

ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

지질학회지 제 52권 제 6호, p. 937-951, (2016년 12월) J. Geol. Soc. Korea, v. 52, no. 6, p. 937-951, (December 2016) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2016.52.6.937

## **우주환<sup>1,2</sup> · 손정희<sup>1</sup> · 윤석훈<sup>2</sup> · 이철우<sup>1,‡</sup>** <sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과 <sup>2</sup>제주대학교 지구해양과학과

요 약

세립질의 쇄설성 퇴적암인 셰일은 아주 얇은 여러 개의 엽층리를 가지며 층리를 따라 얇은 조각으로 쉽게 분 리되는 특성(박리성)을 지니고, 일반적으로 유기물 함량이 높다. 셰일층의 순차층서 분석은 물리 검층 자료와 탄성파 반사자료를 이용한 지역적인 대비나 광역적인 층서 대비의 강력한 도구일 뿐만 아니라 셰일가스가 성숙 되어 부존 되어 있는 층을 찾거나 유기물이 포함되어 있는 층을 인지하는데 중요한 역할을 한다. 셰일층은 퇴적 분지에서 퇴적 가능 공간이 형성되는 해침 시기에 잘 발달된다. 퇴적 가능 공간과 퇴적물 공급량 변화의 상대적 인 크기(속도)에 따라 퇴적상 및 퇴적체의 시공간적 변화를 예측하는 순차층서 모델을 통해 셰일층의 불균질성 및 이방성을 예측할 수 있다. 하지만 현재 제시된 순차층서 분석은 감마선의 API 값에 의존한 층서 경계면의 (SB)의 설정과 감마선의 패턴변화를 분석하여 퇴적계다발을 분류하고 있어 한계가 있다. 이러한 한계를 극복 하기 위해 셰일층의 순차층서 해석과정에서 고려해야 할 퇴적시스템의 지구조 환경, 분지의 지형적 특성, 분지 내 수괴순환이나 생물 생산량 등을 고찰하였다.

주요어: 셰일, 순차층서, 퇴적 모델, 해침

# Ju Hwan Woo, Junghee Son, Seok-Hoon Yoon and Chul Woo Rhee, 2016, Review on sequence stratigraphic interpretation of shale. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 6, p. 937-951

**ABSTRACT:** Shale is fine-grained siliciclastic rock with fissility that often contains high amounts of organic matter. Sequence stratigraphic approach to the shale is a powerful tool not only for regional to local stratigraphic correlation from well logs and seismic profiles, but also for screening intervals most favorable for preservation of organic matter and gas generation and storage. Shale mainly develops during transgression accommodation space increases. Sequence stratigraphic models help us to predict heterogeneity and anisotropy within shale in terms of cyclic sedimentation patterns representing variations in sediment supply and accommodation. A recent depositional sequence stratigraphic model of black shale attempts to identify the key discontinuities within shale based on the vertical change in API gamma ray log. Those models have been verified through correlation with outcrop sections. The log-based shale depositional sequence models are too simple to account for diverse depositional setting for shale formation. As such, this manuscript reviews the variability of depositional systems in terms of tectonic settings, basin physiography, circulation and organic productivity within a basin.

Key words: shale, sequence stratigraphy, depositional model, transgression

(Ju Hwan Woo, Junghee Son and Chul Woo Rhee, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea; Ju Hwan Woo and Seok-Hoon Yoon, Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province 63243, Republic of Korea)

## 1. 서 론

셰일가스 및 셰일오일이 성공적으로 개발되기 전

까지 셰일은 탄화수소 자원의 주요 근원암이나 효율 적인 덮개암으로 인식되었다(Schmoker, 1995; Jarvie *et al.*, 2007; Glaser *et al.*, 2013; Speight, 2014). 그러

<sup>\*</sup> Corresponding author: +82-43-261-3208, E-mail: gloryees@chungbuk.ac.kr

Oceanographic and Biologic	Geologic / Geomorphic / Climatic
• Stratified water mass in silled basin effectively isolated from turbulent, well-oxygenated surface	• Deep basins below storm wave base (tectonics/global sea level highs/minimal sediment input)
water (preservation model)	$\cdot$ Shallow, stagnant, stratified lagoons, swamps, oxbows and lakes
• Excess organic productivity in surface water (upwelling) causes organic overloading on lake	· Globally warm climates
or sea bottom even in well mixed water	Sedimentologic
(productivity model)	· Clay, fine silt and organic debris all have low settling
· Excess terrestrial organic matter in lackes/	velocities and accumulate together in topographic
lagoons (productivity model)	lows in either deep or shallow water

Table 1. The broad factors responsible for the deposition of organic-rich shales (Potter et al., 2005).

나 수평시추기술과 수압파쇄기술의 융합을 통해 공 극율과 투수율이 낮은 셰일층내의 탄화수소 자원이 개발 생산되면서 셰일층은 저류암으로도 인식되기 시작하여 "비전통 자원 셰일저류층(unconventional hydrocarbon shale reservoir)"으로 불리게 되었다. 일반적으로 셰일은 50%의 실트와 35%의 점토 또는 운모 그리고 15%의 화학적 또는 자생광물로 이루어 져 있다(Wilson et al., 2016). 이러한 비전통 자원 셰 일층의 경제적 가치는 탄화수소 자원의 지화학적 부 존특성(geochemical sweet spot)과 인공적인 파쇄 효율성(artificial fracability; geomechanical sweet spot)에 달려있다(Glaser et al., 2013). 지화학적 부 존특성을 결정짓는 요소는 광물조성, 공극율, 탄화 수소 포화도, 체적, 유기물의 함량과 열적 성숙도로 저류층의 품질(reservoir quality: RQ)과 관계되며, 파쇄효율성을 결정짓는 요소는 수압 파쇄를 통해 생 산성을 높여주는 인자로, 저류층의 품질에 영향을 주는 광물 조성뿐 아니라 탄성 특성인 영률, 포와송비, 체적탄성계수 및 암반 경도를 포함하며 이는 생산성 품질(completion quality: CQ)을 결정한다(Glaser et al., 2013). 셰일층 내의 비전통 자원 개발 생산 초 기에는 셰일층을 비교적 균질한 퇴적체로 보고 탐사 작업 보다는 개발 생산 기술이 광구의 경제성을 좌 우하는 것으로 보았다. 그러나 같은 분지 내에서도 생산량의 편차가 드러나면서 지화학 및 암석 역학적 특성에 기초한 셰일층 특성화 즉 저류층의 품질과 생산성 품질이 높은 곳(sweet spot)에 수평 파쇄를 하는 것이 성공적인 개발 생산의 관건이 되었다(Bustin and Bustin, 2012; Soltanzadeh et al., 2015).

이제까지 유기물이 많이 포함된 흑색 셰일층은

비교적 저에너지 환경의 수심이 깊고 산소가 희박하 거나 유기물이 많이 생성되는 곳에서 퇴적되는 것으 로 알려져 있었으나, 수층의 용존산소량 뿐만 아니라 수괴의 이동이 제한되는 분지의 형태, 기후, 해수면 의 높이, 생물상의 변화 등 다양한 요소가 흑색 셰일 층의 퇴적에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Potter et al., 2005; 표 1). 판구조론에 따라 지구표면에서 지 각의 진화를 설명하는 Wilson Cycle은 기후변화와 맞물려 흑색 셰일층이 특정 지질시대에 집중되는 경향 이 있음을 설명해 주기도 한다(Trabucho-Alexandre et al., 2012). 이처럼 셰일층의 형성은 기후조건에 의 해 결정되는 퇴적물의 기원에서부터 운반 퇴적과정 에서의 조립질 퇴적물의 선별적 집적, 그리고 이질 퇴적물의 퇴적을 가능케 하는 상대적 해수면의 변화 로 설명된다(Potter, 1998; 그림 1). 상대적인 해수면의 변화에 따른 분지의 퇴적양상 변화, 특히 서로 다른 셰일층의 퇴적패턴변화는 순차층서 분석, 즉 상대적인 해수면 상승과 하강 그리고 그로 인한 해안선의 전 진과 후퇴과정에서 퇴적상이 변화하듯이 퇴적가능 공간의 변화에 따라 발달하는 퇴적체들의 특징과 생 성 과정, 퇴적체들 간의 관계에 대한 연구를 통해 알 수 있다(Van Wagoner et al., 1990; Emery and Meyers, 1996; Catuneanu, 2002).

그렇지만 셰일층 특성화 작업에서 셰일층의 이방 성 및 불균질성을 밝히려면 수괴의 물리 화학적 특 성변화를 지배하는 지구조적 규모로부터 분지수준의 규모에 이르는 다양한 관점에서의 이해가 필요하다. 예를 들어 중생대 백악기 셰일층인 이글포드(Eagle ford) 셰일은 56%의 석회암, 15%의 석영, 20%의 점 토와 5%의 황철석 그 외 4% 물질로 이루어져 있으 나, 쥬라기 셰일층인 바넷(Barnett)셰일의 경우 45% 의 석영, 8%의 석회암과 돌로마이트, 5% 장석, 5% 황철석, 3% 능철석 그리고 27%의 점토와 5%의 유 기물로 구성된다(Wilson *et al.*, 2016). 이러한 광물 조성의 변화는 다양한 암석 물리학적 요소들의 변화 를 초래한다. 따라서 비전통 셰일자원의 개발을 위 한 셰일층의 지질학적 분석에는 현미경적 관찰로부 터 분지해석에 이르기까지 다양한 관점의 융합해석 이 필요하다. 이 논평에서는 비전통 셰일자원의 개 발생산 대상인 흑색 셰일층(black shale) 특성화 작 업의 기초가 되는 층서 퇴적학적인 분석 과정을 퇴 적 모델과 순차층서적 연구결과를 바탕으로 정리하 고자 한다.

#### 2. 셰일층의 퇴적 모델

셰일층, 특히 유기물이 풍부한 흑색 셰일층의 형 성모델은 크게 세 가지로 나뉜다: 셰일층 내의 유기 물 보존을 수층의 성층화나 수괴순환 저해 등에 의한 물 속의 산소결핍으로 설명하는 보존모델(preservation model) (Demaison and Moore, 1980; Funnell, 1987; Tyson, 1987; Canfield, 1989; Rabouille and Gaillard, 1991; Paropkari *et al.*, 1992)과 수괴 내의 산소로 모두 분해시킬 수 없을 정도로 많은 양의 유기물 생 성으로 설명하는 생산성 모델(productivity model) (Berger, 1979; Morris, 1987; Calvert, 1987; Bender et al., 1989), 그리고 지구조적 진화에 따른 해양 환경 변화로 인한 해수 내의 산소포화도 변화에 따 라(Oceanic Anoxic Event, OAE) 설명하는 고해양 학 모델(paleoceanography model)이다(Miller, 1990; Wignall and Ruffell, 1990).

이암, 즉 셰일층은 뜬짐 형태로 이동하는 점토와 밑짐(bed-load)이나 뜬짐으로 이동하는 실트 크기 의 입자로 구성된다. 이러한 퇴적물을 이동시키는 에너지는 하천의 흐름이나 파도, 조석, 해양이나 호 수의 저탁류 그리고 심해의 고밀도류와 지형류가 있 다(Potter *et al.*, 2005). 지형의 기복이 낮은 곳은, 유 수의 속도가 느리며 밀도가 낮은 유기물 입자가 이 동되기 때문에 유기물이 풍부한 퇴적층이 쌓인다 (Huc, 1988).

보존 모델: 흑해지역의 층서 연구결과에 기초한 모델로 하부수괴에서의 무산소층 발달과정에 대한 해석에 따라 듀서 모델(Deuser Model)과 스트라코 프 모델(Strakhov Model)로 세분된다(Wignall, 1994; 그림 2). 이들 모델은 분지 내의 융기부(sill)를 통한 제한적인 심층수 공급이 무산소층 발달을 촉진하므 로 격리된 분지모델(silled basin model)로 불리기 도 한다. 그런 점에서 증발이 활발한 석호(lagoon)에 서는 융기부를 통한 수괴유입이 제한적이므로 저층 무산소층이 발달하고 유기물이 풍부한 탄산염 셰일 층이 형성된다(Wignall, 1994; 그림 3). 이 모델의 수 층은 계층화 되어 있고 초기 유기물 생산량은 1-100



**Fig. 1.** Flow chart emphasizing the roles of source, transport, and basin on shales. Notice the significance of high rainfall, relif, and relative sea (lake) level on thick, shaly basins. Relative sea level incorporates the three independent controls of supply, eustatic sea level change, and basin subsidence (Potter, 1998).

g/cm<sup>2</sup>/yr 로 적은 편이며, 퇴적물의 집적비 또한 100-10 cm/1,000 yrs (공극율 60%의 퇴적층)로 많 지 않다(Wignall, 1994; Potter *et al.*, 2005).

**생산성 모델**: 북해지역 석유가스 자원의 근원암 으로 대서양에서 쥬라기말에 형성된 Kimmeridge 점토층으로 대표되는 모델로, 영양염류가 풍부한 저 층수의 용승(upwelling)으로 유기물이 증산되어 형 성된 국부적인 저산소대(Oxygen Minimum Zone, OMZ)로 인해 유기물이 분해되지 않고 잘 보존되어 흑색 셰일층을 형성한다고 설명한다(그림 4). 즉 유 기물이 풍부한 퇴적물의 형성은 지속적으로 퇴적체 에 유입되는 높은 유기 탄소량이 주요 매커니즘이다 (Berger, 1979; Calvert, 1987; Morris, 1987; Bender *et al.*, 1989). 이 모델은 보존모델과 달리 저산소대의 형성을 분지로 유입되는 수괴에 녹아있는 산소의 유 출량과 유입량의 차이로 설명하지 않고 수괴자체의



Fig. 2. Formation model of finely laminated, organic-rich shale in Black Sea (Wignall, 1994).



Fig. 3. Model for the formation of black shales with negative water balance through evaporation (Kirkland and Evans, 1981).

시공간적인 산소함유량 변화로 설명하고 있다. 또한 수층은 계층화되지 않고 잘 섞여 있으며 초기 유기 물 생산량은 200-600 g/cm<sup>2</sup>/yr로 높은 편이다. 퇴 적물의 집적비는 1-10 m/1000 yrs (공극율 60%의 퇴적층)로 항상 높게 나타난다(Wignal, 1994; Potter *et al.*, 2005).

고해양학 모델: 퇴적분지의 지구조적 진화에 따 른 해양 환경 변화로 백악기 Abtian-Albian 그리고 Cenomanian-Turonian에 전세계적으로 해수의 산 소포화도가 낮아짐에 따라 흑색 셰일층이 넓게 발달 하였다(Schlanger and Jenkyns, 1976). 해수의 산소 포화도가 낮아지는 원인은 지질학적인 현상과 기후 변화로 설명된다. 후기 백악기의 해침은 연해, 즉 해 양의 범위를 확대시켰으며 이로 인해 수중 유기물의 함량이 높아졌다. 또한 전세계적으로 동일한 기후가 지속되며, 하부 수괴에 저산소대를 형성하여 유기물이 풍부한 퇴적층이 집적되었다(Schlanger and Jenkyns, 1976). Kimmeridge 점토층의 형성환경을 대서양의 열개작용(rifting)과 연관된 함몰대와 대륙붕지역 해 수의 순환작용에 의해 초래된 고립된 저층수괴 환경 으로 설명하기도 한다. 이러한 광역적인 흑색 셰일 층이 형성되는 경우, 증발 작용이 수반되는 경우(Miller,

1990)와 그렇지 않은 경우(Oschmann, 1988)로 구 분하여 설명되기도 하는데, 기본적으로 해수의 열염 순환에 기초하므로 해양학적 모델(oceanographic model)이라고도 한다(Wignall, 1994). 해수의 산소 포화도가 낮아지는 것은 판구조론에 의한 화성활동, 지구표면에서의 해양과 대륙 분포 변화와 그에 따른 해양 순환변화에 기인한다고 볼 수 있는 만큼 Wilson Cycle의 영향을 받는다(Trabucho-Alexandre *et al.*, 2012; 표 2).

**이동과 집적**: 셰일층을 구성하는 이질 퇴적물의 이동과 집적에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 수심으로 알려져 있었으나, 최근의 연구결과에 따르면 이질 퇴 적물은 수심이 깊은 곳뿐만 아니라 조간대(Rine and Ginsburg, 1985; Flemming and Delafontaine, 2000; Deloffre *et al.*, 2007), 대륙붕 및 대륙사면(Loucks and Ruppel, 2007) 등지에서 반원양성 침강(hemipelagic settling)에 의해 퇴적되기도 한다. 이외에도 이질 퇴적 물은 고밀도류(hyperpycnal flows)와 저탁류를 통해 대륙 사면과 분지중심부로 이동 집적될 수 있다(Bhattacharya and MacEachern, 2009; Mulder and Chapron, 2011). 한편, 폭풍이나 지형류(contour currents)는 이렇게 운반 퇴적된 퇴적물을 재동시킬 수 있다(Shanmugam



Fig. 4. Simplified dynamics of a coastal upwelling system (Wignall, 1994).

Wilson stage		Example	Processes	Environments	Black shales
	Terrestrial	East African rift	Crustal thinning, uplift	Alluvial, lakes	Lacustrine
Continental rift	Flooded	Aegean Sea	As above, seawater intrusion	Restricted shallow marine, fan deltas	Shallow marine
Juvenile basin		Red Sea	Spreading, uplift	Small shelves, shallow seafloor	If estuarine
Mature ocean	Opening	Atlantic Ocean	Spreading	Extensive shelves, deep seafloor	Shelf
	Closing	Pacific Ocean	Spreading, subduction	Narrow shelves, very deep seafloor	Upwelling zones
Volcanic arc		Western Pacific Ocean	Spreading, volcanism	Back-arc basin, abyssal seafloor	No
Terminal		Mediterranean sea	Compression, uplift	Marginal basin	If estuarine
Foreland basin	Peripheral	Persian Gulf	Lithospheric flexure, subsidence	Marginal basin	Fluvio-deltaic, shallow marine
	Retroarc	Andean Basins		Marginal basin	Fluvio-deltaic, shallow marine
Orogen		Himalava	Compression, uplift	Alluvial	No

**Table 2.** Summary of black shale occurrence with respect to Wilson Cycle stages and their respective depositional environments (Trabucho-Alexandre *et al.*, 2012).

et al., 1996). 최근들어 셰일층에서 이루어진 미세 퇴 적상 분석에 의해 관찰된 수평층리와 사층리 및 침 식면 등은 셰일층의 퇴적물이 난류에 의해 뜬짐 형태 로 운반된 것이 아니라 점토 크기 이상의 입자로 뭉 쳐서(floccule) 사질 퇴적물과 동등한 크기의 입자처 럼 밑짐으로 이동되었음을 가리킨다(Schieber et al., 2007; Schieber and Southard, 2009). 이러한 셰일 층 내의 퇴적구조는 중생대 및 고생대 지층에서도 보고된 바 있다(O'Brien and Slatt, 1990; Slatt and O'Brien, 2011).

#### 3. 셰일층의 형성과 순차층서적 특징

#### 3.1 해침과 흑색 셰일층 형성

흑색 셰일층의 성인은 퇴적환경보다도 해수면 변 동과 관계가 깊으며 층서적으로는 해침과 연계되 어 발달하는 경우가 많다. 해수면 상승이 시작되는 초기에는 해안지역으로 천해의 퇴적물이 유입되며 얕은 바다에서 흑색 셰일층의 상조합이 형성되는데 (Hallam, 1967), 이후 해침 기간(transgressive systems tract)동안 수심이 깊어지면서 퇴적물 공급이 상당기간 제한되는 경우 흑색 셰일층은 해침 잔류퇴

적물(transgressive lag)을 피복하는 형태로 형성된 다(Wignall and Maynard, 1993). 일반적으로 대부 분의 셰일층이 해양이나 호수에서 형성되는 까닭은 바다나 호수가 강이나 사막보다 상대적인 해수면 변 동이 커서 퇴적가능 공간(accommodation)의 시공 간적 발달이 양호하기 때문이다. 상대적인 해수면이 상승하면 셰일층은 대륙붕단의 상부(up shelf)나 램 프에, 반대로 상대적인 해수면이 하강하면 대륙붕단 의 가장자리(shelf edge)에 형성된다. 이는 분지로 유입되는 조립질 퇴적물(주로 사질)이 해침 시기에 는 연안지역에 집적되어 이질퇴적물과 공간적으로 분리되기 때문이다(Potter, 1998). 물론 이 경우에도 퇴적물의 양이 많고 퇴적공간이 작으면 사질 퇴적물 이 분리되지 않으므로 흑색 셰일층의 형성에서 퇴적 물의 공급량과 퇴적가능 공간의 상대적인 크기가 중 요하다(Potter, 1998). 퇴적가능 공간과 퇴적물 공급 량의 차이에 따라 셰일층의 집적이 좌우되는 만큼, 퇴적가능 공간과 퇴적물 공급량 변화의 상대적인 크 기(속도)에 따라 퇴적상 및 퇴적체의 시공간적 변화 를 예측하는 순차층서 모델을 통해 셰일층의 퇴적양 상을 예측할 수 있다(Wignall, 1994; Bohacs, 1998; 그림 5).

순차충서 모델의 해침시기에 발달하는 흑색 셰일 충은 크게 기저해침(basal transgressive, BT) 흑색 셰일(이하 BT 흑색 셰일)과 최대해침(maximum flooding, MF) 흑색 셰일(이하 MF 흑색 셰일)로 구분된다 (Wignall, 1994). BT흑색 셰일의 형성모델은 퍼들 (puddle)모델로 설명되며 독립적인 소규모의 분지 에 흑색 셰일층이 퇴적된다는 것이다(Dabard and Paris, 1986; 그림 6a). 그 층서적 특징은 (1) 순차층



Fig. 5. Sediment architecture of a well-developed transgressive system tract showing the range of erosion surfaces associated with a retrogradational prarasequence set (Wignall, 1994).



Fig. 6. Model for basal transgressive (BT) black shales (a), and maximum flooding (MF) black shales (b) (Wignall, 1994).

의 경계면(Sequence boundary,SB)이나 이와 대비 되는 정합면에 해당하는 해침면 위에 셰일층이 퇴적 된다. (2) 분지 주변부가 무퇴적시기인 경우에는 분지 중심부와 지형적으로 낮은 요지(topographic hollows)에 퇴적된다. (3) 횡적으로 퇴적상 변화를 보이 지는 않는다(원양성 퇴적작용을 포함함). (4) 해침퇴 적계 다발의 기저부에 발달하므로 천해 퇴적상일 수 있으며, 황철석(pyrite)이 많이 포함된 황화대(Sulphur Band)가 발달한 경우, BT 흑색 셰일층은 천해 퇴적 상을 정합적으로 피복한다.

한편, MF 흑색셰일의 형성모델은 확대된 퍼들 모 델로 설명되며 계층화된 수층 아래 저산소대/무산 소대가 만들어져 bull's-eye 지형의 흑색 셰일층이 형성된다(그림 6b). 그 층서적 특징은 (1) MF 흑색 셰일층은 최대해침면을 정합적으로 피복하나 해침 퇴적계다발의 발달이 미약할 경우 셰일층은 해침면 과 순차층서 경계면을 근접하여 피복한다. (2) MF 흑색 셰일층은 대륙붕에 넓게 발달하며 천해의 연안 퇴적체로 전이한다. (3) 퇴적물 공급이 제한된 심해 융합층(deep-water, sediment-starved condensed section)에서 퇴적되기도 한다(Wignall, 1994).

#### 3.2 셰일층의 순차층서적 특성

일반적으로 흑색 셰일층은 해안선이 육지쪽으로 최대로 이동했을 때, 즉 해침이 최대에 이르렀을 때 형성되며(Watney, 1985; Leckie et al., 1992), 이 때 Exxon 층서 모델의 최대해침면과 관계된 융합층 (condensed section)을 형성한다. 흑색 셰일층의 퇴 적순차층(depositional sequence)적 관점에서의 특 성은 다음과 같다. (1) 셰일층은 층서적, 공간적으로 체계적이고도 두드러진 변화를 보인다. (2) 그 변화 는 퇴적환경과 퇴적가능 공간의 변화(곧, 해수면 변 동과 침강)에 지배된다. (3) 암질, 입도, 화석(흔적화 석 및 실체화석), 유기물 함량, 자연 감마선 방출 등 의 변화를 분석하여 세립질 암층에서 퇴적 순차층과 퇴적계 다발을 인지할 수 있다. (4) 퇴적 순차층의 형 성과정은 지형(topography)에 따른 퇴적물 공급과 퇴적가능 공간의 상호작용으로 설명 가능하다. (5) 해양 퇴적환경에서 형성된 퇴적 순차층 내의 퇴적상 은 넓은 범위에 걸쳐 점이적으로 변화하는 경향이 있다. (6) 연안지역에서 형성된 순차층은 국부적으 로 나타나지만, 그 내부에서 다양한 퇴적상이 급격 하게 변화하는 양상을 보인다. (7) 호수 순차층은 호



**Fig. 7.** Schematic summary of stratal stacking and lithofacies distribution in constructional shelf margin sequence (a), and platform/ramp sequence (b) (Bohacs, 1998). (TOC=total organic carbon, HI=hydrogen index, SB=sequence boundary, dls= downlap surface, TS=transgressive surface).

	Continental Slope/Basin	Constructional Shelf margin	Platform/ Ramp	Paralic (Lagoon/Mire)	Fluvial/ Floodplain	Overfilled Lack Basin	Balanced Fill Lake Basin	Underfilled Lake Basin
Typical Thickness	10 - 130 m	20 - 200 m	3 - 40 m	5 - 50 m	10 - 70 m	10 - 30 m	5 - 15 m	1 - 5 m
C <sub>org</sub> Content (range)	7.0% (1 - 27%)	3.6% (0.9 - 21%)	5.7% (1.2 - 20%)	9.2% (4 - 17%)	2.0% (1.8 - 50%)	7.0% (0.5 - 45%)	15% (2 - 30%)	1.5% (0.2 - 15%)
Organic Matter Type (average; range)	∏, ±Sulfur (HI=500; 150-800)	∏ (HI=427; 180-750)	∏ (HI=640; 150-900)	Ш, Ш- П (HI=188; 35-599)	III (HI=150; 230-445)	I /III (HI=600; 50-700)	I (HI=900; 600-1100)	I (HI=400; 10-600)
Natural Gamma Ray signature	$\begin{array}{c} U \propto \\ K \propto \\ Th \propto \end{array}$	Organic content Clay mineral co Detrital heavy	, ntent, mineral	Widely varyi	ng responses	U NOT ∝ ( K ∝ Clay m K-feldspar (	Organic matte nineral, content	er content,
Lithology	Biogenic (Terrigenous Clays)	Terrigenous Clays Biogenic	Biogenic Terrigenous Clays	Coal Terrigenous Clastics	Terrigenous clastics	Terrigenous clastic Coal	Biogenic Chemical (carbonate)	Chemical (evaporates) Biogenic
Major Controls: Sedimentary Processes	Pelagic snow Hemipelagic plumes Slumps, Mass flows	Hemipelagic plumes Distal storm/flood Pelagic snow	Pelagic snow Hemipelagic plumes Distal storm deposit	Fluvial overbank flow In situ plant growth Advected plant matter	Fluvial overbank flow Advected plant matter	River suspended load Advected plant matter	Algal snow River suspended load Shallow precipitation	Algal snow Evaporitic xlisation River/wind suspended load
Sediment supply	Oceanic circulation Nutrient supply Margin physiography	Influence of rivers Shelfal circulation Nutrient supply	Margin physiography Rate of sea level rise Influence of river	Fluvia Plant pro	l type ductivity	Axial v lateral drainage; Climatic humidity/ seasonality	Climatic Humidity/ seasonality Axial v lateral in put	Wind regime Climatic Humidity/ seasonality
Organic matter input	Marine algae ?Bacterial mats	Marine algae ±Land plants	Marine algae (± land plants)	Land plants Algae	Land plants Algae	Land plants Aquatic algae	Aquatic algae (± land plants)	Aquatic algae Bacteria
Accommodation	Bottom Energy levels Slops stability	Water depth Bottom Energy levels Subsidence	Bottom Energy levels Water depth Subsidence	Groundwa Subsid	ater level lence	Subsidence Lake level	Lake level Subsidence	Lake level Subsidence
Relative influence of major controls		Eustacy		Tecto	onics	Climate		

Table 3. Key factors, controls on depositional sequence in mudrocks (Bohacs, 1998).

수가 발달한 분지의 유형에 따라 달라지는데, 분지의 유형은 퇴적물과 물을 합친 양과 퇴적가능 공간의 상대적인 차이에 따라 달라진다. 퇴적물의 유입양이 퇴적가능 공간보다 큰 경우(overfilled lake basin) 에는 호수 순차층이 천해 쇄설성 퇴적순차층과 유사 하나 그 반대의 경우(underfilled lake basin)는 상 당히 다르다(Bohacs, 1998). 전자의 경우(overfilled lake basin)에 형성되는 유기물이 풍부한 이암(흑색 셰일층)은 앞서 Wignall (1994)이 언급한 MF형에 해당되는 융합층(condensed section)이고 후자의 경우(underfilled lake basin)에 형성되는 흑색 셰일 층은 BT형에 가깝다.

이러한 전반적인 특성에 따라, Bohacs (1998)은 퇴적물 전진퇴적이 일어나는 대륙붕단(constructional shelf margin)에서의 순차층 내부특징은 플랫폼/램 프에서의 순차층 내부특징과 다르다고 설명했다(그 림 7). 그는 나아가 대륙사면(continental slope)과 석탄층이 교호하거나 상조합을 이루는 연안지역에 서의 순차층 특성도 기술했다(표 3). 유기물의 형태 는 해양 퇴적물의 경우 Type II 케로겐이 우세하고 석호나 하성 퇴적체에는 Type III가, 호성 퇴적체에 는 퇴적물의 공급량이 퇴적가능 공간보다 큰 경우에 는 Type I/III가 그 외에는 Type I이 우세하다. 암질 의 경우 해양퇴적물은 생물학적 퇴적물과 쇄설성 점 토로 구성되고, 석호와 퇴적물의 공급이 퇴적가능 공간보다 큰 호수에는 석탄층이나 육성 기원의 물질 로, 하성/범람원환경에서는 육성 기원의 물질이 주 로 나타나며 호성 환경의 경우 생물학적/화학적 퇴 적체가 섞여 있다(Bohacs, 1998). 감마선 패턴의 해 석은 상부로 가며 API값이 커지는 상향 세립화 형상 은 종모양으로 나타나며 선상지 또는 하성 환경의 하도나, 해침이 일어날 때 대륙붕단에서 형성될 수 있다. 반면에 상부로 가며 API값이 작아지는 상향 조립화 형상은 깔때기 모양으로 나타나며 전진 퇴적 하는 삼각주나 연해의 퇴적환경을 지시한다(Rider and Kennedy, 2013). 이처럼 흑색 셰일층의 순차층서는 퇴적 당시의 지형적인 조건에 따라 유기물의 형태, 감마선 패턴, 암질 등 구조와 특성이 다른 만큼 이를 구분함으로써 흑색 셰일층의 비균질성을 좀 더 명확 히 이해할 수 있다.

### 4. 셰일층의 순차층서 분석

#### 4.1 셰일층 내의 순차층서 경계면 특성

유기물이 풍부한 흑색 셰일층의 경우 외견상 균 질하게 보이므로 층서적 구분을 위해 유기물 함량에 민감한 물리검층 자료, 특히 자연감마선 기록(spectral gamma ray)을 활용하는 경우가 많다. 이 기록은 야 외의 노두에 대해서도 측정이 가능한 만큼 셰일층의 층서적 변화를 유추하는데 유용하다. 흑색 셰일층의 자연감마선은 칼륨(K), 우라늄(U) 그리고 토륨(Th) 으로부터 유래하므로 각 원소의 퇴적환경별 거동을 참고하여 해석할 필요가 있다(Bohacs and Schwalbach, 1994; Bohacs, 1998). 우라늄은 유기물에 포함되어 이동하며, 칼륨과 토륨은 점토광물과 연관되므로, 해양 퇴적환경에서는 해침면에서 감마선 값(API)이 우라늄에 의해 크게 나타난다. 이에 반해 화산 쇄설 성 사질 퇴적물이 유입되는 알칼리 호수퇴적층에서 는 칼륨함량이 K-장석에 좌우되고, 토륨의 양은 화 산재의 양이나 육성 퇴적물의 유입을 지시하며, 우 라늄은 중광물의 양에 따라 달라지므로 이들 퇴적물 이 유입되지 않는 해침면(호수면 상승기) 형성기에 오히려 감마선 총량 및 우라늄 감마선량이 감소한 다. 따라서 물리 검층 자료에서 해침면을 설정할 경 우 해양 환경과 알칼리 호수 환경을 구분할 필요가 있다.

이러한 감마선 측정치의 변화뿐만 아니라 셰일 퇴적층에서의 퇴적학적 특징과 퇴적층의 기하학적 구조를 통해서도 순차층서 경계면(SB)과 해침면(FS) 을 인지할 수 있는데, 퇴적환경별 특징은 표 4와 같다. 시퀀스는 부정합면에 의해 경계지워지거나 응축층과 같은 정합면에 의해 나누어진다. 시퀀스는 해침면에 의해 더 작은 단위인 준연계층(parasequence)로 구 분되며 심해 퇴적체 상부에 연해 퇴적체 또는 육성 퇴적체가 쌓이며 현저하게 구별된다. 또한 퇴적물의 유입으로부터 먼 곳에서는 해침면을 따라 황철광화 (pyritization)와 인산염화(phosphatization)가 나타 난다. 셰일 순차층서 분석시 특히 중요한 경계면은 최대 해침면(MFS)으로 해안선이 육지쪽으로 최대 로 밀려났음을 의미하며, 해침퇴적계와 고해수면퇴 적계 다발의 경계면이다. 최대해침면내 준연계층의 퇴적패턴은 탄성파 자료상에서도 확인할 수 있으나 노두에서는 구분이 쉽지 않아 물리 검층 자료를 이 용해야 한다. 최대해침면을 인지할 수 있는 가장 좋 은 단서는 셰일층이며, 대부분 점토와 실트로 이루 어진 퇴적체로 해양 동물군으로 이루어진 해양성 케 로겐을 함유하고 있어 감마선의 값과 총유기탄소함 유량(TOC)이 높게 나타난다(Potter et al, 2005). 이처 럼 순차층 분석시에는 순차층서 경계면이나 최대 해 침면과 같은 층서 불연속면을 활용하면 퇴적계 다발 의 특성이나 퇴적상의 층서적 변화를 분석하기가 더 용이하므로 두 불연속면을 구분하는 것은 의미가 크다.

#### 4.2 셰일층 순차층서 기본 모델

표준적인 순차층서 모델은 일찍이 1980년대에 개 발되었으나(Haq et al., 1984), 다양한 시간층서 규모 에서 셰일층에 적용 가능한 순차층서 모델은 최근에 제시되었다(Slatt and Rodriguez, 2012; Slatt, 2013). 이 모델은 셰일의 퇴적작용을 중심으로 표준적인 순차 층서 모델과 유사하게 다양한 시간층서 단위(Time 1~5)로 구분하였다(그림 8). 첫번째 시기에는 해수 면이 하강하며 해안선이 바다쪽으로 이동하며 순차 층서 경계면이 발달하고 하강 해수면 퇴적체(FSST) 가 형성된다. 두번째 시기에는 해수면이 상승하는 시기로 해안선이 육지쪽으로 이동하며 순차층서 경 계면과 합쳐지는 해침 침식면(transgressive surface of erosion, TSE)이 형성된다(그림 8a). 세번째 시기 에는 해수면의 상승이 극에 달해 해안선이 육지의 끝부분까지 이동하는 시기로 세립질(쇄설성기원과 생물학적기원포함)퇴적물이 해침 퇴적체(TST)를 이 루며 유기물이 풍부한 융합층이 퇴적되고 상부에는 최대 해침면(MFS)이 형성된다. 네번째 시기에는 상

Environment ↓	Sequence Boundary	Flooding surface
Marine Basins	More hemipelagics and biogenic debris and lower total gamma-ray counts (GR) above rath- er than below low-relief, almost conformable boundary. Little or no shift of basinal environ- ments	Minimal bottom energy and terrigenous input; continuous, even lamination and moderate to high total GR plus more deepwater microfossils at or just above surface; phosphatic concretions and lowest terrestrial organic matter above surface
Marine shelf	Greater terrigenous input with more and coarser typically resedimented sandstone, thicker beds, wavy laminations, and lower total GR plus more terrestrial organic matter and bypass of mud above than below boundary, which has some lo- cal scour. Beds below boundary are regionally moderately truncated and onlapped; more shal- low-water fossils above than below boundary. Moderate shift of basinal environments	Minimal bottom energy and terrigenous input plus more concretions, fine-grained pelagics and more marine organic matter at or just above sur- face; possible concentrates of bones, fish scales, (and exceptionally dropstones) at surface, which is typically widespread and fairly even. Both to- tal GR and deepwater fossils maximal; phos- phatic, siliceous or calcareous shales at or above surface
Transitional	Sandstone and siltstone and more pebbles, re-worked concretions and body fossils above than below boundary, which is strongly ero- sional, laterally extensive and may have root- lets, oxidation, and soil profiles. Organic mat- ter below boundary likely to be oxidized. Strong shift of marginal environments	Reduction in bottom energy results in finer grained, slower sedimentation above surface, which may be bioturbated, rich in concretions and microfossils and have bones, fish scales (and possible dropstones) plus glauconite, phos- phate and siderite. High total GR plus possible concentrates of reworked concretions and fossils
Non marine	Significant increase in sandstone-mudstone ratio above extensive, strongly eroded boun- dary that may have well-drained soils, caliche, desiccation cracks or degraded coals in humid climates; integrated; paleovalley system and low ground water table. Terrestrial organic car- bon dominant above boundary. Strong shift of environments above boundary	Less bottom energy at or just above surface as shown by presence of muddy and silty sediments (more fiood basins, lagoons, and bay fills) than below surface. Mudstone continuity highest at surface. High ground water tables (wet soils plus coal and peats) mark fiooding surfaces; terres- trial organic carbon abundant as in pyrite

**Table 4.** Criteria for recognition of sequence boundaries and fiooding surfaces in muddy basins (Simplified from Bohacs, 1998, Potter *et al.*, 2005).

대적인 해수면의 상승이 지속되어 전진 고해수면 퇴 적체(highstand systems tract,HST)가 형성된다(그 림 8b). 마지막 시기는 상대적인 해수면 변동이 끝나 는 시기이다. 퇴적 윤회(depositopnal cycle)로 보면 해안선이 바다쪽으로 최대한 밀려났을 때 퇴적체의 감마선값은 낮게 나타나고, 순차층서 경계면이 형성 된 뒤 상부에 비전통 자원 셰일층이 쌓이게 된다. 특 히 유기물이 풍부한 융합층의 감마선 값은 높게 나 타난다. 또한 해수면이 바다쪽으로 완전히 확장되었 을 때 하강 퇴적체가 쌓이며 기저 해침 비전통 자원 셰일층이 형성된다. 이경우 FSST/LST가 비교 가능 한 정합면이 된다(그림 8c(a)).

이러한 모델은 탄성파 자료상의 반사면 형태와 걸침 관계로부터 이암 퇴적상의 위치를 추정하는데 활용될 수 있다. 그러나 탄성파 자료의 낮은 해상도 로 인해 퇴적상이나 그 암질에 대한 정보는 물리 검 층 자료나 지화학 분석 자료, 또는 시추코어 자료나 야외 노두와의 대비를 통해 확인할 수밖에 없다. 감 마선의 변화패턴과 상대적인 해수면 변동과의 대비 를 통해 상향 세립화와 상향 조립화 경향을 구분하 고 나아가 퇴적상의 전진 및 후퇴(분지 중심부쪽으 로의)를 유추하여 서로 다른 특성을 가진 셰일층의 순차층서 분석이 가능하다(Bohacs and Lazar, 2010; Slatt, 2012; Molinares-Blanco, 2013; Serna-Bernal, 2013; Brito, 2014).

이처럼 감마선 API 값에 기초하여 다양한 시공간 규모에서의 자료를 통합하여 셰일층의 순차층서 분 석을 시도할 수도 있지만 셰일층의 순차층서 분석에 는 감마선과 비저항(resistivity) 검층자료, 총유기탄 소함유량 변화, 박편의 현미경관찰로부터 화석, 지 화학적 생체지표, 광물성분 등 다양한 자료를 사용 할 수 있다. 총유기탄소함유량의 변화는 해침시기와



**Fig. 8.** Generalized sequence stratigraphic model of unconventional resource shale as shown in five time steps (Time 1 to Time 5). SB, sequence boundary; FSST, falling stage systems tract; LST, lowstand systems tract; TSE, transgressive surface of erosion; TST, transgressive systems tract; CS, condensed section; mfs, maximum flooding surface; HST, highstand systems tract. The time steps (a-c) are described in the text. A conceptual gamma ray log is shown on (a) both for stratigraphic sequences that formed landward of the minimum position of the shoreline (TST sits directly on SB/TSE) and seaward of the minimum position of the shoreline (FSST/LST sits below the TST). (b) A relative sea-level curve illustrating the relative times within a sea-level cycle when each component is formed. (c) Second- and third-order cycles and a composite relative sea-level curve by superimposition of these two orders of cyclicity (Slatt, 2013).

해퇴시기를 구분하는 주요 지표가 될 수 있으며(Slatt, 2013), 현미경 관찰을 통해 광물내의 공극을 분류하 면 속성작용의 단계를 유추할 수 있을 뿐만 아니라 (Loucks et al., 2012), 광물조성 및 화석의 변화양상 은 퇴적계다발을 분류하는데 이용할 수 있다. 이와 함께 탄성파 반사면의 기하학적 구조와 관계(걸침관 계)로부터 주요 순차층서학적 경계면 및 퇴적계 다 발을 설정하고, 미화석 대비나 연대측정 결과를 이 용하여 분석대상 지층구간의 지질시대를 확인하여, 순차층의 등급을 결정할 수 있다. 이러한 복합적인 접근 과정은 셰일층의 모델링과정에서 불연속성을 고려한 시공간적 업스케일(upscaling) 작업의 효율 성을 높여준다.

## 5. 결 론

셰일층 집적에 영향을 미치는 요소는 수심, 지형 적 위치, 수괴의 용존산소량, 해수운동 등에 영향을 받을 뿐만 아니라 분지 가장자리인 연안지역에서의 퇴적물 집적과정에 의해서도 영향을 받는다. 이처럼 셰일층 퇴적과정에 미치는 요소가 다양한 만큼 셰일 퇴적상도 다양하게 나타난다. 다양한 퇴적상의 변화 는 순차층서를 통해 체계적으로 분석될 수 있다. 즉, 셰일층이 형성되는 분지의 지구조 환경(표 2)과 지 질시대의 기후와 해수 조성, 생물활동 등의 전반적 인 조건과 아울러 퇴적학적 이해에 필요한 광물조 성, 퇴적물의 조직, 화석(흔적 및 실체), 박편관찰을 통한 퇴적구조, 지화학 분석결과 등을 기초로 퇴적 상 변화를 파악하여 순차층의 주요 경계면(표 4)과 퇴적계 다발을 구분해 나가는 것이다. 셰일 순차층 분석은 도출 가능한 모든 지질학적 자료를 종합적으 로 해석하여 대상 지층의 불균질성을 체계적으로 규 명할 수 있는 도구이므로, 인공적인 파쇄효율성에 영향을 주는 암석역학적 특성과 지화학적 분석자료 를 종합하여 저류암에서 가스 생산 가능성이 높은 최적지(sweet spot)를 찾는데 기여할 수 있다.

# 사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원의 자원개발기 술개발 사업인 "셰일 가스 파쇄효율 향상을 위한 탐 사 프로세스 및 실증연구(20132510100060)"과제에 서 지원되었습니다. 심사과정에서 유익한 조언으로 논문의 질을 높이는데 도움을 주신 두 명의 심사위 원 분들께 감사 드립니다.

#### REFERENCES

- Bender, M., Jahnke, R., Ray, W., Martin, W., Heggie, D.T., Orchardo, J. and Sowers, T., 1989, Organic carbon oxidation and benthic nitrogen and silica dynamics in San Clemente Basin, a continental borderland site. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(3), 685-697.
- Berger, W.H., 1979, Impact of deep-sea drilling on paleoceanography. Deep drilling results in the Atlantic Ocean: continental margins and paleoenvironment, 297-314 (American Geophysical Union).
- Bhattacharya, J.P. and MacEachern, J.A., 2009, Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the Cretaceous seaway of North America. Journal of Sedimentary Research, 79(4), 184-209.
- Bohacs, K.M., 1998, Contrasting expressions of depositional sequences in mudrocks from marine to non marine environs. In: Schieber, J., Zimmerle, W., and Sethi Shales P.S.(eds), Shale and Mudstones I, Basin studies, sedimentology, and paleontology, Sttugart, 33-78.
- Bohacs, K.M. and Lazar, R., 2010, Sequence stratigraphy in fine-grained rocks at the field to flow-unit scale: insights for correlation, mapping and genetic controls. In: Applied Geoscience Conference, 2010, Applied Geoscience Conference of US Gulf Region, Mudstones as Unconventional Shale Gas/Oil Reservoirs, Houston Geological Society Shale Gas Technical Program, Houston, Texas.
- Bohacs, K.M. and Schwalbach, J.R., 1994, Natural gamma-ray spectrometry of the Monterey Formation at Naples Beach, California: insights into lithology, stratigraphy, and source-rock quality. Field Guide to the Monterey Formation between Santa Barbara and Gaviota, California, 85-94.
- Brito, R.J., 2014, Geological characterization and sequence stratigraphic framework of the Brown Shale, central Sumatra Basin, Indonesia: Implications as an unconventional resource. Unpublished M.S. thesis, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 91 p.
- Bustin, A.M. and Bustin, R.M., 2012, Importance of rock properties on the producibility of gas shales. International Journal of Coal Geology, 103, 132-147.
- Calvert, S.E., 1987, Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. Geological Society, London, Special Publications, 26(1), 137-151.
- Canfield, D.E., 1989, Sulfate reduction and oxic respiration in marine sediments: implications for organic carbon

preservation in euxinic environments. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 36(1), 121-138.

- Catuneanu, O., 2002, Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls. Journal of African Earth Sciences , 35, 1-43.
- Dabard, M.P. and Paris, F., 1986, Palaeontological and geochemical characteristics of Silurian black shale formations from the Central Brittany domain of the Armorican Massif (Northwest France). Chemical Geology, 55(1), 17-29.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S. and Cundy, A.B., 2007, Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: sedimentation rhythms and their preservation. Marine Geology, 241(1), 19-32.
- Demaison, G.J. and Moore, G.T., 1980, Anoxic environments and oil source bed genesis. Organic Geochemistry, 2(1), 9-31.
- Emery, D. and Meyers , K.J., 1996, Sequence Stratigraphy. Blackwell Science, Cambridge, 297 p.
- Flemming, B.W. and Delafontaine, M.T., 2000, Mass physical properties of muddy intertidal sediments: some applications, misapplications and non-applications. Continental Shelf research, 20(10), 1179-1197.
- Funnell, B.M., 1987, Anoxic non-events; alternative explanations. Geological Society, London, Special Publications, 26(1), 421-422.
- Glaser, K.S., Miller, C.K., Johnson, G.M., Toelle, B., Kleinberg, R.L., Miller, P. and Pennington, W.D., 2013, Seeking the sweet spot: reservoir and completion quality in organic shales. Oilfield Review, 25(4), 16-29.
- Hallam, A., 1967, The depth significance of shales with bituminous laminae. Marine Geology, 5(5-6), 481-493.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1984, Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In:Wilgus, C.K., Hastings, B.S., St. Kendall, C.G.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C., editors. Sea-Level changes-an integrated approach. SEPM Spec. Pub 1, 42, 71-108.
- Huc, A.Y., 1988, Aspects of depositional processes of organic matter in sedimentary basins. Organic Geochemistry, 13(1-3), 263-272.
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E. and Pollastro, R.M., 2007, Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. AAPG bulletin, 91(4), 475-499.
- Kirkland, D.W. and Evans, R., 1981, Source-rock potential of evaporitic environments. AAPG Bulletin, 65, 181-190.
- Leckie, D.A., Singh, C., Bloch, J., Wilson, M. and Wall, J., 1992, An anoxic event at the Albian-Cenomanian boundary: The Fish Scale marker bed, northern Alberta, Canada.

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 92(1-2), 139-166.

- Loucks, R.G. and Ruppel, S.C., 2007, Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. AAPG bulletin, 91(4), 579-601.
- Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C. and Hammes, U., 2012, Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. AAPG Bulletin, 96,1071-1098.
- Miller, R.G., 1990, A Paleoceanographic Approach to the Kimmeridge Clay Formation. Chapter 2. AAPG studies in geology, 30, 13-26.
- Molinares-Blanco, C., 2013, Stratigraphy and palynomorphs composition of the Woodford Shale in the Wyche Farm Shale pit, Pontotoc County, Oklahoma. M.S. thesis, Norman, Oklahoma, University of Oklahoma, 90 p.
- Morris, R.J., 1987, The formation of organic-rich deposits in two deep-water marine environments. Geological Society, London, Special Publications, 26(1), 153-166.
- Mulder, T. and Chapron, E., 2011, Flood deposits in continental and marine environments: Character and significance. In: Slatt, R.M. and Zavala, C. (eds.), Sedimentary Transfer from Shelf to Deep Water Revisiting the Delivery Mechanisms. AAPG Studies in Geology, 61, 1-31.
- O'Brien, N.R. and Slatt, R.M., 1990, Arigllaceous Rock Atlas. New York, Springer-Verlag, 141 p.
- Oschmann, W., 1988, Kimmeridge Clay sedimentation- a new cyclic model. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 65(3), 217-251.
- Paropkari, A.L., Babu, C.P. and Mascarenko, A., 1992, A critical evaluation of depositional parameters controlling the variability of organic carbon in Arabian Sea sediments. Marine Geology, 107, 213-226.
- Potter, P.E., 1998, Shale-rich basins: controls and origin. In: Schieber, J., Zimmerle, W. and Sethi, P.S., Schweizerbart (eds.), Shales and Mudstones I, Basin studies, sedimentology, and paleontology, Sttugart, 21-32.
- Potter, P.E., Maynard, J.B. and Deperis, P.J., 2005, Mud and Mudstones, Introduction and overview. Springer, Berlin, 305 p.
- Rabouille, C. and Gaillard, J.F., 1991, Towards the EDGE: Early diagenetic global explanation. A model depicting the early diagenesis of organic matter, O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, Mn, and PO<sub>4</sub>. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(9), 2511-2525.
- Rider, M.H. and Kennedy, M., 2013, The geological interpretation of well logs. 432 p.
- Rine, J.M. and Ginsburg, R.N., 1985, Depositional facies of a mud shoreface in Suriname, South America-a mud analogue to sandy, shallow-marine deposits. Journal of Sedimentary Research, 55(5), 633-652.

- Schieber, J. and Southard, J.B., 2009, Bedload transport of mud by floccule ripples-Direct observation of ripple migration processes and their implications. Geology, 37(6), 483-486.
- Schieber, J., Southard, J. and Thaisen, K., 2007, Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples. Science, 318(5857), 1760-1763.
- Schlanger, S.O. and Jenkyns, H.C., 1976, Cretaceous oceanic anoxic events: Causes and consequences. Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw (Classic Papers), 55, 179-184.
- Schmoker, J.W., 1995, Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations. In: Gautier, D.L., Dolton, G.L., Takahashi, K.I. and Varnes, K.L. (eds.), National assessment of United States oil and gas resources-Results, methodology, and supporting data: U.S. Geological Survey Digital Data Series 30, CD-ROM.
- Serna-Bernal, A., 2013, Geological characterization of the Woodford Shale, McAlister Cemetary Quarry, Criner Hills, Oklahoma. M.S. thesis, Norman, Oklahoma, University of Oklahoma, 141 p.
- Shanmugam, G., Spalding, T.D. and Rofheart, D.H., 1996, Deep-marine bottom-current reworked sand (Pliocene and Pleistocene), Ewing Bank 826 Field, Gulf of Mexico. Oceanographic Literature Review, 2(43), 163-164.
- Slatt, R.M., 2012, Sequence Stratigraphy of the Woodford Shale and Application to Drilling and Production. AAPG Search and Discovery Article, 50792.
- Slatt, R.M., 2013, Sequence stratigraphy of unconventional resource shales. Fundamentals of Gas Shale Reservoirs, 71-88.
- Slatt, R.M. and O'Brien, N.R., 2011, Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks. AAPG bulletin, 95(12), 2017-2030.
- Slatt, R.M. and Rodriguez, N.D., 2012, Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence?. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 8, 68-84.
- Soltanzadeh, M., Fox, A., Hawkes, S.R. and Hume, D., 2015, A regional review of geomechanical drilling ex-

perience and problems in the Duvernay Formation in Alberta. Unconventional Resources Technology Conference (URTEC).

- Speight, J.G., 2014, The Chemistry and Technology of Petroleum. fifth ed., CRC Press, 953 P.
- Trabucho-Alexandre, J., Hay, W.W. and De Boer, P.L., 2012, Phanerozoic environments of black shale deposition and the Wilson Cycle. Solid Earth, 3(1), 29-42.
- Tyson, R.V., 1987, The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks. Geological Society, London, Special Publications, 26(1), 47-67.
- 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).
- Watney, W.L., 1985, Evaluation of the significance of tectonic, sedimentary control versus eustatic control of Upper Pennsylvanian cyclothems in the western Midcontinent. In: Recent interpretations of Late Paleozoic cyclothems (eds.), 105-140. SEPM Mid-Continent Section, Proceedings of fue Third Annual Meeting and Field Conference.
- Wignall, P.B., 1994, Black shales. Oxford: Clarendon Press, 30, 144 p.
- Wignall, P.B. and Maynard, J.R., 1993, The sequence stratigraphy of transgressive black shales. Source Rocks in a Sequence stratigraphic framework, 37, 35-47.
- Wignall, P.B. and Ruffell, A.H., 1990, The influence of a sudden climatic change on marine deposition in the kimmeridgian of north west Europe. Journal of the Geological Society, 147, 365-371.
- Wilson, M.J., Shaldybin, M.V. and Wilson, L., 2016, Clay mineralogy and unconventional hydrocarbon shale reservoirs in the USA. I. Occurrence and interpretation of mixed-layer R3 ordered illite/smectite. Earth-Science Reviews, 158, 31-50.

Received	:	October	24,	2016
Revised	:	December	26,	2016
Accepted	:	December	26,	2016