

소음·진동 저감을 위한 고속철도용 방진침목 개발

Development of Resilient Sleeper for Reduction of Sound and Vibration in High Speed Railways

엄 주 환* 양 신 추** 강 윤 석***
Um, Ju-hwan Yang, Sin-chu Kang, Yun-suk

Key Words : Resilient sleeper, Lateral resistance, durability

ABSTRACT

In this paper, the process of development of resilient sleepers, which improves the train safety, passenger comfort and reduces the noise and vibration, is presented. To determine the required material properties of elastic pad, static and dynamic simulations are performed and is applied in manufacturing. Lateral resistance and durability characteristics of the resilient sleepers are experimentally investigated. From the experiment results, it is investigated that the displacement is less for sleeper with elastic pad than that in ordinary PC form. However, the lateral resistance is investigated little less for sleeper with elastic pad than ordinary PC form. These results indicate that the elastic pad can reduce possibility of rail-corrugations and thus resulting in the reduction of maintenance costs.

1. 서론

유도상 궤도의 유지보수 경감과 소음·진동 감소를 목적으로 그림 1과 같이 PC침목의 바닥면에 탄성재를 부착하여 궤도스프링 계수의 감소를 도모하는 유도상 탄성침목이 국내외적으로 많은 관심이 고조되고 있다.

일본의 경우, 현장부설 사례에서 소음·진동 및 궤도 유지보수 경감의 효과가 뚜렷이 나타났으며, 방진침목의 생력화 성능은 50%정도에 이르러 부설

실적이 점점 증가하는 추세이다.

국내 서울지하철 공사에서도 1999년 처음으로 터널부 유도상궤도상에 방진침목을 부설하여 8~14dB 정도의 소음·진동 경감 효과를 나타내는 결과를 얻었다.

이러한 방진침목의 실용화 형식의 개발에 있어서는 탄성재료의 저렴화와 사용량의 저감, 피복재 성형방법의 변경에 의한 생산성과 접착성의 향상, 침목 형상의 최적화에 의한 피복재 박리의 방지와 측면 상부에 대한 캔자갈의 열화 방지 등을 고려하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 고속철도용 방진침목의 국내 실용화 형식의 개발을 위해 필요한 방진침목의 기본요건을 조사한 후 이들을 기준으로 수치해석을 통하여 방진침목의 최적물성치를 산출하였다.

또한 이를 바탕으로 방진패드 및 침목을 시험체

* 한국철도기술연구원, 주임연구원
** 한국철도기술연구원, 책임연구원
*** 한국철도기술연구원, 선임연구원

작하여, 침목패드의 기본물성시험 및 신뢰성시험을 수행하였으며, 방진침목의 현장적용성을 검토하기 위해 도상침하시험 및 도상횡저항력시험을 수행하여 방진침목의 성능을 검증하였다. 시험결과로부터 개발된 방진패드는 현재 고속철도시방기준(안)의 요구성능을 충분히 만족하였다. 또한 방진침목의 성능시험결과에서도 도상침하량 및 침하진전속도 측면에서 보통침목에 비하여 그 성능이 크게 향상되었으며, 도상횡저항력도 충분히 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

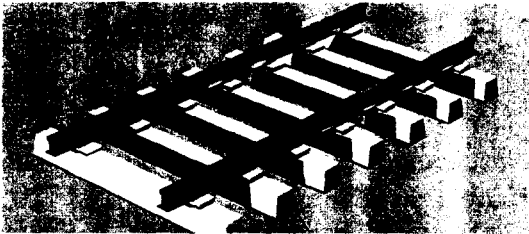


그림 1. 방진패드를 부착한 궤도

2. 수치해석을 통한 방진침목패드의 최적물성치 산출

2.1 궤도정적해석을 통한 침목패드 물성치 산출

궤도의 기본 성능요건을 만족하는 최적침목패드 강성을 산출하기 위하여 정적해석을 수행하였다. 해석모형은 그림 2와 같고 사용된 궤도물성치는 표 1과 같다. 그림 3은 침목패드강성에 따른 레일응력, 모멘트 및 레일압력을 나타낸 것이다.

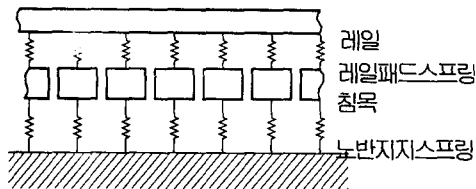
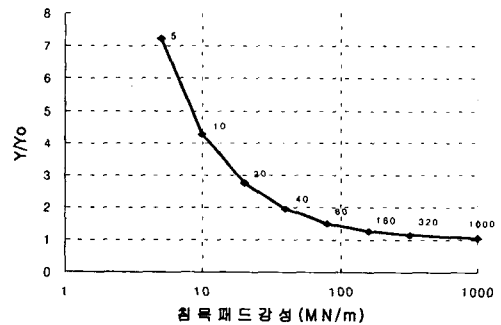


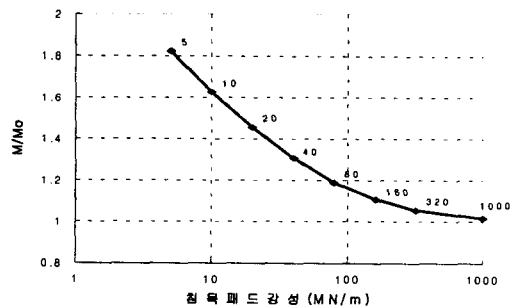
그림 2. 2중보 모델

표 1. 레일 휨응력 계산시 사용된 제원

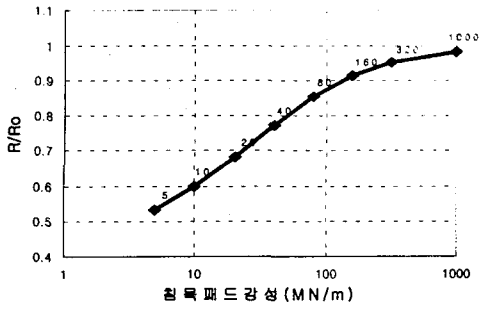
차량/궤도 모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
레일	UIC60kg	레일높이(m)	1.72×10^{-1}
레일질량 (kg/m)	60.3	중심축에서 레일 두부까지길이(m)	9.11×10^{-2}
레일 단면2차 모멘트(m^4)	3.055×10^{-3}	중심축에서 저면까지 길이(m)	8.09×10^{-2}
레일탄성계수 (kN/m^2)	2.1×10^8	침목간격(cm)	0.60
레일패드 지지강성	200MPa	침목지지강성(kN/m)	1.3824×10^5



(a) 레일처짐



(b) 레일모멘트



(c) 레일압력

그림 3. 침목패드강성에 따른 궤도 각부의 응력비교

이들 결과로부터 레일변위 측면에서 방진침목의 지지강성은 25MN/m 이상이어야 함을 알 수 있다. 한편 레일응력은 레일모멘트가 26.8kN·m 이하일 경우 허용응력을 만족하는데 이것은 침목패드 지지강성 2MN/m에 대응하므로 침목패드강성은 크게 레일응력에 제한받지 않음을 알 수 있다. 또한 레일압력측면에서도 신간선 PC침목 기준(18ton)을 그대로 적용하면 침목패드 지지강성은 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 궤도의 정적해석결과로부터 침목패드강성은 25MN/m가 최적임을 알 수 있다.

2.2 동적해석을 통한 침목패드 물성치 결정 가. 이동충중해석(저주파진동해석)

방진침목의 중요한 기능은 도상침하 진행속도를 줄여 궤도틀림 교정에 따른 유지보수비를 줄이는 것이다. 보통 도상침하속도는 도상가속도의 3~4승에 비례하므로 도상가속도를 최대한 줄일 수 있는 방진침목의 패드강성을 설계하는 것은 방진침목 개발에 있어 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 열차의 주행안전성을 유지하면서 도상가속도를 최대한 줄일 수 있는 패드강성을 구하기 위하여 궤도 동적해석을 수행하였다. 그림 4와 같은 이산지지 모델과 표2와 같은 물성을 사용한 궤도 저주파 해석결과는 그림 5와 같다. 이들 결과로부터 패드지지강성이 20~160MN/m 사이에

서 도상가속도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 앞서의 정적해석결과를 고려하여 패드의 지지강성을 25MN/m로 하면 충분한 방진효과가 있을 것으로 판단된다.

표 2. 궤도진동의 시계열응답해석에 사용된 물성치

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도(km/h)	300	축간거리(m)	3.0
차체반질량(kg)	13.6x10 ⁴	축의 질량(kg)	2.0x10 ⁴
2차 현가장치 스프링(kN/m)	700	침목간격(m)	0.6
2차 현가장치 댐핑(kN·s/m)	120	침목질량(kg)	300
대차질량(kg)	1.51x10 ⁵	레일질량(kg/m)	60.8
1차 현가장치 스프링계수(kN·s/m)	825	레일 휨강성	6416
1차 현가장치 댐핑계수(kN·s/m)	6	레일패드강성(kN/m)	100x10 ³
차륜반경(mm)	457	도상질량(kg)	100x10 ³
레일	UIC60	노반지지강성(kN/m)	80.3x10 ³
레일표면반경(mm)	600	노반댐핑계수(kN·s/m)	98
레일패드 댐핑계수(kN·s/m)	98		

나. 주파수영역해석(고주파진동해석)

궤도틀림에 따른 차륜과 레일의 상호작용에 의하여 발생하는 고주파 충격하중을 적절히 완화하여 소음, 진동을 줄이고 도상침하를 최소화할 수 있는 침목패드 강성을 산출하기 위하여 그림 6과 같은 연속보모델을 사용하여 고주파 진동해석을 수행하였다. 해석결과를 나타낸 그림 7로부터 패드강성이 적을수록 도상가속도 저감효과가 크나 앞서 언급한 바와 같이 주행안전성을 고려하여 패드의 지지강성을 25MN/m로 설정하는 것이 적당하다고 판단된다.

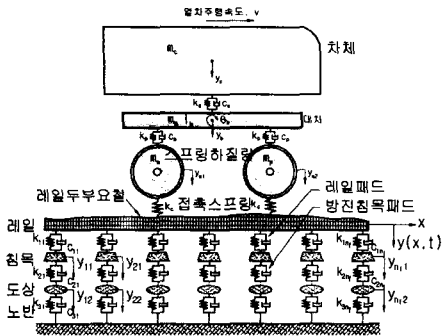


그림 4. 탄성침목궤도의 동적해석모델

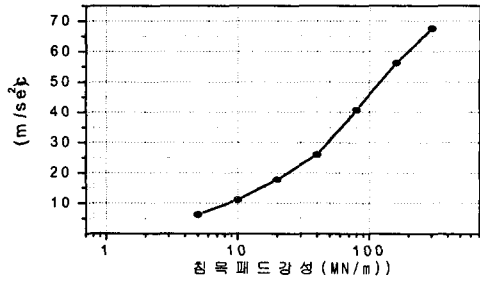


그림 7. 침목패드강성에 따른 도상가속도 변화

3. 방진침목제작 및 성능시험

3.1 방진침목패드 제작

3절의 시뮬레이션을 통한 침목패드의 지지강성을 기초로 침목패드가 소정의 물성을 갖도록 제조하였다. 제작된 방진패드는 가공 및 시공성을 고려하여 폴리우레탄계의 재료를 이용하였으며, 경도 60HD, 80HD 그리고 침목부착면은 60HD, 도상과의 접촉면은 80HD인 2 layer의 패드 등, 패드의 강성(경도)에 따라 서로 다른 3가지 패드를 제작하여 방진침목의 성능을 검토하였다.

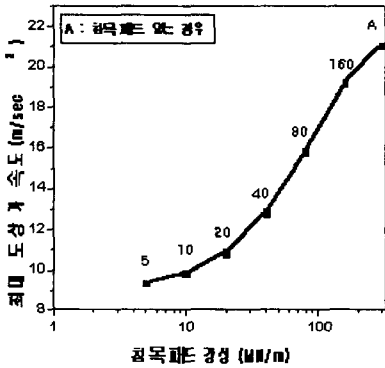


그림 5. 궤도각부의 가속도시계열응답

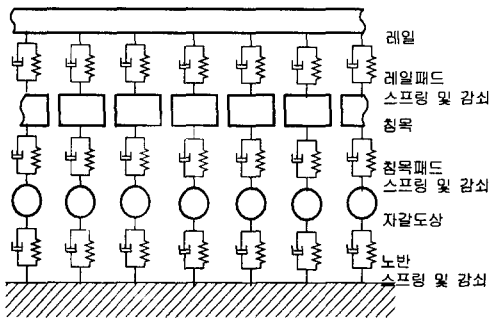


그림 6. 궤도 고주파해석모형



그림 8. 방진패드를 부착한 침목

침목은 고속철도에 사용하고 있는 콘크리트 침목을 사용하였다. 40cm로 절단한 UIC60레일은 e-클립(clip) 체결구를 사용하여 침목에 체결하였고 레일의 하부에는 레일패드를 삽입하였다. 방진패드와 침목은 표면처리 한 후 에폭시(epoxy)에 의하여 24시간 정도 경화하여 부착하였다. 방진패드의 두께는 20mm이다. 그림 8에서 제작 완료된 방진

침목의 견본을 보여주고 있다.

3.2 방진침목패드 물성시험

침목패드의 물성시험항목 및 기준은 고속철도 궤도공사 시방서(안)을 기본적으로 준용하였으며, 시험방법은 한국산업규격(KS)중 가황고무 물리시험방법(M6518)에 준하여 시험을 수행하였다.

방진패드의 물성시험결과, 인장강도는 고속철도 시방서(안)의 규격치 60kgf/cm²의 1.5~2.4배 정도로 아주 양호한 결과로 나타났으며, 70℃에서 96시간 노화후의 경우에도 1.1~2.2배로 규격치를 상회하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 인장특성의 하나인 패드의 신율 또한 노화전·후 모두 규격치 200%의 3.5배 이상으로 나타나 대부분 기준치를 만족하고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 표면경도는 본 연구에서의 주요변수로서, 시방기준은 만족하고 있으나, 평가기준에서의 규격치와는 별도로 60 및 80 그리고 60+80으로 제작하였다.

표 3. PU Elastomer의 물성시험결과

시험항목	단위	결과		고속철도 시방기준	
		HD60	HD80		
기본물성	경도	Hs	60	80	65±5
	인장강도	kgf/cm ²	92	147	60이상
	신율	%	846	753	200이상
내열성	경도변화	Hs	+1	+1	-
	인장강도	kgf/cm ²	71	131	50이상
	신율	%	880	703	120이상
내수성	흡수율	%	1.1	1.1	1.5이상
	인장강도	kgf/cm ²	52	99	-
	신율	%	672	537	-

3.3 방진침목의 성능시험 - 도상침하시험

(1) 시험개요

하중크기는 100kN의 축중 및 충격계수를 고려하여 70±55kN으로 설정하였고, 가진주파수는 10Hz 이내에 주요 주파수성분이 존재하므로 10Hz로 결정하였으며, 총 55회(55시간 가력) 반복하중을 재

하하였다. 그림 9는 방진침목 도상침하 시험장치의 기본 개념도를 나타내며, 그림 10은 개념도를 바탕으로 실제 제작된 시험장치를 나타낸 것이다.

(2) 시험결과

그림 11은 방진침목과 보통침목의 도상침하시험 동안 침목의 침하량을 동시에 나타낸 것이다.

초기단계 침하량의 경우 보통침목이 방진침목에 비하여 약 2배 이상 크고 최종변위의 경우도 각각 4.5mm, 12.76mm로서 200%이상의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 방진침목을 사용할 경우 열차의 반복주행에 따라 궤도틀림의 절대 크기를 크게 줄여 열차주행안전성 및 승차감을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다. 또한 시간경과에 따른 도상침하 변화량에 있어서도 방진침목의 경우 초기단계 침하가 발생한 후 거의 변화가 없는 반면 보통침목의 경우는 초기단계 침하 이후에도 계속적으로 도상침하가 발생함을 알 수 있다.

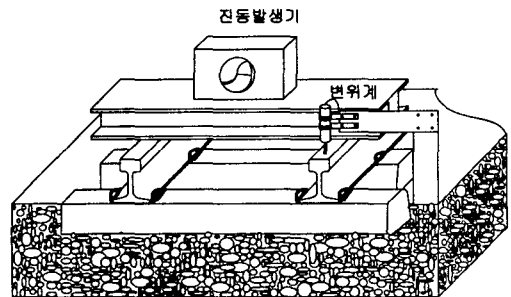


그림 9. 도상침하시험장치 개요도



그림 10. 방진침목 도상침하시험장면

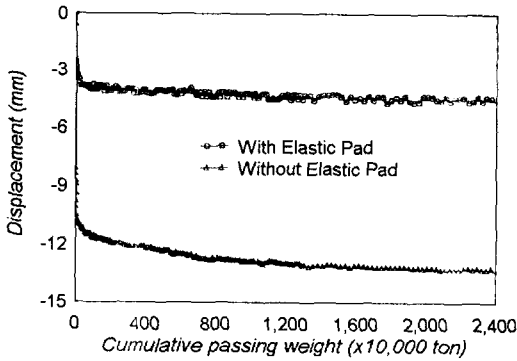


그림 11. 침목의 변위 비교

3.4 방진침목의 성능시험 - 도상횡저항력시험

(1) 시험개요

고속철도 장대레일의 좌굴안정성에 큰 영향을 미치는 도상횡저항력을 검토하기 위해, 방진패드를 부착하지 않은 일반 PC 침목과 3가지 서로 다른 패드를 부착한 방진침목에 대하여 각각 횡저항력 시험을 수행하였다. 먼저, 일반침목과 방진침목과의 실험 결과를 비교분석 하여 방진침목의 성능을 파악하고, 다음으로 3가지의 다른 재료로 부착된 방진침목간의 결과를 비교함으로써 패드의 경도에 따른 횡저항력의 변화 여부를 파악하고자 하였다.

횡저항력 측정에 사용된 장비는 일본에서 제작한 KS-B형 침목거항 측정기를 사용하여 시험을 수행하였다.

도상횡저항력 시험 개념도 및 시험장면을 그림 12와 그림 13 에 소개하고 있다.

(2) 시험결과

시험결과를 각각의 경우에 대해 2회씩 횡저항력을 측정하여 평균값을 산정하였다.

그림 14 에 일반침목과 방진침목의 도상횡저항력 측정결과를 보여주고 있다. 시험 결과, 일반 PC 침목이 방진침목에 비해 비교적 높은 횡저항력을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 즉, 2mm에서의 일반PC침목의 횡저항력은 953kg/m로서 현재 고속

철도 시방기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났으며, 이 값은 방진침목에 비해 12~20%정도 크게 나타났다.

그러나 6mm 이후에서는 패드의 표면경도가 HD60인 방진침목이 오히려 높은 값을 나타내었고, HD80+60과도 거의 유사한 결과를 나타내었다. 즉 초기변형에서부터 6mm사이의 변위에서는 최대 16%정도까지 일반침목이 방진침목 보다 높은 횡저항력값을 보여주고 있다. 이것은 일반PC침목의 경우, 침목 하면의 표면이 매우 거칠어 도상과의 마찰력이 큰데 반하여, 방진침목은 피로하중이 가해지지 않은 초기상태에서는 침목에 부착된 방진패드의 표면이 매끄러워 표면 마찰력이 아주 작기 때문인 것으로 판단된다.

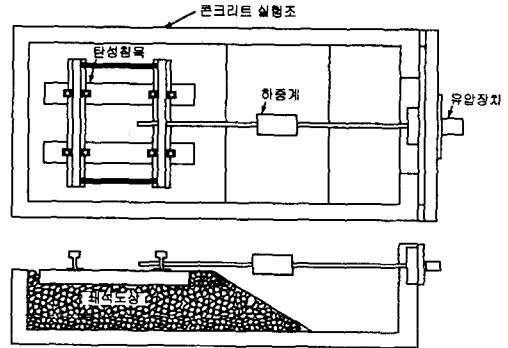


그림 12. 도상횡저항력 시험 개념도



그림 13. 횡저항력 시험 장면

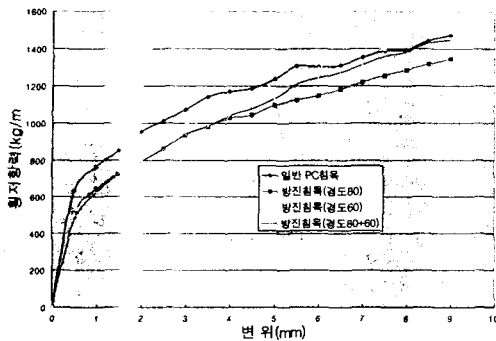


그림 1. 횡저항력 시험결과 종합비교

이상의 결과에서, 열차하중이 작용하지 않은 상태에서의 도상침목과 방진침목의 도상횡저항력을 비교하여 보면, 2mm 변위에서의 횡저항력이 일반 침목은 953 kg/m, 방진침목의 경우 HD60인 경우가 848kg/m, HD80+60과 HD80이 793kg/m로 일반침목이 가장 크게 나타났으며, 방진침목의 경우 경도가 낮은 HD60의 경우가 경도가 높은 경우에 비해 약 7%정도 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 침목에서 도상으로 전달되는 하중의 고주파 성분을 차단하여 자갈분쇄를 방지하고 소음, 진동의 저감 등을 목적으로 하는 방진침목의 개발을 그 성능시험을 수행하였다. 방진 패드는 정적 및 동적 해석을 통하여 그 기본 물성치를 산정하는데 25MN/m 정도의 지지강성을 요구함을 알 수 있었다. 얻어진 결과를 바탕으로 방진패드용기 개발하였다.

방진패드용기의 물성시험결과 대부분 고속철도 시방기준을 만족하는 것으로 나타났다.

방진패드용기 성능시험결과, 도상침목시험은 방진침목의 최대 변위폭이 0.8mm정도를 나타내어 일반 PC 침목의 0.3mm에 비하여 상대적으로 크게 나타났으며, 절대변위량에서 기존 PC 침목에 비하여 매우 우수한 성능을 나타내었는데, 약 200%이

상의 절대변위량 감소를 나타내었으며, 변위의 통과특수에 대한 변화량도 일반 PC 침목에 비하여 적게 나타났다. 도상횡저항력시험의 경우, 방진침목이 일반PC침목 보다 다소 작은 값을 나타내었다. 그러나 이러한 결과는 횡저항력 시험시 열차하중이 가해지지 않았으며, 방진패드표면이 아주 매끄러운 상태였기 때문으로 판단되며, 향후 현장부설시 횡저항력 확보에는 문제가 없을 것으로 사료된다. 이상의 결과로부터 방진침목을 적용할 경우 궤도틀림 교정에 따라 열차의 주행 안정성과 승차감의 향상에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. “軌道關係走行判定基準の提案”, 鐵道線路 32-10.
2. 한국철도기술연구원(2000), “선로구축물시스템 엔지니어링 기술개발 (2단계 1차년도 보고서)”.
3. T.Horiike, M. Hansaka, H. Yanagawa, K. Ando and K. Date (1998), “Development of Low Cost Resilient Tie for Ballasted Track”, RTRI Report, Vol. 12, No. 3.
4. H. Wakui, N. Matsumoto and H. Inoue (1997), “Technological Innovation in Railway Structures System with Ladder Track System”, Proceedings of WCRR 97, pp.61-67.
5. “유도상 궤도의 방진 침목 부설”, 철도선로, NO.30, 이기승(1999)
7. S. Miura, F. Ohish, A. Yokota, T. Horike(1990), “Development of Resilient Tie for Practical Use”, RTRI Report, Vol. 4, No.5
8. 堀池 高廣(2000), “유도상 탄성침목의 저림화와 보수경감 효과”, RRR