

## 페타이어의 철도진동 저감효과에 대한 실험적 연구

김진만 · 이광우 · 조삼덕 · 오세용

한국건설기술연구원 지반연구부

Reduction Effect of Railroad Vibration by Utilizing Waste Tires

**Kim, Jin-Man · Lee, Kwang-Wu · Cho, Sam-Deok and Oh, Se-Yong**

Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT.

### ABSTRACT

This paper describes the results of a series of field experiments which are carried out to assess the reduction effect of railroad vibration by utilizing waste tires. The ground vibration due to train service is measured in Honam Railroad line and Kyongbu Railroad line to assess the ground vibration with the domestic railroad line and train type before field model test. From the results of these tests, frequency on train service is presented from 5Hz to 100Hz and a range of excellence frequency is presented to be about from 20Hz to 40Hz in the domestic railroad line. Also, plate bearing tests are conducted to evaluate the variation of bearing capacity with different thickness of the waste tire layer and the fill layer. Finally, field model test is performed by using tire chips (5cm×5cm in size) as a reduction material of railroad vibration. The reduction effect of railroad vibration by utilizing waste tires increases with increasing the thickness of the waste tire layer and the frequency of the vibration source. The results of this experimental study was shown that the waste tire can be used for reduction of the railroad vibration.

Key Words : *Railroad vibration, Ground vibration, Waste tires, Vibration reducing material.*

### I. 서 론

최근 전세계적으로 연간 약 30억개의 타이어가 생산되고 있고, 그 수요는 계속 증가하고 있다. 이와 더불어 페타이어의 발생량도 해마다 증

가되어 미국의 경우 매년 대략 5,000만개가 발생한다고 보고된 바 있고(Garga & O'Shaughnessy, 2000), 국내의 경우에는 최근 매년 약 2,000만개(2000년 약 1,960만개, 2001년 약 1,692만개, 2002년 약 2,402만개)가 발생하고 있다(한국자원

**Corresponding author** : Lee, Kwang-Wu, Department of Geotechnical Engineering Research,  
Tel : +82-31-910-0232, E-mail : kwangwu@kict.re.kr

재생공사, 2005). 국내의 폐타이어 회수비율은 약 40~80%로서 전량 수거되고 있지 못한 형편일 뿐만 아니라, 수거된 폐타이어의 재활용률도 약 70% 정도여서 미처리되는 양이 적지 않은 실정이다(한국자원재생공사, 2005; 윤여원 등, 2004). 재활용되지 못한 폐타이어를 그대로 방치할 경우 야외 적치 등으로 주변경관을 해칠 뿐 아니라, 해충의 서식처 제공, 화재발생 위험성 상존 등의 환경적인 문제와 더불어 야적장 확보의 어려움 등 그 처리에 따르는 많은 문제가 발생된다. 따라서 최근 국·내외에서 폐타이어의 재활용률을 높이기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 김영진 등(1993)은 폐타이어 가루 혼합토의 특성을 실험적으로 평가함으로써 동상방지재로서의 활용에 대해 연구하였고, 김진만 등(2004)은 폐타이어 조각을 옹벽 배면의 뒤채움재로 활용하기 위한 방안을 연구하였으며, 윤여원 등(2004)은 지반보강재로서 폐타이어를 활용하기 위한 연구를 수행한 바 있다. Humphrey & Manion(1992)은 폐타이어를 혼합한 경량성토재의 공학적 특성을 평가하였고, Nguyen(1996)은 폐타이어로 보강된 성토층의 거동특성을 현장시험을 통해 평가하였으며, Garga & O'Shaughnessy(2000)는 미주 및 유럽 지역에서 토공구조물에 타이어를 실제 적용한 다양한 사례를 소개한 바 있다. 또한 오스트리아의 한 폐타이어 처리업체에서는 연간 40,000톤의 폐타이어를 가공처리하여 스포츠 경기장 건설, 도로 및 소음방지 분야 그리고 학교 및 유치원의 바닥갈래 등으로 활용하고 있고, 독일은 연간 610,000 톤의 폐타이어를 원료로써 재활용하고 있는 것으로 보고된바 있다(한국자원재생공사, 2005).

한편, 최근 교통시설 확충을 위한 지하철, 고속철도, 고속도로 등의 건설공사가 활발히 진행 중에 있어 이들 구조물의 건설 중 혹은 후에 발생하는 진동 및 소음 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히, 건설공사장이나 열차운행 중 발생하는 지반진동은 인접구조물에 균열을 발생시키거나

지반침하를 야기 시키는 원인이 되며, 인체, 가축, 어류 등에 정신적으로 악영향을 미쳐 이로 인한 민원발생으로 공사가 지연되거나 중단되는 경우도 종종 발생하고 있다. 따라서 사전에 지반진동 발생을 합리적으로 예측하고 이를 효과적으로 방지 혹은 저감시킬 수 있는 방안이 시급히 요구되고 있다. 이러한 방안의 일환으로 최근 지하철 진동으로 인한 피해를 최소화하기 위해 고무패드 등의 진동저감 재료를 철로의 침목 하부에 설치하는 등 여러 가지 방진대책들이 강구되고 있다.

이에 본 연구에서는 급증하고 있는 폐타이어의 재활용률 증진 방안의 하나로, 지하철, 고속철도 및 일반철도의 열차운행에 따라 발생하는 지반진동을 저감하기 위해 일정 크기로 자른 폐타이어를 철도의 진동방지층 포설재로 사용한 경우의 진동저감효과를 일련의 실험을 통해 평가하고자 한다.

## II. 철도노반 주변의 진동측정 결과

### 1. 철도진동의 발생 및 전파

지반진동은 각종 형태의 대형 건설공사에 따른 건설 진동과 지하철, 철도 등의 차량 주행에 의한 진동으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 지반진동은 어느 한계치를 넘어서게 되면 인접구조물에 손상을 일으키거나 인근 주민에게 불안감을 주어 여러 가지 사회적인 문제점들을 야기 시킨다.

특히 인구가 밀집되어 있는 주택지나 도심지를 철도나 지하철이 통과할 때 발생하는 지반진동 문제는 철도노선 인접지역의 환경공해 및 구조물의 안전 측면에서 결코 간과할 수 없는 중요한 사항이다. 우리나라의 경우 지하철 차량운행에 따른 지반진동 피해문제는 지하철 운행초기부터 국보문화재의 손상원인중 하나로 제기되면서 부각되었다(우제운, 1993).

지하철 진동피해의 원인규명 및 해결을 위해서는 차량특성 및 운행조건, 궤도시스템 및 선로 구조물, 지반의 성층 특성 및 토질, 수진구조물의

구조적 특성 등 다양한 영향요소들의 복잡한 동역학적 특성에 대한 종합적인 이해가 요구된다. 최근 지하철 진동관련 문제를 해결하기 위하여 수치해석적 기법 등을 이용한 연구들이 일부 시도되고 있긴 하나, 시스템 모델링(modelling)이 복잡하고 관련변수가 많아 아직까지 신뢰성 및 실효성 있는 성과를 기대하기 어려운 단계이고, 따라서 실제 계측성과 및 시공사례 분석을 기반으로 한 경험적 연구가 주류를 이루고 있다.

지하철 주변의 수진구조물에서 발생하는 지반진동은 근본적으로 수진구조물 기초지반의 진동에 기인한다. 이러한 지반진동은 지하철 주행열차의 차륜과 레일의 동적 상호작용 및 접촉으로 발생된 진동력이 레일-궤도 시스템-선로구조물을 거쳐 지반을 가진 시킴으로써 유발된다.

한편, 발생된 지반진동 에너지는 탄성파 형태로 지하철 주변지반 전체로 확산·전파 되면서 지하철 인접구조물들의 기초(직접기초 또는 말뚝)나 기타 접지부위를 통해 전달된 지반진동 에너지는 구조물을 전체적으로 가진시키는 동시에 일부 에너지는 기둥 및 벽체 등을 따라 상부구조로 전파되면서 진동 및 소음을 발생시킨다.

지하철 지반진동의 주파수 성분은 대부분 10~500 Hz 주파수 범위를 보인다. 그리고 상대적으로 높은 레벨의 진동에너지가 집중되는 주파수 대역의 크기는 1~2 옥타브(octave) 정도이며 첨

두치(peak)를 주는 탁월 주파수는 대부분의 경우 60Hz 이하에서 나타난다. 한편, 지하철 진동성분 중 10~30 Hz의 성분은 사람이 몸으로 직접 체감하기에 충분한 물리적 진동으로 감지되고, 30~500Hz의 성분은 물리적 진동보다는 건물의 바닥 등이 울리는 소음형태로 감지된다(우제윤, 1993).

가진원에 의해 발생하는 지반진동의 탄성파는 크게 지반내부로 전파되는 실체파(body wave)와 지표면을 따라 전파되는 표면파(surface wave)로 나눌 수 있으며, 이를 세분하면 그림 1과 같다.

탄성파 중에서 지표면에서 검출되는 진동파는 주로 P파, S파, L파, M파이며, 이들 탄성파들은 각각 다음과 같은 특성을 지니고 있다.

- P파 : 진행방향의 변화가 크고 조밀파이며 진폭은 이들 중 가장 작고 주기는 짧다.
- S파 : 진행방향에 직각인 방향(tangential)이므로 변위가 큰 뒤틀린 파이며 P파에 비하여 진폭도 크고 주기가 길다.
- L파 : S파보다 진폭이 크고 장기적인 파로서 일명 Love파라고 불리는 표면파이다.
- M파 : 가장 진폭이 크고 규칙적인 파이며 일명 Rayleigh파라고 불리는 표면파이다.

이들 탄성파의 측정 시, 표면파는 수직성분으로, 횡파는 접선성분으로 종파는 진행성분으로 각각 측정된다. 이 때 진행성분에는 탄성파의 P파(종파)가, 접선성분에는 S파(횡파)와 L파(Love

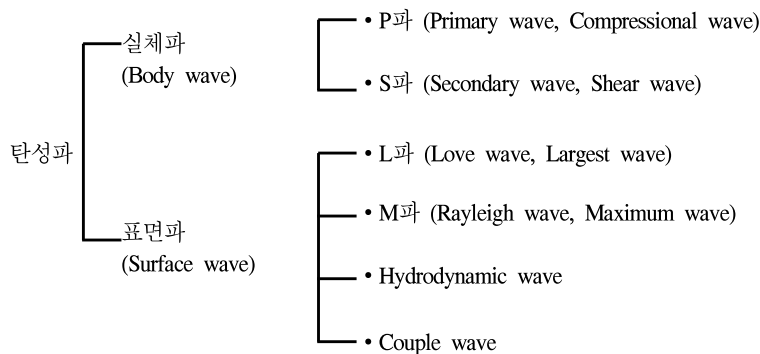


그림 1. 탄성파의 종류.

표 1. 진동저감 대책 및 방법

저감대책	저감방법	대책 예
진동원 대책	발생진동억제 기초로의 전달력 감소 지반으로의 전달력 감소	진동에너지 감소 진동전달감소장치(방진재료 이용) 기초의 질량 및 강성증가, 진동절연
전파경로 대책	전달과 차단 및 감소 거리감쇠효과 전파진동 감소	지중벽, 방진구 완충지역 설치 지반개량
수진점 대책	수진대상의 공진방지 주변대책 심리적장애 제거	건물구조 개조 입지계획, 도시계획 구조진동에 의한 소음제거

wave)가, 수직성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세하다.

한편, 지반진동을 측정하는 경우 측정기에 부착된 Sensor는 대개 한 방향으로만 감응하기 때문에 측정기는 가진원으로부터 진행, 접선, 수직의 3방향의 진동을 각각 측정할 수 있도록 3개의 Sensor를 갖추고 있어야 한다.

## 2. 철도진동의 저감방법

가진원으로부터 발생하는 진동은 지상 및 지하에 위치한 각종 구조물에 과대응력을 유발시켜 구조적인 손상을 유발시킬 수 있으며, 진동에 예민한 기계류 또는 전기·전자제품의 오작동 등과 같은 기능장애를 유발하여 경제적인 손실을 초래할 수도 있다. 또한 철도주변의 민가 등에서는 차량진동으로 인해 구조물에 균열이 발생하거나 인체에 악영향을 끼치기도 한다.

지반진동이 인접구조물이나 사람 또는 가축 등에 미치는 영향을 저감시키기 위해서는, 대상체에 미치는 영향을 평가한 후 진동허용 규제치를 상회하는 부분에 대하여 진동저감량을 산정하고 이에 필요한 진동저감대책을 마련해야 한다.

일반적으로 진동을 차단하거나 저감시키기 위한 대책은 진동원 자체의 발생을 억제하는 방법(진동원대책), 전파경로에서 진동을 차단하는 방법(전파경로 대책), 진동원의 발생을 제어하기 어려운 경우 수진점에서 진동유입을 차단하는 방법

(수진점 대책) 등이 있다. 이와 같은 진동저감을 위한 일반적인 방법은 표 1과 같이 구분할 수 있다(금호건설, 1995).

전술한 진동저감대책 중에서 진동발생원에 대한 대책이 가장 적극적이고 효과적인 방법이며 수진대상에 대한 대책은 소극적인 방법이라 할 수 있다. 또한 진동에너지가 확산하는 곳에서는 대규모 대책을 수립해야 하므로 가능한 한 발생원과 가까운 곳에 진동방지대책을 수립하는 것이 효율적이다.

이러한 진동저감대책 중에서 어떤 방법을 선택하느냐 하는 것은 진동원이나 수진점의 종류, 발생된 진동의 특성, 진동규제치, 시공성, 경제성 등의 요인에 영향을 받는다.

## 3. 열차 운행중 지반진동측정

### 1) 실험현장 조건 및 진동측정 방법

진동 저감제로서 페타이어의 효과를 규명하기 위한 일련의 현장모형실험시 성토체의 크기 결정 및 가진원의 선정에 활용하기 위하여, 실제 열차주행 시 지반을 통해 전달되는 철도 지반진동의 특성을 평가하였다.

본 연구에서 철도 운행시의 지반진동 측정은 호남선 철도 1개소와 경부선 철도 2개소에서 수행하였다. 호남선 구간에 위치한 현장은 현재 복선화 공사가 계획되어 사전지반조사가 이루어진 구간 중 철도 노반고가 1m정도이고 진동측정시

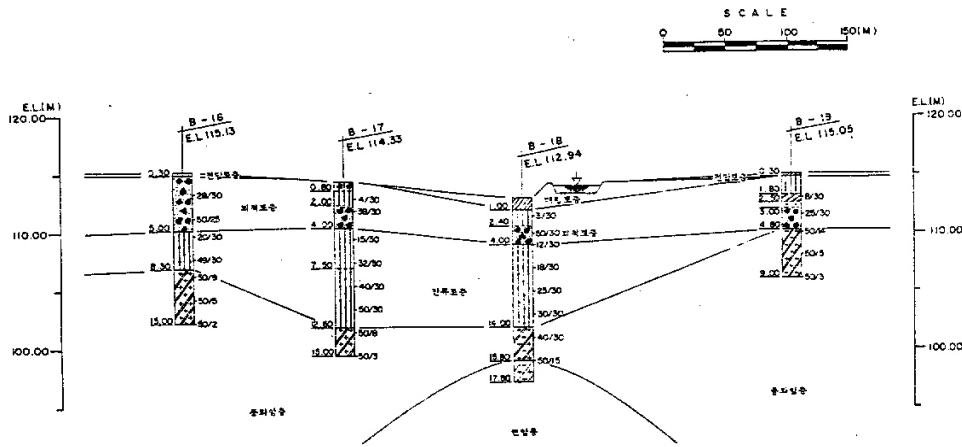


그림 2. 실험구간 지층 단면도(호남선).

표 2. 실험지반의 토질특성.

심도 (m)	N값	자연함수비 (%)	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	흙 분류
0~7	15~30	17~28	2.62~2.67	28.5~34.8	6.0~10.1	SM

다른 진동원에 의한 간섭이 없는 곳을 선정하였다. 그림 2는 선정된 호남선 구간의 지층단면도이다. 본 측정구간의 지반은 기반암인 풍화암이 지표 아래 7~12m에 형성되어 있으며 그 상부에 세립 또는 중간정도의 모래 섞인 실트층이 비교적 느슨하게 분포하고 있다. 실험 지반의 기본적인 물성치는 표 2와 같다.

한편, 경부선 구간의 경우에는 호남선과 지반 조건이 유사하고 철도 노반고가 0.3m 및 0.5m인 곳을 선정하여 진동측정을 수행하였다.

본 연구에서는 여러 개의 진동측정센서를 임의의 지점에 설치하여 최대 20회까지 연속측정이 가능한 진동측정 장비를 사용한 일련의 현장계측 결과를 토대로, 궤도 중심으로부터 열차 주행 시 전달되는 지반진동의 각 방향별 진동성분 특성 및 전과거리에 따른 지반진동의 감쇠정도를 분석하였다.

열차하중 운행 시 발생하는 지반진동의 측정 위치는 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 철도의 지반진동 측정은 현장조건을 고

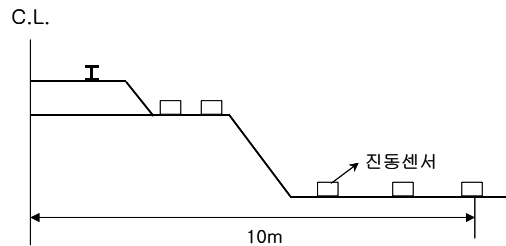
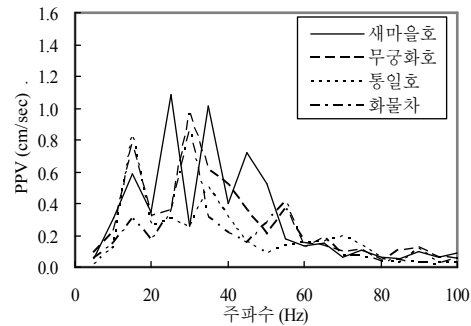
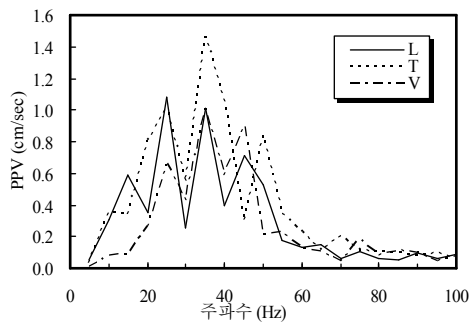


그림 3. 철도진동 측정 위치.

려하여 궤도 중심으로부터 10m 이내의 5개 지점에 진동측정센서를 설치하여 수행하였으며, 열차 통과 시 열차의 주행속도를 동시에 측정하였다.

2) 지반진동 측정결과 및 고찰

호남선 1개소와 경부선 2개소에서 열차 운행 시 지반진동을 측정하였다. 호남선의 경우는 단선철도구간으로 총 20회 측정하였고, 경부선 구간의 경우는 복선구간으로 왕복 통과차량중 한 방향에 대해서 총 45회를 측정하였다. 이때 스피드건에 의한 열차주행속도는 새마을 107~120km/hr, 무궁화 95~110km/hr, 통일호 75~



(a) 철도지반진동의 방향 성분 별 주파수-입자속도 관계 (b) 차종 별 주파수-입자속도 관계 (L과의 경우)

그림 4. 궤도 중심으로부터 3m지점에서의 철도진동 측정 결과.

114km/hr 이었다.

측정자료가 방대한 관계로 본 논문에서는 진동측정 결과를 대표할 수 있는 호남선에서의 일부 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 궤도 중심에서 3m 떨어진 지점에서 측정한 입자속도를 보여준다. 그림 4(a)는 철도지반진동에 대한 각 방향(연직, 종, 횡 방향) 성분의 진동특성을 보여준다. 그림 4(a)에서 각 방향 성분의 주파수 특성은 서로 유사한 주파수 성분을 포함하고 있고 이 중에서 횡방향 성분이 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 철도차량의 진행에 따라 진동의 전달이 철도 측면의 지표면을 따라 전파되는 P파의 크기가 가장 큼을 의미한다. 또한 지반진동의 주파수 성분은 5~100Hz 범위 안에 있으며, 상대적으로 높은 레벨의 진동에너지가 집중되는 탁월주파수는 20~40Hz 범위에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, L파의 측정결과를 차종별로 나타낸 그림 4(b)를 살펴보면, 동일한 지점에서의 열차 진동은 열차 종류에 상관없이 유사한 입자속도를 나타내고 있는데, 이는 실험 대상 열차의 종류별 중량이나 속도의 차이가 그다지 크지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5는 계측결과를 열차종류에 상관없이 거리에 따른 입자속도관계로 나타낸 그림이다. 그림 5에서 보듯이 거리에 따른 입자속도는 철로의 중심으로부터 3m 지점까지 급격히 감쇠하고 점차 완만해 지는 경향을 보인다. 이러한 감쇠특성

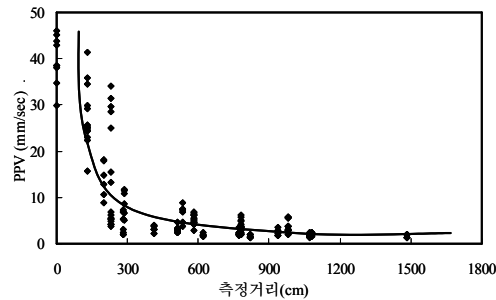


그림 5. 열차진동에 의한 거리에 따른 입자 속도.

은 터널 발파나 말뚝의 항타진동 등의 감쇠에서 보여주는 일반적인 감쇠특성과 유사하며, 입자속도는 3m 지점에서 대략 10mm/sec, 10m 지점에서는 2mm/sec로 나타나 대략 철로로부터 10m 이상의 거리에 위치하면 진동에 의한 영향이 크게 우려되지 않는 것으로 나타났다.

### III. 페타이어 포설층의 진동저감효과 평가를 위한 현장실험

#### 1. 실험현장 조건 및 사용재료

페타이어 포설층의 진동저감효과를 분석하기 위하여 실물모형실험을 수행하였다. 본 실험은 경기도 ○○지구의 해안매립지역에서 수행되었다. 실험 현장지반은 전형적인 서해안 지역의 매립지역이어서 연약층이 15m 깊이로 분포하고 있으며, 현재는 암뮬축진을 통한 지반개량을 위하여 4~6m 정도를 성토한 상태이다. 본 현장을 실험현장으로 선정된 이유는, 실험 시 실물 모형 성

토체에 가진원을 이용하여 진동하중을 가했을 때 암반층 등에 의해 발생하는 반사파의 영향을 최소화하기 위해서이다.

실물모형 구축에 사용된 페타이어시료는 트럭용 대형타이어에서 발생하는 타이어를 칼날식 회전커터로 절단하여 제작되었으며, 그림 6에 보인 바와 같이 한변의 길이가 대략 5cm인 정사각형 형태의 일정한 형상을 가지고 있다. 한편, 본 실험에서 성토재로 사용한 흙시료는 비중이 2.62이고, D 다짐 결과 최대건조밀도가 1.99 g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비는 10.4%인 화강풍화토로서 통일분류법상 SM-SW로 분류된다.

2. 페타이어층의 지지력 특성 평가

일반적으로 페타이어를 철도나 도로에서 진동저감재나 동상방지재로 사용할 경우 철도나 도로의 전체구조물 안전성 평가를 위해 지지력 특성을 이용한다. 이때 페타이어 포설두께는 페타이어 포설에 따른 비용과 적용분야에 대한 진동저감이나 동상방지에 대한 최대 효과 사이에서 결정된다.

본 연구에서는 페타이어의 철도 지반진동 저감재로서의 적합성을 평가하기 위해 평판재하시험(KS F 2310)을 수행하여 건설부 철도시방서 시방기준과 비교하였다. 그림 7은 현장실험에 대한 개략도이다. 본 실험에서는 진동저감 효과가 발현될 수 있는 페타이어층의 최소두께를 장비를 이용하여 포설 가능한 최소두께인 20cm로 정하고, 최대 포설두께는 페타이어의 경제성을 고려하여 50cm로 결정하여 지지력 특성을 평가하였다. 이때 페타이어 상부의 복토층 두께를 50cm, 80cm, 100cm로 변화시켜 가면서 평판재하시험을 수행하였고, 복토층에 대한 현장다짐은 1ton 용량의 소형진동롤러를 사용하여 수행하였으며, 다짐된 각 층에 대해 들밀도시험을 수행하여 다짐도를 확인하였다.

현장 평판재하시험 결과 하중-침하량 관계곡선은 그림 8에 나타내었다. 일반적으로 연직방향 지

반반력계수(Ksv : kg/cm<sup>3</sup>)는 RRL(Road Research Laboratory)법에서 원점과 침하량 1.25mm와 그에 해당하는 접지압과의 활선계수로 규정한다. 고속전철사업기획단에서 1991년에 발행한 고속철도 표준시방서(안)에 의하면 철도하부노반재로의 허용지지력은 Ksv가 최소 7 kg/cm<sup>3</sup> 이상이어야 한다.

그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 평판재하시험에 의한 하중-침하 특성은 재하하중의 증가에 따라, 원지반의 경우는 페타이어층을 포설한 경우에 비해 상대적으로 작은 침하량을 보이고 재하하중 증가에 따라 침하량이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 반면에, 페타이어층을 포설한 경우는 임의 하중단계 이후에 침하가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 페타이어층을 포설한 경우 침하곡선이 복토두께의 증가에 따라 원지반의 침하곡선에 가까워지는 경향을 보이는데, 이러한 현상은 복토두께의 증가에 따라 페타이어 포설층이 재하판에 의해서 형성되는 응력구근의 영향범위 밖으로 벗어나기 때문인 것으로 판단된다.

평판재하시험을 수행한 결과, 페타이어층을 포설한 경우의 지반반력계수는 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이, 페타이어가 20cm 포설된 경우 Ksv는 복토 50cm에서 8.2kg/cm<sup>3</sup>, 복토80cm에서 10.9kg/cm<sup>3</sup>으로 나타났고, 페타이어 포설두께가 50cm인 경우는 복토두께 50cm에서 6.3kg/cm<sup>3</sup>, 복토두께 80cm에서 9.6kg/cm<sup>3</sup>, 복토두께 100cm에서 11.2kg/cm<sup>3</sup>인 것으로 평가되었다. 따라서 철도시방서의 성토재료 기준을 만족하는 최소 복토두께는 페타이어 20cm 포설층에서 최소 복토

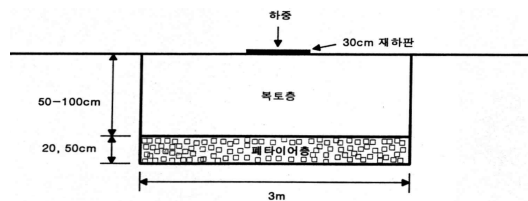


그림 6. 평판재하시험 단면도.

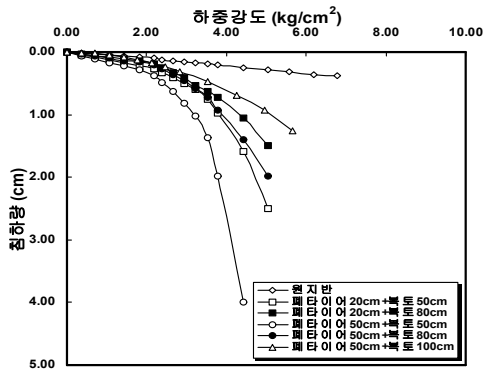


그림 7. 평판재하시험 결과.

두께 50cm 이상, 페타이어 50cm 포설층에서는 80cm 이상임을 알 수 있다.

3. 철도 성토체 제작 및 실험방법

실물모형 성토체의 다짐은 11t 대형 진동롤러를 이용하여 고속전철사업기획단(1991)에서 제시한 1 : 1.5 구배를 유지하면서 수행하였으며, 각 다짐층마다 들밀도시험을 수행하여 일정한 다짐밀도를 유지하도록 하였다.

그림 4에서 국내 철도차량의 주요 진동 주파수 대역인 것으로 평가된 20~40 Hz의 범위를 갖는 가진원을 선정하기 위하여, 소형 진동햄머, 1t 다짐롤러, 11t 다짐롤러 등 다양한 진동 장비를 이용한 진동측정을 실시하였으며, 그 결과 탁월주파수 대역이 진동의 강약 조절시 20~34 Hz 범위를 보이는 것으로 나타나 철도차량의 탁월주파수 대역과 유사한 것으로 평가된 11t 다짐롤러를 가진원으로 선정하였다.

그림 9는 실물 모형성토체와 진동측정을 위한 진동센서의 설치위치를 보여준다. 그림 9에서 보듯이 실물 모형성토체의 성토고는 0.8m 정도로 경부선과 호남선에서 볼 수 있는 일반적인 성토체의 높이와 유사하다. 현장시험시 페타이어층은 그림 9에 보인 바와 같이 포설층 상단면이 원지반고와 일치하도록 하여 20cm 및 50cm 두께로 포설 하였고, 진동센서는 성토체 단면으로부터

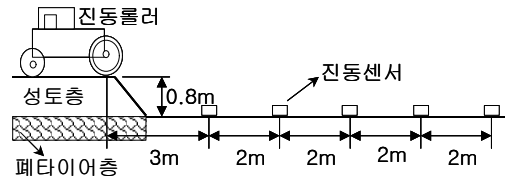


그림 8. 현장시험 단면도.

3m, 5m, 7m, 9m, 11m 거리에 각각 설치하였으며, 주파수 대역은 20Hz와 33Hz로 변화시켜 가면서 페타이어층을 통과한 진동의 거리별 감쇠 정도를 평가하였다.

이러한 성토체 단면은 그림 5에 나타난 열차진동에 의한 거리에 따른 입자속도의 계측결과와 그림 8에 나타난 평판재하시험에 의한 지지력 특성 평가 결과를 토대로 결정하였다. 즉, 국내 철도 주변의 진동은 20~40 Hz의 탁월주파수 대역을 갖는 철도차량의 운행에 의해 철도 중심으로 부터 거리 3m 지점에서 대략 10mm/sec의 진동이 발생하는 것으로 나타났기 때문에, 선정된 가진원인 11t 진동롤러를 이용하여 성토고를 20cm 씩 높여가면서 수행한 진동측정 결과 성토단면으로부터의 거리 3m 지점에서 10 mm/sec의 입자속도가 측정된 성토높이 0.8m를 모형성토체 높이로 결정하였다. 또한 성토고 0.8m는 앞서 언급했던 바와 같이 페타이어층을 50cm 두께로 포설한 경우에 철도시방서의 성토재료 기준을 만족하는 최소 복토두께와도 부합한다.

4. 실험결과 및 고찰

철도의 진동성분 중 10~30Hz의 주파수 범위는 사람의 몸으로 직접 체감하기에 충분한 물리적 진동을 제공한다. 본 실험의 목적은 철도진동의 탁월주파수 대역에서 가진원의 진동을 변화시켜가면서 페타이어가 20~30Hz 주파수 대역의 철도진동저감에 효과적인가를 진동계측을 통하여 평가하는데 있다.

그림 10에서는 가진원의 진동에 의한 거리별 입자속도를 보여준다. 그림 10에서 보듯이 최대



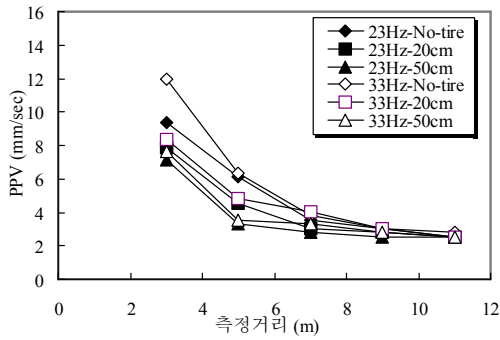


그림 9. 가진원의 진동에 의한 거리별 입자속도.

입자속도는 대략 5m 거리까지 급격한 감소추세를 보이다가 점차 완만해 지는 경향을 보이고 있고, 그림 5에 나타난 실제 철도주변 지반의 감소 추세와 유사한 경향을 보이고 있어 실물 모형성토체의 제작이 잘 이루어 졌음을 확인할 수 있다. 특히, 페타이어층에 의한 진동저감은 가진원로부터 3m인 지점에서, 23Hz 일 때 페타이어 포설 20cm인 경우 16%, 페타이어 포설 50cm인 경우 24%, 33Hz 일 때 페타이어 포설 20cm인 경우 30%, 페타이어 포설 50cm인 경우 36%로 평가되어 페타이어의 진동저감효과는 진동수 33Hz 일 때가 진동수 23Hz 일 때 보다 더 큰 것으로 평가되었다. 이러한 페타이어의 진동저감효과는 페타이어의 재료특성에 기인한 것으로, 가진원으로부터 외력(진동)이 작용할 때 페타이어 성토체 내에 발생하게 되는 마찰과 진동에 의해 외력으로 인한 일(Work)이 소산되면서 발현된다.

또한 페타이어 포설두께에 따른 감쇠정도는 실험대상 주파수에서, 포설두께 20cm인 경우 16~30%, 50cm인 경우에는 24~36%인 것으로 나타나, 포설두께가 클수록 진동저감효과가 커지는 것으로 판명되었다. 따라서 철도진동 저감을 위해 페타이어층을 일정두께로 포설하는 방안을 실제 현장에 적용하고자할 때에는, 현장여건과 페타이어의 재료비가 현재로는 고가인 점 등을 충분히 고려하여 효율적인 페타이어층의 포설두께를 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

한편, 본 논문에서는 성토고가 대략 0.8m로서

성토체 자중에 의한 수직하중이 1.6t/m<sup>2</sup>인 제한된 조건에서 수행된 현장실험결과를 분석하였다. 그러나 철도의 진동특성은 궤도노반의 성토고에 크게 영향을 받을 것으로 사료되며, 따라서 이에 대한 영향이 추가적으로 평가되어야 할 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

철도지반진동을 열차의 종류와 주행속도에 따라 측정하여 얻은 분석결과를 토대로, 철도진동 저감방안으로 사용된 페타이어 조각(한편의 길이가 대략 5cm인 정사각형 형상) 포설층의 진동감쇠효과를 평가하기 위한 실물모형실험을 수행하였다. 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 호남선 및 경부선 구간에서 수행한 열차 운행중 지반진동 측정실험 결과, 열차 운행시 지반진동의 주파수 성분은 열차 종류에 관계없이 5Hz ~ 100Hz 범위 안에 있으며 상대적으로 높은 레벨의 진동에너지가 집중되는 탁월주파수는 20Hz ~ 40Hz 범위를 보인다.

2. 열차 운행 중 지반진동 측정 결과, 거리에 따른 입자속도는 철로의 중심으로부터 3m 지점까지 급격히 감쇠하고 이 후 점차 완만해 지는 경향을 보이며, 선로중심으로부터 측정거리 10m 지점에서는 입자속도가 2mm/sec인 것으로 나타나 진동에 의한 영향이 미소함을 알 수 있다.

3. 페타이어층을 진동저감 방안으로 사용한 경우의 지지력 특성을 평가하기 위해 수행한 평판재하시험 결과, 철도시방서의 성토재료 기준을 만족하는 페타이어층 상부의 최소 복토두께는 페타이어 조각을 20cm 포설한 경우 50cm 이상, 페타이어층을 50cm 포설한 경우에는 80cm 이상인 것으로 나타났다.

4. 페타이어 조각 포설층의 진동감쇠효과를 평가하기 위한 실물모형실험 결과, 페타이어 포설두께에 따른 감쇠정도는 실험대상 주파수(23Hz 및 33Hz)에서, 포설두께 20cm인 경우 16~30%,

50cm인 경우에는 24~36%인 것으로 나타나 포설두께가 클수록 진동저감효과가 커지는 것으로 판명되었으며, 진동수가 클 수록 진동저감효과 또한 증가하는 것으로 나타났다.

5. 이상의 연구결과 폐타이어 조각을 철도노반 하부층에 일정두께로 포설함으로써, 열차 운행으로 인한 지반진동을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

## 인 용 문 헌

- 고속전철사업기획단. 1991. 고속철도 흙 구조물 설계 표준시방서 해설(안).
- 금호건설(주). 1995. 폐타이어의 건설재료로의 활용화 방안에 관한 연구. 연구보고서.
- 김영진 · 김학삼. 1993. 폐타이어가루 혼합토의 특성실험, 대한토목학회 1993년도 학술발표회 개요집 pp. 483-486.
- 김진만 · 조삼덕 · 이광우 · 백영식. 2004. 옹벽 뒤채움재로서 폐타이어 조각의 활용 방안 연구, 한국폐기물학회지 21(2) : 117-126.
- 우제윤. 1993. 지하철 지반진동 영향평가 및 대책, 지하철 시설물 진동영향에 관한 세미나, 서울특별시 지하철공사 pp.1-44.
- 윤여원 · 최경순 · 윤길림 · 김방식. 2004. 지반보강재로서 폐타이어의 활용 - (1) 지반보강 효과, 한국지반공학회논문집 20(3) : 107-117.
- 한국자원재생공사. 2005. <http://www.koreco.or.kr>, 폐기물재활용종합정보.
- Garga, V. K., and V. O'Shaughnessy. 2000. Tire-reinforced earthfill. Part 1 - Construction of a test fill, performance and retaining wall design, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37 : 75-96.
- Humphrey, D. N., and W. P. Manion. 1992. Properties of tire chips for light weight fill, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, 30(2) : 1345-1355.
- Nguyen, T. H. 1996. Utilization of used tires in civil engineering, Proc. of the 2nd international Congress on Environmental Geotechnics, pp. 809-814.

接受 2005年 11月 7日