

수평층상매질에서 가까운 지진전환파의 시간곡선방정식

주세봉, 윤철진

최근 탄성파탐사부문에서는 자연지진전환파를 리용한 탄성경계면결정에 직접파와 전환파의 전파시간차를 리용하고있다. 또한 가까운 지진인 경우에도 먼 지진의 전환파를 리용한 탄성경계면의 깊이계산방법을 그대로 적용하고있다. 그러므로 수평층상매질에서 가까운 지진전환파의 시간곡선방정식을 작성하는것은 탄성파탐사에 의한 심부지질조사와 지구 내부구성의 해명을 위한 연구에서 중요한 문제의 하나이다.

본문에서는 여러개의 탄성지층으로 이루어진 수평층상매질에서 가까운 지진전환파의 시간곡선방정식의 일반형식을 유도하고 그것의 적용가능성을 고찰하였다.

1. 수평층상매질에서 지진전환파의 시간곡선방정식

수평층상매질에서 $n-1$ 번째 경계면에 대한 전환파와 직접파의 전파시간차 ΔT 는 다음의 식으로 계산한다.[3, 4]

$$\Delta T_{n-1} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{D_j}{v_{P_j}} \cdot \left(\frac{K_j}{\cos i_{j,2}} - \frac{1}{\cos i_{j,1}} \right) + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_j}} \cdot \left(\frac{1}{\cos i_{n,2}} - \frac{1}{\cos i_{n,1}} \right) \quad (1)$$

여기서 n 은 지층의 수, v_{P_j} 는 j 번째 지층에서 세로파의 전파속도, D_j 는 j 번째 지층의 두께, K_j 는 j 번째 지층에서 세로파와 가로파의 속도비, H 는 진원깊이, $i_{j,1}$ 과 $i_{j,2}$ 는 직접파와 전환파의 j 번째 지층으로의 굴절각이다.

식 (1)은 진원우의 첫번째 전환경계면에 해당하는 전환파와 직접파의 전파시간차에 관한 방정식이므로 지표와 진원사이에 있는 임의의 전환경계면의 깊이와 직접파와 전환파의 전파시간의 차사이의 관계를 일반적으로 서술할수 없다.

수평층상매질에서의 지진전환파시간곡선방정식을 작성하기 위하여 3층매질의 경우 전환파의 전파경로를 보자.(그림)

이때 지표에 도달하는 전환파는 지표면 아래에 놓인 첫번째 경계면에서 전환되는 전환파($P_3P_2S_1$)와 두번째 경계면에서

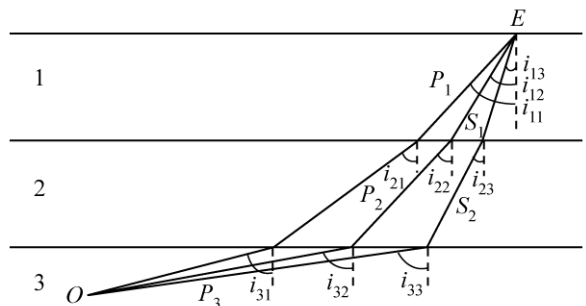


그림. 수평3층매질에서 지진전환파의 전파경로

전환되는 전환파($P_3S_2S_1$)이다.(여기서 첨수 1, 2, 3은 매질의 번호를 나타낸다.)

그림에서 i_{11} 은 직접파($P_3P_2P_1$)의 지표면으로의 입사각, i_{12} , i_{13} 은 첫번째 경계면에서 전환되는 전환파($P_3P_2S_1$)와 두번째 경계면에서 전환되는 전환파($P_3S_2S_1$)의 지표면으로의 입사각이다.

직접파($P_3P_2P_1$)와 이 두 전환파에 대하여 탄성파의 굴절법칙[1]을 적용하면 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{\sin i_{31}}{v_{P_3}} = \frac{\sin i_{21}}{v_{P_2}} = \frac{\sin i_{11}}{v_{P_1}}, \quad \frac{\sin i_{32}}{v_{P_3}} = \frac{\sin i_{22}}{v_{P_2}} = \frac{\sin i_{12}}{v_{S_1}}, \quad \frac{\sin i_{33}}{v_{P_3}} = \frac{\sin i_{23}}{v_{S_2}} = \frac{\sin i_{13}}{v_{S_1}}$$

여기서 $i_{j,1}$, $i_{j,2}$, $i_{j,3}$ 은 각각 직접파와 2개 전환파들의 $j-1$ 번째 지층으로의 입사각, v_{P_j} 와 v_{S_j} 는 j 번째 지층에서 세로파와 가로파의 전파속도이다.

만일 식 (1)을 진원우의 첫번째 경계면이 아닌 다른 경계면에 그대로 적용하면 각이한 전환경계면에서 전환된 전환파들이 같은 입사각으로 지표에 도달한다는것을 알수 있다. 즉 전환파들의 파선경로들이 일치하다면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$i_{12} = i_{13}, \quad i_{22} = i_{23}, \quad i_{32} = i_{33}$$

따라서 탄성파의 전파속도와 파선의 입사각사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{\sin i_{32}}{v_{P_3}} = \frac{\sin i_{33}}{v_{P_3}} = \frac{\sin i_{22}}{v_{P_2}} = \frac{\sin i_{23}}{v_{S_2}}$$

위의 식으로부터 $v_{P_2} = v_{S_2}$ 이라는것을 알수 있는데 실천에서는 $v_{P_2} \neq v_{S_2}$ 이다. 그러므로 경계면들에서 전환되는 전환파들이 동일한 경로를 따라 전파되지 않는다는것을 알수 있다. 즉 각이한 경계면에서 전환되는 전환파들은 서로 다른 경로를 따라 전파된다.

수평3층매질에서와 같이 n 개의 탄성지층으로 이루어진 수평층상매질에서 매 지층경계면이 모두 전환경계면으로 된다면 지표에는 $n-1$ 개의 전환파들이 도달하게 된다.

전환파의 파선경로에 대한 기하학적분석으로부터 직접파와 전환파의 시간곡선방정식을 다음과 같이 유도할수 있다.

$$T_P = \frac{D_1}{v_{P_1} \cdot \cos i_{11}} + \frac{D_2}{v_{P_2} \cdot \cos i_{21}} + \dots + \frac{D_{n-1}}{v_{P_{n-1}} \cdot \cos i_{n-1,1}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,1}} =$$

$$= \sum_{j=1}^{n-1} \frac{D_j}{v_{P_j} \cdot \cos i_{j,1}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,1}} \quad (2)$$

$$T_{PS_1} = \frac{D_1}{v_{S_1} \cdot \cos i_{12}} + \frac{D_2}{v_{P_2} \cdot \cos i_{22}} + \dots + \frac{D_{n-1}}{v_{P_{n-1}} \cdot \cos i_{n-1,2}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,2}}$$

$$= \frac{D_1}{v_{S_1} \cdot \cos i_{12}} + \sum_{j=2}^{n-1} \frac{D_j}{v_{P_j} \cdot \cos i_{j,2}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,2}}$$

$$T_{PS_{n-1}} = \frac{D_1}{v_{S_1} \cdot \cos i_{1,n}} + \frac{D_2}{v_{S_2} \cdot \cos i_{2,n}} + \dots + \frac{D_{n-1}}{v_{S_{n-1}} \cdot \cos i_{n-1,n}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,n}} =$$

$$= \sum_{j=1}^{n-1} \frac{D_j}{v_{S_j} \cdot \cos i_{j,n}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,n}}$$

여기서 T_P 는 직접파의 전파시간, T_{PS_j} 는 전환파(PS_j)의 전파시간이다.

따라서 지진전환파시간곡선방정식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$T_{PS_k} = \sum_{j=1}^k \frac{D_j}{v_{S_j} \cdot \cos i_{j,k+1}} + \sum_{j=k+1}^{n-1} \frac{D_j}{v_{P_j} \cdot \cos i_{j,k+1}} + \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n} \cdot \cos i_{n,k+1}} \quad (3)$$

여기서 $k=1, n-1$ 는 전환경계면의 번호이다.

식 (2)와 (3)으로부터 직접파와 전환파의 전파시간차방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\Delta T_k = \sum_{j=1}^k D_j \left(\frac{1}{v_{S_j} \cdot \cos i_{j,k+1}} - \frac{1}{v_{P_j} \cdot \cos i_{j,1}} \right) + \sum_{j=k+1}^{n-1} \frac{D_j}{v_{P_j}} \left(\frac{1}{\cos i_{j,k+1}} - \frac{1}{\cos i_{j,1}} \right) +$$

$$+ \frac{H - \sum_{j=1}^{n-1} D_j}{v_{P_n}} \left(\frac{1}{\cos i_{n,k+1}} - \frac{1}{\cos i_{n,1}} \right) \quad (4)$$

2. 지진전환파시간곡선방정식의 적용가능성

사전자료를 리용하여 지하매질의 정보를 알아내는것은 지구물리역문제풀이의 한가지 수법[2]이므로 수평2층매질에 대하여 유도된 전환경계면의 깊이와 직접파, 전환파의 전파시간차의 관계를 여러개의 탄성지층으로 이루어진 수평층상매질에로 일반화하면 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\hat{d}_k = \sum_{j=1}^k D_j = \sum_{j=1}^k \frac{\Delta T_j \cdot v_{P_j}}{\left(\sqrt{K_j^2 - P^2 v_{P_j}^2} - \sqrt{1 - P^2 v_{P_j}^2} \right)} \quad (5)$$

여기서 \hat{d}_k 는 k 번째 경계면의 깊이, ΔT_j 는 j 번째 경계면에서 전환되는 전환파와 $j-1$ 번째 경계면에서 전환되는 전환파의 전파시간의 차이이다.(만일 $j=1$ 이면 첫번째 경계면에서 전환되는 전환파와 직접파의 전파시간의 차이이다.)

지진전환파시간곡선방정식의 적용가능성을 고찰하기 위하여 5개의 지층으로 이루어진 수평층상매질모형(표 1)에 대한 계산실험을 진행하였다. 이때 입사각주사방법(본 연구에서 리용한 입사각주사간격은 0.1° , 직접파의 지표

표 1. 계산에 리용된 층속도모형

No.	D/km	$v_P/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	3	3 000
2	4	3 500
3	5	4 000
4	3	4 500

입사각은 30° 에 의하여 파선추적을 진행하고 식 (4)를 리용하여 계산한 직접파와 전환파의 전파시간의 차를 식 (5)에 넣어 전환경계면의 깊이를 계산하였다.(표 2) 진원이 놓이는 매질에서 세로파의 전파속도는 5 000m/s, 진원깊이는 17km로 설정하였을 때 계산되는 진중거리는 15.49km이다.

표 2. 계산실험결과 및 오차평가

No.	d_k /km	D_k /km	ΔT_k /s	\hat{d}_k /km	\hat{D}_k /km	절대오차		상대오차/%	
						d_k	D_k	d_k	D_k
1	3	3	0.967 234	3.00	3.00	0.00	0.00	0.02	0.02
2	7	4	2.002 530	7.07	4.07	0.07	0.07	0.98	1.68
3	12	5	3.068 230	12.28	5.21	0.28	0.21	2.26	4.00
4	15	3	3.625 750	15.62	3.34	0.62	0.34	3.96	10.09

표 2에서 보는바와 같이 전환경계면의 깊이계산결과의 최대상대오차는 4%를 넘지 않으며 매 탄성지층들의 두께계산결과의 최대상대오차는 10%정도이다.

맺 는 말

여러개의 탄성지층으로 이루어진 수평층상매질의 임의의 전환경계면에서 전환되는 전환파의 도달시간을 계산할수 있는 가까운 지진전환파의 시간곡선방정식의 일반형식을 유도하였다.

참 고 문 헌

- [1] 안창준; 탄성파탐사학, 김일성종합대학출판사, 9~23, 주체93(2004).
- [2] 리일경 등; 지구물리탐사리론의 기초, 김일성종합대학출판사, 217~224, 주체101(2012).
- [3] 张家茹; 地球物理学报, 36, 1, 55, 1993.
- [4] 召学钟 等; Geophysics, 74, 6, 79, 2009.

주체103(2014)년 6월 5일 원고접수

Travel Time Equation of the Near Seismic Converted-Wave in Horizontal Layered Media

Ju Se Bong, Yun Chol Jin

We derived the general form of travel time equation of the near seismic converted-wave that can calculate arriving time of converted-wave in any converting boundary surfaces of horizontal layered media composed of several elastic layers.

By means of modeling experiences as the maximum relative error of the depth calculating results of converted boundary surfaces is about 4% and the maximum relative error of the thickness calculating results of every elastic layer is about 10%, we can apply the general form of travel time equation of the near seismic converted-wave.

Key words: near seismic converted-wave, travel time equation