

SSD기반 RAID 시스템에서 빅데이터 유지 보수의 신뢰성을 향상시키기 위한 차등 수명 마감을 유도하는 안전한 IO 조절 기법

이현섭
백석대학교 첨단IT학부 조교수

A Safety IO Throttling Method Inducting Differential End of Life to Improving the Reliability of Big Data Maintenance in the SSD based RAID

Hyun-Seob Lee
Assistant Professor, Division of advanced IT, Baekseok University

요약 최근 데이터의 생산량은 폭발적인 증가를 이루어왔고, 빅데이터를 안전하고 빠르게 저장하기 위한 대용량 저장 시스템이 다양하게 발전하고 있다. 저장시스템의 대표적인 구성은 빠른 데이터 처리속도를 가지고 있는 SSD를 신뢰성 높은 데이터 유지 보수가 가능한 RAID 그룹으로 사용하는 것이다. 그러나 SSD를 구성하는 낸드 플래시 메모리는 특정 횟수 이상 쓰기를 반복할 경우 열화가 발생하는 특징이 있기 때문에 RAID 그룹의 여러 SSD에서 동시에 불량 발생 가능성을 증가시킬 수 있다. 그리고 이러한 동시성 불량은 데이터를 복구할 수 없는 심각한 신뢰성의 문제를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 RAID 그룹 내에서 각 SSD가 차등으로 수명 마감을 유도 되도록 IO를 조절하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 SMART를 활용하여 각 SSD의 상태와 사용된 데이터 패턴에 따라 할당되는 IO 횟수를 단계별로 조절한다. 그리고 이 방법은 SSD의 차등 수명마감을 유도하기 때문에 RAID에서 대량의 동시성 불량이 발생하는 것을 방지하는 장점이 있다.

주제어 : 낸드 플래시 메모리, 레이드, IO조절, 저장시스템, 빅데이터

Abstract Recently, data production has seen explosive growth, and the storage systems to store these big data safely and quickly is evolving in various ways. A typical configuration of storage systems is the use of SSDs with fast data processing speed as a RAID group that can maintain reliable data. However, since NAND flash memory, which composes SSD, has the feature that deterioration if writes more than a certain number of times are repeated, can increase the likelihood of simultaneous failure on multiple SSDs in a RAID group. And this can result in serious reliability problems that data cannot be recovered. Thus, in order to solve this problem, we propose a method of throttling IOs so that each SSD within a RAID group leads to a different life-end. The technique proposed in this paper utilizes SMART to control the state of each SSD and the number of IOs allocated according to the data pattern used step by step. In addition, this method has the advantage of preventing large amounts of concurrency defects in RAID because it induces differential lifetime finishes of SSDs.

Key Words : NAND flash memory, RAID, IO Throttling, Storage System, Big Data.

*This paper was supported by 2022 Baekseok University Research Fund

*This article was expended and excerpted from the conference paper presented at KSIC Spring Conference 2020 of Korean Society of Industry Convergence

*Corresponding Author : Hyun-Seob Lee (hyunseob@bu.ac.kr)

Received March 15, 2022

Revised April 14, 2022

Accepted May 20, 2022

Published May 28, 2022

1. 서론

최근 클라우드 시스템에서 개인 SNS 활동까지 4차 산업 시대의 데이터 생산량은 폭발적으로 증가하고 있다. 이러한 다양하고 거대한 데이터의 증가는 오늘날 빅데이터라는 거대한 데이터 트렌드를 만들었고, 빅데이터를 안전하고 빠르게 저장하기 위한 대용량 저장 시스템이 다양하게 발전하고 있다.[1, 2] 대용량의 데이터를 빠르게 처리하기 위한 저장 시스템의 대표적인 구성은 빠른 데이터 처리 속도를 가지고 있는 SSD(solid state disk)[3-6]를 신뢰성 높은 데이터 유지 보수가 가능한 RAID(redundant array of independent disks)[7-9] 그룹으로 사용하는 것이다. 그러나 SSD를 구성하는 낸드 플래시 메모리는 특정 횟수 이상 쓰기를 반복할 경우 열화가 발생하는 특징 때문에 RAID 그룹의 여러 SSD에서 동시에 불량 발생 가능성이 증가시킬 수 있다. 그리고 이러한 동시성 불량은 다수의 SSD로 구성된 엔터프라이즈 환경에서 데이터를 복구할 수 없는 심각한 신뢰성의 문제를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 RAID 그룹 내에서 각 SSD가 차등으로 수명 마감이 유도되도록 IO를 조절하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 각 SSD의 상태와 사용된 데이터 패턴에 따라 RAID의 각 저장장치에 할당되는 IO 횟수를 단계별로 조절하는 차등 IO 조절 방법을 사용하였다. 이 방법은 주기적으로 RAID 그룹 내에서 상태와 특성이 좋지 않은 SSD의 수명 소비를 가속하여 그룹 내의 다른 SSD보다 더 빠른 수명 마감을 유도한다. 결과적으로 차등 수명 마감 유도된 SSD는 다른 SSD와 교체되고 RAID는 이렇게 교체된 SSD의 데이터를 빠른 속도로 복구할 수 있도록 지원하여 결과적으로 대용량 빅데이터를 장시간 유지하기 위한 신뢰성을 향상시키는 장점이 있다. 향후 RAID의 성능 향상을 위한 연구를 진행할 계획이다.

2. 배경

2.1 낸드 플래시 메모리의 특징

SSD를 구성하는 미디어인 낸드 플래시 메모리는 저전력, 비휘발성, 빠른 처리 속도의 장점 때문에 다양한 저장 장치의 미디어로 활용되고 있다. 그러나 낸드 플래시 메모리는 제자리 갱신(in-place update)이 불가능하기 때문에 쓰기 전 지우기(erase before write) 연산을 수

행해야 하고, 읽기 쓰기 연산은 페이지 단위로 처리되는 반면 지우기 연산은 블록 단위로 처리되는 특징이 있다.[10, 11]. 이러한 플래시 메모리의 독특한 특성을 감추기 위해 일반적으로 FTL[12-14]이 사용된다. FTL은 논리적인 주소를 물리적인 주소로 맵핑하여 플래시 메모리의 물리적인 특징을 감추는 특징이 있다.

2.2 SSD로 구성된 RAID의 특징

RAID의 대표적인 방법 중 한 가지는 RAID5[3]이다. 이 방법은 여러 개의 저장 장치를 하나의 데이터 그룹으로 묶어두고 데이터를 분산하여 저장하는 방법이다. 이때 각 그룹마다 고장 회복을 위한 패리티가 생성이 되는데, 이 패리티의 위치는 데이터 그룹이 변경될 때마다 다른 저장 장치의 위치로 이동시킨다.

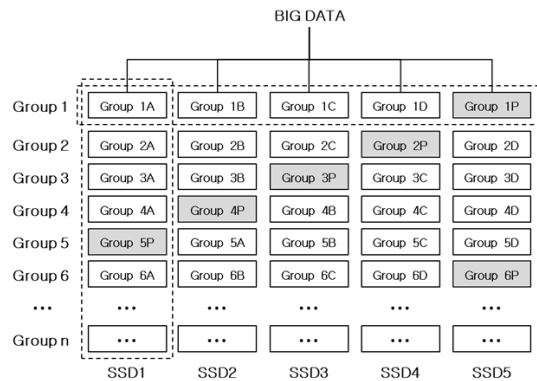


Fig. 1. RAID5

Fig.1은 RAID5의 구조를 보여주고 있다. 그림의 예제에서는 5대의 SSD를 묶어서 RAID로 구성하였고, 총 n개의 데이터 그룹을 만들었다. 그룹 1에서는 5번째 SSD에 패리티가 위치하였다. 그룹 2에서는 4번째 SSD에 패리티가 위치하였다. 그림과 같이 RAID5는 패리티 데이터가 분산 저장되기 때문에 패리티로 인해 하나의 SSD에 쓰기 동작이 집중되는 현상을 방지할 수 있다.

그러나 SSD의 미디어인 낸드 플래시 메모리는 특정 횟수 이상으로 데이터의 읽기 쓰기를 반복하면 미디어의 특성이 저하되어 더 이상 사용할 수 없는 특징이 있기 때문에 데이터 처리량이나 쓰기 동작의 횟수를 기반으로 수명 예측이 가능한 특징이 있다. 또한, RAID를 활용하더라도 여러 대의 저장 장치에서 동시에 고장이 발생하면 불량을 복구할 수 없는 한계가 있다. 따라서 일정 횟수의 데이터 처리량에 도달하면 수명 마감으로 인해 고

장 확률이 올라가는 SSD의 특성으로 인해 RAID 그룹 내에서 동일한 데이터량을 처리하면 동시에 여러 대의 SSD에 수명 마감이 발생하여 고장 회복을 할 수 없는 문제가 발생할 수 있다. 이렇게 SSD를 RAID로 구성했을 때 발생할 수 있는 동시 수명 마감 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 RAID 그룹 내에서 각 SSD들이 차등으로 수명 마감이 유도되도록 데이터 처리량을 조절하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 각 SSD의 상태와 사용된 데이터 패턴에 따라 할당되는 쓰기 동작의 횟수를 단계별로 조절한다. 따라서 장시간 사용하여도 RAID 그룹 내에 SSD에서 차등 수명 마감이 발생하기 때문에 불량 발생하더라도 RAID로 회복 가능하며 대용량의 저장 공간을 필요로 하는 빅데이터를 장시간 유지 보수하는데 신뢰성을 향상시키는 장점 있다.

3. 차등 수명 마감을 유도하는 안전한 쓰기 동작 조절 기법

3.1 Smart를 이용한 수명 기반 정렬 정책

본 논문의 핵심 아이디어는 Smart(Self Monitoring Analysis Report Technology)[15] 정보를 기반으로 각 SSD 쓰기 동작 횟수를 조절하여 차등 수명 마감을 유도하는 것이다. Smart는 디바이스에서 내부적으로 사용된 데이터의 처리량과 남아있는 수명을 호스트에게 전송해 주거나 각 주요 카운트가 임계치에 이르렀을 때 호스트에게 알람을 전달하는 기술이다. 제안하는 아이디어는 먼저 Smart를 이용하여 쓰기 횟수와 같은 디바이스 내부의 수명 정보를 파악하고 이를 기반으로 차등 쓰기 동작을 조절할 순서를 정한다.

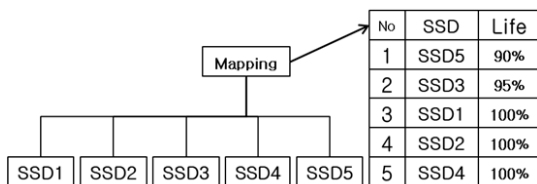


Fig. 2. Ordering SSD based on Life

Fig.2는 Smart를 이용하여 남아있는 수명을 기반으로 쓰기 동작 조절을 하기 위한 SSD의 순서를 정하는 정책을 보여주고 있다. 그림에서 SSD는 물리적으로 1에서 5까지 순서대로 RAID에 연결되어 있지만, Smart를 이

용해 남아있는 수명을 확인했을 때 SSD5의 수명은 90%이고, SSD3의 수명은 95%, 그리고 나머지 SSD들의 수명은 100%였다. 본 논문에서는 남은 수명이 적은 순서대로 정렬을 하고 만약 수명이 동일할 경우 물리적인 순서를 그대로 유지하는 정렬방법을 사용하였다. 따라서 그림의 예제는 논리적인 번호를 SSD5, SSD3, SSD1, SSD2, SSD4의 순서로 부여하여 정렬하는 것을 보여주고 있다.

3.2 차등 수명 마감을 유도하는 쓰기 동작 조절 정책

본 논문에서 제안하는 차등 쓰기 동작 조절 방법은 일정 주기마다 RAID 그룹 중 하나의 SSD에 데이터 쓰기 금지(No Data Write)를 하여 차등 쓰기 동작 조절을 수행하며 이 방법을 통해 특정 SSD에 데이터 처리량을 줄일 수 있다. 그러나 이 방법은 성능에 영향을 줄 수 있기 때문에 RAID의 성능 오차 허용범위 내에서 이루어진다.

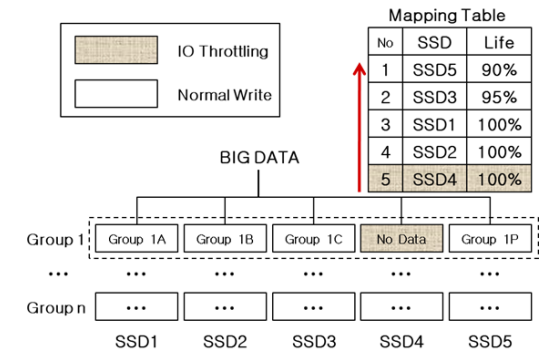


Fig. 3. Write Throttling Policy

Fig.3는 차등 쓰기 동작 조절 정책을 보여주고 있다. 그림과 같이 각 SSD는 남아있는 수명과 연결된 순서대로 따라 SSD5, SSD3, SSD1, SSD2, SSD4 순서대로 정렬되어 논리적인 맵핑을 구성되어 있다. 그리고 데이터 쓰기 요청이 들어왔을 때 맵핑된 역순으로 데이터 쓰기 금지 처리를 수행한다. 그림의 예제에서는 그룹 1에서 SSD4에 대한 쓰기 금지 처리를 수행했다. 그다음 주기에서는 SSD2가 쓰기 금지의 대상이다.

쓰기 금지 처리를 위한 주기는 성능의 오차 허용범위 내에서 이루어진다. 예를 들어 각 SSD의 1회 쓰기 동작 처리를 1MB/s로 가정하고 성능의 오차 허용범위가 1%라고 가정하면 5개의 SSD로 구성된 RAID에서는 한 그룹에 대한 데이터를 처리할 때 5MB/s의 성능을 보인다. 그리고 20번의 RAID 그룹에 쓰기 요청(100MB/s)을 할

때마다 1대의 SSD에 대해 쓰기 금지 처리를 할 수 있다. 따라서, RAID를 구성하는 SSD의 수를 g 로 그리고 성능의 오차 허용 범위를 p 라고 가정하면, 쓰기 동작 조절을 처리하는 주기는 RAID에 쓰기 동작을 요청하는 기준으로 $T = \frac{100}{g \times p}$ 로 표현할 수 있다. 이 수식의 다른 응용은 $\frac{100}{g}$ 주기마다 p 대의 SSD에 대해 쓰기 금지를 수행하는 것과 동일하다.

Request 10	A	B	C	D	No Data
Request 11	A	B	C	D	E
...
Request 20	A	B	C	No Data	E
...
Request 30	A	B	No Data	D	E
...
Request 40	A	No Data	C	D	E
...
Request 50	A	B	C	D	No Data
...
Request 60	A	B	C	No Data	E
...
Request 70	A	B	No Data	D	E
...
Request 80	A	B	C	D	No Data
...
Request 90	A	B	C	No Data	E
...
Request 100	A	B	C	D	No Data
...
	SSD1	SSD2	SSD3	SSD4	SSD5

Fig. 4. Period of No Data Write

Fig.4는 5대의 SSD로 구성된 RAID에서 본 논문에서 제안하는 차등 쓰기 동작 조절 정책을 적용했을 때 쓰기 요청에 대해 일정 주기마다 데이터 쓰기 금지 처리를 하는 것을 보여주고 있다. 그림의 예제에서는 성능의 오차 허용을 2%로 가정하였고, 주기 T 는 10이고, 이것은 RAID에 10회의 쓰기 요청을 하거나 RAID에 50MB의 쓰기 요청을 할 때마다 1대의 SSD에 대해 쓰기 금지를 수행할 수 있는 주기를 의미한다. 그리고, 그림의 예제에서는 RAID 구성을 할 때 모든 SSD의 수명이 동일하고 이에 따라 논리적인 맵핑은 SSD1, SSD2, SSD3, SSD4, SSD5 순으로 물리적 연결의 순서와 동일하다고 가정하였다. 쓰기 금지 수행 주기는 각각 $g - 1$ 개의 주기에서 시작해서 1씩 감소하여 1번의 주기가 될 때까지 주기 그룹이 있으며 각 주기 그룹별로 쓰기 금지를 수행하는 대상은 정렬된 논리적 맵핑의 역순으로 g 번째 SSD에서 주기 그룹이 끝날 때까지 순서대로 쓰기 금지가 수행된다. 그림의 예에서는 g 가 5이기 때문에 총 4개의 주기 그룹

이 있고 각 주기 그룹별로 4, 3, 2, 1번의 쓰기 금지가 수행된다. 첫 번째 주기 그룹에서는 각 주기마다 SSD5, SSD4, SSD3, SSD2 순서로 쓰기 금지가 수행되었고, 두 번째 주기 그룹에서는 SSD5, SSD4, SSD3 순서로 쓰기 금지가 수행된다. 이러한 쓰기 금지 수행은 마지막 주기 그룹의 SSD5에 대한 쓰기 그룹이 끝날 때까지 반복된다. 그림의 예제에서 살펴본 바와 같이 RAID 그룹에 대해 100번의 쓰기 요청이 수행되었을 때 SSD1에서 SSD5까지 각각 100, 99, 98, 97, 96회의 쓰기 요청이 처리되었다. 즉 성능 오차 허용 범위 내에서 차등으로 SSD의 쓰기 동작을 조절하였고, 데이터 처리량 및 쓰기 동작 횟수를 기반으로 수명이 소비되는 SSD의 특성상 차등으로 수명 마감을 유도할 수 있는 장점이 있다.

4. 실험 및 평가

본 논문에서 제안하는 차등 쓰기 조절 정책은 RAID를 구성하는 SSD에 차등으로 쓰기 동작을 분배하여 일정 횟수 이상 쓰기 동작을 반복하면 고장 발생 가능성이 증가하는 물리적 특성이 있는 SSD가 차등으로 수명이 마감하도록 유도하는 방법이다. 그러나 SSD는 데이터를 저장하는 미디어인 낸드 플래시 메모리가 제자리 갱신이 불가능하고 데이터를 쓰고 지우는 단위가 다른 특징 때문에 단순히 외부에서 쓰기 연산 횟수를 측정하는 것으로 SSD 내부적인 낸드 플래시 메모리의 쓰기 연산과 지우기 연산의 횟수를 구분할 수 없다. 따라서 본 절에서는 차등 쓰기 동작 조절 방법을 적용하였을 때 외부 쓰기에 의해 확산되는 쓰기 증폭 계수(write amplification factor)를 고려하여 SSD의 수명이 어떻게 변경되는지를 시뮬레이션을 통해 확인한다.

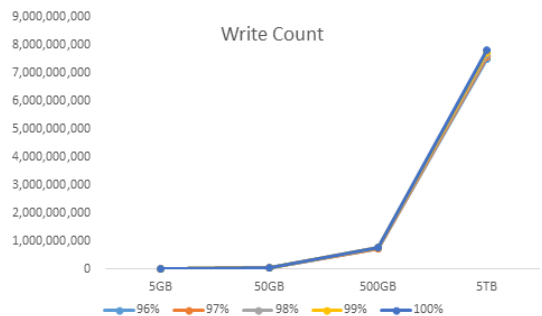


Fig. 5. Internal Write Count

시뮬레이션의 설정에서 RAID는 섹터맵핑 FTL을 적용한 5대의 SSD로 구성하였고, 한 그룹당 하나의 패리티 데이터를 유지하는 RAID5를 적용하였다. 또한 각 SSD는 100MB로 782개의 블록으로 설정하였다. 각 블록은 128개의 페이지를 가지고 있는 것으로 구성하였고, 각 페이지는 1024B의 크기로 설정하였다. 실험에서 사용한 데이터는 패리티를 포함하여 약 5G에서 50TB까지 임의로 발생시켜서 쓰기 연산을 수행하며 차등 수명 마감이 유도되는 것을 평가하였다.

Fig.5는 RAID 그룹에 패리티 데이터가 포함된 5GB에서 5TB의 데이터를 쓰기 처리했을 때 내부적으로 발생한 쓰기 연산의 횟수이다. RAID 그룹의 특성상 SSD 1대당 1GB에서 1TB의 쓰기 연산을 나누어서 수행했고, 각 SSD는 차등 쓰기 조절 정책을 적용하여 전체 데이터에 대한 96%에서 100%의 차등 쓰기 연산을 수행하였으며 100% 경우 쓰기 조절을 적용하지 않은 RAID의 SSD와 동일하다. 실험의 결과에서 낸드 플래시 메모리의 특성 때문에 1GB를 데이터 쓰기 연산을 처리할 때 내부적으로 6,864,471회(약 6.54GB)에서 7,177,512회(약 6.84GB)의 쓰기 연산이 수행되었고 5TB의 데이터 쓰기 연산을 처리할 때 7,496,944,408회(약 6.98TB)에서 7,809,510,687회(약 7.27TB)의 쓰기 데이터가 처리되었다. 실험의 결과에서 쓰기 증폭 계수를 고려한 내부적인 쓰기 요청의 횟수가 쓰기 조절을 4% 적용한 96%에서 약 4.36%에서 4% 수준 감소한 것을 확인하였으니 1GB의 데이터를 처리할 때 313MB의 연산을 줄였던 반면 1TB의 데이터를 처리할 때에는 약 312GB의 데이터 처리 연산을 줄였기 때문에 차등 조절 쓰기 조절 정책을 적용하면 많은 데이터를 처리할수록 실제로 조절되는 데이터의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

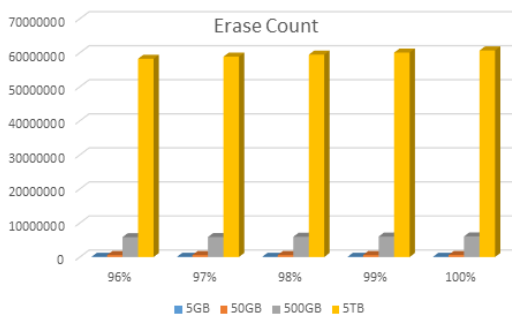


Fig. 6. Erase Count

Fig.6은 RAID 그룹에 패리티 데이터가 포함된 5GB에서 5TB의 데이터를 쓰기 처리했을 때 낸드 플래시 메모리의 특성 때문에 발생한 지우기 연산의 횟수이다. 각 SSD가 1GB에서 1TB의 데이터를 처리할 때 차등 쓰기 조절 정책을 적용하여 쓰기 연산을 96% 처리한 SSD는 지우기 연산이 52527회에서 58237864회 발생했고 100% 처리한 SSD는 54959회에서 60665978회 발생했다. 이것은 차등 쓰기 조절 정책을 적용한 비율과 유사하며 96%를 적용한 SSD에서 약 4.42%에서 4%의 지우기 카운트가 감소한 것을 확인하였다.

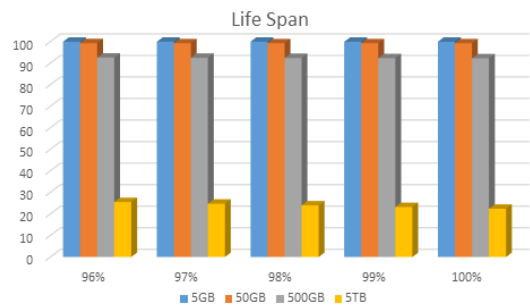


Fig. 7. Life Span

Fig.7은 각 SSD가 1GB에서 1TB의 데이터를 처리할 때 소모되고 남은 수명의 비율을 보여주고 있다. 실험에서 낸드 플래시 메모리의 각 블록은 최대 100,000만 회 쓰고 지우기가 가능하다고 가정하였다. 실험의 결과에서 5GB의 데이터를 처리할 때 각 블록의 블록당 평균 지우기 횟수의 수는 68회에서 71회였고 5TB의 데이터를 처리할 때 74,473회에서 77,578회였다. 이 결과를 그림에서 보여주는 것과 같이 남은 수명의 비율로 환산하면 5GB의 데이터를 처리했을 때에는 약 99.93%에서 99.92%로 큰 차이가 없었다. 그러나 5TB의 데이터를 처리하여 플래시 메모리의 남아있는 지우기 횟수를 소진했을 때에는 25.52%에서 22.42%였다. 따라서 차등 쓰기 조절 정책을 96% 적용한 SSD가 100% 사용을 한 SSD보다 남아있는 수명이 약 3.1%의 마진을 갖는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 대용량의 빅데이터를 관리하는 저장 시스템에서 다수의 SSD로 RAID를 구성하였을 때 SSD의

저장 미디어인 낸드 플래시 메모리의 특성으로 인해 동시 수명 마감이 발생하는 문제를 회피하기 위한 차등 쓰기 조절 정책을 제안하였다. 본 논문에는 RAID를 구성할 때 Smart를 이용하여 남아있는 수명을 기준으로 논리적인 맵핑을 구축하고, 이후 맵핑의 역순으로 쓰기 요청에 대한 주기별로 성능의 오차 허용 범위 내에서 하나의 SSD에 대해 차등으로 쓰기 금지 처리를 하는 방법을 제안하였다. 또한 실험을 통해 차등 쓰기 조절 정책이 SSD의 수명 마감을 차등적으로 발생시킬 수 있음을 보였다. 향후 실제 차등 수명 마감을 처리할 때 발생하는 성능 저하 문제를 해결하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] C. Fan, D. Yan, F. Xiao & et al. (2021). Advanced data analytics for enhancing building performances: From data-driven to big data-driven approaches. *Springer, 14*, 3-24.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0723-1>
- [2] M. naeem, T. Jamal, J. Martinez & et al. (2022). Trends and Future Perspective Challenges in Big Data, *Advances in Intelligent Data Analysis and Applications, 253*, 309-325.
- [3] H. J. Hadi, N. Musthaq & I. U. Khan. (2021). SSD Forensic: Evidence Generation and Forensic Research on Solid State Drives Using Trim Analysis. *2021 International Conference on Cyber Warfare and Security*, 51-56.
DOI: 10.1109/ICCWS53234.2021.9702989
- [4] K. Han & D. Shin. (2021). Remap-based Inter-Partition Copy for Arrayed Solid-State Drives. *IEEE Transactions on Computers*, 1-1.
DOI: 10.1109/TC.2021.3099694
- [5] P. Jin, X. Zhuang, Y. Luo & M. Lu. (2021). Exploring Index Structures for Zoned Namespaces SSDs. *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 5919-5922.
DOI: 10.1109/BigData52589.2021.9671606
- [6] H. Guo & et al. (2021). Lazy-WL: A Wear-aware Load Balanced Data Redistribution Method for Efficient SSD Array Scaling. *IEEE International Conference on Cluster Computing*, 157-168.
DOI: 10.1109/BigData52589.2021.9671606
- [7] S. Byun. (2019). Modeling and simulation of the redundant array of inexpensive/independent disks storage for internet of things monitoring servers. *International Journal of Electrical Engineering & Education*, 156-157.
- [8] NetApp. (2018). RAID-DP: NetApp implementation of double parity RAID for data protection.
- [9] J. Y. Lee, M. H. Kim, S. A. R. Shah, S. U. Ahn, H. Yoon & S. Y. Noh. (2021). Performance Evaluations of Distributed File Systems for Scientific Big Data in FUSE Environment. *Electronics, 10(12)*, 1471.
- [10] M. K. Kim, I. J. Kim & J. S. Lee. (2021). CMOS-compatible ferroelectric NAND flash memory for high-density, low-power, and high-speed three-dimensional memory. *Science Advances*, 7(3).
DOI: 10.1126/sciadv.abe1341
- [11] P. Kumari, U. Surendranathan, M. Wasiolek, K. Hattar, N. P. Bhat & B. Ray. (2021). Radiation-Induced Error Mitigation by Read-Retry Technique for MLC 3-D NAND Flash Memory. *IEEE Transactions on Nuclear Science, 68(5)*, 1032-1039.
DOI: 10.1126/sciadv.abe1341
- [12] S. S. Chae, R. Mativenga, J. Y. Paik, M. Attique & T. S. Chung. (2020). DSFTL: An efficient FTL for flash memory based storage systems. *Electronics 9(1)*, 145.
- [13] I. B. Zion. (2020). Key-value FTL over open channel SSD. *12th ACM International Conference on Systems and Storage*. 192-192.
- [14] H. S. Lee, H. S. Yun & D. H. Lee (2011). HFTL: hybrid flash translation layer based on hot data identification for flash memory. *IEEE Transactions on Consumer Electronics, 55(4)*, 2005-2011.
DOI: 10.1109/TCE.2009.5373762
- [15] M. S. Rothberg. (2005). Disk drive for receiving setup data in a self monitoring analysis and reporting technology (SMART) command. *United States Patent*, US6895500.

이 현 섭(Hyun-Seob Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한양대학교 컴퓨터공학과 (공학 석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 컴퓨터공학과 (공학 박사)
- 2012년 3월 ~ 2021년 2월 : 삼성전자 책임연구원
- 2021년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 첨단

IT학부 조교수

- 관심분야 : 인공지능, 저장 시스템, 임베디드 시스템
- E-Mail : hyunseob@bu.ac.kr