

동해 가스 하이드레이트 자료 깊이영역 구조보정

장 성형¹⁾, 유 동근²⁾, 서 상용³⁾

Depth Migration for Gas Hydrate Data of the East Sea

Seonghyung Jang, Dong-gun Yoo, Sangyong Suh

Key words : Gas hydrate(가스 하이드레이트), BSR(해저면 기인 고진폭 반사파), Depth migration(깊이영역), MPI_PSPI

Abstract : 한국지질자원연구원은 1997년부터 새로운 에너지 자원으로 활용 가능성을 포함하고 있는 가스 하이드레이트를 조사하기 위해 동해 일원에서 탄성과탐사를 실시하고 있다. 탄성과 반사자료로부터 가스 하이드레이트 부존여부를 확인하는 방법은 해저면과 평행하면서 위상이 반대로 나타나는 고진폭 반사파 BSR (Bottom Simulating Reflection)과 BSR 상부에서의 진폭감소, 하부에서 진폭증가와 구간속도 감소 등을 들 수 있다. 여기에서는 가스 하이드레이트 탐사자료에 대한 일반자료처리와 함께 BSR을 포함하고 있는 탄성과 반사자료에 대해 코드 병렬화된 PSPI를 이용하여 깊이영역 구조보정을 실시하였다. 고용량 탐사자료로 구성된 탄성과 반사자료에 깊이영역 구조보정을 적용하기 위해서는 고성능 컴퓨터와 병렬처리 기술이 필요하다. PSPI(Phase Shift Plus Interpolation)법은 적은 컴퓨터 계산량과 효율성 그리고 주파수 영역에서 구조적으로 병렬화가 용이한 특성을 지니고 있어 구조보정에 많이 이용되고 있다. 여기에서는 MPI (Message Passing Interface)_LAM을 이용하여 병렬코드화된 PSPI를 개발하고 인공합성모델과 동해 가스 하이드레이트 깊이영역 구조보정에 적용하였다.

Nomenclature

- u : pressure wave field in time domain
- U : pressure wave field in frequency domain
- k_x : wave number
- v : velocity
- w : frequency

subscript

- PSPI: phase shift plus interpolation
- BSR : bottom simulated reflection
- AVO : amplitude versus offset
- MPI: message passing interface
- LAM: local area multicomputer

1. 서 론

가스 하이드레이트 탄성과 자료는 대용량으로 이루어져 있어 깊이영역 중합 전 구조보정을 적용하기 위해서는 적절하게 병렬화된 방법이 필요하다. 여기에서는 PSPI 병렬코드를 개발하고 인공합성 자료에 대해 타당성 검증을 하고자 하였으며 이를 통해 가스 하이드레이트 자료에 적용하여 깊이영역 지층단면도를 제작하고자 하였다. 한국지질자원연구원에서는 1997년부터 동해에서 메탄 하이드레이트 부존 유망지역을 조사하기 위해 탄성

파 탐사를 수행해 왔으며 여기에서는 2005년 동해에서 취득된 탄성과자료에 대해 일반적인 자료처리를 Geobit-2.10.12 (서 상용⁽¹⁾, 2004)을 이용하여 중합단면도로부터 깊이영역 구조보정을 위한 속도모델을 제작하였으며 또한 구조보정을 적용하기 위한 현장자료에 기본 자료처리를 적용하여 입력자료를 준비하였다. 탄성과 구조보정은 중합 전 구조보정과 중합 후 구조보정으로 나눌 수 있으며 단층, 습곡, 암염 돔 등 복잡한 지형에 대한 구조보정은 중합 전 구조보정이 주로 이용된다. 중합 전 구조보정은 파동위삽이나 파동 역전파를 실시할 때 대용량 탐사자료에 대해 실시해야하므로 많은 컴퓨터 계산시간과 보조기억장치, 고성능 네트워크 등이 필요하다. 따라서 이를 위해 MPI_LAM을 이용하여 병렬코드화 하여 동해 가스 하이드레이트 자료에 적용하여 깊이영역 지층단면도를 제작하였다. 가스 하이드메탄 하이드레이트는 고압 저

-
- 1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail : jang@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3402 Fax : (042)861-0264
 - 2) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail : dgwoo@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3211 Fax : (042)862-7275
 - 3) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail : sysuh@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3400 Fax : (042)861-0264

은 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 영구 동토지역과 수심이 깊은 해저의 천부 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있는 것으로 알려져 있다 (Makogon⁽²⁾, 1997). 가스 하이드레이트 부존확인은 탄성과 단면도에 나타나는 BSR, AVO 해석 그리고 시추자료로부터 직접 확인하는 방법 등이 있다. AVO 분석(Ostrander⁽³⁾, 1984; 양 동우 외 1인⁽⁴⁾, 1996)은 BSR 상부에서 진폭감소현상이 발생하고 하부에는 가스에 의한 진폭증가 현상(Shipley et al.⁽⁵⁾, 1979; Andreassen et al.⁽⁶⁾, 1997) 이 나타난다. 여기에서는 중합단면도상에서 BSR 징후를 보이는 가스 하이드레이트 자료 대해 깊이영역 구조보정을 실시하여 깊이영역에서 지층구조를 확인하고자 하였다.

한편, 주시를 이용한 탄성과 구조보정은 빠른 계산시간으로 중합 전 또는 중합 후 구조보정에 많이 이용되고 있다. 3차원 탄성과 반사법 자료는 방대한 자료 량과 계산시간이 필요하므로 주시를 이용하여 복잡한 지형 영상화에 적용하는데 키르히호프(Kirchhoff) 법, 가우시안 빔 (Gaussian beam) 방법 등을 들 수 있다. 주시를 이용한 구조보정은 주시를 구하는 방법에 따라 영향을 받기 마련이다. 주시를 이용하는 방법이 비록 계산시간은 빠르지만 하나의 파선에 대한 도달시간을 이용하므로 층서구조, 암염 돛 구조등과 같이 복잡한 구조에서는 여러 방향에서 도달하는 파선이 발생하여 정확한 주시를 계산하기 어려워진다. Nichols⁽⁷⁾ (1996)는 최대에너지 주시를 이용한 다중 도달 파 주시문제를 해결하고자 하였다. 다중 도달 파 주시문제를 피하는 방법으로 파동방정식을 이용한다. 완전 파동방정식과 일 방향 동방정식을 이용하는 것으로 나눌 수 있으며 완전파동방정식을 이용하는 경우 가장 정확한 구조보정을 보여주지만 많은 계산이 필요하다 (Shin et al.⁽⁸⁾, 2001). 일방향 파동방정식을 이용하는 구조보정은 빠른 계산시간과 효율성으로 가장 많이 이용한다. 일방향 파동방정식을 이용하는 구조보정법으로는 PSP1 (Gazdag and Sguazzero⁽⁹⁾, 1984), SSF (Stoffa, et al.⁽¹⁰⁾, 1990) 등이 있다. 여기에서는 MPI_LAM을 이용하여 PSP1을 병렬화하여 인공합성자료와 동해 가스 하이드레이트자료에 적용하였으며, 특히 BSR 주위에서 진폭변화와 깊이영역에서 영상화를 구하고자 하였다.

2. PSP1

등방성 매질에서 Gazdag과 Sguazzero⁽⁹⁾ (1984)의 PSP1 구조보정을 살펴보기 위해 음향 파동방정식을 같이 정의한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v(x, z)^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

여기서 $u = u(x, z, t)$ 는 압력파동장, $v(x, z)$ 는 매질의 속도이다. 압력파동장의 이중 푸리에 적분

$$u(x, z, w) = \sum_{k_x} \sum_w U(k_x, z, w) e^{i(k_x x - wt)} \quad (2)$$

를 식 (1)에 대입하면

$$\frac{\partial^2 U(k_x, z, w)}{\partial z^2} = -k_x^2 U(k_x, z, w), \quad (3)$$

이며 여기서 $k_x = \frac{w}{v} \sqrt{1 - (\frac{v}{w})^2 k_x^2}$ 이다. 식 (3)

은 파수-주파수 영역 ($k_x w$)에서 균질 음향파동 방정식의 2차 상미분방정식을 나타낸다. 위 식은 깊이 z 에서 2개의 특성방정식을 가지고 있지만 역시간으로 파동장을 하향외삽 시킬 때는 한 개의 특성방정식 해를 취할 수 있다.

$$U(k_x, z + \Delta z, w) = U(k_x, z, w) e^{ik_x \Delta z}. \quad (5)$$

위 방정식은 다음과 같은 일방향 파동방정식의 해가 되며

$$\frac{\partial U(k_x, z, w)}{\partial z} = ik_x U(k_x, z, w), \quad (6)$$

공간-주파수영역 (x, w)에서 일방향 파동방정식을 이용하는 구조보정의 기본식으로 이용된다. 지하 구조 영상화는 $U(k_x, z + \Delta z, w)$ 를 공간-주파수영역으로 푸리에 역변환을 적용한 후 시간영역에 대해 푸리에 역변환을 실시하면 다음과 같이 $z + \Delta z$ 에서 영상화 $p(x, z, t = 0)$ 를 구할 수 있다.

$$u(x, z + \Delta z, t = 0) = \sum_w U(x, z + \Delta z, w). \quad (7)$$

식 (4), (5), (7)은 위상이동 구조보정의 기본식을 이룬다. 그러나 속도가 수평으로 변하는 경우 위식을 직접 이용할 수 없으므로 속도변화를 수직/수평성분으로 나누어 위상이동을 적용한다. 수직 전파 성분은

$$U_0(x, z, w) = U(x, z, w) e^{ik_x \Delta z}, \quad (8)$$

으로 여기서 $k = \frac{w}{v}$ 이고 $v = v(x, z)$ 이다. 기준

속도 $v^{(1)}$ 에 대한 수평속도성분은

$v^{(1)} < v^{(2)} < \dots < v^{(n)}$ 중의 하나로

$$U^{(n)}(k_x, z + \Delta z, w) = U_0(k_x, z, w)$$

$$e \left(i \left(k^{(n)} - \frac{w}{v^{(n)}} \right) \Delta z \right), \quad (9)$$

이다. 공간-주파수 영역으로 푸리에 역변환을 적용하고 선형보간법을 적용하여 하향외삽 파동장을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 U(x, z + \Delta z, w) = & U^{(n)}(x, z + \Delta z, w) \\
 & \cdot \frac{v^{(n+1)} - v^{(x)}}{v^{(n+1)} - v^{(n)}} \\
 & + U^{(n+1)}(x, z + \Delta z, w) \\
 & \cdot \frac{v^{(x)} - v^{(n)}}{v^{(n+1)} - v^{(n)}},
 \end{aligned} \tag{10}$$

이다.

3. 병렬처리

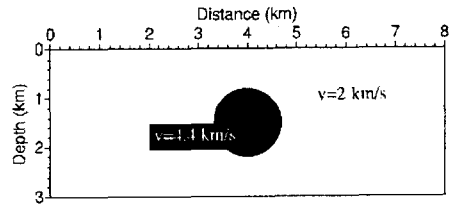
대용량 탄성과 자료를 처리하기 위한 병렬전산기는 분산 메모리와 공유메모리 전산기로 나눌 수 있다. 분산메모리 구조는 하나의 문제를 여러 개의 노드를 이용하여 푸는 방식으로 각 노드는 노드별 메모리를 이용하고 계산결과를 네트워크를 이용하여 데이터를 교환/공유하는 방식이다. 공유메모리 구조는 고속도 메모리 버스를 이용할 수 있는 여러 프로세서를 가지고 있는 것을 말하며 보통 2-16개의 프로세서로 이루어진다. 이 두 가지 혼합방식으로 이루어진 병렬컴퓨터 구조도 있다. 병렬코드는 하나의 문제를 여러 개의 작은 문제로 나누어 동시에 풀어가는데 도메인 분해와 합수분해로 나눌 수 있다. 도메인분해는 자료병렬화를 의미하는 것으로 데이터를 작은 데이터로 나누어 각각 다른 프로세서에서 처리하고 프로세서 사이에서는 네트워크를 이용한 자료교환하는 방식으로 유한차분법이 대표적인 사례라 할 수 있다. 반면 합수분해방식은 문제를 여러 개의 문제로 나누어 각각 프로세서에 해를 구하고 네트워크를 이용하여 자료를 교환하는 방식으로 행렬-벡터 곱에 대표적인 사례라 할 수 있다.

PSPI 알고리즘은 구조적으로 자료(도메인) 병렬을 지니고 있다. 주파수 영역에서 깊이 영역 외삽이 동시에 수행하고 각각 음원에서 구해진 영상들은 마스터 노드에 전해져 합한 후 깊이영역 지층단면도를 구할 수 있다.

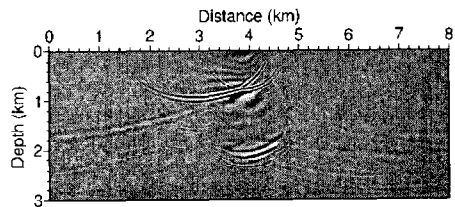
4. 인공자료 구조보정

개발된 깊이영역 구조보정을 검증하기 위해 단순 디스크 지층 모델(Fig. 1 (a))에 인공합성자료를 생성하고 이에 대한 깊이영역 구조보정을 실시하였다. 디스크모형의 내부는 4.4 km/s, 배경속도는 2 km/s 이고 모형크기는 가로 방향으로 8 km, 수직방향으로 3 km 이다. 격자크기는 10 m로 격자의 개수는 801 x 301 이다. 디스크 모형은 모델의 중앙 (4 km, 1.5 km)에 위치하고 지름은 1.4 km이다. 음원은 지표면 2.2 km 에 위치시키고 10 m 간격으로 59 개를, 수진기는 음원과 첫 번째 음원사이 거리를 200 m 로 하여 20 m 간격으로 100 개를 설치하였다. 자료기록은 4 ms로 4초 동안 기록하였으며 이때 이용된 음원파형은 20 Hz 리커 파형을 이용하였다. Fig. 1 (b) 는 음원이 지표면 4 km에 위치하였을 때 깊이영역 구조보정 결과이다.

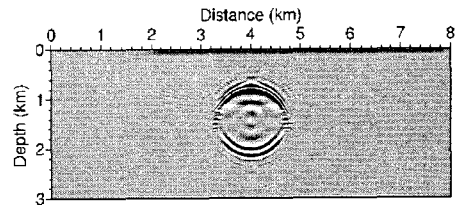
그림에서 보듯이 주로 디스크 모형의 상부와 하부에 에너지 전달이 많아 이 부분 구조가 잘 나타남을 보여준다. 모든 음원에 대한 영상을 합하면 깊이영역 구조단면도를 구할 수 있다 (Fig. 1 (c)).



(a) A simple disk model



(b) A single image gather



(c) The result of prestack depth migration

Fig. 1. A simple disk model and the result of prestack depth migration. (a) a geological model with its geometry, (b) a single image gather at shot point 4 km, and (c) the result after summation of each image gather.

5. 현장자료 구조보정

석유 및 가스 탄성과 자료와 마찬가지로 가스 하이드레이트 탄성과 자료에 대한 깊이영역 구조보정은 음원모음도를 직접 이용하지만 기본적인 자료처리가 필요하다. 일반적인 자료처리 과정 중 트레이스 편집, 듀핑, 구형확산 보정, 중합전 디콘, 주파수 대역 필터링 등 잡음과 다중반사파를 제거하기 위한 필수적인 전처리를 실시한 후 음원영역에서 구조보정을 실시한다. 여기에서는 2005년 동해에서 취득된 탄성과 자료에 대해 지오빳을 이용하여 기본 자료처리를 음원번호 3400에서 4400 까지 1001개에 대해 적용하여 구조보정을 적용하였다. 구조보정에 필요한 속도모델은 지오빳을 이용하여 속도모델(Fig. 2 (a))을 제작하였으며 중합단면도를 통하여 BSR 구간으로 간주될 수 있는 지역을 선정하였다. 속도모델의 크기는 수평방향 28 km, 수직방향 4 km, 1500 m/s에서 3392 m/s 속도분포로 이루어졌으며 제작된 속도모델을

이용하여 중합 전 깊이영역 구조보정을 적용한 결과는 Fig. 2 (b)에 있다. 그림에서 보듯이 지표면 6 km 에서 17 km 사이, 약 2.1 km 부근에서 해저면과 평행하게 발달하면서 위상이 반대로 나타나는 고진폭 이상대를 보여준다.

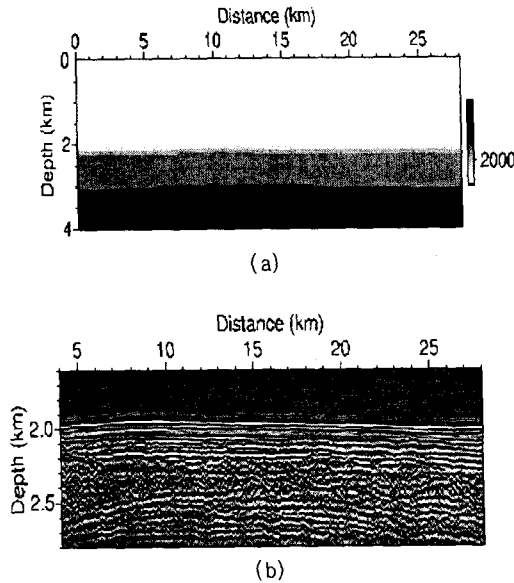


Fig. 2. A velocity model from velocity analysis by Geobit and the result of prestack depth migration. (a) a velocity model for migration and (b) the depth image for gas hydrate.

5. 결론

한국지질자원연구원에서는 2005년도 동해에서 가스 하이드레이트 부존가능성 조사를 목적으로 탄성과 자료를 취득하였으며 이에 대한 자료처리를 자체 개발된 지오빗에 의해 일반자료처리를 실시하였다. 이중 BSR로 여길 수 있는 지역에 대해 깊이영역 구조보정을 실시하여 탄성과 깊이 단면도를 제작하였다. 탄성과 자료는 자료 량이 방대하여 중합 전 구조보정을 실시할 때 코드 병렬화가 필요하며 여기에서는 PSPI법을 MPI_LAM을 이용하여 코드 병렬화를 실시하였다. 인공합성 자료를 통해 개발된 병렬코드의 타당성을 검증하였으며 가스 하이드레이트 자료에 대해 적용하여 깊이영역 탄성과 단면도를 제작하였다. 수치모형실험 결과 반사와 에너지가 집중된 곳에서 영상화가 잘 이루어짐을 나타내고 있어 관심대상지역에 에너지를 많이 보낼 수 있게 자료취득변수를 결정해야 함을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있

는 산업자원 출연사업인 '가스 하이드레이트 지구 물리탐사연구' 과제에서 지원되었습니다.

References

- [1]서 상용, 2005, Geobit-2.10.14 - the Seismic Data Processing Tool, 한국지질자원연구원.
- [2]Makogon, Y. F., 1997, Hydrate of hydrocarbons, PennWell Pub., Tulsa, Oklahoma, U.S., 482p.
- [3]Ostrander, W. J., 1984, Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence, Geophysics, 49, 1637-1648.
- [4]양 동우, 양 승진, 1996, AVO 및 복소분석에 의한 천연가스 저류층 탐지에 관한 연구, 한국 자원공학회지, 제 33 권, 제 5호, 340-348.
- [5]Shibley, T. H. and Houston, M. H., Buffler, R. Tl, Shaub, F. J., McMilen, K. J., Ladd, J. W., and Worzel, J. L., 1979, Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons continental slopes and rises, AAPG Bull., 63, 2204-2213.
- [6]Andreassen, K., Hart, E. H. and MacKay, M., 1977, Amplitude versus offset modeling of the bottom simulation reflection associated with submarine gas hydrate, Marine Geology, 137, 25-40.
- [7]Nichols, D.E. 1996, Maximum energy traveltimes calculated in the seismic frequency band, Geophysics, 61, 253-263.
- [8]Shin, C., Jang, S., and Min, D., 2001, Improved amplitude preservation for prestack depth migration by inverse scattering theory, Geophysical prospecting, 49, 592-606.
- [9]Gazdag, J. and Sguazzero, P., 1984, Migration of seismic data by phase shift plus interpolation, Geophysics, 49, 124-131.
- [10]Stoffa, P. L., Fokkema, J. T., de Luna Freire, R. M., and Kessinger, W. P., 1990, Split-step Fourier migration, Geophysics, 55, 410-421.