

# 성능 모니터링 카운터를 활용한 AMD Opteron 서버에서의 실시간 전력 및 발열 모델

이영호<sup>1)</sup> 김주성 김지홍  
서울대학교 컴퓨터공학과

## Online Power/Thermal Model for AMD Opteron Processors using Performance Monitoring Counters

Young-Ho Lee Joosung Kim Jihong Kim  
School of Computer Science & Engineering, Seoul National University

### 요 약

임베디드 시스템에서 고성능 시스템에 이르기까지 다양한 시스템에서의 전력 감소는 중요한 이슈가 되어 왔으며, 최근에는 멀티프로세서를 채택하는 비율이 높아짐에 따라 전력 뿐만 아니라 발열 문제가 중요해지고 있다. 실시간 전력 소모를 모니터링 하기 위해서는 전력 소모를 측정할 수 있는 특별한 하드웨어의 도움이 필요한데, 이는 비용 및 시간적 제약이 있다는 문제가 있다. 본 논문에서는 성능 모니터링 카운터 (Performance Monitoring Counter: PMC)를 활용한 AMD Opteron 서버에서의 실시간 전력 및 온도 예측 모델을 제안한다. 제안하는 모델은 PMC로부터 실시간 전력을 예측하고, 예측된 전력 값으로부터 실시간 온도를 예측한다. 또한 마이크로 벤치마크를 활용하여 제안한 전력 및 온도 예측 모델의 효용성을 검증한다.

**Keywords:** AMD Opteron, PMC, Power Model, Thermal Model

### 1. 서 론

임베디드 시스템에서 고성능 시스템에 이르기까지 전력 감소는 중요한 이슈가 되어 왔으며, 최근에는 멀티코어 프로세서를 채택하는 비율이 높아짐에 따라 전력 뿐만 아니라 발열 문제도 중요해지고 있다. 전력 및 발열 문제는 시스템의 안정성, 타이밍 문제 등에 악영향을 미칠 수 있다. 특히 전력 소모가 증가하면 프로세서의 온도가 증가하고, 이는 다시 시스템의 누설 전력(leakage power)을 증가<sup>2)</sup>시켜 추가적인 전력 소모를 야기한다는 문제가 있다. 따라서 전력 및 발열 문제를 해결하기 위해서는 전력 소모와 발열 문제를 동시에 고려해야만 한다.

전력 및 발열 최적화를 위한 다양한 연구가 있어 왔으며, 아키텍처 수준에서의 다양한 전력 및 발열 최적화 기법 (e.g., DVFS, power gating, clock gating 등)이 존재한다. 그러나 전력 및 발열량 최적화를 위해서는 먼저 운영체제 수준에서의 전력 및 발열 예측이 중요하다. 만약 운영체제가 현재 프로세서에서 소모하는 전력 소모를 예측할 수 있다면 운영체제는 운영체제 수준 및 아키텍처 수준에서의 다양한 전력 및 발열 최적화를 수행할 수 있다. 예를 들면, 전력 소모가 많은 프로세스의 스케줄을 지연시키거나, 특정 코어의 온도를 줄이기 위해 해당 코어에서 동작하는 프로세스를 다른 코어로 이주(migration)하는 등의 운영체제 수준에서의 최적화 기법을 사용할 수 있다. 또는 DVFS, power gating 등의 아키텍처 수준 최적화 기법을 사용하여 전력 및 발열 소모를 줄일 수 있다.

1) buriburi205@davinci.snu.ac.kr

2) 일반적으로 프로세서의 누설 전력은 온도의 제곱에 비례한다고 알려져 있다.

본 논문에서는 성능 모니터링 카운터 (Performance Monitoring Counter: PMC)를 활용한 AMD Opteron 서버에서의 실시간 전력 및 온도 예측 모델을 제안한다. PMC 기반의 전력 모델 [1][4][10]에 대한 다양한 연구가 있어 왔으나, 발열량에 의한 누설 전력을 고려하지 않았다는 단점이 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 모델은 PMC로부터 실시간 전력을 예측할 때 발열량을 고려하기 때문에 정확도가 더 높다는 장점이 있다. 또한 제안하는 발열 모델은 전력 모델로부터 실시간 온도를 추론한다. 제안한 전력 모델은 microbenchmark를 활용한 검증 결과 평균 3% 내의 오차율을 보였으며, 온도 예측 모델 역시 실측 온도 값과 매우 유사한 경향을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 AMD Opteron 기반의 타겟 시스템에 대해 설명한다. 3장에서는 실시간 전력 및 발열 모델에 대해 설명하고, 4장에서는 제안한 전력 및 발열 모델의 정확도를 검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 환경

그림 1은 본 논문에서 대상으로 하는 AMD Quad-Core Opteron 2376 프로세서를 나타낸다.

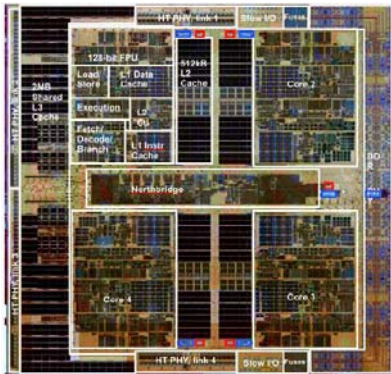


그림 1. AMD Opteron 프로세서

128KB 크기의 private L1 캐시 메모리(명령어, 데이터 별도), 256KB 크기의 private L2 캐시 메모리, 512KB 크기의 shared L3 캐시 메모리로 구성되어 있다. 또한 AMD Opteron 프로세서는 4 단계의 frequency 레벨(2.3GHz, 1.6GHz, 1.1GHz, 0.8GHz)을 지원 하며, 프로세서 코어 별로 frequency 레벨을

독립적으로 변경할 수 있다. 또한 약 50개 정도의 PMC 이벤트를 제공하며, 동시에 4개의 PMC 이벤트를 측정할 수 있다.

## III. 실시간 전력 및 발열 모델

본 장에서는 PMC 기반의 전력 및 발열 모델에 대해 설명한다. 먼저 온도에 의한 누설 전력을 고려한 PMC 기반의 전력 모델에 대해 설명하고, 제안한 전력 모델을 바탕으로 한 발열 모델에 대해 기술한다.

### 4.1 PMU 기반 전력 모델

#### 4.1.1 PMC 이벤트 설정

PMC 기반 전력 모델에서는 대상 프로세서에서 지원하는 PMC 이벤트 중 전력 소모와의 상관관계 (correlation)가 가장 높은 이벤트들을 선정하고, 전력 소모와의 상관관계에 따라 가중치를 서로 다르게 정의한다. 본 논문에서는 PMC 기반 전력 모델 중 AMD Phenom 프로세서를 대상 프로세서로 한 기존 기법[1]에서 활용한 PMC 이벤트를 대상 이벤트로 정의한다. [1]에서는 PMC 이벤트를 선정하기 위해 각 컴포넌트 별로 가장 가중치가 높은 4개의 PMC 이벤트를 선정하였다:

- L2\_CACHE\_MISS:ALL
- RETIRED\_UOPS:ALL
- RETIRED\_MMX\_AND\_FP\_INSTRUCTION:ALL
- DISPATCH\_STALLS

#### 4.1.2 마이크로 벤치마크 구성

응용 프로그램의 특성에 따라 PMC 값이 서로 다르고, 전력 소모 경향도 달라지게 된다. 따라서 다양한 실행 경향을 갖는 응용 프로그램에 대한 PMC 값과 전력 실측 값의 조합이 필요하다. 본 논문에서는 위에서 정의한 PMC 이벤트에 대해 다양한 조합을 얻기 위해 실행 경향이 다른 500여개의 마이크로 벤치마크를 구성하였다. 마이크로 벤치마크는 실행 후 4개의 쓰레드(thread)를 생성하며, 각 쓰레드는 동일한 루틴을 수행한다. 각 루틴은 다양한 형태의 반복문, 배열 접근, 계산, 분기문 등으로 구성된다.

#### 4.1.3 전력 모델 생성

제안하는 전력 모델에서, 시간  $t$ 에서의 프로세서 코어 별 소모 전력은 그림 2와 같이 나타낸다.

$$P(t) = a_1FP + a_2L2MISS + a_3INST + a_4STALLS + a_5T(t) + a_6$$

그림 2. 제안하는 전력 모델

그림 2에서 FP, L2MISS, INST, STALLS는 본 논문에서 정의한 PMC 이벤트에 대한 초당 측정 값을 나타낸다. 온도에 의한 누설 전력을 반영하기 위해 현재 온도를 식 내에 추가하였다.  $a_1 \sim a_6$ 은 각 PMC 이벤트 및 온도에 대한 가중치를 나타낸다.

#### 4.1.3 벤치마크 수행 및 가중치 결정

정확한 전력 모델을 위해서는 모델에서 정의한 가중치  $a_1 \sim a_6$ 를 올바르게 결정해야 한다. 본 논문에서는 약 500개 정도의 마이크로 벤치마크로부터 PMC, 온도, 전력 값을 얻고, 이로부터 회귀분석을 적용하여 가중치 값을 예측하였다.

#### 4.2 발열 모델

일반적으로 프로세서의 발열량은 이전 온도와 현재까지 소모한 에너지와의 관계로 나타낼 수 있다. 그림 3은 제안하는 발열 모델을 나타낸다.

$$T(t) = a_1E(t - 1, t) + a_2T(t - 1)$$

그림 3. 제안하는 발열 모델

그림 3에서  $E(t - 1, t)$ 는 시간  $t-1$ 부터  $t$ 까지 소모된 에너지를 나타내며,  $a_1, a_2$ 는 가중치를 나타낸다.

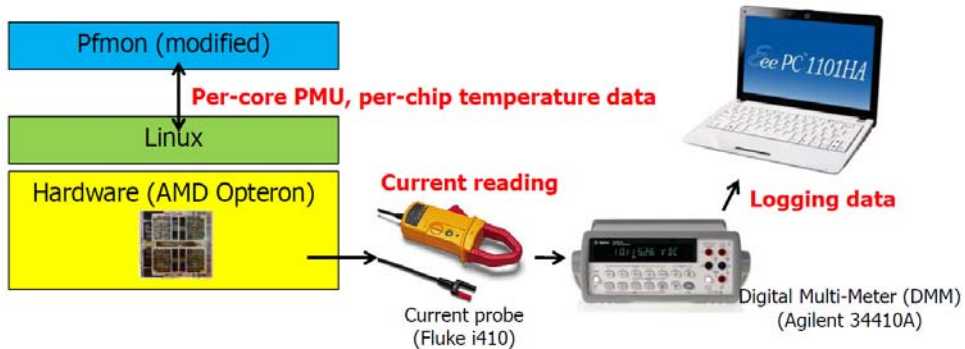


그림 4. 전력 및 발열 실측 환경

발열 모델 역시 가중치를 결정하기 위해 위에서 정의한 500개의 마이크로 벤치마크로부터 회귀분석을 수행하였다.

### IV. 실험 결과

#### 5.1 전력 및 발열 측정 환경

그림 4는 전력 및 발열 실측을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 구성을 나타낸다. 먼저 대상 운영체제는 리눅스 2.4.18 버전으로, PMC 측정을 위해 perfmon2[9] 패치된 커널을 사용하였다. PMC 측정은 응용 프로그램 수준에서 이루어지며, 본 논문에서는 PMC 측정을 위해 수정된 버전의 perfmon2 응용 프로그램을 사용하였다. 주 수정 사항은 PMC 측정 시 PMC 값 뿐만 아니라 응용 프로그램 시작 전/후 온도를 출력하도록 한 것으로, 회귀분석 데이터를 용이하게 얻기 위한 목적이다.

전력 실측 과정은 다음과 같다. 먼저 타겟 시스템 내의 마더보드(motherboard)에 연결된 전력 선 중 프로세서에 직접 공급되는 CPU 전력 선을 전류 측정기로 측정하고, 이를 digital multi-meter (DMM)로 전송한다. DMM은 이를 로깅 PC로 전송하여 프로세서 전력 실측 값을 트레이스 파일(trace file) 형태로 기록한다. 실험에 사용한 전류 측정기는 Fluke i410를, digital multi-meter는 Agilent 사의 34410A를 사용하였다.

#### 5.2 AMD Optreron 서버의 전력 및 발열 모델

4.1 절에서 제안한 전력 및 발열 모델에 대해, 마이크로 벤치마크를 사용한 선형 회귀분석을 수행하였

다. 선형 회귀분석을 통해 얻어진 전력 및 발열 모델의 가중치는 각 표 1, 표 2와 같다.

가중치	값
a1	3.634
a2	-8.604
a3	1.957
a4	8.342
a5	0.288
a6	29.527

표 1. AMD Opteron 프로세서 전력 모델 가중치

가중치	값
a1	$8.03 \times 10^{-5}$
a2	0.577

표 2. AMD Opteron 프로세서 발열 모델 가중치

### 5.3 전력 및 발열 모델 검증 결과

전력 모델의 경우, 모델 생성에 사용한 500개의 마이크로 벤치마크를 제외한 100개의 추가 마이크로 벤치마크에 대해 평균 소모 전력을 검증한 결과, 최대 10%, 평균 3% 이내의 오차를 보였다. 그림 5는 전력 모델 검증 결과를 나타낸다. 그림 5에서 x축은 벤치마크 번호를, y축은 평균 소모 전력(단위:W)를 나타내며, 제안한 기법이 매우 적은 오차로 전력 예측이 가능함을 보인다.

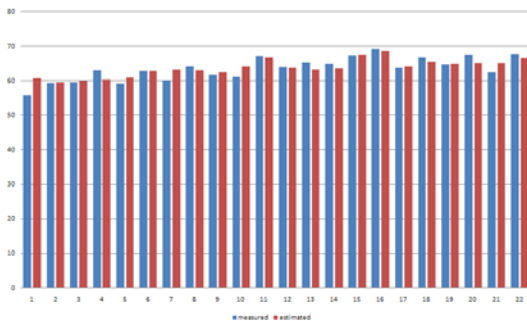


그림 5. 전력 모델 검증 결과

발열 모델의 경우, 전력 모델과 마찬가지로 모델 생성에 필요한 500개의 벤치마크를 제외한 50개의 추가 마이크로 벤치마크를 연속적으로 수행한 후 실측 온도 변화와 발열 모델을 통해 얻어진 온도 변화를 비교하였다. 그림 6은 발열 모델 검증 결과를 나타낸다.

그림 6에서 x축은 벤치마크 번호를 y축은 섭씨 온도를 나타낸다. 각 벤치마크의 실행 경향이 서로 다르에도 불구하고, 제안한 모델을 통해 발열량을 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

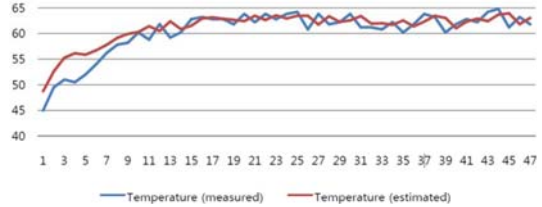


그림 6. 발열 모델 검증 결과

### V. 관련 연구

전력 및 발열 예측 모델과 관련된 다양한 연구가 있었다. 먼저 전력 예측 모델은 분석 모델(Analytic model) 기반과 실험 모델(empirical model) 기반 [1][4][10]의 연구로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 실험 모델 기반 기법 중 PMC를 활용한 기존 연구에 대해 살펴본다. Contreras[4] 등은 XScale 프로세서에서 제공하는 다양한 frequency에 대한 전력 모델을 제안했으며, Merkel[10] 등은 8-way 멀티프로세서 상에서 프로세서 별 전력 소모를 예측하기 위해 PMC를 활용하였다. 또한 Karan Singh[1] 등은 AMD Phenom 프로세서를 위한 PMC 기반의 전력 모델을 제안하였다. 위의 기존 연구 모두 전력 소모와 관련이 깊은 PMC 이벤트를 결정하고, 회귀분석 기반의 모델을 사용하였으나 온도에 의한 영향을 고려하지 않아 온도 변화가 많거나 무거운(heavy) 응용 프로그램의 전력은 정확하게 예측할 수 없다는 단점이 있다. 반면 본 논문에서는 온도에 의한 누설 전력을 고려함으로써 정확한 전력 소모 예측이 가능하였다. 발열 모델은 크게 RC-modeling 기반 발열 모델 [7][8][3]과 전력 소모를 바탕으로 한 발열 모델 [1][2]로 나뉘는데, RC-modeling 기반 발열 모델의 경우, 정확도가 매우 높은 반면 온도 예측을 위한 계산 복잡도가 너무 높아 실시간 발열 예측에는 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 전력 소모를 바탕으로 한 발열 모델을 사용함으로써 운영체제 등에서 전력 및 발열 최적화를 위해 실시간 온도 예측을 가능하게 한다는 장점이 있다.

## VI. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 고성능 멀티코어 프로세서 중 하나인 AMD Opteron 프로세서를 위한 전력 및 발열 모델을 제안하였다. 제안하는 모델은 PMC를 활용한 전력 예측 모델을 바탕으로 하되, 기존 연구와는 달리 온도 변화에 대한 누설 전력을 고려함으로써 정확한 전력 및 온도 예측이 가능하였다. 마이크로 벤치마크를 활용한 검증 결과, 제안한 전력 모델의 경우 평균 3% 이내의 오차율을 보였으며, 발열 모델의 경우 실제 응용 프로그램 수행에 따른 온도 변화를 정확하게 예측할 수 있었다. 제안한 모델은 향후 운영체제 수준에서의 전력 및 발열량 최적화 기법에 활용될 수 있다.

### 감사의 글

이 연구를 위해 연구 장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터 연구소에 감사드립니다. 이 논문은 2009년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R0A-2007-000-20116-0, R33-2008-000-10095-0)입니다.

### 참고 문헌

- [1.] K. Singh et al., Real Time Power Estimation and Thread Scheduling via Performance Counters, ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2009
- [2.] Yefu Wang et al., Temperature-Constrained Power Control for Chip Multiprocessors with Online Model Estimation, ISCA, 2009
- [3.] Thermal-Aware Global Real-Time Scheduling on Multicore Systems, RTAS, 2009
- [4.] G. Contreras et al., Power prediction for intel xscale processors using performance monitoring unit events, ISLPED, 2005
- [5.] C. Isci et al., An analysis of efficient multi-core global power management policies: Maximizing performance for a given power budget, MICRO, 2006
- [6.] C. Isci et al., Runtime power monitoring in high-end processors: Methodology and empirical data, MICRO, 2003
- [7.] K. Skadron et al., Control-theoretic techniques and

thermal-RC modeling for accurate and localized dynamic thermal management, HPCA, 2002

- [8.] K. Skadron et al., Temperature-aware microarchitecture: Modeling and implementation, ACM TACO, 2004
- [9.] Perfmon2, <http://perfmon2.sourceforge.net/>
- [10.] A. Merkel et al., Balancing power consumption in multiprocessor systems, EuroSys, 2006