

끝없이 스피드를 추구하는 세계

프로세서를 지탱하는 기술

PROCESSOR WO SASAERU GIJYUTSU

by Hisa Ando

Copyright © Hisa Ando 2011

All rights reserved.

Original Japanese edition published by Gijyutsu-Hyoron Co., Ltd., Tokyo

This Korean language edition published by arrangement with Gijutsu-Hyoron Co., Ltd., Toyko in care of Tuttle-Mori Agency, Inc., Tokyo through Gaon Agency, Seoul.

Korean translation rights © 2011 by J-Pub

이 책의 한국어판 저작권은 터틀모리 에이전시와 가온 에이전시를 통한 Gijutsu-Hyoron Co., Ltd.와의 독점계약으로 제이펍에 있습니다. 신저작권법에 의하여 한국 내에서 보호를 받는 저작물이므로 무단전재와 무단복제를 금합니다.

끝없이 스피드를 추구하는 세계

프로세서를 지탱하는 기술

초판 1쇄 발행 2011년 11월 18일

지은이 안도 히사

옮긴이 진명조 | 펴낸이 장성두 | 책임편집 안주연

분문디자인 북아이 | 표지디자인 미디어퍼क्स

주소 경기도 파주시 교하읍 파주신도시 에이15-1블록 한빛마을 휴먼빌 201-502

전화 070-8201-9010 | 팩스 02-6280-0405

홈페이지 www.jpub.kr | 펴낸곳 제이펍

출판신고 2009년 11월 10일 제406-2009-000087호

용지 신승지류유통 | 인쇄 해외정판사 | 제본 광우제본

ISBN 978-89-94506-24-1 (93560)

값 27,000원

※ 이 책은 저작권법에 따라 보호를 받는 저작물이므로 무단전재와 무단복제를 금지하며, 이 책 내용의 전부 또는 일부를 이용하려면 반드시 저작권자와 제이펍의 서면동의를 받아야 합니다.

※ 잘못된 책은 구입하신 서점에서 바꾸어 드립니다.

제이펍은 독자 여러분의 책에 관한 아이디어와 원고 투고를 기다리고 있습니다. 책으로 펴내고자 하는 아이디어나 원고가 있으신 분께서는 책에 대한 간단한 개요와 차례, 구성과 저(역)자 약력 등을 메일로 보내주세요. (보내실 곳: jeipub@gmail.com)

끝없이 스피드를 추구하는 세계

프로세서를 지탱하는 기술

200만 배의 성능 향상은 어떻게 실현되었나?

프로세서
개발경력 40년
저자 작필!

아마존 재팬
베스트셀러
★★★★★

시스템 성능을
최대로 이끌어내는
비법!



안도 히사 지음 / 진명조 옮김

드리는 말씀

- 이 책에 기재된 내용을 기반으로 한 운용결과에 대해 저자, 역자, 소프트웨어 개발자 및 제공자, 주식회사 기술평론사, 제이펍 출판사는 일체의 책임을 지지 않으므로 양해바랍니다.
- 이 책에 등장하는 각 회사명, 제품명은 일반적으로 각 회사의 등록상표 또는 상표입니다. 본문 중에는 ™, ©, ® 마크 등이 표시되어 있지 않습니다.

지은이 서문	XII
이 책의 구성	XIV

CHAPTER
01

프로세서와 컴퓨터 시스템 기초

1.1 컴퓨터의 구조	3
컴퓨터의 구성요소 — 프로세서, 메모리, 입출력장치	3
컴퓨터는 2진법으로 계산한다	5
프로세서 — 프로그램을 해석하는 컴퓨터의 두뇌	6
메모리 — 컴퓨터의 '명령' 과 '데이터' 를 기억한다	14
입출력장치 — 컴퓨터의 눈, 귀, 입	20
노스브리지와 사우스브리지 — 희미해져 가는 호칭	23
1.2 컴퓨터의 고속화를 지탱하는 반도체 기술	26
무어의 법칙 — 보다 많은 트랜지스터, 병렬도를 높이는 방향으로	26
방대한 개발투자가 뒷받침하는 반도체의 미세화 — 미세화 추세는 앞으로 당분 간은 계속	28
Dennard Scaling — 트랜지스터의 성능 향상	28
성능 향상의 세 축 — 클럭 향상, 병렬 처리, 기능 확장	29
1.3 컴퓨터와 데이터의 표현	30
바이트, 하프워드, 워드... — 비트의 그룹과 용도	30
문자 코드	31
부호 없는 정수와 부호 있는 정수, 1의 보수표현과 2의 보수표현	33
부동소수점 수 — IEEE 754 규격	35
빅 엔디언과 리틀 엔디언	37

1.4 프로세서와 명령	39
명령 집합 아키텍처 입문	39
기계어 명령 — 프로세서로의 명령	41
어드레스 공간	42
1.5 기계어 명령 프로그램 작성법	45
어셈블러에 의한 프로그래밍	45
컴파일러를 사용하는 고급언어에 의한 프로그래밍	47
인터프리터에 의한 프로그래밍	48
1.6 정리	51

CHAPTER
02

프로세서의 변천

2.1 컴퓨터 이전의 계산장치	57
주판 — 계산을 하기 위한 최초의 도구	57
네이피어의 뼈 — 곱셈 보조도구	58
기계식 계산기 — 시카드의 계산기, Pascaline	60
배비지의 차분기관 — 톱니바퀴를 사용한 슈퍼컴퓨터	61
2.2 초기 전자식 컴퓨터	63
초기 전자식 컴퓨터 — ABC와 ENIAC	63
FUJIC — 일본 최초의 전자식 컴퓨터	64
2.3 프로세서를 구성하는 소자의 변천	65
주요 부품을 기반으로 한 컴퓨터의 세대 분류	65
제1세대: 진공관	65
제2세대: 트랜지스터	67
제3세대: 집적회로(IC, LSI)	68
제4세대: 대규모 집적회로(VLSI)	69
VLSI 프로세서의 소자 개수, 클럭 주파수의 트렌드	72
2.4 명령 집합 아키텍처의 변천	74
명령 집합 아키텍처 발전의 길	74

컴퓨터의 구성요소 — 프로세서, 메모리, 입출력장치	75
가상 메모리 — 보다 유효하게 메모리를 많이 사용하고 싶다	76
TSS와 메모리 관리 기구의 등장	79
멀티프로세스 — 프로그램의 배치 전환이 필요	79
메모리 관리기구, 특권 상태 — 멀티유저에서는 보안문제를 해결할 필요가 있다	80
ISA 확장 — 명령 집합 아키텍처의 확립과 명령 상호성의 실현	82
2.5 마이크로아키텍처의 발전	84
마이크로아키텍처 발전의 길	84
파이프라인 처리 — 파이프라인 레지스터를 사용해서 하드웨어를 유효하게 이용한다	86
연산기의 고속화 — 정수 연산기, 부동소수점 연산기	87
캐시 — '메모리 액세스' 문제에 대처하는 비밀의 상자	88
RISC의 출현 — RISC와 CISC	90
슈퍼스칼라 실행 — 복수 명령을 1사이클에 실행한다	92
비순차 실행 — 명령의 순서를 변경해서 성능을 높인다	94
분기예측과 투기실행 — '조건분기명령' 대책	95
멀티코어 — 소비전력의 제약이 멀티코어화를 이끌다	96
2.6 용도가 확대되는 프로세서	99
다양한 무대에서 활약하는 프로세서	99
저전력, 높은 신뢰기술, 실시간성 — 다양한 요건	100
2.7 정리	101

CHAPTER
03

프로그래머를 위한 프로세서 아키텍처

3.1 마이크로아키텍처를 지탱하는 기술	105
파이프라인 실행의 원리 — '병렬'로 명령을 처리한다	105
캐시의 원리 — 메모리 액세스를 가속한다	118
RISC와 CISC — 고정길이 명령과 가변길이 명령	135
연산기의 고속화 — 프로세서 내에서 처리가 복잡해서 시간이 걸리는 부분 중 하나	139
슈퍼스칼라 실행의 원리 — 1사이클에 복수 명령을 병렬실행	151
비순차 실행의 원리 — 데이터 해저드의 영향을 줄인다	153

분기예측의 원리 — 제어 해저드에 의한 손실을 줄인다 160

현대의 프로세서는 각종 해저드를 해소, 경감해서 성능을 높이고 있다 ... 167

메모리, I/O와 입출력 인터페이스 168

성능 카운터 — 프로파일러, 프로세서 내부의 실행상황에 대한 정보 175

3.2 프로세서의 이용범위를 넓히는 아키텍처 확장 178

멀티프로그래밍과 메모리 관리 구조 178

인터럽트 처리 구조 185

가상화 지원 — 메모리 액세스와 메모리 관리 구조 191

멀티미디어, 암호 등에 대한 지원 — 대량 데이터를 다루는 계산 처리 194

3.3 x86 네할렘 아키텍처 프로세서 201

x86의 명령체계, 인텔 64 아키텍처에 대해 201

Core i7 프로세서의 구성 210

메모리 관리는 4계층 테이블을 사용 216

새로운 프로세서 인터페이스 QPI 221

3.4 정리 224

CHAPTER
04

가상화 지원

4.1 가상화의 목적, 장/단점 229

가상화의 기초지식(복습) 229

가상화의 목적 230

유저 간 분리를 견고하게 실현 — 가상화의 장점 1 230

여러 서버를 모아서 가동률을 개선 — 가상화의 장점 2 232

VMM의 실행 오버헤드 — 가상화의 단점, 주의점 233

4.2 가상화를 실현하기 위해 236

OS에 독립된 (가상) 하드웨어를 제공하는 VMM 236

4.3 가상화를 지원하는 하드웨어 구조 239

하드웨어 조각명령 검출 239

하드웨어 상태의 회피, 복원 — 가상머신의 전환	240
이중 어드레스 변환, TLB	242
I/O 가상화	247
라이브 마이그레이션	252
4.4 정리	254

CHAPTER
05

멀티프로세서의 출현과 보급

5.1 멀티스레드 프로세서	259
스레드, 멀티스레드의 범람(!?) — 우선 용어 복습부터	259
멀티스레드의 두 가지 방식	260
VMT의 원리 — 단시간에 스레드를 전환한다	262
SMT의 원리 — 복수의 스레드의 명령을 섞는다	264
SMT에 필요한 메커니즘	265
멀티스레드의 효과는 얼마나? — 윈도우 작업관리자에서 보는 예	267
5.2 멀티프로세서 시스템	271
멀티프로세서, 멀티코어란 무엇인가?	271
멀티코어 프로세서의 구조	272
캐시 정합성 제어 — 멀티프로세서의 캐시 간 정합성	275
멀티소켓 시스템	282
멀티프로세서 시스템의 성능 향상 — 문제와 대책	289
공유메모리 시스템과 분산메모리 시스템	296
5.3 정리	300

CHAPTER
06

프로세서 주변기술

6.1 메인 메모리 기술	305
메인 메모리의 역사 복습	305

DRAM의 동작원리 — 전하로 정보를 기억한다 306

DRAM 칩과 메모리 DIMM 309

DRAM 칩의 내부구조 — 셀 어레이, 행/열 디코더, 센스 앰프, 뱅크 312

프로세서와 DIMM의 연결 314

메모리 시스템의 에러 대책 316

6.2 입출력장치 연결 322

 프로세서의 I/O 연결 322

 PCI 버스 324

 인텔 Core i 시리즈 프로세서의 I/O 구조 330

 인텔 PCH의 I/O 제어구조 331

6.3 정리 333

CHAPTER
07

GPGPU와 초병렬처리

7.1 GPGPU의 구조 337

 3D 그래픽스와 GPU — 대량의 계산이 필요 337

 GPU 시스템 340

 GPU에서 GPGPU로 341

 ‘초병렬 SIMD 프로세서’ 로서의 GPGPU 342

 ‘초멀티스레드 프로세서’ 로서의 GPGPU 345

 GPGPU의 메모리 계층 346

 GPGPU의 멀티스레드는 범용 레지스터를 분할 사용한다 348

 CPU와 GPGPU의 주요 차이점 350

7.2 GPGPU 프로그래밍 352

 GPGPU 프로그래밍의 현재 352

 CUDA의 실행 모델 — 스레드 블록, 그리드 352

 CUDA에서의 함수 선언, 변수 선언 355

 OpenCL 프로그래밍 356

 GPGPU의 성능을 끌어내려면 358

7.3 정리	369
--------------	-----

CHAPTER
08

프로세서는 앞으로 어떻게 변해갈 것인가?

8.1 소비전력이 모든 것을 지배한다	373
프로세서는 왜 전력을 소비하는가?	373
저전력기술의 발전	377
8.2 고성능, 다기능화	381
반도체의 미세화 기술	381
증가하는 트랜지스터를 잘 사용하려면?	382
일부 트랜지스터를 비용절감을 위해 사용한다	384
일부 블록이 불량인 칩을 유효하게 이용한다	386
8.3 더 신뢰할 수 있고 안전한 프로세서 설계	389
프로세서는 왜 오작동하는가? — 고장, 노이즈	389
오작동을 막아서 안전하게 동작하도록 한다	392
8.4 프로세서의 앞으로의 방향성은?	394
다양한 시스템에서 사용되는 프로세서	394
가전용 프로세서	394
자동차용 프로세서	395
PC용 프로세서	395
스마트폰용 프로세서	396
서버용 프로세서	398
8.5 정리	401

찾아보기 403

지은이 서문

2010년 말 현재 전 세계에서는 매일 100만 대에 달하는 PC가 판매되고 있다. 그 핵심부에는 프로세서가 자리하고 있다. PC뿐만 아니라 휴대전화는 물론 자동차, 가전제품에도 프로세서가 사용되고 있다. 대부분의 휴대전화에 장착되어 있는 ARM 프로세서의 개발사인 영국의 ARM사는 2010년에 ARM 프로세서 누적 출하량이 200억 개를 넘어섰다고 발표했다. ARM 한 회사에서만 연간 제조개수가 40억 개로 전 세계 인구의 절반 이상의 수에 이르고 있다. 우리는 전 세계 총 인구의 몇 배나 되는 프로세서가 우리 주위의 생활을 뒷받침해주고 있는 세상에 살고 있는 것이다. 또한 구글(Google)과 같은 검색 시스템이나 은행 ATM, 철도 운영 시스템 등은 프로세서를 사용한 사회의 기반 시스템으로, 이제 이러한 시스템이 없는 생활은 생각할 수도 없다.

역사를 되돌아보면 오래 전부터 계산을 간단하고 빠르게 실행하기 위한 연구가 거듭되어 왔다. 주판 같은 계산보조 도구부터 톱니바퀴를 사용한 기계식 덧셈/곱셈기가 만들어지고, 더욱 고속으로 동작시키기 위해 톱니바퀴를 대신해 전자회로가 이용되게 되었다. 1946년에 완성돼 실용화된 최초의 컴퓨터인 에니악(ENIAC)은 커다란 방을 가득 채우는 거대한 장치로, 그 성능은 매초 5,000연산, 약 150KW나 되는 전력을 소비했다. 이에 비해 오늘날의 마이크로프로세서는 매초 100억 연산 이상의 성능을 지니며, PC 전체의 소비전력은 기껏해야 300W 정도다. 즉, 연산성능은 '200만 배' 향상되고 소비전력은 '1/500'로 감소한 것이다.

사실 초기의 전자식 컴퓨터부터 시작해서 현재까지 겨우 60년밖에 지나지 않았다. 이 장족의 진보를 이루게 된 과정을 살펴보면 무엇보다 진공관에서 시작해서 트랜지스터 그리고 LSI로 이어지는 회로 테크놀로지의 진보에 힘입은 면이 크며, 한편으로는 보다 빠른 실행을 추구하는 컴퓨터 아키텍처의 진보도 크게 공헌하고 있다.

고속화를 추구해온 프로세서도 최근에는 소비전력에 제약이 따르면서 싱글코어의 성능 향상이 둔화하면서 진화가 일단락된 느낌도 있지만, 멀티스레드, 멀티코어화라는 방향으로 성능 향상을 꾀하고, 나아가 가상화나 보안 등의 기술로 사용 편의성을 개선하려는 노력을 계속 하고 있다. 또한 전통적인 컴퓨터뿐만 아니

라 스마트폰이나 넷북 등의 휴대기기에 강력한 프로세서가 사용되기에 이르렀고, 배터리 수명 측면에서도 한층 더 저소비전력화가 요구되고 있다.

위와 같이 시대와 요구의 변화에 적응하면서 프로세서는 진화를 거듭하고 있다. PC에 'Intel Inside' 라는 로고가 붙게 되기도 하고, 하드웨어 기술에 그다지 관심이 없는 사람일지라도 마이크로프로세서 또는 프로세서라는 용어를 알고 있는 시대다. 그러나 한편으로 최신 프로세서는 그 진화에 걸맞게 대단히 복잡해지고 있지만, 그 구조나 사용법에 대해서는 많은 사람들이 이해하고 있다고 말하기는 어려운 상황이다.

그러나 프로세서의 구조나 동작을 이해하고 있는 것과 내부를 모른 채 블랙박스 사용하고 있는 것과는 활용적인 측면에서 차이가 나지 않을까? 자동차로 말하자면, 승용차를 일상적으로 운전하는 경우에는 자동차의 구조나 각각의 특성 차이에 관한 정보 등을 몰라도 별 상관없을 테지만, 그런 것들을 이해하고 있다면 보다 스포티하게 혹은 보다 경제적인 운전을 할 수 있을 것이다.

이 책은 프로그램을 직접 작성하고 컴퓨터 시스템을 보다 효율적으로 사용하고 싶어하는 독자를 대상으로 한 프로세서에 관한 해설서다. 프로세서에 탑재되어 있는 고성능화 기술 및 내부구조, 기능을 중심으로 설명하고, 프로그램을 어떻게 작성해야 프로세서의 성능을 끌어낼 수 있을지에 대해서도 설명하고 있다. 또한 프로세서의 설계라고 하면 AND, OR 등의 논리회로를 이용한 논리회로 레벨의 하드웨어 설계를 연상할지 모르지만, 이 책에서는 논리회로보다는 상위레벨인, 프로그래머와의 인터페이스가 되는 '마이크로아키텍처'와 '명령 아키텍처'에 초점을 맞추고 있다.

바야흐로 휴대기기부터 사회기반 시스템에 이르기까지 다양한 컴퓨터의 핵심부에 위치해서 중요한 역할을 다하고 있는 프로세서. 독자 여러분이ダイ나믹한 진화를 계속하는 프로세서를 이해하고 한층 더 제대로 사용하는 데 일조를 할 수 있기를 바라며, 그런 생각을 담아서 집필한 것이 바로 이 책이다.

안도 히사

이 책의 구성

이 책에서는 프로그램을 작성하는 독자들을 주요 대상으로 해서 프로세서의 구조와 능숙한 사용법을 알기 쉽게 설명하고 있다. 각 장은 아래와 같은 내용이다.

제1장 프로세서와 컴퓨터 시스템 기초

제1장은 소개에 해당하는 장으로, 프로세서나 이를 사용하는 컴퓨터의 개요 및 용어를 소개하여 프로세서나 컴퓨터 하드웨어 초심자에게도 이후의 내용을 이해할 수 있도록 알기 쉽게 설명하고 있다.

제2장 프로세서의 변천

제2장에서는 계산기가 어떻게 발전해왔는지 그리고 프로세서의 고성능화나 사용 편의성 개선을 위해 어떤 기술이 개발되어 왔는지에 대해 설명한다. 현재 프로세서가 출현하기까지의 과정과 사용되고 있는 기술에 대한 개요를 이해할 수 있도록 하는 것이 목적이다.

제3장 프로그래머를 위한 프로세서 아키텍처

제4장 가상화 지원

제5장 멀티프로세서의 출현과 보급

제3장에서 제5장은 이 책의 중심이 되는 장들이다. 제3장에서는 파이프라인 처리나 캐시, 비순차(Out-of-Order) 처리와 같은 프로세서 고속화 기술이나 메모리 관리, 가상화, 멀티미디어 처리 등의 프로세서의 적용범위를 넓히는 기술에 대해 구체적으로 설명한다. 아울러 프로그램 등의 예를 들어 프로그래머로서 어

떻게 사용해야 효율이 높아질 수 있는지에 대해서도 알기 쉽게 설명한다. 또한 제3장에서는 PC나 서버에 널리 사용되고 있는 인텔 프로세서의 구조도 설명하고 있다.

제4장에서는 최근에 클라우드 시스템 등에서 필수 요소인 가상화에 대해 이를 실현하는 메커니즘이나 가상화 시스템을 효율적으로 운용하기 위해 주의할 점에 대해 설명한다.

제5장에서는 역시 최신 트렌드인 멀티스레드와 멀티코어 프로세서에 대해 그 출현배경부터 사용되고 있는 기술을 설명하고 멀티코어 프로세서를 잘 활용하기 위한 주의점을 설명한다.

제6장 프로세서 주변기술

제6장은 프로세서와 함께 컴퓨터 시스템의 중요한 구성요소인 주변기술을 다루고 기억을 담당하는 메모리와 프로세서에서 입출력장치로 연결되는 구조와 동작에 대해 설명한다.

제7장 GPGPU와 초병렬처리

제7장에서는 최근 뛰어난 계산처리 능력으로 주목 받고 있는 GPU(Graphic Processing Unit), GPGPU(General Purpose GPU)에 주목해서 그 구조나 연산 엔진으로서의 사용상 주의점을 설명한다.

제8장 프로세서는 앞으로 어떻게 변해갈 것인가?

마지막 제8장에서는 프로세서가 앞으로 어떻게 발전해나갈 것인지에 초점을 맞춰 기술적인 발전 방향성과 프로세서의 용도별 발전 방향성에 대해 생각해본다.