

진동주파수 해석을 통한 지반강성 평가방법 Soil Stiffness Evaluation using Vibration Frequency

김주형¹⁾, Ju Hyong Kim, 유완규²⁾, Wan-Kyu Yoo, 김병일³⁾, Byoung Il Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology.

²⁾ 명지대학교 박사과정, Ph.D. Candidate, Myongji University.

³⁾ 명지대학교 교수, Professor, Myongji University.

SYNOPSIS : Continuous Compaction Control is a new cutting edge technique in United States, Japan and European construction market that uses an instrumented compactor to measure soil stiffness in real time usually with vehicle tracking system such as Global Navigation Satellite System (GNSS). In this study, soil stiffness was evaluated by adapting Fourier transforming technique with acceleration data obtained from accelerometers used as a continuous compaction control instrument. The soil stiffness obtained by accelerometers gave analogous results with reference results such as dry density, elastic modulus obtained from Geogauge and Light falling deflectometer.

Keywords : Accelerometer, Vibratory roller, Frequency, Fourier Transform

1. 서론

유럽, 일본, 미국 등 선진국에서는 기존의 다짐도 평가방법의 문제점을 인식하고 첨단장비를 이용한 새로운 형태의 다짐도 평가방법을 개발 적용하고 있다. 이 중 대표적인 것이 지반의 반발력을 측정할 수 있는 가속도계를 진동로울러에 장착하고 다짐 로울러의 위치를 추적할 수 있는 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 함께 장착한 다짐도 평가시스템이다. 이 시스템을 사용하는 경우 기존에 수백미터 또는 수천 평방미터에 1회씩 수행하던 다짐도 평가를 전수조사를 통한 전체 지역의 다짐도를 측정/평가가 가능하다. 현재 미국의 연방도로국(FHWA)을 중심으로 가속도계를 이용한 지반의 다짐도 평가 시스템 개발에 가장 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 미네소타 교통국(Department of Transportation Minnesota, Mn DOT)에서는 관련 다짐시방기준 "Quality Compaction by IC, LWD, & Test Rolling (Pilot Specification for Embankment Grading Materials)" (2007) 을 제안하여 연속다짐평가방법을 시험적으로 사용할 수 있도록 되어 있다. 또한 일본에서도 이미 간사이공항 2차부지 건설시에 가속도계를 이용한 연속다짐평가방법을 이용하여 전체 다짐도를 평가한 실적도 있으나 국내에서는 조성민 등 (2000)이 "반발력을 이용한 다짐도 검사기법" 연구를 수행한 이래 이와 관련한 연구실적이 매우 미미한 실적이다. 본 연구에서는 현장 모형시험을 통해 연속다짐평가용으로 개발된 컴팩토미터(Compactometer)와 일반 가속도계를 이용하여 측정된 진동 가속도 값을 이용하여 지반강성도 측정의 기본 원리와 적용결과를 분석하고자 하였다.

2. 가속도계 측정 원리

진동로울러를 이용하여 지반 다짐을 수행하는 경우 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 식(1)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

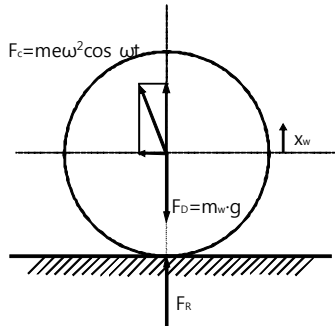


그림 1. 진동로울러의 힘의 평형

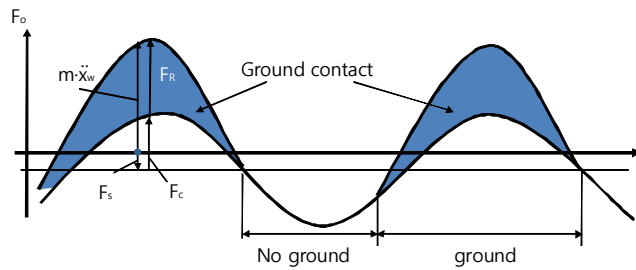


그림 2. 진동 주기에 따른 힘과 지반반력

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: 1768~1830)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 시간신호를 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 고속 푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT) 알고리즘을 사용하는 것이 일반적이다.

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 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.

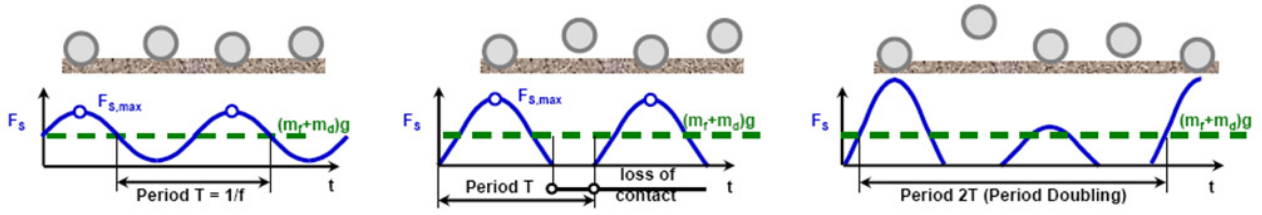
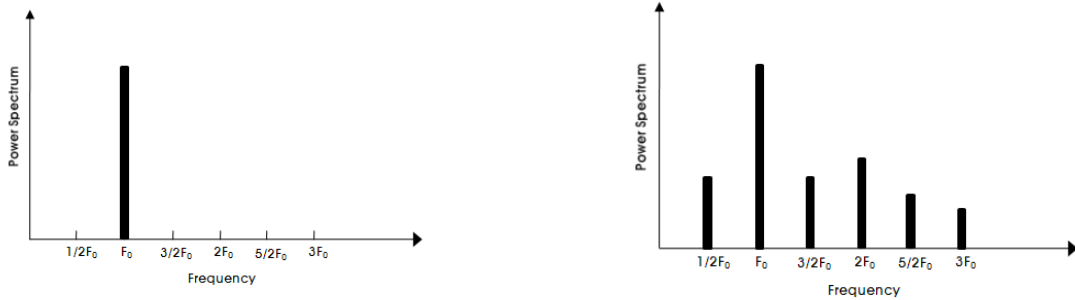


그림 3. 지반강성에 따른 지반 반력의 변화 양상 (AMMANN, 2008)



(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 CMV, 일본 SAKAI사가 제안한 CCV1, CCV2 그리고 일본 PWRI가 제안한 PWRI식이 있으며 각 지표는 식(2)~식(5)와 같이 산정할 수 있다 (Radowski, 2008).

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

$$CCV1 = (A1 + A3 + A4 + A5 + A6)/(A1 + A2) \times 100 \quad (3)$$

$$CCV2 = (A3 + A4 + A5 + A6)/(A1 + A2) \times 100 \quad (4)$$

$$PWRI = \sqrt{A3^2 + A4^2 + A5^2 + A6^2} / \sqrt{A1^2 + A2^2} \times 100 \quad (5)$$

여기서, A1 : 1/2F0 해당 진폭, A2 : F0 해당 진폭, A3 : 3/2F0 해당 진폭, A4 : 2F0 해당 진폭
A5 : 5/2F0 해당 진폭, A6 : 3F0 해당진폭, F0 : 진동장치의 가진주파수 또는 기본진동수

3. 모형시험 개요

가속도계를 이용한 다짐도 평가는 모형시험 조건에 적합하도록 그림 5(a)와 같은 소형 진동핸드롤러를 사용하였다. 일반적으로 대형진동로울러의 진동수는 20~45Hz이지만 본 모형시험에서 사용한 소형진동핸드롤러의 진동수는 55Hz로 대형진동로울러의 진동수보다 약간 큰 것을 사용하였다. 또한 지반의 강성측정을 위한 가속도계로는 상용제품인 컴팩토미터와 25g 용량의 1축가속도계 그리고 5g 용량의 3축 가속도계를 그림 5(b)에 나타난 것과 같이 로울러 바퀴에 장착하였다.

현장모형시험에서는 그림 6에 나타난 것과 같이 폭 70cm, 길이 3m 그리고 두께 20cm의 다짐체를 조성하였으며, 다짐도 기준시험으로 일반적으로 가장 많이 사용하는 들밀도시험을 비롯하여 최근 미국을 중심으로 지반의 강성도를 측정하는 방법으로 많이 사용하고 있는 지오게이지(Geogauge), 동평판재하시험 (Light Falling Weight Deflectometer, LFW) 그리고 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)을 함께 수행하여 가속도계에서 얻은 다짐도 평가 결과와 비교 분석하였다.

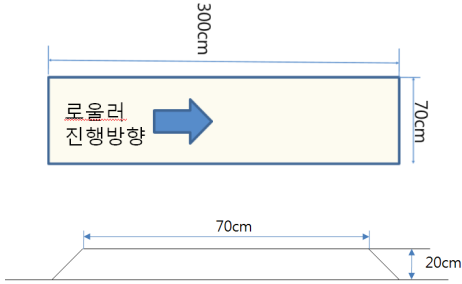


(a) 소형 진동핸드로올러



(b) 컴팩토미터와 가속도계 장착

그림 5. 진동로올러와 가속도계 장착



(a) 모형시험체 평면과 단면도



(b) 모형시험 수행 모습

그림 6. 모형시험 수행

모형시험에서 사용한 흙은 통일분류법(USCS)상 SM으로 분류되는 흙으로 우리나라에서 흔히 볼 수 있는 화강풍화토를 사용하였다. 시험에 사용된 흙에 대한 실내다짐시험 결과, 최대건조단위중량과 최적함수비는 각각 19.6kN/m^3 , 12.8%인 것으로 나타났다. 그러나 현장 함수비는 15%로 다짐곡선상 습윤측으로 나타나 다짐 횟수 증가에 따라 뚜렷한 다짐도 증가가 발생이 어려울 것으로 예측되었다.

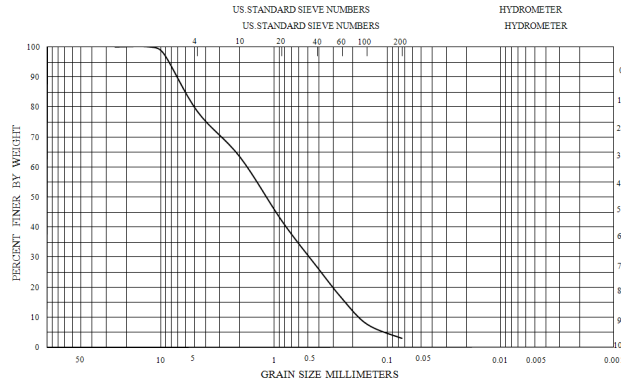


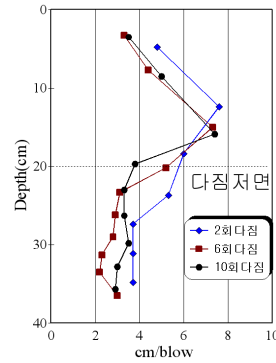
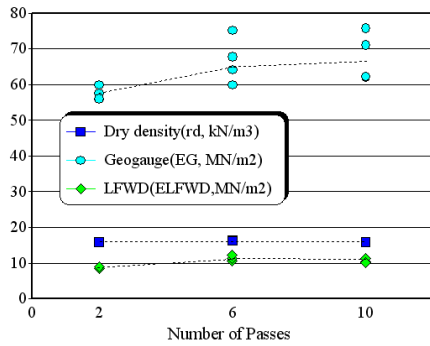
그림 7. 모형시험에 사용한 흙의 입도분포

4. 모형시험 결과 분석

4.1 다짐 흙의 강성변화

그림 8은 모형시험체를 대상으로 다짐횟수를 증가시키면서 측정된 건조단위중량, 지오게이지로 측정된 탄성계수(E_G), 동평판재하시험으로 구한 탄성계수(E_{LFWD})를 나타낸 것이며, 그림 9는 동일 위치에서 수행한 동적콘관입시험 결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서 보면 들밀도시험으로 구한 모형시험체의 건조단위중량은 다짐횟수와는 상관없이 일정한 값을 나타내고 있으며, 지오게이지나 동평판재하시험으로 구한 탄성계수도 2회 다짐시 보다 6회 다짐시에 약간 증가하는 것으로 나타났다. 지오게이지는 10회 다

짐시 6회 다짐시보다 탄성계수(E_G)가 약간 증가하는 것으로 나타났으나, 동평판재하시험으로 구한 탄성계수(E_{LFWD})는 6회 다짐시 보다 10회 다짐시에 오히려 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 그림 9에 나타난 동적콘관입시험 결과에서도 잘 나타나 있는데 2회 다짐시 보다는 6회 다짐시의 관입저항력이 더 적은 것으로 나타났으며, 6회와 10회 다짐시의 관입저항력은 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 다짐횟수가 증가함에 따라 건조단위중량 및 지반강성도가 크게 증가하지 않는 이유는 앞서 언급한 것과 같이 현장의 함수비가 최적함수비에 비해 커 다짐횟수의 증가에도 지반의 강성이 크게 증가하지 않는 것으로 판단된다.



(a) 건조단위중량, 지오게이지, 동평판재하시험 결과

(b) 동적콘관입시험결과

그림 8. 다짐횟수 증가에 따른 모형시험체의 강성 변화

4.2 컴팩토미터와 가속도계 시험 결과

그림 9~그림 13은 그림 8에서 나타난 건조단위중량(r_d), 지오게이지로 구한 탄성계수(E_G), 동평판재하시험으로 구한 탄성계수(E_{LFWD})와 컴팩토미터로 구한 CMV-C값 그리고 식(2)~식(5)을 이용한 주파수 분석을 통해 CMV-A, CCV1, CCV2, PWRI값을 위치별로 함께 나타낸 것이다. 지오게이지로 구한 탄성계수(E_G)는 그림 8에서도 나타나 있듯이 다른 시험결과에 비해 상대적으로 크게 나타나기 때문에 타 시험 결과와 시험 위치에 따른 정성적인 분석을 위해 임의 값 4로 정규화하여 각 그림에 나타내었다. 그림에서 보면 들밀도시험, 지오게이지, 동평판재하시험 결과와 마찬가지로 컴팩토미터로 구한 CMV-C와 식 (2)~식(5)를 이용한 주파수 분석결과로 산정한 CMV-A, CCV1, CCV2, PWRI 값 모두 시험 위치별로 큰 변화가 없으며, 다짐횟수 증가에 따른 지반강성도도 뚜렷하게 증가하고 있는 양상을 발견할 수 없었다. 다만 컴팩토미터로 구한 CMV-C가 식(2)~식(5)로 구한 주파수 분석 결과에 비해 다소 큰 값을 나타내고 있는데, 실제로 가속도계를 이용하여 지반강성도를 평가하는 방법은 절대적인 지반강성도를 측정하는 것이 아니고 기준시험을 통해 상대적인 지반강성도를 이용하여 지반의 다짐정도를 평가하는 방법이므로 주파수 분석 후 임의의 상수를 곱하거나 더하면 기존 컴팩토미터로 구한 CMV-C값과의 상대적 차이는 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

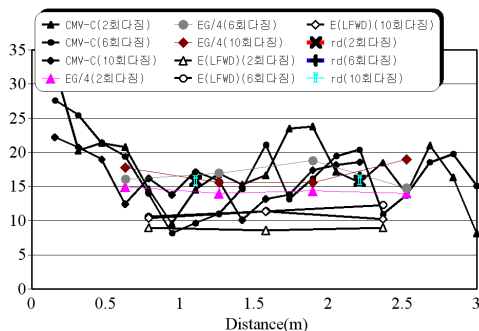


그림 9. CMV-C와 다짐도 평가지험결과 비교

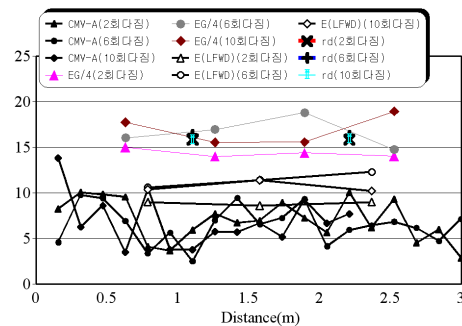


그림 10. CMV-A와 다짐도 평가지험결과 비교

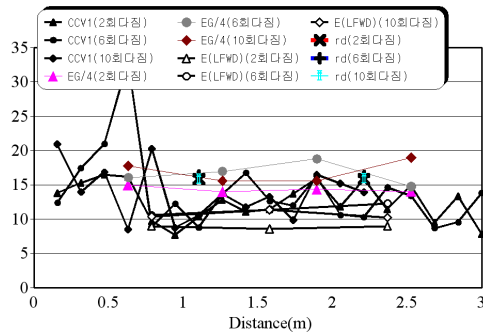


그림 11. CCV1과 다짐도 평가시험결과 비교

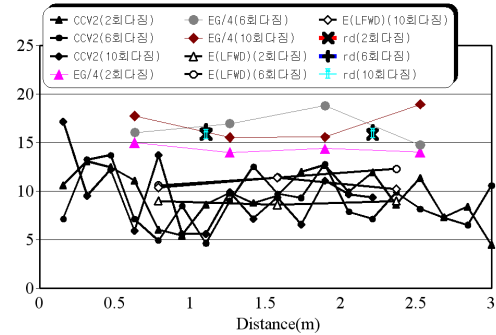


그림 12. CCV2와 다짐도 평가시험결과 비교

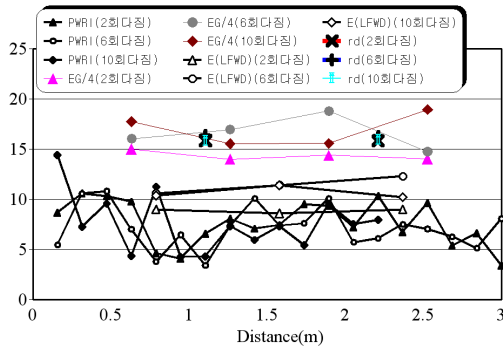


그림 13. PWRI와 다짐도 평가시험결과 비교

5. 요약

본 연구에서는 지반 반발력을 측정하는 상용 콤팩토미터와 일반가속도계에서 얻은 진동가속도를 분석하여 도출한 다양한 다짐도 평가 값 (CMV-A, CCV1, CCV2, PWRI)들을 비교 분석하였다. 본 모형시험 지반의 자연함수비는 최적함수비 보다 약 20%가량 커 기존 다짐도 평가방법인 들밀도시험으로 구한 건조단위중량이 다짐횟수의 증가에 상관없이 일정하게 나타나 잘 다져지지 않는 것으로 나타났으며, 지오게이지와 동평판재하시험으로 구한 강성계수 E_G , E_{LFWD} 도 동일한 경향을 나타냈다. 진동가속도에 대한 주파수 분석으로 구한 다양한 다짐도 평가 값과 콤팩토미터에서 얻은 CMV-C 값 모두 들밀도시험, 지오게이지, 동평판재하시험 그리고 동적콘관입시험 결과와 동일하게 다짐횟수 증가에 크게 상관없는 것으로 나타났다. 추후 다양한 지반조건에 대한 시험 결과를 축적, 분석하여 기존 다짐도 평가방법과의 정량적 상관관계 규명이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조성민, 정경자, “반발력을 이용한 새로운 다짐도 검사기법 개발”, 2000년도 소과제 연구보고서, 한국도로공사 도로연구소, pp.26, 2000.
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

감사의 글

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