

인접 트랙간 간섭 제거기를 이용한 트랙을 겹쳐서 쓰는 자기기록 방식의 성능 개선

김 병 선*, 이 재 진^o

Performance Improvement Using Inter-track Interference Canceller for Shingled Magnetic Recording

Byungsun Kim*, Jaejin Lee^o

요 약

자기기록 장치의 저장 밀도 향상을 위해 인접한 트랙을 겹쳐서 쓰는 방식이 사용되고 있다. 따라서 인접한 트랙간 간섭으로 인한 성능 저하를 방지하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 인접한 트랙간 간섭을 해결하기 위해 인접 트랙간 간섭을 제거하는 모델을 제안하였다. 트랙간 겹치는 정도가 10% 이상인 경우 본 논문에서 제안한 모델이 좋은 성능을 보인다.

Key Words : Shingled magnetic recording, Inter-track interference, Inter-track interference cancelation

ABSTRACT

In order to improve the storage density of magnetic recording, the shingled magnetic recording method is used. However, this method have a problem of interference between adjacent tracks. Therefore, many studies to prevent the performance degradation due to interference between the adjacent track have been conducted. In this paper, in order to solve inter-track interference, we propose a model to remove inter-track interference. In the case of overlap between tracks is 10% or more, the proposed model shows the performance improvement.

I. 서 론

수직 자기기록 방식의 하드디스크는 동심원 상에 위치한 트랙을 따라 기록 매질이 덮여 있어 기록 매질에 데이터를 저장하는 방식이다. 이러한 하드디스크의 성능을 향상시키기 위해선 단위 면적당 기록 밀도를 높여야 하는데 트랙 안에서 밀도를 높이는 방법은 이미 한계에 도달했다. 그래서 대안으로 트랙간의 간격을 줄여 인접한 트랙의 양을 늘리는 방법이 연구되었다. 오늘날에는 더 나아가 인접한 트랙을 서로 겹쳐서

쓰는 SMR (Shingled Magnetic Recording) 방식이 연구되고 있다. 그림 1은 SMR 방식의 모형으로, N-1번째 트랙에 데이터가 입력 된 후, N번째 트랙이 SW(Squeeze Width)만큼 겹쳐진다. 그리고 N번째 트랙에 데이터가 입력된 후 마찬가지로 N+1번째 트랙이 SW만큼 겹쳐지는 방식이다. 본 논문에서 SW는 α 로 표현하였다. 그림 1에서 WTW(Write Track Width)는 전체 트랙의 폭이고, TW(Track Width)는 실제적인 트랙의 폭이 된다. α 값이 커질수록 인접한 트랙의 양은 늘어나 더 많은 데이터를 저장 할 수 있

* 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2059077).

• First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, kimbs@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-08-325, Received August 27, 2014; Revised September 4, 2014; Accepted September 4, 2014

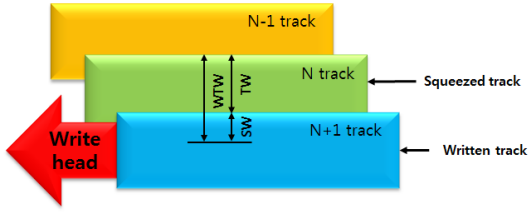


Fig. 1. Shingled Magnetic Recording

게 되지만, 인접한 트랙간 간섭 (Inter-Track Interference, ITI)은 더욱 심각해진다^[1-11].

SMR 방식이 기존의 기술에서 큰 변화 없이 기록 밀도를 높일 수 있어 주목을 받으면서, SMR 방식의 가장 큰 문제점인 ITI를 완화시키기 위한 많은 연구가 진행되어왔다. 한 방법은 ITI를 독립적인 데이터에서 발생하는 하나의 신호나 잡음으로 간주하는 방법이다. 이 경우에는 최대 유사도 방법 (Maximum-Likelihood, ML)으로 검출이 가능하지만, 복잡한 원래의 신호에서 ITI를 분리해내기 쉽지 않아 최종 비트 오류 (Bit Error Rate, BER)이 좋지 못한 단점이 있다. 또 다른 방법은 single-head/successive-multi-track 신호 검출 방법으로, 완벽하게 복원된 데이터나 LLRs (Log-Likelihood Ratios)와 같은 주변 정보를 이용하는 방법이다^[12,13]. 하지만 ITI의 영향을 받지 않은 트랙으로부터 주변정보를 얻어야 하기 때문에 목적지 트랙까지의 접속 처리량이 크게 감소하는 단점이 있다. 본 논문에서는 ITI를 제거하기 위해 ITI를 하나의 잡음으로 보고 인접한 트랙간 간섭을 제거하는 모델을 제시하였다.

본 논문의 II장에서는 ITI의 채널 모델과 ITI 제거기 모델에 대해 살펴보고, III장에서는 제시된 모델의 성능을 비교해 보기 위한 다양한 시뮬레이션 결과를 살펴본다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 정리한다.

II. 인접한 트랙간 간섭 제거 모델

2.1 ITI 채널 모델링

트랙에 데이터를 읽고/쓰는 과정에서 현재의 트랙과 인접한 트랙간의 위상이 어긋나는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 ITI를 제거하기에 앞서 상관관계 (Correlation) 방법을 이용하여 인접한 트랙간의 어긋난 위상을 검출해야 한다. N번째 트랙의 이퀄라이저 출력 $y_k^{(N)}$ 는 다음과 같다.

$$y_k^{(N)} = \sum_{i=-L}^L h_i^{(N)} b_{k-i}^{(N)} + \sum_{i=-L}^L h_i^{(N-1)} b_{k-i-L}^{(N-1)} + \sum_{i=-L}^L h_i^{(N+1)} b_{k-i-L}^{(N+1)} + n_k^{(N)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $h_i^{(N-1)}$, $h_i^{(N)}$, $h_i^{(N+1)}$ 은 길이가 각각 $2L+1$ 인 N-1번째, N번째, N+1번째의 이퀄라이저 채널 응답을 의미한다. 그리고 $L^{(N-1)}$ 과 $L^{(N+1)}$ 은 각각 N-1번째와 N+1번째 트랙의 N번째 트랙과의 상대적인 위상차이다. $b_i^{(N)}$ 은 N번째 트랙에 기록된 비트 시퀀스이고, $n_i^{(N)}$ 은 N번째 트랙의 잡음으로 평균이 영이고 스펙트럼이 상수인 백색잡음으로 가정한다. 그리고 N-1번째와 N+1번째 트랙의 비트 시퀀스 $b_i^{(N-1)}$ 과 $b_i^{(N+1)}$ 은 알고 있다고 가정하였다. ITI가 완전히 제거된 최종 출력의 모양은 다음과 같다.

$$C_y^{(N)} = \sum_{i=-L}^L h_i^{(N)} b_{k-i}^{(N)} + n_k^{(N)} \quad (2)$$

위상차가 없다는 가정에서, N-1번째 트랙의 비트 시퀀스가 N번째 트랙에 미치는 correlation metric은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_m^{(N-1)} &= E[y^{(N)} b^{(N-1)}] \approx \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T y_k^{(N)} b_k^{(N-1)} \\ &= \frac{1}{T} \sum_{i=-L}^L h_i^{(N)} \sum_{k=1}^T b_{k-i}^{(N)} b_k^{(N-1)} \\ &\quad + \frac{1}{T} \sum_{i=-L}^L h_i^{(N-1)} \sum_{k=1}^T b_{k-i}^{(N-1)} b_k^{(N-1)} \\ &\quad + \frac{1}{T} \sum_{i=-L}^L h_i^{(N+1)} \sum_{k=1}^T b_{k-i}^{(N+1)} b_k^{(N-1)} \\ &\quad + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T n_k^{(N)} b_k^{(N-1)} \\ &= h_{m-L}^{(N-1)} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 T는 correlation에 사용되는 샘플의 개수다. 만약 각 트랙의 비트 시퀀스 $b_i^{(N-1)}$, $b_i^{(N)}$, $b_i^{(N+1)}$ 이 서로 독립이며, 평균이 0이면 ($E[b_i^{(N-1)}]=0$, $E[b_i^{(N)}]=0$, $E[b_i^{(N+1)}]=0$), 각 비트 시퀀스간의 correlation은 0이 되고, 이것은 서로 독립인 시퀀스의 correlation은 각각의 평균의 곱과 같고, 각 시퀀스의

평균은 0이기 때문에, 결과적으로 correlation은 0이 된다. ($E[b_i^{(N)} b_i^{(N-1)}] = E[b_i^{(N)}]E[b_i^{(N-1)}] = 0$) 따라서 N-1번째 채널 $h^{(N-1)}$ 의 추정치는 다음과 같다.

$$h^{(\widehat{N-1})} = [C_{m_0}^{(N-1)}, C_{m_0}^{(N-1)} + 1, \dots, C_{m_0}^{(N-1)} + 2L] \quad (4)$$

식 (4)에서 $m_0^{(N-1)}$ 은 $s_m^{(N-1)} = \sum_{i=0}^{2L} |C_{i+m}^{(N-1)}|$ 이 최대가 될 때 값으로 위상 오차를 의미하고, 위 식의 유도 과정에서는 오차를 0으로 가정하였다. 따라서 N-1번째 채널 $h^{(N-1)}$ 의 추정치는 다음과 같다.

$$h^{(\widehat{N-1})} = [C_0^{(N-1)}, C_1^{(N-1)}, \dots, C_{2L}^{(N-1)}] \quad (5)$$

같은 방법으로 채널 $h^{(N+1)}$ 도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h^{(\widehat{N+1})} = [C_0^{(N+1)}, C_1^{(N+1)}, \dots, C_{2L}^{(N+1)}] \quad (6)$$

따라서 인접한 트랙의 간섭을 제거한 최종 이퀄라이저 출력신호 $y_k^{(N)c}$ 는 다음과 같다.

$$y_k^{(N)c} = y_k^{(N)} - \sum_{i=-L}^L \hat{h}_i^{(\widehat{N-1})} b_{k-i-L}^{(N-1)} - \sum_{i=-L}^L \hat{h}_i^{(\widehat{N+1})} b_{k-i-L}^{(N+1)} \quad (7)$$

본 논문에서는 이전 트랙인 N-1번째 트랙의 간섭만을 고려하여 제거한다고 가정한다.

2.2 ITI 제거기 모델

그림 2는 본 논문의 전체 블록도이다. 블록도에서 ITI를 제거한 결과 $y_k^{(N)c}$ 는 다음과 같이 이퀄라이저의 출력인 $y_k^{(N)}$ 에서 이전 트랙의 ITI를 뺀 결과로 표현할 수 있다.

$$y_k^{(N)c} = y_k^{(N)} - ITI \quad (8)$$

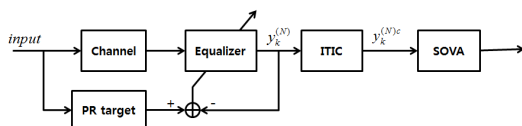


Fig. 2. Block diagram of ITI Cancellation

그리고 인접한 두 트랙간의 correlation은 다음과 같이 표현 된다.

$$C_m^{(N-1)} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T b_{k-m}^{(N-1)} y_k^{(N)}, \quad (-20 \leq m \leq 20) \quad (9)$$

식 (9)에서 $b_m^{(N-1)}$ 은 N-1번째 트랙의 비트 시퀀스이다. m은 현재 트랙과 다음 트랙간의 어긋남의 정도로 만약 m의 값이 음수이면 다음 트랙이 이전트랙의 왼쪽 방향으로 m만큼 어긋난 것이고, 양수이면 다음 트랙이 이전트랙의 오른쪽 방향으로 m만큼 어긋난 것이다. 그리고 T는 단위 블록에 들어가는 전체 비트수이다.

본 논문에서의 ITIC 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1. 모든 m에 대해 $C_m^{(N-1)}$ 를 구한다.

단계 2. 모든 m에 대하여 $S_m^{(N-1)} = \sum_{i=0}^{2L} |S_{i+m}^{(N-1)}|$ 을 구한다. 여기서 L은 correlation의 탭의 개수이며, 총 2L+1개만큼의 탭이 있다. 본 연구에서는 L=2로 고정하였고, 따라서 간섭채널의 탭수는 5가 된다.

단계 3. 단계 2에서 구한 $S_m^{(N-1)}$ 의 값이 최대일 때 두 트랙간의 어긋남이 없는 것이므로, 최대가 되는 $m_0^{(N-1)}$ 를 찾는다.

단계 4. N-1번째 트랙이 N번째 트랙에 미치는 ITI 채널의 추정 탭의 모양은 다음과 같다.

$$\hat{h}^{(N-1)} = [C_{m_0}^{(N-1)}, C_{m_0}^{(N-1)} + 1, \dots, C_{m_0}^{(N-1)} + 2L] \quad (10)$$

단계 5. 따라서 N번째 트랙에 N-1번째 트랙이 미치는 ITI를 제거한 $y_k^{(N)c}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$y_k^{(N)c} = y_k^{(N)} - \sum_{i=-L}^L \hat{h}_i^{(N-1)} b_{k-i-L}^{(N-1)} \quad (11)$$

III. 시뮬레이션 및 결과

3.1 ITIC 유/무에 따른 성능 비교

그림 3은 ITIC를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해, α 가 각각 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30일 때를 비교한 결과이다. 먼저 α 값이 커짐에 따라 트랙 간 겹쳐지는 부분이 많아지므로 ITI가 더 심해지기 때문에 성능이 악화되는 것을 볼 수 있다. α 가 너무 작은 0.00, 0.05일 때는 오히려 ITIC를 사용하지 않았을

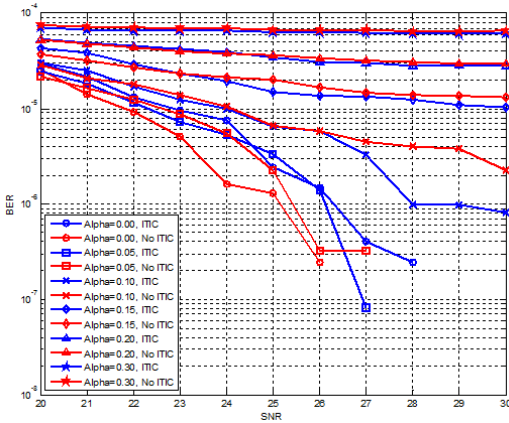


Fig. 3. Performance with ITIC and without ITIC

때의 성능이 더 좋았고, α 가 0.10일 때는 신호 대 잡음 비(Signal-to-noise Ratio, SNR)가 26dB 이상부터 ITIC를 사용하였을 때 성능이 더 좋아졌다. 이것은 ITI가 미미한 경우 ITIC를 사용할 경우 오히려 정상적인 신호에서 엉뚱한 신호를 제거하여 정상적인 신호검출을 방해하는 결과를 초래한다. 하지만 α 가 0.15, 0.2, 0.3으로 커지면서 ITIC를 한 경우의 성능이 더 좋다. 본 실험을 통해 인접한 트랙의 간섭 정도를 파악하는 것이 중요함을 알 수 있다. 간섭 제거가 필요 없을 정도의 ITI 상황에서는 ITIC를 동작시킬 경우 오히려 BER 성능 개선에 역효과를 초래하기 때문에, 채널 상황에 따라 ITIC를 ON/OFF하여야 한다.

3.2 ITIC 처리 단위 길이에 따른 성능 비교

이번 실험은 ITIC를 처리하는 한 블록의 데이터 길이에 따른 성능을 비교하였다. 다른 실험에서는 한 블록의 데이터의 길이를 4096 비트로 고정하였지만, 이번 실험에서의 데이터 길이는 2배~9배까지 늘려 결과를 비교해 보았다.

그림 4에서 보면 한 블록의 데이터의 길이에 따른 성능 변화는 SNR이 커질수록, 즉 채널 환경이 좋아질수록, 그리고 데이터의 길이가 늘어날수록 조금의 성능 악화를 볼 수 있다. 하지만 뚜렷한 성능 차이를 보이지는 않았다.

이것은 실험 환경에 있어서 인접 트랙과 겹침 정도가 항상 일정하였기 때문에 데이터 처리 블록의 길이에 큰 영향을 안 받았다고 생각할 수 있다. 그러나 실제 환경에서도 이러한 상황이 일어나리라고 장담할 수 없다. 따라서 한 블록의 데이터 길이를 어느 정도로 하여 ITIC에서 처리 할지를 현장에서 물리적인 실험을 통해 확인해 봐야 할 것이다. 즉, 항상 트랙간 겹

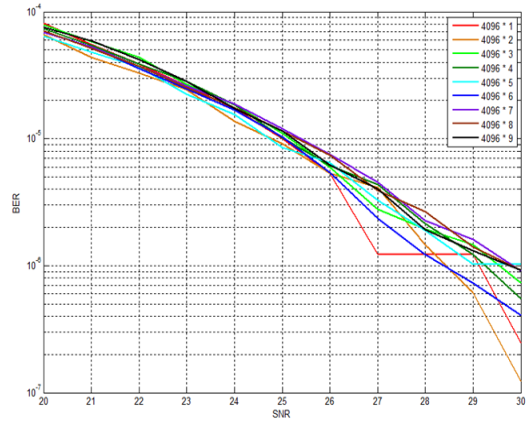


Fig. 4. Performance according to the block length of ITIC

침의 정도를 일정하게 유지시킬 수 있다면 큰 블록 단위로 ITIC를 하여 처리 속도를 향상시킬 수 있으며, 디바이스의 불안정으로 인하여 트랙간 겹침의 정도를 일정하게 유지할 수 없다면 블록의 길이를 짧게 하여 데이터를 처리 해줘야 성능을 기대할 수 있을 것이다.

3.3 α 값이 부분별로 다른 경우의 성능 비교

이전 실험까지는 인접한 트랙간 겹쳐지는 양 α 가 한 블록 안에서 일정하였다. 하지만 이번 실험에서는 한 블록의 구간을 나누어 각각의 구간별로 α 값이 다른 경우를 실험해 보았다. 그림 5는 본 실험에서의 구간별 α 값을 그림으로 나타냈다. 첫 번째는 지금까지처럼 한 섹터 전체가 10%만큼 겹쳐지는 상황이다. 두 번째는 한 섹터를 네 구간으로 나누어서 처음과 끝에는 5%씩, 가운데 두 구간은 15%씩 겹치도록 하였다. 마지막은 한 섹터를 총 6구간으로 나누었고 각각의 구간을 그림처럼 5%, 10%, 15%씩 겹치게 하였다. 세 방법 모두 한 섹터의 평균 α 값은 10%로 동일하다. 각각의 방법에 대해서 한 블록의 데이터 길이가 4096 비트인 경우, 3배(4096*3)인 경우, 5배(4096*5)인 경

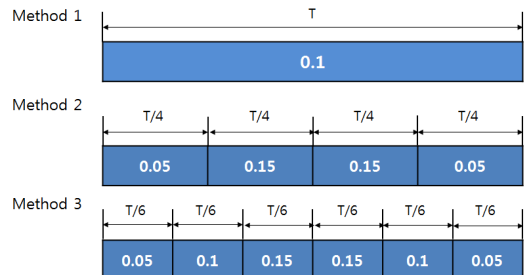


Fig. 5. Different α 's within an ITIC processing block

우를 비교했다.

그림 6은 한 블록의 길이가 4096 비트인 경우이다. BER이 5×10^{-6} 일 때를 기준으로 첫 번째 방법이 두 번째 방법보다 2dB 만큼, 세 번째 방법보다 1dB 만큼 성능 이득을 갖는다.

그림 7은 데이터의 길이가 3배인 경우이다. 이때 역시 BER이 5×10^{-6} 일 때를 기준으로 첫 번째 경우가 두 번째보다 2.8dB 만큼, 세 번째보다 1.8dB 만큼의 성능 이득을 갖는다.

그림 8은 데이터의 길이가 5배인 경우로 마찬가지로 BER이 5×10^{-6} 일 때 첫 번째 경우가 두 번째 경우보다 2.7dB 만큼, 세 번째 경우보다 1.7dB 만큼의 성능 이득을 갖는다.

각각의 데이터 길이마다 성능 이득을 보는 정도는 달랐지만, 공통적으로 첫 번째 α 값이 동일하게 유지되었을 때 가장 좋은 성능을 보였고, 두 번째가 가장 나

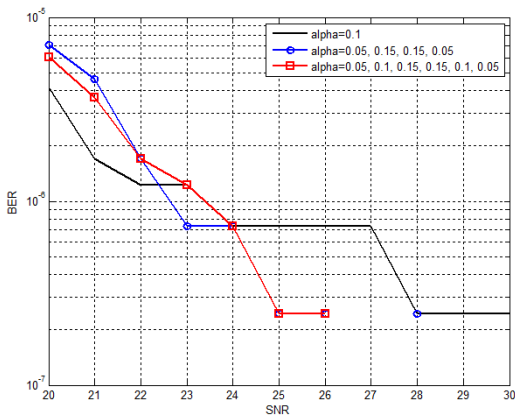


Fig. 6. BER performance when the block length is 4096

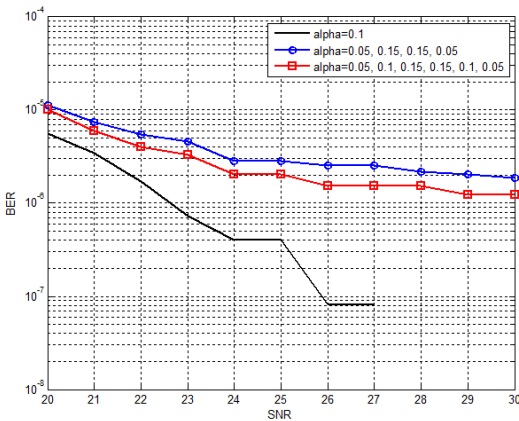


Fig. 7. BER performance when the block length is 4096×3

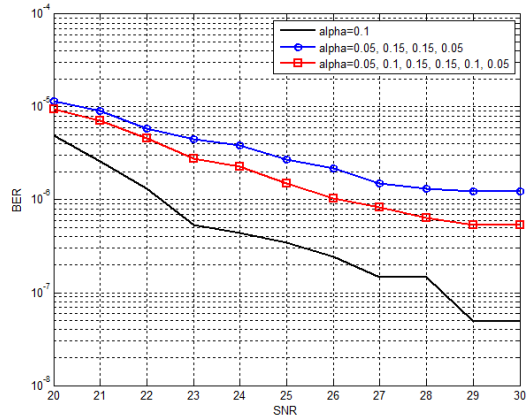


Fig. 8. BER performance when the block length is 4096×5

쁜 성능을 보였다. α 이유는 트랙간 겹치는 비율이 가장 큰 15%가 섹터 안에 많이 존재할수록 더 좋지 않은 성능을 보이는 것으로 생각된다.

이러한 현상은 예측 가능한 결과로, ITIC 필터 탭이 α 가 10%인 경우 제일 잘 동작되도록 설정되었는데, 다른 정도의 겹침이 생기면 최상의 성능을 낼 수 없다. 따라서 이전의 실험에서와 같이, 현재 디바이스가 어느 길이에서 일정한 수준의 인접 트랙간 겹침이 유지되고 있는지 물리적인 실험을 통해 파악하는 것이 중요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 인접 트랙간 간섭 제거기의 모델을 제시하였고, 이를 통해 실제 인접 트랙간 간섭의 정도에 따라 ITIC 유/무에 따른 BER 성능의 차이를 파악하였다. α 가 너무 작은 경우는 오히려 ITIC를 사용하지 않은 경우의 성능이 더 좋았고, α 가 커짐에 따라 ITIC를 사용했을 경우의 성능이 더 좋다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 인접한 트랙간의 간섭 정도를 파악하여 채널 상황에 따라 ITIC를 ON/OFF하여야 한다. ITIC 처리 길이에 따른 실험에서는 어느 정도의 데이터 길이를 하나의 블록으로 하여 ITIC에서 처리하여야 할지를 현장에서 물리적인 실험을 통하여 확인하여야 함을 보였다. 이와 같은 결과를 뒷받침하는 것이 ITIC 처리 블록 내에서 겹침의 정도가 변하는 상황의 실험이다. 한 블록에서 α 가 변하지 않는 경우, 완만하게 변하는 경우, 급하게 변하는 경우의 순으로 성능이 좋음을 보여준다. 따라서 현재 디바이스가 어느 정도 길이에서 인접 트랙간 겹침을 일정한 수준으로

로 유지할 수 있는지 물리적인 실험을 통해 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

References

[1] R. L. White, "The physical boundaries to high-density magnetic recording," *J. Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 209, pp. 1-5, Feb. 2000.

[2] H. J. Richter, E. Champion, and Q. Peng, "Theoretical analysis of longitudinal and perpendicular recording potential," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 2, pp. 697-703, Mar. 2003.

[3] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *J. Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 9, pp. R149, 2007.

[4] D. Park and J. Lee, "Performance of the recursive systematic convolutional code with turbo-equalization method for PMR channel," *J. KICS*, vol. 34, no. 1, pp. 15-20, Jan. 2009.

[5] M. H. Kryder and R. W. Gustafson, "High-density perpendicular recording advances, issues and extensibility," *J. Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 287, pp. 449-458, Feb. 2005.

[6] E. F. Haratsch, G. Mathew, J. Park, M. Jin, K. J. Worrell, and Y. X. Lee, "Intertrack interference cancellation for shingled magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3698-3703, Oct. 2011.

[7] K. Ozaki, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, and H. Muraoka, "ITI canceller for reading shingle-recorded tracks," *PMRC2010*, vol. 16, pp. 158-159, Sendai, Japan, May 2010.

[8] M. Fujii, "Adaptive and iterative ITI canceller for inter-track asynchronous shingled write magnetic recording," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E95-C, no. 1, pp. 155-162, Jan. 2012.

[9] S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, "Shingled recording for 2-3 Tbit/in²," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3823-3829, Oct. 2009.

[10] J. Kim and J. Lee, "Performance of run-length limited coded parity of soft LDPC code for perpendicular magnetic recording channel," *J. KICS*, vol. 38, no. 9, pp. 744-749, Sept. 2013.

[11] G. Kim and J. Lee, "A two-dimensional code for bit patterned magnetic recording channel," *J. KICS*, vol. 38, no. 9, pp. 739-743, Sept. 2013.

[12] M. Fujii and N. Shinohara, "Multi-track iterative ITI canceller for shingled magnetic recording," in *Proc. Int. Symp. Commun. Inf. Technol.*, pp. 1062-1067, 2010.

[13] M. Fujii, "Iterative multi-track ITI canceller for nonbinary-LDPC-coded two-dimensional magnetic recording," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 95, no. 1, pp. 163-171, 2012.

김 병 선 (Byungsun Kim)



2012년 2월 : 정보통신공학과 학사
 2012년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사 재학 중
 <관심분야> 스토리지 시스템, 오류정정부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)



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
 1996년 1월~1997년 2월 : 현대전자 정보통신연구소 책임연구원
 1997년 3월~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과 부교수
 2005년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
 <관심분야> 통신이론, 채널코딩, 정보저장시스템