

# 광 디스크 채널을 위한 PRML 검출 방식의 성능 분석

正會員 김 호 준\*, 맹 준 석\*, 김 기 준\*, 황 금 찬\*

## Performance Analysis of PRML Detection Method for Optical Disk Channel

Hojoon Kim\*, Joonseok Maeng\*, Kijun Kim\*, Keumchan Whang\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 기록 밀도가 높은 광 디스크 채널에서 발생할 수 있는 인접 신호간 간섭(ISI)하에서 재생 신호의 비트 오류율을 개선시킬 수 있는 PRML 검출 방식을 제안하고 그 성능을 분석 하였다. 인접 신호간 간섭 및 기타 채널 왜곡 환경 하에서 PRML 검출을 위해서 적응 최소 평균 자승(MMSE) 알고리즘을 사용한 등화기와 비터비 검출기를 사용하였다. 또한 기록밀도가 높아지면서 발생할 수 있는 인접 트랙간 간섭 및 타이밍 지터 하에서 채널 변화를 보상해줄 수 있도록 적응 등화 방법을 고려하였다. 제안된 비터비 검출기에서는 시스템의 비트 오류 성능을 향상시키기 위하여 부분 응답 특성 뿐만 아니라 변조 부호에 의해 결정되는 제한된 데이터 패턴을 고려하였다. 모의실험을 통해 제안된 PRML 검출 방식과 문턱값 검출 방식의 비트 오류율을 비교 분석하였으며 성능 분석 결과 제안된 PRML 검출 방식은 기존의 방식에 비하여  $10^{-5}$ 의 비트 오류율에서 약 4dB 정도의 SNR이득을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

In this paper, a PRML detection method which are able to improve the bit error rate performance under intersymbol interference on the high-density optical disk is proposed and it's performance is analyzed. Under intersymbol interference and other channel impairment, we consider a equalizer using minimum-mean-squared error creterion and a viterbi detector for PRML detection. We consider the adaptive equalization method under adjacent track interference and timing jitter condition for compensating the channel variation. In the proposed Viterbi detector, limited data patterns which is characterized by the characteristic of partial response signaling and modulation code are considered in order to improve the system bit error rate performance. The performance of the PRML detection method is compared to that of the threshold detection method by means of simulation. From the

\*연세대학교 전기공학과  
論文番號: 97262-0726  
接受日字: 1997年 7月 26日

analysis, the PRML detection method shows SNR gain of 4dB over threshold detection method at the bit error rate of  $10^{-5}$

## I. 서 론

최근 멀티미디어로 일컬어지는 음성 및 화상 정보에 대한 관심이 증가되고 있다. 멀티미디어 정보는 막대한 양의 디지털 데이터를 수반하게 되며 이를 보다 효율적으로 이용하려면 원하는 정보를 저장하고 또 필요에 따라 재생해낼 수 있는 대용량의 저장 매체가 필요하게 된다. 최근 국내에서도 DVD(Digital Video Disk)가 출시되면서 광 디스크 저장 매체에 대한 관심이 증가되고 있다. 광 디스크 저장 매체는 반영구적으로 사용할 수 있으며 먼지나 디스크 표면의 상처 등의 외부 자극에 강하다는 장점을 가지고 있어 음성, 영상 등의 데이터 뿐만 아니라 컴퓨터의 보조 기억 장치로서도 적합한 매체로 주목받고 있다.

광 디스크에 보다 많은 정보를 기록하기 위해서 기록 밀도를 높이기 위한 시도가 계속되고 있다. 한정된 면적의 디스크를 효율적으로 사용하기 위하여 레이저의 단파장화, 대물렌즈의 고 개구수화, 트랙간 간격의 축소, 새로운 신호 변조 및 검출 기술 등이 개발되고 있다[1] [2]. 이와 같이 광 디스크의 기록 밀도를 높이는 방법에는 여러 가지가 있으나 단파장의 청색 레이저 다이오드는 2000년 이후에나 상품화 될 예정이며, 대물렌즈의 개구수 증가는 광학적 안정성을 감소시키는 등의 광학 부품의 물리적인 특성 향상에는 비용과 시간이 많이 드는 단점이 있다. 이러한 한계 때문에 새로운 변조 부호를 개발하거나 등화기를 사용하여 채널 왜곡을 보상하여 주는 방법등의 광 디스크의 재생신호 처리과정에서 기록 밀도를 향상시킬 수 있는 방법들이 많이 연구되고 있다[3] [4].

최근에 광 디스크 저장 매체에서 PRML(Partial Response Maximum Likelihood) 검출방식에 대한 관심이 증가되고 있다. 기존의 등화기는 부호간 간섭을 없애기 위하여 재생 신호의 고주파 성분을 강조하여 부호간 간섭은 억제시키나 잡음의 고주파 성분 또한 함께 증폭하게 되어 SNR은 악화되게 된다. PRML에서 등화기는 채널의 응답을 미리 정해진 목표응답(Target Response)으로 성형하여주는 필터로 구성되

며 이 필터는 의도적으로 부호간 간섭을 줌으로써 고주파 성분을 줄여서 SNR악화를 억제한다. 부호간 간섭이 포함된 등화 신호는 비터비 알고리즘을 사용하여 원래의 데이터로 검출해 내게 된다. 또한 광 디스크의 재생 신호는 부호간 간섭뿐만 아니라 변조 부호에 의해서도 결정되는 제한된 패턴의 데이터 계열만이 나타나는 특성 때문에 비터비 복호법은 이 패턴과 실제의 샘플링 결과를 비교하여 오류를 검출하고 정정할 수 있어 오류 정정 능력이 높게 된다.

본 논문에서는 특정 목표응답특성을 나타낼 수 있는 등화기를 구현하기 위하여 최소 평균 자승 오차(MMSE) 알고리즘을 적용한 등화 방법을 사용하였으며 변조 부호 및 목표응답에 의해 나타날 수 있는 제한된 데이터 패턴을 비터비 알고리즘에 적용하는 방법에 대하여 연구하였다.

II절에서는 광 디스크의 채널 특성을 잘 나타낼 수 있는 채널 모델로서 MTF(Modulation Transfer Function)를 사용한 채널 모델을 제시하고 III절에서는 변조 부호와 채널의 부분 응답특성이 고려된 등화기 및 비터비 복호기를 사용하여 인접 신호간 간섭이 심한 광 디스크 채널하에서 비트오류 확률을 개선하였으며 채널의 변화에 따른 왜곡의 보상을 위하여 적응 등화기를 사용하여 채널 변화에 대처하도록 하였다. 이를 위하여 MMSE 알고리즘을 사용한 디지털 방식의 PR 등화기와 비터비 알고리즘을 사용한 검출기에 대하여 나타내었다. IV절에서는 등화기 및 검출기의 성능 분석을 위하여 모의 실험한 결과를 나타내었다. 성능 분석 방법으로 시스템의 비트 오류를 구해내기 위하여 몬테카를로 방법으로 모의 실험 하였으며, SNR, 인접 트랙간 간섭, 타이밍 지터 등의 채널 파라미터의 변화에 따른 PRML검출 방식의 비트 오류를 분석하고 선형 등화기와 문턱값 검출기를 사용한 검출 방식과의 비트 오류를 비교 분석하였다. 마지막으로 V절에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 및 채널 모델

상 변화 광 디스크 시스템에 정보를 기록하고 재생 해 내는 과정은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 디스크에 저장될 디지털 정보는 RS-PC(Reed-Solomon Product Code)를 사용하여 에러 정정 부호화된 후, (2, 10) RLL(Run Length Limited)부호로서 채널 특성에 맞게 변조된다. (2, 10) RLL 부호의 경우 고주파 성분의 전력이 상대적으로 적으며 저주파 대역에 신호 전력이 모여있게 되어 광 디스크 채널의 특성에 잘 부합된다. 이 경우 RLL부호를 사용하여 동일한 조건하에서 부호화 이득으로 약 1.5배 정도의 저장 밀도의 증가 효과를 얻을 수 있다[6] [8]. 변조된 신호는 기록을 위한 고출력의 레이저에 의해 상 변화 디스크에 기록된다. 상 변화형 광 디스크는 디스크면에 빛이 조사될 때 결정상과 비결정상의 반사도 차이를 재생의 기본 원리로 하는 기록 매체이므로 기록을 위한 레이저는 디스크의 상을 변화시킬수 있도록 고출력이여야 한다. 상 변화라는 용어는 이와 같은 결정상 및 비결정상의 변환 상태를 표현하는 것으로 각 상의 변화를 디지털 정보 1과 0에 대응하여 정보를 저장할 수 있다. 한편 디스크에 기록된 정보의 재생을 위하여 디스크에 재생을 위한 저 출력의 레이저를 조사하면 디스크면에서 빛이 반사된다. 이때 반사되는 빛의 양은 각 상의 반사도 차이에 의해 결정되며 광 검출기(photo detector)는 반사된 광학 신호를 전기적인 신호로 변환시켜 준다. 변환된 신호는 등화기 및 검출기에서 적절한 처리 과정을 거친 다음 변조 복호화되고 에러 정정 복호화되어 저장된 정보로 얻어지게 된다.

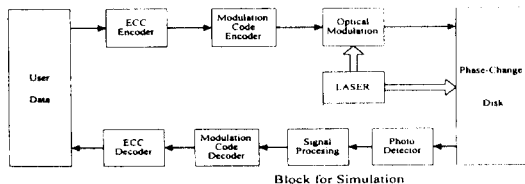


그림 1. 상 변화형 광 디스크 시스템 모델  
Fig. 1. The block diagram of the phase-change disk system

광 디스크의 채널 특성은 레이저 빔의 강도 분포와 스폿(Spot)의 크기에 크게 의존한다[1]. 레이저 빔

의 강도는 가우시안 분포로서 근사화 시킬 수 있으며 이때의 광학계의 주파수 특성은 MTF(Modulation Transfer Function) 모델로 나타낼 수 있다[1] [4]. MTF란 기존의 읽기 전용 광 디스크에서 제안된 모델로서 시스템의 주파수 특성을 나타낸다. 여기에서 주파수 특성이란 디스크에 기록된 피트를 읽어들이는 쪽의 주파수 특성을 말하며 디스크상에서 얼마만큼 작은 피트(Pit)를 읽을 수 있는가를 나타낸다. 상 변화 디스크는 상 변화 현상에 의한 반사광량의 변화를 검출한다는 측면과 레이저 빔의 형상을 가우시안 분포로 근사화 시킬 수 있다는 점에서 가우시안 MTF를 적용하여 채널을 다음과 같이 모델링 할 수 있다[4].

$$H(x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \cos^{-1} \frac{x}{x_0} - \frac{x}{x_0} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0}\right)^2} \right] & x \leq x_0 \\ 0 & x > x_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$H(f) = \frac{2}{\pi} [\cos^{-1} f \sqrt{1 - f^2}] \quad 0 \leq f \leq 1 \quad (2)$$

$$F_c = \frac{2 \times NA \times V}{\lambda} \quad (3)$$

식 (1)에서  $x$ 는 공간 주파수를 나타내며  $x_0$ 는 광학계의 컷오프(cut-off)를 나타낸다. 여기에서  $x_0 = 2NA/\lambda$ 로 나타나며 광학계에서는 이러한 공간 주파수를 초과하는 미세한 피트를 읽을 수 없다는 것을 나타내고 있다. 이를 시간 주파수에 관한 식으로 나타내 보면 식 (2)와 같이 나타내게 되고 MTF의 시간 축의 차단 주파수는 식 (3)으로 표시할 수 있다. 식 (2)에서 주파수는 식 (3)의 차단 주파수에 의해 정규화된 주파수이며, 식 (3)에서  $NA$ 는 대물렌즈의 개구수,  $V$ 는 디스크의 회전 선 속도,  $\lambda$ 는 사용된 레이저의 파장을 나타낸다.

디스크에 저장된 정보의 재생시 광 검출기에서 얻어낸 신호는 잡음에 의해 왜곡되어 나타나게 된다. 본 논문에서는 신호 왜곡을 일으키는 잡음을 전기적 잡음으로 대변되는 비상관성 잡음과 인접 트랙의 간섭 및 타이밍 지터와 같은 상관성 잡음으로 구분하였다[1] [2] [3]. 전기적 잡음을 나타내기 위하여 가우시안 백색 잡음을 사용하였고 채널 모델에서 인접 트랙의 간섭의 영향을 고려해 주기 위해서, 우선 레이저 광의 스폿 크기를 계산한 뒤 광의 강도 분포를 가우시안으로 설정하고 디스크의 트랙간 간격에 따라

서 인접 트랙으로부터의 간섭량을 결정한다. 광 디스크는 RLL부호를 사용하므로 상대적으로 심볼율보다 채널의 주파수 특성이 열악한 환경에서 동작하게 된다. 따라서 타이밍 지터는 신호의 패턴에 민감한 영향을 받게 되며 이를 반영하기 위하여 주위의 심볼로부터 일정시간 지연된 심볼을 보간법(Interpolation)을 사용하여 계산하였다. 그림 2에 MTF의 주파수 특성을 가지는 임펄스 응답,  $h(t)$ 를 사용하여 신호 왜곡이 고려된 광 디스크의 채널 모델을 나타내었다. 그림 2와 같은 채널 모델에서 채널 심볼율은 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$F_{sym} = \frac{(d+1) \times V}{Pl} \quad (4)$$

여기에서  $d$ 는  $(d, k)$ 부호의 제한조건이며,  $V$ 는 디스크의 회전 선 속도,  $Pl$ 은 기록 가능한 최소한의 피트 길이를 나타낸다.

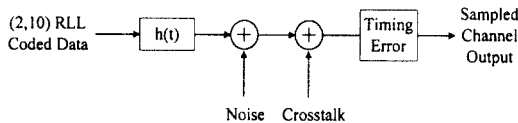


그림 2. 신호 왜곡이 고려된 광 디스크 채널 모델  
Fig. 2. Optical disk channel model with noise and jitter

### Ⅲ. PRML 검출 방식

광 디스크의 기록 밀도를 올리기 위해서는 높은 주파수로 데이터를 읽고 쓰지 않을 수 없게 되고 이렇게 재생 신호의 주파수가 높아지면 광 디스크의 주파수 특성상 재생 신호는 디스크에 기록된 신호의 파형보다 무디어지게 된다. 따라서 각 시간에 재생된 신호간에 간섭이 일어나게 되며 이 때문에 주어진 광 디스크의 재생 특성만으로는 고 밀도화에 한계가 있다. 기존의 등화기는 부호간 간섭을 없애기 위해 넓은 파형을 쫓게 하지만 부분 응답 신호 방법은 파형 등화 시 기존의 부호간 간섭을 의도적으로 하여 SNR의 악화를 억제하면서 간섭된 데이터 열은 비터비 알고리즘을 사용하여 복원해낸다. 이러한 검출 방식을 PRML이라고 하며 이때 부호간 간섭을 받는 방법

에 따라 부분 응답 방법이 여러 가지로 나뉘게 되고 이 방식에 따라 어떤 주파수 성분을 강조하는 것이 결정되게 된다. 이러한 부분 응답 신호 방법을 실현하기 위해 광 디스크 채널 전체가 특정의 부분 응답 특성을 가지도록 등화기를 설계하면 된다.

부분 응답 신호란 조절된 양의 신호간 간섭을 허용하고 이를 통해서 데이터 처리율과 주파수 효율을 높이고자 하는 방법이다. 광 디스크 채널을 부분 응답 신호로 모델링하면 식 (5)와 같은 PR-n 채널과 유사한 주파수 특성을 보여준다고 알려져 있다[4] [9].

$$G(D) = (1 + D)^n \quad (5)$$

여기에서  $D$ 는 한 심볼주기의 시간지연을 의미한다.

광 디스크 채널이 식 (5)와 유사한 특성을 가지므로 등화기를 이용하여 SNR의 악화를 억제하면서 특정 부분 응답 특성에 가깝게 만들어 줄 수 있게 되며 이때 일반적으로 많이 사용되는 파형 슬림 등화기에 비하여 이득을 얻을 수 있게 된다. 또한 이러한 이득을 얻기 위해서는 광 디스크의 채널에 가장 적합한 부분 응답 목표를 찾아내야 한다. 이를 위하여 PR-n 채널 이외에 채널 응답 특성과 유사한 PR을 고려해 볼 수 있으며 본 논문에서는  $(1 + D)$ ,  $(1 + 2D + D^2)$ ,  $(1 + 2D + 2D^2 + D^3)$  등을 고려하여 성능을 비교하였다[5].

디스크에 저장된 정보를 읽어낼 때 정확한 정보를 얻기 위해서는 채널에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 그러나 대부분의 경우 채널의 정확한 특성을 알기 어려울 뿐 아니라 채널은 시간에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 이러한 경우 수신된 신호를 정확한 정보로 복구하기 불가능하며 이를 보상하여 원하는 정보를 얻을 수 있게 해주는 등화기가 필요하게 된다. 특히 PRML의 경우 수신단에서의 비트 오류는 비터비 복호기의 입력 신호가 얼마만큼 원하는 목표 응답에 근접하게 등화되었는 가와 밀접한 관련이 있으므로 이렇게 변화하는 채널의 응답을 적절하게 보상하여 원하는 목표 응답에 맞추어 주는 가가 중요하다[3]. 이 경우 등화기는 채널 응답의 시간에 따른 변화에 적용할 수 있도록 설계되어야 한다.

광 디스크 채널에서 PRML을 구현하기 위한 적용 부분 응답 등화기의 구조를 그림 3에 나타내었다[3]. 그림 3에서 적용 등화기는 전방 필터와 후방 케환 필

터로 구성되어 있다. 전방 필터는 전체 계의 응답 특성을 원하는 부분 응답, P(D)의 응답 특성과 같아지도록 하여주는 역할을 하며, 후방 케환 필터는 전방 필터의 탭 계수 갱신을 위한 에러 신호,  $e(k)$ 의 생성을 위해 사용된다. 여기에서  $e(k) = I(k) - \hat{I}(k)$ 로 나타나며  $I(k)$ 는 저장된 정보,  $\hat{I}(k)$ 는 등화기의 출력을 의미한다. 전방 필터의 탭 계수는 학습 데이터(Training Sequence)에 의해 초기화 되며 초기화된 후 실제 동작시 전방 필터는 결정 지향 모드(decision directed mode)로 동작하며 식 (6)과 같은 LMS 알고리즘을 사용하여 계수를 갱신하게 된다.

$$C(k+1) = C(k) + 2 \cdot \mu \cdot \tilde{e}(k) \cdot X(k) \quad (6)$$

식 (6)에서  $C(k)$ 는 전방 필터의 탭 계수벡터이며  $\mu$ 는 스텝 크기 파라미터,  $X(k)$ 는 등화기의 입력신호 벡터이며  $\tilde{e}(k)$ 는 에러 신호의 추정치이다. 에러 신호의 추정치는  $\tilde{e}(k) = \tilde{I}(k) - \hat{I}(k)$ 와 같이 나타나며  $\hat{I}(k)$ 는 추정된 심볼을 나타낸다. 그림 3의 구조는 결정 케환 등화기(decision feedback equalizer)의 형태와 유사하지만 케환 부분의 결정은 단지 적응 알고리즘을 위한 에러 신호를 얻기 위해 사용한다는 차이점이 있다. 따라서 부분 응답 등화기의 케환은 적응 알고리즘에만 영향을 미친다는 점에서 결정 케환 등화기와 차이가 있으며 오율이 적절한 한계를 유지할 경우 ( $< 10^{-3}$ ) 안정된 동작을 할 수 있게 된다[3]. 그림 3에서 전방 필터가 전체 계의 특성을 원하는 부분 응답의 특성으로 유지할 수 있다면 등화기의 출력은 문턱값 검출기 또는 비터비 검출기를 통하여 원래의 신호로 복원될 수 있다.

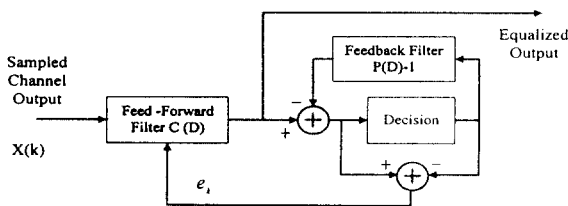


그림 3. 적응 부분 응답 등화기의 구조  
Fig. 3. The configuration of the adaptive partial response equalizer

채널에서 SNR이 낮고 인접 트래킹 간섭 및 타이밍 지터 등의 채널 왜곡이 심하면 그림 3과 같은 구조의 등화기는 수렴의 안정성에 문제가 있다. 그림 3의 구조를 가지는 등화기가 결정 지향 모드로 동작하게 될 때 에러신호의 추정치,  $\tilde{e}(k)$ 를 구하는 과정에서  $\tilde{I}(k)$ 가  $I(k)$ 와 다르게 추정되면 에러신호의 추정치,  $\tilde{e}(k)$ 는 실제 에러신호  $e(k)$ 와 다르게 되고 LMS 알고리즘에 의한 등화기는 수렴하지 않게 된다. 따라서 수렴의 안정성을 얻기 위해서는 보다 정확한  $\tilde{I}(k)$ 를 얻어내는 것이 중요하다.

따라서 본 논문에서는 보다 정확한  $\tilde{I}(k)$ 를 얻어내기 위하여 그림 4와 같이 비터비 검출기와 결합된 형태의 등화기를 제안하였다. 부분 응답 등화 방식이 기존의 방식에 비하여 이득을 얻기 위하여는 등화된 데이터열의 검출시 비터비 알고리즘을 적용해야만 한다. 비터비 알고리즘은 부분 응답 특성 이외에 변조 부호의 특성도 고려해줄 수 있는 장점이 있으므로 에러 정정 능력이 높다. 광 디스크에서 재생된 신호의 검출시 변조 부호의 특성의 고려는 성능에 중요한 요소로 작용하며 등화기에서 보다 정확한 에러 신호의 추정치를 생성하기 위하여 등화기는 비터비 검출기와 함께 동작하게 된다. 이때 그림 4의 구조를 가지는 등화기는 그림 3의 등화기의 경우와는 달리 비터비 검출기를 통하여 추정된  $\tilde{I}(k)$ 가 에러 신호의 추정치를 구할 때 사용되며 이러한 과정에서 그림 3의 경우보다 정확한 에러 신호의 추정이 가능해진다. 이때 전방 필터의 계수 갱신을 위한 에러 신호의 추정치는 비터비 검출기의 메모리 크기 만큼의 시간 지연이 발생하게 된다. 이와 같은 등화기는 비터비 검출기와 결합되어 구조가 복잡하고 에러 신호의 시간 지

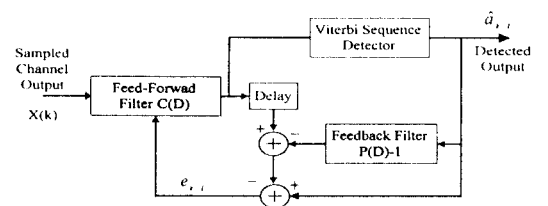


그림 4. 개선된 적응 부분 응답 등화기의 구조  
Fig. 4. The configuration of the improved adaptive partial response equalizer

연으로 인하여 수렴 속도가 약간 늦은 단점이 있으나 보다 정확하게 에러 신호를 추정해낼 수 있으므로 등화기가 결정 지향 모드로 작동시 채널 상황의 변화에 잘 대처할 수 있는 장점이 있다. 또한 실제 모의 실험 결과 에러 신호의 추정시 고려해야할 시간 지연의 경우 비터비 검출기의 메모리의 크기를 5심볼 주기 정도까지 줄여도 성능에 큰 차이가 없었으며 이러한 정도의 시간 지연으로 인한 수렴 속도의 감소는 성능에 큰 영향을 미치지 않았다.

부분 응답신호는 메모리를 가지는 신호이며 이 메모리의 형태는 각 부분 응답의 특성에 따라 다르게 된다. 이러한 메모리 특성은 트렐리스(trellis) 다이어그램에 의해 표현될 수 있다. 최적화된 Maximum-likelihood sequence detector는 수신된 데이터 열을 관찰하여 가장 가능성있는 경로를 선택하게 된다. 광디스크 채널의 경우 메모리의 길이 외에 변조 부호로 사용되는 RLL부호로 인하여 트렐리스의 상태 수가 변화할 수 있다.  $(d, k)$  RLL 부호를 사용하게 될때  $(d, k)$  제한 조건에 의해 채널 입력이 메모리의 특성을 가지게 되며 이에 따라 각 노드에서 입력 경로가 반드시 부분 응답의 메모리 특성에 의해서만 결정되지 않을 수 있으며 마찬가지로 상태 천이에 제한이 따른다. 따라서 트렐리스 다이어그램에서 채널의 메모리 길이 외에도 변조 부호의 특성도 반영 시켜야 한다. 이에 따라서 d 제한 조건이 고려된 부분 응답 등화된 데이터열의 트렐리스 다이어그램을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 RLL부호의 d 제한 조건과 부분 응답의 메모리 크기를 고려한 결과 전체 고려된 메모리의 크기는 3이 된다. 모두  $2^3=8$ 개의 상태에서 d 제한을 만족시키지 못하는 2개를 제외하면 총 6개의 상태가 존재하게 되며 상태 천이의 경우는 그림 5와 같이 a부터 h의 8가지가 존재하게 된다. 상태 천이 시 천이 매트릭은 식(7)과 같으며 각 부분 응답에 대하여 비터비 검출시 사용되는 값들은 표 1과 같다.

$$A[S_k, s_l] = (z - d_{kl})^2 \quad (7)$$

식 (7)에서  $z$ 는 등화기의 출력이며,  $d_{kl}$ 은 표 1에 나타난 상태  $S_k$ 에서  $S_l$ 로 천이할 때의 잡음 없는 출력이다. 비터비 복호기는 등화기로부터 들어온 입력 신호의 각 상태에서 가능한 상태 천이 매트릭을 계산하고

해밍 거리의 합이 최소인 경로만을 남기게 된다. 다음 샘플링 시간에 등화기로부터 들어온 입력 신호로부터 위와 같은 방식으로 하나만의 경로를 남기는 과정을 반복하여 살아남은 경로를 가지고 있게 되며 이렇게 살아남은 경로가 가장 가능성 있는 데이터의 열이 된다. 실제 구현 시에는 모든 시간의 경로를 전부 가지고 있을 수 없기 때문에 일정한 길이의 메모리 길이 만큼의 경로만을 가지고 동작하도록 설계하는 것이 일반적이다.

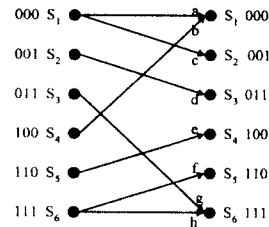


그림 5. 부분 응답 등화된 채널 출력 신호의 트렐리스 다이어그램

Fig. 5. Trellis diagram of partial response equalized channel output signal

표 1. 비터비 복호기에 사용되는 값

Table 1. Values for viterbi detector

Branch	Previous State	Current State	Noiseless-output Level			Decoded output
			PR(1, 1)	PR(1, 2, 1)	PR(1, 2, 2, 1)	
a	S1	S1	-2	-2	-3	0
b	S4	S1	-2	-2	-2	0
c	S1	S2	0	-1	-2	1
d	S2	S3	2	1	0	1
e	S5	S4	-2	-1	0	0
f	S6	S5	0	1	2	0
g	S3	S6	2	2	2	1
h	S6	S6	2	2	3	1

#### IV. 모의 실험 결과 및 분석

모의 실험을 위해 10<sup>7</sup>개의 디지털 데이터를 발생시

켜 (2, 10) RLL부호화 한 후 채널 모델을 통과 시킴으로서 광 디스크에서 재생된 신호 데이터를 얻었다. 재생된 신호 데이터는 적응 부분 응답 등화기 및 비터비 복호기를 거쳐 디지털 데이터로 복구되었다.

채널 모델은 표 2의 레이저의 파장과 대물렌즈의 개구수 및 디스크 회전속도에 의해 결정되는 MTF의 주파수 특성으로부터 채널의 임펄스 응답을 31 탭의 FIR 필터를 사용하여 구현하고 II절에서 서술한 바와 같은 채널 왜곡을 부가하였다. 적응 부분 응답 등화기에서전방 필터는 21개의 탭을 가지는 FIR필터로 구성하였으며 비터비 검출기의 메모리 크기는 5 심볼 주기로 설정하였다.

표 2. 채널 모델에 사용된 파라미터  
Table 2. Parameters for channel model

Parameter	Specification
Wavelength of laser	680 nm
Numerical aperture of objective lens	0.6
Modulation code	(2, 10) RLL
Channel symbol rate	29.27 MHz
Cutoff frequency of channel	7.06 MHz
Linear velocity	4 m/s
Track pitch	0.74 $\mu\text{m}$
Minimum pit length	0.41 $\mu\text{m}$

등화기는 대역 제한된 채널 특성을 보상하기 위하여 고주파 대역의 이득이 큰 주파수 특성을 가지게 된다. 그림 6에서 보면 등화기는 고주파 성분을 강조하는 역할을 하며 파형 슬림 등화기에 비하여 부분 응답 등화기가 고주파 성분의 이득이 적음을 알 수 있다. 부분 응답 등화기의 SNR 이득을 살펴보기 위하여 등화기의 출력 SNR을 살펴 보면 그림 7과 같다. 등화기의 출력 SNR은 그 자체가 성능의 척도로 시스템의 비트 오류만큼 직접적으로 사용되지는 않지만 일반적으로 SNR이 높을수록 비트 오류가 줄어들기 때문에 성능 비교를 위한 척도로 사용될 수 있다. 그림 7에서 등화기의 입력 SNR에서의 신호 전력은 MTF를 통과한 후의 신호를 기준으로 하고 출력 SNR에서는 이상적인 채널을 통과했을 때의 신호전

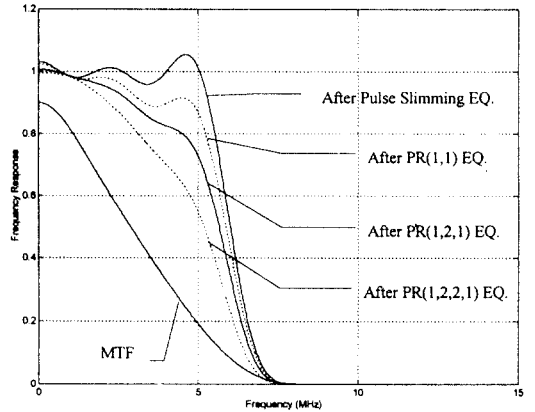


그림 6. MTF와 각 목표 응답으로 등화된 채널의 주파수 특성 비교  
Fig. 6. Comparison of frequency response of MTF and equalized channel

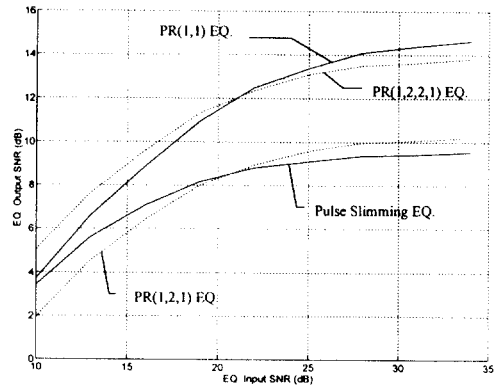


그림 7. 등화 방식에 따른 등화기의 입력 SNR대 출력 SNR  
Fig. 7. Output SNR of various equalizer as a function of input SNR

력을 기준으로 하고 있다. 그림 7에서 PR(1, 1)과 PR(1, 2, 2, 1)은 파형 슬림 등화기에 비해서 출력 SNR에서 이득이 크게 됨을 알 수 있으며 이러한 SNR이득은 비트 오류 성능에 반영되어 PR(1, 1)과 PR(1, 2, 2, 1)은 파형 슬림 등화기를 사용한 경우 보다 비트 오류면에서 우수한 성능을 보이게 된다. PR(1, 2, 1)은 파형 슬림 등화기에 비하여 SNR이득이 그리 크지 않으며 SNR이 낮은 경우 오히려 성능이 열화되는 것으로 나타났다. 이러한 등화기의 성능을 궁극적으로 비

트 오율 성능으로 나타내기 위하여 비터비 알고리즘을 적용하여 신호 검출한 결과를 그림 8, 그림 9 그림 10에 나타내었다.

그림 8에 채널에서 가우시안 잡음만을 고려 하였을 때 SNR과 비트 오율과의 관계를 나타내었다.

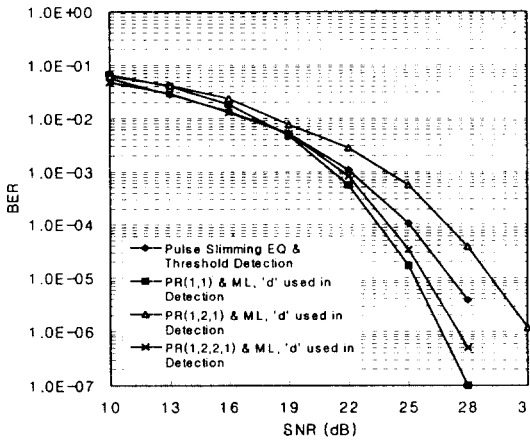


그림 8. 가우시안 채널에서 각 검출 방식에 따른 SNR 대 비트 오율

Fig. 8. The BER of various detection method in gaussian channel as a function of SNR

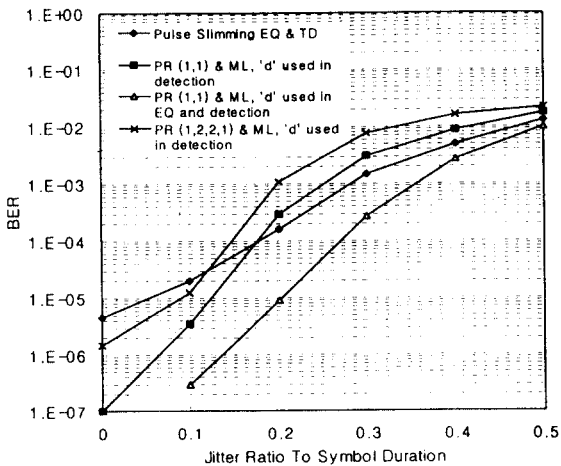


그림 9. 지터량 변화에 따른 각 검출 방식의 비트 오율 (crosstalk, SNR 28 dB)

Fig. 9. The BER of various detection method as a function of jitter(crosstalk, SNR 28 dB)

$10^{-5}$ 의 비트 오율에서 PR(1, 1) 등화하여 비터비 검출한 결과는 파형 슬림 등화기와 문턱값 검출기보다 2 dB정도의 SNR 이득을 얻을 수 있었다. 그림 7의 등화기 출력 SNR성능에서 예상 되었던 PR(1, 1)과 PR(1, 2, 2, 1)의 경우 파형 슬림 등화기 보다 비트 오율 면에서 성능이 우수하며 PR(1, 2, 1)의 경우 파형 슬림 등화기보다 성능이 열화 되었다.

그림 9에서는 인접 트랙의 간섭이 존재하고 가우시안 잡음의 SNR이 28dB일 경우에 타이밍 지터의 변화에 따른 각 등화기의 비트 오율을 나타내었다. 그림 9에서 결정 지향 모드로 동작하는 부분 응답 등화기는 타이밍 지터가 큰 경우, 즉 채널의 변화가 큰 경우 발산하게 되어 모의 실험 결과 최대 지터의 허용 범위가 심플 주기의 20%를 넘어가면 발산하여 적용 알고리즘을 사용할 수 없게 된다. 그러나 비터비 검출기와 결합된 그림 4와 같은 등화기의 경우 그림 9과 같이 채널 변화에 잘 적응하게 되며 결정 지향 모드로 동작하더라도 수렴하게 되며 문턱값 검출기에 비해 비트 오율 성능이 좋아지게 된다. 그림 3과 같은 등화기와 비터비 검출기를 사용하였을 경우는 지터량이 20% 이상이 되면 문턱값 검출기에 비하여 비트 오율이 나빠지는데 이는 변조 부호의 특성의 고려여부가 성능에 중요한 요소가 되며 이러한 구조의 등화기가 채널 변화에 잘 적응하지 못하는 것을 나타내며 비터비 검출기는 데이터 의존적인 잡음에 성능이 열

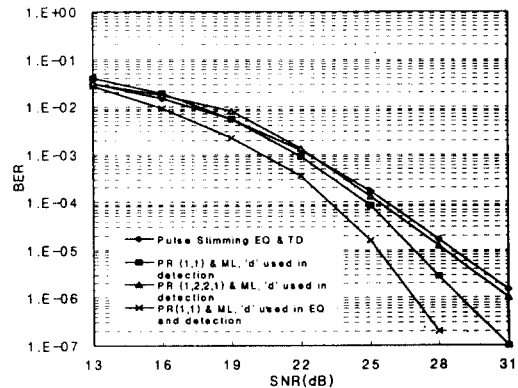


그림 10. SNR변화에 따른 각 검출 방식의 비트 오율 (crosstalk, jitter < 10%)

Fig. 10. The BER of various detection method as a function of SNR(crosstalk, jitter < 10%)



화되는 것을 보여준다. 그림 10에서는 비상관성 잡음과 상관성 잡음이 혼재된 채널 상황에서 각 검출 방식의 비트 오류율 나타내었다. 상관성 잡음으로 인접 트랙의 간섭을 고려하고 타이밍 지터의 양을 10% 이내로 억제 하여 부과하였고 비상관성 잡음으로 가우시안 잡음을 고려한 채널에서 PR(1, 2, 2, 1)은 문턱값 검출기보다 근소한 차의 성능 개선을 보였으며  $10^{-5}$ 의 비트 오류율에서 비터비 검출기와 결합된 등화기를 사용한 PR(1, 1)은 d제한이 고려되지 않은 등화기를 사용한 PR(1, 1)에 비하여 2dB의 SNR이득을 얻을 수 있었으며 기존의 파형 슬림 등화기와 문턱값 검출기를 사용한 경우에 비하여 약 4dB의 SNR이득을 얻을 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 신호 왜곡이 존재하는 광디스크 채널하에서 PRML검출 방식의 성능을 분석하였다. 채널은 대역 제한된 주파수 특성을 나타내는 MTF로 모델링하였고 변조 부호로서는 (2, 10) RLL부호를 사용하였다. 성능 분석시 채널 왜곡으로는 인접 신호간 간섭, 인접 트랙간 간섭, 타이밍 지터등을 고려하였으며 비상관성 잡음으로 가우시안 잡음을 사용하였다. PRML을 구현하기 위하여 적용 부분 응답 등화기를 제안하고 결정 지향 모드로 동작시 수렴의 안정성이 보장되는 구조의 등화기를 제안하였다. 등화된 신호를 올바르게 복구해내기 위하여 부분 응답 신호의 특성 뿐 아니라 변조 부호의 특성도 고려하여 비터비 검출기를 구성하였다. PRML의 성능을 분석하기 위해 몬테카를로 방법으로 모의 실험하여 비트 오류율 구하였으며 비트 오류율과 연관되는 등화기의 출력 SNR을 구하였다. 또한 문턱값 검출기를 사용한 경우의 비트 오류율 구하여 PRML의 성능과 비교하였다.

모의 실험 결과 주어진 채널 파라미터 하에서 인접 트랙간의 간섭은 성능에 큰 영향을 미치지 않으며 고려된 부분 응답 방식 중 PR(1, 1)이 출력SNR과 비트 오류율 측면에서 모두 가장 우수한 성능을 보여 (2, 10) 부호화된 광 디스크 채널에 잘 부합되는 목표 응답으로 나타났다. PRML의 경우 비터비 알고리즘의 특성상 데이터 의존적인 상관성이 있는 잡음이 많은 경우 비상관성 잡음만이 있는 경우 보다 성능 열화가 심하

게 되며 부분 응답 등화에 의한 비터비 검출기의 적용은 문턱값 검출기에 비해 큰 이득을 얻지 못한다. 또한, 결정 지향 모드의 적용 등화 알고리즘에서 여러 신호 생성시 변조 부호로 사용된 RLL부호의 d제한 조건의 고려 여부가 중요한 요소로 작용하게 되며 비터비 검출시에도 부분 응답의 메모리 특성 외에 변조 부호의 특성을 고려해 주어야만 PRML이 문턱값 검출기에 비하여 이득을 가질 수 있게 되며 PRML 검출 방식을 사용하면 기존의 문턱값 검출기를 사용할 때 보다  $10^{-5}$ 의 비트 오류율에서 2-4dB의 SNR이득을 얻을 수 있다.

향후 연구 과제로서는 PRML의 목표 응답으로 GPR(Generalized Partial Response)의 적용 시 PRML과의 성능 비교, 결정 제한 등화기 및 FDTS(Fixed Delay Tree Search)와의 성능 비교 분석 등이 있다.

## 참 고 문 헌

1. Robert T. Lynch, Jr., "Channels and Codes for Magneto-optical Recording," *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, Vol. 10, No. 1, pp. 57-72, Jan. 1992.
2. D.C. Cheng, J.E. Hurst Jr., Lynch Jr., and R.W. Olson, "High Capacity Optical Recording Channel," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3227-3232, Nov. 1995.
3. J.M. Cioffi, W.L. Abbott, H.K. Thapar, C.M. Melas, and K.D. Fisher, "Adaptive Equalization in Magnetic-Disk Storage Channels," *IEEE Commun. Magn.*, pp. 14-29, Feb. 1990.
4. Min-Goo Kim, Kwang Man Ok, and Jae Hong Lee, "Performance Comparison of Detection Methods in Magneto-optical Disc System with (1, 7) RLL Code," *Proc. IEEE GLOBECOM 95*, pp. 1389-1393, 1995.
5. Jaekyun Moon and Weining Zeng, "Equalization for Maximum Likelihood Detectors," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 31, No. 2, pp. 1083-1088, Mar. 1995.
6. Kees A. Schouhamer Immink, *Coding Techniques for Digital Recorders*, first edition, Prentice-Hall, 1991.
7. John G. Proakis, *Digital Communications*, third

- edition, McGraw-Hill, New York, 1995.
8. Paul H. Siegel and Jack K. Wolf, "Modulation and Coding for Information Storage," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 68-86, Dec. 1991.
  9. Yungsoo Kim, Ji-Yong Chun, Hyung-Woon Park, and Ki-Ho Kim, "Performance Comparison of Digital Equalizers for Magneto-Optical Storage Channels," *Proc. IEEE ICC 95*, pp. 658-662, 1995.
  10. Roy D. Cideciyan, Francois Dolivo, Reto Hermann, Walter Hirt, and Wolfgang Schott, "A PRML System for Digital Magnetic Recording," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 10, No. 1, pp. 38-56, Jan. 1992.
  11. Peter Kabal and Subbarayan Pasupathy, "Partial-Response Signaling," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. com-23, No. 9, pp. 921-934, Sep. 1975.
  12. Bernard Sklar, *Digital Communications*, Prentice-Hall, 1988.



**김기준(Ki-Jun Kim) 정회원**  
 1968년 7월 4일생  
 1991년 2월: 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
 1993년 2월: 연세대학교 본대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1993년 3월~현재: 연세대학교 본대학원 전기공학과 박사과정  
 ※주관심 분야: 이동통신시스템, 코딩 이론, 디지털 신호처리

**황금찬(Keum-Chan Whang) 정회원**  
 1944년 7월 18일생  
 1967년 2월: 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
 1979년 6월: Polytechnic Institute of New York Electrical Eng. (Ph.D)  
 1980년 9월~현재: 연세대학교 전기공학과 교수  
 ※주관심분야: 이동무선통신, 대역확산 통신, 무선 패킷망, 광대역 통신망, 탄성표면파 소자 및 그 응용 분야



**김호준(Ho-Joon Kim) 정회원**  
 1963년 6월 6일생  
 1986년 2월: 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
 1988년 2월: 연세대학교 본대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1988년 3월~1993년 4월: 삼성종합기술원 근무

1993년 3월~현재: 연세대학교 본대학원 전기공학과 박사과정  
 ※주관심 분야: 멀티미디어 네트워크, 이동통신시스템, 디지털 신호처리



**맹준석(Joon-Seok Maeng) 정회원**  
 1972년 2월 2일생  
 1995년 2월: 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
 1997년 8월: 연세대학교 본대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1997년 9월~현재: 연세대학교 본대학원 전기공학과 박사과정

※주관심 분야: 이동통신시스템, 디지털 신호처리, 채널 코딩 이론