

# 트랙을 겹쳐서 쓰는 자기기록 방식에서 리드헤드가 틀어진 경우의 성능 분석

김 병 선\*, 이 재 진<sup>o</sup>

## Performance Evaluation of Skewed Read-Head for Shingled Magnetic Recording

Byungsun Kim\*, Jaejin Lee<sup>o</sup>

### 요 약

트랙을 겹쳐서 쓰는 자기기록 방식은 인접한 트랙간 간섭이 심하게 발생한다. 또한 리드헤드가 트랙을 따라 돌면서 데이터를 읽을 때, 물리적인 영향으로 헤드가 틀어질 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해 두 개의 헤드를 사용하는 이차원 이퀄라이저를 제안하였다. 헤드가 틀어진 경우 두 헤드의 위치를 현재 트랙의 중앙에 위치시킴으로 성능을 보완할 수 있다.

**Key Words** : Shingled magnetic recording, Inter-track interference, Two-dimensional equalizer

### ABSTRACT

The shingled magnetic recording method has interference between adjacent tracks. Furthermore, when read-head reads the data along the track, the head can be skewed by some physical effects. In this paper, in order to solve this problem, we propose a two-dimensional equalizer that uses two heads. If the head is skewed, it is possible to complement the performance by positioning the two heads at the center of the current track.

### 1. 서 론

자기기록 저장 장치의 저장 밀도 향상을 위해 수평 자기기록 방식에서 수직 자기기록 방식으로 변화되었다. 하지만 수직 자기기록 저장장치 역시 초성자성 현상에 의한 밀도 증가의 한계에 도달하였다. 이러한 트랙 내에서의 기록 밀도 향상의 한계를 극복하기 위해 트랙간의 간격을 줄이는 방법이 연구되어왔고, 근래에는 트랙과 트랙을 겹쳐서 쓰는 SMR (Shingled Magnetic Recording) 방식이 연구되어왔다. SMR 방식은 이전 트랙의 일부분에 새로 쓰이는 트랙이 일부

겹쳐지는 방식으로 겹쳐지는 양 만큼 이전 트랙의 폭이 원래의 트랙 폭 보다 실질적으로 좁아지는 결과를 가져오게 된다. 따라서 전체적인 기록밀도의 향상을 얻을 수 있게 된다. 하지만 트랙간의 간격이 좁아짐에 따라 인접 신호간 간섭 (Inter-Symbol Interference, ISI)과 함께 인접 트랙간 간섭 (Inter-Track Interference, ITI) 역시 심각한 문제가 되었다<sup>11-11)</sup>.

자기기록 장치에서 리드헤드가 트랙을 따라 돌면서 데이터를 읽을 때, 물리적인 영향으로 리드헤드가 방향이 틀어질 수 있다<sup>12,13)</sup>. 그림 1은 이러한 경우를 그림으로 나타냈다. 그림 1의 첫 번째 그림과 세 번째

\* 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(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 : KICS2014-08-326, Received August 27, 2014; Revised September 4, 2014; Accepted September 4, 2014

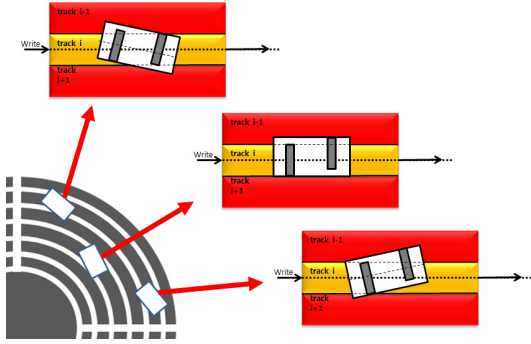


Fig. 1. Three types of skewed head

그림은 각각 리드헤드가 음(-)의 방향과, 양(+)의 방향으로 틀어진 경우이고, 두 번째 그림은 리드헤드의 틀어짐이 없이 정상적으로 데이터를 읽어 들이는 경우이다. 리드헤드가 음 또는 양의 방향으로 틀어진 경우 그림과 같이 인접한 트랙으로 부터의 간섭이 더 심해져 성능이 열화된다.

본 논문에서는 SMR 방식에서의 ITI 문제와 리드헤드의 틀어짐에 따른 성능 문제를 해결하기 위해 두 개의 리드헤드를 사용하는 이차원 이퀄라이저를 제안하였다. II장에서는 본 논문에서 제안된 이차원 이퀄라이저의 알고리즘에 대해서 설명한다. III장에서는 시뮬레이션 환경 및 결과를 보여주었고, 마지막 IV장에서는 앞 장의 결과로 결론을 내린다.

## II. 이차원 이퀄라이저

그림 2는 본 논문에서 사용된 시스템의 블록도이다. 기존에 사용하던 일차원 이퀄라이저의 경우 한 개의 리드헤드를 가지고서 데이터를 읽어들이어 한 개의 신호가 이퀄라이저에 입력된다. 하지만 이차원 이퀄라이저의 경우 두 개의 리드헤드에서 데이터를 읽기 때문에 두 개의 신호가 이퀄라이저로 입력된다. 이퀄라이저는 이퀄라이저의 계수(Coefficient)  $C_n = [C_n(-p), \dots, C_n(0), \dots, C_n(p)]$ 을 업데이트 시키는 과정과 실제 데이터가 이퀄라이저를 통과하여  $y_i$ 를 출력하는 과정 두 가지 과정으로 나뉜다. 이퀄라이저의 업데이트 과정은 다음과 같은 방식으로 진행된다.

$$e_{out} = \sum_{k=-p}^p S_1(k) \cdot C_1(k) + \sum_{k=-p}^p S_2(k) \cdot C_2(k) \quad (1)$$

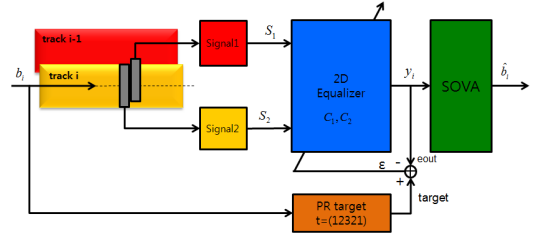


Fig. 2. Block diagram of two-dimensional equalizer

$$target = \sum_{k=0}^m t(k) \cdot b_i(k) \quad (2)$$

$$\epsilon = target - (e_{out}/2) \quad (3)$$

$$C_n(k+1) = C_n(k) + \Delta \cdot \epsilon \cdot S_n(k) \quad (4)$$

식 (1)에서  $S_1$ 과  $S_2$ 는 각각 첫 번째와 두 번째 리드헤드에서 읽어드린 신호이고,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각의 신호에 대한 이퀄라이저의 계수 값을 나타낸다. 그리고 식 (2)에서  $t(k)$ 는 이퀄라이저의 PR target 값 ( $T = [t(0), t(1), \dots, t(m)]$ )을 나타내며,  $b_i$ 는 현재 트랙의 입력 데이터 값을 나타낸다. 식 (2)에서 구한 target 값과 식 (1)에서 구해진  $e_{out}$ 값을 헤드의 개수로 나눠준 값의 차이를 에러값( $\epsilon$ )으로 구한다. 이렇게 구한 값을 이용해 식 (4)와 같이 다음 이퀄라이저 계수 값을 업데이트 해준다.

실제 데이터가 이퀄라이저에 입력되어 출력되는 값  $y_i$ 는 다음과 같이 구해지는데, 여기서  $\hat{C}_1$ 과  $\hat{C}_2$ 는 각각 업데이트 과정에서 구해준 이퀄라이저 계수를 나타낸다.

$$y_i = (\sum_{i=-p}^p \hat{C}_1(i) \cdot S_1(i) + \sum_{i=-p}^p \hat{C}_2(i) \cdot S_2(i))/2 \quad (5)$$

## III. 시뮬레이션 및 결과

### 3.1 실험 환경

본 실험을 위해 총 4096×3000비트만큼의 데이터 비트를 실험하였다. 본 실험에서 쓰인 부분 응답(Partial Response, PR) target 값은 PR(12321)값을 사용하였다. 또한 채널에서의 기록 밀도는 1.3으로 하였으며, 지터 잡음은 전체 잡음의 80%로 하였고, 20%는 부가백색가우시안 잡음으로 모델링 하였다<sup>[14],[15]</sup>. 본 실험에서 HP(Head Position)값은 첫 번째 헤드가 현재 트랙으로 부터의 이동한 정도를 나타낸다. 만약

HP의 값이 양의 값을 가지고 있다면 첫 번째 헤드가 이전 트랙의 방향으로 이동한 것이고, 음의 값을 가지고 있다면 다음 트랙의 방향으로 이동한 것을 의미한다. 또한 두 번째 헤드는 항상 현재 트랙에 위치해 있다고 가정하였다. Skew값은 리드헤드 전체가 틀어진 정도를 의미한다. 만약 skew값이 음의 값이라면 헤드가 시계방향으로 틀어짐을 의미하며, 양의 값이라면 시계반대방향으로 틀어짐을 나타낸다. 따라서 만약 첫 번째 헤드가 이전 트랙방향으로 이동해 있을 때 skew값이 음의 값이라면 헤드가 시계방향으로 틀어짐에 따라 첫 번째 헤드가 점점 현재 트랙으로 위치하게 되고, skew가 양의 값이라면 헤드가 점점 시계반대방향으로 틀어져 첫 번째 헤드가 이전 트랙의 방향으로 위치하게 됨을 의미한다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 본 논문에서 제안한 이차원 이퀄라이저와 기존의 일차원 이퀄라이저를 비교한 결과이다. 여기서  $\alpha$ 는 각 트랙이 겹쳐진 정도로 각각 0.00, 0.05, 0.10인 경우를 실험하였다. 또한 HP는 이차원 이퀄라이저에서 첫 번째 헤드가 현재 트랙으로부터 벗어난 정도로 0.0, 0.1 벗어난 경우를 실험하였다. 헤드의 틀어짐 (skew)은 모두 0인 경우를 가정하여 실험하였다. 먼저 HP값이 0인 경우와 일차원 이퀄라이저의 결과를 비교해 보면,  $\alpha$ 값이 0.00, 0.05인 경우는 모두 이차원 이퀄라이저의 경우가 확연히 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 하지만  $\alpha$ 가 0.10이 되면서 이차원 이퀄라이저의 성능이 더 좋지 못함을 알 수 있다. 이러한 결과는  $\alpha$  값이 커짐에 따라 리드헤드에 이전 트랙과 다음 트랙의 영향이 더 커지는데,  $\alpha$ 값이 0.10이 되면서 이차원

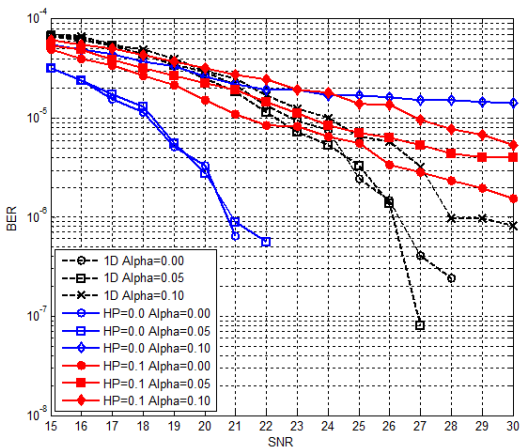


Fig. 3. Performance comparison between 1D equalizer and 2D equalizer

이퀄라이저에서 처리 할 수 있는 값 보다 더 많은 간섭을 받기 때문이다. 같은 이유에서 HP가 0.1인 경우 SNR이 커질수록 모든  $\alpha$ 값에서 일차원 이퀄라이저의 경우가 이차원 이퀄라이저 보다 더 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

그림 4는 헤드가 틀어진 양(skew)이 각각 -10, 0, +10도인 경우 초기 HP값에 따른 실제 HP값을 나타낸다. 먼저 가장 아래의 그래프는 skew가 -10도인 경우이다. 초기 HP값이 0인 경우 실제 HP값은 약 -0.18이고, 초기 HP값이 0.15~0.2 사이에서 실제 HP값이 0이 된다. 가운데 그래프는 skew가 0도인 경우로, 헤드가 틀어지지 않았기 때문에 초기 HP값과 실제 HP값은 같다. 마지막으로 가장 위의 그래프는 skew가 +10도인 경우이다. 초기 HP값이 0인 경우 실제 HP값은 약 0.18이고, 초기 HP값이 -0.2~-0.15 사이에서 실제 HP값이 0이 된다.

그림 5~7은 skew가 -10, 0, +10도인 경우 초기 HP값이 -0.4~+0.4까지의 성능을 각각  $\alpha$ 가 0.00, 0.05, 0.10일 때 비교한 결과이다. 본 실험에서 SNR은 21dB로 고정하였다. 세 경우 모두 skew가 0도인 경우는 초기 HP값이 0일 때 가장 좋은 성능을 나타내고 초기 HP값이 커지거나 작아지는 경우 점점 성능이 악화됨을 알 수 있다. 그리고 그림 5와 6에서 skew가 -10도인 경우는 초기 HP가 -0.2인 경우, 그리고 skew가 +10도인 경우는 초기 HP가 +0.2인 경우 가장 좋은 성능을 보이고 마찬가지로 초기 HP값이 커지거나 작아지는 경우 성능이 점점 악화됨을 알 수 있다. 그리고 그림 7에서는 skew가 -10도인 경우는 초기 HP가 -0.15인 경우, 그리고 skew가 +10도인 경우는 초

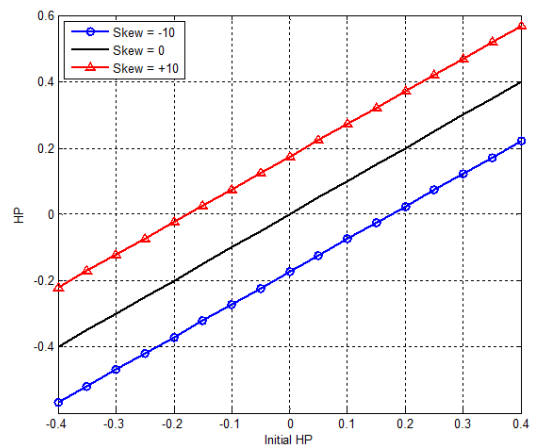


Fig. 4. Head position depending on the initial head position when skew = -10, 0, +10 degree

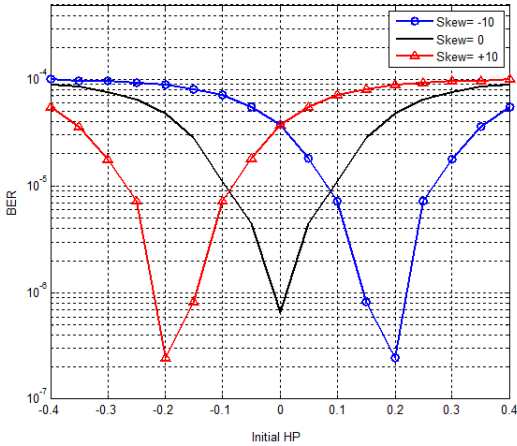


Fig. 5. Performance of initial head positions when  $\alpha = 0.00$ , skew = -10, 0, +10 degree

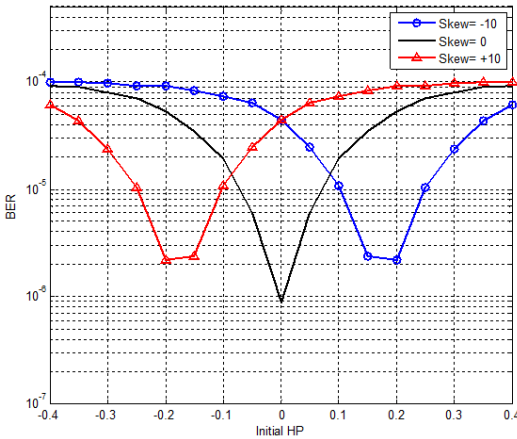


Fig. 6. Performance of initial head positions when  $\alpha = 0.05$ , skew = -10, 0, +10 degree

기 HP가 +0.15인 경우 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 세 경우 모두 가장 좋은 성능을 보이는 구간은 그림 4에서 실제 HP값이 0이 되는 구간에서 가장 좋은 성능을 보임을 확인 할 수 있었다. 이러한 이유는 실제 HP값이 0에 가까워진다는 것은 첫 번째 헤드가 점접 현재 트랙에 위치한 다는 것을 의미하고, 이 경우 인접한 트랙의 영향을 가장 적게 받기 때문이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 인접한 트랙간의 간섭을 제거하고, 헤드의 틀어짐에 따라 발생하는 성능 열화를 해결 하

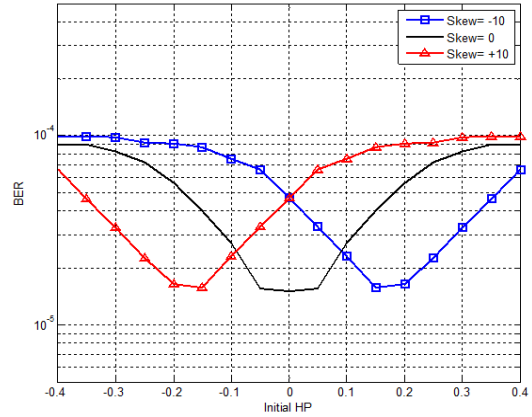


Fig. 7. Performance of initial head positions when  $\alpha = 0.10$ , skew = -10, 0, +10 degree

기 위한 방법으로 두 개의 헤드를 사용하는 이차원 이퀄라이저를 제안하였다. 일차원 이퀄라이저의 결과와 비교하였을 때,  $\alpha$ 값이 작은 경우는 이차원 이퀄라이저의 성능이 더 좋게 나타났지만  $\alpha$ 값이 일정 값보다 커지면 두 개의 헤드에 인접한 트랙의 영향을 받는 만큼 더 좋지 못한 성능이 나옴을 알 수 있었다. 또한 헤드의 틀어짐 정도 (skew)에 따른 성능을 비교해 보았을 때, 초기의 HP값이 skew값에 따라 실제 HP값이 달라져, 실제 HP값이 0에 가까워짐에 따라 성능이 좋아짐을 알 수 있었다. 따라서 skew에 따라 초기 HP값을 조절하여 실제 HP가 0에 가깝도록 할수록 더 좋은 성능을 얻을 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, pp. R149, 2007.
- [4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[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] S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, “Shingled recording for 2-3 Tbit/in<sup>2</sup>,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3823-3829, Oct. 2009.

[9] W. Tan and J. R. Cruz, “Signal processing for perpendicular recording channels with intertrack interference,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 2, pp. 730-735, Feb. 2005.

[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] P. Kasiraj and M. L. Williams, “System and method for writing HDD depending on direction of head skew,” *U.S. Patent*, no. 6,967,810, Nov. 2005.

[13] J. P. Beun, E. De Niet, and AMA Rijckaert, “Magnetic tape recording and/or reproducing apparatus with automatic head positioning,” *U.S. Patent*, no. 4,392,163, Jul. 1983.

[14] M. Madden, M. Oberg, Z. Wu, and R. He, “Read channel for perpendicular magnetic recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 1, pp. 241-246, 2004.

[15] 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.

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