

기계식 쿨링 기법에 따른 고성능 멀티코어 프로세서의 냉각 효율성 분석

강승구* 최홍준* 안진우* 박재형* 김종면** 김철홍*

Analysis on the Cooling Efficiency of High-Performance Multicore Processors according to Cooling Methods

Seung Gu Kang* Hong Jun Choi* JinWoo Ahn* JaeHyung Park* Jong-Myon Kim**
Cheol Hong Kim*

요약

사용자들의 높은 요구 사항을 만족시키는 컴퓨팅 시스템을 개발하기 위해 프로세서의 성능을 향상시키기 위한 연구는 지속적으로 진행되어 왔다. 공정 기술 발달을 비롯한 다양한 기술 발전을 통하여 프로세서의 성능은 비약적으로 발전하였으나 그 이면에는 새로운 문제들이 발생하게 되었다. 그 중에서, 최근 들어 주된 문제점 중 하나로 인식되고 있는 열섬 현상은 칩의 신뢰성에 심각한 영향을 미치기 때문에 프로세서 설계 시 성능, 전력 효율성과 함께 반드시 고려되어야 한다. 과거에는 기계적인 냉각 기법으로 프로세서의 온도를 효과적으로 제어할 수 있었지만, 최근에는 프로세서의 성능이 높아져 발생하는 온도가 높아 냉각 비용이 급속히 증가하고 있다. 이로 인해, 최근의 온도 제어 연구는 기계적인 냉각 기법보다는 구조적 기법을 통한 온도 제어에 더욱 집중되는 추세를 보이고 있다. 하지만, 구조적 기법을 통해 온도를 제어하는 방안은 프로세서의 온도를 낮추는 데에는 효율적이지만 이를 위해 성능을 희생한다는 단점이 존재한다. 따라서, 기계적 냉각 기법을 통해 프로세서의 온도를 효율적으로 제어할 수 있다면, 성능 저하가 발생하는 구조적 기법을 통한 온도 제어기법의 사용 빈도가 줄어 그 만큼 성능이 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 고성능 멀티코어 프로세서에서 발생하는 온도를 기계적인 냉각 기법이 얼마나 효율적으로 제어할 수 있는지를 상세하게 분석해 보고자 한다. 공랭식 냉각기와 수랭식 냉각기를 이용하여 다양한 실험을 수행한 결과, 공랭식 냉각기와 비교하여 수랭식 냉각기가 온도를 효과적으로 제어하는 반면에 전력 소모가 더

• 제1저자 : 강승구 • 교신저자 : 김철홍

• 투고일 : 2010.11.12, 심사일 : 2010.12.21, 게재확정일 : 2011.03.26.

* 전남대학교 전자컴퓨터공학부(School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)

** 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부(School of Computer Engineering and Information Technology, University of Ulsan)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터(NIPA-2011-C1090-1111-0008)의 지원과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. 2010-0008365)의 지원을 받아 수행되었음

많음을 확인할 수 있다. 특히, 1W의 전력을 통해 낮출 수 있는 온도를 분석해 보면 공랭식에 비해서 수랭식이 더 효율적임을 알 수 있으며, 수랭식 냉각기의 경우에는 냉각 단계가 냉각 효율은 오히려 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 실험 결과를 바탕으로 온도에 따라 적절하게 기계적 냉각 기법을 활용한다면 프로세서의 온도를 더욱 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

▶ Keyword : 고성능 프로세서, 열섬 현상, 기계적 냉각 기법, 냉각 비용, 냉각 효율성

Abstract

Many researchers have studied on the methods to improve the processor performance. However, high integrated semiconductor technology for improving the processor performance causes many problems such as battery life, high power density, hotspot, etc. Especially, as hotspot has critical impact on the reliability of chip, thermal problems should be considered together with performance and power consumption when designing high-performance processors. To alleviate the thermal problems of processors, there have been various researches. In the past, mechanical cooling methods have been used to control the temperature of processors. However, up-to-date microprocessors causes severe thermal problems, resulting in increased cooling cost. Therefore, recent studies have focused on architecture-level thermal-aware design techniques than mechanical cooling methods. Even though architecture-level thermal-aware design techniques are efficient for reducing the temperature of processors, they cause performance degradation inevitably. Therefore, if the mechanical cooling methods can manage the thermal problems of processors efficiently, the performance can be improved by reducing the performance degradation due to architecture-level thermal-aware design techniques such as dynamic thermal management. In this paper, we analyze the cooling efficiency of high-performance multicore processors according to mechanical cooling methods. According to our experiments using air cooler and liquid cooler, the liquid cooler consumes more power than the air cooler whereas it reduces the temperature more efficiently. Especially, the cost for reducing 1°C is varied by the environments. Therefore, if the mechanical cooling methods can be used appropriately, the temperature of high-performance processors can be managed more efficiently.

▶ Keyword : High-performance processor, Hotspot, Mechanical cooling method, Cooling cost, Cooling efficiency

1. 서 론

생활수준의 향상과 기술 발전에 힘입어 다양한 기능과 편리한 인터페이스를 가진 전자 기기들을 선호하는 경향이 점차 강해지고 있다. 컴퓨팅 시스템 연구자들은 이러한 사용자들의 요구를 만족시키기 위해 다양한 연구를 진행해왔다. 소프트웨어 측면에서는 다양한 기능을 가진 프로그램 개발과 편리한 사용자 인터페이스를 개발하는데 연구의 중점을 두었고 하드웨어 측면에서는 고사양의 소프트웨어의 원활한 구동을 위해

충분한 메모리 용량과 함께 실시간으로 사용자의 요구에 응답할 수 있는 빠른 성능을 제공하기 위한 연구가 중점적으로 이루어졌다.

현재 프로세서의 성능은 회로 수준에서의 연구와 구조적 수준에서의 연구를 바탕으로 과거와 비교하여 비약적으로 향상되었지만[1][2][3][4], 사용자들의 요구를 충분히 만족시키기 위해서는 성능은 여전히 매우 중요한 요소이며 이를 향상시키기 위한 연구는 지속적으로 이루어져야 한다.

공정 기술의 발달은 트랜지스터의 크기를 줄여주었고 그에 따라 프로세서의 성능이 크게 향상되는 긍정적인 발전을 가져온 반면, 전력 밀도 증가로 인해 발생된 열섬 현상(HotSpot)

이 프로세서의 신뢰성을 위협하는 문제점을 유발하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이, 공정 기술이 발전함에 따라 프로세서 내부의 전력 밀도(Power Density)는 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전력 밀도의 증가는 프로세서 내부의 온도가 크게 상승하는 열섬 현상을 유발하고, 이는 프로세서의 작동 오류를 유발하며, 회로의 변형을 발생시켜서 칩의 신뢰성(Reliability) 및 수명에 부정적인 영향을 미친다[7]. 그림 2에서 보이는 바와 같이 온도가 상승함에 따라서 전자 부품의 오류 발생률은 지수 적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 칩의 온도가 상승함에 따라서 칩의 수명이 짧아지게 되는데, 칩의 온도가 10~15℃ 상승하게 되면 칩의 수명이 절반으로 감소한다는 연구 결과가 발표된 바 있다[8]. 또한, 프로세서 내부의 온도 상승은 냉각 비용과 패키징 비용의 증가로 이어진다[9]. 따라서 프로세서 혹은 시스템의 온도를 낮추는 것은 컴퓨팅 시스템의 성능, 수명, 그리고 신뢰성을 높이기 위한 필수적인 요소로 대두되고 있다.

열섬 현상을 해결하기 위한 방안으로는 기계적인 냉각 기법[11][12]과 구조적 접근을 통한 온도 제어 기법[13][14] 등이 있다. 구조적 접근을 통한 온도 제어 기법 중 가장 널리 사용되는 동적 온도 제어 기법(DTM: Dynamic Thermal Management)은 가변 전압 주파수 조절(DVFS: Dynamic Voltage and Frequency Scaling)이나 인출 지연(Fetch Throttling) 기법 등을 통해 구현되고 있다[15][16][17]. 동적 온도 제어 기법을 포함한 구조적 접근을 통한 온도 제어 기법은 프로세서의 온도가 일정 이상 상승하게 되면 프로세서의 동작을 제한하여 온도의 상승 자체를 억제한다. 이처럼 프로세서에서 발생하는 열 자체를 억제하기 때문에 냉각 비용(Cooling Cost)을 낮출 수 있지만 이 기법을 사용하는 경우 프로세서의 동작 제한으로 인한 성능이 감소한다는 단점이 존재한다. 이에 반해, 기계적인 냉각 방식을 이용하는 경우에는 프로세서의 성능 저하 없이 온도를 낮출 수 있다. 하지만 기계적인 냉각 방식은 온도가 높아질수록 소요되는 냉각 비용이 급격히 증가하기 때문에 점차 사용이 제한되고 있다[18]. 이러한 상황에서 시스템의 소비 전력을 줄이기 위해서 냉각기의 열 저항(Thermal Resistance)을 조절해 프로세서의 온도를 최적화하고 이를 통해 총 전력 소비를 줄이는 등 냉각기를 효과적으로 이용할 수 있는 연구들이 진행되고 있다[19].

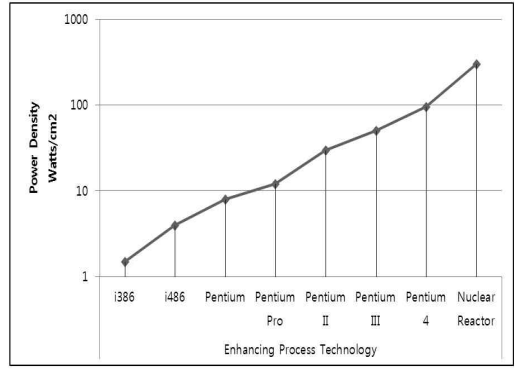


그림 1. 프로세서의 전력 밀도 증가 추세[5][6]
Fig. 1. Trends of the power density on processors

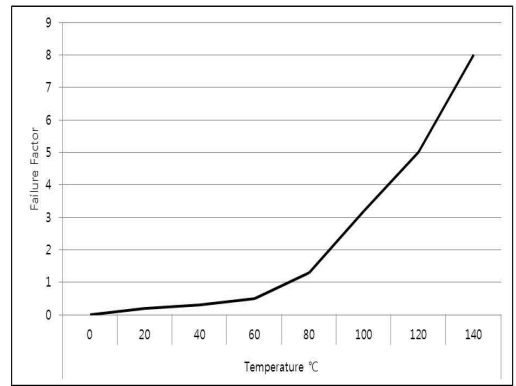


그림 2. 온도에 따른 전자부품의 오류 발생률[10]
Fig. 2. Failure factor of electronic device according to temperature

최신 고성능 프로세서는 짧은 시간에 많은 연산을 수행하기 때문에 필연적으로 내부에서 높은 온도가 발생한다. 이를 완화시키기 위해 구조적인 설계 기법을 적용하기도 하지만 실질적으로 발생하는 높은 온도를 제어하기 위해서는 반드시 기계적인 냉각기법이 필요하다. 또한, 구조적인 접근을 통한 온도 제어는 성능을 희생시키기 때문에 고성능을 요구하는 시스템에서는 큰 문제가 될 수도 있다. 만약, 기계적인 냉각 기법을 통해 효율적으로 온도를 제어할 수 있다면 구조적 접근을 통한 온도 제어 기법의 적용 시간을 줄일 수 있으므로 성능 희생을 최소화 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 기계적 냉각 기법인 공랭식 기법과 수랭식 기법의 적용에 따른 멀티코어 프로세서의 온도를 분석하여 각 냉각 기법의 효율성을 확인해 보고, 냉각기의 동작에 따른 시스템의 전력 소모를 상세하게 분석하고자 한다. 또한, 온도

변화에 따른 시스템의 정적(Leakage) 전력 소모 변화를 확인 하고자 한다. 이와 같은 분석을 통해 고성능 시스템을 구성하고자 할 때 전력 효율 및 냉각 효율을 최적화할 수 있는 방안에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

이하 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기계적 냉각 기법에 대해 기술하고, 3장에서는 본 논문의 실험에서 사용하는 공랭식/수랭식 냉각 기법들의 동작 원리에 대하여 자세히 설명한다. 4장에서는 기계적 냉각기법들의 종류에 따른 시스템의 효율성을 분석하기 위해 수행한 모의실험 환경과 실험 결과를 상세하게 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론 및 향후 과제에 대하여 기술한다.

II. 기계적 냉각 장치

컴퓨터 시스템에서 사용되는 냉각 기법(Cooling Method)은 시스템 내부에서 발생하는 열을 식히는 방식을 의미한다. 예전의 컴퓨터들은 프로세서의 동작 속도가 상대적으로 높지 않아 발열 현상이 거의 무시할 수 있는 수준이었기 때문에, 프로세서에 방열판을 부착하는 기법을 통해 충분한 냉각 효과를 기대할 수 있었다. 하지만, 냉각 기법에 대한 중요도가 높지 않았던 과거와 달리, 최신 컴퓨터 시스템의 경우에는 공정 기술의 발달로 인해 집적회로의 집적도가 점점 높아지고 부품의 크기가 소형화 되면서 점차적으로 냉각 기법의 중요성이 높아지고 있다. 특히, 컴퓨터의 핵심 장치인 중앙처리장치(CPU: Central Processing Unit)와 연산량이 많은 그래픽 처리장치(GPU: Graphics Processing Unit)는 효과적인 냉각 장치가 없다면 사용이 불가능할 정도로 많은 열이 발생한다. 그러므로 최신 컴퓨터 시스템의 신뢰성을 보장하기 위해서는 높은 온도를 유발하는 장치들을 위한 효과적인 냉각 기법이 반드시 필요하다.

컴퓨터에서 사용되는 기계적 냉각 장치는 전체적인 내부 온도를 낮추주는 시스템 냉각 방식과 온도가 높게 발생하는 장치의 온도를 낮추주는 지역적 냉각 방식으로 구분될 수 있다. 일반적으로 시스템 냉각 방식으로는 공랭식 냉각(Air Cooling) 기법이 주로 사용되고 지역적 냉각방식으로는 수동형(Passive) 냉각 기법, 능동형(Active) 냉각 기법, 열전소자(Thermoelectric Module) 냉각 기법, 히트 파이프(Heat-pipe) 냉각 기법, 그리고 공랭식과 수랭식(Liquid) 냉각 기법 등이 사용된다[10].

수동형 냉각 기법은 방열판만을 사용하는 냉각기법으로 효율이 낮아서 비교적 큰 면적의 방열판을 요구한다는 단점이 있다. 방열판과 냉각팬을 동시에 사용하는 능동형 냉각 기법

은 프로세서의 냉각 효과가 시스템 내부 온도의 영향을 많이 받기 때문에 시스템 냉각도 동시에 해주어야 한다. 수동형 냉각 기법과 능동형 냉각 기법에서는 방열판의 크기뿐만 아니라 방열판의 재질과 표면적 등도 냉각기의 효율을 결정하는 중요한 요소가 된다. 방열판의 역할이 표면적이 작은 발열체에서 발생하는 열을 전달 받아 방열판 전체로 분산시킴으로써 열 분산을 도와주기 때문이다. 또한 방열판과 냉각팬을 함께 사용하는 능동형 냉각 기법에서는 방열판의 재질과 크기뿐만 아니라 냉각팬에서 불어오는 바람을 효과적으로 이용하기 위한 냉각 장치의 구조도 냉각 효율을 결정하는 중요한 요소가 된다.

그림 3은 열전소자 냉각 기법의 원리를 보여주고 있다. 펠티어 효과(Peltier Effect)를 활용하는 열전소자 냉각 기법은 전극 양단에 전압이 걸리면 전자가 이동하면서 온도 차가 발생하는 원리를 통해 냉각을 하게 되며, 실온 이하의 온도까지 냉각시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만 펠티어 소자는 탁월한 냉각 성능을 보이는 반면에, 과열 문제와 열 역전 현상 등의 문제가 발생할 수 있고 열전소자의 양단에 전압을 걸어주었을 경우 냉각기 자체의 저항에 의해 발생하는 열이 프로세서에서 발생하는 열과 합쳐져 더욱 많은 열을 발생시킴과 동시에 그에 상응하는 전력까지 요구한다는 단점이 존재한다[10].

그림 4는 히트 파이프의 동작 원리를 보여주고 있다. 히트 파이프 냉각 기법은 열전도율이 높은 구리와 같은 재질로 된 파이프 속에 휘발성 액체를 가득 넣어 냉각기를 구성한다. 일반적으로는 방열판과 함께 사용되는 냉각 기법이다. 히트 파이프는 휘발성 액체가 증발부에서 가열되어 기체 상태로 응축부로 열을 전달하고 방열판에서는 강제 대류 방식으로 열을 식힌 후, 다시 액체가 되어 증발부로 돌아가는 방식으로 동작한다. 히트 파이프는 상변화를 이용하여 열을 전달하기 때문에 높은 냉각효율성을 제공함과 동시에 구조가 간단하고 별도의 동력이 필요하지 않아 적은 유지보수 비용으로 반영구적으로 사용 가능하다는 장점이 있다. 위에서 기술된 냉각 기법들 외에도 상변화(Phase Change) 냉각 기법이나 액체 질소를 이용한 냉각 기법 등이 존재한다.

일반적인 컴퓨터 시스템에서 가장 많이 사용되는 냉각 기법으로는 공랭식과 수랭식 냉각기를 이용한 기법을 들 수 있다. 두 기법들은 냉각 효과에 있어서는 다른 기법들에 비해 효율성이 약간 떨어지기는 하지만 설치비용이나 소모되는 전력 등을 함께 고려할 때에는 상대적으로 높은 효율을 나타내기 때문에 주로 사용되고 있다.

본 논문에서는 기계적 냉각 기법에 따른 멀티코어 프로세서의 냉각 효율성을 상세하게 분석하기 위해서 일반적으로 사용되는 공랭식 냉각 기법과 수랭식 냉각 기법을 사용하는 경

우에 대해 소모되는 전력과 각 냉각 기법의 온도 제어 능력을 살펴보고자 한다.

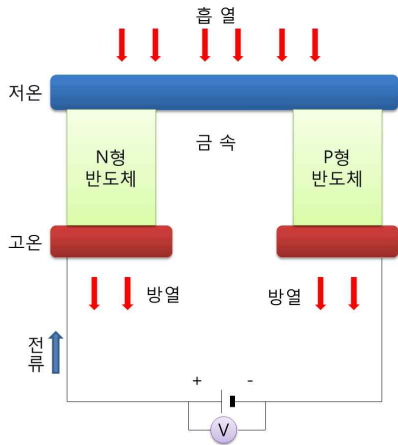


그림 3. 펠티어 소자의 원리[20]
Fig. 3. Principle of peltier elements

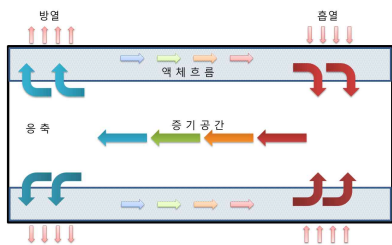


그림 4. 히트 파이프의 동작 원리[21]
Fig. 4. Principle of heat pipe

III. 공랭식/수랭식 냉각 기법

1. 공랭식 냉각기(Air Cooler)

그림 5는 공기를 이용하여 프로세서에서 발생하는 열을 제어하는 공랭식 냉각기의 작동 원리를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이, 많은 작업을 수행하느라 뜨거워진 프로세서의 열을 냉각팬(Cooling Fan)을 이용하여 직접적으로 냉각하는 것이 아니라 프로세서와 직접적으로 부착된 라디에이터를 통해서 냉각한다. 즉, 공랭식 냉각기의 원리는 프로세서의 열을 전달받아 뜨거워진 라디에이터로 팬을 이용하여 차가운 공기를 보내 온도를 제어하는 방식이다.

컴퓨터 시스템의 시장 경쟁력을 판단하는데 있어서 가격은 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 전자 기기를 개발하여 판

매하는 경우에 냉각 비용은 매우 적게 할당된다. 이와 같은 가격적인 제약조건 상에서 공랭식 냉각기는 비용이 크지 않기 때문에 널리 이용되고 있다. 다만, 냉각을 위해 공기를 이용하기 때문에 주변 온도에 직접적인 영향을 많이 받고 효율성이 낮다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 최근에는 라디에이터와 방열판을 같이 사용하기도 하며, 라디에이터에 히트파이프를 적용하기도 한다.

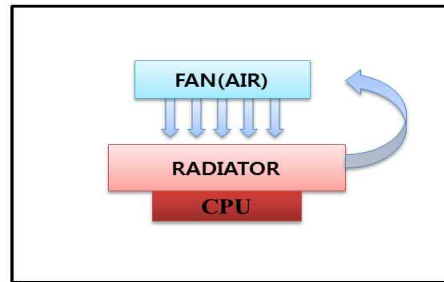


그림 5. 공랭식 냉각기의 동작 원리
Fig. 5. Operation principle of air cooler

2. 수랭식 냉각기

그림 6은 공기를 대신해 물을 이용하여 프로세서에서 발생하는 온도를 제어하는 수랭식 냉각기의 작동 원리를 보여준다. 수랭식 냉각기는 프로세서와 직접 부착된 워터블록과 라디에이터, 물을 순환 시키는 펌프, 물탱크, 그리고 팬으로 구성되어 있다. 워터블록은 속이 빈 금속재질의 방열판으로 내부는 라디에이터로부터 공급되는 냉각수로 채워진다. 워터블록은 뜨거워진 프로세서를 공급받은 냉각수를 이용하여 식혀주는 역할을 하고, 라디에이터는 펌프를 이용하여 프로세서에 부착된 워터블록으로 차가운 냉각수를 공급하고 뜨거워진 냉각수는 물탱크로 다시 보내 주는 일을 수행한다. 뜨거운 냉각수는 워터블록으로 들어가기 전 라디에이터를 통과할 때에 팬을 통해 식혀진다. 즉, 수랭식 냉각기는 차가운 냉각수를 이용하여 프로세서를 식히고, 뜨거워진 냉각수는 다시 식혀 공급하는 순환적인 구조를 가지고 있다. 수랭식 냉각기는 공랭식 냉각기와 비교하여 소음이 적고 공기 대신에 물을 이용하기 때문에 더 높은 냉각 효율을 제공한다. 하지만 공랭식 냉각기와 마찬가지로 팬을 이용하므로 소음이 완전히 사라지지 않고 주변의 온도에도 영향을 많이 받는다. 또한, 공랭식 냉각기보다 가격이 비싸고 유지 보수에 많은 비용이 필요하며, 물을 이용하기 때문에 누수 될 경우에는 프로세서에 치명적인 악영향을 미칠 수 있기 때문에 설치 및 사용 시 많은 주의가 필요하다.

IV. 모의 실험

본 논문에서는 기계적 냉각기법의 효율성을 측정하기 위해서 공랭식 냉각기와 수랭식 냉각기를 사용하여 각각 실험을 수행한다. 전력 소모와 온도는 인스펙터2(Inspector2)와 HWMonitor[22]를 이용하여 측정한다. 인스펙터2는 컴퓨터의 실시간 소모 전력 측정을 위해 사용되었고, HWMonitor는 멀티코어 프로세서 내부 각 코어의 실시간 온도, 최고온도, 최저온도를 모두 측정할 수 있는 도구이다. 실험 시 설정한 환경은 표 1에 자세히 나타나있다.

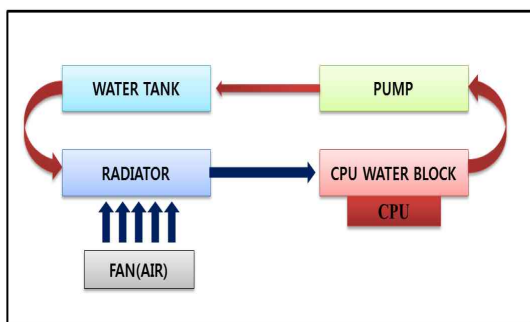


그림 6. 수랭식 냉각기의 동작 원리
Fig. 6. Operation principle of liquid cooler

실험은 MICROSOFT WINDOWS 7 운영체제에서 동작하는 4개의 코어를 가진 프로세서(INTEL QUAD CORE)를 사용하여 수행하였다. 또한, 프로세서의 동작 주파수를 구분하여 일반 프로세서와 고성능 프로세서로 각각 실험을 실시하였다. 일반 프로세서의 동작 주파수는 2.5 GHz이고, 고성능 프로세서의 동작 주파수는 오버클로킹(Over-Clocking)을 적용하여 2.96GHz로 상승 시켰다. 실험 결과에서, 2.5GHz를 사용하는 것은 일반 프로세서로 나타나고, 2.96Hz를 사용하는 경우에는 고성능 프로세서로 나타난다. 프로세서에서 발생하는 열을 제어하기 위해 사용된 공랭식 기법의 냉각기는 INTEL REFERENCE COOLER이고, 수랭식 기법의 냉각기는 KOOLANCE EXOS-2.5이다. 수랭식 냉각기는 냉각 정도에 따라 3단계로 제어 하였다. 이 냉각 단계는 표 2에 나타나 있듯이 수랭식 냉각기의 냉각 팬과 순환 펌프의 성능으로 구분하였다. 이와 같이 실험 환경을 구축한 후, 냉각기의 종류와 냉각 세기를 조절하면서 실험을 실시하였다.

본 실험에서 수행된 작업 부담은 프로세서 점유율에 따른 차이를 분석하기 위해 Standby60, MP3, L_Encoding, H_Encoding의 4가지 경우로 구분한다. Standby60은 운영

체제가 실행된 상태에서 60분 동안 아무 작업도 하지 않는 Idle 상태로 프로세서의 점유율은 1% 미만을 차지한다. MP3는 MP3 재생 프로그램을 통해 음악을 재생하는 경우를 나타내고 L_Encoding은 Light_Encoding으로 곰 인코더라는 프로그램을 통해서 Encoding 작업을 1개만 실시한 경우를 의미하며, 마지막으로 H_Encoding은 Heavy_Encoding으로 시스템의 점유율을 더 높이기 위해 Encoding 작업 3개를 동시에 진행한 경우를 나타낸다. 모든 경우에 대해, 시스템이 안정된 이후에 실험을 수행하기 위해서 각 작업을 수행하기 전 30분 동안은 Idle 상태로 대기한 이후에, 30분간 각각 동작을 수행한 경우를 측정한다. MP3, L_Encoding, H_Encoding의 프로세서 점유율은 각각 2~3%, 30~35%, 70~80%를 보인다. 작업 수행 시에는 프로세서의 모든 코어들에게 태스크(Task) 할당이 운영체제에 의해 균등하게 이루어지기 때문에, 코어에 따른 점유율 변화는 거의 나타나지 않는다.

표 1. 모의실험 시스템 구성 변수
Table 1. System Parameters

구성인자	구성 요소
운영체제	MICROSOFT WINDOWS 7
공랭식 쿨러	INTEL REFERENCE COOLER
수랭식 쿨러	KOOLANCE EXOS-2.5
프로세서	INTEL QUAD CORE
주파수	일반-2.5GHz 고성능-2.96GHz

표 2. 수랭식 냉각기의 성능 구분
Table 2. Cooling Levels of Liquid Cooler

쿨링 단계	Fan Power (%)	Pump Power (%)
1	28	56
2	52	68
3	100	100

1. 전력 소모 비교

실험 결과에서 공랭식 냉각기는 Air로 나타내고, 수랭식 냉각기는 냉각 단계에 따라 Water1,2,3으로 나타낸다. 수랭식 냉각기의 단계는 숫자가 커질수록 냉각을 더 강하게 수행하는 경우를 나타낸다. 그림 7과 그림 8은 각 작업을 일반 프로세서와 고성능 프로세서에서 수행시킬 경우 소모되는 전력을 냉각 방식에 따라 나타낸 그림이다. 전력 소모는 전체 시스템에서 소모되는 실시간 전력 값을 측정된 것으로 단위는 와트(W: Watt)를 사용한다.

그래프에서 확인 할 수 있듯이 프로세서 점유율이 증가함에 따라서 수행되는 연산의 양이 증가하기 때문에 프로세서에서 소비되는 전력 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7과 그림 8을 비교해 보면 오버클로킹을 통해 고성능으로 동작하는 경우에 소비되는 전력의 양이 조금 더 많음을 알 수 있다.

프로세서에 적용된 냉각 기법에 따라서도 소비되는 전력의 양이 달라진다. 첫째로 공랭식 기법과 수랭식 기법의 사용에 있어서 소비 전력의 차이가 많이 발생함을 알 수 있다. 일반 프로세서와 고성능 프로세서 환경에서 공랭식과 수랭식 1단계의 차이가 평균적으로 20.25W와 22.25W이다. 따라서 두 경우 모두 수랭식 기법이 냉각을 위해 더 많은 전력을 소비한다는 것을 말해주고 있다. 또한 수랭식 기법들 사이에서도 냉각 단계가 높아질수록 더 많은 전력을 소비하게 된다. 둘째로 프로세서 점유율이 높아짐에 따라서 수랭식과 공랭식 기법 사이에 발생하는 소비전력의 차가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 점유율이 높아짐에 따라서 프로세서의 동작이 많아져 발열이 심해지고 결과적으로 프로세서에서 소비하는 전력이 상승하는 결과를 낳게 된다. 프로세서의 온도 상승이 정적 전력의 증가로 이어져 추가적인 전력 소모를 유발하게 되기 때문이다.

그림 7과 그림 8의 그래프에서 보이는 결과는 냉각 기법에 따라 시스템에서 전체적으로 소모된 전력량을 나타내고 있다. 시스템에서 소모되는 전력은 동적 전력(Dynamic Power)과 정적 전력(Leakage Power)으로 구분된다. [23]에 따르면, 면적과 온도를 기반으로 하여 CPU에서 소비되는 정적 전력은 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

- (1) $P_{leak} = \alpha \cdot Area \cdot e^{\beta(T_{current} - T_0)}$
- (2) $P_{total} = \sum P_{leak}$

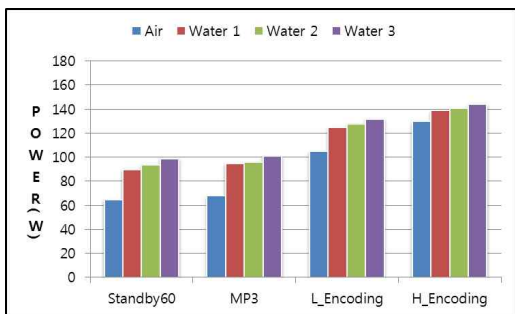


그림 7. 일반 프로세서의 전력 소모 비교
Fig. 7. Power consumption on general processors

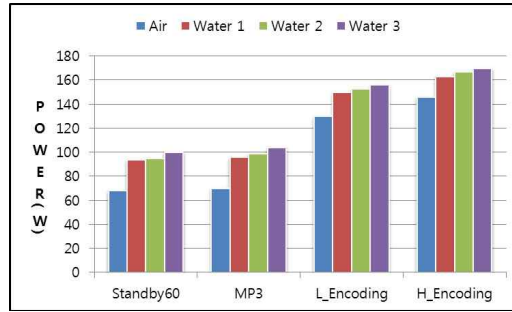


그림 8. 고성능 프로세서의 전력 소모 비교
Fig. 8. Power consumption on high-performance processors

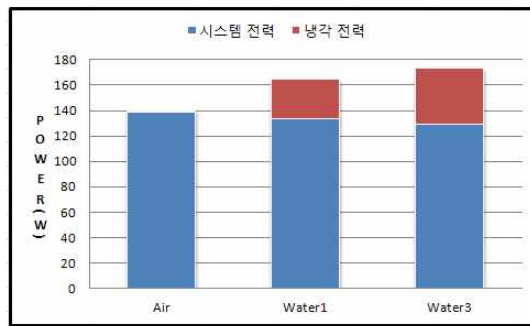


그림 9. 냉각 효율에 따른 전력 소모 상세 비교
Fig. 9. Detailed power consumption analysis according to cooling efficiency

이 두 수식에서 α 는 기본 정적 전력 소비 값을 말하고 β 는 공정에 따라 변하는 상수이다. 또한 $T_{current}$ 는 현재 온도, T_0 는 기본 정적 전력 소비 할 때의 온도를 나타낸다. 그리고 프로그램의 수행에 따른 정적 전력의 값은 그 때 소비되는 P_{leak} 값의 합으로 구할 수 있다. 이와 같이 정적 전력이 계산되기 때문에 온도의 변화가 줄어들면 정적 전력의 소비 또한 줄어들게 된다. 온도 저하를 통한 정적 전력 감소량을 정확하게 확인해보기 위해 H_Encoding을 수행하면서 1시간 동안 소비되는 전력을 공랭식 기법과 수랭식의 3단계 중 2가지 단계를 적용하는 총 3가지 경우에 대해 구분하여 측정하는 실험을 수행하였다. 이에 앞서 사전 실험으로 공랭식과 수랭식 냉각기를 바꿔가면서 동작시키는 과정을 통해 각 냉각기에서 소비되는 전력을 확인한 후에, 확인된 값과 H_Encoding을 수행하면서 측정된 전력의 차이를 계산함으로써 각 냉각 방식에 따라 냉각기를 제외한 시스템에서 소비되는 전력을 구하였다. 측정된 값들을 이용하여 공랭식 냉각기를 사용하는 경우와 수랭식의 1단계와 3단계를 사용하는 경우에 대해 각각을 시스템 소모 전력, 냉각기 소모 전력으로 구분하여 나타낸 결과는

그림 9에서 보이는 바와 같다.

그림 9에 나타난 그래프를 확인해보면 공랭식 기법과 비교하여 수랭식 기법을 적용하는 경우에 시스템에서 소모되는 전력이 얼마나 감소하는지를 알 수 있다. 그래프에서 감소된 시스템 전력은 온도가 저하되면서 감소된 정적 전력 소모를 의미한다. 냉각기 자체에서 소모되는 전력이 공랭식과 수랭식의 경우 큰 차이를 보이기 때문에, 전체 전력 소모는 수랭식 냉각기를 사용하는 경우가 25W와 34W 정도 더 크게 나타나지만, 냉각기를 제외한 시스템에서 소모되는 전력은 5W와 10W 정도 감소하여 냉각 효율성이 좋을수록 감소됨을 알 수 있다.

이 절에서는 냉각 방식과 소비 전력 그리고 온도에 따른 정적 전력의 관계를 실험을 통해 확인할 수 있었다. 공랭식 냉각기에 비해 수랭식 냉각기를 사용하면 더 많은 전력을 소비하게 된다. 또한 그림 9에서 보이는 바와 같이 수랭식 냉각기에서 냉각에서 소요되는 전력이 매우 많기 때문에 수랭식 냉각기법의 냉각 전력을 감소시킬 수 있다면 전체 시스템에서 소비하는 전력을 획기적으로 감소시킬 수 있는 계기가 될 것이다.

2. 온도 비교

그림 10과 그림 11은 일반 프로세서에서와 고성능 프로세서에 공랭식 기법과 수랭식 기법의 3단계를 적용하였을 때 측정되는 최고 온도를 보여주고 있다. 그래프를 통해 공랭식과 수랭식의 냉각 효과 차이를 확실히 확인할 수 있다. 공랭식 기법의 경우 그래프의 MP3와 L_Encoding에서 볼 수 있듯이 그 차이가 20°C 이상의 차이를 보이듯이 프로세서 점유율이 높아짐에 따라서 프로세서의 온도가 급속히 증가 하는 반면, 수랭식 기법의 경우에는 점유율의 차이가 가장 큰 Standby60과 H_Encoding의 온도 비교를 보면 그 차이가 5°C정도의 차이만 발생할 정도로 프로세서의 점유율이 높아 지더라도 온도의 상승 폭은 크지 않음을 알 수 있다. 이는 프로세서의 온도를 제어하는 데 있어서 공랭식 기법보다는 수랭식 기법이 훨씬 더 효과적임을 의미한다. 또한, 수랭식 기법 중에서도 냉각 단계가 증가함에 따라서 냉각 효과는 더욱 향상된다. 고성능 프로세서를 대상으로 실험한 결과를 보면 일반 프로세서에서의 경우와 온도 변화의 패턴은 대부분 비슷하지만 일반 프로세서에 비해서 상대적으로 높은 온도를 보인다. 따라서 고성능 프로세서에서는 냉각 효율을 더 높일 수 있는 방법이 필요하게 된다.

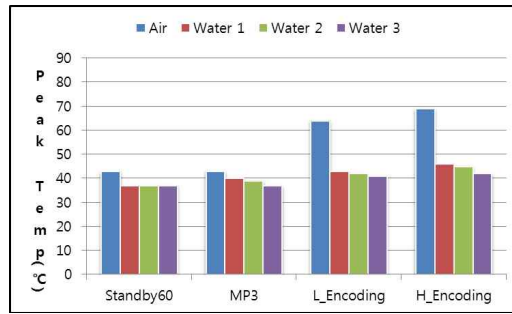


그림 10. 일반 프로세서의 최고 온도
Fig. 10. Peak temperature of general processors

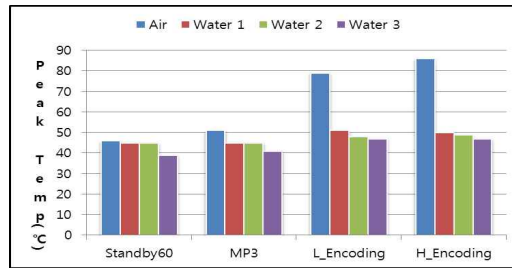


그림 11. 고성능 프로세서의 최고 온도
Fig. 11. Peak temperature of high-performance processors

3. 수랭식 냉각기법의 냉각 효율성

본 논문에서는 냉각 효율성을 비교하기 위한 지표로 1W의 전력으로 감소시킬 수 있는 프로세서의 온도 값을 사용한다. 그림 12와 그림 13은 일반 프로세서와 고성능 프로세서의 냉각 효율성을 나타내고 있다. 그래프는 공랭식 기법을 기준으로 하여 수랭식 기법의 1단계, 2단계, 그리고 3단계를 적용하는 경우의 냉각 효율성을 보여준다.

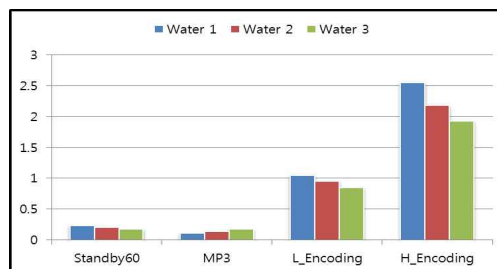


그림 12. 일반 프로세서에서 수랭식 기법의 효율성
Fig. 12. Cooling efficiency of liquid cooler on general processors

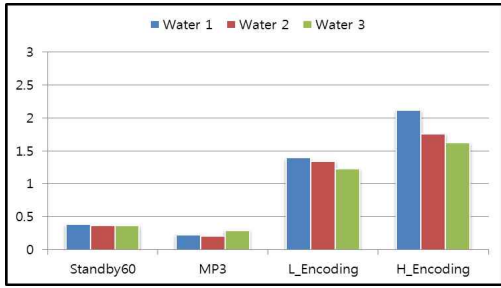


그림 13. 고성능 프로세서에서 수랭식 기법의 효율성
 Fig. 13. Cooling efficiency of liquid cooler on high-performance processors

그래프에서 볼 수 있듯이 프로세서에서 수행되는 작업 부하가 증가함에 따라 프로세서의 온도가 달라지는데 발열이 높을수록 수랭식이 더 효과적으로 온도를 낮출 수 있다. 하지만 수랭식 기법의 냉각 세기가 강해지면 온도를 낮추기 위해 소비 전력의 증가에 비해서 낮출 수 있는 온도가 감소해 그 효율이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 시스템의 사용 환경에 따라서 적절한 냉각 기법을 사용함으로써 전력의 사용을 최소화하며 냉각 효율을 최대화할 수 있을 것이다.

V. 결론

프로세서의 성능이 향상되면서 프로세서 내부에서 열섬 현상이 발생하게 되었다. 열섬 현상을 해결하기 위해 일반적으로는 구조적 접근을 통한 온도 제어 기법을 사용하지만, 이 경우에는 온도를 낮추기 위해 성능이 희생되는 경향이 있으므로 시스템의 성능의 희생을 피하기 위해서는 효과적인 기계적 냉각 기법의 사용이 필수적이다. 본 논문에서는 기계적 냉각 기법 중 가장 많이 사용되는 공랭식과 수랭식 기법의 냉각 효율성을 자세하게 분석해 보았다. 소비 전력 측면에서 공랭식에 비해 수랭식 기법이 냉각을 위해 더 많은 전력을 소비하였다. 그리고 온도결과를 보면 공랭식과 수랭식의 기법을 비교해 보았을 때에는 수랭식이 온도 제어를 하는데 더 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 냉각 기법에 따른 효율성을 분석하기 위해서 1W의 전력으로 낮출 수 있는 온도를 분석해 보면 프로세서의 발열이 많을수록 수랭식이 더 효과적으로 온도를 제어하지만, 수랭식 기법의 냉각 세기가 증가함에 따라서 소비되는 전력이 많아짐에도 불구하고 온도를 낮추는 폭이 작아져 효율성이 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 실험 결과를 바탕으로 기계적 냉각 기법을 통해 온도를 효과적으로 제어한다면 구조적 기법을 통해 온도를 제어할 때 발생하는

성능 저하 문제를 보완하여 성능에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] M. Powell, S.H. Yang, B. Falsafi, K. Roy, and T.N. Vijaykumar, "Gated-Vdd : A circuit technique to reduce leakage in deep-submicron cache memories," In Proceedings of International Symposium on Low Power Electronics and Design, pp. 90-95, July 2000.
- [2] S. J. E. Wilson, N. P. Jouppi, "An enhanced access and cycle time model for on-chip caches," Technical Report 93/5, Digital Equipment Corporation, Western Research Laboratory, 1994.
- [3] N. P. Jouppi, "Improving Direct-Mapped Cache Performance by the Addition of a Small Fully-Associative Cache and Prefetch Buffers," In Proceedings of 17th Annual International Symposium on Computer Architecture, pp. 364-373, June 1990.
- [4] Y.J. Park, J.M. Kim, C.H. Kim, "Low-power Filter Cache Design Technique for Multicore Processors," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 14, No. 12, pp. 9-16, Dec. 2009.
- [5] J.H. Kong, S.W. Chung, "Recent Thermal Management Techniques for Microprocessors," Communications of KIISE, Vol. 27, No. 11, pp. 72-79, Nov. 2009
- [6] F. Pollack. "New Microarchitecture Challenges in the Coming Generations of CMOS Process Technologies," International Symposium on Microarchitecture (MICRO-32) keynote speech, 1999.
- [7] P. Dadvar, K. Skadron, "Potential thermal security risks," In Proceedings of the IEEE/ASME Semiconductor Thermal Measurement, Modeling, and Management Symposium (SEMI-THERM), pp. 229-234, March 2005.
- [8] J.H. Choi, "Thermal Management for Multi-core Processor and Prototyping Thermal-aware Task Scheduler," Journal of KIISE : Computer Systems and Theory, vol.35, no.7-8, pp.354-360, Aug. 2008.
- [9] S. Gunther, F. Binns, D. Carnean, and J. Hall.

“Managing the Impact of Increasing Microprocessor Power Consumption,” Intel Technology Journal, 5, Feb. 2001.

[10] J.H. Jeong, “Heat-radiant and Cooling Device of Central Processing Unit and Peripheral devices,” JOURNAL OF KOREA INTELLECTUAL PATENT SOCIETY, Vol 8, No. 4, pp. 33-43, Dec. 2006.

[11] L. Yeh, R. Chy, “Thermal Management of Microelectronic Equipment,” American Society of Mechanical Engineering, 2001.

[12] Z. Zhijun, L. R. Hoover, and A. L. Phillips, “Advanced thermal architecture for cooling of high power electronics,” Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, vol. 25, no. 4, pp. 629-634, Dec. 2002.

[13] H.J. Choi, N.R. Yang, J.A. LEE, J.M. Kim, C.H. Kim, “Processor Design Technique for Low-Temperature Filter Cache,” Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 15, No. 1, pp. 1-12, Jan. 2010.

[14] K. Sankaranarayanan, S. Velusamy, M. Stan, and K. Skadron, “A Case for Thermal-Aware Floorplanning at the Microarchitectural Level,” Journal of Instruction-Level Parallelism, vol. 7, pp. 1-16, July 2005.

[15] D. Brods and M. Martonosi, “Dynamic Thermal Management for High-Performance Microprocessors,” In Proceedings of the 7th International Symposium on High-Performance Computer Architecture, pp. 172-182, Jan. 2001.

[16] K. Choi, R. Soma, M. Pedram, “Dynamic voltage and frequency scaling based on workload decomposition,” In Proceedings of the 2004 international symposium on Low power electronics and design, pp. 174-179, Aug. 2004.

[17] L. Benini, G. De Micheli, E. Macii, M. Poncino, R. Scarsi, “Symbolic synthesis of clock-gating logic for power optimization of synchronous controllers,” In Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES), vol. 4, issue. 4, pp. 351-375, Oct. 1999.

[18] R. Mahajan, “Thermal Management of CPUs: A Perspective on Trends, Needs, and Opportunities,”

In the 8th International Workshop on THERMal Investigations of ICs and Systems 2002.

[19] “Energy-Optimal Dynamic Thermal Management : Computation and Cooling Power-Optimization”, Donghwa Shin, Sung Woo Chung, Eui-Young Chung, Naehyuk Chang, IEEE Trans. On Industrial Informatics, Vol. 6, No 3. Aug. 2010

[20] Peltier Module, <http://blog.daum.net/iantech/6045548>

[21] Heat-Pipe, <http://withnotebook.tistory.com/55>

[22] HWMonitor, <http://www.cpuid.com>

[23] A. K. Coskun, A. B. Kahng, T. S. Rosing, “Temperature- and Cost-Aware Design of 3D Multiprocessor Architectures,” In Proceedings of 12th Euronicro Conference on Digital System Design and Architectures, Methods and Tools, pp. 183-190, 2009.

저 자 소개



강 승 구

2010: 전남대학교
전자컴퓨터공학부 공학사
2010-현재: 전남대학교
전자컴퓨터공학과 석사과정
관심분야: 컴퓨터구조, 임베디드시스템
Email : freexz84@gmail.com



최 흥 준

2009: 전남대학교
전자컴퓨터공학부 공학사
2011: 전남대학교
전자컴퓨터공학과 석사
관심분야: 저전력 설계, 컴퓨터 구조
Email : chj6083@hanmail.net



안 진 우

2010: 전남대학교
전자컴퓨터공학부 공학사
2010-현재: 전남대학교
전자컴퓨터공학과 석사과정
관심분야: 컴퓨터구조, 임베디드 하드웨어 설계
Email : ajw0411@gmail.com



박 재 형

1991: 연세대학교 컴퓨터공학사
 1993: 한국과학기술원
 컴퓨터공학 석사
 1997: 한국과학기술원
 컴퓨터공학 박사
 2002 - 현재: 전남대학교
 전자컴퓨터공학부 교수
 관심분야 : 네트워크 구조,
 네트워크 프로토콜
 Email : hycoung@chonnam.ac.kr



김 종 면

1995: 명지대학교 전기공학사
 2000: University of Florida
 ECE 석사
 2005: Georgia Institute of
 Technology ECE 박사
 2005 - 2007: 삼성종합기술원
 전임연구원
 2007 - 현재: 울산대학교
 컴퓨터정보통신공학부 교수
 관심분야 : 임베디드 SoC, 컴퓨터구조,
 프로세서 설계, 병렬처리
 Email : jmkim07@ulsan.ac.kr



김 철 홍

1998: 서울대학교 컴퓨터공학사
 2000: 서울대학교 대학원
 컴퓨터공학부 석사
 2006: 서울대학교 대학원
 전기컴퓨터공학부 박사
 2005 - 2007: 삼성전자 반도체총괄
 SYS.LSI사업부 책임 연구원
 2007 - 현재: 전남대학교
 전자컴퓨터공학부 교수
 관심분야 : 임베디드시스템, 컴퓨터
 구조, SoC 설계, 저전력 설계
 Email : cheolhong@gmail.com