

콘크리트 궤도의 최적 탄성에 관한 연구

A Study on the Optimum Stiffness of Concrete Slab Track

공선용*
Kong, Sun-Yong

김상진***
Kim, Sang-Jin

ABSTRACT

In recent railway construction, the concrete slab track is getting highlighted as main stream in track type. However, it is the fact that there are different opinions in selection of the optimized spring coefficient of elastic pad. In this study, the performance of vibration reduction in different stiffness of rail pad for ballasted track was compared, and the changes in characteristics, such as static/dynamic deflection of components, vibration acceleration, insertion loss etc., were analysed by using ISI Program for various types of rail fastening system used in concrete slab track.

It was concluded that the fastening system with softer pads has shown the better performance of vibration reduction in concrete slab track and the optimized static stiffness has been calculated to 21.1kN/mm for conventional railways, 17.6kN/mm for high-speed railways and 17.8kN/mm for subways.

1. 서 론

현재 고속철도 건설은 주로 콘크리트도상으로 건설되어 지고 있으나 콘크리트도상에서 최적화된 탄성패드의 스프링계수 선택에 많은 이견이 있는 것이 사실이다. 금번 연구는 자갈도상에서 레일패드의 강성에 따른 진동 저감 성능을 비교하였고, 현재 콘크리트 궤도구조에 적용된 레일체결시스템에 대한 정적스프링계수를 변화시켜 가며 ISI프로그램을 사용하여 레일 정적/동적 처짐량, 부재별 처짐량, 진동가속도, 삽입손실 등 특성 변화를 분석하였다.

본 연구 결과 콘크리트궤도에서는 부드러운 탄성패드를 갖는 궤도시스템이 레일하부의 진동저감에 유리하며, 정적스프링계수는 일반철도의 경우 21.1kN/mm, 고속철도는 17.6kN/mm정도이며 지하철 조건에서는 17.8kN/mm정도라는 것을 유추하였다.

2. 콘크리트 궤도 일반

우리나라 콘크리트도상 궤도는 1974년 서울지하철 1호선 건설시 역구내의 청결상태를 유지하기 위하여 시청역을 포함한 7개역 구내에 약 3km가 부설된 것이 최초이며, 현재는 서울의 2기 지하철을 비롯하여 다른 도시의 지하철과 경부고속철도 1단계 구간 중 장대터널에 콘크리트도상 System이 적용되어 건설되는 등 많은 기관에서 운영되고 있다.

이러한, 콘크리트도상은 반영구적이며 생력화된 궤도시설물로서 노반에 전달되는 충격(진동)을 흡수하고 완화시키기 위하여 도상자갈을 대신하는 탄성패드를 침목저부 또는 레일저부에 삽입 하고 있는데 이 탄성패드의 스프링계수에 따라 콘크리트도상의 궤도품질과 향후 유지보수 비용이 전적으로 좌우된다 할 수 있다. 따라서 콘크리트도상 궤도를 설계하는데 최적화된 스프링계수가 필수적으로 요구되고 있다.

* 서울메트로 철도토목팀 팀장, 정회원

E-mail : kong54@empal.com

TEL : (02)520-5740 FAX : (02)520-5759

** 서울메트로 철도토목팀 주임, 정회원

3. 레일패드 스프링계수에 따른 특성변화 해석

레일패드의 스프링계수를 기본(200kN/mm), Hard(600kN/mm), Soft(60kN/mm) 3종류로 하여 동일한 열차 하중 조건에서 궤도 각 부재에 발생하는 응력과 변위를 알아보고 노반 면까지 전달되는 진동해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 독일 imb-dynamik의 ISI 프로그램을 사용하였다.

해석을 위해 적용된 각 부재별 입력 Data는 아래와 같다.

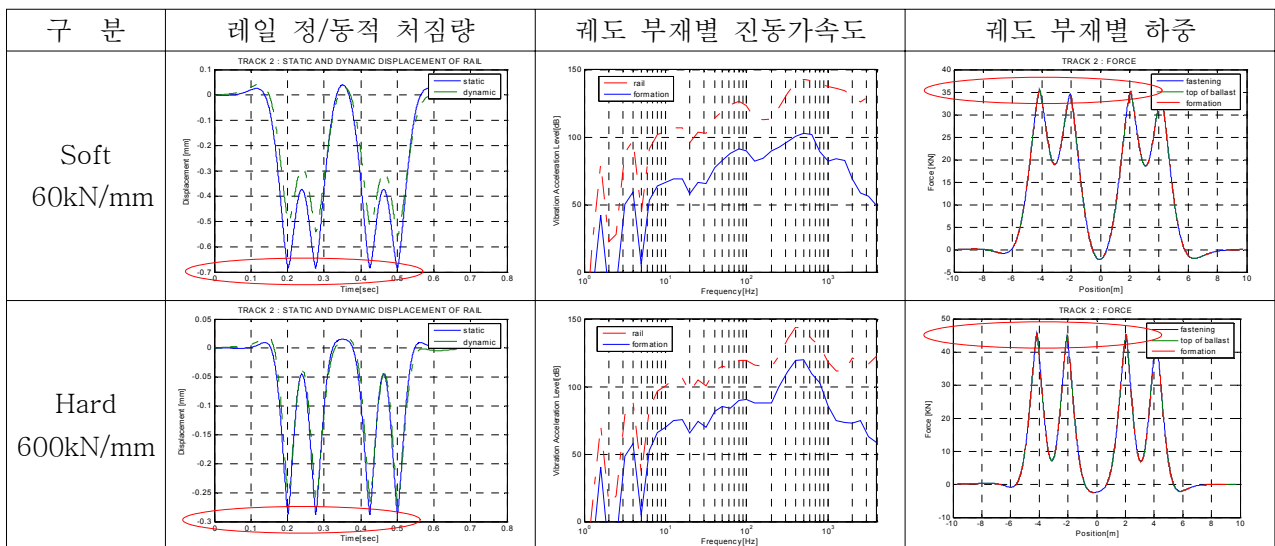
(가) 입력 Data

- 레일 : KS 60
- 노반강성 : 암반
- 침목 : PCT
- 도상 : 자갈도상 30cm
- 차량제원 : 축중 16ton 전동차
- 속도 : 100km/h
- 레일패드 : 3종(기본 200 / Hard 600 / Soft 60kN/mm)

(나) 해석결과 레일패드에 대한 모델별(3종) 각 부재의 발생응력과 변위는 [표 2], [그림 1]과 같으며, Soft(60kN/mm)한 레일패드가 전체적인 수직변위는 크나 레일패드, 도상상면, 노반 면에 가해지는 압력이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 즉, 레일패드의 강성이 작으면 결국 부재에 작용하는 압력과 진동이 감소된다는 것을 알 수 있다.

[표 2] 모델별 발생응력과 변위량 비교

항 목	단위	Hard	기본	Soft	비고
정적스프링계수	kN/mm	600	200	60	
레일의 정적 최대 변위량	mm	0.288	0.387	0.685	
레일의 동적 최대 변위량	mm	0.274	0.339	0.555	
침목의 동적 최대 변위량	mm	0.207	0.191	0.163	
자갈 상부의 동적 최대 변위량	mm	0.207	0.191	0.163	
자갈 하부의 동적 최대 변위량	mm	0.008	0.007	0.007	
노반의 동적 최대 변위	mm	0.008	0.007	0.007	
레일패드의 최대 하중	kN	45.500	41.920	35.540	
자갈궤도 상부의 최대 압축력	N/mm ²	0.164	0.151	0.128	
노반의 최대 압축력	N/mm ²	0.107	0.098	0.083	



[그림 1] Soft & Hard 레일패드별 해석 그래프

4. 탄성패드 스프링계수에 따른 특성변화 해석

본 장에서는 국내 대표적인 3개 철도기관의 궤도조건과 차량제원을 모델로 하여 일반철도(KNR)와 고속철도(KTX)는 17.5 ~ 45.0kN/mm를 지하철(서울메트로)은 16.0 ~ 45.0kN/mm의 정적스프링계수 범위에서 궤도 각 부재에 발생하는 응력과 변위를 알아보고 노반 면까지 전달되는 진동해석을 수행하였다.

해석 프로그램은 독일 imb-dynamik의 ISI 프로그램을 사용하였다.

4.1 일반철도(KNR) 입력 Data 및 해석결과

일반철도(KNR) 해석을 위해 적용된 각 부재별 입력 Data는 아래와 같으며, 스프링계수가 각기 다른 6가지 유형의 탄성패드를 해석하였다.

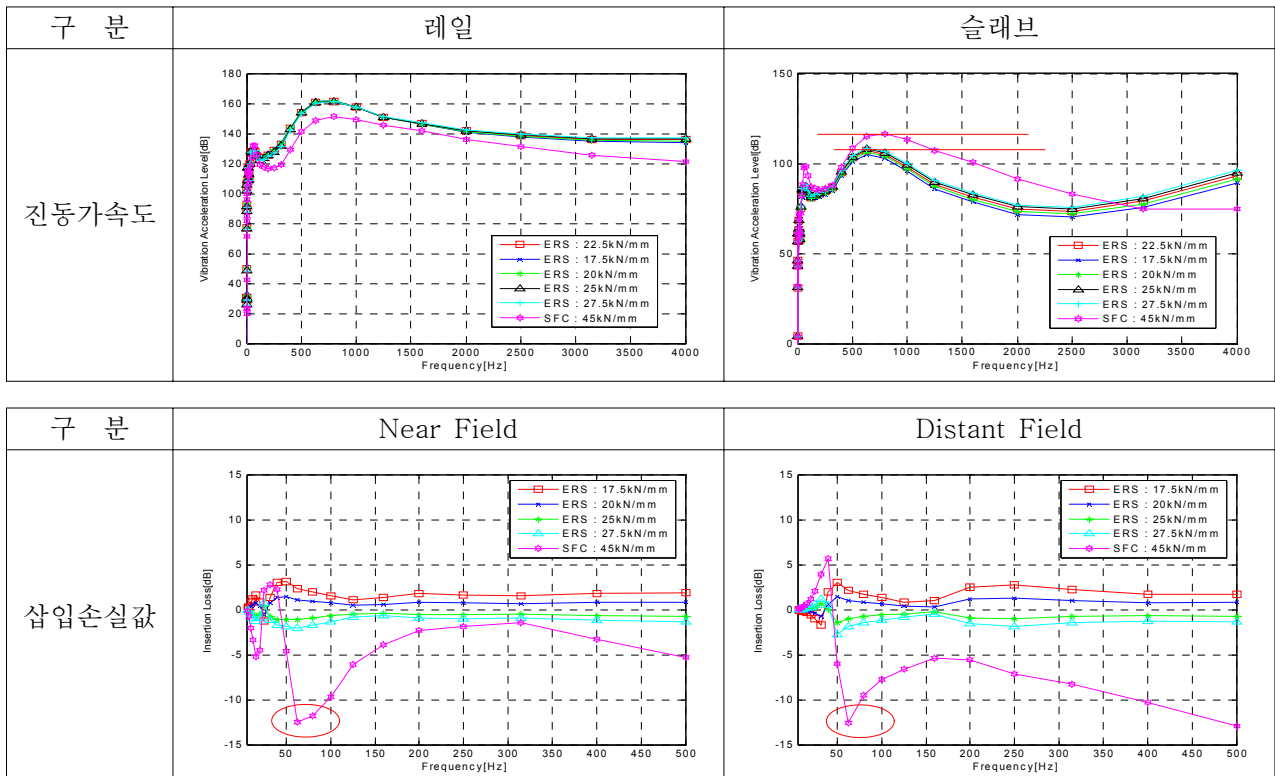
(가) 입력 Data

- 레일 : KS 60
- 노반강성 : 양반
- 침목 : 직결
- 도상 : 슬래브
- 차량제원 : 축중 22ton 새마을호
- 속도 : 150km/h
- 탄성패드 : 6종(17.5 / 20.0 / 22.5 / 25.0 / 27.5 / 45.0kN/mm)

(나) 모델별(6종) 해석결과는 [표 3]과 같으며, KNR에서 적용하고 있는 22.5kN/mm를 기준으로 슬래브에 전달되는 진동가속도[그림 2] 해석결과, 45.0kN/mm인 경우에는 116.6dB, 22.5kN/mm인 경우에는 107.3dB로 약 9.3dB 정도 저감됨을 알 수 있다. 또한, 삽입손실값은 기준값(22.5kN/mm)에서 스프링계수가 17.5kN/mm로 낮아지면 평균 3.0dB 정도의 진동저감 성능이 개선되는 것으로 예측된 반면, 반대로 스프링계수가 45.0kN/mm로 증가할 경우에는 최대 12.0dB 정도의 진동저감 성능이 떨어지는 것으로 해석되었다.

[표 3] 일반철도(KNR) 모델별 발생응력과 변위량 비교

항 목	단위	탄성패드 스프링계수 [kN/mm]					
		17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	45.0
레일의 정적 최대 변위량	mm	1.692	1.536	1.412	1.312	1.228	0.838
레일의 동적 최대 변위량	mm	1.369	1.237	1.133	1.049	0.979	0.587
상판의 동적 최대 변위량	mm	1.335	1.202	1.097	1.011	0.940	0.005
침목의 동적 최대 변위량	mm	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
슬래브 동적 최대 변위량	mm	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
레일패드의 최대 하중	kN	32.830	33.960	35.040	36.070	37.050	45.100
탄성패드의 최대 하중	kN	32.950	34.090	35.170	36.200	37.180	50.930
노반의 최대 압축력	N/mm ²	0.170	0.175	0.181	0.188	0.191	0.870



[그림 2] 일반철도(KNR) 탄성패드 스프링계수 유형별 진동가속도 및 삽입손실 해석 그래프

4.2 고속철도(KTX) 입력 Data 및 해석결과

고속철도(KTX) 해석을 위해 적용된 각 부재별 입력 Data는 아래와 같으며, 일반철도(KNR)와 같이 스프링계수가 각기 다른 6가지 유형의 탄성패드를 해석하였다.

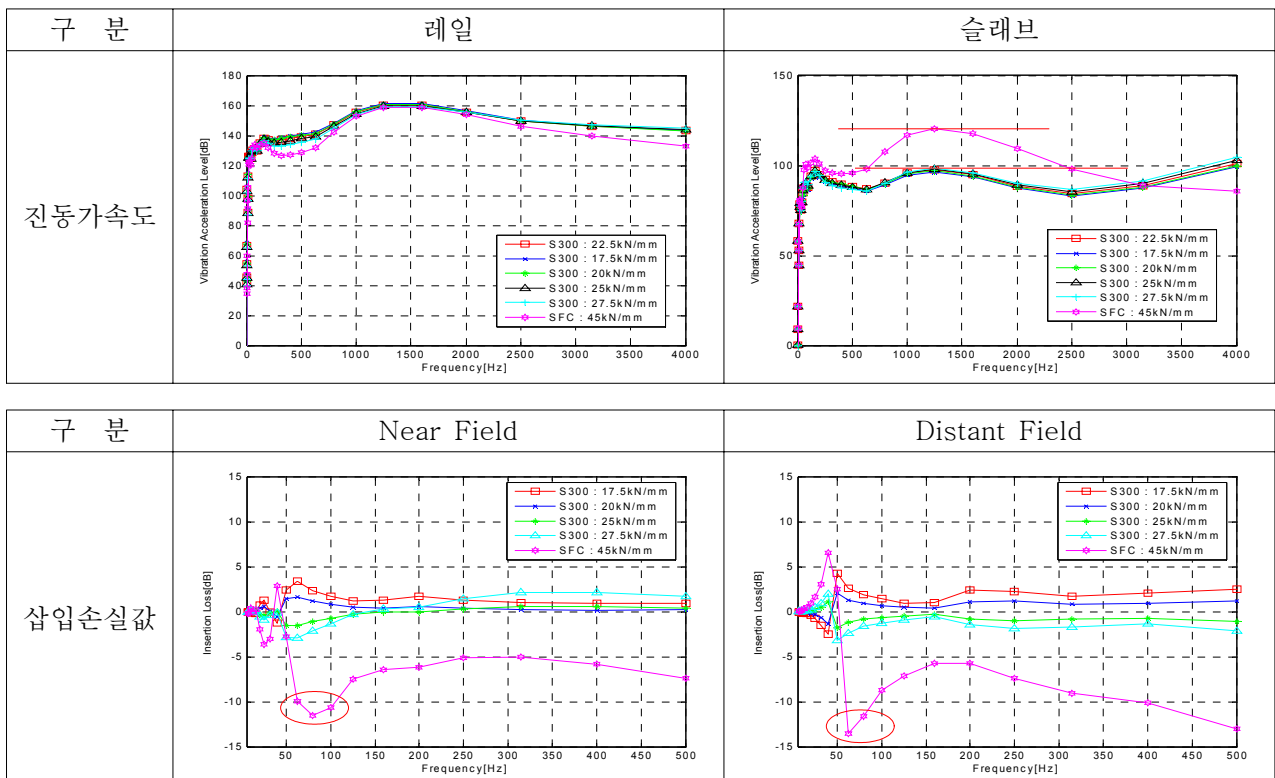
(가) 입력 Data

- 레일 : UIC 60
- 노반강성 : 암반
- 침목 : 직결
- 도상 : 슬래브
- 차량제원 : 축중 17ton KTX
- 속도 : 300km/h
- 탄성패드 : 6종(17.5 / 20.0 / 22.5 / 25.0 / 27.5 / 45.0kN/mm)

(나) 모델별(6종) 해석결과는 [표 3]과 같으며, KTX에서 적용하고 있는 22.5kN/mm를 기준으로 슬래브에 전달되는 진동가속도[그림 3] 해석결과 45.0kN/mm인 경우에는 120.4dB, 22.5kN/mm인 경우에는 97.6dB로 22.8dB 정도 진동이 작은 것을 알 수 있다. 또한, 삽입손실값은 기준값(22.5kN/mm)에서 스프링계수가 17.5kN/mm로 낮아지면 평균 3.0dB 정도의 진동 저감 성능이 개선되는 것으로 예측된 반면, 반대로 스프링계수가 45.0kN/mm로 증가할 경우에는 최대 13.0dB 정도 진동저감 성능이 떨어지는 것으로 해석되었다.

[표 4] 고속철도(KTX) 모델별 발생응력과 변위량 비교

항 목	단위	탄성패드 스프링계수 [kN/mm]					
		17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	45.0
레일의 정적 최대 변위량	mm	1.525	1.392	1.286	1.198	1.125	0.773
레일의 동적 최대 변위량	mm	1.166	1.058	0.973	0.903	0.845	0.504
상판의 동적 최대 변위량	mm	1.135	1.027	0.940	0.870	0.810	0.004
침목의 동적 최대 변위량	mm	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
슬래브 동적 최대 변위량	mm	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
레일패드의 최대 하중	kN	30.180	31.400	32.540	33.620	34.640	43.090
탄성패드의 최대 하중	kN	30.430	31.650	32.790	33.870	34.900	50.680
노반의 최대 압축력	N/mm ²	0.157	0.163	0.169	0.174	0.180	0.866



[그림 3] 고속철도(KTX) 탄성패드 스프링계수 유형별 진동가속도 및 삽입손실 해석 그래프

4.3 지하철(Seoul Metro) 입력 Data 및 해석결과

지하철(Seoul Metro) 해석을 위해 적용된 각 부재별 입력 Data는 아래와 같으며, 일반철도와 고속철도보다 속도와 축하중 등이 작아 16.0~45.0kN/mm의 범위 내에서 각기 다른 6가지 유형의 스프링계수를 변화한 탄성패드를 해석하였다.

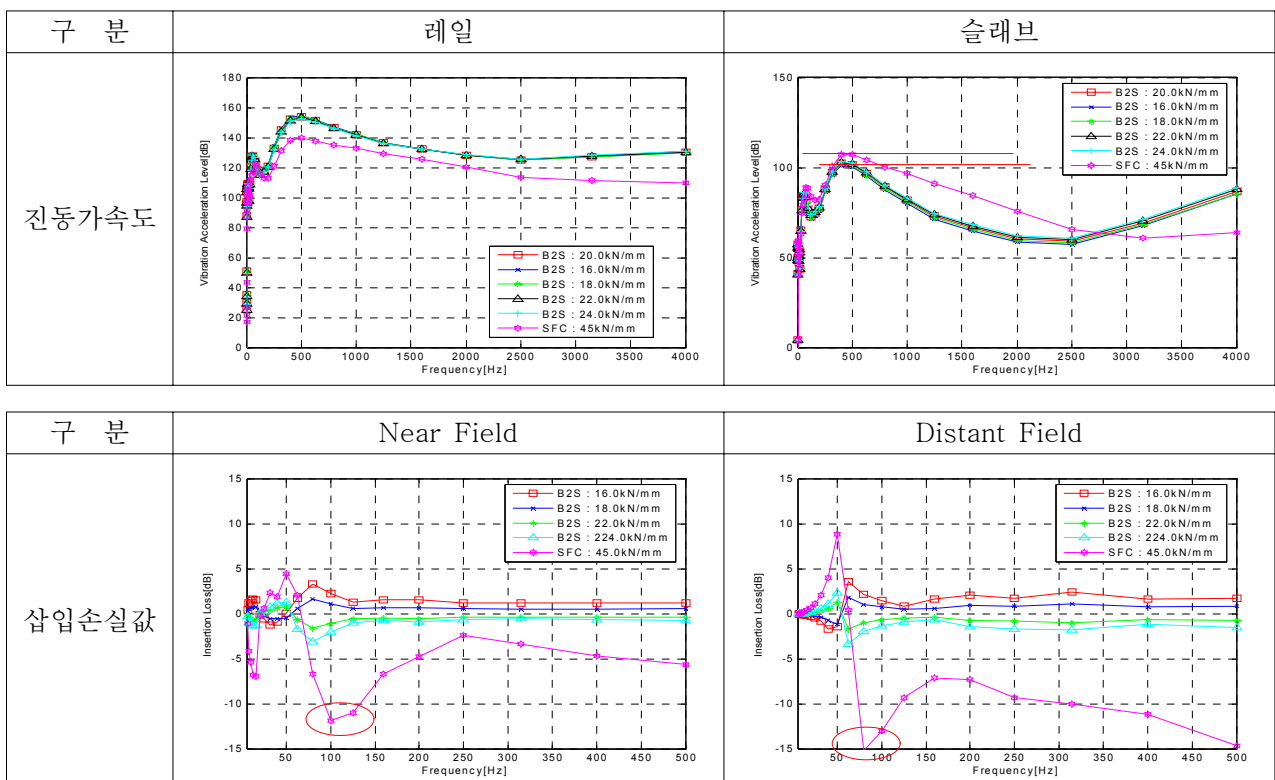
(가) 입력 Data

- 레일 : KS 60
- 노반강성 : 암반
- 침목 : 직결
- 도상 : 슬래브
- 차량제원 : 축중 16ton 전동차
- 속도 : 80km/h
- 탄성패드 : 6종(16.0 / 18.0 / 20.0 / 22.0 / 24.0 / 45.0kN/mm)

(나) 모델별(6종) 해석결과는 [표 5]와 같으며, 서울메트로에서 적용하고 있는 20.0kN/mm를 기준으로 슬래브에 전달되는 진동가속도[그림 4] 해석결과, 45.0kN/mm인 경우에는 107.2dB, 20.0kN/mm인 경우에는 102.4dB로 4.8dB 정도 진동이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 삽입손실값은 기준값(20.0kN/mm)에서 스프링계수가 16.0kN/mm로 낮아지면 평균 3.0dB 정도의 진동 저감 성능이 개선되는 것으로 예측된 반면, 반대로 스프링계수가 45.0kN/mm로 증가할 경우에는 최대 15.0dB 정도 진동저감 성능이 떨어지는 것으로 해석되었다.

[표 5] 지하철(Seoul Metro) 모델별 발생응력과 변위량 비교

항 목	단위	탄성패드 스프링계수 [kN/mm]					
		16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	45.0
레일의 정적 최대 변위량	mm	1.619	1.476	1.361	1.266	1.186	0.715
레일의 동적 최대 변위량	mm	1.348	1.225	1.126	1.045	0.976	0.517
상관의 동적 최대 변위량	mm	1.317	1.194	1.094	1.012	0.943	0.004
침목의 동적 최대 변위량	mm	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
슬래브 동적 최대 변위량	mm	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
레일패드의 최대 하중	kN	28.610	29.270	29.910	30.530	31.120	38.050
탄성패드의 최대 하중	kN	28.680	29.350	29.990	30.610	31.200	41.880
노반의 최대 압축력	N/mm ²	0.148	0.151	0.154	0.157	0.161	0.716



[그림 4] 지하철(Seoul Metro) 탄성패드 스프링계수 유형별 진동가속도 및 삽입손실 해석 그래프

5. 탄성패드의 레일처짐량에 따른 정적스프링계수 최적화 해석

본 장에서는 4항에서 시행한 탄성패드의 스프링계수별 정적/동적 레일처짐량을 근거로 국내 대표적인 3개 철도기관의 콘크리트도상 궤도 건설시 적용될 최적의 정적스프링계수를 해석하였으며, 결과는 다음과 같다.[표 6]

[표 6] 탄성패드의 레일처짐량에 따른 정적스프링계수

종 별		탄성패드 스프링계수 [kN/mm]						스프링계수별 정적처짐량 그래프
		17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	45.0	
KNR	레일정적처짐 [mm]	1.692	1.536	1.412	1.312	1.228	0.838	
	레일동적처짐 [mm]	1.369	1.237	1.133	1.049	0.979	0.587	
※ 콘크리트도상의 레일 적정 처짐량 1.5mm를 적용할 경우 최적의 정적스프링계수는 21.1kN/mm								
KTX	레일정적처짐 [mm]	1.525	1.392	1.286	1.198	1.125	0.773	
	레일동적처짐 [mm]	1.166	1.058	0.973	0.903	0.845	0.504	
※ 콘크리트도상의 레일의 적정 처짐량 1.5mm를 적용할 경우 최적의 정적스프링계수는 17.6kN/mm								
-		16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	45.0	-
지하철	레일정적처짐 [mm]	1.619	1.476	1.361	1.266	1.186	0.715	
	레일동적처짐 [mm]	1.348	1.225	1.126	1.045	0.976	0.517	
※ 콘크리트도상의 레일의 적정 처짐량 1.5mm를 적용할 경우 최적의 정적스프링계수는 17.8kN/mm								

5. 결론

자갈도상에서 레일패드의 스프링계수 정도에 따른 발생응력과 변위 량을 구하고 노반 면 까지 전달 되는 진동을 해석한 결과 Soft한 레일패드가 궤도에 작용하는 압력이 작아짐을 알 수 있었고, 국내 대표적인 일반철도(KNR), 고속철도(KTX), 지하철(서울메트로)에서 콘크리트도상 궤도를 건설할 경우를 가정하여 탄성패드의 스프링계수를 16.0~45.0kN/mm 까지 변화 시키며 해석한 결과,

- 1) KNR에서 정적스프링계수 22.5kN/mm의 탄성패드는 45.0kN/mm 보다 약 9.3dB 정도 진동가속도가 저감되고, 레일처짐량을 1.5mm로 적용하였을 때 최적의 정적스프링계수 값은 21.1kN/mm이다.
- 2) KTX에서 정적스프링계수 22.5kN/mm의 탄성패드는 45.0kN/mm 보다 약 22.8dB 정도 진동가속도가 저감되고, 레일처짐량을 1.5mm로 적용하였을 때 최적의 정적스프링계수 값은 17.6kN/mm이다.
- 3) 서울메트로에서 정적스프링계수 20.0kN/mm의 탄성패드는 45.0kN/mm 보다 약 4.8dB 정도 진동가속도가 저감되고, 레일처짐량을 1.5mm로 적용하였을 때 최적의 정적스프링계수 값은 17.8kN/mm이다.

콘크리트도상 궤도에서 탄성 성능은 철도의 품질을 좌우하는 결정적 요소이므로 궤도를 건설하는데 있어서 가장 우선적으로 고려되어야 할 것이다. 본 연구에서는 탄성패드의 스프링계수에 따른 궤도의 동역학적인 부분에 대하여 검토하였으며, 향후 차량의 안정성과 탄성(방진) 재료의 특성, 내구성 및 체결장치 성능 등에 관한 종합적인 검토와 이의 검증을 통하여 최적의 콘크리트도상 궤도시스템을 도출하고자 한다.

참고문헌

Eurail Press(2005), "Track Compendium," Vol.9.No.7.5,pp.288-289