

탄성과 자료의 구조적 속성 분석을 이용한 호주 Exmouth 소분지의 단층 발달 패턴 분석

우주환¹ · 장성형^{2,*} · 하완수³

¹충북대학교 지구환경과학과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

³부경대학교 에너지자원공학과

요 약

구조적 탄성과 속성 분석을 이용하면 단층 및 하도(river channel)와 같은 지질학적 형상을 가시화 할 수 있을 뿐만 아니라 해상도가 낮아 인지하지 못했던 단층을 지도로 나타낼 수 있다. 또한 단층 해석의 정확도를 높이고 분지의 구조적인 운동을 이해하는데 도움을 얻을 수 있다. 이 연구에서는 Exmouth 소분지 3차원 탄성과 자료의 정밀한 단층 해석을 위해 탄성과 속성 분석을 적용하였다. 호주의 Exmouth 분지는 지속적인 신장력에 의해 형성된 열개 분지로 단층의 발달 패턴을 광역적으로 연구하기에 알맞은 지역이다. 속성 분석 시행 전 단계로 잡음 제거와 분해능 향상을 위한 스펙트럼 향상의 전처리 과정을 수행하였다. 전처리 과정은 속성 분석의 정확도를 높이고 단층선을 뚜렷하게 가시화하는데 효과가 있다. 전 처리가 완료된 탄성과 자료로 경사, 텐서, 구조지향 썸블런스 속성을 계산하여 연구 지역의 단층을 가시화 하였다. 하나의 속성으로 뚜렷이 구분되지 않는 단층 이미지를 향상시키기 위해 컬러 블렌딩을 사용해 3개의 속성 볼륨을 하나로 합쳤다. 다중 속성 분석으로 단층을 해석한 결과 Exmouth 분지에서 신장력의 영향에 따라 열개 시기, 후 열개 시기에 형성된 단층의 유형을 확인할 수 있었다.

주요어: 단층, 속성 분석, 탄성과 자료 해석, 호주 Exmouth 분지

Juhwan Woo, Seonghyung Jang and Wansoo Ha, 2021, Fault development pattern analysis with structural seismic attribute analysis of Exmouth sub-basin, Australia. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 6, p. 827-839

ABSTRACT: Structural seismic attribute analysis not only visualizes the fault image and geometrical features such as channel. It also helps interpreters map faults whose vertical throw falls below seismic resolution. This method improves the fault interpretation accuracy and contributes to obtaining a more complete understanding of tectonic movement. This study focuses on the recognition of the fault pattern of the Exmouth sub-basin based on the interpretation of the 3D seismic data using seismic attribute analysis. The Australian Exmouth sub-basin is suitable for studying rift basin fault systems created by continuous extensional stress. We conducted preprocessing including noise cancellation and spectral enhancement to improve the resolution of the data before seismic attribute analysis. These processes can improve the accuracy of seismic attribute analysis and visualize the fault lines clearly. After preprocessing, we visualized faults using dip, tensor, and structure-oriented semblance (SO semblance) attribute volume. We used the CMY color blending method to combine the three different structural-, edge detection attribute volumes to enhance fault images. The results show that the Exmouth sub-basin contains syn-rift and post-rift phase fault systems by different extensional stress.

Key words: fault, seismic attribute analysis, seismic data interpretation, Australian Exmouth sub-basin

(Juhwan Woo, Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea; Seonghyung Jang, Petroleum and Marine Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Wansoo Ha, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-42-868-3402, E-mail: shang@Kigam.re.kr

1. 서론

호주 대륙의 북서 해안에 북동 방향으로 발달한 북 Carnarvon 분지는 연안 퇴적물이 두껍게 퇴적되어 있다. 석탄기 후기에서 페름기 초기에 발생한 북서-남동 방향의 신장력에 의해 분지의 경계부가 형성되었고 트라이아스기 후기에서 쥐라기 중기의 신장력에 의해 여러 개의 소분지가 형성되며 퇴적층이 15,000 m의 두께로 쌓여 있다(Stagg and Colwell, 1994; Driscoll and Karner, 1998). 북 Carnarvon 분지는 중생대에 북북동 방향으로 형성되었으며, 대륙내 분지인 Dampir, Barrow 분지 그리고 Exmouth 대지(plateau)와 Exmouth 소분지를 포함한다. 연구 지역은 Exmouth 소분지에 위치하며, 분지를 채우고 있는 쥐라기 상부 ~ 백악기 하부 퇴적암에는 석유·가스 자원이 배태되어 있어 자원 탐사가 활발히 진행중이다. Exmouth 소분지의 석유 트랩은 대부분이 구조트랩이기에 이 지역에서 단층을 해석하고 지구조 발달과정을 분석하는 것이 필요하다. 연구 지역에서 취득된 3차원 탄성파 자료를 이용하여 분지 내 단층을 해석하고 열개 시기별 단층 발달 패턴을 분석하였다.

탄성파 자료를 이용한 단층 해석은 지층 변형과정이나 지구조 발달에 대한 이해를 높이고 탄화수소 함유 분지의 부존가능성을 평가하는데 널리 쓰이고 있다. 특히 3차원 탄성파 자료 취득과 처리 기술이 발전함에 따라 지하의 단층을 3차원으로 가시화하고 해석하는 것이 용이해졌다. 3차원 탄성파 자료의 경우 다양한 속성들을 계산하거나 종합처리함으로써 단층 이미지를 향상시키거나 해석을 용이하게 하는 연구들이 진행되고 있다(Bahorich and Farmer, 1995; Cohen *et al.*, 2006; Hale, 2013).

3차원 탄성파 자료는 층서, 구조적인 형상의 진화 과정을 3차원 공간내에서 확인할 수 있어 지층 내 단층의 방향이나 연속성을 확인하는데 효과적이다(Chopra and Marfurt, 2007, 2013). 탄성파 속성은 지층의 물리적 특성을 탄성파 자료로부터 직접 관찰할 수 있거나 수학적으로 계산할 수 있는 정량적 성질로서 지층의 지질학적 특성 및 구조의 발달, 저류층의 특성을 잘 드러나게 하여 탄성파 자료 해석을 용이하게 하는 모든 것을 말한다(Taner *et al.*, 1994; Chopra and Marfurt, 2007). 속성 분석을 위해 물

리적 특성(진폭, 위상, 탄성과 자료의 주파수, 도달시간)을 분석하여 인접한 트레이스로부터 정보를 혼합함으로써 지질학적 특성을 도출할 수 있다. 탄성파 자료 해석에서는 탄성과 속성 분석 결과를 이용해 단층면을 해석하거나 하도(river channel)의 존재 여부를 파악하는 등 지질학적 특성을 빠르게 파악할 수 있다. 탄성파 속성 분석을 탄성파 자료 해석에 사용하는 것은 1970년대부터 시작되었고 현재는 300여 개의 속성 분석 방법이 존재한다(Chopra and Marfurt, 2005; Brown, 2011). 순차층서 경계면, 지층의 주요 침식면, 부정합면과 같은 주요 층서 경계면에서 암질(lithology)의 차이에 따른 속성의 변화가 관찰되듯이 단층이나 균열이 있는 곳에서도 탄성파 반사파의 특성이 변한다. 탄성파 자료에서 단층 해석에 주로 사용되는 속성은 진폭(amplitude), 주파수(frequency), 연속성(continuity), 파형(wavelet), 경사값(dip) 등을 정량적으로 계산하여 도출된 변수들이다. 이 연구에서는 호주 Exmouth 분지 3 차원 탄성파 자료에 대해 단층 해석에 적합한 속성을 분석하고 단층 해석 결과를 제시하고자 한다.

2. Exmouth 소분지의 지질개요

Exmouth 소분지는 약 50 km의 너비를 가지며 신장 단층 블록에 의해 형성된 남동 방향의 분지이다. 분지의 서쪽으로는 Exmouth 대지(plateau), 동쪽으로는 알파 고지대(Alpha Arch), 그리고 남쪽으로는 용기대가 위치한다. 이 연구에서는 $10.5 \times 8.3 \text{ km}^2$ 로 취득된 3차원 탄성파 자료를 분석하여 분지의 단층 발달 과정을 해석하였다. Exmouth 소분지의 층서 해석은 Marshall and Lang (2013)과 McCormack and McClay (2013)의 연구를 이용하였다.

Exmouth 분지의 층서는 쥐라기 중·후기에서 백악기 초까지 여러 번의 구조적인 단계를 거치며 형성되었으며 탄성파 자료의 취득 깊이는 3.5 s로 중생대 동시 열개 작용이 발생하던 시기에서 현생 퇴적체 발달 시기로 기반암까지 탐사되지 않았다.

2.1 분지의 진화과정

Exmouth 열개 분지는 Carnarvon 분지의 남쪽 소분지에 속한다. Carnarvon 분지는 고생대 후기에서 신생대에 형성된 소분지들로 이루어져 있으며 호

주의 북서쪽에 위치한다(Bradshaw *et al.*, 1988)(그림 1). 분지의 퇴적층은 두께가 15 km에 이르며 중생대에서 신생대 시기에 퇴적되었고, 삼각주 퇴적물, 해양 규산염 퇴적물 그리고 대륙붕 탄산염 퇴적물로 구성되어 있다. 호주의 북서부 대륙주변부는 쥐라기에서 백악기 초기까지 이어진 여러 번의 확장 구조 운동으로, 주요 단층과 퇴적 가능 공간이 형성되며 남동 방향의 구조선이 만들어졌다.

트라이아스기 초기 대륙 광과내의 침강이 일어나며 하부에는 Locker 셰일층이 상부에는 하성 삼각주 퇴적층인 Mungaroo 층이 넓게 퇴적되었다(그림 2). 트라이아스기 후기에서 쥐라기 초기에는 지역적인 침강이 발생하며 Exmouth 열개 분지가 형성되었다(Mitchelmore and Smith, 1994; Driscoll and Karner, 1998). Exmouth분지는 두번의 열개 작용의 영향을 받았으며 첫번째 열개는 쥐라기 초·중기의 열개작용으로 Exmouth 대지의 북쪽에 위치한 Argo Lan이 분리되었다. 두번째 열개는 백악기 초기에 일어났으며 서쪽의 Exmouth 대지와 남쪽의 Greater India가 분리되었다.

분지 형성 시기인 쥐라기에 해양성 세립질 퇴적

물이 우세하게 퇴적되었고 쥐라기 후기 첫 번째 열개 시기에 분지의 지형을 형성하였다. 백악기 초기 열개 작용에 의해 Barrow 삼각주의 퇴적체가 퇴적되었으며, 퇴적물의 근원지는 Greater India의 남쪽 융기대, Exmouth 대지의 경계부분, Cape Range의 절리대이다. 두 번째 중생대 열개 시기에는 Greater India의 일부와 북서 봉단에 능동형 대륙분지가 형성되었다. Barrow 층군의 재동작용으로 Birdrong 사암층이 퇴적되었고, 해수면 상승에 의해 퇴적된 클라우코나이트(Glaucconite)가 풍부한 Mardie Green 사암층이 상부에 퇴적되었다. 이후 급격한 해수면의 상승으로 Muderong 셰일층이 광역적으로 퇴적되며 중요한 덮개암 역할을 하고 있다. 규산염퇴적층은 백악기 후기까지 퇴적되었고 그 후에 탄산염 퇴적층이 우세하게 나타난다(Marshall and Lang, 2013; McCormack and McClay, 2013; Gartrell *et al.*, 2016).

3. 연구 자료 및 분석 방법

Exmouth 소분지의 Vincent 오일 필드에서 1996

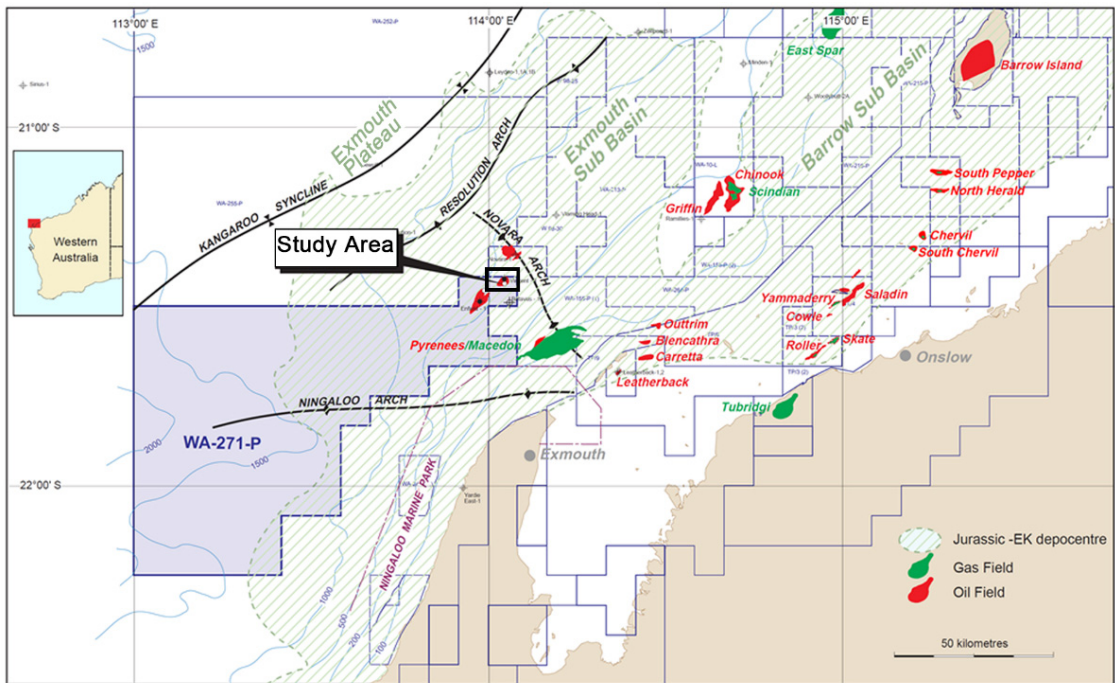


Fig. 1. Location map of sedimentary basin, tectonic elements, and oil and gas fields (Australia, 2021).

년 3차원 탄성파 자료와 1998, 1999, 2007년 Vincent 1, 2, 3 시추 탐사가 진행되었다(그림 3). 물리검층 자료는 Barrow 사암을 분석하기 위한 목적으로 취득되었으나 깊이가 얕아 광역적인 층서 해석에는 사용되지 못하였다. 3차원 탄성파 자료의 단층면 가시화를 위해 탄성파 속성 분석을 진행하였

다. 속성 분석 과정은 탄성파 자료의 노이즈를 제거하고 해상도를 높이기 위한 자료의 전처리 과정과 구조적인 형상을 나타내기 위한 구조 표현 과정으로 크게 나눌 수 있다. 전처리 과정은 3차원 탄성파 자료의 취득과 자료처리 과정에서 형성된 잡음을 제거하는 과정과 탄성파 자료의 분해능을 높이기 위한 스펙트럼 향상 과정이 포함된다. 구조 표현 과정은 여러 가지 속성 분석 결과물을 도출하는 과정이다. 연구에서는 진폭과 위상 그리고 방향성의 차이를 나타내는 일관성 속성에 기초한 구조 텐서(structure-tensor-based coherence), 샘플런스(semblance), 경사(dip) 속성을 도출하고, 세가지 속성 분석을 함께 구현(co-rendering)하여 단층을 가시화하였다. 탄성파 속성 분석이 완료된 여러 개의 자료를 함께 구현하거나 투명도를 주어 속성을 부각하게 되면 하나의 속성으로 관찰되지 않는 지질학적 특성이 잘 나타나게 된다. 각각의 탄성파 속성 분석 결과는 서로 다른 값의 계산 결과이며 이러한 3차원 자료들에 RGB (red-green-blue) 색을 적용하여 함께 구현하거나 CMY (cyan-magenta-yellow) 색을 적용하면 하나의 속성으로 보이지 않았던 부분까지 관찰가능하다. 연구 지역은 단층 가시화를 목적으로 했기 때문에 CMY 블렌딩한 볼륨을 이용하여 3차원 구조를 확인하고 단층을 해석하였다.

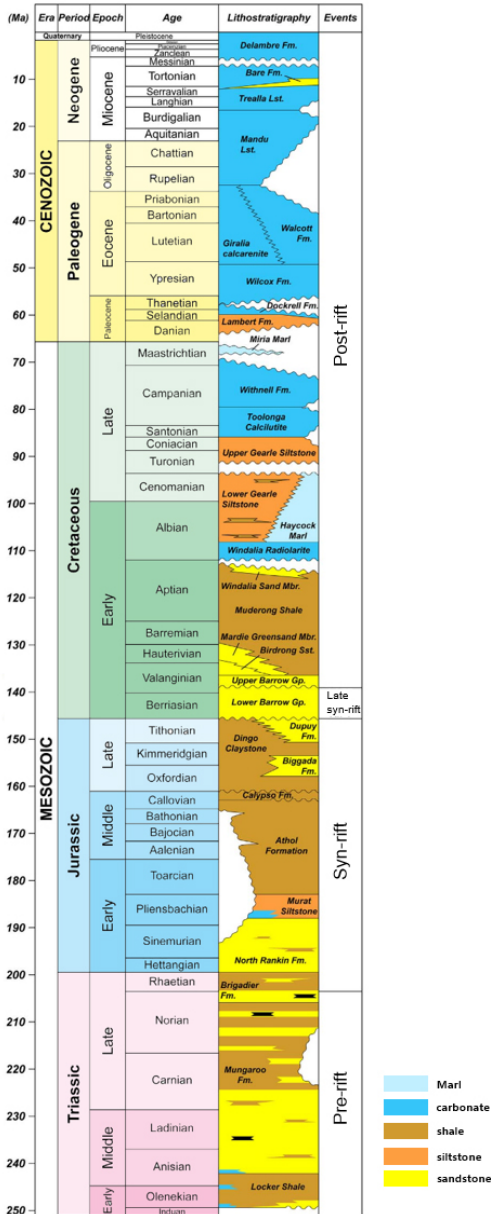


Fig. 2. Chronostratigraphic chart for the Exmouth Sub-basin comprising tectonic event (after McCormack and McClay, 2013).

4. 탄성파 속성 분석

4.1 속성 분석을 위한 전처리 과정

중합 후 탄성파 자료의 신호대 잡음비를 높이고 불연속면을 강조하기 위한 스펙트럴 밸런싱(spectral balancing)을 통해 원본자료에 내재된 중심 주파수

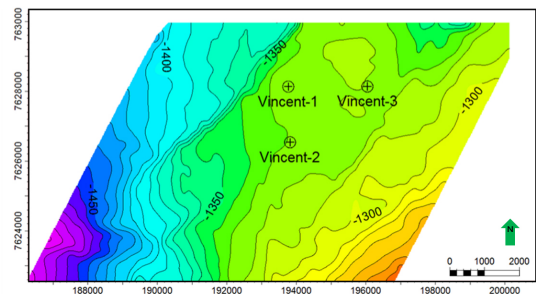


Fig. 3. Location of three wells with structure map of KV Horizon.

를 향상시키게 되면 층의 수직 및 수평 분해능이 향상되어 탄성과 자료의 해석이 용이해진다(Chopra *et al.*, 2011). 또한 탄성과 속성 분석의 정확도가 높아져 자료의 의미 있는 해석이 가능하다. 이 연구에서는 속성 분석 전 단계로 잡음 제거와 스펙트럼 향상 과정을 수행하였다.

탄성과 자료 취득과 자료처리 과정에서 남아있는 잡음을 제거하는 과정은 두 단계로 진행하였다. SO-FMH (Structurally Oriented Finite impulse Median Hybrid) 필터를 사용하여 구조적인 형상을 유지하기 위한 잡음 제거를 시행하였다(Henning and Paton, 2011). SO-FMH 필터는 반사신호음과 잡음이 동시에 기록된 탄성과 단면도에서 단층 모서리, 급경사와 같은 구조 영상은 유지하면서 규칙성 잡음이나 구조 보정 결과인 인공 잡음과 같은 규칙성 잡음은 줄이는 목적으로 적용한다. SO-FMH 입력변수는 단층 경사(θ)와 방위(ϕ)로 구성되고 최대 지층경사 방향의 법선 벡터로 정의되어 3차원 화소(voxel) 개수로 필터 크기를 결정한다. 단층경사가 클수록 화소 개수를 늘리고 경사가 급할수록 작게 결정하는 것이 일반적이다(Lee *et al.*, 2013). 이 연구에서는 단층경사도를 고려하여 필터크기를 x 방향, y 방향, z 방향에 각각 3개로 하여 3차원 경사 단면도와 방위 단면도를 구성하였다(그림 4).

그 후 탄성과 반사 에너지와 상관없이 일관성이 없이 나타나는 무작위 잡음을 제거하게 되면 반사파의 종단이 선명해진다(그림 5). 무작위 잡음을 제거하기 위해 지수함수 평활화 함수를 이용하였다. 평

활화 인자는 값이 클수록 원래 신호 값과 가깝고 작을수록 기존 값과 차이가 많이 나게 되는 특성이 있다(Simonoff, 2012). 탄성과 단면도에서는 반사 신호음 특성을 잘 나타나게 하고 돌출 이미지를 완만하게 하여 무작위 잡음을 축소하게 한다. 이 연구에서는 평활화 인자(Smoothing factor)를 0.1로 하여 중합단면도에서 무작위 잡음을 줄이고자 하였다.

자료의 분해능 향상을 위해, 스펙트럼을 높이거나 대역통과 필터, 고주파수 통과 필터, 저주파수 통과 필터를 사용할 수 있다. 이 연구에서는 스펙트럼 향상 기법을 사용하였으며 분석 구간은 Barrow 사암층 내 1672 ms로 설정하였다. 원본 자료의 최대 주파수는 82.7 Hz, 최소 주파수는 7.8 Hz로, 스펙트럼 분석을 위한 최소 주파수는 7.8 Hz로 설정하여 15개의 주파수 띠(frequency band)로 나누었다. 주

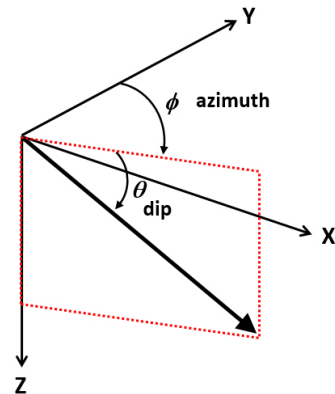


Fig. 4. Schematic geometry of dip and azimuth angles.

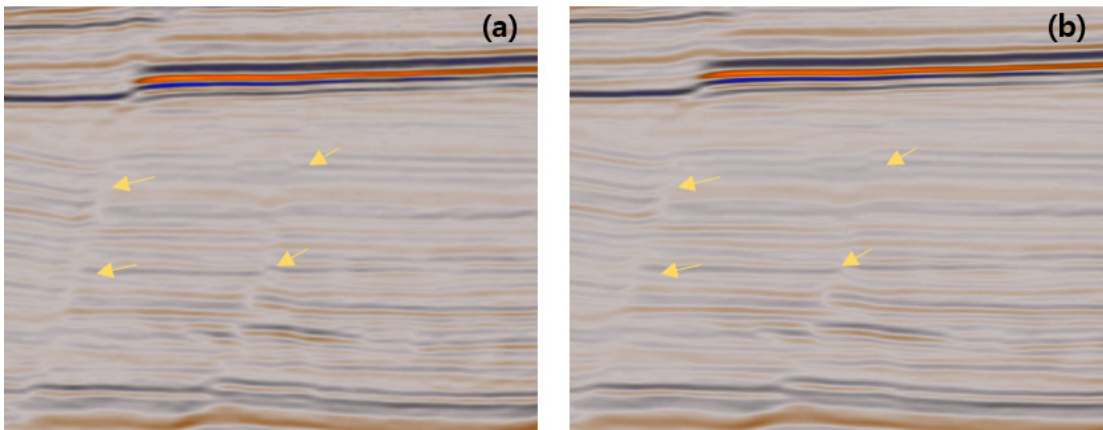


Fig. 5. The seismic section shows the major fault (a) Original and (b) applied noise filters.

파수 띠를 조밀하게 나누게 되면 자료 취득 혹은 자료처리 과정에서 형성된 잡음을 제거하거나 필요한 주파수 범위를 자료의 특성에 따라 조절하는데 효과적이다(McArdle *et al.*, 2014; Woo *et al.*, 2016). 분류된 주파수에 가보 필터(Gaber filter)를 적용하였고 스펙트럼을 향상 시킨 후 다시 합쳐 분해능이 향상된 자료를 얻을 수 있었다. 중심 주파수는 46.9 Hz로 유지하였고, 띠폭(bandwidth)은 62.5 Hz에서 58.6 Hz로, 평균 주파수는 입력자료 43.6 Hz에서 출력자료 43.9 Hz으로 조정하였다(그림 6).

4.2 속성 분석

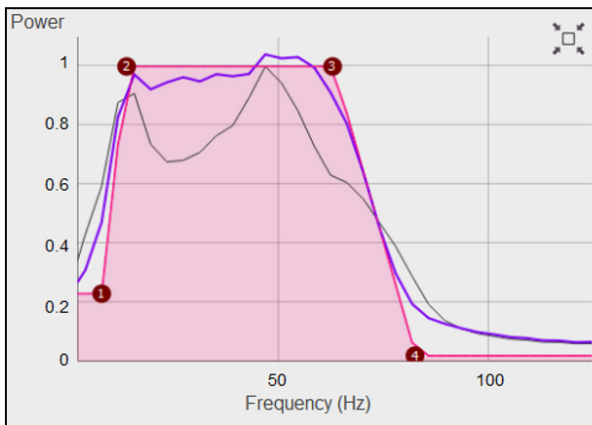
탄성파 속성은 반사 형상에 기초한 기하학적 속성과 반사 특성에 기초한 물리적 속성으로 구분할 수 있다(Taner *et al.*, 1994). 기하학적 속성은 층서 해석과 단층 또는 구조 해석에 적합한 속성으로 3차원 탄성파 자료의 반사 이벤트가 제공하는 정보를 토대로 연속성, 일치성, 무질서, 부정합, 단층, 경사, 경사 방향 등을 알 수 있다. 구조 해석에 사용되는 주요

기하학적 속성에는 경사와 방위각, 일관성(coherence) 및 곡률(curvature)이 있으며 이 연구에서는 경사 속성을 이용하였다. 반사면의 종단(edge)을 나타내기 위한 물리적 속성에는 단층 위치와 연장성을 표현하는데 적합한 속성인 텐서와 샘플런스 속성 분석을 사용하였다. 텐서는 진폭 변화를 계산하여 값이 높게 나타나는 부분을 단층으로 표현하며 큰 단층과 작은 단층의 인지에 적합하다. 위상의 변화를 계산하는 샘플런스 속성은 위상이 끊어진 부분을 단층으로 인지한다.

경사 속성은 구조 속성의 하나이다. 경사와 방위각은 3차원 공간에서 지층의 방향을 정의하기 위한 한쌍의 각도이다. 경사와 방위각에 의해 정의된 벡터는 최대 경사 방향을 나타내는 접선 벡터로 구조적인 변형이 있는 부분에서 가장 가파르다(그림 7b).

$$\text{Dip} = \sqrt{(dt/dx)^2 + (dt/dy)^2}$$

여기에서 첫번째 dt/dx는 x축 방향의 차이이며



Central Frequency		Weight	
7.81Hz		-0.07	
13.16Hz		0.21	
18.51Hz		0.33	
23.86Hz		0.44	
29.20Hz		0.38	
34.55Hz		0.33	
39.90Hz		0.32	
45.25Hz		0.18	
50.60Hz		0.24	
55.95Hz		0.29	
61.30Hz		0.51	
66.64Hz		0.33	
72.00Hz		0.23	
77.34Hz		0.09	
82.70Hz		-0.28	
Dominant Frequency		Bandwidth	Mean Frequency
Original	46.9Hz	62.5Hz	43.6Hz
Enhanced	46.9Hz	58.6Hz	43.9Hz

Fig. 6. The target spectrum for boxcar whitening is defined by (①, ②, ③&④) four frequencies with specific weights. (Grey line: Original spectrum, pink line: target spectrum, purple line: enhanced spectrum (left). The calculated weights of the individual bandpass filtered components with a bandwidth of 7.81 Hz, for the detected frequencies from 7.81 to 82.7 Hz along the horizon of 1672 ms, and enlarged bandwidth and mean frequency with spectral enhancement (right).

두번째 dt/dy 는 y 축을 나타내며 경사는 ms 의 단위를 가진다.

텐서 속성은 탄성과 자료의 진폭값의 변화를 계산하여 반사면의 종단을 강조하기 위한 속성으로 반사면의 주요 방향과 관련된 구조를 분석하기에 적합한 속성이다(Harris and Stevens, 1988).

$$T_{vm} = \lambda_m \cdot v_m$$

v_m 은 세 방향의 고유벡터(eigenvectors)이고 λ_m 세 방향의 고유값(eigenvalues)으로 층서면보다는 단층면을 보여주는데 적합하다(그림 7c).

구조 지향 쉘블런스(Structure Oriented Semblance) 속성은 분석자료의 트레이스로부터 공분산 행렬을 형성하여 고유 구조를 계산하게 된다(Gersztenkorn and Marfurt, 1999). 쉘블런스 속성은 다양한 지연 시간(time lag) 및 경사에 대응하는 가장 높은 일관

성을 갖는 경사를 추정할 수 있다. 세 가지 알고리즘 중에서 가장 빠르고 다양한 유형(크거나 작은 규모의 단층)의 단층을 확인하기에 적합한 속성이다(Marfurt *et al.*, 1998). 또한 단층이 형성된 후 그 영향으로 형성되는 이차적인 단층들을 확인하는데 적합하다(그림 7d). 이 속성은 작은 규모의 단층뿐만 아니라 광역적인 단층을 표현하는데 유용하다. 텐서 속성이 굴곡으로 표현되는 단층에 적합하다면 구조 지향 쉘블런스 속성에서는 단층의 경사에 의해 끊어짐을 표현한다.

컬러 블렌드(RGB, HSV 또는 CMY)는 여러 개의 속성을 함께 구현하는 방법으로 단층이나 하도와 같은 지질학적 사건과 암질의 변화를 고해상도로 확인할 수 있을 뿐만 아니라 퇴적층 두께에 관한 지질학적 정보를 제공하는데 효과적이다. 컬러 블렌드 도구는 다중 속성 데이터를 체계적으로 시각화하는데 효과적인 방법이다. 서로 다른 종단 속성을 가진 자료들은 서로 다른 방법의 단층에 대한 표현이기 때

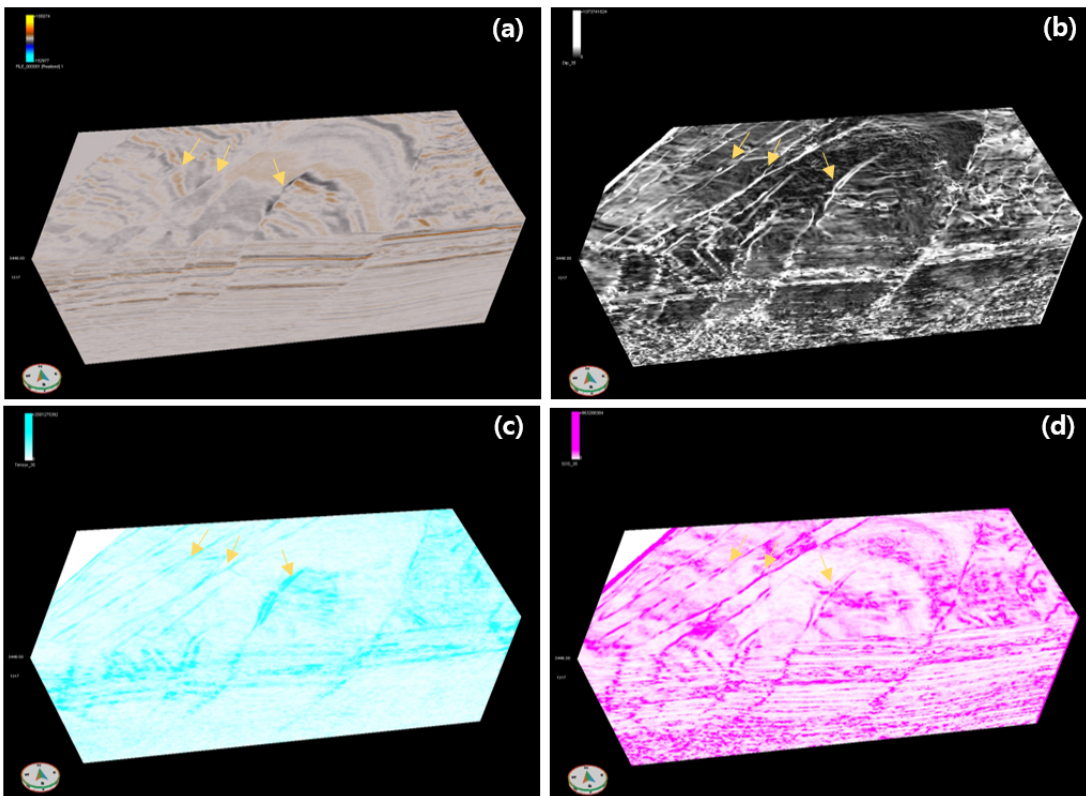


Fig. 7. Comparison of the fault trend before and after seismic attribute analysis for 3-D seismic data from Vincent field. (a) Original seismic volume, (b) Dip, (c) Tensor, (d) Structurally oriented semblance seismic attribute.

문에 다중 속성을 함께 구현하여 블렌딩된 탄성과 볼륨은 단층 해석에 효과적이다(Froner *et al.*, 2013). CMY 블렌딩에 색별로 할당된 속성은 하늘색은 텐서, 분홍은 구조 지향 샘플런스, 노랑은 경사 속성이다. CMY 블렌딩은 가장 깊게 경사진 부분을 노란색으로 표현하고, 세 볼륨이 합쳐지는 부분을 검정으로 표현하여 단층 인지에 효과적이다(그림 8). 입력되는 각각의 볼륨의 속성값은 정규화되어 색의 변화는 일반적인 값의 변화를 지시하게 된다(Froner *et al.*, 2013). 특히 이 연구에서는 함께 구현된 탄성과 속성 분석결과 단층선이 검정으로 표시되어 연장성과 변위를 확인하는데 유리하였다.

5. 탄성과 속성 분석을 이용한 단층 해석 결과 및 토의

5.1 탄성과 층서 분석

Exmouth 소분지에서 취득한 탄성과 자료를 분석한 결과 층서는 열개 작용과 함께 퇴적된 쥐라기 층과 열개 시기 말에 형성된 백악기 퇴적층 그리고 후 열개 시기에 형성된 백악기에서 신생대 층으로 나누어진다(그림 9). 탄성과 자료의 반사면 종단 특성과 형상을 이용하여 열개 시기를 세 개의 층서경계면(JSB1~3)으로 구분하였고, 후 열개 시기의 층서는 물리 검층 자료와의 대비를 통해 KV (Valanginian 부정합면), KC (Top of Gearle 실트암층), TO (Korojon 탄산염층), TM (top of Mandu 층)으로 구분하였다(그림 9, 10).

- 열개 시기(syn-rift): 열개 시기에 퇴적된 퇴적층

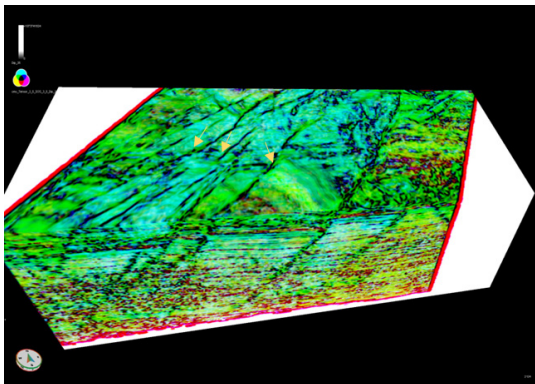


Fig. 8. The fault lines are delineated with CMY color blending volume.

은 진폭의 연속성과 특성에 따라 두개의 층으로 나누어진다. JSB1지층경계면 하부 퇴적층의 진폭은 연속성이 좋고 평행, 준평행의 특징을 띠며 진폭의 두께 또한 두껍다. JSB1 지층경계면과 JSB2 지층경계면사이 퇴적층의 진폭은 무질서하거나 발산하는 형태를 보이고 JSB1 지층경계면 하부층에 비해 강한 진폭을 보여준다. 두 지층경계면에 발달하는 단층은 변위가 크다(270 ms).

- 열개 말기(late syn-rift): 시간단면 1334 ms에서 1840 ms에 해당하며 퇴적가능공간을 채우는 퇴적체의 유입이 활발히 일어나며 진폭의 연속성이 좋고 평행 또는 준평행의 모습을 보여준다. 진폭은 대체적으로 약하나 지역적으로 강한 진폭이 나타나기도 한다. 이 퇴적체는 Barrow 층 하부에 사암층으로 이루어져 있다(Hocking, 1990). Barrow 층은 연구 지역의 주요 석유·가스 탐사 개발층으로 강한 진폭을 나타내는 지층은 유체나 가스를 함유한 지층일 가능성이 있다.
- 후 열개 시기(post-rift): 후 열개 시기로 접어들며 Valanginian 부정합면이 넓게 형성되어 진폭이 강한 KV 경계면을 볼 수 있다. 이 시기 이후의 퇴적체는 암질의 변화에 따라 크게 네가지 시퀀스로 나눌 수 있다(그림 9).

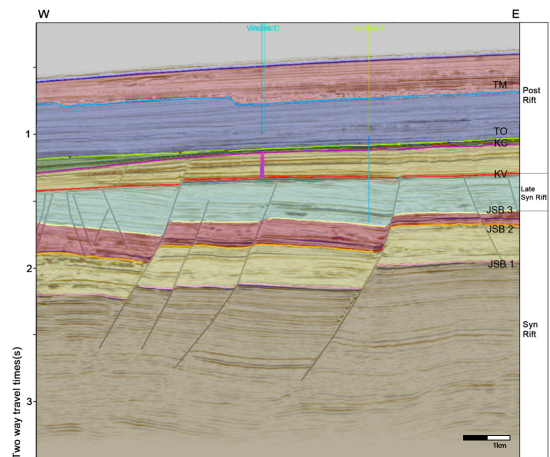


Fig. 9. Interpretation of seismic section of 1211 inline. Seven main unconformities were interpreted across the survey area. JSB1 to JSB3 (Jurassic horizon), KV (Valanginian unconformity), KC (Top Gearle siltstone), TO (Top Cardabia Group), TM (Top Mandu Formation).

5.2 지구조 운동과 관련된 단층의 발달 모습

빈센트 지역에서 취득된 3차원 탄성과 자료는 3.5 s까지 탐사되었다. 가장 하부의 층은 쥐라기 초·중기 열개 작용과 함께 퇴적된 층으로 두 개의 층으로 나눌 수 있으며 단층의 변위가 크다(그림 9). JSB1과 JSB2 지층경계면에서 나타나는 단층을 살펴보면 동-서 방향의 신장력에 의해 형성된 북북동-남남서 방향의 단층을 볼 수 있다(그림 11d, 11e). 동쪽으로는 수평 변위가 큰 단층을, 서쪽으로는 북북동 방향에서 북동방향으로 발달한 시리즈의 단층을 볼 수 있다.

열개 말기(late syn-rift) 에는 단층의 연장선이 짧아지고 복잡해지는 것을 확인 할 수 있다(그림 11c). 동시 열개성 작용에 의해 형성된 주단층과, 주단층의 발달에 따라 이차적으로 형성된 단층선이 교차하는 모습도 관찰된다. 백악기 초기의 Exmouth 분지

는 후 열개 시기에 들어서며 신장력에 의한 영향이 줄어들었고 단층선도 사라지는 것을 확인할 수 있다(그림 11b). 이 시기에는 동쪽에 발달했던 단층의 변위가 줄며 단층선이 희미해지고 서쪽에 발달한 단층은 북동-남서방향으로 발달해 있는 모습이 관찰된다. 후 열개 시기는 구조적인 안정기로 단층이 거의 사라지고 지형적인 특성만 나타난다(그림 11a).

단층의 경사는 주단층의 경우 북서 방향(270~285°)으로 경사지며 반향단층의 경우 남동 방향(90~105°)으로 경사진다(그림 12). 주단층은 열개 동시성 단층이고 반향단층은 열개 작용이 지속되며 형성된 단층으로 변위가 짧고 분포 범위가 작다.

Exmouth 소분지의 구조적 진화과정은 순차적으로 진행되어 왔으며 두번의 열개 작용과 두번의 후 열개작용에 의해 퇴적층이 형성된 것으로 연구되었

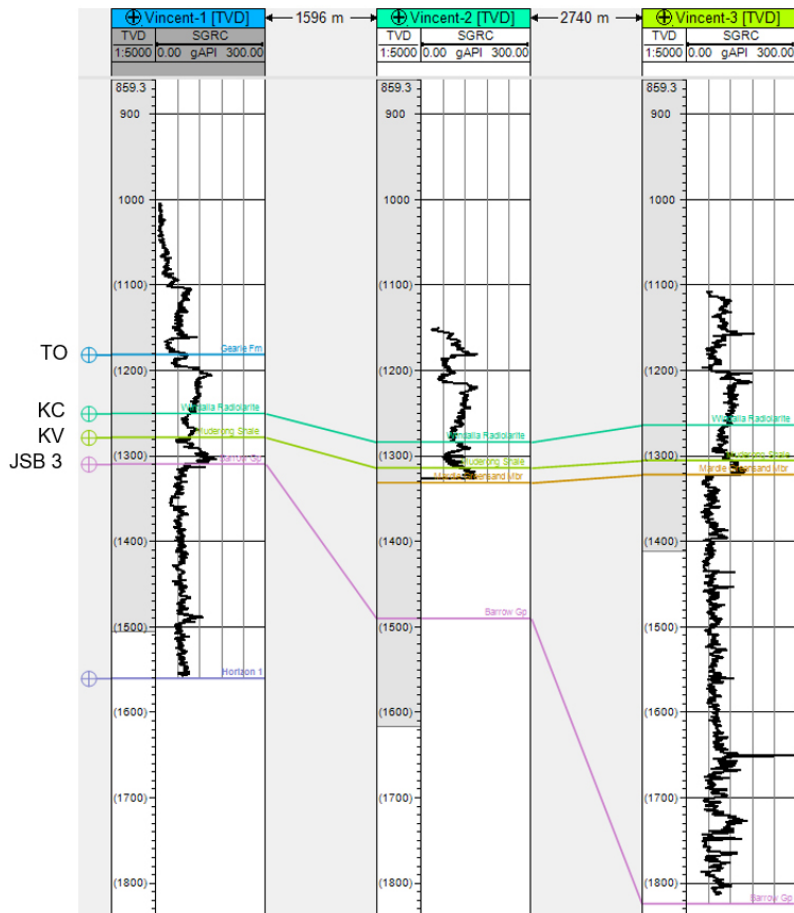


Fig. 10. Stratigraphic Correlation of gamma-ray logs of Vincent 1~3, JSB3 (Jurassic horizon), KV (Valanginian unconformity), KC (Top Gearle siltstone), TO (Top Cardabia Group).

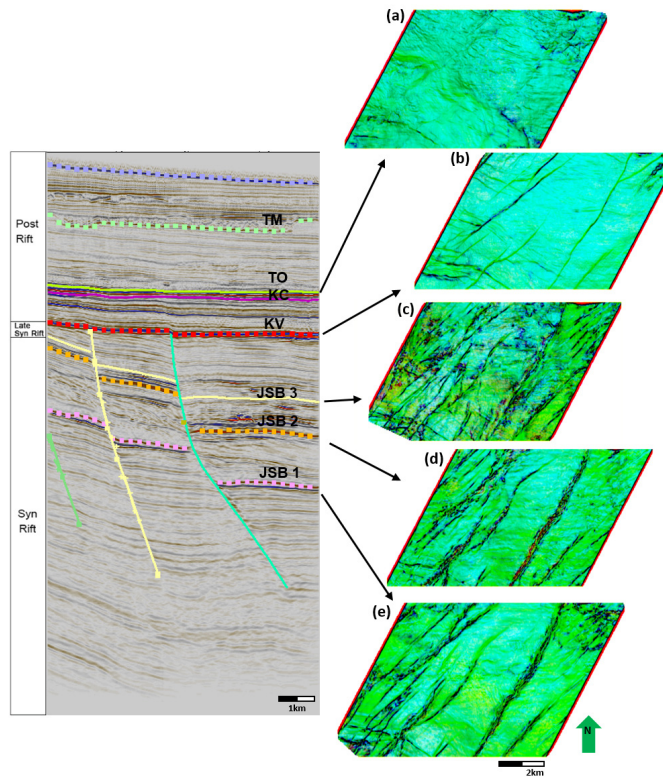


Fig. 11. The time slices attribute map (right) show the CMY color blending analysis results of each surface (left): (a) KC (Top of Gearle), (b) KV (Valanginian unconformity), (c) JSB3 (Jurassic sequence boundary 3) (d) JSB2 (Jurassic sequence boundary 2) (e) JSB1 (Jurassic sequence boundary 1).

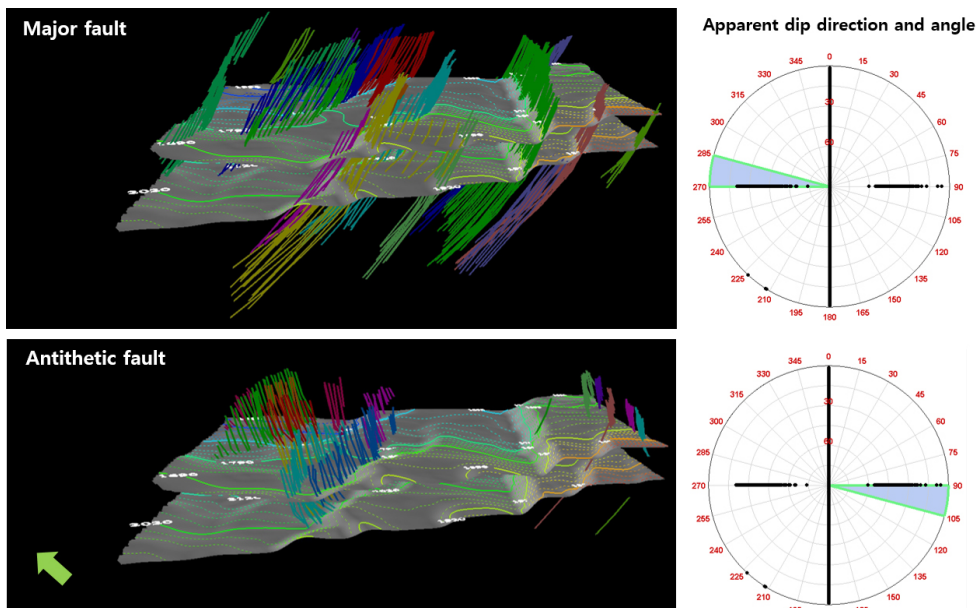


Fig. 12. Apparent dip direction and the angle at syn-rift periods illustrate a variation in the orientation of major and antithetic faults.

다(Black *et al.*, 2017). Vincent 오일 필드의 탐사 자료는 $10.5 \times 8.3 \text{ km}^2$ 로 범위가 좁아 두번의 열개 작용과 두번의 후 열개 작용에 의한 기록이 모두 존재하지는 않는다. 초기 열개 과정에서 형성되었던 다상 신장단층(polyphase extensional fault)의 모습은 확인되지 않았으나, 트라이아스기 후기에서 신생대 초기까지 진행된 수차례의 열개 작용에 의해 발달한 단층의 방향(N-NNE)이 동일함을 확인하였다. 기존의 연구를 토대로 연구 지역의 열개 과정을 분석해 보면 쥐라기 초·중기의 열개 작용으로 형성된

단층과 퇴적층, 쥐라기 후기 열개 작용에 의해 퇴적된 층과 재활성화가 일어나며 형성된 단층들, 그리고 후 열개 시기의 퇴적층이 쌓여 있는 것으로 해석된다(그림 13).

6. 결론

이 연구에서는 3차원 탄성파 자료의 해석과 속성 분석 결과를 단층 해석에 활용하여 열개 시기 지구조 운동에 따른 단층의 발달 양상을 확인하였다. 탄

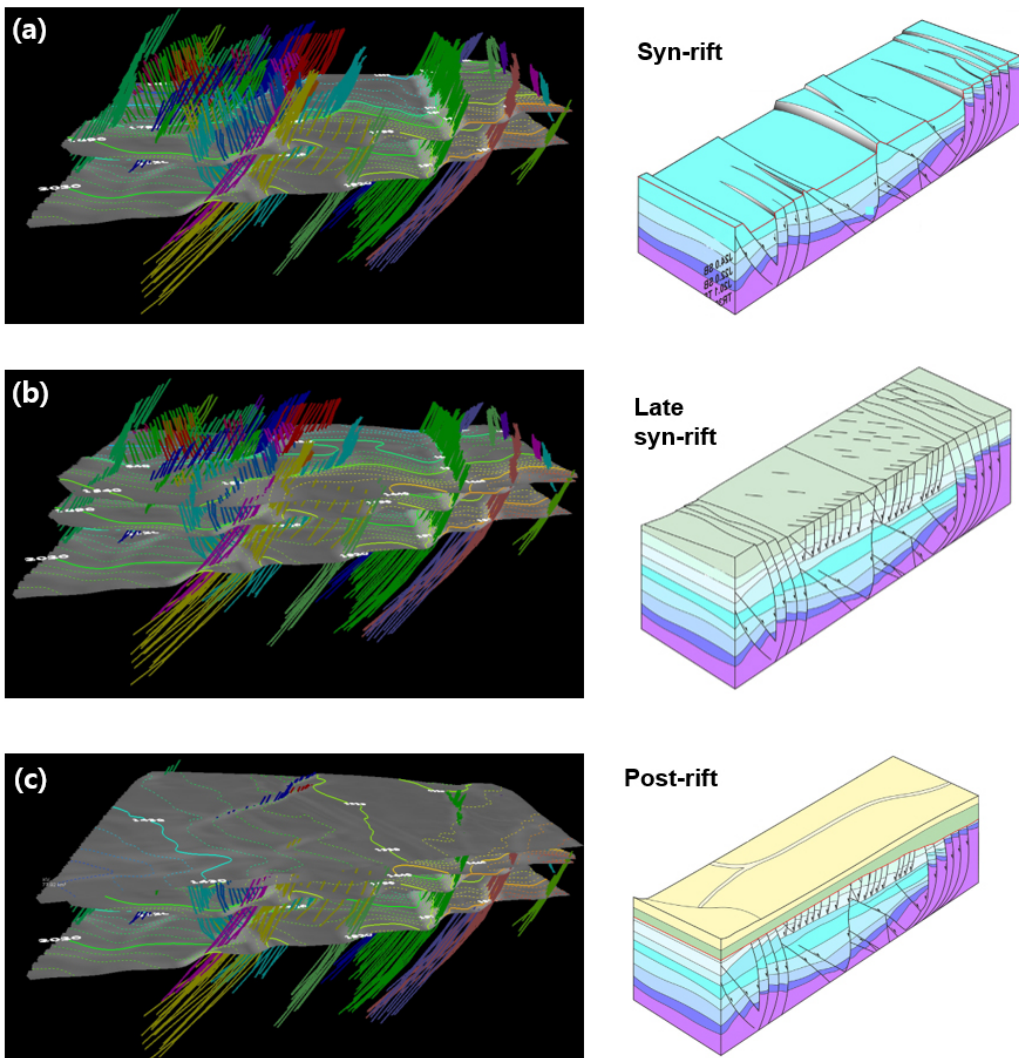


Fig. 13. Comparison of the fault structure model in Vincent seismic data and previous evolutionary models of the Exmouth sub-basin (a) Lower to Middle Jurassic syn-rift, (b) Cretaceous syn-rift, and (c) Cretaceous to present post-rift stages.

성과 속성분석 방법 중 텐서, 경사, 구조지향 쉘블린스는 단층가시화에 적합한 속성으로 확인되었으며 세가지 속성을 함께 구현하는 CMY 컬러 블렌딩은 세 성분이 합쳐지는 부분을 검정으로 표현하여 단층가시화에 효과적으로 나타내었다. Exmouth에서 취득한 탄성과 자료의 해석결과 열개 시기(syn-rift), 열개 말기(late syn-rift), 후 열개 시기(post rift)의 단층의 발달 모습이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 신장력에 의해 열개 작용의 영향을 받는 시기에는 단층의 주향이 북북동-남남서 방향을 향하고 있으며 열개 중·후기에는 재활성화가 일어나며 주단층과 연계되어 나타나는 2차 단층들이 나타나 구조선이 복잡해진다. 단층의 주향은 동시성 열개 작용에 의해 영향을 받은 단층들에 비해 동쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 후 열개 시기에는 광역적인 부정합(KV: Valanginian unconformity)이 형성되었고, 이 시기 퇴적층은 단층의 영향을 거의 받지 않은 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 위해 아카데미 라이선스를 지원해주신 슬림버저사와 fA사에 감사드립니다. 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20182510102470). 세심하게 논문을 검토하고 좋은 의견을 주신 두 분의 심사위원과 편집위원, 편집위원장님께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Australia, 2021, Regional geology of the Northern Carnarvon Basin, 78 p.
- Bahorich, M. and Farmer, S., 1995, 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. *The leading edge*, 14, 1053-1058.
- Black, M., McCormack, K.D., Elders, C. and Robertson, D., 2017, Extensional fault evolution within the Exmouth Sub-basin, North West Shelf, Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 85, 301-315.
- Bradshaw, M.T., Yeates, A.N., Beynon, R.M., Brakel, A.T. and Langford, R.P., 1988, Paleogeographic evolution of the North West Shelf region. In: *The North West shelf, Australia Symposium*, 29-54.
- Brown, A.R., 2011, Interpretation of 3D seismic data (7th ed). AAPG Memoir, 42, 646 p.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2005, Seismic attributes- A historical perspective. *Geophysics*, 70, 3SO-28SO.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007, Seismic attributes for fault/fracture characterization. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1520-1524.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2013, Structural curvature versus amplitude curvature. *The Leading Edge*, 32, 178-184.
- Chopra, S., Misra, S. and Marfurt, K.J., 2011, coherence and curvature attributes on preconditioned seismic data. *The Leading Edge*, 30, 386-393.
- Cohen, I., Coult, N. and Vassiliou, A.A., 2006, Detection and extraction of fault surfaces in 3D seismic data. *Geophysics*, 71, P21-P27.
- Driscoll, N.W. and Karner, G.D., 1998, Lower crustal extension across the Northern Carnarvon basin, Australia: Evidence for an eastward dipping detachment. *Journal of Geophysical Research*, 103(B3), 4975-4991.
- Froner, B., Purves, S.J., Lowell, J. and Henderson, J., 2013, Perception of visual information: The role of color in seismic interpretation. *First Break*, 31, 29-34.
- Gartrell, A., Torres, J., Dixon, M. and Keep, M., 2016, Mesozoic rift onset and its impact on the sequence stratigraphic architecture of the Northern Carnarvon Basin. *APPEA Journal*, 56, 143-158.
- Gersztenkorn, A. and Marfurt, K.J., 1999, Eigenstructurebased coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64, 1468-1479.
- Hale, D., 2013, Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images. *Geophysics*, 78, O33-O43.
- Harris, C. and Stephens, M., 1988, A combined corner and edge detector. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 147-151.
- Henning, A. and Paton, G., 2011, Understanding Thin Beds Using 3D Seismic Analysis Workflow, In: *Attributes: New Views on Seismic Imaging-Their Use in Exploration and Production*. SEPM, Society for Sedimentary Geology, USA, 322-341.
- Hocking, R.M., 1990, Carnarvon Basin. In: *Geology and Mineral Resources of Western Australia*. Western Australia Geological Survey, Memoir, 3, 457-495.
- Lee, O., Elghorori, A. and Bissett, A., 2013, The effect of noise attenuation on data driven interpreter guided fault analysis. In: *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. OnePetro, 164378, 1-5.
- Marfurt, K.J., Kirilin, R.L., Farmer, S.L. and Bahorich, M.S., 1998, 3D seismic attributes using a running window semblance-based algorithm. *Geophysics*, 63, 1150-1165.

- Marshall, N.G. and Lang, S.C., 2013, A new sequence stratigraphic framework for the North West Shelf, Australia. In: Keep, M., Moss, S.J. (Eds.), *The Sedimentary Basins of Western Australia IV: Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia Symposium*. Perth, WA, 2013.
- McArdle, N.J., Iacopini, D., KunleDare, M.A. and Paton, G.S., 2014, The use of geologic expression workflows for basin scale reconnaissance: A case study from the Exmouth Subbasin, North Carnarvon Basin, north-western Australia. *Interpretation*, 2, SA163-SA177.
- McCormack, K.D. and McClay, K., 2013, Structural Architecture of the Gorgon Platform, North West Shelf, Australia. In: *The Sedimentary Basins of Western Australia IV: Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia Symposium*, Perth, WA: PESA, 24 p.
- Mitchelmore, L. and Smith, N., 1994, West Muiron Discovery, WA-155-pdnew Life for an Old Prospect. *Western Australian Basins Symposium II*, 584-596.
- Simonoff, J.S., 2012, *Smoothing methods in statistics*. Springer Science & Business Media, 340 p.
- Stagg, H.M.J. and Colwell, J.B., 1994, The structural foundations of the Northern Carnarvon Basin. *The Sedimentary Basins of Western Australia: Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia Symposium*, Perth, 349-364.
- Taner, M.T., Schuelke, J.S., O'Doherty, R. and Baysal, E., 1994, Seismic attributes revisited. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1104-1106.
- Woo, J.H., Rhee, C.W., Yoon, S.H. and Kim, J.S., 2016, Well to Seismic Ties in Shale Formation with Extending Spectral Bandwidth. *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53, 473-481 (in Korean with English abstract).

Received : September 6, 2021

Revised : October 10, 2021

Accepted : November 5, 2021