컴퓨터과학이 여는 세계

초판 1쇄 발행 2015년 5월 26일 **지은이** 이광근 **펴낸이** 한기성 **펴낸곳** 인사이트 **편집** 이지연 **표지 디자인** 오필민 **본문 디자인** 김종민 **일러스트** 이승언 **제작·관리** 박미경 **표지출력** 소다디자인프린팅 **용지** 월드페이퍼 **인쇄** 현문인쇄 **제본** 자현제책 **등록번호** 제10-2313호 **등록일자** 2002년 2월 19일 **주소** 서울시 마포구 잔다리로 119 석우빌딩 3층 **전화** 02-322-5143 **팩스** 02-3143-5579 **블로그** http://blog.insightbook.co.kr **이메일** insight@insightbook.co.kr **ISBN** 978-89-6626-143-7 책값은 뒤표지에 있습니다. 잘못 만들어진 책은 바꾸어 드립니다. 이 책의 정오표는 http://www.insightbook.co.kr/27291에서 확인하실 수 있습니다. 이 도서의 국립중앙도서관 출판예정도서목록(CIP)은 서지정보유통지원시스템 홈페이지(http://seoji.nl.go.kr)와 국가자료공동목록시스템(http://www.nl.go.kr/kolisnet)에서 이용하실 수 있습니다.(CIP제어번호: CIP2015011003)

Copyright ⓒ 2015 이광근, 인사이트
일러스트 Copyright ⓒ 2015 이승언sujeoji@gmail.com
이 책 내용의 일부 또는 전부를 재사용하려면 반드시 저자와 인사이트 양측 모두의 서면 동의를 얻어야 합니다.

컴퓨터 과학이 여는 세계

펴내면서

PREFACE

컴퓨터 이야기다. 근본이 무엇이고, 어떻게 탄생했고, 소프트웨어의 세계는 어떤 세계인지. 컴퓨터가 우리의 지능과 본능과 현실을 어떻게 확장시키는지. 그래서 우리가 지금 기대고 있는 디지털 세계를 어떻게 바라볼 수 있는지.

독자들은 궁금해 할 것이다. 이 책이 내게 어떤 새로운 도움이 될까? 이 책은 두 가지 성격으로 독자들과 만날 듯하다. 컴퓨터 세계의 근본이 궁금할 때 누구나 펼쳐 볼 수 있는 과학 교양서적으로, 혹은 컴퓨터 전문가의 기본을 준비시켜 주는 '예과' 입문서로서. 다음 네 가지 정도를 염두에 두고 썼기 때문이다.

- 밑거름

  컴퓨터 관련 기술은 대개 매스컴을 통해서 접하고, 우리들의 이해는 표면적인데 머물기 쉽다. 독자들이 컴퓨터과학기술의 핵심을 쉽게 익혀 긴 수명의 밑거름이 되기를 바라며 썼다.

• 안목

컴퓨터와 소프트웨어는 우리의 모든 일상을 움직이는 중요한 인프라다. 독자들이 그 원천 아이디어를 이해해서 미래에 가능한 응용을 창조하거나 예측할 수 있는 안목을 갖추는 데 도움이 되기를 바라며 썼다.

• 확장

컴퓨터과학은 모든 분야의 성과를 바탕으로 자라며 모든 분야(과학, 인문학, 공학, 사회과학, 예술, 교육, 경영, 의학, 법학 등)를 살찌우는 보편 학문의 성격을 점점 띠고 있다. 다른 세계를 상상하는 모두와 이 책이 손잡을 수 있기를 바라며 썼다.

• 기회

지금까지의 정보화 문명은 시작일 뿐이다. 컴퓨터과학기술이 미래에 만들어 갈 다양한 기회를 상기시키는 계기가 되기를 바라며 썼다.

특히 이 책에서는 컴퓨터과학에서 나온 원천적인 아이디어들에 집중했다. 컴퓨터과학 고유의 핵심 아이디어들이 펼쳐진다.

부담이 없지는 않았다. 한숨에 컴퓨터과학이란 분야를 제대로 짚을 순 있는 건지. 멀어지면 숨소리를 놓치고 가까우면 형체를 잃는 그런 줄타기였다. 균형추로 삼은 건 컴퓨터과학 고유의 원천 아이디어들이었다.

의외로 시중에서 그런 아이디어를 모아 소개하는 책은 찾기 어려웠다.

영어권도 마찬가지였다. 단편적이었다. 컴퓨터과학의 풍경 아래에 흐르는 원천 아이디어들. 이것들이 나온 이야기들. 그 연유와 의미. 그래서 그 진폭과 그 주파수로 생각이 진동한다면. 이 책이 독자들에게 그런 진동을 유도할 수 있다면 영광일 것이다.

그런 진동이 우리가 원하는 선진국형 원천지식을 만들어 낼 토양을 도탑게 다져줄 것이라고 본다. 컴퓨터과학에서 그런 지식이 지금까지 어떤 동기로 어떻게 나왔는지, 겁낼 필요 없는 모습을 소개한다.

그리고, 당연하지만 편안한 우리말로 컴퓨터과학을 쉽게 설명할 수 있을 거라 믿고 나섰다. 확인할 수 있어서 즐거웠는데, 독자들도 같은 생각일진 모르겠다.

사실 따스한 모국어로 깊이 있는 전공서적들이 모인 시리즈를 상상해왔었다. 이 책이 그런 시리즈의 한 권이 될 수 있을까. 그래서 누구나 쉽게 들어설 수 있는 열린 울타리의 비옥한 토양, 그 한 귀퉁이를 이 책이 담당한다면 기쁠 것 같다.

전세계적으로 컴퓨터 소프트웨어 교육이 누구에게나 필수가 되고 있고 우리나라도 예외는 아니다. 이 교육의 목표는 시민들에게 우리를 둘러싼 디지털 세상을 바라보는 시각을 형성해주는 것이다. 마치 물리 교육이 우리를 둘러싼 자연을 바라보는 시각을 형성해 주듯이. 그런데 그 시각이란, 근본을 알아내려고 뒤로 물러날 때 더 넓은 부채꼴을 그리며 많은 것을 커버할 수 있을 것이다.

그런 넓은 시각을 형성해 줄 근본적인 내용을 가능한 한 쉽게 전달하는 콘텐츠. 이 책이 그런 한 수이길 바란다.

표기법

전문용어가 나타날 때 영어를 아래첨자*subscript*로 덧붙였다. 전문용어는 최대한 힘을 빼고 쉽고 직관적인 표현을 썼다. 지레 겁먹게 하는 불필요한 한문 단어는 피했다. 도저히 쉬운 말을 찾을 수 없을 땐 영어 발음대로 쓰기도 했다. 사용한 전문용어들의 색인은 책 뒤에 정리해 놓았다. 참고했던 자료는 참고문헌에 정리해 놓았다. 그 밖의 자료는 책에서 언급한 전문용어를 구글 검색창에 넣으면 쉽게 얻을 수 있을 것이다. 길목에 오르막 표시 ⛢가 있으면 조금 어려운 부분의 시작을 뜻한다. 내리막 표시 ⛢까지 건너뛰어도 전체를 조망하는 데는 지장이 없을 것이다.

그리고 단락 사이에 종종 시를 인용해 끼웠다. 이해를 돕는 촉매로, 혹은 한 컷의 삽화나 쉼표를 대신해서 시를 사용했다.

감사

ACKNOWLEDGEMENTS

이 책의 동기를 만들어 준 분들께 감사하다. 이 책의 시작은 2010년으로 거슬러 올라간다. 당시 한국정보과학회에서 컴퓨터분야를 일반인들에게 쉽게 전달할 수 있는 방송 다큐멘터리를 만들자는 기획이 있었고, 그 일을 맡게 되었다. 그해 10월 정보과학회 회장단(회장 홍진표 교수)과 함께 EBS 사장진을 만나 우리의 안을 설명했고 만들어 보자는 결정이 떨어졌다. 그러나 그 실현에는 벽이 있었다. 제작담당 피디들은 우선 잘 정리된 콘텐츠를 달라고 채근했지만 준비된 바가 없었다. 그 콘텐츠를 만들 방법을 궁리하던 중 개설한 과목이 〈컴퓨터과학이 여는 세계〉였다. 서울대학교 기초교육과정 핵심교양 카테고리의 '자연과 기술' 트랙에서 비전공 학생들을 대상으로 하는 강의였다. 그 강의의 내용이 이 책의 기본이 되어 주었다.

그러던 중 2013년 말, 정부의 초중고 소프트웨어 교육과정 도입 움직임에 학계가 기본 콘텐츠를 제공해야 한다는 한국정보과학회(회장 서정연 교수)의 미션이 내게 떨어졌다. 이 책이 그 역할을 어느 정도 갈음할 것으

로 믿어준 분들께 감사하다.

이 책을 준비하며 각 분야의 의문들을 명쾌히 설명해준 국내외의 기라성 같은 동료와 선후배와 스승에게 감사하다. 의문이 있을 때마다 내가 묻고 답을 구할 수 있는 내공 있는 분들이 이 세계 구석구석에 동료로 있다는 것이 감사하고 자랑스럽다. 김기웅(기계학습), 김용대(기계학습), 노종선(정보이론), 도경구(프로그래밍언어), 문병로(알고리즘), 박성우(프로그래밍언어), 안경원(계산물리), 안정호(컴퓨터구조), 이성환(뇌공학), 이원종(계산물리), 정교민(정보이론), 정덕균(논리회로), 정주희(수리논리), 지동표(양자컴퓨팅), 천정희(암호학), 허충길(프로그래밍언어), Arvind(컴퓨터구조), Scott Aaronson(알고리즘), Josh Berdine(프로그래밍언어), Edmund Clarke(하드웨어검증), Patrick Cousot & Radhia Cousot(소프트웨어분석), Matthias Felleisen(프로그래밍시스템), Jérôme Feret(소프트웨어분석), Ranjit Jhala(소프트웨어분석), Peter Lee(프로그래밍시스템), David MacQueen(프로그래밍언어), Alan Mycroft(프로그래밍시스템), George Necula(프로그래밍시스템), Frank Pfenning(계산논리), Martin Rinard(프로그래밍시스템), Xavier Rival(소프트웨어분석), Vinod Vaikuntanathan(암호학) 님들께 감사드린다. 미처 일일이 언급하지 못했으나 집필 과정에 관심과 조언을 주신 모든 분들께도 감사하다. 물론 이 책에 오류가 있다면 그건 온전히 내 책임이다. 번지는 감사가 모두에게 속속들이 스미길 빈다.

거친 원고를 일찌감치부터 꼼꼼히 읽어주고 바로잡아 준 분들에게 진 빚도 크다. 특히 박성우 교수는 원고 전체를 꼼꼼히 읽고 코멘트 해주었고, 문병로 교수, 정주희 교수, 허충길 교수, 류기열 교수, 신승철 박사, 이상현 군은 초반 원고에 대한 소중한 코멘트를 주었다.

국내에서 같은 뜻을 일구며 적지만 똘똘 뭉쳤던 동료와 선후배와 제자

들, 그들과 같이 기울이던 수많은 술잔, 유쾌한 농담, 의기투합, 어깨동무한 밤이 없었다면 이 책은 지지부진했을 것이다. 든든하게 내어주던 어깨와 응원에 늘 감사하다.

또, 강의실 학생들의 반짝이는 눈빛은 내겐 큰 은전이었다. 항상 그들의 시선을 북돋아주는 것으로 답하고 싶었다. 학생들이 던진 질문들이 나를 어떻게 공부시켰는지. 그들은 상상하지 못할 것이다.

그리고 부족한 원고를 책으로 출판하는데 흔쾌히 동의하고 일급의 세밀한 편집을 이끌어준 도서출판 인사이트의 한기성 사장과 실무를 맡은 이지연 씨에게 고마움을 전한다.

마지막으로, 편안한 가정을 완벽하게 가꾸고 이끌어준 아내, 그녀에게 이 책을 선물한다. 그녀의 품이 없었다면 나는 여기 이렇지 못했을 것이다.

차례

CONTENTS

펴내면서 05

감사 09

01 마음의 도구 17

02 400년의 축적 23

2.1 보편만능 기계의 탄생 25

청년 앨런 튜링 25

좌절을 확인하는 데 동원된 소품 27

수학계의 꿈 28

괴델이 깬 그 꿈 29

케임브리지 강의 30

컴퓨터의 원천 설계도 31

단순한 부품 32

궁극의 기계 35

튜링기계를 테이프에 표현하기 36

튜링기계를 돌리는 규칙표 39

급소 40

튜링의 불완전성 증명 42

멈춤 문제의 증명 44
컴퓨터 46
2.2 400년 47
의문 48
다른 트랙 49

03 그 도구의 실현 51

3.1 다른 100년 53
3.2 생각 – 부울의 연구 54
1854년 54
그리고, 또는, 아닌 55
같음 57
조립 58
3.3 스위치 59
직렬, 병렬, 뒤집기 60
1937년 62
스위치 분야의 날개 65
디지털 65
표현 방식 66
판정, 선택, 응답, 기억 69
3.4 컴퓨터의 실현 76
차곡차곡 쌓기 77
규칙표 장치 79
메모리 장치 82

폰 노이만 85
튜링 86
재료 87

04 소프트웨어, 지혜로 짓는 세계 91

4.1 그 도구를 다루는 방법 93
알고리즘 94
언어 95
4.2 푸는 솜씨, 알고리즘과 복잡도 96
풍경 96
알고리즘 예 97
비용 100
현실적 103
비현실적 104
$\mathcal{P}$의 경계 106
$\mathcal{NP}$ 클래스 107
오리무중 113
$\mathcal{P}$의 바깥 115
통밥 118
무작위 120
불가능 122
기본기 124
양자 알고리즘 126
4.3 담는 그릇, 언어와 논리 135
간격 136

번역 사슬 137
생김새 138
표현력 143
자동 번역 144
실행 153
언어 정글 155
언어 중력 157
두 중력권 159
기계의 중력 161
람다의 중력 162
람다 계산법 165
논리는 언어의 거울 175
거울의 효능 185
논리 거울, 짤 프로그램의 구도 잡기 186
논리 거울, 짠 프로그램은 무난한가 192
요약의 그물 198
데이터의 중력 200

05 그 도구의 응용 203

5.1 인간 지능의 확장 206

고유 지능 207
지식 표현 210
지식 생성 215
지식 검색 228
팀워크 지능 234

군중 지능 237

5.2 인간 본능의 확장 239

놀이 본능 239

소통 본능 241

정보이론 242

섀넌과 튜링 244

정보량 246

복음 249

인코딩 251

오류 수정 코드 256

5.3 인간 현실의 확장 258

시공간 공유 258

역발상 259

암호 262

열쇠 264

완벽한 하인 267

진품 감정 269

벼랑 272

06 마치면서 273

아기의 첫 웃음 275

참고자료 278

인용된 시 목록 282

찾아보기 285

01

마음의 도구



컴퓨터과학이 여는 세계

<지>

나는 매일 도구를 쓴다. 자고 일어난 침대, 이 닦는 칫솔, 세수할 때 상하수도와 비누, 밥먹는 그릇과 수저, 입는 옷, 쓰는 안경, 신는 신발, 출퇴근할 때 타는 엘리베이터와 지하철과 마을버스. 이 도구들 덕분에 나는 매일 새로운 기분으로 2만 보가 넘는 거리를 간편하게 이동하며 캠퍼스에 도착한다. 이 모든 도구를 사용할 수 없었다면 나는 그냥 동물일 것이다.

인류가 만든 모든 도구는 인간 능력의 한계를 늘 확장시켜왔지만, 컴퓨터라는 도구는 좀 특이하다. 인류가 발명한 대개의 도구는 물리적인 도구이고 다루려면 물리적인 근육이 필요하다. 하지만 컴퓨터는 '마음의 도구'이고 그 도구를 다루는 방법은 물리적인 근육이 아니라 언어다. 언어로 작성된 텍스트를 컴퓨터의 메모리에 실으면 컴퓨터는 그 텍스트가 표현한 할 일을 해 간다.

컴퓨터라는 도구는 그래서 할 수 있는 일의 한계가 없어 보인다. 컴퓨터가 읽는 텍스트(소프트웨어)는 우리가 무궁무진하게 지어낼 수 있기 때문이다. 그것대로 컴퓨터는 무궁무진한 일을 하기 때문이다. 컴퓨터가 읽는 텍스트는 우리가 읽는 문학과 같다. 읽고 있는 컴퓨터를 지배하고 한없이 많이 지어질 것이다.

이런 소프트웨어들로 마음의 도구를 능숙하게 다루며 인간은 놀랍게 확장하고 있다. 인간의 지능이 확장하고 있고, 인간의 본능이 확장하고 있고, 인간의 현실이 확장하고 있다. 예전에는 불가능했던 지식과 지능이 컴퓨터와 팀이 되어 발휘되고 있고, 예전에는 불가능했던 규모와 속도로 소통하고 놀 수 있게 되었고, 우리를 압박하던 시공간의 제약이 사라지기 시작했다. 우리는 각자의 뇌가 가진 지능의 한계를 탈출하게 되었고, 이별 있는 세상에서 이별 없는 세상에 놓이게 되었고, 상상 속의 거대한 놀이공원에

서 수많은 사람과 맘껏 마음을 맞춰 놀 수 있게 되었고, 여기 같이 있어야만 안심하고 할 수 있는 일들이 아무 때나 멀리서도 가능하게 되었다. 나는 새로운 스케일과 차원으로 확장한 나를 매일 만나게 되었다.

어떻게 이런 일이 가능한 걸까? 마음의 도구와 그 도구를 다루는 방법의 원천은 무엇일까? 컴퓨터과학은 어떻게 탄생한 것이고 지금까지 무엇을 밝혀냈을까?

앞으로 우리는 그 답을 살피러 떠나보겠다. 우리의 여행은 네 개의 코스로 구성되어 있다

- 400년의 축적

  컴퓨터는 특별하다. 컴퓨터 하나로 한없이 많은 일을 할 수 있기 때문이다. 그래서 컴퓨터를 보편만능의 기계*universal machine*라고 부른다. 누가 이런 놀라운 도구를 발명한 걸까? 컴퓨터는 20세기 수학자들의 큰 꿈이 철저히 좌절되는 과정에서 나온 부산물이었다. 좌절을 엄밀히 확인하는 과정에서 고안된 소품. 이것이 21세기 정보혁명의 주인공이 된다.

  컴퓨터(보편만능의 기계)의 디자인이 출현한 원조 논문의 배경과 내용이 펼쳐진다. 원조 밥집을 가보는 재미도 있지만 현란한 디지털 세계의 근본을 쉽게 파악하게 해줄 기초가 거기에 있다.

- 그 도구의 실현

  머릿속에서만 디자인 된 보편만능의 도구. 이를 실제 작동하는 물건으로 어떻게 만들 수 있었을까?

컴퓨터를 실현하기까지는 100여 년간의 색다른 축적 과정이 필요했다. 그런데 이 과정은 컴퓨터가 디자인되던 경로와는 별도로 마무리 되고 있었다. 다른 경로로 무르익은 또 다른 상상과 융합의 열매. 1854년과 1937년을 스치는 100여 년의 선분.

스위치 기술이 부울 논리*boolean logic*를 만나 날개를 달고, 스위치만으로 컴퓨터의 모든 것이 차곡차곡 만들어지는 과정이 펼쳐진다.

• 소프트웨어, 지혜로 짓는 세계

컴퓨터를 만능이게 하는 소프트웨어. 사람은 소프트웨어를 만들고, 컴퓨터는 소프트웨어를 실행한다. 컴퓨터라는 도구를 다루는 방법은 소프트웨어이고, 소프트웨어는 사람의 지혜를 통과하면서 짜여진다.

그렇다면 소프트웨어를 잘 만들 방법은 무엇인가? 이 목표를 위해 컴퓨터과학은 무엇을 밝혀냈는가?

이에 대한 답으로, 두 갈래에서 출현한 컴퓨터과학 고유의 원천 아이디어들이 소개된다. 그 두 갈래는 소프트웨어가 일하는 방도(알고리즘*algorithm*)와 그 소프트웨어를 표현하는 방식(언어*language*)에 대한 탐구다. 이 두 기둥에 기대어 조망하는 소프트웨어의 세계가 펼쳐진다.

• 그 도구의 응용

인간의 능력을 확장시키는 다양함과 규모 면에서 컴퓨터는 다른 도구를 능가한다. 어느 정도로 우리를 확장시키고 있을까?

컴퓨터 덕택에 인간의 능력은 세 갈래로 확장하고 있다. 인간의 지능이 확장하고 있고, 본능이 확장하고 있고, 현실이 확장하고 있다. 우리 지능은 컴퓨터와 팀이 되어 예전엔 상상할 수 없던 지능을 가능하게 하고 있다. 또, 컴퓨터가 우리의 소통 본능과 놀기 본능을 북돋고 있다. 컴퓨터 덕택에 예전엔 상상할 수 없던 규모와 효율로 소통하고 놀 수 있게 되었다. 그리고 컴퓨터 덕택에 우리의 시간과 공간의 울타리가 확장하고 있다. 컴퓨터 덕택에 '지금 여기'여야 하는 일들이 제약없이 가능하게 되었다.

이 세 갈래의 대표되는 응용과 그 바탕에 흐르는 컴퓨터과학의 원천 아이디어들이 펼쳐진다.

각 코스가 하나의 장이고 각각 독립적이다. 마음가는 순서로 각 장을 읽어도 별 무리가 없을 것이다. 컴퓨터의 시작부터 읽고 싶다면 책의 순서대로 읽으면 되고, 응용을 먼저 살피고 싶다면 반대 순서로 읽으면 될 것이다.

드디어 벙어리 낯달의 인내 아래
나는 떠난다
이제까지의 책이 아닌
새로운 책을 위하여
어디인가
새로운 지혜의 지옥을 위하여

– 고은, 〔새로운 책은 어디 있는가〕