

3차원 탄성파로부터 매질의 임피던스 산출에 관한 연구

이 두 성¹⁾

Impedance Estimation from 3-D Seismic Data

Doo Sung Lee

요 약 : 본 논문은 3차원 탄성파자료로부터 저류층의 공극율 분포를 파악하기 위한 자료 전처리 및 역산법에 대한 연구이다. 전처리과정은 음파 및 밀도 검층기록에서 도출한 반사계수 시계열을 사용하여 탄성파기록의 진폭을 보정하는 공정이다. 연구지역에서 획득한 8개의 검층기록과 그 위치의 탄성파 기록으로부터 산출된 보정함수를 크리깅(kriging)하여 모든 탄성파기록의 보정함수를 산출하였다. 일정 대역폭을 보유한 탄성파기록으로부터 검층과 같은 광대역 임피던스 시계열을 도출하기 위해서는 한정된 대역폭의 탄성파 기록에서 손실된 저주파와 고주파 성분을 복구하여야 한다. 본 연구에서는 autoregressive(AR) 방법을 사용하였다.

Abstract : The paper discusses a data processing methodology that derives a three dimensional porosity volume information from the 3-D seismic dataset. The methodology consists of preprocessing and inversion procedures. The purpose of the preprocessing is balancing the amplitudes of seismic traces by using reflectivity series derived from sonic and density logs. There are eight sonic logs are available in the study area; therefore, we can compute only 8 balance functions. The balance function for every seismic trace was derived from these 8 balance functions by kriging. In order to derive a wide-band acoustic impedance --similar to the one can be derived from a sonic log- from a band-limited reflection seismogram, we need to recover missing low- and high-frequency information of the seismic trace. For that purpose we use the autoregressive method.

Keywords : 임피던스, 3-D 공극률, 3-D 탄성파

서 론

본 연구과제의 주요 목표는 3D 탄성파자료로부터 저류층 특성화에 필요한 암석물성 파라미터를 추출하는 기술개발이다. 저류층 특성화에 필요한 암석물성은 투수율과 공극율이다. 탄성파자료로부터 추출할 수 있는 암석 물성은 임피던스로서 이는 암석의 밀도와 탄성파 속도와 곱으로 정의된다. 따라서 암석의 임피던스와 공극율과의 관계 또는 암석의 임피던스와 투수율과의 관계를 알면 탄성파 기록으로부터 저류층 파라미터에 대한 정보를 도출할 수 있다.

탄성파 기록으로부터 임피던스 기록을 작성하는 과정에서 산출 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 탄성파 기록과 함께 보다 직접자료(hard data)인 검층기록을 사용하는 것이 보편적인 방법이다. 검층기록과 탄성파를 종합하는 과정에서 검층기록과 탄성파 트레이스를 보정할 필요가 있다. 검층기록은 깊이로 된 계열이고 탄성파는 시계열(time series)이다. 따라서 이들을 비교하기 위해서 본 연구에서는 검층기록을 시계열로 변환하였다. 시간-깊이관계를 정립하는데는 탄성파의 시간을 기

준 하였고, 검층기록에서 산출된 반사계수 시계열의 저주파 성분을 사용하여 탄성파 트레이스의 진폭을 보정하였다.

탄성파 자료로부터 저류층 특성화에 필요한 암석물성을 산출하는 과정은 탄성파 기록의 역산 과정을 포함한다. 이 역산의 최종목표는 모든 사전정보에 의하여 제어된 임피던스 트레이스 또는 의사 임피던스 검층기록(pseudo-impedence logs)의 산출이라고 할 수 있다. 보편적인 의사임피던스 검층기록의 산출방법은 저주파 성분을 음파검층 기록으로부터 도출하고 고주파 성분을 디콘볼루션된 탄성파 트레이스로부터 도출하여 두 성분을 합성하는 방법이 사용되고 있다(Lindseth, 1979).

탄성파 기록으로부터 매질의 임피던스를 산출하려면 탄성파 기록이 획득된 지점에서 검층기록이 필요하다. 측정된 검층기록들로부터 임의 지점에서 검층기록을 추정하기 위하여 지구통계학적(geostatistical) 알고리즘인 declustering 방법, inverse distance 방법, 그리고 triangulation 방법이 있다. 이러한 추정 방법들은 각각 다른 기준을 사용하며, 주어진 기준을 만족시키는 최적 추정값을 도출하는 방법들이다. 이 외에도 추정오차를 최소화하면서 선형불변 추정량을 얻을 수 있는 ordinary kriging

*1999년 12월 7일 접수

1) 한성대학교 정보시스템공학(Information system engineering, Hansung, University)

방법과 보조자료를 사용하여 추가적인 정보를 이용하는 cokriging방법이 있다. 본 연구에서는 4개의 음파검층 기록과 4개의 중성자검층 기록을 사용하여 총 8개소에서 탄성과 보정함수를 산출하였으며 이들 보정함수를 크리깅하여 모든 측정에서 보정함수를 산출하였다.

진폭보정함수 도출

탄성과 기록으로부터 저류층의 저류특성, 즉 공극율 분포를 규명하기 위한 단계로서 자료처리는 크게 탄성과 고유파형 도출과 반사계수 산출로 구성된다. 탄성과 고유파형 도출에 관한 연구는 이두성(1998)에 발표되었다. 탄성과기록으로부터 반사계수를 추출하는데 있어서 가장 큰 문제는 탄성과의 진폭이 덮은층(overburden)의 영향으로 실제의 지층 경계면에서의 반사계수를 정확하게 대표하지 못한다는 사실이다. 이에 반해서 검층기록은 매질의 변화를 보다 정확히 표출한다고 볼 수 있으므로 검층기록에 기준하여 탄성과 트레이스의 진폭을 보정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 탄성과 트레이스의 진폭 보정을 음파/밀도 검층 기록을 사용하여 보정하였다.

본 연구지역은 미국 텍사스주 북서부의 Boonsville filed 이다(이두성, 1998, Hardage, 1996). 이 지역에는 4개의 음파검층 기록만 있으므로 모든 탄성과 기록에 적용할 보정함수를 도출하기에는 공간적인 데이터 양이 매우 부족하다. 따라서 중성자 검층기록으로부터 음파검층에 해당하는 정보를 추출하고자 하였다. 연구지역 내의 5개소에서 중성자 검층자료가 있다. 그중 1개소에서 음파와 중성자 검층기록이 모두 있어서 이로부터 음파와 중성자 검층 사이의 상관관계를 도출하였고 이 관계식을 사용하여 중성자검층 기록으로부터 의사음파검층(pseudo-sonic log) 기록을 작성하였다.

음파검층 기록으로부터 진폭 보정함수 산출

진폭 보정함수의 산출 과정은 다음과 같다.

1. 검층기록을 탄성과기록과 적합하도록 수축/신장한다.
2. 검층과 탄성과 시계열을 진폭시계열(envelope function)로 변환한다.
3. 검층과 탄성과 진폭 시계열을 저주파(0~10 Hz) 통과필터링한 시계열을 각각 l_i , s_i 라하면 진폭 보정함수 시계열 c_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$c_i = s_i/l_i, \text{ for } (i = 1, ns) \quad (1)$$

여기서 ns는 샘플 수이다.

중성자검층으로부터 음파검층 산출

음파검층과 중성자검층(neutron)은 매질의 공극율에 대한 정보를 제공한다는 사실에 근거하여 동일한 시추공에서 획득한 중성자검층과 음파검층에 대하여 상관관계를 분석하였다.

음파검층과 공극율과의 관계식은 다음과 같은 관계식으로 표시할 수 있다(Cased hole log interpretation Principles/Applications, 1989: Schlumberger Edu. Service).

$$t_{Log} = \phi t_f + (1-\phi) t_{ma} \quad (2a)$$

여기서 t_{Log} 는 음파검층 기록($\mu\text{s}/\text{ft}$), t_{ma} 는 matrix 매질 내의 음파 주행시간($\mu\text{s}/\text{ft}$), $t_f(\mu\text{s})$ 는 공극을 채운 유체 내의 음파 주행시간이며 ϕ 는 공극율이다.

식 (2a)를 아래와 같이 표현하면,

$$t_{Log} = \phi(t_f - t_{ma}) + t_{ma} \quad (2b)$$

공극율과 음파검층 기록이 선형관계인 것을 알 수 있다. 여기서 t_f , t_{ma} 는 각각 매질 및 유체 내의 음파의 주행시간이며 이들의 값에 따라 전환식의 계수가 결정된다. Fig. 1에 음파검층 기록과 공극율(중성자검층)을 cross-plot하였다. Fig. 1에서 보면 음파검층 기록과 공극률 사이에 상관관계가 있음을 알 수 있다.

이 데이터를 선형회귀(linear regression)한 결과 음파검층 기록과 공극율 사이에 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$t_{Log} = 57.5 + 0.92 \cdot \phi \quad (3)$$

식 (3)를 사용하여 계산한 음파검층 예측값과 실측값을 cross-plot하여 비교한 결과, 이들 데이터의 최적 선형 적합의 기울기 및 절편이 각각 1 및 0으로부터 다소 편차가 있으므로 수 차례 식 (2)의 계수 조정을 한 후 음파검층 기록과 공극율 사이에 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$t_{Log} = 49.2 + 1.3 \cdot \phi \quad (3b)$$

식 (3b)를 사용하여 다음의 well에서 중성자검층 기록으로부터 음파검층 기록을 산출하였다.

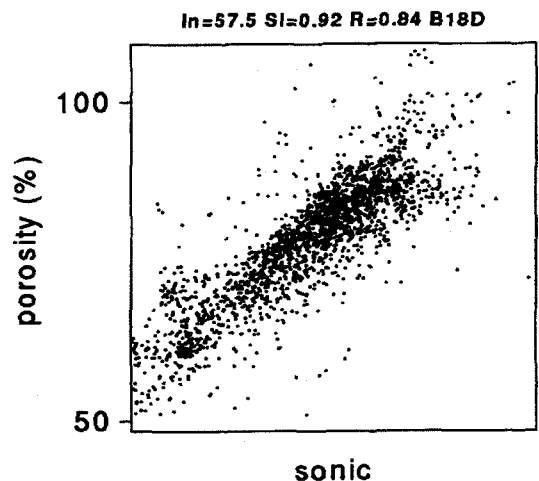


Fig. 1. Cross plot of the sonic and neutron logs.

디킨블루션

탄성과 트래이스는 반사계수 시계열과 고유파형의 컨볼루션이라는 가정 하에 탄성과 트래이스를 디킨블루션하여 반사계수 시계열을 산출한다. 본 연구에서는 일정 대역폭을 갖는 탄성과 트래이스로부터 넓은대역, 즉 sparse spike 반사계수 시계열을 산출하고 그로부터 매질의 임피던스를 구하고자 하였다. 일정 길이의 탄성과 트래이스 $r(t)$ 는 일정 대역폭을 가지므로, 이로부터 도출되는 reflectivity series의 Fourier 변환 $R(f)$ 도 $f_L < f < f_H$ 에서 정의되며 이 대역 밖의 영역에서는 하등의 정보를 얻을 수 없다. 따라서 검층과 같은 넓은대역 impedance 검층을 도출하기 위해서는 spectral extrapolation이나 sparse-spike 디킨블루션을 탄성과 트래이스에 적용함이 바람직하다. 본 연구에서는 autoregressive(AR) 방법에 의한 spectral extrapolation 방법을 사용하였다(Ordenburg, Scheuer, and Levy, 1983).

이 방법을 요약하면 1) 탄성과 트래이스를 Fourier transform 하고 스펙트럼을 관찰하여 신뢰할 수 있는 구간을 선정한 후 그 구간 내의 주파수 성분 $R(f)$ 로부터 forward/reverse 방향의 prediction filter, α_k 를 산출하고, 2) 이 filter를 $R(f)$ 에 적용시켜서 넓은대역 $R(f)$ 를 구한 다음 이를 역 Fourier transform하여 넓은대역 탄성과 트래이스를 산출한다. 이 넓은대역 탄성과 트래이스는 반사계수 시계열에 해당한다.

Reflectivity function을 다음과 같이 표시하면

$$r(t) = \sum_{k=1}^{NL} r_k \delta(t - \tau_k) \quad (4)$$

스펙트럼은 다음의 형태로 표시된다.

$$R(f) = \sum_{k=1}^{NL} r_k e^{-i2\pi f \tau_k} \quad (5)$$

식 (5)은 주파수가 $\omega_k = 2\pi\tau_k$ 인 NL개의 complex sinusoids의 합이다. 단일 주파수 ω 로 구성된 complex time series는 1차 autoregressive(AR)로 표시할 수 있다. 즉 $x_t = a_0 \exp(i\omega t)$ 이라면 $x_t = \alpha_1 x_{t-1}$ 로 표시할 수 있다. 이때 $\alpha_1 = \exp(i\omega)$ 는 complex AR coefficient 또는 prediction filter coefficient이다. 좀더 일반적인 경우인, 즉 $x(t)$ 가 p 개의 complex sinusoids로 구성되었다면, $x(t)$ 는

$$x_t = \sum_{k=1}^p \alpha_k x_{t-k} \quad (6)$$

와 같이 표시되고 이때 $\{\alpha_k\}$ 는 complex이다. 식 (6)는 forward prediction으로서 x_t 가 과거 값으로부터 예측된 값이다. Reverse prediction은 미래 값으로부터 현재 값을 예측하는 것으로서 이를 reverse filter라 하며, 다음과 같이 표시된다.

$$x_t^* = \sum_{k=1}^p \alpha_k x_{t+k}^* \quad (7)$$

여기서 *은 conjugate를 뜻한다.

광대역 $R(f)$ 를 구하는 것은 대역폭 내의 $R(f)$ 로부터 대역 밖의 $R(f)$ 를 산출하는 것이다. 이산 Fourier transform coefficients R_j 는 forward와 reverse AR prediction으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_j = \sum_{k=1}^p \alpha_k R_{j-k} \quad \text{그리고} \quad R_j^* = \sum_{k=1}^p \alpha_k R_{j+k}^* \quad (8)$$

위에서 p 는 p complex number를 표시하므로 p 값은 layer의 수 NL 보다 같거나 커야한다. $\{\alpha_k\}$ 가 구해지면 윗 식을 사용하여 대역 밖의, 즉 저주파 또는 고주파 성분의 R_j 를 구할 수 있다. 식 (7)과 (8)을 산출하기 위하여 Burg 알고리즘을 사용하였다(Appendix).

의사 임피던스

탄성과 데이터로부터 저류층의 공극율을 도출하는 과정은 다음과 같다. 첫째로 탄성과 트래이스를 디킨블루션하여 반사계수 시계열을 작성한다. 이때 음파/밀도 검층기록으로 반사계수를 보정한다. 둘째로 반사계수 시계열로부터 다음의 식을 사용하여 의사 임피던스 시계열을 작성한다.

$$\xi_{k+1} = \xi_k \left(\frac{1+r_k}{1-r_k} \right) = \xi_1 \prod_{j=1}^{j=k} \left(\frac{1+r_j}{1-r_j} \right) \quad (9)$$

이때 첫 번째 샘플의 값, $\rho_1 v_1$ 이 필요하다. 본 연구에서 이 값은 음파/밀도 검층과 중성자검층 기록이 있는 8개의 검층기록에서 산출한 값을 kriging하여 사용하였다.

3D 공극율

본 연구의 최종 결과물은 3D 공극율 데이터 작성이다. 앞에서 기술하였던 탄성과 처리분석 과정, 즉 탄성과와 검층기록을 종합적으로 사용하여 탄성과 트래이스로부터 의사 임피던스 로그의 작성은 공극율 정보를 추출하기 위한 전처리라 할 수 있다. 의사 임피던스로부터 공극율 검층기록을 작성하는 과정은 다음과 같다.

속도검층

탄성과 임피던스는 밀도와 속도의 곱이다. 밀도와 속도와의 관계는 Gardner 식,

$$\rho = 0.31 v^{0.25} \quad (10a)$$

을 이용하였다(Sheriff and Geldart, 1981). 여기서 속도 v 는

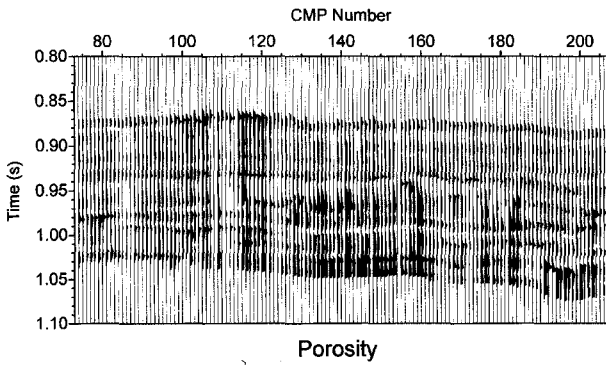


Fig. 2. Porosity derived from the pseudo-impedance trace.

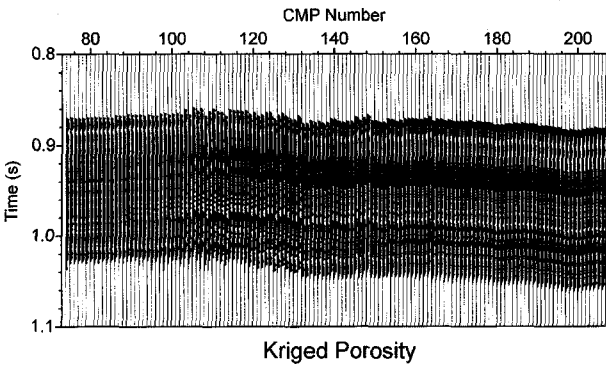


Fig. 3. Porosity derived from 8 well logs by kriging.

(m/s) 이다. 따라서 임피던스로부터 속도를 산출할 수 있다. 본 연구에서 사용한 속도의 단위는 (ft/s)이므로 속도는 다음과 같이 표시된다.

$$v = \left(\frac{I}{0.31 \times 0.3048^{0.25}} \right)^{\frac{1}{1.25}}$$

이를 간단히 표현하면

$$v = (4.34 \cdot I)^{\frac{1}{1.25}} \tag{10b}$$

이다. 식 (10b)를 사용하여 임피던스 트레이스를 속도 트레이스로 변환하고 이로부터 음파검층 기록을 산출하여 식 (3b)를 사용하여 공극을 검층기록을 구할 수 있다. Fig. 2에는 임피던스 트레이스로부터 산출한 공극을 단면을 제시하였고, Fig. 3에는 8개의 검층기록을 kriging한 공극을 단면을 제시하였다. 두 그림에서 보면 seismic으로부터 도출된 공극을 단면이 보다 공간적으로 묘사적인 사실을 볼 수 있다.

상술한 과정에 따라 작성된 3D 공극을 데이터의 수평단면을 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 이 단면은 가스 생산층인 Caddo층 상부에 해당하는 단면으로 탄성과 자료를 사용하여 도출된 단면이 현저하게 공간적으로 고해상 정보를 제공하고 있는 사실을 알 수 있다.

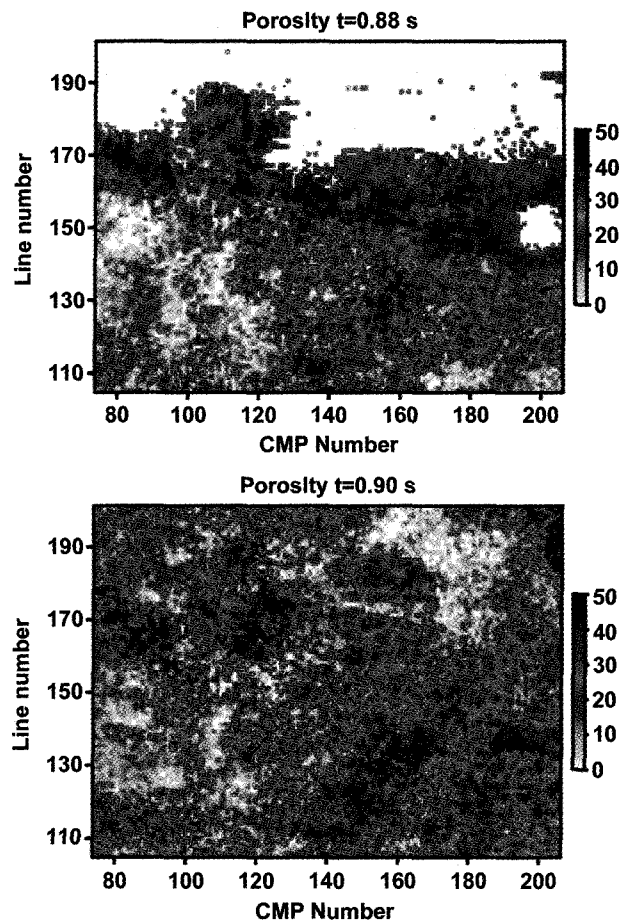


Fig. 4. The porosity is derived from the seismic inversion.

결 론

본 연구의 목적은 검층자료와 탄성과 자료를 효율적으로 이용하여 3D 탄성과자료로부터 저류층 파라미터 중 하나인 공극을 정보를 탄성과 기록의 분해능 수준으로 표현하는 처리 분석 과정에 대한 연구이다.

본 연구에서는 검층기록과 탄성과 트레이스를 종합하는 과정에서 두 데이터의 특성에 근거하여 상호보완적으로 보정하는 알고리즘을 사용하였다. 즉 탄성과 트레이스는 시간영역에서 측정된 데이터이므로 검층기록을 깊이에서 시간으로 변환할 때는 탄성과 기록에 비중을 두었고, 반사계수 진폭은 검층에서 잘 산출할 수 있으므로 탄성과에서 도출한 반사계수의 진폭은 검층기록에 근거하여 보정하였다.

탄성과 데이터를 깊이 영역에서 분석하는데 필요한 검층기록은 음파검층이다. 본 연구 지역에서 획득한 음파 기록은 제한적이므로 중성자 검층기록으로부터 음파 검층을 산출하였다. 이때 한 well에서 도출한 두 검층기록의 상관관계를 사용하여 기타 중성자 검층기록으로부터 음파검층을 산출하였다. 그리고 탄성과 기록의 진폭을 보정하기 위해서는 탄성과 기록의 위치에 해당하는 음파검층 기록이 필요한데 본 연구에서는 공

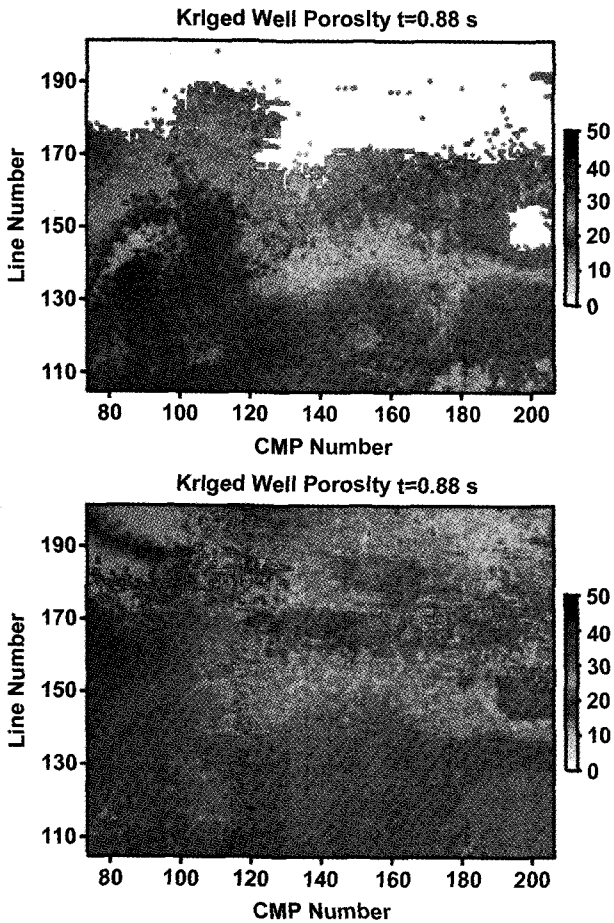


Fig. 5. The porosity is derived from 8 well logs by kriging.

간적인 분포가 한정된 검층기록을 통계학적인 방법으로 kriging하여 도출하였다.

탄성파 데이터로부터 매질의 경계면에 대한 고해상의 정보를 도출하려면 광대역의 데이터가 필요하다. 따라서 제한된 대역폭의 탄성파 기록으로부터 광대역 정보를 추출하여야 한다. 본 연구에서는 주파수 영역에서의 탄성파 데이터 중 신뢰할 수 있는 구간인 20~80 Hz 내의 데이터로부터 forward/reverse

예측필터를 산출하고 이를 사용하여 저주파/고주파 성분을 산출하는 알고리즘을 사용하였다. 이러한 데이터 처리의 효과는 탄성파기록으로부터 주 반사이벤트를 강조하는 공정이다.

사 사

본 연구는 한성대학교 교내 특별연구지원에 의하여 일부 지원되었다. 본 연구에 자료를 제공한 한국석유공사에 감사하며 연구수행 중 자료처리에 도움을 준 김현규 군에게 감사한다.

참고문헌

이두성. 1998, 탄성파 기록으로부터 기본파형 추출에 관한 연구: 물리탐사, **1**(3), 183-187.

Claerbout, J. F., 1976, Fundamentals of geophysical data processing: McGraw-Hill Inc.

Hardage, B. A., 1996, Boonsville 3-D data set: *The Leading Edge*, **15**(7), 835-837.

Helland-Hansen, D., Magnus, I., Edvardsen, A., and Hansen, E., 1997, Seismic inversion for reservoir characterization and well planning in the Snorre Field: *Leading edge*, **16**(3), 269-273.

Lavergne, M., and Willim, C., 1997, Inversion of seismogram and pseudo velocity logs: *Gephys. prosp.*, **25**, 231-250.

Leinbach, J., 1995, Wiener spiking deconvolution and minimum-phase wavelets: tutorial: *Leading edge*, **14**(3), 189-192.

Lindseth, R. O., 1979, Synthetic sonic log- a process for stratigraphic interpretation: *Geophys.*, **44**, 3-26.

Lines, L. R., and Treitel, S., 1984, A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems: *Geophys. Prosp.*, **32**, 159-184.

Ordenburg, D. W., Scheuer, T., and Levy, S., 1983, Recovery of the acoustic impedance from reflection seismigram: *Geophys.*, **48**, 1318-1337.

Sheriff, R. E. and Geldart, L. P., 1981, Exploration seismology: *Cambridge Univ. Press*, **2**, p. 3-4.

Appendix AR processing

```

int nt, nnt; /* number of samples in input trace */
int nfft; /* transform length */
int nf; /* number of frequencies */
int fp, nfilter; /* filter point */
int lx; /* number of complex points input to burg */
int nfmin, nfmax, nflimit; /* number of minimum and maximum frequencies to be input */
float fmin, fmax, flimit; /* minimum and maximum frequencies to compute */
complex *ca; /* complex points of burg's filter */
complex *cx; /* complex trace input to the burg */
register float *rt; /* real trace */
register complex *ct; /* complex transformed trace */
    
```

```

/* FFT */
pfarc(1,nfft,rt,ct); /*seismic trace rt & its Fourier transform ct */

for(i=0; i<lx; i++)
{
    cx[i].r=ct[nfmin+i].r;
    cx[i].i=ct[nfmin+i].i;
}

/* Compute Burg's prediction coefficients. c.f. Clabout(1976) p. 133 */
burg(lx,cx, nfilter,ca,nfft);
/* Apply autoregressive filter to the data */
arfilter(nfmin,nfmax,nflimit,nfilter,nf,ct,ca);

/* Inverse FFT */
pfacr(-1,nfft,ct,rt);

/* Store values */
for(i=0; i<nt; i++) tr.data[i]=rt[i];

puttr(&tr);

void arfilter(int nfmin,int nfmax,int nflimit,int nfilter,int nf,complex *ct,complex *ca)
{
    register int i,j;

    /* Forward prediction */
    for(i=nfmax; i<=nflimit; i++)
    {
        ct[i].r=0.; ct[i].i=0.;

        for(j=1; j<nfilter; j++) ct[i]=csub(ct[i],cmul(ca[j+1],ct[i-j])) ;
    }

    /* Backward prediction */
    for(i=nfmin; i>=0; i--)
    {
        ct[i].r=0; ct[i].i=0;

        for(j=1; j<nfilter; j++) ct[i]=csub(ct[i],cmul(ca[j+1],conjg(ct[i+j])));
        ct[i]=conjg(ct[i]);
    }
}

```