



캐나다 앨버타주 몬트니층의 퇴적상과 퇴적환경: 가스함유 세일층의 파쇄효율 향상을 위한 퇴적학적 특성화

윤석훈[†] · 조영진

제주대학교 지구해양과학과

요 약

캐나다 앨버타주에 분포하는 몬트니층은 중생대 트라이아스기 초기에 형성된 가스함유 세일층으로서, 이 연구에서는 세일가스층 개발 시 파쇄특성을 결정하는 근원암저류층의 퇴적학적 다양성을 이해하기 위하여 Kakwa 시추공 코어(총연장 약 200 m)에서 퇴적상 분석을 통해 퇴적작용과 형성환경을 해석하였다. 연구지역의 몬트니층은 전 구간에 걸쳐 60% 내외의 석영과 장석을 함유하는 실트암과 실트질 이암으로 이루어져 있으며, 암석코어의 조직과 퇴적구조에 따라 균질상(HM), 평행엽층리상(PL), 사엽층리상(XL), 희미한 엽층리상(IL), 생교란상(BT), 변형상(DF) 등 6개의 퇴적상이 구분된다. 몬트니층의 전반적인 퇴적상의 구성은 상부와 하부 구간에서 대조적으로 나타나는데, 하부 몬트니층에서는 점토광물과 유기물의 함량이 상부 몬트니층에 비해 다소 높게 나타나며, 안정적이고 지속적인 저에너지 환경을 지시하는 퇴적상이 우세하다. 반면에 상부 몬트니층의 퇴적상은 고에너지 수축운동(파도, 폭풍)에 의한 퇴적, 침식, 변형 구조, 그리고 퇴적 후의 생물교란에 의한 구조 등을 특징으로 하고 있다. 따라서 몬트니층이 형성되는 동안, 퇴적환경은 상대적 해수면의 하강으로 인해 폭풍과 기저면 하부의 의해 혹은 심해에서 파도와 폭풍의 영향이 우세한 폭풍파 기저면 상부의 대륙붕 연안 환경으로 점차 변화된 것으로 해석된다.

주요어: 퇴적상 분석, 퇴적작용, 니질우세 대륙붕, 폭풍퇴적층, 몬트니층

Seok Hoon Yoon and Young Jin Joe, 2019, Sedimentary facies and depositional environments of the Montney formation in Alberta, Canada: Sedimentological characterization for a shale gas formation. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 3, p. 277-289

ABSTRACT: The Montney Formation in the western Alberta, Canada, is a gas-bearing sedimentary deposit of the early Triassic in age. For the understanding of the sedimentological diversity of source rock reservoirs as a major controlling factor of fracturing efficiency during the shale gas development, this study focuses on sedimentary processes and depositional environments of the Montney Formation (MF) based on sedimentary facies analysis of rock cores (about 200 m in total length) from the Kakwa well. The main lithology of the formation includes siltstones and silty mudstones consisting dominantly of silicate minerals (quartz and felspar) averaging approximately 60% (by weight). Six sedimentary facies were identified on the basis of centimeter-scale description of sedimentary structures and texture in borehole cores: homogeneous mudstone (HM), parallel-laminated mudstone (PL), cross-laminated mudstone (XL), indistinctly laminated mudstone (IL), bioturbated mudstone (BT) and deformed mudstone (DF). The overall occurrence of sedimentary facies shows a distinct contrast between the upper and lower parts of the formation. In the lower MF, contents of clay minerals and organic matters are relatively high, and sedimentary facies are suggestive of persistent hemipelagic sedimentation under the stable and low energy environments. The upper MF, on the other hand, consists of diverse sedimentary facies formed by wave- or storm-induced sedimentation, erosion and deformation as well as bioturbation in high energy environments. During the deposition of the MF, the depositional site has experienced an relative sea-level fall changing from offshore or deeper seafloor below the storm wave base to nearshore in a wave- and storm-dominated continental shelf.

Key words: sedimentary facies analysis, sedimentary process, mud-dominated continental shelf, storm deposit, Montney formation

(Seok Hoon Yoon and Young Jin Joe, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea)

[†] Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

1. 서 언

세일가스는 유기물이 풍부한 세일층에 축적되어 있는 천연가스로서, 성공적인 세일가스층의 개발을 위해서는 대상지역 지층의 층서, 퇴적환경 및 지질 구조의 특성과 분포에 대한 정보를 바탕으로 종합모델을 구축하고 이를 3차원적으로 가시화함으로써 세일가스층의 탐사(sweet spot 도출)와 개발(시추공설계 및 파쇄효율 증진) 과정에서 지질학적 정보의 활용도를 높이는 것이 중요하다(Slatt *et al.*, 2012). 특히, 가스층의 근원암 저류층(source rock reservoir)을 형성하는 주요 암석인 세일(혹은 이암)은 지구표면에 분포하는 퇴적암의 약 75%를 차지할 정도로 다양한 퇴적환경(하천, 호수, 연안, 대륙붕, 심해저 등)에서 형성되기 때문에 광물구성, 공극률, 유기물함량, 입자배열, 층리간격, 지층연장성 등에 따른 수직 및 수평 이방성에 있어서 매우 폭넓은 변화특성을 보인다(Potter *et al.*, 2010). 이러한 세일의 다양성은 생산성과 직결된 수압파쇄 특성을 결정함으로써 세일가스층 탐사와 개발에 중요한 변수로 작용한다. 세

일가스 개발을 위한 3차원 모델링의 첫 단계는 대상지층의 퇴적학적 특성화(sedimentological characterization)이다. 이 과정에서는 암석 코어나 박편을 이용한 암상의 육안기재와 물리검증자료에 대한 분석이 수행되며, 이를 통해 대상 지층의 암상과 층서 특성을 파악함과 동시에 퇴적메커니즘과 형성환경에 대한 정보를 취득함으로써 탄성파자료와 결합하여 광역적 암상분포 모델을 구축할 수 있다(Slatt *et al.*, 2012).

캐나다 서부 앨버타주 중서부에 위치한 Kakwa 광구(그림 1)는 산업통상자원부의 에너지기술개발연구(2013-2017년)를 통해 국내 연구진 자력으로 탐사와 시추설계가 수행되어, 2019년 현재 생산이 이루어지고 있는 한국석유공사의 세일가스전이다. 현재 탐사와 개발이 가장 활발하게 이루어지고 있는 북미지역의 가스함유 세일층은 대부분 해수의 유동과 순환이 제한된 심해환경에서 형성된 것으로 알려져 있다(Loucks and Ruppel, 2007; Yoon *et al.*, 2018). 그러나 Kakwa광구의 근원암 저류층인 몬트니층(Montney Formation)은 세일이 혼재된 치밀저류층(tight res-

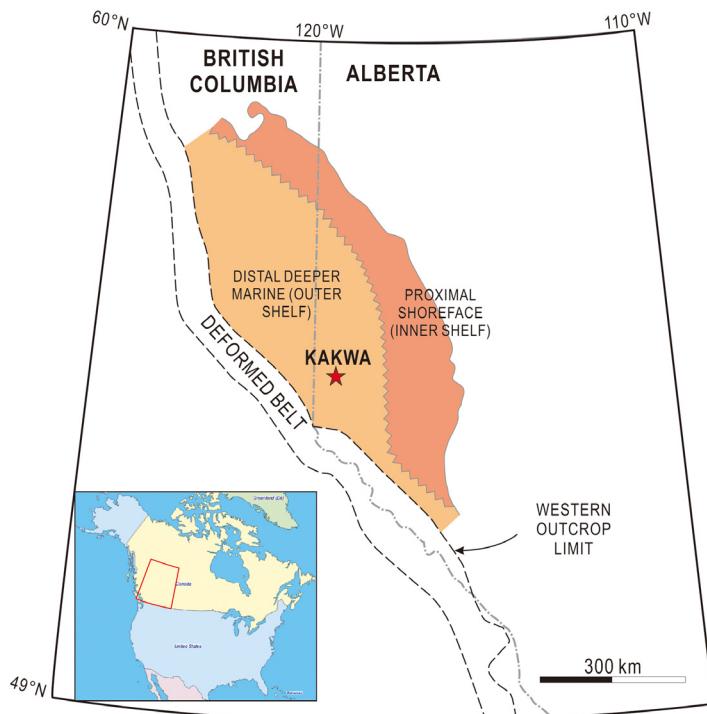


Fig. 1. Location of the Kakwa well (core site) and distribution of the Triassic Montney Formation with overall depositional setting. Modified from Edwards *et al.* (1994).

ervoir)으로서 북미지역의 전형적인 가스함유 세일층에 비해 실트함량이 더 높고 다양한 퇴적구조를 포함하는 암상 특성을 보인다. 이 연구에서는 몬트니총의 퇴적학적 특성화의 일환으로서 시추공 코어 자료에 기초하여 퇴적상 분석을 수행하였다. 연구의 주요 목적은 센터미터 스케일로 시추코어 암상을 기재하여 퇴적상을 분류함으로써 몬트니총의 퇴적작용과 퇴적환경을 밝히는데 있다. 이를 통해 다양한 세일 퇴적환경에 대한 이해의 폭을 넓히고 세일가스의 형성과 보존에 유리한 환경 조건에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 지질 개요

캐나다의 몬트니총은 지금으로부터 약 2억 3,200만 ~2억 4,500만년 전인 중생대 트라이아스기(Triassic) 기 초기에 북미지괴(North American craton)의 서부 가장자리에 발달한 앨버타분지(Alberta Basin)의 북서부에 집적된 해성퇴적층의 일원이다(Edwards *et al.*, 1994). 몬트니총의 분포지역은 브리티시컬럼비아(British Columbia)주 북동부에서부터 앨버타(Alberta) 주 서부지역까지 약 140,000 km²에 걸쳐 북서-남동으로 나타난다(그림 1). 층의 상부경계는 지표면 기준 실수직거리(true vertical depth)로 2,800-3,500 m 깊이에 위치하며 남서쪽으로 경사져 있다(Kuppe *et al.*, 2012). 평균두께는 약 200 m이며 동부에서 서부로 가면서 최대 350 m 이상까지 두꺼워진다. 층서적으로 몬트니총은 고생대 폐름기의 벨로이(Belloy)층을 부정합적으로 피복하며, 상부에서는 트라이아스기에서 백악기(서쪽에서 동쪽으로 가면서 연대가 젊어짐)에 집적된 도이그(Doig)층에 의해 부정합적으로 피복되어 있다. 몬트니총에서 산출되는 화석은 매우 드물며 연대도 불분명하지만, 일반적으로 폐름기 최후기에서부터 전기 트라이아스기(Olenekian)까지의 연대를 갖는 것으로 알려져 있다(Golding *et al.*, 2014). 몬트니총의 퇴적환경은 일반적으로 북서-남동 방향의 분지 중심축을 경계로 하여 2개의 퇴적시스템, 즉 동쪽의 내해 연안환경(proximal shoreface or inner shelf)과 서쪽의 외해 환경(distal deeper marine or outer shelf)으로 구분된다(Kuppe *et al.*, 2012)(그림 1). 기존의 연구에 따르면, 내해 연안환경에서 집적된 퇴적층은 연안면 사암(shoreface sandstones), 백운

암질 패각암(coquinas), 하부 연안면 실트암(lower shoreface siltstones)으로 구성되며, 분지 남서부에 분포하는 외해 퇴적층에서는 폭풍우세(storm-dominated) 실트암이나 저탁류 실트암 혹은 사암이 교호하는 것으로 알려져 있다(Moslow and Davies, 1997; Kendall, 1999; Zonneveld *et al.*, 2010).

3. 연구 자료 및 방법

이 연구의 주요 분석대상은 2014년 한국석유공사(Harvest사)가 캐나다 앨버타주 중서부에서 취득한 Kakwa 시추공(그림 1)의 코어시료로서 시추구간 3166 ~3371.6 m의 몬트니총에 대해 퇴적상 분석을 실시하였다. 코어시료의 분석은 암상, 조직, 퇴적구조, 층리면(bedding plane)특성, 색상 등에 대해 육안 관찰과 1:20 주상도 작성을 통해 이루어졌다. 몬트니총 시추코어에 대한 미세조직, 광물, 유기물 분석은 캐나다 현지 연구기관(CoreLab Canada Ltd)을 통해 수행되었으며, 이 연구에서는 분석 결과보고서를 활용하였다.

4. 암상

기존 연구에 의해 제시된 몬트니총의 층서 특성을 기준으로 보면, Kakwa 시추공에 나타나는 몬트니총은 시추심도 3161.8~3361.7 m 범위에 200 m 두께로 나타난다. 그리고 암상변화에 따라 심도 3268.8 m를 경계로 하여 상부 몬트니총과 하부 몬트니총으로 구분된다.

4.1 하부 몬트니총

하부 몬트니총은 주로 분급이 양호한(moderately well sorted) 조립 혹은 중립 실트 입자로 구성되며, 각형에서 아원형의 원마도를 보인다. X선 회절분석(XRD) 결과, 석영의 함량은 28~52%(평균 45%, 이하 무게비)이며 장석류(feldspar)는 6~15%(평균 12%)의 함량을 보이는데 대부분 쇄설성 실트 입자로 나타난다. 백운석(dolomite)의 함량은 8~42%(평균 15%)이며 교결물, 교결물질 및 니질 기질을 형성하고 있다. 황철석(pyrite), 능철석(siderite), 백철석(marcasite)은 합쳐서 3~9%(평균 5%)의 함량을 보이는데, 공극을 채운 교결물질이나 기질 대체

광물(matrix-replacing)로 나타난다. 이외에도 일라이트(illite), 운모, 스메타이트(smectite), 고령토(kaolinite), 녹나석(chlorite)과 같은 층상 규산염광물(phyllosilicate)이 기질물질로 나타나는데 함량은 11~44%(평균 26%)를 보인다. 이와 같은 광물조성을 기준으로 하부 몬트니층은 대부분 점토질 백운석 실트암(argillaceous dolomitic siltstone)으로 분류되며, 부분적으로 점토질 실트암이나 실트질 이암(silty mudstone)이 나타나기도 한다. 총유기물함량(TOC)은 0.18~1.32%(평균 0.68%) 범위를 보인다.

4.2 상부 몬트니층

상부 몬트니층의 전반적인 조직특성은 하부 몬트니층과 유사하지만(분급양호, 조립 내지 중립 실트 입자 구성), 원마도는 각형 내지 아각형으로 다소 불량하게 나타난다. 광물조성에서 석영의 함량은 21~62%(평균 49%)이며 장석류는 9~19%(평균 14%)의 함량을 보이는데 하부 몬트니층에 비해 다소 높게 나타난다. 이들은 대부분 쇄설성 실트 입자로 나타나며, 부분적으로 조립질 시료에서 석영 과성장(quartz overgrowth)이 관찰되기도 한다. 한편, 층상 규산염광물의 조성은 하부 몬트니층에 비해 크게 다르지 않으나 함량이 평균 15%(4~50% 범위)로 다소 낮게 나타난다. 백운석(dolomite)의 함량은 8~33%(평균 19%)이며 교결물, 교결물질 및 니질 기질을 이루고 있다. 황철석(pyrite), 능철석(siderite), 백철석(marcasite)의 총함량은 2~11%(평균 3%)인데, 주로 공극을 채운 교결물질이나 기질 대체 광물로 나타난다. 이외에도 무수석고가 교결물질로 나타나는데 함량은 1~8%(평균 4%)의 범위를 보인다. 이와 같은 광물조성을 기준으로 상부 몬트니층을 구성하는 세일은 약점토질 백운석 실트암(slightly argillaceous dolomitic siltstone)으로 분류되며, 점토질 실트암이나 실트질 이암이 국지적으로 분포한다. TOC는 하부 몬트니층에 비해 다소 낮은 0.06~1.28%(평균 0.26%) 범위를 보인다.

5. 퇴적상

퇴적상(sedimentary facies)은 퇴적층을 구성하고 있는 퇴적물의 운반기구(mechanism)와 형성환경에 대한 정보를 제공하는 기본적인 특징이다(Stow,

2005; Dalrymple, 2010). 퇴적층의 노두나 시추코어의 경우 퇴적상 분석에 가장 널리 채택되는 기본요소는 1차 퇴적구조와 입자의 조직 특성이다. 이러한 특성들은 퇴적물이 집적될 당시의 주변 자연조건을 반영하기 때문에 고기의 퇴적환경을 해석하기 위한 기본 도구로서 주요 분석의 대상이 되고 있다(Boggs Jr, 2006). 몬트니층의 세일은 광물학적으로 석영과 장석 함량이 60% 내외인 규산쇄설암(siliciclastics)으로 분류되며, 조직적으로는 실트의 함량이 우세한 실트암 혹은 부분적으로 유사한 함량의 실트와 점토로 구성된 이암이 우세하게 나타난다. 퇴적구조로는 다양한 엽충리(평행엽충리, 사엽충리 및 희미한 엽충리)와 층리의 발달이 없는 무구조 등 1차 퇴적구조와 함께, 퇴적 후 구조로서 생물교란 및 가소성 변형구조가 관찰된다. 이와 같은 조직특성과 퇴적구조를 기초로 하여 이 연구에서는 6개의 퇴적상을 구분하였다(표 1; 그림 2). 다만, 입도에 대한 정보가 불충분하여 암석명은 이암으로 통일하여 적용하였다.

5.1 균질 이암(HM: homogeneous mudstone)

5.1.1 특징

이 퇴적상은 대체로 층리나 연흔 등의 퇴적구조가 인지되지 않고 색상의 변화가 거의 없는 전체적으로 균질한 특성을 보인다(그림 2a). 하지만 때로 매우 희미한 엽충리나 점이충리 혹은 점이적인 수직적 색상변화가 관찰되기도 한다. 암석의 색상은 규질 입자가 풍부한 경우 담회색을 띠며, 상대적으로 적은 경우에는 암회색 혹은 암갈색으로 나타난다. 개별 퇴적상 단위의 두께는 수 cm 이하에서 30 cm 이상까지 변화폭이 크게 나타나는데, 암회색의 균질 이암은 대체로 5 cm 이하로 얕게 나타나며 수직적으로는 점이적 조직 혹은 색상 변화를 보이는 경우도 있다. 층단위의 상부와 하부 경계는 비교적 뚜렷하게 나타나는데, 때로 하부에 엽충리 퇴적상이 놓이는 경우에는 그 경계면이 명확하지 않고 점이적으로 나타난다. 생물교란은 전반적으로 우세하게 나타나는 편은 아니지만, 상부 몬트니층의 상부 구간에 나타나는 균질 실트암의 일부에서 부분적으로 심한 생물교란이나 다양한 규모와 형태의 서식구조(burrow)가 인지되기도 한다. 균질 실트암과 이암은 상부 몬트니층에 골고루 분산되어 나타나며, 하부 몬트니층에서는 하부 구간에 제한적으로 관찰된

Table 1. Summary of sedimentary facies from the Montney Formation.

| Sedimentary facies | Characteristics | Sedimentary processes | Depositional environments |
|--------------------------------------|---|--|---|
| Homogeneous mudstone (HM) | Absence of primary structures including bioturbation, but sometimes faintly laminated or graded; boundaries transitional | Rapid settling from buoyant riverine plumes or storm-generated sediment gravity flows | Offshore |
| Parallel-laminated mudstone (PL) | Frequent intercalation of thin laminae; thickness or vertical spacing of individual lamina 0.5~a few mm; lamination dominantly planar and parallel, but partly hummocky cross-laminated (HL); sometimes having a distinct base and a diffuse top; light-colored laminae dominantly composed of siliceous silt particles | Combined flows induced by storms | Nearshore to offshore above storm wave base |
| Cross-laminated mudstone (XL) | Interbedding of silt-rich and clay-rich layers showing a complex of various wave ripple cross-lamination with interwoven or bundled appearance; reactivation surfaces common and distinct; lower bounding surfaces of bedding set arcuate and irregular; variable arrangements of internal foreset lamination; no systematic change among individual lamination types | Oscillatory flows by fair-weather waves | Nearshore above fair-weather wave base |
| Indistinctly laminated mudstone (IL) | Lamination identified by a non-systematic repetition of thin streaks of light-colored siliceous silt laminae; lamination dominantly planar and parallel, but locally curved (wavy) and pinching out; boundaries of individual deposition unit mostly indistinct and gradational | Persistent hemipelagic settling and occasional inrush of waning sediment gravity flows | Offshore or deeper marine setting below storm wave base |
| Bioturbated mudstone (BT) | Intensely disturbed by bioturbation; primary sedimentary structures absent except for diffuse banding; facies thickness variable; boundaries poorly defined and irregular | Mixing or stirring of sediments by benthic organisms during burrowing and grazing | Oxic nearshore to offshore |
| Deformed mudstone (DF) | Irregularly disrupted or convoluted (contorted) bedding with complicated or overturned folds and small-scale faults; original beddings remarkably continuous in spite of intensive deformation; sometimes deformation restricted to the uppermost part of a deposition unit | Penecontemporaneous plastic deformation resulting from the pressure of storm waves | Nearshore to offshore above storm wave base |

다(그림 3).

5.1.2 해석

균질 퇴적상은 명확히 구분되는 퇴적구조가 거의 없이 구성입자가 분급이 되지 않은 채로 고르게 분산되어 있는 조직적 특성을 보인다. 이러한 퇴적상은 전통적으로 세립질 저탁류의 최후기 단계의 생성물로서, 저탁류의 속도가 감소하면서 수층에 고농도로 부유되어 있던 세립입자들이 빠르게 가라앉아 형성된 것으로 해석되고 있다(Piper, 1978; Stow and Shanmugam, 1980; Chough *et al.*, 1984). 이 때 수층의 화학 및 생물학적 조건에 따라 세립입자의 응집(flocculation) 현상이 일어나게 되면 입도에 따른 분급이 충분히 이루어지지 않아서 엽층리나 점이층리와 같은 퇴적구조의 발달이 미약하게 된다. 이와 같은 고농도 수층으로부터의 퇴적은 저탁류 외에도 흥수기에 하구로부터 유입되는 탁류나 폭풍파에 의

해 야기된 과밀도류(hyperpicnal flow)에서도 유사하게 일어날 수 있으며(그림 4), 이때 비교적 두꺼운 균질 니질층이 형성될 수 있다(Plint, 2010).

한편, 균질 퇴적상은 강한 생물교란 활동의 결과로 퇴적물이 심하게 혼합되고 층리와 같은 원래의 1차 퇴적구조가 완전히 파괴된 경우에도 나타날 수 있다(Reineck and Singh, 1980). 중대형 생물에 의한 교란구조는 일반적으로 다양한 형태의 서식구조(burrow)로써 퇴적층 내에서 인지가 가능하지만 퇴적물 내 공극에 서식하는 미생물이나 소형 저서생물의 경우에는 교란흔적의 크기가 작아서 개별 서식구조가 육안으로 쉽게 구분되지 않기 때문이다. 몬트 니층은 중생대 초기 트라이아스기에 형성된 퇴적층으로서 2억년 내외의 오랜 기간 동안 퇴적층이 압밀되고 교결되는 속성작용이 진행되는 과정에서 원래의 생물교란구조가 희미하게 되었을 가능성도 배제하지 못한다.

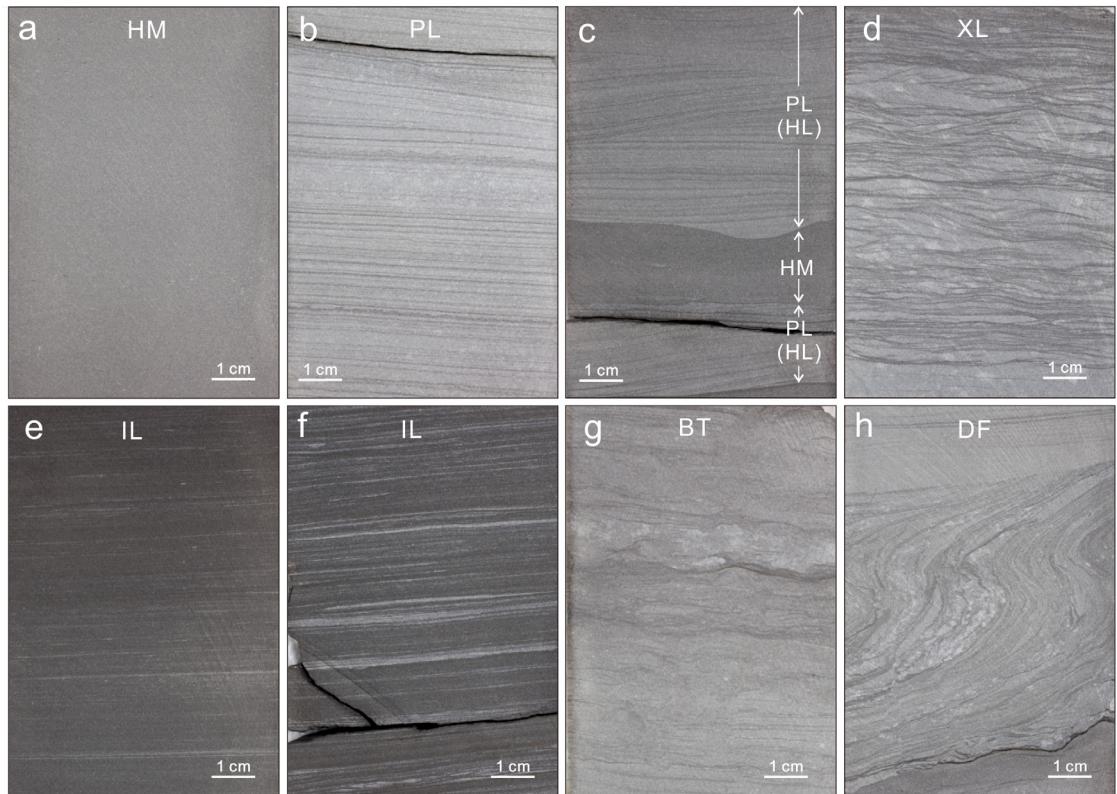


Fig. 2. Photos of sedimentary facies. For location of photos, see Figure 3. HM: homogeneous mudstone, PL: parallel-laminated mudstone, HL: hummocky laminated mudstone, XL: cross-laminated mudstone, IL: indistinctly laminated mudstone, BT: bioturbated mudstone, DF: deformed mudstone.

5.2 평행 엽층리 이암(PL: parallel laminated mudstone)

5.2.1 특징

평행 엽층리 퇴적상은 담회색 혹은 암회색을 띠는 두께 1 mm 이하의 평탄한 엽층(lamina)들이 반복적으로 집적되어 나타나는 특징을 보인다(그림 2b). 그러나 일부에서는 약한 파형을 보이거나 엽층의 두께가 변하면서 완만한 경사를 갖는 언덕 사엽층리(hummocky lamination) 구조가 관찰되기도 한다(그림 2c). 엽층리는 규질 입자가 우세한 담회색 켜와 유기물이나 점토가 우세한 암회색의 켜가 교호하여 집적되면서 형성되었는데, 개별 엽층은 측면상으로 연장성이 양호하고 두께 변화도 작지만 수직적으로는 층리 간격이나 명확도에서 일관성이거나 체계적인 변화패턴이 인지되지는 않는다. 생물교란은 대체로 거의 없거나 매우 미약하게 나타난다. 퇴적상의 상하부 경계는 대부분 뚜렷하며, 일부에서는 하

부 충단위를 삐박한 침식면으로 나타나기도 한다(그림 2c). 그러나 균질 혹은 연흔 사엽층리 퇴적상과 접하고 있는 경우에는 때로 점이적인 경계면을 보이기도 한다. 이 퇴적상은 상부 몬트니층 상부 및 중부 구간에 우세하게 나타난다(그림 3).

5.2.2 해석

몬트니층의 엽층리 퇴적상에서는 침식면이 우세하게 나타나며, 평탄층리, 파형층리 혹은 언덕사층리(hummocky cross-bedding)의 형태로 발달하는데, 이는 높은 에너지 조건에서 밑침이나 고농도 뜯침을 통한 퇴적물 이동과정에서 형성된 것으로 판단된다. 이 경우에 다음과 같이 두 가지의 퇴적물 운반작용과 관련된 것으로 해석할 수 있다. 먼저 퇴적물을 부유시키고 해류를 야기하는 폭풍파에 기인한 세립질(조립 실트~세립 모래) 폭풍퇴적층에서 언덕

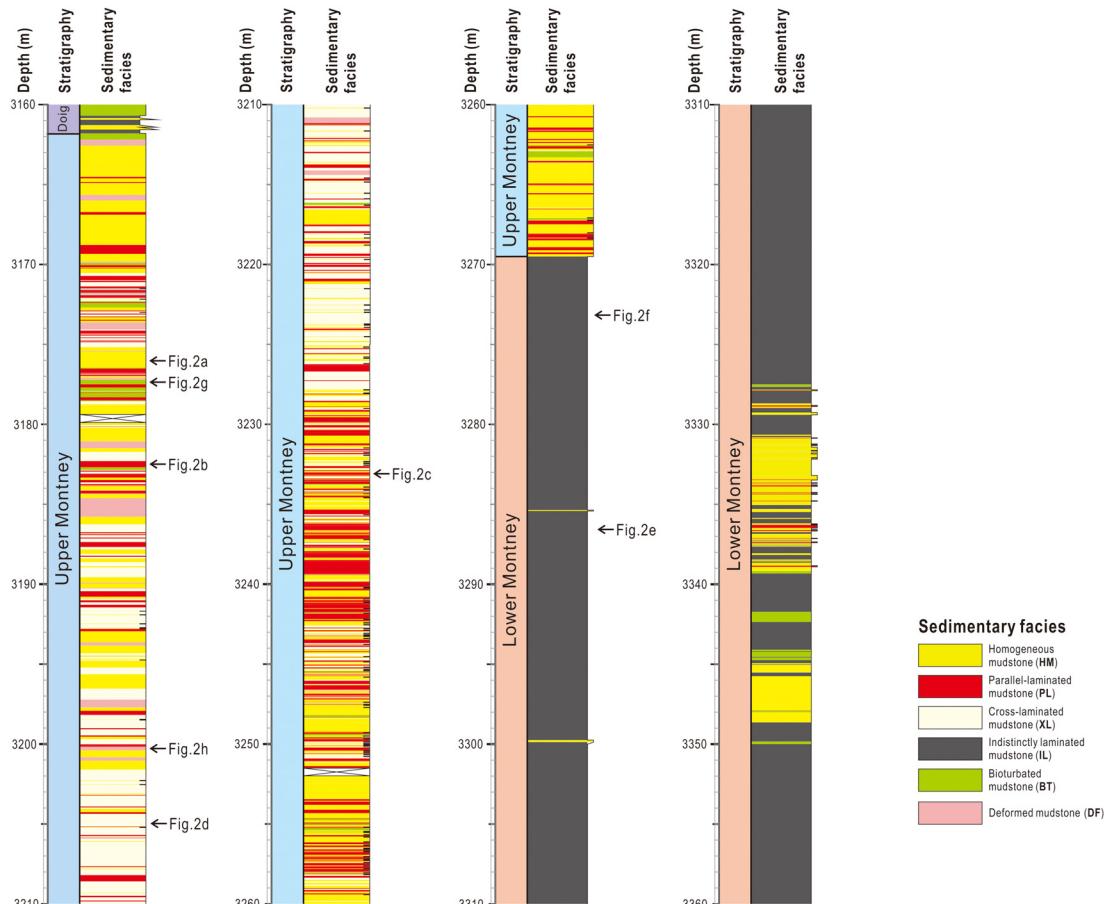


Fig. 3. Summarized borehole plots of stratigraphy and sedimentary facies.

사층리나 평행(엽)층리가 우세하게 관찰된다(Kumar and Sanders, 1976; Amos *et al.*, 1996). 폭풍이 연안 역을 통과하는 경우, 폭풍파에 의한 파동류(oscillatory flow)와 함께 해안지역의 수면상승(storm surge)으로 야기된 해저 지형류(geostrophic bottom current)가 복합적으로 작용하게 된다(Plint, 2010)(그림 4). 평행엽층리를 형성하는 평탄층은 일방향성 지형류보다 파동류가 월등히 강한 폭풍의 최절정기에 형성되며, 점차 약화되는 단계에서는 언덕사층리가 더 우세하게 형성되는 것으로 알려져 있다(Arnott and Southard, 1990; Cheel, 1991). 언덕사층리는 파장이 일반적으로 미터 규모로 나타나기 때문에 이 연구에서와 같이 코어 암편을 분석하는 경우에는 평행층리나 완경사의 준평행층리로 인지될 수도 있다.

한편, 폭풍파에 의해 많은 양의 세립질 퇴적물이 재동되어 부유되는 경우 고농도의 밀도류(density current)가 형성될 수 있는데, 이를 파도기원 퇴적 물중력류(WESGF: wave-enhanced sediment gravity flow)라 한다(Wright *et al.*, 2001; Friedrichs and Wright, 2004)(그림 4). 파도는 퇴적물을 부유시키는 에너지를 제공하고 해저의 경사와 퇴적물 농도에 의한 수층의 밀도차는 외해로의 이동을 야기하는 요인이 된다(Macquaker *et al.*, 2010; Lazar *et al.*, 2015). 퇴적물의 이동과정은 파도에 의한 난류

침식, 부유, 끌림이동(traction transport)으로 이루어지는 파도기원 밀도류의 발달과 감속하는 밀도류로부터의 부유침전 등으로 구분되는데, 끌림이동의 과정에서 평행층리가 형성될 수 있다(Lazar *et al.*, 2015). 한편, Baas *et al.* (2016)은 점착성(니질)과 무점착성(사질) 퇴적물이 혼재하는 난류성 흐름(turbulent flow)의 마지막 단계에서 급격한 감속이 일어날 경우, 난류와 정류가 공존하는 전이성 플러그류(transitional plug flow)가 발달하고 이 과정에서 평행엽층리가 형성될 수 있음을 수로실험을 통해 제시한 바 있다.

5.3 사업층리 이암(XL: cross-laminated mudstone)

5.3.1 특징

이 퇴적상은 기본적으로 주퇴적면(principal surface of sedimentation)에 경사져 발달하는 사업층리(cross-lamination)를 포함하는 다수의 소규모(두께 1~2 cm) 사층리층(cross-bed)으로 이루어져 있다(그림 2d). 내부 엽층리는 평행 엽층리 퇴적상에서 와 유사하게 규질 입자가 우세한 담회색 엽층과 이에 교호하는 유기물이나 점토가 우세한 암회색 엽층으로 구성되어 있다. 개별 사층리층의 경계면은 침식면이나 재활성면(reactivation surface)의 특징을 보이는 드물고 대부분 연흔형(ripple

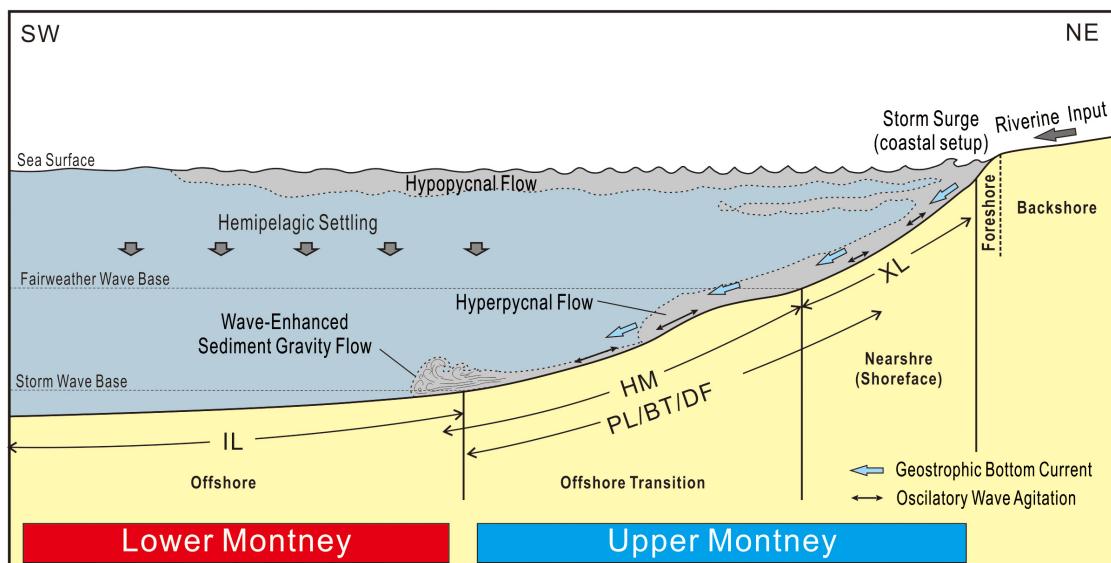


Fig. 4. Schematic diagram showing depositional environments and sedimentary processes of the Montney Formation.

form), 파형(wavy), 곡형(trough) 혹은 불규칙한 형태로 나타난다(그림 2d). 상하부 경계면에 의한 외형도 렌즈형이나 파동형, 불규칙한 판상형 등으로 매우 다양하게 변화한다. 또한 사층리층의 경계면 형태, 외형 및 내부 사엽층리 형태와 방향 등에 있어서도 인접한 사층리층들 간에 동일성이나 일정한 변화 패턴은 거의 보이지 않는다. 생물교란은 다른 퇴적상에 비해 심하게 나타나는데, 대체로 수평 서식구조에 의한 생물교란의 영향이 크다. 이 퇴적상은 상부 몬트니총에서 우세하게 관찰되며, 하부 몬트니총에서는 거의 나타나지 않는다(그림 3).

5.3.2 해석

몬트니총에서 사엽층리를 보이는 개별 층(bed)의 두께는 대부분 1~2 cm 정도로서, 이와 같이 얇은 두께의 사층리는 일반적으로 해류나 파도에 의해 형성되는 소규모 연흔이 측면으로 이동하는 과정에서 발달한다(Reineck and Singh, 1980). 특히, 몬트니총의 사엽층리 퇴적상은 침식 기원의 상경계면, 그리고 일정한 변화 패턴을 보이지 않는 다양한 사층리 형태(연흔형, 파형, 곡형 등)와 개별 층단위의 외형(렌즈형, 파동형, 불규칙 판상형 등)을 특징으로 하고 있는데, 이는 사엽층리 퇴적상을 형성한 연흔이나 충형(bedform)이 한 방향으로 흐르는 해류나 조류보다는 양방향의 파동류(oscillatory flow)를 일으키는 파도에 의해 형성되었음을 지시한다(Reineck and Singh, 1980). 즉, 기상상태에 따라 다양한 방향으로 접근하는 파도에 의해 복잡한 침식-퇴적 과정이 반복되면서 결과적으로 불규칙하고 다양한 형태의 사엽층리가 형성된 것으로 해석된다. 한편, 폭풍 시에도 파도가 해저퇴적물을 재동하여 사층리 구조가 만들어지기도 하지만, 평상시보다 파동류가 강화되고 지형류가 복합적으로 작용하게 되면서 연흔보다는 규모가 큰 사구사층리나 언덕사층리가 더 우세하게 나타난다(Dumas and Arnott, 2006). 따라서 몬트니총의 사엽층리 이암은 대부분 평상시 기상조건에서 발달하는 일반적인 파도의 영향을 받아 형성된 것으로 해석된다. 다른 퇴적상에 비해 심한 생물교란을 받은 구간이 빈번하게 나타나는 것도 상대적으로 약한 파력이 작용하며 퇴적물 집적률이 낮은 이러한 호기상(fair-weather) 조건을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

5.4 희미한 엽층리 이암(IL: indistinctly laminated mudstone)

5.4.1 특징

이 퇴적상에서는 이암 혹은 점토암의 조직특성을 보이며, 전반적으로 회색을 띠는 점토질 기질에 담회색의 석영질 엽층이나 실트입자가 열을 이루어 형성된 불연속적인 엽층이 발달한다(그림 2e). 개별 엽층은 두께는 일부 구간을 제외하고는 대부분 1 mm 이하인데 경계가 명확하지 않고 측면으로 가면서 얇아지면서 소멸하는 특징을 보인다. 하지만 국지적으로는 연속적인 엽층이 인지되기도 하는데, 이 경우에는 대체로 평탄하고 서로 평행하게 발달하며, 내부적으로는 점이층리나 완경사의 사층리를 보이기도 한다(그림 2f). 엽층리의 간격이나 명확도(clarity)의 수직적 변화 패턴은 일정한 경향이 없이 불규칙한 모습을 보인다. 아울러 개별 퇴적상의 상하부 경계면도 침식면으로 나타나는 경우가 거의 없이 대부분 점이적이며, 생물교란은 거의 인지되지 않는다. 이 퇴적상은 대부분 하부 몬트니총에서 우세하게 나타나는데(그림 3), 코어 깊이 3269.6-3291.5 m의 하부 몬트니총 상단부에서는 하부 구간에 비해 측면 연속성이 양호한 담회색의 규질 엽층의 출현빈도와 두께가 점차 증가하는 경향을 보인다(그림 2f).

5.4.2 해석

희미한 엽층리 퇴적상은 상대적으로 유기물이 풍부하고 실트 함량이 적은 이암층(하부 몬트니총)에서 우세하게 나타난다. 이는 전반적으로 충분한 조립 퇴적물의 공급이 이루어지지 않는 상대적으로 낮은 에너지의 안정된 퇴적환경에서 주로 부유물질이 침전되어 형성되었음을 지시한다(Yoon et al., 2018). 이 퇴적상을 보이는 층단위의 경계면이 점이적이며 침식면이 거의 나타나지 않는 점도 이와 같은 해석을 뒷받침한다. 그러나 희미한 엽층리 퇴적상에서는 회색을 띠는 점토질 기질에 담회색의 석영질 엽층이나 실트입자가 열을 이루어 형성된 엽층이 간헐적이고 불규칙하게 나타나는데, 이는 이벤트성의 일시적인 조립질 퇴적물 유입의 결과로 설명할 수 있다. 특히, 점이층리 혹은 사층리를 보이는 엽층들은 세립질 퇴적물 중력류의 영향을 지시하는 것으로서, 이 퇴적상이 형성되는 환경보다 천해에서 형성된 저탁류나 밀도류가 외해로 이동하여 마지막 단계에서 밀

침 혹은 뜬침의 실트질 퇴적물이 침전되면서 평상시 집적된 나질 퇴적층 사이에 얇은 엽층을 형성한 것으로 해석된다. 특히, 나질 퇴적물의 농도가 큰 저탁류에서는 난류의 강도가 약해지면서 전이성 플러그류(transitional plug flow)가 발달될 수 있는데, 이 과정에서 조립질 엽층이나 저각도 사층리 연흔, 렌즈 등이 나질 엽층과 교호하면서 나타날 수 있다 (Baas *et al.*, 2016).

5.5 생교란 이암(BT: bioturbated mudstone)

5.5.1 특징

이 퇴적상은 1 cm 이하의 소규모 혹은 미세한 생물활동 및 서식 구조에 의해 원래의 조직이나 구조가 교란되어 나타나는 특징을 보인다(그림 2g). 노출된 코어면의 50% 이상이 교란되어 있는 경우에 생물교란 퇴적상으로 분류하였는데, 부분적으로 보존되어 있는 원래의 퇴적구조로는 균질층리, 평행엽층리, 사엽층리 등이 주로 인지된다. 입도를 기준으로 할 경우 퇴적상의 대부분은 이암이나 점토암에 해당되며, 퇴적상의 경계는 대부분 생물활동에 의해 교란되어 나타난다. 상부 몬트니층의 최하부와 상단부, 그리고 하부 몬트니층의 하부 일부 구간(3339-3350 m)에 간헐적으로 나타난다(그림 3).

5.5.2 해석

생물교란은 해저 저서생물의 섭식활동이나 주거구조(burrow)에 의한 것이다. 생물교란의 정도는 해저와 수층의 조건에 영향을 받는데, 기본적으로 호기성의 화학적 조건과 비교적 약한 파도나 해류 조건, 퇴적률이 낮은 환경을 반영하는 것으로 해석된다(Potter *et al.*, 2010).

5.6 변형 이암(DF: deformed mudstone)

5.6.1 특징

이 퇴적상에서는 충경계면이나 내부 엽층리가 완전히 혹은 부분적으로 구겨져 접히거나 말리고 역전되는 등 퇴적 후에 일어난 가소성 변형을 특징으로 한다(그림 2h). 충단위의 상단부가 변형되어 있는 경우에는 상부로 가면서 균질 퇴적상으로 전이되기도 한다(그림 2h). 변형구간의 두께는 대부분 수 cm에서 10 cm 이상까지 다양한 규모를 보이며 충경계면은 일부를 제외하고는 대부분 뚜렷하게 나타난다.

이 퇴적상은 상부 몬트니층의 중부 구간에 우세하게 분포한다(그림 3).

5.6.2 해석

이 퇴적상에서 인지되는 변형구조들은 대부분 가소성 변형에 의한 것으로서, 퇴적 후 반고화 상태에서 물리적인 응력을 받아 재동되는 과정에서 형성된 것으로 해석된다. 기존 충단위의 상단부에 국한하여 부분적인 변형이 이루어진 것과 함께 상당한 두께의 지층이 완전히 분리, 변형된 경우도 있다. 후자의 경우에는 하부의 비변형 구간과 퇴적구조의 특성이 다르게 나타나는 것으로 보아 상당한 거리에 걸쳐 이동된 것으로 해석된다. 이러한 퇴적후 변형을 야기하는 요인으로는 일반적으로 퇴적률이 높은 급경사의 대륙사면에서 일어나는 해저사태(slump)나 해저포행(creep)을 들 수 있다. 하지만, 대륙붕과 같은 비교적 평탄한 해저에서도 강한 폭풍파와 해저류에 의해 충분히 고화되지 못한 표층 퇴적층이 교란되면서 재동되기도 한다(Plint, 2010).

6. 토의: 퇴적환경

몬트니층과 그 상부의 도이그층은 전기 및 중기 트라이아스기 동안 서부 캐나다 지역에 발달하였던 비활성 대륙주변부(pассив margin)에서 형성되었다(Edwards *et al.*, 1994). 이 지역은 당시 북반구 중위도에 위치하고 있었는데 기후는 건조하였고 계절적으로 무역풍과 주기적인 용승의 영향을 받았던 것으로 추정된다(Davies, 1997). 광역층서와 고지리 연구결과에 따르면, 몬트니층의 전반적인 퇴적환경은 지구조적으로 안정적인 비활성 대륙주변부의 대륙붕-대륙사면 혹은 완만하게 경사진 램프(ramp) 지형으로서, 북동쪽으로 해안과 연안역이 발달하였고, 남서쪽으로 가면서 점차 깊어지는 외해역을 이루고 있었던 것으로 알려져 있다(Kuppe *et al.*, 2012).

몬트니층의 암상은 분지 내 위치에 따라 사암에서 이암까지 다양하게 나타나는데(Moslow and Davies, 1997; Kendall, 1999; Zonneveld *et al.*, 2010), 이 연구의 몬트니층에서는 전 구간에 걸쳐 대부분 실트와 점토로 이루어진 세립질 퇴적물이 우세하게 나타난다. 일반적으로 해양환경에서 대부분의 나질 퇴적물은 파도나 해류의 영향이 상대적으로 약한 저에너지

해저에 분포하는 것으로 알려져 있다. 특히, 고에너지의 수력학적 조건에 평형을 이루고 있는 대륙붕 등 천해환경에서는 연안역에 사질 퇴적물이 분포하고 있으며, 니질 퇴적물은 수심이 상대적으로 깊은 해파기저면 하부의 중부 대륙붕과 그 외해역에 주로 분포하는 것이 전형적이다. 그러나 상부 몬트니총에서는 고에너지 수층운동(파도, 폭풍)에 의한 퇴적과 침식 구조(퇴적상 HM, PL, XL), 그리고 퇴적 직후의 활발한 생물교란 및 물리적 변형 구조(퇴적상 BT, DF) 등을 특징으로 하고 있다(그림 4).

최근 니질 퇴적물의 집적에 대한 실험연구와 대륙붕 니질 퇴적층에 대한 현장조사에서는 세립질 퇴적층들이 단순히 부유상태에서 서서히 침전되어 쌓이기만 하는 것이 아니라 퇴적, 침식(재동), 수평이동 등 상당히 역동적이고 복잡한 과정을 거치면서 예상보다도 얇은 고에너지 연안역에도 두껍게 분포하고 있음이 밝혀지고 있다(Plint, 2010). 이러한 고에너지 환경에서의 니질 퇴적물 집적은 주로 수층 내에 부유되어 운반되는 세립질 퇴적물의 농도에 크게 영향을 받는데 대륙붕으로 유입되는 하천을 통해 연안역으로 들어오는 고타도의 표층류(hypopycnal riverine plumes)가 주요 공급원이 되고 있다(Hill *et al.*, 2007). 고타도의 하천 유입수 내에 부유된 니질 퇴적물들은 해수와 만나면서 서로 응집(flocculation)되어 실질적인 입도가 증가하게 되는데, 하구로부터 멀어지면서 빠른 속도로 침전하여 기저흔탁층(turbid bottom nepheloid layer)을 형성하게 된다(Potter *et al.*, 2010). 이와 같은 고농도의 퇴적물 수류는 강한 조류나 높은 파도 조건에도 불구하고 연안 해저에 상당량의 니질 퇴적물이 집적될 수 있는 주요 요인이 되고 있다(Rine and Ginsburg, 1985).

한편, 연안역에 퇴적된 하천기원의 니질 퇴적물의 일부는 간헐적 혹은 계절적으로 발생하는 폭풍 시에 강한 파도와 외해로 흐르는 폭풍기원의 지형류(geostrophic current)에 의해 재동되어 언덕사층리나 평행영층리를 보이는 폭풍퇴적층을 형성하거나, 퇴적물중력류의 형태로 외해역으로 이동하여 균질 퇴적상을 특징으로 하는 퇴적층을 집적시킬 수 있다(Plint, 2010). 특히, 현생의 대륙붕에서의 관측에 따르면, 폭풍파는 세립질 모래나 니질 퇴적물을 부유 시켜 고농도의 파도기저경계층(wave boundary layer)을 형성하고 외해로의 흐름, 즉 파도기원 퇴적물

중력류(WESGF: wave-enhanced sediment gravity flow)을 일으킬 수 있는 주요 요인으로 제시되고 있다(Macquaker *et al.*, 2010). 또한 해저면 경사가 큰 연안역에서는 폭풍파에 의해 재동된 세립질 퇴적물들이 고농도의 저층수를 형성하면서 경사진 해저를 따라 외해로의 흐름을 야기하기도 한다(Plint, 2010).

하부 몬트니총에서는 상부 몬트니총에서와는 달리 파도에 의한 연흔이나 사층리 복합체는 거의 나타나지 않고, 대신 지속적인 저에너지의 퇴적을 지시하는 세립질 퇴적상(IL)이 층 전반에 걸쳐 우세하며 상대적으로 높은 점토와 유기물 함량을 보인다. 이는 하부 몬트니총이 상부 몬트니총의 형성환경에 비해 수심이 다소 깊은 폭풍파 기저면 하부의 외해 혹은 심해의 저에너지 조건에서 집적되었음을 지시한다(그림 4). 다만 희미한 엽층리 퇴적상에서는 평상시에 지속적으로 집적된 반원양성의 니질 퇴적구간 사이에 천해에서 발생한 WESGF가 유입되어 형성된 규질 엽층이 간헐적으로 나타난다(그림 4f). 그런데 하부 몬트니총의 상단부에서 이를 규질 엽층의 출현빈도와 두께는 상부로 가면서 점차 증가하는 경향이 확인된다. 이러한 특징은 단순히 WESGF의 발생빈도나 강도가 증가한 결과로 볼 수도 있지만 하부 몬트니총(총두께 91 m) 상단부 약 20 m 구간에 국한하여 나타나며 그 상부의 구간(상부 몬트니총)에서는 천해환경을 지시하는 퇴적상이 우세하게 나타나는 것을 고려한다면, 상대적 해수면의 점진적인 하강으로 인해 발생지가 점차 가까워진 결과로 해석하는 것이 더 타당하다. 한편, 하부 몬트니총에서는 상부 몬트니총과는 달리 생물교란이 일부 구간(3339-3350 m)에만 제한적으로 나타나는데, 퇴적층 내 유기물 함량이 상대적으로 높고 파도나 해류의 영향이 적은 안정적인 조건에서 형성되었음을 감안한다면 수층 내 산소의 결핍이 저서생물들의 서식을 방해하였던 주요 요인으로 해석된다.

7. 결 론

증생대 트라이아스기에 형성된 Kakwa 시추공의 몬트니총에서는 전 구간에 걸쳐 대부분 실트와 점토로 이루어진 세립질 퇴적물이 우세하게 나타난다. 그러나 전반적인 암상과 퇴적상의 세부구성은 상부

와 하부 몬트니층에서 서로 다른 양상을 보인다. 상부 몬트니층의 퇴적상은 고에너지 수층운동(파도, 폭풍)에 의한 퇴적(퇴적상 HM, PL, XL)과 침식/변형 구조(퇴적상 DF), 그리고 퇴적 후의 생물교란에 의한 구조(퇴적상 BT) 등을 특징으로 하고 있으며, 반면 점토광물과 유기물 함량이 상대적으로 높은 하부 몬트니층에서는 안정적이고 지속적인 저에너지 환경에서의 퇴적을 지시하는 퇴적상(IL)이 우세하게 나타난다. 이와 같은 퇴적상 해석결과는 상부 몬트니층이 전반적으로 파도가 우세하고 폭풍의 영향도 빈번한 대륙붕 연안 환경에서 형성되었으며, 하부 몬트니층은 이보다 수심이 깊은 폭풍파 기저면 하부의 외해 혹은 심해 환경에서 집적되었음을 지시한다. 따라서 하부 몬트니층이 형성되는 동안의 해수면은 상부 몬트니층 시기보다 상대적으로 높은 상태에 있었으며, 하부 몬트니층 형성 후기에 점진적으로 하강하였던 것으로 해석된다. 하부 몬트니층이 형성되던 시기에는 높은 해수면으로 인해 해안선이 육지 쪽으로 후퇴하면서 수심이 깊어지고 육성기원 퇴적물의 유입이 제한되었기 때문에 저에너지의 외해 혹은 심해 환경에서 반원양성의 난질 퇴적층이 우세하게 형성되었으며 간헐적으로 폭풍파 기원 밀도류에 의한 퇴적이 이루어졌다. 한편, 상부 몬트니층 형성 시기에는 상대적 해수면의 하강으로 해안선이 전진하여 육상(하천)으로부터의 퇴적물 공급이 증가하였고, 수심이 얕아지면서 파도와 간헐적인 폭풍파의 영향으로 실트 우세 난질 퇴적물이 다양한 유동구조를 보이면서 집적되었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 제주대학교 연구교수 기간에 연구되었다. 시추코어는 한국가스공사에서 주관한 '셰일가스층 파쇄효율 향상을 위한 탐사프로세스 및 실증연구(2013~2017년, 산업통상자원부 에너지기술개발사업)'의 일환으로 한국석유공사에서 취득한 것이다.

REFERENCES

- Amos, C.L., Li, M.Z. and Choung, K.-S., 1996, Storm-generated hummocky stratification on the outer Scotian Shelf. *Geo-Marine Letters*, 16, 85-94.
- Arnott, R.W. and Southard, J.B., 1990, Exploratory flow-duct experiments on combined-flow bed configurations, and some implications for interpreting storm-event stratification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 211-219.
- Baas, J.H., Best, J.L. and Peakall, J., 2016, Predicting bed-forms and primary current stratification in cohesive mixtures of mud and sand. *Journal of the Geological Society*, 173, 12-45.
- Boggs Jr, S., 2006, *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*: Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 662 pp.
- Cheek, R.J., 1991, Grain fabric in hummocky cross-stratified storm beds: genetic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 102-110.
- Chough, S.K., Lee, G.H., Park B.K. and Kim, S.W., 1984, Fine structures of turbidite and associated muds in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan). *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 1212-1220.
- Dalrymple, R.W., 2010, Interpreting sedimentary successions: facies, facies analysis and facies models. In: James, N.P. and Dalrymple, R.W. (eds.), *Facies Models 4*. Geological Association of Canada, Geotext 6, 3-18.
- Davies, G.R., 1997, Aeolian sedimentation and bypass, Triassic of Western Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 45, 624-642.
- Dumas, S. and Arnott, R.W.C., 2006, Origin of hummocky and swaley cross-stratification-The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, 34, 1073-1076.
- Edwards, D.E., Barcally, J.E., Gibson, D.W., Kvill, G.E. and Halton, E., 1994, Triassic Strata of the Western Canada Sedimentary Basin (Chapter 16). In: Mossop, G.D. and Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council, Calgary, 259-275.
- Friedrichs, C.T. and Wright, L.D., 2004, Gravity-driven sediment transport on the continental shelf: Implications for equilibrium profiles near river mouths. *Coastal Engineering*, 51, 795-811.
- Golding, M.L., Orchard, M.J., Zonneveld, J.-P., Henderson, C.M. and Dunn, L., 2014, An exceptional record of the sedimentology and biostratigraphy of the Montney and Doig formations in British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 62, 157-176.
- Hill, P.S., Fox, J.M., Crockett, J.S. and et al., 2007, Sediment delivery to the seabed on continental margins. In: Nittrouer, C.A. et al. (eds.), *Continental Margin Sedimentation, from Sediment Transport to Sequence*

- Stratigraphy, 37, Blackwell Publishing, Oxford, 49-99.
- Kendall, D.R., 1999, Sedimentology and stratigraphy of the Lower Triassic Montney Formation, Peace River Basin, subsurface of northwestern Alberta. MS Thesis, University of Calgary, Calgary, 368 p.
- Kumar, N. and Sanders, J.E., 1976, Characteristics of shoreface storm deposits: modern and ancient examples. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 145-162.
- Kuppe, F., Haysom, S. and Nevokshonoff, G., 2012, Liquids rich unconventional Montney: The geology and the forecast. SPE 162824-MS, URTEC, Calgary, Canada, 30 October-1 November, 2012.
- Lazar, O.R., Bohacs, K.M., Schieber, J., Macquaker, J.H.S. and Demko, T.M., 2015, Mudstone Primer: Lithofacies variations, diagnostic criteria, and sedimentologic-stratigraphic implications at lamina to bedset scale. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, #12, 204 p.
- 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. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91, 579-601.
- Macquaker, J.H.S., Bentley, S. and Bohacs, K.M., 2010, Wave enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions. *Geology*, 38, 947-950.
- Moslow, T.F. and Davies, G.R., 1997, Turbidite Reservoir Facies in the Lower Triassic Montney Formation, west-central Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 45, 507-536.
- Piper, D.J.W., 1978, Turbidite muds and silts in deep-sea fans and abyssal plains. In: Stanley, D.J. and Kelling, G. (eds.), *Sedimentation in Submarine Fans, Canyons, and Trenches*, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, 163-176.
- Plint, A.G., 2010, Wave- and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: James, N.P. and Dalrymple, R.W. (eds.), *Facies Models*, 4, Geo-text 6, Geological Association of Canada, 167-200.
- Potter, P.E., Maynard, J.B. and Depetris, P.J., 2010, Mud and Mudstones. Springer, Heidelberg, 297 p.
- Reineck, H.-E. and Singh, I.B., 1980, *Depositional Sedimentary Environments* (2nd Ed.). Springer-Verlag, Berlin, 551 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 Petrology*, 55, 633-652.
- Slatt, R.M., Philip, P.R., Abousleiman, Y., Singh, P., Perez, R., Portas, R., Marfurt, K.J., Madrid-Arroyo, S., O'Brien, N., Eslinger, E.V. and Baruch, E.T., 2012, Pore-to-regional-scale integrated characterization workflow for unconventional gas shales. In: Breyer, J.A. (ed.), *Shale Reservoirs-Giant Resources for the 21st Century*, AAPG Memoir, 97, 127-150.
- Stow, D.A.V., 2005, *Sedimentary Rocks in the Field*. Manson Publishing Ltd, London, 320 p.
- Stow, D.A.V. and Shanmugam, G., 1980, Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments. *Sedimentary Geology*, 25, 23-42.
- Wright, L.D., Friedrichs, C.T., Kim, S.C. and Scully, M.E., 2001, Effects of ambient currents and waves on gravity-driven sediment transport on continental shelves. *Marine Geology*, 175, 25-45.
- Yoon, S.H., Joe, Y.J., Koh, C.S., Woo, J.H. and Lee, H.S., 2018, Sedimentary processes and depositional environments of the gas-bearing Horn River Shale in British Columbia, Canada. *Geosciences Journal*, 22, 33-46.
- Zonneveld, J.P., MacNaughton, R.B., Utting, J., Beatty, T.W., Pemberton, S.G. and Henderson, C.M., 2010, Sedimentology and ichnology of the Lower Triassic Montney Formation in the Pedigree-Ring/Border-Kahntah River area, northwestern Alberta and northeastern British Columbia. *Bulletin of Canadian Society of Petroleum Geology*, 57, 115-140.

Received : May 13, 2019
 Revised : May 27, 2019
 Accepted : May 27, 2019