MLC 낸드 플래시 기반 저장장치의 쓰기 성능 개선을 위한 계층 통합적 최적화 기법

박지성○, 이성진†, 김지홍
서울대학교 컴퓨터공학부
†인하대학교 컴퓨터정보공학과
{jspark, jihong}@davinci.snu.ac.kr, †sungjin.lee@inha.ac.kr

A Cross Layer Optimization Technique for Improving Performance of MLC NAND Flash-Based Storages

Jisung Park○, Sungjin Lee†, and Jihong Kim
Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University
†Department of Computer Science and Information Engineering, Inha University

요 약

멀티 레벨 셀 기법은 공정 미세화와 함께 낸드 플래시 메모리의 집적도를 낮추는 데 지대한 공헌을 했지만, 그 반대급부로 두 배 이상의 쓰기 성능 악화를 가져왔다. 여러 차세대 컴퓨팅 영역에서 저장장치 성능에 대한 요구조건은 지속적으로 높아지고 있으므로, 낸드 플래시 기반 저장장치의 적용범위 확장을 위해서는 이러한 MLC 낸드 플래시 메모리의 성능 악화를 반드시 해결해야 한다. 본 논문에서는 MLC 낸드 플래시 성능 향상을 위한 기존 계층 통합적 최적화 기법들을 소개하고, 두 기법의 상호보완성을 분석하여 해당 기법들의 한계점을 극복하는 통합 기법을 제안한다. MLC 낸드 플래시 디바이스에 존재하는 성능 비대칭성을 최대로 활용함으로써, 제안하는 기법은 인가되는 다수의 쓰기 명령을 SLC 낸드 플래시 디바이스의 속도로 처리하여 성능 향상을 도모한다. 실험 결과, 기존 기법 대비 평균 22%의 성능 향상을 확인하였다.

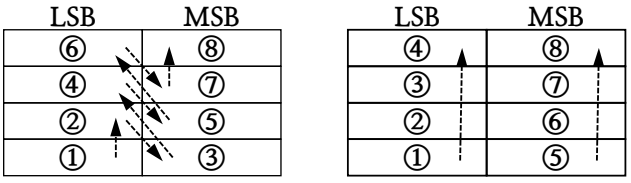
1. 서 론

높은 성능과 휴대성, 적은 파워 소모 등의 강점들을 갖는 낸드 플래시 메모리는 전통적으로 모바일 컴퓨팅 시스템에서 필수적으로 차용돼 왔으며, 최근 저장장치 성능에 대한 높은 요구조건으로 인해 엔터프라이즈 서버와 같은 영역에서도 하드디스크를 빠르게 대체하고있다. 특히, 한 셀에 여러 비트의 정보를 저장하는 멀리 레벨 셀(Multi-Level Cell, MLC) 기법은 반도체 공정의 미세화와 함께 낸드 플래시 메모리의 집적도를 크게 높임으로써, 낸드 플래시 기반 저장장치의 활용범위를 넓히는 데 크게 기여하였다.

한편, 멀티 레벨 셀 기법의 반대급부로서, MLC 낸드 플래시는 기존 싱글 레벨 셀(Single-Level Cell, SLC) 낸드 플래시 보다 성능이 떨어지는 특성을 갖게 된다. 이는 멀티 레벨 셀 기법에서의 페이지 쓰기 방법에 기인한 것으로, 두 개의 비트를 한 셀에 저장하는 2-bit MLC 낸드 플래시를 예로 들면, 첫 번째 페이지(Least-Significant Bit (LSB) Page)를 저장하는 것보다 두 번째 페이지(Most-Significant Bit (MSB) Page)를 저장할 때 더 미세한 전력 제어가 필요하기 때문이다. 빅데이터 시스템 및 클라우드 기반 컴퓨팅에서 저장장치의 성능에 대한 요구조건이 지속적으로 높아짐에 따라, 위와 같은 MLC 낸드 플래시 메모리의 성능 하락은 더 넓은 컴퓨팅 영역에서 낸드 플래시 기반 저장장치가 적용되기 위해 필수적으로 해결해야 할 문제로 여겨지고 있다.

MLC 낸드 플래시 기반 저장장치의 성능 향상을 위한 기존 연구로, MLC 낸드 플래시 상에 존재하는 불필요한 페이지 기록 순서 제약을 완화하여 LSB/MSB 페이지 간의 성능 비대칭성을 활용하는 기법과[1], LSB 페이지의 데이터가 더 이상 유효하지 않을 때 페이지 기록 방식을 바꿔 더 빠르게 MSB 페이지를 기록하는 기법[2] 등을 제안한 바 있다. 두 기법은 디바이스의 특성을 저장장치 펌웨어 수준에서 활용하여 성능을 개선시키는 계층 통합적 최적화 연구로, 모두 주목할 만한 성능 개선을 이루었지만, 전자의 경우 저장장치 시스템에 유휴 시간이 존재하지 않을 정도로 많은 I/O가 집중될 경우 성능 개선을 기대하기 어렵고, 후자의 경우 기존 페이지 기록 순서 제약을 준수할 때 LSB 페이지의 데이터가 무효화될 가능성이 적다는 한계점들을 갖고 있다.

본 논문에서는 위의 두 관련 기법들이 상호 보완적일 수 있다는 고찰을 통해, MLC 낸드 플래시 기반 저장장치의 성능을 개선하는 통합적 최적화 기법을 제안한다. 새로 제안하는 저장장치에서는, 인가되는 쓰기 명령을 LSB 페이지들만을 우선적으로 사용하여 빠르게 처리하고, 이후 LSB 페이지의 데이터가 더 이상 유효하지 않을 때 MSB 페이지의 기록 또한 빠르게 처리하여 MLC 낸드 플래시 기반 저장장치의 성능을 SLC 낸드 플래시 기반 저장장치에 최대한 가깝게 향상 시킨다. 시뮬레이션을 통한 실험결과, 제안하는 기법은 기존 기법들에 비해 평균 22% 이상의 쓰기 명령들을 SLC 낸드 플래시에 가까운 성능으로 처리할 수 있음을 확인하였다.



(a) 기존 페이지 기록 순서 (b) Relaxed Program Sequence

그림 1. 기존 페이지 기록 순서와 RPS의 비교

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 통합의 대상이 되는 기존 기법들을 소개하고 그 한계점을 지적한다. 3장에서는 두 기법의 통합 가능성에 대해 설명하고, 새로운 통합 최적화 기법의 적용을 위한 블록 관리 기법을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 실험 결과를 보이고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

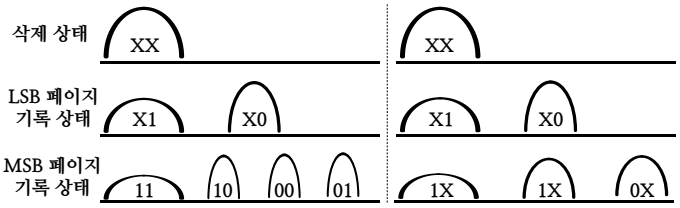
2.1 Relaxed Program Sequence (RPS)

MLC 낸드 플래시에서는 인접한 메모리 셀을 기록할 때, 이미 데이터가 기록된 셀이 영향을 받게 되는 셀 간 간섭현상(Cell-to-Cell Interference)을 최소화하기 위해, 블록 내에서의 페이지 기록 순서가 엄격히 제한된다. 해당 연구[1]에서는 논리적인 분석을 통해, 지금까지 당연하게 여겨지던 페이지 기록 순서에 존재하는 불필요한 제약사항을 찾아내 완화하고, 이를 통해 플래시 변환 계층(Flash Translation Layer, FTL)이 성능 비대칭성을 적극적으로 활용하는 기법을 제안하였다. 그림 1은 불필요한 제약사항이 완화된 Relaxed Program Sequence (RPS)의 예를 기존 페이지 기록 순서와 비교하여 보여준다. 그림 1에서 볼 수 있듯, 기존 순서에서는 빠른 LSB페이지와 느린 MSB 페이지를 번갈아 사용하기 때문에 FTL이 성능 비대칭성을 거의 활용할 수 없지만, RPS에서는 빠른 LSB 페이지를 블록 내에서 우선적으로 사용할 수 있어, 연속적인 LSB 페이지 사용을 통해 순간 성능을 SLC 낸드 플래시 기반 저장장치에 가깝게 향상시킬 수 있다.

한편, 남은 느린 MSB 페이지들은 저장장치에 요구되는 성능이 낮은 때나, 유휴 시간 중 백그라운드 가비지 컬렉션 등에서 사용되는데, 만약 유휴 시간이 거의 없는 집중된 I/O 특성을 갖는 워크로드에서는 높은 성능이 요구될 때도 MSB 페이지를 함께 사용해야 하므로 성능 개선을 기대하기 어렵게 된다.

2.2 SLC-Like Program

MLC 낸드 플래시에서는 하나의 메모리 셀에 다수 비트를 저장하기 위해 더 많은 임계 전압 분포를 생성해야 한다. 같은 전압 범위 내에서 더 많은 수의 분포를 만들기 위해 세밀한 전압 제어가 필요하게 되므로, 두 번째 기록하는 MSB 페이지는 LSB 페이지 보다 더 긴 기록 지연시간을 갖게 된다. 그림 2는 일반적인 MLC 낸드



(a) 기존 페이지 기록 방식 (b) SLC-Like Program

그림 2. 기존 페이지 기록 방식과 SLC-Like Program의 비교

플래시의 기록 방식과 유효하지 않은 LSB 페이지에 대해 빠른 MSB 페이지 기록을 가능하게 하는 SLC-Like Program 기법[2]을 비교하여 보여준다. 일반적인 MLC에서는 두 개의 임계 전압 분포를 생성하는 LSB 페이지 기록에 비해 네 개의 분포를 생성하는 MSB 페이지 기록이 매우 긴 시간을 소모하게 되지만, 만약 LSB 페이지의 데이터가 더 이상 유효하지 않다면, 이미 생성된 분포들을 모두 '1'로 정해놓고 '0'에 해당하는 새로운 분포만을 생성함으로써 MSB 페이지 기록을 빠르게 처리할 수 있다.

해당 기법은 유효하지 않은 데이터를 갖는 LSB 페이지와 대응되는 MSB 페이지의 기록 속도를 LSB 페이지와 비슷하게 향상 시킬 수 있지만, 2.1 절에서 언급한 바와 같은 기존의 페이지 기록 순서에서는 큰 성능 개선을 기대하기 어렵다. 즉, LSB 페이지와 MSB 페이지가 번갈아 사용되어, MSB 페이지의 기록 전 LSB 페이지의 데이터가 무효화될 가능성이 현저히 낮으므로 해당 기록 기법을 적용할 기회가 거의 없을 수 있다.

3. MLC 낸드 페이지 기록 방식의 통합 최적화

3.1 기존 기법 간의 상호 보완성

RPS 기법은 블록 내에서 LSB 페이지들을 대응하는 MSB 페이지를 전혀 사용하지 않고 우선적으로 기록할 수 있게 하므로, MSB 페이지를 사용하기 전에 LSB 페이지들이 무효화될 확률을 크게 높여주게 되고, 결과적으로 SLC-Like Program의 적용 가능성 또한 높아지게 된다. 또한, SLC-Like Program은 LSB 페이지가 무효화되기만 하면 적용 가능하므로, 유휴 시간 없이 I/O가 매우 집중되더라도, 무효화되는 페이지가 일정 수준 이상 존재한다면, LSB페이지를 우선적으로 사용하고도 성능 하락 없이 계속해서 LSB 페이지와 같은 성능으로 쓰기 명령을 처리할 수 있다.

3.2 3-phase 블록 관리 기법

2절에서 언급한 기법들의 효율적인 통합을 위해 본 논문에서는 블록의 상태를 세 가지로 나누어 관리하는 3-phase 블록 관리 기법을 제안한다. 그림 3은 3-phase 블록 관리 기법에서 블록의 순환 과정을 보여준다. 초기 모든 페이지를 사용할 수 있는 상태의 블록은 fast 블록으로, 해당 블록들은 빠른 LSB 페이지들 만을

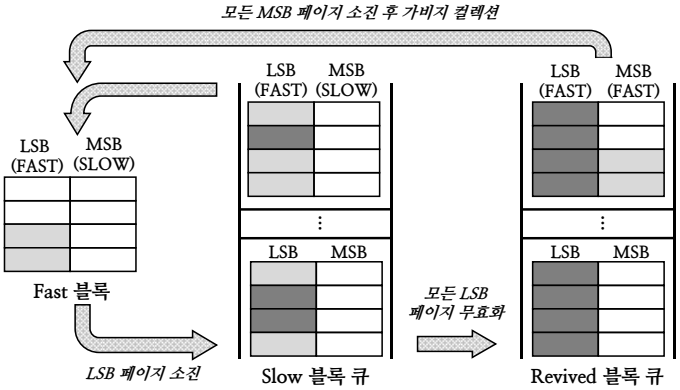


그림 3. 3-phase 블록 관리 기법에서의 블록 순환 과정

사용하여 쓰기 명령을 처리한다. Fast 블록의 모든 LSB 페이지가 사용될 경우, 해당 블록은 slow 블록으로 바뀌고, 큐를 통해 관리된다. 기록된 LSB 페이지가 모두 무효화된 slow 블록은 revived 블록으로 바뀌고, 마찬가지로 별도의 큐를 통해 관리된다. MSB 페이지까지 모두 기록된 slow/revived 블록들은 가비지 컬렉션의 대상이 되어 다시 fast 블록으로 관리된다.

FTL이 쓰기 명령에 따라 페이지를 선택하는 정책은 다음과 같다. FTL은 쓰기 버퍼의 점유율을 기반으로 쓰기 성능 요구수준을 예측하여 페이지를 선택하는데, 기본적으로 높은 성능이 요구될 때는 fast 블록의 LSB페이지나 revived 블록의 MSB 페이지를, 낮은 성능이 요구되거나 유휴 시간 중의 백그라운드 가비지 컬렉션에서는 slow 블록의 MSB 페이지를 사용한다. 기본적인 정책을 준수할 수 없을 때, 예를 들어 높은 성능을 요구하는 시점에서 fast/revived 블록이 없을 때나 낮은 성능을 요구함에도 slow 블록이 없을 때는 다른 종류의 페이지를 사용한다. Fast 블록과 revived 블록은 그 사용 시점이 겹치게 되는데, 두 블록 중 우선도는 revived 블록이 갖게 된다. 즉, 높은 성능이 요구될 때 revived 블록이 존재한다면 우선적으로 revived 블록이 사용되며, revived 블록이 없을 때에만 fast 블록이 사용된다. 이는 fast 블록은 LSB 페이지를 모두 소모하면 slow 블록이 되고, 향후 MSB 페이지를 모두 소모하기 전에는 가비지 컬렉션의 대상이 될 수 없으므로, revived 블록에 우선적으로 데이터를 채워 가비지 컬렉션을 통해 빠른 페이지를 원활하게 공급하기 위함이다.

4. 실험 결과

제안하는 기법의 유효성을 평가하기 위해, FTL 시뮬레이터를 구현하여 각 기법에서 쓰기 명령을 처리할 때 사용하는 페이지의 종류를 측정하였다. 그림 4는 일반적인 페이지 레벨 FTL (page-FTL), RPS를 적용한 FTL (RPS-FTL), SLC-like Program을 적용한 FTL (SLP-FTL), 그리고 새로 제안하는 통합 기법이 적용된 FTL (Integrated-FTL)에서 인가되는 쓰기 명령을 처리할 때 사용한 빠른 페이지의 비율을 나타낸다. 워크로드는 FIO 벤치마크 도구를 사용하여 업데이트 비율을 달리한 250

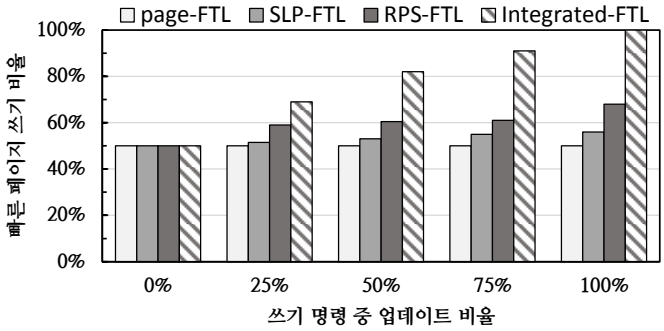


그림 4. 각 FTL의 빠른 페이지 쓰기 비율 비교

MB의 쓰기 명령을 지속적으로 인가하였다.

그림 4에서 확인할 수 있듯, 제안하는 Integrated-FTL은 높은 업데이트 비율을 가질 수록 다수의 쓰기 명령을 빠른 페이지를 사용하여 처리할 수 있었다. 반면, RPS-FTL과 SLP-FTL은 성능 개선이 크지 않은데, RPS-FTL의 경우 쓰기 명령이 지속적으로 인가되어 결국 LSB 페이지와 MSB 페이지를 번갈아 사용하게 되고, SLP-FTL의 경우 LSB 페이지가 무효화될 확률이 매우 적기 때문에 기법의 적용 가능성이 매우 떨어지기 때문이다.

5. 결론

멀티 레벨 셀 기법은 낸드 플래시의 집적도 향상에 지대한 공헌을 했지만, 그로 인해 기존 SLC 낸드 플래시 메모리보다 악화된 MLC 낸드 플래시의 성능은 저장장치에 대한 높은 요구성능을 만족하기 위해 필수적으로 해결해야하는 문제가 되었다. 본 논문에서는 MLC 낸드 플래시의 성능을 개선하기 위한 기존 연구들의 한계점을 분석함과 동시에, 상호 보완적인 기법을 통합하여 그 한계점을 극복하는 새로운 기법을 제안하였다. 실험 결과, 제안하는 기법은 MLC 낸드 플래시에서 빠른 페이지 쓰기를 평균 22% 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터연구소에 감사드립니다. 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015M3C4A7065645). (교신저자: 김지홍)

참고문헌

[1] J. Park et al., “Improving Performance and Lifetime of NAND Storage Systems Using Relaxed Program Sequence,” Design Automation Conference (DAC'16).
[2] Y.-M. Chang, et al., "Achieving SLC performance with MLC flash memory", Design Automation Conference (DAC'15).