

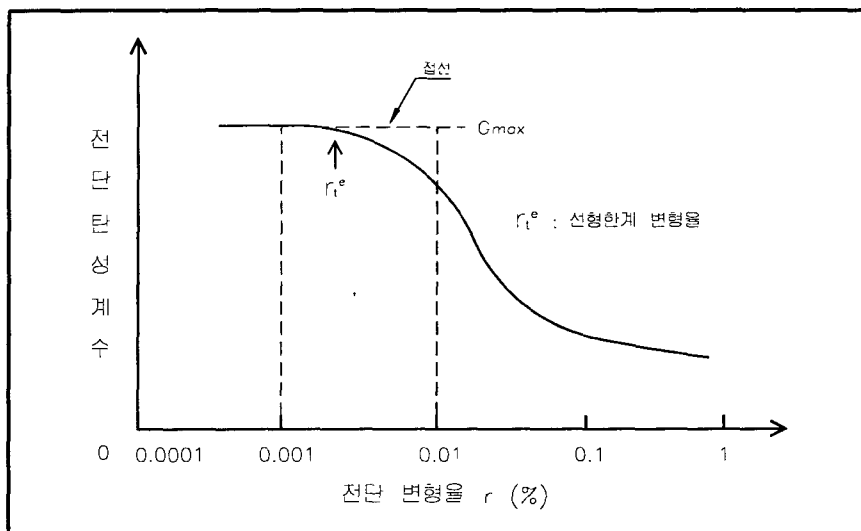
해저퇴적지반의 미소 변형율에서의 변형특성에 관한 연구

Deformation Characteristics of Marine Deposit Soil Under Small Strain

(주) 천일지오컨설팅 대표 이사 장 찬 수
 기술연구소/이사 조 성 민
 기술연구소/차장 윤 원 섭*
 기술연구소/주임 김 성 택

1. 서 론

지진과 같은 동적하중을 받는 구조물의 설계를 위해서는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)에 대한 안정해석이 필요하며 이를 위해서는 동적지반계수의 결정이 필요하다. 이 경우 동적지반계수는 지반에 발생하는 변형율의 크기에 따라 달라질 수 있다. 지반의 변형특성은 <그림-1>에서와 같이 변형율 크기와 변형계수의 관계로 나타내는데, 여기서 선형영역과 비선형영역을 구분하는 선형한계변형율(r_1^0) 이하의 미소변형율 상태에서는 변형율 크기에 관계없이 선형거동을 나타내며, 그 이상에서는 비선형거동을 나타낸다.



<그림-1> 지반의 변형계수와 변형율 관계

지진 등의 진동을 받는 지반의 변형을 범위가 $10^{-4} \sim 10^{-1} \%$ 정도의 범위이므로 삼축, 일축압축 시험 등의 실내강도시험에 의하여 얻을 수 있는 상대적으로 대변형을하에서의 변형특성보다는 미소변형을하에서의 신뢰성있는 동적지반계수의 산정이 필요하다. 이때 미소변형을하에서 지반의 변형특성을 알아보기 위한 현장시험으로는 주로 탄성과탐사법이 사용되며, 대변형을까지 포함하기 위해서는 공진주 시험, 진동삼축압축시험 등의 실내시험을 병행해야 한다.

따라서 본고에서는 해저퇴적지반을 대상으로 미소변형을하에서의 지반변형특성을 알아보기 위한 방법으로 탄성과 속도측정법에 의한 Suspension P·S(S·P·S)검층법 및 다운홀 P·S검층법을 이용하였다. 현장시험으로부터는 동적지반계수를 산정하기 위한 기본요소인 토층별 압축파(V_p) 및 전단파 속도(V_s)를 구하고 이로부터 현장 최대전단탄성계수 (G_{max})_{field}를 구하였다. 또한 동일지반에서 채취한 비교관시료에 대한 실내시험(공진주시험)결과와 합성하여 미소변형에서 대변형에 이르기까지 변형을 크기에 따른 변형계수의 변화를 구하였다. 아울러 경험식으로부터 구한 최대전단탄성계수(G_{max})와도 비교하였고, 조사공에서 실시한 표준관입시험(SPT) N치와 V_s 와의 상관관계에 대해서도 알아보았다.

2. 지반의 동적변형특성 측정방법

지반의 동적변형특성을 측정하는 대표적인 방법으로는 실내시험에 의한 방법(변형을 크기에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비, 액상화 관련계수 등의 파악), 현장에서 탄성파를 이용하는 방법(토층별 압축파 및 전단파속도분포 파악)등이 있다.

2.1 실내시험에 의한 방법

지반의 변형특성을 고려한 동적지반물성치를 결정하기 위한 실내시험은 크게 반복재하식방법과 동적시험방법의 두가지로 구분된다. 전자는 비틀전단(Torsional Shear : TS)시험, 진동삼축(Cyclic Triaxial)시험, 진동단순전단(Cyclic Simple Shear)시험, 진동탁자(Shaking Table)시험 등이며, 후자는 Pulse Test, 공진주(Resonant Column : RC)시험 등이다. 이들 각 시험 방법별 측정 가능한 동적 지반 물성치는 <표-1>과 같다.

실내시험의 경우 시료채취에 따른 교란의 영향, 응력해방, 재성형방법 등에 따라 미소변형조건외의 전단탄성계수를 구하는데는 차이가 발생할 수 있지만 변형율의 증가에 따른 변형특성에는 큰 차이를 보이지는 않는다.

<표-1> 각 실내시험 방법별 측정 가능한 동적지반물성치

항 목	전단탄성계수(G)	탄성계수(E)	감쇠비(D)	반복용력작용시 지반특성
공 진 주	0	0	0	-
Ultrasonic Pulse	0	0	-	-
진동삼축	-	0	0	0
진동단순	0	-	0	0
비틀전단	0	-	0	0
진동탁자	0	-	-	0

2.2 현장에서 탄성과탐사법을 이용하는 방법

현장에서 탄성과탐사법을 이용하여 지반의 동적변형특성을 측정하는 방법에는 시추공을 이용하는 경우와 지표면에서 실시하는 경우로 구분된다. 전자의 경우 P·S검층(Cross Hole, Down Hole), Suspension P·S검층(S·P·S) 등이 있으며, 후자의 경우 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave) 시험법 등이 있다. 이들 시험법의 장단점은 <표-2>와 같다.

<표-2> 현장 시험방법별 장단점

Cross hole 법	Down hole 법	SASW 시험
<ul style="list-style-type: none"> · 두개 이상의 시추공 · 간단한 공내발진자 · 주로 P파와 SV파 사용 · 파의 진행경로길이가 일정 · casing의 영향이 적음 · 자세한 지층구조 조사 가능 · 비용이 비교적 큼 	<ul style="list-style-type: none"> · 한개의 시추공 · 간단한 표면(푸로브내)발진자 · 주로 P파와 SH파 사용 · 깊이에 따라 파의 진행경로 길이가 증가 · casing의 영향이 가능 · 평균적인 지층구조로 조사 · 비용이 비교적 적음 	<ul style="list-style-type: none"> · 시추공이 필요없음 · 간단한 표면발진자 · 표면파 이용 · 지표면 측정으로 파의 진행 경로길이는 일정 · 비관입이므로 영향이 없음 · 평균적인 지층구조로 조사 · 시험의 수행이 빠르고 경제적

특히 해상지역의 경우 진동을 해저지반에 전달하는 것이 곤란하기 때문에 발진기와 수신기가 1개의 Probe내에 갖추어져 있어 시추공내에서 독립적으로 측정이 가능한 Suspension P·S검층법을 사용한다. 측정된 탄성과파속도(V_p : P파 속도, V_s : S파 속도)를 이용하여 동적지반계수(Poisson's ratio, 동강성률, 동탄성계수)를 산출할 수 있다.

① 현장 최대전단탄성계수 (동강성률)

$$(G_{\max})_{field} = \rho \times V_s^2 / g \times 10^{-1} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

여기서 ρ : 밀도 (g/cm^3), g : 중력가속도

② 포아송비

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]}$$

여기서 V_p : P파 속도 (m/s), V_s : S파 속도(m/s)

③ 탄성계수 (영률)

$$E_d = 2G_d(1 + \nu) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

2.2.1 Downhole P · S검층법

(1) 개요

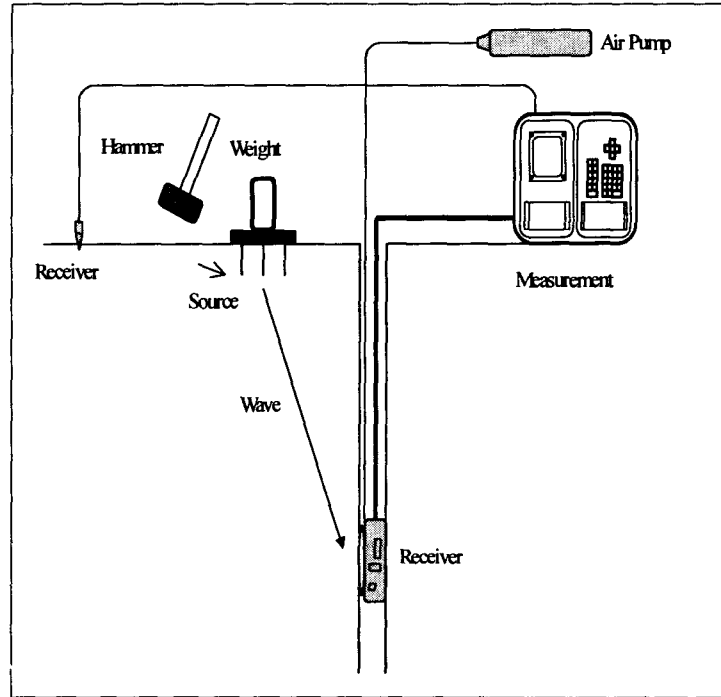
P·S검층법과 같은 속도검층은 시추공 주변 지반에서 P파(Primary wave)와 S파(Secondary wave)라고 하는 2종류의 탄성과 전파속도를 측정하여 지반의 물리적 성질을 조사하는 기법이다. P파는 종파 또는 압축파라고도 하며, 파동의 진행방향으로 진동하면서 전파하는 파동이고, S파는 횡파 또는 전단파라고 하며, 파동의 진행방향에 수직인 방향의 면내에서 진동하면서 진행하는 파동이다. S파에는 진동방향에 따라 SH파와 SV파의 2종류로 나눈다.

(2) 원리 및 측정방법

속도검층에 사용되는 진원은 P파용과 S파용으로 크게 구분되며, P파의 경우는 진원판에 해머를 이용하여 수직으로 타격을 가하고, S파의 경우는 수평하게 타격을 가함으로써 에너지를 발생시킨다. 특히 S파를 발생시키기 위해 진원판을 수평 양방향으로 반복하여 타격을 가함으로써 S파의 위상이 상호 반전된 형태로 수신할 수 있기 때문에 S파의 도달을 쉽게 인지할 수 있다. 이때 P파는 매질에 전단변형없이 체적변형만을 일으키고 매질입자의 운동방향은 파의 전파 방향과 같다. S파는 P파와는 반대로 매질의 체적변형없이 전단변형만을 일으키며 매질입자의 운동방향은 파의 전파방향과 수직을 이룬다. 일반적으로 P파의 진원쪽이 S파의 진원보다 큰 에너지를 발생시킨다. 수신기는 P파를 측정하기 위한 수직성분(z)과 S파를 측정하기 위한 2개의 수평성분(x 및 y)으로 구성되어 있으며 이 수신기를 측정하고자 하는 심도에 위치시켜 앞에서 설명한 바와 같은 방법으로 생성된 P파와 S

파를 측정하게 된다.

P·S 검층에 대한 개념도는 <그림-2>에 나타냈다.



<그림-2> P·S 검층에 대한 개념도

2.2.2 Suspension P·S검층법

(1) 개요

발전기와 수신기를 일련의 Probe에 연결하여 보링공 내의 각심도별로 구간 전파시간을 측정함으로써 지반의 P파 및 S파의 속도를 구하게 된다. 특히 종래의 지표기진, 공내 수신방식의 PS검층(Downhole법 등)으로는 해상탐사가 불가능한데 반하여, Suspension P·S검층법은 이를 개선하여 육상은 물론 해상까지도 적용이 가능한 방법이다.

Suspension P·S검층법의 측정개요도는 <그림-3>과 같다.

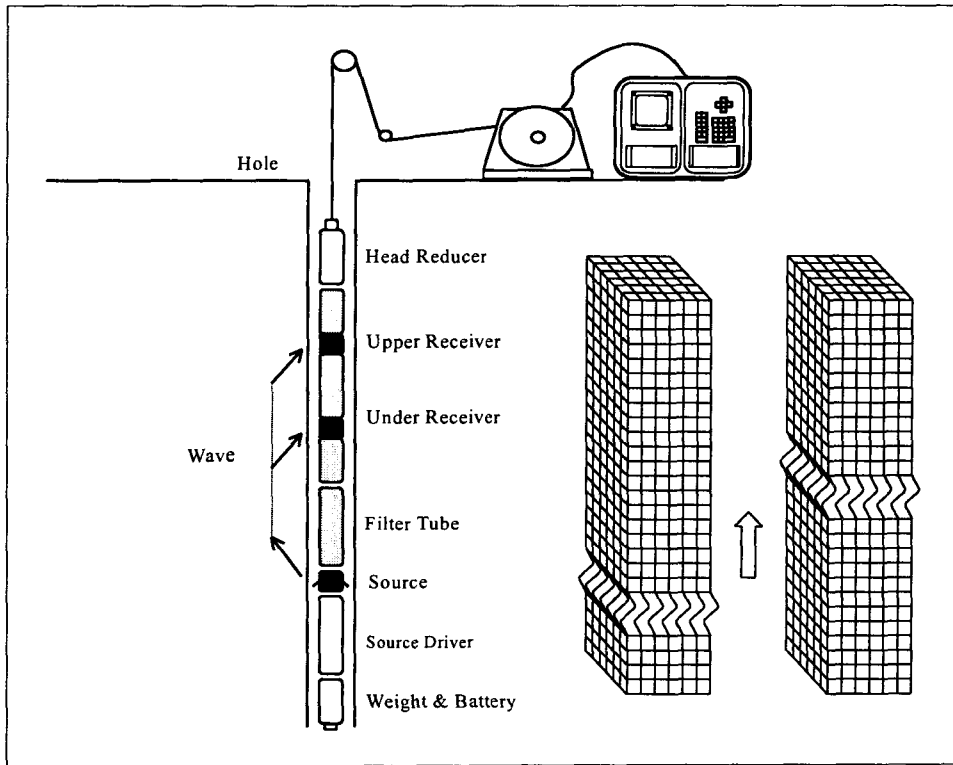
(2) 원리 및 측정방법

① 발전방법

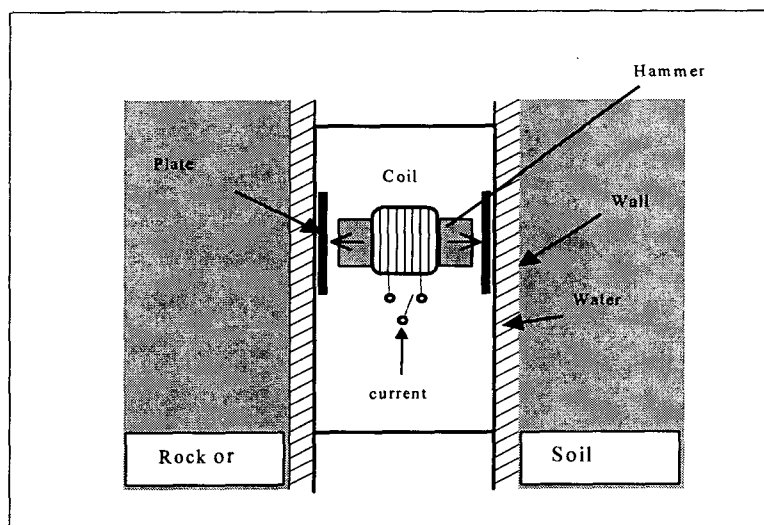
원리는 일반적인 스피커의 진동과 같은 원리로서 Sonde에 내장된 코일을 감은 원통형 철심에 전류를 흘려보내면 전자 해머가 공축과 직교방향으로 진동하게 된다.

공내는 물로 채워져 있는데, 이때 철심에 순간적으로 전류를 흐르게 하면 전자해머가 한쪽 방향

으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하면 반대측의 물은 부의 압력을 받는 형태가 된다. 이러한 압력 분포가 주변의 지반에 전달되어 지반을 변형시킴으로써 P파와 S파를 동시에 발생시키게 된다. <그림-4>에는 발진방법에 대한 개요도를 나타내었다.



<그림-3> Suspension PS 검층 개요도

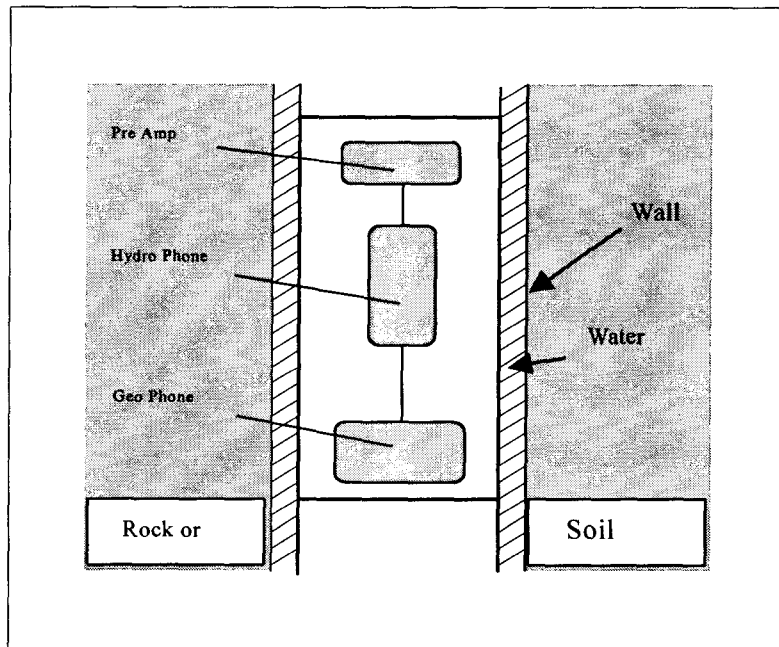


<그림-4> 발진방법

② 수진방법

위 발진방법에서 설명한 바와 같이 진원에서 발생된 파는 지반을 통해 전파하게 되면 이 파는 진원의 상부에 있는 2개의 수진부에 도달하게 된다. 본 Suspension P·S 검층법은 두 수진부에 도달하는 파의 시간차이를 측정함으로써 파가 전파하는 구간의 P파 및 S파의 속도를 구하게 된다. Suspension P·S 검층법은 기존의 Downhole법과는 달리 수진기를 공벽에 밀착시키지 않는 비압착식으로 P파 및 S파를 수진할 수 있는 방법이다.

수진기는 <그림-5>에 나타난 바와 같이 수직으로 움직이는 파(P파)와, 수평으로 움직이는 파(S파)를 수진하는 센서는 물의 비중과 거의 같은 비중통에 설치되어 있다.



<그림-5> 수진방법

③ P파 및 S파 속도의 계산방법

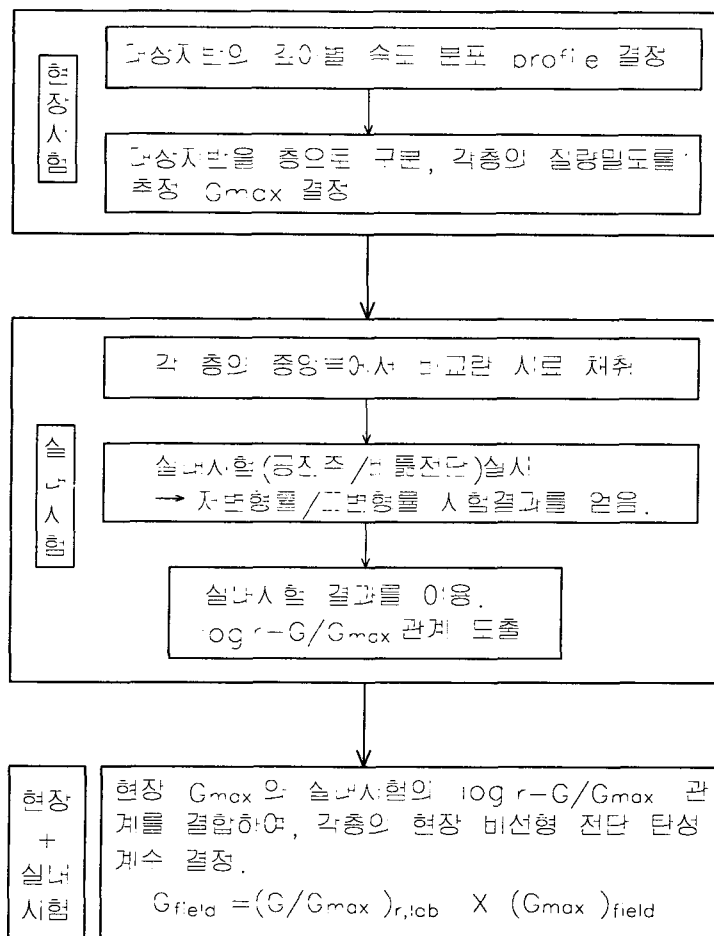
측정한 기록파형은 디스크에 Digital 수치로 저장한다. 이 디스크를 실내 컴퓨터에서 S파와 P파로 분리한다. 수진기는 발진기의 상부쪽에 필터 케이블로 연결되어 있고, 2개의 수진기 사이는 1m 간격으로 떨어져 있어 두 수진기 사이의 파의 도달 시간차를 구함으로써 두 수진기 사이구간 지반의 속도를 계산한다. 즉 두 수진기 사이의 거리가 1m 이므로 두 수진기 사이의 도달시간 차이를 구하게 된다면 그 구간의 속도(V)는 도달시간 차이(T)의 역수가 된다($V=1/T$).

측정심도는 1m 간격의 상하 2개의 수진기의 중간심도로 하며, 산출된 속도치 V_p 및 V_s 는 측정심도의 상하 0.5m 구간의 평균치를 의미한다.

2.3 실내시험과 현장시험과의 관계

현장시험으로 대상지반의 토층별 증방향 속도분포도를 작성하여 미소변형율하($10^{-8} \sim 10^{-6}\%$)에서의 현장 최대전단탄성계수 $(G_{max})_{field}$ 를 구하고, 실내시험으로부터는 변형율 크기에 따른 정규화전단탄성계수(G/G_{max})를 구하여, 이 두개의 결과를 결합하여 현장 비선형 전단탄성계수(G_{field}) 분포도를 작성한다.

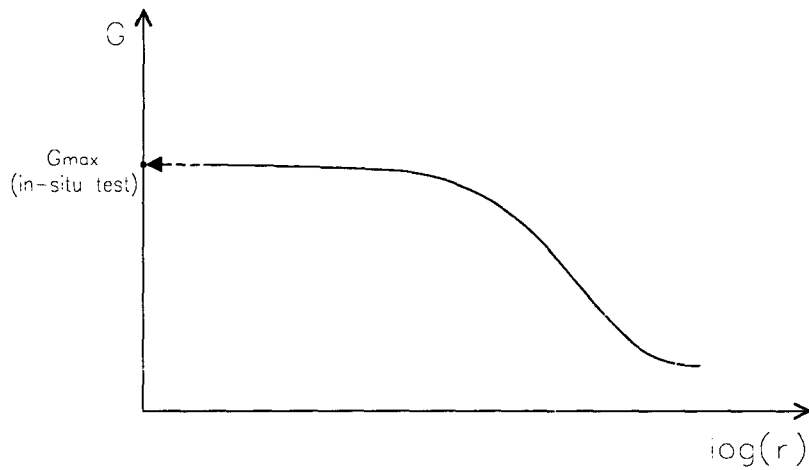
이같은 현장 및 실내시험결과의 조합과정을 설명하면 다음 흐름도와 같다.



<그림-6> 현장시험결과와 실내시험결과의 조합 흐름도

<그림-6>에서 볼 수 있듯이 현장시험과 실내시험을 동시에 시행하는 이유는, 현장시험의 경우 변형율 크기에 따른 전단탄성계수의 변화를 관찰할 수 없으며, 실내시험의 경우 응력해방, 시료교란 등으로 현장의 상황을 그대로 재현할 수 없기에 미소변형조건에서 정확한 최대전단탄성계수를 구하

기는 어렵기 때문이다. 실내시험의 정규화 그래프는 구속압의 조건에 상관없이 일정한 루프를 그리기 때문에 현장에서 구한 최대전단탄성계수를 선형영역의 시점으로 하면 변형율에 따른 실제적인 전단탄성계수를 구할 수 있다. 보통 실내시험(공진주시험)의 구속압은 모든 시료에 대해 3단계로 하여 지반 평균주응력의 1/2, 현장지반 평균주응력, 현장지반 평균주응력의 2배로 재하하여 실시한다. 각 단계에 대해 변형율에 따른 전단탄성계수의 곡선을 얻은 후 각 단계의 최대값으로 정규화한 그래프를 그리게 되면 3단계의 곡선이 일치하는 것을 확인할 수 있다. <그림-7>과 같이 정규화 그래프에 대해 현장에서 구한 최대전단탄성계수를 결합하여 변형율에 따른 실제지반의 전단탄성계수를 구할 수 있다.



<그림-7> 현장의 G_{max} 와 실내시험의 $\log \gamma - G/G_{max}$ 관계의 결합

2.4 경험식에 의한 추정방법

Hardin & Black(1968)은 지반의 전단탄성계수에 영향을 미치는 요소들에 대한 여러 연구를 통해 다음의 함수관계로 이를 표현하였다.

$$G = f(\bar{\sigma}_0, e, A, H, f, C, \theta, \tau_0, S, T)$$

여기서, $\bar{\sigma}_0$ = effective mean principal stress

e = 간극비

A = 전단변형률의 크기

t = 시간, 시간의 크기, 응력증분의 크기를 함수로 하는 2차 영향인자

- H = 응력 이력 및 진동이력
- f = 진동 주파수
- C = 입자 특성
- θ = 흙 구조
- τ_0 = octahedral shearing stress
- S = 포화도
- T = 온도

2.4.1 사질토지반의 경우

Seed & Idriss(1970)는 상대밀도에 따른 $K_{2(max)}$ 값을 제시하여 최대전단탄성계수 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

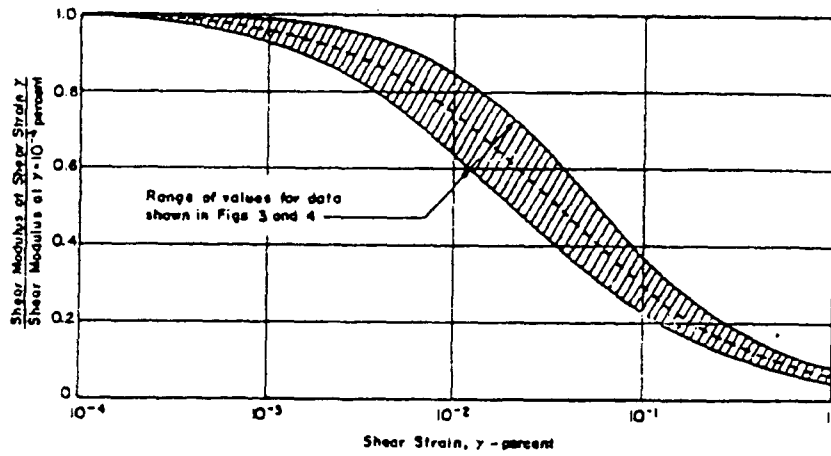
$$G_{max} = 1000K_{2(max)} (\bar{\sigma}_0)^{0.5} \text{ (PSF)}$$

$K_{2(max)}$ 값은 느슨한 모래에 대해 30정도의 값에서 조밀한 모래의 경우 약 75까지 변하는 값으로 다음 <표-3>과 같이 상대밀도에 따른 $K_{2(max)}$ 값을 제시하였다.

<표-3> 상대밀도에 따른 $K_{2(max)}$ 값

Relative density, $R_p(\%)$	$K_{2(max)}$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	61
90	70

<그림-8>은 Seed & Idriss가 사질토에 대해 제안한 변형율에 따른 G/G_{max} 곡선이다.



<그림-8> 사질토의 $\log \gamma - G/G_{max}$ 관계(Seed & Idriss)

2.4.2 점성토지반의 경우

Hardin & Drnevich(1972)는 미소변형율에서의 최대전단탄성계수, G_{max} 를 다음 식으로 표현하였다.

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^k \sigma_0^{-1/2} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad \text{<Hardin - 1>}$$

<표-4> 소성지수와 k의 관계

Plastic Index	k
0	0
20	0.18
40	0.3
60	0.41
80	0.48
100 이상	0.50

그후 Hardin(1978)은 다시 넓은 간극비 영역에서 적용성이 좋으며 계수의 차원이 맞는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot P_a^{1-n} \cdot \bar{\sigma}_0^n \quad \text{<Hardin - 2>}$$

여기서, A = 무차원계수

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$$

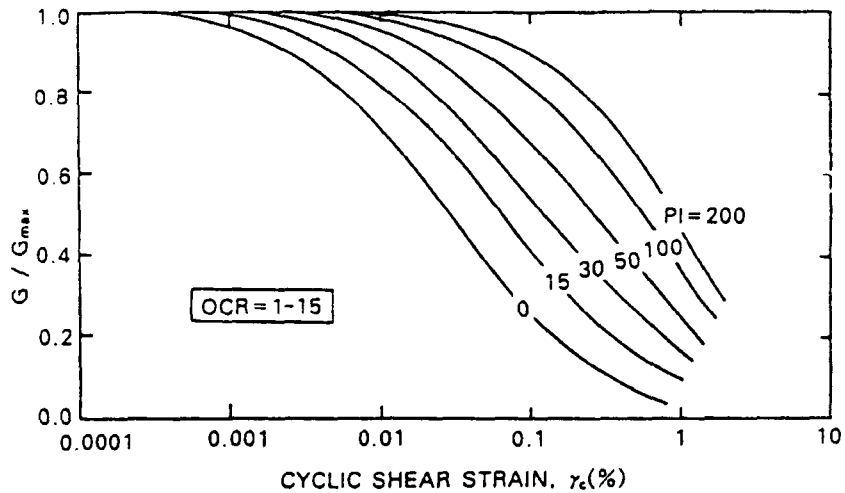
k = 소성지수에 관련된 계수

P_a = 대기압

n = 구속압영향계수

$\bar{\sigma}_0$ = effective mean principal stress

<그림-9>는 Vucetic & Dobry가 제안한 소성지수 및 변형율에 따른 G/G_{\max} 곡선이다.



<그림-9> 점성토의 PI - log γ - G/G_{\max} (Vucetic & Dobry)

3. 탄성파탐사법에 의한 해저퇴적지반의 변형특성

3.1 조사내용 및 대상지반의 공학적특성

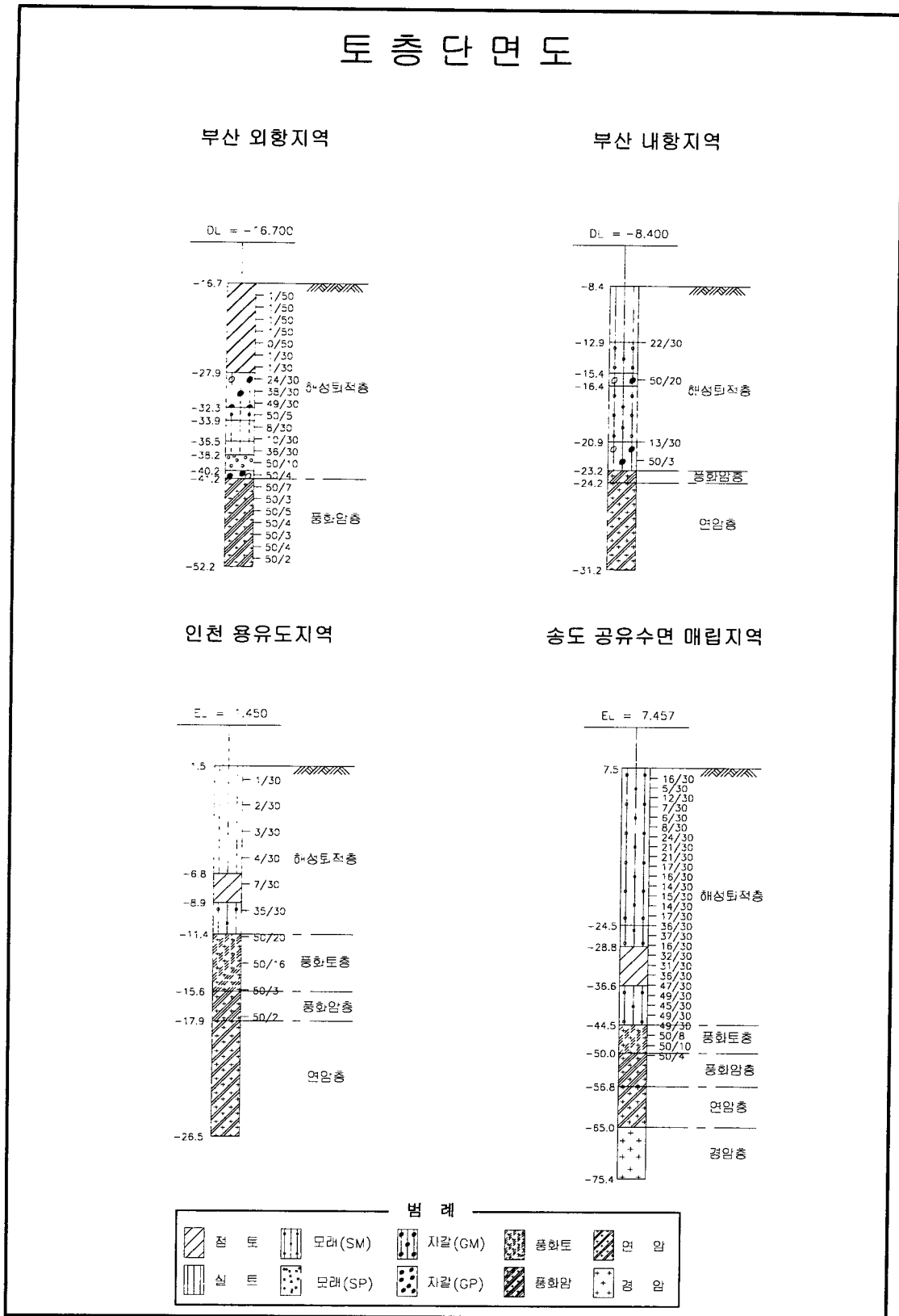
해저퇴적지반의 미소변형율하에서의 변형특성을 알아보기 위한 방법으로 남해안 부산항 인근지역 및 서해안 용유도와 송도 부근 공유수면 매립지역(현 인천 LNG인수기지 건설현장)에 대해 S·P·S 점층과 P·S점층을 실시하여 심도별 토층에 대한 속도분포도와 최대전단탄성계수를 구하였으며, 아울러 표준관입시험 N치 - V_s 상관관계에 대하여도 조사하였다.

조사지역이 해상이므로 해상 기후 조건(파도 및 조류)의 영향을 많이 받아, 종래에 사용하던 합판이나 각목 또는 드럼을 이용하여 제작한 소형 Barge를 사용할 경우 조사결과의 신뢰성에 적지 않은 영향을 받았다. 이에 대한 대책으로 시험결과에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 현장조사시에는 수면 위에 부상하여 파랑, 조류의 영향을 거의 받지 않는 S.E.P.(Self Elevation Platform) Barge를 사용하였다.

<그림-10>은 각 조사지역의 대표적인 토층 단면도를 나타내었으며, 조사지역에 대한 지반물성치 범위는 <표-5>와 같다.

<표-5> 각 조사지역에 대한 지반물성치 범위

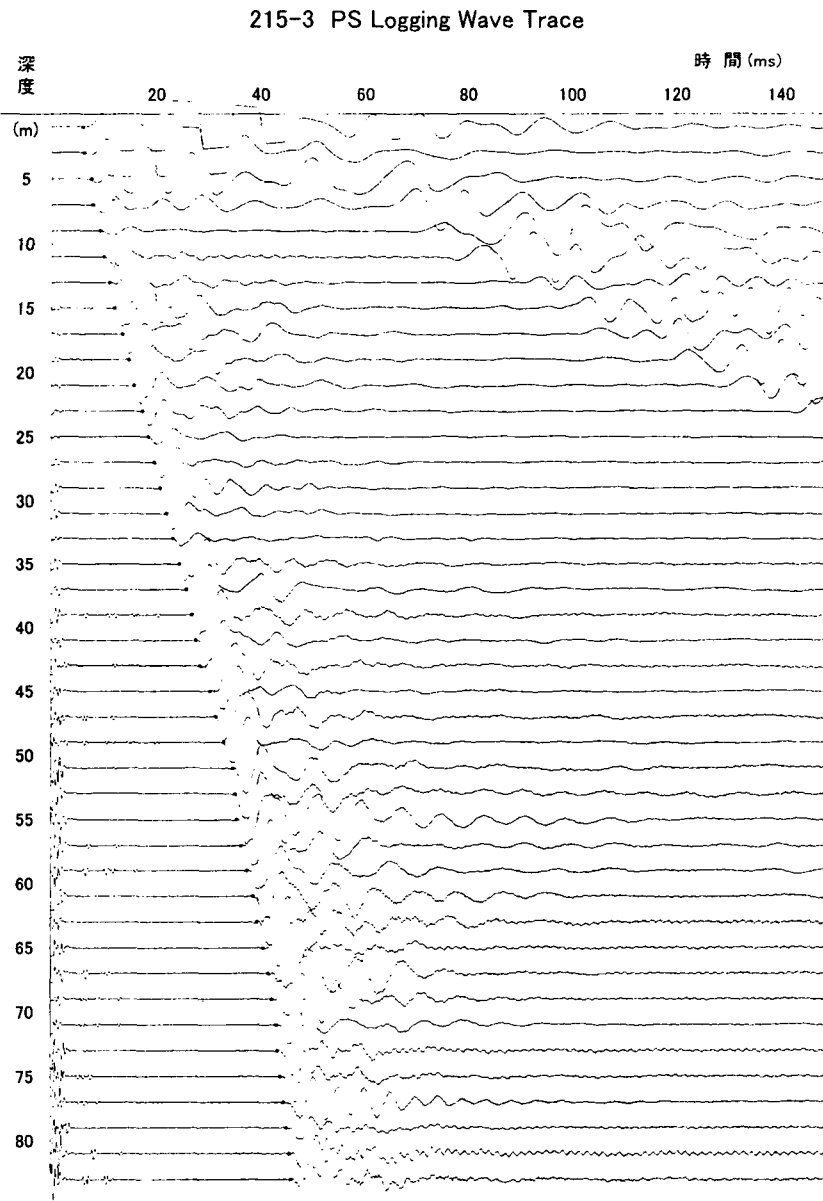
지반 물성치	부산항 외항지역	부산항 내항지역	인천 용유도지역	인천 송도 부근 공유수면 매립지역
함수비(wn, %)	16.8~79.5	26.5~71.1	23.1~34.5	14.0~33.5
액성한계(LL, %)	35.5~76.6	53.3~88.9	30.1~46.1	25.5~34.1
소성지수(PI, %)	14.8~47.1	22.1~48.0	5.3~22.0	6.0~16.5
습윤밀도(r_t , t/m^3)	1.500~1.731	1.597~1.663	1.845~1.965	1.805~1.968
과압밀비(OCR)	0.67~1.42	0.97~3.7	1.23~2.93	-
#200통과량(%)	20~82	15~92	87~93	6~88
통 일 분 류	CL, CH, MH	MH, CH, SM	ML, CL	SM, SP-SM, ML, CL



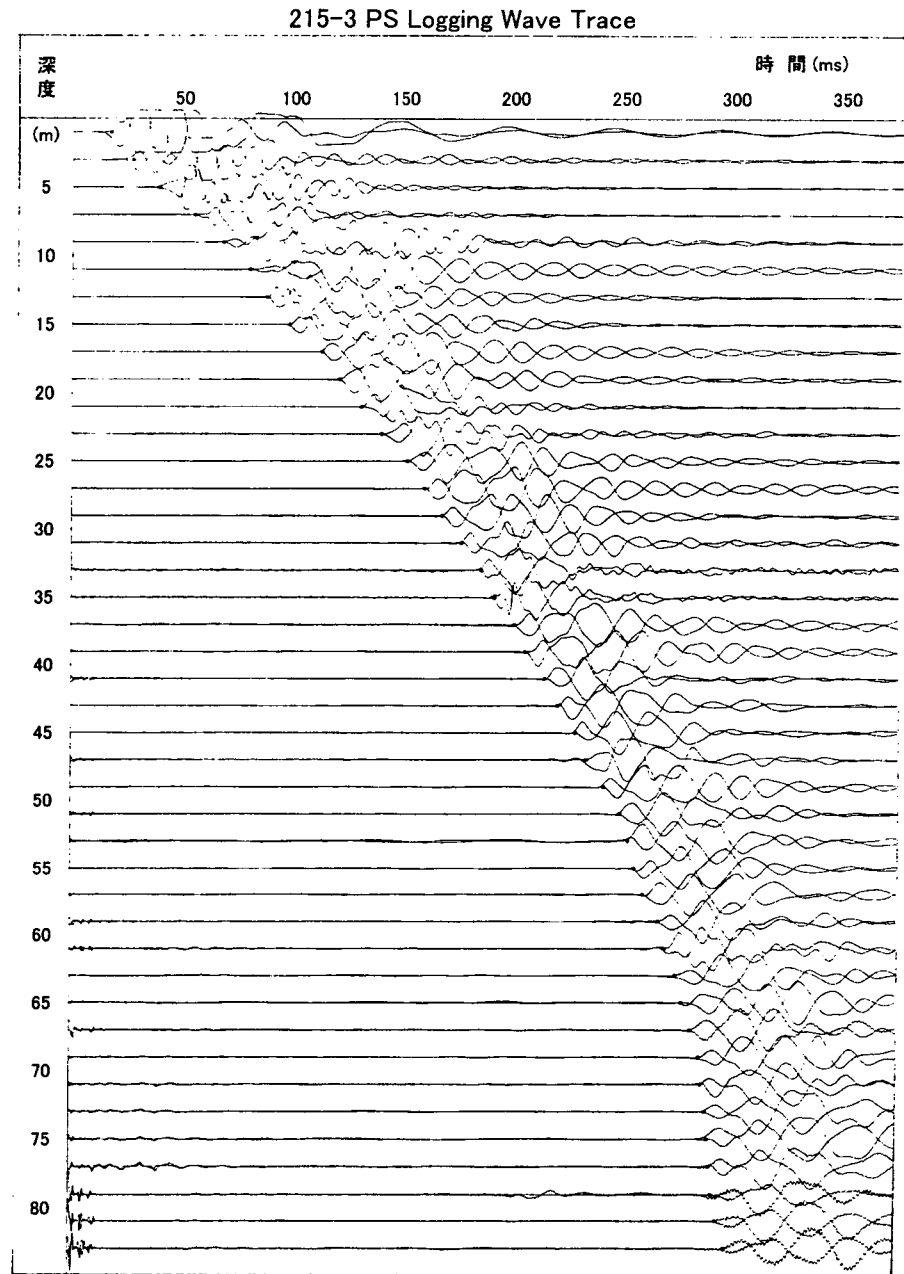
<그림-10> 각 지역별 토층 단면도

3.2 Downhole P·S검층 결과

송도 부근 공유수면 매립지역에 대해서는 육상과 같은 조건이므로 조사가 간편한 다운홀식 P·S 검층을 실시하였으며, 수진기에서 측정된 P파와 S파의 형태를 <그림-11>, <그림-12>에 나타냈으며, <그림-13>은 P·S검층 결과도를 나타내었다. 심도에 따른 전단탄성과 속도와 전단탄성계수, V_s 와 N 치의 관계 그림은 <그림-14>~<그림-16>에 나타내었다.



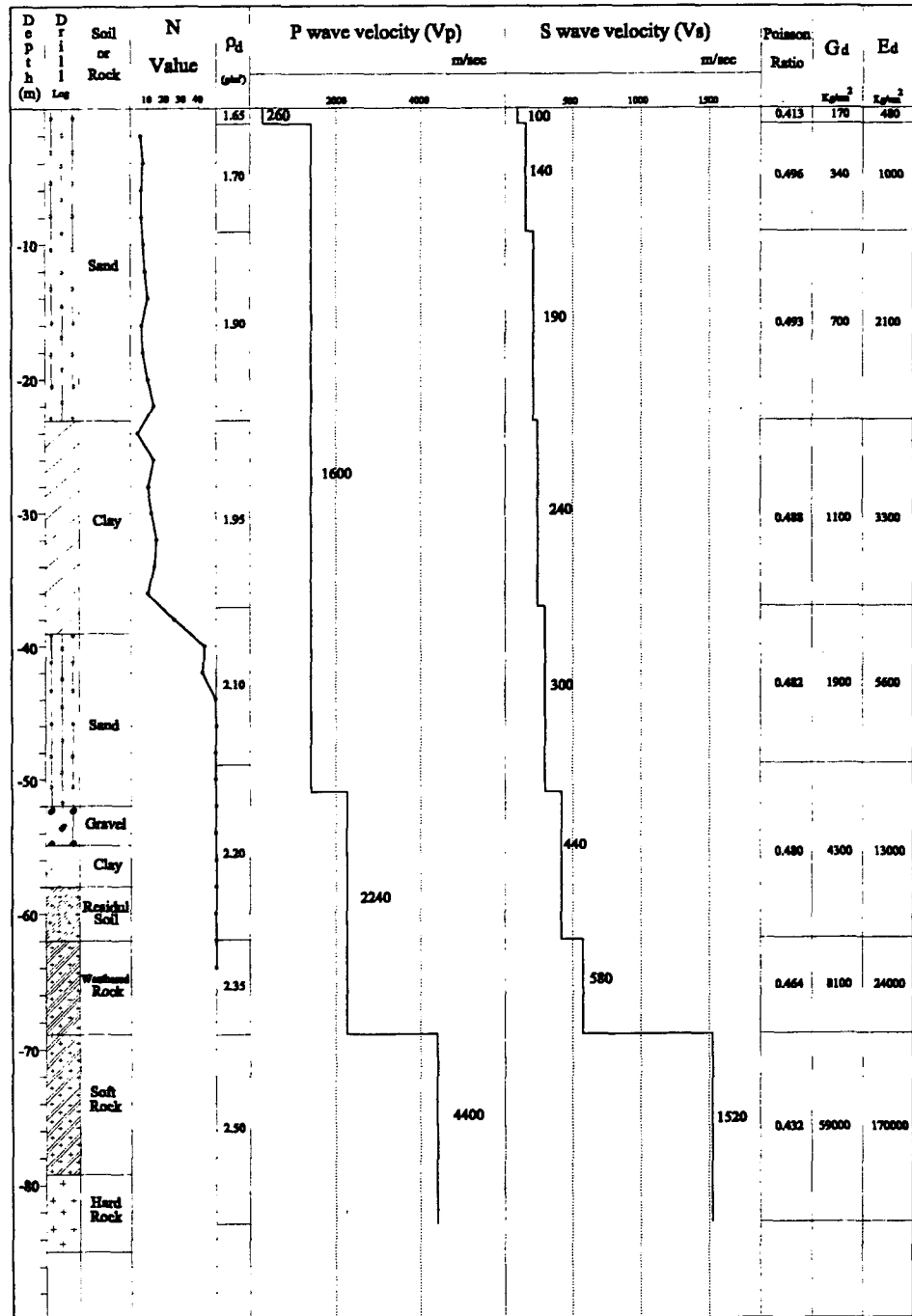
<그림-11> 수진기에서 기록된 P파의 파형



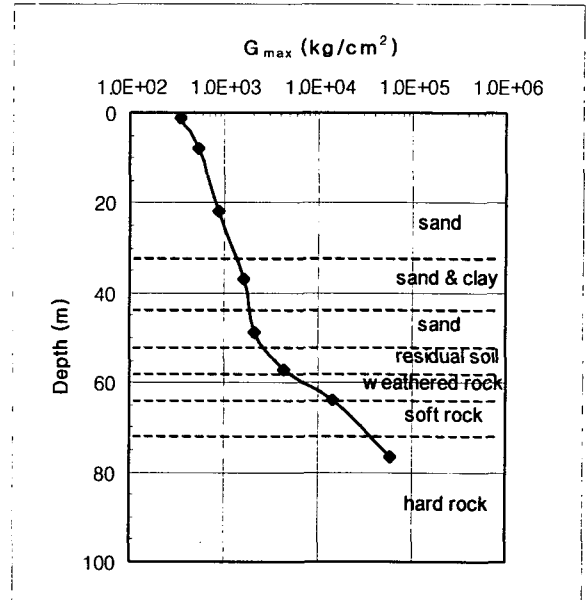
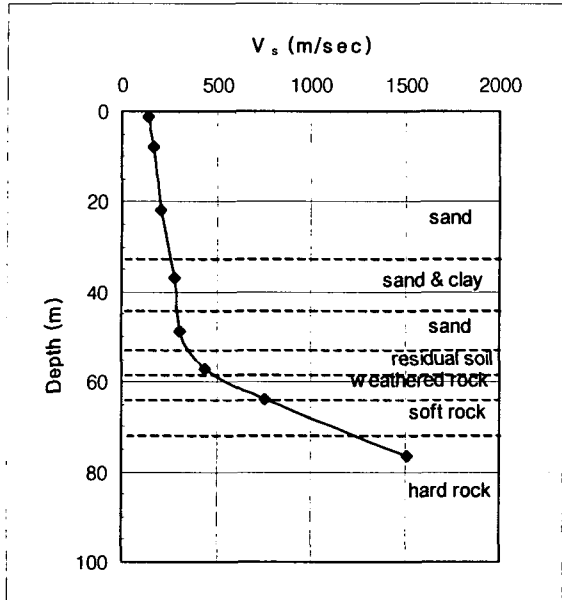
<그림-12> 수진기에서 기록된 S파의 파형

P-S Logging Result Graph

Hole No. 215-3 TANK

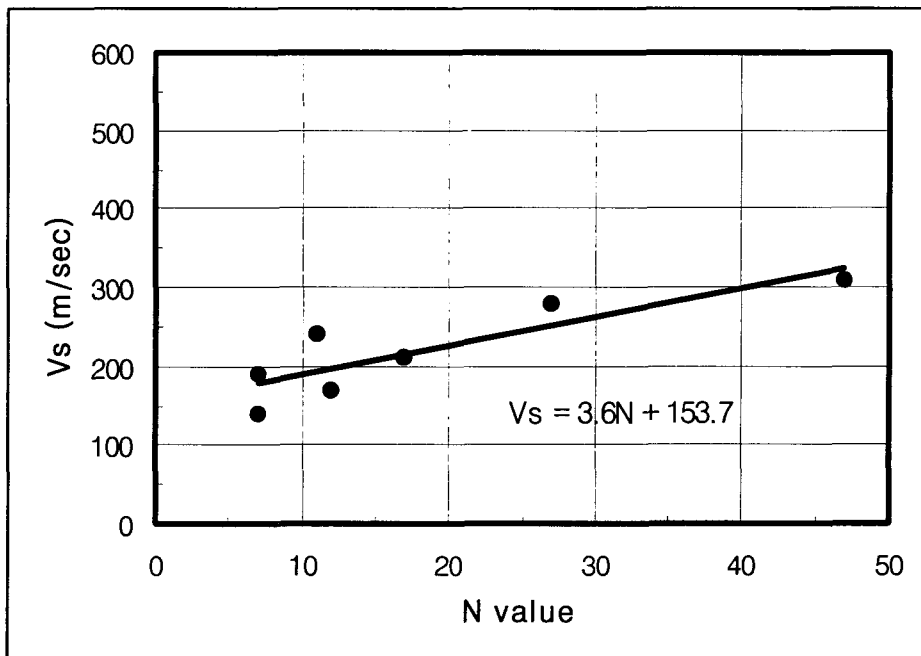


<그림-13> P·S 검층 결과도



<그림-14> 송도 공유수면 매립지역의 V_s 분포도

<그림-15> 송도 공유수면 매립지역의 G_{max} 분포도



<그림-16> 송도 공유수면 매립지역에서의 $N - V_s$ 관계

3.3 Suspension P·S검층 결과

부산항 외항지역의 해저퇴적지반에 대해 S·P·S 검층을 실시하여 상부수진기와 하부수진기에서 기록된 P파 및 S파의 형태를 <그림-17>과 <그림-18>에 나타내었다. <그림-19>는 시험결과인 토층별 P파와 S파 분포와 포아송비(ν), 전단탄성계수(G_d), 탄성계수(E_d)를 나타낸 것이다.

심도에 따른 토층별 V_s 와 G_{max} 의 분포도는 <그림-20>, <그림-21>과 같고, 표준관입시험(SPT) $N - V_s$ 관계는 <그림-22>와 같다.

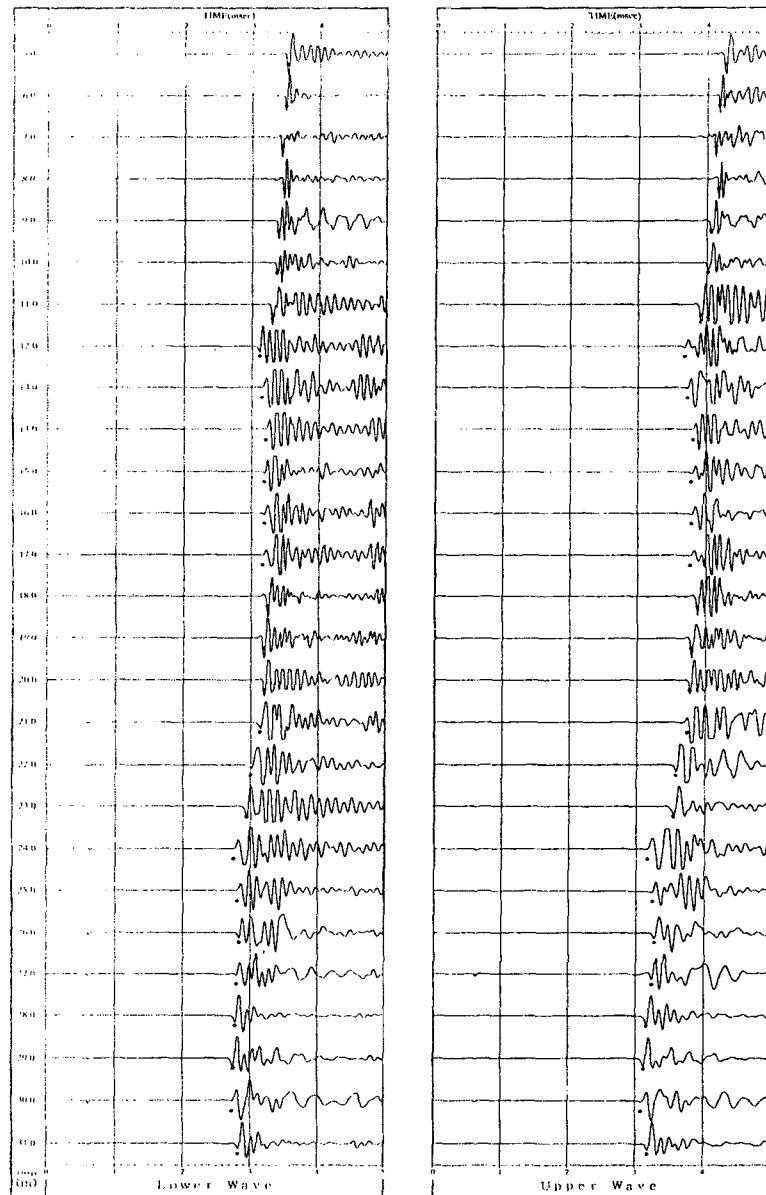


Fig- P-Wave of Suspension PS-Log
-W-21

<그림-17> 상부수진기와 하부수진기에서 기록되는 P파의 파형

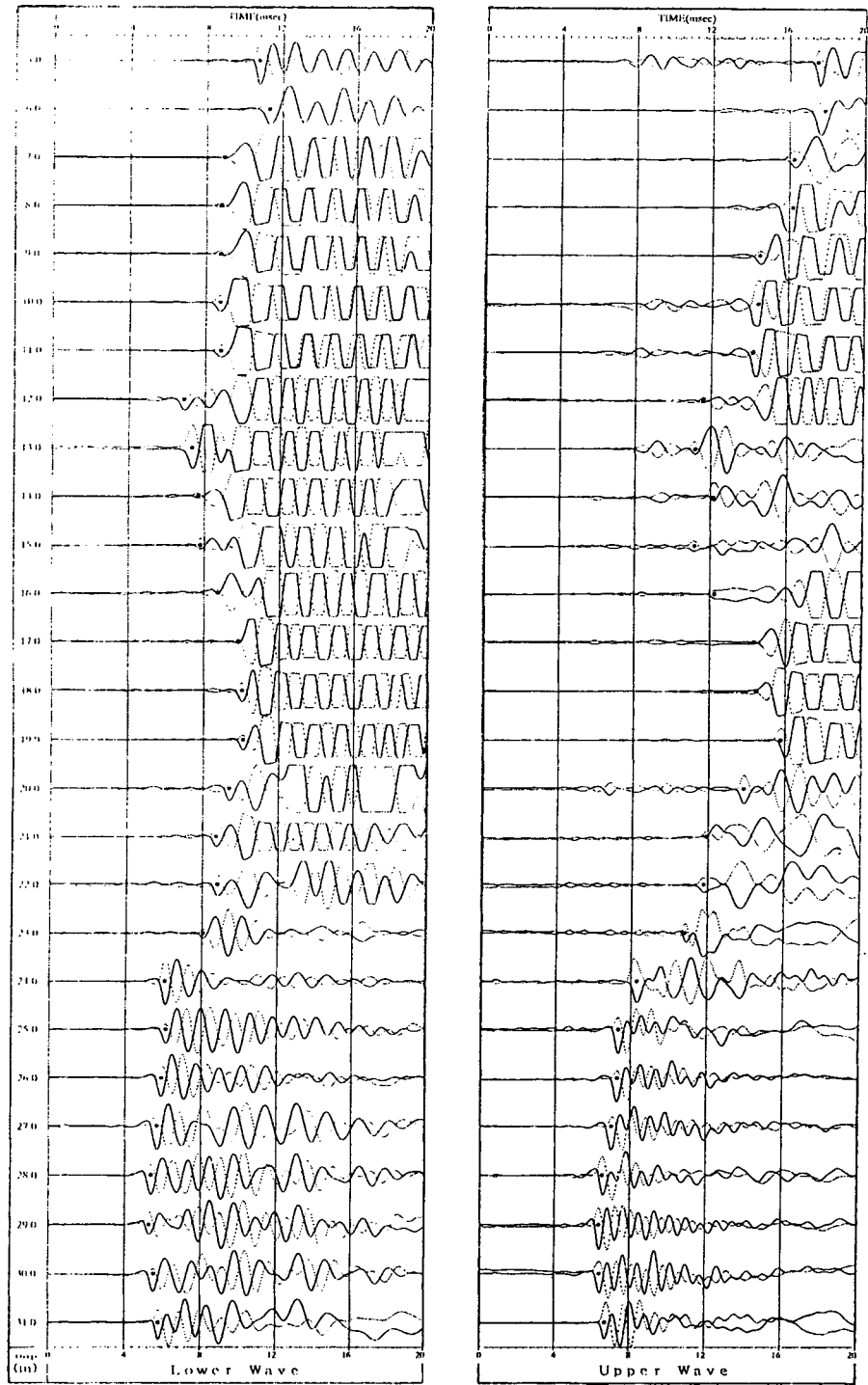
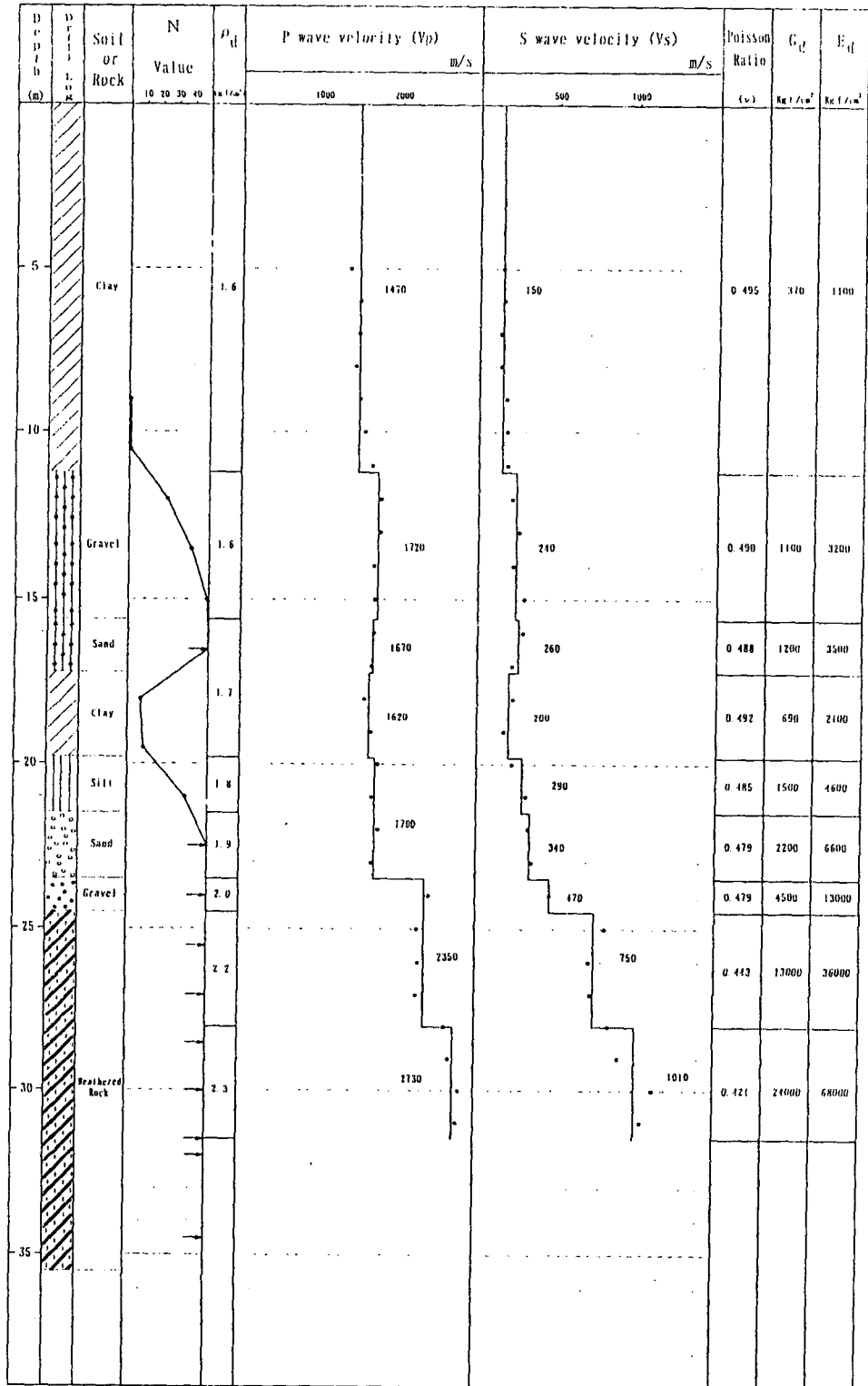


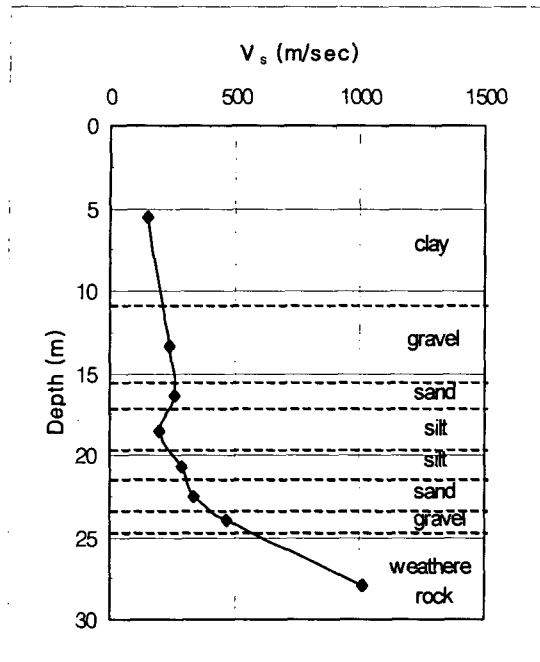
Fig- S-Wave of Suspension PS-Log
-B-21

<그림-18> 상부수진기와 하부수진기에서 기록되는 S파의 파형

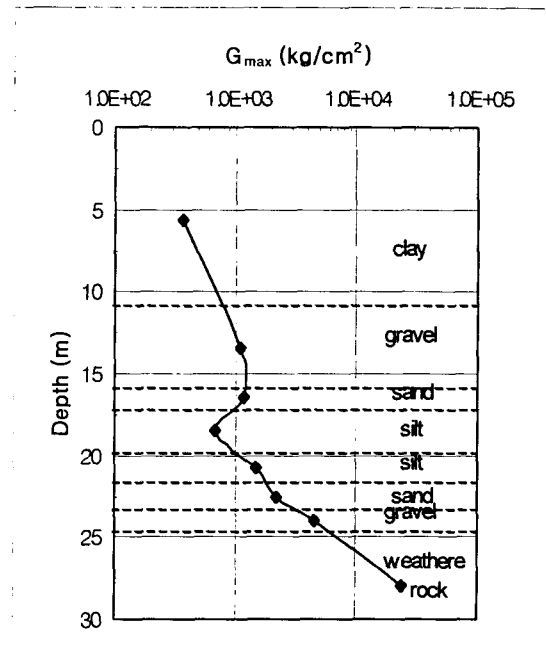
Hole B' - 21 P-S Logging Result Graph



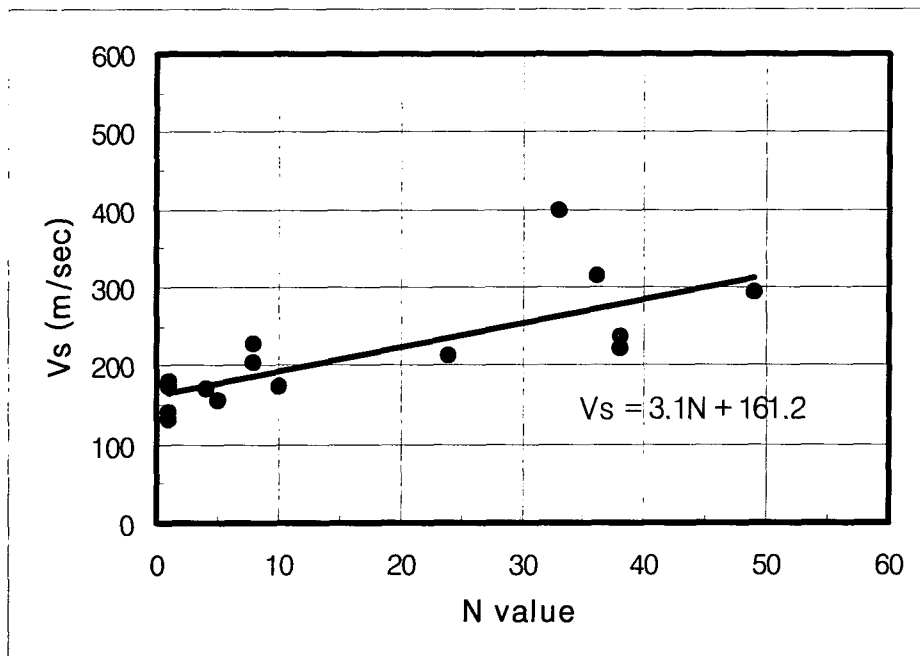
<그림-19> Suspension P·S 검층 결과도



<그림-20> 부산항 외항지역의 V_s 분포도

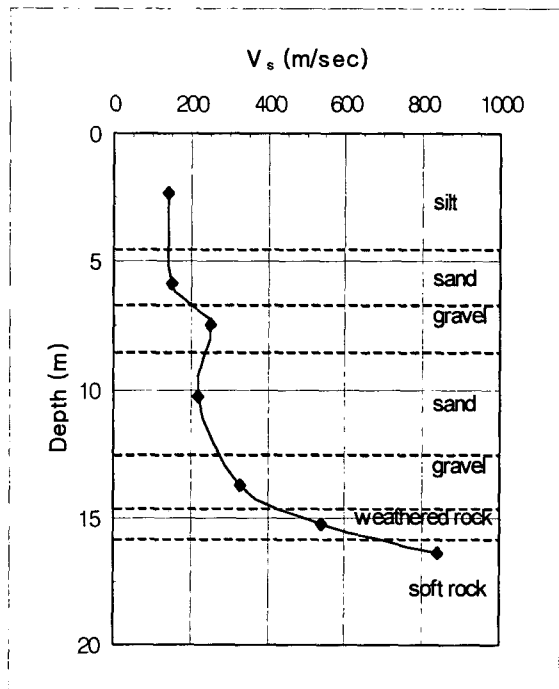


<그림-21> 부산항 외항지역의 G_{max} 분포도

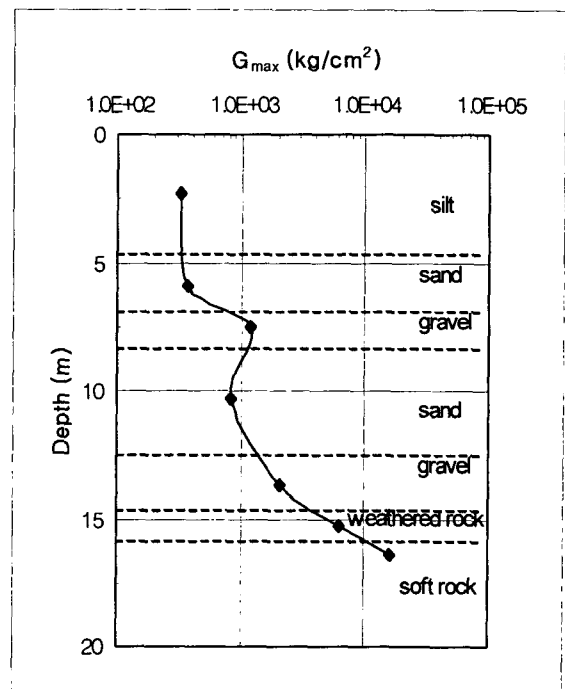


<그림-22> 부산항 외항지역의 N - V_s 관계

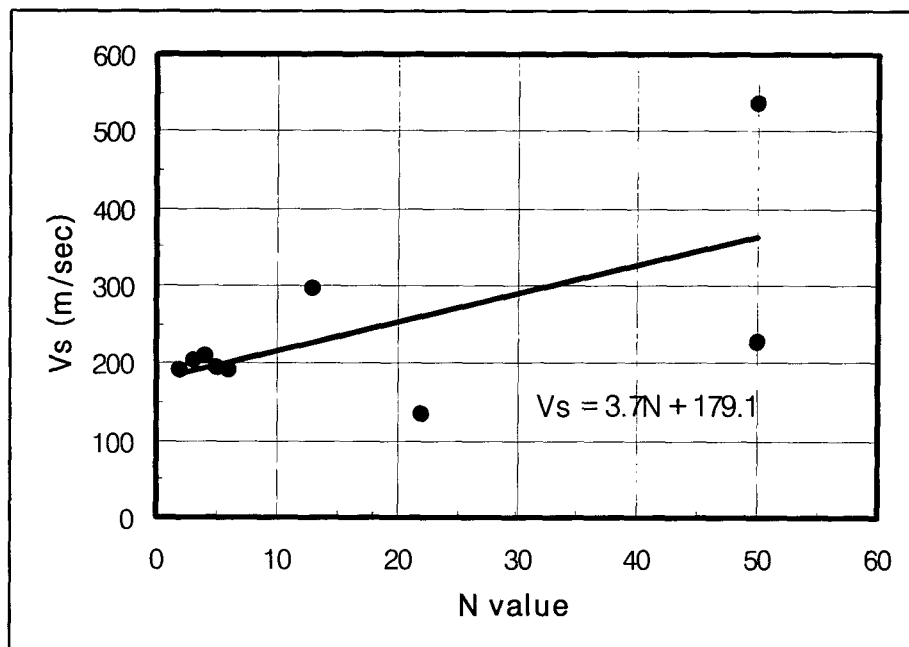
또한, 부산항 내항지역의 해저퇴적지반에 대한 S·P·S검층 결과 V_s 및 G_{max} 의 분포도는 <그림-23>, <그림-24>와 같고, 표준관입시험(SPT) N- V_s 관계는 <그림-25>와 같다.



<그림-23> 부산항 내항 지역의 V_s 분포도

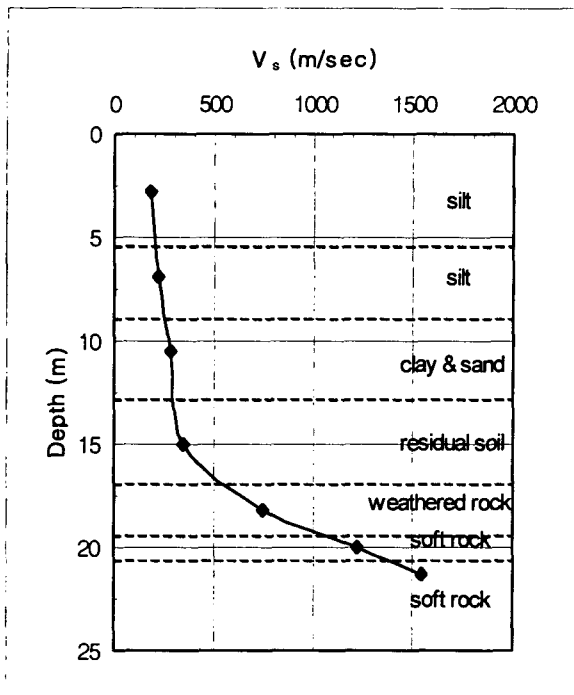


<그림-24> 부산항 내항 지역의 G_{max} 분포도

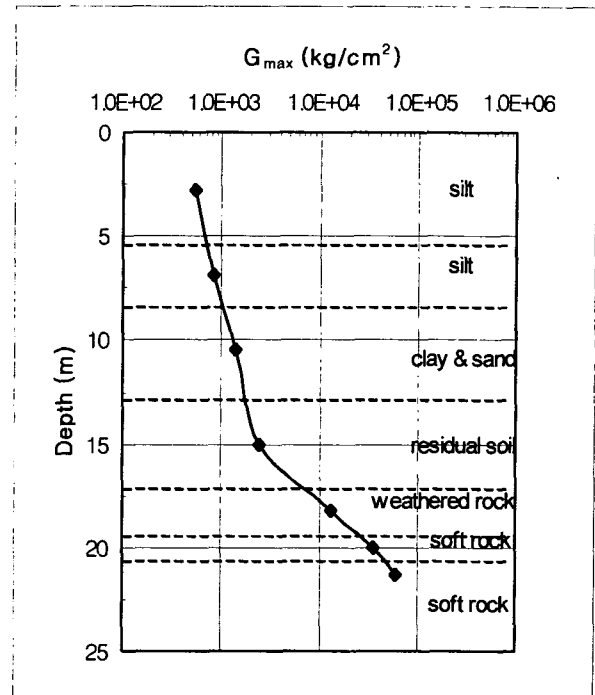


<그림-25> 부산항 내항지역 N - V_s 관계

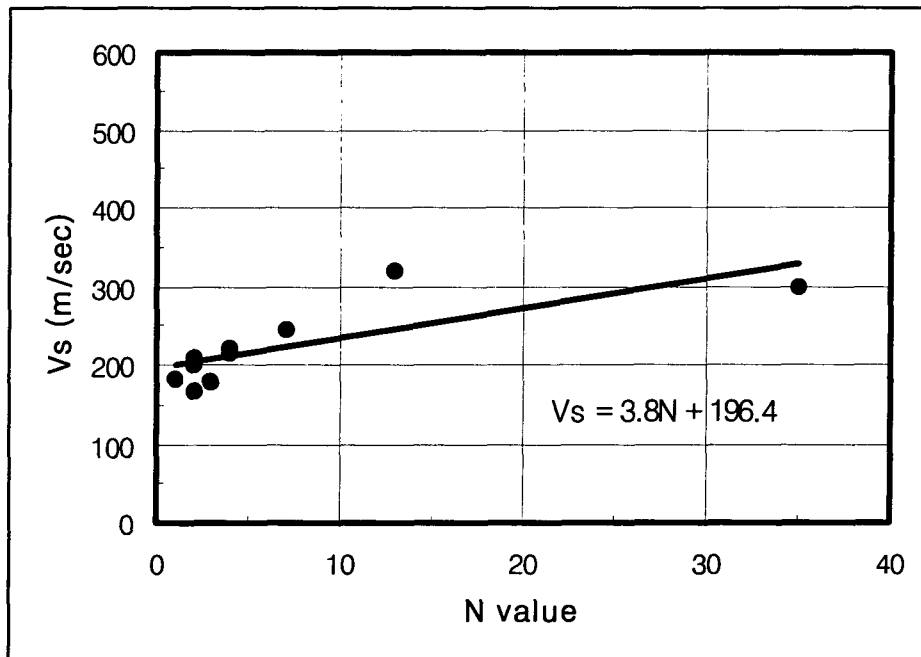
한편, 서해안 인천 용유도 부근에서의 S·P·S검층 결과는<그림-26>, <그림-27>과 같고, 이때 N - V_s 관계는 <그림-28>과 같다.



<그림-26> 인천 용유도 부근의 V_s 분포도



<그림-27> 인천 용유도 부근의 G_{max} 분포도



<그림-28> 인천 용유도 부근에서의 $N - V_s$ 관계

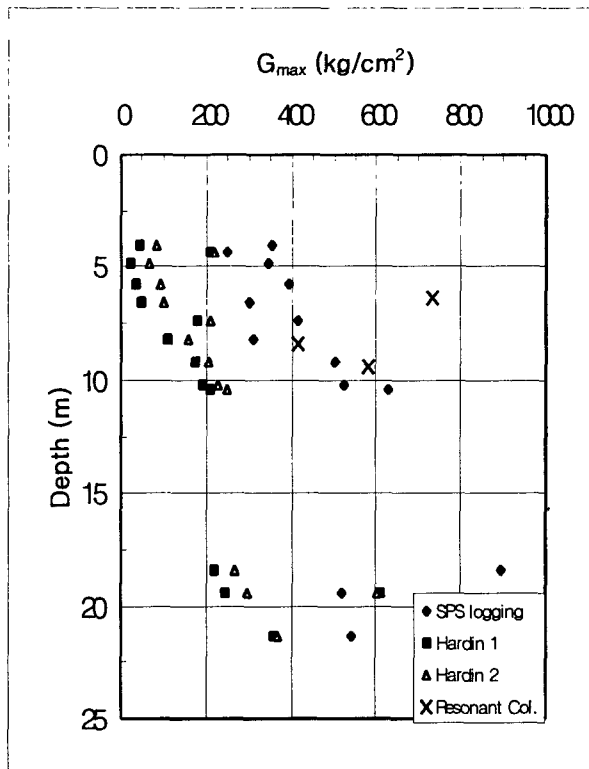
4. 측정결과에 대한 고찰

4.1 경험식에 의한 추정값과의 비교

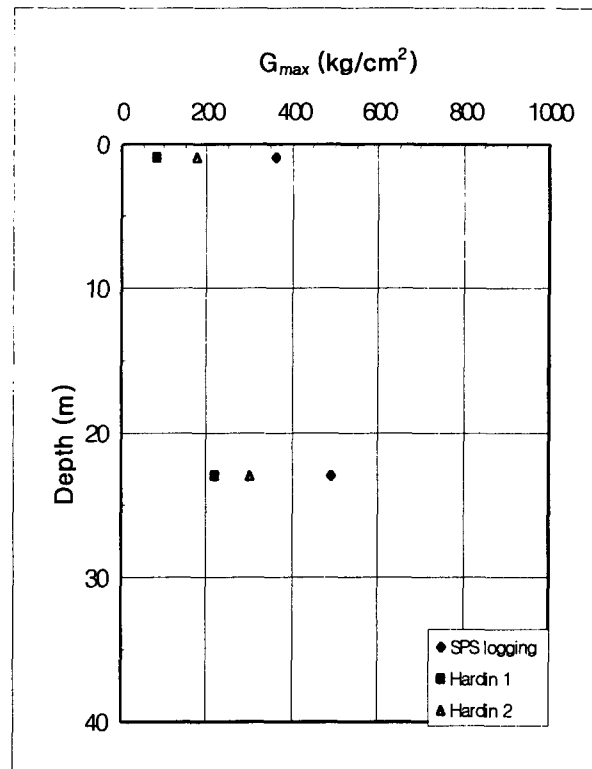
현장시험을 수행하지 않았을 때 지반의 최대전단탄성계수(G_{max})는 점성토지반에 대해서는 Hardin, 사질토 지반에 대해서는 Seed가 제안한 경험식을 사용하여 산정할 수 있다. 본 지역의 경우 경험식을 이용하여 산정한 최대전단탄성계수와 현장 P·S(S·P·S)검층을 이용하여 산정한 최대전단탄성계수를 비교한 결과는 점성토의 경우 <그림-29>~<그림-31>과 같고, 사질토의 경우는 <그림-32>와 같다. 그림의 범례에서 Hardin 1, Hardin 2는 2.4.2절에서 보인 경험식을 이용한 것이고 Resonant Col.은 공진주시험결과를, Seed & Idriss는 2.4.1절에서 보인 경험식을 이용한 것이다.

점성토에 대한 경우, <그림-29>~<그림-31>에서 보듯이 경험식에 의한 최대전단탄성계수(G_{max})가 현장 및 실내시험에 의한 값보다 작게 평가되었으며, <그림-29>는 현장시험과 실내시험(공진주시험)이 같이 실시된 것으로 그 결과가 유사한 것으로 나타났다.

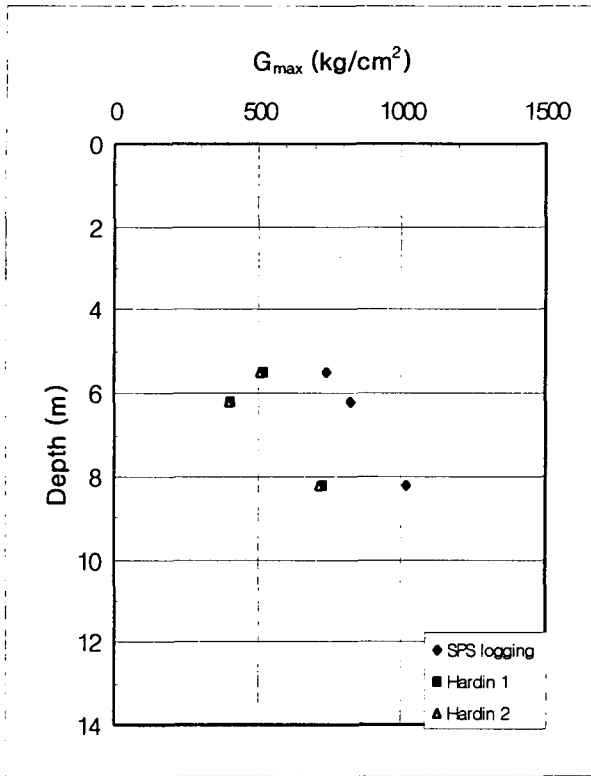
사질토에서는 <그림-32>에서와 같이 경험식에 의한 경우가 현장시험에 의한 값보다 약간 크게 나타났으나 점성토에 대한 경험식의 경우보다 현장시험에 의한 값과 비교적 잘 일치하고 있다.



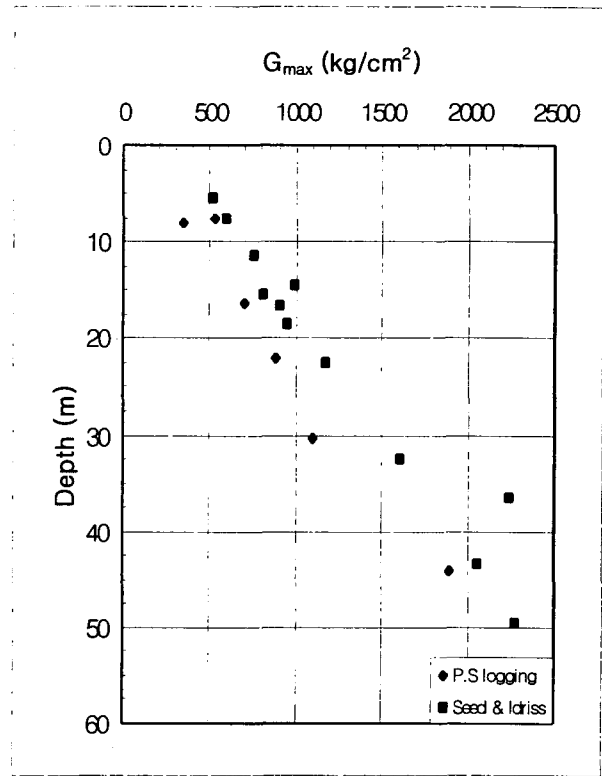
<그림-29> 부산항 외항지역



<그림-30> 부산항 내항지역



<그림-31> 인천 용유도 지역

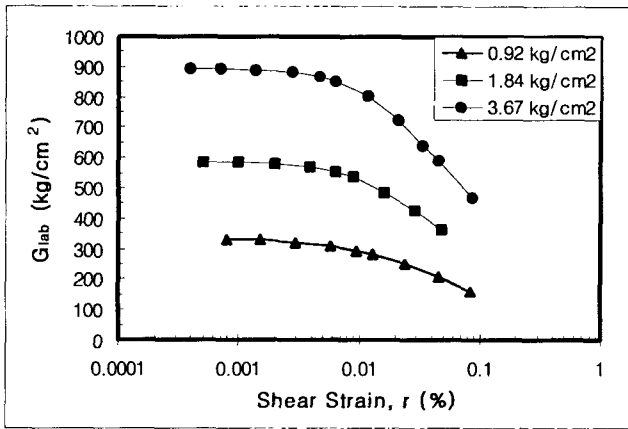


<그림-32> 인천 공유수면 매립지역

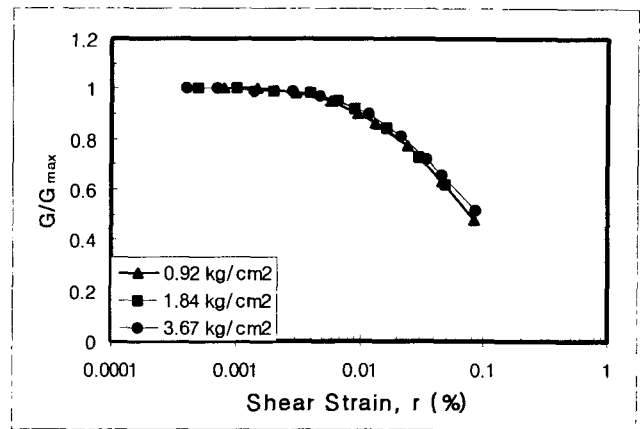
4.2 실내시험 결과와의 결합

변형율에 따른 전단탄성계수를 구하기 위해, 실내시험에서 구한 $\log \gamma - G/G_{max}$ 곡선을 현장에서 구한 최대전단탄성계수가 초기 미소변형율 영역의 시점이 되도록 결합한다. 부산외항지역의 대표 시료에 대한 공진주시험을 실시한 결과로 <그림-33>(a)는 구속압을 달리한 세단계의 $\log \gamma - G$ 곡선을 나타내었고, <그림-33>(b)는 각 단계의 전단탄성계수 최대값으로 정규화한 그림으로 세곡선이 거의 동일한 모습을 보이고 있다. <그림-33>(c)는 현장에서 S·P·S 검층을 이용하여 구한 최대전단탄성계수와 정규화곡선을 결합한 그림이다.

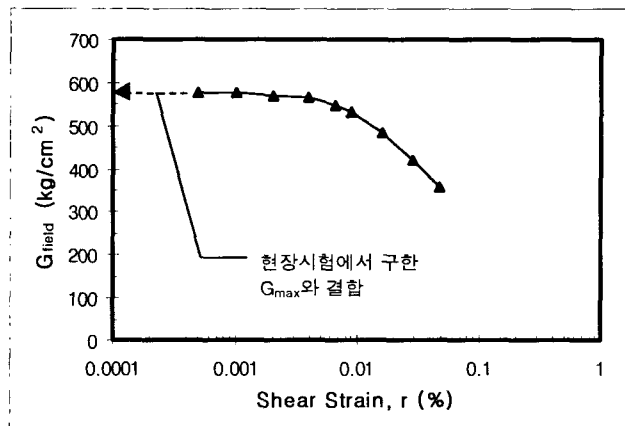
송도 공유수면 매립지역의 실내시험 결과와 현장시험 결과를 결합하는 절차를 나타내는 그림도 부산외항지역에서 나타내었던 것과 동일하게 <그림-34>(a)에서 <그림-34>(c)에 나타내었다.



(a) 세단계의 구속압을 적용한 $\log \gamma - G$ 곡선

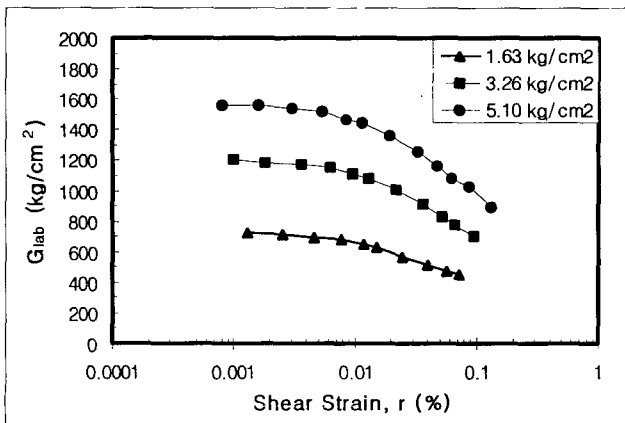


(b) 각 단계 시험곡선에 대한 정규화

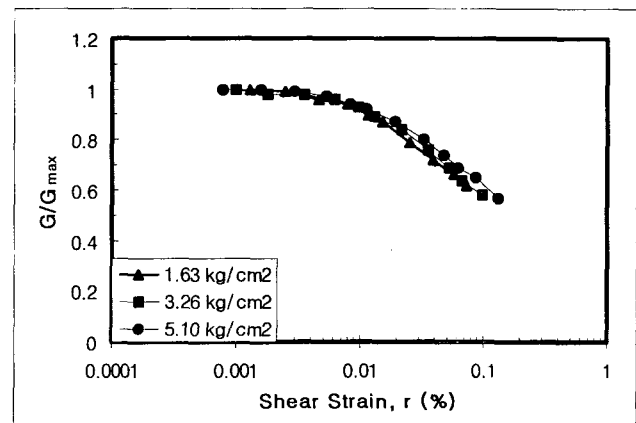


(c) 정규화 곡선을 현장시험결과와 결합

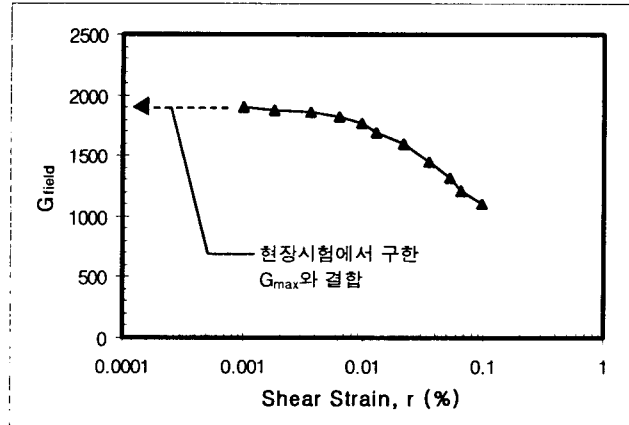
<그림-33> 부산의항지역 대표시료에 대한 실내시험 및 현장시험결과의 결합(점성토 시료, 심도 9m)



(a) 세단계의 구속압을 적용한 $\log \gamma - G$ 곡선



(b) 각 단계 시험곡선에 대한 정규화



(c) 정규화 곡선을 현장시험결과와 결합

<그림-34> 송도 공유수면 매립지역 대표시료에 대한 실내시험 및 현장시험결과의 결합
(사질토 시료, 심도 46~47m)

5. 결 론

본 고에서는 해저퇴적지반을 대상으로 미소변형을 하에서의 지반변형특성에 대하여, 발진기와 수진기를 일련의 Probe로 연결하여 시추공 내의 각 심도별로 구간 전파시간을 측정함으로써 지반의 P파 및 S파 속도를 구할 수 있는 S·P·S 검층 및 시추공 주변 지반을 직접 타격하여 시추공 내에 설치된 수진기를 이용하여 P파 및 S파를 측정하는 P·S검층 등의 현장시험, 공진주시험에 의한 실내시험, 최대전단탄성계수 산정에 관한 경험식 등의 결과를 상호 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 현장 최대전단탄성계수(G_{max})에 직접적 영향을 미치는 요소는 토층(매질)의 밀도(ρ)와 탄성파 속도(V_s)이고 전단탄성계수는 밀도에 비례하며 전단파속도의 제곱에 비례한다. 밀도의 경우 크게 변하지 않는 값이 아니라고 한다면 실제적으로 현장 최대전단탄성계수(G_{max})는 전단파속도(V_s)에 지배된다.

2) 최대전단탄성계수(G_{max})는 지반의 응력이력이나 퇴적기원에 따라 다르겠으나 대체로 심도 증가와 더불어 증가하는데 이는 심도 증가에 따른 유효 평균 주응력의 증가와 간극비 감소에 기인하는 것으로 보인다. 또한 풍화토에서 풍화암으로 토층이 변할 때 전단탄성계수의 급격한 증가를 관찰할 수 있었다.

3) S·P·S 검층 및 P·S 검층 결과를 시추조사의 주상도와 비교한 결과, 토층이 변하는 심도에서 전단파속도(V_s)가 거의 같은 양상으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었으며 전체적으로 토층별 탄성파속도 Profile은 시추주상도와 잘 일치하였다.

4) $N - V_s$ 의 상관관계에서 N 값의 증가에 따라 전단탄성파 속도는 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 최대 전단탄성계수 영향요소와 같이 지반매질의 종류와 응력상태, 간극비에 따른 영향을 받기 때문이다. 또한 표준관입시험시 N 치를 50회/30cm 로 제한한 상태에서의 결과이므로 올바른 경향 파악을 위해서는 관입깊이에 따른 충분한 타격횟수가 확보되어야 할 것으로 보인다.

5) 실내시험을 통해 구한 정규화 곡선인 $\log \gamma - G/G_{max}$ 는 구속압에 상관없이 거의 일치하였으며 이는 현장시험을 통해 최대전단탄성계수를 구하여 실내시험과 결합하면 변형율에 따른 실제지반의 전단탄성계수를 구할 수 있다.

6) 현장시험, 실내시험, 경험식 등이 상호 연계된 관계식을 얻기 위해서는 보다 많은 자료축적이 요구된다.

Reference

1. 동아건설산업, 삼성중공업 등(1999.10), 99-5951-2 시설공사 기본설계 지반조사보고서
2. 부산지방해양수산청, 부산항건설사무소(1999), 부산항 역무선 부두축조 실시설계 용역 지반조사보고서
3. (주)대우(1999.8), 인천 인수기지 2단계 3차공사(#15~16 탱크) 상세설계 지반조사보고서
4. (주)아키에스(1999.8), THALASSOPOLIS SEA HOTEL 지반조사보고서
5. 한국지반공학회(1997), "진동 및 내진설계", 지반공학시리즈 8권, pp. 1~100
6. Das. B. M.(1993), "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT, pp. 156~174
7. Hardin. B. O., and Black. W. L.(1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, NO. SM2, pp.353~369
8. Hardin. B. O., and Drnevich. V. P.(1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp.667~692
9. Prakash. S.(1981), "Soil Dynamics", McGraw-Hill Book Company, pp. 99~123
10. Richart. F. E., Jr.(1977), "Field and Laboratory Measurements of Dynamic Soil Properties",

1999. 12. 14. 한국지반공학회, 지반조사위원회 세미나

Proceedings of DMSR 77, Karlsruhe, pp. 3~36

11. Seed. H. B., Wong. R. T., Idriss. I. M., and Tokimatsu. K.(1986), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. GT11, pp. 1016~1032
12. Woods. R. D.(1977), "Parameters affecting elastic properties", Proceedings of DMSR 77, Karlsruhe, pp. 37~59