Selective Redundancy for Cost-Efficient System Reliability

시스템 신뢰성 향상을 위한 선택적 중복 보호 기법

MemSOS (DRAM) · SVF-RAID (SSD)†

이재욱

서울대학교 컴퓨터공학부 · AI연구원

NVRAMOS 2026 · 2026.10.22 · 제주 신라호텔

서 울 대 학 교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

†**MemSOS**: Presented at HPCA 2026 · **SVF-RAID**: Under review at IEEE CAL

배경: 메모리–스토리지 계층 전반의 신뢰성 문제

CPU · 메모리 컨트롤러 | 오류 발생 | ECC 검출 · 정정 | 잔여 오류 | 시스템 영향

DRAM과 SSD 모두 ECC만으로 해결하기 어려운 잔여 오류가 존재하며,
추가적인 보호 기법이 필요함

SSD
NAND flash
페이지 단위 ECC

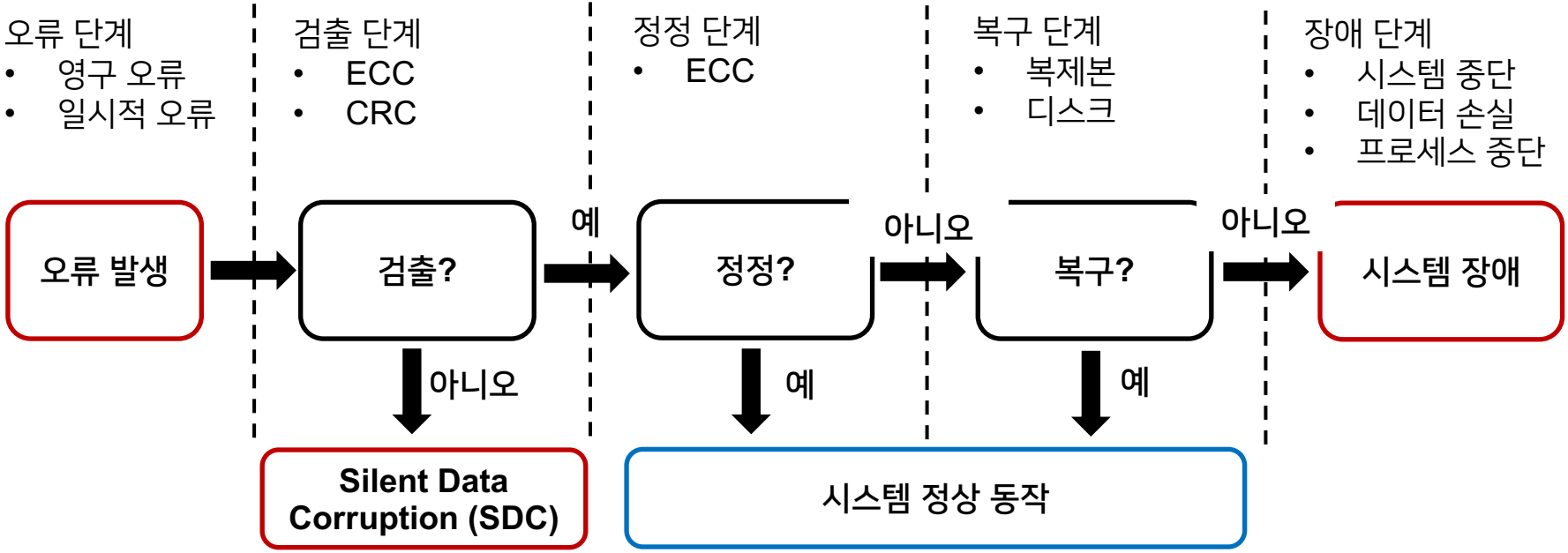
NAND cell의 열화 또는 특정상황에서 발생

페이지 단위 ECC
오류 비트가 일정 개수 이하인 경우 정정

정정 불가 오류
ECC로 복구 불가능할 정도로 많은 오류 비트 발생

데이터 손실

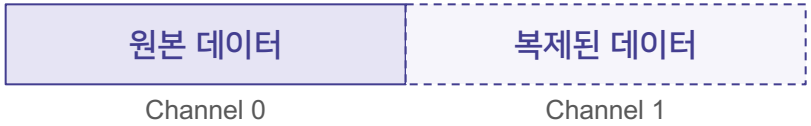
배경: 오류 처리 단계와 중복 보호의 역할



배경: 미러링은 신뢰성을 높이지만 비용이 큼

DRAM · 전체 메모리를 복제본으로 보호

전체 메모리 미러링시 메모리 공간 구성



모든 사용가능한 메모리를 이중으로 저장

↓

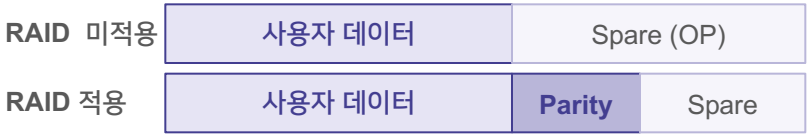
메모리 사용량 **2배** · 채널 사용량 절반

↓

용량 · 성능 비용 발생

SSD · SSD 내부 전체를 RAID로 보호

Flash 공간 구성 (31:1 구성)



Parity가 spare 영역 점유 → **garbage collection 시 복사량 증가** → **쓰기 증폭 WAF 증가**

↓

성능 비용 발생

공통 한계: 모든 데이터를 균일하게 보호하면, 보호 필요성이 낮은 데이터에도 중복 보호 비용을 지불

핵심 관찰: 모든 데이터에 동일한 수준의 보호가 필요하지는 않음

관찰	MemSOS (DRAM)	SVF-RAID (SSD)
데이터 손상이 시스템의 정상 동작에 미치는 영향은 서로 다름	**중요도 :** 페이지 유형별 보호 우선순위 e.g.,) Kernel의 경우 시스템 오류 유발	**중요한 메타데이터:** 시스템 복구에 필수적인 메타데이터는 항상 보호
일부 데이터는 외부에서 복구 가능	**외부 복구 가능성 :** 저장소에 사본 존재 → 보호 대상 제외	**외부 복구 가능성 :** 불러오기 · 재계산 가능 → 보호 대상 제외
제한된 비용으로 보호 대상을 선정	**접근성**: 최근 접근 페이지 우선 보호, 동일 중요도 내에서 우선순위 조절	**Vulnerable time (SVF) :** 과거 I/O 이력으로 오류 노출 시간 추정

공통점은 **균일 보호 대신 선택적 보호** · 선택 기준과 방법은 각 시스템에서 별도로 정의

연구 개요: 두 계층에서의 선별적 중복 보호

연구 질문

제한된 비용으로 높은 시스템 신뢰성을 확보하면서
용량 · 성능 저하를 최소화하려면?

Selective Redundancy · 데이터 특성과 시스템 정보로 중복 보호 대상을 선택

MemSOS Part I · DRAM

Redundancy	OS 페이지 단위 메모리 미러링
선택 기준	중요도 + 최근접근빈도
Guidance	OS
Enforcement	Mirror Manager (메모리 컨트롤러)

SVF-RAID Part II · SSD

Redundancy	SSD 내부 RAID (31:1 ratio)
선택 기준	복구 가능성 + 노출 취약도 (SVF)
Guidance	호스트 제공 (OS / 애플리케이션)
Enforcement	NVMe streams → superblock 분리

Part I · DRAM

MemSOS: OS-Guided Selective Memory Mirroring

페이지 중요도와 최근 접근 빈도를 활용한 OS 기반 선택적 메모리 미러링

Junghoon Kim
Seoul National University

Jongheon Jeong
Seoul National University

Seokwon Moon
Seoul National University

Seong Hoon Seo
Seoul National University

Yeonhong Park
Seoul National University

Jinkyu Jeong
Yonsei University

Nam Sung Kim
University of Illinois at Urbana-Champaign

Jae W. Lee
Seoul National University



DRAM 오류: 서버 장애의 주요 원인

원인







실제 서버 환경에서 메모리 오류는 빈번히 발생[1][2]

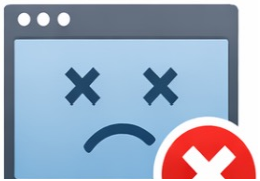
메모리 오류는 서버 장애의 주요 원인[3]



시스템 오류



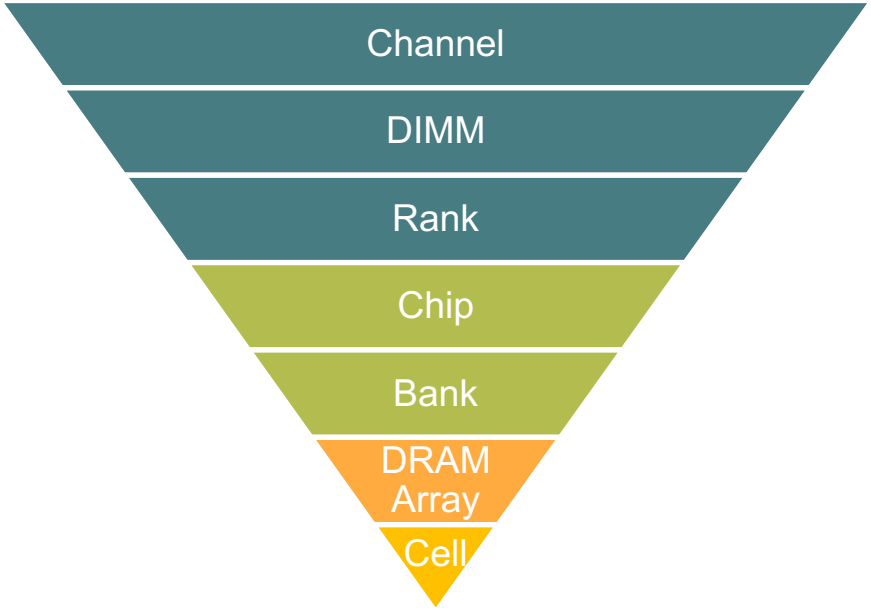
데이터 손상

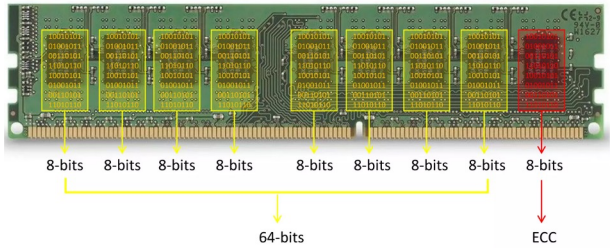




[1] Meza et al., “Revisiting Memory errors in Large-Scale Production Data Centers”, DSN, 2015.
[2] Schroeder et al, “DRAM errors in the wild: a large-scale field study”,SIGMETRICS, 2009.
[3] Cheng et al., “An In-Depth Correlative Study between DRAM Errors and Server Failure in Production Data Centers”, SRDS, 2022

DRAM 신뢰성 향상 기법





Intel mirroring (RAID-1), IBM RAIM (RAID-3)

Advanced ECC (예: Chipkill)

Row/column sparing

In-DRAM ECC

DRAM 신뢰성 기법 (1): ECC



한계: **ECC** 정정 범위를 넘는 광범위한 오류가 빈번히 발생[1][2][3][4]

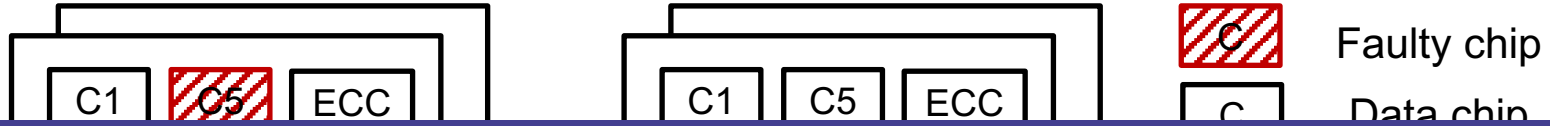
Chipkill 정정 성공 **Chipkill** 정정 실패

ECC

- 메모리 구조에 구조화된 보호 추가
- DRAM 오류를 검출 및 정정
- Advanced ECC (예: Chipkill)는 단일 칩

[1] Meza et al., “Revisiting Memory errors in Large-Scale Production Data Centers”, DSN, 2015.
[2] Schroeder et al, “DRAM errors in the wild: a large-scale field study”,SIGMETRICS, 2009.
[3] Cheng et al., “An In-Depth Correlative Study between DRAM Errors and Server Failure in Production Data Centers”, SRDS, 2022
[4] Wu et al. “Removing Obstacles before Breaking Through the Memory Wall”, ATC, 2024

DRAM 신뢰성 기법 (2): 메모리 미러링



한계: 미러링은 높은 신뢰성을 제공하지만, 큰 메모리 용량이 필요

Chipkill 정정이 실패해도 미러링으로 복구

미러링

- 메모리 내에 데이터의 복제본을 유지
- 원본이 손상되면 복제본으로부터 데이터 복구
- ECC보다 강력한 신뢰성 제공 (다중 칩 결함, 채널 결함 등)

과제: 메모리 미러링의 용량 비용



질문: 높은 용량 비용 없이 높은 신뢰성을 얻으려면?

전체 메모리 미러링

- *모든 사용가능한 메모리*를 미러링
- 강력한 신뢰성 제공
- 메모리 사용량 2배

부분 메모리 미러링

- 사용 가능 메모리 중 일부만 미러링
- 용량 저하 감소

기존 연구 (1): 선별적 메모리 미러링



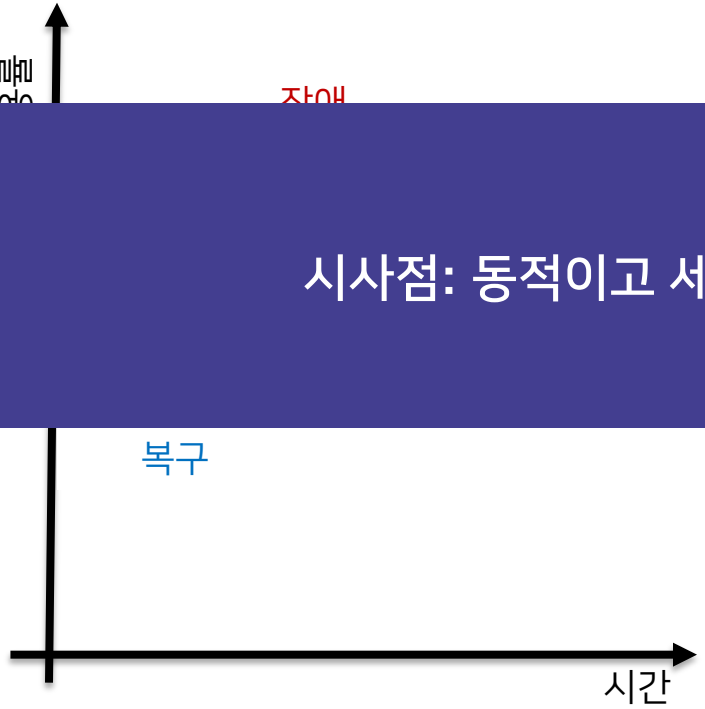
Clean file-backed 페이지

시사점: 모든 페이지를 동일하게 취급하지 않고,
시스템 정상 동작 기준으로 페이지 우선순위를 세분화

한계

- 우선순위 구분이 지나치게 단순:
  File-backed (dirty/clean)와 anonymous
  페이지를 구분하지 않음

기존 연구 (2): 동적 메모리 미러링



해시 모표

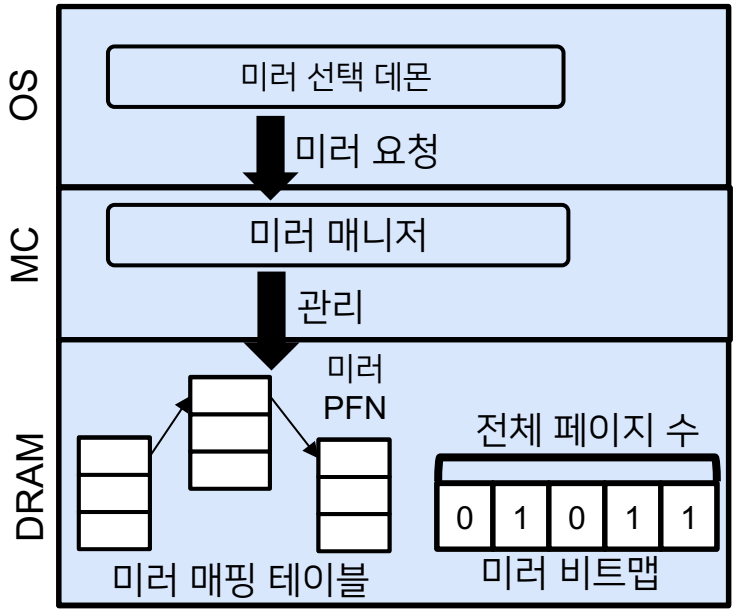
시사점: 동적이고 세밀한 미러링으로 안정적인 신뢰성 제공

- 여유 메모리 ↓ → 미러링 비활성화

한계

- 임계값 기반 미러링은 신뢰성 변동을 유발

MemSOS 개요: OS 기반 선별적 메모리 미러링



Mirror Selection Daemon (OS)

- 결정: *미러링할 페이지 선택*
- 제어: *미러링할 메모리 양*
- 미러 요청 발행

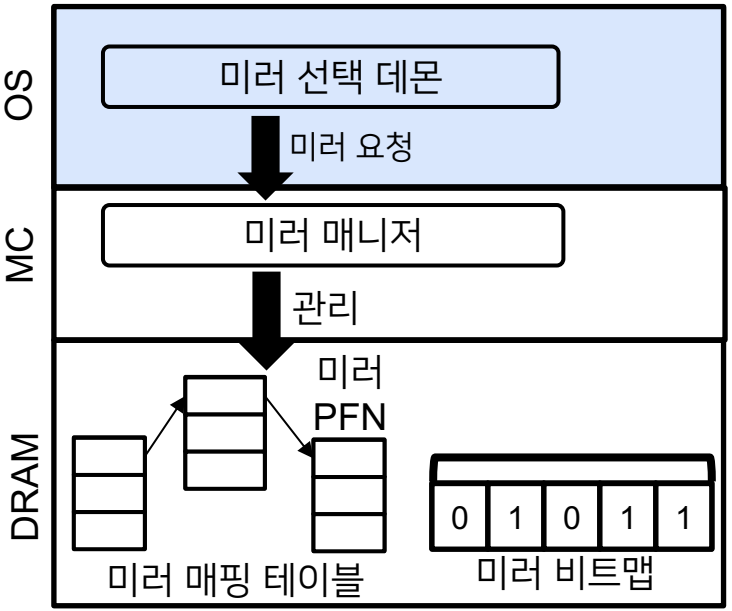
Mirror Manager (MC)

- 미러링 동작 수행
- 미러 메타데이터 관리

Mirror metadata (DRAM)

- 미러 매핑 테이블 (PFN → 미러 PFN)
- 미러 존재 여부 확인용 미러 비트맵

미러 선택 데몬: 페이지 우선순위 결정



Criticality (중요도)

- 시스템 정상 동작에 대한 페이지의 영향
- Kernel (0), dirty file-backed (1), anonymous (2), clean file-backed (3)

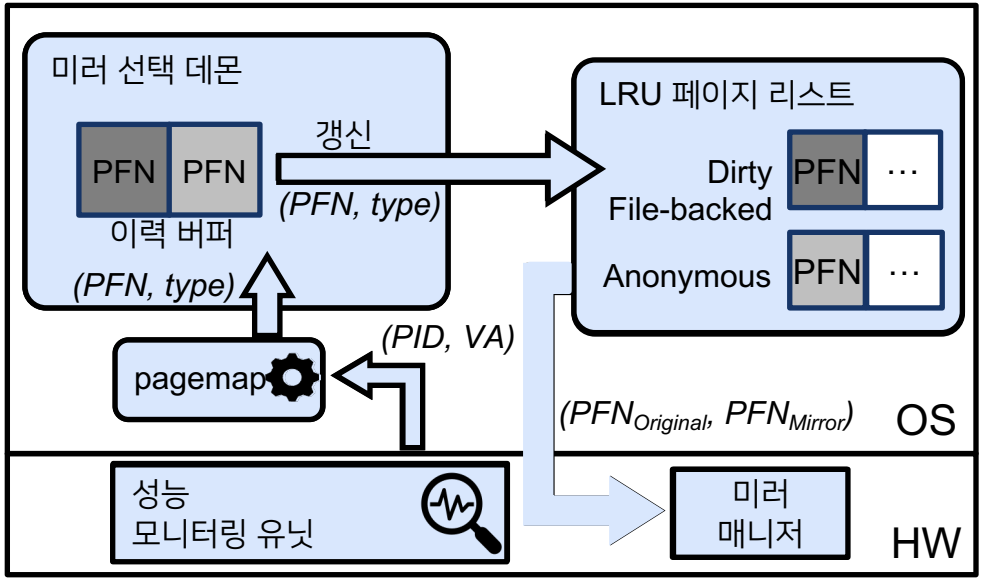
Recency (최근성)

- 페이지가 최근에 접근 또는 갱신된 정도
- 같은 중요도 내 페이지 간 순서 결정

핵심 아이디어

- 중요도로 우선순위 정의
- 접근성으로 같은 중요도 내 순서 세분화

미러 선택 데몬: 2단계 동작 흐름



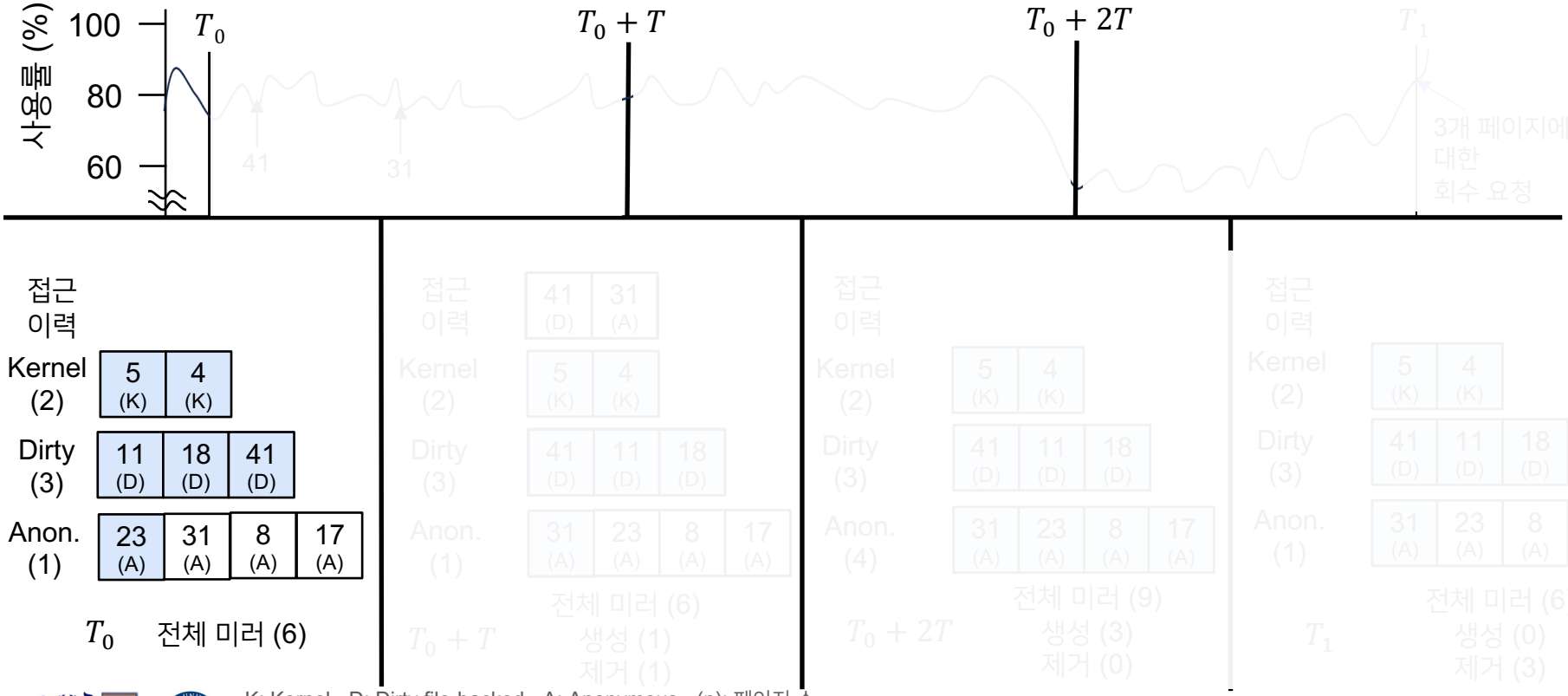
프로파일 단계

- 최근 메모리 접근 샘플링
- 접근을 물리 페이지로 변환
- 경량 접근 이력 기록 관리

업데이트 단계

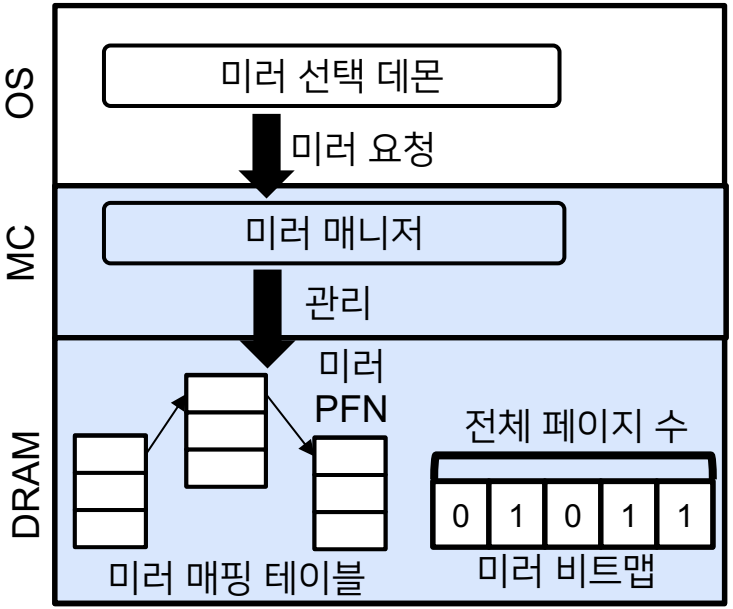
- LRU 리스트 갱신으로 접근 이력 추적
- 미러 매니저에 미러 요청 발행

미러 선택 데몬: 동작 예시



K: Kernel · D: Dirty file-backed · A: Anonymous · (n): 페이지 수

미러 매니저: 미러 관리 방법



생성 / 제거

- 페이지 단위 미러 생성 및 제거
- 미러 메타데이터 갱신

오류 복구

- 캐시 라인 단위 복구 지원
- 정정 불가 메모리 오류 처리

Fault Tolerance

- 원본과 미러 페이지에 쓰기 복제
- 미러를 서로 다른 DRAM 채널에 배치

미러 매니저: 동작 예시

생성 (B, B')
B에 쓰기
B에서 읽기
B 제거
미러 비트맵
0 1 0 1 1
0 1 0 1 1
0 1 0 0 1
미러 매핑 테이블
원본 PFN
미러 PFN
A B
B'
B
B'
오류!
미러 생성
쓰기 요청
오류 복구
미러 제거

MemSOS 평가: 실험 방법

System Configurations		
CPU	Name	Intel Xeon Gold 6426Y
	# of Cores	16
	L3 Cache	37.5MB
	Max Freq.	4.10GHz
DRAM	Type	DDR5 (4800MT/s)
	Total Size	512GB (8×64GB DIMM)
	Peak BW	307.2GB/s
OS		Linux kernel v5.15.0
MemSOS Configurations		
Mirror Mapping Lookaside Buffer	L1	0.5625KB (64 entries)
	L2	8KB (1024 entries)
Mirror Bitmap Cache		60KB (16384 entries)

	File page ratio	Anon. page read ratio	Kernel page read ratio	Total write rate
DeathStarBench				
Hotel Reservation (HR)	Low	Low	Medium	Medium
Social Network (SN)	Low	Low	Medium	High
CloudSuite 4.0				
Data Serving (DS)	High	High	Low	Medium
Web Serving (WSv)	Medium	Low	High	Low
Web Search (WSr)	Low	High	Low	Medium

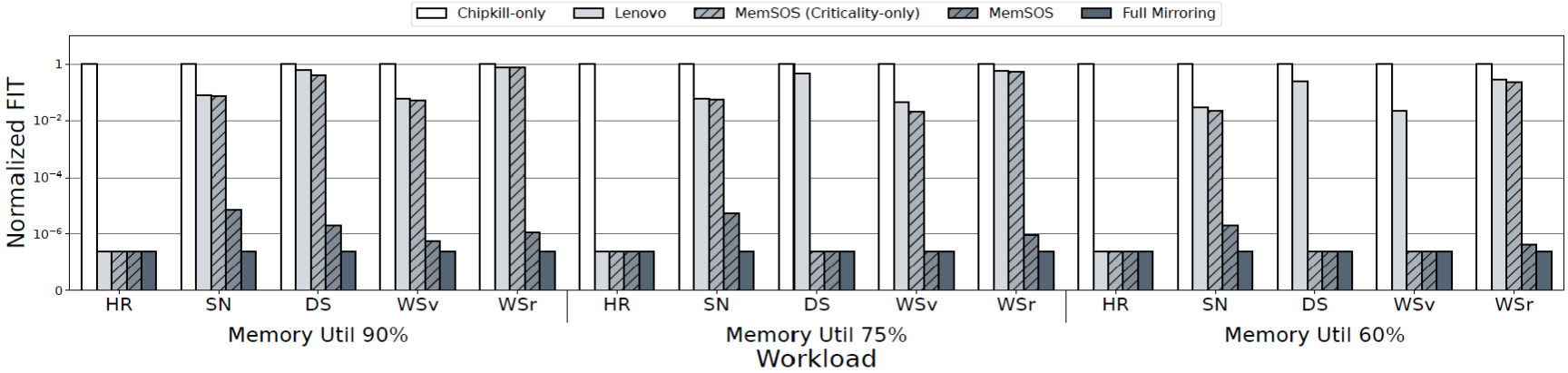
실험 방법

- Failures in Time (FIT) ➔ 10억 시간당 장애 수
- FIT 평가 ➔ DRAM fault simulator[1]

- 두 가지 워크로드
  - DeathStarBench : 마이크로서비스 벤치마크
  - CloudSuite 4.0 : 클라우드 서버 벤치마크

[1] Jung et al., “Predicting Future-System Reliability with a Component-Level DRAM Fault Model”, MICRO, 2023.

MemSOS 평가: FIT 시뮬레이션



FIT 개선

- 기준 기법: 단순 정책 기반 Lenovo 부분 메모리 미러링
- 기준 기법 대비 최대 19,000배 낮은 FIT, 전체 미러링에 근접한 신뢰성
- 메모리 사용률 90%에서 기준 기법 대비 평균 12,000배 개선

MemSOS 요약

- 연구 동기
  - 광범위한 DRAM 오류가 빈번히 발생
  - 기존 메모리 미러링의 한계
    - 전체 미러링: 높은 용량 비용
    - 선별적 미러링: 페이지 중요도를 반영하기에 지나치게 단순
    - 임계값 기반 미러링: 큰 신뢰성 변동

- 해결책: MemSOS (OS 기반 선별적 미러링)
  - 페이지 단위 우선순위 결정 (중요도 & 최근접근빈도)
- 효과: 기준 기법 대비 최대 19,000배 높은 신뢰성, <3% 성능 오버헤드, 최소한의 용량 비용