

SSD 성능과 전력 소모량을 예측하는 시뮬레이터 개발 방법

이철목^o, 원유집

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

itree96@ece.hanyang.ac.kr, yjwon@ece.hanyang.ac.kr

Develop SSD Performance and Power Estimation Simulator

Chulmok Lee^o, Youjip Won

Dept. of Electrical and Computer Engineering

Hanyang University

요 약

오늘날 컴퓨터 시스템에서 중요하게 생각하는 분야 중 하나가 저전력이다. 학계 및 산업에서는 성능을 최대한 보장하면서 사용 전력을 절감하기 위해 많은 기술들이 개발되고, 또 주목을 받고 있다. 그러나 사용 전력을 측정하고 또 이를 절감하려는 개발을 진행하기 위해서는 개발중인 제품에 대해 실시간 전력 측정장비를 이용하여 동작 테스트 후, 실측된 데이터의 분석 작업과 개선 작업을 반복해야만 이루어진다. 이러한 경우 개발 기간이 길어질 뿐만 아니라 실제 동작 가능한 프로토타입의 개발 제품이 만들어져 있을 때만 가능하여 작업 효율성이 떨어질 수 있다.

이를 보완하기 위해 본 논문은 컴퓨터 시스템에서 전력을 많이 사용하는 분야 중 하나인 스토리지 디바이스의 성능 및 전력 사용량을 시뮬레이터를 통해 프로토타입의 개발 시제품이 없이도 분석할 수 있도록 해주는 것이 목적이다.

본 논문의 시뮬레이터는 NAND 플래시 메모리 칩을 사용하는 Solid State Disk(SSD) 장치에 대해서 성능 및 전력 사용량을 분석한다. SSD 내부 구성 부품들의 개별 동작 시간과 단위 사용 전력을 이용하여 주어진 테스트 워크로드를 수행하는 동안의 데이터를 수집함으로써 전체 성능과 전력 사용량을 구할 수 있게 된다. 그리고 본 논문에서는 SSD의 전력 사용량을 향상 시키기 위한 디바이스 구성 및 소프트웨어 알고리즘을 제공하고 이를 시뮬레이터를 통해 확인하도록 한다.

1. 서론

오늘날에는 모든 사람들이 하나 이상의 모바일 전자 장치를 소지하고 있다. 휴대폰, MP3 플레이어, 디지털 카메라, 노트북 등 다양한 모바일 장비가 활용되고 있다. 이러한 모바일 장비에서 중요하게 생각되는 요소 중 하나는 바로 저전력이다. 성능이 아무리 뛰어나도 전력 문제로 인한 사용 시간이 짧아지게 되면 그 제품은 모바일 장비로서 효용성이 떨어지는 것이다. 과거에는 모바일 장비에 사용되는 저장 매체로 HDD가 주로 사용되었으나, 최근에는 NAND 플래시 메모리 혹은 고성능, 고용량을 위해서 SSD를 채택하는 제품이 늘어났다.

SSD 장치를 개발하는 회사의 입장에서는 제품의 성능과 안정성, 전력 사용량 등을 측정하기 위해서 개발된 제품을 이용하여 실제 측정을 하게 되면 개발 비용이 많이 든다. 그러므로 실제 생산된 제품이 존재하지 않은 상태에서 시뮬레이션을 통해 그 성능과 전력 사용량 등의 데이터를 얻을 수 있다면 개발 기간의 단축뿐만 아니라 개발비용까지 절감할 수 있을 것이다. 종래에는 시뮬레이션을 통해 HDD와 같은 저장 매체의 성능과 전력 측정을 정확하고 효율적으로 하기

위한 연구가 많이 진행되었다.

본 논문에서는 NAND 플래시 메모리 칩을 기반으로 하는 SSD 장치가 개발되기 전에 SSD 하드웨어 설계 정보 및 FTL 소프트웨어를 이용하여 성능과 전력 사용량을 미리 예측할 수 있는 시뮬레이터를 개발하도록 한다. SSD의 다양한 하드웨어, 소프트웨어 구조에 따라 성능 및 에너지 사용량을 예측함으로써 미리 병목 지점 및 문제가 되는 부분을 발견할 수 있도록 도움을 주는 것을 목적으로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 스토리지 시스템의 성능 및 전력 사용량을 측정하기 위한 기존의 연구방법에 대해 살펴보고 3장에서는 시뮬레이터에서 SSD의 사용 전력량을 분석하기 위한 방법론을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이터를 통한 실험 방법 및 결과를 제공한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

Michigan University, Carnegie Mellon University 에서 개발된 DiskSim[1]은 스토리지 시스템 분야에서 연구를 지원할 수 있도록, 효율적이고 정확하며 다양한 설계 환경을 적용할 수 있는 HDD 시스템 시뮬레이터이다.

DiskSim은 HDD를 특성화하는 다양한 파라미터 값을 요구한다. 이 파라미터는 디스크의 용량 및 물리적 위치 특성, 동작 특성 그리고 각 동작에서의 시간 등 약 100여 가지의 내용을 포함한다. DiskSim은 디스크, 컨트롤러, 버스, 디바이스 드라이버, 스케줄러, 디스크 블록 캐시 등의 모듈을 시뮬레이션 하여 주어진 워크로드에 따른 성능 결과를 상세하게 보여준다.

Agrawal et al.[2]은 SSD에 대해서 성능을 측정할 수 있도록 DiskSim을 기반으로 SSD 디스크 모델을 추가 개발하였다. 기존의 DiskSim으로는 다룰 수 없는 Address Mapping 알고리즘, Garbage Collection, Parallelism 알고리즘이 추가되어 있고, SSD만의 설계 속성을 파라미터화하여 SSD의 성능 평가를 위한 시뮬레이터를 개발하였다.

John Zedlewski et al.[3]에 의해 개발된 Dempsey (Disk Energy Modeling and Performance Simulation Environment)는 DiskSim을 기반으로 하드 디스크의 성능 뿐만 아니라 전력 사용량에 대해서도 모델링 할 수 있도록 시뮬레이터를 개발하였다. Dempsey는 단위 전력 측정 장비와 실제 HDD를 사용하여 전력 소모에 대한 특성 파라미터 값을 실측함으로써 정확성을 높인 것이 특징이다. 이렇게 함으로써 제조업체에서 제공하는 데이터에 의존하지 않고 측정된 값의 파라미터를 사용하게 되어 시뮬레이터의 전력 측정 모델링 결과를 좀 더 정확하게 해주는 효과를 가질 수 있다.

Cagdas Dirik et al.[4]의 시뮬레이터를 통한 SSD에 대한 성능 모델링 연구는 Agrawal et al.[2]에서 연구한 방식과 유사하다. 그러나 이 논문에서는 NAND 플래시 메모리 중심의 디바이스 레벨보다는 좀 더 시스템 레벨에서의 성능을 모델링 할 수 있는 방향으로 접근하였다. Bus의 개수, 속도, Bandwidth, 동시 접근 속성 등을 다양화함으로써 시스템 레벨의 성능을 측정할 수 있는 모델링을 연구하였다.

3. SSD Simulator 구성

3.1 SSD 전력 소모 분석

그림 1은 SSD 장치 다이어그램에서 많은 전력을 소모하는 내부 장치를 표시한 것이다.

ARM Core는 FTL 소프트웨어를 처리하기 위한 중앙처리장치(CPU)이다. Storage의 Sector Address Mapping 동작, Wear-Leveling, Merge 등의 주요 FTL 알고리즘을 처리하기 위해 많은 전력 자원을 소모하게 된다. ARM Core는 크게 두 가지 모드로 동작을 한다. Instruction 을 처리하는 동안의 Active 모드와 NOP을 처리하는 Idle 모드로 나뉘어 진다.

DRAM Buffer는 SSD의 Read/Write Buffer Management를 위해서 사용되는 내부 모듈이다. NAND에 비해서 속도는 빠르나 비교적 많은 전력을 소모하고 있다.

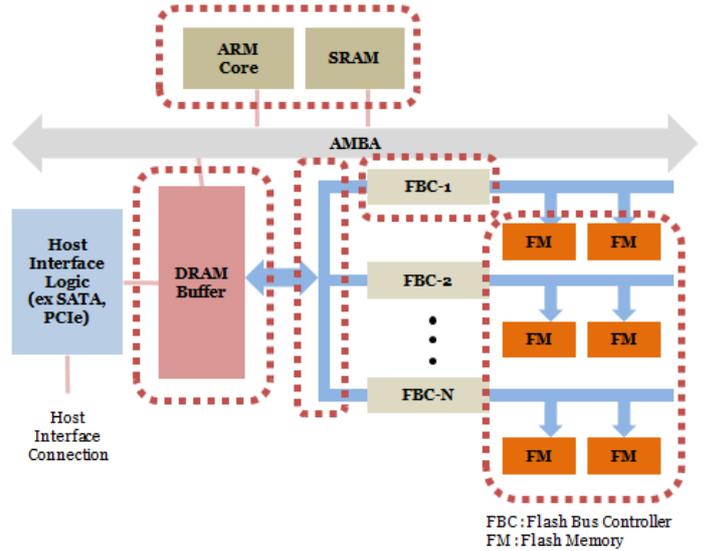


그림 1 SSD의 전력 측정 대상 내부 장치

Flash 메모리 칩 하나에서 사용되는 소모 전력량은 굉장히 적은 값이나, 대용량, 고성능 SSD를 개발하기 위해서는 여러 개의 Flash 메모리 칩을 사용하기 때문에 전체 사용 전력량은 큰 부분을 차지하게 된다.

Flash Bus Controller(FBC)는 Flash 메모리 채널 별로 하나씩 존재하며 Flash 메모리로 데이터를 입, 출력할 때 동기화를 맞춰주기 위해 Clk를 동작 시킴으로써 전력을 사용한다. Flash 메모리에서 일어나는 I/O 작업의 크기만큼 FBC에서 사용되는 전력 사용량이 비례하게 된다.

마지막으로는 SSD 내부 Bus를 통해 Flash 메모리와 DRAM, Host Interface Connection 간의 데이터 전송이 일어나는데 이때 사용되는 전력의 양은 굉장히 적어 전체 전력 사용량에는 크게 영향을 주지 않을 것으로 예상된다.

3.2 Simulator 설계 및 구현

본 논문에서 개발한 Simulator는 DiskSim[1]에 SSD 모듈이 탑재된 Simulator[2]를 기반으로 하여, SSD의 성능 및 에너지 사용을 예측할 수 있도록 추가 개발된 것이다. 그림 2는 전체 시스템의 구성도를 보여주고 있다. DiskSim은 bus와 컨트롤러, 디스크와 같은 스토리지 시스템의 계층적인 컴포넌트를 가상화한다. 그리고 스토리지 시스템의 특성을 설정 파일로 관리함으로써 손쉽게 다양한 스토리지 디바이스를 테스트할 수 있으며, 각 입출력 정보 로그를 상세히 제공함으로써 스토리지 시스템에 대한 분석을 쉽게 할 수 있도록 해준다. Agrawal et al.[2]은 DiskSim에 SSD를 모델링할 수 있도록 모듈을 개발하여 병렬화, Wear-leveling, Cleaning 기능을 수행할 수 있게 하였다.

그리고 Background Cleaning, Interleaving, Overprovisioning, Gang organization 등 다양한 SSD 설정을 파라미터화하여 테스트를 할 수 있도록 구현하였다. 그러나 이 시뮬레이터는 Buffer Cache Management 기능이 없고, 소프트웨어 관점에서 FTL의 구현이 DiskSim과 종속성이 강하여 새로운 FTL을 적용하기가 쉽지 않은 문제가 있다.

본 논문에서는 Agrawal et al. 이 구현한 시뮬레이터 기반에서 SSD의 사용 에너지를 예측할 수 있는 모듈을 추가하고, 저전력 FTL에 사용될 Buffer Cache Management 기능과 새로운 FTL이 쉽게 추가 구현할 수 있고, 각 FTL간 성능 비교를 용이하게 할 수 있는 구조를 가진 Simulator를 개발하고자 한다.

SSD bus current	0.05 mA
-----------------	---------

표 1 SSD 전력 측정 관련 파라미터

표 1은 Simulator에서 사용될 전력 측정 관련 파라미터 정보이다. 이 값들은 삼성전자 Flash 메모리[5], ARM9 Core[6], DRAM[7] 의 Datasheet에서 추출되었다.

각 SSD 내부 장치 별 전력을 측정하는 방식은 아래와 같다. Flash 메모리에서 전력을 사용하는 주요 동작은 읽기, 쓰기, 소거, 데이터 전송 그리고 아무런 동작을 하지 않는 Idle 상태 유지이다. 그러므로 Flash에서 사용되는 총 에너지는 아래와 같이 구해질 수 있다.

$$E_f = (C_{op} * V_f) * T_{op}$$

E_f 는 Flash에서 사용되는 총 에너지량이고, C_{op} 는 Flash의 각 Operation을 수행하면서 소요되는 단위 전류량이다. V_f 는 Flash 메모리에 인가되는 전압이며 T_{op} 는 Flash 메모리의 Operation을 수행하는 동안의 소요 시간을 의미한다. Simulator는 전체 Flash 메모리에서 사용한 에너지뿐만 아니라 각 Flash 메모리 패키지 별로 사용된 전력 및 성능 자료를 보여줄 수 있다.

CPU는 에너지 관점에서 크게 두 가지 모드를 가진다. 하나는 Instruction을 수행하기 위해 지속적인 전력을 공급받는 Power 모드이고, 두 번째는 어떠한 작업도 할당되지 않아 NOP를 수행하는 Idle 모드이다. Power 모드는 어떠한 Instruction을 수행하는 지, 그리고 이때 Cache 및 메모리의 데이터를 이용하는 지 등에 따라 전력의 차이가 있으나, 모든 경우에 있어서 Idle 모드에서 보다는 훨씬 큰 전력을 사용하기 때문에, Power 모드와 Idle 모드에서의 전력은 각 모드 평균 전력을 기준으로 계산하도록 한다. 그러나 Simulator에서 CPU의 Power 모드와 Idle 모드일 때의 작업 시간을 분리하기가 어렵기 때문에 본 논문에서는 SSD가 각각의 IO 요청에 대해서 처리하는 시간 동안을 Power 모드의 시간으로, 그 외에는 Idle 모드 시간으로 가정한다.

$$E_{pc} = (C_{pc} * V_c) * (T_{total\ op} - T_{idle\ op})$$

$$E_{ic} = (C_{ic} * V_c) * T_{idle\ op}$$

$$E_c = E_{pc} + E_{ic}$$

E_{pc} 는 Power 모드에서 CPU가 사용한 에너지이고, C_{pc} 는 Power 모드의 전류, V_c 는 CPU에 인가된 전압이다. Power 모드에서의 동작 시간은 전체 시뮬레이션 시간($T_{total\ op}$)에서 SSD가 Idle인 동안의 시간($T_{idle\ op}$)을 제외하여 얻는다. E_{ic} 는 Idle 모드에서

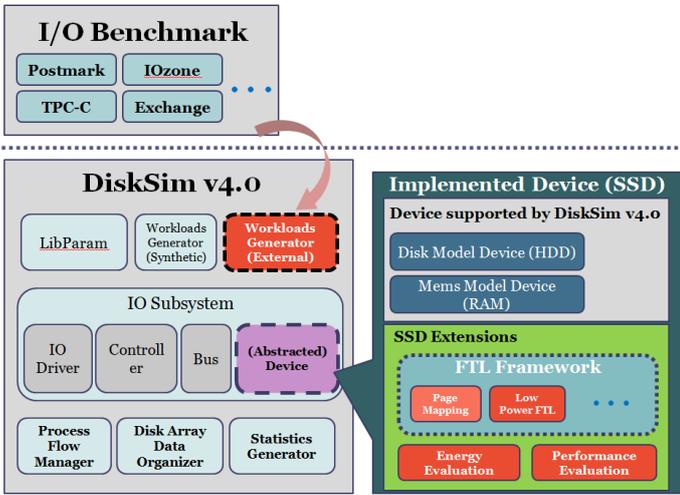


그림 2 Simulator System Overview

실험에서 사용될 테스트 워크로드는 DiskSim의 Synthetic workload 뿐만 아니라, 스토리지 시스템에서 널리 사용되는 벤치마크 툴들을 사용하여 실험결과를 얻을 수 있도록 구성하고자 한다. 이 때 사용될 벤치마크 툴은 IOzone, Postmark 를 수행하며, 두 벤치마크 툴을 수행하여 얻은 IO trace 기록을 DiskSim의 Workload 처리기를 통해 실험 데이터로 사용한다.

SSD input voltage	3.3 V
Page read current	15 mA
Page write current	15 mA
Page erase current	15 mA
Flash idle current	1 mA
Flash bus current	0.05 mA
DRAM idle power	878 mW
DRAM active power	80 mW
CPU normal mode power	259 mW
CPU idle mode power	124 mW
CPU slow mode power	33 mW

사용한 CPU의 에너지이고, C_{ic} 는 Idle 모드에서의 전류이다. 그러므로 CPU가 총 사용한 에너지(E_c)는 Power 모드에서의 에너지와 Idle 모드에서의 에너지를 모두 합함으로써 구할 수 있다.

DRAM에서 에너지를 사용하는 주요 동작은 읽기, 쓰기 동작과 아무런 동작을 하지 않고 내부 데이터를 보존하기 위해 Idle 상태를 유지하는 것이다. 읽기와 쓰기 동작은 같은 크기의 전류를 사용한다.

$$E_r = (C_{op} * V_r) * T_{op}$$

E_r 은 DRAM에서 사용된 총 에너지량이고, C_{op} 는 DRAM 각 Operation시에 요구되는 전류 크기이다. V_r 은 DRAM에 인가된 전압이며, T_{op} 는 DRAM 각 Operation을 수행하는 데 걸린 시간을 의미한다.

데이터 Bus에서 사용되는 에너지는 CPU나 DRAM, NAND 플래시 메모리에 비해서 굉장히 적은 에너지를 사용한다. 그러므로 본 Simulator에서는 Bus에서 사용하는 에너지 양에 대해서는 데이터를 전송하는 동안의 에너지만을 계산하며 Idle인 경우는 무시하도록 한다.

$$E_b = (C_b * V_b) * T_{op}$$

C_b 와 V_b 는 Bus에 인가되는 전류와 전압을 의미하며 T_{op} 는 버스를 통해 데이터를 전송하는 동안의 작업 시간을 의미한다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경

실험에 사용된 시뮬레이터는 DiskSim 기반에서 SSD 디바이스를 위한 모듈과 전력을 측정할 수 있는 모듈이 포함된 것이다. 시뮬레이션에 사용되는 입출력 테스트 워크로드는 DiskSim에서 임의적으로 생성하는 Synthetic 워크로드와 외부 입출력 추적 파일을 이용한 외부 워크로드 2가지 형태를 사용한다. Synthetic 워크로드는 순차 읽기/쓰기, 임의 읽기/쓰기 실험을 수행할 수 있다. 외부 워크로드는 IOzone[8], Postmark[9]를 이용하여 추출된 데이터를 실험에 사용한다.

실험은 SSD에 사용되는 NAND 플래시 메모리 칩의 특성에 따른 SSD의 전체 성능과 전력 소모량을 확인하고, SSD의 NAND 플래시 메모리 및 버스 구성에 따른 결과, SSD FTL의 종류에 따른 각각의 결과를 확인할 수 있도록 진행한다. NAND 플래시 메모리 칩은 Page와 Block의 크기 및 읽기/쓰기 속도가 서로 다른 종류의 칩을 사용한다.

Parameter	NAND Chip #1	NAND Chip #2	NAND Chip #3
-----------	--------------	--------------	--------------

Page Size	2 KB	4 KB	8 KB
Block Size	128 KB	256 KB	512 KB
Page Read to Register	25 μ s	25 μ s	25 μ s
Page Program (write) from Register	200 μ s	200 μ s	200 μ s
Block Erase	1.5 ms	1.5 ms	1.5 ms
Serial Access to Register (Data bus)	50 μ s	100 μ s	200 μ s
Block per plane	4,096	2,048	1,024
Plane per Flash chip	4	4	4
Flash active current	15 mA	15 mA	15 mA
Flash idle current	1 mA	1 mA	1 mA

표 2 NAND 플래시 메모리의 내부 속성 자료

표 2는 시뮬레이터에서 사용될 NAND 플래시 메모리의 특성을 정리한 자료이다.

4.2 실험 결과

먼저 DiskSim의 Synthetic 워크로드를 이용하여 순차 읽기, 순차 쓰기, 임의 읽기, 임의 쓰기 각각을 테스트하였다. 이 때 사용된 SSD의 특성은 8개의 NAND Flash로 8채널 전체 병렬화로 구성되었으며 FTL은 Page Mapped FTL이 사용되었다. 개별 NAND Flash는 표 2의 NAND 플래시 #2 속성을 따르도록 하였다. DiskSim의 각 Synthetic 워크로드는 Cleaning 및 Merge 가 발생할 수 있도록 5,000,000회의 I/O 처리를 수행하도록 실험을 구성하였다.

	순차 읽기	순차 쓰기	임의 읽기	임의 쓰기
Response Latency (ms)	0.132	0.334	0.136	0.593
IOPS	1999.78	1999.78	2000.25	2000.25
Total Running Time (s)	2500.27	2500.27	2499.68	2499.68
Total Energy (J)	674.46	826.85	681.93	918.66
Flash	80.54	133.27	86.16	183.73
CPU	393.72	493.38	395.55	534.71
RAM	200.02	200.02	199.97	199.97
BUS	0.179	0.179	0.249	0.249

표 3 DiskSim 내부 워크로드 실험에 의한 SSD의 성능 및 에너지 사용량

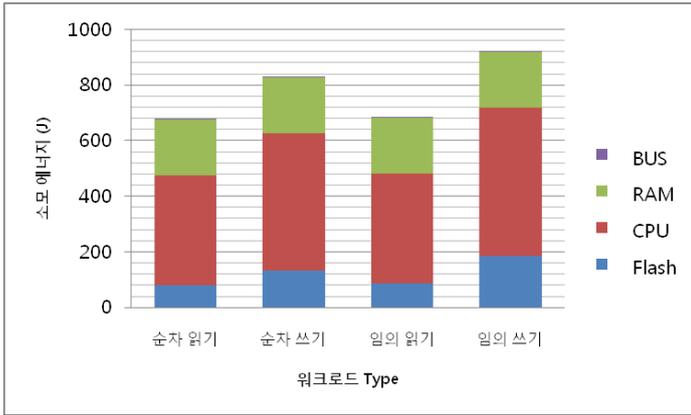


그림 3 DiskSim 내부 워크로드 실험에 의한 SSD의 에너지 사용 구성

표 3과 그림 3은 위의 실험에 의한 결과를 보여주고 있다.

다음은 외부 워크로드인 IOzone, Postmark 벤치마크의 trace 파일을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 워크로드 조건 이외에는 위의 실험과 동일한 환경을 적용하였다. 표 4와 그림 4는 실험 결과를 나타낸다.

	IOzone	Postmark
Response Latency (ms)	6.394	4.14
IOPS	106.18	124.91
Total Running Time (s)	941.71	498.39
Total Energy (J)	384.41	158.91
Flash	131.52	41.54
CPU	177.27	77.5
RAM	75.34	39.87
BUS	0.283	0.108

표 4 IOzone, Postmark 실험에 의한 SSD의 성능 및 에너지 사용량

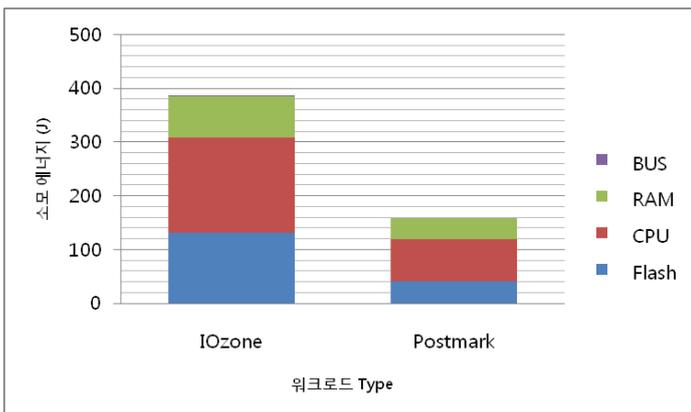


그림 4 IOzone, Postmark 실험에 의한 SSD의 에너지 사용 구성

다음은 SSD 내부에 사용되는 NAND 플래시의 성능을 다르게 함으로써 전체 SSD의 성능 및 에너지 사용량이 어떻게 달라지는 지 살펴보고자 하겠다. 실험에 사용된 NAND 플래시는 Page 크기가 각각 2K, 4K, 8K 로 서로 다른 속성을 가지고 있다. 상세한 NAND 플래시의 특성은 표 2를 참조하도록 한다.

	NAND #1	NAND #2	NAND #3
Response Latency (ms)	62.61	6.39	4.14
IOPS	106.18	106.18	106.18
Total Running Time (s)	941.71	941.71	941.71
Total Energy (J)	505.18	384.41	318.68
Flash	225.63	131.52	84.58
CPU	203.93	177.27	158.48
RAM	75.34	75.34	75.34
BUS	0.283	0.28	0.283

표 5 NAND 플래시의 Page 크기에 따른 IOzone 워크로드의 성능 및 에너지 사용량

	NAND #1	NAND #2	NAND #3
Response Latency (ms)	10.93	4.14	2.9
IOPS	124.91	124.91	124.91
Total Running Time (s)	498.39	498.39	498.39
Total Energy (J)	190.66	159.02	144.11
Flash	65.107	41.54	29.94
CPU	85.57	77.5	74.19
RAM	39.87	39.87	39.87
BUS	0.108	0.108	0.108

표 6 NAND 플래시의 Page 크기에 따른 Postmark 워크로드의 성능 및 에너지 사용량

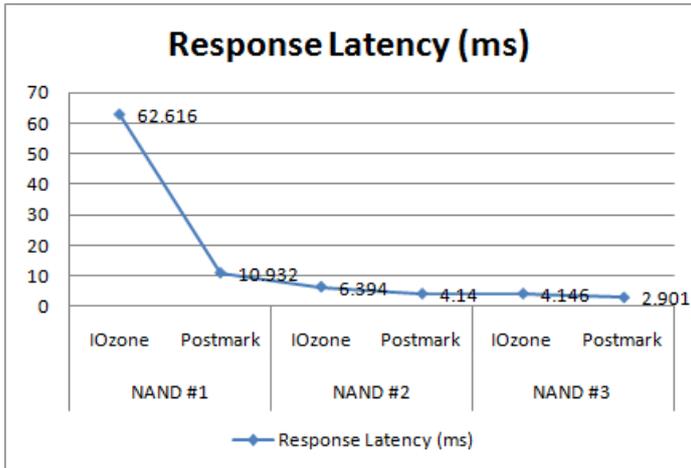


그림 5 NAND 플래시의 Page 크기에 따른 SSD의 Response Latency 추세

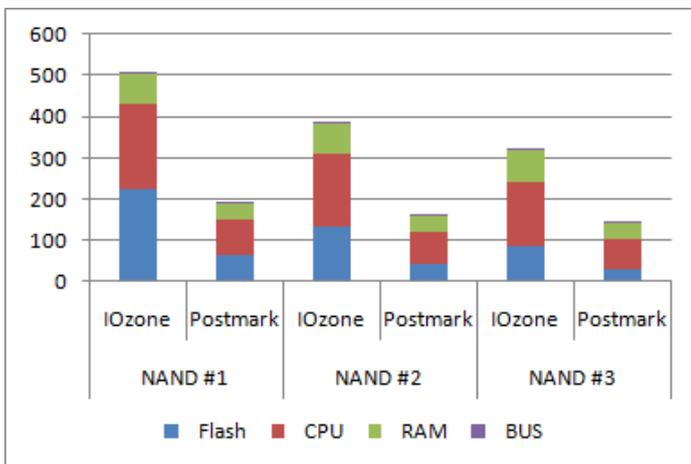


그림 6 NAND 플래시의 Page 크기에 따른 SSD의 에너지 사용 구성

표 5와 표 6은 위의 실험에 의한 결과이다. 그림 5는 플래시의 Page 크기에 따라 응답 속도가 달라지는 모습을 보여주고 있으며, 이에 따라 전력 사용량 역시 달라지는 모습을 그림 6에서 확인할 수 있다.

5. 결론

이번 논문을 통하여 DiskSim 시뮬레이터를 기반으로 SSD 장치의 에너지 소모량을 시뮬레이션 할 수 있는 틀을 개발하게 되었다. SSD 장치의 전체적인 관점에서 전력을 소모하는 모든 컴포넌트를 추출하여, 각 내부 컴포넌트 장치 별 에너지 소모량과 성능을 제공함으로써 저전력 SSD 장치의 개발에 도움을 주고자 한다. 앞으로는 다양한 FTL을 적용하여 각각의 성능 및 전력 사용량을 제공할 수 있도록 하고, 동일한 워크로드 및 하드웨어 사양을 적용하여 실제 SSD에서 측정된 전력 소모량과의 비교가 필요할 것이다.

References

- [1] J. S. Bucy, G. R. Ganger, and et al. The DiskSim Simulation Environment Version 4.0 Reference Manual. <http://www.pdl.cmu.edu/DiskSim>
- [2] Agrawal, N., Prabhakaran, V., Wobber, T., Davis, J. D., M. Manasse, and Panigraphy, R. 2008. Design Tradeoffs for SSD Performance. In *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference* (Boston, MA, June 2008). USENIX 2008.
- [3] Zedlewski, J., Sobti, S., Garg, N., Zheng, F., Krishnamurthy, A., and Wang, R. 2003. Modeling Hard-Disk Power Consumption. In *Proceedings of the 2nd USENIX Conference on File and Storage Technologies* (San Francisco, CA, March 31 - 31, 2003). Conference On File And Storage Technologies. USENIX Association, Berkeley, CA, 217-230.
- [4] Dirik, C. and Jacob, B. 2009. The performance of PC solid-state disks (SSDs) as a function of bandwidth, concurrency, device architecture, and system organization. In *Proceedings of the 36th Annual international Symposium on Computer Architecture* (Austin, TX, USA, June 20 - 24, 2009). ISCA '09. ACM, New York, NY, 279-289.
- [5] Samsung Corporation. ARM920T S3C2410A 200MHz User's manual.
- [6] Samsung Corporation. K9XXG08XXM Flash Memory Specification.
- [7] Kgil, T., Roberts, D., and Mudge, T. 2008. Improving NAND Flash Based Disk Caches. *SIGARCH Comput. Archit. News* 36, 3 (Jun. 2008), 327-338
- [8] IOzone.org. IOzone Filesystem Benchmark. <http://www.iozone.org>.
- [9] J. Katcher. PostMark: a New File System Benchmark. Technical Report TR3022, Network Appliance, October 1997.