

# 광학 저장 매체상에 LDPC 코드를 이용한 데이터의 분산 기록 방법

## (Distributed Data Recording on the Optical Disks using LDPC Codes)

김 태 웅<sup>†</sup>                      류 준 길<sup>†</sup>  
 (Taewoong Kim)                      (Junkil Ryu)

박 찬 익<sup>\*\*</sup>  
 (Chanik Park)

**요 약** 광학 저장 매체는 용량이 과거에 비하여 크게 증가하여 현재 블루레이 디스크(Blu-ray Disc)의 경우 25GB 정도의 대용량을 제공하고 있어 백업용으로 널리 쓰이는 테이프를 대체하는 것이 가능해졌다. 그러나 데이터 기록면이 외부에 노출되어있는 광학 저장 매체의 특성상 스크래치와 같은 표면의 손상으로 쉽게 데이터를 손실할 수 있으므로 데이터를 장기간 동안 안정적으로 보관하기 위해서는 신뢰도를 향상시킬 수 있는 기법이 필요하다. 이를 위해 저장할 데이터에 LDPC 코드를 적용하여 중복 데이터를 생성하고 중복 데이터들을 광학 저장 매체 상에 요구 신뢰도를 충족시켜줄 수 있는 간격을 갖도록 고루 분산시켜 배치하는 방법을 이용해 신뢰도를 향상시켰다.

**키워드** : 광학 저장 매체, 신뢰도, LDPC 코드, 중복 데이터

**Abstract** Optical discs' capacity has increased. In case of Blu-Disc, it can store data up to 25 GB. Due to

· 본 연구는 논문은 2009년도 두뇌한국21사업과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 (NIPA-2009-C1090-0902-0045) 연구결과로 수행되었음  
 · 이 논문은 2008 한국컴퓨터종합학술대회에서 '광학 저장 매체상에 LDPC 코드를 이용한 데이터의 분산 기록 방법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 비 회 원 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과  
 ehoto@postech.ac.kr  
 lancer@postech.ac.kr

\*\* 중 심 회 원 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수  
 cipark@postech.ac.kr  
 논문접수 : 2008년 8월 28일  
 심사완료 : 2009년 8월 19일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 컴퓨팅의 실제 및 레터 제 15권 제 9호(2009.9)

the large capacity, it can substitute tape devices for the use of backup. However, optical discs' surfaces are exposed so that it can lose data easily by exterior damages like scratches. Therefore additional reliability must be provided to maintain data for a long time. In this paper, we suggest a writing technique that gives optical discs additional reliability. Redundant data, generated by LDPC codes, are stored in disc along with the original data. These original data and redundant data are scattered over the disc to avoid losing a large part of data with one scratch. By deploying data with the distance that provides the reliability a user wants, we can enhance optical discs' reliability.

**Key words** : optical disc, reliability, LDPC codes, redundant data

### 1. 서 론

CD, DVD, 블루레이 디스크와 같은 광학 저장 매체는 용량 대비 가격이 저렴하고 기술의 발달로 인해 집적도 또한 증가해 현재 블루레이 디스크의 경우 한 장이 25GB, 듀얼 레이어의 경우 50GB의 용량을 가지고 있다. 광학 저장 매체는 대용량을 제공하면서도 테이프에 비해 온도와 습도 같은 환경적인 요인으로 인한 영향이 적어 데이터 장기 보관에 유리하고 랜덤한 접근이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 여러 가지 기계, 전자적인 부품으로 구성된 하드 디스크 드라이브의 경우 고장으로 인해 내부의 데이터 전체를 읽기 쉬우나 광학 저장 매체는 이와 달리 미디어 자체의 단순한 구조로 인해 데이터를 한꺼번에 읽을 가능성이 낮다. 그러나 광학 저장 매체는 기록면이 직접 외부에 노출되어 있기 때문에 스크래치와 같은 외부적인 손상으로 부분적인 데이터를 손실하기 쉽다. 부분적인 데이터 손실을 방지하기 위해 광학 저장 매체 내부에는 데이터가 기록될 시 하나의 섹터 또는 몇 개의 섹터 단위로 오류 정정 부호(ECC: Error Correcting Codes) 알고리즘을 통해 ECC 블록을 생성하여 기록한다[1-3]. CD는 사용자 데이터 2 KByte 크기의 섹터 마다 ECC 알고리즘을 통해 생성된 패리티 데이터가 추가되며 DVD와 Blu-ray Disc는 각각 2 Kbyte 크기 섹터 16개, 32개 단위로 ECC 체크섬 데이터를 생성해 사용자 데이터와 함께 ECC 블록을 구성한다. 이러한 체크섬 데이터는 원본 데이터가 일부 손실되거나 변경되었을 경우 이를 복구하는 데 사용된다. 광학 저장 매체의 자체 ECC 복구 능력 이상의 데이터 손상이 발생하였을 경우 데이터 복구 실패를 하게 되며 실제로 사용자 데이터를 손실하게 된다. 이와 같은 광학 저장 매체의 자체 ECC 메커니즘을 통해 CD는 약 2.4 mm, DVD는 약 6 mm, Blu-ray Disc는 약 7 mm 길이 이내의 표면 손상이 발생한 경

우에는 데이터 복원이 가능하고 그 이상의 표면 손상이 발생 시 데이터 손실이 발생할 수 있다.

광학 저장 매체 표면의 물리적 손상은 손상 부위에 위치한 데이터의 손실을 야기할 뿐만 아니라 헤더가 참조하는 위치 정보 또한 손실하게 된다. 이로 인해 직접적으로 손상을 입은 부분뿐만 아니라 드라이브의 헤더가 정확한 위치를 인식하지 못하게 되어 동일 트랙 또는 주변 트랙의 데이터를 읽어오지 못하는 현상이 발생한다 [4]. 따라서 실제로 광학 저장 매체 표면 손상 시 광학 저장 매체 드라이브에 구현된 헤더의 위치 인식 알고리즘에 따라 데이터 손실 양에 차이를 보이기도 한다.

광학 저장 매체는 스크래치의 방향에 따라 데이터 손실 정도가 차이를 갖는다. 트랙의 진행방향과 일치하지 않는 방향의 스크래치는 여러 ECC 블록에 걸쳐서 손상을 입히지만 각 ECC 블록에 입히는 손상은 스크래치의 두께만큼이며 이는 비교적 적은 양의 데이터 손실을 야기하므로 광학 저장 매체 자체의 ECC 알고리즘으로 복구하게 된다. 그러나 트랙의 진행방향과 일치하는 스크래치는 스크래치가 걸쳐있는 각각의 ECC 블록에 큰 비율의 데이터를 손실시켜 미디어 자체의 ECC 알고리즘으로 복구가 불가능해져 실제적으로 데이터의 손실을 야기한다. 즉, 트랙의 진행 방향과 일치하지 않는 스크래치에는 강하나 트랙 방향의 스크래치에는 취약한 특징을 가진다. 스크래치의 두께가 굵아짐에 따라 여러 트랙에 걸쳐 영향을 주게 되므로 더 많은 양의 데이터 손실을 가져오게 된다. 반면 일정 길이 이상의 직선 스크래치의 외곽 부분은 트랙 방향과 엇갈리게 되므로 길이에 의한 데이터 손실량은 큰 상관관계를 보이지 않는다.

광학 저장 매체에서는 자체적으로 데이터를 보호하기 위해 사용되는 ECC로 Reed-Solomon 코드[5]를 사용한다. Reed-Solomon 코드의 경우 인코딩과 디코딩 과정에서 비교적 복잡한 계산과정인 Galois Fields arithmetic을 사용으로 인해 큰 오버헤드를 가지고 있다. 반면 LDPC(Low Density Parity Check) 코드[6]는 비교적 단순한 XOR 연산을 이용해 큰 부하 없이 인코딩과 디코딩을 하며 데이터 복구 능력 또한 뛰어나다. 본 논문에서는 광학 저장 매체의 표면 손상으로부터 데이터 손실을 막기 위해 사용자의 데이터를 광학 저장 매체에 저장하기 전에 추가적으로 LDPC 코드를 적용하는 방법을 사용하였다. LDPC 코드는 중복 데이터를 이용하여 일부 데이터의 손실이 발생하여도 데이터를 복구 가능하도록 하여주는 Erasure Codes의 한 종류이다. LDPC 코드는 그림 1과 같이 bipartite 그래프로 표현할 수 있다. 데이터 블록은 저장될 대상 데이터를 나타내고 패리티 블록은 데이터 복구 시 사용될 중복 데이터를 나타낸다. 그래프에서 edge는 패리티를 계산하기 위해

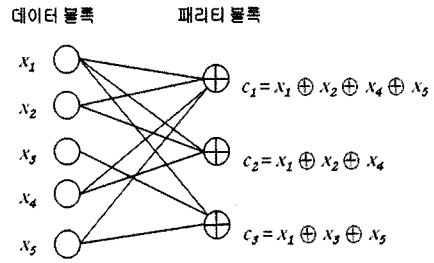


그림 1 Bipartite 그래프로 표현된 LDPC 코드

어떠한 데이터 블록을 XOR 연산하여야 하는지를 표현한다. Edge가 그래프에 존재하는 모든 데이터 블록과 패리티 블록 사이에 연결되지 않고 일부만 연결되기 때문에 low density라는 표현이 사용된다. 즉, 하나의 패리티 블록을 생성하기 위해 모든 데이터 블록을 이용하지 않는다. 이러한 LDPC의 성격으로 인해 빠른 인코딩과 디코딩 성능을 보이게 된다.

데이터 블록의 손실이 발생하였을 경우 데이터 복구는 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 패리티 블록의 이웃 중에 분실된 데이터 블록이 하나뿐일 경우 나머지 이웃 블록과 패리티 블록을 XOR 연산을 하여 분실된 데이터를 복구할 수 있게 된다. 데이터를 손실 했음에도 불구하고 이러한 패리티 블록이 존재하지 않는다면 그 데이터 블록을 복구가 불가능해져 실제적으로 데이터 손실이 발생한다.

사용자의 데이터는 일정 크기의 단위로 나누어져 LDPC 코드를 이용해 인코딩되어 코드 워드(code word)를 생성하게 된다. 코드 워드는 사용자 데이터와 중복 데이터로 구성된다. 코드 워드 내에서 일부의 데이터를 손실해도 LDPC의 디코딩 알고리즘을 통해 복구가 가능해진다. 고밀도로 집적된 광학 저장 매체에서는 작은 스크래치조차 수많은 연속적인 데이터 손실을 야기한다. 따라서 하나의 스크래치만으로도 코드 워드의 상당 부분을 잃어서 디코딩이 불가능해질 수 있다. 이를 방지하기 위해 코드 워드를 광학 저장 매체에 연속적인 영역에 배치하지 않고 미디어 전체에 고루 분포시켜 하나의 스크래치는 코드 워드의 일부분만을 손상시킬 수 있도록 하였다.

## 2. 구현

그림 2와 같이 두 개의 계층으로 구성되어 있다. 첫 번째 계층은 코딩 계층으로 사용자의 데이터에 LDPC 코드를 적용하여 중복 데이터를 생성하여 일부 데이터 손실이 있더라도 복구 가능하도록 해준다. 두 번째 계층에서는 LDPC 코드를 통해 생성된 코드 워드를 광학 저장 매체 전체에 분산시켜주어 부분적인 손상은 코드 워드의 일부에만 손상이 가도록 해준다.

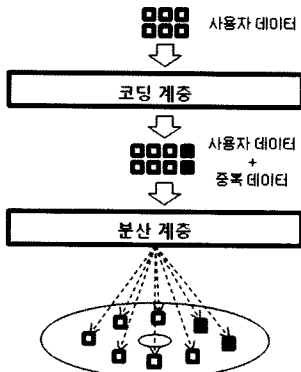


그림 2 코딩 계층과 분산 계층

2.1 코딩 계층

코딩 계층에서는 데이터를 보호하기 위해 LDPC 코드를 사용한다. LDPC 코드를 사용하여 코드 워드를 생성 시 그림 3과 같이 사용자 데이터를 일정 개수의 ECC 블록으로 구성된 세그먼트 단위로 처리하게 된다. 코딩 계층에서는 사용자 데이터를 하나의 세그먼트씩 읽어 들여 LDPC 코드를 통해 패리티 블록을 생성하고 세그먼트 뒤에 패리티 블록들을 붙여 하나의 코드 워드를 생성한다. 사용자의 데이터는 코딩 계층을 통해 여러 개의 코드 워드로 만들어져 코딩 이미지를 생성하여 하드 디스크에 임시로 저장해 둔다.

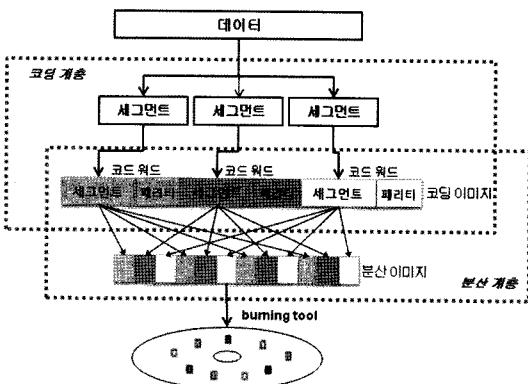


그림 3 사용자 데이터의 처리 과정

2.2 분산 계층

분산 계층에서는 하나의 코드 워드에 속하는 블록들이 일부 영역에 모여있지 않도록 분산시켜주는 역할을 한다. 광학 저장 매체 표면 손상은 그 손상 걸쳐있는 트랙 전체에서 블록 에러를 유발하므로 동일 트랙 또는 인접 트랙에 같은 코드 워드의 블록을 배치한다면 하나의 스크래치에 여러 개의 코드 워드 블록들을 손실할 수 있다. 코드 워드에 속하는 블록들을 서로 떨어진 트

랙 상에 배치하기 위해 분산 계층은 코딩 이미지에서 코드 워드를 하나씩 읽어 들여와 코드 워드의 각 블록들이 일정 간격을 두고 배치되도록 분산 이미지에 저장을 한다. 각 코드 워드들의 블록을 일정 간격으로 분산시키기 위해 그림 5와 같이 각 코드 워드들의 블록들을 서로 interleave 시킨다. g개의 코드 워드를 이와 같은 방법으로 배치하면 하나의 코드 워드에 속하는 블록은 g 블록의 간격을 두고 배치되게 된다.

분산 이미지 파일 상에서는 동일한 블록 간격을 두고 코드 워드의 블록들이 배치되어있어도 데이터를 나선형으로 기록하는 광학 저장 매체의 특성에 따라 실제로 매체 상에 기록 시 코드 워드의 블록들은 그림 4와 같은 구조로 배치된다. 같은 블록 간격을 띄우더라도 둘레가 짧은 안쪽 트랙의 경우 여러 회전을 통해 동일한 수의 블록을 띄워야 하므로 보다 많은 트랙 간 간격을 가지게 된다. 바깥쪽 트랙에서는 적은 회전만으로도 같은 블록 간격을 띄울 수 있으므로 코드 워드의 블록은 좁은 트랙 간격으로 배치된다. 따라서 코드 워드의 모든 블록 간 트랙 간격이 일정 수치가 이상 이 되도록 하기 위해서는 최 외곽에 배치되는 2개 블록의 트랙 간격을 기준으로 블록 간격을 설정하게 된다. 이 간격을 사용자가 요구하는 트랙 거리가 되도록 블록 간격을 설정하면 안쪽 트랙의 블록들도 사용자가 요구하는 트랙 거리 이상의 간격을 두고 배치가 된다.

데이터가 기록되는 최 외곽의 트랙과 그 트랙에서 사용자가 요구하는 d의 거리만큼 떨어진 트랙 사이에 존재하는 블록의 개수를 블록 간격 g로 이용한다. 이를 계산하는 방법은 다음과 같다.

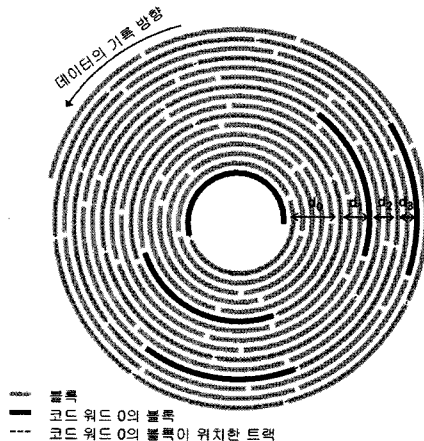


그림 4 광학 저장 매체상에 분산 이미지를 썼을 경우 코드 워드0에 속하는 블록의 분산 상태, 블록이 위치한 트랙 간 간격은 바깥쪽으로 갈수록 짧아진다( $d_0 > d_1 > d_2 > d_3$ ).

$$\text{블록 간격 } g = \left\lfloor \frac{\text{SpiralLen}(\text{outerRadius})}{\text{BlockLength}} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\text{SpiralLen}(\text{outerRadius} - d)}{\text{BlockLength}} \right\rfloor$$

OuterRadius는 최 외각 트랙이 위치하는 매체 상의 반지름이며 BlockLength는 광학 저장 매체에서 사용되는 ECC 블록의 물리적인 길이를 뜻한다. SpiralLen(r)은 광학 저장 매체의 중심으로부터 해당 반지름 r까지의 물리적인 나선 거리를 나타내며 이는 Archimedes의 나선 공식을 사용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

```
float SpiralLen (r)
{
    radian =  $\frac{2 \pi r}{\text{TrackPitch}}$ 
    return  $\frac{1}{2} \frac{\text{TrackPitch}}{2 \pi} \left( \text{radian} \sqrt{1 + \text{radian}^2} + \text{Log} \left( \text{radian} + \sqrt{1 + \text{radian}^2} \right) \right)$ 
}
```

TrackPitch는 광학 저장 매체에서 인접 트랙 간의 물리적 거리를 뜻하며 radian은 반지름 r까지 도달하기 위해 필요한 나선 상에서의 회전 각도를 뜻한다.

위와 같은 방법으로 계산된 블록 간격 g를 이용하여 코드 워드의 블록을 배치하게 되면 하나의 코드 워드에 속하는 블록들은 d 트랙 간격 이상을 가지며 배치된다. 따라서 광학 저장 매체에 d 두께의 손상이 발생해도 두 개 이상의 코드 워드 블록을 손상시키지 않게 된다. 블록 간격 g는 앞서 설명했듯이 광학 저장 매체에 기록되는 총 코드 워드의 개수와도 동일하다. 그림 5와 같이 g개의 블록을 띄우기 위해 g개의 코드 워드가 필요하기 때문이다. 디스크 전체가 갖는 블록의 개수를 코드 워드의 개수인 g로 나누게 되면 코드 워드 하나를 구성하는 블록의 개수 n을 구할 수 있다. “총 블록의 개수 = g x n”라는 공식이 성립해야 하기 때문이다.

### 3. 데이터 읽기

광학 저장 매체 상에 쓰여진 데이터는 코딩 계층과 분

산 계층을 통해서 블록 순서가 변경되어 저장된다. 그러므로 상위 계층에서 내려오는 특정 블록 번호에 대한 읽기 요청은 대상 블록이 실제로 저장된 물리적인 블록 번호로 변환 되어야 한다. 블록 번호 s에 대한 요청이 왔을 시 변환 과정은 다음과 같다.

```
cw =  $\lfloor s/n \rfloor$ 
blk =  $s \% n$ 
물리적 블록 번호 =  $(\text{blk} * n) + \text{cw}$ 
```

n은 코드 워드의 크기를 블록 수로 표현한 것이다. 물리적 블록 번호를 이용하여 실제로 광학 저장 매체에서 데이터를 읽어서 상위 계층에 데이터를 넘겨준다. 디스크의 부분적인 손상으로 해당 블록을 읽을 수 없을 경우 복구 작업을 한다. 복구를 위해 해당 블록이 속한 코드 워드의 나머지 유효한 블록을 버퍼로 읽어 들인다. LCPC 코드의 복구 알고리즘을 사용하여 코드 워드 중 손상된 블록들을 복구한다. 버퍼에서 요청이 있었던 블록을 읽어 상위 계층에 데이터를 넘겨준다.

### 4. 평가

평가를 위해 120mm의 지름을 갖는 DVD-R을 기준으로 분석하였다. 120mm DVD-R은 32Kbyte의 크기의 ECC 블록을 가지며 약 4.3 Gbyte의 용량(143656개의 ECC 블록)을 갖는다. 인접 트랙 간의 간격은 0.74μm이며 사용자 데이터는 반지름 24~58mm 영역에 기록된다. 하나의 ECC 블록은 약 82mm의 물리적인 길이로 기록된다.

그림 6은 코드 워드의 블록이 위치한 최소 트랙 간격에 따른 코드 워드의 크기를 나타낸 것이다. 사용자가 코드 워드 블록의 최소 트랙 간 간격을 입력하게 되면 그 수치만큼 코드 워드의 블록 간 간격이 커지게 되어 한정된 블록의 개수를 갖는 광학 저장 매체에 많은 블록을 배치할 수 없게 된다. 반면에 하나의 코드 워드에 속한 블록들의 트랙 간 간격이 좁게 설정하게 되면 저장 매체 상에 많은 블록을 배치할 수 있게 되므로 코드 워드의 크기가 커진다.

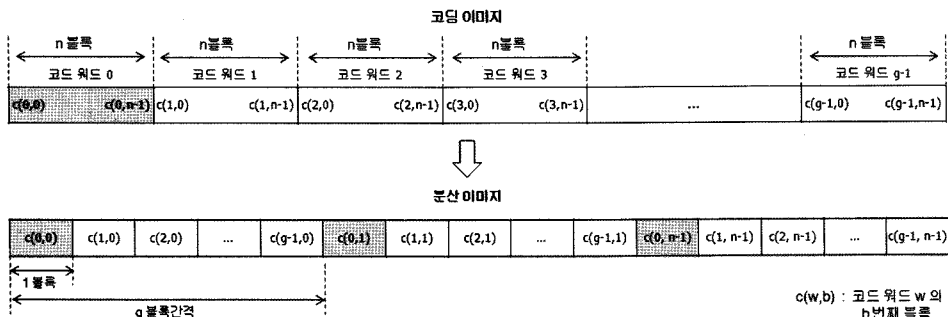


그림 5 코드 워드의 블록을 분산 시키는 과정, 그림자가 진 부분은 코드 워드0의 블록들을 나타낸다.

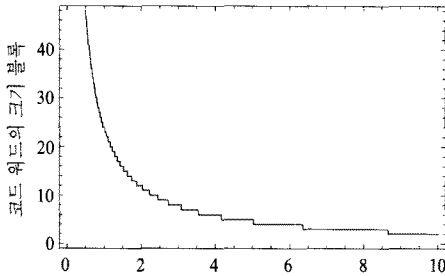


그림 6 코드 워드의 블록이 위치한 최소 트랙 간격 따른 코드 워드의 크기

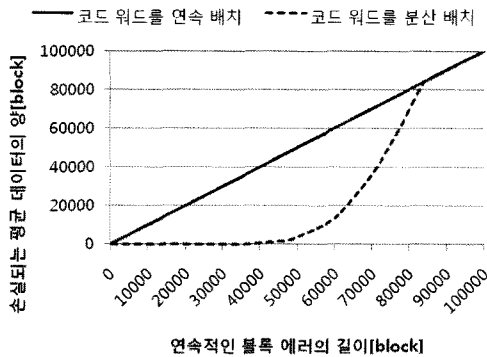


그림 7 블록 에러의 길이와 손실되는 데이터 양

그림 7은 블록 에러의 길이에 따른 평균 데이터 손실 양의 관계를 나타낸 것이다. 코드 워드를 연속으로 배치하였을 경우와 코드 워드를 분산시켜 배치했을 경우 데이터 손실 정도를 비교하였다. 두 경우 모두 하나의 코드 워드는 12개의 블록으로 구성되었다. 12개의 블록을 분산 배치하는 경우에 2mm 이상의 트랙 간 간격을 가지며 배치되며 블록은 서로 11971개의 간격으로 배치된다. 12개의 코드워드 블록 중 6개의 블록을 패리티로 사용하도록 설정하였다. LDPC 코드를 사용하기 위해 100개의 bipartite 그래프를 랜덤하게 생성하고 테스트하여 가장 높은 복구 성능을 보이는 그래프를 선택했다. 이를 이용하게 되면 모든 경우의 3개의 블록 손실 시 복구를 보장할 수 있게 된다. 선택된 그래프를 이용해 모든 경우의 블록 손실 패턴을 시뮬레이션 해보았다. 시뮬레이션을 통해 데이터 손실 확률을 구하여 평균 데이터 손실 양을 측정하였다. 코드 워드를 단순히 연속적으로 배치했을 경우 연속적인 4개 블록 손상부터 데이터를 복구하지 못하고 손실하였다. 코드 워드의 블록을 11971개의 블록 간격으로 분산 배치 시 35913개의 연속적인 블록 손상까지는 데이터 손실 없이 복구가 가능했다. 35913개의 연속적인 블록 손실이 11971개의 코드 워드로 분산되어 하나의 코드 워드에는 3개의 블록만이

손상되기 때문이다. 35913개 이상의 블록 손실이 발생하면서 점점 손실되는 데이터 양이 늘다가 83797개 이상의 블록 손실이 발생하면 더 이상 복구가 불가능해져 블록 에러가 발생한 만큼 데이터를 손실하게 된다. 즉, 코드 워드 당 7개의 블록 손실이 발생해 데이터 블록의 개수보다도 적은 블록만이 남기 때문에 복구가 불가능해지는 것이다.

## 5. 결론

LDPC 코드를 이용하여 코드 워드를 생성하고 코드 워드를 광학 저장 매체 전체에 고루 분산시켜 저장시키는 기법을 이용하여 추가적인 신뢰도를 제공할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 사용자가 지정하는 수치 이상의 트랙 간 간격을 유지하며 코드 워드 블록을 배치하도록 하여 사용자가 요구하는 정도의 신뢰도를 제공하였다.

## 참고 문헌

- [1] ISO International Standard, "Information technology - Data interchange on read-only 120 mm optical data disks (CD-ROM)," Reference number: ISO/IEC 10149:1995(E).
- [2] European Computer Manufacturers Association (ECMA), "Standard ECMA-359: 80 mm (1,46 Gbytes per side) and 120 mm (4,70 Gbytes per side) DVD Recordable Disk (DVD-R)," ECMA International, 1st Edition, December 2004.
- [3] Blu-ray Disc Association, "Blu-ray Disc Recordable Format," Part 1: Physical specification, February 2006.
- [4] Jerome L. Hartke, "WHITE PAPER: Defect Management Capabilities of Various DVD Technologies," Media Sciences, Inc. May 2004.
- [5] I. S. Reed and G. Solomon, "Polynomial codes over certain finite fields," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol.8, no.2, pp.300-304, Jun. 1960.
- [6] R. G. Gallager, "Low Density Parity-Check Codes," MIT Press, Cambridge, MA, 1963.