

DRAM Per-Row Activation Counting 기법의 시스템 성능 영향 분석

양성필^{§†}, 강태운[§], 구건재[§]

[§]고려대학교, [†]SK하이닉스

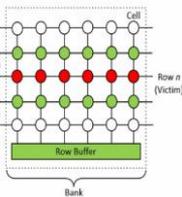


1. 연구 동기



System

DRAM



Target Row Refresh(TRR), On Die ECC 등 자체 방어 Scheme 강화
→ 지속적인 Tech. Shrink에 따른 신뢰성 문제는 여전히 존재

Row Hammer 모니터링 강화 및 시스템 차원 대응
1. RFM 지원 - Bank단위 CNT로 정확도 부족
2. Per-Row Activation Counting (PRAC) 지원

PRAC란? DRAM의 각 Row 활성화를 Count하여, Row Hammer 공격에 취약한 Row 예방 조치

Row ACT 카운팅

임계값 도달 (ABO_Threshold)

DRAM → Host Alert Back Off

Host Alert 감지 PRAC RFM 명령

Recovery* 진입 대상/인접 Row Refresh

카운터 초기화 Alert 정상 복귀

* Recovery 상태에서는 일반 CMD 동작 불가

단점: Counter 및 추가 Refresh를 위한 타이밍 증가와 PRAC 개입에 따른 성능 감소 가능성



분석을 통해, PRAC가 실제 시스템에 수용 가능한 수준인지 점검하고자 함.

목차

1. 연구동기
2. 실험 환경
3. 3가지 관점 시스템 성능 영향 분석
 - 3-1. PRAC On / Off 간 성능 변화
 - 3-2. 타이밍 파라미터별 성능 변화
 - 3-3. Refresh 주기 변화에 따른 성능 변화
4. 결론

2. 실험 환경

Processor	4.8GHz, 4 Cores/1 Core, 4-wide issue, 128-entry instr.
Last-Level Cache	64-byte cache line, 8MB
Memory Controller	64-entry read/write request queues; Scheduling policy: FRFCFS; Address mapping: RoBaRaCoCh
Main Memory (DRAM)	DDR5-3200, 1 channel, 2 ranks

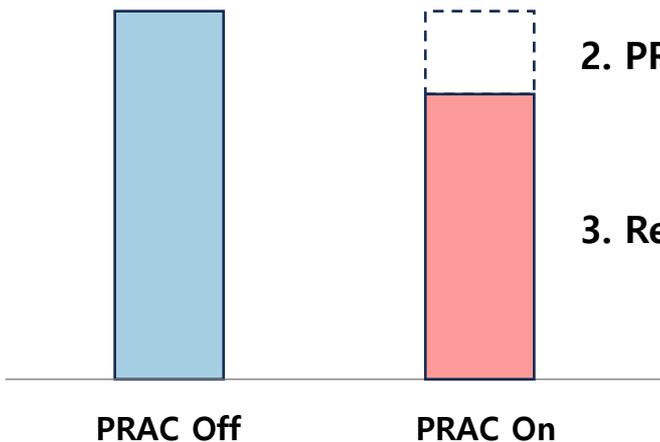
워크로드 구성 - SPEC CPU2006/2017의 메모리 집약적(H) 15개, 연산 집약적(L) 26개 기반 HHHH, HHHL, HHLL, HLLL, LLLL 각 형태별 랜덤 생성하여 다양한 워크로드 조합 구성

실험 결과 도출

- 1) 멀티코어 상황 워크로드 25회(5종 워크로드 조합 x 5회 반복 구성) 실험을 수행
- 2) 각 코어에서 측정된 IPC를 해당 워크로드의 싱글코어 IPC로 나누어 weighted Speed Up 계산
- 3) PRAC Off 결과를 기준으로 하여 정규화 계산하여 각 비교군이 성능에 미치는 상대적 영향 분석

3. 시스템 성능 영향 분석을 위한 접근 관점

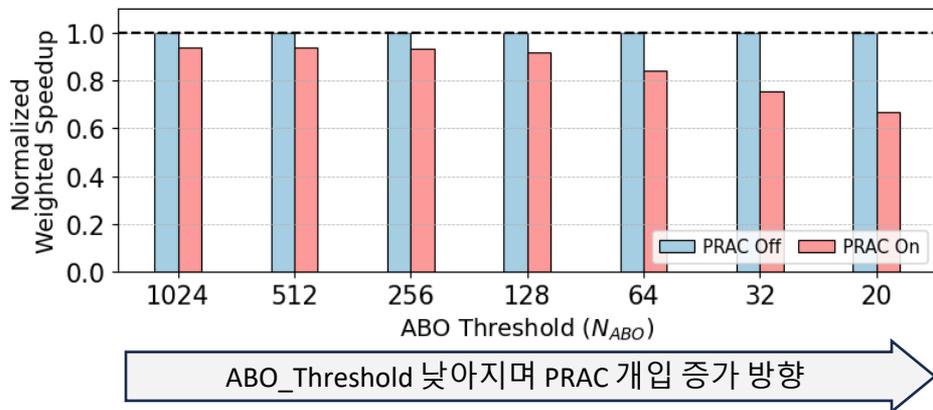
1. PRAC On / Off 에 따른 기본 성능 변화



2. PRAC 관련 타이밍 파라미터 영향

3. Refresh 주기(t_{REFI}) 변화에 따른 영향

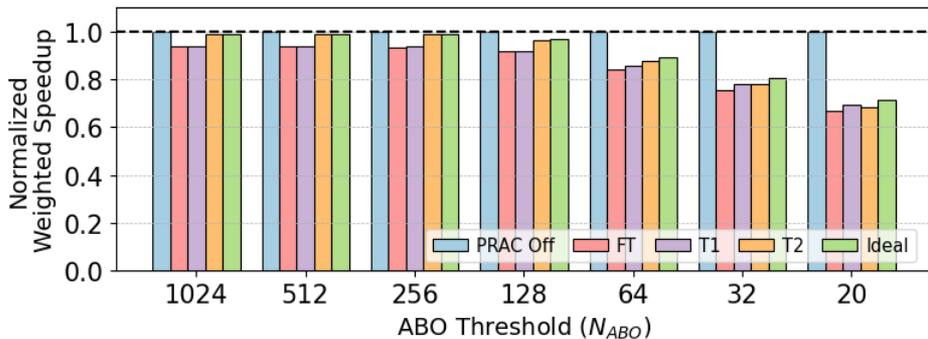
3-1. PRAC On / Off에 따른 기본 성능 변화



- N_{ABO} (임계값) 1024 ~ 256 평균 성능 감소 6.2 ~ 6.6% 수준으로 유사
 - 임계값 128 이하 성능 급격히 감소 ($N_{RH} = 20$ 약 33.4% 감소)
- 임계값이 작을수록 PRAC 개입 빈도 증가 하나,

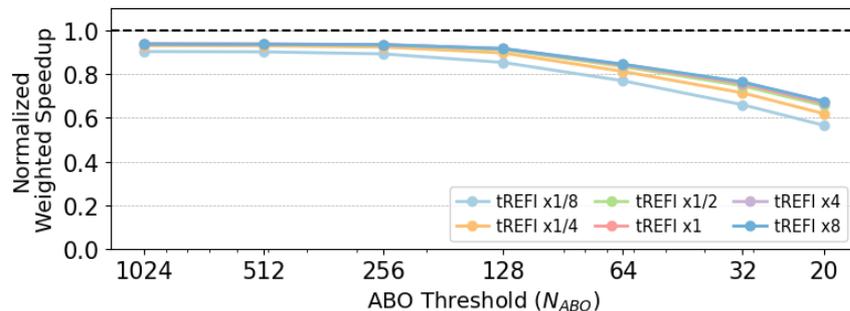
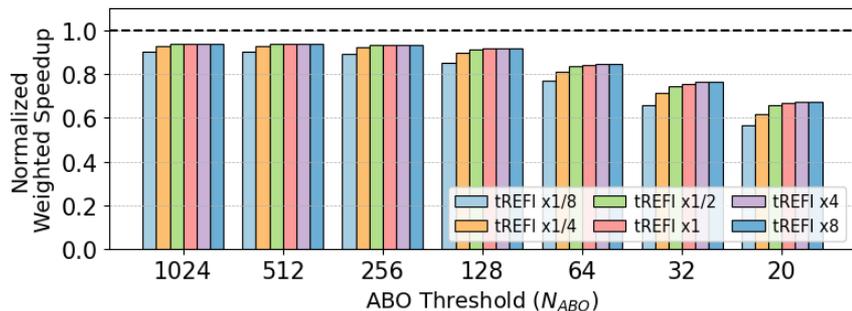
임계값 128 이상 설정할 경우, 성능 감소폭이 적으므로 수용 가능한 수준으로 판단

3-2. PRAC 관련 타이밍 파라미터 영향



- 카운터 타이밍 T1(t_{RP} , t_{RC}), RFM 타이밍 T2(t_{RFM1} , t_{RFMsb}) 기반 4가지 조합(T1 x T2) 실험
 - N_{ABO} (임계값) 128 이상 구간 FT(T1, T2 모두 적용) 와 T1(T1만 적용) 유사
- 카운터 타이밍(T1) Delay 에 의한 성능 저하가 주요 원인

3-3. Refresh 주기(tREFI) 변화에 따른 영향



- Refresh 주기(tREFI)는 온도에 따라 최대 DDR5 x1/2배, LPDDR6 x1/8배
- x1/2 이상 평균 6.7%, x1/4 7.7%, x1/8 10.9% 수준 성능 감소

→ Refresh 빈도수 증가에 따른 성능 영향 심화

- 경미하지만 꾸준한 성능 저하 경향 관찰

→ 메모리 접근 기회 감소와 뱅크 블로킹 현상 누적이 원인으로 추정

4. 결론

- PRAC는 row별 활성화 횟수 기반으로 정확도가 높아져 보안이 강화되나, 타이밍 지연, 리프레시 간섭 등으로 성능 저하 발생 가능성 있음
- 이번 실험 통해, 임계값 128 이상에서는 성능 감소가 제한적
→ 실제 시스템에서 충분히 수용 가능한 수준으로 판단
- PRAC는 비교적 적은 성능 감소로 기존 대비 높은 보안 효과 제공
시스템이 보안 요구 수준과 성능 목표에 따라 필요시에만 PRAC 적용 가능(유연성 제공)



Q & A