

낸드 플래시 메모리의 불량 발생빈도를 이용한 저장장치의 수명 예측 최적화 방법

이현섭*

백석대학교 컴퓨터공학부 교수

A method for optimizing lifetime prediction of a storage device using the frequency of occurrence of defects in NAND flash memory

Hyun-Seob Lee*

Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

요약 고신뢰성을 요구하는 컴퓨팅 시스템에서 저장장치의 수명예측방법은 데이터 보호뿐만 아니라 활용성을 극대화할 수 있기 때문에 시스템 관리하기 위한 중요한 요소 중 한 가지이다. 최근 여러 저장시스템에서 저장장치로 사용되고 있는 SSD(Solid State Drive)의 수명은 이를 구성하고 있는 낸드 플래시 메모리의 수명이 실질적인 수명과 연결된다. 따라서 SSD를 이용하여 구성된 저장시스템에서는 낸드 플래시 메모리의 수명을 정확하고 효율적으로 예측하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 낸드 플래시 메모리 불량 발생빈도를 이용하여 플래시 메모리 기반 저장장치의 수명 예측을 최적화할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위해 DWPD(Drive Writes Per Day) 단위로 데이터를 처리할 때 발생하는 불량 발생빈도를 수집하기 위한 비용 매트릭스(Cost Metrix)를 설계한다. 그리고 경사하강법(Gradient Descent)을 이용하여 수명의 마감이 발생하는 경사도까지 남은 비용을 예측하는 방법을 제안한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 임의의 불량이 발생했을 때 제안하는 방법을 통한 수명예측의 우수성을 증명했다.

주제어 : 낸드 플래시 메모리, 불량 발생 예측, 수명 예측 최적화, 저장시스템, 빅데이터 분석

Abstract In computing systems that require high reliability, the method of predicting the lifetime of a storage device is one of the important factors for system management because it can maximize usability as well as data protection. The life of a solid state drive (SSD) that has recently been used as a storage device in several storage systems is linked to the life of the NAND flash memory that constitutes it. Therefore, in a storage system configured using an SSD, a method of accurately and efficiently predicting the lifespan of a NAND flash memory is required. In this paper, a method for optimizing the lifetime prediction of a flash memory-based storage device using the frequency of NAND flash memory failure is proposed. For this, we design a cost matrix to collect the frequency of defects that occur when processing data in units of Drive Writes Per Day (DWPD). In addition, a method of predicting the remaining cost to the slope where the life-long finish occurs using the Gradient Descent method is proposed. Finally, we proved the excellence of the proposed idea when any defect occurs with simulation.

Key Words : Nand flash memory, Prediction of occurrence of defects, Optimizing lifetime prediction., Storage system, Big data analysis

*이 논문은 2021학년도 백석대학교 학술연구비 지원을 받아 작성되었음

*교신저자 : 이현섭(hyunseob@bu.ac.kr)

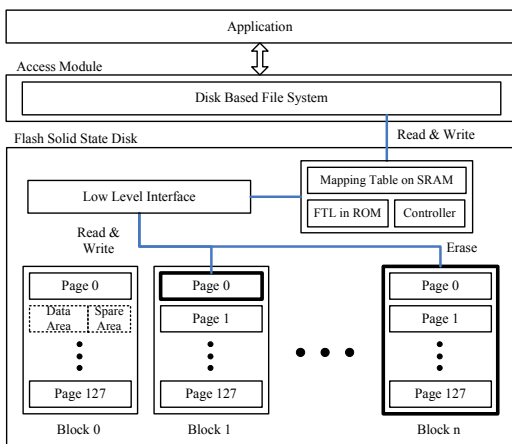
접수일 2021년 8월 26일 수정일 2021년 10월 12일 심사완료일 2021년 10월 16일

1. 서론

고신뢰성을 요구하는 컴퓨팅 시스템에서 저장장치의 수명 예측 방법은 데이터 보호 뿐만 아니라 활용성을 극대화 할 수 있기 때문에 시스템 관리하기 위한 중요한 요소 중 한 가지이다. 최근 여러 저장시스템에서 저장장치로 사용되고 있는 SSD는 이를 구성하고 있는 낸드 플래시 메모리의 수명이 실질적인 수명과 연결된다. 따라서 SSD를 이용하여 구성된 저장시스템에서는 낸드 플래시 메모리의 수명을 정확하고 효율적으로 예측하는 방법이 필요하다. 그러나 과거의 수명 예측방법은 단순히 고정적인 읽기/쓰기 횟수를 기반으로 예측하는 방법이기 때문에 SSD의 수명을 정확하게 예측 하는 것은 한계가 있다. 본 논문에서는 낸드 플래시 메모리 불량 발생빈도를 이용하여 플래시 메모리 기반 저장장치의 수명 예측을 최적화 할수 있는 방법을 제안한다. 이를 위해 DWPD 단위로 데이터를 처리할 때 발생하는 불량 발생빈도를 수집하기 위한 비용 매트릭스를 설계한다. 그리고 경사하강법을 이용하여 수명의 마감이 발생하는 경사도까지 남은 비용을 예측하는 방법을 제안한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안하는 아이디어의 우수성을 증명한다.

2. 플래시 메모리 기반 저장장치의 특징

2.1 플래시 메모리의 특징



[Fig. 1] Architecture of Solid State Disk

낸드 플래시메모리는 저 전력 소비와 빠른 데이터 읽고 쓰기 속도의 특징이 있다. 이러한 장점 때문에 소규모

임베디드 시스템에서 빅데이터를 관리하는 대용량 데이터 서버까지 여러 분야의 저장장치 미디어로 활용되고 있다. 그러나 플래시 메모리는 읽고 쓰는 데이터 단위가 다르고 이미 데이터가 기록된 공간에 데이터를 쓰기 위해서는 이전의 데이터를 지워야 하는 특징이 있다. 이러한 독특한 특징을 감추고 데이터를 처리하기 위해 FTL(Flash Translation Layer)이라는 소프트웨어 계층을 사용하고 있다.[1-8]

Fig. 1은 플래시 메모리의 특성을 감추기 위해 FTL을 적용한 SSD의 예제를 보여주고 있다.

플래시 메모리의 중요 특징 중 한 가지는 한 지역의 공간에 일정횟수 이상의 반복적인 쓰기/지우기 동작을 반복하면 블록의 수명이 다한다는 것이다. 이러한 제약 사항은 저장장치의 데이터 신뢰성뿐만 아니라 성능에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 다양한 분야에서 수명 예측을 기반으로 제약사항을 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다. [9-15]

2.2 플래시 메모리 수명 예측 방법의 한계

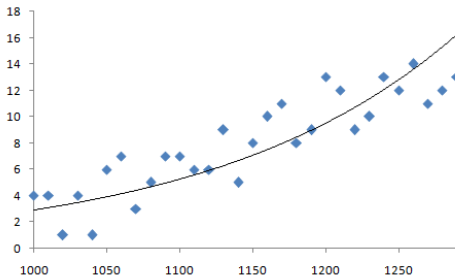
이전까지 플래시 메모리의 수명을 예측하는 대표적인 방법으로 쓰거나 지우기 횟수를 활용하는 기법이 있다.[13] 이 방법은 플래시 메모리에 권장하는 최대 쓰기 지우기 횟수를 제공하고 실행 된 동작의 횟수를 이용하여 저장시스템의 수명을 계산하는 방법이다. 예를 들어 플래시메모리의 권장 쓰기 지우기 횟수가 1만회 이고 현재 100회의 쓰고 지우기 연산을 수행했다면 이 저장시스템의 수명은 99%남은 것으로 계산 될 수 있다. 그러나 이러한 고정된 횟수는 제조회사에서 보증하는 최소 신뢰 기준이고 실제로는 제한된 횟수보다 훨씬 많은 횟수의 쓰고 지우기 연산을 수행 후에도 여전히 동작 가능한 플래시 메모리가 있거나, 훨씬 못 미치는 횟수로도 블록의 특성이 나빠져서 더 이상 사용할 수 없기도 하다. 심지어는 생산 과정에서 발생하는 초기 불량 블록도 존재하기 때문에 이러한 고정적인 횟수를 이용 한 수명예측 방법은 대용량의 저장장치에서는 수명예측을 정확하게 할 수 없는 단점이 있다.

고정된 수명 문제를 극복하기 위한 또 다른 방법은 예비 블록(Spare block)을 활용하는 방법이다.[14, 15] 예비 블록은 불량이 발생한 블록을 교체하기 위해 추가로 제공하는 블록으로 사용 중인 특정 블록에서 불량이 발생했을 때 정상 상태인 예비 블록 중 하나를 교체하여 전체 블록 중 불량이 발생한 블록을 감추는 방법이다. 예를 들어 1000개의 데이터 블록과 100개의 예비 블록으로

이루어진 저장장치는 논리적으로는 1000개의 블록으로 보이지만, 물리적으로 1100개의 블록으로 구성되어 있고, 100개의 예비 블록이 모두 교체될 때 까지 일반 블록에서 발생하는 불량에 대해 물리적으로 대처할 수 있다. 따라서 예비 블록을 이용하여 수명을 예측하는 방법은 남아있는 예비 블록의 개수를 확인하여 수명을 예측할 수 있는 특징이 있다. 예를 들어, 남아있는 예비 블록의 수가 90개라면 90%의 수명이 남아있다고 예측하는 기법이다. 그러나 이 방법은 발생한 불량에 대한 회복 가능한 비율이기 때문에 IO 패턴에 따라 변화하는 불량률이 변화할 경우 현재 상태에서 수명감까지 몇 번의 IO가 가능한지에 대한 예측이 불가능하다.

3. 효율적인 플래시메모리의 수명예측 방법

3.1 플래시 메모리의 불량 발생 경향 분석



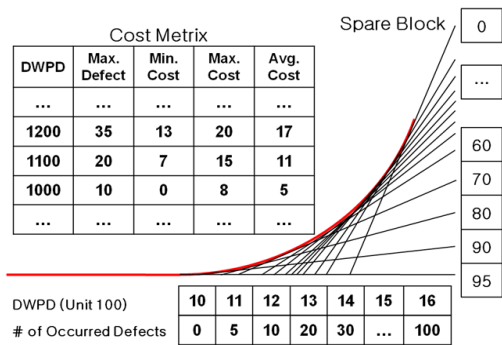
[Fig. 2] Tendency of Defects whith Throughput

Fig.2는 데이터 처리량 증가에 따른 불량 발생의 경향을 보여주고 있다. 그림에서 X축은 SSD가 데이터를 하루에 처리할 수 있는 양인 DWPDP(Drive Writes Per Day)를 의미하고, Y축은 DWPDP를 처리할 때 발생하는 불량 횟수를 의미한다. 일반적으로, 불량 발생 확률은 임의의 확률값이지만 이 확률은 사용량에 비례하여 증가하기 때문에, 일정 단위 기간이나 사용 횟수마다 발생하는 불량의 구간 합이나 평균값을 연결하면 그림과 같은 지수형태의 곡선에 수렴하는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 원인은 SSD에서 블록이 마모(Wear-out)되기 시작하면 비슷한 사용량을 가지고 있는 이웃하는 블록에서도 연쇄적으로 마모가 발생할 가능성이 증가하기 때문이다.

3.2 빅데이터를 이용한 수명 예측 기법

본 논문에서 제안하는 방법은 저장장치에서 특정 IO

횟수를 처리할 때 마다 사전에 학습된 비용 매트릭스의 정보를 기반으로 수명을 예측하는 방법이다. 제안하는 방법의 수명 예측 기법 정책은 다음과 같다. 먼저, 저장장치에 누적된 쓰기 요청의 횟수를 기반으로 처리된 데이터 량을 DWPDP 단위로 환산하여 계산한다. 그다음 계산된 DWPDP와 현재까지 발생한 불량 횟수를 비용 모델에 대입하여 비용을 계산한다. 그리고, 계산된 비용이 사전에 학습된 데이터를 포함하고 있는 비용 매트릭스와 비교하여 예상 범위 내의 비용인지 확인한다. 만약 학습된 예상 범위 내의 비용이면, 비용 매트릭스에 포함되어 있는 최대 불량과 저장장치에서 불량을 처리할 수 있는 예비 블록의 자원을 비교하여 수명을 예측한다. 그러나 만약 예상 범위 밖의 비용이면 보정 정책을 통해 남은 수명에 대한 가중치를 조절하여 비용을 재계산 후 수명을 예측한다.



[Fig. 3] Efficient Method Predicting End of Life

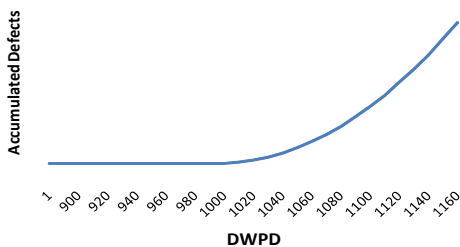
Fig.3은 본 논문에서 제안하는 수명예측 방법의 예를 보여주고 있다. 그림의 예에서 비용 모델에 의한 산출된 비용은 직전 DWPDP 처리 이후 발생한 불량과 초기 불량률의 합산과 동일하다고 가정하였다. 그리고 초기 불량률은 5로 가정하였다. 또한 예비 블록의 총 개수가 100개일 때 최대 1600DWPDP 까지 처리할 수 있다고 가정하고, 각 DWPDP 마다 최대불량, 최소비용, 최대비용, 평균비용의 정보를 유지하고 있는 비용 매트릭스를 이용해 900DWPDP 이후, 100DWPDP의 데이터가 처리될 때 마다 수명을 예측하는 방법의 예제를 보여주고 있다. 그림의 예제에서 1000DWPDP를 처리했을 때 이전 대비 증가된 불량률의 개수는 0이다. 따라서 비용 모델을 통해 계산된 불량률은 5이다. 그리고 이 비용값은 비용 매트릭스의 최대 최소비용 오차범위 내의 값이기 때문에 학습된 최대불량률은 10이고, 앞으로 처리할 수 있는 데이터량은

600DWPD이다. 즉 가까운 시일 안에 5개의 추가 불량 이 발생할 가능성이있기 때문에 현재까지 실제로 사용한 예비 블록의 자원은 5이지만 다음 수명예측 전까지 예비 블록의 소모량은 90프로 남은 것으로 가정한다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험을 위한 환경 설정

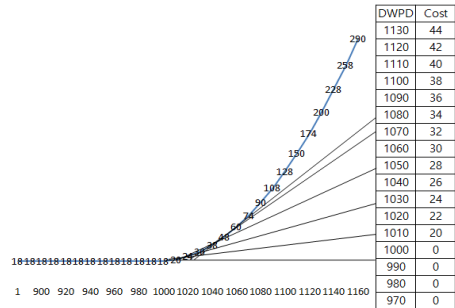
본 논문에서는 제안하는 방법의 불량예측 효과를 측정 하기 위해 시뮬레이션을 통해 수명예측 과정을 분석하였다. 실제 발생하는 불량률과 유사한 형태의 데이터로 실험을 하기 위해 불량 발생의 증가는 초기 불량이후 보증 기간까지는 불량 발생하지 않고, 보증기간 이후 지수 선과 같은 비율로 증가한다고 가정하였다. 또한, 실험을 위해 구체적인 구성으로 저장장치의 보증기간은 2 년이 고, 1000DWPD 까지 보증하는 가상의 저장장치를 가정 하였고, 데이터의 불량 발생률은 지수형태로 발생하기 때문에 1000DWPD 이후 10DWPD를 처리할 때마다 발생하는 불량률의 개수에 계차수열을 적용하였다. 적용한 계차수열에서 계차는 공차가 2인 등차수열로 가정했고, 이로 인해 각 단위에서 발생하는 불량률의 개수는 2, 4, 6, 등의 순서로 이전보다 2씩 증가한다. 불량 발생에 계차 수열을 적용한 이유는 랜덤하게 발생하는 불량률의 개수도 많은 양의 데이터를 처리하는 구간 동안 발생하는 불량 들의 구간 합이나 그 평균값은 지수형태의 증가 경향에 수렴하고, 계차수열을 통한 데이터 증가가 구간별 합산 을 이용한 지수 선을 가장 직관적으로 보여줄 수 있기 때 문이다. 그리고 수명예측 데이터의 업데이트 주기는 10DWPD마다 갱신하는 것으로 가정을 하였다. 또한, 발 생한 불량률을 교체할 수 있는 예비 블록은 200개로 가정 하였고, 초기 불량률은 18 블록(예비 블록의 10% 미만으로 임의의 값을 산정) 하였다.



[Fig. 4] Results of Simulation

4.2 실험의 결과

Fig.4는 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림의 결 과와 같이 1000DWPD 이후 불량률이 발생하는 추세를 연 결하면 우상향의 곡선 그래프가 생성된다. 이 곡선 그래 프에 10DWPD마다 경사 하강법을 적용하면 Fig.5와 같 은 결과를 얻을 수 있다.



[Fig. 5] Gradient Decent Method on Results

Fig.5는 경사하강법을 이용하여 10DWPD 마다 발생 한 불량률의 비용을 측정된 결과이다. 본 논문에서는 데이 터 표준편차로 인한 변화량을 최소화 하고, 일정 주기별 평균값을 적용하기 위해 10DWPD 마다 발생한 불량 빈 도를 합산하여 경사도의 비용을 측정하였고, 이것은 저 장장치가 10일 동안 수용할 수 있는 쓰기 데이터를 처리 할 때마다 비용을 측정된 것을 의미한다.

본 논문에서 사용한 경사하강법에서 비용을 계산하는 방법은 Eq.1의 수식을 이용하였다.

$$cost = beginBad + runtimeBad$$

[Eq. 1] Cost for Occured Bad Block

Eq.1의 수식에서 *cost*는 경사하강법에 적용한 비용을 의미하고 *beginBad*는 초기 불량률 의미한다. 그리고 *runtimeBad*는 최근 10DWPD를 처리하는 동안 발생한 불량률 의미한다. 본 논문에서 초기불량 비용을 합산한 이유는 보증 된 수명 이후 불량률이 발생하기 시작하면 초 기 불량률에 따라 남아있는 수명이 영향을 받기 때문이 다. 즉 초기 불량률이 높을수록 발생하는 불량률의 빈도에 따라 수명마감이 빠르게 다가오고 초기 불량률이 낮으면 상대적으로 불량률 발생해도 수명마감이 늦게 다가온다. 본 논문에서는 초기 불량률 18개의 블록으로 가정하였기 때문에 *beginBad*는 18이다.

<Table 1> Summary of Results

DWPD	Defects	Cost	Old	New
1130	200	44	-	0%
1120	174	42	-	13%
1110	150	40	-	25%
1100	128	38	-	36%
1090	108	36	-	46%
1080	90	34	-	55%
1070	74	32	-	63%
1060	60	30	-	70%
1050	48	28	-	76%
1040	38	26	-	81%
1030	30	24	-	85%
1020	24	22	-	88%
1010	20	20	-	90%
1000	18	18	0%	91%
990	18	18	1%	91%
980	18	18	2%	91%
970	18	18	3%	91%
960	18	18	4%	91%

Table 1은 10DWPD마다 발생한 불량량의 빈도를 이용하여 수명 비용을 계산한 결과이다. 테이블의 구조는 각각의 줄 별로 3개의 독립된 결과값과 논문에서 제안하는 수명예측방법과 이전에 사용하던 방법을 비교한 결과이다. 첫 번째 값은 DWPD를 의미한다. 두 번째 값은 좌측의 DWPD를 저장장치에서 처리하는 동안 발생한 누적된 불량량의 개수와 초기 불량량의 합계이다. 세 번째 값은 이전 DWPD에서 현재 DWPD를 처리하는동안 발생한 순간 변화율 즉 구간 불량량의 개수와 초기 불량량의 개수를 합한 비용이다. 네 번째 항목인 Old의 값은 이전에 보증 데이터 처리량을 기반으로 한 수명예측 방법이다. 마지막 New항목은 본 논문에서 제안하는 방법으로 수명을 예측한 방법이다. 테이블의 결과는 10DWPD 단위로 증가하는 DWPD를 960부터 1130까지 증가하는 동안 누적된 불량량의 개수를 표시하고 있다. 누적된 불량량은 초기 불량량의 개수를 포함하고 있고 200개의 누적 불량량이 발생한 1130DWPD까지 표시한 이유는 저장장치에서 교체할 수 있는 예비 블록의 수가 200개 이다. 즉 본 시물레이션에서 가정한 저장장치는 최대 200개의 불량발생까지 정상 처리할 수 있고 이때의 비용은 44이다. 일반적으로 같은 공정으로 제조된 반도체의 특성과 수명은 유사한 값을 갖기 때문에 양산과정에서 측정된 비용의 평균을 산정하면 플래시 메모리의 비용이 같은 값을 갖는 구간에서 수명이 수렴이 된다. 따라서 본 시물레이션에서는 44의 비용을 갖는 구간이 발생한 불량을 사용자에게 가리고 사용할 수 있는 최대 구간이다.

이러한 실험의 결과를 기반으로 기존의 수명 마감에 예측하는 방법과 비교를 하면 다음과 같다. 고정 임계값을 사용하는 방법은 수명주기 동안 보증할 수 있는 최대 처리 가능 데이터는 고정 임계값과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 1000DWPD 이후 수명을 예측하거나 보증할 수 없다. 예약블록을 사용하는 방법은 불량량이 언제 발생되어 예약 블록들을 모두 소진할지 알 수 없으므로 최대 처리 가능한 데이터를 단독으로 알 수는 없기 때문에 고정 임계값 처리 방식과 함께 사용된다. 마지막으로 제안된 방법은 실제로 학습된 데이터를 통해 1130DWPD를 처리할 수 있는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 이전 방법 대비 13%수준의 데이터를 처리할 수 있음을 알 수 있다. 그다음, 저장장치의 현재 상태에서 남은 처리 가능 데이터를 확인하는 방법의 경우 고정 임계값을 사용하는 방법은 처리된 데이터량 대비 남은 임계값을 제공할 수 있으나 실제로 1130DWPD를 처리할 수 있는 저장장치에서 실제 처리 가능한 데이터를 기반으로 한 것이 아니기 때문에 제안된 방법 대비 부정확하다. 마지막으로, 고정 임계값을 사용하는 방법은 저장장치에서 보증하는 1000DWPD의 데이터를 모두 처리한 이후의 수명을 예측할 수 없다. 그리고 예약블록을 사용하는 방법은 남아있는 예약 블록의 개수를 통해 추가 연장사용 가능성은 알 수 있으나 앞으로 몇 번의 DWPD를 처리할 수 있는지 예측할 수 없다. 반면, 제안하는 방법은 보증된 DWPD를 처리한 뒤에도 학습된 정보를 통해 연장사용도 가능하고, 앞으로 남아있는 처리 가능한 데이터량도 예측 가능한 장점이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 수명 발생빈도를 포함하는 빅데이터를 기반으로 남아있는 수명을 예측하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 방법은 제조과정에서 양산된 반도체의 불량 발생빈도를 측정하여 경사하강법을 기반으로 수명을 예측하는 방법이다. 그리고 실험을 통해 제안하는 방법이 고정된 읽고 쓰기 횟수의 임계치를 기반으로 수명을 예측 이전 방법들 보다 정확하게 수명을 예측할 수 있음을 증명하였다. 또한 학습된 비용 매트릭스를 이용하여 수명을 예측하였을 때 제조사의 기준으로 제공되는 수명보다 더 긴 기간 동안 안정적으로 저장장치를 사용될 수 있음을 증명하였다. 향후 다양한 예외 상황에 대한 구체적인 정책을 연구하여 보다 우수한 수명 예측 방법을 연구할 예정이다.

REFERENCES

- [1] S.S.Chae, R.Mativenga, J.Y.Paik, M.Attique, and T.S.Chung, "DSFTL: An efficient FTL for flash memory based storage systems." *Electronics* Vol.9, No.1, pp.145, 2020.
- [2] W.Xie, Y.Chen, and P.C.Poth, "ASA-FTL: An adaptive separation aware flash translation layer for solid state drives," *Parallel Computing*, Vol.61, pp.3-17, 2017.
- [3] I.B.Zion, "Key-value FTL over open channel SSD," *12th ACM International Conference on Systems and Storage*. pp.192-192, 2020.
- [4] S.Kim and Y.Son, "Optimizing Key-Value Stores for Flash-Based SSDs via Key Reshaping," *IEEE Access* 9, pp.115135~115144, 2021.
- [5] J.H.Park, D.J.Park, T.S.Chung, and S.W.Lee, "ARK, Jong-Hyeok, et al. A Crash Recovery Scheme for a Hybrid Mapping FTL in NAND Flash Storage Devices," *Electronics*, Vol.10, No.3, pp.327, 2021.
- [6] Samsung Electronics, Samsung Solid State Drive. http://www.samsung.com/zglobal/business/semiconductor/support/brochures/support_Flash_SSD.html.
- [7] H.S.Lee and D.H.Lee, "An efficient index buffer management scheme for implementing a B-tree on NAND flash memory," *Data & Knowledge Engineering*. Vol.69, No.9, pp.901-916. 2010.
- [8] H.S.Lee, H.S.Yun, and D.H.Lee, "HFTL: hybrid flash translation layer based on hot data identification for flash memory." *Consumer Electronics, IEEE Transactions*. Vol.55, No.4, pp.2005-2011, 2011.
- [9] H.S.Lee, S.W.Park and D.H.Lee, "RMSS: an efficient recovery management scheme on NAND flash memory based solid state disk," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.59, No.1, pp.107-112, February 2013.
- [10] Y.Pan, H.Chen, J.Zhao, and Y.Xu, "Lifetime-aware FTL to improve the lifetime and performance of solid-state drives." *Future Generation Computer Systems* 93, pp.58-67, 2019.
- [11] Y.Lue, Y.Cai, S.Ghose, J.Choi, and O.Mutlu, "WARM: Improving NAND flash memory lifetime with write-hotness aware retention management," *Mass Storage Systems and Technologies*, pp.1-14, 2015.
- [12] J.H.Choi, K.M.Kim, and J.W.Kwak, "WPA: Write Pattern Aware Hybrid Disk Buffer Management for Improving Lifespan of NAND Flash Memory," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vo.66, No.2, pp.193-202., 2020.
- [13] B.Kai, X.Hui, X.Qiyu, and Y.Wei, "Schemes for Extending the Lifetime of SSD," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol.12, No.9, pp6940-6945, 2014.
- [14] S.Wang, F.Wu, Z.Lu, Y.Zhau, Q.Xiong, M.Zhang, and C.Xie, "Lifetime adaptive ECC in NAND flash page management. In Design," *Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, pp.1253-1556, 2017.
- [15] Y.J.Woo, "Diversifying wear index for MLC NAND flash memory to extend the lifetime of SSDs," *Embedded Software (EMSOFT)*, pp1-10., 2013.

이 현 섭(Hyun-Seob Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한양대학교 컴퓨터 공학과 (공학 석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 컴퓨터 공학과 (공학 박사)
- 2012년 3월 ~ 2021년 2월 : 삼성전자 책임연구원
- 2021년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 컴퓨터공학부 조교수

〈관심분야〉

인공지능, 저장시스템, 임베디드 시스템