

## 다짐품질관리를 위한 IoT 기반 DCPT 적용 평가

### Evaluation of Compaction Quality Control applied the Dynamic Cone Penetrometer Test based on IoT

김지선<sup>1</sup>, 김진영<sup>2</sup>, 김남규<sup>3</sup>, 백성하<sup>4</sup>, 조진우<sup>5\*</sup>

Jisun Kim<sup>1</sup>, Jinyoung Kim<sup>2</sup>, Namgyu Kim<sup>3</sup>, Sungha Baek<sup>4</sup>, Jinwoo Cho<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Postdoctoral Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>3</sup>Non-Member, Senior Researcher, Research Strategic Planning Department, Strategic Tasks Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>4</sup>Non-Member, Assistant Professor, School of Civil and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Generally, the plate load test and the field density test are conducted for compaction quality control in earthwork, and then additional analysis. Recently developed that the DCPT (Dynamic Cone Penetration Test) equipment for smart compaction quality control its the system are able to get location and real-time information about worker history management. The IoT-based the DCPT system improved the time-cost in the field compared traditional test, and the functions recording and storage of the DPI (Dynamic Cone Penetration Index) were automated. This paper describes using these DCPT equipment on in-situ and compared to the standards of the DCPT, and the compaction trend had be confirmed with DPI as the field test data. As a result, the DPI of the final compaction decreased by 1.4 times compared to the initial compaction, confirming the increase in the compaction strength of the subgrade compaction layer 10 to 14 cm deep from the surface. A trend of increasing compaction strength was observed. This showed a tendency to increase the compaction strength of the target DPI proposed by MnDOT and the results of the existing plate load test, but there was a difference in the increase rate. Therefore, additional studies are needed on domestic compaction materials and laboratory conditions for target DPI and correlation studies with the plate load tests. If this is reflected, it is suggested that DCPT will be widely used as smart construction equipment in earthworks.

#### 요 지

토공사에서 다짐품질관리를 위해 일반적으로 평판재하시험 및 현장밀도시험 등이 실시되며, 다짐확인을 위한 추가 분석이 동반된다. 최근 IoT(Internet of Things) 기반의 디지털 환경이 조성되면서 스마트 다짐품질관리가 가능한 DCPT(Dynamic Cone Penetration Test) 장비가 개발되었고, 이러한 디지털 DCPT 시스템은 실시간 다짐에 대한 위치·시간정보와 작업자의 이력관리가 가능하게 되었다. IoT 기반의 DCPT 시스템은 기존의 다짐품질시험의 시간적·비용적 단점을 개선하고 현장에서 유연하게 적용가능하게 되었으며, 현장다짐 지표인 DPI(Dynamic Cone Penetration Index)의 기록과 저장이 자동화 되었다.

Received 13 Oct. 2022, Revised 16 Nov. 2022, Accepted 28 Nov. 2022

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0780; Fax: +82-31-995-0960

E-mail address: jimucho@kict.re.kr (J. Cho)

본 연구에서는 이러한 DCPT 장비를 현장 적용하여, 현장 적용 데이터인 DPI를 통해 다짐강도의 경향을 확인하였다. 그 결과 최종다짐에서 초기다짐의 DPI보다 1.4배 감소하여 지표에서 10~14cm 깊이인 노상 다짐층의 다짐강도 증가를 확인할 수 있었으며, 다짐결과비교를 위한 평판재하시험의 지지력 계수의 경향과 동일하게 최종 다짐시 다짐강도 증가경향을 확인할 수 있었다. 또한 기존 아날로그 DCPT의 경우가 아닌 IoT DCPT장비를 사용하므로 인원 및 시간을 저감한 시험수행이 가능하였으며 측정데이터의 스마트기기 전송을 통해 다짐정보의 실시간 확인이 가능하게 되었다. 이러한 스마트 기능이 추가된 IoT 기반 DCPT장비를 통해 DPI로 실시간 다짐관리 가능성을 확인할 수 있었으며, DPI에 대한 국내 다짐 재료 및 실내시험조건에 대한 추가연구와 평판재하시험과의 상관성에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 다짐관리 및 확인 용도로 IoT 기반 DCPT장비가 폭넓게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

**Keywords** : DCPT, IoT based DCPT, Dynamic cone penetration test, Dynamic cone penetration index

## 1. 서론

건설 분야에서는 과거보다 지능화, 자율화, 고도화된 기술 적용을 위해 4차 산업과 연계된 스마트 건설산업이 도입되고 있다. 스마트건설은 클라우드 BIM, 빅데이터 네비게이션, 인공지능, IoT 센서 네트워크, 엣지 컴퓨팅, 최적화된 네트워크, 정밀 측위, 무인화 원격 환경 등의 스마트 기술을 이용한 것으로 건설 산업 전 분야에서 연구되고 있으며 관련 기술 등이 빠르게 적용되고 있다(Park and Yoon, 2019). 도로 및 포장부분에서도 생산성향상과 기술 고도화를 달성할 수 있는 관련기술개발이 진행되고 있으며 특히 토공사에서의 연계기술 연구가 활발히 이루어지고 있다(Seo et al., 2020).

우리나라는 다짐관리를 위한 도로 하부지반다짐기준을 현장밀도시험과 평판재하시험 등의 현장시험을 실시하고 있으며, 설계 및 시방기준의 적합성에 따라 다짐품질을 결정하고 있다.

특히 평판재하시험은 도로 노상, 노체를 대상으로 지반 특성을 나타내는 지지력 계수를 산출하여 평가하는 것으로 국내 대부분의 현장에서 사용하고 있다. 그러나 평판재하시험의 경우 하중재하를 위한 중장비차량의 반입이 반드시 필요하고 회당 시험시간이 상당히 소요되며 시험방법 및 절차에 전문적 특성을 보여 전문성에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 기존의 다짐평가방법의 단점을 보완하고 다짐품질을 확인하기 위해 보다 간소하고 편리한 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT)의 연구가 국내·외에서 진행되고 있다(Youn and Oh, 2013).

동적콘관입시험은 남아프리카, 영국, 오스트레일리아, 뉴질랜드와 미국 등 전세계에서 포장층 및 도로하부의 특성을 파악하기 위해 사용되고 있으며, 다짐품질 확인을 위

해 DCPT를 현장 적용한 연구가 이루어지고 있다(Kleyn, 1975). 국내에서도 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011)에서 노상토의 재료의 강성을 평가하기 위해 동적콘관입시험을 적용 수 있도록 시험방법 및 규격 등을 제시하고 있으며 이러한 시험의 현장측정값을 통해 지반의 강성을 나타내는 탄성계수를 추정하여 회복탄성계수  $M_R$ (Resilient Modulus)와 비교하여 사용되고 있다. 이렇듯 국내·외에서 DCPT를 활용한 다짐강도 및 다짐 지수의 연구가 이루어지고 있으며 최근 스마트건설로 전환되는 과정에서, IoT 기술 및 자동화 기술의 도입되어 새로운 장비들이 개발되고 있다. 특히 기존의 DCPT의 장비에 스마트기술이 적용된 IoT 기반 DCPT 장비는 기존의 장비와 동일한 다짐지수를 상대적으로 편리하게 측정·관리 할 수 있는 장점이 있다.

Park and Bae(2020)의 연구에 따르면, IoT(Internet of Things)기술 기반으로 개발된 디지털 DCPT 장비는 GPS 등의 3차원 공간정보를 이용하고, 기존의 아날로그 DCPT 보다 쉽고 경제적인 특징을 지닌다. 또한 다짐강도 측정기록이 자동화 되고 실시간 저장되며, 장비에 부착된 블루투스를 통해 모바일기기 등으로 전송되므로 현장다짐에 대한 품질·이력관리가 가능하다.

Kim and Bae(2021)의 연구에서는 이러한 IoT 기반 DCPT 장비를 각각 거리센서 모듈, 관측모듈, 관리모듈로 설명하고 있다. 거리센서 모듈은 디지털 와이어 거리측정기를 통해 1mm 오차의 전자식 측정이 가능하며, 관측모듈에서는 블루투스 리모콘의 원격기능으로 측정데이터를 스마트 기기에 전송가능하다. 또한, 관리모듈에서는 스마트 기기용 안드로이드 어플리케이션을 이용하여 위치정보 및 DPI 등의 다짐관련 정보데이터 관리를 가능하게 한다. 이러한 IoT기반 DCPT장비의 기존 아날로그 DCPT장비에 대한 보완 기능은 DPI의 활용 및 다짐 품질 향상이 가

능한 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 IoT DCPT 장비의 결과와 동일하게 적용하는 일반적인 DCPT 장비적용에 대한 국외의 DCPT 시험방법 등을 확인하고 동적콘관입시험인 DPI를 다짐강도 판단 요소로서 적용하므로 현장에서 다짐증가에 따른 다짐경향을 확인해보고자 하였다.

## 2. 동적 콘관입시험

### 2.1 개요

동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT)은 일정 무게의 해머의 자유낙하 힘을 콘선단(cone tip)에 전달하여 콘이 지면을 뚫고 들어가는 능력을 측정하여 평가한다. 즉, 자유낙하 충격하중에 의해 다짐 대상층을 뚫고 들어가는 콘의 충격횟수당 관입량(DPI or Penetration Rate, PR)값을 측정하므로 실제 현장 강도 및 강성 평가에 효과적인 시험법이다.

DCPT에 대한 장비사항 및 시험방법은 국내의 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011) 및 국외의 ASTM 6951-03에 대표적으로 제시되어 있다. Fig. 1은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011)의 DCPT 장비이며, 575mm 높이로 떨어지는 8kg 해머와 기본 직경이 20mm 인 60° 콘, 콘이 침투되는 관입량을 측정하기 위한 수직측정자 등으로 구성된다.

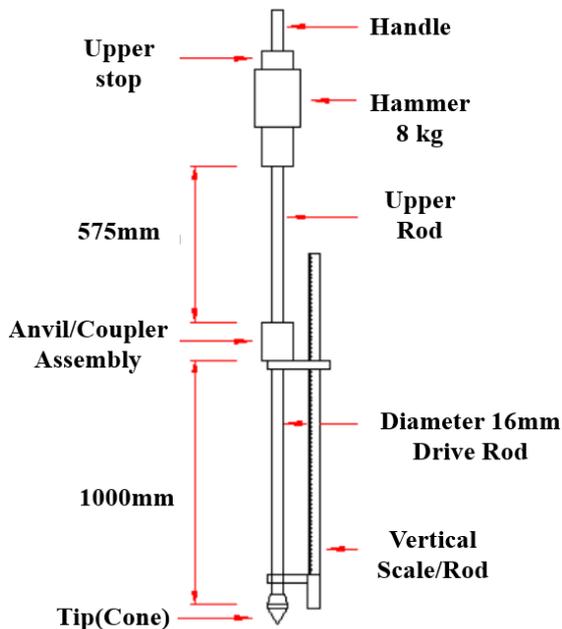


Fig. 1. Dynamic cone penetration test Device

### 2.2 시험방법 및 DPI 산출

동적콘관입시험은 ASTM D 6951-03(2003)과 Siekmeier et al.(2009)에 제시되어 있으며 시행방법 및 순서에 대한 상세내용과 세부 산출 방법이 설명되어있다. 국내의 동적콘관입시험 방법에 대해서는 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011)등에서 제시 되어있으나 시험 상세 내용 및 DPI의 산출방법에 대해서는 자세히 기술되어있지 않으므로 본 연구에서는 ASTM 및 MnDOT의 연구내용을 중심으로 다루었다.

Siekmeier et al.(2009)에 따르면 세 명 이상의 작업자가 먼저 장비 및 체결상태를 확인한 후 장비를 수직 유지하여 위치를 기록한다. 이후 해머를 들어올리고, 놓는 방법을 반복하여 콘이 관입되는 깊이를 지면으로부터 눈금자의 측정관입 높이를 육안관측 후 기록한다.

DPI 산출방법은 측정된 콘관입량을 관입횟수와 깊이에 대해 계산하여 대표값을 산출하는 방식으로 Edill and Benson(2005)는 산술평균 식 (1) 또는 가중평균 식 (2)으로, Siekmeier et al.(2009)에서는 지표에서 처음 2회, 중간 5회, 마지막 5회로 세 번 측정 후 깊이에 따라 식 (3)과 같이 계산한다.

$$DPI_{avg} = \frac{\sum_i^N (DPI)}{N} \quad (1)$$

여기서, DPI : 동적콘관입침투지수  
I : 침투횟수  
N : 해당깊이의 DPI 총수

$$DPI_{avg} = \frac{1}{H} \sum_i^N [(DPI)_i \cdot (Z)_i] \quad (2)$$

여기서, Z : 타격당 침투거리  
H : 전체침투깊이

$$DPI_{seating} = \frac{D_2 - D_{\text{정기reading}}}{2 \text{ drops}} \quad \& \quad DPI_1 = \frac{D_7 - D_3}{5 \text{ drops}} \quad \& \quad DPI_2 = \frac{D_{12} - D_8}{5 \text{ drops}} \quad (3)$$

여기서,  $D_i$  : 해당침투횟수에 대한 각 동적콘관입침투값

DPI는 일반적으로 수치가 낮을수록 다짐품질이 우수한 것을 나타내며, 표면층일수록 구속력이 약해 지반이 느슨하여 DPI가 크고, 다짐 깊이가 깊을수록 강도특성이 증가하여 DPI가 작게 나타나는 것으로 보고된다(Siekmeier et al., 2009).

ASTM D 6951-03의 경우 DPI와 현장 CBR과의 상관관계에 대해 Table 1과 같이 제시하고 있으며, 아래와 같은 DPI와 CBR의 상관식을 제시하고 있다. 식 (4)는 CL토질과 CH 토질을 제외한 모든 토질에서 식 (5)는 CL토질에서 식 (6)는 CH토질에서 적용한다.

$$CBR=292/DPI^{1.12} \quad (4)$$

$$CBR=1/(0.017019 \times DPI)^2 \quad (5)$$

$$CBR=1/0.002871 \times DPI \quad (6)$$

여기서, CBR : 노상토 지지력비(California Bearing Ratio)

Table 1. Tabulated Correlation of CBR versus DCP Index of ASTM

DCP Index (mm/blow)	CBR (%)	DCP Index (mm/blow)	CBR (%)	DCP Index (mm/blow)	CBR (%)
<3	100	39	4.8	69-71	2.5
3	80	40	4.7	72-74	2.4
4	60	41	4.6	75-77	2.3
5	50	42	4.4	78-80	2.2
6	40	43	4.3	81-83	2.1
7	35	44	4.2	84-87	2
8	3	45	4.1	88-91	1.9
9	25	46	4	92-96	1.8
10-11	20	47	3.9	97-101	1.7
12	18	48	3.8	102-107	1.6
13	16	49-50	3.7	108-114	1.5
14	15	51	3.6	115-121	1.4
15	14	52	3.5	122-130	1.3
16	13	53-54	3.4	131-140	1.2
17	12	55	3.3	141-152	1.1
18-19	11	56-57	3.2	153-166	1
20-21	10	58	3.1	166-183	0.9
22-23	9	59-60	3	184-205	0.8
24-26	8	61-62	2.9	206-233	0.7
27-29	7	63-64	2.8	234-271	0.6
30-34	6	65-66	2.7	272-324	0.5
35-38	5	67-68	2.6	<324	<0.5

한편 Siekmeier et al.(2009)에서는 DPI 산출 방법과 함께 재료적 특징에 대해서 Minnesota 주 내의 토질을 수집 분류하여 조합한 토질분류기준 Grading Number(GN)을 제안하였다. GN은 식 (7)과 같고, 표준체에서 대표 7개의 체의 누적통과백분율의 합을 100으로 나눈 새로운 분류기준이다.

$$GN = \frac{1''+3/4''+3/8''+\#4+\#10+\#40+\#200}{100} \quad (7)$$

여기서 1'' : 25mm, 3/4'' : 19mm, 3/8'' : 9.5mm,

#4 : 4.75mm, #10 : 2.0mm, #40 : 0.425mm,

#200 : 0.038mm(표준체 크기에 해당하는 통과율)

GN은 기존선행연구(Davich et al., 2006)에서 다짐이 잘되지 않는 입도영역을 개선하기 위해 수정 제안되었으며, 20% 이하의 미세분을 갖는 토양을 입상재료(Granular Material)로 분류 하였다. 이러한 입상재료의 함수비의 조건에 따라 목표 DPI로 구분하여 다짐지표를 제시하였고, Table 2와 같다. 여기서 목표 DPI의 다짐기준은 실내 Barrel시험을 통해 22개의 시험표본으로 실시된 건조밀도 99~111%를 반영하였으며, GN값이 클수록 미세입자가 많고 작을수록 큰 크기골재와 거친 모래를 함유 하고 있다. 일반적으로

Table 2. Target DPI of MnDOT Research Report (Siekmeier et al.(2009))

Grading Number (GN)	Moisture Content %	Target DPI mm/blow
3.1-3.5	5-7	10
	7-9	12
	9-11	16
3.6-4.0	5-7	10
	7-9	15
	9-11	19
4.1-4.5	5-7	13
	7-9	17
	9-11	21
4.6-5.0	5-7	15
	7-9	19
	9-11	23
5.1-5.5	5-7	17
	7-9	21
	9-11	25
5.6-6.0	5-7	19
	7-9	24
	9-11	28

자갈과 거친 모래로 구성된 토질은 고운모래가 많은 토질보다 강도가 더 크므로 DPI와 GN이 감소함에 따라 지반강성이 증가할 것으로 예상된다. 이러한 Siekmeier et al.(2009)의 목표 DPI는 각 프로젝트에서 강도가 적합한지 확인할 수 있는 추정치로 사용될 수 있으며, 보다 광범위한 지역 및 현장검증을 통해 수정 보완되어 활용될 수 있다.

Table 3. Comparison of Subgrade DCPT Criteria (Oh et al., 2019)

Proponent	Subgrade criteria (mm/blow)		Remarks
	Top	Bottom	
US Army Method	20-21	35-38	CBR criteria Top 10 Bottom 5
	18,66	32,55	
Kleyrn(1975)	41,52	22,73	
	44,38	26,24	
Smith and Partt(1983)	37,77	20,3	
	26,28	18,58	
Harison(1987)	35,59	71,17	
	20,34	37,77	
Amy Corps of Engineers	12	Top 300mm	
	25	Silty/Clay	
Waterways Experiment Station	7	Select granular	
Webster et al.(1992)			
NCHRP(2004)			
Wu and Sargand(2007)			
Burnham(1997)			

이와 같이 DCPT의 시험법 및 기준 등을 통해 측정값을 DPI로 산출할 수 있으며, DPI 범위를 통해 다짐층의 다짐 정도를 판단 할 수 있다. 이러한 국내외의 DPI 연구 및 기준에 대해 Oh et al.(2019)은 Table 3과 같이 정리하였다.

### 2.3 IoT 기반 동적콘관입시험 기술개발

IoT 기반 DCPT 장비의 기술개발은 디지털 기반의 위치, 시간, 관측값 등을 자동으로 생성하고 다짐정보를 취득하는 것을 목적으로 하고 있으며, 국내외 관련 규정을 적용하여 아날로그 DCPT와 동일한 규격의 8kg의 해머를 575mm 높이에서 자유낙하 시켜 추의 관입량 측정하는 내용으로 개발되었다(Park and Bae, 2020). 여기에서 핵심기술은 부착된 거리측정센서를 통해 자유낙하의 수직도, 관입량등을 자동 측정할 수 있는 기능이며 이러한 측정정보와 측정횟수, 작업자정보, 시간정보 등을 함께 기록관리할 수 있다. 또한 IoT 기술을 적용한 블루투스 장비를 통해 기록정보가 모바일 등의 휴대기기 전송되고, 획득된 정보는 실시간으로 통합되어, 관리·분석할 수 있다(Kim and Bae, 2021).

IoT기반 DCPT 장비 시스템 기술은 기존의 해머의 낙하 깊이를 육안관측 하였던 아날로그 장비에서 발생할 수 있는 관측오차를 제거하여 정확도를 향상시키고, 시험지점의 각 회당 수기작성 하던 위치 및 측정횟수 정보를 자동 기록하여 실시간 데이터로 획득하므로 시험수행에 필요한 노력을 감소시킬 수 있다. 또한 작성시간 및 관측시간 등의 시험시간을 단축시켜 작업효율이 향상되어 다수의 다양한 조건의 시험이 가능할 것으로 예상된다. Fig. 2는 이러한

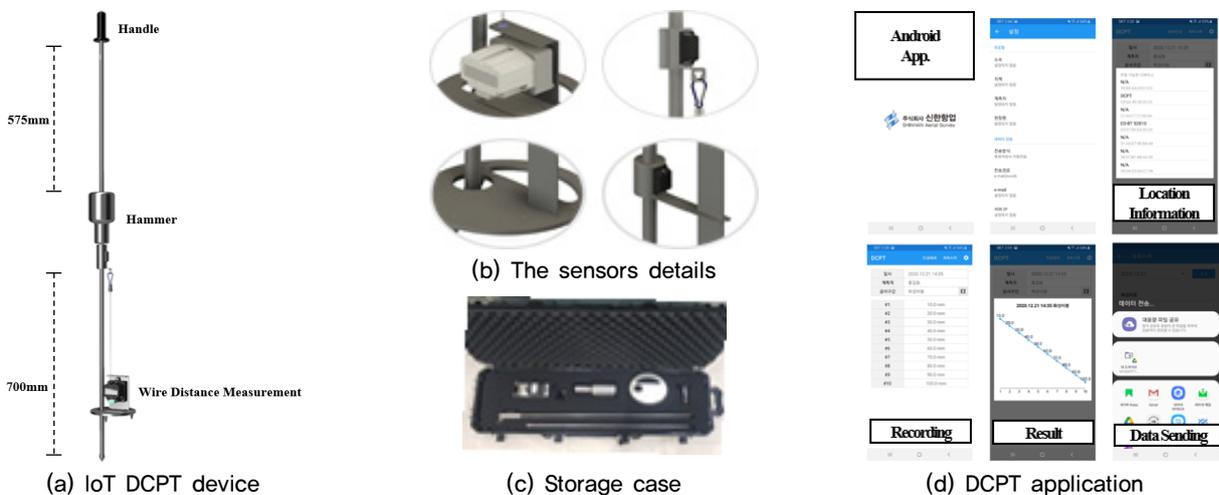
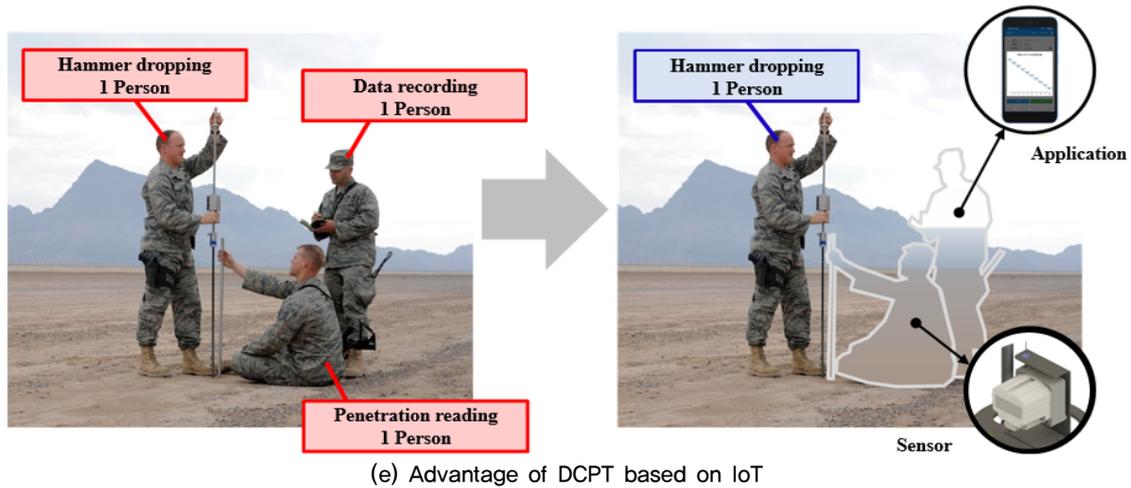


Fig. 2. DCPT system based on IoT (Park and Bae, 2021)



(e) Advantage of DCPT based on IoT  
 Fig. 2. DCPT system based on IoT (Park and Bae, 2021) (continued)

Table 4. Result of Sieve analysis test

Sieve size (mm)	19.0	9.5	4.75	2.0	0.840	0.425	0.250	0.106
PassingRate (%)	100	97.9	85.4	57.4	47.8	31.3	29.7	21.3
Sieve size (mm)	0.075	0.0133	0.0097	0.0054	0.0038	0.0021	0.0011	0.0004
PassingRate (%)	16.8	5.7	5.0	5.0	4.3	4.3	3.6	3.6

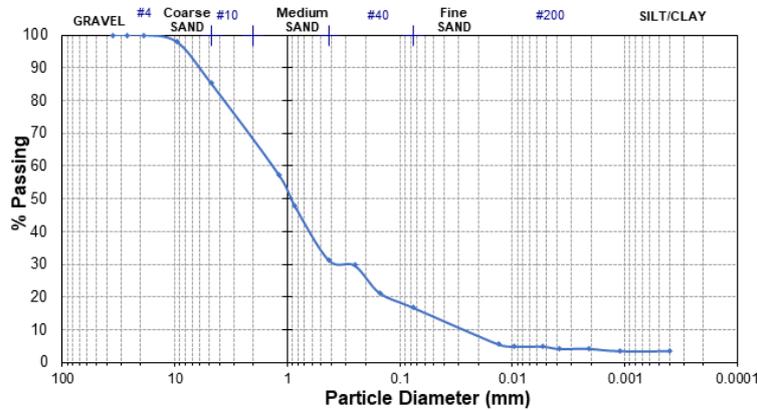


Fig. 3. Grading curve

IoT기반의 DCPT 장비 및 측정정보 시스템과 활용효과를 나타내었다(Kim and Bae, 2021).

### 3. 현장시험

#### 3.1 토질 및 현장시험 방법

IoT 기반 DCPT장비의 현장 적용을 위해 현장다짐시험이 실시되었으며, 지반의 입도조건 및 밀도확인을 위해 실

내시험을 실시하였다. D다짐에 의한 실내다짐시험결과 본 현장 지반은 최대건조중량  $19.2\text{kN/m}^3$ , 최적함수비 10.2%로 나타났고, 체분석 시험에 의한 입도분포는 Table 4와 Fig. 3이며, 통일분류법의 실트질 모래(SM)에 해당하였다.

본 연구의 시험시공조건은 Fig. 4와 같이 폭 17m 길이 20m의 면적으로 조성되었다. 다짐롤러는 BOMAG사 진동롤러를 사용하였으며, 폭에 대해 2m 간격으로 7개의 Lane에서 1회부터 7회까지 다짐 하였다. 동적콘관입시험은 길이 5m간격으로 중앙 및 상·하의 위치에서 각 Lane

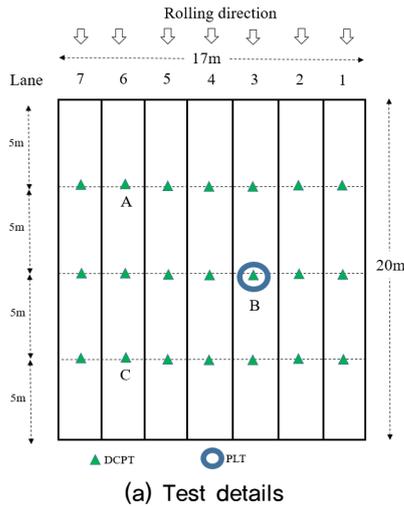
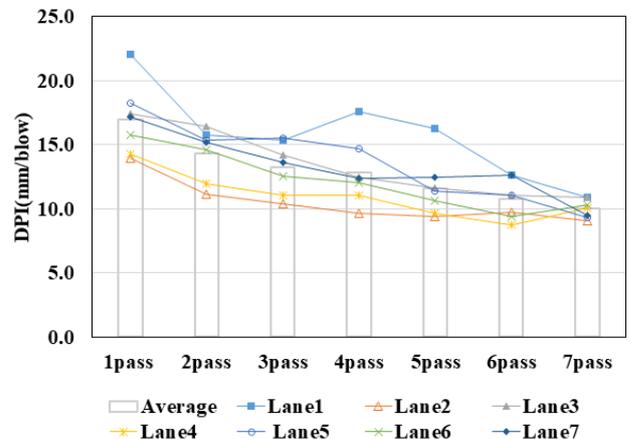


Fig. 4. Field test condition

Table 5. Result of DPI in lanes

	1 Lane	2 Lane	3 Lane	4 Lane	5 Lane	6 Lane	7 Lane
1pass	22.1	14.0	17.4	14.3	18.2	15.8	17.2
2pass	15.8	11.1	16.4	11.9	15.3	14.6	15.2
3pass	15.4	10.4	14.2	11.0	15.5	12.6	13.6
4pass	17.6	9.6	12.4	11.1	14.7	12.0	12.4
5pass	16.2	9.4	11.6	9.7	11.4	10.6	12.5
6pass	12.7	9.7	11.1	8.7	11.1	9.4	12.7
7pass	10.9	9.1	10.9	10.1	9.3	10.3	9.5

당 3회 총 21 지점에서 측정 하였다. 측정에 사용된 IoT DCPT장비는 국내 S사의 개발 장비를 사용하였으며, 측정 기록을 위한 인력을 감원하여 수행하였다. GPS를 이용한 측정위치와 DPI등의 측정데이터 및 다짐정보데이터는 블루투스 리모콘을 이용해 모바일기기에 전송하였다. 전송된 다짐정보는 다짐진행에 따라 실시간 DPI로 확인 가능하였다. 또한 DCPT 결과의 추가분석을 위해 A, B, C지점을 지정하였고 그 중 Lane 3의 B지점에서 기존 다짐평가 시험과의 비교를 위해 평판재하시험을 한 지점에서 실시하였다.



### 3.2 분석결과

#### 3.2.1 전 시험구간 DPI 결과

본 연구에서는 Sickmeier et al.(2009)의 연구를 반영하여 seating value을 적용 후 DPI를 산출하였으며, 아래의 Table 5, Fig. 5의 결과로 나타났다. 전체 Lane에서 1회 다짐시 DPI는 22.1~14.0mm/blow의 범위이고 최종 다짐 7회시 DPI는 10.9~9.1mm/blows의 범위를 나타내므로

DPI 감소를 확인할 수 있었으며 다짐강도가 증가하였다. 또한 최종 7회 다짐시 DPI의 Lane별 편차가 줄어들고 대략 10mm/ blow의 일정한 값으로 나타나 지반다짐강도가 균질화 됨을 확인할 수 있다.

전체 Lane에서 다짐횟수 증가에 따라 DPI가 감소하는 경향을 보이나 Lane 1의 4회와 5회다짐, Lane7의 5회와 6회다짐에서는 다짐횟수 증가에도 이전보다 큰 DPI를 보

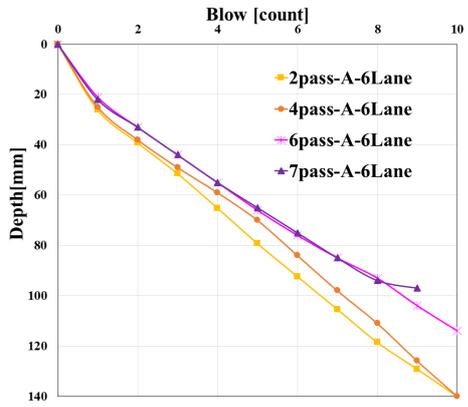
인다. 이것은 실제 다짐층의 개별 함수비와 토질 재료에 대한 비연속 특성과 다짐에너지의 불균등한 분포 때문이라 판단된다. 따라서 현장다짐지표로 DPI를 판단시 최종 다짐에 대한 DPI 뿐만아니라 다짐진행 중(본 현장의 2~6회)의 DPI의 경향을 참고하여 다짐품질에 대해 판단하여야 할 것이다.

### 3.2.2 특정 지점의 다짐분석

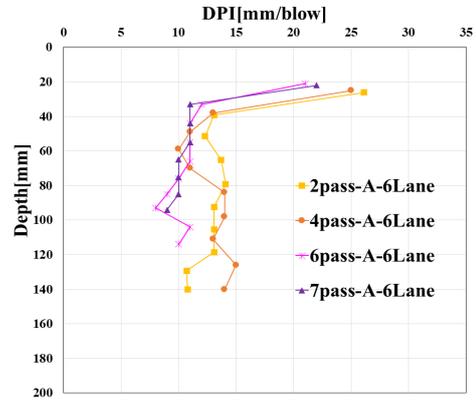
#### (1) 깊이별 DPI 결과

다짐경향확인을 위해 Lane 6 과 Lane 3의 A, B, C 지점에서 각각 다짐횟수 2회, 4회, 6회, 7회의 DPI지수를 누적 깊이와 깊이별 DPI로 Fig. 6~8로 나타냈다.

DCPT를 수행하여 측정된 누적관입깊이는 지표면으로

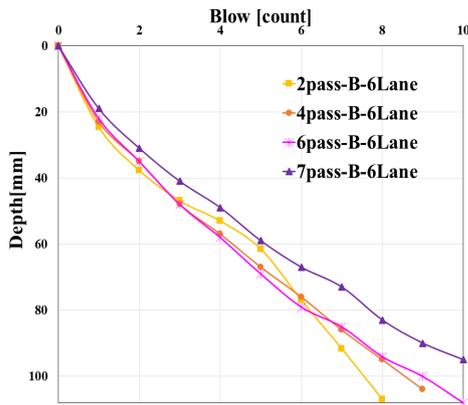


(a) Blow versus depth

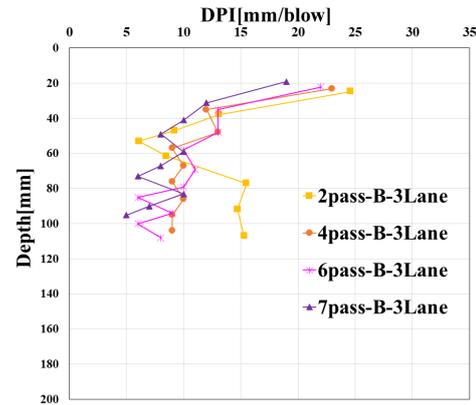


(b) DPI versus depth

Fig. 6. Lane 6 Spot A

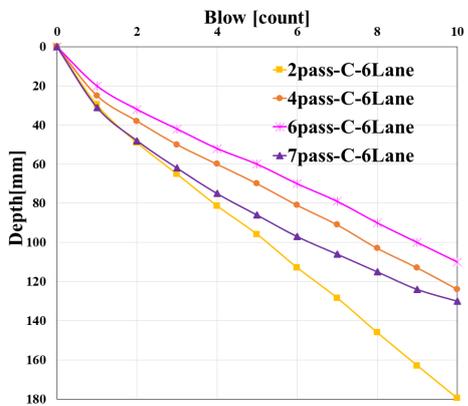


(a) Blow versus depth

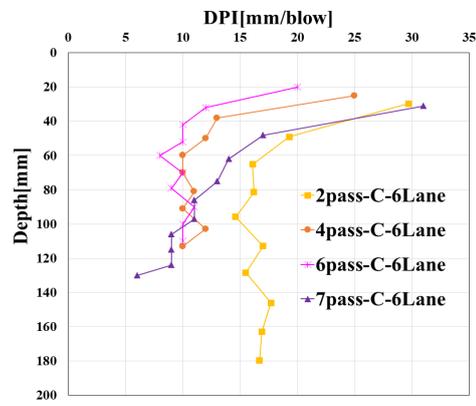


(b) DPI versus depth

Fig. 7. Lane 3 Spot B



(a) Blow versus depth



(b) DPI versus depth

Fig. 8. Lane 6 Spot C

부터 11~18cm이며, A, B, C 모든 지점에서 최종 7회 다짐 시 DPI가 감소함을 확인할 수 있다. 또한 최대 DPI는 다짐 7회 시 C지점의 첫 침투 관입량 31mm/blow이고 최소 DPI는 다짐 7회 시 B지점 마지막 침투 관입량 5mm/blow로 나타났다. 이러한 결과는 동일한 7회 다짐시에도 지점위치와 깊이에 따라 다짐강도 차이를 확인할 수 있으며, 깊은 위치에서 다짐강도 증가 경향을 확인 할 수 있다.

또한 Fig. 6~8(a)는 관입횟수에 대한 누적깊이 그래프이고 기울기는 DPI를 나타내며, 지표에서 가까운 첫 번째 관입량의 기울기가 전 측정에서 크게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 6~8(b)의 깊이별 실제 DPI 결과에서도 첫 번째와 두번째 침투된 관입량의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 지표층이 구속력이 약하여 상대적으로 느슨하므로 첫 침투관입의 DPI를 산출시 Siekmeier et al.(2009)의 연구에서 제시한 Seating value로 판단해도 무방함을 확인할 수 있다.

## (2) MnDOT의 목표 DPI 적용 결과

Siekmeier et al.(2009)의 목표 DPI에 관련하여 A, B, C 측정점의 DPI를 적용하였다. 먼저 체분석을 통한 대표 7개 체의 통과율을 GN 산출 식 (6)을 적용하여 본 시험현장의 GN을 Table 6으로 나타냈다. 이때 각 다짐횟수에서 실내

Table 6. Gradation data (use % passing in formulas)

Sieve	% Passing
1"	100
3/4"	100
3/8"	97.9
#4	85.4
#10	57.4
#40	31.3
#200	16.8
GN	$488.8/100 = 4.9$

Table 7. Target DPI and DPI Results to compaction pass

Compaction No. pass	6 Lane (A)			3 Lane (B)			6 Lane (C)		
	Moisture Content	Target DPI	DPI	Moisture Content	Target DPI	DPI	Moisture Content	Target DPI	DPI
1Pass	—	—	18.6	—	—	15.0	—	—	14.2
2Pass	8.2	—	12.7	7.9	—	13.4	8.2	—	16.7
4Pass	8.0	—	12.8	8.1	—	10.1	8.0	—	11.0
6Pass	8.5	—	10.3	7.9	—	9.6	8.5	—	10.0
7pass	8.2	19	10.1	7.5	19	8.4	8.2	19	11.0

시험을 통해 얻은 7.9~8.5% 함수비를 Table 2에 적용하면 목표 DPI는 19mm/blow이고, 각 다짐횟수별 DPI 결과 및 함수비는 Table 7과 같다.

다짐횟수에 대한 DPI의 결과 전 지점에서 목표 DPI 19mm/blow이하로 나타났으며, A지점 1회 다짐시 DPI는 18.6mm/blow로 목표 DPI 19mm/blow에 근접한 값으로, C 지점의 2회 다짐시 16.7mm/blow는 1회다짐의 14.2mm/blow보다 증가한 값으로, A지점 4회 다짐시 12.8mm/blow는 이전 3회 다짐시 12.7mm/blow와 비슷한 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 다짐횟수가 증가함에 따라 DPI의 결과가 일정하게 감소하는 경향이 아닌 일부 지점에서 변동 경향을 나타내었다. 그러나 다짐이 진행될수록 전 구간에서 DPI는 일정해져 10mm/blow~12mm/blow로 나타나며 최종 7회 다짐시 8.4~11.0mm/blow로 평균 9.3mm/blow 나타났다.

본 시험에서 최종 다짐횟수 7회는 국내 다짐기준시 사용되는 평판재하시험에서 K<sub>30</sub> 지지력계수 기준이상조건으로 결정하였다. 최종다짐에서 평균 9.3mm/blow는 목표 DPI 19mm/blow이하의 값을 충분히 만족하며, 목표 DPI와 최종 다짐의 DPI의 차이를 확인할 수 있다. 이는 목표 DPI의 방법을 제시한 Siekmeier et al.(2009)의 보고서 입상 토질재료 및 함수비 조건과 국내노상재료와 조건차이로 인한 것일 수 있으며, Siekmeier et al.(2009)의 보고서에 적용된 기준시험에 대한 다짐평가방법과 평판재하시험의 시험 방법에 대한 메커니즘 차이일 수 있을 것이다. 따라서 Siekmeier et al.(2009)의 연구방법을 참고하여 국내 토질상태와 함수비를 적용한 기준 실내시험을 수행 적용한 추가적인 연구가 필요하며, DPI에 대한 국내 현장의 평판재하시험과의 상관성에 관한 다양한 연구도 필요하다. 이러한 연구가 진행된다면 현장 DPI가 각 다짐에서 목표 DPI에 대한 적합판단 뿐아니라 다짐진행 중에서 DPI의 경향 및 다짐강도 예상하여 다짐평가 기준으로서 DPI를 활용할 수 있을 것이다.

Table 8. Result of compaction tests

No. pass	PLT $K_{30}$		DPI	
	kN/m <sup>2</sup>	$\Delta\theta$	(mm/blow)	$\Delta\theta$
2pass	80	1.0	14.3	1.0
4pass	141	1.8	12.8	1.1
6pass	190	2.4	10.8	1.3
7pass	236	2.9	10.0	1.4

**(3) 기존 다짐평가시험 비교 분석**

DCPT의 결과 검증을 위해 국내 현장에서 필수적으로 수행하고 있는 평판재하시험을 대표 지점 B 에서 2회, 4회, 6회, 7회 다짐시 실시하였다. 시험결과인 지지력 계수  $K_{30}$  은 Table 8과 같고, 동적콘관입시험 결과값인 DPI와의 경향 확인을 위해 다짐2회를 기준으로 변화율을 비교하였다.

결과에 따르면 다짐횟수 증가시 평판재하시험의 지지력계수  $K_{30}$ 의 변화율은 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 7회 다짐시 노상 지지력계수 약 200kN/m<sup>2</sup>이상을 만족함을 확인할 수 있었다. DPI 역시 다짐횟수 증가시 감소하여 다짐강도 경향이 증가함을 확인할 수 있었다. 평판재하시험의 지지력계수는 초기다짐에 비해 3배, DPI의 값은 1.4배의 변화율을 보여 다짐이 증가할수록 다짐강도는 일정하게 증가함을 확인할 수 있으나 변화율은 차이를 보인다. 이러한 차이는 DCPT와 같은 동적하중을 이용한 비파괴시험의 특징치는 미소변형률을 통해 지반특성을 산정하므로 소성변형율이 낮아 탄성변형률에 의해 결과가 좌우되고, 중간정도의 변형을 유발하는 평판재하시험의 지지력계수는 소성변형을 포함한 탄소성 변형을 반영한 결과를 나타내기 때문인 것으로 판단된다(Kim, 2015).

따라서 다짐강도평가지표인 DPI와 평판재하시험의 지지력 계수  $K_{30}$ 과의 다짐강도증가경향은 확인할 수 있었으며 국내 현장 DPI 측정값을 이용한 탄성계수 등의 상관성에 대한 추가적인 연구가 보완된다면 DPI를 다짐평가에 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

**(4) IoT DCPT장비 적용**

본 연구에서 적용한 IoT 기반 DCPT 장비의 경우 기존 장비와 헤머, 콘크기, 자유낙하 거리등 장비의 기본사양은 동일하므로 실험에 따른 결과 값인 DPI는 기존 DCPT장비와 동일하게 적용된다. 그러나 측정방법에서 기존의 육안관찰이 아닌 자동계측기능과 IoT 블루투스기능을 이용한 데이터의 실시간 전송기능을 이용하므로 효율적인 시험운영이 가능하였다. 또한 기존 DCPT장비 보다 감소된

Table 9. Normal versus based on IoT DCPT equipment (Kim and Bae, 2021)

Measurement	Normal DCPT	IoT DCPT
Frequency	1,000m <sup>3</sup> at 3 spot	1,000m <sup>3</sup> at 3 spot
Time (spot)	10 min	2~3min
workers	2~3	1~2
Operation	Hand-operated	Automatic-operated
Error	Observation	Instrument
Method	Visual observation	Sensor-based
Record	Hand written data	Real-time automatic storage and transmission

투입인력으로 시험을 수행할 수 있었다.

Kim and Bae(2021)는 Table 9와 같이 기존 DCPT와 IoT DCPT를 비교하고 있으며, 동일면적에 대해 지점당 3배이상 작업시간 감소와 1명이상 투입인력이 감소됨을 제시하였다. 본 연구에서는 총 21개지점당 7회 테스트 (147회 이상)의 다측점 시험으로 IoT 기반 DCPT 장비를 적용하여 작업시간 단축이 가능하였으며 야장에 기록하던 기존방식에 비해 실시간 전송된 다짐정보를 확인하므로 효율적 정보관리가 가능하였다. 따라서 IoT 기반 DCPT 장비는 기존 DCPT 장비와 동일한 다짐평가지표 DPI를 얻으면서 시간·비용을 저감하고 생산성을 향상할 수 있는 기술이 적용되었음을 확인할 수 있었다.

**4. 결론**

토공분야의 다짐공정에서 기존의 다짐평가시험방법보다 생산성 향상 및 현장 활용성을 증가시킨 IoT 기반의 DCP 시험 장비가 개발되었다. 본 연구는 이러한 장비를 적용하여 현장 실증시험을 통해 다짐품질관리를 위한 기초연구를 수행하였다. IoT 기반 DCPT장비는 기존의 아날로그 DCPT와 시험수행 및 운영의 차이가 있으나, 기존 DCPT 장비와 동일한 DPI 다짐지표를 얻을수 있다. 따라서 현장시험의 DPI 분석연구를 통해 최종다짐시의 다짐 적합성 및 다짐경향을 확인하고 DPI의 다짐관리 판단지표로의 가능성을 고찰했으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 자동화 기술이 적용된 IoT기반 DCPT 장비는 시간 및 투입인력 측면에서 생산적이었으며, GPS를 통한 측정 위치좌표가 스마트기술을 통해 자동 획득 저장되므로

원하는 특정 위치에서 연속 측정이 가능하여 기존의 DCPT 장비에 비해 시간 및 투입인력 면에서 효율적 실험운영이 가능했으므로 현장다짐평가 및 다짐관리 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

- (2) 대표 지점의 DPI의 분석결과 첫 침투 관입량이 크게 나타나 Siekmeier et al.(2009)의 seating value를 확인할 수 있었으며, 깊이가 깊을수록 DPI가 지표층보다 감소하므로 깊은 깊이의 다짐강도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 현장 DPI를 Siekmeier et al.(2009)에서 제안한 목표 DPI 19mm/blow를 적용할 경우 최종다짐시의 DPI가 목표 이하 약 10mm/blow로 나타나 DPI로 다짐관리가 가능함을 확인할 수 있었다. 그러나 본 시험의 최종다짐횟수는 평판재하시험기준으로 적용되어 Siekmeier et al.(2009)에서 제안된 목표 DPI보다 작게 나타났다. 이는 국내와의 지역적 입상 토질재료 및 함수비 조건 차이에 의한 것일 수 있으며, Siekmeier et al.(2009) 기준시험에 대한 기준시험의 메커니즘 차이일 수 있을 것이다. 따라서 국내에서도 MnDOT의 연구방법을 참고하여 국내 토질상태와 함수비 및 실내실험등의 조건을 적용시킨 추가적인 연구가 필요하다.
- (4) 기존 평판재하시험의 지지력계수는 초기다짐에 비해 3배, DPI의 값은 1.4배의 변화율을 보여 다짐이 증가할수록 다짐강도는 일정하게 증가함을 확인할 수 있었으나 변화율의 차이가 있었다. 이는 동적하중을 이용한 DCPT의 변형율은 미소변형을 통해 지반특성을 산정하므로 탄성변형에 의해 결과가 좌우되고, 중간 정도의 변형을 유발하는 평판재하시험의 지지력계수는 소성변형을 포함한 탄소성 변형을 반영한 결과를 나타내므로 변화율의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 국내 현장 DPI 측정값과 평판재하시험의 상관성에 대한 추가적인 연구가 필요하며 국내에서 DPI의 다짐판단 지표로 사용될 수 있도록 검증 보완할 추가 연구가 이루어져야 할 것이다.

### Acknowledgement

This research was supported by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government (Project Number: 21SMIP-A157130-02).

### References

1. ASTM D6951-03 (2003), "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement".
2. Burnham, T. R. (1997), "Application of the dynamic cone penetrometer to Minnesota department of transportation pavement assessment procedures (No. MN/RC-97/19)", *Minnesota. Department of Transportation*.
3. Davich, P., Camargo, F., Larsen, B., Roberson, R. and Siekmeier, J. (2006), "Validation of DCP and LWD moisture specifications for granular materials (No. MN/RC-2006-20)", *Minnesota. Department of Transportation*.
4. Edill, T. B. and Benson, C. H. (2005), "Investigation of the DCP and SSG as Alternative Methods to Determine Subgrade Stability", *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison*.
5. Harison, J. R. (1987), "Correlation Between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils", *Proc. Instn. of Civ. Engrs., London, Part2*, pp.83-87.
6. Kim, D. H. and Bae, K. H. (2021), "Developing DCPT System based on IoT and Field Demonstration for Smart Construction of Earthwork". *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.22, No.11 pp.488-498.
7. Kim, K. S. (2015), "Comparison of Elastic Moduli of Subgrade Soils Using Plate Loading Test", *Soil Stiffness Gauge and Dynamic Cone Penetrometer. Journal Of Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.3, pp.63-72.
8. Kley, E. G. (1975), "The Use of The Dynamic Cone Penetrometer(DCP)", *Transvaal Road Department. Report 2/74*.
9. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), "Temporary Guidelines for Pavement Lower Structural", *Resolutions Management*, p.56. (in Korean)
10. National Cooperative Highway Research Program (2004), "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Part 2, Design inputs", Final Rep., No. NCHRP 1-37A, Washington, D.C.
11. Oh, B. T., Choi, J. S. and You, K. H. (2019), "Evaluation of Subgrade Compaction Degree Using Dynamic CPT", *Korean Society of Road Engineering*, Vol.21, No.6, pp.85-95.
12. Park, H. G. and Bae, K. H. (2020), "Development of DCPT Equipment based on IoT for Rod Tamping in Smart Construction", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.11 pp.501-509.
13. Park, J. W. and Yoon, W. G. (2019), "3D Geospatial Information Model based Smart Construction System in Earthwork", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.67, No.11, pp.20-27.
14. Seo, J. W., Gang, T. G. and Choe, C. H. (2020), "Automation Technology and Control Technology of Construction Equipment", *Construction Engineering and Management*, Vol.21,

No.4, pp.4-10.

15. Siekmeier, J., Pinta, C., Merth, S., Jensen, J., Davich, P., Camargo, F. F., and Beyer, M. (2009), "Using the dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer for construction quality assurance (No. MN/RC 2009-12)", *Minnesota Dept. of Transportation. Office of Materials and Road Research*.
16. Smith, R. B. and Pratt, D. N. (1983), "A field study of in situ California bearing ratio and dynamic cone penetrometer testing for road subgrade investigations", *Australian Road Research*, 13(4).
17. Webster, S. L., Grau, R. H. and Williams, T. P. (1992), "Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer", *Geotechnical Laboratory (US)*.
18. Wu, S. and Sargand, S. (2007), "Use of dynamic cone penetrometer in subgrade and base acceptance (No.FHWA/ODOT-2007/01)", Ohio Research Institute for Transportation and the Environment.
19. Youn, I. R. and Oh. S.W. (2013), "Estimate of the Bearing Capacity on Subbase and Subgrade with Dynamic Plate Bearing Test", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.14, No.8, pp.53-60.