

# 플로팅 슬래브 궤도용 방진시스템 개발

## The Development of a Floating Slab Track to Isolation System

박 상 곤\*, 구 형 옥\*, 한 현 희\*, 전 중 균\*\*, 장 승 업\*\*\*

Sang Gon Park, Hyung wook Koo, Hyun Hee Han, Chong Keun Chun, Seung Yup Jang

**Key Words** : floating slab track(저진동 궤도), second-phase noise(2차 소음), vibration isolator(방진제), stations under railway lines(선하역사), rubber mat(고무매트)

### ABSTRACT

Recently the construction of stations under railway lines and railway sections passing through central area of cities are increasing, calling for an urgent establishment of countermeasures against railway vibration and its subsequent second-phase noise. Of technology developed up to now, the most efficient countermeasure is the floating slab track, a track system isolated from the sub-structure by springs. Unfortunately, however, the system design technology and technology for key components have not yet developed in Korea. As such, in this study, the analysis and design technology of floating slab track and its vibration isolator technology can be achieved. In preparation for future demands, it is expected to raise awareness for the need of technology self-support and to make a meaningful contribution to mitigating vibration and noise produced by the next-generation high-speed railway.

### 기 호 설 명

- $W$  : 변형률 에너지 함수
- $I$  : 변형률 불변량
- $\lambda$  : 주방향신장

### 1. 서 론

교통편의성을 고려한 도시설계가 2000년대부터 적용되면서 철도의 도심통과구간이나 선하역사 건설이 증가하고 있다. 특히 선하역사내 각종 편의시설과 상업시설 증가로 이용고객이 늘고 있으나 철도 진동과 이로 인한 2차 소음으로 인해 민원이 발생하고 있다.

역사 내부 또는 철도 인접 건물 내부로 유입되는 진동과 구조소음을 효율적으로 저감시키는 방법으로

는 궤도 전체를 하부구조와 분리시키는 플로팅 슬래브 궤도 공법이 있다. 국내에서는 아직 플로팅 슬래브 시스템 설계기술과 관련 구성품 설계기술이 확보되어 있지 못하기 때문에 대부분 국외에서 개발된 시스템을 그대로 도입하고, 핵심 구성품인 방진재로는 모두 수입에 의존하는 등 관련 기술의 자립도가 매우 낮은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순수 국내 기술을 바탕으로 플로팅 슬래브 궤도용 방진시스템 개발을 위해 방진마운트 최적설계 및 제작과 방진장치 시공성, 교체성 등을 고려한 시스템을 개발하고자 한다.

### 2. 플로팅 슬래브 궤도용 방진장치 개발

#### 2.1 방진장치 고유 진동수 산정

열차 주행으로 발생된 진동은 역사 구조물로 전달되어 구조물의 고유진동수와 공진을 일으킬 소지가 있어 열차 주행하중의 주파수 특성을 파악해야 한다. 속도에 따라 다르지만 대략 40~140Hz 내외(침목간격 60~65cm에 대해 속도 100~300 km/h)에서 피크치가 관찰되지만 차축간격(2.5 ~3m)에 대한 가진 진동수인 10~30Hz의 저주파 대역에서도 높은

† 교신저자; 정회원, RMS Technology  
E-mail : psg8722@rmstech.co.kr  
Tel : (041) 556-7600, Fax : (041) 556-7603

\* RMS Technology

\*\* 선문대학교

\*\*\*한국철도기술연구원

진동이 관찰된다.<sup>(4)</sup> 이러한 방진마운트 고유진동수는 가진특성, 플로팅 슬래브레도 및 하부구조물의 모빌리티(mobility)를 고려하여 전달율을 최소화하고, 공진을 회피할 수 있는 범위에서 결정되어야 한다.

방진마운트의 고유진동수를 결정하기 위해 다양한 변수(열차별 하중, 길이, 속도, 플로팅 슬래브 모드 등)와 다양한 차종의 특성을 고려하여 다음과 같이 선정하였다.

- 방진장치의 설치간격 : 2.6m
- 고유진동수 : 7Hz(열차중량 제외시)
- 수직방향 스프링 상수 : 10±2kN /mm
- 수평방향 스프링 상수 : 슬래브 밀림을 고려하여 수직방향의 80% 이상

## 2.2 방진장치용 고무소재 재료 특성 실험

방진고무의 유한요소 해석에 필수적인 고무소재의 특성은 그 값의 변화에 따라 고무부품의 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 정확성 및 수렴성에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 제품과 동일한 성분 및 조건으로 제작된 고무소재의 시편에 대한 특성실험을 통한 정확한 고무소재의 특성값 확보가 필수적이다. 고무소재의 특성은 변형률 에너지 함수(Strain Energy Function,  $W$ )의 계수값으로 표현되는데, 이 계수 값들은 여러 가지 다른 하중상태에서의 고무소재 실험을 통하여 구해진 응력-변형률의 실험결과 데이터를 변형률 에너지 함수로부터 유도된 응력-변형률 곡선으로 피팅(Fitting)하여 실험값과 계산값의 차이를 최소화함으로써 결정된다.<sup>(6)</sup>

고무의 변형을 표현하기 위해서는 재료거동은 탄성이며, 등방성이라는 가정 하에 변형률 에너지함수( $W$ )는 변형률 불변량(Strain Invariant,  $I$ )의 함수와 부방향 신장을 제외한 주방향신장(Principal Stretch,  $\lambda$ )의 함수로 식(1)와 같이 표현할 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

여기서,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주방향신장이며, 재료가 등방성인 경우  $I_1, I_2, I_3$ 는 식(2)와 같다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

비압축성 고무의 변형해석에 널리 쓰이는 변형률 에너지 함수는 다음 식(3), (4)와 같이 변형률 불변량의 함수로 표시되는 Mooney-Rivlin 함수 형태와 주방향 신장의 함수로 표시되는 Ogden 함수로 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

Mooney-Rivlin 함수 :

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

Ogden 함수 :

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (4)$$

여기서,  $C_{ij}, \mu_n, \alpha_n$ 는 실험결과로부터 결정되는 고무소재의 재료상수로 단순한 변형을 포함하는 인장실험, 압축실험, 전단실험 등으로 구한 응력과 변형률 관계를 이용하여 결정된다.<sup>(5)</sup>

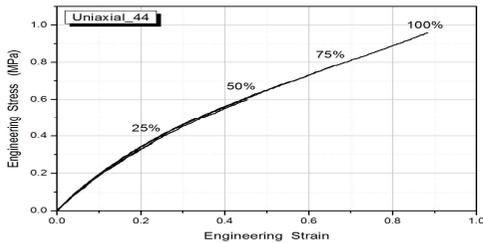
고무소재 비선형 재료 상수값을 결정하기 위해 단축 인장시험과 이축 인장 시험을 실시하였으며, 고무시편은 경도-44, 46, 48, 50으로 4개 종류를 대상으로 하였다.



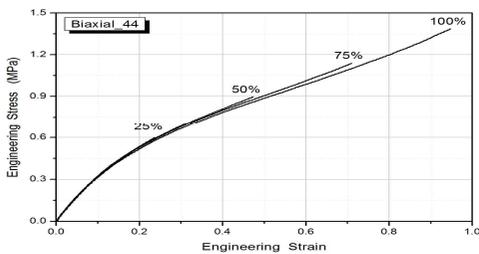
Fig. 1 Rubber specimen test equipment

고무시편에 대한 단축 인장시험과 이축 인장시험을 통하여 얻어진 응력-변형률 곡선은 25%, 50%, 75%, 100%의 변형률 범위로 Fig. 2와 같다(경도 44의 결과만 본 논문에 게재함). 시험을 통해 구한 응력-변형률 데이터와 변형률 에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 커브 피팅을 하였다. 식(3)과 (4)을 이용하여 Mooney-Rivlin 2항과 Ogden 3항의 비선형 재료상수를 결정하였다. 일

반적으로 Ogden 모델의 응력-변형률 관계에서 연신률의 지수가 실수 값이므로 그 지수가 정수 값을 가지는 Mooney-Rivlin 모델에 비해 곡선 묘사에 유연성을 갖고 있기 때문에 본 논문에서는 Ogden 상수 값을 해석에 사용하였다.<sup>(7)</sup> 변형률 결과 중 대변형을 고려하여 100% 비선형 재료상수값을 해석에 사용하였다.



(a) Uniaxial Tension(Hardness-44)



(b) Biaxial Tension(Hardness-44)

Fig. 2 Strain range stress-strain curve

Table 1 Nonlinear material constants

hardness	Ogden				
	$\mu_2$	$\mu_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
H-44	1.3	0.515	2.043	4.16	0.054
H-46	0.006	21.56	0.009	0.613	1.814
H-48	0.201	0.704	2.067	8.39E-6	0.703
H-50	0.252	0.674	2.261	2.44E-6	1.018

### 2.3 방진마운트 비선형해석

방진장치내 방진마운트의 비선형해석을 위해 Ansys workbench을 이용하였다. Fig. 3에서 보듯이 주요 구성은 상/하부 고무층 사이에 철판(4mm)이 접착된 형태이다. 방진마운트의 직경(300mm)과 고무층의 두께(15mm)이외의 변수는 고무층의 경사각이다. 최적의 고무층 설치 경사각 결정을 위해 경도 50의 고무재료일 때, 경사각 55°, 57°, 60°의 형상으로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4에서 보듯

이 정적 스프링 계수는 55°-13.8kN/mm, 57°-8.6kN/mm, 60°-7.6kN/mm로 설치 경사각을 55° 일때가 스프링 계수가 높은 것으로 나타났다. 제한된 직경과 일정한 고무두께의 조건내에서는 경사각을 55°로 적용한 경우 가장 최적인 것으로 확인되었다.

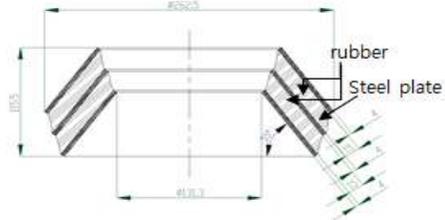


Fig. 3 Shape design of anti-vibration rubber part

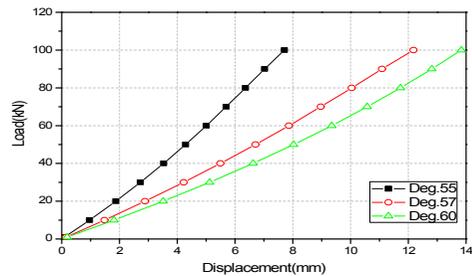


Fig. 4 Analysis results according to the inclination

방진마운트의 정적 스프링계수가 설계목표치 10±2kN/mm에 부합되는 고무소재를 결정하기 위해 앞에서 고무소재 실험을 통해 구한 경도 44, 46, 48, 50에 대해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6에 나타난 결과와 같이 경도별 정적 스프링계수를 계산해보면 경도 44-11.8kN/mm, 경도 46-11.7kN/mm, 경도 48-13.1kN/mm, 경도 50-13.8kN/mm 이다. 목표로 하는 정적 스프링 계수 설계목표치와 부합되는 것은 경도 44와 경도 46 이다.

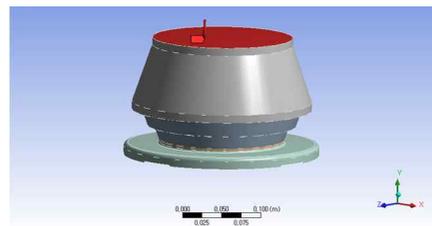


Fig. 5 Vibration isolator analytical model

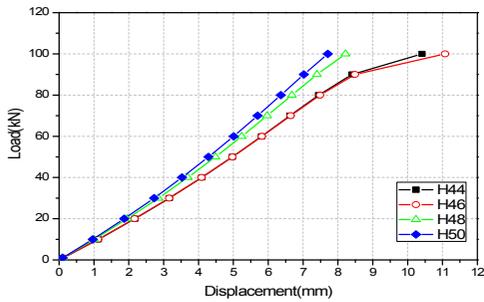


Fig. 6 Analysis results according to the Hardness

2.4 시제품 방진마운트의 정적, 동적 실험 비선형해석을 통해 방진마운트의 고무층의 설치 경사각(55°)과 고무소재 경도(44, 46)를 결정하여 시제품을 제작하여 정적, 동적 특성 시험을 수행하였다.



Fig. 7 Hardness specific prototype

경도별 시제품의 시험결과 정적 스프링계수는 경도44-11.1kN/mm, 경도 46-11.8kN/mm로 나타났다. 주파수별 힘과 변위의 data를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 산정한 동적스프링계수와 손실계수는 Table 2와 같다.

Table 2 Dynamic stiffness and loss factor measurement results

Division		Hz			
		4.92	6.20	15.6	19.7
H-44	Dynamic stiffness (kN/mm)	13.714	13.764	13.830	13.392
	Loss factor $\eta$	0.0628	0.0670	0.1055	0.1186
H-46	Dynamic stiffness (kN/mm)	14.603	14.639	15.102	15.059
	Loss factor $\eta$	0.0799	0.0834	0.1189	0.1329

동적 스프링계수는 정적 스프링계수에 비해 약 25%정도 차이로 성능면에서 만족할만 하다. 더불어 감쇠비도 10% 이내로 경도 44와 46 모두 설계 목

표치와 적합한 성능을 보였다. 그러나 경도 46에 비해 경도 44의 정적 스프링 계수가 설계목표치와 가장 근접하게 나타나 최종 방진마운트는 고무소재 경도 44로 결정하였다.



Fig. 7 Spring coefficient experiments

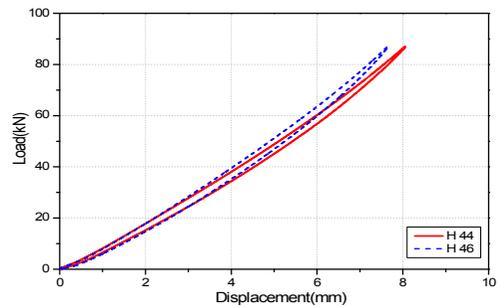
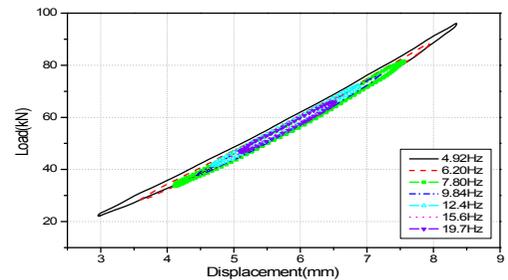
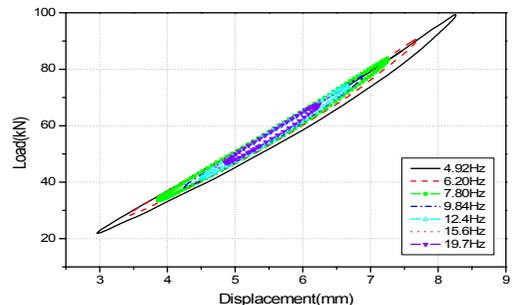


Fig. 8 Spring coefficient of static experiments



(a) H-44



(b) H-46

Fig. 9 Spring coefficient of dynamic experiments (Vibration velocity 25mm/s)

### 2.5 방진장치 리프팅 구조 설계

Fig.10에서 보듯이 방진고무의 위아래에는 각각 상하부 steel plate가 위치하고 상부 plate에 유압 실린더를 설치하였다.

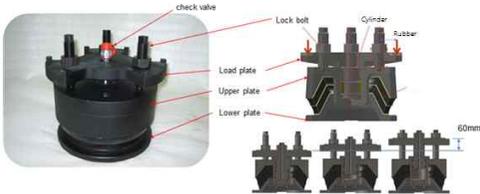


Fig. 10 Vibration isolator structure

self-lifting이 가능한 방진장치를 적용함으로써 슬래브를 들어 올린 후 측면에서 방진장치를 설치하는 기존 방법에 비해 슬래브 상부에서 아래로 방진장치를 설치할 수 있어 측면에 공간이 부족한 구간에서도 설치가 가능하며, 별도의 유압잭 없이 슬래브의 높이 조정(post-alignment)이 가능하다. 또한 사용 중에 방진고무의 상태를 점검하고 문제가 있을 때 고무마운트를 교체할 수 있는 장점이 있다.

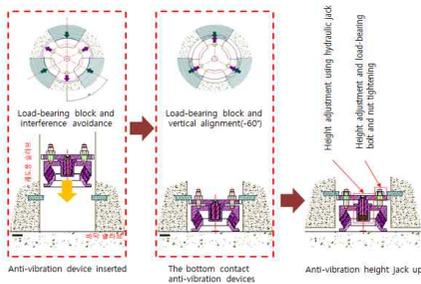


Fig. 11 Vibration isolator installation order

### 3. 현장 시험부설 및 성능평가

#### 3.1 현장 시험부설

본 연구에서 개발된 플로팅 슬래브궤도용 방진시스템의 성능을 검증하기 위해 경전선 OO역 정거장 구간에 시험부설 하였다. 함안 정거장 구간은 총 110m 라멘 구조물로 정거장 구간의 선로는 직선 구간이고, 본선 상선 구간에 개발된 방진시스템을 적용한 플로팅 슬래브궤도가 부설되었고, 본선 하선 구간에는 고무방진매트 방식의 플로팅 슬래브궤도를 부설하였다.



(a) Vibration isolator (b) Rubber Mat  
Fig. 12 Comparison of floating slab track section OO station



(a) Slab lifting(Multi channel hydraulic pressure jack-up system)



(b) Slab lifting and track status  
Fig. 13 Test construction process

#### 3.2 현장성능측정 및 평가

개발된 방진장치를 적용한 플로팅 슬래브궤도(상행선)의 진동 및 구조소음 저감 성능을 평가하기 위해 Fig. 14와 같이 궤도 슬라브에 가속도센서와 1층 대합실에 소음계를 설치하였다. 하행선구간에는 고무방진매트가 설치되어 있어 비교대상으로 삼기 위해 상행선 측정조건과 동일하게 진동과 소음을 측정하였다.

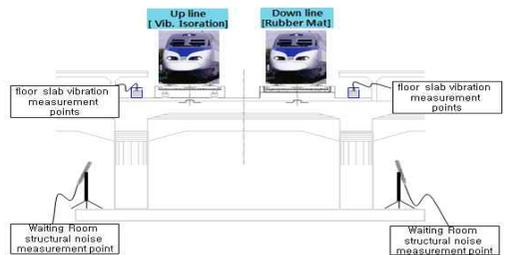


Fig. 14 Vibration and structural noise measurement schematic diagram

방진장치의 성능검증을 위해 시험 운행 중인 KTX 열차와 무궁화 열차를 대상으로 측정한 결과는 Table 3와 같다. 측정시 KTX는 역에 정차하지 않고 통과하였고, 무궁화는 역에 정차 후 출발하는 상황이었다.

**Table 3** Vibration and noise measurement results

Division		Up line (Vibration isolator)	Down line (Rubber Mat)
2nd floor of orbit slab vibration	KTX 150km/h	Vel. mm/s	0.45
		dB (ref 5x10 <sup>-8</sup> m/s)	79.0
	KTX 120km/h	Vel. mm/s	0.39
		dB (ref 5x10 <sup>-8</sup> m/s)	77.8
	Mugunghwa (Stops after departure)	Vel. mm/s	0.22
		dB (ref 5x10 <sup>-8</sup> m/s)	72.9
1st floor of the main terminal structure noise	KTX 120km/h	dB(A)	21.7
	Mugunghwa (Stops after departure)	dB(A)	26.6

고무방진매트를 설치한 하행선에 비해 개발된 방진시스템을 적용된 상행선은 진동(1~100Hz)측면에서 26~33dB 차이가 발생하였다. 구조소음(25~160Hz)측면에서는 11~16dB(A) 차이가 있는 것으로 평가되었다. 고무방진매트가 설치되지 않은 구간과 비교할 경우 더 큰 차이를 보일 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

선하역사 또는 철도 인접 건물 내부로 유입되는 진동과 구조소음 저감을 위한 플로팅 슬래브레도 시스템 설계기술과 관련 구성품 설계기술 확보를 위해 진행된 연구에서 핵심 구성품인 방진장치 개발 및 개발된 방진장치를 경전선 OO역 정거장 구간에 시험부설하여 진동과 소음을 측정하였다. 그 결과 고무방진매트를 설치한 선로구간에 비해 개발된 방진시스템을 적용된 구간에서는 진동(1~100Hz)측면에서 26~33dB 차이가 발생하였고, 구조소음(25~160Hz)측면에서는 11~16dB(A) 차이가 있는 것으로 나타났다.

이는 해외에서 적용된 방진장치 중 대표적인 일본 플로팅 라다 레도시스템(50Hz이상 대역 약 20dB 감소)이나 독일 Heitkamp사의 HISO Track System(20Hz 이상 대역 약 20dB 감소)과 비교해 뛰어난 성능을 확인할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2009년~2012년도 국토해양부 미래철도 기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Yang, S, C., Kang, Y, S., 2000, Development of Evaluation Method of Vibration-Reduction Efficiency in Slab Track, Korean Society for Civil Engineer., Vol. 20, No. 4-D, p427~p435.

[2] Yang, S, C, Kim, T, Y., 2003, 5, Vibration Analysis Method for Railway Structure with Floating Slab, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference., p. 561~566.

[3] Jang, S, Y., Low vibration track (floating slab track) Survey foreign technology and related technical data collection, 2008, KRRI Overseas Trip Report.

[4] Moon, J, W., Development of Low Vibration Track(Floating Slab Track) and Technology for Improvement of Performance of Long-Span Bridges. 2009, Next-generation high-speed rail technology industry 1st Report p 2~3, p55~p57

[5] Lee, Y, H., 2009, Study on Dynamic Characteristics Prediction of Rubber Components for Improvement of Vehicle Vibration Performance, Ph.D. Dissertation, Hanyang University, pp. 25~27.

[6] Fredrick, R. E., 1978, Theory and Practice of Engineering with Rubber, Applied Science Publisher LTD, London

[7] Treloar, L. R. G., 1975, The Physics of Rubber Elasticity, 3rd ed.,