

캐나다 앨버타분지 하부 백악기 층서와 남부 평원 지역 하부 맨빌층군 석유시스템에 대한 고찰

최용석^{1*}, 김문기², 이효종³, 홍시찬⁴

¹지오클루, ²한국해양과학기술원 대양자원연구센터, ³서울대학교 지구환경과학부, ⁴골든엔지니어링

A review of the Lower Cretaceous stratigraphy of the Alberta Basin and petroleum systems of the Lower Mannville Group in the southern Alberta Plain, Canada

Yong Seok Choi^{1*}, Mun Gi Kim², Hyojong Lee³, Si Chan Hong⁴

¹Geoclew Inc.

²Global Ocean Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)

³School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University (SNU)

⁴Golden Engineering

요 약

캐나다 앨버타분지 내 맨빌층군에는 많은 양의 탄화수소 자원이 매장되어 오랜 기간 석유자원이 개발되어 왔으나, 대부분의 지층이 지하 시추공에서 정의되어 있는 한계로 인해 지하 저류층 및 석유시스템에 대한 층서명 사용에 연구자 간 불일치와 혼란이 존재한다. 따라서 여러 문헌을 검토하여 앨버타평원 지역에 존재하는 맨빌층군 및 이와 대비되는 지층들을 비교 분석하여 일부 지층들의 지질 시대 및 공간적 분포를 분지 전체의 퇴적사와 층서학적 대비를 바탕으로 재해석하였다. 그 결과, 맨빌층군 기저 부정합면 바로 위의 데빌층은 상, 하부 지층과의 부정합적 관계 그리고 성인적 관점에서 상부의 맨빌층군 및 하부의 주라기층과 분리하여 별개의 지층으로 구별하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 베이실쿼츠는 오스트라코드베드 아래에 있는 하부 맨빌층군을 지칭하는 비공식 지층명이다. 맨빌층군 내 블루스카이사암 및 와비스코사암은 글로코나이트사암과 암상적으로 매우 유사하나, 해침기(블루스카이/와비스코 사암)와 해퇴기(글로코나이트사암)로 시대를 달리하며, 서로 다른 지역에 퇴적된 지층이라는 점에서 층서적으로 구별되어야 할 것으로 판단된다. 앨버타분지 남부 지역에서 가장 주된 저류층은 베이실쿼츠 내 사암층으로서 이 저류층은 여러 차례 중첩된 각 절개곡에 형성된 남-북 방향의 주하도 및 이에 수직상으로 연결된 지류에 쌓인 하도 사암층이다. 이 저류층에 탄화수소를 공급한 주된 근원암은 주라기에 퇴적된 페니층군 내 유기물이 풍부한 해양성 셰일일 것으로 해석되며, 저류층 상부의 치밀한 퇴적물로 구성된 오스트라코드베드가 광역적 덮개암의 역할을 하여 여러 지역에서 층서적 집유장을 형성한 것으로 해석된다.

핵심어: 앨버타분지, 맨빌층군, 층서학적 재해석, 석유시스템

ABSTRACT

The Mannville Group in the Alberta Basin, Canada, contains large amounts of hydrocarbon resources and has long been a target of petroleum exploration and production. However, there exists no standard stratigraphic classification system that can be applied for the basin-wide underground reservoirs and petroleum systems, mainly due to the limitations that most stratigraphic nomenclatures were defined by information obtained from underground boreholes. In this review, after extensive literature survey we reinterpret the spatio-temporal relationships of the Mannville Group and its correlative strata on the basis of the depositional history and stratigraphic context in the Alberta Plain region. It seems appropriate to distinguish the Deville Formation lying immediately above the sub-Mannville unconformity as a stratigraphic unit separated from the overlying Mannville Group and the underlying Jurassic strata based on its unconformable relationship both above and below and its depositional origin. The Basal Quartz, commonly used unofficially, is a stratigraphic unit referring to the lower Mannville strata beneath the Ostracod Beds. The Bluesky and the Wabiskaw sandstones in the Mannville Group are very similar to the Glauconitic Sandstone in terms of lithology, but their depositional histories are different from the latter. The former sandstones had been deposited during the overall transgressive stages, whereas the latter is a deposit that was formed during the following regressive stage after the deposition of the former sandstones. The main reservoirs in the southern Alberta region are the Basal Quartz sandstones, which represent fluvial channel sandstones that filled the main channels having a N-S orientation and dendritic tributary channels connected to the main channels. The main source rocks are interpreted to be organic matter-rich marine shales of the Jurassic Fernie Group. The Ostracod Beds are very poor in permeability and thus form a regional seal, forming stratigraphic traps in numerous areas.

Keywords: Alberta Basin, Mannville Group, stratigraphic reinterpretation, petroleum systems

1. 서언

캐나다 서부에는 길이 수 천 km, 너비 1,000 km 이상의 넓은

지역에 고생대부터 수억 년에 걸쳐 퇴적층이 쌓인 서캐나다 퇴적분지(Western Canada Sedimentary Basin: WCSB)가 분포한다. WCSB의 원유 및 가스 매장량은 세계적으로도 손꼽히는 수준이며,

Manuscript received September 14, 2018; Revised October 16, 2018; Accepted October 18, 2018.

*Corresponding author: Yong Seok Choi, Tel: +82-2-537-1151, E-mail: geoclew@gmail.com

© 2018 Korean Society of Petroleum and Sedimentary Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

육상이라는 이점을 바탕으로 다양한 규모의 석유 개발 및 생산이 지난 수십 년 간 이어져왔고, 2000년대 이후에는 고유가에 따른 경제성을 확보한 세계 최대의 오일샌드 매장량이 중요한 대체재로 자리매김하였다(Hein, 2015). 그러나 대부분의 지층이 지하 시추공에서 정의되어 있을 뿐만 아니라, 시기별 연구자에 따라 여러 층서 구분 체계가 혼용되어 사용되고 있다. 또한 일부 지층에 대해서는 정확한 층서적 개념 적용보다는 특정 지역에서의 실용적 통용이 우선시 되는 업계의 특성에 따라 비공식적 층서명이 사용되고 있으므로, 지하 저류층의 특성과 공간적 변화에 대한 판단과 해석에 있어 연구자 및 현장 종사자들 사이의 소통에 많은 어려움이 존재한다. 따라서 본 논평에서는 서캐나다 퇴적분지의 대부분을 차지하며, 현재 가장 활발한 석유 생산이 이루어지는 앨버타분지에서 남부 평원 지역 하부 백악기층의 상세한 층서와 이와 대비되는 앨버타주 중부 및 북부 평원 지역의 층서를 비교 분석하여 앨버타분지 하부 백악기층 전체의 공간적 변화와 퇴적사를 고찰하였다. 그리고 이를 바탕으로 앨버타 남부 지역의 주저류층인 하부 백악기 맨빌층군(Mannville Group)의 석유시스템에 대해 검토하였다.

2. 광역지질

2.1. 서캐나다 퇴적분지(WCSB)

WCSB는 여러 소분지로 이루어져 있으며, 캐나다 서부 브리티시 컬럼비아주의 북동부로부터 앨버타주, 그리고 사스카추완주 및 마니토바주의 남부 지역, 그리고 미국 북부에 이르는 광대한 지역에 걸쳐 분포한다(Fig. 1). 분지의 동쪽 경계는 침식으로 퇴적층의 상당부분이 삭박되어 캐나다 순상지를 이루는 선캠브리아 결정질 기반암이 노출된 지점까지이며, 서쪽 경계는 분지 내 퇴적층들이 융기 후 침식

되어 나타나지 않는 지점들까지 이어진다. WCSB의 기저에는 25억 년에서 20억년의 연대를 갖는 선캠브리아 이원 결정질 화성암 및 변성암이 놓인다. 이 기반암(basement)은 분지 동쪽인 캐나다 중부-동부의 광활한 지대에 자리하는 캐나다 순상지(Canadian Shield)의 연장부로서, 전체를 아우르는 포괄적 명칭으로 로렌시아(Laurentia) 혹은 북아메리카 강괴(North American Craton)에 해당한다(Hoffman, 1988). 현재 분포하는 WCSB의 형태는 북아메리카 강괴 주변의 안정된 탁상지(platform)가 주라기에 대륙전면분지(foreland basin)로 전환되는 과정에서 코딜레라(Cordillera) 조산대-WCSB-캐나다순상지(Canadian Shield)로 이어지는 대륙 스케일의 지구조로서 형성된 것이다.

한편, 주라기 이전의 지구조 운동에 의해 형성되어 분지 내 퇴적에 영향을 준 소규모 지구조들이 존재하는데(Fig. 2), 타쓰리나하이(Tathlina High), 피스리버아치(Peach River Arch), 보우아일랜드아치(Bow Island Arch) 등은 일정한 축을 따라 주변보다 높게 솟아 올랐던 일종의 융기대이다(Wright *et al.*, 1994). 타쓰리나하이는 북쪽에 위치한 맥켄지분지(MacKenzie Basin)를 WCSB 중앙부의 앨버타분지(Alberta Basin)와 구분하는 경계가 되고, 보우아일랜드아치는 앨버타 남동부에서 북동-남서 축을 따라 WCSB를 앨버타분지(Alberta Basin)와 윌리스톤분지(Williston Basin)로 구분하는 경계를 형성한다(Fig. 2). 한편, 앨버타분지의 중부를 북동동-남서서로 가로지르는 피스리버아치를 경계로 앨버타분지를 북/남 앨버타분지(northern/southern Alberta Basin)로 구분하기도 한다(Wright *et al.*, 1994). 이외에도 WCSB의 북서쪽에 위치한 보비단층(Bovie Fault)을 경계로 서쪽에 리아드분지(Liard Basin)가 존재한다(Fig. 2). WCSB 내 퇴적층의 시대는 고생대에서 신생대 제3기 까지에 걸쳐 있으며, 주 고찰 대상인 맨빌층군을 포함한 중생대 백악

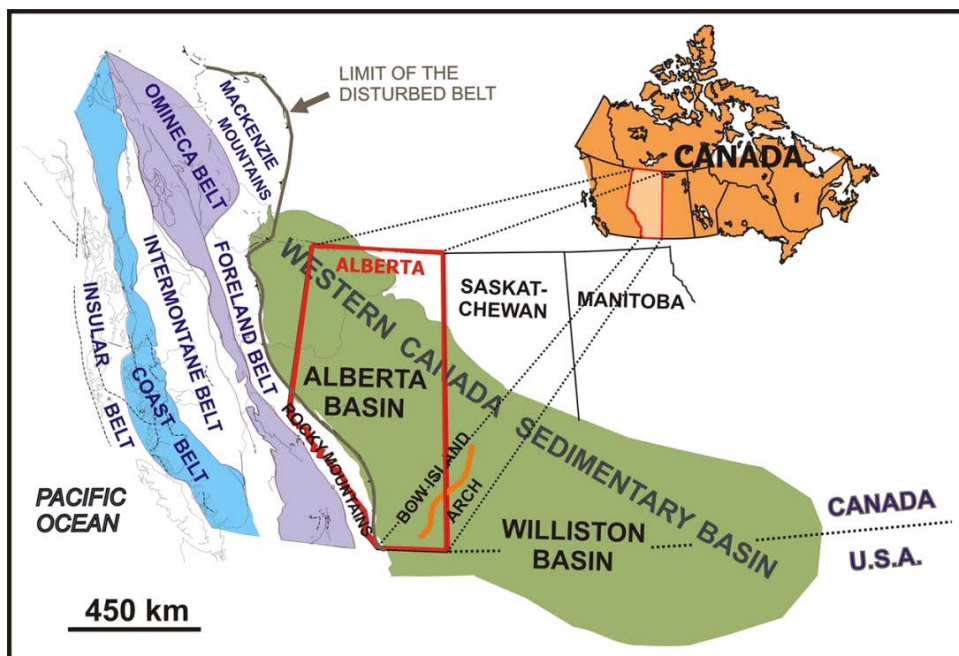


Fig. 1. Location map of the Western Canada Sedimentary Basin relative to the Canadian Cordillera (Machel *et al.*, 2012). The Western Canada Sedimentary Basin stretches across several provinces in Canada and into the northern United States. It is divided into the Alberta Basin and the Williston Basin. The Alberta Basin forms the foreland basin of the Rocky Mountains.

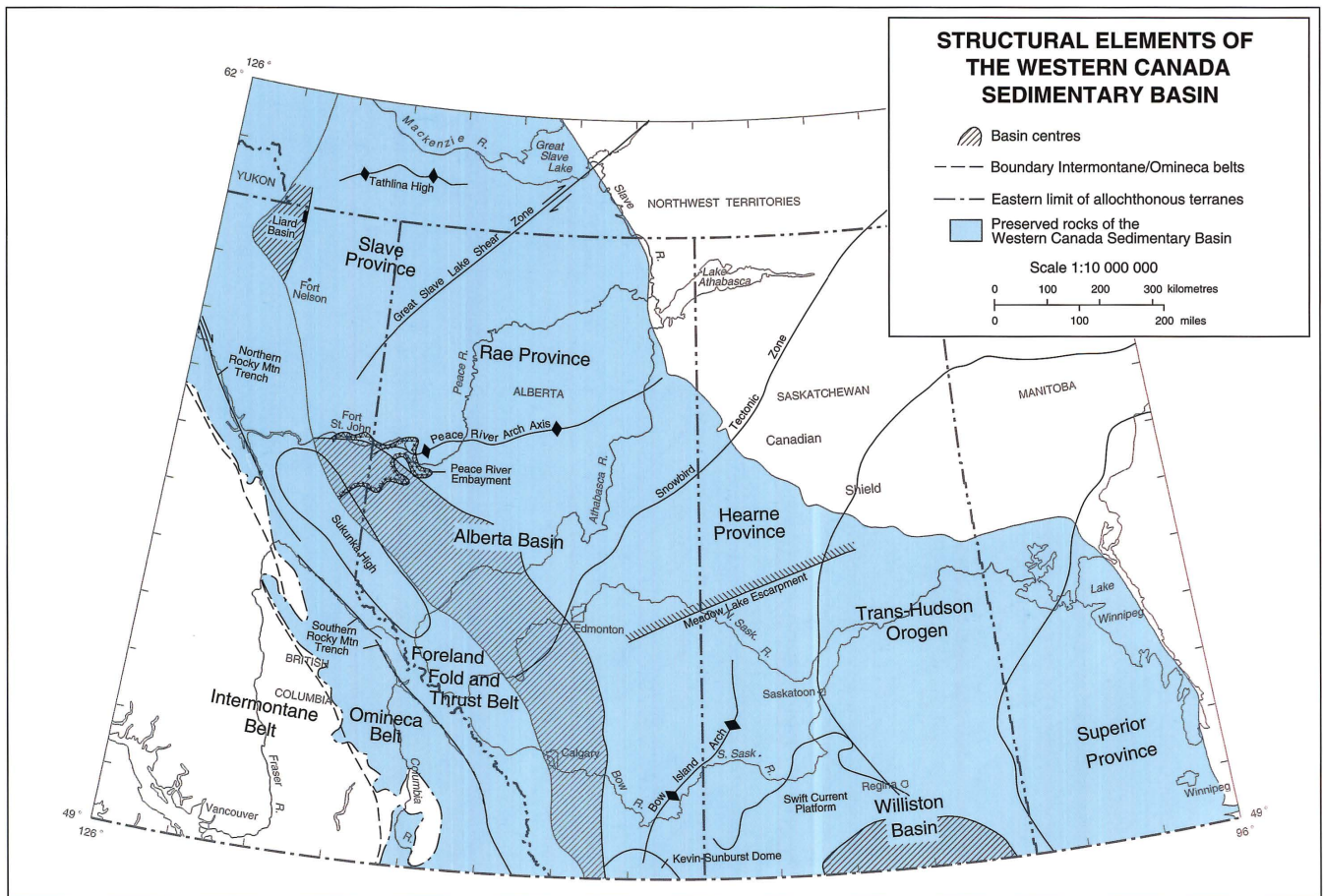


Fig. 2. Structural elements of the Western Canada Sedimentary Basin (Wright *et al.*, 1994). The Alberta Basin is defined by the Tathlina High and the Bow Island Arch which separates the Alberta Basin from the Williston Basin to the southeast. The Peace River Arch separates the Alberta Basin into two basins, the Northern and Southern basins.

기층이 남서 방향의 경사를 가지고 하부의 유라기층 및 고생대층을 경사부정합으로 덮고 있다(Fig. 3). 한편, 퇴적 당시 주변보다 고지대(paleotopographic high)를 형성했던 지구조가 위치한 지역의 퇴적층은 그 층후가 상대적으로 얇아지는데, 이는 WCSB 내 기반암 용기 지역의 공통된 특징이다(Wright *et al.*, 1994).

2.2. 분지 형성 및 진화

WCSB의 기저에는 몇 차례의 초대륙 형성 주기를 거치는 과정에서 퇴적된 원생대 지층들이 일부 지역에 변성 퇴적암의 상태로 분포하지만, 광역적인 퇴적 기록이 분지에 보존되어 있는 것은 중부 캄브리아기부터이다(Alberta Geological Survey, 2015). 중부 캄브리아기부터 중부 유라기까지 WCSB는 지구조적으로 북아메리카 강괴의 안정된 대륙대지(platform) 내지 비활성 대륙연변부(passive continental margin) 환경이었으며, 이 기간 동안은 상대 해수면 변동에 따라 탄산염 혹은 증발암 위주로 퇴적되었다(Alberta Geological Survey, 2015).

한편, 중부 유라기부터 분지 서쪽에서 태평양판의 섭입이 시작되면서(이 시기를 트라이아스기로 보는 최근 견해도 있다; Rohais *et*

al., 2018; Zonneveld and Moslow, 2018), WCSB는 활성 대륙연변부(active continental margin)의 대륙전면분지로 전환되었고, 쇄설성 퇴적물이 주로 퇴적되었다(Wright *et al.*, 1994). 활성형 판의 경계에서 판의 충돌에 의한 압축성 지구조운동(compressive tectonism)에 의해 형성되는 대륙전면분지 시스템에는 습곡-스러스트대(fold-thrust belt)를 포함하는 조산대와 전면분지(foredeep), 그리고 전면 용기부(forebulge 또는 peripheral bulge) 및 용기부 배후분지(backbulge) 등이 주압축 방향으로부터 멀어지면서 차례로 위치한다(DeCelles and Giles, 1996). WCSB의 서쪽에 가해졌던 수천만년 주기의 불규칙적인 지구조적 하중(tectonic loading)을 가했던 지구조적 압축작용(tectonic pulse)에 의해 앨버타분지 지역에는 굴곡성 침강(flexural subsidence)과 용기가 반복되어 분지 전체의 퇴적가능공간(accommodation)의 변동이 일어나게 되었다(Fig. 4).

중생대에 시작되었던 압축성 지구조운동은 신생대까지 지속되었는데, 특히 신생대 에오세 들어서 조산운동이 더욱 활발해지며 분지 대부분 지역에서는 퇴적작용보다 침식작용이 우세해졌으며, 하천의 발달과 함께 신생대층 및 상부 백악기층 일부가 삭박되었다(Dawson *et al.*, 1990). 또한 플라이오세 말부터는 빙하기-간빙기 사이클에

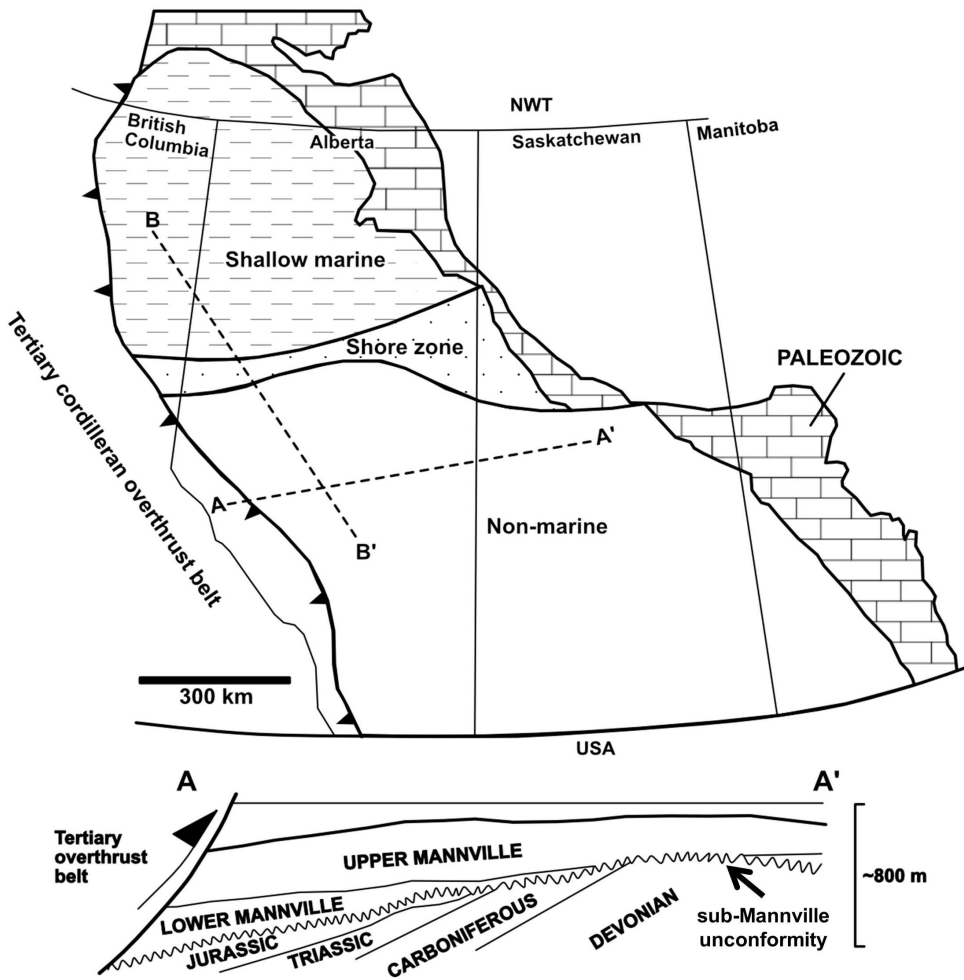


Fig. 3. Map of the Western Canada foreland basin adjacent to the Canadian Cordillera. Generalized facies distribution during Upper Mannville deposition shows the sediment transport direction toward northwest. The Tertiary overthrust belt (black triangles) is much younger than the Aptian-Albian Mannville Group and the Lower Cretaceous overthrust belt was farther west. At the bottom, a cross section (A-A') shows truncation of Devonian to Jurassic units below. A cross section (B-B') is shown in Fig. 8. Modified from Cant (1996).

따른 빙하의 전진-후퇴가 현재의 지형에 상당한 영향을 미치게 되었다(Duk-Rodkin *et al.*, 2004).

3. 층서 및 퇴적사

앨버타평원(Alberta Plains) 지역의 하부 백악기 퇴적층의 공식적인 층서는 과거 수십 년 동안 석유자원 개발을 위해 이 지역에 시추되었던 수 많은 시추공의 암상 분석 및 횡적 대비를 바탕으로 정의되었다(Fig. 5). 유라기 말-백악기 초 앨버타분지 남서부 조산대에 가까운 지역에는 서쪽으로부터 쇄설성 퇴적물이 공급되어 육상 및 천해 환경 퇴적층인 니카나신층(Nikanassin Formation)/몬테이스층(Monteith Formation)이 나타나, 이 지층은 동쪽의 대부분 앨버타평원 지역에는 나타나지 않는다(Fig. 5). 이후 백악기 초 용기에 따라 WCSB 전체가 광범위한 침식작용을 겪었으며, 특히 북동부에서는 데본기 이전 퇴적층 기록이 모두 삭박되었다(Poulton *et al.*, 1994). 이 시기에 형성된 광역부정합을 맨빌층군 기저부정합(Sub-Mannville Unconformity; Hayes *et al.*, 1994)이라 칭하며, 그 위로 일련의 하부 백악기층이 본격적으로 분지 전체에 걸쳐 쌓였다. 앨버타평원 동부와 남부 지역에서는 이 부정합면 위에 쌓인

하부 퇴적층을 맨빌층군(Mannville Group)으로, 그리고 또 한 차례의 부정합 형성 이후 쌓인 중-상부 구간의 퇴적층을 콜로라도층군(Colorado Group)으로 부른다(Fig. 5; Leckie *et al.*, 1994). 한편, Hayes *et al.*(1994)은 WCSB 일대 각 지역의 백악기층을 비교하고 앨버타평원 각 지역의 층서를 상세히 구분 대비하였으나(Fig. 6), 그 중 일부 지층의 시대와 횡적 대비에서 최근 표준 층서(Alberta Geological Survey, 2015)와 차이가 존재한다. 여러 문헌 및 보고서에서 나타나는 이러한 차이점에 관해서는 본 논평의 토의 부분에서 좀더 상세히 검토하였다.

3.1. 맨빌층군

맨빌층군은 그 분포 범위가 매우 넓고 횡적으로 불균질하기 때문에 지역에 따라 그 세부 층서명이 매우 상이하나, 어느 지역이든 반드시 그 하부에 부정합면으로 경계지어진다(Hayes *et al.*, 1994, Fig. 3). 맨빌층군은 육상 및 연안 환경에서 퇴적된 사암과 이암으로 주로 구성되며, 최하부층은 육상층으로서 정확한 시대 측정이 어려우나, 일반적으로 압트절(Aptian) 초기(125 Ma)에 퇴적이 시작된 것으로 추정된다(Hayes *et al.*, 1994). 맨빌층군의 층후는 평균적으로 145미터 정도이며, 최소 40미터에서 최대 700미터에 이른다

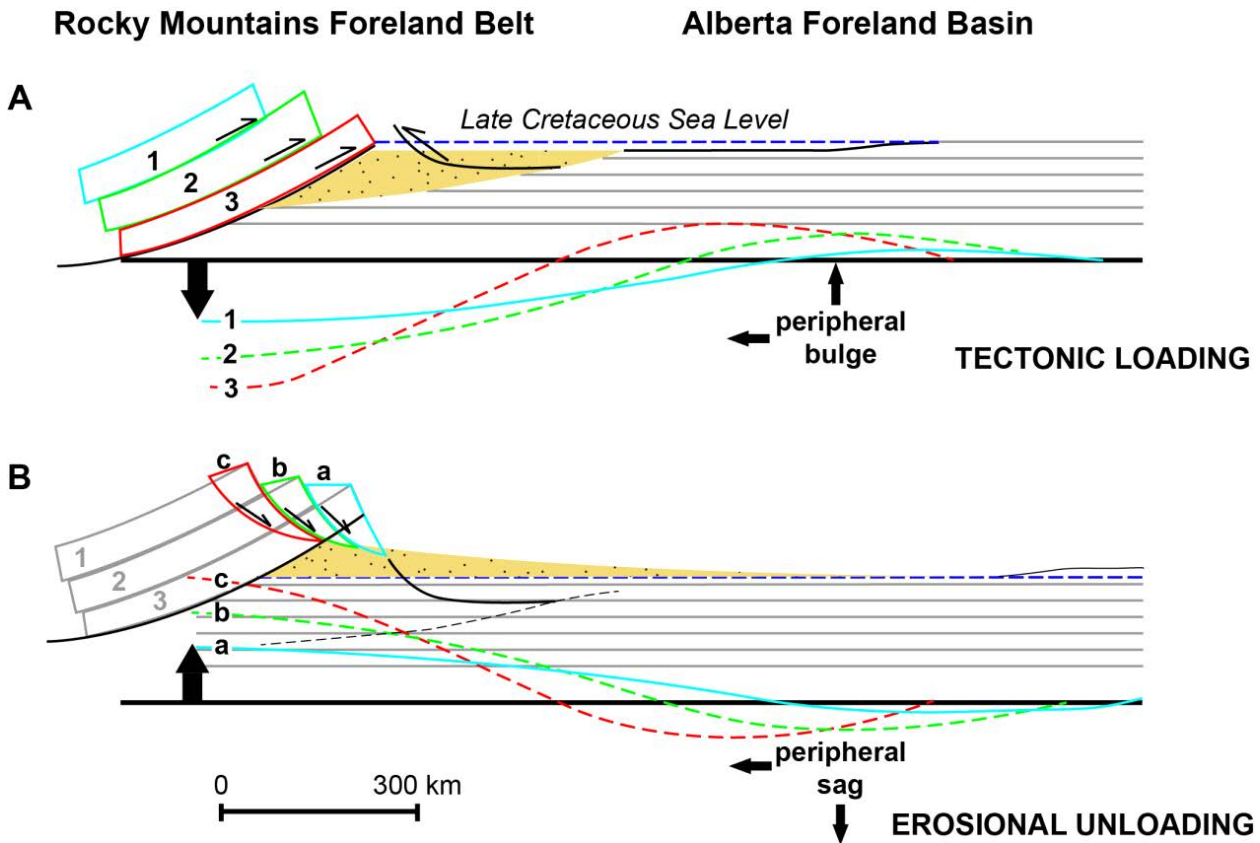


Fig. 4. Schematic illustration of the direct relationship between thrusting in the Rockies and its consequences in the Alberta Basin. Tectonic pulses bringing about flexural subsidence by tectonic loading (a) and subsequent uplift due to erosional unloading (b) are the primary controls on the creation or destruction of accommodation space in the foreland system, thus controlling, to a large extent, the type of depositional system and the thickness of depositional sequences. Modified from Alberta Geological Survey (2017).

(CSPG, 1990). 맨빌층군 기저부정합면 아래에는 분지 서쪽 및 남쪽 경계를 따라 중생대 삼첩기와 주라기 퇴적층이 분포하며, 분지 북동쪽으로 갈수록 고생대 페름기, 석탄기, 데본기, 그리고 그 외 전기 고생대 퇴적층의 순으로 고기의 퇴적층이 접한다(Hayes *et al.*, 1994; Fig. 3). 맨빌층군의 상부는 앨버타 북서부를 제외한 대부분의 앨버타 평원 지역에서 콜로라도층군의 최하부에 해당하는 줄리포우층(Joli Fou Formation) 세일에 의해 부정합으로 덮여 있다(Figs. 5, 6).

앨버타 남부 평원 지역의 맨빌층군은 대체로 하부의 3, 4개의 층원(member)과 상부의 2개 층(formation)으로 나누어지는데, 하부는 컷뱅크사암(Cut Bank Sandstone), 선버스트사암(Sunburst Sandstone), 오스트라코드베드(Ostracod Beds)로, 상부는 글로코나이트사암(Glaconitic Sandstone) 및 상부 맨빌층(Upper Mannville Formation)으로 구성된다(Figs. 5, 6). 컷뱅크사암은 처트를 포함하는 석영질의 중립질 사암으로 주로 구성되나, 입자의 크기는 세립질에서 역에 이르기까지 다양하며, 일반적으로 서쪽으로 갈수록 크기가 증가한다(CSPG, 1990). 컷뱅크사암은 기저에 부정합면에 해당하는 침식면을 지니고, 지역에 따라 탄질물(coaly material)이나 이암 역(mudstone clast) 등의 역(gravel)을 포함한다(CSPG, 1990). 한편, 컷뱅크사암은 층서적으로 사층리를 보이며, 상향 세립

화하는 사암층들이 중합된(amalgamated) 형태로 나타나며, 서쪽의 분지 가장자리(proximal) 지역에 위치한 카도민층(Cadomin Formation)에 대비되는데(Hayes *et al.*, 1994), 일부 지역에서는 테이버사암(Taber Sandstone)으로 불리기도 한다(CSPG, 1990). 선버스트사암층원은 세립질-조립질의 준암편질(sublithic) 및 석영질 사암으로 구성되며, 주로 리본 형태의 공간적 분포를 보이거나 일부는 중합된 판상의 사암체 형태를 나타내는데(CSPG, 1990), 전자는 육상의 하도(channel)에서 퇴적된 하도 사암층으로, 그리고 후자는 하도에 가까운 범람원 환경에서 퇴적된 틸새 터집(crevasse splay) 사암층으로 해석된다. 한편, 밴트리세일(Bantry Shale)은 주로 앨버타 주 남부 지역에서 국지적으로 분포하며, 층서적으로 선버스트사암 상위에 위치한 비공식적 층원명으로서(CSPG, 1990; Figs. 5, 6) 주로 범람원 환경에서 퇴적된 육성 세일로 해석된다(Leckie *et al.*, 2004). 앨버타주 남부 및 중부 지역에서 하부 맨빌층의 최상부 층원을 구성하는 오스트라코드베드는 밝은 회색에서 흑색을 띠는 석회질 세일(calcareous shale)과 회색의 석회암으로 구성되며, 개형충(ostracod)과 이매패류/복족류 화석이 흔하게 나타난다. 오스트라코드베드는 만곡하구(estuary)의 기수성(brackish) 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다(Hayes *et al.*, 1994). 글로코나이트사암은 상부 맨

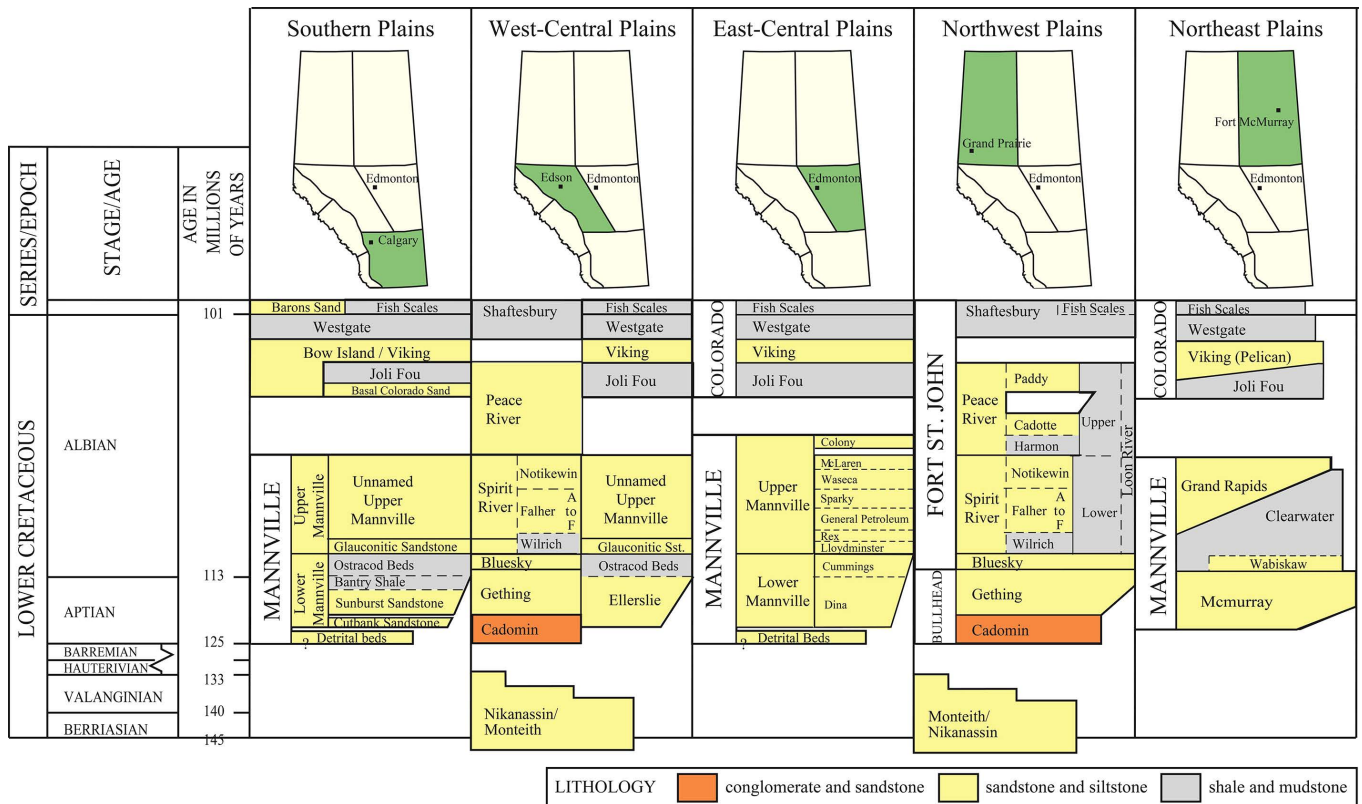


Fig. 5. Lower Cretaceous stratigraphy of the Alberta Basin formally presented by Alberta Geological Survey in 2015, showing stratigraphic correlation between 5 subdivided regions in the Alberta Plain. The green-colored polygons in the small reference maps represent only the approximate area that each stratigraphic column represents. Blank gaps in the columns represent major unconformities due either to nondeposition or deposition and subsequent erosion. The time scale is not linear. Question marks denote considerable uncertainty in the stratigraphic position or naming of the unit. Modified from Alberta Geological Survey (2015).

빌층의 최하부층으로서 앨버타주 남부와 중부에서 세립질-중립질의 석영질 사암에 붙여진 지층명으로서 해록석 및 부분적으로 능철석(siderite)을 포함하고 있으며(CSPG, 1990), 쇄설성 대륙붕 환경에서 최대해침기를 지나 초기에 전진퇴적(progradation)하는 해안전면부(shoreface) 사암체로 해석된다(Cant, 1996). 글로코나이트사암 위의 상부 맨빌층은 해성 세일과 세립질의 해안전면부 사암이 여러 차례 전진퇴적하는 사이클로 이루어진 전형적인 개방해(open marine)의 대륙붕 퇴적층에 해당한다(Cant, 1996).

앨버타주 중부 평원 지역에서는 맨빌층군이 4개의 층/층원으로 구분되며, 하부로부터 엘러스리(Ellerslie), 오스트라코드베드, 글로코나이트사암, 그리고 상부 맨빌층으로 구성된다(Figs. 5, 6). 엘러스리층의 하부는 중립질의 사암이나 실트암으로 구성되며, 약간의 탄층을 포함하고 있는 반면, 상부는 세립질의 사암 및 렌즈 상의 사질 세일/이질 사암의 호층으로 구성된다(Cant, 1996). 엘러스리층은 동쪽 평원에 대비되는 디나층(Dina Formation)과 함께 하천 퇴적 환경에서 쌓인 것으로 해석된다(Figs. 5, 6). 오스트라코드베드는 세일이나 탄산염암, 그리고 약간의 사암 등으로 구성되며, 특히 석회암은 개형층 등의 생물 화석을 다량 포함하고 있다. 오스트라코드베드로부터 그 상부의 글로코나이트사암 그리고 상부 맨빌층에 이르기까

지 앨버타주 남부 및 중부 평원은 수직적 층서 유사성을 보인다(Figs. 5, 6). 중부 평원 지역의 동부는 하부 맨빌층과 상부 맨빌층으로 구분되며, 특히 이 지역에서 상부 맨빌층은 매우 세분된 층원으로 구성되나(Figs. 5, 6), 본 논평에서는 중부 평원 서부 지역만을 대표적으로 상술하였다.

앨버타주 북서 평원 지역에서 맨빌층군에 대비되는 지층은 하부로부터 카도민층, 게팅층(Gething Formation), 블루스카이층(Bluesky Formation) 및 스피릿리버층(Spirit River Formation) 등 총 4개의 층으로 구분된다(Figs. 5, 6). 카도민층은 주로 역암 및 이와 호층을 이루는 조립질 사암, 세일, 탄층으로 구성되며(CSPG, 1990), 맨빌층군 및 이에 대비되는 앨버타분지 내 지층 중 가장 초기에 퇴적된 층으로서 주로 앨버타주 서쪽의 조산대에 인접한 산기슭(foothills)지역 및 서부 평원 지역에 국한되어 나타난다(Hayes *et al.*, 1994). 카도민층은 주로 서쪽의 조산대에서 공급된 퇴적물이 축적된 상지 및 이와 연결된 망상하천에 쌓여서 퇴적된 것으로 해석되며, 이와 대비되는 남부 평원의 컷뱅크사암은 동 시기에 말단부(distal)에 퇴적된 것으로 추정된다(Hayes *et al.*, 1994). 게팅층은 앨버타주 북동 평원 오일샌드 지역의 맥머리층(McMurray Formation), 앨버타주 중부 평원의 엘러스리층 및 디나층에 대비되는 지층으로서

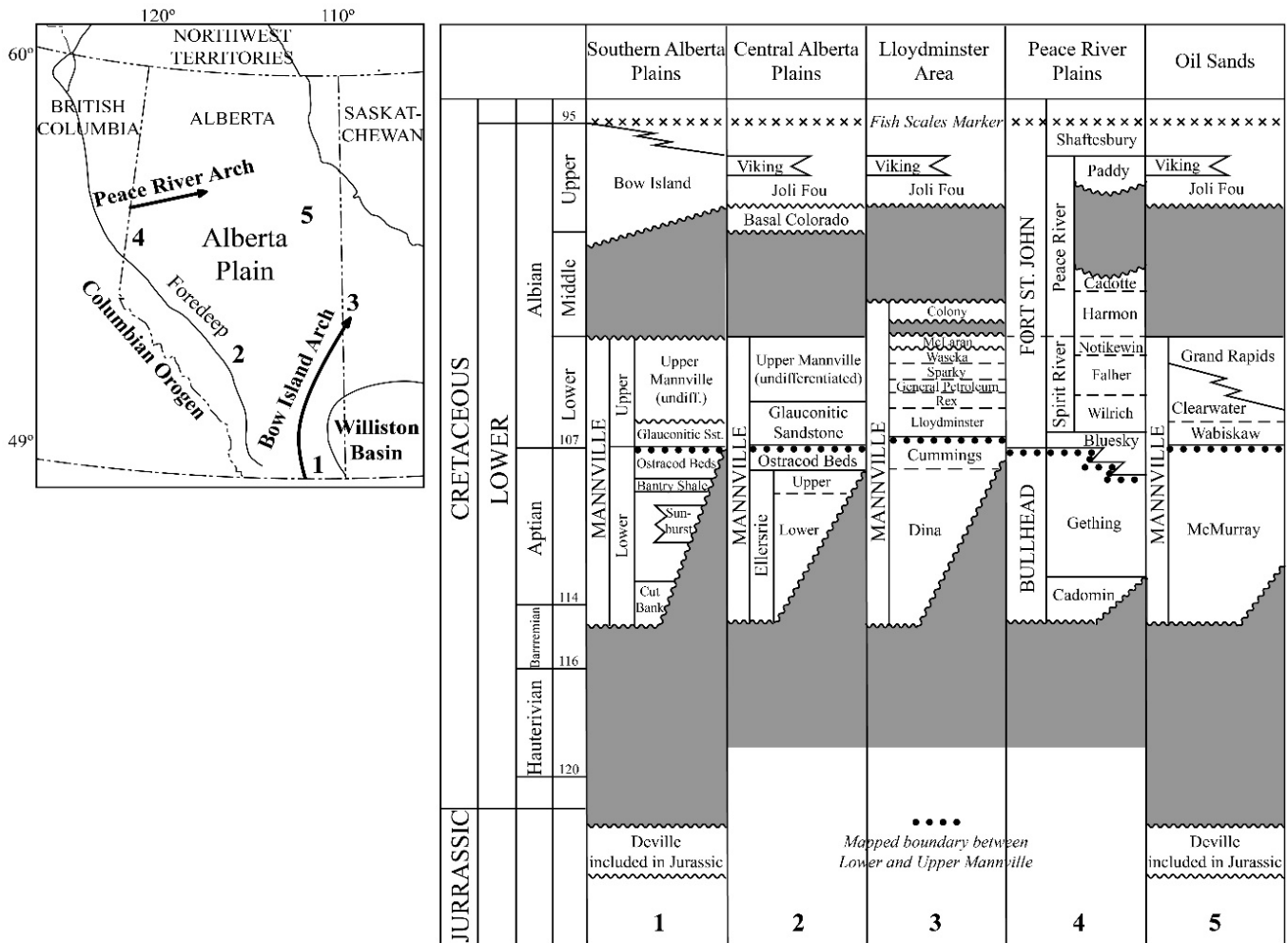


Fig. 6. Stratigraphic nomenclature for the Mannville Group and equivalent strata in the Alberta Basin for comparison to the more recently formalized stratigraphy (Fig. 5). Column numbers refer to areas marked in the map (left). The dotted lines indicate the boundary between the Lower Mannville and Upper Mannville units, and the Bluesky Formation and Glauconitic Sandstone are correlated as equivalent strata above the dotted line. Modified from Hayes *et al.* (1994).

(Figs. 5, 6), 앨버타주 대부분의 지역에서 이 층들은 셰일 및 셰립질 사암으로 주로 구성되고, 조립질 사암 내지 역암으로 구성된 퇴적체가 곳곳에 산재되어 분포하는 양상을 보이므로, 본지 전체에 걸쳐 발달한 하천환경에서 퇴적되었을 것으로 해석된다(Smith *et al.*, 1984; Hayes *et al.*, 1994).

앨버타주 북서 평원 지역에서 포트세인트존스층군(Port St. John Group)의 일부인 블루스카이층과 스피릿리버층은 상부 맨빌층군에 대비된다. 블루스카이는 기수성 환경을 지시하는 흔적화석 및 해륙석을 흔히 포함하므로 비슷한 시기에 퇴적된 해륙성 사암체인 앨버타주 북동부의 와비스코층원(Wabiskaw Member) 및 중부 일대의 글로코나이트사암 등과 대체로 대비되는 것으로 알려져 있다(Fig. 6). 스피릿리버층은 남부 평원 지역의 상부 맨빌층처럼 전체적으로 전진퇴적하는 대륙붕 퇴적층으로서 최하부에 주로 해양성의 셰일로 구성된 윌리치층원(Wilrich Member)과 그 상부의 셰일에서 사암까지 상향조립화하는 몇 차례의 사이클로 이루어진 팔러층

원(Falher Member) 및 노티케윈층원(Notikewin Member)으로 구성된다(Figs. 5, 6). 피스리버층은 하부에서부터 암회색 이질암인 하몬층원(Harmon Member), 셰립질 사암-실트암으로 구성된 캐도트층원(Cadotte Member), 그리고 다양한 입자 크기의 세립성 퇴적암으로 이루어진 패디층원(Paddy Member)으로 구성된다(Figs. 5, 6). 캐도트층원과 패디층원의 관계는 부정합이며, 맨빌층군과 콜로라도층군 사이에 존재하는 부정합이 좀더 연속적인 퇴적이 있었던 이 지역에서는 비교적 소규모로 발달된 것으로 판단된다(Figs. 5, 6; Leckie *et al.*, 1994; Smith *et al.*, 1994).

앨버타주 북동 평원 지역의 맨빌층군은 하부로부터 맥머리층, 와비스코층원, 클리어워터층(Clearwater Formation), 그리고 그랜드래피드층(Grand Rapids Formation)이 차례로 놓인다. 맥머리층은 셰립질의 석영질 사암으로서, 앨버타주 북동부 아사바스카(Athabasca) 지역에서 역청(bitumen)을 대규모로 함유하고 있는 저류층으로 잘 알려져 있다(Cant, 1996). 맥머리층은 흔히 비공식적인

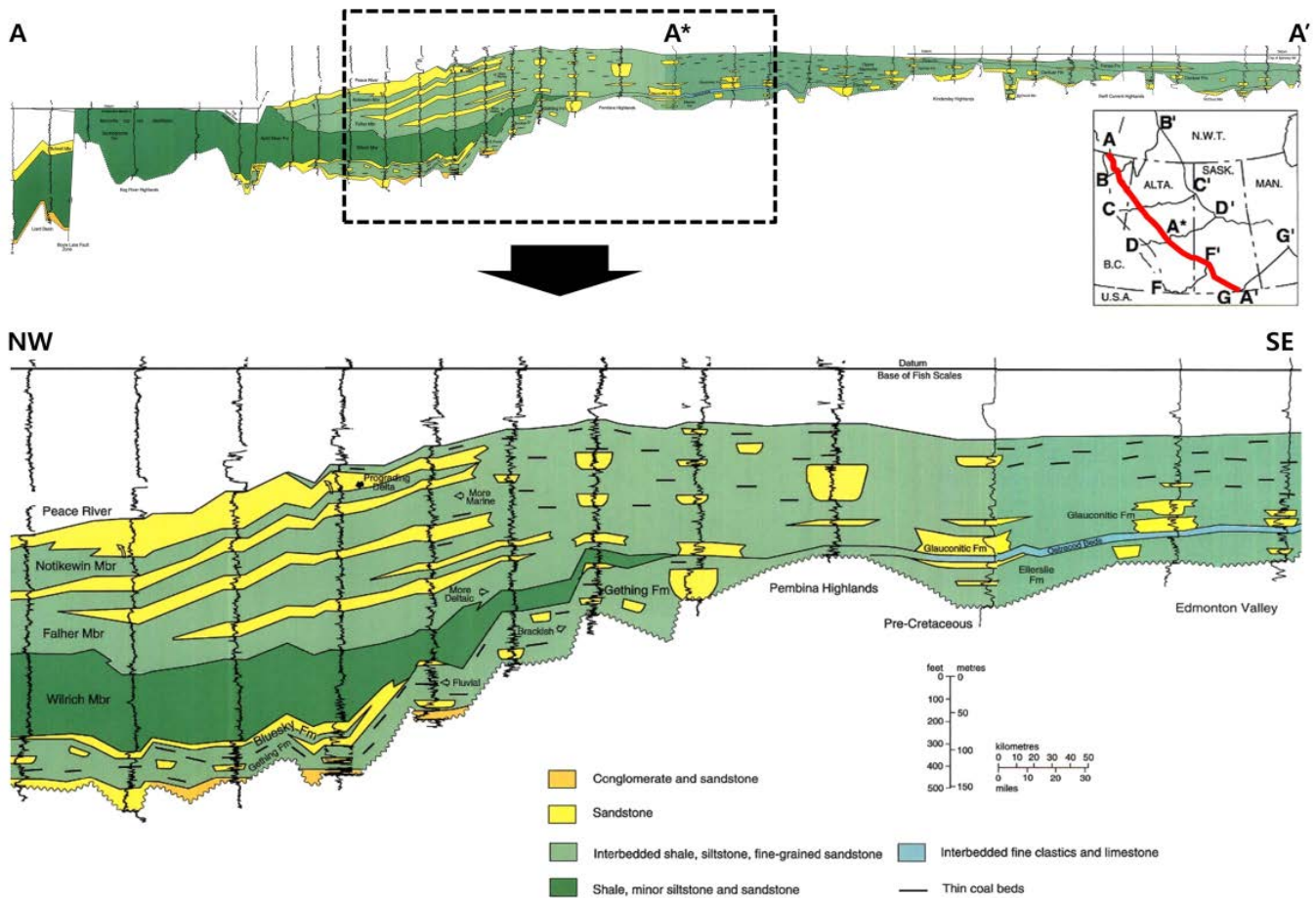


Fig. 7. Regional NW-SE cross-section of the Mannville Group and its equivalent strata in WCSB (A-A', red line in the map). An enlarged section is shown for the areas of interest. The offshore Wilrich shale thins toward the southeast to be replaced by shallower facies such as the Glauconite Sandstone. Note also that the incised valley fills are more abundant in the proximal region. Modified from Hayes *et al.* (1994).

세 개의 층원으로 구분되는데, 하부 층원은 고생대 데본기층 위에 발달한 기복이 큰 부정합면 위에 쌓였던 역암 및 분급이 불량한 이질 사암층으로서 주로 퇴적 당시 지형의 저지대에 나타나며 횡적 층후 변화가 크다(CSPG, 1990). 그 위의 중부층원은 수십 미터 규모의 경사 층리를 보이는 세립질 사암으로 구성되며, 상부 층원은 기수성 동물군(fauna) 화석을 포함하며, 수평 층리를 보이는 이질 및 극세립 사암으로 구성된다(CSPG, 1990). 맥머리층은 전체적으로 점진적 해침에 수반되는 육상 퇴적가능공간(fluvial accommodation)의 증가로 하부의 하도 사암, 중부의 만곡하구에 인접한 사행천(meandering stream) 곡류사주(point bar) 퇴적층, 그리고 상부의 범조 간대(peritidal) 이질/사질 퇴적층이 차례로 놓이는 것으로 해석된다(Mossop and Flach, 1983; Flach and Mossop, 1985; Hassanpour, 2009; Jo and Ha, 2013). 와비스코층원은 클리어워터층의 하부 층원으로 간주하며, 해륙석을 포함하고 있는 세립질 사암과 흑색 셰일의 호층으로 구성된다(CSPG, 1990). 와비스코층원을 제외한 클리어워터층의 나머지는 흑색 또는 녹회색 셰일로 주로 구성되며, 간혹 회색 또는 녹색의 사암을 포함한다(CSPG, 1990). 클리어

워터층은 상, 하부의 지층과 정합적인 관계를 가지며, 다른 지역의 상부 맨빌층에 대비된다(Figs. 5, 6). 그랜드래피드층은 주로 비투멘을 포함하고 있는 세립질에서 중립질의 사암으로 구성되며, 간혹 셰일이나 실트스톤을 포함하고 흔히 처트를 역으로 포함하고 있다(CSPG, 1990). 클리어워터층과 그랜드래피드층은 이 지역에서 층서적으로 횡적 지교 관계(interfingering relationship)를 보인다(CSPG, 1990).

전체적으로 맨빌층군은 지구조운동에 의한 분지 침강과 수백만 년~수천만년 주기의 전지구적 해수면 변동(eustatic sea-level change)이 결합된 상대 해수면 변화에 따른 퇴적환경 변화 및 퇴적물 공급에 수반된 암상의 변화를 나타낸다(Hayes *et al.*, 1994; Cant, 1996) 즉, 하부 맨빌층군이 상부로 갈수록 점차적인 해침이 진행되는 과정에서 육상의 하도나 범람원 환경에서 퇴적된 육성층으로부터 연안 환경에서 퇴적된 해성층으로의 변화를 보여주는 반면, 상부 맨빌층군은 상대 해수면 상승속도의 점차적 감소로 인해 외대륙붕의 해양성 셰일에서 해륙성 사암층과 같은 천해의 해안전면부 및 삼각주 전면의 전진퇴적, 그리고 하도나 범람원 등의 육상 환경으

로의 변화를 보인다(Hayes *et al.*, 1994; Smith, 1994).

Fig. 7은 WCSB 맨빌층군의 북서-남동 단면을 보여주는 광역적인 층서단면도(stratigraphic cross section)로서 맨빌층군의 층후는 대체로 앨버타주 북서 평원에 위치한 피스리버아치 방향으로 대체로 증가하는 것을 보인다. 또한 외해의 해양성 세일인 윌리치층원은 하부의 블루스카이사암과 함께 앨버타주 중부 평원에 위치한 펄비나 하이랜드(Pembina Highland)를 향해 소멸(pinch out)하는 반면 그 남동부에서 오스트라코드베드 및 글로코나이트사암에 각각 대비되는 것을 알 수 있다(Fig. 7). Cant(1996)은 앨버타평원 지역 맨빌층군을 수천만년에 걸친 큰 스케일의 상대 해수면 변동에 따른 퇴적환경 변화와 관련하여 해석하고, 맨빌층군 내 여러 지층을 대비하여 앨버타분지 내 퇴적 경사 방향의 광역적 층서단면도 작성에 활용하였다(Fig. 8).

3.2. 퇴적사(Depositional History)

WCSB에서 하부 백악기 맨빌층군의 퇴적은 분지 서쪽의 조산운동에 따른 전연분지(foredeep)의 발달로 시작되었다. 전연분지의 중심을 따라 남동에서 북서로 앨버타분지를 길게 횡단하며 흐르는 침식 계곡 시스템이 형성되었고, 이들 각 계곡을 따라 하천이 발달하여 퇴적물을 북쪽으로 운반함에 따라 상류지역인 분지 남쪽에는 하천 시스템이 발달하고, 북쪽에는 연안 및 삼각주 환경이, 그리고 습곡-스트레스대와 인접한 서쪽 지역에서는 충적선상지 환경이 각각 발달하였다(Fig. 9a). 이 시기에 분지 남서쪽 충적선상지에 카도민 역암층이 퇴적되었고, 분지 대부분의 육상의 하도와 범람원 환경에서 컷뱅크사암 층원과 엘러스리층 및 게팅층이 퇴적되었으며, 이와 대비되는 분지 북동부의 삼각주 환경에서는 맥머리층이 퇴적되었다(Smith, 1994).

육상 퇴적환경이 우세했던 하부 맨빌층군 퇴적 초기를 지나 상대

해수면 상승으로 인한 해침이 진행되면서 분지 북부 일부 지역에 위치했던 연안/만 환경이 남쪽으로 점차 확장되었다. 상대 해수면 상승 속도가 최고조에 달한 시기에는 피스리버아치 지역 일부와 고지대를 제외한 서부캐나다 퇴적분지 전역이 해수면 아래로 잠기게 되었고(Fig. 9b), 이암과 석회암이 지배적인 오스트라코드베드가 저에너지의 연안 환경에서 퇴적되었다(Smith, 1994). 한편, 오스트라코드베드와 대비되어 해륙석을 포함하는 사암체인 블루스카이와 와비스코 층원들은 동 시기에 만곡하구 어귀(estuary mouth)에 위치한 사주(sand bar) 혹은 개방해의 고에너지 해안전면부 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다(Fig. 8).

WCSB에서 최대 해침기를 지나 상대 해수면 상승 속도가 점차 감소하고 해퇴가 시작되면서 퇴적물 공급이 상대적으로 높은 반면, 해수면 상승의 영향은 적게 받았던 분지 남서쪽 지역에서는 하도/범람원, 그리고 그 전면의 삼각주 환경이 북쪽을 향해 다시 확장되기 시작하였다(Fig. 9c). 이 시기에 퇴적된 글로코나이트사암에 대하여 Smith(1994)는 남서쪽 지역에 형성되었던 절개곡(incised valley)을 하도-만곡하구 환경에서 퇴적된 사암이 국지적으로 충진한 것으로 해석하였으나, Cant (1996)은 개방된 대륙붕 환경에서 최대 해침기를 지난 초기에 전진퇴적하는 해안전면부 사암체로 해석하고 더 깊은 곳에 퇴적된 윌리치층원의 해양성 세일에 대비하였다(Fig. 8).

상부 맨빌층 퇴적 시기에 이르러 해퇴가 계속 진행되어 하도/범람원 및 삼각주 환경이 분지 남서쪽 지역으로부터 북쪽과 동쪽을 향해 빠르게 확장하면서 상부 맨빌층이 하도/범람원 환경에서 퇴적되었으며, 클리어워터층이나 그랜드래피드층은 연안/만 환경이나 삼각주 환경에서 퇴적되었다(Fig. 9d). 이후 맨빌층군 퇴적 말기까지 북쪽 방향으로의 해퇴는 지속되지만 동쪽으로는 진행되지 않고, 사스카추완주에 해당하는 지역은 여전히 연안/만 환경으로 남아있게 되었다(Fig. 9e).

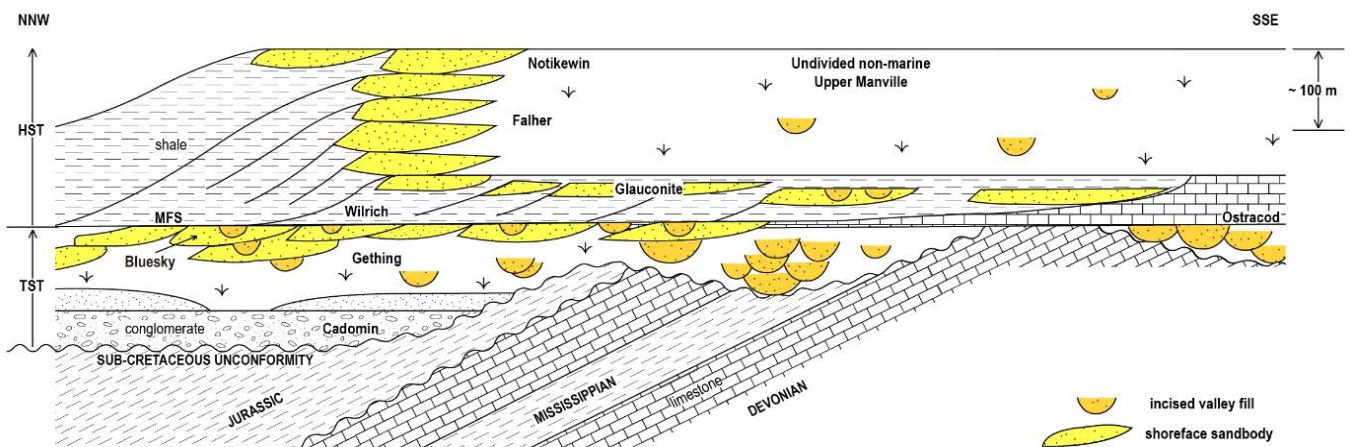


Fig. 8. Composite diagram of the Mannville Group stratigraphy across the Alberta Plain (location in Fig. 3). The basal transgressive systems tract (TST) is dominantly nonmarine (Cadomin and Gething). These sediments are overlain by Bluesky shoreface sandstones. The maximum flooding surface (MFS) lies above these, at the base of the Wilrich Shale and extends into the lagoonal Ostracod unit. The highstand systems tract (HST) regresses strongly during Glauconite shoreface deposition. The Falher and Notikewin shorefaces are stacked vertically at the margin of a basement structure. Modified from Cant (1996).

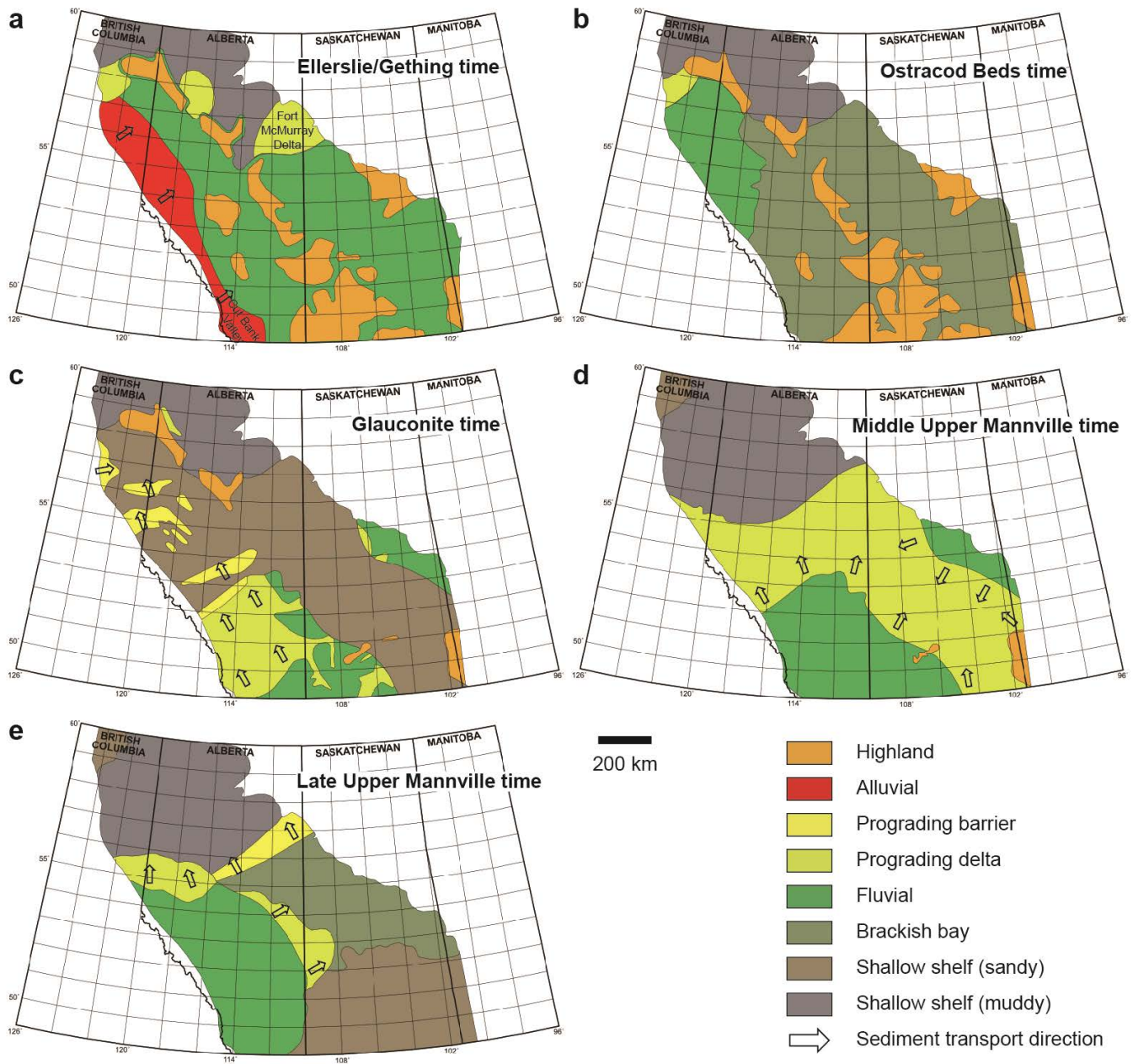


Fig. 9. Paleogeography of the Western Canada Sedimentary Basin during (a) Ellerslie/Gething, (b) Ostracod Beds, (c) Glauconite, (d) Middle Upper Mannville, and (e) Late Upper Mannville times. Modified from Smith *et al.* (1994).

4. 석유시스템

4.1. 저류암

앨버타주 남부 평원 지역의 주 저류층은 데빌층과 맨빌층군 하부의 베이설퀴츠로 불리는 사암층으로서, 부정합면 위에 발달된 절개곡을 하도 사암이 충전한 것이다. 앨버타주 남부 지역은 해수면 상승의 영향을 북부에 비해 적게 받았을 뿐만 아니라, 주변의 고지대로부터 공급된 퇴적물이 스피릿 리버 계곡의 좁은 공간을 따라 모여 운반되었기 때문에, 퇴적물 공급에 비해 상대적으로 낮은 퇴적가능공간 생성률 조건이 유지되었으며, 경우에 따라 빠른 주기의 상대 해수면

하강기에는 기존에 쌓인 퇴적물의 침식이 일어나기도 하였다(Ardies *et al.*, 2002). 이로 인해 앨버타주 남부 지역 사암층들은 수 차례 중합되며, 그 두께와 횡적 연장성이 증가되어 우수한 저류암을 형성한 반면, 앨버타주 중부 지역에서는 상대적으로 높은 퇴적가능공간 생성률 조건으로 인해 사암층의 규모가 남부에 비해 작은 것으로 알려졌다(Hayes *et al.*, 1994). 베이설퀴츠 내 저류층의 대부분은 하천 퇴적환경에서 퇴적된 하도 사암층으로서 퇴적 당시 하도는 스피릿리버 계곡의 축을 따라 존재하였기 때문에 하도의 본류에 해당하는 사암층들은 대체로 남-북 방향의 연장성을 보이나, 지류에 해당하는 사암층들의 경우에는 본류의 서, 남, 동쪽으로부터 수지상으로 본

류의 사암층과 이어진다(Ardies *et al.*, 2002).

4.2. 덮개암 및 집유장

앨버타주 남부 평원 지역의 석유시스템에서는 주 저류암인 베이 설퀴츠 하도 사암 상부의 불투성의 범람원 이암(엘러스리층)이 지역적으로 가장 주요한 덮개암의 역할을 한다. 또한 상부에 존재하는 치밀한 퇴적물로 구성된 오스트라코드베드가 분지 전역에 걸친 해침 시기 동안 퇴적되어 공간적 연장성이 뛰어나기 때문에 광역적 덮개암의 역할을 한다. 특히 지역에 따라 주 저류암 기저 부정합면 아래에 존재하는 치밀한 탄산염이 하부 또는 측면 경계를 이루는 경우 훌륭한 층서적 집유장(stratigraphic trap)이 형성될 수 있다.

4.3. 근원암 및 탄화수소 이동

앨버타주 남부에 존재하는 베이설퀴츠에 부존된 탄화수소는 그 기저의 부정합면을 경계로 접하고 있는 유기물을 다량 포함한 주라기의 셰일 층으로부터 직접 공급되었거나, 또는 백악기 이전의 모든 잠재적 근원암들이 대륙전면 분지가 발달하는 과정에서 열성숙된 탄화수소를 부정합면을 따라 공급하였을 가능성이 제시되었다(Brooks *et al.*, 1988, 1989, 1990; Creaney and Allen, 1990, 1992; Riediger *et al.*, 2001). 한편 맨빌층군 내에서도 최하부층에 삼각주/해안 평원 등의 환경에서 퇴적된 하부의 석탄층이 상부 맨빌층이나 그보다 상부의 저류층들에 대해 육성층 기원의 탄화수소를 공급했을 가능성도 제시되었다(Welte *et al.*, 1984). Creaney and Allen (1990, 1992)은 주라기의 퍼니층군(Fernie Group), 석탄기의 엑쇼층(Exshaw Formation), 데본기의 두버네층(Duvernay Formation), 삼첩기의 도이그층(Doig Formation) 등이 맨빌층군 탄화수소의 근원암으로 기능하였으며, 이 중 특히 퍼니층군에 속한 고돈데일/노데그 층원(Gordondale/Nordeg Member)이 가장 주된 근원암이었다고 제안하였다. 이와는 달리 Brooks *et al.* (1988, 1989, 1990)은 생물지표(biomarker)를 사용한 연구에서 맨빌층군의 탄화수소가 지역에 관계없이 비교적 균질하다는 연구 결과를 바탕으로 단일한 근원암이 맨빌층군 전체의 탄화수소를 공급했을 가능성을 제시하였다.

맨빌층군에 부존되어 있는 탄화수소의 특성은 근원암으로부터의 이동거리가 짧았을 가능성을 강하게 제시하는데, Riediger(1994)는 이를 바탕으로 서부 캐나다 분지의 서쪽과 남쪽 경계에만 분포하는 주라기층(Fig. 3)은 맥머리층 등 분지 동북쪽 영역에 존재하는 저류암에까지 탄화수소를 공급하기는 어려웠을 것이며, 따라서 맨빌층군 기저부정합 아래에 존재하는 다양한 지질시대의 근원암들이 각각 인근 저류암에 탄화수소를 공급했을 수도 있다고 추정하였다. 이에 더하여 Riediger *et al.* (2001)은 생물지표를 이용하여 맥머리층 등에 대해서는 엑쇼층이, Du Rouchet(1985)은 탄화수소의 지화학적 조성에 기반하여 삼첩기 도이그층이 주된 근원암일 가능성을 제시하였다. 그러나 보다 최근에 Higley *et al.* (2009)은 사차원 분지 발달 모델을 이용하여 열성숙 과정에서 주라기 퍼니층군이 분지 북동쪽의

맥머리층을 포함하여 분지 전역의 맨빌층군에 대해 탄화수소를 공급할 수 있었다는 사실을 제시하며, Riediger 등의 주장에 대해 반대되는 결과를 보인 바 있다. 특히 무엇보다도 맨빌층군의 탄화수소가 황이 풍부한 타입 IIS 케로진에서 기원하는데, 이를 공급할 수 있는 근원암은 퍼니층군 이외에는 찾기 어렵다는 점을 강조하였다.

5. 토의

본 논평의 주 서술 대상인 맨빌층군 및 이와 층서적으로 대비되는 앨버타분지의 각 층군에 포함되는 층/층원의 명칭은 지역에 따라, 시기에 따라 혹은 연구자의 주관적 편의성에 따라 여러 암층서명(lithostratigraphic name)을 가지고 있다(Figs. 5, 6). 이러한 구별은 퇴적층에 일반적인 횡적 상변화에서 근원한 실체적 차이이거나 혹은 실용성을 중시하는 현장에서 대상 지층에 대한 오인(misidentification)이나 층서적 개념에 대한 이해의 부족에서 나온 오류일 수도 있다. 따라서 본 토의에서는 맨빌층군을 대상으로 한 여러 문헌에서, 명칭과 시대 해석 등이 가장 불분명하거나 불일치하는 지층들에 대한 문제점을 살펴보고 이에 대한 퇴적학적 해석과 층서학적 대비에 기초한 의견을 제시하고자 한다.

5.1. 데빌층(디트리탈베드)

앨버타평원 지역에는 맨빌층군 하부 부정합면 바로 위에 그 상부의 전형적인 맨빌층군의 육성층과 구분되는 매우 불균질한 암상의 육성 퇴적층이 국지적으로 분포하는데, 이 지층을 데빌층(Deville Formation) 혹은 디트리탈 베드(Detrital Beds)로 부른다(Williams, 1963; Figs. 5, 6). 데빌층은 녹회색 또는 암적색을 보이며, 능철석단괴(siderite nodule) 셰일 및 실트암, 이질 성분이 많은 석영질 사암 등으로 구성된다. 데빌층 기저의 부정합면 바로 하부에 후기 석탄기 탄산염과 접하는 경우에는 처트 역(chert pebble)들이 셰일 안에 많이 포함되어 나타나고(CSPG, 1990), 지역에 따라 고토양(paleosol)이 흔하게 관찰된다(Hayes *et al.*, 1994; Poulton *et al.*, 1994). 육성층인 데빌층은 생물 화석이 산출되지 않아 그 시기가 명확하지 않으므로 암상의 유사성에 따라 하부 백악기 맨빌층군 최하부에 포함되거나(Fig. 5), 생성 시기를 추정하여 전기 백악기(Barremian; Burden, 1984) 혹은 주라기에 포함되기도 하였다(Fig. 6; Hayes *et al.*, 1994).

데빌층이 나타나는 지역의 퇴적사를 살펴보면 주라기말~백악기 초에 있었던 용기에 의해 상대적으로 큰 함몰지가 위치했던 북서부 및 중서부 지역을 제외한 대부분 앨버타평원 지역에 침식 계곡이 발달하였다(Poulton *et al.*, 1994). 데빌층은 이 시기에 고지대에 노출된 기반암이 오랜 기간 풍화작용을 받아 토양이 형성되어 그 자리에 잔류되거나, 일부는 근거리로 이동되어 국지적인 저지대에 퇴적된 것으로 추정된다(Poulton *et al.*, 1994). 따라서 상, 하부 지층과의 부정합적 관계 그리고 성인적 관점에서 퇴적 혹은 생성 시기를 고찰해 볼 때 데빌층은 상부에 놓인 맨빌층군 및 하부의 주라기층과

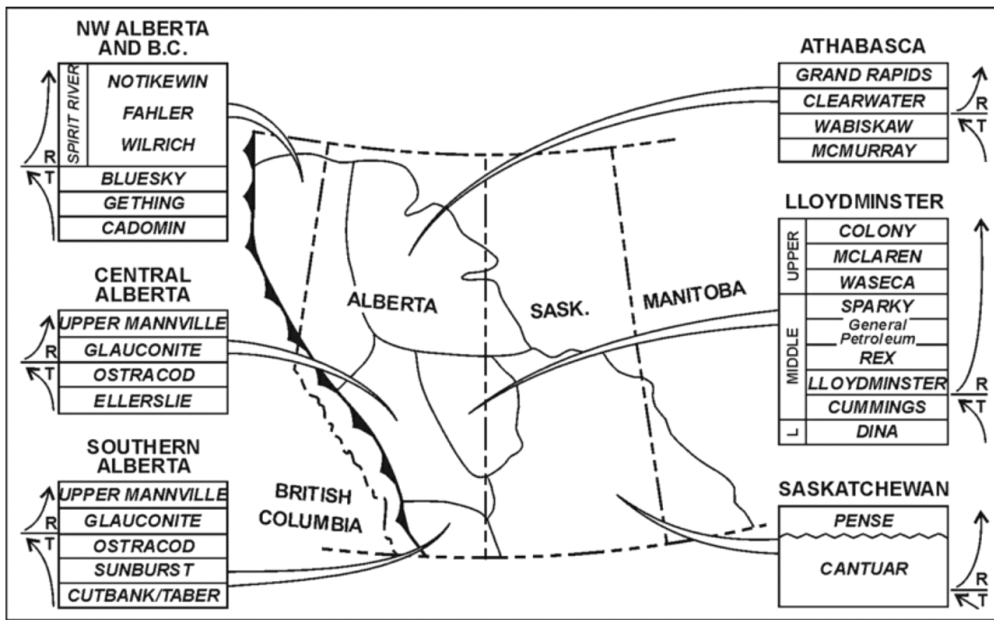


Fig. 10. Stratigraphic breakdown of the Mannville Group and its correlation to the equivalent strata in the Alberta Basin (Cant, 1996). Lithostratigraphic formations (and some members) are shown in each column. T and R represent transgression and regression, respectively. Based on the interpreted overall depositional trend (T-R), most of the stratigraphic units can be well correlated inter-regionally within one basin.

분리하여 백악기 초(Necomian: Berriasian~Hauterivian)의 독립된 지층으로 구별하는 것이 적절할 것으로 판단된다(Poulton *et al.*, 1994). 또한 지하 시추공에서 얻어진 검층 자료만으로 판단할 때 테빌층을 그 상부의 사암과 구별하기가 어려우므로 현장에서 지층 명을 적용할 때 유의할 필요가 있다.

5.2. 베이셜쿼츠 사암

앨버타주 남부 지역에서는 위에 언급한 층/층원 명과는 관계없이 여러 문헌에서 맨빌층군 하부의 석영질 사암층(또는 역질 사암층)에 대하여 흔히 베이셜쿼츠(Basal Quartz)라고 칭하는 경우가 있다(Lukie, 1999; Ardies *et al.*, 2002; Zaitlin *et al.*, 2002). 이는 앨버타 남부 평원 지역에 존재하는 맨빌층군 기저부정합면 위에서부터 오스트라코드베드 아래까지의 모든 퇴적층을 포괄하는 비공식 층명으로서 주로 석유개발 업계에서 빈번하게 사용되고 있다. 또한 베이셜쿼츠는 특정한 층이나 층원과 1:1로 대응되지 않고, 지역마다 다른 대상을 지칭하는 경우가 많은데, 대체로 엘러스리층, 컷뱅크와 선버스트 층원의 대부분이 베이셜쿼츠로 지칭된다(Lukie, 1999). 한편, 앨버타주 남부 지역의 베이셜쿼츠를 세분한 네 개의 시퀀스(sequence)에서 각 시퀀스의 퇴적상 뿐만 아니라, 주된 광물 조성이 변하는 것이 관찰되는데, 이로부터 하나의 단일한 사암층으로 인식되었던 베이셜쿼츠가 여러 차례 짧은 주기의 침식과 퇴적이 반복되는 과정에서 형성된, 서로 다른 시기의 절개곡 충전물(incised valley fill)이 중첩된 것이라고 해석되었다(Lukie, 1999; Zaitlin *et al.*, 2002). 따라서 베이셜쿼츠라는 층명은 여러 지역에서 서로 다른 층이나 층원에 해당하는 포괄적 명칭이며, 여러 지역에 다른 시기에 산발적으로 발달한 침식 절개곡(incised valley)을 충전하는 사암에 대해 지질학적 구분 없이 사용되고 있기 때문에, 서로 다른 지역의 베이셜쿼츠를 층서적으로 동일하거나 횡적으로 연속된 지층이라고

오해하지 않도록 주의할 필요가 있다.

5.3. 블루스카이, 와비스코 및 글로코나이트 사암

앨버타평원 대부분 지역의 하부 맨빌층군과 상부 맨빌층군의 경계 부근에는 해록석을 풍부하게 함유하고 주로 세립질~중립질의 석영질 사암으로 구성된 퇴적층이 나타나는데, 이 지층을 지역에 따라 글로코나이트사암, 블루스카이층 및 와비스코 층원으로 부르며(Figs. 5, 6), 여러 문헌에서 동일 시기 퇴적층으로 대비되었다(Smith *et al.*, 1984; CSPG, 1990; Hayes *et al.*, 1994). 그러나 앨버타주 북부 지역의 블루스카이층 및 와비스코층원은 해록석을 많이 함유하며, 파도에너지가 우세한 천해에서 퇴적된 사암체라는 점에서는 중부 및 남부 지역의 글로코나이트층과 매우 유사하지만, 기수성 환경을 지시하는 흔적 화석상(ichnofacies) 및 퇴적상 조합(Oppelt, 1988; Shields and Strobl, 2010)은 해침 시기에 형성되는 만곡하구 시스템 내 강어귀(river mouth) 사암체일 가능성을 지시한다. 한편, 블루스카이 및 와비스코 사암을 전진퇴적하는 해안전면부 사암체로 해석하는 경우에도 장기간의 해침 추세에 중첩되어 여러 차례 짧은 주기로 전진퇴적하는 사암체가 계단식으로 후퇴퇴적(retrogradational back-stepping)하는 사암체로의 해석(Fig. 8)이 가능하다는 점에서, 최대해침기가 지나 장기간의 점진적 해퇴 초기에 전진퇴적하는 해안전면부 사암체로 해석되는 글로코나이트층과는 층서적으로 명확히 구분된다(Cant, 1996).

따라서 글로코나이트층은 점진적 해침기에 퇴적된 하부 맨빌층군의 최상부에 위치한 블루스카이, 와비스코, 오스트라코드베드 등의 만곡하구 연안 퇴적층과 구분하여 점진적 해퇴기에 퇴적된 상부 맨빌층군의 최하부층에 해당하는 것으로 해석하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이러한 판단은 상대적으로 분지 중앙에 가까운 북부 지역에 블루스카이 및 와비스코 사암층이 먼저 퇴적되고, 분지 가장자리

에 위치한 남부 지역에 유사한 퇴적상인 글로코나이트사암층이 나층에 퇴적되는 가설과도 잘 일치한다는 점에서 더욱 설득력이 있는 것으로 받아들여진다. Cant (1996)은 WCSB 내 맨빌층군 및 동 시대 지층들에 대해 수직적 퇴적상 변화를 분석하여 수천만년에 걸친 해침-해퇴 주기(T-R cycle)로 해석하고, 이를 국지적 및 광역적 층서 대비에 활용하였는데(Fig. 10), 이러한 퇴적추세(depositional trend)에 기초한 횡적 대비는 순차층서학적(sequence stratigraphic) 해석의 바탕이 되는 원리이며, 동일 분지 내에 존재하는 동시대 지층에 대한 매우 유용한 대비 방법이다(Catuneanu *et al.*, 2009; Choi, 2016).

6. 결론

앨버타평원 지역에 존재하는 하부 백악기 맨빌층군 및 이와 대비되는 지층들을 여러 문헌 자료를 통해 비교 분석한 결과, 일부 지층들의 시대 및 공간적 분포를 분지 전체의 퇴적사와 층서 대비 틀 내에서 다음과 같이 재해석하였다. 먼저 앨버타주 남부 및 중부 지역의 맨빌층군 기저 부정합면 바로 위에 국지적으로 나타나는 데빌층은 백악기 초기에 동 지역 기반암이 오랜 기간 노출된 결과 형성된 풍화 잔류층 혹은 일부가 근거리로 이동되어 쌓인 퇴적층이므로, 상부의 맨빌층군 및 하부의 주라기층과 분리하여 독립된 지층으로 구별하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 한편, 앨버타주 남부 지역에서 주로 사용되는 비공식적 지층명인 베이설퀴츠는 오스트라코드베드 아래에 놓인 대부분의 하부 맨빌층군 내 사암층을 지칭하며, 짧은 주기의 침식과 퇴적이 여러 차례 반복되는 과정에서 서로 다른 시기에 형성된 절개곡 충전물이 중합된 것으로 해석된다. 또한 하부 맨빌층군과 상부 맨빌층군의 경계부에 위치한 블루스카이스암 및 와비스코 사암은 모두 개방된 천해에서 생성되는 해륙석을 많이 포함한다는 점에서 글로코나이트사암과 암상적으로 매우 유사하나, 전술한 두 지층이 점진적 해침기에 분지 중앙부에 가까운 북부 지역에 퇴적된 반면, 글로코나이트사암은 최대해침기를 지나 해퇴가 시작되는 초기에 분지 가장자리에 해당하는 앨버타분지 남부 지역에 쌓인 지층이라는 점에서 층서적으로 구별되어야 한다.

사사

이 연구는 한국에너지기술연구원 주요 연구개발사업(201625101 02040)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 캐나다 현지에서 자료 수집을 도와주신 권순일 교수님께 감사드립니다. 또한 본 논문을 검토하고 유익한 조언을 해주신 이용일 교수님께 감사드리며 익명의 심사위원님께도 감사드립니다.

References

Alberta Geological Survey, 2015, Alberta Table of Forma-

tions; Alberta Energy Regulator.

Alberta Geological Survey, 2017, Mountain Building and the Alberta Basin. Retrieved from <https://ags.aer.ca/mountain-building-and-the-alberta-basin>

Ardies, G.W., Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A., 2002, Controls on the geometry of incised valleys in the Basal Quartz Unit (Lower Cretaceous), western Canada sedimentary basin. *Journal of Sedimentary Research* 72, 602-618.

Brooks, P.W., Fowler, M.G. and Macqueen, R.W., 1988, Biological marker and conventional organic geochemistry of oil sands/heavy oils, Western Canada Basin. *Organic Geochemistry* 12, 519-539.

Brooks, P.W., Fowler, M.G. and Macqueen, R.W., 1989, Biomarker geochemistry of Cretaceous oil sands, heavy oil and Paleozoic carbonate trend bitumens, Western Canada Basin. In: Meyer, R.F., Wiggins, E.J. (eds.), *Proceedings of the Fourth UNITAR/UNDP International Conference on Heavy Crude and Tar Sands (Volume 2)*, 594-606.

Brooks, P.W., Fowler, M.G. and Macqueen, R.W., 1990, Use of biomarkers, including aromatic steroids, to indicate relationships between oil sands/heavy oils/bitumens and conventional oils, Western Canada Basin. In: Lazar, D.J. (eds.), *Proceedings of the 1989 Eastern Oil Shale Symposium*, Lexington, Kentucky. 104-111.

Burden, E.T., 1984, Terrestrial palynomorph biostratigraphy of the lower part of the Mannville Group (Lower Cretaceous), Alberta and Montana. In: Stott, D.F., Glass, D. (eds.), *The Mesozoic of Middle North America: A Selection of Papers from the Symposium on the Mesozoic of Middle North America*, Calgary, Alberta, Canada. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 9, 249-269.

Canadian Society of Petroleum Geologists (CSPG), 1990, *Lexicon of Canadian Stratigraphy v. 4*. Western Canada including Eastern British Columbia, Alberta, Saskatchewan and Southern Manitoba.

Cant, D.J., 1996, Sedimentological and sequence stratigraphic organization of a foreland clastic wedge, Mannville Group, Western Canada Basin. *Journal of Sedimentary Research* 66, 1137-1147.

Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, Christopher R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G.St.C.,

- Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, L., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel, R.J., Strasser, A., Tucker, M.E., and Winker, C., 2009, Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 92, 1-33.
- Choi, Y.S., 2016, Principles of sequence stratigraphy and petroleum exploration, In: Cheong D.K. (ed.), *Petroleum Energy Geology*. Sigma Press, 329-370.
- Creaney, S. and Allan, J., 1990, Hydrocarbon generation and migration in the Western Canada Sedimentary Basin. In: Brooks, J. (eds.), *Classic Petroleum Provinces*. Geological Society London Special Publication 50, 189-202.
- Creaney, S. and Allan, J., 1992, Petroleum systems in the foreland basin of Western Canada. In: Macqueen, R.W., Leckie, D.A. (eds.), *Foreland Basins and Foldbelts*. AAPG Memoir 55, 279-308.
- Dawson, F.M., Evans, C., Marsh, R. and Power, B., 1990, Uppermost Cretaceous-Tertiary strata of the Western Canada Sedimentary Basin. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 38, 160-161.
- DeCelles, P.G. and Giles, K.A., 1996, Foreland basin systems. *Basin Research* 8, 105-123.
- Du Rouchet, J., 1985, Migration in fracture networks - an alternative interpretation of the supply of the giant tar accumulations in Alberta, Canada. Part II. *Journal of Petroleum Geology* 8, 107-114.
- Duk-Rodkin, A., Barendregt, R.W., Froese, D.G., Weber, F., Enkin, R., Smith, I.R., Zazula, G.D., Pamela, W. and Klassen, R., 2004, Timing and extent of Plio-Pleistocene glaciations in north-western Canada and east-central Alaska. In: Ehlers, J., Gibbard, P.L. (eds.), *Developments in Quaternary Sciences* (Volume 2). 313-345.
- Flach, P.D. and Mossop, G.D., 1985, Depositional environments of Lower Cretaceous McMurray Formation, Athabasca oil sands, Alberta. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 69, 1195-1207.
- Fockler, M. and McKenzie, B., 2016, Western Canada Resource Plays: The Phoenix Awaits. AAPG Annual Convention and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, June 19-22.
- Hassanpour, R.M., 2009, A review of McMurray Formation Geology in Athabasca Oil Sands. *Centre for Computational Geostatistics Annual Report* 11. 1-8.
- Hayes, B.J.R., Christopher, J.E., Rosenthal, L., Los, G., McKercher, B., Minken, D., Tremblay, Y.M., Fennell, J. and Smith, D.G., 1994, Cretaceous Mannville Group of the western Canada sedimentary basin. In: Ossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, 317-334.
- Hein, F.J., 2015, The Cretaceous McMurray oil sands, Alberta, Canada: A world-class, tidally influenced fluvial-estuarine system—an Alberta government perspective. In: Ashworth, P.J., Best, J.L., Parsons, D.R. (eds.), *Fluvial-Tidal Sedimentology. Developments in Sedimentology* 68, 561-621.
- Higley, D.K., Lewan, M.D., Roberts, L.N. and Henry, M., 2009, Timing and petroleum sources for the Lower Cretaceous Mannville Group oil sands of northern Alberta based on 4-D modeling. *AAPG bulletin* 93, 203-230.
- Hoffman, P.F., 1988, United plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16, 543-603.
- Huerta, P., Armenteros, I. and Silva, P.G., 2011, Large-scale architecture in non-marine basins: the response to the interplay between accommodation space and sediment supply. *Sedimentology* 58, 1716-1736.
- Jo, H.R. and Ha, C.G., 2013, Stratigraphic architecture of fluvial deposits of the Cretaceous McMurray Formation, Athabasca oil sands, Alberta, Canada. *Geosciences Journal* 17, 417-427.
- Leckie, D.A., Bhattacharya, J.P., Bloch, J., Gilboy, C.F., Norris, B. and Plint, G., 1994, Cretaceous Colorado/Alberta group of the Western Canada sedimentary basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, 335-352.
- Leckie, D.A., Wallace-Dudley, K.E., Vanbeselaere, N.A. and James, D.P., 2004, Sedimentation in a low-accommodation setting: Nonmarine (Cretaceous) Mannville and marine (Jurassic) Ellis groups, Manyberries field, south-eastern Alberta. *AAPG Bulletin* 88, 1391-1418.
- Lukie, T.D., 1999, A study of the sedimentology, geochemistry, and stratigraphic organization of the Lower Cretaceous Horsefly (Basal Quartz) valley (Taber-Cutbank), Southern Alberta and Northern Montana. Unpublished MSc Thesis, Kingston, Queens University.
- Machel, H.G., Borrero, M.L., Dembicki, E., Huebscher, H., Ping, L. and Zhao, Y., 2012, The Grosmont: the world's largest unconventional oil reservoir hosted in carbonate

- rocks. Geological Society London Special Publications 370, 49-81.
- 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.
- Oppelt, H., 1988, Sedimentology and ichnology of the Bluesky Formation in Northeastern British Columbia. In: James, D.P., Leckie, D.A. (eds.), *Sequences, Stratigraphy, Sedimentology: Surface and Subsurface*. Canadian Society of Petroleum Geologists Special Issue 15, 401-415.
- Poulton, T.P., Christopher, J.E., Hayes, B.J.R., Losert, J., Titterton, J. and Gilchrist, R.D., 1994, Jurassic and lowermost Cretaceous strata of the Western Canada Sedimentary Basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, 297-316.
- Riediger, C.L., 1994, Migration of "Nordegg" oil in the Western Canada Basin: How much and how far?. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 42, 63-73.
- Riediger, C.L., Ness, S., Fowler, M. and Akpulat, N.T., 2001, Timing of oil generation and migration, northeastern British Columbia and southern Alberta—Significance for understanding the development of the eastern Alberta tar sands deposits. AAPG Annual Convention, Denver, Colorado, U.S.A., 3-6 June.
- Rohais, S., Crombez, V., Euzen, T. and Zonneveld, J.P., 2018, Subsidence dynamics of the Montney Formation (Early Triassic, Western Canada Sedimentary Basin): Insights for its geodynamic setting and wider implications. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 66, 128-160.
- Shields, J. and Strobl, R., 2010, The Wabiskaw D Member, Clearwater Formation: A World Class Oil Sands Reservoir Hosted in an Incised Valley Complex. AAPG Annual Convention and Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., 7-10 June.
- Smith, D.G., 1994, Paleogeographic evolution of the Western Canada Foreland Basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, 277-296.
- Smith, D.G., Zorn, C.E., Sneider, R.M., 1984, The paleogeography of the Lower Cretaceous of western Alberta and northeastern British Columbia in and adjacent to the Deep Basin of the Elmworth area. In: Masters, J.A. (eds.), *Elmworth - Case Study of a Deep Basin Gas Field*. AAPG Memoir 38, 79-114.
- Spence, B.R., 1997, Sedimentology and diagenesis of the basal quartz formation, Calgary, Alberta. Unpublished MSc Thesis, Calgary, University of Calgary.
- Williams, G.D., 1963, The Mannville Group (Lower Cretaceous) of central Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 11, 350-368.
- Welte, D.H., Schaefer, R.G., Stroessinger, W. and Radke, M., 1984, Gas generation and migration in the Deep Basin Gas Field. In: Masters, J.A. (eds.), *Elmworth - Case Study of a Deep Basin Gas Field*. AAPG Memoir 38, 35-47.
- Wright, G.N., McMechan, M.E., Potter, D.E.G. and Holter, M.E., 1994, Structure and architecture of the Western Canada Sedimentary Basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, 25-40.
- Zaitlin, B.A., Warren, M.J., Potocki, D., Rosenthal, L. and Boyd, R., 2002, Depositional styles in a low accommodation foreland basin setting: an example from the Basal Quartz (Lower Cretaceous), southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 50, 31-72.
- Zonneveld, J.P. and Moslow, T.F., 2018, Palaeogeographic setting, lithostratigraphy, and sedimentary framework of the Lower Triassic Montney Formation of Western Alberta and Northeastern British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 66, 93-127.