

# 공내재하시험을 이용한 화강풍화토의 전단계수 산정

A Study on the Shear Modulus of Weathered  
Granite Soil by Pressuremeter Tests

김 종 수* <sup>1</sup>	이 규 환* <sup>2</sup>
Kim, Jong-Soo	Lee, Kyu-Hwan
이 장 덕* <sup>3</sup>	이 송* <sup>4</sup>
Lee, Chang-Tok	Lee, Song

## Abstract

A pressuremeter is an expandable tube which is placed in the soil, and then expanded under controlled condition against the soil. From this test a pressure expansion curve of the soil can be obtained. However soil disturbance during the test has significant influence on the results of tests.

A general governing equation for pressuremeter test can be theoretically derived on the basis of the hyperbolic soil model and the cavity expansion theory. The curve fitting technique was used to establish the pressure-strain curve without disturbance of soil during testing. This interpretation makes use of both the loading and unloading portions of the test. An interpretation methodology is described and illustrated with pressuremeter test data carried out in the weathered granitic soil to estimate initial shear modulus.

Standard penetration test is a very common site investigation technique in Korea.

Therefore the blow counts of standard penetration test are discussed by comparing them with initial shear modulus.

## 요 지

공내재하시험은 고무 튜브를 보링공에 넣어 압축을 가함으로써 압력과 변형관계 곡선을 얻을 수 있는데 지반교란이 해석 결과에 큰 영향을 미친다. 공내재하시험의 지배방정식은 공동확장이론과 쌍곡선 형태의 흙모델을 기본으로 이론적으로 유도할 수 있으며 이렇게 유도된 식과 곡선 보정기법을 적용시키면 지반교란이 없는 상태의 응력-변형 곡선을 얻을 수 있다. 이러한 해석 방법은 재하단계에 적용할 수 있으며 국내의 화강풍화토의 공내재하시험 결과에 적용하여 초기전단계수를 구하였다. 이렇게 구한 초기전단계수값을 표준관입시험 결과와 비교 분석하여 초기전

\*1 정희원, 현대산업개발(주) 토목부 차장

\*2 정희원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*3 정희원, S & Q 전문위원

\*4 정희원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수

단계수값과 표준관입시험의 상관관계를 구하였다.

Keywords : Pressuremeter test, Hyperbolic soil model, Cavity expansion theory, Weathered granite soil, Initial shear modulus

## 1. 서론

Mair and Wood(1987)에 의하면 공내재하 시험은 1933년 Kögler가 하나의 셀형 측정장치로 지반변형해석을 시작한 후 1954년에 미국의 Fang과 Menard가 독립적으로 공내재하시험의 개념 등에 대해 연구하였다. 그러다가 1956년 Menard에 의해 개발되어 유럽, 북미 등지에서 많이 사용되고 있을 뿐 아니라 많은 연구가 진행되고 있다. 이는 공내재하시험이 다른 현장시험보다 대체적으로 이론 적용이 용이하며, 지반의 응력-변형 등을 고려한 경계조건을 조절할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 공내재하시험으로부터 얻을 수 있는 지반의 공학적 특성은 크게 지반의 변형계수, 지반의 강도, 지반의 수평토압 등 3가지로 나눌 수 있으며 지반의 강도는 점토나 연암 등의 비배수 강도와 사질토 지반에는 지반의 내부마찰각이나 팽창(dilation)각으로 나타낼 수 있다. 이러한 공내재하시험 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 지반교란인데 이러한 지반교란을 최소화하기 위하여 자가보링 공내재하시험(self boring pressuremeter test)이 개발되어 공내재하시험 결과 해석에 획기적인 발전을 이루어 오고 있는 실정이다.

공내재하시험에서 얻을 수 있는 일반적인 지반의 공학적 특성의 적용 범위는 얇은기초, 말뚝기초, 흙막이 구조물, 터널, 지반의 다짐특성은 물론 지반의 초기응력의 측정까지 다양하지만 국내의 경우 국한적으로 사용되어 오고 있는데 이는 지반교란으로 인해 신뢰성있는 응력-변형 곡선을 얻는데 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다.

공내재하시험 결과에 이러한 이론적 해석을

적용한 것은 1852년도에 Lamé이 지반을 탄성으로 가정하여 관계식을 유도한 이후, 사질토 지반의 체적변화를 고려한 Manassero(1989)의 이론식 등 지속적인 연구가 진행되어 오고 있는 실정이며, Ferreira(1992)는 흙의 거동을 쌍곡선형태(hyperbolic)라 가정하고 공내재하시험의 특성을 이용하여 지반의 초기 교란이 없는 응력-변형 관계를 추정하였다.

Duncan과 Chang(1970)에 의해 흙의 거동 해석에 널리 쓰이고 있는 쌍곡선형태 모델은 흙의 거동을 효과적으로 모델링할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 그러므로 공내재하시험에 적용되는 동공확장 이론식에 지반의 전단응력과 공내변형의 관계가 쌍곡선형태라는 가정을 적용하면 공내재하시험에 작용하는 응력과 변형의 관계식을 유도해 낼 수 있다. 이러한 해석 방법을 국내 화강풍화토 지반의 공내재하시험 결과 해석에 적용하면 지반교란을 무시한 공내재하시험 응력-변형 관계를 도출하여 여러가지 공학적 특성을 파악할 수 있다. 이러한 공학적 특성 중 대표적인 것이 지반의 변형계수이며 이것은 크게 배수조건에 영향을 받는 탄성계수와 배수조건에 영향을 받지 않는 전단변형계수로 나눌 수 있다. 지난 20년 동안 현장계측 및 수치해석을 통한 분석결과 실제 현장의 전단변형계수가 실내시험에서의 추정값 보다 크게 평가되고 있는데 이는 실내시험의 변형률이 현장 변형률보다 크기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 곡선보정기법(curve fitting technique)에 의해 지반 교란이 무시된 초기단계의 응력-변형 곡선으로부터 현장조건에 조금 더 부합된 변형률 10%에서 흙의 전단변형계수를 합리적으로 추정할 수 있다.

본 논문에서는 국내 화강풍화토 지반의 초기

전단응력계수 값을 공내재하시험 결과로부터 측정하고자 한다. 또한 국내에서 일반적으로 지반조사에서 널리 쓰이는 표준관입시험 결과와 공내재하시험 결과를 비교 분석하고자 한다.

## 2. 화강풍화토의 공내재하시험

### 2.1 쌍곡선형태 모델을 이용한 압력-공내변형 관계

1963년도에 Konder에 의해 소개된 쌍곡선형태 모델은 Duncan과 Chang(1970)에 의해 일반적인 흙의 비선형거동 해석에 널리 쓰이고 있다. 이러한 쌍곡선형태 모델은 흙의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있으며, 그림 1과 같이 흙의 전단응력과 전단변형의 관계를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{2G_i} + \frac{\varepsilon}{\tau_{ult}}} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$  : 전단응력

$G_i$ : 초기전단변형계수

$\tau_{ult}$ : 재하시 최대 비배수전단강도

$\varepsilon$  : 공내재하시험의 공내변형

그러므로 식(1)에서 2개의 상수  $G_i$ 와  $\tau_{ult}$ 을 알게 되면 그림 1의 (b)와 같이 식 (1)을 이용하여 전단응력-공내변형 관계를 얻을 수 있다.

Hughes와 Robertson(1985), Manassero(1989)에 의하면 여기서의  $2G_i$ 은 전단응력-공내변형 관계의 초기 기울기로서 접선 전단변형계수를 나타내며, 변형률이 대략 0.1% 정도 되는 범위에서도  $G_i$  값을 얻을 수 있다.

이 쌍곡선형태 모델을 제하단계에서도 재하단계와 같이 식(2)로 적용할 수 있다.

$$\tau^* = \frac{\varepsilon^*}{\frac{1}{2G_i} + \frac{\varepsilon^*}{\tau_{ult}^*}} \quad (2)$$

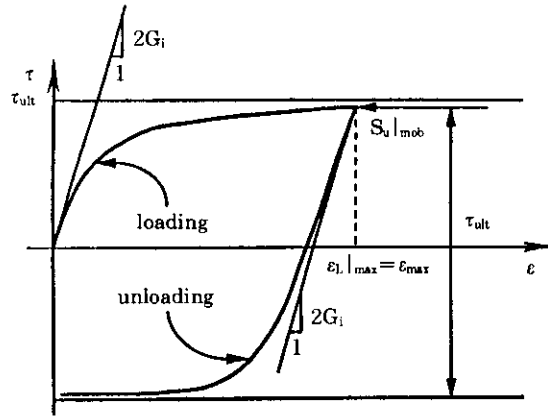
여기서,  $\tau^*$  : 전단응력

$\varepsilon^*$  : 제하단계에서 공내재하시험의 공내변형

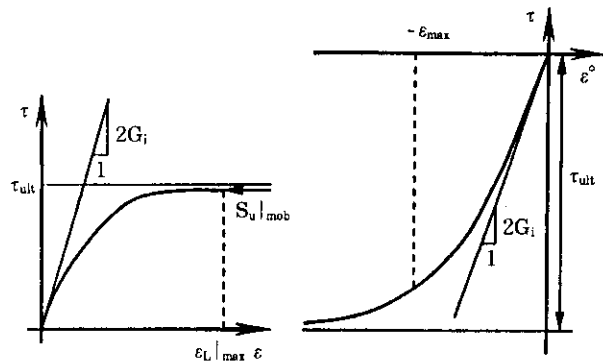
$\tau_{ult}^*$ : 비배수상태의 제하시 최대 전단강도

이러한 쌍곡선형태 모델을 사용할 때 제하단계의 전단응력-공내변형의 관계를 그림 1 (c)에서 설명하였으며, 곡선의 초기 기울기는  $2G_i$  값을 나타낸다.

또한 쌍곡선형태 모델의 전단응력-공내변형 관계로부터 재하단계에서 식(3)과 같은 미분방정식을 얻을 수 있으며, 같은 방법으로 제하단계에서도 식(4)와 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.



(a) 재하 및 제하단계



(b) 재하

(c) 제하

그림 1. 공내재하시험의 재하, 제하단계별 쌍곡선형태 모델

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = \frac{\varepsilon^*}{\frac{1}{2G_i} - \frac{\varepsilon^*}{\tau_{ult}^*}} \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{dP}{d\varepsilon} = \frac{\varepsilon^*}{\frac{1}{2G_i} - \frac{\varepsilon^*}{\tau_{ult}^*}} \quad (4)$$

이들 식에 경계조건 및 초기조건을 적용하여 미분방정식을 풀면 식(5),(6)과 같이 공내재하 및 제하시험의 압력-공내변형 관계를 각각 유도할 수 있다.

즉, 재하단계에서는

$$P = \sigma_{ho} + \frac{\tau_{ult}^*}{R} \cdot \ell n \left( 1 + \frac{2G_i \cdot R \cdot \varepsilon}{\tau_{ult}^*} \right) \quad (5)$$

제하단계에서는

$$P = P_{max} + \tau_{ult}^* \cdot \ell n \left\{ \frac{1}{1 - \frac{2G_i(\varepsilon - \varepsilon_{max})}{(1 + \varepsilon_{max}) \cdot \tau_{ult}^*}} \right\} \quad (6)$$

이다.

## 2.2 해석 방법

공내재하시험 결과는 지반의 교란에 영향을 받는다. 이러한 지반 교란의 영향을 최소화시키기 위해 1970년 초반에 자가보링 공내재하시험기가 개발되어 사용하고 있다.

그러나, 자가보링 공내재하시험기의 시험 결과 초기하중 단계에서 어느 정도 지반교란을 피할 수 없는데 흙의 강성이 증가함에 따라 교란범위도 커져 간다. Hughes와 Robertson (1985)은 일반적으로 공내재하시험은 탐침(probe) 설치시 어느 정도의 지반교란을 피할 수 없는데 이러한 초기 지반교란이 공내재하시험의 압력-공내변형 곡선의 초기치에 큰 영향을 미친다. 그러므로 일반적으로 공내재하시험의 시험결과 초기부분은 신뢰할 수 없는 것으로 알려져 있다. 그림 2는 Robertson와 Hughes(1986)가 보링공의 같은 지점에서 공내재하시험의 탐침을 모래지반에서 2번 팽창시켜 초기 지반교란이 어느 정도 압력-공내변형 관계에 영향을 미치는 것인가를 보인 것이다.

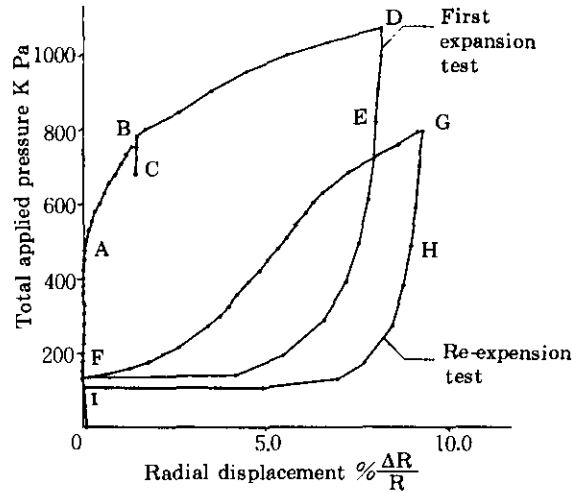


그림 2. 모래지반에서 초기지반교란에 의한 공내재하시험의 결과 영향

그림 2에서 ABCDEF곡선은 자가보링 공내재하시험기로 9.3m까지 탐침(probe)을 관입 후 처음으로 팽창시킨 것인데 이 곡선은 모래지반에서 자가보링 공내재하 시험의 전형적인 곡선 형태를 보인 것이다. 시험이 끝난 후 공내재하시험의 고무막을 아무런 내부 응력이 없는 상태인 초기치로 환원시킨 후, 탐침의 이동없이 다시 한번 고무막을 팽창시켜 얻은 곡선이 FGHI인데 그림에서 보는 바와 같이 초기의 지반교란이 공내재하시험의 결과에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로 초기 지반교란이 있는 FGHI곡선으로부터 얻을 수 있는 전단강도나, 곡선의 초기기울기인 공내재하시험 계수 등이 ABCDEF에서부터 얻을 수 있는 값과는 다르게 되므로 지반교란이 공내재하시험에 영향을 미치는 것임을 알 수 있다. 그러나 제하단계에서는 DE와 GH의 두 곡선의 형태가 매우 유사한 것을 알 수 있다. 또한 Baguelin 외 (1978)에 의하면 공내재하시험에서 한계압력이 공내재하시험계수보다 지반교란의 영향이 훨씬 적은 것으로 연구결과가 발표되고 있다. 이러한 공내재하시험 결과의 특성을 이용하면 지반 교란이 없는 압력-공내변형 관계

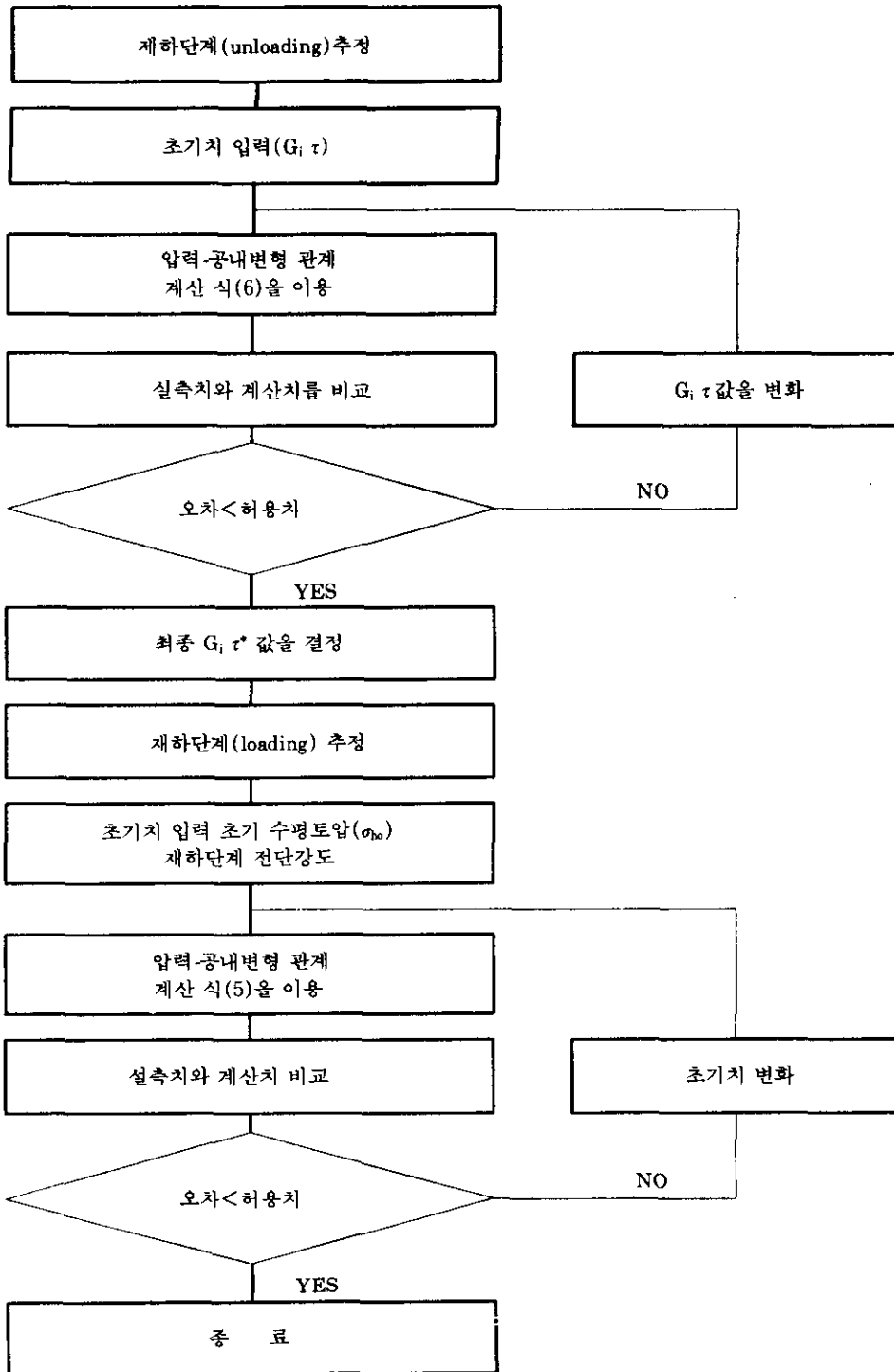


그림 3. 곡선보정 프로그램의 순서도

를 재현할 수 있다. 즉, 곡선의 제하단계를 나타내는 식 (6)을 이용하고, 실제 공내재하시험에서 실측한 제하단계의 실측치와 일치하도록 곡선보정기법을 사용하면, 제하단계의 식 (6)의 전단강도와 초기 전단변형 계수값을 추정해 낼 수 있다. 이 값들을 이용하고 마지막 제하단계의 실측치와 제하단계의 식 (5)가 일치하도록 곡선보정을 하면, 공내재하시험의 재하 및 제하단계 압력-공내변형 관계를 재현할 수 있다. 이러한 곡선보정기법을 Withers 외(1989) 등이 모래의 공내재하시험 결과에 적용하였다. 즉 초기에 수평토압, 팽창각, 내부마찰각과 전단계수값을 가정하여 실측치의 압력-공내변형 관계와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 이러한 초기치를 변화시켜 최종의  $\sigma_{ho}$ ,  $\phi$ ,  $\Phi$ ,  $G$  값을 추정하였다. 그러나 이 방법은 입력 초기치가 많아 실내시험 등을 거쳐 적절한 지반의 특성치를 파악해야 하는 단점이 있다. 그러나 Ferreria(1992)는 비배수상태시 이러한 곡선보정기법을 적용하여 매우 효과적으로 지반의 공학적 특성을 파악할 수 있다고 주장하였다. 또한 Ferreria(1992)의 연구결과에 의하면 이러한 곡선보정기법으로 추정된 초기 전단계수값을 신뢰성 있게 추정할 수 있다고 발표하였다. 이러한 해석적 해를 실험 실측치에 맞추기 위해서는 여러가지 수치 해석 방법을 사용할 수 있다. 이러한 수치 해석 방법들을 최소한의 계산만 하도록 많은 곡선보정기법을 이용한 프로그램이 개발되어 사용되고 있으며, 보통은 개인용 컴퓨터에서 효과적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 프로그램은 Kaleidagraph로 Machintosh 개인용 컴퓨터와 호환되게 개발된 프로그램이며, 계산, 그래프 및 곡선보정기법 등에 매우 강력한 프로그램이다. 현장에서 수행한 공내재하시험 결과를 보정한 후 Kaleidagraph의 작업표에 옮긴 후 내림차순으로 정리하여 재하 및 제하단계로 분리할 수 있다. 최소자승법(least square method)에 의한 곡선보정기법을 이용하면 해석적 해가 실측치와 일치하도록 사용되는데 가장 쉽게 적용

할 수 있을 뿐 아니라 곡선보정중 실제로 그 과정을 화면에 그림으로 나타내 주므로 이용에 편리하다. 해석적 해인 식 (5)과 식 (6)을 입력하고, 최초 초기치를 추측으로 가정하여 입력만 시켜 주면 프로그램은 자동으로 최상의 곡선보정을 보여주며, 그때의 보정계수(correction factor, R)값을 출력시킨다. 이러한 프로그램의 순서도를 나타내면 그림 3과 같다.

### 2.3 화강풍화토의 전단변형계수

한국의 지질은 절반 이상이 화강암질 암석으로 구성되어 있다. 김상규, 이은수(1996)에 의하면 이러한 화강암류가 풍화되어 잔류토 또는 퇴적토의 형태로 한반도에 널리 분포하고 있으며, 최근 한국토지개발공사에 의하면 토지개발공사의 사업지구중 전면적의 56.1%가 화강풍화토가 분포하는 것으로 보고되고 있다.

그러므로 이러한 화강풍화토에 대한 연구는 꾸준히 지속되어 오고 있는 실정이다. 일반적으로 화강풍화토는 풍화정도에 따라 차이가 있지만 지반조사중 일반적으로 통일분류법에 의하여 SM으로 분류되고 있으며, 입도 분포 또는 배수 조건에 따라 그 공학적 성질에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 분석한 화강풍화토는 풍화잔류토로서 세립의 입자가 주를 이루고 있으며, 색깔은 황갈색으로 중간 내지 조밀한 상태의 밀도를 보이고 있었다. 그림 4는 시험지역의 대표적인 화강풍화토의 입도분포와 물성치를 보인 것이다. 경기도 일산, 김포 일대에서 수행했던 지반조사로 국내에서 널리 쓰이고 있는 Elastometer 공내재하시험 OYO 100을 사용하였으며, 표준관입시험의 N치는 에너지나 유효응력보정 없이 통상적으로 지반보고서에 사용한 표준관입시험값을 이용하기로 하였다. OYO 100은 한개의 셀을 포함한 탐침으로 구성되어 있으며 최대압력은  $2.5\text{MN}/\text{m}^2$ 로 국내에서 널리 쓰이는 공내재하시험이다. Glarke(1995)은 세계적으로 사용되는 공내재하시험

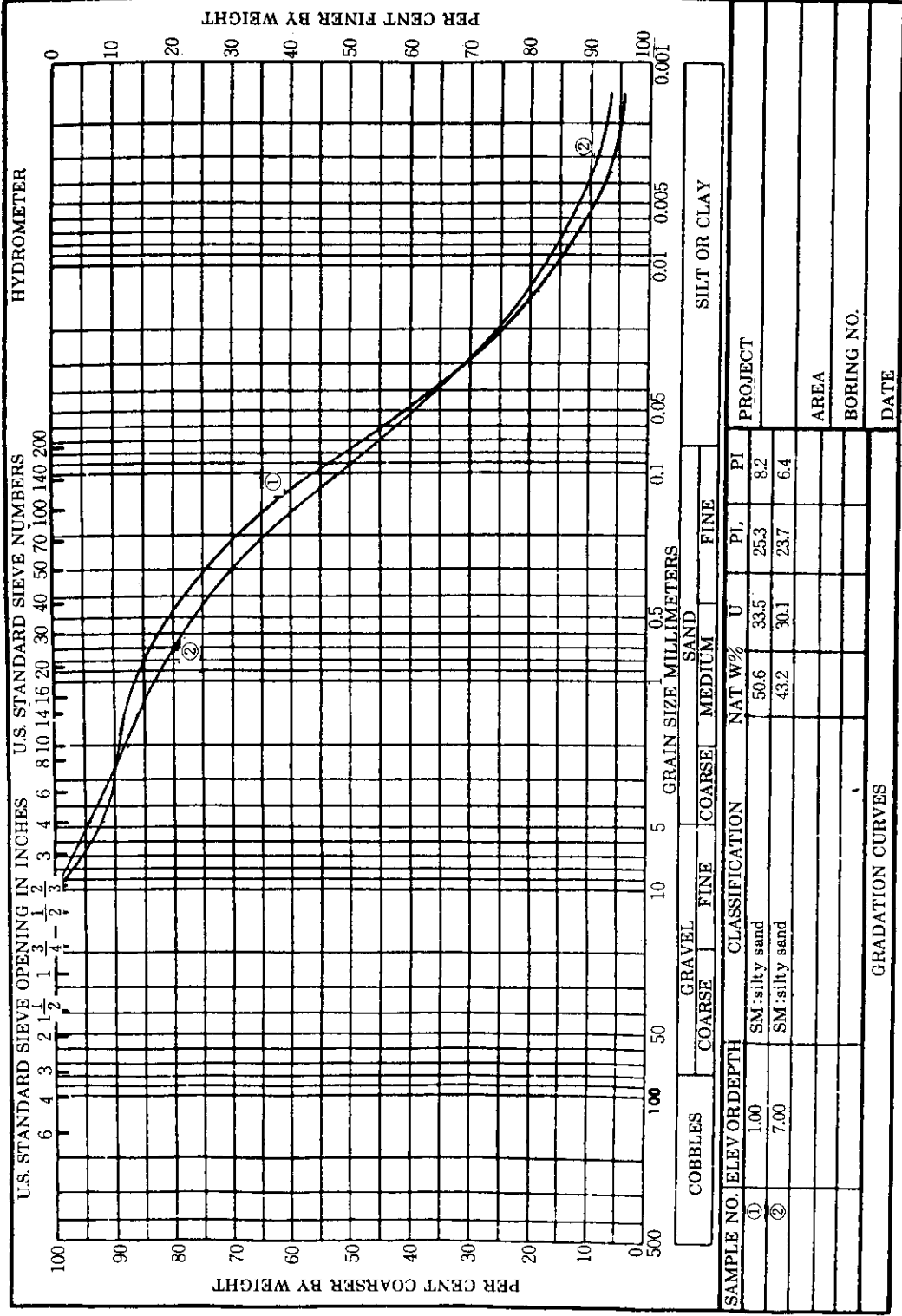


그림 4 화강암학토의 입도분포 곡선

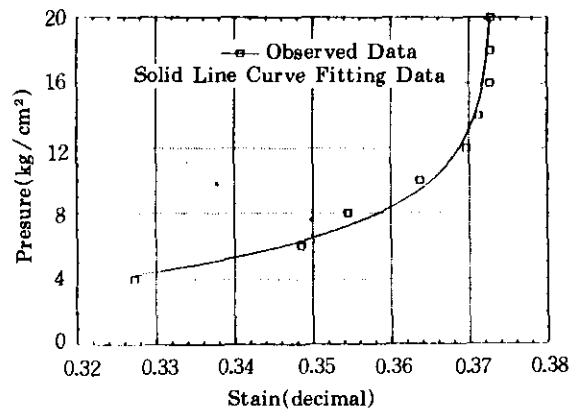
기의 특징을 자세히 설명하고 있다. 화강풍화토의 심도별 분포는 지역에 따라 다르지만 연구 대상 지역의 화강풍화토의 심도는 지표면에서 11~15m 사이에 분포하고 있으며, 표준관입시험의 N치는 10이상으로 나타나 있다. 하지만 앞절에서 언급한 흙의 쌍곡선형태 모델 특성과 공동확장이론에 의하여 유도한 (5), (6) 식은 비배수지반에만 적용해야 하는 한계가 있다. 즉, 공내재하시험중 체적 변화가 일어나는 배수 상황에서는 지배 방정식이 복잡할 뿐 아니라 해석적 해를 얻는데 많은 어려움이 있으므로 본 연구에서는 비배수상태 화강풍화토에만 적용하기로 하였다.

화강풍화토가 공내재하시험중 체적변화가 없는 비배수상태로 가정하여 그 결과를 분석하기 위해서는 화강풍화토의 투수계수 특성에 대하여 알아야 할 것이다. 한국토지개발공사(1991)의 연구 결과에 의하면 #200체 통과율이 25% 이상인 화강풍화토는 다짐특성이 95%인 경우 투수계수가  $10^{-5}$ cm/sec 이하로 나타나고 있으며, #200체 통과율이 10% 이하라 하더라도  $10^{-3}$ cm/sec 이하의 투수계수를 보이는 것으로 보고하고 있다. 또한 공내재하시험의 시험 특성상 각 하중 단계별로 1분의 시간이 소요되므로 전체의 시험 소요 시간도 15분 이내로 단시간 내에 시험이 완료될 수 있다. 그러므로 지하수위 아래 #200 체통과율이 45~50%이상으로 세립질이 우세하며, N치가 20 이상으로 견고한 화강풍화토에 대해 투수계수가 작아 공내재하시험 적용시 비배수상태로 체적변화가 없을 것이라고 가정하는 것은 타당하다고 판단된다.

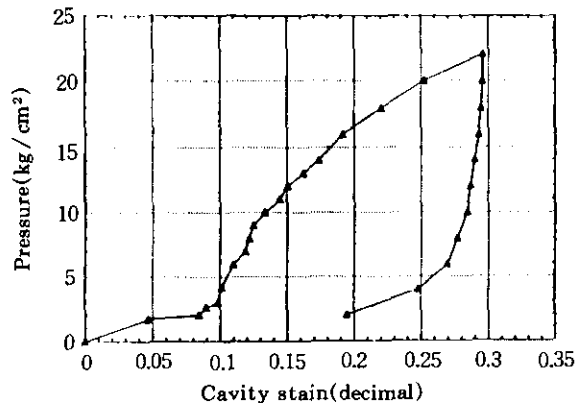
공내재하시험으로 얻을 수 있는 지반의 공학적 특성중 하나는 흙의 변형계수이다. 이러한 흙의 변형계수는 알은기초 침하량 산정시 사용되다가 현재는 수치해석용 프로그램의 입력데이터로 널리 사용되고 있으며, 정확한 흙의 변형계수 산정은 지반거동을 해석하는데 중요한 상수이다. 그러나, 흙의 변형계수는 응력이나 변형정도에 따라 크게 영향을 받을 뿐 아니라

특히, 배수조건에 따라서도 영향을 받으므로, 배수조건에 영향을 받지 않는 지반의 전단변형계수 값을 지반변형 해석시 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

공내재하시험 결과 제하-재하단계의 압력-변형 관계 곡선의 기울기가 2G,이므로 전단변형계수 값을 쉽게 얻을 수 있다. 만일 흙의 거동이 완전한 탄성체라면 제하-재하단계를 반복하더라도 압력-변형 관계 곡선의 기울기는 2G,로 일정하게 될 것이다. 지반변형이 작은 구간에서는 흙은 탄성적으로 거동한다고 가정할 수 있으므로 공내재하시험으로부터 구한 값을 지



(a) 화강풍화토에서 공내재하시험 결과



(b) 초기전단변형계수 값을 얻은 곡선정보기법의 예

그림 5. 공내재하시험 해석 예



반의 포아송비만으로 쉽게 지반의 탄성계수 값으로 환산이 가능하다. 그림 5 (a)는 전술한 본 연구 시료인 화강풍화토에 실시했던 공내재하시험 결과를 보인 것이며, 그림 5 (b)는 지반의 전단변형계수를 구하기 위하여 제하단계를 곡선보정기법을 통해 그 기울기로부터 지반의 전단계수 값을 쉽게 구할 수 있다.

#### 2.4 공내재하시험에 의한 전단변형계수와 표준관입시험결과 비교

그림 5(a)에서 보는 바와 같이 공내재하시험의 초기 10%의 변위가 발생하기까지는 지반교란으로 인해 보링공과 공내재하시험기의 멤브레인 사이가 완전하게 접촉되지 않아 신뢰성 있는 지반의 공학적 특성을 파악하는데 한계가 있는 것으로 판단된다. 이러한 화강풍화토에 대한 공내재하시험 결과를 곡선보정기법을 적용하여 지반교란이 없는 응력 변형곡선을 그림 6과 같이 구하였다.

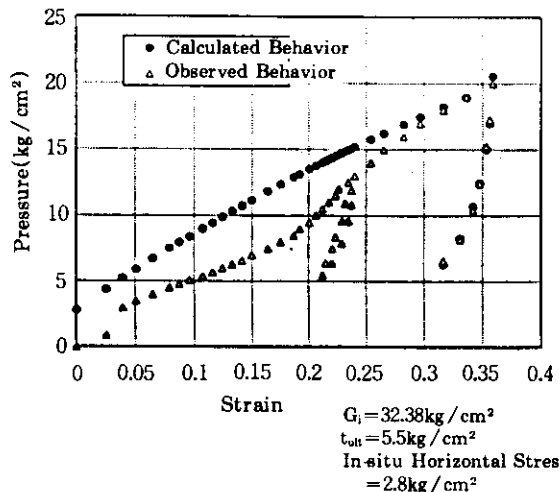


그림 6. 곡선보정기법의 화강풍화토 공내재하시험에 적용

국내에서는 대부분의 지반조사가 표준관입시험으로 이루어지고 있을 뿐아니라 표준관입시험의 N치로 기초설계에 필요한 흙의 공학적

특성을 구하므로 표준관입시험 결과와 공내재하시험 결과로 얻은 전단변형계수 값을 비교하기로 하였다.

15회의 공내재하시험을 분석하였다. 흙의 전단변형계수 값을 구하기 위해 제하단계를 이용하여 그림 5 (b)와 같이 곡선보정을 시켜 구한 전단계수값을 표준관입시험의 N치와 비교하였다. 여기서, 표준관입시험의 N치는 통상적으로 국내의 지반조사에 쓰이는 유효응력, 에너지보정 등을 적용하지 않은 경우이다.

사실도 지반 위의 구조물의 침하를 예측하기 위해서는 이제까지 표준관입시험 결과를 많이 이용하였는데, 이는 Terzaghi와 Peck이 1948년 최초로 제안했던 경험식이 직접기초의 침하를 계산할 수 있는 간편성 때문이었다. 그러므로 표준관입시험을 이용해서 지반의 탄성계수를 간접적으로 산정해 낼 수 있을 뿐아니라, 반경험식으로 직접 침하량을 산정하고 있다. 하지만 표준관입시험과 탄성계수와의 관계는 많은 시험을 통해서 분석한 결과 응력경로, 흙입자의 경시효과, 모래의 광물학적인 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 표준관입시험 결과를 가지고 탄성계수를 산정하는 방법에는 많은 연구가 진행되어 오고 있는데, 1990년 Anagnostopoulos에 의하면 기초지반의 침하량을 산정하기 위하여 실험실 시험에 의해 다음과 같이 제안하였다.

$$E_s(\text{MPa}) = 7.5 + 0.8N \quad (7)$$

또한, 1970년도 Schmertmann은 모래질 지반에서 탄성계수를

$$E_s(\text{MPa}) = 0.766N \quad (8)$$

으로 제안하고 있는데 식 (7), (8) 모두 표준관입시험의 N치와 비례관계가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 기존식을 공내재하시험 결과로부터 구한 전단계수값을 비교하여 공내재하시험으로부터 구한 전단계수값의 특성에 대해서 검토하였다.

전단변형계수와 표준관입시험의 N치와의 관계를 나타내면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 공내재하시험을 이용하여 초기 전단

변형계수( $G_i$ )와 SPT 상관관계에 대한 연구와 자료를 회귀분석하여 전단변형계수와 N치의 상관관계를 구하면 식 (9)와 같은 직선식을 얻을 수 있다.

$$G_i = -102 + 12.8N \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \text{ (} N > 10 \text{ 이상)}$$

(9)

이렇게 구한 전단변형계수를 식 (7), (8) 등과 비교하기 위해  $E=2G(1+\nu)$ 식을 이용하고 흙의 포아송비가 0.3이라 가정하면 공내재하시험으로부터 구한 모든 탄성계수 값이 기존의 식 (7), (8) 보다 2~3배 정도 크게 평가된 것으로 계산되었다. 이러한 이유는 기존의 제안 식 (7), (8)이 할선변형계수(secant modulus)로 상당히 변형이 발생한 후의 탄성계수 값인데 반하여 공내재하시험으로 구한 탄성계수 값은 지반의 변형률이 0.1% 정도의 초기탄성계수 값이기 때문에 기존의 식보다 크게 평가되는 것으로 판단된다.

실제적으로 수치해석으로 지반의 거동을 해석할 경우 입력자료로 사용되는 탄성계수 값은 실내시험을 통하여 1~10%의 변형률에서 구하는 것이 일반적이다. 하지만 수치해석을 이용한 지반 변형률 대부분이 탄성계수를 구한 1~10%의 변형률에 훨씬 미치지 못하므로 실제로 지반의 거동해석을 위해서는 변형률이 작

은 경우의 탄성계수를 사용하여야 보다 합리적인 해석결과를 얻을 수 있는 것이다. 더구나 사질토 지반의 탄성계수의 측정은 시료의 교란 때문에 일반적으로 현장시험의 결과를 이용하는 것이 대부분이므로 공내재하시험 결과를 응용하여 추정된 탄성계수 값이 보다 합리적이고 효율적인 방법이라 사료된다.

### 3. 결 론

지반조사시 쓰이고 있는 공내재하시험은 그 결과가 초기지반교란에 의하여 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이러한 이유로 공내재하시험의 해석결과가 제한적으로 사용되어 오고 있는 실정이다.

본 논문에서는 체적변화가 없는 비배수 상태의 지반에서 공내재하시험을 공동확장이론을 적용하고 흙의 거동을 쌍곡선 형태라는 가정을 도입한 공내재하시험의 지배방정식을 곡선보정기법을 이용하여 지반의 교란을 무시할 수 있는 공내재하시험 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 이러한 해석방법으로 국내지반의 대표적인 화강풍화토 지반에 적용하여 초기전단강도를 추정하였다. 이러한 초기전단강도는 지반 변형이 10<sup>-1</sup>% 정도에서 합리적으로 추정할 수 있으며 이렇게 구한 전단강도는 기존의 제안된 식보다 크게 평가되었다. 또한 이렇게 구한 지반의 전단계수값을 국내에서 많이 사용하는 표준관입시험의 N치와 상관관계를 구할 수 있었다.

좀더 많은 지역의 신뢰성 있는 공내재하시험 결과와 지반조사 결과치를 사용하여 우리나라 지반의 공학적 특성 파악을 위한 전단변형계수와 N치와의 좀더 명확한 상관관계의 규명이 가능할 것으로 여겨지며 또한 이러한 곡선보정기법을 이용하여 추후 초기 수평토압, 흙의 비배수 전단강도, 지반의 정지토압계수 등의 산정에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 보다 많은 이러한 연구가 표준관입시험으로 대표되는 국내의 지반조사의 다양화에 기

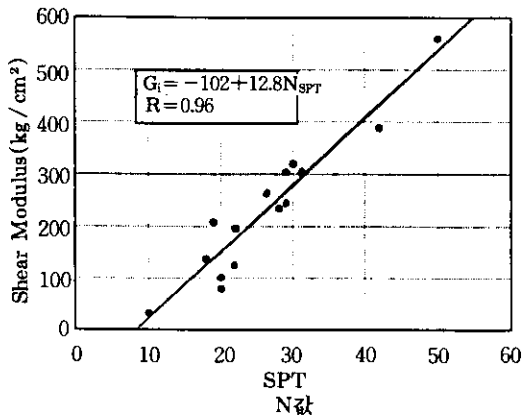


그림 7. 전단변형계수와 N값의 관계비교

여할 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. 김상규, 이은수(1996) '보강토구조물 뒷채움 재료로서 화강풍화토의 적용성' 한국지반공학화지 Vol. 12, No2 pp.63-72.
2. 한국토지 개발공사(1991), 화강암질 풍화토의 기층 및 보조기층 이용방안연구
3. Baguelin, F, Jezequel, J.F and Shields, D.H. (1978) The Pressuremeter and Foundation Engineering, Trans. Tech Publications, 1st Edition. p. 610.
4. Duncan, J.M. and Chang, C.Y (1970). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. ASCE-Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96: pp.1629-1653.
5. Ferreira, RS(1992) Interpretation of Pressuremeter Tests Using a Curve Fitting Technique, PhD Thesis, University of Albera.
6. Glarke(1995) 'Pressuremeters in Geotechnical Design' Blackie Academic & Professional, p. 364.
7. Hughes, J.M.O., and Robertson, P.K. (1985) Full Displacement Pressuremeter Testing in Sands. Canadian Geotechnical Journal, 22: No.3,
8. Manassero, M. (1989) Stress-Strain Relationships from Drained Self-boring Pressuremeter Tests in Sand, Geotechnique, 39, pp293-307.
9. Mair, R. J. & Wood, D. M. (1987) 'Pressuremeter Testing Methods and Interpretation' CIRIA Butterworths p.160.
10. Robertson, P.K., and Hughes, J.M.O. (1986). Determination of Properties of Sand from Self-boring Pressuremeter Tests. The Pressuremeter and Its Marine Applications : Second International Symposium, pp. 283-302.
11. Withers, N.J., Howie, J., Hages, J.M.D. and Robertson, P.K.(1989) Performance and Analysis Cone Pressuremeter Tests in Sands, Geotechnique, 39(3) pp433-454.

(접수일자 1997. 9. 18)