

운행선에서 레일패드의 탄성변화율과 내구년수 예측

Estmation of the Rail pad Stiffness Characteristic and the Sustainable period in Service

박대근1) · 김정훈2) · 최현수3) · 강영종4)

Park, Dae Geun · Kim, Jung Hun · Choi, Hyun Su · Kang, Young Jong

ABSTRACT

Any track system needs major changes of its components during its life. The most economical solution is, if possible, to make all components reach their life limit during the major track rehabilitation operation. Usually, the rail does a role as the driving component for the objective: its life-time is equivalent to around 500 million tons of traffic on high speed lines. On the KTX line with 110 trains per day, this would correspond to around 16 years, which is probably too long for the elastic pads of a concrete slab track. The most economical solution should be to change them at an intermediate step of 8 years, without changing the rail, and then to change both the rail and elastic pad at 16 years intervals (some rail changes on the South East TGV line in France began 15 years after service opening at 260 km/h, but recent rails have better characteristics).

1. 서 론

모든 궤도 시스템은 수명 주기 동안 구성품의 교체가 필요하며, 가장 경제적인 해결책은 가능하다면 주요 궤도 복구 작업 시 모든 구성품들이 수명 한계에 도달하도록 하는 것이다. 일반적으로, 레일은 이를 위한 결정적인 구성요소이다. 레일의 수명은 고속노선에서 약 5억 톤의 교통량에 해당되며, 프랑스 남동 TGV 구간에서는 260km/h의 속도로 개통되고 나서 15년 후에 레일교체되었다.

궤도시스템의 탄성 구성품의 내구성 문제는 체결시스템의 성능기준 요구조건에 의해 나타내기는 매우 어려운 것이 사실이다. 이는 매우 정확하고 세부적인 탄성 재료 시험이 필요하고, 체결시스템의 설계 및 경제성에 대해 다소 높은 제한 조건을 적용하기 때문이다. (더 두껍지만 유연한 탄성 패드는 얇지만 딱딱한 패드와 동등한 손상 위험을 나타내지만 사용되는 탄성 재료는 다른 구성품과 비교하여 일반적으로 비용이 많이 든다). 현재 기준(CEN, KR)에서 제시하는 내구성 확인은 3백만 주기의 피로시험 후 측정되는 강도 변화율을 통해 이루어진다.

체결구 성능시험에 의한 결과값을 가지고 패드의 강도변화와 내구성을 예측하였다.

2. 레일패드의 변화율과 내구연한

2.1 레일체결장치의 기계적 성능시험

레일체결장치는 한국철도시설공단(KR) 규격에 따라 다음과 같이 두 곳의 실험실에서 시험되었다.

1)정회원 · 한국철도시설공단 부장·고려대학교 건축·사회 환경공학과 박사과정·공학석사·E-mail: ktx2136@nate.com -발표자

2)정회원 · 고려대학교 건축·사회 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail: zamsin97@korea.ac.kr

3)정회원 · 고려대학교 건축·사회 환경공학과 석사과정 · E-mail: s7305248@korea.ac.kr

4)정회원 · 고려대학교 건축·사회 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: yjkang@korea.ac.kr

-2005년 5월 한국기계연구원(KIMM)에서 시행되었으며 번호가 N° 2005183832-3인 5월 31일자 시험인증서와 이에 첨부된 번호 N° BS765-1180.M의 보고서

-2006년 6월, SNCF의 궤도 연구부의 시험센터에서 시행되었으며 번호가 N° L2430-2006-02 인 2006년 7월 7일 자 보고서

이 두 보고서 모두 체결장치의 기계적 성능을 판단하는 데에 충분한 정보를 제공하고 있다.

▶ 패드 정적 탄성계수

이 시험 항목은 한국철도시설공단(KR) 시험 규정에 따라 시험한 결과는 다음과 같다.

표1

		패드 수직 탄성 계수 (kN/mm)	
		SNCF 시험	요구 값
피로시험 전	측정범위(kN)	40.5	20 ~ 50
피로시험 후	20 ~ 95	43.4 (+ 7.2%)	± 25 %

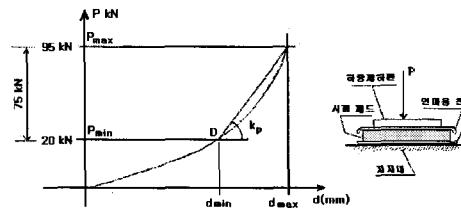
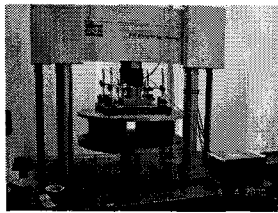


그림1 레일패드 정적수직스프링계수 시험

▶ 패드 동적 탄성계수

이 시험 항목은 피로시험의 하중과 기울임 각도를 정하는 데에만 필요하므로 요구되는 성능 값은 없다.

표2

		패드 동적 수직 스프링 계수 (kN/mm)	
		SNCF 시험	
피로시험 전	측정범위(kN)	54.3	
	20 - 95		

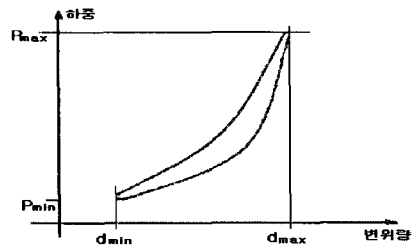
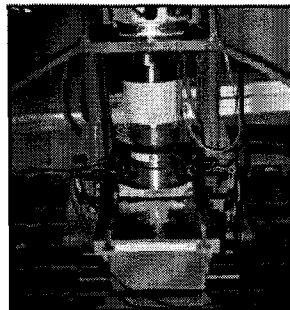


그림2 레일패드의 동적스프링계수 시험

▶ 레일체결장치의 수직 정적 탄성계수

이 시험 항목의 측정에는 KR규격에는 요구되지 않고 있다. SNCF 시험에서는 패드 스프링 정수를 측정했을 때와 같은 수직하중으로 피로 시험을 시행하여 피로 시험 전 그리고 피로시험 각 단계 별로 시스템의 탄성치를 측정하였다.

표 3

		시스템 정적 수직 탄성계수 (kN/mm)	
		측정범위(kN)	SNCF 시험
피로시험 전		20 - 95	50.4
피로시험 후		20 - 95	51.7
경사 피로 시험 중간의 측정결과	Number of cycles		
	10	0.5 - 58.42	52.182
	50,000	0.5 - 58.42	53.631
	500,000	0.5 - 58.42	56.235
	1,000,000	0.5 - 58.42	60.335
	1,500,000	0.5 - 58.42	56.786
	2,000,000	0.5 - 58.42	57.348
	2,500,000	0.5 - 58.42	57.922
	3,000,000	0.5 - 58.42	60.970
	평균값	0.5 - 58.42	56.801
표준편차		3.237	

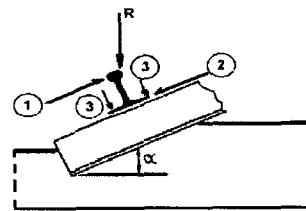
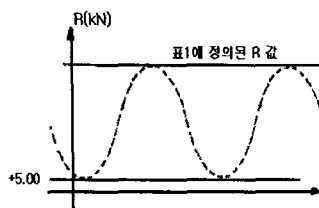


그림3 피로시험

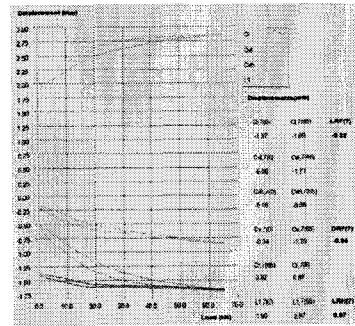
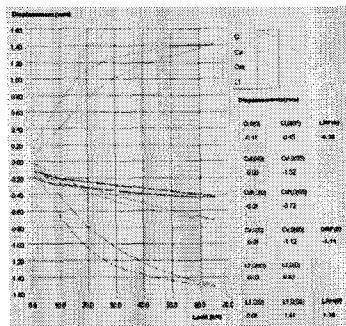
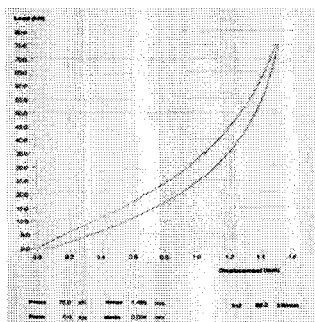


그림4 피로시험 회수 0과 300백만

▶ 피로시험 결과

Fatigue Test	SNCF test			Remarks
	LRH	LRF	DRF	
Cycle				Requirement LRH < 4mm
10	1.38	0.33	1.11	
50,000	1.15	0.36	1.08	
500,000	1.05	0.35	1.03	
1,000,000	1.00	0.30	0.96	
1,500,000	1.02	0.36	1.02	
2,000,000	1.01	0.36	1.01	
2,500,000	1.01	0.36	1.00	
3,000,000	0.97	0.32	0.95	

▶ 레일체결장치의 수직 동적 탄성계수

이 시험 항목의 측정은 패드 수직 동적 탄성 계수를 기초로 한 대응 값이 측정되기 때문에 KR규격에는 요구되지 않고 있다. 하지만 SNCF 시험에서는 아래 표 4와 같이 측정하였다.

표 4

		시스템 수직 동적 탄성계수(kN/mm)	
		SNCF 시험	
피로시험 전	측정범위(kN) 5 - 60 (25 - 80)	56.6	

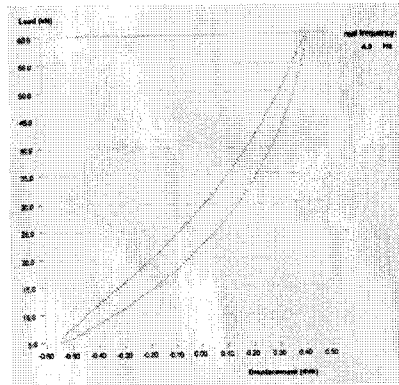
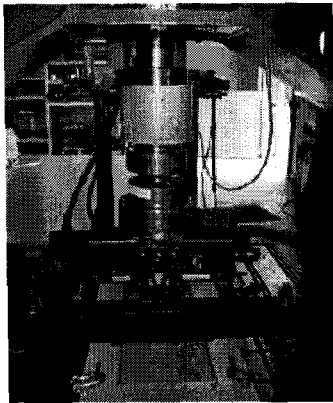


그림5 완성된 체결장치의 동적스프링계수 시험

2.2 궤도에서 실제 운행 조건하의 동적 탄성계수 예상

레일체결장치가 부설된 고속철도궤도에서 발생할 수 있는 동적차륜 하중을 측정하기 위해서는 실 운행조건인 경우에서의 동적 탄성계수 예상수치를 결정해야 한다.

▶ 예상된 동적 차륜하중

		동적 차륜 하중 예상치(kN)					
		300				350	
궤도 배치 (geometry)	속도 (km/h) 갠트 cant deficiency (mm)	0	100	130	150	0	80
좋은	$Q_{dyn}^{2\sigma}$	109.3	120.1	123.4	125.6	113.4	122.1
	Q_{dyn}^{max}	200.6	213.2	217.1	219.6	220.7	231.2
중간	$Q_{dyn}^{2\sigma}$	117.8	128.6	131.9	134.1	123.4	132.1
	Q_{dyn}^{max}	220.2	233.2	237.1	239.7	244.2	254.9
나쁨	$Q_{dyn}^{2\sigma}$	130.3	141.3	144.6	<u>146.8</u>	138.1	<u>146.9</u>
	Q_{dyn}^{max}	250.6	264.0	268.0	<u>270.7</u>	280.5	<u>291.6</u>

▶ 레일과 슬래브 상판(Slab deck) 저항 한계치

		차륜 하중 한계치 (kN)	
		레일	슬래브 상판(Slab deck)
$Q_{dyn}^{2\sigma}$ (피로)		178.6	220
Q_{dyn}^{max} (파단)		302.5	544

그러나 주어진 강도의 체결시스템 성능을 분석할 때, 동적 윤중은 최악의 캔트 부족량 (300km/h에서 130/150mm, 350km/h에서 80mm)으로 계산하였고 피로에 대한 동적 윤중 한계치를 2개의 표준편차 $Q_{dyn}^{3\sigma}$ (즉, 궤도상에서 초과되는 동적 윤중이 단지 2.25%인 경우)와 비교하였다. 이 동적 윤중 값은 통상적으로 체결시스템과 콘크리트 침목에 대한 피로 시험 하중을 결정할 때 사용된다. 이러한 종류의 시험에서는 최대 사인과 하중 (Sinusoidal force)을 가진 반복 하중이 궤도상의 실제하중분포보다 더 심하기 때문이다. 반대로, 레일에 작용하는 충격 Q_{dyn}^{max} 하에서 동적 윤중은 통계적인 수치로 추정되지 않지만, 주어진 레일 표면 각도에 대한 궤도 강도에 작용되는 스프링 하 질량의 실제적인 반응에 근거한다.

궤도의 강도 한계치를 결정하기 위하여 2개의 표준편차로 계산된 추정치는 매우 낮으며, 500kN/mm이상의 매우 높은 강도 값을 야기할 것이다. 이는 궤도상에서 이 값을 초과할 가능성이 2.25%로 너무 높기 때문이다. 3개의 표준편차에서 동적 윤중 추정치는 실제 궤도조건에서 더 실제적인데 이는 운행시 초과가능성이 0.135%에 불과하기 때문이다.

▶ 레일지지강성 산출

캔트부족량이 300km/h에서 85mm이고 350km/h에서 65mm(곡선반경이 7,000m인 경우 KTX 한계치 이상이지만 결과 값에 안전마진을 포함시킴)인 경우 동적 윤중 $Q_{dyn}^{3\sigma}$ 과 Q_{dyn}^{max} 이 레일의 피로 및 인장강도 한계치에 도달하는 경우 동적강도를 제한하는 변수를 계산하면 다음과 같다.

레일 피로와 인장강도 한계치가 주어진 조건에서 동적 강도를 제한하는 변수 (kN/mm)			
속도 (km/h)		300	350
캔트 부족량 (mm)		85	65
레일 피로 한계 $Q_{dyn}^{3\sigma} = 178.6 \text{ kN}$	저 품질 궤도	165	91
	중 품질 궤도	582	370
레일 인장강도 한계 $Q_{dyn}^{max} = 302.5 \text{ kN}$	저 품질 궤도	102	70
	중 품질 궤도	167	113

계산된 값으로 부터

-궤도와 레일표면 형상은 궤도의 동적 강도 요구조건에서 가장 중요하며 특히 350km/h 속도에서 더욱 중요하다. 이 경우 피로한계와 인장강도한계 요구조건은 100kN/mm 미만의 강도를 요구한다(이 값은 자갈궤도와 근접). 그러나 궤도 품질은 300km/h와 350km/h가 동등한 것으로 고려되고 자갈궤도에 근거하여 궤도 형상은 슬래브 궤도에서 더 양호한 조건으로 유지될 것이다 (자갈궤도의 중 품질 궤도 형상과 유사).

-모든 경우에, 레일의 인장강도 한계치의 경우에 최악의 조건에 도달하며, 이는 주로 레일 표면 결함에 좌우된다. 이러한 레일 결함은 자갈궤도 (레일 용접부 형상)와 슬래브 궤도가 거의 동일하다. 하지만 이런 결함은 국부적인 결함이며 궤도열화는 특정 지점으로 제한된다.

결론적으로 콘크리트 시스템이 제공하는 궤도 형상 품질은 비교적 양호하며, 레일 표면의 유지보수가 요구된다. 체결시스템의 지지강성은 300km/h 운행시 160kN/mm이고 350km/h 운행시 110N/mm에 도달하여도 안전에 대한 위험성은 없을 것이다.

2.2 운행시 레일패드 강도특성의 변화

시험 방법은 공인된 시험 절차를 통해 얻어진 결과를 토대로 한다. 패드 특성 변화에 관한 유일한 시험은 피로시험 전후의 정적 강도를 결정하는 것이며 이 경우 변화율은 25% 미만으로 한다.

피로시험 중 패드 강도의 변화율	
SNCF 시험	
패드에 직접 측정된 강도 변화율	+ 7.2%
피로시험 중 각 단계의 측정치 D_{RF} 로부터 추정된 최대 강도 변화율	+ 16.8%

예측모델은 패드의 정적 스프링정수 변화율 시험결과에 근거해야 한다.

아래와 같은 가정이 가능하다.

- 동일한 하중분포 하에서 동적 패드강도의 변화율은 정적 강도 변화율과 같다.
- 패드 강도의 변화율은 주기 횟수 (Number of cycle)와 선형관계가 있다.

$$\rho_{dyn}(N) = A \cdot N + \rho_{dyn}(0)$$

이 가정은 엄격한 것으로서, 일반적으로 이러한 고무 재료는 선형보다는 대수의 법칙 (Logarithmic law)에 가까운 변화율을 나타낸다. 패드 강도의 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(N) = \frac{\rho_{dyn}(N)}{\rho_{dyn}(0)} - 1 = \frac{A}{\rho_{dyn}(0)} N$$

시험하중하에서 3백만 주기의 시험 결과 값이 적용되므로:

$$v(3) = \frac{A \cdot 3 \cdot 10^6}{\rho_{dyn}(0)}$$

이로서 계수 A가 결정된다.

$$A = \frac{v(3) \rho_{dyn}(0)}{3 \cdot 10^6}$$

그리고

$$v(N) = \frac{v(3)}{3 \cdot 10^6} N \tag{1}$$

시험에 적용된 반복하중과는 다른 실제运行时 궤도 하중을 고려하여 다음과 같은 가정을 도출할 수 있다.

- 강도 특성의 변화는 1 주기 동안 적용되는 하중과 선형관계가 있다. 이 가정은 상당히 엄격한 것으로서 이는 재료의 열화가 종종 하중의 제곱 또는 3제곱 법칙을 따르기 때문이며 또한 실제 运行时의 하중이 시험하중보다 낮기 때문에 본 가정이 더 유리하다.
- 패드의 피로 법칙을 결정하기 위해 고려해야 하는 동적 하중은 2개의 표준편차에서의 추정치에 근거할 수 없다. 이 추정치는 피로의 최대값이며 2.25%에 도달하거나 초과한다. 표준편차 0.67(궤도에 적용되는 동적 운중의 75%에 해당)에서의 통계치가 유지될 것이다.
- 표준편차 0.67에서의 동적 운중은 궤도 동적 강도와 선형관계가 있다. 궤도 품질의 개별적인 조건, 속도, 켄트 부족량을 고려하여 다음과 같은 변화 법칙이 성립된다.

$$Q_{dyn}^{0.67\sigma} = B \cdot \rho_{dyn} + Q_0$$

다음과 같은 계수들을 적용

궤도 품질	보통 품질의 궤도				우수 품질의 궤도	
속도 (km/h)	300	300	350	350	300	350
켄트 부족량 (mm)	0	85	0	65	0	0
계수 B (mm)	0.0291	0.0291	0.0340	0.0340	0.0286	0.0334
계수 Q ₀ (kN)	94.454	103.490	96.030	102.940	91.689	92.804

-운행은 최대정적축하중 17톤인 TGV 열차로 이루어진다. 보기(Boggy) 하에서 궤도 침하(Settlement)는 양 축간에서 0으로 돌아오지 않는다. 그러므로 보기(Boggy) 하에서의 하중 주기는 1회의 전체 주기 및 최대 0.895회의 감소된 하중에서의 1 주기에 해당한다. 게다가, 실제 운행시 체결시스템은 전체 윤증이 아닌 침목 반응 (시험체와 같이)을 따른다. 고려된 궤도강도 값의 경우, 전체 윤증에 대한 침목 반응의 비율은 다소 일정하며 0.44로 나타난다.

파손 법칙(Damage law)을 선형으로 고려한 바와 같이, 피로시험조건에서의 1주기와 비교하여 1 Boggy에 의한 주기간 동등값(Equivalence)을 추정할 수 있다.

$$1 \text{ boggy cycle} \Rightarrow \frac{0.44Q_{\text{dyn}}(1+0.895)}{P_{\text{test}}}$$

여기서 P_{test} 는 피로시험에서 레일좌면과 수직 하중, $P_{\text{test}} = 58.42 \text{ kN}$, 또는 1 boggy cycle은 피로시험의 $kQ_{\text{dyn}}=1.4273 \cdot 10^{-2}Q_{\text{dyn}}$ 주기와 동일하다.

그러나 동적 강도는 시험 조건에서 주기 횟수 함수 (Function of the number of cycles)에 따라 실제 운행시 변화한다. 이 변화율은 상응하는 동등한 누적 교통 하중 주기를 증가시킨다.

$$N^{\text{test}} = \sum_1^n kQ_{\text{dyn}}^i = \sum_1^n k(B \cdot \rho_{\text{dyn}}^i + Q_0) = \sum_1^n k[B \cdot (A \cdot i + \rho_{\text{dyn}}(0)) + Q_0]$$

상기 공식은 쉽게 계산될 수 있으며 일부 조건을 무시하여 단순화 시킬 수 있다. 또한 상기 공식은 시험주기횟수에 상응하는 누적된 Boggy 주기횟수를 식으로 나타낼 수 있다.

$$N^{\text{test}} = N^{\text{boggy}} \cdot k \cdot (Q_0 + B \cdot \rho_{\text{dyn}}(0))$$

시험조건 하에서, 공식(1)로부터 다음이 나온다.

$$v(N^{\text{test}}) = \frac{v(3)}{3.10^6} N^{\text{test}} = \frac{v(3)}{3.10^6} N^{\text{boggy}} k \cdot (Q_0 + B \rho_{\text{dyn}}(0)) \quad (2)$$

상기 공식으로 누적된 Boggy 주기 횟수 N^{boggy} 에 대한 강도변화율 v 를 개략적으로 계산할 수 있다.

2.3 레일체결시스템에의 적용

본 적용은 일일 평균 110대의 KTX 열차를 토대로 하며, 이는 연간 923,450 Boggy 주기에 해당한다. 계수가 궤도 속도에 좌우될 경우 켄트 부족량과 강도는 다음과 같이 계산한다.

$$C_v = k(Q_0 + B \cdot \rho_{\text{dyn}}(0))$$

열차운행 누적 연수는

$$Y_T = \frac{N_{boggie}}{923,450}$$

상기 공식은 아래와 같이 표현된다.

$$Y_T = 3.2487 \cdot \frac{v(Y_T)}{C_v \cdot v(3)}$$

이 공식을 이용하여 주어진 궤도강도의 최대 변화율에 대한 수명을 계산할 수 있으며 역으로 주어진 운행 기간에 대한 궤도강도의 변화율을 구할 수 있다.

시험한 체결시스템을 고려 시 피로시험 전의 동적 강도에 대하여 SNCF에서 측정(전체 시스템에 대하여)한 값을 사용할 수 있다. $P_{dyn}(0) = 56.6 \text{ kN/mm}$, 또한 피로시험 하에서의 강도 변화율의 경우 정적 강도보다 동적 강도가 더 크게 증가할 수 있기 때문에 SNCF의 값보다 약간 높은 값을 유지할 수도 있다

따라서 궤도 강도의 변화율은 일정기간 동안의 누적 운행을 기준으로 하며 또한 역으로 주어진 변화율에 도달하는 누적 운행의 기간을 기준으로 할 수 있다.

패드 특성의 품질저하 평가							
궤도 품질		보통				우수	
속도 (km/h)		300	300	350	350	300	350
캔트 부족량 (mm) (직선궤도)		0	85	0	65	0	0
계수	Q ₀ (kN)	94.454	103.490	96.030	102.940	91.689	92.804
	B (mm)	0.0291	0.0291	0.0340	0.0340	0.0286	0.0334
	C _v	1.372	1.501	1.398	1.497	1.332	1.352
상기 조건에서 주어진 누적 운행 기간에서의 강도 변화율 추정치(%)							
누적운행 기간 (년수)	3	10.1	11.1	10.3	11.1	9.8	10.0
	4	13.5	14.8	13.8	14.7	13.1	13.3
	5	16.9	18.5	17.2	18.4	16.4	16.6
	6	20.3	22.2	20.7	22.1	19.7	20.0
	7	23.6	25.9	24.1	25.8	23.0	23.3
	8	27.0	29.6	27.5	29.5	26.2	26.6
	9	30.4	33.3	31.0	33.2	29.5	30.0
10	33.8	37.0	34.4	36.9	32.8	33.3	
상기 조건에서 주어진 체결구 강도 변화율에도달한 후 누적된 운행 기간 추정치(Year ; 상기 조건 적용)							
강도 변화 한계치	10 %	2.96	2.71	2.91	2.71	3.05	3.00
	15 %	4.44	4.06	4.36	4.07	4.57	4.51
	20 %	5.92	5.41	5.81	5.43	6.10	6.00
	25 %	7.40	6.77	7.26	6.78	7.62	7.51
	40 %	11.84	10.83	11.62	10.85	12.20	12.02

탄성 패드의 수명은 우수한 품질의 궤도와 직선 궤도에서 더 길다는 것은 놀라운 일이 아니다. 5년의 기간의 경우 패드 강도의 변화율은 16.4% (300km/h, 직선구간 우수한 품질의 궤도, 슬래브궤도 구간인 경우)와 18.5%(300km/h, 85mm의 캔트부족량을 가진 곡선 구간, KTX와 다른 구간의 경우)사이의 범위로 산출되었다. 이 수치들은 궤도거동에 주요한 변화를 야기하지 않을 것이기 때문에 수용될 수 있으며 상응하는 동적 강도의 범위는 65.88 ~ 67.07kN/mm가 될 것이다. 피로시험의 한계치로 간주되는 변화율 25%는 7.62 ~ 6.77년의 운행기간에 해당할 것이다. 그러나

이 한계치는 피로시험 결과에만 적용되므로 이러한 관점에서 제한된 성능을 가진 시스템은 실제 운행시 단기간 후에 한계치를 초과할 것이지만 운행상 수용 가능한 것으로 간주할 수 있다. 변화율 40%에 대한 동적 강도는 79.24kN/m로서 수용 가능하다. 이 수치는 유도상궤도의 동적강도보다 낮고 일일(궤도 당) 110대의 열차 운행 하에서 실제 운행시 10.5년 이상의 수명을 제공할 것이다.

만일 5년의 운행기간 후에 조정이 이루어진다면 강도 변화율이 20%로 설정되어야 하며 패드가 햇빛 또는 습기와 같은 외부 요인으로부터 잘 보호된다 하더라도 패드 외부환경이 품질 저하에 기여한다는 것에 주목해야 한다. 가능하다면 실제 부설된 패드와 같은 로트로 같은 기간 동안 양호한 상태에서 보관된 패드와의 비교가 이루어져야 한다. 이는 다른 시험방법 또는 절차로 인해 발생할 수 있는 차이점을 피하기 위한 것이다. 또한 다른 상황에서 채취된 패드를 이용하여 시험을 수행할 수 있다. 직선선형과 최대 캔트부족량을 가진 곡선구간, 그리고, 가능하다면 덜 심한 환경(터널 구간)에 부설된 패드를 이용하여 외부조건 영향의 영향을 측정할 수 있다.

상기 방법에서 추정 수명 Y_T 는 다음 사항에 의해 좌우된다.

- C_v 계수 이것은 대략 Q_0 에 비례하며 k 계수가 작기 때문에 최초강도 $p_{dyn}(0)$ 를 포함한 조건에서 단지 경미한 정정이 이루어진다.

- 3백만 주기 시험 후에 측정된 변화율 $\alpha(3)$ 이것이 가장 중요한 인자이다.

동적 윤중 Q_0 을 통한 계산 방법은 궤도 형상 품질 영향을 제시하며, 이는 결합지점의 최대 한계치에 미치는 영향과 비교하여 그다지 중요한 사항이 아니다.

명백히 말해서 최초 강도 $p_{dyn}(0)$ 을 통해서 나타나는 시스템의 동적 강도도 그리 중요한 요소가 아니다. 실제로, 이 강도는 결과 값에 영향을 주는데 이는 3백만 주기의 시험 후 측정된 변화율 $\alpha(3)$ 이 최초 강도에 의해 좌우되기 때문이며 패드의 변형이 클수록 탄성 재료의 빠른 변화를 야기할 것이다. 엄밀히 말하면, 이러한 영향은 패드의 변형률(패드두께의 탄성변형률)에 의해 좌우되며 실제 변형에 의해서만 좌우되지 않는다. 그러나 같은 두께의 패드의 경우 유연한 패드가 더 높은 품질저하를 나타낼 것이다.

탄성재료에 미치는 손상 영향이 하중 하에서 변형과 비례한다고 가정하면 일정 기간의 운행 이후의 강도 변화율은 최초 강도 값과 반비례할 것이다. 또한 역으로 탄성패드의 수명은 최초 강도와 비례할 것이다. 계수 2에 의한 체결 강도의 감소는 동 계수만큼 패드의 수명을 감소시킬 것이다.

따라서 낮은 강도 값이 동적 윤중과 레일 및 콘크리트 침목과 같은 궤도 구성요소의 손상을 감소시킨다면 이것은 탄성 구성요소 자체의 위험성 증가의 결과로 볼 수 있다.

3. 결론

레일체결시스템의 성능시험 결과(피로시험, 완성된 수직동적탄성계수등)를 분석하여 최적 강도에 관한 일반적인 결론은 다음과 같다.

- 40%의 강도 증가는 운행 조건에서 수용 가능하다.

- 패드의 최대 동적 강도는 90 ~ 110kN/mm의 범위여야 한다.

- 신규 패드의 최대 최초 동적 강도는 같은 운행 조건하에서 64 ~ 79kN/mm가 되어야 한다.

- 동적 궤도강도 56.6kN/mm가 3백만 주기에서 8%의 강도 변화율을 나타내고 KTX 노선에서 8년의 운행 후에 30%의 변화율 (레일 수명의 절반)을 나타내는 것을 고려하면 42.5kN/mm의 최초 동적 강도를 가진 시스템의 경우 동일한 8년 주기 동안 40%의 변화율 한계에 도달할 것이다. 이것은 3백만 주기의 피로시험 이후의 변화율 10.7%에 해당한다.

-만일 좀 더 빈번한 탄성패드의 교체가 허용된다면 (예를 들어, 레일교체 중간에 1회가 아닌 2회) 최초 동적 강도는 계수 1.5에 의해 28.3kN/mm로 낮아질 수 있다. 이것은 피로시험 이후의 변화율 16%에 해당한다.

-만일 동적 강도와 정적 강도간 비율이 $54.3/40.5 = 1.34$ 로 허용된다면 (SNCF 결과값) 상기 고려사항으로부터 아래와 같은 정적 강도 값이 추천된다.

-최대값 : 47.7 ~ 58.9 kN/mm

-최소값 : 31.7kN/mm (21.1kN/mm로 감소될 수 있지만 궤도의 탄성 구성품을 더 빈번하게 교체해야 한다)

상기 값들은 KR시방서에 패드의 정적수직 스프링정수에 대한 요구조건으로 명시된 20 ~ 50 kN/mm 범위와 일치한다.

레일패드의 강도변화와 내구성예측은 재료자체의 노화시험 및 피로시험등을 시행하여 좀더 정확하게 예측할 필요가 있고 또한 현장시공시에 철저한 품질관리등이 시행되어야 양호한 품질과 내구성이 확보될 것이다.

본 내용은 경부고속철도 2단계 구간(대구~경주~부산)의 궤도설시설계시 국내의 자료와 SNCF 및 KIMM시험결과 및 Systra 검토보고서입니다.

참고문헌

1. KHRC “체결구 성능시방서(2002. 4. 19)” 2554/APA/KR/164-02/FL
2. KIMM(한국기계기술연구원)이 발행한 No. BS1765-1180에 대한 시험결과 보고서(2005.5.)
3. KHRC “체결구 성능시방서(2002. 4. 19)” 2554/APA/KR/164-02/FL에 따른 Pandrol 시스템 No. 12408의 인증시험에 관한 SNCF 보고서(2006년 7월 7일자)
4. SYSTRA의 보고서(2006년 8월 21일자) “고속철도 슬래브궤도용 체결시스템 분석”
무도상궤도 RHEDA 2000에서 UM 71 궤도회로의 효율성 (무도상궤도 Rheda 2000에서 UM 궤도회로의 효율성 조사, Pfleiderer AG와 Ansaldo Signal - CSEE Transport)
5. UIC Infrastructure Commission 2002년 3월의 "무도상궤도"의 적용성연구
6. KHRC의 2002년 4월 19일자 "체결장치 성능 시방서" 2554/APA/KR/164-02/FL 참조
7. RFI(이탈리아 FS 그룹) “무도상궤도의 이용에 대한 지침서”, 2006년 1월 30일
8. ITALCERTIFER(Italian Institute of railway research an certification)의 체결시스템 Pandrol Fastclip FC 1507에 관한 시험보고서
9. 유럽기준 EN 13146-4-2002
레일체결시스템의 장기 성능을 평가하는 실험실 시험방법에 대한 규정
10. 유럽기준 EN 13481-5-2002
무도상궤도에 적용되는 체결시스템의 성능시방규정