

## 울릉분지 돌고래 시추공의 생층서: 고환경 및 이들의 석유탐사에서의 응용

이성숙<sup>1)</sup>, 윤혜수<sup>2)</sup>, 배부영<sup>2)</sup>, 박세진<sup>1)</sup>, 이의형<sup>3)</sup>, 강소라<sup>4)</sup>, 김재호<sup>2)</sup>, 김기현<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 한국석유공사 기술실, 경기도 안양시 관양동 1588

<sup>2)</sup> 충남대학교 지질학과, 대전광역시 유성구 궁동 220

<sup>3)</sup> 고려대학교 지구환경과학과, 서울특별시 성북구 안암동 5가 1

<sup>4)</sup> 부산대학교 지질학과, 부산광역시 금정구 장전동 30

### ABSTRACT

Biostratigraphic and paleoenvironmental analyses are carried out on cutting samples from the Dolgorae wells drilled in the Ulleung Basin. The clayey, silty, and sandy sediments of the wells yield various microfossil assemblages of relatively good preservation, among which five fossil groups are reported; a total of 97 foraminiferal species of 66 genera, 19 nannofossil species of 12 genera, 86 ostracod species of 41 genera, 107 diatom species of 44 genera, and 124 dinoflagellate cysts species of 45 genera. Based on microfossils the geologic ages of the Dolgorae wells are dated to be from late Early Miocene to Early Pleistocene.

Several biohorizons are defined in Neogene successions by the LOD (Last Occurrence Datum) and FOD (First Occurrence Datum) of marker species including *G. truncatulinooides* (LOD: 1.9 Ma) of foraminifera; *C. macintyeri* (LOD: 1.64-1.60), *G. oceanica* (FOD: 1.65 Ma), *G. caribbeanica* (1.72 Ma), *D. brouweri* (LOD: 2 Ma), *R. pseudoumbilica* (LOD: 3.66 Ma), *P. lacunosa* (FOD: 4.2 Ma) of nannofossils; *S. ellipsoideus* (LOD: 4 Ma), *S. palcacantha* (LOD: 10.2), *C. giuseppei* (LOD: 14 Ma) of dinocysts; *D. seminae v. fossilis* (FOD: 3.7 Ma), *T. antiqua* (LOD: 1.7 Ma), *T. convexa* (LOD: 2.4 Ma), *N. kamtschatica* (LOD: 2.58 Ma), *T. oestrupii* (FOD: 5.1 Ma) of diatoms.

Abundance patterns of microfossils throughout the wells reflect changes in paleoenvironmental and sedimentological settings of the basin in relation to sea-level variations. According to these data the large-cycle and small-cycle changes of transgression and regression phases are observed in terrestrial to marine sediments. This high-resolution sequence biostratigraphy established by various fossil groups enabled more reliable correlation between strata and refined interpretation on deposition

systems of the basin. It also proved to provide fundamental and precise informations regarding stratigraphic correlation, tectonic events, basin, and depositional history for hydrocarbon explorations, especially in collaboration with seismic-stratigraphic analyses.

## 1. 서론

울릉분지 (Ulleung Basin)는 동해의 동남쪽에 위치하고 있는 퇴적분지로서 쓰시마 분지 (Tsushima Basin; Frazier *et al.*, 1976; Hyun *et al.*, 1980) 또는 울릉도분지 (Ulleung-do Basin)로 불리었으나 (Kim, 1976) 지금은 울릉분지로 약칭되고 있다 (Chough, 1983; Park, 1990; 신 외, 1997). 분지의 동쪽경계는 일본 Oki Bank이며 남쪽과 북쪽의 경계는 각각 남서부 일본열도와 한국대지이다 (Chough, 1983; Hirayama, 1991; Fig. 1). 분지의 현재 수심은 200 m 이하에서부터 2300 m까지 이르고 있다 (Tamaki, 1988).

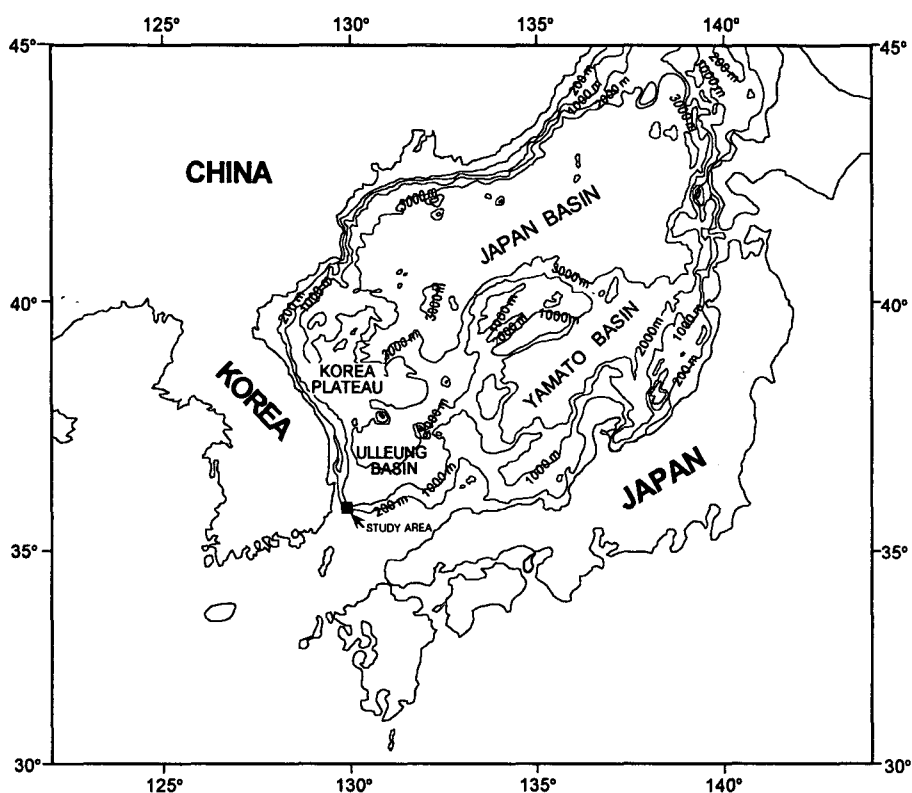


Fig. 1. Location of the Dolgorae wells in the Ulleung Basin, Korea.

VI-1광구는 울릉분지의 남서쪽에 위치하며 지형적으로 수심 200 m 이하의 넓은 대륙붕과 수심 200 ~ 1500 m의 급경사 대륙사면으로 구성되어 있다. 구조적으로는 광구의

중앙부를 지나는 단층 (thrust)을 경계로 남동쪽의 구조 변형 지역과 북서쪽의 구조 미변형 지역으로 구분된다 (Inoue, 1982; Chough and Barg, 1987; Park, 1992; 최동림 외, 1994).

VI-1 광구에서는 1973년 이후 석유탐사를 목적으로 돌고래 8개 공 (돌고래 I, II, III, III-1, III-2, V, V-1, VII)과 고래 6개 공 (고래 I, I-1, I-2, II, V, V-1) 등 총 14개 공을 시추하였다. 지금까지 각 시추공의 마이오세 사암층에서 가스와 컨덴세이트를 발견하였다. 이 저류층들의 탄화수소 트랩양상은 단층을 수반한 배사구조이며 층서와 구조 복합 트랩의 양상을 보여준다.

이러한 사실들로 볼 때 울릉분지내 탄화수소 부존 지층을 파악하기 위해서는 퇴적층의 층서와 퇴적환경을 분석하고 이들 결과들을 토대로 분지내 구조운동의 시기나 발달양상등을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 일차적으로 울릉분지내 시추공들 중에서 화석의 보존이 양호한 시추공을 선별하여 미화석들 석회질 초미화석, 유공충, 개형충, 와편모조류, 규편모류)을 분석한다. 분석한 미화석종들 중에서 시대 지시종이 지니는 출현시기나 절멸시기에 의해 퇴적층의 지질시대와 층서를 규명할 수 있다. 또한 환경 지시종이나 미화석의 산출양상은 해수면 변동이나 지역적인 대구조 운동 변화와 밀접한 관계가 있으므로 분지의 퇴적환경 변천사를 해석할 수 있다.

결과적으로, 각 시추공에서 얻어진 생층서나 고퇴적환경 변천사 결과들은 탄성과 층서나 순차층서와 대비할 때 근원암과 저류암의 형성, 연장성 파악 및 유망구조의 생성시기나 층서적 위치, 트랩양상등을 해석할 수 있으므로 향후 석유탐사에 유용하게 활용할 수 있다.

## 2. 지역지질

### 2.1. 지구조

중기 ~ 후기 에오세 (40 Ma) 시기에 인도와 아시아 대륙의 충돌 (collision)은 북동아시아 지역에 장력 (tensional setting)을 집적시켜 아시아대륙 내부 및 그 연변부에 많은 열곡(rift valley)과 연변해(marginal sea)를 생성시켰다 (Kim, 1985). 소련의 Baikal rift, 중국의 North China Basin (Ye *et al.*, 1985), Okhotsk해의 Kuril Basin, South China Basin (Taylor and Hayes, 1983) 및 동해의 확장을 야기하게 되었다 (김, 1992).

동해확장의 초기 단계에서는 동한단층과 Oki 단층의 약선이 우향 주향이동 단층선으로 북서-남동 방향으로 확장됨에 따라 북쪽의 동해 분지가 형성되었다. 후기 단계에서는 한국과 대한해협외의 양산 단층계와 남서 일본열도의 단층들이 각각 우향 주향이동 단층과 좌향 주향이동 단층으로 활성화됨으로써 북북서-남남동 방향의 확장을 통하여 야마토 분지와 울릉분지가 형성되었다 (김, 1992).

판구조 운동론에 의한 복원 연구들(Kimura and Tamaki, 1986; Tamaki, 1988; Kaneoka *et al.*, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992)도 후기 올리고세 ~ 전기 마이오세 시기에 Amurian microplate가 일본 해구로부터 후퇴하면서 야기된 상대적인 이동이 back-arc rifting을 야기 시킴으로써 동해가 확장되었음을 지시한다. 최근의 ODP Legs 127/128 결과 (Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki *et al.*, 1992, Ingle, 1992)에 따르면 32 Ma 시기에 일본분지 북동부의 지각이 얇아지기 시작하였고, 뒤이어 28 Ma 시기에 sea-floor spreading이 시작되었다. 동해 분지의 초기 spreading 시기 동안에 야마토 분지와 울릉분지의 crustal extension이 시작되었다. 전기 마이오세 (18 Ma) 시기에 동해 확장의 속도는 다소 느려지는데 이는 18 Ma 이전의 Magnetic anomaly lineation과 화산암의 드문 산출로 알 수 있다 (Kaneoka *et al.*, 1992; Tamaki *et al.*, 1992). 중기 마이오세(11 ~ 12 Ma) 시기에 Bonin arc과 central Honshu와의 충돌은 subduction hinge를 Ryuku Trench에서 육지쪽으로 후퇴시킴으로써 back-arc는 닫히게 되고 crust는 shortening되는 결과를 초래하였다 (Chough and Barg, 1987). 이러한 분지 닫힘을 초래한 tectonic reorganization은 후기 마이오세 이후 분지의 destruction과 지역적인 융기를 형성하였다 (Ingle, 1992).

동해의 ODP 결과에서도 동해의 형성을 장력에 의한 침강 시기 (32 ~ 10 Ma)와 압축력에 의한 융기시기 (10 Ma 이후)로 구분하고 이를 다시 8개의 진화단계로 세분하였다 (Ingle, 1992). 각 시기별 침강율이나 융기율은 1) 후기 올리고세 (32 ~ 25 Ma)의 침강율은 <150 m/m.y., 2) 전기 마이오세 (24 ~ 23 Ma)의 침강율은 100 ~ 500 m/m.y., 3) 전기 마이오세 말기~중기 마이오세 (18 ~ 16-15 Ma)의 침강율은 900 m/m.y., 4) 중기 ~ 후기 마이오세 (12.5 ~ 10 Ma)의 침강율은 <200 m/m.y., 5) 후기 플라이오세~플라이스토세 (2.0 ~ 0.7 Ma)의 융기율은 500 ~ 1500 m/m.y. 이다.

동해확장의 후기 단계에 형성된 울릉분지에서도 VI-1 광구지역에 발달된 퇴적양상이나 구조발달에서 3개의 Tectonic episode를 인지할 수 있다 (Exploi Tech, 1989). 1) Episode I (후기 올리고세 내지 전기 마이오세 ~ 12.5 Ma)은 분지의 확장과 침강으로 기반암의 침강과 passive 대륙붕 연변부의 발달 단계이며, 2) Episode II (12.5 Ma ~ 6.3 Ma)는 쓰러스트와 부정합을 수반한 압축운동 단계이며, 3) Episode III (6.3 Ma ~ 현재)은 wrench 단층을 유발하는 압축운동 단계이다.

따라서 이러한 연구결과들을 토대로 울릉분지의 대구조 진화 (tectonic evolution)를 1) pull-apart opening stage (후기 올리고세 ~ 전기 마이오세), 2) rotational opening stage (중기 마이오세: 15 Ma), 3) back-arc closing stage (중기 마이오세 ~ 현재: 12 Ma 이후)로 요약할 수 있다 (Jolivet *et al.*, 1991; Yoon and Chough, 1995).

## 2. 층서

울릉분지는 후기 에오세 ~ 초기 마이오세 시기에 본격적인 분지형태를 이루게 되면서 분지의 하부에는 초기의 내륙성 호소 퇴적층이, 상부에는 해성 퇴적층이 발달되었다. 탄성과 자료에 의하면 분지내 음향기저면 (acoustic basement)은 해저면 하 10 km에 존재하며 상부의 신생대 퇴적층의 두께는 약 8 ~ 10 km에 이르는 것으로 알려져 있다. 기반암은 백악기 및 고 제 3기의 화산암이며 상부는 마이오세의 심해 저탁류 사암층, 대륙붕 및 해안평야 그리고 플라이오세 이후의 외대륙붕 환경의 쇄설퇴적층이 퇴적되어있다 (Kim *et al.*, 1987; Park, 1992). 분지 남서부의 탄성과 자료에 의하면 상부 마이오세 층의 고수로 (paleochannel)들은 주로 남서쪽에서 북동쪽으로의 방향을 갖는다 (조규장 외, 1982).

울릉분지를 포함한 인근 해역의 퇴적지층에 대한 초기의 층서연구는 탄성과 탐사 자료와 시추공 자료들을 이용한 연구들로 (Minami, 1979; Inoue, 1982)로 퇴적층을 하부로 부터 기반암 (백악기), X 층군 (Paleogene ~ early Miocene), N 층군 (Early ~ Middle Miocene), K 층군 (Middle ~ Late Miocene), D 층군 (Late Miocene ~ Holocene)으로 구분하였다. D 층군은 다시 D층 (Late Miocene), C층 (Pliocene), B층 (Pleistocene) 및 A층 (Holocene)으로 세분하였다.

생층서 연구는 Keij and Trapman (1973)이 돌고래 I 공의 중기 마이오세 ~ 플라이스토세 퇴적층에서 5개, *Cyclamina japonica* Zone (Early Miocene), *Martinotiella communis* Zone (Middle Miocene), Rare & Barren Zone (Late Miocene), *Epistominella pulchella* Zone (Pliocene), *Criboelphidium yabei* Zone (Pleistocene)의 유공충 생층서대를 설정한 것이 최초의 연구이다. 이후 돌고래 (II III, III-1, III-2, V, V-1, VII)와 고래 공 (I, II, V)의 퇴적층으로부터 유공충, 석회질 초미화석, 화분포자, 와편모조류 미화석들에 의한 생층서대가 설정되었다 (석유공사 연구보고서 1982, 1989a, b, c, 1990a, b, 1991, 1992, 1994, 1995; Microstrat, 1993; 이호영, 1994; Byun, 1995). 유공충 미화석은 *Cyclamina japonica* Zone (Middle Miocene), *Martinottiella communis* Zone (Middle Miocene), Rare to Barren(Late Miocene), *Cassidulina laevigata* Zone (Pliocene), *Globorotalia truncatulinoides* Zone (Pleistocene)등 5개 생층서대 (N9 ~ N22)를 설정하였다. 화분포자 미화석은 *Liquidambar-Carya* assemblage Zone (Middle Miocene), *Taxodiaceae-Fagus* assemblage Zone (Late Miocene-Early Pliocene), *Algae & Non-arboreal pollen* assemblage Zone (Late Pliocene-Pleistocene)등 3개 생층서 군집대로 구분하였다. 와편모조류 미화석은 *Criboeridinium giuseppi* Zone (16.2 ~ 14 Ma), *Systematophora placacantha* Zone (14 ~ 12 Ma), *Spiniferites ellipsoideus* Zone (12 ~ 4 Ma), *Filisphaera filifera* Zone (4 ~ 1 Ma)등 4개 생층서대를 각각 설정하였다

(Byun, 1995).

최근에는 탄성과 자료와 석유 시추공의 층서자료 및 퇴적암석 자료들을 상호 비교하여 설정한 순차층서와 탄성과 층서에 관한 연구들이 활발하게 이루어졌다. 순차층서 경우 Chough *et al.* (1997)은 분지 형성시 지구조 운동과 관련하여 퇴적층을 3개의 퇴적 연속체 (succession)로 구분하였다: Succession I (A-C interval; 16 ~ 12 Ma), Succession II (C-G interval; 12 ~ 6.5 Ma), Succession III (6.5 Ma ~ Present). Cheong *et al.* (1999)은 2D 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션 프로그램 (SEDBAK)을 이용하여 울릉분지의 초기 분지형태 (configuration), 지역적인 대구조 운동, 해수면 변동, 쇄설퇴적물의 유입양과 유입방향 등의 변수들을 매개로 다체널 탄성과 탐사 단면상에서 지층 경계면 (sequence boundary)을 기준으로 7개의 퇴적 연속체 (sequence succession)로 구분하였다.

탄성과 층서에서 최동림 외 (1994)는 울릉분지 퇴적층을 하부로부터 Unit MM (후기 마이오세 초기 및 고기 퇴적층), Unit ML (후기 마이오세), Unit P (플라이오세), Unit Q(제 4기)의 4개 탄성과 층서 Unit로 구분하였다. Unit MM은 지층변형을 심하게 받아 습곡 및 단층구조들이 특징적으로 발달되어있으며 하부의 Unit MM과 뚜렷한 경사 부정합 관계로 퇴적된 상부 지층들은 거의 변형을 받지않은 지층들로 상호 정합적인 관계를 나타낸다. Shin *et al.* (1997)은 분지형성 조구조 운동과 관련하여 선열개 (Pre-rift), 열개동시성 (Syn-rift: 시퀀스 A1, A2), 후열개 (Post-rift: 시퀀스 B1, B2, B3), 횡압력 동시성(Syn-compressional: 시퀀스 C), 후횡압력 (Post-compressional: 시퀀스 D) 등 5개 메가시퀀스의 탄성과 퇴적층서로 세분하였다.

### 3. 결과 및 토의

울릉분지내 VI-1광구의 돌고래 시추공들로부터 미화석들 석회질 초미화석, 유공충, 개형충, 규조류, 와편모조류를 분석하여 울릉분지의 생층서분대, 지질시대, 고퇴적환경 및 지구조등을 해석하였다. 전반적으로, 석회질 미화석들 유공충, 개형충, 석회질 초미화석과 규질 미화석 규조류)들은 상부지층에서만 풍부한 산출량을 보이고 하부지층으로 갈수록 산출량이 급격히 감소하여 무화석대를 형성한다. 반면에 유기질 미화석들 와편모조류, 화분,포자)은 하부구간까지 꾸준한 산출양상을 나타낸다.

#### 3.1 생층서

울릉분지의 돌고래 시추공들에서 유공충 66속 97종, 석회질 초미화석 12속 19종, 개형충 41속 86종, 규조류 45속 108종, 와편모조류 45속 124종이 산출하였다. 미화석들 중에서 시대 지시종들의 첫 출현시기 FOD나 마지막 절멸시기 LOD를 근거로 퇴적층준 (horizon)의 지질시대를 결정하고 생층서대를 설정하여 시추공간 대비를 실시하였다.

각 시추공에서는 중기 마이오세~전기 플라이스토세를 지시하는 시대지시종들이 산출하였다. 석회질 초미화석의 시대 지시종으로는 *Gephyrocapsa caribbeanica* (FOD: 1.72 Ma; Sato and Kameo, 1996), *G. oenica* (FOD: 1.65 Ma; Sato and Kameo, 1996), *Pseudoemiliania lacunosa* (FOD: 4.2 Ma; Shipboard Scientific Party, 1999), *Calcidiscus macintyreii* (LOD: 1.60 ~ 1.64 Ma; Shipboard Scientific Party, 1996), *Helicosphaera sellii* (LOD: 1.26 Ma; Sato and Kameo, 1996), *Discoaster brouweri* (LOD: 2 Ma; Sato and Kameo, 1996), *Reticulofenestra pseudoumbilica* (LOD: 3.66 Ma) 등이 산출한다. 유공충 미화석의 시대 지시종으로는 마이오세임을 지시하는 *Haplaphragmoides compressum*, *H. renzi*, *Cyclammina japonica*, *C. ezoensis* 등이 산출한다. 와편모조류 미화석의 시대 지시종으로는 *Cribroperidinium giuseppei* (LOD: 14 Ma), *Hystrichostrogylon membraniphorum* (LOD: 13 Ma), *Heteraulacacysta campanula* (LOD: 12 Ma), *Systematophora palacacantha* (LOD: 11.2 Ma), *Batiacasphaera sphaerica* (LOD: 11.2 Ma), *Dapsilidinium pseudocolligerum* (LOD: 8 Ma), *Filisphaera filifera* (FOD: 8 Ma), *Spiniferites elongatus* (FOD: 8 Ma), *Pentadinium laticinctum* (LOD: 6 Ma), *Spiniferites pseudofurcatus* (LOD: 5.3 Ma), *Xandarodinium xanthum* (LOD: 5.3 Ma), *Achomosphaera crassipellis* (LOD: 4 Ma), *Spiniferites ellipsoideus* (LOD: 4 Ma), *Hystrichosphaeropsis obscura* (LOD: 3.4 Ma), *Capillicysta fusca* (LOD: 3.4 Ma), *Spiniferites pachyderma* (FOD: 3.4 Ma), *Impagidinium verolum* (LOD: 1.78 Ma), *Spiniferites hexatypicus* (LOD: 1.78 Ma), *Spiniferites elongatus* (LOD: 1 Ma), *Filisphaera filifera* (LOD: 1 Ma), *Xandarodinium variabile* (LOD: 1 Ma), *Melitasphaeridium angustum* (LOD: 1 Ma), *Impagidinium japonicum* (LOD: 1 Ma), *Operculodinium longispinigerum* (LOD: 1 Ma), *Nematosphaeridium lemniscata* (LOD: 1 Ma), *Lejeunecysta fallax* (LOD: 1 Ma), *Reticulatosphaera actinocornata* (LOD: 1 Ma), *Hystrichokolpoma rigaudiae* (LOD: 1 Ma), 등이 산출한다. 규조류 미화석의 시대 지시종으로는 *Denticulopsis seminae* v. *fossilis* (LOD: 1.25 Ma, FOD: 3.7 Ma; Koizumi, 1985), *Rhizosolenia praebergonii* (LOD: 1.66 Ma; Koizumi, 1985), *Thalassiosira antiqua* (LOD: 1.7 Ma; Akiba, 1983), *Thalassiosira convexa* (LOD: 2.4 Ma; Koizumi and Tanimura, 1985), *Neodenticula kamtschatica* (LOD: 2.58 Ma; Koizumi, 1985), *T. oestrupii* (FOD: 5.1 Ma; Koizumi, 1985) 등이 산출한다.

### 3.2 고환경

각 시추공의 고퇴적환경과 해수면 변동은 환경지시종의 산출이나 미화석 산출양상의 변화에 근거하여 분석하였다. 유공충 미화석의 반심해종으로는 *Haplaphragmoides compressum*,

*H. renzi*, *Cyclammina japonica*, *C. ezoensis* 등이 산출하며 내해 및 천해종으로는 *Elphidium clavatum*, *Buccella frigida*, *Bulimina marginata*, *Ammonia becarii*, *Elphidium advenum*, *Pseudononion japonicum*, *Porosorotalia makiyamai* 종들이 산출한다. 외편모조류 미화석은 원양성종으로 *Impagidinium*, *Nematosphaeropsis*속의 종들이 산출하며 천해종은 *L. machaerophorum*, *O. centrocarpum*, *O. israelianum*, *Spiniferites*속의 종들이 산출한다. 규조류 미화석은 원양성종으로 *Actinocyclus curvatulus*, *Bacteriastrium* sp., *Coscinodiscus marginatus*, *C. oculus-iridis*, *Neodenticula kamtschatica*, *Hemidiscus cuneiformis*, *Nitzschia reinholdii*, *N. sicula*, *Stephanopyxis turris*, *Thalassiosira antiqua*, *T. convexa*, *T. decipiens*, *T. eccentrica*, *T. lineata*, *T. nordenskioldii* 등과 천해 내지 연안성종으로 *Actinocyclus octonarius*, *Actinoptychus senarius*, *A. splendens*, *Cocconeis scutellum*, *Cyclotella striata*, *Diploneis bombus*, *D. smithii*, *Paralia sulcata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Trachyneis aspera* 등이 산출한다.

고해양환경은 미화석의 난류종과 한류종의 산출양상에 근거하여 해석하였다. 석회질 초미화석의 한류종으로는 *Coccolithus pelagicus*가, 난류종으로는 *Discoaster* 종이 산출한다. 유공충 화석의 한류종으로는 *Elphidium clavatum*, *P. makiyamai*, *Globigerina bulloides* 종이 산출하며 온대종으로는 *B. frigida*, *P. japonicum* 등이 산출하며 난류종으로는 *Ammonia becarii*, *Bulimina marginata*, *Globigerinoides ruber*, *Globorotalia menardii*, *Pulleniatina obliquiloculata* 등이 산출한다. 개형충 화석은 *Acuticythereis*, *Finmarchinella*, *Kotoracythere*, *Normanicycythere*, *Palmenella*, *Robertsonites*, *Yezocythere* 등 전형적인 한류성 종들이 산출한다. 외편모조류 미화석은 대부분의 산출종들이 한류 지시종들이며 난류종으로는 *T. vancampoae*, *O. israelianum* 등이 산출한다. 규조류 미화석은 한류종으로 *Actinocyclus curvatulus*, *A. ochotensis*, *Coscinodiscus marginatus*, *Odontella aurita*, *Thalassiosira kryophila*, *T. nordenskioldii* 등이 산출하며 난류종으로 *Coscinodiscus lineatus*, *Hemidiscus cuneiformis*, *Nitzschia marina* 가 산출한다.

### 3.3 지구조

동해의 울릉분지는 후기 올리고세에 열개가 시작되어 전기와 중기 마이오세에 활발한 확장운동이 지속되었으며 중기 마이오세 말기 이후로는 압축력에 의한 변형과 융기가 계속되어왔다 (Kimura and Tamaki, 1986; Tamaki, 1988; Kaneoka *et al.*, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992). 울릉분지내 돌고래-1공의 결과 (Chough and Barg, 1987)에서도 분지의 초기단계 (전기 ~ 중기 마이오세: 16 ~ 12 Ma)에는 침강(300 m/m.y.)이 진행되었



으며 뒤이어 압축력에 의한 습곡등의 변형 (중기 마이오세: 12 Ma) 등으로 융기(240 m/m.y.)가 진행되었다. 후기단계 (플라이오세: 5 Ma)에 이르어 지역적인 정단층을 수반한 지속적인 침강 (100 m/m.y.)이 이어졌다.

이러한 울릉분지의 지구조 진화는 분지내 구조 변형지역에 위치한 돌고래 시추공들의 미화석 분석 결과에도 잘 나타나있다. 미화석의 산출양과 산출양상의 변화패턴은 지구조 운동에 따른 융기, 침식 및 해수면 변화와 밀접한 관계가 있다. 또한 미화석의 시대지시종에 의해 구조 운동의 시기와 퇴적층준의 지질시대를 밝히고 이를 근거로 분지내 퇴적율이나 구조운동에 따른 퇴적환경 변화등을 해석할 수 있다.

### 3.3.1 돌고래 II, III-1, III-2 시추공

#### 1) Middle Miocene (ca. 15 ~ 14 Ma)

본 구간의 상부경계는 *Cribroperidinium giuseppeii*의 절멸시기인 14 Ma이며 하부경계는 뚜렷하지 않으나 종조성으로 볼 때 15 Ma를 넘지는 않는 시기이다.

분지가 침강하는 시기로 반심해 (upper bathyal)의 원양 (oceanic)환경을 지시하는 유공충 *Haplaphragmoides compressum*, *H. renzi*, *Cyclammina japonica*, *C. ezoensis*, *C. pusilla* 종들과 *Impagidinium*, *Nematosphaeropsis*속의 와편모조류 미화석종들이 산출한다. 고 해양환경은 한류종들이 우세하게 산출하는 것으로 보아 남쪽의 쿠로시오 난류 유입이 차단되고 북쪽의 한류 영향이 우세했던 것으로 판단된다. 따라서 고지리를 복원하면 분지의 남쪽 지층이 융기되어 난류의 유입이 차단되고 북쪽으로 열린 형태를 나타낸다.

구조적으로 장력에 의한 열개작용으로 분지의 침강이 지속적으로 일어나던 시기이다. 미화석의 시대지시종에 의한 지질시대와 퇴적층 두께로 계산한 퇴적율은 약 1000 m/m.y.이다. 본 구간은 해수면 변화를 기준한 순차 연대층서(Sequence chronostratigraphy)의 3rd-order cycle인 TB 2.4 (15.5 ~ 13.8 Ma)에 대비된다. 미화석의 산출양상 변화에 의하면 4개의 소규모 해수면 변화 주기(subcycle 1 ~ 4)가 나타난다.

#### 2) Middle Miocene (14 ~ 12 Ma)

본 구간의 하부경계는 *Cribroperidinium giuseppeii*의 절멸시기 (LOD: 14 Ma) 층준이며 상부경계는 *Systematophora placacantha*의 절멸시기 (10.2 Ma)까지이다. 그러나 절멸시기가 12 Ma인 *Heteraulacacysta campanula*나 중기 마이오세 말에 절멸하는 *S. placacantha*나 *Batiacasphaera sphaerica* 등이 상부경계까지 풍부하게 산출하고 있으므로 상부경계는 12 Ma보다는 젊지 않으며 그 상부지층은 대규모 부정합에 의해 깎인 상태이

다.

산출종들은 상부 반심해를 지시하는 *Haplophragmoides*, *Cyclammina* 속의 유공충 미화석종들과 외해 연안 (outer Neritic) 내지 원양 (oceanic) 환경을 지시하는 *Impagidinium*, *Nematosphaeropsis* 속의 외편모조류 미화석종들이 산출한다. 전반적으로 분지의 침강시기이나 하부지층 보다는 수심이 다소 얕아졌다. 고해류는 한류종이 우세한 환경으로 남쪽의 쿠로시로 난류 유입이 계속적으로 차단되었다.

구조적으로 장력에 의한 분지의 침강이 지속되던 시기로 지층의 상부는 대규모의 부정합에 의해 경계지워진다. 미화석의 시대지시종에 의한 지질시대와 퇴적층 두께로 계산한 퇴적율은 하부층보다는 적은 455 ~ 510 m/m.y.이다. 본 구간은 순차 연대층서의 3rd-order cycle인 TB 2.5 (13.8 ~ 12.5 Ma)에 대비되며 미화석의 산출양상 변화에 의하면 4개의 소규모 해수면 변화 주기 (subcycle 1 ~ 4)가 관찰된다.

### 3) Late Miocene (ca. 8.7 ~ 5.3 Ma)

본 구간은 미화석 산출이 드물거나 무화석대인 Rare to Barren Zone에 해당된다.

구조적으로 압축력에 의한 지층의 용기로 퇴적층의 하부에는 결층 (hiatus)이 나타나는 시기이다. 지질시대와 퇴적층 두께로 계산한 퇴적율은 65 ~ 93 m/m.y.이며 하부에는 약 3.3 m.y. 동안의 침식 및 결층이 존재한다. 순차 연대층서 (Sequence chronostratigraphy)의 3rd-order cycles인 TB 3.2 ~ 3.3 (8.7 ~ 5.5 Ma)에 대비되며. 미화석의 산출양상 변화에 의하면 2개의 소규모 해수면 변화 주기 (subcycle 1, 2)가 나타난다.

### 4) Pliocene (5.3 ~ 1.7 Ma)

본 구간의 상부경계는 *Discoaster brouweri*의 절멸시기 (LOD: 2 Ma) 층준으로 결정하였으나 하부경계는 뚜렷한 시대지시종이 산출하지않아 구간내 시대지시종과 종조성 및 순차연대층서에 의해 결정하였다. 규조류의 *Thalassiosira antiqua*의 절멸시기 (LOD: 1.7 Ma), *T. convexa*의 절멸시기 (LOD: 2.4 Ma), *Thalassiosira oestrupii* (FOD: 5.1 Ma)와 석회질 초미화석 *Pseudoemiliana lacunosa*의 출현시기 (FOD: 4.2 Ma) 층준이 관찰된다.

산출종들은 내해환경을 지시하는 유공충 *Elphidium clavatum*, *Buccella frigida*, *Bulimina marginata*, *Ammonia becarrii*, *Elphidium advenum*, *Pseudononion japonicum*, *Porosorotalia makiyamai* 등이 주로 산출하며 외편모조류 미화석은 내해 지시종인 *Lingulodinium*, *Spiniferites*, *Operculodinium*속 종들이 우세하게 산출한다. 고 해양환경은 한대 내지 온대의 유공충인 *B. frigida*, *P. japonicum*등과 난류종인 *Ammonia becarrii*,

*Bulimina marginata*, *Globigerinoides ruber*, *Globorotalia menardii*, *Pulleniatina obliquiloculata* 등의 종들이 산출된다. 외편모조류 미화석은 한류종과 함께 *Tuberculodinium vancampoae*, *Polysphaeridium zoharyi* 등의 난류종이 증가한다. 석회질 초미화석은 난류종인 *Discoaster*종과 함께 한류종인 *Coccolithus pelagicus*가 산출한다. 규조류 미화석은 난류종인 *Coscinodiscus lineatus*, *Hemidiscus cuneiformis*, *Nitzschia marina*종들과 한류종인 *Actinocyclus curvatulus*, *A. ochotensis*, *Coscinodiscus marginatus*, *Odontella aurita*, *Thalassiosira kryophila*, *T. nordenskiöldii* 종들이 산출한다. 따라서 본 구간은 내해 내지 외해환경의 한류와 난류가 혼합되는 환경으로 하부지층은 난류의 영향이 다소 우세한 해양환경이다. 그러나 상부지층에서는 개형층의 한류종인 *Acuticythereis*, *Finmarchinella*, *Kotoracythere*, *Normanicythere*, *Palmenella*, *Robertsonites*, *Yezocythere*와 석회질 초미화석의 *C. pelagicus*가 급격히 증가하여 한류가 우세한 해양환경으로 변화한다. 이러한 사실은 이 시기의 초기에는 분지가 침강하여 남쪽의 쿠로시오 난류가 유입되므로 난류와 한류가 혼합하는 해양환경이었으나 플라이스토세와 경계를 이루는 후기에는 구조적으로 융기되고 수심이 낮아져 남쪽의 난류영향이 차단되고 북쪽의 한류영향이 증가하였음을 나타낸다.

구조적으로 초기에는 침강시기이나 후기에는 압축력 의한 융기가 지속되던 시기로 지질시대와 퇴적층 두께로 계산한 퇴적율은 113 m/m.y.이다. 순차 연대층서 (Sequence chronostratigraphy)의 3rd-order cycles인 TB 3.4 ~ 3.8 (5.5 ~ 1.6 Ma)에 해당되며 미화석 산출양상 변화에 의하면 3개의 소규모 해수면 변화주기 (subcycle 1 ~ 3)가 존재한다.

##### 5) Pleistocene (1.7 ~ ca. 1.2 Ma)

본 구간에서는 플라이스토세 지시종인 *Gephyrocapsa*속 종들이 풍부하게 산출한다. 하부경계는 *Discoaster brouweri*의 절멸시기 (LOD: 2 Ma)와 *Globorotalia truncatulinoides* (FOD: 1.9 Ma)와 *Gephyrocapsa caribbeanica*의 출현시기 (FOD: 1.72 Ma)를 근거로 결정하였다. 구간내에는 *Calcidiscus maintyrei*의 절멸시기 (1.64 ~ 1.60) 층준이 나타나며 상부구간까지 *Helicosphaera sellii* (LOD: 1.26)가 산출하고 있으므로 상부구간의 지질시대는 1.26 Ma보다 오래된 시대이다. 산출종들은 대부분 내해연안 (Inner Neritic) 종들이며 전형적인 한류종들로 개형층 *Acuticythereis*, *Finmarchinella*, *Kotoracythere*, *Normanicythere*, *Palmenella*, *Robertsonites*, *Yezocythere*종과 석회질 초미화석의 *Coccolithus pelagicus*가 풍부하게 산출한다.

구조적으로 압축력에 의한 융기가 지속되던 시기로 하부경계 층준에서는 해수면 하강으로 인한 퇴적환경과 미화석 산출량의 변화가 존재한다. 순차 연대층서 (Sequence chro-

nostratigraphy)의 3rd-order cycle인 TB 3.9의 하부 (1.6 ~ 1.3 Ma)에 대비되며 지질시대와 퇴적층 두께로 계산한 퇴적율은 약 120 m/m.y.이다.

### 3.3.2 고래 VII 시추공

돌고래 VII 공은 하부의 육성층 발달로 인하여 다른 돌고래공과 차이를 보이며 교환경과 지질시대 구분에서도 다소 차이가 난다.

#### 1) Early ~ Middle Miocene: 4616.5 m ~ 3655 m

본 무화석대는 해성화석이 산출되지 않는 구간으로 다량의 탄화된 식물파편과 소량의 화분포자화석만 산출되어 육성층으로 판단된다. 이 두꺼운 육성층들은 동해 열개의 초기 단계에 생성된 열개동시성 퇴적물 (synrift sediments)로 보이며 인근의 돌고래 V-1공에서도 하부에서도 같은 두께의 유사한 퇴적층이 발견되었다. 무화석대와 두꺼운 육성층의 발달은 활발한 지괴운동, 상당한 침강기간과 양 그리고 빠른 침강속도를 지시한다.

#### 2) Middle Miocene ( ~ 14 Ma): 3625 m ~ 2695 m

본 구간 하부경계의 지질시대는 분명하지 않으나 전기 마이오세의 화석이 산출하지 않는 것으로 보아 중기 마이오세에 해당한다. 상부경계는 *Cribopteridinium giusepei*의 절멸 (LOD: 14 Ma)층준까지이다. 두꺼운 육성층의 발달과 계속된 침강운동에 뒤이어 퇴적환경은 3625 m 층준에서 해침이 서서히 시작되었다. 2965 m 까지는 용기와 침강이 반복하는 해침과 해퇴가 반복하는 점이환경이다 (lower coastal). 상부구간인 2935 m 부터는 해성 미화석인 와편모조류가 지속적으로 산출되어 비교적 안정된 해성환경을 지시한다.

#### 3) Middle Miocene (14 ~ 11.2 Ma): 2665 m ~ 1520 m

본 구간의 하부경계는 *C. giusepei*의 절멸 (LOD: 14 Ma)층준이며 상부경계는 *Systematophora placacantha*의 절멸시기 (LOD: 10.2 Ma) 층준이다. 이 시기는 계속적인 분지의 침강운동으로 상시 해성환경 (shore face; 대륙붕 - 상부 대륙사면)이 이루어져 상부까지 비교적 조용한 지각운동의 시대가 지속되었다.

#### 4) Late Miocene (11.2 ~ 5.3 Ma): 1490 ~ 680 m

본 구간의 하부경계는 *Systematophora placacantha*의 절멸시기 (LOD: 10.2 Ma) 층준이며 상부까지 뚜렷한 플라이오세층은 산출하지 않는다. 퇴적환경은 980 m 구간까지는 상시 천해환경이었으나 (lower coastal)상부의 950 m 층준부터는 수심이 얕은 조간대와 육지해안이 교차하는 환경 (upper coastal)으로 변한다.

## 참고문헌

- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산 단층계의 주향이동. 지질학회지, 28, p. 84-109.
- 신국선, 유강민, 김건득, 엄창렬, 1997, 한국 대륙붕 VI-1광구 고래 II지역의 3D 탄성과 자료해석. 한국석유지질학회지, 5(1,2), p. 27-35.
- 이호영, 1994, 동해울릉분지 남단부의 신 제 3기 유공층 생성서. 서울대학교 박사학위논문, 377 p.
- 조규장, 이원영, 박관순, 박근필, 한현철, 김승우, 최현일, 장정해, 이치원, 전희영, 이호여, 봉필윤, 곽영훈, 손진담, 오재호, 양문열, 손용오, 곽민호, 박계화, 1982, 대륙붕 석유탐사자료 평가연구. 한국자원연구소 용역보고서, 342 p.
- 최동림, 오재경, Satoh, M., 1994, 동해 울릉분지 남부해역의 신생대 지질구조 미 지구조 변화. 한국석유지질학회지 2(2), p. 59-70.
- 한국석유개발공사, 1989a, VI-1광구 돌고래 II 시추공 시료분석 보고서.
- 한국석유개발공사, 1989b, VI-1광구 돌고래 III-2 시추공 시료분석 보고서.
- 한국석유개발공사, 1989c, VI-1광구 돌고래 III, III-1, III-2 시추공 시료분석 보고서.
- 한국석유개발공사, 1990a, VI-1광구 돌고래 V 시추공 시료분석 보고서.
- 한국석유개발공사, 1990b, VI-1광구 돌고래 V-1 시추공 시료분석 보고서. 한국석유개발공사, 1991a. VI-1광구 돌고래 VII 시추공 시료분석 보고서.
- 한국석유개발공사, 1991b, 국내대륙붕 유망광구 평가보고서, 한국자원연구소 용역보고서, 204 p.
- 한국석유개발공사, 1992, VI-1광구 돌고래 VI-1 광구 층서트랩 평가. 한국석유개발공사, 1994. Well evaluation report of Gorae I.

- 한국석유개발공사, 1995, Well evaluation report, Gorae 1-1 and Gorae 1-2, Block VI-1, Offshore Korea, 145 p.
- 한국석유개발공사, 1998, 포항분지에 대한 석유지질학적 연구 - 포항분지 및 울릉분지의 석유지질학적 관련성 연구- 한국자원연구소, p. 1-96.
- Akiba, F., 1983, Revised Neogene diatom zonation in middle-high latitude North Pacific, *Kaiyo-kagaku(Mar. Sci.)*, 15, p. 717-724.
- Byun, H. S., 1995, Cenozoic dinoflagellate cysts from the Pohang Basin and southern margin of the Ulleung Basin, Korea. Unpublished PH.D. Thesis, Chungnam National University, 283 p.
- Cheong, D., Whittle, G. and Kendall, C. G. St. C., 1999, Graphical simulation of clastic margin progradation: Ulleung Basins, offshore Korea. *Geosciences Journal*, 3(1), p. 63-73.
- Chough, S.K., 1983, Marine geology of Korean Seas. International Human Resources Development Corporation, Boston, U.S.A., 157 p.
- Chough, S. K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, p. 45-48.
- Chough, S. K. and Lee, K. E., 1992, Mult-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, p. 32-39.
- Chough, S. K., Yoon, S. H. and Park, S. J., 1997, Stratal patterns in the southwestern margin of the Uleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geo-Marine Letters*, 17, p. 207-212.
- Exploi Tech, 1989, Exploration and development evaluation block VI-1 Ulleung Basin. Exploi Tech, Inc.

- Frazier, S. B., Choi, S. O., Kim, B. K. and Schwart. D., 1976, Marine petroleum exploration of Huksan Platform, Korea. American Association of Petroleum Geologists Memoit, 25, p. 268-275.
- Hirayama, J., 1991, Total sedimentary isopach maps offshore East Asia. Commottee for co-ordination of joint prospecting for mineral resources in Asian offshore areas (CCOP), Technical Bulletin, 23, 116 p.
- Huntec, 1968, Report on the offshore geophysical survey in the Pohang area, Republic of Korea. Committee for co-ordination of joint prospecting for mineral resources in Asian offshore areas (CCOP), Technical Bulletin, 1, p. 1-12.
- Hyun, B. K., Koo, J. H., Cho, K. J., Kwon, B. C., Lee, D. H., Cheong, S. H., Yang, S. J., Kim, S. W., Park, K. S., Yoon, H. S., Suh, S. Y., Park, K. P., Shin, S. C., Park, Y. S., Min, S. S., Shin, H. J., and Boo, S. J., 1980, Petroleum resources potential in the continental shelf of Korea. Korea Resources Research Report, 80-16, 210 p. (in Korean).
- Ingle, J. C. Jr., 1992, Subsidence of the Japan Sea: Stratigraphic evidence from ODP Sites and onshore sections: Proceedings, Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, part 2, p. 1197-1218.
- Inoue, E., 1982, Geological problems on Cretaceous and Tertiary rocks in and around Tsushima-Korea Straits. Committee for co-ordination of joint prospecting for mineral resources in Asian offshore areas (CCOP), Technical Bulletin, 15, p. 85-121.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea refion and volcanic activity of the northeast Japan arc. Proceedings, Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, part 2, p. 1311-1331.

- Jolivet, L. Tamaki, K., and Fournier, M., 1994, Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), 22,237-22,259.
- Jolivet, L. Huchon, P., Brun, J.P., X. Chamot-Rooke, N., and Thomas, J.C. 1991. Arc deformation and margin basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, p. 4367-4384.
- Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S., and Tamaki, K., 1992, 40 Ar39- analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: Constraints on the age of formation of the Japan Sea. *Proceedings, Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, part 2, p. 819-836.
- Karig, D. E., 1971, Origin and development of marginal basins in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 96, p. 4367-4384.
- Keij, A. J. and Trapman, S., 1973, Stratigraphy of exploration well, Dolgorae-1, Korea. Shell International petroleum Maatschappij B. V., The Hague, 5 p.
- Kim, C. S., 1976, Petroleum potential of Korean offshore. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 25, p. 261-267.
- Kim, C. S., Lee, W. Y., Kim, C. M., Park, K. P., Kim, W. S., Shin, W. C., Lee, H. Y., Choi, O. S., Choi, Y. G., Kim, S. W., Kong, Y. S., Park, Y. S., Choi, K. L., Kwak, Y. H., Son, J. D., Han, J. H., Cheong, T. J., Son, B. K., Bong, P. Y., Lee, H. Y., Choi, S. J., and Chun, H. Y., 1987, Geology and hydrocarbon on the continental shelf of Korea. *Korea Institute of Energy and Resources Research Report*, KR-86-2-22, p. 1-204.
- Kimura, G., and Tamaki, K., 1986, Collision, rotation, and back-arc spreading in the region of the Okhotsk and Japan Sea. *Tectonics*, 5, p. 380-401.
- Koizumi, I., 1985, Diatom biochronology for Late Cenozoic Northwest Pacific, *Journal of the Geological Society of Japan*, vol. 91, no.3, p. 195-211.



- Koizumi, I. and Tanimura, Y., 1985, Neogene diatom biostratigraphy of the middle latitude western North Pacific. Deep Sea Drilling Project Leg 86, *In* : Heath G.R., Burckle, L.H., *et al.*(ed.), Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 86: Washington, U.S. Govt. Printing Office, p. 269-300.
- Microstrat, 1993, Integrated seismic sequence stratigraphic analysis of the Gorae-1 well, Block VI-1, 52 p. Park, K.S., 1990. The seismic stratigraphy, structure and hydrocarbon potential of the Korea Strait. Unpublished Ph.D. Thesis, Imperial University, 431 p.
- Minami, A., 1979, Distribution and characteristics of the sedimentary basin offshore San-in to Tsushima island: Journal of the Japanese Association of Petroleum and Technologists, 44(5), p. 321-328.
- Park, K. S., 1992, Geological structure and seismic stratigraphy of the southern part of Ulleung basin. In: Chough, S.K. (ed.) Sedimentary basin in the Korean Peninsular and adjacent seas. Special Publication of the Korea Sedimentology Research Group. Hanlimwon Publishers, Seoul, Korea, p. 40-59.
- Sato, T. and Kameo, K., 1996, Pliocene to Quaternary calcareous nannofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, with reference to late Pliocene glaciation. In: Thiedem, J. Myhre, A.M., Firth, J.V., Johnson, G.L. and Ruddiman, W.F., eds. Proc. ODP, Sci. 151: College Station, TX (Ocean Drilling Program). p. 39-59.
- Shipboard Scientific Party, 1996, Explanatory notes. In: Paull, C.K., Matsumoto, R., Wallace, P.J., Proc. ODP, Init. Repts., 164: College Station, TX (Ocean Drilling Program). p. 13-41.
- Tamaki, K. 1988, Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. Bull. Geol. Surv. Japan, 39, p. 269-365.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J.C.Jr., and Pisciotto, K.A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Hapan Sea ODP drilling. In: Tamaki, K., Suyehiro,

K., Allan, J., McWilliams, M., *et al.*, Proc. ODP, Sci. 127/128, Pt2: College Station, TX (Ocean Drilling Program). p. 1311-1348.

Taylor, R. J. and Hamilton, G. B., 1982, Techniques: In A.R. Lord(ed.), A stratigraphic index of calcareous nannofossils. Ellis Horwood Limited, Chichester, p. 11-15.

Taylor, B. and Hayes, D. E., 1983, Origin and History of the South China Basin. In: Hayes, D.E. (ed.), The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. Geophys. Monogr. 27, Amer. Geophys. Union, p. 23-56.

Ye, H., Shedlock, K. M., Hellinger, S. J. and Sclater, J. G., 1985, The North China Basin: an example of a Cenozoic rifted intraplate basin. *Tectonics*, 4, p. 153-169.

Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995. Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basins, East Sea (Sea of Japan). *GSA Bulletin*, 107(1), p. 83-97.