

표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출

Evaluation of Shear Wave Velocity Profiles by Performing Uphole Test Using SPT

김 동 수*¹ Kim, Dong-Soo
방 은 석*² Bang, Eun-Seok
서 원 석*³ Seo, Won-Seok

Abstract

Uphole test is a seismic field test using receivers on ground surface and a source in depth. In this paper, the uphole test using SPT(standard penetration test) which is economical and reliable for obtaining shear wave velocity profile was introduced. In the proposed uphole test, SPT sampler which is common in site investigation, was used as a source and several 1Hz geophones in line were used as receivers. Test procedures in field and interpretation methods for obtaining interval times and for determining shear wave velocity profile considering refracted ray path were introduced. Finally, uphole test was performed at three sites, and the applicability of the proposed uphole test was verified by comparing wave velocity profiles determined by the uphole test with the profiles determined by downhole test, SASW test and SPT-N values.

요 지

본 논문에서는 지반의 전단파 속도 주상도를 획득하기 위한 현장 시험법으로 표준관입시험 샘플러를 가진원으로 이용한 업홀 시험기법을 연구하였다. 제안된 업홀 시험은 지표면에 여러 개의 속도계를 시추 장비로부터 일정한 간격으로 한 줄로 배치를 하고 표준관입시험의 시료 채취기로부터 발생하는 진동원의 신호를 계속하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는 방법이다. 여러 선행 실험을 통하여 확립된 업홀 시험 방법 및 결과 분석법에 대해 소개하였다. 진동원과 감지기간의 거리가 멀기 때문에 지반에서 진행되는 전단파의 진행 경로는 지반의 강성 변화에 근거한 굴절 경로를 적용하였다. 국내 3개 시험 부지에서 수행한 업홀 시험결과를 동일 부지에서 행한 다운홀, SASW시험 및 SPT-N치와 비교하여 봄으로써 제안된 업홀 시험의 현장 적용성을 확인하였다.

Keywords : Field seismic test, Shear wave velocity, Site characterization, SPT, Uphole test

1. 서 론

지진시 지반의 거동은 부지 특성에 따라 상당한 영향

을 받으며 이러한 부지 증폭 현상을 연구하기 위해서는 지진시 지반 거동 변형을 영역인 1%이하에서의 변형율에 따른 전단탄성계수 감소곡선이 필요하다. 또한

*1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

*2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), silvston@kaist.ac.kr)

*3 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

진동문제 해결에 있어 선형 탄성(0.001%이하) 영역에서의 강성도 및 감쇠특성이 필요하며 도심지 굴착의 경우나 기초하부 지반의 정적 변형 문제를 해결하기 위하여 공용하중상태에서의 변형을 영역인 1%미만의 저변형률(small strain) 및 중간변형률(intermediate strain) 영역에 있어서 탄성계수의 결정은 매우 중요하다. 선형한계 변형률 이하의 저변형률 영역($\nu < 10^{-4}\%$)에서 지반의 선형거동을 측정하기 위하여 일반적으로 현장 탄성파시험이 이용된다. 탄성파 시험을 통하여 지반의 전단파 속도 주상도를 획득하고 그 값을 이용하여 지반의 최대 전단탄성계수를 획득, 공진주 시험등의 실내시험 결과와 조합함으로써 지반의 변형률에 따른 전단탄성계수의 감소 정도를 규명할 수 있다. 지반의 전단파 속도 주상도 획득을 위하여 사용되고 있는 현장 탄성파 시험에는 크로스홀(Cross-hole), 다운홀(Down-hole), SPS-Logging (Suspension PS logging) 그리고 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 등이 있다(김동수, 1997).

각각의 시험법은 시험 방법 및 현장 적용성에 있어 장단점이 있으며 그 결과 또한 현장 시험 여건 및 결과 분석방법에 따라 일치하지 않는 경우가 많다. 그러므로 지반의 전단파 주상도 획득을 위해서는 시험의 중요성과 현장 여건에 적합한 현장 탄성파 시험을 결정하고 수행하여야 한다. 그리고 단독으로 하나의 탄성파 시험만을 수행하여 전단파 속도 주상도를 결정하는 것보다 몇 개의 탄성파 실험을 동시에 실시하여 각 시험 결과를 신뢰성에 바탕을 두고 평가하여 하나의 대표 전단파 속도 주상도를 도출하는 것이 바람직하다(김동수, 1997).

국내 지반에서 다운홀 및 크로스홀 시험을 통해 지반의 전단파 속도 주상도를 획득하기에는 많은 어려움이 있다. 풍화토 및 풍화암 지대 및 자갈질 퇴적토 등이 대부분인 우리나라에서는 다운홀 및 크로스홀 시험을 수

행하기 위한 시험공 설치하기가 용이하지 않으며 지반을 통한 탄성파의 전달이 용이하지 않아서 신뢰성 있는 시험 결과를 획득하기 어려움이 있다. 본 논문에서 소개하고자 하는 업홀시험은 시추와 동시에 실시할 수 있기 때문에 시험공이 필요한 다른 탄성파 시험을 실시하기 전 미리 지반상태를 평가할 수 있고 이후에 실시하는 다른 탄성파 시험결과와 비교할 수 있는 자료로 활용할 수 있다고 판단된다. 또한 업홀 시험과 다른 탄성파 시험에서 유사한 결과를 얻어 업홀시험의 신뢰성이 검증된다면 향후 업홀 시험 결과 자체만으로 해당 부지의 전단파 속도 주상도를 매우 경제적으로 획득할 수 있는 방안이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 표준관입시험을 이용한 업홀 시험의 현장 시험법을 확립하고 신뢰성 있는 결과 도출을 위하여 굴절 전파 경로를 고려한 분석법을 개발하고자 하였으며 동일 시험 부지에서 다운홀 시험, SASW 표준관입시험을 수행하여 업홀 시험 결과와 비교하여 봄으로써 제안된 업홀 시험법에 대한 신뢰성을 검증하고자 하였다.

2. 업홀 시험의 특징 및 현장 수행 방법

탄성파 실험 장비는 가진원 시스템, 감지기 시스템 그리고 데이터 획득 시스템으로 분류된다. 본 논문에서 제안한 업홀 시험은 감지기 시스템으로 지표면 진동을 측정하기 위하여 일반적으로 사용되는 1Hz 수직 방향 속도계와 케이블을, 데이터 획득 시스템은 감지기에서 수신된 신호를 디지털신호로 바꾸어 저장할 수 있는 GRAPHTEC사의 MA6000 장치를 사용하였다. 대부분의 탄성파 시험에서 가장 중요한 부분은 가진원 시스템인데 제안된 업홀 시험에서는 가진원으로 표준관입시험에서 햄머를 타격할 때 지중 시료 채취기가 지반을 관입하면서 생기

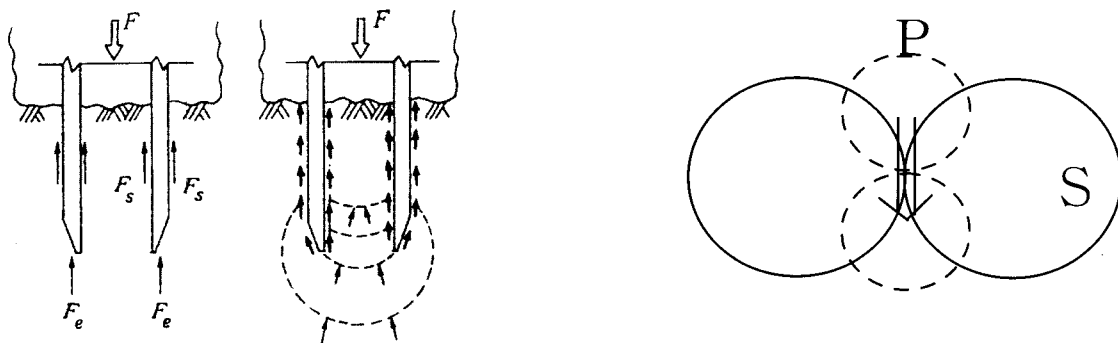


그림 1. 시료 채취기의 관입 메커니즘과 압축파와 전단파의 전달 형태

는 진동원을 사용한다. 일반적 지반 조사에서 사용되는 표준관입시험 장비를 사용하는 것이 제안된 업홀시험의 장점이라 할 수 있다. 타격에 의한 시료 채취기의 움직임 방향이 수직방향이므로 가로방향으로는 지반을 통하여 입자운동방향이 수직이고 파의 진행방향은 수평인 전단파 즉, SV파가 발생하며 세로방향으로는 입자방향과 진행방향이 같은 압축파, P파가 주로 발생하게 된다(그림 1). 그러므로 시추공으로부터 감지기가 너무 가깝지 않으면 지중 가진원으로부터 지표면의 감지기로 획득되는 신호의 대부분의 에너지는 SV파에 해당된다고 볼 수 있다.

본 논문에서 제안하는 업홀 현장시험법은 다음과 같다(그림 2).

- 1) 시추할 장소에 시추 위치로부터 일정한 간격으로 감지기를 설치한다. 본 연구에서는 시추 위치로부터 6m, 9m, 12m, 15m로 배열하였고 감지기는 Mark Products사의 1Hz 수직 속도계를 사용하였다.
- 2) 시험 깊이까지 시추를 수행한 후 표준관입시험을 실시한다. 해당 깊이의 표준관입시험치의 정확한 획득을 위하여 업홀 시험은 표준관입시험 종료 후 실시한다. 표준관입시험 수행 후 정확한 가진 깊이를 알기 위하여 샘플러 끝단의 지중 깊이를 측정하고 가진한다. 이 때 시추기의 진동 잡음이 크면 시동을 끄고

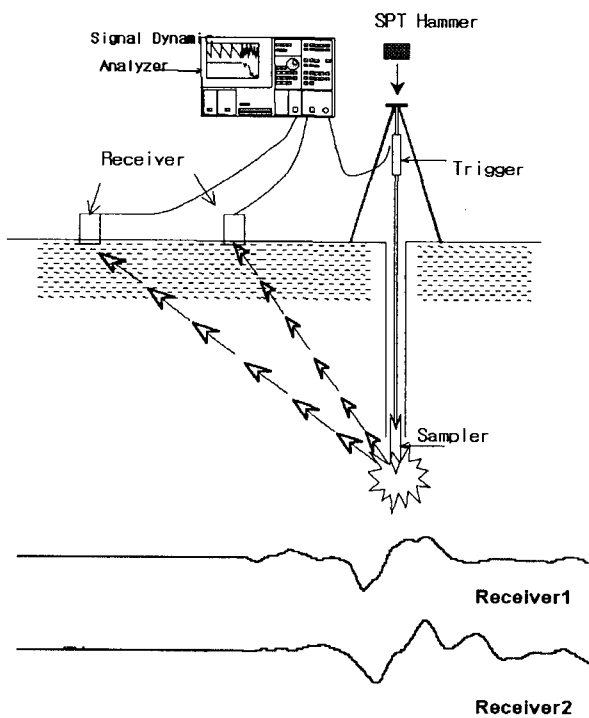


그림 2. 업홀 시험 개요도 및 전형적인 획득 신호

수동으로 타격하는 것이 바람직하다. 또한 타격시점을 알기 위하여 표준관입시험용 로드 상단에 속도계나 로드셀을 설치한다. 이때, 로드 상단에 위치하는 트리거로 사용되는 장비와 로드 하단까지의 길이를 별도로 측정하여 트리거 시점을 보정한다.

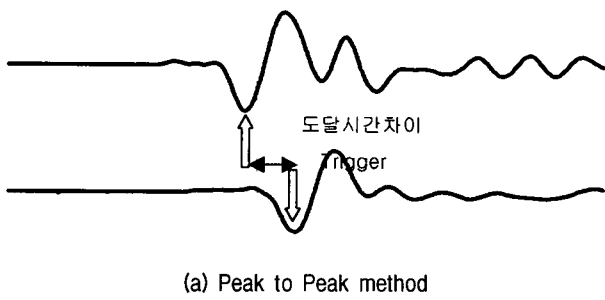
- 3) 각 감지기에서 계측된 신호를 동적신호 분석기를 통하여 획득한다. 신호가 반복성 있게 획득되어 지면 해당 깊이에서의 시험을 종료하고 획득된 신호를 저장한다.
- 4) 다음 시험 깊이까지 시추를 수행하고 2)-3)과정을 시험 종료 심도까지 반복한다.

3. 업홀 시험결과 분석

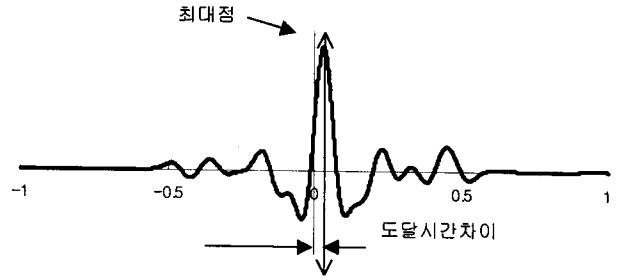
3.1 도달시간 획득법

일반적으로 탄성과 시험의 결과 분석에서는 가진원으로부터 감지기까지의 도달시간이 중요하다. 크로스홀과 다운홀에서는 전단파의 극성 특성을 이용하여 가진시점부터 전단파 도달시점까지 직접적으로 도달시간을 획득하거나 간접적으로 측정하는 경우에는 형상이 비슷한 두 신호를 이용하여 전단파 도달시간 차이(이하 DT)의 획득을 통하여 전단파 주상도를 도출하게 된다 (Campanella, 1992). 업홀 시험의 경우 가진원의 특성상 전단파의 극성특성을 이용하기 어려우므로 동일 깊이에서의 가진 신호가 지표면의 여러 감지기에 획득된 신호의 도달시간 차이를 이용하거나 다른 측정 깊이에서 가진 신호가 동일 감지기에 도달한 신호들의 도달시간의 차이를 이용하여 전단파 속도 주상도를 도출하여야 한다. 일반적으로 두 신호의 전단파 도달시간의 차이는 그림 3과 같이 Peak to Peak Method나 Cross-correlation method를 이용하여 획득할 수 있다.

Peak to Peak 방법은 주된 전단파 에너지 도달지점에서 동일한 방향으로의 첨부지점간의 시간 차이를 두 신호간 전단파 도달 시간의 차이라고 판단하는 방법이다. 또한 Cross-correlation 방법은 식 (1)과 같이 하나의 신호를 다른 한 신호에 겹쳐 이동해가면서 그 때 마다 두 신호의 곱을 산출한 뒤 최대지점의 값을 이용하여 도달시간 차이를 자동으로 산출하는 방식이다. 그림 3(b)에 그림 3(a)의 두 신호를 이용하여 Cross-correlation을 수행한 결과를 나타내었다. 앞의 두 방식 모두 두 신호간에 첫 번째 도달하는 전단파의 형상이 크게 차이가 나지



(a) Peak to Peak method



(b) Cross-correlation method

그림 3. 두 신호의 도달시간 차이 획득법

않는 경우에 아주 신뢰성 있게 사용할 수 있다. 또한 개인의 주관이 개입되지 않고 자동적으로 도달시간 차이를 산출 가능하므로 실험 분석 과정의 자동화를 이루어 낼 수 있다.

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

여기서 CR: Cross-correlation Function

τ : f(t)와 g(t)와의 time lag

3.2 전단파 속도 주상도 획득

획득된 전단파 도달시간의 차이를 이용하여 전단파 주상도를 도출하는 업홀 분석방법은 감지기간 DT법과 깊이간 DT법이 있으며 시추공과 감지기간의 거리가 멀기 때문에 굴절 경로를 고려한 분석방법을 사용하는 것이 바람직하다. Batsila(1995), Joh & Mok(1998), 김동수(2000) 등의 연구에서 탄성과 시험 결과 분석시 Snell의 법칙에 근거한 굴절 경로를 고려하는 것이 강조된 바 있다. 본 논문에서 소개되는 업홀 분석법들은 앞에서 언급한 연구자들에 의해 소개된 다운홀 시험의 결과 분석법과 유사하게 유도되어 진다.

3.2.1 감지기간 DT법

실험을 통해 획득하는 감지기 1(시추공에서 가까운 감지기)과 감지기 2(시추공에서 먼 감지기) 사이의 도달시간의 차이는 다음 식 (2)와 같이 표현된다. 업홀 시험에서는 시험법상 시험 횡수와 층수가 동일하고 측정 심도 간격이 층의 두께를 나타나게 된다.

$$DT_i = T_{i,f} - T_{i,n} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

여기서, $T_{i,f}$: 감지기 2의 i번째 측정시의 도달시간

$T_{i,n}$: 감지기 1의 i번째 측정시의 도달시간

첫 층의 전단파 속도는 식 (3)을 이용 도출할 수 있다.

$$V_1 = \frac{R_{1,f} - R_{1,n}}{DT_1} \quad (3)$$

여기서, $R_{1,f}$: 감지기 2의 1번째 측정시의 전파 경로의 총 길이

$R_{1,n}$: 감지기 1의 1번째 측정시의 전파 경로의 총 길이

i번째 층에 있어서의 전단파 속도를 도출하는 과정은 다음과 같다. 감지기 1과 감지기 2의 탄성과 도달시간은 각각 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$T_{i,n} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{j,n}}{V_j} = \frac{L_{1,n}}{V_1} + \frac{L_{2,n}}{V_2} + \dots + \frac{L_{i,n}}{V_i} \quad (4)$$

$$T_{i,f} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{j,f}}{V_j} = \frac{L_{1,f}}{V_1} + \frac{L_{2,f}}{V_2} + \dots + \frac{L_{i,f}}{V_i} \quad (5)$$

$T_{i,n}$: i번째 실험시 가진원으로부터 감지기 1까지의 도달시간

$T_{i,f}$: i번째 실험시 가진원으로부터 감지기 2까지의 도달시간

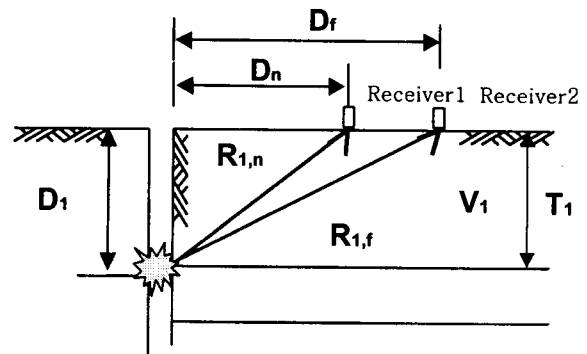


그림 4. 감지기간 DT법(첫 층)

각 층의 통과거리는 식 (6)과 식 (7)과 같이 각각 통과 거리의 수평성분의 합이 시추공과 가진원의 거리와 같다는 조건과 Snell의 법칙에 따라 입사각과 굴절각이 결정되는데 기인하여 산정된다. $i-1$ 층까지의 속도는 이전 과정에 의해서 이미 구해졌으나 i 층에서의 속도는 일단 가정하여야 한다.

$$T_1 \tan \alpha_{i1} + T_2 \tan \alpha_{i2} + \dots + T_i \tan \alpha_{ii} = D \quad (6)$$

$$\frac{\sin \alpha_{i1}}{V_1} = \frac{\sin \alpha_{i2}}{V_2} = \dots = \frac{\sin \alpha_{ii}}{V_i} = \dots = \frac{\sin \alpha_{ii}}{V_i} \quad (7)$$

여기서 d_{ij} : i 번째 전파 경로상에서 j 층에서 $j+1$ 층으로의 입사각

T_i : i 번째 층의 두께 (i 번째 측정 깊이와 $i-1$ 번째 측정 깊이 간격)

D : 감지기와 시추공 사이의 거리

V_i : i 번째 층의 전단파 속도

이렇게 해서 정해진 각 층에서의 통과거리는 다음 식 (8)과 같이 표현이 되며 일반적인 i 번째 층에서의 속도 V_i 는 식 (9)와 같이 결정된다. 반복작업을 통하여 가정된 속도와 도출된 속도가 어느 정도의 오차범위 내로 수렴되면 그 값을 해당 층의 속도로 최종 결정한다.

$$L_{ii,n} = T_j / \cos \alpha_{ij,n} \quad (8a)$$

$$L_{ii,f} = T_j / \cos \alpha_{ij,f} \quad (8b)$$

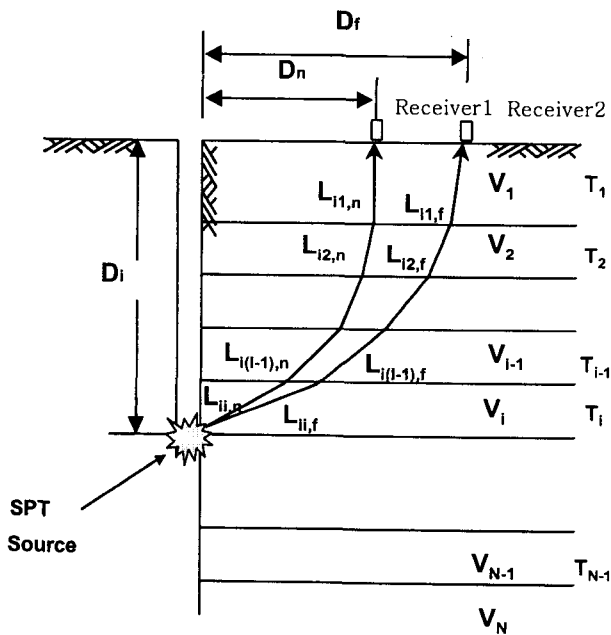


그림 5. 감지기간 DT법

여기서 $L_{ij,n}$: i 번째 시험시 가진원과 감지기 거리 중 j 층 통과거리

$L_{ij,f}$: 감지기 2와 i 번째 시험지점간 거리 중 j 층 통과거리

$\alpha_{ij,n}$: 감지기 1과 i 번째 시험지점간 j 층에서의 굴절각

$\alpha_{ij,f}$: 감지기 2와 i 번째 시험지점간 j 층에서의 굴절각

T_j : j 번째 층의 층두께

$$V_i = \frac{L_{ii,f} - L_{ii,n}}{DT_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij,f} - L_{ij,n}}{V_j}} \quad (9)$$

3.2.2 깊이간 DT법

본 논문에서 제안하는 업홀 분석법 중 깊이간 DT법은 다운홀 분석법에서 쓰이는 분석법 중 Snell의 법칙 전파 경로법과 유사하다. 단지 가진원과 감지기 위치가 바뀌었을 뿐 분석원리는 동일하다. 각 시험지점에서의 가진원과 감지기까지의 직접도달시간이 도출하고 가진원으로부터 감지기까지의 전파 경로를 산정한 뒤 각 층의 속도를 도출하게 된다. 대개의 경우 표층에서는 동일 감지기에서의 깊이별 도달시간의 차이가 음수가 나오는 경우가 많아 기존 간접법을 적용하기가 힘들다. 따라서 업홀의 깊이간 DT법에서 첫층의 속도는 감지기간 DT법에서와 같은 방법인 지표면 두 개의 감지기 사이의 도달시

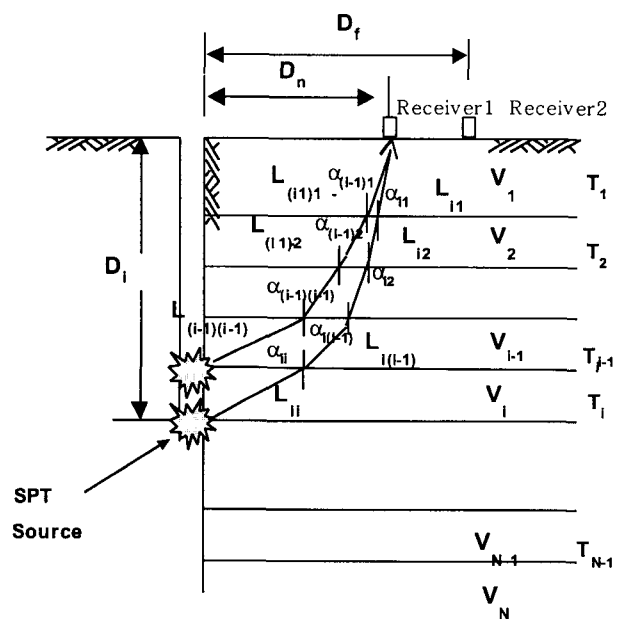


그림 6. 깊이간 DT법

간 차이를 이용하여 산출하는 것이 바람직하다.

식 (3)을 이용하여 획득한 첫 층의 속도 V_1 을 바탕으로 첫 번째 시험지점에서부터 감지기1까지의 직접 도달 시간을 식 (10)을 이용하여 역으로 산출한다. 첫 번째 시험지점의 직접 도달시간에 실험을 통해 획득한 각 시험지점간의 전단파 도달시간의 차이를 더해줌으로써 각 가진 지점에서의 직접 도달시간을 식 (11)과 같이 산출할 수 있다. 하지만 여기서 각 시험 깊이에서 획득한 탄성과 신호가 동일 가진원에서 획득했던 것이 아니므로 지중 Trigger를 사용하지 않았을 경우에는 지상 Trigger 지점부터 지중 가진 지점까지의 Rod의 길이의 차이에 발생하는 Trigger시점 오차를 보정시간 DT_{rod} 를 고려하여 보정하여야 한다.

$$T_{1,1} = \frac{R_{1,n}}{V_1} \quad (10)$$

$$T_{i,1} = T_{i-1,1} + (DT_{i,1} - DT_{rod}) \quad (i = 2, \dots, N) \quad (11)$$

$$DT_{rod,i} = \frac{DL_i}{C} \quad (i = 2, \dots, N) \quad (12)$$

$$C = \frac{2L}{T_c} \quad (13)$$

- $T_{i,1}$ 감지기 1의 i번째 측정시의 도달시간
- $DT_{i,1}$ 감지기 1의 i번째 측정시의 도달시간과 i-1번째 측정시의 도달시간의 차
- DT_{rod} Rod의 길이 차이에 의한 Trigger시점 보정시간
- DL_i i번째 시험깊이와 i-1번째 시험 깊이와의 차이 (m)
- C Rod의 막대파 속도(m/s)
- L 로드셀에서 시험깊이까지의 총 Rod 길이(m)
- T_c 해머 타격 시점으로부터 인장과 도달시점(Cut-off time)

이렇게 보정된 시험 깊이별 직접도달시간이 도출이 되면 감지기간 DT법과 같은 방법으로 굴절 경로 가정에 대한 각 층의 통과거리를 산정한 뒤 시험층에서의 속도를 식 (14)와 같은 방법으로 도출할 수 있게 된다. 이 방법에서도 가정된 속도와 도출된 속도가 일치할 때까지 반복 계산을 통하여 최종 해당 층의 속도를 결정하게 된다.

$$V_i = \frac{L_{ii}}{T_{i,i} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij}}{V_j}} \quad (14)$$

4. 현장 시험의 수행 및 신뢰성 검증

제안된 업홀 시험을 검증하기 위하여 국내 3개의 부지에서 업홀 현장시험을 수행하고 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다. 모든 부지에서 앞에서 제시한 업홀 현장 시험법에 근거하여 시험을 수행하였으며 부지별로 다운홀, SASW 및 표준관입시험 등이 수행되어 업홀 시험 결과와 비교를 통해 신뢰성 검증을 하고자 하였다.

4.1 김제 현장

본 논문에서 제안한 시험법을 검증하기 위하여 전라북도 김제의 서해안 고속도로 현장에서 현장 시험을 수행하였다. 그림 7은 시험 부지에서의 업홀 시험 수행 장면이다. 감지기 1은 시추위치로부터 6m 떨어진 위치에 나머지 감지기 2, 3, 4는 각각 6m, 9m, 12m 위치에 설치하였다. 표준관입시험을 1.5m 간격으로 수행하였으며 업홀 시험은 시추 후 표준관입시험이 종료된 뒤 수행하였다. 따라서 업홀 시험 심도와 표준관입시험 심도와는 약간의 차이가 있으며 시추기의 기계진동을 제거하기 위하여 업홀 시험시에는 시추기 시동을 끄고 난 뒤 수동으로 타격을 시도하였다.

그림 8은 본 김제 현장에서 수행한 업홀 시험의 획득 신호를 4개의 감지기에서 깊이별로 나타내었다. 그림 8에서 보면 압축파와 전단파가 분리되어 도착하는 것을 알 수 있으며 감지기의 감지 방향과 가진원의 위치로 고려하여 볼 때 획득된 신호에서 주된 에너지는 수직방향으로 입자가 운동하며 파가 진행하는 전단파(SV파)인 것

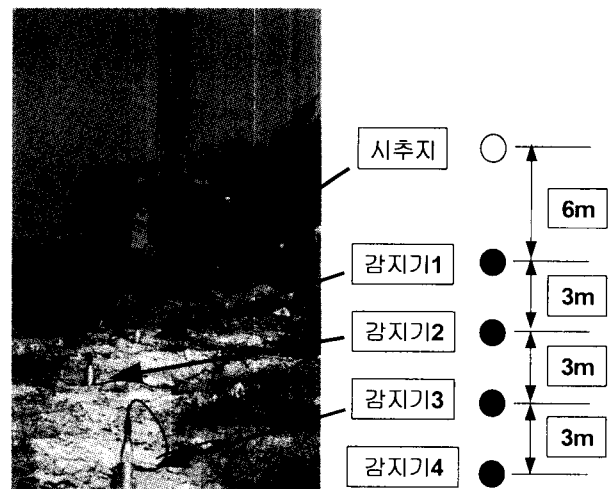
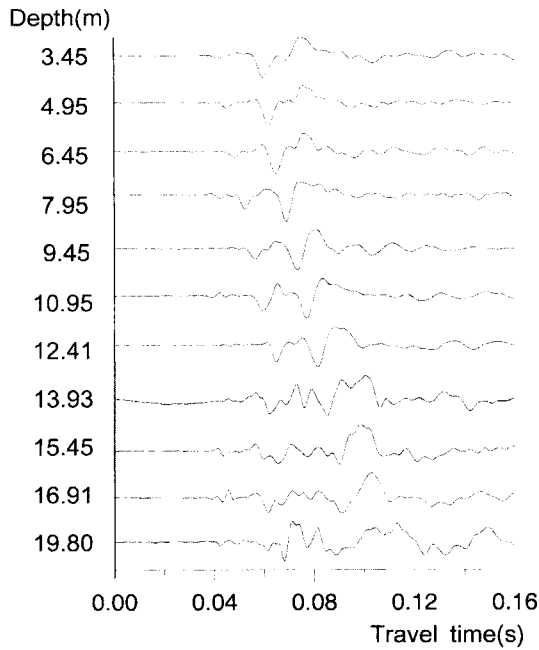
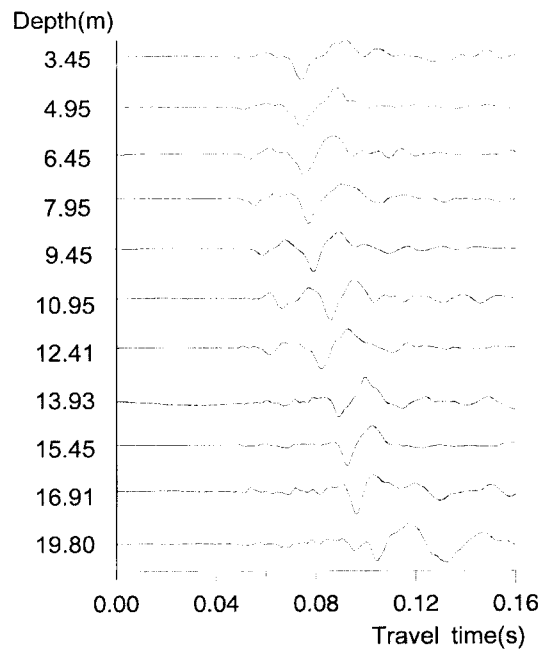


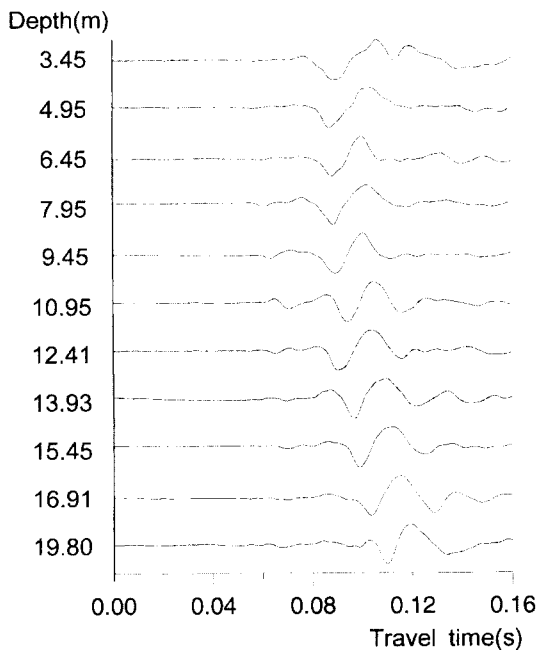
그림 7. 김제 현장 업홀시험 수행 장면



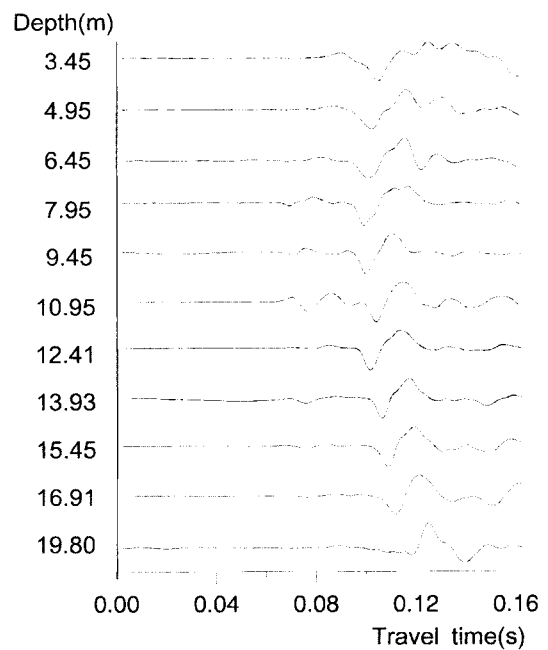
(a) 감지기 1 (6m)



(b) 감지기 2 (9m)



(c) 감지기 3 (12m)



(d) 감지기 4 (15m)

그림 8. 김제 풍화토 부지 업홀 시험 감지기별 획득 신호

을 알 수 있다. 시험을 통해 획득한 신호를 보면 극성 특성을 이용하지 못함에 따라 정확한 전단파 도달시점의 결정에는 단점이 있으나 전단파 에너지가 매우 풍부하고 주에너지 도달 지점이 명확한 것을 알 수 있다. 그리하여 Cross-correlation 방법을 통하여 각각의 감지기에 대해서 동일 감지기 깊이별 도달 시간 차이 및 동일 깊이가진에 대한 감지기별 도달시간 차이를 자동 획득하였다. 그러나, 그림 8(a)의 감지기1의 깊이별 획득 신호를 보면 다른

감지기의 경우와는 달리 심도 13m이하에서 압축파로 인해 전단파 도달시점이 불분명해 지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 지중의 한 지점에서 시료채취기에 의해 진동이 발생하였을 때 압축파와 전단파의 전달 형태는 그림 1과 같으므로 심도가 깊어질수록 시추위치로부터 가까운 감지기일수록 전단파의 영향범위에서 벗어날 수도 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 깊은 심도에서의 업홀 시험 수행 시에는 감지기의 위치가 시추지로부터 멀어야

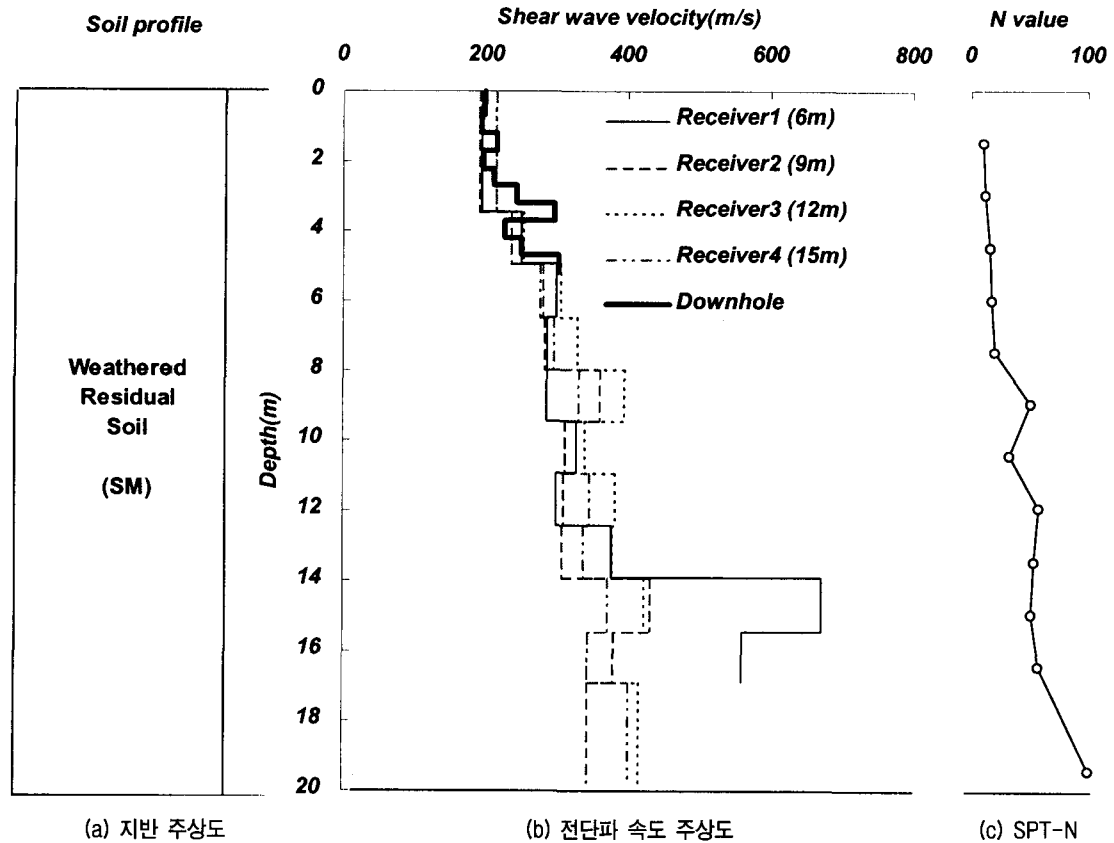


그림 9. 김제 풍화토 현장 업홀 시험 수행 결과 (깊이간 DT법)

유리하다는 것을 알 수 있다. 하지만 감지기의 위치가 시추위치에서 너무 멀면 아무리 굴절 전파 경로를 가정하여 결과를 도출한다고 해도 지층 형태가 이상적이지 않을 경우 결과 도출에 오류가 있을 수 있으므로 감지기의 설치 위치는 시추위치로부터 너무 멀어도 문제가 있다고 본다. 따라서 감지기의 설치 위치는 최종 업홀 시험 심도를 고려하여 결정하는 것이 바람직하다.

획득한 도달시간 정보를 이용하여 깊이간 DT법을 이용하여 도출한 전단파 속도 주상도가 그림 9와 같다. 시험 종료 위치까지 균질한 풍화 잔류토 지반으로써 탄성파 시험을 수행하기에는 아주 이상적인 지반 조건이라 할 수 있다. 전단파 속도 주상도 및 동일 시추공에서 실시한 표준관입시험치 및 동일 시험공에서 실시한 다운홀 시험 결과를 비교하여 나타내었다. 우선 각 감지기별 전단파 속도 주상도가 경향이 일치하고 거의 같은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 깊이별 표준관입시험치와 비교하여 볼 때 심도가 깊어질수록 강성이 증가하는 것을 볼 수 있는데 업홀 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 이들 결과는 제한한 업홀 시험이 실험 방법과 분석 방법에 있어 신뢰성이 있음을 의미한다. 다운홀 시험은 신뢰

성을 높이기 위해 나공에서 시험을 실시하였다. 시험공이 함몰하여 시험 종료 심도가 6m밖에 안 되었지만 해당 심도까지는 업홀 결과와 거의 동일한 것을 볼 수 있다.

그림 10(a)는 가진원부터 감지기까지의 전파 경로가 본 논문에서 제시한 굴절 경로가 아닌 직선경로로 가정하고 획득한 결과를 보여주고 있다. 김제 시험 부지가 전반적으로 강성의 변화가 크지 않은 지반이라 굴절 경로 가정 결과와 직선 경로 가정 결과와 확연한 차이가 보이지는 않지만 직선 경로 가정에 있어 굴절 경로 가정보다 강성이 증가가 두드러지는 9m, 14m 깊이에서 굴절 경로를 가정하여 획득한 전단파 속도보다 더 큰 값을 도출하는 것을 볼 수 있다. 여러 강성 모델을 통해 수행한 영향요소 분석 연구에서 직선 경로 가정을 통해 해석한 결과가 굴절 경로 가정을 통해 해석한 결과보다 강성이 커지는 구간에 대해 실제보다 크게 평가하는 것을 확인한 바 있다(방은석, 2001). 동일한 도달시간 정보를 이용하여 앞에서 제시한 두 가지 분석 방법 중 감지기간 DT법을 이용하여 결과를 도출하여 보았으며 그 결과를 그림 10(b)에 나타내었다. 감지기 2-3간의 결과는 신뢰도가 너무 낮아 그림에서 제외하였다. 그림에서 보면 감

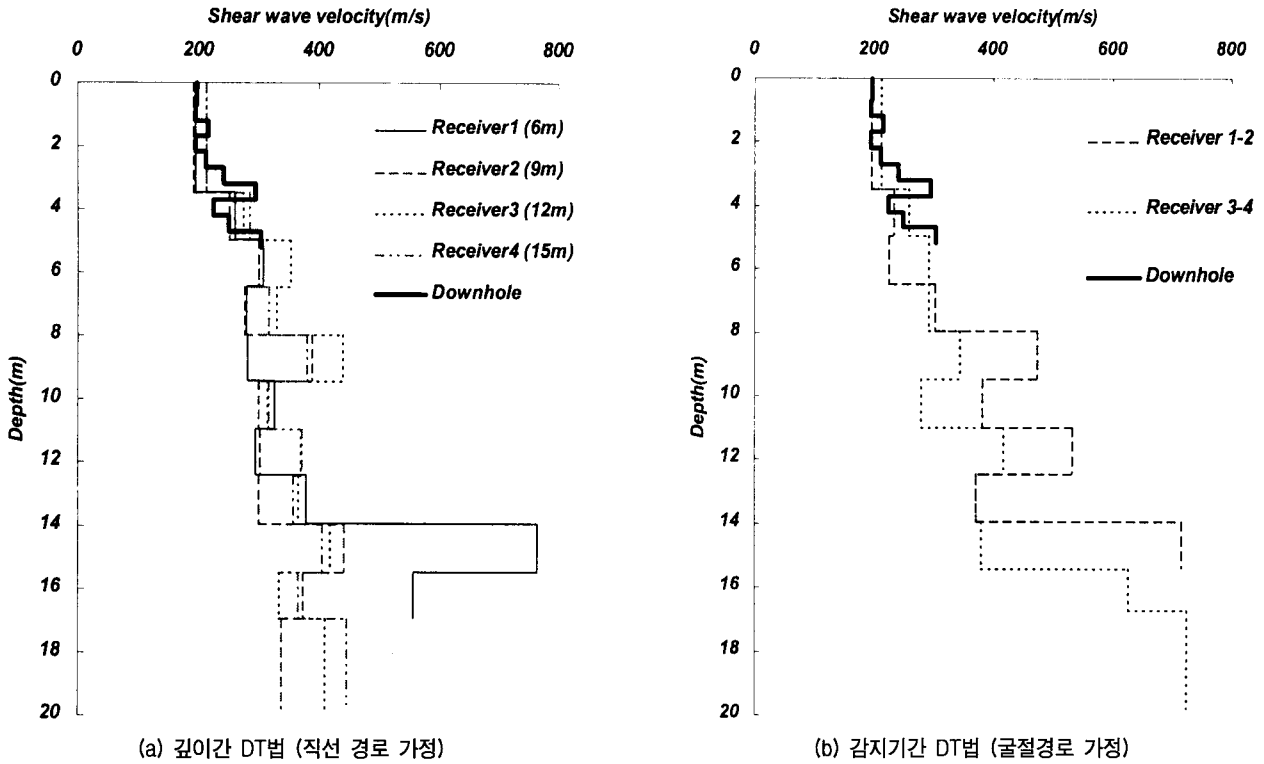


그림 10. 다른 업홀 분석법을 이용한 전단파 속도 주상도의 도출 (김제 풍화토)

지기간 DT법 결과는 서로 다른 감지기를 이용한 결과들이 일치하지 않으며 깊이간 DT법을 이용하여 획득한 결과와도 경향은 비슷하지만 절대값이 다른 것을 볼 수 있다. 업홀시험 분석방법에서 가정한대로 현장의 층상

구조가 강성이 다른 하나의 균질한 층이 수평하게 차례 차례 쌓여 있다고 본다면 감지기간 DT법의 결과와 깊이간 DT법의 결과는 동일하여야 한다. 하지만 일반적으로 현장의 지반은 그렇지 아니하며 이러한 가정과 다를

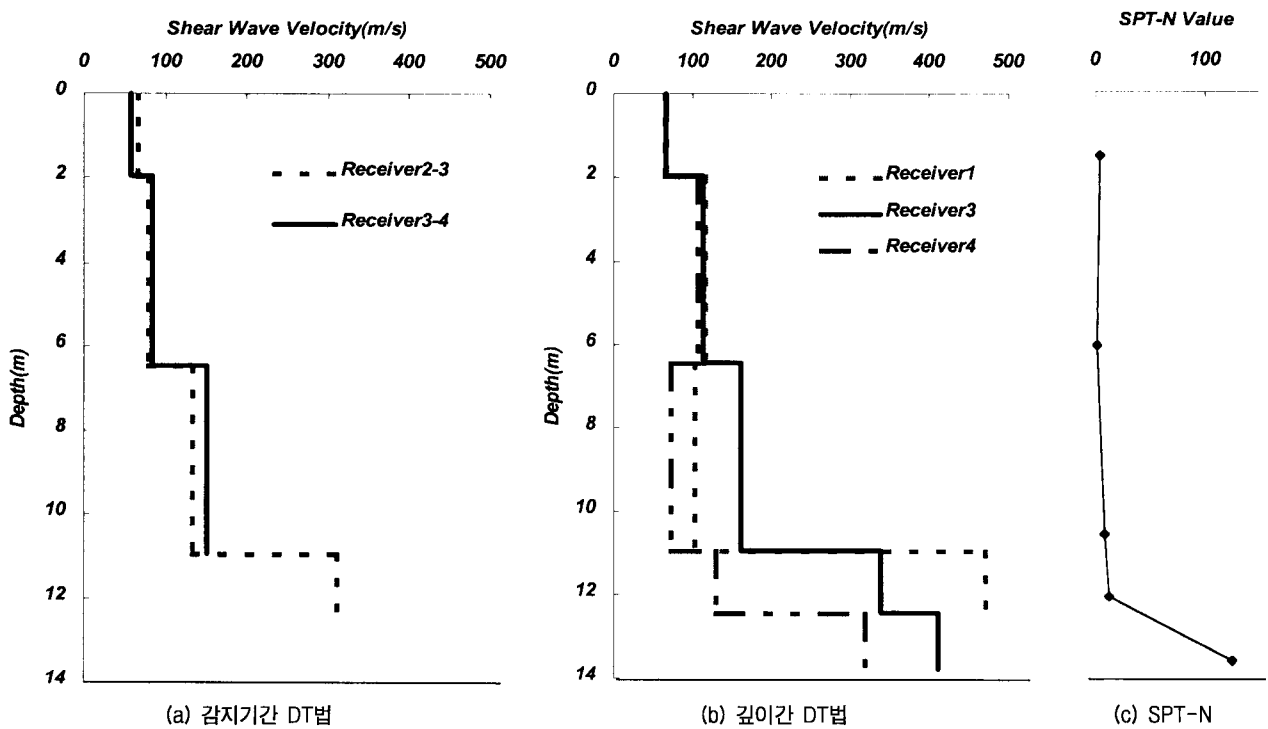


그림 11. 김제 연약 지반 현장의 업홀 시험 수행 결과

경우 감지기간 DT법보다 더 작은 구역을 이용하여 결과를 도출하는 깊이간 DT법이 그 영향을 덜 받기 때문에 층상구조에 있어 수평적 변화가 있는 지반에서 수행한 업홀 시험 결과의 분석은 깊이간 DT법으로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

김제 풍화토 시험 부지에 이웃하여 있는 김제 연약지반 시험 부지에서 동일한 시험 방식으로 업홀 시험을 수행하였다. 이 시험 부지는 표층에 1m 정도의 매립토가 있고 12m까지 거의 SPT 로드 자중에 의해 시료 채취기가 관입될 정도로 연약한 점토층이 존재하며 그 이하에 풍화토가 위치하는 지반이다. 그림 11(c)와 같이 연약층에 있어서의 N치는 0에 가까우며 풍화토의 경우 거의 풍화암에 가까울 정도로 N치가 큰 것을 볼 수 있다. N치가 0인 경우에는 SPT 시험을 수행하지 못하므로 업홀 시험 또한 수행하지 못하였고 결과에서도 나타났듯이 동일 강성을 가진다고 가정된 하나의 층 두께가 SPT 시험 간격과 동일하게 커진 것을 알 수 있다. 김제 연약지반의 업홀 시험을 통해 획득한 전단파 속도 주상도를 살펴보면 김제 풍화토 시험 부지에 비해 전단파 속도의 절대값이 작은 것을 알 수 있으며 풍화토 지반에 가까워

지면서 전단파 속도 값 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 시험부지에서 부지 여건상 다른 탄성과 시험을 수행하지 못하여 업홀에서 측정할 값을 검증할 수는 없었지만 업홀 시험 결과가 지반 층상 구조를 잘 대변하는 결과를 도출한다는 것을 알 수 있다.

3.2 이천 현장

경기도 이천 중부내륙고속도로 현장에서 업홀 시험을 수행하였으며 그 시추공에 대해 시험공을 설치하여 다운홀 시험을 수행하였다. 이천 시험 부지는 2m까지 매립토, 13m까지는 풍화잔류토이며 그 이하는 풍화암이 존재한다. 시추는 15m에서 종료하였고 업홀 시험 또한 15m까지 수행하였다. 감지기는 각각 9m, 12m, 15m에 설치하였으며 결과분석은 깊이간 DT법을 이용하였다.

그림 12(b)에서 보듯이 업홀 시험 결과는 김제 풍화토 시험 부지 결과와 마찬가지로 감지기별로 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 또한 SPT 시험 결과와 동일하게 깊어질수록 점점 전단파 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이천 시험부지에서는 시추를 수행한 뒤 다운홀 시

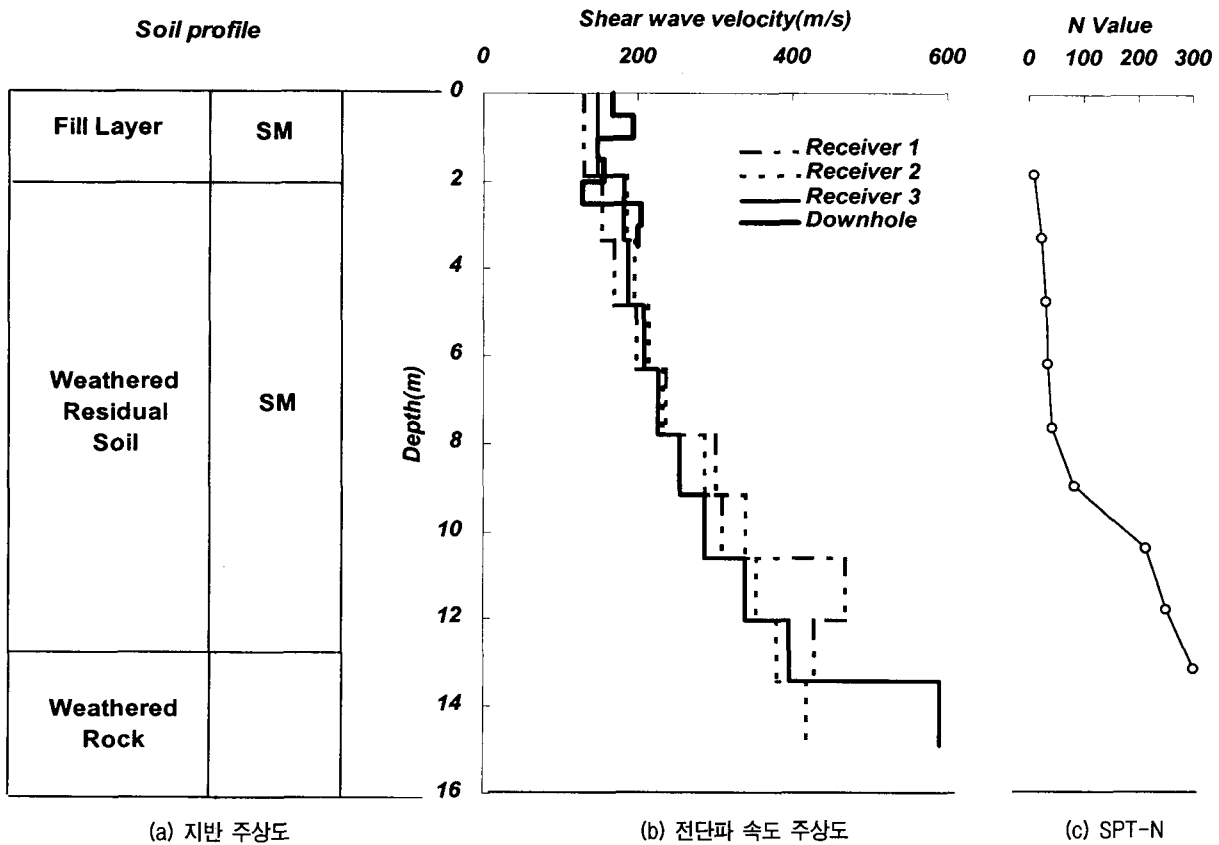


그림 12. 이천 현장 실험 결과

험 수행을 위하여 PVC 파이프를 이용하여 시험공을 설치하였지만 시험공벽과 지반과의 접촉을 위한 그라우팅 작업이 잘 안 되어 결국 3.5m밖에 다운홀 시험을 수행할 수밖에 없었다. 따라서 이천 현장 시험부지에서도 다운홀을 통한 업홀 시험 결과의 검증이 전체 깊이에서 이루어지지 못하였다. 상부층에 대해서만 비교를 해 보면 업홀 시험 결과가 다운홀 시험 결과의 평균적인 값을 도출하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 업홀 시험은 타 공내 탄성과 시험과는 달리 별도의 시험공을 설치할 필요가 없으므로 시험공 설치에 따른 경제적인 문제 및 시험공 설치 성공 여부에 따라 시험의 성공여부가 결정되는 문제를 야기하지 않으므로 무척 경제적이며 간편하다는 것을 알 수 있다.

3.3 광주 현장

그림 13는 광주 OO대교 공사 현장에 대한 업홀 시험 결과이다. 이 시험 부지는 표층의 퇴적층 뿐만 아니라 심도가 30m이상 되는 풍화암 및 연암의 물성치를 획득하여야 하는 것이 목표였다. 이 시험 부지에서는 SASW 시

험 및 SPS-Logging 시험 또한 동시에 수행되었다. 시추지 주변이 약간의 늪지대였으므로 다운홀 시험에 필요한 지표면 가진원을 설치할 수 없었으며 지층 구조상 30m 이하의 깊이까지 가진원이 지중으로 전달되리라 생각되지 않았으므로 다운홀 시험을 수행하지 않았다. SASW 시험 또한 시추지에서 바로 수행하지 못하여 시추지 옆을 지나는 강변 진입로상에서 실시하였다. SPS-Logging 시험은 토층임에도 불구하고 시험공 함몰을 방지하기 위하여 시추시 이용하는 강관을 설치한 상태에서 시험을 수행하였다.

그림 13(b)에 각 탄성과 시험 결과를 비교하여 나타내었다. 우선, SASW 시험 결과와 업홀 시험 결과와는 비교적 동일한 결과를 보이는 것을 볼 수 있다. 지표면에서 SASW 결과와 업홀 시험 결과가 차이가 나는 것은 부지 여건상 SASW 시험을 지표면 다짐이 되어있는 시추지 옆 진입도로에서 수행하였기 때문이라 판단된다. SPS-Logging 시험 결과는 타 시험에 비해 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있고 지반 상태 및 SPT-N치가 비교해 볼 때 전단파 속도가 토층에서는 너무 작게 풍화암층에서는 너무 크게 산정이 되었지 않았나 생각되었다. 이

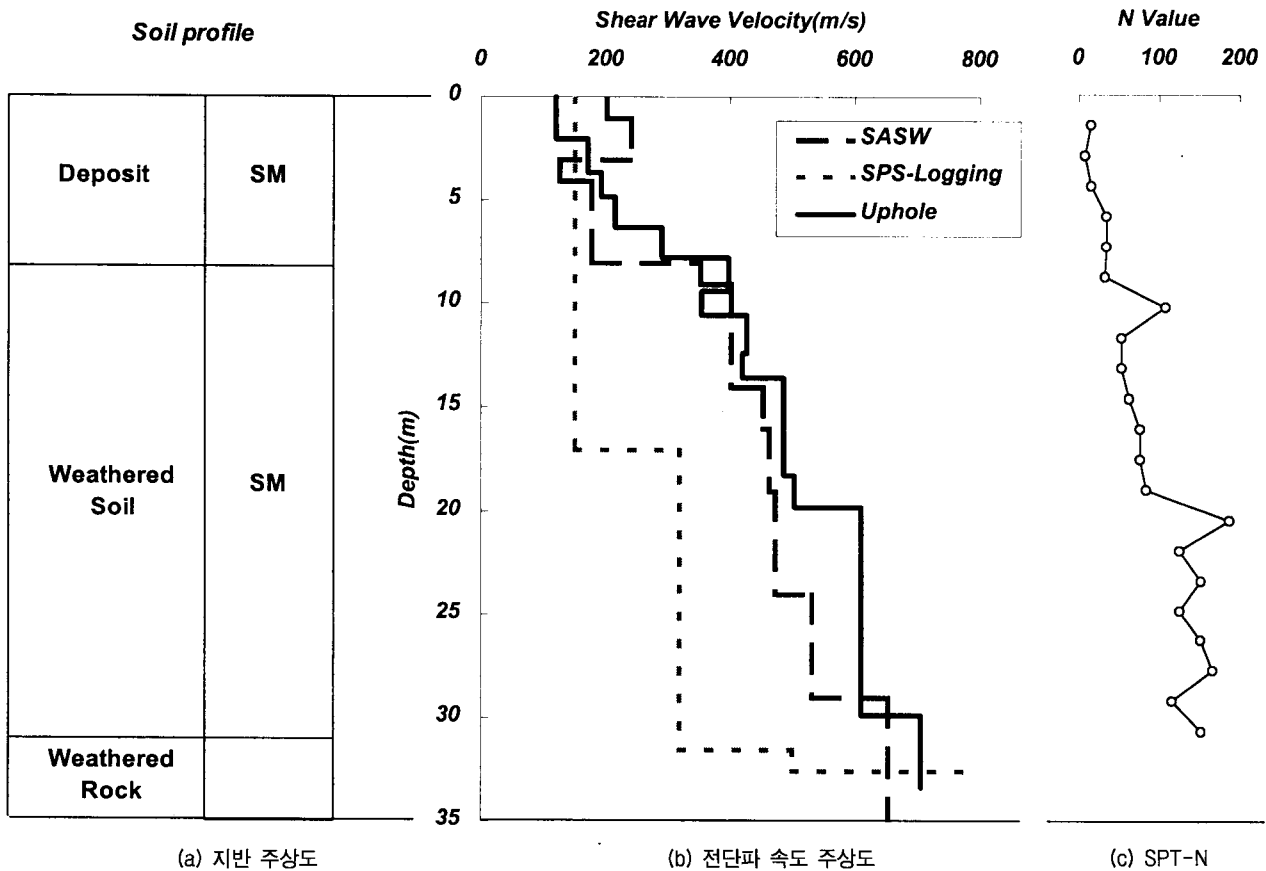


그림 13. 광주 현장 시험 결과

것은 강관을 설치한 상태에서 시험을 수행하였기 때문에 결과 분석시 오류가 있었으리라 판단된다.

광주 현장 실험을 통하여 업홀 시험의 장점에 대해 다시 한번 확인할 수 있었다. 우선, 다운홀 시험의 가장 큰 문제인 지표면 가진원을 사용함으로써 발생하는 시험 깊이의 한계를 극복할 수 있었고 양질의 시험 부지의 확보 문제에 있어서도 SASW 시험 보다는 유리하며 별도의 시험공을 설치할 필요가 없기 때문에 부대적으로 발생하는 여러 가지 문제를 야기하지 않는다. 또한 업홀 시험은 다운홀과 마찬가지로 가진원로부터 감지기까지의 탄성파의 도달시간을 이용하여 직접적으로 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는 방식이므로 다운홀과 유사한 신뢰성을 가지고 있다고 생각된다.

본 논문에서 제안한 업홀 시험의 최대 장점은 바로 표준관입시험과 동시 수행할 수 있다는 것이다. 국내 지반조사에서 시추 및 표준관입시험은 필수 사항이므로 시추비용 외 추가적인 비용 없이 수행할 수 있는 업홀 시험은 타 탄성파에 비해 아주 매력적이라고 생각된다. 또한 가진 에너지가 매우 풍부하여 시험 수행 깊이가 다운홀에 비해 깊으며 전단파 도달 시점이 비교적 명확하여 도달시간 차이의 자동 산출을 통해 업홀 시험 결과 분석의 자동화가 가능하리라 판단된다. 이렇게 된다면 현장에서 별도의 전문가의 동행 없이 시추자들이 시추를 하면서 동시에 업홀 시험을 수행할 수 있게 되어 표준관입시험을 통해서 지반의 강도 정수를 업홀 시험을 통해서 지반의 강성 변화를 알 수 있게 되리라 판단된다. 업홀 시험이 일반화 되어 많은 데이터가 축적이 되면 지반의 강도 정수와 지반의 강성 지수 간의 상관관계를 도출하는데 있어서도 많은 도움이 되리라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 SPT 가진원을 이용한 업홀 시험의 개발, 분석기법의 도출, 그리고 현장 적용을 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 제안된 업홀 시험은 가진원으로 표준관입시험시 타격에너지를 이용하는 것으로 시추와 동시에 시험을 간편히 수행할 수 있어 매우 경제적이다. 또한 지중 가진원을 사용함으로써 다운홀 시험 수행시 문제시 되었던 시험 수행 깊이의 한계를 어느 정도 극복하

였다고 판단된다. 또한 별도의 시험공 설치가 불필요하기 때문에 타 공내 탄성파 시험시 문제시 되었던 그라우팅 및 시험공 함몰로 인한 문제를 야기하지 않는다.

- (2) 업홀 시험의 결과를 분석하기 위하여 시추지와 감지기와의 거리가 멀기 때문에 굴절경로 가정을 통한 감지기간 DT법과 깊이간 DT법을 이용하여 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하다. 하지만 층상구조에서 수평적 변화가 있는 지반에서는 깊이간 DT법이 신뢰성 있는 결과를 도출하는데 더 유리한 것으로 판단된다.
- (3) 시추지로부터 감지기까지의 거리가 너무 가까우면 압축파 성분이 전단파 성분보다 풍부하게 감지되어 전단파 도달 시점 판단에 어려움이 있고 시추지로부터 감지기까지의 거리가 너무 멀면 굴절 경로를 가정한다고 해도 결과 해석시 신뢰성이 떨어질 수가 있으므로 시추위치와 감지기간의 거리는 최종 시험 심도를 고려하여 적절히 결정하여야 한다.
- (4) 현장에서 업홀 시험을 수행하고 시험 결과를 다운홀, SASW 시험 결과 및 SPT N 값과 비교함으로써 업홀 시험의 현장 적용성을 입증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원으로 수행된 것임을 밝히며 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김동수(1997), 진동 및 내진 설계 제2장, 한국지반공학회, pp.55-94.
2. 김동수, 방은석, 목영진, 박상호(2000), "다운홀 시험법의 신뢰성 있는 결과분석을 위한 영향요소 연구", 대한토목공학회논문집, 제20권 제6-C호, pp.485-493.
3. 방은석(2001), "다운홀 및 업홀을 이용한 지반의 전단파 속도 주상도의 도출", 석사학위 논문, 한국과학기술원.
4. Batsila, Evanthia(1995), "Investigation of Ray Path Assumptions on Downhole Velocity Profiles", Master Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
5. Campanella, R. G. and Stewart, W. P.(1992), "Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization", *Can. Geotech. Journal*. Vol.29, pp.477-486.
6. Joh, Sung-Ho, Mok, Young-Jin(1998), "Development of an Inversion Analysis Technique for Downhole Testing and Continuous Seismic CPT", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.14, No.3, June.

(접수일자 2002. 11. 8, 심사완료일 2003. 4. 14)