

셰일가스광구 Sweet Spot 도출체계 연구

고경남^{*} · 정택주 · 박영주 · 김기수 · 박경식 · 우인수
한국가스공사

요 약

셰일가스 저류층은 투수율이 매우 낮아서 상업적인 가스 생산을 위해서는 수평정 시추 및 수압파쇄 등의 인위적인 회수 증진기술이 필요하며 상당한 개발비가 소요된다. 셰일가스 개발의 경제성은 셰일층의 총 유기탄소 함량, 취성도, 이방성 등에 의해 발생되는 지역 또는 지층별 생산량 편차에 대한 예측, 즉 Sweet Spot 분석을 통해 개선이 가능하다. 셰일가스 Sweet Spot은 가스함유량이 높고 수압파쇄 유망성이 확보된 곳을 의미한다. 본 논문에서는 캐나다 서부 혼리버 분지 셰일가스 광구를 대상으로 석유물리학적 분석을 통해 시추공 저류층 물성 예측과 유망성 분석을 수행하고 탄성과 역산과 다속성 선형회귀/확률론적 인공신경망법을 통해 3차원 저류층 물성을 예측하였다. 셰일가스 Sweet Spot 분석을 위해 예측된 총 유기탄소함유량, 공극률, 투수율, 가스포화율은 가스함유량 인자로, 취성도, 자연균열대 밀도, 공극압력은 수압파쇄 유망성 인자로 선정하고 각 인자에 대한 가중치 분석 등 정량화 및 통합을 통해 연구 대상광구의 최대 생산량 예상지역을 선정하였다. 선정결과는 미소 지진과 생산량 자료를 활용하여 검증하였다.

주요어: 셰일가스, 스위트스팟(Sweet Spot), G&G 통합모델, 저류층 양호성, 수압파쇄 양호성

Kyung Nam Ko, Taek Ju Jeoung, Young Joo Park, Ki Soo Kim, Kyung Sick Park and In Soo Woo, 2016,
A study of shale gas field Sweet Spot determination process. Journal of the Geological Society of Korea,
v. 52, no. 6, p. 799-814

ABSTRACT: Enhanced recovery technology such as horizontal drilling and hydraulic fracturing entailing a lot of cost spending is required for shale gas field development owing to very low permeability of shale gas reservoir. In order to improve economic benefits, it is necessary to carry out the research on Sweet Spot discrimination predicting the difference in the amount of gas production in areas or formations in the shale gas field due to the causes such as TOC, brittleness, anisotropy and so on. The Sweet Spot in shale gas reservoir means the space carrying high gas contents and efficient hydraulic completion. This paper covers prospect analysis and the prediction of reservoir properties from petrophysical analysis in the location of wells using well loggings, prediction of spatial reservoir properties using seismic inversion, multi-attribute linear regression and probabilistic neural network method based on seismic and well data in a shale gas field located in Horn River Basin, Canada. For Sweet Spot analysis, total organic contents, porosity, permeability, gas saturation are selected as parameters of gas contents, brittleness, natural fracture intensity, pore pressure are selected as parameters of hydraulic fracturing efficiency. The maximum production probable area is determined in shale gas field used for this research through the process of quantification and integration of each parameter including whether weighting value is put on each parameter or not in gas contents and hydraulic fracturing efficiency as Sweet Spot elements. Resulted Sweet Spot area is validated with use of microseismic and gas production data.

Key words: shale gas, sweet spot, G&G integration modeling, reservoir quality, completion quality

(Kyung Nam Ko, Taek Ju Jeoung, Young Joo Park, Ki Soo Kim, Kyung Sick Park and In Soo Woo, Korea Gas Corporation, Daegu 41062, Republic of Korea)

1. 서 론

셰일가스는 투수율이 매우 낮아서 저류층과의 접

촉면적을 증가시키기 위한 수평정 시추, 가스의 이동경로를 확대시키기 위한 수압파쇄 등 인위적인 방법으로 생산성을 향상시키기 위한 공학적인 관점에서

^{*} Corresponding author: +82-53-670-6422, E-mail: knko@kogas.or.kr

의 노력을 지속적으로 수행하였다(Kim *et al.*, 2014). 그리하여 기존의 셰일가스 개발은, 수평정 길이를 증가시키고, 수압파쇄에 사용되는 프로판트(proppant)의 양과 수평정 간격을 조정하며 최적의 생산성을 확보하였다(Lara, 2010; Reynolds and Munn, 2010; Graham, 2011). 하지만, 그림 1과 같이 수평정 시추공에서 오히려 수직 시추공보다 더 적게 생산되는 곳(그림 1 노란색 원)도 있으며, 수평정 길이와 프로판트 양을 증가시켰음에도 불구하고 더 낮은 생산성

을 나타내기도 한다. 최근에는 유가스 가격이 하락되면서 상업생산이 가능한 셰일가스 개발이 줄어드는 추세이다. 또한, 동일 분지 및 광구 내에서도 생산성 차이가 크다는 것을 확인(그림 2)하면서 지질학적인 분석을 통하여 생산성이 높은 지역을 찾아내는 분석을 앞에서 언급한 공학적인 분석과 더불어서 수행하고 있는 추세이다(Karen *et al.*, 2013).

북미지역의 주요 7개 셰일가스 분지에 대한 특징을 표 1에 표시하였다. 셰일가스 광구에서는 석영 함

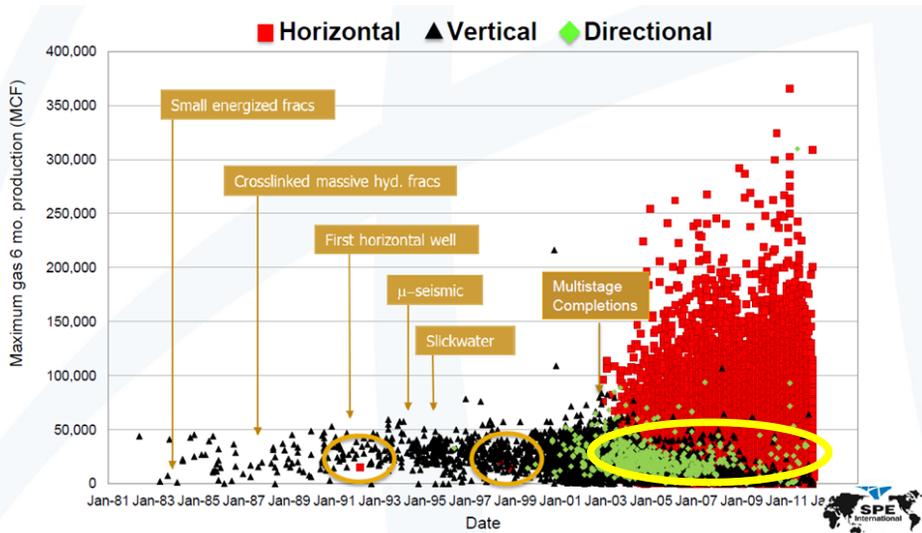


Fig. 1. Unconventional Development - Learning Curve of Barnett Shale Development. Note that some horizontal well production rates are lower than vertical ones in the yellow circle (Usman, 2012).

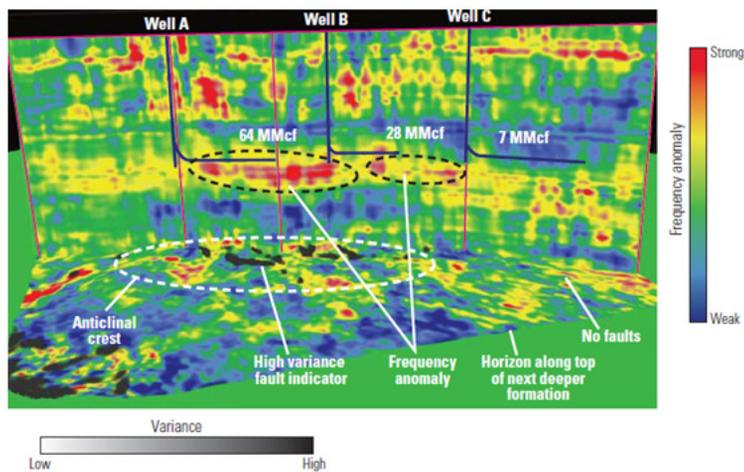


Fig. 2. Fracture detection with seismic frequency attributes. Note that productivity is 10 times higher in high frequency anomaly area (Karen *et al.*, 2013).

Table 1. Geological and reservoir characteristics of North America Basins (Deloitte, 2013).

Basin	Barnett Fort Worth	Eagle Ford Maverick	Haynesville East Texas Salt	Marcellus Appalachian	Duvernay Western Canadian Sedimentary	Horn River Horn River	Montney Western Canadian Sedimentary
Geological Age	Mississippian	Cretaceous	Jurassic	Devonian	Devonian	Devonian	Triassic
Depth (m)	18,00-2,750	1,850-3,650	3,500-4,300	1,500-2,450	2,700-4,000	1,600-3,000	1,600-2,800
Porosity (%)	3-9	6-14	8-15	3-9	3-8	3-9	3-18
Thermal Maturity	1.2-2.0	1.0-1.6	1.3-2.2	0.9-3.5	1.6-2.0	2.2-3.8	0.8-2.0
Gross Thickness (m)	90-150	30-90	50-100	15-105	20-90	50-200	10-275
Quartz (%)	40-60	5-20	20-35	25-40	55-80	55-80	30-60
Clay (%)	10-30	15-25	25-35	20-35	7-10	7-20	5-30
Pressure Gradient (psi/ft)	0.46-0.53	0.55-0.73	0.7-0.9	0.32-0.8	0.5-0.7	0.5-0.7	0.45-0.6
Total Organic Content (%)	3-8	2-6	1-5	3-10	2-5	2-7	1-5

량이 높고 점토의 함유량이 낮은 곳을 선정하여 수압파쇄를 수행함으로써 가스유동성을 확보하는 것이 중요하다. 석영의 경우, Barnett은 40~60%를 함유하고 있지만, Eagle Ford는 5~20%로 두 개의 분지 특성이 매우 다르게 나타난다. 또한, 점토의 경우 Marcellus는 20~35%, Duvernay는 7~10%로 두 개의 분지 특성이 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 세일가스 개발 시 생산성이 높은 곳을 선정하기 위해서는 한 개의 기준(예 : 석영 함량 30% 이상)을 적용하여 동일하게 적용할 수 없으므로, 우선적으로 분지 및 광구의 특성을 파악한 후에 광구를 개발해야 하는 것이 중요하다.

세일가스 광구 개발 시 최소한의 비용으로 최대의 생산성을 확보하기 위해서는 가스함유량이 높고 수압파쇄가 용이한 곳을 찾기 위한 지질 및 지구물리학적(G&G)분석, 최적의 수평정 길이와 수압파쇄에 사용되는 프로판트 양을 산정하기 위한 공학적인 분석 및 지역별 가스가격과 세금, 환경규제와 도로 및 배관망 등의 설비활용 가능성을 분석하기 위한 경제성분석 등도 필요하지만, 본 연구에서는 광구개발의 시작이 되는 G&G 분석위주로 최대가스 생산 가능 구간(Sweet Spot)을 선정하는 연구를 북미지역 세일가스 광구를 대상으로 실증하였다.

2. 연구대상 광구의 위치 및 지질학적인 특성

연구 대상광구는 캐나다 브리티시주 북동쪽 혼리버분지에 위치하고 있으며, 광구의 전체면적은 약

200 km²이다. 본 광구는 2010년부터 패드(Pad) 개념으로 개발되었으며, 4개 패드에서 31공을 시추하여 가스를 생산 중이다(그림 3).

광구 내에는 북서쪽 끝자락에 단층이 발달하고 퇴적층의 경사가 수평에 가까우며, 광역적인 응력은 북동에서 남서쪽으로 형성되어 있다(Heidbach *et al.*, 2008). 이 광구는 고생대 대본기 해성 환경에서 퇴적된 후 구조적인 영향을 거의 받지 않았으며, 석영(Quartz)과 유기물이 많은 세일이 우세한 세일가스 광구이다(Gibson and Edwards, 1990; Davies, 1997; Proverbs *et al.*, 2010). 세일가스층의 심도는 약 2,400 m 지점으로, 200 m의 층후 내에 3개의 주요 저류층으로 구분된다.

본 광구 물리검층 자료 분석 시 자료의 신뢰성을 높이기 위해 코어자료 분석결과(XRD, SEM 등)와 대비검증하였다. 또한, 분석된 저류층 물성들의 상관성을 분석함으로써 Sweet Spot 도출에 중요한 인자들을 도출하고자 노력하였다. 저류층별 분석결과 B층의 경우 상대적으로 점토(Clay)함량이 많아 파쇄효율을 저하시키는 큰 요인으로 작용하고, A층과 C층은 총유기탄소함량(TOC), 공극률(Porosity), 취성도(Brittleness Index: BI) 특성이 양호하게 나타났다(그림 4). 특히, 수압파쇄 효율성을 분석할 때 널리 사용하는 인자는 λ_p , μ_p , 취성도, 폐쇄응력(Closure Stress Scalar: CSS)이다. λ_p (Incompressibility)는 비압축성을 지시하는 저류층 물성이며 저류층 공극 안에 가스가 존재할 경우 가스의 압축성으로 인해 λ_p 값이 낮아진다. μ_p (Rigidity)는 강성률을 나타내

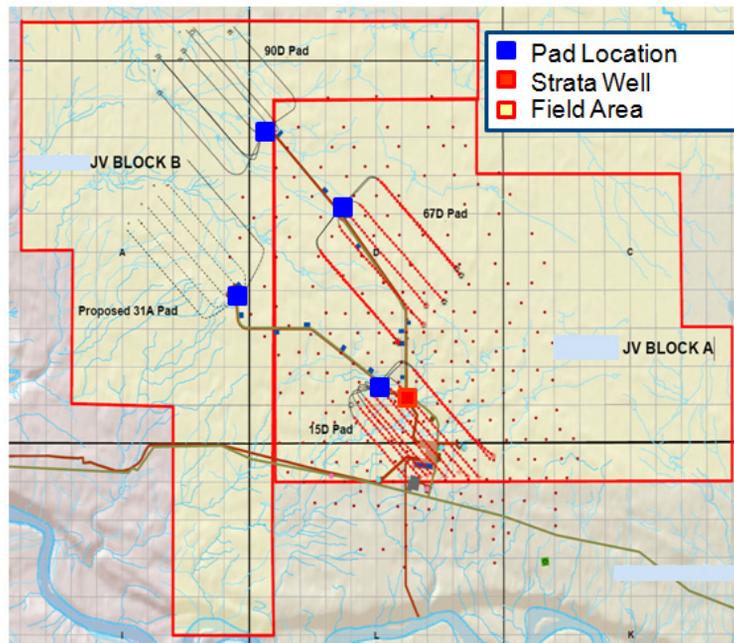


Fig. 3. Shale gas field and pad locations used in this paper. Total size of the field including 4 pads and 31 wells is about 200 km².

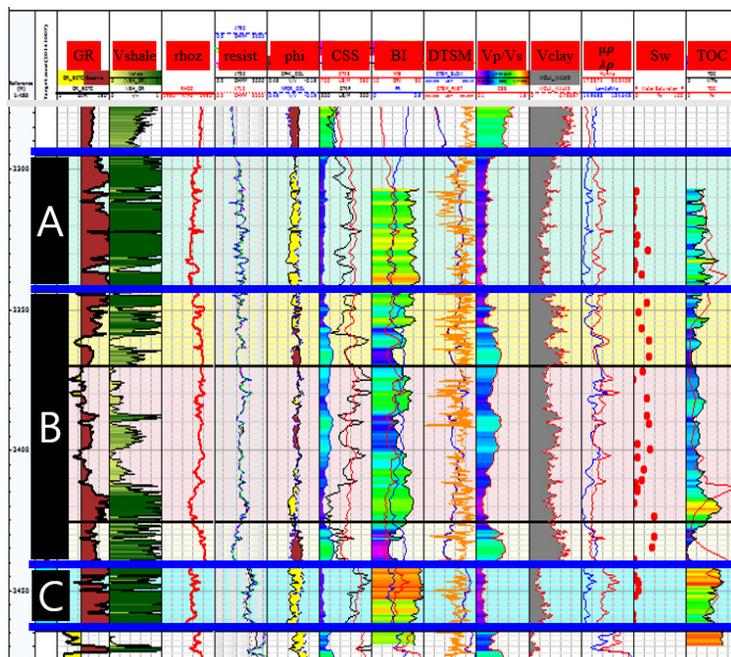


Fig. 4. Shale gas field well logging data for three target reservoirs (A, B and C). Note that reservoir depth is from 2,300 m to 2,475 m, and thickness of A, B, and C formations are 50 m, 100 m, and 25 m, respectively. GR, Vshale, rhoz, resist., phi, CSS, BI, DSTM, Vp/Vs, Vclay, μ_r , λ_r , Sw, TOC on the section are gamma ray, shale volume, bulk density, resistivity, porosity, closure stress scalar, brittleness index, shear sonic velocity, Vp/Vs ratio, clay volume, rigidity, incompressibility, water saturation, total organic contents, respectively.

는 지시자로서 외부에서 가한 힘에 대해 물체의 모양이 얼마나 변하는지를 나타내는 척도로 암석속에 석영, 장석, 운모 등의 광석이 많이 포함되어 있을수록 강성률이 좋아져서 수압파쇄가 용이해지는 경향을 있다. 취성도는 영률(Young's modulus)과 프와송비(Poisson's ratio)의 비 또는 광물 조성 비로 도출될 수 있으며 영률이 클수록 프와송비가 작을수록 좋은 취성도를 보인다. 수압파쇄 시 생성된 균열(fracture)이 점토와 같이 연성이 높은 물질로 인해 균열을 유지하지 못하고 닫힌다면 수압파쇄 효율은 급격히 낮아질 수 있다. 따라서, 연성이 높은 점토가 저류층에 적게 존재할수록 파쇄응력은 낮아져 수압파쇄가 용이한 저류층일 가능성이 높다. 본 광구에 대해 TOC, $\lambda\rho$, $\mu\rho$, 취성도, 파쇄응력(Closure Stress

Scalar: CSS)을 지질·지화학·암석역학적으로 통합분석한 결과 $\lambda\rho$ 가 작을수록, $\mu\rho$ 는 클수록 TOC, BI가 높고, CSS가 낮을수록 양호한 저류층 특성을 나타냈다. 즉, 본 광구의 경우 TOC, 공극률이 높은 구간에서 파쇄가 양호한 경향이 있으므로, Sweet Spot 도출을 위해서는 TOC, 공극률, BI가 높고, 점토함량 및 CSS가 낮은 구간을 도출해내는 것이 중요하다(그림 5).

2.1 혼리버광구 Sweet Spot 요소 선정

본 논문에서의 Sweet Spot은 최대 가스생산이 가능한 곳으로, G&G 분석을 통한 가스함유량이 가장 많으면서 수압파쇄가 용이한 곳을 선정하는 것으로 한정하였다. 즉, 기존설비(도로, 가스배관, 가스처리설비, 물공급처 등) 활용을 고려한 경제성 부분은 배

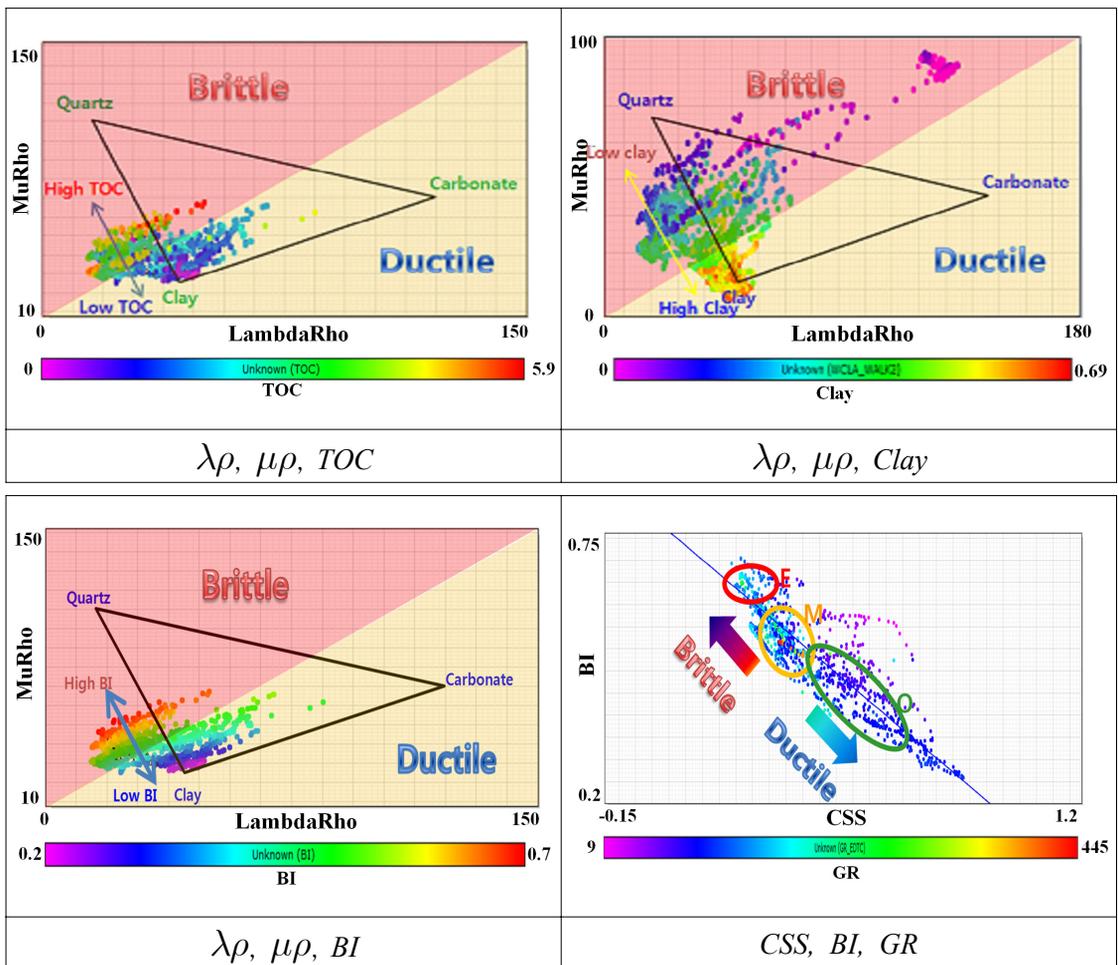


Fig. 5. Correlation analysis of shale reservoirs to figure out brittle or ductile reservoir formations.

제하고, 지역 및 저류층별로 가스를 가장 많이 생산할 수 있는 곳을 선정하였다.

G&G 관점에서의 가스생산성이 높은곳을 선정하기 위한 요소로는, TOC, Porosity, Natural Fracture 등이 있다(Deshpande, 2008; Helena *et al.*, 2013; Karen *et al.*, 2013)(그림 6). 이러한 다양한 요소중에서 가스함유량이 높은 지역을 선정하기 위한 Reservoir Quality (RQ)와 수압파쇄가 용이한 곳을 선정하기 위한 Completion Quality (CQ)로 구분하여 Sweet Spot 요소로 선정한다(Diaz *et al.*, 2013). 해당 세일가스 광구의 분지특성과 관련된 논문자료를 분석하고, 인근 광구의 운영사들이 시추위치를 선정하는데 이용한 자료 등을 활용하여 RQ에 대해서는 총유기탄소함량, 가스포화율, 공극률, 투수율 등 4가지를, CQ에 대해서는 취성도, 자연균열대 밀도, 공극압력 등 3가지를 선정하였다. 단, CQ 인자 중 자연균열대 밀도는 방위각(azimuth)으로 정렬된 탄성과 자료의 역산(seismic inversion)을 통해 방위각별 속도차이를 예측하고 그 차이를 자연균열에 기인한 이방성으로 해석하여 수치화 하였다.

2.2 G&G 통합모델 구축(Sweet Spot 요소 활용)

코어, 물리검층 및 아래의 탄성과 속성에 기반하여 다속성 선형회귀 기법과 확률론적 인공신경망 기법(Hampson *et al.*, 2001) 을 활용하여 Sweet Spot

인자에 대한 3차원 모델링을 수행하였다. 모델링 후에는 시추공 위치에서 예측/실제 물성치에 대한 검증을 위해 교차검증법(cross validation)을 활용하였다. 교차검증법이란 다속성 선형회귀 기법(Multi attribute linear regression method)과 확률론적 인공신경망 기법(Probabilistic neural network method)의 학습(training)에 사용된 시추공자료 중 하나의 시추공자료를 제외하고 탄성과 속성과 나머지 시추공 자료만을 이용하여 학습을 수행한 후, 학습에서 제외된 시추공 위치의 물성값을 계산 및 실제 물성값과 비교하여 검증오차를 구한다. 학습에 이용된 모든 시추공을 한 번씩 제외하는 방법으로 각 시추공의 위치에서 오차값을 구한 후 전체 시추공에 대한 평균오차를 구하는 방법이다. 표 2는 교차검증법을 통해 도출된 예측치와 실제 물성치의 상관도를 보여준다. 평균 상관도는 73~84% 정도의 범위를 보이며 양호한 수준이다.

3. RQ 모델

Reservoir Quality는 가스함유량과 연관이 있는 총유기탄소함량, 가스포화율, 공극률 및 투수율 네 가지 요소를 아래와 같이 주요 저류층별로 구분하여 개별적으로 모델을 구축하였다.

- RQ 인자 예측에 활용된 탄성과 속성 : 진폭, 주파

Table 2. Average correlation coefficient of predicted and actual properties logs based on the cross validation method.

Parameter	TOC	Gas Saturation	Porosity	Permeability	Brittleness	Pore Pressure
Method	Probabilistic neural network	Probabilistic neural network	Multi attribute linear regression	Probabilistic neural network	Multi attribute linear regression	Multi attribute linear regression
Correlation coefficient	81%	84%	80%	84%	77%	73%

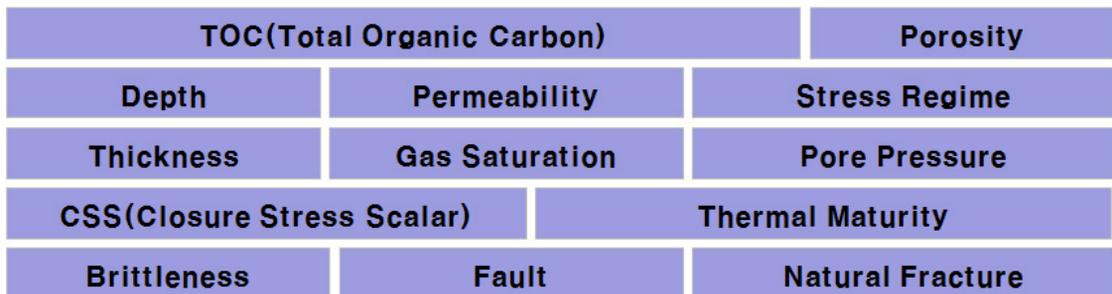


Fig. 6. Shale gas field Sweet Spot parameters.

수, 주파수필터, 위상, 지층밀도, MuRho, 영률, 균열밀도, Vp/Vs Ratio, 공극률(투수율 예측시 활용)

3.1 개별요소 모델

총유기탄소함량(TOC, Total Organic Carbon): 세일가스 광구는 전통적인 유·가스전 광구와는 달리 근원암과 저류암이 동일하기 때문에 총유기탄소 함량이 저류층의 가스함유량과 상관도가 높으며, 저류층의 유기물 탄화수소 양을 파악하기 위해서는 코어자료를 활용하여 분석하여야 하며, 총유기탄소함량 모델링은 Passey *et al.* (1990)이 제안한 음향검층과 비저항검층간의 차이를 총유기탄소함량으로 환산하는 $\Delta \log R$ 방법을 이용하여 시추공의 총유기탄소함량을 계산하고 코어에서 측정된 총유기탄소함량으로 검증하였으며, 공간적 가시화는 RQ 탄성과 속성들과 학습을 수행하는 인공신경망 기법을 적용하여 총유기탄소함량 예측오차를 최소화하였다. 대상광구는 저류층별 평균값 기준으로 2.8~7.3% 정도의 범위를 보인다(그림 7).

가스포화율(Gas Saturation): 가스포화율 모델링은 Waxman-smits 식(Waxman and Smits, 1968)을 이용하여 시추공별로 가스포화율을 계산하고 코

어자료로 검증한 후, 가스포화율 예측오차를 최소화 하는 RQ 탄성과 속성들과 학습을 수행하는 인공신경망 기법을 적용하여 가스포화율을 공간적으로 가시화하였다. 가스포화율은 수포화율과 역관계에 있으므로, 수포화율이 낮은 지역이 가스포화율과 가스함유량이 높게 나타나며 대상광구는 저류층별로 46~95% 정도의 범위를 보인다(그림 8).

공극률(Porosity): 공극률 모델링은 밀도(bulk density)에서 계산된 공극률을 코어에서 측정된 공극률로 검증한 후, RQ 탄성과 속성들과 다속성 선형 회귀기법의 학습을 통해 공극률 예측오차를 최소화 한 후 공간적으로 가시화하였다. 공극률이 높은 곳이 가스를 많이 함유할 수 있는 공간을 제공할 수 있기 때문에, 공극률이 높은 곳이 가스함유량이 높게 나타나며 대상광구는 저류층별로 2~8%의 값을 나타낸다(그림 9).

투수율(Permeability): 투수율 모델링은 시추공 코어의 공극률과 투수율간의 관계식을 도출하고, 코어가 존재하지 않는 다른 시추공에 적용하여 투수율을 적용하였다. 투수율의 공간적 가시화에는 RQ 탄성과 속성들과 각 시추공에서 계산된 투수율을 바탕으로 학습을 수행하고 투수율 예측오차를 최소화하

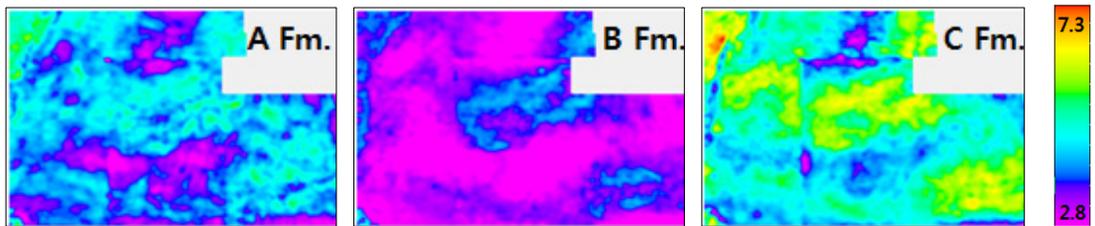


Fig. 7. Average TOC maps predicted from Probabilistic Neural Network method. C formation shows the highest TOC values among A, B and C formations. Especially, middle and south east area in C formation exhibit relatively higher porosity values than other areas.

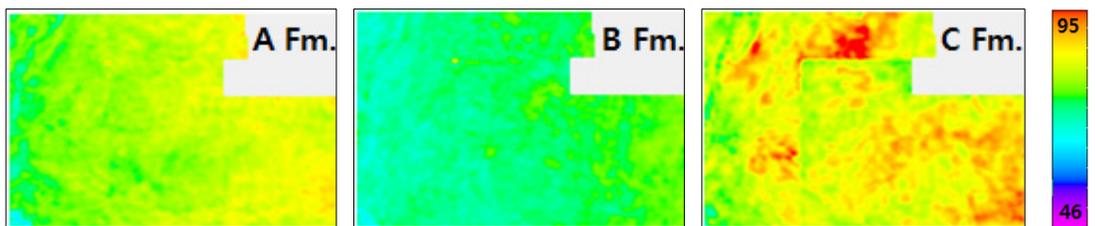


Fig. 8. Average gas saturation maps predicted from Probabilistic Neural Network method. C formation shows the highest gas saturation values among A, B and C formations. Especially, north, middle and south east area in C formation exhibit relatively higher porosity values than other areas.

는 인공신경망 기법이 활용되었다. 모델링에서 도출된 투수율은 공극률과 매우 유사한 경향을 보였다. 이러한 현상은 코어 실험에서 도출된 공극률-투수율간의 선형 관계, 즉 공극률이 양호한 지역에서 투수율도 양호하게 나타나는 특성과 유사하였다(그림 10).

3.2 요소별 가중치 부여

상기에서는 개별 요소별로 가스함유량이 높은 곳을 선정하기 위해 분석하였으나, 어느 요소가 가스 생산성과 가장 높은 상관성이 있는지를 파악하기 위해서 4가지 요소를 통합하여 분석하였다. 이때, 각 요소별로 정규화하고 가중치를 달리하여 통합 모델을 구축한 후 생산 자료와의 일치성 여부를 파악하

였는데, 우선적으로는 개별적인 요소에 가중치를 부여한 결과와의 비교를 위하여 4개 요소에 동일하게 25%씩의 가중치를 부여하여 분석하였다(그림 11). 다음으로, 세일가스는 전통가스전 광구와 달리 근원암에서 가스가 생성된 후 저류층 내에 존재하고 있기 때문에 RQ에서의 주요 인자로는 일반적으로 TOC가 중요한 요인으로 분석이 되며(Liu *et al.*, 2014), 본 광구에서도 두 번째 사례에서는 TOC에 40%의 가중치를 부여하고, 나머지 3개의 요소에는 20%씩의 가중치를 부여하였다(그림 12). 두 개의 RQ 통합 모델을 비교한 결과, 저류층 및 지역별로 별다른 변화가 없었기 때문에 향후 G&G (RQ+CQ)통합모델을 구축할 때에는 가중치를 부여하지 않은 첫 번째

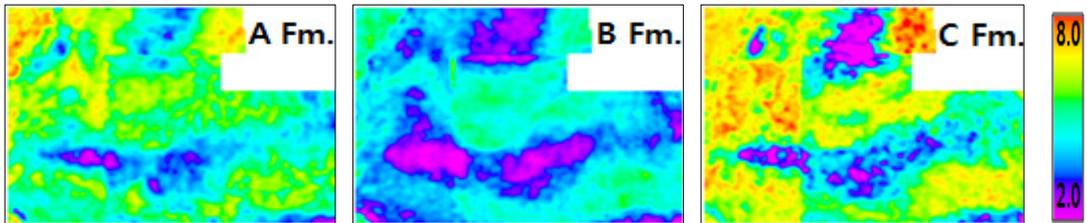


Fig. 9. Average porosity predicted maps from Multi-attribute Linear Regression method. C formation shows the highest porosity values among A, B, C formations. Especially, middle, south east and west area in C formation exhibit relatively higher porosity values than other areas.

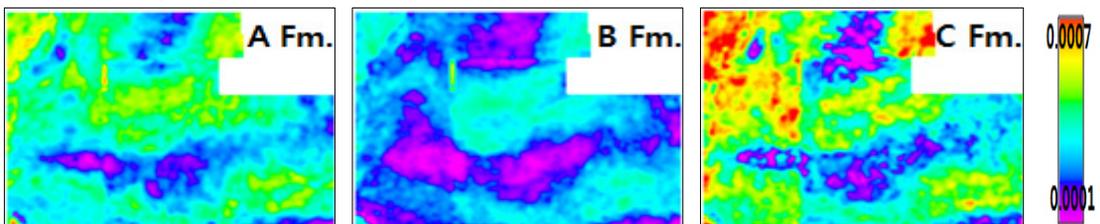


Fig. 10. Average permeability maps predicted from Probabilistic Neural Network method. C formation shows the highest permeability values. Permeability value in middle, south east and west area of C formation is relatively higher than other areas. This trend is almost similar to other RQ parameters.

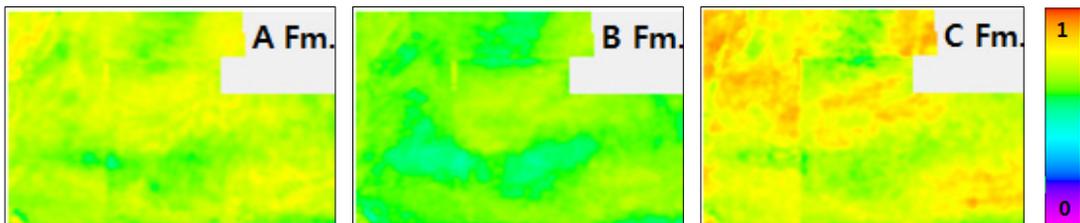


Fig. 11. Average RQ Map which is generated after putting an equal weighing value to each RQ parameter (No weighting: TOC 25% + Gas saturation 25% + Porosity 25% + Permeability 25%).

케이스의 RQ 통합 모델(그림 11)을 활용하였다.

4. CQ 모델

세일가스 광구를 개발하여 가스를 생산하기 위해서는 전통적인 가스전 광구와는 달리 저류층의 가스 유동경로를 확장시키기 위하여 수압파쇄를 수행하여야 하므로(Kim *et al.*, 2014), 수압파쇄 효율이 양호한 곳을 파악하기 위해서는 저류층에 수압을 가했을 때에 파쇄의 전파범위가 넓고 파쇄가 된 이후에도 확보된 유동경로가 오랜 시간동안 유지될 수 있는 조건들을 만족하는 구간을 찾아야한다. 이를 위해서는 저류층 수압파쇄와 연관된 암석역학 특성중 취성도, 자연균열대 밀도, 공극압력 세 가지 요소를 해당광구 분석에 활용하였고, 코어, 물리검층, 탄성파 속성을 기반으로 다속성 선형회귀 기법과 확률론적 인공신경망 기법을 활용하여 3차원 모델링을 수행하였다.

- CQ 인자 예측에 활용된 탄성파 속성 : 진폭, 주파수, 주파수필터, 미분연산자(Derivative), 위상, 지층밀도, 프와송비, P-impedance, 균열밀도, 투수율(공극압력 예측시 활용)

Completion Quality는 수압파쇄와 연관이 있는 3가지 인자에 대하여 아래와 같이 주요 저류층별로 구분하여 Reservoir Quality와 동일한 방법으로 우선 개별적으로 모델을 구축하였다.

4.1 개별요소 모델

취성도(Brittleness Index): 취성도 모델링은 종파(p-sonic)과 횡파(s-sonic) 음향검층을 이용하여 프와송비(poisson's ratio)와 영률(young's modulus)을 도출하고 두 인자를 조합하여 계산하였다. 공간적 가시화는 시추공 취성도와 CQ 탄성파 속성들과의 학습을 수행하여 취성도 예측오차를 최소화하는 다속성 선형회귀 기법을 적용하여 이루어졌다. 해당 세일가스 광구는 코어분석결과, 이암(Mudstone), 석영(Quartz)과 탄산염암(Carbonate) 성분이 주를 이루고 있으므로, 석영 및 탄산염암이 많이 있는 곳을 선정할 필요가 있으며 특히 이암중에서도 수압파쇄 후 수분을 흡수하여 가스유동경로를 차단시키는 녹점토(Smectite) 성분이 적은 곳을 선정하여야 한다. 각 저류층별로 상대적인 범위(0.3~0.7)로 분석한 결과의 취성도 분포도이다(그림 13).

자연균열대 밀도(Natural Fracture Intensity): 자

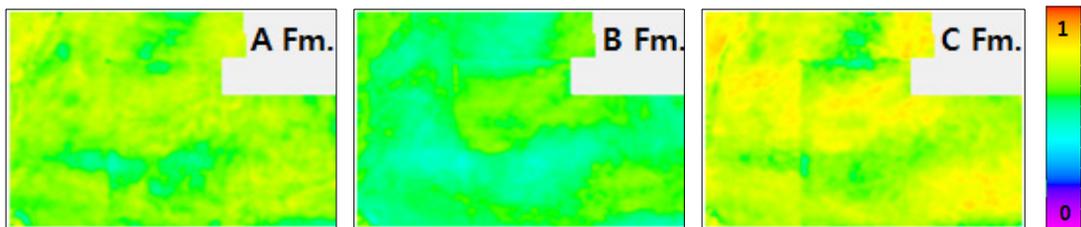


Fig. 12. Average RQ Map which is generated after putting a different weighting value to each RQ parameters (Weighting: TOC 40% + Gas saturation 20% + Porosity 20% + Permeability 20%).

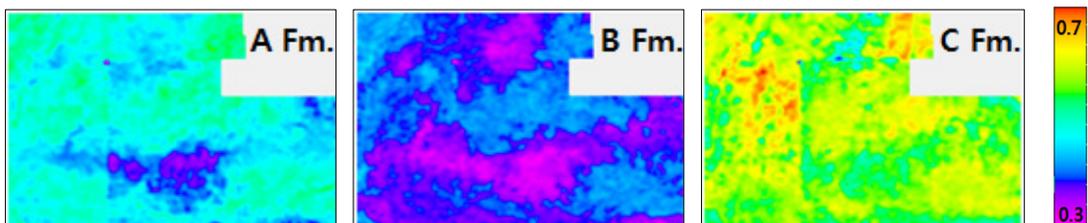


Fig. 13. Average brittleness index maps predicted from Multi-attribute Linear Regression method. C formation is the best in brittleness index. B formation shows the lowest brittleness index. It is owing to more than 7% of the Smectite component in the B formation, and resulting to very low brittleness index. It means that B formation is not efficient in the viewpoint of hydraulic fracturing.

연균열대(Natural Fracture)는 수압파쇄시 가스의 유동경로를 확장시켜줌으로써 가스생산성에 도움을 주므로 자연균열대가 많이 분포한곳을 선정할 필요성이 있다(Taylor *et al.*, 2013). 그리고, 균열밀도가 단일방향으로 분포하기 보다는 유기적으로 연결되면서 다각도로 분포하는게 수압파쇄 효율성을 증진 시키는데 도움이 된다(Sayers and Le Calvez, 2010). 본 논문에서는 방향각별 속도차이에 의한 이방성 정도를 자연균열의 밀도로 산정하였다. 자연균열 밀도는 모든 저류층의 중앙지역에서 높게 나타나며 다른 2개층에 비해 C층에서 자연균열밀도가 높게 나타난다(그림 14).

공극압력(Pore Pressure): 수압파쇄 시 또 하나

중요한 요인은 공극압력이다. 공극압력이 높은 곳일 수록 수압파쇄 후에 가스가 지상으로 이동할 수 있는 에너지가 강하므로 공극압력이 높은 곳이 가스생산성이 높다(Palmer and Mansoori, 1996). 본 논문의 공극압력은 Eaton (1975)이 제시한 음향검층(p-sonic)을 활용한 공극압력 예측법을 이용하여 시추공의 공극압력을 계산하여, 공극압력을 공간적으로 가시화 하였으며, 가시화된 공극압력 분포도는 2,500~4,800 psi 범위로 나타났다(그림 15).

4.2 요소별 가중치 부여

개별 요소별로 수압파쇄 효율성이 높은 곳을 선정하기 위한 분석을 상기에서 분석한 후, 어느 요소

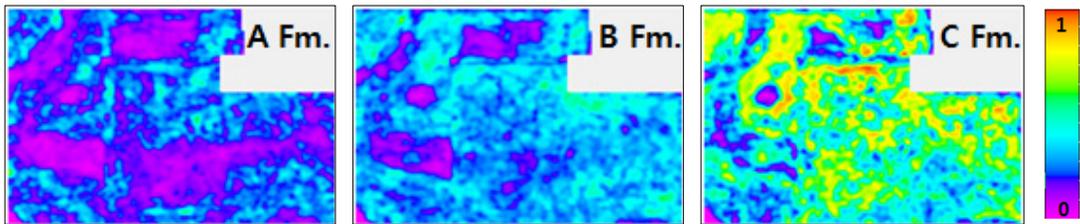


Fig. 14. Average natural fracture intensity maps predicted from VVAZ (Velocity Versus AZimuth) seismic inversion. C formation shows relatively higher natural fracture intensity values than the other two formations. Middle area in C formation exhibits higher natural fracture intensity than other areas.

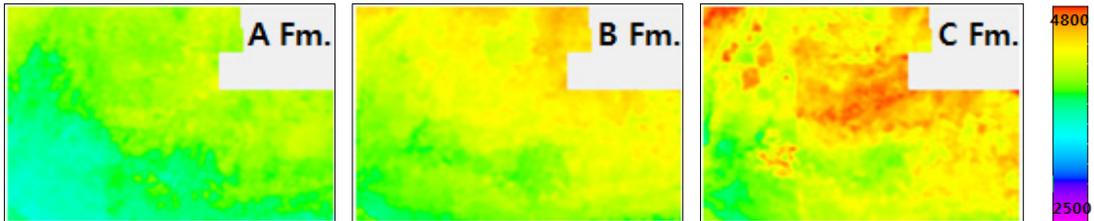


Fig. 15. Average pore pressure maps predicted from Multi-attribute Linear Regression method. The values of pore pressure in middle and east area of C formation are higher among three formations.

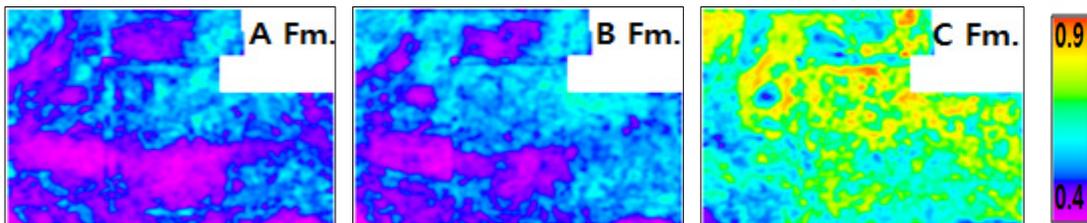


Fig. 16. Average CQ maps which is generated after putting a equal weighing value to each CQ parameter (No weighting: Brittleness Index 33% + Natural Fracture Intensity 33% + Pore Pressure 33%).

가 수압파쇄와 상관성이 높은지를 파악하기 위해서는 3가지 요소를 정규화한 후에 RQ 분석과 유사하게 통합하여 분석하였다. 우선 개별적인 요소에 가중치를 부여하지 않고 3개 요소에 동일하게 33%씩의 가중치를 동일하게 부여하여 분석하였다(그림 16). 그 다음으로는 3개 요소맵에 미소지진(Microseismic)을 도시하고 각 요소 값 증감과 미소지진 발달 분포/방향과 일치 정도를 고려하여(그림 18), 취성도는 가중치 50%, 자연균열 밀도는 가중치 30%, 공극압력은 가중치 20%를 부여하였고, 그림 17은 그 결과이다. 가중치를 부여한 경우에는 A층이 B층에 비해 양호하며, 가중치를 미부여 한 경우에는 B층이 A층에 비해 양호한 것으로 나타난다. 반면에 C층의 양호성은 동일하게 나타난다. 본 연구에서는 수압파쇄시 지표에서 측정된 미소지진 결과를 신뢰하여 가중치를 부여한 두 번째 사례를 G&G (RQ+CQ) 통합모델 구축에 CQ모델로 반영하였다(그림 17).

5. G&G (RQ+CQ) 통합모델 구축 및 검증

그 다음으로는 가스함유량이 높으면서 수압파쇄 효율이 동시에 양호한 곳을 선정하기 위하여 G&G (RQ+CQ) 통합모델을 구축하였다(그림 19). 통합모델 구축시 RQ 및 CQ 개별 모델에서 분석한 결과를 바탕으로 가스함유량과 관련된 RQ모델에는 가중치를 부여하지 않은 4가지 요소(TOC 25% + 가스함량 25% + 공극률 25% + 투수율 25%), 수압파쇄 효율성과 관련된 CQ모델에는 가중치를 부여한 3가지 요소(취성도 50% + 자연균열대 밀도 30% + 공극압력 20%) 활용하였다.

통합모델에 대한 적합성 여부를 판단하기 위해서는, 각 지역(패드) 및 저류층 구간별 생산 자료와의 일치성 여부를 시행하였다. 이때에 주의할 점은 세일가스 광구는 일반적으로 생산개시 2년 이내에 전체 매장량의 50% 이상이 생산되므로, 생산 초기 30

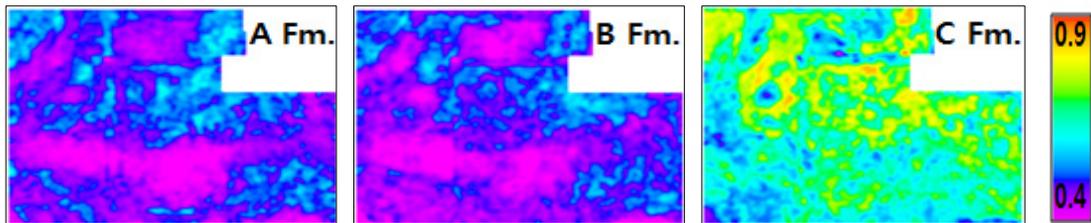


Fig. 17. Average CQ maps which is generated after putting a different weighing value to each CQ parameter (Weighting: Brittleness Index 50% + Natural Fracture Intensity 30% + Pore Pressure 20%).

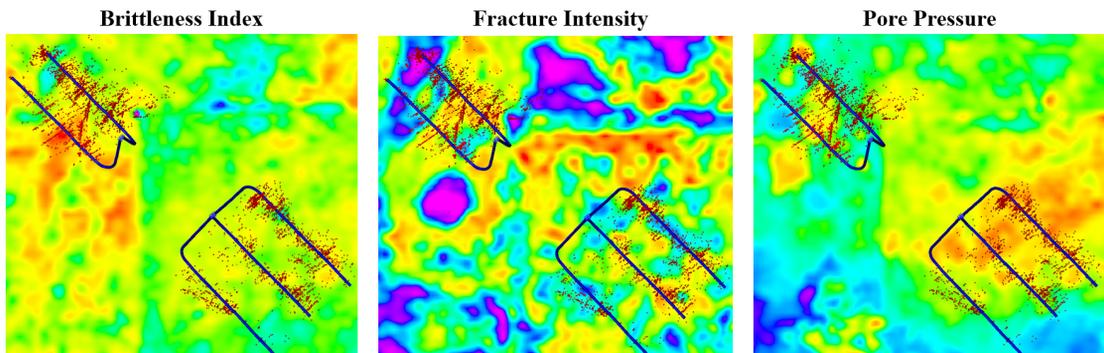


Fig. 18. Average brittleness index, fracture intensity and pore pressure of C formation with the microseismic data displayed. The areas showing high values of brittleness index match well with better induced fracturing development areas on microseismic data. Whereas, the area showing high values of fracture intensity and pore pressure do not match well with these areas. Fracture intensity matches slightly better with these areas than pore pressure. Therefore, based on these analysis, 50%, 30% and 20% of weighting values are given to brittleness index, fracture intensity and pore pressure, respectively.

일(IP30) 자료와 생산개시 후 생산성이 다소 차이가 있을 수 있으므로, 가능한 오랜 기간의 자료를 취합하여 자료를 비교 분석할 필요가 있다. 참고로, 본 과제에서는 패드별로 상이하지만 2~4년간의 생산 자료를 활용하여 생산성과 통합모델과의 일치성 여부를 분석하였다(표 3). 그 결과, G&G 통합모델에서 양호하게 나타난 Pad2 지역에서 생산성이 가장 높게 나타났으며, 저류층별로는 Evie 층이 가장 높게 나타난 결과와 생산자료가 동일함을 확인하여, 통합 모델에 대한 신뢰도를 확보하였다.

또한, 최근에는 수압파쇄 결과의 양호성을 분석하기 위해 미소지진(Microseismic) 자료를 취득하는 사례가 늘고 있는데, 본 광구에서는 천부배열(Surface Array) 방식으로 미소지진 자료를 취득하였으며 CQ 인자(취성도, 자연균열 밀도, 공극압력)들의 가중치 분석과 생산자료와 상관성 분석에 활용함으로써 통합모델링 결과의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

6. Sweet Spot 도출

최근에는 광구운영의 효율성을 높이기 위하여, 지상에서의 시추공간을 최소화하고자 패드단위로 시추하여 광구를 운영하고 있다. 본 광구도 7~10개의 수평정을 1개의 패드에서 시추하였으며, 수 천만 불에 달하는 여러 개의 생산정을 동시에 시추하는 상황에서는 Sweet Spot 선정에 대한 중요성이 증가

한다. 그러므로, Sweet Spot 도출을 위해서는 G&G 통합모델 구축과 더불어서 물리검층 및 코어 자료를 활용한 수직적인 관점에서의 해석과 다양한 탄성과 속성들을 활용한 저류층별 수평적인 관점에서의 해석도 함께 수행하면서 Sweet Spot 도출결과에 대한 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

우선적으로, 수직적인 관점에서의 해석을 위하여, 물리검층자료 및 코어자료를 활용한 패드별로 분석을 수행하였으며, 이때에는 RQ 및 CQ에 있는 7가지 요소 이외에도 저류층 두께, 점토함량 등의 다양한 자료를 활용하여 분석하였다. 이때 패드별 층준 해석시 가장 중요한 셰일가스 저류층 특성은 가스 존재시 나타나는 밀도-중성자 Cross-over 현상과 셰일함량, 취성도이다. 셰일함량은 감마선 검층을 이용해 도출했고, A층과 C층에서 높게 나타났으며 이는 점토광물에 포함된 우라늄 성분이 높게 나타났기 때문임을 코어분석 자료(XRD) 및 ECS (Elemental Capture Spectroscopy) 결과에 의해 검증되었다.

파쇄에 가장 큰 영향을 미치는 취성도는 광물을 이용한 방법, 시추공 속도에 의한 방법, 그리고 시추공 ECS 검층에 의한 방법 등 세 가지로 도출하였으며, 이 방법들에 의한 결과는 매우 비슷한 경향을 보였다. A층과 C층에서 좋은 취성도 구간을 나타내었다. 속도에 의한 파쇄효율 구간은 영률이 높고 프와 송비가 낮은 구간으로 도출될 수 있다. 패드1에서도 출된 물성들에 대한 검증은 코어분석 자료에 의해

Table 3. Pad 1~4 Production data.

Pad	1			2		3		4	
Formation	A	B	C	A	C	A	C	A	C
Average Production (mmcf/d)	2.7	1.8	2.4	3.9	5.1	2.8	3.1	3.1	3.3

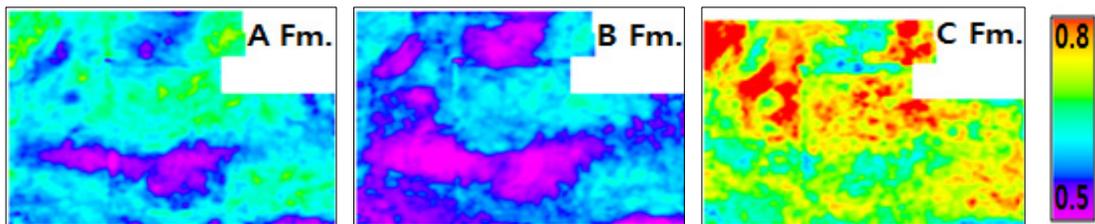


Fig. 19. Average G&G maps which integrates four RQ (No weighting : TOC 25% + gas saturation 25% + porosity 25% + permeability 25%) and three CQ (Weighting : brittleness index 50% + natural fracture intensity 30% + pore pressure 20%) parameters. Note that middle area in C formation shows the best value.

시행되었으며, 패드1의 각 물성별 도출 방법은 인근 시추공(Pad2, Pad3)에 적용되어 아래와 같이 저류층 물성이 도출되었다(그림 20). 특히, 황파(S파)의 수직성분(Sv)과 수평성분(Sh)의 차이는 균열밀도(Fracture Intensity) 정보를 제공한다. A층과 C층이 B층에 비해 Sv와 Sh 차이가 크고, 이는 시추공이

미지 로그에서 나온 균열정보와 일치하여 신뢰성이 있는 분석임이 증명되었다.

다음으로는 수평적인 관점에서의 해석을 위하여, 중합전 탄성파(Pre-Stack Seismic) 자료를 활용하여 탄성파자료 역산 후 불연속성(Discontinuity), 곡률(Curvature), $\lambda\rho$, $\mu\rho$, 영률, 프외송비, 저주파수(Low

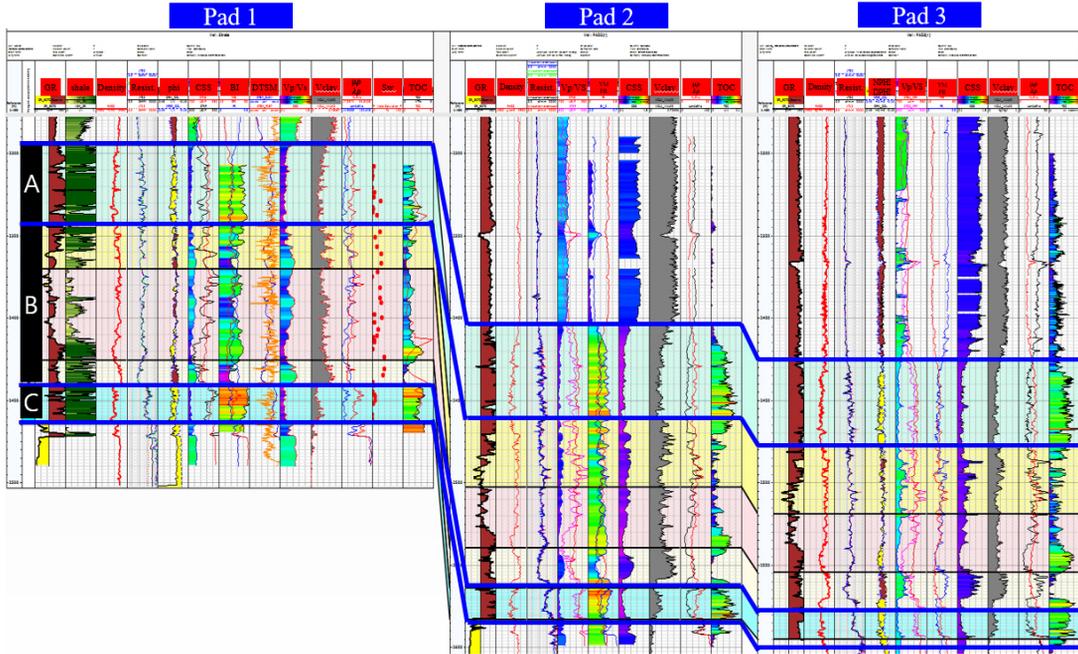


Fig. 20. The cross section of well logging data in three Pads. C formation of Pad 2 is the most prospective shale gas reservoir with high porosity, gas saturation, brittleness index, and low clay contents, etc..

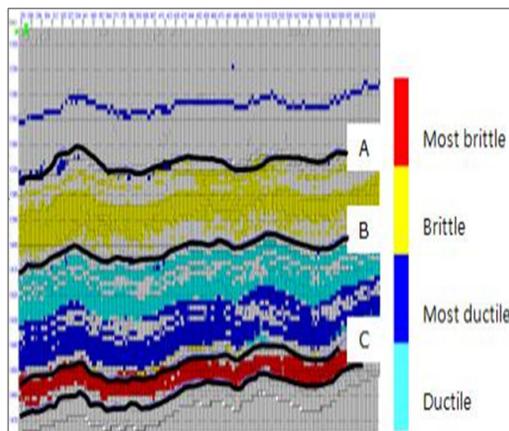


Fig. 21. Hydraulic fracturing prospectivity of A, B, and C formations predicted from seismic attribute analysis (Cross plot of Young's Modulus & Poisson's ratio). A, B, and C formations show brittle, most ductile, and most brittle, respectively.

Frequency) 및 VVAZ (Velocity Versus AZimuth) 등의 탄성과 속성분석을 통하여 수압파쇄 효율이 양호한 유망 저류층을 도출하였으며, 그중에서 예시로 영률과 프와송비의 교차도시를 통한 결과를 그림 21에 나타냈다. 그 결과, 수평적으로도 가장 취성도가 높고, 자연균열 밀도가 높게 분석이 된 C층에서 생

산성이 가장 높게 나타나서, 분석결과와 일치함을 확인하였다.

최종적으로, 코어, 물리검층 및 탄성과 속성 분석을 통한 수직·수평적인 관점의 해석과 G&G 통합모델링 결과에 따르면, C층의 저류층이 가장 가스함유량이 높고 수압파쇄 효율성이 높게 나타났으며, 지

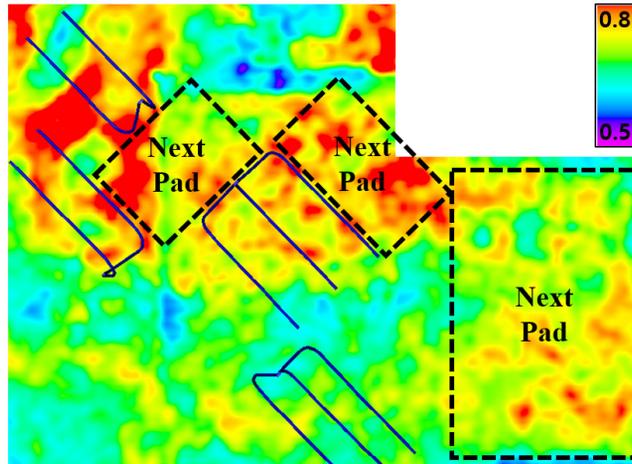


Fig. 22. Average Sweet Spot map of C formation resulted from G&G Model which integrates four RQ and three CQ parameters. Note that middle and east area would be next pad development location.

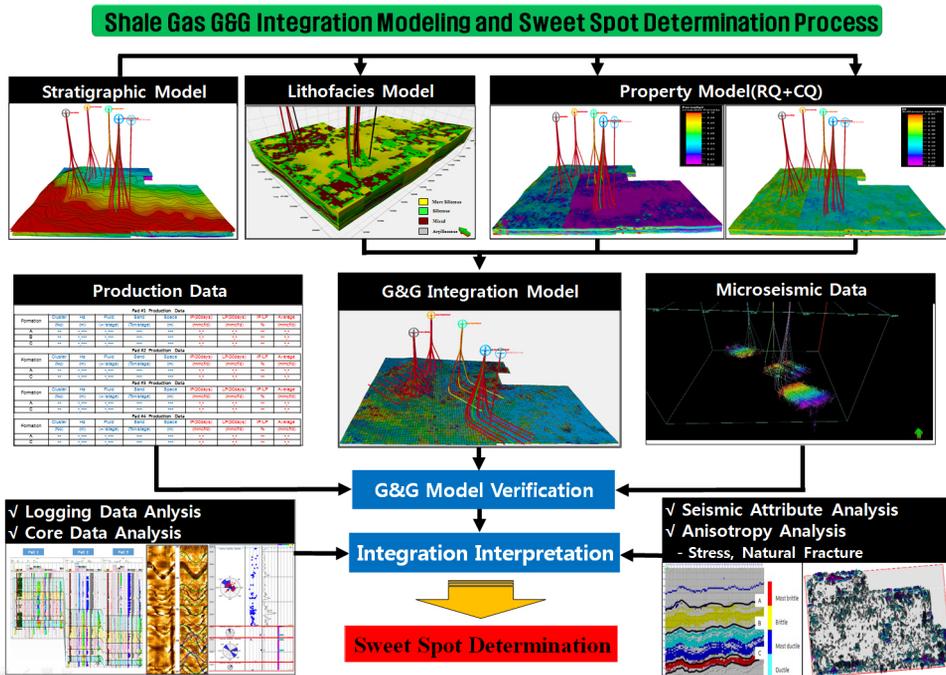


Fig. 23. Shale Gas G&G Integration Modeling and Sweet Spot determination process.

역별로는 광구 중앙부위와 동쪽이 양호하여 C층의 중앙 및 동쪽 지역을 Sweet Spot으로 도출하였고, 이를 반영한 차기 유망 패드는 그림 22와 같다.

7. 결 론

본 논문에서는 캐나다 혼리버 분지의 세일가스 광구를 대상으로 가스 생산성이 가장 높은 곳(Sweet Spot)을 선정하기 위하여, 가스함유량과 연관된 Reservoir Quality (RQ) 요소 4개(TOC, 가스포화율, 공극률, 투수율)와 수압파쇄가 용이한 지역을 선정하기 위한 Completion Quality (CQ) 요소 3개(취성도, 자연균열대 밀도, 공극압력)에 대한 통합 G&G 모델을 구축하여 물리검층, 탄성과 속성분석 및 생산자료 등과의 일치성 여부 등에 대한 분석을 통하여 Sweet Spot을 도출하여 차기 유망 패드 지역을 선정하였다.

기존에는 원시부존량(Original Gas In Place: OGIP) 산정을 위한 요소중의 하나인 저류층의 두께를 중요하게 판단하여 수압파쇄가 다소 용이한 A와 C층 중에서 저류층 두께가 두배정도 두꺼운 A층(50~60 m)을 주요저류층으로 산정하여 생산정을 가장 많이 시추하였지만, 생산자료 분석결과 C층(25~30 m)의 생산성이 오히려 다소 높았으며, RQ 요소들중 공극률이, CQ 요소들 중 취성도가 높은 곳이 생산성에 더 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다. 결론적으로, 혼리버 분지의 세일가스 광구를 대상으로 G&G 통합 모델 구축 후에 Sweet Spot으로 선정한 곳과 최근 4년간의 생산자료를 분석한 결과 Sweet Spot으로 선정한 곳의 생산성이 가장 높게 나타났으며, 이에 따른 “세일가스 G&G 통합모델 구축 및 Sweet Spot 도출 프로세스”를 다음 그림과 같이 도식화하였다(그림 23). 광구개발시 그림 23의 프로세스에 따라서 분석을 수행할 수 있다면 좋겠지만, 취득 자료 및 시간적인 제약이 있다면 혼리버 분지내에서는 공극률과 취성도를 우선적으로 분석하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행하고 있는 “세일가스층 파쇄효율 향상을 위한 탐사프로세스

및 실증연구” 과제입니다(과제번호 20132510100060). 바쁘신 중에도 자세하게 심사해 주신 두분의 익명의 심사자에게도 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Davies, G.R., 1997, The Triassic of the Western Canada Sedimentary Basin: tectonic and stratigraphic framework, paleogeography, paleoclimate and biota. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 45, pp. 434-460.
- Deloitte LLP and affiliated entities, 2013, Play Summaries of Key North American Unconventional Shale & Canadian Coal Bed Methane Basins. AAPEA, pp. 63.
- Deshpande, V.P., 2008, General screening criteria for shale gas reservoirs and production data analysis of barnett shale. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, USA, pp. 30-34.
- Diaz, H.G., Miller, C., Lewis, R. and Fuentess, C.C., 2013, Evaluating the impact of mineralogy on reservoir quality and completion quality of organic shale plays. Adapted from oral presentation given at AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Salt Lake City, Utah, pp. 22-24.
- Eaton, B.A., 1975, The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, September 28-October 1, Dallas, Texas, <http://dx.doi.org/10.2118/5544-MS>.
- Gibson, D.W. and Edwards, D.E., 1990, An overview of Triassic stratigraphy and depositional environments in the Rocky Mountain Foothills and western Interior Plains, Peace River Arch area, Northeastern British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 38A, pp. 146-158.
- Graham, M., 2011, Encana corporation 2011 Key resource play conference all series - Horn River. October 4, pp. 9-10.
- Hampson, D.P., Schuelke, J.S. and Quirein, J.A., 2001, Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data. *Geophysics*, 66, pp. 220-236.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfelß, D. and Muller, B., 2008, The World Stress Map database release 2008. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Karen, S.G., Camron K.M., Greg, M.J, Brian T., Robert, L.K., Paul, M. and Wayne, D.P., 2013, Seeking the Sweet Spot: Reservoir and Completion Quality in Organic Shales. *Oilfield Review Winter 2013/2014*, 25, no. 4. pp. 16-29.
- Kim, H.T., Park, J.K. and Kim, Y.J., 2014, Technology development trend of shale gas and oil. *Journal of the KSME*, 54(11), 2014, pp. 46-51 (in Korean).
- Lara, C., 2010, British Columbia's key natural gas plays - Horn river and Montney. Prince George Resources Expo, June 4, pp. 39-41.

- Liu, L., Yusheong, Z., Gang, Y., Fei, C. and Xueli, L., 2014, Shale gas sweet spot identification seismic method. A case in Longmaxi, Sichuan basin, Second EAGE/AAPE Shale Gas Workshop in the Middle East.
- Palmer, I. and Mansoori, J., 1996, How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 6-9, October, Denver, Colorado.
- Passey, Q.R., Creaney, S., Kulla, J.B., Moretti, F.J. and Stroud, J.D., 1990, A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. AAPG Bulletin, v. 74, p. 1777-1794.
- Proverbs, I.P., Bann, K.L. and Fratton, C., 2010, Integrated sedimentary, ichnology and petrography of unconventional gas reservoirs of the Montney Formation. Dawson Creek Region, Northeastern B.C., GeoCanada 2010 - Working with the Earth, Conference Core Abstracts.
- Reynolds, M.M. and Munn, D.L., 2010, Development update for an emerging shale gas giant field-Horn river basin, British Columbia, Canada. SPE unconventional gas conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, February 23-25, pp. 1-8, <http://dx.doi.org/10.2118/130103-MS>.
- Sayers, C.M. and Le Calvez, J., 2010, Characterization of microseismic data in gas shales using the radius of gyration tensor. 2010 SEG Annual Meeting, October 17-22, Denver, Colorado.
- Taylor, T., Waters, G.A. and Sturm, S., 2013, Evaluating the impact of mineralogy, natural fractures and in situ stresses on hydraulically induced fracture system geometry in horizontal shale wells. Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. The Woodlands, Texas, USA, February 4-6, <http://dx.doi.org/10.2118/163878-MS>.
- Usman, A., 2012, Optimized Shale Resource Development using proper placement of Wells and Hydraulic Fracture Stages. Baker Hughes Incorporated, pp. 6-7.
- Waxman, M.H. and Smits, L.J.M., 1968, Electrical Conductivity in Oil Bearing Shaly Sands. Society of Petroleum Engineers Journal, p.107-122, <http://dx.doi.org/10.2118/1863-A>.

Received : November 3, 2016

Revised : December 23, 2016

Accepted : December 27, 2016