Journal of the Korean Geo-Environmental Society
19(11): 5～14. (November 2018) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2018.19.11.5

휴대용 다짐도 측정기의 현장실험을 통한 다짐도와 관입깊이 상관성 연구

A Study on the Correlation with the Degree of Compaction and the Penetration Depth Using the Portable Penetration Meter at Field Test

박 근 현†
Geoun Hyun Park

Received: June 7th, 2018; Revised: June 20th, 2018; Accepted: October 23rd, 2018

ABSTRACT : Worldwide, soil compaction work is one of the most important activities that are carried out on civil engineering works sites. Compaction work, particularly in the area of road construction, is considered to be important, as poor compaction work is closely related with poor construction even after a construction is complete. Currently, the plate bearing test or the sand cone method relative to the unit weight of soil test are commonly used to measure the degree of compaction, but as these require a great deal of time, equipment and manpower, it is difficult to secure economic efficiency. The method that is used to measure the degree of compaction according to the penetration depth achieved by free fall objects through gravity is the Free-Fall Penetration Test (FFPT), which uses a so-called "portable compaction measuring meter (PCMM)." In this study, the degree of compaction was measured and a penetration depth graph was developed after the field test using the portable compaction measuring meter. The coefficient of determination was 0.963 at a drop height of 10 cm, showing the highest level of accuracy. Both horizontal axis and longitudinal axis were developed in a decimal form of graph, and the range of allowable error was ±1.28 mm based on the penetration depth. The portable compaction measuring meter makes it possible to measure the degree of compaction simply, quickly and accurately in the field, which will ensure economic efficiency and facilitate the process management.

Keywords : Degree of compaction, Subgrade compaction, Roadbed compaction, Portable compaction measuring meter, Free fall compaction meter

요 지 : 전 세계적으로 토목공사 현장에서 토사의 다짐작업은 중요한 공종 중 하나의 공종이다. 특히 도로공사에서의 다짐작업은 공사 후에도 부실시공과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 매우 중요하게 평가된다. 현재는 여러 가지 다짐도 측정방법 중에 평판재하시험이나 모래 치환법에 의한 흙의 단위 중량 시험방법을 가장 많이 사용하고 있으나 많은 시간과 장비가 필요하며 인력도 많이 소모되어 경제성을 확보하지 못하고 있다. 본 연구에서는 중력에 의한 자유낙하 물체의 관입 깊이에 따라 다짐도 측정방법인 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험(Free-Fall Penetration Test, FFPT) 일명 휴대용 다짐도 측정기를 이용하여 현장실험을 실시하여 다짐도와 관입깊이 그래프를 작성하였고 낙하고 10cm에서 결정계수 값이 0.963으로 가장 정확도가 높았으며 그래프는 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며, 허용오차범위는 관입깊이 기준으로 ±1.28mm로 작성되었다. 휴대용 다짐도 측정기를 통하여 현장에서 간단하고 신속, 정확한 다짐도 측정이 가능하여 경제성 확보와 공정 관리가 편리하게 진행될 것이다.

주요어 : 다짐도, 노상다짐, 노체다짐, 휴대용 다짐도 측정기, 자유낙하 다짐도 측정기

1. 서 론

세계적으로 많은 건설 현장이 인류의 발전과 편익을 위하여 건설이 진행되고 있고 국내의 건설 현장도 각 지방 곳곳에서 진행되고 있는 상황이다. 어느 건설 현장이든 흙과 흙의 다짐이 중요한 공종과 공사의 목적이 되고 있다. 특히 토목현장에서는 더욱 중요시 다루어지고 있으며 수많은 도로 및 공항 건설현장에서는 가장 중요한 공사의 핵심 중의 하나로 다루어지고 있다.

토목공사의 전체 공사비에서 토공분야의 공사비가 가장 큰 것이 토공의 운반비용과 다짐비용이 차지하기 때문이다. 특히 도로공사 현장과 공항, 댐, 제방, 등 흙의 다짐이 필요한 현장에서는 항상 현장시험 방법이 평판재하시험(한국표준협회, 2015, "KS F 2310)이나 모래치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법(한국표준협회, 2016, "KS F 2311)을 통하여 다짐도 측정이 시행되며 많은 시간과 인력, 장비가 필요하고 다짐도 시험이 끝나고 검측 결과가 판정되어야 다음 공사가 진행되므로 경제성이 많이 부족한 상태이다. 간단한 실험방법의 개

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

발과 장비의 제작으로 체계적이고 신뢰성을 확보한 간편한 실험을 하는 것이 본 논문의 목적이라 할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법 및 내용

본 논문에서는 지구의 중력을 이용하여 일정한 무게의 물체를 자유낙하 후 낙하물체의 선단에 설치된 관입 침(두께 t=3mm의 피아노 강선으로 일정한 단면적을 가지는 원통형)이 지표면(노상, 노체 다짐시공 마무리면)에 관입 되면 그 깊이를 측정하고 그래프를 통하여 다짐도를 구하는 원리이다.

다짐도 측정기의 낙하 추를 낙하하여 측정된 관입 깊이별 그래프를 작성하여 가장 검측이 용이하고 결정계수의 정확성이 높은 추세선을 작성하여 현장에서 관입 깊이만으로 다짐도 측정이 가능하도록 하는 것이다. 각 지역별 현장마다 다른 토질과 다른 조건이므로 각 현장 시공표준 시험 시 기준을 정한다. 그 방법은 현장 시공표준 시험 시 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험(Free-Fall Penetration Test, FFPT)을 5회 실험하고 그 위치에 현장 들 밀도시험(한국표준협회, 2016, "KS F 2311)을 실시하여 관입깊이와 다짐도를 구하여 추세선을 작성하여 표준 그래프로 사용한다.

관입 침의 관입 깊이는 mm로 표기되며 자유 낙하의 낙하고는 cm로 표기하여 선형의 일정한 간격 유지로 계측 시 편리함과 관측이 용이하도록 작성하였다. 그래프는 X축과 Y축으로 구분하여 10진법과 로그 그래프를 사용하여 작성하고 실험 결과 값을 그래프화 하였을 경우 가장 측정이 용이한 그래프를 사용하여 작성하였으며 실험을 할 위치에 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험(FFPT)을 낙하 높이별 5회 실험하여 가장 큰 값과 가장 작은 값을 제외하고 나머지 3회 값을 합산한 값을 3으로 나누어 그 값을 평균값으로 사용하였다. 그리고 낙하높이별 낙하시험이 총 25회 실험이 끝나면 그 데이터 값을 기록하고 낙하실험을 실시한 위치에 현장 들 밀도시험을 1회 시험하여 다짐도와 함수비를 측정하여 기록하였다.

FFPT시험기 현장 들 밀도시험을 총 57회 시험하였으며 자유낙하 관입시험은 총 1425회 실험하였으며 현장 들 밀도 시험과 자유낙하 관입 실험의 데이터 값이 늘어나면 정확도와 신뢰도가 높아질 것이다.

3. 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험(Free-Fall Penetration Test, FFPT) 방법 및 제원

3.1 휴대용 다짐도 측정기의 제원

일정한 무게와 높이를 유지하고 중력에 의한 자유낙하를 실시하며 낙하추의 하단부에 관입침을 설치하여 지면에 관입 될 수 있는 장비를 제작하여 실험을 실시하였다.

3.1.1 FFPT 측정기 제원

Table 1은 FFPT 다짐도 측정기의 제원을 명칭과 함께 규격을 작성하였다.

Table 1. Penetration meter specification

Thickness of penetration steel wire	3 mm
Length of penetration steel wire	5.3～6.8 cm
Dimension of weight after free-fall	6～6.8 cm
Length of weight after free-fall	7.5～10 cm
Free fall height	10 cm～50 cm

아래 Table 2는 FFPT 다짐도 측정기 관입 침 강선의 길이가 53mm이고 낙하추의 무게가 2.503kg으로 관입 침의 두께는 3mm로 제작하였다.

자유낙하 높이는 10cm에서 50cm까지 시험하였으며 계측이 불필요한 40cm와 50cm 부분은 삭제하여 측정기를 더 소형화 및 간편화하여 다시 제작하였다.

Table 2. Penetration meter production specification

Classifi-cation	Length of penetrate steel wire (cm)	Weight (kg)	Dimension of weight after free-fall (cm)	Free fall height (cm)	Length of weight after free-fall (cm)
Penetration meter	5.3	2.503	6.8	10, 20, 30, 40, 50	7.5

Fig. 1에서와같이 측정기 작동이 간단하고 중력에 의한 자유낙하가 보장되어야 하며 측정기 하단에 측정 눈금자를 설치하고 낙하 추 낙하 시 측정기 내부 공기압에 의한 저항

Fig. 1. Penetration meter form and shop drawing

이 발생하지 않을 수 있도록 측정기 측면과 상, 하단 부분에 측정기 내부공기를 배출하는 배출구를 설치하였다.

3.1.2 낙하 추 및 관입 침

일정한 무게의 낙하 추와 관입 침(피아노 강선 두께 3mm)을 Fig. 2의 형태로 제작하였다.

Fig. 2. Penetration steel wire and drop weight

3.2 관입 침의 형태에 따른 측정기(FFPT) 사용 결정

Fig. 3과 같이 휴대용 다짐도 측정기의 관입 침의 형태와 모양에 따라 선단부지지력과 표면마찰부지지력의 확인이 수치적 해석이 어려운 FFPT-2, FFPT-3의 측정기는 시험에서 제외하고 관입 침의 형태가 원통형으로 동일한 FFPT 측정기로 호칭한다.

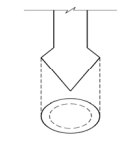
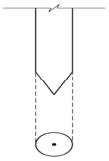
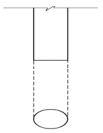
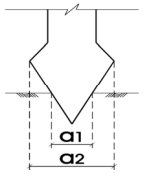
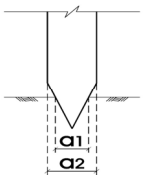
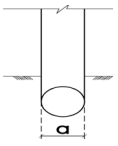
Classification	FFPT-2 Penetration meter	FFPT-3 Penetration meter	FFPT Penetration meter
Shape of penetration steel wire			
Sectional area of penetration steel wire			

Fig. 3. Penetration type comparison by penetration meter

관입 침의 형태가 화살모양의 형태를 가지고 있거나 FFPT-3 측정기와 같은 송곳모양의 형태는 FFPT 측정기에서 제외하였다.

관입 침의 형태로 보면 화살모양이나 송곳모양의 관입 침은 초기 관입 시 깊이별로 단면적이 변화하므로 선단부지지력(Q_p) 계산이 어려운 상태이며, 초기관입 후 주변마찰저항력(Q_s) 계산 또한 힘든 상태로 판단된다. 말뚝의 기초 원리와 동일하게 선단지지력과 주변마찰력은 지지층의 경도와 말뚝 선단부 면적의 증가에 따라 비례하는 원리와 동일하다.

Fig. 4는 말뚝에 작용된 하중이 흙으로 전달되는 하중전달 원리를 나타낸 것으로 매우 복잡하다. 그림의 (L)은 말뚝 길이, 지표면의 말뚝하중은 Q(z=0)로 점차 증가시키고 말뚝 주변 마찰력에 의해 저항 되는 것은 (Q_1)으로 말뚝 선단에 위치한 흙에 의하여 지지된 것은 (Q_2)로 하고 임의의 깊이(z)의 말뚝축 주변에 전달되는 하중은(Q_z)로 정하면 Fig. 4에서와같이 $Q(z=0)=Q_u$ 이므로 주변마찰저항력(Q_s)=Q_1, 선단부지지력(Q_p)=Q_2, 말뚝의 극한 지지력(Q_u)=Q_p+Q_s로 정리가 가능하다.

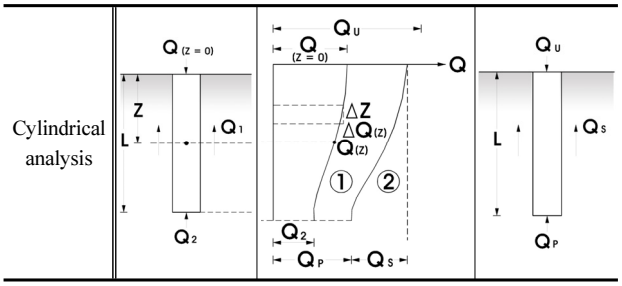


Fig. 4. Cylindrical load transfer principle

3.3 자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(FFPT) 현장 실험

자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(FFPT)의 현장 실험 방법은 우선 실험하고자 하는 곳을 평탄하게 고르기 작업하고 휴대용 다짐도 측정기를 실험 위치에 거치한 후 눈금을 0cm에 고정하여야 한다.

다짐도에 따른 관입 깊이의 변화를 광범위하게 구하기 위하여 낙하고를 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변화를 주어 자유낙하 시험을 하고 관입깊이를 기록한다. 낙하시험은 높이별로 5회 시행하여 기록하되 가장 큰 값과 가장 작은 값을 제외하고 3회을 합산하여 평균한 값을 측정값으로 기록한다. 아래 Fig. 5에서와같이 측정기가 지면과 수직을

Test location	Drop height position	Penetration test location

Fig. 5. Degree of compaction field test by free fall penetration depth (FFPT)

유지하여야 하며 측정기 내면의 표면 마찰이나 공기의 저항이 없는 상태이어야 한다.

측정기로 자유낙하 5회 측정하고 그 위치에 모래 치환법의 현장 들 밀도 시험(KS F 2311-91(96))을 실시하고 다짐도와 함수비를 측정하여 기록하고 자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정용 그래프를 작성하되 그래프는 로그 그래프와 10진법 그래프를 병행하여 모두 작성하며 가장 적합한 그래프 형태를 찾아 결론 편에 수록했다.

Table 3. A degree of compaction test chart by free fall penetration depth (test chart)

Date		20 . . (Day)		Weather	
Project name					
Test location				(No. + .00)	
Construction type		○ Subgrade compaction (D2 95%)		○ Poadbed compaction (A1 90%)	
Test number			Tester	① ② ③	
Drop height 10 cm	1Time		Penetration depth	+ +	
	2Times			= mm	
	3Times			• Exclude maximum and minimum measurement	
	4Times				
	5Times				
Drop height 20 cm	1Time		Penetration depth	+ +	
	2Times			= mm	
	3Times			• Exclude maximum and minimum measurement	
	4Times				
	5Times				
Drop height 30 cm	1Time		Penetration depth	+ +	
	2Times			= mm	
	3Times			• Exclude maximum and minimum measurement	
	4Times				
	5Times				
Drop height 40 cm	1Time		Penetration depth	+ +	
	2Times			= mm	
	3Times			• Exclude maximum and minimum measurement	
	4Times				
	5Times				
Drop height 50 cm	1Time		Penetration depth	+ +	
	2Times			= mm	
	3Times			• Exclude maximum and minimum measurement	
	4Times				
	5Times				

Table 3은 측정기 현장기록 시험지로 사전에 작성하여 현장 측정 시험 시 준비하여 현장에서 기록지로 사용한다.

현장에서 관입깊이 측정실험을 시행하고 기록지에 관입침의 관입깊이를 기록하여 실내시험에 사용하며 현장시험값을 확인결과 낙하높이가 클수록 관입깊이가 낙하높이에 비례하여 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3.4 흙의 다짐시험

흙의 다짐시험 (다짐공법 A_1, D_2) 위치는 경기도 남양주시 지금동 일원의 00신도시 부지조성공사 4공구 흙의 다짐시험 측정값을 분석하여 연구에 활용하였다.

측정 시기는 2016년도 4월부터 2018년 3월까지 현장 실험과 실내 시험을 진행하였으며 체가름시험의 결과 값과 밀도측정 시험 값, 함수비 측정값을 구하여 작성하였다.

Table 4. Specific gravity measurement

Specific gravity measurement	
γd max	1.910 g/cm^3
OMC	12.0%
Specific gravity	2.77

흙의 다짐시험 (다짐공법 D) 00신도시 부지조성공사 4공구 흙의 다짐시험 측정값을 분석하여 연구에 반영하며 측정일시는 2017년도 4월 시행하였으며 위치는 중로 1류 1호선 위치에서 측정하여 밀도측정 시험 값과 함수비 측정값을 구하여 최종 비중 값이 2.77로 작성되었다.

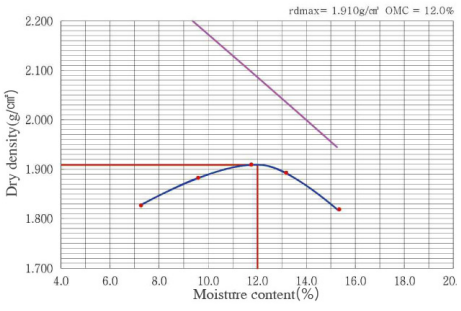


Fig. 6. Dry density and moisture content of field test sample (Optimal curve)

시험을 진행하는 기간이 길어지면서 시험 장비나 토취장의 위치 등의 변화에 따라 시험 기본 데이터가 변경되는 경우가 발생하여 날짜별로 변경요인과 적용값을 정리하였다.

체가름 시험으로 입도분포의 구성비를 확인할 때 No.4번체와 No.10체 그리고 No.40번과 No.200번체 통과량과 통과율을 분석하여 입경가적곡선을 작성하고 그에 따른 입도

Table 5. Fields density test change factor result table

Date	Unit	2016.4.6	2016.6.30	2016.11.25	2017.10.24
Sand weight in the Funnel (D)	g	2,345	2,345	2,345	1,565
Container weight (G)	g	302	302	302	721
Unit volume of sand (J)	g/cm^3	1.395	1.395	1.322	1.365
Maximum dry density (N)	g/cm^3	1.713	1.883	1.910	1.885
Optimum moisture content (O)	%	14.6	10.1	11.9	14.6

Table 6. Sieve analysis through rate (%)

No. 4	4.75 mm	Through rate (%)	96.3%
No. 10	2.00 mm	Through rate (%)	79.8%
No. 40	0.425 mm	Through rate (%)	38.8%
No. 200	0.075 mm	Through rate (%)	21.9%

분포 곡선을 해석한다.

Fig. 7에서 현장시료의 입도시험 통과율을 활용한 입도가적곡선을 작성한 그림이다.

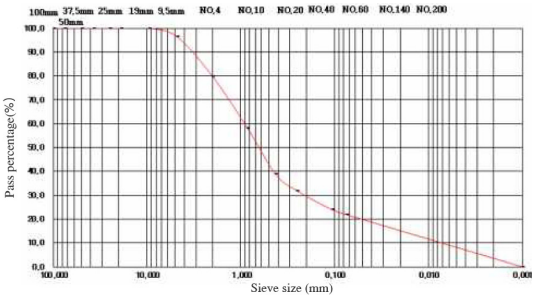


Fig. 7. Field test sample grading curve

Table 7은 균등계수와 곡률계수로써 입도분포의 좋고 나쁨을 판단하며 모래와 자갈은 좋은 입자로 곡률계수도 좋은 입도로 되었다.

Table 7. Coefficient of uniformity and coefficient of curvature

Cu : Coefficient of uniformity	Sand Cu>6, Gravel Cu>4, Good particle
Cg : Coefficient of curvature	1 to 3, Good particle size
D10, D30, D60	The particle size corresponding to each cumulative pass efficiency (mm)

Table 8은 시료의 자갈, 모래, 실토, 점토의 함유율을 작성해 두었다.

Table 8. Percentage of g, s, m, C of sample (%)

Diameter range (mm)	Gravel (G) 4.75 mm or more	Sand (S)		Silt (M) 0.075～0.002	Clay (C) 0.002 Below	Total
		Thick 4.75～0.425	Thin 0.425～0.075			
Content ratio of aggregate (%)	3.7	58	16.4	18.9	3	100

4. 자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(FFPT) 현장측정데이터분석

4.1 다짐도와 함수비 상관성 비교(FFPT 측정기)

자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(FFPT)를 활용한 현장의 관측값을 정리하여 측정기 기계별 관입깊이와 함수비의 관계 증명과 관입깊이와 다짐도의 관계를 확인하기 위하여 그래프를 작성하는 작업을 시행하며 가로축과 세로축의 그래프 눈금수치의 변화를 주어 그 그래프 작도 형태를 알아보고 가장 합리적이며 작도와 해석이 간편하여 현장사용이 용이하여 경제성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 여러 가지 방향으로 작성하여 결과치를 해석하였다. 먼저 그래프는 로그 그래프와 10진법 그래프를 이용하여 작성하며 가로축을 로그 그래프와 10진법 그래프를 변경하여 작성하고 가로축도 로그 그래프와 10진법 그래프로 변화를 주어 작성하여 그 결과 값을 가지고 해석하고 최종 분석결과는 Table 9와 같다.

자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(FFPT)로 현장 관입시험 측정값을 구하고 관입깊이 시험을 진행한 위치에 현장들 밀도 시험 시 급속 함수량 시험기를 통하여 함수비 시험을 시행하여 함수비와 다짐도의 상관관계를 그래프로 작성하였다.

4.2 관입깊이별 다짐도 그래프분석(FFPT)

자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(FFPT)로 낙하 높이별 관측값을 그래프에 도식화하여 그래프 형태와 상관성을 비교 분석하였다. 그래프 분석 시 가로측과 세로측의 그래프 눈금 형태를 십진법, 로그 그래프 눈금으로 변경하며 작성하여 변화를 확인하였다.

그래프 작성 후 추세선을 작성하여 구배형태를 파악하고 정확성을 위하여 R^2 값으로 확인하였다. 먼저 가로축은 10진법 세로축은 로그 그래프로 작성하였으며 다음은 가로축과 세로축 모두를 로그 그래프로 작성하였다. 다음으로 가로축을 로그 그래프로 세로축을 10진법 그래프로 작성하였으며 그래프 변경에 따른 변화를 확인하였다.

Table 9. Data analyses of portable penetration meter by free fallpenetration depth

Classifi-cation	Subgrade compaction (D2 compaction)	Penetration depth (mm)					Remarks
No	Degree of field compaction (%)	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	Moisture content (%)
1	90.1	33	42	51	53	53	6.8
2	107.7	15	24	31	39	49	3.6
3	111.3	11	20	29	36	43	3.6
4	91.4	31	40	52	53	53	2.4
5	81.4	40	51	53	53	53	5.8
6	86	37	45	53	53	53	1.2
7	97.2	25	34	45	51	53	1.6
8	103.7	20	27	41	48	53	2.2
9	90.3	30	40	52	53	53	2.8
10	93.5	29	38	48	53	53	3.8
11	101.2	21	31	43	48	53	4
12	100	22	32	42	50	53	4
13	81.9	40	50	53	53	53	6.2
14	92.1	29	40	50	53	53	4.4
15	105.1	17	25	36	44	53	3.4
16	107.8	16	23	31	42	50	3.2
17	95.9	25	35	43	51	53	6.6
18	94.4	25	36	44	53	53	6
19	102.5	19	30	41	49	53	6.8
20	99.6	24	31	41	49	53	5.8
21	85.1	37	48	52	53	53	7.3
22	97.8	24	36	43	50	53	6.5
23	89.8	32	43	48	53	53	8
24	89	31	43	52	53	53	6.4
25	95.7	22	36	44	51	53	6.8
26	68.7	48	53	53	53	53	8
27	104.5	18	28	38	47	53	6.9
28	98.7	23	34	41	53	53	7.3
29	102.1	19	28	40	46	53	7.5
30	92.9	31	38	49	53	53	8.7
31	104.3	15	29	36	45	53	7.2
32	87.2	36	44	53	53	53	8.2
33	100	21	30	43	49	53	9.6
34	100.7	20	30	42	48	53	7.2
35	100.6	19	31	41	49	53	9.2
36	84.7	41	46	53	53	53	9.8
37	85	36	47	53	53	53	8.2
38	104.7	16	28	38	43	53	4.5
39	91.4	29	37	50	53	53	4.4
40	103.2	20	31	39	45	53	4.5
41	94.9	25	36	45	53	53	4.3
42	90.7	30	39	49	53	53	5.4
43	109.8	12	23	33	39	49	3.4
44	92.3	28	38	50	53	53	3.8
45	101.1	22	29	39	49	53	4.4
46	109.5	11	21	31	40	46	5.3
47	103.8	16	26	39	44	53	4.4
48	94.9	27	40	46	53	53	4.2
49	105.8	16	26	35	43	49	3.5
50	107.7	15	24	38	46	50	2.8
51	94.4	25	36	45	53	53	3.6
52	105.4	15	29	39	46	53	2.8
53	105.7	15	24	32	45	50	3.2
54	97.3	23	31	44	49	53	4
55	104.8	13	23	35	42	51	2
56	97.4	25	38	43	52	53	3.5
57	102.1	18	29	37	46	53	3.6

첫 번째 변화는 10cm와 20cm의 낮은 낙하고에서의 시험은 관입깊이 확인 및 표현이 가능하나 낙하고가 높은 시험은 관입 침의 마지막까지 관입되어 측정이 불가능하였다. 특히 다짐도가 낮은 곳에서는 더욱 확연한 차이를 보이고 있었다.

그래프 형태의 변화 시험에서 알 수 있는 것은 가로축과 세로축이 모두 10진법 그래프를 사용하여야 정확한 데이터를 구할 수 있었다.

4.2.1 가로축 10진법, 세로측 로그 그래프 작성 분석

Fig. 8은 모든 낙하고에서 데이터를 그래프로 작성하였다.

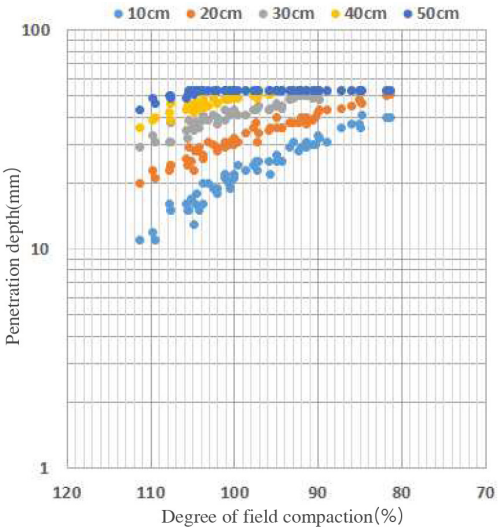


Fig. 8. Horizontal axis decimal, vertical axis log graph

4.2.2 가로축, 세로축 모두 로그 그래프 작성 분석

Fig. 9는 가로축과 세로축 모두 로그 그래프로 작성하고 모든 낙하고에서 데이터를 그래프로 작성하였다.

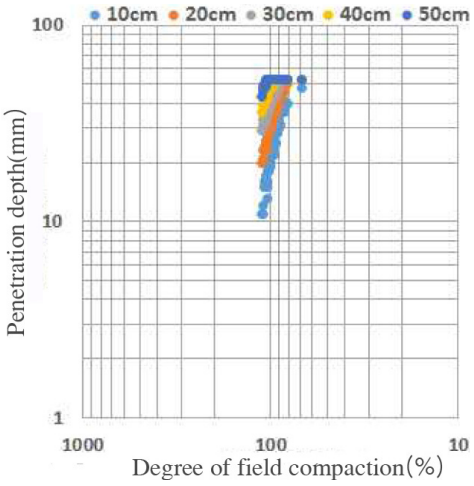


Fig. 9. Total Log graph on both horizontal axis and vertical axis

4.2.3 가로축 로그, 세로측 10진법 그래프 작성 분석

Fig. 10은 가로축은 로그 그래프로 세로축은 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 데이터를 낙하고 높이의 모든 데이터를 그래프로 작성하였다.

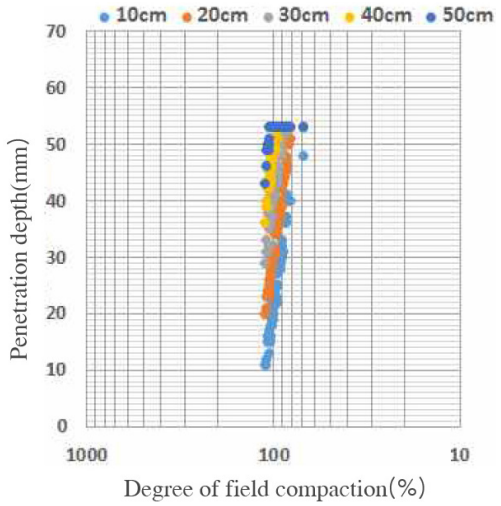


Fig. 10. Horizontal axis logarithmic,vertical axis decimal decimal graph

4.2.4 가로축, 세로측 10진법 그래프 작성 분석

Fig. 11은 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 낙하고 높이는 10cm 데이터를 그래프로 작성하였다.

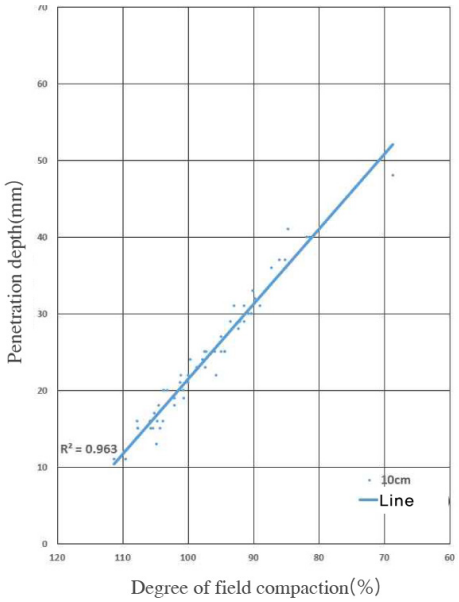


Fig. 11. Horizontal and vertical decimals graph (h = 10 cm)

4.2.5 가로축, 세로측 10진법 그래프 작성 분석

Fig. 12는 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 낙하고 높이는 20cm 데이터를 그래프로 작성하였다.

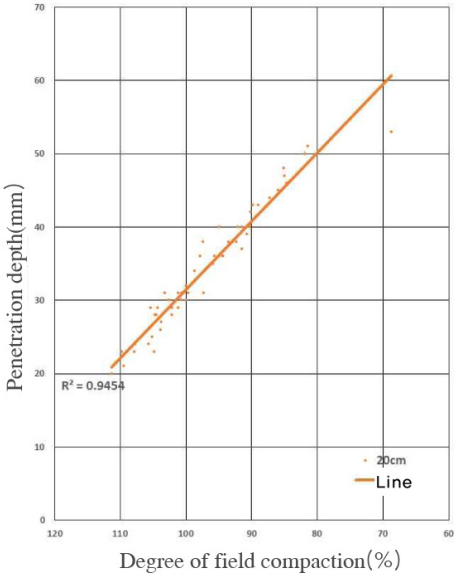


Fig. 12. Horizontal and vertical decimals graph (h = 20 cm)

다짐도 측정기의 자유낙하 높이가 10cm에서 20cm로 상향되면서 관입깊이는 다소 깊어지며 그래프의 타점과 추세선이 위쪽으로 이동하여 형성되는 것을 볼 수 있다.

4.2.6 가로축, 세로측 10진법 그래프 작성 분석

Fig. 13은 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 낙하고 높이는 30cm 데이터를 그래프로 작성하였다.

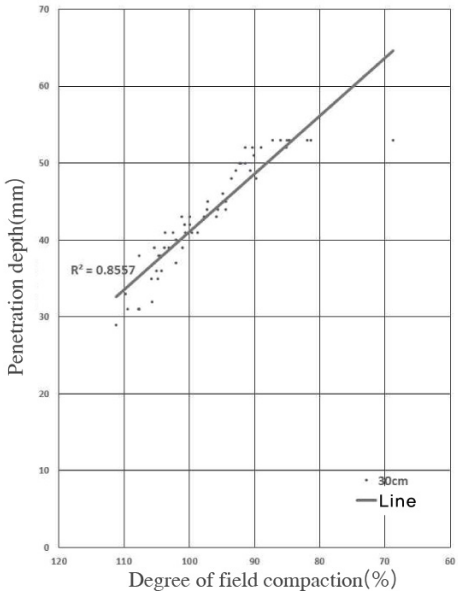


Fig. 13. Horizontal and vertical decimals graph (h = 30 cm)

Fig. 13과 Fig. 14에서 나타난 것처럼 낙하고가 30cm 이상 높아지면 관입 침이 모두 관입되어 측정이 불가능한 상태가 되었다. 특히 다짐도가 낮은 곳에서 그러한 현상이 발생하였다.

4.2.7 가로축, 세로측 10진법 그래프작성 분석

Fig. 14는 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 낙하고 높이는 40cm 데이터를 그래프로 작성하였다.

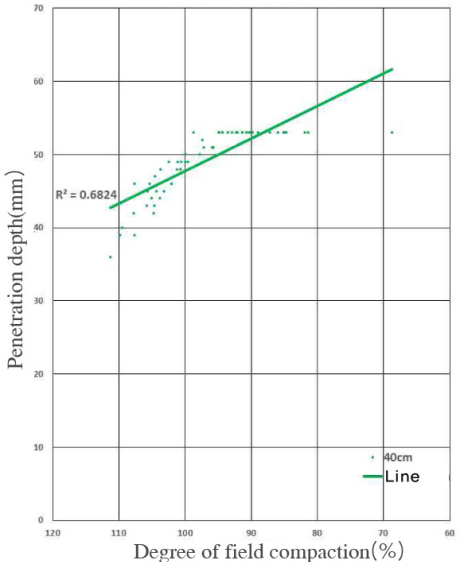


Fig. 14. Horizontal and vertical decimals graph (h = 40 cm)

4.2.8 가로축, 세로측 10진법 그래프 작성 분석

Fig. 15는 가로축과 세로축 모두 10진법 그래프로 작성하였으며 자유낙하 관입 깊이별 낙하고 높이는 50cm 데이터를 그래프로 작성하였다.

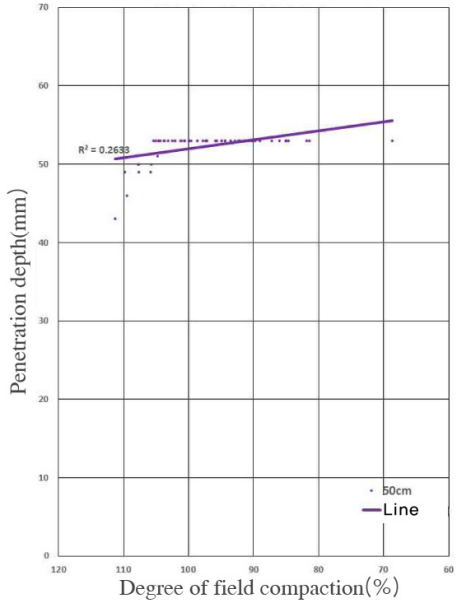


Fig. 15. Horizontal and vertical decimals graph (h = 50 cm)

현재까지의 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험기(Free-Fall Penetration test, FFPT)의 여러 가지 조건을 변경하며 시험한 결과 10진법 그래프에서 낙하고 10cm의 R^2 값이 0.963이고, 20cm는 0.945, 30cm는 0.855, 40cm부터는 급격히 떨어져 0.682를 50cm는 0.263의 값을 보이고 있다. 따라서 본 논문에서는 낙하높이 40cm, 50cm에서 시험한 데이터는 사용이 불가능한 것으로 판단하고 FFPT 측정기는 낙하고 h=10cm 그래프를 활용하는 것이 가장 적합한 것으로 판단하였다.

4.3 관입깊이별 다짐도 시험(FFPT) 허용오차 범위 산정

다짐도 측정기와 그래프의 값을 확인하고 허용오차 범위를 어느 정도까지 허용할 것인가 하는 것은 90% 또는 95%의 범위로 결정할 수 있으나, 본 논문에서는 추세선을 기준으로 상부와 하부 평균이격거리의 합산 값을 나누어 허용오차 값으로 결정하였다.

4.3.1 낙하고 높이별 허용오차 범위 산정(FFPT)

FFPT 측정기의 낙하높이별 허용오차 그래프를 Fig. 16과 같이 작성하였다.

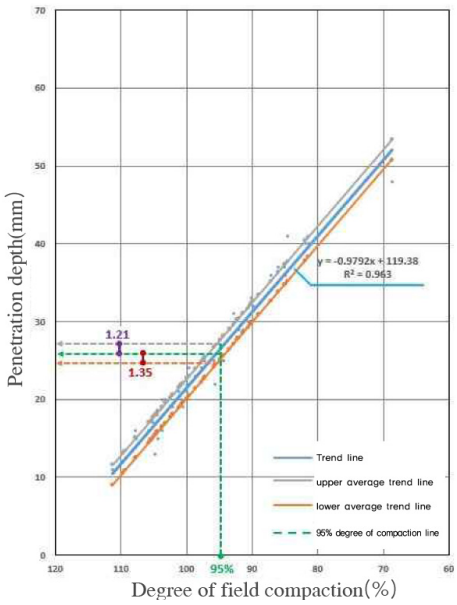


Fig. 16. Falling height 10 cm average distance between upper and lower (FFPT)

먼저 추세선을 기준으로 상부측과 하부측으로 구분 후 각각의 타점과 추세선과의 이격거리를 합산값의 평균치를 상부 평균이격거리(1.21mm)와 하부 평균이격거리(1.35mm)

라하고 두 값을 나누어 적용하는 방법과 90% 또는 95%로 가정하여 오차범위를 결정할 수 있으나, 아래 Fig. 17은 낙하고 10cm 시험 상부와 하부 평균이격거리를 구하여 상부와 하부 허용오차범위를 ±1.28mm로 결정하였다.

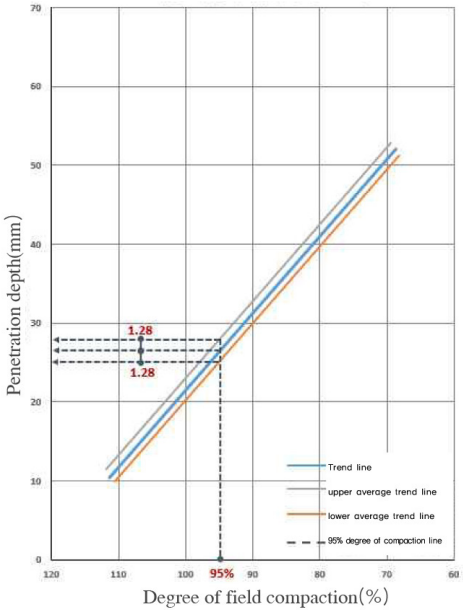


Fig. 17. Falling height 10 cm average allowable error between upper and lower (FFPT)

5. 자유낙하 관입깊이별 다짐도 시험(free-fall penetration test, FFPT) 측정치 분석 및 토론

5.1 최적 함수비와 다짐도 분석

측정기 FFPT의 실험결과 현장 평균함수비가 2.5%~8.2%로 분포하고 있으며 무게중심 함수비는 5.17%이며 모래치환법에 의한 흙의 단위 중량시험방법의 현장 다짐도는 80%~110%까지 분포하며 무게중심 다짐도는 97.14%로 확인되었다. 이는 공원이나 비다짐 구간과 다짐 정도가 과다짐된 공사용 가설도로에서도 FFPT 측정기로 실험하였으므로 100% 이상의 다짐도를 구할 수 있었다.

FFPT에서는 급속 함수비 측정기에 의한 현장평균함수비는 5%로 결정하고 모래치환법에 의한 흙의 단위 중량시험방법에 의한 현장평균 다짐도는 95%로 결정하였다.

본 연구에서는 자유 낙하 높이를 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변경하며 실험을 실시하고 그 결과 값의 추세선을 작성하여 결론 편에서 낙하높이와 결정계수를 정하고 허용오차범위도 결정하였다.

5.2 그래프별 분석

가로축과 세로축 모두를 로그 그래프로 작성 시 측정기의 낙하높이를 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변경하여 관입깊이와 다짐도를 작성한 결과 그래프에 타점들이 우측 상단에 몰려서 작성되어 해석이 불가능한 상태가 되었다. 가로축 로그 그래프와 세로축 10진법 그래프로 작성 시와 가로축 10진법 그래프와 세로축 로그 그래프로 작성 시 모두 그래프 해석이 불가능하게 작성되었다.

그러나 가로축 10진법 그래프와 세로축 10진법 그래프로 작성 시 측정기의 낙하높이를 변경하여 관입깊이와 다짐도를 작성한 결과 그래프에 타점들이 가로방향과 세로방향 모두 등분포하게 작성되어 수치해석 및 검측값을 읽을 수 있는 상태로 배치되어 측정값 수치해석과 추세선 작성이 가능한 것으로 확인되었다.

5.3 FFPT 측정치 토론

FFPT 그래프의 가로·세로 형태는 10진법의 그래프를 사용하여 수치를 해석하는 것이 바람직한 것으로 판단되며 FFPT의 낙하고 결정은 여러 가지 복잡한 문제점과 해석이 필요해 보이나 측정기의 형태와 무게 그리고 관입 침의 길이와도 연관성이 있으며 본 연구에서 구한 자료를 분석한 결과로는 40cm 이상 낙하고를 가지며 수치해석이 불가능하거나 관입 침의 길이를 연장해야 하지만 이 또한 관입 침의 휘어짐 현상으로 사용이 불가능하다.

본 논문에서 실시한 FFPT의 경우는 낙하높이 40cm와 50cm를 제외하고 데이터 사용에서 제외한다. 또한 FFPT기의 현장 적용 시 현장에서 공사를 착공하기 전에 시험 포장이나 시험을 위한 실내와 실외 시험 시 FFPT 측정기도 병행하여 시험하므로 데이터를 수집하여 시험을 통하여 현장 흙의 물성치에 적합한 측정용 그래프와 추세선을 작성하여 사용하여야 하며 본 논문 인용으로 많은 연구가 추가적으로 진행되어 토목공사의 다짐도 측정방법의 변화로 인하여 공사기간과 공사비용의 절감으로 많은 경제적 효과를 기대하며 토질 및 기초 학문이 경험치와 수많은 반복 실험으로 얻어진 데이터의 수치해석이 기본이므로 많은 연구의 진행이 필요하다.

6. 결론 및 제안

본 논문의 시작은 현장에서의 다짐도 측정 시 평판재하시험(한국표준협회, 2015, “KS F 2310)이나 모래치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법(한국표준협회, 2016, “KS F 2311)

으로 번거롭고 힘든 시험방식을 조금 더 편리하고 간편하게 개선하여 시간의 절약과 경제성을 확보하기 위하여 시작되었다. 여러 낙하높이에서의 실험을 통하여 얻어진 데이터를 정리하여 가장 현실적이고 타당한 결과를 도출하여 현장에 적용하고자 하며 지금까지 데이터를 종합 정리하여 해석한 결과를 정리하였다. 먼저 그래프 작성은 가로축과 세로축 모두 로그 그래프를 제외한 10진법 그래프로 작성하였으며 낙하높이는 10cm에서 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 추세선에 의한 결정계수 R^2값이 0.963으로 작성되었으며 허용오차 범위는 추세선을 기준으로 상부 평균이격거리(1.21mm)와 하부 평균이격거리(1.35mm)에서 평균값인 허용오차범위를 ±1.28mm로 결정하였다.

본 논문의 시험 값을 통하여 가장 이상적으로 형성되는 그래프의 추세선인 결정계수는 여러 가지 공사현장에서 신속한 다짐도 측정에 활용되어 정확도와 신뢰성이 확인되어야 한다. 자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(Free-Fall Penetration Test, FFPT)별 현장의 용도와 공종별로 사용처의 용도에 적합한 측정기로 진화하여 노상다짐과 노체다짐 또는 되 메우기 다짐이 필요한 공사현장에서 사용되어 수많은 데이터의 수집과 분석이 이루어진다면 보다 정확도가 높은 자유낙하 관입깊이별 다짐도 측정기(Free-Fall Penetration Test, FFPT)가 될 것이며 측정기의 40cm와 50cm의 낙하높이 실험이 불필요하므로 절단하여 30cm 크기의 소형 측정기로 변경 제작하였다.

본 논문에서 현장시험은 경기도 남양주시에 위치한 00신도시에서 진행하였으며 현장 직접시험을 바탕으로 작성하였으므로 향후에 타 지역의 건설 현장이나 조건이 다른 곳에서 시험이 추가될 경우 토질별, 지역별로 많은 데이터가 확보됨으로 많은 데이터를 기반으로 높은 정확성을 확보할 수 있을 것으로 판단되며 본 논문과 관련하여 추가적으로 많은 연구가 진행될 것이다.

References

1. Koean standards association (2015), “KS F 2310 plate bearing test method of road”.
2. Korean standards association (2016), “KS F 2311 soil density test according to sand cone method”.