

다운홀 기법에서 신뢰성 있는 도달시간 정보 산출 방법에 대한 고찰

A Study of Obtaining Reliable Travel Time Information in Downhole Seismic Method

방 은 석¹ Bang, Eun-Seok

이 세 현² Lee, Sei-Hyun

김 종 태³ Kim, Jong-Tae

김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

Downhole seismic method is widely used for obtaining shear wave velocity profile of a site because it is simple and economical. Determining accurate travel time of shear wave is very important to obtain reliable result in downhole seismic method. In this paper, comparison study of various travel time determination methods was performed. Numerical study and model chamber test were performed for effective comparison study. Signal traces were acquired by performing downhole test at each numerical simulation and soil box test. Travel time data for each signal traces were determined by using six different methods and V_s profiles were evaluated. Comparing travel time data and V_s profiles with the reference value, the first arrival picking method proved to be ambiguous and unreliable. Other methods also did not always provide accurate results and the magnitude of error was dependent on the signal to noise ratio. Cross-correlation method proved to be the most adequate method for the field application and it was verified additionally with field data.

요 지

지반의 전단파 속도 추상도를 도출하는데 있어 다운홀 기법은 하나의 시추공을 이용하고 간단한 지표면 가진원을 사용하므로 매우 경제적이다. 그러나 실험을 통해 획득한 신호에서 전단파 성분의 도달시간 정보를 정확히 도출하지 못할 경우 최종 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서 다운홀 기법에 있어 최종 결과의 신뢰성을 높이기 위해 도달시간 정보의 결정 방법에 대한 고찰은 매우 중요하다. 본 논문에서는 총 6가지 방법을 이용하여 다운홀 시험을 통해 획득한 신호에서 도달시간 정보를 획득, 비교하고자 하였으며 각 방법에 대한 효율적인 비교 및 검증을 위하여 유한요소 해석 및 실내 모형 토조 시험을 수행하였다. 유한요소 해석을 이용한 검증에서는 모델의 입력치와, 실내 모형 토조에서는 벤더 엘리먼트 시험 결과와의 비교를 통해 각 방법의 오차정도를 비교해 보았다. 초동 추정 방법의 결과는 다른 방법에 비해 오차정도가 매우 컸다. 다른 방법들 또한 획득 파형의 특성에 따라 오차 정도가 달랐으며 정확한 값을 제공하지 못하는 것을 볼 수 있었다. 그 중에서 상호상관법이 적용성이 가장 뛰어난 것으로 판단되었으며 현장 시험 데이터를 이용한 추가적인 검토를 통해 확인할 수 있었다.

Keywords : Chamber test, Downhole seismic method, HWAW, Numerical analysis, Travel time

1 정희원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, KIGAM)

2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반의 전단파 속도는 지진에 의한 지반의 거동에 가장 큰 영향을 주는 지반 물성이다. 지반의 전단파 속도는 지진 뿐만 아니라 실생활에서 발생하는 교통하중, 진동기초 등의 여러 가지 진동에 의한 주변 영향 등을 예측하는데 사용되고 있다(Taniguchi와 Sawada, 1979; Woods와 Jedele, 1985). 전단파 속도는 동적문제 뿐만 아니라, 굴착 진행 중 굴착면의 변위 및 주변 지반의 침하 예측, 기초로 지지된 구조물 하부 지반의 정적 변형 문제에도 중요한 변수로 작용되고 있다(Burland 등, 1977; Stokoe 등, 2004). 전단파 속도(V_s)는 현장 지반의 입자구조의 밀도 및 응력상태를 잘 대변하는 값이므로 사질도 지반의 다짐 평가 및 점성토 지반의 압밀에 의한 개량효과를 평가하는데도 적용이 가능하다(Kim과 Park, 1999; Youn 등, 2005). 또한, 전단파 속도를 이용하여 지반 특성과 상관식을 도출하거나 설계 정수와 직접적으로 관계를 맺는 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Wei 등, 1996; Sun 등, 2006). 이와 같이 전단파 속도는 지반의 전반적인 특성을 평가하는데 있어 중요한 변수로 사용되고 있으며 적용 대상이 점점 다양해지고 있다. 지반의 전단파 속도 추상을 획득하기 위하여 다양한 현장 탄성과 탐사가 적용되고 있으며 더욱 경제적으로 그리고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위하여 많은 연구가 국내외에서 진행 중에 있다.

다운홀 기법은 하나의 시험공과 간단한 지표면 가진원을 사용하므로 경제적이고 결과의 신뢰도 또한 높은 편이어서 현업에서 가장 널리 사용되고 있는 현장 탄성과 탐사기법 중 하나이다. 다운홀 기법 수행 과정은 일반적으로 세 단계로 구분된다. 첫 번째 단계는 현장 시험을 통한 신호 획득이며 두 번째 단계는 획득한 신호로부터 도달시간 정보의 결정, 그리고 마지막 단계는 도달시간 정보로부터 지반의 전단파 속도 추상을 도출하는 것이다. 세 단계 모두 최종 결과의 신뢰성을 보장하기 위해 중요하며 각 단계의 수행에 있어 이전 단계의 결과물에 크게 영향을 받는다. 따라서 해석 기법에서의 입력 값인 도달시간 정보가 정확하지 않을 경우 잘못된 최종 결과를 도출하게 된다. 그러므로 다운홀 기법에서 두 번째 단계인 획득 신호로부터 도달시간 정보를 결정하는 단계 또한 매우 중요하며 이에 대한 고찰이 요구된다.

다운홀 기법에서는 동일 가진원 위치에서 시추공 내에 깊이를 달리하여 연속적으로 실험을 수행하므로 트

리거 지점으로부터 전단파 성분의 초동 지점까지의 직접 도달시간 뿐만 아니라 연속적인 측점에서의 도달시간 차이 정보도 입력 값으로 사용이 가능하다. 그러므로 다운홀 기법에서 도달시간 정보 획득 방법으로 초동 추정 방법(first arrival picking method) 외에 두 지점 사이의 도달시간 차를 구하는 방법들의 적용이 가능하다. 크게 전체 신호에서 어느 한 지점을 기준으로 하는 방법과 전체 신호를 이용하는 방법들로 구분되며 어느 한 지점을 기준으로 하는 방법에는 극대점 이용 기법(peak to peak method), 교차점 이용 방법(cross-over method) 등이 있으며 전체 신호를 이용하는 방법들로는 상호상관법(cross-correlation method), 스펙트럼 분석법(spectrum analysis) 등이 적용되어 왔다(Larkin과 Taylor, 1979; Campanella와 Stewart, 1992; Baziw, 1993; Crice, 2002). 최근에는 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 기법(Park과 Kim, 2001) 등과 같은 시간-주파수 해석을 통해 두 신호의 도달시간차를 도출하는 기법도 소개되었다.

도달시간 정보 획득을 위한 방법으로 이와 같이 여러 가지 방법이 소개되어 왔지만 다운홀 기법에서는 이 중에서 초동 추정 방법이 가장 널리 이용되고 있다. 다른 방법에 비해 단순하며 적용하기 쉽기 때문이다. 하지만, 여러 가지 원인으로 인해 초동이 불분명한 경우가 많아 도출된 도달시간 정보의 정확성을 확신하지는 못한다. 따라서 본 논문에서는 여러 가지 도달시간 정보 획득 방법들에 대한 비교 및 검증 연구를 수행하여 초동 추정 방법의 문제점에 대해 고찰하여 보고 다운홀 기법에 적합한 도달시간 정보 산출법에 대해 실질적인 적용성 측면에서 고찰하고자 하였다. 신뢰성 있는 비교 연구를 위해 수치해석 및 모형 토조 실험을 활용하였다. 동일한 신호에 대해서 6가지 방법들을 적용하여 도달시간 정보를 각각 획득하여 보았으며 전단파 속도 추상도 또한 도출하여 비교하였다. 현장 적용성의 실질적 평가를 위해 다운홀 시험 수행을 통해 획득한 깊이별 신호 또한 이용하였다. 이러한 연구를 통해 각각의 도달시간 정보 결정법의 장단점을 파악하고 다운홀 기법에 적합한 도달시간 결정법에 대해 고찰해 보고자 하였다.

2. 정확한 도달시간 정보 획득의 중요성

일반적으로 현장 시험을 통해 획득한 파형을 이용하여 전단파 성분의 도달시간 정보를 획득할 때 다운홀 기법의 특성상 획득신호가 불량한 경우가 많으며 이는

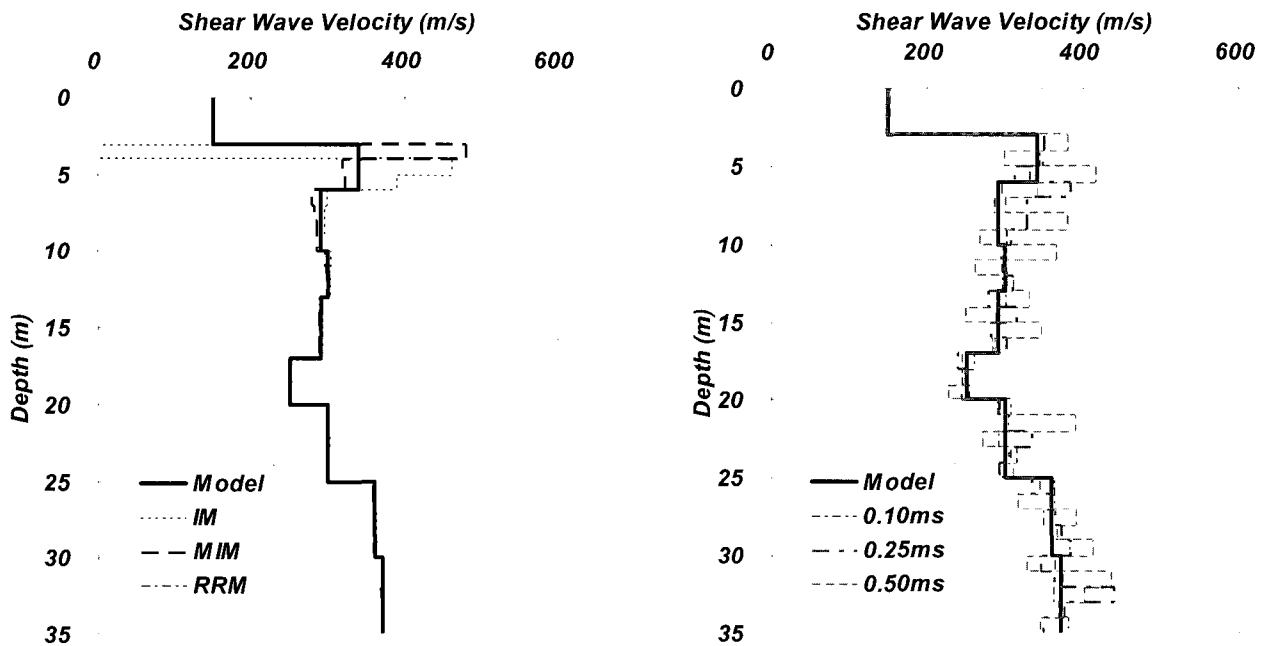
곧 잘못된 초동정보 산출로 이어지게 된다. 시험 심도가 깊지 않을 경우 가진원으로부터 감지기까지의 거리가 가까우므로 근점장 효과(near field effect)에 의해 전단파 도달시점이 압축파의 영향에 의해 왜곡될 수 있다. 또한 시험 심도가 깊어질수록 주주파수(dominant frequency)는 낮아지게 되고 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, S/N)가 작아지게 되므로 초동 추정은 더욱 어렵다.

주어진 모델에 대해 계산된 이론적 도달시간으로 다운홀 해석 기법(data reduction method)을 적용하여 전단파 속도 주상도를 도출한 결과를 그림 1(a)에 모델값과 비교하여 도시하였다. 이론적 도달시간은 3m 떨어진 가상의 지표면 가진원으로부터 각 시험심도까지의 도달시간 정보를 Snell의 법칙에 근거한 굴절 경로를 고려하여 계산한 것이다. 굴절 경로법(refracted ray path method, RRM)만이 모델과 동일한 결과를 주고 있는데 탄성파의 이동은 Snell의 법칙에 근거하여 굴절되어 전파되므로 결과 해석에 있어서도 굴절 경로법이 가장 정확한 결과를 제공하게 된다(Kim 등, 2004). 획득한 신호에서 초동을 정확히 추정하지 못한 상황을 모사하기 위하여 획득한 이론적 도달시간 정보에 각각의 깊이별로 오차를 포함시켰다. 실제와 유사하게 모사하기 위하여 랜덤함수에 의해 각 깊이별로 첨가되는 오차 정도는 설정된 최대 크기 범위 내에서의 다르게 하였다. 여기서 최대 크기의 범위는 획득 신호의 양호도 정도가 다른 것을 의미하게

되며 최대 오차 정도를 $\pm 0.10\text{ms}$, $\pm 0.25\text{ms}$, $\pm 0.50\text{ms}$ 범위로 하여 총 3 세트의 오차가 포함된 도달시간 정보를 제작하였다. 이렇게 산출된 도달시간 정보를 이용하여 굴절 경로법으로 도출한 전단파 속도 주상도를 그림 1(b)에 지반 모델과 비교하여 도시하였다. 깊이별 오차가 0.10ms 이내로 포함된 도달시간 정보를 이용할 경우 모델과 유사한 결과를 보여주는 것을 볼 수 있으나 그 이상의 오차가 존재할 경우는 깊이별로 전단파 속도의 증감이 심하여 모델 값과 상이한 것을 볼 수 있다. 전단파 속도가 깊이별로 증감이 반복되는 현상은 굴절 경로법으로 실제 현장 실험 결과를 해석할 시에도 종종 발생해 왔던 것으로 최종적인 전단파 속도 주상도 결정에 있어 상당한 어려움이 있어 왔다. 이러한 사실로 미루어 보아 굴절 경로법을 적용하여 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 최소한 0.1ms 단위까지는 도달시간 정보를 정확하게 획득하여야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 유한요소 해석을 통한 도달시간 정보 획득 방법의 비교

기존에 Sanchez-Saliner(1987)는 분석적 신호(analytical signal)를 이용하여 도달시간 정보 획득 연구를 한 사례가 있다. 하지만 분석적 신호는 지중 3차원 상에서 가진에 의한 특정 거리에서의 이상적 신호이므로 크로

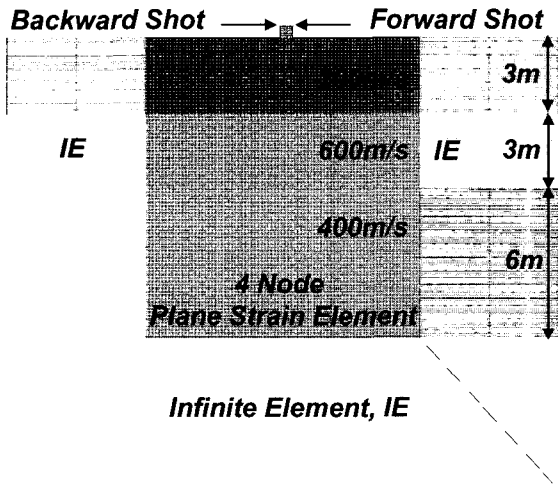


(a) 0.01ms(100k sampling) 단위 정확도의 데이터

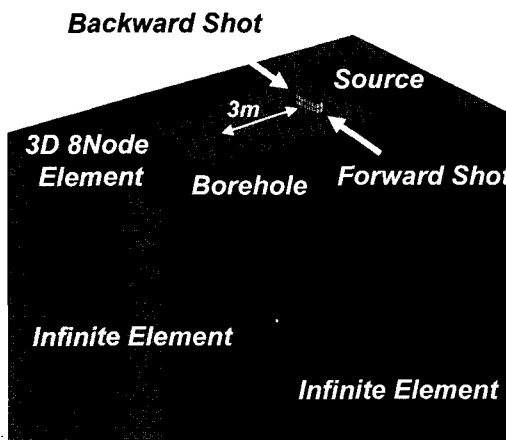
(b) 깊이별 오차 첨부한 데이터

그림 1. 오차가 첨부된 데이터를 이용한 다운홀 해석 기법의 적용(IM : 간접법, MIM : 수정간접법, RRM : 굴절 경로법)

스홀 기법에 국한된다. 그러므로 본 연구에서는 지표면 가진원을 사용하는 다운홀 기법을 모사하고자 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 ABAQUS Standard를 사용하였다. 그림 2에 해석에 사용된 2개의 수치 모델을 도시하였으며 각 층의 두께 및 전단파 속도를



(a) 2차원 모델



(b) 3차원 모델

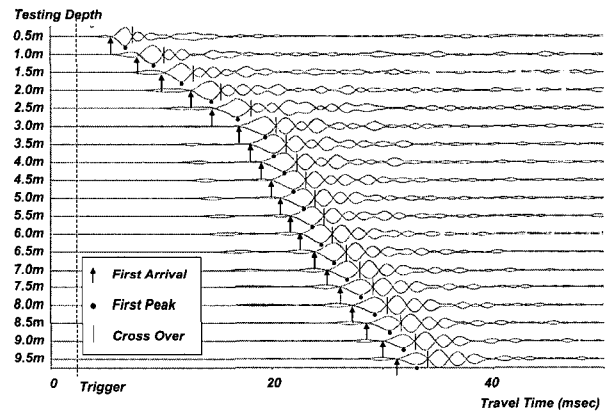
그림 2. 도달시간 정보 획득 방법 비교 연구를 위한 다운홀 모의 시험 수치해석 모델

표 1. 수치해석 결과와 이론적 도달시간 정보와의 비교

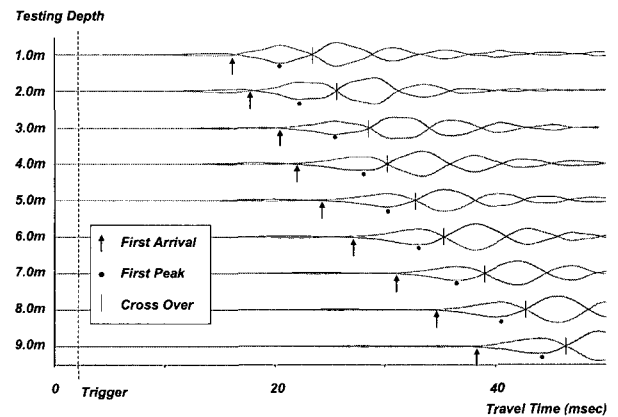
Layer No.	2차원 모델		3차원 모델	
	두께 (m)	전단파 속도 (m/s)	두께 (m)	전단파 속도 (m/s)
1	3	200	3	200
2	3	600	3	300
3	4	400	4	250

표 1에 표기하였다. 2차원 모델은 가진원 거리를 0m로 한 것으로 순수하게 도달시간 도출 방법들을 비교할 수 있다. 4절점 평면 변형률 요소(CPE4)를 이용하였으며 모델 경계에서의 반사파를 줄이기 위하여 모델 경계에 무한요소(Infinite Element, IE)를 첨부하였다. 또한, 실제 다운홀 기법과 동일한 상태로 모델링하기 위해 3차원 모델을 구성하였다. 8절점 요소(C3D8)를 사용하였으며 모든 모델 경계면에 있어서 무한요소를 첨부하였다. 탄성과 전파 특성을 모델링할 경우 적합한 요소의 크기는 최소 파장의 0.2배 이하이어야 하며 계산 간격은 요소내 통과 시간의 1/10에서 1배 사이가 적합한 것으로 알려졌다(Zerwer 등, 2002). 따라서 요소 크기를 2차원 모델의 경우 0.1m로 3차원 모델의 경우 0.2m로 충분히 작게 결정하였으며 계산 간격은 한 요소를 이동하면서 10번 이상의 계산이 수행되어 정확한 계산이 이루어지도록 0.01ms로 설정하였다.

각 모델에 있어 가상 감지기 위치에서 획득한 깊이별 탄성과 신호를 그림 3에 도시하였다. 획득된 파형의 주



(a) 2차원 모델



(b) 3차원 모델

그림 3. 다운홀 모의 실험 수치해석을 통한 깊이별 획득 파형

주파수 영역이 다른 것은 유한요소 해석에서 노드의 크기가 서로 다르기 때문이다. 전단파 성분의 이동이 육안으로 뚜렷하게 인식이 되며 모델 입력치를 반영하며 전단파 성분 이동의 기울기가 바뀌는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 신호를 이용하여 6가지 방법을 통해 깊이별 도달시간 정보를 각각 획득하였으며 전단파 속도 추상을 도출하였다. 그 결과를 모델 입력치와 비교를 해 봄으로써 각각의 도달시간 결정 방법을 비교 검증하였다.

3.1 초동 추정 방법

육안에 의한 초동 추정(first arrival picking method, FA)은 획득한 파형에서 실질적인 전단파 성분의 도달시점을 직접적으로 추정하는 것이므로 개념적으로 확실하게 도달시간 정보를 도출할 수 있다. 유한요소 해석을 통해 획득한 깊이별 탄성파 신호에서 육안으로 전단파 성분의 초동을 파악하여 보았으며 그림 3에 상향 화살표로 표기하였다. 유한요소 해석에서는 이상적으로 가진을 하였으므로 획득한 신호상에서 압축파 성분이 크게 나타나

지 않으나 가진원 근처의 얇은 심도에 있어서는 근접장 성분이 관찰 되었다. 따라서 육안 판단의 기준은 근접장 효과에 의한 신호 이후에 전단파 성분이 도달되었다고 판단되는 곳을 추정하였다. 깊이가 깊어짐에 따라 근접장 영역과 전단파 성분이 구분되어져 가므로 전단파 성분의 도달시점을 파악하기가 용이해지는 것을 볼 수 있다. 각 모델에 대해서 획득한 시험 깊이별 도달시간 정보를 표 2와 표 3에 각각 기재하였다. 다운홀 기법에서 각 층의 전단파 속도는 도달시간차 정보와 밀접하게 관련되어 있으므로 도달시간 정보 비교 항목을 도달시간차 정보로 통일하였다. 이론적 도달시간 정보는 2차원 모델의 경우 가진원 거리가 0m이므로 1차원 상의 이동시간이 되므로 모델의 입력치를 바탕으로 계산되었으며 3차원 모델의 경우 굴절 경로를 고려하여 지표면 가진원으로부터 각 시험심도까지의 도달시간 정보를 계산하였다. 전반적으로 초동 추정에 의해 산출된 도달시간 정보는 이론적 도달시간과 상당한 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 최대값이 2차원 모델에서는 0.76ms, 3차원 모델에서는 1.71ms에 이르는 것을 볼 수 있다.

표 2. 2차원 모델에서 수치해석 결과와 이론적 도달시간 정보와의 비교

구간 (m)	이론적 도달 시간차 (msec)	수치해석 결과(msec)														
		육안인식 (FA)		극대점 (PP)		교차점 (CO)		상호상관법				스펙트럼 분석법 (CPS)		HWAW		
		도달 시간차	오차	도달 시간차	오차	도달 시간차	오차	원도우 무 (CC)	원도우 유 (CC_W)	원도우 무 (CC)	원도우 유 (CC_W)	도달 시간차	오차	도달 시간차	오차	
0	0.5	2.5	2.67	0.17												
0.5	1.0	2.5	2.61	0.11	2.5	0.00	2.72	0.22	2.67	0.17	2.64	0.14	2.55	0.05	2.59	0.09
1.0	1.5	2.5	2.53	0.03	2.55	0.05	2.63	0.13	2.63	0.13	2.57	0.07	2.50	0.00	2.55	0.05
1.5	2.0	2.5	2.26	-0.24	2.66	0.16	2.6	0.10	2.69	0.19	2.58	0.08	2.55	0.05	2.58	0.08
2.0	2.5	2.5	2.27	-0.23	2.34	-0.16	2.71	0.21	2.65	0.15	2.60	0.10	2.53	0.03	2.57	0.07
2.5	3.0	2.5	1.74	-0.76	2.52	0.02	2.24	-0.26	2.55	0.05	2.39	-0.11	2.53	0.03	2.56	0.06
3.0	3.5	0.83	1.21	0.38	0.8	-0.03	0.9	0.07	0.90	0.07	0.90	0.07	0.86	0.03	0.90	0.06
3.5	4.0	0.83	1.24	0.41	0.91	0.08	0.91	0.08	0.88	0.05	0.91	0.08	0.85	0.01	0.89	0.06
4.0	4.5	0.83	0.84	0.01	0.92	0.09	0.89	0.06	0.86	0.03	0.85	0.02	0.83	0.00	0.89	0.06
4.5	5.0	0.83	0.89	0.06	0.85	0.02	0.78	-0.05	0.82	-0.01	0.83	0.00	0.82	-0.01	0.84	0.00
5.0	5.5	0.83	0.88	0.05	0.8	-0.03	0.85	0.02	0.82	-0.01	0.84	0.01	0.80	-0.03	0.80	-0.03
5.5	6.0	0.83	1.03	0.20	0.79	-0.04	0.78	-0.05	0.82	-0.01	0.79	-0.04	0.81	-0.03	0.81	-0.02
6.0	6.5	1.25	1.11	-0.14	1.19	-0.06	1.2	-0.05	1.25	0.00	1.22	-0.03	1.24	-0.01	1.25	0.00
6.5	7.0	1.25	1.16	-0.09	1.21	-0.04	1.24	-0.01	1.23	-0.02	1.23	-0.02	1.25	0.00	1.26	0.01
7.0	7.5	1.25	1.16	-0.09	1.22	-0.03	1.2	-0.05	1.24	-0.01	1.21	-0.04	1.24	-0.01	1.25	0.00
7.5	8.0	1.25	1.15	-0.10	1.28	0.03	1.24	-0.01	1.25	0.00	1.26	0.01	1.25	0.00	1.26	0.01
8.0	8.5	1.25	1.33	0.08	1.25	0.00	1.25	0.00	1.27	0.02	1.27	0.02	1.27	0.02	1.28	0.03
8.5	9.0	1.25	1.33	0.08	1.23	-0.02	1.23	-0.02	1.27	0.02	1.26	0.01	1.26	0.01	1.27	0.02
9.0	9.5	1.25	1.35	0.10	1.22	-0.03	1.21	-0.04	1.26	0.01	1.23	-0.02	1.25	0.00	1.26	0.01

표 3. 3차원 모델에서 수치해석 결과와 이론적 도달시간 정보와의 비교

구간 (m)		이론적 도달 시간차 (msec)	수치해석 결과(msec)													
			육안인식		극대점		교차점		상호상관법				스펙트럼 분석법		HWAW	
			도달 시간차	오차	도달 시간차	오차	도달 시간차	오차	원도우 무		원도우 유		도달 시간차	오차	도달 시간차	오차
0	1	15.81	15.9	0.09												
1	2	2.20	1.6	-0.60	1.65	-0.55	15.9	0.09	2.45	0.25	2.2	0.00	2.00	-0.20	2.45	0.25
2	3	3.19	2.2	-0.99	3.15	-0.04	2.1	-0.10	2.80	-0.39	2.8	-0.39	2.34	-0.85	2.81	-0.38
3	4	1.49	1.1	-0.39	2.7	1.21	2.95	-0.24	1.85	0.36	1.7	0.21	1.55	0.06	1.83	0.34
4	5	2.39	4.1	1.71	2.15	-0.24	1.65	0.16	2.25	-0.14	2.5	0.11	2.31	-0.08	2.36	-0.03
5	6	2.72	2.85	0.13	2.85	0.13	2.55	0.16	2.80	0.08	2.8	0.08	2.58	-0.14	2.75	0.03
6	7	3.64	3.65	0.01	3.35	-0.29	2.55	-0.17	3.65	0.01	3.7	0.06	3.46	-0.18	3.67	0.03
7	8	3.72	3.1	-0.62	3.9	0.18	3.75	0.11	3.60	-0.12	3.6	-0.12	3.49	-0.23	3.73	0.01
8	9	3.77	3.4	-0.37	3.85	0.08	3.65	-0.07	3.20	-0.57	3.7	-0.07	3.42	-0.35	3.29	-0.48

3.2 극대점 이용 방법

유한요소 해석을 통해 획득한 깊이별 탄성과 신호상에서 전단파 성분의 첫 극대점을 이용하여 도달시간 정보를 도출(peak to peak method, PP)하여 보았으며 그림 3에 점으로 그 기준점을 표기하였다. 극대점 이용 방법은 전단파 성분의 직접 도달시간을 직접적으로 도출하지는 못하지만 이전 깊이의 신호와의 도달시간 차이를 획득함으로써 구간 속도를 도출하는 정보로 사용할 수 있다. 전단파 성분의 첫 극대점을 기준으로 할 경우 기준점이 명확하기 때문에 결과가 객관적이며 압축파 성분 및 근접장 성분에 의한 간섭효과를 배제할 수가 있다. 표 2와 표 3의 이론적 도달시간과의 비교 결과를 보면 부분적으로 큰 오차가 존재하지만 육안으로 초동을 추정할 결과보다는 전반적으로 오차가 작은 것을 볼 수 있다.

3.3 교차지점 이용 방법

획득한 깊이별 탄성과 신호상에서 좌우 타격신호의 전단파 성분의 첫 교차지점을 이용하여 도달시간 정보를 도출(cross-over method, CO)하여 보았으며 그림 3에 그 기준점을 세로 직선으로 표기하였다. 교차지점 이용 방법은 극대점 이용 방법과 동일하게 전단파 성분의 직접 도달시간을 도출하지는 못하지만 이전 깊이 신호와의 도달시간 차이를 획득함으로써 구간 속도를 도출하는 정보로 사용할 수 있다. 전단파 성분의 첫 교차지점을 기준으로 할 경우도 기준점이 명확하기 때문에 객관적으로 결과를 도출할 수 있으며 압축파 성분에 의한 간

섭효과를 배제할 수가 있다. 표 2와 표 3을 보면 부분적으로 약간의 오차가 존재하지만 모든 깊이에 대해서 오차가 그다지 크지 않으며 최대 오차가 0.26ms인 것을 볼 수 있다.

3.4 상호상관법

이웃한 위·아래 시험 깊이에서 측정된 두 신호의 전단파 성분 도달시간 차이를 상호상관법(cross-correlation method, CC)을 이용하여 도출하여 보았다. 상호상관법은 식 (1)과 같이 표현되며 그림 5에 상호상관법을 이용하여 도달시간 정보를 도출하는 과정을 도시하였다.

$$CC(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+\tau)dt \quad (1)$$

따라서 여기서 획득한 값은 두 신호의 도달시간 차이 정보가 된다. 압축파에 비해서 전단파 성분의 에너지가 클 경우에는 전체 신호를 그대로 이용하여도 무방하나 두 신호의 파형 형태가 크게 차이가 나거나 전단파 성분의 에너지가 다른 성분에 비해 작을 경우 전단파 성분으로 추정되는 구간 외에 다른 구간을 시간 영역 윈도우(time domain windowing)을 통해 제거한 상태에서 상호상관법을 적용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이러한 시간 영역 윈도우에 의한 효과를 알아보기 위해 동일한 신호에 대해 윈도우 적용 전후에 대한 도달시간 정보를 모두 산출하여 보았다. 이론적 도달시간과의 비교 결과를 보면 부분적으로 약간의 오차가 존재하지만 전

반적으로 오차가 작은 것을 볼 수 있으며 윈도우를 적용하였을 경우가 전반적으로 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 수치해석을 통해 획득한 신호는 이상적이므로 윈도우에 대한 효과가 그다지 크지 않으나 실제 신호에 있어서는 압축파 및 반사파 등의 잡음에 의해 주된 전단파 성분만의 도달시간 차이 정보를 정확하게 획득하기 힘들어진다.

3.5 스펙트럼 분석법

스펙트럼 분석법(Spectral Analysis Method)은 크로스 파워 스펙트럼(Cross Power Spectrum, CPS)의 주파수별 위상차 정보를 이용하는 기법으로 표면파 기법 중 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법에서 실험분산곡선 도출시 이용되고 있다(Stokoe 등, 1994). 두 신호에 대한 크로스 파워 스펙트럼을 계산하고 위상전개를 통해 주파수별 실제 위상($\phi_{f_o,real}$)을 획득한 뒤 식 (2)를 통해 도달시간차를 주파수별로 산정할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{\phi_{f_o,real}}{2\pi f_o} \quad (2)$$

그림 4의 두 신호에 대해 크로스 파워 스펙트럼을 수행한 결과를 그림 5(a)에 도시하였으며 상부는 위상차 정보, 하부는 크기 정보이다. 실제 위상차 정보를 획득하기 위하여 위상차 정보를 전개한 것이 그림 5(b)이다. 위상각 전개시 적절한 매스킹(masking) 작업을 통해서 -180° 에서 180° 로 표현된 위상차 정보의 점프수를 정확히 추정해야지만 실제 위상차 정보의 도출이 가능하다. 그림 5(c)의 위상차 정보를 이용하여 주파수별 도달시간차 정보를 도출한 결과를 보면 적절한 매스킹을 수행하지 않아 주파수 200Hz 근처에서 값이 발산하는 것을 볼

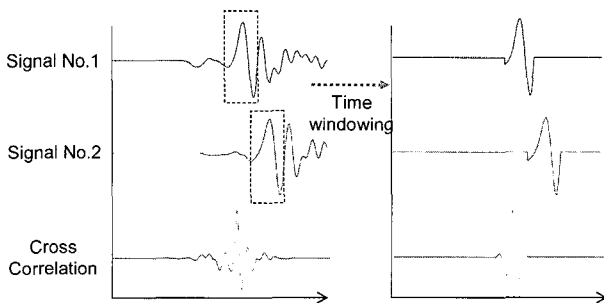
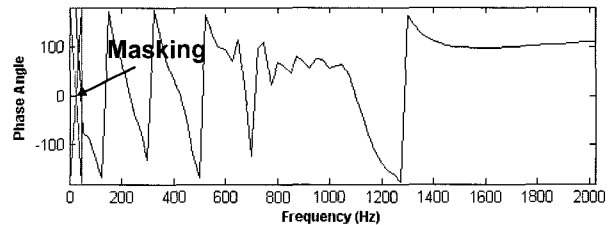
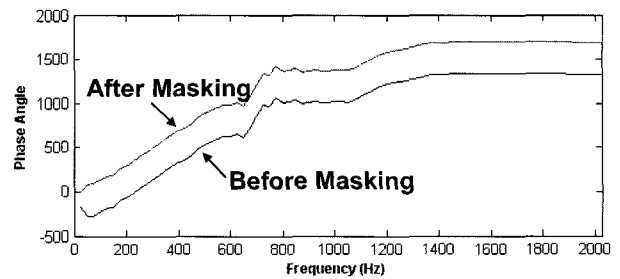


그림 4. 상호상관법의 이용 일례(좌측은 원시데이터 이용 결과, 우측은 주된 전단파 성분 영역에 대해 윈도우링한 데이터 이용 결과)

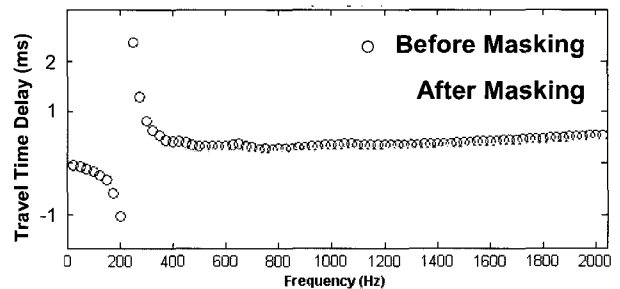
수 있다(그림 내 before masking). 저주파 대역에서 적절한 매스킹을 통해 올바른 위상차 정보를 도출하게 되면 주파수별로 유사한 도달시간차 정보를 획득할 수 있게 된다(그림 내 after masking). 지반이 분산 특성(dispersive characteristics)을 보이는 경우 동일 지반에서도 주파수별로 탄성파의 이동 속도가 다르게 되지만 주파수별로 속도를 산정하는 것은 실용적인 측면에서 무의미하며 일반적으로 대표 도달시간차 정보를 사용한다. 따라서 본 연구에서는 크로스 파워 스펙트럼의 크기 정보에서 최대 크기의 0.2배 이상 되는 영역을 주된 에너지 영역으로 설정하고 설정된 주파수 영역 내에서의 도달시간 정보를 가중치 평균하는 방식으로 대표 도달시간 정보를 획득하였다. 표 2와 표 3의 도출된 결과를 보면 전반적으로 오차가 적은 것을 볼 수 있다. 하지만 정확한 결과



(a) 크로스파워스펙트럼을 이용한 주파수별 위상차 및 크기 획득



(b) 위상전개를 통한 실제 위상차 도출



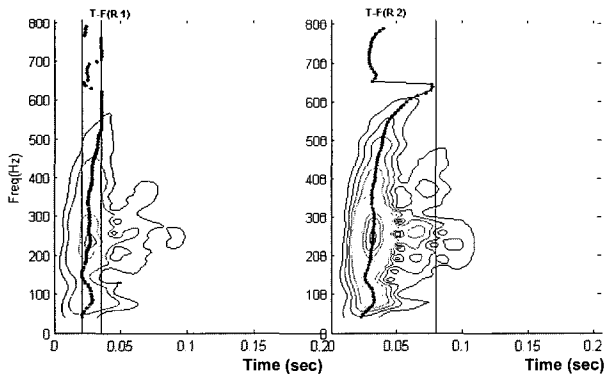
(c) 주파수별 도달시간차 도출

그림 5. 스펙트럼 분석법을 이용한 도달시간차 도출 과정

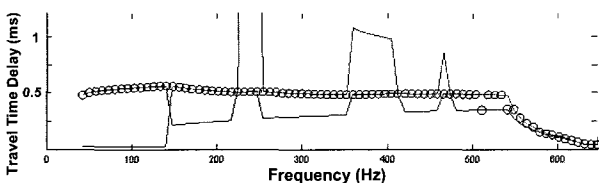
를 획득하기 위해서는 적절한 매스킹 작업을 선행하여야 하므로 자동화가 어려우며 현장 적용성이 떨어진다 고 판단되었다.

3.6 HWAW 기법

Park과 Kim(2001) 의해 소개된 하모닉 웨이블릿 파분 석법(Harmonic Wavelet Anlysis of Waves, HWAW)은 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하기 위한 표면파 기법에 적용되어 연구되고 있지만 시간-주파수 분석을 통해 주파수별로 두 신호의 도달시간 차 정보를 도출하는 방식이므로 적용 대상이 다양하다고 할 수 있다(박형춘 등, 2005). 스펙트럼 분석법과 비교하여 볼 때 에너지가 최대인 지점을 이용한다는 점에 있어서 분석하고자 하는 주된 파성분(전단파 성분)외의 잡음(압축파, 반사파 등)에 대한 영향이 적다. 또한 매스킹 과정이 요구되지 않으므로 도달시간 정보를 산출하는데 있어 전문가적인 판단을 요구하지 않아 자동화가 가능하다는 장점이 있다. 그림 4의 두 신호에 대한 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석 결과를 그림 6(a)에 도시하였으며 주파수별로 에너지가 최대인 지점을 표기하였다. 이 지점을 이용하여 두 신호간의 도달시간차 정보를 그림 6(b)와 같이 획득하게 된다. 앞 절의 스펙트럼 분석법과 동일하게 각 파형에 대해 주파수 영역에서 주된 에너지



(a) 각 신호의 시간-주파수 해석 결과



(b) 주파수별 도달시간차 획득

그림 6. HWAW 기법 이용 방법

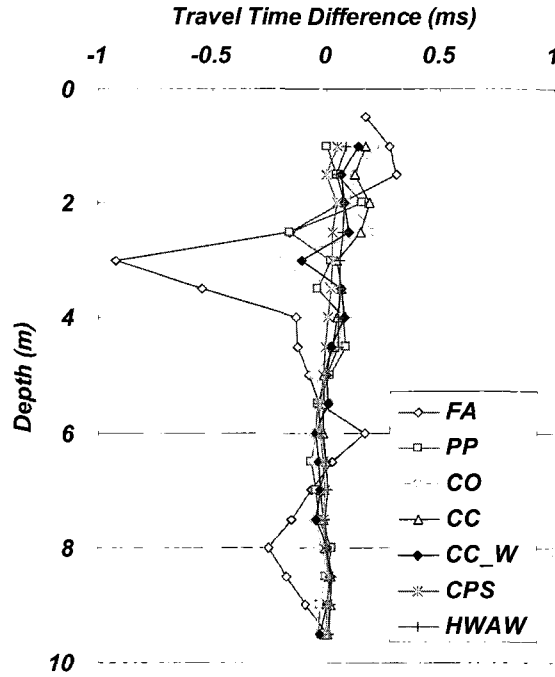
영역을 설정하고 설정된 주파수 영역 내에서 각 주파수 성분의 에너지에 대해 가중치를 주어 도달시간 정보를 평균하는 방식을 취하였다. 표 2와 표 3의 결과를 보면 전반적으로 오차가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 하지만 해석 시간이 타 기법에 비해 오래 걸리는 편이므로 실용성 측면에서는 불리하다.

3.7 해석 결과의 비교 및 고찰

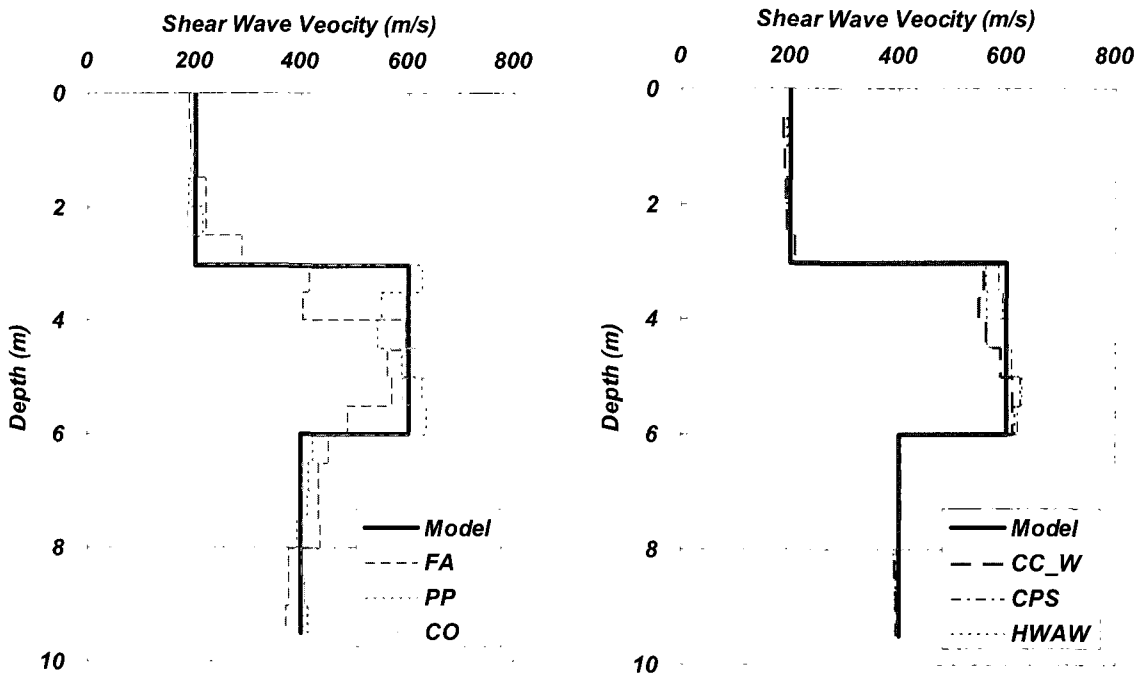
2차원 모델에 대한 수치해석 비교 연구 결과를 그림 7에 정리하였다. 그림 7(a)에 이론적 도달시간과의 도달시간 차이, 즉 오차 정도를 도시하였으며 그림 7(b)에 이러한 도달시간 정보를 이용하여 굴절 경로법으로 도출된 전단파 속도 주상도를 도시하였다. 그림 8에는 3차원 모델에 대한 결과를 동일한 방식으로 정리하였다. 또한, 각 모델에 있어서 각 방법에 대한 최대 오차, 평균 오차 및 %오차 평균을 표 3에 요약하여 정리하였다. 전반적으로 육안 인식을 통한 초동 추정 방법은 오차가 매우 크며 이는 결과적으로 전단파 속도 주상도가 모델과 상이하게 도출되는 것으로 이어졌다. 수치해석을 통한 이상적인 신호에서도 초동의 정확한 추정이 어려웠으므로 실제 신호에서는 더욱 힘들 것이라 판단된다. 그리고 어느 하나의 기준점을 이용하는 FA, PP, CO 방법에 비해 전체 신호를 이용하는 CC, CPS, HWAW 방법이 더욱 정확한 결과를 제공하는 것을 볼 수 있다(CC_W는 시간 영역 원도 우잉 적용 결과). 하나의 기준점을 이용하는 방법들은

표 4. 각 모델에 있어 수치해석 결과의 이론적 도달시간에 대한 오차 비교

적용기법	모델종류	도달시간(ms) 기준		
		최대 오차	평균 오차	%오차 평균
초동 추정	2차원 모델	1.50	0.76	33.94
	3차원 모델	1.71	0.60	23.43
극대점 이용	2차원 모델	0.68	0.12	3.51
	3차원 모델	1.21	0.34	17.15
교차점 이용	2차원 모델	0.21	0.05	2.36
	3차원 모델	0.23	0.13	5.18
상호상관법 (원도링)	2차원 모델	0.55	0.11	3.33
	3차원 모델	0.39	0.13	5.08
스펙트럼 분석법	2차원 모델	0.22	0.09	2.88
	3차원 모델	0.84	0.26	8.63
HWAW 기법	2차원 모델	0.24	0.09	2.62
	3차원 모델	0.55	0.17	7.41



(a) 도달시간 오차 비교

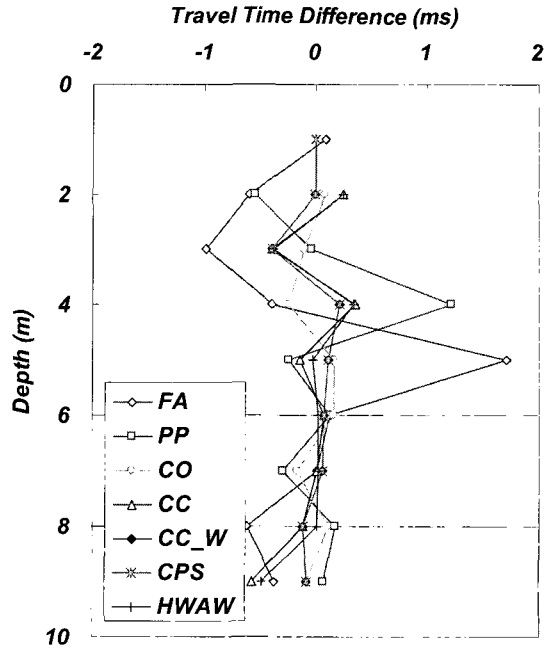


(b) 전단파 속도 주상도 (좌측은 하나의 기준점을 이용 방법 결과, 우측은 전체 신호를 이용하는 방법 결과)

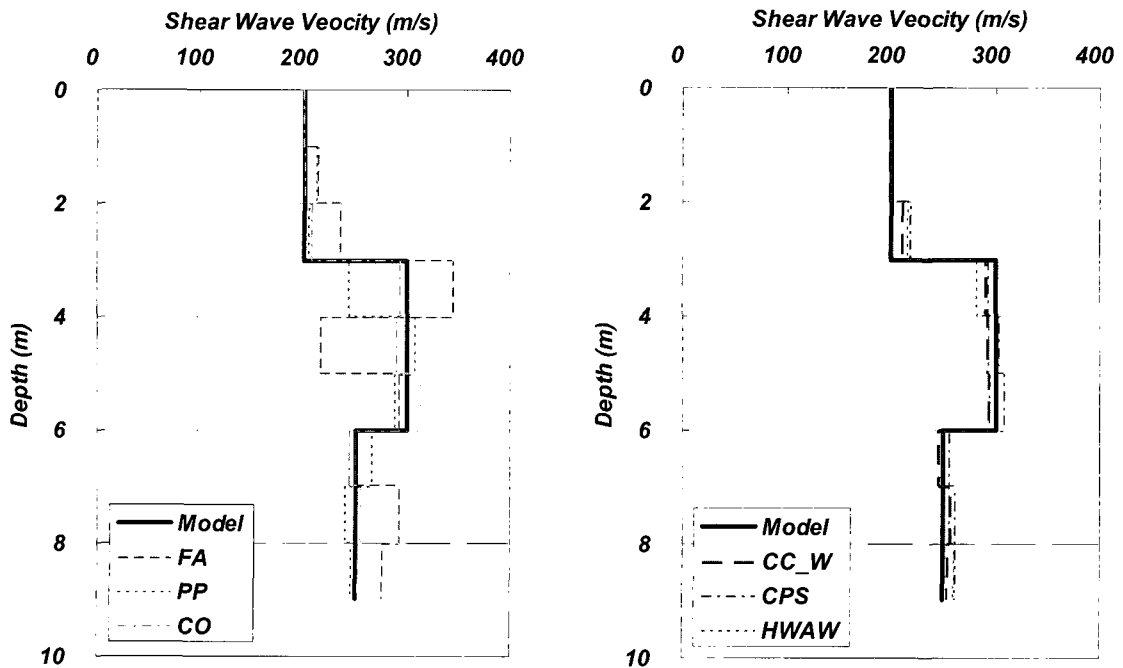
그림 7. 2차원 모델에 대한 결과 비교(FA : 초동 추정 방법, PP : 극대점 이용 방법, CO : 교차점 이용 방법, CC : 상호상관법, CC_W : 시간영역 윈도우 적용 상호상관법, CPS : 스펙트럼 분석법, HAWW : HAWW 기법)

오차가 크게 발생하는 지점이 있으며 도출된 전단파 속도 주상도의 증감현상이 존재하는 것을 볼 수 있다. 전체 신호를 이용하는 방법은 하나의 기준점을 이용하는 방법에 비해 오차가 작으며 도출된 전단파 속도 주상도 또한 모델값과 비교하여 볼 때 유사한 결과를 도출하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 탄성파에 있어서

전단파 성분의 이동은 특정 주파수 대역을 가지는 에너지의 이동이므로 어느 한 점을 기준으로 하는 방법으로는 정확하게 측정하기 어려운 것으로 판단된다. 반면, 전체 신호를 이용하는 방법들은 특정 주파수 대역에 있어서의 에너지 이동에 대한 평균적인 도달시간 차를 산출하므로 더욱 안정적이며 신뢰성 있는 결과



(a) 도달시간 오차 비교



(b) 전단파 속도 주상도(좌측은 하나의 기준점을 이용 방법 결과, 우측은 전체 신호를 이용하는 방법 결과)

그림 8. 3차원 모델에 대한 결과 비교

를 도출하는 것으로 판단이 된다.

4. 토조 실험을 통한 도달시간 정보 획득 방법의 비교

수치해석을 통해 획득한 파형은 다분히 이상적이므로 이러한 파형을 이용하여 실용적 측면에서 각 방법에

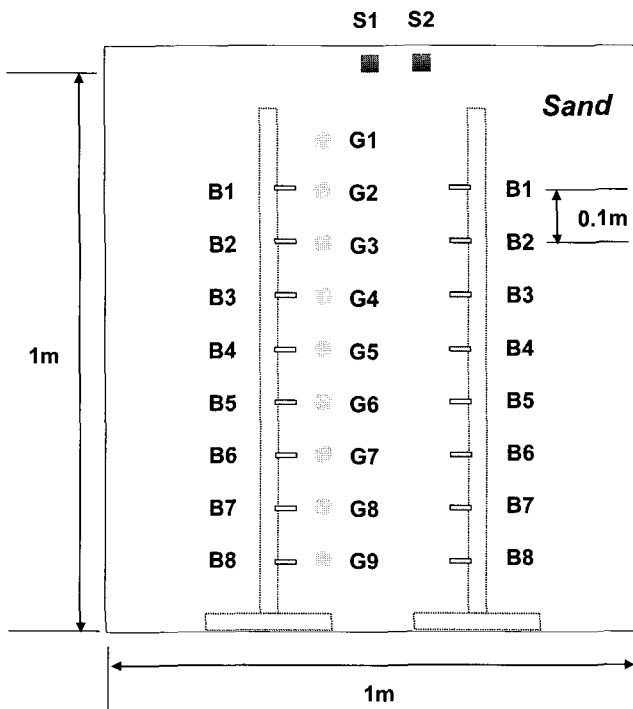
대한 비교 연구를 수행하기에는 부족함이 있다. 그러므로 실제 지반에서 다운홀 실험을 통해 획득한 파형을 이용하여 고찰해 보는 것이 필요하다. 하지만 실제 현장에서는 수치해석에서와 같이 검증하기 위한 정해를 알기가 힘들다. 검증용 비교자료로 크로스홀 기법 결과를 활용하는 것이 가장 신뢰성이 높다고 인식되어 있으나 크로스홀 기법 또한 층상구조가 수평하지 않거나 시험공

영향 등에 의해 잘못된 결과를 도출할 수 있으므로 검증이 어렵다. 따라서 실내 토조를 이용하여 도달시간 정보 획득 방법의 비교 연구를 수행하였다. 토조내 지반 조성시 각 깊이별로 속도계를 매설하는 방식을 통해 일반적인 다운홀 시험에서 발생할 수 있는 시험 지점의 오류 및 시추공 영향을 없앤 상태에서 양질의 신호를 획득할 수 있다. 또한 토조 내의 지반에서 벤더 엘리먼트 실험(bender element test)을 수행함으로써 비교적 정확한 검증용 자료를 획득할 수 있다.

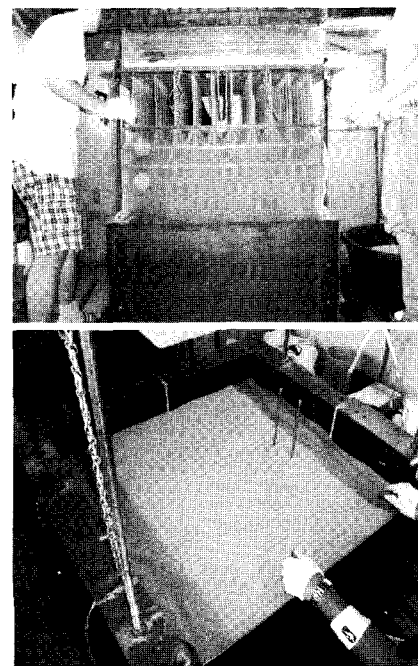
검증용 실내 토조에 대한 모식도를 그림 9에 도시하였다. 토조의 크기는 1m×1m×1.2m(가로×세로×높이)이며 10cm 깊이 간격으로 수평 방향 성분의 10Hz 속도계를 매설하였다. 또한 크로스홀 방식의 벤더 엘리먼트 실험을 위해 10cm간격으로 벤더 엘리먼트를 설치한 벤더 봉 2개를 설치하였다. 벤더 엘리먼트 실험 수행시 지반 입자의 움직임 방향을 다운홀 기법에서와 동일하게 하고자 압전 소자를 좌우 방향으로 가진하고 감진하도록 설치하였다. 토조내 지반은 토조 상부에 설치된 낙사 장치를 이용하여 수평적으로 균등하게 조성하였으며 주문진 표준사를 이용하였다. 낙사 1회에 10cm 정도 지반이 조성되도록 하였으며 낙사를 지속적으로 실시하여 약 1m 정도 높이로 지반을 조성하였다.

벤더 엘리먼트 실험을 통해 획득한 깊이별 파형을 그림 10과 같으며 추정되는 전단파 성분의 도달 시점을 상향 화살표로 표기하였다. 벤더 엘리먼트 실험에서는 근접장 영향으로 인하여 전단파 성분의 도달 시점을 정확하게 추정하기 어려운 경우가 많으나 본 토조 실험에서는 가진 지점과 감지 지점의 거리가 가진 주파수에 비해 비교적 길기 때문에 근접장 영향이 적어 비교적 정확하게 전단파 성분의 도달시점을 추정할 수 있었다. 토조내 전단파 속도는 구속압에 의한 효과만 작용되어 깊이에 따라 점차적으로 증가할 것이며 심도에 따라 전단파 성분의 도달 시점이 서서히 빨라지는 것으로 보아 계획한 바대로 지반이 잘 조성되었다고 판단된다.

다운홀 모의 실험을 수행하여 깊이별 파형을 획득하였다. 가진원으로부터 감지기까지의 거리가 짧기 때문에 근접장 영향을 줄여주고 도달시간 정보 획득에 유리하도록 소형의 지표면 가진원 및 소형 해머를 사용하여 최대한 가진 주파수를 크게하였다. 가진원 거리를 10cm 및 20cm로 달리하여 시험을 수행하였으며 각 가진원 거리당 2회를 실시, 총 4개의 깊이별 파형을 획득하였다. 가진원 거리별로 획득한 파형 일례를 그림 11에 도시하였다. 수치해석 수행을 통해 획득한 파형과 비교하여 볼 때 근접장 성분이 더욱 관찰이 되며 토조 벽면에서 반사



(a) 검증용 토조의 구성(G:속도계, B:벤더)



(b) 토조 내 지반 조성 과정(낙사방식)

그림 9. 검증용 토조 개요도 및 지반조성 과정

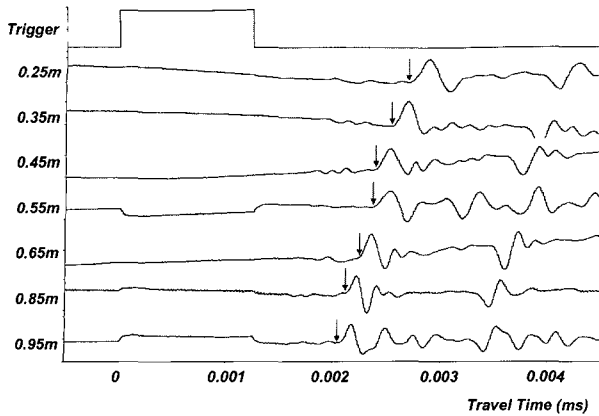
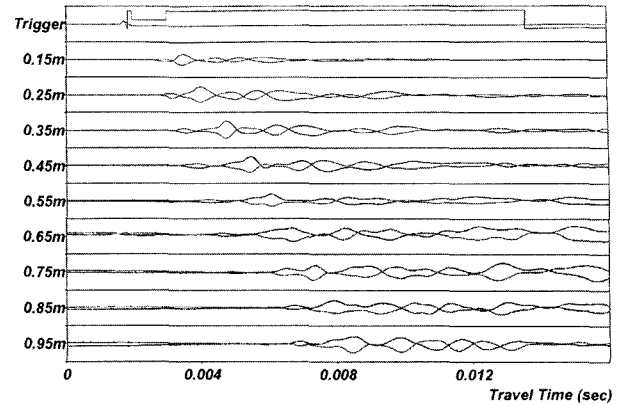


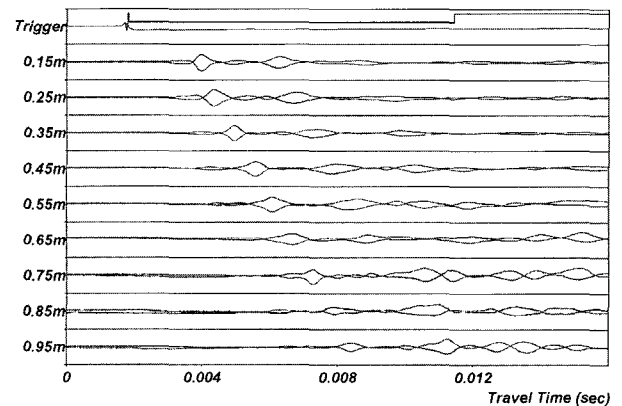
그림 10. 토조내에 설치된 벤더 엘리먼트를 통해 획득한 깊이별 파형

된 파들 또한 감지되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 4개의 깊이별 획득 파형을 이용하여 6가지 방법을 통해 도달시간 정보를 결정하였다. 또한 이를 이용하여 굴절 경로법으로 전단파 속도 추상을 도출하여 보았다. 그림 12에 벤더 엘리먼트 실험 결과와 함께 각각의 도달시간 정보 획득 방법별로 결과를 비교하여 도시하였다.

육안인식에 의한 초동 추정 방법은 4개의 파형에 대한 결과들의 분산이 다른 기법에 비하여 심한 것을 볼 수 있다(그림 12(a)). 이는 동일한 지반에서 같은 가진원 위치에서 동일하게 실험한 것이라고 할지라도 초동 추정 방법은 도달시간 정보를 결정할 때마다 다른 값이 도출될 가능성이 있음을 의미한다. 다른 방법들을 이용한 결과는 비교적 유사한 형태를 보이며 특히 동일 가진원 위치에서의 결과에서는 거의 동일함을 알 수 있다. 스펙트럼 분석법을 제외하고는 벤더 엘리먼트 실험 결과와 거의 유사한 결과를 도출 하는 것을 볼 수 있다. 스펙트럼 분석법은 토조 결과 해석시 획득 파형에 대한 복잡한 매스킹 과정이 요구 되었으며 이에 따라 상당 부분의 주파수 영역에서 데이터를 상실하였다. 이러한 이유로 정확한 도달시간 정보를 획득하지 못한 것으로 판단된다. 교차점 이용 방법에 있어서는 하부 지점에 있어서 속도가 약간 작게 도출되는 것을 볼 수 있는데 이는 심도가 깊어질수록 획득 파형에서 주주파수 성분이 저주파 성분으로 이동하게 되며 교차점이 불명확해져 도달시간 정보를 실제보다 좀 크게 산출하였기 때문이다. 전체 파형을 이용하는 방법에 있어서 하부 2측점의 결과가 벤더 엘리먼트 결과와 약간 다르게 산정된 것을 볼 수 있는데 이는 토조 벽면 등의 반사파로 인한 것으로 판단된다. 본 토조를 통한 비교 연구에 있어서는 극대점 이용방법이 전반적으로 가장 정확한 값을 도출하



(a) 가진 위치 10cm



(b) 가진 위치 20cm

그림 11. 토조내 속도계를 이용하여 수행한 다운홀 시험의 깊이별 획득 파형

고 있으며 결과의 반복성도 뛰어난 것으로 판단이 되었으며 하부 지점의 결과를 제외하면 상호상관법이나 HWAW 기법을 적용한 결과 또한 신뢰성 있는 결과를 도출하였다고 판단이 된다.

5. 현장 획득 자료에 대한 적용

본 절에서는 실제 현장 데이터를 이용하여 도달시간 결정법에 대해 비교하여 보았다. 현장 시험 데이터에 의한 결과는 단순히 도출된 도달시간 정보의 정확성에만 결정되는 것이 아니라 정확한 시험 심도의 설정, 지반의 횡방향 불균질성 등 여러 가지 현장 상황이 반영된다. 따라서 현장 시험 데이터를 이용하여서는 도달시간 결정법에 대해 정확하게 비교 및 평가하기는 힘들지만 최종 결과를 합리적으로 도출하는데 가장 적합하고 실용적 측면에서 유리한 기법에 대해 고찰해 보고자 하였다. 그림 13에 도시한 깊이별 파형은 충청남도 홍성 소하천 부지에서 다운홀 시험을 통해 획득한 것이다. 하천 득의

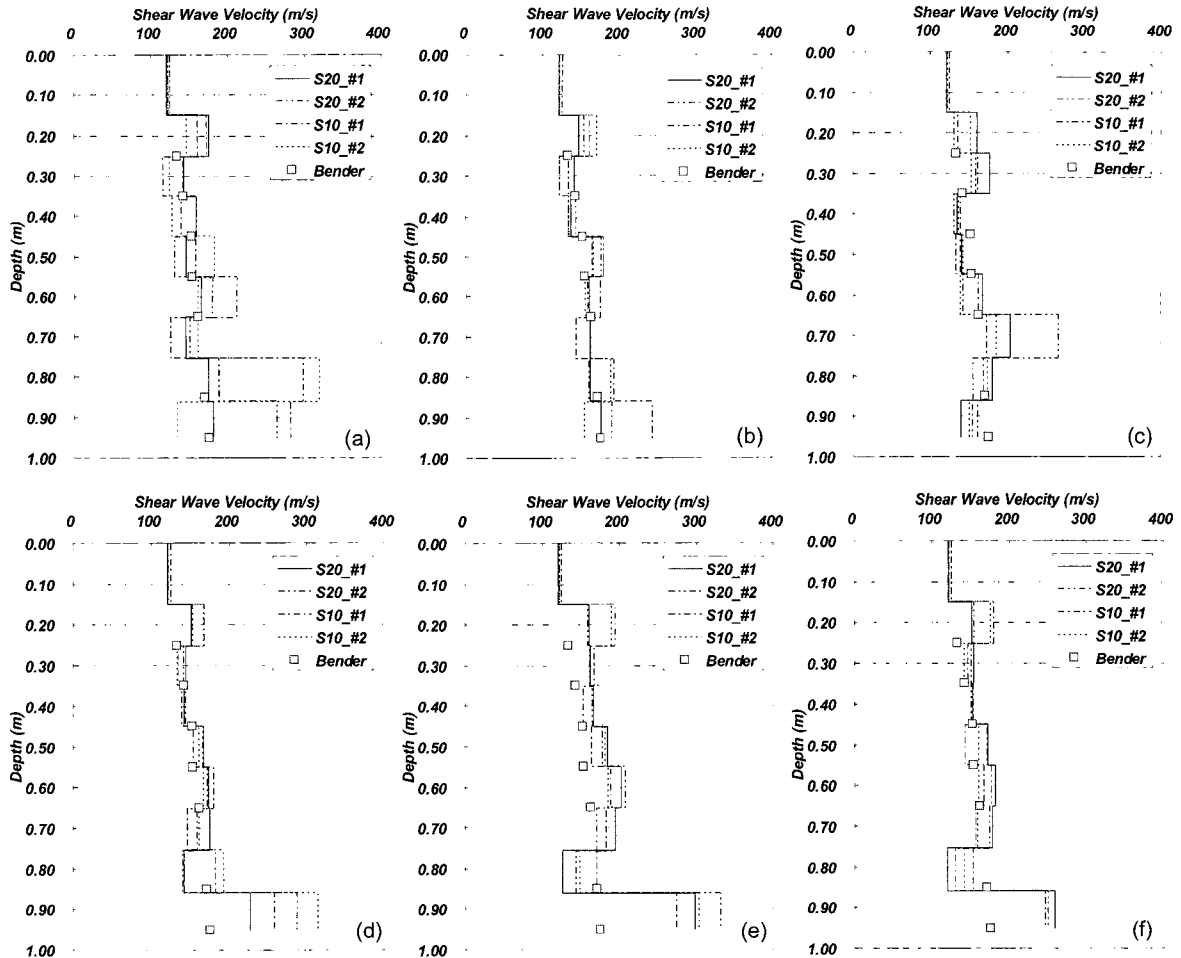


그림 12. 토조 실험 정보를 이용한 전단파 속도 주상도 도출 결과 (a) 초동 추정 방법, (b) 극대점 이용 방법, (c) 교차점 이용 방법, (d) 상호상관법, (e) 스펙트럼 분석법, (f) HVAW 기법

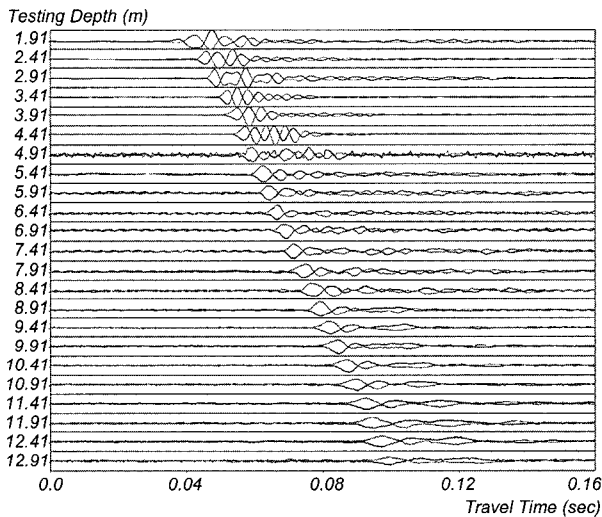


그림 13. 다운홀 현장 시험 수행을 통해 획득한 깊이별 신호(홍성 소하천 부지)

성토체 평가를 위해 수행한 것으로 12.91m까지 시험을 수행하였다. 방향로드 방식의 감지기 시스템을 사용하였으며 노이즈 제거 상태가 불량하여 심도가 깊어질수록

획득한 신호의 상태가 양호하지 못한 것을 알 수 있다. 각각의 도달시간 정보 결정법으로 결정된 전단파 속도 주상도들을 그림 14에 시추 주상도와 SPT-N치와 비교하여 도시하였다. SPT-N치 형상으로 미루어 보아 본 부지는 깊이에 따라 전단파 속도가 서서히 증가하는 지반으로 추정할 수 있다. 시험 심도의 부정확성에 의해 증감현상이 있을 수 있지만 획득된 전단파 속도의 깊이별 변화 형상은 잘못된 도달시간 정보 결정에 의한 것이 주된 것으로 판단이 된다. 전체 신호를 이용하는 방법에는 전체적으로 유사한 결과를 도출한 것으로 보이지만 한 점을 이용하는 방법에는 결과가 서로 달랐으며 특히 초동 추정 방법에 의한 결과는 깊이별 증감 현상이 두드러졌다. 또한, 교차점 이용 방법은 토조 결과에서도 그 특성이 볼 수 있었던 것처럼 심도가 깊어질수록 전단파 속도를 낮게 평가하는 것을 볼 수 있다. 이는 획득한 신호 상에서 상부에 비해 하부의 주파수 대역이 저주파로 옮겨진 것에 의한 것으로 그림 13에

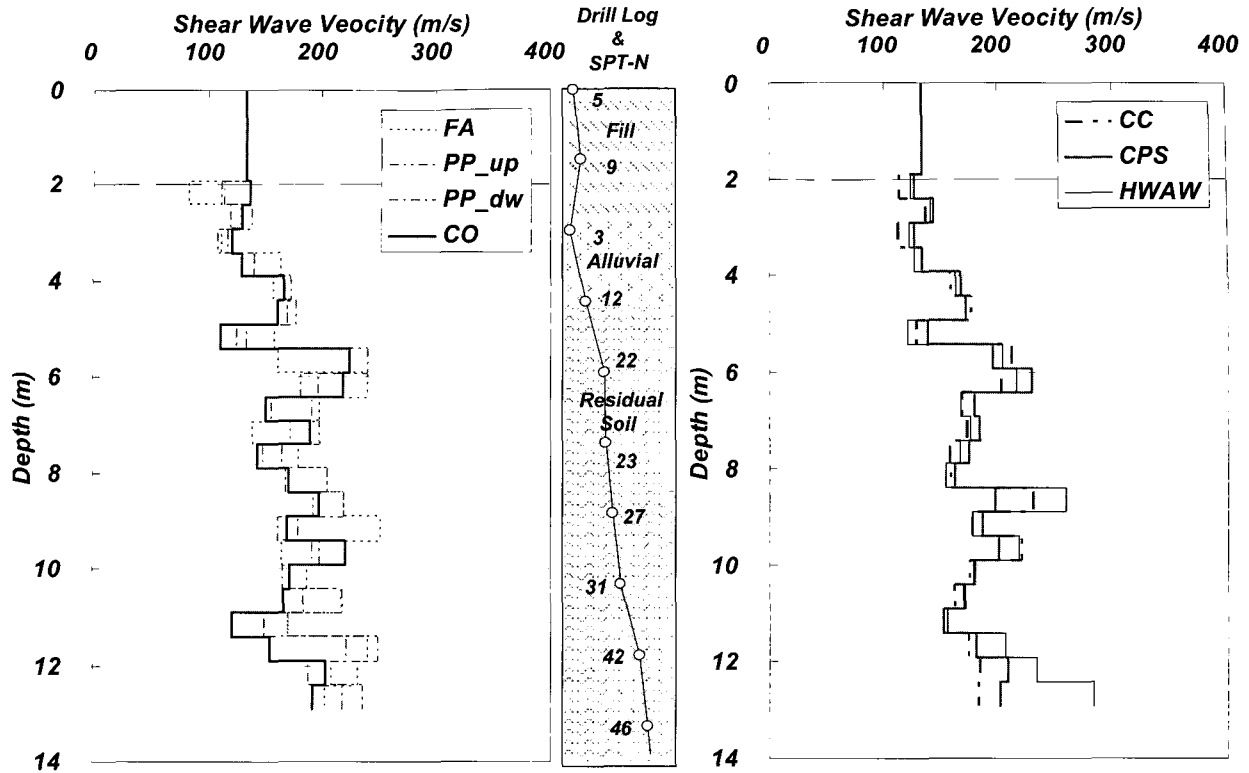


그림 14. 도달시간 도출 방법별 도출된 전단파 속도 주상도의 비교(홍성 소하천 부지)

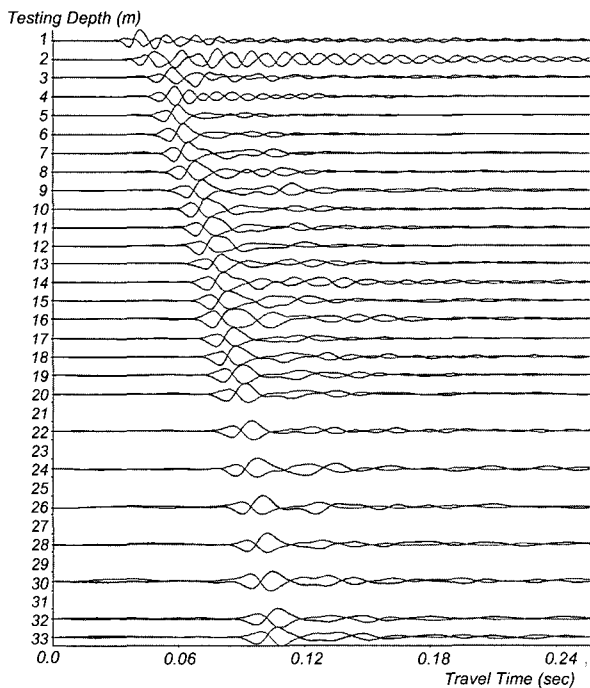


그림 15. 다운홀 현장 시험 수행을 통해 획득한 깊이별 신호(평택 서해대교 부지)

서 확연히 확인할 수 있다.

그림 15은 평택 서해대교 부지에서 다운홀 시험을 통해 획득한 깊이별 신호로써 Geostuff사의 BHG 감지

기를 사용한 것이다. 신호 획득 장비는 Geomatrix 사의 StratavisorNZ으로 아날로그 입력 해상도가 24bit이고 중첩기능이 있어 최종 시험 심도인 33m까지 획득 신호의 양호도가 매우 우수한 것을 볼 수 있다. 그림 16에 굴절 경로법 적용을 통해 도출된 전단파 속도 주상도를 시추 주상도와 SPT-N값과 비교하여 도시하였다. 획득 신호가 매우 양호함에도 불구하고 각 도달시간 결정법에 따라 그 결과가 상이하였으며 깊이별 속도의 증감이 매우 심하였으며 초동 추정에 의한 결과가 특히 두드러지는 것을 확인 할 수 있다. 전체 신호를 이용하는 방법의 경우에는 3개의 방법에 의한 결과가 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 심도 16m-20m 근방에 있어 속도의 증감이 매우 심한 것을 알 수 있다. 이는 시험 심도에 의한 오차나 해당 층이 풍화토에서 풍화암으로 전이되는 구역이므로 횡방향 불균질성 등에 의한 것으로 판단이 된다.

실질적으로 다운홀 시험에 있어 여러 가지 오류의 원인이 존재하기 때문에 굴절 경로법으로 시험 간격별 전단파 속도를 자세하게 도출하기에는 무리가 있다. 도달 시간 정보 오류의 보정을 통해 합리적인 전단파 속도 주상도를 도출하기 위한 방편으로 평균 굴절 경로법(방은석 등, 2006)이 소개된 바 있으며 평균 굴절 경로법으로

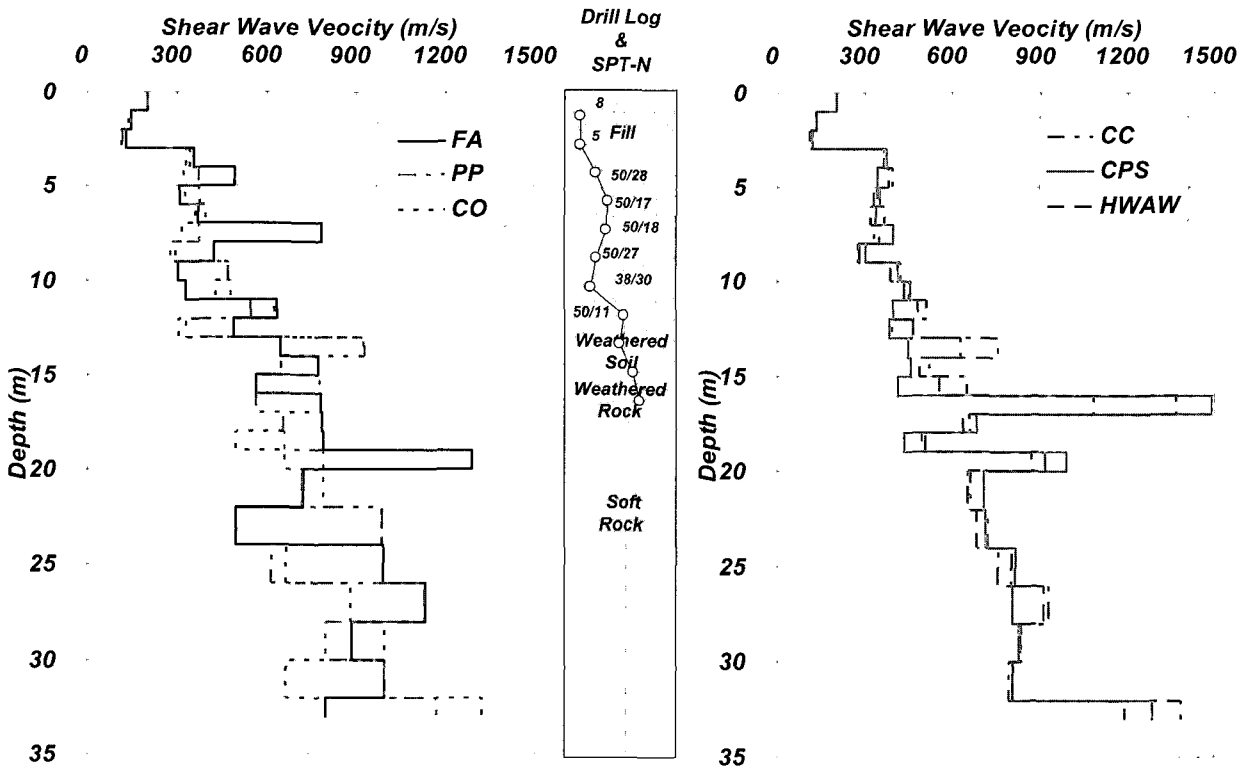


그림 16. 굴절 경로법으로 획득한 전단파 속도 주상도의 비교(평택 서해대교 부지)

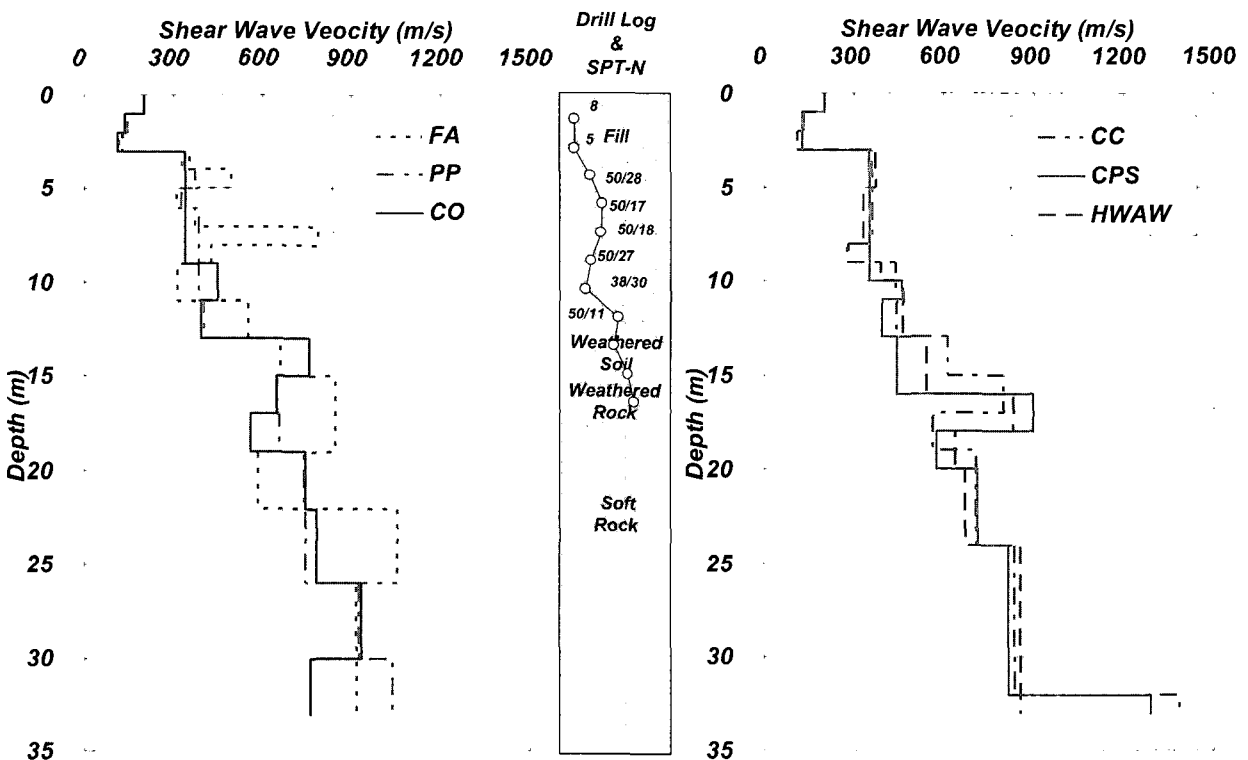


그림 17. 평균 굴절 경로법으로 획득한 전단파 속도 주상도의 비교(평택 서해대교 부지)

도출된 전단파 속도 주상도를 그림 17에 도시하였다. 합리적인 비교를 위하여 평균 굴절 경로법 적용을 위한 R^2 값 및 최소층 두께 기준은 모두 동일한 상태로 결과

를 도출하였다. 평균 굴절 경로법은 도달시간 오차에 의한 보정을 해주지만 기존 도달시간 정보의 양호도에 의존적이다. 따라서 평균 굴절 경로법을 통해 도달시간 정

보 오류가 보정된 뒤에도 초정 추정치에 의한 방법 결과는 비정상적인 증감이 존재하는 것을 볼 수 있다. 전체 신호를 이용하는 방법의 결과는 서로 유사한 것을 볼 수 있다. 심도가 깊어질수록 전단파 속도가 서서히 증가하는 형상으로 결정되었으며 풍화암층에서 속도가 증가하여 층이 구분됨을 유추할 수 있도록 해주고 있다.

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 다운홀 기법 해석 과정에 있어 신뢰성 있는 도달시간 산출 방법에 대해 수치해석, 실내 토조 실험, 현장 실험 결과를 이용하여 고찰하여 보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 육안 인식을 통한 초동 추정 방법은 압축파의 영향 및 근접장 효과로 인하여 정확한 추정이 어렵고 그 기준이 모호하므로 해석자의 주관적 판단에 따라 결과가 달라지며 신뢰성 있는 결과를 도출하지 못하는 것으로 판단되었다.
- (2) 극대점 이용 방법 및 교차점 이용 방법은 하나의 기준점을 이용하므로 파형이 왜곡된 특정 심도에서 큰 오차를 유발할 수 있다. 특히 교차점 이용 방법은 시험 심도가 깊어질수록 획득 파형의 주파수 대역이 저주파로 이동하므로 도달시간 정보를 실제보다 과대평가 할 수 있다.
- (3) 상호상관법, 스펙트럼 분석법, HWAW 기법은 전체 신호를 이용하므로 전체적인 전단파 성분의 이동 시간을 신뢰성 있게 도출하고 있다고 판단되었다. 상호상관법 적용 시에는 시간 영역 윈도우잉을 적용하는 것이 더욱 정확한 결과를 도출하는 것으로 나타났다.
- (4) 스펙트럼 분석법은 도달시간 결정시 파형의 양호도에 따라 적절한 매스킹 과정이 요구되었으나 HWAW 기법은 도달시간 결정시 해석자의 판단이 요구되지 않으므로 더욱 유리한 것으로 판단되었다. 단, HWAW 기법은 다른 방법에 비해 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있었다.
- (5) 본 연구에서는 결과의 신뢰성 측면이나 결과 도출의 자동화 가능 여부 및 간편성 등의 실용적인 측면에서 상호상관법이 다운홀 기법에서 도달시간 정보를 결정하는 방법으로 가장 적합한 것으로 판단이 되었다.

- (6) 적절한 도달시간 결정법으로 신뢰성 있는 도달시간 정보의 산출이 어느정도 가능하지만 항상 그렇지는 못하므로 도달시간 정보 오차를 적절히 보정해 주는 해석 기법을 적용함으로써 이러한 문제를 극복하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술B01-04)과 한국지질자원연구원 기본사업인 “지하정밀 영상화 융합기술 개발”의 일환으로 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박형춘, 김동수, 조성은 (2005), “HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 사용한 말뚝의 비파괴 건전도 평가방법의 개발”, *대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집/전문학회 세션*, pp.2868-2871.
2. 방은석, 김동수, 윤종구 (2006), “다운홀 시험에서 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출을 위한 해석 기법의 개선”, *대한 토목학회 논문집대한토목학회 논문집*, Vol.26, No.3c, pp.157-170.
3. Baziw, E.J. (1993), Digital filtering techniques for interpreting seismic cone data, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.119, No.6, pp.998-1018.
4. Burland J B, Longworth T I and Moore J. F. A. (1977), “Study of Ground and Progressive Failure Caused By a Deep Excavation in Oxford Clay”, *Geotechnique*, Vol.27, No.4, pp.557-591.
5. Campanella, R. G. and Stewart, W. P. (1992), “Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp.477-486.
6. Crice, D. (2002), *Borehole Shear-Wave Surveys for Engineering Site Investigations*, Geostuff, <http://www.georadar.com/Shearwaves2.pdf>.
7. Kim, D. S., Bang, E. S. and Kim, W. C. (2004), “Evaluation of various downhole data reduction methods to obtain reliable Vs profile”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.6, pp.585-597.
8. Kim, D. S. and Park, H. C. (1999), “Evaluation of Ground Densification Using SASW Method and Resonant Column Tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.291-299.
9. Larkin T. J. and Taylor. P. W. (1979), “Comparison of down-hole and laboratory shear wave velocities”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.152-162.
10. Park H. C. and Kim D. S. (2001), “Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform”, *NDT & E Int*, Vol.34, pp.457-467.
11. Sanchez-Salinerio, I. (1987), *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*, Ph. D. dissertation, The Univ. of Texas of Austin. 401p.
12. Stokoe, K. H., II, Wright, G. W., James, A. B. and Roesset, J. M.

- (1994), "Characterization of geotechnical sites by SASW method in geophysical characterization of sites", *ISSMFE*, Technical Committee #10, Edited by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
13. Stokoe K.H., Joh S.H. and Woods R.D. (2004), "Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems", *International Site Characterization ISC'2 Porto*, Portugal, pp.19-42.
 14. Sun, C. G., Chung, C. K., Shin, J. S. and Chi, H. C. (2006), "Empirical Correlations between Geotechnical In-site Parameters and Shear Wave Velocity from Borehole Seismic Tests", *Proceeding of the 10th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics*, RAEG 2006, KIGAM, Korea, pp.151-158.
 15. Taniguchi, E. and Sawada, K. (1979), "Attenuation with Distance of Traffic-Induced Vibrations", *Soil and Foundations*, Vol.19, No.2, pp.16-28.
 16. Wei, B.-Z., Pezeshk, S., Chang, T.-S., Hall, K. H. and H., P. L. (1996), "An Empirical Method to Estimate Shear Wave Velocity of Soils in the New Madrid Seismic Zone", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol.15, pp.399-408.
 17. Woods, R. D. and Jedele, L. P. (1985), "Energy Attenuation Relationships from Construction Vibrations", *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*. ASCE Convention in Detroit, Michigan, pp.229-246.
 18. Youn, J. U., Kim, J. T., Kim, D. S., Lee, J. S. and Kim, J. K. (2005), "Comparison of shear wave velocity on soft clays obtained by laboratory and field tests", *Proceeding's of 18th KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Kaohsiung, Taiwan, pp.485-490.
 19. Zerwer, A., Cascante, G. and Hutchinson, J. (2002), "Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.3, pp.250-261. *ironmental Engineering*, Vol.128, No.3, pp.250-261.

(접수일자 2006. 6. 28, 심사완료일 2007. 7. 18)