

한반도 동해안과 제주도 연안에서 발견되는 방해석질 각질의 미량원소, 부원소 및 탄소와 산소 동위원소 함량의 변화

지옥미 · 우경식
강원대학교 지질학과

Trace (Minor) Elemental and Isotopic Compositions of Calcitic Skeletons in the Eastern Coast and Cheju Island, Korea

OK MI JI AND KYUNG SIK WOO

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

이 연구는 한반도 동해안과 제주도에서 발견되는 방해석으로 이루어진 가지상과 덮개상 홍조류(articulated and encrusting algae), 성게(echinoid), 따개비(barnacle) 및 굴(oyster)의 미량원소(부원소)와 안정동위원소 함량의 위도에 따른(즉, 수온에 따른) 변화를 알아보기 위하여 수행되었다. 가지상과 덮개상 홍조류는 7~21 mol% $MgCO_3$, 성게는 7~15 mol% $MgCO_3$ 의 고마그네슘 방해석으로 이루어져 있으나, 따개비는 1~5 mol% $MgCO_3$ 의 저마그네슘 방해석으로 이루어져 있다. 가지상 홍조류, 따개비와 굴의 각질 내의 Mg 함량은 해수의 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이나 덮개상 홍조류와 성게의 경우 온도변화에 따른 뚜렷한 변화가 없다. 가지상 홍조류, 성게와 따개비에서의 Sr 함량은 수온이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나 덮개상 홍조류와 굴에서는 온도변화에 따른 뚜렷한 경향이 없다. Mn 함량의 경우 가지상 홍조류와 덮개상 홍조류에서는 해수의 온도가 증가함에 따라 감소하나, 성게와 따개비에서는 온도변화에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 가지상 홍조류의 Fe 함량은 해수의 온도가 증가함에 따라 감소하나, 덮개상 홍조류와 굴에서의 Fe 함량은 증가한다. 하지만 성게와 따개비의 경우 Fe 함량은 해수온도 변화에 따른 뚜렷한 경향이 없다. Ba 함량은 성게와 저마그네슘 방해석으로 이루어진 각질 내에서는 온도변화에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 하지만 가지상 홍조류는 해수의 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 덮개상 홍조류에서는 증가하는 경향을 보인다. Cd와 Pb 함량은 조사한 모든 생물들이 해수온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. Cu 함량의 경우 덮개상 홍조류에서는 해수의 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이나, 가지상 홍조류, 성게, 따개비와 굴에서는 해수온도 변화에 따른 뚜렷한 경향이 나타나지 않는다. 고마그네슘 방해석으로 이루어진 각질과 저마그네슘 방해석으로 이루어진 각질 내의 Zn 함량은 해수온도 변화에 따른 뚜렷한 변화가 없다. 따개비를 제외한 각 생물의 각질에서 측정된 산소동위원소 값으로 추정된 생물들의 성장온도는 동해안과 제주도의 해수온도보다 높게 나타난다. 굴과 성게의 각질에서 측정된 산소동위원소 값은 밀집되어 나타나며, 해수의 온도변화에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 이는 각 생물들이 주변 해수와 산소동위원소적으로 비평형상태에서 각질을 생성하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 따개비의 동위원소 성분은 고환경의 해수온도를 측정하는데 이용할 수 있지만, 나머지 생물들은 고환경의 해수온도를 추정하는데 적합하지 않은 것으로 사료된다.

The objectives of this study are to investigate the trace (minor) elemental and isotopic compositions of calcitic skeletons, such as barnacle, echinoid, branching and encrusting calcareous algae and oyster, from the eastern coast of Korean peninsula and Cheju Island, and to compare their variations with latitude, that is, the temperature of ambient seawater at which the skeletons grew. Articulated and encrusting red algae are composed of high-Mg calcite (7—21 mol% $MgCO_3$). Echinoids are also composed of high-Mg calcite (7—15 mol% $MgCO_3$). Whereas barnacles are composed of low-Mg calcite (1—5 mol% $MgCO_3$). The Mg compositions of articulated red algae, barnacle and oyster tend to increase with increasing water temperature, whereas those of encrusting red algae and echinoid do not show any trend. Sr compositions of articulated red algae, echinoid and barnacle tend to decrease with increasing water temperature, whereas those of encrusting red algae and oyster do not show any trend. Mn compositions of articulated red algae and encrusting red algae decrease with an increase of water temperature, whereas those of echinoid and barnacle do not show any trend. Fe compositions of articulated red algae tend to decrease with increasing water temperature, whereas those of encrusting red algae and oyster increase. Fe

compositions of echinoid and barnacle do not show any trend with water temperature variations. Ba compositions of echinoid and low-magnesium calcitic skeletons do not show any trend with water temperature variations. Ba compositions of articulated red algae tend to decrease with increasing water temperature, whereas those of encrusting red algae increase. Cd and Pb compositions of all the skeletons tend to increase with increasing water temperature. Cu compositions of encrusting red algae increase with increasing water temperature, whereas articulated red algae, echinoid, barnacle and oyster do not show any trend. Zn compositions of high-magnesium calcitic skeletons and low-magnesium calcitic skeletons do not show any trend. Estimated water temperatures from oxygen isotopic data of all the skeletons except for the barnacle are higher than the range of temperature of the shallow seawater of the East Sea and around Cheju Island. The oxygen isotopic compositions of oyster and echinoid are well clustered, and they do not show any trend with increasing water temperature. Therefore, this could reflect that the organisms have not secreted their shells in oxygen isotopic equilibrium with ambient seawater due to vital effect. Thus, the oxygen isotopic composition of barnacle can potentially be utilized for paleotemperature estimate whereas those of other organisms in this study may not be useful.

서론

각질 내의 미량원소와 안정동위원소 성분을 이용한 환경학적 연구는 19세기 이전에 시작되었다. 무척추동물의 각질 내에 Mg 성분이 존재한다는 것은 Silliman(1846)에 의해 처음으로 보고되었으며, 그 이후 많은 연구가 1960년대 이후에 활발히 이루어져 왔다. 우리나라의 경우에는 화석을 이용한 고해양학적인 연구가 주로 이루어졌으나(Woo, 1994; Woo *et al.*, 1994, 1995a, 1995b), 현생의 탄산염 각질에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

탄산염 각질의 미량원소 성분은 각질의 광물성분에 따라 크게 달라지며(Chave, 1954), 염도에 따라(Harriss and Pilkey, 1966; Pilkey and Hower, 1960; Dodd, 1965) 혹은 온도에 따라서도 변화된다고 알려져 있다(Chave, 1954; Pilkey and Hower, 1960; Keith *et al.*, 1964; Dodd, 1965, 1967; Hallam and Price, 1968; Weber, 1969; Schifano and Censi, 1986). 하지만 이들 연구는 대부분 넓은 지역을 대상으로 조사하였고, 특히 1960년대의 연구결과들은 분석자료 자체에 대한 문제점이 제기되고 있다. 최근에 이르러 분석기기의 발달은 탄산염 각질 내의 미량원소 성분에 대한 정량적인 분석을 가능하게 하였고, 따라서 각질 내의 미량원소 성분과 각질을 생성한 생물이 서식하고 있던 환경과의 관계는 많은 과학자들의 주요한 관심분야 중의 하나가 되었다. 이러한 의미에서 한반도 해역의 해수는 비교적 좁은 지역내에서 환경의 변화가 심한 온대 기후하에 있으므로, 이와같은 연구에 매우 적합한 지역이다. 한반도 동해안에서 제주도까지 해수의 염도차가 크지 않고 약 34~35‰ 정도의 값을 보여주지만(FRDA, 1986), 해수온도는 계절의 변화와 해류이동 등에 의해서 위도에 따라 많은 온도 차이를 보여 준다.

이 논문은 우리나라 동해안 화진포에서 제주도에 이르는 수온의 차이가 비교적 큰 지역에서 방해석으로 이루어진 탄산염 각질 내의 미량원소(부원소) 및 산소와 탄소 동위원소의 성분 변화를 알아보고, 또한 이러한 지화학성분의 변화가 탄산염 각질이 생성된 주변 해수의 온도와 어떠한 관계가 있는지 알아보는 데 그 목적이 있다.

연구방법

이 연구를 위하여 한반도 동해안 화진포에서부터 송지호, 봉포, 연금정, 속초, 광진, 주문진, 강릉, 삼척, 울진, 평해, 포항, 하서까지, 그리고 제주도의 서귀포, 애월, 이호, 세화, 표선, 화순, 대정, 송악산 부근의 해안에서 방해석으로 각질을 생성하는 여러 생물 중 가지상 홍조류, 덮개상 홍조류, 성게, 따개비 그리고 굴을 채집하였다(Fig. 1). 채집된 생물 중 따개비류, 가지상 홍조류와 덮개상 홍조류는 바위에 고착하여 살고 있는 것을 채집하

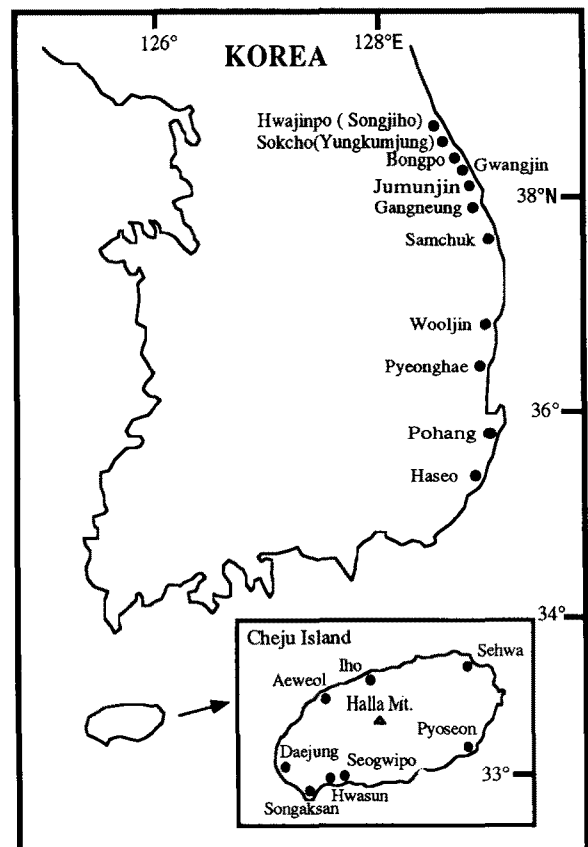


Fig. 1. Geographic localities of the sampling sites.

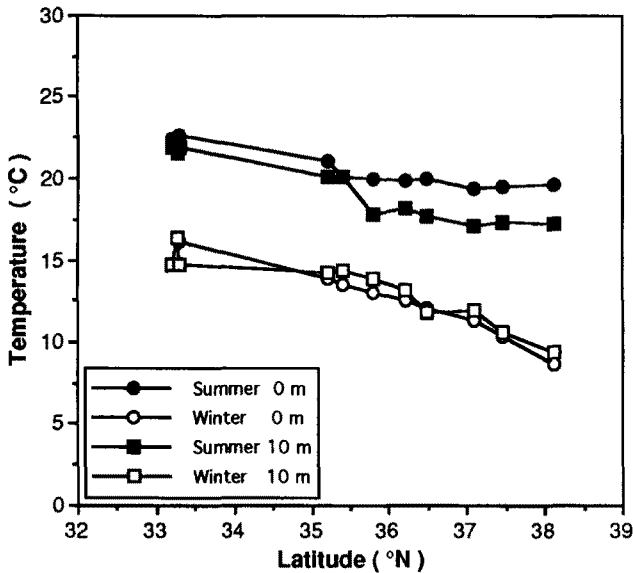


Fig. 2. Mean temperature variations of shallow seawater of the study areas at the depths of 0 and 10 m (after FRDA, 1986).

였으며 대부분의 성게류와 굴은 만조선 위의 해빈퇴적물에서 각질부분만을 채집하였다.

채집한 생물은 대부분 수심 10 m 이내의 환경에서 서식했던 것들이며, 국립수산진흥원 자료(FRDA, 1986)를 이용하여 표층의 수온과 수심 10 m에서의 온도를 추정하였다(Fig. 2). 각 생물의 광물성분과 각질이 갖고있는 미세구조를 파악하기 위하여 채집한 생물들을 에폭시(epoxy)에 경화시켜 박편으로 제작하여 관찰하였다. 또한 각질의 미량원소 성분의 분석을 위하여 각질 내의 유기물을 제거하였다. 이를 위해 채집된 생물을 상용 표백제인 유한락스에 24 시간 정도 반응시킨 후에 분말로 만들었다. 미세한 결정내에 존재하는 유기물질을 제거하기 위하여 분말로 된 시료를 30% H₂O₂에 넣어 2 시간 정도 80°C에서 반응시켰다.

시료 내의 미량원소와 부원소의 성분함량을 알기 위하여 시료 50 mg을 0.2% HNO₃에 반응시킨 후, ICP(inductively coupled plasma spectrometer; Leeman PS900)를 이용하여 분석하였다. 각 원소에 대한 ICP 분석결과의 오차는 95% 신뢰도를 사용하여 계산하였다(Mg: 2.75±0.56 ppm, Sr: 0.99±0.35 ppm, Fe: 0.84±0.17 ppm, Mn: 0.57±0.13 ppm, Ba: 0.0003±0.0002 ppm, Cd: 0.02±0.002 ppm, Cu: 0.05±0.005 ppm, Pb: 0.26±0.003 ppm, Zn: 0.02±0.01 ppm). 산소 및 탄소 동위원소 값을 측정하기 위하여 시료 약 10 mg을 50°C의 항온조에서 100% 인산에 반응시킨 후, CO₂를 포집하여 안정동위원소 질량분석기(stable isotope mass spectrometer; VG Prism II)를 이용하여 분석하였다(기초과학지원센터에 의뢰분석). 분석한 탄소와 산소 동위원소의 분석오차는 NBS-19가 δ¹³C=1.09±0.83‰(PDB), δ¹⁸O=-3.78±1.38‰(PDB)이며, NBS-20는 δ¹³C=-1.23±0.02‰(PDB), δ¹⁸O=-4.63±0.22‰(PDB)이다. 이 논문의 자료는 모두 PDB standard에 따른 값이다.

연구결과

각질의 조직

탄산염 골격질의 내부구조는 대부분 각질을 이루고 있는 작은 미결정들의 배열에 따라서 좌우된다. 이러한 미세구조들은 조직적 관찰을 통하여 구별되며, 이들은 일반적으로 같은 종 내에서는 같은 구조를 가지는 것으로 알려져 있다.

홍조류는 광합성을 하며 물 속에서 서식하는 식물로 세포 내에서나 세포 사이의 벽에서 탄산칼슘을 침전시키는 생물이다. 홍조류는 대부분 텔러스(thallus)라고 불리는 식물조직을 보여주며 골격은 미세결정의 고마그네슘 방해석으로 이루어져 있다. 가지상 홍조류(*Corallina pilulifera*)는 석회질로 된 마디가 석회질이 아닌 유기물질에 의하여 연결이 되어 있으며 내부구조는 작은 방들이 직각방향으로 배열되어 있는 텔러스를 보여준다. 덮개상 홍조류는 가지상 홍조류와 마찬가지로 작은 방들이 배열되어 있으며 포자를 포함하던 콘셉터클(conceptacle)이 방해석으로 충전되어 나타난다(지와 우, 1995).

성게(*Strongylocentrotus* sp.)의 각질은 다공질로서 많은 공극을 가지고 있으며 단결정 미세구조(single crystal microstructure)로 이루어져 있다. 따개비는 해양환경에서만 살며 대부분이 딱딱한 기저에 고착하여 생활한다. 각질의 내부에는 튜브모양의 구멍이 기저로부터 수직방향으로 서로 평행하게 배열되어 있으며 각질 내부는 엽상(foliated)구조와 층상(laminated)구조로 되어 있다. 굴은 익형목(Pteriomorphia) 굴과(Ostreidae)에 속하며 모두 방해석으로 이루어져 있고 엽상구조와 성긴(chalky) 구조를 보여준다.

부원소 및 미량원소 성분

고마그네슘방해석으로 구성된 탄산염 각질: 각 생물의 지화학분석 결과는 Table 1에 있다. 각 그림에서 보여주는 원소의 분석결과는 대부분의 경우 한 점은 각 지역당 3 개 시료 분석결과의 평균값이 표시된 것이다. 가지상 홍조류는 수온이 낮은 고위도지역(화진포~삼척)에서는 10~18 mol% MgCO₃를 나타내며, 울진, 포항, 하서지역에서는 7~20 mol% MgCO₃, 수온이 따뜻한 제주도지역에서는 13~18 mol% MgCO₃ 값을 보여준다(Fig. 3). 따라서 수온이 따뜻한 지역으로 갈수록, 즉 고위도에서 저위도지역으로 갈수록 가지상 홍조류내의 Mg 농도가 증가한다. Sr 성분은 전체적으로 1500~4000 ppm의 농도를 보이며 각각 화진포에서 삼척지역까지는 1453~4154 ppm, 울진에서 하서지역까지는 1662~3256 ppm, 제주도지역에서는 1465~7657 ppm으로, 수온이 따뜻한 지역으로 갈수록 농도가 감소한다(Fig. 3). Fe 함량은 44~1850 ppm 까지 넓은 범위의 농도값을 보여준다. 특히 고위도지역에서는 각 지역에서의 농도 차이가 매우 심하게 나타나는데 주문진지역이 1000 ppm 이상의 농도를 보이고 나머지 대부분의 지역은 1000 ppm 이하의 농도를 나타낸다(Fig. 3). 울진에서 하서지역까지는 62~238 ppm의 농도를 나타내며 대정을 제외한 대부분의 제주도지역에서는 500 ppm 이하의 농도를 나타낸다(Table 1). Fe 함량은 대체적으로 수온이 따뜻한 저위도지역으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. Mn 함량은 고위도지역(화진포-삼척)에서는 21~200 ppm, 울진에서 하서지역까지는 57~152 ppm, 저위도의 제주도지역에서는 3~127 ppm 이하의 농도를 보인다. 울진에서 하서까지의 지역이 화진포

Table 1. Isotopic and elemental compositions of calcitic skeletons in this study ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values are in per mil (‰) relative to PDB standard; Mg compositions are in mol% MgCO_3 except for the oyster (in ppm); all the rest of the elemental concentrations are in ppm)

Locality	Mg	Sr	Fe	Mn	Ba	Cu	Cd	Pb	Zn	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
<i>Articulated red algae</i>											
Hwajinpo-1	14	2888	795	114	9	28	3	87	116	-1.0	-0.15
Hwajinpo-2	11	1680	597	64	10	22	3	80	125	-1.9	-0.15
Hwajinpo-3	11	1685	580	64	9	21	3	103	122		
Songjinho-1	18	3724	688	77	6	25	3	68	144		
Songjinho-2	13	1562	386	32	6	22	3	60	146		
Songjinho-3	13	1565	376	31	5	20	4	62	142		
Yungkumjung-1	15	3377	201	64	6	44	3	61	153		
Yungkumjung-2	11	1542	453	21	5	36	5	88	168		
Yungkumjung-3	11	1453	495	22	5	37	4	140	92		
Sokcho-1	18	3314	261	71	8	32	3	79	124		
Sokcho-2	13	2048	137	35	7	28	3	66	109		
Sokcho-3	14	2135	144	36	5	32	3	70	103		
Gwangjin-1	14	2797	531	82	11	55	7	133	161		
Gwangjin-2	12	2135	421	32	8	29	3	77	108		
Gwangjin-3	12	2137	395	34	8	29	4	80	113		
Jumunjin-1	13	2105	1850	200	21	64	7	110	192		
Jumunjin-2	12	1754	1269	133	12	41	5	99	144		
Jumunjin-3	13	1771	1481	137	12	41	5	105	158		
Gangneung-1	15	4154	1453	129	11	34	4	101	136		
Gangneung-2	10	1742	825	57	11	36	5	81	134		
Gangneung-3	12	2407	1049	67	11	38	4	83	133		
Samchuk-1	12	2418	194	90	32	54	6	131	115		
Samchuk-2	10	1454	97	27	10	31	6	86	117		
Samchuk-3	10	1490	117	29	10	29	4	67	93		
Wooljin-1	15	2526	222	3	3	50	7	13	124		
Wooljin-2	16	2513	127	123	16	49	6	109	124	-2.6	-1.83
Wooljin-3	7	3256	238	152	14	54	6	96	106		
Pohang-1	13	1662	62	57	7	26	4	73	84	-1.1	-1.93
Pohang-2	14	1724	91	59	6	26	5	62	84		
Haseo-1	20	3122	177	123	8	26	4	99	71		
Haseo-2	15	1726	105	68	8	25	4	91	65		
Haseo-3	14	1725	86	65	8	26	5	95	65		
Seogwipo-1	18	3522	228	65	4	26	5	91	92		
Seogwipo-2	13	1501	78	21	1	46	7	144	135		
Iho-1	14	1481	229	16	3	49	9	138	125	-4.3	-4.17
Iho-2	17	1465	100	12	9	48	9	163	121		
Iho-3	14	1565	142	22	4	28	4	84	75	-4.0	-4.31
Sehwa-1	13	2262		0							
Sehwa-2	13	1621	136	11	5	55	9	176	125		
Pyoseon-1	14	1656	268	25	4	32	6	113	73		
Pyoseon-2	17	2074	491	24	3	53	10	199	123		
Pyoseon-3	16	2109	538	29	6	51	9	194	101		
Hwasun-1	15	1683		93	10	25	5	113	61		
Songaksan-1	15	2038	77	10	4	54	10	204	105		
Songaksan-2	15	1972	44	3	3	68	15	277	193		
Songaksan-3	16	2111	167	20	9	57	9	191	140		
Daejung-1	17	1480	522	37	8	32	6	105	85		
Daejung-2	16	7657	1189	127	6	30	6	113	84		
<i>Encrusting red algae</i>											
Hwajinpo-1	18	4243	142	41	4	20	3	74	78	-2.4	-1.73
Hwajinpo-2	16	1734	81	11	2	18	3	61	70	-2.4	-4.31
Hwajinpo-3	16	1852	74	14	3	19	3	74	83	-1.8	-4.01
Sungjiho-1	19	4424	237	76	8	22	4	67	243		
Sungjiho-2	15	198	103	27	4	24	5	58	206		
Sungjiho-3	15	1890	152	32	5	25	5	72	242		
Jumunjin-1	19	3947	289	57	6	35	4	78	95		
Jumunjin-2	16	1403	131	17	4	31	4	74	87	-1.9	-3.62
Jumunjin-3	17	1461	143	16	4	32	4	82	92	-2.5	-3.72
Seogwipo-1	21	3053	168	41	5	26	5	93	94		
Seogwipo-2	17	1699	52	12	6	28	6	111	85		
Seogwipo-3	16	1451	80	19	3	28	6	999	75		

Table 1. Continued

Locality	Mg	Sr	Fe	Mn	Ba	Cu	Cd	Pb	Zn	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Hyupjae-1	19	3688	423	74	8	29	5	107	59		
Hyupjae-2	15	1896	131	14	4	27	6	84	66		
Hyupjae-3	12	2579	226	18	8	28	5	90	55		
Aeweol-1	20	9281	526	159	6	29	5	104	64		
Aeweol-2	16	2361	96	57	12	26	6	107	85	-0.2	-2.33
Aeweol-3	17	1302	230	32	3	26	4	110	71	-1.4	-1.93
Sehwa-1	16	2548	290	30	10	30	5	106	97		
Sehwa-2	16	1822	368	27	6	28	5	94	71		
Sehwa-3	17	2555	211	399	7	29	5	114	64		
Songaksan-1	19	270	201	15	5	30	5	98	58		
Songaksan-2	18	2309	225	10	5	33	6	128	66		
Songaksan-3	18	2667	1166	27	8	32	5	116	56		
Daejung-1	17	1334	218	17	4	29	6	114	68		
Daejung-2	16	1413	104	14	4	30	5	111	73		
<i>Echinoderm</i>											
Songjiho-1	9	3064	79	30	13	24	3	54	71		
Sokcho-1	8	2669	58	73	26	53	4	113	124		
Bongpo-1	8	3462	143	34	3	31	3	55	49		
Gwangjin-1	9	3539	182	35	4	28	4	59	55	-4.7	-1.24
Gwangjin-2	10	1592	400	41	7	30	4	89	54	-2.1	-0.64
Gwangjin-3	8	1434	224	33	6	31	3	94	49		
Jumunjin-1	9	3775	119	29	4	32	6	82	70		
Jumunjin-2	7	1684	38	7	4	30	4	106	46		
Jumunjin-3	7	1635	5	7	4	31	4	89	47		
Samchuk-1	9	2557	143	60	13		5	82	110		
Wooljin-1	10	2974	41	38	5	25	3	64	53		
Punghae-1	10	2982	65	35	12	26	4	69	59	-2.9	-0.25
Punghae-2	8	2369	18	20	3	33	3	59	56	-3	-0.54
Punghae-3	9	2266	30	132	4	28	3	73	56		
Seowipo-1	15	3748	78	27	3	26	4	87	55		
Aewwol-1	8	1662	39	5	3	27	4	97	50	-3.9	-0.25
Aewwol-2	7	1591	20	6	4	27	4	89	58	-3.2	-0.54
Aewwol-3	7	1667	25	5	3	28	5	91	50		
Iho-1	8	1988	111	7	12	27	4	94	62		
Iho-2	9	2055	57	8	7	36	4	93	51		
Iho-3	13	2017	128	10	6	27	5	98	57		
Sehwa-1	9	2044	106	5	4	27	4	104	65		
Sehwa-2	8	1941	81	4	3	25	7	128	76		
Sehwa-3	8	1956	104	4	3	26	6	119	47		
Hwasun-1	7	1625	102	8	5	31	5	112	61		
Hwasun-2	12	2230	251	9	8	29	6	111	57		
Hwasun-3	10	2035	433	34	8	39	5	113	60		
Songaksan-1	9	2159	138	7	5	30	5	96	59		
Songaksan-2	8	2016	88	6	4	31	4	94	59		
Songaksan-3	8	1997	583	17	4	27	5	93	55		
Daejung-1	11	8030	84	64	4	36	5	107	60		
Daejung-2	8	1665	13	5	4	30	5	108	49		
Daejung-3	7	1677	1	4	4	31	5		56		
<i>Barnacle</i>											
Hwajinpo-1	2	5390	117	46	8	18	3	59	104	1.2	-0.05
Hwajinpo-2	1	3109	47	17	6	19	4	75	134	1.1	-0.35
Hwajinpo-3	1	2919	53	16	6	24	3	60	107		
Songjiho-1	2	5085	59	36	8	21	3	67	75		
Songjiho-2	1	2718	16	11	9	18	3	52	69		
Songjiho-3	1	2830	41	12	11	31	2	64	65		
Yungkumjung-1	2	6297	102	43	8	27	3	47	60		
Yungkumjung-2	2	3548	21	12	8	30	3	54	61		
Yungkumjung-3	1	3562	42	12	9	29	2	45	66		
Bongpo-1	2	5926	439	69	9	31	3	68	85		
Bongpo-2	1	2663	317	27	9	40	3	76	87		
Bongpo-3	1	2716	349	29	9	30	3	64	96		

Table 1. Continued

Locality	Mg	Sr	Fe	Mn	Ba	Cu	Cd	Pb	Zn	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Gangneung-1	2	6119	151	41	9	34	3	73	69	0.7	0.54
Gangneung-2	2	6250	164	53	9	31	4	115	75	0.8	0.54
Gangneung-3	1	3462	468	13	8	30	3	77	70		
Gangneung-4	1	3420	63	127	12	29	3	78	71		
Seogwipo-1	5	5219	39	31	12	26	6	114	83		
Seogwipo-2	4	2771	7	10	7	33	5	88	58		
Seogwipo-3	4	2828	0	41	6	27	4	92	62		
Aeweol-1	3		100	100	24	28	4	81	53		
Aeweol-2	2	3027	31	17	42	30	5	99	58	0.2	-2.13
Aeweol-3	3	2809	316	16	11	30	4	83	49	0.7	-1.14
Hwasun-1	2	3419	137	5	6	19	6	115	58		
Hwasun-2	3	3601	716	19	6	29	5	123	62		
Hwasun-3	3	2527	25	11	6	29	5	117	64		
<i>Oyster</i>											
Hosan-1	1047	608	8		5	32	10	93	8	-0.8	-2.82
Hosan-2	1471	698	31		4	31	12	130	10	-1.6	-2.13
Hosan-3	1122	590	36		9	33	11	113	31	-1.3	-1.63
Samchuk-1	1355	779	95		1	35	12	130	26	-0.9	-1.54
Samchuk-2	1779	789	49		1	32	11	133	8	-1.4	-1.34
Samchuk-3	2433	596	54		1	44	12	135	11	-0.6	-1.73
Punghae-1	1269	515			3	68	23	255	36		
Punghae-2	708	555	17		1	38	11	124	12	-1.0	-1.63
Punghae-3	1714	584	20		1	34	11	114	11	-2.0	0.05
Haseo-1	1214	686	73		2	34	13	143	22		
Haseo-2	1056	689	113		1	35	13	150	24		
Haseo-3	1140	610	84		1	36	13	152	29		
Aeweol-1	2057	469	56		7	35	13	161	11		
Aeweol-2	1703	493	44		2	35	14	187	19		
Aeweol-3	1309	602	64		2	36	13	161	16		
Hwasun-1	807	612	98		5	35	13	166	24	-0.6	-1.83
Hwasun-2	2034	655	121		1	37	13	163	19	-1.3	-1.63
Hwasun-3	2540	613	92		3	36	15	171	19	-1.1	-2.92

~삼척지역과 제주도지역보다는 농도가 높게 나타나는 경향을 보이나, Mn 함량도 역시 전반적으로 수온이 따뜻한 지역으로 갈수록 감소하는 경향을 보이는 것으로 생각된다(Fig. 3).

Ba 함량은 화진포지역에서 삼척지역까지는 5~32 ppm, 울진에서 하서지역까지는 6~16 ppm, 제주도지역에서는 0~10 ppm 정도의 농도를 나타내며 수온이 따뜻한 지역으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4). Cd 함량은 전체 지역이 10 ppm 이하의 낮은 농도범위를 나타내지만 고위도지역이 저위도지역보다 낮은 농도를 보여준다. 화진포에서 삼척지역까지는 3~7 ppm, 울진에서 하서지역에서는 4~7 ppm, 제주도지역에서는 4~15 ppm의 농도를 보여준다(Fig. 4). Cu 함량은 화진포에서 제주도지역까지 20~68 ppm의 농도범위를 보여주며 화진포에서 삼척지역까지는 20~64 ppm, 울진에서 하서지역까지는 25~54 ppm, 제주도지역에서는 25~68 ppm의 농도를 나타낸다(Fig. 4). Pb 함량은 화진포-삼척에서부터 울진-하서 그리고 제주도지역으로 갈수록 각각 60~133 ppm, 50~130 ppm, 84~277 ppm 정도로 증가한다(Fig. 4). Zn 함량은 화진포에서 삼척까지의 지역이 91~192 ppm, 울진-하서지역 65~124 ppm, 제주도지역이 61~193 ppm의 농도를 보인다. 조사한 지역에서 Zn 함량은 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 4).

덧개상 홍조류는 화진포-삼척지역과 제주도지역에서만 채집하여 분석하였는데, 15~21 mol% MgCO₃를 나타내며 위도의

변화에 따른 경향을 보이지 않는다(Fig. 5). Sr 함량은 화진포, 송지호, 주문진에서 채취한 3 개의 시료중 각각 1 개의 시료에서 4243, 4424, 3947 ppm의 높은 값이 나왔으며, 나머지 2 개의 시료들은 1403~1981 ppm의 농도를 보였다. 제주도지역에서의 Sr 함량을 대체로 1302~3688 ppm의 농도범위를 나타내나, 애월지역의 1 개의 시료는 9281 ppm의 매우 높은 값을 나타낸다(Table 1). 따라서 Sr 함량은 조사한 지역에서 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 5).

Mn과 Fe 함량은 대부분 300 ppm 이하의 낮은 농도를 보인다. Mn 함량은 특히 150~400 ppm 정도의 매우 높은 값을 보이는 제주도의 애월과 세화지역을 제외하면 대부분이 100 ppm 이하의 농도를 보여주며, 제주도지역으로 갈수록 다소 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5). Fe 함량은 Mn 함량과는 달리 고위도지역(74~289 ppm)에서 저위도지역(52~526 ppm)으로 갈수록 다소 증가한다(Fig. 5). Ba 함량은 10 ppm 이하의 낮은 농도를 보이지만 각 위도별로 농도범위의 차가 있으며, 고위도지역(2~8 ppm)에서 저위도지역인 제주도(3~12 ppm)로 갈수록 증가한다(Fig. 6). 그리고 Cd 함량도 역시 6 ppm 이하의 낮은 농도를 보이나 고위도지역(3~5 ppm)에서 저위도지역(4~6 ppm)으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 6). Cu 함량은 고위도의 주문진지역이 30~35 ppm의 다소 높은 농도를 보여주나, 화진포와 송지호지역은 18~25 ppm의 값을 나타내며, 제주도지역에서는

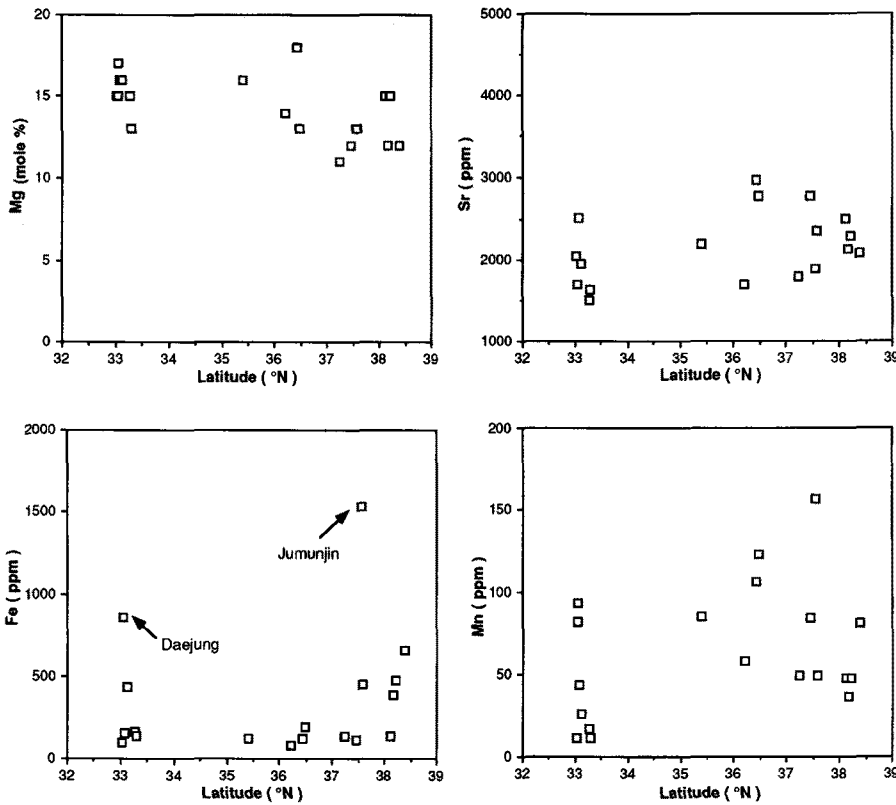


Fig. 3. Scatter diagram of Mg, Sr, Fe and Mn compositions vs. latitude for articulated red algae. Each point represents the averaged value of three data.

26~33 ppm의 농도값을 나타내어 수온이 따뜻한 지역으로 갈수록 증가한다(Fig. 6). Pb 함량도 역시 화진포, 송지호, 주문진 지역에서는 58~82 ppm, 제주도지역에서는 93~128 ppm의 농도를 보이며 제주도지역으로 갈수록 농도가 증가한다(Fig. 6). 그러나 Zn 함량은 송지호지역이 206~243 ppm으로 상당히 높은 값을 보이지만, 화진포, 주문진지역은 70~95 ppm, 제주도지역은 55~97 ppm 정도의 값을 보여주므로 위도에 따른 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 6).

송지호, 속초, 봉포, 삼척, 울진, 포항과 제주도의 서귀포지역의 분석결과는 1 개의 시료에 대한 값을 나타낸다(Table 1). 조사한 모든 지역에서 성계는 7~15 mol% MgCO₃를 보이며 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 7). Sr 함량은 송지호, 속초, 광진, 주문진, 삼척지역에서는 대체로 1434~3775 ppm의 농도를 보이며 울진, 평해, 포항지역에서는 2266~2982 ppm의 농도를 나타낸다. 제주도지역은 대정과 서귀포지역이 각각 1665~8030 ppm과 3748 ppm의 높은 값을 보이나 애월, 이호, 세화, 화순, 송악산 부근에서 채집한 성계에서는 1591~2230 ppm의 값을 보여준다. 따라서 높은 값을 갖는 제주도의 대정과 서귀포지역을 제외하면 대체적으로 고위도로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보여준다(Fig. 7). Fe 함량은 광진지역(182~400 ppm)을 제외한 송지호에서 삼척지역까지는 5~143 ppm의 농도를 보이며 울진~포항은 18~65 ppm의 농도를 나타낸다. 제주도지역은 화순과 송악산 부근에서 채집한 성계가 각각 102~433, 88~583 ppm의 높은 값을 보이나 나머지 지역에서는 1~128 ppm의 농도를 나타낸다(Fig. 7). Mn 함량은 송지호에서 삼척지역까지는 7~73 ppm의 농도를 보이며 울진, 평해, 포항은

20~132 ppm, 제주도 지역은 5~64 ppm의 농도를 보이고 위도에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않는다(Fig. 7). Ba 함량은 전체지역이 3~26 ppm의 농도범위를 나타낸다. 송지호, 광진, 주문진, 삼척지역은 대체로 4~13 ppm의 농도를 보이나 속초지역은 26 ppm의 높은 값을 나타낸다. 울진, 평해, 포항은 3~12 ppm의 농도를 보이고, 제주도는 3~12 ppm의 농도를 나타내며, 전체적으로 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 8). 송지호에서 삼척지역까지 Cd와 Cu 함량은 각각 3~6 ppm, 24~54 ppm, 울진, 평해, 포항에서는 3~4 ppm, 25~33 ppm, 제주도지역에서는 4~7 ppm, 25~39 ppm의 농도범위를 나타낸다. 따라서 Cd 함량은 제주도지역으로 갈수록 증가하는 경향을 보이나, Cu 함량은 위도에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다(Fig. 8). Pb 함량은 고위도에서 저위도지역으로 갈수록 54~113 ppm에서 87~128 ppm의 값을 나타내며 증가하는 경향을 보이지만, Zn 함량은 고위도지역에서는 46~124 ppm, 저위도지역인 제주도에서는 47~76 ppm의 농도를 보이며 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 8).

저마그네슘 방해석으로 구성된 각질: 따개비는 기저판(basal plate)만이 아라고나이트로 이루어져 있으며 나머지는 방해석으로 구성되어 있는데, 방해석으로 이루어진 부분만을 분석하였다. 모든 지역에서 분석한 따개비는 1~5 mol% MgCO₃의 저마그네슘 방해석으로 이루어져 있다. 화진포, 송지호, 연금정, 봉포, 강릉지역에서는 1~2 mol% MgCO₃을 나타내고 제주도지역에서는 2~5 mol% MgCO₃범위를 보여 고위도에서 저위도로 갈수록 Mg의 mol%가 증가한다(Fig. 9). Sr 함량은 고위도지역(화진포~강릉)에서는 2669~6297 ppm의 값을 나타내고, 저위도

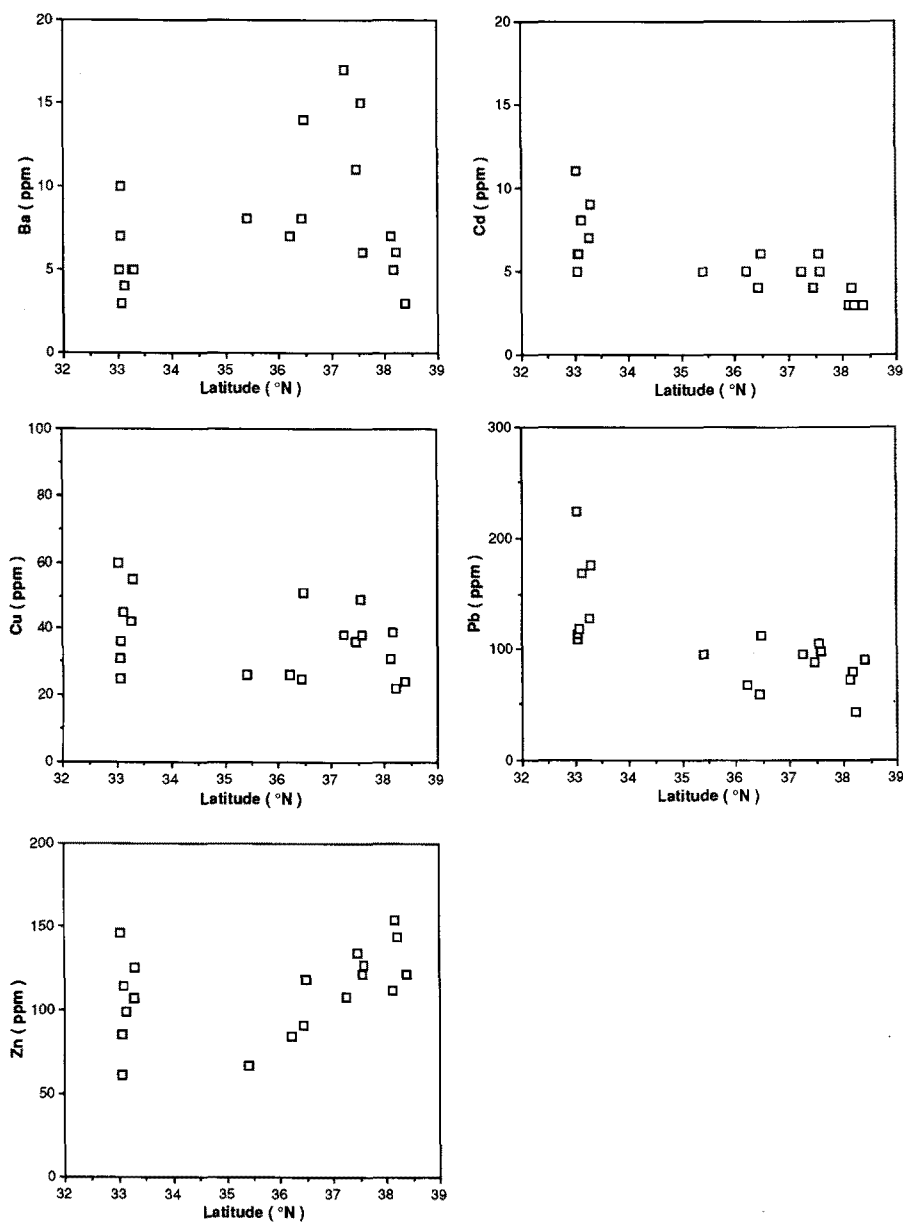


Fig. 4. Scatter diagram of Ba, Cd, Cu, Pb and Zn compositions vs. latitude for articulated red algae.

인 제주도지역에서는 2527~5219 ppm의 값을 보인다(Table 1). 따라서 Sr 함량은 저위도지역에서 고위도지역으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 9). Fe 함량은 화진포-강릉지역에서는 16~468 ppm, 제주도지역에서는 0~716 ppm으로 변화폭이 매우 크다(Fig. 9). Mn 함량은 봉포, 강릉, 애월지역의 시료들 중 1 개의 시료만을 제외하면 대체적으로 50 ppm 이하의 농도를 보이며(Table 1), 위도에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않는다(Fig. 9). Ba 함량은 고위도인 화진포에서 강릉지역까지 6~12 ppm의 농도를 보이며 제주도지역에서는 6~42 ppm의 농도변화를 보이는데, 농도가 높은 애월지역(11~42 ppm)을 제외하면 고위도에서 저위도지역까지 온도에 따른 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 10). Cd 함량은 화진포에서 제주도지역까지 모두 6 ppm 이하의 낮은 농도를 보이며 고위도지역에서는 3~4 ppm, 저위도인 제주도지역에서는 4~6 ppm으로 제주도지역으로 갈수록 다

소 증가하는 경향을 보인다(Fig. 10). Cu 함량은 화진포에서 강릉지역까지 18~40 ppm, 제주도지역은 26~33 ppm으로 위도에 따른 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 10). Pb 함량은 고위도지역(45~115 ppm)에서 제주도지역(83~123 ppm)으로 갈수록 증가하는 경향을 보이나, Zn 함량은 고위도지역(60~134 ppm)과 수온이 따뜻한 제주도지역(49~83 ppm)과의 뚜렷한 차이를 보이지 않는다(Fig. 10).

연체동물 중 이매패에 속하는 굴의 각질은 모두 방해석으로 구성되어 있지만 위에서 조사한 홍조류, 성게 그리고 따개비와는 달리 삼척, 호산, 평해, 하서 그리고 제주도의 애월, 화순지역 모두에서 708~2540 ppm의 낮은 Mg 값을 나타낸다(Table 1). 삼척지역은 1355~2433 ppm으로 제주도지역과 비슷한 Mg 값을 보여주는데 삼척지역을 제외하면 대체적으로 제주도지역으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 11). Sr 함량은 삼척, 호

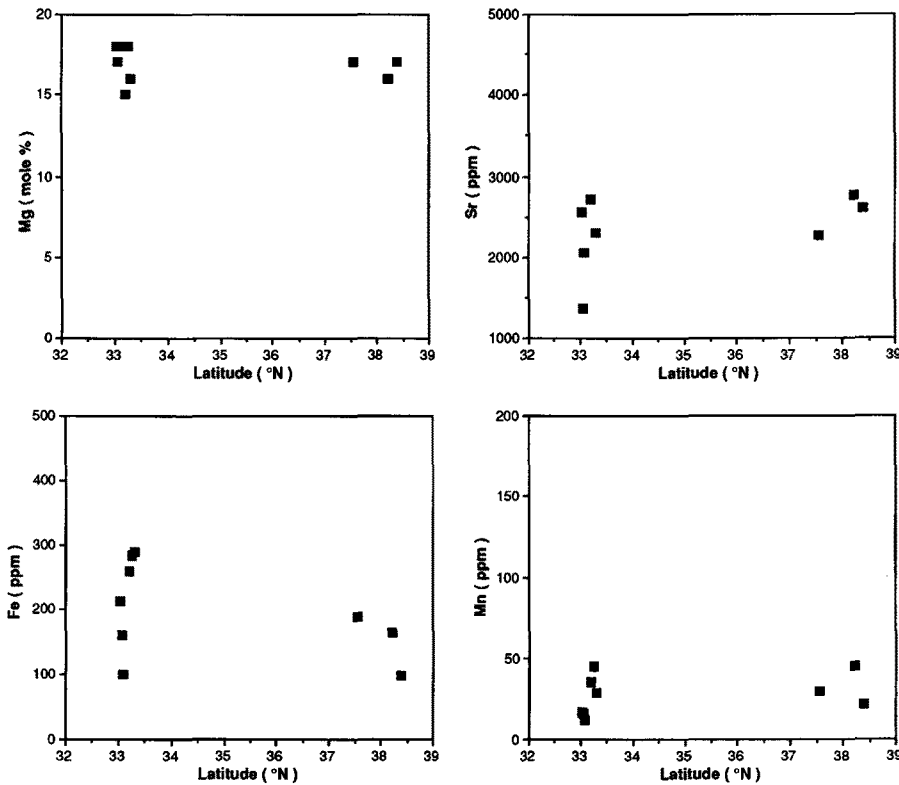


Fig. 5. Scatter diagram of Mg, Sr, Fe and Mn compositions vs. latitude for encrusting red algae.

산, 하서지역에서 590~789 ppm의 값을 보이며 평해지역은 다소 낮은 515~584 ppm의 값을 나타낸다. 제주도지역의 애월과 화순지역에서 각각 469~603 ppm, 612~655 ppm의 값을 보인다(Table 1). 따라서 Sr 함량은 조사한 지역에서 위도에 따른 큰 변화를 보여주지 않는다(Fig. 11). Fe 함량은 대체적으로 100 ppm 정도의 낮은 값을 보이며 저위도지역으로 갈수록 증가한다(Fig. 11). Ba 함량은 전체 지역이 10 ppm 이하의 낮은 값을 보이며 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 11). Cd 함량은 전체가 11~23 ppm의 농도를 보이며 평해지역을 제외한 나머지 지역에서는 고위도지역으로 갈수록 다소 감소하는 경향을 보인다(Fig. 12). Cu 함량은 대체적으로 31~44 ppm의 값을 보인다. 그러나 평해지역은 34~68 ppm으로 나머지 지역에 비해 높은 값을 보여주며, 3 개 시료의 성분변화폭도 크다(Table 1). 따라서 조사한 지역에서 Cu 함량은 위도에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않는다(Fig. 12). Pb 함량은 평해의 1 개 시료를 제외하곤 삼척, 호산, 평해와 하서지역에서 93~152 ppm 값을 보이며 제주도지역에서는 161~187 ppm의 값을 보인다. 따라서 저위도인 제주도지역에서 고위도지역으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다(Fig. 12). Zn 함량은 전체적으로 8~36 ppm의 값을 보이며 위도에 따른 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 12).

안정동위원소

가지상 홍조류는 화진포, 울진, 제주도의 이호지역에서 채취한 시료 중 2 개씩 분석하였다. 화진포지역은 $\delta^{18}O = -0.15\%$, $\delta^{13}C = -1.9\%$ 의 값을 보여주며, 울진은 $\delta^{18}O = -1.93\%$ ~ -0.25% , $\delta^{13}C = -2.6\%$ ~ -1.1% , 제주도 이호지역은 $\delta^{18}O = -4.71\%$ ~ -4.31% , $\delta^{13}C = -4.3\%$ ~ -4.0% 의 값을 나타낸다(Table 1). 가지

상 홍조류는 $\delta^{18}O = -4.71\%$ ~ -0.15% , $\delta^{13}C = -4.3\%$ ~ -1.1% 로 모두 저위도인 제주도지역으로 갈수록 산소동위원소 값이 고갈된 값을 갖는다.

덧개상 홍조류는 화진포와 애월지역의 시료를 분석하였는데, 화진포는 $\delta^{18}O = -4.31\%$ ~ -1.73% , $\delta^{13}C = -2.4\%$ 의 값을 보이며 애월지역은 $\delta^{18}O = -2.33\%$ ~ -1.93% , $\delta^{13}C = -1.4\%$ ~ -0.2% 을 나타낸다(Table 1). 덧개상 홍조류는 가지상 홍조류와는 달리 고위도지역에서 저위도지역으로 갈수록 수온의 변화에 따른 산소동위원소의 뚜렷한 변화가 없다.

성계는 광진에서 $\delta^{18}O = -1.24\%$ ~ -0.64% , $\delta^{13}C = -4.7\%$ ~ -2.1% 의 값을 보여주며, 평해에서는 $\delta^{18}O = -0.54\%$ ~ -0.25% , $\delta^{13}C = -3.0\%$ ~ -2.9% 의 값을 나타낸다(Table 1). 그리고 제주도의 애월지역은 $\delta^{18}O = -1.24\%$, $\delta^{13}C = -3.9\%$ ~ -3.2% 의 값을 나타내는데 덧개상 홍조류와 마찬가지로 수온의 변화에 따른 산소동위원소 변화가 보이지 않는다.

따개비는 화진포와 애월지역의 시료만을 분석하였는데, 화진포는 $\delta^{18}O = -0.35\%$ ~ -0.05% , $\delta^{13}C = 1.1\%$ ~ 1.2% , 애월지역은 $\delta^{18}O = -2.13\%$ ~ -1.14% , $\delta^{13}C = 0.2\%$ ~ 0.7% 의 값을 보이며, 해수의 온도가 따뜻한 제주도지역이 화진포지역에 비해 산소동위원소가 고갈되는 값을 보인다(Table 1).

굴은 삼척, 호산, 제주도의 화순지역에서 채취한 것을 분석하였다. 삼척지역은 $\delta^{18}O = -1.73\%$ ~ -1.34% , $\delta^{13}C = -1.4\%$ ~ 0.6% , 호산지역은 $\delta^{18}O = -2.82\%$ ~ -1.63% , $\delta^{13}C = -1.6\%$ ~ -0.8% , 그리고 화순지역은 $\delta^{18}O = -2.92\%$ ~ -1.63% , $\delta^{13}C = -1.3\%$ ~ -0.6% 으로 전체적으로 $\delta^{18}O = -3.00\%$ ~ 0.05% , $\delta^{13}C = -2.0\%$ ~ -1.5% 의 분포를 보이며 수온변화에 따른 산소동위원소 변화가 뚜렷하지 않다(Table 1).

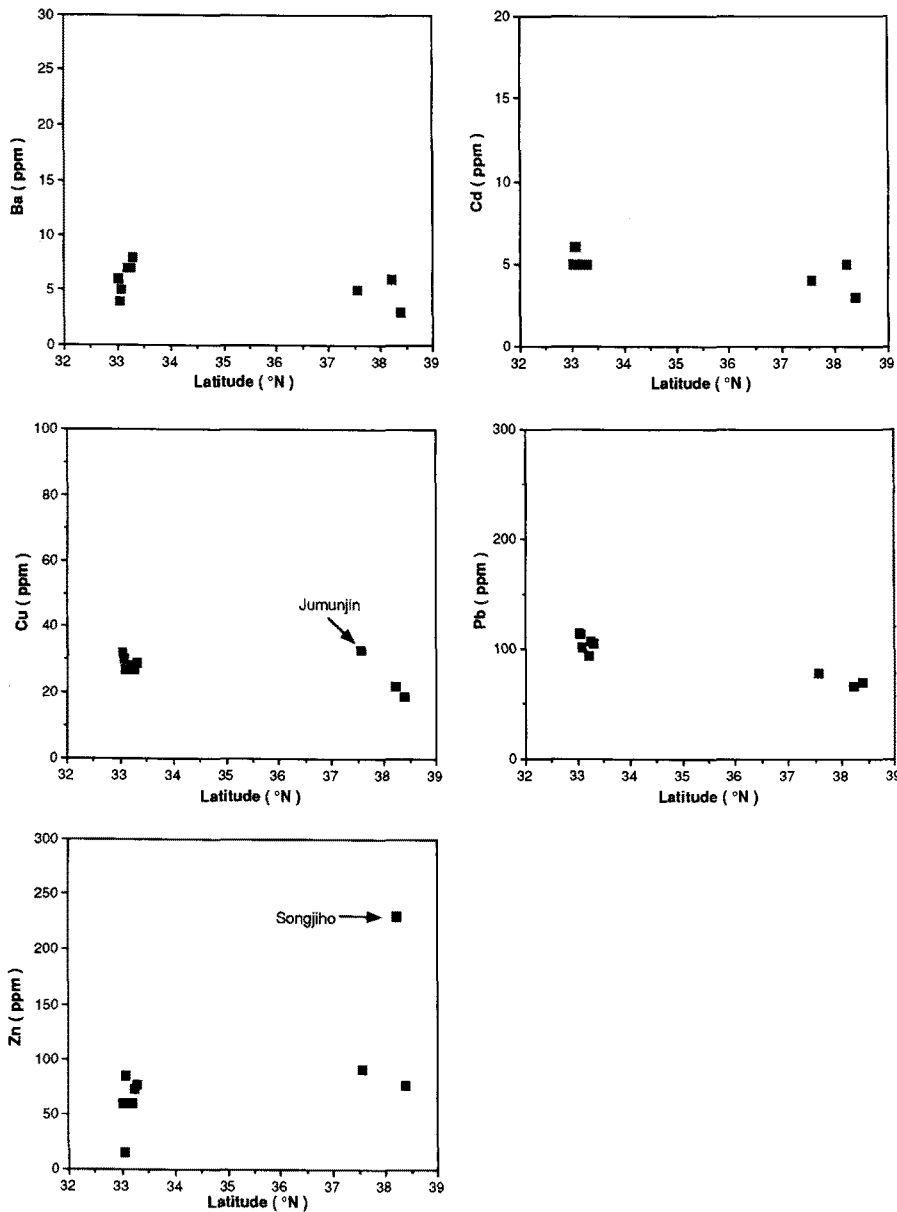


Fig. 6. Scatter diagram of Ba, Cd, Cu, Pb and Zn compositions vs. latitude for encrusting red algae.

각질의 탄소동위원소 성분은 성계가 $\delta^{13}\text{C} = -4.7 \sim -2.1\text{‰}$ 으로 다른 생물에 비해 고갈된 값을 보이며, 따개비는 $\delta^{13}\text{C} = 0.2 \sim 1.2\text{‰}$ 로 다른 생물에 비해 부화된 값을 보인다(Fig. 13). 또한 분석한 생물들의 각질의 산소동위원소 값은 $\delta^{18}\text{O} = -3.00 \sim 0.50\text{‰}$ 정도이며, 굴과 성계의 각질만이 밀집되어 나타난다(Fig. 13).

토 의

동해안 화진포에서 제주도에서 서식하는 방해석질 각질을 분석한 결과, Mg 함량 변화는 가지상 홍조류, 따개비, 그리고 굴에서는 저위도지역일수록, 즉 수온이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이나, 덮개상 홍조류와 성계는 성장온도와 Mg 함량변화가 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다(Fig. 14). Chave(1954)는 방해석이나 아라고나이트를 침전시켜 각질을 만드는 여러 해양 생물체의 각질 내의 Mg의 분포를 조절하는 요인에 대해 연구하

였다. 그 결과에 의하면 구성광물이 Mg 함량에 가장 큰 영향을 주는데, 방해석으로 이루어진 각질이 아라고나이트로 이루어진 것보다 더 높은 Mg 함량을 보여주고 있다. 또한 각질 내의 Mg 함량은 각질을 침전시킨 주위의 해수온도가 증가할수록 증가함을 보여주었다. 그리고 Chave(1954)는 방해석의 각질을 갖는 생물 중에서 좀 더 진화된 생물일수록 그 생물의 각질에 분포하는 Mg 함량이 더 낮다고 제시하였다. 특히 Dodd(1967)는 생물의 진화정도에 따라 방해석 각질을 갖는 생물과 아라고나이트 각질을 갖는 생물에 대한 Mg 함량의 변화를 보여주었다. 방해석 각질을 갖는 생물뿐만 아니라 아라고나이트 각질을 갖는 생물 각질 내의 Mg 함량은 진화된 생물일수록 각질의 Mg의 양이 감소함을 보였다. 따라서 진화정도가 낮은 조류의 Mg 성분이 가장 높고 진화정도가 높은 연체동물 이매패나 복족류의 Mg 값은 낮다. 또한 Pilkey and Hower(1960)는 성계류 *Dendraster*를 가지고 연구한 결과 Mg 함량변화에 영향을 주는 것은 해수온도와

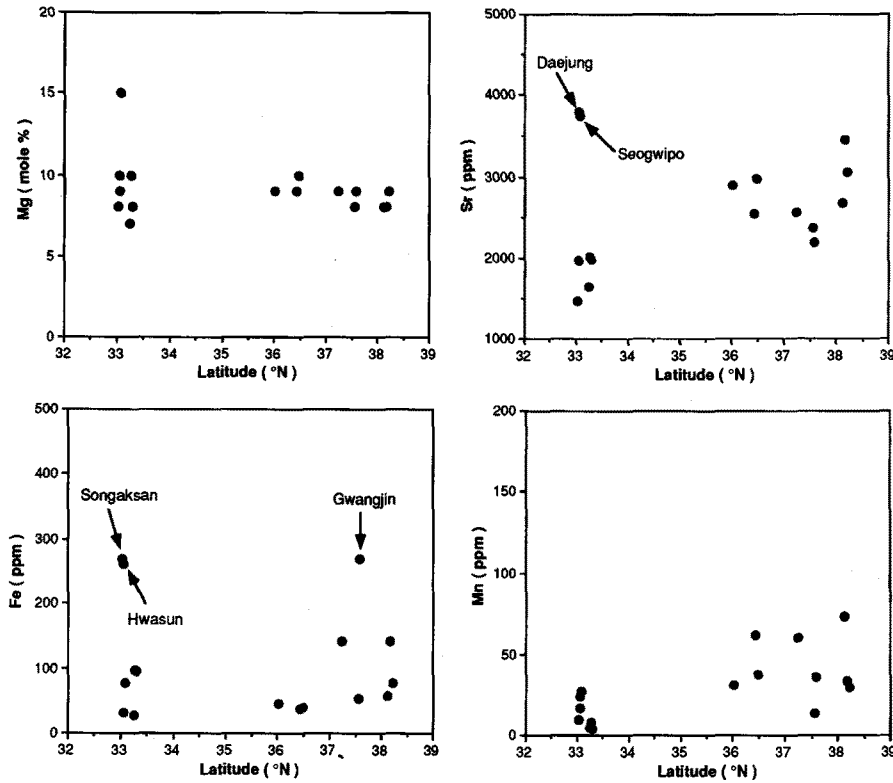


Fig. 7. Scatter diagram of Mg, Sr, Fe and Mn compositions vs. latitude for echinoderm.

같은 환경적인 요인보다는 유전적인 요인에 의해 조절된다고 하였다. Weber(1969)는 여러 종의 성게류를 대상으로 연구한 결과, 성게 한 개체의 각질과 침(spine), 이(tooth)와 같은 각 부분의 Mg 함량이 유전적인 영향으로 서로 약간씩 다르지만, 각 부분의 Mg 함량은 주위의 해수온도의 변화에 따라 어느 정도 영향을 받는다고 하였다. 하지만 같은 환경내에서 서식한 성게류들도 서로 다른 종들의 각질은 Mg 함량의 차이를 보여주며, 이러한 것은 생물체들의 종에 따라 서로 다른 생리작용에 의한 영향이라고 하였다.

이 연구에서 조사한 생물들의 각질 중에서 Mg 함량은 해수온도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 점은 각질의 Mg 함량이 주위의 환경변화를 어느 정도 반영하는 것으로 생각된다. 그리고 Chave(1954)는 성게 각질의 Mg 함량이 온도가 증가함에 따라 증가한다고 하였지만, 이 연구에서 조사한 성게에서는 Chave(1954)의 결과와는 다르게 수온의 변화에 따른 뚜렷한 변화가 없다.

탄산염 광물로 이루어진 여러 탄산염 각질 내의 Sr 함량과 온도와의 관계를 살펴보면 온도가 증가할수록 Sr 함량은 감소하는 경향을 보이기도 하지만(Pilkey and Hower, 1960; Dodd, 1965; Hallam and Price, 1968), 증가하는 경향을 보이기도 한다(Dodd, 1965, 1967; Schifano and Censi, 1986). 특히 Dodd(1965)는 *Mytilus*의 각질에서 Sr 함량과 온도와의 관계를 조사한 결과 바깥층의 방해석으로 이루어진 각질에서는 Sr 함량이 온도가 증가함에 따라 증가하지만, 아라고나이트로 이루어진 내부층(벽돌상 미세구조를 이루는 층)은 Sr 농도가 감소한다고 보고하였다. 그러나 이 연구에서는 방해석 각질의 경우, 온도가 증가함에 따라 Sr 함량이 감소하는 경향을 보여준다(Fig.

14). 그리고 Thompson and Chow(1955)와 Odum(1957)은 방해석 각질을 갖는 여러 생물 중, 특히 따개비에서 Sr 함량이 가장 높다고 보고한 바 있는데, 이는 이 연구에서의 결과와 잘 일치한다.

가지상 홍조류의 Fe 함량은 온도가 증가할수록 농도는 감소하는 경향을 보이지만 덮개상 홍조류와 굴의 경우, 변화폭은 작지만 온도가 증가할수록 Fe 함량 역시 증가하는 경향을 보여준다. 하지만 따개비와 성게는 수온변화에 따른 Fe 농도의 변화가 없다(Fig. 14).

Pilkey and Hower(1960), Harriss and Pilkey(1966), Raup(1966)은 성게 *Dendraster*에서 Mn 함량이 수온이 증가함에 따라 감소한다고 하였는데, 이 연구에서 분석한 성게는 온도에 따른 뚜렷한 변화를 보여주지 않는다. 하지만 가지상 홍조류와 덮개상 홍조류는 성게와는 달리 온도가 증가함에 따라 Mn 함량이 감소하는 경향을 보인다(Fig. 15). 또한 저마그네슘 방해석으로 이루어진 굴의 경우 Mn은 1 ppm 이하의 아주 낮은 농도를 나타내므로 해수의 온도변화에 따른 농도의 변화를 추정하기 어렵다.

Ba 함량은 각 생물마다 온도에 따라 나타나는 성분변화가 일정하지 않다. 덮개상 홍조류의 Ba 함량은 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 가지상 홍조류는 감소하는 경향을 보인다(Fig. 15). 성게와 저마그네슘 방해석으로 이루어진 따개비와 굴은 온도변화에 따른 성분변화를 보여주지 않는다. Turekian and Armstrong(1961)은 현생 연체동물의 탄산염 각질 내에서 Mg, Sr, Ba과 같은 원소의 함량을 조절하는 가장 중요한 요인은 수온이나 각질 내의 방해석과 아라고나이트의 비보다는 유전적인 요인이라고 제안한 바 있다. 따라서 이 연구에서 Ba

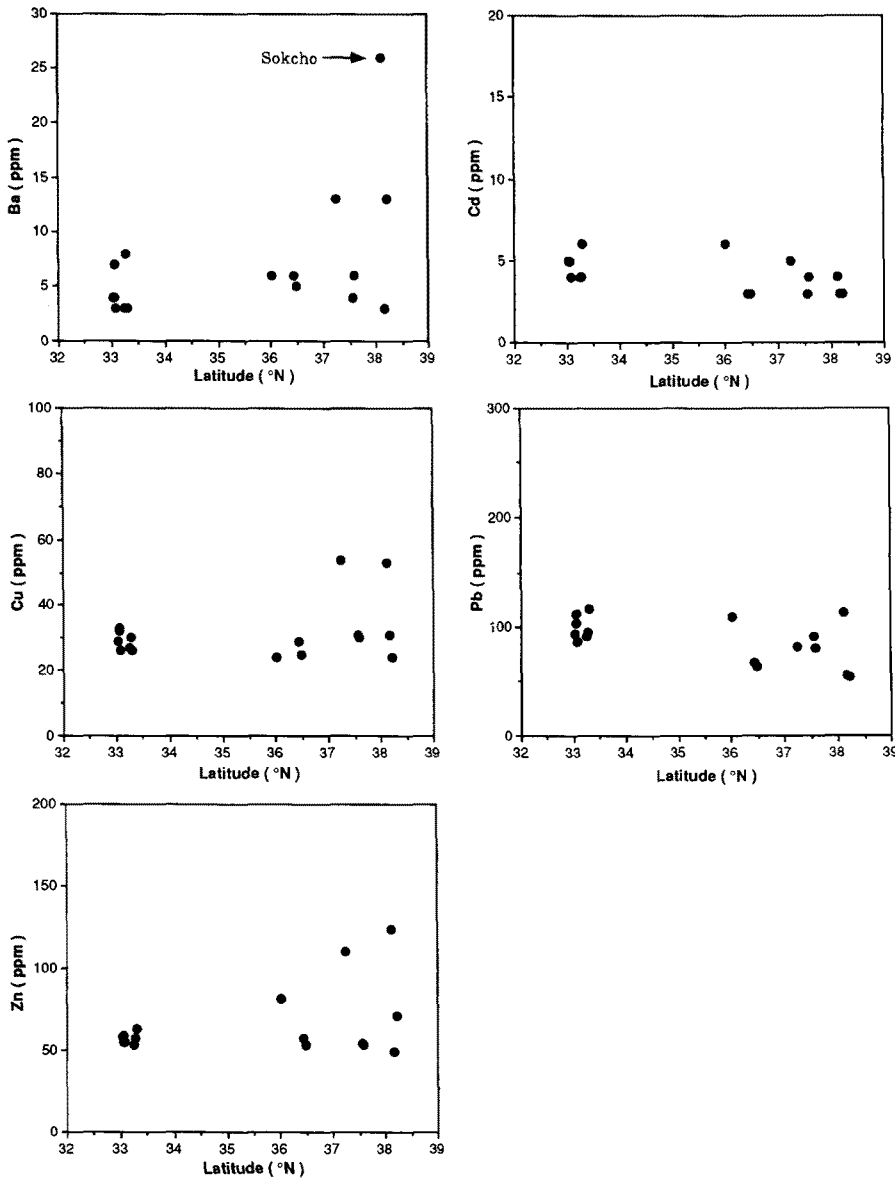


Fig. 8. Scatter diagram of Ba, Cd, Cu, Pb and Zn compositions vs. latitude for echinoderm.

함량의 변화가 생물마다 일정한 경향성을 보이지 않는 것은 생물마다의 신진대사 활동에서 오는 차이로 생각된다.

Cu 함량의 경우 덮개상 홍조류에서는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다(Fig. 15). Cd와 Pb 함량은 고마그네슘 방해석과 저마그네슘 방해석으로 이루어진 각질 모두 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 15). Zn의 경우, 고마그네슘 방해석으로 이루어진 각질과 저마그네슘 방해석으로 이루어진 각질 모두 수온변화에 따른 함량의 변화가 없다.

현재의 해수는 강의 유입이 있거나 오염원이 있는 지역을 제외하고는 지역에 관계없이 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} 등의 원소가 일정한 양으로 존재한다 (Milliman, 1974). 생물 각질의 미량원소 성분은 생물이 성장한 수온뿐만 아니라 염도에 의해 영향을 받는다고 제안된 바 있다 (Pilkey and Hower, 1960; Dodd, 1965; Harriss and Pilkey, 1966). 이 조사지역 내의 해수의 염도변화는 수심 10 m 이내에서 약

33.63‰~33.71‰ 정도로 변화폭이 매우 작으므로(FRDA, 1986), 각질에 포함되는 미량원소 함량의 변화가 염도에 의한 영향이라고 보기는 어렵다. 따라서 이러한 생물 각질 내에 포함되어 있는 미량원소의 변화는 생물이 성장하던 주위 환경의 변화뿐만 아니라, 성장온도에 따른 생물의 생리현상(metabolism)의 차이에 의한 것이라고 생각될 수 있다.

연체동물의 안정동위원소 성분은 고해양환경 지시자로서 사용되어 왔다. 특히 현생종으로부터 산소동위원소를 이용한 생물의 성장온도 추정은 그 생물이 성장한 실제의 해수의 온도를 잘 반영한다(Dodd, 1964; Keith *et al.*, 1964; Jones *et al.*, 1983). 그러나 연체동물을 제외한 몇몇 해양 생물들은 각질을 생성시킨 해수와 동위원소적으로 비평형적으로 각질을 생성한다고 알려져 있는데, 대표적인 예로 성게, 산호, 유공충, 홍조류, 녹조류 등이 있다. Morrison and Brand(1986)는 성게, 홍조류와 육사산호가 주위의 해수와 동위원소적으로 비평형상태에

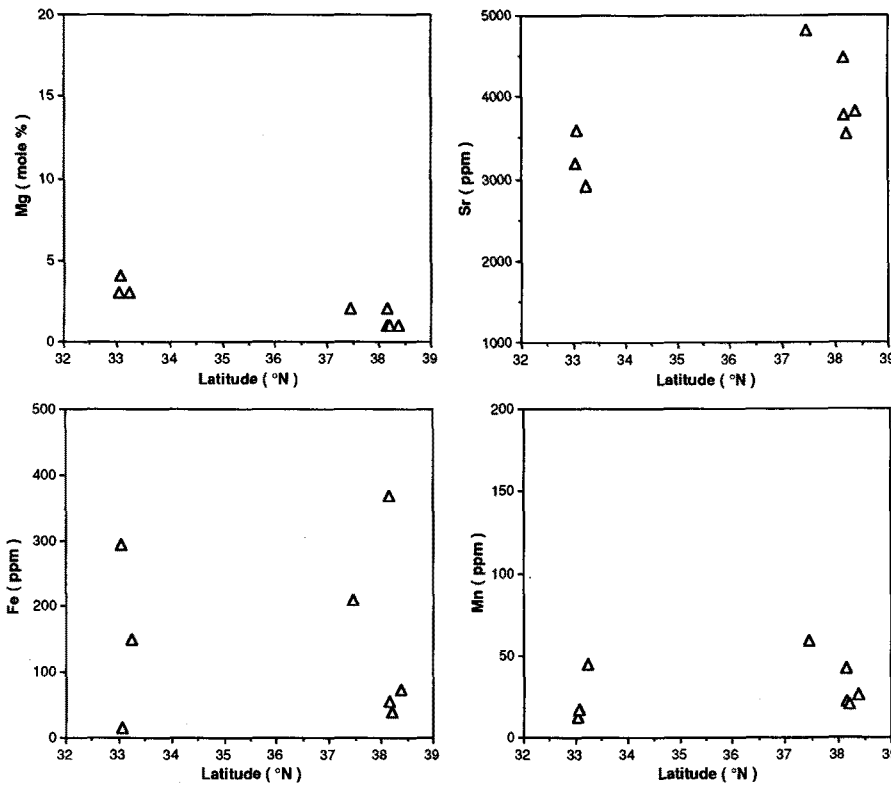


Fig. 9. Scatter diagram of Mg, Sr, Fe and Mn compositions vs. latitude for barnacle.

서 각질을 생성하는 것은 생물체가 무거운 동위원소에 비해 가벼운 동위원소를 선택적으로 선호하는 생리현상 때문이라고 제안하였다.

연구지역에서 서식하는 고마그네슘 방해석으로 이루어진 생물의 산소 및 탄소 동위원소 값을 살펴보면 가지상 홍조류는 각각 $\delta^{18}\text{O} = -4.70 \sim -0.20\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -4.3 \sim -1.1\text{‰}$, 덮개상 홍조류는 $\delta^{18}\text{O} = -4.30 \sim -1.70\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -2.5 \sim -0.2\text{‰}$ 의 값을 나타내고, 성게는 $\delta^{18}\text{O} = -1.20 \sim -0.30\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = 4.7 \sim -2.1\text{‰}$ 의 값을 보여준다(Fig. 13). 이러한 산소 동위원소 값으로 생물이 성장한 해수의 온도를 해수의 산소동위원소 성분이 0‰(SMOW)이라 가정하고 추정할 때, 가지상 홍조류는 17~38°C, 덮개상 홍조류는 24~36°C를 나타내고 성게는 17~21°C의 온도를 나타낸다(Fig. 16). 화진포지역과 울진지역의 가지상 홍조류에서 계산한 해수온도는 실제의 화진포지역과 울진지역의 여름철 해수온도를 잘 반영하고 있으나, 제주도지역에서 계산한 해수온도는 실제의 여름철 해수온도보다 약 10°C 정도 높음을 보여준다. 덮개상 홍조류의 산소동위원소 값으로 추정한 해수온도는 제주도지역의 경우 실제의 여름철 해수온도를 반영하고 있으나, 화진포와 주문진 지역의 덮개상 홍조류의 경우는 실제 여름철 해수온도보다 약 10~12°C 정도 높게 나타난다(Fig. 16). 해수의 온도가 낮은 고위도지역의 화진포에서 해수의 온도가 높은 저위도지역의 제주도로 갈수록 산소동위원소 값으로부터 계산된 온도는 가지상 홍조류에서는 증가하는 경향을 보여주나 덮개상 홍조류에서는 감소하는 경향을 보여준다. 그리고 성게의 산소 및 탄소 동위원소 값은 각각 $\delta^{18}\text{O} = -1.20 \sim -0.30\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -4.7 \sim -2.1\text{‰}$ 의 값을 나타내며 산소동위원소 값으로 계산된 해수의 온도는 17~21°C를 나타낸다. 이 온도는 국립수산진흥원에서 보고

한 여름철 해수온도 범위 내에 속하나 위도에 따른 변화를 보여주지 않는다.

저마그네슘 방해석으로 이루어진 따개비와 굴의 산소 및 탄소 동위원소 값은 각각 따개비 $\delta^{18}\text{O} = -2.10 \sim -0.10\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = 0.2 \sim 1.0\text{‰}$ 을 나타내고 굴은 $\delta^{18}\text{O} = -2.90 \sim -1.30\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -2.0 \sim -0.6\text{‰}$ 의 값을 보여준다(Fig. 13). 측정된 산소 동위원소 값으로부터 해수의 온도를 계산해 보면 따개비는 14~25°C, 굴은 16~29°C의 범위를 나타낸다. 따개비에서 측정된 산소동위원소 값으로 계산된 해수온도 중, 강릉지역은 실제의 여름철 해수온도(17~23°C)에 비해 3°C 정도 낮지만, 나머지 지역은 실제의 여름철 해수온도 범위에 포함되며 저위도 지역으로 갈수록 동위원소 값으로부터 계산된 해수의 온도가 증가하는 경향을 보인다(Fig. 16). 굴은 호산지역과 제주의 화순지역 중 한 표본만이 다소 낮은 산소동위원소 값을 보이고, 대체적으로 조사지역의 전구간에서 밀집된 값을 보여준다. 측정된 산소동위원소 값으로부터 계산된 해수온도는 위도에 따른 뚜렷한 경향을 보여주지 않으며 실제 여름철 해수온도 보다 대부분 높게 나타난다(Fig. 16).

해수로부터 침전된 탄산염 각질의 성장온도를 좀 더 정확히 추정하기 위해서는 각질이 생성된 해수의 산소동위원소 성분을 알아야만 가능하다. 하지만 현재 한반도 주위 해역에 대한 해수의 산소동위원소 성분의 분석은 거의 이루어지지 않은 실정이다. 일반적으로 해수는 증발이 심하거나 주위의 육지로부터 민물의 유입이 없는 한, 0‰(SMOW)에 가까운 값을 보여준다. 따라서 이 연구에서는 해수의 산소동위원소 값을 0‰(SMOW)이라 가정하였다. 만약 생물이 성장한 해수의 산소동위원소 값이 0‰보다 부화되었다면, 이에 따른 계산된 온도는 이 논문에서 제시하는 생물의 성장온도 범위보다 더 높은 온도를 나타낸다.

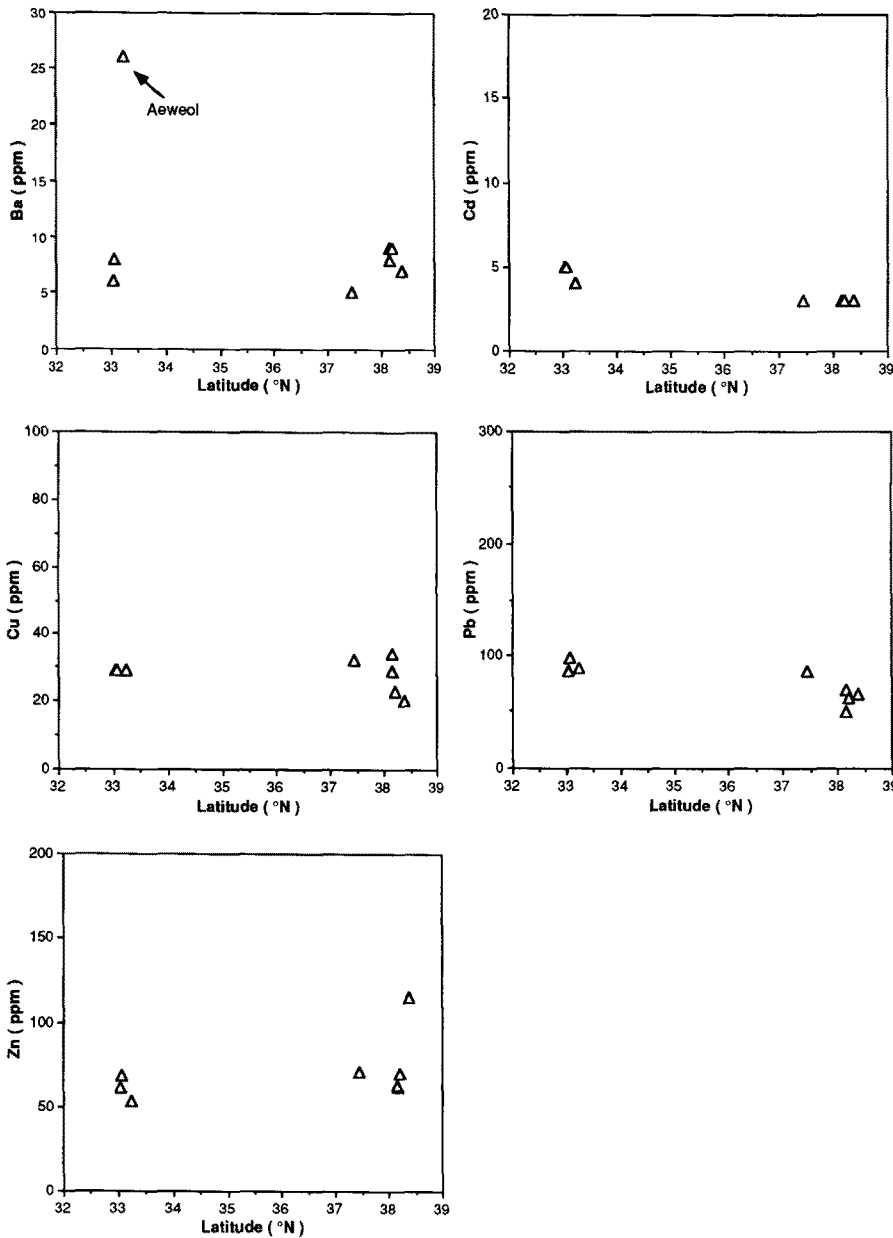


Fig. 10. Scatter diagram of Ba, Cd, Cu, Pb and Zn compositions vs. latitude for barnacle.

일반적으로 해수의 산소동위원소 값이 0‰보다 부화된 값을 갖는 경우는 증발이 많이 일어나는 지역의 해수이다. 그러나 우리나라의 경우 한반도 주변해역의 염도는 위도에 따른 큰 차이가 없으므로 해수의 동위원소 값이 0‰보다 부화된 값이라 가정하는 것은 적합하지 않다. 또한 해수의 동위원소 값이 0‰보다 고갈된 값을 갖는다면 계산된 온도는 제시하고 있는 생물의 성장온도보다 낮은 온도를 가지게 된다. 이러한 경우는 해수가 연안지역에서 민물의 유입에 의해 해수와 서로 혼합되는 경우이다. 현재 한반도 주변해역에서 분석 보고된 해수의 산소동위원소 성분에 대한 자료는 매우 부족한 실정이다. 다만 1993년 한국해양연구소의 자료에 의하면 우리나라 남동해역의 연안에서 해수의 동위원소 값은 지역마다 조금씩 차이가 있으나 약 -0.5~0‰ 정도라고 보고된 바 있다. 만약 연구지역 해수의 산소동위원소 값이 -0.5‰이라면, 해수온도 계산값은 약 2~

3°C 정도 낮아지게 된다. 이러한 경우, 가지상 홍조류는 고위도 지역의 실제 여름철 해수온도 범위 내에 속하게 되나 저위도의 제주도지역에서는 실제 여름철 해수온도 범위 내에 속하지 않는다. 그러나 덮개상 홍조류의 경우, 가지상 홍조류와는 반대로 저위도의 제주도지역에서는 이미 실제의 여름철 해수온도 범위에 속하게 되나, 고위도지역에서는 이 온도 범위 내에 속하지 않게 된다.

지마그네슘 방해석으로 이루어진 각질에서는 해수온도가 약 2~3°C 정도 낮아지게 되면, 굴시료의 경우 저위도지역은 실제 해수온도 범위내에 속하게 되나 고위도지역에서는 여전히 실제 해수온도 보다 높게 된다. 만약 각질 내의 산소동위원소 변화가 온도와 환경적인 요인에 의해 결정된다면, 동위원소 값이 위도에 따라 일정한 변화를 보여야 하는데, 굴의 경우 실제로 측정된 산소동위원소 분석결과는 위도에 따른 뚜렷한 변화없이 서

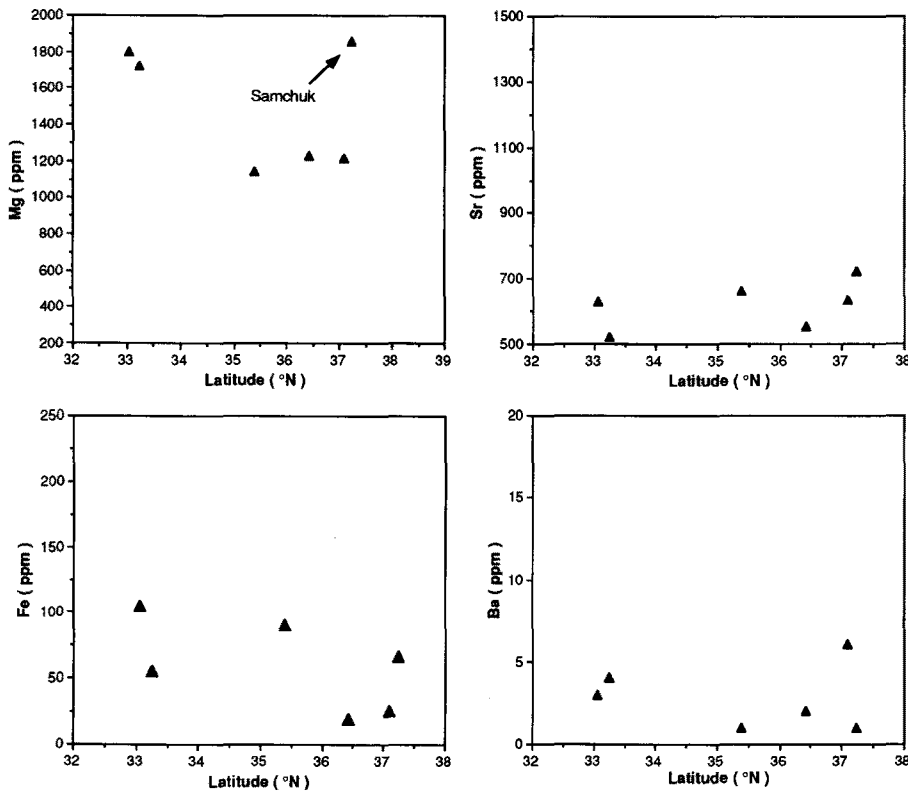


Fig. 11. Scatter diagram of Mg, Sr, Fe and Ba compositions vs. latitude for oyster.

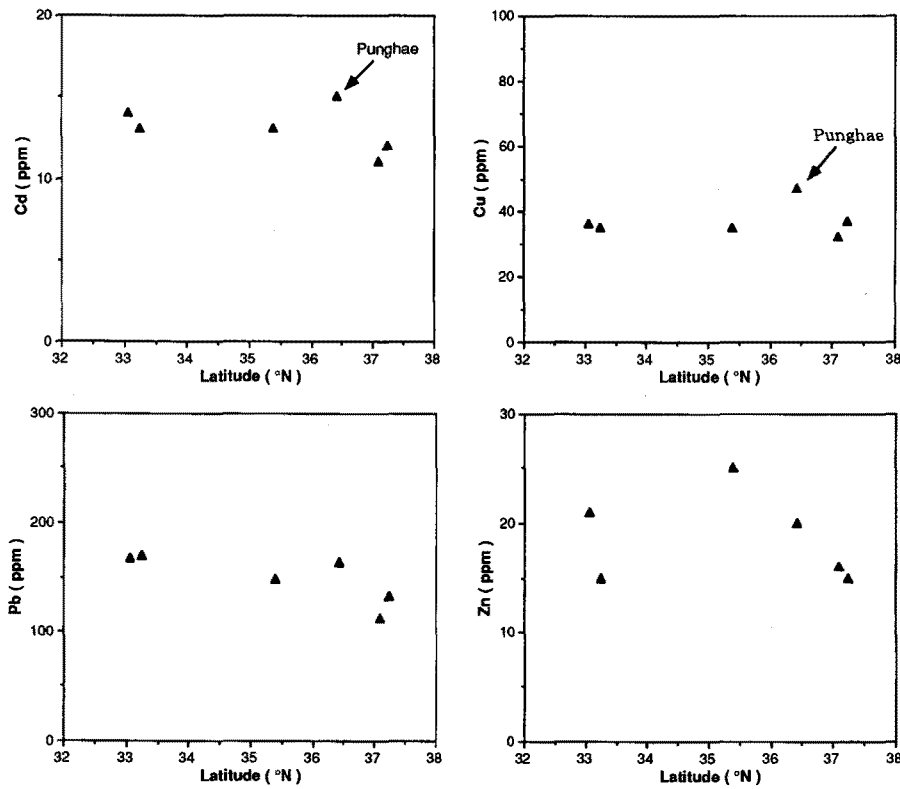


Fig. 12. Scatter diagram of Cd, Cu, Pb and Zn compositions vs. latitude for oyster.

로 밀집되어 나타난다(Fig. 13). 이러한 점은 각질 내의 산소동위원소 성분이 주위의 성장온도에 따른 분별작용 보다는 생물의 생리작용에 의해 변화하기 때문이라 생각된다. 이들에 대한 좀 더 정확한 해석을 위해서는 동해안 해수의 산소동위원소 값

이 측정되어야 하고, 각 개체 내의 동위원소 성분의 계절별 변화를 측정해야 한다.

따라서 따개비는 산소동위원소적으로 주위의 해수와 평형상태에서 각질을 생성하는 것으로 생각되나, 가지상과 뒷개상 홍

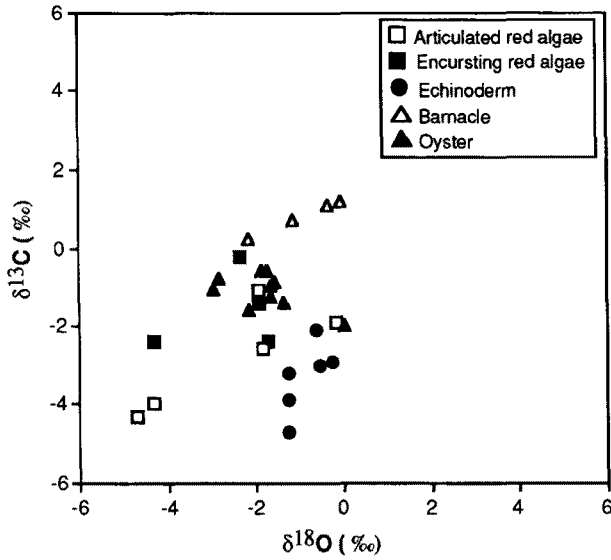


Fig. 13. Scatter diagram of carbon vs. oxygen isotopic compositions for high- and low-magnesium calcite skeletons.

조류, 그리고 성게는 비평형상태에서 각질을 생성하는 것으로 생각된다. 그러므로 따개비는 고환경의 해수온도를 추정하는데 이용이 될 수 있지만, 나머지 생물들을 이용하여 고환경의 해수온도를 추정하는 데는 많은 주의가 필요하다.

결론

1. 연구지역의 가지상 홍조류와 덮개상 홍조류의 각질은 7~21 mol% MgCO₃, 성게는 7~15 mol% MgCO₃의 고마그네슘 방해석으로 이루어져 있으나, 따개비와 굴은 1~5 mol% MgCO₃를 갖는 저마그네슘 방해석으로 이루어져 있다.

2. 가지상 홍조류는 저위도지역으로 갈수록, 즉 수온이 증가할수록, 각질 내의 Mg, Cd, Pb 함량은 증가하나 Sr, Fe, Mn, Ba 함량은 감소한다. Cu와 Zn 함량은 해수의 온도변화에 따른 변화가 없다.

3. 덮개상 홍조류는 저위도지역으로 갈수록, 각질 내의 Fe, Ba, Cd, Cu, Pb 함량은 증가하나 Mn 함량은 감소한다. Mg, Sr,

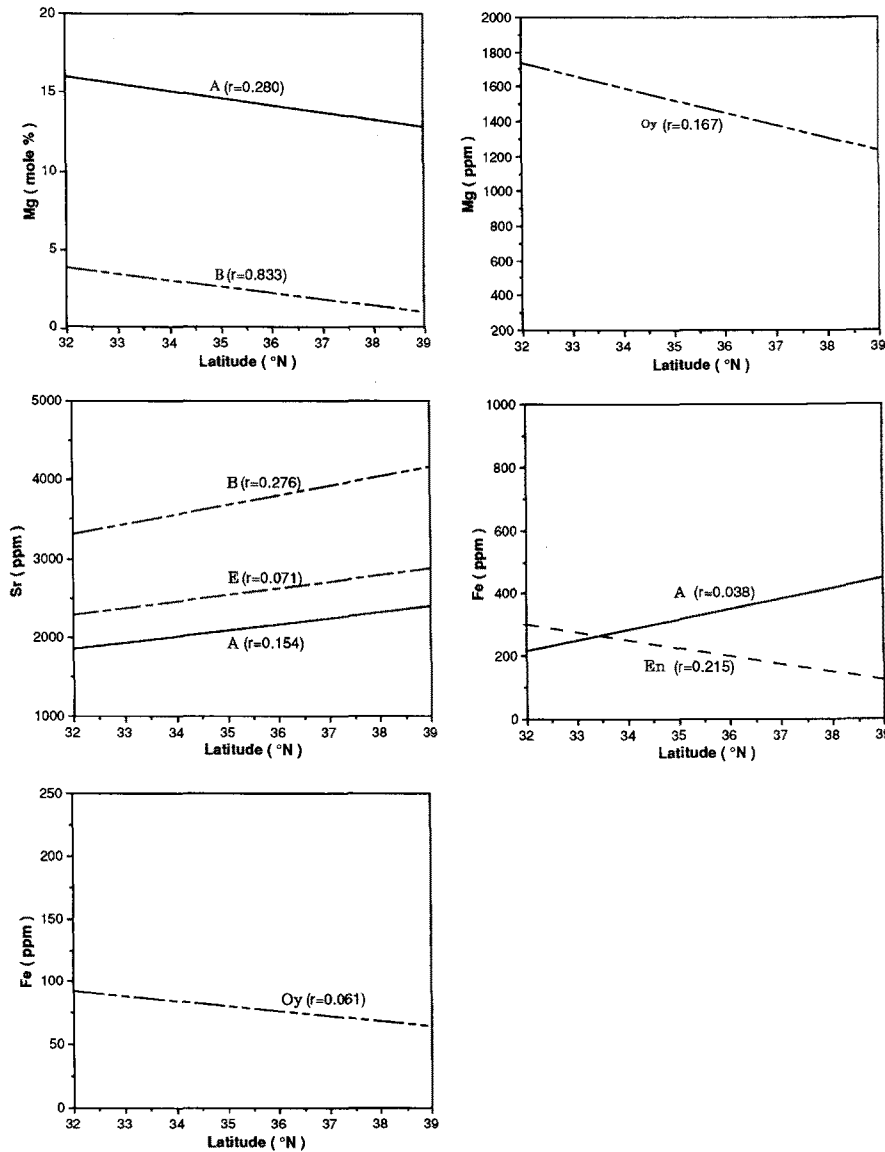


Fig. 14. Compositional variations of Mg, Sr and Fe compositions with latitude. A=algae, B=barnacle, E=echinoderm, Oy=Oyster.

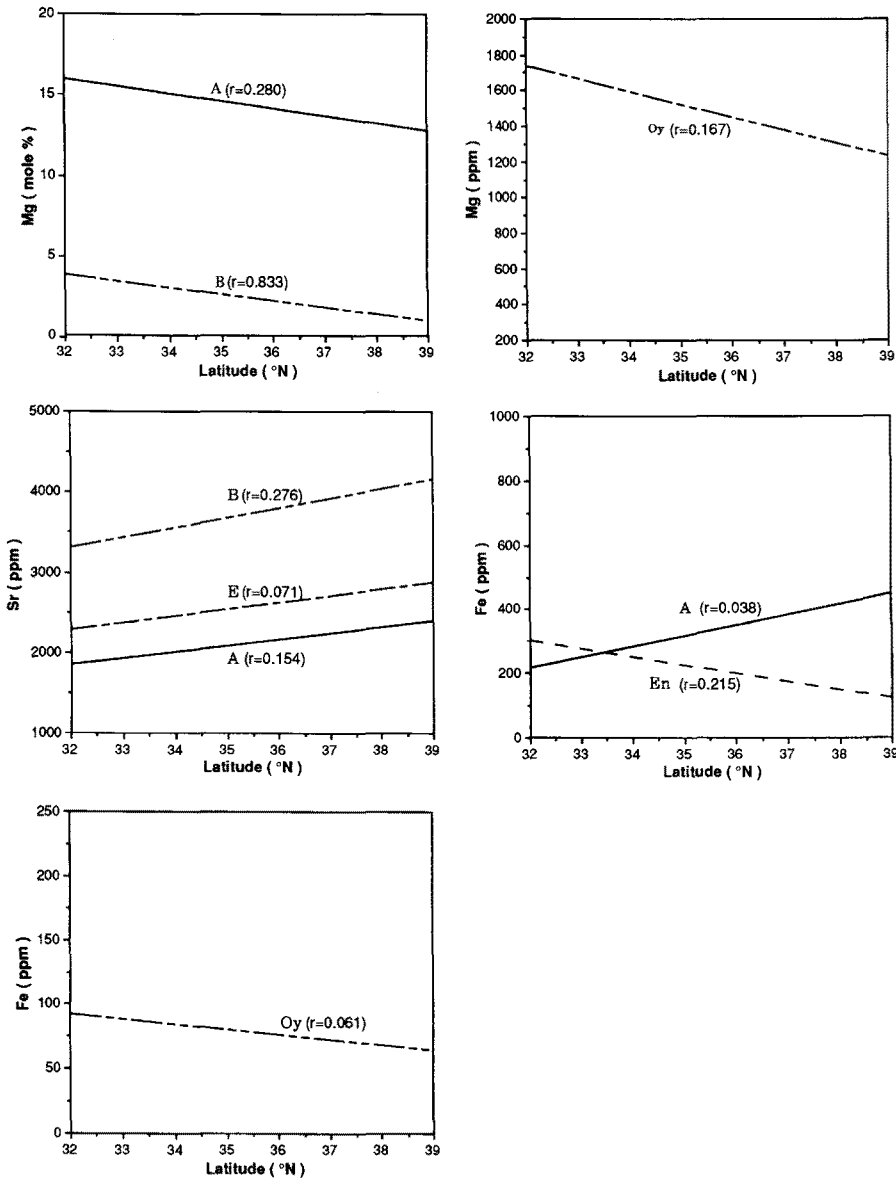


Fig. 15. Compositional variations of Mn, Ba, Cd, Cu and Pb compositions with latitude.

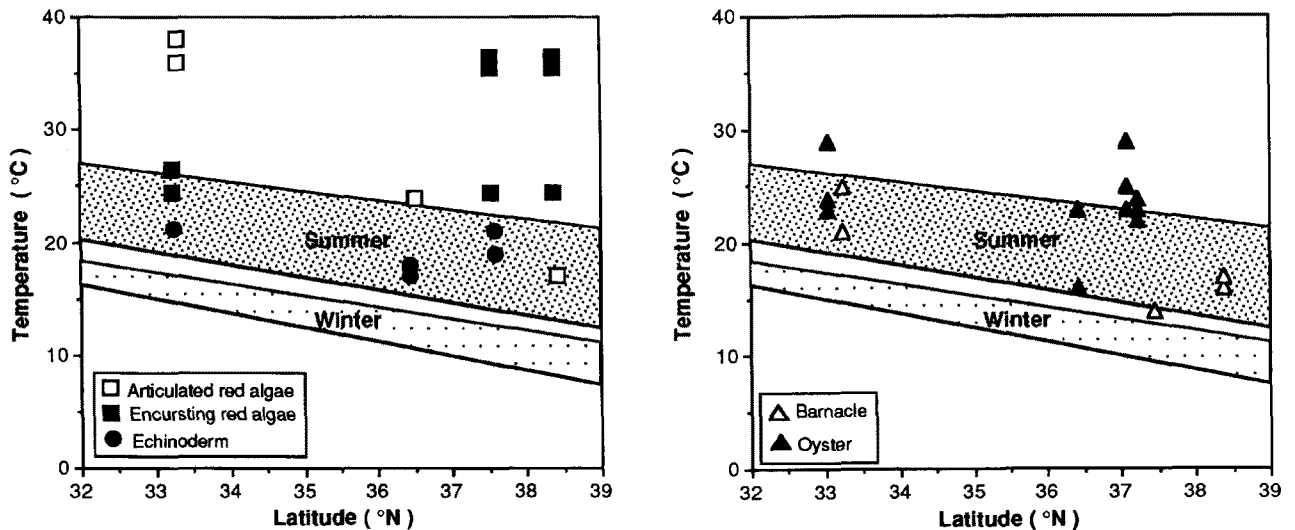


Fig. 16. Scatter diagram of calculated temperatures from oxygen isotopic data vs. latitude for all the skeletons examined. Temperatures were calculated using the equation of Epstein *et al.* (1953).

Zn 함량은 해수의 변화에 따른 농도변화가 없다.

4. 성개는 저위도지역으로 갈수록, 각질 내의 Cd와 Pb 함량은 증가하나 Sr 함량은 감소한다. Mg, Fe, Mn, Ba, Cu, Zn 함량은 해수의 온도변화에 따른 변화가 없다.

5. 따개비는 저위도지역으로 갈수록, 각질 내의 Mg, Cd, Pb 함량은 증가하나 Sr 함량은 감소한다. 그러나 Fe, Mn, Ba, Cu, Zn 함량은 해수의 온도변화에 따른 변화가 없다.

6. 저마그네슘 방해석으로 이루어진 굴은 저위도지역으로 갈수록, 각질 내의 Mg, Fe, Cd, Pb 함량은 증가하나 Sr, Ba, Cu, Zn 함량은 해수의 온도변화에 따른 변화가 없다.

7. 고마그네슘 방해석으로 이루어진 생물들의 각질에서 측정 한 동위원소 값으로부터 계산한 해수의 온도는 생물체가 자란 여름철 해수온도 보다 높게 나타났다. 저마그네슘 방해석으로 이루어진 생물 중에서 따개비의 산소 동위원소값으로부터 계산 한 해수온도는 대체로 따개비가 자란 수온을 반영했으나, 굴의 동위원소값은 밀집되어 나타났으며 생물체가 자란 수온보다 높 게 나타났다. 따라서 따개비는 고해양 해수온도를 추정하는데 유용하다고 생각되지만, 나머지 생물들은 고해양 해수온도를 추정하는데 이용하기에는 더 많은 조사가 필요한 것으로 생각 된다.

사 사

이 논문은 지옥미의 석사논문의 일부분으로 구성되었다. 표 품채집에 도움을 준 강원대학교 지질학과 신영욱에게 감사한 다. 이 연구는 교육부 특성화과제 기초과학연구소 학술연구조 성비(과제번호: BSRI-96-2424)에 의해 일부 지원되었다.

참고문헌

지옥미, 우경식, 1995. 제주도 해빈퇴적물의 구성성분. 한국해양 학회지, **30**: 480—492.

Chave, K.E., 1954. Aspects of the biogeochemistry of magne- sium, 1. Calcareous marine organisms. *J. Geol.*, **62**: 266—283.

Dodd, J.R., 1965. Environmental control of strontium and mag- nesium in *Mytilus*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **29**: 385— 398.

Dodd, J.R., 1967. Magnesium and strontium in calcareous skeletons: A review. *J. Paleont.*, **41**: 1313—1329.

Epstein, S., R. Buchsbaum, H.A. Lowenstam and H.C. Urey, 1953. Revised carbonate water isotopic temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **64**: 1315—1326.

FRDA (Fisheries Research and Development Agency), 1986. Mean Oceanographic Chart of the Adjacent Seas of Korea. Pusan, 179 pp.

Hallam, A. and N.B. Price, 1968. Environmental and bio- chemical control of strontium in shells of *Cardium edule*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**: 319—328.

Harriss, R.C. and O.H. Pilkey, 1966. Temperature and salinity control of the concentration of skeletal Na, Mn, and Fe in

Dendraster excentricus. *Pacific Sci.*, **20**: 235—238.

Jones, D.S., D.F. Williams and M.A. Arthur, 1983. Growth history and ecology of the Atlantic surf clam, *Spisula solidissima* (Dillwyn), as revealed by stable isotopes and annual shell increments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **73**: 225—242.

Keith, M.L., G.M. Anderson and R. Eichler, 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of mollusk shells from marine and freshwater environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**: 1757—1786.

Milliman, J.D., 1974. Marine Carbonates. Springer-Verlag, Berlin, 375 pp.

Morrison, J.O. and U. Brand, 1986. Geochemistry of Recent marine invertebrates. *Geosci. Can.*, **13**: 237—254.

Odum, H.T., 1957. Biogeochemical deposition of strontium. *Inst. Mar. Sci., Pub.*, **4**: 38—114.

Pilkey, O.H. and J. Hower, 1960. The effect of environment on the concentration of skeletal magnesium and strontium in *Dendraster*. *J. Geol.*, **68**: 203—216.

Raup, D.M., 1966. The endoskeleton. In: *The Physiology of Echinodermata*, edited by Booloottian, R.A., John Wiley & Sons, New York, pp. 379—395.

Schifano, G. and P. Censi, 1986. Oxygen and carbon isotope composition, magnesium and strontium contents of calcite from a subtidal *Patella coerulea* shell. *Chem. Geol. (Isotope Geosci. Sect.)*, **58**: 325—331.

Silliman, B., 1846. On the chemical composition of the cal- careous corals. *Am. J. Sci.*, **1**: 189—199.

Thompson, T.G. and J. Chow, 1955. The strontium-calcium atom ratio in the carbonate-secreting marine organisms. *Deep-Sea Res., Suppl.*, **3**: 20—39.

Turekian, K.K. and R.L. Armstrong, 1961. Magnesium, stron- tium and barium concentrations and calcite/aragonite ratios of some recent molluscan shells. *J. Mar. Res.*, **18**: 133—151.

Weber, J.N., 1969. The incorporation of magnesium into the skeletal calcites of echinoderms. *Am. J. Sci.*, **267**: 537—566.

Woo, K.S., 1994. Paleoenvironmental reconstruction from calcareous fossils. *Korean J. Malacol.*, **10**: 10—23.

Woo, K.S., M. Huh and S.N. Park, 1994. Paleooceanographic investigation from the ostracodes of the middle Miocene Chunbuk formation in Pohang basin. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **29**: 164—170.

Woo, K.S., M. Huh, S.M. Park, E. Keppens, K.H. Park and K.S. Lee, 1995a. Paleooceanographic investigation from the well preserved mollusks of the Chunbuk conglomerate in Pohang basin. *J. Geol. Soc. Korea*, **31**: 188—199.

Woo, K.S., D.K. Chung and B.K. Park, 1995b. Paleooceano- graphic investigation from the calcareous skeletons of the Pleistocene Seoguipo formation, Cheju Island, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 216—226.

1997년 7월 3일 원고 접수

1997년 11월 4일 수정본 채택