

## <Review>

# 중국 가스함유 육성 셰일층(Songliao 분지)의 퇴적환경과 층서 및 이를 바탕으로 한 호성 셰일가스 함유 퇴적층에 대한 고찰

이정현<sup>1</sup> · 윤석훈<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지질환경과학과

<sup>2</sup>제주대학교 지구해양과학과

## 요 약

이 논평에서는 중국 일대에 발달하는 셰일가스 함유 육성(호수) 퇴적층 중 Songliao 분지에 대해 고찰하고 이를 바탕으로 호성층 및 해성층 기원의 셰일가스를 비교하였다. 중국 북동부에 분포하는 Songliao 분지는 호수에서 퇴적된 흑색 셰일을 다량으로 포함하고 있어 최근 들어 중요한 셰일가스 탐사 대상지로 떠오르고 있다. Songliao 분지는 주로 백악기에 발달하였으며, 그 중에서도 백악기 후기에 퇴적된 Qingshankou층과 Nenjiang층에 흑색 셰일이 두껍게 나타난다. 흑색 셰일은 Songliao 분지 내에 발달한 호수가 크게 확장되었을 때 퇴적되었으며, 이 시기는 전세계적으로 해수면이 상승한 시기와 대략적으로 일치하고 따라서 당시에는 분지내 호수가 바다와 연결되어 있었을 것으로 추정된다. 이러한 호성 셰일가스 함유 퇴적층은 해성층의 그것과는 다른 특징을 보이는데 그 중에서도 가장 중요한 것은 호성 흑색 셰일층의 수직적 및 수평적 분포가 매우 복잡하다는 것이다. 그 이유로는 호수 분지의 지구조적 진화 과정, 호수의 작은 크기에 따른 잦은 퇴적 환경의 변화, 유입되는 퇴적물의 경로 변화, 기후 변화에 따라 급격하게 일어나는 호수면의 변화 등이 있다. 이렇게 생성된 호성 퇴적층은 수평적 분포는 좁으나 수직적으로는 매우 두껍게 나타나는 양상을 보이며, 이로 인해 셰일가스를 함유하고 있는 퇴적층의 부피가 일정 이상으로 유지될 수 있다. 또한 호수 환경에 쌓이는 셰일의 암석학적인 특성, 즉 취성도, 석영 함량 등이 해성층의 그것과 다르며, 이는 셰일가스의 생산단계에서 중요하게 고려해야 할 대상이 된다.

**주요어:** 호성 퇴적분지, Songliao 분지, 퇴적환경, 층서, 셰일가스

**Jeong-Hyun Lee and Seok-Hoon Yoon, 2017, Review on the depositional environment and stratigraphy of Chinese gas-bearing shale succession (Songliao Basin) and their implication on lacustrine shale gas deposits. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 6, p. 845-862**

**ABSTRACT:** This manuscript reviews shale gas-bearing lacustrine deposits in the Songliao Basin, located in northeast China, and compares lacustrine and marine gas-bearing shales. Abundant black shales deposited in the lake environment occur in the Songliao Basin, and therefore the basin has been a focus of shale gas study. The Songliao Basin mainly formed during the Cretaceous, and thick black shales developed in the Qingshankou and Nenjiang formations during the Late Cretaceous. These shale deposits mainly formed when the lake developed extensively, and this time interval overlaps with the time of global sea-level rise. Therefore, it has been thought that the lake would have been connected with the ocean during the intervals of high lake level. These lacustrine shale gas bearing deposits are fairly different from those of marine origin, especially in their distribution pattern; vertical and lateral distributions of the lacustrine black shales are very much complex. Such complex distribution of lacustrine shale was caused by structural evolution history of the lacustrine basin, abundant changes in depositional condition due to small size of lake, changes in sediment route, and rapid lake level changes caused by climate change. The lake deposits form laterally restricted but vertically thick successions, resulting in volumetrically significant shale gas distribution. In addition, lithologic characteristics of lacustrine shale are different from those of marine shale, such as brittleness and proportion of quartz, which are important in terms of shale gas production.

\* Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

**Key words:** Lacustrine basin, Songliao Basin, sedimentary environment, stratigraphy, shale gas

(Jeong-Hyun Lee, Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; Seok-Hoon Yoon, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea)

## 1. 서 언

최근 들어 전 세계적으로 셰일가스 개발에 대한 관심이 고조되고 있으며, 그 중에서도 미국 및 캐나다 등 북미 일대에서 셰일가스의 상업적 생산이 활발하게 이루어지고 있다. 현재 상업적인 가스 생산이 이루어지고 있는 셰일층의 대부분은 해양에서 형성된 것으로서, 대표적인 예로는 미국의 백악기 Eagle Ford층군, 캐나다의 트라이아스기 Montney층, 중국의 실루리아기 Longmaxi층 등이 있다. 그러나 중국에는 육성 기원의 호성 퇴적층들에도 다량의 유기물질을 함유한 흑색 셰일이 존재하며, 이들은 향후 중요한 셰일가스 탐사 대상으로 고려되고 있다(Zou *et al.*, 2013). 중국에 분포하는 셰일가스 함유 퇴적층 중 해양 기원의 셰일은 전체의 1/3에 지나지 않으며, 2/3가량은 해안선 일대 또는 육성 환경에서 퇴적된 것이다(Zhang *et al.*, 2012). 육성 환경에서 퇴적된 호성 셰일은 해양 환경에서 퇴적된 셰일과 그 퇴적학적 생성 과정이 다르며, 그 결과 형성된 퇴적층의 분포 양상도 달라 해양 기원의 셰일층에서 사용하던 셰일 가스 생산 기법을 그대로 도입하기에는 어려움이 있다(Karz and Lin, 2014).

중국 일대에는 다양한 시기의 셰일가스 퇴적층이 널리 분포하고 있으며, 이에 대하여 지질학적 연구가 다방면으로 이루어지고 있다(Zou *et al.*, 2010). 중국은 현재 미국, 캐나다와 함께 셰일가스의 상업적 생산이 이루어지는 국가로서, 향후 생산 가능한 셰일가스 매장량은 31조 6천억 m<sup>3</sup>에 달하는 것으로 평가되고 있다(EIA, 2017). 중국에서는 2005년부터 셰일가스의 탐사가 시작되어, 그동안 다양한 지질시대의 셰일층에 대한 지질학적 조사가 수행되었다. 실제로 이들 중 일부에서는 상업적 생산이 이루어지고 있는데, 2010년 최초로 생산이 이루어진 후 지속적으로 생산량은 증가하는 추세이다(Zou *et al.*, 2016). 그러나 아직까지 중국은 셰일가스의 생산이 활발한 미국 및 캐나다에 비해 그 생산이 뒤쳐지고 있는데, 이는 도로 등 셰일가스의 생산에 필요한 기반시설의 부족,

셰일층을 파쇄하기 위한 수자원의 부족, 중국 일대에 발달하는 셰일층의 복잡한 구조특성 등에서 기인한다(Zou *et al.*, 2016).

이 논평에서는 최근 들어 주목을 받고 있는 중국의 육성 호수 기원 셰일가스 함유 퇴적층을 소개하고, 그 중 상대적으로 연구가 자세히 이루어진 Songliao 분지에 발달하는 셰일 및 이암층에 대해 종합하여 보고하고자 한다. 이를 바탕으로 육성 환경에서 발달하는 셰일가스를 함유한 퇴적층에 대해 특히 그 퇴적작용 및 주요 퇴적환경을 고찰하고자 한다. 아울러 육성 및 해성 셰일층을 퇴적학적 및 석유지질학적 관점에서 비교해보고자 한다. 현재 중국만이 셰일가스를 함유하는 호성 퇴적층에 대해 실질적으로 탐사 및 생산을 실시하고 있다는 점을 고려할 때, 이러한 정보는 향후 육성 셰일층에서 셰일가스를 생산할 때 도움이 될 수 있을 것이다.

## 2. 중국 대륙에서의 셰일 및 이암층의 개요

중국 대륙에 분포하는 셰일가스를 함유한 퇴적층은 지질학적으로 크게 세 종류로 나눌 수 있는데, 전기 고생대-중기 고생대에 원양에서 퇴적된 해양성 셰일, 후기 고생대-전기 중생대에 해안선 일대에서 퇴적된 셰일 또는 탄화셰일, 그리고 중생대-전기 신생대에 걸쳐 형성된 육성 호수 퇴적층 등이다(Zou *et al.*, 2010). 이들 중 유기물질이 풍부한 흑색 셰일로 구성된 호성 퇴적층은 중국 서부의 Junggar, Ordos 분지, 남부의 Sichuan 분지, 북동부의 Songliao 분지, 황해 북쪽의 Bohai Bay 분지 등이 있다(표 1). 이들 중 Songliao, Bohai Bay, Ordos, Junggar 분지 등은 중국 대륙에 분포하는 탄화수소자원의 주요 분포지로 알려져 있다(Zou *et al.*, 2015).

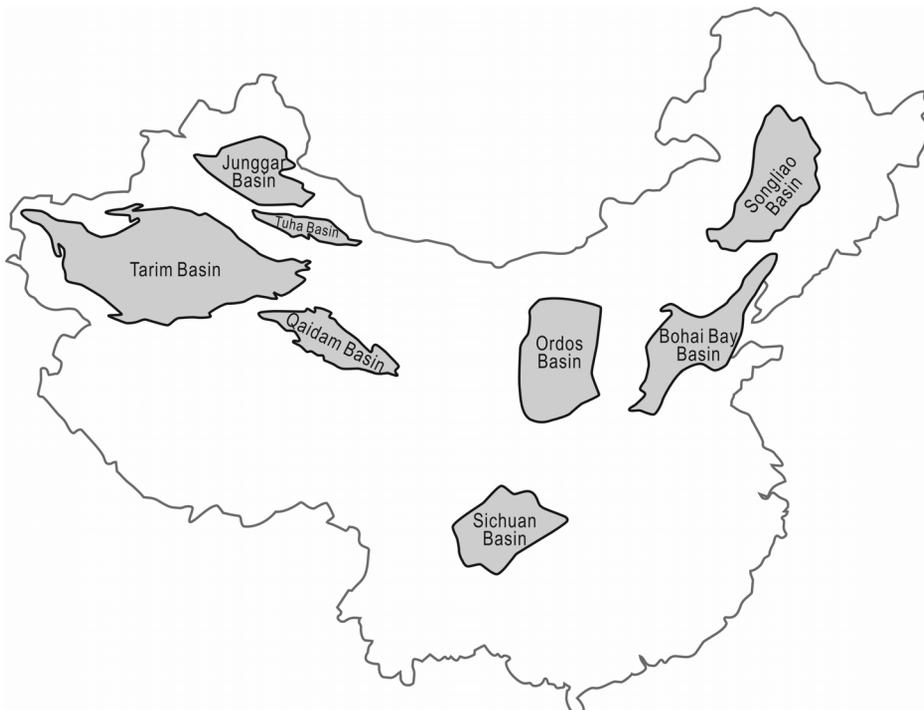
중국에서 셰일가스를 함유한 육성 호수 퇴적층은 중생대에서 전기 신생대에 걸쳐 발달하며, 여기에는 중국 북동부에 발달하는 백악기 Songliao 분지, 중국 동부 베이징 일대에 발달하는 고제3기 Bohai Gulf 분지, 중국 중부 일대에 발달하는 트라이아스기 Ordos

분지, 중국 남동부에 발달하는 트라이아스기-จู라기 Sichuan 분지, 중국 북서부에 발달하는 쥬라기 Junggar-Tuha 분지, 중국 서부에 발달하는 트라이아스기-쥬라기 Tarim 분지와 제3기 Qaidam 분지 등이 포함된다(그림 1). 이들 분지에 분포하는 육성 호수 퇴적층들은 중국 내 세일가스층 중에서 가장 큰 면적을 차지한다. 이들은 주로 침하지(depression) 또는 열개분지(rift basin)에서 퇴적된 것으로, 유기물질이 풍부한 세일, 석회암, 사암, 이암 등으로 이루어져 있다(Zou *et al.*, 2010).

동북아시아 일대의 중생대 및 신생대 육성 퇴적분지들은 대부분 이 지역에 분포하는 여러 지판들이 충돌하는 과정에서 생긴 것들이다. 중국 동북부에 분포하는 퇴적 분지들은 고태평양판(이자나기판)이 유라시아판 아래로 섭입하는 과정에서 유라시아판 내에 발달한 단층대와 밀접한 관계가 있다(Chough and Sohn, 2010). 중생대 후기, 이자나기판은 태평양판 아래로 비스듬하게 섭입하였으며, 그 결과 동아시아 일대에 분포하는 유라시아판 내에는 좌수향 단층계가 대거 발달하였다(Klimetz, 1983; Engebretson *et al.*,

**Table 1.** Lacustrine shale distribution in China. Modified after Zou *et al.* (2010).

Age		Thickness (m)	Area (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	Distribution
Mesozoic	Triassic-Jurassic	1200-1500	2.0-3.0	Junggar Basin
	Triassic	20-160	4.0-5.0	Ordos Basin
	Cretaceous	200-400	4.0-5.0	Songliao Basin
	Jurassic	300-500	0.3-0.5	Tuha Basin
Cenozoic	Eocene	800-2300	0.8-1.0	Bohai Bay Basin (Liaohu, Huanghua, Jiyang depressions)
	Eocene	2000-2500	1.0-1.5	
	Eocene	220-1300	1.2-1.5	
	Oligocene-Pliocene	800	0.3-0.5	Qaidam Basin



**Fig. 1.** Distribution of Mesozoic-Cenozoic lacustrine shale in China. Modified from Zou *et al.* (2010).

1985; Watson *et al.*, 1987; Kim *et al.*, 1997). 동시기 한반도 일대에도 여러 소규모 주향이동분지(strike-slip basin)들이 생성되었으며, 경상도 일대에는 후배호분지(back-arc basin)가 발달하였다(Chough and Sohn, 2010; Chough, 2013). Songliao, Bohai Bay 분지 등이 이와 같은 지구조적 사건의 결과로 생성되었으며, 최근 들어 석유가 발견되었다고 보고된 서해 북쪽의 북한 영해 내에 발달한 서한만분지 또한 동일한 지구조 운동에 의해 형성되었다(Chen and Qin, 1989; Allen *et al.*, 1997; Ren *et al.*, 2002). 반면, 중국 서북부에 위치하는 퇴적 분지들은 여러 작은 판들이 고생대 말-중생대 초에 걸쳐 충돌한 결과 생성된 것으로, Junggar 및 Tuha 분지는 카자흐스탄, 시베리아 및 타림판이, 그리고 Qaidam 분지는 유라시아판과 인도판이 충돌하는 과정에서 생성된 것으로 알려져 있다(Wang and Chen, 2004; Yin *et al.*, 2008).

### 3. Songliao 분지

Songliao 분지는 중국 북동부에 분포하는데, 길이 750 km, 너비 330-370 km로 면적은 260,000 km<sup>2</sup>에 달하며(Feng *et al.*, 2010), 구조적인 특성에 따라 북부 급락지(Northern Plunge), 중앙 요곡(Central Downward), 북동 융기대(Northeastern Uplift), 남동 융기대(Southeastern Uplift), 남서 융기대(Southwestern Uplift), 서부 사면(Western Slope) 등 크게 6개의 구역으로 구분된다(그림 2). Songliao 분지를 구성하는 암층서 단위들의 연대는 미화석 연구를 통해 잘 알려져 있는데(Wan *et al.*, 2013), 이에 따르면 Songliao 분지에는 중생대 주라기 또는 백악기부터 신생대 신제3기까지에 걸쳐 두께 약 10 km에 달하는 퇴적층이 집적되었으며, 분지의 가장자리로 가면서 퇴적층의 두께는 점진적으로 얇아지는 양상을 띤다(그림 3). 퇴



**Fig. 2.** Location map showing the Songliao Basin and its structural units. Base map from Google Earth. Structural units adapted from Jia *et al.* (2013). A-A' indicates location of seismic profile shown in Fig. 3.

적층 하부의 기반암은 주로 고생대의 변성암, 화성암, 화산암 등으로 구성되어 있다(Gao and Cai, 1997).

### 3.1 지구조적 분지 발달사

Songliao 분지의 형성 과정은 지구조적으로 맨틀 융승, 열개작용, 열개후 열적 수축에 의한 침강, 구조적 역전 등으로 크게 네 단계로 나누어 볼 수 있다. 맨틀 융승 시기는 주라기 중기에서 후기에 해당되며, 이 시기에는 분지의 확장이 활발한 화산 활동을 동반하여 일어났다. 이 시기에 퇴적된 암석들은 일부 지구조 단위에만 부분적으로 퇴적되었으나 그 두께는 최대 7 km에 달한다(Xie *et al.*, 2003).

열개가 일어난 이후에는 백악기 전기에서 후기에 걸쳐 퇴적층의 열적 수축에 의해 점진적으로 침강이 일어나게 된다. 이 시기에 발달한 열개후 퇴적체는 그 두께가 평균 약 3,000-4,000 m 정도로 최대 6,000 m에 달하며, 분지 전역에 걸쳐 하부에 있는 열개 동시성 퇴적체를 부정합적으로 피복한다. 신생대에는 구조 역전이 일어났으며, 분지 서부에만 일부 퇴적이 일어났고 그 두께는 최대 510 m 정도이다(그림 4) (Feng *et al.*, 2010).

### 3.2 층서 및 퇴적환경

Songliao 분지에 형성된 퇴적체는 하부로부터 주라기 후기에 퇴적된 Huoshiling층, 백악기 전기에 퇴적된 Shahezi, Yingcheng, Denglouku, Quantou층, 백악기 후기에 퇴적된 Qingshankou, Yaojia, Nenjiang, Sifangtai, Mingshui층, 신생대에 퇴적된 Yi'an, Da'an, Taikang층 등으로 이루어진다(그림 4). 이들은 분지의 지구조 발달사에 따라 크게 4개의 지구조 층단위, 즉 심부 지구조 층단위(deep tectonic unit layer), 하부 지구조 층단위(lower tectonic unit layer), 중부 지구조 층단위(middle tectonic unit layer), 상부 지구조 층단위(upper tectonic unit layer)로 구분된다(Liu *et al.*, 1993).

#### 3.2.1 심부 지구조 층단위(deep tectonic unit layer)

분지 발달 초기(백악기 전기) 열개가 일어나며 퇴적암이 분지 내에 일부 발달하였다. 이 당시에 형성된 퇴적층들은 아래서부터 Huoshiling층(백악기 전기), Shahezi층(백악기 전기), Yingcheng층(백악기 전기)이다. 분지의 발달이 언제 시작하였는지에 대해서는 논란이 있으나, 최근 Chang *et al.* (2017)은 화산 기

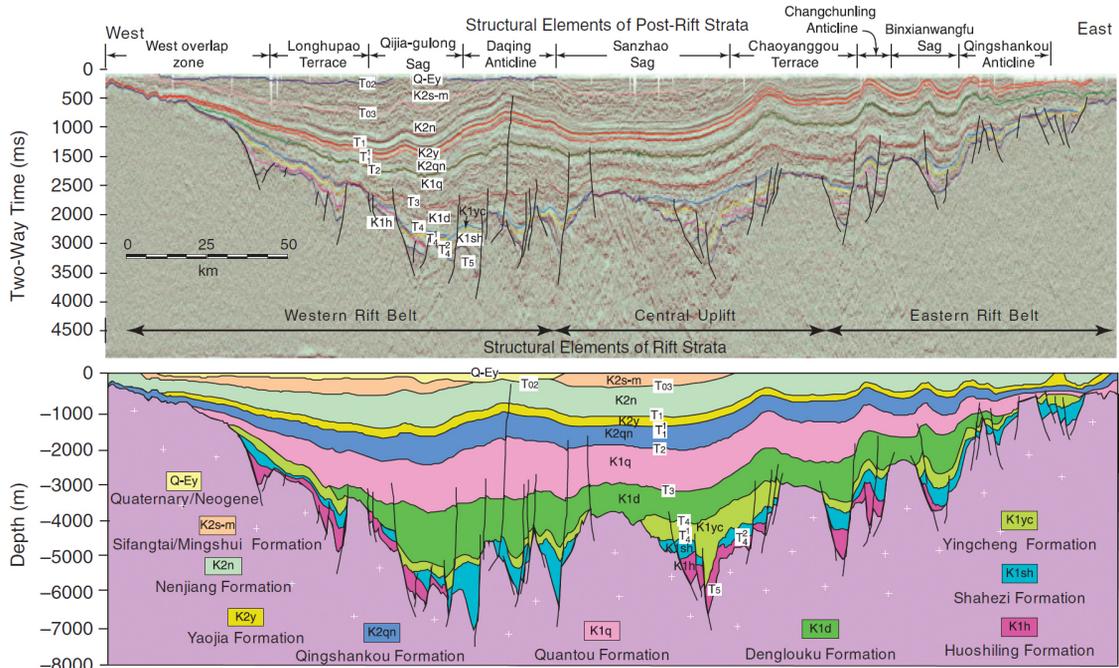


Fig. 3. Regional seismic section and structural cross section across the central part of the Songliao Basin. Lithologic and stratigraphic information derived from geophysical logs and cores tied to seismic sections. After Feng *et al.* (2010).

원의 퇴적층에 대한 분석을 바탕으로 Huoshiling층이 약 124-118 Ma경 퇴적되었다고 설명하였다. 이 시기에는 대부분 지구조적 침강에 의해 분지의 발달이 결정되었다. 분지의 기반암이 침강하고 여러 단층들이 발달한 결과, 30개 이상의 서로 독립된 소분지들이 발달하였다. 분지를 결정하는 단층의 특성에 따

라 초기 분지들의 형태가 결정되었으며, 이들은 크게 세 종류, 즉 지구대(graben), 반지구대(semi-graben), 그리고 혼합형(combination type)으로 구분될 수 있다. 분지의 경계를 따라 형성 초기에 화산활동이 활발히 일어났으며, 분지에 발달하는 퇴적층들은 주로 충적 산상지(alluvial fan), 산상지 삼각주(fan

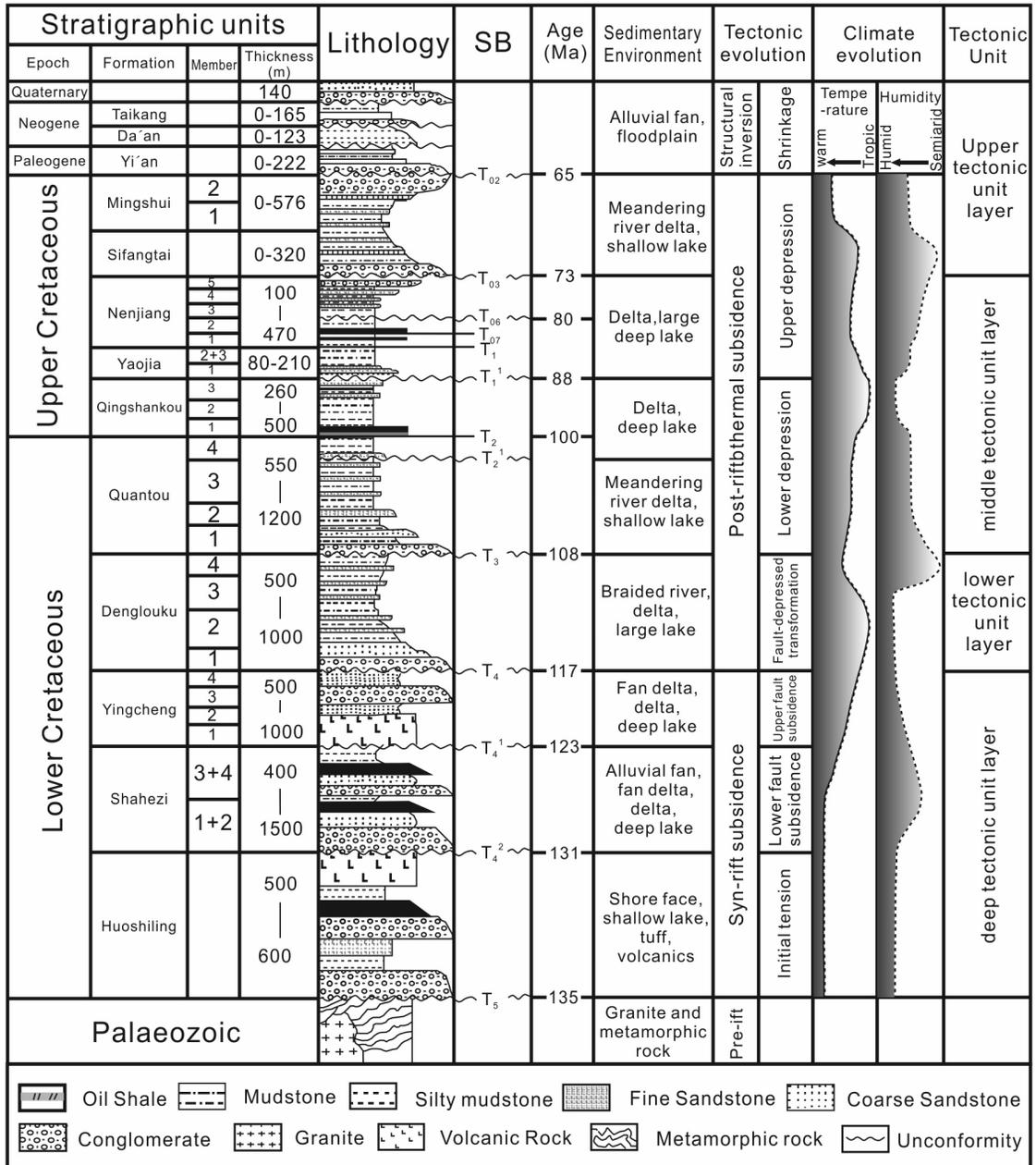


Fig. 4. Generalized stratigraphic column of the Songliao basin. Modified after Jia *et al.* (2013).

delta), 호수, 범람원 등에서 퇴적된 것으로 해석된다(Liu *et al.*, 1993). 분지 형성 당시 단층 활동에 의해 주변에 산악 지형이 만들어졌으며, 그 결과 축적 산상지가 호수 가장자리에 대거 발달하면서 각종 중력류 퇴적층들이 집적되었다. 이러한 중력류 퇴적체에는 수중 슬럼프 각력암(subaquatic slumping breccia), 수중 이류(subaquatic mud flow), 저탁암(turbidite) 등이 포함된다.

**3.2.2 하부 지구조 층단위(lower tectonic unit layer)**

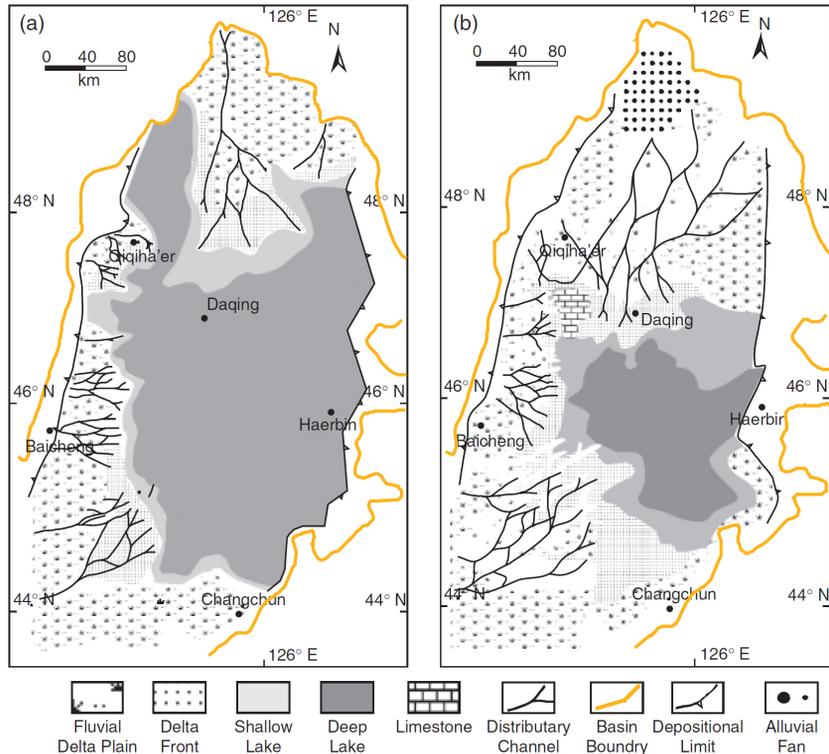
백악기 전기에 퇴적된 Denglouku층으로 구성되어 있으며, 분지가 열개를 멈추고 점차 식어가며 침강하는 시기에 형성된 것이다. 이 지층이 형성되던 시기는 분리되어 있던 소분지들이 서로 합쳐지면서 대규모 단일 퇴적분지로 변화하는 시기이다. 이 시기의 퇴적체는 축적 범람원-삼각주-얕은 호수-축적 범람원 순으로 구성되는 경우가 많으며, 이들은 호수의 수위가 변해가는 양상을 지시한다. 주로 분지 가장자리에는 삼각주가 형성되었으며, 분지 중심부

에는 호수가 형성되었다(Feng *et al.*, 2010).

**3.2.3 중부 지구조 층단위(middle tectonic unit layer)**

백악기 전기에 퇴적된 Quantou층과 백악기 후기에 퇴적된 Qingshankou, Yaojia, Nenjiang층으로 구성되어 있으며, 대략 3,000만년에 걸쳐 퇴적이 이루어졌던 시기이며 전체 분지발달 과정의 1/3에 해당한다. 이 시기 동안 분지의 규모가 전반적으로 크게 증가하였으며, 분지 전체를 덮는 넓은 호수가 발달하였다. 이 시기까지 분지의 발달을 좌우하는 가장 중요한 요소는 북동에서 북북동 방향으로 발달한 단층계였으며, 즉 기반암의 침강 정도가 분지의 발달에 가장 중요하게 작용하였다(Liu *et al.*, 1993; Feng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012).

이 시기의 가장 큰 특징은 호수가 넓게 발달하였다는 것인데, Qingshankou층이 퇴적될 초기(1번 층원)에 넓고 깊은 호수가 형성되었으며, 이 때 호수의 크기는 최대 87,000 km<sup>2</sup>에 달하였다(그림 5a)(Feng *et al.*, 2010). 당시 깊은 호수 환경에서 퇴적된 흑색 세



**Fig. 5.** Depositional facies map of the first (a) and second and third members (b) of the Qingshankou Formation. After Feng *et al.* (2010).

일은 분지 중심부를 따라 광범위하게 발달하며, 그 두께가 60-100 m에 달해 Songliao 분지의 가장 중요한 석유 근원암인 동시에 셰일가스를 포함하고 있는 층원으로 알려져 있다. Qingshankou층의 2, 3번 층원이 퇴적될 때에는 북쪽과 서쪽에서 삼각주가 전진 발달하여 호수의 크기가 약 41,000 km<sup>2</sup>로 감소하였으며, 두께 200-300 m의 셰일층이 분지에 집적되었다(그림 5b). 이 때 주로 퇴적된 암석은 회색에서 흑색의 셰일들과 교호하는 오일 셰일, 회색 사암 및 실트암이다.

이후 소규모 호수들이 분지 남쪽에 형성되었고, 반면 분지 북쪽에는 몇 번의 부정합면이 발달하며 주로 하천 및 범람원 퇴적층으로 구성된 두께 80-210 m의 Yaojia층이 퇴적되었다. 이 시기에는 대기중 노출을 지시하는 여러 증거들, 예를 들면 이암 역(rip-up clast), 건열 칼리치(caliche), 생교란구조 등이 나타난다(Feng *et al.*, 2010).

백악기 후기 Nenjiang층이 퇴적될 때 다시 호수가 넓게 발달하였다(Liu *et al.*, 1993; Feng *et al.*, 2010). 이 시기 동안 주로 형성된 퇴적암은 회색에서 흑색 셰일, 석회암, 얇은 실트암 또는 사암과 교호하는 오일 셰일 등이다(Feng *et al.*, 2010). Songliao 분지의 퇴적 역사를 통틀어볼 때 가장 넓은 호수가 이 시기에 형성되었는데, 그 크기는 200,000 km<sup>2</sup>에 달한다(Chi *et al.*, 2002). 호수의 확장은 분지의 침강 속도가 증가함과 함께 하였으며, 또한 해수면의 변동과도 연관되어 있다(Liu *et al.*, 1993; Feng *et al.*, 2010). 호수 퇴적층 내에는 저탁암이 자주 나타나는데, 이는 당시의 기후 변화에 따른 호수면 변화에 따른 것으로 생각된다(Wei *et al.*, 2016).

### 3.2.4 상부 지구조 층단위(upper tectonic unit layer)

분지 발달이 끝나가는 시기(백악기 말), 분지의 확장이 멈추고 수축이 시작되었고, 그 결과 분지의 퇴적 가능공간(accommodation space)의 크기가 크게 감소하였다. 분지 동편에서는 용기가 일어났으며, 퇴적 중심은 서쪽으로 이동하였고, 그 결과 분지 전체에 전반적으로 퇴적물의 공급량이 크게 증가하였다. 침강 속도보다 퇴적물의 공급량이 높아진 결과 분지가 퇴적물로 채워져 전반적으로 얕아졌으며, 퇴적 환경이 얇은 호수 환경에서 충적 범람원, 충적 선상지로 변해가는 등 전반적으로 상향 조립화의 경향을 보인

다. 이 시기에 형성된 퇴적층들은 Sifangtai, Mingshui 층이다(Liu *et al.*, 1993).

## 4. Songliao 분지의 호성 셰일층: Qingshankou층

Songliao 분지에서 셰일의 성인에 대한 퇴적학적 연구는 주로 백악기 후기에 퇴적된 Qingshankou층과 Nenjing층에 집중되어 있는데, 이들 지층이 주로 유기물이 풍부한 흑색 셰일로 구성되어 있어 석유자원의 주요 근원암으로 작용하기 때문이다. 지난 10년간 이루어진 연구에 의하면 Qingshankou층과 Nenjiang층의 미성숙하거나 일부 속성작용이 일어난 셰일에서 생물학적으로 생성된 메탄가스가 발견되었으며, 따라서 셰일가스를 생산할 수 있는 주요 저류지로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2006; Xia *et al.*, 2012). 이들 중 비교적 상세히 연구가 이루어진 Qingshankou층에 대해 소개하고자 한다.

Qingshankou층은 암층서적으로 크게 3개의 층원(member)으로 이루어져 있으며, 이들은 하부로 부터 1, 2, 3층원으로 불린다. 이들 중 1번 층원은 주로 호수 환경에서 퇴적된 셰일로 구성되어 있으며, 2, 3번 층원에서는 사암이 더 많이 나타난다(그림 6). 이들 중 주로 셰일가스를 포함하고 있으며 또한 석유의 근원암이 되는 것은 1번 층원이다. 2, 3번 층원은 그 경계가 불분명하여 보통 함께 기재된다. Qingshankou층에 대한 퇴적학적 연구는 주로 Songliao 분지의 중심부에서 취득된 CCSD-SK-I (China Cretaceous Continental Scientific Drilling-Songke 1) 시추공의 코어에서 이루어졌다. 개형층 등의 미화석, 화분, 자기층서 등의 연구에 따르면 Qingshankou층은 백악기 후기 Turonian 중기(92 Ma)부터 퇴적이 시작되었으며, 약 90.4 Ma까지 두께 약 81 m의 1번 층원을 형성하였다. 이후 두께 약 416 m의 2/3번 층원을 Coniacian 후기(86.2 Ma)까지 퇴적되었다(Wan *et al.*, 2013). 미화석들에 의한 고기후 연구 결과는 퇴적이 일어날 동안 다소 습윤한(sub-humid) 아열대 중간(mid-subtropical) 정도의 기후가 우세하였음을 지시한다(Zhao *et al.*, 2014).

## 4.1 암상

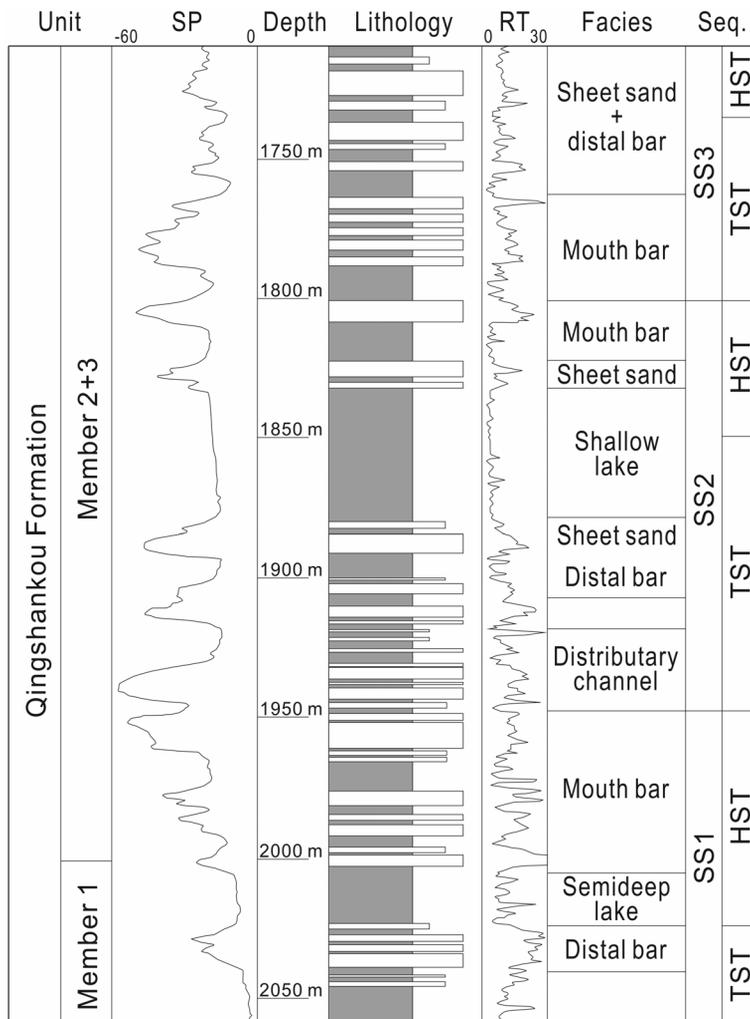
### 4.1.1 Qingshankou-1 층원

Qingshankou-1 층원은 분지 전체에 걸쳐 널리 발

달하며, 분지의 서부 경계부에서만 거의 나타나지 않는다(그림 5a). 1번 층원의 두께는 보통 0-80 m이며, 최대 130 m까지 발달하기도 한다(그림 6)(Gao *et al.*, 2009). 이들은 일반적으로 깊은 호수 환경에서 퇴적된 것으로 알려져 있다. 분지의 중부 및 동남부에서 1번 층원은 주로 흑색에서 회색 이암 및 이와 교호하는 오일 세일로 이루어져 있으며, 서부 및 북부에서는 주로 흑회색 및 녹회색 이암, 회백색 사암 및 실트암들이 서로 교호하는 형태로 나타나고, 남부 및 남서부에서는 적색 이암 및 사암이 나타나며, 분지가

장자리에서는 사암 및 역암이 나타난다고 알려져 있다(Gao *et al.*, 2009). Qingshankou-1 층원은 그 하부의 Quantou층 및 상부의 2/3번 층원과 정합적인 관계를 이룬다.

SK-1 코어에서 Qingshankou-1 층원은 그 두께가 81.41 m이며 100%의 코어 회수율을 보인다. 여기에서 나타나는 암상은 이암, 백운암, 이회암, 결정질 석회암, 개형층을 포함하는 석회암, 응회암 등이다(그림 7)(Gao *et al.*, 2009). 이들 중 가장 흔하게 나타나는 암상은 이암으로, 전체 지층구간의 96%를 차지한



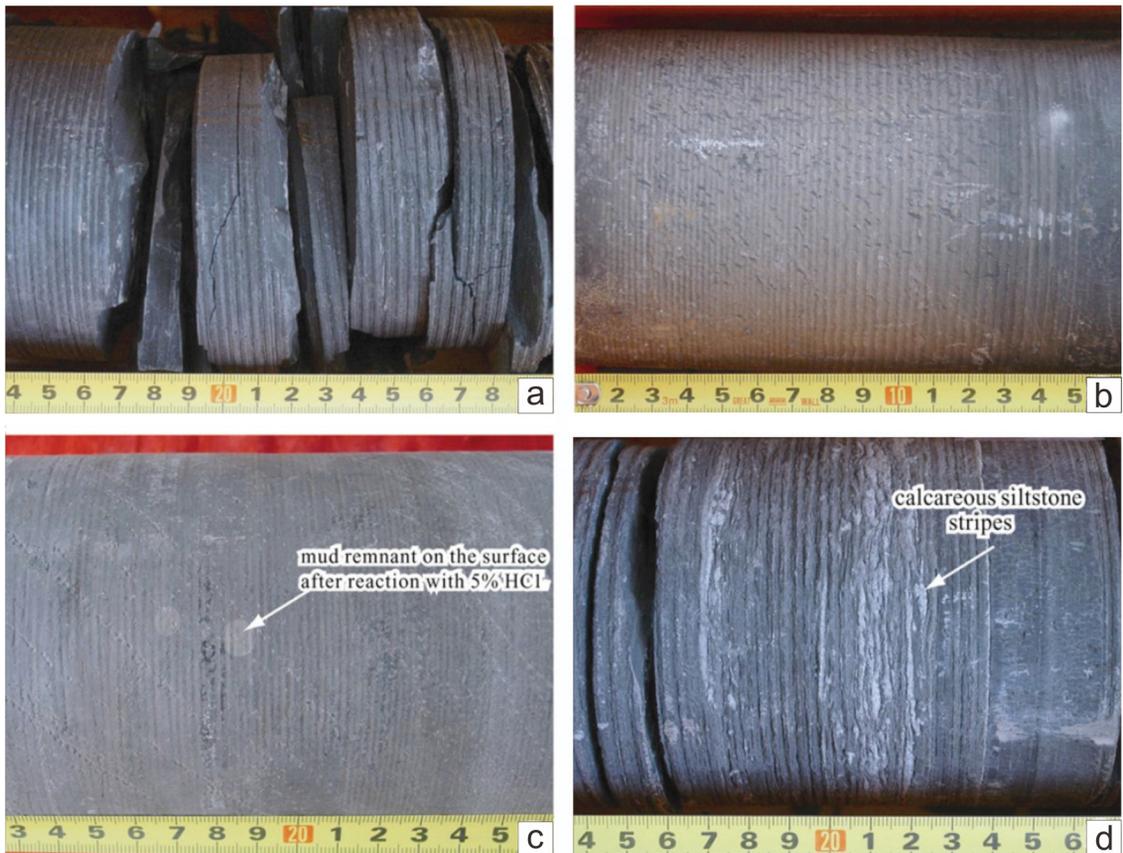
**Fig. 6.** Higher order sequence stratigraphic profile in a downdip-type well in the Sifangtuozi 3-D survey. Twenty higher order sequences (S15-S45) were recognized in the four third-order sequences (SS1-SS4) in the Qingshankou and Yaojia formations. The first number after “S” denotes a third-order sequence; the second number represents a higher order sequence in that third-order sequence. TST = transgressive systems tract; LST = lowstand systems tract; HST = highstand systems tract. After Zhao *et al.* (2011).

다. 이암에서는 주로 수평층리와 약간의 화석 조각이 나타나며, 백운암이 단괴 형태로 나타나거나 또는 얇은 석회암층이 교호하는 것이 관찰된다. 생흔 화석이 부분적으로 관찰되는 경우도 있으나, 매우 드물게 나타난다. 이회암에서는 그 내부 구조가 거의 나타나지 않으며, 부분적으로 용해구조가 존재하며 그 내부에 비투멘이 충전되어 있는 경우들이 있다. 이들에 대한 상세한 퇴적상 분석(facies analysis)은 이루어져 있지 않다. Gao *et al.* (2009)은 이들을 심호성 이암(deep lake mudstone), 백운암(dolomite), 이회암(marl), 석회암(limestone), 개형층을 포함하는 석회암(ostracode limestone), 화산재(volcanic ash) 등 여섯 개의 퇴적상으로 구분하였으나, 이들의 분류 기준 및 성인에 대한 기재는 제시되어 있지 않다.

#### 4.1.2 Qingshankou-2/3 층원

Qingshankou-2/3 층원은 분지 전체에 걸쳐 널리 발달하며, 그 두께는 255-550 m 정도이다(Wang *et al.*, 2009). 1번 층원을 정합적으로 덮는 이질 사암으로 주로 구성되어 있으며, 상위의 Yaojia층으로 점이적으로 변해가는 구간이다. 주로 회색, 암회색 및 녹회색의 이암으로 이루어져 있으며 일부의 적자색 이암, 회색 이질 실트암, 회백색 사암 및 석회질 실트암 등이 포함되어 있다. 상기한 것과 같이 2번과 3번 층원 사이의 경계는 뚜렷하지 않으며, 정합적으로 생각되나 일부 구간에서는 부분적으로 부정합면이 발달하기도 한다.

SK-I 코어에서 Qingshankou-2/3번 층원에 나타나는 암상에 대한 기재는 Wang *et al.* (2009)에 의해



**Fig. 7.** Plate showing main lithologies of the first member of the Qingshankou Formation in SK-I. (a) dark gray mudstone, horizontal bedding, mudstone of still water in deep lake; (b) light olive gray dolomite, massive bedding, dolomite sediments in deep lake; (c) light olive gray muddy limestone, massive bedding, muddy limestone sediments; (d) light gray calcareous siltstone stripes in the dark gray mudstone, deep lake turbidite microfacies. After Gao *et al.* (2009).

수행되었다. 코어에서 2/3번 층원은 총 415.6 m 두께로 나타나며, 코어 회수율은 100%이다. 총 12종류의 암상이 분류되었는데, 이암, 개형층을 포함하는 이암, 실트질 이암, 이질 실트암, 석회질 실트암, 오일 세일, 백운암, 이회암, 석회질 이암, 결정질 석회암, 개형층을 포함하는 석회암 및 응회암 등이다. 이들 중 가장 흔하게 분포하는 암상은 이암 및 개형층을 포함하는 이암이며, 나머지 암상들은 보통 매우 얇고 적은 빈도로만 나타난다.

Wang *et al.* (2009)은 2/3번 층원을 구성하는 암석을 크게 약간 깊은(semi-deep) 호수 및 얇은 호수에서 쌓인 퇴적암들로 구분하였다. 약간 깊은 호수에서 쌓인 퇴적암들에는 주로 암회색 이암 및 이와 교호하는 석회암이 있는데, 암회색 이암은 조용한 환경에서 퇴적물이 침전하며 형성된 것으로 해석하였고, 이와 교호하는 석회암은 저탁류에 의해 생성된 것으로 해석하였다. 얇은 호수에서 쌓인 퇴적암으로는 주로 회갈색 및 녹회색 이암이 있으며, 이들은 색깔을 바탕으로 얇은 호수에서 쌓인 것으로 해석된다. 이와 교호하는 실트암층은 저탁류에 의해 생성된 것으로 설명하였다. 층리 변형 구조가 관찰되기도 하는데, 이들은 지진에 의한 것으로 해석되었다. 그러나 이러한 해석은 단순 관찰에 의거한 것으로, 이를 제대로 이해하기 위해서는 자세한 퇴적학적 분석이 필요할 것으로 보인다.

## 4.2 호수면 변동과 순차층서

Songliao 분지에서 이루어진 순차층서학적 연구를 바탕으로 호수면의 변화에 대한 연구가 이루어져 있다(Liu *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 2011; Cai *et al.*, 2017). 이를 바탕으로 백악기 동안 호수면의 변화가 크게 여섯 번 있었던 것을 알 수 있다(Liu *et al.*, 1993). 이들 중 호수가 가장 크게 발달한 시기는 크게 두 번으로, Qingshankou층과 Nenjiang층의 형성시기에 해당되는데, 이 시기에는 분지의 침강 속도가 퇴적물의 공급 속도보다 빨랐다. 또한, 지화학적인 연구 결과를 바탕으로 미루어보면 호수면이 가장 높았던 시기에는 호수를 구성하는 물이 기수 내지 염수였으며(Huang *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2013), 호수에서 사는 생물들도 기수 및 염수 환경을 지시하는 경우가 많다(Gao *et al.*, 1992).

이러한 연구결과를 전세계적인 해수면 변화와 연

동시켜 보면, 이들 간에 연관성이 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 전세계적인 해수면이 상승했던 시기에 Songliao 분지에서도 함께 호수면이 상승했으며, 백악기 동안 전세계적으로 바다에 무산소 환경이 존재했던 시기와 Songliao 분지에 흑색 세일이 퇴적된 시기가 비슷하다는 것이다(그림 8). 이러한 정보들을 바탕으로 미루어볼 때, 호수면이 가장 크게 발달한 시기에는 이 호수들이 바다와 연결되어 있었을 것으로 추정되고 있다(Liu *et al.*, 1993; Huang *et al.*, 2013; Xi *et al.*, 2016). 해수면과 함께 호수면도 상승하였고, 분지가 침강하여 퇴적 가능 공간(accommodation space)이 증가한 결과 이 시기 동안 호수의 넓이와 깊이가 모두 증가하였고, 분지의 중심부에 유기물을 다량으로 함유하는 흑색 세일이 퇴적될 수 있었다(그림 4, 5, 6).

Qingshankou층의 퇴적 환경에 대해 순차층서학적으로 분석한 연구에 따르면, Quantou층과 그 위에 놓이는 Qingshankou층은 하나의 2차 규모 순차층(SSI)을 이루며, 다시 그 위에 놓이는 Yaojia층은 또다른 2차 규모 순차층(SSII)을 이루는 것으로 제시되어 있다(Zhao *et al.*, 2011). Qingshankou층은 크게 3개의 3차 규모(3rd order) 순차층, 즉 SS1, SS2, SS3으로 나눌 수 있다(Zhao *et al.*, 2011)(그림 6).

### 4.2.1 순차층 SS1

이 순차층은 Qingshankou-1과 Qingshankou-2 층원의 하부를 포함한다. 1번 층원의 퇴적이 시작되던 시기, 호수의 수면이 빠르게 상승하여 저해수면 퇴적체(LST)가 거의 형성되지 않았다. 1번 층원은 따라서 해침 퇴적체(TST)로 풀이되며, 주로 나타나는 퇴적상은 삼각주 전면(delta front)에서 전삼각주(prodelta) 환경에서 퇴적된 소규모 퇴적체들과 호수 환경에서 퇴적된 암회색의 세일층이다. 2번 층원 하부는 해침 퇴적체 위에 쌓인 고해수면 퇴적체(HST)로, 주로 전진 발달하는 삼각주 전면 및 전삼각주의 퇴적물들로 대표된다.

### 4.2.2 순차층 SS2

Qingshankou-2 층원의 상부와 Qingshankou-3 층원 하부를 포함한다. 이 퇴적계 다발에서도 저해수면 퇴적체는 거의 발달하지 않았다. 해침 퇴적체는 주로 후퇴 발달하는 삼각주 시스템으로, 이들은

다시 상대적으로 고해수면 시기에 발달한 전진 발달하는 삼각주의 하부에 놓인다.

4.2.3 순차층 SS3

대부분의 Qingshankou-3 층위에 해당하는 구간이다. 역시 저해수면 퇴적체는 거의 발달하지 않는다. SS3은 상대적으로 호수면이 낮아졌을 때 형성되었으며, 그 결과 삼각주에서 퇴적된 사암이 두껍게 나타난다.

5. 고찰: 육성 호수 이암층의 퇴적학적 특성 및 Songliao 분지와의 비교

5.1 육성 호수 이암층의 퇴적작용

일반적으로 유기 물질이 다량으로 함유된 흑색 셰일이 퇴적되기 위해서는 두 가지 조건이 필요하다. 첫째, 유기 물질이 다량으로 생산되어 공급되어야 하며, 둘째, 유기물질이 잘 보존될 수 있는 지형 혹은 환경(저산소 환경) 조건이 만족되어야 한다. 이러한 조건들이 유지될 수 있는 퇴적학적 환경에는 크게 네 가지가 있는데, 바다 또는 호수의 수위 상승(transgression), 온도/염분 차이에 의한 수직적 성

층 현상(stratification), 문턱(threshold)에 의한 물의 순환 차단, 용승(upwelling)에 의해 유기 물질 생산이 대량으로 증가하는 경우 등이다. 이들 중 육성 호수 환경에서는 앞의 세 가지 상황만이 존재하며, 각각의 환경에서 흑색 셰일이 퇴적될 수 있는 조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

호수면이 상승하는 경우, 호수가 깊어지면 깊은 곳에서는 저산소 환경이 넓게 나타날 수 있으며, 특히 하기한 물의 성층 현상이 함께 일어날 경우 이러한 양상이 널리 나타난다. 그 결과 깊은 곳에 쌓인 유기물들이 분해되지 못하여 흑색 셰일의 형태로 보존되게 되는데, 이러한 조건 하에서 만들어진 흑색 셰일들은 상대적으로 넓은 범위에 걸쳐 분포하게 된다.

물의 성층 현상이 일어날 경우 호수 위쪽과 아래쪽의 물이 온도, 염도 또는 다른 원인에 의하여 밀도 차이가 생겨 순환이 일어나지 않게 된다. 이 때문에 호수 위쪽의 물에서는 대기과 직접 접촉하여 산소 교환이 일어나지만 호수 아래쪽에서는 산소의 공급이 차단되어 저산소 환경이 만들어지게 된다. 예를 들어, 여름에는 호수 위쪽의 수온이 상승하여 밀도가 낮아지는 반면 호수 아래쪽의 수온은 상대적으로 낮아 밀도가 높으며, 그 때문에 순환이 일어나지 않

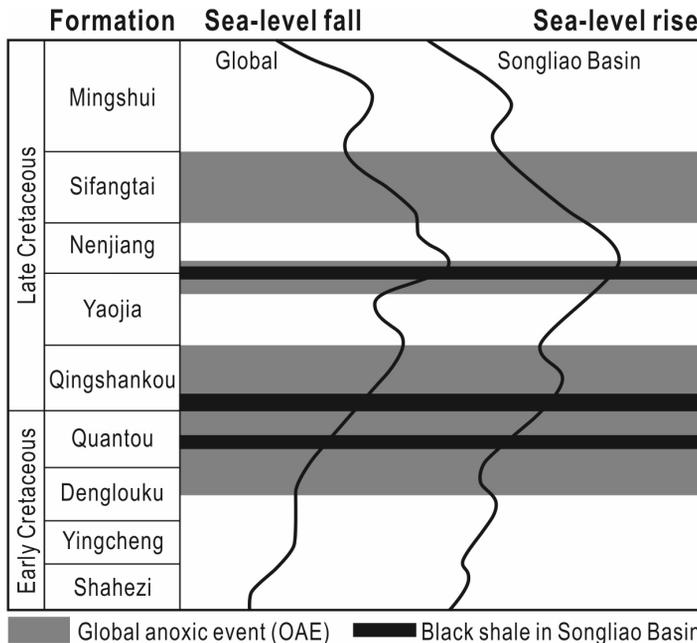


Fig. 8. Relationship between the eustasy and strata distribution in the global anoxic event and in the Songliao Basin in Cretaceous. Modified after Liu *et al.* (1993).

게 된다. 기후 변화에 따른 담수의 유입 및 증발량의 변화 또한 호수의 성층 현상에 영향을 미친다. 이는 호수 환경에서 유기물질이 풍부한 세일이 퇴적되는데 가장 중요한 원인이기도 하다.

문턱 모델은 호수에 물이 유입되거나 유출되지 않게 하는 '문턱'의 존재 유무로 결정되며, 크게 높은 문턱 모델(high threshold)과 낮은 문턱 모델(low threshold)으로 나뉜다. 높은 문턱 모델은 주로 지구조적 원인으로 설명될 수 있는데, 열개분지(rift basin) 또는 대륙전사면분지(foreland basin)가 만들어질 때 분지 내에 생성되는 호수를 설명할 때 쓰인다. 이 때 생성된 호수는 외부와의 물 교환이 '문턱'이 생기기 때문에 차단되며, 그 결과 물의 성층 현상이 일어나 유기물질이 풍부한 흑색 세일이 만들어질 수 있다. 낮은 문턱 모델은 얇은 호수에서 물이 정체되는 환경(예: 늪지대)에서 찾아볼 수 있는데, 이러한 환경에서 생물이 산소를 대량으로 소모하게 되면 호수 내부에는 저산소 환경이 형성되어 그 결과 유기물질이 잘 보존되게 된다. 낮은 문턱 모델의 가장 큰 특징은 물의 성층 현상이 없어도 생길 수 있다는 것으로, 주로 늪지대에 나무 등의 고등 식물이 대량으로 매장되어 석탄질 세일이 생기는 경우 찾아볼 수 있다.

육상 호수 퇴적층에서 나타나는 유기물질이 풍부한 세일의 수직적 분포는 매우 복잡할 수 있으며, 그 원인으로는 호수를 형성하는 퇴적 분지의 지구조적 형성 과정 및 진화, 호수의 작은 크기에 따른 수평적 및 수직적 퇴적 환경의 변화, 호수에 공급되는 퇴적물의 유입 경로 변화, 계절 또는 시간에 따른 호수면 수위 변화 등이 있다(Hakanson and Jansson, 2002). 특히, 호수면 변화는 기후에 가장 크게 영향을 받는데, 이는 기후에 의해 물이 증발하는 정도 및 강수량이 결정되며, 이에 따라 호수에 유입되는 물의 양이 결정되기 때문이다. 호수의 경우 기후 변화에 따라 주기적으로 호수면의 수위가 변하게 되는데, 이에 따라 물의 깊이와 퇴적물의 공급량도 함께 주기적으로 변화하게 된다. 이는 퇴적물 내의 총유기물(TOC) 함량이 규칙적으로 변하는 양상으로 나타나게 된다(Gemaisson and Moore, 1980).

순차층서학적으로 호수 퇴적층을 분석하면 물이 얇을 때 퇴적물이 빨리 쌓이고 산소가 자주 공급되게 되면 TOC가 낮아지게 되며, 이는 주로 순차층서학적 경계와 일치한다. 반면, 퇴적 속도가 낮아지면

물의 깊이가 점차적으로 깊어지게 되고, 이는 호수의 최대 침수면(maximum flooding surface)과 일치하게 되며 이 때 유기물질 함량이 높아 TOC 값이 높은 퇴적물이 느린 속도로 쌓이게 된다. 즉, 해양 기원의 퇴적층에서와 마찬가지로 호수 환경에서도 주로 최대 침수면 인근에 유기물질 함량이 높은 세일이 응축층(condensed section)으로 생성되지만, 반드시 그런 것만은 아니라는 것을 유의하여야 한다(Hunt, 1990).

Carroll and Bohacs (1999)은 호수의 퇴적 가능 공간(accommodation space)과 호수면 변화에 따라 고대 호수 분지를 크게 물과 퇴적물이 공급되는 양이 퇴적 가능 공간을 초과하는 과충진(overfilled), 물과 퇴적물의 공급량이 퇴적 가능 공간과 균형을 이루는 균형 충진(balanced fill), 퇴적 가능 공간이 공급되는 물과 퇴적물의 양보다 많은 충진 부족(underfilled) 등 세 종류로 나누었다. 퇴적 가능 공간은 주로 호수 퇴적 분지를 형성하는 지구조적 원인에 의해 결정되며, 호수면 변화는 주로 기후에 의해 결정된다는 점을 고려하면 이들 두 가지 요소가 호수 퇴적층의 발달 과정에서 가장 중요하게 작용한다고 말할 수 있을 것이다.

## 5.2 육성 세일(이암)과 해성 세일의 특성 비교

퇴적학적으로 바다와 호수의 가장 큰 차이는 이들이 기후 변화에 얼마나 예민하게 반응하는가, 즉 해수면 또는 호수면이 얼마나 빨리 변화하는가에 의해 결정된다(Bohacs *et al.*, 2000). 호수의 수면 변화는 해수면 변화에 비해 기후에 더 예민하게 반응하며, 수면 변화의 속도 또한 훨씬 빠르고 그 규모가 수백 배에서 수백 배 이상 크게 나타난다. 예를 들어, 동아프리카 열곡대에서는 과거 15,000년간에 걸쳐 300 m 이상의 호수면 변화가 일어났으며, 특정 지역에서는 600 m 이상의 호수면 변화가 일어난 경우도 있다(Talbot, 1988; Scholz and Soreghan, 1999). 반면, 바다의 경우 수억 년에 걸쳐 최대 300 m 정도의 해수면 변화가 일어날 뿐이며, 빙하기에는 단주기의 해수면 변화도 관찰되나 이는 최대 130 m 정도 밖에 미치지 못한다.

또한, 호수와 바다의 큰 차이는 그 분지의 크기에서 비롯되는 퇴적학적 특징, 즉 수평적인 암상의 변화에서 찾아볼 수 있다. 일반적으로 깊은 바다의 경

우, 수평적 및 수직적으로 그 퇴적학적 특징이 크게 다르지 않으나, 호수의 경우에는 겨우 수십 센티미터 이내 두께의 퇴적물 내에서도 변화가 관찰될 수 있으며, 이는 호수면 변화와 그에 따라 일어나는 호수 분지 크기의 변화가 바다에 비해 매우 크기 때문이다(Longley *et al.*, 1990). 예를 들어, 북아메리카 서부 Great Basin에 위치하였던 Bonneville 호수의 경우, 현재로부터 약 30,000년 전에서 15,000년 전까지는 최대 깊이가 300 m 이상에 달했으며, 약 51,800 km<sup>2</sup>에 달하는 영역에 걸쳐 존재했으나 지금 이 호수는 여러 개의 작은 호수들로 분리되었으며, 이들 중 가장 큰 Great Salt Lake는 겨우 10 m 깊이에 4,400 km<sup>2</sup>의 영역에 걸쳐 존재할 뿐이다(Arnold and Stephens, 1989). 이렇게 호수면이 낮아지면 호수의 가장 깊은 곳까지에도 모래가 운반되고 퇴적될 수 있으며, 이는 호수가 장기적으로 유지되었던 지역에서도 마찬가지이다. 호수 주변의 퇴적 환경 변화 또한 중요한데, 강이 호수로 유입되는 곳에 모래가 다량 퇴적될

수 있기 때문이다. 이러한 퇴적 환경 변화를 이해하는 것이 호수 퇴적층을 이해하는 데 있어 가장 중요할 것이다.

호수 분지는 그 크기가 바다에 비해 매우 작기 때문에 호수 퇴적층에서 유기물이 풍부한 셰일 층의 분포는 해성층의 그것과 비교할 때 매우 제한적이나, 그 두께는 해성층보다 훨씬 두꺼울 수 있다(그림 9). 일반적으로 석유 근원암의 두께는 평균적으로 100 m 이내에 불과하지만(Sluijk and Nederlof, 1984), 호수 퇴적층에서 나타나는 근원암의 두께는 100 m를 쉽게 넘으며, 1 km에 달하는 경우도 존재한다(Karz and Lin, 2014)(그림 9). 이는 해양 환경에 퇴적되는 근원암은 넓은 범위에 걸쳐 발달하며 해수면 변화에 의해 그 퇴적 양상이 결정되나, 호수 환경은 주로 대륙 내부에 지구조적으로 발달하는 분지에 발달하기 때문에 상대적으로 빠르게 침강하고 퇴적률이 높기 때문이다. 이러한 호수 퇴적층의 특성 때문에 경제적으로 생산 가능한 석유 근원암의 부피는 어느 정

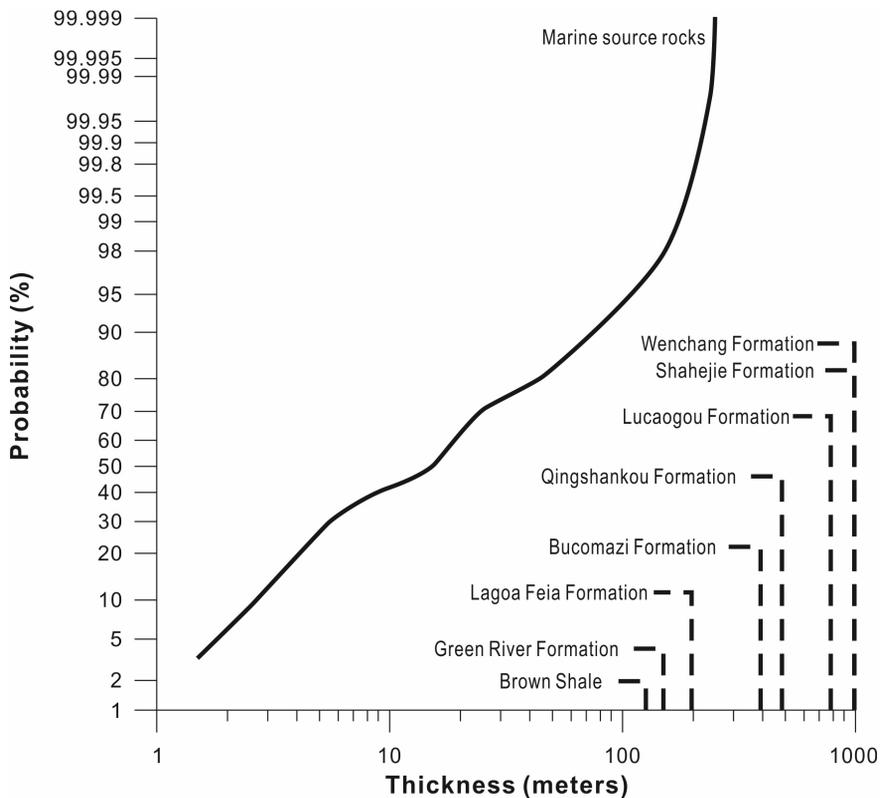


Fig. 9. Comparison of lacustrine source rock thicknesses compared with reported net marine source rocks. After Karz and Lin (2014).

도 유지될 수 있다.

호성 셰일은 상대적으로 해성 셰일에 비해 셰일 가스를 생산하는데 유리한 편이며, 그 내부에 더 많은 탄화수소가 보존된 경우가 많다. 이는 호성 셰일이 주로 판상으로 나타나는 해성 셰일에 비해 그 분포가 좁고 두꺼운 괴상으로 나타나기 때문으로, 이는 생성된 석유의 이동 과정에서 기인한다. 즉, 일반적으로 탄화수소는 근원암의 가장자리에서 흘러나오며(Leythaeuser *et al.*, 1988), 근원암과 이에 맞닿아 있는 석유가 흐를 수 있는 암석(carrier bed)의 면적이 좁을수록 탄화수소가 기반암에서 흘러나가는 비율(expulsion)이 줄어들기 때문에(Lafargue *et al.*, 1994) 해성 셰일보다 그 표면적이 작은 호성 셰일에 생성된 석유가 남아 있을 확률이 높다. 또한 셰일의 공극이 매우 작기 때문에 여기에서 생성된 석유가 멀리 이동하지 못하고 그대로 근원암 안에 갇혀 있는 경우가 많다.

### 5.3 Songliao 분지에서 나타나는 호성 셰일의 특성 비교

상기한 호수 퇴적층의 특성은 Songliao 분지에서도 유사하게 나타난다. Songliao 분지에는 지구조적인 분지 발달 과정 및 해수면(및 이와 연동된 호수면)의 변화에 따라 호수가 크게 두 번 발달하였으며 그 결과 유기물을 다량 함유한 셰일층이 광범위하게 퇴적되었으나(Qingshankou층 및 Nenjing층), 이들은 해성 셰일층과는 달리 퇴적 당시의 환경 변화에 따라 수직적 및 수평적으로 균질하지 못한 암상을 나타내는 것을 볼 수 있다(Liu *et al.*, 1993). 특히, 이 논평에서 자세하게 고찰한 Qingshankou층은 국지적으로 500 m 이상의 두께를 보여 해성층에 비해 상대적으로 두꺼운 편임을 알 수 있다(그림 6). 반면 Qingshankou층의 수평적인 암상 변화는 극심하게 나타나는 편으로, 1번 층원의 면적이 2, 3번 층원에 비해 두 배 이상 크다는 점에서 쉽게 미루어 짐작할 수 있다(그림 5).

퇴적학적으로 볼 때 Qingshankou층이 퇴적될 당시 삼각주의 발달 여부 및 이에서 유래한 저탁류 기원 퇴적층이 셰일의 면적 및 두께에 유의미한 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 특히, 이러한 저탁류 퇴적층은 수로가 발달한 방향을 따라 나타나므로, 이들의 분포는 셰일층의 균질도에 중요한 영향을 끼친다(Wei *et al.*, 2016). 순차층서학적으로 분석하면

Qingshankou층의 경우 주로 셰일이 퇴적된 1번 층원은 해침 퇴적체(TST)로 해석되며, 수심이 깊어짐에 따라 유기물질이 풍부한 퇴적물이 널리 쌓이는 양상을 나타낸다(Zhao *et al.*, 2011). 반면 수심이 점차적으로 낮아지는 과정에서 쌓인 고해수면 퇴적체(HST)인 2, 3번 층원에서는 셰일의 함량이 상대적으로 적고 그 분포 범위가 적은 반면 두께는 1번 층원보다 훨씬 두꺼운 것을 알 수 있다. 이는 해침이 일어날 때에는 수심이 깊어져 퇴적 속도가 느려지는 반면 호수면의 상승 속도가 느려지는 시기에는 수심이 점차적으로 얕아져 퇴적 속도가 빨라지기 때문이다.

이처럼 Songliao 분지의 셰일에서 나타나는 특징들은 호성 셰일층에서 공통적으로 발견되는 특징들, 즉 상대적으로 좁은 셰일의 수평적 분포와 그에 반해 두껍게 나타나는 수직적 분포, 퇴적학적으로 나타나는 수평적으로 복잡한 암상의 변화 등을 보이며, 이러한 특징들을 바탕으로 해성층에서 나타나는 이암과 쉽게 구분할 수 있다. Songliao 분지의 예시는 상기한 육성 셰일의 특징들이 실제로는 어떤 식으로 나타나는지 잘 보여준다. 이러한 결과는 호성 이암층의 분포 양상을 알고 효과적으로 셰일가스를 생산하기 위해서는 호수 퇴적층의 특성을 이해하고 자세한 퇴적학적인 연구를 진행하여야 함을 지시한다.

## 6. 결 언

현재까지 주로 개발되고 있는 해성층 기원의 비전통 석유 시스템과 비교할 때 육성 호성 셰일가스 함유 퇴적층은 그 퇴적학적인 발달 과정이 달라 이를 개발하기 앞서 해당 퇴적 시스템에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해 중국 동북부에 발달하는 Songliao 분지에 대해 검토하고 이를 바탕으로 호성층 기원 셰일에 대한 전반적인 특성을 정리하였다. Songliao 분지에는 중생대 동안 큰 호수가 형성되었으며, 여기에 흑색 셰일이 퇴적되어 중요한 셰일가스의 저류지로 생각되고 있다. 호수의 발달 과정 및 호수면 변화는 해수면 변화와 대비될 수 있으며, 호수가 커지는 시기가 크게 두 번 존재하였으며 이들은 흑색 셰일이 널리 퇴적된 시기와 일치한다. 유의할 점은 일반적으로 넓게 판상으로 분포하는 해성 셰일과 달리 호수 기원의 비전통 석유 시스템에서 최적지(sweet spot)는 지역적으로 그 분포가 좁은 편이라는 것이

다. 이 최적지는 일반적으로 호수가 장기적으로 유지되었던 지역에 발달하게 된다. 따라서 분지 전체의 넓이에 비추어볼 때 최적지의 면적은 매우 좁은 편이지만, 이 특정 지역에서는 세일 층이 매우 두껍게 발달할 수 있기 때문에 그 부피는 상당히 클 수 있다. 또한, 이렇게 생산된 석유 및 가스가 호수 퇴적층에서는 그 두께 및 사암의 부재 때문에 잘 빠져나가지 못하기 때문에 비전통 석유 시스템의 가치를 상승시키는 경우가 많다. 호성 세일의 수직적 및 수평적 분포 양상은 매우 복잡할 수 있는데, 그 이유는 호수 환경이 그 크기가 작아 주위 환경, 특히 기후 변화에 따른 물의 깊이 및 퇴적물의 공급량 변화에 크게 영향을 받기 때문이다. 특히, 모래가 분포하는 양상은 석유 근원암에서 생성된 석유가 운반되는 경로를 좌우하며, 따라서 이는 비전통 석유 자원의 분포를 결정하는 중요한 요소이기도 하다. 결국, 가장 효율적인 비전통 석유 시스템은 생산된 석유가 근원암 내부에 그대로 보존되며 다른 곳으로 운반되지 않을 때 생기게 될 것이다.

## 감사의 글

이 논평은 한국에너지기술평가원의 자원개발기술 개발 사업인 “세일가스 파쇄효율 향상을 위한 탐사 프로세스 및 실증연구(20132510100060)” 및 충남대학교 학술연구비 과제에서 지원되었다. 논문의 심사 과정에서 유익한 조언을 주신 서울대학교 이용일 교수님과 한국해양대학교 장태수 교수님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Allen, M.B., Macdonald, D.I.M., Xun, Z., Vincent, S.J. and Brouet-Menzies, C., 1997, Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 14, 951-972.
- Amow, T. and Stephens, D., 1989, Hydrologic Characteristics of the Great Salt Lake, Utah: 1847-1986. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 2332, 32 pp.
- Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E. and Mankiewicz, P.J., 2000, Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework. In: Gierlowski-Kordesch, E.H., Kelts, K.R. (Eds.), *Lake Basins Through Space and Time*. AAPG (Tulsa) Studies in Geology, 46, 3-34.
- Cai, Q., Hu, M., Ngia, N.R. and Hu, Z., 2017, Sequence stratigraphy, sedimentary systems and implications for hydrocarbon exploration in the northern Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, NE China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152, 471-494.
- Carroll, A.C. and Bohacs, K.M., 1999, Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls. *Geology*, 27, 99-102.
- Chang, W., Shan, X., Yi, J., Du, T. and Qu, Y., 2017, Spatial and temporal distributions of the late Mesozoic volcanic successions and their controlling effects on the Changling fault depression of the Songliao Basin, northeast China. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 54, 1194-1213.
- Chen, H. and Qin, D., 1989, Unstable cratonic and Paleozoic basins of China. In: Zhu, X. (Ed.), *Chinese Sedimentary Basins*. Elsevier, Amsterdam, pp. 7-16.
- Chi, Y.L., Yun, J.B., Meng, Q.A., Yin, J.Y. and Meng, G.T., 2002, Mantle Framework, Basin Forming Dynamic and Hydrocarbon Migration and Accumulation in the Songliao Basin. Petroleum industry press, Beijing, 10-34 (in Chinese).
- Chough, S.K., 2013, *Geology and Sedimentology of Korean Peninsula*. Elsevier Insights, Elsevier, 363 pp.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- EIA, 2017, U.S. Energy Information Administration (EIA). <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/> (Accessed 22 Oct. 2017).
- Engelbreton, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America Special Papers*, 206. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 59 pp.
- Feng, Z.-Q., Jia, C.-Z., Xie, X.-N., Zhang, S., Feng, Z.-H. and Cross, T.A., 2010, Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China. *Basin Research*, 22, 79-95.
- Gao, R. and Cai, X., 1997, Hydrocarbon Formation Conditions and Distribution Rules in the Songliao Basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Gao, R.Q., He, C.Q. and Qiao, X.Y., 1992, A new genus and species of Cretaceous dinoflagellates from two transgressive beds in Songliao Basin, NE China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 31, 17-29 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Wang, P., Cheng, R., Wang, G., Wan, X., Wu, H., Wang, S. and Liang, W., 2009, Description of Cretaceous Sedimentary Sequence of the First Member of the

- Qingshankou Formation Recovered by CCSD-SK-Is Borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, Sedimentary Facies, and Cyclic Stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 16, 314-323.
- Gemaisson, G.J. and Moore, G.T., 1980, Anoxic environments and oil source bed genesis. *Organic Geochemistry*, 2, 9-31.
- Hakanson, L. and Jansson, M., 2002, Principles of Lake Sedimentology. The Blackburn Press, 316 p.
- Huang, Y., Yang, G., Gu, J., Wang, P., Huang, Q., Feng, Z. and Feng, L., 2013, Marine incursion events in the Late Cretaceous Songliao Basin: Constraints from sulfur geochemistry records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385, 152-161.
- Hunt, J.M., 1990, Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74, 1-12.
- Jia, J., Liu, Z., Bechtel, A., Strobl, S.A.I. and Sun, P., 2013, Tectonic and climate control of oil shale deposition in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (Songliao Basin, NE China). *International Journal of Earth Sciences*, 102, 1717-1734.
- Katz, B. and Lin, F., 2014, Lacustrine basin unconventional resource plays: Key differences. *Marine and Petroleum Geology*, 56, 255-265.
- Kim, S.B., Chun, S.S. and Chough, S.K., 1997, Discussion on structural development and stratigraphy of the Kyokpo Pull-Apart Basin, South Korea and tectonic implications for inverted extensional basins. *Journal of the Geological Society of London*, 154, 369-372.
- Klimetz, M., 1983, Speculations on the Mesozoic plate tectonic evolution of Eastern China. *Tectonics*, 2, 139-166.
- Lafargue, E., Espitalié, J., Brooks, T.M. and Nyland, B., 1994, Experimental simulation of primary migration. *Organic Geochemistry*, 22, 575-586.
- Leythaeuser, D., Schaefer, R.G. and Radke, M., 1988, Geochemical effects of primary migration of petroleum in Kimmeridge source rocks from Brae field area, North Sea. I: gross composition of C<sub>15</sub> $\beta$ -soluble organic matter and molecular composition of C<sub>15</sub> $\beta$ -saturated hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 701-713.
- Liu, Z., Wang, D., Liu, L., Liu, W., Wang, P., Du, X. and Yang, G., 1993, Sedimentary characteristics of the Cretaceous in the Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 6, 167-180.
- Longley, I.M., Barraclough, R., Bridden, M.A. and Brown, S., 1990, Pematang lacustrine petroleum source rocks from the Malacca Strait PSC, Central Sumatra, Indonesia. In: Proceedings of the 19th Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association, pp. 270-288.
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344, 175-205.
- Scholz, C.A. and Soreghan, M.J., 1999, Tropical sublacustrine fans: seismic data examples from Lakes Tanganyika and Malawi, East African Rift. In: AAPG Annual Convention, San Antonio, April 11-19, 1999, Abstract Volume, A125.
- Sluijk, D. and Nederlof, M.H., 1984, Worldwide geological experience as a systematic basis for prospect appraisal. In: Demaison, G., Murris, R.J. (Eds.), *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation*. AAPG (Tulsa) Memoir, 35, 15-26.
- Talbot, M.R., 1988, The origins of lacustrine oil source rocks: evidence from the lakes of tropical Africa. In: Fleet, A.J., Kelts, K., Talbot, M.R. (Eds.), *Lacustrine Petroleum Source Rocks*, Geological Society (London) Special Publication, vol. 40, pp. 29-43.
- Wan, X., Zhao, J., Scott, R.W., Wang, P., Feng, Z., Huang, Q. and Xi, D., 2013, Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385, 31-43.
- Wang, C., Feng, Z., Zhang, L., Huang, Y., Cao, K., Wang, P. and Zhao, B., 2012, Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SK1 borehole sites in Songliao Basin, northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385, 17-30.
- Wang, P., Gao, Y., Cheng, R., Wang, G., Wu, H., Wan, X., Yang, G. and Wang, Z., 2009, Description of Cretaceous Sedimentary Sequence of the Second and Third Member of the Qingshankou Formation Recovered by CCSD-SK-Is Borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, Sedimentary Facies and Cyclic Stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 16, 288-313.
- Wang, W. and Chen, Y., 2004, Tectonic evolution and petroleum systems in the Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 78, 667-675.
- Wang, X., Feng, Z.H. and Song, L.B., 2006, Characteristics and origin of biogas in the north Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 26, 5-7.
- Watson, M.P., Hayward, A.B., Parkinson, D.N. and Zhang, Z.M., 1987, Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China. *Marine and Petroleum Geology*, 4, 205-225.
- Wei, W., Zhang, C., Zhang, S., Wu, C. and Yang, K., 2016, Study on the Cretaceous turbidite and reservoir features in the Qingshankou Formation in northern Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 78, 797-806.
- Xi, D., Cao, W., Huang, Q., Carmo, D.A.D., Li, S., Jing, X., Tu, Y., Jia, J., Qu, H., Zhao, J. and Wan, X., 2016, Late Cretaceous marine fossils and seawater incursion events in the Songliao Basin, NE China. *Cretaceous*

- Research, 62, 172-182.
- Xia, Y.J., Wang, Y.B., Wang, X.B., Zhang, Y., Wang, D.L., Li, Z.S. and Yang, C.X., 2012, Main controlling factors in the shallow-gas reservoir formation and its favorable exploration area in the northern Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 33, 961-969.
- Xie, X.N., Jiao, J.J., Tang, Z.H. and Zheng, C.M., 2003, Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the Southeast Uplift zone of Songliao Basin, China. *AAPG Bulletin*, 87, 99-119.
- Yin, A., Dang, Y.-Q., Zhang, M., Chen, X.-H. and McRivette, M.W., 2008, Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 847-876.
- Zhang, D.W., Li, Y.X., Zhang, J.C., Qiao, D.W., Jiang, W.L. and Zhang, J.F., 2012, National survey and assessment of shale gas resource potential in China. Beijing: Geologic Publishing House (in Chinese).
- Zhao, J., Wan, X.Q., Xi, D.P., Xia, J., Li, W., Huang, Q.H. and Zhang, J.Y., 2014, Late Cretaceous palynology and paleoclimate change: Evidence from the SK1 (South) core, Songliao Basin, NE China. *Science China Earth Sciences*, 57, 2985-2997.
- Zhao, W., Zou, C., Chi, Y. and Zeng, H., 2011, Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and lithostratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozhi area, southwest Songliao Basin, China. *AAPG Bulletin*, 95, 241-265.
- Zou, C., Dong, D., Wang, S., Li, J., Li, X., Wang, Y., Li, D. and Cheng, K., 2010, Geological characteristics and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37, 641-653.
- Zou, C., Dong, D., Wang, Y., Li, X., Huang, J., Wang, S., Guan, Q., Zhang, C., Wang, H., Liu, H., Bai, W., Liang, F., Lin, W., Zhao, Q., Liu, D., Yang, Z., Liang, P., Sun, S. and Qiu, Z., 2015, Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I). *Petroleum Exploration and Development*, 42, 753-767.
- Zou, C., Dong, D., Wang, Y., Li, X., Huang, J., Wang, S., Guan, Q., Zhang, C., Wang, H., Liu, H., Bai, W., Liang, F., Lin, W., Zhao, Q., Liu, D., Yang, Z., Liang, P., Sun, S. and Qiu, Z., 2016, Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II). *Petroleum Exploration and Development*, 43, 182-196.
- Zou, C., Yang, Z., Cui, J., Zhu, R., Hou, L., Tao, S., Yuan, X., Wu, S., Lin, S., Wang, L., Bai, B. and Yao, J., 2013, Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40, 15-27.

---

Received : November 2, 2017

Revised : November 24, 2017

Accepted : November 24, 2017