

대기과학 에센스

하경자 · 김경익

부산대학교 출판부

개정판에 부치는 저자의 글

오늘날을 사는 현대인에게 지구상의 대기에서 일어나는 기상과 기후에 대한 과학적 이해는 필수적이다. 그래서 기상과 기후를 전반적으로 다루는 ‘대기과학’은 과학과 공학을 공부하는 학생들에게 필수적인 과목으로 자리매김하고 있다. 그 이유는 경제성장과 기후변화로 기상과 기후예측 그리고 그 응용에 대한 수요가 계속 급증하고 있기 때문이다. 이 책은 다음 두 가지를 지향하고 있다. 첫째는 한 권의 책으로 대기과학의 기본적이고 중요한 지식을 습득할 수 있도록 기술하였다. 따라서 대기과학의 기본 개념에서 수치예보, 기후변화까지 망라하여 다루고 있다. 가급적 강의하는 교수의 입장보다는 학생의 입장에서 어려운 내용을 쉽게 기술하여 이해를 도우려고 노력하였다. 둘째는 대기과학의 기본원리를 실제 응용하여 문제 해결을 시도할 수 있도록 그 내용을 구성하였다. 따라서 대기과학의 기본 원리에 충분한 이해를 도모할 수 있는 상세한 설명과 활용을 염두에 둔 응용문제를 풀이하는 방식을 채택하였다. 이는 그동안 국가고시를 비롯한 각종 시험문제에 출제위원으로 참여하면서 대기과학에 대한 ‘이해’의 단계를 넘어 활용 가능한 ‘지식’으로 끌고 갈 서적은 응용까지 포함해야 한다는 판단에서 비롯되었다. ‘대기과학 에센스’는 20개의 장으로 구성되어 있으며, 그 이름이 의미하는 바와 같이 기초의 이해 단계를 어느 정도 넘어서서 책이다. 기존의 서적들은 수학적 부분이 배제된 설명 위주의 책이거나 또는 완전히 수학적이고 물리적인 것을 강조한 것이 많다. 이 책은 그 어느 하나에 치우치지 않고, 포괄적인 이해의 어려움이 있는 내용은 실전 문제를 통하여 해결하고자 하였다. 최근의 학문적 요구에 걸맞게 대기과학의 물리적 현상을 이해하고 나아가 실전의 공학적 문제를 계산으로 해결할 수 있도록 독자들에게 도움이 되는 책을 저술하고자 하였다.

이 책의 초판에서 잘못된 부분과 일부 내용을 보완하여 개정판을 내놓지만, 마음이 편하지 않은 것은 완성이라는 말을 하기에는 부족함이 여전히 크기 때문이다. 저자들의 부주의와 이해의 부족으로 잘못된 부분이나 보충이 필요한 부분은 독자들의 관용을 바라며, 주저 없이 지적하여 주면 차후에 수정·보완할 계획이다. 오늘 이 책의 개정판을 출판하기까지 조언을 주신 주변의 교수님들과 독자의 의견을 준 학생들에게 이 자리를 빌려 깊은 감사를 드린다. 개정판을 준비하면서 도움을 준 문수연, 이아름 학생과 부산대학교출판부에 깊은 감사의 마음을 전한다.

2017년 8월 15일 저자 하경자, 김경익

Page13, line7, 의하며 → 의하면

Page14, line7, 직접적 → 직접적인

Page17, line6(예제 1.1), 계산에 → 계산을, 되어야 한다 → 된다 Page18, line15, 입자들이 → 입자들을 제외한

Page18, line19, 미세먼지 → 초미세먼지

Page18, line26, A_r → A_r

Page23, line13, $287.053JKgK^0$ → $287.053JKg^0K^0$

Page35, line19, $\nabla \times 3\vec{A} \times \vec{B} = \vec{A}3\nabla \cdot \vec{B} - \vec{B}3\nabla \cdot \vec{A} - \nabla 7\vec{B} + 3\vec{B} \cdot \nabla 7\vec{A}$
→ $\nabla \times 3\vec{A} \times \vec{B} = \vec{A}3\nabla \cdot \vec{B} - \vec{B}3\nabla \cdot \vec{A} - 3\vec{A} \cdot \nabla 7\vec{B} + 3\vec{B} \cdot \nabla 7\vec{A}$

Page35, line4(예제 1.3),

$$\vec{k} \cdot \nabla \times \vec{B} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \nabla \times \vec{B} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \nabla \times \vec{B}$$

Page42, line15, $Wm^Hs^0\mu m^0$ → $Wm^Hsr^0\mu m^0$

Page45, line21, m^Hkg^0 → m^Hkg^0

Page49, line19, 1,024kg → 10^{24}

Page49, line24, Gm → $1Gm$

Page51, line10, 날수로써 → 날수로서

Page55, line2, 2.38 → (2.38)

Page55, line11, ()이때, → 이때,

Page72, line16,

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho C_p} S \left[\frac{\Delta F_{vx}}{\Delta x} + \frac{\Delta F_{vy}}{\Delta y} + \frac{\Delta F_{vz}}{\Delta z} \right] + \frac{\Delta S^\wedge}{\rho C_p}$$

Page73, line3,

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -S \left[\frac{\Delta F_{kx}}{\Delta x} + \frac{\Delta F_{ky}}{\Delta y} + \frac{\Delta F_{kz}}{\Delta z} \right] + \frac{\Delta S^\wedge}{\rho C_p}$$

Page74, line12, ()여기서 → 여기서

Page74, line13, $k = 2.53 \times 10^H Wm^H K^0$ → $k = 2.53 \times 10^H Wm^0 K^0$

Page77, line17,

$$w = c \frac{gz_i}{T_v} F v \rightarrow w_* = c \frac{gz_i}{T_v} F v^{0/h}$$

Page81, line8(예제 3.4),

$$(2.5Kkg_{air}g^{0kateo}kg_{air}/g_{pater}) \rightarrow (2.5Kkg_{air}g^{0kateo})$$

Page101, line13, $(1.22m^{H_S/H}) \rightarrow (1.22ms^{0})$

Page101, line14, $(0.71m^{H_S/H}) \rightarrow (0.71ms^{0})$

Page105, line9, $10km \rightarrow 10m$

Page105, line17, $Tv \rightarrow T_v$

Page117, line8,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow u \frac{\partial}{\partial x}$$

Page122, line22, 에너지의 발산(R_n) \rightarrow 에너지(R_n)의 발산

Page123, line4, $(Kgm^{H_S/H}) \rightarrow (kgm^{H_S/H})$

Page124, line10, $\kappa_v \rightarrow K_v$

Page129, line17, $L_v \rightarrow L_d$

Page131, line3, $273.16 \rightarrow 273.16K$

Page136, line6, 습구온도의 \rightarrow 건구온도의

Page137, line11, 습구온구 \rightarrow 습구온도

Page157, line7,

$$\frac{N^H}{[\Delta V/\Delta_z]^{0/H}} \rightarrow \frac{N^H}{[\Delta V/\Delta_z]^H}$$

Page157, line15, $R_i \rightarrow Ri$

Page157, line17, $R_i \rightarrow Ri$

Page159, line9, 절대운동의 \rightarrow 절대운동량의

Page170, line1, $\sinh(\alpha) \rightarrow \sinh(\alpha H)$

Page170, line3,

$$\frac{\Lambda^{HH}}{\alpha} \coth \alpha - \frac{\Lambda^H}{\alpha^H \dot{a}} \rightarrow \frac{\Lambda^{HH}}{\alpha} \coth \alpha H - \frac{\Lambda^H}{\alpha^H \dot{a}}$$

Page170, line17,

$$S \frac{\alpha_c H}{2} - \tanh^H(\alpha_c H/2) \Big] S \frac{\alpha_c H}{2} - \coth^H(\alpha_c H/2) \Big] = 0$$

$$\rightarrow S \frac{\alpha_c H}{2} - \tanh(\alpha_c H/2) \Big] S \frac{\alpha_c H}{2} - \coth(\alpha_c H/2) \Big] = 0$$

Page170, line20, $\coth^H \rightarrow \coth$

Page174, line7(예제 8.1), $\Delta T = 4 - 20 = -16^\circ C \rightarrow \Delta T = 20 - 4 = 16^\circ C$

Page205, line12, $4 \times 10^4 \rightarrow 4 \times 10^6$

Page215, line1, 종단속도는 \rightarrow 종단속도

Page224, line6, $\vec{\Omega} \times \vec{r} \rightarrow \vec{\omega}$

Page235, line10, (10.54) \rightarrow 식(10.54)

Page237, line6(표 10.1), 형성파(장파) \rightarrow 행성파(장파)

Page238, line7(표 10.3), $10^{\text{t}} \rightarrow 10^{\text{i}}$

Page302, line16, $10^{\text{i}} \text{km}^{\text{H}} \text{s}^{\text{0}} \text{kg}^{\text{0}} \rightarrow 10^{\text{i}} \text{Km}^{\text{H}} \text{s}^{\text{0}} \text{kg}^{\text{0}}$

Page339, line4(그림 14.12), $\odot \rightarrow (c)$

Page339, line5(그림 14.12), $-\alpha \rightarrow -\beta$, $-\beta \rightarrow -\gamma$

Page360, line8(4번 문항), 온난이류 \rightarrow 한랭이류

Page357, line4, $w \rightarrow \omega$

Page357, line7, $w \rightarrow \omega$

Page357, line9, $w \rightarrow \omega$

Page357, line11, $w \rightarrow \omega$

Page423, line3, 수위가 관측과 \rightarrow 수위 관측이 Page458,

line9, $K^{\text{e}4} \rightarrow K^{\text{e}}$

Page461, line7, 이화질소 \rightarrow 이산화질소

Page461, line8, $CCL_{\text{H}} \rightarrow CCl_{\text{H}}$

Page471, line7, 강수량은의 \rightarrow 강수량의

목 차

저자의 글

제1장 대기과학의 기초

1.1 대기과학의 기본개념	11
1.2 지구 회전체의 특성	12
1.3 대기-해양 상호작용	14
1.4 지구 대기의 조성과 특징	16
1.5 지구 대기 연직 구조	19
1.6 대기의 열역학적 상태	23
1.7 정역학평형	25
1.8 측고공식	28
1.9 대기 운동의 기술헌을 위한 좌표계	29
1.10 대기과학을 위한 기초수학	31

제2장 복사와 복사전달

2.1 복사의 전파특성	37
2.2 복사 에너지 속에 관한 기본정의	38
2.3 복사법칙	41
2.4 복사전달 방정식	44
2.5 태양복사의 시 공간 변화	47
2.6 지표면에서의 에너지 분포	53
2.7 지표의 복사수지	58

제3장 열역학 과정과 열수지

3.1 열역학 제1법칙	62
3.2 대기의 온도변화	64
3.3 열역학선도	67
3.4 공기 덩이의 열수지	70
3.5 지표면 열수지	80

제4장 대기경계층

4.1 대기경계층의 정의	86
4.2 경계층의 형성	88
4.3 기온의 일 변화	90
4.4 바람의 구조	95

제5장	난류운동	
5.1	난류의 물리적 특성	105
5.2	난류의 통계적 기술	107
5.3	난류 플럭스	113
5.4	경계층의 지배 방정식	114
5.5	난류 관측 특성들	124
제6장	대기수분과 물수지	
6.1	포화 수증기압	128
6.2	습도변수	131
6.3	총수분 혼합비	138
6.4	수분의 보존과 물수지	140
6.5	물수지	141
6.6	대기에서 수증기의 체류 시간	145
제7장	대기의 안정도	
7.1	대기의 불안정의 구분	148
7.2	대기의 정역학적 불안정	149
7.3	대기 흐름의 불안정	154
7.4	파동의 안정도 분석	163
7.5	순압 불안정	164
7.6	경압 불안정	166
제8장	구름의 형성과 발달	
8.1	포화과정	172
8.2	구름의 연직 발달	175
8.3	안개의 특성과 유형	181
8.4	구름과 안개의 소산	189
제9장	수적의 형성과 강수발달	
9.1	강수 형성 과정의 개요	195
9.2	수적의 형성과 응결성장	197
9.3	응결에 의한 구름입자의 성장	203
9.4	충돌에 의한 수적 성장	205
9.5	빙정 형성과 결정 모양	209
9.6	충돌에 의한 빙정 성장	214
제10장	대기의 운동과 에너지	
10.1	대기운동의 기술	220

10.2 유체운동의 기술	234
10.3 운동방정식의 근사	237
10.4 힘의 균형에 따른 각종 바람	239
10.5 연속방정식	246
10.6 에너지 방정식	248
제11장 대기의 순환과 와도	
11.1 순환과 물리적 해석	251
11.2 순환과 와도	257
11.3 절대와도	262
11.4 와도의 생성과 강화	264
11.5 종관규모의 와도방정식	267
제12장 국지풍	
12.1 바람의 시 공간 규모	270
12.2 해륙풍의 발달과정	273
12.3 해풍순환의 단순모형	277
12.4 활승바람과 활강바람	279
12.5 보라와 편	285
12.6 산악파	287
제13장 지구 규모 순환	
13.1 차등가열로 인한 순환	293
13.2 온도풍 관계	296
13.3 제트류	299
13.4 소용돌이도	301
13.5 중위도 종관 에디	304
13.6 삼 세 포 대기 대순환	311
13.7 평균류와 수송	312
제14장 기단과 전선	
14.1 저기압 발생	319
14.2 고기압	320
14.3 기단	322
14.4 종관 일기도	327
14.5 지상 전선	330
14.6 전선 발생	332
14.7 폐색전선	338
14.8 정체 전선	339

제15장 저기압

15.1 저기압 발생	343
15.2 풍하 저기압 발생	345
15.3 저기압 선회증가	349
15.4 상향 운동	354

제16장 태풍의 생성과 발달

16.1 태풍의 특성	362
16.2 태풍의 생성조건	366
16.3 태풍의 발달과정	368
16.4 태풍의 열역학	375
16.5 태풍의 이동 경로	377
16.6 폭풍해일	378

제17장 뇌우

17.1 뇌우의 분류	384
17.2 뇌우의 형성과 발달	385
17.3 일반뇌우	391
17.4 다세포 뇌우의 특징	393
17.5 초대형세포 뇌우	397
17.6 토네이도의 형성	400
17.7 하강돌풍	403
17.8 돌풍 전선과 주위 바람	406

제18장 수치예보

18.1 역사적 고찰	409
18.2 대기 방정식의 풀이	416
18.3 유한 차분 방정식	419
18.4 수치적 안정	423
18.5 수치예보 과정	426
18.6 비선형 역학과 앙상블예보	433

제19장 대기 오염

19.1 대기 오염의 물질	439
19.2 확산 인자	442
19.3 대기환경 기준	443
19.4 분산 통계	444
19.5 테일러 통계 이론	447
19.6 중립인 경계층과 안정한 경계층에서의 확산	449

19.7 불안정층에서의 확산..... 453

제20장 기후 변동성과 기후 변화

20.1 복사강제력과 지구 평형 온도..... 459
20.2 온실 효과와 대기의 창..... 463
20.3 되먹임 현상..... 465
20.4 기후 변동성..... 468
20.5 기후 변화..... 473
20.6 민감도와 취약성..... 476

유용한 상수..... 482
참고문헌..... 483
해설..... 490
색인..... 505

