

중앙태평양 마이크로네시아 군도 해저산 일원에서 발견되는 탄산염암의 속성작용

우경식 · 최윤지¹ · 이경용¹ · 강정극¹ · 박병권¹
강원대학교 지질학과, ¹한국해양연구소 심해저자원연구센터

Diagenesis of the Carbonate Rocks of the Seamounts in the Federated States of Micronesia, Central Pacific

KYUNG SIK WOO, YOON JI CHOI¹, KYEONG YONG LEE¹
JUNG KEUK KANG¹ AND BYONG KWON PARK

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
¹Deep-Sea Resources Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

중앙태평양 마이크로네시아 군도 해저산 일원에서 발견되는 탄산염암의 구성성분과 속성작용을 이해하기 위하여 조직적, 지화학적 연구를 수행하였다. 연구지역은 Caroline 해령, Chuuk 섬, Hunter 뱅크, Yap 해구 일대이며, 대부분의 시료들은 수심 약 1,000~3,000 m 깊이에서 준설된 것들이다. 연구지역에서 발견되는 탄산염암은 부유성 유공충으로 이루어진 원양성 퇴적물과 산호, 석회조류, 연체동물 및 극피류 등으로 이루어진 천해퇴적물의 두 종류가 있다. 이들 퇴적물은 Hunter 뱅크와 Yap A 지역을 제외하고는 모두 조직적, 화학적 속성변질을 받았다. 천해기원 교질물들이 발견되므로, 천해에서 퇴적된 후 현재의 깊이로 침강되었거나 재동된 것으로 사료된다. 조직 특성은 천수에 의한 속성변질산물과 매우 유사한 양상을 보여주나, 변질된 시료의 탄소동위원소는 해수 기원 탄소의 특성을 보여주며, 산소동위원소는 변질되지 않은 시료와 같거나 부화된 값을 보여준다. 따라서 이 지역의 탄산염암은 심해의 해수에 의해 변질되었음을 알 수 있다.

This study was carried out to investigate the composition and diagenesis of the carbonate rocks from the seamounts in the Federated States of Micronesia, Central Pacific. Most of the samples were dredged from the water depth of about 1000—3000 m mainly in Chuuk Island, Hunter Bank, Caroline Ridge and Yap Trench. The carbonate rocks are either pelagic sediment mainly of planktonic foraminifera or shallow-marine sediment of corals, calcareous algae, mollusks and echinoderms. The rocks are altered texturally and chemically, except for those from the Hunter Bank and Yap A. The presence of shallow-marine cements suggests that the carbonate sediment has been subsided or reworked to the present water depth after deposition in shallow-marine environments. The texture of the carbonate sediment is reminiscent of meteoric diagenesis; however, the stable carbon isotopic composition of the altered rock samples shows affinity with that of sea water and the oxygen isotopic values are slightly enriched or same as compared to those of unaltered samples. These stable isotopic data suggest that the carbonate sediment of the study area has been diagenetically altered in the present deep-marine environment.

서 론

현생의 해양환경에서 탄산염 퇴적물이 분포하는 지역을 크게 두 개로 구분하면, 하나는 주로 열대 및 아열대 지역의 빠른 퇴적작용이 일어나는 천해환경이고, 다른 하나는 부유성 미생물이 떨어져서 천천히 퇴적작용이 일어나는 심해환경이다. 지금까지 탄산염암에 관한 연구는 주로 수심이 얕고 탄산염 퇴적물의 공급이 많은 퇴적환경에 대해서 활발히 진행되어 왔다. 심해 탄산염암에 대해서는 최근에 이르러서야 낮은 수온 환경에서의 준

안정한 탄산염 광물의 방해석화 작용, 방해석 교질물의 침전 및 선택적으로 일어나는 탄산염 광물의 용해작용 등이 이해되기 시작하였다.

해수의 탄산염 광물에 대한 포화도는 해수의 온도, 압력 및 해수 내의 CO₂ 분압에 따라 달라진다. 일반적으로 열대 및 아열대의 천해는 높은 온도, 낮은 압력 및 낮은 CO₂ 분압으로 인하여 모든 탄산염 광물에 대해 과포화 상태에 있다. 하지만 심해로 갈수록 해수의 온도는 감소하고 압력은 증가하며 CO₂ 분압이 높아져 해수는 탄산염 광물에 대해 불포화 상태에 이르게 된

다(Morse and Berner, 1979). 현생 열대 지역의 천해환경에서 퇴적되는 탄산염 입자는 아라고나이트와 고마그네슘 방해석으로 이루어져 있으며, 다양한 형태의 고마그네슘 방해석과 아라고나이트 교질물이 나타난다(James and Choquette, 1990). 심해환경(용해비약수심(lysocline)보다는 깊고 탄산염보상심도(carbonate compensation depth)보다는 더 얇은 곳)는 탄산염 광물의 용해와 침전이 동시에 일어나는 지역으로 주로 아라고나이트나 고마그네슘 방해석이 퇴적되며, 부분적인 용해와 방해석에 의한 치환 및 저마그네슘 방해석 교질작용이 일어난다(Bathurst, 1975). 열대 지역의 심해해수는 아라고나이트에 대해 거의 불포화 상태에 있지만 방해석에 대해서는 과포화 상태에 있다. 이것은 민물 속성 환경과 매우 비슷한 화학적 조건이다(유와 우, 1997).

중양태평양에서 발견되는 수많은 해저산의 정상부와 사면에는 극부적으로 탄산염암이 분포하고 있다. 이곳에서는 천해기원의 산호, 석회조류, 연체동물 및 극피류로 이루어진 천해퇴적물과 원양퇴적물이 함께 발견된다. 본 연구에서는 이 지역에서 채취된 탄산염암의 구성성분 분석과 조직 관찰, 이와 병행한 지화학적 분석을 통하여 용해비약수심 아래에서의 탄산염 퇴적물의 속성과정을 밝히고자 한다. 이 연구는 천해에서 형성된 퇴적물이 심해로 이동됨에 따라 받게 되는 속성작용의 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다.

연구지역

연구지역은 중양태평양 마이크로네시아 군도(Federated States of Micronesia)의 서쪽에 위치한 Yap 해구와 Caroline 해령 부근의 해저산 일원이다(Fig. 1). 이 지역은 1990년 한국해양연구소와 미국의 국립지질연구소(USGS)가 공동으로 망간각자원을 비롯한 심해저 광물자원의 부존 현황을 파악하기 위하여 탐사를 수행한 지역이다. Yap 해구는 동쪽의 Mariana 해구와 서쪽의 Palau 해구가 연결되는 중간지점에 위치하는데 활저림 굽어져 있으며, 수심은 7~8 km 깊이이고, 동남쪽에 Caroline 해령이 인접해 있다(Fig. 1). 이 지역의 섬과 해저산들은 대부분 화산암으로 이루어져 있다. 이들 섬과 해저산들은 1,400만년 전부터 하와이 열도와 서로 평행하게 배열되어 발달하였는데, 이러한 현상은 Caroline 지역의 섬과 해저산들이 열점작용에 의해서 생성되었음을 지시한다(Jurrard and Clague, 1977). 이들 화산섬들은 중양해령에서 멀어지면서 기반암을 이루는 해양지각이 열수축에 의해 점차 침강하거나, 해수면의 상승에 따른 침수에 의해 해저산(seamount)이나 잠도(guyot)로 변화하였으며(Schlanger et al., 1987), 일부 그대로 해수면 위로 노출된 섬들은 환초(atoll)로 진화하였다. 해저산 정상부에는 천해환경이 형성되어 급속한 산호초의 발달과 퇴적이 일어났다. 본 연구에 사용된 시료가 채

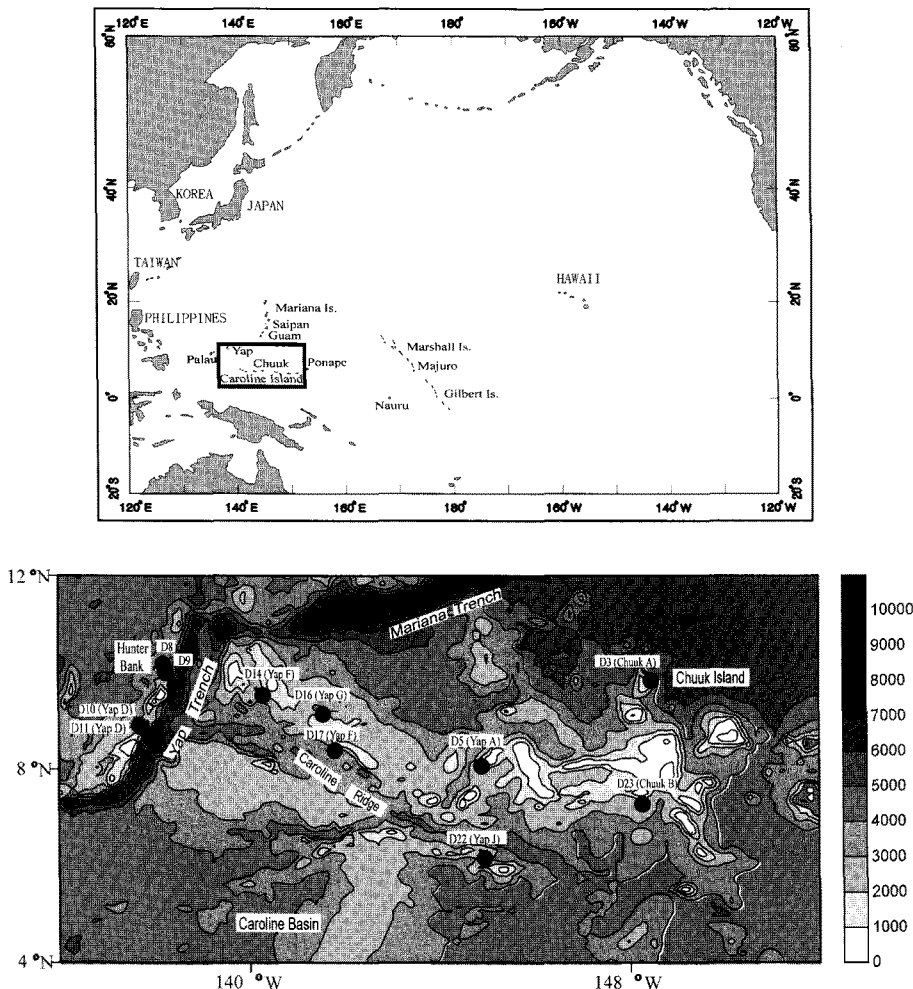


Fig. 1. Location map of the study area (Top). Topographic map of the study area (Bottom). Dots represent dredge sites. Contours are in meters.

취된 지역은 Caroline 해령, Chuuk 섬, Hunter 뱅크, Yap 해구 등이며, Hunter 뱅크의 일부 시료를 제외한 채취된 시료 대부분이 약 1,300~2,700 m의 깊이에서 준설된 것들이다(과학기술처, 1991).

조사해역의 대표적 표층해류는 남적도해류와 북적도해류이며, 두 적도류 사이에 적도반류가 존재하고 있다. 해수의 표층 온도는 28°C 이상이며, 수심 300~500 m에서는 온도가 급속히 감소하는 수온약층이 뚜렷이 나타난다(과학기술처, 1991). 조사해역에서의 용존산소량은 수심 100~150 m 구간에서 급격히 감소하기 시작하여 수심 250~900 m에서 최소값을 보인다(과학기술처, 1991). 태평양의 탄산염보상심도는 약 3,500 m 정도이며, 용해비약수심은 탄산염보상심도보다 약 1,000 m 얕은 깊이에 위치한다(유와 우, 1997).

재료 및 방법

망간각 및 기반암 시료를 채취하기에 앞서 먼저 연구지역에 대한 개괄적인 지질정보를 얻기 위한 탄성과 탐사를 수행하여 수심, 지형, 퇴적물의 분포 등을 파악하였다. 직경이 84 cm인 원형 주철프레임에 길이 180 cm의 드래지 백(dredge bag)이 달려있는 드래지(dredge)를 이용하여 시료를 채취하였다. 준설된 시료는 망간각(manganese crust), 각력암(breccia), 현무암(basalt), 탄산염암(limestone), 인산염암(phosphorite), 화산쇄설기원의 이암, 실트암, 사암, 철암 그리고 변질화산암 순으로 산출되었다(과학기술처, 1991). 조사지역 내 10 개 정점(Fig. 1)에서 준설된 시료들 중 43 개의 탄산염암을 연구대상으로 하였다.

선택된 시료들은 대부분이 반고화(semi-lithified) 상태이기 때문에 에폭시(epoxy)로 경화(impregnation)시켰다. 경화시킨 시료들을 반으로 절단한 후, 한쪽 면은 박편을 제작하여 조직을 관찰하였고, 다른 한 면에서는 조직적 관찰을 토대로 미량표품채취기로 미표품을 채취하여 원소분석을 실시하였다. 방해석 교질물 층서(cement stratigraphy)와 생물골격(skeleton)의 변질정도를 파악하기 위하여 음극선 발광법(cathodoluminescence)을 이용하였다. 발광현미경(luminoscope)은 한국해양연구소 극지 지질실에 있는 Nuclide 기종을 사용하였고 음극선 발광도(Cathodoluminescence; CL)는 5 단계로 구분하였다(밝은 발광도=CL5, 밝거나 흐린 발광도=CL4, 흐린 발광도=CL3, 흐리거나 거의 발광도가 없음=CL2, 발광도가 없음=CL1).

미량원소 및 부원소의 측정은 Perkin Elmer 2380 원자흡광분광분석기를 사용하였다. 약 10~50 mg의 시료를 0.5N HCl에 4~6 시간 용해시킨 후 불용성 잔류물을 걸러낸 후, 25 ml volumetric flask에 채워서 분석하였다. 양이온의 masking effect를 방지하기 위하여 모든 시료에 5 ml 5% LaCl₃·7H₂O를 추가하였다. 이러한 방법은 Pingitore(1976, 1978)와 Brand and Veizer(1980)의 방법을 보완한 것이다. 같은 농도, 같은 양의 HCl과 LaCl₃·7H₂O를 모든 표준 용액에도 넣어서 측정하였다. 표준용액은 1,000 ppm 상용표준용액을 희석시켜서 사용하였으며, Mn, Sr, Fe 분석을 위해서는 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm의 용액을 사용하였고, Mg 분석을 위해서는 2 ppm, 5 ppm, 10 ppm의 용액을 사용하였다. Mg, Mn, Fe 분석은 air-acetylene gas를 이용하

였으며, Sr 분석은 N₂O-acetylene gas를 사용하였다. 모든 원소 분석은 강원대학교 퇴적학연구실에서 제작한 working standard를 이용하여 보정하였다.

산소 및 탄소 안정동위원소 성분 분석은 기초과학지원센터에 의뢰하여 VG Sira II 기종을 사용하여 분석하였으며, Craig (1957)의 방법을 이용하여 보정하였다. 100% 인산을 90°C에서 시료와 반응시키는 자동추출장치를 사용하였다. 이 논문에서 보고되는 값은 PDB standard로 기술된다. 또한 δ 값은 아래식으로 표시되며 단위는 per mil(‰)이다.

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \frac{(\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{sample}} - (\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{standard}}}{(\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{standard}}} \times 1000$$

결과 및 고찰

조사정점별 구성성분

채취된 시료들의 조사정점별 구성성분은 Table 1에 요약되어 있으며, 이들의 특징은 다음과 같다.

Chuuk A(시료 D3): 부유성 유공충(55~71%)과 discocyclinid 형의 저서성 유공충(28~45%)이 주를 이루며 약간의 극피류와 연체동물 조각들을 포함한다. 때로는 부유성 유공충만이 발견되는 시료도 있다. 유공충의 발광도는 CL1이며, 기질과 등립질 방해석은 CL2~CL3의 발광도를 보여준다. 암상은 Dumham(1962)의 분류상 팩스톤(packstone)에 해당한다.

Yap A(시료 D5): 대부분이 변질되지 않은 산호로 이루어져 있으며, 산호 내에는 침상의 아라고나이트 교질물이 잘 발달되어 있다. 발광도는 CL1이며, 암상은 바운드스톤(boundstone)에 해당한다.

Hunter Bank(시료 D8, D9): 주로 변질되지 않은 산호로 구성되어 있다. 산호 내의 공극에는 침상의 아라고나이트 교질물이나 부유성 유공충이 다량 쌓여있다(Figs. 2A, 2B). 산호 외에도 녹조류의 일종인 *Halimeda*가 변질되지 않은 상태로 나타나며, discocyclinid 형의 저서성 유공충, 연체동물인 이매패의 골격, 복족류, 펠로이드(peloid)와 태선동물도 발견된다(Figs. 2C, 2D). 산호는 구멍이 뚫려있으며 이 구멍은 마이크로이트로 채워져 있다. 산호 내에서 발견된 저서성 유공충 중에는 덮개상의 *Homotrema* sp.도 있다. 펠로이드 주변에서는 마이크로이트 교질물(micritic rim cement)이 발견된다. 대부분의 표품들은 발광도 CL1을 보여주나, 일차공극을 채우고 있는 등립질 방해석 교질물의 일부는 낮은 발광도를 보여준다. 암상은 팩스톤에 해당한다.

Yap D(시료 D10, D11): 전형적인 원양성 퇴적물로서, 발견되는 생물들은 모두 부유성 유공충이다(Fig. 2E). 기질은 적색점토의 일종으로 생각된다. 대부분의 부유성 유공충은 발광도 CL1을 보여주며 기질은 CL2~CL3, 일부 등립질 방해석은 CL5까지 보여준다. 일부 시료에서는 화산암편도 발견되며, 암상은 전반적으로 팩스톤에 해당한다.

Yap F(시료 D14): 다양한 구성성분과 조직의 암상이 나타난다. 팩스톤은 uniserial이나 biserial 혹은 globigerinid 형의 부유성 유공충으로 주로 구성되어 있으며, 약간의 저서성 유공충, 덮개상형의 홍조류 조각, 사장석, 석영입자 그리고 화산암편 등을

Table 1. Rock types, cathodoluminescence (CL), and skeletal and nonskeletal compositions of the carbonate sediments. pkst=packstone, wkst=wackestone, bdst=boundstone, gnst=grainstone, mdst=mudstone, PF=planktonic foraminifera, BF (D, H, M, N, O)=benthic foraminifera (discocyclinid, Helimeda, miliolid, nummulitid, others), Ech=echinoderm, Mol=mollusk, Co=coral, MC (A)=marine cement (aragonite), Bv=bivalve, Ga=gastropod, Pel=pellet, Br=bryozoan, CA (A, E)=coral-like algae (articulated, encrusting), RA (E)=red algae (encrusting), Os=ostracod, Wt=worm tube, Ic=intraclast

Sample no.	Rock type	CL	Components
D3-6-1	pkst	1-3	PF, BF, Ech
D3-6-4	pkst	1-2	mostly PF, BF (D), Mol, Ech
D3-7-1	wkst/pkst	2-3	mostly PF, Ech
D5-1-1	bdst	1	Co, acicular MC (A)
D8-9	bdst		Co
D9-10-1	bdst	1	Co, PF
D9-10-4	pkst/bdst	1	Co, PF
D9-10-5	bdst	1	Co, PF, MC (A)
D9-11			mostly BF (H), PF, Bv, Ga
D9-14-1	bdst	1	BF (D, N, O), Co, PF, Ech, Homotrema
D9-14-2	pkst	1	PF, BF (D, H, N), Mol, Ga, Pel, Br
D10-3-1	pkst	1-5	PF
D10-4	pkst	1-2	mostly PF, BF (D, N), Mol
D11-5-2			PF, BF
D14-2-1	pkst	2-3	Ech, CA, BF, Pel, Br
D14-2-3'	pkst	1-2	BF, RA, Ech, Co
D14-2-3"	gnst	1-5	CA (A), BF (H), Ech, Br, MC
D14-2-4	bdst/gnst	1-4	Co, Algae, BF, PF, Pel, Ech, Mol
D14-3	breccia	1-2	
D14-5-1	gnst	1-5	BF, Algae, Ech
D14-5-2	gnst	1-2	BF (N, O), Ech, RA (E), Mol
D14-5-3	bdst	1-2	Co
D14-5-4	pkst	1-3	BF (D), Co, Os, sponge (?)
D14-5-5	gnst	1-2	PF, CA, BF (H, O), Bv, Ech
D14-6			PF
D14-15-7	bdst	1-3	Co
D14-15-8	gnst	2-5	CA (A, E), Mol, Ech, MC
D14-15-12	bdst	1-2	Co
D14-15-14	bdst		CA (E), Wt, Pel, Ech
D14-15-17	gnst	1-4	BF (M, O), CA (A)
D14-15-18	pkst/bdst	1-5	CA (A), BF (H, M), Co, PF, Ech
D14-15-20	bdst/pkst	1-3	Os, Co, CA (A), Mol, BF, MC
D14-15-21	mdst/wkst	1-3	PF
D14-15-28	gnst	1-5	CA, PF
D16-14-2	bdst	1-3	Co, CA (A, E), Ech, BF (H)
D17-2	pkst	1	PF
D22-2-1			mostly PF, BF, Bv
D22-2-2	wkst	1	PF
D22-4-1			BF, Mol, PF, Br
D22-4-2	gnst	1	BF (A), Ic
D22-10-1			PF
D22-11-2	pkst	1	PF
D22-13			PF
D23-4	chalk	1	PF, coccolith, discoaster

소량 포함한다. 저서성 유공충과 가지상형 홍조류로 주로 구성된 입자암과 팩스톤도 산출된다. 저서성 유공충은 discocyclinid 형과 fusulinid 형이 다양하게 발견되며, 가지상형 홍조류는 *Amphiroa*

가 주종을 이루고 있다. 이 밖에 산호, 암편(intraclast), 극피류 침, 태선동물 조각, 펠로이드, 사장석, 석영입자와 화산암편이 소량 포함되어 있다(Figs. 2F, 2G). 입자 사이는 천해교질물로 충전되어 있고 나머지 공극들은 등립질 방해석으로 채워져 있다. 천해교질물은 아라고나이트로 이루어진 침상 교질물이나 고마그네슘 방해석으로 이루어진 섬유상 교질물이며, 사질 저서성 유공충 내의 지오페탈(geopetal) 퇴적물, 극피류 조각 주위나 갈라진 틈 사이, 또는 아라고나이트 교질물 위 등에 나타난다(Figs. 2H, 3A, 3B, 3D). 원래 아라고나이트로 이루어진 입자들은 속성변질을 받았다. 산호는 마이크로이트 엔벨로프(micritic envelope)로 된 곳만이 그 형태가 보존되어 있고, 일차공극 뿐만 아니라 원래 산호골격 부분도 용해되어 등립질 방해석으로 충전되어 있다. 몇몇 산호 시료는 원래의 형태를 구별하지 못할 정도로 변질된 것도 있다(Fig. 3C). 녹조류인 *Halimeda*도 변질을 받아서 내부의 공극이 등립질 방해석으로 채워져 있다. 일부 극피류 조각 위에서 등축 과성장(syntaxial overgrowth)이 관찰되며, 때로는 아라고나이트 성분이 용해된 몰드(mold)가 등립질 방해석으로 충전되어 있기도 하다(Fig. 3A). Fig. 3A는 아라고나이트 용해에 따른 지오페탈 퇴적물의 붕괴 후, 몰드 내의 이차공극과 지오페탈 퇴적물 내의 일차공극이 등립질 방해석으로 채워진 경우이다. 아라고나이트로 되어있던 각질은 차별용해를 받았으나, 마이크로이트 엔벨로프 부분은 용해되지 않고 보존되어, 생물 각질의 형태를 보존하기도 한다(Figs. 3E, 3F). Fig. 3E는 이 공극조차 등립질 방해석 교질물로 충전되어 있는 경우이며, Fig. 3F는 생물 각질의 중앙부분만이 용해된 경우이다. 또한 등립질 방해석 교질물은 저서성 유공충의 방층(Fig. 3G)이나, 공극 내 천해교질물 위에서 연속성을 가지고 발달하기도 한다(Fig. 3H). 변질되지 않은 저마그네슘 방해석 시료들의 발광도는 CL1이며, 변질된 골격들의 발광도는 CL1~CL5이다(Fig. 4).

Yap G(시료 D16): 산호가 주성분이며, 덮개상과 가지상 홍조류, 극피류, nummulitid 형의 저서성 유공충이 발견된다. 산호와 같이 원래 아라고나이트로 구성되어 있던 입자들은 심한 변질을 받았다. 극피류 위에서는 등축 과장상이 발견되며, 입자 사이의 일차공극은 등립질 방해석 교질물로 채워져 있다. 생물체 골격의 발광도는 CL1이며, 방해석 교질물의 발광도는 CL2~CL3이다.

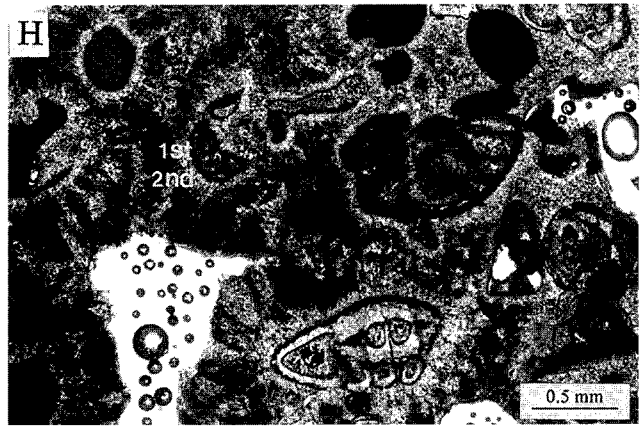
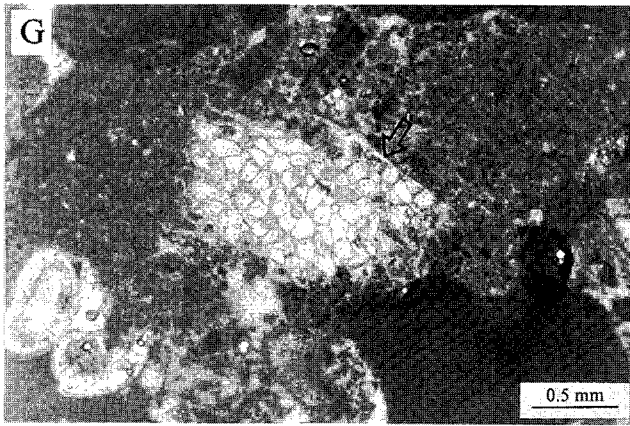
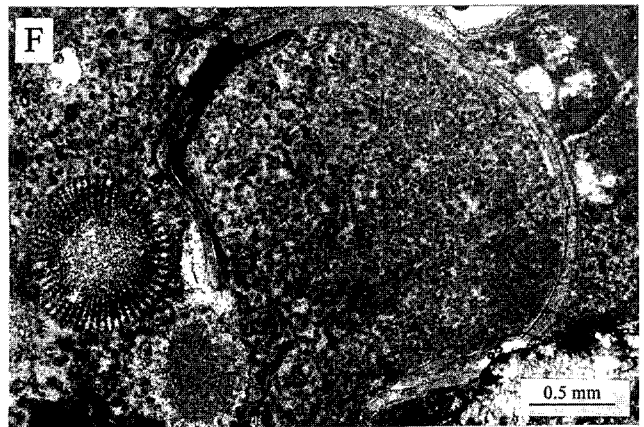
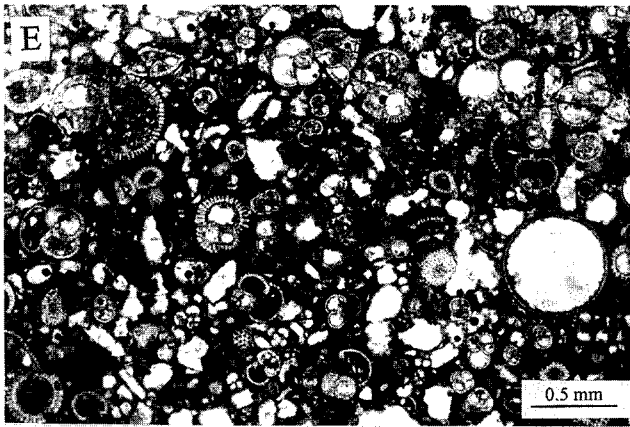
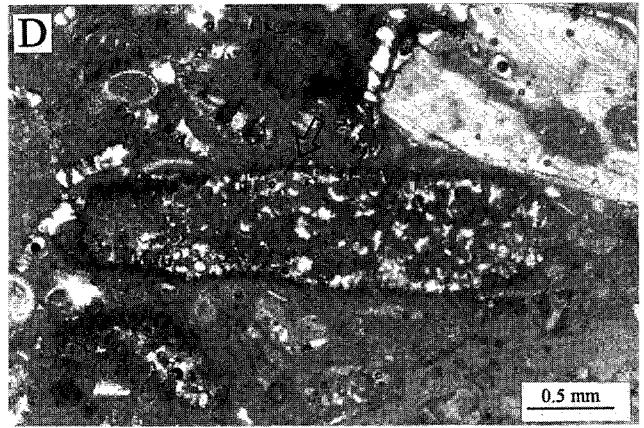
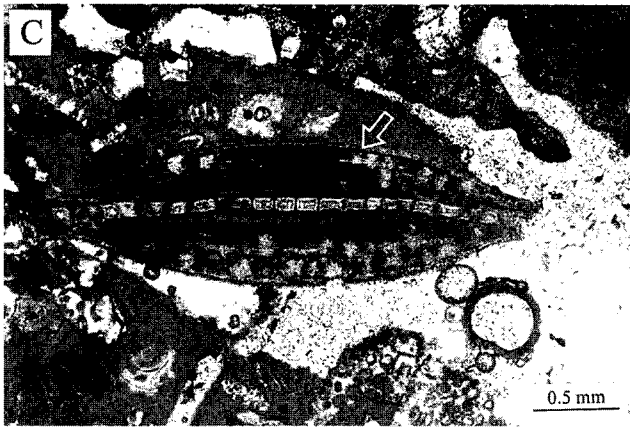
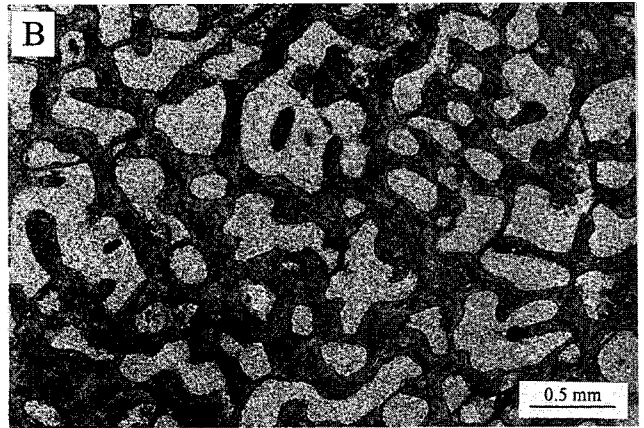
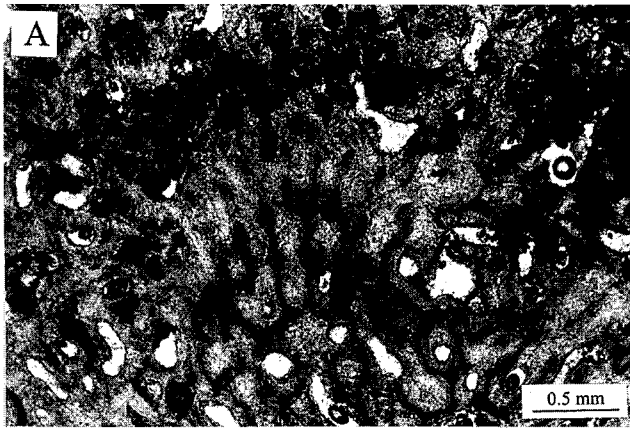
Yap H(시료 D17): 부유성 유공충이 대부분을 차지하는 원양성 퇴적물로 팩스톤의 조직을 보인다. 부유성 유공충과 기질 모두 발광도는 CL1이다.

Yap J(시료 D22): 부유성 유공충으로만 구성되어 있는 원양성 퇴적물과 저서성 유공충과 연체동물 파편으로 이루어진 퇴적물로 구분된다. 두 퇴적물 모두 CL1의 발광도를 보여준다. 입자암(grainstone)의 암상을 나타내며, 입자사이에는 천해교질물과 등립질 방해석 교질물이 충전되어 있다.

Chuuk B(시료 D23): 미고화된 퇴적물로서 주로 부유성 유공충과 코콜리스(coccolith)로 구성되어 있다. 이 외에 세립질의 탄산염 이질퇴적물이 많이 포함되어 있다.

조직 관찰 결과

천해 교질작용: 조사된 시료들은 Hunter 뱅크(760~820 m)를



제외하고는 대부분이 수심 약 1,300~2,700 m 깊이에서 준설된 것들이다. 하지만 원양성 퇴적물을 제외한 많은 시료들에서 천해 교질물이 발견된다. 천해 교질물은 어느 특정지역에만 국한된 것이 아니라 조사지역의 대부분(Chuuk A, Hunter Bank, Yap F, Yap G)에서 발견된다. 천해교질물은 주로 열대 및 아열대 지역의 천해환경에서 형성된 산호초 내에서 많이 발견되었으며, 주로 아라고나이트와 고마그네슘 방해석으로 이루어져 있다(James and Ginsburg, 1979). 따라서 천해 교질물의 존재는 조사지역의 탄산염 퇴적물이 대부분 천해에서 퇴적된 후 현재의 깊이로 침강되었거나 재동되었음을 지시한다. 아라고나이트 교질물은 침강의 결정형을 보이며 산호 내의 일차공극, 입자와 입자 사이의 일차공극, 구멍 등에서 발견된다(Figs. 2H, 3E). Hunter 뱅크, Yap A 지역, Yap F 지역 등에서 모두 발견된다. 방해석 교질물은 섬유상 조직을 보이며, 원래의 광물성분은 고마그네슘 방해석이었을 것으로 생각된다. 입자와 입자 사이의 일차공극, 저서성 유공층의 방, 극피류 조각 주위, 맥 등에서 발견된다(Figs. 2H, 3B, 3D). 고마그네슘 방해석 교질물은 Yap F 지역에서만 발견된다. 입자 사이에 침강의 아라고나이트 교질물이 자란 후, 그 위로 섬유상 고마그네슘 방해석 교질물이 성장한 경우도 있다(Fig. 2H). 이는 교질물이 자란 공극 내 공극수의 화학적 성분 변화에 의한 것으로 사료된다.

등립질 방해석 교질작용: 등립질 방해석 교질물은 모두 저마그네슘 방해석으로 이루어져 있으며, 주로 Yap F, Yap G, Yap H, Yap J 지역에서 산출되며, 천해교질물이 채워진 후에 남은 일차공극을 충전하고 있다(Figs. 3E, 3G). 산호 내의 일차공극이나 생물골격이 용해된 몰드 내에서도 발견된다(Figs. 3C, 3E). 때로 방해석 교질물은 등립질 조직뿐만 아니라 개의 이빨 형태를 보이기도 한다(Fig. 3H). 이 경우 방해석 결정이 천해교질물과 같은 광축으로 성장한 것이 특징이다.

탄산염 입자의 변질작용: Yap A 지역과 Hunter 뱅크에서 채취된 시료들은 변질되지 않았으며 고유의 미세구조와 조직을 잘 보존하고 있다(Figs. 2A, 2B, 2D). 반면에 Yap F, Yap G 지역의 시료들에서는 아라고나이트질 생물골격이 심한 조직적 변질을 보인다. 산호의 경우, 골격은 용해되고 미크라이트 엔빌로프 부분만 보존되어 산호의 형태는 유지되었으나 내부는 등립질 방해석으로 채워져 있는 경우도 있고, 산호의 형태가 거의 보존되지 않은 채 심하게 변질된 것도 있다(Fig. 3C). *Halimeda*의 경우 내부 튜브(tube) 구조는 어느 정도 보존되었으나, 대부분의 공극은

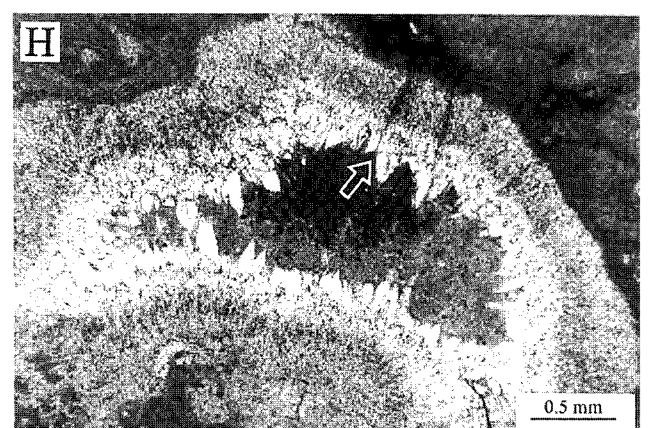
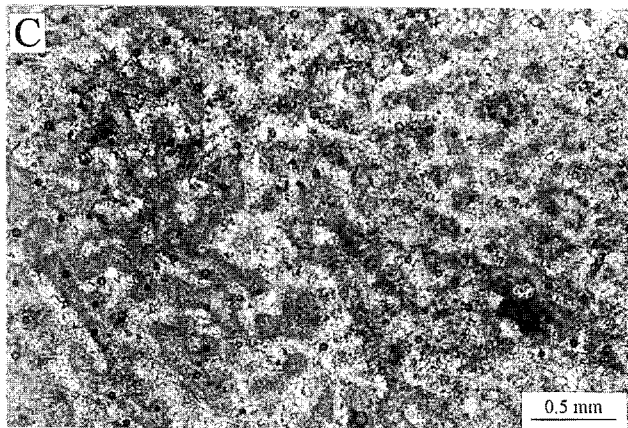
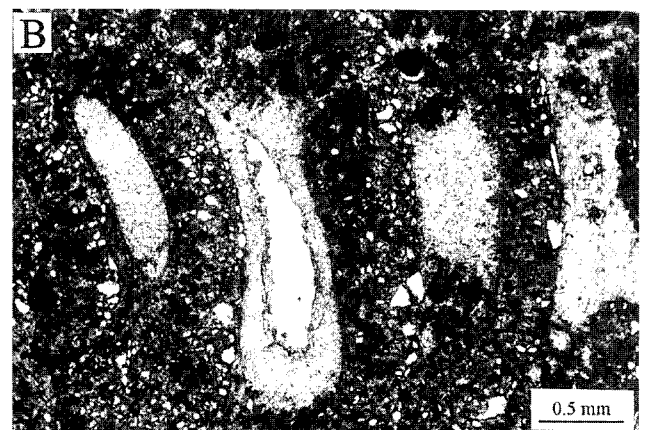
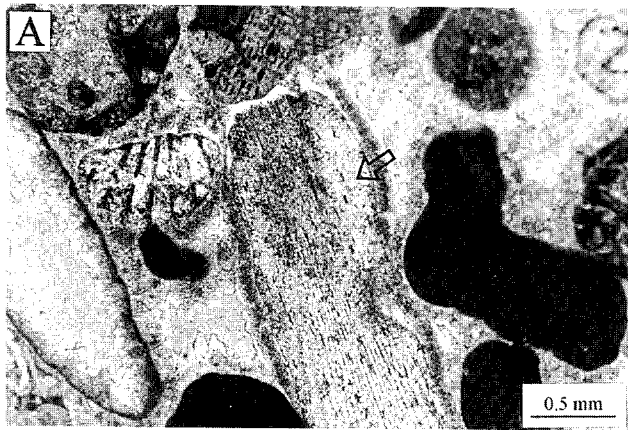
등립질 방해석 교질물로 채워져 있다. 원래 아라고나이트로 되어 있던 입자들은 미크라이트 엔빌로프 부분을 제외한 내부가 용해되고, 이 부분이 등립질 방해석 교질물로 충전된 조직을 보여준다(Figs. 3E, 3F). 또한 아라고나이트 골격이 모두 용해되어 몰드가 된 후, 이 몰드가 등립질 방해석 교질물로 충전된 경우도 발견된다.

교질물 층서(cement stratigraphy): 교질물 층서 및 탄산염 입자의 화학적 변질 상태를 알아보기 위하여 발광도를 관찰하였다. 일반적으로 천해에서 퇴적된 퇴적물은 해수 내의 Mn과 Fe 함량이 낮기 때문에 대부분 CL1의 발광도를 보여준다(Frank *et al.*, 1982). 그런데 이 연구에서 조사된 탄산염암들은 CL1~CL5의 다양한 발광도를 보여주고 있다(Fig. 4). 이는 변질될 당시 속성수에 Mn이 많이 함유되어 있었을 가능성을 지시한다. 원양퇴적물 중 부유성 유공층의 발광도는 대부분 CL1이나 세립질의 미크라이트로 이루어진 기질의 발광도는 CL2~CL3이다. 따라서 이들 기질 역시 천해로부터 공급된 퇴적물이라면 모두 변질되었다고 생각된다. 퇴적물 내 구성입자들 각각의 발광도를 살펴보면, 원래의 광물성분이 사기질 각질이었던 저서성 유공층은 CL4~CL5의 발광도를 보여준다(Figs. 4A, 4B). 고마그네슘 방해석으로 이루어진 홍조류의 경우도 대부분이 CL3~CL5의 밝은 발광도를 보여준다(Figs. 4C, 4D). 고마그네슘 방해석으로 이루어진 극피류의 경우는 CL1~CL5의 다양한 발광도를 보인다. 조직적으로 변질되지 않은 시료 D5와 시료 D9의 발광도는 모두 CL1으로 나타났다. 이러한 결과는 조직적으로 변질 받지 않은 시료들도 화학적으로는 속성수와 재평형상태에서 변질되었음을 암시한다.

각 시료들의 발광도를 서로 비교한 결과, 조사지역의 탄산염암의 교질물 층서는 Table 2과 같이 5 단계로 구분할 수 있었다. 최초로 탄산염 퇴적물을 변질시킨 속성수는 발광도 CL4를 보이는 방해석을 자라게 한 속성수로서, 이 속성수에 의하여 모든 탄산염 입자는 변질을 받은 것으로 생각된다. CL4 정도의 발광도를 보이는 Fig. 4B의 저서성 유공층과 Fig. 4D의 산호질 조류(coralline algae)가 이에 해당한다. 극피류 침도 이때에 변질을 받았다. 두번째 단계는 발광도 CL2의 방해석이 생성된 시기로 고마그네슘 방해석 천해교질물과 극피류 등이 변질 받았다(Fig. 4D). 세번째 단계는 발광도 CL5의 방해석이 얇은 층을 이루며 성장한 시기이다. 극피류 주위의 고마그네슘 방해석으로 이루어진 천해교질물과 아라고나이트질 천해교질물이 이 시기의 속성수에 의해 변질된 것으로 생각된다. 따라서 연구지역 탄산염 퇴적물 대부분이 첫번째 단계에서 세번째 단계 사이에 변질되었을 것으로 생각된다. 네번째 단계는 발광도 CL1의 방해석 교질물이, 다섯번째 단계는 발광도 CL5의 방해석 교질물이 일차공극과 이차공극에 주로 침전된 시기이다. 개의 이빨 모양의 방해석 결정과, 지오펀탈 퇴적물 위의 등립질 방해석 결정(Fig. 4D)이 네번째와 다섯번째 단계에서 형성된 것이다. 퇴적물의 일부가 용해된 공극 내에서 네번째와 다섯번째 단계의 방해석이 발견되기도 한다(Fig. 4D). 이러한 5 단계 속성광물은 모두 Yap F 지역에서 채취된 시료에서 관찰된 것이다. Yap G 지역에서 채취된 시료는 일차공극에서 자란 등립질 방해석이 여러 번의 분대를 보여주고 있다.

조직 결과 종합: Yap F와 Yap G 지역에서 채취된 시료들의

Fig. 2. Photomicrographs. (A) Unaltered coral. Intraskelatal pores are filled with equant calcite cements and internal sediments (Sample D9-10-1). (B) Unaltered coral. Intraskelatal pores remain vacant (Sample D9-14-1). (C) Benthic foraminifera (arrow) in bioclastic packstone (Sample D9-14-1). (D) Unaltered *Halimeda* (arrow) and mollusk fragments in bioclastic packstone (Sample D9-14-2). (E) Pelagic sediments composed of planktonic foraminifera (Sample D11-5-2). (F) Peloidal and bioclastic grainstone. Peloids occur within the intraskelatal pore as well as in the matrix between bioclasts (Sample D14-15-8). (G) Bryozoan (arrow) in bioclastic packstone (Sample D14-15-8). (H) Bioclastic grainstone (Sample D14-5-5) showing two stages of marine cementation. 1st stage is characterized by growth of acicular aragonite, followed by infilling of 2nd-stage, fibrous high-Mg calcite.



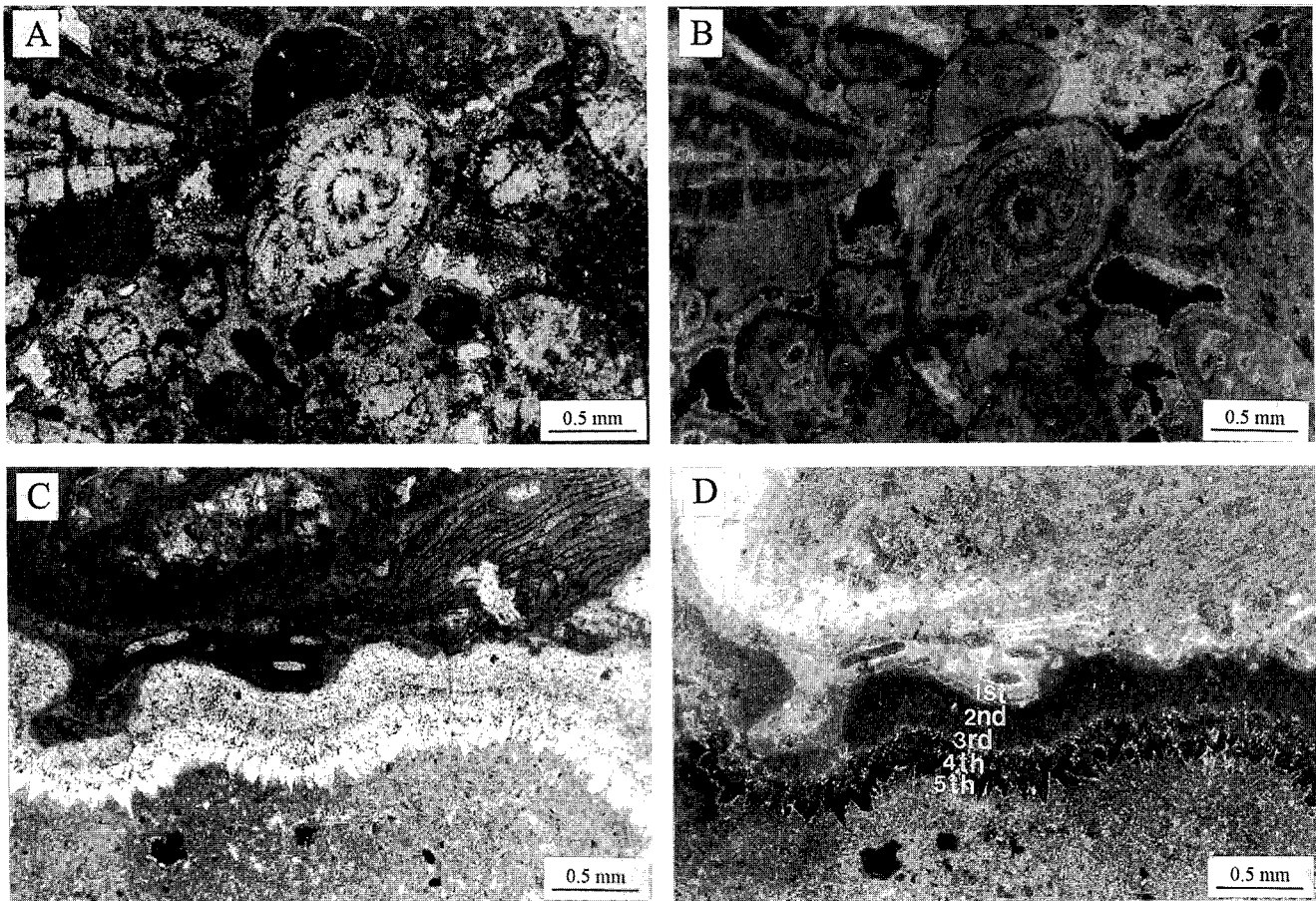


Fig. 4. Photomicrographs of cathodoluminescence. (A) Bioclastic grainstone mostly composed of benthic foraminifera (Sample D14-2-3'). Benthic foraminifera shows well-preserved texture. (B) Cathodoluminescence photograph of (A). Benthic foraminifera shows dull to bright luminescence, suggesting that it was chemically altered. (C) Marine cements which grew on encrusting red algae (Sample D14-2-4). (D) Cathodoluminescence photograph of (C). Five diagenetic stages can be discerned. 1st stage=red algae (CL4), 2nd stage=fibrous marine cements (CL2), 3rd stage=micritic cements (CL5), 4th stages=dog-teeth calcite cements (CL1), 5th stage=tip of dog-teeth calcite cements (CL5).

조직적 특성은 민물에 의한 속성변질산물과 매우 유사한 양상을 보여준다. 특히 불안정한 광물의 용해, 고마그네슘 방해석의

Fig. 3. Photomicrographs. (A) A syntaxial overgrowth on echinoderm fragments (arrow) (Sample D14-5-1). Note that the overgrowth is rich in inclusions. (B) Fibrous high-Mg calcite cements in the chambers of agglutinated foraminifera (Sample D14-5-4). (C) Altered coral (Sample D14-15-12). Skeletal morphology can be recognized from micritic envelopes. Skeletal parts were dissolved out and then filled with equant calcite cements. Intraskelatal pores were also filled with equant calcite cements. (D) Fibrous high-Mg calcite cements on echinoderm fragments (Sample D14-5-8). Note the bore (arrow) showing the geopetal fabric. (E) Bioclastic grainstone (Sample D14-5-1). Originally aragonitic skeleton (arrow) is texturally altered but its original morphology is preserved due to micritic envelopes. Originally skeletal part has been dissolved out and replaced by micritic and equant calcite cements. (F) Bioclastic grainstone with acicular and equant cements in the interparticle pores (Sample D14-5-1). Originally aragonitic skeleton (arrow) was dissolved out and replaced by equant calcite cements. (G) Bioclastic grainstone (Sample D14-5-5). Interparticle pores were mostly filled with marine cements, which were followed by equant calcite cements. (H) Dog-teeth calcite cements grown over fibrous marine cements (arrow). Note that marine cements are rich in inclusions, whereas dog-teeth calcite cements are free of inclusions. The remaining pore is filled with marine sediments (Sample D14-2-4).

저마그네슘 방해석화, 등립질 방해석 교질작용 및 극피류 조각 위의 등축 과성장 등은 모두 민물포화대 속성작용의 전형적인 조직이다. 그러나 본 지역의 시료들이 천해에서 퇴적된 후 해수면 하강으로 인하여 민물속성환경의 영역에서 변질되었는지, 아니면 용해비약수심 아래로 기반암이 침강하여 해수 내에서 변질되었는지는 조직적 결과만으로는 확실하게 알 수 없다. 다음에 언급하는 지화학적 결과가 이에 대한 해석을 제시하고 있다.

지화학적 결과

산소 및 탄소 동위원소, Sr, Mg, Mn, Fe, Na 등의 원소 분석을

Table 2. Diagenetic stages of carbonates asserted in this study based on the cement zonations of cathodoluminescence

Stage	Luminescence character	Altered component
1	CL4	Coralline algae
2	CL2	Marine cement
3	CL5	Marine cement between marine cement and dog-tooth calcite spar
4	CL1	Dog-tooth calcite spar
5	CL5	Tip of dog-tooth calcite spar

Table 3. Isotopic and elemental compositions of the carbonate sediments. Carbon and oxygen isotopic data are in per mil (relative to PDB standard) and elemental data in ppm. A=altered rocks, U=unaltered rocks, UA=mixture of unaltered and altered rocks, bioclastic ls=bioclastic limestone, PF=planktonic foraminifera, Mx=matrix, Co=coral, MC (A)=marine cement (aragonite), BF=benthic foraminifera, CA=coral algae, BLC=equant cement, Ech=echinoderm

Sample no.	Description	U/A	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	Sr	Mn	Na	Fe	K	Mg
D2-6-1	whole rock (bioclastic ls)	U (?)			998	325	2020	2106	647	2445
D2-6-3-1	whole rock (bioclastic ls)	A (?)			605	395	381	447	108	4088
D2-6-3-2	whole rock (bioclastic ls)	U (?)			1436	1864	2514	4517	1347	3356
D3-6-1	whole rock (PF & Mx)	A (U)	1.84	0.27	528	204	782	635	264	4117
D3-6-4	whole rock (PF & Mx)	A (U)	1.88	0.41	577	377	399	417	136	4413
D3-7-1	whole rock (PF & Mx)	A (U)			790	1753	1533	1678	546	4742
D5-1-1-1	Co & MC (A)	U	1.86	-0.96	12312	29	950	264	81	1569
D5-1-1-2	Co & MC (A)	U	1.65	-1.09	10419	41	1091	433	169	1564
D9-10-1-1	Co	U	1.64	-2.37	11546	52	1290	316	108	2094
D9-10-1-2	Co	U			11036	50	1276	373	140	2510
D9-10-4-1	Co	U	-0.22	-3.69	8645	77	1178	438	72	2744
D9-10-4-2	Co	U			7050	103	1152	602	96	3329
D9-10-5-1	Co & MC (A)	U			8981	98	1075	498	135	1969
D9-10-5-2	PF	U	0.37	-2.08	528	71	168	328	67	4519
D9-14-1-1	Co	U			2956	134	612	718	106	9717
D9-14-1-2	PF	U			2572	187	679	875	85	5688
D9-14-2-1	whole rock (bioclastic ls)	U	2.32	2.53	2196	91	566	440	82	8183
D9-14-2-2	whole rock (bioclastic ls)	U			2270	85	643	488	98	8147
D10-3-1-1	whole rock (PF & Mx)	A (U)	0.27	2.52	804	449	803	2402	442	8587
D10-3-1-2	whole rock (PF & Mx)	A (U)			712	676	803	2486	424	8746
D10-4-1	whole rock (PF & Mx)	A (U)	0.84	-1.22	1108	86	1954		387	5346
D10-4-2	whole rock (PF & Mx)	A (U)			1305	127	1078		273	4715
D14-2-1-1	BF (A)	A (U)	-1.74	-3.51	4844	599	5745	1854	370	24115
D14-2-1-2	sediments within primary pore	U			1872	256	842	1139	305	6018
D14-2-1-3	whole rock (bioclastic ls)	A (U)	0.33	-1.8	852	156	417	368	59	7034
D14-2-1-4	cements (?)				948	123	508	326	21	3331
D14-2-3-1	CA	A	1.85	-0.24	874	179	195	217	34	6449
D14-2-3-2	whole rock (bioclastic ls)	A	1.96	0.65	759	253	548	232	45	5698
D14-2-3-3	BF (A)	A	1.88	0.45	1176	413	1897	745	142	5780
D14-2-4-1	Co	A	1.8	0.33	1373	420	166	285	43	5764
D14-2-4-2	whole rock (bioclastic ls)	A			1245	358	199	373	52	5093
D14-3-1	whole rock (breccia/bioclastic ls)	A	1.92	-0.89	1140	233	467	335	65	5605
D14-3-2	whole rock (breccia/bioclastic ls)	A			1158	241	295	405	32	5076
D14-5-1-1	whole rock (bioclastic ls)	A	0.26	-1.77	1169	224	345	264	50	5736
D14-5-1-2	whole rock (bioclastic ls)	A			1272	180	405	316	16	5167
D14-5-2	altered allochems & MC (C)	A (U)			1175	175	753	456	63	4793
D14-5-3-1	altered Co & BLC	A	1.65	-0.05	1951	255	351	432	30	4294
D14-5-3-2	altered Co & BLC	A			1302	192	215	233	28	6093
D14-5-4-1	BF (A)	A (U)	2.12	0.51	3594	801	3340	1461	270	17031
D14-5-4-2	whole rock (bioclastic ls)	A	2.25	0.04	505	266	364	346	52	5751
D14-5-5-1	whole rock (bioclastic ls)	A	-0.24	-1.5	591	331	337	573	51	4712
D14-5-5-2	whole rock (bioclastic ls)	A			812	220	487	525	48	4889
D14-15-7-1	altered Co & BLC	A	2.2	0.7	867	339	251	513	45	4298
D14-15-7-2	altered Co & BLC	A			655	208	224	300	18	3682
D14-15-8-1	Ech	A	2.07	0.14	975	153	429	533	9	5770
D14-15-8-2	CA	A	2.11	0.43	926	221	453	460	63	5647
D14-15-8-3	Co	A	1.9	0.17	586	263	293	418	52	6615
D14-15-8-4	MC & BLC	A			753	194	258	233	89	5843
D14-15-12-1	altered Co & BLC	A	1.56	-0.9	1782	208	349	415	17	5789
D14-15-12-2	altered Co & BLC	A			1581	211	314	266	31	5865
D14-15-12-3	altered Co	A			761	134	166	374	69	6773
D14-15-14-1	whole rock (bioclastic ls)	A	2.43	-0.34	947	180	386	320	29	6776
D14-15-14-2	whole rock (bioclastic ls)	A			917	167	358	405	88	6043
D14-15-17-1	whole rock (bioclastic ls)	A	0.77	-3.09	853	106	380	195	38	7239
D14-15-17-2	whole rock (bioclastic ls)	A			697	116	364	282	28	5833
D14-15-17-3	whole rock (bioclastic ls)	A			1040	155	488	324	24	6770
D14-15-18-1	whole rock (bioclastic ls with PF)	A (U)	1.95	0.93	934	130	196	220	16	5657

Table 3. Continued

Sample no.	Description	U/A	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	Sr	Mn	Na	Fe	K	Mg
D14-15-18-2	whole rock (bioclastic ls with PF)	A (U)			891	105	265	299	52	5901
D14-15-20-1	altered Co	A	-1.72	-1.96	1139	138	860	676	106	333
D14-15-20-2	CA	A	-0.37	-1.61	1088	192	586	552	55	5893
D14-15-20-3	CA	A			1110	97	933	213	13	393
D14-15-21-1	whole rock (PF & Mx)	A			500	189	150	411	61	6683
D14-15-21-2	whole rock (PF & Mx)	A			471	212	168	416	98	7382
D14-15-28-1	whole rock (bioclastic ls)	A(U)	2.51	-0.06	1089	199	181	428	38	6104
D14-15-28-2	whole rock (bioclastic ls)	A(U)			841	188	179	389	14	5442
D16-14-2-1	altered coral	A	1.61	0.84	1624	1669	2898	6844	6478	6194
D16-14-2-2	altered coral	A			1213	2333	2142	5029	4961	3860
D16-14-2-3	CA	A			1264	1071	2326	2867	6264	5481
D17-2-1	whole rock (PF & Mx)	U(A)	0.73	1.5	1442	178	767	523	80	4770
D17-2-2	whole rock (PF & Mx)	U(A)			1667	273	623	877	233	5458
D22-2-2-1	whole rock (PF & Mx)	U	1.41	-1.59	1522	123	5946	1135		2174
D22-2-2-2	whole rock (PF & Mx)	U			1062	823	2982	2577	7198	3468
D22-4-2-1	whole rock (bioclastic ls)	A	-0.54	0.61	660	104	514		102	3944
D22-4-2-2	whole rock (bioclastic ls)	A			1053	188	264	517	115	5983
D22-11-2-1	whole rock (PF & Mx)	U	1.44	0.16	1136	1697	5059	5335		2167
D22-11-2-2	whole rock (PF & Mx)	U			1422	1114	4846	4910		2590
D23-4	chalk (PF, coccolith & Mx)	U	1.09	-0.17	1929	168	2088	1258	603	2855

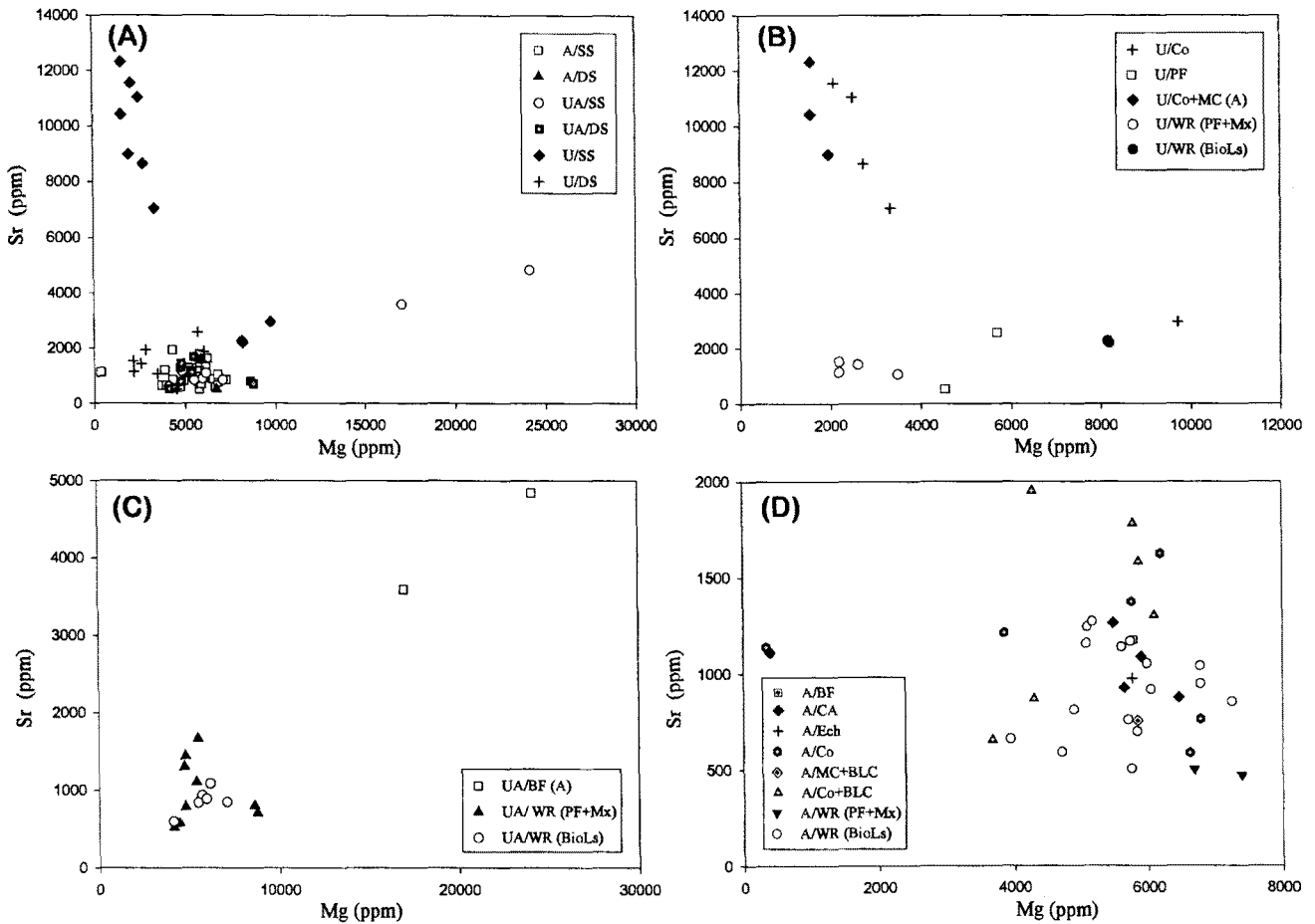


Fig. 5. Scatter diagrams of Sr vs. Mg contents. A=altered rocks, U=unaltered rocks, UA=mixture of unaltered and altered rocks, SS=shallow marine sediments, DS=deep-sea sediments, Co=coral, PF=planktonic foraminifera, MC (A)=aragonitic marine cements, WR=whole rock, Mx=matrix, BioLs=bioclastic limestone, BF=benthic foraminifera, CA=coralline algae, Ech=echinoderm, BLC=equant cement.

실시하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 일부 시료들은 발광도에 따른 미량채취가 불가능하여 변질되지 않은 퇴적물과 구성

입자, 변질된 기질 및 등립질 방해석과 변질되지 않은 부분이 함께 나타나는 부분 그리고 변질된 성분을 구분하여 채취, 분석

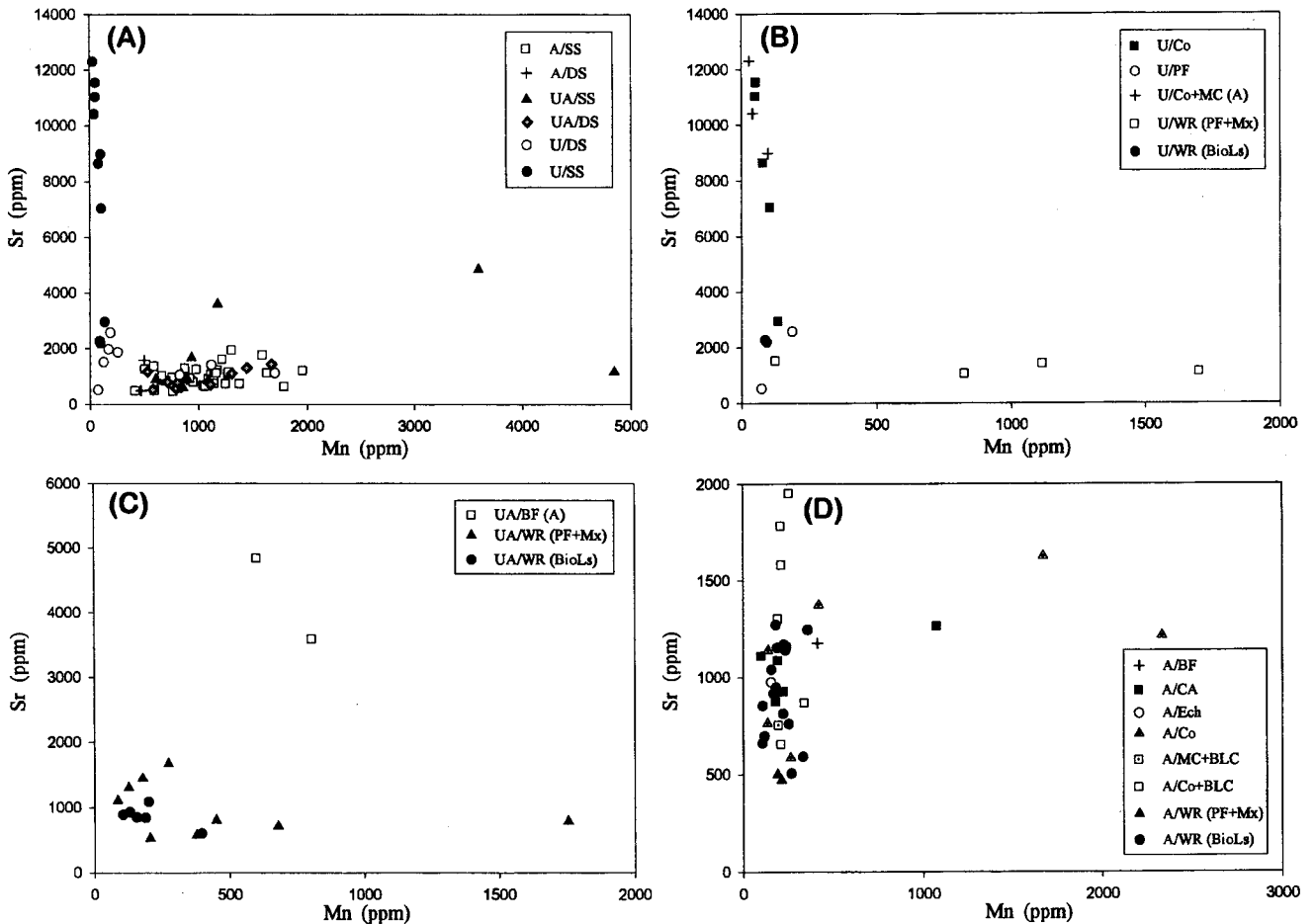


Fig. 6. Scatter diagrams of Sr vs. Mn contents. Abbreviations as in Fig. 5.

하였다. Fig. 5A는 변질된 성분과 변질되지 않은 성분, 또한 천해기원의 퇴적물과 원양성 퇴적물을 구분하여 Sr과 Mg의 함량 변화를 표시한 도표이다. 변질되지 않은 아라고나이트로 이루어진 산호 및 산호를 포함하는 침상의 아라고나이트 교질물은 6,000~13,000 ppm의 높은 Sr 함량과 2,000~6,000 ppm의 Mg 함량을 나타낸다. 또한 산호만의 분석결과가 교질물과 산호를 함께 분석한 결과에 비해 Sr 함량은 비슷하나 Mg 함량은 약간 높게 나타난다(Fig. 5B). 천해에서 퇴적된 생쇄설물로 이루어진 퇴적물은 원양퇴적물과 비슷한 Sr 값을 가지지만 Mg 값은 약 8,000 ppm 정도로 약간 높다(Fig. 5B). 이는 생쇄설물 퇴적물 내에 고마그네슘 방해석 성분을 가진 입자가 포함되어 있기 때문인 것으로 생각된다. 변질된 석회암의 Sr과 Mg 값은 각각 500~2,000 ppm, 4,000~8,000 ppm 정도로(Figs. 5C, 5D), 변질되지 않은 원양퇴적물, 즉 원래 저마그네슘 방해석이 주성분인 퇴적물과 비슷한 값을 보인다(Fig. 5A). 이 때의 속성계(diagenetic system)는 변질작용을 일으킨 깊이에서 이 두 원소들에 대하여 어느 정도 닫힌계(closed system)였던 것으로 간주된다. Fig. 5C에서 discocyclinid 형의 저서성 유공충만이 높은 Sr과 Mg 값을 보여 주는데, 이는 아마도 이들이 변질되지 않아 원래의 높은 Mg와 Sr 값을 보존하고 있기 때문으로 사료된다. 잘 보존된 아라고나이트는 높은 Sr 값과 낮은 Mn 값(250 ppm 이하)을 나타내지만 몇몇 변질된 원양퇴적물과 천해퇴적물은

1,000~2,500 ppm 정도의 높은 Mn 함량을 보이는 것도 있다(Fig. 6A). 대부분의 변질된 퇴적물과 변질되지 않은 원양퇴적물은 500~3,000 ppm의 Sr 값과 500 ppm 이하의 Mn 값을 갖는다. 변질되지 않은 성분 중 일부 원양퇴적물(대부분이 부유성 유공충과 기질로 이루어져 있음)이 750~1,750 ppm 정도의 높은 Mn 값을 나타낸다(Fig. 6B). 이러한 수치는 현생 유공충이나 퇴적물의 값에 비교하면 대단히 높은 값이다. 따라서 조직적으로 변질되지 않은 것처럼 보이는 퇴적물도 실제로는 속성수에 의해 변질된 것으로 생각된다. Fig. 6C의 1,750 ppm의 Mn 값을 가지는 원양퇴적물과 Fig. 6D의 1,000~2,500 ppm의 Mn 값을 가지는 변질된 산호질 조류와 산호도 같은 종류의 속성변질작용의 산물로 생각된다. 특이한 점은 이런 높은 Mn 값을 가지는 시료들이 Yap J 지역과 Chuuk A 지역에서 채취되었다는 점이다. Yap F 지역에서 채취된 시료들은 모두 500 ppm 이하의 Mn 값을 가지고 있다. 따라서 공극수에 Mn이 많이 공급되는 지역에서 생성된 저마그네슘 방해석은 높은 Mn 값을 가지는 것으로 생각된다. 이는 Mn의 재분배가 닫힌계가 아닌 어느 정도 열린계(open system)에서 이루어졌음을 암시한다. 또한 Na 값은 6,000 ppm 이하, Fe 값은 8,000 ppm 이하의 다양한 값을 가진다(Fig. 7A). 변질되지 않은 천해퇴적물과 원양퇴적물의 Na 값은 500~1,500 ppm, Fe 값은 1,000 ppm 이하이며, Yap J 지역에서 채취된 시료에서는 특별히 높은 Na와 Fe 값이 나타난다(Fig.

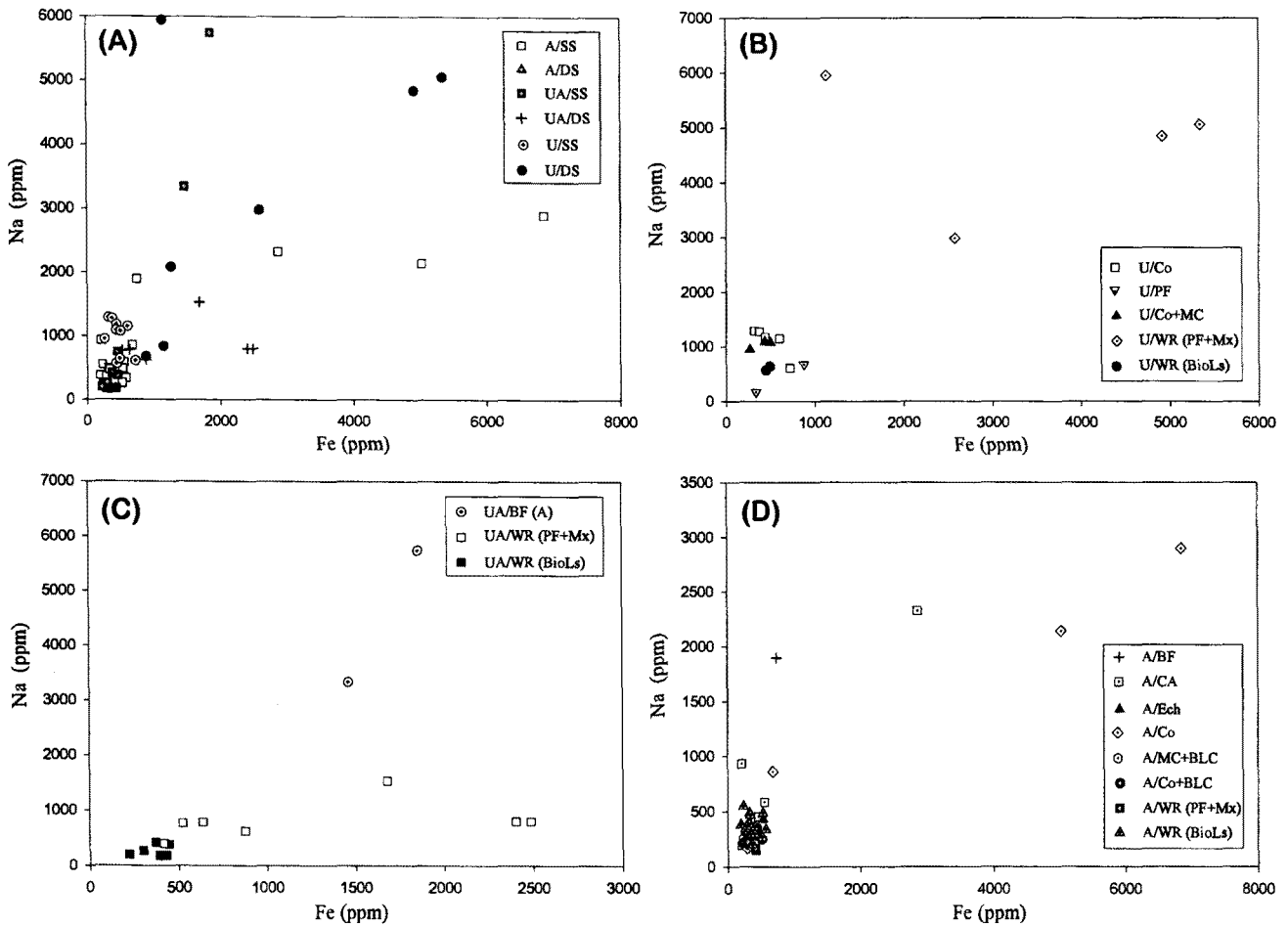


Fig. 7. Scatter diagrams of Na vs. Fe contents. Abbreviations as in Fig. 5.

7B). 높은 Fe 값은 높은 Mn 값과 마찬가지로 일반 해양환경에서 생성된 생물골격에서는 보통 나타나지 않으므로, Yap J 지역 시료들은 변질되었을 가능성이 매우 높다. Yap G 지역의 변질된 산호와 산호질 조류 역시 높은 Fe 값을 보인다(Fig. 7D). 특징적인 점은 Yap G 지역과 Yap J 지역의 시료들이 모두 높은 Fe와 Mn 값을 가진다는 사실인데, 이는 이 지역 속성수의 Fe와 Mn 함량이 높았으며, 또한 환원상태이었음을 지시한다. 하지만 일부 원양퇴적물은 Fe 값이 2,500 ppm 정도인 반면(Fig. 7C), Mn 값은 449~676 ppm 정도로 낮아서(Fig. 6C), 이 지역의 공극수는 Fe의 함량만이 높았음을 나타낸다. 그러나, Yap F 지역의 퇴적물은 대부분 변질정도에 관계없이 모두 같은 범위의 Na, Fe 값을 보인다. 이는 변질작용이 Na와 Fe 원소에 대하여 단히계에서 일어났음을 나타낸다.

Fig. 8A는 변질된 퇴적물과 변질되지 않은 퇴적물의 산소 및 탄소동위원소의 값을 나타낸 도표이다. 탄소동위원소 성분은 모두 -2~+2%의 값을 보이며, 이는 해양 탄산염 탄소의 범위와 일치한다(Anderson and Arthur, 1983). 산소동위원소 성분은 변질된 천해퇴적물과 변질되지 않은 원양퇴적물이 -2~-1%의 값을 보이며, 변질되지 않은 천해퇴적물은 -1%의 값을 보인다. Epstein *et al.*(1953)과 Craig(1957)은 물 속에서 생성되는 방해석의 산소동위원소 값은 물의 산소동위원소 성분과 온도에 의하

여 조절된다고 제안하였다. 이들이 제안한 방법을 이용하여 변질되지 않은 퇴적물의 산소동위원소의 값 -1%로부터 계산된 수온은 약 20°C 정도이다. 이는 변질되지 않은 퇴적물이 열대의 천해에서 만들어졌음을 나타낸다. 만일 천해퇴적물과 원양성 퇴적물이 현재의 깊이(약 2,000~3,000 m)에서 변질되었다면, 시료가 채취된 깊이의 현재 수온이 약 2~3°C 정도이므로 방해석의 산소동위원소 값은 약 +4% 정도가 되어야 한다. 하지만 조사지역의 퇴적물 대부분은 변질정도에 관계없이 -2~-1%의 산소동위원소 값을 보이므로 현재 깊이에서의 해수 조건을 반영하지 못하고 있다. 역으로 -2~-1% 값을 온도로 계산하면 약 10~20°C 정도이다. 이러한 온도를 가지는 해수는 수심 1 m 이내이며(Gross, 1982), 이 지역은 용해비약수심보다 얕은 지대이기 때문에 해수에 의한 속성변질작용은 가능하지 않다. 따라서 변질된 퇴적물의 산소동위원소 값이 변질되지 않은 원양퇴적물과 천해퇴적물의 산소동위원소 값과 같은 범위 내에 있다는 것은 변질작용이 탄소 및 산소 동위원소에 대해 단히계에서 일어났음을 나타낸다. 또한 만일 민물의 영향에 의해 변질되었다면 산소동위원소의 값이 좀 더 고갈된 값을 보여야 한다(Hudson, 1977). 주목할 만한 것은 변질되지 않은 산호의 산소동위원소 성분이 -2~-4%의 값을 보인다는 점이다(Fig. 8B). 산호의 산소동위원소 성분은 생물의 생리적 영향(vital effect)으로

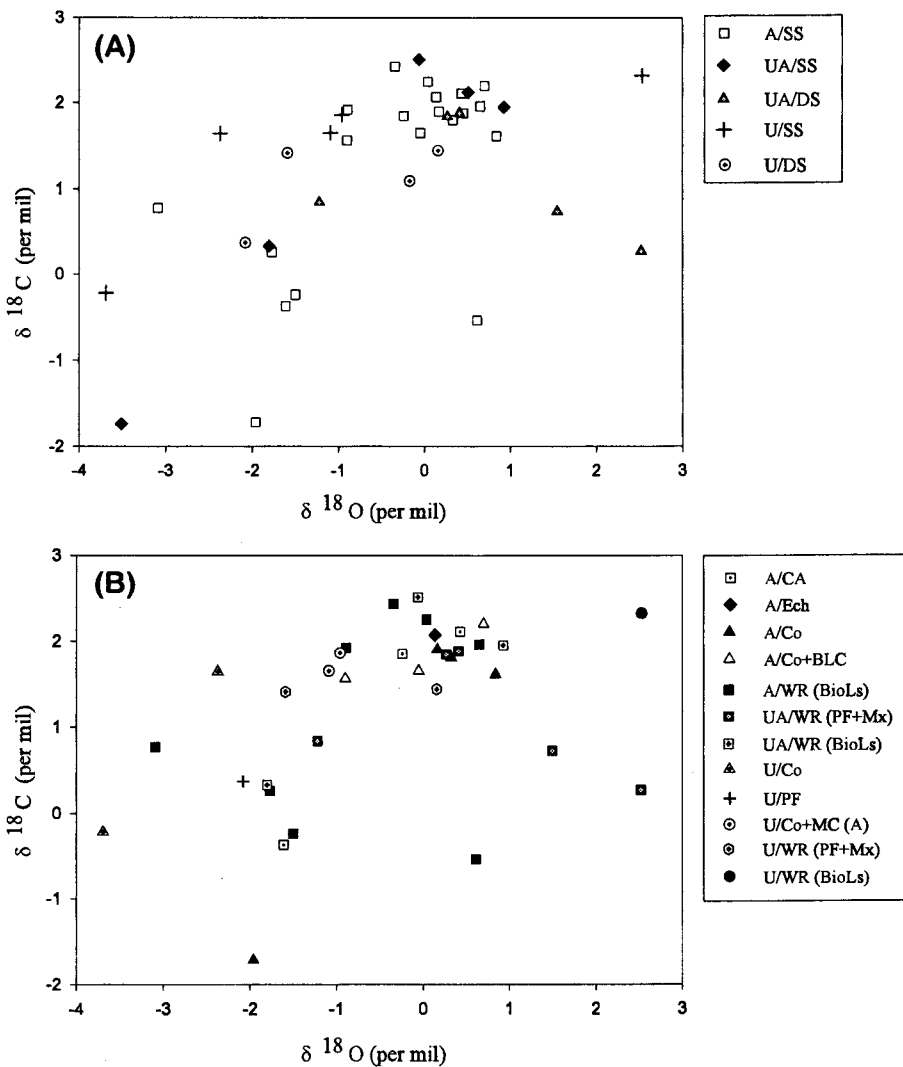


Fig. 8. Scatter diagrams of $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ data. Abbreviations as in Fig. 5.

인하여 평형상태의 침전물보다 더 고갈된 값을 가진다(Weber and Woodhead, 1972). 변질된 산호의 산소동위원소 값은 0~1%로 나타나므로 변질된 산호는 민물포화대에서 나타나는 변질작용의 반대쪽으로(positive) 부화된 것이다. 따라서 탄소 및 산소동위원소, 부원소 및 미량원소의 값은 연구지역의 탄산염암이 용해비약수심보다 깊은 지역에서 단한계의 속성변질을 받았음을 보여준다.

결론

중양태평양 마이크로네시아 군도의 해저산 일원에서 채취된 탄산염암은 주로 부유성 유공충으로 이루어진 원양성 퇴적물과 산호, 석회조류, 연체동물 및 극피류 등으로 이루어진 천해퇴적물로 이루어져 있다. 이들 퇴적물은 Hunter 뱅크와 Yap A 지역을 제외하고는 모두 조직적, 화학적 속성변질을 받았다. 조직의 보존이 잘 된 입자들에 비하여 변질된 시료에서 보다 다양한 발광도가 나타난다. Na와 Sr 함량은 변질된 탄산염암에서 높은 편이며, Mn과 Fe 성분은 변질된 퇴적물과 변질이 되지 않은 퇴적물 모두에서 낮은 편이다. 변질된 퇴적물의 탄소동위원소는 해

수기원 탄소의 특성을 보여주며, 산소동위원소는 변질되지 않은 시료와 같거나 부화된 값을 보여준다. 따라서 탐사해역에서 채취된 탄산염암은 천해보다는 심해에서 속성변질작용을 받은 것으로 생각된다. 즉, 퇴적물이 아라고나이트 용해비약수심보다 깊은 수심까지 재동되거나 침강한 뒤에 단한계에서 속성작용을 받은 것으로 사료된다.

사사

이 연구는 1990년 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 결과이다. 이 연구에 사용된 시료는 한국해양연구소 심해저사업단에서 실시한 1990년도 제 2차 망간각탐사에서 채취된 것들이다. 본 연구에 많은 도움을 주신 안중호 박사님께 감사 드리며, 논문을 심사해주신 심사위원 두 분께도 감사 드립니다.

참고문헌

유강민, 우경식, 1997. 퇴적암석학, 민음사, 서울, pp. 247-408
 과학기술처, 1991. 태평양 심해저 광물자원 개발 연구. BSPG

- 00118-369-5, 1101 pp.
- Anderson, T.F. and M.A. Arthur, 1983. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. In: *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, edited by Arthur, M.A. *et al.*, Soc. Econ. Paleontol. Mineral., *Short Course*, **10**: 1-151.
- Bathurst, R.G.C., 1975. Carbonate Sediments and Their Diagenesis. *Development in Sedimentology No. 12*, Elsevier, Amsterdam, 658 pp.
- Brand, U. and J. Veizer, 1980. Chemical diagenesis of a multi-component carbonate system. *J. Sediment. Petrol.*, **50**: 1219-1236.
- Craig, H., 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Coschim. Acta*, **12**: 133-149.
- Dumham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks*, edited by Ham, W.E., *Am. Asso. Petrol. Geol., Mem.*, **1**: 108-121.
- Epstein, S., R. Buchbaum, H.A. Lowenstam and H.C. Urey, 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **2**: 417-425.
- Frank, J.R., A.B. Carpenter and T.W. Oglesby, 1982. Cathodoluminescence and composition of calcite cement in the Taum Sauk Limestone (Upper Cambrian), Southeast Missouri. *J. Sediment. Petrol.*, **52**: 631-638.
- Gross, M.G., 1982. *Oceanography—A View of the Earth*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey), 581 pp.
- Hudson, J.D., 1977. Stable isotopes and limestone lithifications. *J. Geol. Soc. (Lond.)*, **133**: 637-660.
- James, N. and P.W. Choquette, 1990. Limestones—The sea floor diagenetic environments. In: *Diagenesis*, edited by Mclireath, I.A. and D.W. Morrow, *Geosci. Can. Reprint Ser.*, **4**: 13-34.
- James, N.P. and R.N. Ginsburg, 1979. The Seaward Margin of Belize Barrier and Atoll Reefs. International Association of Sedimentologists, Special Publication No. 3, 191 pp.
- Jurrard, R.D. and D.A. Clague, 1977. Implications of Pacific islands and seamount ages for the origin of volcanic chains. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**: 57-76.
- Morse, J.W. and R.A. Berner, 1979. Chemistry of calcium carbonate in the deep oceans. In: *Chemical Modelling in Aqueous Systems*, edited by Jenne, E.A., American Chemical Society, Washington DC, pp. 499-535.
- Pingitore, N.E., Jr., 1976. Vadose and phreatic diagenesis: processes, products and their recognition in corals. *J. Sediment. Petrol.*, **46**: 985-1006.
- Pingitore, N.E., Jr., 1978. The behavior of Zn and Mn during carbonate diagenesis: Theory and application. *J. Sediment. Petrol.*, **48**: 799-814.
- Schlanger, S.O., 1987. Subsurface geology of Eniwetok Atoll. *US Geol. Surv., Prof. Pap.*, **260**: 991-1066.
- Weber, J.N. and P.M.J. Woodhead, 1972. Temperature dependence of oxygen-18 concentrations in reef coral carbonates. *J. Geophys. Res.*, **77**: 463-473.

1998년 2월 5일 원고 접수

1998년 8월 31일 수정본 채택