논문 99-24-6A-13 한국통신학회논문지 '99-6 Vol.24 No.6A

광기록저장장치를 위한 M-ary 다중트랙 RLL 코드

정회원 이 재 진*

M-ary Multitrack Run-length Limited Codes for Optical Storage Systems

Jaejin Lee* ***Regular Member***

요 약

본 논문에서는 광기록저장장치를 위한 *M-ary* 다중트랙 런길이 제한 코드(Run-length Limited, RLL)를 제안하고, 각각의 (d,k) 조건에 따른 채널용량과 기록밀도를 계산하였다. 이를 위하여 우선 *M-ary* 다중트랙 (d,k) 코드를 위한 일반적인 상태전이행렬(State transition matrix)을 구하며, 그 행렬의 최대 고유치(eigenvalue)를 이용하여 채널용량을 구한다. 단일트랙코드와 비교할 때, 작은 k 값에서도 채널용량이 한계치에 도달함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper introduces *M-ary* multitrack run-length limited (d,k) constrained codes for optical storage systems. We calculate capacities and densities of the codes. We have driven a general form of the state transition matrix for *M-ary* multitrack (d,k) codes. Using the largest eigenvalue of the transition matrix, we calculate the capacity and density. The capacity approaches to the limit with a small k constraint compared to single-track codes.

I. 서 론

지금까지 상용중인 광기록저장장치는 기록매체 위에 있는 트랙을 따라 홈이 패였는지 또는 안 패였는지의 구분으로 이진데이터를 기록한다. 최근에는 기록밀도를 높이기 위하여 M-ary 데이터를 기록하기 위한 연구가 많이 진행되어왔다.[1]-[5] 이중에서 가장 대표적인 방법으로는 ETOM (Electron Trapping Optical Memory[4][5]) 방식과 MEM(Mark Edge Modulation[1]-[3]) 방식이 있다. McLaughlin[6]은 ETOM 방식을 근거로 하여 단일트랙에서의 M-ary 코드를 제시하였다. 이 코드를 사용할 경우 코딩밀도를 최소 심볼시간당 2-4 비트까지 향상시킬 수 있다. (이진 데이터 기록시 1-1.5 비트)

한편, 기록밀도를 높이는 방법으로 다중트랙코드가 이미 소개되었다.[7]-[11] 다중트랙코드의 기본 아이디어는 단일트랙에서 독립적으로 행해지는 타이밍 복원(timing recovery)을 대신하여, 한 트랙의 타이밍신호를 여러 트랙이 공유하므로써 생기는 최대 런길이 제한 조건의 완화이다. 이와 같은 각각의 코드들을 정리하면 다음과 같다.

정의 1: 이진데이터를 위한 단일트랙 (d, k) 코드는 다음의 조건을 만족하는 코드이다.

- ISI 제한조건 : 임의의 두 인접한 1 사이에 최소한 d 개의 0이 있어야 한다.
- 타이밍 제한조건 : 임의의 두 인접한 1 사이에 최대로 k 개의 0이 있을 수 있다.

정의 2: 이진데이터를 위한 다중트랙 (d, k) 코드는 다음의 조건을 만족하는 코드이다.

- ISI 제한조건 : 각각의 트랙에 대하여 임의의 두 인접한 1 사이에 최소한 d 개의 0이 있어야 한다.

* 동국대학교 전자공학과(zlee@cakra.dongguk.ac.kr)
논문번호 : 98369-0909, 접수일자 : 1998년 9월 9일
※ 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

• 타이밍 제한조건 : 모든 n x (k+1) 사각창 안에는 적어도 한 개의 1을 가지고 있어야 한다.

정의 3: M-ary 데이터를 위한 단일트랙 (d, k) 코드는 다음의 조건을 만족하는 코드이다.

• ISI 제한조건 : 임의의 두 인접한 영이 아닌 심볼(non-zero symbols) 사이에 최소한 d 개의 0이 있어야 한다.

• 타이밍 제한조건 : 임의의 두 인접한 영이 아닌 심볼 사이에 최대로 k 개의 0이 있을 수 있다.

이 논문에서 제안하는 M-ary 다중트랙 런길이 제한(MMRLL) 코드는 다음과 같이 정의할 수 있다.

정의 4: M-ary 데이터를 위한 다중트랙 (d, k) 코드는 다음의 조건을 만족하는 코드이다.

• ISI 제한조건 : 각각의 트랙에 대하여 임의의 두 인접한 영이 아닌 심볼 사이에 최소한 d 개의 0이 있어야 한다.

• 타이밍 제한조건 : 모든 n x (k+1) 사각창 안에는 적어도 한 개의 영이 아닌 심볼을 가지고 있어야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II 절에서는 제안된 MMRLL 코드의 각 (d,k) 조건에 따른 채널용량을 계산하기 위하여 필요한 상태전이행렬의 일반식을 유도한다. 제 III 절에서는 런길이 조건, 트랙 수, 심볼 수의 변화에 따른 채널용량과 밀도를 구하고 그 결과를 분석한다. 마지막으로 제 IV 절에서 본 논문을 요약한다.

II. M-ary 다중트랙 RLL 코드

제안된 MMRLL 코드는 심볼의 개수가 두 개 이상이라는 점을 제외하고는 이진데이터를 위한 다중트랙 RLL 코드[7]와 유사하다. 따라서 본 논문은 [7]의 표기방식에 따라서 MMRLL 코드 상태전이행렬의 일반식을 유도하기로 하며, $1 \le d \le k$ 인 경우에 대해서만 생각하기로 한다. 우선, n 개의 트랙이라 가정하고, 시스템의 상태(state)를 $(x_1, x_2, \cdots, x_n; y)$로 표시하면, x_i는 i번째 트랙에서 가장 최근의 영 아닌 심볼 이후로 발생한 0 의 개수를 뜻한다. 즉 $x_i = m$ 이라면 i번째 트랙에서 가장 최근의 영 아닌 심볼 이후로 m개의 0 이 발생하였음을 나타낸다. 여기서 m이 가질 수 있는 값은 {0, 1, 2, ⋯ , d-1} 이다. 그리고 $x_i = d$ 는 i번째 트랙에서 가장 최근의 영 아닌 심볼 이후로 d개 이상의 0 이 발생하였음을 나타낸다. 또 y는 세로로 연속한 영벡터의 수를 나타낸다. 따라서 k 조건을 만족하기 위한 y 의 값은 {0,1,2, ⋯ , k} 중의 하나이며, 모든 트랙에서 $x_i = d$ 이면 $d \le y \le k$ 이며, 이 외의 경우 $y = \min(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 이 된다. 그러므로 다음과 같이 시스템의 상태를 정의할 수 있다.

정의 5: $D = (d+1)^n - 1$ 이며, $\boldsymbol{x}_D = (d, \cdots, d)$ 라고 하면, S_0에서 S_{D+k-d} 까지 $(d+1)^n+k-d$ 개의 가능한 상태가 있으며 각 상태는 다음과 같다.

• j=0,1,2, ⋯,D 일 때, $S_j = (x_{j1}, \cdots, x_{jn}; y)$ 이고,

• t=1,2, ⋯,k-d 일 때, $S_{D+t} = (\boldsymbol{x}_D; d+t)$ 이다.

MMRLL 코드 상태전이행렬의 일반식을 유도하기 위하여, 두 가지의 간단한 예를 들어 설명하기로 하자.

예 1. n=2, d=1, k=3 인 경우:

다음과 같은 여섯 개의 상태를 갖는다. S_0=(0, 0 ; 0), S_1=(0, 1 ; 0), S_2=(1, 0 ; 0), S_3=(1, 1 ; 1), S_4=(1, 1 ; 2), S_5=(1, 1 ; 3). 우선, 상태 S_0 에서는 두 트랙 모두에서 영 아닌 심볼이 발생하였으므로 가능한 다음 상태는 d 조건을 만족시키기 위하여 S_3 밖에 없다. 즉, 두 트랙 모두에서 0이 나와야 한다. 상태 S_1 에서는 첫 번째 트랙에서는 영 아닌 심볼이고 두 번째 트랙에서는 0 이 나왔으므로 가능한 다음 상태는 S_2=(1, 0 ; 0) 또는 S_3=(1, 1 ; 1) 이다. 여기서 S_1=(0, 1 ; 0)에서 S_2=(1, 0 ; 0)로 갈 수 있는 가지 수는 영 아닌 심볼의 수 m=M-1 이며, S_1=(0, 1 ; 0)에서 S_3=(1, 1 ; 1)로 갈 수 있는 가지 수는 한 가지이다. 상태 S_2 에서는 두 번째 트랙에서는 영 아닌 심볼이고 첫 번째 트랙에서는 0 이 나왔으므로 가능한 다음 상태는 S_1=(0, 1 ; 0) 또는 S_3=(1, 1 ; 1) 이다. 여기서 S_2=(1, 0 ; 0)에서 S_1=(0, 1 ; 0)로 갈 수 있는 가지 수는 영 아닌 심볼의 수 m=M-1 이며, S_2=(1, 0 ; 0)에서 S_3=(1, 1 ; 1)로 갈 수 있는 가지 수는 한 가지이다. 상태 S_3=(1, 1 ; 1) 에서는 S_0=(0, 0 ; 0), S_1=(0, 1 ; 0), S_2=(1, 0 ; 0), S_4=(1, 1 ; 2)로 갈 수 있으며, 각각의 가능한 가지 수는 m^2, m, m, 1 이다. 마찬가지로, 상태 S_4=(1, 1 ; 2) 에서는 S_0=(0, 0 ; 0), S_1=(0, 1 ; 0), S_2=(1, 0 ; 0), S_5=(1, 1 ; 3)로 갈

수 있으며, 각각의 가능한 가지 수는 m^2, m, m, 1 이다. 상태 S_5=(1, 1 ; 3)에서는 S_0=(0, 0 ; 0), S_1=(0, 1 ; 0), S_2=(1, 0 ; 0)로 갈 수 있으며, 각각의 가능한 가지 수는 m^2, m, m 이다. 이것을 상태전이행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$T_2(1,3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 1 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m^2 & m & m & 0 & 1 & 0 \\ m^2 & m & m & 0 & 0 & 1 \\ m^2 & m & m & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

예 2. n=2, d=2, k=4 인 경우:

여기서 MMRLL 코드 상태전이행렬의 재귀적인 (recursive) 성질을 살펴보기 위하여 먼저 단일트랙의 경우에서부터 시작하기로 한다. 이 때 가능한 상태들은 S_0=(0 ; 0), S_1=(1 ; 1), S_2=(2 ; 2), S_3=(2 ; 3), S_4=(2 ; 4) 이며, 상태전이행렬식은 다음과 같다.

$$T_1(2,4) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m & 0 & 0 & 1 & 0 \\ m & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

n=2 인 경우에 가능한 상태들은 S_0=(0, 0 ; 0), S_1=(0, 1 ; 0), S_2=(0, 2 ; 0), S_3=(1, 0 ; 0), S_4=(1, 1 ; 1), S_5=(1, 2 ; 1), S_6=(2, 0 ; 0), S_7=(2, 1 ; 1), S_8=(2, 2 ; 2), S_9=(2, 2 ; 3), S_{10}=(2, 2 ; 4) 이며, 상태전이행렬식은 다음과 같다.

$$T_2(2,4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m^2 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 1 & 0 \\ m^2 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m^2 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

이 (3)식에서 왼쪽 위에서부터 9×9 행렬의 모양을 다시 살펴보면 다음과 같다.

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & A_1 \\ mA_1 & 0 & A_1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ m & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_1(2,\infty) \tag{5}$$

즉, 단일트랙 코드의 행렬식을 재귀적으로 반복하는 형태를 나타내고 있다. 단, 9×9 행렬의 오른쪽 제일 아래만 1이 아니고 0이다. 이것을 일반화 시켜서 식으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_n = A_n - \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & A_{n-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & A_{n-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_{n-1} \\ mA_{n-1} & 0 & 0 & \cdots & A_{n-1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$A_1 = T_1(d,\infty) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

한편, (3)식의 α_n 행렬의 아랫 부분 행렬을 β_n 행렬이라 하면, 이것은 α_n 행렬의 제일 아래 행을 그대로 복사한 형태이다. 왜냐하면, 상태 S_D, S_{D+1}, … , S_{D+k-d} 가 가질 수 있는 다음 상태가 모두 같기 때문이다. 또, α_n 행렬의 오른쪽 $D\times(k\text{-}d)$ 부분행렬은 모두 0으로 채워진다. 왜냐하면 상태 {S_0, S_1, … , S_{D-1}} 으로부터 상태 {S_D, S_{D+1}, … , S_{D+k-d} } 로 가는 것은 불가능하기 때문이다. 이 영행렬 아래는 $(k\text{-}d)\times(k\text{-}d)$ 크기의 identity 행렬이 되는데, 이것은 j=1, 2, … , k-d-1 에 대하여 상태 S_{D+j} 에서 S_{D+j+1} 로 이동할 수 있기 때문이다. 마지막으로, 이 identity 행렬의 아래는 영벡터가 된다. 이것은 상태 S_{D+k-d}에서 S_{D+1}, … , S_{D+k-d} 로의 이동이 불가능하기 때문이다. 이것들을 종합하여, M-ary n 트랙 (d,k) 코드의 상태전이행렬식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_n(d,k) = \left[\begin{array}{c|c} & 0 \;\cdots\; 0 \\ & 0 \;\cdots\; 0 \\ \alpha_n & \vdots \quad\; \vdots \\ & 0 \;\cdots\; 0 \\ \cline{2-2} \hline & I_{k-d} \\ \beta_n & \\ \cline{2-2} & 0 \;\cdots\; 0 \end{array}\right] \tag{9}$$

Ⅲ. MMRLL 코드의 채널용량 및 밀도

MMRLL 코드의 채널용량은 그 코드의 상태전이 행렬식의 최대 고유치를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.[7]

$$C_n(d,k)=\frac{\log_2 \lambda}{n} \quad (1)$$

여기서 λ 는 (d,k) 조건을 갖는 n 트랙 코드의 상태전이행렬의 최대 고유치이다. 이 때 코드의 밀도는 다음 식에 의해 구해진다.[6]

$$D_n(d,k)=\frac{(1+d)\,C_n(d,k)}{T_{\min}} \quad (2)$$

여기서 트랙의 수가 늘어남에 따라 그 상태전이 행렬의 크기도 기하급수적으로 커지게 된다. 따라서 상태전이행렬의 최대 고유치를 구하기 위하여 우리는 반복급수방법(power iteration method)을 이용한다. 알고리즘을 요약하면 다음과 같다.[10]

1) 초기벡터 z_0를 정하고 p=1로 한다.

2) $z_p = T_n(d,k)z_{p-1}$

3) $\lambda_i = \max\{z_{pj}\}$, j에 관하여 구한다.

표 1. MMRLL 코드의 채널용량, M=3

d	k	n=2	3	4	5	6
1	1	0.9248	0.9832	0.9957	0.9988	0.9997
	2	0.9839	0.9980	0.9997	1.0000	
	3	0.9962	0.9998	1.0000		
	4	0.9991	1.0000			
	5	0.9998				
	6	0.9999				
	7	1.0000				
2	2	0.6987	0.7477	0.7582	0.7609	0.7615
	3	0.7428	0.7591	0.7614	0.7617	0.7618
	4	0.7556	0.7613	0.7618	0.7618	
	5	0.7597	0.7617	0.7618		
	6	0.7611	0.7618			
	7	0.7616	0.7618			
3	3	0.5727	0.6145	0.6234	0.6256	0.6262
	4	0.6067	0.6233	0.6259	0.6263	0.6264
	5	0.6186	0.6256	0.6263	0.6264	
	6	0.6232	0.6262	0.6264		
	7	0.6251	0.6263			
	8	0.6258	0.6264			

표 2. MMRLL 코드의 채널용량, M=5

d	k	n=2	3	4	5	6
1	1	1.3168	1.3504	1.3558	1.3568	1.3570
	2	1.3514	1.3566	1.3570	1.3570	
	3	1.3562	1.3570	1.3570		
	4	1.3569	1.3570			
	5	1.3570				
	6	1.3570				
	7	1.3570				
2	2	0.9611	0.9932	0.9987	0.9997	0.9999
	3	0.9912	0.9992	0.9999	1.0000	
	4	0.9979	0.9999	1.0000		
	5	0.9995	1.0000			
	6	0.9999				
	7	1.0000				
3	3	0.7706	0.7997	0.8048	0.8058	0.8060
	4	0.7955	0.8049	0.8059	0.8060	
	5	0.8027	0.8058	0.8060		
	6	0.8050	0.8060			
	7	0.8057	0.8060			
	8	0.8059				

표 3. MMRLL 코드의 밀도, M=4

d	k	n=2	3	4	5	6
1	1	2.3020	2.3872	2.4026	2.4058	2.4065
	2	2.3891	2.4052	2.4066	2.4067	
	3	2.4035	2.4066	2.4067		
	4	2.4061	2.4067			
	5	2.4066				
	6	2.4067				
	7	2.4067				
2	2	2.5518	2.6669	2.6885	2.6931	2.6942
	3	2.6579	2.6904	2.6940	2.6945	2.6945
	4	2.6844	2.6939	2.6945		
	5	2.6917	2.6944	2.6945		
	6	2.6937	2.6945			
	7	2.6943				
3	3	2.7496	2.8852	2.9108	2.9164	2.9177
	4	2.8632	2.9111	2.9172	2.9180	2.9181
	5	2.8990	2.9166	2.9180	2.9181	
	6	2.9113	2.9178	2.9181		
	7	2.9157	2.9180			
	8	2.9172	2.9181			

표 4. MMRLL 코드의 밀도, M=6

d	k	n=2	3	4	5	6
1	1	2.8965	2.9522	2.9602	2.9616	2.9618
	2	2.9541	2.9614	2.9618		
	3	2.9609	2.9618			
	4	2.9617	2.9619			
	5	2.9618				
	6	2.9619				
	7	2.9619				
2	2	3.1451	3.2287	3.2418	3.2442	3.2446
	3	3.2242	3.2431	3.2446	3.2447	3.2447
	4	3.2420	3.2445	3.2447		
	5	3.2437	3.2447	3.2447		
	6	3.2445	3.2447			
	7	3.2447				
3	3	3.3440	3.4476	3.4645	3.4676	3.4682
	4	3.4338	3.4650	3.4680	3.4683	3.4683
	5	3.4583	3.4678	3.4683		
	6	3.4654	3.4683			
	7	3.4674	3.4683			
	8	3.4681				

4) $z_p = z_p/\lambda_i$

5) λ_i 가 수렴하였는지 검사

6) 수렴할 때까지 p를 1 씩 증가시키면서 과정 2)를 반복한다.

표 1과 2에서 M=3과 5일 때의 MMRLL 코드의 채널용량을 구하였다. 또, 표 3과 4에서 M=4과 6일 때의 MMRLL 코드의 밀도를 구하였다. 일반적으로 채널용량이 트랙의 수가 늘어나거나 또는 심볼 수가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있다. 다중트랙의 특성으로, 단일트랙 코드와 비교할 때, 작은 k 값에서도 k 조건이 없는(즉, k가 무한대인 경우) 코드의 채널용량에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이점은 다중트랙 코드의 경우 단일트랙 코드보다 빨리 타이밍 신호를 추출할 수 있음을 의미한다.

Ⅳ. 결 론

이 논문은 M-ary 다중트랙 RLL 코드를 제안하고 그 코드의 채널용량과 밀도를 구하였다. 채널용량을 계산하기 위한 MMRLL 코드의 일반적인 상태전이행렬식을 유도하였으며, 그 행렬식의 최대 고유치를 반복급수방법으로 구하여 채널용량을 구하였다.

참 고 문 헌

[1] E. Ohno, K. Nishiuchi, K. Ishibashi, N. Yamada and N. Akahira, "Multipulse recording method for pulse-width modulation recording on an erasable phase change optical disk," *Japan J. of Appl. Phys.*, vol. 30, no.4, pp. 677-681, 1991.

[2] T.Ishida, M. Shoji, Y. Miyabata, Y. Shibata, E. Ohno and S. Ohara, "High density mark edge recording on a phase change disk by a 680nm laser diode," *Proc. of SPIE(Optical Data Storage '94)*, vol. 2338, pp. 121-126, 1994.

[3] M. Arai, S. Kobayashi and H. Ooki, "MO recording by single carrier independent mark edge modulation," *Proc. of SPIE(Optical Data Storage '95)*, vol. 2514, pp. 91-98, 1995.

[4] S. W. McLaughlin, A. R. Calderbank, R. Laroia, J. Gerpheide and A. Jain, "Partial response modulation codes for electron trapping optical memory (ETOM)," *Proc. of SPIE(Optical Data Storage '95)*, vol. 2514, pp. 82-90, 1995.

[5] J. Gerpheide and A. Jain, "Symbol discriminator for high density multilevel recording," *Proc. of SPIE (Optical Data Storage '95)*, vol. 2514, pp. 218-226, 1995.

[6] S. W. McLaughlin, "Five run-length limited codes for M-ary recording channels," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 3, pp. 2442-2450, May 1997.

[7] M. Marcellin and H. Weber, "Two-dimensional modulation codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, pp. 254-266, January 1992.

[8] R. Swanson and J. Wolf, "A new class of two-dimensional RLL recording codes," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 6, pp. 3047-3416, Nov. 1992.

[9] E. K. Orcutt and M. Marcellin, "Redundant multi-track (d,k) codes," *IEEE Trans. on*

Information Theory, vol. 39, no. 5, pp. 1744-1750, Sep. 1993.
[10] Jaejin Lee and V. K. Madisetti, "Constrained multitrack RLL codes for the storage channel," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 31, no. 3, pp. 2355-2364, May 1995.
[11] 이재진, "트랙간 간섭채널을 위한 다중트랙 RLL(Run-length Limited) 코드," *한국통신학회논문지*, 제22권 7호, pp. 1559-1565, 1997.

이 재 진(Jaejin Lee) 정회원

1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
1984년 2월 : U. of Michigan, Dept. of EECS 석사
1994년 12월 : Georgia Tech, Sch. of ECE 박사
1995년 1월~1995년 12월 : Georgia Tech, 연구원
1996년 1월~1997년 2월 : 현대전자 정보통신연 구소, 책임연구원
1997년 3월~현재 : 동국대학교 전자공학과 조교수
<주관심 분야> 통신이론, 비밀통신, 기록저장시스템