 각각  $R_o$ 와  $R_i$ 인 직렬연접 길쌈부호의 비트오율 상위경계를 구하면 다음 식과 같다<sup>[10],[12],[14]</sup>.

$$P_b \leq \sum_{d=d_{min}}^N \left( \sum_{w=1}^{NR_i} \frac{w}{NR_o} A_{w,d} \right) Q\left(\sqrt{d \frac{2RE_b}{N_o}}\right) \quad (11)$$

모의실험을 통하여 구한 세 가지 형태의 직렬연접 길쌈부호에 대한 거리 스펙트럼은 표 2와 같다.

여기서  $W_d$ 는 식 (11)의  $\sum_{w=1}^{NR_i} w A_{w,d}$ 와 같다. 표 2를

살펴보면 입력정보어의 가중치가 3일 때 첫 번째 구조의 자유거리는 9이고 두 번째 구조는 18, 그리고 세 번째 구조는 19임을 알 수 있다.

표 2. 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 거리 스펙트럼

Type I		Type II		Type III	
d	$W_d$	d	$W_d$	d	$W_d$
9	3	18	3	19	3
10	4	22	5	23	3
12	8	26	5	24	3
13	9	28	5	26	5

표 2에 나타난 결과를 식 (10)과 (11)에 대입하면 직렬연접 길쌈부호의 비트오율에 대한 상위경계를 구할 수 있다. 세 가지 구조의 직렬연접 길쌈부호에 대한 상위경계 성능이 그림 8에 나타나있다. 그림에서 점선은 상위경계 성능을 나타내며, 실선은 반복복호 횟수가 7회이고 인터리버 크기가 500일 때의 비트오율을 나타낸다. 거리 스펙트럼에서 자유거리에 의한 향이 상위경계 성능에 가장 큰 영향을 미치므로 그림에서는 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 자유거리만을 나타내었다.

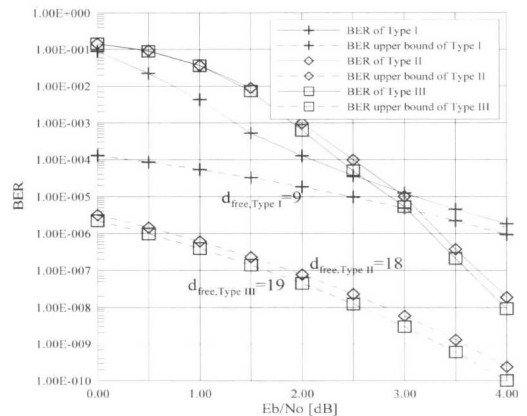


그림 8. 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 비트오율과 상위경계

그림에서 보는 바와 같이 자유거리가 클수록 직렬연접 길쌈부호의 상위경계 성능이 더 우수해짐을 알 수 있다. 그리고 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 비트오율 성능은 Eb/No가 증가할수록 상위경계 성능에 근접해짐을 알 수 있다. 그러므로 Eb/No와 반복복호 횟수를 증가하더라도 성능이 더 이상 향상

되지 않는 오류마루는 세 번째 직렬연접 길쌈부호에서 가장 늦게 발생할 것으로 사료된다.

### V. 결론

본 논문에서는 구성부호의 연결방식에 따라 세 가지 구조의 직렬연접 길쌈부호를 제시하고 그 성능을 모의실험을 통하여 비교 및 분석하였다. 그리고 거리 스펙트럼의 관점에서 세 가지 구조의 성능을 비교 및 분석하였다.

모의실험 결과 낮은 신호 대 잡음비 영역에서는 상대적으로 가장 간단한 첫 번째 구조의 성능이 가장 우수하였다. 그리고 높은 신호 대 잡음비 영역에서는 상대적으로 가장 복잡한 세 번째 구조의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다. 그리고 첫 번째 구조에서는 병렬연접 길쌈부호에서처럼 오류마루가 발생하는 데 비하여 두 번째 구조와 세 번째 구조에서는 오류마루가 나타나지 않았다. 이것은 두 번째와 세 번째 직렬연접 길쌈부호의 자유거리가 첫 번째 직렬연접 길쌈부호의 자유거리보다 상대적으로 더 크기 때문이다. 또한 자유거리가 가장 큰 세 번째 직렬연접 길쌈부호의 상위경계 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다. 그리고 신호 대 잡음비가 증가할수록 세 가지 직렬연접 길쌈부호의 비트오율 성능은 거리 스펙트럼으로 구한 상위경계 성능에 근접해짐을 알 수 있었다. 따라서 오류마루는 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호에서 가장 늦게 발생할 것으로 사료된다.

그러므로 첫 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호는 간단한 하드웨어의 특성을 살릴 수 있도록 상대적으로 잡음 및 오류 여유도가 있는 서비스에 응용이 가능하고, 세 번째 형태의 직렬연접 길쌈부호는 복잡한 하드웨어에도 불구하고 고품질이 요구되는 서비스에 적합할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.

[2] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear code for minimizing symbol error rate," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 20, no. 2, pp. 284-287, Mar. 1974.

[3] S. S. Pietrobon and A. S. Barbulescu, "A simplification of the modified Bahl decoding algorithm for systematic convolutional codes," *Proc. IEEE ISITA '94*, Sydney, Australia, pp. 1073-1077, Nov. 1994.

[4] P. Robertson, E. Villerun, and P. Hoeher, "A comparison of optimal and sub-optimal MAP decoding algorithms operating in log domain," *Proc. IEEE ICC '95*, Seattle, Washington, vol. 2, pp. 1009-1013, June 1995.

[5] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Soft-output decoding algorithms for continuous decoding of parallel concatenated convolutional codes," *Proc. IEEE ICC '96*, Dallas, Texas, vol. 2, pp. 112-117, June 1996.

[6] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Soft-output decoding algorithms in iterative decoding of turbo codes," *The TDA Progress report 42-124*, Pasadena, California, pp. 63-87, Feb. 15, 1996.

[7] J. Hagenauer, "The turbo principle: tutorial introduction and state of the art," *Proc. Int. Symp. on Turbo Codes and Related Topics*, Brest, France, pp. 1-11, Sep. 1997.

[8] 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.

[9] D. Divsalar and F. Pollar, "On the design of Turbo codes," *JPL TDA Progress Report 42-123*, Pasadena, California, pp. 99-121, Nov. 1995.

[10] S. Benedetto, G. Montorsi, D. Divsalar, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes: Performance analysis, design, and iterative decoding," *JPL TDA Progress Report*, Pasadena, California, vol. 42, pp. 1-26, Aug. 1996.

[11] S. Benedetto and G. Montorsi, "Serial concatenation of block and convolutional codes," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 887-888, May 1996.

[12] S. Benedetto, G. Montorsi, D. Divsalar, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes: Performance analysis, design, and

iterative decoding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 909-926, May 1998.

[13] A. Ambroze, G. Wade, and M. Tomlinson, "Iterative MAP decoding for serial concatenated convolutional codes," *Proc. IEE Commun.*, vol. 145, no. 2, pp. 53-59, Apr. 1998.

[14] B. Vucetic and J. Yuan, *Turbo Codes Principles and Applications*, Kluwer Academic, Mass., 2000.

[15] L. C. Perez, J. Seghers, and D. J. Costello, "A distance spectrum interpretation of Turbo codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, no. 6, pp. 1698-1709, Nov. 1996.

[16] S. Dolinar and D. Divsalar, "Weight distributions for turbo codes using random and nonrandom permutations," *The TDA Progress report 42-122*, Pasadena, California, pp. 56-65, Aug. 15, 1995.

[17] J. Rolf and Sh.Z. Kamil, *Fundamentals of Convolutional Coding*, IEEE Press, NJ., 1999.

[18] P. Robertson, "Illuminating the structure of parallel concatenated recursive systematic (turbo) codes," *Proc. IEEE Globecom'94*, San Francisco, California, pp. 1298-1303, Nov. 1994.

[19] A. J. Viterbi and J. K. Omura, *Principles of Digital Communication and Coding*, McGraw Hill Book Co., NY., 1979.

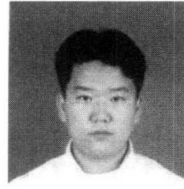
배 상 재(Sang-jae Bae) 정회원



1993년 2월 : 경북대학교  
전자공학과 졸업  
1995년 2월 : 경북대학교  
전자공학과 석사  
1995년 3월~현재 : 경북대학교  
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 터보부호, 다중레벨 부호변조, 이동통신, WCDMA.

이 상 훈(Sang-hoon Lee) 정회원



1999년 2월 : 경북대학교  
전자공학과 졸업  
2001년 2월 : 경북대학교  
전자공학과 석사  
2001년 3월~현재 : 경북대학교  
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 터보부호, 다중레벨 부호변조, 이동통신.

주 언 경(Eon-kyeong Joo) 중신회원



1976년 : 서울대학교 공과대학  
전자공학과 졸업(공학사)  
1984년 : 미국 Ohio State  
University 전기공학과  
졸업(M.S.)  
1987년 : 미국 Ohio State  
University 전기공학과  
졸업(Ph.D.)

1976년~1979년 : 해군통신전자 기술장교  
1979년~1982년 : 한국과학기술원 연구원  
1987년~현재 : 경북대학교 공과대학 전자전기공학부  
재직(교수)

<주관심 분야> : Digital Communication Systems, Coding and Decoding, Modulation and Demodulation, Digital Signal Processing for Communications.