

# 새로운 다짐도 평가기법의 적용성에 관한 연구

## Application of the New Degree of Compaction Evaluation Method

박 근 보<sup>1</sup> Park, Keun-Bo

김 주 형<sup>2</sup> Kim, Ju-Hyong

### Abstract

CMV(Compaction Meter Value) obtained from compaction results using an accelerometer, which measures the impact on the ground and the resilient force of the ground, is compared with the other degree of compaction through regression analysis. As a result, there is no correlation between results from conventional test methods (e.g., the plate load test and field density test) and the degree of compaction evaluated by either the Geogauge or the dynamic cone penetrometer. To assess the possibility of replacing the conventional test methods with new test methods using CMV, several degrees of compaction tests were carried out. Those results show that the CMV obtained from compaction results using an accelerometer can be used as a substitute for conventional methods to evaluate the stiffness characteristics of compacted soil.

### 요 지

현장 다짐기에 가속도계를 이용한 연속다짐 평가장치를 부착하여 얻은 지반의 지지력 평가값 및 기존의 다짐도 평가장치의 결과 값들을 회귀분석하여 비교하였다. 회귀분석 평가 결과, 특정 성토재료에서 Geogauge와 동적콘관입시험은 기존 다짐도 평가(평판재하시험 및 다짐도시험) 결과와의 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 CMV를 이용한 평가법이 기존 다짐도 평가를 대체할 수 있는지를 알아보기 위하여 여러 가지 다짐도 평가를 실시하였다. 그 결과 가속도계를 이용한 CMV는 다져진 지반의 강성 특성을 빠르고 편리하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** CMV, Compaction, Degree of compaction, Dynamic cone penetration, Field density test, Geogauge, Plate load, Regression analysis

### 1. 서 론

산업화에 따른 각종 기술의 발달과 더불어 활발한 토목 건설물 축조에 따른 공법의 개발, 개선 및 건설장비의 개발도 급속하게 진행되어 왔다. 국내의 경우, 다짐 평가관리는 시간과 노력이 많이 드는 평판 재하시험(KS F 2310; 한국산업표준, 2000)이나 현장에서 모래를 치환하는 흙의 밀도 시험방법(KS F 2311; 한국산업표

준, 2001), 실내 흙의 다짐 시험방법(KS F2312; 한국산업표준, 2001) 등을 이용한 일점시험(spot test)으로 전체의 다짐을 관리하고 있어 현재의 시험관리 방법으로는 전체 부지의 다짐도를 정확히 판단할 수 없으며 현장시험과 실내시험의 차이로 다짐도 평가의 개념적인 차이가 존재한다. 외국의 경우, 1986년 미국 AASHTO에서 기존의 강성 개념의 포장 하부구조 설계법 대신, 하부구조 재료의 역학적 특성인 회복탄성계수(resilient modulus

1 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 (Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 (Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, KICT, haitink@kict.re.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이하  $M_R$ )를 이용한 도로포장설계법을 발표하면서 많은 학계 및 업계 연구진들 역시 탄성계수를 포장 하부구조 설계 및 관리에 이용하고자 많은 연구들이 실시되었다. 특히 평판 재하시험을 대체할 수 있는 Geogauge, 소형충격재하시험(Light Falling Weight Deflectometer, LFWD), DCP(Dynamic Cone Penetrometer)를 이용한 연구들이 (De Beer, 1990; FHWA, 2002; Khalid et al, 2005) 많이 진행되고 있으나 이 시험법 역시 일점시험으로 전체 다짐을 관리하기에는 부족하다.

최근 유럽, 미국과 일본의 건설 시장에서 사용하는 새로운 기술인 연속다짐평가(Intelligent Continuous Compaction Control) 또는 연속다짐(Intelligent Compaction) 기술은 실시간으로 흙의 다짐을 제어하는 기술로 다짐공정과 다짐 평가를 분리하여 진행하던 공정을 다짐 진행과 동시에 다짐평가를 연속적으로 수행할 수 있는 다짐 방법이다. 외국의 경우, 오스트리아, 스웨덴, 미국, 일본 그리고 독일 등의 선진국에서는 이미 많은 다짐장비 제작회사들이 연속다짐평가 기기가 부착된 장비를 판매하고 있으며 일부 국가에서는 시방기준까지 제안되어 있다. 그러나 국내의 경우 연속다짐평가에 관한 연구는 2000년도 한국도로공사 도로연구소(조성민과 정경자, 2000)에서 수행된 적이 있을 뿐 외국에 비해 아직 초기단계에 있다.

본 연구에서는 여러 가지 시험조건으로 실제 현장규모로 다짐을 수행하여 가속도계를 이용한 연속다짐평가 방법에 대한 가능성을 살펴보았다. 또한 평판재하시험(PLT), 현장들밀도시험, 소형충격재하시험(LFWD), Geogauge 및 DCP를 이용하여 다짐도를 평가하고 비교, 분석하였다. 특히 가속도계를 이용한 연속다짐 평가가 기존 다짐도 평가를 대체할 수 있는지를 분석하기 위하여 기존의 다짐도 평가 장치를 이용한 지지력계수와 가속도계를 이용한 연속다짐평가 결과를 비교하였다.

## 2. 가속도계를 이용한 다짐도 평가 방법

연속다짐시 지반의 강성도 측정방법은 진동로울러에 가해지는 진동과 진동으로 인한 반발력의 관계를 이용하며 이때 진동로울러 드럼과 지반에 작용하는 힘의 평형도는 그림 1과 같다. 여기에는 편심하중(eccentric mass)의 회전으로 인해 작용하는 원심력( $F_c$ )과 진동드럼 자체 하중( $F_D$ ) 그리고 진동으로 인해 유발되는 지반의 반발력( $F_R$ )으로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다

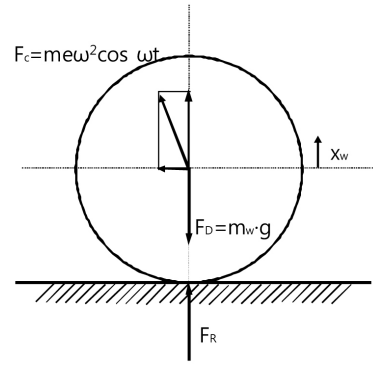


그림 1. 진동로울러의 힘의 평형

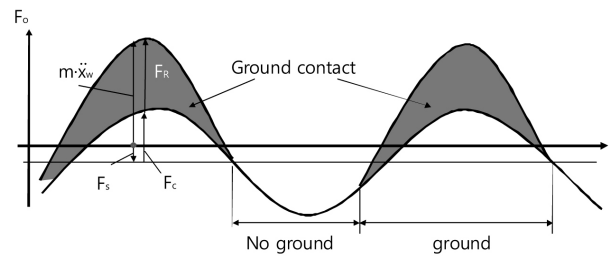


그림 2. 진동 주기에 따른 힘과 지반반력

음과 같으며, 로울러의 진동으로 인해 발생하는 진폭은 측정된 가속도를 두 번 적분함으로써 구할 수 있다.

$$m_w \cdot \ddot{x}_w = m \cdot e \cdot \omega^2 \cos \omega t - (m_w + m_f) \cdot g - F_R \quad (1)$$

여기서,  $m_w$  : 로울러 드럼의 자중,

$\ddot{x}_w$  : 드럼의 가속도,  $m$  : 편심체 하중,

$e$  : 편심,  $\omega$  : 편심체 각속도,  $t$  : 시간,

$m_f$  : 로울러 프레임의 자중,

$g$  : 중력가속도,  $x_w$  : 변위

또한, 그림 2는 진동에 따라 발생하는 힘과 이에 따라 발생하는 지반의 반발력을 나타낸 것이다. 만약 로울러가 지반에 가하는 진동이 일정하고, 로울러의 주행 횟수가 많을수록 지반은 단단해지며 지반의 반발력은 증가할 것이다. 로울러의 진동은 일정한 주파수를 가지게 되는데 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하면 지반에서 발생하는 반발력의 크기를 측정할 수 있다. 즉, 그림 1과 그림 2에 나타낸 진동로울러의 진동주기에 따른 힘과 지반반력은 지반의 강성에 따라 그림 3에 나타낸 것과 같은 다양한 형태로 나타나며, 여기서 얻어진 진동 가속도 값에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용하면 그림 4와 같은 주파수 파워스펙트럼을 구할 수 있다. 즉, 지반의 강성은 응력의 변화량과 지반의 침하량

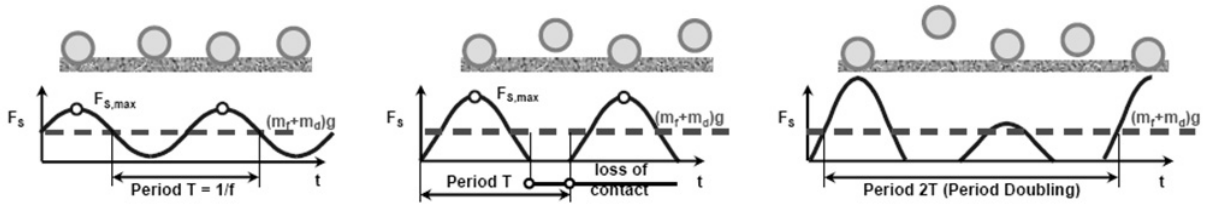


그림 3. 지반강성에 따른 지반 반력의 변화 양상(AMMANN, 2008)

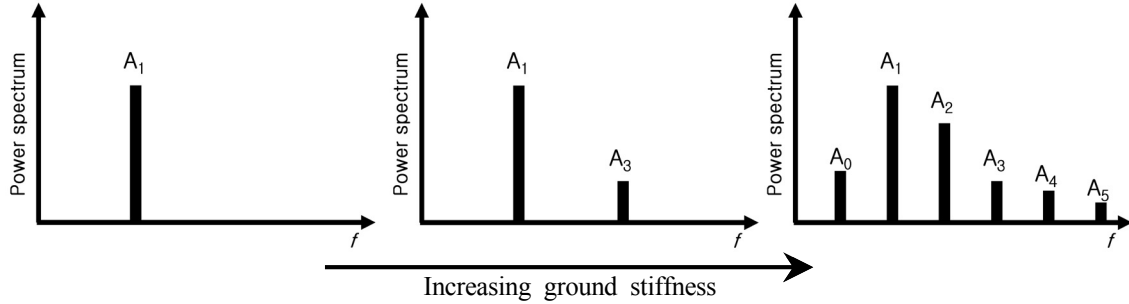


그림 4. 지반강성 증가에 따른 주파수 파워스펙트럼(George 등, 2009)

에 의해 결정이 되는데 응력의 변화량은 가속도계에서 측정되는 수직가속도에 비례하기 때문에 진동로울러에 가속도계를 장착하여 각 진동원의 가속도를 측정하므로써 지반의 강성도를 간접적으로 측정하는 원리이다.

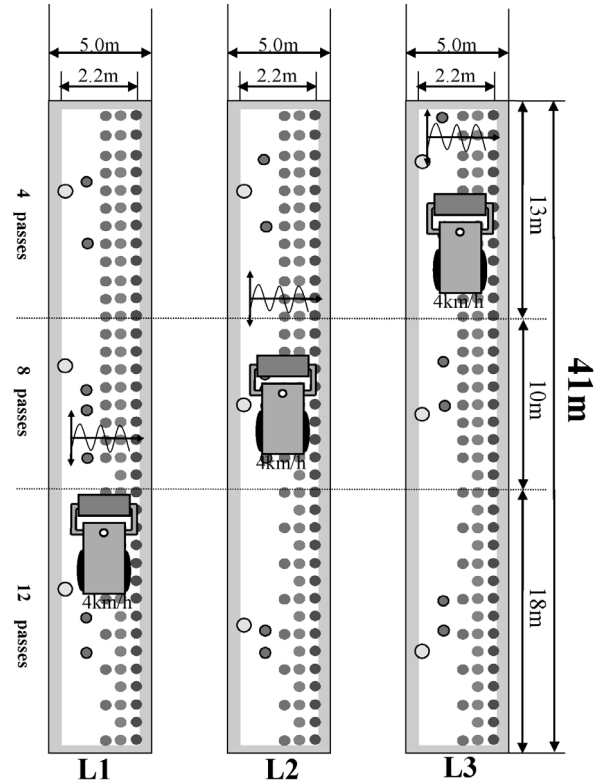
이러한 다짐도 평가를 CMV(Compaction Meter Value) 하고 다음의 식 (2)와 같다(Sandström과 Pettersson, 2004).

$$CMV = C \cdot \frac{A_3}{A_1} \quad (2)$$

여기서, C = 상수(지반과 관련 있는 상수로 300으로 주로 사용됨; Mooney and Adam, 2007); A<sub>1</sub> = 첫 번째 조화성분의 가속도 크기; 그리고 A<sub>3</sub> = 기본주파수 성분의 가속도 크기. CMV는 로울러의 치수(즉, 드럼 폭과 무게 등)에 의존하는 무차원값이며 로울러 작동시 매개 변수(즉, 주파수, 진폭, 속도 등)에 의존한다.

### 3. 현장 시험 조건 및 방법

경기도에 위치한 OO 공사 현장에서 수행한 현장시험은 실제 현장규모로 수행하여 가속도계를 이용한 다짐도 평가 가능성을 평가하였다. 현장시험은 그림 5와 같이 5×41m의 직사각형 부지로 성토재료의 최대입자크기를 달리하여 표 1의 시험조건으로 시험을 실시하였고 성토재료의 입도분포곡선은 그림 6과 같다. 그림 5에 나타난 바와 같이 L1과 L2 레인은 자갈이 포함된 성토재료(GP)를 사용하였고, L3은 No. 4체로 자갈을 제거한



○ : 평판재하시험   ● : 현장들밀도시험  
● : LFWD   ● : geogauge   ● : DCP

그림 5. 현장시험 시험조건

성토재료(SM)를 사용하여 현장 다짐을 수행한 경우이다.

현장시험에 사용된 다짐로울러는 다짐 폭이 약 2.2m 이고 진동횟수는 23~28Hz까지 조절이 가능한 제품으로 총 중량은 약 10ton이며 0~10km/h의 속도로 이동이

표 1. 현장시험 시험조건

성토여부	다짐횟수	다짐속도
성토	4, 8, 12회	4km/h

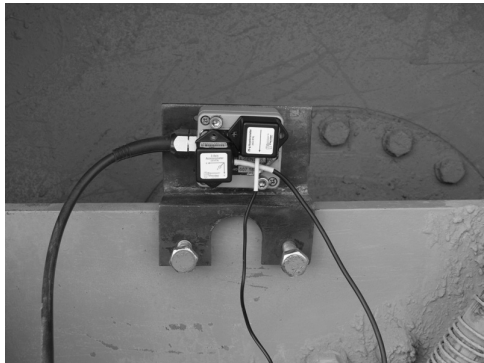


그림 6. 가속도계 부착 모습

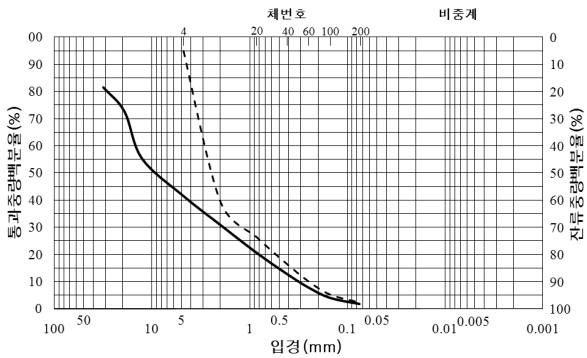


그림 7. 현장시험에 사용된 흙의 입도분포곡선

표 2. 시험에 사용된 흙의 물성치

흙 종류	비중, $G_s$	아터버그 한계		OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	USCS
		LL (%)	PI (%)			
화강풍화토	2.67	NP	NP	8.57	20.38	GP

가능하다. 본 연구의 현장 시험에서는 4km/h의 속도를 기본으로 하여 다짐을 실시하였다. 다짐로울러에는 그림 7과 같이 가속도계를 설치하였다. 또한 현장 다짐시 가속도계에서 얻어지는 데이터는 데이터로거를 통해 기록된다. 다짐을 수행한 지역에서의 지반강성(CMV)과 다짐하는 곳의 위치 역시 기록된다. 기록된 연속다짐 데이터는 다짐기에 장착된 화면을 통해 운전자가 다짐의 정도를 파악할 수 있으며 모든 데이터는 하드웨어를 통해 저장된다.

현장시험에 사용한 성토재료의 기본물성치와 입도분포곡선은 표 2 및 그림 6과 같다. 표 2에서와 같이 현장 시험에 사용한 흙은 통일분류법(USCS)에 의해 GP로 분

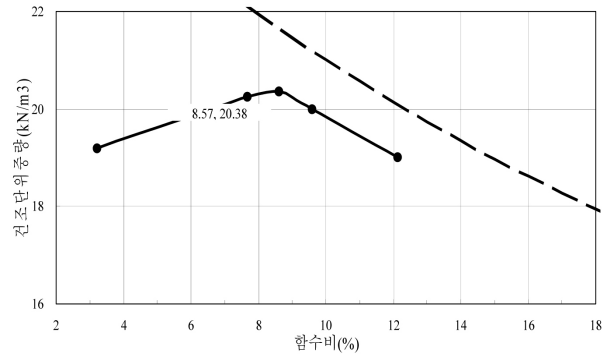


그림 8. 현장시험에 사용된 흙의 다짐곡선

류되었으며, 이 흙을 이용한 다짐시험(KS F2312)결과 (그림 8 참조) 최대진조단위중량과 최적함수비는 각각 20.38kN/m<sup>3</sup>, 8.57%이고, 함수비 3.8~11.26% 구간에서 최대진조단위중량의 95%이상에 해당하는 진조단위중량을 갖는 것으로 나타났다.

이 밖에 본 연구에서는 다짐된 지반의 다짐도 평가를 위하여 다짐도 기준 평가시험인 판재하시험(PLT) 및 현장밀도시험을 실시하고, 최근 많이 사용되는 소형충격재하시험, Geogauge 및 DCP 시험을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 본 연구에서 사용된 소형충격재하시험기는 독일의 “흙과 암으로 건설하는 도로의 기술 시방서 TP BF -StB Teil B 8.3”에 제시되어 있는 소형충격재하시험에 적합하게 만들어진 독일제 “Light Drop Weight Tester ZFG2000”을 사용하였다. 동적 재하를 위한 추는 10kg 짜리를 사용하며 펄스의 폭은 18ms이다. 하중진동을 발생시키기 위해 스프링을 타격하고, 안전하게 작동시키기 위해서는 추는 운반 고정핀과 가이드 룯드 그리고 안정 장치로 고정되어 있어야 한다. 재하판의 직경은 300mm이며 재하로 인한 처짐은 0.2~30mm 까지 측정할 수 있다. 또한 Geogauge는 shaker라는 장치를 이용하여 동력을 발생시켜 다져진 흙의 강성을 측정하는데 장비이다. 이 장비는 지오게이지의 본체에 달린 지오폰 센서로 shaker의 동력에 대한 변위량( $\delta$ )을 측정하는데 Geogauge 강성 측정값( $H_{SG}$ )은 다음 식에 의해 흙의 탄성계수( $E_G$ )로 변환된다.

$$E_G = H_{SG} \frac{(1-\nu^2)}{1.77R} \quad (3)$$

여기서,  $E_G$  = 탄성계수(MPa);  $H_{SG}$  : 지오게이지 강성 읽음 값(MN/m);  $\nu$  = 포아송비;  $R$  = Geogauge 다리의 반경(57.15mm=2.25 in.)

## 4. 시험 결과 분석

### 4.1 다짐 레인별 시험결과

성토된 현장 지반에 다짐로울러를 이용하여 4km/h 속도와 27~28Hz의 진동수로 진동을 가하여 다짐을 실시하였으며 이 때 측정된 CMV는 그림 9와 같다. L2의 12회 다짐을 제외하고 4, 8, 12회의 다짐횟수 증가에 따라 CMV가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 12회 다짐시 CMV는 24~35m 구간에서 40~50정도로 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 그림 9와 같이 같은 다짐횟수에서 CMV 값이 변화하는 것은 로울러가 주행하는 표층 지반조건이 영향을 주기 때문이다. 이것은 기존의 연구자들(Sandströ, 1993, 1994; Thuner, 1991, 2000)의 결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 특히 표층 하부 1.5m 이상 깊이까지 지층 탄성계수가 CMV에 영향을 줄 수 있으므로, 성토층 자체가 균질하게 시공된다 하더라도 외부 진동에 대한 반발력은 달라질 수 있기 때문에 같은 다짐횟수에서 CMV 값의 변화가 발생하는 것으로 판단된다(Sandströ, 1993, 1994; Thuner, 1991, 2000).

현장 다짐에서는 다짐도 기준시험으로 일반적으로 사용되는 평판재하시험을 수행하였으며 수행된 평판재하시험의 위치는 CMV 측정값 변화가 많이 발생하는 위치에서 시험하였다. 평판재하시험 결과로부터 지지력계수( $E_{PLT}$ )를 산정하였다. 그림 10은 거리에 따른 평판재하시험으로 구한 지지력계수( $E_{PLT}$ )를 나타내고 있다. L1과 L2에서는 4회에서 12회로 다짐횟수가 증가함에 따라 지지력계수가 약간 증가하는 경향을 나타내고 있지만 L1과 L2의 12회다짐에서는 8회다짐과 거의 비슷한 지지력계수 값을 나타내고 있다. 반면에 L3의 경우 4회에서 8회로 다짐이 증가하지만 지지력계수는 거의 차이가 없고 8회에서 12회로 다짐횟수가 증가됨에 따라

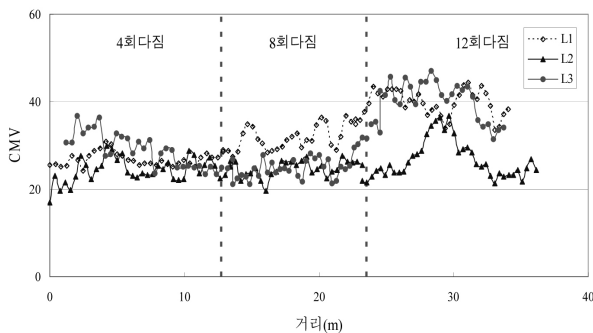


그림 9. CMV 결과

지지력계수도 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다.  $E_{PLT}$ 의 경우 L3을 제외하고 뚜렷한 증가 경향을 보이지 않는데 이것은 자갈들의 맞물림에 의해 L1과 L2는 8회다짐과 12회다짐에서 거의 차이가 없고 L3의 경우 SM 성토지반으로 12회다짐에서 지지력계수가 크게 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 GM 및 SM 성토지반의 특성이 차이가 나는 것으로 판단된다. 본 연구에서 지지력계수는 Kleyn(1975)이 제안한 식을 사용하였다.

그림 11은 거리와 다짐횟수에 따른 소형충격재하시험으로 측정된 동적탄성계수  $E_{LFWD}$ (MPa)의 변화를 나타내었다. L1에서의  $E_{LFWD}$ 는 다짐횟수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있지만 L2와 L3에서는 전 구간에서  $E_{LFWD}$ 의 변화양상이 거의 유사한 것으로 나타났다.

그림 12는 현장들밀도시험으로 구한 건조단위중량( $\gamma_d$ ,  $kN/m^3$ )과 지반 함수비(%)를 거리에 따라 비교한 것으로, 그림에서와 같이 현장들밀도시험 측정 위치에서의 건조단위중량의 변화는 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그림 12를 바탕으로 계산된 다짐도 변화의 결과를 그림 13에 나타내었다. 그림에서와 같이 다짐횟수가 증가함에 따라 다짐도가 약간 증가함을 알 수 있었다.

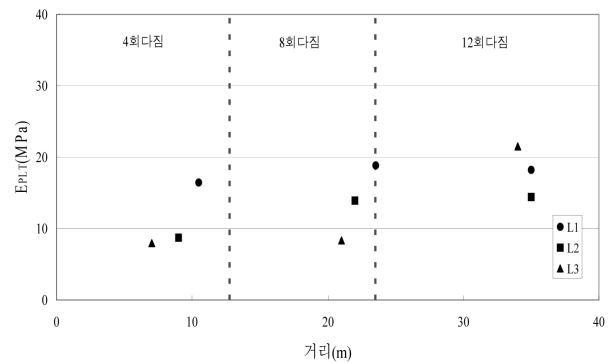


그림 10.  $E_{PLT}$  결과

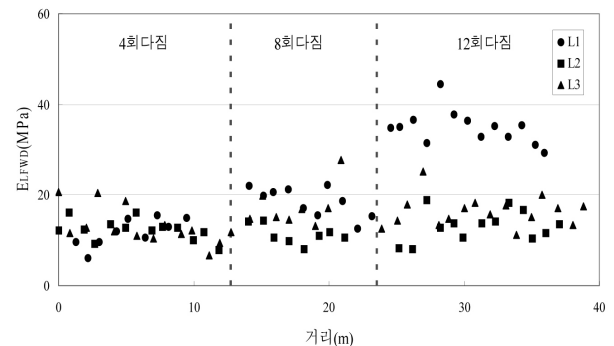


그림 11.  $E_{LFWD}$  결과

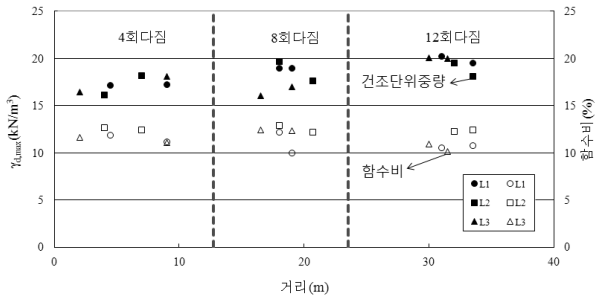


그림 12. 건조단위중량 및 함수비의 변화

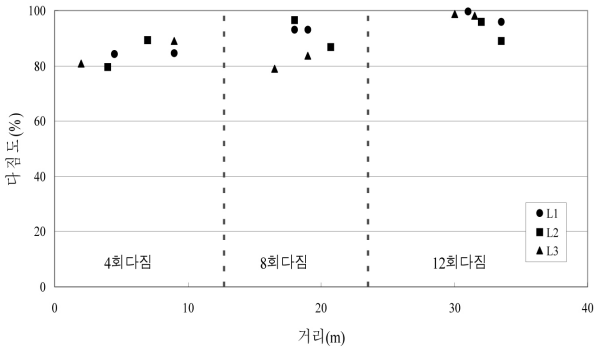


그림 13. 다짐도의 변화

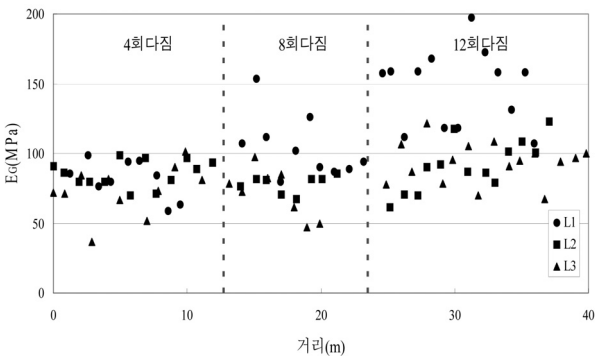


그림 14. Geogauge의 지반강성 변화

그림 14는 다짐횟수에 따른 Geogauge로 측정된 지반강성  $E_G$ (MPa)의 변화를 거리에 따라 나타내었다. 그림 14와 같이 L1의 경우 다짐횟수에 따라  $E_G$ 의 값이 증가하는 양상을 보이지만 L2와 L3의 경우  $E_G$  값의 변화는 크게 나타나지 않았다. 또한 모든 레인에서 4회의 변동 폭보다 12회 다짐으로 갈수록  $E_G$  값의 변동 폭이 더 커짐을 알 수 있었다.

그림 15는 다짐횟수에 따른 DCP 시험기로 측정된 DCP ratio의 변화를 나타내었다. DCP ratio는 주어진 위치에서 관입깊이를 타격횟수로 나눈 값(mm/blow)을 의미하여 DCP ratio의 경우 지반강성이 증가할수록 측정된 DCP ratio가 감소하는 특징을 나타낸다. 이것은 CMV

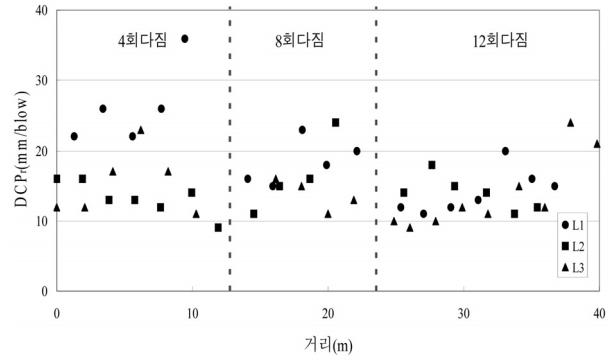


그림 15. DCP의 지반강성 변화

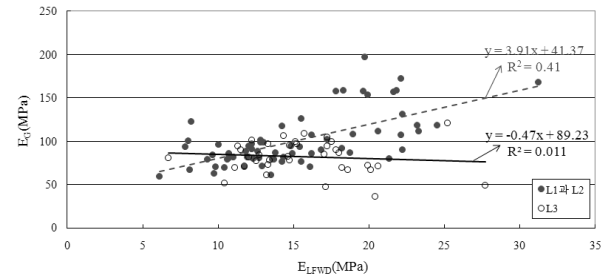


그림 16. 소형충격재하시험과 Geogauge시험 결과의 상관관계

의 경향과는 반대의 변화양상이다. 그림 15와 같이 DCP로 측정된 DCP ratio는 다짐횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내기는 하지만 각 다짐횟수에서의 변화 양상은 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다.

#### 4.2 다짐도 평가시험간의 관계

현장에서 식 (2)를 이용하여 얻은 CMV, Kley(1975)이 제안한 지지력계수 식을 사용한 평판재하시험 결과 ( $E_{PLT}$ ), 현장들밀도시험과 함수비를 이용한 다짐도(%), 소형충격재하시험 결과( $E_{LFWD}$ ), Geogauge( $E_G$ ) 및 DCP 시험 결과인 DCP ratio( $DCP_r$ )를 회귀분석하여 각각의 다짐도 평가시험간의 추세의 상관관계를 성토재료의 차이로 인한 영향을 보기 위하여 L1과 L2 및 L3로 나누어 분석하여 그림 16에서 그림 30에 나타내었다.

그림 16에서 그림 18은 소형충격재하시험과 Geogauge 시험 결과, DCP시험 결과와 소형충격재하시험 결과, DCP시험 결과와 Geogauge시험 결과에 대한 회귀분석을 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 대부분의 회귀분석이 통계적으로 매우 약한 분포를 나타내고 있다. L1과 L2의 경우 소형충격재하시험과 Geogauge시험 결과에 대한 상관관계를 회귀분석 결과 L3에 비해 상대적으로 상관관계가 양호한 것으로 나타났다. 또한 그림 18과

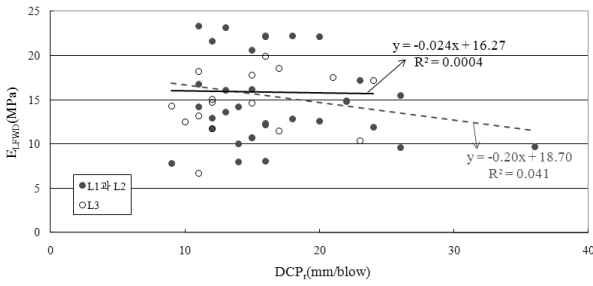


그림 17. DCP시험 결과와 소형충격재하시험 결과의 상관관계

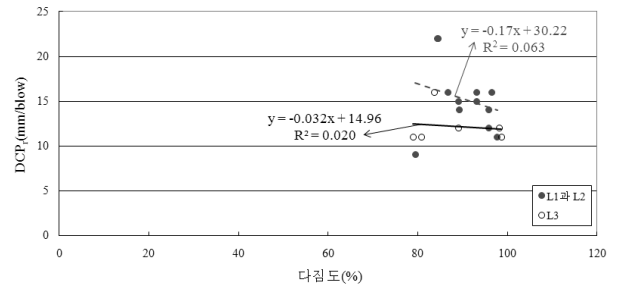


그림 21. 다짐도와 DCP시험 결과의 상관관계

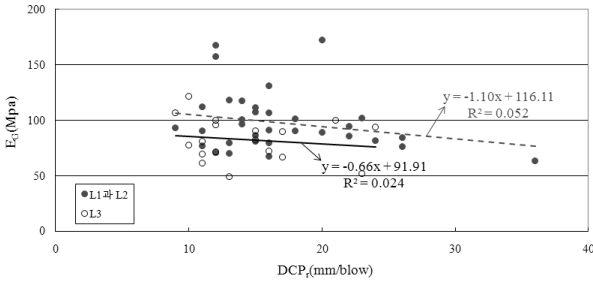


그림 18. DCP시험 결과와 Geogauge시험 결과의 상관관계

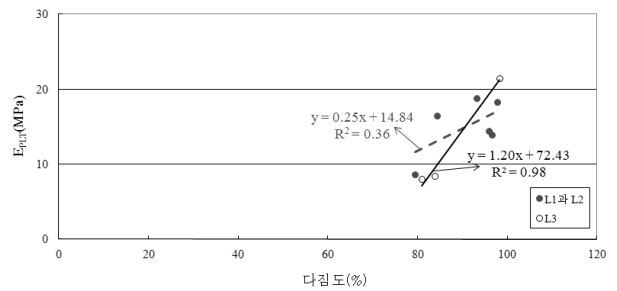


그림 22. 평판재하시험과 다짐도의 상관관계

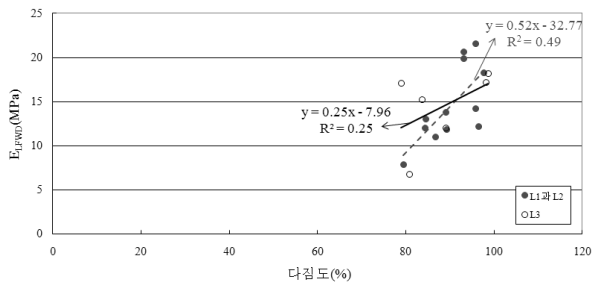


그림 19. 다짐도와 소형충격재하시험 결과의 상관관계

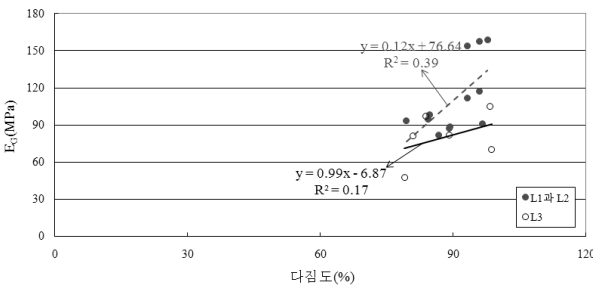


그림 20. 다짐도와 Geogauge시험 결과의 상관관계

같이 DCP시험 결과와 Geogauge시험결과만 비슷한 상관관계식의 기울기를 가지는 형태를 나타내고 있고 소형충격재하시험과 Geogauge시험 결과 및 DCP시험 결과와 소형충격재하시험 결과의 기울기는 차이가 많이 남을 알 수 있었다.

그림 19에서 그림 22는 현장들밀도 시험과 함수비를 이용한 다짐도에 따른 다짐도 평가시험들의 회귀분석을

나타내었다. 그림 19에서 그림 21에 나타난 바와 같이 다짐도와 소형충격재하시험 결과, 다짐도와 Geogauge 시험 결과 및 다짐도와 DCP시험 결과에 대한 회귀분석은 매우 약한 상관관계를 나타내고 있다. 그러나 그림 22와 같이 평판재하시험과 다짐도에 대한 상관관계는 L1과 L2의 경우 통계적으로 약한 상관관계를 나타내고 있지만 L3의 경우 통계적으로 매우 좋은 분포를 나타내고 있다. 따라서 다짐도와 평판재하시험 결과를 제외하고 다짐도 평가 시험들의 측정값에 대한 상관관계를 회귀분석 결과는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 이 같은 원인은 그림 10에서 그림 15에 나타난 바와 같이 현장시험에서 측정된 다짐도 평가 시험 결과가 비교적 폭 넓은 범위를 나타내고 있었던 것으로 기인하며 자갈의 유무에 따라 지반강성의 평가 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

다짐도 평가시험에서 가장 많이 사용하고 있는 평판재하시험과 여러 가지 다짐도 평가시험들 간의 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석하여 그림 23에서 그림 25에 나타내었다. 그림 23의 평판재하시험과 소형충격재하시험 결과의 상관관계는 L3 보다 L1과 L2에서 더 높으나 그림 24의 평판재하시험과 DCP 시험 결과, 그림 25의 평판재하시험과 Geogauge 시험에서는 L1과 L2 보다 L3에서의 상관관계가 더 강한 분포로 나타났다. 또한 그림 23과 그림 24에 나타난 바와 같이 평판

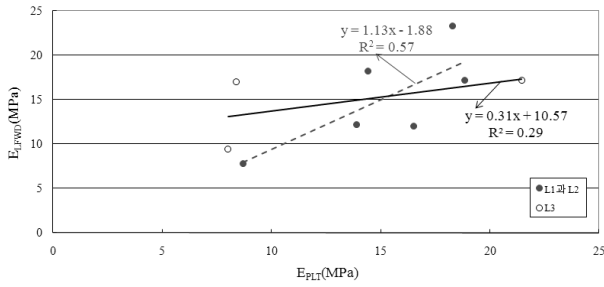


그림 23. 평판재하시험과 소형충격재하시험 결과의 상관관계

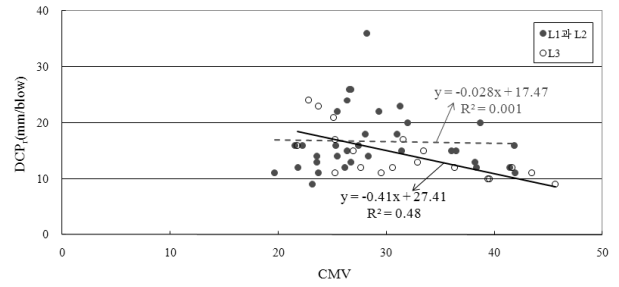


그림 26. DCP시험 결과와 CMV의 상관관계

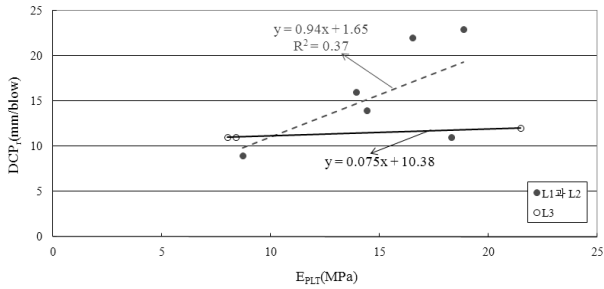


그림 24. 평판재하시험과 DCP 시험 결과의 상관관계

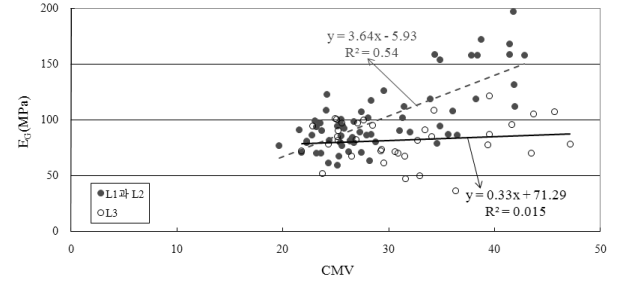


그림 27. Geogauge시험 결과와 CMV의 상관관계

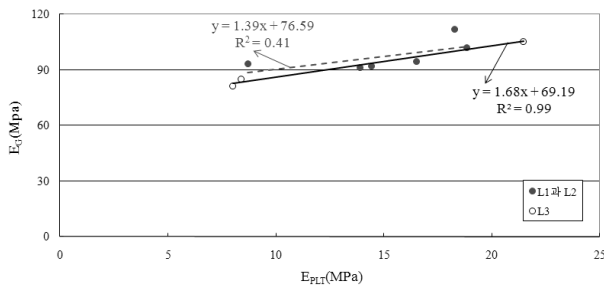


그림 25. 평판재하시험과 Geogauge 시험 결과의 상관관계

재하시험과 소형충격재하시험 결과 및 평판재하시험과 DCP 시험 결과의 상관관계식에 대한 기울기는 일정치 않았지만 그림 22와 그림 25와 같이 평판재하시험과 다짐도 및 평판재하시험과 Geogauge 시험 결과의 상관관계 식의 기울기는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

최근 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(2009)에서는 현장 시험을 통한 평판재하시험  $E_{PLT}$  값, 기초 물성 시험을 통한 설계 다짐도 값과 소형충격재하시험  $E_{LFWD}$  값의 상관관계식을 산출하였으며, 이를 기존 문헌연구로 얻은 상관관계식과 비교 검증 하였다. 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(2009)에서 소형충격재하시험  $E_{LFWD}$  값과 평판재하시험  $E_{PLT}$  값과의 S계열 상관관계식 및 소형충격재하시험  $E_{LFWD}$  값과 다짐도 값과의 S계열 상관관계식을 다음과 같이 나타내었다.

$$E_{LFWD} = 0.4739 E_{PLT} + 7.9415 \quad R^2 = 0.8905 \quad (4)$$

$$E_{LFWD} = 3.5316(\text{다짐도}) - 240.19 \quad R^2 = 0.9666 \quad (5)$$

본 연구에서 수행된 현장 시험 데이터의 회귀분석 결과와 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(2009)에서 수행한 결과, 소형충격재하시험  $E_{LFWD}$  값과 평판재하시험  $E_{PLT}$  값과의 상관관계식 및 소형충격재하시험  $E_{LFWD}$  값과 다짐도 값과의 상관관계가 약간 차이가 남을 알 수 있다. 특히 자갈이 많이 함유되어 있는 곳의 결정계수( $R$ -square,  $R^2$ ) 차이는 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(2009)와 비교하여 현저한 차이가 발생하였다. 이는 데이터의 한계성, 소형충격재하시험기와 현장 성토재료의 차이로 인하여 판단되며, 경험모형 모델인자의 적용확대를 위한 더 많은 시험 데이터베이스가 필요함을 알 수 있었다.

가속도계를 이용한 연속다짐평가에 대한 다짐도 평가 가능성을 살펴보기 위하여 CMV와 다짐도 평가시험들간의 회귀분석을 수행하여 그림 26에서 그림 30에 나타내었다. 그림 26과 그림 27은 DCP시험과 Geogauge 시험 결과에 대한 CMV와의 비교를 나타내고 있는데 그림에 나타난 것과 같이 대부분의 회귀분석이 통계적으로 매우 약한 분포를 나타내고 있으므로 상관관계가 거의 없다고 할 수 있다. 그림 28에서 그림 30은 소형충격재하시험, 평판재하시험 및 다짐도에 대한 CMV와의



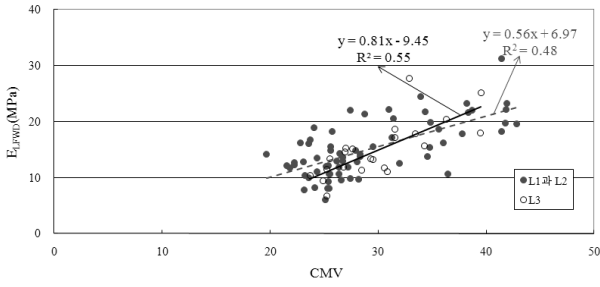


그림 28. 소형충격재하시험과 CMV의 상관관계

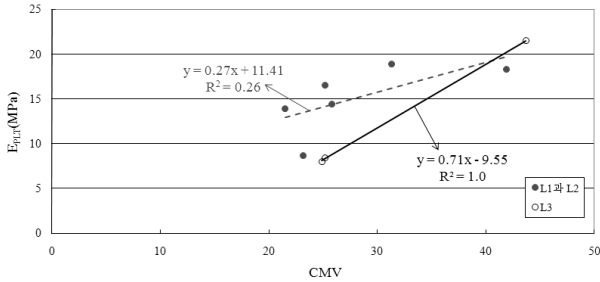


그림 29. 평판재하시험과 CMV의 상관관계

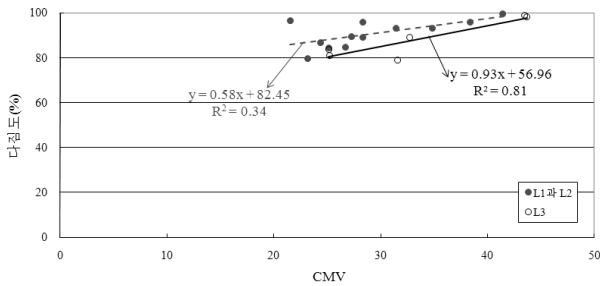


그림 30. 다짐도와 CMV의 상관관계

비교를 나타내고 있는데 DCP와 Geogauge 시험 결과 보다 상대적으로 강한 분포를 나타내고 있다. 또한 그림 29를 제외하고 비슷한 상관관계식의 기울기를 나타내고 있으며 L1과 L2 보다 L3에서 CMV와 소형충격재하시험, 다짐도 및 평판재하시험으로 획득한 데이터들의 회귀분석이 상대적으로 매우 좋은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 L3의 경우 그림 28에서 그림 30에 나타난 소형충격재하시험의 결과와 CMV, 평판재하시험의 결과와 CMV 및 다짐도 결과와 CMV의 측정값이 비교적 폭이 좁은 범위에 데이터들이 도시되었고, 이에 대한 회귀분석 결과 양호한 상관관계가 나타났다. 이처럼 소형충격재하시험, 다짐도, CMV와 평판재하시험 결과의 상관관계가 매우 좋은 것은 균질한 성토지반 재료를 이용한 다짐도로 자갈이 포함되지 않았기 때문으로 판단된다. 그러나 L1과 L2의 경우 CMV와 소형충격재하시험, 다짐도 및 평판재하시험 간의 회귀

분석 결과가 L3의 결과에 비해 상대적으로 낮은  $R^2$  값으로 인해 평가기준값으로 이용하기에는 더 높은 신뢰도가 필요한 해석과 데이터 획득이 필요할 것으로 판단된다. 그림 16에서 그림 30에 작성된 직선식은 통계적 해석을 통한 회귀분석 결과인 선형회귀분석 방정식의 기울기와 절편을 의미하며, R은 표본 상관계수이다.

본 연구에서는 CMV의 적용성을 평가하기 위하여 다짐도 약 86% ~ 다짐도 약 96%(4회 다짐 = 약 86%, 8회 다짐 = 약 87%, 및 12회 다짐 = 96%) 사이의 데이터에 대해 분석하였으나 사용된 LFWD, Geogauge, DCPT 측정 장비는 강성 측정 장비이므로 적절한 다짐도(즉 지반의 상태가 균질한)에서 좀 더 정확한 값을 나타낼 수 있다. 따라서 보다 많은 현장 시험 및 데이터 획득으로 LFWD, Geogauge, DCPT 측정 장비 및 CMV의 현장 적용성을 확인하고 향후 더 많은 데이터를 활용한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

최근 다짐공사는 지지력계수와 같은 흙의 역학적 특성을 이용한 시방 기준에 따라 설계와 유지관리를 수행한다. 그러나 기존의 다짐시공 시에는 실내다짐시험 결과로 산정되는 최대건조단위중량과 최적함수비를 이용하여 현장에서의 단위중량을 측정 비교하여 현장다짐 두께 및 현장다짐장비의 운영을 계획한다. 이러한 설계, 시공관리, 그리고 유지관리 간의 개념적 차이는 전체 건설공정의 일관성을 떨어뜨리고 있으며 기술자의 경험적 판단에 크게 의지하는 불합리한 면을 지니고 있다. 특히 다짐도를 평가하는 경우, 일점법에 의한 다짐 품질을 평가하기 때문에 전체 지역의 다짐도를 평가하는데는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 현장 다짐기에 가속도계를 이용한 연속다짐 평가장치를 부착하여 현장시험에 대한 CMV와 다른 다짐도 평가장비들의 비교하였다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 소형충격재하시험과 Geogauge시험 결과, DCP시험 결과와 소형충격재하시험 결과, DCP시험 결과와 Geogauge시험 결과에 대한 회귀분석 결과 대부분의 회귀분석이 통계적으로 매우 약한 분포를 나타내고 있었다. 또한 다짐도와 소형충격재하시험 결과, 다짐도와 Geogauge시험 결과 및 다짐도와 DCP

시험 결과에 대한 회귀분석 역시 매우 약한 상관관계를 나타내고 있다. 그러나 일부 L3의 경우 통계적으로 매우 좋은 분포를 나타내고 있었다. 따라서 다짐도와 평판재하시험 결과를 제외하고 다짐도 평가 시험들의 측정값에 대한 상관관계를 회귀분석 결과는 시험 데이터를 활용한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

- (2) 현장시험에 대한 CMV와 다른 다짐도 평가장비들의 비교 분석 결과 CMV에 대한 평판재하시험 및 다짐도 계수간에 상관관계를 회귀분석하여 성토재료가 균질한 경우 통계적으로 매우 양호한 상관관계식을 얻을 수 있었다. 따라서 기존의 평판재하시험 및 다짐도에 의한 지지력계수를 연속다짐 평가계수인 CMV로 변환하여 다짐관리에 활용할 수도 있음을 알았다.
- (3) CMV를 이용한 다짐도 평가 후 검증을 위한 시험으로는 거의 모두 그 경향이 유사하게 나타난 평판재하시험, 소형충격재하시험 및 현장밀도시험을 통한 다짐도가 다른 시험에 비해 가장 상관관계가 강한 시험방법인 것으로 판단되었다.
- (4) 평판재하시험과 다짐도의 경우 시험의 특성상 연속적인 시험이 불가능하고 시험에 많은 시간이 소요된다는 점을 감안할 때 시험속도가 상대적으로 빠른 CMV와 연관하여 다짐도 평가를 검증하는 것도 효과적일 것으로 판단되었다. 특히 CMV의 경우 다짐공정과 다짐 평가를 분리하여 진행하던 공정을 다짐 진행과 동시에 다짐평가를 연속적으로 수행할 수 있으므로 다른 다짐도 평가 시험에 비해 빠른 공정관리를 진행할 수 있으며 일점시험(spot test)으로 전체의 다짐을 관리하고 있는 현재의 시험관리 방법과는 다르게 전체 부지의 다짐도를 평가할 수 있는 가능성을 제시 하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(06건설핵심-D02)에 의해 수행된 연구의 일부이며, 본 연구를 지원해준 국토해양부/한국건설교통기술평가원에 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고 문헌

1. 국토해양부 (2009), 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구.
2. 조성민, 정경자 (2000), “반발력을 이용한 새로운 다짐도 검사기법 개발”, 2000년도 소과제 연구보고서, 한국도로공사 도로연구소, pp.26.
3. 표준협회 (2000), 한국산업표준.
4. 표준협회 (2001), 한국산업표준.
5. AMMANN\_CASE (2008), AMMANN/Case/Texana IC System, presentation, “Intelligent Compaction. GPS-based Compaction Control”, TPF ICS intial-TWG meeting.
6. De Beer, M. (1990), “Use of Dynamic Cone Penetrometer (DCP) in the Design of Road Structures”, Geotechnics in African Environment, Blight et al., eds, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.167-176.
7. Federal Highway Administration (FHWA) (2002), “Geogauge Pooled Fund Study Documents” (www.tdcfiles.com)
8. George K. Chang, Qinwu Xu, Rob Rasmussen, David Merritt, Larry Michael, David White, and Bob Horan (2009), “Accelerated implementation of intelligent compaction technology for embankment subgrade soils, aggregate base, and asphalt pavement materials”, Year 1 report, FHWA-IF-07, Federal Highway administration.
9. Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M., and Seyman, E. (2005), “Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools”, J. of Materials in Civil Eng., Vol.17, No.5. pp.560-569.
10. Kleyn, E. G. (1975), “The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)”, Report 2/74. Transvaal Roads Department, Pretoria.
11. Mooney, M. A., and Adam, D. (2007), “Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: An overview”, Proc., 7th Intl.Symp. on Field Measurements in Geomechanics: FMGM 2007, ASCE, Boston, Ma.
12. Sandström, Åk (1993), “Oscillatory compaction”, Proceedings of XII IRF World Congress, Madrid, pp.957-961.
13. Sandström, Åk (1994), “Numerical simulation of a vibratory roller on cohesionless soil”, Geodynamik Report, Stockholm, pp.22.
14. Sandström, A. and Pettersson, C. (2004), “Intelligent systems for QA/QC in soil compaction”, Proc., Annual Transportation Research Board Meeting (CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, D.C.
15. Thurner, H., Sandström, Åk (1991), “Quality assurance in soil compaction”, Proceedings of the XIXth PIARC World Congress, Question II, Marrakech, pp.468-477.
16. Thurner, H., Sandström, Åk (2000), “Continuous compaction control”, CCC. Compaction of Soils and Granular Materials. Modelling and Properties of Compacted materials, Paris, pp.237-245.

(접수일자 2010. 6. 30, 심사완료일 2011. 12. 9)