

## 전단파를 이용한 연약지반의 압밀도 평가기법 적용성 연구 Feasibility study on the Evaluation of the degree of consolidation using shear waves for soft clay deposits

윤준웅<sup>1)</sup>, Jun-Ung Youn, 김종태<sup>2)</sup>, Jong-Tae Kim, 이진선<sup>3)</sup>, Jin-Sun Lee, 김동수<sup>4)</sup>, Dong-Soo Kim

<sup>1)</sup> KAIST 건설및환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering

<sup>2)</sup> KAIST 건설및환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering

<sup>3)</sup> 소방방재청 방재관리본부 사무관, Official, National Emergency Management Agency

<sup>4)</sup> KAIST 건설및환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

**SYNOPSIS** : The evaluation of field degree of consolidation on soft clays has been an important problem in geotechnical areas. Monitoring either settlements or pore water pressures has been widely applied in the field, but occasionally they have some problems. This study addresses the suggestion and application of another method for evaluating the degree of consolidation using shear wave velocities. A research site where soft clay layers were consolidated by surcharging loads was chosen. Laboratory tests were performed to determine the relation between shear wave velocity and effective stress. Field seismic tests were conducted several times during the consolidation of the clay layers. The tests results show that the shear wave velocity increased significantly as clays consolidated. The shear wave velocities at each field stress states were derived from the laboratory results and the degree of consolidation was evaluated by comparing the shear wave velocities obtained by laboratory and field seismic methods. In most stress states, the degree of consolidation evaluated using the shear wave velocity matched well with that obtained from field settlement record, showing the potential of applying the method using shear waves in the evaluation of field degree of consolidation on soft clay deposits.

**Key words** : Consolidation, Shear wave, Bender element testing, Downhole seismic method

### 1. 서 론

연약지반 상부에서의 구조물 축조나, 양호한 부지 확충을 위한 준설매립 등의 문제에 있어서 상부 구조물의 안정성이나 공사일정의 결정 등을 위하여 지반의 압밀도를 신뢰성 있게 평가하는 것이 매우 중요하다. 현재 현장 실무에서 압밀도를 평가하기 위해서는 지표침하판을 이용하여 원지반 지표면의 침하량을 측정하거나, 층별침하계를 이용하여 연약한 점성토층의 심도별 침하량을 측정하는 방법, 또는 간극수압계를 이용하여 성토하중에 의한 간극수압의 증감을 측정하는 방법이 널리 이용되고 있다. 그러나 지표침하판은 연약 점성토층의 전체 깊이에 대한 침하량을 결정하기 때문에 심도에 따른 국부 압밀도를 평가하기 어렵고, 또한 침하판을 설치하게 될 경우 공사중 침하봉 보호 문제 때문에 다짐작업을 힘들게 하여 재하성토 등의 작업성에 있어 어려움을 주게 되는 문제를 가지고 있다. 그리고 간극수압을 이용하는 방법의 경우에도 간극수압계가 적절히 밀봉되지 않았을 경우 간극수압 측정에 있어서 오차가 많이 발생하게 되나, 지반에 밀봉을 유지한 채 간극수압계를 설치하는 것은 매우 어려운 작업이다. 따라서 현

장에서 연약지반의 압밀도를 보다 효율적이고 신뢰성 있게 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하며, 이를 위한 하나의 방안으로 비파괴적인 탄성과 시험을 이용하여 연약 점토층의 전단파 속도를 측정함으로써 압밀도를 평가하는 방법이 이용될 수 있다.

지반은 입자로 구성된 물질이기 때문에 지반의 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )와 전단파 속도( $V_s$ )는 유효응력의 영향을 받으므로, 압밀과정중 유효응력이 증가하게 되면 전단파 속도 또한 증가하게 된다. 전단파 속도를 이용하여 연약지반의 압밀도를 평가하는 방법에 관한 가능성은 오랫동안 연구되어 왔다. Shirley와 Hampton(1978)은 1차 압밀동안 전단파 속도를 관측함으로써, 압밀시간에 따른 전단파 속도의 증가를 관측하였다. Fam과 Santamarina(1997)는 압밀시험기에 전단파의 가진 및 도달의 측정이 가능한 벤더 엘리먼트를 부착하여 점토의 압밀과정중 전단파 속도를 관측하였고, 전단파에 기반한 압밀 평가기법에 대해 연구하였다. Chang과 Cho(2007)는 현장 전단파 속도 측정결과를 실내시험을 통해 평가한 전단파 속도와 비교함으로써 현장점토지반의 압밀상태를 평가하였다. 이와 같이 전단파 속도를 이용하여 연약지반의 압밀도를 평가하는 방법에 관하여 다양한 연구가 수행되어왔으나, 국내외적으로 실제 현장적용을 통한 검증 및 적용사례는 거의 보고되지 않고 있다.

전단파 속도는 지반의 영구적인 교란 없이 평가가 가능한 장점을 가지며, 현재 현장 및 실내 양쪽 모두에서 효율적이고 신뢰성 있게 지반의 전단파 속도를 평가할 수 있는 다양한 기법들이 개발되어 있다. 전단파 속도를 이용한 연약지반의 압밀도 평가방법은 기존 압밀도 평가방법들의 단점을 보완할 수 있는 기법이 될 수 있으므로, 실제 현장적용을 통하여 전단파 속도측정을 이용한 압밀도 평가방법을 검증하고 확립하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 전단파 속도측정을 이용한 연약지반 압밀도 평가기법의 절차를 제안하고, 제안한 방법을 실제 선형재하에 의한 연약지반 개량현장에 적용하여봄으로써 그 적용성을 검증하였다.

## 2 전단파를 이용한 연약지반 개량정도 평가방법

### 2.1 점토의 전단파 속도-유효응력 관계

입자로 구성된 물질의 전단파 속도는 전단파의 전파방향(x)과 극성(polarization)방향(y)의 유효응력에 영향을 받으며, 축응력 성분에 의한 영향을 덜 받으므로, 전파방향과 입자 움직임 방향으로 구성되는 평면에서의 평균유효응력의 향으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Roesler, 1979; Knox 등, 1982; Fam과 Santamarina, 1997).

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_{av}}{1kPa} \right)^\beta = \alpha \left( \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2kPa} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 상수이고,  $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$ 는 각각 전파 방향과 전단 극성방향에서의 유효응력이며,  $\sigma'_{av} = (\sigma'_x + \sigma'_y)/2$ 는 평균유효응력이다.

과압밀 점토의 전단파 속도는 동일 유효응력하의 정규압밀 점토의 전단파 속도보다 큰 값을 나타내며, 식 (2)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_{av}}{1kPa} \right)^\beta OCR^n \quad (2)$$

여기서, OCR은 과압밀비이고, n은 상수이다(Viggiani & Atkinson, 1995).

## 2.2 전단파를 이용한 연약지반 개량효과 평가방법

재하성토 등에 의한 점토지반의 응력증가시, 초기에는 과잉간극수압이 발현되고, 시간이 경과함에 따라 압밀이 진행되면서 과잉간극수압이 소산되고 유효응력이 증가하게 되면, 전단파 속도 역시 증가하게 된다. 따라서, 압밀 과정중 전단파 속도를 측정함으로써 지반의 유효응력 증가정도, 곧 압밀도를 평가하는 것이 가능하다.

### 2.2.2 현장탄성과 시험

현장에서의 전단파 속도 주상도를 획득하기 위한 다양한 현장탄성과 시험기법이 개발되어 적용되고 있다. 본 연구에서는 효율적이고 신뢰성 있게 현장점토지반의 전단파 속도 주상도를 획득하기 위하여, 관입형 콘모양 감지기를 이용한 다운홀 시험(DH)을 수행하였다. 연직배수재가 설치되어 점토지반이 횡방향으로 압밀이 진행되는 경우에도, 다운홀 시험으로 측정된 전단파 속도는 상대적으로 긴 파장 및 긴 전과거리를 가지므로 횡방향의 평균 전단파 속도를 평가할 수 있는 장점을 가진다.

### 2.2.2 실내 시험

실내에서 지반의 유효응력과 전단파 속도의 상관관계를 획득하기 위하여, 공진주 시험(RC)이 널리 이용되어왔다. 최근에는 전단파의 가진 및 도달의 측정이 가능한 벤더엘리먼트를 설치함으로써 압밀과정중 전단파 속도의 측정이 가능한 압밀시험장비가 이용되고 있다. 본 연구에서는, 벤더엘리먼트가 수직방향으로 설치된 공진주 시험장비 및 압밀 시험장비를 이용하여 유효응력과 전단파 속도의 상관관계를 평가하였다.

### 2.2.3 평가방법

실내 및 현장 탄성과 시험 결과의 비교시, 각 시험방법에서 전단파의 전파방향 및 극성방향이 고려되어야 한다. 본 연구에서 수행된 모든 실내 및 현장 탄성과 시험의 경우, 전단파의 전파 및 극성방향은 각각 수직과 수평방향이므로, 식 (1)은 식 (3)으로 나타내어 질 수 있다..

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2kPa} \right)^\beta = \alpha \left( \frac{(1 + K_0)\sigma'_v}{2kPa} \right)^\beta \quad (3)$$

여기서,  $\sigma'_v$ ,  $\sigma'_h$ 는 각각 수직 및 수평유효응력이며,  $K_0 = \sigma'_h/\sigma'_v$ 는 정지토압계수이다.

점토지반의 유효응력이  $\Delta\sigma'_v$ 만큼 증가된 경우의 전단파 속도는 식 (4)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$V_s = \alpha \left( \frac{(1 + K_0)(\sigma'_v + \Delta\sigma'_v)}{2kPa} \right)^\beta \quad (4)$$

현장 탄성과 시험을 수행하여 전단파 속도를 측정하고 식 (4)를 적용함으로써 현재 유효응력의 증가량을 평가할 수 있으며, 식 (5)를 이용하여 압밀도를 평가하는 것이 가능하다.

$$U = 1 - \frac{\Delta u}{u_0} = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\sigma'_{v,f}} \quad (5)$$

여기서, U는 압밀도이고,  $\Delta\sigma'_{v,f}$ 는 재하성토에 의한 최종 유효응력 증가량이다.

이때, 실내시험으로 압밀시험장비를 이용하는 경우 점토의 압밀은  $K_0$  압밀이며, 이 경우 실내 및 현

장의  $K_0$  값이 동일하다고 가정한다면, 증가된 전단파 속도는  $K_0$  값을 제외하고 식 (6)을 이용하여 평가할 수 있고, 곧 식 (5)를 이용하여 압밀도의 평가가 가능하다.

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{1kPa} \right)^\beta \quad (6)$$

### 3 현장적용사례

전단파 속도를 이용한 연약점토지반의 압밀도 평가기법의 적용성을 확인하기 위하여, 부산신항만 북 컨테이너 터미널 축조공사 부지에서 사례연구를 수행하였다.

#### 3.1 연구현장개요

##### 3.1.1 현장지반조건 및 지반개량계획

연구현장의 지반주상도를 그림 1에 나타내었다. 최상부에 고소성 점토층(CH)이 21 m 가량 존재하며, 그 하부에 저소성 점토층(CL)이 20 m 정도 위치하고 있다. 그 하부에는 비교적 단단한 실트층, 모래 및 자갈, 연암층층이 존재하고 있다. SPT-N치 8 미만인 상부 40m 가량에 위치한 CH 및 CL 층이 지반개량 대상지반에 해당한다.

대상현장은 선행하중공법 및 PBD(Plast Board Drain) 공법을 이용하여 지반을 개량하도록 계획되었으며, 개략적인 시공절차는 다음과 같다. 약 5m의 두께의 샌드매트(sand mat)를 포설한 후, PBD를 1.2 m×1.2 m의 간격으로 CL층 하부까지 40 m 가량 관입시킨다. PBD 관입 후, 모래를 이용하여 대략 9개월 동안 3단계에 걸쳐 재하성토하며, 9개월 정도 방치하여 연약점토층을 개량한 후 제거하게 된다.

샌드매트 포설 후 재하성토 전에 침하량 계측을 위한 층별침하계가 설치되었다. 대상지역은 약 400 m×400 m 지역이 재하성토 되므로, 하부지반의 1차원 응력증가를 가정할 수 있다.

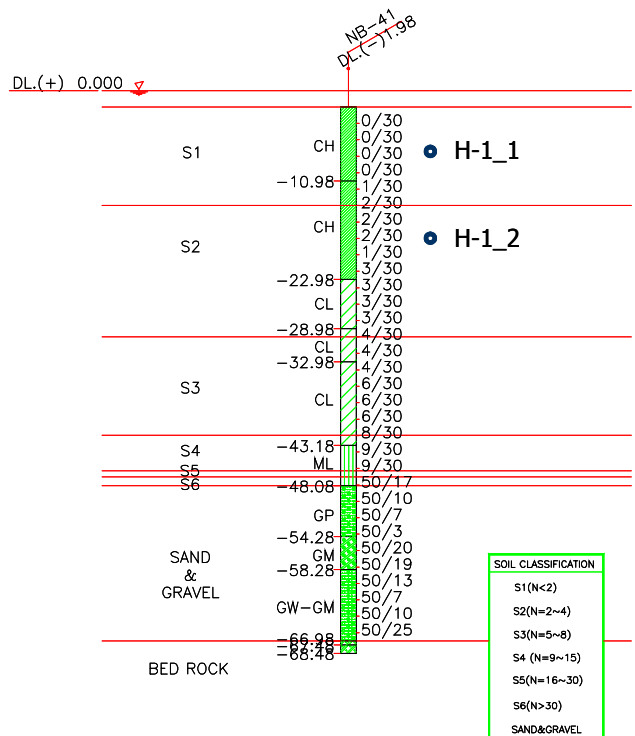


그림 1. 연구현장의 지반조건

##### 3.1.2 시추 및 비교란 시료의 채취

샌드매트 포설 후, 비교란 시료 채취를 위하여 DL-23m까지 26m 가량 추가시추를 수행하였다. 그림 1에 나타낸 바와 같이, 상부 고소성 점토층에서 H1-1 (DL-7.4 m) 및 H1-2 (DL-18.4 m), 2개의 비교란 시료를 채취하였다.

#### 3.2 실내시험

2개의 비교란 시료에 대한 유효응력과 전단파 속도의 상관관계를 산정하기 위하여, 공진주 시험(RC) 및 압밀 시험(OE)을 수행하였다. 두 시험장비 모두 상부캡 및 하부 좌대에 벤더엘리먼트를 부착하여 벤

더엘리먼트 시험(BE)을 병행하여 수행하였다. 각 시료의 현장 재하성토시 겪는 유효응력 범위를 포함하도록 응력단계를 선정하여 시험을 수행하였다.

### 3.2.1 공진주 시험

H1-1 시료의 경우 공진주 시험장비를 이용하여 시험을 수행하였으며, 시험조건을 표 1에 나타내었다. 그림 2는 하나의 하중재하 단계에서 대수 시간에 따른 시편의 높이변화 및 전단파 속도 측정결과를 나타낸 일례이다. BE 시험으로 평가된 전단파 속도는 RC 시험으로 평가된 전단파 속도에 비하여 절대값이 조금 크게 나타났으나, 두 결과는 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 차이는 하중주파수의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 그림 2에 표시한 바와 같이, 시편의 높이변화 측정결과로부터 각 하중단계에서의 1차압밀 완료시점이 결정되었다. 1차압밀 종료 후에도 전단파 속도가 계속 증가하는 것을 볼 수 있으며, 시험시료가 고소성 점토이기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 각 하중재하단계에서의 전단파 속도를 1차압밀 완료시의 전단파 속도값으로 채택하였다.

그림 3은 각 하중단계에서 평균유효응력과 1차압밀 종료시의 전단파 속도의 관계를 나타낸 것이다. H1-1 시료에 대한 시험결과에 식 (3)을 적용할 경우  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 23.9와 0.39의 값을 갖는 것으로 평가되었다.

표 1. H1-1 시료의 시험조건

깊이 (DL, m)	시험	현장응력( $\sigma_{av}$ ), kPa		시험 평균유효응력, kPa
		원지반	최종재하성토	
-7.4	LARC, BE	35	195	25/50/100/200

\* LARC : 저변형률 공진주 시험 (Low amplitude resonant column test)

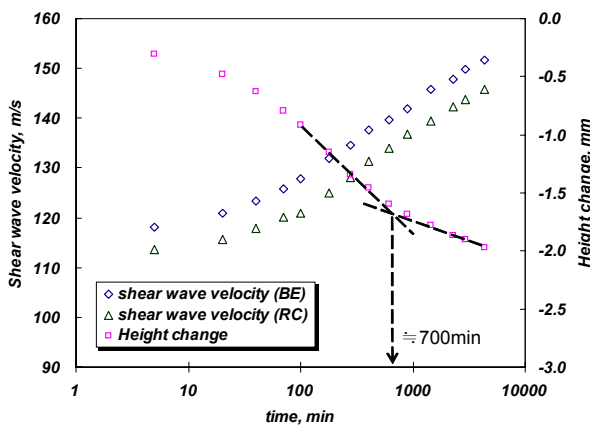


그림 2. 압밀중 시편높이 및 전단파 속도 변화 측정일례 (H1-1 시료: 50 → 100 kPa)

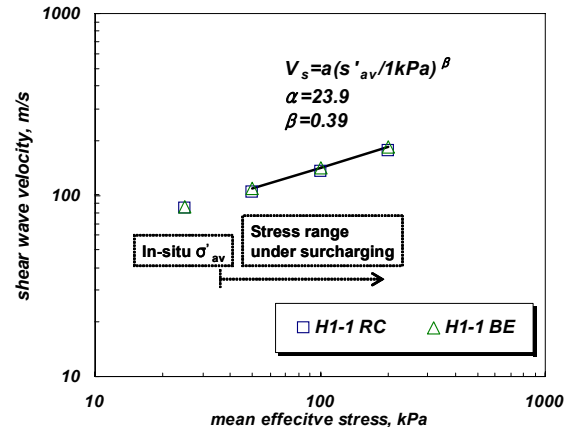


그림 3. 평균유효응력에 따른 1차압밀 종료시의 전단파 속도 변화 (H1-1 시료)

### 3.2.2 압밀 시험

H1-2 시료는 압밀시험장비를 이용하여 시험을 수행하였으며, 시험조건을 표 2에 나타내었다. 그림 4는 각 응력단계에서 1차압밀 완료시의 전단파 속도를 수직유효응력에 따라 나타낸 것이다. 수직유효응력과 전단파 속도의 관계가 비선형성을 나타내었으며, 100 kPa 이하에서의 낮은 기울기를 갖는 측정결과는 시료의 샘플링 과정 중 응력해방에 의한 과압밀의 영향으로 판단된다. 본 연구에서는 재하성토에 의한 점토의 전단파 속도 증가를 평가하는 것이 목적이므로, 그림 4에 표시한 바와 같이 165 kPa 이상의 응력단계의 결과를 이용하였으며, 식 (6)을 적용할 경우  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 5.7과 0.59의 값을 갖는 것으로 평가되었다.

표 2. H1-2 시료의 시험조건

깊이 (DL, m)	시험	현장응력( $\sigma_v$ ), kPa		시험 수직유효응력, kPa
		원지반	최종재하성도	
-18.4	Oedo.w/ BE	125	340	10/35/100/165/200/272/368/604

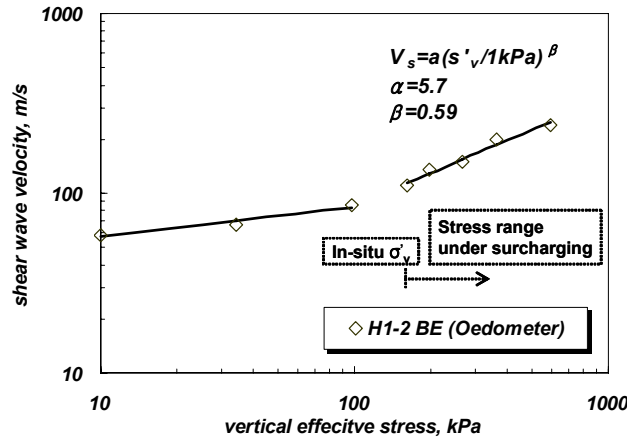


그림 4. 수직유효응력에 따른 1차압밀 종료시의 전단파 속도와 속도 변화 (H1-2 시료)

### 3.3 현장탄성과 시험

대상지반의 개량과정 중 현장에서 전단파 속도와 속도 변화를 측정하기 위하여, 다운홀 시험(DH)을 총 5회 수행하였다. 현장의 재하성도에 따른 다운홀 시험 수행 이력 및 시추공 H1 인근에 설치된 층별침하계의 침하량 측정결과를 그림 5에 나타내었다.

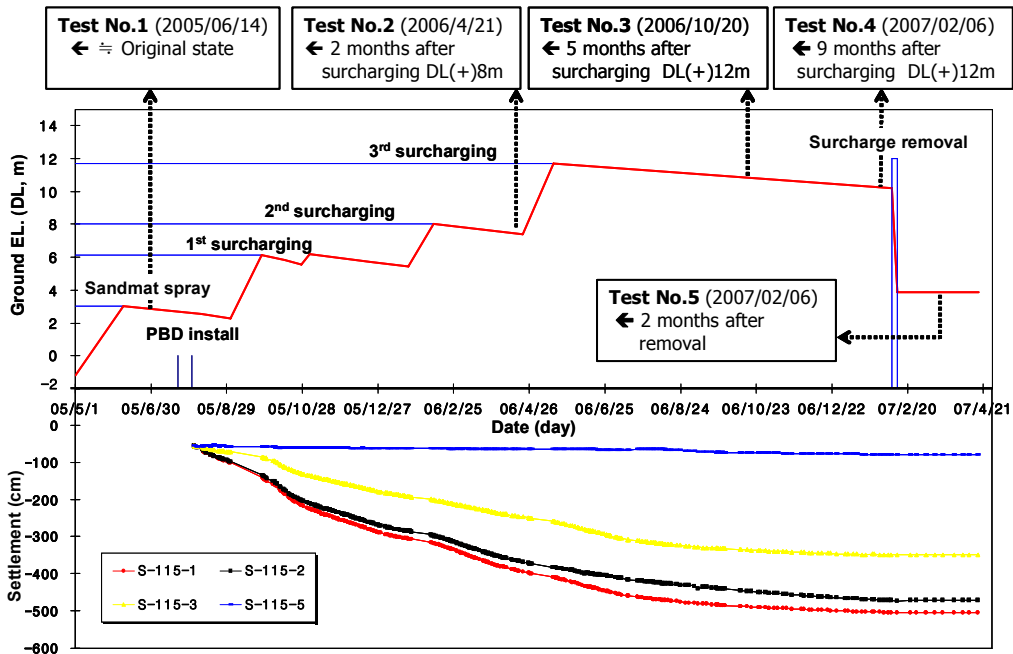
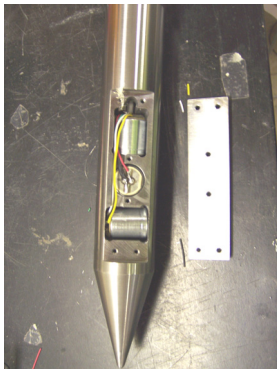


그림 5. 성토, 침하이력 및 다운홀 시험 수행이력

추가시추공 H1에 PVC 케이싱을 설치하여 1차 다운홀 시험을 수행하였다. 비록 5 m의 샌드매트가

포설되었으나, PBD 설치 이전에는 압밀이 거의 진행되지 않을 것으로 판단되므로 1차 시험은 원지반상태의 전단파 속도를 나타낼 것으로 판단된다.

다운홀 시험시 점토지반과 PVC 케이싱의 접촉문제 및 압밀 과정중 PVC 케이싱의 파괴 등의 문제를 해결하기 위하여 콘모양의 관입형 감지기를 제작하였으며(그림 6(a)), 2, 3, 4, 5차 다운홀 시험은 제작된 감지기와 콘관입장비를 이용하여 H1 시추공 근처에서 시험을 수행하였다(그림 6(b)). 그림 7은 콘모양 관입형 감지기를 이용하여 다운홀 시험시 획득한 깊이별 신호를 보여준다. 관입형 감지기 시스템을 이용시 17 m 가량의 재하성토 상부모래를 포함하여 약 40 m 깊이까지 전단파 도달신호를 획득할 수 있었다. 그림 7에서 점토층에서 전파되는 전단파는 대략 50 Hz의 주파수를 가지고, 곧 점토지반에서의 전단파는 대략 4 m의 파장을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, PBD 간격 1.2m를 고려시, DH 시험으로부터 평가된 전단파 속도는 PBD로부터의 횡방향 거리에 따른 압밀차이의 평균값을 반영한 평균 전단파 속도를 가질 것으로 판단된다. 그림 7의 획득신호로부터 전단파 속도를 평가시 객관성을 위하여 도달시간은 상호상관법(cross-correlation method)을 적용하여 결정하였고, 결정된 도달시간을 이용하여 평균 굴절경로법(MRM, mean refracted ray path method)을 적용하여 전단파 속도 추상도를 도출하였다. 평균굴절경로법의 경우, 도달시간 측정오차와 지층구분을 자동적으로 고려함으로써 객관적이고 신뢰성 있는 전단파 속도 추상도의 도출이 가능하다(Bang과 Kim, 2007).



a) 관입형 콘모양 3방향 감지기



(b) 다운홀 시험 수행 장면

그림 6. 다운홀 시험 수행 모습

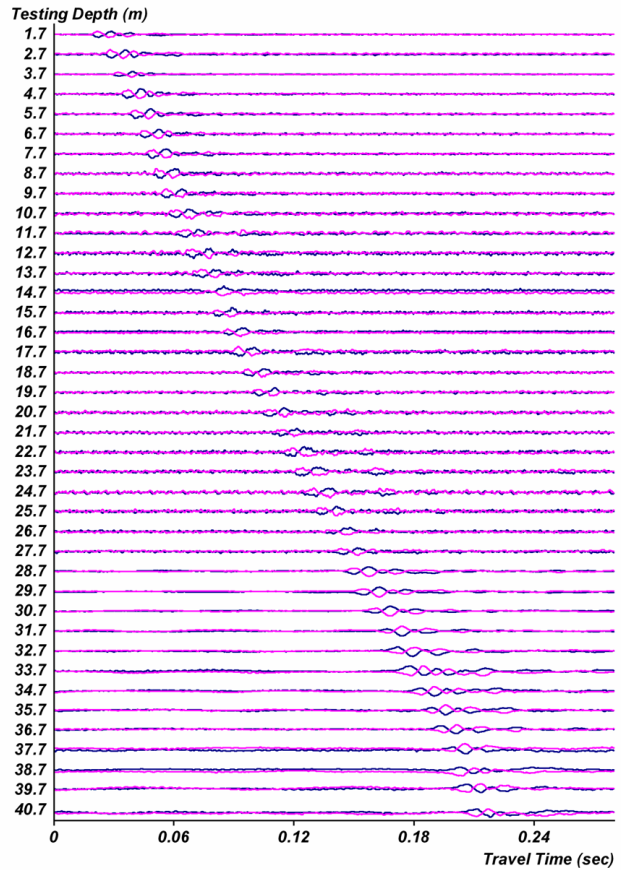


그림 7. 다운홀 시험시 획득한 깊이별 신호- 4차 시험

총 5회의 다운홀 시험을 통하여 산정한 전단파 속도 추상도를 그림 8에 함께 도시하였다. 모든 시험 결과에서 샌드매트와 원지반 점토층의 경계가 명확하게 나타났으며, 이는 침하계측결과로부터 계산된 경계와 잘 일치하였다. 또한, 재하성토에 의한 압밀과정중 대상점토지반의 전단파 속도가 확연히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 재하성토의 제거 후에 전단파 속도가 조금 감소하는 것으로 나타났다. 각 시험에

서 평가된 깊이별 전단파 속도의 경향으로부터 상부 20m의 대상점토층은 크게 3개의 하위층(sub-layers)으로 구분되는 것으로 판단된다.

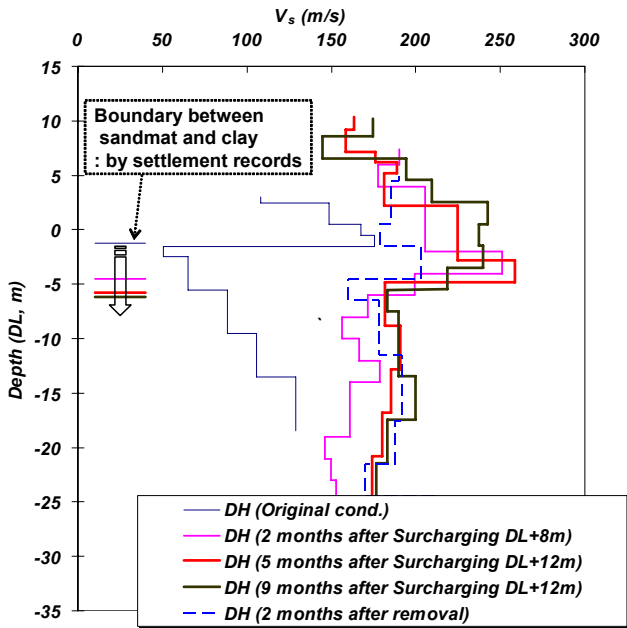


그림 8. 지반개량 과정 중 수행된 다운홀 시험결과

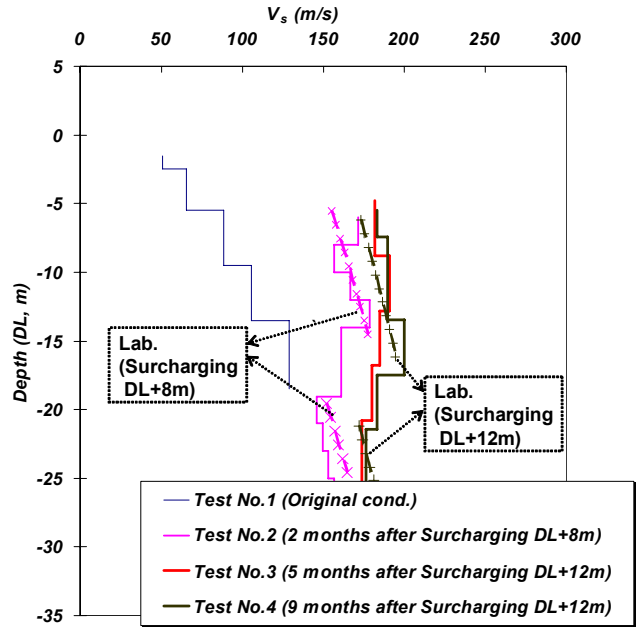


그림 9. 실내 및 현장 전단파 속도 결과의 비교

## 4 결과분석 및 고찰

### 4.1 현장 전단파 속도와 실내 전단파 속도의 비교

그림 8의 다운홀 시험결과 중 모래층의 전단파 속도결과를 제외하고 점토층의 전단파 속도만을 그림 9에 나타내었으며, 실내시험결과로부터 DL+ 8m 및 DL+ 12m의 2가지 재하성토하중조건을 적용하여 예측한 전단파 속도를 함께 도시하였다. 약 10m 두께의 상부층의 경우 H1-1시료(초기 깊이 : DL-7.4m)로부터 평가된  $\alpha$ 와  $\beta$ 값을 식 (4)에 적용하여 전단파 속도를 산정하였으며, 그림 9에 상부의 점선으로 표시하였다. 이때, H1-1 시료의  $K_0$  값은 0.52로 가정되었다(Ting 등, 1994). H1-2 시료(초기 깊이 : DL-18.4m)로부터 평가된  $\alpha$ 와  $\beta$ 값을 식 (6)에 적용한 결과를 약 5 m 두께의 최하단 층에 적용하였으며, 그 결과를 그림 9의 하부 점선으로 도시하였다. 대상 점토층에서 시료를 보다 촘촘히 채취할 경우, 이러한 층구분을 보다 명확히 할 수 있을 것으로 판단된다.

H1-1 시료의 결과를 이용한 경우(상부 2개의 점선), 다운홀 시험을 수행하여 평가한 전단파 속도는 두 가지 재하성토하중 조건 모두에서 실내시험으로부터 예측된 전단파 속도와 유사한 값을 나타내었다. 따라서, 각각의 다운홀 시험이 수행된 시점에서 각 재하하중에 의한 점토지반의 1차압밀이 거의 완료된 것으로 판단된다. H1-2 시료의 결과를 이용한 경우(하부 2개의 점선), DL+ 12m의 재하성토 후 수행된 3차 및 4차의 다운홀 시험결과로부터는 1차압밀 거의 완료된 것으로 나타났으며, DL+9m 재하성토 후 실시된 2차 시험 수행시에는 점토지반의 압밀이 진행중인 것으로 판단된다.

### 4.2 압밀도 산정 및 비교

표 3과 4는 전단파 속도를 이용하여 산정한 압밀도 결과를 보여준다. 이 때, 등방압밀조건인 공진주 시험장비를 이용한 H1-1 시료의 경우 식 (4)와 식 (5)를 적용하였으며,  $K_0$  압밀조건인 압밀 시험장비를



이용한 H1-2 시료의 경우 식 (6)과 식 (5)를 적용하였다. H1-2 시료결과 - 3차 다운홀 시험 조합의 경우를 제외하면 전단과 속도를 이용하여 산정한 압밀도는 모두 95% 이상으로 나타났다. 곧, 각 다운홀 시험이 수행된 시점에서 각 성토하중에 의한 1차압밀이 거의 완료된 것으로 평가되었다.

표 3. 전단과 속도로부터 산정된 압밀도 (H1-1 시료)

시험번호	$V_s$ (m/s)	$\Delta\sigma_{av}$ (kPa)	$\Delta\sigma_{av,f}$ (kPa)	U (%)
Test No. 3	168	114	115	99
Test No. 4	184	153	161	95
Test No. 5	192	174	161	109

표 4. 전단과 속도로부터 산정된 압밀도 (H1-2 시료)

시험번호	$V_s$ (m/s)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\Delta\sigma_{v,f}$ (kPa)	U (%)
Test No. 3	150	129	151	86
Test No. 4	174	203	211	96
Test No. 5	176	211	211	100

전단과 속도를 이용한 압밀도 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여, 침하량 측정결과를 이용하여 압밀도를 평가하였다. 쌍곡선법(Tan 등, 1991),  $\sqrt{S}$ 법 (정성교 등, 1998)과 Asaoka 법(Asaoka, 1978)의 침하 예측기법들로부터 최종침하량  $S_f$ 를 평가하고, 식 (7)을 이용하여 압밀도를 산정하였으며 그 결과를 표 5에 나타내었다. 3차 시험수행 시의 침하량을 이용한 경우에는, 재하성토 후 침하계측기간이 길지 않아 최종침하량 산정시  $\sqrt{S}$ 법만 적용되었다. 이오의 경우, 세 가지 방법에 의한 압밀도는 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다..

$$U = \frac{S}{S_f} \quad (7)$$

표 5. 침하량으로부터 산정된 압밀도

시험번호	S (cm)	$S_f$ (cm)			U (%)		
		hyp.	$\sqrt{S}$	Asa.	hyp.	$\sqrt{S}$	Asa.
No. 3	394	-	463	-	-	85	-
No. 4	449	510	501	507	88	90	89
No. 5	504	510	501	507	99	100	99

\* hyp.=쌍곡선법(hyperbolic method); Asa.=Asaoka method.

그림 10에 침하계측결과로부터  $\sqrt{S}$ 법을 이용하여 평가한 압밀도와 전단과 속도를 이용하여 평가한 압밀도를 비교하여 나타내었다. 전단과 속도로부터 평가된 압밀도가 침하량을 이용한 압밀도에 비해 조금 큰 값을 나타내나, 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 전단과 속도와 유효응력의 관계는 1차압밀 완료시의 전단과 속도를 이용하여 평가되었으나, 침하량 예측기법에 의해 평가된 최종침하량의 경우 2차압밀에 의한 침하량이 포함되기 때문으로 판단된다.

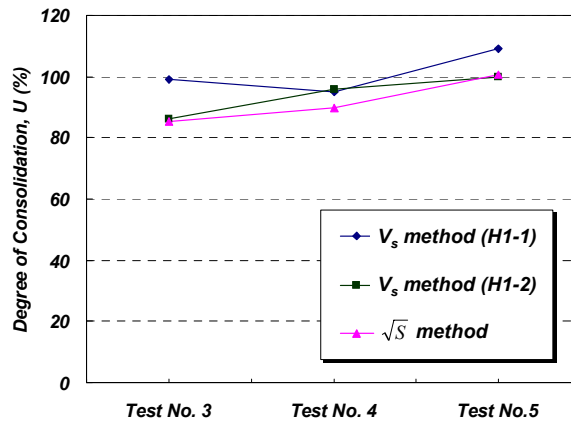


그림 10. 침하량 및 전단파 속도로 평가된 압밀도의 비교

## 5. 결론

전단파 속도를 이용한 연약지반의 압밀도 평가기법을 제안하였으며, 대상현장을 선정하여 적용하여 봄으로써 그 적용성을 평가하였다. 실제 대상현장에서 재하성토 후 압밀과정중 수행된 일련의 다운홀 시험결과들은 압밀이 진행됨에 따라 점토지반의 전단파 속도가 명확하게 증가하는 보여주었다. 또한, 이를 원지반 점토의 실내압밀시험으로부터 산정한 유효응력-전단파 속도 관계를 이용하여 예측한 결과와 비교함으로써 점토지반의 압밀도를 산정하였다. 전단파 속도를 이용하여 평가한 압밀도는 현장 침하계 측정결과로부터 구해진 압밀도와 잘 일치하였으며, 따라서 제안된 전단파 속도를 이용한 압밀도 평가방법의 타당성 및 실제 적용성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 정성교, 최관희, 최호광, 조기영, "압밀해석을 위한  $\sqrt{s}$ -예측기법," 한국지반공학회 논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 41-52.
2. Asaoka, A., (1978), "Observation Procedure of Settlement Prediction", Soil and Foundation, Vol.18, No.4, pp. 87-101.
3. Eun-Seok Bang and Dong-Soo Kim, "Improvement of Data Interpretation Method for Downhole Seismic Method", Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, 2007. 6 .
4. Fam, M. and Santamarina, J. C., (1979). "A Study of Consolidation using Mechanical and Electromagnetic Waves", Geotechnique, Vol. 47, No. 2, pp. 203~219.
5. Ilhan Chang and Cye-Chun Cho (2007) "A Laboratory Procedure to Characterize Reclaimed Clay Deposits using Shear Wave", Geotechnical special publication, No. 164, pp. 29-37.
6. Knox DP, Stokoe KH, Kopperman SE (1982) "Effect of state of Stress on Velocity of Low-amplitude Shear Wave Propagating along Principal Stress directions in Dry Sand.
7. Rosler, S. K. (1979) "Anisotropic Shear Modulus Due to Stress Anisotropy", Geotechnical Engrg. Div., Vol. 105, No.7, pp. 871-880.
8. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001) Soils and Waves-Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley and Sons, New York.
9. Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978) "Shear-wave measurement in laboratory sediments", J. Acoust. Soc. Am, Vol. 63, No. 2, pp. 607~613.
10. Tan, T. S., Inoue, T., and Lee, S.L. (1991), "Hyperbolic Method for Consolidation Analysis", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 11, pp. 1723-1737.
11. Ting, C. M. R., Sills, G. C. and Wijeyesekera, D. C.,(1994)."Development of  $K_0$  in Soft Soils". Geotechnique. Vol. 44 (1), pp.101-109.
12. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995) "Stiffness of Fine-grained Soils at Very Small Strain", Geotechnique, Vol. 45, No. 2, pp. 249-265.