

# 수직자기기록 채널에서 터보등화기 구조를 이용한 순환 구조적 길쌈 부호의 성능

준회원 박 동 혁\*, 종신회원 이 재 진\*

## Performance of the Recursive Systematic Convolutional Code with Turbo-Equalization Method for PMR Channel

Donghyuk Park\* Associate Member, Jaejin Lee\* Lifelong Member

### 요 약

수직자기기록 채널에서의 검출 기법으로는 잡음 예측 최대 유사도 검출 (NPML, Noise-Predictive Maximum Likelihood Detection) 기법을 사용한다. 하지만, 더 높은 기록 밀도의 요구로 더 이상 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법을 이용하여 검출이 어려워지게 되었다. 따라서 높은 기록밀도에서도 성능 이득을 얻을 수 있는 부호화 기법들이 연구되고 있다. 본 논문에서는 복잡도가 비교적 적은 순환 구조적 길쌈 부호를 부호기로 사용하였으며 성능 이득을 얻기 위하여 터보등화기 구조를 이용하였다. 또한, 다양한 기록 밀도에서 터보등화기 구조를 이용한 순환 구조적 길쌈 부호가 어떠한 성능을 보여주는지 비교하였다. 잡음환경은 80%의 지터 잡음과 20%의 백색 가우시안 잡음으로 실험하였다.

Key Words : Turbo-Equalization, Recursive Systematic Convolutional (RSC) Code, PMR, channel iteration, iterative decoding

### ABSTRACT

For perpendicular magnetic recording (PMR) channels, noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection method has been used. But, it is hard to expect improving the performance when the bit density is increased. Hence, we exploit the coding methods which has good performance. In this paper, we show the performance of the recursive systematic convolutional (RSC) codes with turbo-equalization method with different channel bit densities. The noise model is 80% jitter noise and 20% AWGN.

### I. 서 론

수직자기기록 방식의 하드디스크에서 저장능력을 향상시키기 위하여 기록 밀도의 증가가 반드시 필요하다. 하지만, 기록 밀도가 증가할수록 인접한 심볼 간의 간섭이 더 심해지게 되고, 따라서 더 많은 검출 오류가 생기게 된다. 따라서 기록 밀도가 증가

하더라도 검출 오류를 줄일 수 있는 신호처리 기법의 연구가 필요하다. 수직자기기록 방식의 하드디스크의 데이터 검출 알고리즘으로 잡음 예측 최대 유사도 검출 (NPML Detection, Noise Predictive Maximum Likelihood Detection) 기법을 이용하여 검출한다<sup>[1][2]</sup>. 하지만 기록밀도가 점점 더 높아지면서 더 이상 잡음 예측 최대 유사도 검출기를 통해

\* 본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(manakg@hotmail.com), (zlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-10-454, 접수일자 : 2008년 10월 16일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 3일

서는 성능 이득을 얻기가 힘들어 졌다. 따라서 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호 혹은 터보 부호 등의 반복복호 (Iterative Decoding) 기법을 이용한 부호들을 정보저장 시스템에 적용하려는 연구들이 진행 되고 있다<sup>3),6)</sup>. 하지만, LDPC 부호 혹은 터보부호 등의 반복복호 부호는 그 자체만으로 구현 복잡도가 매우 크다. 따라서 LDPC 등의 반복복호 부호를 대신하여 복잡도가 비교적 적은 부호를 사용하면서 터보등화기 구조를 통하여 성능을 향상시키는 연구가 필요하다.

순환 되지 않는 길쌈 부호의 성능이 순환되는 길쌈 부호의 성능 보다 더 나쁘다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. 또한, 순환 구조적 길쌈 부호 (RSC Code, Recursive Systematic Convolutional Code)를 터보등화기 구조를 이용하여 복호 하면 수직자기기록 채널에서 좋은 성능을 낸다<sup>8)</sup>. 본 논문에서는 기록 밀도가 점점 높아짐에 따라 터보등화기 기법을 이용한 순환 구조적 길쌈 부호의 성능이 어떻게 변하는지를 보았다. 또한, 반복복호 부호가 아닌 부호를 사용하여 터보등화기 구조를 통한 채널 반복복호를 할 때 성능 향상에 어떠한 영향력이 있는지 보았다.

II장에서는 수직자기기록 채널의 모델링과 실험에 사용한 시스템에 대하여 간략히 설명한다. 또한, 실험 환경에 대해서도 언급한다. III장에서는 시뮬레이션 결과를 정리 하며, 그 결과를 토대로 IV장에서 결론을 내린다.

## II. 시스템 개요

### 2.1 수직자기기록 채널 모델

수직자기기록 채널의 모델은 단일 천이 응답으로 다음과 같이 나타낸다<sup>8)</sup>.

$$g(t) = A \times \tanh\left(\frac{2t}{0.597\pi \times T_{50}}\right) \quad (1)$$

A는 g(t)의 최저값에서 최대값의 크기이고, T<sub>50</sub>은 g(t) 펄스가 -A/2 ~ A/2 까지 걸리는 시간이다. 채널 비트 밀도 (CBD, Channel Bit Density)의 정의는 T<sub>50</sub>/T<sub>b</sub>이며, T<sub>b</sub>는 비트 간격이다. 실험에서 A는 1이며, 비트 간격은 1 이다. 수직자기기록 채널을 통과한 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k [g(t-kT) - g(t-(k+1)T)] + n_w(t) + n_j(t) \quad (2)$$

여기서, a<sub>k</sub>는 입력 비트, n<sub>j</sub>(t)는 지터 잡음, n<sub>w</sub>(t)는 백색가우시안 잡음이다. SNR은 다음으로 정의한다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{A^2}{\sigma_w^2 + \sigma_j^2 \|g'(t)\|^2} \right) \quad (3)$$

σ<sub>w</sub><sup>2</sup>, σ<sub>j</sub><sup>2</sup>은 각각 백색가우시안잡음과 지터 잡음의 전력이다. A는 신호의 전력을 나타내며, 실험에서 이 값은 0.5 로 정의하였다.

### 2.2 메시지 전달 복호 알고리즘

연관정 값을 내는 알고리즘으로는 SOVA (soft-output Viterbi algorithm)과 BCJR 알고리즘 등이 있다. 본 논문에서는 BCJR 알고리즘의 일종인 메시지 전달 복호 알고리즘을 사용하여 채널 검출기와 RSC 복호기를 구현하였다.

실험에 사용한 채널 검출기와 RSC 복호기에 사용한 메시지 전달 복호 알고리즘은 다음과 같다.

#### 1. 초기화

$$\begin{aligned} L_{A_0(m)} &= L_{B_0(m)} = \begin{cases} 0 & , m = 0 \\ -\infty & , m \neq 0 \end{cases} \\ L_{A_n(m)} &= L_{B_n(m)} = -\ln(M) \quad , \forall m \quad ; n \neq 0, N \end{aligned}$$

#### 2. 노드의 출력 값 A<sub>n+1</sub>(m), B<sub>n</sub>(m) 을 모든 노드, 모든 상태에 대해서 구한다.

$$\begin{aligned} L_{A_{n+1}(m)} &= \ln(e^{\sum L_{A_n(m')} + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])}) \\ &\approx \max[L_{A_n(m')} + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])] \\ L_{B_n(m)} &= \ln(e^{\sum L_{B_{n+1}(m')} + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])}) \\ &\approx \max[L_{B_{n+1}(m')} + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])] \end{aligned}$$

#### 3. 각 노드의 복호 확률 정보 ln(Pr[x<sub>n</sub>]) 을 구한다.

$$\begin{aligned} \ln(\Pr[x_n]) &= \sum e^{L_{A_n(m)} + \ln(\Pr[y_n|r_n]) + L_{B_{n+1}(m)}} \\ &\approx \max[L_{A_n(m')} + \ln(\Pr[y_n|r_n]) + L_{B_{n+1}(m)}] \end{aligned}$$

위 알고리즘에서 y<sub>n</sub>, r<sub>n</sub>은 각각 노드 트렐리스의 정답 값과 채널을 통과한 값이다. L<sub>A<sub>n</sub>(m)</sub>, L<sub>B<sub>n</sub>(m)</sub>은 각각 트렐리스에서의 진행방향과 역방향의 각 노드의 확률 정보이다. N, M은 각각 트렐리스의 길이와 상태의 길이이다. 실험에서 N은 4336이고, M은 16이다. Pr[x<sub>n</sub>], Pr[y<sub>n|x<sub>n</sub>}]은 각각 복호후의 확률 정보와 트렐리스에서 연결 경로 (path)의 확률 정보이다. 각 노드의 확률 정보 Pr[y<sub>n|r<sub>n</sub>}]은 다음으로 나타낸다.</sub></sub>

$$\Pr[y_n | r_n] = \frac{1}{1+d^2} \quad (4)$$

$d$  는  $|y_n - r_n|$ 으로 정의한다.

### 2.3 시스템 모델

그림 1은 시스템 모델을 보여준다. 시스템에 사용된 순환 구조적 길쌈 부호의 생성 다항식은 (31, 23)<sub>8</sub>이다. 부분 응답 (PR, Partial-Response) 타겟 값은 PR(12321)을 사용하였다. 데이터 비트는 4096비트이며, 패리티 비트는 240비트이다. 순환 구조적 길쌈 부호의 부호기에서 패리티의 출력을 펼쳐링하여 240비트로 만들었다. 부호율은 0.945(≈ 4096/4336)이다. 불규칙적인 인터리버를 사용하여 성능을 향상시켰다. 인터리버의 크기는 4336비트

이다. 잡음은 수직자기기록 채널에서 지배적인 오류의 요인인 지터 잡음을 전체 잡음의 80%로 하였다<sup>9)</sup>. 20%는 부가백색가우시안 잡음으로 모델링하여 실험하였다<sup>10)</sup>. 터보등화기 구조를 활용하기 위하여 채널 검출기와 순환 구조적 길쌈 부호(RSC)의 복호기는 연판정 값을 출력으로 해야 하므로, 메시지 전달 알고리즘을 이용하여 각각을 구현하였다<sup>16)</sup>. 터보등화기의 목적은 채널 통과후의 오류가 많은 데이터를 통해 검출 하였을 때, 낮은 BER 성능을 내는 것을 반복복호를 통하여 그 검출기의 성능이득을 더 높이는 것이다. 따라서, 터보등화기를 통하여 검출기에서 이전 보다 높은 BER 성능을 얻는다면 복호기에서 더 높은 BER 성능 이득을 얻을 수 있는 것이다. 수직자기기록 채널 모델은 II장에서 설명하였고, 등화기는 LMS (least mean square) 알고리즘을 이용하여, 탭 계수를 학습하였다. 등화기와 검출기는 부분응답 최대 유사도 검출 방법 구조이며, 시스템은 부분응답 최대 유사도 검출기에 외부 부호기로 순환 구조적 길쌈 부호를 사용하였다. 기록 밀도가 1.7, 2.0, 2.4, 2.8 일 때 순환 구조적 길쌈 부호의 성능을 보았다. 또한, 그 성능을 비교하기 위하여 수직 자기 기록 채널에서 현재 사용하고 있는 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법의 성능을 각각의 기록밀도에서 실험하였다.

하였다.

실험에서 정의한 기록 밀도의 의미는 사용자 비트 밀도 (UBD, User Bit Density)로서 실제로 채널에 기록되는 채널 비트 밀도는 사용자 비트 밀도 값에 부호율 (R) 값을 나눈 결과이다. 따라서 각 기록 밀도 1.7, 2.0, 2.4, 2.8은 순환 구조적 길쌈 부호를 사용할 때의 부호율인 0.945로 나누어 각각 채널 기록 밀도가 1.799, 2.117, 2.540, 2.964가 된다. 또한, 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법을 이용한 시스템의 기록 밀도는 부호율이 1이므로 각각 1.7, 2.0, 2.4, 2.8이 된다. 사용자 비트 밀도의 의미는 데이터를 동일한 공간에 얼마나 저장 하는지를 나타내는 변수 값이다. 사용자 비트 밀도가 같으면, 동일한 공간에 동일한 비트 수의 데이터를 저장하는 것이다. 순환 구조적 길쌈 부호의 패리티는 240비트이므로 단위 면적에 데이터 비트(4096비트)와 패리티 비트(240비트)가 모두 저장되며, 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법에서는 단위 면적에 데이터 비트(4096비트)만이 저장되어 서로 다른 채널 비트 밀도를 가진다. 본 실험에서 순환 구조적 길쌈 부호를 이용한 시스템과 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법을 이용한 시스템의 정확한 비교를 위해서는 동일한 데이터 비트를 저장할 때의 성능을 비교해야 하므로, 사용자 비트 밀도를 고정하여 실험하여야 한다.

실험한 비트수는 SNR 구간에 따라 가변적인 길이로 실험하였다. 낮은 SNR 구간에서는 3,000블록(12,288,000비트)에서 10,000블록(40,960,000비트)의 길이로 실험하였고, 10<sup>-6</sup> BER 이상이 요구되는 SNR 구간에서는 최대 30,000블록(122,880,000비트)을 실험하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

기록밀도를 증가시켜 가면서 순환 구조적 길쌈 부호의 성능을 실험하였다. 그림 2는 기록밀도가 1.7일 때, 채널 반복복호 횟수를 증가시켜 가면서 성능의 변화를 실험한 것이다. 채널 반복복호 횟수가 1회일

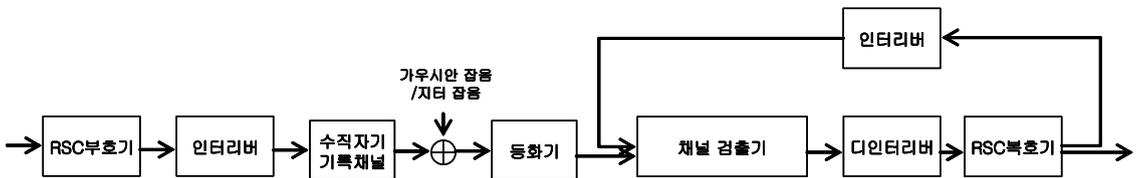


그림 1. 수직 자기기록 채널에서 순환 구조적 길쌈 부호를 이용하여 복호하는 시스템의 블록 다이어그램

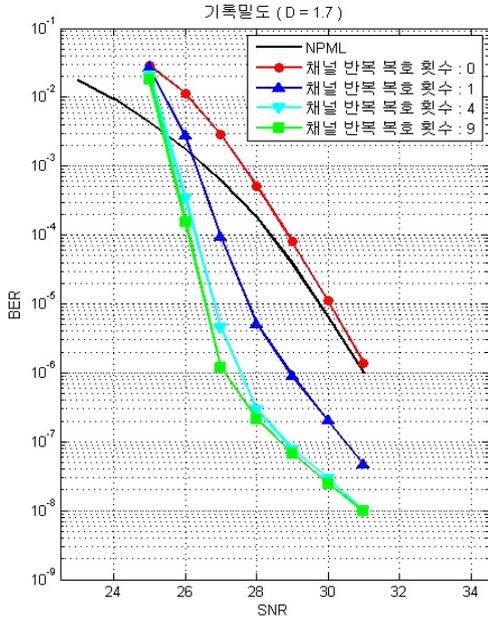


그림 2. 기록 밀도 1.7 일 때, 채널 반복복호 횟수에 따른 시스템 성능

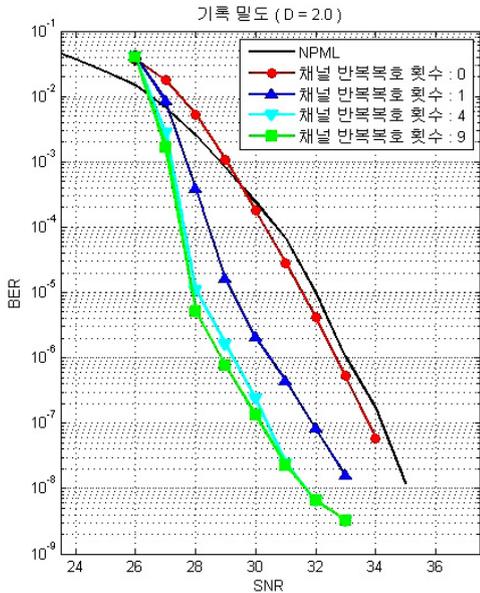


그림 3. 기록 밀도 2.0 일 때, 채널 반복복호 횟수에 따른 시스템 성능

때의 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법보다  $10^{-6}$  BER일 때 2dB 좋다. 채널 반복복호 횟수가 9회일 때는 잡음 예측 최대 유사도 검출기법보다  $10^{-6}$  BER일 때 4dB 좋다. 채널 반복복호의 횟수가 증가할수록 성능이 더 좋아지는 것을 볼 수 있다. 채

널 반복복호 횟수가 4회일 때와 9회일 때의 성능 그래프는 거의 일치하는 것을 보여준다. 채널 반복복호가 증가하면 응답속도도 비례하여 증가한다. 따라서 반복복호의 횟수는 4회가 적당하다.

그림 3은 기록밀도가 2.0일 때의 성능 그래프를 보여준다.  $10^{-6}$  BER일 때 채널 반복복호를 하지 않았을 때의 순환 구조적 길쌈 부호의 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다 0.2dB 좋다.  $10^{-6}$  BER 일 때 채널 반복복호 횟수가 1회, 9회인 경우의 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다 각각 2.5dB, 4dB 좋다. 여기서도 마찬가지로 채널 반복복호의 횟수가 4회일 때와 9회일 때가 성능이 거의 비슷하다. 그림 4는 기록 밀도가 2.4일 때의 그래프이다. 채널 반복복호를 하지 않았을 때의 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다  $10^{-6}$  BER일 때 0.5dB 정도 좋아졌다. 그림 5는 기록 밀도가 2.8일 때의 성능인데, 채널 복호를 하지 않았을 때의 성능이  $10^{-6}$  BER 일 때 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다 1.3dB 좋아졌다. 채널 반복복호의 횟수가 4회와 9회 일 때 각각 비슷한 성능을 보였다.

기록 밀도 1.7~2.8 일 때의 실험결과에서 기록 밀도가 높아질수록 순환 구조적 길쌈 부호의 자체 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다 더 좋아지는 것을 알 수 있다. 즉, 기록 밀도가 높아질수록

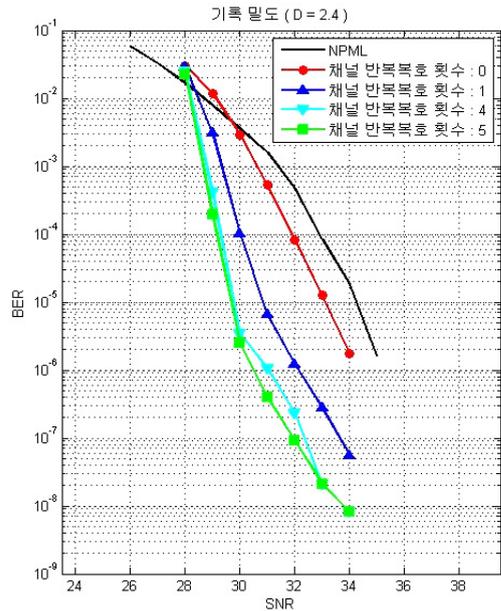


그림 4. 기록 밀도 2.4 일 때, 채널 반복복호 횟수에 따른 시스템 성능

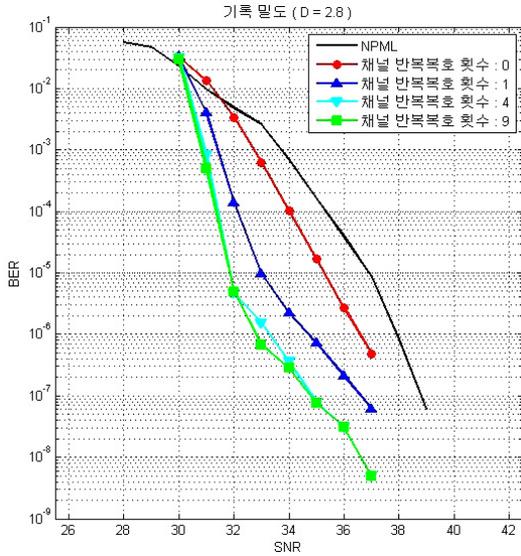


그림 5. 기록 밀도 2.8 일 때, 채널 반복복호 횟수에 따른 시스템 성능

록 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법에서 사용하는 잡음 필터의 효과 보다 순환 구조적 길쌈 부호와 부분 응답 최대유사도 검출 기법을 연결하였을 때의 성능이 더 좋아진다는 것을 뜻한다. 또한, 기록 밀도가 높아지더라도 채널 반복복호의 횟수가 증가할수록 순환 구조적 길쌈 부호의 성능이 증가되는 것을 보였다. 즉, 터보등화기 구조로 성능의 향상이 있다는 것을 보였다.  $10^{-6}$  BER 이전의 성능에서는 급격하게 성능이 좋아지는 폭포(waterfall) 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 반면,  $10^{-6}$  BER 이후에는 오류 마루(error floor) 현상이 보이는 것을 확인하였다. 하지만, 일반적인 오류 마루 현상과는 달리, SNR이 높아지면서 큰 폭은 아니지만 계속적으로 성능 향상이 있는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

채널 반복복호를 하지 않은 순환 구조적 길쌈 부호의 복호 성능이 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법의 성능 보다,  $10^{-6}$  BER 에서, 기록 밀도 1.7일 때, 비슷한 성능을 보였고, 기록 밀도 2.0일 때, 0.2dB의 성능이득, 기록 밀도 2.4일 때, 0.5dB의 성능이득, 기록 밀도 2.8일 때, 1.3dB의 성능이득을 보였다. 기록 밀도가 높아질수록, 잡음 최대 유사도 검출 기법 보다 순환 구조적 길쌈 부호의 복호 성능이 더 좋아지는 것을 확인하였다. 기록 밀도가 낮을 때는 잡음 예

측 최대 유사도 검출 기법을 이용하였을 때의 성능이 채널 반복복호를 하지 않았을 때의 순환 구조적 길쌈 부호의 성능보다 좋은 것을 확인할 수 있었다. 그 이유로는 순환 구조적 길쌈 부호는 패리티 비트가 있어 기록되는 채널 비트 밀도가 더 커지기 때문이다. 하지만 기록 밀도가 높아질수록 채널 비트의 밀도가 커지면서 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법의 성능이 저하되고 순환 구조적 길쌈 부호의 패리티의 영향으로 성능이 향상되는 것이다. 따라서 기록 밀도를 높여서 하드디스크의 저장 능력을 향상시키기 위해서는 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법이 아닌 터보 등화기 구조를 이용한 순환 구조적 길쌈 부호 등의 반복 복호 기법들이 필요하다.

채널 반복복호가 9회인 순환 구조적 길쌈 부호의 복호 성능은  $10^{-6}$  BER에서, 잡음 예측 최대 유사도 검출 기법 보다, 기록 밀도 1.7에서는 4dB, 기록 밀도 2.0에서는 4dB, 기록 밀도 2.4에서는 4.5dB, 기록 밀도 2.8에서는 5dB의 성능이득을 보였다. 기록 밀도가 높아질수록 채널 반복복호의 성능이득은 더 커지는 것을 확인하였다. 실험 결과로 확인하였을 때 채널 반복복호의 적정 횟수는 4회이다.

결론적으로, 하드디스크의 저장 용량을 향상시키기 위하여 밀도의 증가가 반드시 필요하므로 잡음 예측 유사도 검출 방법 보다 높은 기록 밀도에서 좋은 성능 이득이 있는 순환 구조적 길쌈 부호를 사용하여야 한다. 또한, 터보등화기를 이용한 채널 반복복호를 통하여 더 큰 성능 이득을 얻을 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. R. Chevillat, E. Eleftheriou, and D. Maiwald, "Noise-predictive partial-response equalizers and applications," *IEEE Conf. Records ICC'92*, Vol.2, pp.942-947, June 14-18, 1992.
- [2] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith, and W. Hirt, "Noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection," *IEEE Journal on Sel. Areas Comm.*, Vol.10, No.1, pp.38-56, Jan. 1992.
- [3] X. Hu and B. V. K. V. Kumar, "Evaluation of low-density parity-check codes on perpendicular magnetic recording model," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.43, No.2, pp.727-734, Feb. 2007.
- [4] E. M. Kurtas, A. V. Kuznetsov, and I.

Djudjevic, "System perspectives for the application of structured LDPC codes to data storage devices," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.42, No.2, pp.200-207, Feb. 2006.

- [5] W. E. Ryan, "Performance of high rate turbo codes on a PR4 equalized magnetic recording channel," in *Proceedings of IEEE International Conference on Comm.*, Vol.2, pp.947-951, June, 1998.
- [6] 박동혁, 이재진, "수직자기기록 채널에서 LDPC를 이용한 메시지 전달 방식의 채널 검출 성능 비교", *한국통신학회논문지 '08-04 Vol.33, No.4*, pp.299-304, April 2008.
- [7] D. Park, J. Kim, J. Lee, "Message-passing detector with serial concatenated codes for PMR channel," *Intermag2008 conference*, HM-6, May 4-8, 2008.
- [8] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near shannon limit error-correcting coding and decoding : turbo-codes," *Proc. 1993 Int. Conf. Commun.*, Vol.2, pp.1064-1070, May 1993.
- [9] M. Madden M. Öberg, Z. Wu, and R. He, "Read channel for perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, No.1, pp.241-246, Jan. 2004.
- [10] 박동혁, 이재진, "수직자기기록 채널에서의 메시지 전달 알고리즘을 이용한 콘볼루션 부호의 성능," *제 18회 JCCI통신 정보 합동 학술대회*, pp.299, April 2008.

박 동 혁 (Donghyuk Park)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2007년 2월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
<관심분야> 스토리지 시스템, LDPC 부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)

중신회원

한국통신학회 논문지 Vol.33, No.4 참조