



## 플래시 저장장치에서의 쓰기 증폭 모델에 대한 고찰

A Study on Write Amplification Model in Flash Storage Devices

---

저자 (Authors)	박창현, 원유집, 박영준 Changhyun Park, Youjip Won, Yongjun Park
출처 (Source)	<a href="#">전자공학회논문지 56(7)</a> , 2019.7, 24-30(7 pages) <a href="#">Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers 56(7)</a> , 2019.7, 24-30(7 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">대한전자공학회</a> The Institute of Electronics and Information Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08762502">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08762502</a>
APA Style	박창현, 원유집, 박영준 (2019). 플래시 저장장치에서의 쓰기 증폭 모델에 대한 고찰. 전자공학회논문지, 56(7), 24-30
이용정보 (Accessed)	KAIST 143.***.103.24 2021/04/28 10:35 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

논문 2019-56-7-4

# 플래시 저장장치에서의 쓰기 증폭 모델에 대한 고찰

## ( A Study on Write Amplification Model in Flash Storage Devices )

박 창 현\*, 원 유 집\*\*, 박 영 준\*\*\*

( Changhyun Park, Youjip Won<sup>©</sup>, and Yongjun Park )

### 요 약

SSD의 예상 수명을 알기 위하여 플래시 기반 저장장치의 쓰기 증폭을 예측하는 여러 분석 모델들이 제안되었다. 본 논문에서 우리는 4가지의 쓰기 증폭 예측 모델을 조사하여 분석하였다. 분석 결과 대부분의 모델들은 SSD 모든 영역을 균일하게 활용하는 워크로드를 가정하여 쓰기 증폭을 예측하였고, 그렇기 때문에 일반적인 작업 부하에서 쓰기 증폭을 예측하는 데는 적용할 수 없음을 알 수 있었다. 본 논문은 추가적으로 각 모델의 장단점을 비교하고, 실제 SSD에서의 쓰기 증폭 측정을 통해 정확도를 검증하였다. 모든 모델들이 균일한 워크로드에서의 예측은 매우 높은 정확도를 나타내었으나, 실제 워크로드에서의 쓰기 증폭은 1.2 미만으로 모델 예측값보다 매우 낮으므로 이를 정확하게 예측하기 위한 후속 연구가 필요하다.

### Abstract

Several analytical models have been proposed to estimate the write amplification of flash-based storage devices to obtain the expected lifetime of SSDs. In this study, we analyze four write amplification models. Most models assume uniform workload to predict write amplification, and therefore, they can not be directly applied to predict write amplification in real-world workloads. We also found the strengths and weaknesses of the models, and validate them using real SSD. All models are proven to be accurate in uniform workloads, but the write amplification in real-world workloads is much lower than the model-expected values in real SSD. Therefore, more studies are needed to accurately predict the write amplification.

**Keywords :** SSD, Write Amplification, WAF, Lifetime

### I. 서 론

SSD는 전력 소비가 적으면서 성능이 좋은 저장장치이지만, SSD를 구성하는 NAND 플래시 메모리의 고유 특성으로 인하여 쓰기 증폭이 발생한다. 쓰기 증폭은 SSD의 성능을 저하시키고 수명을 단축하기 때문에 이를 분석하여 SSD의 효율을 높이는 것이 중요하다.

플래시 저장장치는 요청받은 쓰기 연산보다 실제로 더 많은 쓰기 연산을 수행하는데 이것을 쓰기 증폭이라고 한다. 이는 플래시 저장장치가 덮어쓰기를 할 수 없으며

읽기와 쓰기 연산은 페이지 단위, 소거 연산은 페이지의 집합인 블록 단위로 수행하기 때문에 발생한다.

SSD의 블록은 소거 연산을 일정 횟수 이상 수행하면 신뢰도가 급격하게 감소하기 때문에 수명에 제한이 있다. 쓰기 증폭이 발생함으로써 인해 SSD는 제한된 수명이 더 빨리 줄어들고 SSD의 내부에서 처리해야할 쓰기 연산의 수가 증가하기 때문에 성능 저하도 나타난다. 이 때문에 정량화된 쓰기 증폭의 연구는 SSD의 성능과 수명을 예측하는데 매우 중요하다. 많은 연구자들이 이를 분석하고 예측하기 위한 연구를 진행하였으나 현재까지

\* 학생회원, 한양대학교(Hanyang University), \*\* 정회원, 한국과학기술원(KAIST), \*\*\* 정회원, 한양대학교(Hanyang University)  
© Corresponding Author(E-mail : ywon@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 2018년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (2018-0-00549, 매니코어 초대용량 메모리를 위한 확장형 순서보장 운영체제 개발)

※ 본 연구는 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 기초연구실지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1A4A1015498).

Received ; April 15, 2019

Revised ; May 29, 2019

Accepted ; June 17, 2019

발표된 연구 결과의 대부분은 특수한 상황을 가정하였고 일반적인 상황에서 쓰기 증폭 얼마나 발생하는지는 알려진 것이 없다. 그래서 본 논문에서는 쓰기 증폭을 예측한 분석 모델들을 살펴보고, 이 모델들의 문제점을 분석하였다. 또한 실제 SSD에서 발생하는 쓰기 증폭을 다양한 워크로드에서 측정하였다. 쓰기 증폭 예측 모델과 실제 SSD에서 발생하는 쓰기 증폭을 비교하였다.

## II. 배경

### 1. 쓰레기 수집과 쓰기 증폭

쓰기 증폭(Write Amplification)의 발생 원인은 플래시 메모리의 블록 소거 연산이다. 이 섹션에서는 블록 소거 연산을 발생시키는 쓰레기 수집(Garbage Collection: GC)<sup>[6, 8]</sup>에 대해 설명한다.

낸드 플래시는 블록으로 구성되어 있고, 각 블록은 모두 같은 수의 페이지를 가지고 있다. 읽기 연산과 쓰기 연산은 페이지 단위로 수행하고, 덮어쓰기(overwrite)를 할 수 없다. 따라서 덮어쓰기가 발생하면, 기존 페이지를 무효화하고 빈 페이지에 쓰기를 수행한다. 이렇게 발생하는 무효 페이지는 불필요한 공간을 차지하기 때문에, 사용할 공간이 부족하면 GC를 수행한다. GC는 무효 페이지를 가진 블록을 소거하여 빈 페이지로 만들어 공간을 확보하는 작업이다. 플래시에서 소거 연산은 블록 단위로 수행한다. 이 때 소거할 블록에 있는 유효 페이지들은 지우면 안 되므로 다른 블록으로 이동시킨다. 이 유효 페이지들로 인하여 추가로 쓰기 연산이 발생한다. GC 정책은 알고리즘이 비교적 간단한 greedy GC 정책<sup>[8]</sup>이 많이 사용된다. Greedy GC 정책은 무효 페이지가 가장 많은 블록을 희생자로 선정하여, 희생자 블록의 유효 페이지를 이동시키고 희생자 블록을 소거하는 정책이다. 유효 페이지가 가장 적은 블록을 희생자로 정하기 때문에, 다른 정책에 비해 추가 쓰기 연산의 발생이 적다.

쓰기 증폭은 쓰기 요청 1회에 대하여 SSD에서 발생한 실제 쓰기 연산의 수 또는 (블록 당 페이지 수) / (GC 수행 시 희생자 블록의 무효페이지 수의 평균) 으로 정의<sup>[7, 8, 11]</sup>한다. 두 정의는 동치이다.

### 2. 오버프로비저닝 인수

GC를 수행하면 희생자 블록의 유효 페이지를 이동해야 한다. 만약 SSD의 사용률이 빈 블록이 없을 정도로 높다면 GC를 수행할 때 유효 페이지를 옮길 수 없어서

GC를 수행할 수 없다. 이런 현상을 방지하기 위하여 SSD의 일부 영역을 사용자가 직접 쓸 수 없도록 숨겨놓는다. 이 숨겨진 영역을 오버프로비저닝 영역이라고 하고, 이 영역의 비율을 오버프로비저닝 인수(over-provisioning factor)<sup>[4-5]</sup>라고 한다. 오버프로비저닝 인수는 ((물리적 용량 - 사용자용량) / 사용자용량) 로 정의한다.

## III. 쓰기 증폭 모델

본 논문은 다음의 4가지 쓰기 증폭 예측 모델을 비교 분석하였다. Uniform Distribution<sup>[7]</sup>, Expected Value<sup>[12]</sup>, Markov<sup>[11]</sup>, Mean Field<sup>[13]</sup> 모델이다. 각 모델들은 GC를 수행할 때 희생자 블록에서 이동해야 하는 유효페이지 수를 추정하는 방법에 따라 명명하였다.

Uniform Distribution(UD) 모델<sup>[7]</sup>은 균등 분포를 사용하여 유효 페이지 수와 쓰기 증폭을 예측하였다. 이 모델은 Greedy GC 정책에서 쓰기 증폭을 예측하였다. Greedy GC 정책은 유효 페이지가 가장 적은 블록을 희생자 블록으로 선택한다. 따라서, SSD가 안정적인 상태가 되면 각 블록들은 일정 수 이상의 유효 페이지를 가진다. 하나의 페이지가 유효할 확률은 전체 물리적인 페이지의 수에 대한 전체 유효 페이지 수의 비율이다. 이를 이용하여 유효 페이지 수에 대한 블록들의 분포를 구할 수 있는데, 이 분포를 균등 분포로 근사하였다. 이 분포를 통해 유효페이지가 가장 적은 블록의 유효페이지 수를 구하고 쓰기 증폭을 예측하였다.

Expected Value(EV) 모델<sup>[12]</sup> 또한 Greedy GC 정책에서 쓰기 증폭을 예측하였다. 본 모델은 희생자 블록에서 무효페이지 수의 기댓값을 구하고, 이를 통해 쓰기 증폭을 예측한다. 각 GC 사이에 발생하는 쓰기 횟수를 이용해 하나의 페이지가 무효 될 확률을 구하고, 여기에 블록 당 페이지 수를 곱하여 블록의 무효 페이지 수의 기댓값을 계산할 수 있으므로, 이를 통해 쓰기 증폭을 예측하였다.

Markov(Mk) 모델<sup>[11]</sup>은 다른 모델들 보다 다양한 상황에서 쓰기 증폭을 예측하였다. 특히, LRU GC 정책과 비균일 워크로드 등에서의 쓰기 증폭도 예측하였다. 이 모델은 유효 페이지의 분포를 Markov chain을 이용하여 표현하고, 이를 이용하여 쓰기 증폭을 예측하였다. 본 모델에서는 각 블록의 유효 페이지 수를 state로 정의하였고, Greedy GC 정책으로 인하여 특정 수 이하의 state는 존재하지 않는다. 각 state가 i에서 i-1로 전이될 확률과 최소 state를 이용하여 쓰기 증폭을 예측한다.

Mean-field(MF) 모델<sup>[13]</sup>은 random GC와 d-Choices GC에서 쓰기 증폭 예측 모델을 개발하였다. random GC는 GC 수행시 희생자 블록을 임의로 선정하는 정책이고, d-Choices GC는 임의의 d개 블록을 선정하여 그 블록들 중에서 유효 페이지가 가장 적은 블록을 희생자 블록으로 선정하는 정책이다. 따라서 d가 1이면 random GC, d가 전체 블록 수와 같으면 greedy GC이다. 이 모델은 쓰기 연산을 1회 수행할 때, 특정 블록의 유효 페이지 수가 하나 줄어들 확률과 GC의 정책에 따라 희생자로 선정된 블록의 유효 페이지 수 등을 평균장 이론을 이용하여 구하였다. 이를 통해 d-choices GC 정책에서 쓰기 증폭을 예측하였다.

#### IV. 쓰기 증폭 모델의 문제점

표 1. 모델별 고려 사항  
Table1. Considerations.

		UD	EV	Mk	MF
GC Policy	Greedy	O	O	O	O
	Others	X	X	O	O
Workload	Uniform	O	O	O	O
	Non-Uniform	X	X	O	O
Wear Leveling		X	X	X	X

표 1은 각 모델의 고려 사항을 나타낸 표이다. Uniform Distributed 모델과 Expected value 모델은 greedy GC 정책에서의 쓰기 증폭을 예측하였고, Markov 모델은 greedy, windowed greedy와 LRU GC정책에서 쓰기 증폭을 예측하였다. Mean field 모델은 greedy, random GC정책 등을 포함한 d-choices 정책과 random++ GC정책 등에서 예측하였다. 대부분 greedy GC 정책 또는 greedy GC 정책에서 파생된 비교적 간단한 알고리즘이다. 블록의 나이 등을 고려한 복잡한 정책에 대한 연구도 필요할 것이다.

모든 모델이 분석 및 예측을 단순화하여 모델링을 쉽게 하기 위해 균일 워크로드에서의 쓰기 증폭을 예측하였다. 이는 실제 사용 환경에서는 발생하지 않는 워크로드이며, 해당 워크로드는 최악의 쓰기 증폭을 보여준다. 그러나 일반적인 상황에서 발생하는 쓰기 증폭과의 차이를 가늠할 수도 없고, 실제로는 발생하지 않는 워크로드이기 때문에 큰 의미를 두기는 힘들다. Markov와 Mean Field 모델은 비균일 워크로드에서의 예측 모델도 연구하였다. 워크로드를 접근 빈도에 따라 그룹을 나누

고, 그룹별 빈도에 따라 쓰기 증폭을 예측하였다. 비균일 워크로드도 균일 워크로드처럼 실제로는 발생하지 않는 가공된 워크로드이지만, 일반적인 워크로드에서의 쓰기 증폭을 예측하기 위한 방법이다.

모든 모델들이 SSD의 마모 균등화(wear-leveling)<sup>[6, 9~10]</sup>의 영향은 고려하지 않았다. 마모 균등화는 SSD의 블록들을 불균형하게 사용하여, 특정 블록의 수명만 다하는 것을 막도록 하는 작업이다. 균일 워크로드는 SSD의 모든 영역을 고르게 접근하기 때문에 마모 균등화 동작이 거의 발생하지 않는다. 그래서 마모 균등화로 인한 쓰기 증폭을 무시한 것으로 보인다. 그러나 일반적인 상황에서는 SSD를 불균형하게 사용하고, 이로 인해 각 블록의 마모도의 차이가 생기기 때문에, 마모 균등화 동작이 필요하다. 마모 균등화 동작도 유효페이지를 이동하므로 쓰기 증폭이 발생한다. 따라서 이에 대한 연구가 필요하지만, 이 모델들은 마모 균등화에 대한 언급이 없다.

#### V. 실험

우리는 앞서 소개한 쓰기 증폭 예측 모델들의 결과를 비교하고, 실제 SSD에서의 쓰기 증폭을 측정하여 모델을 검증하였다. 또한, 비균일 워크로드와 일반적인 워크로드에서 발생하는 쓰기 증폭을 실험적으로 구하였다.

##### 1. 실험 환경

표 2. 실험 환경  
Table2. Experiment environment.

	Compare Models	SSD Measurement
CPU	Intel core i7-3820	Intel core i5-2500k
Memory	24GB	12GB
OS	Windows7 64bit	Ubuntu 14.04 64bit
SSD	-	Samsung 843TN

표 3. SSD 사양  
Table3. SSD Specification.

SSD Parameters	Size
Physical capacity	240GB
Overprovisioning capacity	23.4GB
page size (read/write unit)	8KB
superblock size (erase unit)	256MB

표 2는 모델을 비교하고 검증하는데 사용한 실험환경이다. 우리는 각 모델의 쓰기 증폭 예측 값을 측정하고,

각 모델을 실행하는 시간 복잡도를 측정하였다. 각 예측 모델의 쓰기 증폭과 시간 복잡도 비교를 위해 표 2의 왼쪽과 MATLAB(7.11.0.584(R2010b))을 사용하였다. 표 2의 오른쪽과 표 3은 SSD에서의 쓰기 증폭을 측정하기 위하여 사용한 실험 환경과 사용한 SSD의 사양이다. SSD에 요청된 쓰기 연산의 양과 SSD 장치에 실제 프로그램된 데이터의 양을 측정하기 위하여 SSD의 펌웨어를 수정하였다.

## 2. 쓰기 증폭 모델의 비교

### 가. 쓰기 증폭 예측값 비교

그림 1은 오버프로비저닝 인수에 따른 각 모델의 쓰기 증폭 예측 값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서의 블록 당 페이지 수는 256개이다. 오버프로비저닝 인수가 쓰기 증폭에 많은 영향을 주고 오버프로비저닝 비율이 작을수록 더 큰 영향을 준다. 모델별로 쓰기 증폭 예측 값의 차이가 있으나 그래프로는 그 차이를 알기 어렵다. 그래서 이것을 표준화하여 비교하였다.

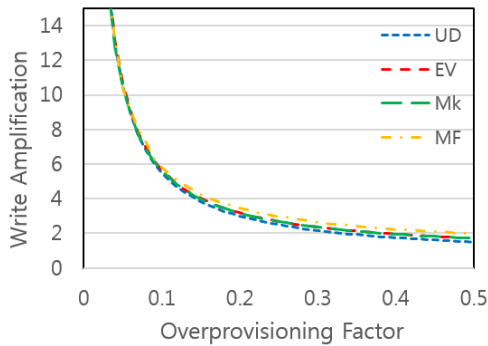


그림 1. 각 모델의 쓰기 증폭 예측

Fig. 1. Write amplification of each model.

표 4. EV 모델을 기준으로 표준화한 예측 차이  
Table4. Standardization based on EV model.

UD	EV	Mk	MF
93%	100%	99%	108%

표 4는 Expected Value 모델을 기준으로 각 모델이 예측한 쓰기 증폭의 차이를 표준화한 결과를 나타낸 표이다. Uniform Distribution 모델이 약 7%, Mean Field 모델이 약 8%의 차이가 난다. Markov 모델은 약 1% 차이로 매우 비슷한 결과를 보인다. 같은 상황을 가정하였기 때문에 모델간의 결과가 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

### 나. 모델 검증

모델이 실제 환경에 적용할 수 있는지 알아보기 위하여 우리는 실제 SSD에서 발생하는 쓰기 증폭을 측정하여 모델과 비교하였다. SSD는 EXT4 파일시스템으로 포맷하여 사용하였다. 8KB의 쓰기 워크로드를 생성하여 direct IO로 파일시스템의 페이지 캐시를 무시하고 SSD에 즉시 기록하도록 하였다. 또한 접근하는 모든 LBA 주소에 대하여 균일한 랜덤분포를 가진 워크로드를 사용하였다. 우리는 오버프로비저닝 인수를 실제 SSD<sup>[4-5]</sup>에서 사용하는 0.067과 0.28로 설정하였다. 실험에 사용한 SSD는 오버프로비저닝 인수가 약 0.1 이기 때문에 0.067인 경우는 측정을 하지 못하였고, SSD에 콜드 데이터를 채워서 오버프로비저닝 인수가 0.28인 것처럼 동작하도록 하였다. SSD에서 콜드 영역을 제외한 전체 영역에 대해 15배의 쓰기 연산을 수행하여 쓰기 증폭을 측정하였다.

그림 2는 SSD의 쓰기 증폭 측정값과 각 모델에서의 예측 값을 나타낸 그래프이다. 블록 당 페이지 수는 SSD의 소거 단위에 맞춰서 32768개로 설정하였다.

오버프로비저닝 인수가 0.28일 때, SSD의 쓰기 증폭은 2.466으로 측정되었다. Expected Value 와 Markov 모델은 2.481의 쓰기 증폭 예측 값을 나타냈다. SSD에서 측정된 쓰기 증폭에 비해 약 0.6% 낮은 값으로 예측 결과가 매우 정확하다. Uniform Distribution 모델은 약 8%, Mean Field 모델은 약 10%의 차이를 나타냈다. 상대적으로 Uniform Distribution, Mean Field 모델의 정확도가 낮지만 4개의 모델 모두 신뢰할 수 있는 정확도를 가지고 있다. 오버프로비저닝 인수가 0.067일 때의 쓰기 증폭 또한 모든 모델들의 예측값이 10% 이내의 오차를 나타냈다.

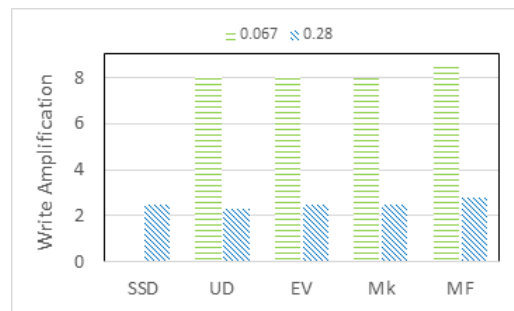


그림 2. SSD와 모델의 쓰기 증폭

Fig. 2. Write amplification of SSD and model.

### 3. 일반적인 워크로드에서의 쓰기 증폭

앞선 실험에서 우리는 실제 SSD에 대한 실험을 수행하여 모델의 정확도를 비교하였다. 그러나 각 모델에서 가정한 워크로드는 실제로는 사용되지 않는 워크로드이다.

그러므로 이 섹션에서는 각 모델이 가지는 한계점과 SSD의 사용률과 핫 파일의 크기가 쓰기 증폭에 미치는 영향을 이해하기 위한 몇 가지 실험을 하였다.

우리는 SSD를 EXT4 파일시스템으로 포맷하고 콜드 파일과 핫 파일을 만들어서 쓰기 증폭을 측정하였다

SSD의 사용률을 파일시스템 파티션에 대해 60%, 70%, 80%로 변경하고, 핫 파일의 크기는 10%, 20%, 30% 변경하였다. 핫 파일에 임의, 순차, 임의+순차 워크로드를 사용하여 각각의 쓰기 증폭을 측정하였다. 임의+순차 워크로드에서 임의와 순차의 비율은 1:1이다.

그림 3은 이 실험으로 측정한 쓰기 증폭 그래프이다. 쓰기 증폭의 값은 대부분 1.2 미만으로 앞서 모델이 예측한 값들 보다 매우 낮다. 특히 핫 파일의 크기가 작은 경우에는 쓰기 증폭이 거의 1에 가까운 것을 확인할 수 있다. 핫 파일의 크기보다 빈 공간이 더 크면 쓰기 증폭이 거의 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. SSD의 사용률이 높은 경우에도 쓰기 증폭은 낮았다.

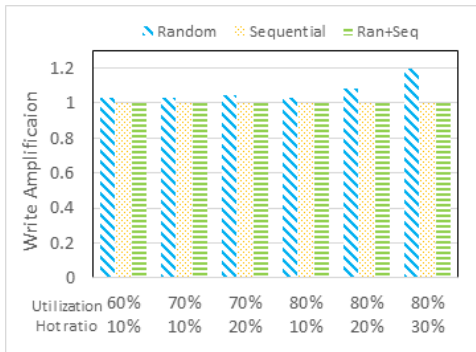


그림 3. SSD 사용률에 대한 쓰기 증폭  
Fig. 3. Write amplification for SSD utilization.

우리는 가공하여 만든 워크로드보다 좀 더 유의미한 결과를 측정하기 위하여, 실제 워크로드를 이용하여 쓰기 증폭을 측정하였다. 이를 위해 서버 벤치마크인 Filebench<sup>[1]</sup>의 Fileserver와 Varmail, 데이터베이스 벤치마크인 Sysbench<sup>[2]</sup>의 OLTP, YCSB<sup>[3]</sup>의 Cassandra 등을 사용하였다. 콜드 데이터를 각각 50%, 60%, 70% 채우고, 각 벤치마크를 표 5의 매개변수로 수행하였다.

그림 4는 이 실험으로 측정한 쓰기 증폭 그래프이다. SSD 사용률이 증가할수록 빈 공간이 줄어들기 때문에 쓰기 증폭이 증가한다. 그러나 쓰기 증폭은 1.1 미만으로 매우 작다.

4. 마모 균등화로 인한 쓰기 증폭  
4장에서 마모 균등화에 의한 쓰기 증폭 연구에 필요

표 5. 벤치마크 매개변수  
Table5. Benchmark parameters.

	file size	files	threads
Fileserver	256KB	80K	50
Varmail	16KB	720K	16
	records	requests	threads
OLTP	45M	1M	8
Cassandra	6M	60M	10

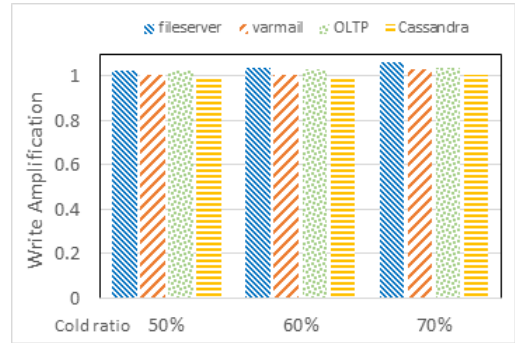


그림 4. 벤치마크에서 쓰기 증폭  
Fig. 4. Write amplification on benchmark.

성을 언급하였다. 이에 우리는 마모 균등화가 쓰기 증폭을 얼마나 발생시키는지 시뮬레이션을 통하여 측정하였다. 실제 SSD는 마모 균등화에 대한 매개 변수를 조절할 수 없기 때문에, FTL을 모사하는 시뮬레이터를 만들어 사용하였다.

측정에 사용한 워크로드는 핫데이터의 영역이 20%, 빈도율이 80%인 가공 워크로드이다. SSD의 사용률을 40%부터 80%까지 증가시키면서 GC로 인해 발생하는 쓰기 증폭과 마모 균등화로 인해 발생하는 쓰기 증폭을 측정하였다. 마모 균등화는 마모도가 가장 높은 블록과 가장 낮은 블록이 일정 수치 이상 차이가 나면 해당 블록의 데이터를 교환하는 알고리즘<sup>[10]</sup>을 사용하였다.

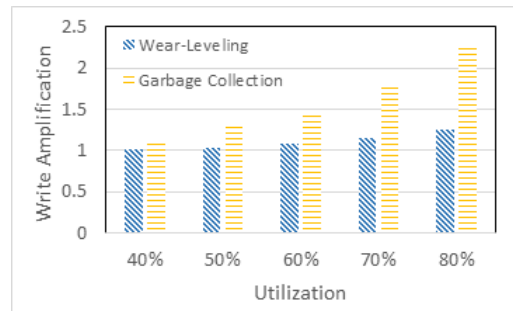


그림 5. 쓰레기 수집과 마모 균등화에 의한 쓰기 증폭  
Fig. 5. Write amplification by GC and wear-leveling.

그림 5는 쓰기 증폭 측정 결과이다. SSD의 사용률에 따라 GC로 인한 쓰기 증폭이 1.13에서 2.28까지 측정되

었다. 또한, 마모 균등화에 의한 쓰기 증폭은 1.02에서 1.24로 측정되었다. GC에 의한 쓰기 증폭에 비하면 적지만, 무시할 수 없을 정도의 쓰기 증폭이 발생한다. 마모 균등화에 의한 쓰기 증폭 연구의 필요성을 실험적으로 확인하였다.

## VI. 결 론

우리는 쓰기 증폭의 몇가지 예측 모델을 분석하여 장 단점을 설명하고 동일한 조건으로 재평가 하였다. 또한, 이전 연구에서 보여주지 못했던 실제 SSD의 쓰기 증폭을 측정하여 예측 모델과 비교하였다. Expected value 모델과 Markov 모델은 실제 SSD와 매우 유사한 결과를 보였다. Uniform distribution 모델과 Mean field 모델도 신뢰할 수 있을 정도이다. SSD의 쓰기 증폭은 SSD의 사용률과 핫 파일의 비율 등에 따라 달라진다는 것을 알아냈다. 특히, SSD의 빈 공간(오버프로비저닝 영역과 미사용 공간)의 크기가 충분하다면, 쓰기 증폭이 1.2를 넘지 않는다는 것을 확인하였다.

예측 모델들이 특정 상황에서는 높은 정확도를 보이지만, 실제 상황에 적용하기에는 아직은 부적합하다. 몇몇 연구에서 제시한 것과 같이 실제 워크로드에서 활용할 수 있는 모델을 연구해야한다. 또한 SSD의 특성도 고려해야한다. 쓰기 증폭의 정확한 예측을 위해서는 쓰기 연산에서의 병렬화, 마모 평준화 등 SSD의 성능 및 수명에 영향을 주는 요소들에 대한 연구가 필요하다.

## REFERENCES

- [1] "Filebench". <https://github.com/filebench/filebench/wik>.
- [2] "Sysbench". <https://github.com/akopytov/sysbench>.
- [3] "Ycsb". <https://github.com/brianfrankcooper/YCSB/wiki>.
- [4] "Understanding over-provisioning", Technical report, Kingston Technology, 2013.
- [5] "Over-provisioning: Maximize the lifetime and performance of your ssd with small effect to earn more", Technical report, Samsung Electronics Co., 2014.
- [6] N. Agrawal, V. Prabhakaran, T. Wobber, J. D. Davis, M. S. Manasse And R. Panigrahy. "Design tradeoffs for ssd performance.", In Proceedings of USENIX Annual Technical Conference, pp. 57-70. Boston, Massachusetts, USA. Jun 2008.
- [7] R. Agarwal and M. Marrow, "A closed-form expression for write amplification in nand flash", In Proceedings of Global Communications Conference, pp. 1846-1850. Miami, Florida, USA, Dec 2010.
- [8] W. BUX and I. Iliadis, "Performance of greedy garbage collection in flash-based solid-state drives". Performance Evaluation, Vol. 67, No. 11, pp. 1172-1186. 2010.
- [9] L. P. CHANG, "On efficient wear leveling for large-scale flash-memory storage systems." In Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, pp. 1126-1130. Seoul, Korea. Mar 2007.
- [10] L. P. CHANG, and T. W. Kuo "Efficient management for large-scale flash-memory storage systems with resource conservation." ACM Transactions on Storage Vol. 1. No. 4. pp. 381-418. 2005
- [11] P. Desnoyers, "Analytic modeling of ssd write performance", In Proceedings of the 5th Annual International Systems and Storage Conference, Haifa, Israel, Jun 2012.
- [12] X. Luojie and B. M. Kurkoski, "An improved analytic expression for write amplification in nand flash", In Proceedings of Computing, Networking and Communications, pp. 497-501. Maui, Hawaii, USA, Jan 2012.
- [13] B. Van Houdt, "A mean field model for a class of garbage collection algorithms in flash-based solid state drives", In Proceedings of ACM SIGMETRICS, pp. 191-202, Pittsburgh, PA, USA. Jun 2013.



저 자 소 개



**박 창 현**(학생회원)  
 2010년 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 학사 졸업.  
 2013년 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사 졸업.  
 현재 한양대학교 컴퓨터소프트웨어학과 박사과정 재학 중.

<주관심분야: 운영체제, 스토리지 시스템, 모바일 스토리지>



**원 유 집**(정회원)  
 1990년 서울대학교 계산통계학과 학사 졸업.  
 1992년 서울대학교 계산통계학과 석사 졸업.  
 1997년 University of Minnesota 전산학과 박사 졸업.

현재 한국과학기술원 교수  
 <주관심분야: 운영체제, 파일 시스템, 스토리지 시스템, 모바일 스토리지>



**박 영 준**(정회원)  
 2007년 포항공과대학교 전지전자공학과 학사 졸업.  
 2009년 University of Michigan 전자공학과 석사 졸업.  
 2013년 University of Michigan 전자공학과 박사 졸업.

현재 한양대학교 조교수  
 <주관심분야: 컴퓨터 구조, 운영체제, 컴파일러>