

건 전 도 시 험

- 목 차 -

1. 서 론

2. 저변형을 말뚝 건전도시험(Low Strain Pile Integrity Test)

2.1 기본이론

2.2 측정장치

2.3 시험방법 및 유의사항

3. 시험결과의 해석

3.1 Sonic Pulse Echo Method(SPEM)

3.2 Transient Response Method(TRM)

4. 시험결과 분석 Program

4.1 PITWAP

4.2 PITSTOP

5. PIT 시험의 제한사항

1. 서 론

관입깊이에 따른 지반의 특성 변화와 시공기술의 차이 등에 기인한 여러 가지 불확실성 때문에 말뚝의 지지력과 건전도의 예측은 매우 어려운 문제이며 말뚝의 정적재하 시험만이 이에 대한 측정방법으로 간주되어 왔으나 시간과 비용이 많이 소요되는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 약 25 년 전부터 비파괴 건전도시험이 유럽에서 시작되었으며 주로 사용자의 경험적인 데이터에 기초한 방법을 사용하였다. Steinbach & Vey(1975)가 케이슨과 말뚝의 불완전성을 추적하기 위해 응력과 전파 방법에 대해 연구를 수행한 이래로 이 방법이 만족스러운 결과를 이끌어 낸다는 것이 많은 사람들에게 의해서 증명되어 왔다. 이러한 말뚝의 건전도시험은 저변형률(low strain) 파동을 이용한 비파괴 시험으로 발전하였다. 그중 PIT(Pile Integrity Test)는 가벼운 망치로 충격을 가하여 말뚝두부에서 측정된 파의 특성을 분석하여 말뚝의 길이와 형상을 추정하는 방법이다. 비록 이 시험법은 지지력을 산정할 수는 없지만 말뚝의 지지력에 영향을 줄 수 있는 균열이나 결함 등의 구조적 문제를 예측 할 수 있게 한다. 이 시험으로부터 구조적인 결함이 있는 것으로 추정된 말뚝에 대해서는 고변형률(high strain)의 PDA(Pile Driving Analyzer) 시험이나 정적재하 시험을 통해 재확인하는 것이 바람직하다.

PC 나 PHC 콘크리트 말뚝은 강관 말뚝과는 달리 인장에 약하며 항타에 의한 지반관입시 과다한 힘 또는 압축응력등에 의한 손상이 생길 가능성이 상당히 높다. 또한 현장타설 말뚝의 경우 시공기술의 숙련도에 따라 품질이 좌우되므로 엄격한 품질관리가 요구되며, 이의 관리방법으로는 시간도 적게 걸리고 간단한 시험으로 많은 정보를 얻을 수 있는 PIT 가 경제적인 방법이라 할 수 있겠다.

2. 저변형률 말뚝 건전도시험(Low Strain Pile Integrity Test)

2.1 기본이론

저변형률 건전도시험(low strain integrity test)은 선형일차원 파동방정식(linear one dimensional wave equation)을 사용하여 말뚝의 손상여부를 추정하는 방법이다.

말뚝두부에 어떤 충격(impact)이 가해지면, 이 충격은 말뚝표면의 순간압축과 입자운동을 발생시킨다. 순간압축에 의한 힘으로부터 발생한 응력파는 콘크리트 말뚝인 경우 대략 3,500~4,000m/sec 의 속도를 갖는다. 이 응력파속도(c)는 말뚝 재질과 관계된 것으로 재질이 균일하다면 일정한 값을 가지며 다음 식(2.1)과 같이 표현된다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

여기서, c : 응력파 속도(stress wave propagation velocity)

E : 말뚝의 탄성계수(elastic modulus of pile)

ρ : 말뚝의 밀도(density of pile)

또한 지반 저항 효과가 없다면 말뚝두부에서의 응력파의 변화는 말뚝 임피던스(impedance) 변화에 의한 영향이며, 말뚝재질이 같을 경우 이는 단면적의 변화에 의존한다.

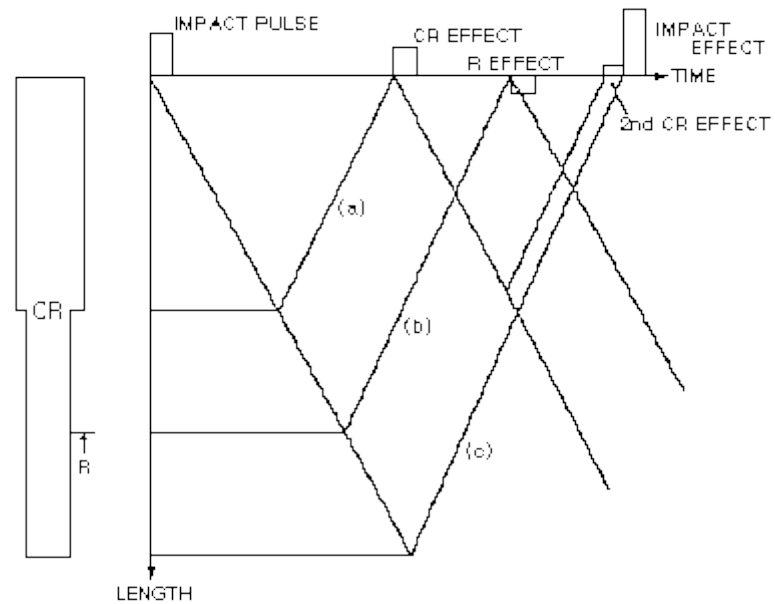
이러한 말뚝의 단면변화를 나타내는 말뚝 임피던스(impedance) Z 는 다음과 같이 정의한다.

$$Z = \frac{EA}{c} = A\sqrt{E\rho} \quad (2.2)$$

여기서, A : 말뚝의 단면적(cross sectional area of pile)

말뚝두부에서의 입자 속도는 임피던스(impedance) 변화에 의해 발생한 압축반사파와 인장반사파의 말뚝두부 도달에 의해 영향을 받는다. [그림 2.1]은 단면변화 및 지반저항 요소가 있는 말뚝에 있어서 반사파에 의한 메아리효과(echo effect)를 설명하기위한 것으로서 응력파의 경로를 시간-관입깊이의 관계로 나타낸 것이다. CR Effect(cross sectional reduction), 즉 단면적 감소 효과는 단면적 감소로 인하여 발생한 반사파의 영향을 나타낸다. 또한 충격효과(impact effect)는 말뚝두부에 가해진 초기 충격파가 말뚝선단부에서 반사되어 발생한 파의 영향을 의미하며, 이차단면적 감소효과(2nd CR effect)는 앞서의 단면적 감소의 영향으로 발생한 반사파가 두부에 도달한 후 다시 반사되어 발생하는 이차적인 효과를 나타낸다. 지반저항 역시 반사파를 발생시키며 초기 응력파와 반대의 방향을 갖는다.

위의 이론을 이용한 시험결과 임피던스의 변화가 존재한다고 가정하면 아래에 언급한 베타방법(beta method)을 이용, 임피던스 변화의 크기를 추정할 수 있다.



[그림 2.1] 압축 이동파와 메아리 효과

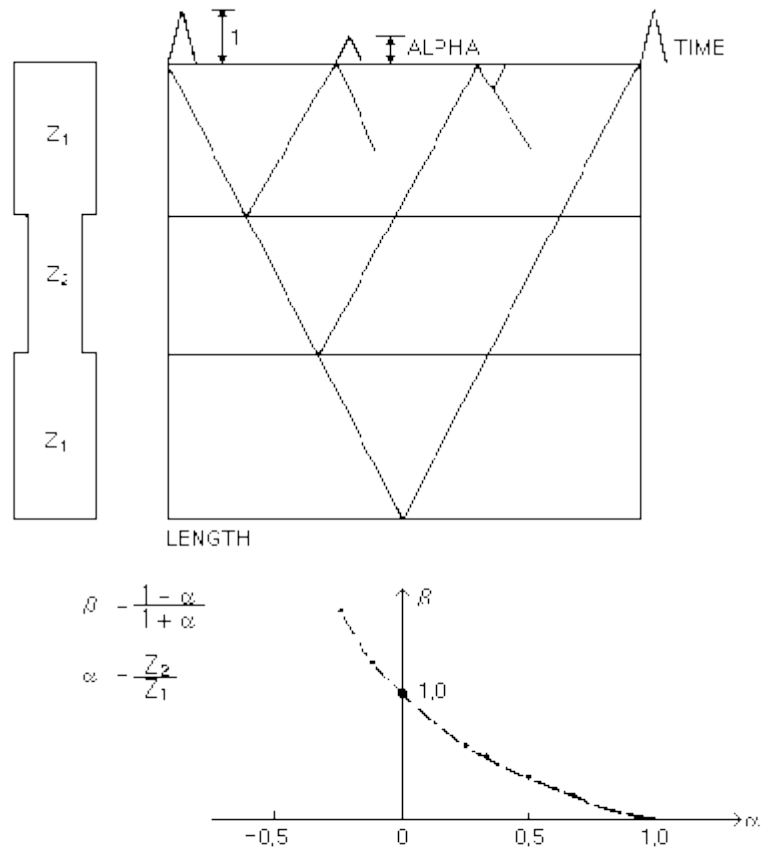
[그림 2.2]에 나타낸 바와 같이 말뚝두부에서 x 만큼 떨어진 곳에서 말뚝의 임피던스(impedance)가 Z_1 에서 Z_2 로 변화한다고 가정하면 하향으로 이동하는 초기 입력파 F_i 는 반사되어 상향의 파 F_u 와 하향의 파 F_d 로 나뉘어진다. 임피던스의 변화가 발생하는 단면 양단에서의 힘의 평형조건에 의해 이 관계는 다음 식(2.3)으로 표시할 수 있다.

$$F_d = F_i + F_u \quad (2.3)$$

여기서, F_i = 하향의 초기 입력파

F_u = 상향의 반사파

F_d = 하향의 반사파



[그림 2.2] The Beta (β) Method

또한 파의 연속성을 만족시키기 위해서는 임피던스(impedance)가 변화하는 단면 양쪽에서의 입자 속도(particle velocity)가 같아야 하므로 다음식으로 표현할 수 있다.

$$V_d = V_i + V_u \quad (2.4)$$

여기서, V_d : 하향의 입자속도

V_i : 초기 입력파의 입자속도

V_u : 상향의 입자속도

입자속도(V)와 힘(F)사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
F_d &= Z_2 V_d \\
F_i &= Z_1 V_i \\
F_u &= (-Z_1) V_u
\end{aligned} \tag{2.5}$$

위의 관계를 식(2.4)에 적용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F_d}{Z_2} = \frac{F_i}{Z_1} - \frac{F_u}{Z_1} \tag{2.6}$$

여기서 건전도계수(integrity factor) β 를 다음과 같이 정의하고,

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{2.7}$$

식(2.7)을 식(2.6)에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$F_d = \beta (F_i - F_u) \tag{2.8}$$

식(2.3)에 식(2.8)을 대입하면 다음 식(2.9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
F_i + F_u &= \beta (F_i - F_u) \\
\text{또는 } F_u &= -F_i \left(\frac{1-\beta}{1+\beta} \right)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

여기서 상향 반사파의 초기입력(하향)파에 대한 비 α 를 다음 식(2.10)과 같이 정의하고

$$\alpha = -\frac{F_u}{F_i} \tag{2.10}$$

이를 β 에 대해 풀면 다음 식(2.11)을 얻게 된다.

$$\beta = \frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)} \tag{2.11}$$

말뚝두부에서의 상향파는 식(2.12)에 나타낸 바와 같이 말뚝두부의 힘과 속도(임피던스를 곱하여 힘으로 환산된) 사이의 차이로 나타난다.

$$2F_u = F_{top} - Z_1 V_{top} \quad (2.12)$$

PIT 시험에 있어서 말뚝두부에 작용한 힘 F_{top} 은 초기 충격 후에는 항상 0 이 된다. 또한 충격파는 입자 속도로 표시할 수 있으므로 다음 식(2.13)을 얻을 수 있다.

$$\alpha = -\frac{F_u}{F_i} = Z_1 \frac{V_{top}}{2F_i} = \frac{V_{top}}{2V_i} \quad (2.13)$$

PIT program 은 충격속도 V_i 의 크기를 100%로 나타내며([그림 2.2] 참조) 따라서 α 값은 단순히 상대속도의 증가로 측정된다. 위의 식(2.13)은 임피던스 변화(impedance change)에 의해 발생한 속도증가의 반(1/2)을 취해야 한다는 것을 나타낸다. 따라서 말뚝의 선단부는 200%의 크기를 가진 반사신호(reflection signal)를 발생시켜야 하는데 지반의 마찰저항과 말뚝의 구조적 임피던스 손실(내부 damping) 등을 고려할 때 $2L/c$ 위치에서 그렇게 큰 진폭을 가진 반사파를 기대할 수는 없다.

실제에 있어서는 $2L/c$ 에서의 반사파가 초기 충격파와 같은 크기가 되도록 지수적으로 증폭시키는 방법을 택하고 있다.

그러나 말뚝선단부에서의 β 값은 여전히 '0'이 되어야 하므로 α 값의 계산에 있어 말뚝두부속도를 2로 나누어서는 안된다.

반면, 말뚝두부에 인접한 곳에서는 에너지 손실이 작으므로 2로 나누어야 한다.

이러한 내용은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$0.5 V_{top} (\text{말뚝 두부 부근}) < \alpha < V_{top} (\text{말뚝 선단부 부근})$$

값에 대한 β 의 함수 관계를 보여주고 있다.

[그림 2.2]의 아랫쪽 graph 는 이와 같은 α 값에 대한 β 의 함수 관계를 보여주고 있다.

2.2 측정장치

말뚝의 건전도시험을 위한 측정장치는 Pile Dynamics, Inc.의 PIT-Collector 를 사용한다. 이 기기는 가속도계에 의해 측정된 가속도를 속도로 환산하여 나타내며 별도의 가속도계가 부착된 작은 해머를 사용하면 힘의 측정이 가능하다. 이 측정장치는 [사진 1]에서 보는 바와 같으며 각각의 특징은 다음과 같다.

(1) 해머(Hammer)

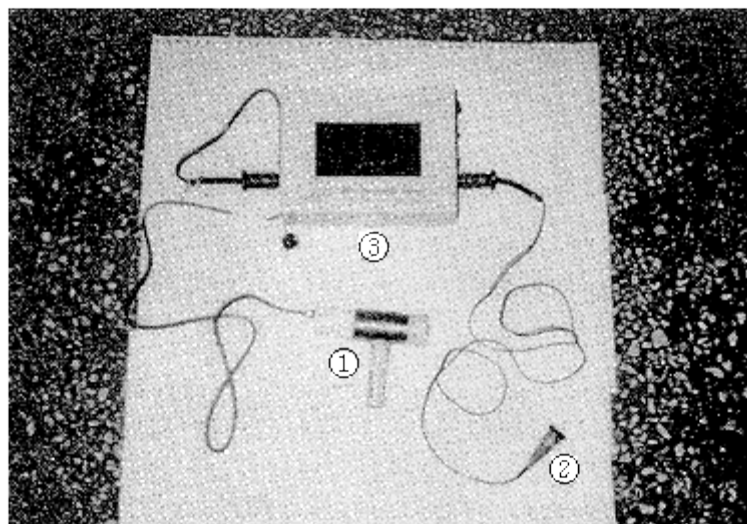
시험할 말뚝 크기에 따라 망치 질량은 다양하나 통상적으로 시험을 위해 사용하는 것은 1.0lbs (450g)와 2.0lbs (900g) 두 종류이다. 가벼운 망치를 사용하면 충격파의 상승시간이 날카로워지며 더 높은 진동수(higher frequency)를 유발시키게 되어 임피던스(impedance) 변화를 좀 더 상세히 파악할 수 있다. 또한 무거운 망치는 말뚝 두부에 더 큰 에너지를 전달 시켜 말뚝선단부에서 명확한 반사파를 발생시키도록 한다.

(2) 파동감지장치(Motion Sensor)

파동감지장치에는 가속도계(accelerometer)와 지중청음기(geophones)가 있으며 보통 높은 진동수에서 명확한 임피던스(impedance) 변화를 얻기 위해서는 가속도계(accelerometer)를 사용한다.

(3) 중앙처리장치(Processor)

측정결과는 [사진 1](③)에서 보는 바와 같은 PIT-Collector 에 저장한 후 컴퓨터해석을 수행할 수 있도록 되어 있으며, PITSTOP 등의 분석 프로그램을 이용, 급속푸리에 변환(Fast Fourier Transform : FFT)을 수행하여 시간영역(time domain)이나, 주파수 영역(frequency domain) 모두에서 파형의 해석을 적절히 수행할 수 있도록 지원해 준다.

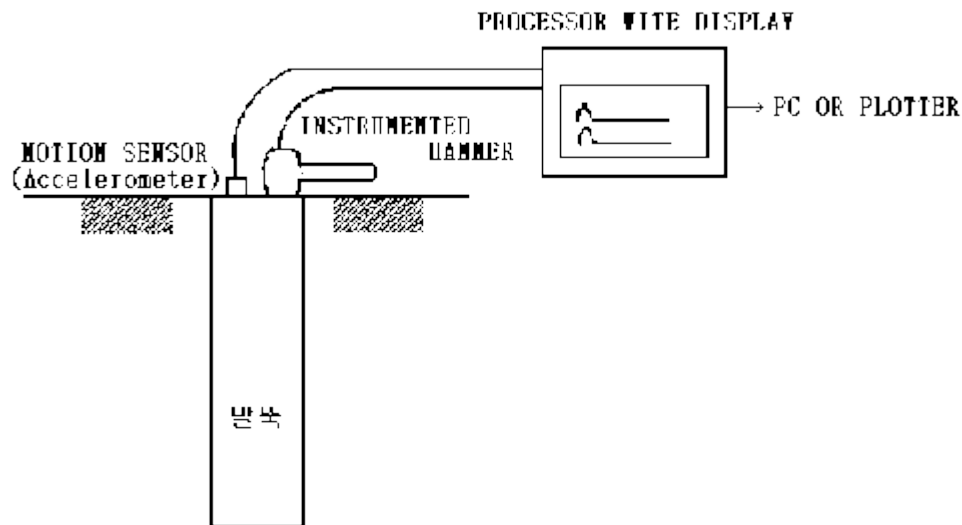


[사진 1] 측정장치 : PIT Collector

2.3 시험방법 및 유의사항

[그림 2.3]은 PIT 시험의 구조도를 나타낸 것이며 시험방법 및 이에 따른 유의사항은

다음과 같다.



[그림 2.3] PIT 시험의 구조도

(1) 시험방법

1. 시험말뚝을 선정하고 말뚝번호 및 길이를 기록한 다음 wave speed 를 결정한다(콘크리트 말뚝의 경우 보통 4000 m/sec).
2. 해머로 타격할 부분 및 가속도계를 부착할 위치의 말뚝 표면을 깨끗이 하여(불순물이 섞여 있지 않은) 단단한 콘크리트면을 노출시킨다. 시험말뚝의 직경이 큰 경우 적어도 2 개소 이상 이와 같은 콘크리트면이 노출되도록 한다.
3. 가속도계를 "velocity"라 쓰여진 곳에 연결한다.(FV option 을 선택할 경우에는 해머에 연결된 신호케이블을 "force"라고 쓰여진 곳에 연결한다)
4. 가속계를 준비한 말뚝 표면에 붙인다.(겨울철에는 vaseline 을, 여름철에는 petro wax 사용)
5. PIT Program 을 작동한 후 menu screen 에 의거, 공사명, 말뚝길이, wave speed, ID 등을 입력한다.
6. 선택한 ID 숫자를 모두 채울 수 있도록 수차례 타격을 가한다.
7. 타격에 의해 얻은 기록을 평균(average)하여 "Analysis Screen"에 입력시킨다.

(2) 유의사항

1. 말뚝길이에 비해 입력 signal 이 너무 길 때는 작은 해머를 사용한다.
2. 측정기록이 지나치게 떨리거나(ringing) 선단부 signal 이 확실치 않을 때는 타격의 강도를 약하게 하되 그 결과 타격에너지가 충분치 않다고 판단되면 큰 해머를

선택하도록 한다.

* Integrity Testing 의 성과는 80%가 해머의 타격에 의해 좌우된다.

3. 가능한한 force 와 velocity 를 모두 측정한다.

4. 측정파의 상태가 신뢰성 있는 해석 결과를 얻기 어려운 정도라고 판단될 때는 다음 사항을 시도해 본다.

a. 가속도계를 부착한 말뚝 표면이 깨끗이 청소되어 균열 등의 손상이 있거나 불순물이 섞이지 않은, 단단한 콘크리트가 노출되어 있는지 확인하고 불량부분을 제거한다.

b. 가속도계를 말뚝 표면에 단단히 밀착시킨다.

c. 해머의 플라스틱 부분을 단단히 조인다.

d. 가속도계와 케이블이 타격과정에서 해머와 부딪치지 않았는지 확인한다.

e. 바람직하지 않은 진동을 유발시킬 가능성이 있는 철근은 바깥쪽으로 구부리도록 하되 용이치 않은 경우 가속도계의 측정위치를 타격 및 철근위치로부터 가급적 멀리한다.

5. 측정된 반사원(源)의 위치를 산정하기 위해서 탄성파의 속도(wave speed)를 가정하며 정확한 값은 말뚝선단부로 부터의 반사파를 관찰하여 확인하여야 한다. 만약 선단부로 부터의 반사파가 뚜렷이 나타나지 않는다면 그 시험은 일부분만 성공적이라고 볼 수 있으며 그 이유는 말뚝중간부위에서 발생한 반사파의 정확한 위치를 산정할 수 없기 때문이다. 따라서 어느 현장에서나 충분한 갯수의 말뚝을 시험하는 것이 좋으며 이렇게 함으로써 전반적인 말뚝의 평균길이 혹은 선단부의 깊이를 설정할 수 있을 것이다. 다른 말뚝들은 이와 같이 설정된 평균값을 참고하여 판단할 수 있다.

3. 시험결과와 해석

앞에서 설명한 바와 같이 말뚝의 건전도시험은 손망치로 말뚝두부에 충격을 가함으로 발생하는 압축응력파를 이용한다. 이 응력파는 말뚝 단면이나 재질이 변화하는 곳이나 말뚝 선단부에서 반사되며, 말뚝두부에서 이 반사파를 측정하여 해석한다.

시험으로부터 얻어진 파를 분석하는 방법에는 말뚝두부 속도를 시간의 함수로 나타낸 SPEM(Sonic Pulse Echo Method), 말뚝두부 속도와 힘의 진동수 스펙트럼(spectrum)의 비인 모빌리티(mobility)의 함수로 나타낸 TRM(Transient Response Method) 방법이 있다.

3.1 Sonic Pulse Echo Method(SPEM)

SPEM(Sonic Pulse Echo Method)은 말뚝두부의 속도를 시간에 관한 함수로 측정하여 파의 형태로부터 단면변화 사항을 추정한다. 망치의 가격에 의한 충격(impact)은 대략 가속도 10g ~ 100g (g : 중력가속도), 말뚝변형률 10⁻⁵, 입자 속도(particle velocity) 30mm/sec, 0.03mm 이하의 변위를 발생시킨다.

말뚝에 충격을 가해 발생한 파의 속도에는 많은 유용한 정보들이 포함되어 있으므로 해석을 위해 먼저 선단부 반사파(toe signal)를 살펴보아야 한다.

그런데 말뚝이 길거나 또는 결함부위가 깊은 곳에 있는 경우에는 말뚝 및 지반고유의 재료감쇠(material 또는 internal damping) 및 파에너지의 입체적 분산으로 인한 기하학적 감쇠(geometric damping) 효과로 인하여 반사파의 진폭은 매우 작아져 잡음신호(noise signal) 등의 영향이 상대적으로 커지므로 반사파의 식별이 불가능하게 되는 때가 많다. 따라서 단순한 진동신호의 포착 감지 만으로는 정확한 결과를 기대하기 어렵고, 신호의 잡음비(signal-to-noise ratio : SN 비)를 낮추기 위한 신호처리 기술이 필수적이며 이중 대표적인 것은 신호여과 및 지수증폭 등이 있으며 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

■ 신호여과(Signal Filtering)

잡음 신호원(noise source)은 측정 시스템 자체 및 외부의 전자기적 교란 요인에 의해 발생하는 전기적 잡음신호(electric noise)와 시험의 본질적 특성이나 주변 여건 등에 의해 불가피하게 발생하는 잡음진동(extraneous vibration) 신호로 대분된다. 전자의 경우는 접지(grounding) 처리상태를 점검·개선하거나, 시간평균화(time-averaging)기법 등을 적용하여 대부분의 경우 간단히 제거할 수 있다. 문제가 되는 것은 후자의 경우인데 이에 속하는 잡음신호는 시험성과에 지대한 영향을 미치므로 반드시 제거해야만 한다.

이와 같은 잡음진동 신호가 발생하는 것은 대부분의 경우 다음 두 가지 요인에 의해서이다. 그 중 하나는 충격에 의해 말뚝전체가 강체진동(rigid-body vibration)하는 것에 기인하는 것으로서, 이에 의해서는 매우 낮은 저주파수 성분의 잡음신호가 발생한다. 또 다른 요인은 말뚝의 두부 부근에서 흔히 발생하는 불량시공부위나 파손/균열부위, 그리고 가속도계가 놓인 표면직하에 가까이 있는 국소적인 결함부위에 의한 것이다. 이러한 가속도계 근처의 결함부위에 의해서는 매우 높은 주파수를 수반하는 공진패턴의 잡음신호가 발생된다. 이와 같은 고주파수의 잡음진동 신호는 주결함부위로 인해 발생된 반사파의 형태를 교란시켜 도달시점의 식별을 어렵게 만든다.

이러한 잡음진동 신호의 제거를 위해서는 신호여과기(signal filter)를 사용해야 하는데,

여기에는 특정 주파수 이하의 모든 저주파수 신호를 제거하는 고주파 통과식(high-pass filter), 반대로 특정 주파수 이상의 모든 고주파 신호를 제거하는 저주파 통과식(low-pass filter)이 있다.

■ 지수증폭(Exponential Amplification)

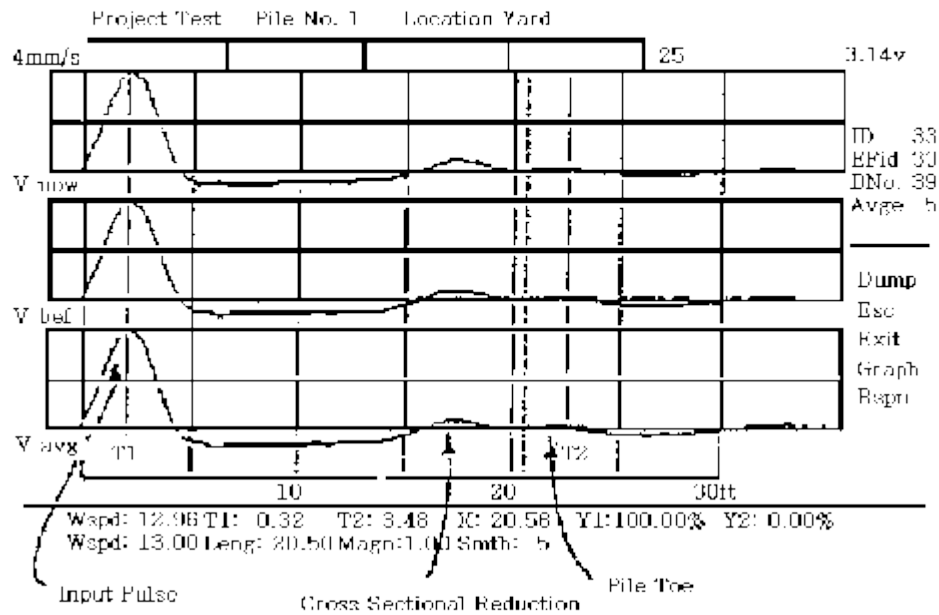
신호 여과를 통하여 어느정도 잡음진동 신호를 제거한 경우라도 지반의 마찰저항 및 말뚝 표면(두부)의 저질(低質) 콘크리트는 탄성파의 에너지를 소산(消散)시키기 때문에 반사원(源)이 깊은 경우에는 반사파의 진폭이 식별이 곤란할 정도로 매우 작은 경우가 흔히 발생하게 된다. 이러한 경우에는 시간축을 따라 지수함수적으로 신호의 증폭비를 증가시키는 이른바 지수증폭(exponential amplification)을 통하여 후속시간대에 도착하는 반사파의 진폭을 상대적으로 크게 함으로써 반사파의 식별을 용이하게 할 수 있다. 이와 같은 지수증폭은 처리대상 시간구간(time range)을 조절할 수 있는데, 이를 통하여 문제가 되는 반사파 성분을 식별할 수 있다.

그러나 이러한 방식에 의한 측정파의 강화(enhancement)는 원래의 측정파가 말뚝의 하단부로 부터의 식별가능한 반사파를 포함하고 있을 경우에만 소기의 성과를 거둘 수 있다. 즉 측정기록 후반부에 나타나는 말뚝두부로부터의 진동신호 역시 함께 증폭되어 신호를 왜곡시킬 가능성이 높기 때문이다. 따라서 이와 같은 지수 증폭 방법은 극도로 신중하게 적용하여야 한다.

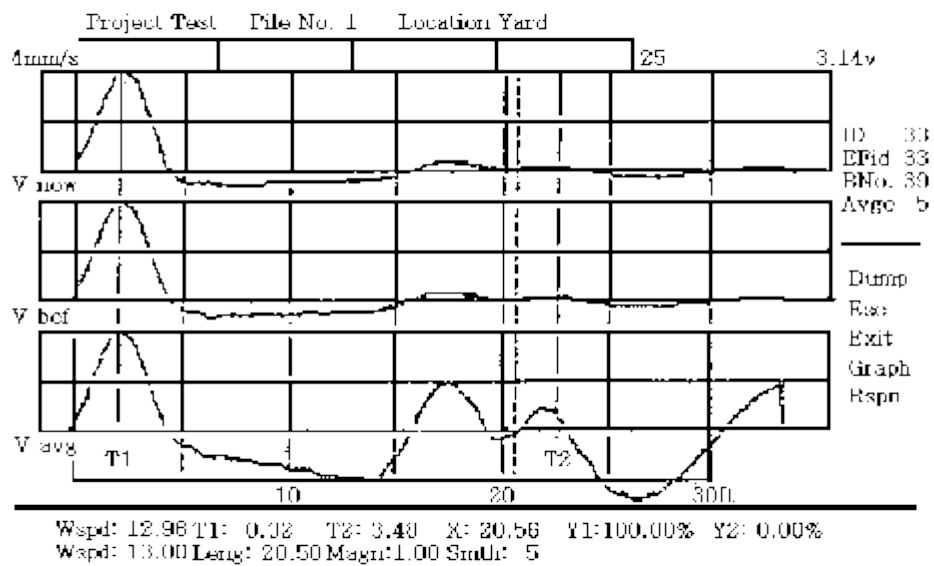
시간-속도 그래프에 나타난 속도 변화는 말뚝의 단면적 변화, 콘크리트의 품질변화, 흙의 저항력의 변화 등에 의해 발생하며 특히 말뚝 두부 속도의 증가는 단면적 감소나 혹은 저항력에 기인해 나타난다. 일반적으로 급하게 변하는 반사파는 임피던스(impedance) 변화에 기인하며 점진적으로 변하는 반사파는 지반저항력에 기인한다.

SPEM(Sonic Pulse Echo Method)에서는 시간과 길이의 함수로 평균된 말뚝두부 속도를 [그림 3.1.1]과 같이 나타내며, 말뚝 길이는 가정된 파의 속도와 시간의 곱으로 계산된다. [그림 3.1.1](a)에서와 같이 선단부의 반사파가 분명치 않다면 [그림 3.1.1](b)와 같이 $2L/c$ 에서 최대치에 도달하는 파가 나오도록 지수배로 증폭한다.

[그림 3.1.1]에 나타난 말뚝은 파의 형태가 급격한 변화를 일으킨 것으로 보아 말뚝 두부로부터 14 ft(4.2 m) 부근에서 임피던스(impedance) 감소가 발생한 것으로 판단할 수 있다.



(a) SPCM 방법에 의한 평균 속도 파형



(b) SPCM 방법에 의한 증폭된 속도 파형

[그림 3.1.1] SPCM 해석 방법

시간영역(time domain)에 의한 해석에 있어서, 임피던스의 변화가 발생한 위치까지의 거리(Delta L) 는 단순히 경과시간(Delta T) 에 탄성파의 속도(c) 를 곱하여 이를 2 로 나눔으로써 구할 수 있다.

$$\Delta L = \Delta T \cdot c/2$$

그러나 어떤 경우에는 속도파를 다음 절 3.2 에 설명하는 주파수 영역(frequency domain)으로 변환시킴으로써 몇가지 측정기록에 대해서는 보다 명확한 해석을 할 수 있다.

다음 [그림 3.1.2]는 급속 Fourier 변화에 의한 velocity spectrum 의 예로서 그 종(縱)좌표의 단위는 속도(ft/sec 또는 m/sec)이며 횡(橫)좌표는 주파수 단위이다.

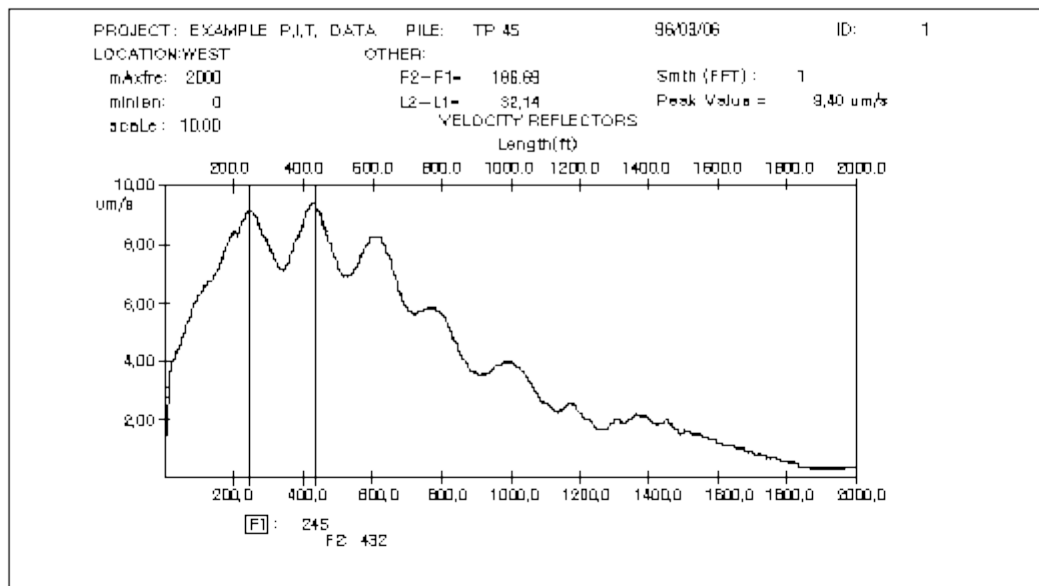
이 velocity spectrum 에서 말뚝의 선단부 위치를 알아내기 위해서는(측정 기록이 명확한 선단부 반사파를 포함하는 경우에 한함) 정점(peak) 주파수 사이의 거리(Delta f) 를 다음식에 의해 길이로 환산해야 한다.

$$\Delta L = c/(2\Delta f)$$

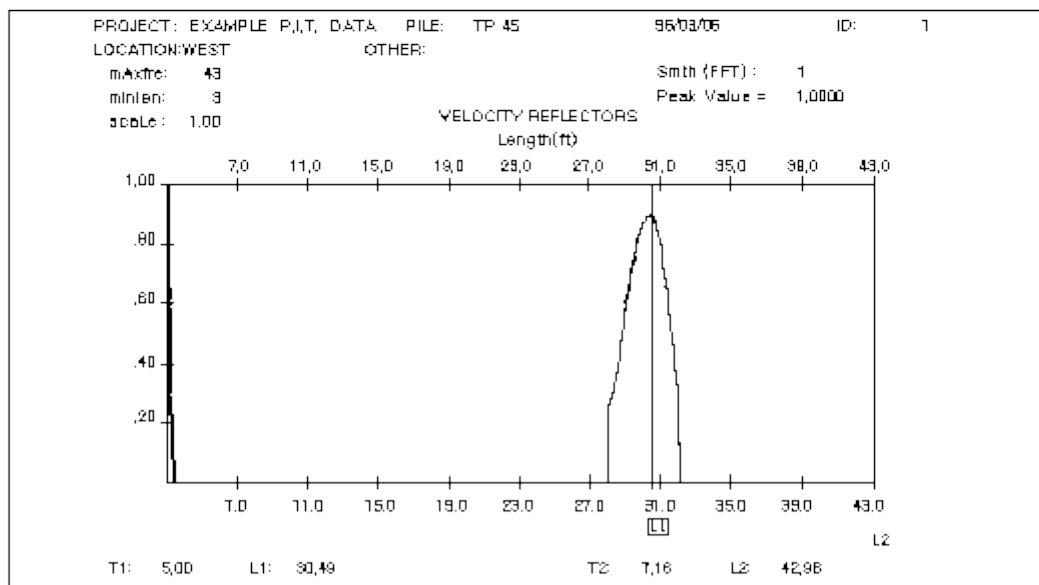
그림에서 F1 및 F2 는 각각 시간축 T1, T2 에서의 주파수를 나타내며 F2-F1 은 T1 과 T2 사이의 주파수 차이를, L2-L1 은 이에 따른 길이의 차이를 나타낸다.

주기적인 정점 주파수가 나타나는 경우 velocity spectrum 을 오차 Fourier 변환하면 陽(+)의 성분으로 이루어진 velocity reflectors [그림 3.1.3]를 얻게 되며 이를 이용하여 말뚝길이를 산정할 수 있다.

즉 이러한 reflector 들은 다시 시간단위 또는 wave speed 를 이용하여 길이 단위로 나타내지며 지배주파수(governing frequency)와 가장 높은 정점(dominant peak)에 의해 말뚝선단부에서 반사된 신호의 위치나 결함부위를 보다 명백히 파악할 수 있다. velocity reflectors 는 원래의 시간에 따른 파형의 陽(+)의 성분과 크게 다르지 않으나 앞부분의 파동(pulse)들은 보통 scale 상에서 실제보다 크게 과장되어 나타나게 된다.



[그림 3.1.2] Velocity Spectrum(Frequency Domain)



[그림 3.1.3] Velocity Reflector

3.2 Transient Response Method(TRM)

TRM(Transient Response Method)은 주파수 영역(frequency domain)에서의 해석방법으로서 이 방법을 적용하기 위해서는 말뚝 두부의 속도와 힘이 모두 측정되어야 한다. 이 방법은 표준비파괴시험기술(standard non-destructive testing technology)에서 유래되었으며 실제로 있어 최초의 말뚝 비파괴시험은 다양한 주파수대에서 상당한 크기의 힘을 가할 수 있는 연속 진동기(steady state vibrator) 아래에서 힘과 속도를 측정함으로써 수행되었다. 그러나 작은 손망치에 의한 힘의 주파수 스펙트럼(force frequency spectrum)은 넓은 주파수대에 걸쳐 거의 일정하게 나타나므로 단순히 작은 손망치로도 건전한 말뚝과 손상된 말뚝 모두에 대하여 TRM 해석에 필요한 주파수를 얻을 수 있다. 이 시험기법을 위해서는 spectrum analyzer 와 같은 일반적인 용도의 기기를 속도와 힘을 측정하기 위한 sensor 와 함께 사용할 수 있으나 작은 손망치에 충격하중을 측정할 수 있는 장치를 부착하면 앞서 기술한 Sonic Pluse Echo Method 에 사용한 것과 같은 기기를 사용하여 필요한 신호처리(signal conditioning) 및 분석을 수행할 수 있다.

다음은 TRM 해석에 사용되는 주요 용어 및 그 내용이다.

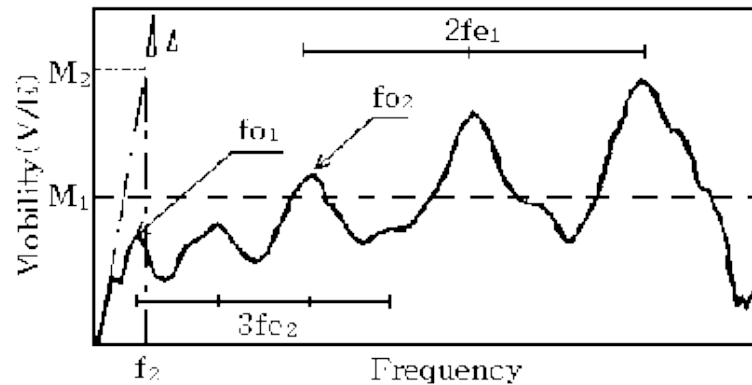
■ Mobility Spectrum 및 Characteristic Impedance

Mobility 는 입자속도(v)/힘(F)의 물리량을 나타내는 것으로서 말뚝과 같은 봉체(rod)에 대한 응력과 전파이론으로부터 $v = F/(\rho c A)$ 의 관계가 성립하므로 dynamic mobility 는 말뚝재료의 임피던스($=\rho c A$)의 역수 즉, $1/\rho c A$ 의 관계가 있다. 즉, mobility spectrum 은 주파수에 따른 임피던스(impedance)의 변화를 나타내는 특성 곡선인 것이다.

Mobility spectrum 은 신호의 패턴(반향 및 공진)에 따라 두 가지 전형적인 양상을 나타낸다. [그림 3.2.1]에 나타낸 것은 반향 패턴에 해당되는 것으로서 서로 상이한 echo frequency 값을 갖는 일련의 반향 정점(echo peak)들이 형성되어 있음을 보여주고 있다. 주파수와 진폭이 큰 반향 정점들은 상대적으로 얕은 위치에 있는 결함 부위에 의한 것이며 주파수와 진폭이 작은 반향 정점들은 깊은 위치에 있는 결함 부위에 의한 것이다. 이는 결함부위의 깊이가 깊을 수록 응력파의 왕복시간이 길어지고, 또한 파의 전파 경로가 길어지므로 재료 및 기하학적 감쇠(damping)에 의한 파에너지 손실량이 커지기 때문이다.

한편, [그림 3.2.1]에 나타낸 바와 같이 mobility spectrum 의 평균 높이에 해당하는 mobility 값 M_1 을 characteristic impedance 라고 칭하며 이는 말뚝-지반 시스템의

총체적 임피던스를 나타낸다. 이러한 characteristic impedance 는 말뚝의 내부 결함정도가 심할수록 또는 말뚝의 선단부의 지지층이 연약하거나, 말뚝 주변부에서 말뚝-지반의 마찰저항 상태가 불량할수록 증가하게 된다.



[그림 3.2.1] Mobility Spectrum

mobility spectrum 으로부터 characteristic impedance 를 결정하기 위해서는 전체적인 mobility spectrum 의 추세를 감안하여 눈 짐작으로 기하학적인 평균치를 구해도 대부분의 경우 큰 문제가 없다. 그러나 곡선의 변화 양상이 복잡하거나, 정확도를 높이기 위해서는 분석대상 주파수 대역을 매우 크게하여 전반적인 곡선의 형상을 응축시킨 다음, 응축된 곡선하의 전면적을 계산하고 곡선이 차지하는 주파수 대역의 크기로 나누어 산정하는 것이 바람직하다. 참고로 해머의 타격으로 발생하는 응력파의 주파수 성분은 대략 10~2000 Hz의 범위에 놓이는데, 고주파수 성분은 감쇠가 심하여 높은 coherence 를 나타내는 대역의 상한계는 대부분의 경우 500 Hz 내외이다.

이와 같은 characteristic impedance 는 지반상태가 크게 변화하지 않는 일정한 지역에 여러 개의 말뚝이 시공된 경우 말뚝들의 상대적인 결함정도 및 말뚝-지반의 지지/접촉 상태를 포함한 말뚝의 총체적인 건전도(integrity)를 판단하는데 매우 효과적인 수단이 된다. 그러나 보다 실질적으로는 말뚝두부에 가까운 곳에 위치한 병목부(necking)/확대부(bulging)와 같은 결함부위의 존재여부를 파악하는데 유효한 척도가 된다. 이는 건전도시험시 적용되는 타격강도는 그다지 큰 편이 아니며, 특히 말뚝이 길 경우나 말뚝 주변지반의 강성도가 큰 경우는 말뚝두부에 부착된 sensor 로 되돌아오는 반사파의 에너지 강도가 상대적으로 작아지기 때문이다.

■ Characteristic Compliance

[그림 3.2.1]에 나타난 바와 같이 저주파수 영역에서 형성되는 mobility spectrum 의

초기부는 직선형태가 되는데, 이 직선부의 기울기를 characteristic compliance 라고 하며 말뚝 선단부 지지층의 강성도(stiffness)와 관계가 있다. 왜냐하면 낮은 주파수 성분의 응력파는 재료의 damping 으로 인한 파에너지 손실량이 적어 말뚝의 선단부까지 도달하는데, characteristic compliance 는 바로 이와 같이 선단부까지 전달된 응력파에 의한 말뚝 선단부-지지층 시스템의 동적 거동 특성을 반영하는 것이기 때문이다.

Characteristic compliance 가 갖는 물리적 의미는 다음과 같다.

정현진동 이론으로부터 변위진폭(u) 은 속도진폭(v)과 $v=(2\pi f) \cdot u$ 의 관계가 있으므로 characteristic compliance(Δ) 와 dynamic stiffness(DS) 및 dynamic flexibility(DF) 는 다음의 관계가 있다.

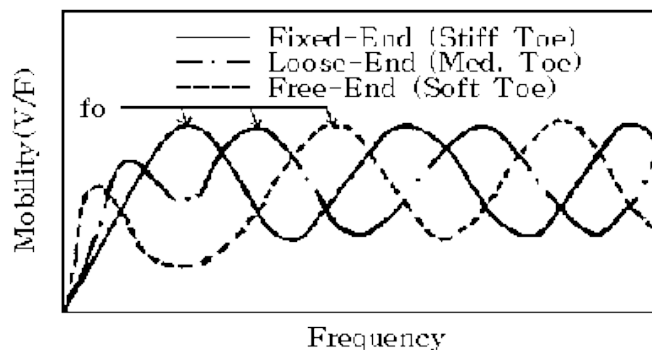
$$DS = 2\pi f_2 / M_2 = 2\pi / \Delta$$

$$DF = 1 / DS = \Delta / 2\pi$$

윗 식에서 M_2 , f_2 는 [그림 3.2.1]에 나타낸 바와 같이 mobility spectrum 의 초기 직선부 연장선상에서 택한 임의의 mobility 값 및 해당 주파수 값이다.

윗식의 관계로부터 characteristic compliance 는 바로 말뚝 선단부의 지지상태(stiffness 및 flexibility 특성)를 나타내는 척도임을 알 수 있다. 따라서 말뚝의 선단부가 굴착 잔류토층이나 연약지층에 놓일 경우는 견고한 지층에 놓일 경우 보다 characteristic compliance 값이 상대적으로 커진다.

한편, [그림 3.2.2]에는 건전한 말뚝의 경우에 대하여 말뚝 선단부의 상태에 따른 mobility spectrum 의 이론적인 변화 양상을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝 선단부의 상태가 불량할수록 mobility spectrum 의 초기 직선부의 기울기가 급해짐을 알 수 있다.



[그림 3.2.2] 말뚝선단부 상태에 따른 Mobility Spectra

■ Characteristic Frequency

[그림 3.2.2]를 살펴보면 말뚝의 선단부의 상태가 불량할수록 mobility spectrum 은 주파수축의 증가방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 mobility spectrum 의 반향정점(echo-peak)들에 해당하는 주파수는 증가하고 있으나, 각 정점간의 간격(즉, echo frequency)은 변함이 없음을 알 수 있다. 그리고 강성 지지층의 경우를 제외하고는 최초의 반향 정점이 형성되기 전에 초기 직선부 사이에 골(valley)이 형성되고 그 깊이는 선단부 상태가 불량할수록 커지게 됨을 알 수 있다.

위의 내용은 최초의 반향 정점이 나타나는 주파수(f_0) -이를 characteristic frequency 라고 한다-는 말뚝의 선단부 상태가 나쁠수록 증가한다는 것을 의미한다. 이론적으로 말뚝이 이상적인 강성지지층(rigid base)에 고정된 경우의 초기 characteristic frequency(f_0) 는 echo-frequency(f_e) 의 1/2 값이 된다. 그러나 실제의 경우에 이상적인 강성지지층은 존재하지 않으므로 말뚝이 아주 견고한 지층에 관입된 경우라도 앞에서 서술한 characteristic compliance 는 이상적인 강성지지층에 비해 클 것이다. 따라서 mobility spectrum 의 초기 직선부의 기울기는 이상적인 강성지지층의 경우보다 약간 더 급해질 것이고, 이에 따라 최초의 반향정점이 형성되는 위치가 달라지는 현상은 비단 말뚝선단부에 상응하는 반향 정점들에서만이 아니라, 말뚝내부의 결함부위에 해당하는 반향 정점들에 대해서도 마찬가지로 발생한다. 따라서 내부결함 부위에 상응하는 characteristic frequency(f_{o2}) 와 이 때의 echo frequency(f_{e2}) 의 비율로부터 내부결함 부위의 특성(공동, 불량 콘크리트 부위)을 파악할 수 있다.

■ Dynamic Stiffness

Dynamic Stiffness(동적 강성도)란 간단히 말해서 용수철 위에 어떤 중량을 얹어 놓아 변위를 측정함으로써 정적 스프링 강성도(static spring stiffness ; kgf/cm)를 계산하는 것과 유사하다. 즉, dynamic stiffness 는 재하시험에 의해 측정된 정적 강성도(static stiffness)와 연관지을 수 있다.

Dynamic stiffness 는 지반-말뚝간의 거동이 직선 스프링으로 이상화 될 수 있는 낮은 주파수 대역에서 측정할 수 있으며 직선형태의 반응은 대략 100 Hz이하의 주파수대에서 나타난다. mobility spectrum 에 있어 이러한 초기 직선의 기울기는 말뚝의 유연도(flexibility) 즉 단위하중에 대한 변위를 나타내며 dynamic stiffness 는 이러한 flexibility 의 역수(逆數)이다.

Dynamic stiffness 는 보통 말뚝기초에 대한 저변형을 정적 강성도(low strain static stiffness)의 1~2 배 범위의 값을 가지나 토사의 유입, 균열 및 necking 등 결함을 지닌 말뚝에 있어서는 이보다 낮은 값이 측정된다.

Dynamic stiffness 는 반드시 유사한 지반에 설치된 비슷한 크기(직경 및 길이)의 말뚝에 대해 비교되어야 하며 정적 지지력을 예측하는데 사용되어서는 아니된다.

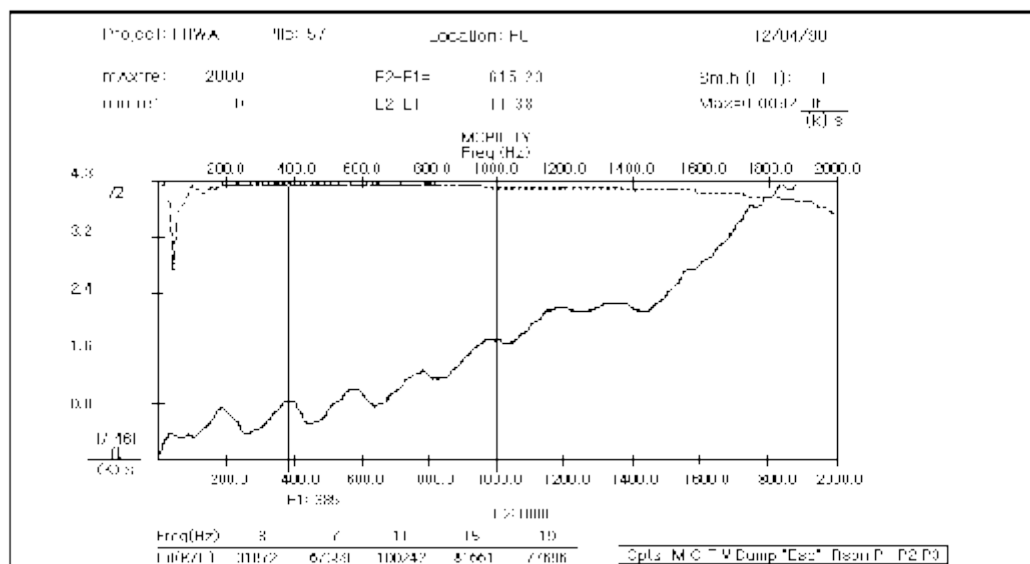
■ Coherence

몇차례의 타격에 의한 힘과 속도의 측정이 이루어졌다면 이들 파형간의 'Coherence'를 계산하여 표시할 수 있다. 실제에 있어 Coherence 는 각각의 타격에 의한 주파수 성분들이 서로 얼마나 잘 부합(match)되는가를 검사하는데 사용된다.

진동이 심한 경우라면 각 측정파형간의 부합은 전혀 이루어지지 않을 것이며 이때의 coherence 값은 '0'이 된다. 잘 부합된 주파수 성분들의 경우에는 Coherence 값이 '1'이 된다.

[그림 3.2.3]은 mobility spectrum 의 실례(實例)로서 Coherence 를 점선으로 나타내었으며 아랫부분에는 몇가지 주파수에 해당하는 E_d (dynamic stiffness)값을 표시하였다.

[그림 3.2.3]의 경우 50 Hz부근의 Coherence 값이 매우 낮으며 100 Hz에서 1600 Hz사이에서는 '1'에 가까운 값을 보여주고 있고 이후 주파수가 증가할수록 점차 감소하고 있다(세로축의 scale 은 0~1). 따라서 낮은 Coherence 값을 나타내는 부분에 대한 분석은 신뢰해서는 아니됨을 알 수 있다.



[그림 3.2.3] Mobility Spectrum

4. 시험결과 분석 Program

4.1 PITWAP(Pile Integrity Testing Wave Analysis Program)

(1) Signal Matching 방법

이 프로그램은 CAPWAP(CAse Pile Wave Analysis Program)에 기반을 둔 것으로서 말뚝과 지반에 관한 사항을 입력치로 하여 시간에 따른 말뚝두부의 속도 또는 mobility 를 계산하여 출력해 낸다. 측정된 힘의 파형(또는 기록)을 말뚝과 지반 분석모델(analytical model)에 대한 말뚝두부의 경계조건으로 가정하여 말뚝두부의 속도를 계산해 낸다.

측정된 속도와 계산에 의해 얻어진 속도를 비교함으로써 말뚝의 임피던스 변화를 알 수 있다. 따라서 임피던스가 다른 여러 가지 말뚝 모델에 대한 재분석을 수행함으로써 측정된 속도와 계산된 말뚝두부 속도간의 부합(match)정도를 향상시키게 된다. 이와 같이 임피던스를 바꿔가며 재분석을 수행하는 과정은 만족할 만한 부합상태를 얻을 때까지 계속되며 최상의 match 가 이루어진 시점에서 실제 상태에 가장 가까운 말뚝의 임피던스 profile 이 결정된다.

보통 PITWAP 분석에서는 말뚝을 250mm 길이 단위의 연속되는 segment 로 나누며 지반 저항에 관한 model 을 결정하고 나면 자동적으로 모든 segment 의 임피던스를 계산해 낸다.(이때 지반 저항에 관한 modeling 은 말뚝항타시 작용하는 damping 이나 정적저항력과는 무관한 것이 된다)

일반적으로 이와 같은 지반저항에 관련된 parameter 들은 기준말뚝(reference pile)에 대해 힘과 속도를 함께 측정하여 얻을 수 있으며 이들은 여타 말뚝들에 대한 임피던스 변화 상태를 분석하는데 이용된다.

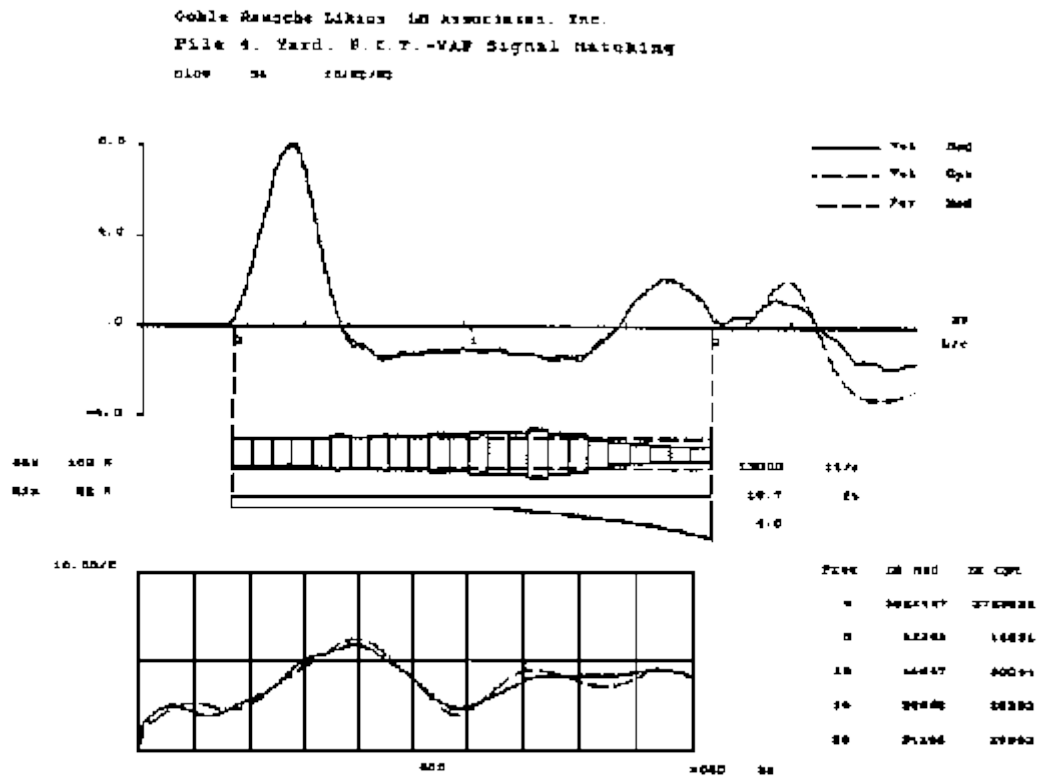
다음 [그림 4.1.1] 에는 PITWAP Signal Matching 분석 결과(예)를 나타내었다.

그림에서는 측정/계산된 속도를 토대로 한 속도의 signal matching 결과, 추정된 말뚝 임피던스 변화 및 mobility 를 보여주고 있다.

(2) Pile Profile

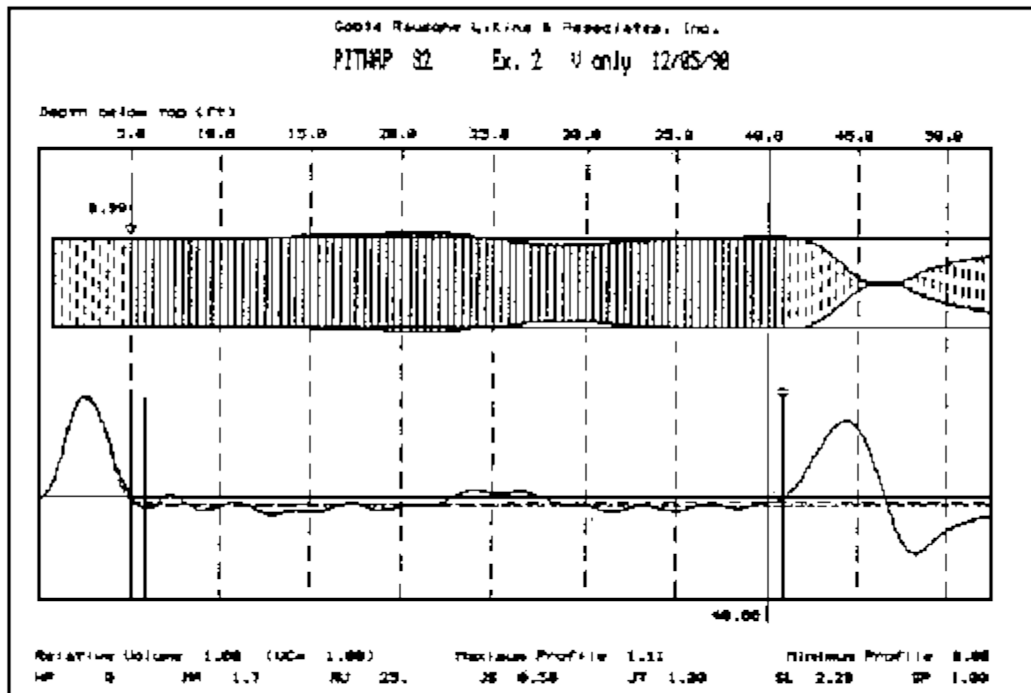
PITWAP 은 말뚝의 임피던스(impedance) 계산을 위한 option 을 포함하고 있으며 이것이 말뚝의 profile, 즉 임피던스 종단면도의 산정방법이다. 추정된 말뚝 profile 은 측정 및 계산된 말뚝두부 속도의 차이로부터 계산된다. 말뚝 profile 계산의 기초는 임피던스(impedance)의 단계적인 변화가 말뚝두부에서 파동형태의 속도 효과로 나타난다는 사실이다. 달리 말하면 profile 이란 말뚝 두부에서의 속도 반사파들을 시간에

대해 적분한 것이 되며 따라서 지반저항의 효과를 배제한다면 profile 이란 결국 말뚝두부 변위의 형상을 갖게 되는 것이다.



[그림 4.1.1] Signal Matching 분석 결과

[그림 4.1.2]는 말뚝 profile 분석 결과를 나타낸 것으로서 말뚝 두부로부터 길이, 말뚝 profile 로부터 계산된 상대체적(relative volume)을 나타낸다. 상대체적 값은 실제 타설된 콘크리트양과의 비교대상으로 사용될 수 있다. 여기서 상대체적 1.0 은 말뚝두부 단면적에 말뚝길이를 곱한 값을 의미한다. 말뚝 profile 그래프는 입력파동의 폭에 기인한 불확실한 음영 부분을 포함하며 이러한 음영부분 사이의 최소, 최대 임피던스 값을 표시해 준다. [그림 4.1.2]의 아랫쪽에는 지반저항효과를 고려하여 계산된 속도(점선)와 측정된 속도(실선)를 나타내고 있다. 이 방법은 앞서 기술한 signal matching 기법에 비해 훨씬 간단히 말뚝의 profile 을 산정할 수 있다는 장점이 있으나 2 차반사 효과를 고려할 수 없다는 단점이 있다. 또한 말뚝의 균열(손상), 콘크리트의 품질 불량 등 모든 형태의 임피던스 감소를 단지 단면적의 감소로만 나타내게 된다.



[그림 4.1.2] 말뚝 PROFILE 분석(예)

4.2 PITSTOP(Pile Integrity Tester Sonic and Transient Output Program)

PITSTOP 은 앞서 설명한 SPEM(Sonic Pulse Echo Method) 또는 TRM(Transient Response Method)에 의한 해석을 수행하도록 개발된 program 으로서 다음과 같은 software 가 포함되어 있다.

PLINK : PIT Collector 에 의해 측정된 data 를 computer 로 이송하여 file 로 저장하는 기능을 수행한다.

PITPLOT/MULTIPLOT : PITPLOT 은 측정된 PIT data 를 화면에 나타내어 기본적인 parameter 들의 조정 및 분석을 수행할 수 있도록 한 program 이며 그 결과 선정된 data 를 MULTIPLOT 에 의해 한(1) page 에 종합하여 나타낼 수 있다.

PROFILE : Pile Profile analysis 를 수행하여 깊이에 따른 말뚝의 임피던스변화, 즉 종단면도를 나타낸다.

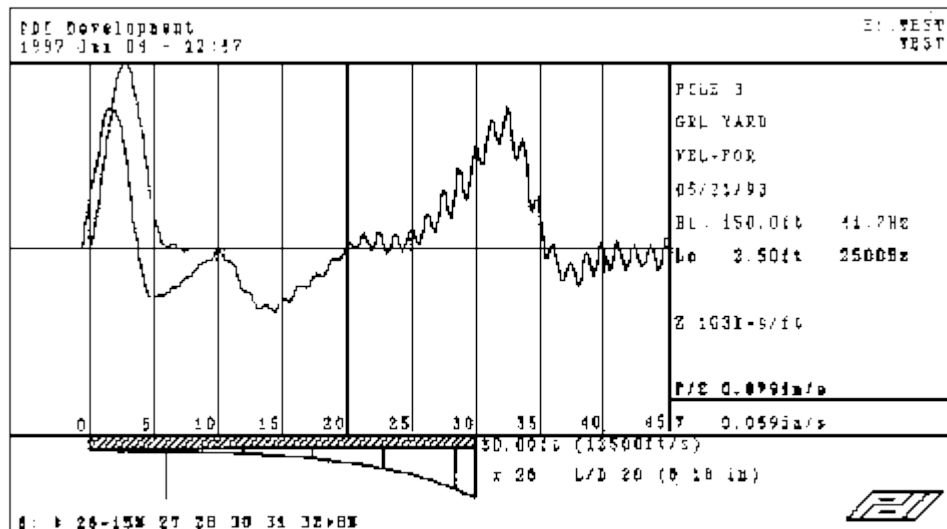
FREQUENCY : 측정된 힘과 속도를 사용하여 주파수 spectrum 및 이에 따른 coherence, mobility, dynamic stiffness 등과 가능한 경우 주요 mobility 정점(peak)의 위치를 계산한다. 만약 속도만 측정된 data 를 사용하는 경우에는 힘의 파형(force curve)을 추정하여 분석을 수행하며 이러한 경우 여타 정량적인

결과치들은 의미가 없기 때문에 따로 계산하여 출력하지 않는다.

2-VELOCITY : 정해진 거리만큼 떨어진 위치에 가속도계를 두(2)개 부착하여 시험하는 경우 해당말뚝의 wave speed 를 계산해 준다.

(1) PITPLOT, MULTIPLY PROGRAM

PITPLOT 은 P.I.T Collector 에 의해 측정된 data 를 computer 화면에 재생하여 SPEM 방법에 의한 기본적인 분석을 수행할 수 있도록 만든 program 으로서 [그림 4.2.1]은 PITPLOT 화면의 한 예이다.

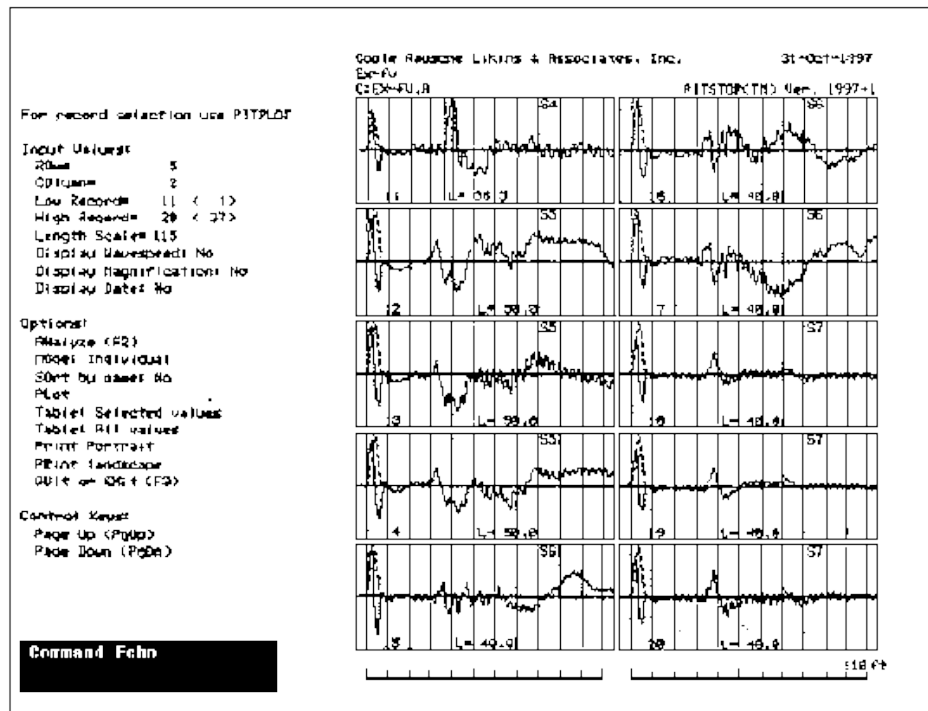


[그림 4.2.1] PITPLOT 화면(예)

PITPLOT 이 기본적인 분석과 여러형태의 출력화면을 제공하는 반면, MULTIPLY 은 많은 수의 측정기록/파형을 같은 길이의 scale 로 정리하여 간단하게 출력할 수 있도록 한다.

MULTIPLY 과 PITPLOT 은 밀접하게 관련되어 있다. 즉 측정기록의 선택, 말뚝길이, wave speed, 확대율, pivot, noise filter 의 선택 등 분석을 위한 parameter 의 선정은 PITPLOT 에서 행해져야 하며 PITPLOT 에 의해 선택된 모든 측정기록들은 개별적으로 또는 평균값으로 동일말뚝번호를 사용하여 MULTIPLY 에 나타낸다.

다른 [그림 4.2.2]는 MULTIPLY 화면의 한 예이다.



[그림 4.2.2] MULTILOT 화면(예)

(2) PROFILE PROGRAM

이 PROGRAM 은 전술한 PITWAP 의 「Pile Profile」 과 같은 내용으로서 기본적으로 말뚝 두부의 변위(속도에 대한 적분값)가 관입깊이에 따른 임피던스(impedance)변화를 나타내는 것으로 간주하여 분석을 수행한다.

즉 측정 또는 계산된 힘을 입력값으로 하여 가정된 지반의 저항요소들(damping, quake 등)과 일정단면의 말뚝 model 에 대한 속도를 계산하고, 그 결과 나타난 계산된 속도와 측정된 속도의 차이를 말뚝 임피던스의 변화로 간주하는 것이다.

이때 지반저항력의 영향을 배제하기 위하여 기준선(reference line)을 설정하며 이는 주어진 지반조건하에서의 일정단면의 말뚝에 해당하는 속도파형을 찾기 위함이다.

이 방법은 저변형을 속도파형에서 개략적인 방식으로 반사파에 대한 정량화를 위해 사용할 수 있다.

또한 이 분석방법은 앞서 기술한 β -방법(2.1 기본이론 참조)과 달리 반사파의 크기에만 의존하지 않고 폭(또는 지속시간)도 함께 고려하여 임피던스 변화의 크기를 계산한다.

단 이 분석방법은 다음 사항의 경우에만 의미를 지니며 따라서 그 결과도 적절한 scale 로 나타낼 수 있다.

a. 측정기록이 명확히 구분할 수 있는 선단부로부터의 반사파를 포함하고 있는 경우(만약 선단부를 확실히 구분할 수 없으면 앞 부분에서의 반사파 위치를 말뚝선단으로 잘못 인식할 수 있다)

b. 시험 대상 말뚝의 종류가 주요 고주파수 반사파(major high frequency reflections)들이 단면적이나 재료의 성질 변화를 반영할 수 있는 말뚝인 경우

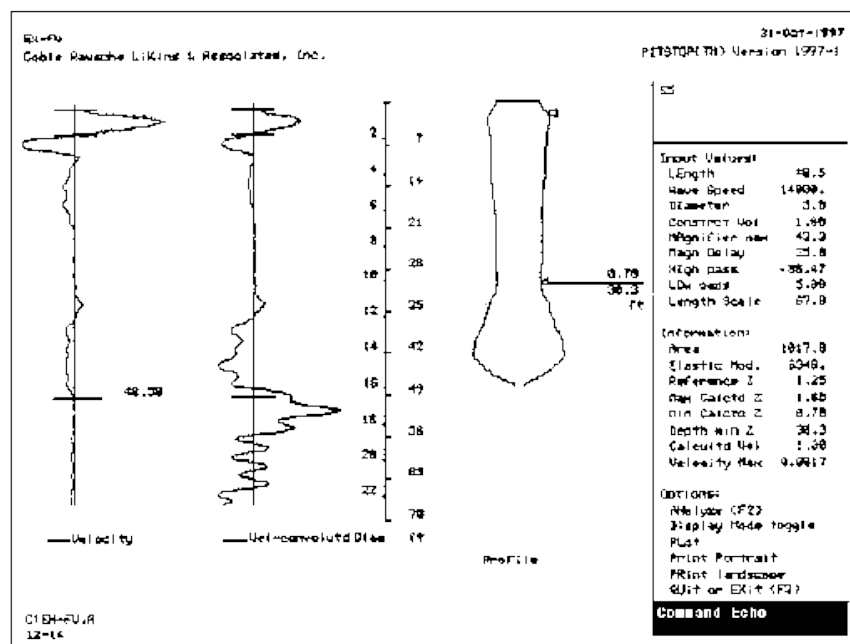
이 분석에서는 때때로 지반저항에 의한 반사파의 영향을 감소시키기 위해서 상당한 고주파여과(high pass filtering)를 행하며 또한 말뚝 선단부 반사파가 발생하는 시간에서 속도의 적분 결과가 말뚝 끝부분을 나타내도록 지수증폭(exponential amplification) 방법을 사용한다. 이러한 방식에 의해 조정된 속도를 'convoluted velocity'라고 부른다.

적절한 분석결과를 얻기 위해서는 정확한 말뚝길이와 wave speed 에 대한 정보가 필수적이며 이들은 PITPLOT 에 의한 사전 분석에서 수행되어야 한다. 또한 PITPLOT 에 의해 적절한 증폭깊이(대체로 주요 지반저항이 시작되는 곳) 및 필요한 경우 저주파여과(low pass filtering)가 수행되어야 한다.

단 PITPLOT 에 의해 선택된 high pass filter 및 magnification, pivoting 등은 이 분석에서 무시된다.

이밖에 최종결과를 평가하는데 도움을 주기 위해서는 말뚝설치를 위해 타설한 콘크리트 양(量)에 관한 정보가 요구된다.

다음 [그림 4.2.3]은 PROFILE 분석 결과의 한 예이다.



[그림 4.2.3] PROFILE 분석결과(예)

註) β -Method 는 개략적인 방식의, impedance 변화에 대한 정량적 판정방법으로서, 측정기록을 선단부 반사파의 크기가 충격파와 같게 되도록 지수함수적으로 증폭하여 반사파와 충격파의 크기를 비교함으로써 분석을 수행한다.

PIT 에 의한 속도 측정기록을 Signal Matching 방법 또는 Pile Profile 방법에 의해 분석하는데 있어서 속도파의 higher frequency 성분은 임피던스 변화로 인해 발생하는 것으로 간주된다.

따라서 지반저항에 의한 영향이 우선 측정기록으로부터 제거되어야 하므로 지반저항의 효과를 충분히 감안한 reference line 이 반드시 설정되어야 한다.

당초의 PITWAP program 에서는 이를 위해 지반저항값을 입력하여 파동분석을 실시한 다음 non-uniform pile 모델을 설정, 측정된 속도파에 대한 signal matching 을 실시하여 가장 근접한 말뚝의 형상 또는 임피던스 log 를 도출하였다. 이 방식은 장시간이 소요되었으며 high pass filtering 및 지수적 증폭으로 변질된 측정파형에 대해서 여전히 합리적이고 세심한 signal matching 이 요구되었기 때문에 항상 성공적인 분석결과를 얻기 힘들었다. 지수적 증폭은 또한 지반저항 효과를 감안하는 추가적인 방법으로도 사용되었다.

이와 같이 PITWAP 에서의 signal matching 과정에서는 세(3)가지의 다른 방법들이 지반저항 효과를 고려하기 위해서 사용되었다.

당초의 Pile Profile Program 에 있어서는 지반저항 효과를 고려하기 위해 첫째 임피던스 계산을 위한 reference curve 를 설정한 다음, 분석과정을 단순화하기 위해, 설정된 reference curve 의 위치를 옮길 수 있도록 했으며 마지막으로 측정 속도파에 대해 high pass filtering 과 지수함수적 증폭을 추가 적용하여 좀더 신뢰성 있는 계산결과를 얻도록 하였다.

다시 말하면 지반저항 효과가 배제된 Pile Profile 을 계산하기 위해서 네(4)가지 수단들이 동원되었다.

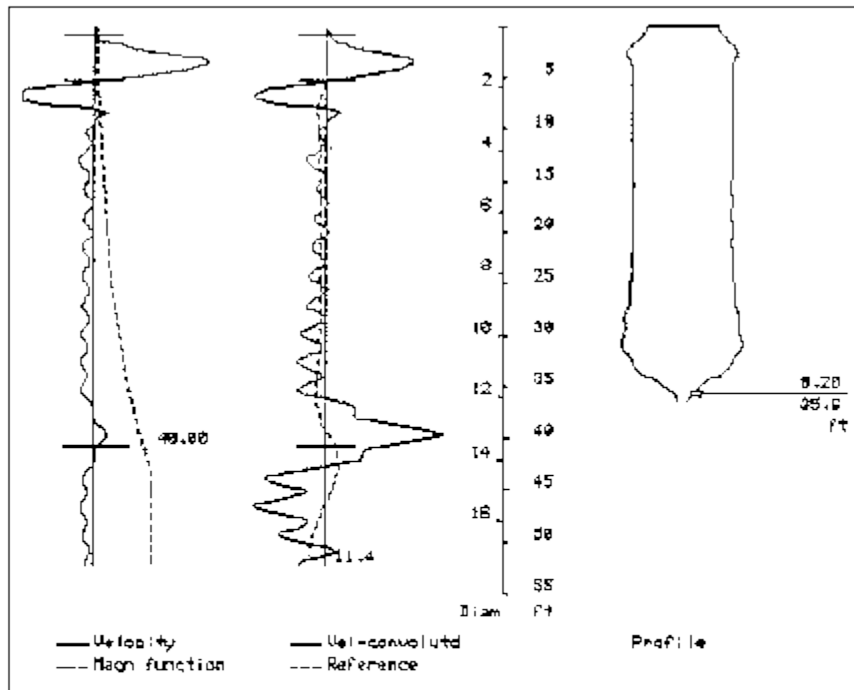
위와 같은 이유로 인해, 흔히 PITWAP 방법은 toe signal 이 충격파와 비슷한 크기로 증폭되지 못한다든지 또는 toe signal 이 나타나지 않은 측정파를 분석한다든지 등의 적절치 못한 방식으로 사용되었다.

PITSTOP 의 Profile program 은 이를 보완한 방법으로서, 지반저항 효과를 감소시키기 위해 세(3)가지 수단을 사용한다.

이들은 high pass filtering, 지수함수적 증폭 및 기본적으로 convoluted velocity 의 저주파 성분만을 포함하는 reference line 들이며 convoluted velocity curve 와 reference

line 과의 차이를 임피던스 변화로 해석한다.

다음 [그림 4.2.4]를 자세히 살펴보면 convoluted velocity 의 어떤 부분은 측정된 것과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.



[그림 4.2.4] 측정 속도 파형과 증폭 배율(왼쪽)

convoluted velocity와 reference line(중앙)

profile 분석결과(오른쪽)

(3) FREQUENCY PROGRAM

이 분석방법은 TRM(Transient Response Method)에 의한 것으로서 기본적으로 힘과 속도 모두에 대해 주파수 영역에서의 분석을 수행하며 mobility 와 동적강성도(dynamic stiffness)를 계산해 낸다.

mobility 는 velocity spectrum 을 force spectrum 으로 나눈 것이므로 속도의 더 높은 주파수 부위가 해당 힘이 낮아(force spectrum 에서) 작게 나타난다면 mobility 는 원래의 velocity spectrum 에서보다 해당 부위를 보다 명확하게 보여줄 것이다.

만약 힘과 속도가 비례관계(proportionality)를 이룬다면 힘에 대한 속도의 비는 $1/Z'$ 이 되어야 한다.

1/Z' 보다 큰 mobility 값은 힘이 속도에 비해 낮음을 뜻하며 이는 저항력(지지력)이 작거나 혹은 강성도(stiffness)가 낮은 말뚝으로 해석할 수 있다.

이와는 반대로 낮은 mobility 값은 높은 지지력 또는 강성도를 갖는 말뚝을 가리키는 것으로 볼 수 있다.

geometric average 또는 characteristic mobility 값은

$$M_A = \sqrt{PQ}$$

로 표시되며 여기서 P 와 Q 는 각각 mobility 곡선에서 가장 높은 정점(highest peak)과 가장 낮은 정점(lowest peak)을 나타낸다.

이값은 1/Z 단위로 표시되며 보통 0.5/Z 와 2/Z 사이의 값을 갖는다. M_A 값은 P 와 Q 가 결정되는 주파수간격(frequency interval)에 따라 변한다. PITSTOP 에서 이 간격은 100 Hz에서 시작하여 도화된 spectrum 의 끝까지 계속된다.

말뚝의 동적 강성도(dynamic stiffness)는 대략 50 Hz의 주파수 f_0 에서의 mobility 값 M_0 로부터 다음식에 의해 계산된다.

$$E_D = 2\pi f_0 / M_0$$

만약 mobility 가 원점과 f_0 사이에서 직선형태를 나타내지 않는다면 dynamic stiffness 값은 의미를 갖지 못한다.

dynamic stiffness 는 낮은하중에서 탄성적으로 회복이 가능한 말뚝의 스프링 강성도와 관련이 있으며 EA/L 값과 비교될 수 있다. 강한 선단부 신호(toe signal)는 임피던스감소로 인한 陽(+)의 신호와 마찬가지로의 낮은 말뚝의 강성도를 나타낸다.

이와 같이 건전도와 지반의 저항력 모두 어느정도 동적 강성도값(dynamic stiffness)에 의해 정량화 될 수 있다.

만약 몇차례의 타격에 의해 힘과 속도의 파를 측정할 수 있다면 FREQUENCY Program 은 이들 파형 curve 사이의 Coherence 를 계산하여 나타내 준다.

실제로 이러한 Coherence 분석은 측정된 몇 개의 파형 기록들 서로간의 주파수 성분이 얼마나 잘 부합(match)하는지를 검사하는 것이다. 잘 부합된 부분의 Coherence 값은 1 이 된다. 낮은 Coherence 값을 나타내는 기록 부분들은 말뚝의 품질 또는 길이를 결정하는데 사용되어서는 아니된다.

註) a. mobility 계산에 있어서 high pass filtering 은 급속 Fourier 변환을 실시하기전의 속도파에 대해 적용하며 이에 는 주충격파를 포함한다.

이러한 filtering 은 측정파의 저주파 성분(low frequency components)을 감소시켜

의미있는 동적 강성도(dynamic stiffness)를 계산할 수 있도록 하기 위함이다.

b. mobility spectrum 에서의 동적강성도(dynamic stiffness)는 대략 50 Hz 부근에서 계산하며 이 값은 millisecond 로 표시되는 측정파의 길이(T)에 의해 좌우된다.

분석에는 4096 point 를 포함하므로 측정파의 길이는 $4096 \div F_D$ (F_D 는 digitizing frequency)가 된다.

예를 들어 $F_D = 30000$ 인 경우 $T = 137\text{ms}$ 가 되며 따라서 frequency 의 최소 증분(増分) $\Delta f = 1/T = 1000/137 = 7.3 \text{ Hz}$ 가 되며 dynamic stiffness 계산을 위해 선정된 point 는 $7.3 \text{ Hz times } 6 \approx 44 \text{ Hz}$ 가 된다(이 다음의 point 는 50 Hz를 초과하게 됨).

이 분석방법은 정확한 말뚝의 임피던스값과 함께 알맞게 교정된 힘과 속도의 기록이 측정되었을 경우에만 의미있는 결과를 얻을 수 있다.

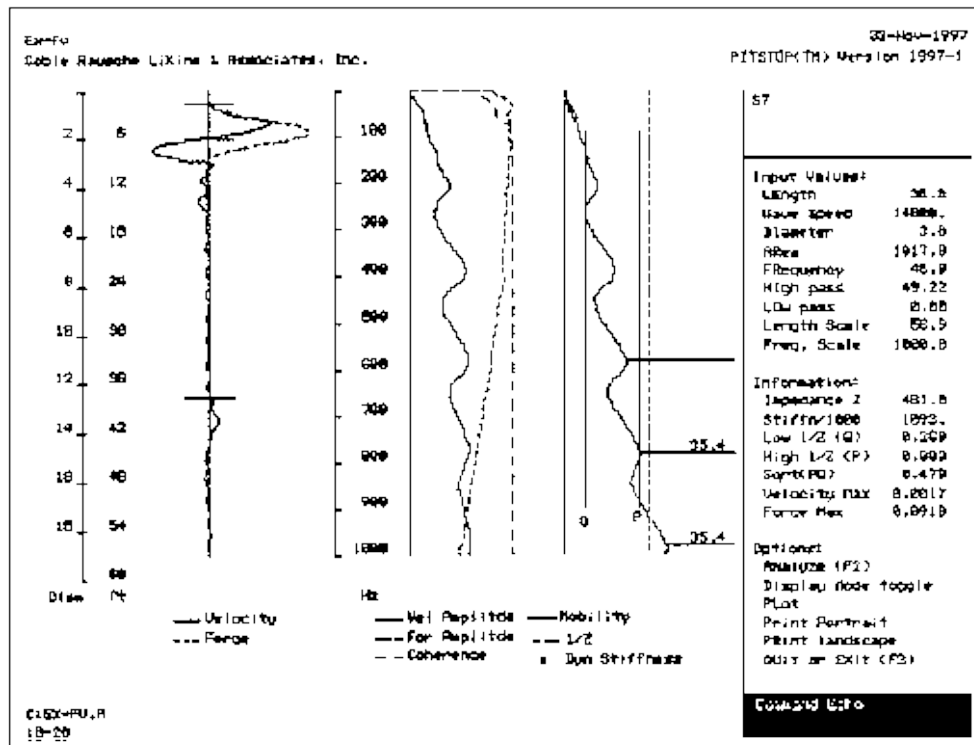
속도만 측정된 경우에도, 가정에 의한 힘의 파형 (속도의 타격파×말뚝의 임피던스)을 사용하여 역시 주파수 분석을 실시할 수 있으나 정량적인 결과를 산출해 낼 수는 없다.

측정된 힘과 속도파에 의한 TRM 분석결과는 유사한 상태로 시공된 무리말뚝간의 상대적 품질 비교를 위해 유용하게 사용할 수 있다. 말뚝의 길이 또는 주요 손상/결함 부위의 위치 등은 주요 mobility 정점들에 의해 나타나는 주파수 차이를 통해 얻을 수 있다.

단, 합리적인 분석결과를 얻기 위해서는 말뚝길이 및 wave speed 에 대한 정확한 정보가 필수적이며 이들 값의 결정은 사전에 PITPLOT 분석을 통해 이루어져야 한다.

PITPLOT 에 의해 선택된 high pass filter, magnification 및 pivoting 등은 이 분석에서 무시된다.

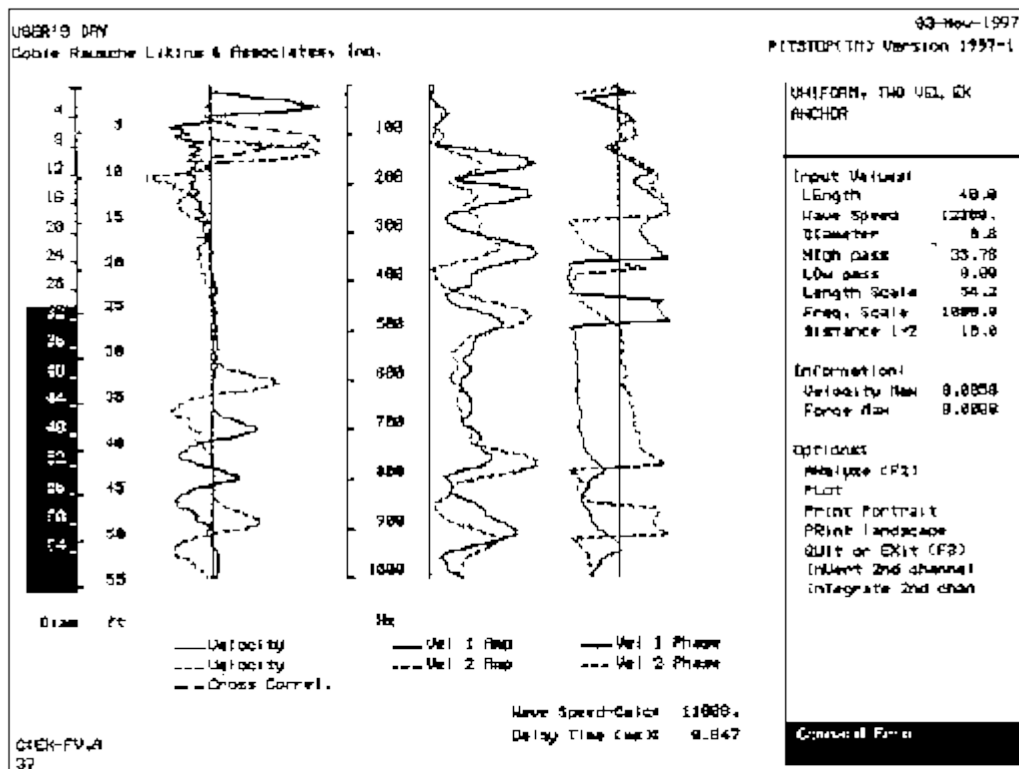
다음 [그림 4.2.5]은 FREQUENCY PROGRAM 에 의한 분석결과의 한 예이다.



[그림 4.2.5] FREQUENCY 분석결과(예)

(4) Two(2) VELOCITY PROGRAM

이 분석방법은 정해진 거리만큼 떨어진 2 개소의 위치에서 측정된 속도파를 이용하여 해당말뚝의 wave speed 를 계산해 내는 것으로서 말뚝의 두부 노출이 불가능한 기존 구조물에 대해 적용할 수 있다.



[그림 4.2.6] 2-Velocity 분석결과(예)

윗 [그림 4.2.6]는 직경 0.8ft (24cm)의 콘크리트 말뚝에 3m 거리를 두고 부착한 2 개의 가속도계를 통해 측정된 기록을 분석한 것이다.

2 개의 속도파 사이에는 0.847ms 의 시간차(差)가 있으며 따라서 이 말뚝의 wave speed 는 11800ft/sec (3540m/sec)가 됨을 알 수 있다.

화면 오른쪽에 나타난 것은 진폭 및 위상 spectrum 이다.

5. PIT 시험의 제한사항

■ PIT 시험에서 기본적으로 발견가능한 사항들로서는 말뚝재료의 임피던스(impedance) 변화에 따른 단면형상(확대 또는 축소), 말뚝의 시공길이파악(계획길이 대비 실제 길이), 충격 압축파의 속도(wave propagation velocity) 변화에 따른 콘크리트 품질 등을 들 수 있다. 이들 사항이 제대로 파악되기 위해서는 근본적으로 양호한 파형이 측정되어야 하며(clear toe signal) 기술자의 경험과 판단지식이 수반되어야 한다.

■ PIT 시험은 말뚝의 지지력이나 말뚝본체의 강도 등을 측정하기 위한 시험이 아니라 시공상태의 양호, 불량 여부를 파악하기 위한 시험이므로 PIT 시험결과에 의한 구조적

검토(지지력 시험, 강도시험)의 필요성은 엔지니어가 추가적으로 결정하여야 할 사항이다. 즉 비파괴 시험으로 강도를 검토하고자 할 때는 검측공을 이용한 Sonic Logging Test 를 PIT 와 병행하여 실시하므로써 종합/판단할 수 있을 것이며, Static 또는 Dynamic Test 에 의하여 지지력을 확인할 수 있다.

■ 일반적으로 PIT 를 포함한 NDT(Non-Destructive Testing)방법으로 측정한 시험결과는 아래와 같은 4 가지 범주로 구분할 수 있으나 이들을 명확하게 정량적(quantitative)으로 구분할 수 있는 수치는 없으며 시험결과에 따라서는 기술자의 경험과 engineering judgement 에 의존하는 비중이 큰 것으로 알려져 있다.

범주 A - 말뚝시공상태가 양호함을 분명히 알 수 있는 경우
(clear indication of a sound pile shaft)

범주 B - 말뚝시공상태에 심각한 결함이 있음을 분명히 알 수 있는 경우
(clear indication of a serious defect)

범주 C - 말뚝시공상태에 다소의 문제가 있음을 파악할 수 있는 경우
(indication of a somewhat defective pile shaft)

범주 D - 측정결과가 어떤 결론을 내리기에 불충분한 경우
(records don't support any conclusions)

■ 각각의 범주에 대하여 부가적으로 설명하면 다음과 같다.

「범주 A」는 선단부 확인이 분명(clear toe signal)하고 말뚝의 길이나 말뚝몸체의 건전성에 문제가 없는 경우를 말하며, 「범주 B」는 분명한 선단부 확인을 전제로 말뚝의 시공길이가 계획길이보다 현저하게 짧거나 긴 것으로 판단할 수 있는 경우 또는 말뚝몸체의 심각한 necking 이나 bulging 이 확인되는 경우이며, 「범주 C」는 「범주 B」와 비교할 때 상대적으로 소규모인 결함을 판단할 수 있는 경우이고, 「범주 D」는 시험전 콘크리트 말뚝의 표면처리가 불량하면 충격에너지의 분산 때문에 분명한 파형을 얻을 수 없어 해석이 곤란한 경우로서 재시험을 수행할 필요가 있는 경우이다.

■ 참고사항으로서 PIT 시험에 의한 발견가능결함(can be detected defects)과 감지할 수 없는 결함(can not be detected)을 열거하면 아래와 같다.

- 발견가능 결함 -

- a) 기준말뚝(reference pile)이 있는 경우 계획시공길이보다 5% 이상 짧게 시공된 말뚝(기준말뚝이 없을 때는 10% 이상 짧은 경우)
- b) 말뚝단면이 분리될 정도의 완전한 균열, 예를 들어 수축에 의하여 발생한 무근말뚝 부위의 노출크랙 또는 굴착도중 시공장비에 의해 손상된 부분 등에서는 완전한 반사파(complete wave reflection)가 형성되므로 감지가능함. 단, 이러한 균열

직하(直下)의 결함은 감지하기 어려움.

- c) 선단부 반사파(toe signal)를 분명하게 확인할 수 있을 정도의 충분한 충격 energy 가 제공된다면, 약 20% 이상의 임피던스 감소현상을 감지할 수 있음. 만일 기준말뚝이 없거나 toe signal 이 불분명할 경우에는 경험적 방법(rule of thumb)으로 해석할 수 있으며 이 경우 말뚝길이가 대략 30D(D : 말뚝직경)정도까지의 범위내에서 결함의 존재여부를 파악할 수 있음.
- d) 임피던스 변화에 대한 정량적 평가는 공칭 임피던스(nominal impedance)에 대하여 20% 정도의 정밀도를 갖는정도로 한정되며 20% 이하의 결함은 확실있는 판단이 쉽지 않음.

- 발견할 수 없는 결함 -

- a) 말뚝주변의 지반저항의 영향으로 임피던스 변화가 복잡하게 형성되는 부분적으로 산재하는 균열
- b) 임피던스 변화가 50% 이상 발생하는 경우에는 매우 복잡한 파형을 형성하게 되어 해석이 어려우며 특히 이러한 큰 임피던스 변화 부위의 바로 아래에 있는 결함.
- c) 충격파의 폭(impact pulse width)의 수배이상 거리를 두고 발생하는 콘크리트 재질의 점진적인 손상 또는 단면적 변화
- d) 충격파 전파속도는 $\pm 5\%$ 정밀도에 그치므로 정확한 말뚝길이 산정은 이의 영향을 받게됨.
- e) 선단부 반사파(toe signal)가 아주 분명한 경우에는 예외이나 대체로 30 D 이상의 길이를 갖는 말뚝시공상태