

지능형 다짐 기술 기반 토공사 다짐 품질관리 실증 연구

Field Validation of Earthwork Compaction Quality Control Based on Intelligent Compaction Technology

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 김 진 영² Kim, Jin-Young
김 지 선³ Kim, Jisun 조 진 우⁴ Cho, Jin-Woo

Abstract

This study implemented intelligent compaction technology at the construction site of the AY Highway in Gyeonggi Province, with a focus on obtaining the representative intelligent compaction value, CMV. The target CMV for quality control was established through trial construction, and the validation of the compaction quality control process based on intelligent compaction was conducted. The optimal approach for determining the target CMV was confirmed to be through linear regression of the average CMV measured within a 5-m radius from the plate load testing location. Upon assessing compaction quality against the target CMV, it was observed that the quality criteria outlined in the domestic intelligent compaction standard were met. However, the criteria outlined in Austria and the United States were not satisfied. Notably, indicators related to the variability of compaction quality did not meet the specified criteria, suggesting a stringent standard compared to the observed variability of CMV, ranging from 17% to 55%. Consequently, it is recommended to conduct additional field tests to further validate the compaction quality control process based on intelligent compaction. This will aid in confirming and enhancing the appropriateness of the regulations stipulated in each standard.

요 지

본 연구에서는 경기도 소재 AY 고속도로 토공사 현장에 지능형 다짐기술을 적용해 대표적인 지능형 다짐값인 CMV를 획득했다. 시험시공을 통해 품질관리 목표 CMV를 결정하고, 이를 이용해 본 시공 구간의 다짐품질을 관리하는 과정을 실증했다. 시험시공 결과, 평판재하시험이 수행된 위치로부터 5m 이내에서 측정된 CMV의 평균값과 지지력 계수의 선형회귀식을 통해 목표 CMV를 결정하는 것이 최적임을 확인했다. 시험시공을 통해 결정된 목표 CMV를 기반으로 본 시공 구간의 다짐품질을 확인한 결과, 국내 지능형 다짐공 표준시방서에서 제시된 품질기준은 만족했지만, 오스트리아, 미국에서 제시된 품질기준은 만족하지 못했다. 특히 다짐품질의 변동성과 관련한 지표를 대부분 만족하지 못하는 것으로 나타나, 변동계수가 17~55%에 달하는 CMV의 변동성에 비해 관련 기준이 매우 엄격하게 설정되어 있음을 확인했다. 추후 추가적인 현장시험을 통해 지능형 다짐 기반 다짐품질 관리 과정을 실증하여, 각 기준에서 제시하고 있는 규정의 적절성을 검증하고 개선해야 할 것으로 보인다.

Keywords : CMV, Earthwork, Field test, Intelligent compaction, Quality control

1 정희원, 한경국립대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil and Environmental Engrg. & Construction Engrg. Research Institute, Hankyong National Univ.)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech., Tel: +82-31-910-0780, jinucho@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

토공사(earthwork)는 도로 및 단지 건설의 초기 단계에서 흙쌓기 재료를 운반, 포설, 다짐하는 기초 공정이다. 현행 쌓기 표준시방서(KCS 11 20 20, 2023)에 따르면, 토공사의 다짐 품질관리 시 평판재하시험(KS F 2310, 2015)을 통해 얻어지는 지지력 계수 또는 흙의 밀도시험(KS F 2311, 2016)을 통해 얻어지는 다짐도를 이용한다. 다짐이 완료된 후 작업자는 현장시험(평판재하시험 혹은 흙의 밀도시험)을 수행해 지지력 계수 또는 다짐도를 측정하는데, 이 경우 불필요한 다짐롤러 대기시간이 발생되며 넓은 면적을 한 점의 측정값으로 관리하므로 전체 현장의 품질을 확인하는 것이 사실상 불가능하다(Baek et al., 2020).

상술한 문제를 개선하고자 다짐롤러에 부착된 센서(고정밀 GPS, 가속도계)로부터 얻어진 데이터를 분석해 다짐품질을 실시간-연속적으로 평가하는 지능형 다짐(Intelligent Compaction, IC) 기술이 개발되었다(Fig. 1). 지능형 다짐을 통해 토공사의 다짐품질과 관련된 데이터(다짐롤러의 위치와 속도, 다짐롤러 드럼의 진폭과 진동수, 지반강성 등)를 획득함으로써 시공 면적 전체를 관리할 수 있으며, 운전자가 다짐롤러에 탑재된 태블릿(tablet) PC에서 품질 현황을 실시간으로 파악함으로써 효율적인 다짐 작업(국부적인 다짐도 저하 및 과다짐 방지)이 가능하다. 또한 다짐이 완료된 후 수행되는 평판재하시험 및 흙의 밀도시험을 최소화함으로써 불필요한 다짐롤러 대기시간을 단축시켜 생산성을 극대화

할 수 있다.

해외 선진사들(Trimble, Topcon, Leica 등의 센서 제작사와 Caterpillar, Ammann, Dynapac 등의 건설장비 제작사)은 고정밀 GPS 및 가속도계로 구성된 센서 패키지(sensor package)를 다짐롤러에 부착해 지능형 다짐을 수행할 수 있는 상용화 솔루션을 제공하고 있다. 이에 발맞춰 오스트리아(RVS, 1999), 스웨덴(Vagverket, 2004), 미국(FHWA, 2014), 일본(국토교통성, 2020) 등의 국가 및 단체에서는 지능형 다짐기술을 통한 토공사 품질관리 기준을 제시하고 있다. 국내의 경우 국토교통 R&D “스마트건설기술개발사업(2020.04~2025.12)”에 참여하고 있는 한국건설기술연구원을 중심으로 지능형 다짐을 위한 센서 패키지 및 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 70 20, 2021)를 개발하는 등 선진 기술을 뒤쫓는 패스트 팔로어(fast follower)의 움직임을 보여주고 있다.

상술한 바와 같이 지능형 다짐은 많은 기술적 장점과 제도적 뒷받침을 받고 있음에도 불구하고, 미국 미네소타 주 TH-64 프로젝트가 지능형 다짐을 적용한 유일한 실규모 토공사 현장일 만큼 관련 기술의 실증 사례가 부족한 실정이다. TH-64 프로젝트도 지능형 다짐의 현장 실증(연구용 지능형 다짐 데이터 확보 등)에 초점을 맞추었을 뿐, 지능형 다짐 기술을 통해 다짐 품질을 관리하지는 못했다. 이는 아직까지 오랜 기간 토공사 품질관리를 위해 사용되어 온 현장 품질시험을 대체할 만큼의 트랙레코드(track-record)가 확보되지 못했고, 지능형 다짐기술 자체에 대한 전반적인 이해도 부족하기 때문으

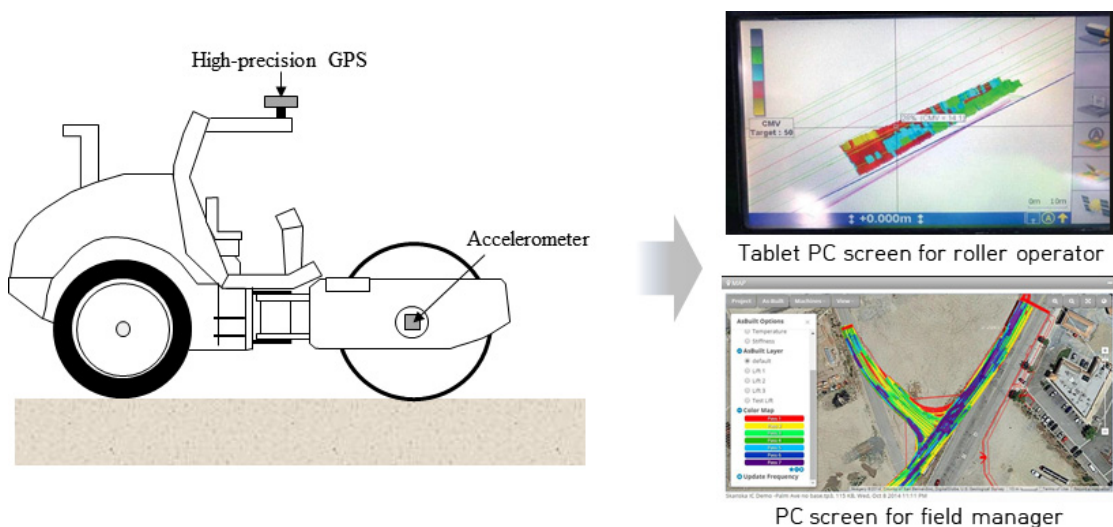


Fig. 1. Earthwork compaction quality control of using intelligent compaction technology

로 판단된다. 국내외를 걸쳐 제시되고 있는 지능형 다짐 기술을 통한 토공사 품질관리 기준도 실상을 들여다보면 선언적인 수준에 그치고 있으며, 이를 실제 현장의 토공사 품질관리에 적용한 사례는 전무하다.

본 연구에서는 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 상용화를 위한 기초과정으로, 경기도 소재 AY 고속도로 토공사 현장에 지능형 다짐기술을 적용했다. 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 70 20, 2021)를 기반으로 해당 현장의 지능형 다짐품질을 분석하였고 지능형 다짐기술의 현장 적용을 위한 이슈를 도출했다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 국내외에서 발간된 지능형 다짐 기반 토공사 품질관리 기준을 요약 및 비교했다. 3장에서는 경기도 소재 AY 고속도로 토공사 현장에서 수행된 지능형 다짐기술 현장 적용 조건을 기술했다. 4장에서는 현장 시험 데이터를 이용해 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 과정을 실증하고, 지능형 다짐기술의 현장 적용을 위한 이슈를 도출했다. 본 연구의 요약 및 결론은 5절에서 기술했다.

2. 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 기준

1990년대 초 오스트리아(RVS, 1999)에서 처음 개발된 이래로, 스웨덴(Vagverket, 2004), 미국(FHWA, 2014), 일본(국토교통성, 2020), 한국(KCS 10 20 70, 2021) 등의 국가에서 지능형 다짐 기반 토공사 품질관리 기준을 제시해 왔다. 대부분의 지능형 다짐 품질관리 기준은 기존에 다짐 품질관리를 위해 사용되던 지지력 계수와 다짐도를 대신해 지능형 다짐값(Intelligent Compaction

Measurement Value, ICMV)을 품질관리 지표로 사용한다. 여기서 지능형 다짐값이란 지능형 다짐을 통해 얻어지는 다짐도 관련 지표로, Trimble 社가 사용하는 CMV (Compaction Meter Value)가 대표적이다. 일반적으로 지능형 다짐값은 상대적인 지표(성토재료의 종류, 다짐롤러의 운용 조건 등에 영향을 받음)로 물리적인 의미를 가지는 값(지반의 강성 등)이 아니다. 따라서 지능형 다짐값을 기반으로 특정 현장의 다짐품질을 관리하기 위해서는 성토재료의 종류 및 다짐롤러의 운용조건이 공사 기간 내 최대한 일정하게 유지되어야 한다. 또한 물리적인 의미를 가지는 지지력 계수 등과의 상관관계 분석(선형회귀분석)을 통해 다짐관리 기준으로 사용될 목표 지능형 다짐값을 결정하고, 이를 바탕으로 토공사의 품질을 관리해야 한다.

Table 1과 Fig. 2는 국내외 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 기준을 요약해 나타낸 것이다. 여기서 시험시공(trial construction)이란 다짐품질 관리 기준을 결정하기 위해 소규모 영역에서 수행되는 것으로 시험시공을 통해 결정된 기준에 따라 본 시공 구간(실제 토공사 구간)의 다짐품질을 관리한다.

지능형 다짐기술과 관련한 국내외 기준에는 지능형 다짐값을 목표값으로 설정하여 토공사의 품질을 관리하는 절차가 기술되어 있다. 일점시험(평균재하시험, 현장 밀도시험 등) 위치를 찾기 위한 한정적인 목적으로 지능형 다짐값을 활용하는 Vagverket(1994)과 고정밀 GPS를 기반으로 자동 측정되는 다짐횟수를 기반으로 품질을 관리하는 일본 국토교통성(2020)을 제외하면, 모든 기준에서 공통적으로 시험시공을 통해 목표 지능형 다

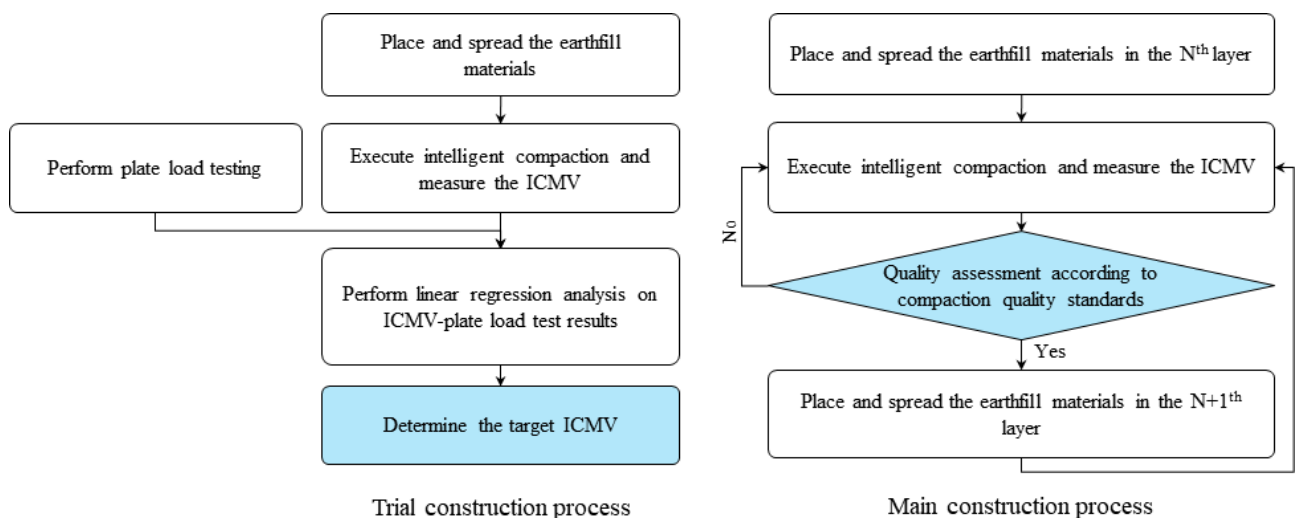


Fig. 2. Compaction quality control procedure for earthwork based on intelligent compaction measurement value (ICMV)

Table 1. Summary of national and international standards for compaction quality control using intelligent compaction technology

Reference	Trial construction	Main construction
Austria (RVS, 1999)	<ol style="list-style-type: none"> (1) Obtain a linear regression equation relating the intelligent compaction value and the modulus of subgrade reaction obtained through plate load testing (a correlation coefficient more than 0.7 is required). (2) Determine target intelligent compaction values that correspond to 105% and 95% of the target modulus of subgrade reaction in the quality control guidelines (referred to as target intelligent compaction value and the minimum intelligent compaction value, respectively). 	<ol style="list-style-type: none"> (1) The average of intelligent compaction values must be greater than the target intelligent compaction value. (2) 90% or more of the measured intelligent compaction values must be greater than the minimum intelligent compaction value. (3) The measured intelligent compaction values should be distributed between 150% of the minimum intelligent compaction value and 80% of the minimum intelligent compaction value. Additionally, the coefficient of variation should not exceed 20%.
Sweden (Vagverket, 2004)	-	<ol style="list-style-type: none"> (1) Measure the intelligent compaction values to identify vulnerable areas. (2) Perform plate load testing in the most vulnerable areas (at least 2 locations) to obtain the modulus of subgrade reaction. (3) The modulus of subgrade reaction in vulnerable areas must meet or exceed the target value specified in the quality control guidelines.
U.S.A (FHWA, 2014)	<ol style="list-style-type: none"> (1) Obtain a linear regression equation relating the intelligent compaction value and the modulus of subgrade reaction obtained through plate load testing (a correlation coefficient more than 0.7 is required). (2) Determine target intelligent compaction values that correspond to the target modulus of subgrade reaction in the quality control guidelines 	<ol style="list-style-type: none"> (1) 90% or more of the measured intelligent compaction values should exceed 90% of the target intelligent compaction value.
Japan (MLIT, 2020)	<ol style="list-style-type: none"> (1) Determine the number of roller passes that meets the target degree of compaction specified in the quality control guidelines (2) For earthfill materials that are difficult to manage based on degree of compaction, measure the surface settlement during compaction and determine the target number of passes by identifying the inflection point in the relationship between the number of roller passes and surface settlement. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) Compact to meet the target number of roller passes (using automatically measured number of roller passes based on high-precision GPS, without utilizing intelligent compaction values).
Korea (KCS 10 20 70, 2021)	<ol style="list-style-type: none"> (1) Obtain a linear regression equation relating the intelligent compaction value and the modulus of subgrade reaction obtained through plate load testing (a correlation coefficient more than 0.7 is required). (2) Determine target intelligent compaction values that correspond to the target modulus of subgrade reaction in the quality control guidelines 	<ol style="list-style-type: none"> (1) The average of intelligent compaction values must exceed 105% of the target intelligent compaction value. (2) At least 90% of the intelligent compaction values should exceed 70% of the target intelligent compaction value.

짐값을 결정하고 이 값을 바탕으로 본 시공 구간의 품질을 관리하도록 한다.

각 기준에서 제시하는 품질관리 절차는 전반적으로 유사하지만, 목표 지능형 다짐값의 결정방법 및 이를 활용한 품질관리 상세 기준은 상이하(Fig. 2의 음영 표시). 예를 들어 RVS(1999)는 품질관리 시방에 제시된 지지력 계수의 95%와 105%에 부합하는 지능형 다짐값을 기준으로 토공사 품질을 관리하지만, FHWA(2014)와 국내 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70, 2021)는 품질관리 시방에 제시된 지지력 계수의 100%에 부합하는 지능형 다짐값을 기준으로 한다. 또한 FHWA(2014)는 본 시공 영역에서 측정된 지능형 다짐값의 90% 이상

이 목표 지능형 다짐값의 90% 이상이 되도록 다짐관리를 하도록 하고, 국내 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70, 2021)는 본 시공 영역에서 측정된 지능형 다짐값의 평균이 목표 지능형 다짐값의 105% 이상이고 측정된 지능형 다짐값의 90% 이상이 목표 지능형 다짐값의 70% 이상이 되도록 규정한다. RVS(1999)는 보다 엄격한 관점에서, 본 시공 영역에서 측정된 지능형 다짐값의 평균값 뿐 아니라 최대값, 최소값, 변동성 까지 규정하고 있다.

상술한 바와 같이, 미국 미네소타 주 TH-64 프로젝트가 실규모 토공사 현장에 지능형 다짐기술을 적용한 유일한 현장일 만큼 관련 기술의 실증 사례가 매우 부족한

실정이므로, 각 기관에서 제시하고 있는 품질관리 절차의 유효성 및 신뢰성이 충분히 검증되었다고 말하기는 어렵다. 보다 다양한 현장에서 실증연구를 수행해 목표 지능형 다짐값 결정방법 및 최적화된 품질관리 상세 기준을 확립하고, 기 제안된 기준을 검증 및 보완해야 할 것으로 판단된다.

3. 현장시험 방법 및 조건

3.1 현장시험 개요

본 연구에서는 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 과정을 실증하기 위해 지능형 다짐 장치가 부착된 진동롤러를 이용해 현장시험을 수행했다. 현장시험을 위한 부지는 경기도 AY 고속도로의 노체 시공 구간에 위치하며, 시험부지 내에 길이 및 너비가 각각 30m 및 2m 인 시험시공 구간과 30m 및 15m 인 본 시공 구간을 조성했다(Fig. 3). 시험시공 및 본 시공 구간의 원지반(underlying layer) 위에 성토재료를 약 500mm 두께로 균질하게 포설한 뒤, Bomag의 BW 211D 진동롤러(총 중량 10,600kg, 드럼하중 5,670kg, 드럼 직경 1.5m, 드럼 너비 2.13m)를 이용해 수평진동(oscillation) 다짐했다. 진동롤러의 가진 주파수는 30-34Hz 이며, 최대 이동속도는 전진 및 후진 각각에 대해 11km/h와 2km/h 이다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 진동롤러 캐빈(cabin) 상단과 드럼의 축에 각각 고정밀 GPS와 가속도계를 부착하여, 다짐 중 진동롤러의 좌표와 가속도 값을 수집했다. 고정밀 GPS는 DMB 데이터 채널을 이용해 보정신

호를 전송받아 고정밀 측위를 수행하는 문화방송(MBC)의 TDR-2000을 이용했다. 가속도계는 스웨덴 Geodynamik의 상용 제품인 Compactometer를 사용해 대표적인 지능형 다짐값인 CMV(Compaction Meter Value)를 획득했다. CMV는 시간 이력에 따라 측정된 가속도 값을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 주파수 도메인(frequency domain)으로 변환한 뒤, Eq. (1)을 통해 산정된다. 본 연구에서는 이 과정을 통해 산정된 CMV 값을 동일한 시간에서 측정된 좌표값(초당 1개씩 수집됨)과 1:1 매칭하여 위치 별 다짐품질을 획득했다.

$$CMV = C \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

여기서, C 는 상수로 주로 300이 사용되며, A_0 과 A_1 은 각각 드럼에 부착된 가속도계로부터 얻은 시간 이력 가속도의 첫 번째 조화성분(즉, 진동롤러의 가진 주파수)의 진폭과 두 번째 조화성분의 진폭을 의미한다(Sandstrom and Pettersson, 2004). CMV는 진동롤러 드럼의 진동에 대한 지반 반력을 가속도계로 측정해 얻는 무차원값(dimensionless value)으로, 지반 종류에 따른 대략적인 범위(자갈은 40~70, 모래는 25~40, 실트는 20~30)가 제시되어 있다(Forsblad, 1980; Adam, 1997). 그러나 CMV는 지반의 다짐도와 상관성이 높을 뿐 물리적인 의미를 가지는 값(평판재하시험의 지지력 계수와 같이 지반의 강성을 직접적으로 측정한 값)이라 할 수 없으며, 성토재료의 종류 및 다짐롤러의 운용조건 등

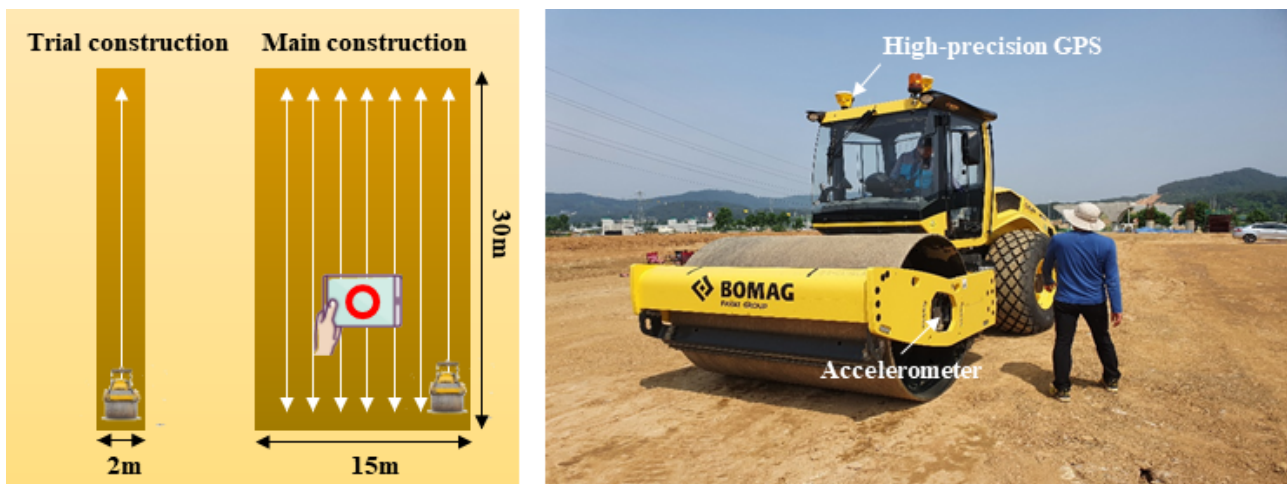


Fig. 3. Test site (left) and intelligent compaction device equipped vibratory roller used in this study (right)

에 따라 크기가 달라진다(Baek et al., 2020; Cao et al., 2021; Choi et al., 2021). 따라서 CMV를 지반의 다짐품질 지표로 사용하기 위해서는 물리적인 의미를 가지는 지지력 계수 등과의 상관관계 분석이 필요하다. 또한 현재는 성토재료의 종류 및 다짐롤러의 운용조건이 CMV에 미치는 영향을 최소화하고자 이들을 일정하게 유지하도록 규정하고 있는데(RVS, 1999; Vagverket, 2004; FHWA, 2014, KCS 10 20 70, 2021), 추후 각 영향인자에 대한 연구를 수행해 그 영향을 적절히 고려하는 방법을 개발할 필요가 있다.

3.2 현장시험 조건

Fig. 3과 같이 부지를 시험시공 및 본 시공 구간으로 구분하여 지능형 다짐을 수행했다. 다짐롤러의 진행 방향은 홀수 번째 다짐 시 전진, 짝수 번째 다짐 시 후진 이었고, 가진 주파수는 30Hz로 일정하게 유지했다. 시험시공 시 다짐롤러의 속도는 전진 시 4km/h, 후진 시 2km/h로 조절했다. 시험시공 시 다짐롤러의 속도에 따라 CMV의 크기에 차이가 있음을 확인한 후, 본 시공 시에는 전후진 모두 2km/h의 동일한 속도를 적용했다.

우선 시험시공 구간에 포설된 성토재료를 진동롤러를 이용해 10회 다짐(왕복 5회 다짐)했으며, 진동롤러에 지능형 다짐 장치(고정밀 GPS와 가속도계)를 부착해 CMV와 좌표를 획득했다. 또한 다짐횟수가 1, 3, 5, 7회 일 때 시험시공 부지의 중앙에서 평판재하시험을 수행하여, 품질관리 목표 CMV 결정에 활용했다. 본 시공 구간에 포설된 성토재료는 지능형 다짐 장치가 부착된 진동롤러를 이용해 7회 다짐했다. 여기서 다짐횟수 7회는 시험시공 시 품질관리 시방에 제시된 목표 지지력 계수를 만족한 다짐횟수 였다.

Table 2는 실험실 시험(laboratory test)으로부터 얻어진 성토재료의 기본 물성값을 나타낸다. 성토재료는 4번체 및 200번체 통과량이 각각 69.7% 및 12.1% 이며, 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 따라 SP-SM(실트를 함유한 빈입도의 모래)으로 분류되었다. Fig. 4는 수정다짐시험(ASTM D 1557-02)으로부터 얻어진 성토재료의 다짐곡선을 나타낸다. 성토

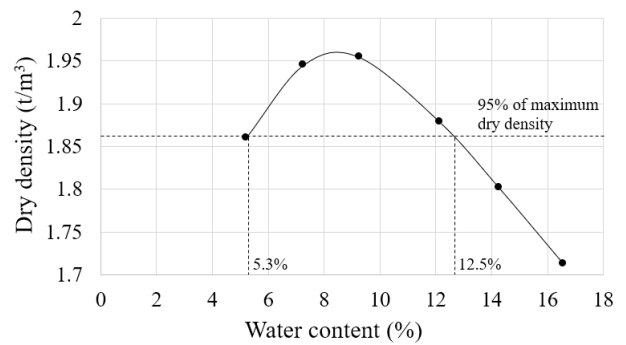


Fig. 4. Compaction curve of the earthfill material used in this study

재료의 최대 건조단위중량과 최적 함수비는 각각 1.96t/m³, 8.6% 이고, 함수비 5.3~12.5% 범위에서 최대 건조단위중량의 95%를 만족하도록 다질 수 있는 것으로 나타났다. 현장 함수비는 위치에 다소 차이가 있었지만, 모두 최적 함수비보다 낮은 건조측(dry side)에 위치했고 최대 건조단위중량의 95%를 달성할 수 있는 범위 내에 존재했다.

4. 현장시험 결과 분석 및 고찰

본 장에서는 시험시공 및 본 시공 구간에서 획득된 CMV 데이터와 평판재하시험 결과를 바탕으로 지능형 다짐 기반 토공사 다짐품질 관리 과정을 실증했다. 시험시공을 통해 목표 지능형 다짐값을 결정하고 이 값을 바탕으로 본 시공 구간의 품질을 관리하도록 하는 오스트리아의 RVS(1999), 미국의 FHWA(2014), 국내의 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70, 2021)를 적용했으며, 지능형 다짐 기술의 현장 적용 확대를 위한 이슈를 도출했다.

4.1 시험시공을 통한 품질관리 목표 CMV 결정

시험시공 구간에서는 성토재료를 지능형 다짐 장치가 부착된 진동롤러를 이용해 10회 다짐했으며, 다짐횟수가 1, 3, 5, 7회 일 때 부지의 중앙에서 평판재하시험을 수행했다. Fig. 5는 평판재하시험을 통해 얻어진 지지력 계수를 다짐횟수에 따라 나타낸 것이다. 쌓기 표준

Table 2. Index properties of the earthfill material used in this study

USCS	G_s	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	$\gamma_{d(max)}$ (t/m ³)	w_{opt} (%)
SP-SM	2.65	0.38	1.45	2.50	1.96	8.6

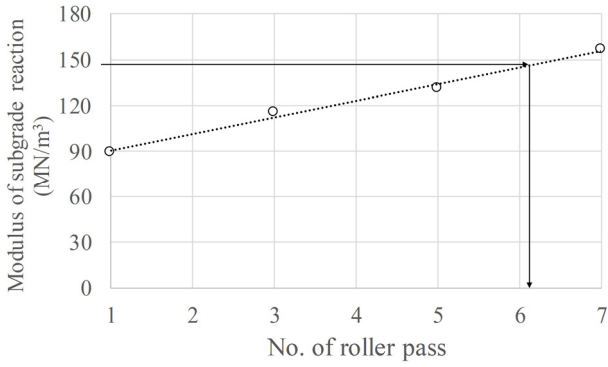


Fig. 5. Relationship between bearing capacity coefficient and compaction frequency and determination of target compaction frequency

시방서(KCS 11 20 20, 2023)가 제시하고 있는 목표 지지력 계수는 147.1 MN/m^3 이며(아스팔트 포장 노체 일반쌓기 기준), 이 값에 부합하는 다짐횟수는 약 6.2회이다. 이를 올림해 본 시공 구간에 적용할 목표 다짐횟수를 7회로 결정했다(KCS 10 20 70, 2021).

Fig. 6은 시험시공을 통해 획득한 CMV의 평균값과 변동계수(동일한 다짐횟수에서 측정된 CMV의 표준편차를 평균값으로 나눠 산정한 값을 백분율로 표시함)를 다짐횟수에 따라 나타낸 것이다. 시험시공 시 다짐롤러

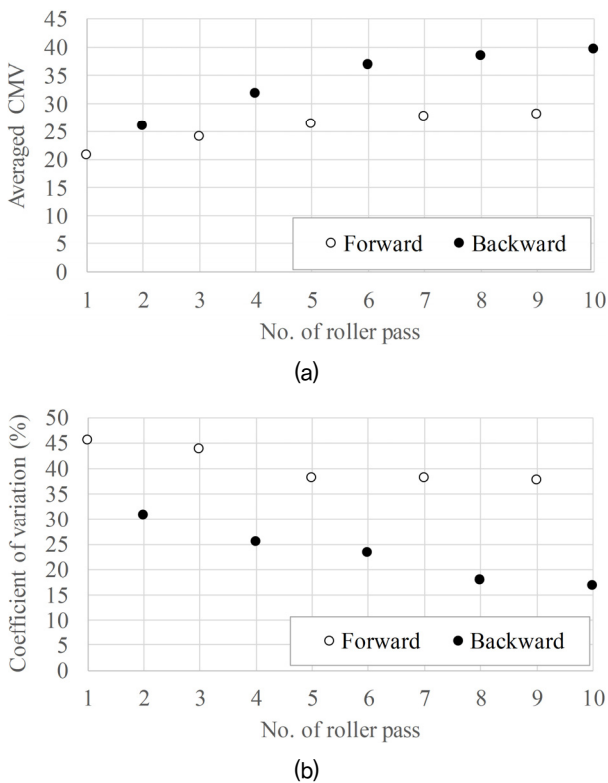


Fig. 6. (a) The averaged value and (b) coefficient of variation of CMV obtained through trial construction

는 4km/h(전진)와 2km/h(후진)의 속도로 30m를 이동했다. 따라서 전진 시 약 30개, 후진 시 약 50개 씩 획득된 CMV 데이터를 분석한 결과이다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 다짐롤러의 진행 방향에 따라 CMV의 통계량에 큰 차이가 나타났다. 다짐롤러가 전진하며 측정된 홀수 다짐횟수(1, 3, 5, 7, 9)의 CMV가 후진하며 측정된 짝수 다짐횟수(2, 4, 6, 8, 10)의 CMV에 비해 평균값은 작고 변동계수는 큰 경향을 나타냈다. 이는 다짐롤러의 진행 방향 혹은 속도에 기인한 것으로 예상된다. Forsslab(1980)와 Kim et al.(2022)은 다짐롤러의 속도가 빨라질 때 CMV가 낮아지는 현상을 보고한 바 있다. 시험시공 시 다짐롤러의 전진 속도가 약 2배 더 빨랐음을 고려할 때, CMV의 차이는 다짐롤러의 속도에 따라 나타난 현상으로 보인다. 다짐롤러의 진행 방향이 CMV에 미치는 영향은 전후진의 속도가 달랐던 시험시공을 통해서서는 확인할 수 없었고, 전후진 시 동일한 속도(2km/h)가 적용된 본 시공을 통해 확인했다.

동일한 진행 방향에서 측정된 CMV의 평균값과 변동계수는 다짐횟수가 증가할수록 각각 증가 및 감소하는 것으로 나타났다. 다짐횟수가 증가할수록 지반의 평균적인 강성이 증가하고 위치별 변동성이 감소하여 다짐품질이 향상되는 것이다. 다만, 다짐횟수가 증가해 다짐품질이 향상됨에도 불구하고 변동계수가 17~45%의 범위에 있다는 사실은 지반의 내재적인 불균질성 및 국부적인 환경 조건의 변화 등에 따른 다짐품질의 변동성이 매우 크다는 점을 시사한다. 이는 Iowa State University의 D.J. White 교수가 미국의 미네소타 주에서 수행한 현장 실증시험에서도 공통적으로 지적하고 있는 사항이다(White et al., 2007). 다짐품질의 변동성은 넓은 현장을 한 점에서 측정된 지지력 계수 또는 다짐도로 관리하는 현행 기준에서는 고려하지 않았던 사항으로, 지능형 다짐 기술의 도입에 따라 다짐품질의 변동성이 기록된다면 시공자와 공사감독자 간 상당한 다툼(argue)의 여지가 있을 것으로 예상된다. 따라서 보다 많은 현장 적용 데이터를 확보한 뒤 이를 통계적으로 분석해 허용할만한(acceptable) 변동계수의 범위를 결정하거나 혹은 지능형 다짐값의 분포 특성을 고려해 효과적으로 이상치(outlier)를 제거하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

지능형 다짐값 기반 다짐품질 관리 기준(RVS, 1999; FHWA, 2014; KCS 10 20 70, 2021)에서는 지능형 다짐

값과 평판재하시험을 통해 얻어진 지지력 계수의 선형 회귀식을 이용해 다짐품질 관리에 사용할 목표 지능형 다짐값(목표 CMV)를 결정하도록 명시하고 있다. 그러나 선형회귀식의 획득 및 목표 지능형 다짐값 결정 과정은 상세히 기술되어 있지 않다. 지능형 다짐값은 연속적으로 획득되는 값(본 시험시공에서는 전진 시 약 30개, 후진 시 약 50개 씩 얻어짐)이며, 지지력 계수는 평판재하시험이 수행된 한 점에서 획득되는 값이다. 따라서 선형회귀식을 결정하기 위해서는 분석에 사용할 지능형 다짐값을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 지지력 계수가 측정된 위치(즉, 평판재하시험 위치)로부터의 직선 거리를 window size (x)로 정의하고(Fig. 7 참조), window size를 변화시켜 가며 범위 내에서 측정된 CMV의 평균값과 지지력 계수의 상관성을 분석했다.

Fig. 8은 window size에 따른 피어슨 상관계수(지지력 계수와 window 내에서 측정된 CMV 평균값의 선형회귀모델 상관계수)를 나타낸다. 선형회귀모델의 상관계수는 window size가 증가함에 따라 점차 증가하다가 5m를 기준으로 감소하여 전체 데이터를 사용한 선형회귀모델의 상관계수에 수렴하는 경향이 나타났다. 이는 너무 작은 window size는 CMV의 국부적 변동성에 과도한 영향을 받고 너무 큰 window size는 대표성의 문제가 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 본 시험 결과로부터 선형회귀식 결정을 위한 최적 window size는 5m로 결정되었다. 다만 최적 window size는 지능형 다짐 수행 조건(현장, 지반, 장비 등)에 따라 달라질 수 있으

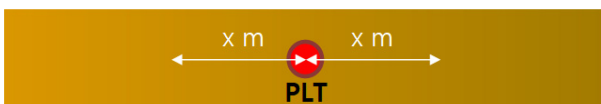


Fig. 7. Definition of window size (x) for linear regression analysis

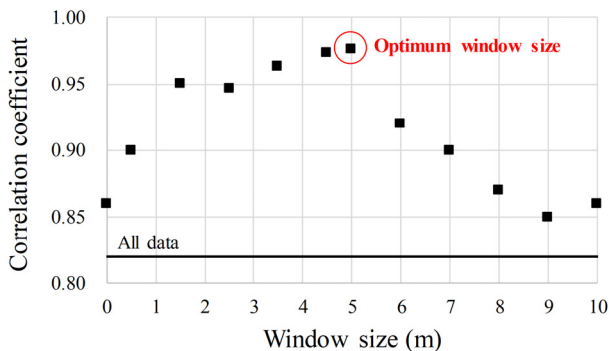


Fig. 8. Linear regression model pearson correlation coefficient of the modulus of subgrade reaction and averaged CMV value according to window size

므로, 보편적(universal)으로 적용 가능한 window size는 추후 보다 많은 현장 적용 데이터를 분석해 확정해야 할 것으로 보인다.

Fig. 9는 window size를 5m로 적용했을 때 CMV(즉, 평판재하시험이 수행된 위치로부터 5m 이내에서 측정된 CMV)의 평균값과 지지력 계수의 선형회귀식을 나타낸다. 선형회귀식의 결정계수는 0.96으로 국내외 지능형 다짐 관리 기준에서 선형회귀모델의 유효성을 규정하는 0.70 보다 컸다. RVS(1999)는 품질관리 시방에 제시된 지지력 계수의 95%와 105%에 부합하는 지능형 다짐값을 기준으로, FHWA(2014)와 KCS 10 20 70(2021)은 품질관리 시방에 제시된 지지력 계수의 100%에 부합하는 지능형 다짐값을 기준으로 다짐품질을 관리한다. 쌓기 표준시방서(KCS 11 20 20, 2023)가 제시하고 있는 목표 지지력 계수(147.1MN/m³)의 95%, 100%, 105%에 부합하는 CMV를 선형회귀식을 이용해 산정하면, 각각 26.4, 27.2, 28.0 이다. 즉, 본 시공 구간의 다짐품질 관리를 위해서, RVS(1999)는 CMV 26.4(최소 CMV)와 28.0(목표 CMV)를 이용하고 FHWA(2014)와 KCS 10 20 70(2021)은 CMV 27.2(목표 CMV)를 이용한다(Table 1 참조).

4.2 본 시공을 통한 CMV 기반 다짐품질 관리

본 시공 구간의 성토재료를 진동롤러를 이용해 7회(시험시공을 통해 결정된 목표 다짐횟수) 다짐하며 CMV를 측정했다. Fig. 10은 본 시공을 통해 획득한 CMV의 평균값과 변동계수를 나타낸다. 다짐롤러가 약 2.0km/h의 속도로 15m × 30m 부지를 다짐하며 CMV를 측정했으므로, 각 다짐횟수 별로 약 350~400개 씩 얻어진 CMV

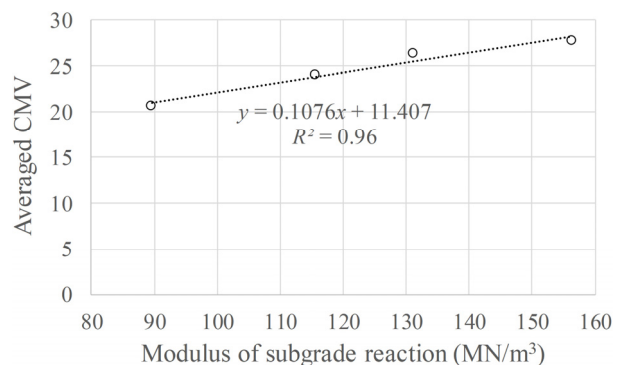


Fig. 9. Linear regression model of averaged CMV and the modulus of subgrade reaction with optimal window size of 5m applied

데이터를 분석한 결과이다.

CMV의 평균값과 변동계수는 다짐횟수가 증가할수록 각각 증가 및 감소하여, 다짐품질이 향상되었다. 시험시공과 마찬가지로 다짐품질이 향상됨에도 불구하고 CMV의 변동계수는 35~55%로 상당히 높은 수준을 보였는데, CMV의 변동성과 이상치 고려 방법에 대한 연구가 필요함을 다시 한번 확인할 수 있었다. 반면, 다짐롤러의 진행 방향에 따라 CMV의 통계량에 큰 차이가 나타났던 시험시공과 달리, 본 시공에서는 다짐롤러의 진행 방향에 따른 유의미한 차이를 확인할 수 없었다.

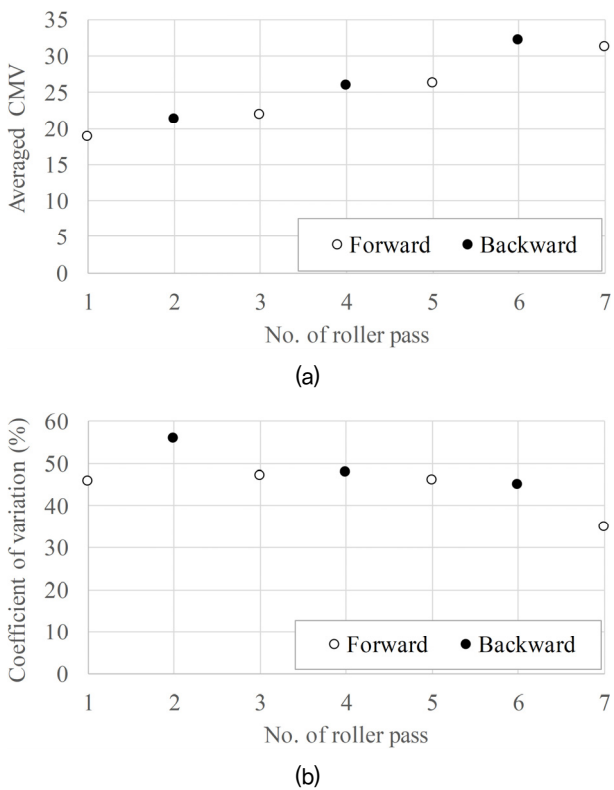


Fig. 10. (a) The averaged value and (b) coefficient of variation of CMV obtained through main construction

본 시공 시 다짐롤러의 속도가 진행 방향에 관계없이 약 2km/h로 일정했음을 고려할 때, CMV 값은 다짐롤러의 속도가 빨라질수록 작아지지만 진행 방향에는 무관한 것으로 판단된다.

Table 1에 나타나 있듯이, RVS(1999)는 ① CMV의 평균값이 목표 CMV(여기서는, 28.0) 보다 크고, ② CMV의 90% 이상이 최소 CMV(여기서는, 26.4) 보다 크고, ③ 모든 CMV가 최소 CMV의 150%(여기서는, 39.6)와 80%(여기서는 21.1) 사이에 위치하고, ④ CMV의 변동계수가 20%를 넘지 않도록 다짐품질을 관리한다. FHWA(2014)는 CMV의 90% 이상이 목표 CMV의 90%(여기서는, 24.5)가 넘도록 규정하고 있으며, 국내 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70, 2021)는 ① CMV의 평균값이 목표 CMV의 105%(여기서는, 28.6) 보다 크고, ② CMV의 90% 이상이 목표 CMV의 70%(여기서는, 19.0)가 넘도록 규정하고 있다. 지능형 다짐 기술을 통해 본 시공 구간의 다짐품질을 관리하려면, 본 시공 구간에서 측정된 CMV가 상술한 규정을 만족해야 한다.

Table 3은 본 시공 시 측정된 CMV와 RVS(1999), FHWA(2014), KCS 10 20 70(2021)에서 제시하고 있는 품질관리 기준을 비교한 결과이다. 다짐횟수가 증가함에 따라 CMV의 평균값, 최대값, 최소값, 특정한 값(최소 CMV, 목표 CMV의 90% 및 70%)을 넘는 비율이 모두 증가하고, 변동계수는 작아졌다. 즉, Fig. 10과 마찬가지로, 다짐횟수가 시험시공을 통해 얻어진 목표 다짐횟수 7회에 가까워질수록 다짐도가 커지고 변동성이 낮아져 다짐품질이 개선되었다.

목표 다짐횟수 7회를 기준으로, 본 시공 구간의 CMV는 국내 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70 : 2021)에서 제시된 품질기준은 모두 만족했지만, RVS(1999)와 FHWA(2014)에서 제시하는 품질기준은 만족

Table 3. Comparison of measured CMV and intelligent compaction quality control standards in the main construction

Reference	Index	Reference value	The number of roller passes			
			1	3	5	7
RVS (1999)	Averaged CMV	28.0	18.9	23.9	27.2	31.2
	A ratio of CMV lower than the minimum CMV (%)	90.0	46.3	43.2	54.1	65.7
	Maximum CMV	39.6	49.0	55.0	57.0	60.0
	Minimum CMV	21.1	1.0	3.0	3.0	6.0
	Coefficient of variation (%)	20.0	45.7	47.1	46.1	34.8
FHWA (2014)	A ratio of CMV lower than 0.9 times the target CMV (%)	90.0	58.4	57.4	66.4	79.5
KCS 10 20 70 (2021)	Averaged CMV	28.6	18.9	23.9	27.2	31.2
	A ratio of CMV lower than 0.7 times the target CMV (%)	90.0	72.5	70.4	77.2	91.8

하지 못했다. 지표 별로 살펴보면, 다짐 구간의 평균적인 다짐품질을 나타내는 지표인 평균 CMV와 관련된 기준은 모두 만족했다. 그러나 CMV가 특정한 하한값 이상인 비율을 나타내는 지표는 비교적 느슨한 하한값(목표 CMV의 70%)을 이용하는 KCS 10 20 70(2021)을 제외하고는 만족하지 못했다. 또한 다짐 품질의 변동성(혹은 균질성)과 관련된 지표인 최대 CMV, 최소 CMV, 변동계수도 만족하지 못했다. 이는 CMV의 변동성(즉, 다짐품질의 변동성)에 비하여, 관련 기준이 매우 엄격하게 설정되어 있음을 시사한다.

본 연구를 제외하면 지능형 다짐 기반 품질관리 기준을 실증한 연구를 찾아볼 수 없으므로, 상술한 결과만을 이용해 각 기준에서 제시하고 있는 규정의 적절성을 확인하기는 어렵다. 그러나 한 가지 명확한 사실은 CMV와 같이 변동성이 큰 지능형 다짐값을 기반으로 다짐품질을 관리하기 위해서는, 지능형 다짐에 대한 명확한 이해와 실증 데이터를 바탕으로 다짐품질의 변동성을 적절히 고려하기 위한 연구가 필요하다는 것이다. 추후 추가적인 현장시험을 수행한 뒤 본 연구와 유사한 과정을 통해 지능형 다짐 기반 다짐품질 관리 과정을 실증하여, 각 기준의 적절성을 검증하고 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 기 제안된 기준은 철저하게 기술 공급자(연구자 혹은 개발자)를 중심으로 기술되어 있어, 기준만 주어진 상태에서 기술 수요자가 지능형 다짐을 통해 다짐품질을 관리하는 것이 사실상 어렵다. 지능형 다짐 기술의 구현은 기존의 현장시험 기반 품질관리 방법에 비해 복잡하고 까다로운 측면이 있으므로, 이같은 기술 공급자 중심의 기준은 현장에 독이 되거나 불필요한 비용만 유발할 가능성이 높을 것으로 보인다. 향후 현장의 현실적 상황을 고려해 기준을 상세히 기술하고(혹은 기준 관련 해설서를 개발하고) 기술 수요자 맞춤형 교육 프로그램을 개발하는 등, 기술의 확산을 위한 전방위적 노력이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지능형 다짐기술 기반 토공사 품질관리 상용화를 위한 기초과정으로, 경기도 소재 AY 고속도로 토공사 현장에 지능형 다짐기술을 적용했다. 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 70 20, 2021)를 기반으로 해당 현장의 지능형 다짐품질을 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다짐횟수가 증가할수록 CMV의 평균값과 변동계수가 각각 증가 및 감소(즉, 지반의 평균적인 강성이 증가하고 위치별 변동성이 감소)하여 다짐품질이 향상되었다. CMV는 다짐롤러의 속도가 빨라질수록 작아지는 경향을 보였는데, 이는 CMV 기반의 다짐품질 관리 시 다짐롤러의 속도를 일정하게 유지해야 함을 의미한다.
- (2) 동일한 조건에서 측정된 CMV의 변동계수는 17~55%로 매우 컸다. 이는 지반의 내재적인 불균질성 및 국부적인 환경 조건의 변화에 기인한 것으로 보인다. 다짐품질의 변동성은 넓은 현장을 한 점에서 측정된 품질정보를 이용해 관리하는 현행 기준에서는 고려하지 않았던 사항이다. 지능형 다짐 기술의 도입에 따라 다짐품질의 변동성이 기록된다면 수급인과 공사감독자 간 상당한 다툼의 여지가 있을 것으로 예상된다. 따라서 보다 많은 현장 적용 데이터를 통계적으로 분석해 허용할만한 변동계수의 범위를 결정하거나 혹은 지능형 다짐값의 분포 특성을 고려해 효과적으로 이상치를 제거하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 지능형 다짐값과 지지력 계수의 선형회귀분석을 위한 최적 window size는 5m로 나타나, 평판재하시험이 수행된 위치로부터 5m 이내에서 측정된 CMV의 평균값과 지지력 계수의 선형회귀식을 통해 목표 CMV를 결정하는 것이 적절할 것으로 보인다. 다만 최적 window size는 지능형 다짐 수행 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 보편적으로 적용 가능한 window size 결정을 위한 현장 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 시험시공을 통해 얻어진 목표 CMV를 기반으로 다짐품질을 확인한 결과, 국내 지능형 다짐공 표준시방서(KCS 10 20 70 : 2021)에서 제시된 품질기준은 만족했지만 오스트리아(RVS 8S.02.6, 1999), 미국(FHWA, 2014)에서 제시하는 품질기준은 만족하지 못했다. 특히 CMV의 변동성과 관련한 지표를 대부분 만족하지 못했는데, 이는 다짐품질의 변동성에 비하여 관련 기준이 매우 엄격하게 설정되어 있음을 시사한다.

상술한 결과는 지능형 다짐기술 기반 다짐품질 관리를 위한 기초 자료로써, 국내외에서 제시된 지능형 다짐 기반 품질관리 기준을 최초로 실증한 연구라는데 그 의

의가 있다. 다만, 본 연구는 단일 현장에서 도출된 결과이므로 상술한 결과만을 이용해 각 기준에서 제시하고 있는 규정의 적절성을 확인하기는 어렵다. 추후 추가적인 현장시험을 수행한 뒤 본 연구와 유사한 과정을 통해 지능형 다짐 기반 다짐품질 관리 과정을 실증하여, 각 기준의 적절성을 검증하고 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌 (References)

- Adam, D. (1997), Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Rollers, Proceedings of GeoEnvironment 97, Melbourne, Australia, Balkema, Rotterdam, pp.245-250.
- ASTM D1557-02 (2009), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
- Baek, S.H., Kim, J.Y., Cho, J.W., Kim, N., Jeong, Y.H., and Choi, C. (2020), Fundamental Study on Earthwork Quality Control Based on Intelligent Compaction Technology, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.12, pp.45-56.
- Cao, L., Zhou, J., Li, T., Chen, F., and Dong, Z. (2021), Influence of Roller-related Factors on Compaction Meter Value and its Prediction Utilizing Artificial Neural Network, *Construction and Building Materials*, 268, 121078.
- Choi, C., Jeong, Y.H., Baek, S.H., Kim, J.Y., Kim, N., and Cho, J.W. (2021), A Study for Deriving Target CMV (Compaction Meter Value) of Intelligent Compaction Earthwork Quality Control, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.9, pp.25-36.
- FHWA (2014), Intelligent Compaction Technology for Soils Applications, <https://www.intelligentconstruction.com/resources/ic-specifications>
- Forsssblad, L. (1980), Compaction Meter on Vibrating Rollers for Improved Compaction Control, *Proceedings of International Conference on Compaction*, Vol. II, Assoc. Amicale de Ingenieurs, Paris, France, pp.541-546.
- Kim, J.Y., Baek, S.H., Kim, N., Choi, C., Kim, J., and Cho, J. (2022), Evaluation of 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.
- KS F 2311 (2016), Standard test method for density of soil in place by the sand cone method.
- KS F 2310 (2015), Standard test method for plate load test of road construction.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2023), Korean Construction Specification for Earthworks (KCS 11 20 20 : 2023).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), Korean Construction Specification for Intelligent Compaction (KCS 10 70 20 : 2016).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2020), Management Guidelines for Embankment Compaction using TS/GNSS.
- RVS (1999), Continuous compactor integrated compaction - proof (proof of compaction), Technical contract stipulations RVS 8S.02.6 - Earthworks. Vienna: Federal Ministry for Economic Affairs.
- Sandstrom, A. and Pettersson, C. (2004), Intelligent Systems for QA/QC in Soil Compaction, Proceedings of Annual Transportation Research Board Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., CD- ROM.
- Vagverket (Swedish Road Administration) (1994), Road 94: General Technical Construction Specification for Roads, Road and Traffic Division, Stockholm, Sweden, Publication 1994: 25(E).
- White, D., Vennapusa, P., and Thompson, M. (2007), Field validation of intelligent compaction monitoring technology for unbound materials, Final Report, Minnesota Department of Transportation, Maplewood, Minnesota.

Received : November 2nd, 2023

Revised : November 9th, 2023

Accepted : November 13th, 2023