

모빌리티 전용 저장장치의 고온 고장 방지를 위한 온도 관리 시스템 설계

이현섭*
백석대학교 컴퓨터공학부 교수

A Design of Temperature Management System for Preventing High Temperature Failures on Mobility Dedicated Storage

Hyun-Seob Lee*
Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

요약 모빌리티 기술의 급격한 성장으로 산업 분야의 수요는 차량 내에 다양한 장비와 센서의 데이터를 안정적으로 처리할 수 있는 저장장치를 요구하고 있다. NAND 플래시 메모리는 외부에 강한 충격뿐만 아니라 저전력, 빠른 데이터 처리 속도의 장점이 있기 때문에 모빌리티 환경의 저장장치로 활용되고 있다. 그러나 플래시 메모리는 고온에 장기 노출될 경우 데이터 손상이 발생할 수 있는 특징이 있다. 따라서 태양 복사열 등 날씨나 외부 열원에 의한 고온 노출이 빈번한 모빌리티 환경에서는 온도를 관리하기 위한 전용 시스템이 필요하다. 본 논문은 모빌리티 환경에서 저장장치 온도 관리하기 위한 전용 온도 관리 시스템을 설계한다. 설계한 온도 관리 시스템은 전통적인 공기 냉각 방식과 수 냉각 방식의 기술을 하이브리드로 적용하였다. 냉각 방식은 저장장치의 온도에 따라 적응형으로 동작하도록 설계하였으며, 온도 단계가 낮을 경우 동작하지 않도록 설계하여 에너지 효율을 높였다. 마지막으로 실험을 통해 각 냉각방식과 방열 재질의 차이 따른 온도 차이를 분석하였고, 온도 관리 정책이 성능을 유지하는데 효과가 있음을 증명하였다.

주제어 : 낸드 플래시 메모리, 모빌리티, 저장장치, 온도 관리, 사물인터넷

Abstract With the rapid growth of mobility technology, the industrial sector is demanding storage devices that can reliably process data from various equipment and sensors in vehicles. NAND flash memory is being utilized as a storage device in mobility environments because it has the advantages of low power and fast data processing speed as well as strong external shock resistance. However, flash memory is characterized by data corruption due to long-term exposure to high temperatures. Therefore, a dedicated system for temperature management is required in mobility environments where high temperature exposure due to weather or external heat sources such as solar radiation is frequent. This paper designs a dedicated temperature management system for managing storage device temperature in a mobility environment. The designed temperature management system is a hybrid of traditional air cooling and water cooling technologies. The cooling method is designed to operate adaptively according to the temperature of the storage device, and it is designed not to operate when the temperature step is low to improve energy efficiency. Finally, experiments were conducted to analyze the temperature difference between each cooling method and different heat dissipation materials, proving that the temperature management policy is effective in maintaining performance.

Key Words : Nand Flash Memory, Mobility, Storage, Temperature Management, IoT

*This paper was supported by 2023 Baekseok University Research Fund

*교신저자 : 이현섭(hyunseob@bu.ac.kr)

접수일 2024년 02월 15일 수정일 2024년 03월 4일 심사완료일 2024년 3월 12일

1. 서론

최근 모빌리티 산업 기술은 급격한 발전을 이루어 다양한 기능의 장치들이 도입되고 있다. 따라서 모빌리티 환경의 내부 장치들은 정보 처리를 위해 주변 환경과 상호 작용을 위한 다양한 센서를 도입하고 있다. 레이더, 라이더, 카메라, 초음파 센서 등의 다양한 센서들은 차량 주변의 정보를 실시간으로 수집하고, 이 데이터를 분석하여 자율주행 및 안전 시스템에 적용하고 있다. 이러한 센서 데이터는 막대한 양의 정보를 생성하며 실시간으로 처리되어야 한다. 그러나 디스크 기반 저장장치는 이러한 대용량 데이터를 효과적으로 다루는데 한계가 있으며 자율주행의 안정성과 효율적인 운영을 위한 고속의 안정적인 데이터 처리가 가능한 저장장치가 필요하다.

NAND 플래시 메모리는 저전력, 비휘발성, 고속의 데이터 처리가 가능한 장점[1-3]으로 모빌리티 환경의 자율주행에 적합한 저장장치이다. 그러나 플래시 메모리는 고온에 장시간 노출되었을 경우 데이터를 손실하는 물리적인 한계가 있다[4-7]. 특히 외부 주차장에 주차한 차량의 경우 날씨와 외부 태양 복사열로 인해 실내 온도가 75도 이상 상승하여 사고가 발생한 사례[8]를 살펴보면 일반적인 주차 환경도 차량 내부에 설치한 플래시 메모리 기반 저장장치가 고온으로 인한 손상과 신뢰성 저하 문제를 발생할 수 있다.

본 논문은 이러한 저장장치 신뢰성 하락 문제를 해결하기 위해 모빌리티 환경에서 저장장치 온도 관리하기 위한 온도 관리 시스템을 설계하였다. 설계한 온도 관리 시스템은 전통적인 공기 냉각 방식과 수 냉각 방식의 기술을 하이브리드로 적용하였다. 또한, 온도에 따라 다른 냉각 방식이 동작하도록 설계하여 저온 상태의 에너지 효율을 높이고 고온 상태의 냉각 성능을 높였다. 마지막으로 실험을 통해 각 냉각방식의 차이를 분석하였고 저장장치의 방열 케이스에 따른 냉각 시스템의 온도 차이를 분석하였다.

2. 배경

2.1 SMART 정책

SMART(Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology)는 SSD와 같은 저장장치에서 발생하는 잠재적인 문제를 모니터링하고 현재의 상태 정보와 예상되는 문제를 리포트하는 기술이다. SMART의 주요 역할은

온도 모니터링, 실패 예측, 속도 및 에러 계수 모니터링, 전원 이벤트 모니터링이다. 이 기술은 저장장치의 예측 가능한 장애 및 잠재적인 문제를 식별하는 데 도움을 준다. 결과적으로 모니터링 정보를 통해 앞으로 발생할 수 있는 잠재적 고장 문제를 예방할 수 있다.

〈Table 1〉 SMART Information of SSD

ID	Attribute
5	Reallocated Sector Count
9	Power-on Hours
12	Power-on Count
177	Wear Leveling Count
179	Used Reserved Block Count
180	Unused Reserved Block Count
181	Program Fail Count
182	Erase Fail Count
183	Runtime Bad Count
184	End to End Error Count
187	Uncorrectable Error Count
190	Airflow Temperature
195	ECC Error Rate
199	CRC Error Count
202	SSD Mode Status
235	POR Recovery Count
241	Total LBA Written
242	Total LBA Read
250	SATA Interface Downshifts

Table 1은 SMART의 정보를 보여주고 있다[9]. 이 테이블에서 SMART ID 190의 데이터는 저장장치의 온도 관련 정보를 보여주며, 현재의 온도, 최고 온도와 같은 온도 로깅 정보를 보여줄 뿐만 아니라 정상 동작을 위한 임계값과 온도에 의한 데이터 손상 가능성의 정보를 포함한다.

2.2 관련 연구

SSD는 고속의 데이터 처리 능력과 에너지 효율성으로 다양한 모바일 기기와 자동차 등에서 널리 사용되고 있다. 이러한 이유로 SSD의 온도 관리와 모빌리티 환경에 대한 연구는 다양한 방면에서 이루어지고 있다.

Yi Wang[10]의 연구에서는 저장장치에 저장되어 있는 내부 데이터 배치를 온도에 따라 최적화하는 TLSM(Temperature-aware Long-Structured Merge) 방법을 제안하였다. 이 방법은 3-D 낸드 플래시 메모리에 기반한 로그 구조 병합 트리 기반의 키-값 저장소를 위한 온

도를 고려한 지속성 있는 데이터 관리 방법이다. 이 연구에서는 애플리케이션과 펌웨어를 최적화하여 3-D NAND 플래시 메모리의 온도를 감소시키기 위한 방법을 제안하였다. 그러나 소프트웨어 최적화를 통한 문제 해결 방법만으로는 물리적인 고온 현상을 관리하는데 한계가 있다.

M. R. Amini[11]의 연구에서는 전기차 등에서 온도 관리를 최적화하기 위한 계층적 모델 예측제어 방법인 MPC(Model Predictive Control) 방식을 제안하였다. MPC는 현재 및 미래의 데이터를 모델링하여 최적의 제어 입력을 도출하는 방법으로 다양한 제약 조건과 목표를 고려할 수 있다. 또한 복잡한 시스템과 환경에서 모빌리티의 내부 장치들을 효율적으로 제어할 수 있도록 설계하였다. 이 연구에서는 차량의 열부하, 특히 승객 구획과 배터리 온도를 실시간으로 관리하면서 전력 소모를 줄이는 방법을 연구하였다. 실시간 교통정보와 차량의 속도 예측을 활용하여 온도 관리 전략을 계획하고 적용함으로써 차량에서의 연비를 최대 5.3%까지 개선할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 그러나 이 연구는 차량의 복합적인 제어 및 관리를 통해 연비 저하를 목적으로 진행된 연구이다. 따라서 저장장치의 온도를 직접적으로 관리하기 위한 최적화 방안으로는 한계가 있다.

Julien Coutet[12]의 연구에서는 MLC(Multi Level Cell)의 읽기 쓰기 과정 중 온도가 미치는 영향에 대한 실험 분석을 진행하였다. 이 관련 연구에서는 온도가 NAND 플래시 메모리의 읽고 쓰는 동작에 영향을 주지 않으나 고온에 관리할 경우 셀의 전하 누설 현상[13-15]으로 인해 데이터 손실이 발생할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 이 연구에서는 온도가 미치는 NAND 플래시 메모리의 영향성에 대한 실험 및 분석은 진행하였으나 고온 현상으로부터 데이터를 지키기 위한 온도관리 방법에 대한 연구는 진행하지 않았다.

앞에서 살펴본 바와 같이 관련 연구에서는 모빌리티 환경에서 고온 현상이 NAND 플래시 메모리에 미치는 문제를 인지하고 최적화하기 위한 연구를 진행하였으나 고온 현상을 직접적으로 관리하는 방법 및 연구는 진행하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 모빌리티 환경에서 고온 현상을 시뮬레이션하기 위한 실험환경을 구축하고 저장장치에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 온도를 관리하기 위한 연구를 진행하고 실험을 통해 효과를 분석한다.

3. 온도 관리 시스템 설계

3.1 핵심 설계 구조



[Fig. 1] System Architecture

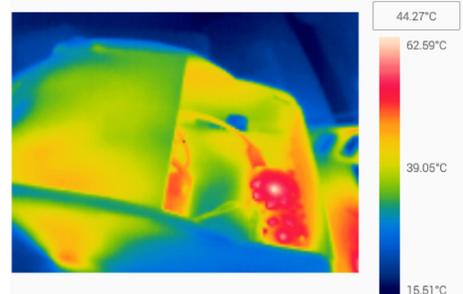
Fig. 1은 모빌리티 전용 냉각 시스템의 핵심 설계 구조를 보여주고 있다. 그림과 같이 저장 매체는 NAND 플래시 메모리 기반 저장장치인 SSD를 사용하였다. 냉각기는 공기 냉각 방식과 수 냉각방식을 사용하였고 온도에 따라 단계적으로 동작하도록 설계하였다.

3.2 태양 복사열 시뮬레이션 환경 설계



[Fig. 2] Simulation Environment

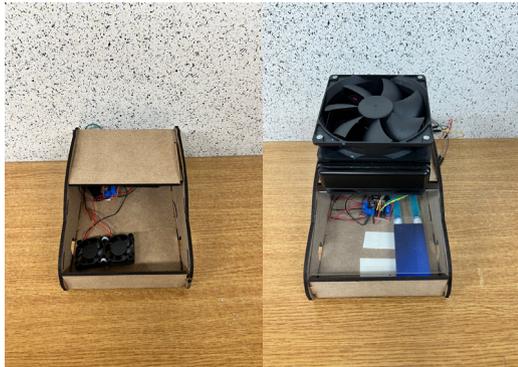
Fig. 2는 태양 복사열을 시뮬레이션하기 위해 설계한 차량 환경을 보여주고 있다. 열원은 250W에서 중심온도가 섭씨 약 200도까지 열을 발생하는 할로겐램프를 사용하였다. 차량 모델은 복사열로 온도 상승이 가능한 MDF로 만들었고, 측정을 통해 최대 섭씨 50도를 전달하는 환경을 구축하였다.



[Fig. 3] Thermal Camera Screen

Fig. 3은 차량 모델과 동작 중에 발생한 열화상 카메라 화면을 보여주고 있다. 그림과 같이 SSD를 중심으로 열원이 발생하고 있다. SSD의 단순한 데이터 처리 동작만으로 섭씨 약 53도까지 상승하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 차량 모델 및 냉각 시스템의 설계



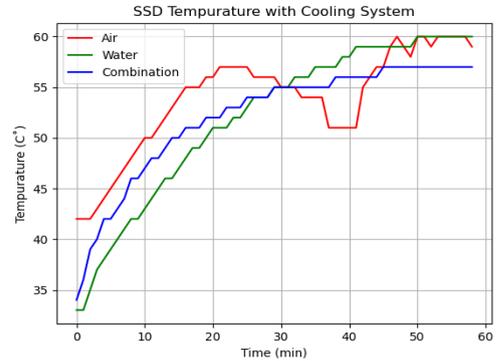
[Fig. 4] Design of Cooling System

Fig. 4는 공기 냉각 방식과 수 냉각 방식 냉각 시스템을 적용한 차량 모델을 보여주고 있다. 차량에 사용한 제어 시스템 플랫폼은 라즈베리파이 3B+ 모델을 사용하였다. 공기 냉각 방식은 40x40(mm) 규격의 팬을 2대 부착하였다. 일반적으로 SSD는 자체적으로 온도 상승을 지연하기 위해 입출력 동작 속도를 제한하는 DTT(Dynamic Thermal Throttling)를 적용하였다. DTT는 섭씨 60도 전후로 동작하기 때문에 냉각 시스템의 팬 동작은 섭씨 50도에서 5도 증가할 때마다 RPM을 30%, 50%, 70%, 100%로 나누어 동작하도록 설계했다. 수 냉각 방식은 저장장치에 부착된 알루미늄 워터블럭에 열전도가 가용하도록 방열 패드를 사이에 두어 부착하였다. 워터펌프를 통해 냉각수를 워터블럭에서 워터펌프, 라디에이터, 워터펌프, 워터블럭 순으로 순환하여 냉각수가 발열의 상승을 감소시키도록 하였다. 마지막으로 하이브리드 냉각 시스템은 수 냉각 방식에서 라디에이터에 냉각 팬을 장착하여, 냉각수가 순환하는 과정에서 냉각 팬으로 냉각수의 온도를 낮추는 역할을 추가한 방식이다.

4. 실험 및 평가

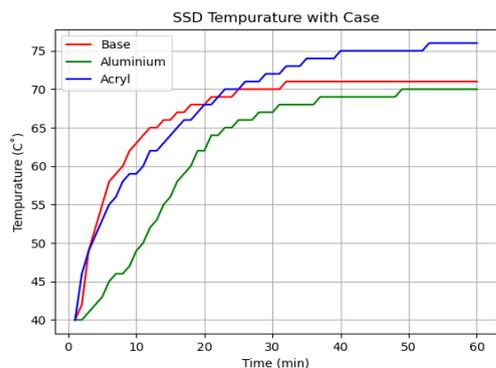
본 절에서는 제안하는 냉각 시스템이 저장장치에 미치는 효과를 증명하기 위해 설계한 냉각 시스템을 적용하기 위한 차량 모델을 제작하였다. 실험에 사용한 저장장

치는 삼성 PM981a 256GB NVMe SSD를 사용하였다. 실험에서 성능지표를 측정하기 위해 FIO(Flexible I/O Tester)를 사용하였다.



[Fig. 5] Variation by Cooling Systems

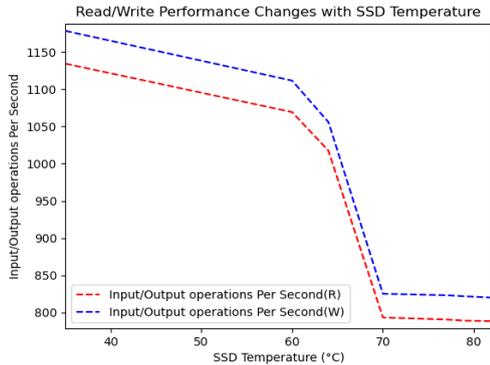
Fig. 5는 60분간 냉각 시스템 동작에 따른 온도의 변화를 보여주고 있다. X축은 할로겐램프를 통해 복사열을 방출한 시간이다. Y축은 냉각 시스템이 동작하는 동안 측정된 저장장치의 온도(섭씨)다. 이 중 Air는 공기 냉각 방식을 의미하고, Water는 수 냉각 방식이다. Combination은 공기 냉각 방식과 수 냉각 방식을 동시에 동작시킨 결과다. 실험의 결과와 같이 평균적인 온도는 섭씨 32도에서 58도를 보인 하이브리드를 적용한 방법이 우수한 성능을 보였다. 공기 냉각 방식은 32도에서 61.5도까지 증가하였고, 수 냉각 방식은 32도에서 61도까지 증가하였다.



[Fig. 6] Variation by Case

Fig. 6은 저장장치의 케이스 재질에 따른 온도의 증가를 측정하였다. 실험의 결과에서 Base는 케이스를 사용하지 않고 냉각 시스템을 적용한 결과이다. Aluminium은 알루미늄 케이스를 의미하고, Acryl은 아크릴 재질의

케이스다. 실험에서 케이스를 적용하지 않은 Base는 약 30분 후 섭씨 71도까지 상승하였다. Aluminium의 경우 약 49분이 되어 70도에 도달하였다. 마지막으로 Acryl은 약 23분에 70도를 넘었고 최대 76.5도까지 증가하였다. 실험 결과와 같이 Aluminium의 평가에서 최대 온도 도달 시간이 가장 우수한 결과를 보였으며 최대 온도 또한 섭씨 70도로 가장 우수한 효과를 보였다.

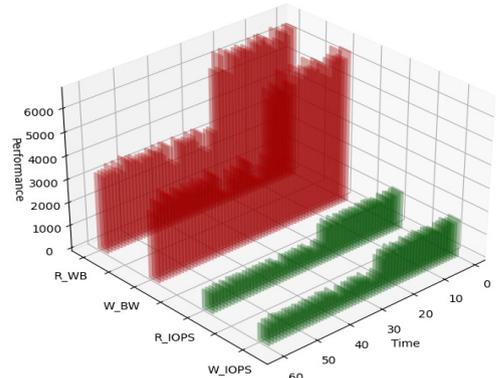


[Fig. 7] Performance Evaluation

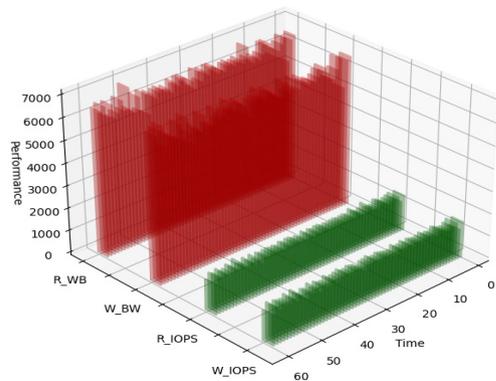
Fig. 7은 SSD의 온도가 섭씨 약 40도에서 80도 구간 일 때 FIO를 통한 읽기 쓰기 성능(IOPS)을 측정 결과를 보여주고 있다. 실험 결과와 같이 온도 온도가 상승할수록 성능이 저하되는 경향을 보여주고 있다. 온도가 약 40도일 때는 읽기 성능의 평균은 약 1,140IOPS, 쓰기 성능은 약 1,190IOPS를 보여주고 있다. 그리고 SSD가 약 60도에 도달할 때까지 성능이 선형으로 감소하는 것을 보여주었다. 온도가 60도일 때 읽기 성능은 1,075IOPS 쓰기 성능은 1,115IOPS로 각각 5.7%, 6.3%까지 감소했다. 약 65도에서는 더 가파른 속도로 감소하여 읽기 쓰기 속도가 각각 약 1,010, 1,060IOPS로 11.4%, 10.9% 감소하였고, 70°C에 도달했을 때는 읽기 쓰기 성능이 각각 약 840, 790IOPS로 26.3%, 33.6% 감소하였다. 즉 온도가 60도 이상 증가하면 성능이 저하되기 때문에 SSD의 온도가 60도에 도달하는 것을 지연하기 위한 냉각 시스템이 성능 감소에 효과가 있음을 판단할 수 있다.

Fig. 8은 아크릴 케이스에서 시간에 따른 성능을 측정 결과를 보여주고 있다. X축은 측정된 시간, Y축은 성능의 기준이다. 그리고 Z축은 실제 측정된 성능을 의미한다. 실험 결과와 같이 26분 전 평균 읽기, 쓰기 성능은 약 1,560, 1,543IOPS를 보였다. 평균 읽기 쓰기 속도는 모두 약 620MB/S였다. 그리고 26분 이후 성능은 각각 797, 784IOPS,이고 속도는 약 310MB/S로 저하되었다.

성능이 저하된 구간의 측정온도는 71도였다. 따라서 임계점을 넘어가는 온도상승이 결과적으로 SSD의 전체적인 성능저하를 야기한 것으로 분석된다.



[Fig. 8] Performance with ACRYL Case



[Fig. 9] Performance with Aluminium Case

Fig. 9는 알루미늄 케이스와 냉각 시스템을 적용한 환경에서 성능을 측정된 결과이다. 이 방법은 사전 실험의 결과와 같이 시험 구간에서 온도 상승을 70도 이하로 지연시키기 때문에 성능저하 없이 약 1560IOPS, 620MB/S를 유지하였다.

5. 결론

본 논문에서는 모빌리티 환경에서 저장장치의 온도를 관리하기 위한 냉각 시스템을 제안하였다. 또한, 다양한 실험을 통해 온도를 관리하는 것이 데이터 손실 방지뿐만 아니라 안정적인 성능 유지 효과가 있음을 증명하였다. 향후에는 냉각 시스템이 모빌리티 환경에서 자율주행에 미치는 영향을 연구할 예정이다.

REFERENCES

- [1] H.S.Lee, "High Efficiency Life Prediction and Exception Processing Method of NAND Flash Memory-based Storage using Gradient Descent Method," *Journal of Convergence for Information Technology*, Vol.11, No.11, pp.44-50, 2021
- [2] H.S.Lee, "A Safety IO Throttling Method Inducting Differential End of Life to Improving the Reliability of Big Data Maintenance in the SSD based RAID," *Journal of Digital Convergence*, Vol.20, No.5, pp.593-598, 2022.
- [3] H.S.Lee, "Performance analysis and prediction through various over-provision on NAND flash memory based storage," *Journal of Digital Convergence*, Vol.20, No.3, pp.343-348, 2022.
- [4] H.S.Lee, "A Memory Mapping Technique to Reduce Data Retrieval Cost in the Storage Consisting of Multi Memories," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.1, pp.19-24, 2023.
- [5] H.S.Lee, "A Study on Characteristics and Techniques that Affect Data Integrity for Digital Forensic on Flash Memory-Based Storage Devices," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.3, pp.7-12, 2023.
- [6] H.S.Lee, "An Efficient SLC Transition Method for Improving Defect Rate and Longer Lifetime on Flash Memory," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.3, pp.81-86, 2023.
- [7] H.S.Lee, "An Efficient SLC Transition Method for Improving Defect Rate and Longer Lifetime on Flash Memory," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.3, pp.81-86, 2023.
- [8] <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5517938>, *Korean Broadcasting System NEWS*, 2022.
- [9] Samsung Electronics, "For Data Centers, S.M.A.R.T, Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology," *Application Note*, 2014.
- [10] Y.Wang, J.Tan, R.Mao and T.Li, "Temperature-Aware Persistent Data Management for LSM-Tree on 3-D NAND Flash Memory," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol.39, No.12, pp.4611-4622, 2020.
- [11] M.R.Amini, H.Wang, X.Gong, D.L.McPherson, I.Kolmanovsky and J.Sun, "Cabin and battery thermal management of connected and automated HEVs for improved energy efficiency using hierarchical model predictive control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.28, No.5, pp.1711-1726, 2019.
- [12] J.Coutet, F.Marc, F.Dozolme, R.Guetard, A.Janvresse, P.Lebosse, A.Pastre and J.C.Clement, "Influence of temperature of storage, write and read operations on multiple level cells NAND flash memories," *Microelectronics Reliability*, Vol.88, pp.61-66, 2018.
- [13] B.Govoreanu, J.V.Houdt, "On the roll-off of the activation energy plot in high temperature flash memory retention tests and its impact on the reliability assessment," *IEEE Electron Device Lett*, Vol.29, No.2, pp.177-179, 2008.
- [14] B.D.Salvo, G.Ghibaudo, G.Pananakakis, G.Reimbold, F.Mondond, B.Guillaumot and P.Candelier, "Experimental and theoretical investigation of nonvolatile memory dataretention", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.46, No.7, pp.1518-1524, 1999.
- [15] K. Lee, M. Kang, Y. Hwang, H. Shin, Accurate lifetime estimation of sub-20-nm NAND flash memory, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.63, No.2, pp659-667, 2016.

이 현 섭(Hyun-Seob Lee)

[종신회원]



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

〈관심분야〉

인공지능, 저장시스템, 임베디드 시스템