

# 외부 가열 시간에 따른 USB 데이터 손상 양상 분석

오현민\*, 한승재\*, 박준석\*, 김창훈\*\*

\*대구대학교 (\*학부생, \*\*교수)

## Analysis of USB Data Damage Patterns under Varying External Heating Durations

Hyeon-Min Oh\*, Seung-Jae Han\*, June-Seok Park\*, Chang-Hoon Kim\*\*

\*Daegu University(\*Undergraduate Student, \*\*Professor)

### 요약

본 연구는 외부 가열 시간이 보급형 USB 저장장치의 데이터 손상에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. ChipBank CBM2199E 칩이 적용된 USB 저장장치를 대상으로 단계별 가열 실험을 수행하고, 장치 인식, 파일 시스템 마운트, 파일 열람 및 해시값 일치 여부를 비교하였다. 그 결과, 열전달 조건이 강화되고 노출 시간이 증가할수록 파일 손상, 해시값 불일치, 파일 시스템 이상, 장치 인식 불가가 순차적으로 나타났다. 데이터 손상은 특정 시점에서 일괄 발생하기보다 열 누적에 따라 단계적으로 확대되는 경향을 보였다.

### I. 서론

USB 메모리와 같은 NAND Flash 기반 저장장치는 일상적인 데이터 저장 매체이자 디지털 포렌식에서 중요한 분석 대상이다. 기존 연구에서는 플래시 메모리의 저수준 획득 방식과 데이터 복구 절차의 필요성이 제시되었으며[1], 물리적으로 손상되거나 전기적으로 지워진 USB로부터 데이터를 복구하기 위한 실험도 보고되었다[2]. 이러한 연구는 손상 저장장치에 대한 단순 논리 접근만으로는 한계가 있으며, 실제 손상 조건을 반영한 실증적 검토가 필요함을 시사한다.

한편 열은 NAND Flash의 데이터 유지 특성과 복구 가능성에 직접적인 영향을 줄 수 있다. Fukami 등은 chip-off 분석 시 열 기반 칩 분리 절차가 NAND Flash 내 오류를 증가시켜 복구 가능성을 저하시킬 수 있음을 보고하였고[3], Cai 등은 retention error가 NAND Flash의 주요 오류 원인 중 하나임을 제시하였다[4]. 또한 Coutet 등은 온도 조건이 MLC NAND Flash 메모리의 신뢰성에 유의한 영향을 미친다고 보고하였다[5].

그러나 기존 연구는 저수준 복구 절차나 NAND 칩 수준의 온도-신뢰성 특성에 초점을 둔 경우가 많아, 시중에서 구매 가능한 USB 저장장치를 대상으로 외부 가열 시간 변화에 따른 장치 인식, 파일 시스템 상태, 파일 열람 및 해시값 변화가 어떠한 순서로 나타나는지를 관찰한 연구는 드물다. 이에 본 연구에서는 ChipBank CBM2199E 칩이 적용된 보급형 USB 저장장치를 대상으로 외부 가열 실험을 수행하고, 가열 시간 증가에 따른 데이터 손상 양상을 단계적으로 분석하고자 한다.

### II. 실험 방법

#### 2.1 실험 개요

외부 가열 시간 증가에 따른 USB 저장장치의 데이터 손상 양상을 단계적으로 확인하기 위해 예비 실험, 보완 실험, 본 실험의 순서로 진행하였다. 예비 실험은 초기 조건에서 손상 발생 여부를 확인하기 위한 단계이며, 보완 실험은 열전달 조건을 강화하여 손상이 시작되는 시간 구간을 탐색하기 위한 단계이다. 본 실험은 이를 바탕으로 손상 발생 가능성이 높은 구간을

세분화하여 재현성을 확인하기 위해 수행하였다.

## 2.2 공통 실험 환경

실험 대상은 시중 저가 매장에서 구매한 보급형 USB 저장장치이며, 내부 칩은 ChipBank CBM2199E로 확인되었다. 해당 장치는 원칩 구조이며, 모든 실험은 동일 모델의 독립 시료를 사용하였다. 파일 시스템은 FAT32로 통일하였고, 저장 데이터는 동영상 1개, 음악 5종, 이미지 5종으로 구성하였다. 각 시료에는 동일한 데이터를 사전 저장한 뒤 SHA-1 해시값을 산출하였다. 분석 환경은 Windows 11 24H2 PC이며, 평가 항목은 장치 인식, 파일 시스템 마운트, 파일 열람, 해시값 일치 여부이다. 가열 위치는 USB 커넥터 반대편의 칩 위치로 고정하였다. 세부 구성은 [표 1]과 같다.

[표 1] 공통 실험 환경

항목	내용
저장매체	ChipBank CBM2199E 칩이 적용된 보급형 USB 저장장치
파일 시스템	FAT32 방식
저장 데이터	동영상 1개(.mp4), 음악 5개(.mp3), 이미지 5개(.jpg)
무결성 기준	사전 산출한 해시(SHA-1)값
가열 위치	USB 커넥터 반대편 ChipBank CBM2199E 칩 위치
분석 환경	Windows 11 24H2 PC
평가 항목	장치 인식, 파일 시스템 마운트, 파일 열람, 해시값 일치 여부

## 2.3 예비 및 보완 실험 환경

예비 실험에서는 히팅건 설정 온도 200°C, 가열 거리 3cm 조건에서 30초, 60초, 5분 동안 USB를 가열하였다. 유의미한 손상이 관찰되지 않아 보완 실험에서는 열전달 조건을 강화하였다. USB 외부 케이스를 제거하고, 히팅건 설정 온도를 300°C, 가열 거리를 1cm로 조정하여 2분, 3분, 3분 15초, 3분 30초, 4분 조건으로 실험하였다.

## 2.4 본 실험 환경 및 절차

본 실험에서는 히팅건 설정 온도 300°C, 하부 가열판 설정 온도 170°C, 가열 거리 1cm로 설정하였으며, USB는 외부 케이스를 제거한 상태로 실험하였다. 노출 시간은 1분, 1분 30초, 2분, 2분 30초, 3분이며, 각 시간 조건마다 4개의 독립 시료를 사용하였다. 각 시료를 설정된 시간 동안 가열한 뒤 자연 냉각을 실시하고, 장치 인식 여부, 파일 시스템 마운트 여부, 파일 열람 가능 여부를 확인한 후, 가열 전 산출한 해시값과 비교하여 무결성 변화를 검토하였다.

## III. 데이터 접근성 변화 및 손상 양상

예비 실험에서는 모든 시료가 정상 인식되었고, 파일 열람 및 해시값에서도 유의미한 이상이 관찰되지 않았다. 이에 열전달 조건을 강화하여 본 실험을 수행하였다.

본 실험 결과, 1분 조건에서는 4개 시료 중 3개가 정상 동작하였고 1개가 장치 인식에 실패하였다. 1분 30초 조건에서는 모든 시료가 인식 및 마운트에 성공하였으나, 일부 시료에서 동영상 열람 실패와 이미지 부분 손상이 나타났다. 2분 조건에서는 1개 시료가 장치 인식에 실패하였고, 인식된 시료에서도 동영상은 모두 열람 불가하였으며, 음악 및 이미지는 부분 성공과 실패가 혼재하였다. 2분 30초 조건에서는 모든 시료가 인식·마운트는 가능하였으나 동영상은 전 시료에서 열람 불가하였고, 음악 및 이미지의 손상 범위도 확대되었다. 3분 조건에서는 2개 시료가 장치 인식에 실패하였고, 1개는 인식되었으나 마운트에 실패하였으며, 마운트된 1개 시료에서도 동영상은 열람 불가하고 이미지 일부만 확인되었다. 세부 결과는 [표 2]와 같다.

종합하면, 외부 가열 시간이 증가할수록 손상은 일부 파일의 열람 실패에서 해시값 불일치, 파일 시스템 이상, 장치 인식 불가 단계로 점진적으로 확대되었으며, 동일 조건 내에서도 시료 간 손상 편차가 관찰되었다.

[표 2] 외부 가열 시간에 따른 데이터 접근성 및 손상 결과

시간	샘플	장치 인식	FS	영상	음악	사진	해시
1분	1	X	X	0/1	0/5	0/5	N/A
	2	O	O	1/1	5/5	5/5	일치
	3	O	O	1/1	5/5	5/5	일치
	4	O	O	1/1	5/5	5/5	일치
1.5분	1	O	O	0/1	5/5	1/5	불일치
	2	O	O	1/1	5/5	5/5	일치
	3	O	O	1/1	5/5	5/5	일치
	4	O	O	1/1	5/5	4/5	불일치
2분	1	O	O	0/1	5/5	3/5	불일치
	2	O	O	0/1	2/5	5/5	불일치
	3	X	X	0/1	0/5	0/5	불일치
	4	O	O	0/1	3/5	5/5	불일치
2.5분	1	O	O	0/1	4/5	2/5	불일치
	2	O	O	0/1	3/5	4/5	불일치
	3	O	O	0/1	4/5	5/5	불일치
	4	O	O	0/1	0/5	0/5	불일치
3분	1	O	X	0/1	0/5	0/5	N/A
	2	X	X	0/1	0/5	0/5	N/A
	3	X	X	0/1	0/5	0/5	N/A
	4	O	O	0/1	5/5	1/5	불일치

#### IV. 종합 분석 및 결론

외부 가열 시간에 따른 USB 데이터 손상 양상을 실험적으로 분석하기 위해 단계별 실험을 수행하였다. 예비 실험에서는 유의미한 손상이 관찰되지 않았으나, 열전달 조건을 강화한 본 실험에서는 일부 파일 손상, 해시값 불일치, 파일 시스템 이상, 장치 인식 불가가 순차적으로 나타났다. 이를 통해 데이터 손상 여부는 단순한 설정 온도보다 실제 열전달 효율의 영향을 크게 받을 수 있음을 확인하였다.

데이터 손상은 특정 시점에서 단번에 발생하기보다, 열이 누적됨에 따라 단계적으로 진행되는 경향을 보였다. 초기에는 일부 파일의 열람 실패와 부분 손상이 나타났고, 이후 해시값 불일치와 파일 시스템 이상이 확인되었으며, 최종적으로 장치 인식 불가 상태로 이어졌다. 또한 강화된 열전달 조건에서는 손상 발생 시점이 앞당겨지고 유사한 양상이 반복되어, 일정한 조건 하에서 손상 패턴의 재현 가능성이 있음을 확인하였다.

이상의 결과는 외부 가열에 노출된 USB 저장 장치의 손상 진행 양상을 실험적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있으며, 디지털 포렌식 관

점에서 손상 저장매체의 분석 가능성을 판단하는 기초 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서 확인된 단계적 손상 양상은 NAND Flash 메모리에서 온도 조건이 저장 및 동작 특성에 영향을 미친다는 선행 연구와도 연결된다[5]. 다만 실험 대상이 CBM2199E 칩이 적용된 단일 모델, FAT32 파일 시스템, 제한된 파일 종류 및 장비 설정 조건을 대상으로 수행되었으므로, 결과를 일반화하기에는 한계가 있다. 향후에는 다양한 저장장치 유형과 정밀한 온도 제어 환경을 반영한 추가 연구가 필요하다.

#### [참고문헌]

- [1] M. Breeuwsma, M. de Jongh, C. Klaver, R. van der Knijff, and M. Roeloffs, "Forensic Data Recovery from Flash Memory," *Small Scale Digital Device Forensics Journal*, vol. 1, no. 1, 2007.
- [2] B. J. Phillips, C. D. Schmidt, and D. R. Kelly, "Recovering data from USB Flash memory sticks that have been damaged or electronically erased," in *Proc. E-FORENSICS*, 2010, doi: 10.4108/e-forensics.2008.2771.
- [3] A. Fukami, S. Ghose, Y. Luo, Y. Cai, and O. Mutlu, "Improving the reliability of chip-off forensic analysis of NAND flash memory devices," *Digital Investigation*, vol. 20, Suppl., pp. S1-S11, 2017, doi: 10.1016/j.diin.2017.01.011.
- [4] Y. Cai, Y. Luo, E. F. Haratsch, K. Mai, and O. Mutlu, "Data Retention in MLC NAND Flash Memory: Characterization, Optimization, and Recovery," in *2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, pp. 551-563, 2015, doi: 10.1109/HPCA.2015.7056062.
- [5] J. Coutet, F. Marc, F. Dozolme, R. Guétard, A. Janvresse, P. Lebossé, A. Pastre, and J.-C. Clement, "Influence of temperature of storage, write and read operations on multiple level cells NAND flash memories," *Microelectronics Reliability*, vols. 88-90, pp. 61-66, 2018, doi: 10.1016/j.microrel.2018.06.088.