

# 스마트 다짐품질관리에 대한 방법 제안

김지선<sup>1</sup>, 조진우<sup>1</sup>, 김진영<sup>1</sup>, 김남규<sup>2</sup>, 김건웅<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지반연구본부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 연구전략기획본부

## Proposal for Smart Compaction Quality Management Method

Ji Sun Kim<sup>1</sup>, Jin-Woo Cho<sup>1</sup>, Jin-Young Kim<sup>1</sup>, Namgyu Kim<sup>2</sup>, Gunwoong Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Division of Strategic Tasks, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약** 본 연구는 지능형 다짐기술등의 스마트 기술을 다짐품질관리에 통합 적용한 새로운 다짐관리 방법을 제안하였다. 현재 국내 다짐평가방법은 평판재하시험, 현장밀도시험등으로 한 지점의 시험값이 전체현장의 다짐품질을 대표하여 사용하므로 한계가 있다. 또한, 시험 및 결과 처리과정에서 시간 및 공간적 제약이 따른다. 이러한 기존 다짐평가방법을 대체할 대표적인 스마트 다짐평가방법으로 지능형 다짐기술이 있으며, 이는 롤러에 부착된 센서의 측정 값을 통해 다짐 시공시 실시간으로 다짐횟수 및 다짐품질을 확인할 수 있다. 그 외의 스마트 다짐품질관리기술로는 IoT 기반 DCPT 다짐평가기술, UAV기반 함수비도출 기술이 있으며 이러한 기술을 지능형 다짐 시 병행하여 다짐품질을 비교하므로 다짐품질에 대한 보조지표로 활용 가능하다. 현재 지능형 다짐기술은 표준시방서 제정을 통해 국내 최초의 스마트기술에 대한 제도적 기반을 마련하였다. 이에 본 연구에서는 지능형 다짐공 표준시방서 핵심내용을 기본으로 종합적인 스마트 다짐기술을 제안하고 각각의 기술에 대한 현장시험을 통해 다짐평가 결과를 확인하므로 스마트 다짐품질관리가 가능함을 확인하였다. 이러한 종합적 다짐평가방법의 실용화를 위해서는 반복 현장 검증테스트 및 기술 상세 지침에 대한 고도화의 노력이 필요하며 관리 체계 확립을 위한 사용자 가이드라인 제시 등의 제도의 보완과 개선이 뒷받침 되어야 할 것이다.

**Abstract** This study proposed a new compaction management method that utilizes smart technologies such as intelligent compaction technology to manage compaction quality. The current domestic compaction evaluation methods are limited since the test value of one point is used as a representative of the compaction quality of the entire site, such as plate load test and field density test. In addition, there are time and space constraints in the testing and result analysis process. A representative smart compaction evaluation method to replace these existing compaction evaluation methods by using intelligent compaction technology, which can determine the number of compaction and compaction quality in real-time during compaction through the output measured by the sensor attached to the roller. In addition, other smart compaction quality management technologies include IoT-based DCPT compaction evaluation technology and UAV-based water-content derivation technology, and these technologies can be used as a supplementary index for compaction quality by comparing compaction quality simultaneously. Currently, the standardized specifications for intelligent compaction methods have been established, providing an institutional foundation of the smart technology in Korea for the first time. In this study, a comprehensive smart compaction technology is proposed based on the proposal of the intelligent compaction method, and the results of compaction quality are partially confirmed through field tests for each technology. For the practical application of these comprehensive technologies, continuous and repeated field testing and technological advancement efforts are necessary, and institutional improvements such as proposing guidelines for smart compaction quality management technologies to establish a system should be supported.

**Keywords** : Smart Compaction, Quality Control Method, Intelligent Compaction, Compacting Control, Compaction Meter Value

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호: RS-2020-KA157130).

\*Corresponding Author : Gunwoong Kim(KICT)

email: gwkim86@kict.re.kr

Received November 13, 2023

Revised January 24, 2024

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

## 1. 서론

최근 국내의 건설 분야는 스마트 기술의 발달에 따라 기존 건설기술에 IoT(Internet of Thing), 빅데이터, 로봇, UAV, AR(Augmented Reality), VR (Virtual Reality) 기술 등을 적용하여, 기존기술의 단점을 보완한 새로운 건설 환경을 제시하여 안전성, 생산성, 품질향상을 위한 기술혁신이 이루어지고 있으며, 단계적으로 건설현장에 도입 되고 있다[1].

토공사의 경우 다른 공종에 비해 건설 장비비의 의존도가 높으며, 특히 다짐공은 다짐 장비인 롤러 운전자의 숙달정도와 다짐 재료등의 작업 환경에 따라 다짐품질이 좌우되며 최종 다짐완료 후 다짐품질을 확인하기 위해 추가적인 현장시험을 실시하여 평가하고 있다. 우리나라에서는 성토체의 다짐품질관리를 위해 평판재하시험(KS F 2310), 모래치환법(KS F 2311)등의 현장품질시험을 실시하여 평가기준에 따라 다짐품질의 적합여부를 판단한다[2].

평판재하시험, 모래치환법등 기존의 다짐평가방법은 특정 지점에서의 전체의 다짐품질에 대한 값으로 대표되므로 전체 현장을 반영하였을 때 다짐품질평가 결과와 차이가 있을 수 있다. 이러한 기존 다짐품질 평가방법의 문제점을 보완하기 위해 스마트기술을 활용한 다짐품질관리 평가가 필요하다.

현재 스마트 다짐 기술은 현장 작업 위치에 대한 GPS의 통한 좌표를 확보하므로, 롤러드럼에 부착된 지반 강성을 가속도계 센서를 통해 데이터로 취득하여, 장비 운전자가 디스플레이어를 통해 확인할 수 있는 시스템이 개발되어있다. 이러한 스마트 기술은 기존의 다짐측정방법과 평가방법에 비해 시간적, 공간적으로 작업 효율을 극대화 할 수 있다.

다짐공정에서의 대표적 스마트 건설기술인 지능형 다짐 (Intelligent Compaction, IC) 기술은 기존의 일점 시험방법 (spot test)의 문제점을 개선한 실시간-연속적인 다짐품질 평가 방법이다.

본 연구는 지능형 다짐기술과 그 외의 스마트 기술을 다짐품질관리에 통합 적용한 새로운 다짐관리 방법을 연구하였다.

먼저, 국내 기존 다짐평가방법 및 현황에 대해 알아보고, 연구·개발 진행 중인 대표적인 스마트 다짐평가방법 및 기술들을 소개하고 검증 시험을 수행하였다. 또한 기술개발에 대한 제도적 기반인 지능형 다짐공 표준시방서 (2021)의 다짐평가방법을 설명하였다.

최종적으로 지능형 다짐공 표준시방서의 내용을 참고하여 지능형다짐평가 방법을 기본으로 사용하고, 기타 스마트 다짐평가 기술 보조지표로 적용한 종합적 다짐품질평가인 스마트 다짐품질관리 평가방법에 대해 제안하였다.

## 2. 스마트 다짐관리 기술

### 2.1 다짐품질평가 방법

#### 2.1.1 기존방법

국내의 성토다짐에 대한 평가방법은 흙쌓기(성토) 표준시방서 (KCS 11 20 20 2018)에서 제시하고 있으며, 모래 치환법에 의한 흙의 밀도시험방법 (KS F 2311), 흙의 다짐시험방법 (KS F 2312), 도로평판재하시험법 (KS F 2310)을 기본 시험법으로 사용하고 있다. 이러한 기존의 방법은 실제 국내 토공사에서 상당 기간 동안 대부분 현장의 다짐품질관리 방법으로 사용되고 있으며, 특수한 경우를 제외하고 현재까지 현장에서 가장 많이 사용되는 방법이다.

기존의 다짐품질에 대한 현장시험 방법 중 가장대표적인 방법은 흙의밀도시험(들밀도시험)과 평판재하시험이다. 도로포장공사의 경우 표준시방서 및 지침에 따라 1000m<sup>3</sup>의 면적에 대해 1~3지점 이상으로 실시하도록 하고 있다. 이러한 다짐품질평가방법에서 현장시험 위치의 선택은 감독관의 판단에 따라 실시하도록 하며, Fig. 1과 같이 선택된 지점에 대해 시험을 수행하고, 야장에 수기 기록 후 문서작업을 추가적으로 실시하고 있다. 이러한 다짐품질확인 방법은 지반특성의 정보를 현장에서 채취 또는 측정하여 확인할 수 있으며, 적용사례가 풍부



Fig. 1. Conventional compaction quality control Method

한 장점이 있다. 그러나 넓은 다짐 면적에 대해 일부 지점시험(spot test) 결과값을 적용하므로 실제 현장에서는 다짐도의 편차가 발생할 수 있으며 품질결과의 변동성이 내재되어 있어 정확도의 한계가 있다. 또한, 다짐작업 후 추가적인 분석 처리작업 단계를 거치므로 실시간성이 저하되어 생산성이 떨어지는 단점이 있다.

### 2.1.2 다짐관리 기준 현황

한편, 국토해양부에서 2011년 제시하고 있는 포장 하부구조의 다짐품질 평가기준[3]에서는 노상과 보조기층에 대해 평판재하시험 및 현장밀도에 대한 다짐도 기준의 LFWD (Light Falling Weight Deflectometer), 동적콘관입시험 (Dynamic Cone Pre Test, DCPT)등을 포함한 Table 1과 같은 다짐 기준을 제시하고 있으며, 도로포장을 위한 다짐공 수행 시 각 기준을 만족하도록 하고 있다.

Table 1. Criteria for subgrade compaction test [3]

Division	Contents	Remark
Thickness after completion of 1 <sup>st</sup> floor compaction	20cm or less	Design thickness 10% or more, not increase or decrease
Compaction (%)	95% or more of $\gamma_{dmax}$	KS F 2311 KS F 2312
Compaction method	C, D, E	KS F 2312
Moisture content (%)	Optimum moisture content $\pm 2\%$	KS F 2306
LFWD	$E_{LFWD} = 0.44M_R - 19.37$	Design $E_{LFWD} \leq$ Field $E_{LFWD}$
DCPT	$PR = 805.72 / (M_R - 43.93)$	Design PR $\geq$ Field PR
PBT	$k_{30} = 0.85M_R - 15.66$	Design $k_{30} \leq$ Field $k_{30}$

기준에 제시되어있는 다짐품질 평가시험 중에 LFWD 및 DCPT와 같은 지반강성을 측정하는 소형기기의 평가 방법은 국외에서는 보편화 되어있으며, 다양한 현장에서 활용되고 있다. 그러나 이러한 장비의 국내평가방법은 다짐도를 측정하여 설계 탄성계수를 산출하기 위한 기준으로 제시 되어있고 실제 현장적용을 위한 사용 상세에 대한 이해가 부족한 실정이다. 따라서 다짐 현장에서 기존 다른 방법들에 비해 활용도가 낮으며, 설계탄성계수의 적합성을 확인하거나 평판재하시험등이 어려운 경우, 연구 또는 상대비교를 위한 다짐평가방법으로 일부 사용

되고 있다.

따라서 이러한 기존의 다짐관리 방법의 문제점을 스마트 기술을 활용하여 보완한 다짐관리기술 및 다짐평가에 대한 새로운 방법이 필요하다.

## 2.2 스마트기술을 활용한 다짐관리

### 2.2.1 지능형 다짐

지능형 다짐(Intelligent Compaction)이란, 다짐롤러에 부착된 센서로부터 획득한 연속적인 계측데이터를 기반으로 다짐공정을 제어·관리하는 기술이다[4]. 지능형 다짐기술은 계측 센서와 GNSS 수신기를 통해 다짐작업에 따른 지반의 상대적 강성 변화를 나타내는 지능형 다짐값을 실시간으로 산정하고 출력하여 다짐횟수 및 다짐지수를 파악하여 다짐관리를 수행할 수 있다. 국내의 경우 한국도로공사 교통연구원, 한국건설기술연구원, 한양대학교 등에서 지능형 다짐관리 시스템 개발 및 관련 기초 연구가 수행되었고, 실용화를 위한 기술 고도화가 진행 중이다.

지능형 다짐기술의 기본 매커니즘은 진동롤러의 가속도 센서의 기록을 고속 푸리에 변환(FFT)하여, 첫 번째와 두 번째 주파수의 조화성분의 진폭 간 비율을 CMV(Compaction Meter Value)로 정의하여 나타낸다[5]. 이러한 측정 데이터를 통해 지반의 상대적인 강성을 확인하여 다짐도를 평가한다.

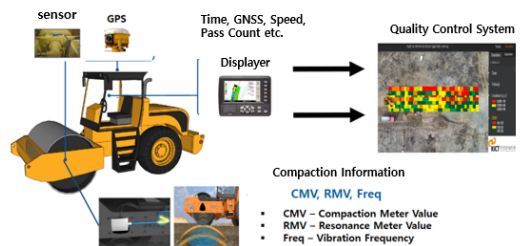


Fig. 2. ICMV Q/C System

또한 데이터의 처리과정을 통해 계측 정보를 시각화하여 장비 내 설치된 디스플레이어를 통해 장비 운전자가 다짐작업의 경로 및 횟수, 지능형다짐값(ICMV)을 실시간으로 확인 가능하다. 따라서, 다짐수행 중에 기존 작업자의 숙련도에 의지하던 방식을 벗어나 실시간 작업 기록 확인 가능하므로 작업효율 및 관리가 향상된 기술이며 기존다짐평가기술의 대안으로 사용될 수 있다.

### 2.2.2 IoT 기반 동적콘관입시험(DCPT)

DCPT(Dynamic Cone Penetration Test)를 통한 다짐강도 확인시험법은 해머의 자유낙하 충격하중에 의해 다짐층에 하부 콘이 지면을 뚫고 들어가 1회 타격횟수 당 평균관입량 (PR: Penetration Rate)을 측정하므로 지반의 다짐강성을 편리하게 측정할 수 있는 현장시험이다[6](ASTM, 2003).

IoT 기반 DCPT 시스템은 기존의 아날로그 방식DCPT 장비에 디지털 센서와 모바일 어플리케이션을 접목한 시스템으로 기존 아날로그 DCPT의 단점을 보완한 특징을 가지고 있다. 기존의 장비는 최소 3명의 인원으로 야장 기록, 시험수행을 해야 했지만 IoT기술 및 어플리케이션을 활용하여 적은 인원을 투입가능하며 야장 처리 방법을 디지털화하여 작업효율을 높일 수 있게 되었다[7].

IoT기반 DCPT 장비는 Fig. 3과 같이 상부부분, 하부부분과 와이어로 구성되며, IoT를 이용하여 측정 시험결과를 모바일기기를 통해 실시간 확인할 수 있다. 또한 최종 시험 결과 데이터 및 그래프의 송신이 현장에서 가능하다. 이것은 지반의 다짐도를 나타내는 지반강성의 현장 시험값인 PR(or DPI) 결과를 문서처리 과정 없이 확인 하므로 실시간 다짐품질을 판단할 수 있다[8].

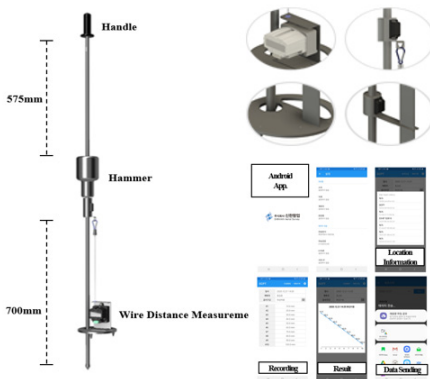


Fig. 3. IoT DCPT

DCPT는 해외에 비해 국내에서 매뉴얼 및 기준에 대한 사용자의 이해가 부족하여 사용성이 낮다. 스마트 기술의 적용된 DCPT의 연구개발을 통해 사용방법 및 결과처리 부분의 기능적 효율성은 확보 되었다. 그러므로 DCPT의 현장활용 보급화하기 위해서는 국내의 평가기준 외 사용 매뉴얼 및 다양한 현장조건에 따른 수행결과 데이터 베이스 구축이 필요하다. 또한 기존의 평가방법인 평판재하시험과의 상관성 분석을 통해 기술적 검증 을 통해 신뢰할 수 있는 다짐평가방법으로 실용화될 수 있을 것 이다.

### 2.2.3 UAV 기반 함수비 도출기술

토양 함수비는 다짐작업 수행 시 중요한 인자이며 이론적으로 최적함수비일 때 가장 고효율의 다짐을 수행할 수 있으므로, 지반함수비는 다짐작업 시 매우 중요한 요소이다.

최근 측정기술의 발달에 따라 토양의 수분을 기존의 현장 채취 후 실험실로 이동하여 건조 후 측정하지 않고 영상정보를 통해 다짐현장의 상태를 분석하여 함수비를 도출하는 스마트 기술을 활용한 연구가 이루어지고 있다.

UAV기반의 함수비 도출기술은 드론 탑재용 초분광 카메라(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 이용해 상공에서 다짐 현장을 촬영하여 이미지를 획득한 후 이를 시스템에서 분석·처리하여 정형화된 함수비를 획득하는 기술이다[9]. 본 연구에 활용된 드론은 DJI M300 Pro이며, 분광카메라는 Shark (microHSI 410 Sensor, Corning 사)를 사용하여 기술 적합성을 확인하고 있다. 함수비 도출기술의 세부 단계는 현장에서 드론 촬영 후 현장에 적합한 장비에 대한 세팅의 과정이 확실히 이루어져야한다. 이후 촬영 이미지를 분석·처리하는 시스템에서 현장시험 및 레퍼런스 등을 반영하여 기존 축적된 DB에 변환 공식을 적용·처리 하므로 함수비를 시각화해서 확인할 수 있는 CCM (Color-coded-map)으로 출력하여 현장함수비를 획득한다. 이러한 방법을 통해 현장 다짐에 따른 연속적인 다짐지반 함수비의 상태변화를 지도화 하여 확인할 수 있다[9].

현재 산출되어 사용되는 스펙트럼 지수는 현장 조건에 맞는 함수비 도출을 위해 최적의 파장 선택 및 조합을 연구하여 실내에서 적용하고 있다. 따라서 현장의 촬영 정보를 변환 공식을 통해 나타내므로 신뢰도를 위한 검증이 필요하며 다양한 현장 데이터를 현장 변수에 대한 기계학습을 통해 기술의 고도화가 이루어야 할 것이며 최적화된 시스템을 구축해야 할 것이다.

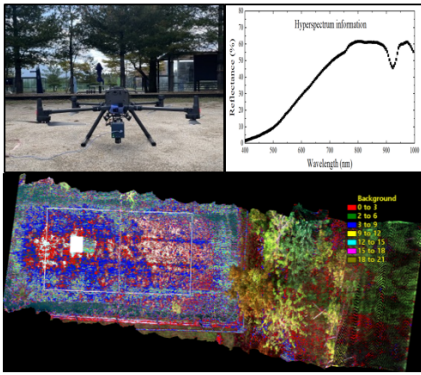


Fig. 4. Color-coded map method for soil water content

### 3. 스마트 다짐관리 기술 검증

#### 3.1 지능형 다짐

앞서 언급한 지능형 다짐 (Intelligent Compaction) 은, 다짐롤러에 부착된 센서로부터 획득한 연속적인 계측데이터를 활용한다. 부착된 센서는 실시간으로 다짐 정도 파악을 위한 가속도계와 다짐 횟수를 취득하기 위한 GNSS 수신기로 나뉜다.

품질 관리를 위해서는 기준확립 뿐아니라 이를 위한 기술적 검증이 우선 되어야 한다. 따라서, 경기도 연천의 자체 테스트베드에서 지능형 다짐 시험을 위한 기술적 검증을 수행하였다. 다짐은 전·후진 포함 총 7회 수행하였으며, 다짐 수행 결과는 그림과 같다 (Fig. 5).

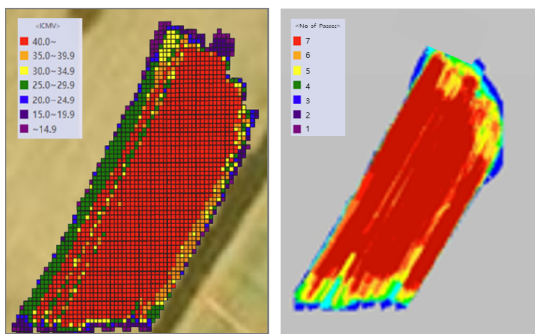


Fig. 5. ICMV Testing Result (CMV and Number of Passes)

Fig. 5에 나타나듯이 다짐 횟수에 따라 CMV 값이 증가하는 경향을 보였으며, GNSS 수신기를 통해 롤러가 이동한 위치의 흔적을 구현할 수 있음을 확인하였다. 특히, 다짐 횟수의 경우 검증을 위해 계획된 라인에 맞추어

다짐을 수행하므로, 공사 현장 활용에 문제없는 높은 수준의 정확도를 보였다. 가시화된 다짐품질인 CMV의 경우 이전 연구의 보완 및 기존 다짐도평가 방법인 평판재하시험과의 상관성을 통해 다짐결과에 대한 신뢰성을 더욱 확보 중이다[2,5]. 이번 테스트베드 및 추가적인 현장 검증을 통해 기술 보완 및 개선 항목을 검토중이다. 현장 시험을 통해 지능형 다짐 품질관리 기술 및 단계 시스템에 대한의 기반이 확보되었음을 확인 할 수 있었다.

#### 3.2 IoT 기반 동적콘관입시험(DCPT)

기존 DCPT(Dynamic Cone Penetration Test)를 통한 다짐강도 확인시험은 ASTM에 활용법이 개제된 검증받은 시험법 이다[6]. 기존 아날로그 방식에서 나타날 수 있는 측정의 휴먼에러를 극복하고 편의성을 증대시키기 위해 자동화시스템을 구축하였다. 자동화된 IoT 기반의 DCPT 기기 검증을 위해 아날로그 방식의 DCPT 장비와 비교 시험을 자체 테스트베스에서 실시하였으며 시험에서 비교된 관입량은 다음과 같다 (Fig. 6).

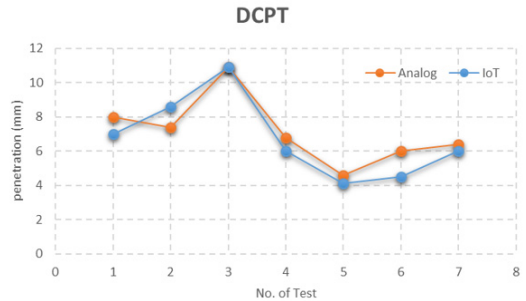


Fig. 6. Comparison of Analog and IoT DCPT Test

시험 결과에서 볼 수 있듯이, 자동화된 DCPT가 전반적으로 낮은 값을 보였으며 평균적으로 약 0.42 mm 수준의 오차를 보였다. 오차의 크기가 크지 않아, 추가적인 시험을 통한 Calibration을 거친다면 현장 적용 가능할 것으로 판단되며, 기존 아날로그 방식의 사용성이 보완되어 보다 다짐품질관리의 효율적 수행이 가능할 것으로 기대된다.

### 4. 지능형다짐품질관리

#### 4.1 지능형 다짐공 표준시방서

앞서 스마트기술로서 다짐품질을 확인하는 방법 중 하

나로 소개한 지능형 다짐은 지능형 다짐공 표준시방서 (KCS 10 70 20(2021))를 제정하므로 제도적 기반을 마련하였다. 이는 국내 최초 스마트건설에 대한 국가 기준이다. 이러한 국내 제도적 기준 마련을 위해 국외 (오스트리아, 독일, 스웨덴, 일본, 미국 등)의 지능형 다짐 관련 가이드라인을 분석하였으며, 검증 을 위한 현장 테스트를 수행하고, 기존의 평판재하시험을 비교 확인할 수 있도록 국내의 실정에 맞게 제시하고 있다.

지능형 다짐공 표준시방서는 기존의 재래식 다짐품질 평가방법의 단점을 보완하고 스마트기술을 접목한 시방 기준이다[10].

Fig. 7, 8는 현재 지능형 다짐공 표준시방서에 제시되어 있는 지능형 다짐품질 관리 절차의 이해를 돕기 위한 시공 흐름도 이고, 1단계 시험시공, 2단계 본시공으로 구분하여 설명할 수 있다.

#### 4.1.1 1단계 시험시공

시험시공은 현장에서 다짐품질관리에 대한 목표값을 결정하는 단계로 본 시공에 앞서 사전에 기존 토질시험의 다짐도를 만족하는 지능형 다짐값을 측정하여 품질관리 목표값(다짐횟수, ICMV등)을 결정하는 단계이다. 이때 기존의 다짐품질시험인 평판재하시험과 현장밀도시험을 병행하여 지능형 다짐측정 값을 검증 확인하고 본시공에 적용할 지능형 다짐의 목표값을 선정한다.

#### 4.1.2 2단계 본시공

본시공 단계에서는 시험시공에서 결정된 지능형다짐값 (다짐횟수, ICMV)인 목표값에 맞춰 다짐시공 한다. 각 목표값에 대한 다짐층의 측정값이 목표값을 만족한다면 다음 층을 성토하게 되고, 최종 다짐층 까지 측정값이 목표값을 만족하면 다짐 시공을 완료한다. 지능형다짐표준시방서에서는 Fig. 7, 8 외에 다짐도 평가에 대해 추가적으로 ① 다짐성차가 측정값 대비 105% 이상이어야 하며, ②다짐판정기준 다짐값 70% 미만 다짐경로가 전체 경로의 10% 이하의 조건을 모두 만족하도록 제안하고 있다.

지능형 다짐품질 관리기술은 토공의 장비 자동화기술을 반영하므로 실용화를 위해 자동화 장비 운영 조건과 다양한 현장 성토재료의 테스트베드 적용하여야 하며 이러한 결과를 종합한 매뉴얼 상세가 제시되어야 한다.

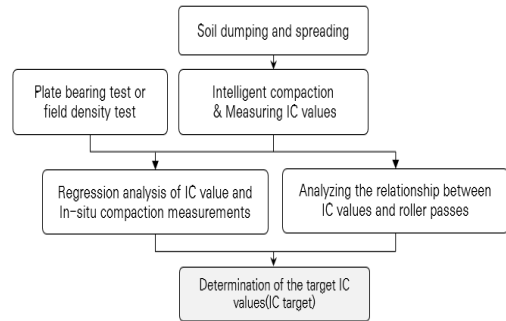


Fig. 7. Trial construction procedure

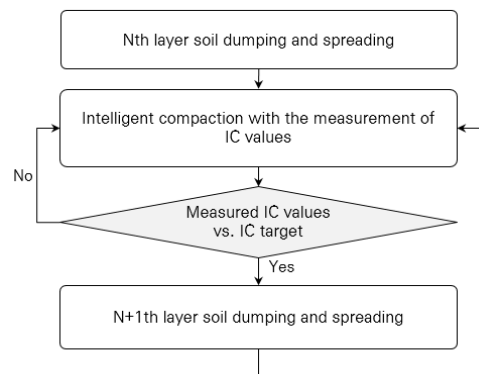


Fig. 8. Quality control procedure

현재 연구 개발 중인 매뉴얼 및 사용자 가이드라인에 세부사항을 통해 기술이 고도화 되고 있으며, 실사용 가능한 스마트 다짐품질평가 시스템으로 정의된다. 스마트 다짐품질의 핵심요소인 지능형 다짐공에 대한 매뉴얼 및 사용자 가이드라인 작성을 위해 국내·외 현장실험을 통해 수집된 ICMV와 기존 품질검사 관련 보고서를 통해 데이터 디지털화 (digitizing)하여 방대한 양의 메타데이터를 구축하고 분석 하였다. 이러한 연구는 각국의 대략 481가지 현장 조건에서 수행된 지능형 다짐 기술 현장 적용 메타데이터를 확보하여 지능형 다짐값 125,324 개 및 현장 품질시험 결과 4,713개를 분석하므로 제정된 지능형 다짐공 표준시방서의 기술적 근거 및 기술 실용화에 대한 기반이 될 것으로 기대한다.

## 4.2 스마트 기술 종합적용 다짐품질관리

기존의 다짐평가방법은 현장에서 다짐작업이 완료된 후 일정기간동안 데이터를 분석한 후에야 다짐에 대한 평가가 가능하였다. 반면, 스마트기술을 적용한 다짐공

질관리방법은 앞서 확인하였듯이 기존 평가 방법과 다르게 실시간으로 다짐의 적합 여부를 확인 할 수 있다. 또한 면적 단위의 연속적 측정을 수행하며 기존에 비해 적은 수의 일점 시험이 필요하므로, 신속한 다짐 품질에 대한 확인이 가능하다.

이러한 스마트 기술을 활용하여 다짐 품질관리를 수행하기 위해 종합적 체계 및 단계별 수행 과정이 필요하다. 따라서, 단계에 따른 수행 항목과 고려 사항에 설명하고 스마트다짐품질관리 방법을 제안하고자 한다.

먼저, 스마트기술이 적용된 종합적 다짐품질관리를 위해 제도적으로 방법이 구축된 지능형다짐의 품질평가방법을 기본으로 활용한다. 또한 앞서 소개한 두 가지 스마트 다짐평가기술들을 요소기술로 활용하여 종합적인 다짐 평가를 수행한다. Fig. 9는 스마트 다짐품질관리를 위한 단계별 처리 과정을 보여준다.

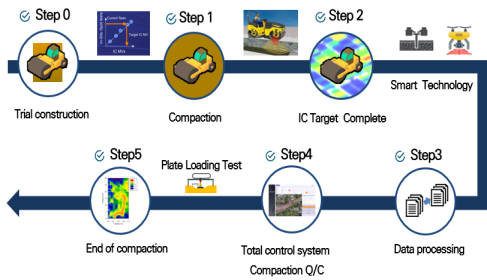


Fig. 9. Comprehensive Compaction Q/C Flowchart

#### 4.2.1 다짐품질평가 단계별 과정

본 연구에서 제안하는 단계는 지능형 다짐공 표준시방서와 다음과 같은 차이가 있다. 우선, 본 연구에서는 다짐이 요구되는 본 시공에서 다짐을 실시하는 것을 1단계로 하며, 이전에 다짐 관리의 기준이 되는 목표다짐지표(다짐횟수, CMV)을 얻기 위해 수행하는 시험시공을 0단계로 정의한다. 0단계의 시험시공은 본 시공 면적의 일부에서 실시하는 것으로 앞장에 설명한 바와 같이 지능형 다짐공 표준시방서(2021) 내용에 기술된 방법을 따른다.

시험시공 단계에서는 지능형 다짐 계측값을 기존의 평판재하시험, 현장밀도시험의 현장시험값을 함께 측정하여 기존 다짐도 기준에 상응하는 지능형 목표 다짐 값을 회귀분석으로 결정하는 단계이다. 이러한 과정을 통해 결정된 목표 다짐값은 1단계인 본시공에 활용된다.

본 시공에서는 시험시공에서 얻어진 목표 다짐값을 기준으로 다짐을 실시한다. 예를 들어 시험시공에서 목표 다짐횟수가 5회일 경우, 전 다짐면적에 대해 5회 다짐을

시행한다. 이때 다짐 작업 수행시 작업자는 운행 정보(위치, 속도 등)와 실시간, 연속적인 다짐 정보(다짐횟수, CMV)를 장비 디스플레이어를 통해 확인할 수 있고, 다짐 중 실시간 생성된 지능형 다짐 데이터를 통합운영시스템에 전송할 수 있으며 시각화하여 현장 외 장소에서도 확인할 수 있다.

지능형 다짐 표준시방서에서는 측정값이 목표값을 만족하면 다음 단계로 진행된다. 하지만, 본 연구에서는 이 과정에서 추가적인 기술들을 활용할 것을 제안한다. 다음 단계로 진행되기 전, DCPT 및 UAV드론 함수비 도출 기술과 같은 스마트 다짐품질측정 기술과 보조지표를 이용하여 데이터 처리 단계 이전에 다짐 현장 품질을 간편하게 확인하고 비교하는 과정을 추가한다면 다짐 품질관리에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

DCPT의 경우 1000m<sup>3</sup>당 3지점 이상으로 포장하부구조점검지침(2011)에 제시되어있다. 그러나 IoT기반의 DCPT의 경우 작업효율과 사용성이 높으므로 더 많은 지점에 대해서 현장상황에 맞게 조정하여 다짐평가를 수행할 수 있을 것이다. 또한 시험 결과값을 실시간 모바일 저장한 후 전 시험 지점 데이터를 통합운영 시스템 전송하므로 아날로그 방식에 비해 짧은 시간에 다짐 평가를 수행할 수 있다.

또한, 두번째 보조지표로서 다짐품질평가의 요소기술인 UAV기반 함수비 도출기술을 이용하여, 1단계 전후 드론촬영을 통해 해당하는 본 시공 다짐면적에 대해 다짐촬영을 하여 다짐 작업으로 변화하는 함수비를 드론 촬영으로 획득한다.

1단계 본 시공의 다짐작업이 완료된 후, 드론의 초분광 카메라를 통해 얻어진 촬영 이미지의 함수비 정보를 수집하여 영상보정등의 처리작업을 거쳐 최종적으로 DB의 함수비 보정식을 통해 현장 좌표가 포함된 함수비 지도인 CCM을 도출하게 되므로 최종 함수비정보는 3단계 데이터 처리단계를 포함한 통합운영시스템에서 다짐 완료 후 함수비 변화에 대한 정보를 목표 다짐완료이후의 CMV값과 비교할 수 있다.

본시공의 목표 다짐값에 대해 완료된 다짐품질정보는 각각의 기술별로 데이터 및 시각적으로 확인할 수 있는 처리과정을 거쳐 통합운영 시스템으로 전달된다. 통합운영 시스템에서는 다짐품질정보 ① 지능형 다짐 결과값(다짐횟수, CMV) ② DCPT 작업면(좌표포함)에 대한 다짐결과 ③ 함수비(좌표포함)값을 같은 위치에 대해서 다짐결과를 시각적으로 확인할 수 있다.

이러한 종합적 다짐품질 정보를 다짐 전체 다짐 구간

인 본시공 구간에 대해 목표 다짐 횡수 및 CMV를 달성했는지 여부를 확인할 수 있으며, 만약 달성하지 못한 위치에서 요소기술로 얻어진 DCPT 결과와 함수비 결과를 비교하므로 다짐 품질을 검증 할 수 있다. 이때 동일한 위치에서 다짐품질결과가 미흡한 경우로 확인된다면, 해당 위치는 다짐 취약구간으로 기존 평가방법인 평판재하시험의 작업위치로 선정하고 추가 다짐 여부를 결정한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 스마트기술의 발달에 따라 연구·개발되고 있는 스마트다짐평가기술을 원활히 건설현장에 도입하여 활용하기 위해 기존기술을 확인하고, 기존기술의 단점을 보완한 스마트 개발 기술 상세에 대해 설명 및 검증하였다. 현장검증은 지능형 다짐롤러와 IoT 기반의 DCPT장비를 활용하였으며, 두 시험 모두 다짐 품질평가를 위해 충족되어야 할 수준을 갖춘 것으로 확인되었다. 하지만, 보조 기술로 활용 될 UAV기반의 함수비 도출 기술의 경우, 현장 검증이 진행 중인 실정이다.

종합적 다짐품질평가에서는 지능형 다짐품질 평가 기술을 기본 평가 바탕으로 활용하며 목표다짐값이 정해지는 시험 시공 단계, 시험시공에서 정해진 목표다짐값을 작업 전체 다짐공에서 수행하는 본시공 단계의 차례로 수행한다. 이후 요소기술로서 스마트기술이 활용된 DCPT 및 드론을 이용한 함수비도출을 통해 보다 신뢰성 높은 평가를 가능하게 한다. 취득한 각각의 다짐평가 결과 데이터는 시각화 처리한 후 통합시스템에서 확인할 수 있으며, 이때 동일한 본시공의 다짐영역에서 지능형 다짐의 품질평가 및 요소기술의 다짐품질 평가에 대한 데이터를 비교한다. 이러한 종합적 평가 단계를 통해 다짐 취약지역을 판단하고 다짐 완료 또는 재다짐을 결정하게 되며, 필요시, 기존 평판재하시험등의 위치를 결정하여 다짐품질을 평가한다.

종합적 판단을 위해 현재 토공 자동화에 따른 지능형 다짐공 표준시방서 고도화 및 세부지침 개발 기반은 마련되어 있다. 또한 지능형 다짐공의 다짐품질기준으로서의 검증을 위해 다양한 현장 및 재료 조건의 DB가 구축되고 있고, 기존의 다짐품질시험결과와의 상관성 분석 등을 통해 다짐 측정데이터의 신뢰도를 향상시키고 있다.

그러나 기존의 방법을 완전히 대체하기 위해서는 각 스마트 다짐품질평가 기술에 대해 국내외의 사례 검증 및 실사용자 기반의 가이드라인 및 교육들이 뒷받침 되

어 할 것이다. 또한 개발된 스마트 기술이 단편적인 개별적 요소기술로가 아닌 통합플랫폼 내에 종합적 평가기술로 활용하기 위해서는 다짐품질평가의 제도의 개선과 체계 정립이 필요하다. 본 연구는 스마트 기술의 적용을 위한 체계 정립의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## References

- [1] J. W. Park, and 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, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2019.22.2.125>
- [2] J. Y. Kim, S. H. Baek, N. G. Kim, C.H. Choi, J.S. Kim and J. W. Cho, *Compaction Impact According to Compaction Roller Operating Conditions through CMV Analysis*, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.23, No.8 pp.11~16, 2022  
DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2022.23.8.11>
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Temporary Guidelines for Pavement Lower Structural*, Resolutions Management, pp.56, 2011.  
[https://www.codil.or.kr/filebank/moct2014/201208/MOCT1071\\_1.PDF?nserialno=1071](https://www.codil.or.kr/filebank/moct2014/201208/MOCT1071_1.PDF?nserialno=1071)
- [4] Adam, D. (1997), *Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Rollers*, Proceedings of GeoEnvironment 97, Melbourne, Australia, Balkema, Rotterdam, pp.245-250.  
<http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6241178>
- [5] S. H. Baek, J. Y. Kim, J. W. Cho, N. G. Kim, Y. H. Jeong and C. H. Choi, *Fundamental Study on Earthwork Quality Control Based on Intelligent Compaction Technology*, Journal of the Korean geotechnical society, vol.36, No.12, pp.56~56, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2020.36.12.45>
- [6] ASTM, D6951-03, *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement*.
- [7] D. H. Kim, and K. H. Bae, *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, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.11.488>
- [8] J. S Kim, J. Y. Kim, N.G. Kim, S. H. Baek and J. W. Cho *Evaluation of Compaction Quality Control applied the Dynamic Cone Penetrometer Test based on IoT*. Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 21, No. 4 pp. 1~12. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2022.21.4.001>
- [9] K. C. Lee, H. C. Ahn, J. J. Park, J. W. Cho, S. K. You and G. G. Hong, *A study on Reliability Analysis for*



*Prediction Technology of Water Content in the Ground using Hyperspectral Informations.* Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 20, No. 4 pp. 141~149. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2021.20.4.141>

[10] KCS 10 70 20: Intelligent Compaction Technology. 2020  
<https://www.kcsc.re.kr/StandardCode/Viewer/40965>

김 지 선(Ji Sun Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 중앙대학교 (지반공학 석사)
- 2022년 2월 : 중앙대학교 (지반공학 박사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

지반공학, 스마트건설

조 진 우(Jin-Woo Cho)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 (지반공학 석사)
- 2018년 2월 : 중앙대학교 (지반공학 박사)
- 2000년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

지반공학, 스마트건설

김 진 영(Jin-Young Kim)

[정회원]



- 2011 2월 : 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 (지반공학 석사)
- 2014년 8월 : 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 (지반공학 박사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

지반공학, 스마트건설

김 남 규(Namgyu Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 세종대학교 토목환경공학과 공학석사 (구조공학)
- 2017년 2월 : 세종대학교 건설환경공학과 공학박사 (구조공학)
- 2014년 1월 ~ 2017년 12월 : University of Central Florida, Visiting scholar

- 2017년 3월 ~ 2019년 2월 : 세종대학교 건설환경공학과 박사후연구원/선임연구원
- 2019년 3월 ~ 2019년 12월 : 세종대학교 건설환경공학과 조교수
- 2019년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구전략기획본부 전략사업실 수석연구원

<관심분야>

구조공학, 스마트건설

김 건 웅(Gunwoong Kim)

[정회원]



- 2017년 5월 : University of Texas at Austin (지반공학 석사)
- 2022년 12월 : University of Texas at Austin (지반공학 박사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

지반공학, 스마트건설