

# 도시철도 궤도의 소음·진동의 저감 대책에 관한 연구

## A Study of Decreide Light Railway of Track's Noise and Vibration

김동기† · 박종복\* · 박광현\*\*

Kim, Dong-Ki, Pack, Jong-Bok and Pack, Kwang-Hyun

### ABSTRACT

A light railway operation is an effective means to solve a traffic problem of the city however, noise and vibration is pollution happened. This paper studied noise and vibration pollution of a light railway operation in order to let a decrease. The study range was only track condition and civil engineering structure condition.

The way how we decrease noise and vibration in a protection vibration track, ballasted track, non-ballasted track, floating track trends was devoted is long rail laying, low vibration track lying. It was the most economic that the examination results track section a complement, and it was proved that a certain way.

### 1. 서론

여기에 서론을 입력하십시오. 현대도시에서는 경량철도의 건설이 활발하게 추진되고 있다. 경량철도는 건설비의 투자가 적고, 공사기간이 비교적 짧게 단축시킬 수 있으며, 운행 빈도를 최소화 하므로써 도시민의 편의를 증진시킬 수 있다. 그러나 이용객의 편의를 위해 주거지역에 인접한 관계로 운행시 발생하는 소음·진동은 경전철의 약점이라 할수 있다. 차량의 운행으로 인하여 발생하는 소음·진동에 대한 방음·방진 대책수립은 크게 발생원 대책, 전달경로 상에서의 대책, 수신부 대책 등으로 구분할 수 있다. 경량철도 운행시 발생하는 소음·진동 문제는 세 가지의 저감방안을 상호 복합적으로 검토하여 수립하는 것이 소음·진동 저감에 가장 효과적이다. 그러나 그중 가장 효과적인 대책은 발생원 대책이라 생각되며 소음·진동 저감에 가장 효과적인 방안이라 할 수 있다. 발생원 대책은 차량운행 시 발생하는 소음·진동의 저감을 위해서 궤도뿐 아니라 차량, 교량·터널·토공 등 노반구조물, 전차선(제3궤조) 등이 종합적으로 검토되어야 한다. 발생원 대책으로는 레일에 대해서는 레일 표면

의 관리, 레일복부에 저감대책, 장대레일 사용 등이 있으며 궤도부분에서는 저진동궤도, 터널부분에서의 터널 중량증대 및 이중박스터널 사용 등이 있다. 여기서는 여러 가지 저감 대책 가운데 궤도형식에 다른 저감대책에 대해서 기술하였다.

### 2. 방진궤도의종류

경량철도는 일반적으로 수신부를 인접하여 고가 및 지하로 통과하기 때문에 발생원으로부터의 대책수립이 무엇보다 중요하다. 따라서, 궤도구조 자체에서 진동을 흡수하기 위하여 탄성계수(스프링계수)가 적은 궤도구조를 사용하며 이로 인한 저주파 진동의 발생을 차단하도록 해야 한다. 발생원 대책으로서 열차운행시 발생하는 진동 및 동적하중을 저감시켜 주는 방진궤도, 즉 저진동궤도의 개발이 필요하게 되었고 이에 따라서 여러 가지 형태의 방진궤도가 개발되어 사용되어 왔는데 그 기본은 침목의 스프링상수를 낮추는 방법, 레일과 지반 사이의 중량을 크게 하는 방법, 레일의 단면적을 크게 하여 단면의 2차 모멘트를 크게 하는 방법 등이다. 이 중 경량철도에서 사용하는 가장 일반적인 방법은 첫째와 셋째 방법을 함께 사용하는 것, 즉 중량레일을 사용하고 레일의 하부에 방진궤도를 설치하는 것이다. 이러한

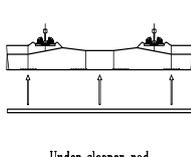
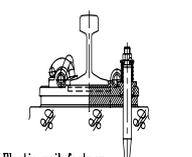
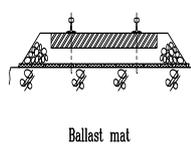
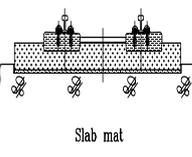
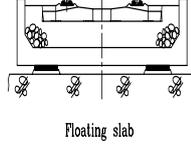
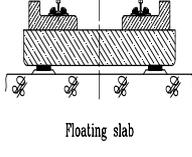
† (주)일신하이텍 철도본부, ,  
E-mail : dgkim54@hanmail.net  
Tel:(02) 570-8450 Fax:(02) 576-8002

\* (주)유신코퍼레이션 철도부

\*\* (주)유신코퍼레이션 환경부

방진궤도를 설치할 경우에 그 목적을 충분히 달성하기 위해서는 방진궤도의 구조설정과 함께 방진재의 동적특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요한 일이다.

경량궤도궤도는 크게 자갈도상궤도(ballasted track)와 콘크리트 도상궤도(non-ballasted track), 부유궤도(floating track)로 구분할 수 있다.

Natural frequency	Ballast track	Slab track
~30Hz	 Under sleeper pad	 Elastic rail fastener
15-30Hz	 Ballast mat	 Slab mat
7-15Hz	 Floating slab	 Floating slab

### 방진궤도의 종류

#### 3 자갈도상궤도(ballasted track)

경량궤도에서는 특별한 경우를 제외하고 토공노반에 국한하여 적용한다. 자갈도상궤도는 침목과 지반의 사이에 차량에서 발생하는 동적하중을 분산시켜 주기 위해 자갈을 사용하는 궤도가 주로 사용되어 왔는데 이는 자갈궤도가 바퀴를 통해 전달되는 진동을 지반으로 분산시킬 때 좋은 감쇠특성이 있고 배수특성이 우수할 뿐만 아니라 자갈과 자갈의 틈새에 의한 흡음성이 탁월해서 터널 등과 같은 밀폐된 공간에서의 음의 반사를 저감시켜 주는 성능이 있기 때문이다. 그러나, 경량궤도의 장기적인 운행으로 인한 피로에 의해 자갈의 파손이 우려되는 곳이나 발생진동에 의해 거주지역에 피해가 예상되는 곳에서는 진동방지대책 중 한 가지를 선택하여 사용함으로써 발생진동을 허용치 이하로 줄이는 노력을 기울여야 한다. 그러나, 이러한 자갈궤도는 자갈의 품귀, 자갈의 마모에 따른 분진의 발생 및 분진의 자갈층에 존치, 그리고 특히 지하터널구간의 경우 자갈층 오염에 따른 악취 및 세균발생 등의 지하환경오염 및 유지보수의 어려움 등의 문제로 인하여 무자갈궤도(non ballasted track)

로 대체되는 것이 세계적인 추세이다. 또한, 교량구간에서는 자갈도상에 따른 사하중의 증가 및 이에 따른 구조물의 산뜻한 이미지 훼손, 무인자동으로 운영되는 경량궤도에서 승객들에게 미관의 저해, 계속되는 유지관리로 유지보수비 증가에 따른 재무적인 부담 등의 문제가 있어 계속되는 노반의 미세한 침하로 생력화 궤도의 채택이 어려운 토노반 외에는 사용이 자제되어지고 있다.



방진침목궤도



자갈도상매트궤도

방진침목궤도는 주로 지하구간에 사용하는 방법으로 고무패드를 사용할 경우 궤도의 고유진동수가 30Hz 이상이기 때문에 진동차단의 측면보다는 고체음차단의 측면에서 사용되어 왔으나 micro-cellular polyurethane이 개발되면서 ballast mat를 사용할 때와 거의 같은 방진성능을 발휘하기 때문에 자갈궤도에서 가장 경제적인 진동 및 고체음 저감대책이라고 할 수 있다. 근래 일본 및 유럽에서는 독자적으로 설계된 방진침목궤도를 개발하여 설치하고 있는데 이런 방진침목패드는 침목에 부착되는 탄성재(elastic layer)와 자갈과 접촉하는 보호재(protection layer)로 구성되어 있으며 탄성재는 열차의 주행으로 인한 동적하중 및 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있으며 동시에 레일의 처짐량을 적절히 (정적 : 4-5mm, 동적 : 3-4mm) 유지할 수 있도록 설계되며 보호재는 동적하중을 자갈에 분산시켜 주고 자갈의 날카

로운 면으로부터 탄성재를 보호해 줄 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 방진침목패드의 특징은 다음과 같다.

- 진동 및 고체음의 저감효과가 크다.
- Rail pad나 baseplate pad의 사용시와 같이 궤도가 넓어지지 않는다.
- Track의 안정성이 우수하다.
- 자갈에 전달되는 동적하중을 줄여 자갈이 세립화되는 현상을 방지한다.
- 방진패드의 두께 및 밀도를 조정하여 스프링상수를 조정할 수 있기 때문에 매우 다양한 제품을 생산할 수 있다.
- 시공성이 우수하다.
- 성능 대비 가격이 저렴하다.

그러나, 방진침목은 현재 운영중인 선로에서 자갈층의 세립화 및 좀 더 탄성계수를 하향시켜야 할 필요성이 있을 때에 사용하는 것이 일반적이다. 지하구간이나 고가교에 쓰이는 콘크리트 바닥에 자갈을 포설하는 궤도의 경우에는 자갈층에 의한 기본적인 진동감소보다 추가적인 진동감소를 고려해야 하는 경우가 있다. 자갈매트(ballast mat)는 이와 같은 추가 방진을 위해 사용되는 것으로 지금까지는 천연고무, 네오프렌(neoprene), 유리섬유, 광물모직재(mineral wool), 페타이어 등이 사용되어 왔으나 고무가 가지고 있는 내구성 및 동적특성의 약점을 보완하기 위해 micro-cellular polyurethane과 같은 탄성중합재 등의 재질이 개발되어 ballast mat의 개념이 바뀌고 있다.

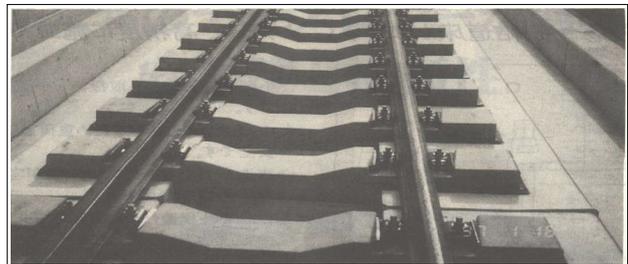
이전의 자갈매트(주로 천연고무)는 자갈층과 바닥 사이에 설치하여 궤도의 진동저감보다는 자갈의 파쇄를 방지하기 위해 사용되었기 때문에 지하구간과 같이 바닥이 콘크리트인 경우에는 그 효과가 있었지만 지상 및 고가구간에서는 그 효과가 거의 없는 것으로 알려져 왔다. 그 이유는 지반 및 성토노반을 도상으로 하는 재래식 지상 경량철도구간의 경우 자갈매트의 방진효과가 경미한 것은 토사도상의 진동저항도(dynamic impedance)가 콘크리트도상에 비하여 매우 낮기 때문이지만 재질의 개발로 인해 충분히 유연한 스프링상수를 유지하면서 레일의 처짐량을 허용치(3mm) 이내로 제한할 수 있는 탄성재인 microcellular polyurethane이 개발되어 토노반, 교량, 고가 등에 성공적으로 사용되고 있다.

#### 4. 콘크리트 도상궤도(무자갈궤도 : non-ballasted track)

콘크리트 도상궤도는 터널 및 교량구간 등에 있어 자갈 대신 콘크리트를 타설하고 그 위에 레일을 설치하는 궤도를 총칭하며 슬래브트랙(slab track)이라고도 부른다. 지하공간과 같이 지하의 밀폐된 공간에 자갈궤도를 설치할 경우 유

지 및 보수가 불편하고 자갈의 세립화에 의해 분진을 비롯한 각종 환경적인 문제가 대두되어 콘크리트 도상궤도가 사용되고 있다. 그러나, 자갈궤도에 비하여 진동면에서는 유리할 수 있으나 소음면에서는 흡음기능이 없어서 불리하기 때문에 적절한 흡음대책 및 진동방지대책을 강구하여 진동 및 고체음을 줄이는 노력을 기울여야 한다.

목단침목궤도는 별도의 방진장치가 없이 목단침목을 콘크리트 도상에 직접 체결한 궤도를 말한다. 목단침목에 베이스플레이트와 레일을 조립한 상태에서 콘크리트를 타설하여 완성시킨 궤도시스템이 일반적이며 서울의 1기 지하철의 역사내에 적용된 궤도이다. 이 때 사용되는 나무침목은 레일을 체결하고 레일로부터 전달되는 열차하중이 콘크리트 도상에 균등하게 분산되도록 하는 것이 주 기능이며 방진효과는 목재의 탄성 외에는 기대할 수 없다.



직결체결장치 : Redha Light 궤도

콘크리트궤도의 방진침목시스템으로는 서울의 2기 지하철에 채택된 Stedef 시스템, LVT 궤도, 방진상(영단형) 궤도 시스템이 대표적인 것인데 이 시스템은 레일을 한 쌍의 독립된 콘크리트블록으로 이루어진 침목으로 지지하고 각 콘크리트블록은 고무상자(rubber boots)로 둘러 쌓여 콘크리트 슬래브의 내부에 형성된 홈 부위에 설치된다.



직결체결장치 : 콘크리트도상궤도

침목과 고무상자의 사이에는 방진패드(침목패드)를 설치하여 침목과 콘크리트 슬래브간의 진동전달을 최대한 감소시키도록 한 것이 방진설계의 핵심이다. 레일과 침목 사이에도 얇은 레일패드가 놓이는데 이 레일패드는 근본적으로 rail과 wheel의 interaction force를 줄여 주어 차량 내부에서의 소음 및 진동을 줄여주는 것이 목적이다. 이와 같은 방진침목궤도와 방진체결궤도와의 차이점은 콘크리트 슬래브와 분리된 침목의 질량에 의해 사실상 레일중량을 증가시

키는 효과를 얻을 수 있고 이에 따라 방진효율을 부가적으로 높일 수 있다는 것과 침목이 콘크리트 슬래브의 홈 속에서 구속되는 관계로 레일의 횡적 안정성이 높아 방진체결구에 사용되는 방진패드보다 낮은 강성도를 갖는 방진패드를 사용할 수 있는 것이다.

한편, Stedef 시스템과 유사한 개념으로 고안된 다른 방진침목계도로는 Sonneville 시스템(L.V.T 시스템)과 Voest-Semperit 시스템이 있다. Sonneville 시스템(L.V.T 시스템)은 사실상 Stedef 시스템의 개량형으로서 두 개의 콘크리트 블록을 연결하는 타이바(tie-bar)를 사용하지 않고 침목패드의 재질을 달리한 것이 Stedef 시스템과의 차이점으로서 동일한 개발자(Roger Sonneville)에 의해 개량된 Stedef 시스템의 변종이다. 한편, Voest-Semperit 시스템은 오스트리아의 Semperit Rubber Company에 의해 개발된 것으로서 두 개의 콘크리트 블록 대신 하나의 PVC 침목을 사용하고 침목의 양단에 Stedef 시스템과 유사한 방진치리를 한 궤도시스템이다. 일반적으로, 방진침목계도의 방진 효과는 자갈궤도나 방진체결궤도보다 우수한 것으로 알려져 있다.



Colone Egg형 Base Plate

직결체결장치는 침목을 사용하지 않고 고무나 폴리우레탄을 사용한 방진패드와 탄성체결구만을 이용하여 레일을 콘크리트도상에 직접 체결하는 궤도를 말하며 방진패드가 베이스플레이트의 내부에 접착된 직결체결장치와 베이스플레이트와 콘크리트도상의 사이에 분리되어 설치되는 탄성체결구로 구분할 수 있다.



Colone Egg Alternative 1형 Base Plate

이러한 방식은 Colone Egg, Colone Egg Alternative 1, 2와 Vossloh DFF 14형 등을 들 수 있다. 직결체결장치의 방진효과는 근본적으로 탄성재의 동특성에 좌우되며 탄성재의 동특성은 근본적으로 진동의 주파수 특성 및 강도에 따라 변하므로 제품의 선정시에는 관련된 동적실험을 통하여 실질적인 진동주파수 및 진동강도를 재현한 시험성적을 참조하는 것이 필수적이며 시험선에서 적정성을 검증해야 할 것이다. 또한, 방진패드는 열·화공약품·유제 등에 의해 그 성질이 크게 변하고 진동하중의 반복 작용에 따른 피로현상에 의해 시간이 지남에 따라 성질이 변하므로 화학적 내구성, 피로 내구성 등에 대한 실증적 시험성적을 고려하여 선정하는 것도 중요하다.

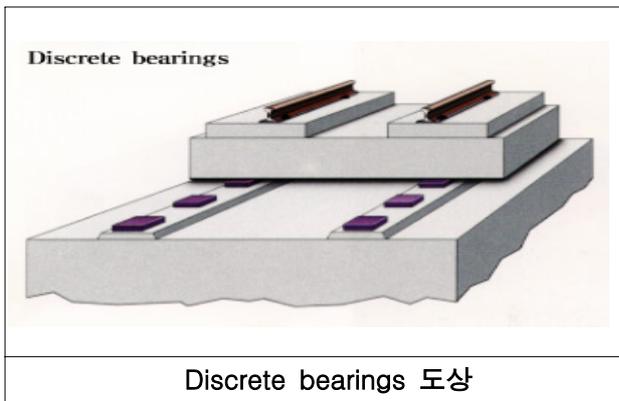
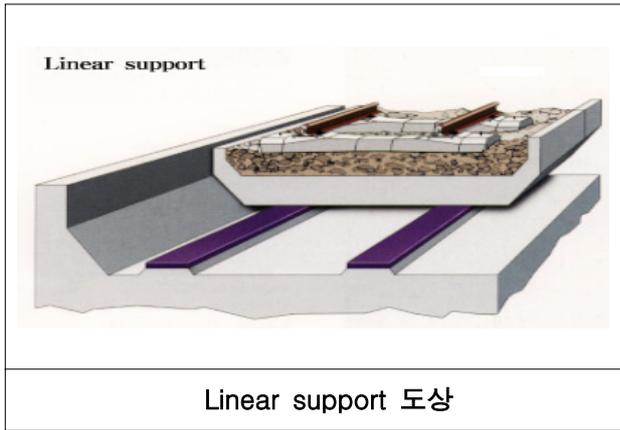
### 5. 부유궤도(floating track)

부유궤도는 진동을 최소화하는 궤도분야에서의 최종적인 방안이라고 할 수 있으며 궤도와 토목구조물을 탄성체로 완전히 분리하여 궤도로부터의 진동이 직접 전달되지 않도록 하는 방안이다. 진동이나 고체음에 민감한 건물이 있는 경우에 주로 사용되며 궤도의 고유진동수를 7-15Hz 정도로 낮출 수 있기 때문에 진동 및 고체음 차단에 매우 탁월한 효과를 발휘할 수 있다. 구조적 특성상 부유식 슬래브궤도(floating slab track)라고도 부르며 방진재의 종류에 따라 크게 스프링 삽입 시스템과 패드 삽입 시스템의 두 가지로 구분할 수 있다. 패드 시스템은 슬래브와 도상 사이에 고무나 기타 탄성체 패드를 삽입하여 진동을 감소시켜 주는 시스템을 말하며 스프링 삽입 시스템은 슬래브와 터널바닥 사이에 스프링이 들어가 열차로 인해 발생하는 진동의 전달을 감소시켜 주는 시스템을 말한다.

매트형 부유궤도 시스템은 궤도용 슬래브와 토목 F.L.간에 방진용 매트를 삽입하는 형태로 서울 지하철 7호선 고속터미널 정거장, 부산지하철 2호선에서 적용한 공법이다. 방진매트 설치형태에 따라서 크게 3종류가 있으며 방진효과는 자갈도상에 비하여 약 15-20dB 감소하는 것으로 보고되고 있다. 본 매트형 부유궤도에는 full surface supporting 도상, linear support 도상, discrete bearings 도상 등 3종류가 있다.



Full surface supporting 도상



<그림 > 매트형 부유궤도 시스템 개요도

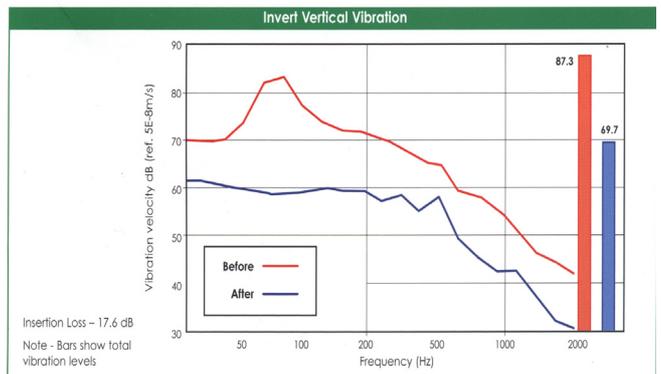
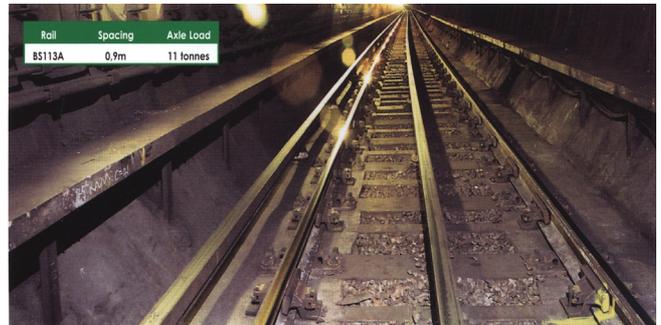
스프링형 부유궤도는 독일 Gerb사에서 생산·공급하는 시스템이 대표적이며 우리나라는 경인선 부천역사, 경부고속철도 천안정거장에서 적용하고 있고 궤도용 슬래브와 토목 F.L.간에 스프링을 삽입한 형태로서 성능은 우수하나 공사비가 많이 소요되는 단점이 있다. 해외 지하철, 경전철(영국 DLR, 독일 Bielefeld Tramway, 독일 프랑크푸르트 공항 PTS, 독일 Stuttgart Tramway) 등에서 노선이 주거지역 하부로 통과시 및 노선 하부에 주거지역 및 호텔 등이 위치할 경우 많이 적용되고 있다. 방진효과는 자갈도상에 비하여 약 20~25dB 감소되는 것으로 보고되고 있다.

## 6. 특수궤도

소음·진동을 최소화할 목적으로 개발된 궤도구조로서 대표적으로 영국 팬드롤(Pandrol)사에서 개발한 Vanguard를 들 수 있다. Vanguard system은 모든 하중의 지지를 rubber 계통의 완충재가 레일복부에서 하며 레일저부가 바닥에 직접 닿지 않는다. 이 시스템은 진동을 감소시키는데 탁월한 성능이 있으며 부설후 유지 및 보수를 하는 데에도 아주 편리하도록 개발되었다. 일반도상과 비교하여 진동의 감소량은

Hz에 따라 상이한데 자갈도상, 콘크리트도상에서 전반적으로 감소한다. 고가 교량에서 Vanguard system을 운영하려면 거어터 실험에 따른 Vanguard system의 복진저항력은 설치할 때 일정한 압력을 가하기 때문에 일정량의 복진저항력이 발생하며 교량용과 터널용이 약간 다른데 교량용은 추후 교량구조의 변경에 대비하고 철근 등에 손상이 가지 않도록 하기 위하여 베이스플레이트를 사용하며 터널용은 일단 변경의 여지가 없으며 콘크리트가 구조체가 아니어서 설치를 위한 구멍을 뚫어도 문제가 없고 경제적인 면을 고려하여 베이스플레이트를 사용하지 않는 방식을 선정한다. Vanguard system의 정정범위는 베이스플레이트를 사용하는 구조는 베이스플레이트 자체가 40mm까지 이동이 가능하고 Vanguard system이 ±5.5mm까지 이동이 가능하다. 높이 정정은 shim plate를 삽입하면 15mm까지 높일 수 있으며 Vanguard 자체는 21mm까지 높이는 것이 가능하다. 단지 높이 올릴 경우에는 좌우 이동량이 제한된다. 면맞춤의 경우로 베이스플레이트 밑에 shim base plate를 사용하지 않는 터널용과 일반자갈 도상용은 줄맞춤 ±5.5mm, 높이가 21mm까지 정정이 가능하다. 교량에서 거어터와 거어터 사이의 접속부에서 처짐각이 일정하게 작용하는데 대한 대책으로는 실제와 동일한 상태에서 시험을 하여 증명을 하였는데 실제 처짐치는 6% 이상이다.

아래그림은 콘크리트 도상에서 주파수별 진동의 감소량을 나타낸 것으로 주파수별 차이가 있지만 그림과 같이 전반적으로 진동이 감소한다.



## 7. 경량철도 소음·진동 저감방안

저 감 방 안	저 감 효 과	비 고
저진동궤도 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>차량하중 적용시 2mm 이상 soft한 탄성을 갖는 base plate를 설치</li> <li>진동발생원으로부터 진동을 줄일 수 있는 효과적인 방법</li> <li>20-30Hz 이상에서 20-30dB 저감 가능</li> </ul>	Stedef 궤도/ LVT 궤도/ 방진상 궤도 / Redha Light 궤도/ ALT 궤도 등
부유궤도 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>진동발생원으로부터 진동을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방법(패드형, 스프링형)</li> </ul>	공사비의 증가로 진동에 민감한 지역에서만 사용
레일 지지형궤도 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>레일 복부에 탄성체로 지지함으로 인하여 레일 진동을 줄일 수 있는 효과적인 방법 (Vanguard)</li> </ul>	진동에 민감한 지역에서만 사용
마모방지 레일에 도유시스템 적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>마모방지레일이 곡선부 외측차륜 레일에 접촉하지 않도록 설치후 마모방지레일에 도유</li> </ul>	영국 도클랜드 경전철
분기기	<ul style="list-style-type: none"> <li>크로싱 결선부를 제거할 수 있어 소음·진동의 현저한 감소 가능</li> </ul>	캐나다 Sky Train 영국 도클랜드 경전철

저 감 방 안	저 감 효 과	비 고
장대레일 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>저주파영역 : 5dB 저감 가능</li> <li>고주파영역 : 10dB 저감 가능</li> </ul>	
차륜 및 레일표면 관리 철저	<ul style="list-style-type: none"> <li>6-10dB 저감 가능</li> </ul>	Monitoring system 활용
레일 복부에 탄성흡수재 부착	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차진동에 의한 소음 제거</li> </ul>	Vanguard 등
탄성체결장 치 사용	<ul style="list-style-type: none"> <li>진동레벨이 20LogK(K는 레일지지 강성 계수)에 비례하므로 구조체가 유연할수록 저감효과 증가</li> </ul>	

## 4. 결론

경량철도는 우리사회에서 대량성 및 경제성 외에 소음, 진동이 상대적으로 적은 정숙한 주행이 가능한 친환경적인 교통수단으로 도심지에서 현실적인 교통 수단으로 인식되어져 지속적인 건설이 추진되고 있다.

그러나 경량철도는 차량의 중량은 작지만 도심지를 통과하는 관계로 수음, 수진부와 인접하게 되고, 열차운행회수가 많아 경량철도 운행에 따른 민원발생요소가 많아 근본적인 소음, 진동을 최소화하는 대책이 필요하였다.

본 연구에서는 선로구축물 중 궤도를 중심으로 소음, 진동의 최소화 방안을 중점 연구하였다. 여기서는 방진 궤도, 자갈 도상 궤도, 콘크리트 도상 궤도, 부유 궤도 등 여러 가지 궤도형식에 대한 저감대책을 레일, 궤도, 분기기로 구분하여 궤도 재료의 특성에 따른 저감대책에 대해서 기술하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이 덕영 등, 2003.9 “경량전철 실무” (주)유신
- (2) 이 종득 저, 1996. 3 “철도공학” 노해출판사
- (3) 서 사범 역, 2003. 5 “최신 철도선로 (Modern Railway Track) ” 열과알