

천연가스 저류층의 직접 탐지를 위한 AVO 분석과 SA 기법에 의한 AVO 역산 연구

양 동우^a, 양 승진^a, 서 상용^b, 박 근필^b

^a한양대학교 자원환경공학과, ^b한국자원연구소

1. 서 론

AVO 분석은 천연가스 부존에 대한 지시자(indicator)로서 시추지점 선정과 시추 성공률을 높이는 데 효과적인 현장에서 그 활용도가 높은 기술이며 AVO 역산에 의한 지층 물성의 정량적인 규명은 정성적인 특성을 고찰하는 AVO 분석 결과의 해석과 서로 보완적인 역할을 한다.

AVO(Amplitude Versus Offset : AVO) 분석에 의한 천연가스 저류층의 직접 탐지에 대한 시도는 탄성과 중합단면도 상의 반사강도가 강한 부분인 'Bright Spot'에 대한 정밀 분석 기술이 요구되면서 활발한 연구와 활용이 시작되었다(Ostrander, 1985; Yu, 1985).

탄성파가 천연가스 저류층의 상·하 경계면에서 반사할 때 입사각 또는 음원-수진기 거리에 따라서 그 진폭이 변화한다는 사실은 석유 및 천연가스 저류층 탐지에 주요한 단서가 된다. CDP(Common Depth Point: CDP)법에 의한 탄성과 반사 기록은 지층 내의 한 반사점에 대해서 fold 수만큼의 트레이스를 가지며 이에 대한 AVO 분석은 이 트레이스들의 음원-수진기 거리에 따른 AVO 특성을 입사각에 따른 진폭변화로 전환하여 천연가스 부존 여부를 판명한다. 일반적으로 천연가스 저류층은 모암인 사암에 비해 작은 포아송 비를 가지며(Domenico, 1976; Gregory, 1976) 이로 인해 음원-수진기 거리가 증가함에 따라 반사계수 즉 진폭의 절대치가 증가하는 특성을 보인다(Ostrander, 1984; Koefoed, 1956 and 1962). 이러한 AVO 특성의 존재 여부를 정밀히 파악하기 위해서는 반사계수 이외의 진폭에 영향을 주는 각종 요인에 대한 보정이 필요하다(Yu, 1985; Swan, 1991). 또한 AVO의 특성은 지역 별 지층 물성에 따라 다르기 때문에(Rutherford, 1989) 지역적인 AVO 특성과 사례연구들이 발표되고 있고(Allen and Peddy, 1993; Sengupta, 1993; Hall et al., 1995), 이러한 AVO 특성을 분석하는 연구가 활발히 시행되고 있다(Backus and Castagna, 1993).

본 연구에서는 현장 자료인 국내 대륙붕의 탄성과 반사 기록으로부터 천연가스 부존 여부를 규명해 보기 위하여 각종 진폭 보정 방법을 적용한 후 AVO 분석을 시행하고, 또한 중합자료에 복소 분석 방법을 적용하여 그 결과로 천연가스 지층에서의 특성을 고찰한다(Taner, 1979; Mazzotti, 1991).

AVO 역산은 AVO 곡선의 정성적인 면을 고찰하여 천연가스 부존 여부를 규명하는 AVO 분석과는 달리 AVO 곡선으로부터 반사면 상·하 지층의 P -파 속도, S -파 속도 및 상·하 지층의 밀도의 비를 결정함으로써 AVO 곡선을 정량적인 면에서 해석하여 천연가스 부존 여부를 규명하는 것이다. AVO 곡선의 정량적인 해석 연구는 주로 지역적 최적화 기법인 반복적 최소자승법을 이용하였고(Demirbag, 1990; Mallick, 1993; Hampson, 1991), 이들의 연구 결과를 보면 각

모델 변수의 초기값이 실제값에 근사한 경우에만 해로 수렴한다. 이는 P-파에 대한 정보만 포함 되어 있는 AVO 곡선으로부터 상·하 지층의 P-파 속도, S-파 속도 및 상·하 지층의 밀도의 비등 모든 물성을 규명하는 문제는 어렵다는 것을 의미한다(de Hass and Berkhout, 1988). 또한 AVO 역산문제의 목적함수는 그 기하학적인 형태가 닫힌 폐곡선이 아닌 열린 협곡 형태여서 초기값에 민감한 반복적 역산법으로는 모델 변수의 정확한 역산이 어려우며(Scales, et al., 1992), 반사면 상·하 지층의 P-파 속도가 목적함수에 미치는 영향이 커서 P-파 속도를 포함하여 물성 전부를 역산하는 것은 정밀하고 유일한 해를 얻을 수 없다(Frazier, 1992; Drufuca and Mazzotti, 1995). 이처럼 닫힌 폐곡선이 아닌 열린 형태의 평면을 가진 목적함수에 대한 역산 문제는 목적함수 전체를 탐색공간으로 하여 통계적 방식으로 전역적 해를 결정하도록 고안된 유전자 알고리즘(Holland, 1975), Simulated Annealing(SA)과 같은 전역적 최적화 기법을 사용함으로써 좀 더 정밀한 최적해로의 수렴이 가능하다(Goldberg, 1989; Kirkpatrick, 1983; Ingber, 1993).

전역적 최적화 기법을 물리탐사 자료에 적용함으로써 정량적인 면에서 자료를 해석하는 연구는 여러 학자들에 의해서 시도되고 있는데 Dittmer와 Szymanski(1995)는 자력 및 비저항 탐사자료에 통계적인 방식으로 다음 단계의 해로 수렴하는 SA기법을 적용하여 물성을 역산하였고, Sen과 Stoffa(1992) 및 Mallick(1995)는 자연계의 진화 양식을 모방하여 개발된 유전자 알고리즘을 이용하여 AVO 역산에 활용하는 연구와 Zoeppritz식의 근사식에 적용하여 상·하 지층의 포아송비의 차이와 수직반사계수를 역산하는 연구를 하였다. 또한 Nolte와 Frazer(1997)는 유전자 알고리즘과 SA기법을 비교하는 연구를 통하여 탄성과 탐사자료에 대한 전역적인 최적화 기법의 활용성을 확인 하였다.

본 연구에서는 전역적 최적화기법인 SA 기법에 의한 역산을 합성 AVO 자료와 일부 대륙붕 자료에 적용하여 지층 물성을 규명하고 그 결과를 검토한다. 또한 P-파 속도가 목적함수에 미치는 영향에 기인한 비유일해 문제를 해결하기 위해서 속도분석 결과로 획득된 상·하 지층의 P-파 속도를 구간속도로 인정하여 P-파 속도를 기지수로 하고 나머지 물성인 S-파 속도와 상·하 지층의 밀도의 비만을 합성자료와 대륙붕 자료에 적용하여 역산하고 그 결과를 비교 분석한다.

2. 전역적 최적화 이론의 개요

역산의 목적은 관찰된 자료와 가정한 모델에 대하여 이론적으로 계산된 자료간의 오차 또는 오차의 제곱으로 정의되는 목적함수 $E(m)$ 이 최소(minimum)가 되도록 모델변수 m 을 결정하는 것이다.

지구물리학에서의 역산 문제는 목적함수가 대부분이 모델 인자의 변화에 따라 지역적인 최소값을 갖는 다중정점(multimodal) 형태이거나, 목적함수의 등고선이 말안장 형태의 평탄면(plateau) 또는 좁은 협곡 형태를 취하기 때문에 목적함수를 구성하고 있는 최적의 물성을 결정하는 일이 쉽지 않다. 목적함수에 모델 인자에 대한 편미분을 취하여 얻은 경사도(gradient)에 의하여 탐색방향이 결정되는 Gradient법이나 반복적 최소자승법과 같은 지역적 최적화 방법은

목적함수가 하나의 최대값 또는 최소값을 갖는 단순한 형태라면 초기값과 상관없이 모델 공간내의 어느 지점에서 시작하든지 최적의 해로 수렴하지만 목적함수의 기하학적인 형태가 복잡하면 초기값의 위치에 따라서 수렴하는 해가 다르다. 즉, 반복적으로 새로운 해로 수정될 때 현 위치의 인근에서 그 방향과 이동 거리(step length)를 결정할 뿐 모델 공간내의 먼 거리에 위치한 지역에 대한 탐색은 곤란하기 때문에 목적함수의 유일해(unique solution)에 대한 수렴은 초기값에 크게 의존한다.

지역적 최적화 방법은 초기값 주위의 지역적 최적값으로 빠르게 수렴하므로 정점이 하나이고 (unimodal) 정점 주위의 기하학적인 형상이 평탄형 또는 좁은 협곡형이 아닌 목적함수에 대해서는 매우 효과적이다. 그러므로 역해 문제에 대한 특성을 충분히 조사하여 초기값을 전역적인 최적값 주변의 값으로 선택할 경우에는 효과적으로 최적해를 구할 수 있다.

전역적인 최적값에 수렴하는 최적화 방법은 Monte Carlo 방법, 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA), Simulated Annealing(SA) 등이며 이들 방법은 지역적 최적화 방법과는 달리 모델 공간내의 넓은 지역을 탐색하여 전체 모델 공간 속에서 전역적인 최적값을 찾는 기법이다.

Monte Carlo 방법은 직접적으로 모델 공간을 구성하고 있는 모든 개개의 모델에 대한 목적함수를 검토 및 평가하여 최적의 값을 결정하는 방법이다. 계산 과정에서 유의해야 될 것은 현재의 모델과 새로운 모델간의 "차별성(distinctness)"을 확인하는 과정으로 매우 단순하고, 많은 계산 시간이 필요한 소모적인 방식이므로 방법의 활용도는 매우 낮다.

GA는 1960년대 말과 1970년대 초에 Holland(1975)에 의해서 고안된 자연계의 생물학적인 진화 방식을 모방하여 해의 모집단에서 더 나은 해로 진화시켜나가는 방식으로 최적해를 찾아가는 것이다(Goldberg, 1989).

SA법은 용융된 고체가 결정으로 성장하는 과정을 모사한 방법으로서 Kirkpatrick(1983)에 의해서 고안된 이후 흥미 있는 연구주제로 부상하였고, 최근 몇 년간 알고리즘의 구현과 효율성 면에서 상당한 진보가 있었다(Ingber, 1992, 1993, 1995). SA는 모델 공간내의 초기값에 가까운 지역적인 정점으로 이동하려는 경향과 확률적으로 선택된 방향의 정점으로 이동하려는 경향 사이에서 경쟁적인 해의 수정(update)이 이루어지고, 제어인자의 값이 낮아지면서 점차로 확률적인 선택에 의한 해의 선택이 줄어들면서 현재의 위치에서 가까운 위치의 정점으로 수렴하는 방식이다. SA법의 계산시간과 해의 수렴 여부는 반복적 최소자승법과 달리 목적함수의 기하학적인 형태와 상관없이 이동 길이(step length)와 제어인자의 감쇄되는 정도에 좌우된다.

본 연구의 AVO 역산은 그 목적함수가 다중정점 문제는 아니고 최적값 주변이 좁은 협곡 형태이다. 이러한 문제는 협곡내에서 모델변수에 대한 목적함수의 경사도를 계산하기가 어렵기 때문에 모델 인자에 대한 편미분치 즉 기울기를 이용하는 기존의 지역적 최적화 방식은 모델 공간내의 전역적 최적해를 얻는데 어려움이 따를 수밖에 없다. 이러한 문제점을 해소하기 위하여 본 연구에서는 전역적 최적화 기법인 SA법을 이용하여 AVO역산을 수행하였다.

3. Simulated Annealing(SA)의 탐색 원리

SA는 목적함수 $E(m)$ 의 전역적인 최대값 또는 최소값을 찾기 위한 방법이며 여러 개의 매

개변수로 구성된 다양한 형태의 최적화 문제에 대해 적용 가능하다(Kirkpatrick et al., 1983; Geman and Geman, 1984). 지구물리학에서는 파형 역산과 비저항 자료 역산에 성공적으로 적용되었다(Rothman, 1985 ; Basu and Fraser, 1990; Sen and Stoffa, 1991, 1992, 1995). 본 연구의 AVO 역산문제는 여러 모델변수에 대한 목적함수의 최소값을 결정하는 문제이다.

어떤 물리적인 계의 완냉각 과정은 용융된 고체가 냉각되면서 모든 입자들이 저 준위의 상평형에 도달하게 되고 일정한 구조로 배열되는 결정화가 이루어질 때 일어나는데 SA 기법은 이러한 물리적인 계의 완냉각 과정에서 일어나는 고체 분자의 거동과 최적화 문제의 모델변수 사이의 특징들을 통계역학적으로 시뮬레이션 하여 초기값 부근의 지역적 최적해가 아닌 전체 모델 공간을 탐색하여 전역적인 해로 수렴하는 방법이다(Kirkpatrick, 1983, Ingber, 1992, 1993). 목적함수의 모델 변수 m_i 가 함수값 $E(m_i)$ 를 가지고 모델공간내에 존재할 확률 $P(E(m_i))$ 는

$$P(E(m_i)) = \frac{\exp\left(-\frac{E(m_i)}{T}\right)}{\sum_{j \in Z} \exp\left(-\frac{E(m_j)}{T}\right)} \quad (1)$$

이다(Kirkpatrick, 1983).

여기서 Z 는 가능한 모든 모델변수의 집합으로서 $j=1 \sim n$ 이고, T 는 제어인자(control parameter)로서 확률 $P(E(m_i))$ 은 이 제어인자에 따라서 그 값이 제어된다. 즉 제어인자의 값이 큰 경우는 모델변수의 존재 확률값이 커지므로써 모델 공간을 넓게 탐색한다는 전역적인 의미를 가지고, 제어인자의 값이 작으면 모델변수의 존재 확률값도 작아져서 좁은 모델 공간만을 탐색하는 지역적인 의미를 가지게 된다. 이것은 제어인자의 값에 따라서 전체 모델공간을 탐색하느냐 지역적인 좁은 공간만을 탐색하느냐가 결정된다는 의미가 되고 본 연구에서의 제어인자 T 는 10~20 정도의 값을 이용하였다. 모델인자 m_i 의 개수가 k 개이고, 모델 공간 내에서 각 모델인자의 존재 가능한 수를 n 개로 정의하면 집합 Z 의 존재 가능한 모델의 수는 n^k 개이다. 즉 제어인자가 주어지면 집합 Z 개만큼의 계산이 이루어진 후에 다음 단계로 넘어가게 되므로 SA의 계산량은 각 모델인자의 존재 가능한 수 n 개에 따라서 결정되게 된다. 이 개수는 모델 공간의 크기에 따라서 달라지지만 본 연구에서는 50~100개 정도를 사용하였다. 구체적인 수렴 방식을 살펴보면 목적함수 $E(m_i)$ 를 갖는 초기 모델인자 m_i^j 에 작은 변량(perturbation)을 가하여 다음과 같은 목적함수 $E(m_i^{j+1})$ 를 갖는 새로운 모델 m_i^{j+1} 은 다음과 같이

$$m_i^{j+1} = m_i^j + \Delta m_i \quad (2)$$

된다. Metropolis(1953)는 다음 단계의 모델 변수가 발생된 다음 새로운 모델이 수렴하는지에 대한 수렴 조건을 고안하였는데 신규 모델의 목적함수 차이 ΔE 는

$$\Delta E = E(m_i^{j+1}) - E(m_i^j) \quad (3)$$

이 되고, 이 새로운 모델 m_i^{j+1} 가 받아들여질 것인지 아닌지는 ΔE 의 값에 의존하게 된다. $\Delta E \leq 0$ 이면 새로운 모델 m_i^{j+1} 은 항상 받아들여지게 되고, $\Delta E > 0$ 이면 확률

$$P = \exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right) \quad (4)$$

에 따라서 받아들여지게 되거나 버려지게 된다. 위의 수렴 규칙에 의하여 모델의 발생과 수렴 과정이 모델인자의 존재 가능한 수만큼 반복되면서 각 제어인자에서의 수렴값이 결정되게 된다. 제어인자는 정해진 계획(예를 들면 $T=0.5T$ 이면 매 반복시 절반씩 줄어든다)에 따라 감쇄하면서 각 제어인자 마다 새로운 수렴값으로 수렴하고, 제어인자가 계속 감쇄하여 무한히 영에 접근하면서 전역적인 최소값으로 수렴하게 된다(Geman and Geman, 1984).

지역적 탐색 방법에서는 초기 모델에서 $\Delta E \leq 0$ 이면 새로운 모델은 언제나 받아들여진다. 즉 그것의 탐색 방향은 언제나 감소하는 쪽이 된다. 그러나 SA 기법에서는 수렴 규칙에서 정해진 것처럼 비록 $\Delta E > 0$ 이라 하더라도 모든 모델이 새로운 모델이 될 수 있는 확률을 갖게 된다. 그러므로 지역적 최적화 기법은 초기 모델의 이웃에 있는 지역적 최소값으로 급속하게 수렴하지만 SA는 지역적 최소값에서 빠져들지 않고 전체적인 모델 공간을 탐색하는 확률을 가지게 된다. 그러나 제어인자에 대한 감쇄가 너무 급속하면 탐색영역이 좁아지고 이는 전체 모델공간 탐색이 불가능하게 되어 지역적인 최소값으로 수렴하는 현상이 일어나게 될 것이다.

4. AVO분석과 SA에 의한 AVO역산 결과

대륙붕 자료에 대한 AVO 분석 결과고찰

본 연구에서 분석한 탄성파탐사 자료는 한국 대륙붕 중 시추결과 천연가스 부존이 확인된 지역의 탄성파탐사 자료로서 Fig. 1은 분석하고자 하는 시추지점 부근의 중합단면도이며 단면도 상의 Shot Point(SP) 90이 천연가스가 검출된 시추지점이다. 중합단면도 상의 시간 1.1sec ~ 1.13sec의 진폭이 강하게 보이는 "Bright Spot"이 AVO 분석 대상 지층이다.

CDP 모음 자료에 대해 속도 분석 결과를 이용한 NMO 보정과 각종 진폭보정을 시행한 후 AVO 곡선을 도시하였다. Fig. 2 a)는 SP 85(시추 지점은 SP 90)에 대한 AVO 분석 결과이며, 본 그림들의 상부 도면은 저류층인 $t_0=1.13\text{sec}$ 전 후의 AVO 진폭을 보여주며, 중부 도면은 $t_0=1.13\text{sec}$ 에서의 AVO 곡선을 막대그래프로 나타낸 것이고, 하부도면은 파형요소의 넓이인 30ms 정도의 Window내의 진폭에 대한 에너지를 음원-수진기 거리별로 도시한 것이다. 이들 그림에서 보듯이 에너지 변화 추세는 중부 도면인 AVO와 거의 일치 하는 것을 볼 수 있으며 이는 반사 진폭이 증가하는 것은 반사 에너지가 증가하는 것으로 보아도 된다는 것을 의미한다. 각 도면의 특성은 음원-수진기 거리가 증가 함에 따라 진폭의 절대치가 증가하는 특성을 보이며 이는 천연가스 부존을 지시한다고 할 수 있다.

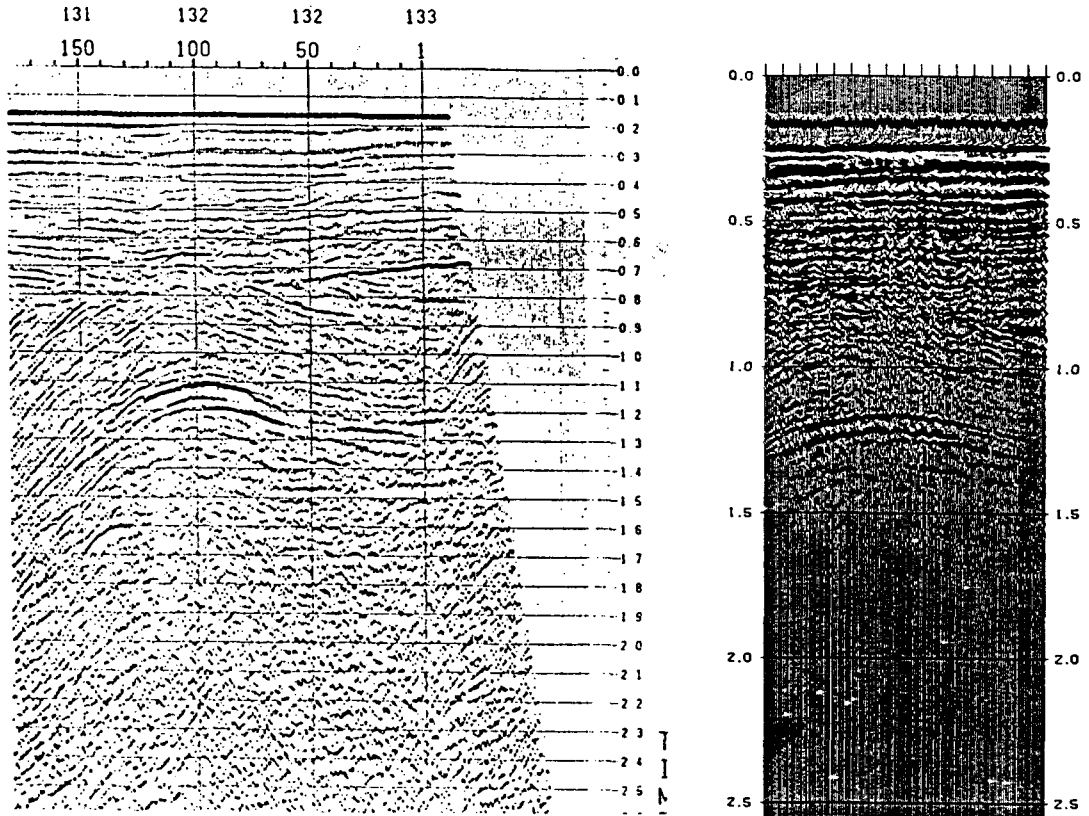


Fig. 1 Stacked seismic section on gas-reservoir

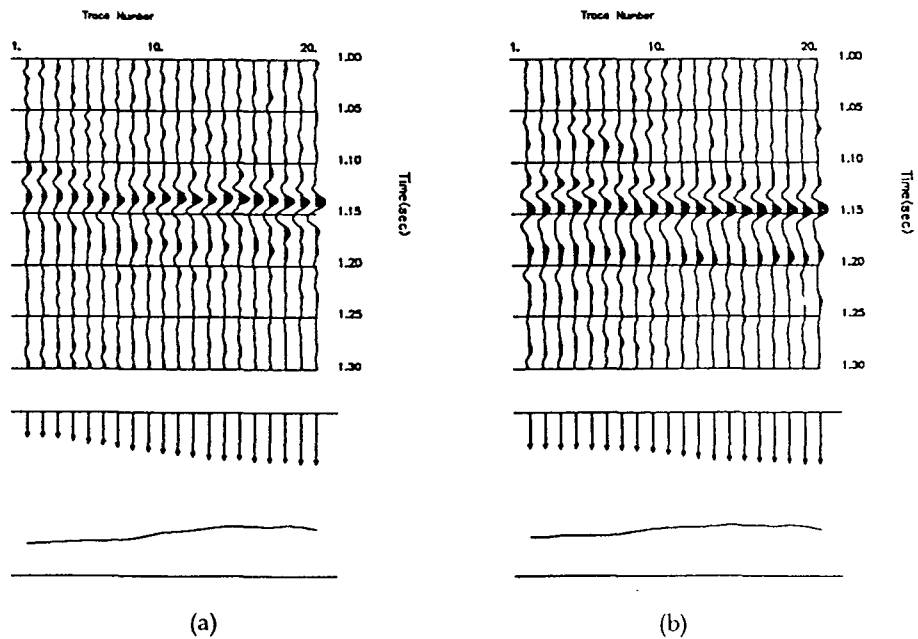


Fig. 2. NMO corrected CDP traces(upper), AVO(mid) and Energy curve(lower) at $t_0 = 1.13$ sec for a) SP 85, b) SP 120.

Fig. 2 b)는 시추 지점으로부터 약 800m 거리의 SP 120 자료이며 중합단면도에서도 이 지점들에서 상당히 강한 반사진폭이 관찰되며 AVO 분석 결과 역시 천연가스 징후를 선명하게 보인다. SP 120 주변인 SP 119 및 123에 대한 AVO 결과를 종합하면 대체로 강한 반사 진폭이 관찰되고 그 AVO 특성도 음원-수진기 거리에 따라 그 진폭이 증가하는 추세를 보이는 것으로 보아 천연가스의 부존 가능성이 크다고 생각된다. Zoeppritz 근사식에 의해서 천연가스 저류층에서의 AVO 특성을 고찰해 보기 위해 SP 85부터 SP 125 까지 모든 CDP 모음 자료에 대한 AVO 곡선을 $R(\theta) = R_0 + G \sin^2\theta$ 로 적합하여 수직 반사계수인 R_0 와 상·하 지층의 포아송비의 차이인 $\Delta\sigma$ 와 밀접한 관계를 갖는 기울기 G 를 결정하고 이들의 곱 (R_0G), 차이 ($(R_0 - G)/2 = S_0$) 및 합 ($(R_0 + G)/2 = R_0 - S_0$)을 구하였다. Fig. 3의 a)~e)는 각각 이들 계수를 나타낸 것이다. 본 도의 a)는 수직 반사계수인 R_0 값으로서 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 큰 (-)값을 갖으며 b)의 G 값은 상당히 불규칙한 양상을 보인다. 이 불규칙한 현상은 잡음의 영향으로 사료되지만 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 (-) 값을 나타내는 곳이 많기 때문에 앞서 고찰하였던 AVO 곡선에서의 특성과 유사한 결과를 보여준다. c)는 R_0G 로서 이 값도 G 값의 불규칙성 영향으로 역시 불규칙하나 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 절대치가 큰 값들이 많이 나타나는 특성을 보인다. d)는 $(R_0 - G)/2$ 즉 S_0 와 수직반사계수 S_0 의 값이며 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 절대치가 큰 특성을 보인다. e)는 $(R_0 + G)/2$ 즉 $R_0 - S_0$ 값을 나타내며 이것도 역시 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 절대치가 크다. 이상의 사항을 종합해 볼 때 AVO 근사식에 의한 분석 결과 중 R_0 , $(R_0 - G)/2 (= S_0)$, $(R_0 + G)/2 (= R_0 - S_0)$ 는 결과는 천연가스 부존을 지시하며 G 및 R_0G 는 불규칙하게 변하여 천연가스 부존 규명에 이용하기 곤란하다.

본 연구의 분석에 이용된 중합자료(Fig. 1)에 대한 복소분석 결과는 Fig. 4의 a), b), c)이다. 본 도의 a)는 진폭강도를 나타낸 것이며 Fig. 1의 중합단면도와 매우 유사하게 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근의 천연가스 저류층에서 진폭 이상(Bright Spot)이 강하게 나타난다. 특히 SP 90 부근과 SP 120 부근에서 진폭 강도의 크기가 강하게 나타나는데 이는 앞서의 AVO 분석 결과와 대략 일치하며 이 강도의 크기는 저류층의 천연가스 함유정도를 나타내는 것으로 추정된다. b)는 위상을 나타내며 여기서 볼 때 저류층 상부 경계면 및 그 하부 몇 개 지층들의 수평적 연속성을 잘 나타내 준다. 이러한 연속성에 대한 정보는 지층 해석뿐만 아니라 단층과 습곡 등에 의한 지층의 경계면의 왜곡현상에 대한 해석도 가능함을 보여 주고 있다. c)는 주파수 변화를 보여주며 $t_0=1.13\text{sec}$ 부근에서 고주파 성분이 나타나고 그 하부 지층들에서는 이들이 소멸되는 특성을 보인다. 천연가스나 석유를 함유한 지층이 고주파 성분을 흡수하는 물질임을 고려할 때 $t=1.13\text{sec}$ 부근의 지층이 가스나 석유를 함유하고 있는 저류층임을 지시한다고 볼 수 있다.

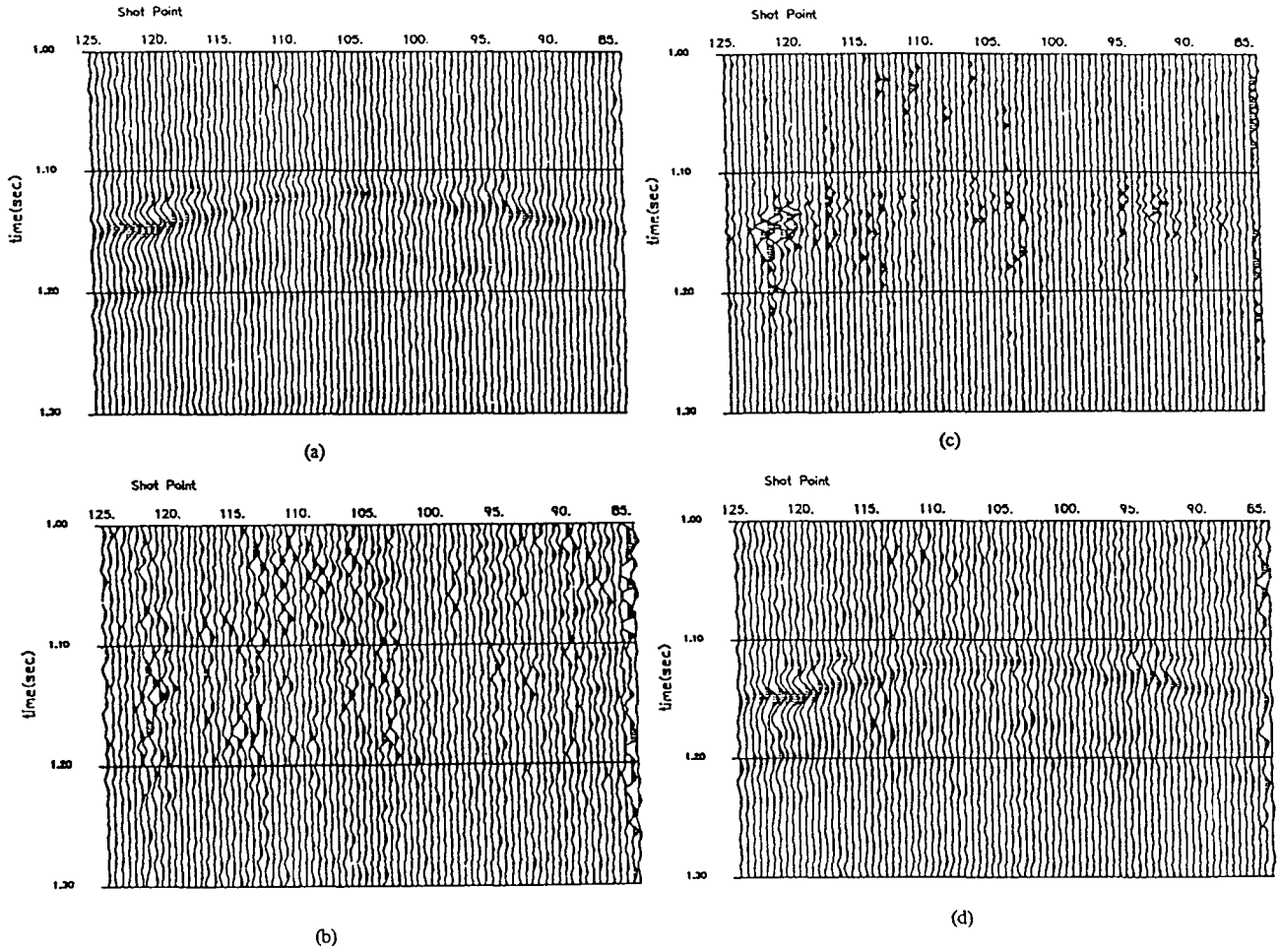


Fig. 3. Parameters determined from approximate AVO relation to $\sin^2\theta$ for the CDP traces in the gas reservoir. a) zero-offset amplitude, R_0 , b) gradient, G , c) R_0G , d) $(R_0 - G)/2$, and e) $(R_0 + G)/2$.

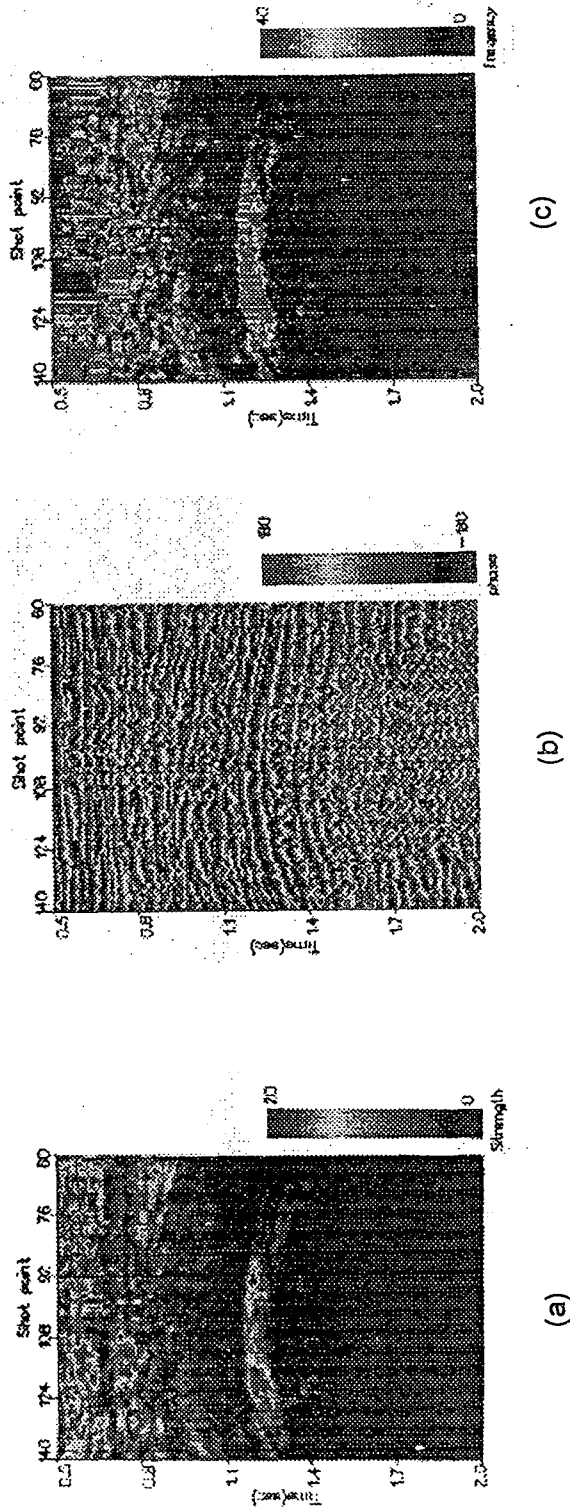


Fig. 4 Complex analysis of the stacked section.
a) amplitude strength, b) instantaneous phase, c) frequency

대륙붕 자료에 대한 AVO 역산 결과고찰

SA기법을 대륙붕 탄성과 탐사 자료에 대한 AVO 자료에 적용하여 역산을 수행해 보기로 한다. 수직 반사계수를 알 수 없으므로 입력자료로는 각 트레이스에서 최대치에 절대치를 취한 값으로 모든 트레이스의 진폭을 나누어준 값을 입력자료로 사용하고, 모델 변수는 상·하 지층의 P-파 속도와 S-파 속도 그리고 밀도의 비 (ρ_1/ρ_2)이다.

Fig. 2의 SP 85에 대한 AVO자료로부터 지층물성을 역산하기 위해 상·하 지층의 P-파 속도 그리고 포아송비 및 밀도비의 초기치를 Table. 1의 initial model값으로 가정한 후 SA-AVO로 역산한 결과 표에서 보듯이 상·하지층의 포아송비가 각각 0.385 및 0.154, P-파 속도가 2750m/sec 및 2200m/sec, 밀도비가 1.053로 결정되었다. Table 2는 속도분석에 의해 결정된 상·하 지층의 P-파 속도를 알고있는 값으로 하여 역산한 결과이며 당연하게도 P-파 속도와 포아송비는 차이가 있지만 비슷하게 결정되었음을 알 수 있다. 결정된 물성치에 대한 AVO 이론곡선과 실제 AVO 곡선은 Fig. 5에 도시되어 있고 그 결과는 정확하게 일치한다. 여기서 역산된 포아송비가 0.15로서 일반적으로 천연가스 저류층에서의 포아송비 값으로 알려진 0.1보다는 크지만 일반적 사암 및 셰일의 포아송비 인 0.3~0.4보다는 낮고, P-파속도도 상층보다 낮으며 밀도비(ρ_1/ρ_2)가 1.05이어서 반사면 하부층에서 밀도가 감소함을 의미한다. 그러므로 위 역산 결과는 천연가스의 부존을 지시한다고 볼 수 있다.

Table. 1. Inversion results of AVO curve for SP 85 by Simulated Annealing algorithm.

Layer	P-wave velocity (m/sec)		Poisson's ratio		Density ratio (ρ_1/ρ_2)	
	Initial model	Inversed model	Initial model	Inversed model	Initial model	Inversed model
Top layer	2600	2750	0.35	0.385	1.2	1.053
Bottom layer	2000	2230	0.25	0.154		

Table 2. Inversion results of AVO curve SP 85 with known velocity P-wave.

Layer	P-wave velocity (m/sec)	Poisson's ratio (-)		Density ratio (ρ_1/ρ_2)	
	True	Initial model	Inversed model	Initial model	Inversed model
Top layer	2864	0.35	0.39	1.0	1.05
Bottom layer	2293	0.25	0.12		

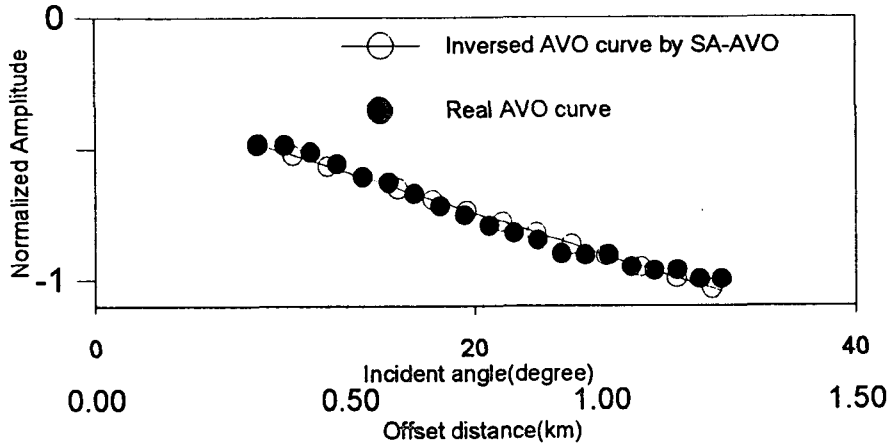


Fig. 5. AVO curve for SP 85 and its inversed curve by Simulated Annealing algorithm.

5. 결 론

탄성파탐사 자료에서 천연가스 부존 여부를 규명하는 정밀분석법으로 AVO 자료 특성 검토, AVO 진폭보정 및 AVO 분석과 복소분석 방법을 확립하여 대륙붕 자료에 적용하여 그 결과를 검토하고 AVO 자료에 Simulated Annealing 기법을 이용한 역산 등의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천연가스가 검출되었던 대륙붕 탄성파 탐사 자료중 일부 CDP 모음 자료는 음원-수진기 거리가 증가함에 따라 진폭의 절대치가 증가하는 현상이 보이며 이는 한국 대륙붕의 천연가스 저류층이 AVO 분석에 의해 탐지 될 수 있음을 지시한다. SA에 의한 역산 결과는 정밀한 물성을 규명하였고, 결과로 산출된 낮은 포아송비는 대상 지층이 천연가스 저류층임을 지시한다.
2. 분석 대상인 시추지점 SP 90 부근 및 시추 지점과 약간의 거리가 있는 SP 120 부근도 강한 반사 진폭과 AVO 증가 현상을 보이므로 SP 120 부근도 SP 90과 연결된 저류층으로 볼 수 있어 천연가스 부존을 지시한다.
3. 중합자료에 대한 복소분석을 시행하여 진폭강도, 순간 위상, 및 주파수에 대한 단면도를 작성한 결과 진폭강도 단면도에는 시추 지점인 SP 90과 시추지점에서 거리가 있는 SP 120 부근에서 강한 반사가 있음을 볼 수 있고, 순간 위상 단면도는 천연가스 저류층에서 불연속성이 보인다. 또한 주파수 단면도는 천연가스 저류층의 아래 즉 SP 90 부근과 SP 120 부근에서 탄성파의 고주파수성분이 감소한다. 이러한 현상은 분석 대상인 지층에 천연가스가 부

존 되어 있어서 고주파 성분을 흡수하기 때문일 것이다.

4. AVO 근사식에 의한 수직 반사계수 및 기울기에 대한 단면도 작성결과 강한 반사계수 이상이 SP 90 부근과 SP 120 부근에서 관찰되며 기울기 단면도에서는 SP 90 부근과 SP 120 부근에서 큰 기울기가 보여 이는 음원-수진기 거리가 증가함에 따라 진폭이 증가함을 의미한다. 따라서 대륙붕의 타 지역에 대해서도 AVO 근사식에 의한 분석을 시행하면 저류층 분포의 규명에 도움을 줄 것이다.

5. SA법에 의해 합성 자료를 역산한 결과 정확한 최적해에 도달하였고 비유일해 문제를 해소하기 위하여 속도분석에 의해서 얻은 P-파 속도를 알고 있다고 가정하고 수행한 역산은 초기값의 상관없이 최적해에 도달하였다. 대륙붕 AVO 자료를 SA법에 의해 역산한 결과 저류층의 P-파 속도, 포아송비, 상·하 지층의 밀도의 비가 각각 2230m/sec, 0.154, 1.053 이므로 이는 천연가스 부존을 의미한다.

참고문헌

- 양동우, 양승진, 1996, AVO 및 복소 분석에 의한 천연가스 저류층 탐지에 관한 연구, 한국 자원공 학회지, 33, 340-348.
- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology, theory and methods, volume 1: W. H. Freeman and Company.
- Allen, J. L. and Peddy, C. P., 1993. Amplitude variation with offset: Gulf Coast Case Studies: Geophysical Developments series Volume 4, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.
- Backus, M. and Castagna, J., 1993, Offset-dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis: Investigations in Geophysics No. 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.
- Castagna, J. P. and Smith, S. W., 1994, Comparison of AVO indicators: A modeling study: Geophysics, 59, 1489-1855.
- Dittmer, J. K. and Szymanski, J., E., 1995, The stochastic inversion of magnetic and resistivity data using the simulated annealing algorithm: Geophysical Prospecting, 43, 397-416.
- Ingber, L., 1993, Simulated annealing: Practice versus theory: Mathematical and Computer Modelling, 18, 25-57, [http://www.alumni.caltech.edu/~ingber/asa93_sapvt.ps.Z]
- Ingber, L., 1995, Adaptive simulated annealing(ASA) : Lessons learned : Control and cybernetics, [<http://www.alumni.caltech.edu/~ingber/asa96lessons.ps.Z>]
- Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr. C. D. ,and Vecchi, M. P., 1983, Optimization by simulated annealing : Science, 220, 671-680.
- Ostrander, W. J., 1984, Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence: Geophysics, 49, 1637-1648.

- Scales, J. A. and Smith, M. L., 1992, Global optimization methods for multimodal inverse problems: *Journal of Computational Physics*, 103, 258-268.
- Sen, M. K. and Stoffa, P. L., 1991, Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing: *Geophysics*, 56, 1624-1638.
- Taner, M. T. and Koehler, F., 1979, Complex seismic trace analysis: *Geophysics*, 44, 1041-1063