

AVO 분석을 이용한 고래 I 지역 저류층 특성 연구

The study of reservoirs in Gorae I area using AVO

황석연 (Sukyeon Hwang)* · 장희란 (Heeran Jang)**

요 약

국내 대륙붕 제 6-1광구 고래 I지역에 대한 AVO 분석 (OFFSET에 따른 진폭변화 연구; 주로 유체성분분석)을 수행하였다. 특히, 관심을 끌었던 고래 I 지역의 다층에 대한 AVO 분석결과, 물을 함유한 층인, 다층에서는 가스를 함유한 저류층인 가층에 비해 가스를 함유할 가능성이 더 높게 나타났다. 하지만, 시추결과에 따르면 다층은 물로 채워진 층으로 판명되었다. 본 연구에서는, 가스를 함유하지 않은 다층이 더 뚜렷한 AVO 현상을 나타나게 된 원인을 분석 및 고찰하였다. 그 방법으로 다양한 AVO 분석 방법 (PxG stack, psedo-Poisson's ratio stack, Scaled-S-Wave reflectivity stack 분석 법 및 Cross Plot 등)을 통해 가스층과 물을 함유한 층의 분류 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 일반적인 AVO 분석 방법에 의해서는 가스층과 물을 함유한층의 분류가 어려웠다. 따라서, AVO 분석시 나타나는 AVO 현상에 대한 심도있는 고찰을 위해서는 AVO 모델링 기법의 적용을 고려해 볼 수 있으며, 이를 통해 탐사 위험도를 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 새로운 유망구조에 대한 상기 AVO 분석방법을 적용하여 유망구조의 가스함유 가능성에 대한 연구가 가능할 것으로 판단된다. 그 실례로, 고래 I 지역에 대한 새로운 유망구조에서의 가스 함유가능성에 대한 연구를 수행하였다. 연구 방법으로는 상기에서 언급한 다양한 AVO 분석 방법을 적용하였으며, 그 결과 유망구조에서의 가스 발견 가능성은 높은 것으로 사료된다. 따라서, 향후, 가스층 탐사시 (물론, 연구결과 얻어진 가능성에 대한 시추결과가 있어야 하겠지만) 축적된 AVO 분석기법을 적용 시 석유탐사에서 위험률 제고에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

서 론

본 연구의 대상지역은 동해 울릉분지의 중서부에 위치하는 국내대륙붕 제 6-1광구의 중부에 위치한 고래 I 구조이다 (그림 1 참조). 본 저류층의 생성시기는 마이오세이며, 저류층의 이름은 가층, 다층으로 명명되었다. 이 구조의 play concept은 구조를 형성하고 있는 사암이 세일로 채워진 채널에 의해 트랩된 복합 층서 트랩이다 (기술실, 1995).

본 연구를 위해서 2D 탄성과 자료와 고래 1공과 고래 1-1공의 sonic, density 및 gamma ray 시추공 자료를 이용하였다. 그림 2는 본 연구 축선의 탄성과 단면도로 저류층 및 시추공 위치를 나타내고 있다. 고래 1-1공의 위치는 그림에서 나타나는 위치와는 정확히 일치하지 않으나 가장 근접한 위치의 CDP gather를 선정하여 연구를 수행하였다.

본 지역은 여러 개의 저류층으로 구분되어 있으며 (그림 2참조). 저류층으로 예상된 층은 가층 (그림 2에서 2250 ms, Gorae-1, Gorae1-1주변) 다층 (그림 2에서 2100-2150 ms, Gorae1-1), 하부 가층 등이 있었으나 공식적인 가스확인 구간은 상부 가층만이며 다층은 물로 채워진 층으로 판명되었다. 가층의 두께는 약 70 m, 다층은 약 100 m이다. 이 가층의 공극률은 약 12.7%이며 다층은 약 20% 정도이다.

본 연구에서는 크게 두 가지 연구가 수행되었다. 하나는 시추공 자료를 이용해 AVO 분석 중 AVO 중합과 P stack과 G stack

을 한 도면에 Cross-plot을 수행하였다. 다른 하나는 시추공 자료를 이용해 새로이 제시된 저류층 target 1 (그림 2참조)으로 1600-1680 ms, Target 1에 대한 가스 유무를 예측하는 작업이다.

AVO 분석을 수행하기 위해서 check shot 자료를 이용하여 sonic 자료를 시간-심도에 대한 보정을 수행하고 이 자료와 탄성과 자료를 이용하였다. 한편 AVO 분석을 위해서 offset에 따른 stack 및 AVO 결과물과 Cross-plot을 각각 수행하였다.

본 론

AVO 자료처리

AVO 분석을 위한 자료처리는 일반적인 자료처리에 비해 영상보다는 자료의 주 신호를 가능한 보존하는, 진폭에 영향을 주지 않는 자료처리 과정을 적용하였다. 자료처리는 Mazzotti et al. (1995)에 의해 제시된 방법을 적용하였다. 또한, 일부 구간에서 나타나는 회절과 영향을 보정하기 위해서 전중합 구조보정을 적용하였다.

해양탄성과 탐사에서 가장 문제가 되는 것은 해수면에서 발생하는 다중반사파의 영향이다. 일반 자료처리에서는 적절한 중합에 의해서도 이에 의한 영향을 감쇄시킬 수 있지만 offset 증가에 따라 변화하는 진폭의 상태를 관찰하는 AVO 분석에서 다중반사파의 영향은 정확한 진폭의 변화 양상 파악에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 Hampson & Russell 사

*한국석유공사 (Korea National Oil Corporation, 1588-14, Dongan-Gu Kwanyang-dong, Anyang city, Kyungki-do 431-711); syhwang@knoc.co.kr

**한국석유공사 (Korea National Oil Corporation)

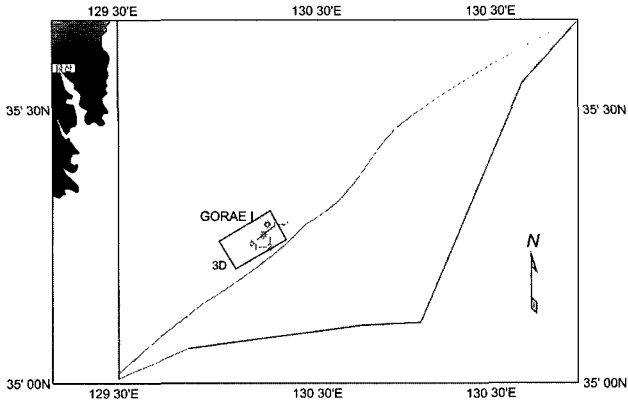


Fig. 1. Area of Gorae I Block 6-1.

의 AVO 자료처리 소프트웨어인 INVEST를 이용하여 다중반사파를 제거하였다. 그림 3(a) 및 (b)에서 보여주듯이 다중반사파를 제거하기 전에는 near offset stack 결과가 far offset stack(a)에 비해 진폭이 강하게 나타나나 제거 후 far offset stack의 진폭이 near offset stack(b)에 비해 더 강하게 나타남을 알 수 있다. 그림 4(a)는 다중반사파를 제거하기 전 PxG stack을 나타낸 것으로 구역 A와 B에서 특별한 AVO 현상을 발견할 수 없다. 반면, 그림 (b)는 같은 PxG stack이지만 다중반사파를 제거한 후 AVO 자료처리를 한 결과로 구역 A와 B에서 AVO 현상을 보이고 있다. 즉, 다중반사파는 주신호의 offset에 따른 진폭 변화에 분석에 상당한 영향을 미치므로, AVO 분석에 앞서 반드시 제거하고 분석을 수행하여야 한다.

AVO 자료처리 결과물 해석

AVO 모델링 및 정밀 분석에 앞서 일반적으로 수행하는 AVO 자료처리를 수행하였다. 자료처리를 위해 이용한 시추공 자료는 고래 1공의 Check Shot Corrected P-wave (그림 5)를 이용하였으며, 만약, 상기 자료가 없을 경우 속도분석을 통해 구한 interval velocity를 적용하여 분석하는 것도 가능하다. 자료처리 결과물로 PxG stack, Poisson stack과 S stack 얻었다 (Castagna and Backus, 1993). 또한 다양한 해석을 위해서 P&G cross plot을 통해 각 구간에 대한 AVO 분석을 수행하였다. 한편, PxG stack은 AVO type중 Class III의 경우 가장 적절한 가스 지시자로, 가장 일반적으로 얻어지는 AVO 자료처리 결과물이다. Poisson stack은 비교적 AVO type에 무관하게 가스층을 파악하는데 이용될 수 있다 (Castagna and Smith, 1994). 따라서, Poisson stack은 PxG stack보다는 비교적 광범위하게 정보를 얻을 수 있다. S stack은 가스층과 석탄층의 구분하는데 적절하게

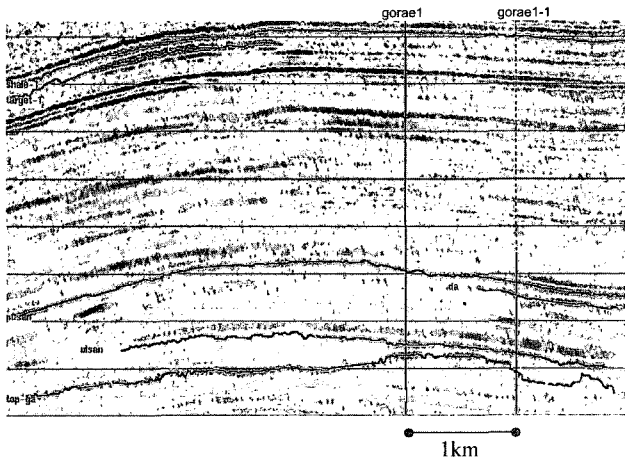


Fig. 2. CDP Stack Line 92-6-43.

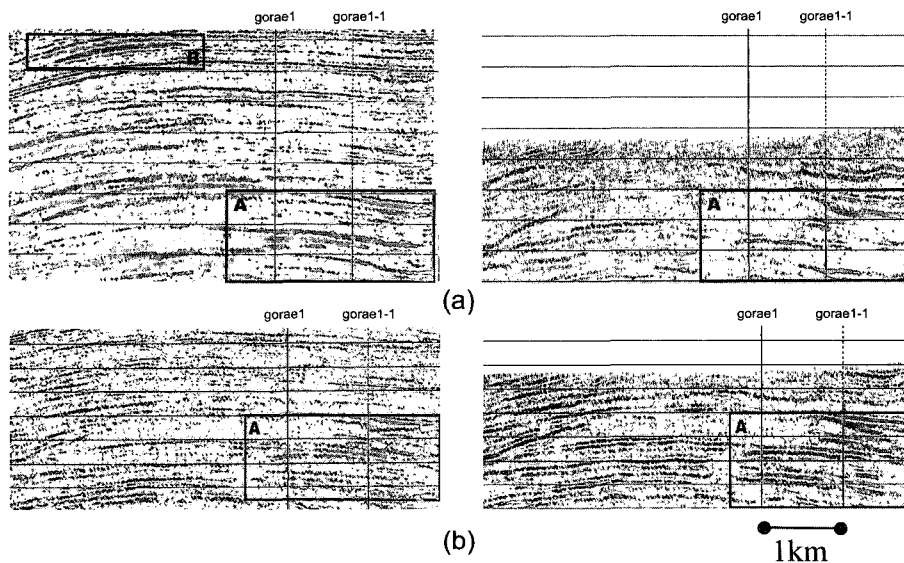


Fig. 3. Offset Range_limited stack with multiples (a) and without multiples(b) at near (left) and far (right) offset.

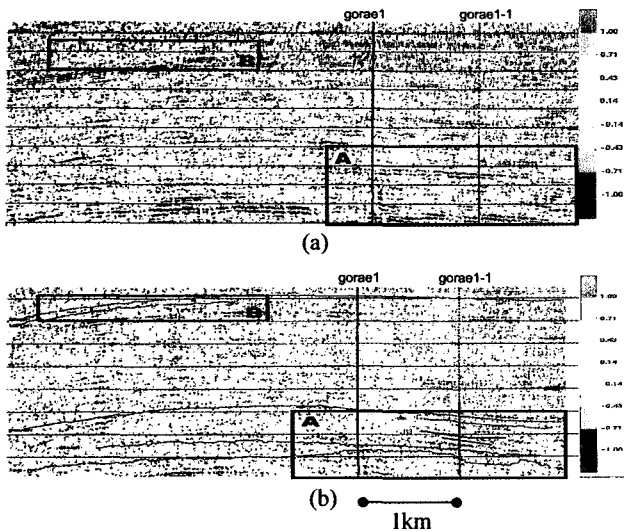


Fig. 4. (a) PxG stack with multiples, (b) PxG stack without multiples.

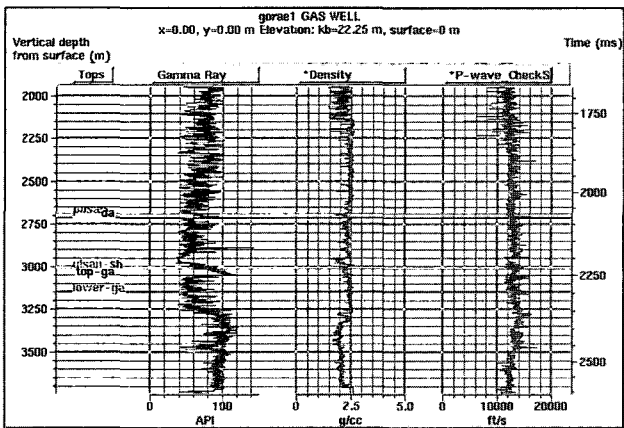


Fig. 5. Gorae 1 checkshot corrected well data.

이용될 수 있다. 이유는 석탄층에서 S파는 가스층에 비해서 상당히 낮으므로 S stack시 뚜렷하게 구분이 가능하기 때문이다 (황석연, 1999).

AVO 결과를 해석

그림 4(b)는 PxG stack으로 먼저 구역 A는 기존에 시추된 고래 1공과 1-1공이 포함된 지역으로 가스가 확인된 가층과 물로 채워진 다층 및 다층 직하부층 (다층과 가층 사이에 위치: 그림 2 참조, 이하 나층)을 포함하는 구간이다. 다층에서는 AVO 현상이 뚜렷하게 보이고 그 하부 나층에서 비교적 뚜렷한 AVO 현상이 나타나고 있다. 한편 가층에서는 상대적으로 미약한 AVO 현상이 나타나고 있다. 한편 상부 (구역 B)에서는 유망구조의 저류층(이하 수리층)에서 뚜렷한 AVO 현상 (상부와 하부에서 붉은 색을 보이는 class III)을 보여주고 있다.

그림 6은 Poisson stack이다. 구역 A를 보면 다층에서 PxG stack과 같이 높은 Poisson 비를 보여, 뚜렷한 AVO 현상을 나타

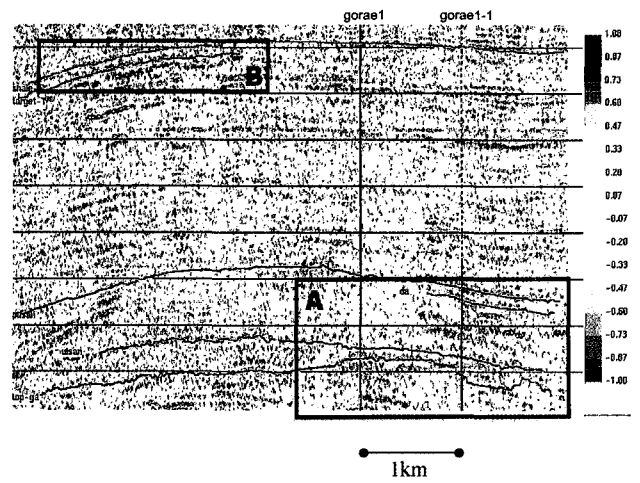


Fig. 6. Poisson Stack.

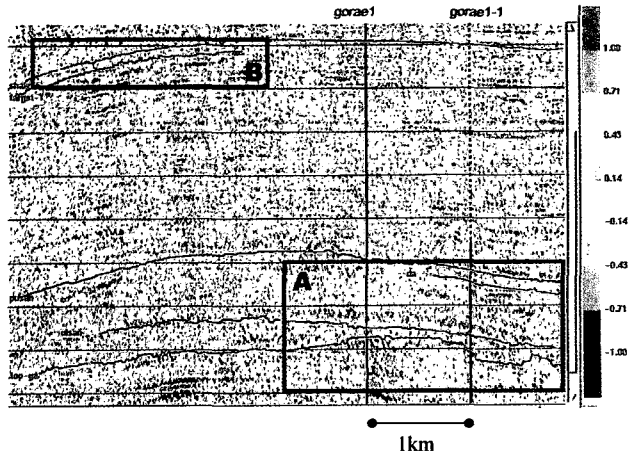


Fig. 7. Pseudo-Shear stack.

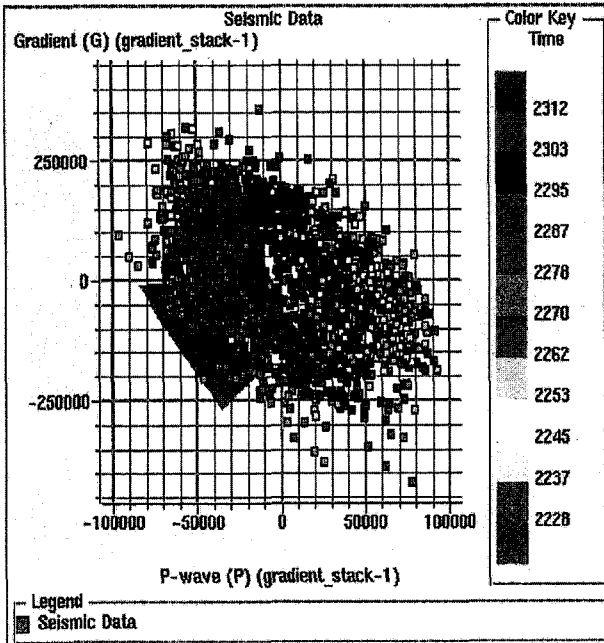
내고 있으며 나층은 다층에 비해 강도는 낮지만 AVO 현상을 보이고 있다. 한편 가스가 포함된 층인 가층에서는 세 층중 가장 낮은 Poisson 비를 보이고 있다. 구역 B에서 수리층은 전반적으로 가층과 유사한 Poisson 비를 보이고 있다.

그림 7은 S stack이다. 구역 A에서 다층과 나층에서는 비교적 뚜렷하게 나타나고 있으나 가층에서는 약하고 오히려 상부와 하부에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 한편, 구역 B의 수리층에서는 구역 A의 가층과 같이 미약하게 나타나고 있다. 이는 가층처럼 수리층이 석탄을 함유할 가능성이 낮음을 의미하며 한편, 다층과 나층의 상부층은 세일로 상대적으로 횡파 속도가 낮음을 의미한다.

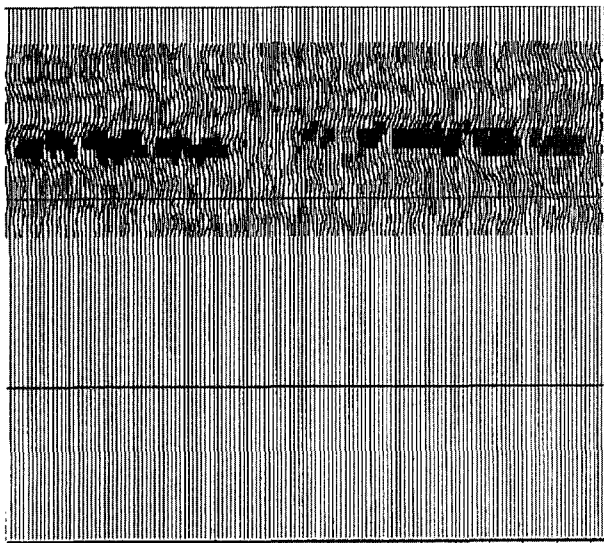
P vs.G Cross Plot

Cross Plot은 AVO 분석시 가스층에 대한 유용한 정보를 제공한다. P&G cross plot을 통해 목표층이 몇 상한에 나타나며 이를 통해 AVO type 중 목표층이 어느 Class에 속하는 것과 같은 정보를 제공한다. 또한, 이의 분석을 통해, 목표층의 가스의 유무 가능성을 파악할 수 있다.

그림 8은 가층을 포함하는 구간에 대한 P&G cross plot(a)과

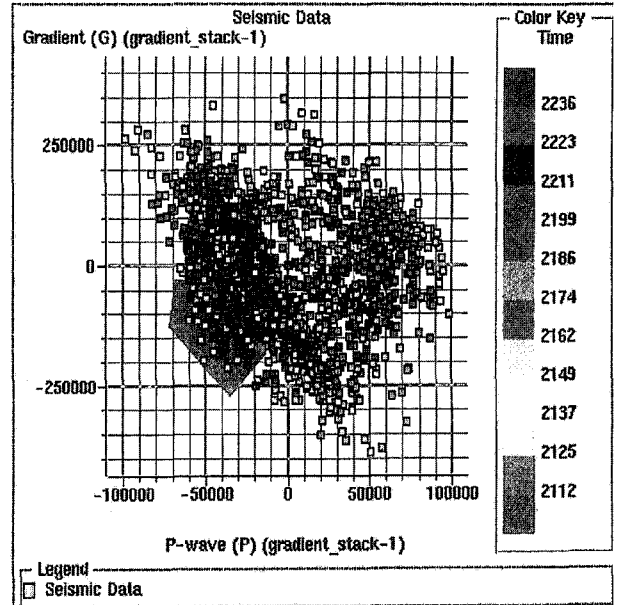


(a)

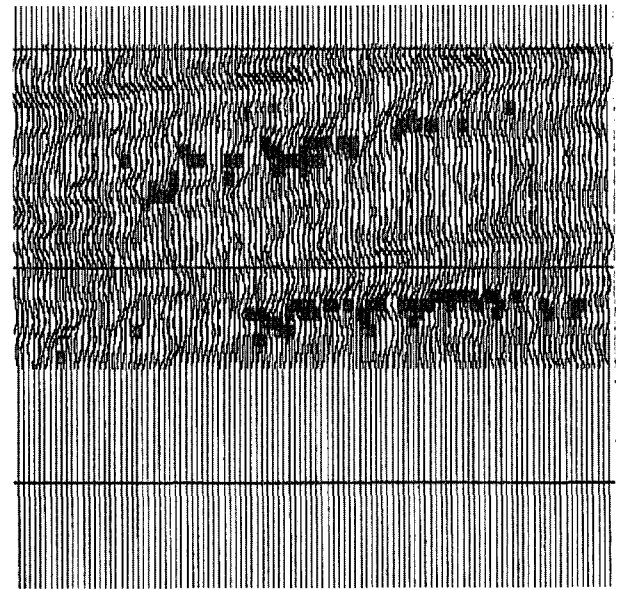


(b)

Fig. 8. (a) P&G cross-plot for Ga sand. Target area is colored by Red, (b) Cross section of (a).



(a)



(b)

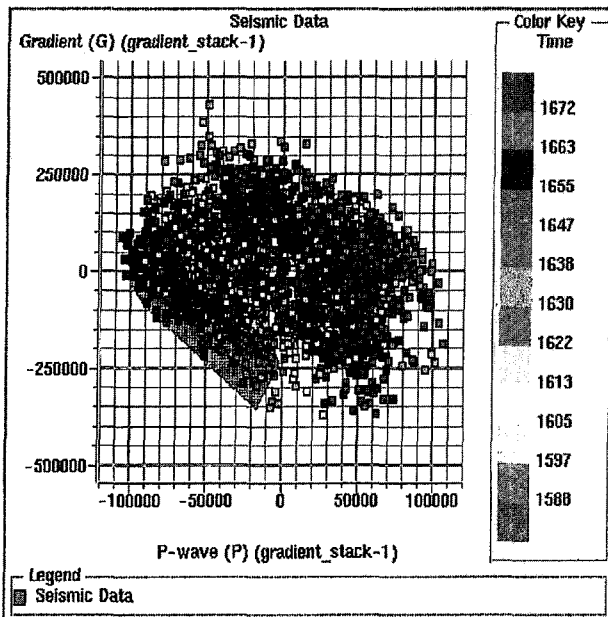
Fig. 9. (a) P&G cross-plot for Da and Na sand. Target area is colored by Red, (b) Cross section of (a).

분석을 실시한 cross section(b)을 나타낸 것이다. 먼저 그림 8(a)는 sample된 P와 G 값을 좌표에 도시한 것이고 붉은색 지역은 가스를 함유할 가능성이 높은 구간을 표시한 것이다. 그림 8(b)는 붉은색 지역의 cross section에 표시한 것이다. cross section에 표시된 붉은색 구간은 가층을 나타낸 것이다. 따라서 가층은 가스를 함유할 가능성이 높은 구간이며 AVO 분류상 class III에 해당됨을 cross plot을 통해 알 수 있다.

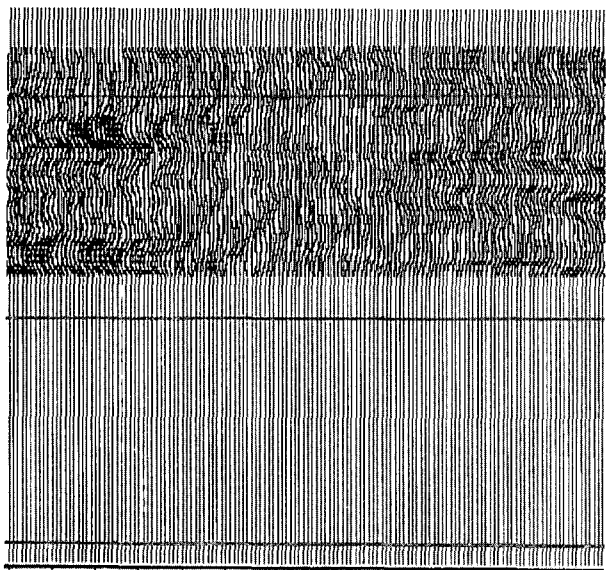
그림 9(a) 및 (b)는 다층과 나층을 포함하는 cross plot과 cross

section이다. 그림 9(a)는 cross plot으로 가스를 함유가 가능한 구간을 pink 색으로 표시하였다. 그림 9(b)는 pink 색으로 표시된 지역을 cross section에 나타낸 것이다. 표시된 구간은 다층과 나층 구간이다. 따라서 상기 구간도 cross plot 결과에 따르면 가스를 함유할 가능성이 있는 구간이다.

그림 10(a) 및 (b)는 수리층과 주변압층을 포함하는 cross plot과 cross section이다. 그림 10(a)는 cross plot으로 가스를 함유가 가능한 구간을 파란색으로 표시하였다. 그림 10(b)는 파란색으로 표



(a)



(b)

Fig. 10. (a) P&G cross-plot for Suri sand. Target area is colored by Blue, (b) Cross section of (a).

시된 지역을 cross section에 나타낸 것이다. 표시된 구간은 수리층과 그 상(하부의 암층을 포함하고 있다. 따라서 상기 구간들도 cross plot 결과에 따르면 가스를 함유할 가능성이 있는 구간이다.

종합 해석

전반적인 AVO 현상의 특징을 살펴보면, 다층과 나층 경우에는 상부 셰일층과 사암층에서 특징적인 Class III에 해당하는 AVO 현상을 나타내고 있다. 특히 그림 8의 Poisson stack에서 상부

셰일층에서는 높은 양의 값을 보이고 하부 다층에서는 높은 음의 값을 보이며, 그림 9의 S stack에서는 반대로 셰일층에서 음의 값을 보이고 다층에서 양의 값을 보이고 있다. 한편, 가층은 그림 8에서 가스층 상부에서 음의 값을 하부에서는 양의 큰 값을 보이고 있으며, 그림 9에서는 반대로 상부는 양의 값을 하부에서는 음의 값이 크게 나타나고 있다. 구역 B의 수리층은 Poisson stack(그림 8) 가층과 같이 상부에서 높은 음의 값을 보이고 하부에서도 높은 양의 값을 보이고 있다. 또한 S stack에서 수리층은 가층과 같이 상부에서 미약한 양의 값을 보이고 하부에서는 비교적 높은 음의 값을 보이고 있다. 한편 cross plot의 경우에는 다, 나, 가 그리고 수리층 모두 가스를 함유할 가능성이 높은 구간으로 나타나고 있다. 물론 다층과 나층에서는 wet 구간으로 밝혀졌으므로 상기 분석만을 이용하여 가스 유무를 판단하는 것은 위험함을 알 수 있다.

상기를 종합할 때, 저류층인 가층의 경우 물을 함유한 다와 나층과는 다르게 하부에서 강한 AVO 현상을 관찰할 수 있으며, S stack에서 보듯이 상부에서 미약한 AVO 현상을 보이고 있다. 새로운 유망 저류층인 수리층은 S stack에서 미약한 반응을 보임으로 석탄층 가능성은 매우 낮으며, 전반적인 특성이 가층과 매우 유사함을 알 수 있다.

결 론

대륙붕 탐사에서 다중반사파는 주 신호에 심각한 영향을 미친다. 그 결과 offset에 따른 AVO 분석에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 따라서 AVO 분석시 다중반사파 제거 기술은 필히 적용하여야 한다.

offset에 따른 종합 결과와 AVO 분석을 통해 얻어진 결과물(Cross Plot을 포함)을 검토하였을 때, 고래 I 지역 저류층의 AVO type은 class III에 해당되며, 가스를 함유한 가층과 물을 포함하는 다층 및 나층을 비교해 볼 때 가스를 함유한 가층에서는 하부에서 더 뚜렷한 AVO 현상을 보이고 있으며, 다층과 나층의 경우 상부층에서 더 뚜렷한 AVO 현상을 보이고 있다.

고래 I공의 시추결과를 토대로 AVO 분석 결과, 가층과 나 및 다층의 AVO 현상은 매우 유사하였으며 따라서 일반적인 AVO 분석(AVO 종합 및 cross-plot)만으로는 고래 1 지역에서 가스를 함유한 층과 물을 함유한 층의 분류는 위험함을 알 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 보다 정밀한 AVO 분석 기법의 개발이 필요하며, 또한 AVO 모델링과 같은 기법을 적용함으로써 위험도를 낮출 수 있을 것이다.

새로운 유망구조인 수리층의 경우 AVO 현상을 분석하였을 때, 가층과 유사한 AVO 특성을 보이고 있으나, 이 결과가 가스의 유무를 밝히기에는 AVO 분석 방법에 한계가 있으며, 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 보다 정밀한 AVO 분석 기법 및 모델링 기법의 연구가 필수적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

Aki, K. and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology: W. H. Free-

- man and Co.
- Castagna, J. P. and Backus, M. M., 1993, Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis: SEG.
- Castagna, J. P. and Smith, H. W., 1997, Principles of AVO crossplotting: TLE, 4, 337-342.
- Castagna, J. P., 1993, Petrophysical imaging using AVO: TLE, 3, 172-178.
- Castagna, J. P. and Smith, S. W., 1994, Comparison of AVO indicators: A modeling study: Geophysics, 59, 1849-1855.
- Fatti, J. L., Smith, G. C., Vail, P. J., Strauss, P. J. and Levitt, P. R., 1994, Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique: Geophysics, 59, 1362-1376.
- Goodway, B., Chen T. and Downton, J., 1998, Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters: " $\lambda\rho$ ", " $\mu\rho$ ", & " $\lambda\mu$ " fluid stack", from P and S inversions: 68th ann. Mtg. SEG Expanded Abstracts, 183-186.
- Hall, D. J. and Adamick, J. A., 1995, AVO as an exploitation tool: Gulf of Mexico case studies and examples: TLE, 8, 863-869.
- Hilterman, F., 1994, Seismic lithology course note: GDC.
- Mazzotti, A. and Ravagman, G., 1995, Impact of processing on the amplitude versus offset response of a marine seismic data set: Geophy. Prosp., 43, 263-281.
- Ostrander, W. J., 1984, Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence: Geophysics, 49, 1637-1648.
- Peddy, C. P. and Sengupta, M. K., 1995, AVO analysis in high-impedance sandstone reservoirs: TLE, 8, 871-877.
- Reilly, J. M., 1994, Wireline shear and AVO modeling: Application to AVO investigations for the Tertiary, U.K. Central North Sea: Geophysics, 59, 1249-1260.
- Ross, C. P. and Kinman, D. L., 1995, Nonbright-spot AVO: Two examples: Geophysics, 60, 1398-1408.
- Ross, C. P., 1993, AVO in the presence of coherent noise: TLE, 3, 196-201.
- Russell, B. H., 1996, AVO manual: Hampson & Russell co.
- Rutherford, S. R. and Williams, R. H., 1989, Amplitude-versus-offset variations in gas sands: Geophysics, 54, 680-688.
- Shey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations: Geophysics, 50, 609-614.
- Smith, G. C. and Gidlow, P. M., 1987, Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas: Geophy. prosp., 35, 993-1014.
- White, R., Simm, R. and Xu, S., 1998, Well tie, fluid substitution and AVO modeling a North Sea example: Geophy. prosp., 46, 323-346.
- Yu, G., 1985, Offset-amplitude variation and controlled-amplitude processing: Geophysics, 50, 2697-2708.
- 황석연, 1999, 제 6-1광구 고래 V 지역 탄성파 모델링 결과 보고, 기술실.
- 황석연, 1999, 제 6-1광구 고래 I 지역 탄성파 모델링 결과 보고, 기술실.
- 황석연, 1999, 제 6-1광구 고래 V지역 저류층 특성화 연구 결과보고, 기술실.

(2002년 11월 30일 접수)