

## 통계해석에 기초한 연속다짐평가기법 개발

### Development of an Intelligent Compaction Evaluation Method Based on Statistics Analysis

박 근 보<sup>1</sup> Park, Keunbo

김 주 형<sup>2</sup> Kim, Ju-Hyong

#### Abstract

The objective of this paper is to assess the potential use of the resilient force of the ground obtained from an accelerometer and to propose a new compaction control process. Several comprehensive field experimental programs were conducted to analyze the correlation of compaction results obtained from an accelerometer and conventional test methods (e.g. the plate load test and field density test). This study focused on comparing the compaction results obtained from an accelerometer with conventional test results statistically. Based on the statistical analysis results, impact and resilient force measured from an accelerometer, mounted on the drum of a roller are very useful factors for continuous compaction control. A new compaction criteria determination process using an accelerometer is also proposed in this study.

#### 요 지

본 연구에서는 여러 가지 시험조건으로 실제 현장규모로 다짐을 수행한 후 연속다짐방법과 새로운 다짐도 평가에 관한 절차를 제안하고 가속도계를 이용한 다짐도 평가와 기존의 다짐도 평가 시험(평판재하시험, 현장들밀도시험 및 동평판재하시험 등)과의 상관관계를 분석하였다. 가속도계를 이용한 다짐도 평가를 현장에서 사용할 수 있는지에 대한 적용성을 평가하고 가속도계를 이용한 다짐도 평가를 통계적 방법에 의해 분석하고 평가하였다. 평가결과 신속성, 편리성, 숙련도 면에서 가속도계를 이용한 연속다짐평가가 가장 적합한 방법으로 판단되었다. 또한 현장다짐 시 사용되는 설계기준값을 제안하고 제안된 설계기준값과 추가적인 현장시험 결과와의 비교를 통해 가속도를 이용한 연속다짐 측정값에 대한 적용성을 검증하였다.

**Keywords :** CMV, Degree of compaction, Intelligent compaction, Regression analysis

#### 1. 서 론

성토에서 주목적으로 하는 다짐은 하천제방, 간택제방, 도로성토, 철도성토, 공장이나 주택 등의 부지조성용 성토, 대규모의 댐, 어스댐 등에 적용되고 있으며 각각 흙 또는 모래, 자갈을 재료로서 사용하고 있다. 이

와 같은 일련의 다짐공정들은 전체 공사비, 공사시간 등에 막대한 영향을 미치나 대부분 체계적인 평가 및 관리시스템의 부재로 작업자 자신의 인위적인 판단에 의해 작업이 진행되는 것이 대부분이다. 일반적으로 다짐 품질을 평가하기 위한 시료 채취의 위치 문제, 일점법에 의한 대표성 문제, 시험자의 오차 및 토질 종류에

1 정회원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 (Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Infrastructure Research Department, KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 (Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Infrastructure Research Department, KICT, [haitink@kict.re.kr](mailto:haitink@kict.re.kr) 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

다른 역학적 특성 등 지반공학적으로 고려해야 할 중요한 요소가 많음에도 불구하고 단지 장비의 일정통과에 의해 충분히 다져진다고 간과하기 쉽다. 그러나 실제현상으로 본 최적의 다짐과 현장관리는 다짐의 목적, 방법 및 장비의 상호 관계 등에 의존하는 매우 복잡한 공정이다. 특히, 국내의 다짐공정관리는 시간과 노력이 많이 드는 평판 재하시험(KS F 2310; 한국산업표준, 2000)이나 현장에서 모래를 치환하는 흙의 밀도 시험방법(KS F 2311; 한국산업표준, 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 판단할 수 없다.

최근 가속도계를 이용한 연속다짐평가(Intelligent Continuous Compaction Control) 또는 연속다짐(Intelligent Compaction) 기술은 실시간으로 흙 또는 아스팔트의 다짐을 제어하는 기술로 다짐공정과 다짐평가를 분리하여 진행하던 공정을 다짐 진행과 동시에 다짐평가를 연속적으로 수행할 수 있는 다짐 방법으로 유럽, 미국과 일본의 건설 시장에서 많이 사용하는 방법이다. 연속다짐 방법은 설계시 일정한 로울러 통과 횟수, 로울러의 속도 및 진동수가 결정되었다 하더라도 실제 현장에서 흙의 함수비 차이 및 흙의 종류 등의 원인으로 특정 다짐지역이 과다짐 및 과소다짐 되는데 이를 정확히 파악하여 추가 다짐 등을 통해 다짐구간의 일정 다짐도를 이루어지기 위하여 도입되었다. 외국의 경우, 오스트리아, 스웨덴, 미국, 일본 그리고 독일 등의 선진국에서는 이미 많은 다짐장비 제작회사들이 연속다짐평가 기기가 부착된 장비를 판매하고 있으며 일부 국가에서는 시방기준까지 제안되어 있지만 국내의 경우 외국에 비해 아직 시작단계에 있다. 특히 현장에서 가속도계를 이용한 연속다짐 방법을 효율적으로 적용하기 위해서는 토질특성을 고려한 적합한 다짐도 평가 방법이 적용되어야 한다. 이를 위해서는 연속다짐 관련 지침을 정립하고 합리적인 현장평가기법 개발이 병행되어야 한다. 또한 체계적인 설계, 시공 및 유지관리의 합리성을 제고하기 위해서는 설계 및 해석에 사용하는 역학적 물성값인 탄성계수 등과 현장다짐 관리 특성 값인 지반지지력의 상관성을 보다 높일 수 있는 관리방안에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 여러 가지 시험조건으로 실제 현장규모로 다짐을 수행한 후 그 결과를 분석하여 최적의 연속다짐방법을 제안하고 가속도계를 이용한 다짐도 평가

와 기존의 다짐도 평가 시험(평판재하시험, 현장밀도 시험 및 동평판재하시험 등)과의 상관관계를 분석하였다. 또한 통계적 분석 방법을 이용하여 연속다짐방법의 적용성을 평가하고 새로운 다짐도 평가에 관한 절차를 제안·평가 하였다.

## 2. 현장 다짐평가

### 2.1 기존의 현장 다짐평가 과정

일반적으로 다짐은 흙의 간극을 축소하여 침투수를 최소화 함으로써 지반을 안정시키고, 간극 축소에 인한 강도특성 강화 및 역학적 균질화를 목적으로 한다. 따라서 이러한 목적에 부합된 시공을 수행한다. 성토의 안정은 시공의 정밀도에 크게 좌우되고 있으며 시방기준에 준하여 다짐을 충분히 실시하고 균질한 성토를 실시하는 것이 중요하다.

토목공사에서 1개 층에 대한 일반적인 다짐 시공절차는 그림 1과 같다. 그림 1에서 ‘층다짐 성토 실시’ 항목을 기준으로 왼편에 있는 내용이 각 층별 다짐 완료 후 다짐도를 평가하는 부분이고 오른편에 나타난 내용이 층별 다짐절차를 나타내는 것이다. 다짐작업은 다짐작업 수행동안 균질성과 효율성을 높이기 위해 진동 로울러가 적절하게 작동되어야 하며, 장비의 궤적에 따른 흐트러짐을 방지하기 위하여 회전, 급정거 및 급출발을 금지하고 로울러 패스가 균일하게 다져지도록 로울러 패스의 일부를 겹쳐서 다짐작업을 실시하여야 한다.

성토 설계시에는 토질에 적합한 시공기계를 사용하고, 수평으로 얇고 균일하게 다져야 하며 다짐정도, 다

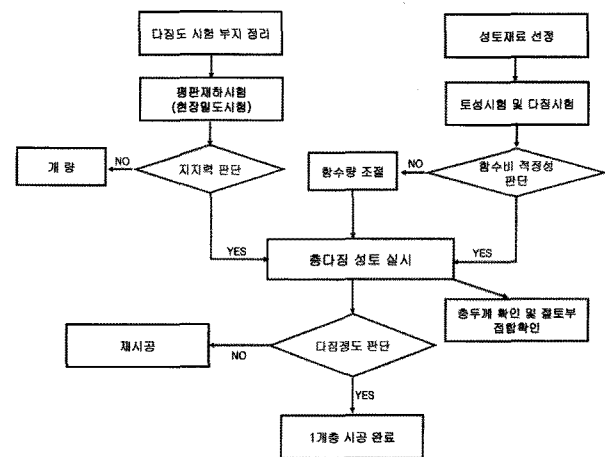


그림 1. 다짐 시공절차

짐 시의 함수량, 다짐 시의 층두께 등에 관한 기준을 정하여야 한다. 다짐규정은 최소관리이므로 각층의 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 하며 공사 상황에 맞게 도로설계편람(건설교통부, 2001), 철도공사전문시방서(철도청, 1999a) 및 철도표준시방서(철도청, 1999b), 도로설계요령(한국도로공사, 2002), 고속도로공사 전문시방서-토목편(한국도로공사, 2001) 등의 품질수준을 만족하여야 한다.

다짐 시공 후 다짐도 검사를 위한 시험방법은 설계수준에 따라 평판재하시험 및 동적 콘 관입시험, 소형 충격 재하시험, 모래 치환법에 의한 흙의 밀도시험방법, 평판재하시험 방법, 실내다짐 시험 등이 주로 사용되며 시공 층의 두께 등에 관한 기준이 되는 다짐 규정은 다음 4가지로 구분된다(한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 2007).

① 건조밀도로 규정하는 방법

최대건조밀도와 최적함수량을 이용하는 방법이 가장 일반적인 방법으로서 현장에서 다져진 흙의 밀도와 기준시험방법에 따른 흙의 최대건조밀도와의 비를 다짐도라고 부르고 있는데 이 값을 규정하는 방법을 말한다. 시방 규정값은 노체 90% 이상, 노상 95% 이상이면 합격으로 간주한다(도로공사 표준시방서, 2009).

다짐도

$$= \frac{\text{현장에서 다져진 흙의 건조밀도}}{\text{시험실에서 기준방법에 의해 다져진 흙의 최대 건조밀도}} \times 100 \quad (1)$$

② 포화도 혹은 간극비로 규정하는 방법

다져진 흙이 안정된 상태로 있을 수 있는 조건으로서 간극비 또는 포화도가 일정한 범위 안에 있도록 규정하는 방법을 말한다. 현장에서 다져진 흙의 포화도 및 간극비는 그 상태에서의 흙의 단위체적중량을 측정해서 구한다. 도로시방규정에서는 포화도를 85~95% 및 간극비를 1~10%로 규정하고 있다. 이 방법은 규정된 건조물도를 얻을 수 있는 함수비보다 자연함수비가 높은 흙이나 토질의 변화가 큰 현장에서 각종 흙의 혼합비가 변동할 경우에 주로 사용한다.

③ 강도특성으로 규정하는 방법

다져진 성토부의 강도 또는 변형특성을 확인하기 위해 관입저항, 현장CBR, 지지력, proof-rolling에 의한 처

짐변형량 등으로 규정하는 방식이다. 다짐을 규정하는 기준이 성토체가 필요로 하는 특성치와 직접적인 관계가 있고 시험방법도 간단하다는 장점이 있다. 강도특성으로 규정하는 방법은 안정된 재료(암괴, 호박돌, 모래, 사질토 등)에 사용한다. 강도특성으로서 지반지지력계수, CBR치, cone지수 등이 주로 이용된다.

④ 재료의 역학적 특성으로 규정하는 방법

강도기준으로 다짐 후 동적 콘 관입시험, 동적 탄성계수시험을 이용하여 현장탄성계수를 구하여 측정하는 방법으로 현장다짐 시험을 실시하여 다짐기종, 다짐횟수, 다짐두께, 다짐폭, 다짐속도 등 규정한다. 현장 다짐 시험은 폭 3m, 길이 5m, 두께 15~50cm 기준으로 다짐기계 하나의 기종에 대해 다짐 두께를 3 종류 이상 시험하여 다짐횟수별 성토의 밀도, 함수비 측정하고 표면 침하량, 내부침하량을 측정한다. 또한 함수비를 달리하여 여러번 시험함으로써 시공 시 적용할 함수비를 결정한다.

다짐도 검사는 다짐 시공 후 다짐 기준에 부합되도록 시공이 되었는지 확인하기 위한 과정이다. 따라서 다짐도 검사는 다짐 시공 후 각각의 시방서에 나타난 기준에 부합 되어야 하며 다짐 시공 후 적정 다짐도 합격 여부를 판단한다. 다짐도 검사 후 기준에 부합 하지 못하는 경우에는 재다짐을 하여야 한다.

2.2 연속다짐평가 과정

연속다짐의 평가는 다짐과 다짐도 검사의 과정이 분리된 기존의 다짐평가과정에서 좀 더 발전된 형태로 그림 2와 같이 다짐의 시공 절차를 제안하였다. 즉 그림 2에

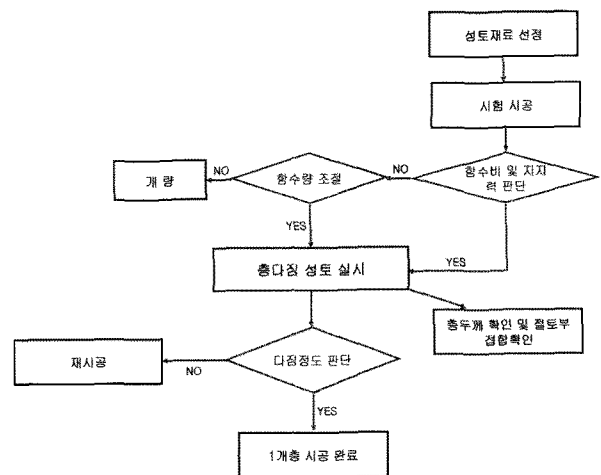


그림 2. 연속다짐 시공 절차

나타낸 연속다짐 시공 절차는 그림 1의 ‘층다짐 성토 실시’ 항목을 기준으로 원편에 있는 내용을 제외한 부분으로만 수행하면 된다. 이 제외된 부분은 각 층별 다짐 완료 후 다짐도를 평가하는 부분이고 연속다짐에서는 다짐공정과 다짐평가를 분리하여 진행하던 공정을 다짐 진행과 동시에 다짐평가를 연속적으로 진행하기 때문이다.

연속다짐의 다짐도 평가에서 다짐의 정도를 평가하는 설계기준값(여기서 설계기준값은 다짐의 기준과 같음)은 각 해당 다짐재료에 대해 연속다짐로올러에 부착된 가속도계를 이용한 측정값(CMV, Compaction Meter Value)으로 식 (2)와 같다(Sandström과 Pettersson, 2004). 즉 진동로올러에 가해지는 진동과 진동으로 인한 반발력의 관계를 이용하여 지반의 강성도를 측정하는 방법으로 진동로올러의 진동주기에 따른 힘과 지반반력은 지반의 강성에 따라 다양한 형태로 나타나며, 여기서 얻어진 진동 가속도 값에 대해 FFT를 적용하여 주파수 파워스펙트럼 이용하여 강성도를 측정한다. 지반의 강성은 응력의 변화량과 지반의 침하량에 의해 결정이 되는데 응력의 변화량은 가속도계에서 측정되는 수직가속도에 비례하기 때문에 진동로올러에 가속도계를 장착하여 각 진동원의 가속도를 측정하여 지반의 강성도를 간접적으로 측정하는 원리이다.

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

여기서, CMV = Compaction meter value; C = 상수(지반과 관련 있는 상수로 300으로 주로 사용됨; Mooney and Adam, 2007);  $A_1$  = 첫 번째 조화성분의 가속도 크기; 그리고  $A_3$  = 기본주파수 성분의 가속도 크기. CMV는 로올러의 치수(즉, 드럼 폭과 무게 등)에 의존하는 무차원값이며 로올러 작동시 매개변수(즉, 주파수, 진폭, 속도 등)에 의존한다. 또한 CMV는 로올러 속도와 진행방향, 로올러 다짐횟수 및 지반 물성치에 의해 관한 함수이다.

연속다짐을 수행할 때 다짐도 평가에 기준이 되는 설계기준값은 연속다짐에 관한 현장시험 결과가 많지 않으므로 기존의 다짐도 평가 시험을 통해서 얻은 현장다짐도, 평판재하시험 및 동평판재하시험 등의 시험 데이터와 연속다짐 측정값과의 신뢰성 있는 회귀분석을 통해 각각의 다짐관리기준에 부합되도록 그림 3과 같이 제안한다.

CMV를 이용한 다짐평가는 현장에서 운행되는 모든 다짐로올러가 설계도면 위에 표시되고 모니터링 함으로써 전체 작업현장의 상황 판단을 신속 정확히 할 수 있으며 해당 다짐로올러의 작업 범위(궤적), 다짐횟수, 운행 속도, 진동 여부 및 다짐정도 등의 상세한 정보를 정확하고 편리하게 관리할 수 있다. 또한 기존 다짐도 평가 시험의 숙련도에 의한 결과값의 오차를 줄일 수 있다.

### 3. 현장 다짐 시험 및 결과

#### 3.1 현장 다짐 시험 조건 및 방법

본 연구에서는 기존의 현장 다짐과는 다른 다짐을 진행중에 다짐도를 평가할 수 있는 연속다짐 방법을 제안하고 제안된 방법을 이용한 현장데이터와 기존의 다짐도 평가방법과의 회귀분석을 통해 연속다짐 설계기준값을 산정하기 위하여 경기도에 위치한 OO 공사 현장에서 수행한 현장시험의 결과를 이용하였다. 현장시험은 그림 4와 같이 5×41m의 직사각형 부지로 성토재료

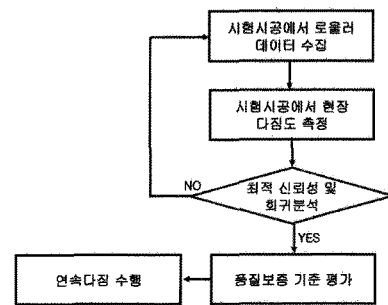


그림 3. 연속다짐 설계기준값 산정 절차

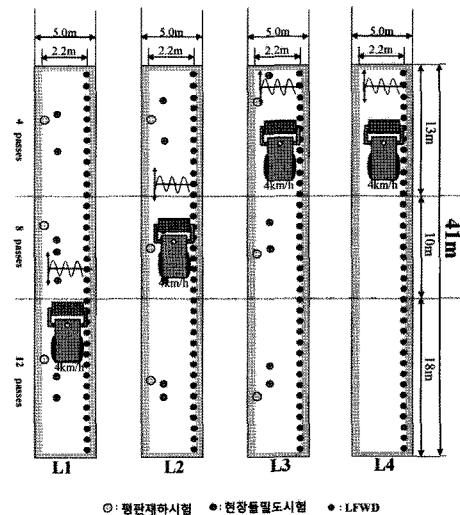


그림 4. 현장시험 시험조건

표 1. 현장시험 시험조건

성토여부	다짐횟수	다짐속도
성토	4, 8, 12회	4km/h

를 다르게 하여 표 1의 시험조건으로 4개의 레인에 대해 현장 다짐시험을 실시하였다. 특히 L1과 L2 레인은 자갈이 포함된 성토재료를 사용하였고, L3은 자갈을 제거한 성토재료를 사용하여 현장 다짐을 수행하였으며 L4는 제안된 설계기준값에 대한 평가를 위해 추가 현장시험을 실시하였다. 현장시험에 사용된 다짐로울러는 다짐 폭이 약 2.2m이고 진동횟수는 23~28Hz까지 조절이 가능한 제품으로 총 중량은 약 10ton이며 0~10km/h의 속도로 이동이 가능하다. 현장 시험시공에 사용한 진동 다짐로울러는 0~10km/h의 속도로 이동할 수 있는데 시험 도중에는 4km/h 이하의 속도를 유지하면서 시험을 수행하였다. 현장 다짐 시 가속도계에서 얻어지는 데이터는 데이터로거를 통해 저장되며 그 때의 위치도 같이 기록된다. 다짐을 수행한 지역에서는 가속도계를 이용하여 CMV를 측정하였고 기존 다짐도 평가와의 비료를 위하여 평판재하시험, 현장들밀도시험, 함수비, 동평판재하시험을 실시하였다(박근보와 김주형, 2011).

### 3.2 다짐 시험결과

성토된 현장 지반에 다짐로울러를 이용하여 다짐을 실시하여 다짐횟수에 따른 CMV, 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험의 결과를 거리에 따라 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 그림 6에서 x축은 다짐도 평가 시험들의 측정 위치를 나타내는 거리를 의미한다. 그림 5에서와 같이 다짐횟수에 따른 CMV의 경우 다짐 횟수 증가에 따라 CMV값이 뚜렷히 증가하지만 다짐횟수에 따른 평판재하시험의 지지력계수( $E_{PLT}$ , 식 (3) 참조)의 경우 4회에서 8회로 다짐횟수 증가 시 다소 증가하다가 8회에서 12회로 다짐횟수 증가시 L2를 제외하고 증가하지 않는다. 그림 6에서도 마찬가지로 다짐횟수에 따라 동평판재하시험의 지지력계수( $E_{LFWD}$ , 식 (4) 참조)는 다소 증가한다. 현장들밀도시험과 함수비를 이용하여 산정한 다짐도는 다짐횟수가 증가할수록 다짐도는 증가하지만 그 증가폭은 작았다.

$$E_{PLT} = \frac{2P(1-\nu^2)}{\pi R\delta} \quad (3)$$

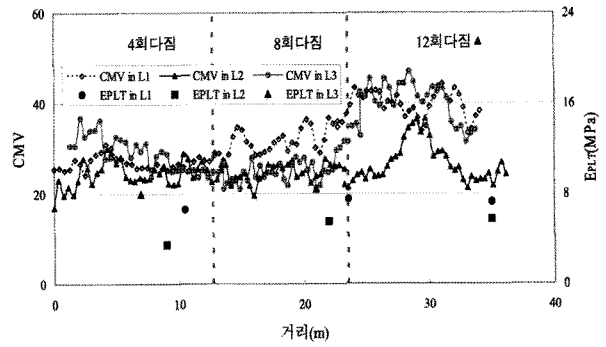


그림 5. CMV 및 평판재하시험 결과

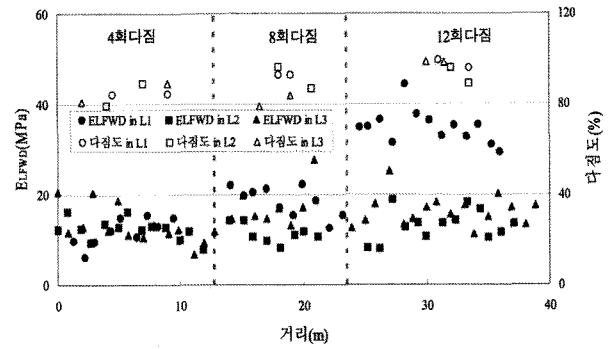


그림 6. 다짐도 및 동평판재하시험 결과

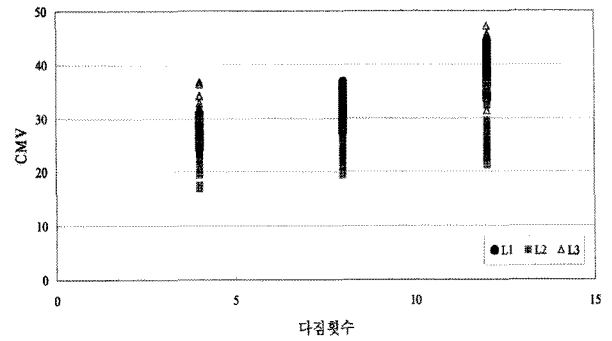


그림 7. 다짐횟수에 따른 CMV값

$$E_{LFED} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma \times R}{\delta_c} \quad (4)$$

여기서, P = 작용하중; R = 재하판 반경;  $\delta$  = 재하판 침하량;  $\sigma$  = 적용된 응력;  $\nu$  = 포아송비.

측정된 CMV, 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험 결과가 다짐횟수에 따라 어떤 범위에 분포하는지를 알아보기 위하여 다짐횟수에 따른 각각의 시험 결과를 그림 7에서 그림 10에 나타내었다. 그림 7과 같이 연속다짐의 결과로 얻어진 CMV 결과값이 그림 5와 그림 6에 나타난 경향과 비슷하게 L1, L2 및 L3의 레인에서

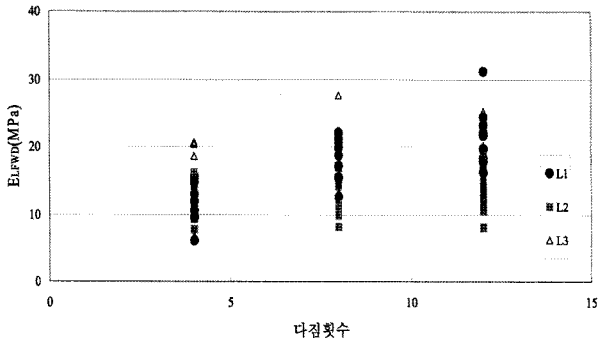


그림 8. 다짐횟수에 따른  $E_{LFWD}$  값

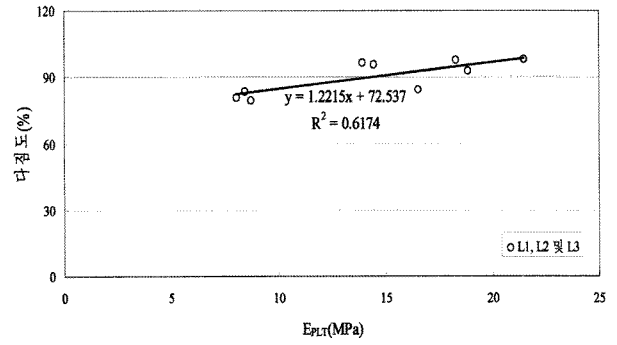


그림 11. 다짐도와 평판재하시험 결과의 상관관계

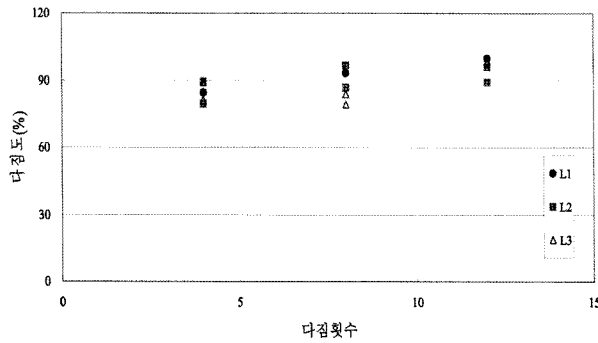


그림 9. 다짐횟수에 따른 다짐도 값

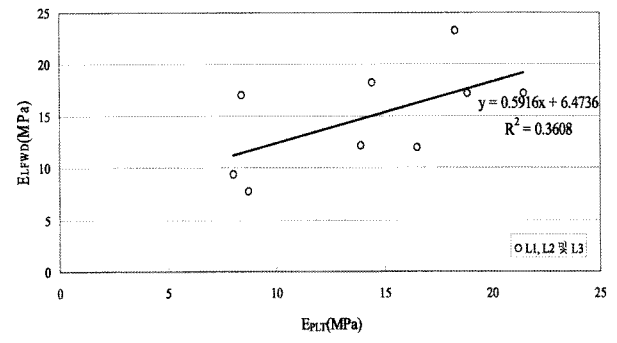


그림 12. 동평판재하시험과 평판재하시험 결과의 상관관계

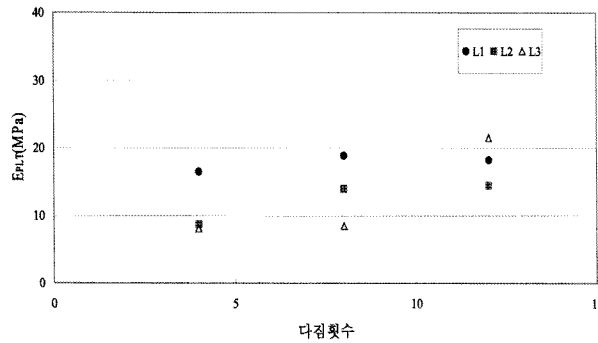


그림 10. 다짐횟수에 따른  $E_{PLT}$  값

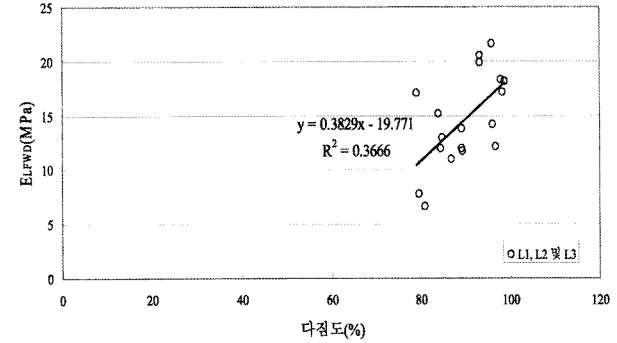


그림 13. 동평판재하시험과 다짐도 결과의 상관관계

다짐횟수가 증가될수록 증가하였다.

최근 국내에서도 연구가 많이 진행되고 있는 다짐도 평가 시험으로 동적평판재하시험 결과를 다짐횟수에 따라 그림 8에 나타내었다. 동적평판재하시험의 위치는 약 1m 간격으로 측정하였으며 그림 8에서 보는 바와 같이 다짐횟수가 증가함에 따라 동적평판재하시험의 지지력계수( $E_{LFWD}$ )가 4회에서 8회로 다짐할 때 증가하지만 12회 다짐 시에는 8회 다짐과 차이가 없으며 그 범위는 8회에 비하여 더 큰 것으로 나타났다. 그림 9와 그림 10은 다짐횟수에 따라 다짐도와 평판재하시험 결과 곡선이다. 두 그림에서 다짐횟수가 증가할수록 다짐도와 평판재하시험 지지력계수( $E_{PLT}$ )는 증가하지만 그 증가

폭은 작았다. 그림 7에서 그림 10에 나타난 바와 같이 시험결과 값이 다짐횟수가 증가할수록 증가한다. 그러나 현장다짐 시험에서 측정된 CMV, 평판재하시험, 및 동평판재하시험 값의 폭이 넓은 범위를 나타내고 있으나 현장드릴도시험을 이용한 다짐도의 경우 상대적으로 좁은 범위를 나타내고 있었다.

### 3.3 다짐도 평가시험간의 관계

여러 가지 현장 다짐도 평가 시험 측정값을 비교하여 이들의 상관관계를 산정하기 위하여 회귀분석을 수행하고 그 결과를 그림 11에서 그림 16에 나타내었다. 그

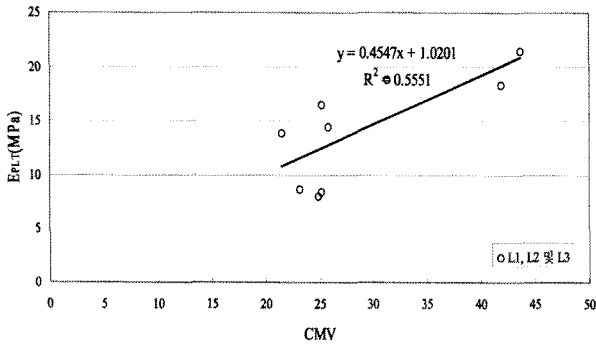


그림 14. 평판재하시험과 CMV의 상관관계

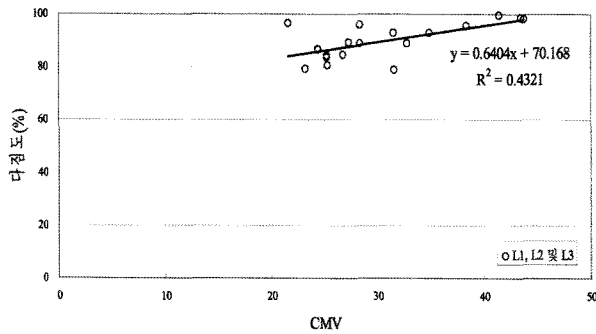


그림 15. 다짐도와 CMV의 상관관계

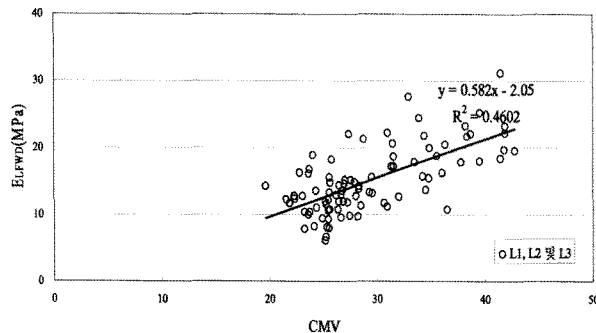


그림 16. 동평판재하시험과 CMV의 상관관계

림 11에서 그림 13은 다짐도, 평판재하시험 및 동평판재하시험 결과에 대한 회귀분석 결과이다. 그림에서 나타난 것과 같이 대부분의 회귀분석이 통계적으로 매우 약한 분포를 나타내고 있다. 이 같은 원인은 그림 7에서 그림 10에 나타난 바와 같이 현장시험에서 측정된 다짐도 평가 시험 결과 폭이 넓은 범위를 나타내고 있었던 것으로 기인하며 성토재료에 포함된 자갈의 유무에 따라 다짐도 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

가속도계를 이용한 연속다짐 측정값(CMV)과 현장 다짐도 평가 시험 측정값의 상관관계를 알아보기 위하여 평판재하시험한 결과, 다짐도, 동평판재하시험 및 CMV 결과를 회귀분석하여 각각의 다짐도 평가시험간

의 추세의 상관관계를 그림 14에서 그림 16에 나타내었다. CMV와 다짐도 및 CMV와 동평판재하시험의 측정값에 대한 상관관계를 회귀분석한 결과  $R^2 = 0.4321$  및  $R^2 = 0.4601$ 로 상관관계가 약한 것으로 관찰되었다. 그러나 CMV와 평판재하시험의 측정값에 대한 상관관계를 회귀분석 결과(그림 14)는  $R^2 = 0.5551$ 로 CMV와 다짐도 및 CMV와 동평판재하시험의 측정값 보다 양호한 상관관계를 나타내었다. CMV와 평판재하시험의 측정값에 대한 회귀분석 결과가 상대적으로 높은 상호관계에도 불구하고 CMV를 연속다짐 설계기준값으로 이용하기에는 낮은  $R^2$ 값으로 인해 더 높은 신뢰도가 필요한 해석이 필요하다. 그림 11에서 그림 16의 그래프에 작성된 직선식은 통계적 해석을 통한 회귀분석 결과인 선형 회귀분석 방정식의 기울기와 절편을 의미하며, R은 표본 상관계수이다.

#### 4. 연속다짐 설계기준값

##### 4.1 연속다짐 설계기준값 산정 방법

좀 더 신뢰성 있는 연속다짐 설계기준값을 산정하기 위하여 각각의 시험시공 측정값에 대한 통계분석을 수행하였다. 통계분석에 수행된 해석프로그램은 범용적으로 사용하고 있는 SPSS(Statistical Package for the Social Science)를 사용하였다. SPSS는 컴퓨터를 이용하여 복잡한 자료를 아주 쉽게 처리할 수 있는 통계분석 프로그램이다(SPSS for windows, 2001).

표 2는 다짐횟수에 따라 평균, 중간값, 분산, 표준편차, 변동계수에 대해 다짐도 평가 시험의 측정값에 대한

표 2. SPSS 해석결과

	다짐횟수	평균	중간값	분산	표준편차	변동계수
CMV	4회	12.1	11.5	12.3	3.5	28.9
	8회	12.6	11.5	17.9	4.2	33.8
	12회	18.0	19.1	69.0	8.3	46.2
평판	4회	11.1	8.7	22.3	4.7	42.6
	8회	13.7	13.9	27.3	5.2	38.1
	12회	18.1	18.3	12.4	3.5	19.5
LFWD	4회	12.1	11.5	12.3	3.5	28.9
	8회	13.4	12.4	15.4	3.9	29.4
	12회	21.2	23.5	47.9	6.9	32.7
다짐도	4회	17.6	17.2	1.4	1.2	6.8
	8회	17.8	17.7	1.6	1.2	7.0
	12회	19.6	19.8	0.6	0.8	4.0

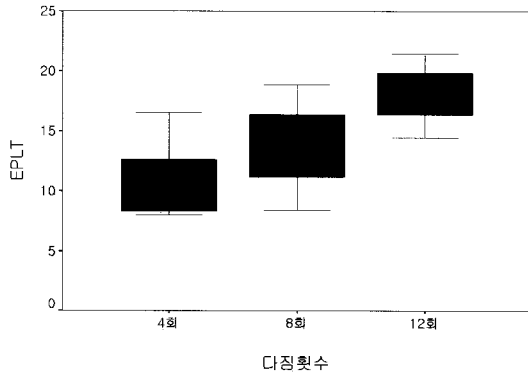


그림 17. 다짐횟수에 따른 평판재하시험 상자그림

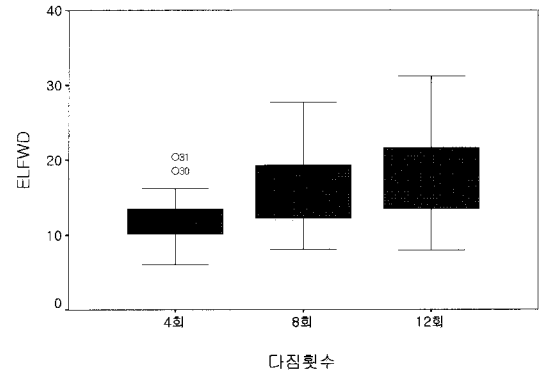


그림 19. 다짐횟수에 따른 동평판재하시험 상자그림

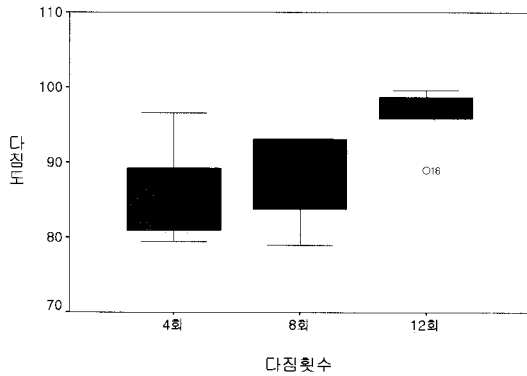


그림 18. 다짐횟수에 따른 다짐도 상자그림

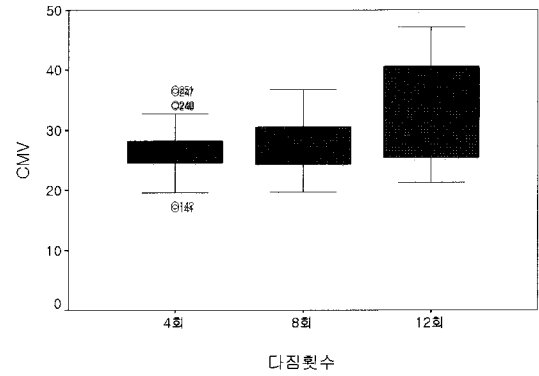


그림 20. 다짐횟수에 따른 CMV 상자그림

SPSS 해석결과를 나타내고 있다. 표 2는 대상 현장의 다져진 지반 형태와 다짐 특성을 의미한다. 여기서, 분산(variance)은 각 측정값들이 자료의 중심, 즉 거리에 따른 측정값의 평균으로부터 어느 정도 떨어져 있는가를 나타낸다. 다짐횟수가 4회와 8회의 경우 평판재하시험의 분산이 가장 크며 12회 다짐의 경우 CMV의 분산이 가장 크게 산정되었다. 표 2에서 변동 계수(coefficient of variation, COV)는 현장 측정값의 평균값을 고려한 상대적인 산포도 값으로 숫자가 클수록 상대적인 차이가 크다는 것을 의미하며 다짐횟수에 대한 변동계수는 평판재하시험이 상대적인 차이가 가장 크며 다짐도가 가장 작다. 현장에서 높은 변동 계수를 갖는 데이터는 낮은 변동 계수로 측정된 데이터에 비해 상대적으로 같은 신뢰성을 제공하기 위한 더 많은 시험 측정이 요구되기 때문에 변동 계수 값은 성능수준을 고려한 토목건설공사를 수행하는데 있어 중요한 요소가 된다(White 등, 2006). 각 측정값의 범위는 소형충격재하시험이 가장 큰 것을 알 수 있으며 통계적인 측정은 3가지 측정치에 대한 계수가 서로 다르며 측정 데이터의 폭이 넓은 범위에 존재하고 있음을 알 수 있다.

그림 17에서 20은 다짐도 평가 시험 결과에 대해 측정값들의 분포모양을 산정할 수 있는 상자그래프를 도시하였다. 다짐도 평가시험의 다짐횟수별 상자그림은 다짐횟수가 증가할수록 상자그림의 중간값이 증가하는 경향을 보이고 있어 전체적인 모든 다짐도 평가시험의 값들이 다짐횟수에 따라 증가한다. 특히 대부분의 중간값이 4회에서 8회 다짐 보다 8회에서 12회 다짐의 중간값이 급격히 증가한다. 또한 현장 다짐도 평가 시험에서 많은 데이터를 통한 통계학적으로 시험이 수행되지 못했다 할지라도 대부분의 데이터는 정규 분포의 형태와 잘 일치하고 있다. 특히 동평판재하시험과 CMV의 경우 정규 분포의 형태와 잘 일치하고 있다. 그러나 평판재하시험 다짐횟수 4회의 경우 상자그래프는 왼쪽으로 치우친 분포를 이루고 있으며, 다짐도의 경우 다짐횟수 8회 및 12회의 경우 각각 오른쪽과 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있어 다른 시험 결과값에 비해 대표성이 부족하다.

그림 21에서 그림 23은 CMV 평균값과 다짐횟수별 평균값을 사용한 상관관계를 나타낸다. 이러한 방법을 공간평균 접근법(White 등, 2006)이라 한다. 이 경우에서 각각의 데이터 위치는 로올러가 한번 지나는 동안에 기



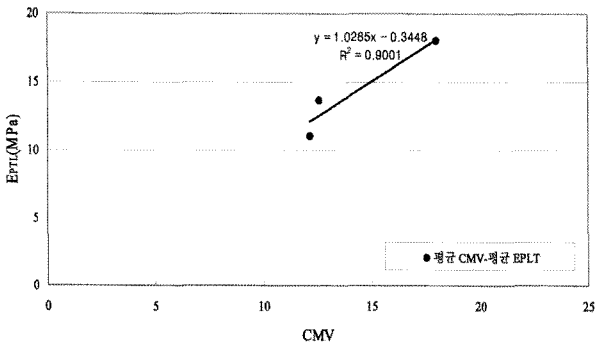


그림 21. 평균 평판재하시험과 평균 CMV 곡선

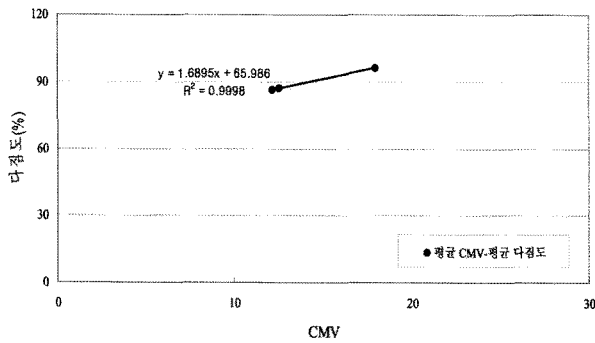


그림 22. 평균 다짐도와 평균 CMV 곡선

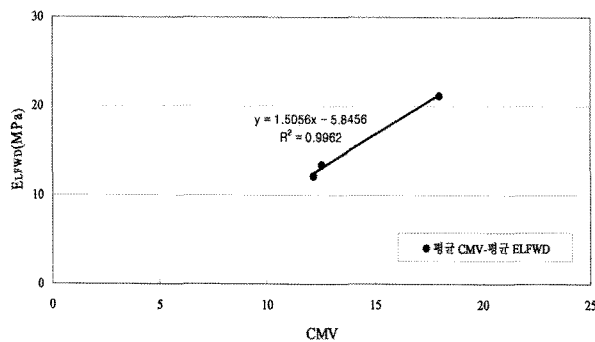


그림 23. 평균 E<sub>LFWD</sub>와 평균 CMV 곡선

록된 모든 데이터 측정 결과의 평균으로 나타낸다. 평균 값은 그림 17에서 20의 상자그림을 해석하면서도 구할 수 있으며 평균값은 표 2에 나타내었다. 이 접근법을 사용하면, 빈약하거나 존재하지 않는 CMV에 대한 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험 측정값에 대한 상관관계를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 그림 14에서 그림 16에 나타난 바와 같이 R<sup>2</sup> 값은 0.5551, 0.4321 및 0.4602의 CMV와 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험에 대한 선형 곡선이 공간평균 접근법에 의해 R<sup>2</sup> 값이 0.9001, 0.9998 및 0.9962 정도에 이르기까지 증가된다. 이와 같이 회귀분석된 값은 지반에 대한 평판재하

시험, 다짐도 및 동평판재하시험 설계기준값이 CMV로부터 예측될 수 있다는 것을 암시한다. 그러나 로올러에 측정된 CMV 데이터와 지반의 다짐도에 대한 대표적인 평균값은 높은 수준의 신뢰성을 제공하지 않는다. 따라서 공간평균 접근법에 의한 회귀분석에서 인정할 수 있는 설계기준값을 산정하기 위해서는 공간평균 접근법에서 구한 회귀분석 곡선에 대한 최소 영역을 정의해야 한다. 이것은 알맞은 경험적 상관관계를 산출하기 위해서는 공간영역을 최소로 감소시키기 위해서 필요하다.

#### 4.2 연속다짐 설계기준값의 산정 절차

일반적인 다짐도 평가는 다짐완료후 평판재하시험 또는 현장들밀도시험을 통한 일점법으로 실시하며 소정의 다짐 설계기준값을 만족시켜야 한다. 다짐 설계기준값에 대한 규정은 최소관리이므로 각층의 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 한다. 그러나 CMV를 이용한 다짐규정은 아직 제정되어 있지 않으므로 본 연구에서는 다짐도를 만족하는 CMV를 얻기 위해 기존의 다짐도 평가시험의 결과와 비교하였다.

현장다짐 실시후 그림 3에서 설명한 절차에 따라 연속다짐 측정 데이터와 다짐도 평가 시험 데이터 측정 결과를 이용하여 신뢰성 있는 통계 해석으로부터 연속다짐 설계기준값을 결정한다. 그러나 가속도 해석을 통한 연속다짐 결과값(CMV)은 상대적인 평균값으로 연속다짐 설계기준값으로 제시되기 위해서는 어떤 수준의 보정(최소 영역의 정의)이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 공간평균 접근법에 의한 회귀분석식을 이용한 설계기준값을 산정하기 위해서 그림 24에서 그림 26과 같이 제안된 회귀분석식 곡선의 신뢰도 95%에 해당하는 데이터를 설계기준값으로 제안한다. 여기서 신뢰도 95%의

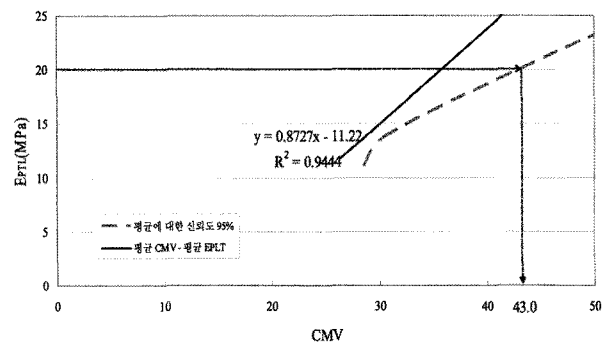


그림 24. 평판재하시험에 대한 CMV 설계기준값 산정

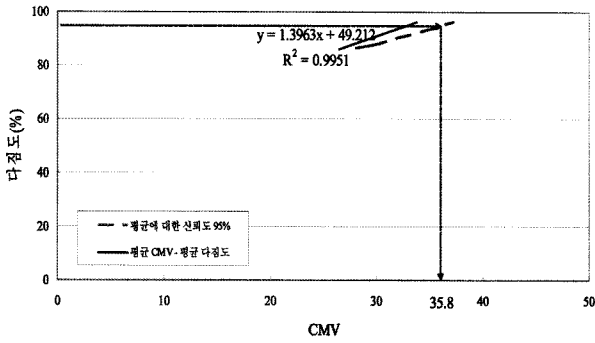


그림 25. 다짐도에 대한 CMV 설계기준값 산정

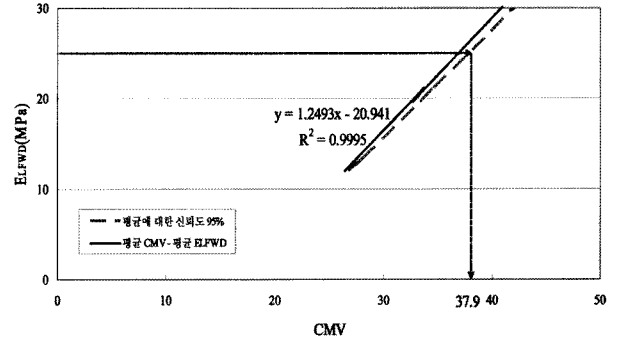


그림 26. E<sub>LFWD</sub>에 대한 CMV 설계기준값 산정

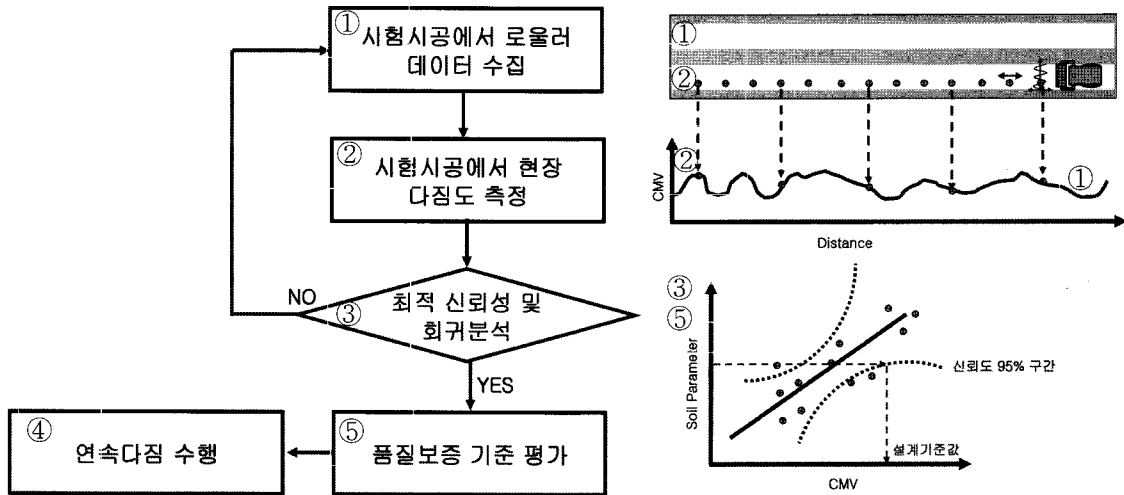


그림 27. 설계기준값 산정절차

표준편차는 그림 14에서 그림 16의 데이터를 이용한다.

제안된 설계기준값을 산정하는 절차는 그림 27에 나타내었다. 그림 27은 연속다짐 설계기준값을 평가하기 위한 흐름도 및 설계기준값 산정절차를 보여주고 있다. 각 항목별 세부적인 내용은 그림 27을 번호순으로 기술하면 다음과 같다.

- ① 연속다짐로올러 데이터 수집 : 연속다짐로올러에 부착된 가속도계를 이용하여 연속다짐로올러 데이터를 수집한다. 이 때 각각의 시험 위치에서 로올러 폭을 교차하여 데이터를 수집한다. 이 같은 측정은 각각의 위치에서 얻어지는 측정값에 대한 분산을 설명할 수 있고, 측정값에 대한 신뢰성 있는 회귀분석식을 계산할 수 있다.
- ② 현장 다짐도 시험 데이터 수집 : 본 연구에서는 평판재하시험, 다짐도, 동평판재하시험을 이용하여 설계기준값을 선정하였다. 이 때 각각의 시험 결과는 작업자의 숙련도, 시험장비의 기계적 효율, 현장상태 등과 같이 여러 조건에 따라서 값의

차이가 발생할 수 있으므로 오차가 발생되지 않도록 시험한다.

- ③ 설계기준값을 결정하기 위한 회귀분석 : ①과 ②에서 수집된 데이터는 같은 위치에서 측정된 데이터로 4.1절에서 설명한 바와 같이 공간평균 접근법을 이용하여 회귀분석 한다. 이때 제안된 곡선의 신뢰도 95%에 해당하는 데이터를 설계기준값으로 제안한다. 좀 더 양질의 회귀분석을 하기 위하여 연속다짐기에서 수집된 측정값은 다짐횟수가 낮은 곳에서 높은 곳으로 분리하여 분석한다. 다짐횟수가 증가함에 따라 데이터가 증가하는 양상이면 일반적으로 좋은 상관성을 가지는 결과를 나타낸다.
- ④ 품질보증 기준 평가 : ③에서 제안된 설계기준값을 이용하여 연속다짐을 수행하며 예측된 데이터가 설계기준값 이상 시행된 측정된 데이터만을 품질 기준으로 채택한다.
- ⑤ 연속다짐 수행 : 제안된 설계기준값을 사용하여

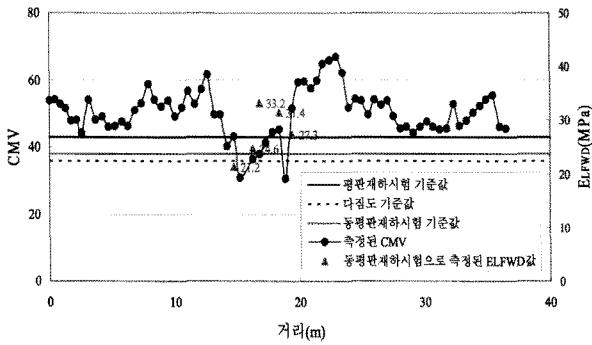


그림 28. 설계기준값 평가

지반의 다짐평가를 실시간으로 측정하고 설계기준값 보다 작은 영역은 재다짐 한다.

### 4.3 연속다짐 설계기준값의 현장 평가

CMV 설계기준값은 그림 24에서 그림 26에 나타난 바와 같이 40.3, 35.8 및 37.9로 결정한 후 동일한 성토 재료를 이용하여 그림 5의 L4와 같이 연속다짐을 12회 수행하여 거리에 따른 CMV 변화와 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험으로 구한 CMV 설계기준값을 그림 25에 나타내었다. 대부분의 CMV가 설계기준값 위에 존재하지만 15m에서 19m까지 설계기준값보다 작은 CMV가 측정되었다. 따라서 이 위치에서 지지력계수 측정의 정확성 및 이동의 간편성이 다른 다짐도 평가 시험보다 좋은 동평판재하시험을 이용하여 현장 다짐도 평가 실험을 실시하였다. 다짐도 평가 시험 실시결과 동평판재하시험 결과 값이 15m에서 19m 구간에서 21.2~24.6MPa로 설계 설계기준값 25MPa 보다 작게 산출되었다. 따라서 CMV로 다짐도 평가를 검증하는 방법으로 매우 효과적일 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

본 연구는 성토 지반의 다짐 시 다짐관리 기준에 의한 다짐이 실제 현장에서 구현되도록 기존현장에서 사용되고 있는 현장 다짐기에 가속도계를 이용한 연속다짐평가장치를 부착하여 기존현장에서 사용되고 있는 현장 다짐도에 의한 하부지반 시공 및 관리와는 전혀 다른 새로운 개념의 다짐관리를 제시하는 것이다. 이에 시공 현장에서의 일점법의 판단으로 관리되는 다짐평가가 아닌 전수조사 개념의 다짐관리체계를 확립하는 것이며 이에 따라 다짐 시공 절차를 제안하고 특히 가속

도계를 이용한 다짐도를 평가하는 절차를 제안하고 실증하였다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 다짐도, 평판재하시험 결과 및 동평판재하시험 결과에 대한 회귀분석 결과 대부분의 회귀분석이 통계적으로 매우 약한 분포를 나타냈다. 또한 현장에서 획득한 다짐도 평가시험과 CMV와의 상관관계를 회귀분석한 결과  $R^2$  값이 약 0.6 이하의 값으로 통계적으로 약한 분포를 나타내고 있었다.
- (2) 다짐도 평가시험간의 공간평균 접근법을 이용한 회귀분석 결과,  $R^2$  값이 0.9이상의 값으로 빈약한 CMV에 대한 평판재하시험, 다짐도 및 동평판재하시험 측정값에 대한 상관관계를 보다 정확하게 예측할 수 있었다.
- (3) CMV 데이터와 지반의 다짐도에 대한 대표적인 평균값에 대한 높은 수준의 신뢰성을 제공하기 위하여 제안된 공간평균 접근법을 이용한 회귀분석식 곡선의 신뢰도 95%에 해당하는 데이터를 설계기준값으로 제안하고 제안된 설계기준값과 추가적인 현장시험 결과와의 비교를 통해 CMV를 이용한 다짐도 평가 방법을 제안하고 검증하였다.
- (4) 본 연구에서 사용된 CMV를 이용한 다짐도 평가는 신속성, 편리성, 숙련도 면에서 매우 효과적일 것으로 판단되며, 적용된 연속다짐은 가속도 해석과 다져질 지반의 연속적 평가라는 개념적인 과정을 통해 모든 현장 다짐 지반에 관한 데이터를 축적할 수 있으며 데이터 축적으로 인한 효율적인 다짐관리 및 시공 신뢰성 확보할 수 있는 기술을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 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 (2007), 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구.

2. 건설교통부 (2001), 도로설계편람.
3. 박근보, 김주형 (2011), 새로운 다짐도 평가기법의 적용성에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, (in review).
4. 철도청 (1999a), 철도공사전문시방서.
5. 철도청 (1999b), 철도표준시방서.
6. 한국도로공사 (2001), 고속도로공사 전문시방서-토목편.
7. 한국도로공사 (2002), 도로설계요령.
8. 한국도로공사 (2009), 도로공사 표준시방서.
9. 표준협회 (2000), 한국산업표준.
10. 표준협회 (2001), 한국산업표준.
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, 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.
13. SPSS Inc. (2001), SPSS for Windows, SPSS Inc.
14. White, D.J, Morris, M., and Thompson, M. (2006), "Power-based compaction monitoring using vibratory padfoot roller," Proc., *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, Atlanta, CD-ROM.

(접수일자 2010. 6. 30, 심사완료일 2011. 8. 24)