

고속철도 방진침목 개발

Development of Sleeper for High Speed Railway

양신추* 노혁천** 강윤석*** 이종득****
Yang, Sin-Chu Noh, Hyuk-Chun Kang, Yun-Suk Lee, Jong-Duk

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 discussed. To determine the required material properties of elastic pad, static and dynamic simulations are performed and is applied in manufacturing. From the experiment results, it is investigated that the displacement is less for sleeper with elastic pad than that in ordinary PC form. The rate of displacement is also shown to be less for the sleeper with elastic pad. These results indicate that the elastic pad can reduce possibility of rail-corrugations and thus resulting in the reduction of maintenance costs.

1. 서론

방진침목은 탄성고무 또는 폴리우레탄 등 탄성재를 침목의 하면에 부착하여(그림 1) 하부로 전달되는 하중의 고주파 성분을 차단함으로써 자갈분쇄의 방지와 소음, 진동의 저감 등에 큰 효과가 있어 세계적으로 개발중에 있다. 고속철도의 경우는 열차의 고속주행에 의하여 충격하중이 기존철도에 비하여 커 궤도틀림진전이 빠른 반면, 궤도틀림에 의한 열차주행안전성의 영향이 크므로 궤도보수에 대한 많은 작업이 투입되어야 한다. 따라서 고속철도에 적용할 수 있는 방진침목의 개발은 유지보수비의 절감뿐만 아니라 열차의 주행안전성 및 승차감 향상과 소음·진동의 저감 등의 측면에서 의미가 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 고속철도용 방진침목을 개발하기 위하여 필요한 방진침목의 기본요건을 조사한 후 이들을 기준으로 수치해석을 통하여 방진침목의 최적물성치를 산출하였다. 또한 방진침목을 시험제작하여 침목패드와 기본물성시험 및 신뢰성시험을 수행하였고, 실내 모의 가진시험을 통하여 방진침목의 성능을 검증하였다.

시험결과로부터 개발된 방진침목은 도상침하량 및 침하진전속도 측면에서 보통침목에 비하여 그 성능이 크게 향상됨을 알 수 있었다.

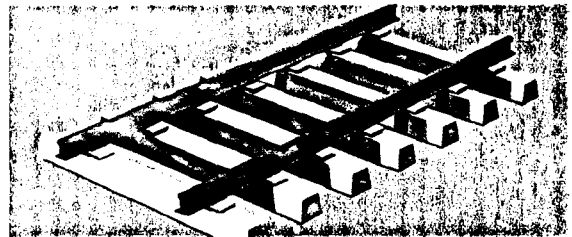


그림 1. 방진패드를 부착한 궤도

* 양신추 : 한국철도기술연구원 책임연구원
** 노혁천 : 한국철도기술연구원 선임연구원
*** 강윤석 : 한국철도기술연구원 주임연구원
**** 이종득 : 한국철도대학 교수

2. 방진침목의 성능요구조건

2.1 방진침목의 일반요건

궤도의 구성품으로서 방진침목의 성능조건은 일반 보통침목의 성능조건과 같다고 할 수 있다. 그러나 하부의 탄성패드는 열차충격하중 및 기후변화 등에 의하여 경화 및 노후화가 급격히 진행될 수 있으므로 장기적 내구성 측면에서 보통침목의 성능을 갖기 위해서는 관련시험을 통하여 그 성능이 충분히 입증되어야 한다. 방진침목 개발시 특수하게 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

가. 침목패드의 내구성 확보

방진침목이 일정기간 성능을 유지하기 위하여서는 계속되는 열차주행하중에 대하여 침목하면에 부착된 패드는 영구변형이 크지 않아야 하고, 또한 혹독한 기상조건에도 견딜 수 있어야 한다.

나. 도상저항력 확보

궤도 특히 침목의 중요한 기능은 레일을 일정한 위치로 유지시키기 위하여 충분한 도상 중/횡저항력을 가져야 한다는 것이다. 침목하면에 패드를 부착하므로써 도상저항력이 줄어들 경우 열차주행안전성은 크게 위협받을 수 있다. 따라서 방진침목의 경우 도상저항력 확보를 위하여 침목과 패드 사이에 충분한 부착력과, 패드와 자갈도상 사이에 소정의 마찰력을 확보하여야 한다.

다. 도상가속도의 저감

방진침목이 경제성을 확보하기 위해서는 궤도의 유지보수비를 가능한 한 저감시킬 수 있어야 한다. 이를 위해서는 침목하면으로 전달하는 충격력을 완화시켜 도상침하의 진전속도를 크게 줄여야 한다. 따라서 방진침목을 개발하기 위해서는 상기 가. 나. 항목을 만족하면서 가능한 한 도상가속도를 최대한 줄일 수 있는 침목패드의 개발이 요구된다.

2.2 방진침목의 궤도시스템성능 요건

궤도시스템의 주행안전성 판단을 위하여서는 적절한 기준의 정립이 필요하다. 본 연구에서는 고속철도차량의 주행안전성 판단을 위하여 일본기준[1]과 독일기준[2]을 참고로 하여 결정하였다. 제시한 값을 근거로 하되 방진침목의 거동특성(일반침목 보다 변위가 큰 점)을 고려하여 방진침목의 성능검토에 필요한 기준에 대해서만 재정립하면 표 1과 같다.

표 1. 고속철도 방진침목 궤도의 주행판정 기준

측정항목	증별	평가기준 및 기준값
정적처짐 시험		· 레일처짐 $\leq 2.0\text{mm}$
동적처짐 시험		· 레일처짐 $\leq 2.0\text{mm}$
레일응력		· 응력 $\leq 80\text{N/mm}^2$
침목의 상하변위		· 침목변위 $\leq 1\text{mm}$
도상횡저항력		· 도상저항력 $\geq 20\text{N/mm}$

2.3 방진패드 물성시험기준

자갈상에 놓이는 침목패드는 열차의 되풀이되는 충격하중에 대하여 경화 또는 파손되지 않고 수명기간동안 충분히 기능을 유지하여야 한다. 또한 방진성을 향상시키기 위해서는 적절한 탄성을 유지하여야 한다. 이러한 사항을 고려한 패드물성시험에 대한 항목 및 관련기준은 표 2와 같다.

표 2. 탄성치목의 물성시험

항 목	단 위	기 준	
정적스프링정수	(하중/길이), MN/m	비브로질하중재하 전후에 대하여 -5%이상 10%이하	
압축영구변형량	%	6.7%이하	
각누름 파입깊이	mm	3.0mm이하	
파괴강도 파입량	%	10%이하	
인장(引張) 특성	인장강도	MPa	최소인장강도 3MPa, 비브로질하중재하 전후에 대하여 ±20%이하
	신율	%	
인장(引裝)특성	kN/m	10kN/m 이상	

3. 수치해석을 통한 방진침목패드의 최적물성치 산출

3.1 궤도정적해석을 통한 침목패드의 물성치 산출

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

표 3. 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 두부까지 길이 (m)	9.11×10^{-2}
레일 단면2차 모멘트(m^4)	3.055×10^{-5}	중심축에서 저면 까지 길이(m)	8.09×10^{-2}
레일탄성계수 (kN/m^2)	2.1×10^8	침목간격cm	0.60
레일패드 지지강성	200MPa	침목저지강성(kN/ m)	1.3824×10^9

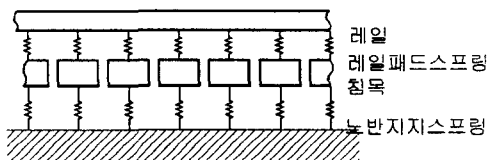
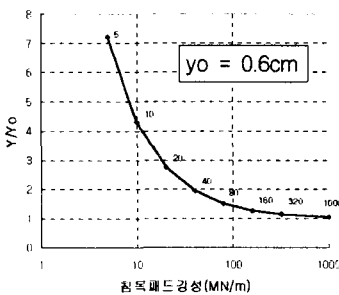
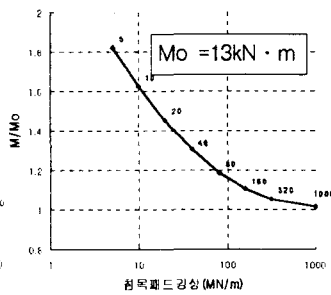


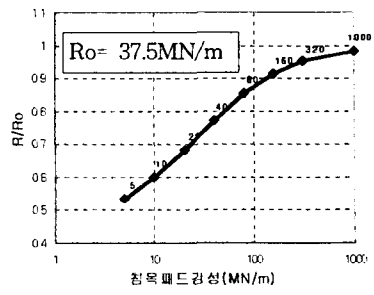
그림 2. 2중보 모델



(a) 레일처짐



(b) 레일모멘트



(c) 레일압력

그림 3. 레일패드강성에 따른 궤도 각부의 응력비교

이들 결과에 표 1의 궤도 성능기준을 적용하면 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 레

일응력에 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.

3.2 동적해석을 통한 침목패드 물성치 결정

가. 이동충증해석(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.

표 4. 궤도진동의 시계열응답해석에 사용된 물성치

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도(km/h)	300	축간거리(m)	3.0
차체반질량(kg)	13.6x10 ³	축의 질량(kg)	2.0x10 ³
2차 현가장치 스프링(kN/m)	700	침목간격(m)	0.6
2차 현가장치 댐핑(kN · s/m)	120	침목질량(kg)	300
대차질량(kg)	1.51x10 ³	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		

본 연구에서는 열차의 주행안전성을 유지하면서 도상가속도를 최대한 줄일 수 있는 패드강성을 구하기 위하여 궤도 동적해석을 수행하였다. 그림 4와 같은 이산지지 모델과 표 4의 물성을 사용한 궤도 저주파 해석결과는 그림 5와 같다. 이들 결과로부터 패드지지강성이 20~160MN/m 사이에서 도상가속도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 앞서의 정적해석결과를 고려하여 패드의 지지강성을 25MN/m로 하면 충분한 방진효과가 있을 것으로 판단된다.

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 저감효과 크나 앞서 언급한 바와 같이 주행안전성을 고려하여 패드의 지지강성을 25MN/m로 설정하는 것이 적당하다고 판단된다.

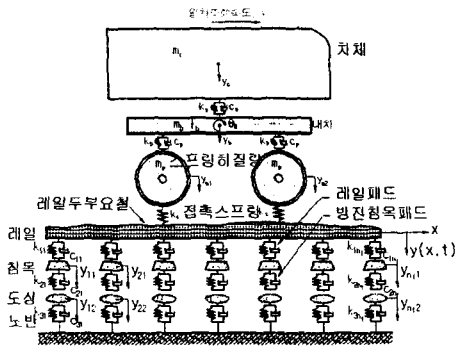


그림 4. 탄성침목궤도의 동적해석모델

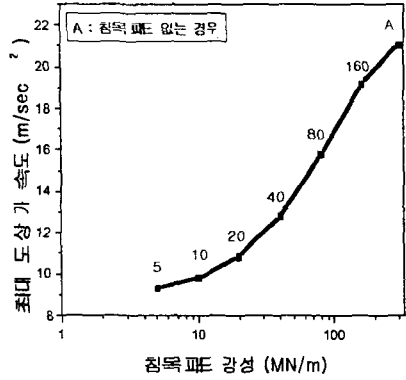


그림 5. 궤도각부의 가속도시계열응답

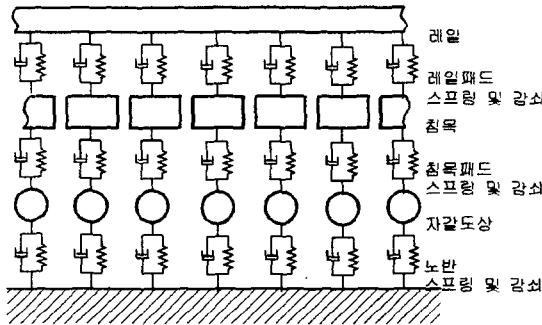


그림 6. 궤도 고주파해석모형

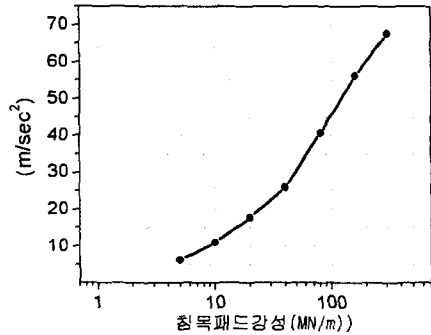


그림 7. 침목패드강성에 따른 도상가속도 변화

4. 방진침목제작 및 성능시험

4.1 방진침목패드 제작

3절의 시뮬레이션을 통한 침목패드의 지지강성을 기초로 침목패드가 소정의 강성을 갖도록 제조하였다. 침목은 고속철도에 사용하고 있는 콘크리트 침목을 사용하였다. 40cm로 절단한 레일은 e-클립(clip) 체결구를 사용하여 침목에 체결하였고 레일의 하부에는 레일패드를 삽입하였다. 방진패드와 침목은 표면처리 한 후 에폭시(epoxy)에 의하여 18시간 정도 경화하여 부착하였다. 방진패드의 두께는 25mm이다. 제조 완료된 방진침목의 전본은 그림 8과 같다.

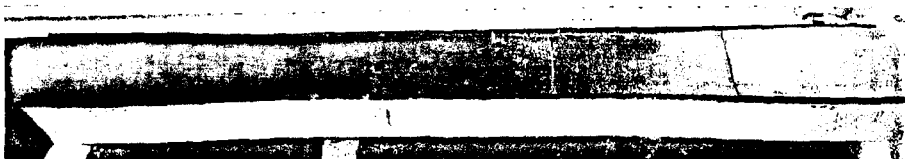


그림 8. 방진패드를 부착한 침목

4.2 방진침목패드 물성시험

침목패드의 물성시험은 한국산업규격(KS)중 가황고무 물리시험방법(M6518)에 준하여 시험을 수행하였다 (표 5).

표 5. 방진침목패드의 물성시험 결과

NO	시험구분	측정값	B'T NO	9K302-0 2	0A072-0 3	0B111-0 2	0C051-0 2	0D032-0 3	0E161-0 2	평균	표준편차
1	Hs	Shore"A"(pts)		64	64	63	64	62	63	63	1
2	Sp.Gr	(sp,gr)		1.117	1.1228	1.1185	1.1199	1.1184	1.1173	1	0
3	인장특성	Tb(kgf/cm ²)		224	224	242	236	232	232	232	7
		Eb(%)		450	480	466	478	461	468	467	11
		M100(kgf/cm ²)		31	31	32	36	31	31	32	2
		M200(kgf/cm ²)		81	78	84	88	80	78	82	4
		M300(kgf/cm ²)		141	133	144	113	139	136	134.333	11.129
		M400(kgf/cm ²)		198	186	204	198	197	195	194.8	5.0695
4	70℃×72hrs 노화후	ΔHs(pts)		-	3	3	2	2	1	2	1
		ΔTb(%)		-	-8	-6	-4	-10	-3	-6	3
		ΔEb(%)		-	-9	-8	-10	-9	-9	-9	1
	100℃×22hrs 노화후	ΔHs(pts)		3	3	4	4	1	4	3	1.2
		ΔTb(%)		-5	-12	-13	-12	-11	-6	-10	3
		ΔEb(%)		-18	-17	-20	-22	-17	-12	-18	3
	100℃×168hrs 노화후	ΔHs(pts)		-	7	12	10	8	7	-	2
		ΔTb(%)		-	-39	-48	-62	-36	-40	-45	10
		ΔEb(%)		-	-52	-58	-72	-43	-47	-54	11
5	반발탄성	Rs(%)		64	63	64	60	62	66	63	2
6	HBU	발열온도(℃)		104	106	104	106	106	104	105	1
		P/SET(%)		2.6	4	4	3	3	3	3	1
7	70℃×22hrs	C/SET(%)		-	15	13	14	12	12	13	1.3038
	100℃×22hrs			39	40	41	46	28	32	38	7
8	내마모성	NBS마모율(%)		23	23.2	24	24	14	23	22	4
9	내오존성	균열유무		No Crack	No Crack	No Crack	No Crack	No Crack	No Crack	No Crack	No Crack
10	CREEP	CREEP(mm)		-	-	-	-	-	-	-	-
11	점탄성	E, G, TAn δ		-	-	-	-	-	-	-	-
12	마찰성	마찰계수		-	-	0.601	0.603	-	-	0.6	0.001

4.3 방진침목의 성능시험 - 도상침하시험

방진패드를 부착한 경우와 부착하지 않은 콘크리트 침목에 대하여 피로시험을 수행하여 두 결과를 비교함으로써 침목패드의 부착에 따른 침목의 침하진행속도 및 도상자갈 마모효과를 파악하고자 하였다. 레일이 체결된 단일 콘크리트 침목에 대한 피로시험을 위하여 2900×1400×500(W×D×H) 크기로 시험비트를 제작하였다. 시험비트는 피로시험기의 구조적 특성에 따라 세 부분으로 분할된 형태로 설계/제작되었다. 하중을 레일두부에 전달하는 부분인 지그(zig)는 설계하중 10ton을 기준으로 구조계산 후 적정치수를 결정하여 제작하였다.

하중크기는 KTX의 축중 및 충격계수를 고려하여 80±40kN으로 정하였고, 가진주파수는 10Hz 이내에 주요 주파수성분이 존재하므로 10Hz로 결정하였으며, 총 200만회(55시간 가력) 반복하중을 재하였다. 그림 9는 방진침목 도상침하 시험장치의 기본 개념도를 나타내며, 그림 10은 개념도를 바탕으로 실제 제작된 시험장치를 나타낸 것이다.

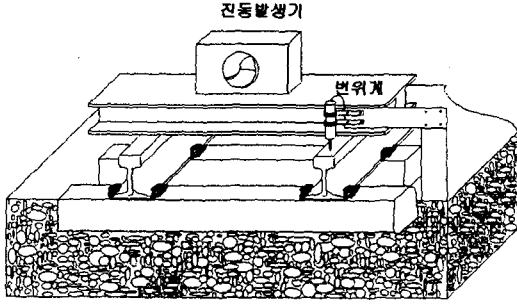


그림 9. 도상침하시험장치 개요도

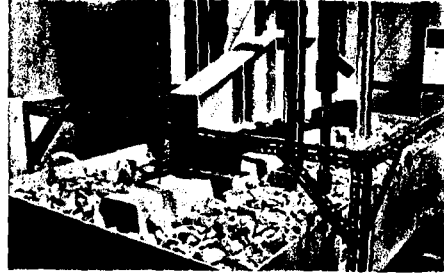


그림 10. 방진침목 도상침하시험장면

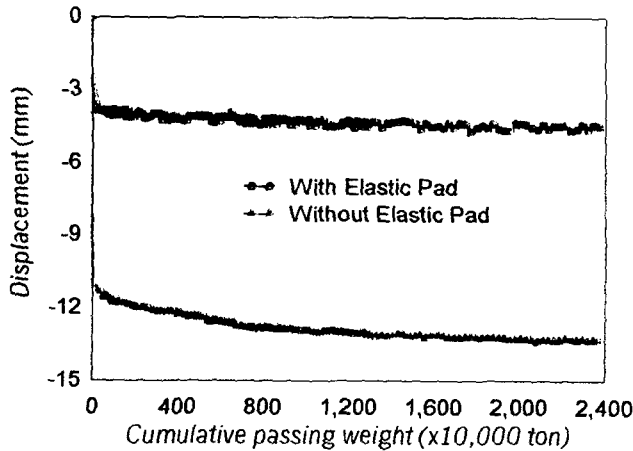


그림 11. 침목의 변위 비교

그림 11은 방진침목과 보통침목의 도상침하시험동안 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.

일반 PC 침목의 경우 본 실험에서는 제한된 크기의 시험비트를 사용하였기 때문에 도상침하 변화량이 크지 않았지만 일반 토공구간에서는 그 크기가 매우 클 것으로 예상된다. 시험결과와 이러한 예측으로부터 방진침목을 사용할 경우 궤도틀림의 교정효과에 따라 유지보수비를 현격히 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 12는 시험 후에 시험침목의 끝단과 중앙에서 관측된 방진패드의 마모상태를 보여주고 있다. 자갈과 접한 부분에는 영구변형이 일부 나타나고 있으나 패드가 크게 마모된 현상은 나타나지 않아 패드의 기능에는 큰 문제가 없는 것으로 관찰되어 제작된 방진패드가 충분한 내구성을 가지고 있음을 보여주고 있다.

시험 전·후의 자갈상태를 검토한 결과 하중의 작용에 따라 자갈의 분쇄가 발생하였고 분진이

나타난 것을 볼 수 있었는데 이러한 현상은 일반 PC 침목이 방진패드를 부착한 방진침목에 비하여 더 과대하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 방진패드의 유연화 작용에 의하여 침목이 자갈에 가하는 하중이 감소하여 나타나는 것으로 생각된다.



(a) 단부

(b) 중양부

그림 12. 시험후의 패드형상

5. 결론

본 연구에서는 침목에서 도상으로 전달되는 하중의 고주파 성분을 차단하여 자갈분쇄를 방지하고 소음, 진동의 저감 등을 목적으로 하는 방진침목의 개발 및 그 성능시험을 수행하였다. 방진패드는 정적 및 동적 해석을 통하여 그 기본 물성치를 산정하였는데 25MN/m 정도의 지지강성을 요구함을 알 수 있었다. 얻어진 결과를 바탕으로 방진패드를 제작하였다. 현재로서는 일체형의 방진패드 제작이 불가하여 5개로 조각난 패드를 제작 시험하였다. 방진패드와 침목은 예폭시에 의하여 18시간 정도 경화하여 부착하였다.

시험결과 방진침목은 변위량 진폭의 경우 0.8mm정도를 나타내어 일반 PC 침목의 0.3mm에 비하여 상대적으로 크게 나타났으나 절대변위량에서 기존 PC 침목에 비하여 매우 우수한 성능을 나타내었는데 약 200%이상의 절대변위량 감소를 나타내었으며, 변위의 통과톤수에 대한 변화량도 일반 PC 침목에 비하여 적게 나타났다. 이러한 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.