

남해 대륙붕 도미분지의 탄성파층서와 구조운동

Seismic Stratigraphy and Structural Evolution in Domi Basin, South Sea of Korea

김은정 (Eun-Jung Kim)¹ · 오진용 (Jin-Yong Oh)^{2*} · 장태우 (Tae-Woo Chang)³ ·
윤혜수 (Hye-Su Yun)⁴ · 유인창 (In-Chang Yu)³

요약 : 도미분지에 위치한 일본측 후쿠에-1공의 생층서를 바탕으로 탄성파탐사자료를 해석하여 제주분지, 일본 북서 큐슈지역의 제3기분지들과 대비하였다. 도미분지를 포함하는 동중국해 분지의 구조발달은 후기 백악기말~제3기 팔레오세 열개작용에 의해 형성되기 시작하여 팔레오세~올리고세에 두꺼운 열개동시성 퇴적층의 형성으로 분지확장이 완료되었고, 마이오세에는 횡신장 및 침강작용으로 후열개 퇴적작용이 일어났다고 알려졌다. 도미분지에 대한 기존 탄성파 층서해석에서는 마이오세 층의 분포가 우세하였다. 그러나 연구 결과 분지퇴적물은 두꺼운 (>3 km) 고제3기층이며, 마이오세 퇴적층은 비교적 얇은 수십m~수백m 두께의 범위를 보이며 남서쪽으로 갈수록 두꺼워져 제주분지까지 이어진다. 제주분지 및 일본 북서 큐슈지역의 제3기분지의 최하부층에서도 올리고세~에오세 시대지시종이 확인되고 올리고세~에오세 열개동시성 퇴적층 및 마이오세 후열개 퇴적층을 포함하고 있어 본 연구의 층서해석과 잘 부합한다.

주요어 : 도미분지, 후쿠에분지, 마이오세, 탄성파탐사자료 해석

Abstract : Seismic interpretation was carried out based on biostratigraphy of Fukue-1 well in Japan side of the Domi Basin and compared with the Cheju Basin and Tertiary basins in north-west Kyushu. East China Sea Basin including Domi Basin began to develop in the latest Cretaceous~Paleocene related to rifting. The basin was filled with a thick package of syn-rift sediments during Paleocene to Oligocene and was under post-rift stage effected by transtension during Miocene. Previous studies suggest that the basin had been mostly filled with Miocene formation (>3 km), but the Miocene formation is interpreted to be comparatively thin in this study. The thickness of the Miocene formation varies from tens of meters to hundreds of meters and become thicker to the south-west of Cheju Basin. The index taxa of the Oligocene~Eocene nannofossils and dinoflagellates found in the Cheju Basin and Tertiary basins in north-west Kyushu also corroborate the result of this study.

Keywords : Domi Basin, Fukue Basin, Miocene, Seismic Interpretation

서론

한국 남해대륙붕은 동중국해의 북동부에 위치하고 있는 신생대 퇴적분지로 동서로는 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi Uplift), 체민 융기대(Zhemini Uplift), 남쪽으로는 중국측 시후 함몰대(Xihu Depression)와 접하고 있으며 대륙붕 제IV 광구, V광구, VI-2광구 및 한일공동개발광구(JDZ: Korea-Japan Joint Development Zone)의 서부를 포함한다(Fig. 1). 제주분지(Cheju Basin)는 동중국해대륙붕분지(East China Sea Shelf Basin; Zhou *et al.*, 1989)의 북동부에 위치하고 있으며 31°-31.5°N 사이의 음향기반암 부분을 남쪽경계로 한다. 도미분지(Domi Basin)는 제주분지의 북동부에 위치하고 있으며 기반암 고지대(basement high)에 의해 제주분지와 분

리된다. 한국측 도미분지(VI-2광구지역)는 분지의 북부 가장 자리에 해당하며 남동부로 갈수록 깊어져 일본측 해역으로 이어진다.

도미분지는 일본에서는 후쿠에분지(Fukue Basin; Frazier *et al.*, 1976)로 알려져 있으며 동제주분지, 도미-소라분지, 도미소분지(오진용 외, 1997)로도 불린다. 도미분지는 제주분지 및 일본 북서 큐슈지역에 발달하고 있는 고제3기분지와 동해의 울릉분지, 한반도 육상 동남부를 포함하는 신제3기분지들의 경계에 위치하고 있어 한반도 인근지역의 분지형성 및 발달사를 이해하기 위해 중요한 지역이다. 도미분지의 최하부 지층의 연령에 대해 일본측(Itoh and Nagasaki, 1995; Itoh, 2000)에서는 전기 에오세 또는 팔레오세, 한국측(HADSON, 1989; 한국자원연구소, 1997; 한국석유개발공사,

¹한국석유공사 석유개발연구원(Petroleum Technology Institute, Korea National Oil Corporation, Anyang 431-711, Korea)

²충남대학교 기초과학연구소(Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

*Corresponding author: Tel: +82-42-821-7564, E-mail: 2004class@hanmail.net

³경북대학교 지질학과(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

⁴충남대학교 지질환경과학과(Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

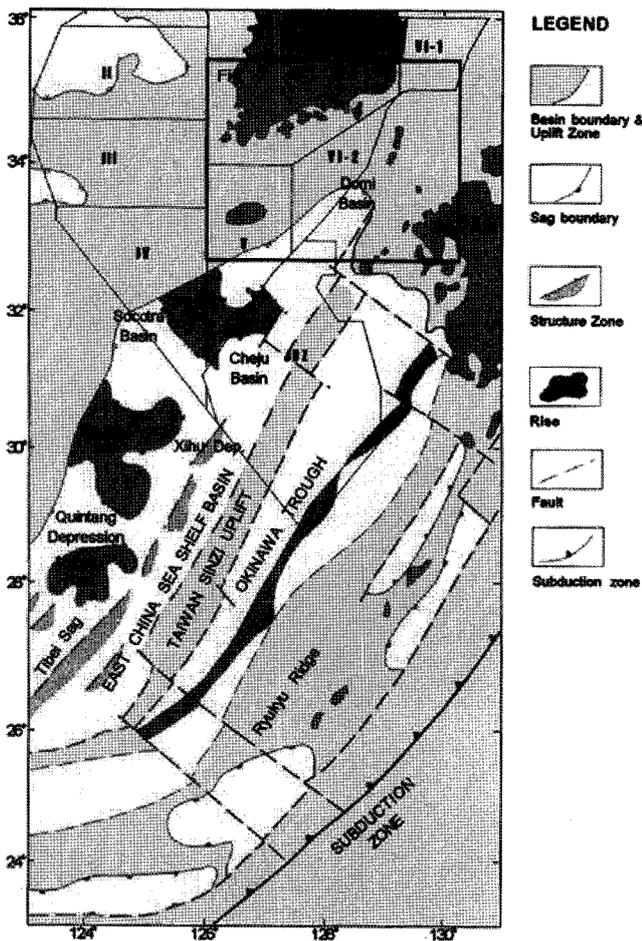


Fig. 1. Basin physiography of the East China Sea Basin (Modified from Zhou *et al.*, 1989). Inset box indicates the location of Fig. 3.

1997, 1998)에서는 올리고세 또는 전기 마이오세로 해석하고 있으며(Fig. 2) 이러한 시대불일치는 시추공들의 생층서 분석 결과에 따른 것으로 금번 연구에서는 일본측의 시추공자료와 인근지역의 층서해석을 바탕으로 탄성파탐사자료를 해석하고 도미분지의 발달사를 규명하고자 한다.

광역지질

한반도 제3기분지

한반도 동남부지역에 발달하는 제3기 퇴적분지들은 백악기 경상누층군을 기반으로하여 형성되어 분지 충전물인 고제 3기의 화산암류와 퇴적암류가 경상누층군을 부정합적으로 덮고 있다. 경상분지의 경상누층군은 쇠설성 퇴적물로 구성된 신동층군과 화산성쇄설암, 화산암 등을 포함하는 하양층군, 유천층군으로 구성되어 있으며 불국사화강암에 의해 관입된다. 경상분지의 동부에는 북북동-남남서 주향의 단층들이 잘 발달되어 있으며 북부에는 북북동-남남서 주향의 단층들이 서북서-동남동 주향의 단층들을 절단하고 있다(Choi and Park, 1985).

마이오세 육상 제3기분지 내에는 주로 육성 쇠설성퇴적암류와 화산암류로 구성되는 장기층군 및 범곡리층군으로 충전되어 있으며 이는 상부의 해성층인 중기 마이오세 연일층군과 부정합 관계로 접하고 있다(윤선, 1988). 한반도에서 제3기 육상 퇴적분지들은 대부분 동해안을 따라 발달하고 있다. 따라서 제3기 퇴적분지들의 형성기구는 호후방분지인 동해의 형성과 밀접히 연관될 수 밖에 없으며 올리고세 후기 내지 마이오세 초기에 한반도로부터 일본을 분리시킨 북서-남동 방향의 신장성 지구조운동의 산물로 간주되고 있다

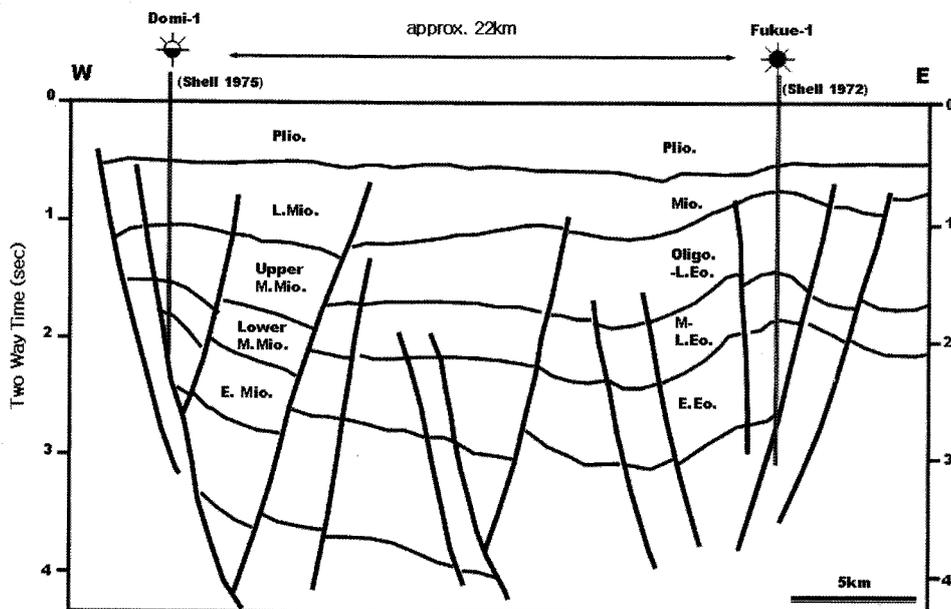


Fig. 2. Well correlation of Domi-1 and Fukue-1 with crossing seismic profiles (Modified from PEDCO, 1998). Geoseismic section of A-A' line of Fig. 3.

(Chough and Barg, 1987; 최동림 외, 1994; 장태우 외, 2007). 한편, 제3기분지의 형성을 양산단층 운동과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각하는 견해도 있다(김인수, 1992; 손문과 김인수, 1996; 손문, 1998). 즉, 장기층군을 포함하는 전기 마이오세 퇴적분지는 북북동-남남서 주향의 양산단층의 우수향이동에 의한 인렬분지로 발달하였고, 연일층군의 중기 마이오세 퇴적분지는 양산단층의 좌수향이동 시의 북동-남서 신장응력에 의해 형성된 것으로 해석하고 있다.

북서 큐슈 제3기분지

일본 북서부 큐슈지역에는 한반도 양산단층계와 유사한 주향의 쓰시마 단층계에 의해 형성된 제3기 퇴적분지들이 발달하고 있으며 석탄층을 포함하는 에오세~올리고세층들이 최하부에 퇴적되어 있다(Karakida *et al.*, 1992). 북서 큐슈 인근 해양에도 제3기 퇴적분지들이 발달하고 있으며 고토-나다분지(Goto-nada Basin), 아마쿠사-나다분지(Amakusa-nada Basin)의 시추공(MITI Goto-nada, Amakusa-oki 1X) 생층서 분석결과 최하부층의 시대가 후기 에오세~전기 올리고세에 해당한다(Itoh *et al.*, 1999; Itawa and Kameo, 2001). 또한 후기 마이오세의 필리핀해판의 북쪽으로는 섭입으로 인한 대규모 용기작용으로 마이오세 층이 결층으로 나타나며 에오세~올리고세 퇴적층을 플라이오세 층들이 부정합적으로 덮고 있다(Itoh *et al.*, 1999). 소라-1공에서도 기반암 상부에 석탄층을 협재한 상향조립질의 두꺼운 충적선상지(alluvial fan) 퇴적물이 존재하며(KIER, 1982), Itoh and Nagasaki(1995)는 이 층을 일본 북서큐슈지역에 나타나는 에오세 아가사키 층군(Akasaki Group; Karakida *et al.*, 1992)과 대비되는 것으로 해석하였다.

제주/도미분지

제주분지는 백악기~팔레오세에 류큐 호상열도의 섭입과 관련하여 형성된 남서-북동주향의 열개분지로(Meng and Chou, 1976; Li, 1984) 동중국해 분지의 북쪽 소분지로 알려져 있다. 주로 동중국해분지의 시후 트러프(Xihu Trough)의 지역적인 구조운동의 영향을 받았으며(Yin and Liu, 1990) 에오세 말의 압축운동으로 대규모 용기작용이 일어났다(Jolivet *et al.*, 1989). 올리고세에 들어서면서 태평양판의 섭입이 지속되면서 발생한 신장력에 의해 새로운 확장기에 이르렀으며(Jolivet *et al.*, 1989), 후기 마이오세에는 롱징운동으로 발생한 횡압력에 의해 제주분지 북동쪽 쓰시마 지역이 용기되었다(Yin and Liu, 1990).

광역적으로 도미분지는 제주분지의 북부 소분지 중 하나로 분류되며 도미분지의 발달사를 규명하기 위해서는 제주분지의 연장선상에서 연구되어야 한다. 그러나 기존 연구결과에서 분지발달 및 진화단계에서 제주분지와 차이를 보이고 있으며 이는 실제로 분지 형성시기가 다르기 때문일 수도 있지만 도미분지의 시대결정 오류에 의한 것일 수도 있다(한국자원연구소, 1997). 특히 제주분지 내 옥돔-1, 거북-1공, JDZ

V-1, JDZ V-3의 석회질 초미화석, 외편모조류, 화분포자에 근거한 생층서 분석 시 하부층에 올리고세, 에오세 종들이 발견되었고(윤혜수 외, 1999, 한국석유공사, 2005), 도미분지 북동부에 위치한 울릉분지 내 돌고래 III-1, III-2 시추공의 마이오세 지층으로부터 재이동(reworked)된 에오세~올리고세 외편모조류(dinoflagellates)들이 보고되었다(Yun *et al.*, 2007).

연구 자료

시추공자료

한국측 도미-1공, 소라-1공의 시추공분석자료(물리검층, 코어분석, 생층서분석결과) 및 제주분지, 일본측 후쿠에분지 및 해양 제3기 분지들의 시추공에 의한 층서자료를 참고하였다.

탄성파탐사자료

한국 대륙붕 지역은 1970-1971년 Shell사에 의해 VI-1, VI-2광구에 걸쳐 5,330 Lkm의 광역적인 탄성파탐사자료가 취득되었으며 도미분지가 위치한 남해대륙붕 VI-2광구에서는 한국석유공사에 의해 총 7,567 Lkm(1990, 2,509 Lkm; 1992, 839 Lkm; 1997, 2,320 Lkm; 2006, 1,899 Lkm)의 2D 탄성파탐사자료가 취득되었고 자료의 일부가 1998년에 전산 재처리 되었다. 북동-남서 주향의 축선과 북서-남동주향의 축선이 교차하고 있으며 축선간격은 약 2~4 km 범위이다(Fig. 3). 본 연구에서는 주로 1990, 1997, 2006년도 탐사자료를 이용하였다.

시추공자료 해석

도미분지 내 층서를 정립하기 위해 기존의 도미-1공, 소라-1공의 암편시료 분석자료 및 물리검층해석결과(HADSON, 1989; 박관순 등, 1993; 한국자원연구소, 1997)를 일본측의 시추공자료와 비교하였다. 한국측은 도미-1공, 소라-1공에 대해 석회질 미화석 및 화분포자화석의 산출에 근거한 생층서 분석을 실시하였고, 일본측에서는 후쿠에-1공, 츠쿠-1공 등 6개 공에 대하여 부유성 유공충, 석회질 나노화석을 이용한 생층서를 분석하고 인근 북서 큐슈지역의 육상에 발달하는 고제3기층과 대비하였다.

도미-1공의 314 m~449 m 구간(소라-1공: 151 m~440 m)은 천해환경의 실트질 이암, 실트암, 실트질 사암으로 구성되어 있고 고생물 분석 시 플라이스토세~플라이오세를 지시하는 부유성 유공충이 나타나며 물리검층자료에서 449 m 구간에 뚜렷한 부정합면이 인지된다. 449 m~1,018 m 구간(소라-1공: 440 m~456 m)에서는 육성환경으로 추정되는 녹회색 이암, 담회색 사암으로 주로 구성되어 있으며 470 m~860 m 구간에 석탄층이 협재되어 있다. 물리검층자료에서 1,018 m 구간에 뚜렷한 부정합면이 인지되며 고생물 분석 시 후기 마이오세로 해석하였다(HADSON, 1989). 본 구간에 대해 일본측은 마이오세(전기 마이오세 말~후기 마이오세)로 해석하였으며 북서 큐슈지역의 마이오세 노지마 층군(Nojima Group)과 대

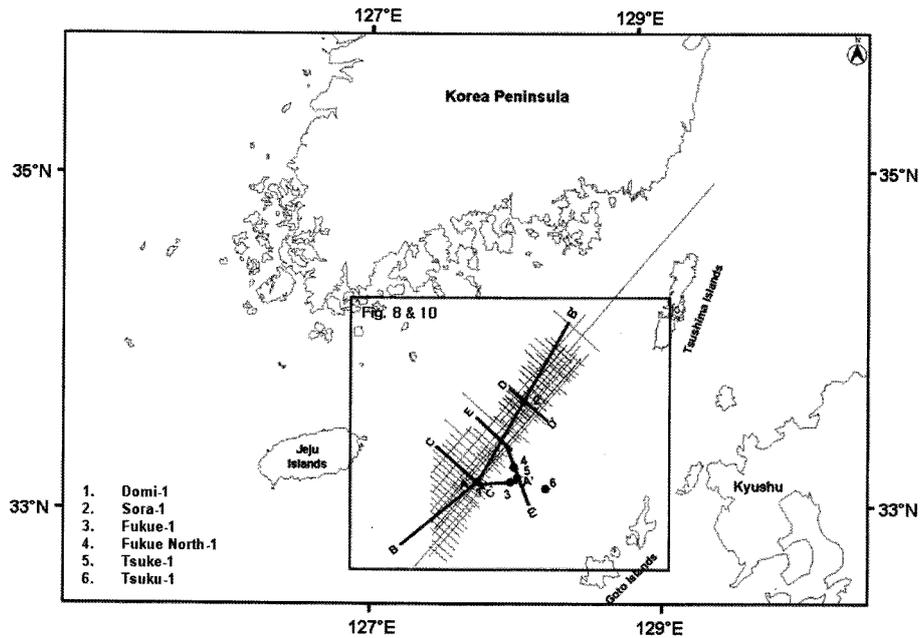


Fig. 3. Distribution of seismic lines of the study area. Small box indicates the location of Figs. 8 and 10. Bold lines indicate the line locations of Fig. 4~Fig. 9. Small dots indicate wells.

비하였다(SNSK, 1980; Itoh and Nagasaki 1995). 1,018 m~3,201 m 구간(소라-1공: 456 m~3,167 m)은 상부에 하성환경을 지시하는 상부세립질 쇄설물을 시작으로 그 하부에 석탄층을 많이 협재한 이암, 사암(도미-1공에서 1,090~1,210 m, 1,600 m~2,000 m 구간)이 나타나고 하부로 갈수록 역암, 이암, 실트암 및 사암이 교호한다. 물리검층자료에서 구간 내 뚜렷한 부정합면이 발견되지 않고 생층서 분석결과 시대지시종이 발견되지 않아 세부층서를 구분하기 어렵다. 최하부층에 대한 시기를 HADSON사(1989)는 올리고세 또는 이전, 한국자원연구소(1997)는 전기 마이오세로 보았는 데 이는 정확한 시대지시종(index taxa)에 근거하지 않고 보존에 약한 석회질 미화석 및 화분포자화석의 산출에 근거하여 해석되었기 때문에 시대결정에 대한 신뢰성이 낮은 것으로 판단된다. 또한 인근 제주분지에 위치하는 옥둑-1공, 거북-1공, JDZ V-1, JDZ V-3공의 하부 구간에서 올리고세~에오세 석회질 초미화석, 외편모조류를 포함하는 해성층이 발견되어(윤혜수 외, 1999; 한국석유공사, 2005) 도미분지 최하부층을 올리고세 또는 전기 마이오세로 본 기존연구결과와 부합되지 않는다.

일본측에서는 최하부층의 시기를 팔레오세~에오세로 해석하고 북서 큐슈지역의 고제3기 층과 대비하였다. 최근 후쿠에-1공의 2,193~2,215 m 구간과 츠쿠-1공의 2,599~2,647 m 구간에 나타난 조립 현무암에 대해 K-Ar 전암 분석을 실시하였으며 각각 39 Ma, 34.6±1.5 Ma로 후기 에오세로 분석되어(JGI, 2005) 생층서 분석결과에 대한 신뢰도를 높여준다. 또한 인근에 위치한 북서 큐슈지역의 해양분지(Goto-nada Basin, Amakusa-nada Basin)의 시추공분석결과에서도 하부에 두꺼운 고제3기층의 존재를 확인하였고(Itoh et al., 1999), 소

라-1공의 최하부에 일본의 에오세 아가사키 층군(Akasaki Group)에 대비되는 층적선상지 역암이(KIER, 1982; Itoh and Nagasaki, 1995) 존재한다. 최근 해성 외편모조류에 의한 생층서 연구에서 도미-1공에서는 1,040~2,270 m 구간, 소라-1공에서는 850~880 m 구간에서 올리고세~에오세 시대지시종을 발견하였으며(변현숙, personal comm.) 이는 후쿠에-1공의 생층서 분석결과와 부합한다. 따라서 본 연구에서는 도미-1공, 소라-1공 및 인근지역 시추공분석결과를 바탕으로 도미-1공의 314 m~449 m 구간(소라-1공: 151 m~440 m)을 플라이오세~플라이스토세, 449 m~1,018 m 구간(소라-1공: 440 m~456 m)을 마이오세, 1,018 m~3,201 m 구간(소라-1공: 456 m~3,167 m)을 팔레오세~올리고세로 해석하였다.

탄성과 탐사자료 해석

기존연구에서 한국측은 최하부층의 연령을 올리고세(HADSON, 1989) 또는 전기 마이오세(박관순 등, 1993; 한국자원연구소, 1997)로 해석하고 도미분지를 신제3기분지로 해석하였으나 일본측은 최하부층을 팔레오세~에오세(>3,300 m) 층으로 해석하여 상부에 1,500 m 이상의 두꺼운 후기 에오세, 올리고세 층이 존재하고 있고 상부의 마이오세 층은 600~1,000 m 정도의 두께로 분포하는 것으로 해석하였다(SNSK, 1980). 따라서 본 연구에서는 한국측과 일본측의 해석에서 상이한 결과를 보이는 마이오세동안의 도미분지의 분지발달사를 해석하기 위해 마이오세 상부, 마이오세 하부, 기반암 상부 반사면을 해석하였다. 도미-1공 및 후쿠에-1공을 지나는 탄성과 단면을 해석 기준면으로 하였으며 일본측의 후쿠에-1공의 층서를 반영하였다(Fig. 4). 마이오세 상부,

하부 경계면은 시추공분석결과에 따라 후쿠에-1공에서 420 m, 640 m 구간, 도미-1공의 경우 449 m, 1,018 m이며 시추공과 탄성파탐사자료의 대비를 위해 도미-1공, 소라-1공의 시간-심도곡선을 이용하였다.

기반암 상부 반사면

도미분지 내 기반암을 통과한 시추공은 없으며 여기에서 기반암 반사면이란 음향 기반암의 최상부 반사면을 지시한다. 동중국해 분지에서 기반암을 통과한 PZ-1공, KV-1공,

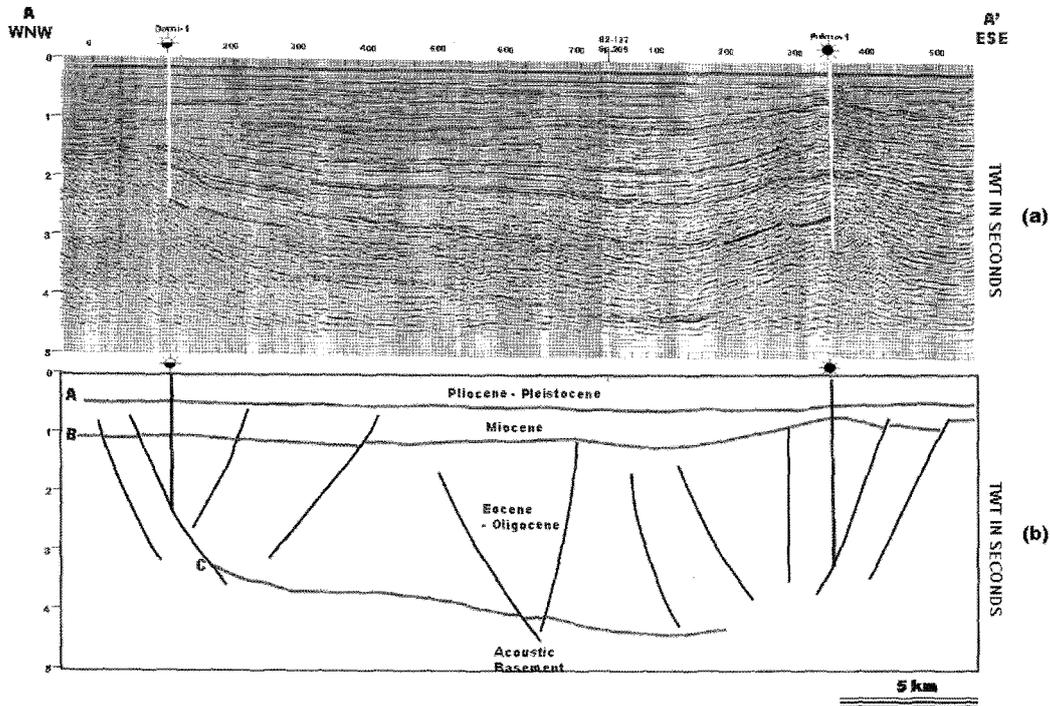


Fig. 4. Seismic and well tie. C: top of acoustic basement, B: bottom of Miocene, A: top of Miocene. See Fig. 3 for the location.

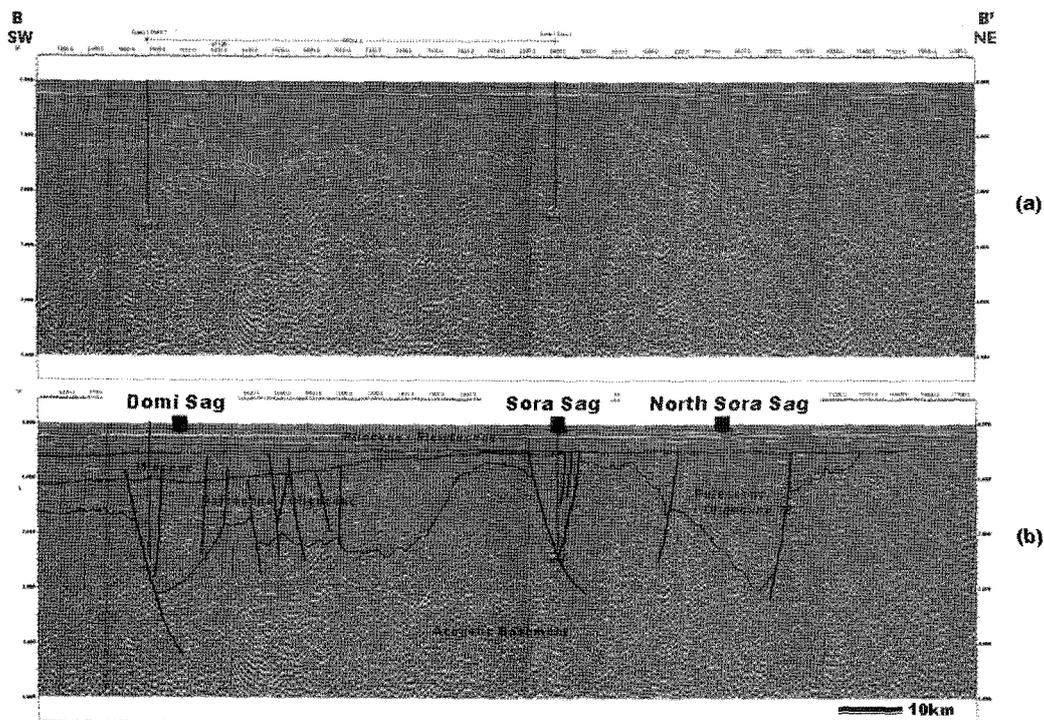


Fig. 5. A seismic profile crossing Domi-1 and Sora-1. (a) not interpreted profile, (b) interpreted profile. See Fig. 3 for the seismic line location. Domi Basin is divided into 3 sub-basins (Domi, Sora, North Sora) by intervening basement highs.

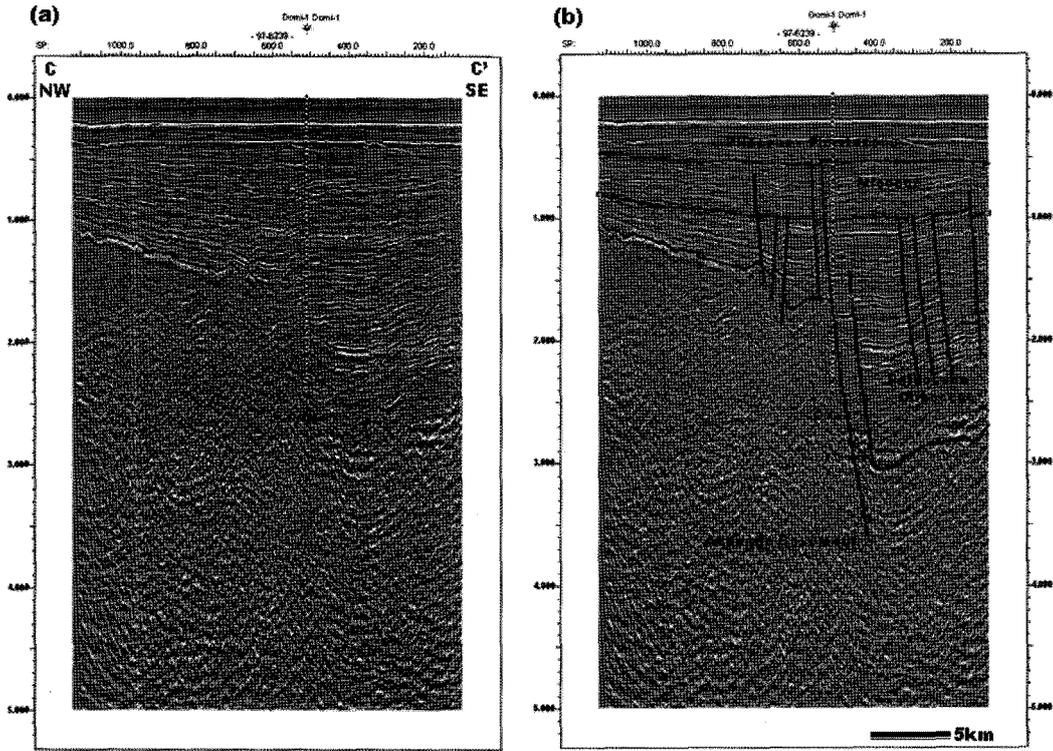


Fig. 6. A seismic profile crossing Domi-1. See Fig. 3 for the seismic line location.

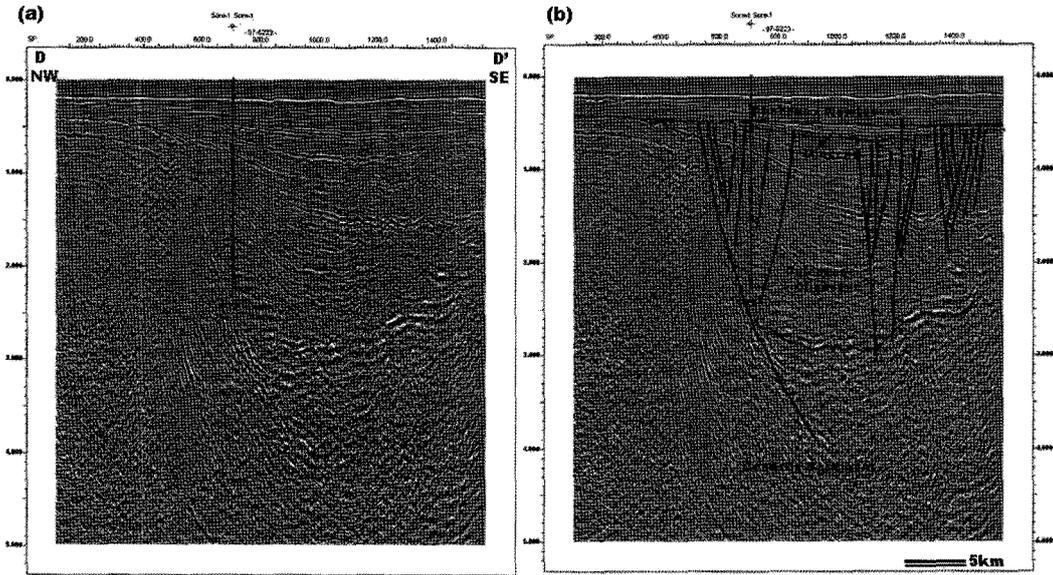


Fig. 7. A seismic profile crossing Sora-1. See Fig. 3 for the seismic line location.

JDZ V-1공, JDZ V-2공 등의 시추공자료 분석결과 화강암 및 시대미상의 변성암이 주요 기반암으로 화강암류의 절대연령 측정결과 백악기로 밝혀졌다(박영수 외, 1987, 1989; 봉필윤 외, 1993). 변성암류에 대한 시대결정은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았으나 원생대~중생대로 해석하고 있다(Zhou *et al.*, 1989). 도미분지에서 기반암은 대체로 남동쪽으로 갈수록 깊어지며 도미, 소라, 복소라 3개의 소분지로 분리된다(Fig. 5). 기반암의 반사면은 퇴적층이 얇게 분포하는

도미, 소라, 복소라 소분지의 경계가 되는 고지대에서는 뚜렷한 반사면을 보이나 퇴적층이 두껍게 발달하는 분지 중심부 지역에서는 반사계수가 낮아져 기반암의 인지가 어렵다(Figs. 6, 7).

마이오세 하부 반사면(고제3기와 마이오세 경계면)

기존 연구에서 마이오세 하부면은 북서 큐슈지역과의 층서 대비를 통해 전기 마이오세 말로 해석하였으나(Sakai *et al.*,

1990; Itoh and Nagasaki, 1995) 한국측(HADSON, 1988; 한국자원연구소, 1997)에서는 후기 마이오세로 해석하였다. 시추공에서의 왕복주시는 후쿠에-1공에서 0.9초, 도미-1공에서 1.1초에 해당하며(Fig. 4) 분지의 북서 가장자리에서는 하부층준과 경사부정합 관계를 보이고 있어 비교적 쉽게 인지가 되는 편이나 분지의 중심부로 갈수록 부정합에 준하는 정합관계를 보이고 있어 하부 층준과의 구별이 어렵다(Figs. 6, 7). 반사면은 비교적 뚜렷한 반사계수를 보여 연장성은 좋은 편이나 남동부로 갈수록 진폭이 일정하지 않고 제주분지로 이어지는 도미 소분지의 남동부 지역에서는 인지가 어렵다. 분지의 북서부에 위치한 북소라 소분지에는 시대결정을 할 수 있는 시추공이 없으며 기반암 고지대 및 곡면단층(listric fault)에 의해 도미 소분지, 소라 소분지와 분리되어 있어 마이오세하부면의 연장성을 확인할 수 없다.

마이오세 상부 반사면(마이오세와 플라이오세 경계면)

마이오세 상부층준 경계면은 일본측(Itoh and Nagasaki 1995, Itoh *et al.*, 1999; Itoh, 2001)과 한국측(한국자원연구소, 1997)의 연구결과가 일치한다. 마이오세 상부반사면에 대한 왕복주시는 후쿠에-1공에서 0.5초, 도미-1공에서 0.5초에 해당하며 분지 전반에 걸쳐 심도변화가 심하지 않다 (0.35~0.65초 범위). 대체로 반사면의 연속성이 양호하고 진폭도 비교적 일정하게 나타나지만 도미 소분지의 남서부 지역으로 갈수록 진폭의 변화가 심하게 나타나는 곳이 존재한다(Fig. 5). 소라 소분지, 북소라 소분지가 위치한 분지의 북동부 지역에서는 대규모 용기작용에 의해 마이오세 층이 대부분 삭박되어 매우 뚜렷한 경사부정합면으로 나타나며 하부층과 잘 구분된다. 그러나 남서방향으로 갈수록 침식정도가 약해져 도미 소분지에서는 분지의 가장자리를 제외하고는 평행부정합관계를 보이며 하부 층준과 잘 구분되지 않는다.

결과 및 토의

기존 연구에서는 도미분지 내 최하부층의 연령을 전기 마이오세~올리고세로 해석하고 마이오세동안 분지의 확장 및 열개동시기성(syn-rift) 퇴적층이 형성된 것으로 해석하여 한반도 동남부에 위치한 제3기분지의 형성과 관련하여 해석하였다(한국자원연구소, 1997; 한국석유개발공사, 1998). 그러나 일본측에서는 최하부 층준을 에오세로 해석하였고 대부분의 분지형성과 퇴적작용이 팔레오세~올리고세에 일어났으며 마이오세에는 분지형성이 거의 종결되어 최대 1,000 m (400~1,400 m) 두께의 후열개(post-rift) 퇴적층을 형성한 것으로 해석하였다(SNSK, 1980; Itoh and Nagasaki, 1995). 한국측의 기존연구는 도미-1, 소라-1공의 제한된 자료를 이용하여 정확한 시대지시종(index taxa)에 근거하지 않고 상대적으로 보존에 약한 석회질 미화석 및 화분포자화석의 산출에 주로 근거하여 해석되어 시대결정에 대한 신뢰성이 낮고 올리고세~에오세 해성층을 포함하는 제주분지의 옥돔-1,

거북-1공, JDZ V-1, JDZ V-3 시추공분석결과와도 부합되지 않는다. 일본측에서는 분지 중심부에 상대적으로 많은 시추공(후쿠에-1공 등 6공)을 이용하여 생층서분석 및 절대연령 분석을 실시하였고 층서분석 결과가 고제3기층을 포함하는 인근 북서 큐슈지역의 제3기분지들 및 제주분지의 해석결과와 부합한다. 따라서 본 연구에서는 일본측의 시추공자료의 층서를 기준으로 마이오세층을 해석하였으며 탄성파탐사자료 해석결과 역시 일본측의 해석결과와 잘 부합한다.

마이오세 이전 퇴적층

마이오세 이전에는 분지형성 과정에서 형성된 일련의 반지구대에 제한되어 퇴적작용이 일어났으며 등층후도에 따르면 두께는 최고 4 km에 달한다(Fig. 8a). 기반암 고지대에 의해 도미, 소라, 북소라 소분지로 나뉘어지며 도미, 소라 분지는 일본측 해역으로 이어지나 북소라 분지는 소라분지의 북동부에 고립적으로 나타난다. 퇴적물의 두께는 남동쪽으로 갈수록 두꺼워지며 일본측 해역에서 가장 두껍게 나타나는 양상을 보이는 데(Fig. 8a), 이는 이 시기의 퇴적중심지가 분지형성 시 발생한 곡면단층이 존재하는 남동부 지역에 있었음을 나타낸다. 도미, 소라 소분지의 마이오세 이전 퇴적층 내에는 북동-남서 주향의 곡면단층이 많이 나타나며 이는 마이오세 이전에는 주로 북서-남동 신장응력 하에서 분지의 확장이 이루어진 것으로 판단된다. 또한 마이오세 하부 층에서는 횡압력에 의한 습곡이 잘 관찰되며 이는 후피지아오 고지대(Hupijiao Rise; Fig. 1) 주변에 나타나는 습곡을 동반하는 올리고세 변형구조(Zhou *et al.*, 1989)와 연관된 것으로 해석된다.

마이오세 퇴적층

탄성파탐사자료 해석에 따른 마이오세 층준의 등층후도(Iaopach map) 작성결과 두께는 수십m에서 500 m에 달하며 이 시기에 도미 소분지와 소라 소분지는 연결되어 퇴적중심지가 남서부로 이동하면서 제주분지로 연장된다(Fig. 8b). 마이오세 상·하부경계면에 대해 일본측의 후쿠에-1공, 츠시마-1공을 지나는 탄성파탐사자료 해석결과(Itoh, 2001)와 비교해 본 결과 반사면의 왕복주시가 거의 일치하였다(Figs. 9, 10). 일본측에서는 북서 큐슈지역의 층서와 분지 내 6개의 시추공 자료와 대비하여 사세보 층군(Sasebo Group)과 노지마 층군(Nojima Group)의 경계에 해당하는 부분을 마이오세 하부경계면(전기 마이오세 말)으로, 플라이오세 해성층과 노지마 층군의 경계를 마이오세 상부경계면으로 보았으며 시추공을 지나는 탄성파탐사자료를 기준으로 연장 해석하였다(Itoh and Nagasaki, 1995; Itoh, 2001).

마이오세 층준을 절단하는 단층들은 북동-남서, 동-서 주향의 정단층이 우세하며(Fig. 10) 횡인장(transension)에 의한 주향이동운동을 지시하는 불꽃구조(negative flower structure)들이 나타난다(Fig. 9). 소라 소분지 및 북소라 소분지에서는 압축력으로 인한 분지경계 곡면단층 및 북동주향 정단층들의

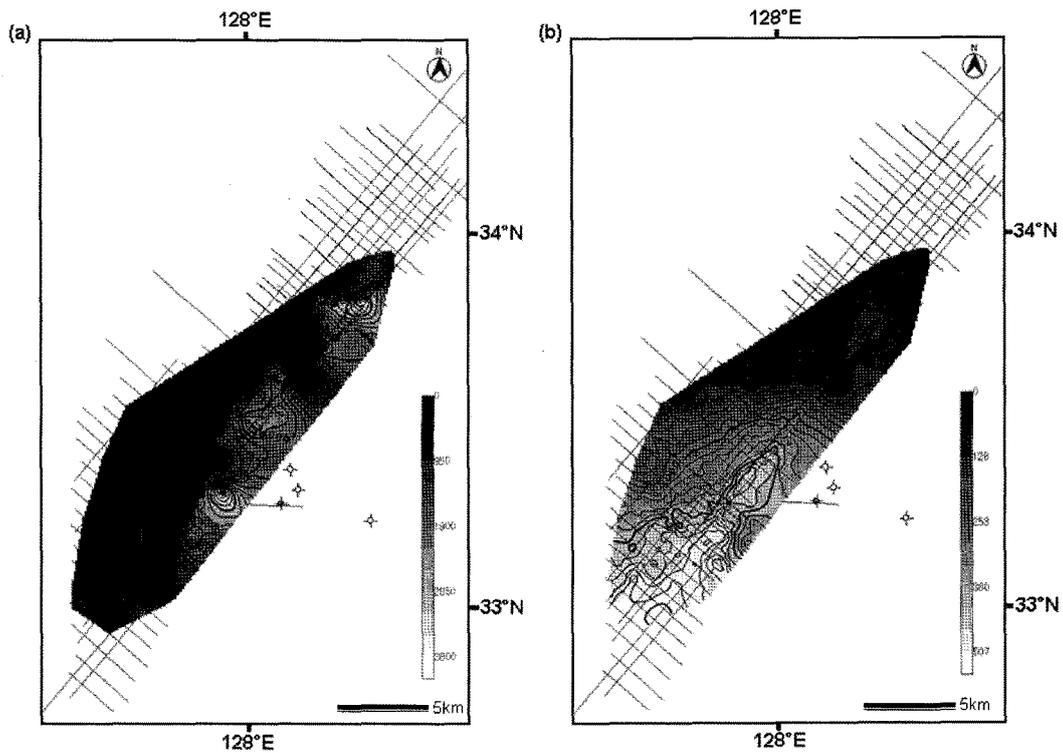


Fig. 8. Isopach map of Pre-Miocene (a) and Miocene (b). See Fig. 3 for the location. Contours are in meters with an interval of 25 m.

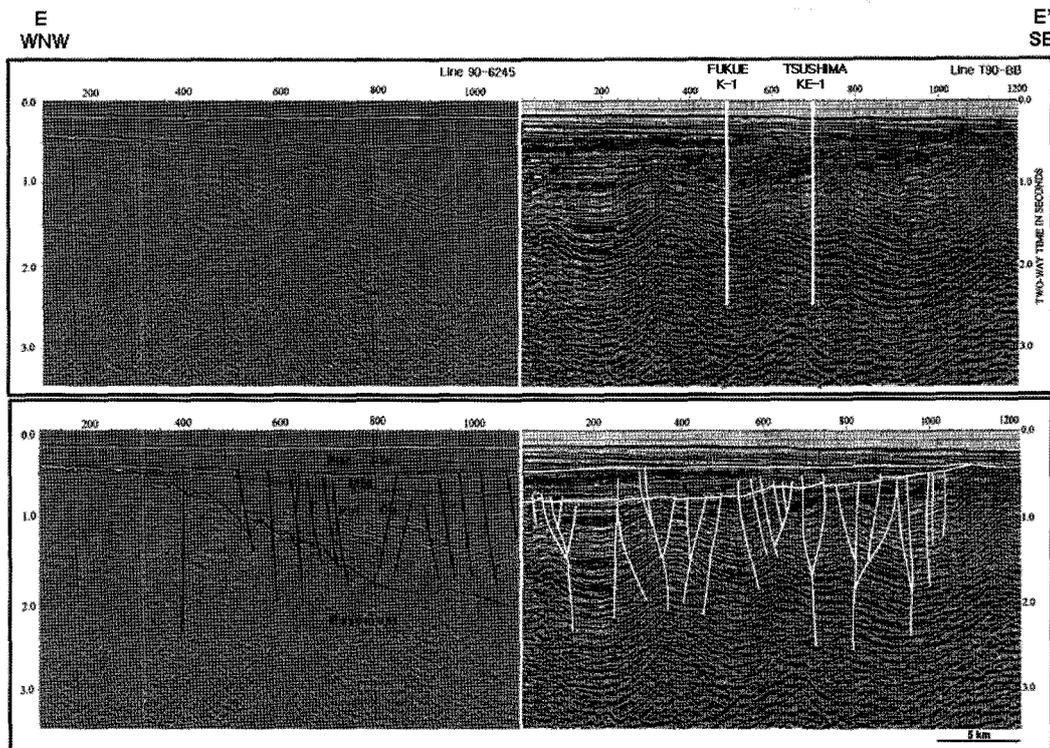


Fig. 9. Correlation of the interpreted horizons with Korean side (left) and Japan side (right). The seismic profile of Japan side is from Fig. 3 of Itoh (2001). See Fig. 3 for the line location.

역전작용(inversion)을 포함하는 구조변형의 흔적이 관찰되며 용기로 인한 침식작용으로 마이오세층이 침식되어 플라이오

세층과 올리고세층 경계는 뚜렷한 경사부정합 관계를 보인다 (Figs. 5, 7). 이러한 현상은 남서부로 갈수록 줄어들어 도미

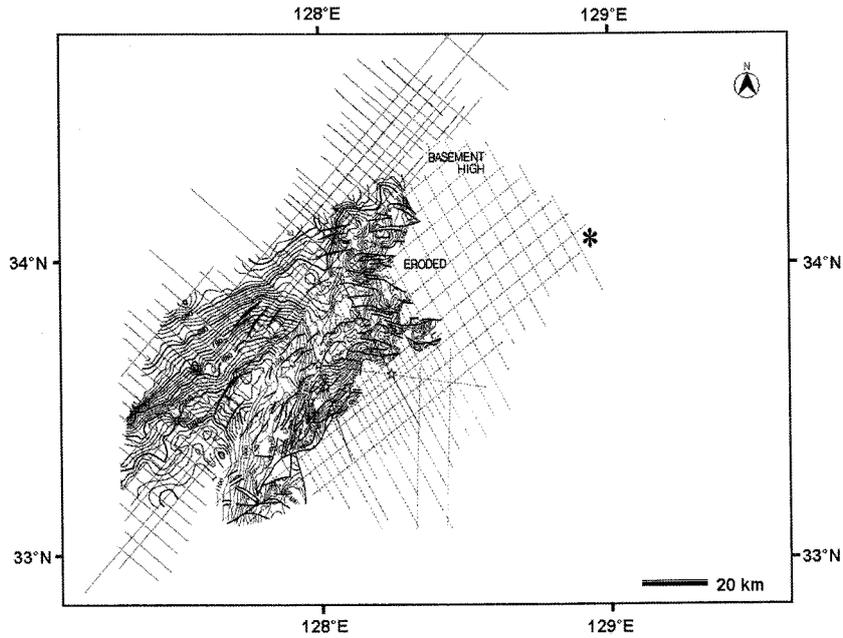


Fig. 10. Time structure map of bottom Miocene combined with the result of Itoh *et al.* (2001). Straight lines: Korean side, dashed lines: Japan side. Bold lines: faults. See Fig. 3 for the location. Contours are in msec with an interval of 20 msec.

소분지의 중심부에서는 구조변형의 증거가 관찰되지 않으며 분지의 경계부에서만 하부층준과 경사부정합 관계를 보이고 있다(Figs. 5, 6). 이와 같은 구조역전 현상은 후기 마이오세 말의 오키나와 트러프(Okinawa Trough)의 호후방 확장(back-arc spreading)의 영향으로 발생한 북서-남동 방향의 압축작용(Yin and Liu, 1990)과 관련된 것으로 판단된다. 또한 북동부로 갈수록 마이오세 층준의 두께가 얇아지고(Fig. 8b) 구조변형정도가 심해지는 것(Fig. 5)으로 보아 북동쪽으로 갈수록 압축작용에 따른 융기 및 침식작용이 더 활발히 일어난 것으로 판단된다. 북소라 소분지는 기반암 고지대에 의해 도미, 소라 소분지와 분리되어 있으며(Fig. 5) 시추자료가 없어 마이오세 층의 존재여부를 확인할 수 없다. 그러나 북쪽으로 갈수록 마이오세 층준의 두께가 얇아지고(Fig. 8b), 인근 북서 큐슈 해양분지에서 후기 마이오세 말 대규모 융기작용에 의해 마이오세 층준이 삭박되어 나타나는 점(Itoh *et al.*, 1999)을 감안할 때 마이오세 층준이 삭박되었을 가능성이 존재한다.

도미분지의 발달사

후기 백악기말~팔레오세에 태평양판의 북북서 방향으로의 섭입으로 북동-남서 방향의 장력에 의한 단층함몰작용이 있었으며(Zhou *et al.*, 1989) 이로 인해 도미분지 내 지구 또는 반지구가 형성되었고 올리고세 말까지 분지확장이 지속된 것으로 판단된다. 탄성파탐사자료 해석결과에 따르면 분지형성 및 열개동시기성 퇴적작용은 마이오세 이전에 완료된 것으로 판단되며(Fig. 8), 탄성파 단면상에서 마이오세층 하부에서만 습곡 및 기 발달 구조의 역전현상이 관찰되고 마이오세 층준은 이러한 영향을 받지 않은 것으로 보아 마이오세

이전에 압축구조운동이 한번 이상 있었음을 알 수 있다. 전기 마이오세 이후 분지는 광역적인 침강단계에 접어들었고 북서-남동방향의 신장에 의해 북동-남서 주향의 일련의 정단층계가 발달하였으며 이로 인해 분지의 확장이 이루어졌다(Figs. 9, 10). 후기 마이오세에 분지의 북동부에 위치한 소라, 북소라 소분지에서는 구조변형 및 융기작용이 일어나 침식작용이 활발히 일어났으며 도미 소분지에서는 이러한 구조운동의 영향을 받지 않은 것으로 보인다. 플라이오세로 접어들면서 도미분지는 광역적인 해침작용을 받아 내대륙붕(inner shelf) 환경으로 변이되었다(한국석유개발공사, 1998).

결 론

도미분지는 기존 연구에서 분지충진물의 연령을 전기 마이오세 또는 올리고세로 해석하여 마이오세에 열개동시기성 퇴적층이 활발히 퇴적된 신제3기분지로 해석되어 한반도 제3기분지와 대비하였으나 본 연구에 따르면 최하부층이 에오세 또는 팔레오세에 해당하고 에오세~올리고세 동안 열개동시기성 퇴적작용이 지속된 고제3기분지로 해석된다. 마이오세에는 열개작용에 의한 분지 확장이 대부분 종결되었고 오키나와 트러프의 후열도 확장과 관련한 횡신장 및 광역적인 침강작용의 영향을 받았다. 마이오세 층은 고제3기 퇴적층 상부에 부정합적으로 수십m에서 최고 600 m 두께로 퇴적되었으며 남서부로 갈수록 두꺼워져 제주분지로 연장된다.

사 사

이 연구는 한국석유공사 2008년 연구과제 “대륙붕 6-2광구

의 종합 층서연구” 사업 결과의 일부이며, 자료를 제공해 준 한국석유공사에 감사드립니다.

참고문헌

- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산 단층계의 주향이동. 지질학회지, 28, 84-109.
- 박관순, 박근필, 신창수, 조철현, 봉필윤, 이호영, 권영인, 오재호, 박영훈, 손진담, 정태진, 류병재, 손병국, 이영주, 김학주, 1993, 도미분지의 석유자원 평가 연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-92-3A-1, 197p.
- 박영수, 공영세, 최계림, 김승우, 1987, 대륙붕 한일공동개발구역 제 5소구 시추공 지질자료 해석연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-87-24-1, 1-34.
- 박영수, 공영세, 최계림, 김승우, 1989, 대륙붕 한일공동개발구역 제 7소구 시추공 지질자료 해석연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-89-3A-1, 7-45.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달. 부산대학교 박사 논문, 233p.
- 손문, 김인수, 1996, 남한 제3기 분지 지역에 대한 고자기 연구: 포항분지 중부의 현무암질암. 대한환경지질학회지, 29, 369-380.
- 봉필윤, 이호영, 권영인, 손진담 (1), 오재호, 박영훈, 손진담, 정태진, 류병재, 손병국, 이영주, 김학주, 황인걸 (2), 박관순, 박근필, 신창수, 조철현 (3), 1993, 소코트라 분지의 석유자원평가 연구. 한국자원연구소 연구보고서, KR-95(C)-24, 1-182.
- 오진용, 박관순, 박근필, 1997, 한국 대륙주변부의 퇴적분지 명칭. 지질학회지, 3, 148-159.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 26p.
- 윤혜수, 이성숙, 이상현, 김재호, 변현숙, 김기현, 박동배, 1999, 제주분지 거북-1공과 옥돔-1공의 생층서 및 고환경. 한국고생물학회지, 43-94.
- 장태우, 정재혁, 장천중, 2007, 한반도 동남부 제3기 어일분지 및 와읍분지의 지구조 운동. 지질공학, 17, 27-40.
- 최동림, 오재경, Mikio SATOH, 1994, 동해 울릉분지 남부해역의 신생대 지질구조 및 지구조 진화. 석유지질학회지, 2, 59-70.
- 한국석유개발공사(PEDCO), 1997, 국내 대륙붕 종합 기술 평가 보고서 (동중국해 분지 I).
- 한국석유개발공사(PEDCO), 1998, 국내 대륙붕 도미소분지 탄화수소 부존 유망성 평가보고서, 124p.
- 한국석유공사, 2005, 한일공동광구 생층서 연구 보고서, 111p.
- 한국자원연구소, 1997, 국내 대륙붕 종합 기술 평가 보고서. 한국 석유개발공사 용역보고서, 420p.
- Choi, H.-I. and Park, K.-S., 1985, Cretaceous/Neogene Stratigraphic Transition and Post-gyeongsang Tectonic Evolution Along and Off the Southeast Coast, Korea. *Journal of The Geological Society of Korea*, 21, 281-296.
- Chough, S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- 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 Memoir*, 25, 268-275.
- HADSON, 1989, Well Domi-1 Offshore Korea Stratigraphy and Maturity of the interval 314-3,201m, 17p
- Iwata, T. and Kameo, K., 2001, Sequence stratigraphy and sedimentary processes of coal-bearing sedimentary basins in northwest Kyushu. *Journal of the Japanese Association form Petroleum Technology*, 66, 278-291.
- Itoh, Y. and Nagasaki, Y., 1995, Post-Cretaceous structural evolution of offshore basins to the west of Kyushu. In: Chang, K.H., Park, S.O.(Eds.), *Environmental and Tectonic History of East and South Asia*. Kyungpook National University, Taegu, 203-217.
- Itoh, Y., Matsuoka, K. and Takemura, K., 1999, Palcogene and Plio-Pleistocene basin formation around northwestern Kyushu, Japan. *The Island Arc* 8, 56-65.
- Itoh, Y., 2000, Late Cenozoic tectonics around the southern part of the Japan Sea and Kyushu. *Journal of the Japanese Association form Petroleum Technology*, 65, 48-57.
- Itoh, Y., 2001, A Miocene pull-apart deformation zone at the western margin of the Japan Sea back-arc basin: implications for the back-arc opening model. *Tectonophysics*, 334, 235-244.
- JGI, Inc., 2005, Regional G&G Study in Joint Development Zone Korea-Japan Continental Shelf, 97p.
- Jolivet, L., Huchon, L. and Claude, R., 1989, Tectonic setting of Western Pacific marginal basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- Karakida Y., Hayasaka S., and Hase Y., 1992, Regional Geology of Japan: Part 9 Kyushu, 371, Kyoritsu Shuppan Co., Tokyo.
- KIER(Korea Institute of Energy and Resources), 1982, Petroleum Resources Potential in Continental Shelf of Korea, 342p.
- Li, D., 1984, Geologic evolution of petroliferous basins on continental shelf of China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68, 993-1003.
- Meng, W.J. and Chou, J.T., 1976, Petoliferous Tiwan basins in framework of Western Pacific Ocean. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 25, 256-260.
- Sakai, H., Nishi, H. and Miyachi, M., 1990, Geologic age of the unconformity between the Sasebo and Nojima Groups, northwest Kyushu and its tectonic significances. *Journal of the Japanese Association form Petroleum Technology*, 96, 327-330.
- SNSK(Shin Nishi-Nihon Oil Development Co.), 1980, Geological Evaluation of Hydrocarbon Potential of the SNSK Concessions, Offshore Japan.
- Yin, P.L. and Liu, S.S., 1990, Characteristics and Hydrocarbon Exploration of the East China Sea, Proceeding of International Symposium on Tectonic Evolution and Petroleum Potential of the East China Sea, Stanford University, 80-100.
- Yun, H. S., Li, S. S., Oh, J. Y., Byun, H. S., and Shin, K. S., 2007, Micropaleontological and seismic observations for early developmental stage of the southwestern Ulleng Basin, East Sea (Japan Sea). *Island Arc*, 16, 262-275.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the East China Sea. In: Zhu, X. (ed.) *Chinese sedimentary basins*, Elsevier, New York, U.S.A., 165-179.

(2008. 6. 26. 원고접수)

(2008. 9. 11. 수정본 채택)