

## 북동태평양지역의 방산충 생층서 및 고해양환경 연구

김기현 · 박정희

한국해양연구소 심해저자원연구센터

### Radiolarian Biostratigraphy and Paleooceanographic Study from the Northeast Equatorial Pacific

Ki-Hyune Kim and Jeoung-Hee Park

Deep-Sea Resources Research Center, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract:** Radiolarian assemblages from KODOS area were analyzed in order to understand the biostratigraphy and paleooceanography of deep-sea sediment from the Northeast Equatorial Pacific. The sediment core was divided into two or three units on the basis of the chemical and physical properties. In the upper sediment, mixtures of Quaternary and Tertiary radiolarians are found indicating active reworking processes. Dissolution of radiolarians seem to increase with depth. Radiolarians are seldom in Unit III presumably due to dissolution and corrosion. The middle part of Unit I appears to correspond to *Collosphaera invaginata* Zone (0.21 Ma). Unit II belongs to *Collosphaera tuberosa* Zone. Based on the absence of *Stylatractus universus*, we estimate its age to be younger than 0.42 Ma. Based on our analyses of radiolarians in Unit I and II, we estimated the age of Unit III as Tertiary, particularly from Oligocene to Miocene. There may be hiatuses of more than 3 My from late Miocene to Pliocene, which probably resulted from erosion and dissolution by the Antarctic Bottom Water. Sedimentation rates during Quaternary range from 0.15 to 0.50 mm/ky with significant variabilities among stations. Radiolarians in the study area were mostly warm-water species.

**Key words:** 방산충(Radiolaria), 퇴적결층(Hiatus), 제 4기(Quaternary), 제 3기(Tertiary), 남극저층해류(Antarctic bottom water).

#### 1. 서론

대한민국 심해연구 (Korea Deep Ocean Study, KODOS) 해역인 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 지역(Clarion-Clipperton Fracture Zone, C-C 지역)은 평균 수심이 4,500 m 이상으로 탄산염 보상심도 (CCD) 보다 깊은 곳에 위치하고 있으며 표층 퇴적물은 대부분의 규질 연니로 구성되어 있고 그 외에 규질 파편, 점토광물, 장석류, 철-망간 산화물 또는 미세망간단괴 등을 함유한다 (김 등 1996, 1997). 이 지역의 해저면 지형은 다양한

구조의 해저산 등에 의해 복잡하게 나타나고 지형적인 영향으로 인하여 저층 퇴적물에 작용하는 해류의 영향이 달라서 수 Km 이내의 좁은 지역에서도 퇴적작용의 변화가 심하게 나타난다 (Johnson and Johnson 1970; Moore 1970).

KODOS지역은 C-C지역중 남쪽의 클리퍼톤 균열대 지역에 보다 근접한 곳에 위치하고 있으며, 표층 퇴적층은 상부로부터 Unit I, II, III로 구분되고 각 Unit별로 산출되는 미화석 및 화학적, 지질공학적 특징들은 뚜렷하게 다르다 (김 등 1994, 1996, 1997; 정 등 1997; 박과 김 1997, 1999). KODOS지역의 퇴적물 내에

다량 함유되어 있는 방산층은 석회질 미화석들이 용해되는 탄산염 보상심도 보다 깊은 심해 퇴적물에서 광범위하게 산출되어 태평양 저위도 지역의 퇴적역사와 생층서를 밝히는데 훌륭한 도구로 이용된다 (Moore 1978; Wolfart 1988).

고해양환경의 해석과 심해저 광물자원의 성인규명을 위해서는 퇴적작용의 이해와 퇴적층서의 확립이 선행되어야 하나 KODOS 지역은 퇴적물의 교란작용이 활발하고 극히 낮은 퇴적율로 인해 지역적인 퇴적작용의 변화가 활발하여 지역 전반에 걸친 종합적인 층서가 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 94년~96년 동안 박스코어로 채취된 퇴적물 시료와 97년~98년 멀티플코어로 채취된 퇴적물 시료에 다량 함유되어 있는 방산층 자료를 중심으로 연구지역의 종합적인 퇴적층서를 확립하고 그 결과를 바탕으로 고해양환경을 해석하고자 한다.

## 2. 지질개관

북동태평양에 위치한 KODOS 지역은 북위 9~11°, 서경 131~132° 사이에 위치하고 있으며 (Fig. 1) 상부 퇴적물은 규질 연니와 규질 점토가 우세하고 망간단괴나 스멕타이트 등과 같은 자생광물을 다량 포함하고 있다 (Horn *et al.* 1973). 퇴적층은 깊이 따라 색깔차이에 의해 두 개 혹은 세 개의 Unit로 나누어지며 각 Unit별로 퇴적물중 금속함량, 미세망간단괴 함량, 점토광물의 함량, 미화석의 산출정도 등이 변한다 (Fig. 2) (김 등 1996, 1997). 색상변화의 깊이는 정점별로 일정하지 않고, 정점에 따라 세 개의 Unit가 모두 나타나는 경우도 있고 한가지 혹은

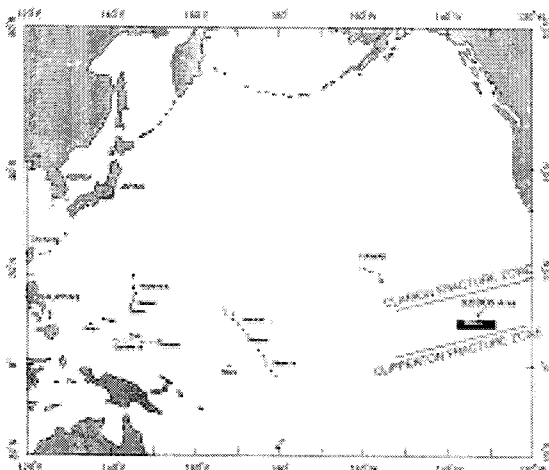


Fig. 1. Location of the KODOS area.

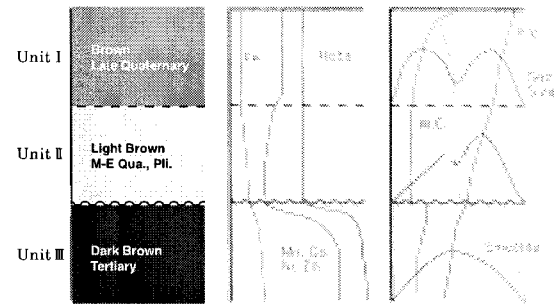


Fig. 2. Chemical and mineralogical characteristics of each Unit (reconstructed from Jung *et al.* 1999).

두 가지 Unit 만 나타나는 경우도 있다. 각 Unit마다 생물에 의해 형성된 것으로 보이는 다양한 크기와 모양을 가지는 구혈 (haloed burrows)들이 다수 관찰되어 퇴적물이 생교란작용 (bioturbation)을 많이 받았음을 보여준다.

최상부의 Unit I은 갈색 (dark yellowish or reddish brown: 10YR 5/3 - 10YR 4/2, Munsell 1988)의 퇴적층으로 생물 및 저층해류의 작용을 많이 받아 높은 함수율 (300% 이상)과 낮은 전단응력 (10 g/cm<sup>2</sup> 이하)을 가진다. Unit II는 밝은 갈색 (pale brown: 10YR 6/4-6/6)의 색상을 띠고 깊이가 증가함에 따라 함수율이 감소하는 반면에 전단응력은 증가한다. 최하부의 Unit III는 흑갈색 (dark brown: 10YR 4/3-3/3)의 퇴적층으로 함수율이 급격히 감소하고 전단응력이 40 g/cm<sup>2</sup> 이상 (김 등, 1996)으로 다소 고화되어 있고 가장자리에 밝은 황색의 테가 둘러진 형태의 보존이 양호한 구혈들이 다수 관찰된다 (Donahue 1971; Berger *et al.* 1979). Unit III에서 관찰되는 이러한 구혈들은 본 연구지역의 깊은 퇴적층 까지도 생물의 작용이 미침을 보여준다.

## 3. 재료 및 연구방법

94년~96년 동안 박스코어로 채취된 퇴적물 시료 (Table 1, 총 34정점)와 97년~98년 멀티플코어로 채취한 시료 (Fig. 3, 총 21정점)를 분석했다.

젖은시료 약 10 g을 250 ml 비커에 넣고 10% 과산화수소수 150 ml 가량을 첨가하여 유기물을 제거시켰다. 이 과정으로 퇴적물이 충분히 분해 되지 않았으면 0.02% Sodium Pyrophosphate를 첨가하여 약하게 가열하여 유기물을 완전히

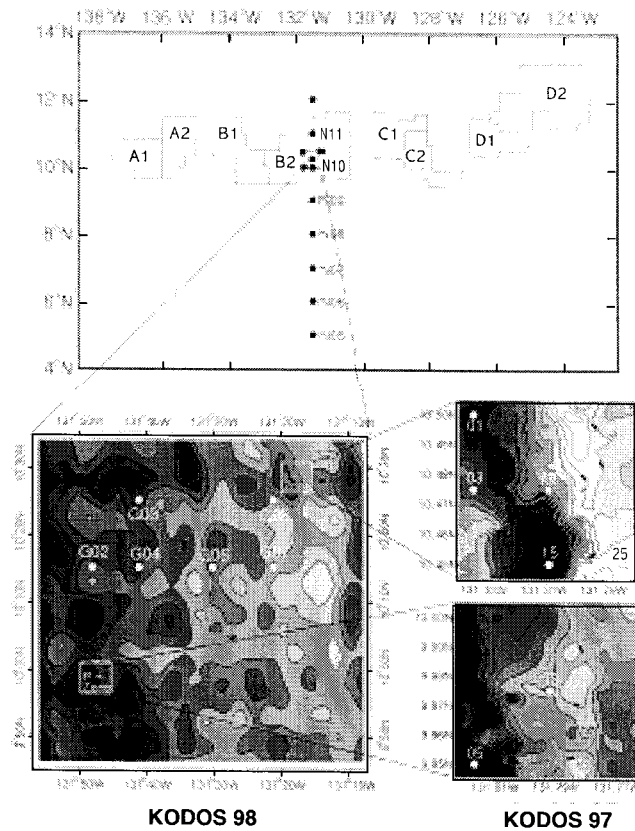


Fig. 3. Station of the KODOS 97, 98 area.

제거후 60  $\mu\text{m}$ 의 체로 걸러서 과산화수소수 성분을 제거시킨 후, 남은 시료에 다시 10% 염산을 첨가하여 약 24시간 가량 가열하여 탄산칼슘 성분을 제거하였다.

화학처리가 끝난 시료는 증류수로 3회 이상 세척했고 이때 시료가 충분히 침전하도록 15분 이상을 방치하였다. 60  $\mu\text{m}$ 의 체를 이용하여 한번 더 거른 후 방산층이 포함된 잔류물을 채취하여 10 ml의 용기에 약 5 ml의 증류수와 함께 담고 일회용 피펫을 사용하여 용기로부터 0.1-0.2 ml 정도의 시료를 취하여 76×26 mm 슬라이드 위에 떨어뜨려 골고루 퍼뜨린 후 약 20  $^{\circ}\text{C}$ 의 가열판 위에 올려놓고 건조시킨 다음 Xylene을 한 두 방울 첨가시켜 화석속의 공기를 제거하였다. 적당량의 캐나다 발삼 (Canada Balsam)을 건조된 슬라이드 글라스 위에 첨가시킨 후 기포가 생기지 않도록 주의하면서 22×40 mm 덮개유리를 덮어서 슬라이드를 제작했다. 완성된 슬라이드는 약 2주 가량 저온(약 60  $^{\circ}\text{C}$ )의 건조로에서 건조시켰다. 각 박편은 종들의 형태학적 변화, 군집의 보존상태 등을 분석하기 위해 Zeiss photomicroscope를 이용하여 관찰하였

Table 1. Sediment samples for radiolarian analysis in the KODOS 94, 95, 96 area.

Station No.	Location (Latitude/Longitude)	Water Depth(m)	Station No.	Location (latitude/Longitude)	Water Depth(m)
94-46	9°31' N/131°17' W	4,940	95-09	10°27' N/132°05' W	4,788
94-74	9°45' N/130°48' W	4,870	96-1	10°44' N/131°87' W	4,963
94-79	10°26' N/130°35' W	4,760	96-2	10°27' N/131°98' W	4,925
94-15	9°55' N/131°47' W	4,965	96-4	10°02' N/131°88' W	4,961
94-51	9°45' N/131°03' W	4,730	96-6	9°90' N/131°73' W	4,023
94-54	10°15' N/131°03' W	4,701	96-7	10°03' N/131°71' W	4,925
95-12	10°06' N/132°15' W	4,794	96-9	10°31' N/131°71' W	4,939
95-21	10°06' N/132°35' W	4,658	96-12	10°32' N/131°54' W	4,810
95-22	09°52' N/132°35' W	4,862	96-13	10°18' N/131°55' W	4,904
95-26	09°45' N/132°42' W	4,847	96-15	9°89' N/131°54' W	4,909
95-28-A	10°06' N/132°45' W	4,836	96-17	10°03' N/131°37' W	4,856
95-29-A	10°27' N/132°45' W	4,830	96-18	10°18' N/131°36' W	4,882
95-31	10°13' N/132°54' W	4,505	96-19	10°31' N/131°38' W	4,835
95-34	09°31' N/132°55' W	5,120	96-21	10°44' N/131°21' W	4,942
95-40	10°13' N/133°15' W	4,951	96-22	10°32' N/131°21' W	4,833
95-02	09°59' N/131°56' W	4,976	96-23	10°18' N/131°21' W	4,858
95-05	09°31' N/132°04' W	4,910	96-24	10°03' N/131°21' W	4,859
95-08	10°12' N/132°05' W	4,887	96-25	9°90' N/131°73' W	4,845

Table 2. Stratigraphic ranges of radiolarian species observed in the sediment cores from the KODOS area.

EPOCHS	EE	ME	LE	O	EM	MM															
Radiolaria Zones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<i>Botryopsis dicycephalis</i>																					
<i>Lychnocanama bandyca</i>																					
<i>Theocyrtis tuberosa</i>																					
<i>Artophormis gracilis</i>																					
<i>Centroborys gravis</i>																					
<i>Lithocyclia angusta</i>																					
<i>Theocorys spongoconum</i>																					
<i>Didymocorytis prismatica</i>																					
<i>Cyclampterium pegretum</i>																					
<i>Dorcadospyrus praeforcipata</i>																					
<i>Dorcadospyrus ateuchus</i>																					
<i>Siphostichartus praecorona</i>																					
<i>Artostrobis pretabulatus</i>																					
<i>Theocyrtis annosa</i>																					
<i>Dorcadospyrus forcipata</i>																					
<i>Lychnocanama elongata</i>																					
<i>Dorcadospyrus simplex</i>																					
<i>Calocyclella serrata</i>																					
<i>Calocyclella virginis</i>																					
<i>Cyrtocapsella tetrapera</i>																					
<i>Cyrtocapsella cornuta</i>																					
<i>Stichocorys wolfii</i>																					
<i>Calocyclella costata</i>																					
<i>Cyrtocapsella japonica</i>																					

EPOCHS	E	O	EM	MM	LM	P	Q														
Radiolaria Zones	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
<i>Stichocorys delmontensis</i>																					
<i>Cornateila profunda</i>																					
<i>Calocyclella caepa</i>																					
<i>Eucyrtidium acuminatum</i>																					
<i>Phormostichoartus dolioatum</i>																					
<i>Didymocorytis laticonus</i>																					
<i>Diartus petterssoni</i>																					
<i>Didymocorytis antepenultima</i>																					
<i>Diartus hughesi</i>																					
<i>Euchitonia furcata</i>																					
<i>Euchitonia elegance</i>																					
<i>Anthocorytidium jenghisi</i>																					
<i>Lychnocanama grande</i>																					
<i>Stichocorys peregrina</i>																					
<i>Spirocorytis scalaris</i>																					
<i>Anthocorytidium ophiense</i>																					
<i>Acrosphaera cyrtodon</i>																					
<i>Amphirhopalum ypsilon</i>																					
<i>Pterocanium p. praetextum</i>																					
<i>Pterocanium t. eucolpium</i>																					
<i>Theocorythium vetulum</i>																					
<i>Anthocorytidium zangebaricum</i>																					
<i>Panartus t. coronatus</i>																					
<i>Panartus t. tetrahalamus</i>																					
<i>Theicalyptira dovisiana</i>																					
<i>Lamprocyclus m. maritilis</i>																					
<i>Lamprocyclus m. polypora</i>																					
<i>Pterocorys zancleus</i>																					
<i>Spongogaster t. irregularis</i>																					
<i>Spongogaster t. tetras</i>																					
<i>Lamprocyrtis neoheteropora</i>																					
<i>Theocorythium t. dianae</i>																					
<i>Theocorythium t. trachelium</i>																					
<i>Collosphaera huxleyi</i>																					
<i>Acrosphaera trepanata</i>																					
<i>Dityocoryne truncatum</i>																					
<i>Lamprocyrtis nigrinae</i>																					
<i>Theocanus hertwigii</i>																					
<i>Collosphaera orthoconus</i>																					
<i>Sphaerococum punctatum</i>																					
<i>Polysolenia lappacea</i>																					
<i>Collosphaera tuberosa</i>																					
<i>Collosphaera invaginata</i>																					

EPOCHS

EE : Early Eocene, ME : Middle Eocene, LE : Late Eocene  
O : Oligogene, EM : Early Miocene, MM : Miocene,  
LM : Late Miocene, P : Pliocene, Q : Quaternary

Radiolaria Zones

- 1 : Bekoma badartensis Zone,
- 2 : Buryella clinata Zone,
- 3 : phormocorytis striata striata Zone,
- 4 : Theocotyle cryptocephala Zone,
- 5 : Diatopora mongolfieri Zone,
- 6 : Thyrocorytis triacantha Zone,
- 7 : Podocorytis ampls Zone,
- 8 : Podocorytis mitra Zone,
- 9 : Podocorytis chalara Zone,
- 10 : Bekoma badartensis Zone,
- 11 : Buryella clinata Zone,
- 12 : phormocorytis striata striata Zone,
- 13 : Dorcadospyrus ateuchus Zone,
- 15 : Cyrtocapsella tetrapera Zone,
- 16 : Stichocorys delmontensis Zone,
- 19 : Dorcadospyrus alata Zone,
- 20 : Diartus petterssoni Zone,
- 23 : Stichocorys peregrina Zone,
- 24 : Spongaster penras Zone,
- 27 : Anthocorytidium ypsilon Zone,
- 28 : Collosphaera tuberosa Zone,

- 11 : Buryella clinata Zone,
- 14 : Lychnocanama elongata Zone,
- 17 : Stichocorys wolfii Zone,
- 18 : Calocyclella costata Zone,
- 21 : Didymocorytis antepenultima Zone,
- 22 : Didymocorytis penultima Zone,
- 25 : Pterocanium prismatium Zone,
- 26 : Anthocorytidium angulare Zone,
- 29 : Collosphaera invaginata Zone,

다. 2/3이상 보존된 것은 1개체로 보았다.

4. 결과 및 고찰

각 Unit별 방산충 산출양상

연구해역에서 채취된 퇴적물 내에는 중기 에오세에서 현생까지의 시대구분이 가능한 약 200종 이상의 다양하고 풍부한 양의 방산충이 산출되었다 각 Unit 별로 산출되는 방산충의 양상이 달랐으

며, 몇몇 중요 종에 의해 생층서 분대를 구분하는 것이 가능했다 (Table 2).

Unit 1의 방산충 군집양상

정점에 따라 차이는 있으나 약 2-10 cm까지의 퇴적구간이 Unit 1으로 나타났다. 이 곳에서는 보존상태가 양호한 풍부한 양의 방산충이 산출되며 제 3기와 제 4기종들이 섞인 상태로 관찰된다. 산출되는 종들 중 주요 종으로는 제 4기 후기 Collosphaera invaginata Zone에 국한되어 전세계적으로 동시기에 산출되는 C.

*invaginata*와 제 4기 후기 *Collosphaera tuberosa* Zone의 *C. tuberosa*와 *Sphaerocozium punctatum*, *Polysolenia lappacea* 등이 관찰되고 그 외 다수의 제 4기 종들이 나타난다. 정점에 따라 제 3기 종들이 상부에서도 소량으로 그리고 간헐적으로 산출된다. 이들은 대부분 조각이거나 보존상태가 불량해 생물교란작용에 의해 하부의 고기의 종들이 상부로 유입되었거나 인접 지역의 오래된 퇴적물이 저층해류 및 저층생물에 의해 운반되어 제 4기 퇴적물과 혼합되어진 것으로 보인다.

#### Unit II의 방산충 군집 양상

Unit II도 Unit I과 산출되는 양상은 비슷하여 제 4기 방산충이 우세하게 산출되며 후기 에오세에서 플라이오세까지의 시대 범위를 가지는 제 3기 종들이 간헐적으로 나타난다. *C. invaginata*는 관찰되지 않으며 *C. tuberosa* Zone에 속하는 *C. tuberosa*와 *S. punctatum*, *P. lappacea* 등이 Unit II의 중간정도 깊이에서 최초출현 (First Appearance Depth)이 관찰된다. Unit II의 하부까지 제 4기종인 *Dictyocoryne truncatum*, *Lamprocyrtis nigrinae*, *Theoconus hertwigii*, *Acrosphaera trepanata* 등이 관찰된다. Unit I에 비해 제 4기종들의 다양도 (diversity)는 감소하지 않지만 산출량 (abundance)과 보존량 (preservation)은 깊이가 증가함에 따라 점점 불량해지고 산출되는 제 3기종의 양도 증가한다. 이는 퇴적깊이가 깊어지면서 연령이 증가함과 동시에 상대적으로 용해에 약한 제 4기 종들이 용해된 결과로 해석된다.

#### Unit III의 방산충 군집 양상

Unit III에서는 화석이 대부분의 화석이 용해되어 산출되지 않고 드물게 나타나는 종들도 내부가 퇴적물로 충전된 3기종의 조각이나 *Spyrids*속들, *Calocycletta*속들의 머리 (cephalis)부분 등 용해에 강한 종의 조각들만 몇 개체 관찰된다. 이들은 *Cyrtocapsella cornuta*, *Cyrtocapsella tetrapera*, *Calocycletta virginis*, *Artophormis gracilis*, *Botryopyle dictyocephalis* 등 주로 마이오세 종이거나 마이오세에서 올리고세까지의 시대범위를 가지는 종들이며, 가끔 후기 에오세에서 올리고세의 시대범위를 가지는 *Theocyrtis tuberosa*와 중기 에오세에서 산출되는 *Thyrsocyrtis triacantha*, *Lychnocanoma bellum* 등도 관찰된다.

중요종에 의한 생층서 구분

*Collosphaera invaginata*와 *Collosphaera* sp. A에 의한 연령 측정

*C. invaginata*는 제 4기 상부를 대표하는 표준화석이다. 그들의 최초출현은 각 약 0.21 Ma (Johnson and Knoll 1975), 0.2 Ma (Caulet 1979), 0.17 Ma (Johnson et al. 1989)로 보고된 현생종이다. 이들의 최초출현 시기는 Nigrini (1971)가 방산충을 이용하여 정립한 생분대 중 Zone 1 (*C. invaginata* Zone)의 하부에 해당하고 전세계적으로 동시기적인 사건으로 인정받고 있다.

KODOS지역에서는 각 정점에 따라 일정치는 않으나 2-10 cm 퇴적구간 즉, Unit I의 하부에서 *C. invaginata*의 최초출현이 관찰되었다. 그러나 *C. invaginata*는 골격이 아주 약해 (Johnson 1974) 퇴적후 쉽게 용해되어 관찰되지 않는 단점이 있고 또한 KODOS지역은 퇴적물이 아주 낮고 표층 퇴적물이 저층해류나 생물작용 등에 의해 재동되었을 가능성이 있기 때문에 *C. invaginata* 한 종만의 출현여부로 생분대를 정립하기는 부족하며, 퇴적층 내에서 *C. invaginata*와 *C. sp. A*와의 진화관계를 고려해 보는 것이 타당하다.

Knoll and Johnson (1975)은 동태평양 시료에서 관찰결과 *C. sp. A*가 형태적인 변이를 거치면서 *C. invaginata*로 진화했으며 변이의 연령은 고지자기 자료와 비교해본 결과 약 210,000 ± 20,000 yr으로 보고했다. 이 시기는 *C. invaginata*의 최초출현과 일치하는 연령이다. 이 두 종의 형태변화에 의해 진화적으로 안정되어 시대적 표준화석이 드문 제 4기의 생층서를 좀더 세분화 할 수 있는 기준을 마련해 주었으며, *C. invaginata*가 산출빈도가 낮고 보존이 나빠 화석에서 드물게 나타남으로 인해 발생하는 층서적인 문제를 해결하는데 도움을 주었다.

본 연구에 사용된 KODOS지역 퇴적물은 94~96년까지는 박스코어로 채취되었으며, *C. invaginata*와 *C. sp. A*가 Unit I에서 깊이에 상관없이 서로 뒤섞여 나왔으며 <sup>10</sup>Be 동위원소값도 일정해 상부퇴적물은 약 10 cm까지 상하부로 퇴적물이 완전히 재동된 "peneliquid layer"이나 "mixed layer"로 보고되었다 (박과 김 1997; Kim et al. 1997). 그러나 97년과 98년의 밀티플코어로 채취된 시료의 분석결과에 의하면 *C. invaginata*와 *C. sp. A*가 산출되는 깊이가 Unit I에서 구분되어 나타나 Unit I의 하부를 *C. invaginata* Zone을 나눌수 있었다 (박과 김 1999) (Fig 4).

*Collosphaera tuberosa*와 *Stylatractus universus*에 의한 연령 측정

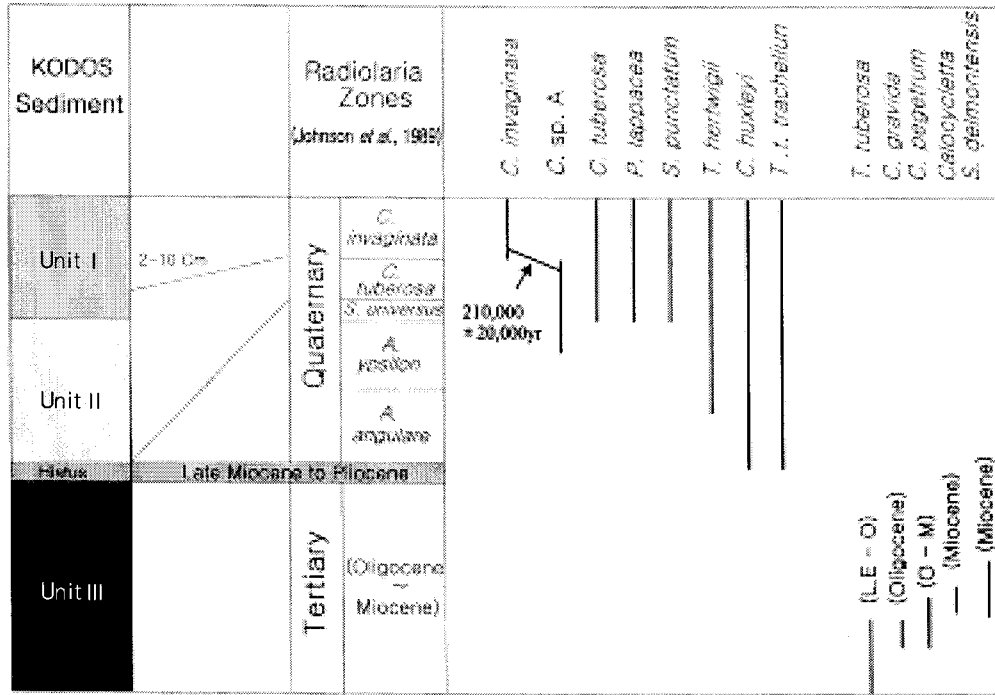


Fig. 4. Summary description of stratigraphy from the KODOS area (cited from 박과 김 1999).

*C. tuberosa*는 *C. invaginata*와 함께 제 4기를 인식할 수 있는 표준화석이다. *C. tuberosa*의 최초출현을 약 0.37 Ma (Johnson and Knoll 1975), 약 0.58 Ma (Johnson et al. 1989), 약 0.65 Ma (Caulet 1979)로 보고되고 있으며 전세계적으로 동시기적인 사건이다. 이들의 연령은 Nigrini (1971)의 Zone 2 (*C. tuberosa* Zone)에 해당한다. 한편 Johnson et al. (1989)은 *C. tuberosa* Zone을 *Stylatractus universus*의 최초출현에 의해 *C. tuberosa* Zone과 *S. universus* Zone으로 두 개의 생분대로 다시 나누었다. *S. universus*는 최초출현이 약 0.42 Ma (Morley and Shackleton 1978)로 전세계적으로 동시기적인 사건이며 그들의 출현여부는 퇴적물 내에서 쉽게 인식가능하다 (Johnson et al. 1989). KODOS해역의 퇴적물 내에서 *C. tuberosa*는 약 16-36 cm사이에서 최초출현이 관찰되고 이는 모두 Unit II의 중간이거나 기저부분이다. *C. tuberosa*와 같은 시대범위를 가지는 *Sphaerozoum punctatum*, *Polysolenia lappaacea* 등도 Unit II의 하부 깊이에서 최초출현이 관찰된다. Unit II 전체 퇴적층에서 *C. tuberosa*가 출현된 이후 절멸하는 *S. universus*는 관찰되지 않았다. 따라서 Unit II는 *S. universus*가 절멸하는 시기인 0.42 Ma 보다 젊은층으로 생분대가 가능하다 (Fig. 4).

Tertiary 종들에 의한 연령 측정

KODOS지역에서는 상부 퇴적물에서도 제 4기와 제 3기종이 섞여 나온다. 산출되는 제 3기 종들은 플라이오세 종인 *Lychnocanoma grande*와 마이오세에서 플라이오세까지 산출되는 *Phormostichoartus doliolum*과 *Calocyclus caepa*, 마이오세의 대표적인 속인 *Calocyclus*속들에 속하는 종들, 올리고세에서 마이오세 까지 산출되는 *Artostrobus pretabulatus*, *Botryopyle dictyocephalis*, *Theocyrtis annosa*, *Didymocyrtis prismatica*, 후기 에오세에서 올리고세 기간중 산출되는 *Theocyrtis tuberosa* 등으로 상부퇴적물에서 간헐적으로 소량이 산출된다. 이들은 대부분 조각이거나 보존상태가 아주 불량해 상부의 종들과는 확연히 구분된다. 상부 퇴적층에서 산출되는 제 3기 종들은 생물교란작용에 의해 하부 (Unit III)의 오래된 종들이 상부로 유입되었거나 인접 지역의 오래된 퇴적물이 저층해류에 의해 운반되어 제4기 퇴적물과 혼합되어진 것으로 생각할 수 있다. KODOS 지역의 Unit III 층에서는 화석이 거의 산출되지 않기 때문에 Unit III층의 연령을 정확히 추정하기는 어려우나, 상부에서 산출되는 제 3기 종들의 연령에 근거하면 Unit III는 후기 에오세 보다는 오래되

지 않은 제 3기층으로 추정된다 (Fig. 4).

#### 고환경 해석

KODOS의 상부 퇴적물 (Unit I 과 Unit II)에서는 깊이가 증가할수록 방산충 화석의 산출량 및 보존정도가 점진적으로 변하지 만, Unit III에서는 산출양상이 급격히 달라져 화석이 거의 나타나 지 않고 용해에 강한 일부종의 조각들만 가끔 관찰되었다. 방산충과 같은 오팔성분을 가진 생물들의 용해정도는 퇴적물 깊이 또는 퇴적연령에 비례 (Johnson 1976; Berner 1980)하는데 본 연구지역에서는 퇴적깊이에 상관없이 Unit III에서 화석이 급격히 감소하 기 때문에 KODOS지역의 방산충 용해는 퇴적깊이 보다는 퇴적연 령의 차이, 즉 퇴적결층에 의한 것으로 이해할 수 있다. 전 지역을 통해 플라이오세를 지시하는 표준화석이 극히 드물게 관찰되고 정 점에 따라서는 전혀 산출되지 않은 곳도 있으며, 마이오세에서 플라 이오세를 걸쳐 산출되는 종 또는 후기 마이오세 종이 관찰되지 않은 곳이 있어 퇴적결층의 시기는 후기 마이오세와 플라이오세 사이임 을 암시해준다.

후기 마이오세와 플라이오세 동안 남극에 강한 빙하기가 도래했 고, 이때 형성된 남극저층해류가 북태평양의 퇴적물에도 영향을 미 쳐 C-C지역에서 제 3기와 제 4기 사이에 광범위한 퇴적결층을 형 성하였다 (Johnson 1972; van Andel et al. 1975; Piper and Blueford 1982; von Stackelberg 1982). 심해저에서 퇴적결층의 요인은 저층해류에 의한 퇴적물의 침식이나 용해, 또는 표층 생산력 의 저하로 인해 퇴적이 이루어지지 않은 것 (van Andel et al. 1975)인데 KODOS지역의 퇴적결층은 남극저층해류의 영향에 기 인한 것으로 추정된다. 퇴적결층의 시기인 후기 마이오세에서 플라 이오세 동안 방산충을 포함한 퇴적물들의 퇴적이 이루어지기는 했 으나 남극저층해류의 지속적인 영향으로 퇴적물이 침식되고 퇴적 물속의 방산충 또한 용해되거나 재동되었을 것이다. 특히 오팔은 산 화환경에서도 잘 용해되는 특성이 있기 때문에 풍부한 산소를 함유 한 남극저층해류에 의해 쉽게 용해되었을 것으로 생각된다. Unit III에서는 방산충이 급격히 감소함과 동시에 스멕타이트의 양이 증 가하는 현상 (김 등 1996, 1997)을 보이는데 이는 방산충의 골격 성분인 오팔이 용해됨으로써 나온 silica성분들이 스멕타이트로 전 이된 것들로 추정된다.

퇴적결층은 KODOS지역의 전반에 걸쳐 인지되는 현상이나 그 깊이와 시기는 각 점마다 일정하지 않다 (정희수 1994; 박과 김

1997, 1999; Jung et al. 1998). 이는 심해저의 지형적 요인에 의한 것으로, 좁은 지역 내에서도 지형의 기복이 심하여 저층해류 의 유속변화가 컸기 때문인 것으로 추정된다. C-C지역의 퇴적율은 0.06 mm/ky~수 mm/ky로 지역에 따라 다양하게 보고되었다 (Piper and Williamson 1977; Muller and Mangini 1980; Halbach et al. 1988; Kim et al. 1997). 이와 같이 낮은 퇴적율 또한 지형 적 요인에 의한 것으로, 저층해류에 의해 이동되어진 퇴적물은 주로 언덕보다는 계곡에 쌓인다 (Johnson and Johnson 1970). KODOS지역에서 방산충 화석을 이용하여 계산한 제 4기 동안의 퇴적율은 약 0.15-0.5 mm/ky로 정점에 따라 약 3배 정도의 퇴적율 변화를 보이고 있다.

KODOS지역에서 온도를 지시하는 방산충 종들은 *Euchitonia elegance*, *Pnartus tetrathalamus tetrathlamus*, *Eucyrtidium hexagonatum*, *Spongogaster tetras tetras*, *Laprocycas maritilis polypora*, *Theocorythium trachelium trachelium* 등 주로 열대종들이었고 한대종들은 관찰되지 않아 제 3기나 제4기의 기후변동을 반영하지 않았다. 방산충 생지리구역 (biogeographic zone)에 의하면 본 연구지역은 적도구역에 해당하 는데 (Casey 1971a, b), 빙하기때 온도변화가 가장 심했던 지역은 아냉극과 아열대 환류의 동쪽지역이고 (Morley and Hays 1979), Boltovskoy (1991)는 적도지방에서 방산충 군집을 분석한 결과 한대종과 열대종의 산출양상에 뚜렷한 차이는 없음을 보고했다. KODOS지역에서 기후변동에 따른 방산충 군집의 변화가 나타나지 않는 현상은 두 가지 요인이 복합적으로 작용했으리라 추측할 수 있 다. 즉, 본 시료채취 지역이 저위도에 위치하여 기후변동의 영향을 중위도나 고위도에 비해 상대적으로 적게받은 까닭이며, 또한 빙하 기때 강한 저층해류의 작용으로 인해 상대적으로 소량인 한대종 조 차도 용해되었거나 퇴적물의 침식작용을 받아 보존되지 않았을 것 으로 추정된다.

#### 5. 결 론

KODOS지역의 퇴적물은 각 Unit별로 특징을 달리한다. 중기 에오세에서 제 4기까지의 다양한 시대범위를 갖는 풍부한 양의 방 산충이 산출되며 대부분의 깊이에서 제 3기와 제 4기종들이 섞여나 와 방산충을 포함한 퇴적물의 재동작용이 활발한 지역임을 나타낸 다. 상부퇴적물에서 제 3기와 제 4기종들이 섞여 나오기는 하지만, 제 4기를 대표하는 표준화석들의 출현여부에 의해 상부퇴적물의 생

분대가 가능하다. Unit I의 하부가 제 4기의 최상부인 *Collosphaera invaginara* Zone에 속하는 층으로 약 0.21 Ma의 연령을 가진다. Unit II는 *Collosphaera tuberosa* Zone에 속하고 0.42 Ma보다 젊은 층이다. Unit III는 후기 에오세보다 오래되지 않는 제 3기 층으로 올리고세와 마이오세 사이에 퇴적된 것으로 추정된다. Unit III와 그 상부 퇴적층 사이에는 최소한 300만년 이상의 퇴적결층이 존재하는데 퇴적결층의 시기는 후기 마이오세와 플라이오세 기간중이며 이때 강화된 남극저층해류가 퇴적결층의 원인으로 추정된다. 퇴적결층의 깊이와 시기는 정점에 따라 일정하지 않다. 이는 심해의 다양한 지형적인 영향에 의한 것으로 추정된다. 방사성 동위원소를 이용하여 계산한 제 4기 동안의 퇴적율은 약 0.15-0.5 mm/ky로 아주 낮은 퇴적율을 가지며 정점에 따른 변화폭이 크다. 전 코어를 통해 산출되는 방사성 동위원소는 대부분 온대종으로 퇴적물내에서 기후변동에 따른 방사성 동위원소 조성의 변화를 반영하지 않았다.

## 사 사

시료채취와 분석과정에서 여러모로 도움과 조언을 아끼지 않으신 한국해양연구소 심해저자원연구센터 여러분들에게 감사드립니다. 아울러, 어려운 상황에서도 시료채취에 도움을 주신 은누리호 승조원 여러분들께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 심사를 통하여 좋은 의견을 주신 심사자들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김기현, 박정희, 박정기. 1994. 한국심해연구(KODOS) 94해역의 퇴적물내에서 산출된 방사성 동위원소 군집에 관한 연구. 한국고생물학회지, 10, 257-275.
- 김기현 등. 1995. 심해저 광물자원 탐사보고서 (통상산업부). 1권.
- 김기현 등. 1996. 심해저 광물자원 탐사보고서 (해양수산부). 1권.
- 김기현 등. 1997. 심해저 광물자원 탐사보고서 (해양수산부). 1권.
- 박정희, 김기현. 1997. 북동태평양 한국심해연구지역의 방사성 동위원소와 고환경. 한국고생물학회지, 13, 119-136.
- 박정희, 김기현. 1999. 북동태평양 KODOS-97지역 주상퇴적물의 층서 및 고해양학적 연구. 한국해양학회지 '바다', 2, 50-62.
- 정희수. 1994. 북동태평양 KODOS 지역 퇴적물과 공극수 및 망간단괴의 지구화학적 특성. 서울대학교 이학박사 학위논문.
- 정희수, 박승현, 김동선, 최만식, 이경용. 1997. 한국심해환경연구(KODES) 지역 주상 퇴적물중 금속 및 희토류원소의 지구화학적 특성. 한국해양학회지 '바다', 2, 125-137.
- 정희수 등. 1999. 심해저 퇴적물 중 Barite 추출 및 조성연구, 한국해양연구소.
- Berger, W. H., A. A. Edkale, and P. P. Bryant. 1979. Selective preservation of burrows in deep-sea carbonates. *Marine Geology*, 32, M205-M230.
- Berner, R. A. 1980. Early Diagenesis, A theoretical approach. Princeton Univ. Press, Princeton.
- Boltovskoy, D. 1991. Holocene-Upper Pleistocene radiolarian biostratigraphy and paleoecology of the equatorial Pacific. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 86, 227-241.
- Casey, R. E. 1971a. Distribution of poycystine radiolarian in the oceans in relation to physical and chemical condition. p. 151-159. In *The Micropaleontology of oceans*. ed. by B. M. Funnel and W. R. Riedel. Cambridge University Press, Cambridge.
- Casey, R. E. 1971b. Radiolarians as indicators of past and present water-masses. p. 331-349. In *The Micropaleontology of oceans*. ed. by B. M. Funnel and W. R. Riedel. Cambridge University Press, Cambridge.
- Calet, J. P. 1979. Les dépôts à adiolaries d'âge Pliocène supérieur a Pleistocène dans l'océan Indien central: nouvelle zonation biostratigraphique. *Mem. Mus. Natl. Hist. Nat. Paris, ser. C*, 43, 119-141.
- Donahue, J. 1971. Burrow morphologies in north central Pacific sediments. *Marine Geology*, 11, M1-M7.
- Halbach, P., G. Friedrich, and U. von Stackelberg. 1988. The manganese nodule belt of the Pacific Ocean. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Horn, D. R., B. M. Horn, and M. N. Delach. 1973. Copper



- and nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. p. 71-76. In *The Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for Exploration*, Valdivia Manganese Exploration Group. ed. by M. Morgenstein. Univ. of Hawaii and IDOE/NSF, Honolulu.
- Johnson, D. A. 1972. Ocean-floor erosion in equatorial Pacific. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 3121-3144.
- Johnson T. C. 1974. The dissolution of microfossils in surface sediment of the eastern tropical Pacific. *Deep-Sea Research*, 21, 851-863.
- Johnson T. C. 1976. Biogenic opal preservation in pelagic sediments of a small area in the eastern tropical Pacific. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1273-1282.
- Johnson, D. A. and T. C. Johnson. 1970. Sediment redistribution by bottom current in the central Pacific. *Deep-Sea Research*, 17, 157-169.
- Johnson, D. A. and A. H. Knoll. 1975. Absolute age of Quaternary radiolarian datum levels in the equatorial Pacific. *Quaternary Research*, 5, 99-110.
- Johnson, D. A., D. A. Schneider, C. A. Nigrini, J. P. Cault, and D. V. Kent. 1989. Pliocene-Pleistocene radiolarian event and magnetostratigraphic calibration for the tropical Indian Ocean. *Marine Micropaleontology*, 14, 33-66.
- Jung, H. S., C. B. Lee, K. S. Jeong, and J. K. Kang. 1998. Geochemical and mineralogical characteristics in two-color core sediments from the Korea Deep Ocean Study(KODOS) area, northeast equatorial Pacific. *Marine Geology*, 144, 295-309.
- Kim, D. S., J. H. Park, and K. H. Kim. 1997. The determination of sedimentation rates by using cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in a sediment core from the Korea Deep Ocean Study(KODOS) area northeast equatorial Pacific. *Ocean Research*, 19, 127-132.
- Knoll, A. W. and D. A. Johnson. 1975. Late Pleistocene evolution of the collosphaerid radiolarian *Buccinosphaera invaginata* Haeckel. *Micropaleontology*, 21, 60-68.
- Moore, T. C. Jr. 1970. Abyssal hills in the central equatorial Pacific : Sedimentation and stratigraphy. *Deep-Sea Research*, 17, 573-593.
- Moore, T. C. Jr. 1978. The distribution of radiolarian assemblages in the modern and Ice-age Pacific. *Marine Micropaleontology*, 3, 229-266.
- Morley, J. J. and N. J. Shackleton. 1978. Extension of the radiolarian Stylatracturus universus as a biostratigraphic datum to the Atlantic Ocean. *Geology*, 6, 309-311.
- Morley, J. J. and J. D. Hays. 1979. Comparison of glacial and interglacial oceanographic conditions in the South Atlantic from variations in calcium carbonate and radiolarian distribution. *Quaternary Research*, 12, 396-408.
- Muller, P. J. and A. Mangini. 1980. Organic carbon decomposition rates in sediment of the Pacific manganese nodule belt dated by Th-230 and Pa-231. *Earth and Planetary Science Letters*, 51, 94-114.
- Munsell. 1988. Soil color chart. McBeth Div., Kolmorgen Corp., Maryland.
- Nigrini, C. A. 1971. Radiolarian zones in the Quaternary of the equatorial Pacific Ocean. p. 443-461. In *The micropaleontology of ocean*, ed. by B. M. Funnell and W. R. Riedel. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Piper, D. Z. and M. E. Williamson. 1977. Composition of Pacific Ocean ferromanganese nodules. *Marine Geology*, 23, 285-303.
- Piper, D. Z. and J. R. Blueford. 1982. Distribution, mineralogy, and texture of manganese nodules and their relation to sedimentation at DOMES site A in the equatorial north Pacific. *Deep-Sea Research*, 29, 927-926.
- van Andel, T. H., G. R. Heath, and T. C. Moore. Jr. 1975. Cenozoic history and paleoceanography of the central equatorial Pacific Ocean. *Geological Society America Inc. Memoir*, 143, 1-134.
- von Stackelberg, U. 1982. Influence of hiatus and volcanic ash rains on the origin of manganese nodules of the equatorial north Pacific(Valdivia cruises VA-13/2 and VA-18). *Marine Mining*, 3, 297-314.

Wolfart R. 1988. Radiolarian biostratigraphy of the Cenozoic. p. 115-118. In *The manganese nodule belt of the Pacific ocean*. ed. by P. Halbach, G. Friedrich, and von Stackelberg. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

---

*Received Aug. 6, 1999*

*Accepted Dec. 15, 1999*