

# 토공사의 스마트건설화를 위한 IoT 기반 DCPT 시스템 개발 및 현장 실증

김동한, 배경호\*  
(\*)신한항공 부설연구소

## Developing DCPT System based on IoT and Field Demonstration for Smart Construction of Earthwork

Donghan Kim, Kyoung-Ho Bae\*  
Research Institute, Shinhan Aerial Survey CO.,LTD

**요약** 건설공사 토공사는 건설의 핵심공정으로 거의 모든 공정의 기초가 되며 구조물의 안전과 직결된다. 이에 평판재하시험 및 들밀도 시험과 같은 다짐시험을 통한 다짐의 정도 분석과 확인은 필수이다. 그러나 현재의 아날로그 방식 다짐측정은 현장의 위치, 시간 등을 포함한 작업자의 이력관리와 실시간 데이터 확인이 어렵다는 단점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 기존 다짐정보 구축 방식의 문제해결을 위해 스마트건설 환경에 적합한 IoT (Internet of Things) 기반의 DCPT (Dynamic Cone Penetration Test) 시스템을 개발하였다. 스마트폰 환경에서 운영되는 IoT 기반 DCPT 시스템은 다양한 어플리케이션의 적용이 가능한 유연성과 고효율, 저비용의 특징을 가지고 있다. 개발된 장비는 경부고속도로 건설현장에 적용하여 검증 및 개선사항을 반영하였다. 현장 실증은 평판재하시험, 아날로그 DCPT와 비교하여 수행하였으며 IoT 기반 DCPT 시스템의 정확도, 소요시간, 투입인력 모두 우수한 결과를 나타냈다. 본 연구에서 개발한 IoT 기반의 DCPT 시스템은 디지털 다짐정보, 측정 횟수당 다짐정보, 위치정보, 시간정보, 작업자 인적관리 등을 종합적으로 기록하여 현장에서 분석하고 가시화하며 구축된 다양한 정보는 스마트폰을 통해 관리센터로 실시간 전송되기 때문에 건설공정 관리에 많은 기여가 예상된다.

**Abstract** Earthwork in the construction field is a core process of construction. It is the basis for almost all processes and is connected to the safety of the structure directly. Therefore, it is essential to confirm the degree of Road Tamping and analyze it through a PBT (Plate Bearing Test) and Field Density Test. Since the current methods of measuring the Road Tamping are analog, real-time history management in the field is difficult, including the management of location and time histories. To solve the limitations of the analog method, the present study developed an IoT (Internet of Things)-based DCPT (Dynamic Cone Penetration Test) system suitable for smart construction. The IoT-based DCPT system operating in a mobile phone environment has the characteristics of low cost, high efficiency, and flexibility of use in various applications. The developed equipment was verified and improved by using it in the construction site of Gyeongbu highway. The field demonstration of the developed equipment was performed by comparing the present system with the PBT and analog DCPT. The accuracy, time, and manpower requirement of the IoT-based DCPT system showed excellent improvements compared to the existing analog systems. Moreover, the IoT-based DCPT system developed in this study comprehensively records digital compaction, location, and time. The newly developed system is also used in the human management of workers in the field. Based on the analysis results, the present system is expected to contribute a lot to the construction process management.

**Keywords** : Smart Construction, Rod Tamping, DCPT, IoT, Real Time

본 연구는 국토교통부 스마트건설기술개발사업의 연구비지원(20SMIP-B156083-01)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Kyoung-Ho Bae(Shinhan Aerial Survey CO.,LTD)

email: qpandora@hanmail.net

Received October 12, 2021

Revised October 26, 2021

Accepted November 5, 2021

Published November 30, 2021

## 1. 서론

최근 건설산업은 복잡하고 위험한 환경속에서 다양한 공사 작업 수행의 생산성과 안전성 개선, 비용절감을 위해 건설자동화 및 디지털화를 통한 기술혁신을 추진하고 있다. 자동화 시공은 단순히 현장 인력의 경험에 의존하는 시공 과정을 장비로 대체하는 수준을 벗어나 토목 구조물의 품질을 향상시키기 위한 필수적인 과정으로 진화하고 있다[1].

국토교통부에서는 2025년까지 스마트건설 기술 활용 기반 구축 및 2030년까지 건설자동화 완성을 목표로 하는 '스마트 건설기술 로드맵'을 수립하였으며[2], 이는 건설현장에서 2차원 설계도면에서 3차원 정보모델을 활용하고, 인력·경험 중심 반복 작업에서 데이터 기반 시뮬레이션으로 변화하기 위해 건설 전 과정에서 ICT를 접목하는 것이다. 또한, 건설장비 IoT/ICT 시장은 점차 큰 시장을 형성할 것이며 그에 부응하기 위해 건설장비의 경우 머신가이드(Machine Guidance/중장비 작업 가이드) 및 머신컨트롤(Machine Control/중장비 자동화)에 대한 필요성 및 환경이 확대될 전망이다[3].

건설의 기초공정인 토공사는 건설공사 계약중 약 11%의 비중을 차지하며 생산성 향상의 주요요소인 공기단축 및 공사원가 절감에 효과적이며 건설공사의 생산성 향상을 위해서는 토공사 계획 및 관리가 중요하다[4]. 이를 위하여 건설현장에서는 매 성토마다 토공사의 다짐정보를 확인하고 정보화한다[5]. 토공사는 다른 공종에 비하여 건설 중장비 대한 작업 의존도가 매우 높고 투입되는 건설 중장비의 능력에 따라서 생산성이 크게 좌우된다는 특징을 가지고 있다[6]. 그러나 현재의 다짐정보 구축 방식은 아날로그 기반의 평판재하시험(Plate Bearing Test, 이하 PBT) 및 들밀도 시험으로 실시하여 정확한 측정위치의 기록과 이력관리가 어려운 실정이다. 또한 투입인력, 장비, 비용이 높은 단점과 검측결과를 실시간으로 확인하지 못하여 공정관리에 제한적으로 사용된다[5]. 이를 위해 많은 건설현장에서 시험법이 간편하고 휴대성이 좋은 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT)에 대한 관심이 높아지는 추세이다. 하지만 현재까지 개발된 DCPT 또한 아날로그 기반으로 측정위치, 이력관리가 어렵고 실시간 검측결과와 한계를 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 기존 아날로그 방식의 DCPT에 디지털 센서를 접목한 IoT 기반의 DCPT 시스템을 개발하였다. 스마트폰 기반으로 운영되는 IoT 기반의 DCPT

시스템은 디지털 와이어 다짐측정, 측정모듈, 관리모듈로 구성되며 1인 계측, 시험시간, 비용절감, 실시간 데이터 가시화, 이력관리, 위치정보기록 등의 특징이 있다. 개발된 시스템은 개선, 검증을 위해 경부고속도로 현장에 적용되었다.

## 2. 스마트건설 개요

최근 디지털 기기와 인간, 그리고 물리적 환경의 융합으로 그 변화의 속도와 파급력이 급속도로 빨라지면서 4차 산업혁명을 위한 사회경제적, 기술적 환경이 조성되어 오고 있다. 4차 산업혁명은 기존 3차 산업혁명의 지능형 기술의 영역에서 보다 확장된 개념으로 인공지능, 빅데이터 사물인터넷 생명공학 기술 등 다양한 신기술들이 융합되어 기존 산업간의 구분과 경계를 허물고 있으며 새로운 산업구조와 패러다임을 지칭하는 개념이며 그 특징을 나타내는 기술 요소를 살펴보면 사물인터넷, 빅데이터, 플랫폼, 인공지능 등이 있다[7].

그러나 건설산업분야는 설계변경 등으로 인한 계획과 실행의 불일치, 공사기간의 지연, 사업비의 증가 등의 이유로 제조업 등 타 산업 대비 낮은 생산성과 수익성을 나타내고 있는 실정이다[8]. 또한 저출산의 과속화와 노동자의 고령화로 인하여 전문 기술 노동 인력이 부족한 문제가 심화되고 있다[9].

World Economy Forum (WEF)에서는 2016년, 건설인력 부족과 생산성 저하 문제를 해결하기 위해 인공지능, 빅데이터, Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), Internet of Things (IoT) 등을 활용한 건설산업의 혁신을 강조했다[10].

뿐만 아니라 정부에서는 6차 '건설기술진흥 기본계획'을 통하여 4차 산업혁명 대응계획을 발표하였으며, 국토교통부는 건설산업에 적용성이 높은 주요 디지털 기술을 '스마트 건설기술'로 정의하고, 이를 산업 내 효과적으로 도입하기 위한 활성화 방안과 로드맵 등을 제시했다(Fig. 1)[11].

스마트건설은 정형화된 형태로 정의하기는 아직 어렵다. 현재까지 정의된 스마트건설은 전통적인 토목기술에 빅데이터, IoT, 로봇, 드론, Building Information Modeling (BIM) 등 스마트 기술이 융합된 건설장비 자동화, 현장 안전관리, 가상건설, 건설 전 과정의 디지털화 등 건설 생산성과 안전성을 극대화하는 기술로 정의된다[12]. 각종 정보를 공유·유통시켜 빅데이터 분석을

활성화하는 등 데이터 중심의 디지털 기술로 변모시키고, ICT, 기계 등 타분야의 기술을 도입·융합하여 설계-시공-유지-관리 단계별 분절을 해소하며, 알기 쉬운 3D 시각화로 계획초기인 설계 단계에서 시공자-운영자 등 미래 수요자의 참여 기회가 제공되는 기술로 의미를 부여할 수 있다[13].

스마트건설이 도입되면 계획 및 설계단계에서는 정보 취득과 설계의 자동화가 가능하다. 각종 고성능 센서가 각종장비에 부착되어 지형정보 등의 설계정보가 자동으로 취득되며 이를 활용한 인공지능 설계가 가능하다. 시공단계에서는 각종 건설장비와 기계의 머신 가이드스 기술을 활용하게 될 것이며 시설 구축은 실시간 정보 네트워크와 정밀 측량성과를 통하여 효율적으로 구축되고 이런 과정에서 현장 관리 능력 또한 향상될 것이다[2].

시설물 준공 이후에는 구축된 디지털 정보를 활용하여 시설물의 점검 및 유지관리에 스마트건설 기술이 효율적으로 사용될 것이다. 시설물은 스마트건설 기술이 적용되어 빅데이터에 기반의 다양한 시뮬레이션이 가능하고 예방적 유지관리를 통해 시설물의 수명 연장, 서비스의 향상 등이 가능하다.



Fig. 1. Roadmap of Smart Construction[2]

### 3. IoT 기반 DCPT 시스템 개발

#### 3.1 국내 건설현장 다짐정보 구축 현황분석

건설공사에서 토공사의 성토작업은 흙을 쌓는 작업으로 넓은 부지 조성이나 도로 등의 건설에 반드시 필요한 공정이다. 성토작업에서 다짐공정은 흙의 역학적, 물리적 특성을 개선하기 위해 반드시 필요하며 흙을 다짐으로써 지지력과 강도증가, 과도한 침하 방지 및 감소, 투수성 감소, 동상이나 수축 등과 같이 바람직하지 않은 부피변화 억제 효과를 얻을 수 있다[13,14]. 따라서 다짐의 평가와 관리는 매우 중요하기 때문에 객관적으로 이루어

져야한다.

국내 시공현장에서 철도나 도로의 성토지반, 배면 매립토, 노상토에 대한 다짐관리는 일반적으로 밀도시험과 평판재하시험(Plate Load Test, PBT)을 통해서 이루어지며 필요에 따라 캘리포니아 지지력비(California Bearing Ratio, CBR)시험을 수행한다[15].

평판재하시험은 강성의 재하판에 하중을 가해 시간, 하중, 침하량을 측정하여 노상, 노반의 지지력을 알기 위해 수행한다[16]. 시험장치 및 기구는 재하판, 잭, 변위계 침하량 측정장치, 지지력장치, 시계 등으로 구성되어있다[17](Fig. 2). 평판재하시험은 반력 확보를 위한 중차량의 개입이 반드시 필요하고 시간, 공간, 비용적인 측면 등에서 비합리적이라는 평가를 받고 있다[15]. 뿐만 아니라 표층에 국한된 시험으로 지지력 계수를 추정하여 실제 다짐도보다 과대평가 될 수 있다[18].



Fig. 2. Plate Bearing Test

밀도 시험은 상대다짐도(Relative Compaction, RC)를 평가하는 방법으로 흙의 물리적 특성을 이용하여 측정하는 현장밀도로 수행한다[15](Fig. 3). 시험기구 및 장치는 시험구멍 굴착기수, 급속함수량 시험기, 밀도측정기, 저울로 구성되어있다[19]. 밀도시험의 경우 시험 과정에 요차요인이 많고 시료건조에 오랜시간이 소요되며 시험자에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있다는 단점이 있다.



Fig. 3. Field Density Test[22]

### 3.2 아날로그 기반 DCPT 장비

이러한 문제점들을 해결하기 위해 국내외 많은 연구자들은 40년 동안 평판재하시험을 대체할 수 있도록 접근성, 경제성, 신속성, 간편성 등이 우수한 동평판재하시험(dynamic plate bearing test, DPBT)와 DCPT 등을 이용한 연구를 진행되었으며[19] 국내의 경우 국토교통부의 포장 하부구조 다짐관리 잠정지침에 의거하여 건설 현장에 적용되고 있다.

DCPT는 노상의 지지력과 도로포장상태를 측정하기 위해 고안되었다. 일정 무게의 자유낙하를 힘을 통해 콘 선단(cone tip)이 시험 지표면을 뚫고 들어가는 능력을 측정하는 장비이다. 즉, 자유낙하 충격하중에 의해 보조 기층 또는 노상토를 뚫고 들어가는 콘의 1회 충격횟수당 평균관입량(Penetration Rate, PR)값을 측정한다[18].

시험 제한 조건으로는 연속 낙하 횟수가 5회 이상일때 관입량이 2mm/blow 이하이거나 시험 중 수직도가 유지되지 않아 수평 변위량이 75mm 이상이 되면 시험을 종료하고 기존 시험지점의 300mm 거리 이내에서 다시 시험을 수행한다. 콘에 마모가 발생할 경우에는 콘을 교체하여 사용한다[20,21].

DCPT 시험기는 크게 상부부분, 하부부분과 눈금자로 구성된다. 해머는 철로 주조되며 나머지 부분은 스테인레스로 제작되어 부식을 방지한다. 상부부분은 장비를 수직으로 고정시키는 핸들과 그 하부에 위치한 상부모루, 상부모루에서 하부모루까지 자유 낙하하는 8kg 무게의 해머, 해머의 자유낙하 운동을 유도하는 상부 로트로 이루어져 있다. 하부부분은 하부모루의 해머의 타격으로 발생하는 충격에너지를 콘까지 전달하는 하부로트와 지반으로 관입되는 콘으로 구성된다(Fig. 4)[21].

DCPT는 기존 다짐시험법에 비해 간편한 휴대성, 쉬운 시험 난이도, 빠른 시험시간의 장점이 있다. 하지만 자료축적이 많지 않아 실무 적용의 한계와 시험시 2명 이상의 인원이 필요하고 관입량을 눈금자로 직접 측정하기 때문에 오차가 발생할 수 있다.

DCPT 시험기는 휴대성과 간편하고 시험방법이 간단하다는 장점이 있지만, 시험시 2~3명의 인원이 필요하고 눈금자로 다짐정도를 측정하기 때문에 오차가 발생할 수 있다. 또한 매 타격마다 해머를 수동으로 올려야하는 한계점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 다짐정보 구축이 아날로그 방식으로 수행되어 시간, 관측값, 다짐정보를 취득하는 위치 등이 자동으로 저장되지 못하며 작업자의 숙련도에 따라 작업의 능률이 달라지는 문제점이 있다.

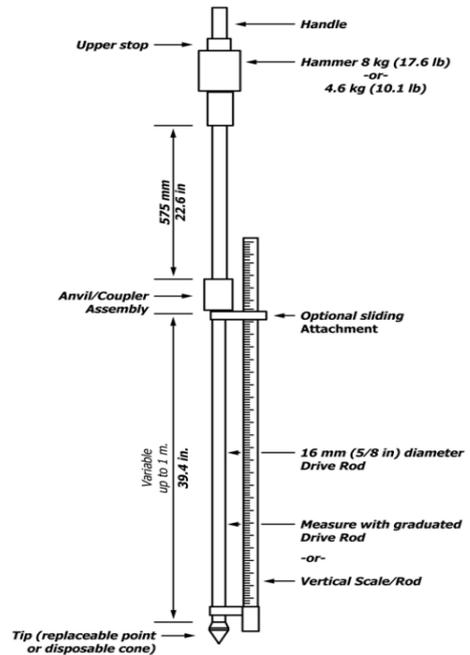


Fig. 4. American dynamic cone penetration test equipment[21]

### 3.3 IoT 기반 DCPT 시스템

본 연구에서는 기존의 아날로그 기반 DCPT의 단점을 보완하기 위해 디지털 센서와 모바일 어플리케이션을 접목한 IoT 기반의 DCPT 시스템을 개발하였다.

개발된 IoT 기반 DCPT 시스템은 관측모듈, 관리모듈, 거리센서모듈로 구성되며(Fig. 5) 위치정보, 시간정보, 관측데이터가 모두 모바일 어플리케이션에 저장/관리된다.

IoT 기반 DCPT 시스템은 국내의 관련 규정을 준용하여 8kg의 해머를 575mm 높이에서 자유낙하 시켜 추의 관입량을 측정하는 것을 핵심 내용으로 개발했다. IoT 기술은 센서를 활용하여 자유낙하 당시의 기울기 등 자세정보, 측정횟수 및 작업자정보, 시간정보, 관입량 측정정보, 블루투스를 이용한 전송센서, 위치정보 기록 등이 적용되었다. 또한 어플리케이션을 통해 획득된 위치정보와 다짐정보 등의 부속정보를 실시간으로 통합하여 현장에서 다짐정보를 분석하고 가시화 기능을 구현했다. 최종적으로 구축된 다짐정보는 향후 관리센터로 실시간으로 전송하여 성토 관리를 위한 공정관리에 사용가능하다(Fig. 6).

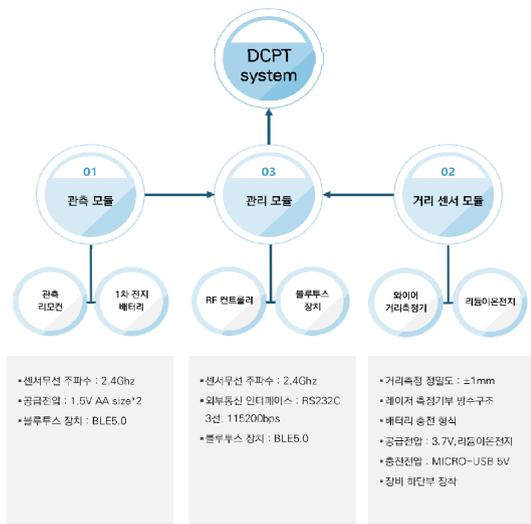


Fig. 5. Composition map of DCPT system based on IoT

### <IoT 기반 DCPT 시스템>

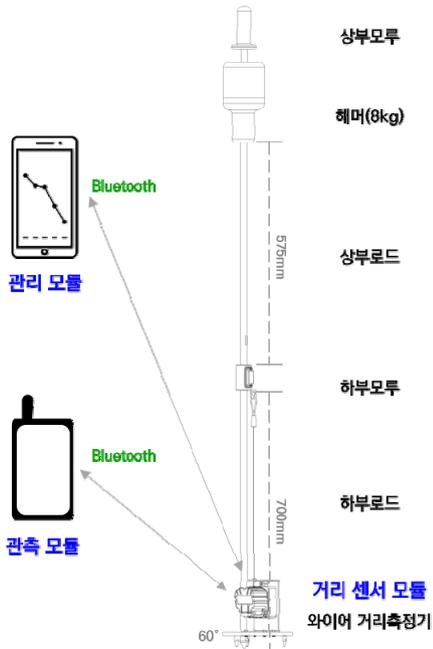


Fig. 6. DCPT system based on IoT

거리센서모듈은 리튬이온전지, 디지털 와이어 거리측정기, 메인보드, 블루투스로 구성된다. 거리측정기의 와이어를 하부모두의 고리에 걸어 해머 낙하 후 관입량 만

큼 줄어든 와이어의 길이를 측정해 메인보드에 기록한다. 와이어 방식의 채택으로 인하여 국외에서 사용중인 레이저 방식의 거리측정보다 비용이 절감되고 현장 환경(모래, 진흙, 이물질 등에 완고한 특성을 가진다(Fig. 7).

### <거리 센서 모듈>

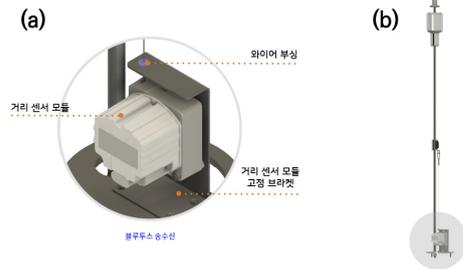


Fig. 7. Distance sensor module  
(a) Details of the distance sensor module,  
(b) Diagram of DCPT based on IoT

관측모듈은 해머 낙하 후 관입데이터를 모바일로 전송시키는 리모컨, 하부모두로 구성된다. 사용자가 매 낙하마다 리모컨으로 신호를 발생시키면 송수신 신호는 블루투스를 통해 거리센서모듈에 저장된 관입량을 관리모듈로 전송한다. 하부모두는 디지털 와이어를 거는 디지털 방식 이외에 아날로그 방식을 혼용할 수 있도록 설계하였다. 따라서 현장상황으로 인해 디지털 방식의 사용이 불가할 때 눈금자를 장착하여 아날로그 방식으로도 측정이 가능한 유연성을 가진다(Fig. 8).

### <관측 모듈>



Fig. 8. Observation module  
(a) Details of the observation module,  
(b) Diagram of DCPT based on IoT

관리 모듈은 모바일 어플리케이션, 블루투스로 구성된다. 모바일 어플리케이션에서는 관측 모듈의 신호를 통해 거리관측모듈의 관입량이 수신되면 날짜, 위치정보, 현장명, 관측자 등의 부가정보와 함께 핸드폰에 저장된

다. 저장된 데이터는 관측 완료 후 누적 그래프를 통해 가시화되며 모바일 위치정보 기반의 다집정보가 엑셀 형식으로 저장되어 이력관리가 가능하다(Fig. 9).



Fig. 9. Management module  
(a) Screen shot of mobile application,  
(b) Diagram of DCPT based on IoT

## 4. 현장실증 및 비교검증

### 4.1 실증현장 선정



Fig. 10. The test field  
(a) The side image of test field,  
(b) The front image of test field

개발된 IoT 기반 DCPT 시스템의 실증을 위해 본 연구에서는 경기도 화성시 영천동에 위치한 경부고속도로 건설현장을 채택하였다.

선정된 실증현장은 보강토 옹벽 공법이 적용된 뒤채움 공사현장이다. 보강토 옹벽 공법은 흙속에 연속성을 갖는 판형, 띠형 또는 줄기형의 요소를 수평방향으로 삽입하여 마찰력을 높여 흙의 전단강도를 개선하는 방법으로 지반이 매우 단단한 특성을 가지고 있다. 실증현장의 노상은 자갈이 포함된 흙으로 입자가 100mm 이하의 자갈로 구성이 되어있다(Fig. 10).

실증은 2021년 9월 6일, 2021년 9월 15일, 2021년 10월 12일 총 3일간 실시했다.

### 4.2 1차 시험

1차 시험은 2021년 9월 6일에 진행되었으며 PBT, 아날로그 DCPT와 함께 비교검증을 수행했다. 1차 시험에서는 PBT와 DCPT 시험의 연관성, 시험법의 비용, 투입장비, 투입인력, 소요시간에 중점을 두었다.

시험은 Fig. 11과 같이 총 6구역에서 비교검증을 수행했으며 각 구역내 PBT, 아날로그 DCPT, IoT DCPT의 타점간 거리는 약 15cm, 구역 간 거리는 약 5m로 설정했다. 황색사각형은 PBT, 청색삼각형은 아날로그 DCPT, 녹색원은 IoT DCPT를 나타낸다. 아날로그 DCPT와 IoT DCPT는 타점당 10회 타격을 수행하였다.

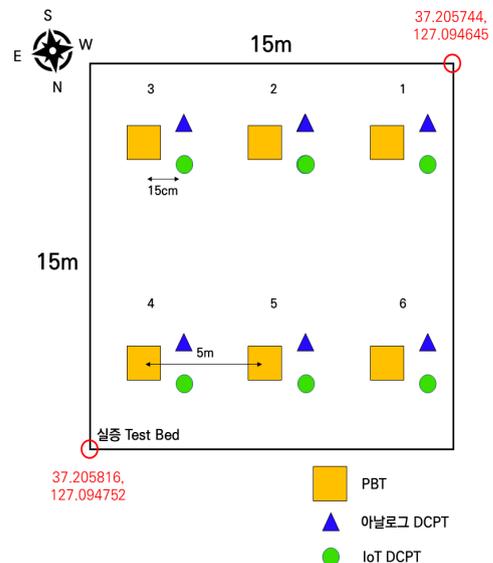


Fig. 11. Demonstration plan of first test

PBT는 재하판에 하중을 가해 지지력 계수를 측정하는 방식이다. 하지만 DCPT의 경우 평균관입량을 산정하기 때문에 데이터 비교를 위해 PBT의 관입량을 사용하였으며 단위 통일을 위해 25의 상수를 곱했다.

PBT, 아날로그 DCPT, IoT DCPT의 평균관입량 시험결과는 Fig. 13(a)와 같다. 황색 선은 PBT, 청색 선은 아날로그 DCPT, 적색 선은 IoT DCPT를 나타낸다. 평균관입량은 mm단위로 표현했다. Fig. 13(b)는 아날로그 DCPT의 평균관입량에서 IoT의 평균관입량을 뺀 결과로 오차를 나타낸다.



Fig. 12. Pavement tests  
(a) PBT, (b) DCPT equipment based on IoT

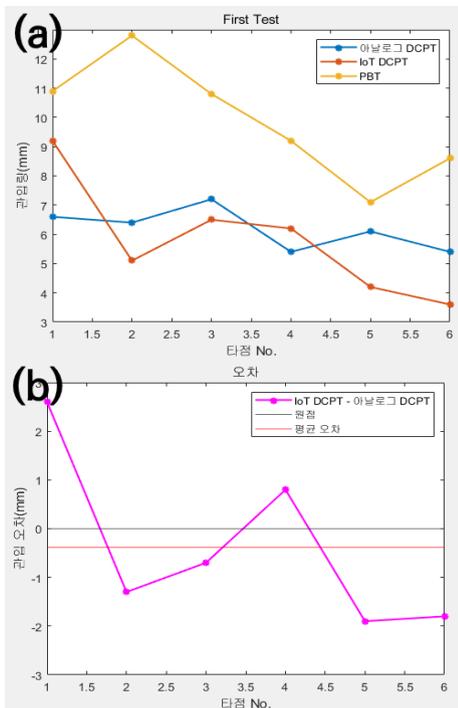


Fig. 13. Test analysis results  
(a) Penetration rate of PBT, analog DCPT and IoT DCPT, (b) Penetration error of DCPT and IoT DCPT

시험결과를 보면 PBT와 DCPT 시험은 큰 연관성이 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 이는 PBT 시험의 결과 값인 지지력 계수가 아닌 평균관입량을 사용했기 때문으로 생각된다. 향후 PBT의 결과값인 지지력계수 K와 DCPT의 주요인자인 설계탄성계수 M값의 연관성분석이 필요하며 이를 위해 방대한 데이터 구축이 요구된다(Fig. 13(a)).

아날로그 DCPT와 IoT DCPT의 오차는 모두 3mm 이내 표준편차는 1.73mm으로 낮게 나타났다. 하지만 시험구역이 6개로 적어 구역간 다짐정도의 경향성이 나타나지 않는 한계가 있었다. 따라서 IoT DCPT와 아날로그 DCPT의 추가분석을 통해 IoT DCPT의 정확도 분석이 요구된다(Fig. 13(b)).

Table 1은 PBT, 아날로그 DCPT, IoT DCPT의 투입비용, 장비, 인력, 시간 등을 비교한 결과이다. PBT는 시험법에 비해 시험 소요시간이 길고 장비설치가 번거로워 3인 이상의 투입인력이 요구된다. 또한 재하판의 하중을 위해 25T급 덤프트럭의 투입이 필요하며 대한건설협회 발표자료에 따르면 시간당 약 3만원의 경비와 추가적인 차량 임대료가 발생하는 것으로 나타났다. 반면 DCPT는 시험법이 매우 간편하고 휴대성이 용이하여 시험 소요시간과 투입장비, 인력, 비용 모두 PBT에 비해 적게 나타났다. 특히 IoT 기반의 DCPT는 데이터 기록, 관리가 모두 디지털로 적용되어 1인 계측이 가능하고 매우 적은 시험 소요시간이 필요한 장점을 보였다(Fig. 12).

Table 1. Examination result of PBT, analog DCPT and IoT DCPT

Method	PBT	Analog DCPT	IoT DCPT
<b>Average Time Required</b>	10min	2min	1min
<b>Manpower</b>	Over 3	2~3	1
<b>Expense</b>	High	Middle	Low
<b>Input</b>	• PB	• DCP	• DCP
<b>Equipment</b>	• Dump Truck	• DCP	• Mobile Phone

### 4.3 2차 시험

2차시험은 2021년 9월 15일에 진행되었으며 아날로그 DCPT와 비교검증을 수행했다. 2차 시험에서는 아날로그 DCPT와의 비교를 통해 IoT DCPT의 사용성과 정확도 분석에 중점을 두었다. 시험은 총 12개 구역에서 진행했다. 타점간 거리는 10cm, 구역간 거리는 3m로 설정했다.

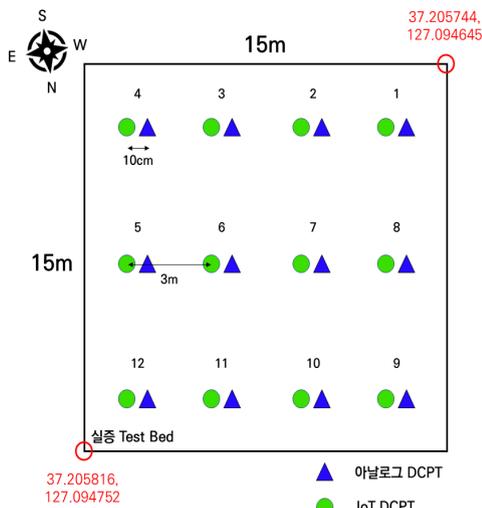


Fig. 14. Demonstration plan of second test

분석결과는 Fig. 15와 같다. IoT DCPT와 아날로그 DCPT는 전반적으로 유사한 결과를 보였으며 구역간 지

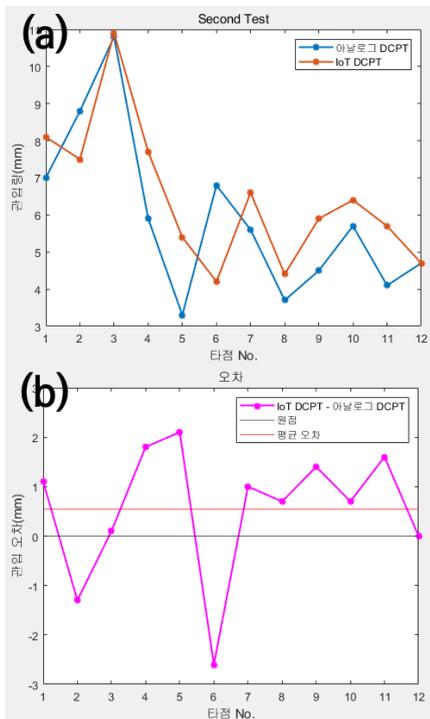


Fig. 15. Test analysis results  
(a) Penetration rate of analog DCPT and IoT DCPT, (b) Penetration error of DCPT and IoT DCPT

반 토질특성에 따른 관입 경향성이 나타났다. 두 시험의 평균관입량 오차 또한 3mm 이내로 낮게 나타났으며 표준편차는 1.4mm로 1차 시험보다 낮았다. 오차의 평균은 약 0.7mm로 IoT DCPT의 평균관입량이 전반적으로 다소 높게 나타났다. 이는 DCPT 룯드, 콘, 해머의 경도 및 강도차이와 해머의 충격에너지를 바로 전달하기 위해 하부 모루의 돌기를 제거했기 때문인 것으로 생각된다. 또한 시험현장이 100mm 이하의 자갈로 구성되어 있기 때문에 Fig. 16(a)와 같이 입자가 큰 자갈을 타격할 때 Fig. 16(b)의 적색 사각형과 같이 관입이 되지 않는 경우가 발생했다.

#### 4.4 3차 시험

3차 시험은 2021년 10월 12일에 수행했으며 2차 시험과 동일한 조건으로 시험을 진행했다. 2차 시험에서 Fig. 16 (a)와 같이 입자가 큰 자갈이 있을 경우 관입 오차가 발생하여 3차 시험에서는 타격 중 관입이 발생하지 않을 경우, 시험을 종료하고 주변 10cm 반경 이외에서 재시험을 수행했다.

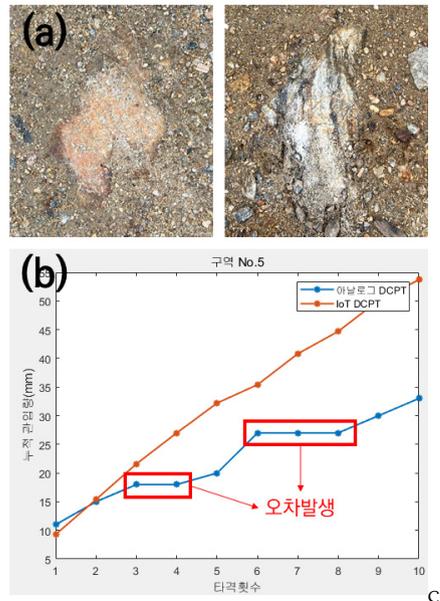


Fig. 16. Variable of test field  
(a) Gravel over 100mm, (b) Error caused by gravel

시험결과는 Fig. 17과 같다. IoT DCPT와 아날로그 DCPT의 평균관입량은 매우 유사하게 나타났다. 이는 재시험으로 인하여 두 시험법의 시험조건이 비슷하기 때문

인 것으로 분석된다. 두 시험법의 오차 또한 2mm 이내로 낮게 나타났으며 표준편차는 0.7로 2차시험보다 좋은 결과를 보였다. 오차의 평균은 약 1mm로 2차시험과 동일하게 IoT DCPT가 다소 높은 평균관입량을 가지는 경향성을 보였으며 경향성을 제거하면 1mm 이내의 오차를 가진다. 1, 2, 3차 시험의 오차모두 3mm 이내로 아날로그 DCPT의 관측오차를 제외하면 IoT 기반의 DCPT 시스템이 기존 아날로그 DCPT와 동일한 정확도를 갖는 것으로 분석되었다.

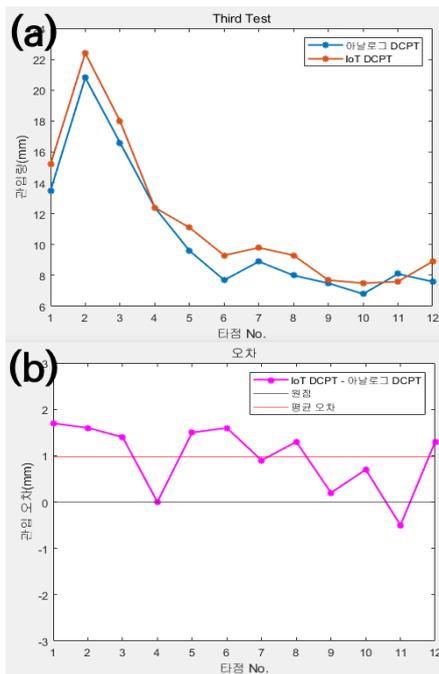


Fig. 17. Test analysis results  
 (a) Penetration rate of analog DCPT and IoT DCPT, (b) Penetration error of DCPT and IoT DCPT

### 5. 결론

건설분야 생산성 향상을 목표로 하는 스마트건설은 전통적인 아날로그 방식에서 각종 공정의 디지털화 및 실시간 데이터 연동을 목표로 하고 있다. 이를 위해 각종 센서 기반의 디지털 건설정보를 수집하고 분석하는 체계는 스마트건설의 핵심기술이다.

이에 많은 건설현장에서 시험의 간편성, 휴대성, 신속성 등의 장점을 갖는 DCPT를 도입하는 추세이다. 본 연

구에서는 기존 아날로그 DCPT에 IoT 기술을 접목하여 간편성, 신속성, 경제성 및 실시간 1인 계측이 가능한 IoT 기반의 DCPT 시스템을 개발하였으며 DCPT의 모듈별 기능을 정의하였다. IoT 기반의 DCPT 시스템은 미국 ASTM의 DCPT 규정 및 국내 국토교통부의 포장하부구조 다짐관리 잠정지침을 분석하여 개발되었다.

개발된 IoT 기반의 DCPT 시스템의 핵심모듈은 관리모듈, 관측모듈, 거리센서모듈로 모두 블루투스로 연동되며 모바일 어플리케이션 기반으로 제작되어 사용자의 로그인 및 이력관리, 실시간 데이터 분석 및 가시화, 위치정보, 시간정보 기록을 지원한다.

개발된 IoT 기반 DCPT 시스템은 토공사 현장인 경우 고속도로 건설현장에 3일간 현장실증 및 비교검증을 수행하여 개발한 장비의 우수성을 입증하였다. IoT 기반의 DCPT 시스템은 PBT, 아날로그 DCPT와 비교하여 저비용, 1인 계측, 1분의 소요시간 등의 장점을 나타냈다. 계측 정확도 또한 기존 아날로그 DCPT와 비교해 평균적으로 약 1mm 이내의 오차로 우수하게 나타났다. 하지만 PBT의 경우 6회의 적은 시험횟수와 지지력계수가 아닌 평균관입량을 사용하여 DCPT와 비교했기 때문에 DCPT와 큰 경향성이 나타나지는 않았다. 향후 PBT의 지지력계수와 DCPT 평균관입량의 연결을 위한 고찰이 필요하며 많은 DB 구축을 통해 DCPT의 현장투입을 위한 분석이 필요하다.

본 연구에서 개발한 IoT 기반의 DCPT 시스템을 통한 현장의 스마트건설화로 인하여 작업자의 효율성 향상 및 관리자의 실시간 공정관리 및 생산성 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

### References

- [1] T. Y. Yoon, "A study on the quality management technology and specification of standing-up compaction using intelligent compaction equipment", *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol.22, No.2, pp.74-79, 2020.
- [2] Smart Construction Technology Roadmap for Innovation in Construction and Safety, Available From: <http://www.ssyenc.com/file/kor/tech/html/2019/6.%20%ED%8A%B9%EC%A7%91%EA%B8%B0%ED%9A%8D%201.pdf> (accessed Sep. 2, 2020)
- [3] J. W. Park, W. G. Yoon, "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, Nov. 2019.
- [4] S. Sa, C. Lee, H. Cho, K. I. Kang, "Development of Simulation Model for Earthwork Considering Factors Affecting Construction Productivity", *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, Vol.21, No.1, pp.149-150, May. 2021.
- [5] H. G. Park, G. H. Bae, "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, Nov. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.501>
- [6] Y. W. Park, D. J. Yeom, "Development of Determination System for Optimal Combination of Earthwork Equipments", *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, Vol.23, No.6, pp.957-969, Aug. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.6.957>
- [7] S. W. Kwon, "The latest trends in smart construction and strategies for responding to the construction industry", *Construction Engineering and Management*, Vol.22, No.4, pp.23-31, Aug. 2020.
- [8] G. P. Lee, S. I. Choi, "The direction of legislation to revitalize smart construction technology", *Construction Engineering and Management*, Vol.20, No.5, pp.28-32, Oct. 2019.
- [9] J. W. Seo, T. G. Gang, C.H. Choe, "[Field 1] Automation of Construction Equipment and Control Technology", *Construction Engineering and Management*, Vol.21, No.4, pp.4-10, Aug. 2020.
- [10] Shaping the Future of Construction: a Breakthrough in Mindset and Technology, Available From: <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology> (accessed Sep. 2, 2020)
- [11] G. P. Lee, S. Y. Choi, T. H. Son, S. I. Choi, "Survey on Smart Technology Applications of Korean Construction Companies and Strategies for Activation", *Construction & Economy Research Institute of Korea* Available From: [https://www.e-ia.co.kr/cg/vol247/247\\_news.pdf](https://www.e-ia.co.kr/cg/vol247/247_news.pdf) (accessed Oct. 28, 2021)
- [12] J. H. Jeong, S. Y. Hwang, H. J. Yun, U. S. Yu, "[Field 4] Building a Digital Platform of Smart Construction and Test Bed Operation", *Construction Engineering and Management*, Vol.21, No.4, pp.25-30, Aug. 2020.
- [13] S. M. Moon, Y. S. Kim, "Status of Smart Construction Technology R&D", *Construction Engineering and Management*, Vol.19, No.6, pp.33-36, Dec. 2018.
- [14] W. K. Yoo, B. I. Kim, J. H. Kim, K. B. Park, "A Study on Various Soil Stiffness Evaluation Methods with Field Test", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.11, No.4, pp.1373-1380, Apr. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.4.1373>
- [15] K. S. Kim, W. Woo, C. Lee, W. Lee, "Laboratory Soil Box Tests for Compaction Characteristics of Foundation Soils using Nondestructive and Penetration Tests", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.5, pp.93-101, Oct. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.5.093>
- [16] J. J. Park, H. Shin, D. Kim, S. K. You, J. M. Yun, G. Hong, "A Field Test on Bearing Capacity Characteristics of Materials for Ground Cavity Restoration Based on Plate Bearing Test", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.4, pp.293-304, Dec. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2018.17.4.293>
- [17] Korea Industrial Standards (KS) F 2310:2000 Method for Plate Load Test on Soils for Road, Available From: <https://www.standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?menuId=503&topMenuId=502&ksNo=KSF2310&tmprKsNo=KSF2310&reformNo=10> (accessed Sep. 2, 2020)
- [18] U. G. Kim, L. Zhuang, K. W. Lee, "Development of advanced dynamic cone penetration test apparatus and its application performance evaluation", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.13, No.4, pp.119-131, Dec. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2014.13.4.119>
- [19] J. Lee, J. H. Jeoung, C. Choi, J. Y. Kim, H. Jin, "Analysis of Correlation among Various Compaction Evaluation Methods for Estimating of the Bearing Capacity on Subgrades", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.4, pp.45-58, Dec. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2015.14.4.045>
- [20] K. S. Park, S. H. Lee, J. W. Lee, S. Y. Seo, "The Trackbed assurance management technique relation analysis and management reference improvement plan", *Proc. of 2012 The Korean Society for Railway*, Jeonman, Korea, pp.1569-1576, 2012.
- [21] ASTM, D6951-03 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications, Available From: [https://www.academia.edu/24924839/Standard\\_Test\\_Method\\_for\\_Use\\_of\\_the\\_Dynamic\\_Cone\\_Penetrometer\\_in\\_Shallow\\_Pavement\\_Applications\\_1](https://www.academia.edu/24924839/Standard_Test_Method_for_Use_of_the_Dynamic_Cone_Penetrometer_in_Shallow_Pavement_Applications_1) (accessed Sep. 2, 2020)
- [22] M. F. Ahmed, M. S. Khan, M. A. Raza, S. Saqip, H. Saadat, "Slope failure analysis of Havelian landslide", *Abbottabad Pakistan. Pakistan Journal of Science*, Vol.68, No.4, pp.462-469, Dec. 2016.

김 동 한(Donghan Kim)

[정회원]



- 2020년 8월 : 세종대학교 지구정보공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : ㈜신한항공 대리

<관심분야>

공간정보, 원격탐사, 레이더 측량

---

배 경 호(Kyoung-Ho Bae)

[정회원]



- 2006년 2월 : 동아대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 2017년 7월 : 공간정보산업협회 책임연구원
- 2017년 7월 ~ 현재 : ㈜신한항공 연구소장

<관심분야>

공간정보, 지도제작, 정보통신