

# 경기만 석모수도 수로제방 조간대층에 발달하는 경사이질암상층리의 퇴적학적 연구 - 오일샌드 탐사 적용가능성

## Sedimentology of Inclined Heterolithic Stratification in Sukmo Channel, Kyonggi Bay, Korea - Application to Oil Sand Exploration

최경식 (Kyung-Sik Choi)\* · Dalrymple, R.W.\*\* · 전승수 (Seung-Soo Chun)\*\*\* · 김성필 (Sung-Pil Kim)\*\*\*\* · 박세진 (Se-Jin Park)\*

**요약 :** 경기만 북부 석모수도 수로제방에 40 m 두께의 조수로 포인트바(tidal point bar) 퇴적층이 발달하고 있다. 수로 제방은 위로 볼록한 형태를 가지고 있으며 간헐적으로 간조선 근방에서 파랑기원의 침식면이 나타난다. 경사이질암상층리는 최대 25 m 두께로 발달하며 수로 방향으로 경사도는 14도에 달한다. 경사이질암상층리의 하부에는 밀물방향성을 갖는 사층리층이 발달한다. 석모수도는 썰물우세 수로이지만 밀물 방향성의 사층리가 우세하게 발달하는데 이것은 조수로의 전형적인 특성인 창조류와 낙조류의 상호 회피성에 기인한다. 경사이질암상층리는 세립사와 점토의 교호층리로 구성되며 상향 세립화의 경향성을 보인다. 석모수도의 거대한 크기와 한강으로부터의 멀리 떨어진 위치, 강한 조류의 영향으로 인해 퇴적층 내에는 한강의 계절적인 유량변동이 기록되지 않는다.

**주요어 :** 경사이질암상층리(IHS), 오일샌드, 조간대, 석모수로, 경기만

**Abstract :** An occurrence of inclined heterolithic stratification (IHS) is described from a tidal point bar in a 40-m-deep distributary of the macrotidal, Han River delta, Korea. The channel bank demonstrates a convex-upward profile with intermittent presence of wave-formed scarps and terraces near the low-water level. The vertical succession of IHS is approximately 25 m thick and dips into the channel with angles reaching up to 14°. The IHS overlies 15 m of trough cross-bedded sand deposited in the channel bottom. Even though the channel as a whole is ebb dominated, the preserved cross bedding is predominantly flood directed because the mutually evasive nature of the ebb and flood currents causes the point bar surface to be flood dominated. The IHS itself consists of inter-stratified fine sand, sandy silt, and silt with an fining-upward textural trend. Seasonal discharge variations of the Han River are not obvious in the deposits, because the large size, distal location, and energetic tidal environment of the studied channel reduces the impact of river-stage fluctuations.

**Keywords :** inclined heterolithic stratification (IHS), oil sand, tidal flat, Sukmo channel, Kyonggi Bay

### 서론

모래와 점토의 교호층이 기준면에 경사지게 발달하는 것을 경사이질암상층리 (IHS, inclined heterolithic stratification)라고 한다(Thomas *et al.*, 1987). 경사이질암상층리는 과거에 epsilon cross stratification (Allen, 1963) 또는 longitudinal cross bedding (Reineck, 1958)으로 불리기도 했으며 최근에는 고환경 복원에 있어서의 중요성이 부각되면서 주목을 받고 있는 퇴적체이다. 이 퇴적체는 삼각주의 성장에 의해서 형성되기도 하지만 (Stanley and Surdam, 1978; Martinus *et al.*, 2001), 주로 사행하는 하천의 포인트바가 횡으로 성장하면서 만들어진다 (Barwis, 1978; Clifton, 1983; De Mowbray, 1983; Thomas *et al.*, 1987; Smith, 1988). 육상의 하천환경에서 관찰되기도 하나 (Jackson, 1981; Makaske and Nap, 1995; Page *et al.*, 2003), 경사이질암상층리는 조수퇴

적환경에서 두드러지게 관찰된다(Smith, 1987; Thomas *et al.*, 1987; Shanley *et al.*, 1992; Kvale and Vondra, 1993; Ainsworth and Walker, 1994; Eberth, 1996; Cotter and Driese, 1998; Falcon-Lang, 1998; Gingras *et al.*, 1999; Gingras *et al.*, 2002; Shanmugam *et al.*, 2000; Martinus *et al.*, 2001; Beets *et al.*, 2003; Dalrymple *et al.*, 2003). 현생과 고기 퇴적층에서 관찰되는 경사이질암상층리의 규모는 매우 극단적인 차이를 보인다. 현생에서 관찰되는 경사이질암상층리는 대개 1~4미터의 소규모로 나타나는 반면 (Reineck, 1958; Bridges and Leeder, 1976; Barwis, 1978; Clifton, 1983; De Mowbray 1983; Smith 1988; Anima *et al.*, 1989), 고기 퇴적층에서는 최대 25미터 두께를 보이기도 한다(Mossop and Flach, 1983; Plint and Wadsworth, 2003) (Fig. 1).

오일샌드 (일명 타르샌드)란 저류층내에서의 점성도가 10,000cP

\*한국석유공사 (Korea National Oil Corp.), E-mail: tidalchoi@knoc.co.kr; tidalchoi@hotmail.com

\*\*Queen's University, Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Kingston, Canada

\*\*\*전남대학교 지구환경과학부 (Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University), E-mail: sschun@jnu.ac.kr

\*\*\*\*한국지질자원연구원 (KIGAM)

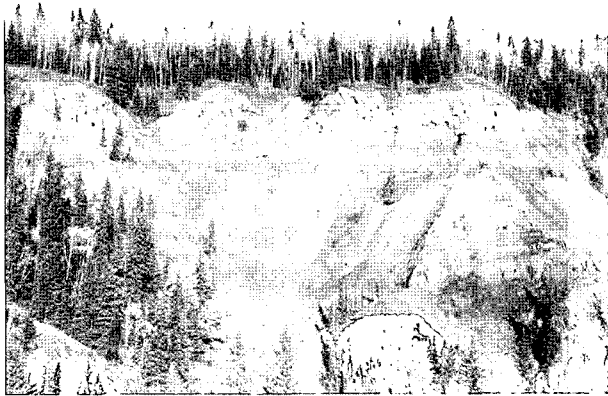


Fig. 1. Giant (~25 m thick) inclined heterolithic stratification (IHS) in McMurray Formation (Alberta, Canada).

를 넘는 석유 (비투먼, bitumen)를 지칭한다 (Meyer, 1995). 일반적으로는 시추공을 뚫었을 때 저류층내에 있는 석유가 매우 점성이 높아 상업적인 생산이 가능할 정도로 흘러나오지 않는 석유 함유 사암층을 일컫는다 (AEUB, 1996; Butler, 1997). 오일샌드는 전세계적으로 약 1조 7천억 배럴이 매장되어 있는 것으로 알려져 있고 이중 80% 이상이 캐나다 앨버타주의 Athabaska 지역에 매장되어 있다. 오일샌드는 현재 유력한 석유대체자원으로 급부상하고 있으며 향후 2015년에 이르면 일일 160만 배럴 이상이 캐나다 앨버타주에서 생산될 예정이다. 앨버타주에 위치한 오일샌드는 대부분 조수퇴적체 내에 존재한다. Athabaska 지역에 발달하는 조수퇴적체는 거대한 경사이질암상층리로 구성되어 있는

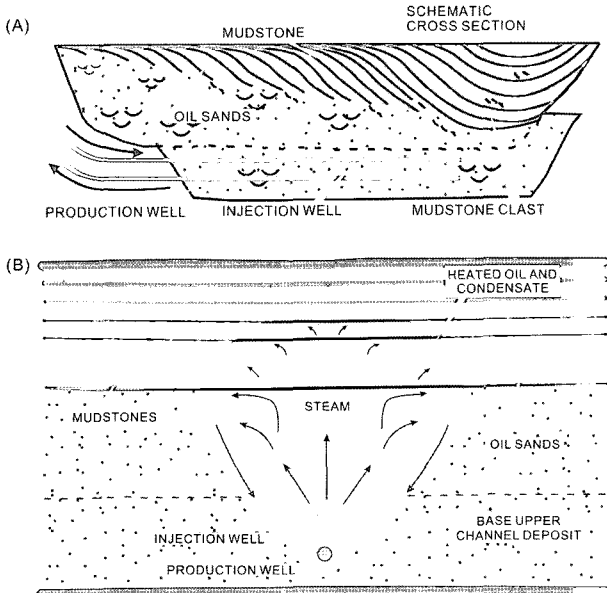


Fig. 2. Schematic diagram of Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) in 2 stacked channel deposits. (A) Longitudinal profile of horizontal well pair. (B) Cross section of (A) showing development of steam chamber retarded by lateral accretion of mudstones. Sandy to muddy channel "life cycle" from Wightman and Pemberton (1997).

데 이 퇴적체와 유사한 규모를 갖는 퇴적체가 아직까지 현생에서 보고된 적이 없어서 해석에 어려움을 겪고 있으며 기원에 대해 여러 가지 가설들이 제시된 바 있다 (Mossop and Flach, 1983; Gingras, 2003). 오일샌드의 효율적인 개발 및 탐사를 위해서는 경사이질암상층리가 형성되는 퇴적시스템의 이해가 선행되어야 한다. 그 이유는 오일샌드 퇴적층의 특성에 따라 각기 다른 공법들이 적용되기 때문이다. 일반적으로 퇴적체가 상향조립화의 경향을 보이는 경우 CSS (Cyclic Steam Stimulation), 상향세립화의 경향을 보이는 경우 SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage)의 공법이 적용된다 (Wightman, 2003) (Fig. 2). 본 논문에서는 경기만 북부 석모수도 수로제방에 발달하는 거대 경사이질암상층리의 퇴적학적 특성을 기술하고, 이 퇴적층이 갖는 오일샌드 탐사에서의 적용가능성을 토의하고자 한다.

연구 지역 및 방법

경기만은 대조차 환경으로 강한 왕복성 조류에 의해 광대한 조간대와 조수성 사구가 발달하고 있다. 한강은 4개의 지류를 통해

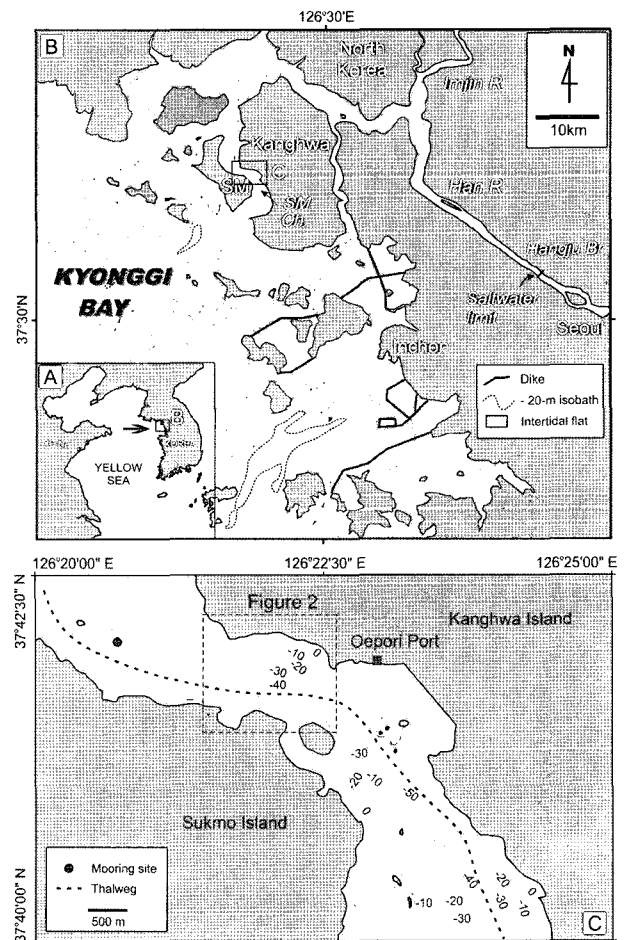


Fig. 3. (A) Map of Korean Peninsular showing location of Kyonggi Bay (B) Map of inner Kyonggi Bay showing study area in Sukmo Channel, the main distributary of the Han River. (C) Bathymetric map of Sukmo Channel in the vicinity of Oepori Port.

경기만에 퇴적물을 공급하고 있다. 강화도와 석모도 사이에 위치하는 석모수도는 이 4개의 지류 중 가장 수심이 깊고 조류의 세기가 강해 가장 중요한 지류로 여겨진다. 석모수도는 그 폭이 1000~1500 m이며 사행천과 같이 S자 형태이다 (Fig. 3). 강화도 근방에는 전진구축형의 퇴적층이 최대 50 m 두께로 발달한다 (KIER, 1987). 연구지역은 외포리항 동쪽 1 km 지점에 위치하며 폭이 50~80 m에 달하는 조간대가 발달한다. 이 조간대는 위로 볼록한 단면 (convex-upward)을 가지고 있으며 조간대의 경사는 간조선에서 만조선으로 가면서 점진적으로 감소한다. 외포리항 부근의 조치는 사리 때 7.8 m, 조금 때 3.6 m에 달한다. 조류는 최대 2 m/sec에 달하며 전반적으로 썰물우세이다 (Chang and Oh, 1991). 한강의 연강 유량은 23 km<sup>3</sup>이고 이중 약 60%가 우기인 7월에서 9월 사이에 집중된다 (MCT, 2001). 유량의 증가에 의한 수면 상승은 행주대교 근방에서 1.5 m이며, 외포리항 근방에서는 0.6 m이다 (KHO, 2000). 부유물질의 농도는 계절적으로 뚜렷한 변화를 보이는데 낮은 유량시기에는 ~750 mg/l, 홍수기에는 >1500 mg/l에 달한다 (Chang and Oh, 1991). 평균 풍속은 4월에 가장 강한 (>2.5 m/s) 서풍이 발달하고, 10월에서 12월 사이에 가장 약한 (<2.0 m/s) 북서풍이 형성된다 (KMA, 2001, 2003).

석모수도 조하대 지역의 지형은 NAVISOUND 215 음향측심기를 사용하여 측량하였다. 퇴적상 분석을 위한 시료점정의 위치는 오차가 1 m 미만인 DGPS를 사용하여 측정되었다. 조간대지역 측량은 PS-1 Sokkia 수준기를 사용하여 3년간 6차례에 걸쳐 실시하였다. 이와 함께 4차례에 걸친 목측에 의한 측량도 이루어졌다.

**연구 결과**

**음향측심을 이용한 지형분석**

외포리 부근의 석모수도는 최고 수심이 대조시 (spring tides)에 43 m에 달하고 최대 폭이 1 km이다. 석모수도의 조하대 지역에는 강한 조류에 의해 형성된 사구층면구조 (dune bedform)가 우세하게 발달한다. 외포리 조간대의 조하대 연장선에 해당하는 지역은 조간대 지역과는 달리 위로 오목한 단면을 보이고 있다. 외포리 조간대 퇴적층이 수심 약 30 m의 조하대까지 연장되는 것으로 해석된다. 조하대에서 관찰되는 경사면은 최대 약 9도의 경사를 갖는다 (Fig. 4).

**수로조간대 계절별 지형변화 분석**

여섯 차례에 걸친 외포리 조간대의 지형측량 결과 전반적으로 조간대 지형이 순퇴적작용 (net sedimentation)의 결과로 인해 수로쪽으로 전진 구축되는 양상을 보이고 있다. 이러한 측량결과 분석된 퇴적물은 평균적으로 5~10 cm/month이며 간조선 근방에서 가장 높게 나타났다 (Fig. 5). 여섯 번의 관측시기 모두 단조로운 조간대 지형을 보여주고 있으나 실제로는 이러한 단조로운 조간대 지형이 계절에 따른 퇴적/침식작용의 결과로 간혹 소규모 절벽을 보이는 침식지형이 관찰되기도 한다. 2000년 5월 24일에 관측된 외포리 조간대 지형이 그 대표적인 예로 이때 관측된 절개면의 높이는 최고 1.5 m에 달했으며 간조선 근방에는 침식작용의 결과로 형성된 수많은 mud ball들이 관측되기도 하였다. 이러한

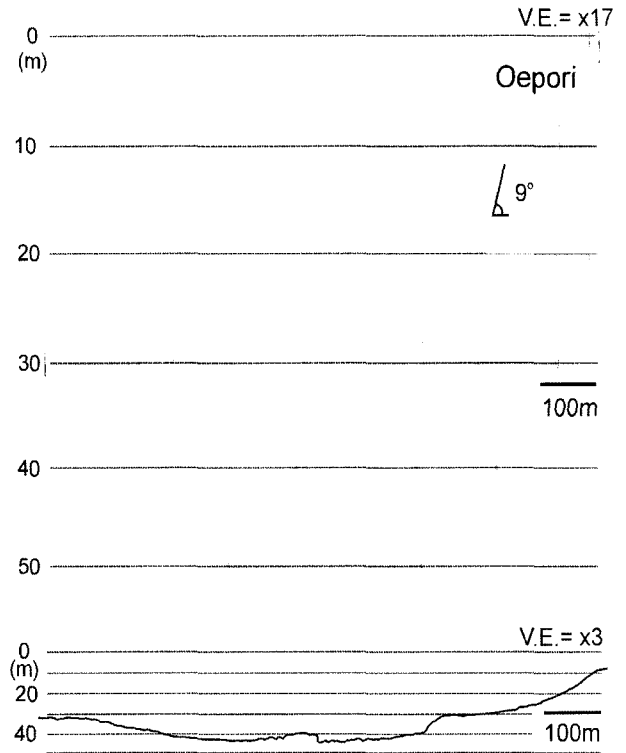


Fig. 4. Cross-sectional profile of Sukmo Channel, drawn from echosounding. The maximum slope of channel wall reaches 9 degree.

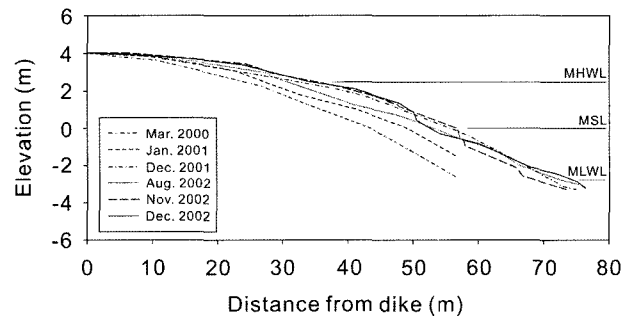
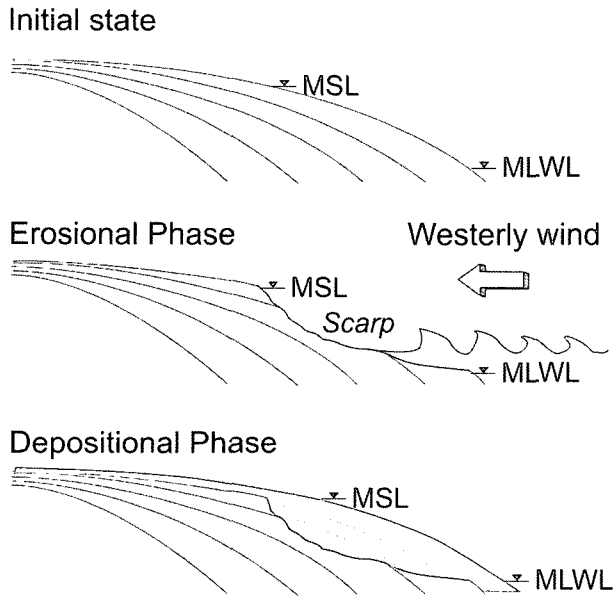


Fig. 5. Repeated profiles of Oepori channel bank. Note alternation of progradation/aggradation and retreat over short time intervals, especially in the area below mean sea level (MSL).

침식지형은 그 이후 퇴적작용이 진행되면서 원래와 같은 단조로운 위로 볼록한 지형으로 변화하였다. 이러한 수로조간대 지형변화는 대체로 계절과는 무관하게 변하는 양상을 보이는 것으로 파악되었다 (Fig. 6). 가을철과 겨울철에는 조간대 지형의 변화가 거의 일어나지 않는 것으로 나타났는데 이것은 이 시기에 외포리 조간대가 뚜렷한 퇴적작용이나 침식작용을 겪지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 봄철이 되면 외포리 조간대에는 급격한 퇴적작용이 일어나면서 원래의 단조로운 위로 볼록한 지형단면으로 변해간다 (Fig. 6).

**미세퇴적구조 분석**

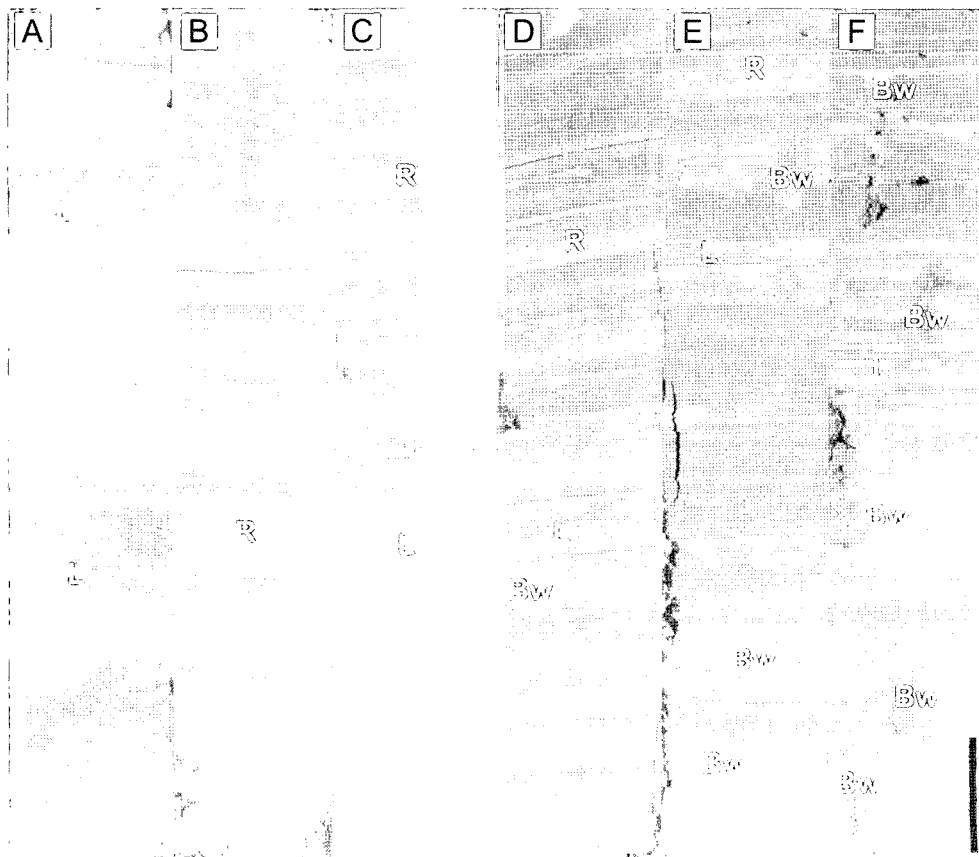
외포리 조간대 퇴적층은 주로 평행엽층리로 구성되어 있으며 생



**Fig. 6.** Conceptual diagrams showing temporal variation of channel-bank morphology. Note alternation of smooth convex-up shape during depositional phase and terraced morphology during erosional phase. Erosional scarps are mainly present below mean sea level (MSL). MLWL: mean low-water level.

물고관 작용은 전반적으로 매우 미약하다 (Fig. 7). 이 층은 대부분 실트질 입자로 이루어져 있으며 엽층리의 두께는 주기성을 가지고 있다. 평형엽층리는 대체로 1~4 mm 두께이며 하부의 모래질 우세층과 상부의 니질 우세층으로 구성되어 있고 상향세립의 점이층리를 특징적으로 갖는다. 각각의 엽층리는 조간대의 주향 방향을 따라 약 100 m 이상의 연장성을 보이고 있다. 모래질 우세 엽층리는 퇴행성침식 (recessive weathering)을 받는 관계로 보다 저항력이 큰 니질 우세 엽리와 뚜렷한 대비를 보이고 있다. 이러한 특성으로 인해 절개면 노두에서 니질 우세 엽층리와 모래질 우세 엽층리의 구분이 용이하다. 평형엽층리는 그 엽층리의 두께가 주기적으로 변화하는 특징을 보이고 있다. 이러한 주기성은 조석의 주기와 유사성을 갖는다.

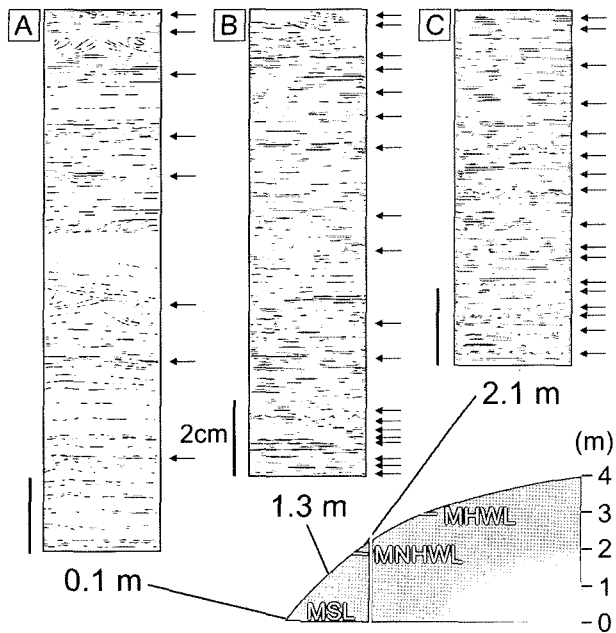
대조차 해역인 경기만 일대는 소조기 (조금, neap tides)에서 대조기 (사리, spring tides)로 가면서 조류의 세기가 증가하는 것이 일반적이다. 조류의 유속이 점차 증가하면서 조류가 운반하는 부유퇴적물의 농도도 함께 증가한다. 일반적으로 대조기에 형성된 엽층리는 소조기에 형성된 것에 비해 더 두껍고 모래함량이 상대적으로 높게 나타난다. 엽층리의 수도 대조기에 형성된 층이 더 많은 경향을 보여준다. 이러한 현상은 대조기 때에 조간대 지역이 침수되는 횟수가 더 많기 때문인 것으로 판단된다 (Dalrymple *et al.*, 1991; Tessier, 1993). 반면에 두껍고 모래질인 엽층리들은



**Fig. 7.** Photographs showing representative sedimentary facies: laminated sandy silt (A, B), laminated silt (C, D), and laminated mud (E, F). Note lamina thickness and size of deformation structures generally decrease from lower (A) to higher (F) elevations. Scale bar in (F) is 3 cm.

대조기를 반영하는 것으로 해석된다. 니질 우세 얽층리에서 모래질 우세 얽층리로 점진적인 두께변화를 보이는 구간은 보름의 절반 즉 일주일을 반영하는 것으로 해석된다. 이러한 점진적인 얽층리 두께의 변화는 달의 정합주기와 관련이 있는 것으로 해석된다 (Kvale *et al.*, 1989).

이러한 소조기와 대조기의 조석변화 이외에도 다른 조석주기를 지시하는 퇴적구조가 관찰된다. 연속적으로 분포하는 얽층리의 두께가 두껍고 얇은 것이 교대로 나타나는 부분이 있는데 이것은 경기만과 같은 반일주조가 우세한 해역에서 흔하게 관찰되는 일조부등 (diurnal inequality) 현상으로 해석된다. 일조부등이란 반일주조 즉 하루에 두 번 조석이 발생하는 곳에서 오전의 고조가 오후의 고조에 비해 그 높이가 낮았지 아니면 높게 나타나는 현상을 말한다. 하루에 두 번 발생하는 조석의 크기 차이를 일컫는 말로서 이에 따라 형성되는 얽층리의 두께도 서로 차이를 보이게 되는 것이다. 이러한 조석 현상은 달의 지구 공전궤도면이 기울어짐에 따라 생기는 현상이다 (Pugh, 1987). 또한 대조기-소조기를 반영하는 구간의 두께가 두껍고 얇게 반복되는 것이 관찰이 되는데 (Fig. 7), 이것은 높은 사리와 낮은 사리가 반복적으로 나타나는 달의 회귀조와 관련이 있는 것으로 해석된다 (Kvale *et al.*, 1989). 달의 회귀조는 달의 공전궤도면이 타원형을 이루기 때문에 발생하는 것으로서 달의 위치가 지구와 가까운 경우 (근지점)엔 큰 사리가 발생하고 반대로 멀리 위치했을 경우 (원지점)엔 작은 사리가 발생하게 된다. 이에 따라 형성되는 얽층리도 근지점의 경우가 원지점에 비해 얽층리의 두께가 더 크고 모래질이 상

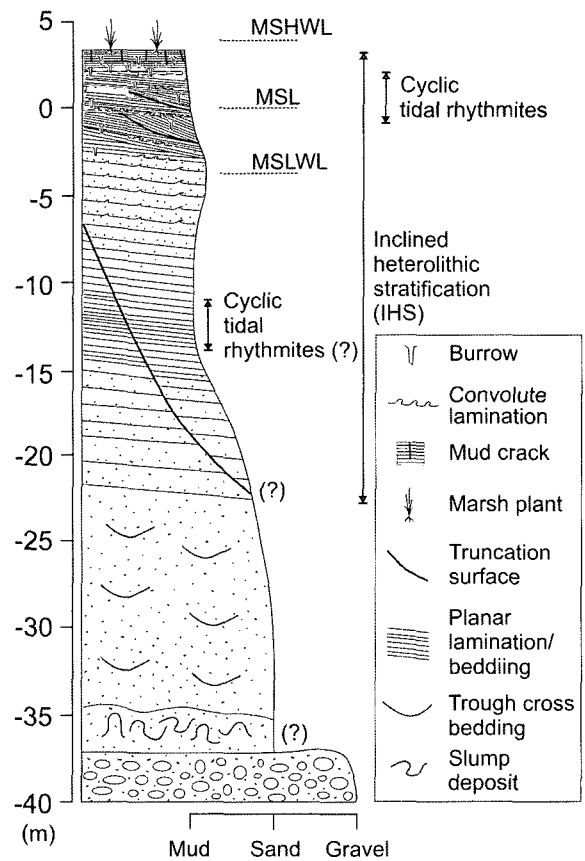


**Fig. 8.** Line drawings showing variation of rhythmic tidal lamination (tidal rhythmites) with increasing elevation. Arrows indicate inferred neap-stage laminae. Thicknesses of neap-spring cycles become smaller with increasing elevation. Note that convolute lamination commonly occurs in thick, spring-tide laminae. MSL, mean sea level; MNHWL, mean neap high-water level; MHWL, mean high-water level.

대적으로 우세하게 나타난다.

얽층리의 주기성은 조간대내 해수면에 대한 상대적인 고도에 따라 변화하는 양상을 보인다 (Fig. 8). 일례로 만조선 근방으로 갈수록 대조기-소조기 (사리-조금)를 반영하는 구간의 두께가 점진적으로 감소한다. 아울러 사리-조금 구간 내에 보존된 얽층리의 수도 감소한다. 이것은 고도가 높아짐에 따라 그곳에 도달하는 조류의 세기가 약해지고 또한 그 수도 감소함을 반영하는 것으로 판단된다. 얽층리의 주기성에 근거해서 퇴적률을 계산해보면 평균해수면 (mean sea level) 부근에서는 5 cm/month 이고 평균 조금만조선 (mean neap high water level) 근방에서는 5 mm/month 내외로 감소한다. 얽층리의 주기성은 평균 저조선 (mean low water level) 이하에서는 잘 관찰되지 않는다.

평행얽층리와 함께 외포리 조간대에서 우세하게 관찰되는 퇴적 구조로는 층내변형 얽층리 (convolute lamination)가 있다. 층내변



**Fig. 9.** Schematic columnar section of Sukmo Channel bank near Oepori Port. Note that inclined heterolithic stratification extends through the entire intertidal and shallow subtidal portion (upper 25 m) of the bank. Tidal rhythmites are present mainly in the upper intertidal zone, and may also be present in the shallow subtidal zone. Coarsening near the MSLWL is attributed to wave influence. The cross-bedded medium sand below -25 m is flood dominated; ebb-oriented cross bedding may occur at the very base of the succession. The IHS may be cut by large-scale slump scars, with chaotic debris near the channel base. MSLWL, mean spring low-water level; MSL, mean sea level; MSHWL, mean spring high-water level.

형 엽층리는 심하게 굴곡된 엽층리를 지시하는 것으로 변형된 구간이 20 cm 두께에 달하는 것도 관찰되었다. 이 변형 엽층리는 퇴적작용이 급하게 일어나거나 불안정한 경사면 상에서 퇴적물의 액화현상 (liquefaction)이 일어날 때 형성되는 것으로 알려져 있다.

#### 수로조간대 층서분석 (진동시추코아 및 코아슬랩)

노출절개면과, 캔코아, 진동시추코아를 분석한 결과 석모수도의 외포리 조간대에 발달한 퇴적층은 상향세립화의 층서를 갖는 것으로 해석된다 (Fig. 9). 최상부를 제외한 전체 구간에서 경사이질암상층리 (inclined heterolithic stratification)가 우세하게 발달하며 이 엽층리에서 조석주기가 관찰된다. 생물교란흔적은 전체적으로 드물게 나타나며 만조선 근방으로 가면서 증가하는 양상을 보인다. 또한 층내변형 엽층리층도 전 층서구간에 걸쳐 관찰된다. 퇴적구조 중에서 조간대 환경을 직접적으로 지시하는 퇴적구조인 건열구조 (mud crack)는 큰 사리 (perigean spring tides) 동안에만 물에 잠기는 외포리 조간대 최상부에서만 관찰된다. 전체적인 층서의 구성과 퇴적층의 특성으로 미루어볼 때 외포리 조간대층은 사행하천 (meandering channel)에서 관찰되는 포인트바 (point bar) 퇴적층과 매우 유사한 특성을 보인다. 외포리 조간대에서 관찰되는 침식면은 계절적인 변화와 무관하며 (Fig. 6), 국지적으로 강한 서풍이 발생할 때 파랑의 작용으로 형성되는 것으로 해석된다.

### 토 론

석모수도 제방은 33개월의 연구기간 동안 현저한 지형변화를 겪었다. 제방측량을 통해 추정된 평균 퇴적률은 하부 조간대에서 8 cm, 상부 조간대에서 3 cm로 고도가 높아짐에 따라 퇴적률이 점차 감소한다. 상부조간대 지역의 경우, 측량을 통해 추정된 퇴적률은 조석리듬층 (tidal rhythmites)에서 유추된 값과 유사하다. 사리-조금 주기를 바탕으로 추정된 퇴적률은 평균 조금만조선 근방에서 한달에 5 cm, 평균 사리만조선 근방에서 한달에 1 cm로 고도에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 반면에 하부조간대 지역에서는 측량값과 퇴적층에서 추정된 값을 비교할 수가 없다. 실제로 측량에 의한 결과 한달에 약 40 cm의 퇴적률이 계산이 되었으나 엽리두께를 계산한 결과 하루에 5 cm까지 퇴적되는 것으로 해석되었다. 이론적으로 이러한 퇴적률이 한달간 지속되면 약 2 m에 달하는 퇴적층이 쌓여야 하나 실제로는 그렇지 않다. 이것은 설사 이러한 퇴적층이 쌓였다 하더라도 급격한 퇴적작용으로 인해 퇴적층이 고화되기 어렵고 빈번한 파랑의 작용으로 인해 침식을 겪어서 보존되기 어렵기 때문인 것으로 해석된다.

석모수도의 환경조건은 계절적으로 현저하게 변한다. 특히 여름철 홍수기의 경우 유량 및 부유물질의 농도가 급격하게 증가한다. 이러한 변화에도 불구하고 퇴적층에는 뚜렷한 기록이 보존되지 않는다. 일반적으로 홍수기에 형성되는 사리-조금 주기 퇴적층은 다른 시기에 형성된 것에 비해 상대적으로 두껍다 (Kvale *et al.*, 1994). 제방측량을 통해 추정된 퇴적률 값을 살펴보면 연중 내내 높은 퇴적률이 기록되었다. 이러한 사실은 우기시 증가된 유량에 의한 퇴적작용의 증거가 석모수도 제방의 퇴적층내에 뚜렷

하게 기록될 가능성이 낮음을 의미한다. 계절적인 변화가 현저하지 않다는 사실은 석모수도의 퇴적환경이 연중 내내 고에너지에 노출되어 있고 높은 퇴적률이 지속된다는 것을 의미한다. 또한 우기시 유량의 증가에 의해 수면이 약 60 cm 상승하는데 이것은 이 지역 조차 (5~9 m)에 비해서 매우 작은 값이다. 결과적으로 퇴적률의 계절적 변동이 있다 하더라도 매우 미약한 수준이 될 것으로 판단된다.

개념적인 석모수도 제방층의 층서모델이 Fig. 9에 제시되었다. 심부 조하대의 경우 곡사층리 모래 퇴적상으로 구성되어 있으며 사층리들은 밀물 방향으로 수로의 경계면과 평행하게 놓여 있을 것으로 추정된다. 제방층의 하부에 나타나는 불연속면은 아마도 급격한 퇴적작용으로 야기된 인장성 단층면에 의해 기인되었을 가능성이 높다.

제방층의 상부 20~25 m는 경사이질암상층리로 구성되어 있다 (Fig. 9). 이 층리들의 경사는 1~14° 내외이며 고도에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 엽층리의 두께 역시 고도에 따라 감소하며 전체적으로 상향 세립화의 경향성을 분명하게 나타낸다. 생물교란작용은 고도에 따라 증가한다. 하부 조간대 부근에서는 소규모의 아래로 오목한 절단면이 관찰되고 이외는 별개로 제방층의 상부 전체를 절단하는 대규모 미끄러짐면도 발견된다. 이러한 불연속면의 존재로 인해 이질층리들은 경사방향으로 연속성이 매우 불량하다. 이는 특히 조간대 지역에서 분명하게 관찰되며 조하대의 지역에서도 사태에 의한 절단면이 존재하는 경우 경사방향 연속성이 불량하다. 대조적으로 주향 방향으로의 연속성은 매우 양호하다.

석모수도 제방에서 관찰되는 경사이질암상층리는 이전에 보고된 것들과 매우 유사한 특징을 갖는다. 상향세립화의 층서를 보이는 것이 대표적이다. 다만 층후가 현저하게 두껍고 하부의 사층리 모래층의 두께가 상당하다는 사실은 이전에 보고된 예와는 차이를 보이는 점이다. 이러한 차이는 석모수도가 기반암에 의해 한정되어 있고 고에너지환경이라는 점을 반영하는 것으로 판단된다.

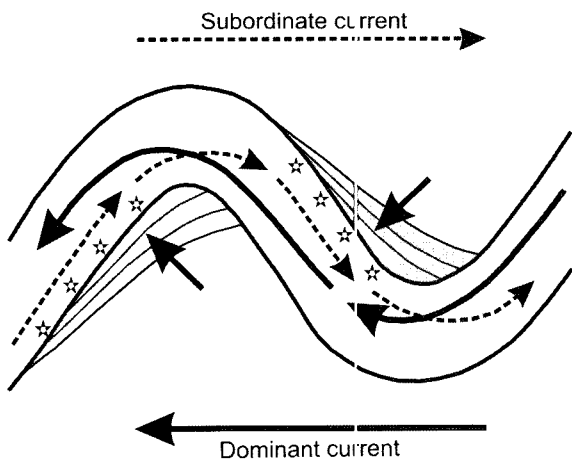
이전의 연구 결과들은 경사이질암상층리에서 관찰되는 이질적인 퇴적암상이 조류에 의한 것이라기 보다는 계절적인 요인에 의한 것으로 보았다(Thomas *et al.*, 1987; Smith, 1988). 연구지역에 직접적으로 퇴적물을 공급하는 한강이 계절적으로 현저한 유량차이를 보이긴 하지만, 석모수도에 관찰되는 이질암상은 조류의 흐름에 의한 것이다.

위로 오목한 침식면은 경사이질암상층리내에서 흔히 발견된다. 이전의 연구결과들은 이러한 침식면이 요선 (thalweg) 수준까지 발달하는 것으로 보고하고 있는데 이는 이 면들이 증가된 유량을 감당하기 위해 수로를 확장시키거나 수로의 요선 (thalweg)이 국지적으로 제방을 절단하는 과정 속에서 형성된 것으로 보기 때문이다 (Bridges and Leeder, 1976; De Mowbray, 1983; Zaitlin, 1987; Dalrymple and Zaitlin, 1994). 본 연구에서 보고된 경사이질암상층리내에는 침식면이 제방층의 하부 조간대 지역에 집중된다. 이러한 현상을 일으키는 요인으로 유량의 계절적 변동뿐만 아니라 수로 크기의 차이, 하천 시스템 내 수로의 위치 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 소규모의 하천에 비해 대규모의 하천에서는 유량의 증가에 의한 수위 상승을 만들기가 어렵다.

이는 특히 대규모의 하천이 지류상에 위치할 때 더욱 그러하다. 석모수도와 같은 대규모 하천의 경우 탁월풍에 의해 극적인 파랑이 형성될 가능성이 높다. 간조선 근방에서 관찰되는 침식면은 파랑에 의해 형성된 것으로 해석된다.

Thomas *et al.* (1987)은 하천과 조류의 상대적인 기여도에 따라 다양한 규모의 경사이질암상층리가 발달함을 밝힌 바 있다. 일례로 하천-해양의 전이지대내에서 조류의 세기가 강할 수록 경사이질암상층리는 보다 더 분명한 조석주기성을 띤다는 사실이 보고되었다 (e.g., Smith, 1988; Rahmani, 1988; Ainsworth and Walker, 1994; Eberth, 1996). 주기성을 갖는 경사이질암상층리는 최대흔타이 발달하는 곳에서 잘 형성된다고 보고한 연구사례도 있다 (Ainsworth and Walker, 1994). 하천이 보다 외해쪽에 위치하는 경우에는 외해로부터 도달하는 빈번한 파랑의 존재 또는 현저한 수로폭의 증가로 인해 파랑 에너지를 겪을 가능성이 높기 때문에 조석리듬층과 같은 주기성을 갖는 경사이질암상층리의 보존이 매우 희박해진다.

석모수도 자체는 썰물우세 하천이지만 음향측심 결과 제방층내 보존된 사층리의 대부분은 밀물우세 방향이다. 예상과 상반된 방향성의 사층리가 발달하는 것은 외포리항 부근 지역이 강한 썰물의 영향을 직접적으로 받지 않는 보호된 곳에 위치하고 실제로 창조류가 더 강하게 발달하기 때문이다. 이러한 현상은 조수로의 전형적인 특징 중의 하나인 상호-회피성 조류의 발달에 기인한 것이다. 이러한 환경조건하에서는 전반적으로 우세한 썰물에 의해 제방에서는 외해쪽으로 성장해가는 경사이질암상층리가 발달하지만 내부적으로는 밀물방향의 소규모 사층리가 우세할 것으로 예상된다 (Fig. 10).



**Fig. 10.** Flow patterns of the dominant and subordinant currents in a meandering tidal channel. The dominant current is responsible for the obliquely down-current migration of the point bars, as indicated by the short black arrows, because the point-bar surfaces (indicated by stars) are in a low-speed zone at this time. By contrast, the subordinate current is stronger on the point-bar surface than it is on the cut-bank side of the channel. This may cause the preferential preservation within the point bar of cross stratification dipping in the direction of the subordinate current. The deposits of the channel thalweg may preserve the dominant flow direction.

석모수도에 발달하는 경사이질암상층리는 캐나다 오일샌드 탐사에 있어서 중요한 의미를 갖는다. 캐나다 오일샌드 퇴적층은 대부분 조수퇴적환경에서 형성된 것으로 알려져 있으며 특히 Athabaska 지역의 오일샌드층은 거대한 조수로 환경에서 형성된 것으로 추정된다 (Mossop and Flack, 1983). 그러나 지금까지 현생환경에서 이와 유사한 규모의 경사이질암상퇴적체가 보고된 예가 없어서 저류층의 특성을 파악하기 위해 필수적인 점토층의 공간분포 양상에 대한 자료가 부족한 것이 사실이다. 이 점토층은 유체흐름의 장애요소가 되기 때문에 효율적인 중유회수를 위해서 공간분포 양상을 규명하는 것이 필수적이다. 점토층의 공간분포 양상은 또한 사암층의 연결성과 연속성을 판단하는 중요한 근거 자료가 되며 이를 근거로 저류층의 품위를 보다 정확하게 추정할 수 있다 (Jackson *et al.*, 2005).

**결론**

조석우세 한강삼각주내 석모수도의 수로제방에는 상향세립화 경향을 보이는 40 m 층후의 퇴적층이 발달하는데 하부 15 m는 밀물우세 사층리 중립사로, 상부 25 m는 세립질의 경사이질암상층리로 구성되어 있다. 경사이질암상층리는 모래와 점토의 교호층리로 구성되어 있으며 고도에 따라 층리의 두께가 점진적으로 감소한다. 조석리듬층은 경사이질암상층리의 중부 및 상부 조건대 고도에 해당하는 구간에 발달하며, 얇은 조하대에서도 발견된다. 탁월풍에 의해 야기된 파랑에 의해 위로 오목한 침식면이 형성된다. 층리의 연속성은 경사방향에 비해 주향방향이 양호하다. 석모수도의 수로제방에 발달하는 경사이질암상층리는 규모면에서 캐나다 오일샌드층과 유사하며 거대 경사이질암상층리내 퇴적상의 공간적 변화 및 3차원 아키텍처를 이해하는데 도움을 줄 것으로 기대한다.

**사사**

이 연구는 한국과학재단(#R01-2001-00081, 전승수) 및 캐나다 과학공학재단(#7553-01; R.W. Dalrymple)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

**참고문헌**

AEUB (Alberta Energy and Utilities Board), 1996, Crude Bitumen Reserves Atlas. Statistical Series, 96-138.  
 Ainsworth, R.B. and Walker, R.G., 1994, Control of estuarine valley-fill deposition by fluctuations of relative sea-level, Cretaceous Bearpaw-Horseshoe Canyon transition, Drumheller, Alberta, Canada, *in* Dalrymple, R.W., Boyd, R., and Zaitlin, B.A., eds., Incised Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences: SEPM, Special Publication 51, 159-174.  
 Allen, J.R.L., 1963, The classification of cross-stratified units, with notes on their origin: *Sedimentology* 2, 93-114.  
 Anima, R.J., Clifton, H.E., and Phillips, R.L., 1989, Comparison of modern and Pleistocene estuarine facies in Willapa Bay, Washington, *in* Reinson, G.E., ed., Modern and Ancient Examples

- of Clastic Tidal Deposits A Core and Peel Workshop. Canadian Society of Petroleum Geologists, 1-19.
- Barwis, J.H., 1978, Sedimentology of some South Carolina tidal-creek point bars, and a comparison with their fluvial counterparts, in Miall, A.D., ed., *Fluvial Sedimentology*: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, 129-160.
- Beets, D.J., de Groot, T.A.M., and Davies, H.A., 2003, Holocene tidal back-barrier development at decelerating sea-level rise: a 5 millennia record, exposed in the western Netherlands: *Sedimentary Geology* 158, 117-144.
- Bridges, P.H. and Leeder, M.R., 1976, Sedimentary model for intertidal mudflat channels, with examples from the Solway Firth, Scotland: *Sedimentology* 23, 533-552.
- Butler, R.M., 1997, *Thermal Recovery of Oil and Bitumen*. Calgary, GravDrain Inc.
- Chang, H.D. and Oh, J.K., 1991, Depositional sedimentary environments in the Han River estuary and around the Kyonggi Bay posterior to the Han River's developments. *Oceanological Society of Korea, Journal* 26, 13-23.
- Clifton, H.E., 1983, Discrimination between subtidal and intertidal facies in Pleistocene deposits, Willapa Bay, Washington: *Journal of Sedimentary Petrology* 53, 353-369.
- Cotter, E. and Driese, S.G., 1998, Incised-valley fills and other evidence of sea-level fluctuations affecting deposition of the Catskill Formation (upper Devonian), Appalachian foreland basin, Pennsylvania: *Journal of Sedimentary Research* 68, 347-361.
- Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A., 1994, High-resolution sequence stratigraphy of a complex, incised valley succession, the Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada: *Sedimentology* 41, 1069-1091.
- Dalrymple, R.W., Baker, E.K., Harris, P.T., and Hughes, M.G., 2003, Sedimentology and stratigraphy of a tide-dominated, foreland-basin delta (Fly River, Papua New Guinea) in Sidi, F.H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H. and Posamentier, H.W., eds., *Tropical Deltas of Southeast Asia Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*: SEPM, Special Publication 76, 147-173.
- Dalrymple, R.W., Makino, Y., and Zaitlin, B.A., 1991, Temporal and spatial patterns of rhythmite deposition on mudflats in the macrotidal Cobequid-Salmon River Estuary, Bay of Fundy, Canada, in Smith, D.G., Reinson, G.E., Zaitlin, B.A., and Rahmani, R.A., eds., *Clastic Tidal Sedimentology*: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 16, 137-160.
- De Mowbray, T., 1983, The genesis of lateral accretion deposits in recent intertidal mudflat channels, Solway Firth, Scotland: *Sedimentology* 30, 425-435.
- Eberth, D.A., 1996, Origin and significance of mud-filled incised valleys (Upper Cretaceous) in southern Alberta, Canada: *Sedimentology* 43, 459-477.
- Falcon-Lang, L.H., 1998, The impact of wildfire on an Early Carboniferous coastal environment, North Mayo, Ireland: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 139, 121-138.
- Gingras, M.K., Ranger, M.J., and Caplan, M., 2003, The incised valley fill of the McMurray Formation, northeastern Alberta, comprises estuarine and deltaic deposits. Abstracts in AAPG Annual Meeting (Salt Lake City, Utah, USA). A62-63.
- Gingras, M.K., Pemberton, S.G., Saunders, T.D.A., and Clifton, H.E., 1999, The ichnology of modern and Pleistocene brackish-water deposits at Willapa Bay, Washington: Variability in estuarine setting: *Palaos* 14, 352-374.
- Gingras, M.K., Räsänen, M., and Ranzi, M., 2002, The significance of bioturbated inclined heterolithic stratification in the southern part of the Miocene Solimoes Formation, Rio Acre, Amazonia Brazil: *Palaos* 17, 591-601.
- Jackson, R.G., 1981, Sedimentology of muddy fine-grained channel deposits in meandering streams of the American middle west: *Journal of Sedimentary Petrology* 51, 1169-1192.
- Jackson, M.D., Yoshida, S., Mugeridge, A.H., and Johnson, H.D., 2005, Three-dimensional reservoir characterization and flow simulation of heterolithic tidal sandstones. *American Association Petroleum Geologists* 89, 507-528.
- KIER (Korea Institute of Energy and Resources), 1987, Marine Investigation report for the development of coastal islands, 42 p.
- KHO (Korea Hydrographic Office), 2000, Tidal tables, v.1: Publication no. 1201-1, 250p.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2001, Annual Climatological Report (year 2000): Publication no. 11-1360000-000016-10, 284p.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2003, Annual Climatological Report (year 2002): Publication no. 11-1360000-000016-10, 254p.
- Kvale, E.P., Archer, A.W., and Johnson, H.R., 1989, Daily, monthly and yearly tidal cycles within laminated siltstones of the Mansfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana. *Geology* 17, 365-368.
- Kvale, E.P. and Vondra, C.F., 1993, Effects of relative sea-level changes and local tectonics on a lower Cretaceous fluvial to transitional marine sequence, Bighorn Basin, Wyoming, USA., in Marzo, M., and Puigdefabregas, C., eds., *Alluvial Sedimentation: International Association of Sedimentologists, Special Publication* 17, 383-399.
- Kvale, E.P., Fraser, G.S., Archer, A.W., Zawistoski, A., Kemp, N., and McGough, P., 1994, Evidence of seasonal precipitation in Pennsylvanian sediments of the Illinois Basin. *Geology* 22, 331-334.
- Makaske, B. and Nap, R.L., 1995, A transition from a braided to a meandering channel facies, showing inclined heterolithic stratification (late Weichselian, central Netherlands): *Geologie en Mijnbouw* 74, 13-20.
- Martinius, A.W., Kaas, I., Næss, A., Helgesen, G., Kjærefjord, J.M., and Leith, D.A., 2001, Sedimentology of the heterolithic and tide-dominated Tilje Formation (Early Jurassic, Halten Terrace, offshore mid-Norway), in Martinsen O.J., and Dreyer T., eds., *Sedimentary Environments Offshore Norway/Paleozoic to Recent: Norwegian Petroleum Society, Special Publication* 10, Amsterdam, Elsevier, 103-144.
- MCT (Ministry of Construction and Transportation), 2001, Hydrological Annual Report in Korea (year 2000): Publication no. 11-1500000-0005800-10, 452p.
- Meyer, R.F., 1995, Bitumen. In *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*, 4 volume set, New York. John Wiley and Sons, 433-454.
- Mossop, G.D. and Flach, P.D., 1983, Deep channel sedimentation in the Lower Cretaceous McMurray Formation, Athabasca Oil Sands, Alberta: *Sedimentology* 30, 493-509.
- Page, K.J., Nanson, G.C., and Frazier, P.S., 2003, Floodplain formation and sediment stratigraphy resulting from oblique accretion on the Murrumbidgee River, Australia: *Journal of Sedimentary Research* 73, 5-14.
- Plint, A.G. and Wadsworth, J.A., 2003, Sedimentology and palaeogeomorphology of four largevalley systems incising delta plains, western Canada Foreland Basin: implications for mid-Cretaceous sea-level changes: *Sedimentology* 50, 1147-1186.
- Pugh, D.T., 1987, *Tides, Surges and Mean Sea-level*. John Wiley and



- Sons, New York, 472p.
- Rahmani, R.A., 1988, Estuarine tidal channel and nearshore sedimentation of a late Cretaceous epicontinental sea, Drumheller, Alberta, Canada, *in* de Boer, P.L., van Gelder, A., and Nio, S.D., eds., *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*: Dordrecht, Holland, Reidel Publishing Company, 433-471.
- Reineck, H.E., 1958, Longitudinale Schrägschichten im Watt: *Geologische Rundschau* 47, 73-82.
- Shanley, K.W., McCabe, P.J., and Hettinger, R.D., 1992, Tidal influence in Cretaceous fluvial strata from Utah, USA: A key to sequence stratigraphic interpretation: *Sedimentology* 39, 905-930.
- Shanmugam, G., Poffenberger, M., and Alava, J.T., 2000, Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo ('T' and 'U') formations (Cretaceous), Sacha field, Oriente basin, Ecuador: *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 84, 652-682.
- Smith, D.G., 1987, Meandering river point bar lithofacies models: modern and ancient examples compared, *in* Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M.D., eds., *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*: SEPM, Special Publication 39, 83-91.
- Smith, D.G., 1988, Modern point bar deposits analogous to the Athabasca Oil Sands, Alberta, Canada, *in* de Boer, P.L., van Gelder, A., and Nio, S.D., eds., *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*: Dordrecht, Holland, Reidel Publishing Company, 417-432.
- Stanley, K.O. and Surdam, R.C., 1978, Sedimentation on the front of Eocene Gilbert-type deltas, Washakie Basin, Wyoming: *Journal of Sedimentary Petrology* 48, 557-573.
- Tessier, B., 1993, Upper intertidal rhythmites in the Mont-Saint-Michel Bay (NW France): perspectives for paleoreconstruction. *Marine Geology* 110, 355-367.
- Thomas, R.G., Smith, D.G., Wood, J.M., Visser, J., Calverley-Range, E.A., and Koster, E.H., 1987, Inclined heterolithic stratification terminology, description, interpretation and significance: *Sedimentary Geology* 53, 123-179.
- Wightman, D.M., 2003, Oil Sands. *In*: G. Middleton ed., *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 499-502.
- Wightman, D.M. and Pemberton, S.G., 1997, The lower Cretaceous (Aptian) McMurray Formation: an overview of the Fort McMurray area, northeastern Alberta. *In* Pemberton, S.G., and James, D.P., (eds.), *Petroleum Geology of the Cretaceous Mannville Group, Western Canada*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 18, 312-344.
- Zaitlin, B.A., 1987, *Sedimentology of the Cobequid Bay-Salmon River Estuary, Bay of Fundy, Canada* (unpublished Ph.D. thesis). Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 391p.

---

(2005. 6. 10 원고 접수)

(2005. 6. 27 수정본 채택)