

## 자유낙하 콘관입시험법을 활용한 휴대용 다짐도 측정기의 실내시험을 통한 검증 연구

### A Study on the Verification of an Indoor Test of a Portable Penetration Meter Using the Cone Penetration Test Method

박 근 현<sup>†</sup> · 양 안 승<sup>1)</sup>

Geoun Hyun Park · An Seung Yang

Received: November 19<sup>th</sup>, 2018; Revised: November 27<sup>th</sup>, 2018; Accepted: December 11<sup>th</sup>, 2018

**ABSTRACT** : Soil compaction is one of the most important activities in the area of civil works, including road construction, airport construction, port construction and backfilling construction of structures. Soil compaction, particularly in road construction, can be categorized into subgrade compaction and roadbed compaction, and is significant work that when done poorly can serve as a factor causing poor construction due to a lack of compaction. Currently, there are many different types of compaction tests, and the plate bearing test and the unit weight of soil test based on the sand cone method are commonly used to measure the degree of compaction, but many other methods are under development as it is difficult to secure economic efficiency. For the purpose of this research, a portable penetration meter called the Free-Fall Penetration Test (FFPT) was developed and manufactured. In this study, a homogeneous sample was obtained from the construction site and soil was classified through a sieve analysis test in order to perform grain size analysis and a specific gravity test for an indoor test. The principle of FFPT is that the penetration needle installed at the tip of an object put into free fall using gravity is used to measure the depth of penetration into the road surface after subgrade or roadbed compaction has been completed; the degree of compaction is obtained through the unit weight of soil test according to the sand cone method and the relationship between the degree of compaction and the depth of the penetration needle is verified. The maximum allowable grain size of soil is 2.36 mm. For A<sub>1</sub> compaction, a trend line was developed using the result of the test performed from a drop height of 10 cm, and coefficient of determination of the trend line was  $R^2 = 0.8677$ , while for D<sub>2</sub> compaction, coefficient of determination of the trend line was  $R^2 = 0.9815$  when testing at a drop height of 20 cm. Free fall test was carried out with the drop height adjusted from 10 cm to 50 cm at increments of 10 cm. This study intends to compare and analyze the correlation between the degree of compaction obtained from the unit weight of soil test based on the sand cone method and the depth of penetration of the penetration needle obtained from the FFPT meter. As such, it is expected that a portable penetration tester will make it easy to test the degree of compaction at many construction sites, and will lead to a reduction in time, equipment, and manpower which are the disadvantages of the current degree of compaction test, ultimately contributing to accurate and simple measurements of the degree of compaction as well as greater economic feasibility.

**Keywords** : Degree of compaction, Roadbed compaction, Subgrade compaction, Portable penetration tester, Specific gravity test

**요 지** : 국내에 많은 도로공사, 공항공사, 항만공사, 구조물 퇴배우기 공사 등의 토목공사에서 흙의 다짐은 가장 중요한 공정 중 하나이다. 특히 도로공사에서 흙의 다짐공사는 노체다짐과 노상다짐으로 구분하며 다짐도 부족으로 부실공사의 원인으로 작용하기도 하는 중요한 작업이다. 현재는 여러 가지 다짐도 측정방법이 있으나 가장 많이 사용되는 평판재하시험이나 모래치환법에 의한 흙의 단위중량 시험방법을 가장 많이 사용하고 있으나 경제성이 없어 여러 측정방법이 개발되고 있다. 간편한 다짐도 측정 방법의 목적으로 측정기를 개발하고 제작한 것이 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(Free-Fall Penetration Test; FFPT)이다. 본 연구에서는 실내시험을 위하여 균질한 시료를 공사현장에서 확보하여 체가름 시험을 통해 흙을 분류하고 입도분석시험과 비중시험을 실시하였다. 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(FFPT)의 원리는 지구중력을 이용한 자유낙하 물체의 선단에 설치된 관입 침이 노체 또는 노상의 다짐이 완료된 노면에 관입 되는 깊이를 관측하고 그 위치에 모래치환법에 의한 흙의 단위중량시험을 통하여 다짐도 값을 구하여 분석하고 연관성을 검증하는 것으로 흙의 최대허용입경이 2.36mm로 시험하였으며 A<sub>1</sub>다짐의 경우는 낙하고 10cm에서 시험한 결과 값으로 추세선을 작성하고 추세선의 결정계수  $R^2 = 0.8677$  값을 도출하였으며 D<sub>2</sub>다짐의 경우는 낙하고 20cm에서 측정시 결정계수  $R^2 = 0.9815$  값이 관측되었다. 자유낙하시험은 낙하높이를 10cm에서 50cm까지 10cm 간격으로 변경을 하면서 시험하였다. 본 연구는 모래치환법에 의한 흙의 단위중량시험을 통하여 얻은 다짐도 값과 FFPT 시험기를 통해 얻은 관입침의 관입깊이와의 연관성을 비교 분석하여 현재의 다짐도 측정방법의 단점인 시간, 장비, 인력의 소모를 최소화하여 경제성을 확보하고 정확성과 간편성을 보장하는 다짐도 측정기 제작으로 여러 공사현장에서 다짐도 측정이 간단하게 진행될 것이다.

**주요어** : 다짐도, 노상다짐, 노체다짐, 휴대용 다짐도 측정기, 자유낙하관입시험

† Ph.D. Student, Graduate School Department of Civil Engineering, University of Seoul (Corresponding Author : opensky1004@naver.com)

1) Master, Graduate School Department of Civil Engineering, University of Seoul

# 1. 서론

인류의 발전에 따라 편익을 위하여 전 세계적으로 토목 공사가 많이 진행되고 있다. 특히 도로공사, 공항공사, 댐공사, 제방공사 등의 공사현장에서는 가장 중요한 공정으로 흙의 다짐공사가 평가되고 있으며 부실공사의 원인이 되기도 한다. 경제적인 문제로는 신도시건설공사의 전체 공사비에서 토공분야의 공사비가 가장 크며, 토공분야 중 토공의 운반비용과 다짐 비용이 큰 부분을 차지하고 있다. 많은 도로공사 현장에서는 노상, 노체공사와 구조물 되메우기 공사가 진행되며 다짐공사 관리를 위해 다양한 방법으로 다짐도 측정을 시행하며 현재는 여러 다짐도 측정방법 중에 평판재하시험(KS F 2444, 2015)이나 모래 치환법에 의한 흙의 단위 중량 시험방법(KS F 2311, 2016; ASTM D 1556-90, 2015)을 가장 많이 사용하고 있으나 다짐도 측정시험에 필요한 장비와 인력, 시간이 많이 소요되므로 경제성이 부족하며 전문적 기술자가 시험하여야 하므로 간편한 다짐도 측정 방법과 장비들이 개발되고 있다.

본 논문은 현장에서 휴대가 간편한 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(Free-Fall Penetration Test; FFPT)를 이용한 다짐도 측정시험을 진행하여 관입깊이 데이터를 수집하고 동일한 위치에 모래 치환법에 의한 흙의 단위 중량 시험 방법을 통하여 다짐도 결과 값을 구하여 상관성을 검토하고 그래프를 작성하여 현장에서 함께 사용하므로 현장에서 다짐도 측정시험과 동시에 결과를 확인할 수 있다. 그러나 현장에서 노상과 노체 다짐이 끝난 노면에 현장시험을 시행한 결과 현장 여건상 다짐 시 흙의 균질성이 보장받지 못하며 자갈이나 나무뿌리 등의 이물질이 흙에 혼합되어 있어 균질한 실내시험 조건에서의 검증이 추가적으로 필요하다고 판단하여 본 연구를 시작하였다. 국토교통부 기준에 따르면 노체다짐의 경우는 A<sub>1</sub>다짐의 90% 이상 다짐도를 요구하고 노상다짐의 경우는 D<sub>2</sub>다짐의 95% 이상이 되어야 한다. 따라서 본 연구의 주된 목적은 많은 시간과 장비와 인력이 필요한 기존의 다짐도 측정 방법들이 아닌 휴대용 다짐도 측정기가 도로건설 현장에서 주로 사용되어 신속하고 정확한 검측과 그에 따른 결과가 현장에서 확인 되는 것이다.

## 2. 연구 동향

다짐도 측정을 위하여 사용되는 관입 시험의 역사는 1846년 프랑스의 기술자 콜린이 여러 가지 점토의 응집력을 추

정하기 위해 직경 1mm 바늘 모양의 관입 시험기를 개발함으로써 시작되었다(Sanglerat, 1972). 따라서 다양한 디스크와 토양을 통한 연구는 계속되어 왔다. Lim & Lee(2003)은 콘 관입 시험기를 이용해 다짐도를 측정하고 지반정수 추출법을 개발함으로써, 기존 현장에서 널리 사용되는 평판재하시험에 의한 다짐도 평가는 다짐횟수와 노상의 층 두께에 따라 잘못된 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. Kim(2005)와 Hwang(2011)은 동적 콘 관입 시험기를 제작해 국내 여러 지역을 강모래의 다짐특성을 분석하였다. 따라서 다양한 토양에 대처하고 좀 더 정확하고 간편한 방법을 위해 여러 유형의 관입 시험기들이 개발되고 이에 대한 실험은 꾸준히 진행되고 있다.

## 3. 자유낙하 휴대용 다짐도 측정기(Free-Fall Penetration Test, FFPT)의 개발

### 3.1 이론 배경

본 연구는 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(Free-Fall Penetration Test; FFPT)의 관입깊이와 다짐곡선의 관계를 분석하기 위하여 현장조건이 아닌 실내실험조건에서 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 시료는 공사현장에서 채취한 흙을 110℃에서 완전 건조시켜서 사용하였다. 이 시료를 사용하여 입도분석시험, 비중시험, A다짐시험, D다짐시험, 자유낙하관입시험을 실시하였다.

휴대용 다짐도 측정기는 일정한 무게의 물체를 자유낙하 후 낙하추의 선단에 설치된 피아노 강선 두께 3mm의 관입 침이 지표면에 관입 되는 관입깊이를 측정하고 그 위치에 모래 치환법에 의한 흙의 단위 중량 시험방법을 이용하여 다짐도를 측정하는 원리이다. 본 연구에서는 일정한 두께와 직경을 가진 관입 침과 일정한 무게를 가진 자유낙하추의 자유낙하높이를 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변경하면서 실험을 시행하였으며 A<sub>1</sub>다짐시험, D<sub>2</sub>다짐시험, 자유낙하관입시험을 실시하였다. 시험 후 데이터 분석을 통하여 관입깊이에 대한 건조밀도, 관입깊이에 대한 다짐도를 통해 어떤 추세선이 도출되는지 연구하였고 다짐곡선과 관입깊이의 그래프를 작성하여 검측결과 가장 신뢰할 수 있는 높이를 선정하였다. 자유낙하(Free-Fall)와 다짐도(Penetration)를 시험(Test)하는 명칭으로 FFPT라 하고 현장에서 휴대가 간편하고 조작방법도 간단한 기구를 사용하여 현장 다짐도 측정이 가능한 시험기로 몇 가지 원칙만 이해하고 사용하면 경제적이고 편리한 방법으로 다짐도 측정이 가능하다.

## 3.2 시험방법

### 3.2.1 기기설계 및 제원

일정한 무게와 높이를 유지하고 중력에 의한 자유낙하로 지면에 관입 침이 관입 될 수 있는 장비를 제작하여 시험을 실시하였다.

FFPT 다짐도 측정기는 강선의 길이가 53mm이고 낙하추의 무게가 2.503kg으로 관입 침의 두께는 3mm로 제작하였다. 자유낙하 높이는 10cm에서 50cm까지 시험하였다. Fig. 1에서 보는 것처럼 측정기 작동이 간단하고 중력에 의한 낙하 추와 관입 침이 자유낙하가 보장되어야 하며 측정 눈금자를 설치하고 낙하 추 형태는 일정한 무게의 추와 관입 침을 교체가 가능한 형태로 Fig. 2와 같이 제작하였다.

Fig. 3의 관입 측정부로 관입 침과 계측에 필요한 눈금자



Fig. 1. Penetration meter

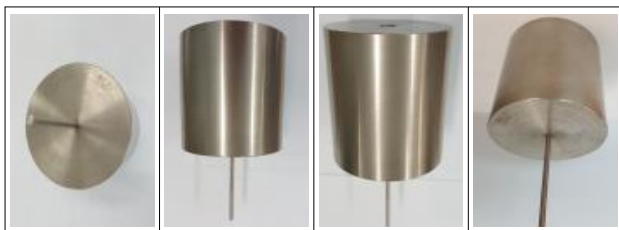


Fig. 2. Penetration steel wire and drop weight

Table 1. Penetration meter specification

Thickness of penetration steel wire	3 mm
Length of penetration steel wire	5.3 cm
Dimension of drop weight	6.8 cm
Length of drop weight	7.5 cm
Free fall height	10 cm~50 cm

설치와 측정기 내부공기를 신속하게 배출하기 위하여 공기 배출구를 설치하였다.

### 3.2.2 실내시험 방법

본 연구에서 사용된 대상 시료는 00신도시 공사현장에서 채취한 흙을 110℃에서 완전 건조시켜서 사용하였으며 이토사를 이용하여 입도분석시험, 함수비시험, 비중시험, A<sub>1</sub> 다짐시험, D<sub>2</sub>다짐시험, 자유낙하관입시험을 실시하였으며 시료의 최대허용입경을 2.36mm로 시험을 하였다.

Fig. 4와 같이 휴대용 다짐도 측정기와 다짐몰드의 크기 차이가 없어 다짐몰드 내부 흙의 교란이 발생하고 관입시험 시 오차가 발생하기 쉽다. 따라서 시료의 최대허용입경은 관입 되는 피아노 강선의 직경 3mm보다 작은 2.36mm로 결정하였으며 휴대용 다짐도 측정기로 자유낙하 관입시험을 시행하기 위해서 다음과 같은 순서로 시험을 실시하였다.

- ① 흙의 최대허용입경이 2.36mm인 시료를 준비하고 건조로에 24시간 건조시킨 후 시험을 시작하며 함수비 단계별로 시료에 물을 혼합하여 시료를 작성한다.



Fig. 3. Penetration steel wire and measuring rules



Fig. 4. Comparing specifications of Penetration meter and D compaction mold



Fig. 5. Free fall penetration test

- ② 다짐 몰드에 시료를 넣고 각각 A<sub>1</sub>다짐 방법과 D<sub>2</sub>다짐 방법에 따라 낙하횟수 및 낙하고를 정해 다짐을 실시한다.
- ③ 다짐이 끝나면 몰드+시료를 저울에 무게를 측정하고 Fig. 5와 같이 휴대용다짐도 측정기로 자유낙하관입 시험을 실시한다.

## 4. 시험시료의 분석 결과

### 4.1 입도분석시험

본 연구의 입도분석시험은 한국표준협회의 KS F 2302 (2017)에 의거하여 실시하였으며 Fig. 6에서와같이 입도 가

Table 2. Soil weight left on each sieve

Sieves (#)	Diameter d, (mm)	Soil weight left		Cumulative percentage	
		Each sieve (g)	Cumulative weight (g)	Residue (%)	Pass (%)
-	25	0	0	0	100
-	19	0	0	0	100
-	9.5	0	0	0	100
4	4.75	0	0	0	100
10	2	152.7	152.7	23.25	76.75
20	0.85	226.4	379.1	57.73	42.27
40	0.425	125.5	504.6	76.84	23.16
60	0.25	67.8	572.4	87.16	12.84
100	0.15	40.4	612.8	93.32	6.68
200	0.075	38.2	651	99.13	0.87
Pan		4.4	-	-	-

적곡선을 그리고 누가 통과율을 분석하여 입도분포의 좋고 나쁨을 판단하며 자갈, 모래, 실트, 점토 등의 구성 비율을 결정하였다.

입도분석시험 후 통일 분류법에 의해 분류한 결과, Table 3과 같이 균등계수(Cu)는 약 7.2, 곡률계수(Cc)는 1.17 정도로 입도가 양호한 모래(SW)로 분류되었다.

### 4.2 함수비와 건조밀도 실내시험

최대허용입경이 2.36mm인 시료의 A<sub>1</sub>다짐시험 결과 Fig. 7에서와같이 최적함수비는 13.79%와 최대 건조밀도는 1.741 g/cm<sup>3</sup>의 시험결과가 작성되었다.

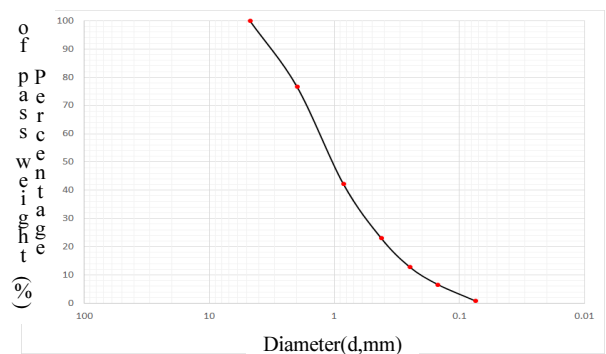


Fig. 6. Gradient curves for the passage rate

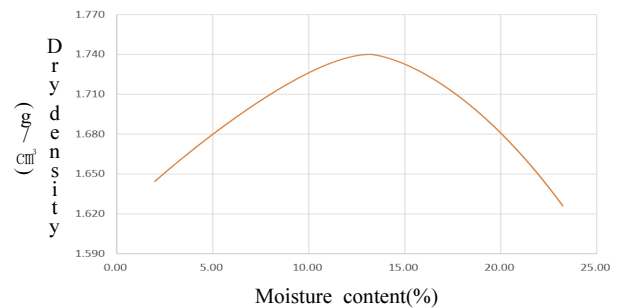


Fig. 7. A Compaction test curve for the sample with the maximum allowable particle diameter of 2.36 mm

Table 3. Data calculation of sieve analysis

Data calculated value of sieve analysis	
D10	0.2
D30	0.58
D60	1.44
Cu	7.2
Cc	1.17

Table 4. Content by soil particle size of particle size analysis

Gravel	Coarse sand	Thin sand	Silt	Clay
G>4.75mm	4.75~0.425	0.425~0.075	0.075~0.002	C<0.002
0	77	22	1	0

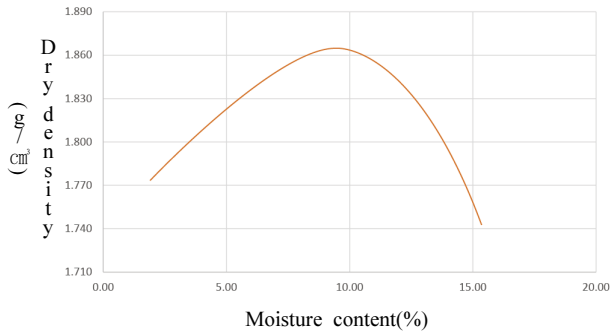


Fig. 8. D Compaction test curve for the sample with the maximum permissible particle diameter of 2.36 mm

Fig. 8과 같이 그래프작성 결과 최대허용입경이 2.36mm 인 시료의 D<sub>2</sub>다짐시험 결과 최적함수비는 9.92%와 최대 건조밀도는 1.863g/cm<sup>3</sup>의 시험결과가 작성되었다.

### 4.3 자유낙하 관입시험

시료의 최대허용입경은 2.36mm이며, 각각 A<sub>1</sub>다짐 시험과 D<sub>2</sub>다짐 시험을 시험방법에 따라 다짐시험을 실시하였으며, 다짐시험이 완료된 후 휴대용 다짐도 측정기를 이용하여 Fig. 9와 같이 자유낙하관입시험을 실시하였다.

함수비와 건조밀도 시험 시 함수비의 변화를 주면서 자유낙하 관입시험도 반복하여 실시하였다.

A<sub>1</sub>다짐 시험 시 자유낙하 관입시험기의 낙하 높이를 10cm 높이에서 낙하하고 관측한 관입깊이는 최대 55mm이고 최소 35mm의 범위에서 관측되었으며 함수비의 변화에 따라 관입 침의 관입 깊이가 다양하게 나타났으며, 20cm 높이에서 자유낙하 시험한 경우 관입깊이는 최대 55mm에서 최소 50mm 관측되었다. 따라서 자유낙하하고 30cm에서 50cm 높이의 낙하 시험은 함수비와 관계없이 모두 관입깊이가 관입



Fig. 9. Upper view of compaction mold after penetration test

침의 최대 관입깊이를 초과하여 측정되었으므로 시험이 불가능하였다.

최대허용입경이 2.36mm인 시료의 D<sub>2</sub>다짐 몰드에 함수비를 조금씩 증가시키면서 자유낙하관입시험을 시행한 결과 자유낙하 관입시험기의 낙하고를 10cm 높이에서 자유낙하시험결과 관입깊이는 최대 55mm에서 최소 19mm까지 함수비의 변화에 따라 다양하게 관입 침의 관입 깊이가 관측되었다. 그리고 낙하 높이를 20cm에서 낙하 시험을 시행한 결과 관입깊이는 최대 55mm에서 최소 29mm까지 관측되었으며, 30cm 높이에서 관입깊이는 최대 55mm에서 최소 32mm 관측 값을 보였으며, 40cm 높이에서 낙하 시험의 경우 관입깊이는 최대 55mm에서 최소 39mm가 관입되었다. 50cm 높이에서 낙하 시험 시 관입깊이는 최대 55mm부터 최소 44mm까지 관측되었다.

Table 5. Depth of penetration depth (mm) of a compaction sample with maximum allowable particle diameter of 2.36 mm

	Moisture content (%)	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Degree of compaction (%)	Depth of tester 1 penetration depth (mm)				
				10cm Fall	20cm Fall	30cm Fall	40cm Fall	50cm Fall
A-1	2.13	1.641	94.23	55	55	55	55	55
A-2	3.97	1.666	95.69	50	55	55	55	55
A-3	6.00	1.686	96.82	48	55	55	55	55
A-4	7.99	1.703	97.83	45	55	55	55	55
A-5	10.01	1.718	98.68	43	55	55	55	55
A-6	12.12	1.734	99.57	40	55	55	55	55
A-7	13.79	1.741	100.0	39	53	55	55	55
A-8	16.02	1.729	99.33	35	50	55	55	55
A-9	17.83	1.720	98.79	37	52	55	55	55
A-10	20.57	1.699	97.56	45	55	55	55	55
A-11	21.84	1.678	96.39	52	55	55	55	55
A-12	23.98	1.622	93.18	55	55	55	55	55

Table 6. Depth of penetration depth (mm) of D compaction sample with maximum allowable particle diameter of 2.36 mm

	Moisture content (%)	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Degree of compaction (%)	Depth of tester 1 penetration depth (mm)				
				10cm Fall	20cm Fall	30cm Fall	40cm Fall	50cm Fall
D-1	1.99	1.778	95.47	36	48	55	55	55
D-2	4.05	1.793	96.24	27	37	55	55	55
D-3	5.97	1.820	97.73	26	36	43	50	55
D-4	7.97	1.847	99.13	21	31	41	50	51
D-5	9.92	1.863	100.0	19	29	32	39	44
D-6	12.09	1.852	99.43	19	33	43	55	55
D-7	14.07	1.783	95.74	55	55	55	55	55
D-8	16.00	1.741	93.47	55	55	55	55	55

## 5. 관입깊이와 건조밀도 상관성

### 5.1 최대 허용입경(2.36mm) A<sub>1</sub>다짐 시험결과

최대허용입경이 2.36mm인 흙의 A<sub>1</sub>시험 다짐 몰드에 자유낙하 관입시험을 실시한 결과 Fig. 10과 Fig. 11과 같은 그래프로 작성되었으며 낙하고를 10cm, 20cm 높이에서 낙하하였을 때 건조밀도가 낮을수록 관입깊이가 증가하는 양상을 보였다. 특히 Fig. 10을 보면, 시험기 모두 10cm 높이에서 낙하하였을 때 추세선에 의한 결정계수( $R^2$ )=0.8677로 측정할 수 있었으며 낙하고 20cm부터는 관입 침 전체길이 이상의 관입깊이가 측정되어 관측이 불가능 하였다.

### 5.2 최대 허용입경(2.36mm) D<sub>2</sub>다짐 시험결과

최대허용입경이 2.36mm인 흙의 D<sub>2</sub>다짐 몰드에 자유낙하관입시험 결과는 Fig. 12와 Fig. 13과 같은 그래프로 작성되었으며 낙하고 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm에서 낙하하였을 때 건조밀도가 낮을수록 관입깊이는 증가하는 양상을 보였으며 특히 Fig. 13 그래프를 작성 분석결과 낙하고 20cm에서 낙하하였을 때 추세선에 의한 결정계수( $R^2$ )=0.9815로 확인할 수 있었다. 그리고 낙하고에 의한 관입깊이 데이터를 활용하여 그래프를 작성 시 Fig. 13에서와같이 적색의 타점이 작성되었다. 이러한 경우를 분석하여 얻은 결론은 측정기의 관입깊이 측정 시 자유낙하가 보장되어야 하는 것이

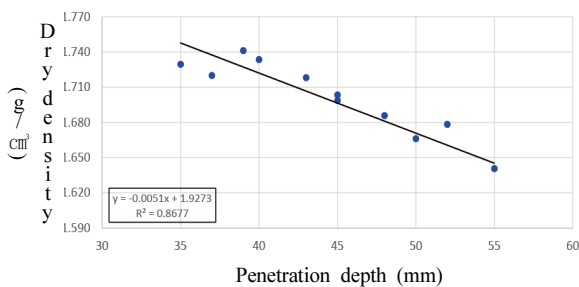


Fig. 10. Penetration meter (h = 10cm) dry density graph -A compaction

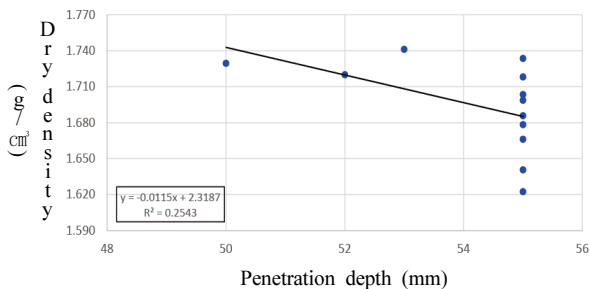


Fig. 11. Penetration meter (h = 20cm) dry density graph -A compaction

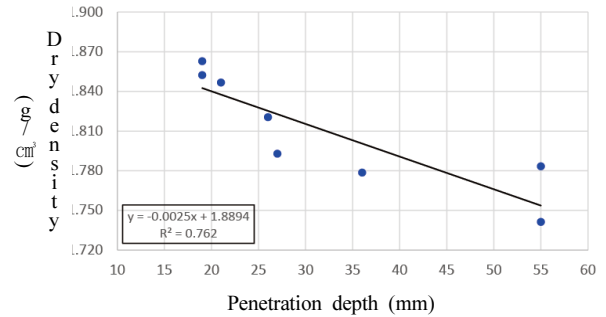


Fig. 12. Penetration meter (h = 10cm) dry density graph -D compaction

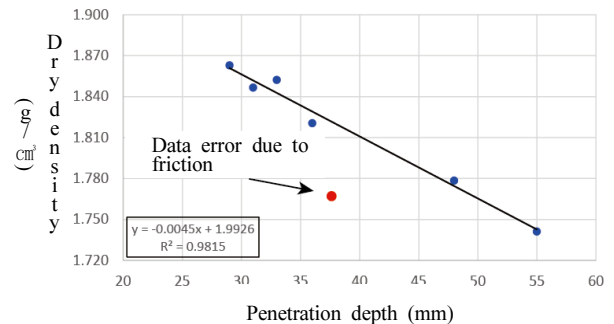


Fig. 13. Penetration meter (h = 20cm) dry density graph -D compaction

기본 원칙이나 시험자의 개인적 실수로 측정기가 기울어진 상태에서 시험이 실행될 경우 그러한 현상이 발견되었다. 따라서 본 시험을 진행할 경우는 측정기의 관입깊이 측정 시 5회를 측정하여 가장 큰 값과 가장 작은 값을 제외하고 나머지 3점의 관입깊이의 평균값을 구하여 관입깊이 값으로 최종 결정한다. 나머지 낙하고 h=30~50cm의 데이터는 관입 침의 최대길이 이상의 관입깊이를 보이고 있으므로 데이터로 사용이 불가능할 것으로 판단되며 정확도가 낮아 사용하지 않았다

## 6. 관입깊이와 다짐곡선의 상관성 분석

시료의 최대허용입경이 2.36mm인 흙의 A<sub>1</sub>다짐 몰드와 D<sub>2</sub>다짐 몰드에서 자유낙하 관입시험을 실시하여 그 결과는 Fig. 14와 Fig. 15에서와 같은 그래프로 작성되었으며 관입깊이가 가장 적은 지점 즉, 다짐도가 가장 높은 위치가 최적함수비 지점과 동일하거나 최적함수비 위치보다 오른쪽으로 조금 치우침을 알 수 있었으며 관입깊이는 점차적으로 감소하다가 최적함수비 지점 이후에 관입깊이가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 따라서 최적함수비에서 다짐도가 가장 좋으며 관입깊이는 가장 적은 값을 나타내고 있다.

## 6.1 관입깊이와 다짐도 곡선 그래프 A<sub>1</sub>다짐 시험결과

최적 함수비 그래프와 관입 깊이의 곡선 그래프가 대칭 형태로 형성되어 나타나고 있으며 최적함수비 위치에서 다짐도가 최대를 나타내고 있으며 최적 함수비를 지나서 급격히 증가하는 변화를 보인다. 이것은 함수비와 다짐도의 관계가 매우 중요하다는 것을 증명하며, 흙의 다짐에서 최적 함수비의 함수량을 정확하게 준수하여 다짐도의 효과를 극대화할 필요가 있어 보이는 부분이다.

## 6.2 관입깊이와 다짐도 곡선 그래프 D<sub>2</sub>다짐 시험결과

D<sub>2</sub>다짐에서도 A<sub>1</sub>다짐 방법과 동일하게 최적 함수비 그래프와 관입 깊이의 곡선 그래프가 대칭되게 형성되어 나타나고 있으며 최적함수비를 지나면서 급격한 관입깊이의 증가를 보이고 있으며 관입 침의 관입깊이가 최대값을 나타내고 있어 관입 침이 모두 관입하고 낙하 후에 도달하여 관측이 불가능하다. 따라서 함수비가 최적함수비에 미치지 못하는 경우는 관입깊이가 서서히 변화하는 것을 볼 수 있으나 함수량이 최적함수비를 초과하면 급격하게 변화하는 것은 함수비가 부족한 것이 과다한 것에 비하여 다짐도 면에서는 좋은 것으로 판단할 수 있다.

본 논문과 병행하여 실제 시공 시 현장에서 다짐도 시험

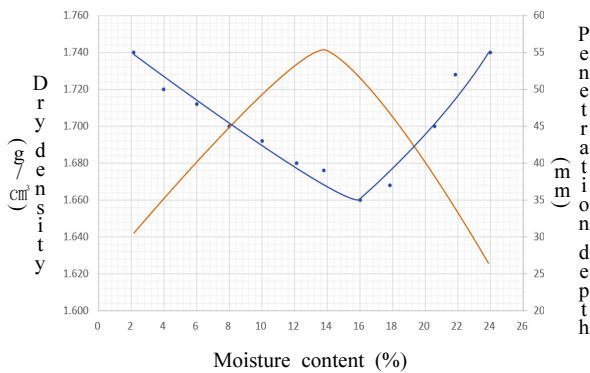


Fig. 14. Penetration meter (h=10cm) moisture-density curve graph

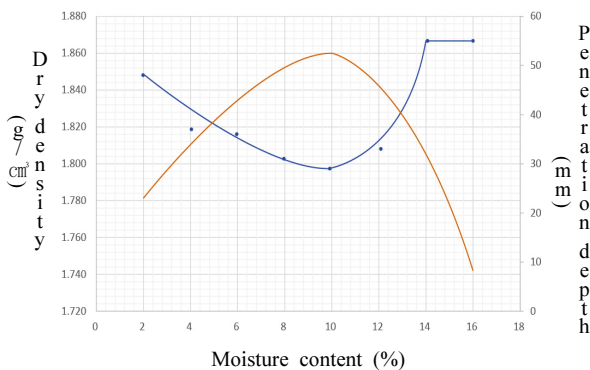


Fig. 15. Penetration meter (h=20cm) moisture-density curve graph

시 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기를 이용한 다짐도를 측정하여 실의시험에 관한 연구를 진행하고 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 지반의 다짐도를 측정하기 위하여 간편하고 휴대가 가능하게 제작된 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(Free-Fall Penetration Test; FFPT)를 실내시험 조건에서 시험하였다. 시료는 00신도시 건설 공사현장에서 채취한 흙을 110℃에서 완전 건조시켜서 사용하였으며, 이 시료를 사용하여 입도분석시험, 비중시험과 최대허용입경이 2.36mm인 흙 시료의 A<sub>1</sub>다짐시험과 D<sub>2</sub>다짐시험 몰드에 다짐시험을 실시하였으며, 낙하고는 h=10~50cm 낙하높이에서 자유낙하 관입시험을 실시하여 관입깊이에 대한 건조밀도, 관입깊이에 대한 다짐곡선을 그래프로 나타내어 관계를 해석하였다.

함수비가 최적함수비에 접근하면서 다짐도 값이 커지고, 휴대용 다짐도 측정기의 관입깊이 값은 점차적으로 감소하였으며 함수비가 최적함수비일 때는 다짐도가 최대 상태이므로 휴대용 다짐도 측정기의 관입깊이 값이 가장 작게 관측되었다. 최적함수비 이후에는 다짐도가 급격히 감소하고 이에 따라 휴대용 다짐도 측정기의 관입깊이 값이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

시험용 시료의 최대허용입경이 2.36mm인 흙의 다짐곡선은 관입깊이의 최저치가 최적 함수비 지점과 동일하거나 오른쪽으로 조금 치우치는 것을 알 수 있었다.

시료의 최대허용입경이 2.36mm인 A<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>다짐 몰드의 관입깊이에 대한 건조밀도와 다짐도의 측정값은 각각 A<sub>1</sub>다짐 몰드에서는 낙하고 h=10cm에서 추세선에 의한 결정계수(R<sup>2</sup>)=0.8677로 측정하였으며 D<sub>2</sub>다짐 몰드에서는 낙하고 h=20cm에서 추세선에 의한 결정계수(R<sup>2</sup>)=0.9815로 측정되었다. 따라서 자유낙하 관입시험을 하는 경우 FFPT시험기의 적정 낙하높이를 A<sub>1</sub>다짐 몰드에서는 h=10cm, D<sub>2</sub>다짐 몰드에서는 h=20cm를 확인할 수 있었으며 이는 현장에서 사용 시 노체다짐 시험 시 FFPT 측정기를 h=10cm 낙하고를 유지하여 시험하고 현장 여건을 고려하여 진행된 현장 관입깊이 시험으로 작성된 그래프를 이용하여 계측하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 그리고 노상다짐 시험 시 FFPT 측정기는 h=20cm 낙하고를 유지하는 것이 정확하고 신뢰성을 가지는 것을 확인하였으며 타 지역의 많은 현장에서 지속적인 시험이 이루어지고 데이터가 수집되어 다짐도 측정기의 정확성이 높아질 뿐만 아니라 다짐도 측정방법과 장비의 개발에 많은 도움이 되어 국내와 해외에서도 간편하게 다짐도를 측정할 수 있기를 기대한다.

## References

1. ASTM (2015), "American Society for Testing and Materials".
2. Hwang, S. C. (2011), A study on portable cone penetration tester to measure the degree of compaction, The Journal of Korean society of hazard mitigation, Vol. 11, No. 5, pp. 231~239.
3. Kim, K. T. (2005), Development on degree of compaction measurement equipment for backfill material of underground electric distribution pipe, A master's thesis.
4. Korean standards association (2015), KS F 2444 Standard test method for plate bearing test on shallow foundation.
5. Korean standards association (2016), KS F 2311 soil density test according to sand cone method.
6. Korean standards association (2017), KS F 2302 Test method for particle size distribution of soils.
7. Lim, Y. J. and Lee, H. S. (2003), Development of a system for decision of strength parameters and of degree of compaction in compacted soil with cone penetrometer, The Journal of engineering Paichai University, Korea, Vol. 5, No. 1, pp. 109~118.
8. Sanglerat, G. (1972), The Penetrometer and Soil Exploration, Volume 1: Developments in Géotechnical Engineering, pp. 1~89.