

## 일방향 파동방정식을 이용한 복잡한 구조의 키르히호프 종합전 심도구조보정

고승원<sup>1)</sup> · 양승진<sup>2)</sup>

### Kirchhoff Prestack Depth Migration for the Complex Structure Using One-Way Wave Equation

Seung Won Ko<sup>1)</sup> and Seung Jin Yang<sup>2)</sup>

**요 약 :** 단일 도달주시로서 최대에너지 도달주시는 카르히호프 구조보정을 위한 가장 적합한 연산자로 알려져 있다. 단순구조모델의 경우에 초동주시나 최대에너지 도달주시는 모두 정확한 카르히호프 구조보정 연산자로 사용될 수 있다. 그러나 구조가 복잡하고 속도대비가 큰 모델에 대해서 초동주시를 이용한 구조보정은 정확한 심도단면도를 얻을 수 없다. 즉 카르히호프 구조보정에서 요구되는 주시는 최대에너지 도달주시이지만 이 주시는 초동주시에 비해 상당히 많은 계산 시간을 요한다. 본 논문에서는 일방향 파동방정식을 이용하여 최대에너지 도달주시에 근사한 주시를 계산하는 방법을 제안한다. 일방향 파동 방정식을 이용해 초동주시를 계산할 때 사용되는 WAS(Wrap Around Suppression, 두루마리현상억제)계수를 수평방향의 격자간격과 깊이에 대한 함수로 정의하고 음원 파형의 지연시간을 고려하여 최대 에너지 도달 시간에 근사한 주시를 구하였다. 이 주시의 타당성을 검증하고자 계산된 주시를 단순구조 및 복잡한 구조의 구조보정에 적용하고 그 심도단면도를 초동주시를 이용해 구한 심도단면도와 비교하였다.

**Abstract :** As a single arrival traveltme, maximum energy arrival traveltme has been known as the most proper operator for Kirchhoff migration. In case of the model having the simple structure, both the first arrival traveltme and the maximum energy arrival traveltme can be used as the correct operators for Kirchhoff migration. However for some model having the complex and high velocity contrast structure, the migration using the first arrival traveltme can't give the correct depth section. That is, traveltme to be required in Kirchhoff migration is the maximum energy traveltme, but, needs considerably more calculation time than that of first arrival. In this paper, we propose the method for calculating the traveltme approximated to the maximum energy arrival using one-way wave equation. After defining the WAS(Wrap Around Suppression) factor to be used for calculating the first arrival traveltme using one-way wave equation as the function of lateral grid interval and depth and considering the delay time of source wavelet, we calculate the traveltme approximated to the maximum energy arrival. To verify the validity of this traveltme, we applied this to the migraion for simple structure and complex structure and compared the depth section with that obtained by using the first arrival traveltme.

## 서 론

1990년 초까지 키르히호프 구조보정을 위해 필요한 주시계산은 eikonal 방정식의 수치해를 구하는데 집중되어 있었다(Gray, 1986; Vidale, 1988; Podvin and Lecomte, 1991). 이 방법은 상당히 효율적인 방법으로 아이코날 방정식의 해를 구함으로써 우리가 미리 설정하게 되는 모델의 모든 격자점에 대해서 그 격자점까지 전파되는 파동에서 초동주시를 계산하게 된다. 그러나 방정식의 특성상 선두파의 주시를 계산할 수 있는 격자점이 생기게 되고 따라서 투과주시(transmission traveltme)를 필요로 하는 키르히호프 구조보정시 굴절과 주시로 인

한 이미지의 왜곡을 초래하게 된다. 정확한 투과주시를 계산하기 위해 파선 추적법을 이용한 주시계산 알고리즘이 개발되었는데(Hill, 1990) 파선 추적알고리즘은 상대적으로 많은 계산 시간을 필요로 하기 때문에 실제 3차원 자료처리 시 우리의 요구와 부합될 수 있다. 이와는 달리 일방향 파동방정식을 이용한 주시계산 알고리즘은 하향 전파되는 파동만을 고려하므로 상향 전파되는 굴절파를 없앨 수 있고 또한 주파수 영역에서 하나의 주파수만을 사용하므로 계산시간 또한 아이코날 방정식을 이용한 Vidale 알고리즘과 비슷하다(신창수외, 2000). Vidale의 방법이나 일방향 파동 방정식을 이용한 방법은 모두 비교적 단순한 모델에 대해서 정확한 이미지를 얻을 수 있지

\*2001년 9월 17일 접수

- 1) 서울대학교 지구환경시스템 공학부 국가지정 연구실
- 2) 한양대학교 지구환경시스템 공학과

만 구조가 복잡하고 속도 대비가 큰 구조에서는 정확한 이미지를 얻을 수 없다(Gray, 1994; 신창수의, 2000). Kirchhoff 구조보정에서 필요한 주시는 특히 복잡한 구조에서 Kirchhoff 구조보정을 위해 필요한 주시는 초동주시가 아닌 최대 에너지가 도달할 때의 주시이다(Geoltrain and Brac, 1993). 즉 초동주시가 아닌 최대진폭을 갖을 때의 주시가 필요하며 따라서 최대진폭을 갖을 때의 주시를 구하기 위한 방법으로 파락시얼(paraxial) 파선 추적법은 각 격자점에 도달하는 파선의 수를 모두 계산하여 그 숫자에 비례해 최대 진폭을 정의하고 그에 따른 최대 에너지 도달 시간을 계산하게 된다(Rekdal and Biondi, 1994). 이와는 달리 모델링을 통해 주파수 영역에서 파동방정식의 해를 구해 최대 에너지 도달시간과 진폭을 구하는 방법도 개발되었다(Nichols, 1996). 이 두 방법에 의해 얻어진 최대 에너지 도달주시를 적용하면 복잡한 구조의 구조보정 시 정확한 이미지를 얻을 수는 있으나 일방향 파동 방정식에 비해 상당한 계산시간을 필요로 한다.

본 논문에서는 일방향 파동방정식에서 반사이벤트의 초동을 따르는 신호를 감쇄시키기 위해 사용된 WAS 계수를 여러 모형 시험을 통해 경험적으로 깊이에 대한 함수로써 정의하였다. 일방향 파동 방정식을 이용한 주시계산에서 WAS 계수는 깊이에 따른 주시에 영향을 주며 따라서 이 값을 잘 적용하면 최대진폭의 도달주시에 근사한 주시를 얻을 수 있다. 이렇게 구한 주시와 Vidale방법을 이용해 구한 주시를 단순한 모델과 Marmousi 모델에 적용하여 구조보정 이미지를 비교해 보고 그 타당성을 검증해 보고자 한다.

### WAS 계수

주파수 영역 모델링시 파동의 두루마리효과를 억제하기 위

해 복소 주파수를 사용하게 되는데 일방향 파동 방정식을 이용하여 초동주시를 구하기 위해서 WAS계수를 다음과 같은 식으로 정의하였다(신창수의, 2000).

$$\varepsilon = \exp[-1.013653\ln(\Delta x) + 4.55133] \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 WAS 계수이며,  $\Delta x$ 는 수평방향의 격자간격이다. 식(1)은 수평방향의 격자간격과 파장당 필요한 격자수를 고려하여 정의된 경험식이다. 이식을 이용하여 모델링을 하면 전형적인 탄성과 기록(Fig. 1(a))은 델타함수(Fig. 1(b))로써 정의된다. 즉 초동 주시를 제외한 신호를 감쇄시키는 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 식 (1)을 이용하여 구한 정확한 초동주시는 속도 대비가 큰 복잡한 구조의 구조보정에 사용될 경우 단순한 지층에서 얻어진 성공적인 구조보정과는 달리 정확한 구조보정 이미지를 얻을 수 없다(신창수의, 2000). 일방향 파동방정식을 이용한 초동주시 계산 시 사용되는 WAS계수는 속도대비가 큰 복잡한 구조에서 값이 커짐에 따라 그 격자점에서의 시간을 지연하는 효과를 볼 수 있다. 따라서 초동주시보다 시간이 늦은 최대에너지 도달주시를 구하기 위해 최대에너지를 잘 표현할 수 있도록 모형시험을 통해 경험식을 유도하였고 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \exp[-1.013653\ln(\Delta x) + 4.55133] \times (1 + \text{INT} \left[ \frac{\text{depth}}{0.95} \right]) \quad (2)$$

여기서, 변수 depth는 모델의 깊이를 나타내는 것으로  $\Delta x$ 와 함께 단위는 킬로미터이다. 여기서, INT는 깊이를 0.95로 나눈 정수값을 나타낸다. 식 (2)에서 볼 수 있듯이 0.95킬로미터의 깊이마다 2배의 WAS 계수값이 적용된다. 일방향 파동방정식의 주시는 주파수 영역에서의 파동장에 로그를 취한 후 주파수로 나누어주면 된다(신창수의, 2000). 초동주시의 경우와는

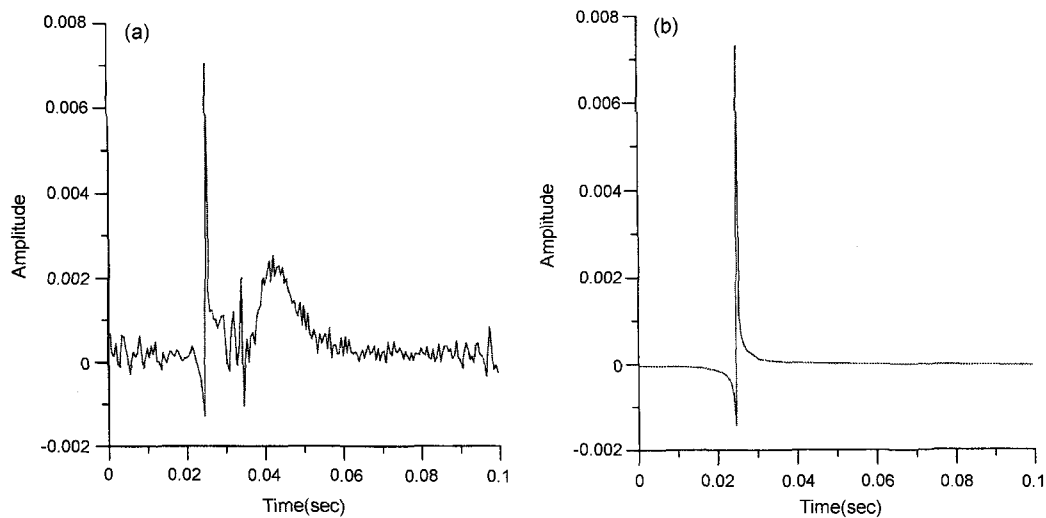


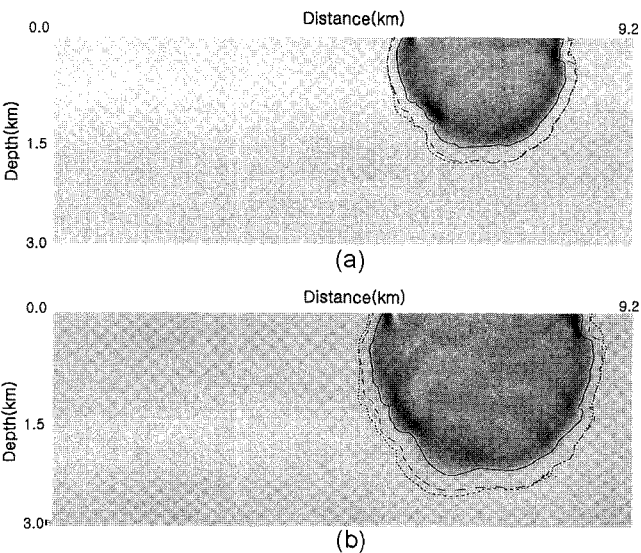
Fig. 1. Typical seismogram generated by using one-way wave equation (a) without wrap around suppression factor and (b) with wrap around suppression factor.

달리 최대에너지 도달주시를 계산할 때는 음원 파형이 갖는 최대에너지까지의 시간 지연을 고려해 주어야 하므로 식 (2)를 적용하여 일방향 파동방정식으로 구한 주시에 음원 파형의 시간지연을 더해줌으로서 최대에너지 도달 주시에 근사한 주시를 구할 수 있고 이것을 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$T(x, y) = Im(\log(u(x, z, \omega)))/\omega + \text{delay of source} \quad (3)$$

$Im(\log(u(x, z, \omega)))$ 는 주파수 영역에서의 파동장에 로그를 취한 후 허수 항만 취한 것을 나타내며,  $\omega$ 는 모델링 시 사용된 각 주파수를 나타낸다. Fig. 2는 Marmousi 모델에 대해 음원의 위치가 6800 m일 때 모델링을 통해 얻은 일정 시간에서의 파동장과 주시이다. Fig. 2(a), (b)는 각각 0.8초와 1.0초에서의 파동장과 주시를 나타낸 것으로 바깥쪽의 점선은 Vidale의 주시이고 단속선은 식 (1)을 적용한 일방향 파동방정식을 이용한 주시이다. 그리고 안쪽의 실선은 식 (2)와 식 (3)을 적용하여 일방향 파동방정식을 이용하여 구한 최대에너지 도달 주시에 근사한 주시를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 음원 파형의 시간지연을 고려하여 (2)식을 적용하고 음원 파형의 시간지연을 고려한 주시는 파동장의 최대치를 잘 표현하고 있다. 이 주시는 정확한 최대에너지 도달주시는 아니지만 신속하게 근사값을 구하고자 하였다.

다음은 본 방법에 의해 구한 주시를 이용하여 단순구조를 갖는 모델과 Marmousi 모델에 각각 적용해 보았다. Marmousi 모델은 국외에서 많은 구조보정 알고리즘검증을 위한 모델로 많이 적용되어 왔다. 따라서 본 연구에서도 Marmousi 모델에 본 방법에 의한 주시를 적용하여 결과를 보고자 한다. 또

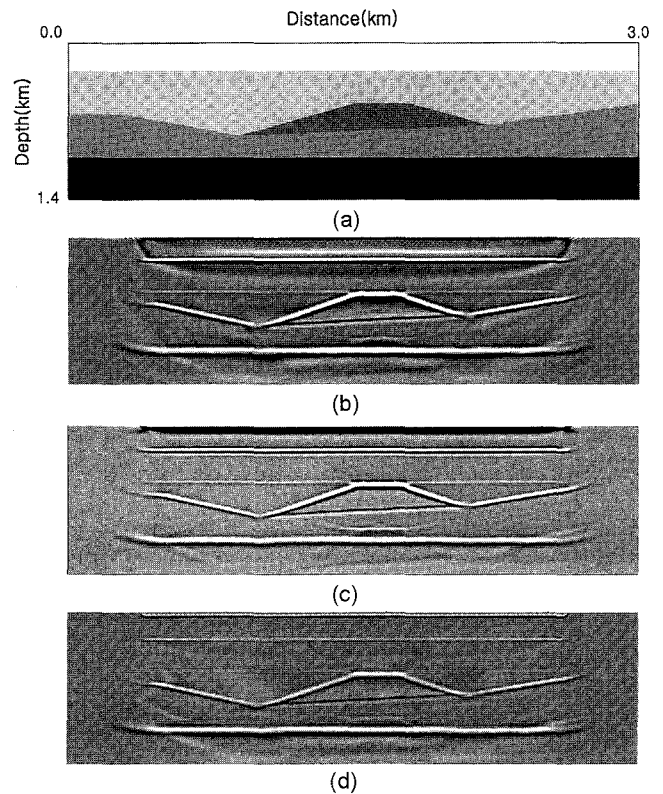


**Fig. 2.** Traveltime contours (wave-fronts) and snapshots at (a) 0.8 sec and (b) 1.0 sec for Marmousi model; dotted lines are Vidale's traveltime, dashed lines are one-way traveltime obtained by applying equation (1), and inner solid lines are one-way traveltime obtained by applying equation (2).

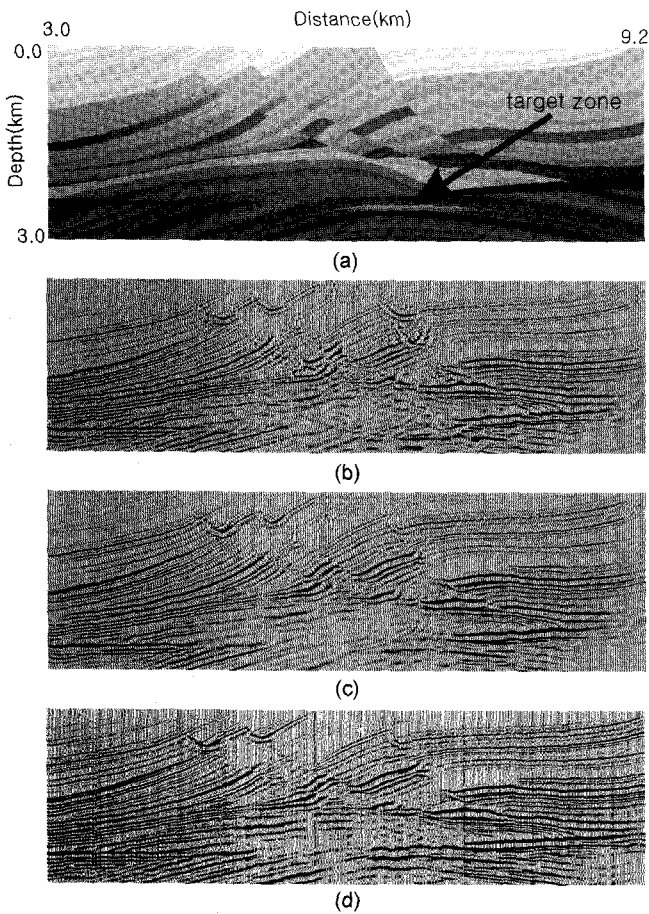
Vidale주시와 일방향 파동 방정식을 이용한 초동주시를 각각의 모델에 대한 구조보정에 적용해 보고 각각의 키르히호프 중합전 심도 구조보정 단면도를 비교할 것이다.

### 단순 모델

Fig. 3(a)는 단순한 3층 구조로서 가운데 속도가 큰 이상대가 있는 모델이다. 모델크기는 수평방향으로 3 km, 수직방향으로 1.4 km이다. 음원 및 수신기 간격은 5 m이고 음원과 수신기의 개수는 519개, 601개이다. 수신기 배열은 모든 음원에 대해 고정 배열시켰고 같은 중간점을 갖는 트레이스를 취합하여 공통 중간점 키르히호프 중합전 심도구조보정을 실시하였다. Fig. 3(b), (c), (d)는 3가지 주시(Vidale주시, 식 (1)을 이용한 일방향 파동방정식의 주시, 식 (2)를 이용하고 음원 파형의 시간지연을 고려한 일방향 파동방정식의 주시)를 이용하여 각각 공통 중간점 키르히호프 심도구조보정을 실시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 3가지 단면도에서 약간의 잡음과 다중 반사파 이미지가 보이긴 하지만 모두 정확한 구조보정 이미지를 보여주고 있다. 심도보정 또한 정확하게 그려내고 있다. 이것은 단순구조에 대해 초동주시가 키르히호프 구조보정에 적



**Fig. 3.** (a) Simple velocity model and Kirchhoff prestack depth migrated images obtained by using (b) Vidale's traveltime, (c) one-way traveltime obtained by applying equation (1) and (d) one-way traveltime obtained by applying equation (2).



**Fig. 4.** (a) Marmousi velocity model and Kirchhoff prestack depth migration images obtained by using (b) Vidale's traveltime, (c) one-way traveltime obtained by applying equation (1) and (d) one-way traveltime obtained by applying equation (2).

합한 연산자로 쓰이고 있음을 보여준다.

### Marmousi 모델

Fig. 4(a)는 복잡한 모델로서 구조보정의 중요한 시험모델로 쓰이는 Marmousi 모델의 속도모델을 보여준다. Marmousi 모델의 크기는 수평으로 9.2 km, 수직으로 3.0 km이다. 음원과 수신기의 개수는 각각 240개, 96개이고, Fig. 4(b), (c), (d)는 Marmousi 모델에 대한 키르히호프 심도구조보정 결과로써 초기모델은 실제 모델을 사용하였다. Fig. 4(b)는 Vidale방법에 의한 주시를 이용하여 Marmousi 모델에 대해 키르히호프 심도구조보정을 한 결과이다. Vidale방법은 지표근처의 단층이나 단층선을 잘 이미지하고 있지만 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 가스나 석유 부존 가능성이 있는 복잡한 지역(target zone)의 구조보정은 어렵다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 식 (1)을 이용하여 일방향 파동방정식으로부터 구한 주시를 이용한 키르히호프 심도 구조보정결과로써 Vidale 방법보다는 전체적으로

구보보정 이미지의 해상도가 향상되었지만 심부 구조는 여전히 뚜렷하지 않고, 석유나 가스부존 가능지역을 정확히 해석할 수 없다. Fig. 4(d)는 음원 파형의 시간지연을 고려하고 식(2)를 적용하여 일방향 파동방정식으로부터 구한 주시를 사용한 구조보정 결과로써 앞의 두 가지 결과와 비교할 때 상당히 향상된 이미지를 보여준다. 특히 석유 부존 지역의 지층경계선의 연속성이 뚜렷이 좋아졌다. 또한 암염돔 구조 밑의 배사구조를 잘 영상화하고 있다.

### 결론

키르히호프 심도구조보정에서 Vidale 방법에 의한 주시나 수평격자간격을 고려한 일방향 파동방정식을 이용한 주시는 단순 지층 구조에서 적절하게 쓰이지만 복잡한 구조 특히 속도대비가 큰 지역이나 암염돔과 같이 속도가 큰 지층 밑의 구조를 영상화 하지는 못한다. 이것은 속도대비가 큰 지층경계 근처에서 Vidale주시는 상향 및 하향 굴절주시를 초동으로 계산하는 격자점과 수평 격자간격을 고려한 일방향 파동방정식을 이용한 주시는 하향 굴절주시를 계산하는 격자점이 생기게 된다. 따라서 투과주시를 필요로 하는 키르히호프 구조보정에서는 속도가 큰 지층 밑의 구조를 영상화하기는 적절치 못하다. 그러나 일방향 파동방정식을 이용해 주시를 구하고자 할 때 WAS계수를 식 (2)와 같이 적용하고 음원 파형의 시간지연을 고려하면 최대에너지를 갖는 주시에 근사한 값을 구할 수 있다. 또한 이 주시는 단순한 구조를 갖는 모델뿐 아니라 복잡한 구조를 갖는 모델에서도 거의 정확한 구조보정 결과를 얻을 수 있다. 하지만 구조보정 시 우리가 목표로 하는 지역을 정확히 찾아내기 위해서는 구조보정 단면도에서 그 지역의 진폭이 중요하다. 따라서 진폭을 적용한 정확한 구조보정을 위해 최대진폭을 계산하는 알고리즘의 개발이 시급하다.

### 참고문헌

신창수, 신성렬, 김원식, 고승원, 유혜수, 2000, 단일주파수 일방향 파동방정식을 이용한 주시계산, *물리탐사*, 3(4), 119-124.  
 Geoltran, S., and Brac, J., 1993, Can we image complex structures with first-arrival traveltime?: *Geophysics*, 58, 564-575.  
 Gray, S. H., 1986, Efficient traveltime calculations for Kirchhoff migration: *Geophysics*, 51, 1685-1688.  
 Hill, N. R., 1990, Gaussian beam migration: *Geophysics*, 55, 1416-1428.  
 Nichols, D. E., 1996, Maximum energy traveltimes calculated in the seismic frequency band: *Geophysics*, 61, 253-263.  
 Podvin, P., and Lecomte, I., 1991, Finite-difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: A massively parallel approach and its associated tools: *Geophys. J. Internat.*, 105, 271-284.

Rekdal, T., and Biondi, B., 1994, Paraxial ray tracing in the Marmousi model: *64th Ann. Internat. Meeting, Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract*, 1406-1409.

Samul, H. G., and William, P. M., 1994, Kirchhoff migration

using eikonal equation traveltimes: *Geophysics*, **59**, 810-817.

Vidale, J., 1988, Finite-difference calculation of traveltimes *Bull. Seis. Soc. Am.*, **78**, 2062-2076.