論文97-34S-2-1

DVCR 시스템의 연집 오류 정정을 위한 클러스터 순환 프러덕트 부호

(A Clustered Cyclic Product Code for the Burst Error Correction in the DVCR Systems)

李 鐘 和 **, 劉 哲 雨 *, 康 昌 彦 *, 洪 大 植 *

(Jong-Hwa Lee, Cheol-Woo You, Chang-Eon Kang, and Dae-Sik Hong)

요 약

기존의 상용 DVCR 시스템에서는 채널 부호로 Reed-Solomon 프러덕트 채널 부호화 기법을 채택하여 사용하고 있다. 이 논문에서는 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력에 대한 개선된 하한을 제시하고 이 하한의 분석을 통해 기존의 순환 프러덕트 부호를 변형시킨 클러스터 순환 프러덕트 부호를 제안한다. 제안된 부호는 연집오류 정정능력을 향상시키기 위해 기존의 순환 프러덕트 부호에 클러스터 개념을 결합시킨 것으로써 인접한 몇 개의 부호 심볼들을 묶어 클러스터로 정의하고 이 클러스터를 부호 배열 전송의 새로운 기본 단위로 하여 기존 순환 프러덕트 부호의 부호 배열 전송 방식에 적용한다. 제안된 부호는 랜덤오류 정정능력에서의 성능저하 없이 연집오류 정정능력의 성능 향상을 나타내며 상용 DVCR 시스템에 적용하여 성능을 비교하였을 때도 기존의 부호화 기법들보다 향상된 성능을 나타낸다.

Abstract

In this paper, an improved lower bound on the burst-error correcting capability of the cyclic product code is presented and through the analysis of this new bound Clustered Cyclic Product (CCP abbr.) code is proposed. The CCP code, to improve the burst-error correcting capability, combines the idea of clustering and the transmission method of cyclic product code. That is, a cluster which is defined in this paper as a group of consecutive code symbols is employed as a new transmission unit to the code array transmission of cyclic product code. The burst-error correcting capability of the CCP code is improved without a loss in the random error correcting capability and performance comparison in the Digital Video Camera Records(DVCR) system shows the superiority of the proposed CCP code over conventional product codes.

I. 서 론

다경로 페이딩의 영향을 받는 이동통신 채널이나 자기기록 매체를 사용하는 자기기록 채널에서는 랜덤오류에 비해 연집오류에 의한 영향이 훨씬 지배적이다. 이러한 연집오류는 랜덤오류 정정 부호를 사용하여 정정하거나, 채널 보상기에 의해 적절하게 보상해주기가 어렵기 때문에 Reed-Solomon (이하 RS) 부호나 콘볼루셔널 부호에 연집오류의 정정을 위해 개발된 인터리빙 기법을 적용하여 연집오류 정정에 많이 사용하고 있다[2-4].

이 논문에서는 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력에 대해 기존에 제시된 수식을 수정하여 연집오류 정정능력에 대한 개선된 하한을 유도·제시하며, 제안된 수식을 통해 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력을 향상시킨 클러스터 순환 프러덕트 부호를 제안한다.

* 正會員, 延世大學校 電子工學科 情報通信研究室
(Yonsei Univ., Elec. Eng., Info. & Telecomm. Lab.)

** 正會員, 三星電子 半導體 Micro本部 LSI 技術設計팀
(Samsung Elec., Semi-conductor Micro Business, LSI Technology Design Team)

接受日字: 1996年9月5日, 수정완료일: 1997年1月9日

이 논문의 2 장에서는 기존의 프러덕트 부호와 순환 프러덕트 부호의 구성 및 오류 정정능력에 대해 살펴보고, 3 장에서는 기존에 제시된 연집오류 정정능력에 대한 하한을 수정·보완하여 연집오류 정정능력에 대한 보다 정확한 수식을 유도한다. 4 장에서는 이 논문의 주제인 클러스터 순환 프러덕트 부호를 제안하고, 3 장에서 유도된 연집오류 정정능력에 대한 수식을 제안된 부호화 기법에 맞게 다시 유도하여 제안된 부호화 기법의 연집오류 정정능력에 대해 살펴본다. 5 장에서는 제안된 부호화 기법과 기존의 부호화 기법들을 실험을 통해 비교·분석한다.

Ⅱ. 기존의 프러덕트 부호화 기법

프러덕트 부호는 인터리빙 기법과 연결 기법(concatenation)의 특성을 결합시킨 것으로서 내부(inner) 부호와 외부 (outer) 부호라 불리는 두 개의 부호를 적용시켜 부호 배열을 형성한다[3, 5].

프러덕트 부호에 사용된 두 개의 블록 부호를 각각

- C_1: $(n_1, k_1; d_{\min 1})$ – t_1 에러 정정 코드
- C_2: $(n_2, k_2; d_{\min 2})$ – t_2 에러 정정 코드

라고 하면 이 부호들로 구성되는 프러덕트 부호는 다음과 같은 랜덤오류와 연집오류 정정능력을 갖는 부호 C: $(n_1 n_2, k_1 k_2; d_{\min 1} d_{\min 2})$가 된다[3].

- 코드 C 의 랜덤에러 정정능력 : $t = \left\lfloor \frac{(d_{\min 1} d_{\min 2} - 1)}{2} \right\rfloor$ (1a)
- 코드 C 의 연집에러 정정능력 : $l \geq \max(n_1 t_2, n_2 t_1) \triangleq l_p$ (1b)

프러덕트 부호의 기본적인 데이터 전송 방식은 행 방향 또는 열 방향의 순차전송이다. 그러나 사용된 부호의 부호 길이가 서로 소 (relatively prime)일 때는 그림 1과 같은 데이터 전송 방식을 택할 수 있으며 이러한 부호 배열 전송 방식을 택하는 프러덕트 부호를 순환 프러덕트 부호 (cyclic product code)라고 부른다[6].

이 방식은 부호 배열의 우상단에서 시작하여 좌하의 대각선 방향으로 데이터를 전송하여 열 방향 부호의 마지막 행에 다다랐을 때 왼쪽 열의 첫행부터 대각선 전송을 다시 시작하며 행 방향 부호의 맨 첫열에 다다르면 다음 행의 마지막 열에서부터 대각선 전송을 시작한다. 따라서 부호의 길이가 서로 소일 때만 모든 데이터의 전송이 가능하다.

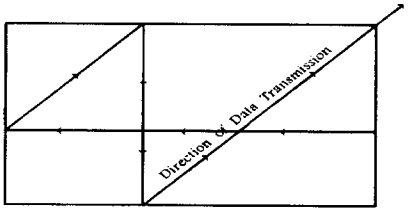


그림 1. 순환프러덕트 부호의 부호 배열 전송 방식
Fig. 1. Transmission method of a cyclic product code.

순환 프러덕트 부호에서 사용하는 전송 방식의 요점은 채널을 통과한 인접 수신 부호 심볼들이 같은 행과 열에 놓이지 않도록 (즉, 인접한 부호 심볼들이 부호 배열의 서로 다른 코셋 - coset - 에 위치하도록) 하는데 있다. 따라서 인접한 수신 부호 심볼들이 인접한 행과 열에 대각선으로 위치하면 시작위치와 대각선 진행 방향은 결과에 영향을 미치지 않으며, 이 논문에서는 편의상 좌상단에서 시작하여 우하 방향으로 전송하는 방식을 택한다.

기존 프러덕트 부호의 크로스 인터리빙과 순환 프러덕트 부호의 전송 방식 사이의 차이는, 기존 프러덕트 부호가 연집오류의 정정을 전적으로 외부 부호에 의존하게 되는 데 반해 순환 프러덕트 부호는 연집오류의 정정에 내·외부 부호가 모두 기능할 수 있도록 부호 배열을 전송한다는 데 있다.

기존 순환 프러덕트 부호의 정정능력은 아래와 같다[6].

- 랜덤에러 정정능력 : $t = \left\lfloor \frac{(d_{\min 1} d_{\min 2} - 1)}{2} \right\rfloor$ (2a)
- 연집에러 정정능력 : $l \geq \max(n_1 t_2 + l_1, n_2 t_1 + l_2)$ (2b)

여기서 l_1, l_2는 각각 부호 C_1과 C_2의 연집오류 정정능력으로써 이레이져 복호를 적용하지 않으면 t_1, t_2와 같다.

랜덤오류와 연집오류가 동시에 존재하는 결합오류의 경우 기존의 프러덕트 부호는 내부 부호가 연집오류 발생 부분 이외의 랜덤오류를 정정하고 외부 부호가 연집오류의 정정을 행하게 된다. 따라서 정정 한계 이내의 연집오류가 발생하는 경우 랜덤오류가 내부 부호의 정정능력 내에 있으면 이 두 가지 오류를 모두 정

정할 수 있다. 그러나 순환 프러덕트 부호에서는 연집오류가 정정 한계 이내인 경우에도 랜덤오류가 부호 배열 상에 분산 배열된 연집오류들 사이에 존재하여 연집오류를 정정할 수 없게 만들 수 있어 결합오류(combined error)에 대해서는 기존 프러덕트 부호에 비해 비효율적인 단점이 있다.

Ⅲ. 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정 능력에 대한 개선된 하한의 유도

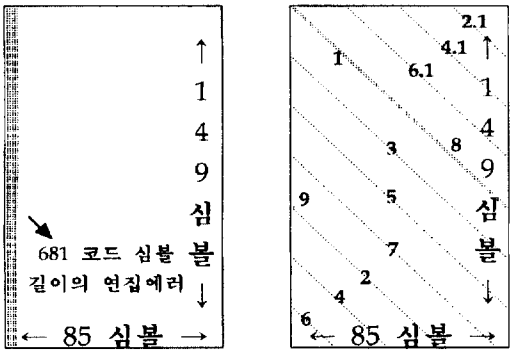
식 (2b)로 주어지는 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력은 부호 배열 내의 임의의 위치에 발생해도 정정 가능한 단일 연집오류의 최대 길이에 대한 하한을 제시하고 있다.

부호 배열 상의 연집오류 배열이 사용된 부호의 정정능력과 부호 길이 및 연집오류의 길이에 따라 여러 가지 상황을 만들어내기 때문에 순환 프러덕트 부호의 정확한 연집오류 정정능력은 사용된 부호의 정정능력과 부호 길이에 따라 다른 방식에 의해 산출되어야 한다. 식 (2b)는 이러한 여러 가지 경우에 대한 정확한 연집오류 정정능력의 산출을 대신해서 단순히 이 여러 가지 경우에 모두 적용할 수 있는 최소 하한으로서의 연집오류 정정능력만을 제시한다. 그러나, 채널을 통과하면서 삽입된 연집오류가 순환 프러덕트 부호에 의해 부호 배열에 배열되는 여러 가지 패턴을 분석하면 정정 가능한 연집오류의 최대 길이에 대한 정확한 수식을 유도할 수 있으며 이것은 부호의 연집오류 정정능력에 대한 상한이 된다.

그림 2에 행 방향으로 C_1: (85, 77) − 4 에러 정정의 내부 부호, 열 방향의 외부 부호로 C_2: (149, 138)−5 에러 정정 부호를 적용하여 기존의 순환 프러덕트 부호를 구성하고 이 부호에 681 부호 심볼 길이의 연집오류를 발생시켰을 때, 기존 프러덕트 부호 (a)와 순환 프러덕트 부호 (b)에서의 오류패턴을 나타내었다. 편의상 좌상단에서부터 연집오류가 배열되도록 하였는데 부호 배열의 어느 위치에서 연집오류가 시작되어도 부호의 순환 특성에 의해 오류패턴을 좌상단의 위치로 이동시킬 수 있으므로, 이 배열에 대한 분석을 부호 배열 내의 임의의 위치에서부터 시작되는 연집오류에 대해 적용하여도 일반성을 잃지 않는다.

그림 2(b)에서 대각선 형태로 연집오류 8이 배열되면 이전에 배열된 연집오류 중 대각선 2, 4, 6을 제외한 부분이 내부 부호의 정정능력을 넘게 되어 내부 부호 복호 후에도 정정되지 않고 남게 된다. 이러한 연집오류는 외부 부호의 복호에서 정정되는데 그림 2(b)에서 대각선 9 이후로 연집오류가 배열되면 외부 부호의 복호 후에도 정정되지 않고 남는 연집오류가 발생하게 된다.

결국, 순환 프러덕트 부호가 정정할 수 있는 연집오류의 최대 길이는 연집오류의 길이가 내부 부호 방향으로 내부 부호의 정정능력 한계를 넘는 전·후의 오류패턴을 분석하므로써 구할 수 있다.



(a)프러덕트 (b) 순환프러덕트

그림 2. 기존 프러덕트 부호와 순환 프러덕트 부호의 배열 방식

Fig. 2. Comparison of the transmission methods.

내·외부 부호로 C_1: (n_1, k_1, d_{min1}) − t_1 오류 정정 부호와 C_2: (n_2, k_2, d_{min2}) − t_2 부호를 사용한다고 할 때, 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력을 정확하게 유도하기 위해 다음과 같이 몇 개의 변수를 정의한다.

$$\cdot n_{interval} = n_1 - (n_2 \bmod n_1) \tag{3}$$

$$\cdot n_{inner} = \left\lfloor \frac{n_2 \cdot t_1}{n_1} \right\rfloor \tag{4}$$

$$\cdot n_{piled} = \left\lfloor \frac{(n_{inner}+1) \cdot n_1}{n_2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{(\left\lfloor \frac{n_2 \cdot t_1}{n_1} \right\rfloor + 1) \cdot n_1}{n_2} \right\rfloor \tag{5}$$

식 (3)의 $n_{interval}$은 연집오류가 대각선으로 재배열되면서 부호 배열을 외부 부호 방향으로 한바퀴 돌아 같은 내부 부호워드에 다시 놓일 때 이전에 그 부호워드에

배열된 오류 심볼과 현재 배열될 오류 심볼 사이의 거리를 나타낸다. 그림 2(b)에서는 대각선 1과 2.1의 첫 행에서의 거리로 우상단의 모서리로부터 첫 번째 행의 마지막 오류 심볼까지의 거리인 17 심볼과 같다.

식 (4)의 n_{inner}는 연집오류가 내부 부호의 정정능력을 넘어서기 직전까지 배열되었을 때 부호 배열에 배열된 n_1 길이의 대각선 수를 나타낸다. 그림 2(b)의 1부터 7까지의 대각선이 배열된 상태에서는 모든 내부 부호의 오류 패턴이 4개씩의 오류 심볼을 포함하고 있음을 알 수 있는데 이 상태가 연집오류가 내부 부호의 정정능력을 넘어서기 직전이며 따라서 n_{inner}는 7이다.

식 (5)의 n_{piled}는 연집오류가 내부 부호의 정정능력을 넘어서기 직전까지 배열되었을 때 연집오류가 부호 배열을 외부 부호 방향으로 몇 회 반복해서 지나갔는지를 나타내며 이것은 내부 부호에서 보았을 때 내부 부호가 정정해야할 오류 심볼의 수를 의미하게 된다. 즉 대각선 1~7을 배열하는 동안 다음과 같이 길이가 n_2인 4개의 연집오류 군이 생긴다.

- i 군 : 대각선 1, 2
- ii 군 : 대각선 2.1, 3, 4
- iii 군 : 대각선 4.1, 5, 6
- iv 군 : 대각선 6.1, 7

모든 내부 부호워드가 위의 4개 연집오류 군에서 각기 하나씩의 대각선을 포함하게 되어 결국 내부 부호 방향으로 4개씩의 오류 심볼이 배열됨을 알 수 있다.

그림 2(b)에서 대각선 8이 배열되기 시작하면 내부 부호 방향으로 배열되는 오류 심볼이 내부 부호의 정정능력을 넘기 시작하고 내부 부호의 복호에 의해 정정되지 않고 남는 오류가 발생한다. 정정 가능한 연집오류의 최대 길이는 내부 부호의 복호 후에 남는 오류가 외부 부호 방향으로 외부 부호의 정정능력과 정확히 같은 길이가 되었을 때로 결정되며 이러한 상황을 정의하기 위해 다음 식 (6)과 같은 관계식을 세울 수 있다.

$$\begin{cases} n_{extend} \cdot (n_{piled}+1) + n_{tail} = t_2 \\ 0 \le n_{tail} \le n_{piled} \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)의 n_{extend}는 내부 부호의 복호 후 외부 부호에 의해 정정되어야 하는 연집오류의 길이와 관련된 변수이다. 이것은 내부 부호의 정정한계를 넘는 순간부터 내부 부호의 복호 후 외부 부호가 정정할 수 없는 양의 오류가 남기 직전까지 연장 가능한 연집오류의 길이가 되며 n_1 길이의 대각선 수로 나타낸다. 즉, 대각선 8이 배열되기 시작하면 이전에 정정능력 내에 있던 n_{piled} 개의 대각선을 모두 정정할 수 없게 되는데 8 이후의 대각선들이 모두 이러한 상황을 만들어 낸다. 따라서, 대각선 8 이후로 n_{extend} 개의 대각선 연집오류가 더 배열되면 이전의 n_{piled} 개 대각선과 현재 배열되는 대각선을 합해 외부 부호 방향으로 $n_{extend} \times (n_{piled}+1)$ 개의 오류 심볼이 나타나게 된다.

n_{tail}은 이전까지 배열된 대각선의 지형과 관련된 변수로서 연집오류를 완전히 정정할 수 있을 때 연집오류 끝부분의 심볼이 내부 부호 방향에서 보았을 때 이전에 배열된 몇 개의 대각선과 동일 부호워드에 놓일 수 있는 지를 계산하는 데 사용된다. 즉, 식 (6)에서 $n_{extend} \times (n_{piled}+1)$이 t_2와 정확히 같지 않은 경우는 아직 외부 부호 방향으로 연집오류를 더 배열할 여지가 남아있다는 의미가 되며 n_{tail}은 이것을 정확히 계산하는데 사용한다.

식 (6)을 만족시키는 변수 n_{tail}과 가장 큰 n_{extend} 값에 의해 다음 식 (7)과 같이 기존 순환 프리덕트 부호로 정정 가능한 연집오류의 최대 길이 l_{cp}가 구해진다.

i) $2 \cdot n_{interval} < n_1$ 인 경우

$$l_{cp} = (n_{inner}+1+n_{extend}) \cdot n_1 - (n_{piled}-n_{tail}) \cdot n_{interval} \quad (7a)$$

ii) $2 \cdot n_{interval} \ge n_1$ 인 경우

$$l_{cp} = (n_{inner}+n_{extend}) \cdot n_1 + (n_1 - n_{interval}) \cdot (n_{tail}+n_{piled}) \quad (7b)$$

iii) $t_1 = 0$과 $n_{piled} = 0$ 인 경우

$$l_{cp} = n_1 \cdot t_2 + t_1 \quad (7c)$$

i)의 경우는 연집오류가 배열될 때 대각선 오류 패턴이 우상에서 좌하 방향으로 겹쳐나가는 경우이며, ii)의 경우는 대각선 오류패턴이 좌하에서 우상 방향으로 겹쳐나가는 경우로 n_{tail}이 이전에 배열된 대각선들과 겹치는 지형적 특성이 서로 달라지므로 연집오류 길이의 계산 방식에 서로 차이가 있다. iii)의 경우는 연집오류의 배열이 부호 배열을 1순회 (巡廻) 하기 전에 외부 부호 방향의 오류 배열이 외부 부호의 정정능력 한계

에 도달하기 때문에 연집오류의 정정을 전적으로 외부 부호에 의존해야 하는 경우로써 식 (2b)에 나타난 정정능력의 하한과 같게 된다.

이 방식에 따라 앞에서 예로 든 기존의 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력을 구하면 681 부호 심볼이 된다. 식 (2b)에 의해 주어지는 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력에 대한 하한 149·4+5=601 부호 심볼을 이 절에서 유도한 수식에 따른 정확한 연집오류 정정능력 681 부호 심볼과 비교하면 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이 수치상의 차이는 순환 프러덕트 부호가 기존의 프러덕트 부호에서 랜덤오류의 정정에 사용되었던 내부 부호의 정정능력을 연집오류를 정정하는데 사용할 수 있도록 오류패턴을 배열하는데 기인하며, 동시에 같은 이유로 인해 순환 프러덕트 부호의 결합오류에 대한 연집오류 정정능력은 연집오류만 존재할 때보다 성능이 떨어지게 된다.

식 (7)을 보면 n_{inner} 또는 n_{extend}를 증가시키므로써 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 부호 길이를 변경하지 않고 n_{inner}를 증가시키기 위해서는 식 (4)에서 내부 부호의 정정능력 (t_1)을 증가시켜야 하는데 이것은 정보 용량의 감소를 의미하므로 고려대상으로 적합하지 않다. 연집오류 정정능력을 증가시키기 위한 또하나의 방법으로 사용된 부호의 변경없이 식 (6)의 n_{extend}를 증가시키는 것이 이 논문에서 제안하는 새로운 부호화 기법이다.

Ⅳ. 클러스터 순환 프러덕트 부호

식 (6)에서 n_{extend}를 증가시키기 위해서는 식 (5)의 n_{piled}를 감소시켜야 한다. 이 논문의 핵심은 부호 설정의 변경없이 순환 배열 개념에서 본래의 내부 부호가 더 짧은 부호워드 길이를 갖는 형태가 되도록 연집오류를 배열하므로써 식 (5)의 n_1을 감소시켜 n_{piled}의 감소를 얻고 결과적으로 n_{extend}의 증가와 연집오류 정정능력의 증가를 얻는 데 있다.

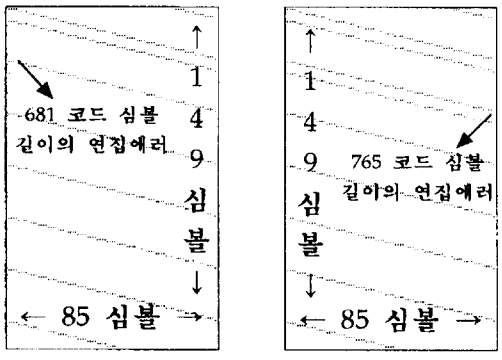
내부 부호 방향에서 보았을 때 연속하는 몇 개씩의 심볼들을 하나의 단위로 묶고 이 단위를 클러스터(cluster)라고 정의한다. 이 클러스터 단위를 기본으로 기존의 순환 프러덕트 부호의 배열 방식을 적용하게 되면 부호 배열은 내부 부호의 길이가 $\left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil$ 인 순환 프러덕트 부호를 배열했을 때와 동일한 형태로 나타난다. 차이점은 클러스터가 기본 단위이므로 각 클러스터는 기존의 순환 프러덕트 부호에서와 마찬가지로 대각선 방향으로 위치하지만 클러스터 내의 부호 심볼들은 동일한 행에 위치하게 된다는 데에 있다. 즉, 클러스터의 배열은 기존의 순환 프러덕트 부호의 배열 형태가 되나 부호 심볼들은 결과적으로 계단식 배열을 이루게 된다. 이 배열 방식이 기본 단위로써 부호 심볼들의 묶음인 클러스터를 사용하고 기존 순환 프러덕트 부호와 동일한 배열 방식을 택하므로 이 부호를 클러스터 순환 프러덕트 부호 (Clustered Cyclic Product code - 이하 CCP 부호)라고 정의한다.

이 방식을 따르면 내부 부호가 순환 프러덕트 부호의 개념에서 보았을 때 $\hat{t}_1 \triangleq \left\lfloor \frac{t_1}{n_{cluster}} \right\rfloor$ cluster 정정 부호가 되는데 내부 부호의 길이 역시 $\hat{n}_1 \triangleq \left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil$ cluster가 되므로 식 (4)의 n_{inner}는 다음 식에서 볼 수 있듯이 크게 감소하지 않는다.

$$\hat{n}_{inner} = \left\lfloor \frac{n_2 \cdot \hat{t}_1}{\hat{n}_1} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n_2 \cdot \left\lfloor \frac{t_1}{n_{cluster}} \right\rfloor}{\left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil} \right\rfloor \approx \left\lfloor \frac{n_2 \cdot t_1}{n_1} \right\rfloor \quad (8)$$

결국, 제안된 CCP 부호는 부호 설정의 변경없이 연집오류가 내부 부호의 랜덤오류 정정능력 내에 기존 순환 프러덕트 부호에서보다 효율적으로 배열될 수 있도록 기존 순환 프러덕트 부호의 배열 방식을 수정한다.

3 장에서 예로 든 부호를 $n_{cluster}$ = 4인 CCP 부호로 바꾸고 채널에서 그림 2에서처럼 681 부호 심볼 길이의 단일 연집오류가 삽입되었다고 할 때 CCP 부호에 의해 배열된 연집오류를 그림 3(a)에 나타내었다. 그림 3(b)는 이 CCP 부호의 연집오류 정정능력인 765 부호 심볼 길이의 연집오류를 삽입하였을 때의 연집오류 배열을 나타낸 것이다. 그림 2(b)와 그림 3(a)를 비교하면 제안된 CCP 부호가 내부 부호의 랜덤오류 정정능력을 연집오류 정정에 보다 효율적으로 이용하기 위해 연집오류를 내부 부호 방향으로 어떻게 분산 배열하는지 알 수 있을 것이다.



(a) 그림 2에서의 연집에러 (b) 정정가능한 최대 연집에러

그림 3. 제안된 CCP 부호의 배열 방식
Fig. 3. Code arrangement of the proposed CCP code.

CCP 부호는 내부 부호로 부호 길이가 $\left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil$ 이고 정정능력은 $\left\lfloor \frac{t_1}{n_{cluster}} \right\rfloor$ 인 부호를 사용하는 순환 프러덕트 부호로 볼 수 있다. 앞에서 보았듯이 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력이 n_{inner}와 n_{extend}에 의해 크게 좌우되기 때문에 CCP 부호는 $\left\lfloor \frac{t_1}{n_{cluster}} \right\rfloor$ 를 0으로 하지 않으면서 최소의 $\left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil$ 를 결정하는 $n_{cluster}$ 값에 의해 최대치를 갖게 되고 이 조건은 $n_{cluster} = t_1$ 일 때 만족된다.

3 장에 정리된 연집오류 정정능력의 정확한 유도식을 CCP 부호에 적용하여 수정한 결과를 식 (9)~(15)에 정리하였다.

$$\cdot \tilde{n}_1 = \left\lceil \frac{n_1}{n_{cluster}} \right\rceil \cdot \tilde{t}_1 = \left\lfloor \frac{t_1}{n_{cluster}} \right\rfloor \quad (9)$$

$$\cdot n_{gap} = (n_1 \bmod n_{cluster}) \quad (10)$$

$$\cdot n_{interval} = \tilde{n}_1 - (n_2 \bmod \tilde{n}_1) \quad (11)$$

$$\cdot n_{inner} = \left\lfloor \frac{n_2 \cdot \tilde{t}_1}{\tilde{n}_1} \right\rfloor \quad (12)$$

$$\cdot n_{piled} = \left\lfloor \frac{(n_{inner}+1)\cdot \tilde{n}_1}{n_2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{(\left\lfloor \frac{n_2 \cdot \tilde{t}_1}{\tilde{n}_1} \right\rfloor +1)\cdot \tilde{n}_1}{n_2} \right\rfloor \quad (13)$$

$$\begin{cases} n_{extend} \cdot (n_{piled}+1) + n_{tail} = t_2 \\ 0 \le n_{tail} \le n_{piled} \end{cases} \quad (14)$$

i) $2 \cdot n_{interval} < \tilde{n}_1$ 인 경우

$$(n_{inner}+1+n_{extend}) \cdot n_1 - (n_{piled} - n_{tail}) \cdot n_{interval} \cdot n_{cluster} - n_{gap} \le l_{ccp} \le (n_{inner}+1+n_{extend}) \cdot n_1 - (n_{piled} - n_{tail}) \cdot n_{interval} \cdot n_{cluster} \quad (15a)$$

ii) $2 \cdot n_{interval} \ge \tilde{n}_1$ 인 경우

$$(n_{inner}+n_{extend}) \cdot n_1 + (\tilde{n}_1 - n_{interval}) \cdot (n_{tail}+n_{piled}) \cdot n_{cluster} - n_{gap} \le l_{ccp} \le (n_{inner}+n_{extend}) \cdot n_1 + (\tilde{n}_1 - n_{interval}) \cdot (n_{tail}+n_{piled}) \cdot n_{cluster} \quad (15b)$$

iii) $t_1 = 0$과 $n_{piled} = 0$ 인 경우

$$l_{ccp} = n_1 \cdot t_2 + t_1 \quad (15c)$$

내부 부호의 부호 길이 n_1이 클러스터 길이 $n_{cluster}$의 배수이면 (이 경우 $n_{gap} = 0$이다.) 식 (15a)와 식 (15)b는 연집오류 정정능력의 상·하한 표현으로 나타나지 않고 3 장의 식 (7a)와 식 (7b)처럼 등식으로 나타난다. 이 수정식에 따라 3 장에 예로 든 부호 설정으로 클러스터 크기가 4인 CCP 부호를 구성하여 연집오류 정정능력을 구하면 최대 765 부호 심볼이 되며 3 장에서 계산된 기존 프러덕트와 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력 601, 681 부호 심볼과 비교하면 각각 164, 84 부호 심볼만큼의 연집오류 정정능력 증가를 얻었음을 알 수 있다.

V. 실험 결과 및 분석

DVCR 시스템의 Video 데이터 프러덕트 부호 규격을 바탕으로 실험에 사용할 8개 부호의 부호 설정과 논문에서 유도한 방식에 따른 연집오류 정정능력을 표 1에 정리하였다.

부호 1, 2, 3은 각각 이레이져 복호를 적용하지 않은 기존 프러덕트 부호, 기존 순환 프러덕트 부호, 클러스터 4의 CCP 부호이며, 부호 4, 5, 6은 각각 부호 1, 2, 3에 이레이져 복호를 적용한 부호이다. 부호 7, 8은 내부 부호의 부호 길이가 각각 85, 149인 경우에 이레이져 복호를 적용할 때 최대의 연집오류 정정능력을 갖는 CCP 부호이며 부호 5~8의 이레이져 복호는 부호 심볼 또는 채널 심볼 단위의 이레이져 선언이 가능하다는 가정 하에 적용하였다. 이레이져 복호를 적용하지 않으면 클러스터 4의 CCP 부호가 가장 큰 연집오류 정정능력을 갖는다. CCP 부호의 연집오류 정정능력이

기존의 부호화 기법에 비해 훨씬 향상되어있으며 이레이져 복호를 적용하는 경우 기존 프러덕트 부호에 비해 연집오류 정정능력에서 최대 168.72%의 성능 향상(부호 8)을 얻는 것이 가능하다.

표 1. 코드 설정 및 연집에러 정정능력
Table 1. Code configuration and the burst-error correcting capability.

코드 색인	코드규격 내부|외부	클러스터 크기	전송 방식	이레이져 복호		연집에러 정정능력
				내부 코드	외부 코드	
코드 1	(149, 138) (85, 77)	·	프러덕트	×	×	4808 bits 601 심볼
코드 2	(85, 77) (149, 138)	·	순환 프러덕트	×	×	5448 bits 681 심볼
코드 3	(85, 77) (149, 138)	4	CCP	×	×	6120 bits 765 심볼
코드 4	(149, 138) (85, 77)	·	프러덕트	×	○	9576 bits 1197 심볼
코드 5	(85, 77) (149, 138)	·	CCP	○	○	9872 bits 1234 심볼
코드 6	(85, 77) (149, 138)	4	CCP	○	○	11560 bits 1445 심볼
코드 7	(149, 138) (85, 77)	11	CCP	○	○	12008bits 1501심볼
코드 8	(85, 77) (149, 138)	8	CCP	○	○	12920 bits 1615 심볼

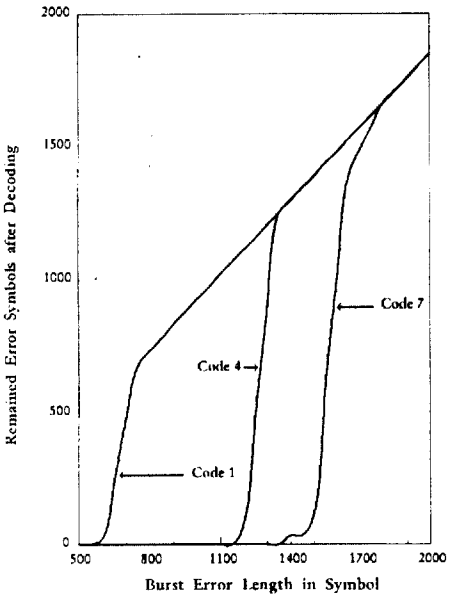


그림 4. A 코드굴의 연집오류길이 대 성능비교
Fig. 4. Burst-error length vs. performance of group A codes.

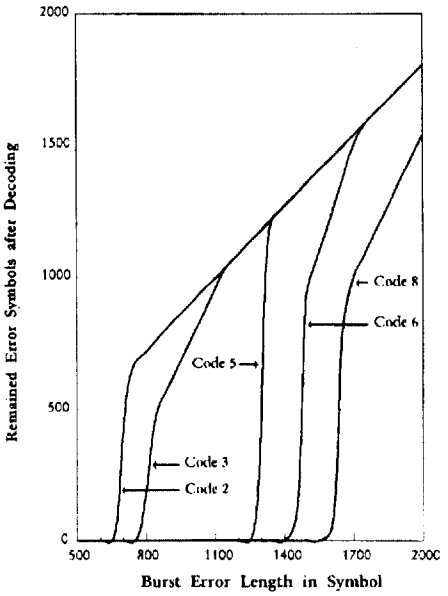


그림 5. B 코드군의 연집오류 길이 대 성능 비교
Fig. 5. Burst-error length vs. performance of group B codes.

그림 4와 그림 5에 단일 연집오류를 인가하여 부호의 성능을 실험한 결과를 나타내었다. 부호 배열 내의 무작위 위치에서 시작하는 단일 연집오류를 발생시키고 부호의 복호 후에 남은 오류를 계산하며 연집오류의 길이를 500 부호 심볼부터 2000 부호 심볼까지 50 부호 심볼씩 증가시키면서 실험하고 랜덤오류는 삽입하지 않는다.

그림 4는 내부 부호의 길이가 149 부호 심볼인 부호 1, 4, 7 (A 부호군)에 대한 성능 곡선을 나타내고 있으며, 그림 5는 내부 부호의 길이가 85 부호 심볼인 부호 2, 3, 5, 6, 8 (B 부호군)에 대한 성능 곡선을 나타낸다.

그림 4와 그림 5에서 각 부호의 복호 후 정정되지 않은 오류가 남기 시작할 때의 연집오류 길이를 보면 표 1의 수치와 정확히 일치함을 확인할 수 있으며 논문에서 유도된 순환 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력에 대한 유도식이 연집오류 정정능력에 대해 기존의 수식보다 정확한 척도를 제시하고 있음을 알 수 있다.

각 성능 곡선은 곡선이 꺾이는 점을 기준으로 곡선을 부호의 복호 성능에 따라 3개의 영역으로 나눌 수 있으며 그림 6에 그림 4의 A 부호군에서 부호 4, 그림 5의 B 부호군에서 부호 3을 뽑아 영역 구분의 예를 들었다.

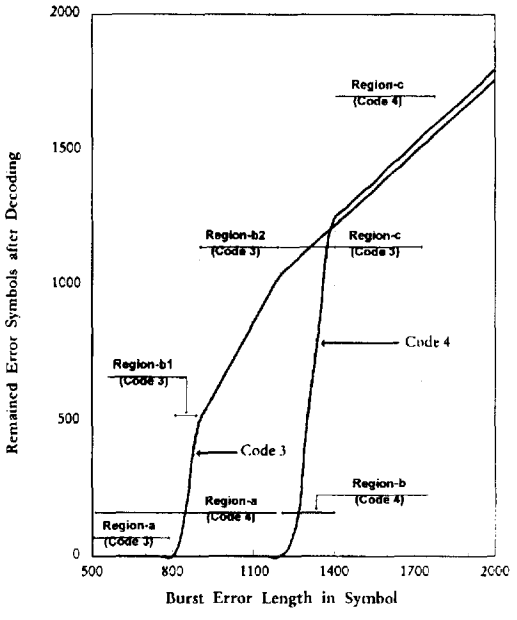


그림 6. 연집에러 정정능력에 따른 영역 구분
Fig. 6. Division of regions according to burst-error correctring capability.

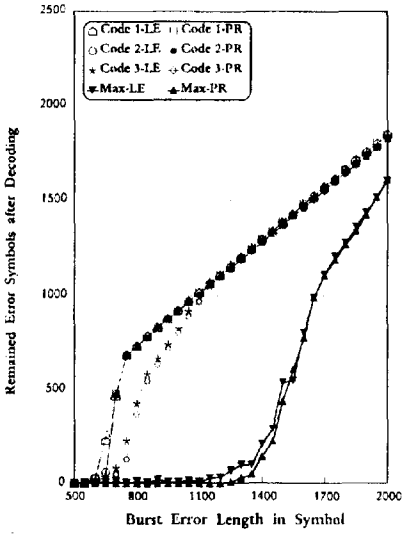


그림 7. PW_{50}/T=2.0 E_b/N_o=18dB
Fig. 7. Error-correcting performance in the DVCR system.

첫 번째 영역 (영역-a)은 삽입된 연집오류가 완전히 정정되는 경우로써 표 1에 나타난 부호의 연집오류 정정능력과 직접적인 연관을 갖는다. 두 번째 영역 (영역-b)은 삽입된 오류의 일부만 정정되어 복호 후 삽입된 연집오류의 일부가 남는 경우이고 마지막 세 번째 영역 (영역-c)은 연집오류가 부호의 정정한계를 훨씬 넘어 삽입된 오류가 정정되지 않고 모두 남는 경우이다.

아래에 DVCR 시스템을 구성하고 기존의 프러덕트 부호와 CCP 부호를 채널 부호로 사용하였을 때의 결과를 비교한다. 채널 보상기로는 선형 보상기와 PR-IV 부분응답 보상기를 사용하며, 자기 기록 시스템의 기록 밀도를 중밀도 2.0과 고밀도 3.0으로 설정하였을 때 채널의 신호대 랜덤오류비 E_b/N_o와 임의로 삽입된 연집오류의 길이를 변화시켜가며 성능을 실험한다.

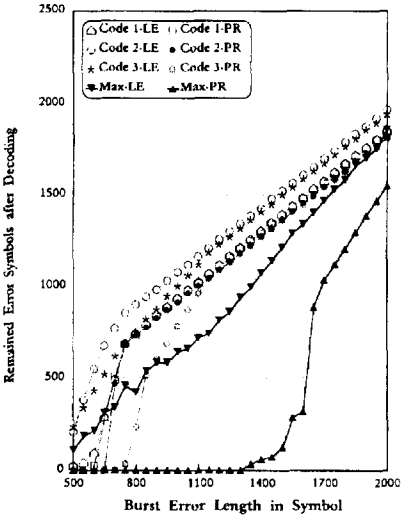


그림 8. PW_{50}/T=2.0 E_b/N_o=15dB
Fig. 8. Error-correcting performance in the DVCR system.

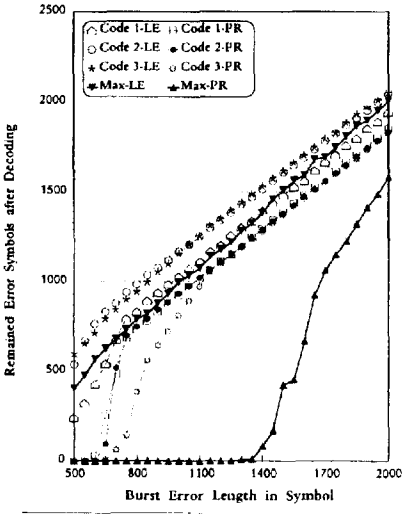


그림 9. PW_{50}/T=3.0 E_b/N_o=18dB
Fig. 9. Error-correcting performance in the DVCR system.

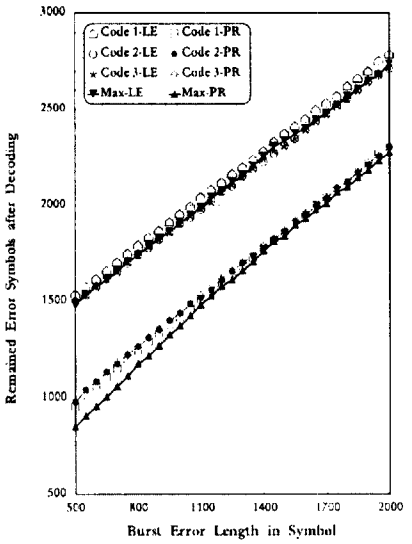


그림 10. PW_{50}/T=2.0 E_b/N_o=15dB
Fig. 10. Error-correcting performance in the DVCR system.

그림 7~10에 DVCR 시스템에 기존의 프러덕트 부호와 부호 6을 적용하고, 여러 가지 단일 연집오류를 첨가하였을 때의 성능을 비교한 결과를 나타내었다. 실험에 사용된 부호는 이레이져를 적용하지 않은 기존 프러덕트 부호, 순환 프러덕트 부호와 클러스터 4의 CCP 부호이며, 최대의 정정능력을 나타내는 부호 8도 비교를 위해 추가하였다.

3 장에서 CCP 부호와 순환 프러덕트 부호가 부호의 랜덤오류 정정능력 일부를 연집오류 정정에 사용하여 연집오류 정정능력을 향상시키기 때문에 랜덤오류와 연집오류가 동시에 존재하는 결합오류에 약한 단점을 갖고 있음을 언급한 바 있다. 표 2에 각 환경에서 부호의 복호 전에 랜덤오류가 어느 정도 삽입되었는 지 BER을 정리하였다.

표 2. DVCR 시스템 환경에서의 랜덤에러 BER 특성
Table 2. The BER property of random errors in a DVCR system.

	기록밀도 = 2.0		기록밀도 = 3.0	
	Eb/No 18dB 그림.7	Eb/No 15dB 그림.8	Eb/No 18dB 그림.9	Eb/No 15dB 그림.10
선형보상기	3.5×10^{-4}	1.8×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.4×10^{-2}
PR-IV보상기	0	0	1.7×10^{-4}	6.5×10^{-3}
PRML보상기	0	0	0	1.2×10^{-3}

기존의 프러덕트 부호인 부호 1, 4가 랜덤오류의 영향을 거의 받지 않는데 반해, CCP 부호들은 랜덤오류의 존재에 의한 성능 저하를 나타내며 PR-IV 보상기와 결합하여 사용할 때보다 채널 보상 능력이 떨어지는 선형 보상기와 결합하였을 때의 성능 저하가 훨씬 심하다. 그림 7에서는 두 보상기에 대해 두 부호의 정정능력에서 약 100~400 심볼 정도의 성능 차이가 나타나고 있다.

그림 7과 그림 8에서 선형 보상기와 결합한 부호 6의 성능을 비교하여 보면 랜덤오류의 BER 3.5×10^{-4}에서 1.8×10^{-3}으로의 변화에 정정능력이 급격히 떨어졌음을 볼 수 있는데, 부호 1은 그림 7~9에서 랜덤오류에 의해 그다지 큰 성능 저하를 나타내지 않는다. 그림 10에 나타난 것처럼 랜덤오류 BER이 더 악화되어 기존 프러덕트 부호가 랜덤오류의 영향을 무시할 수 없게 되는 환경에서는 부호들의 성능 차이가 거의 없다.

앞에서 언급한 것처럼 채널 보상기는 랜덤오류의 보상에는 우수한 성능을 보이지만 연집오류를 제대로 보상해 주지 못하며, 이 논문에서 제안된 CCP 부호는 결합오류에 약한 단점이 있다. 그러나, 표 2에 나타낸 PRML 보상기처럼 부호의 복호 전에 랜덤오류를 적정 수준까지 낮출 수 있는 우수한 채널 보상기를 사용하여 CCP 채널 부호의 결합오류에 대한 단점을 보완해 주므로써 연집오류가 지배적인 DVCR 시스템에 CCP 부호를 효과적으로 적용시킬 수 있을 것이다.

VI. 결 론

이 논문에서는 프러덕트 부호의 연집오류 정정능력을 향상시키기 위해 기존의 순환 프러덕트 부호에 클러스터 개념을 적용한 클러스터 순환 프러덕트 부호를 제안하고 순환 프러덕트 부호의 정확한 연집오류 정정능력을 유도·제시하였다.

제시된 연집오류 정정능력에 대한 수식은 실험에서 기존의 수식에 비해 훨씬 정확한 척도를 제시하고 있음을 확인하였다. 실험에 사용된 (149, 138) RS 부호와 (85, 77) RS 부호로 구성된 프러덕트 부호를 기준으로 하였을 때, 새로 제안된 CCP 부호는 랜덤오류에 대해서는 기존의 부호화 기법들과 동일한 성능을 보여주었으며, 연집오류에 대해서는 결합오류에 대한 성능 분석을 제외할 때 기존의 프러덕트 부호화 기법에 비

해 훨씬 향상된 성능을 보여주었다.

결합오류에서의 성능은 랜덤오류의 존재에 의해 연집오류 정정능력이 떨어지는 단점을 갖고 있지만, DVCR 시스템에 CCP 부호를 적용하여 실험한 결과 채널 보상기처럼 부호의 복호 전에 랜덤오류의 BER을 적정 수준으로 낮춰줄 수 있는 효율적인 신호처리기법과 결합하여 사용하므로써 CCP 부호의 연집오류 정정능력을 보장해 줄 수 있음을 알 수 있다. 실제의 상용 DVCR 시스템에서는 채널 보상기에 의해 채널 부호화기 이전의 랜덤오류 수준이 BER 10-4~10-5 이하의 수준으로 떨어지며 이 수준의 랜덤오류는 실험에서 볼 수 있는 것처럼 CCP 부호의 복호에 거의 영향을 미치지 않는다.

제안된 CCP 부호는 기존 부호화 기법들에 대한 연집오류 정정능력의 향상 이외에도 정정능력 이상의 연집오류에 대해 복호 후 남는 잔류 오류의 수준이 기존 방식들의 경우보다 낮아 부호가 처리할 수 없는 비교적 긴 연집오류의 발생에 있어 기존 부호화 기법에 비해 피해를 줄일 수 있는 장점을 나타낸다.

※ 본 연구는 정보통신연구관리단의 대학기초연구지원 사업의 일환으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

[1] *Specifications of Digital VCR for Consumer-Use*, HD-Digital VCR Conference.

[2] S.B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*, Prentice-Hall, Inc., 1995.

[3] Shu Lin and D.J. Costello, Jr., *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, Inc., 1983.

[4] S.B. Wicker and V.K. Bhargava, *Reed-Solomon Codes and their Applications*, IEEE Press, 1994.

[5] John Watkinson, *The Art of Digital Video*, Focal Press, 1990.

[6] H.O. Burton and E.J. Weldon, Jr., "Cyclic Product Codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, IT-11, pp.433~440, July 1965.

[7] J. H. Cho, C. W. You and D. S. Hong, "The Neural Decision Feedback Equalization for the Nonlinear Digital Magnetic Recording Systems" *ICC '96*, pp. 573-576, Dallas, June 1996.

[8] 김영환, 조재희, 이종화, 홍대식, 강창언, "디지털 자기 기록 시스템에서 부분 응답 신호의 오차 조절 검출 방식", *전자공학회 추계종합학술대회 논문집*, 제18권, 제2호, pp.87~90, 1995.12

저 자 소 개

李 鐘 和(正會員) 第 33卷 B編 第 6號 參照
현재 삼성전자 반도체 마이크로 본부 LSI기술 설계팀 재직 중

劉 哲 雨(正會員) 第 33卷 A編 第 4號 參照
현재 연세대학교 전자공학과 박사 과정 재학중

康 昌 彦(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照
현재 연세대학교 전자공학과 교수 재직중

洪 大 植(正會員) 第 33卷 A編 第 4號 參照
현재 연세대학교 전자공학과 부교수 재직중