

연속 다짐 평가에 관한 연구

Study of the Intelligent Compaction Evaluation

박근보¹⁾, Keub-Bo Park, 김주형¹⁾, Ju-Hyong Kim, 조삼덕¹⁾, Sam-Deok Cho

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT

SYNOPSIS : In this study, we considered the development for degree of compaction for intelligent compaction. In practice, any direct or indirect method can be used as a intelligent compaction method. A series of field tests was conducted using an accelerometer. This is quick and simple indirect methods of measuring soil stiffness. Each result was compared with the results from a plate load test. A prototype device for intelligent compaction was developed, and we evaluated its performance.

Keywords : Degree of compaction, Intelligent Compaction(CCC), geogauge, Evaluation of degree of compaction

1. 서론

산업화에 따른 각종 기술의 발달과 더불어 활발한 토목 건설물 축조에 따른 공법의 개발, 개선 및 건설장비의 개발도 급속하게 진행되어 왔다. 특히 토목 건설에서 다짐공법은 사용목적별로 다양화된 장비의 기계화, 자동화 및 대형화에 따른 공기의 단축, 품질관리의 효율성이 증대되어 왔다. 그러나 이와 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. 따라서 현재까지도 과거 인력에 의해 개별적으로 관리되어 왔던 다짐 평가 및 관리시스템은 전체적인 공정에 첨단 기술을 접목시켜 체계적으로 관리하는 종합 관리 시스템 개발이 필요하다.

최근 연속다짐(Intelligent Continuous Compaction 또는 Intelligent Compaction)은 유럽, 미국과 일본의 건설 시장에서 사용하는 새로운 기술이다. 연속다짐관리 기술은 실시간으로 흙 또는 아스팔트의 다짐을 제어하는 다짐기를 사용한 새로운 기술로 다짐공정과 다짐 평가를 분리하여 진행하던 공정을 다짐 진행과 동시에 다짐평가를 연속적으로 수행할 수 있는 다짐 방법이다. 연속다짐 기술은 토목 다짐관련 공사의 공정관리에 적용할 수 있는 최초의 기술이다. 현재 국내에서 연속다짐관리에 관한 연구는 아직 시작단계에 있으며 오스트리아, 스웨덴, 미국, 일본 그리고 독일 등의 선진국에서는 일부 시방기준 등까지 제안되어 있으나, 토질 특성, 다짐 방법 및 다짐 평가 방법에 따라 그 결과가 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 계속 진행 중에 있다.

본 연구에서는 여러 가지 시험조건으로 실제 현장규모로 다짐을 수행하여 가속도계를 이용한 다짐도 평가 가능성을 평가하였다. 또한 다짐도 평가를 위하여 평판재하시험(PLT)을 수행하여 이 결과를 가속도계를 이용한 다짐도 평가 결과와 비교, 분석하였다.

2. 연속다짐의 평가 방법

진동로울러를 이용하여 지반 다짐을 수행하는 경우 진동로울러 드럼과 지반에 작용하는 힘의 평형도는 그림 1과 같다. 여기에는 편심하중(eccentric mass)의 회전으로 인해 작용하는 원심력(FC)와 진동드럼 자체 하중 (FD) 그리고 진동으로 인해 유발되는 지반의 반발력 (FR)으로 나타낼 수 있다. 이를 식으

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

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

여기서, m_w : 로울러 자중, m : 편심체 하중,
 e : 편심, x_w : 변위
 ω : 편심체 각속도 t : 시간 g : 중력가속도

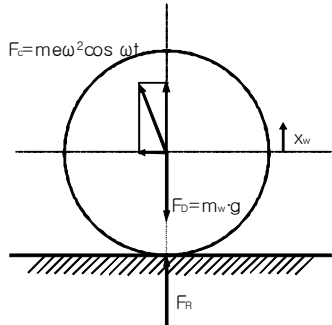


그림 1 진동로울러의 힘의 평형

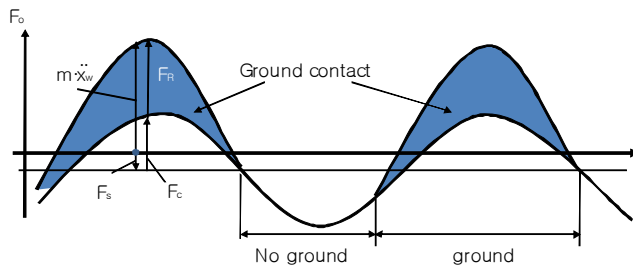


그림 2 진동 주기에 따른 힘과 지반반력

또한, 그림 2는 진동에 따라 발생하는 힘과 이에 따라 발생하는 지반의 반발력을 나타낸 것이다. 만약 로울러가 지반에 가하는 진동이 일정하다면, 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 지반에서 발생하는 반발력의 크기를 측정하여 다짐도를 평가할 수 있다. 푸리에 변환은 프랑스의 수학자 푸리에(J.B.A. Fourier)가 발견한 이론으로, 어떠한 신호 파형이라도 그 파형에 반복이 있으면 여러 가지 주파수의 삼각함수(sin파, cos파)로 분해할 수 있다는 이론이다. 이 이론의 발견으로 소리나 진동 등의 시간 신호를 주파수 성분별로 분해할 수 있게 되어 이를 응용한 기계, 전자분야의 많은 발전을 이루게 되었다. 그러나 푸리에 변환 자체만으로는 계산량이 많아 주파수를 성분별로 분해하는데 시간이 많이 걸리기 때문에 현재에는 빠른 속도로 주파수 성분 분해가 가능한 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT) 알고리즘을 사용하는 것이 일반적이다. 즉, 그림 1과 2에 나타낸 진동로울러의 진동주기에 따른 힘과 지반반력은 지반의 강성에 따라 그림 3에 나타낸 것과 같은 다양한 형태로 나타나며, 여기서 얻어진 진동 가속도 값에 대해 FFT를 적용하면 그림 4와 같은 주파수 파워스펙트럼을 구할 수 있다. 즉, 지반의 강성은 응력의 변화량과 지반의 침하량에 의해 결정이 되는데 응력의 변화량은 가속도계에서 측정되는 수직가속도에 비례하기 때문에 진동로울러에 가속도계를 장착하여 각 진동원에 의한 가속도를 측정하여 지반의 강성도를 간접적으로 측정할 수 있는 원리이다.

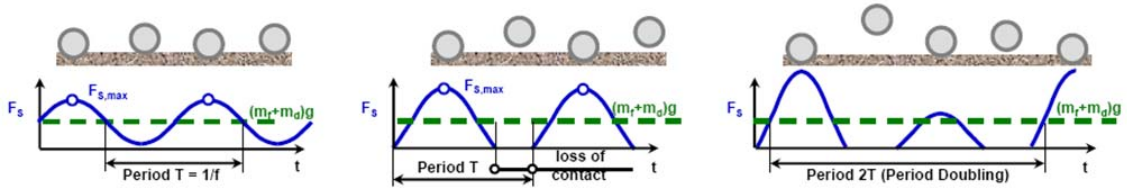
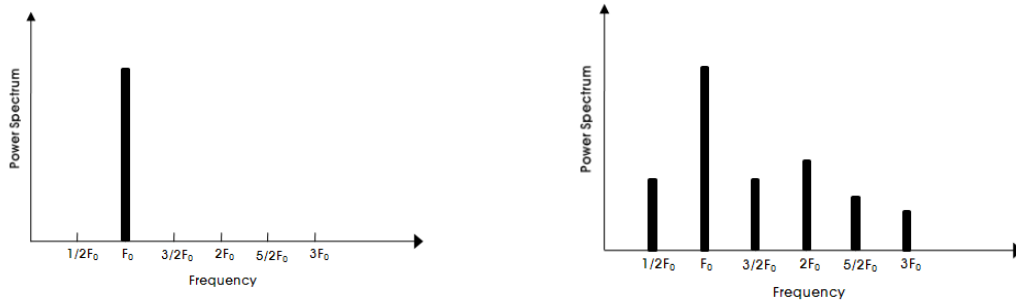


그림 3 지반강성에 따른 지반 반력의 변화 양상 (AMMANN, 2008)



(a) 0회 다짐

(b) 수회 다짐

그림 4 다짐횟수 증가에 따른 주파수 파워스펙트럼

그림 4에 나타난 주파수 파워스펙트럼을 이용하여 지반의 강성도를 나타내는 지표로는 스웨덴 지오다이나믹사가 제안한 CMV는 다음과 같이 산정할 수 있다 (Radowski, 2008).

$$CMV = (A4/A2) \times 100 \quad (2)$$

여기서, A2 : F0 해당 진폭, A4 : 2F0 해당 진폭, F0 : 진동장치의 가진주파수 또는 기본진동수를 나타낸다.

3. 현장시험

현장시험은 경기도 일산에 위치한 OO 공사 현장에서 그림 5와 같이 1개의 레인(폭 5m, 길이 41m)을 이용하여 다짐로울러의 드럼에 CMV를 측정할 수 있는 컴팩토미터를 진동다짐로울러에 장착한 후 다짐 횟수를 4, 8, 12회로 달리하여 다짐을 수행하며 CMV를 측정하였고, 각각의 다짐평가지험을 실시하였다. 현장시험에 사용한 흙은 통일분류법(USCS)상 GP로 기본물성치는 표 2와 같다.

현장시험에 사용된 다짐로울러는 일본 SAKAI사에서 제작한 SV500으로 다짐 폭이 약 2.2m이고 진동 횟수는 23~28Hz까지 조절이 가능한 제품으로 총 중량은 약 10ton이다.

표 1 시험에 사용된 흙의 물성치

흙 종류	비중(G_s)	OMC(%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	함수비(%)
GP	2.67	8.57	20.38	11.96

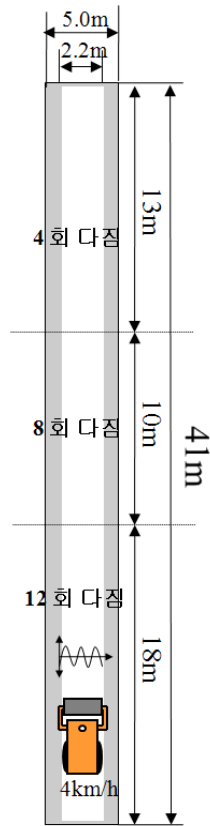


그림 5 성토다짐 시험시공 평면도

4. 시험결과

그림 5에 나타난 시험시공 평면도의 단면과 같이 다짐기를 제어하여 연속다짐을 수행하여 실시간으로 연속다짐 측정값 CMV를 산정하였다. 연속다짐의 결과로 얻어진 CMV 결과를 거리와 다짐회수에 따라 그림 6 및 7에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 현장 시험시공에서는 CMV값이 다짐회수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 7에 나타난 바와 같이 거리에 따른 CMV 값은 다짐회수에 따라 연속적으로 증가하는 양상을 나타냈다. 특히 측정치가 거리에 따라 다짐회수가 증가할수록 감소되거나 증가되는 경향이 거의 일치함을 알 수 있었다.

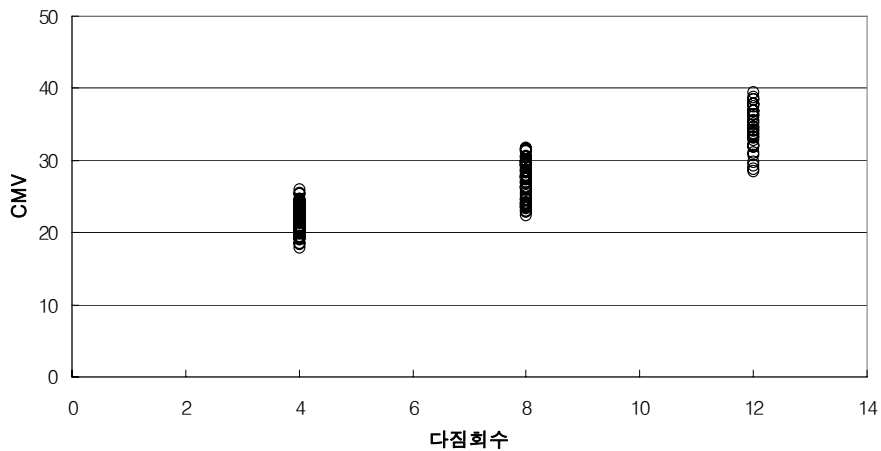


그림 6 다짐회수에 따른 CMV값

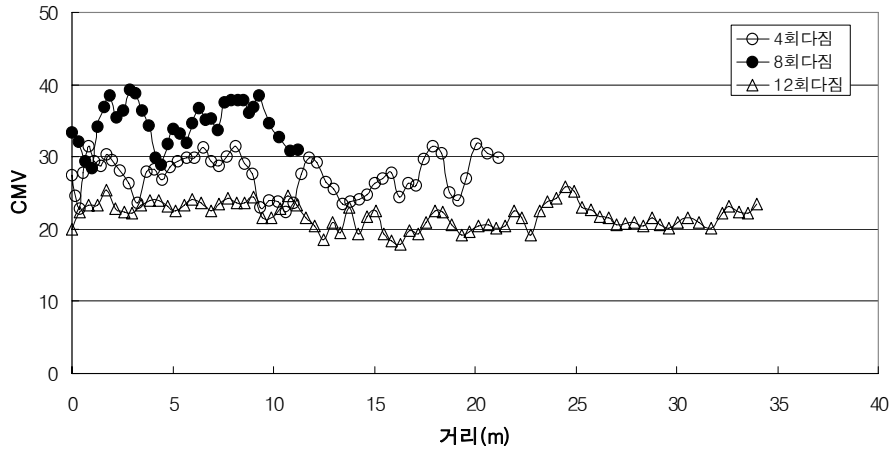


그림 7 거리에 따른 CMV값

현장 시험시공에서는 다짐도 기준시험으로 일반적으로 사용되는 평판재하시험을 수행하였으며 수행된 평판재하시험의 위치는 CMV 측정값 변화가 많이 발생하는 위치에서 시험하였다. 평판재하시험 측정값과 지능형 연속다짐 측정값과의 비교를 위하여 평판재하시험 결과로부터 K_{30} 을 산정하였다. 시험시공중 평판재하시험결과로 얻어진 K_{30} 결과를 거리와 다짐회수에 따라 그림 8 및 9에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 현장 시험시공에서는 K_{30} 이 다짐회수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으나 8회와 12회 다짐의 경우 각각 4회와 8회에 비해 다소 감소하는 결과를 보인 측정값도 있었다. 그림 9의 거리에 따른 K_{30} 의 경우, 4회 다짐시 보다는 8회 다짐시의 K_{30} 이 더 크게 나타났으며, 8회 다짐시의 K_{30} 보다는 12회다짐시 K_{30} 이 더 큰 값이 나타났으나, 위치별 편차가 크게 나타났다. 다짐회수가 증가할수록 K_{30} 이 증가하는 경향이 있지만 CMV값에 비해 증가 경향이 다소 떨어짐을 알 수 있다.

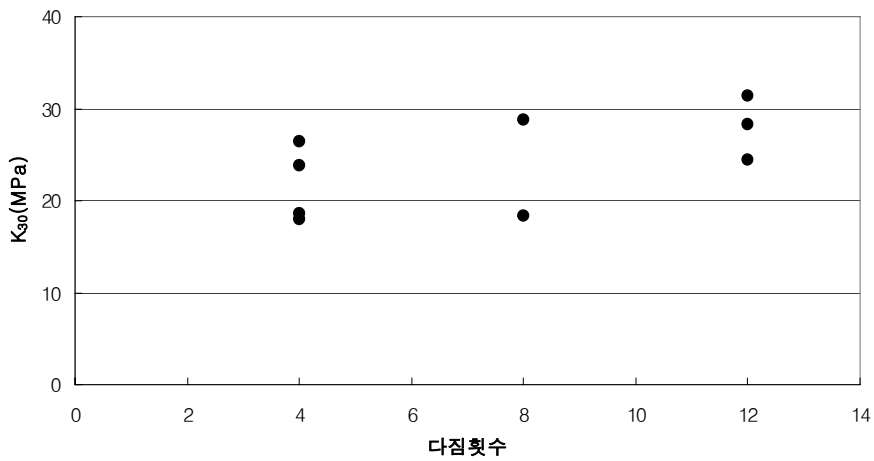


그림 8 다짐회수에 따른 K_{30} 값

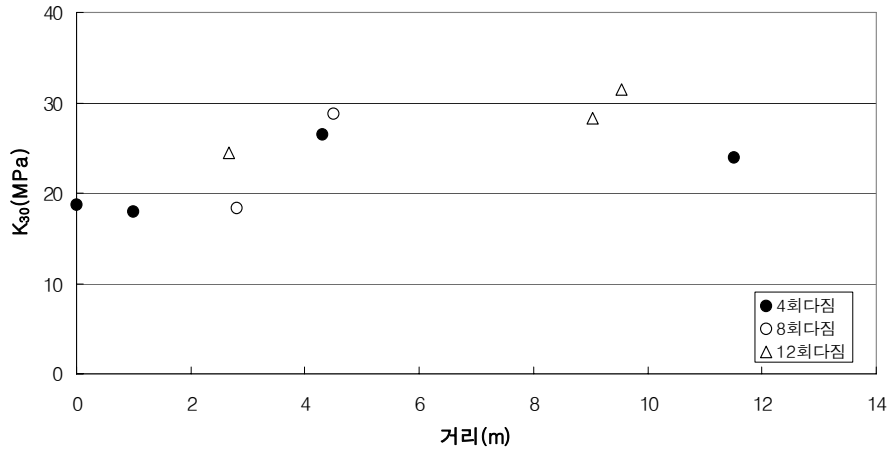


그림 9 거리에 따른 K₃₀값

좀 더 신뢰성 있는 연속다짐을 평가하기 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 (김정은등, 2003).

표 2는 평균, 표준편차, 변동계수, 최소값, 최대값 및 3가지 주요 시험 측정값에 대한 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 나타내며 CMV의 분산이 가장 크게 산정되었다. 변동 계수(coefficient of variation, COV)는 현장 측정값의 평균값을 고려한 상대적인 산포도 값으로 숫자가 클수록 상대적인 차이가 크다는 것을 의미하며 평판 재하시험이 상대적인 차이가 가장 크다는 것을 의미한다. 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 (Tompson과 White, 2008). 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.

표 2 현장 시험시공의 통계해석 결과

방법	평균	표준편차	분산	변동계수	최소	최대
평판재하시험	24.3	5.0	24.8	21	18	31
CMV	26.3	5.4	29.4	20	18	39

그림 10과 11은 각각의 시험 결과에 대해 측정값들의 분포모양을 산정할 수 있는 상자그래프를 도시하였다. 대부분의 데이터는 정규 분포의 형태와 잘 일치하고 있지만 평판재하시험 8회의 경우의 상자그래프는 오른쪽을 치우친 분포를 이루고 있어 다른 시험 결과값에 비해 대표성이 부족하다. 이것은 많은 데이터를 이용한 통계학적 해석이 수행되지 못하였기 때문으로 판단된다. 그러나 많은 데이터를 사용한 CMV는 정규 분포와 잘 일치하고 있었으며 다짐횟수에 따라서 CMV값이 증가하는 경향을 정확히 보여주고 있다. 여기서 CMV의 값보다 상대적으로 적은 K₃₀ 데이터의 개수가 사용된 것은 건설공사 품질시험기준에 입각한 다짐시험 판정기준에서 의해 얻은 시험 빈도에 따라 측정된 것이다. 이러한 시험빈도를 사용하는 기존의 평판재하시험은 시간과 노력이 많이 들며, 일점시험(spot test)으로 전체의 다짐을 관리하고 있어 현재의 시험관리 방법으로는 전체 부지의 다짐도를 판단할 수 없다. 일반적으로 다짐작

업은 일점법에 의한 대표성, 다짐 품질을 평가하기 위한 시료 채취의 위치 문제, 시험자의 오차 및 토질 종류에 따른 역학적 특성과 지반 공학적으로 매우 중요함에도 불구하고 단지 장비의 일정통과에 의해 충분히 다져진다고 생각하며 간과하기 쉽기 때문이다.

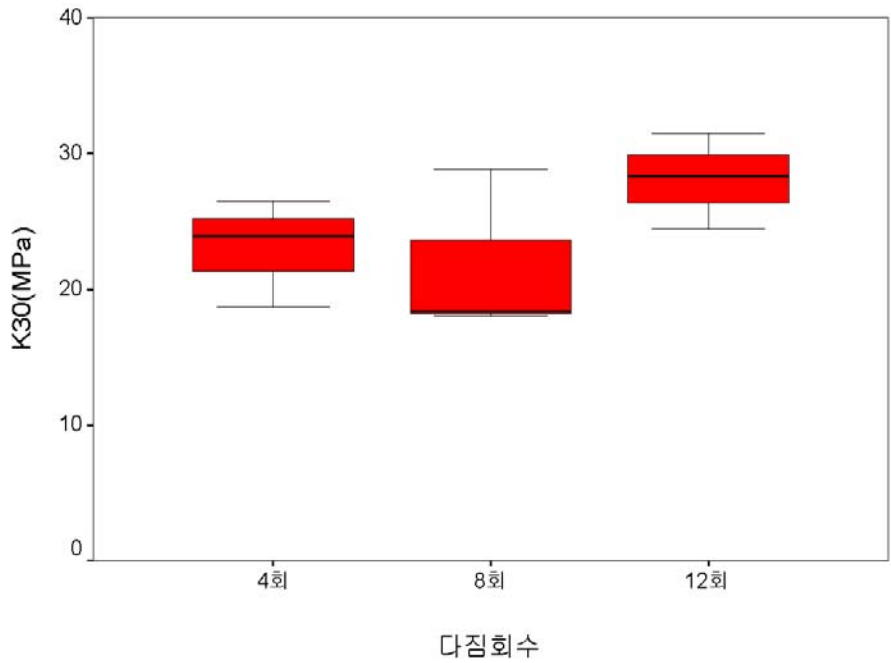


그림 10 다짐회수에 따른 평판재하시험 상자그림

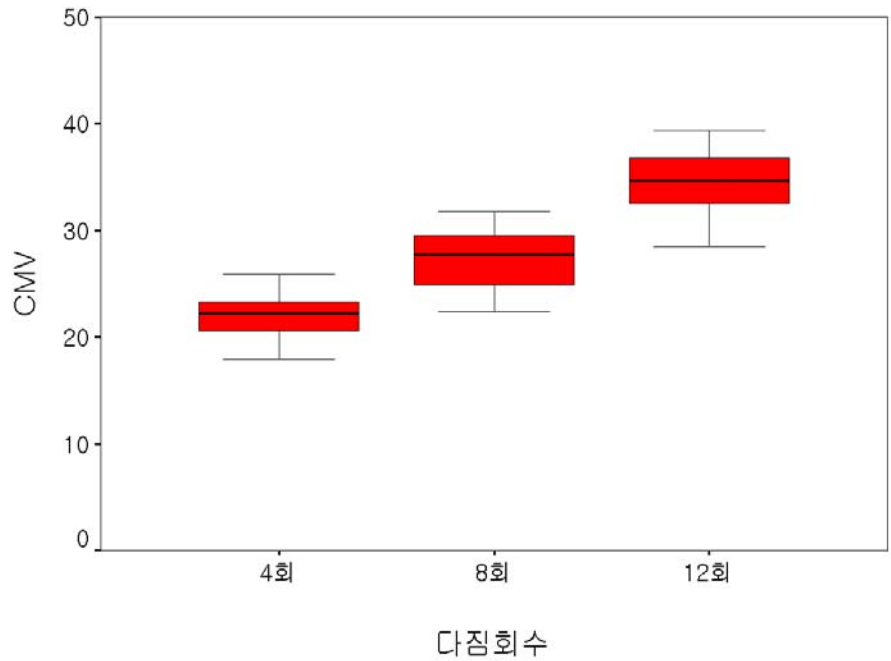


그림 11 다짐회수에 따른 CMV 상자그림

5. 결론

성토 지반의 다짐시 다짐관리 기준에 의한 다짐이 실제 현장에서 구현되도록 기존현장에서 사용되고 있

는 현장 다짐기에 연속다짐 평가장치를 부착하여 기존현장에서 사용되고 있는 현장 다짐도에 의한 하부 지반 시공 및 관리와는 전혀 다른 새로운 개념(CMV)의 다짐을 제시하였다. 또한 기존의 평판재하시험이 시간과 노력이 많이 들며, 일점시험(spot test)으로 인한 전체 부지의 다짐도 평가 부재를 개선하기 위하여 새로운 개념의 다짐도 평가장치를 이용하여 기존의 평가법과 비교를 통하여 전체부지의 다짐도를 평가할 수 있는 가능성을 살펴보았다.

1. 김정은, 박양규, 박중재 (2003), **윈도우용 SPSS 통계분석 10**, 21세기사.
2. AMMANN_CASE (2008), AMMANN/Case/Texana IC System, presentation, "Intelligent Compaction.. GPS-based Compaction Control", *TPF ICS intial-TWG meeting*.
3. Radowski, S (2008), Sakai IC System, presentation, "Intelligent Compaction, CCV IC, SAKAI", *TPF ICS intial-TWG meeting*.
4. Thompson M. J. and White D. J. (2008) Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 134, No. 12, pp 1771 - 1777.