무가선 저상트램 노면선로의 시험시공 평가와 소음·진동 특성연구

A Study on the Test Construction Evaluation and Noise and Vibration Characteristics of Wireless Low-Floored Trams Trackway

정 영 도^{1)*} 안 동 근²⁾ 전 진 택³⁾ 정 우 태⁴⁾ 이 수 형⁵⁾
Jeong, Young Do An, Dong Geun Jun, Jin Taek Jeong, Woo Tae Lee, Su Hyung

Abstract

The wireless low-floored tram is an innovative transportation system which is environment-friendly and highly energy-efficient. In addition, the system has various advantages such as low construction cost, improvement of urban landscape, revitalization of surrounding commercial area, elevated convenience for passengers, etc. Therefore, more than ten local governments have proposed tram construction projects in Korea. Accordingly, many research and development projects are ongoing funded by government including the developments of tram vehicle, tram trackway, signal system, etc.

The embedded rail system are commonly used in order to provide leveled roadway surface in urban area. It is effective to reduce the noise and vibration, caused at the interface between the wheel and track, to minimize the construction period, and to lower the maintenance cost.

This paper investigated the design and construction processes for tram trackway and figured out the constructability for the test track with embedded rail system for the first time in Korea. The performance to reduce the noise and vibration were quantitatively measured in the test track with embedded rail system. In addition, the results were compared to the ones for track with conventional rail system.

Keywords : Wireless low-floored trams trackway, Embedded rail system, Test construction, Vibration measurement, Noise measurement

1. 서론

최근 에너지 고갈과 지구 온난화 문제로 온실가스감축에 대한 관심이 증대되면서 교통 및 수송시스템 분야에서도 배기가스 저감뿐 아니라 에너지 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 현재 고령화 사회로 진입하면서 교통약자의 편의성 배려 및 도시미관의 향상 또한 중요한 요소로 자리 잡고 있어 새로운 교통시스템의 도입이 요구되고 있는 실정이다(W. Jeong et al, 2008).

무가선 저상트램은 차량에 2차전지(배터리)를 탑재함으로써 제동에너지의 100% 재사용이 가능하다. 이는 기

존 전기철도시스템에서 회생제동에너지를 가선으로 송전할 때 발생하는 회생실효 문제를 해결한 것으로 에너지활용을 극대화 한 것이다. 또한 도로상을 주행하므로 도시의 미관 및 안전에 문제가 되는 고가구조물과 전력공급선인 가선이 필요 없게 되어 환경 친화적인 교통시스템이다. 그리고 저상차량이므로 지하 또는 고가구조물의 역사를 사용하지 않고 노면에 설치된 정거장 이용을 가능하게 하여 교통 약자 및 이용자에게 접근성과 편의성 향상을 도모한다. 경제적 측면에서는 도로상을 주행하기 때문에 지하철 등 다른 교통시스템에 비해 토목건설비가 1/10 이하로 소요되며 공사기간도 현저히 낮아지게 되므로 많

1) 정회원, (주)포스코건설 R&D Center 기술연구소 선임연구원, 교신저자

2) 비회원, (주)포스코건설 R&D Center 기술연구소 상무보

3) 비회원, (주)포스코건설 R&D Center 기술연구소 전문연구원

4) 비회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

5) 비회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

* Corresponding author : jyd@poscoenc.com 032-200-2210

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

은 장점을 가지고 있어 최적의 교통시스템으로 각광을 받고 있다(Hyung soon Park, 2010).

유럽과 일본 등 교통선진국에서는 지난 30여 년간 활발한 트램 운행과 더불어 각국의 도심 운행에 적합한 무가선 저상트램 차량, 노면선로, 신호시스템 등에 대한 기술 개발이 함께 이루어져 왔다. 반면 국내에서는 2009년 12월부터 국토해양부 연구개발사업으로 새로운 친환경 트램 차량과 트램용 노면선로 개발이 이루어지고 있다(Su Hyung Lee et al, 2012).

무가선 저상트램의 선로 중 도심지 구간은 레일이 노면에 매립되는 매립형궤도 시스템이 적용될 수 있다. 매립형궤도 시스템은 공기 단축에 따른 건설비 저감, 소음·진동 제어 및 유지보수 최소화 등에 유리한 시스템으로 알려져 있다(Young Hoon Bae et al, 2012).

본 논문에서는 국내에서 시공사례가 전무한 매립형궤도 시스템을 설계하여 시험시공을 수행하였고 시공과정에서 발생한 문제점을 파악하였다. 또한 시험선 완공 후 진동과 소음을 일반 자갈도상궤도와 비교 측정하여 매립형궤도 시스템의 소음·진동 저감 성능을 정량적으로 분석하였다.

2. 무가선 저상트램용 매립형궤도 시스템

2.1 트램 선로의 분류

트램은 전용선이나 도시 외곽에서는 자갈도상에 묻힌 침목에 체결된 레일로 구성되는 일반철도에서 운행 될 수도 있으나 도심에서 운영되는 경우 기존 도로교통과 동일

한 공간을 공유하기 위해 일반철도의 건널목과 같이 포장 내에 레일이 매립되어 있는 형태로 궤도가 적용된다. 이 경우 트램의 차륜 플랜지가 도로 면에서 충분한 공간을 확보하기 위해 홈이 있는 레일(Grooved Rail)을 사용하는 것이 일반적이다. Esveld(2001)는 트램 궤도를 다음의 세 가지 유형으로 분류하였다.

2.1.1 트램 전용 궤도

다른 도로 교통은 이용할 수 없는 트램만 운영되는 독립적인 선로로 일반 자갈도상궤도 및 콘크리트궤도가 적용될 수 있으며 도심지 구간에서는 미관을 위해 매립형궤도가 적용 될 수 있다.

2.1.2 개방 트램 궤도

이 유형은 포장된 매립형궤도로 건설되며 트램의 운영 뿐만 아니라 버스(공공교통), 공공 서비스 및 때때로 택시와 같은 특정한 유형의 도로 교통만이 사용할 수 있는 궤도이다.

2.1.3 보통 트램 궤도

트램과 모든 도로 교통이 같은 공간을 사용할 수 있는 형태로 포장된 매립형궤도가 적용된다.

트램용 궤도는 설치되는 도시의 특성 및 환경에 따라 많은 제작용체에서 다양한 형태로 개발되어 왔다. Fig. 1은 설치 위치에 따른 트램용 궤도의 유형을 나타내며 보행자의 통행이 많은 도심에는 석재 또는 보도블록을 적용한 궤도가 많이 적용되고 있고 도로 교통과 병행하는 구간은 아스팔트 및 콘크리트를 적용한 궤도가 많이 적용되고 있으

Fig. 1 Type of Tram trackway due to the installation location

Fig. 2 General type of embedded rail system(Systra, 2011)

며 트램 전용궤도나 시외곽에서는 잔디나 자갈도상 궤도가 많이 적용되고 있다(Su Hyung Lee et al, 2012).

국내에서 일반적으로 시공되는 자갈도상 및 콘크리케도는 아무 문제없이 트램용 궤도로 적용이 가능하나 트램의 도시 운행을 위한 매립형궤도의 경우는 현재 수지고정형 매립형궤도가 국가 연구개발사업으로 연구 중에 있다.

2.2 수지고정형 매립형궤도

매립형궤도는 보행자나 도로교통이 병행하는 도심에 주로 설치되기 때문에 보행자 및 다른 교통수단의 안전을 위하여 누설전류(Stray current)를 방지하기 위한 절연 처리가 필요하며 건물에 매우 근접하여 설치되기 때문에 소음 및 진동에 대한 대책도 일반궤도에 비하여 철저히 강구되어야 한다. Fig. 2는 유럽에 설치되고 있는 전통적인 매립형궤도 시스템을 나타낸다. 이 형태는 레일이 침목에 체결되는 다점지지 방식의 궤도이다. 이 경우 침목 간격은 75cm에서 150cm까지 적용되고 있다. 레일 하부는 침목을 고정하고 있는 궤도지지 슬래브, 노반과 접하는 기초콘크리트로 이루어져 있다. 궤도 콘크리트 상부는 목적에 따라 콘크리트, 아스팔트, 석재, 잔디, 나무판넬 등의 재료를 이용하여 레일 상부 높이까지 포장된다. 궤도의 높이는 최소 55cm에서 최대 75cm로 유럽 전역에서 사용되고 있다. 누설전류에 대한 절연은 레일 매립부를 채우는 재료와 체결장치를 통해 이루어진다.

전통적인 매립형궤도는 도심지에 설치 시 소음과 일반 차량 통과에 따른 잦은 유지보수 등의 문제점을 일으킨다. 따라서 최근에는 레일을 궤도지지 슬래브에 수지형태의 합성화합물(Corklast, Masterflow, CDM, Polycork 등)을 이용하여 직접 고정하는 방식(Fig. 3)이 많이 적용되고 있다. 이 방식은 침목을 사용하지 않기 때문에 레일

Fig. 3 Embedded rail system with adhesive fastening system

은 궤도지지 슬래브에 의하여 연속적으로 지지된다(Su Hyung Lee et al, 2012).

수지고정형 매립형궤도는 레일체결을 위한 재료로 인해 시공비용이 상대적으로 높으나 일반적인 다점지지 궤도에 비하여 저소음, 저진동의 성능과 일반차량 운행에 의한 궤도 열화가 적어 유지보수가 거의 필요 없다는 장점을 갖고 있으므로 특히 도심구간에서 건물이 근접한 경우 교차로에서 궤도 직각방향 도로교통 통행이 빈번한 경우에 많이 적용되고 있다. 본 논문에서는 Polycork라는 합성화합물을 레일체결에 사용하는 방식의 매립형궤도 시스템을 대상으로 한다.

3. 시험시공

3.1 시험시공 개요

시험시공의 목적은 무가선 저상트램용 매립형궤도 시스템이 국내에서 시공사례가 없기 때문에 시험시공을 통하여 매립형궤도 시스템의 시공시 발생할 수 있는 문제점

Fig. 4 Plane view of test construction site

을 파악하고 개선방법을 확립하는 것이다.

충북 충주시에서 시험시공이 수행되었고 시험선의 구성은 Fig. 4와 같이 총 연장 31.88m로 직선부 11.88m와 곡선부 20m로 구성된다. 직선부는 잔디마감 형식으로 시공하며 곡선부는 석재마감 형식으로 시공이 이루어졌다. 배수로는 석재마감 구간과 잔디마감 구간의 경계부에 설치하였다.

3.2 시험시공 단면 설계

매립형궤도 시스템의 구조설계에서는 궤도지지 슬래브를 탄성적으로 지지된 보로서 취급하였고 동적하중의 재

Fig. 5 Tram load

하를 위하여 정적하중에 충격계수를 적용하였다. 또한 레일이 합성수지인 Polycork에 의해 연속적으로 궤도 슬래

(a) Stone finish trackway

(b) Lawn finish trackway

Fig. 6 Design section of trackway

브에 지지되어있다. 따라서 레일에 발생하는 고정하중, 활하중, 충격하중, 원심하중 및 횡하중 및 풍하중 등을 고려하여 매립형레도 시스템을 설계하였다. 설계조건으로 재료물성치, 지반반력계수는 아래와 같고 트램차량 하중은 Fig. 5와 같이 적용하여 설계하였다.

- 콘크리트 : $f_{ck} = 24MPa$, $E_c = 2.32 \times 10^4 MPa$
- 철근 : $f_y = 400MPa$, $E_s = 2.00 \times 10^5 MPa$
- 지반조건 : 강화노반 지지력 $K_{30} = 11 \times 10^4 kN/m^3$

Fig. 6에서와 같은 설계단면 가정에 따라 MIDAS CIVIL 범용 구조해석 프로그램을 이용하여 단면력을 산정하기 위해 2차원 Frame 해석과 Plate 요소를 이용한 3차원 해석을 수행하였다. Fig. 7은 석재마감 구간의 최대 발생 모멘트 해석결과를 나타낸다. 이와 같이 발생된 단면력에 대해 강도설계법을 적용하여 레도지지 슬래브의 단면을 설계하였다. 또한 잔디식생의 경우 미관효과를 크게 하기 위하여 콘크리트 표면의 노출을 가능한 한 줄이고 많은 식생표면을 확보하도록 하였다.

잔디마감 구간에서 레도지지 슬래브 상부에 고정되는

Fig. 7 Design force(bending moment diagram)

(a) The load applied on the angle

(b) Maximum principal stress ($f_{\max} = 137.3 \text{ MPa} < 140.0 \text{ MPa } O.K$)

(c) Maximum shear stress ($f_v = 70.6 \text{ MPa} < 80.0 \text{ MPa } O.K$)

Fig. 8 Structural analysis of angle

레일은 강재 Angle과 Polycork에 의해 고정된다. 이에 따른 Angle 구조부재의 구조적 안전성을 확인하기 위해 MIDAS CIVIL을 이용한 상세해석을 수행하였고 그 결과 Fig. 8과 같이 안전한 것으로 확인되었다.

최종 시험시공에 적용된 단면은 상기 설계조건, 구조해석결과를 바탕으로 단면에 대한 구조설계를 수행한 결과 Fig. 6의 단면으로 결정되었다.

Fig. 9 The steps of test construction

3.3 시험시공 절차

Fig. 9는 석재마감 구간과 잔디식생 구간의 시공과정을 나타낸다. 시공과정은 크게 궤도지지 슬래브 시공공정, Polycork 타설에 의한 레일고정 작업 및 궤도지지 슬래브 상부 마감공사로 나눌 수 있다.

3.4 시험시공 분석

시험시공을 수행하면서 발생한 문제점과 문제점의 개선사항을 정리하면 Table 1과 같다. 석재마감 구간인 곡선부 콘크리트 슬래브 및 레일의 시공, 상부 마감재 설치 공정, 배수공사에서 개선점이 발견되었다.

Table 1 Problems and improvements during test construction

NO.	Problems	Improvements	remarks
1	<ul style="list-style-type: none"> Construction of curved concrete slab : Trackway misalignment due to field measurement error during construction.	<ul style="list-style-type: none"> After the bending of rail in workshop and temporary placement, construction centers are marked using spacer. 	Slab construction work
2	<ul style="list-style-type: none"> Unable to bend rail on site due to small curve radius of 25m.	<ul style="list-style-type: none"> Rail was bent in workshop using bending machine. Field bending can be done with curve radius of 150m or more. For curve radius less than 150m, bending should be performed in workshop. 	Rail construction work
3	<ul style="list-style-type: none"> When field welding of rail, accuracy of work was not satisfied without using rail spacer for alignment.	<ul style="list-style-type: none"> Rail spacer was used for proper alignment when welding. 	Welding work
4	<ul style="list-style-type: none"> Humed pipe was used for drainage. Drainage in the area off the pipe was not proper. 	<ul style="list-style-type: none"> Drainage mat was installed beneath the humed pipe to fully cover the slab area to improve the drainage. 	Drainage work
5	<ul style="list-style-type: none"> Stone finish tile was covered for pedestrian way, parking area. 	<ul style="list-style-type: none"> Stone tile with high durability and abrasivity is used for the area with high traffic volume. (Tile for roadway : bending strength 6MPa) 	Finish work

4. 소음 및 진동 측정

4.1 측정 개요

국내 무가선 저상트램의 개발에 있어 채택된 노면선로는 매립형궤도 시스템으로 우수한 진동, 소음 저감 효과를 나타낸다고 알려져 있다(Jeung Geun Park et al, 2008). 무가선 저상트램용 매립형궤도 시스템은 국내에서 시공 사례가 전무하여 일반적으로 알려져 있는 진동, 소음 저감 효과에 대해 실험적 증명이 이루어지지 않은 상태이다. 이에 시험시공 완료 후 진동 및 소음 측정을 수행하여 매립형궤도 시스템의 저진동, 저소음 성능을 평가하였다.

4.1.1 측정 대상

진동, 소음 측정 실험은 충주시에 시험시공한 매립형궤도시스템인 시험선에서 수행되었고 저진동, 저소음의 성능을 비교, 평가하기 위해 Fig. 10과 같이 의왕시에 위치한 일반적인 궤도시스템인 자갈도상궤도 시스템을 대상으로 측정을 하였다.

4.1.2 측정 장비

진동, 소음 측정에 사용된 장비는 Table 2와 같다. 시험시공 완료된 시험선에는 아직 무가선 저상트램 차량이 운행하지 않기 때문에 진동과 소음을 유발하는 진동원과 소음원으로 Tapping Machine이 사용되었다. Tapping Machine은 질량 500g의 강철재 해머 5개가 연속적으로 40mm의 높이에서 자유낙하하여 바닥을 타격하는 구조를 갖고 있다. 진동 특성을 측정하기 위해서 레이저진동계를 사용하였고 소음 측정의 경우에는 Sound Level Meter와 Microphone을 사용하여 계측하였다. 레이저진동계의 경우 측정 대상위치에 반사스티커를 부착하여 송출된 레이저가 반사되어 돌아오는 속도를 측정한다. 이렇게 측정된 속도데이터를 변위, 가속도로 변환하여 진동

Fig. 10 Test location of conventional railway track

성능을 분석할 수 있다.

4.1.3 측정 방법

매립형궤도 시스템 시험선의 석재마감 구간과 잔디마감 구간 그리고 일반 자갈도상궤도에 대한 진동측정 방법은 Fig. 11(a)와 같이 레일 위에 Tapping Machine을 이용하여 진동을 발생시키고 Tapping Machine 중앙에서 궤도 교축방향으로 40cm, 교축직각 방향으로 70cm 떨어진 위치에서 레이저진동계를 이용하여 속도응답을 측정하였다. 석재마감 구간에서는 석재표면의 응답을 측정하였고 잔디마감 구간에서는 잔디식생 위의 속도응답을 측정하였다. 그리고 일반 자갈도상 궤도에서는 침목의 응답을 측정하였다.

소음측정은 Fig. 11(d)와 같이 레일 위에 Tapping Machine을 이용하여 소음을 발생시키고 Tapping Machine의 중앙에서 교축방향으로 2m 떨어진 위치에서 Microphone을 이용하여 소음을 수신 받고 Sound Level Meters로 측정값을 확인하였다.

Table 2 Vibration and noise measurement devices

measurement devices	Characteristic of the devices
Tapping Machine	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturers : Bruel & Kjaer Name of model : B&K 3207 Standard : 2Hz~10Hz Use : Occurring mild shock and impact noise
Laser vibration measurement device	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturers : Polytec GmbH Name of model : PDV-100 Maximum measurable distance : 30m Use : Measuring vibration
Sound Level Meters	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturers : Bruel & Kjaer Name of model : B&K 2260 Standard : 12.5Hz~8,000Hz (1/3 Octave) Use : Measuring sound pressure
Microphone	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturers : Bruel & Kjaer Name of model : B&K Type 4189 Standard : 20Hz~20,000Hz (1 Octave) Use : Measuring sound pressure

(a) Vibration measurement
(Stone finish trackway)

(b) Vibration measurement
(conventional railway track)

(c) Vibration measurement
(Lawn finish trackway)

(d) Noise measurement
(Lawn finish trackway)

(e) Noise measurement
(conventional railway track)

(f) Noise measurement
(Stone finish trackway)

Fig. 11 Photo of vibration and noise measurement

4.2 측정 결과 및 분석

일반적으로 궤도구조에서 진동평가라고 하면 승객의 입장에서 논하게 되는 승차감과 레일에 작용하는 동적하중에 의한 진동이 주변으로 전달되어 레일 주변지역의 진동 정도에 대한 평가를 의미한다. 본 연구에서는 차량, 구조물 및 지반을 모두 고려하여야 하는 승차감 측면의 진동을 측정 목적으로 하기 보다는 레일에 직접 작용하는 진동이 주변지역으로 전파되면서 저감되는 효과를 분석한다.

레이저진동계를 통해 측정된 속도를 가속도로 변환한 결과는 Fig. 12와 같이 일반 자갈도상 궤도시스템의 응답치가 최대 0.35g로 가장 크게 발생하였고 잔디식색 노면선로의 응답치가 최대 0.01g로 가장 작게 발생하였다. 일반 자갈도상 궤도시스템과 석재마감 구간, 잔디마감 구간의 가속도 응답을 비교하면 일반 자갈도상 궤도시스템에 비해 석재마감 노면선로의 진동은 40%의 감소를 보이며 잔디마감 구간의 진동은 98%의 감소효과를 나타내고 있다.

일반적으로 콘크리트 도상궤도 시스템이 자갈도상 궤도시스템보다 진동이 큰 것으로 알려져 있다(Sung Woo Park et al, 2011). 하지만 계측결과 콘크리트 도상궤도 시스템과 유사한 매립형궤도 시스템의 진동이 일반 자갈도상 궤도시스템의 경우 보다 작게 발생하였다. 그 원인

으로는 매립형궤도 시스템에 적용되는 합성수지계열의 Polycork가 레일을 감싸며 고정하고 있고 레일 아래에는 연속 레일패드 설치되어 있어 진동 가속도 성분이 흡수되었기 때문인 것으로 분석된다. 또한 석재마감 구간보다 잔디 마감구간의 가속도 응답이 현저히 감소되는 이유는 잔디 마감구간의 진동 가속도 성분이 레일에서 Polycork와 연속 레일패드를 지나며 감소하고 또한 매질이 밀하지 않은 토양이 Damping 작용을 함으로서 석재마감 구간보다 현저히 가속도가 감소하는 것으로 분석된다. 실제 무가선 저상트램 차량 주행시에 이루어진 진동측정은 아니지만 동일한 가진 조건에서 동일한 위치의 가속도 응답을 비교한 것으로 일반 자갈도상 궤도시스템에 비해 무가선 저상트램용 매립형궤도 시스템의 진동저감 효과가 탁월하다는 것을 유추할 수 있다.

소음측정 결과는 Table 3과 같이 일반 자갈도상궤도에 76dB로 가장 큰 소음이 발생하였고 잔디마감 구간에서 72dB로 가장 작은 소음이 측정되었다. 일반 자갈도상 궤도에 비해 석재마감 구간의 경우 3% 소음감소 효과가 있고 잔디마감 구간의 경우 6%의 감소효과가 나타났다. 일반적으로 1000Hz 대역의 소음원에 대해서는 석재마감의 매립형궤도 보다 흙이 있는 잔디마감 매립형궤도에서 소음의 크기가 크게 감소된다(Pallas et al, 2008). 하지

(a) Lawn finish trackway

(b) Stone finish trackway

(c) conventional railway track

Fig. 12 Result of vibration measurement (Acceleration response)

Table 3 Result of noise measurement

Type	Lawn finish trackway	Stone finish trackway	Conventional railway track	Regular noise
Noise (dB)	72	74	76	56

만 Tapping Machine에 의한 소음은 2~10Hz 대역의 소음이므로 소음감소 효과가 작게 발생한 것으로 판단된다. 감소효과 정도에는 차이가 있지만 진동 측정 결과와 동일한 경향을 나타내는 원인으로는 레일을 지지하고 있는 합성수지인 Polycork가 소음원에 의한 에너지를 일정부분 흡수하기 때문이라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 국내에서 시공사례가 전무한 매립형궤도 시스템을 시험시공하여 시공과정에서 발생한 문제점

을 파악하고 개선방향을 제시하였다. 또한 시험선 완공 후 진동과 소음을 일반 자갈도상궤도와 비교 측정하여 매립형궤도 시스템의 저진동, 저소음 효과를 정량적으로 분석하였다.

- (1) 시험시공을 통하여 도출된 개선사항으로는 곡선부 궤도지지 슬래브 측량의 정밀도를 향상시켜야하고 곡선반경이 150m 이하인 트램 노면선로의 시공에서는 Grooved Rail을 공장에서 사전 밴딩을 실시해야 하며 레일의 용접시 레일 교정기를 사용해야 할 것으로 판단되었다. 또한 배수매트를 이용한 배수층을 설치한 후 시공을 하여야 할 것으로 나타났다.
- (2) 시험시공 완공 후 진동 측정 시험결과 가속도응답의 분석에 의하면 일반 자갈도상궤도에 비해 매립형궤도 시스템의 형식인 석재마감 구간의 진동이 40%의 감소를 보이며 잔디마감 구간의 경우 98%의 감소효과를 보이고 있다. 이러한 원인으로는 매립형궤도 시스템에 적용되는 합성수지계열의 Polycork가 레일을 감싸며 고정하고 있고 레일 아래에는 연속 레일패드와 설치되어 있어 진동 가속도 성분이 흡수되었기 때문인 것으로 분석된다.
- (3) 소음 측정결과 일반 자갈도상궤도에 비해 석재마감 구간의 경우 3%의 감소효과가 있고 잔디마감 구간의 경우 6%의 감소효과를 나타내었다. 소음 감소 효과가 작게 나타나는 원인으로는 Tapping Machine에 의한 소음의 주파수대역이 낮기 때문이라 판단된다.

본 연구에서는 실제 트램 주행시에 진동, 소음 측정이 이루어지지 않았지만 향후 1km의 시험선이 건설되어 트램차량의 운행이 예정되어 있으므로 더욱 정밀한 실험과 평가가 이루어질 것으로 예상되며 본 연구의 결과는 1km의 시험선 건설에 기초적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 “무가선 저상트램 시스템 개발 연구” 국책연구과제의 연구비 지원으로 작성되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. C. Esveld, Modern railway track 2nd Ed., MRT Production, 2001.
2. Hyung soon Park, "The Introduction of Catenary-free Low Floor Tram", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, vol. 32, No. 3, 2010, pp.32-35.
3. Jeung Geun Park, Sun Cheol Kim, Jong Mon Han, "Evaluation of ERS(Embedded Rail Track System): Design and Experiments", Proceedings of the 2008 Spring Conference of The Korean Society for Railway, 2008, pp.1649-1658.
4. Korea Rail Network Authority, Design Criteria for Railroad : Roadbed, 2011.
5. M. A. Pallas, J. Lelong, R. Chatagnon, "Tram noise emission : spectral analysis of the noise source contribution", Proceeding of euronoise 2008, Paris, France, June 29-July 4.
6. Su Hyung Lee, Yun Suk Kang, Jae ho Kwak, Hyeon Chyeol Hwang, Soon Woo Han, Yong Guk Oh, "Development of Wireless Tram and Embedded Rail Track System in Korea", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 60, No. 6, 2012, pp.57-61.
7. Sung Woo Park, Seung Su Park, In Baek Hwang, "A Study on the Vibration Characteristics of Subway Structure by Train Load", Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection, vol. 15, No. 4, 2011, pp.107-115.
8. SYSTRA, "Tram Track Concept Design (Pase 1)", Project Report, 2011.
9. W. Jeong, S. H. Jang, J. H. Kwak, "Key Technologies of Battery Driven Hybrid Low-Floor Tram", Proceedings of the 2008 Autumn Conference the Korean Society of Precision Engineering, 2008, pp.681-682.
10. Young Hoon Bae, Yun Suk Kang, Jeong Geun Park, Jeong Chan Min, Kyung Jun Jeong, "Performance Evaluation of Embedded Rail Track with Adhesive Fastening System", Proceedings of the 2012 Spring Conference of The Korean Society for Railway, 2012, pp.1665-1670.

Received : 05/25/2012

Revised : 08/13/2012

Accepted : 08/23/2012

요 지

무가선 저상트램은 친환경 고효율 교통수단으로서 저렴한 건설비, 도시 미관의 개선, 도시 주변 지역 활성화 및 승객 편의성 확보 등의 장점을 보유한 신교통 수단으로 10개 이상의 지역단체에서 도입을 검토 중에 있다. 이에 따라 무가선 저상트램 차량과 노면선로 및 도로교통과 복합된 신호시스템의 개발, 인프라시스템 구축을 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

무가선 저상트램 노면선로 중 도심지 구간에서는 레일이 노면에 매립되는 매립형레도 시스템이 적용되고 있다. 매립형레도 시스템은 소음진동의 저감, 공기 단축 및 유지보수 최소화 등의 장점을 보유한 것으로 알려져 있다. 이에 본 논문에서는 국내에서 시공사례가 전무한 매립형레도 시스템을 설계하여 시험시공을 수행하였고 시공과정에서 발생한 문제점을 파악하였다. 또한 시험선 완공 후 진동과 소음을 일반 자갈도상계도와 비교 측정하여 매립형레도 시스템의 소음진동 저감 성능을 정량적으로 분석하였다.

핵심 용어 : 무가선 저상트램 노면선로, 매립형레일 시스템, 시험시공, 진동 측정, 소음 측정