

열차 진동 저감을 위한 채움재 개발

The Development of Filled Material for Reduction of Train Vibration

°장강석*, 권형오*, 김두훈*, 이일화**, 황선근**

Kang-Seok Jang*, kwon-hyung Oh*, Doo-Hoon Kim*, Il-Wha Lee**, Seon-Keun Hwang**

ABSTRACT

Nowadays, the environmental vibration criteria has been severely restricted from the viewpoint of recipient. The vibration created by urban transit systems can be an important source of community discontent, and can have influence on high technology equipments. This has led to a desire of transit system operators to reduce vibration and to minimize community exposure to vibration. Recent research in this area has significantly increased for transit system engineers to reduce vibration. Unlike other material, soil has a complicated characteristic and it is very difficult to prevent vibration from transmitting. Generally, the trench can use to breaking propagation of vibration on passing way but needs much too maintenance. Therefore, the filled materials for trench had successfully developed and the characteristic test for the filled material had conducted during this term. Finally, we had executed analyses of real characteristic through the propagation test of ground vibration.

1. 서론

최근 국제적으로 사회 전 분야에 걸쳐 진동문제에 대한 규제가 엄격해지고 있으며, 우리 나라에서도 쾌적한 주거환경에 대한 욕구가 커지면서 진동공해문제가 점점 심각하게 인식되고 있다. 최근에는 집단 주거영역과 산업적으로 진동에 민감한 영역에서 발생하는 진동문제가 빈번한 민원으로 이어지고 있다. 민원이 발생하면 현재까지의 방진대책은 대부분이 진동원 또는 궤도에서 진동전파를 억제하는 방법을 주로 사용하고 있다. 이러한 방법으로 진동에 민감한 수진 영역에서 만족할 만한 진동수준이 되지 않으면 달리 진동을 제어할 방진기법이 현재까지는 제대로 수립되어 있지 않다. 따라서 진동전파방지 기술의 다양화는 정밀장비를 운용하는 산업체 및 진동에 상당히 민감한 수진영역 측면에서 볼 때 매우 중요하다. 또한, 진동에 민감한 건물이나 주거지 또는 문화재 등이 위치해 있을 때는 어쩔 수 없이 수진점에서 진동유입을 저감하는 방법이나 진동전파경로에서 진동을 차단하는 방법 등을 사용하여야 한다.

위와 같이 진동전파 경로상에서 진동을 차단하기 위한 연구가 선진국에서는 활발히 진행되고 있으나 국내의 연구는 미미한 실정이다. 그러므로, 진동차진에 효율적인 채움재를 개발, 방진벽을 이용하여 고속철도 진동전파 경로상에서의 진동을 차단하기 위한 연구, 그리고 경제성 및 시공성이 우수한 채움재를 개발하는 것은 앞으로 미세한 진동이 문제가 되는 영역의 진동제어를 위해 반드시

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

** 철도기술연구원

시 필요하다고 할 수 있다. 물론, 해외로부터 기술을 도입해서 그 해결이 가능한 영역도 있으나 지반조건 및 선로환경 등 경우마다 설계조건이 다른 국내여건을 고려할 때 한번의 기술 도입으로 국내에 적합한 기술을 개발할 수는 없으며, 그 설계비 또한 상당할 것으로 예측된다.

진동전파경로상 차진대책은 진동원과 수신점 사이의 지반에 임피던스(impedence)가 다른 층을 설치하여 진동파의 에너지를 산란, 흡수, 반사시켜 진동의 지반전파를 감소시키는 방법이다. 진동 저감효과는 진동원의 특성, 채움재의 종류, 매립깊이, 지반의 종류에 밀접한 관계를 가지고 있다. 가장 보편적인 개방식방진구(open trench)의 경우 표면파에너지의 대부분을 반사시켜 진동절연효과는 좋으나 방진벽 함몰, 사람의 실족, 반사된 표면파로 인한 진동증가 등을 설계시 고려하여야 한다. 따라서, 방진구에 지반파 임피던스가 상이한 재료를 채워 이러한 문제를 해결하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 지반전파 차단을 위한 채움재의 종류는 물성특성에 따라 크게 연성채움재와 경성채움재로 구분될 수 있다. 그러나, 저역주파수대역(16Hz 이하)의 경우 전파 진동 파장의 길이가 너무 길어 진동제어를 위해서는 방진구의 깊이가 상당히 깊어져야 한다. 이로 인해 경제성 및 시공상의 큰 문제가 발생하기 때문에 방진구 및 방진벽을 저주파 대역의 차진에 이용한다는 것은 불합리하다. 따라서, 본 연구에서는 중역주파수대역(16Hz 이상) 이상의 진동제어에 목표를 두고 방진구 채움재 개발을 수행하였다. 물론, 방진구에 채움재를 채우지 않은 상태가 지반 진동 저감 효과 면에서는 가장 좋으나 현장적용 시 발생하는 시공성, 안전성 그리고 유지 보수 등의 문제가 야기될 수 있다. 본 연구에서는 우선적으로 채움재개발에 관한 연구를 진행하여 보호층 및 절연층으로 구성된 채움재 개발을 완료하였다. 또한, 개발채움재의 성능개선 및 현장 시공을 용이하게 하기 위해 임피던스가 서로 다른 콘크리트와 폐고무를 합성한 복합채움재에 대한 연구도 수행하여 시험/시공을 위한 복합방진구 채움재료를 개발하였다.

또한, Impact 시험 및 Exciter 시험을 통해 원지반의 진동전파특성을 파악하였고, 이 시험을 통해 진동특성이 파악된 원지반에 깊이 2m 폭 4m의 방진구를 굴착한 후 Exciter 시험을 수행하여 방진구의 차진성능을 평가하였다. 선정된 방진구의 가장 효율적인 차진 주파수는 100Hz이나 이보다 낮은 파장을 갖는 주파수대역과 높은 파장을 갖는 주파수대역의 차진성능을 평가하기 위해, 채움재 채움 전/후의 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz, 그리고 250Hz의 주파수영역에 대한 평가를 수행하고 차진성능 및 진동전파특성을 분석하였다. .

2. 채움재 개발

2.1 채움재 형상개발

개발된 채움재는 보호층과 절연층으로 구성되어 있으며 시공 지역에 따라서 설치 여건 및 환경에 맞게 다양한 보호층을 사용할 수 있다. 그리고 문제를 야기시키는 주파수영역에 따라 절연층의 적층 두께를 다르게 하여 최적의 차진 효과를 볼 수 있도록 설계 제작되었다. 최상의 채움재료를 개발하기 위해 각기 다른 동특성을 갖는 여러 가지 종류의 채움재를 개발하였다.

2.1.1 보호층 제작

보호층은 시공 중에 발생할 수 있는 제품의 손상 등을 방지하고 절연층 내부 공기층이 침적할 때 수분의 침투로 인한 제품의 물성 저하를 방지하는데 있다.

2.1.2 절연층 제작

비교적 Soft하게 제작된 채움재 하부 층은 지반진동전파 차단을 위한 절연층으로 제품 내부가 Open Cell 형상 저밀도의 조직으로 구성되어 있다. Cell의 구조적인 공기층 때문에 절연층을 제작

할 때는 길이 방향으로 균일한 탄성계수를 갖도록 해야 하며, 제어 주파수에 영역에 따라 적층을 달리하여 낮은 주파수영역을 차진하는 것도 가능하게 하였다.

2.2 채움재 성능개선

채움재를 이용한 진동차진 방법은 임피던스가 아주 상이한 다른 물질을 진동 전파과정에 삽입하여 진동전파를 차단하는 방법이다. 임피던스 차단 방법에는 두 가지가 방법이 있는데 하나는 지반보다 임피던스가 아주 높은 물질을 차진재로 사용하는 방법이고, 다른 하나는 지반보다 임피던스가 극히 낮은 물질을 차진재로 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 시험/시공의 편리성 및 성능 개선을 위해 지반보다 낮은 임피던스를 갖는 개발채움재와 높은 임피던스를 갖는 콘크리트를 합성한 경량연성채움재를 개발하였다.

3. 물성특성평가

3.1 정적시험

개발채움재의 정적시험은 KS M6604(방진고무 시험방법)에 의거 정해진 규정에 따라 정적시험을 수행하였다. 정적시험에 사용된 시험편은 URCP19 (138(mm)×138(mm)×19t) 6개, URCP65(138(mm)×138(mm)×65t) 1개이며 정적스프링 상수를 구하기 위하여 5Ton 정하중 시험기를 이용하였다. 정적시험 결과는 도표 1에 나타내었다.

도표 1 개발 채움재의 정적 스프링상수

	Sample Size	Static Stiffness(Ks)
URCP19 1겹	138(mm)×138(mm)×19t	3.55kg/cm ²
URCP19 2겹	138(mm)×138(mm)×38t	2.05kg/cm ²
URCP19 3겹	138(mm)×138(mm)×57t	1.76kg/cm ²
URCP65	138(mm)×138(mm)×65t	1.89kg/cm ²

3.2 동적시험

채움재의 동특성을 평가하기 위해, 일본공업시험규격 JIS A6321, 6322는 시험체와 하중들로 구성되는 진동계의 자유진동측정 결과를 이용하여 동탄성계수와 손실계수를 구하고 있다. 그러나 본 연구에서는 이와 동일한 동적시험으로 인정되고 있는 주파수응답함수법을 이용 폐고무 채움재의 동탄성계수와 손실계수를 산정하고, 정적시험에 사용한 시편과 같은 크기의 시편을 사용하여 시험을 수행하였다.

URCP19와 URCP65 두 종류의 채움재 시험편에 대해 앞 절의 시험방법에 의거하여 동특성 파악을 위한 동적시험을 실시하였다. URCP19를 3겹까지 적층하면서 시험을 수행한 결과; Damping Ratio는 적층 수에 무관하게 7-8 % 정도의 감쇠를 보였으나, Dynamic Stiffness 값은 적층 겹수에 따라 한 겹 11-13 (kgf/cm²), 두 겹 4.5-6.5 (kgf/cm²), 그리고 세 겹은 3-4 (kgf/cm²)로 차이를 나타냈다. 또한, URCP65는 Damping Ratio 가 6-7%로 URCP19보다 낮았으며, Dynamic Stiffness는 URCP19를 세 겹 적층 할 때와 유사했다. 고유진동수는 URCP65가 가장 작게 나타났다.

4. 시험시공을 통한 성능평가

4.1 시험장소 선정 및 시험방법

시험 장소는 시험조건 및 시공여건을 고려하여 UNISON 수신 공장 건설부지로 설정하였으며, 최적의 위치를 선정하기 위해 수신 공장 3개 단지의 지반 특성을 조사하였다. 지반 특성을 조사한 결과, 1단지와 2단지의 원지반 특성은 깊이 1m 이상부터 암 지반이므로 방진구를 굴착하는데 상당한 어려움이 있어 일부가 되메움 지반인 3단지를 시험/시공 구간으로 선정하였다. 수신 공장의 원지반 물성특성치는 도표 2에 나타내었다.

도표 2 시험시공 부지의 지반물성특성

Property	E(MPa)	G(MPa)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	ν	$\zeta(\%)$	$\nu_b(\text{m/s})$	$\nu_s(\text{m/s})$	$\nu_R(\text{m/s})$
Value	425	170	2000	0.25	20	505	291.5	269

4.1.1 표면파의 파장 결정

표면 파장을 결정하기 위해 그림. 1과 같이 지반진동전파시험을 수행하였다. 전파시험은 가진기를 사용하여 100Hz의 특정 주파수로 가진하고 계측을 수행한 후, 식 4.1-4.4에 의거하여 위상차 및 파장을 산정하였다.

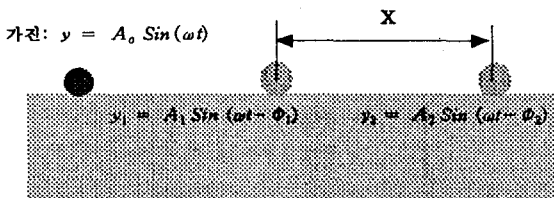


그림1. 파장산정을 위한 지반진동전파 시험

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \quad \langle \text{식 4.1} \rangle$$

$$t_{p1-p2} = \left(\frac{\Delta\Phi}{2\pi} \right) \times \frac{1}{f} \quad \langle \text{식 4.2} \rangle$$

$$V_s = x / t_{p1-p2} \quad \langle \text{식 4.3} \rangle$$

$$\lambda = V_s / f \quad \langle \text{식 4.4} \rangle$$

위 시험 결과, 산정된 파장의 길이는 100Hz에서 약 1.63m 정도이고 이론적으로 표면파는 파장의 1.5배 깊이에서는 영향력이 상당히 작은 것으로 알려져 있다. 따라서 현장 작업여건을 고려하여 방진구의 깊이를 100Hz의 약 1.3배 파장인 2m 정도 결정하고 이를 기준으로 시험/시공을 수행하였다.

4.1.2 시험조건

방진구의 크기는 현장 시공여건, 수치해석 그리고 문헌 참조하여 방진구 하부 경계면을 통하여 회절 되는 진동성분이 100Hz 영역에서 최소화 되도록 100Hz 파장의 약 1.3배 정도인 깊이 2m로 결정하였다. 또, 문헌 및 실험 Database에서는 파장이 4-3 m 경우 적어도 방진구의 깊이가 1-2m

이상일 것을 제안하고 있는데 50Hz 파장이 3.27m인 점을 감안하면 50Hz 주파수영역의 차진성능 평가도 가능한 깊이임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 채움재 제작 여건 및 현장의 방진구 굴착 작업능력 그리고 시공성을 고려하여 깊이 2m, 기진원에서 이격거리 3m, 그리고 길이 4m로 방진구의 크기를 설정하였다. 채움재 차진성능 평가를 위한 주파수영역은 고주파수 영역의 차진성능 평가를 위해 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz, 그리고 250Hz 성분으로 정하였다.

4.1.3 시험방법

가. Impact Test

지반에 충격성 힘을 가진하고 가진 된 힘을 산정하기 위해 Impact test set을 설계한 후 연구소 자체 제작을 통해 Impact test set을 완성하였다. 제작된 Impact test set은 높이와 Mass에 의해 가진량을 어느 정도 조절할 수 있도록 제작하였다. Impact test set을 이용 지반을 가진하는 방법은, set 중앙에 설치된 post를 따라 상하로 자유로이 움직이는 mass를 규정된 높이까지 rope을 이용하여 올린 후 자유낙하 시킨다. 이때 자유 낙하된 mass가 충격성 가진를 지반에 가하고 set 하부와 지반 사이에 설치된 force transducer를 이용하여 지반에 가해진 충격량을 계측한다. 이와 동시에 지진가속도계를 이용 각 위치마다 진동 응답을 recorder를 이용하여 기록한 후, 주파수 분석기를 통하여 각 주파수 성분을 filtering하여 진동전파특성 및 주파수응답특성 분석하고 이 결과를 이용 방진구 성능평가 및 채움재 차진성능을 평가하였다.

나. Exciter Test

Impact test와 같이 차진성능을 평가하는 또 다른 방법 중 하나가 Exciter test 이며, 여러 가지 성능평가 방법들 중에서 Exciter test는 가장 신뢰성을 갖는 방법으로 평가받고 있다. 본 연구 과제에서는 가진 주파수영역이 40-300Hz 이고 불균형 질량을 설치했을 경우 가진력이 30-1234 (N) 정도 발생하는 가진기를 사용하여 50Hz 그리고 100Hz의 특정주파수로 연속적인 가진력을 지반에 주고 Impact 시험과 유사한 계측 시스템을 이용 Exciter 시험을 수행하였다.

4.2 채움재료 성능시험

4.2.1 원지반 진동전파시험

시험시공 예정 지역의 50Hz와 100Hz 특정 주파수에 대한 진동전파특성을 파악을 위해 특별히 개발된 Exciter에 질량 25g/cm의 불균형 질량을 부착하여 지속적인 가진력을 원지반에 주고 충분한 시간에 걸친 진동응답을 기록한 후, 계측된 자료중에서 FFT 분석기를 이용 비교적 좋은 상태의 시간 신호만을 분석하였다. 진동 응답치는 환경 진동 단위인 dB 값으로 각 주파수 별로 평가하였으며, 원지반의 특성을 상세하게 파악하기 위해 50Hz, 100Hz 이 외에 150Hz, 200Hz 그리고 250Hz의 주파수 성분에 대한 진동특성도 조사하였다. 위와 같이 계측된 자료를 분석한 결과, 50Hz 주파수 성분에 비해 고주파수 성분으로 갈수록 거리에 따른 진동 감쇠를 훨씬 빠름을 알 수 있었다. Exciter 원지반 시험 자료는 경량연성채움재 및 방진구의 차진성능을 평가하는데 이용되었다.

4.2.2 방진구 성능시험

경량연성채움재의 성능평가를 하기 전에 앞에서 설정한 크기로 깊이 2m 길이 4m의 방진구를 굴

작하였다. 원지반 시험과 같은 방법으로 굴착된 방진구에 대해 가진기를 이용 지속적으로 지반을 가진하고 Recorder를 사용하여 충분한 시간동안 지반진동전파 신호를 녹음하였다. 가진 주파수는 경량연성채움재의 차진성을 평가하기 위한 특정 주파수인 50Hz와 100Hz, 150Hz, 200Hz, 그리고 250Hz로 설정하였으며, 가진시에 발생하는 가진력은 원지반 시험에 이용된 가진력과 동일하다.

4.2.3 경량연성채움재 성능시험

본 연구의 궁극적인 목적인 경량연성채움재의 차진 성능평가를 위해 콘크리트 block과 채움재(URCP)로 구성된 경량연성채움재를 매설한 후, 방진구 시험과 동일한 시험방법에 의거 경량연성채움재 차진 성능시험을 수행하였다.

4.3 성능시험 결과

4.3.1 방진구 성능평가 결과

FFT 분석기를 이용 제측된 자료를 분석한 결과, 100Hz 가진 주파수의 경우, 방진구 전에서는 원지반에 비해 오히려 5dB 정도 진동응답치가 증가하였으나 방진구를 지난 지점에서는 15dB 정도 저감되었고, 8m 지점의 진동 감쇠가 22dB 정도로 최고치를 이루었으나 16m 지점에서는 17dB 정도의 감쇠효과가 나타났다. 그림 2에 지반과 방진구의 진동응답치가 나타나 있다. 한편 50Hz 가진 주파수의 경우, 방진구 전에서는 2dB 정도 진동응답치가 증가했으나 방진구를 지난 지점에서는 9dB 정도의 진동 감쇠를 보였으며, 거리에 따라 일정한 감쇠를 보이다 16m 지점에서는 13dB 정도로 감쇠효과가 상승되었으며 그림 3에 그 결과를 나타내었다.

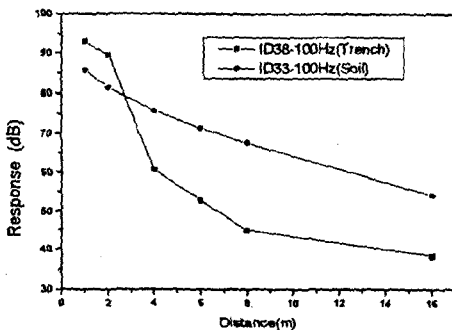


그림2. 100Hz 성분의 방진구의 차진성능 평가

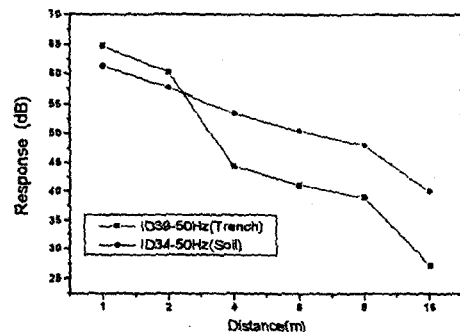


그림3. 50Hz 성분의 방진구의 차진성능 평가

위 결과에서 100Hz의 가진 주파수가 50Hz 의 가진 주파수 보다 10m 내외에서는 10dB 정도 감쇠효과가 있었으나 거리에 따라 차이가 좁혀지면서 16m 지점에서는 4dB밖에 차이가 없었다.

4.3.2 경량연성채움재 성능평가 결과

경량연성채움재를 방진구에 채운 후 시험을 수행하고, FFT를 이용하여 제측자료를 분석하였다. 최종적인 성능평가는 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz, 그리고 250Hz 가진력에 대한 거리별 진동응답치를 기준으로 채움재 삽입 전/후의 진동응답치 비인 진동저감계수(Amplitude Reduction Factor)와 진동응답치로 나타내었다. 경량연성채움재를 채우고 시험한 자료를 분석한 결과, ARF가 50Hz에서 URCP 0.4, Trench 0.32; 100Hz에서 URCP 0.15, Trench 0.13; 150Hz에서 URCP 0.13,

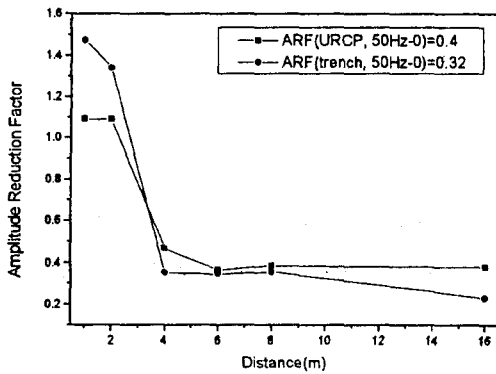


그림4. 50Hz 성분의 방진구와 채움재 성능비교

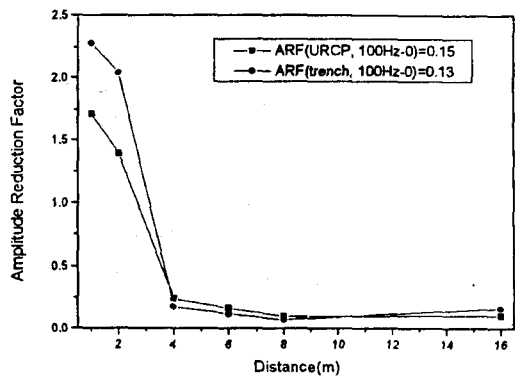


그림5. 100Hz 성분의 방진구와 채움재 성능비교

Trench 0.09; 200Hz에서 URCP 0.11, Trench 0.06; 250Hz에서 URCP 0.06, Trench 0.05로 나타났으며 근거리에서는 100Hz 이상은 차진율이 상당히 높음을 확인할 수 있었다. 또한 50Hz 영역에서도 높은 차진성능을 나타냈다. 자세한 ARF 분석결과는 그림 4 ~ 8에 나타내었다.

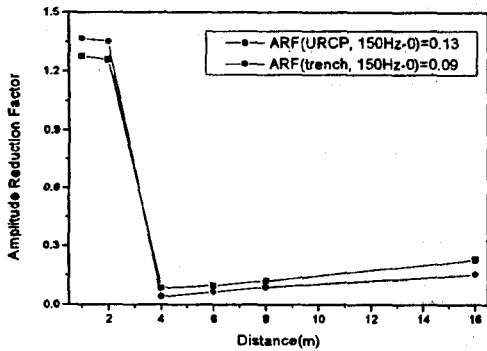


그림6. 150Hz 성분의 방진구와 채움재 성능비교

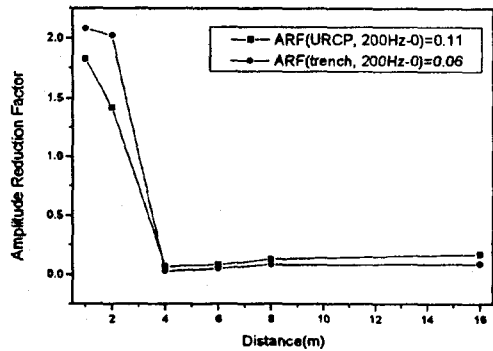


그림7. 200Hz 성분의 방진구와 채움재 성능비교

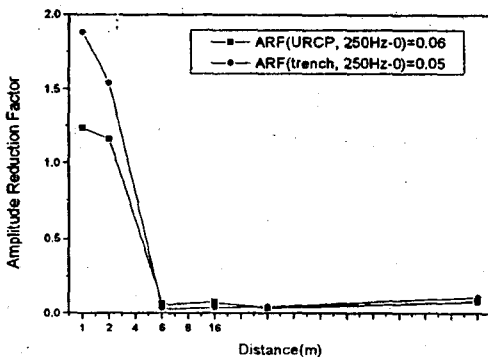


그림8. 250Hz 성분의 방진구와 채움재 성능비교

50Hz와 100Hz 주파수 성분은 기진원으로부터 10m 내외의 거리에서 경량연성채움재를 채우기 전인 open 상태와 진동저감치가 2dB 내외의 차이를 나타내어 경량연성채움재의 차진 성능이 상당히 우수한 것으로 나타났다. 또한, 10m 이상 떨어진 지점에서는 open 상태보다 경량연성채움재의 차진 성능이 3-5dB 정도 작게 나타났으나, 기존에 조사된 국외의 다른 채움재들의 성능이 4-9 dB 인 점을 감안하면 개발된 경량연성채움재는 상당히 우수한 차진 성능을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 또한 경량연성채움재는 시공이 용이하도록 개발되어 있어 현장에 적용할 때도 상당한 장점이 있다. 각 주파수별 원지반, open 상태 방진구, 그리고 경량연성채움재의 진동 응답 레벨을 그림 9~그림13에 자세하게 나타내었다.

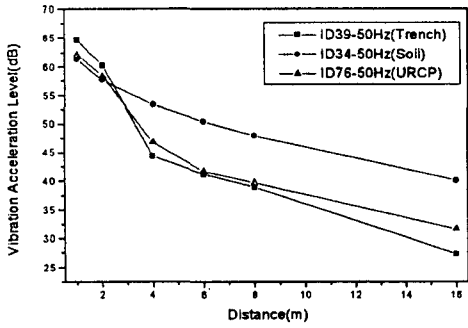


그림9. 50Hz 성분 방진구 및 채움재 진동레벨

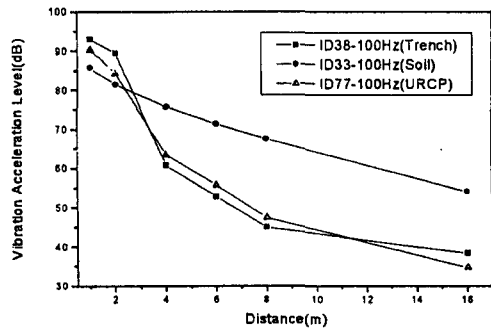


그림10. 100Hz 성분 방진구 및 채움재 진동레벨

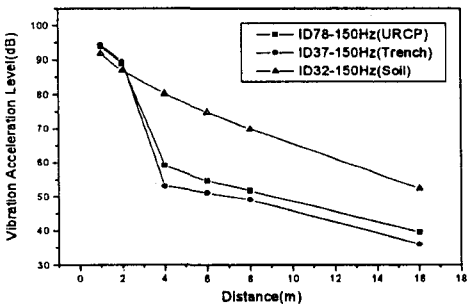


그림11. 150Hz 성분 방진구 및 채움재 진동레벨

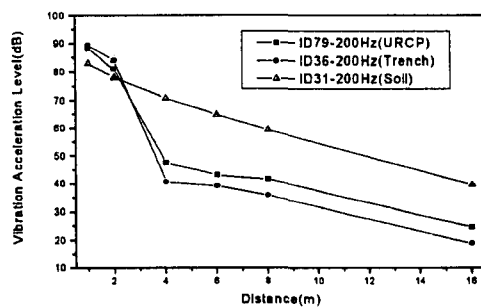


그림12. 200Hz 성분 방진구 및 채움재 진동레벨

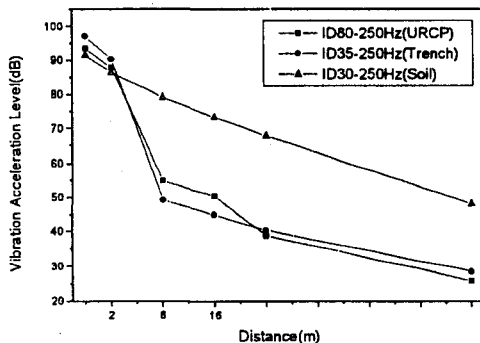


그림13. 250Hz 성분 방진구 및 채움재 진동레벨

5. 결론

본 연구에서는 각 채움재의 경제성, 시공성, 방진성능 등을 검토하였다. 이 결과를 채움재 개발을 수행하여 기존 제품에 비해 경제성이 뛰어나고 차진성능도 우수한 폐고무 채움재를 개발하였다. 개발된 폐고무 채움재는 지반 조건 및 가진 조건에 따라 쉽게 고유진동수 및 감쇠율을 변경할 수 있도록 개발되었으며 개발된 채움재의 물성특성 평가를 위해 규정된 시험 절차에 따라 시험을 수행하고 정특성 및 동특성 평가를 완료하였다.

또한, 현장 시공성을 고려한 채움재 형상개발에 관한 연구를 수행하여 현장 시공이 용이한 복합 채움재를 개발하였다. 채움재의 성능평가 결과가 보다 신뢰성을 갖기 위해서는 방진구에 채움재를 시공한 후 지반진동 시험을 통해 채움재의 성능평가를 수행하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 지반전파시험을 통하여 파장을 산정한 후, 원지반, open 상태 방진구, 그리고 채움재 채움후에 대해 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz, 그리고 250Hz 주파수 성분에 대한 차진성능을 평가하였다. 향후 지반진동전파 폭에 대한 시험 및 분석을 통해 자세한 차진성능 평가를 수행 할 예정에 있으며, 채움재의 차진성능개선 및 간편한 시공기법에 관한 연구가 계속해서 수행될 필요가 있다. 최종적으로는 양산을 위한 기술 및 설계능력을 확보하는 것은 반드시 필요하다.

참고문헌

- (1) Freakley, P. K. and Payne, A. R., Theory and practice of engineering with rubber, Applied Science Publishers LTD, London, 1978
- (2) John P. Wolf, Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain, Prentice-Hall, 1995.
- (3) Hiroshi, Yoshitaka, Takuo, Akihiko, Development of Method for Reduction of Wayside Train Vibration, Railway Technical Research Institute, 1996. 11.
- (4) 이종세, 손윤기, 방진벽에 의한 표면파 산란의 수치해석에 관한 연구, 한국지진공학회, '98 추계학술대회 논문집 pp. 106~112, 1998.
- (5) 한국철도기술연구원, 고속전철 토공 및 지반진동 저감기술개발 (1차년도 연차 보고서), 한국철도기술연구원, 1997.

* 본 연구는 "고속전철 토공 및 지반진동 저감기술개발" G7 과제로 수행되었습니다.