

SLC/MLC 혼합 플래시 메모리를 이용한 하이브리드 하드디스크 설계

유승준 홍성철^o 신동군
성균관대학교 정보통신공학부

paraxxxx@skku.edu, adonis0101@skku.edu, dongkun@skku.edu

Designing Hybrid HDD using SLC/MLC combined flash memory

Seung Joon Yoo Seong Cheol Hong^o and Dongkun Shin
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

최근 낸드 플래시 메모리의 급속한 확산으로 기존의 하드디스크가 플래시 메모리 기반의 SSD (Solid State Disk)로 대체될 것으로 예상되고 있다. 하지만, 가격과 용량 문제로 SSD가 하드디스크를 완전히 대체하기는 힘든 상황이다. 이러한 이유로 하드디스크와 낸드 플래시 메모리를 결합한 하이브리드 하드디스크가 개발되었다. 일반적인 하이브리드 하드디스크는 하드디스크와 낸드 플래시 메모리, 디램이 결합된 형태이다. 낸드 플래시 메모리는 디램과 하드디스크 사이에서 쓰기 버퍼로, 혹은 캐시로 사용된다. 현재까지 이와 관련된 여러 연구들이 진행되어 왔다.[1,2]

Hsieh[1]는 하이브리드 하드디스크의 플래시 메모리를 위한 효과적인 탐색 기법을 제시하고 플래시 메모리의 용량, 매핑 기법에 따른 응답 시간, 수명, 소비 전력의 변화를 측정하였다. 그리고 Kim[2]은 데이터 고정 기법을 사용하는 하이브리드 하드디스크를 제안하였다. 이것은 플래시 메모리를 고정 구역과 비고정 구역으로 나누어 자주 사용되는 데이터 블록들을 고정 구역에 넣음으로써 이 블록들이 낸드 플래시 메모리에 더 오래 머물게 한다. 이 방법으로 기존의 하드디스크에 비해 소비 전력을 줄이고, 입출력 성능을 향상시킨다.

낸드 플래시 메모리에는 SLC와 MLC의 두 가지 타입이 있다. SLC 플래시 메모리는 빠르고 수명이 긴 반면 가격이 비싸고, MLC 플래시 메모리는 상대적으로 느리고 수명이 짧지만 용량이 커지기 때문에 가격이 싸다. 만약에 하이브리드 하드디스크에 SLC를 사용한다면, 같은 가격의 MLC를 사용했을 때보다 메모리 자체의 속도는 조금 더 빨라지지만 버퍼의 용량이 작아지기 때문에 하드디스크에 더 자주 접근이 발생하여 응답 시간과 전력 소모가 각각 늘어날 것이다. 반면에 MLC를 사용한다면, 응답시간과 전력소모 측면에서는 유리하지만 MLC는 SLC보다 수명이 훨씬 짧기 때문에 하이브리드 하드디스크의 수명이 짧아질 수 있다.

이러한 SLC와 MLC 낸드 플래시 메모리의 약점을 최소화하기 위해 SLC 플래시 메모리와 MLC 플래시 메모리를 결합한 형태의 비휘발성 캐시를 고려해볼 수 있다. 이러한 구성은 별도의 SLC 칩과 MLC 칩을 이용하여 구성할 수도 있고, 하나의 플래시 칩에서 각 블록을 SLC 또는 MLC로 설정하여 구성할 수도 있다.

본 논문에서는 앞서 설명한 기존 연구들과는 다르게 SLC와 MLC를 결합한 플래시 메모리를 버퍼로 사용하는 새로운 하이브리드 하드디스크 구조를 제안한다. 그리고 제안한 구조에서 SLC와 MLC의 비율 변화에 따라 성능, 수명, 전력 소모가 어떤 변화를 보이는 지 조사하여 최적의 SLC/MLC 비율을 선택할 수 있는 기준을 제시한다.

제안하는 하이브리드 하드디스크는 컨트롤러, 디램, 낸드 플래시 메모리, HDD로 이루어져 있다. 호스트 인터페이스에서 입출력 요청이 하이브리드 하드디스크의 컨트롤러로 전달된다. 컨트롤러는 디램, 플래시 메모리, 하드디스크 등 모든 장치들을 제어하고, 해당 논리 블록 주소(LBA, Logical Block Address)에 대한 요청이 실제로 어디로 전달되어야 할지를 결정한다. 컨트롤러는 읽기 요청과 쓰기 요청을 각각 다른 정책으로 처리한다. 우선 읽기 요청이 발생하면, 컨트롤러는 요청된 블록이 어느 장치에 있는지 알아내기 위해 디램, 플래시 메모리, 하드디스크의 순서로 검색한다. 만일 디램에서는 miss가 발생하고 해당 데이터가 SLC에 있으면 컨트롤러는 해당 블록을 디램으로 복사하며, MLC나 하드디스크에 있는 경우에는 시간적 지역성(temporal locality)을 고려하여 디램뿐만 아니라 SLC에도 복사해 둔다. 디램에서 데이터는 LRU 관리정책에 의해서 관리된다. 그리고 쓰기 요청이 발생하면, 데이터는 우선 디램에 기록되었다가 백그라운드로 플래시 메모리의 SLC 영역에 기록된다.

하이브리드 하드디스크 내부의 낸드 플래시 메모리는 다음과 같이 관리된다. SLC영역과 MLC영역은 서클러 버퍼로 동작한다. 각 영역은 시작 지점, 현재 지점, 핫 지점, 끝 지점의 네 개의 지점이 있다. 먼저 시작 지점이 있으면, 끝 지점은 10%의 여유 공간을 남기고 지정된다. 이것은 가비지 컬렉션을 위한 여유 공간이다. 데이터 블록들은 시작 지점부터 현재 지점까지 저장되어 있고, 새로운 데이터가 들어오면 현재 지점에 저장된다. 현재 지점은 각 SLC와 MLC에 데이터가 저장되면서 끝 지점 쪽으로 이동한다. 만일 현재 지점이 끝 지점에 닿으면, 가비지 컬렉션을 통해서 빈 공간을 확보하게 된다.

핫 지점은 가비지 컬렉션과 관련되는 데, 시작 지점과 끝 지점 사이를 3:7(SLC) 혹은 4:6(MLC)으로 나누는 지

점으로 설정된다. 시작 지점 쪽에 가까운 데이터는 접근된 지 오래됐거나, 이미 새로운 업데이트가 일어나 무효화(invalidate)됐을 가능성이 높다. 또한 현재 지점에 가까운 데이터는 최근에 접근되었을 뿐 아니라 자주 접근될 가능성이 높다. 즉, 시작 지점으로부터 핫 지점까지가 콜드 구역, 핫 지점으로부터 끝 지점까지가 핫 구역으로 설정된다. 그리고 가비지 컬렉션 시에 콜드 구역 내의 유효한 데이터들을 이동시키고 콜드 구역내의 모든 블록을 삭제연산을 통해 초기화시킨 후 새로운 데이터를 기록할 공간으로 활용한다.

콜드 구역내의 유효한 페이지는 가비지 컬렉션에 의해 해당 SLC나 MLC영역에 다시 기록되거나, 하위 레벨의 저장장치로 이동된다. MLC 영역의 콜드 구역 비율이 SLC 영역의 콜드 구역보다 더 큰 이유는 SLC의 데이터를 MLC로 이동시키는 비용보다 MLC의 데이터를 HDD로 이동시키는 비용이 훨씬 클 뿐만 아니라 스핀 다운 상태인 HDD를 스핀 업 상태로 변환하는 추가적인 비용까지 들 수 있기 때문이다. 그러므로, HDD를 스핀 업 시켜야 하는 상황에서 가끔적 데이터를 많이 보내도록 MLC의 콜드 구역 비율을 더 크게 설정한다.

새롭게 제안하는 하이브리드 하드디스크의 성능을 평가하기 위해 트레이스-드리븐 시뮬레이터를 만들어 실험을 수행하였다. 디램의 용량은 512KB로 설정했으며, 플래시 메모리의 용량은 SLC로만 사용하면 512MB, MLC로만 사용하면 1GB가 되도록 설정했다. 또한 하드디스크는 삼성 HM080H1 제품을 모델링 하였고, threshold-based power management(TPM)을 사용하여 일정 시간동안 접근이 없으면, 하드디스크가 스핀 다운 하여 idle 혹은 standby 상태가 되도록 하였다.

실험에 사용한 트레이스는 Financial1, bonnie++, desktop의 총 세 가지이다. 먼저 Financial1 트레이스는 웹 사이트에서 받을 수 있는 공개된 트레이스[3]이다. 또한 bonnie++ 트레이스는 동명의 디스크 성능 벤치마크 프로그램을 사용하여 얻은 트레이스이다. 마지막으로 desktop 트레이스는 Diskmon [4] 프로그램을 이용하여 데스크탑 환경에서 일반적인 어플리케이션을 실행시켜 얻은 트레이스이다.

수행한 실험들은 다음과 같다. 먼저 SLC와 MLC의 비율 변화에 따른 평균 읽기 응답 시간을 측정하였다. 읽기 응답 시간만을 측정한 이유는, 쓰기 요청의 경우 처음에 무조건 디램에 쓰이고, 지연은 비동기적으로 발생하는 반면에, 읽기의 경우 해당 블록이 디램에 없으면 SLC, MLC 혹은 최악의 경우 HDD에서 읽어와야 하기 때문에 전체 성능에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다. 읽기 응답 시간의 경우, 모든 트레이스에서 공통적으로 SLC의 비율이 늘어남에 따라 성능이 떨어졌다. 이는 SLC의 비율이 늘어날수록 플래시 메모리 전체 용량이 줄어들어 플래시의 hit rate이 떨어지기 때문이다.

둘째, SLC와 MLC의 비율 변화에 따른 플래시 메모리의 수명을 측정하였다. SLC영역의 수명은 셀 당 50000 번, MLC 영역의 수명은 셀 당 10000 번 지웠다가 쓸 수 있다고 가정하고 실험을 수행하였다. 수명을 측정한 결과는 두 가지 경향을 보인다. 먼저 Financial1, desktop 트레이스 처럼 수명이 선형적으로 증가하는 경우가 있는 반면, bonnie++ 트레이스 처럼 수명이 가장 짧은 지점이 중간에 있는 경우이다. 하지만 일반적으로 SLC의 비율이 클수록 수명도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

셋째, SLC와 MLC의 비율 변화에 따른 하드디스크의 전력 소모 값을 측정하였다. 전력 소모의 경우, 모든 트레이스에서 공통적으로 MLC 비율이 클 수록 최소 6.3%에서 최대 17.4%까지 전력 소모가 줄어드는 경향을 보인다. 이는 플래시 메모리의 용량이 줄어들수록 플래시 메모리에서 처리되는 요청 줄어들게 되어 그만큼 하드디스크에서의 작업이 늘어나기 때문이다. 그러므로 전력 소모를 줄이기 위해서는 MLC의 비율을 최대한 늘려 플래시 메모리 용량을 키워야 한다.

우리는 이 논문을 통해 SLC와 MLC를 결합한 플래시 메모리를 사용하는 새로운 하이브리드 하드디스크 구조와 적절한 정책을 제안하였다. 그리고 우리가 제안한 새로운 하이브리드 하드디스크에서 SLC, MLC의 비율을 변화시키며 응답시간, 수명, 전력소모를 측정하였다. 공통적으로 MLC의 비율이 높을 수록 응답시간, 전력소모 측면에서 효율적임을 알 수 있었다. 또한 워크로드마다 약간씩 차이가 있지만, SLC의 비율이 높을 수록 수명이 길어지는 경향을 보였다. 플래시 메모리의 용량을 최대한 크게 하여 성능, 전력 소모상의 이익을 보면서 일정 수준 이상의 수명을 갖기 위해서는 SLC와 MLC를 결합한 플래시 메모리를 사용하는 것이 좋다. 또한 우리의 실험을 통해 사용자의 요구사항과 워크로드에 따라 최적의 응답시간, 수명, 전력소모를 갖는 SLC와 MLC 비율을 찾아낼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.-W. Hsieh et al., "Energy-Efficient and Performance-Enhanced Disks Using Flash-Memory Cache", Proc. of ISLPED, pp.334-339, 2007
- [2] Y.-J. Kim et al., "I/O Performance Optimization Techniques for Hybrid Hard Disk-Based Mobile Consumer Devices", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 53, no. 4, pp. 1469-1476, 2007
- [3] University of Massachusetts Trace Repository. <http://traces.cs.umass.edu/index.php/Storage/Storage>
- [4] Diskmon, <http://www.microsoft.com/technet/sysinternals/default.msp>