

# 고성능 프로세서에서의 냉각 기법의 효율성 분석

최홍준, 안진우, 김철홍  
전남대학교 전자컴퓨터공학부

mai3832@nate.com, yadowman@naver.com, chkim22@chonnam.ac.kr

## Analysis of the Impact of Cooling Methods in High-Performance Processors

Hong Jun Choi, Jin Woo Ahn, Cheol Hong Kim  
School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University

### 요 약

최근에는 반도체 공정 기술의 발달로 인하여 프로세서의 성능은 급속도로 발전하였다. 하지만 프로세서에서 소모되는 전력이 급속도로 증가하고, 이에 따라 발생된 높은 온도는 프로세서 신뢰성에 부정적인 영향을 미치고 있다. 그러므로 최근의 프로세서 설계 시 전력, 온도등도 성능과 함께 중요한 고려사항이다. 프로세서의 신뢰성에 치명적인 영향을 미치는 고온현상을 해결하기 위해서 여러 가지 연구가 이루어지고 있다. 대표적으로 방열 판, 냉각 팬 등을 이용한 기계적인 기법과 동적 온도 관리 기법, 연산 이관 기법 등을 적용한 구조적인 기법이 활발하게 연구되고 있다. 이러한 기법들의 적용으로 프로세서의 온도를 효과적으로 제어할 수 있게 되었으나 기계적인 냉각 기법은 냉각 효율성이 높지 않다는 단점이 존재하고, 구조적 설계 기법을 통한 냉각기법은 온도를 제어하기 위해 프로세서의 성능을 저하시키는 치명적인 단점이 존재하기 때문에 두 기법 모두 더 많은 연구가 필요하다. 최근의 프로세서 온도 제어 연구의 초점은 부가적인 장치들 통해 프로세서 내에서 발생된 온도를 제어하는 기계적인 냉각 기법에서 프로세서 내에서 발생하는 온도를 효과적으로 제어하여 프로세서의 신뢰성과 냉각 비용을 절감할 수 있는 구조적 설계 기법으로 이동하고 있다. 본 논문에서는 연구의 초점이 이동하는 원인에 대해 분석하고자 고성능 프로세서에서의 기계적 냉각 기법의 냉각 효율성을 분석하고자 한다. 실험 결과, 온도를 제어하는 데 있어서 매우 높은 비용(1°C 감소 당 최대 3.58W, 평균 3.36W)이 소모되는 것으로 나타났다. 향후에는 구조적인 설계 기법의 냉각 효율성을 분석하는 실험을 진행하고자 한다.

## 1. 서 론

칩 공정 기술 발달로 인하여 프로세서의 성능은 크게 향상되었다. 하지만, 프로세서의 성능 향상에 의한 전력 소모가 크게 증가하면서 배터리 수명이 짧아지게 되었다. 또한, 단위 면적당 소모되는 전력량의 증가로 인해 프로세서 내에서 고온(열섬: Hotspot) 현상이 새로운 문제점으로 부각되고 있다[1]. 이러한 프로세서내의 열섬 현상은 고온으로 인한 프로세서의 회로 손상과 그에 따른 오작동 문제를 발생시키게 되고, 이는 프로세서의 신뢰성에 치명적인 영향을 미치게 된다[2]. 국제 반도체 기술 로드맵(ITRS : International Technology Roadmap for Semiconductors)에서는 반도체 공정이 0.13um 이하에서는 칩의 최고 적합 온도(maximum junction temperature)가 90도보다 낮아야 한다고 발표하였다[3]. 이러한 사항들을 고려해 볼 때, 최신의 프로세서를 설계 할 시 발열문제는 성능, 전력과 더불어 반드시 고려되어야 한다. 전통적으로 프로세서 내의 온도를 유지하기 위해서 기계적 냉각기법을 사용한다. 기계적 냉각 기법으로는 방열 판(Heat Sink), 냉각 팬(Cooling Fan), 액체(Liquid) 등을 이용하는 기법이 있다. 기계적 냉각 기법은 성능의 저하 없이 온도를 제어 할 수 있지만 냉각 효율과 비용적인 측면에서 한계를 지니고 있다. 실제 개인용 컴퓨터 시장

에서 가장 많이 사용되는 기계적 냉각 기법인 냉각 팬의 경우, 오랜 시간 작동시킬 경우 컴퓨터 내부의 먼지에 의하여 냉각 팬의 효율이 떨어진다. 특히 복잡하고 많은 양의 데이터(또는 중요한 데이터)를 처리하는데 사용하는 고성능 프로세서에 기계적인 냉각 기법을 적용하였을 시 냉각기의 문제점이 발생할 경우, 고온으로 인해 심각한 문제가 발생할 수 있다.

이러한 비용과 효율, 그리고 신뢰성 등에 따른 문제점들에 의해 최신의 온도 제어 연구의 초점은 발생된 온도를 제어하는 기계적 냉각 기법을 통한 기법이 아닌 프로세서 내에서 발생하는 온도 자체를 감소하는 프로세서의 구조적인 설계 기법으로 이동하고 있다. 최신의 고성능 프로세서에서는 발열 문제를 해결하기 위해 사용되는 구조적인 설계 기법 중 대표적인 동적 온도 관리(DTM; Dynamic Thermal Management)기법[4]이 존재한다. 동적 온도 관리 기법은 전압이나 주파수를 조절 하여 프로세서의 온도를 제어 하는 가변 전압 주파수 조절(DVFS; Dynamic Voltage and Frequency Scaling)이나 명령어 인출을 지연시키거나 멈추는 기법을 사용해서 온도를 제어하는 인출 지연(Fetch Throttling) 기법을 통해 구현 되고 있다[5]. 동적 온도 관리 기법은 발생하는 온도 자체를 낮추기 때문에 냉각 비용을 감소시킬겸 동시에 프로세서의 신뢰성을 높이는 장점이 있다. 하지만 온도를 제어하기 위해서 프로세서의 성능을 희생한다는 단점이 존재한다. 가변 주파수 조절 기법은 2~3%, 가변

전압 주파수 조절 기법은 6~9%, 인출 조절 기법은 8% 정도의 성능이 하락한다고 한다[6]. 또 다른 구조적인 기법은 높은 온도가 발생하는 유닛을 중복하여 보조 유닛을 추가하는 것이다. 이를 보조 유닛을 통해 주 유닛의 사용률을 낮춤으로써 특정 유닛의 발열을 감소시키는 연산 이관(Computation Migrating) 기법[8]이라고 한다. 연산 이관 기법에는 유닛의 온도를 기준으로 동작할 유닛을 선택하는 기법을 사용하므로 프로세서의 온도가 높은 경향을 가질수록 연산 이관이 발생하는 빈도가 높아져 성능의 저하가 상당히 발생하고, 온도가 낮은 경우 프로세서의 연산 이관 발생 빈도가 낮아져 성능의 저하가 거의 발생하지 않는다. 결과적으로 높은 온도를 제어하기 위한 구조적 기법은 성능을 저하시키기 때문에 이를 충분히 고려해야 한다.

본 논문에서는 이러한 성능 저하를 감수하고도 기계적 냉각 기법보다 구조적 기법이 더 효과적이라는 최신의 연구의 신뢰성을 확인하여 추후에 진행하고자 하는 구조적 기법을 이용한 온도 제어 기법 연구의 당위성을 증명하고자 한다. 본 논문에서는 이를 위해, 성능의 저하가 없는 기계적 냉각 기법의 냉각 효율성을 분석하기 위해 기존의 대표적인 기계적 냉각 기법인 공냉식 기법(공냉식 쿨러)과 향상된 기계적 수냉식 기법(수냉식 쿨러)을 통해 냉각 효율성에 대해 실험을 통해 분석해 보았다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 비교할 2가지 종류의 기계식 냉각기법 기법인 공냉식 쿨러와 수냉식 쿨러에 대한 설명을 한다. 3장에서는 본 논문에서 수행한 실험의 환경을 설명하고 4장에서는 실험 결과를 상세하게 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문에서 수행한 실험에 대한 결론을 내리고 향후 연구방향에 대하여 기술한다.

## 2. 기계적 냉각 기법

기계적 냉각 기법은 프로세서의 발열 온도를 제어하기 위한 대표적인 기법이다. 기계적 냉각 기법은 프로세서 외부에 온도를 제어해주는 하드웨어를 구성하는 기법으로 프로세서의 온도를 제어한다. 프로세서의 성능이 발전함에 따라 높아진 온도를 제어하기 위한 기계적인 냉각 기법 역시 여러 기법들이 개발되었다. 그 중 기계적 냉각 기법 중 많이 사용되는 공냉식과 수냉식 쿨러에 대해서 설명한다.

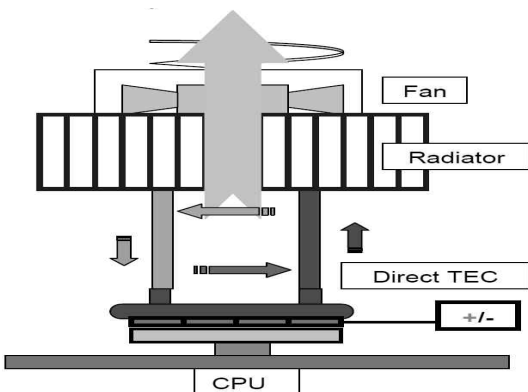


그림 1. 공냉식 쿨러

그림 1은 공기를 이용하여 프로세서를 냉각시키는 공냉식 쿨러의 동작 방식을 나타내고 있다. 공냉식 쿨러는 프로세서와 직접적으로 부착된 방열판과 냉각 팬이 부착된 라디에이터로 구성된다. 방열판과 라디에이터 사이에 연결된 히트 파이프라는 금속에서 프로세서로부터 올라오는 뜨거운 열을 전달시켜주는 역할을 한다. 프로세서로부터 올라온 열은 라디에이터에 부착된 냉각 팬이 공기로 냉각시켜 열을 떨어뜨린다.

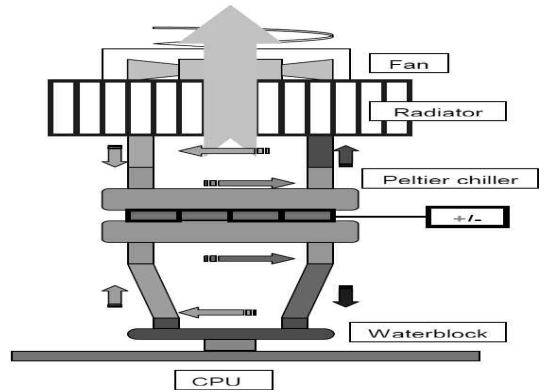


그림 2. 수냉식 쿨러

그림 2는 액체를 이용하여 프로세서를 냉각시키는 수냉식 쿨러의 동작 방식을 나타내고 있다. 수냉식 쿨러는 프로세서와 직접적으로 부착된 워터블록과 라디에이터로 구성된다. 워터블록은 금속재질의 속이 빈 방열판으로 그 내부는 라디에이터로부터 공급된 냉각수로 채워진다. 워터블록은 뜨거운 프로세서를 냉각수의 낮은 온도를 이용하여 온도를 낮추는 역할을 한다. 워터블록의 내부온도가 상승하지 않도록 라디에이터는 펌프를 작동시켜 냉각수를 다시 라디에이터로 돌아오게 한다. 즉 라디에이터의 펌프를 이용하여 프로세서에 부착된 워터블록으로 차가운 냉각수를 공급해주고, 뜨거운 액체를 다시 받아 들여 냉각시키는 기법의 순환작용을 하는 구조이다.

기계적인 냉각기법들은 냉각을 담당하는 기계적 구조물의 크기가 클수록 성능이 우수하다는 장점과 냉각 비용(Cooling cost)이 많이 든다는 공통점이 있다. 공냉식 쿨러의 경우는 방열판의 크기와 냉각 팬의 회전이 빠를수록 온도제어 능력은 우수하나, 전력 소모량이 증가하고 소음이 많이 발생한다는 단점이 존재한다. 수냉식 쿨러의 경우 라디에이터에 부착된 냉각 팬의 개수와 라디에이터에 설치된 기계적 장비의 성능이 우수할수록 온도제어 능력이 뛰어나나 공냉식 쿨러와 마찬가지로 컴퓨터의 전체적인 전력 소모량과 소음이 증가하는 단점이 있다.

## 3. 실험 방법

본 논문에서는 앞서 설명한 기계적 냉각기법들을 일반 프로세서와 고성능 프로세서에 적용시켰을 시 컴퓨터에서 소모하는 실시간 전력과 프로세서에서 발생하는 온도를 측정하기 위하여 인스펙터(Inspector)[9]와 HWMonitor[10]를 사용하였다.

실험에서 사용된 인스펙터는 컴퓨터의 실시간 소모 전력 측정을 위해 사용되었다. HWMonitor는 프로세서의 코어 개수에 따라서 각 코어의 개수만큼 실시간 온도, 최고온도, 최저온도를 모두 측정할 수 있다.

표 1. 모의 실험 시 시스템 구성 변수

운영체제	MICROSOFT WINDOWS7
공냉식 쿨러	INTEL REFERENCE COOLER
수냉식 쿨러	KOOLANCE EXOS-2.5
CPU	INTEL QUAD CORE
주파수	기본-2.5GHz/ 고성능-2.96GHz
냉각 기법	공냉식-없음, 수냉식-3단계

실험 시 설정한 실험환경은 표 1에 보이는 바와 같이, 운영체제는 MICROSOFT WINDOWS7, CPU는 INTEL QUAD CORE를 사용하였다. 그리고 2.5GHz의 주파수를 사용하는 프로세서를 일반프로세서로 나타내며, 고성능 프로세서는 2.96GHz를 사용한 프로세서라고 가정하고 실험하였다. 냉각 기법은 공냉식 기법과 수냉식 기법을 사용하였으며, 수냉식 기법은 세기에 따라 3단계로 나뉘어져있다. 공냉식 쿨러는 INTEL REFERENCE COOLER, 수냉식 쿨러는 KOOLANCE EXOS-2.5를 사용하였다.

#### 4. 실험 결과

실험에서는 기존의 프로세서와 고성능 프로세서에 기계적 냉각 기법을 적용하였을 시 발생하는 온도와 전력 소모를 측정하기 위하여 프로세서에 수행될 어플리케이션을 설정하였다. 어플리케이션의 종류는 booting30, booting60, MP3, 동영상, 게임 등이 있다. booting30,60은 운영체제가 실행된 상태에서 30분, 60분 동안 어떠한 작업도 하지 않은 상태이다. MP3, 동영상, 게임 등은 booting30을 선행한 뒤 각 해당 어플리케이션을 30분간 수행한 상태이다. 3가지 어플리케이션을 실행시켰을 시 나타난 CPU의 점유율을 보면 MP3의 경우 20퍼센트의 점유율을 기록하였고, 동영상의 경우는 43퍼센트의 점유율을 기록하였다. 그리고 가장 고성능을 요구하는 게임의 경우 80퍼센트의 CPU 점유율을 기록하였다. 이에 따라 본 논문의 그림에서는 booting30은 대기상태30, booting60은 대기상태60, MP3는 저용량 어플리케이션, 동영상은 일반용량 어플리케이션으로 표현한다. 그리고 게임은 고용량 어플리케이션으로 표현하기로 한다. 논문에서 사용하는 전력 값은 컴퓨터 본체에서 소모하는 실시간 전력 값을 측정한 것으로 일반프로세서의 대기상태60의 값을 기준으로 정규화 한 것으로 단위는 와트(Watt)를 사용한다. 본 실험에서는 표1에서 보이다시피 4개의 코어를 사용했지만 온도 측정 시 프로세서의 4개의 코어 중 코어1과 코어2는 어플리케이션에 따른 실시간 온도 변화가 민감하게 반응한 반면, 코어3과 코어4의 경우 온도 변화가 거의 없었다. 그러므로 본 논문에서는 코어1과 코어2의 최고 발열 온도만을 사용하기로

한다.

#### 4.1 프로세서 성능에 따른 소모전력 및 발열온도

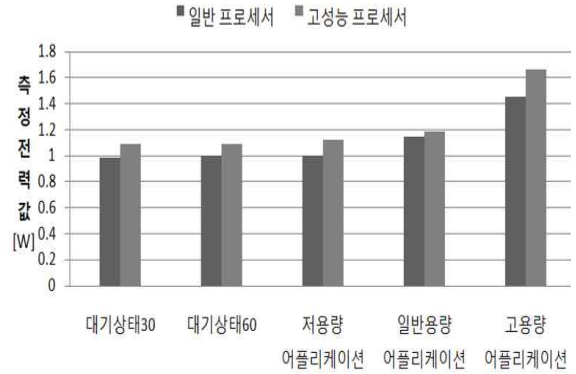


그림 3. 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서의 실시간 소모전력

그림 3은 일반 프로세서와 고성능 프로세서간의 실시간 소모 전력을 어플리케이션 별로 비교한 것이다. 대기상태60의 경우 대기상태30과 같이 아무 작업량이 없지만, 실시간 소모 전력이 소폭(1.85%) 상승되었다. 이는 컴퓨터를 사용하지 않더라도 소모되는 전력으로 인해 발생한 온도를 제어하기 위해서 소모전력이 증가한 것으로 분석된다. 그 외의 어플리케이션에서의 실시간 소모 전력은 CPU의 점유율이 높은 어플리케이션의 순으로 나타났다. 이는 많은 양의 데이터를 처리하기 위해서 전력 소모량(저용량 어플리케이션 2.31%, 일반용량 어플리케이션 16.98%, 고용량 어플리케이션 47.99%)이 증가함을 알 수 있다. 또한, 모든 경우 일반 프로세서 보다 고성능 프로세서에서의 전력 소모량(평균 9.63%)이 높은 값을 보이고 있다. 이는 고성능의 프로세서가 빠르게 일을 처리하기 위해 높은 주파수를 사용하게 되며, 이에 따라 소모되는 전력이 증가한 것으로 분석된다.

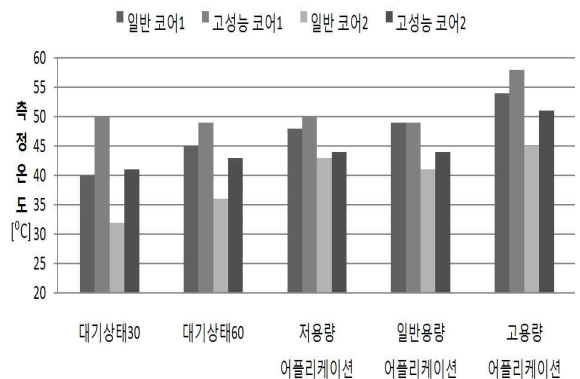


그림 4. 일반 프로세서와 고성능 프로세서의 온도

그림 4는 일반 프로세서와 고성능 프로세서의 실시간 발열 온도이다. 그림 4에서 온도 값은 대기상태60이 대기상태30보다

높고, 고성능 프로세서가 일반 프로세서보다 높은 경향을 보여 준다. 또한, 어플리케이션은 CPU 점유율이 높은 순으로 온도가 높게 발생하고 있다. 모든 일(Task)는 일단 코어1부터 할당되는 시스템의 특성 때문에 코어1이 코어2보다 높은 온도가 발생하는 결과를 보여주고 있다.

그림 4는 그림 3과 완전히 동일한 패턴으로 나타난다. 그러므로 전력소모가 온도에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 냉각기법에 따른 전력소모 및 발열온도

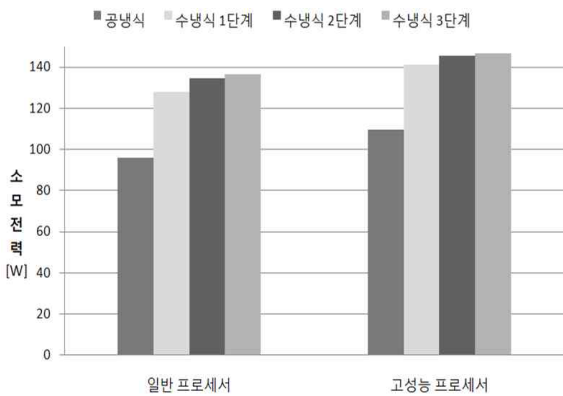


그림 5. 냉각 기법에 따른 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서의 실시간 전력소모

그림 5는 고용량 어플리케이션을 수행하였을 시 냉각 기법에 따라 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서 실시간으로 소모하는 전력을 나타낸다. 일반 프로세서와 고성능 프로세서 모두에서 공냉식 쿨러를 적용한 경우보다 수냉식 쿨러를 적용한 경우 소모되는 전력을 많이 소모한다. 공냉식과 비교 시 평균적으로 수냉식 1단계의 경우 31.08%, 2단계의 경우 36.38% 그리고 3단계의 경우 37.96%의 전력을 더 소모한다. 또한 같은 냉각기법을 사용하는 경우 일반 프로세서보다 고성능 프로세서가 더 많은 전력(최대 10.39%, 평균 8.78%)을 소모하고 있다.

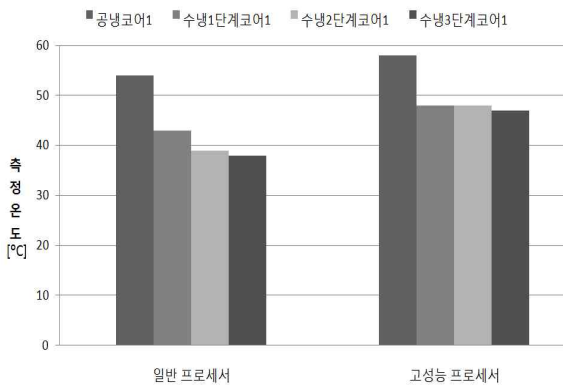


그림 6. 냉각 기법에 따른 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서의 온도

그림 6은 고용량 어플리케이션을 냉각 방식에 따라 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서 수행시켰을 경우 발생하는 온도를 나타낸다. 일반 프로세서와 고성능 프로세서 모두 공냉식 쿨러를 적용한 경우보다 수냉식 쿨러를 적용한 경우 온도가 많이 감소함을 보여주고 있다. 수냉식 쿨러를 적용한 경우 공냉식 쿨러와 비교해 보았을 시, 평균적으로 1단계는 10.5℃, 2단계는 12.5℃ 그리고 3단계는 13.5℃의 온도가 감소하였다.

또한 일반 프로세서보다 고성능 프로세서의 경우 같은 냉각기법을 사용하는 경우(최대 11℃, 평균 10.3℃)의 온도를 더 감소시켰다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서 기계적 기법(공냉식 쿨러, 수냉식 쿨러)을 적용시켰을 시 컴퓨터의 실시간 소모 전력과 프로세서의 발열 온도를 비교 분석하여 기계적 냉각 기법의 효율성을 분석하였다.

실험결과, 고성능 프로세서의 높은 발열 온도를 제어하기 위한 기계적인 냉각 기법으로 향상된 냉각기법(수냉식 쿨러)이 온도제어 측면에서는 우수한 성능을 발휘하지만 기존의 냉각기법(공냉식 쿨러)을 적용한 경우보다 온도(평균 10.3℃ 감소)는 효과적으로 제어했지만 냉각 비용(1℃ 감소 당 3.36W)이 많이 증가했다는 사실을 확인할 수 있었다. 그러므로 기술의 발달의 따라 점점 높아져가는 온도를 제어하기에는 기계적 냉각 기법으로는 한계가 존재 한다. 추후 프로세서의 온도를 제어하기 위해서는 기계적 기법보다는 구조적 기법을 통해 발생하는 온도 자체를 줄이기 위한 연구 방안이 더욱 효과적으로 분석된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2009-0068087)과 지식 경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT연구센터의 지원으로(NIPA-2010-C1090-1011-0008) 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] 이병석, 김철홍, 이정아, "온도인지 마이크로 프로세서에서 동적 연산 이관을 위한 유닛선택 기법에 관한 비교분석," 한국컴퓨터종합학술대회 논문집 제36권, 제1호(A), pp. 328-329, 2009
- [2] L. Yeh and R. Chy, "Thermal Management of Microelectronic Equipment," American Society of Mechanical Engineering, 2001
- [3] SIA, "Technology Roadmap for Semiconductors," 2005
- [4] K. Sankaranarayanan, S. Velusamy, M. Stan, and K.

- Skadron, "A Case for Thermal-Aware Floorplanning at the Microarchitectural Level," *Instruction-Level Parallelism*, Vol. 8, pp. 1-16, 2005
- [5] 최진항, 공준호, 정의영, 정성우, "온도 인지 마이크로 프로세서를 위한 듀얼 레지스터 파일구조," *정보과학회 논문지, 시스템 및 이론 제 35권*, pp. 231-234, 2008
- [6] 최홍준, 양나라, 이정아, 김종면, 김철홍 "필터 캐쉬 저온도 유지를 위한 프로세서 설계 기법," *한국컴퓨터 정보학회논문지*, 2010
- [7] J. Kin, M. Gupta, W. Mangione-Smith, "The Filter Cache: An Energy Efficient Memory Structure," In *Proceedings of International Symposium on Microarchitecture*, pp. 184-193, 1997
- [8] H. Seongmoo, K. Barr, K. Asanovic, "Reducing power density through activity migration," in *Proceeding of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 217-222, 2003
- [9] Available at <http://www.x4-life.de>
- [10] Available at <http://www.cpuid.com>