

## 인텔 펜티엄 4와 코어2 듀오의 실행시간과 파워소모량 효율성 비교

공준호\*, 최진항\*, 이종성\*, 정성우\*\*

### The power consumption and performance comparison between Intel Pentium 4 and Core2 Duo

Joonho Kong\*, Jinhang Choi\*, Jong Sung Lee\*, Sung Woo Chung\*\*

#### 요약

프로세서의 설계 시 여러 가지 요소를 고려해야 하는데 특히 에너지, 파워 소모, 그리고 성능은 가장 기본적으로 고려해야 할 요소들이다. 이들 요소는 서로 상충되는 측면이 있기 때문에 프로세서의 설계 시에 설계 목적에 따라 어느 한 요소에 가중치를 주기도 한다. 본 논문에서는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 정성적, 정량적 비교를 통해서 각 프로세서의 특성을 알아보고 실제 벤치마크를 실행시켰을 때 어떤 프로세서가 어떠한 측면에서 더 나은지 비교해보았다. 실제 프로세서의 성능 계수기를 통해서 파워, 에너지 소모를 계산하였고 성능은 실행 시간으로 측정하였다. 결과로 코어2 듀오가 더 적은 에너지와 파워를 소모하는 것으로 나타났고, 성능 면에서도 펜티엄 4에 비해 나은 성능을 보여주었다. 그러나, 펜티엄 4에 최적화되어 컴파일 되어있던 bzip2의 경우 펜티엄 4가 에너지, 파워, 성능 면에서 코어2 듀오에 비해 월등하였다.

#### Abstract

There are many metrics when designing microprocessors. Especially, energy, power consumption and performance are the most fundamental metrics. Since these metrics are contradictory, microprocessor designers give more weight to some metrics than the other metrics. In this paper, we compare Intel Pentium 4 and Core2 Duo both qualitatively and quantitatively. Furthermore, we provide detailed comparison between Pentium 4 and Core2 Duo when running real benchmarks. Through performance counter of real processors, we calculate energy and power consumption. Performance metric is execution time. In experimental result, Core2 Duo consumes less energy and power. Moreover, performance of Core2 Duo is also better than that of Pentium 4. However, in case of bzip2 which is optimized in Pentium 4, Pentium 4 shows much better performance and lower energy and power consumption than Core2 Duo.

▶ Keyword : 컴퓨터 구조 (Computer Architecture), 파워 효율성 (Power efficiency), 성능 (Performance), 컴파일러 최적화 (Compiler optimization)

• 제1저자 : 공준호    교신저자 : 정성우

• 접수일 : 2008. 10. 1, 심사일 : 2008. 11. 10, 심사완료일 : 2008. 12. 24.

\* 고려대학교 정보통신대학 석사과정    \*\* 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터통신공학부 조교수

※ 이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21 사업'과 '2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(R01-2007-000-20750-0)'의 지원비를 받았음.

## I. 서론

마이크로프로세서 설계 시 에너지, 파워, 그리고 실행시간은 중요한 척도이다. 특히 공정 기술이 나노스케일(nano-scale)로 내려감에 따라서 이 세 가지 척도를 더욱 더 심도있게 고려해야한다 [1]. 이 세 가지 측면은 서로 상충되는 측면이 있어서, 파워 소모를 줄이게 되면 성능이 저하되고, 성능을 올리려고 하면 파워 소모가 심해진다. 마이크로프로세서 설계자들은 설계 시 이 세 가지 측면에 대해서 하나도 놓치지 않고 최대의 성과와 최소의 에너지, 파워 소모라는 목표를 가지고 설계한다.

마이크로프로세서 설계 시, 이 프로세서가 어떤 용도로 쓰일 것이냐에 따라서 위 세 가지 기준 중에 가중치를 줄 수 있다. 예를 들어, 임베디드/모바일 디바이스에 쓰이는 마이크로프로세서의 경우, 성능보다는 에너지나 파워에 중점을 두고 설계한다. 이유는 임베디드/모바일 디바이스의 경우 배터리 성능 [5] 이나 수명이 마이크로프로세서의 파워, 에너지 소모에 직결되기 때문에 성능에서 약간 손해를 보더라도 에너지, 파워 소모를 줄이는 것이 설계 시 일차적인 목표가 된다. 반대로 고성능 마이크로프로세서의 경우, 에너지, 파워 소모보다는 성능에 중점을 두고 설계한다. 이유는 고성능 마이크로프로세서는 휴대용이 아니기 때문에, 배터리 수명과 전혀 관계가 없고, 구매자들이 성능에 중점을 두기 때문이다.

그러나, 어떤 한 측면에 가중치를 준다고 해서 나머지 측면에 대해서 전혀 고려를 안 할 수 없다. 이유는 아무리 성능이 좋아도, 파워나 에너지 소모가 심각하다면 그 마이크로프로세서는 구매자들에게 외면 받게 될 확률이 크다. 특히, 파워나 에너지 소모가 심각하면, 마이크로프로세서의 신뢰성 문제 [7] 와도 직결되기 때문에 설계자들은 무한정 성능을 좋게 하기 위해서 에너지, 파워 소모에 대해서 전혀 고려하지 않을 수 없다. 그 반대의 경우도 마찬가지이다. 따라서, 마이크로프로세서 설계 시 에너지 소모, 파워 소모, 성능, 이 세 가지 측면에 대해서 종합적으로 고려해야 한다.

본 논문에서는 대표적인 상용 마이크로프로세서인 인텔 펜티엄 4 [10] 와 코어2 듀오 [11] 의 에너지, 파워, 성능 측면에 대해서 비교해보고 나아가서 이 두 가지 측면을 모두 고려했을 때 어떤 프로세서가 더 효율적인지에 대해서 비교해본다. 이에 덧붙여, 컴파일러 최적화 [2], [4] 가 미치는 영향까지도 비교해본다. 본 논문은 실시간으로 실제 시스템에서 성능 계수기를 이용하여 상용 마이크로프로세서의 실시간 전력 소모량, 에너지 소모량, 성능, 그리고 EDP를 측정할 최소

의 논문이며, 추후 이러한 측정 결과는 다른 연구자들에게 유용한 자료로 활용될 수 있다. 더불어, 실제 상용 마이크로프로세서의 비교를 통해서 설계자들은 프로세서 설계 시 어떤 측면을 더 고려해야 하고, 어떻게 해야 세 가지 측면에 대해서 가장 효율적인 프로세서를 설계할 수 있을 지에 대한 통찰력을 얻을 수 있을 것이다.

## II. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 정성적/정량적 비교

인텔 펜티엄 4 마이크로프로세서와 인텔 코어2 듀오 프로세서는 현재 데스크탑 개인용 컴퓨터에 많이 쓰이고 있는 프로세서이다. 개인용 컴퓨터는 에너지/파워 소모량보다는 성능에 중점을 두고 설계되기 때문에 성능을 최대한 끌어올리는 설계에 초점이 맞추어져 있지만, 최근 경향은 파워나 에너지 소모량도 같이 고려되어야 하는 추세이다. 이유는 파워 소모가 극심할 경우, 마이크로프로세서의 신뢰성에 심각한 문제를 일으킬 수 있기 때문이다. 마이크로프로세서의 신뢰성이라 함은 여러 가지 측면을 포함하는 것이지만, 온도 문제를 예로 들 수 있다. 마이크로프로세서의 온도는 파워 소모량에 크게 의존하는데, 파워 소모가 극심할 경우 마이크로프로세서에 열점(hotspot)을 생기게 하고, 이는 마이크로프로세서의 수명을 단축시키거나, 극단적인 경우 마이크로프로세서를 타버리게 만들 수도 있다 [6]. 따라서 최근 마이크로프로세서 설계 시 파워/에너지 소모량은 중요하게 고려되는 요소이다.

펜티엄 4 [10] 의 경우 슈퍼스칼라(super-scalar) 프로세서 설계로, 동시 다중 스레딩(Simultaneous Multi-Threading) [8] 을 지원하며, 파이프라인 단계가 20단계에 육박하는 깊은 파이프라인 구조 설계로 프로세서의 클럭 주파수를 최대한 끌어올렸다. 따라서 높은 클럭 주파수를 가지며, 이는 파워 소모 측면에서 약점을 가질 수 밖에 없는 구조이다. 또한, 깊은 파이프라인 구조로 인해서 파이프라인 단계 사이에 존재하는 오버헤드(overhead)가 심해질 수 밖에 없다. 따라서 클럭 주파수가 높아졌지만 명령어 하나 당 걸리는 클럭 사이클 수가 많아졌으므로 성능 측면에서도 좋지 못한 단점이 있다.

반면, 코어2 듀오 프로세서 [11] 의 경우, 파이프라인을 상대적으로 얇게 설계하고, 클럭 주파수가 상대적으로 낮은 대신, 새로운 마이크로아키텍처(microarchitecture)를 이용하여, 성능을 끌어올렸다. 또한, 마이크로프로세서 하나에 코어가 2개 들어있다. 개인용 컴퓨터의 경우 다중 프로그래밍(Multi-programming)환경을 사용하므로, 이러한 다중 코

어의 설계는 효율적이라 할 수 있다. 처리량 (throughput) 측면에서 보면, 서로 다른 프로세스 (process) 혹은 스레드 (thread) 가 동시에 하나의 프로세서에서 실행되므로, 펜티엄 4에 비해서 많은 성능 향상을 기대할 수 있다.

표 1은 펜티엄 4와 코어2 듀오를 수치적으로 비교한 표이다. 펜티엄 4의 경우 코어2 듀오보다 훨씬 높은 클럭 주파수를 보여주는데 이유는 파이프라인 깊이와 관계가 있다. 명령어 실행의 단계를 훨씬 세밀하게 자름으로써 파이프라인을 훨씬 더 깊게 설계하는 것이 가능한데, 한 개의 명령어 실행의 단계가 걸리는 시간이 클럭 주기 시간을 결정하는 요소이다. 높은 클럭 주파수를 가진다는 것은 파워 소모 측면에서는 악영향을 미칠 수 있다. 이유는 동적 파워 소모량이 다음과 같이 계산되기 때문이다 [9].

$$\text{파워소모} \propto f V_{dd}^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{에너지소모} \propto V_{dd}^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

수식 (2.1)에서 파워 소모량은 프로세서의 클럭 주파수(f)에 비례하고 공급 전압(Vdd)의 제곱에 비례한다. 표 1에서 보이는 바와 같이 펜티엄 4의 공급 전압은 코어2 듀오와 비교해서 0.2V 정도 높고 클럭 주파수 또한 더 높다. 따라서 펜티엄 4의 파워 소모량은 같은 작업 부하를 실행시켰을 때 코어2 듀오에 비해서 상대적으로 클 거라고 예상할 수 있다. 또한 수식 (2.2)에서와 같이 에너지 소모량은 클럭 주파수와는 관계가 없지만 공급 전압의 제곱에 비례하기 때문에 에너지 소모 또한 동일한 작업 부하를 주었을 경우 펜티엄 4가 코어2 듀오보다 많을 거라 예상할 수 있다.

펜티엄 4는 단일 코어의 슈퍼스칼라 구조에 SMT를 지원하고, 코어2 듀오는 같은 슈퍼스칼라 구조지만, 코어의 개수가 2개이고 펜티엄 4에 비해서 파이프라인 깊이가 상대적으로 얕다.

### III. 실험 환경

실제 환경에서 실험하기 위해 각각 펜티엄4와 코어2 듀오에 리눅스를 설치하고 성능 계수기를 이용한 각 기능 유닛 (Functional Unit) 별 성능 계수를 추출하였다. 성능 계수기를 이용하여 각 기능 유닛의 접근 횟수를 센 뒤, 그에 기반하여 파워 소모량을 측정하였다. 그림 1은 전체적인 파워 측정 방법에 대해 묘사한 그림이다. 마이크로프로세서에서 각 기능 유닛별 성능 계수기로부터 성능 계수를 추출하고, 각 기능 유닛별 1회 접근 당 파워 소모량을 곱해서 실제 파워 소모

량을 추출한다. 파워 소모량은 [3] 에서 제안되었던 파워 측정 방법을 사용하였다. [3]에서는 마이크로프로세서에서 성능 계수를 추출한 뒤 1회 접근 당 소모하는 파워량을 성능 계수에 곱하는 방법을 사용하였다. 성능 척도로 실행 시간을 측정하였고, 에너지는 바로 측정되는 값이 아니기 때문에, 분석적 모델 (Analytic Model)을 적용하였다. 본 논문에서 사용된 에너지 소모량 측정 모델은 다음과 같다. 작업 부하를 실행시키는 동안 1 클럭 사이클 당 평균적으로 소모된 파워에 실행 시간을 곱하면 전체 에너지 소모량을 도출할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 수식 (2.3)과 같다.

$$\text{에너지소모량}(J) = \text{평균파워소모}(W) \times \text{실행시간}(초) \dots\dots\dots (2.3)$$

또한, 본 논문에서는 에너지 소모량과 성능의 종합적인 평가를 위하여 EDP (Energy-Delay Product) 를 또 하나의 측정 기준으로 정했다. EDP값은 수식 (2.4)와 같이 계산한다.

$$EDP = \text{에너지소모량}(J) \times \text{실행시간}(초) \dots\dots\dots (2.4)$$

펜티엄 4는 통상 하나의 프로세서 코어 (core)에서 실행되고, 코어2 듀오는 프로세서 코어가 2개이다. 코어2 듀오에서 실행되는 프로그램은 각각의 코어에서 동시에 같은 프로그램이 실행되는 것으로 가정하였다.

작업 부하는 SPEC2000 벤치마크 (benchmark) [12]에서 4개의 응용프로그램을 선정하였다. (gzip, bzip2, crafty, twolf) 이 네 가지 벤치마크에 대해서 각 에너지 소모량, 성능, EDP 결과를 보여줄 것이다. bzip2의 경우 펜티엄 4에 최적화하여 컴파일 하였고, gzip, crafty, twolf 이 세 가지 응용프로그램은 어느 마이크로프로세서에도 최적화되지 않았다.

표 1. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 정량적 비교 [10], [11]  
Table 1. Quantitative comparison between Pentium 4 and Core2 Duo [10], [11]

	펜티엄 4	코어2 듀오
클럭 주파수	3.0 GHz	2.0 GHz
클럭 주기 시간	0.3333 ns	0.5 ns
공급 전압	1.5 V	1.225-1.325 V
코어의 수	1	2
파이프라인 깊이	20 단계	14 단계

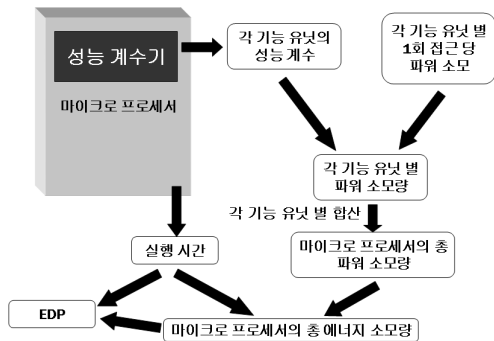


그림 1. 전체적인 실험 설계도. 마이크로프로세서에서 각 기능 유닛 별 성능 계수를 추출하고, 이를 바탕으로 마이크로프로세서 전체 파워소모량과 각 기능 유닛 별 파워소모량을 도출할 수 있다. 실행시간을 별도로 측정하여 추가적으로 에너지 소모량과 EDP를 측정할 수 있다.

Fig 1. Overall experiment process. Through performance counter of each functional unit, we calculate power consumption of microprocessor and each functional unit. To evaluate performance, we can measure execution time, which can be used to calculate energy consumption of microprocessor and EDP.

#### IV. 실험 결과

본 논문에서는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 에너지 소모량과 성능, 그리고 그 두 가지를 종합적으로 비교해볼 수 있는 EDP 측정값에 대해서 보여줄 것이다.

##### 4.1. 시간 흐름에 따른 파워 소모량 비교

이 장에서는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 시간의 흐름에 따른 각 기능 유닛별 파워 소모량을 비교한다. 그림 2는 펜티엄 4의 응용프로그램에 따른 각 기능 유닛 별 파워 소모량을 보여준다. 네 가지 응용프로그램 모두 공통적으로 정수 레지스터 유닛 (IntReg)의 파워 소모량이 가장 많은 것으로 나타났다. 이 유닛 네 가지 응용프로그램들이 SPEC INT 벤치마크이기 때문이다. SPEC INT 벤치마크는 정수유닛을 주로 사용하는 응용프로그램들로 구성되어 있다. 파워 소모량의 변화는 응용프로그램의 특성에 기인하기 때문에 응용프로그램에 따라서 파워의 소모량이 시간에 따라서 변화한다. Gzip의 경우에 가장 높은 파워 소모량을 보여준다.

그림 3은 코어2 듀오의 네 가지 응용프로그램에 따른 각 기능 유닛 별 파워 소모량을 보여준다. 코어2 듀오의 경우에는 정수 유닛 (INT\_c0)의 파워 소모량이 대체적으로 가장 높다. 펜티엄 4에서는 정수 레지스터 유닛의 파워 소모가 가장 많은 반면, 코어2 듀오의 경우에는 정수 연산기 유닛 (Integer

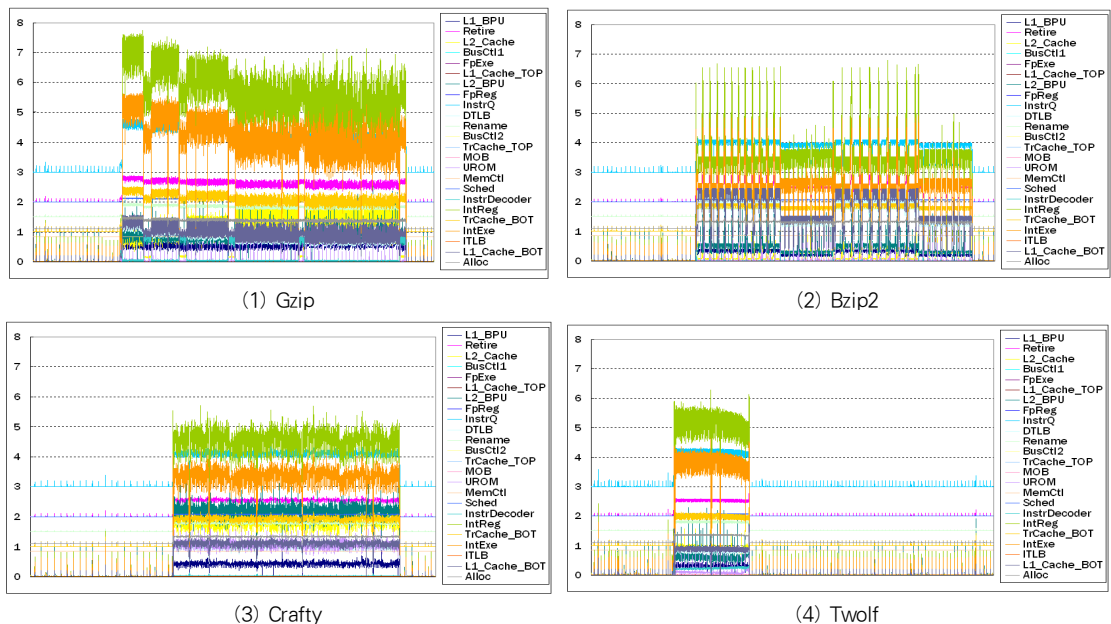


그림 2 펜티엄 4의 응용프로그램 별 시간에 따른 각 기능 유닛 별 파워 소모량. y축의 단위는 와트(W)이다.

Fig 2. Power consumption of each functional unit in Pentium 4 according to applications. The metric of y-axis is Watt (W).

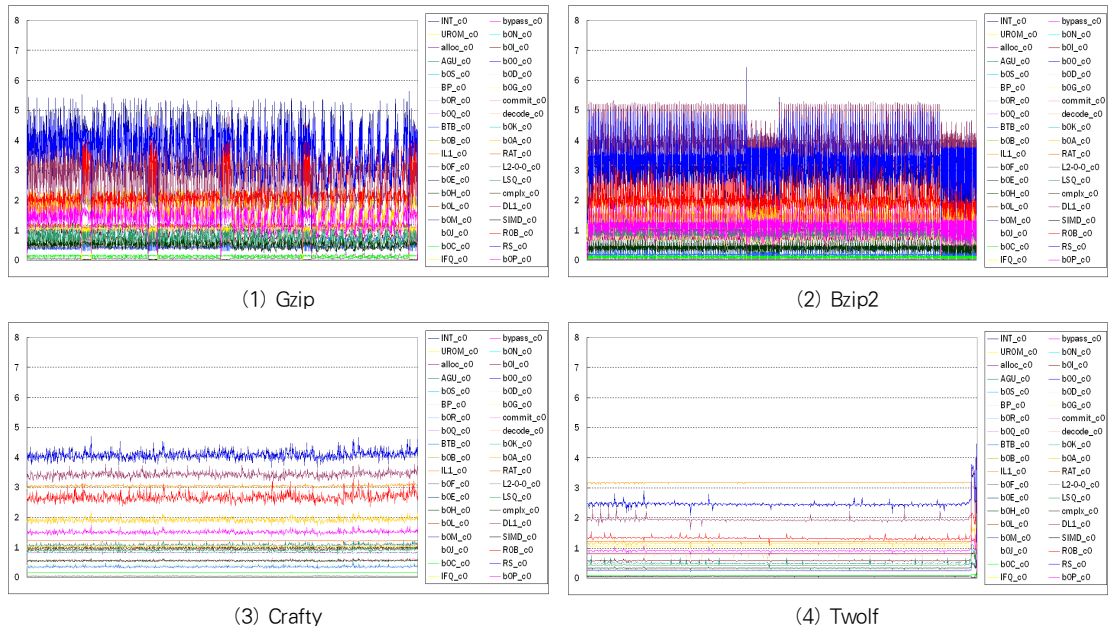


그림 3 코어2 듀오의 응용프로그램 별 시간에 따른 각 기능 유닛 별 파워 소모량. y축의 단위는 와트(W)이다.

Fig 3. Power consumption of each functional unit in Core2 Duo according to applications. The metric of y-axis is Watt (W).

ALU)의 파워 소모량이 가장 많다. 그리고, 펜티엄 4의 경우와는 달리 응용프로그램마다 가장 파워를 많이 소모하는 유닛이 틀리다. Gzip, bzip2, 그리고 crafty의 경우 정수 유닛의 파워 소모량이 가장 많은 반면 Twolf의 경우 대기영역(Reservation Station)의 파워 소모량이 가장 높게 나타났다. 또한, gzip과 bzip2의 경우에는 파워 소모량의 변화가 많은 반면, crafty와 twolf의 경우에는 파워 소모량의 변화가 상대적으로 적었다. 이는 gzip과 bzip2가 메모리를 접근할 때에는 마이크로프로세서의 파워소모가 상대적으로 적기 때문이다. Crafty와 twolf같은 경우에는 메모리 접근이 그다지 많지 않기 때문에 마이크로프로세서에서 일정 수준 이상의 파워를 계속 소모하는 경향이 있다. 코어2 듀오의 경우 프로세서 코어가 2개이기 때문에 같은 기능 유닛이 2개씩 존재해야 하지만 같은 프로그램을 각기 다른 코어에서 동시에 실행시킨 것으로 가정했기 때문에 코어 1개의 파워 소모 변화량만을 나타내었다.

그림 2와 3으로 미루어보면 서로 한 개의 코어만을 비교했을 때, 한 유닛 당 파워 소모량이 펜티엄 4가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. Gzip의 경우 펜티엄 4에서 실행시켰을 때 최대 파워 소모량이 7.5W (정수 레지스터 유닛의 경우)인 반면에 코어2 듀오의 경우 5.7W (정수 연산기 유닛의 경우)이다. 이는 코어2 듀오의 공급 전압이 펜티엄 4보다 0.2V정도 높고 클럭 주파수

가 3.0GHz로 2.0GHz인 코어2 듀오보다 더 높은 것에 기인한다. 마이크로프로세서의 동적 파워 소모량은 공급 전압의 제곱과 클럭 주파수에 비례하게 되므로 같은 프로그램을 실행시켰을 경우 공급 전압과 클럭 주파수가 더 높은 펜티엄 4의 경우에 파워 소모량이 더욱 많다. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 가장 파워를 많이 소모하는 기능 유닛의 파워 소모 차이는 응용프로그램별로 상이하지만 대체적으로 2~3W정도 펜티엄 4가 코어2 듀오에 비해 파워를 많이 소모한다.

#### 4.2. 실행 시간

실행 시간의 경우, 실제 리눅스 시스템의 문맥 전환(Context-switch) 등 기타 오버헤드를 제외하고, 순수하게 응용프로그램이 실행된 시간만을 측정하였다. 그림 4는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 각 응용프로그램 별 실행 시간을 보여준다. Gzip의 경우, 2.06배정도 코어2 듀오가 빠르고, crafty의 경우 1.47배정도 코어2 듀오가 좋은 성능을 보여주었다. twolf의 경우 많이 차이나지는 않았지만 (1.28배) 코어2 듀오가 약간 더 좋은 성능을 보여주었다. 비록, 펜티엄 4의 경우 깊은 파이프라인 구조를 통해 클럭 주파수를 최대한 끌어올렸으나, 너무 많은 파이프라인 단계로 인한 파이프라인 단계 사이의 오버헤드(파이프라인 레지스터와 많은 인터커넥트(interconnect) 선) 들로 인해서 끌어올린 클럭 주파수로 얻는 이득보다 오버헤드로 인

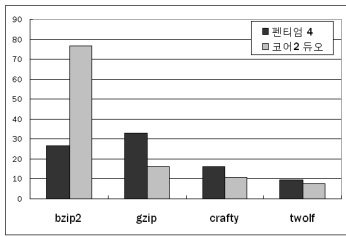


그림 4. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 성능 비교. x축은 응용프로그램 이름이고, y축은 초 단위이다.

Fig 4. The comparison of performance between Pentium 4 and Core2 Duo. The metric of y-axis is second.

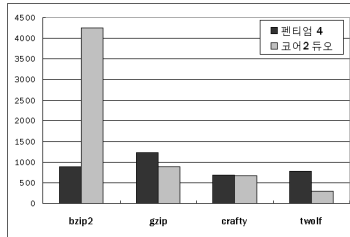


그림 5. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 에너지 소모 비교. x축은 응용프로그램 이름이고, y축은 줄(J) 단위이다.

Fig 5. The comparison of energy consumption between Pentium 4 and Core2 Duo. The metric of y-axis is Joule (J).

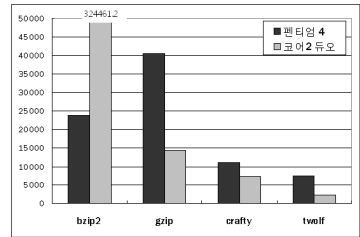


그림 6. 펜티엄 4와 코어2 듀오의 EDP 비교. x축은 응용프로그램 이름이고, y축은 줄(J)×초(s) 단위이다.

Fig 6. The comparison of EDP between Pentium 4 and Core2 Duo. The metric of y-axis is Joule\*second (J\*s).

한 성능 손실이 더 커졌다. 그러나, bzip2의 경우 2.88배정도 펜티엄4가 코어2 듀오보다 빠른 성능을 보여주었다. 이유는 컴파일러 최적화가 bzip2는 펜티엄 4에 맞추어 최적화되어 있기 때문이다. 다른 응용프로그램들이 보여주는 결과와 전혀 상반되는 결과를 보여주는데 이는 컴파일러 최적화가 성능에 미치는 영향이 엄청나다는 것을 보여준다.

### 4.3. 에너지 소모

3장에서 제시한 바와 같이 파워 소모량과 실행시간의 정보를 이용하여 응용프로그램을 실행시켰을 때의 총 에너지 소모량을 도출하였다.

그림 5는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 에너지 소모량을 보여준다. Gzip, crafty, 그리고 twolf의 경우 코어2 듀오가 에너지 효율성이 좋다. Twolf의 경우에는 펜티엄 4가 2.5배정도 많은 에너지를 소모하는 것으로 나타났다. 그리고 crafty의 경우 많은 차이를 보이지는 않았으나, 펜티엄 4가 20J정도 에너지를 많이 소모하는 것으로 나타났다. Gzip의 경우 펜티엄 4가 25%정도 많은 에너지를 소모했다. 그러나, bzip2의 경우 코어2 듀오의 에너지 소모량이 월등히 많았다. 그 이유로, bzip2가 펜티엄 4에 최적화되어 컴파일 되었기 때문에 코어2 듀오가 파워를 적게 소모해도 실행시간이 펜티엄 4가 코어2 듀오에 비해 훨씬 짧기 때문에 더 많은 에너지를 소모한다고 볼 수 있다. 코어2 듀오가 다른 응용프로그램들 (gzip, crafty, twolf) 을 실행시켰을 때, 에너지 소모 측면에서 확실히 펜티엄 4보다 좋지만 응용프로그램의 최적화가 잘못되었을 경우, 훨씬 많은 에너지를 소모할 수 있다는 결론이 나온다. 에너지 소모의 경우, 실행 시간이 오래 걸릴 수록 그에 따른 에너지의 소모도 심각하기 때문에, 파워 소모

량 이외에 실행시간의 영향 또한 무시할 수 없다.

### 4.4. EDP (Energy-Delay Product)

에너지와 성능 두 가지의 효율성에 대해 동시에 고려할 수 있는 척도인 EDP를 비교해보았다. EDP의 계산 방법은 3장에서 보여진 바와 같이 응용프로그램을 실행시켰을 때, 소모되는 에너지와 실행시간을 곱한 값이 된다.

그림 6에서 보이는 바와 같이 EDP에서는 두 개의 값을 곱했기 때문에, 더욱더 많이 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. Gzip의 경우 2.83배정도 코어2 듀오가 EDP면에서 월등한 것으로 나타나고, crafty의 경우 1.51배, 그리고 twolf의 경우 3.31배 차이가 난다. 그러나 bzip2의 경우 반대로 펜티엄 4가 EDP 효율성이 13.56배정도 좋은 것으로 나타난다. 이유는 앞에서 설명했던 것처럼 bzip2는 펜티엄 4에 최적화된 바이너리 (binary)이기 때문에 에너지 소모 측면과 실행 시간 측면에서 월등히 좋은 결과를 보여준다. (그림 6에서 bzip2의 코어2 듀오에서의 EDP 측정값이 너무 크기 때문에 숫자로 표시했다.) 이는 역시 마이크로프로세서의 구조 이외에 컴파일러의 최적화가 얼마나 큰 영향을 미치는지를 보여주는 결과이다.

## V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 펜티엄 4와 코어2 듀오의 에너지, 파워 소모량, 그리고 실행시간을 비교해보았다. 결과에서 보이듯이 파워, 에너지 소모, 실행시간 모든 측면에서 코어2 듀오가 더 나은 결과를 보여주었다. 그러나 bzip2의 결과에서 보이듯이 컴파일러 최적화가 에너지 소모와 성능에 미치는 영향이 상당

히 크다는 결과도 나왔다. 즉, 마이크로프로세서 내부 구조를 아무리 잘 설계하더라도 소프트웨어적인 최적화가 되어있지 않으면 에너지 소모나 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

마이크로프로세서의 설계 기준에 여러 가지가 있다. 설계 목표는 에너지 소모를 줄이고, 성능을 높이는 것이지만 서로 상충되는 부분이 있어서 한 쪽에서 이득을 보면 한 쪽에서는 손해를 보아야 한다. 그러나, 마이크로프로세서 설계자들은 이 두 가지를 모두 놓치고 싶어하지 않는다. 본 논문에서는 대표적인 상용 마이크로프로세서인 인텔사의 펜티엄 4와 코어2 듀오의 에너지 소모와 성능을 비교해봄으로써 마이크로프로세서 설계와 에너지 소모, 성능 간에 어떠한 연관 관계가 있는지 논하였다. 본 논문을 통하여 추후에 마이크로프로세서를 설계할 때, 어떠한 부분이 중요시 되어야 하고 어떻게 설계가 되어야 하는지 설계자들은 이에 대한 통찰력을 얻을 수 있을 것이다. 본 논문에서는 고성능 마이크로프로세서끼리 비교하였지만, 추후 연구 계획으로는 내장형 (embedded) 마이크로프로세서와 고성능 마이크로프로세서를 비교, 분석할 계획이다.

## 참고문헌

- [1] S. Borkar. "Design Challenges of Technology Scaling", IEEE Micro, 1999.
- [2] John L. Hennessy, David A. Patterson. "Computer Architecture: A Quantitative Approach", 4th Edition Morgan Kaufmann 2007.
- [3] C. Isci and M. Martonosi. "Runtime Power Monitoring in High-End Processors: Methodology and Empirical Data." In 36th ACM/IEEE International Symposium on Microarchitecture (MICRO-36), Dec. 2003.
- [4] John S. Seng, Dean M. Tullsen: The Effect of Compiler Optimizations on Pentium 4 Power Consumption. Interaction between Compilers and Computer Architectures 2003: 51-56
- [5] T. Simunic, L. Benini, G. D. Micheli. "Energy-efficient design of battery-powered embedded systems." IEEE Trans. VLSI Systems. 9(1), pages 15-28, 2001.
- [6] K. Skadron, M. R. Stan, W. Huang, S. Velusamy, K. Sankaranarayanan, and D. Tarjan. "Temperature-aware microarchitecture." In 30th ACM/IEEE International Symposium on Computer Architecture (ISCA-30), pages 2-13, June 2003.
- [7] J. Srinivasan, S. V. Adve, P. Bose, J. A. Rivers. "The Case for Lifetime Reliability-Aware Microprocessors." In 31st ACM/IEEE International Symposium on Computer Architecture (ISCA-31), pages 276-287, June 2004.
- [8] D. M. Tullsen, S. J. Eggers, H. M. Levy, "Simultaneous Multithreading: Maximizing on-chip parallelism", In 22nd ACM/IEEE International Symposium on Computer Architecture (ISCA-22), pages. 191-202, June 1995.
- [9] B. Zhai, D. Blaauw, D. Sylvester, and K. Flautner. "The limit of dynamic voltage scaling and insomniac dynamic voltage scaling", IEEE Trans. VLSI Systems, 13(11), pages 1239-1252, 2005.
- [10] Intel(R) Pentium(R) 4 Processor on 90 nm Process Datasheet. Available at <ftp://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/30056103.pdf>
- [11] Intel(R) Core TM2 Duo Processor E8000 and E7000 Series Datasheet. Available at <http://download.intel.com/design/processor/datashts/318732.pdf>
- [12] SPEC2000 benchmark suite. <http://www.spec.org>

저 자 소 개



공 준 호  
2007년 8월: 고려대학교 정보통신대학  
컴퓨터과학 학사  
2007년 9월~현재: 고려대학교 컴퓨  
터통신공학부 석  
사과정 재학 중  
관심 분야: 컴퓨터 구조, 고성능 컴퓨  
터, 임베디드 프로세서



정 성 우  
2003년 2월: 서울대학교 전기 컴퓨  
터공학 박사  
2003년 1월~2005년 2월: 삼성전자  
반도체총괄, Senior  
engineer  
2005년 3월~2006년 1월: 방문 연  
구원, Department of  
Computer Science,  
University of Virginia.  
2006년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨  
터통신공학부 조  
교수  
관심 분야: 컴퓨터 구조, 프로세서 온  
도 관리, 플래쉬 메모리,  
System on Chip



최 진 항  
2008년 2월: 고려대학교 컴퓨터과학  
학사  
2008년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨  
터통신공학부 석사과정 재학 중  
관심 분야: 컴퓨터 구조, 고성능 컴퓨  
터, 실시간 처리



이 중 성  
2007년 2월: 고려대학교 정보통신대  
학 컴퓨터과학 학사  
2007년 3월~현재: 고려대학교 정보  
통신대학 컴퓨터통신공학부  
석사과정 재학 중  
관심 분야: 컴퓨터 구조, 시스템 소프  
트웨어, Solid-State  
Disk