

남중국해 남서부 지역에서의 지구조 분석 및 순차층서학적 연구

이응규* · 이기화**

*현대종합상사 석유가스팀 · **서울대학교 지구시스템과학과

요 약

남중국해 남서부 남콘손분지 지역에서 광역적인 2차원 탄성과 탐사자료를 활용하여 대상지역의 지구조적 분석을 시도하고, 구조적으로 매우 복잡한 지역에 대해 3차원 탄성과 탐사자료를 활용하여 탄성과층서 분석을 통한 퇴적층서, 퇴적환경 및 구조적 진화 과정을 규명하였다. 3차원 탄성과 자료 및 2개 시추정자료를 활용하여 제3기 마이오세층에 대한 8개의 연계층을 해석하였으며, 이에 대한 구조도, 층후도를 작성하였다. 또한 각 연계층 및 연계층 경계면에 대한 탄성과상(seismic facies) 분석을 시도하였다. 3차원 탄성과지역의 특성은 연계층내 해침환경하의 퇴적층에서 석탄층이 많이 나타나고 있다는 점과 연계층 경계부 위에 하도가 많이 발달되어 있다는 점이다. 마이오세 초기층은 석탄층 및 두꺼운 세일층으로 대변되는 습지환경의 육해성 점이지대 퇴적층이 주로 분포하다가, 중기 및 후기 마이오세에 이르면서 본격적인 침강 및 해침 작용으로 천해성 대륙붕 환경하의 쇄설성 퇴적물이 두껍게 쌓인 것으로 해석된다. 연계층에 대한 층후도 및 구조적 발달 상태로부터 퇴적물은 서에서 동으로 혹은 북서 방향에서 남동 방향으로 이동하였음을 알 수 있다.

주요어: 남중국해, 탄성과층서, 탄성과상, 연계층, 반사파강도

Lee, Eung Kyu and Lee, Kiehwa, 1999, Structure and Sequence Stratigraphy in the Southwestern Area of the South China Sea. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 2, n. 3, p. 179-190.

ABSTRACT: The overall structural framework was studied using the regional 2D seismic data, followed by the sequence stratigraphic study on the 3D seismic and well-log data in the margin of the South Con Son basin of the South China Sea. This research contributes to delineate depositional stratigraphy, depositional environment and geologic history in the 3D seismic area of highly complicated faulting. Eight Miocene sequences were indicated on the 3D seismic and well-log data, in which the structural maps of each sequence boundary and the isochron maps for the corresponding sequence were made. The seismic facies were analyzed for each sequence volume and sequence boundary surface. The 3D seismic area is characterized by coal beds deposited in the transgression environment (transgression systems tract) and channel distributions just above the sequence boundaries. During the Early Miocene, the coals and thick shales deposited in the mangrove swamp representing the lower coastal plain environment. During the Mid to Late Miocene, thick clastic sediments deposited in the coastal to shallow shelf by regional subsidence and marine transgression. The isochron maps and structural patterns indicate that the sediments were transported from west to east or from northwest to southeast.

Key words: South China Sea, seismic stratigraphy, seismic facies, sequence, reflection intensity

(Lee, Eungkyu, Oil & Gas Team, Hyundai Corporation, Seoul 110-793, Korea; Lee Kiehwa, Department of Earth System Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea. email: eklee@hyundaicorp.com)

1. 서 론

탄성과자료를 층서학적으로 분석하고, 범지구적

해수면 변화로 층서를 해석하는 탄성과층서(seismic stratigraphy)의 개념은(Payton, 1977) 부정합면에 의해서 경계지워지는 층서단위로 정의되는 연계층

(sequence)이 Sloss (1950)에 의해 제시된 이후, Mitchum · Vail (1977)에 의해 보다 세분화된 개념으로 발전되었다. 연계층 내에서 보다 작은 층서 단위로 퇴적계다발(systems tract)의 개념이 도입되었고(Brown · Fisher, 1977; Posamentier · Vail, 1988), 이후 탄성파자료 뿐만 아니라 물리검층, 코아, 노두등 자료를 모두 종합하여 층서 및 상분석(facies analysis)을 시도하는 순차층서학(sequence stratigraphy)의 개념으로 발전되었다(Van Wagoner *et al.*, 1990). 1970년대 말 이후 순차층서학적 연구는 멕시코만 해상지역에서 매우 활발하게 연구되었으며, 석유탐사에 적극 활용되었다. 최근에는 해양성분지 뿐만아니라 육성기원의 호소성분지 그리고 지역적인 지구조운동이 큰 영향을 끼치는 활성분지에서도 확대 적용되고 있다.

연구지역은 두꺼운 제3기 퇴적층으로 형성된 남중국해 남콘손분지의 가장자리에 위치한다(Fig. 1). 동 분지는 그동안 석유회사들과 몇몇 연구기관들에 의해 연구되어 왔으나 공개된 논문은 그리 많지 않은 편이다. 분지의 보다 정확한 구조운동사 및 퇴적사를 밝히려면 광범위한 지역에 걸친 종합적인 자료의 취득 및 해석이 필요할 것이다. 연구지역은 분지의 일부 지역에 불과하나, 2차원 및 3차원 탄성파자료 뿐만 아니라, 시추정에서 얻어진 물리검층, 고생물자료 및 코아자료를 최대한 활용한 순차층서적 연구를 통하여 분지의 보다 나은 이해를 도

모하였다. 특히, 3차원 탄성파자료를 중심으로 탄성파상 및 탄성파속성(seismic attributes) 분석 등 고해상도의 탄성파 층서 연구에 집중하였다. 분지 퇴적층의 대부분을 차지하는 마이오세 층에 대하여 8개의 연계층을 해석하고, 각 연계층에 대한 구조적 특징, 퇴적 환경등을 분석해 보았다.

2. 자료 취득

남중국해 남서부 대륙붕에 위치하는 연구지역의 면적은 2,500 km² (50 km × 50 km)이며 인도차이나 남부 해안가로부터 약 300 km, 칼리만탄섬 북부 해안가로부터 약 600 km에 위치한다(Fig. 1). 수심은 약 80-100 m에 이르고 있다.

순차층서학적 연구를 위해서는 탄성파자료, 물리검층 그리고 고생물학자료 등 가능한 모든 자료를 종합할 필요가 있다. 2차원 반사법 탄성파자료는 1992년 CGG사에 의해 3,500 km에 이르는 다중채널 탄성파자료를 취득하였으며, 주로 광역적인 지질구조적 특성을 조사할 목적으로 대부분 북-남, 동-서 방향으로 1 km에서 2 km 간격의 격자 형태로 취득되었다. 또한 2차원 탄성파탐사 지역 내 매우 복잡한 지질구조를 보여주는 북부 중앙부에 대하여 1993년 3차원 탄성파탐사를 실시하였다. 3차원 탄성파탐사는 Geco-Prakla사에 의해 취득되었으며, 420 km² (16,000 km)에 대해 25 m

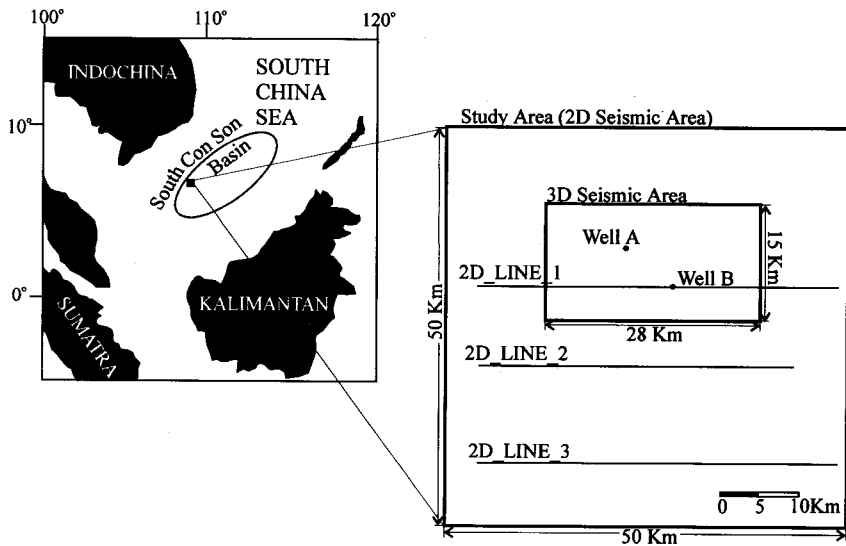


Fig. 1. Location map showing the study area, 2D seismic key lines and 3D seismic area.

간격으로 이루어 졌다.

3차원 탄성파 지역내 2개의 탐사시추정에서 얻어진 물리검층, 고생물분석자료 및 수직탄성파 단면도(vertical seismic profile)자료 등을 이용하여 종합적인 순차층서학적 분석을 시도하였다.

3. 구조 분석

연구지역의 지질구조를 이해하기 위하여 2차원 및 3차원 탄성파자료를 이용하여 주요 단층들을 해석하였으며(Fig. 2, 3, 4), 제3기 이전 기반암에 대한 구조도(Fig. 5)를 작성하였다. 분지 심부(depocenter)는 동쪽 중앙부에 위치하며, 대규모 정단층(C-1,

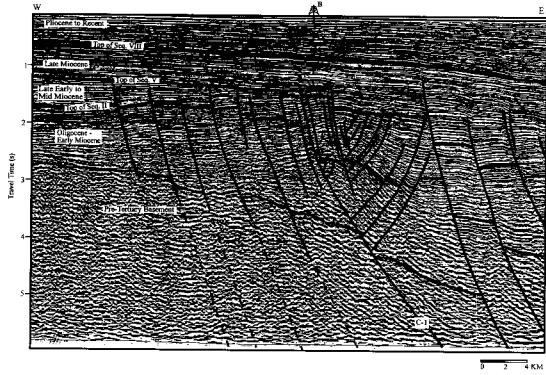


Fig.2. Interpreted seismic section of 2D_Line_1, vertically exaggerated by 2:1. The structure drilled by the well B shows numerous synthetic and antithetic faults with the development of the growth fault C-1.

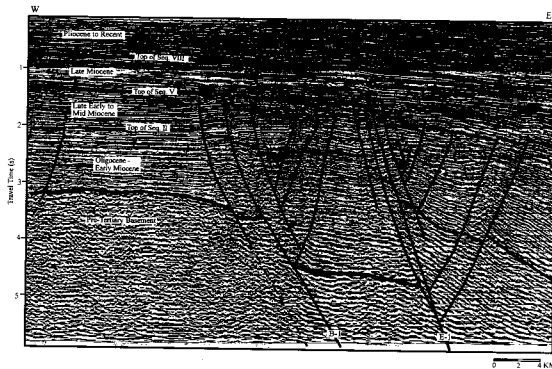


Fig. 3. Interpreted seismic section of 2D_Line_2, vertically exaggerated by 2:1. The section crosses the depocenter of the study area and the eastern part continues deepening toward the basin center.

D-1, E-1) 발달에 의해 동쪽으로 가면서 점차 깊어져 남콘손분지의 중심부로 이어지는 것으로 보인다. 대부분의 주요 단층들은 남북 방향으로 발달되어 있으며, 초기 마이오세 말 광역적인 주향

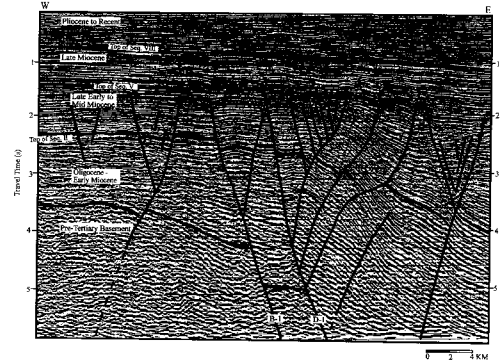


Fig. 4. Interpreted seismic section of 2D_Line_3, vertically exaggerated by 2:1.

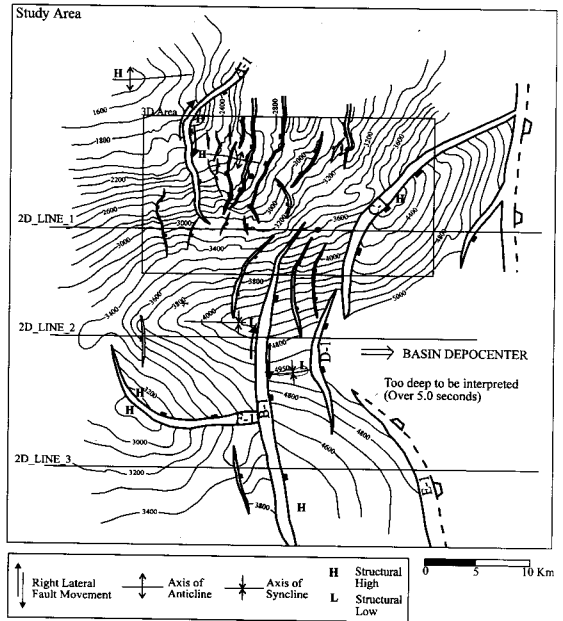


Fig. 5. Pre-Tertiary basement structural map interpreted with 2D and 3D seismic data sets in the study area (Contour interval : 100 ms TWT). Most of faults show a N-S trend which are most likely associated with the regional strike-slip movement in the late Early to Mid Miocene. The faults A-1 and B-1 indicate the right lateral strike-slip movement by the offset of structural highs or lows in the hangingwall and footwall.

Table 1. Plate tectonic history and structural movements in the study area.

Geological Age	Regional Tectonics in the Southeast Asia	Tectonics in the South Con Son Basin	Structural history in the study area
Eocene	Collision between the India plate and the Eurasia plate > Southward extrusion of Indochina plate > Major strike-slip fault development such as Red River, Shan and Three Pagodas Faults	Initiation of the basin by extension	
Oligocene	Sea floor spreading in the South China Sea Ongoing subduction in the North Kalimantan trench Crustal stretching continued Clockwise rotation of the Indochina Block	Development of the basin as a form of graben or half graben with N-S and NE-SW trending faults	Development of major faults - N-S trend : A-1, B-1, D-1, E-1 - NE-SW trend : C-1 - E-W trend : F-1
Early Miocene	The extrusion and crustal stretching of the Indochina plate slowed down Cessation of large scaled block rotations Left-lateral movements of the Red River Fault stopped and reversed	Rifting ended Slow subsidence by thermal cooling	Inactive faulting
Late Early Miocene - Mid Miocene	Large strike-slip faulting with N-S trends in the southeast area of the Indochina Collision of the micro-continental block to the North Kalimantan with the end of the subduction Cessation of sea floor spreading in the South China Sea	Reactivated rifting Large strike-slip faulting with a N-S trend Fault activity gradually reduced	Reactive faulting Right-lateral strike-slip motion with a N-S trend along the existing faults (A-1, B-1) Anti-clockwise block rotation
Late Miocene	Regional subsidence	Regional transgression Prevailed marine condition	Inactive faulting except a few faults such as C-1
Pliocene - Recent	Passive regional subsidence	Inactive fault activity Thick clastic sedimentation	Inactive faulting

이동 구조운동(strike-slip movement)에 의한 것으로 보인다. 주요 단층중에는 F-1 단층의 경우만 동-서 방향으로 발달되어 있는데, 이는 중기 마이오세 국부적인 남-북 방향의 장력 작용에 의한 것으로 추정된다. 조사지역의 모든 단층들은 정단층으로 해석되었으며, 분지 형성기 동안 계속적인 장력에 의해 구조 운동이 일어났음을 암시한다.

단층 A-1은 기반암까지 연결되는 수 개의 동향 및 역향 단층들(synthetic and antithetic faults)로 구성되어 있으며, 위로 발산하는 형태의 역상 꽃다발 구조(negative flower structure)를 보여준다. 기반암 상부 구조도(Fig. 5)에서 보이는 바와 같이 단층 양쪽의 구조적 정부(apex)가 약 7 km 정도 어긋나서 나타나고 있어, 우수주향이동 단층(right lateral strike-slip fault)임을 알 수 있다. 단층 B-1의 경우에도 단층의 양쪽면에서 구조의 심부가 약 5 km 정도 어긋난 우수주향이동 단층임을 보여주고 있다. 단층 C-1의 경우에도 역상 꽃다발 구조 형태를 보여주는 주향이동 단층으로 추정되나, 뚜렷

한 근거는 없다. 동 단층에 연계된 수많은 동향 및 역향의 단층들은 급격한 침강 작용과 동쪽으로의 급격한 퇴적물의 공급에 의한 차별 압밀작용(compaction)에 따른 성장단층의 발달과 함께 형성된 것으로 보인다.

연구지역의 구조 형성 및 발달 과정을 분지의 광역적인 지구조운동과 연계하여 Table 1로 정리하였다. 대부분 큰 규모의 주요 단층들은 올리고세 분지 형성과 함께 발달하기 시작한 것으로 보인다. 초기 마이오세 말 분지 전체에 광역적인 주향이동 운동이 일어났으며, 기존 균열대를 따라 남-북 방향의 우수주향이동 단층들을 형성해 하였다. 또한 남동 방향으로의 장력이 동시에 작용하여 대규모의 정단층 및 역상 꽃다발 구조 형태를 조성하였다. 이러한 역학적 힘의 계속적 작용으로 C-1, D-1, E-1과 같은 단층들이 성장단층으로 발달하였으며, 동쪽 방향으로 두꺼운 퇴적층을 공급, 분지의 중심부를 형성하게 되었다.

4. 주요 경계면의 특징

순차층서학적 연구를 위해서 연계층의 주요면을 - 연계층 경계면(sequence boundary) 혹은 최대해침면(maximum flooding surface) - 먼저 인지하여야 한다. 1-2백만년 기간의 3차주기에 해당하는 주요 경계면(key surface)을 고생물자료, 탄성파자료 및 물리검층자료로부터 각기 독립적으로 결정한후 상호연관을 통하여 가장 적합한 경계면을 선정하였다.

4.1 고생물자료

두 개의 시추정(A, B)에서 채취된 코아자료로부터 시대 및 퇴적환경 분석이 이루어졌다. 연계층 경계부에서는 식물 포자, 화분의 분포가 최대치를 보여주는데 이는 저해수면 상태에서의 하성활동(fluvial activity)의 증가에 기인한다(Poumot, 1989). 해수면이 점차 상승하면서 해성 미화석의 증가를 보여주며, 최대해침면에서 최대치를 보여준다.

4.2 탄성파상 특징

연계층 경계면은 탄성파 단면도상에서 위결침(onlap) 혹은 침식절단면(erosional truncation)에 의해서, 최대해침면은 아래결침(downlap)에 의해서 인지된다. 연구지역은 전반적으로 평행한 반사파(reflection)를 보여주는 대륙붕단 지역이며(Fig. 2, 3, 4), 특히 3차원 탄성파지역은 매우 복잡한 단층의 발달로 반사파가 끊어져 있어(Fig. 6), 위결침 혹은 아래결침 현상을 발견하기가 쉽지 않았다. 연구

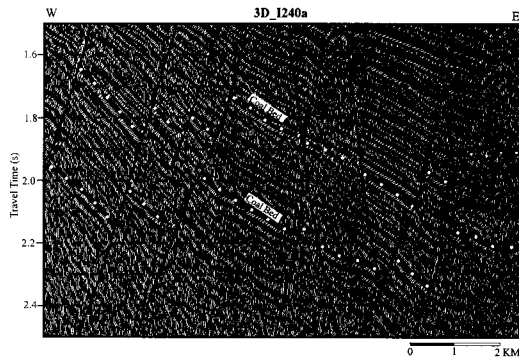


Fig. 6. 3D seismic section showing strong reflections due to coal beds. The upper strong reflections (white dotted) correspond to the top of Sequence II and the lower reflections correspond to the base of Sequence I.

지역은 연계층 경계면에서 하도가 많이 발달되어 있는 것이 특징이다. 하도는 연계층 내에서도 발달할 수 있어, 반드시 연계층 경계면과 일치하는 것은 아니나, 경계면을 인지하는데 좋은 지시자 역할

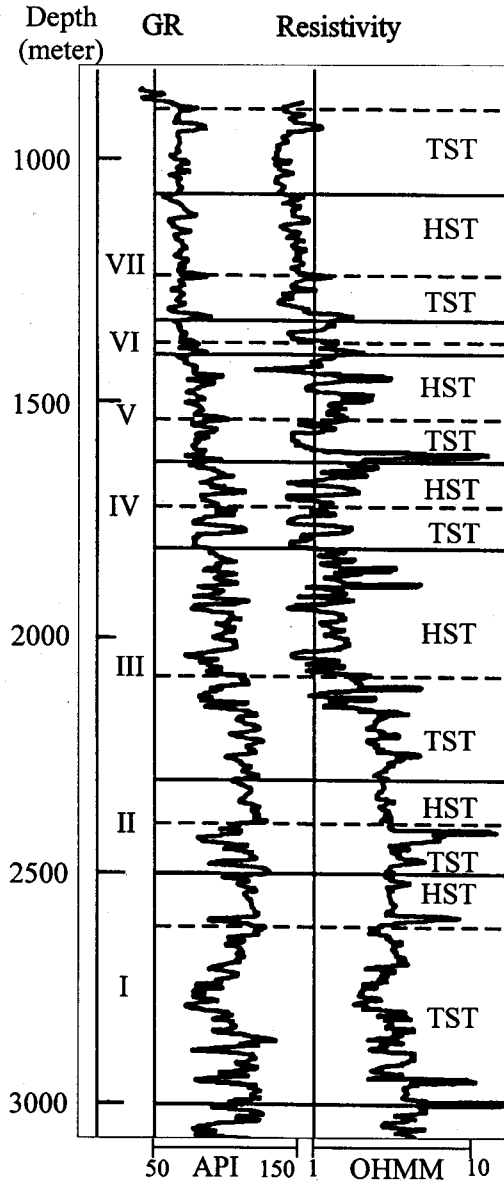


Fig. 7. Gamma ray and resistivity logs of Well A showing stacking patterns of sequences. Horizontal solid lines indicate sequence boundaries and dashed lines indicate maximum flooding surfaces.

을 하고 있다. 또 하나의 특징은 몇몇 경계면에서 높은 진폭을 갖는 연속적인 반사파를 보여준다는 것이다(Fig. 6). 시추정자료와 상관시켜 본 결과는 연계층 경계면 혹은 바로 상부에 광범위하게 분포하고 있는 석탄층에 기인하는 것으로 판단된다. Kentucky 동부지역 Pennsylvanian Breathitt Group에 대한 순차층서학적 연구 결과, 침식골짜기(incised valley)와 이와 관련된 연계층 경계면이 두껍고, 수평적으로 광범위한 석탄층으로 덮여 있다는 사실을 확인한 바 있다(Aitken · Flint, 1995). 이러한 현상은 연계층 경계면 즉, 부정합면에서 해수면 상승시 쇄설성 퇴적물의 공급 중단과 수면 상승 효과에 따른 석탄층의 발달로 해석하였으며, 따라서 가장 높은 퇴적공간이 형성되는 해침시기에 잘 발달되는 것으로 추정되고 있다(Aitken, 1995). 연구지역 내에서는 수개의 석탄층들이 해침퇴적계다발(transgressive systems tract) 내에서 나타나고 있으며, 가장 두꺼운 석탄층들이 연계층 경계면 부근에 2-3 m의 두께로 발달되어 있다. 석탄층은 낮은 밀도와 느린 음파속도로 인한 주변 암층과의 매우 큰 음향 임피던스(acoustic impedance) 차로 매우 강한 반사파를 보여주므로, 탄성과 단면도상에서 쉽게 인지될 수 있다.

4.3 물리검층 집적 형태(stacking patterns)

물리검층자료 중 특히 감마선(gamma-ray log) 혹은 자연전위(SP log) 검층 곡선을 분석해 보면, 일반적으로 연계층 경계면을 중심으로 상부층에서

는 상향 세립화, 하부층에서는 상향 조립화 경향을 보이는 반면 최대해침면을 중심으로는 상부층에서는 상향 조립화, 하부층에서는 상향 세립화 경향을 보인다(Van Wagoner *et al.*, 1990). 몇몇 연계층에서는 연계층 경계면 바로 위로 해침 초기에 퇴적된 세일층이 나타나고, 일부 왜곡된 로그 집적 형태를 보여주기도 하나, 전반적으로 위와 같은 성향을 보여주고 있다(Fig. 7).

Galloway (1989a, 1989b)는 최대해침면에 의해 경계되는 퇴적단위, 소위 성인적 연계층(genetic sequence)을 제안한바 있으며, Van Wagoner *et al.* (1990)은 부정합면 혹은 부정합면과 대비되는 정합면을 경계로 하는 연계층이 광역적인 층서 분석에 보다 용이하고 실용적인 층서단위임을 강조한 바 있다. 그러나, 이러한 2가지 모델은 반드시 어느 것이 용이하다기 보다는, 퇴적분지 혹은 연구지역의 특성에 따라서 적합한 모델을 선택해야 한다고 생각한다. 연구지역은 해안평원(coastal plain)에서 얇은 대륙붕에 위치한 곳으로 아래결침보다는 위결침이 많이 나타나는 지역이고, 연계층 경계부에서 하도의 발달 및 석탄층으로 인한 강한 반사파를 보이는 지역이 많아 부정합면 혹은 이와 대비되는 정합면을 경계로 하는 Vail의 모델(Vail, 1987)을 적용하는 것이 훨씬 용이한 것으로 판단되었다. 남콘손분지의 주 퇴적층인 마이오세층에 대하여 3차주기에 해당하는 8개의 연계층을 분석하였으며, Fig. 8은 시추정 A에 대한 연계층을 도시한 층서주상도이다.

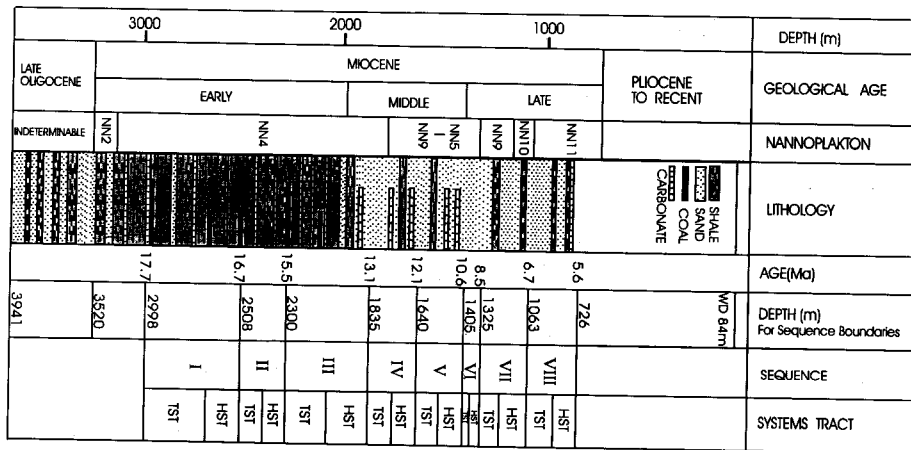


Fig. 8. Stratigraphic column of Well A with Miocene sequences.

5. 순차층서학적 연구 결과

5.1. 연계층 경계면의 구조적 특성

이용 가능한 모든 자료를 분석, 상호상관을 통하여 연계층 경계면을 결정한 후, 3차원 탄성파자료에 대하여 8개의 연계층을 구성하는 경계면을 모두 해석하였다. Fig. 9a는 2개 시추정 위치를 가로지르며 3차원 탄성파지역의 대표적인 구조 형태를 보여주는 임의의 방향의 탄성파 단면도이며, Fig. 9b는 해석된 단층면과 연계층 경계면을 보여주는 구조 단면도이다. 큰 규모의 두 개의 단층(A-1, C-1)이 남-북 혹은 북동-남서 방향으로 발달되어 있으며, 3차원 탄성파지역은 3개의 다른 지질학적 영역으로(AA, BB, CC) 구분된다.

각 연계층 경계면에 대한 구조도를 작성하였으며, 이는 단층들의 수평적인 발달과 단층의 수평 전위(heave) 등을 보여준다. 모든 경계면은 대체적

으로 북서지역에서 남동 방향으로 가면서 심도가 점차 깊어지는 양상을 보인다. 연계층 II의 상부 경계면은 3차원 전지역에 걸쳐 광범위하게 분포하는 석탄층으로 인해 탄성파 단면도에서 매우 강한 반사파를 보여주고 있어 가장 쉽게 인지할 수 있고(Fig. 6), 단층을 경계로한 상호상관시 매우 중요한 지표가 되는 면이다. 또한 동 경계면을 중심으로 두꺼운 세일층이 분포하고 있어 석유지질상 광역적인 덮개암 역할을 해주는 것으로 분석되는 중요한 면으로서, 초·중기 마이오세층의 대표적인 구조적 형태를 Fig. 10에서 볼 수 있다. 대부분의 단층들이 남-북 혹은 북동-남서 방향으로 발달되어 있으며, 수많은 단층으로 인한 매우 복잡한 구조적 양상을 보여준다. 단층 C-1을 경계로하여 동쪽 방향으로 심도가 급격히 떨어지는 급경사를 형성하고 있다. 이러한 구조적 양상은 상부로 가면서 단층의 수평전위가 점차 작아지기는 하나 초·

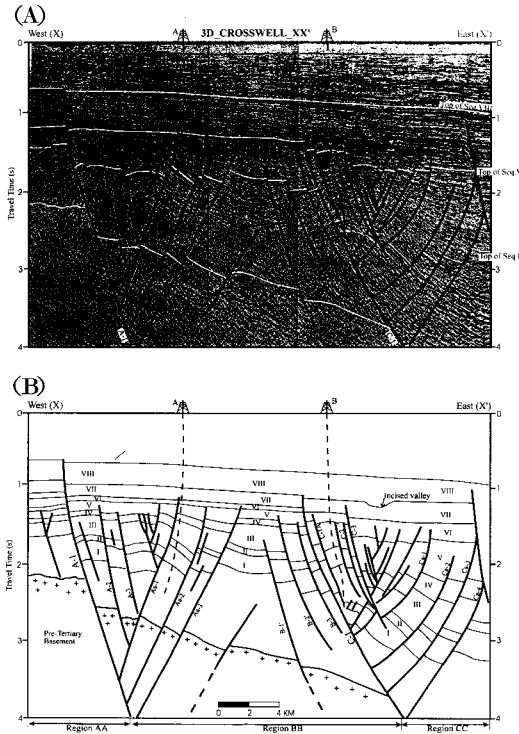


Fig. 9. (a) Seismic section of 3D_CROSSWELL_XX' representing the structure of the 3D area. (b) Structural cross section of 3D_CROSSWELL_XX' showing the structures and sequences I to VIII. The 3D area can be divided into 3 structural regions (AA, BB and CC) by two major faults (A-1 and C-1).

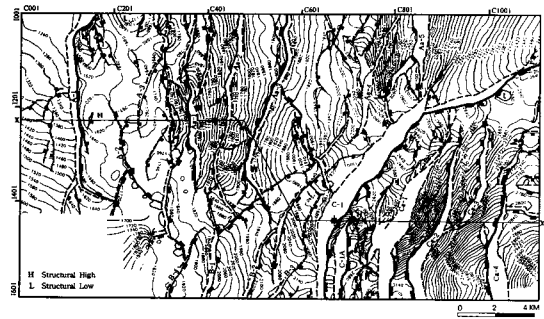


Fig. 10. Time structure map of the top of Sequence II (Contour interval : 20 ms TWT). The surface generally deepens to the southeast and shows very complex faulting.

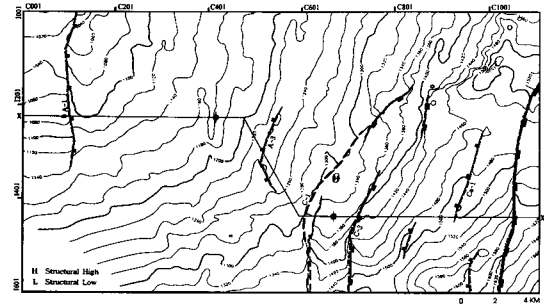


Fig. 11. Time structure map of the top of Sequence VI (Contour interval : 20 ms TWT). The surface generally deepens to the southeast. Most of faults disappear on this horizon.

중기 마이오세에 해당하는 각 경계면에서 비슷한 양상을 보여준다. 후기 마이오세층으로 가면서 대부분의 단층면이 사라지고, 전체적으로 남동 방향으로 경사진 단순한 구조형태를 보여준다(Fig. 11). 이는 대부분의 단층활동이 후기 마이오세에 이르러 정지되었음을 암시한다.

5.2. 탄성파상 분석

각 연계층에 대한 등층후도(isochron)를 작성하여 퇴적층의 두께 변화, 퇴적시기에 대한 단층 활성도, 퇴적 방향 등을 유추해 보았다. 또한, 퇴적 환경을 분석하는데 반사파의 진폭, 기하학적 특성과 연속성 등 탄성파상 분석 방법이 유용하게 쓰인다. 기하형태와 연속성에 대해서는 정성적인 분석을 시도하였고, 진폭 속성 분석을 위해서는 다음과 같은 식으로 표현되는 탄성파강도(reflection intensity)를 정량적으로 분석 시도하였다.

$$I(x,y,t_1,t_2) = \int_{t_1}^{t_2} |R(x,y,t)| dt$$

여기서, $I(x,y,t_1,t_2)$ 는 특정 구간에 대한 탄성파강도를, $R(x,y,t)$ 는 탄성파 트레이스의 시점 t 에서의 복소진폭을 의미한다(Taner *et al.*, 1979). 하나의 연계층을 이루는 경계면 내에서의 탄성파강도를 계산할 수 있으며, 이는 연계층 볼륨에 대한 강도를 보여준다.

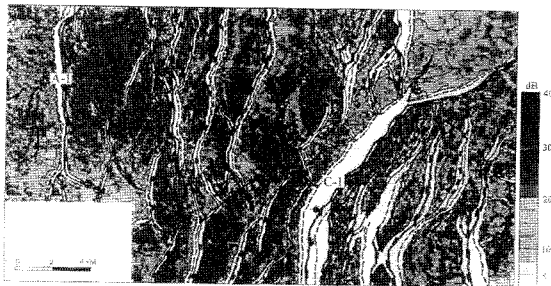


Fig. 12. Reflection intensity map of Sequence II on isochron map of the sequence. It shows high intensity in almost whole area due to the coal beds distributed in TST.

5.2.1. 초기 마이오세 연계층(연계층 I - 연계층 III 하부)

각 연계층의 두께는 남동 방향으로 가면서 점차 두꺼워 지는 경향을 보인다(Fig. 9a, 9b). 연계층 I의 경우 A-1 단층을 경계로 동쪽으로 갑자기 두꺼워지는 경향을 보이는데, 동 연계층 퇴적 당시 A-1 단층이 활성화되었음을 알 수 있다. C-1 단층도 단층을 경계로 약간의 두께 변화를 보이고 있어 단층 활동이 있었던 것으로 보인다. 두 단층은 이후에도 지속적인 활동이 있었던 것으로 분석된다.

초기 마이오세의 연계층은 주로 세일층이 우세하며, 해침퇴적계다발은 수 개의 석탄층이 협재되어 있는 것이 특징이다. 특히 연계층 I, II의 상하 경계면 혹은 바로 위에는 두께 2-3 m에 이르는 석탄층이 광범위하게 분포하고 있으며, 탄성파 단면도에서(Fig. 6) 강한 반사파를 보인다. 탄성파상을 분석해 보면 전체적으로 별 차이는 없으나, C-1 단층을 경계로 서부지역(AA, BB)은 연속적이고 평행한 반사파 형태를 보이고, 동부지역(CC)은 반연속적이고 준평행한 형태가 많이 나타난다. 반사파 강도 또한 전체적으로 비슷한 분포를 보여주며, 연계층 II에서는 여러 석탄층 분포에 의한 영향으로 거의 전지역에 걸쳐 높은 강도를 보인다(Fig. 12).

3차원 탄성파 전지역에 걸쳐 암상의 분포와 탄성파상이 유사하게 나타나고 있어 거의 동일한 퇴적환경으로 해석된다. 전체적으로 해안평원에 해당하는 퇴적환경으로서, 해침퇴적계다발에 주로 나타나고 있는 석탄층은 소택지 환경하에서 퇴적된 것으로 분석된다.



Fig. 13. Reflection intensity map of Sequence IV on isochron map of the sequence. It shows high to very high intensity in the western area caused by interbedded carbonates.

5.2.2. 중기 마이오세 연계층(연계층 III 상부 - 연계층 V)

각 연계층의 두께는 남동 방향으로 가면서 점차 두꺼워지며, 대부분의 단층들을 경계로 두께의 변화를 보인다(Fig. 9a, 9b). 특히, A-1과 C-1 단층을 경계로 동쪽지역의 상반(hanging wall)이 매우 두꺼워 지고 있다. 이는 대부분의 단층들이 동 시기에 활성화 작용이 있었으며, A-1과 C-1 단층이 주 단층으로서 가장 활발한 단층운동이 있었음을 암시한다.

중기 마이오세 연계층들은 주로 사암층이 우세하게 나타나며, C-1 단층을 경계로 서부 BB 지역에서는 얇은 탄산염암층이 협재하여 나타나는 반면, 동부 CC 지역에서는 탄산염암층이 거의 나타나지 않고 있다.

탄성파상 분석 결과도 양쪽 지역에서 확연히 다른 양상을 보여준다. 서부지역은 연속적이고 평행한 반사파 형태를, 동부지역은 반연속적이고 준평행한 형태가 우세하게 나타난다(Fig. 9a). 특히 반사파강도 분석 결과 서부지역에서 동부지역에 비해 훨씬 강한 강도를 보여주는데(Fig. 13), 이는 서부지역에만 주로 퇴적된 탄산염암의 영향인 것으로 분석된다.

따라서, 동 시기동안 C-1 단층의 지속적인 활성화 작용으로 양쪽에 퇴적환경의 변화를 가져온 것으로 해석된다. 서부지역은 삼각주 평원(delta plain)에서 내부 천해성 대륙붕(inner neritic shelf)에 이르는 퇴적환경의 반복, 동부지역은 삼각주 전면(delta front)에서 외부 천해성 대륙붕(outer neritic shelf)에 이르는 퇴적환경의 반복으로 해석된다.

5.2.3. 후기 마이오세 연계층(연계층 VI - VIII)

각 연계층의 두께는 남동 방향으로 가면서 점차 두꺼워진다(Fig. 9a, 9b). 후기 마이오세에 이르러서는 대부분의 단층들의 활성화 작용이 정지된 것으로 보이나, 동부 CC 지역의 단층들은 연계층 VI 혹은 VII 까지 활성화작용이 있었던 것으로 분석된다.

후기 마이오세 연계층 역시 사암층이 우세하게 나타나며, 블록 형태의 사암층 단위가 발달되어 있는 것이 특징이다. 탄성파상은 전지역에 걸쳐 연속적이고 평행한 형태를 보여주며(Fig. 9a), 반사파강도는 지역적으로 별 차이 없이 전체적으로 낮거나 중간 정도의 강도를 보인다(Fig. 14). 이는 단층작용이 거의 중단되고, 광역적인 침강작용이 일어나면서 거의 동일한 퇴적환경, 즉 천해성 대륙붕 환

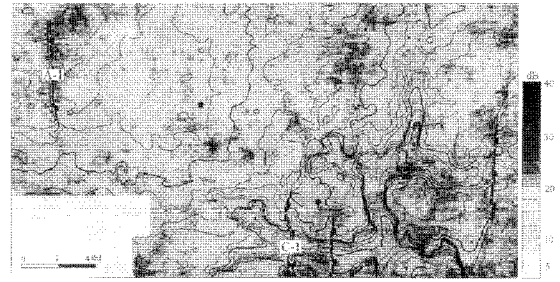


Fig. 14. Reflection intensity map of Sequence VIII on isochron map of the sequence. It shows low to moderate intensity in overall area.

경하에서 퇴적된 것으로 분석된다.

각 시대별 연계층에 대한 암상, 물리검층 집적형태(well-log stacking pattern), 탄성파상 및 이들 분석에 근거한 퇴적환경을 정리하면 Table 2와 같다.

5.3. 순차층서학적 모델

퇴적분지는 지구조운동, 퇴적물의 공급량 그리고 평균 해수면의 변화등에 의해 각기 고유한 형태의 분지를 형성한다. 일반적인 순차층서학적 모델이 Vail (1987)에 의해서 제시되었으나, 분지의 특성을 보다 명확히 이해하기 위해서는 각 분지에 대한 고유한 모델이 개발되어야 할것이다.

동 연구지역에서의 순차층서학적 연구결과 초기 마이오세 연계층과 중·후기 마이오세 연계층 간에 매우 다른 특성을 보여 주었다. 따라서, 시대별로 각기 다른 2개의 순차층서학적 모델을 설정해 보았다. Fig. 15는 초기 마이오세 연계층에 대한 순차층서학적 모델로서 소택지 상을 갖는 해안평원 환경하에 퇴적되었음을 보여준다. 수개의 석탄층이 해침퇴적계다발 내에 퇴적되었으며, 광범위하게 퇴적된 두꺼운 석탄층이 연계층 경계면 부근에서 퇴적되었다. 지구조적으로 상대적으로 안정된 시기였던 것으로 분석된다.

Fig. 16은 중·후기 마이오세 연계층에 대한 순차층서학적 모델을 보여준다. 중기 마이오세 시기에는 단층들의 활성화 작용으로 단층의 상반부가 동쪽 아래로 떨어지면서 급격한 침강작용을 일으켜, 퇴적 공간의 확대와 상당량의 퇴적물 공급을 유도하였다. 이 시기동안 삼각주와 천부 해양성 환경의 반복적 퇴적 환경을 보여주며, 이는 짧은 주기를 갖는 “자기순환과정(autocyclic mechanism)”으로 설명된다(Plint et al., 1992). C-1 단층은 중기

Table 2. Facies analysis and depositional environment in the 3D area.

Geologic Age / Sequence		REGION BB			REGION CC				
		Log stacking/Lithology	Seismic Facies	Environment	Log stacking/Lithology	Seismic Facies	Environment		
Early Miocene	I	TST	Several coal beds and thick shale units	Continuous Parallel	Lower coastal plain	Not available		Semi-continuous Sub-parallel	Lower coastal plain
		HST	A coarsening upward shale unit	Low intensity		Not available		Low intensity	
	II	TST	Thick coal beds with interbedded sands	Continuous Parallel		Not available		Continuous Parallel	
		HST	A coarsening upward shale unit	High intensity		Not available		High intensity	
Mid Miocene	III	TST	Sand shale interbedding with coal beds	Continuous Parallel	Delta plain ↑ Inner neritic shelf	TST	A thick shale flooding unit with coal beds	Semi-continuous Sub-parallel	Delta front ↑ Mid to Outer neritic shelf
		HST	Thick sandstone units with interbedded carbonates and thinly bedded shales	Moderate-High int.		HST	Several small depositional cycles with sands and thinly bedded shales	Low intensity	
	IV	TST	Fining upward sand units	Continuous Parallel		TST	Fining upward sand units	Semi-continuous Parallel	
		HST	Coarsening upward sand units with interbedded carbonates	High-Very High int.		HST	Coarsening upward sands and silts	Low intensity	
	V	TST	A fining upward sand unit with interbedded carbonates	Continuous Parallel		TST	Fining upward sand units	Continuous Parallel to Sub-parallel	
		HST	Coarsening upward sand units with interbedded carbonates	High-Very High int.		HST	Coarsening upward sand units	Low-Moderate int.	
Late Miocene	VI	TST	Two thin sand units	Continuous Parallel	Inner to Mid neritic shelf	TST	Two thick sand units	Continuous Parallel	Inner to Mid neritic shelf
		HST	A coarsening upward sand	Moderate-High int.		HST	A coarsening upward sand unit	Moderate intensity	
	VII	TST	A single blocky sand unit	Continuous Parallel		TST	Two different pattern sand units	Continuous Parallel	
		HST	An overall coarsening upward thick sands	Low-Moderate int.		HST	Thick sands underlying a silt unit	Moderate-High int.	
	VIII	TST	Thick and blocky sand units	Continuous Parallel		TST	Thick and blocky sand units	Continuous Parallel	
		HST	Not available	Low-Moderate int.		HST	Two coarsening upward sand units	Low-Moderate int.	

마이오세 시기에 매우 활성화 되었으며, 주기적인 단층 활동으로 인해 연계층 내에서 해침과 해퇴를 반복하게 되었다. 침강작용으로 일어나는 해침기

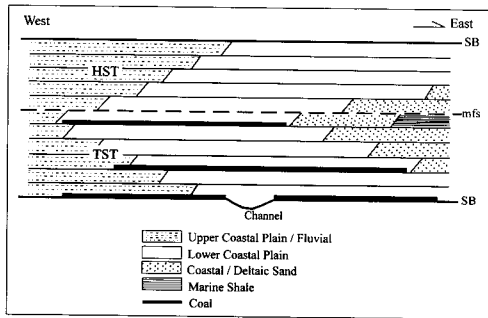


Fig. 15. Sequence stratigraphic model for the Early Miocene section - Sequences I, II and III (TST). The TST consists of thick shales and coal beds indicating mangrove swamp facies in the coastal plain. The channels are well developed on or just above the sequence boundaries.

간동안에는 천해성 환경이 우세하였다. 서부의 BB 지역은 상대적으로 더 얇은 내부 천해성 대륙붕 환경으로서 얇은 탄산염암층이 협재하여 퇴적되었으나, 동부의 CC 지역은 심도가 보다 깊은 외부 천해성 대륙붕 환경으로 세일과 사암층이 퇴적되었다. 해퇴환경으로 전환되면서, 삼각주 환경이 형성되고, BB 지역은 삼각주평원이 CC 지역은 삼각주전면에 해당하는 환경을 조성하였다. CC 지역으로 가면서 더 두꺼운 퇴적층이 쌓이게 되고 단층을 경계로 차별적인 압밀작용이 다시 단층을 재활성화 시킨다. 이러한 삼각주 형성시기와 해침성 천해성 환경이 연계층 내에서 수천년 혹은 수만년을 주기로 반복되었다. 이러한 자기순환과정에 의한 삼각주 형성과 천해성 환경의 반복은 미시시피 델타에서 잘 나타나고 있다(Bhattacharya · Walker, 1992). 후기 마이오세에 이르러서는 단층이 비활성화 되면서, 광역적인 침강작용과 함께 해양 환경이 우세하게 되었다. 천해성 대륙붕 환경하에서 두꺼운 쇄설성 퇴적층이 형성되었다.

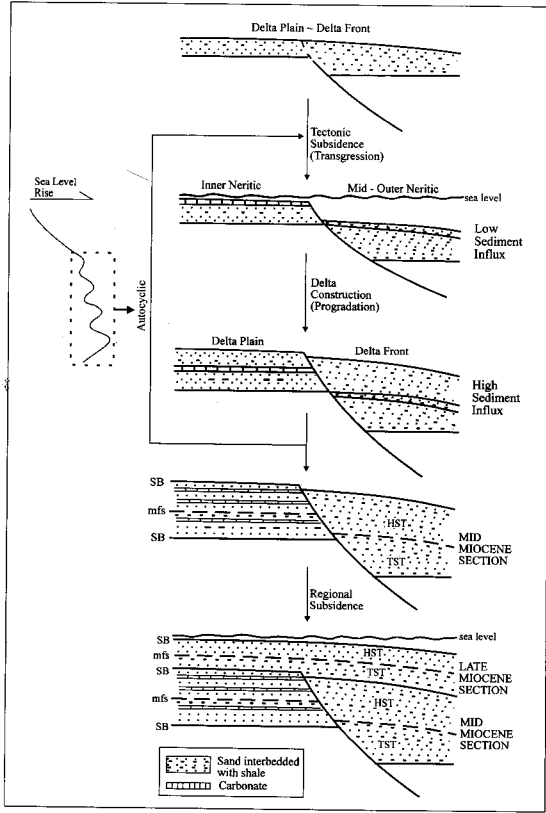


Fig. 16. Sequence stratigraphic model for the Mid to Late Miocene sections - Sequences III (HST), IV, V, VI, VII and VIII. During the Mid Miocene, a delta to shallow marine environment was repeated within a sequence by the autocyclic mechanism caused by tectonic subsidence. During the Late Miocene, thick clastic sediments deposited in the shallow marine shelf with the regional subsidence.

6. 결 론

남중국해 남서부 남콘손분지 지역에서 시추정자료, 고생물 분석자료, 반사법 탄성파자료 특히 3차원 탄성파자료를 중심으로 순차층서학적 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연구지역내 대부분의 단층들은 남콘손분지가 형성되던 올리고세 시기에 단층 활동이 일어났다. 이러한 단층들은 남-북 혹은 북동-남서 방향성을 가지며, 남동 방향으로 작용한 장력과 관련된 분지의 광역적인 구조적 방향성과 일치한다. 단층 활동은 마이오세 초에 이르러서 점차 비활성화 되

었다. 초기 마이오세 말부터 중기 마이오세 동안, 분지의 열개작용이 재활성화 되었으며, 기존 주요 단층들에 영향을 주었다. 이 시기에 분지에 작용한 남북 방향의 주향이동 운동으로 기존 단층대를 따라 우수주향이동 단층들이 발달하게 되었다. 이러한 우수주향이동 움직임이 분지지역 지괴의 반시계 방향 회전을 유도하였으며, 대부분의 단층들이 이 시기에 가장 활성화 되었다.

2. 3차원 탄성파지역 내에서는 2개의 대규모 단층대가 규명되었다. 이 단층들은 올리고세 시기에 발생하였으며, 성장단층으로 발달하였다. 대부분의 다른 단층들은 초기 마이오세 말에서 중기 마이오세 시기에 대규모 단층들의 발달과 연계되어 형성되었다. 서부지역 A-1 단층은 우수주향이동 단층으로서 동향 및 역향 단층들의 발달과 함께 역상꽃다발 구조를 형성하였다. 반면, 동부지역 C-1 단층은 말기 마이오세까지 지속적인 활성화 작용이 일어났으며, 급격한 지구조적 침강작용과 동쪽으로 유입되는 다량의 퇴적물에 따른 차별 압밀작용으로 매우 큰 단층 낙차를 형성하였다. 중기 마이오세에서 말기 마이오세 초 시기에 수많은 동향 및 역향 단층들이 생겨나면서 매우 복잡한 단층화된 배사구조를 형성하였다.

3. 3차원 탄성파지역내 모든 연계층 경계면은 동쪽 혹은 남동쪽으로 경사가 발달하였으며, 구조적으로 높은 부분이 서-동 혹은 북서-남동 방향으로 중앙부를 가로지른다. 제3기 이전의 기반암 상부면도 다른 연계층 경계면과 구조적으로 같은 경향을 보여주며, 이는 기반암 구조가 광역적인 지질구조에 영향을 끼쳤음을 암시한다.

4. 연구지역의 모든 연계층들이 고수위퇴적계다발(highstand systems tract)과 해침퇴적계다발(transgressive systems tract)로 구성되어 있으며, 평행 혹은 준평행한 반사파 특성을 보여준다. 이는 해안평원에서 친해성 대륙붕 환경하에 나타나는 일 반적인 특징이라 할 수 있다.

5. 연구지역에서는 최대해침면 보다는 부정합면 혹은 이와 대비되는 정합면에 해당하는 연계층 경계면을 찾기가 더 용이하였다. 반사파는 대부분 거의 평행한 양상을 보이고, 매우 복잡한 단층작용으로 탄성파단면도 상에서 위걸침, 아래걸침 등을 인지하기는 어렵다. 하지만, 연계층 경계면 부근에 발달한 하도와 경계면 바로 위로 초기 해침기에 퇴적된 석탄층은 연계층 경계면의 지시자 역할을 하며, 탄성파 단면도 및 물리검층자료에서

쉽게 인지된다.

6. 대부분의 석탄층은 초기 마이오세 시기 해침 퇴적계다발에 분포하고 있으며, 특히 광역적으로 분포하는 두꺼운 석탄층은 연계층 경계면 바로 위에 퇴적되었다. 이는 석탄층이 하성활동의 영향을 적게 받는 해침 환경하에서 잘 발달된다는 것을 암시한다.

7. 3차원 탄성파지역은 마이오세 각 시기별로 다음과 같은 세가지 형태의 퇴적환경을 갖는다. (1) 초기 마이오세 - 홍수림(mangrove) 세일과 석탄층으로 특징지워지는 해안평원 (2) 중기 마이오세 - 지구조적 침강작용과 연관된 자가순환과정에 의한 삼각주에서 친해성 대륙붕 환경으로의 순환 반복적 퇴적 환경 (3) 말기 마이오세 - 광역적인 침강작용과 함께 해양성 환경이 우세한 대륙붕 환경

8. 퇴적물은 서쪽에서 동쪽으로 혹은 북서에서 남동 방향으로 공급, 퇴적되었다. 이러한 퇴적물의 이동은 기반암의 구조 형태에 의해 영향을 받은 것으로 보이며, 또한 남-북 혹은 북동-남서 방향의 정단층의 발달이 함몰사태(slumping)에 의해서 동쪽 혹은 남동쪽으로의 퇴적물 유입을 유도하였다.

사 사

이 논문을 심사하여 주시고 많은 의견을 주신 심사위원 두 분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Aitken, J.F., 1995, Utility of coal seams as genetic stratigraphic sequence boundaries in nonmarine basins: An example from the Gunnedah basin, Australia: Discussion, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79, 1179-1181.
- Aitken, J.F. and S.S. Flint, 1995, The application of high resolution sequence stratigraphy to fluvial systems: a case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, U.S.A.: Sedimentology, 42, 3-30.
- Bhattacharya, J.P. and Walker, R.G., 1992, Deltas, in R. G. Walker, and N. P. James, ed., Facies Models: Response to sea level change, Geological Association of Canada, 157-177.
- Brown, L.F. and W. L. Fisher, 1977, Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazil rift and pull-apart basins: in C. E. Payton, ed., Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 26, 213-248.
- Galloway, W.E., 1989a, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 73, 125-142.
- Galloway, W.E., 1989b, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis II: application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 73, 143-154.
- Mitchum, R.M., Jr. and Vail, P.R., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure: in C. E. Payton, ed., Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 26, 135-143.
- Payton, C.E., ed., 1977, Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration, AAPG Memoir, 26, 516.
- Plint, A.G., Eyles, N., Eyles, C.H., and Walker, R.G., 1992, Control of sea level change: in R. G. Walker and N. P. James, Eds., Facies Models: Response to sea level change. Geological Association of Canada, 15-25.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition II-sequence and systems tract models: in C.K. Wilgus *et al.*, Eds., Sea-level changes: an integrated approach: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 42, 125-154.
- Poumot, C., 1989, Palynological evidence for eustatic events in the tropical Neogene, Bull. Centres Rech. Elf Aquitaine, 13, 437-453.
- Sloss, L. L., 1950, Paleozoic stratigraphy in the Montana area, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 34, 423-451.
- Taner, M.T., Koehler, F., and Sheriff, R.E., 1979, Complex seismic trace analysis, Geophysics, 44, 1041-1063.
- Vail, P.R., 1987, Seismic stratigraphy interpretation procedure: in A.W. Bally ed., Atlas of Seismic Stratigraphy. American Association of Petroleum Geologists, its studies in Geology, 27, 1-10.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campion, K.M., and Rahmanian, V.D., 1990, Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies, AAPG Methods in Exploration Series, 7, 55.

1999년 4월 22일 원고접수

1999년 8월 27일 원고채택