

점성토 시료추출관이 시료교란에 미치는 영향

Effect of Thin Wall Tube on Clay Soil Disturbance during Sampling

임성훈*

Eam, Sung Hoon*

ABSTRACT

The total recovery ratio test on undisturbed clay soil sampling in the field and the finite element method analysis on modified static state of penetration process were conducted for the purpose of deciding the most important factor among the shape factors of thin wall tube. The adhesion between tube wall and soil did not decrease although internal clearance ratio of tube increased within the little change of tube area ratio. The most part of disturbance occurred in the tip of sampling tube during the penetration. The longitudinal displacement was larger than the lateral displacement because soil was confined laterally after being entered into tube, and also the longitudinal displacement was larger in the upper part of the sample tube than in the lower part.

Keywords: Thin wall tube; inside clearance; area ratio; sample disturbance; numerical analysis

1. 서 론

지반 공학 분야에서 신뢰성 있는 해석을 하기 위한 일반적인 조건은 다음과 같다. 우선 지반의 특성에 대한 정보를 얻고 해석에 영향을 주는 여러 인자들을 추출한 후에 조건에 적합한 해석방법을 적용하여야 한다. 이 과정 중에서 지반의 특성에 대한 정보를 얻기 위해서 원지반 상태를 대표할 수 있는 시료를 추출하고 현장조건에 부합하는 실내시험을 하여야 한다. 현장에서 시료를 추출하는 과정에 오류가 발생하면 후속과정의 결과들도 왜곡된다. 이와 같은 중요성 때문에 시료채취에 관한 Hvorslev의 기념비적인 논문 이후로 사질토지반과 점성토지반에서 각각 교란시료 및 불교란시료를 채취하는 많은 방법들(NAVFAC DM-7.1, 1982)과 교란정도를 평가하는 방법, 시료의 운반과정에서 교란을 억제하는 방법, 지중응력상태의 변화에 의한 시료의 변형 등등, 시료채취와 관련된 다양한 주제에

대한 많은 연구가 수행되었다. 이들 분야 중에서 몇몇 주요 연구내용은 다음과 같다.

Hvorslev (1949)는 시료채취관 특징을 나타낼 수 있는 내부간격률, 외부간격률, 면적비 및 장경비 등을 제안하였으며 면적비가 시료의 교란에 가장 큰 영향을 나타낸다고 하였다. 또한 채취된 시료의 교란정도를 정량적으로 평가하기 위해서 시료의 회수율을 정의하였으나 회수율은 많은 요인에 의해서 영향을 받기 때문에 독립적인 기준을 제시하지는 못했다. 점성토 시료의 교란정도를 정량적으로 평가하는 방법은 주로 일축압축강도나 삼축압축강도를 비교하는 방법으로 이루어졌고 많은 연구결과들이 제시되었다(Horn, 1979). Horicuchi et al. (1987)은 시료의 교란정도를 정량적으로 평가하기 위한 약간 변형된 방법을 제시하였다. Horicuchi의 방법은 일축압축강도에 대한 할선탄성계수(E_{50})의 비율이 50을 넘는지 여부를 기준으로 50을 넘으면 불교란시료, 50 이하이면 교란시료로 판정한다.

Shelby tube가 국내에서 불교란 점성토 시료를 채취하기 위한 방법으로 많이 사용되고 있으며 한국산업규격 KS F 2317으로 명시되어 있다(KSA, 2006). KS에서는 내부간격률을 1%로 제시하고 있으며, 규격에 제시된 치수로 산정한 면적비는 11.5% ~ 12.7%로 각각 Hvorslev (1949)가 제안한 범위 내에 있다.

* 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학전공
Tel.: +82-41-330-1264
Fax: +82-41-330-1269
E-mail address: geotechkor@kongju.ac.kr

2009년 8월 12일 투고
2009년 9월 4일 심사완료
2009년 9월 22일 게재확정

시료채취와 관련된 연구는 고전적인 연구 분야이지만 그 중요성 때문에 최근에도 지속적으로 연구되고 있다. 최근에 지반의 동역학적 안정성 문제가 제기되면서 사질토 지반에서 불교란시료를 효율적으로 채취하기 위한 연구들이 수행되었다 (Wride et al., 2000; Huagn and Huang, 2007). Kim and Kang (2008)은 연약지반 뿐만 아니라 사질토 및 풍화토 지반에서도 교란을 최소화하면서 시료를 채취할 수 있는 대구경 샘플러를 개발하였고, Messerklinger et al. (2009)은 정규 압밀된 호상점토의 채취 후 응력이완을 억제할 목적으로 대구경 시료채취관을 개발하였다. 두 연구 모두 채취된 시료의 교란정도를 판단하는 방법으로는 다른 많은 연구자들의 방법과 비슷하게 실내전단강도시험결과들을 비교하는 방법을 사용하였다.

이상과 같은 시료채취와 관련된 많은 연구들의 방법을 요약하면, 새로운 시료채취관으로 채취한 시료와 기존의 시료채취관으로 채취한 시료의 실내시험에 의한 전단강도를 비교하여 전단강도가 큰 값을 나타내는 시료가 교란의 정도가 상대적으로 작다는 것을 간접적으로 나타낸다고 판단하였다. 이러한 연구 방법에서는 조건과 결과만이 나타나고, 시료채취관이 관입되는 중에 지반과 서로 어떠한 영향을 주고받는지 분석하는 것이 곤란하다. 또한 시료 채취 과정에서 압축이 되어 전단강도가 커질 수 있는 가능성을 무시하고 있다.

Lee (1996)는 관입과정 중에 채취관과 지반의 상호작용을 분석하기 위해서 수치해석을 하였다. 지반에 시료채취관이 관입되는 것은 동적인 상황이다. 현재까지는 이러한 동적인 상황을 적절하게 모사할 수 있는 지배방정식이 개발되지 않고 있다. Lee (1996)는 지반의 깊이가 무한하고 무한한 길이의 시료채취관이 일정한 속도로 관입하는 것으로 가정하여 시료채취관의 관입효과를 정적인 경계조건으로 변형시켜서 유한요소해석을 하였다. 채취된 원주형 시료형상에 대한 해석을 하였으므로 관입되는 중에 원지반에 발생하는 응력-변형 거동은 알 수 없다.

이 연구에서는 점성토 시료추출관이 지반에 관입되는 과정에서 발생하는 응력-변형 거동을 분석하고 시료 교란에 가장 큰 영향을 주는 요인을 확인하기 위해서 현장에서 시료채취시험을 실시하고, 변형된 정적 조건을 적용한 수치해석을 실시하여 현장시험결과와 비교 검증하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시료채취를 위한 야외관입시험

시료채취관의 직경과 내부간격을 다르게 시료채취관을 제작하여 야외에서 시료를 채취하고 회수율을 산정하였다. 해안

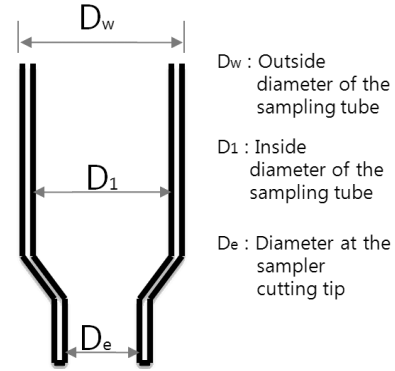


Fig. 1 Schematic shape of sampling tube

가에서 연약지반 지표면으로부터 약 0.5 m 굴착하고 시료채취관을 수직으로 세운 후에 시료채취관 상부에 굴삭기를 이용해서 수직하중을 주어서 채취관을 지반에 천천히 관입시켰다. 보링공에서 피스톤 샘플러를 이용해서 시료를 채취하는 경우에는 관입 후에 인발을 하여야 하지만 이 야외시험에서는 인발하지 않고 관입된 영역 전체를 하나의 덩어리로 굴착하고 덩어리를 분리하여 시료채취관을 회수하였다. 따라서 시료채취관 내부에서 인발과정 중에 나타날 수 있는 시료의 하강 이탈은 발생하지 않았다. 시료채취관의 내부간격을 및 면적비는 Hvorslev (1949)가 Fig. 1과 같이 정의한 식 (1) 및 식 (2)에 의해서 계산하였다.

내부간격률

$$C_i = \frac{D_1 - D_e}{D_e} \tag{1}$$

면적비

$$C_a = \frac{D_w^2 - D_e^2}{D_e^2} \tag{2}$$

여기서,

D_1 : 시료채취관의 내경

D_e : 시료채취관 선단부의 내경

D_w : 시료채취관의 외경

내경이 63.5 mm인 A형 시료채취관 및 내경이 76.4 mm인 B형 시료채취관의 두께는 각각 1.25 mm 및 1.38 mm이다. 내부간격률을 다양한 범위로 제작하려 하였으나 가공의 어려움에 의해서 A형 시료채취관의 내부간격률은 3.25 % ~ 3.93 %, B형 시료채취관의 내부간격률은 2.83 % ~ 4.51 %의 범위로 제작되었다. A형 시료 채취관보다는 상대적으로 내경이 큰 B형

Table 1 Dimensions of sampling tubes

| Tube No. | D_1 | D_e | C_i (%) | C_a (%) | Penetration depth (mm) |
|----------|-------|-------|-----------|-----------|------------------------|
| A-1 | 63.5 | 61.1 | 3.93 | 12.30 | 825 |
| A-2 | 63.5 | 61.2 | 3.76 | 11.94 | 790 |
| A-3 | 63.5 | 61.3 | 3.59 | 11.57 | 810 |
| A-4 | 63.5 | 61.4 | 3.42 | 11.21 | 825 |
| A-5 | 63.5 | 61.4 | 3.42 | 11.21 | 790 |
| A-6 | 63.5 | 61.5 | 3.25 | 10.85 | 780 |
| A-7 | 63.5 | 61.5 | 3.25 | 10.85 | 785 |
| B-01 | 76.4 | 73.1 | 4.51 | 13.21 | 815 |
| B-02 | 76.4 | 73.2 | 4.39 | 12.94 | 798 |
| B-03 | 76.4 | 73.9 | 3.38 | 10.78 | 802 |
| B-04 | 76.4 | 74.1 | 3.10 | 10.18 | 775 |
| B-05 | 76.4 | 74.2 | 2.96 | 9.88 | 775 |
| B-06 | 76.4 | 74.2 | 2.96 | 9.88 | 820 |
| B-07 | 76.4 | 74.2 | 2.96 | 9.88 | 810 |
| B-08 | 76.4 | 74.2 | 2.96 | 9.88 | 790 |
| B-09 | 76.4 | 74.3 | 2.83 | 9.59 | 790 |
| B-10 | 76.4 | 74.3 | 2.83 | 9.59 | 815 |

시료채취관의 내부간격을 가공이 상대적으로 쉬웠다. Table 1에는 실험에 사용된 전체 시료채취관의 형상이 나타나 있다.

2. 변형된 정적조건을 적용한 유한요소해석

시료채취관이 관입될 때 관 내부에서 일어나는 현상을 분석하기 위해서 범용유한요소해석프로그램 (sigma/W)에 의한 수치해석을 하였다 (Geo-slope, 2002). 해석대상은 Table 1에서 B-05 ~ B-08로 선정하였다. 당초에는 Table 1에 주어진 조건보다도 더 넓은 범위의 내부간격을 및 관의 직경에 대해서 해석을 하고자 하였으나 해석방법을 탐구하는 과정에서 작업량이 증가하여 한 가지 조건에 대해서만 해석을 실시하고 시료의 회수율과 비교 검증하고자 하였다.

공학적인 문제의 수치해석을 할 때 실제 물리적 조건을 모두 구현하는 것은 어려우므로 합리적인 범위 내에서 단순화하여야 한다. 시료채취관이 지반 속에 관입하는 경우에는 축대칭문제라 볼 수 있으므로 Fig. 2와 같이 지반을 1000×1000 mm의 유한요소망으로 구현하고 아래쪽 끝과 오른쪽 끝의 요소들은 무한요소로 구성하였다.

시료채취관을 유한요소로 구현하기 위해서 Fig. 3과 같이 단순화시켰다. 시료채취관의 끝은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 내부간격이 있지만 유한요소로 구현하는 것이 곤란하여 Fig. 3의 오른쪽과 같이 직사각형 요소 B로 단순화시켰다. 요소의 폭은

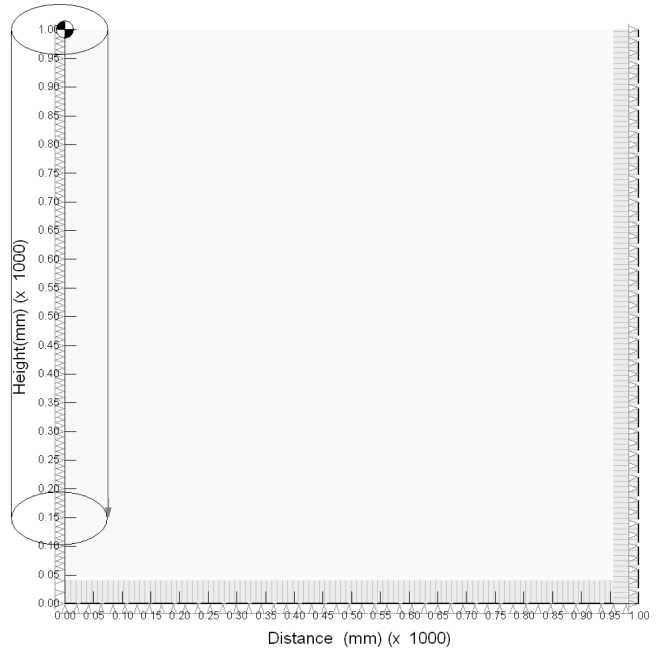


Fig. 2 Schematic figure of mesh for FEM analysis

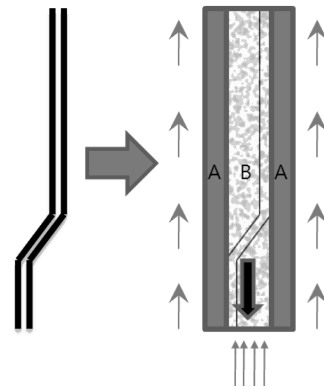


Fig. 3 Simplification of the tube wall

내부간격 (2.2 mm)과 근사적인 관의 두께 (1.4 mm)의 합 (3.6 mm)으로 하였으며 해석모델은 강성이 매우 큰 탄성모델을 적용하였다.

시료채취관이 관입될 때 관입에 저항하는 힘으로 관의 내부와 외부의 측면에 작용하는 부착력과 관의 선단부에서 위쪽으로 작용하는 지지력이 있다. 시료채취관처럼 속이 비어있는 원형관이 지반에 관입될 때 적용할 수 있는 깊은 기초의 지지력 산정방법이 현재까지는 제시되어 있지 않기 때문에 관의 선단부에 점착력만이 지지력으로 작용하는 것으로 설정하였다. 채취관이 관입될 때 지반이 관 벽을 미끄러지므로 지반과 관의 벽 사이에는 Slip surface 요소가 있어야 한다. Slip surface 요소는 두께는 무관하고 전단강도만이 요소의 거동에 역할을

하므로 Fig. 3의 오른쪽 그림과 같이 육안으로 구분할 수 있는 최소두께의 Slip surface 요소 A를 배치하였다. Slip surface 요소의 전단강도는 지반과 시료채취관의 측면의 부착력을 나타낸다. 이 부착력은 관의 내부간격에 따라서 각각 다른 값을 나타낼 것으로 예상할 수 있다. 또한 관 내부에 시료가 채워져 있는 높이에 의해서 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 이러한 모든 요소들을 정확하게 구현하는 것은 복잡하고 어려운 문제이므로 이 연구에서는 부착력이 지반의 점착력과 같은 경우 및 2/3인 경우에 대해서 해석을 하였다. 관에 주어지는 관입하중은 저항하는 힘과 같아야 되므로 산정된 저항력의 합이 요소 B의 안쪽과 바깥쪽 절점에 점하중으로 작용하도록 하였다. 관입하중이 채취관의 위쪽에 작용할 경우에 불필요한 좌굴효과가 나타나는 것을 방지하기 위해서 관입하중은 관입되는 선단부에 작용하도록 하였다.

지반을 유한요소법에 의해서 해석하기 위한 일반적인 모델들은 정적인 지반상태를 해석 대상으로 한다. 채취관이 지반에 관입되는 동적인 조건을 해석하기 위해서는 일반적으로 사용가능한 모델들과는 전혀 다른 새로운 지배방정식을 개발하여야 한다. 이 연구에서는 기존의 정적인 해석방법을 시료채취관의 관입에 대해서도 적용할 수 있는 합리적인 방법을 탐구하였다. 우선 지표면에 관입하중이 주어진 조건에 대해서 0단계 해석을 한 후에 다음 1단계에서 관입될 깊이까지 지반요소를 Fig. 3의 요소 A와 B로 치환하고 0단계에서 해석된 변위, 응력 및 변형률을 1단계 해석의 초기조건으로 적용하였다. 다음에 2단계에서 관입될 깊이까지 지반요소를 요소 A와 B로 치환하고 1단계에서 해석된 변위, 응력 및 변형률을 2단계 해석의 초기조건으로 입력하여 해석하였다. 이상과 같은 과정을 전체 시료채취관의 길이에 해당되는 관입깊이까지 반복하였다. 따라서 각 단계별 변위, 응력 및 변형률은 마지막 단계까지 모두 누적되

어 나타난다. Fig. 4에 이상과 같은 과정의 일례로 각 단계별 치환에 의한 관입모사깊이를 10 mm로 하였을 때의 0단계 ~ 3단계까지의 요소치환과정을 나타내었다. 관의 관입이 연속적으로 진행되는 과정이지만 이 연구에서 사용한 해석방법은 불연속적이다. 단계별 관입깊이를 무한히 작게 할 수는 없으므로 단계별 관입깊이가 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm 및 10 mm인 경우에 대해서 해석을 하고 관입깊이가 감소함에 따른 결과들의 경향을 추정하는 방법으로 동적인 조건을 정적인 조건으로 변형하여 해석하였다. 일반적으로 성토나 굴착과정이 연속된 단계별 해석으로 많이 구현되지만 요소의 치환은 많이 사용되지 않는 방법이기 때문에 범용프로그램에서 이상과 같은

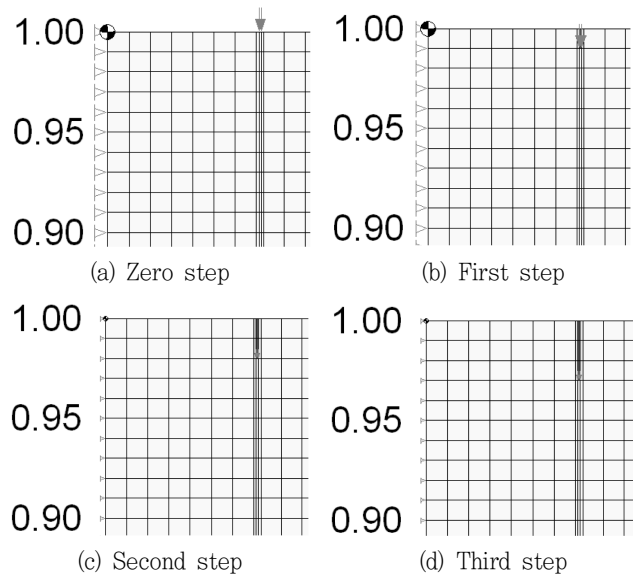


Fig. 4 Imitation of the process of sampling tube penetration in the ground

Table 2 Parameters applied in FEM analysis

| Cohesion of ground c (kPa) | Internal friction of ground ϕ (°) | Poisson's ratio | USCS of ground | Adapted analysis model | The length of sampling tube (m) | Adhesion between tube wall and soil F (kPa) | Depth of penetration at each step (m) | Total steps of analysis | |
|------------------------------|--|-----------------|----------------|--|---------------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------|----|
| 29.4 | 0 | 0.49 | CL | Elastic-Plastic Elastic modulus = $E_{50} : 1470$ (kPa) | 0.85 | 19.6 | 0.05 | 17 | |
| | | | | | | | 0.04 | 22 | |
| | | | | | | | 0.03 | 29 | |
| | | | | | | | 0.02 | 43 | |
| | | | | | | | 0.01 | 85 | |
| | | | | | | 29.4 | 0.05 | 17 | |
| | | | | | | | | 0.04 | 22 |
| | | | | | | | | 0.03 | 29 |
| | | | | | | | | 0.02 | 43 |
| | | | | | | | | 0.01 | 85 |

과정을 구현할 수 있는 방법이 제공되지 않는다. 따라서 현재의 과정에서 다음 과정으로 넘어가는 모든 조작을 수작업으로 진행하였다. Table 2에는 해석에 사용된 입력정수들이 나타나 있다.

요소 B의 선단부에 작용하는 관입하중은 식 (3)에 의해서 산정하였다.

$$P_{inside} = P_{outside} = c \times \frac{W}{2} + F \times D \quad (3)$$

여기서,

P_{inside} : 요소 B의 안쪽에 작용하는 관입하중

$P_{outside}$: 요소 B의 바깥쪽에 작용하는 관입하중

c : 점착력

W : 요소 B의 폭

F : 관과 지반의 부착강도

D : 관입깊이

선단부의 지지력과 부착력 중에서 관입이 진행됨에 따라서 지지력은 부착력에 비해서 상대적으로 매우 작은 값을 나타내기 때문에 전체 해석에 큰 영향을 주지 않는다.

III. 결과 및 고찰

1. 시료채취를 위한 야외관입시험 결과

Table 1에 나타난 형상의 시료채취관을 지반에 관입하여 시료를 채취하고 Hvorslev (1949)가 정의한 식 (4)의 총 회수율 (Total recovery ratio)을 측정하였다. tube를 관입 후 지상으로 인발해서 tube를 회수하면 인발과정에서 관 내부 시료의 일부가 다시 관 밖으로 나가므로 인발 후 회수율을 측정하면 Hvorslev (1949)의 Gross recovery ratio가 측정된다. 그러나 이 연구에서는 인발과정을 거치지 않았으므로 회수율은 Total recovery ratio (%)이다.

$$TRR = \frac{L}{H} \times 100 (\%) \quad (4)$$

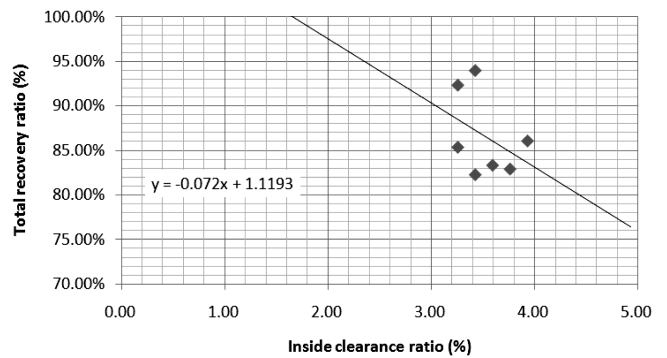
여기서,

H : tube의 관입깊이

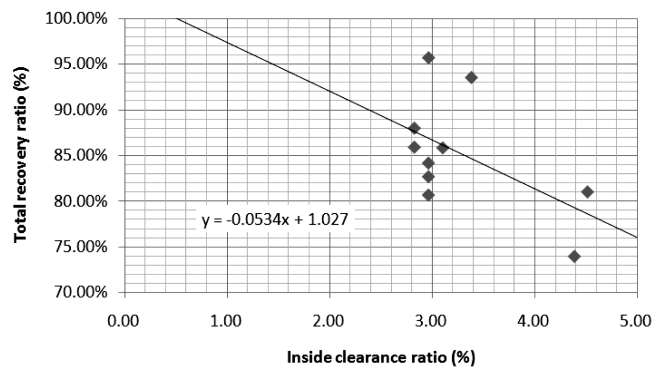
L : 관입직후 tube에 채워진 시료의 높이

내경이 63.5 mm인 A형 시료채취관의 회수율은 약 82.9 % ~ 93.9 %의 범위로 나타났다. 내경이 76.4 mm인 B형 시료

채취관의 회수율은 73.9 % ~ 95.7 %의 범위로 나타났다. 시료채취관의 형상에 대한 특징을 나타내는 인자들 중에서 면적비가 시료의 교란에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Hvorslev,1949). 이 연구에서 사용한 시료채취관처럼 관의 바깥지름이 일정한 경우에는 내부간격률과 면적비는 1:1 대응관계가 성립하므로 실질적으로 중복되는 의미의 인자이다. Fig. 5는 야외에서 실시한 시료채취시험 결과를 나타낸 것이다. A형 및 B형 시료채취관의 내부간격률 (inside clearance ratio)과 회수율 (total recovery ratio)과의 관계를 각각 나타내고 있다. 시료의 회수율은 다양한 요인들에 의해서 영향을 받는다. 내부간격률과 회수율의 직선적인 관계가 높게 나타나지는 않았으므로, 정량적인 의미를 부여하는 것보다는 경향을 분석하는 것이 합리적인 것으로 생각된다. 내부간격률은 시료채취관 내부의 관 벽과 시료의 마찰을 작게 하기 위해서 필요한 것으로 알려져 있다 (Hvorslev,1949). 그러므로 내부간격률이 크면 시료의 회수율도 커질 것으로 예상할 수 있다. 이 현장시험결과에서는 내부간격률이 커짐에 따라서 회수율은 작게 나타났다. Table 1에 표시된 것처럼 시료채취관의 면적비는 Hvorslev가 제안한 10 % ~ 15 %의 범위 내에 있으므로 불교란시료채취에 적합



(a) A type sampling tube



(b) B type sampling tube

Fig. 5 Relationships between recovery ratio and inside clearance ratio

한 범위라고 할 수 있다. 이런 면적비 범위에서 내부간격률이 커짐에 따라서 시료의 회수율이 작아지는 원인은 시료의 회수율이 관 벽의 마찰보다는 선단부에서의 압축의 영향을 더 많이 받기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서 채취관 선단부에서 지반의 저항을 최소화하면서 진입할 수 있는 형상에 관한 연구가 중요할 것으로 판단된다.

2. 변형된 정적조건을 적용한 유한요소해석결과

Fig. 6은 전술한 것과 같이 관입과정을 모사하기 위해서 각 단계별 치환 깊이를 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm 및 10 mm로 하고 시료채취관이 850 mm까지 지반에 관입되었을 때의 시료의 총 회수율을 관 부착력이 19.6 kPa 및 29.4 kPa인 경우에 대해서 각각 나타낸 것이다. 관입이 연속적으로 이루어지므로 단계별 치환 깊이를 50 mm에서부터 점점 작게 하여 해석했을 때 나타나는 경향으로부터 단계별 치환 깊이가 0 mm에 가까워질 때의 회수율을 최종적인 회수율로 산정하려고 하였다. 그러나 단계별 치환에 의한 관입모사깊이가 50 mm ~

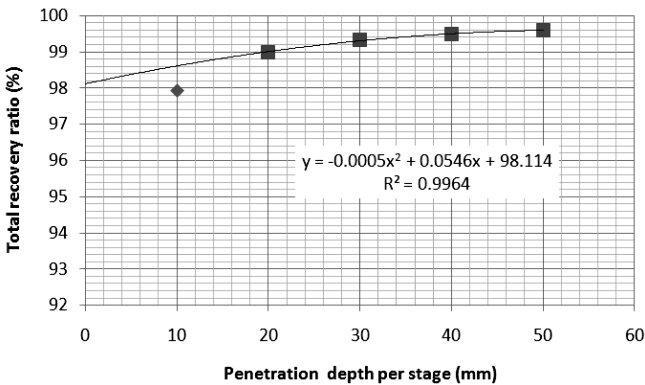
20 mm까지는 매우 밀접한 2차 함수 관계를 나타내고 있으나 10 mm에서는 편차를 나타내었다. 규칙적인 수렴성을 찾기 위해서 적용한 2차 함수는 특정한 이론에 근거한 것은 아니며 많은 함수식들을 적용하여 탐색한 결과 가장 근접한 경향을 나타내는 결과로 얻은 것이다. 이러한 경향은 관부착력이 상이한 Fig. 6의 (a) 및 (b) 모두 비슷한 경향을 나타냈으며 관부착력이 29.4 kPa일 때 더 두드러지게 나타났다. 단계별 관입깊이가 10 mm인 경우의 회수율을 제외하고 2차함수관계를 적용하면 관 부착력이 19.6 kPa 및 29.4 kPa인 경우에 대해서 각각 결정계수 R2이 0.9964 및 0.9933으로 높게 나타났기 때문에 경향을 추정할 수 있는 합리적인 관계로 판단되었다.

이 연구에서는 탄-소성 모델을 적용하여 지반의 응력-변형 거동을 해석하였다. 탄-소성 해석모델은 매우 간단하며 실제의 흙의 거동을 상당히 비슷하게 모사할 수 있지만 탄성범위의 끝에서 약간의 응력 증가량에 의해서도 완전소성영역으로 넘어가기 때문에 수치해석의 수렴과정에서 진동을 할 수 있고 이러한 본질적인 불안정성 때문에 탄-소성 모델을 사용할 때는 극도로 세심한 주의와 결과에 대한 다양한 교차확인 이 필요하다 (Nagtegaal, et al., 1974). 이 연구에서도 탄-소성 모델의 본질적인 불안정성에 의해서 관입깊이 10 mm인 경우에만 다른 경향을 나타내는 것으로 추정되었다.

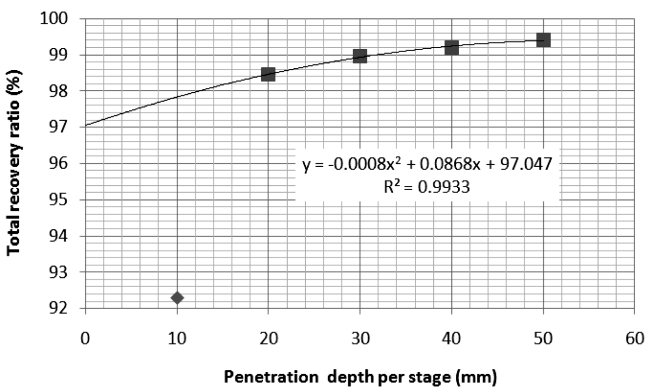
해석대상인 B-5 ~ B-8 시료채취관에 의한 야외시료채취시험에서의 회수율은 Fig. 5(b)에 의하면 회수율이 약 95.7 %로 특이값을 나타내는 한 경우를 제외한 나머지 세 경우의 평균 값은 약 82.5 %이다. 유한요소해석에 의한 회수율은 관 부착력이 19.6 kPa 및 29.4 kPa인 경우에 각각 98.1 % 및 97.0 %로 다소 크게 나타났다.

관부착력이 커지면 회수율은 감소해야 한다. 관부착력을 점착력의 2/3로 했을 때와 점착력과 같은 크기로 했을 때 모두 해석된 회수율이 현장시험결과보다 크게 나타났으므로 실제의 관부착력은 점착력에 보다 가까울 것으로 추정된다. KS 및 ASTM에서는 내부간격률을 1 % 또는 그 이하로 규정하고 있다 (ASTM International, 2008). 내부간격률이 이보다 큰 범위의 실험 및 해석에서 관부착력이 점착력에 근접할 것으로 추정되는 결과는 면적비를 크게 변화시키지 않는 범위에서는 내부간격률이 커질 경우에도 관부착력이 작아지지 않는다는 것을 간접적으로 나타낸다.

Fig. 7에는 각 단계별 치환에 의한 관입모사 깊이를 40 mm로 했을 때 대략 중간정도 깊이인 440 mm와 최종깊이인 850 mm까지 관입된 상태에서의 최대전단변형률을 나타낸 것이다. Fig. 7의 (a)와 (b)의 등치선은 각각의 상대적인 분포를 나타낸 것으로, 짙은 색이 작은 값이고 밝은 색이 큰 값을 나타낸다. 최종 관입깊이의 약 1/2이 관입된 (a)의 경우 선단부에서의 전



(a) 19.6 kPa of adhesion between tube wall and soil



(b) 29.4 kPa of adhesion between tube wall and soil

Fig. 6 Relationships between the penetration depth per stage and the total recovery ratio

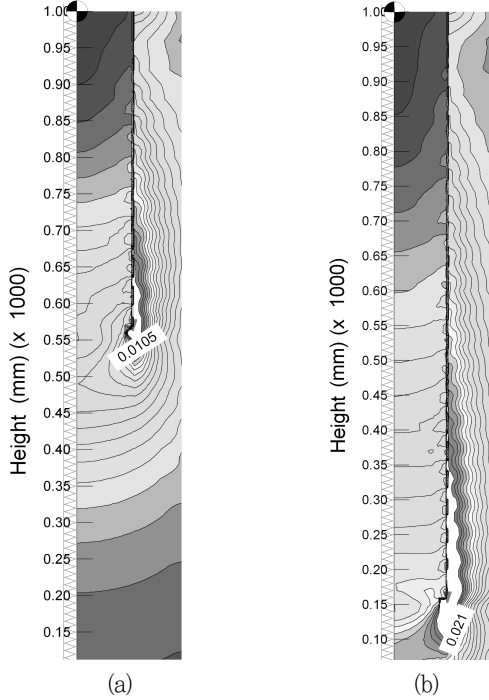


Fig. 7 Contours of maximum shear strain from the analyses on 40 mm of penetration depth per each step; (a) 440 mm of total penetration depth; (b) 850 mm of total penetration depth

단변형률은 약1% 이상이고 최종 관입깊이인 850 mm가 관입된 경우의 전단변형률은 대략 2 % 이상으로 나타났다. 전단변형률도 Fig. 6의 회수율과 같은 수렴관계가 성립된다고 설정하면 최종적인 전단변형률은 약간 커질 것으로 예상되지만 전체적으로 시료관입에 의한 전단변형은 작은 범위 이내에 있는 것으로 판단된다.

관 부착력을 점착력과 동일한 크기로 설정하였지만 최대전단 변형은 관 벽보다는 관입이 진행되는 선단부에서 대부분 발생하고 있다. 또한 내부 관 벽 보다는 외부 관 벽에서 상대적으로 더 큰 전단변형이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 각 단계별 치환에 의한 관입모사 깊이를 40 mm로 했을 때 마지막 850 mm 관입단계에서 횡방향 및 종방향의 변위량을 나타내고 있다. Fig. 8의 (a)와 (b)의 등치선은 서로 무관하게 별개의 값을 나타낸 것이다. x방향 변형은 선단부 아래에서 바깥쪽으로 밀려나가는 것으로 나타났고, 변형량은 선단부 아래쪽에서 가장 크게 나타났지만 그 크기는 종방향 변형량에 비해서 작은 값이다. 이것은 관입과정 중에 시료채취관 바깥쪽으로 지반이 밀려나가기만 관입이 된 후에는 관 내부에 구속되어 있는 효과를 나타내고 있으며 전단변형률의 거동양상과도 일치되는 경향이다. 종방향의 변형은 구속되지 않고 계속해

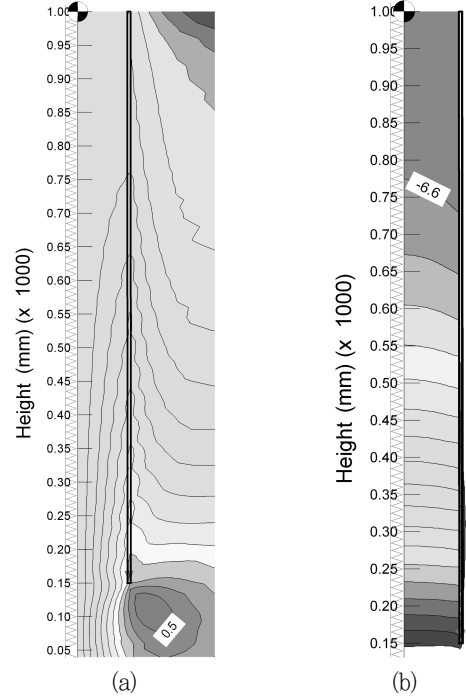


Fig. 8 Contours of displacement from the analyses on 40 mm of penetration depth per each step; (a) X-direction displacement; (b) Y-direction displacement

서 누적되므로 관입이 진행됨에 따라서 계속해서 압축이 되고 결과적으로 시료의 위 부분에서 가장 큰 압축이 발생하는 것으로 나타났다.

시료채취 및 교란에 관한 다른 많은 연구에서 다양한 방법으로 채취한 시료의 실내 전단강도 시험 결과들을 서로 비교함으로써 교란정도를 평가하였다. 그러나 어느 시료가 완전하게 불교란 상태인지를 판단하는데 불확실한 요소가 있고 연구의 내용도 조건 및 결과만 있을 뿐 과정에 대한 분석은 곤란하였다.

이 연구에서는 비록 간접적이지만 관입과정 중에 지반 내부에서 발생하는 거동들을 분석하였고 시료채취관의 형상들 중에서 어느 부분이 교란에 큰 영향을 주는지를 판단하였으므로 불교란 시료채취관을 개발하고자 하는 경우에 참고가 될 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

현장에서 얇은 관에 의한 불교란 시료 채취 시험 및 시료채취관입정을 모사하기 위한 유한요소 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

면적비가 10 % 이하인 범위 내에서는 내부간격률이 증가하여도 시료와 관 벽의 부착력이 감소하지는 않는다.

내부간격을 포함한 관 벽의 두께가 3.6 mm인 경우에 관 벽의 마찰에 의해 일어나는 전단변형 보다 관입시 선단부에서 발생하는 전단변형에 의한 교란이 더 큰 것으로 나타났다.

흙의 연경도가 연약으로 분류되고 포화되어 있는 점토에서는 시료채취관의 관입시에 횡방향 변위보다는 종방향 변위가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

선단부에서 시료가 관 내부로 관입된 이후에는 횡방향 변위는 구속되어 더 이상 진행되지 않지만 종방향 압축은 관입이 진행됨에 따라서 계속해서 누적이 되어서 관의 상단부에서 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

이 논문은 2006년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의해서 연구되었음.

References

1. ASTM International, 2008. Standard practice for thin-walled tube sampling of soils for geotechnical purposes. ASTM D 1587 - 08.
2. Geo-slope, 2002. Sigma/W version 5 user's guide.
3. Horicuchi, T., A. Eiki, and M. Funahashi, 1987. Evaluation of sample quality by thin-wall sampling tube. in *Proc. of the 8th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, 1: 41-44. Kyoto.
4. Horn, H. M., 1979. North american experience in sampling and laboratory dynamic testing. *Geotechnical Testing Journal ASTM 2(2)* : 84-97.
5. Huagn, A. B. and Y. T. Huang, 2007. Undisturbed sampling and laboratory shearing tests on a sand with various fines contents. *Soils and Foundations 47(4)*: 771-781.
6. Hvorslev, M. J., 1949. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes. U.S. Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station. Vicksburg. Miss. quoted in Soil sampling. 1996.
7. Kim, Y. C., and J. M. Kang, 2008. Analysis of soil samples obtained from piston sampler and large diameter sampler. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society 9(3)*: 29-34 (in Korean).
8. Korean Standards Association. 2006. Method for thin-walled tube sampling of soils. KS F 2317:2006 (in Korean).
9. Lee, Y. S., 1996. Finite element analysis for the soil inside the sampling tube penetrating into the ground. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers 16 (III-1)* : 111-119 (in Korean).
10. Messerklinger, S. and S. M. Springman, 2009. Economic sampling and extraction of undisturbed, high quality samples in normally consolidated lacustrine clays using a large diameter tube. *Geotechnical and Geological Engineering Springer 27*: 207-215.
11. Nagtegaal, J. C., D. M. Parks, and J. R. Rice, 1974. On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Elsevier 4*: 153-177.
12. NAVFAC, 1982. Soil Mechanics Design Manual 7.1
13. U.S. Army Corps of Engineers, 1996. Soil sampling, Engineering and Design Manual EM 1110-1-1906. Washington, D.C.
14. Wride, C. E., B. A. Hotmann, and D. C. Sego, 2000. Ground sampling program at the CANLEX test sites. *Canadian geotechnical journal 37(3)*: 530-542.