

STT-MRAM 기반 스토리지 디바이스의 성능 및 파워, 발열에 대한 비교 분석 연구

박중언¹, 마진석², 오명훈², 김영재¹

¹서강대학교 컴퓨터공학과, ²한국전자통신연구원

{wnddjssla, youkim}@sogang.ac.kr {majinsuk, mhoonoh}@etri.re.kr

Comparative Analysis of Performance, Power and Heat of STT-MRAM-Based Storage Devices

Joongeon Park¹, Jinseok Ma², Myeonghoon Oh², Youngjae Kim¹

¹Sogang University, Seoul, South Korea, ²Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, South Korea

요약

NAND Flash Memory 기반의 Solid-state drive(SSD)는 스토리지로 고성능 스토리지 시스템에 널리 사용되고 있다. 하지만 NAND Flash Memory 기반의 SSD는 다음과 같은 문제점을 갖고 있다. 첫째, NAND Flash Memory는 Main Memory로 사용되는 DRAM에 비해 접근속도가 낮다. 둘째, Out-of-place update로 인해 Write Amplification 문제가 있다. 한편, 최근에 Spin Transfer Torque-Magnetic RAM(STT-MRAM), Phase change Memory(PCM), 3D-XPoint Memory와 같은 Storage-Class Memory(SCM)은 1) DRAM만큼 접근속도가 빠르고 2) 비휘발성의 특성을 갖고 있어, 스토리지로 사용되는 연구가 진행되고 있다. 하지만 DRAM에 비해, 읽기/쓰기시 많은 에너지소비를 한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 STT-MRAM 기반의 SSD와 NAND Flash 기반 SSD(M.2 Samsung 970 EVO, Intel SSD 750) 및 3D-Xpoint 기반 SSD(Intel Optane SSD 900P)와의 대역폭 및 에너지의 효율성을 비교 분석하는 연구를 진행하였다. 또한, 읽기/쓰기에 따른 온도 변화를 측정하여 발열에 따른 STT-MRAM의 동작상태를 확인하였다. 대표적인 결과로 읽기/쓰기에 대한 에너지 효율성을 비교 분석 한 결과, 쓰기를 수행할 때, Intel SSD 750 비해 11.15배 증가하였고 읽기를 수행할 때, 2.07배 대역폭 대비 에너지 효율성을 보였다. Intel Optane SSD 900P에 비해서는 쓰기일 때 4.6배, 읽기를 수행할 때 1.98배 대역폭 대비 에너지 효율성을 확인했다.

1 서론

STT-MRAM, PCM, 3D-XPoint Memory 같은 SCM 메모리는 (i) 바이트 단위 접근, (ii) 데이터 영속성 (Persistence), (iii) DRAM에 근접한 읽기, 쓰기 접근 속도 같은 특성으로 메인 메모리 대치 또는 혼합 사용 (하이브리드 메모리), 또는 스토리지 디바이스로 사용이 가능하다. 표 1은 STT-MRAM, PCM, 3D-XPoint Memory의 대역폭, 지연시간, 쓰기 시 에너지 소모에 대한 비교를 보여준다. STT-MRAM은 세가지 메모리 소자 중에 가장 높은 대역폭, 낮은 지연시간 및 적은 쓰기 에너지를 소모한다. 기존의 연구는 각 디바이스 소자의 성능 및 에너지 소모량을 분석하는 연구결과이며 각 메모리 소자의 디바이스의 성능 및 에너지 소모량을 비교 분석 하는 연구는 부족하였다.

본 연구에서는 다양한 메모리 소자 기반의 스토리지 디바이스의 성능 및 에너지 효율 평가를 위해 NAND Flash Memory 기반의 Samsung 970 EVO SSD, Intel 750 SSD, 3D-Xpoint Memory 기반의 Intel Optane SSD와 STT-MRAM 기반의 SSD의 대역폭, 에너지 소모량 및 온도 변화를 비교 분석 하였다. 각 디바이스의 성능 평가는 fair-io [1] 벤치마크를 사용하여 순차적 읽기/쓰기에 대한 대역폭을 측정하였다. 또한, 외부 전력 측정 장비 [2]를 사용하여 디바이스의 소모 전력을 측정하였고, 외장 온도 측정 장비 [3]를 디바이스의 발열판에 부착하여 실측을 하였다. 대표적인 실험결과로 STT-MRAM은 M.2 Samsung 970 EVO SSD, Intel 750 SSD와 Intel Optane SSD에 비해 쓰기 수행시 각각 최대 약 11배와 3배, 읽기 수행시 최대 약 2.7배 및 약 2.6배의 높은 대역폭을 보였다. 각 스토리지 디바이스의 에너지 소비량은 쓰기시 최대 약 5.3배 및 약 1.1배, 읽기를 할 때 약 3.2배, 약 1.2배를 NAND Flash Memory SSD, 3D-Xpoint SSD와 비교하여 더 많이 소비하였다. 또한 STT-MRAM SSD의 경우 추가적인 Fan이 없을 때 읽기/쓰기 수행시, 65.8도에 도달하면 발열로 인해 동작이 정지한다는 것을 관찰하였다.

2 비휘발성 메모리

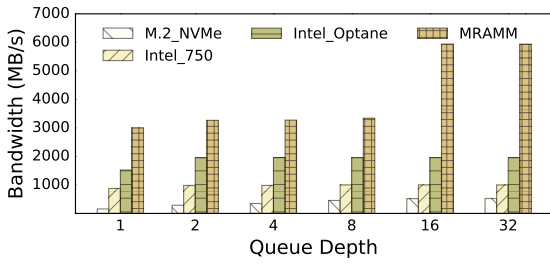
NAND Flash Memory: 데이터의 읽기/쓰기 수행 시, 워드 라인(Word Line)과 연결된 다수의 컨트롤 게이트로 page 단위의 접근을 한다 [5]. 또한 NAND Flash Memory는 Out-of-place Update 방식의 쓰기 특성으로 인해 Garbage Collection(GC)의 연산이 발생한다. 이러한 GC의 연산은 내부적으로 추가적인 읽기/쓰기를 발생시켜 Write Amplification문제를 유발하기 때문에 낮은 성능의 원인이 된다.

3D-Xpoint Memory: 워드 라인(Word Line)과 비트 라인(Bit Line)이 겹치는 부분에 메모리셀이 존재하여 각각의 메모리셀을 독립적으로 접근할 수 있다. 따라서 바이트 단위 접근을 하여 In-place Update가 가능해지고 GC연산이 불필요하여 NAND Flash Memory에 비해 높은 접근속도를 보인다. 하지만, 저항 레벨을 달리하여 쓰기를 수행하는 특성과 읽기와 쓰기를 구분하기 위해 메모리셀 내부의 셀렉터에 전압을 인가하는 특성으로 인해, 에너지 소비량이 많다 [6].

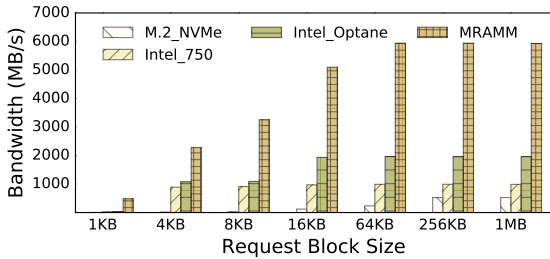
STT-MRAM: 독립적인 Magnetic Tunnel Junction(MTJ)에 전류를 인가하여 자기 방향을 변경하는 방식으로 데이터를 저장한다. 따라서, 바이트 단위로 접근이 가능하고, 3D-Xpoint Memory와 마

표 1: 메모리 소자 종류에 따른 대역폭, 지연시간, 쓰기 에너지 소비량 비교 [4]

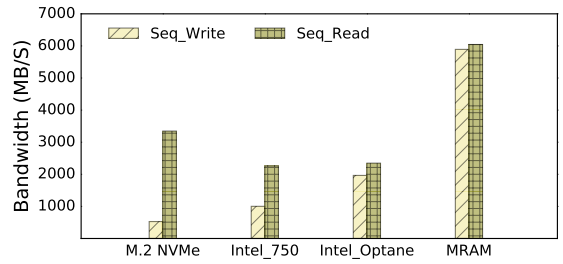
Memory Device	대역폭 (GB/s)	지연시간 (ns)	쓰기 Energy (nJ)
STT-MRAM	10.6	10-50	0.26
3D-Xpoint	2.5	10000	0.46
PCM	3.5	50-100	6.31



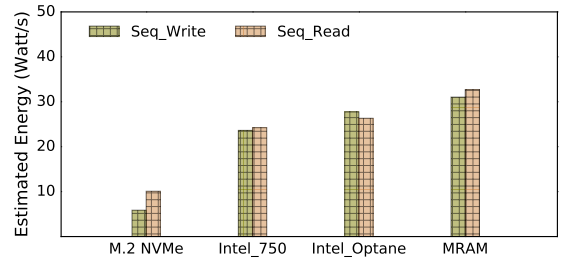
(a) Queue Depth에 따른 대역폭



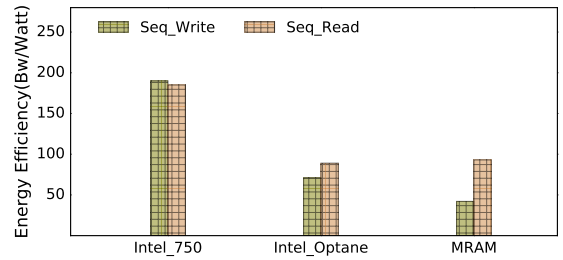
(b) Block Size에 따른 대역폭



(a) 대역폭



(b) 에너지 소비량



(c) 에너지 효율성

그림 1: 비휘발성 메모리 기반 SSD들의 Queue Depth와 Block Size 변화에 따른 성능평가

찬가지로 In-place Update가 가능하여 NAND Flash Memory보다 높은 대역폭 및 접근 속도를 보인다. 하지만, 쓰기를 하기 위해 자기접합터널의 자유층 자화방향을 바꾸는 것과 읽기를 하기 위해 전류를 흘려 보낼 시 많은 에너지 소비 및 열을 발생시킨다. [7].

3 실험 환경 설정

본 실험은 PCIe 3.0 lane에 스토리지 디바이스를 연결하여 진행하였다. 자세한 실험환경 내용은 표2에 있다. STT-MRAM과 다른 스토리지와의 성능 및 에너지 소모량, 온도의 변화 등을 비교하기 위해 fair-lio [1] 벤치마크를 사용하여 순차적 읽기/쓰기 수행하였다. STT-MRAM은 디바이스가 작동할 수 있는 임계점 온도를 넘어서는 경우 동작을 하지 않기 때문에 Fan을 탈부착하며 실험을 진행하였다. Fan을 부착한 상태에서 STT-MRAM은 약 32.2도의 온도를 유지하였다.

휴면 상태 에너지 소비량을 측정하기 위해 스토리지 디바이스가 연결되어 있지 않고 읽기/쓰기가 수행되지 않는 상태를 기본 에너지 소비량으로 설정하였다. 현재, 우리가 갖고 있는 외부 전력 측정 장비는 전체 시스템 에너지 소비량만을 측정하기 때문에 스토리지 디바이스만의 에너지 소비량을 측정할 수 없다. 따라서, 스토리지 디바이스를 연결하여 읽기/쓰기를 수행하는 동작 상태의 에너지 소비량을 예측하기 위해 전체 시스템 에너지 소비량 - 기본 에너지 소비량의 식을 통해 전력에 대한 스토리지의 에너지 소비량을 예측하였다.

표 2: 실험환경

CPU	Intel Core i7 8700 CPU, 6 core, 3.2GHz
Main Memory	16GB DDR4 1340MHz
Interface	PCIe 3.0 x8
Benchmark	fair-lio [1]

그림 2: 다양한 SSD의 에너지 효율성 비교

그림 3은 STT-MRAM의 발열량을 측정하기 위해 발열판에 온도 센서를 부착한 것을 보여준다. 발열판이 칩의 발열 정도에 따라 민감한 온도의 변화를 보이기 때문에 다른 SSD 디바이스들 또한 STT-MRAM과 동일한 방식으로 발열량을 측정하였다. 이러한 실측 방법으로 특정시간 동안 쓰기를 할 때, Fan을 부착하지 않은 상태에서 각 디바이스의 발열에 따른 동작상태를 실험을 하였다. 또한, 데스크탑 내부의 공기 온도 변화에 따른 STT-MRAM에 동작상태에 대해서도 분석하였다.

4 실험 평가

4.1 대역폭 성능 평가

본 실험에서는 각 SSD의 최대 성능을 내는 Block size와 Queue Depth를 찾기 위해, Block Size와 Queue Depth를 변화하며 각 디바이스의 읽기/쓰기 성능을 측정하였다. 그림 1 (a)와 (b)는 쓰기를 수행할 때 포화되는 대역폭의 Queue depth는 16, Block size는 256KB임을 보여준다. 해당 실험 결과에 기반하여 이후 실험은 Queue Depth는 16, Block Size는 256KB에서 진행하였다.

그림 2 (a)는 순차적 읽기/쓰기를 수행시 각 스토리지의 대역폭을 보여준다. STT-MRAM은 NAND Flash Memory 기반 SSD에 비해 최대 11.15배, 읽기 할 때 최대 2.74배의 대역폭 향상을 보였다. 3D-Xpoint Memory 기반 SSD에 비해서는 각각 3배, 2.57배의 차이를 보였다. 표1에서 제시된 STT-MRAM의 대역폭과 그림 2 (a)의 대역폭의 차이가 발생하는 것은 스토리지 디바이스가 표 2에



그림 3: STT-MRAM SSD와 온도측정기

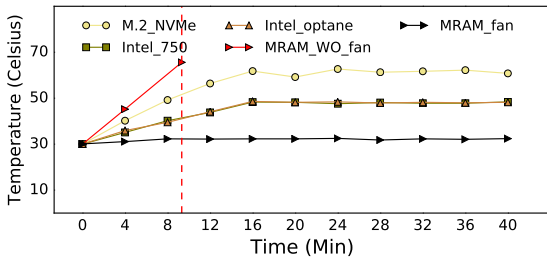


그림 4: 온도 변화 비교

제시된 인터페이스를 통해 읽기/쓰기를 하는 과정에서 생기는 오버헤드로 인해 성능이 저하되기 때문이다.

4.2 에너지 소비량 평가

그림 2 (b)는 순차적 읽기/쓰기를 수행시 각 스토리지의 에너지 소비량을 보여준다. STT-MRAM은 NAND Flash Memory 기반 SSD 비해 최대 5.29배, 읽기를 할 때 3.2배 에너지 소비를 하였다. 3D-Xpoint Memory 기반 SSD와는 각각 1.12배, 1.24배를 더 소비하였다. 표1에서 제시된 쓰기 에너지의 비율을 봤을 때, 실측값과 기준에 알려진 에너지의 소비 비율이 다르다. 그 이유는 각 스토리지의 집적도와 셀의 규격마다 인가되는 전류의 양이 다르기 때문이다.

그림 2 (c)는 Intel SSD 750, Intel Optane SSD 900P, STT-MRAM의 순차적 읽기/쓰기에 대한 에너지 효율성을 비교 분석하였다. 쓰기를 수행할 때, Intel SSD 750 비해 11.15배 증가하였고 읽기를 수행할 때, 2.07배 대역폭 대비 에너지 효율성을 보였다. Intel Optane SSD 900P에 비해서는 쓰기일 때 4.6배, 읽기를 수행할 때 1.98배 대역폭 대비 에너지 효율성을 확인하였다.

4.3 디바이스의 발열에 대한 분석

그림 4는 각 디바이스들의 발열에 따른 온도변화를 보여준다. Thermal Throttling으로 인해 한계점 온도 이후에 STT-MRAM은 작동하지 않아, 약 9분 정도가 지났을 때 65.6도에 도달하여 동작하지 않는다. 또한, STT-MRAM의 온도가 급격히 상승하는데 이는 자화방향을 돌릴 때와 읽기를 하기 위해 전류를 인가할 때 에너지가 많이 소비되기 때문이다.

그림 5는 쓰기를 수행할 때, 주변 환경 온도에 따른 STT-MRAM 온도 변화를 보여준다. 각각 다른 주변 환경의 온도에서 디바이스가 동작을 멈출때까지 워크로드를 수행했을 때, 주변의 온도에 영향을 받지 않고 발열 상승률이 일정한 것을 볼 수 있다. 하지만, 주변의 온도가 상승할수록 디바이스의 동작시간은 5초정도씩 감소하였다. 따라서 30도 일 때의 동작시간(약 490초)을 기준으로 했을

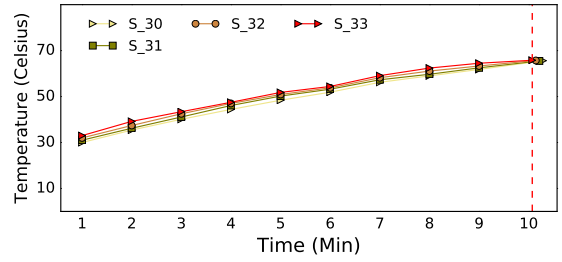


그림 5: 주변 온도에 따른 STT-MRAM SSD 온도 변화

때, 주변 온도가 1도씩 올라갈수록 약 1%의 동작시간이 감소한 것을 확인 할 수 있다.

5 결론

본 논문에서는 SCM 중 하나인 STT-MRAM을 기반으로한 스토리지 디바이스의 성능(Bandwidth), 에너지 소모량, 발열에 대한 비교 분석을 하였다. STT-MRAM을 의 NAND Flash Memory 기반 SSD와 3D-Xpoint 기반 SSD와 비교하였을 때 성능 관점에서는 쓰기 수행시 각각 최대 11.15배, 3배, 읽기 수행시 각각 최대 2.74배, 2.57배의 높은 대역폭 보였다. 에너지 소비량 관점에서는 쓰기를 할 때 각각 최대 5.29배, 1.12배, 읽기 할 때 최대 3.2배, 1.24배 더 많은 에너지 소비량을 보였다. 그러나 쓰기 수행시, NAND Flash를 비롯한 다른 디바이스들의 경우와 달리 STT-MRAM은 Fan이 없는 Passive Cooling 시 65.8도에 도달하여 동작을 멈추었다. 따라서, 발열로 인한 동작 문제가 발생되지 않는다면 STT-MRAM은 에너지 소비량 대비 효율적인 성능을 갖는 스토리지 디바이스로 사용될 수 있다.

6 사사문구

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기획 평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00503, 메모리중심 차세대 컴퓨팅 시스템 구조 연구)

참고 문헌

- [1] <https://github.com/fwang2/ioutils/tree/master/fair-lio>.
- [2] http://www.biall.com.pl/BAZA_PRODUKTOW_SMB/114210/114210.INSTRUKCJA_EN..2010-03-09.1.pdf.
- [3] <http://www.elitechlog.com/rc-4hc-pdf-temperaturehumidity-data-logger>.
- [4] X. Dong, C. Xu, Y. Xie, and N. P. Jouppi, "Nvsim: A circuit-level performance, energy, and area model for emerging nonvolatile memory," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 31, pp. 994–1007, July 2012.
- [5] R. Novotný, J. Kadlec, and R. Kuchta, "Nand flash memory organization and operations," *Journal of Information Technology Software Engineering*, vol. 5, p. 1–8, 2015.
- [6] F. T. Hady, A. Foong, B. Veal, and D. Williams, "Platform storage performance with 3d xpoint technology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 1822–1833, Sep. 2017.
- [7] E. Kültürsay, M. Kandemir, A. Sivasubramaniam, and O. Mutlu, "Evaluating stt-ram as an energy-efficient main memory alternative," in *2013 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS)*, pp. 256–267, April 2013.