

# 트랙간 간섭 채널을 위한 다중트랙 RLL(Run-length Limited) 코드

正會員 이 재 진\*

## Multitrack Run-length Limited Codes for Intertrack Interference Channels

Jaejin Lee\* *Regular Member*

### 요 약

고밀도 저장 기록장치에서 앞으로 고려되어야 할 점은 인접한 트랙간에 생길 수 있는 간섭인데, 이 트랙간 간섭 (ITI, intertrack interference)에 면역성이 있는 새로운 다중트랙 RLL 코드(MRLL Codes, Multitrack Run-length Limited Codes)를 제안하였다. 동시에 인접 트랙에서 변이(transition)가 일어나는 것을 방지하므로써 트랙의 폭과 트랙과 트랙 사이의 보호 대역을 줄일 수 있는 고밀도 저장 채널이 이 코드의 목적이다. 트랙간 간섭 채널을 위한 다중트랙 RLL 코드를 정의하고 각각의 조건에 따른 그 코드의 용량을 구하고 기존의 한트랙용 RLL코드의 채널 용량과 비교하였다.

### ABSTRACT

A new multitrack RLL codes with immunity to intertrack interference (ITI) is proposed. This code takes aim at a high density storage channels by reducing the track width and/or guard bands between tracks since it prevents transitions in neighboring tracks at the same time epoch. The capacities of the codes are found for each maximum and minimum constraint pair.

### I. 서 론

현재, 기록저장장치(storage systems)에 쓰이는 변조 코드는 한 트랙용 RLL 코드로써 기록저장장치의 고

밀도화에 많은 역할을 해왔다. 하지만 한트랙용 변조 코드는 선형적인 밀도를 증가시킬 수는 있지만 단위 면적당 밀도의 증가에는 한계가 있다. 동시에 여러개의 트랙에 읽고 쓸 수 있는 기록 시스템에서는 각 트랙의 제한 조건을 완화시켜 단위면적당 밀도를 증가시킬 수 있는데[1]-[5], 이 제안은 다수의 트랙이 타이밍 신호를 공유하여 최대 런길이 제한조건(maximum

\*동국대학교 전자공학과 교수  
論文番號:97155-0509  
接受日字:1997年 5月 9日

run-length constraint)을 만족한다는 가정하에 이루어진다. 한 트랙용  $(d, k)$  RLL 코드는 최소 런길이 제한 조건(minimum run-length constraint)  $d$ 와 최대 런길이 제한조건(maximum run-length constraint)  $k$ 에 의해 정의되는데,  $d$ 는 인접한 "1" 사이에 올 수 있는 최소한의 "0"의 개수를 말하며,  $k$ 는 인접한 "1" 사이에 올 수 있는 최대한의 "0"의 개수를 의미한다. 후자의 제한조건은 타이밍 정보를 수신된 데이터열로부터 얻기 위해 있으며, 반면 전자의 제한조건은 심플한 간섭(ISI)을 제거시키기 위해 있다. 다중트랙 RLL(MRLL) 코드에서 동시에 처리하는 트랙의 개수가  $n$  개이면 최대 런길이 제한조건,  $k$ 는 행의 개수가  $n$ 이고 열의 개수가  $k+1$ 인 행렬과 비슷한 창(window)에 적어도 한 개의 "1"이 있으면 된다. 이것은 한 트랙 RLL 코드와 비교해 볼 때, 부호율을 증가시킬 수 있게 되므로 채널 용량의 증가를 가능케 한다.

코밀도 저장기록장치의 또 하나의 주요한 밀도손실의 요인은 트랙간 간섭(ITI)이다. 트랙과 트랙간에 생기는 인접 트랙 신호의 간섭(offtrack interference)으로 인해 생기는 신호검출기능의 저하이다. 이를 위해, Ve와 Moura[6]는 트랙간 간섭이 있는 자기기록 채널 모델을 만들었으며, Barbosa[7]는 트랙간 간섭이 있는 상황에서 헤드열(array heads)을 이용하여 신호를 검출했다. Abot, Cioffi 그리고 Thapar[8]는 트랙간 간섭이 있을 때 동화기를 이용하여 신호를 검출하였다. Soljanin과 Georghiades[9]는 다중트랙 다중헤드 시스템을 위한 단일트랙 코드 이용의 가능성에 대해 연구했다. 이와 같은 연구는 ITI를 신호검출의 측면에서 ITI의 문제를 해결하려고 시도한 반면, 우리는 신호의 생성단계에서부터 ITI가 생기지 않도록 데이터를 부호화함으로써 ITI를 줄이기 위한 것이라 할 수 있다.

본 논문에서 우리는 ITI에 면역성을 가진 MRLL 코드를 제안한다. 이 코드는 같은 시간에 이웃한 트랙에서 동시에 전이가 일어나지 않도록 한다. 따라서, 보통의 경우 각 트랙에 대한 최소 런길이 제한조건  $d_x$ 로 ISI를 감소시키는 반면, 이 코드는 트랙 사이의 최소 런길이 제한  $d_y$ 가 추가로 필요하다. ITI에 면역성을 가진 MRLL 코드(MRLL-ITI Codes)를 정의하면 다음과 같다.

정의:  $(d_x, d_y, k; n)$  코드는 다음의 조건을 만족하

는 코드이다.

- ISI 제한조건:  $n$  개의 트랙 각각에는 임의의 두 인접한 1 사이에 최소한  $d_x$ 개의 0이 있어야 한다.
- ITI 제한조건: 각 단위 시간에서 트랙 사이의 임의의 두 연속되는 1 사이에는 최소한  $d_y$ 개의 0이 있어야 한다.
- 타이밍 제한조건: 모든  $n \times (k+1)$  사각창 안에는 최소한 한 개의 1을 가지고 있어야 한다.

우리는 이 코드를 MRLL  $(d_x, d_y, k; n)$  코드라고 하며, 이 코드는 트랙과 트랙 사이에 필요한 최소 런길이 제한조건  $d_y$ 를 한 개 더 가지고 있는 것을 제외하고는 MRLL  $(d, k; n)$  코드와 유사하다. 선형적인 측면에서 볼 때 이 코드가 MRLL  $(d, k; n)$  코드보다 작은 밀도를 가질 것이라고 예상할 수 있으나, 이 코드는 트랙폭과 보호대역을 감소시킬수 있는 높은 가능성 때문에 더욱 큰 면적밀도를 가질 수 있게 된다. 예를 들어, 만일 부호율 1/2인  $(d_x, d_y, k; n)$  코드가 부호율 2/3인 한트랙 RLL코드에 필요한 보호대역의 1/4 이상을 성능저하 없이 줄일 수 있다면, 부호율 1/2  $(d_x, d_y, k; n)$  코드는 부호율 2/3 코드(보통의 RLL코드 또는 MRLL코드)보다 더 큰 면적밀도를 가질수 있다. 이 논문에서는 채널을  $d_y > 1$ 인 조건을 이용해 제한하는 것은 실용적인 부호율을 얻을 수 없기 때문에  $d_y = 1$ 인 경우만을 고려하여 기술한다. 따라서, 우리는  $d_y = 1$ 이라고 가정하며,  $(d_x, d_y, k; n)$  코드를 MRLL-ITI 코드라고 부른다. 다음 절에서는 MRLL-ITI 코드를 설명한다. 여기서 우리는 각 제한조건에서의 유한 상태 전이도(FSTD, finite state transition diagram)과, 각 제한조건에 대한 상태 전이 행렬(state transition matrix)을 어떻게 구성할 것인가에 대해 설명하고 구해진 상태 전이 행렬을 이용해 그 코드의 채널용량을 구한다.

## II. ITI를 위한 다중트랙 RLL코드

MRLL코드의 성질에 의해, 사용 가능한 MRLL 코드워드는  $n \times m$  행렬로 나타낼 수 있으며, 여기서  $n$ 은 트랙의 수이며  $m$ 은 트랙당 비트수이다. 따라서, MRLL 코드워드는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$$

단,  $c_j$ 는 모든  $j=1, 2, \dots, m$ 에 대해  $n$ 개의 2진 요소로 된 열벡터이다. 우리는 표기상의 편의를 위해 이러한  $c_j$ 를 2진 열벡터 표현과 일치하는 십진수로 나타낸다. 예로써,  $c_j = (00001001)^T$ 는  $n=8$  트랙에 대해 "9"로 표현된다. 따라서, 코드워드(1, 4, 10, 5)는 다음과 같은 4-트랙 코드워드를 나타낸다.

$$c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

MRLL-ITI 코드 구성의 첫 번째 단계는 트랙의 개수  $n$ 이 주어지면  $d_y$  조건을 만족하는  $n$ -요소( $n$ -tuple) 열벡터를 찾아내는 것이다. 각각의 트랙 개수에 대해 ITI 제한조건( $d_y=1$ )을 만족하는 십진수는 다음과 같이 주어진다.

- $A_2 = \{0, 1, 2\}$
- $A_3 = A_2 \cup \{4, 5\}$
- $A_4 = A_3 \cup \{8, 9, 10\}$
- $A_5 = A_4 \cup \{16, 17, 18, 20, 21\}$
- $A_6 = A_5 \cup \{32, 33, 34, 36, 37, 40, 41, 42\}$
- $A_7 = A_6 \cup \{64, 65, 66, 68, 69, 72, 73, 74, 80, 81, 82, 84, 85\}$
- $A_8 = A_7 \cup \{128, 129, 130, 132, 133, 136, 137, 138, 144, 145, 146, 148, 149, 160, 161, 162, 164, 165, 168, 169, 170\}$

여기서  $A_i$ 는  $i=1, 2, \dots, 8$  트랙일 경우에 대해 ITI 제한조건을 만족하는 십진의 집합이다.

1.  $d_x=1$ 인 경우

만일  $d_x=1$ 이라고 하면, 최대 런길이 제한조건이 없는 경우 즉,  $k=\infty$ 인 경우와 최대 런길이 제한조건이 있는 경우 즉,  $k$ 가 유한한 경우의 두 가지가 있다. 가장 간단한 FSTD의 경우는  $k=\infty$ 일 때이다.  $n$  개의 트랙이 있고 FSTD의 상태들은  $A_n$  집합의 성분들이라 하고 FSTD에서 두 상태를 연결하는 한 실선은 하나

의 상태에서 다른 상태로 변할 때 제한조건을 위반하지 않은 경우라고 하면, 그림 1은  $n=2, d_x=1, d_y=1, k=\infty$ 일 때 FSTD의 예이다. 그리고 그림 2는  $n=3$ 인 FSTD의 예로서, 첫 번째 열의 상태에서 두 번째 열 상태로 갈 수 있는 가능한 전이들을 보여주고 있다.  $A_3$ 에 있는 것처럼,  $n=3$ 인 FSTD에서 가능한 상태는  $S_0, S_1, S_2, S_4, S_5$ 의 다섯 개가 있다. 상태전이행렬의 각 요소  $t_{ij}$ 는  $i$ 와  $j$ 에 의해 표현되는 벡터가 연결가능함을 나타낸다. 즉, FSTD에서 상태  $S_i$ 부터  $S_j$ 로 연결될 수 있음을 뜻한다. 따라서, 그림 1, 2의 FSTD에 대응하는 상태전이행렬은 각각 다음과 같다.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

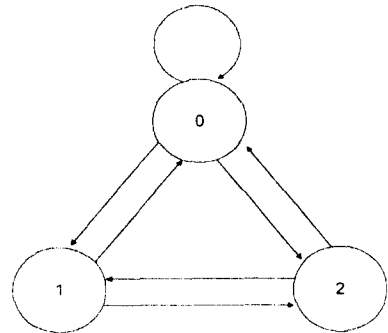


그림 1.  $n=2, d_x=1, d_y=1, k=\infty$ 일 때의 FSTD  
Fig. 1 FSTD for  $n=2, d_x=1, d_y=1, k=\infty$

Transition edges	
from state	to state
0	0, 1, 2, 4, 5
1	0, 2, 4
2	0, 1, 4, 5
4	0, 1, 2
5	0, 2

그림 2.  $n=3, d_x=1, d_y=1, k=\infty$ 일 때의 FSTD  
Fig. 2 FSTD for  $n=3, d_x=1, d_y=1, k=\infty$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

한편, 유한한  $k$ 인 경우, 가장 간단한 경우는  $k=0$ ,  $k=1$ 의 두 가지가 있다.  $k=0$ 인 경우의 FSTD는  $k=\infty$ 인 FSTD에서 상태  $S_0$ 를 제거하고 이 상태와 연결된 모든 실선을 제거한 것과 같다.  $k=1$ 인 경우의 FSTD는 상태  $S_0$ 에서  $S_0$ 로의 전이(edge)를 제거시키는 것만을 제외하고는  $k=\infty$ 인 경우와 같다. 일반적으로  $1 < k < \infty$ 인 경우, 상태  $S_0$ 는  $S_{0_1}, S_{0_2}, \dots, S_{0_k}$  등의  $k$ 개의 상태로 나눌 수 있으며, 열벡터  $0_i$ 는 코드워드열에서  $i$ 번째 연속되는 0 벡터를 나타낸다. 만일 시작점이 되는 상태가  $S_{0_i}$ 이면,  $S_{0_i}$ 에서는  $i=1, 2, \dots, k-1$ 에 대해  $S_{0_{i+1}}$  상태로 전이할 수 있다. 또  $i=1, 2, \dots, k$ 에 대한 모든 상태  $S_{0_i}$ 는 모든  $j$ 가 0이 아닌  $S_j$  상태로 전이가 가능하다. 한편,  $j=1, 2, \dots, k$ 에 대한 모든 상태  $S_j$ 는  $S_{0_i}$  상태로만 전이할 수 있다. 0이 아닌 상태 사이의 전이는  $k=\infty$ 인 경우와 같다. 유한한  $k$ 제한조건의 예를 들면,  $n=2, d_x=1, k=3$ 인 경우의 FSTD를 그림 3에 나타냈다.  $k=3$ 이기 때문에 세개의 영(zero) 상태  $S_{0_1}, S_{0_2}, S_{0_3}$ 가 있다. 그림 3에서 구해진 FSTD를 상태전이행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$n=3, d_x=1, d_y=1, k=3$ 인 경우에는, 상태  $S_1$ 은 상태  $S_{0_1}, S_2, S_4$ 로 갈 수 있으며, 상태  $S_2$ 는 상태  $S_{0_1}, S_1, S_4, S_5$ 로 각각 이동 가능하다. 상태  $S_5$ 는 상태  $S_{0_1}, S_1, S_2$ 로 이동할 수 있다. 마지막으로, 상태  $S_5$ 는 상태  $S_{0_1}, S_2$ 로 이동할 수 있다. 따라서, 상태전이 행렬을 구성할 수 있는데 이것은  $d_y$  제한조건을 만족하는 벡터들 사이의 연결표(concatenation table)과 같다. 따라서,  $n=3, d_x=1, d_y=1, k=3$  일 때, 상태전이행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

한편,  $d_x=1$  일 때, 총 상태 개수  $N_s$ 는 다음과 같다.

$$N_s = a_n + k - 1 \tag{1}$$

여기서  $a_n$ 은 트랙의 개수가  $n$  일 때의 심볼의 개수이다.

### 2. $d_x > 1$ 인 경우

FSTD의 상태는 제한조건을 어기지 않는, 길이가  $d_x$ 인 모든 가능한 수열(sequences)이다. 그 수열에서의 각 심볼은 트랙의 개수  $n$ 에 의해 주어진 알파벳 집합  $A_n$ 의 성분이다. 예를 들어  $n=3, d_x=2, k=3$ 인 경우, FSTD의 상태는 쌍을 이루는 아랫 첨자로 표현할 수 있다.  $d_x=2$ 이기 때문에 상태들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

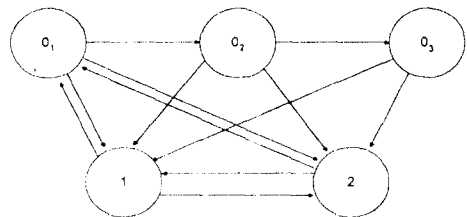


그림 3.  $n=2, d_x=1, d_y=1, k=3$ 일 때의 FSTD  
Fig. 3 FSTD for  $n=2, d_x=1, d_y=1, k=3$

- $S_{(0_1, 0_1)}, S_{(0_1, 0_2)}, S_{(0_1, 0_3)}, S_{(0_2, 0_1)}, S_{(0_2, 0_2)}, S_{(0_2, 0_3)}, S_{(0_3, 0_1)}, S_{(0_3, 0_2)}, S_{(0_3, 0_3)},$
- $S_{(1, 0_1)}, S_{(1, 0_2)}, S_{(1, 0_3)},$
- $S_{(2, 0_1)}, S_{(2, 0_2)}, S_{(2, 0_3)}, S_{(2, 5)},$
- $S_{(4, 0_1)}, S_{(4, 0_2)}, S_{(4, 0_3)},$
- $S_{(5, 0_1)}, S_{(5, 0_2)}$

상태전이행렬의 엔트리는 시작 상태(starting state)의

from state	to state							
	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
S <sub>(0,1,0,2)</sub> =S <sub>0</sub>	0	1	1	1	0	0	0	0
S <sub>(0,2,0,1)</sub> =S <sub>1</sub>	0	0	1	1	0	0	0	0
S <sub>(0,1,1)</sub> =S <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	1	0	0
S <sub>(0,2,2)</sub> =S <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	1	1
S <sub>(1,1,0)</sub> =S <sub>4</sub>	1	0	0	1	0	0	0	0
S <sub>(1,2,2)</sub> =S <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0
S <sub>(2,2,0)</sub> =S <sub>6</sub>	1	0	1	0	0	0	0	0
S <sub>(2,2,1)</sub> =S <sub>7</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0

그림 4. n=2, d<sub>x</sub>=2, k=3 일 때의 전이상태  
Fig. 4 Transition in FSTD for n=2, d<sub>x</sub>=2, k=3

두 번째 아랫첨자가 마지막 상태(ending state)의 첫 번째 아랫첨자와 같다면 "1"이 된다. 그리고 시작 상태의 첫 번째, 두 번째 아랫첨자와 마지막 상태의 두 번째 아랫첨자의 수열은 dx 제한조건을 어기지 않아야 한다. 그림 4는 n=2, d<sub>x</sub>=2, k=3 일 때의 FSTD가 가지는 전이를 나타낸다. "1"은 두 상태 사이에 연결이 있음을 나타내며 "0"은 두 상태 사이에 연결이 없음을 의미한다. 예를 들어, 상태전이행렬에서 상태 S<sub>(2,1)</sub>의 행과 S<sub>(1,0)</sub>의 열에 위치한 값은 "1"이 되는데 이것은 코드워드(2, 1, 0)은 제한조건을 만족하는 코드워드이기 때문이다. 그러나, S<sub>(2,1)</sub> 상태의 행과 S<sub>(1,2)</sub> 상태의 열에 위치한 엔트리는 "0"이다. 왜냐하면 시작상태의 두 번째 아랫첨자가 마지막상태의 첫 번째 아랫첨자와 동일하다 하더라도 코드워드(2, 1, 2)가 d<sub>x</sub>=2라는 제한조건을 만족하지 못하기 때문이다. 이와 마찬가지로 d<sub>x</sub>>2인 경우에, 상태전이행렬의 엔트리는 만일 시작상태의 두 번째 아랫첨자에서부터 마지막 아랫첨자까지의 수열이 마지막상태의 첫 번째 아랫첨자에서부터 d<sub>x</sub>-1까지의 아랫첨자까지의 수열과 같다면 "1"이 되고, 시작상태의 첫 번째부터 마지막까지의 아랫첨자와 마지막 상태의 마지막 아랫첨자는 dx 의 제한조건을 만족해야 한다.

d<sub>x</sub>>1인 경우, k<∞에 대해 상태의 총 개수 N<sub>s</sub>는 다음과 같다.

$$N_s < \frac{a_n!}{(a_n - d_x)!} + k \quad (2)$$

또, k=∞일 때 상태의 총 개수 N<sub>s</sub>는 다음과 같다.

$$N_s \leq \frac{a_n!}{(a_n - d_x)!} \quad (3)$$

여기서 a<sub>n</sub>은 트랙의 개수가 n 일 때 심볼의 개수이다.

위 (1), (2), (3)식으로 부터 상태의 총 개수 N<sub>s</sub>가 다른 MRLL코드보다 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 참고로 (d, k; n)코드의 총 상태 개수는 다음과 같다.[1]

$$N_s = (d + 1)^n + k - d \quad (4)$$

위에서 d=d<sub>x</sub>이다. 또 (d, k<sub>x</sub>, k<sub>y</sub>; n)코드의 총 상태 개수는 다음과 같다.[2]

$$N_s \approx (k_x + 1)^n \quad (5)$$

위에서 k<sub>x</sub>는 각 트랙에서의 최대 런길이 제한조건이다. 이들 상태 개수는 트랙의 개수 n에 따라 지수함수적으로 증가한다. 그러나 본 논문에서 제안된 MRLL-ITI 코드의 총 상태 개수 N<sub>s</sub>는 대략 a<sub>n</sub><sup>d<sub>x</sub></sup>이고, n이 증가함에 따라 (4)나 (5)식보다는 훨씬 작아지게 된다.

### Ⅲ. MRLL-ITI 코드의 채널용량

MRLL-ITI코드의 트랙당 용량은 다음과 같이 구할 수 있다.[1]

$$C(d_x, d_y=1, k; n) = \frac{\log_2 \lambda}{n} \quad (6)$$

여기서 λ는 상태전이행렬의 가장 큰 고유값(eigenvalue)이다.

MRLL-ITI코드의 전이행렬의 크기는 상대적으로 MRLL코드[1, 2, 3]의 크기보다 작기 때문에 임의의 행렬취급 프로그램을 이용해 가장 큰 고유값을 쉽게 찾을 수 있다. 우리는 표 1과 같이 MRLL-ITI코드의 용량을 각각의 제한조건에 따라 구하였다. 용량은 트랙의 수가 증가함에 따라 감소한다. 이 현상은 트랙간 간섭을 줄이기 위해 부가한 d<sub>y</sub>=1 제한조건의 결과인데, 트랙의 수가 증가함에 따라 용량이 증가하는 이전의 MRLL코드와 다른 점이라 할 수 있다. 또, MRLL-ITI 코드의 용량이 단일트랙 코드보다 항상

표 1. MRLL-ITI 코드의 채널용량

Table 1. Capacities of  $n$ -track MRLL-ITI codes

$d_x$	$k$	$n$						
		3	4	5	6	7	1	
1	2	0.6099	0.6094	0.6065	0.6038	0.6016	0.4057	
	3	0.6174	0.6116	0.6071	0.6039	0.6017	0.5515	
	4	0.6194	0.6119	0.6072	0.6040		0.6174	
	5	0.6199	0.6120	0.6072			0.6509	
	6	0.6201	0.6120				0.6690	
	7	0.6201					0.6793	
	$\infty$	0.62017	0.61207	0.60724	0.60402	0.60171	0.6942	
	2	3	0.5066	0.5087	0.5076	0.5063	0.5052	0.2878
4		0.5122	0.5102	0.5081	0.5064	0.5052	0.4057	
5		0.5140	0.5106	0.5081			0.4650	
6		0.5146	0.5107				0.4979	
7		0.5148	0.5107				0.5174	
$\infty$		0.51499	0.51074	0.50819	0.50650	0.50528	0.5515	
3		4	0.4357	0.4387	0.4384	0.4377		0.2232
		5	0.4402	0.4399	0.4387	0.4378		0.3218
	6	0.4419	0.4403	0.4388	0.4378		0.3746	
	7	0.4426	0.4404	0.4388			0.4057	
	$\infty$	0.44307	0.44046	0.43889	0.43785		0.4650	

크지는 않음을 볼 수 있다. 예를 들어  $d_x=1$ 이고  $k>4$  일 때와  $d_x=2$ 이고  $k>6$  일 때 그리고  $d_x=3$ 이고  $k>9$  일 때와 같은 경우 단일 트랙 코드의 용량이 크게 나타나는데, 이것은 오직 선형밀도만을 비교하였기 때문이다. MRLL-ITI 코드는 인접한 트랙에서 동시에 전이가 일어나지 않도록 고안된 코드이므로 실제적으로 트랙폭을 줄이거나 단일트랙 코드나 MRLL 코드에서 필요한 트랙간 보호대역폭보다 다중트랙 코드를 사용하여 트랙간 보호대역폭을 줄일 수 있어서 전체적인 면적밀도를 크게 할 수 있다. 한편,  $k$  제한 조건의 영향이 즉,  $k$ 가 크던 작던간에, 매우 작기 때문에 적절한 타이밍 신호의 추출을 위해 작은  $k$ 의 사용이 바람직하다. 이것은  $k$ 에 따라 채널용량이 영향을 받기 때문에  $k$ 를 크게 해야되는 단일트랙 코드나 MRLL 코드보다 타이밍 신호의 추출이 훨씬 쉽다는 것을 의미한다. 트랙의 수가  $n=3, 4, 5, 6, 7, 8$ 이고  $k=3, 4, 5, 6, 7$ 이며  $d_x=1, 2, 3$  일 때의 코드워드의 개수는 [10]에 열거되어 있다.

#### IV. 결 론

이 논문은 트랙간 간섭(ITI)을 완화시키는 다른 종류의 다중트랙 RLL 코드를 제안하였다. 신호검출의 측면에서 ITI 문제를 다루기보다는 원천적으로 ITI가 없는 코드를 구하려는 방법을 모색하였다. 이 코드를 디자인하는데 있어서 최대 런길이 제한 조건은 중요한 요인이 아니라는 점이 밝혀졌다. 따라서 적절한 타이밍 신호의 추출을 위해 작은  $k$ 의 사용이 바람직하다. 또 트랙수가 증가함에 따라 제안된 MRLL-ITI 코드의 선형적인 채널용량은 감소되지만, 단일트랙 RLL 코드나 MRLL 코드에서 발생하는 트랙간 간섭을 원천적으로 줄임으로써 트랙간 보호대역폭을 줄일 수 있기 때문에 전체적인 면적밀도를 크게 할 수 있다. 따라서 제안된 MRLL-ITI 코드는 현재 쓰이고 있는 단일트랙 RLL 코드나 MRLL 코드보다 전체적인 면적밀도를 크게 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Marcellin and H. Weber, "Two-dimensional modulation codes," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 10, pp. 254-266, January 1992.
2. 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.
3. 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.
4. Jaejin Lee, "Robust two-dimensional RLL codes for data storage," Proceedings of ICC, New Orleans, pp. 1814-1818, May 1994.
5. Jaejin Lee and V. K. Madisetti, "Constrained multi-track RLL codes for the storage channel," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 31, no. 3, pp. 2355-2364, May 1995.
6. M. Vea and J. Moura, "Magnetic recording channel model with intertrack interference," IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-27, no. 6, pp.

- 4834-4836, Nov. 1991.
- 7 L. Barbosa, "Simultaneous detection of readback signals from interfering magnetic recording tracks using array heads," IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-26, no. 5, pp. 2163-2165, Sep. 1990.
  8. W. Abbot, J. Cioffi, and H. Thapar, "Performance of digital magnetic recording with equalization and off-track interference," IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-27, no. 1, pp. 705-716, Jan. 1991.
  9. E. Soljanin and C. N. Georghiades, "On coding in multi-track, multi-head, disk recording systems," Proceedings of GLOBECOM, pp. 18-22, 1993.
  10. Jaejin Lee and V. K. Madisetti, "Multitrack RLL codes for the storage channel with immunity to intertrack interference," Proceedings of GLOBECOM, pp. 1477-1481, Nov. 1994.



李 載 晉(Jaejin Lee) 정희원  
1983년 2월:연세대학교 전자공학과 학사

1984년 12월:University of Michigan, EECS(공학석사)

1994년 12월:Georgia Institute of Technology, ECE(공학박사)

1993년 7월~1994년 12월:Research Assistant, Georgia Tech

1995년 1월~1995년 12월:Research Associate, Georgia Tech

1996년 1월~1997년 2월:현대전자 정보통신연구소 책임연구원

1997년 3월~현재:동국대학교 전자공학과 교수

※주관심분야:통신신호처리, 채널코딩, 자기 및 광 기록 저장장치