



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

제주분지 신생대 퇴적층 형성과정  
수치모델링

안 연 수

강원대학교 대학원

지질학과

2015년 2월



정 대 교 교 수 지 도  
이학석사학위논문

제주분지 신생대 퇴적층 형성과정  
수치모델링

Numerical modeling of the depositional and burial  
processes of Tertiary strata of the Jeju Basin

강원대학교 대학원

지질학과

안 연 수

안연수의 석사 학위논문을  
합격으로 판정함

2015년 12월

심사위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

# 제주분지 신생대 퇴적층 형성과정 수치모델링

안연수

강원대학교 대학원 지질학과

제주분지는 몇 개의 지구조 융기대들로 구분된 동중국해분지의 소분지들 중 하나로 이 분지의 북부에 위치하고 있으며, 동중국해는 북북동-남남서 방향의 단층에 의해 Zhemin 융기대, 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin), 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi uplift belt), 오키나와 해곡(Okinawa trough) 및 류큐 해령(Ryukyu Ridge) 등의 5개의 지구조대로 구분된다. 이번 연구에서는 제주분지의 중남부지역을 북서-남동으로 가로지르는 탄성과 탐사 축선과 동-서로 가로지르는 축선을 이용하여 퇴적층 모델링을 실시하였고, 가까운 위치에서 시추된 코어자료를 참조하여 퇴적층 입력 자료를 도출해 시뮬레이션을 수행하였다.

퇴적시스템 발달사 모델링을 위해 퇴적분지의 형성 및 진화과정에 관여한 것으로 추정되는 입력값(input data)을 정량적으로 평가하여 분지 내 퇴적층의 축적, 매몰 속성과정을 재현하였다. 이번 연구에서는 제주분지 내 퇴적층의 광역부정합면을 기준으로 4개의 Stage로 나누었으며 퇴적층 simulation 분석을 위해 다시 6개의 Unit으로 추가 세분하였다. 이를 바탕으로 모식단면도를 만들어 시뮬레이션에 필요한 여러 변수를 정량화하였다. 이번 연구를 위해 탄성과 단면도와 시추공 자료를 바탕으로 산출한 퇴적층 분포 모식도와 해수면 변화(sea-level change), 퇴적물 공급량(sediment supply), 침강률

(subsidence rate) 등을 simulation을 위한 입력 자료로 활용하였다. 퇴적분지 생성 이후 퇴적물 축적 및 매몰 속성과정을 재현해 주는 2-D graphic simulation software인 SEDPAK을 활용하여 sediment simulation 분석을 실시하고 simulation 분석결과를 기초로 하여 분지의 진화과정과 퇴적시스템 발달사를 재현하고자 하였다.

모델링 수행 결과, Stage 1이 형성되는 시기에는 신생대 에오세 시기로서 분지가 형성되는 초기로 지속적인 단층운동이 발생하였고 높은 침강률과 높은 퇴적율을 보인다. Stage 2가 형성되는 시기는 신생대 올리고세 시기로서 퇴적환경이 육성환경에서 해성환경으로 전이되며, 침강과 융기가 반복되고 낮은 퇴적율을 보인다. Stage 3는 마이오세시기로서 지속적으로 침강이 일어나며 높은 침강률과 높은 퇴적율을 보이고, 마지막으로 광범위한 침강이 일어나는 Stage 4는 플라이오세~플라이스토세 시기로서 천해환경에서 높은 침강률과 높은 퇴적율을 보인다. 열적성숙도 시뮬레이션 분석 결과는 Line 1, 2 모두 Unit A에서 onset of oil generation 성숙도를 보이며, Stage 4가 형성되는 시기에 oil생성이 시작된다.

# 목 차

국문 요약	i
목차	iii
List of Figures	v
List of Tables	viii
I. 서론	1
II. 연구지역	3
III. 연구방법	6
III-1. SEDPAK simulation 원리와 기능	6
III-2. Simulation 입력 변수	10
IV. 연구결과	15
IV-1. 2D모델링	15
IV-1-1. Line 1	15
IV-1-2. Line 2	24
IV-2. 최종입력변수 결정	32
IV-2-1. 퇴적물 공급률	32
IV-2-2. 침강률	36
IV-2-3. 해수면 변화	40



V. 토의	41
V-1. Simulation 결과의 해석	41
V-1-1. Stage 1	43
V-1-2. Stage 2	44
V-1-3. Stage 3	45
V-1-4. Stage 4	46
V-2. 열성속도 모델링	47
VI. 결론	50
참고문헌	53

## List of Figures

Fig. 1. Location map of the study area including drilling wells and seismic Lines (Kim and Son, 2013). . . . .	5
Fig. 2. Flow chart of SEDPAK simulation program(Kim et al., 2007). . . . .	9
Fig 3. The interpreted seismic profile of the simulated 85-13 section. . . . .	12
Fig 4. The interpreted seismic profile of the simulated 81-138 section. . . . .	12
Fig 5. Input diagram for 2D Modeling, (A): Line 85-13, (B): Line 81-138. . . . .	13
Fig. 6. A correlation of sediment supply rate, depositional distance and height. (S=sediment supply rate, D=depositional distance, H=height, T=sedimentation rate)(Kim, 2011). . . . .	14
Fig 7. The simulation results of Line 1 for Unit A. . . . .	18
Fig 8. The simulation results of Line 1 for Unit B. . . . .	19

Fig 9. The simulation results of Line 1 for Unit C. ....	20
Fig 10. The simulation results of Line 1 for Unit D. ....	21
Fig 11. The simulation results of Line 1 for Unit E. ....	22
Fig 12. The simulation results of Line 1 for Unit F. ....	23
Fig 13. The simulation results of Line 2 for Unit A. ....	26
Fig 14. The simulation results of Line 2 for Unit B. ....	27
Fig 15. The simulation results of Line 2 for Unit C. ....	28
Fig 16. The simulation results of Line 2 for Unit D. ....	29
Fig 17. The simulation results of Line 2 for Unit E. ....	30
Fig 18. The simulation results of Line 2 for Unit F. ....	31
Fig 19. Sediment supply rate curve of Line 1. ....	33
Fig 20. Sediment supply rate curve of each sediment type of Line 1. ....	33

Fig 21. Sediment supply rate curve of Line 2. ....	34
Fig 22. Sediment supply rate curve of each sediment type of Line 2. ....	34
Fig 23. Subsidence rate curves of Line 1. ....	37
Fig 24. Subsidence rate curves of Line 1 at each distance and time. ....	37
Fig 25 Subsidence rate curves of Line 2. ....	38
Fig 26. Subsidence rate curves of Line 2 at each distance and time. ....	38
Fig 27. Digitized eustatic sea level curve (Haq et al., 1987). ..	40
Fig 28. 3D simulation of sequence in the Jeju Basin. ....	42
Fig 29. The simulation results of the TTI maturity show oil window of the Line 1, 2. ....	49

## List of Table

Table 1. Input data of geological ages for six Units. ....	14
Table 2. Sediment supply rate for each sediment type for six Units of Line 1. ....	35
Table 3. Sediment supply rate for each sediment type for six Units of Line 2. ....	35
Table 4. Subsidence rates at each distance for six Units of Line 1. ....	39
Table 5. Subsidence rates at each distance for six Units of Line 2. ....	39

# I. 서론

퇴적분지 내에 축적되어 있는 퇴적층에 대한 해석은 지질조사와 지구물리 탐사 등 다양한 자료 획득을 토대로 가능하다. 하지만 이들 자료는 현재의 형태, 즉 퇴적층 진화과정의 마지막 단계만을 보여주기 때문에 과거 퇴적진화 과정을 이해하기에는 어려움이 있다.

컴퓨터 시뮬레이션 소프트웨어(computer simulation software)를 이용한 퇴적층 매물 진화 과정 복원 연구는 이러한 해석의 불확실성을 보완할 수 있으며, 시간 및 공간적 제약을 받지 않고 과거에 형성된 지층이 어떤 퇴적 과정을 거쳐 현재의 모습을 갖게 되었는지에 대해 모델링을 할 수 있게 한다. 그리고 퇴적층의 형성 과정에서 어떤 요소가 우세하게 작용하였는지, 과거에 작용했던 퇴적 조건 또는 환경에 대한 다양한 영향요소들을 적용하여 퇴적과정과 진화단계를 재현함으로써 보다 현실감 있게 지질학적 현상들을 묘사할 수 있으며 이와 관련된 많은 정보를 얻을 수 있다. 순수 학문적인 분야 이외에도 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연구는 석유 개발에 있어서도 매우 유용하게 사용되며, 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(왕민규, 2012; 김대홍, 2011; 이보라와 손병국, 2007; Al-Ameri and Al-Musawi, 2010; Hudson, S.M., Ganson, A.D., 2010).

이번 연구에서는 제주분지가 형성된 이후부터 현재까지 퇴적층 형성과 매물진화과정을 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 SEDPAK을 이용하여 모델링(modeling)함으로써, 분지의 형성 및 진화 과정을 복원하는데 목적이 있다. 기존 연구들에서 주로 해양 환경 또는 호수 환경에 대한 모델링을 위해 사용되던 프로그램을 이번 연구에서는 육성 환경과 해양 환경이 전이되는 퇴

적분지에 적용함으로써, 기존 연구에서 사용해 온 분지로의 퇴적물 공급, 분지기반의 침강 그리고 해수면 변화 요소 이외에 추가로 침식기준면 (base-level)의 개념을 도입하여 이들 요소들의 영향 정도를 정량적으로 제시하고 가시화할 수 있었다. 최종적으로 시뮬레이션의 결과로부터 얻어진 여러 변수들의 정량적인 값과 그 변수들의 상관관계에 대해 파악하고 기존 연구결과와 비교함으로써 제주분지의 진화과정과 퇴적시스템 발달사를 재현하고자 하였다.

## II. 연구지역

연구지역인 제주분지는 중국, 타이완, 일본, 한국 인근의 바다를 포함하는 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin)의 북동쪽에 위치하며 (Fig. 1), 제주분지의 수심은 70~150 m 내외로 비교적 얇고, 남동쪽으로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다(Kwon, 1996). 동중국해는 북북동-남남서 방향 단층의 발달로 체민 융기대(Zhemin Uplift), 동중국해 분지(East China Sea Shelf Basin), 타이완-신지 습곡대(Taiwan-Sinzi belt), 오키나와 해곡(Okinawa trough) 및 류큐 해령(Ryukyu Ridge) 등 5개의 지구조대로 구분되며, 이들의 형성 시기는 동쪽으로 가면서 젊어진다(허식 외, 2004). 동중국해 분지는 몇 개의 지구조 융기대들로 구분된 소분지들로 구성되어 있으며, 우리나라 남해 지역에는 도미분지와 제주분지가 위치하고 있다(허식 외, 2004). 그리고 제주분지의 기반암은 화성암(화강암, 화강섬록암, 안산암)과 변성암(편마암)으로 구성되어 있으며, 기반암 내에 북동-남서 방향의 지구(graben)내지 반지구(half-graben) 구조가 발달되어 있다(Cukur, 2011).

제주 퇴적분지의 형성은 백악기에 태평양판이 유라시아판 밑으로 섭입하면서 발생한 압축력에 의해 주향이동단층이 형성되고 이후 인장력에 의해 열 개가 시작되었으며, 에오세 말과 올리고세 사이에 인도와 유라시아판의 충돌로 인한 압축력이 분지에 작용하여 올리고세 이전의 퇴적물들은 융기 후 일차침식을 받게 되었다. 이 결과 광역적인 부정합면이 형성되었다(Kim and Son, 2013). 제주분지는 전·중기 마이오세에 급격한 침강이 일어났으며(권영인 외., 1995), 필리핀판이 북쪽으로 섭입함에 따라 열개 및 침강이 계속되었다(Kim and Son, 2013). 후기 마이오세에는 두꺼운 퇴적층이 형성되



었으나 광역적인 융기 후 다시 많은 양의 퇴적물이 침식되고, 그로 인해 광역적인 부정합면이 형성되었다. 플라이오세부터 현재까지는 광역적인 침강이 계속되고 있으며, 가장 두꺼운 퇴적층을 형성하고 있다.

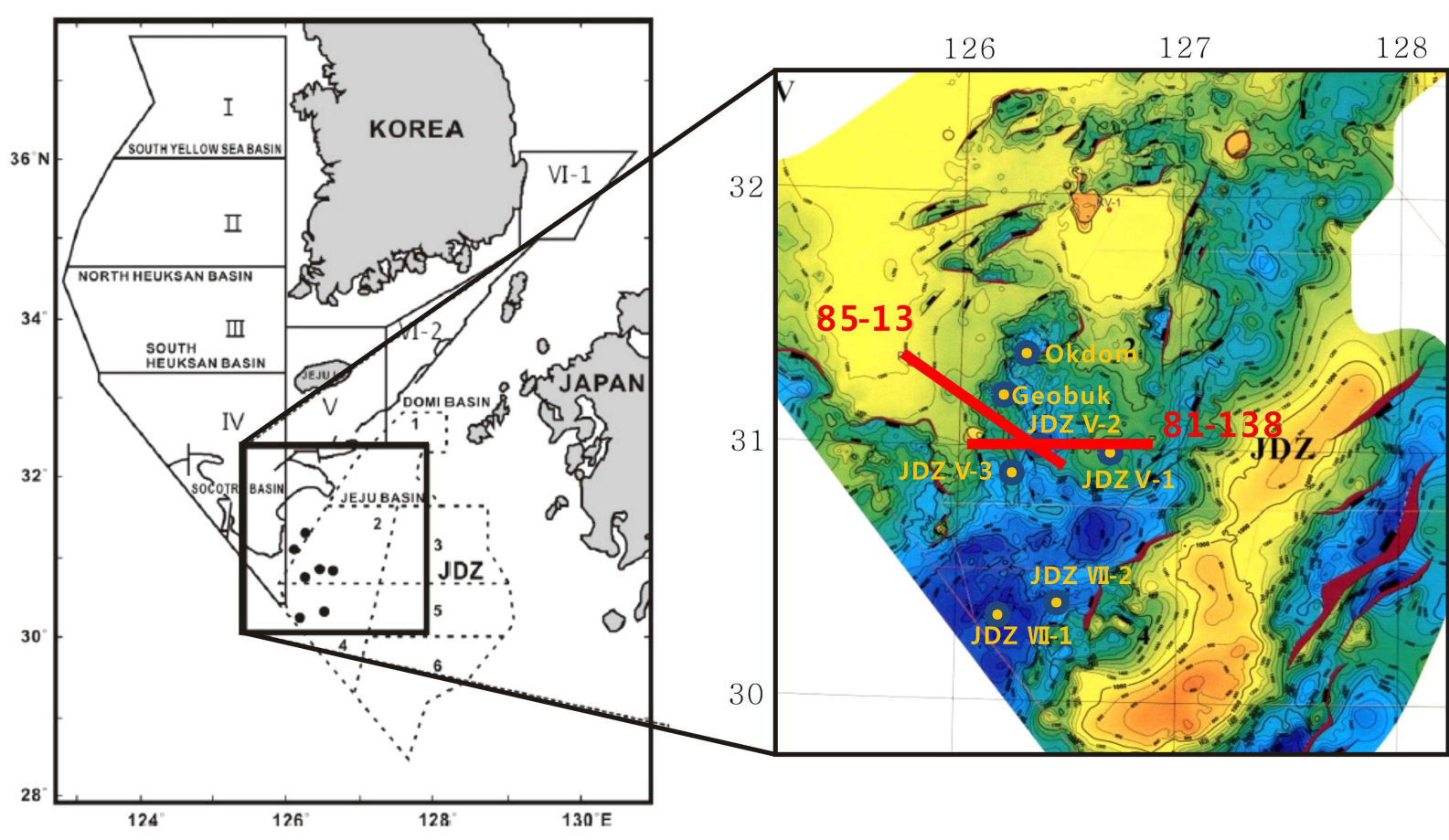


Fig. 1. Location map of the study area including drilling wells and seismic Lines (Kim and Son, 2013).

### Ⅲ. 연구방법

#### Ⅲ-1. SEDPAK Simulation 원리와 기능

이번 연구에서 활용된 SEDPAK은 퇴적분지 생성 이후 분지 내에 퇴적된 퇴적층을 기하학적으로 표현하고 매물 속성과정을 재현해주는 2차원 그래픽 시뮬레이션 소프트웨어로, 1988년 미국 University of South Carolina의 StratMod Group에 의해서 개발되었으며, 층서학적 예측을 위해 경험적 접근(empirical approach)법을 사용한다(Kendall *et al.*, 1993). SEDPAK은 퇴적공간을 채우는 전진 퇴적 시뮬레이션(forward sedimentary simulation) 프로그램으로 층서 경계(sequence boundary) 사이에 형성되는 기하학적 형태를 시각화함으로써 분지를 채우는 모델링의 기초 틀을 제공한다(Siregar, 1995)(Fig. 2). 또한 탄화수소의 잠재성과 분지 내 퇴적물 축적을 추정하여 표현할 때에도 사용가능하며 이는 지구조 운동(tectonic movement), 전 지구적 해수면 변화(eustasy), 퇴적물유입(sedimentation)의 변화에 반응하여 발생하는 쇄설성 또는 탄산염질 퇴적물의 퇴적작용과 매물 진화과정을 재현할 수 있다(Strobel *et al.*, 1989).

분지의 퇴적을 조절하는 주요 변수로는 해수면 변화(sea level change), 침강률(subsidence rate), 퇴적물 공급률(sediment supply rate)을 사용하며 그 외에도 분지 생성 후 초기의 기저면 형태(basin surface)와 퇴적물의 이동거리(depositional distance) 등의 보조 입력 변수들도 고려하여 시뮬레이션을 수행한다. 이러한 변수들은 탄성파탐사 자료, 시추공 자료 등 여러 기초자료를 이용하여 정량적으로 도출한 후, 반복적인 계산을 통해 현재 퇴적층과 동

일한 기하학적 형태를 얻게 되면 그에 해당하는 변수들을 최종 정량적인 입력변수 값으로 확정하게 된다. 이번 연구에서는 2개의 해석된 탄성과 축선 단면과 시추자료 등 기존자료를 이용해 퇴적단위를 6개의 층(Unit)으로 나누었으며, 모식단면도를 작성하고 퇴적층의 순차적인 형성진화과정을 도출하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다.

퇴적 시뮬레이션(sedimentary simulation)의 장점으로는 석유 탐사 시 시추대상 또는 위치에 대한 지질정보를 제공해주고, 석유시스템에서 각 석유시스템 요소 간의 관계를 모델링에 의해 파악할 수 있으며, 위험 요소(risk factor)를 완화할 수 있게 도와준다. 또한 퇴적물 공급률(sediment supply rate), 경사면 각(slope angle), 퇴적물 이동 거리(depositional distance), 해수면 변화(sea level change) 및 지구조운동(tectonic) 등의 층서를 결정하는 주요 요소에 대해 정량값을 제시함으로써 탄성과 해석에 유익한 자료를 제공하기도 한다(김대홍, 2011).

SEDPACK 시뮬레이션 프로그램의 장점으로는 이해하기 쉬운 경험적 모델을 사용하며, 퇴적과정에 있어 복잡한 변수들의 상관관계를 단순화하고 그 결과를 바로 볼 수 있다는 점이다. 사용자의 필요에 따라 입력변수들을 쉽게 설정하고 수정 및 해석이 가능하며 일반적인 퇴적분지 규모에서 적절한 모델링을 수행할 수 있다. 완성된 모델링의 결과를 이용하여 개략적인 초기 입력변수 값을 최적화해서 최종적으로 입력변수를 도출해 낼 수 있으며, 이는 다른 연구의 기초자료로 활용할 수 있다. 또한 프로그램에 내장된 TTI(Time Temperature Index)와 kinetic 모델을 이용하여 석유와 가스의 생성구간(oil or gas window)을 가시적으로 볼 수 있어 저류층 특성화는 물론 석유 탐사 시 유용하게 활용할 수 있는 장점이 있다(차승희, 2011).

SEDPACK의 한계로는 입력되는 퇴적물의 종류가 사질(sand)퇴적물과 이질

(shale)퇴적물, 탄산염(carbonate)퇴적물로만 단순화시켜 입력할 수 있기에 역질 퇴적물은 사질퇴적물로 간주하여야 하고, 이질 퇴적물은 모두 shale로 구분하여 입력하도록 구성되어 있다. 그러므로 퇴적 당시의 퇴적물의 공극률, 투수율 및 속성작용 등을 상세하게 나타내기에는 어려움이 있다. 또한 해수면의 아래에서만 퇴적이 이루어지기 때문에 해수면 위에서 퇴적이 발생하는 육성 퇴적층에 대한 시뮬레이션의 경우 해수면을 입력변수로 사용하는 대신에 침식기준면(base-level)을 설정하여 구현하여야 하고, 이론적으로는 침식기준면 위에서는 침식이 일어나야 하지만 프로그램에서는 침식이 일어나는 시간이 짧을 경우, 충분한 침식이 자동으로 일어나지 않기 때문에 침식이 시작되는 시기에 수동으로 침식면을 입력해야하는 한라는 단점이 있다.

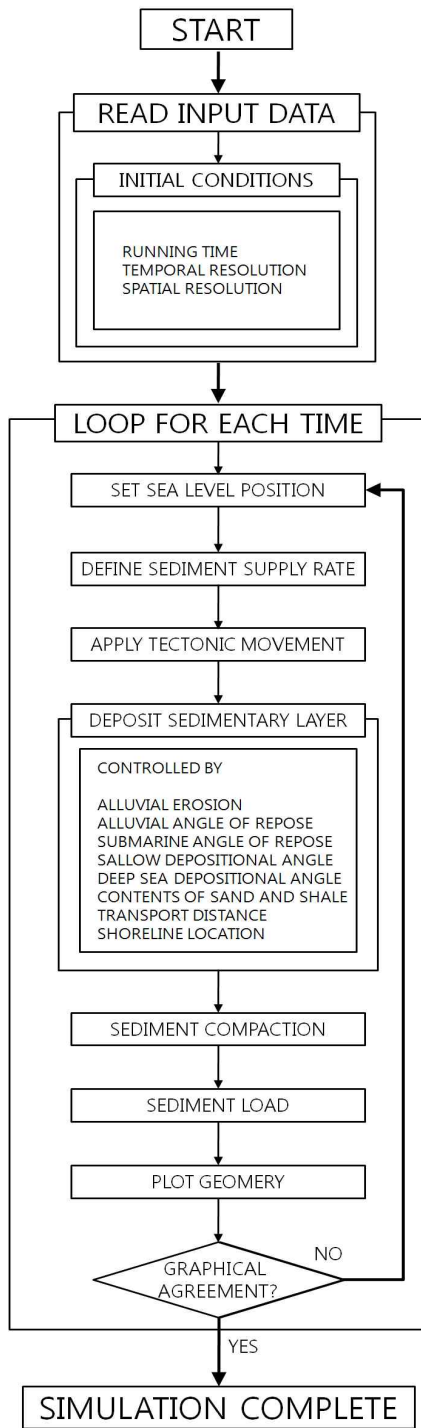


Fig 2. Flow chart of SEDPAK simulation program (Kim et al., 2007).

### III-2. Simulation 입력 변수

SEDPAK 모델링은 순차층 경계(sequence boundary) 사이에 형성되는 기하학적 형태를 시각화함으로써 분지를 채우는 과정을 이해하는데 도움을 준다. 퇴적층이 형성되는 과정을 재현하기 위해서는 퇴적단위(sedimentary sequence Unit)의 연대와 깊이, 순차 층 사이의 두께 및 지구조운동 시기를 파악하는 것이 매우 중요하다(김대홍, 2011). 이번 연구에서는 해석된 탄성파 단면 85-13 Line(Fig. 1; Fig. 3)과 81-138 Line(Fig. 1; Fig. 4)을 사용하였으며, 인접한 시추공 JDZ V-2 외에 선행 연구된 다른 자료들을 이용하여 퇴적단위의 연대와 깊이, 개별 퇴적단위의 두께, 암상, 퇴적환경 등을 파악하여 모식단면도를 작성하였다(Fig. 5, Table 1).

퇴적물 공급률은 앞서 언급한 모식도상에서 개별 퇴적단위의 면적을 시간으로 나누어 계산하였으며, 코어자료에서 얻어진 암상비율을 적용하여 사질과 이질 퇴적물로 구분하여 입력하였다. SEDPAK은 기본 설정에 의해 퇴적물 유입부로부터 직각삼각형 형태로 퇴적되며 퇴적물 공급량은  $\text{km}^2/\text{ka}$  로 표현되므로 퇴적물 이동거리(depositional distance)에 따라 그 형태가 달라지고, 이를 보정하기 위해서 퇴적물 공급량을 퇴적물 이동거리로 나눈 단위거리 당 상대퇴적률로 정의하여 '퇴적률'로 표현한다(김대홍, 2011; Fig. 6).

침강률은 기존에 제시된 자료와 제주분지, 동중국해 대륙붕 분지, 주변의 지구조적인 운동을 고려하여 입력하였다. 퇴적작용이 시작된 에오세 시기에는 단층운동이 활발했으며, 분지의 침강이 비교적 빠르게 계속되었고, 올리고세에는 융기가 있었다(Yang, 1992). 전·중기 마이오세에는 급격한 침강이 일어났으며(권영인 외, 1995), 후기 마이오세에는 융기 후 침식이 일어났고, 이후 현재까지 광역적인 침강이 일어났다(Zhou *et al.*, 1989).

마지막으로 해수면 변화 자료는 Haq *et al.*(1987)이 제시한 자료를 입력하였으며, SEDPAK 프로그램에 0.2Ma 단위로 이미 입력되어 있는 값을 수정하지 않고 사용하였다. 연구지역은 시뮬레이션 시기 동안 육성환경과 해양환경 사이의 환경전이가 있었으므로, 육성환경의 경우 해수면 값을 그대로 사용하는 대신 침식기준면으로 전환하여 입력하였다. 따라서 해수면 변화값은 SEDPAK에 이미 입력된 default값을 그대로 활용했고, 퇴적물 공급률과 침강률 외 다른 보조 변수들은 시기별로 조정하여 시뮬레이션을 실시하였다.



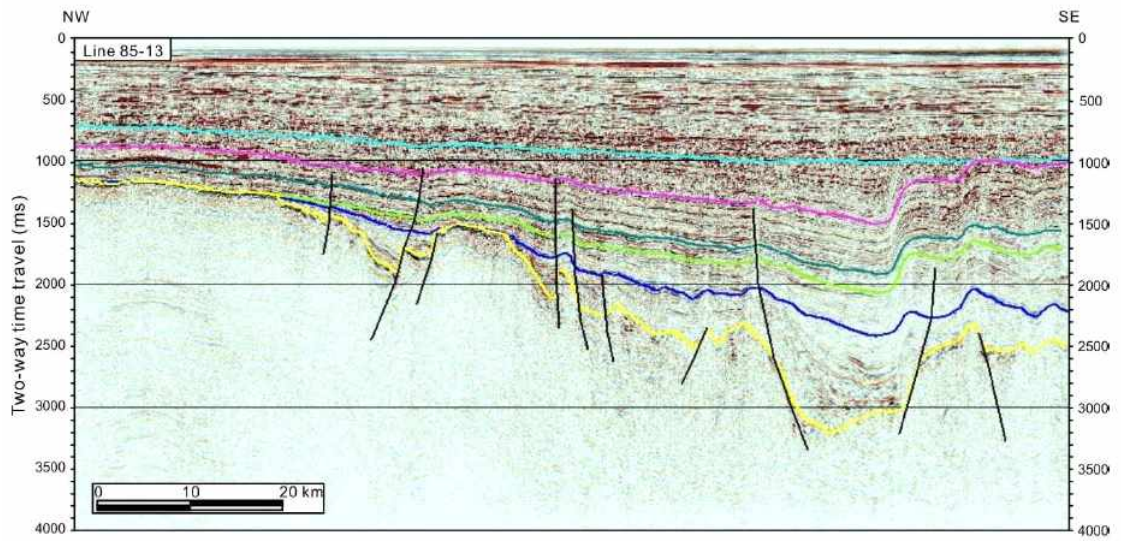


Fig 3. The interpreted seismic profile of the simulated 85-13 section.

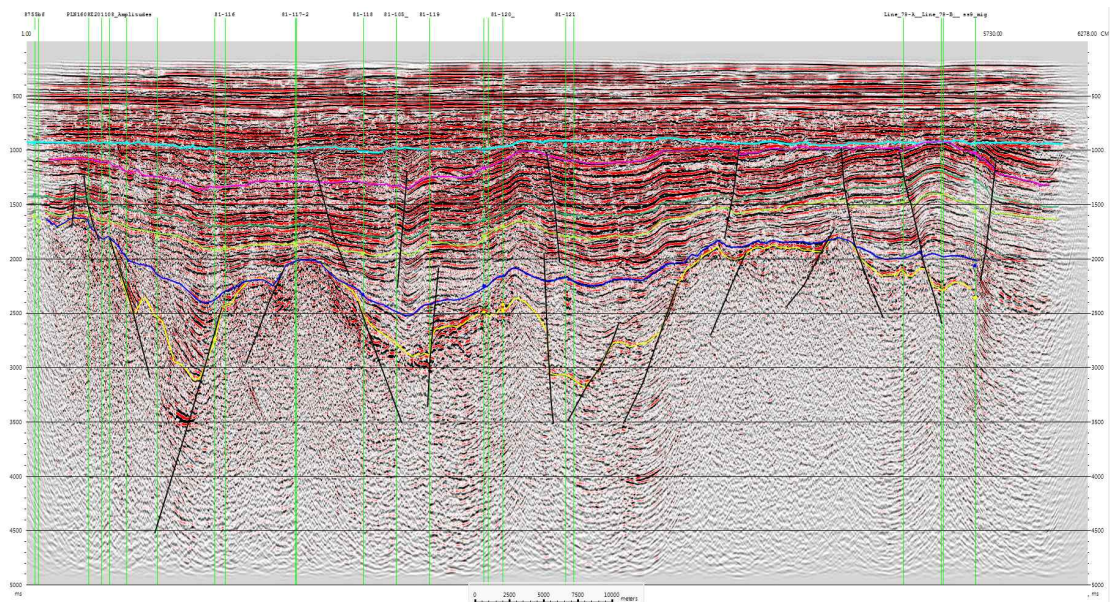


Fig 4. The interpreted seismic profile of the simulated 81-138 section.

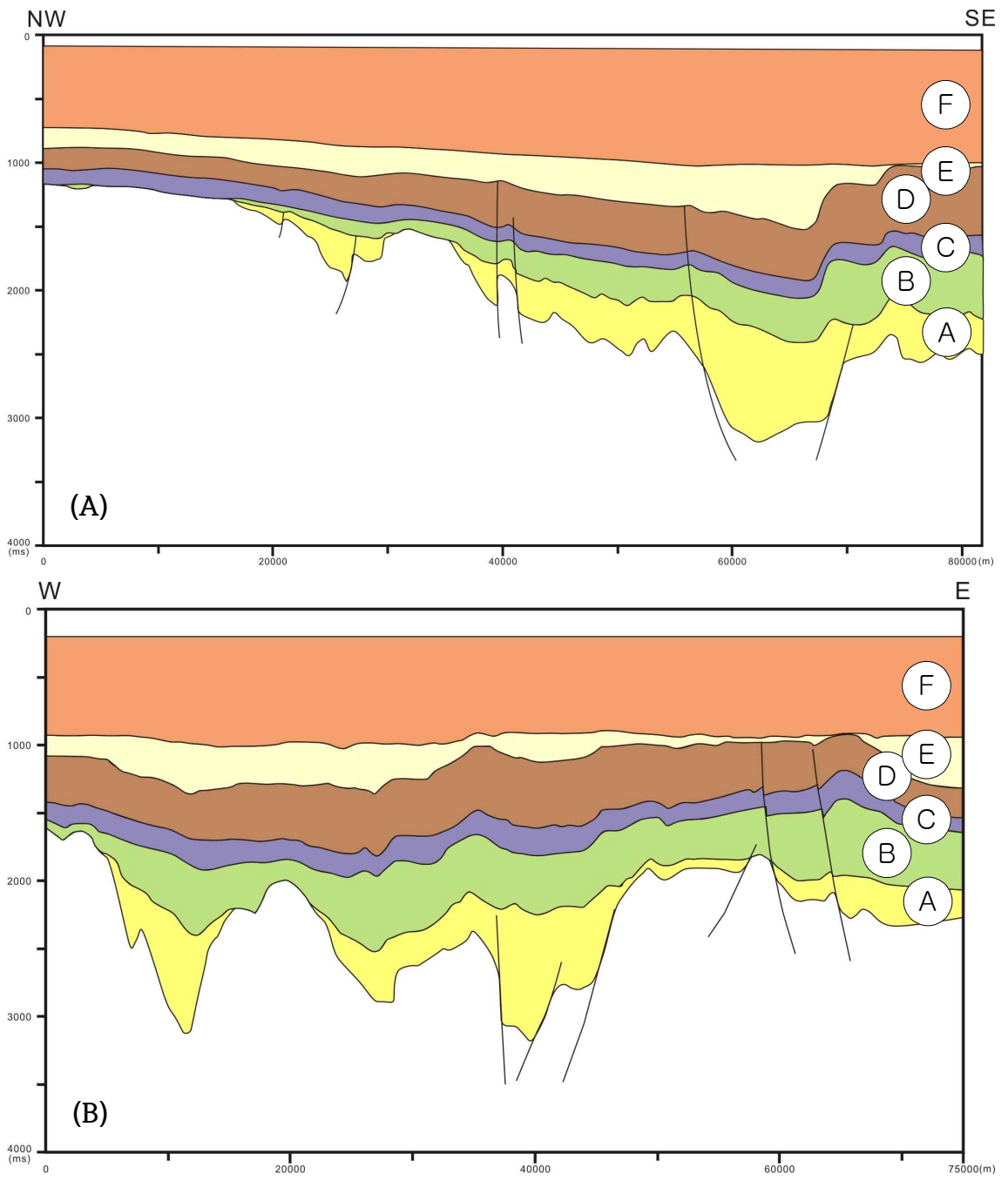
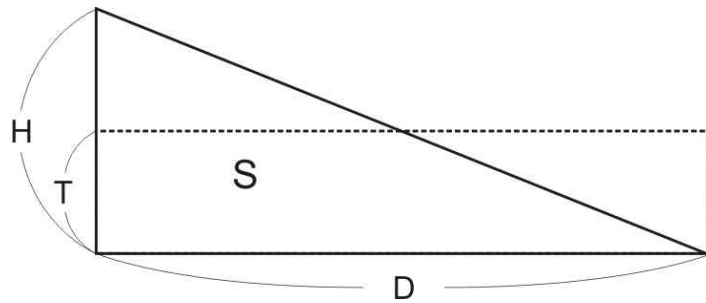


Fig 5. Input diagram for 2D Modeling, (A): Line 85-13, (B): Line 81-138.

Table 1. Input data of geological ages for six Units.

Rock Unit	Begin age (Ma)	Chronostratigraphy
F	5	Plio-Pleistocene
E	11	L. Miocene
D	16	M. Miocene
C	23	E. Miocene
B	36	Oligocene
A	45	Eocene



$$1) S = \frac{D \cdot H}{2}$$

$$2) H = \frac{2 \cdot S}{D}$$

$$3) \frac{H}{2} = \frac{S}{D}$$

$$4) T = \frac{S}{D}$$

Fig. 6. A correlation of sediment supply rate, depositional distance and height. (S=sediment supply rate, D=depositional distance, H=height, T=sedimentation rate)(Kim, 2011).

## IV. 연구결과

### IV-1. 2D 모델링

#### IV-1-1. Line 1

Line 1(85-13)은 북서-남동방향의 탄성과 단면으로 길이는 약 75 km이며, 퇴적물은 두껍게는 3200 m 이상, 얇게는 1200 m의 두께로, 북서방향에서 남동방향으로 갈수록 퇴적층이 두껍게 퇴적된 것을 확인할 수 있다.

Unit A는 에오세인 45~36 Ma 동안에 퇴적되었으며, 분지가 계속해서 열리는 시기로 단층운동이 활발하게 일어났으며, 이로 인해 분지의 기저면의 굴곡이 심했다. 하성 또는 호수 환경에서 퇴적이 진행되었으며, 사질퇴적물 0.0012 km<sup>2</sup>/ka, 이질퇴적물 0.0036 km<sup>2</sup>/ka로 이질퇴적물이 우세하다. 그리 높지 않은 퇴적물 공급률을 보이며, Line의 오른쪽(남동쪽)에서 퇴적물의 공급이 왼쪽(북서쪽)보다 더 많았던 것으로 해석되었다. 침강률은 거리에 따라 조금의 차이가 있지만 평균 침강률은 -0.1414 m/ka로 높은 침강률을 보였다.

Unit B는 올리고세인 36~23 Ma 동안에 퇴적되었으며, 후기에는 지반의 융기로 인해 퇴적물의 일부가 삭박되었다. 하성 또는 호수 환경에서 천해환경으로의 퇴적환경전이가 일어났고, 사질퇴적물 0.0018 km<sup>2</sup>/ka, 이질퇴적물 0.0018 km<sup>2</sup>/ka로 사질과 이질 퇴적물이 동일한 비율로 축적된 것으로 간주하였으며, 낮은 퇴적물 공급률을 보였다. 융기와 침강이 계속해서 반복되는 시기로, 평균 침강률은 0.0043 m/ka로 낮게 나타나며, Unit A와 마찬가지로 북

서쪽에서 남동쪽으로 갈수록 두께가 두꺼워지는 지층의 형태를 보여준다.

Unit C는 초기 마이오세인 23~16 Ma 동안에 퇴적되었으며, 퇴적분지 기저면의 침강은 계속 진행되었다. 암상은 이질퇴적물이 우세하며, 사질퇴적물  $0.0012 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물  $0.0036 \text{ km}^2/\text{ka}$ 로 낮은 퇴적률을 보인다. 퇴적환경은 하성 또는 호수 환경으로 해석되었으며, 시뮬레이션 결과 가장 얇은 층을 형성하고, Unit A, B와 달리 이질 퇴적물이 우세하게 퇴적되어 수평적으로 두께가 비슷한 퇴적층이 형성되었다. 기반의 평균 침강률은  $-0.08 \text{ m/ka}$ 로 비교적 높게 나타난다.

Unit D는 중기 마이오세인 16~11 Ma 동안에 퇴적되었으며, 전기 마이오세와 같은 퇴적환경에서 퇴적된 것으로 제시된다. 암상은 이질퇴적물이 우세하며, 사질퇴적물은  $0.0034 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물은  $0.0062 \text{ km}^2/\text{ka}$ 로 Unit A에서부터 이 시기까지 퇴적물 공급률이 점점 높아지는 경향성을 보였다. 퇴적분지 기반의 평균 침강률은  $-0.09 \text{ m/ka}$ 로 높게 나타나며, 광역적인 침강이 있었음을 보여준다. Unit D가 퇴적된 후 구조운동으로 크고 작은 습곡들이 형성되었다.

Unit E는 후기 마이오세인 11~5Ma 동안에 퇴적되었으며, Unit C, D와 같은 퇴적환경이 계속 유지되다가 기반의 융기 후 광역적으로 일어난 침식으로 인해 부정합면이 형성되었다. 침식이 시작된 7 Ma부터 5 Ma까지는 퇴적물 공급이 중단되었다. 시추코어 퇴적물 자료를 확인한 결과 이질퇴적물만으로 이루어져 있으며,  $0.0186 \text{ km}^2/\text{ka}$ 로 높은 퇴적률을 보였다. 침강률은  $0.0275 \text{ m/ka}$ 로 매우 낮은 값을 보였다.

Unit F는 5Ma~현재까지 형성된 퇴적층으로, 천해환경에서 퇴적된 퇴적물로 추정되고 퇴적환경이 큰 변화없이 유지되었으며, 거의 이질퇴적물만으로 이루어져 있다. 양방향에서 퇴적물이 공급되어  $0.0320 \text{ km}^2/\text{ka}$ 의 높은 퇴적물

공급률을 보였고, 광역적인 침강이 계속되었던 시기로  $-0.0871 \text{ m/ka}$ 의 높은 침강률을 보였다.

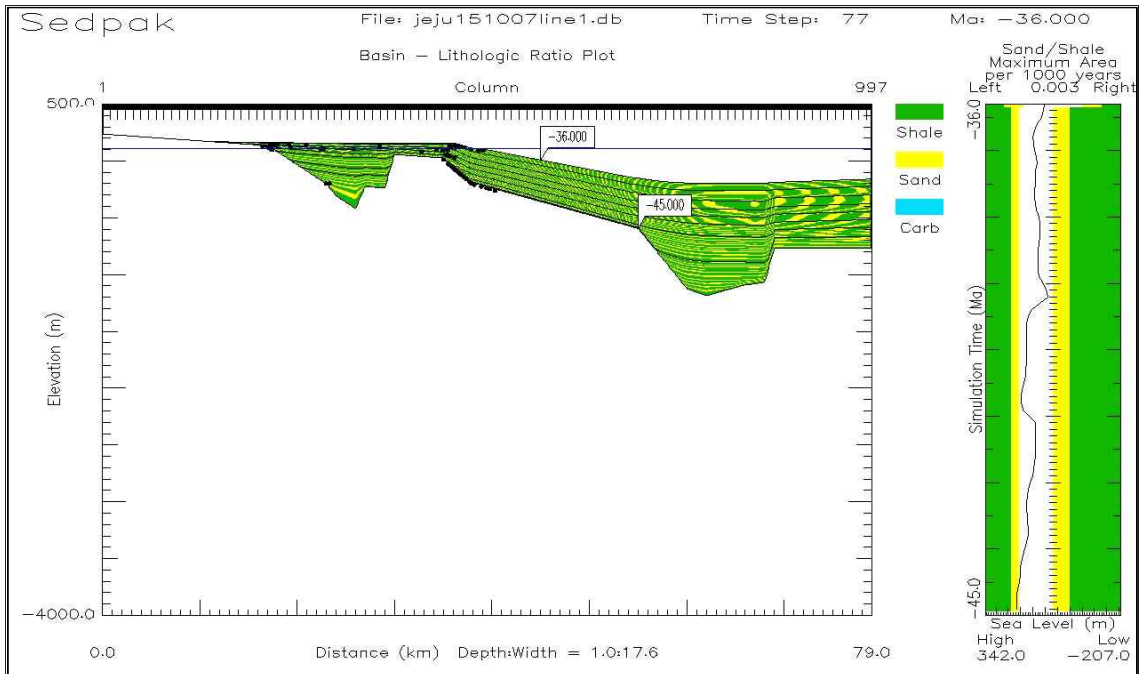
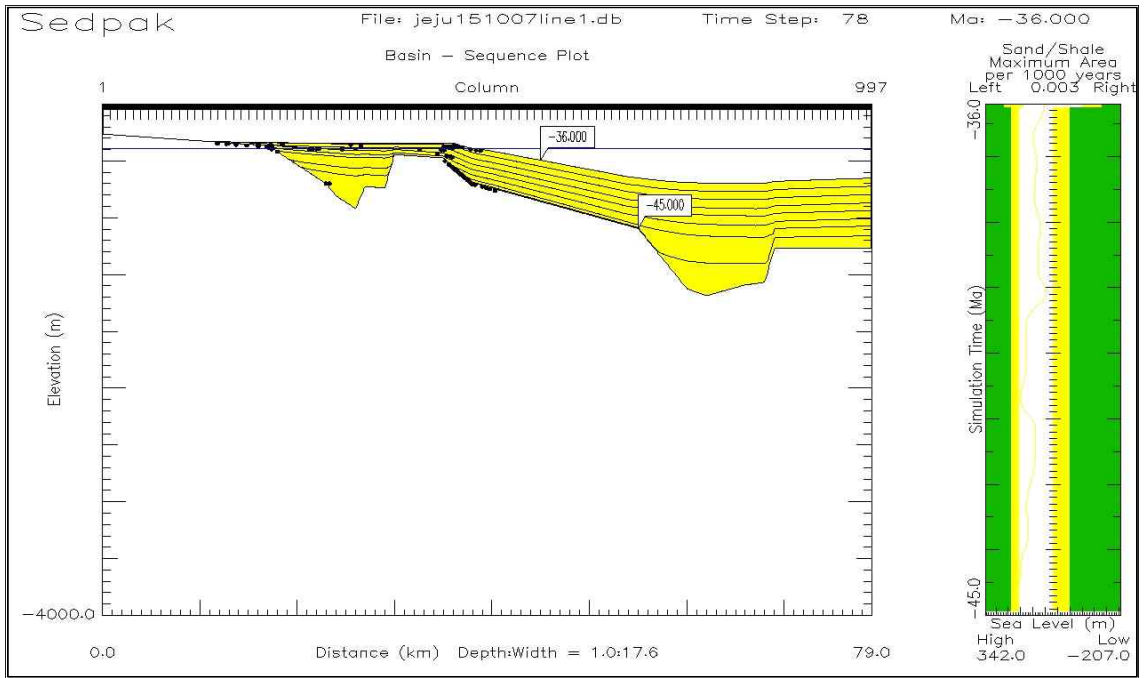


Fig 7. The simulation results of Line 1 for Unit A.



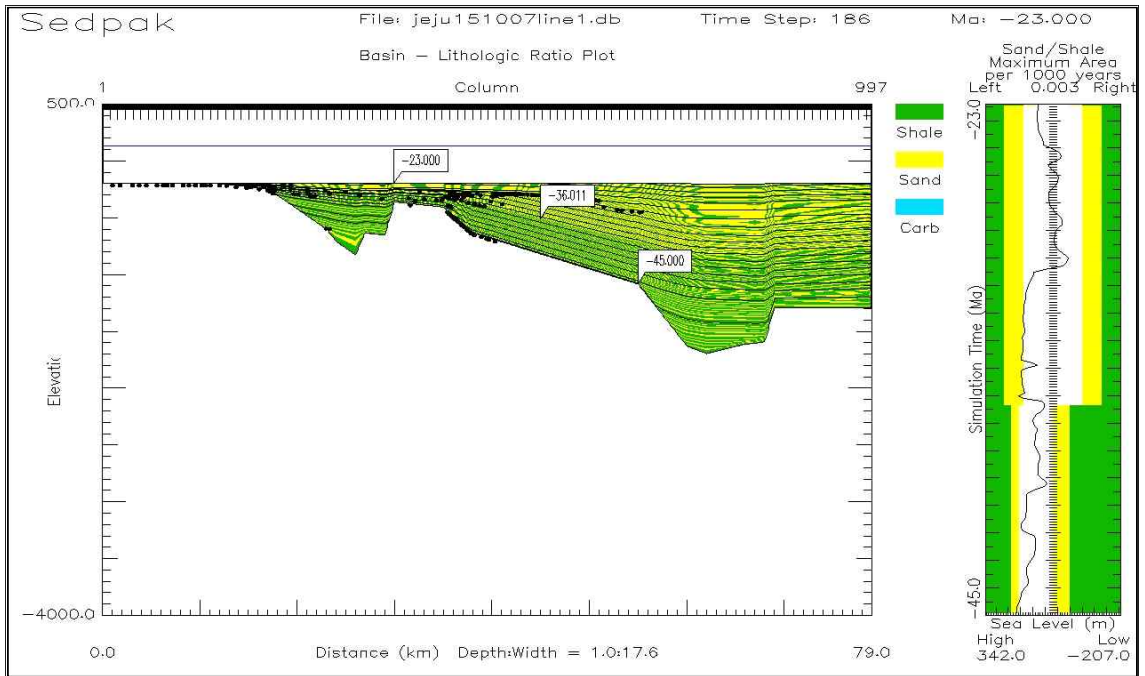
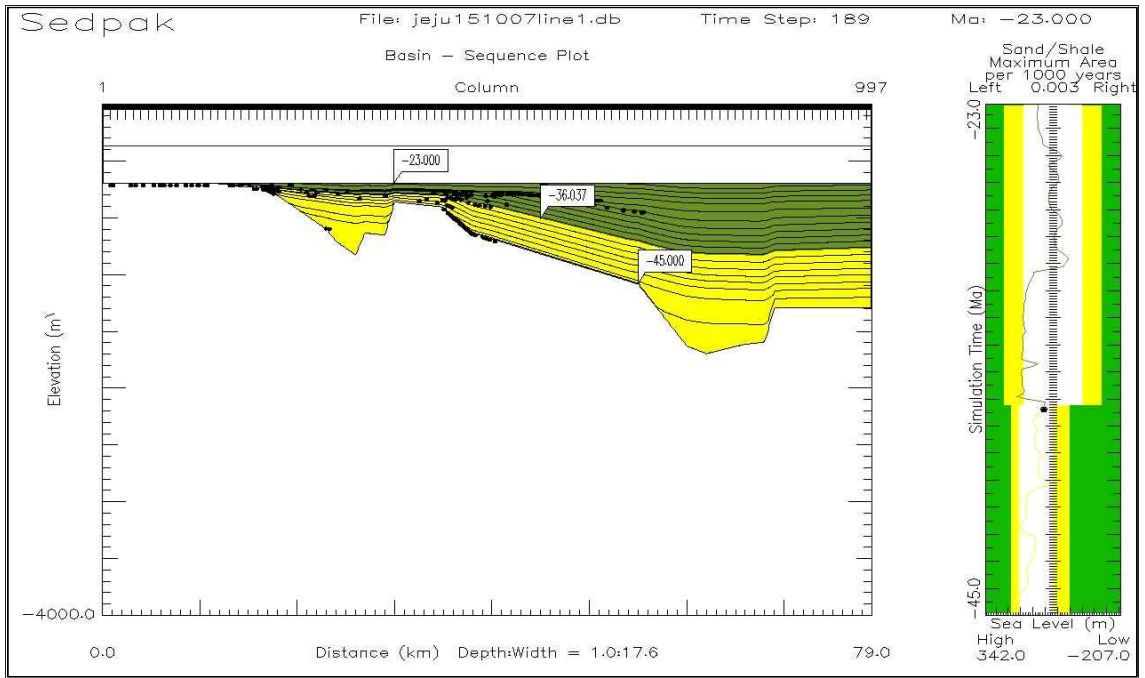


Fig 8. The simulation results of Line 1 for Unit B.



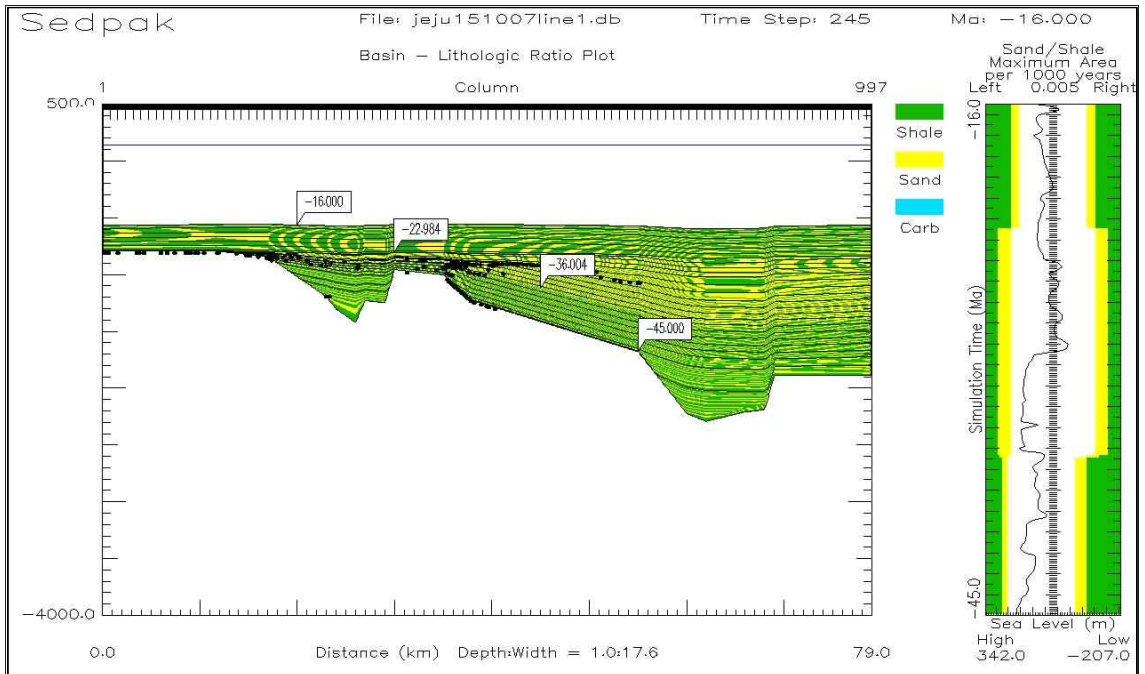
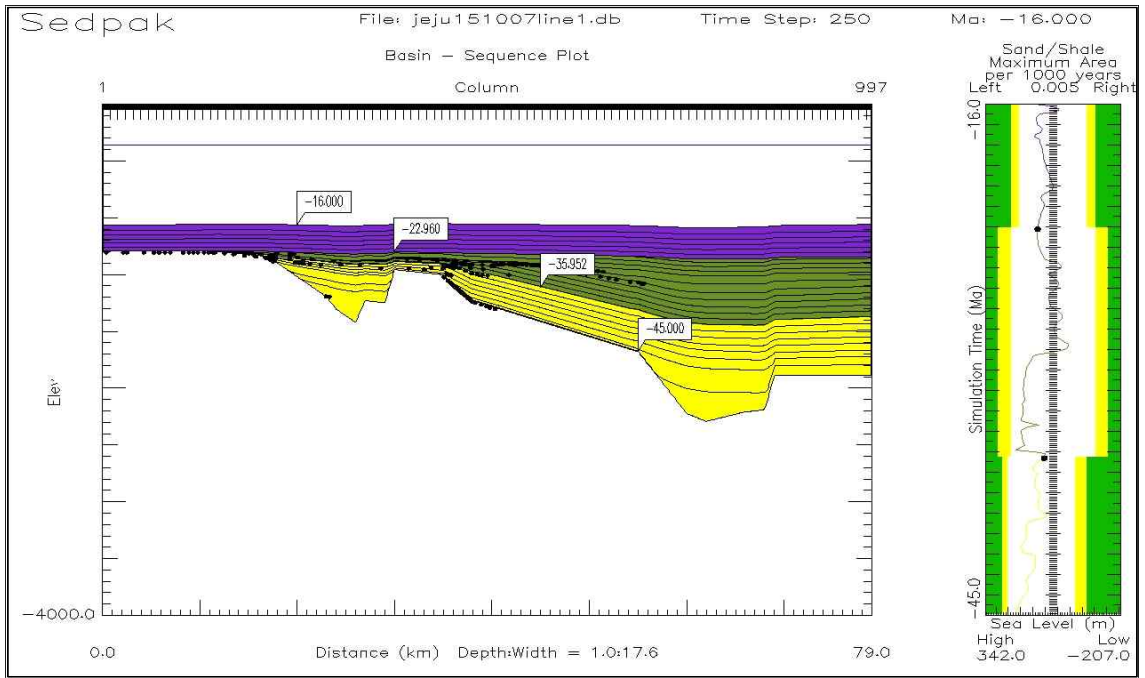


Fig 9. The simulation results of Line 1 for Unit C.

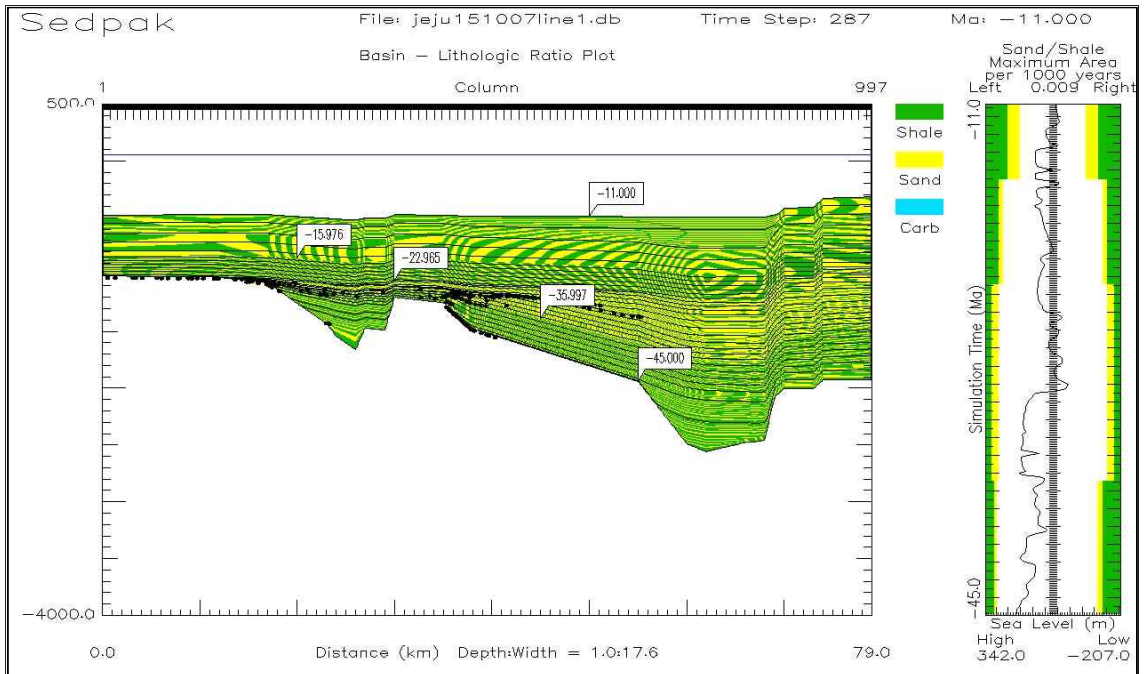
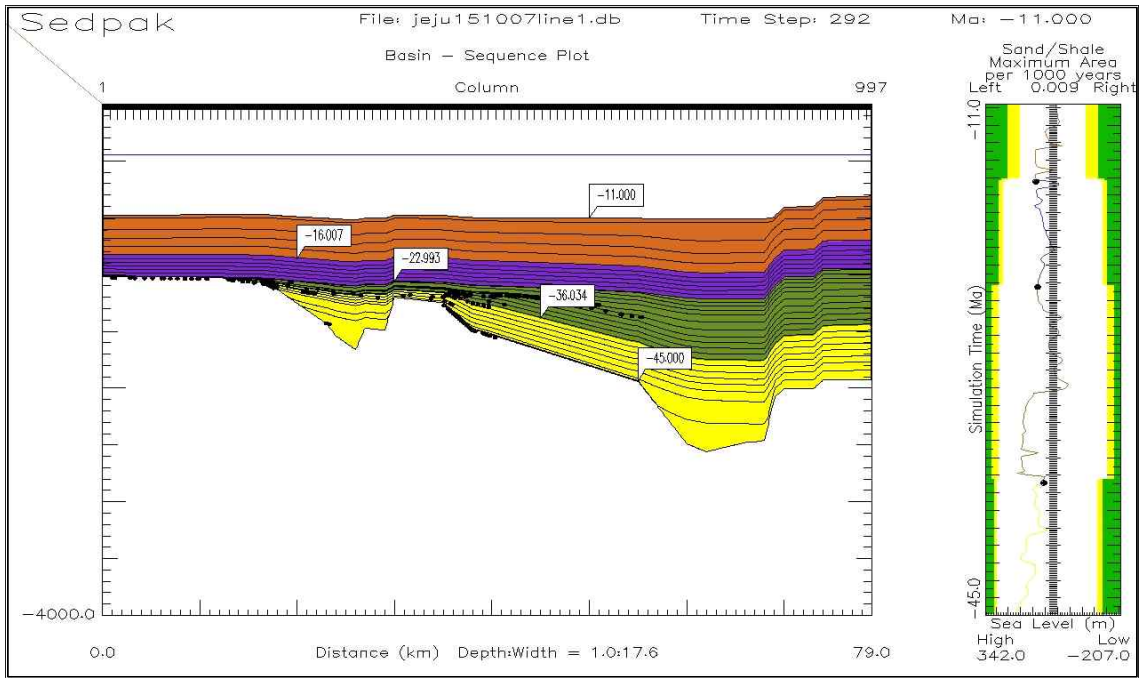


Fig 10. The simulation results of Line 1 for Unit D.

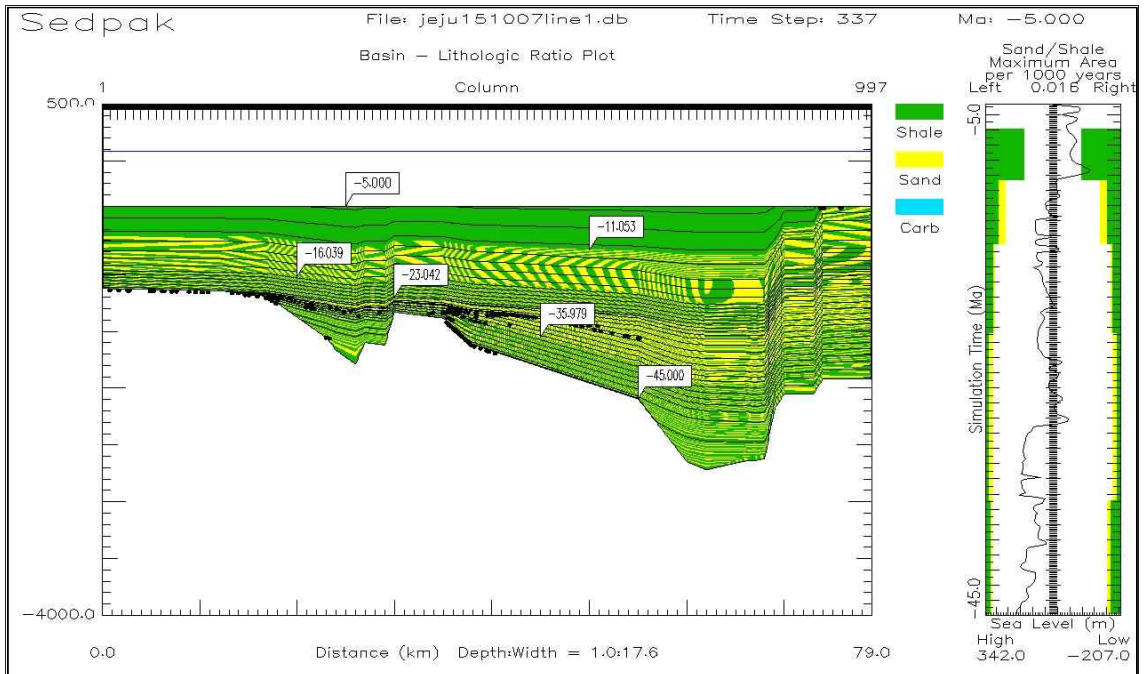
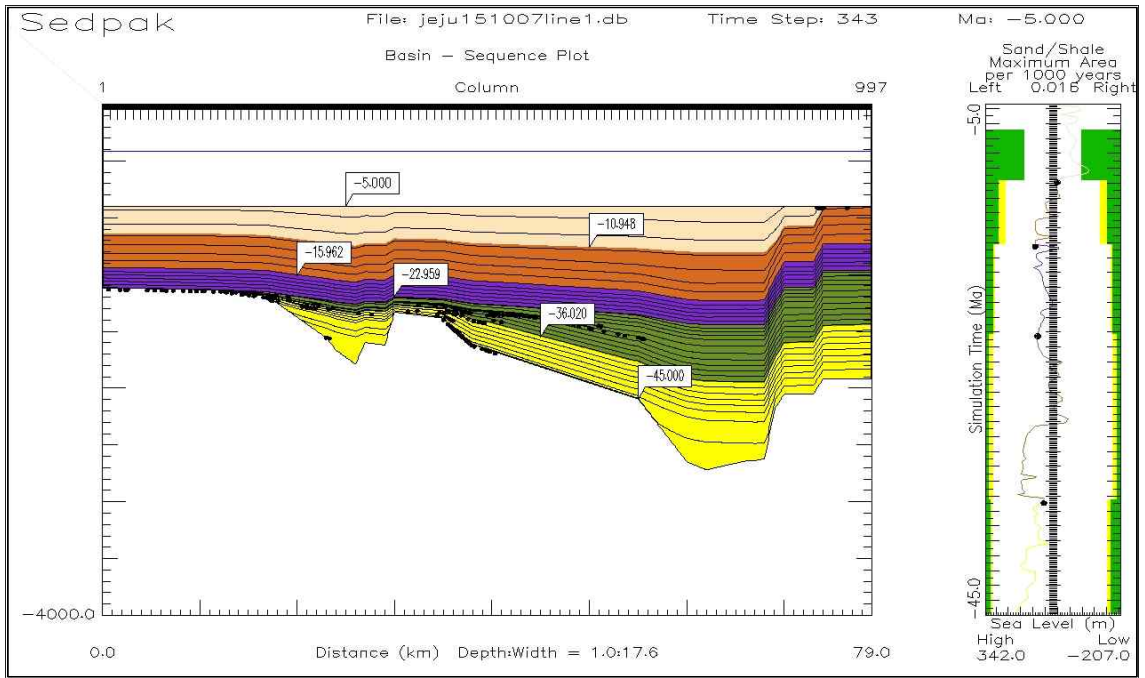


Fig 11. The simulation results of Line 1 for Unit E.

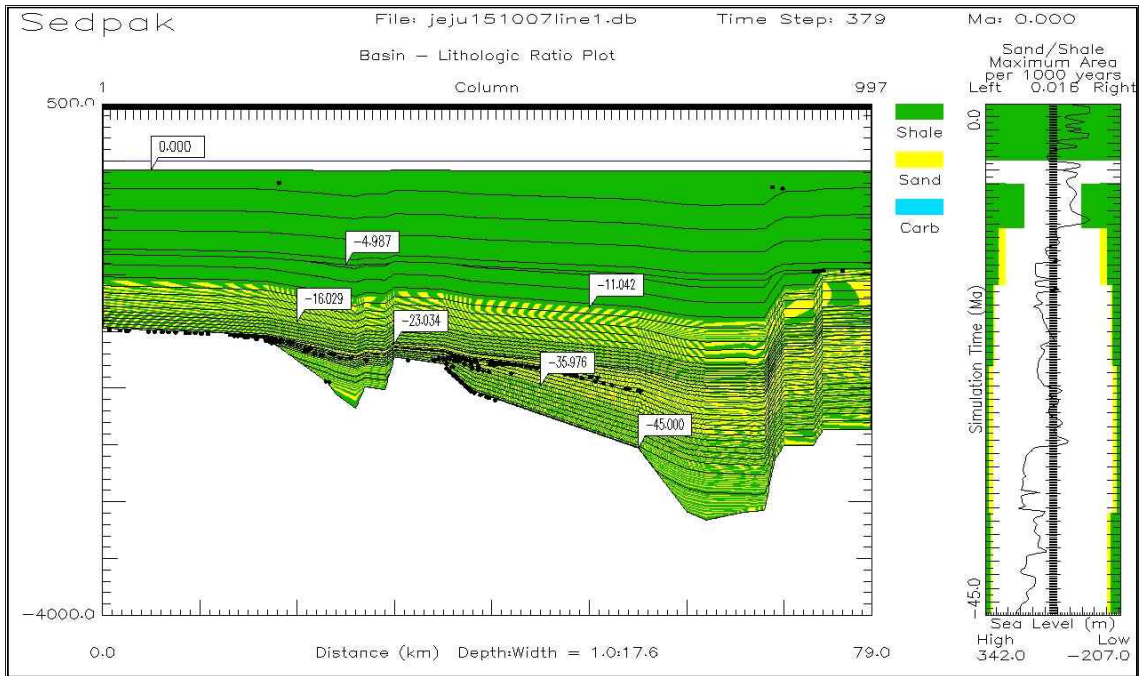
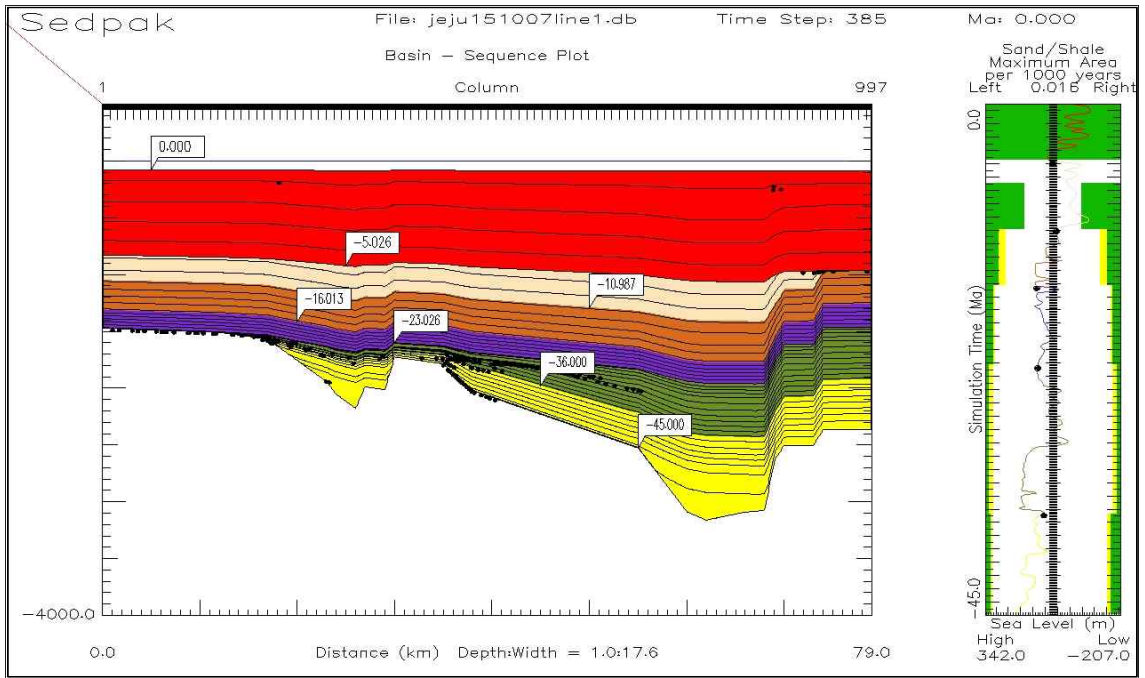


Fig 12. The simulation results of Line 1 for Unit F.

## IV-1-2. Line 2

Line 2(81-138)는 동-서 방향의 탄성과 단면으로 길이는 약 80 km이며, 시뮬레이션 상에서는 79 km로 설정하였다. 이는 SEDPAK 프로그램의 한계로, 80 km까지 시뮬레이션이 구현되지 않았기 때문이다. 퇴적물은 두껍게는 3200 m 이상, 얇게는 1600 m의 두께로, 동서 방향으로 넓게 퇴적되며, 두께의 차이가 있는 부분은 분지형성 당시 Unit A가 쌓일 때 지구조운동에 의해 영향을 받은 것으로 해석된다.

Unit A는 에오세인 45~36 Ma 동안에 퇴적되었다. Line 2는 Line 1과 비교했을 때 분지 기저면의 굴곡이 심하며, 단층활동이 더욱 활발했던 지역으로 보인다. 하성 또는 호수 환경으로 해석되고, 사질퇴적물  $0.0008 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물  $0.0020 \text{ km}^2/\text{ka}$ 의 퇴적률로 이질퇴적물이 우세하게 유입된 것으로 입력되었다. 퇴적물 공급률은 그리 높지 않은 값을 보이며, 퇴적분지 기반의 평균 침강률은  $-0.15 \text{ m/ka}$ 로 높은 침강률을 보였다.

Unit B는 올리고세인 36~23 Ma 동안에 퇴적되었으며, 하성 또는 호수 환경에서 천해환경으로의 환경전이가 일어나고, 사질퇴적물  $0.002 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물  $0.0012 \text{ km}^2/\text{ka}$ 의 퇴적률로 이질퇴적물이 우세하게 유입된 것으로 입력되었다. 퇴적물 공급률은 낮은 값을 보이며, 분지 기반의 융기와 침강이 계속해서 반복되던 시기로, 평균 침강률은  $-0.0025 \text{ m/ka}$ 로 낮게 나타난다.

Unit C는 전기 마이오세인 23~16 Ma 동안에 퇴적되었으며, 퇴적분지 기저의 침강이 계속 진행되었다. 암상은 이질퇴적물이 우세하며, 사질퇴적물  $0.0018 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물  $0.0038 \text{ km}^2/\text{ka}$ 의 퇴적률로 낮은 퇴적물 유입을 보였다. 퇴적환경은 하성 또는 호수 환경으로 해석되며, 시뮬레이션 결과 Line 1과 마찬가지로 이질 퇴적물이 우세하게 유입되어 가장 얇은 수평층을

형성한다. 분지 기저의 평균 침강률은  $-0.08$  m/ka로 비교적 높게 나타난다.

Unit D는 중기 마이오세인 16~11 Ma 동안에 퇴적되었으며, 전기 마이오세와 유사한 퇴적환경에서 퇴적된 것으로 해석된다. 암상은 사질퇴적물이 우세하며, 사질퇴적물  $0.0068$  km<sup>2</sup>/ka, 이질퇴적물  $0.0050$  km<sup>2</sup>/ka로 퇴적물 공급률은 이전 시기에 비해 점점 높아지는 경향을 보인다. 평균 침강률은  $-0.09$  m/ka로 높게 나타나며, 광역적인 침강이 있었음을 보여준다. Unit D가 퇴적된 후 지구조적인 운동으로 크고 작은 습곡들이 퇴적단면 전반에 걸쳐 형성되었다.

Unit E는 후기 마이오세인 11~5 Ma 동안에 퇴적되었으며, Unit D와 같은 퇴적환경이 계속 유지되다가 융기 후 침식으로 인해 부정합면이 형성되었다. 침식이 시작된 7 Ma부터 5 Ma까지는 퇴적물 공급은 중단되었고, 사질퇴적물  $0.0026$ km<sup>2</sup>/ka, 이질퇴적물  $0.0118$  km<sup>2</sup>/ka로 높은 퇴적률을 보인다. 분지의 침강률은  $0.0388$  m/ka로 매우 낮은 침강률을 보인다.

Unit F는 플라이오세인 5 Ma부터 현재까지 퇴적된 퇴적단위로 천해환경에서 형성된 퇴적물들로, 거의 이질퇴적물로 이루어져 있다. 사질퇴적물  $0.0027$  km<sup>2</sup>/ka, 이질퇴적물  $0.0241$  km<sup>2</sup>/ka의 높은 퇴적물 공급률을 보이며,  $-0.09$  m/ka의 높은 분지 기반의 침강률을 보인다.



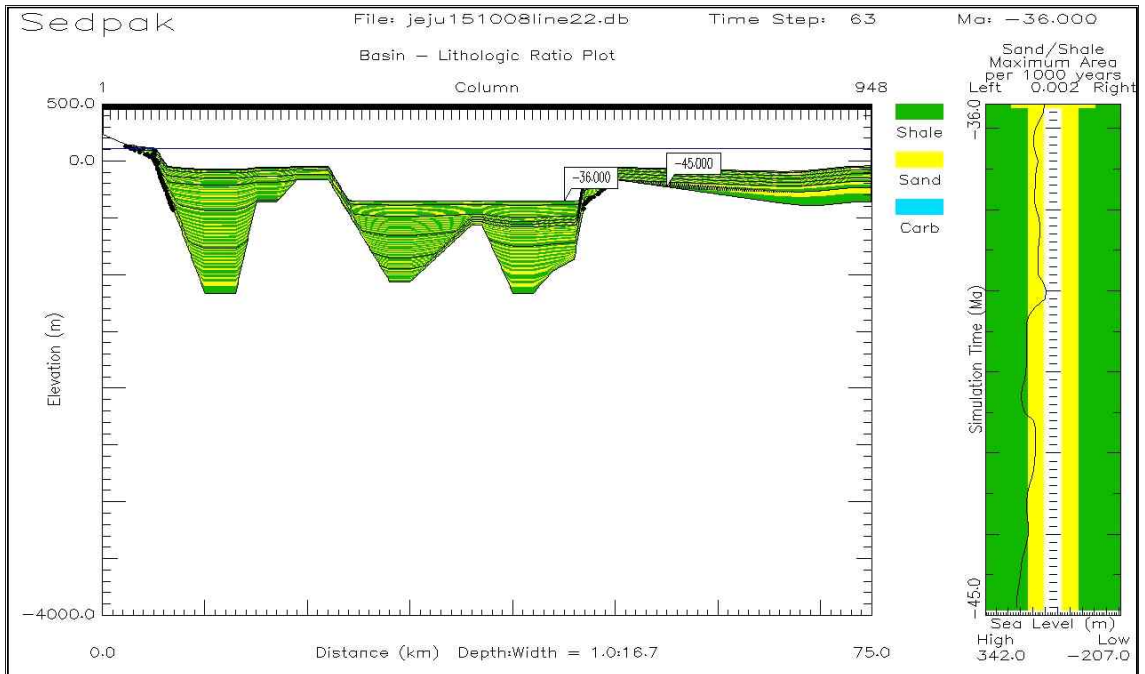
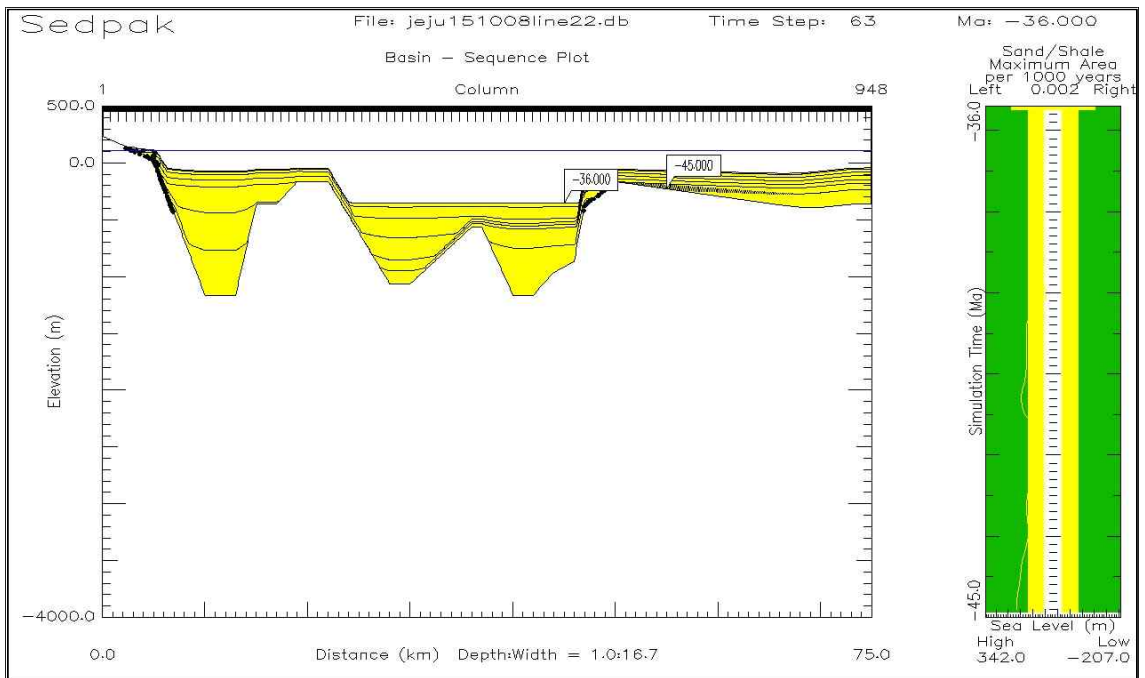


Fig 13. The simulation results of Line 2 for Unit A.

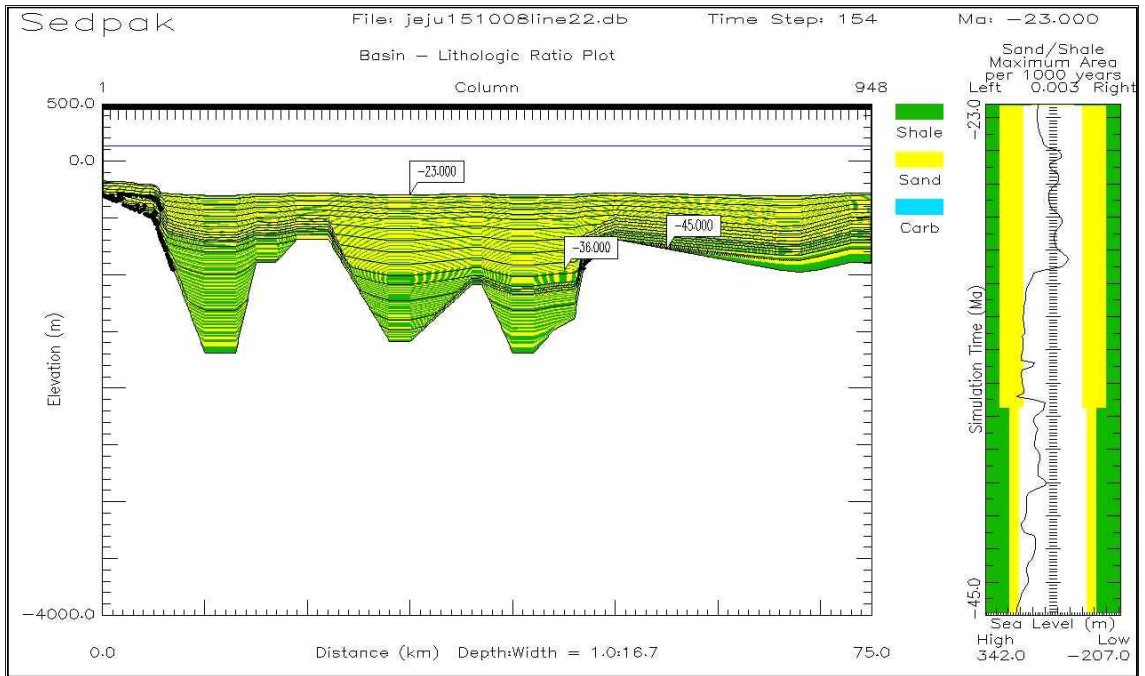
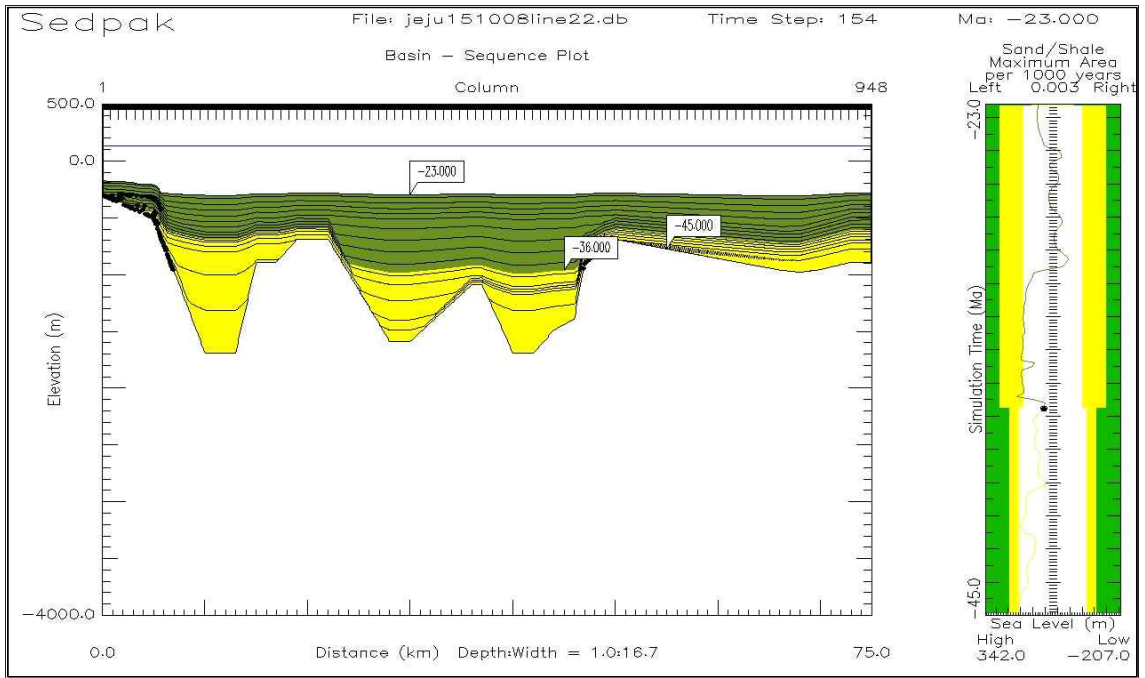


Fig 14. The simulation results of Line 2 for Unit B.



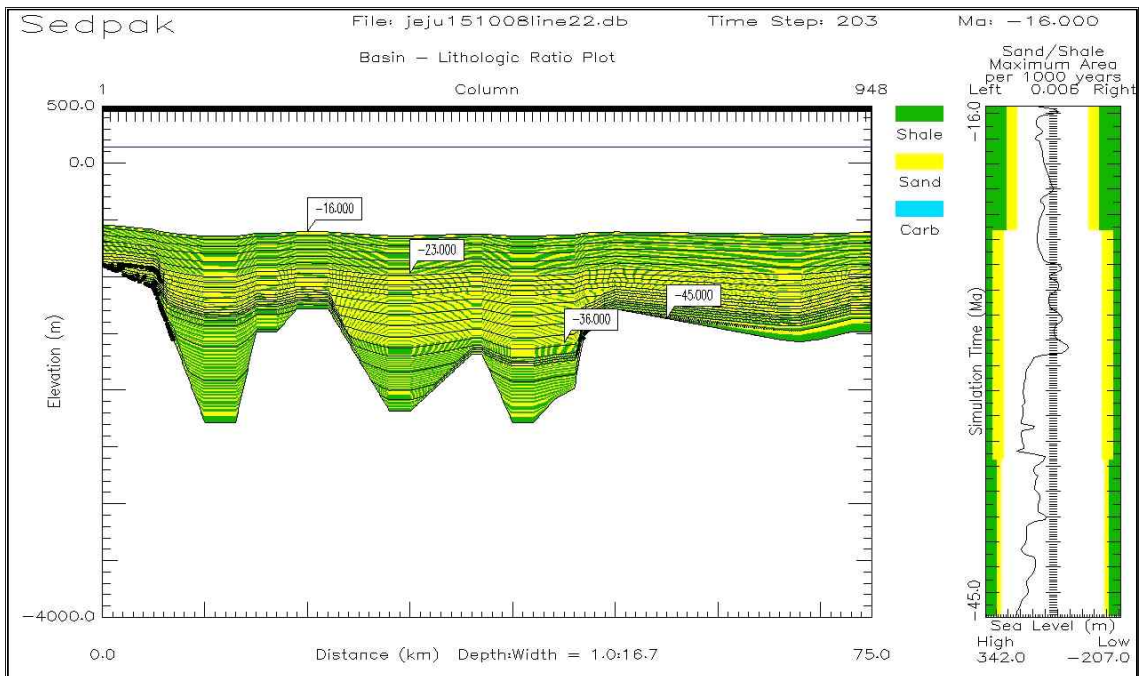
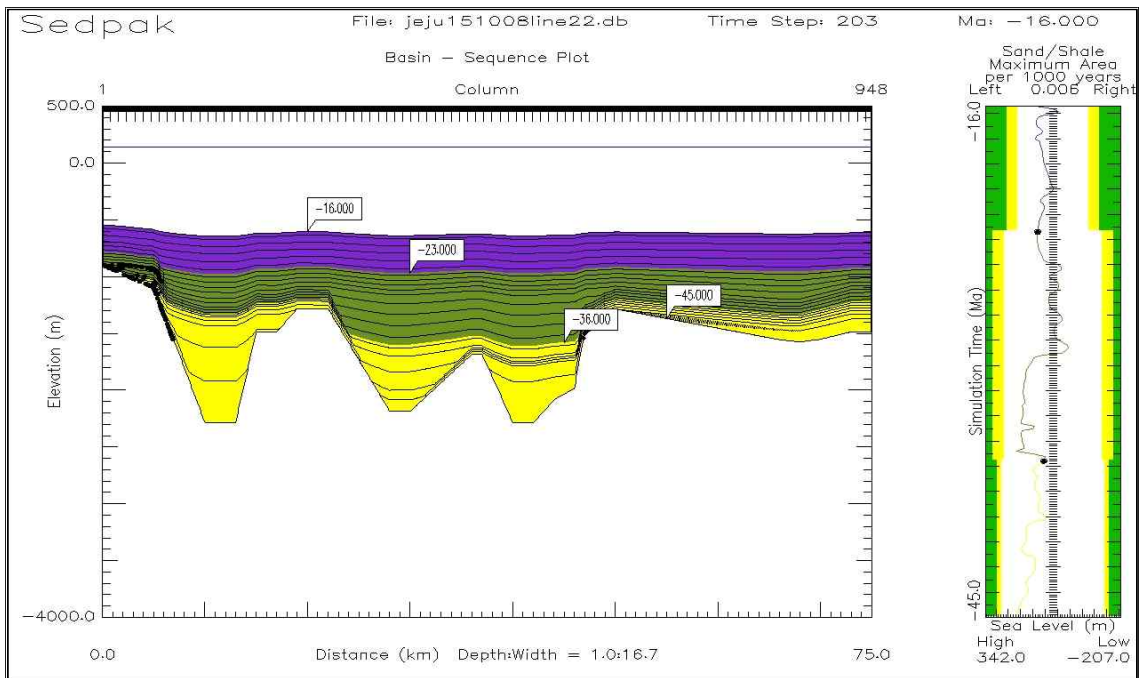


Fig 15. The simulation results of Line 2 for Unit C.

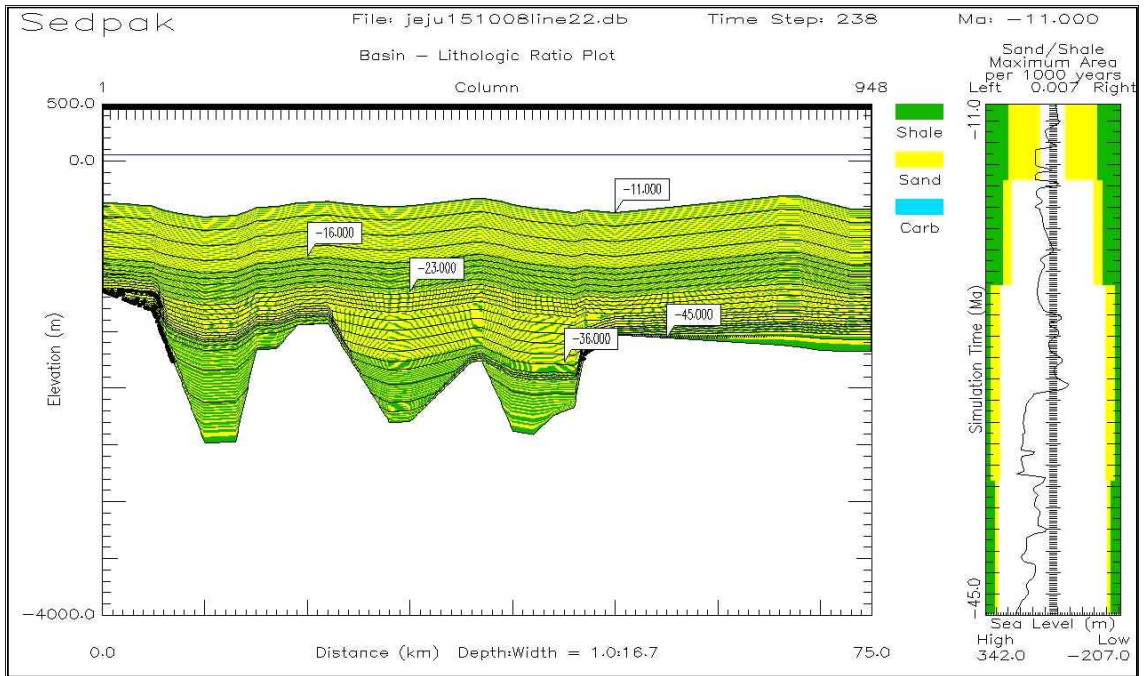
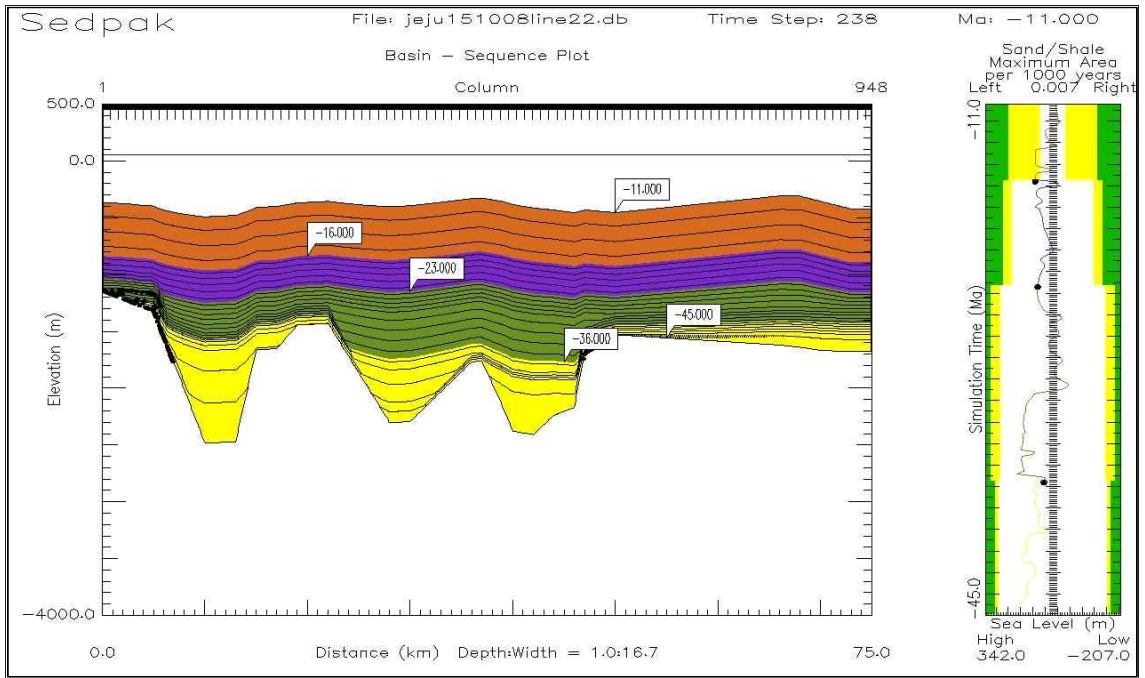


Fig 16. The simulation results of Line 2 for Unit D.

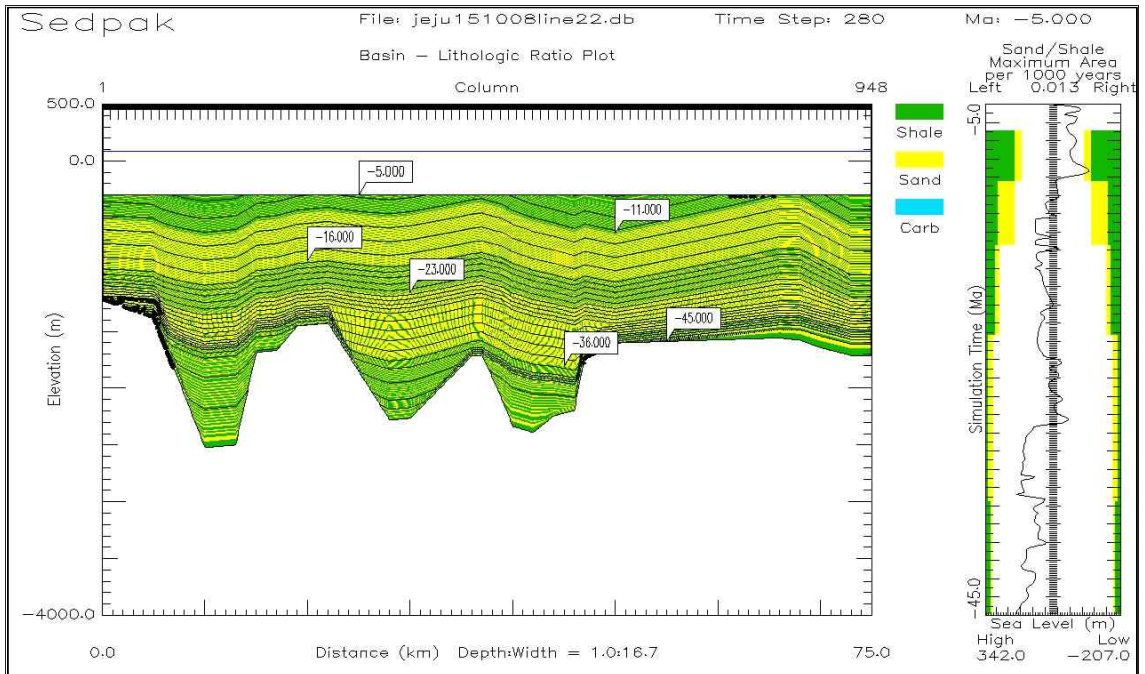
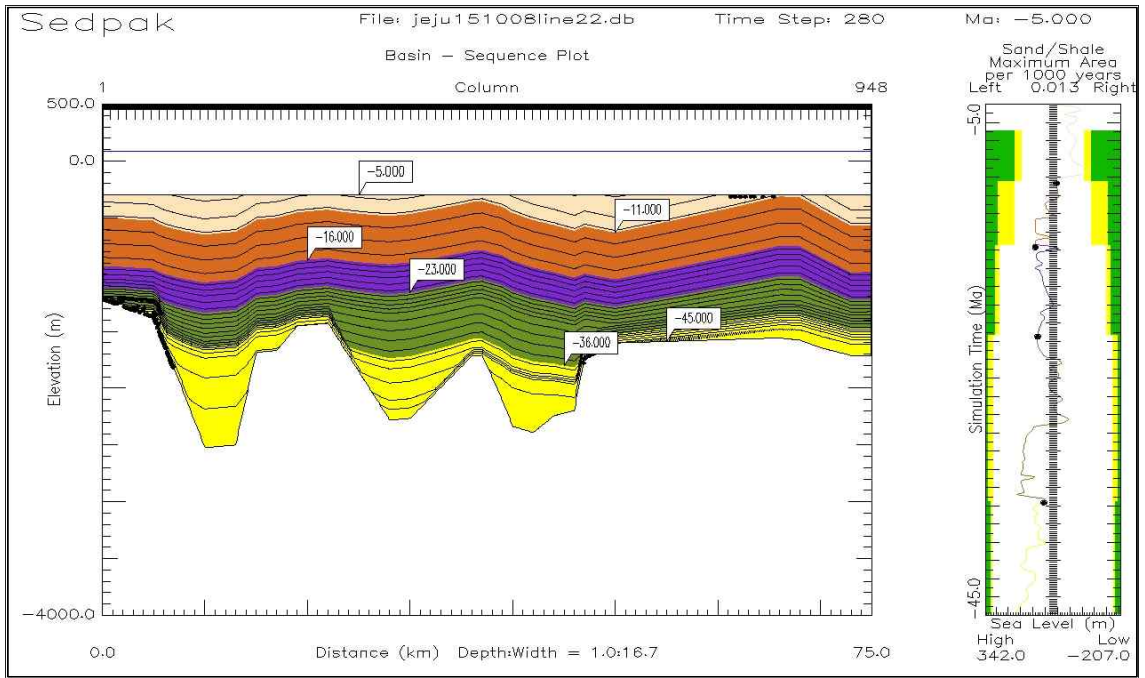


Fig 17. The simulation results of Line 2 for Unit E.



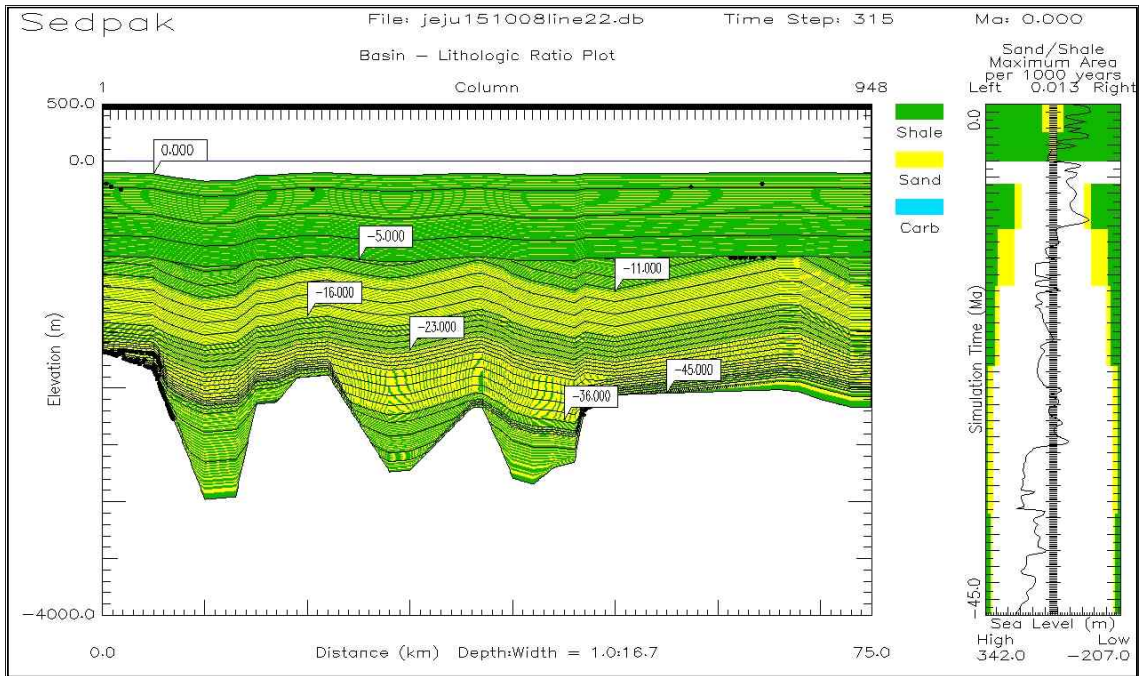
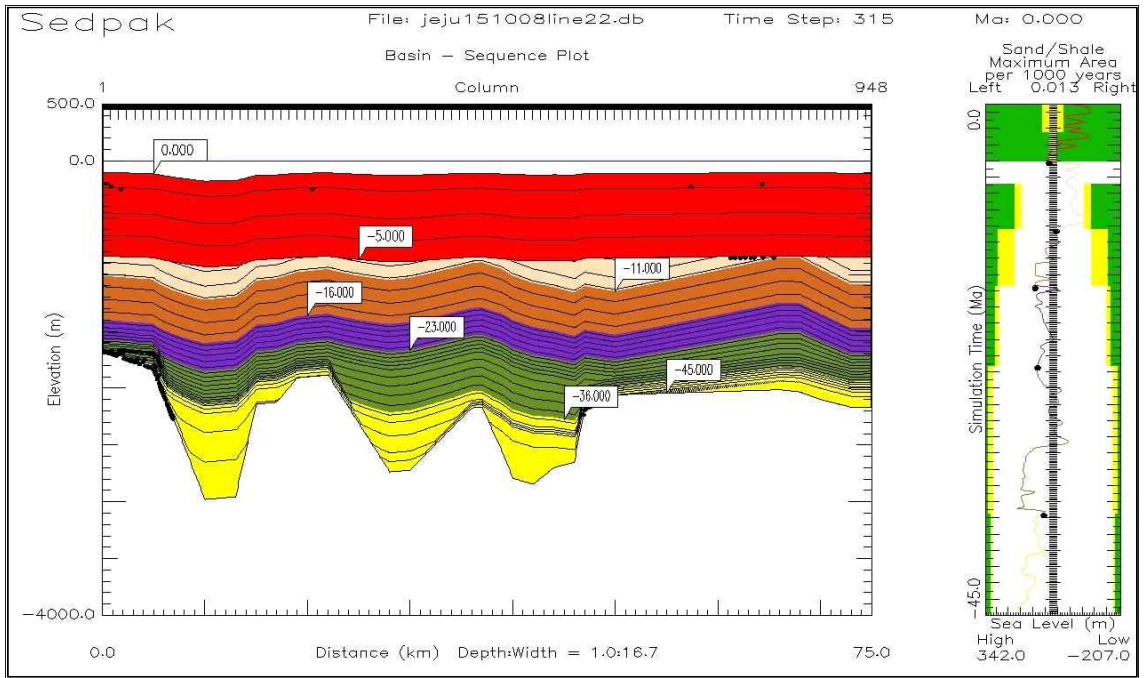


Fig 18. The simulation results of Line 2 for Unit F.

## IV-2. 최종입력변수 결정

### IV-2-1. 퇴적물 공급률

퇴적층 시뮬레이션 모델링을 통해 두 탄성과 도면에서 구분된 6개의 퇴적 단위(Unit)층에 대한 총 퇴적물 공급률을 도출하였으며, 각 층별로 사질퇴적물과 이질퇴적물의 공급량을 구분하고, 북서-남동방향과 동-서방향의 값을 구분하여 제시하였다(Table 1, 2). 시간이 흐름에 따라 퇴적물 공급률의 증감은 두 Line에서 비슷한 양상을 보였으며, 분지가 형성됨과 동시에 퇴적이 일어나는 초기에는 퇴적물 공급률에 차이가 보이고, 퇴적물의 공급방향 또한 일정하지 않은 것으로 나타난다. 전체적으로 급격한 침강이 있었던 시기에 퇴적물 공급률도 함께 높아지는 것이 확인되며, 후기 마이오세와 플라이오세 이후부터 지금까지 각각 퇴적물 공급률이 가장 높았던 것으로 보인다. 계산된 공급률을 각 층의 초기시점부터 경계면까지의 입력변수로 활용했으며, 마지막 플라이오세부터 현재까지는 일정한 공급률이 유지되는 것으로 설정하였고, 분지가 융기되고 침식이 일어나는 시기인 7~5 Ma에는 퇴적물의 공급이 없었던 것으로 시뮬레이션 하였다. 퇴적작용이 일어나는 동안 전체적으로 이질퇴적물이 사질퇴적물보다 우세하게 나타나며, 후기로 갈수록 점차 그 비율이 커지는 것으로 나타난다.

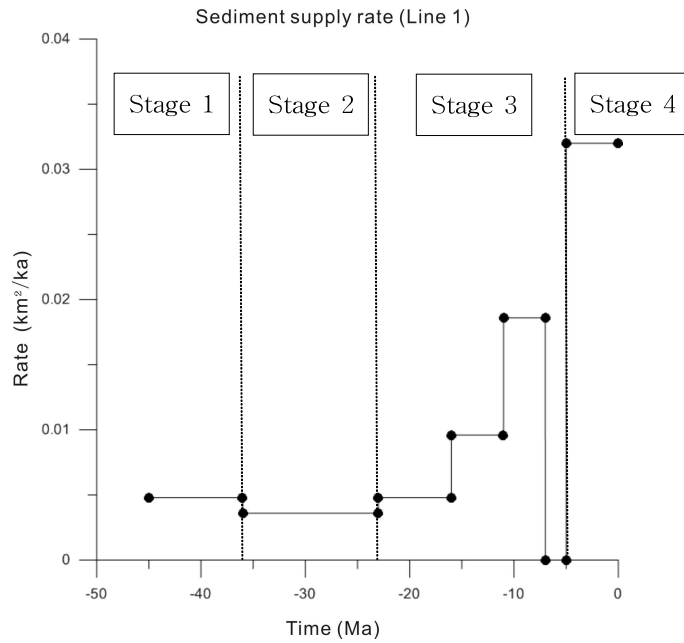


Fig 19. Sediment supply rate curve of Line 1.

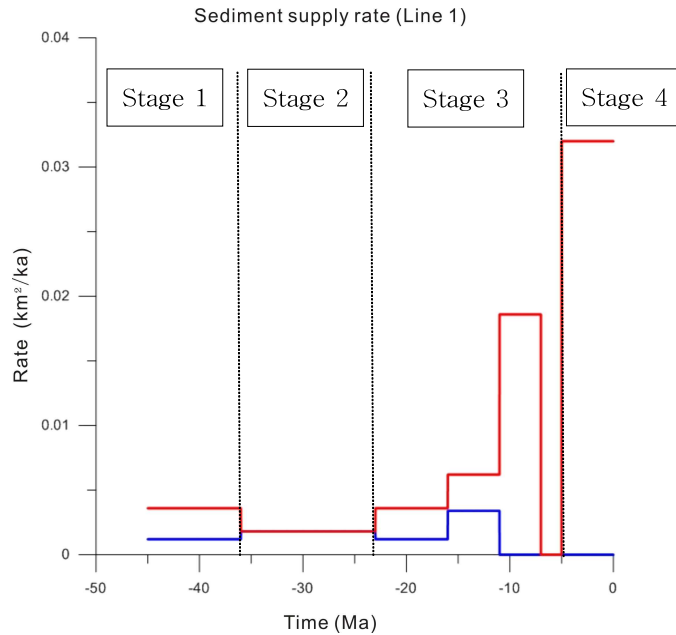


Fig 20. Sediment supply rate curve of each sediment type of Line 1.

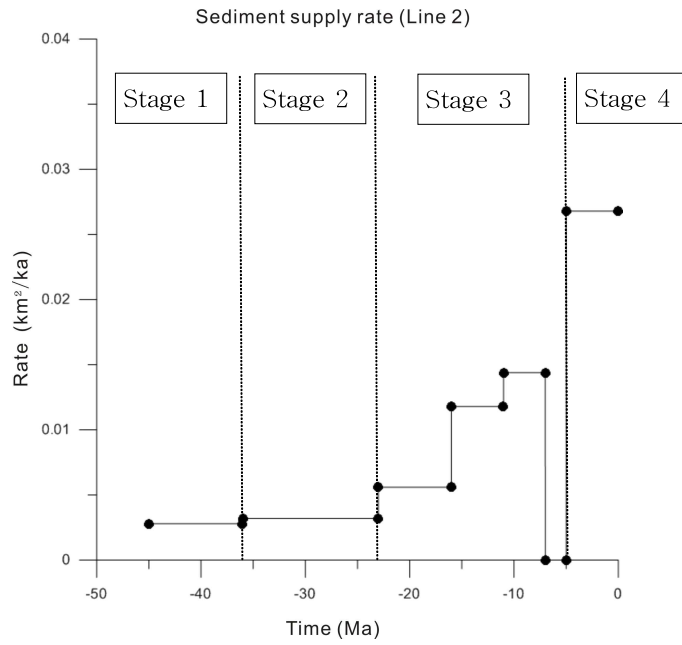


Fig 21. Sediment supply rate curve of Line 2.

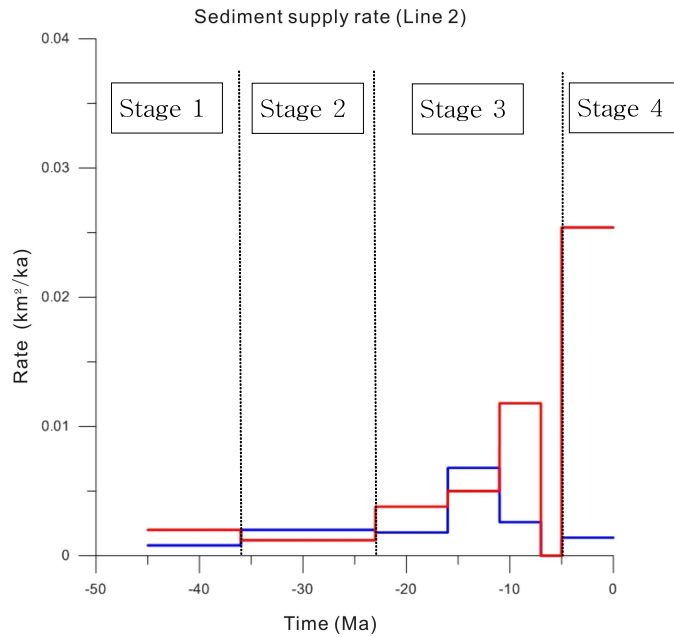


Fig 22. Sediment supply rate curve of each sediment type of Line 2.

Table 2. Sediment supply rate of each sediment type for six Units of Line 1.

Sequence	NW		SE	
	Sand	Shale	Sand	Shale
Unit F	-	0.0160	-	0.0160
Unit E	-	0.0093	-	0.193
Unit D	0.0017	0.0031	0.0017	0.0031
Unit C	0.0006	0.0018	0.0006	0.0018
Unit B	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
Unit A	0.0004	0.0012	0.0008	0.0024

[km<sup>2</sup>/ka]

Table 3. Sediment supply rate of each sediment type for six Units of Line 2.

Sequence	S		N	
	Sand	Shale	Sand	Shale
Unit F	0.0021	0.0241	0.0021	0.0241
Unit E	0.0013	0.0059	0.0013	0.0059
Unit D	0.0034	0.0025	0.0034	0.0025
Unit C	0.0009	0.0019	0.0009	0.0019
Unit B	0.0010	0.0006	0.0010	0.0006
Unit A	0.0004	0.0010	0.0004	0.0010

[km<sup>2</sup>/ka]



#### IV-2-2. 침강률

각각의 퇴적단위(Unit)가 형성되는 초기에 침강률을 입력해주었으며, 시뮬레이션 단면상에서 거리에 따라 달라지는 침강률 값을 구분하여 사용하였다 (Fig 21, 22). 시간이 지남에 따라 나타나는 변화 경향성은 보이지 않으며, 퇴적이 일어나는 초기와 구조적 역전이 있었던 시기에 거리에 따라 침강률이 달라지는 것으로 나타났다. 처음 퇴적이 일어난 시기와 전·중기 마이오세, 플라이스토세에 급격한 침강이 일어났으며, 침식이 있었던 올리고세, 후기 마이오세 시기에는 낮은 침강률을 보인다.

기존 연구에 의하면 전·중기 마이오세시기에 약  $-0.07142$  m/ka로 침강률이 가장 높았으며, 플라이스토세 역시 약  $-0.062$  m/ka로 높은 침강률을 보였고, 후기 마이오세와 플라이오세 시기에는 약  $-0.015$  m/ka로 낮은 침강률을 갖는 것으로 보고된 바 있다(권영인 외.,1995). 이번 연구 결과 침강률의 증, 감은 기존 연구와 비슷한 양상을 보이고, 절대적인 값 또한 비슷하게 도출되었지만, 약간의 차이는 있는 것으로 보인다. 차이가 있는 시기의 침강률 값들은 기존 연구의 절대 값보다는 약간 더 높은 침강률로 제시되었다. 기존 연구 자료를 활용하여 시뮬레이션을 했을 때, 침강률에 비하여 퇴적물의 공급량이 많아 해수면 아래의 퇴적가능 공간을 다 채워 퇴적이 더 이상 일어나지 않기 때문에 퇴적공간을 만들어주기 위하여 침강률을 더 높여 입력하였다. 이러한 사실은 이 시기에 기존 연구에서 제시된 침강률 보다는 실제로 더 큰 침강이 발생했음을 의미한다.

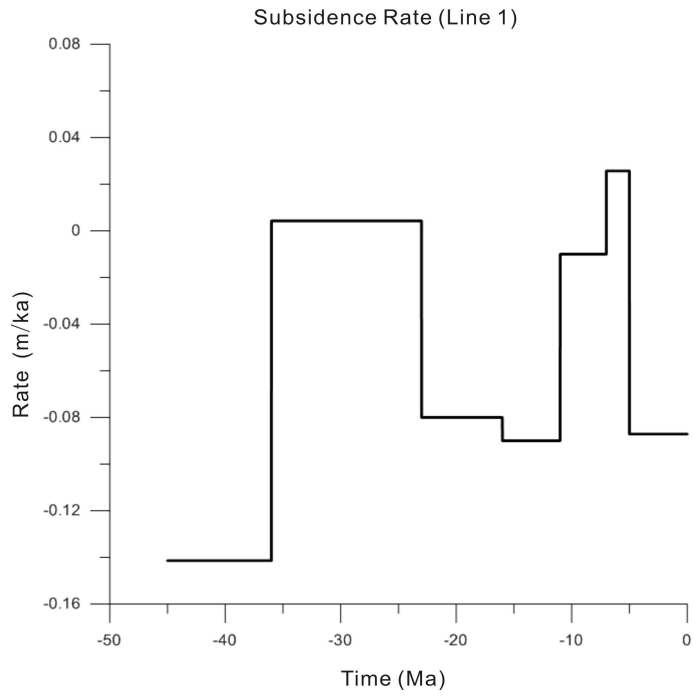


Fig 23. Subsidence rate curves of Line 1.

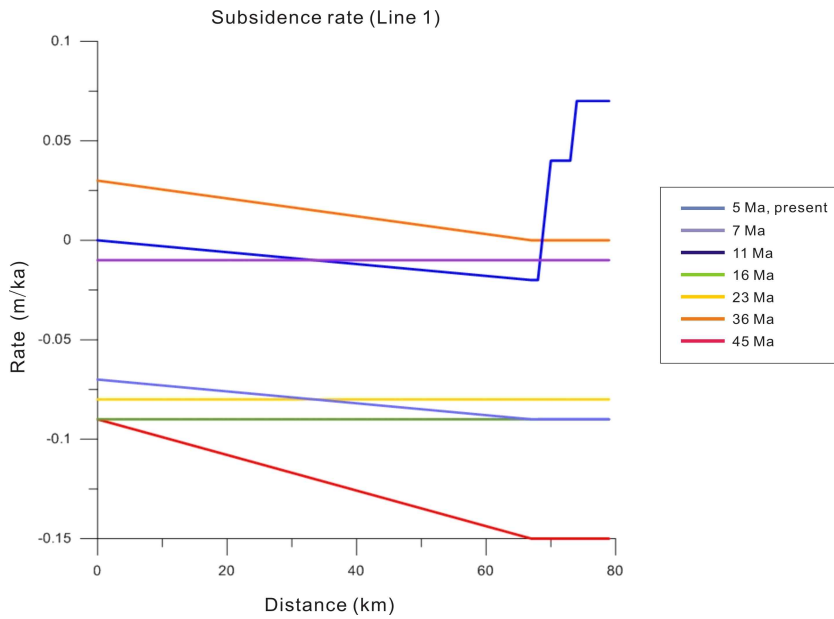


Fig 24. Subsidence rate curves of Line 1 at each distance and time.

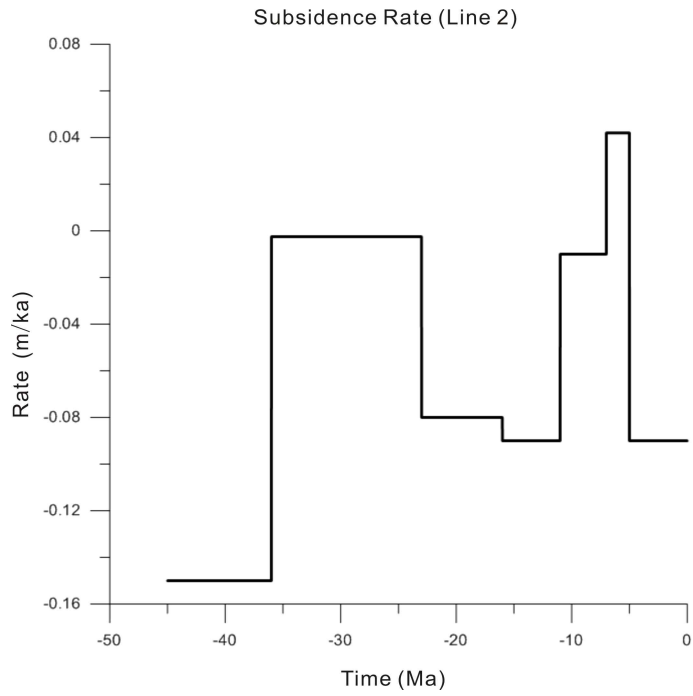


Fig 25. Subsidence rate curves of Line 2.

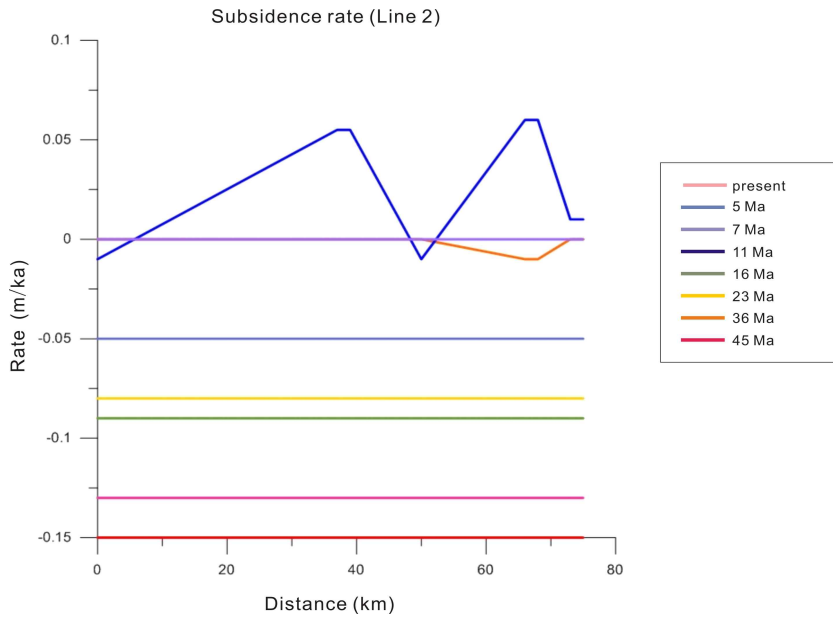


Fig 26. Subsidence rate curves of Line 2 at each distance and time.

Table 4. Subsidence rates at each distance for six Units of Line 1.

Unit	Time (Ma)	Distance (km)						
		NW 0	67	68	70	73	74	SE 79
F	Present	-0.07	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
	5	-0.07	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
E	7	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
	11	0	-0.02	-0.02	0.04	0.04	0.07	0.07
D	16	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
C	23	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
B	36	0.03	0	0	0	0	0	0
A	45	-0.09	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15

[Unit : m/ka]

Table 5. Subsidence rates at each distance for six Units of Line 2.

Unit	Time (Ma)	Distance (km)							
		W 0	37	39	50	66	68	73	E 75
F	Present	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13
	5	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
E	7	0	0	0	0	0	0	0	
	11	-0.01	0.055	0.055	-0.01	0.06	0.06	0.01	0.01
D	16	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
C	23	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
B	36	0	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0

[Unit : m/ka]

### IV-2-3. 해수면 변화

해수면 변화 자료는 이미 많은 기존 연구에서 활용된 바 있는 Haq *et al.*(1987)이 제시한 자료를 입력하였으며(Chough and Brag, 1987; Yoon *et al.*, 1997; Choi, 1998; Cheong *et al.*, 1999), 제주분지는 해양 환경에서의 퇴적보다 육성 환경에서의 퇴적이 주된 분지로, 육성 환경에서 퇴적작용이 일어난 것으로 추정되는 시기인 45~30 Ma와 23~5 Ma동안 base-level의 개념을 도입하여 이 자료를 추정 입력하였다.

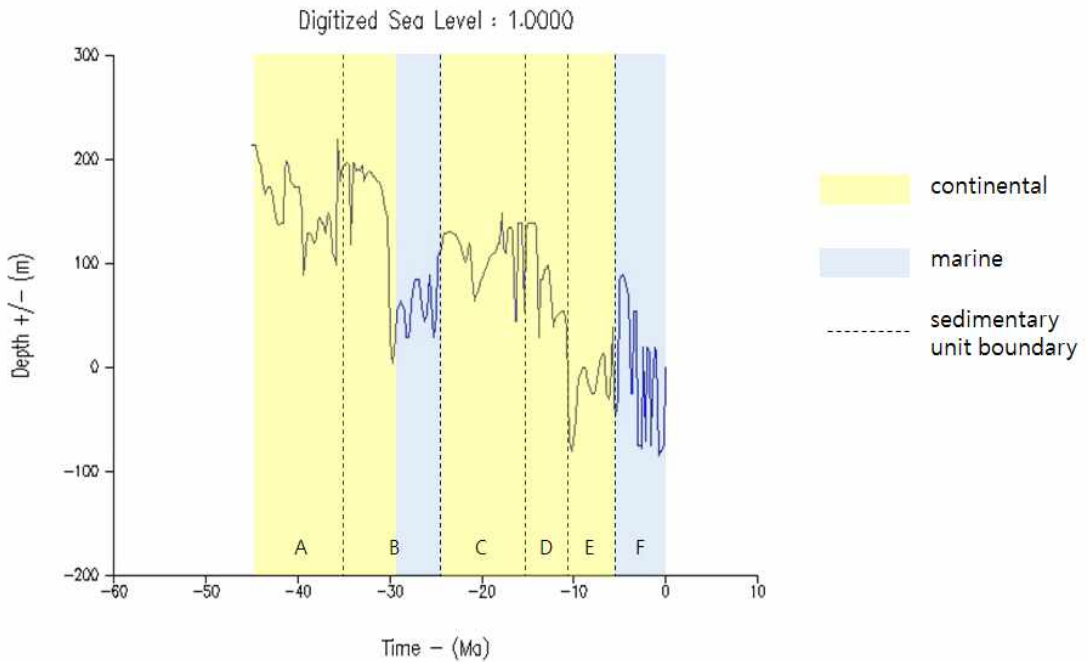


Fig 27. Digitized eustatic sea level curve(Haq *et al.*, 1987).

## V. 토의

### V-1. Simulation 결과의 해석

6개의 Unit으로 나누었던 퇴적단위를 퇴적 시뮬레이션 후 침강률, 퇴적물 공급률, 퇴적환경의 변화와 부정합면을 기준으로 4개의 Stage로 구분하여 해석하였다. 전반적으로 Line 1과 Line 2의 시뮬레이션 결과 값들이 비슷하게 나타났으나, 퇴적방향, 분지 기저면의 형태, 구조운동 등에 따라 일부 다르게 나타나는 부분이 있다. 따라서 두 Line을 동일하게 4개의 Stage로 구분하였으며, 각 Stage 별 변수들의 상관관계에 대해서도 살펴보았다.

Stage 1은 분지가 형성됨과 동시에 퇴적이 일어나는 시기로 Unit A가 이에 해당한다. 퇴적환경은 하성 또는 호수 환경이었으며, 낮은 퇴적물 공급률과 높은 침강률이 나타나는 것이 특징이다. Stage 2는 퇴적환경의 변화가 있었던 시기로, Unit B가 이에 해당한다. 하성 또는 호수 환경에서 퇴적이 시작되지만, 해수면이 지속적으로 상승하여 상부층은 천해환경에서 퇴적된 것으로 해석된다. 낮은 퇴적물 공급률과 낮은 침강률로 특징지어진다. Stage 3에 해당하는 Unit C, D, E는 환경의 변화가 거의 일어나지 않는 곳에서 정합적으로 퇴적되었으며, 높은 침강률과 높은 퇴적물 공급률이 특징이어서 Stage 2와 구분된다. Stage 4는 Stage 3시기의 퇴적 후 광역적으로 일어난 융기로 인해 퇴적물이 삭박되었고 이로 인해 형성된 부정합면을 기준으로 이전 단계와 구분된다. 광역적인 침강이 일어난 시기에 형성된 Unit F는, 천해환경에서 퇴적되었고 높은 퇴적물 공급률과 침강률을 보이는 것이 특징이다.

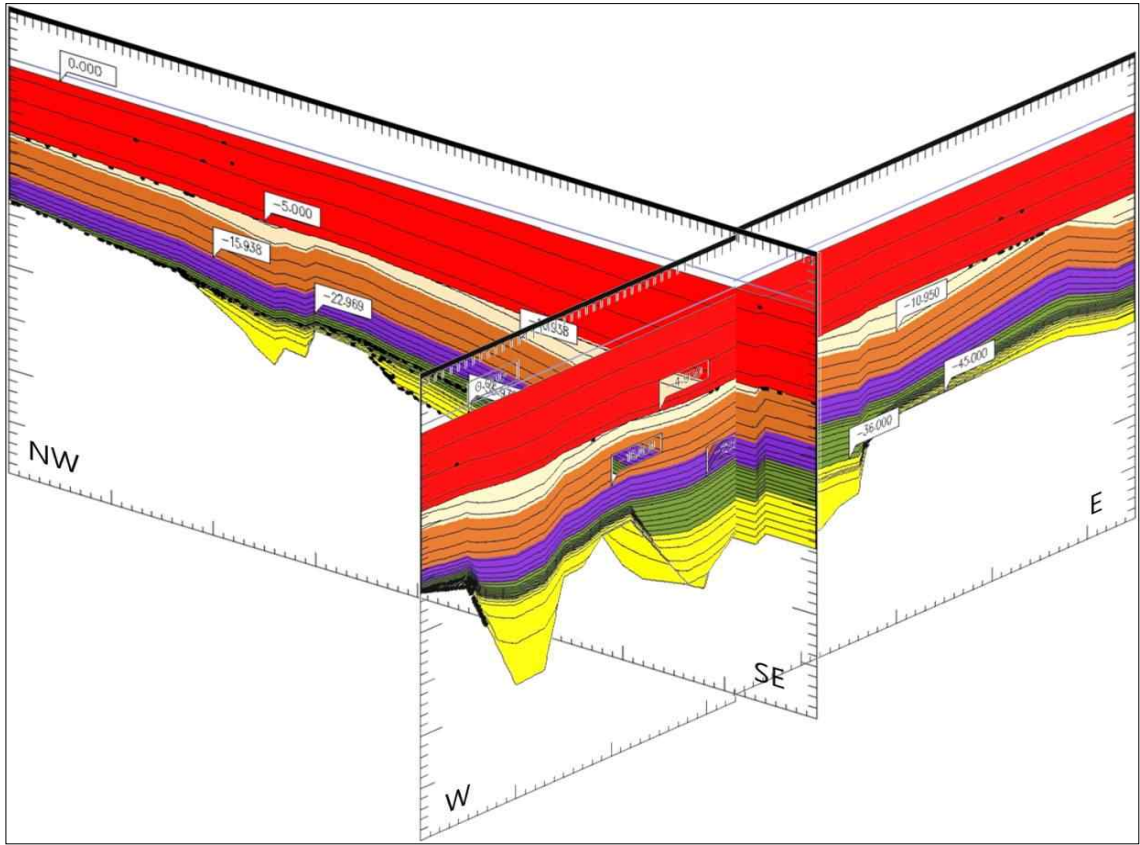


Fig. 28. 3D simulation of sequence in the Jeju Basin.

Line 1, 2의 시뮬레이션 결과를 3차원으로 교차시켜 확인해 본 결과, 모든 퇴적층의 경계가 정확히 일치하지는 않지만, 대부분 비슷하게 나온 것을 확인하였다. 후기 마이오세에 쌓인 Unit E의 경계가 잘 맞지 않는 것으로 확인 되었으며, 이는 퇴적작용이 일어난 후에 있었던 구조 활동의 결과로, 습곡작용을 형성했을 당시의 굴곡의 정도를 세밀하게 구현하지 못한 이유로 판단 된다.

## V-1-1 Stage 1

Stage 1은 약 45~36 Ma 기간에 해당하며, 기존 연구에 따르면 이 시기의 제주분지 퇴적환경은 하성 또는 호수 환경으로 해석 되었고, 시뮬레이션 시 이용한 탄성과 단면과 인접한 코어 자료를 확인한 결과 사질퇴적물 보다는 주로 이질 퇴적물이 퇴적된 것으로 호수 환경에서 퇴적되었을 가능성이 높은 것으로 보인다. 퇴적물 공급률은 Line 1이 Line 2보다 높게 도출되었다. 이는 Stage 1 시기에 퇴적된 Unit A가 기반암 바로 위에 퇴적된 지층으로, 분지가 열리면서 형성된 여러 단층을 경계로 제한되어 분포하고, 국부적인 융기가 있었기에 두 Line의 퇴적물 공급률에 차이가 나타난 것으로 해석된다. 또한 Line 2에서는 동, 서 방향에서 동일한 퇴적물 공급률을 설정하였으나, Line 1에서는 남동쪽에서 공급률을 더 높게 설정하였는데, 이는 남동쪽에 두껍게 나타나는 퇴적층이 되어 있기 때문이다. 기존 연구된 자료에 따르면 Unit A는 분지가 형성됨과 동시에 퇴적된 층으로 멀지 않은 국부적인 융기대에서 삭박된 퇴적물이 공급 축적되었을 것으로 해석되고, 퇴적물은 여러 방향에서 공급이 되지만 특히, 북서쪽의 기원지 보다는 가까운 남동쪽의 기원지에서 더 많이 공급되었을 것으로 해석된다. 침강률은 다른 Stage와 비교하여 높게 나타났으며, 두 Line의 값이 동일하게 도출되었다. 이는 태평양판이 유라시아 판으로 섭입하면서 주향이동단층을 형성하였고, 이후 열개가 시작되면서 높은 침강률을 보였기 때문인 것으로 해석된다.



## V-1-2 Stage 2

Stage 2은 약 36~23 Ma 기간에 해당하며, 하부층은 하성 또는 호수 환경에서 퇴적되었으며, 상부층은 해수면의 상승으로 인한 천해환경으로 전이해 퇴적되었다. 낮은 퇴적물 공급률을 보이며, 이는 분지의 기저가 융기를 시작하여, 융기와 침식으로 인해 퇴적 중심지가 서쪽에서 동쪽으로 이동함에 따라 연구대상 지역이 퇴적중심지와 멀어지게 되고, 퇴적 이후 침식 또한 일어난 것으로 판단된다. Line 1은 남동쪽으로 갈수록 퇴적물이 두껍게 퇴적된 반면 Line 2에서는 동-서 방향의 퇴적물 공급률의 차이가 보이지 않는 것으로 보아 Line 1의 남동쪽 끝부분에서 교차하는 Line 2는 당시 퇴적중심지와 비교적 가까웠던 것으로 해석된다. 낮은 침강률 값은 실제 어느 정도의 초기 침강은 진행되어 있었으나, 에오세말~올리고세 사이에 발생한 인도판과 유라시아판의 충돌로 인한 압축력으로 인해 후기에는 단층형성, 국부적인 융기 등이 일어남으로써, 일부 초기 침강이 상쇄되어 평균 침강률은 낮게 나타나는 것으로 해석된다.

### V-1-3 Stage 3

Stage 3은 분지기저가 지속적인 침강을 보이는 시기로 약 23~5 Ma 기간에 해당된다. 이 시기의 퇴적환경은 다시 하성 또는 호수 환경으로, 환경의 큰 변화 없이 정합적으로 퇴적이 진행되었다. 필리핀 판이 북쪽으로 섭입함에 따라 열개작용과 광역적인 침강이 계속되었으며, 이로 인해 높은 침강률을 보인 것으로 추정된다. 후기 마이오세에는 분지에 강한 압축력이 작용함에 따라 여러 단층, 습곡들이 형성되었으며, 퇴적층 시물레이션 프로그램에서는 습곡만이 표현되었다. 이는 단층의 변위가 작기 때문에 단층을 형성시켜도 시물레이션 결과, 잘 나타나지 않으며 오히려 단층생성 이후에 퇴적되는 층이 수평적으로 퇴적되지 않고, 굴곡져서 퇴적되기 때문에 단층은 제외하고 습곡만 구현하였다. Stage 3는 전·중기 마이오세부터 퇴적물의 공급이 약간 증가하는 양상을 보이다가 후기 마이오세에는 퇴적물의 공급이 급격하게 늘어나는 것으로 시물레이션 되었는데, 이는 중기 마이오세 이후 분지 전체 규모의 구조역전이 발생하고, 분지기반의 융기에 의해 동쪽과 남쪽에서 상당한 양의 퇴적물이 삭박되고 재퇴적되었기 때문인 것으로 해석되며, 이러한 침식으로 인해 광역적인 부정합면이 형성된 것으로 추정된다. 퇴적층 시물레이션 결과에서도 공급량과 비교하여 상대적으로 얇은 퇴적층을 볼 수 있는데, 이는 침식이 일어난 후의 퇴적층을 탄성과 단면 해석 자료를 이용하여 기저면을 새롭게 추가 설정해주는 방법을 이용했기 때문이고, 침식이 일어나는 시기인 7~5 Ma 동안에는 퇴적물 공급률도 0으로 설정하여 구현하였기 때문이다.

#### V-1-4 Stage 4

Stage 4는 부정합면이 형성된 이후 지속적인 침강이 일어났던 시기로 5 Ma~현재시기에 해당된다. 이 시기의 퇴적환경은 천해환경으로, 현재와 같이 북서쪽의 활발한 양쯔강 시스템에 의해 퇴적물이 황해로 공급이 계속되어 Unit F가 퇴적되고 있다. 두 개의 Line에서 모두 이질 퇴적물이 우세하며, 높은 퇴적물을 보인다. 이질 퇴적물이 우세하게 나타나는 이유 중 하나는 분지가 열린 후 퇴적이 일어난 시기로, 이전의 Stage에서 기원지와의 거리보다 멀어졌기에 상대적으로 조립질의 퇴적물이 적은 것으로 생각되며, 또한 Stage 3가 형성되는 시기에는 화산활동을 수반한 융기된 조산대로부터 조립질의 퇴적물이 유입되었을 것으로 생각되나, 점차 줄어들었을 것으로 판단된다. 절대적으로 이질퇴적물이 많은 이유는 양쯔강으로부터 공급된 사질과 이질 퇴적물의 이동거리에도 차이가 있지만, 밀집보다는 뜬짐으로 이동된 퇴적물들이 많은 것으로 판단된다. 광역적인 침강이 일어나던 이 시기는 이질 퇴적물이 우세하게 공급 퇴적되었기 때문에 수평적으로 각 지역에서 균등하게 퇴적되는 양상을 보인다. 비교적 퇴적되는 기간이 짧지만 퇴적물 공급률이 높아 퇴적물의 총량이 증가하여 퇴적물의 두께가 두껍게 관찰된다. 또한 상대적으로 하부의 지층보다 퇴적물의 하중에 의한 영향이 적어 다짐작용이 적게 작용하여 두껍게 나타나는 것으로 해석하였다.

## V-2. 열성속도 모델링

SEDBAK을 이용한 모델링 수행 시 원유 및 가스 생성대의 범위를 알 수 있으나 유기물의 타입, 유기물의 양 등 지구화학적 자료는 입력하지 않기 때문에 원유 및 가스의 창출, 이동 및 집적을 알 수는 없다. 따라서 SEDPAK 모델링은 지온상승률에 따른 열적 성속도 범위만을 제시한다.

연구지역의 잠재적 근원암 층 내 탄화수소의 부존 가능성을 알아보기 위해 TTI(time-temperature index)를 이용하여 열적 성속도에 대한 시뮬레이션 모델링을 수행하였다. 입력 자료로 사용된 geothermal gradient input 값은 공저온도(bottom hole temperature; BHT)와 제주분지의 평균 해저면 온도를 적용하여 계산한 JDZ V-2의 열류량 값을 이용하였다(Kim and Son, 2013). 초기(45 Ma)에는 76 mW/m<sup>2</sup>, 현재는 51 mW/m<sup>2</sup>를 입력하여 퇴적분지 진화기간 동안에 열류량이 점차 감소하는 것으로 제시하였다.

$$TTI = \sum_{T_{min}}^{T_{max}} (\Delta t_i)(r)^{n_i}$$

Tmax와 Tmin는 온도로 표시되며,  $\Delta t_i$ 는 각 온도구간에서 경과된 시간(단위 : 백만년),  $r$ 는 2,  $n_i = (t_i - 100)/10$ 이다(Pauling and Pauling, 1975).

현재 시점에서 열적성속도 시뮬레이션 분석 결과는 Line 1, 2 모두 Unit A에서 onset of oil generation 성속도를 보이며, Stage 4가 형성되는 시기에 oil의 생성이 시작되는 것으로 제시된다. 따라서 앞으로 매몰시간이 길어지면서 더 많은 탄화수소의 생성이 기대되며, 이후 Stage 2, 3에 형성된 퇴적층이 이동통로가 되고, 후기 마이오세에 형성된 구조들에 의하여 탄화수소가

집적된다면 경제적으로도 가치가 있을 것으로 판단되다. 그러나 Unit A의 경우 육성 환경에서 퇴적이 일어났으며, 육성층의 경우 유기물이 충분하지 않아 oil의 생성이 제한되기 때문에, 유기물의 타입과 양을 연구한 자료와 비교할 필요가 있으며, 보다 정확한 경제적인 가치를 판단하기 위해서 석유시스템 연구자료 또한 비교해 볼 필요가 있다.

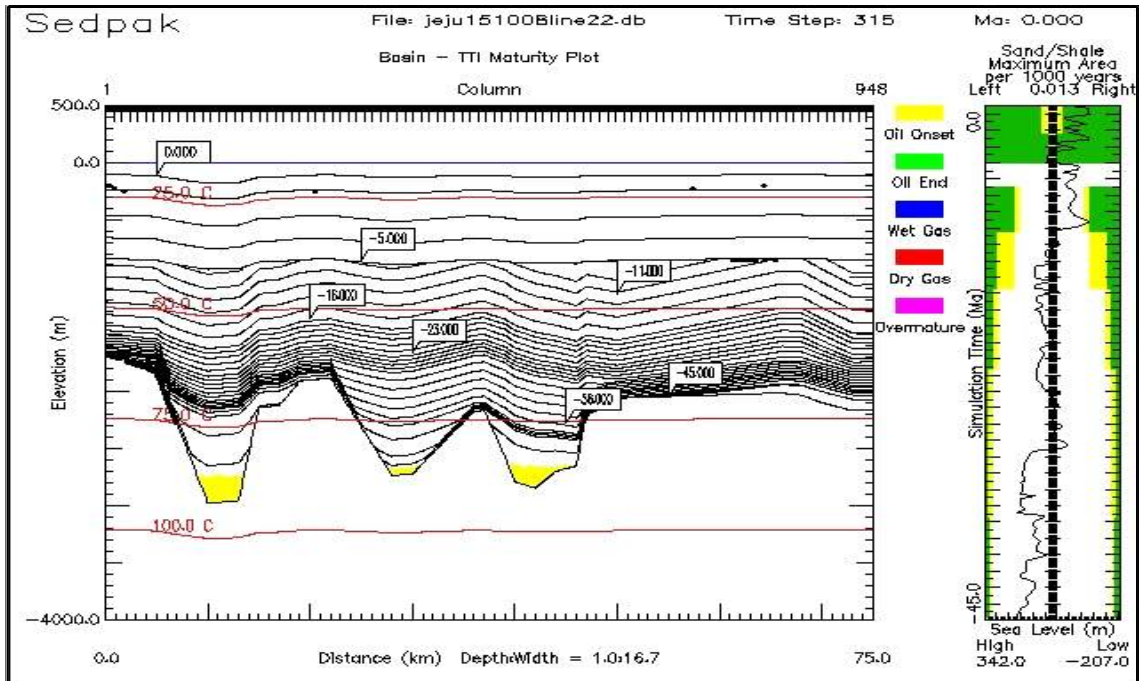
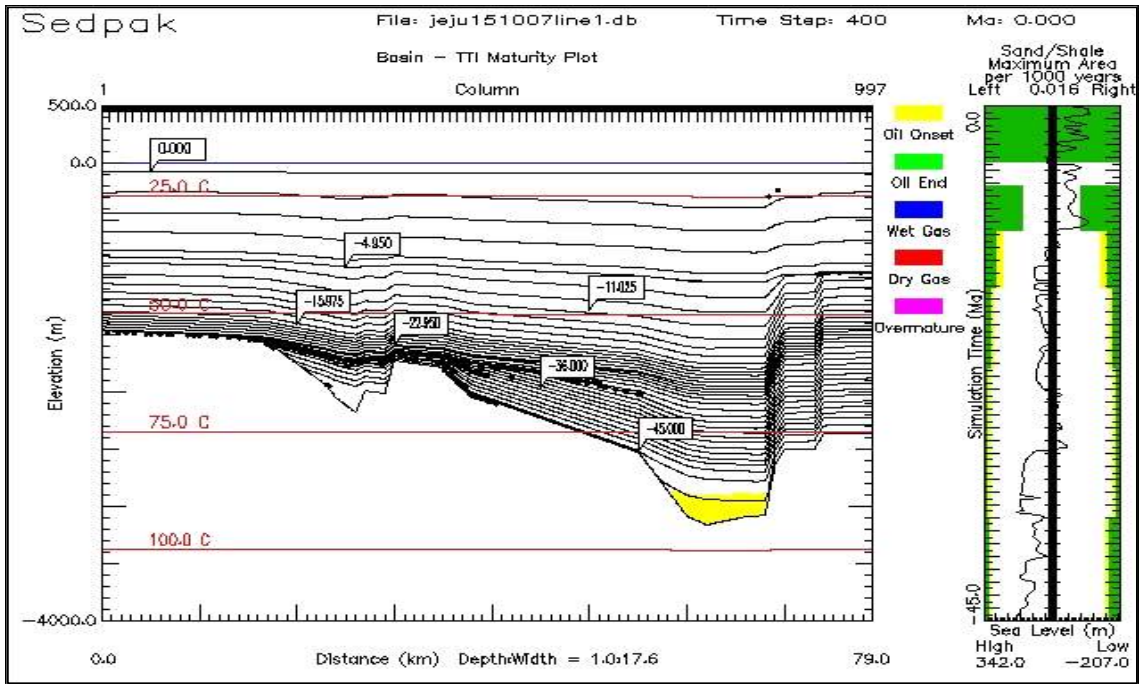


Fig. 29. The simulation results of the TTI maturity show oil window of the Line 1, 2.

## VI. 결 론

제주분지의 퇴적 진화과정을 복원하기 위해 시뮬레이션을 실시하였으며, 최종 퇴적층 시뮬레이션 결과를 이용하여 퇴적물 공급률과 침강률의 정량적인 값을 도출하였고, 이러한 입력변수들의 변화에 따라 퇴적 진화 과정을 4개의 Stage로 구분하여 해석하였다.

Stage 1은 분지의 형성 초기단계로 Unit A가 퇴적된 시기에 해당하며, 45~36 Ma 기간에 해당한다. 이 시기동안 퇴적환경은 육성의 하천환경 또는 호수 환경으로, 퇴적물 공급률은 Line 1에서 사질 퇴적물은  $0.0012 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.0036 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이며, Line 2에서 사질 퇴적물은  $0.0008 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.0020 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이다. Unit A가 퇴적된 후 부정합이 형성되었으며, 높은 침강률( $-0.15 \text{ m/ka}$ )을 보이는 시기이다.

Stage 2은 Unit B가 형성된 시기에 해당되며, 36~23 Ma 기간에 해당한다. 이 시기의 퇴적환경은 하천 또는 호수 환경에서 천해환경으로 전이하였고, 북서쪽에서 남동쪽으로 갈수록 퇴적물이 두껍게 퇴적되는 것이 특징이다. 시뮬레이션 구간 중 가장 낮은 퇴적물 공급률을 갖으며 이 시기의 퇴적물 공급률은 Line 1에서 사질 퇴적물은  $0.0018 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.0018 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이며, Line 2에서 사질 퇴적물은  $0.0012 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.002 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이다. 이 시기에는 침강과 융기가 계속 반복되었으며, 가장 낮은 침강률인  $-0.01 \text{ m/ka}$ 의 값을 갖는다.

Stage 3은 분지가 계속적인 침강을 보이는 시기로 Unit C, D, E가 해당하며, 23~5 Ma 기간에 해당된다. 이 시기에 퇴적환경은 하천 또는 호수 환경으로, 퇴적물 공급률이 급격히 증가하여, 가장 높은 값을 가진다. 퇴적물 공

급률은 Line 1에서 사질퇴적물은  $0.0046 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.0284 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이며, Line 2에서 사질 퇴적물은  $0.0112 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질 퇴적물은  $0.0206 \text{ km}^2/\text{ka}$ 이다. 높은 침강률을 보이며, 평균  $-0.08 \text{ m/ka}$ 의 침강률을 보인다.

Stage 4는 광역적인 침강이 계속된 시기로 Unit F가 이에 해당하고, 5 Ma~현재에 해당된다. 이 시기의 퇴적환경은 천해환경으로 북쪽에 위치하는 양쯔강 시스템에 의한 지속적인 퇴적물의 공급에 의해 퇴적이 일어났으며, 퇴적물 공급률은 Line 1에서는 이질퇴적물이  $0.064 \text{ km}^2/\text{ka}$ , Line 2에서는 사질퇴적물이  $0.0054 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 이질퇴적물이  $0.0482 \text{ km}^2/\text{ka}$ 로 모두 이질퇴적물이 우세하고 높은 값을 갖는다. 침강률은  $-0.09 \text{ m/ka}$ 으로 나타난다.

각 Stage 별 시뮬레이션의 주요 입력변수인 해수면변동과 퇴적물 공급률 그리고 침강률 분석 결과를 고려하여 종합해 보면 연구지역의 퇴적작용과 지질환경은 다음과 같다.

Stage 1은 하성 또는 호수 환경으로 초기의 단층운동에 의해 퇴적공간의 형성되었으며, 시뮬레이션 결과에 의하면 낮은 퇴적물 공급률과 높은 침강률을 갖는다.

Stage 2는 하성 또는 호수 환경에서 천해환경으로 환경이 전이되는 시기로 낮은 퇴적물 공급률을 보이며, 침강과 융기의 반복으로 낮은 침강률을 보인다.

Stage 3는 계속적으로 분지가 침강하는 시기로 하천 또는 호수 환경에서 퇴적이 일어나며, 퇴적물 공급률과 침강률 모두가 높게 나타난다.

Stage 4는 천해 환경으로 거의 이질퇴적물이 퇴적되며, 높은 퇴적물 공급률과 높은 침강률을 보인다.

이러한 결과를 종합해 보면 제주분지는 전반적으로 침강이 일어나는 시기에는 퇴적물의 공급이 꾸준히 있었으며, 융기가 일어나는 시기에도 일부 지



역에서만 퇴적이 있었으며, base-level의 상부까지 지반이 융기되는 경우에만 퇴적이 멈추고 침식이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

열적성숙도 시뮬레이션 분석 결과는 Unit A에서 onset of oil generation 성숙도를 보이며, Stage 4가 형성되는 시기에 oil생성이 시작되는 것으로 제시된다.

## 참고문헌

- 권영인, 박관순, 유강민, 손진담, 1995, 제주분지 제삼기 육성층의 층서 및 퇴적물 기원, 석유지질학회지 3, 1, p. 1-15.
- 김대홍, 2011, 동해 울릉분지 남서연변부 퇴적층의 퇴적과정 복원 및 탄화수소의 열적성숙도 파악을 위한 SEDPAK 모델링. 강원대학교 석사학위논문.
- 오진용, 박관순, 박근필, 1997, 한국 대륙주변부의 퇴적분지 명칭, 지질학회지, 33, 3, p. 148-159.
- 이보라, 손병국, 2007. 동해 울릉분지 남서연변부 대륙붕 지역의 석유 시스템 모델링. 지질학회지, 43, 311-329.
- 임현학, 2007, Computer Simulation(SEDPAK)을 이용한 도음산 선상지-삼각주(포항분지)의 순차층서적 해석. 충북대학교 학사학위논문, 1-2, 40 p.
- 조준현, 2014, 퇴적 시뮬레이션(SEDPAK)을 이용한 포항분지 마이오세 퇴적층의 형성 및 매물 진화과정 복원, 강원대학교 석사학위논문.
- 차승희, 2011, 동해 울릉분지 남서연변부 신생대 후기 퇴적층의 정량적 분석 및 석유 시스템. 강원대학교 석사학위논문, 56 p.

허식, 최동림, 유해수, 민동주, 홍종국, 이광자, 2004, 남해 제주분지 해역의 퇴적환경 및 지질구조 예비해석, 지구물리학회지 제7권 제3호, p. 225-232.

Al-Ameri, T.K. and Al-Musawi, F.A., 2011, Hydrocarbon generation potential of the uppermost Jurassic-basal Cretaceous Sulaiy formation, South Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 4, 53-58.

Chough, S.K., Lee H.J. and Yoon S.H., 2000. *Marine Geology of Korea Seas* (2nd edition). Elsevier, Amsterdam, p. 313.

Cukur, D., Horozal, S., Kim, D.C. and Han, H.C., 2011, Seismic stratigraphy and structural analysis of the northern East China Sea Shelf Basin interpreted from multi-channel seismic reflection data and cross-section restoration. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1003-1022.

Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987, Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235, 1156-1167.

Hudson, S.M. and Hanson, A.D., 2010, Thermal maturation and hydrocarbon migration within La Popa Basin, northeastern Mexico, with implications for other salt structures. *AAPG Bulletin*, 94, 273-291.

Jolivet, L., Huchon, L. and Claude, R., 1989, Tectonic setting of Western Pacific Marginal Basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.

Kendall, C.G.St.C. and Lerche, I., 1988. The rise and fall of eustasy. In: Wilgus, C.K., Hastings, B., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H., Ross, C. and van Wagoner, J.C. (eds.), *Sea-Level Changes: an Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 42, 3-18.

Kendall, C.G.St.C., Whittle, G.L., Ehrlich, R., Moore, P.D., Cannon, R.L. and Hellmann, D.R., 1993, Computer sedimentary simulation models sequence stratigraphy. *Oil & Gas Journal*, 91, 46-51.

Kim and Son, 2013, Petroleum system modeling of the Jeju basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 49, no. 4, p. 473-491.

Kim, W., Cheong, D., and Kendall, C.G.St.C., 2007. Effects of in-phase and out-of-phase sediment supply responses to tectonic movement on the sequence development in the late Tertiary Southern Ulleung Basin, East (Japan) Sea. *Computers & Geosciences*, Volume 33, Issue 3, p. 299-310.

Kwon, Y.I., 1996, Sequences Stratigraphy and Rift-related Sediment Characteristics in the Cheju Basin. Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, Korea, 302 p (in Korean with English abstract).

- Lee, E.Y., 2010, Subsidence history of the Gunsan Basin (Cretaceous–Cenozoic) in the Yellow Sea, offshore Korea, *Austrian Journal of Earth Sciences*, 103/1, 111–120.
- Lee, G.H., Kim, B.Y., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geologic evolution and aspects of the petroleum geology of the northern East China Sea shelf basin. *American Association of Petroleum Geologists*, 90, 237–260.
- Lee, Y.J., 1997, *Petroleum Geochemistry of Organic Matter from the Cheju Basin, northeastern part of the East China Sea*. Ph.D. thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 328 p.
- Liming Dai, Sanzhong Li, Da Lou, Xin Liu, Yanhui Suo and Shan Yu, 2014, Numerical modeling of Late Miocene tectonic inversion in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, China, *Journal of Asian Earth Sciences* 86 (2014) 25 - 37.
- M. Zhang et al, 2015, Paleocene sequence stratigraphy and depositional systems in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin, *Marine and Petroleum Geology* 59, 390–405.
- S. -K Hsu et al. 2001, Magnetic inversion in the East China Sea and Okinawa Trough: tectonic implications, *Tectonophysics* 333, 111–122.

- Strobel, J., Cannon R., Kendall C.G.St.C., Biswas G., and Bezdek J., 1989. Interactive (SEDPACK) Simulation Of Clastic And Carbonate Sediments In Shelf To Basin Settings. *Computers and Geoscience*, v. 15, p. 1279-1290.
- S. Yang et al, 2004, Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea Basin, *Marine and Petroleum Geology* 21, 1095 - 1105.
- Yang, Q.L, 1992, Geotectonic framework of the East China Sea. In: Watkins, J.S., Zhiqiang, F., McMillen, K.J. (Eds.), *Geology and Geophysics of Continental Margins*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 53, pp. 17-25.
- Ye, J., Qing, H., Bend, S.L. and Gu, H., 2007, Petroleum systems in the offshore Xihu Basin on the continental shelf of the East China Sea. *American Association of Petroleum Geologists*, 91, 1167-1188.
- Zhou, Z., Zzaao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the east China Sea. In: Zhu, X. (ed.), *Chinese sedimentary basins*, Elsevier, 165-179.

# Numerical modeling of the depositional and burial processes of Tertiary strata of the Jeju Basin

YeonSu An

*Department of Geology  
Graduate School, Kangwon National University*

## Abstract

The East China Sea is located within the convergence zone between the Eurasian, the Pacific and the Philippine Sea Plates. The ECSSB(East China Sea Shelf Basin) consists of sub-basin or depression, separated by basement highs or rises. The Jeju Basin is a graben or half-graben basin located in the northwestern part of the ECSSB. The initial rifting in the ECSSB started in the Late Cretaceous.

The purpose of this study is to interpret the depositional and burial process in Jeju basin using sedimentary simulation(SEDPAK) and to understand the situation and quantitative investigation of major parameters. Input parameters which affected sedimentary sequences and burial evolution were estimated quantitatively. The input data of sediment

type, sequence depth and geothermal gradient were obtained through the preexisting well data, and the sediment supply rate and subsidence rate were estimated from the published paper.

The simulation results for the study area show relatively high subsidence rates and high sediment supply rates during Eocene to Oligocene (Stage 1). From Oligocene to Early Miocene (Stage 2), the basin began to uplift because of tectonic compression. At that time, subsidence rates and sediment supply rates were relatively lower than that of Stage 1. From Early Miocene to Late Miocene (Stage 3), relatively high subsidence rates and sediment supply rates continued and there were uplift and erosion at Late Miocene. From Pliocene to present (Stage 4), high subsidence rates and highest sediment supply rate continued in the study area. The simulation modeling of thermal maturity indicates the onset of oil generation for Unit A at present.