

# 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 2차원 코드

준회원 김 나 영\*, 종신회원 이 재 진\*\*

## A Two-Dimensional Pseudo-balanced Code for Holographic Data Storage Systems

Na Young Kim\* Associate Member, Jaejin Lee\*\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 차세대 대용량 데이터 저장장치로 부각되고 있는 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 2차원 변조코드를 제안한다. 단위 면적당 기록 밀도의 증가로 인한 인접 심볼간 간섭과 3차원적인 홀로그래픽 저장으로 인한 페이지간 간섭 등에 강한 성능을 갖도록 같은 페이지 내의 1과 0의 개수가 거의 동일하도록 설계하였으며, 또 가능한 많은 1과 0의 천이가 일어나도록 설계하였다. 제안된 코드의 코드율은 5/9로서 기존의 4/9 코드보다 25%의 코드율 개선을 하였다.

**Key Words** : HDSS, Two-dimensional Modulation Code, ISI, IPI

### ABSTRACT

In this paper, we introduce a two-dimensional modulation code for holographic data storage systems(HDSS), which is a candidate for the next generation data storage system. The two-dimensional(2D) intersymbol interference(ISI) induces higher bit error rate(BER). The balanced number of zeros(dark) and ones(light) in each page reduces inter-page interference(IPI). The code rate is 5/9. Although the proposed code has higher code rate than other 2D code with rate 4/9, the BER performances of two codes are similar.

### 1. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage systems, HDSS)는 기록과 재생이 페이지 단위로 이루어지므로 한 페이지가 가지는 총 비트 수와 다중화된 홀로그램 수의 곱으로 저장 매질의 총 저장용량이 결정된다. 표면에 정보를 기록하는 광기록 방식(CD, DVD)이나 자기기록 방식(HDD, magnetic tape)과는 다르게 저장 매질의 체적에 정보를 기록하기 때문에 저장용량을 현저히 향상시킬 수 있다. HDSS의 이론적인 저장밀도는 
$$h(x,y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x}{\sigma}, \frac{y}{\sigma}\right)$$
이며,

파장을 532nm로 가정하면 6.64bits/ $\mu\text{m}^3$ 가 된다. 만약 저장 매질의 두께를 1mm로 가정하면 6640bits/ $\mu\text{m}^2$ 가 된다. 다른 저장 매체인 CD(0.7bits/ $\mu\text{m}^2$ ), DVD(4.5bits/ $\mu\text{m}^2$ ), 1GB IBM Microdrive (23bits/ $\mu\text{m}^2$ ) 등과 비교하면 디지털 HDSS의 저장용량은 탁월한 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

기존의 데이터 저장장치인 HDD, CD/DVD 등은 데이터의 기록과 재생 원리가 직렬 방식이다. 즉 정보의 기록과 재생을 비트 단위로 처리하므로 데이터 처리 속도 및 전송률에 있어서 한계를 가진다. 이에 비해 HDSS는 기록과 재생이 각 데이터를 포함하는 페이지 단위로 이루어지므로 데이터 처리속

\* 본 논문은 숭실대학교 연구비 지원으로 이루어졌음.

\* 엘지전자(764young@hanmail.net), \*\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(zlee@ssu.ac.kr) (° : 교신저자) 논문번호 : KICS2006-04-159, 접수일자 : 2006년 4월 3일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 27일

도 및 전송률이 매우 높다. 즉, 초당 1000 프레임을 처리할 수 있는 1000×1000 픽셀을 가지는 SLM(spatial light modulator)과 CCD(charge-coupled detector)를 사용하는 경우 1000×1000×1000 = 1Gbits/s의 매우 빠른 데이터 전송률을 얻을 수 있다.

### 1.1 변조코드의 필요성

HDSS에서 변조코드는 페이지 내에서 공간상의 빔의 불균일 분포 및 인접 심볼간 간섭을 줄일 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 우선, HDSS에서 신뢰성 있는 정보 데이터가 검출되기 위한 가장 핵심적인 고려사항은 다음과 같다.

첫째, 정보 데이터가 SLM에 의해 빛의 양으로 기록되므로써 인접한 페이지 사이에 발생하는 간섭(interpage interference, IPI)을 줄이는 것이다<sup>[1]</sup>. 기록측면에서 볼 때, 각 정보 페이지에서 신호빔으로부터 발생하는 빛의 양이 비슷하면 신호빔의 강도(intensity)에 의한 변화가 적기 때문에 기록조건이 유사하고, 재생 또한 유리한 면에 있다. 만약, 신호빔의 강도에 많은 차이가 발생하면 저장 매질의 비선형 특징으로 인하여, 재생 과정에서 과포화 현상이 발생하는 페이지가 존재할 수 있으며, 밝기가 어두운 페이지에서는 균일한 조건을 결정하기 어렵다. 결국, 인접한 페이지에 영향을 미치므로써 데이터 검출 성능 저하의 원인이 되어 전체적인 저장용량의 감소를 초래하게 된다. 따라서, 정보 페이지에서 항상 1(on)과 0(off)의 픽셀의 분포가 유사하여야 한다.

둘째, 정보 페이지의 각 행과 열에서 1에서 0, 0에서 1의 천이 발생회수를 증가시켜야 한다<sup>[2]</sup>. 즉, 정보 페이지내에서 동일한 패턴의 중복현상을 랜덤한 패턴의 형태로 변화시키는 것을 의미한다. 결과적으로 퓨리에면에서 일정(uniform)한 강도를 갖는 분포를 만들 수 있다. 현재 이러한 조건을 충족시키기 위해서 가이드드 스크램블링(Guided scrambling, GS) 기법이 사용되고 있다<sup>[3]</sup>.

셋째, 저역통과 필터링(low-pass filtering) 효과를 고려하는 것이다<sup>[4]</sup>. 정보 페이지 내에서 저역통과 필터의 특성을 갖는 코드를 사용하여 2차원 인접 심볼간 간섭(two-dimensional ISI)을 줄일 수 있으며, 2차원 인접 심볼간 간섭의 예를 들면 그림 1과 같다.

이러한 고려사항들 중 두 번째 조건은 고주파수 특성, 세 번째 조건은 저주파수 특성에 초점을 맞추었기 때문에 두 조건은 서로 trade-off 관계라고 할

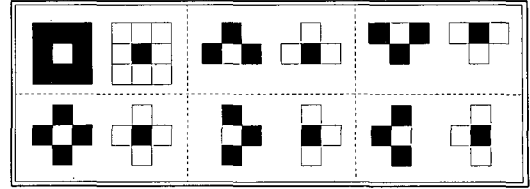


그림 1. 2차원 형태인 인접 심볼간의 간섭 패턴의 예.

수 있다. 결론적으로 두 가지 조건을 적절하게 충족시킬 수 있는 변조 코드의 개발이 요구된다.

### 1.2 코드율이 4/9인 2차원 변조코드

HDSS로부터 재생된 데이터 페이지는 전기·광학적 잡음 그리고 CCD의 고정 패턴 잡음 등으로 인한 공간적 빔 세기의 불균일성 때문에 정보 데이터의 검출 성능이 저하된다. 결국, 신뢰성 있는 데이터의 재생을 위해서는 변조 코딩 기술이 필수적으로 요구된다.

기존에 제안된 코드율이 4/9(=0.4444)인 2차원 변조코드는 인접 심볼간의 간섭을 최소화시키는 것이 주된 목적이다<sup>[5]</sup>. 이 코드는 고주파수의 영역을 제한하는 부호화 방식으로 그림 2와 같으며, 1차원 형태인 정보 데이터를 2차원 형태인 페이지 단위로 변환시킴으로써 1차원의 인접 심볼간의 간섭뿐만 아니라 2차원의 인접 심볼간의 간섭까지 고려한다. 그림 2에서  $[b_0, b_1, b_2, b_3]$ 는 1차원인 정보 데이터의 단위 블록이며,  $x$ 는  $b_0, b_1, b_2$ 와  $b_3$  값에 의해 결정된다. 만약,  $[b_0, b_1, b_2, b_3]$ 에서 1(on)의 총 개수가 2보다 큰 경우  $x$ 는 1(on)이며, 나머지 경우에는 0(off)이다.

$$[b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3] \longrightarrow \begin{bmatrix} 0 & b_1 & 0 \\ b_0 & x & b_3 \\ 0 & b_2 & 0 \end{bmatrix}$$

그림 2. 코드율이 4/9인 2차원의 변조 코드 부호화 과정.

## II. 제안한 2차원 변조코드

본 논문에서 새롭게 제안한 코드율이 5/9(=0.5559)인 2차원 변조 코드는 인접 페이지간의 간섭(IPI)과 인접 심볼간의 간섭(ISI)을 제거하여 기록/재생 과정이 원활하게 이루어질 수 있도록 하였다. 이러한 코드는 정보 페이지 내에서 1(on)과 0(off)의 개수가 거의 같은(pseudo-balanced) 특성을 갖기 때문에 인접한 페이지 사이에서의 간섭이 최소화 된다. 또한,

제안된 변조 코드는 low-pass 필터링 특성을 갖도록 하여 신호검출 오류를 유발하는 2차원 인접 심볼간 간섭 패턴을 제거하였다.

그림 3은 제안한 변조 코드의 부호화 과정에 대한 설명이다. 제안한 변조 코드는 5개의 사용자(user) 비트와 4개의 패리티(parity) 비트로 구성된다. 5개의 사용자 비트는 A, B, C, D, E, 4개의 패리티 비트는 w, x, y, z로 표현하였다. 여기서 3×3 배열에서 사용자 비트들 중 A, B, D, E는 각각의 모서리에 위치하도록 하고, C는 중앙에 위치하도록 설계하였다. 일반적으로 패리티 비트는 인접한 사용자 비트들 간의 exclusive-OR 연산을 하여 결정하며, 특정한 인접 심볼간의 간섭 패턴을 제거하기 위하여 다음의 세 가지 예외가 적용된다.

- ① 사용자 비트들이 대각선 방향에 대해 동일한 값을 갖지만 각각의 대각선 방향의 사용자 비트 값이 다른 경우
- ② 사용자 비트들 중 중앙에 위치한 C가 각 모서리에 위치한 동일한 4개의 비트 값과 다른 경우
- ③ 사용자 비트들 중 중앙에 위치한 C와 한 개의 사용자 비트 값과 동일하고 세 개의 사용자 비트는 반대 값일 경우

이러한 세 가지 경우에 대한 세부적인 부호화 방법은 그림 3에 나타내었다. 결과적으로, 제안한 변조 코드는 인접 심볼간의 간섭 패턴을 제거함으로써 고주파수 특성을 제한하였고, 모든 페이지 내에서 1과 0의 개수를 유사하게 유지하므로써 일정한 에너지 값을 유지할 수 있도록 하였다. 또한, 입력 데이터가 변조된 후에도 사용자 비트는 보존되기 때문에 복호화 과정에서 에러 전파(propagation)의 개수는 유일하게 하나뿐이다.

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4																																											
<table border="1"> <tr><td>A</td><td>w</td><td>B</td></tr> <tr><td>x</td><td>C</td><td>z</td></tr> <tr><td>D</td><td>y</td><td>E</td></tr> </table>	A	w	B	x	C	z	D	y	E	<table border="1"> <tr><td>w</td><td>w</td><td>w</td></tr> <tr><td>x</td><td>C</td><td>x</td></tr> <tr><td>y</td><td>y</td><td>y</td></tr> </table>	w	w	w	x	C	x	y	y	y	<table border="1"> <tr><td>w</td><td>w</td><td>w</td></tr> <tr><td>x</td><td>z</td><td>x</td></tr> <tr><td>y</td><td>y</td><td>y</td></tr> </table>	w	w	w	x	z	x	y	y	y	<table border="1"> <tr><td>w</td><td>w</td><td>w</td><td>w</td></tr> <tr><td>x</td><td>z</td><td>x</td><td>z</td></tr> <tr><td>y</td><td>y</td><td>y</td><td>y</td></tr> <tr><td>z</td><td>z</td><td>z</td><td>z</td></tr> </table>	w	w	w	w	x	z	x	z	y	y	y	y	z	z	z	z
A	w	B																																												
x	C	z																																												
D	y	E																																												
w	w	w																																												
x	C	x																																												
y	y	y																																												
w	w	w																																												
x	z	x																																												
y	y	y																																												
w	w	w	w																																											
x	z	x	z																																											
y	y	y	y																																											
z	z	z	z																																											
User bits A, B, C, D, E Parity bits w, x, y, z	$w=A$ $x=D$ $y=E$ $z=B$	$w=A \oplus B$ $x=C$ $y=D \oplus E$ $z=C$	$A=B$ $w=A \oplus B$ $D=A$ $x=D \oplus A$ $A=B$ $w=C$ $D=A$ $x=C$																																											
General case $w=A \oplus B \oplus C$ $x=A \oplus C \oplus D$ $y=C \oplus D \oplus E$ $z=B \oplus C \oplus E$	$w=B$ $x=A$ $y=D$ $z=E$	$w=C$ $x=A \oplus D$ $y=C$ $z=B \oplus E$	$E=D$ $y=E \oplus D$ $B=E$ $z=B \oplus E$ $E \neq D$ $y=C$ $B \neq E$ $z=C$																																											

그림 3. 코드율이 5/9인 2차원 코드의 부호화 규칙 (⊕ : exclusive-OR).

### III. 제안한 변조코드의 성능 비교

#### 3.1 모의실험 환경

모의 실험에서는 본 논문에서 제안한 코드율이 5/9인 2차원 변조 코드의 성능을 파악하기 위해서 HDSS의 채널 모델을 구현하였다<sup>5, 6</sup>. 입력 페이지에서(p, q)의 위치에 있는 이진 입력 데이터 값은 a[p, q]로 정의하였고, 연속적인 PSF(point-spread function)는 식 (1)과 같다.

$$h(x, y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x}{\sigma}, \frac{y}{\sigma}\right) \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 분산된 신호의 회미한(blur) 정도를 나타내며,  $\text{blur}(\sigma)$ 의 값이 크면 클수록 인접 심볼간의 간섭이 증가하여 BER이 높아진다. 각 변조된 데이터 비트 사이의 간격을 1로 가정하면, 수신된 채널 값 r[p, q]와 광학 시스템에서 Nyquist aperture에 대한 임펄스 응답(impulse response)인 이산적인 PSF h[p, q]는 각각 수식 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다.

$$r[p, q] = a[p, q] \otimes h[p, q] + n[p, q] \quad (2)$$

$$h[p, q] = h(x, y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x}{\sigma}, \frac{y}{\sigma}\right) \quad (3)$$

위의 수식에서  $\alpha(0 < \alpha \leq 1)$ 는 CCD fill factor를 나타내며,  $\otimes$ 는 2차원 컨볼루션 연산으로 정의한다. 또한, n[p, q]는 평균이 0인 AWGN(additive white Gaussian noise)으로 입력 데이터의 채널 값에 첨가하였고, 이산적인 PSF의 범위는 5×5 배열의 크기로 정의하였다.

본 논문에서는 위에서 구현한 채널 모델을 이용하여 제안한 변조 코드의 성능을 비교 분석하기 위해 랜덤 시퀀스와 기준에 제안된 코드율이 4/9인 2

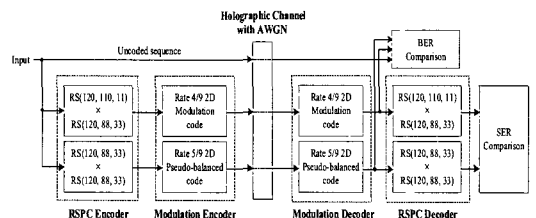


그림 4. 모의 실험을 위한 변/복조와 ECC 블록.

위해 120×120 비트의 크기를 갖는 100 페이지차원의 변조 코드를 사용하였다. 세부적인 블록도는 그림 4와 같으며, BER의 신뢰성 있는 결과를 얻기 위한 입력 데이터를 사용하여 BER을 통한 성능 비교를 하였고, SER(symbol error rate)의 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 5×10<sup>6</sup> 바이트의 입력 데이터를 사용하여 SER 성능을 평가를 하였다.

### 3.2 랜덤시퀀스의 수신 강도

그림 5는 HDSS에서 잡음을 첨가하지 않고, 2차원의 인접 심볼간 간섭만을 첨가한 수신된 채널 값, 즉 강도의 분포도이다. CCD fill factor가  $\alpha=67\%$ 와 100%인 상황에서  $\sigma=1.4$ 인 조건일 때, 랜덤 시퀀스의 성능을 나타낸다. 랜덤 시퀀스의 경우, 2차원의 인접 심볼간 간섭은 각각 1(on)과 0(off) 픽셀로부터 수신된 강도 사이에서 극심한 오버랩(overlap) 현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. Blur ( $\sigma$ )의 값이 일정할 때, CCD fill factor의 값이 증가하면 증가할수록 1과 0의 수신된 강도 사이의 오버랩 간격의 크기가 증가함을 알 수 있다.

### 3.3 변조코드 적용후의 수신 강도

그림 6은 잡음을 고려하지 않고, 2차원의 인접 심볼간의 간섭만을 첨가한 수신된 채널 값의 분포도이다.  $\sigma=1.3$ 과 1.4인 상황에서 CCD fill factor가 100%인 조건일 때, 본 논문에서 제안한 5/9 코드와 기존에 제안된 4/9 코드의 성능을 나타낸다. 그 결과, Blur 값이 커지면 클수록 각각의 1과 0의 픽셀로부터 발생된 수신된 강도의 분리된 간격(intensity separation interval)이 좁아지기 때문에 데이터 검출의 정확도가 감소함을 알 수 있다. 그림 6으로부터 두 변조코드의 경우 모두 코딩을 하지 않은 경우 보다 1과 0의 수신 강도의 간격이 넓어지는 것을 알 수 있다. 따라서 변조 코딩을 한 경우의 신호 검출 성능이 랜덤시퀀스의 경우보다 우수하리라 예측할 수 있다. 본 논문에서 제안한 코드는 기존의 코드를 4/9인 코드보다 1과 0으로부터 수신된 강도의 분리된 간격이 0.05만큼 좁기 때문에 검출 성능이 약간 떨어질 것으로 예측할 수 있다. 그러나 수신 강도의 분포를 보면 기존의 코드는 1과 0의 분포가 완전히 비대칭인 반면 제안한 코드는 거의 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있으며, 이것은 인접 페이지간 간섭을 줄이는 중요한 요소이다. 또 코드를 측면에서 도, 제안한 코드는 코딩율이 4/9인 코드보다 25%  $(=(5/9-4/9)/(4/9))$ 만큼 상승하였

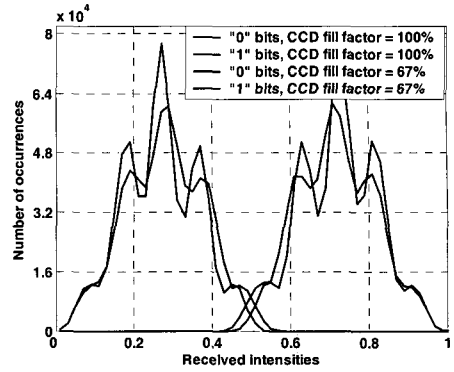


그림 5. 랜덤 시퀀스의 수신된 강도 ( $\sigma = 1.4$ ).

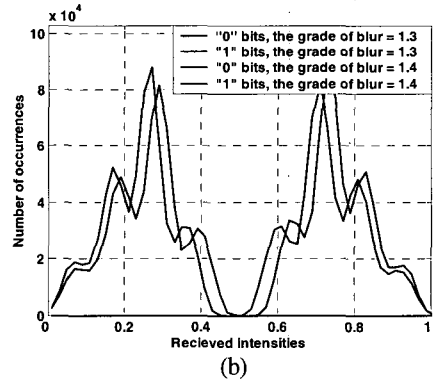
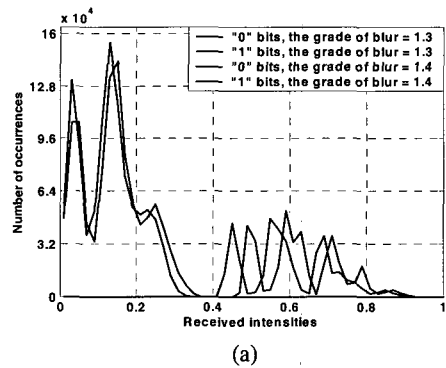
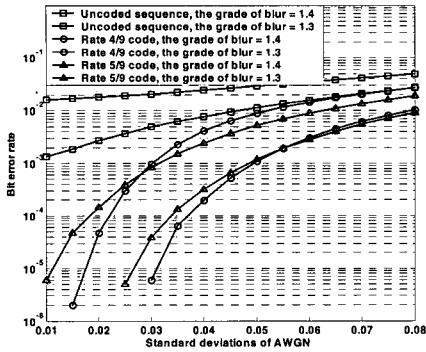


그림 6. 변조 코드 적용 후의 수신된 강도 ( $\alpha = 100\%$ ). (a) 기존의 2D 변조코드, (b) 제안한 2D 변조코드

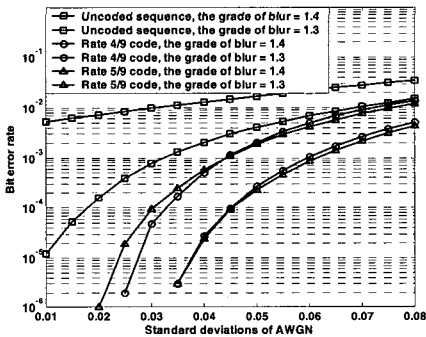
고, 모든 입력 페이지에서 1과 0의 픽셀 수에 대한 분포가 거의 동일함을 확인 할 수 있다.

### 3.4 BER을 이용한 성능 분석

그림 7은 AWGN과 2차원의 인접 심볼간의 간섭을 첨가한 채널에서 CCD fill factor가 67%, 100%인 경우,  $\sigma=1.3$ 과 1.4에 대한 BER 성능을 보여 준다. 데이터 검출 방식은 threshold level slicer에



(a)



(b)

그림 7. 제안한 코드의 성능. (a)  $\alpha = 100\%$  (b)  $\alpha = 67\%$

의해 수행되었고, 제안한 코드의 성능 평가를 위해 랜덤 시퀀스와 기존에 제안된 2차원 4/9 코드를 비교 대상으로 하였다. 여기서 두 가지 변조코드를 적용시킨 경우,  $\sigma = 1.3$ 과  $1.4$ 인 조건에서 1과 0 픽셀로부터 발생된 수신 강도의 분리된 간격은 CCD fill factor가 100%인 경우 보다 67%일 때 각각 0.09와 0.06만큼 증가하였다.

결과적으로 코드율이 4/9와 5/9인 코드는  $BER=10^{-5}$  지점에서 Blur 값이 1.3과 1.4일 때,

$\alpha=67\%$ 인 경우의 AWGN의 표준 편차 값이  $\alpha=100\%$ 인 경우보다 대략 0.008~0.013만큼 증가되는 것을 알 수 있다. 랜덤 시퀀스의 경우, Blur 값이 1.4일 때, 2차원의 인접 심볼간 간섭으로 인하여 1과 0의 수신 강도가 겹치기 때문에 BER 성능을 만족시키지 못한다. 따라서 두 변조 코드는 랜덤시퀀스와 비교하여검출 성능을 현저하게 향상시킬 수 있다. 특히 제안한 코드는 높은 코드율임에도 불구하고 Blur 값이 1.3이고  $\alpha=67\%$ 인 조건에서 BER 성능이 기존의 4/9 코드와 거의 유사함을 알 수 있다.

### 3.5 SER을 이용한 성능 분석

본 논문에서 제안한 코드율이 5/9인 2차원의 pseudo-balanced한 코드와 기존에 제안된 코드율이 4/9인 2차원의 변조 코드의 성능에 대한 정확한 비교 분석을 하기 위해서 전체적으로 동일한 코드율의 조건을 갖도록 RSPC를 설계하여 추가적인 모의 실험을 하였다. RSPC의 구조는 행(row)방향으로 적용되는 inner 코드  $RS(n_1, k_1, d_{min1})$ 와 열(column)방향으로 적용되는 outer 코드  $RS(n_2, k_2, d_{min2})$ 로 구성하였다. 결과적으로 총 코드율( $R_t$ )은 수식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_t = R_{ECC} R_{MOD} = \frac{k_1 \times k_2}{n_1 \times n_2} R_{MOD} \quad (4)$$

여기서  $R_{ECC}$ 와  $R_{MOD}$ 는 각각 ECC와 변조 블록의 코드율을 나타낸다. 표 1은 본 논문에서 제안한 5/9 코드와 기존에 제안된 4/9 코드의 총 코드율을 보여준다.

표 1. RSPC와 변조 블록 사이의 코드율 관계.

변조 코드 종류	RSPC 블록		총 코드율
	구성	코드율	
4/9 코드	$RS(120,110,11) \times RS(120,88,33)$	$\frac{110 \times 88}{120 \times 120}$	0.2988
5/9 코드	$RS(120,88,33) \times RS(120,88,33)$	$\frac{88 \times 88}{120 \times 120}$	0.2988

기존에 제안된 4/9 변조 코드에 대한 RSPC 블록의 정보 데이터는 110바이트×88행으로 구성하였다. 우선 부호화 단계에서 바깥(outer)코드  $RS(120, 88, 33)$ 에 의해 32바이트의 패리티를 110개의 열에 붙인다. 다음으로 안쪽(inner)코드  $RS(120, 110, 11)$ 에 의해 10바이트의 패리티를 120개의 행에 붙인다. RSPC에 의해 부호화된 시퀀스는 코드율이 4/9인 변조 코드를 적용한 후 HDSS에 페이지 단위로 저장된다. 그 결과, 연립어러는 행 방향으로 발생한다.

RSPC의 복호화 과정은 두 단계로 나눌 수 있다. 첫째, inner 코드  $RS(120, 110, 11)$ 의 복호화를 수행한다. 여기서 inner 코드는 행 방향으로 5개의 심볼까지 에러 정정이 가능하다. 에러 정정이 불가능한 inner 코드 워드를 위해서 outer RS 복호기에 에러의 위치를 전송하는 방법으로 이레이저(eraser)를 선언한다. 이레이저를 사용하여 outer 코드

RS(120, 88, 33)의 복호화 과정을 수행한다. Outer RS 코드의  $d_{min}$ 이 33이므로, outer 복호기는 최대 32 심볼까지 정정할 수 있다.

이와 동일한 방법으로 본 논문에서 제안한 pseudo-balanced한 코드에 대해서 RSPC 블록의 정보 데이터는 88바이트×88행으로 구성하였다. 여기서 inner 코드와 outer 코드는 동일한 RS(120, 88, 33) 코드를 사용하였다. 따라서 inner 복호기는 각 행 방향으로 16개의 심볼까지 여러 정정이 가능하므로, 코드율이 4/9인 변조 코드에 적용한 RSPC의 에러 정정 능력보다 3.2배 향상됨을 알 수 있다.

그림 8을 통해 CCD fill factor가 67%와 100%인 경우,  $SER = 10^{-5}$  지점에서 제안한 코드는 기존의 코드율이 4/9인 변조 코드보다 AWGN의 표준 편차 값이 대략 0.025 ~ 0.03만큼 증가함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 코드는 기존에 제안된 코드율이 4/9인 변조 코드보다 SER 성능이 우수함을 알 수 있다.

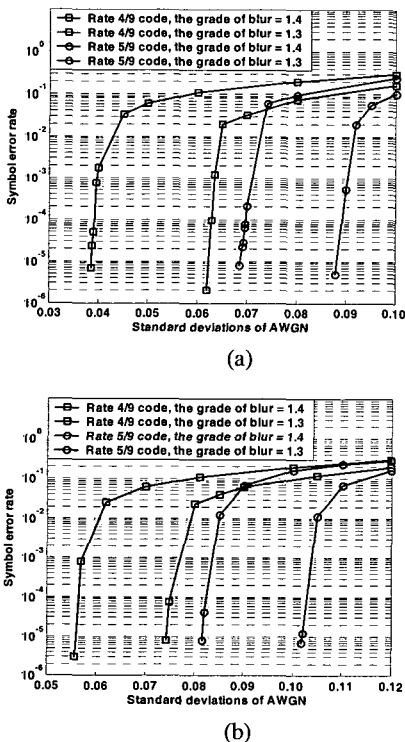


그림 8. ECC 적용 후의 성능. (a)  $\alpha=100\%$ , (b)  $\alpha=67\%$

#### IV. 결론

본 논문에서는 HDSS에서 데이터의 검출 성능을 향상시키기 위해 코드율이 5/9인 2차원 코드를 제

안하였다. 제안된 코드는 기존의 코드율이 4/9인 2차원의 변조 코드보다 1(on)과 0(off)의 픽셀 수를 유사하게 함으로써 각각의 페이지에 대해 일정한 에너지를 유지할 수 있도록 하여 인접 페이지간의 간섭(IPI)을 감소시켰다. 또한, 2차원 ISI 패턴까지 고려하여 검출 성능이 향상되도록 하였다.

제안한 5/9 코드나 기존에 제안된 4/9 변조 코드를 적용하면, 랜덤 시퀀스인 경우에서 발생하는 수신된 1과 0 사이의 강도에 극심한 오버랩 현상을 제거하여 데이터의 검출 성능을 현저하게 향상시킬 수 있었다. ECC를 제외한 BER의 성능 평가의 경우, 코드율 측면에서 보면 제안한 코드는 기존의 코드율이 4/9인 코드보다 25%만큼 상승하였음에도 불구하고, CCD fill factor가 67%일 때, Blur 값이 1.3인 조건에서 BER 성능이 거의 유사함을 알 수 있었다. 또한 ECC를 적용한 후 SER의 성능 평가의 경우, CCD fill factor가 67%와 100%인 경우,  $SER=10^{-5}$  지점에서 코드율이 5/9인 코드는 기존에 제안된 코드율이 4/9인 변조 코드보다 AWGN의 표준 편차 값이 대략 0.025 ~ 0.03만큼 증가하였다.

#### 참고 문헌

- [1] E. Hwang, J. Roh, J. Kim, J. Cho, J. Park and H. Jung, "A new two-dimensional pseudo-random modulation code for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 2B, pp. 1010-1013, Feb. 2003.
- [2] A. Vardy, M. Blaum, P. H. Siegel and G. T. Sincerbox, "Conservative arrays: multidimensional modulation codes for holographic recording," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. 42, no. 1, pp. 227-230, Jan. 1996.
- [3] N. Y. Kim, J. Lee, Y. Hong and J. Lee, "Optimal number of control bits in the guided scrambling method for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 5B, pp. 3449-3452, May 2005.
- [4] J. J. Ashley and B. H. Marcus, "Two-dimensional low-pass filtering codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 4
- [5] D. E. Pansatiakul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," *Proc. SPIE*, vol. 4342, pp. 393-400, Jan. 2002.

- [6] M. Keskinov and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," Proc. SPIE, vol. 4090, pp. 205-210, Sep. 2000.

김 나 영 (Na Young Kim)

준회원



2004년 2월 동국대학교 전자공학과 학사  
2006년 2월 동국대학교 전자공학과 석사  
2006년 2월~현재 엘지전자 연구원  
<관심분야> 채널코딩, 홀로그래픽 저장장치

이 재 진 (Jaejin Lee)

중신회원



1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사  
1984년 12월 U. of Michigan, Dept. of EECS 석사  
1994년 12월 Georgia Tech.Sch. of ECE 박사  
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원  
1995년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원  
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수  
2005년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수  
<관심분야> 채널코딩, 스토리지 시스템, 통신이론