

5장

물리 및 열역학 자료

차례

1. 기본 상수 값.....	182
2. 원자량.....	182
3. 수증기압.....	185
3.1 순수한 물.....	185
3.2 해수.....	185
4. 밀도.....	186
4.1 공기 포화된 물.....	186
4.2 해수.....	186
4.3 염화나트륨 용액.....	187
4.4 NaCl 과 HCl 혼합 용액 (25°C).....	187
4.5 각종 고체.....	188
5. 이산화탄소의 비리얼 (virial) 계수.....	188
5.1 순수한 이산화탄소 가스.....	188
5.2 대기중 이산화탄소.....	189
6. 염분과 해수의 조성.....	189
6.1 해수의 주성분 이온.....	189
6.2 간단한 인공해수 제조법.....	191
7. 평형 상수.....	192
7.1 해수에서 이산화탄소 용해도.....	192
7.2 해수 중의 산-염기 반응.....	192
7.2.1 중황산 이온 (bisulfate ion).....	192
7.2.2 붕산 (boric acid).....	193
7.2.3 탄산 (carbonic acid).....	194
7.2.4 불산 (hydrogen fluoride).....	194
7.2.5 인산 (phosphoric acid).....	195
7.2.6 규산 (silicic acid).....	196
7.2.7 물.....	197
7.3 소금물 매질에서 산-염기 반응.....	197
7.3.1 탄산 (carbonic acid).....	197
7.3.2 2-amino-2-hydroxymethyl-1,3-propanediol (“TRIS”).....	198
7.3.3 물.....	198
8. 참고문헌.....	198

1. 기본 상수 값

$$\text{기체 상수 } R = 8.314472(15) \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{패러데이 상수 } F = 96485.3399(24) \text{ C mol}^{-1}$$

$$0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K (확정)}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa (확정)}$$

(출처 <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>). 각 상수의 끝에 두 자리에 대한 표준 불확실도는 괄호 안의 수로 제시되었다.

2. 원자량

표 5-1에 인용한 원자량은 유효숫자를 소수 다섯째 자리까지로 했다. 지금까지 원자량 측정에 대해 최고권위를 지닌 값의 불확실성이나 정상적인 육상 환경에서 동위원소의 조성의 변동 (*r*이라 주석을 붙여준 원소들) 요인을 합친 것이 다섯째 자리보다 클 경우에는 예외로 하였다. 원자량 다음에 괄호 안에 숫자를 넣어 불확실도를 밝힌 경우를 제외하고는 마지막 자리수의 ± 1 이내로 무게는 확실하다. IUPAC (2006)이 공식 발표한 값은 대부분의 경우에 소수 다섯째 자리를 넘으며 따라서 정밀도는 이 표의 ± 1 보다 우수하다. 몇 가지 경우에 다섯째 자리로 절삭한 것 때문에 참 신뢰 구간은 마지막 자리값에 대해 매우 비대칭적이다. 정상적인 시료라면 최대값과 최소값이 모두 여기에 불확실도로 제시한 값을 넘지 않을 것이다. 그러나 표에 제시된 값은 지질 시대의 자료 (*g*라 주석을 붙여준 원소들)에서 처럼 매우 예외적인 동위원소 조성을 가졌다거나 인위적으로 동위원소 비를 바꿔준 (*m*이라 주석을 붙여준 원소들)은 예외이다. 육상 환경에서 안정한 동위원소 비를 보이는 Th, Pa, U를 제외하고는 안정동위원소를 가지지 않는 원소는 표에서 제외시켰다.

표 5-1 IUPAC (2006) 원자량을 소수 5자리까지로 줄인 표. 질량번호 12인 탄소의 질량을 12로 보고 (2007년도 수정 포함) 이에 맞춰 조정한 값임.

	원소명	원소기호	원자량	주석
1	Hydrogen	H	1.0079	g m
2	Helium	He	4.0026	
3	Lithium	Li	6.941(2)	g m r
4	Beryllium	Be	9.0122	
5	Boron	B	10.811(7)	g m r
6	Carbon	C	12.011	g r
7	Nitrogen	N	14.007	
8	Oxygen	O	15.999	
9	Fluorine	F	18.998	
10	Neon	Ne	20.180	m
11	Sodium (Natrium)	Na	22.990	
12	Magnesium	Mg	24.305	
13	Aluminium	Al	26.982	
14	Silicon	Si	28.086	
15	Phosphorus	P	30.974	
16	Sulfur	S	32.065(5)	g r
17	Chlorine	Cl	35.453(2)	m
18	Argon	Ar	39.948	g r
19	Potassium (Kalium)	K	39.098	g
20	Calcium	Ca	40.078(4)	g
21	Scandium	Sc	44.956	
22	Titanium	Ti	47.867	
23	Vanadium	V	50.942	
24	Chromium	Cr	51.996	
25	Manganese	Mn	54.938	
26	Iron	Fe	55.845(2)	
27	Cobalt	Co	58.933	
28	Nickel	Ni	58.693	
29	Copper	Cu	63.546(3)	r
30	Zinc	Zn	65.38(2)	
31	Gallium	Ga	69.723	
32	Germanium	Ge	72.64	
33	Arsenic	As	74.922	
34	Selenium	Se	78.96(3)	
35	Bromine	Br	79.904	
36	Krypton	Kr	83.798(2)	g m
37	Rubidium	Rb	85.468	
38	Strontium	Sr	87.62	
39	Yttrium	Y	88.906	
40	Zirconium	Zr	91.224(2)	g
41	Niobium	Nb	92.906	
42	Molybdenum	Mo	95.96(2)	g

표 5-1 이어짐.

	원소명	원소 기호	원자량	주석
44	Ruthenium	Ru	101.07(2)	g
45	Rhodium	Rh	102.91	
46	Palladium	Pd	106.42	g
47	Silver	Ag	107.87	
48	Cadmium	Cd	112.41	
49	Indium	In	114.82	
50	Tin	Sn	118.71	
51	Antimony (Stibium)	Sb	121.76	g
52	Tellurium	Te	127.60(3)	g
53	Iodine	I	126.90	
54	Xenon	Xe	131.29	g m
55	Caesium	Cs	132.91	
56	Barium	Ba	137.33	
57	Lanthanum	La	138.91	
58	Cerium	Ce	140.12	g
59	Praseodymium	Pr	140.91	
60	Neodymium	Nd	144.24	g
62	Samarium	Sm	150.36(2)	g
63	Europium	Eu	151.96	g
64	Gadolinium	Gd	157.25(3)	g
65	Terbium	Tb	158.93	
66	Dysprosium	Dy	162.50	g
67	Holmium	Ho	164.93	
68	Erbium	Er	167.26	g
69	Thulium	Tm	168.93	
70	Ytterbium	Yb	173.05	
71	Lutetium	Lu	174.97	g
72	Hafnium	Hf	178.49(2)	
73	Tantalum	Ta	180.95	
74	Tungsten (Wolfram)	W	183.84	
75	Rhenium	Re	186.21	
76	Osmium	Os	190.23(3)	g
77	Iridium	Ir	192.22	
78	Platinum	Pt	195.08	
79	Gold	Au	196.97	
80	Mercury	Hg	200.59(2)	
81	Thallium	Tl	204.38	
82	Lead	Pb	207.2	g r
83	Bismuth	Bi	208.98	
90	Thorium*	Th	232.04	g
91	Protactinium*	Pa	231.04	
92	Uranium*	U	238.03	g m

* 표시된 원소는 안정동위원소를 가지지 않음

3. 수증기압

3.1 순수한 물

온도 범위 273K에서 647K (즉, 물의 삼중점에서 임계점까지)에 대한 순수한 물의 수증기압 p_σ 는 다음 식으로 제시된다 (Wagner and Pruß, 2002).

$$\ln\left(\frac{p_\sigma}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} \left(a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^{1.5} + a_3 \vartheta^3 + a_4 \vartheta^{3.5} + a_5 \vartheta^4 + a_6 \vartheta^{7.5} \right) \quad (1)$$

식에서 $\vartheta = (1 - T/T_c)$, $T_c = 647.096$ K 그리고 $p_c = 22.064$ MPa. 각 계수들은:

$$\begin{aligned} a_1 &= -7.859\,517\,83 & a_4 &= 22.680\,741\,1 \\ a_2 &= 1.844\,082\,59 & a_5 &= -15.961\,871\,9 \\ a_3 &= -11.786\,649\,7 & a_6 &= 1.801\,225\,02 \end{aligned}$$

25°C (298.15 K)에서 $p_\sigma = 3.1698$ kPa이다.

3.2 해수

해수의 수증기압은 순수한 물의 값에 대비된다.

$$p_\sigma(\text{s/w}) \approx p_\sigma \exp\left(-0.018\phi \sum_B m_B/m^\circ\right) \quad (2)$$

식에서

p_σ : 순수한 물의 수증기압 (1)

$\sum_B m_B$: 용존 화학종의 총 몰 농도 (3)

ϕ : 해수의 삼투압 계수 (4)

$m^\circ = 1 \text{ mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$

(조성이 6.1 절에 자세히 소개된) 해수 경우에

$$\sum_B m_B/m^\circ = \frac{31.998S}{10^3 - 1.005S} \quad (3)$$

이것과 25°C에서 $I = 0.3 - 0.8 \text{ mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$ ($S = 16-40$) 사이의 해수의 삼투압 계수 (Millero, 1974)

$$\begin{aligned} \phi &= 0.90799 - 0.08992 \left(\frac{\frac{1}{2} \sum_B m_B}{m^\circ} \right) + 0.18458 \left(\frac{\frac{1}{2} \sum_B m_B}{m^\circ} \right)^2 \\ &\quad - 0.07395 \left(\frac{\frac{1}{2} \sum_B m_B}{m^\circ} \right)^3 - 0.00221 \left(\frac{\frac{1}{2} \sum_B m_B}{m^\circ} \right)^4 \end{aligned} \quad (4)$$

(엄격히 따지면 ϕ 는 이온세기 I 와 온도의 종속 함수이다. 온도 범위 0에서 40°C에서 변하는 전형적인 값은 1%로 여기서는 무시했다.)

25°C 이고 $S = 35$ 일 때 $p_{\sigma}(s/w) = 3.1106$ kPa이다.

4. 밀도

4.1 공기 포화된 물

온도 범위 5에서 40°C (즉 최대 밀도를 보이는 온도에서 벗어난) 에 대한 공기 포화된 물의 밀도는 아래 식으로 주어진다 (Jones and Harris, 1992).

$$\begin{aligned} \rho_w / (\text{kg m}^{-3}) = & 999.84847 + 6.337563 \times 10^{-2} (t / ^\circ\text{C}) - 8.523829 \times 10^{-3} (t / ^\circ\text{C})^2 \\ & + 6.943248 \times 10^{-5} (t / ^\circ\text{C})^3 - 3.821216 \times 10^{-7} (t / ^\circ\text{C})^4 \end{aligned} \quad (5)$$

25°C에서 $\rho_w = 997.041$ kg m⁻³ = 0.997041 g cm⁻³이다.

4.2 해수

온도 범위가 0에서 40°C (ITS 68¹) 사이이고 염분 범위가 0에서 42인 해수의 밀도는 다음 식으로 주어진다 (Millero and Poisson, 1981).

$$\rho_{sw} / (\text{kg m}^{-3}) = \rho_{SMOW} / (\text{kg m}^{-3}) + AS + BS^{1.5} + CS^2 \quad (6)$$

식에서²

$$\begin{aligned} \rho_{SMOW} / (\text{kg m}^{-3}) = & 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2} (t / ^\circ\text{C}) \\ & - 9.095290 \times 10^{-3} (t / ^\circ\text{C})^2 + 1.001685 \times 10^{-4} (t / ^\circ\text{C})^3 \\ & - 1.120083 \times 10^{-6} (t / ^\circ\text{C})^4 + 6.536332 \times 10^{-9} (t / ^\circ\text{C})^5 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A = & 8.24493 \times 10^{-1} - 4.0899 \times 10^{-3} (t / ^\circ\text{C}) \\ & + 7.6438 \times 10^{-5} (t / ^\circ\text{C})^2 - 8.2467 \times 10^{-7} (t / ^\circ\text{C})^3 + 5.3875 \times 10^{-9} (t / ^\circ\text{C})^4 \end{aligned} \quad (8)$$

$$B = -5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4} (t / ^\circ\text{C}) - 1.6546 \times 10^{-6} (t / ^\circ\text{C})^2 \quad (9)$$

$$C = 4.8314 \times 10^{-4} \quad (10)$$

t 는 IPTS 68 척도 값이고 S 는 염분이다.

25°C (ITS 68)와 $S = 35$ 에서 $\rho_{sw} = 1023.343$ kg m⁻³이다.

¹ The International Practical Temperature Scale of 1968 (ITS 68)은 International Temperature Scale of 1990 (ITS 90)로 대체 되었음. 해양의 온도 범위 0에서 40°C 에 대해 간단한 환산식을 쓰면 됨 (Jones and Harris, 1992):

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = 0.0002 + 0.99975 t_{68}/^{\circ}\text{C}$$

² SMOW—Standard Mean Ocean Water (Craig, 1961)—는 특정 동위원소 비를 가지며 기체를 제거한 순수 해수이다.

4.3 염화나트륨 용액

온도 범위 0도에서 50°C (각주 1 참조) 그리고 농도 범위가 0.1 mol kg-H₂O⁻¹에서 포화에 이르는 소금 수용액의 밀도는 다음 식으로 계산된다 (Lo Surdo *et al.*, 1982).

$$\begin{aligned} \frac{10^3(\rho(\text{NaCl}) - \rho_{\text{SMOW}})}{\text{g cm}^{-3}} = & \left(\frac{m}{m^\circ}\right) \left[45.5655 - 0.2341 \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right) \right. \\ & + 3.4128 \times 10^{-3} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right)^2 - 2.7030 \times 10^{-5} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right)^3 + 1.4037 \times 10^{-7} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right)^4 \left. \right] \\ & + \left(\frac{m}{m^\circ}\right)^{3/2} \left[-1.8527 + 5.3956 \times 10^{-2} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right) - 6.2635 \times 10^{-4} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right)^2 \right] \\ & + \left(\frac{m}{m^\circ}\right)^2 \left[-1.6368 - 9.5653 \times 10^{-4} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right) + 5.2829 \times 10^{-5} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}}\right)^2 \right] \\ & + 0.2274 \left(\frac{m}{m^\circ}\right)^{5/2} \end{aligned} \quad (11)$$

식에서 t 는 IPTS 68척도 온도, m 은 소금물의 몰 농도, $m^\circ = 1 \text{ mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$, ρ_{SMOW} 는 식 7로 계산한다³.

소금 물의 농도 단위 mol kg-soln⁻¹— $C(\text{NaCl})$ 을 아래 식을 써서 mol kg-H₂O⁻¹로 바꾸어준다.

$$\frac{m(\text{NaCl})}{m^\circ} = \frac{10^3 C(\text{NaCl})}{10^3 - 58.443 C(\text{NaCl})} \quad (12)$$

25°C 에서 $m = 0.725 \text{ mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$ 일 때 $\rho(\text{NaCl}) = 1.02581 \text{ g cm}^{-3}$ 이다.

4.4 NaCl 과 HCl 혼합 용액 (25°C)

온도 25°C⁴ 에서 NaCl and HCl 의 혼합 용액의 밀도를 구하는 식은 Young의 법칙에 근거하여 개발되었다 (Millero, personal communication).

$$\rho_{\text{mix}}(25^\circ\text{C}) = \frac{\rho_w(25^\circ\text{C}) \left[10^3 + m_T (m(\text{HCl}) + m(\text{NaCl})) \right]}{10^3 + \varphi_{\text{mix}} (m(\text{HCl}) + m(\text{NaCl})) (\rho_w(25^\circ\text{C}))} \quad (13)$$

식에서 $\rho_w(25^\circ\text{C}) = 0.99704 \text{ g cm}^{-3}$,

$$m_T = \frac{36.46m(\text{HCl}) + 58.44m(\text{NaCl})}{m(\text{HCl}) + m(\text{NaCl})} \quad (14)$$

³ Lo Surdo *et al.* (1982)의 원전에서는 순수한 물의 밀도를 Kell (1975)의 방법으로 계산했다. 밀도 값 차이는 0–50°C 사이에서 10⁻⁵ 미만임.

⁴ 25°C가 아닌 온도에서 식 (13)은 신뢰도가 떨어진다.

$$\varphi_{\text{mix}} = \frac{m(\text{HCl})\varphi_{\text{HCl}} + m(\text{NaCl})\varphi_{\text{NaCl}}}{m(\text{HCl}) + m(\text{NaCl})} \quad (15)$$

그리고 25°C에서 명목상의 몰 부피는

$$\varphi_{\text{HCl}} = 17.854 + 1.460\sqrt{m} - 0.307m \quad (16)$$

$$\varphi_{\text{NaCl}} = 16.613 + 1.811\sqrt{m} + 0.094m \quad (17)$$

식에서 $m = m(\text{HCl}) + m(\text{NaCl})$. $m(\text{HCl})$ 과 $m(\text{NaCl})$ 의 단위는 mol kg-H₂O⁻¹이다.

$m(\text{HCl}) = 0.2$ mol kg-H₂O⁻¹이고 $m(\text{NaCl}) = 0.5$ mol kg-H₂O⁻¹일 때 $\rho_{\text{mix}}(25^\circ\text{C}) = 1.02056$ g cm⁻³이다.

4.5 각종 고체

Weast (1975)의 자료에서

$$\text{염화칼륨 (Potassium chloride): } \rho(\text{KCl}) = 1.984 \text{ g cm}^{-3} \quad (18)$$

$$\text{염화나트륨 (Sodium chloride): } \rho(\text{NaCl}) = 2.165 \text{ g cm}^{-3} \quad (19)$$

$$\text{탄산나트륨 (Sodium carbonate): } \rho(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 2.532 \text{ g cm}^{-3} \quad (20)$$

$$\text{황산나트륨 (Sodium sulfate): } \rho(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 2.68 \text{ g cm}^{-3} \quad (21)$$

Sodium tetraborate decahydrate (borax):

$$\rho(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) = 1.73 \text{ g cm}^{-3} \quad (22)$$

2-amino-2-hydroxymethyl-1,3-propanediol (“TRIS”):

$$\rho(\text{H}_2\text{NC}(\text{CH}_2\text{OH})_3) = 1.35 \text{ g cm}^{-3} \quad (23)$$

$$\text{2-aminopyridine: } \rho(\text{C}_5\text{H}_6\text{N}_2) = 1.24 \text{ g cm}^{-3} \quad (24)$$

5. 이산화탄소의 비리얼(Virial) 계수

5.1 순수한 이산화탄소 가스

CO₂의 첫 번째 비리얼 계수는 다음 식으로 제시되었다 (Weiss, 1974).

$$\begin{aligned} \frac{B(\text{CO}_2, T)}{\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}} = & -1636.75 + 12.0408 \left(\frac{T}{\text{K}} \right) - 3.27957 \times 10^{-2} \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^2 \\ & + 3.16528 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^3 \end{aligned} \quad (25)$$

적용가능한 온도 범위는 $265 < T/\text{K} < 320$ 이다.

25°C (298.15 K)에서 $B(\text{CO}_2, 298.15 \text{ K}) = -123.2 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 이다.

5.2 대기중 이산화탄소

두 기체 혼합물에 (B-C) 대해 기체 상호간 비리얼 계수를 정의할 수 있다.

$$\delta_{B-C} = B_{BC} - \frac{1}{2}(B_{BB} + B_{CC}) \quad (26)$$

Weiss (1974)는 Lennard-Jones (6-12) potential을 이용해서 CO₂-공기 둘로 된 혼합물의 δ 를 계산했다. Weiss는 이 매개변수의 온도 의존성이 다음 식을 따르는 것을 발견했다(SOP 24 참조).

$$\frac{\delta(\text{CO}_2 - \text{air})}{\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}} = 57.7 - 0.118 \left(\frac{T}{\text{K}} \right) \quad (27)$$

적용가능한 온도 범위는 $273 < T/\text{K} < 313$ 이다.

25°C (298.15 K)에서 $\delta(\text{CO}_2 - \text{air}) = 22.5 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$.

6. 염분과 해수의 조성

6.1 해수의 주성분 이온

전통적으로 해수에 녹아 있는 고체를 측정하는 인자로 염분 S 가 쓰여 왔다. 염분은 분석 항목으로 단위는 g kg^{-1} 가 쓰였는데 직접 측정은 보다 간편한 (즉, chlorinity나 전기전도도 비) 방식으로 빠르게 대체되었다. 해수의 일정성분비라는 개념은 이들 인자를 염분에 연결시켜 주었다 (UNESCO, 1966).

일정성분비라는 개념은 엄밀하게 따지면 정확하지는 않지만 해수의 이화학적 성질을 탐구하는 것을 단순하게 해주는 유용한 도구이다. 한 가지 예는 해수의 열역학적 성질을 나타낼 때 물과 바다 소금이라는 두 성분인 것으로 처리하는 것이다 (삼투압 계수나 밀도의 예- 3.2와 4.2절 참조).

해수에 대한 다른 시각은 이온 세기가 일정한 매질로 보고 그 안에서 부수적인 성분(minor constituents)이 포함된 여러 가지 화학적 과정을 탐구하는 것이다 (기체 용해도나 산-염기 반응이 이런 예에 해당됨).

해수의 나머지 주성분의 분석 결과는 대체로 chlorinity에 대한 상대비로 표시하며(표 5-2) 해수의 표준 평균 조성(표 5-3)은 물과 탄산 붕산의 평형 상수로 계산할 수 있다.

표 5-2 해수의 표준 평균 분석 조성 ($S = 35$, chlorinity = 19.374)

성분	상대 농도 ^a	mol kg-soln ⁻¹	참고문헌Reference
Chloride	0.99889	0.54586	chlorinity로 계산한 값임
Sulfate	0.1400	0.02824	Morris and Riley (1966)
Bromide	0.003473	0.00084	Morris and Riley (1966)
Fluoride	0.000067	0.00007	Riley (1965)
Sodium	0.55661	0.46906	from charge balance
Magnesium	0.06626	0.05282	Carpenter and Manella (1973)
Calcium	0.02127	0.01028	Riley and Tongudai (1967)
Potassium	0.0206	0.01021	Riley and Tongudai (1967)
Strontium	0.00041	0.00009	Riley and Tongudai (1967)
Boron	0.000232	0.000416	Uppström (1974)
Total alkalinity	–	0.002400	average surface water
pH = 8.1	–	10 ^{-8.1}	average surface water

^a chlorinity (= $S/1.80655$)에 대한 상대비로 나타냈음. 따라서 염분 S 에서 총황산염의 농도는 다음과 같이 주어진다.

$$S_T = \left(\frac{0.1400}{96.062} \right) \times \left(\frac{S}{1.80655} \right) \text{ mol kg-soln}^{-1}$$

표 5-3 해수의 표준 평균 화학 조성 ($S = 35$)

화학종	mol kg-soln ⁻¹	g kg-soln ⁻¹	mol kg-H ₂ O ⁻¹	g kg-H ₂ O ⁻¹
Cl ⁻	0.54586	19.3524	0.56576	20.0579
SO ₄ ²⁻	0.02824	2.7123	0.02927	2.8117
Br ⁻	0.00084	0.0673	0.00087	0.0695
F ⁻	0.00007	0.0013	0.00007	0.0013
Na ⁺	0.46906	10.7837	0.48616	11.1768
Mg ²⁺	0.05282	1.2837	0.05475	1.3307
Ca ²⁺	0.01028	0.4121	0.01065	0.4268
K ⁺	0.01021	0.3991	0.01058	0.4137
Sr ²⁺	0.00009	0.0079	0.00009	0.0079
B(OH) ₃	0.00032	0.0198	0.00033	0.0204
B(OH) ₄ ⁻	0.00010	0.0079	0.00010	0.0079
CO ₂ [*]	0.00001	0.0004	0.00001	0.0004
HCO ₃ ⁻	0.00177	0.1080	0.00183	0.1117
CO ₃ ²⁻	0.00026	0.0156	0.00027	0.0162
OH ⁻	0.00001	0.0002	0.00001	0.0002
계	1.11994	35.1717	1.16075	36.4531
이온 세기	0.69734	—	0.72275	—

6.2 간단한 인공해수 제조법

표 2로부터 간단하게 인공 해수를 만드는 법을 만들어 보면 bromide, fluoride, 총알칼리도는 chloride로 strontium은 calcium으로 대체하면 된다. 이렇게 만든 조성 (표 4)에 따라 인공 해수를 만들고 이를 바탕으로 여러 가지 평형 상수를 측정한다 (예, Dickson, 1990; Roy *et al.*, 1993).

표 5-4 단순화 시킨 인공 해수 조성 ($S = 35$)^a

화학종	mol kg-soln ⁻¹	g kg-soln ⁻¹	mol kg-H ₂ O ⁻¹	g kg-H ₂ O ⁻¹
Cl ⁻	0.54922	19.4715	0.56918	20.1791
SO ₄ ²⁻	0.02824	2.7128	0.02927	2.8117
Na ⁺	0.46911	10.7848	0.48616	11.1768
Mg ²⁺	0.05283	1.2840	0.05475	1.3307
Ca ²⁺	0.01036	0.4152	0.01074	0.4304
K ⁺	0.01021	0.3992	0.01058	0.4137
계	1.11997	35.0675	1.16068	36.3424
이온 세기	0.69713	—	0.72248	—

^a 이 조성은 Dickson (1990)이나 Roy *et al.* (1993) 것과 약간 다르다. 각 종 농도를 계산하는데 쓰인 몰 당 질량을 조금 수정했기 때문이다.

7. 평형 상수

여기에 제시된 모든 평형 상수에 관한 식은 수용액 1 킬로그램 당 몰 수로 나타냈다. 이에 덧붙여 중황산이온(bisulfate)를 빼고는 모든 산 해리 상수는 총수소이온 척도로 제시하였다 (2장 참조).

7.1 이산화탄소의 해수 용해도

다음 반응의



평형 상수는

$$K_0 = [\text{CO}_2^*] / f(\text{CO}_2) \quad (29)$$

아래 식으로 주어진다 (Weiss, 1974).

$$\begin{aligned} \ln(K/k^\circ) = & 93.4517 \left(\frac{100}{T/K} \right) - 60.2409 + 23.3585 \ln \left(\frac{T/K}{100} \right) \\ & + S \left[0.023517 - 0.023656 \left(\frac{T/K}{100} \right) + 0.0047036 \left(\frac{T/K}{100} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (30)$$

CO₂ 가스의 퓨개시티 (2장 참조)는 기압으로 표시된다; $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_0/k^\circ) = -3.5617$ 이다.

7.2 해수 중의 산-염기 반응

7.2.1 중황산 이온 (Bisulfate ion)

다음 반응의



평형 상수는

$$K_S = [\text{H}^+]_F [\text{SO}_4^{2-}] / [\text{HSO}_4^-] \quad (32)$$

아래 식으로 주어진다 (Dickson, 1990a).

$$\begin{aligned} \ln(K_S/k^\circ) = & \frac{-4276.1}{(T/K)} + 141.328 - 23.093 \ln(T/K) \\ & + \left(\frac{-13856}{(T/K)} + 324.57 - 47.986 \ln(T/K) \right) \times \left(\frac{I}{m^\circ} \right)^{1/2} \\ & + \left(\frac{35474}{(T/K)} - 771.54 + 114.723 \ln(T/K) \right) \times \left(\frac{I}{m^\circ} \right) \\ & - \frac{2698}{(T/K)} \left(\frac{I}{m^\circ} \right)^{3/2} + \frac{1776}{(T/K)} \left(\frac{I}{m^\circ} \right)^2 + \ln(1 - 0.001005S) \end{aligned} \quad (33)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 수소이온 농도는 “free” 척도로 주어진다. 이온 세기는 아래 식으로 계산한다.

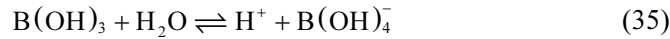
$$I/m^\circ = \frac{19.924S}{1000 - 1.005S} \quad (34)$$

$\ln(1 - 0.001005S)$ 항은 K_S 값을 $\text{mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$ (Dickson, 1990a에서 쓰였음) 단위에서 mol kg-soln^{-1} 으로 환산한다.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_S/k^\circ) = -2.30$ 이다.

7.2.2 붕산 (Boric acid)

다음 반응의



평형 상수는,

$$K_B = \frac{[\text{H}^+][\text{B(OH)}_4^-]}{[\text{B(OH)}_3]} \quad (36)$$

아래 식으로 주어진다 (Dickson, 1990b).

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{K_B}{k^\circ}\right) = & \frac{-8966.90 - 2890.53S^{1/2} - 77.942S + 1.728S^{3/2} - 0.0996S^2}{(T/K)} \\ & + (148.0248 + 137.1942S^{1/2} + 1.62142S) \\ & + (-24.4344 - 25.085S^{1/2} - 0.2474S) \ln(T/K) \\ & + 0.053105S^{1/2}(T/K) \end{aligned} \quad (37)$$

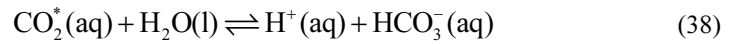
식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이다. 이 식은 Roy *et al.* (1993a)의 측정 결과와 정확히 일치한다; 또한 Hansson (1973a)의 결과와도 잘 맞는 편이다.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_B/k^\circ) = -19.7964$ 이다.

7.2.3 탄산 (Carbonic acid)

여기에 제시한 평형상수는 Mehrbach *et al.* (1973)의 측정에 근거한 것으로 Lueker *et al.* (2000)이 총수소이온 척도로 환산한 것인데 결과는 $p(\text{CO}_2)$, C_T , A_T 를 직접 측정한 것과 잘 일치한다. 이 상수들은 Roy *et al.* (1993b), Goyet and Poisson (1989), Hansson (1973b)이 측정한 값들과도 잘 맞는 편이다.

다음 반응의



평형 상수는

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_2^*] \quad (39)$$

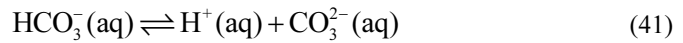
아래 식으로 주어진다 (Lueker *et al.*, 2000).

$$\begin{aligned} \log_{10}(K_1/k^\circ) = & \frac{-3633.86}{(T/\text{K})} + 61.2172 - 9.67770 \ln(T/\text{K}) \\ & + 0.011555S - 0.0001152S^2 \end{aligned} \quad (40)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\log_{10}(K_1/k^\circ) = -5.8472$.

다음 반응의



평형 상수는

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] \quad (42)$$

아래 식으로 주어진다 (Lueker *et al.*, 2000).

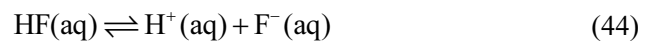
$$\begin{aligned} \log_{10}(K_2/k^\circ) = & \frac{-471.78}{(T/\text{K})} - 25.9290 + 3.16967 \ln(T/\text{K}) \\ & + 0.01781S - 0.0001122S^2 \end{aligned} \quad (43)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\log_{10}(K_2/k^\circ) = -8.9660$ 이다.

7.2.4 불산 (Hydrogen fluoride)

다음 반응의



평형 상수는

$$K_F = [\text{H}^+][\text{F}^-]/[\text{HF}] \quad (45)$$

아래 식으로 주어진다 (Perez and Fraga, 1987).

$$\ln(K_F/k^\circ) = \frac{874}{(T/K)} - 9.68 + 0.111S^{1/2} \quad (46)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$. 이 식은 Dickson and Riley (1979a)가 권장한 값에 잘 맞는 값을 내준다.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_F/k^\circ) = -6.09$ 이다.

7.2.5 인산 (Phosphoric acid)

아래 식들은 Millero(1995)⁵가 제시한 것으로 Kester and Pytkowicz(1967), Dickson and Riley(1979b), Johansson and Wedborg(1979)의 측정값을 모은 것이다.

다음 반응의



평형 상수는

$$K_{1P} = [\text{H}^+][\text{H}_2\text{PO}_4^-]/[\text{H}_3\text{PO}_4] \quad (48)$$

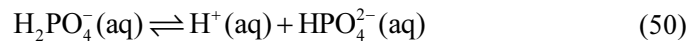
아래 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \ln(K_{1P}/k^\circ) = & \frac{-4576.752}{T/K} + 115.525 - 18.453 \ln(T/K) \\ & + \left(\frac{-106.736}{(T/K)} + 0.69171 \right) S^{1/2} + \left(-\frac{0.65643}{(T/K)} - 0.01844 \right) S \end{aligned} \quad (49)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_{1P}/k^\circ) = -3.71$ 이다.

다음 반응의



평형 상수는

$$K_{2P} = [\text{H}^+][\text{HPO}_4^{2-}]/[\text{H}_2\text{PO}_4^-] \quad (51)$$

⁵ Millero (1995)가 썼던 SWS pH 척도 (HF 포함)에서 총수소이온 척도로 대략 환산해 주기 위해서 식 (49), (52), (55)에서 0.015 씩을 빼주었음.

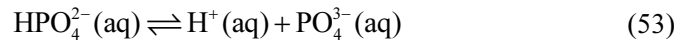
아래 식으로 주어진다.

$$\ln(K_{2P}/k^\circ) = \frac{-8814.715}{T/K} + 172.0883 - 27.927 \ln(T/K) + \left(\frac{-160.340}{(T/K)} + 1.3566 \right) S^{1/2} + \left(\frac{0.37335}{(T/K)} - 0.05778 \right) S \quad (52)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이다.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_{2P}/k^\circ) = -13.727$.

다음 반응의



평형 상수는

$$K_{3P} = [\text{H}^+][\text{PO}_4^{3-}]/[\text{HPO}_4^{2-}] \quad (54)$$

아래 식으로 주어진다.

$$\ln(K_{3P}/k^\circ) = \frac{-3070.75}{(T/K)} - 18.141 + \left(\frac{17.27039}{(T/K)} + 2.81197 \right) S^{1/2} + \left(\frac{-44.99486}{(T/K)} - 0.09984 \right) S \quad (55)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_{3P}/k^\circ) = -20.24$ 이다.

7.2.6 규산 (Silicic acid)

다음 반응의



평형 상수는

$$K_{\text{Si}} = [\text{H}^+][\text{SiO}(\text{OH})_3^-]/[\text{Si}(\text{OH})_4] \quad (57)$$

아래 식으로 주어진다 (Millero, 1995).

$$\ln(K_{\text{Si}}/k^\circ) = \frac{-8904.2}{(T/K)} + 117.385 - 19.334 \ln(T/K) + \left(\frac{-458.79}{(T/K)} + 3.5913 \right) (I/m^\circ)^{1/2} + \left(\frac{188.74}{(T/K)} - 1.5998 \right) (I/m^\circ) + \left(\frac{-12.1652}{(T/K)} + 0.07871 \right) (I/m^\circ)^2 + \ln(1 - 0.001005S) \quad (58)$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$, 이 식은 Sjöberg *et al.* (1981)의 결과를 따른 것으로 Baes and Mesmer (1976)가 검토하였다. 상수에서 0.015 를 빼주었다 (각주 5 참조).

이온 세기는 다음 식으로 계산한다.

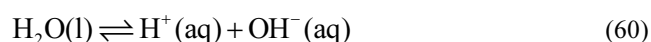
$$I/m^\circ = \frac{19.924S}{1000 - 1.005S} \approx 0.02S \quad (59)$$

$\ln(1 - 0.001005S)$ 항은 K_{Si} 값을 $\text{mol kg-H}_2\text{O}^{-1}$ 단위에서 mol kg-soln^{-1} 으로 환산해주며, m° 는 식 (11)에서와 같다.

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_{Si}/k^\circ) = -21.61$ 이다.

7.2.7 물(water)

다음 반응의



평형 상수는

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] \quad (61)$$

아래 식으로 주어진다 (Millero, 1995).

$$\begin{aligned} \ln(K_w/(k^\circ)^2) = & \frac{-13847.26}{(T/\text{K})} + 148.9652 - 23.6521 \ln(T/\text{K}) \\ & + \left(\frac{118.67}{(T/\text{K})} - 5.977 + 1.0495 \ln(T/\text{K}) \right) S^{1/2} - 0.01615S \quad (62) \end{aligned}$$

식에서 $k^\circ = 1 \text{ mol kg-soln}^{-1}$. 이 식은 Hansson (1973a), Culberson and Pytkowicz (1973), Dickson and Riley (1979a)가 발표한 결과에 근거한다. 상수에서 0.015 씩 빼주었음에 유의하시오 (각주 5 참조).

염분 $S = 35$ 와 온도 $t = 25^\circ\text{C}$ (298.15 K)에서 $\ln(K_w/(k^\circ)^2) = -30.434$ 이다.

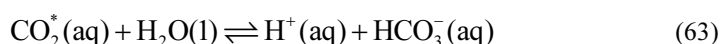
7.3 소금물 매질에서의 산-염기 반응

여기에 제시된 값들은 바탕 매질인 소금물의 농도가 $C(\text{NaCl}) = 0.7 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 온도 25°C 에 적절하다.

7.3.1 탄산(Carbonic acid)

값들은 Dyrssen and Hansson (1973)에서 인용하였다.

다음 반응의



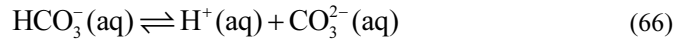
평형 상수는

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_2^*] \quad (64)$$

$C(\text{NaCl}) = 0.7 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 $t = 25^\circ\text{C}$ 에서

$$\ln(K_1/k^\circ) = -13.82 \text{ 이다.} \quad (65)$$

다음 반응의



평형 상수는

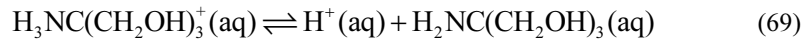
$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] \quad (67)$$

$C(\text{NaCl}) = 0.7 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 $t = 25^\circ\text{C}$ 에서

$$\ln(K_2/k^\circ) = -21.97 \text{ 이다.} \quad (68)$$

7.3.2 2-amino-2-hydroxymethyl-1,3-propanediol (“TRIS”)

다음 반응의



평형 상수는

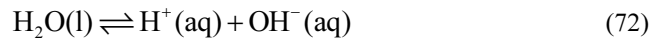
$$K_{\text{tris}} = [\text{H}^+][\text{H}_2\text{NC}(\text{CH}_2\text{OH})_3]/[\text{H}_3\text{NC}(\text{CH}_2\text{OH})_3^+] \quad (70)$$

$C(\text{NaCl}) = 0.7 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 $t = 25^\circ\text{C}$ 에서

$$\ln(K_{\text{TRIS}}/k^\circ) = -18.90 \text{ 이다 (Millero } et al., 1987). \quad (71)$$

7.3.3 물

다음 반응의



평형 상수는,

$$K_{\text{w}} = [\text{H}^+][\text{OH}^-] \quad (73)$$

$C(\text{NaCl}) = 0.7 \text{ mol kg-soln}^{-1}$ 이고 $t = 25^\circ\text{C}$ 에서

$$\ln(K_{\text{w}}/(k^\circ)^2) = -31.71 \text{ 이다 (Dyrssen and Hansson, 1973).} \quad (74)$$

8. 참고 문헌

Baes, Jr., C.F. and Mesmer, R.E. 1976. The Hydrolysis of Cations. John Wiley & Sons, Inc., 489 pp.

- Carpenter, J.H. and Manella, M.E. 1973. Magnesium to chlorinity ratios in sea water. *J. Geophys. Res.* **78**: 3621–3626.
- Craig, H. 1961. Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science* **133**: 1833–1834.
- Culberson, C.H. and Pytkowicz, R.M. 1973. Ionization of water in seawater. *Mar. Chem.* **1**: 309–316.
- Dickson, A.G. and Riley, J.P. 1979a. The estimation of acid dissociation constants in seawater media from potentiometric titrations with strong base. I. The ionic product of water (K_w). *Mar. Chem.* **7**: 89–99.
- Dickson, A.G. and Riley, J.P. 1979b. The estimation of acid dissociation constants in seawater media from potentiometric titrations with strong base. II. The dissociation of phosphoric acid. *Mar. Chem.* **7**: 101–109.
- Dickson, A.G. 1990a. Standard potential of the reaction: $\text{AgCl(s)} + \frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g}) = \text{Ag(s)} + \text{HCl(aq)}$, and the standard acidity constant of the ion HSO_4^- in synthetic sea water from 273.15 to 318.15 K. *J. Chem. Thermodyn.* **22**: 113–127.
- Dickson, A.G. 1990b. Thermodynamics of the dissociation of boric acid in synthetic sea water from 273.15 to 298.15 K. *Deep-Sea Res.* **37**: 755–766.
- Dyrssen, D. and Hansson, I. 1973. Ionic medium effects in sea water — a comparison of acidity constants of carbonic acid and boric acid in sodium chloride and synthetic sea water. *Mar. Chem.* **1**: 137–149.
- Goyet C. and Poisson, A. 1989. New determination of carbonic acid dissociation constants in seawater as a function of temperature and salinity. *Deep-Sea Res.* **36**: 1635–1654.
- Hansson, I. 1973a. Determination of the acidity constant of boric acid in synthetic sea water media. *Acta Chem. Scandinavica* **27**: 924–930.
- Hansson, I. 1973b. The determination of the dissociation constants of carbonic acid in synthetic sea water in the salinity range of 20–40‰ and temperature range of 5–3°C. *Acta Chem. Scandinavica* **27**: 931–944.
- IUPAC 1993. 1991 Table of atomic weights abridged to five significant figures. *Chem. Internat.* **15**: 128–129. (Based upon the 1991 table published in *Pure and Applied Chemistry* 1992, **64**: 1519–1534.)
- IUPAC 2006. Atomic weights of the elements 2005. *Pure Appl. Chem.* **78**: 2051–2066. (revised 2007 see: http://www.iupac.org/news/archives/2007/atomic-weights_revised07.html)
- Jones, F.E. and Harris, G.L. 1992. ITS-90 density of water formulation for volumetric standards calibration. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* **97**: 335–340.
- Kell, G.S. 1975. Density, thermal expansivity, and compressibility of water from 0 to 150 °C: correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. *J. Chem. Eng. Data* **20**: 97–105.
- Kester, D.R. and Pytkowicz, R.M. 1967. Determination of the apparent dissociation constants of phosphoric acid in sea water. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 243–252.
- Khoo, K.H., Ramette, R.W., Culberson, C.H. and Bates, R.G. 1977. Determination of hydrogen ion concentrations in seawater from 5 to 40 °C: standard potentials at salinities from 20 to 45‰. *Anal. Chem.* **49**: 29–34.
- Lo Surdo, A., Alzola, E.M. and Millero, F.J. 1982. The (p, V, T) properties of concentrated aqueous electrolytes. I. Densities and apparent molar volumes of NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 , and MgSO_4 solutions from 0.1 mol·kg⁻¹ to saturation and from 273.15 to 323.15 K. *J. Chem. Thermodyn.* **14**: 649–662.

- Lueker, T.J., Dickson, A.G. and Keeling, C.D. 2000. Ocean pCO₂ calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K_1 and K_2 : validation based on laboratory measurements of CO₂ in gas and seawater at equilibrium. *Mar. Chem.* **70**: 105–119.
- Mehrbach, C., Culberson, C.H., Hawley, J.E. and Pytkowicz, R.M. 1973. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnol. Oceanogr.* **18**: 897–907.
- Millero, F.J. 1974. Seawater as a multicomponent electrolyte solution. pp. 3–80. In: *The Sea*, Vol. 5, Edited by E.D. Goldberg.
- Millero, F.J. 1995. Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**: 661–677.
- Millero, F.J. and Poisson, A. 1981. International one-atmosphere equation of state for sea water. *Deep-Sea Res.* **28**: 625–629.
- Millero, F.J., Hershey, J.P. and Fernandez, M. 1987. The pK* of TRISH⁺ in Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄ Brines – pH scales. *Geochim. Cosmochim. Acta* **51**: 707–711.
- Morris, A.W. and Riley, J.P. 1966. The bromide/chlorinity and sulphate/chlorinity ratio in sea water. *Deep-Sea Res.* **13**: 699–705.
- Perez, F.F. and Fraga, F. 1987. Association constant of fluoride and hydrogen ions in seawater. *Mar. Chem.* **21**: 161–168.
- Riley, J.P. 1965. The occurrence of anomalously high fluoride concentrations in the North Atlantic. *Deep-Sea Res.* **12**: 219–220.
- Riley, J.P. and Tongudai, M. 1967. The major cation / chlorinity ratios in sea water. *Chem. Geol.* **2**: 263–269.
- Roy, R.N., Roy, L.N., Lawson, M., Vogel, K.M., Porter-Moore, C., Davis, W. and Millero, F.J. 1993a. Thermodynamics of the dissociation of boric acid in seawater at $S = 35$ from 0 to 55 °C. *Mar. Chem.* **44**: 243–248.
- Roy, R.N., Roy, L.N., Vogel, K.M., Porter-Moore, C., Pearson, T., Good, C.E., Millero, F.J. and Cambell, D.J. 1993b. Determination of the ionization constants of carbonic acid in seawater in salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45 °C. *Mar. Chem.* **44**: 249–267.
- Sjöberg, S., Nordin, A. and Ingri, N. 1981. Equilibrium and structural studies of silicon(IV) and aluminium(III) in aqueous solution. II. Formation constants for the monosilicate ions SiO(OH)₃⁻ and SiO₂(OH)₂²⁻. A precision study at 25 °C in a simplified seawater medium. *Mar. Chem.* **10**: 521–532.
- UNESCO 1966. Second report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards. UNESCO Tech. Papers Mar. Sci. No. 4.
- Uppström, L.R. 1974. Boron/chlorinity ratio of deep-sea water from the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* **21**: 161–162.
- Wagner, W. and Pruß, A. 2002. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *J. Phys. Chem. Ref. Data* **31**: 387–535.
- Weast, R.F. 1975. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 56th edition, Chemical Rubber Company.
- Weiss, R.F. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Mar. Chem.* **2**: 203–215.