

레일부유궤도 시스템에 대한 성능 평가

Performance Evaluation On Floating Rail Track System

김순철* 강정옥** 지윤배*** 한광섭**** 전병찬*****
Kim, Soon-Cheol Kang, Jeong-Ok Ji, Yunc-Bae Han, Kwang-Seob Jeon, Byung-Chan

ABSTRACT

Up to now, the only way is Floating Slab Track System, which cuts off vibration by installing spring between concrete slab and ground for the lines of particularly requiring attenuating vibration. The weak point of Floating Slab Track System is large increase of construction cost because normally the structure is getting bigger. In regards to this matter, Floating Rail Track System has been developed, which cuts off vibration by floating the first cause of vibration : rail, and the system is in operation. In the thesis, the application of new attenuating vibration track system has been confirmed by studying theoretical background of Floating Rail Track System and evaluating dynamic deflection of track and attenuating of noise and vibration performance through various measurements from laboratory tests and site inspection.

1. 서론

궤도설계를 함에 있어 입선 가능한 궤도시스템인가를 논하던 과거와 달리 오늘날은 입선 가능한 것은 물론이고 유지보수가 적어야 할 뿐만 아니라 일정수준 이상 소음·진동이 방출되어서는 안 되도록 점차 규제가 강화되고 있으며, 쾌적한 승차감과 안정된 교통시설을 유지할 위해 끊임없이 개선이 요구되고 있다.

이에 따라 오래전부터 몇몇 선진국에서는 전통적인 자갈도상 궤도시스템에서의 유지보수 노력을 절감하고자 여러 가지 콘크리트도상 궤도시스템을 개발하여 부설·운영하고 있으며 계속해서 연구 발전시키고 있는 실정이다. 그러나 이러한 콘크리트도상 궤도시스템은 단순히 도상형태만을 변경할 경우 자갈도상 궤도시스템에 비해 소음·진동이 증가하기 때문에 자갈도상 궤도의 궤도탄성과 유사하거나 그보다 좋은 탄성거동을 부여하기 위해 궤도시스템에 Soft한 탄성층을 형성하게 되는 것이 일반적이다. 하지만 방진에 대한 더 높은 요구는 급기야 콘크리트도상 궤도를 노반과 격리시키는 Floating Slab Track(FST) 시스템을 개발시켰으며, 이러한 FST는 특별히 방진성능이 요구되는 개소에 다양한 형태로 부설 운영되고 있다. 그러나 이와 같이 콘크리트도상을 들어올리는 방식의 FST는 대체로 구조물 규모가 커지기 때문에 건설비용이 많이 소요될 뿐만 아니라, 특별한 시공기술을 요하게 된다. 때문에 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하면서 신설선 뿐만 아니라 운영 중인 기존선로에도 부설하여 방진성능을 향상시킬 수 있도록 개발된 레일 부유 궤도시스템에 대해 이론적 고찰과 실험 및 현장계측을 통해 방진성능 등을 평가하고 국내 철도노반 시설물 형태와 연계하여 그 적용성을 판단하고자 한다.

* (주)척탑엔지니어링 궤도부 상무, 철도원호대학원 공학석사, 정회원

** (주)척탑엔지니어링 궤도부 과장, 정회원

*** (주)척탑엔지니어링 궤도부 대리, 정회원

**** (주)척탑엔지니어링 궤도부 주임, 공학석사, 정회원

***** (주)척탑엔지니어링 궤도부 사원, 정회원

2. Floating Slab Track(FST)의 이론적 고찰

Floating Slab Track(FST)은 무거운 슬래브 레일을 Soft한 스프링으로 지지하도록 하여, 결국 레일 전량은 증가시키고 Stiffness는 감소시켜 시스템의 고유진동수를 현저히 낮추는 효과로 인해 방진 효과가 극대화 되도록 고안된 것으로 대표적인 형태는 그림1과 같다.

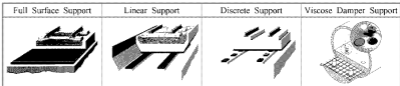


그림1. 여러 가지 Floating Slab Track System

이와 같은 FST는 시스템의 고유진동수가 10Hz 이하로 60Hz 정도인 일반적인 콘크리트도상레일과 또, 70Hz 대역에 속하는 자갈도상레일과 비교된다. 현재 국내 지하철에 가장 많이 보급된 Boots Type의 콘크리트도상레일과 DFF Type(직결방식)의 콘크리트도상레일을 예를 들어 비교하면 표2와 같으며, 이론적 고찰을 위해 가정한 차량조건 및 선로조건은 표1과 같다.

표1. 이론적 고찰을 위한 차량 변수들

• 축 중 : 16ton	• 최고속도 : 100km/h	• 전축간격 : 62.5cm
• 축 거 : 2.1m	• 레일중면 : 60kg/m	• 선 형 : 직선
• M_w (Unsprung Wheel Mass) = 16ton \times 1/2 \times 10% = 0.8ton = 800kg		
• M_s (Unsprung Wheel Mass per Sleeper) = 800kg \times 35% = 280kg/sleeper		

표2. 레일구조 형식별 고유진동수 계산

구분	Boots Type 콘크리트도상	DFF Type 콘크리트도상	자갈도상레일
모형			
mass (정복당)	<ul style="list-style-type: none"> • M_w : = 280 kg • Rail : 60kg \times 0.625 = 37.5 kg • Sleeper : = 100 kg 계 417.5 kg 	<ul style="list-style-type: none"> • M_w : = 280 kg • Rail : 60kg \times 0.625 = 37.5 kg • Steel Base Plate : = 10 kg 계 327.5 kg 	<ul style="list-style-type: none"> • M_w : = 280 kg • Rail : 60kg \times 0.625 = 37.5 kg • Sleeper : = 120 kg 계 437.5 kg
K_0	$1/(1/400+1/90) \approx 73\text{kN/mm} = 73,000,000\text{N/m}$	$1/(1/400+1/46) \approx 41\text{kN/mm} = 41,000,000\text{N/m}$	$1/(1/200+1/200) \approx 100\text{kN/mm} = 100,000,000\text{N/m}$
f_0	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{73,000,000}{417.5}} = 67\text{Hz}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{41,000,000}{327.5}} = 56\text{Hz}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{100,000,000}{437.5}} = 76\text{Hz}$
Note	상기 콘크리트도상레일은 국내 지하철에 부설되어 있는 LVT와 ALT-1을 모델로 하였으며 자갈도상레일의 경우 현역고무 제진의 Rail Pad를 사용하는 것으로 가정하였음.		

이와 같이 일반적인 콘크리트도상 레일시스템의 고유진동수는 60Hz 내외로서 자갈도상레일과 비교해 약간 낮은 경향을 보이나, 이를 FST와 할 경우에는 두께 30cm 이상의 철근콘크리트 Slab 중앙과 Slab 밑의 부드러운 스프링으로 인해 Mass는 증가하나 K_0 값이 작아지기 때문에 시스템의

고유진동수가 현저히 낮아지게 된다.

예를 들어, 1/2 레도에서 침목당 M_0 및 레일과 침목을 모두 포함한 콘크리트도상 슬래브 중량을 1300kg으로 가정하고 슬래브 밑에 Discrete Support 방식의 탄성패드 (예:500×400×80mm, $C_{str}=10kN/mm$, $C_{on}=14kN/mm$)를 좌우 레일 옆을 따라 약 2m 간격으로 배치했다고 가정할 경우, 침목당 스프링계수 값은 $C_{on}=14+2 \times 0.625 \times 4.4kN/mm$ 가 되기 때문에,

① Boots Type 콘크리트도상을 Floating 할 경우에는,

$$K_{on}=1/(1/400+1/90+1/4.4)=4.15kN/mm=4,150,000N/m, \therefore f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4,150,000}{1,300}}=9Hz가\ 되며,$$

② DFF Type 콘크리트도상을 Floating 할 경우에는,

$$K_{on}=1/(1/400+1/46+1/4.4)=4.0kN/mm=4,000,000N/m, \therefore f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4,000,000}{1,300}}=8.8Hz가\ 된다.$$

이와 같이 FST는 시스템의 고유진동수를 10Hz 이하로 줄일 수 있기 때문에, 차량의 Wheel Passing 1차 가진주파수 ($f_a=\frac{100}{3.6 \times 2.1}=13Hz$)가 f_0 의 $\sqrt{2}$ 배 이상($13Hz > 9\sqrt{2}=12.7Hz$)이 되어 지주파수 대역에서도 방진효과를 기대할 수 있게 된다.

또한, FST에서 레도의 동적침하량은 침목(레일지지점)당 분배하중이 개략 80kN×0.35=28kN 이므로 28kN×4.0kN/mm=7mm가 되나, 이는 대부분 레일침하가 아닌 슬래브 밑의 탄성체의 수직변위로 인한 레도전체의 침하량이기 때문에 레도침하량이 크더라도 레일의 수직변위가 작기 때문에 레일 휨응력이나 Airborne Noise에는 영향을 미치지 않게 된다.

3. 레일부유궤도(Floating Rail Track : FRT)의 이론적 고찰

FRT는 FST와 달리 레일반을 도상(또는 침목)으로부터 부유시킨 것으로 일종의 특별한 레일체결장치라고도 할 수 있다. 일반적인 레도에서는 대부분 레일저면을 지지하도록 되어있는 구조가 일반적이나 FRT에서는 Rubber Wedge로 레일두부 아래 부분을 지지하게 되며 과대하중 발생으로 레일이 나하되는 특별한 경우에만 보조적으로 레일저면을 지지하도록 고안되어 있다.



그림2. FRT System 개요

이와 같이 레일저면을 지지하는 일반적인 콘크리트도상 궤도구조에서 시스템의 고유진동수를 낮출 수 있는 한계를 생각해 볼 때 레일두부의 횡변위 한도 내에서의 안전율을 고려한 레일 수직 침하량을 1.5mm 정도라 하면 탄성패드의 동적 Stiffness는 28kN/1.5mm=19kN/mm가 된다.

즉, 동특성이 우수한 탄성패드를 사용하는 직결궤도를 상정할 경우 시스템의 고유진동수는:

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{19,000,000}{327.5}}=38Hz가\ 되며,\ 이\ 값이\ 일반적인\ 콘크리트도상에서\ 고유진동수를\ 낮출\ 수\ 있는\ 한계값으로\ 10Hz\ 이하인\ FST와\ 많은\ 차이를\ 보이고\ 있다.\ 만일\ FST와\ 유사한\ 고유진동수를\ 원한다면\ 1/2\ 레도당\ 시스템\ Mass를\ 4000kg\ 이상으로\ 증가시켜야\ 하나\ 이는\ 현실적으로\ 불가능하다.$$

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{19,000,000}{4,000}}=11Hz$$

이 때문에 FRT는 시스템의 고유진동수를 낮추기 위해 체결시스템의 Stiffness를 5kN/mm 정도로

대폭 낮추어서 해결하도록 하였으며 ($f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{5,000,000}{327.5}}=20Hz$), 매우 낮은 Stiffness로 레일의 수직변위가 상당히 커짐에도 레일두부의 횡변위가 매우 작도록 하여 시스템 실용이 가능하게 하였다. 이것이 FRT의 기하학적인 성립이론이다.

그림3은 레일의 수직 및 횡변위 실험 상황을 보여주는 것으로 일반적인 체결시스템에서는 수직 변위량이 증가함에 따라 횡변위량 역시 동등한 크기로 변위를 일으키나 FRT의 경우 수직 변위량에 비해 횡변위량이 현저히 작음을 보여주고 있다.

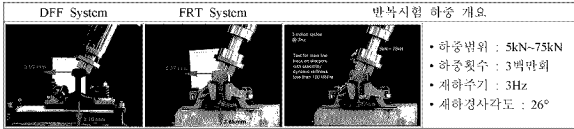


그림3. 레일의 수직 및 횡방향변위 시험

일반적인 체결시스템에서 레일의 수직 및 횡변위에 대한 이론적 해석은 다음과 같다.

우선 레일에 가해지는 차분하중은 수직 및 수평분력으로 나누어지며 그 합력은 레일 두부 내측 모서리에 일정각도로 가해지게 되는데 실내실험과 유사한 조건에서 분석하기 위해 L/V율을 0.5(경사각 26°에 해당)를 적용하고 특별히 곡선부에서 원심력이 크게 작용할 경우를 가정하여 L/V율을 0.8로 증가시켰을 경우에 대해서도 각각 계산하였다.

또한, 탄성체드의 Stiffness는 $K_{cut}=23kN/mm$ ($K_{cut}=24.5kN/mm$)와 $K_{cut}=5kN/mm$ ($K_{cut}=7.5kN/mm$)를 적용하고 각각에 대해 작용하중을 75kN과 실제 운영하중과 유사한 28kN(유중의 약35%)을 적용하여 계산하였으며, 계산결과를 요약하면 표3 및 표4와 같다.

표3. 레도 구성 요소별 계산제원 및 하중조건

레도 구성 요소별 계산 제원		레일레드 탄성계수(kN/mm)				
레일의 탄성계수	E	2,100,000 kgf/cm ²	K_{cut} case1 23.0 case2 5.0			
레일의 X축 단면2차 모멘트	I_x	3,090 cm ⁴				
레일의 횡강성	EI_x	6,489,000,000 kgf·cm ²	7.5			
침목해치 간격	a	62.500 cm	레일지지선의 작용하중(kN)			
레일의 비틀림 강성	E_p	235,000,000 kgf·cm ²	L/V율	0.5	0.8	
레일의 높이	h_R	17.400 cm				
체결구 선단 탄성계수	K_C	1,000 t/cm	하중조건	P(함력)	75.00	75.00
체결구 선단 간격	l_2	13.500 cm				
레일패드 유효폭	b_1	14.500 cm	시험하중	V(수직)	67.08	58.57
레일패드길이(레일길이방향)	l_1	18.000 cm				
침목축 스프링계수	K_C	700.000 kN/mm	운영하중	V(수직)	25.04	21.87
재하위치	E	3.000 cm				

표4. 하중조건별 레일의 수직 및 횡변위 계산결과

각종 평가항목	하중조건 및 레드의 Stiffness	시험하중(75kN)				운영하중(28kN)			
		L/V = 0.5		L/V = 0.8		L/V = 0.5		L/V = 0.8	
		K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}	K_{cut}
레일의 기울기 저항 모멘트계수(tf·cm)	$K_r = 1/12 \times (K_{cut} \times b_1^2 + 1/2 \times K_{cut} \times b_2^2)$	696	223	696	223	696	223	696	223
레일의 기울기 $\theta = (a/(K_r \times E_p))^{1/2} \times 1/2 \times (h_R \times L_{cut} - V_{cut} \times e)$ (radian)		0.012	0.021	0.020	0.035	0.004	0.008	0.007	0.013
레일두부의 횡변위량(동적)	$Z_x = h_R \times \theta$	2.057	3.637	3.440	6.083	0.768	1.357	1.285	2.270
레일지주의 횡변위량(동적)	$Z_y = L_1 / K_C$	0.048	0.048	0.067	0.067	0.018	0.018	0.025	0.025
레일중앙에서의 수직침하량(동적)	$\delta V_{cut} = (\delta V_x + \delta V_y) / 2$	2.128	8.394	1.894	7.498	0.976	3.969	0.889	3.635
레일패드의 압축량(곡선외측)	$\delta V_{cut} = K_C / K_{cut} + (V_{cut} / (K_{cut} + 2 \times K_C)) + 1/2 \times b_1 \times \theta$	2.985	9.910	3.328	10.033	1.296	4.535	1.424	4.581
레일패드의 압축량(곡선내측)	$\delta V_{cut} = K_C / K_{cut} + (V_{cut} / (K_{cut} + 2 \times K_C)) - 1/2 \times b_1 \times \theta$	1.271	6.879	0.461	4.964	0.656	3.404	0.354	2.689

이상의 계산결과 $K_{dn}=34.5\text{KN/mm}$ 인 레일패드를 사용할 경우 레일의 수직변위량이 2.128mm 일 때 레일두부의 횡변위량이 2.057mm로서 시험실에서의 실험값과 잘 일치하고 있다.

분석결과 운영하중 하에서 L/V율이 0.5 이하일 경우에는 이론상 매우 부드러운 레일패드를 사용할 경우 (예: $K_{dn}=7.5\text{KN/mm}$) 레일두부의 횡변위량 보다는 레일의 수직침하량이 체결구의 피로진 쪽을 초과하여 체결구 성능유지에 문제가 될 수 있으며, L/V율을 0.8 정도로 가정한 경우에는 레일의 수직침하량뿐 아니라 레일두부의 횡변위량 증가로 동적레간 확장을 유발하여 입차주행이 극히 불안정해지는 문제점을 야기할 수 있게 됨을 알 수 있다.

따라서, 이와 같은 이유로 일반적인 체결구조에서는 레일패드의 Stiffness를 적정값 이상 유지해야만 한다. 그에 비해 FRT에서는 레일의 수직침하량이 운영하중(28kN)에서 표4의 계산결과와 유사한 4mm 정도임에도 체결크립이 없는 구조이기 때문에 체결구에 대한 피로를 우려하지 않아도 될 뿐만 아니라 레일두부의 횡변위량이 매우 작아 동적레간 확장의 우려도 없게 된다.

이와 같이, FRT에서 레일두부의 횡변위량이 작은 이유는 Rubber Wedge 사용으로 인해 레일기울기 발생모멘트가 작아지기 때문이다. 즉, 그림4에서의 같이 일반적인 체결구조에서는 합력의 작용선과 회전축인 레일두부의 중심선을 잇는 모멘트 작용길이 l 이 약 60mm인데 비해 Rubber Wedge를 사용하는 FRT 경우에는 모멘트 작용길이 l 가 약 10mm에 불과하여 발생모멘트가 1/6로 작아지는 한편 Rubber Wedge가 레일의 양 복부에서 상시 20kN의 횡압력을 가하기 때문에 레일의 회전에 저항하게 되므로 레일의 횡변위가 억제된다.

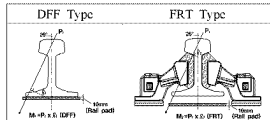


그림4. 모멘트 작용길이 비교

4. 레일의 동적거동과 진동저감 성능 분석

FRT의 국내지하철 적용성을 판단하기 위해 국내지하철 하중조건 및 선로조건을 감안하여 레일의 동적거동과 레일지지점에 작용하는 하중을 분석했다. 시스템의 Stiffness는 정적일 때 5KN/mm 동적일 때 7.5KN/mm 인 것으로 가정하였으며, 60kg 레일과 레일지지점 간격은 625mm로 하고 축중은 160kN으로 하였다.

- 하중분배계수 : $D_f = \frac{d}{\sqrt{8}} \left\{ \frac{K_{dn}}{d \cdot EI} \right\}^{0.25} = \frac{625}{\sqrt{8}} \left\{ \frac{7.5}{625 \times 4,859,400,000} \right\}^{0.25} = 0.277$
- 레일의 침하량 : $y_{dn} = Q \times \frac{D_f}{K_{dn}} = 80 \times \frac{0.277}{7.5} \approx 3.0\text{mm}$
- 레일지지점에 작용하는 하중 : $F = K_{dn} \times y_{dn} = 7.5 \times 3 = 22.5\text{kN}$
- 레일의 휨모멘트 : $M_{dn} = Q \times D_f \times L/4 = 80 \times 1.513 \times (4 \times 4,859,400,000 \times 625/7.5)^{0.25} / 4 = 34,138\text{kN/mm}$
(여기서, $D_f = 1.513$, $L = (4EI/K_T)^{0.25}$, $K_T = K_{dn}/d$)
- 레일의 휨응력 : $\sigma_r = M_{dn}/Z = 34,138/306,000 \times 1,000 = 86.2\text{N/mm}^2$ (허용응력 : 180N/mm^2)

이와 같이 FRT는 레일의 침하량이 3mm에 이르는 매우 Soft한 궤도이지만 하나 레일의 휨응력이 허용응력에는 훨씬 못 미치는 수준에 구조적으로 문제가 없다.

참고로 최대 허용응력 수준에 도달하게 하는 레일변위는 약 9mm정도이며, 축중 25ton 운영노선인 경우 이 변위에 도달하는 최소 궤도노반강성은 약 4.5kN/mm이다.

한편, 동일한 하중조건에서 정적 Stiffness 23kN/mm(동적 : 34.5kN/mm)인 탄성패드를 사용하는 DFF 궤도의 경우에는 하중분배계수 : $D_f=0.406$, 레일의 침하량 : $y_{dn}=0.94\text{mm}$, 레일지지점에 작용하는 하중 : $F=32.4\text{kN}$ 이 되어 수치상으로 FRT에 비해 Hard한 궤도라는 것을 알 수 있다.

이상 2 Type의 궤도에 대한 레인의 동적침하곡선을 나타내면 그림5와 같으며, FRT의 경우 제1축 위치에서 실제 레인침하량은 제1축에 의한 침하량 3mm와 제2축에 의한 침하량 0.3mm가 더해져 전체 침하량은 약 3.3mm가 되는 것을 알 수 있다. 그에 비해 DFF 궤도의 경우 제1축 위치에서 함게 0.9mm가 침하되고 있다.

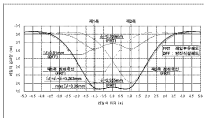


그림5. 레인의 동적침하량 비교

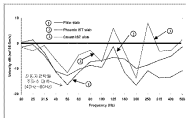


그림6. FRT System 설치 전후 진동 비교

다음에 FRT에 대한 방진성능 평가로서, 기존의 여러 형태의 궤도에서 본 시스템 설치 전후를 비교 측정 한 결과 그림6과 같이 대체로 40Hz~80Hz 주파수대역에서 약10dB(ref 5E-8n/s) 정도의 방진효과를 보이고 있는 것으로 나타났다.

이러한 경향을 이론적으로 증명하기 위해 isi program을 사용하여 궤도의 진동특성을 비교분석하였으며, 분석결과 그림7, 8에서 보는 바와 같이 레인의 침하량이 큰 FRT가 DFF 궤도에 비해 레인의 진동속도는 크게 나타났으나 반면 Slab의 진동속도는 상대적으로 작게 나타났으며, 이에 따라 DFF 궤도를 기준으로 할 때 50Hz~80Hz 대역에서 FRT의 방진성능이 탁월한 것을 알 수 있었다.

따라서, 현장 실측자료와 이론분석이 유사한 경향을 보이고 있어 저주파수 대역에서 방진효과를 기대할 수 있는 것으로 확인되었다.

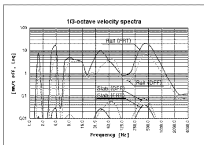


그림7. FRT와 DFF System의 진동특성 (isi program)

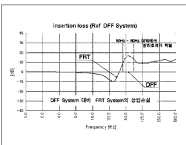


그림8. FRT System의 insertion Loss (isi program)

5. FRT System의 성능평가를 위한 CEN Test 분석

개발된 FRT System에 대해, 레인저철정치로서 기본적으로 요구되는 성능을 평가하기 위해 CEN 규정 pr EN13481-2에 따라 내구성시험을 비롯해 몇 가지 시험을 시행한 바 CEN 규정을 만족하는 것으로 나타났으며, 개요를 요약하면 다음과 같다.

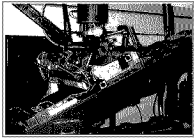


그림9. 내구성시험 (반복하중 시험)

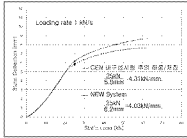


그림10. 장직 수직강성 시험결과

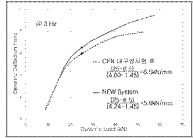


그림11. 동적 수직강성 시험결과

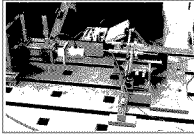
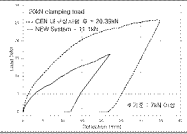


그림12. 복원저항시험 및 결과



- 전기저항시험 ;
 기준 : 5kΩ 이상
 결과 : 79.4kΩ
- 내화학성시험 (최대팽창율)
 기준 : 20% 이하
 결과 : 5.3%

이상과 같이 실험실내에서 시행한 성능시험에서 CEN 규정을 만족함에 따라 국내지하철노선 등지에 FRT System을 적용함에 있어서 기능상 특별한 문제는 없는 것으로 판단되었다.

6. 결 론

Floating Slab Track System의 방진성능에는 미치지 못하나 그보다 월등히 저렴한 비용으로 일반적인 콘크리트도상궤도는 물론 자갈도상궤도에서도 방진성능을 향상시킬 목적으로 개발된 Floating Rail Track System에 대해 기능성과 실용성 측면에서 시스템의 성능을 평가하여 국내 지하철노선 등지에 적용 가능성을 판단하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- Floating Rail Track System의 진동특성상 40Hz~80Hz 대역에서 방진성능이 우수하므로 저주파수 대역의 진동에 민감한 구간에 적용할 경우 매우 효과적일 것으로 판단되었으며,
- CEN 규정에 의한 성능시험결과 레일체결장치로서의 성능을 충분히 만족하므로 실용화에 특별한 문제는 없었으나, 유지관리 면에 대해서는 운영환경과 보수정서를 고려한 별도의 관리방안이 필요하며,
- 매우 낮은 시스템의 강성은 지반진동을 감소시키는 긍정적인 측면이 있는 반면, 레일진동 증가로 Airborne Noise가 증가하는 부정적인 측면이 있는 것이 사실이므로, 보다 완벽한 시스템으로 발전시키기 위해서는 레일에서 방출되는 소음을 저감시킬 수 있도록 추가 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 佐藤吉彦 (1997), “新軌道力学”, (株)鐵道現業社
2. Coenraad Esveld (2001), “Modern Railway Track Second Edition”, MRT-Productions
3. Pandrol Rail Fastenings Limited, “REPORT NO : 41607, 85171-7, 85171-11, 85171-12”
4. Karl Popp, Lecture Notes in Applied Mechanics Vol.6, “System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade”