고속철도 레일 표면 결함 관리기준에 관한 연구

Investigation of the Maintenance Criteria for the Rail Surface Defects in High-Speed Railways

양신추¹ · 장승엽[†]

Sin Chu Yang · Seung Yup Jang

Abstract The rail surface defects can cause the high impact load on the track and lead to the progress of the rail fatigue damage and the rail break. In case of the rail break, there is a great deal of risk for derailment, and thus the maintenance criteria for the rail surface defects are of great importance. In this study, using the dynamic train-track interaction analysis program, the impact wheel loads and rail bending stresses according to the depths of the surface defects have been calculated with the input data of the rail surface irregularities measured at 43 spots with surface defects in the ballasted track of high-speed railway. Considering the irregularity of track geometry, the allowable limits of wheel load and rail bending stress have been set, and the maintenance criteria for the rail surface defects was suggested by analyzing the relationship of the maximum values of wheel load and rail bending stress versus depth and width of rail surface defect. The analysis results suggest that the allowable depth of the surface defect is determined approximately 0.2mm from the limit of the impact wheel load.

Keywords : rail surface defects, impact wheel load, track, high-speed railway, track irregularity

초 록 레일 표면 결함이 발생할 경우 매우 높은 충격하중이 발생하여 레일 피로 진전 또는 레일 파단에 이를 수 있고 레일이 파단될 경우 열차탈선 등 대형 사고가 발생할 수 있으므로 레일 결함부에 대한 관리기준의 정립이 매우 중요하다. 본 연구에서는 차량-궤도 동적 상호작용 해석 프로그램을 이용하여, 실제 고속철도 자갈궤도에서 결함이 발생한 43개 지점에서 측정된 레일요철을 입력값으로 하여, 요철 깊이에 따른 충격 윤중과 레일 휨응력을 산정하였다. 궤도틀림을 감안하여 윤중 및 레일 휨응력의 한계값을 설정하고, 해석결과로부터 얻은 윤중 및 레일 휨응력 최대값과 결함 깊이 및 폭과의 상관관계를 분석함으로써 레일 표면 결함부에 대한 관리기준을 제시하였다. 분석 결과, 허용할 수 있는 요철 깊이는 충격 윤중에 의하여 발생할 수 있는 레일 두부의 소성 변형을 방지하기 위하여 관리되어야 하며, 엄격한 조건을 평가할 경우 그 값은 0.2mm 정도가 적당함을 알 수 있었다.

주요어 : 레일 표면 결함, 충격 윤중, 자갈궤도, 고속철도, 궤도틀림

1. 서 론

고속철도 궤도에서는 차량과 레일의 주접점(rolling contact) 시 부등마모(differential wear)나 부등 소성변형(differential plastic deformation)에 의해 발생하는 스쿼트(squat), 유지보수작업 또는 열차풍 등에 의하여 미소 자갈 입자가 레일 표면에 놓인 경우 열차가 그 상부를 지나갈 때 발생하는 자갈 임프린트(ballast imprint) 등과 같은 다양한 레일 표면 결함(rail surface defects)이 발생한다[1-2]. 이와 같은 레일 표면 결함이 발생할 경우 매우 높은 충격하중이 발생하여 레일 피로 진전 또는 레일 파단에 이를 수 있기 때문에 일정 크기 이상의 결함은 즉시 보수하여야 한다. 경

부고속철도 선로 점검차의 검측 결과에 대한 불량개소 판단 기준에 의하면 표면 결함 면적에 관계없이 결함 깊이가 0.3mm 이상인 경우에는 보수계획 수립에 반영하여 적기에 조치토록 하고 있다[3]. 그러나 이 지침은 국외 기준을 준용한 것이어서 국내 고속철도 선로 및 운영조건에 적합한지를 원점에서 검토하여 국내 고속철도 운영실정에 맞는 레일 결함부에 대한 관리기준을 재정립할 필요가 있다.

본 연구에서는 고속철도 자갈궤도의 레일 표면 결함 발생 지점에서 레일 표면의 요철(rail surface roughness)을 정밀하게 측정된 후 이 측정값을 입력값으로 하여 차량/궤도 상호작용 해석을 통해 충격 윤중 변동과 레일 휨응력을 산정하였다. 궤도틀림을 감안하여 윤중 및 레일 휨응력의 한계값을 설정하고, 해석 결과로부터 얻은 윤중 및 레일 휨응력 최대값과 결함 깊이 및 폭과의 상관관계를 분석함으로써 레일 표면 결함부의 유형에 따른 요철 깊이 관리기준을 제시하였다.

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 신교통연구본부
E-mail : syjang@krti.re.kr

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부

2. 레일 표면 요철을 고려한 차량/궤도 상호작용 해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 해석에 사용된 차량과 궤도의 수직방향 상호작용 해석모델을 나타낸다[4-5]. 차량 서브모델(sub-model)은 차체와 2개의 대차, 그리고 4개의 윤축(wheel-set)으로 구성되며, 이들은 각각 강체운동을 하는 것으로 가정하여 질점(lumped mass)으로 모델링하며, 차체와 대차를 연결하는 2차 현수장치와 대차와 윤축을 연결하는 1차 현수장치는 스프링과 감쇠 요소(damping element)로 모델링한다. 차량은 수직운동만 하는 것으로 가정하여 10개의 자유도 시스템으로 나타낸다. 이 경우 차량 시스템의 강성, 감쇠, 그리고 질량 행렬은 문헌[6-7]에서 제시한 것과 같은 방법으로 구성할 수 있다.

궤도 서브모델은 자갈궤도의 레일, 레일체결장치, 침목, 도상자갈(ballast), 그리고 노반이 다층(multi-layers)으로 배열된 것으로 하고 최상부층을 구성하는 레일은 Timoshenko 연속체로 모형화하였으며, 하부의 레일체결장치 및 패드는 질점, 선형스프링(linear spring) 및 댐퍼(damper)로, 침목은 질점(mass)으로만 모형화하였다. 도상자갈은 문헌[8]에서 제시한 상층자갈-하층자갈 피라미드 모형을 적용하였다. 따라서 상부의 자갈층과 하부의 자갈층을 각각의 질점, 선형스프링, 그리고 감쇠로 나타낼 수 있다. 이들 층에서 인접 블록(block) 사이의 상대변위에 따른 간섭(coupling) 효과는 블록을 연결하는 점탄성 요소로 나타내며, 스프링 및 감쇠 계수는 수직방향 값의 30%를 적용한다. 차륜과 레일 사이의 접촉에 의한 상호작용은 비선형 헤르츠 스프링(nonlinear Hertzian spring)으로 모형화하였다.

본 연구에서 적용한 해석기법에서는 레일의 주행면(rail running surface)과 차륜 답면(wheel tread)이 헤르츠 스프링(Hertzian)에 의해 1점 접촉하는 것으로 가정하기 때문에 Table 2의 해석결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 차륜 답면이 레일의 요철 깊이까지 접촉하는 경우에만 유효하다. 이

Fig. 2 Critical depth of defect that wheel tread surface contacts the rail surface

때 차륜 답면이 요철부 레일 표면과 접촉할 수 있는 임계 요철 깊이(critical depth)는 요철 형상을 원형으로 가정할 때 아래와 같이 차륜 반경과 요철 폭에 따라 구할 수 있다.

$$h_{\max} = r - \sqrt{r^2 - (b/2)^2} \quad (1)$$

여기서, $h_{\max}$ 는 차륜과 레일의 접촉이 가능한 임계 요철 깊이(mm), r 는 차륜 반경(mm), b 는 요철 폭(mm)을 나타낸다.

고속철도 자갈궤도에서 차량궤도 상호작용해석에 필요한 차량 및 궤도의 입력자료는 Table 1에 나타난 바와 같다. 차량의 물성 및 제원은 KTX차량을 대상으로 한 것이며, 궤도의 물성 및 제원은 경부고속철도 1단계 구간에 부설된 자갈궤도를 대상으로 도출 및 평가된 것이다.

Table 2에 나타난 바와 같이 차륜 반경 450mm에 대해 모든 경우에 요철 깊이는 한계 요철 깊이 이내에 있으므로 레일면은 차륜 답면과 접촉한다는 가정이 유효함을 알 수 있다. 또한 레일 결함부에서는 차륜과 레일의 접촉 패치(patch)의 면적이 달라지므로 정상구간과는 헤르츠 상수(Hertzian constant)가 달라지게 되지만, 헤르츠 상수는 궤도 강성에 비하여 매우 크므로 헤르츠 상수의 변화가 전체 차량과 궤도의 상호작용에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상되어 레일 결함부에서도 정상 구간과 동일한 값으로 가정하였다.

Fig. 1 Train-track vertical dynamic interaction analysis model

Table 1 Input parameters for train and track

Input parameters	Symbol	Unit	Input values
<i>Vehicle sub-system</i> [9]			
Wagon body mass (loaded)	M_c	t	27.48
Wagon mass moment of inertia about Y axis	J_c	t·m ²	565.95
Bogie mass	M_b	t	1.210
Bogie mass moment of inertia about Y axis	J_b	t·m ²	1.297
Secondary suspension stiffness	K_{sc}	kN/m	1.268×10^3
Secondary suspension damping	C_{sc}	kN · s/m	28.5
Primary suspension stiffness	K_{pr}	kN/m	1.252×10^3
Primary suspension damping	C_{pr}	kN · s/m	16.0
Distance between two bogie Y-direction centerline	L_c	m	14.0
Wheelset base	L_W	m	3.0
Wheel radius	r	m	0.43
<i>Track sub-system</i> [10-11]			
Rail mass per meter	m_r	t/m	60.3×10^{-3}
Rail cross-section area	A_r	m ²	7.687×10^{-3}
Elastic modulus of rail	E_r	kN/m ²	2.10×10^8
Poisson's ratio of rail	G_r	-	0.3
Rail second moment of area	I_r	m ⁴	3.055×10^{-5}
Rail profile radius on top	R	m	0.3
Timoshenko shear coefficient	k	-	0.34
Rail pad damping coefficient	C_p	kN · s/m	100.0
Rail pad stiffness	K_p	kN/mm	250.0
Sleeper spacing	S_l	m	0.6
Sleeper mass	m_s	t	0.14
Sleeper damping	C_s	kN · s/m	300.0
Sleeper stiffness	K_s	kN/mm	326.6
Effective length of sleeper	L_s	m	2.6
Effective width of sleeper	B_s	m	0.27
Ballast height	H_b	m	0.35
Unit weight of ballast		t/m ³	2.0
Elastic modulus of ballast	E_b	MN/m ²	200.0
Elastic modulus of subgrade	$E_f=K_{30}$	MN/m ³	100.0
Damping coefficient of subgrade		kN · s/m	100.0
Ballast stress distribution angle	α	°	35
Ratio of vertical and horizontal stiffness		-	0.3

2.2 레일 표면 요철 측정

레일 표면 요철의 측정은 경부고속철도 1단계 구간(광명~대구)의 자갈궤도구간 43개소에서 이루어졌으며 측정 데이터를 분석한 결과, 레일 표면 요철의 전체적인 형상에 따라 아래로 오목한 경우(Type 1, Fig. 3(a))와 요철이 대체로 평평한 경우(Type 2, Fig. 3(b)), 그리고 요철이 위로 볼록한 경우(Type 3, Fig. 3(c))로 크게 3개 그룹으로 분류될 수 있는

것으로 나타났다. 전체 측정개소에서 Type 1에 속한 경우는 24개소, Type 2에 속한 경우는 9개소, Type 3에 속한 경우는 10 개소였다(Table 2 참조). Type 1의 개소가 Type 2, 3의 개소보다 많은 이유는 결함개소의 충격 윤증으로 레일표면이 아래로 소성변형이 발생하는 경우가 많기 때문으로 판단된다.

Table 2 Maximum values of wheel load and rail bottom bending stress according to depth and width of rail surface defect

Type	Site No.	Depth of surface defect (mm)	Width of surface defect (mm)	Critical depth of surface defect (mm)	Analytic results	
					Wheel load (kN)	Rail bottom bending stress (MPa)
1	1-8	0.0673	35	0.3404	144.4608	50.94248
	1-9	0.0659	35	0.3404	140.0703	49.89941
	1-11	0.2683	90	2.2557	281.2005	80.15456
	1-12	0.2396	55	0.8411	289.2818	81.99318
	1-14	0.2528	65	1.1751	270.6381	79.74755
	site 1	0.0444	50	0.695	116.7303	46.04914
	2-1	0.0310	40	0.4447	105.7052	45.9646
	2-2	0.0316	40	0.4447	105.8076	45.99662
	2-3	0.0495	45	0.5629	118.3463	46.35705
	2-5	0.0515	45	0.5629	121.2547	46.03983
	2-6	0.1946	85	2.0114	203.4795	66.7956
	2-7	0.1945	80	1.7813	202.4155	67.22544
	2-8	0.0904	35	0.3404	176.5461	59.27835
	2-9	0.0910	35	0.3404	180.8057	59.89565
	2-10	0.0471	40	0.4447	110.7538	51.75958
	2-11	0.0423	30	0.2501	110.861	51.4614
	2-14	0.2213	60	1.0011	263.5249	75.53175
	2-15	0.1981	60	1.0011	262.8611	74.82843
	2-22	0.1450	45	0.5629	196.4567	65.83628
	2-23	0.1489	50	0.695	201.8221	65.90157
	2-24	0.1958	55	0.8411	244.5949	72.77684
	2-25	0.1948	55	0.8411	244.8547	72.76157
	2-34	0.2934	60	1.0011	338.5071	88.30289
	2-35	0.2875	60	1.0011	334.8474	88.75024
2	1-1	0.1294	55	0.8411	215.1602	65.172
	1-10	0.1065	40	0.4447	182.7143	57.09735
	1-15	0.3572	50	0.695	416.1718	101.7455
	1-16	0.3611	55	0.8411	403.4454	98.08562
	2-16	0.0644	35	0.3404	158.631	53.90994
	2-17	0.0794	40	0.4447	159.1835	54.32766
	2-18	0.0501	35	0.3404	127.9336	47.1357
	2-32	0.2272	50	0.695	282.5614	79.8239
	2-33	0.2246	55	0.8411	283.2267	80.00362
3	1-13	0.0549	30	0.2501	147.7321	50.09817
	2-12	0.2891	50	0.695	361.3391	88.15004
	2-13	0.2888	45	0.5629	361.0337	88.06548
	2-20	0.0790	35	0.3404	163.5265	53.38581
	2-21	0.0827	40	0.4447	165.7972	53.75832
	2-26	0.3267	65	1.1751	369.8443	93.79782
	2-28	0.1311	35	0.3404	204.1257	61.95754
	2-29	0.1295	30	0.2501	211.9376	62.58071
	2-30	0.2484	50	0.695	292.1944	79.61999
	2-31	0.2275	40	0.4447	288.3539	79.00131

b : width of rail surface defect, h : depth of rail surface defect

Fig. 3 Types of defects according to rail surface irregularity profile

3. 해석결과 및 분석

3.1 윤중 및 레일 휨응력 해석결과

Fig. 4는 각각 Type 1, 2, 3 요철 유형에 대하여 요철 형상(profile)과 요철 깊이 및 폭을 입력자료로 하여 해석을 통해 얻은 결과로, KTX 열차가 300km/h 속도로 주행할 때 윤중 및 레일 응력과 이들의 최대값을 나타낸 것이다. Table 2는 43개 측정개소의 요철 폭과 깊이에 따른 윤중 및 레일 저부 휨응력의 해석결과 최대값을 나타낸 것이다. 이들 결

과로부터 용접부에서 윤중과 레일 응력의 발생 파형은 요철 형상이 아래로 오목한 경우(Type I), 평평한 경우(Type II), 위로 볼록한 경우(Type III)에 관계없이 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 윤중 및 레일응력의 최대값은 용접부를 중심으로 한 넓은 범위의 장파장 요철보다는 용접부 직상부에 발생하는 단파장 요철의 깊이에 직접적으로 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 용접부의 요철관리는 용접부 직상부에서 발생하는 단파장 요철을 적정 수준 이하로 관리하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

Fig. 4 Analytic results according to types of defect

Fig. 4 Continued

Fig. 5 Correlation between width and depth of rail surface defect

Fig. 6 Wheel load and rail bottom bending stress according to depth of rail surface defect

Fig. 7 Wheel load and rail bottom bending stress according to width of rail surface defect

Table 3 Correlation of rail surface defect depth with wheel load and rail bottom bending stress

(a) Wheel load				
	A	B	R ²	Standard deviation
Total	83.4605	864.9714	0.9803	17.5264
Type 1	82.2166	810.2557	0.9767	16.4971
Type 2	91.5656	878.1406	0.9971	8.6880
Type 3	95.2195	868.6489	0.9931	11.0296
(b) Rail bottom bending stress				
	A	B	R ²	Standard deviation
Total	41.1649	161.0433	0.9897	2.3451
Type 1	41.4719	156.3642	0.9822	2.7701
Type 2	41.5051	164.8574	0.9948	2.1690
Type 3	40.8370	162.5909	0.9989	0.8012

한편 레일 표면 요철의 깊이와 폭의 상관관계를 나타낸 Fig. 5로부터 결함이 발생할 경우 요철의 폭과 깊이는 다소의 상관관계는 있지만 그 상관성은 높지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 각각 요철 깊이와 폭에 따른 윤중 변동 및 레일 저부 휨응력의 최대값과 선형회귀식을 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 결함 발생개소에서 매우 큰 윤중 및 레일 저부 휨응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 윤중 변동과 레일 저부 휨응력은 요철 폭 보다는 요철 깊이와 매우 강한 상관관계가 있으며, 아래와 같은 직선식으로 회귀식을 도출할 수 있음을 알 수 있다.

$$Y = A + Bx \quad (2)$$

Table 3은 해석으로부터 얻은 윤중 및 레일 저부 휨응력 최대값의 선형 회귀 파라메타를 나타낸 것이다. 이들 결과

로부터 윤중 및 레일 저부 휨응력 모두 요철 형상에 관계없이 결정계수가 97.6% 이상으로 회귀식을 식(2)와 같은 직선식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)에서 레일 저부 휨응력은 결함 발생개소의 요철 형상(결함 유형)에 따라 변동폭이 크지 않지만, Fig. 6(a)에서 결함 발생개소의 요철 형상이 아래로 오목한 경우(Type 1)보다 평평하거나(Type 2) 위로 볼록한 경우(Type 3)의 윤중이 비교적 크게 발생함을 알 수 있다.

3.2 한계 충격 윤중 및 휨응력을 고려한 요철 깊이 한계값 산정

Esveld[12]에 따르면 충격하중 발생 시 레일 두부에서 발생하는 소성 전단변형을 방지하기 위한 허용 윤중은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$Q_a = 8.3 \times 10^{-7} r \sigma_f^2 \quad (3)$$

여기서, Q_a 는 허용 윤중(kN), r 은 차륜 반경(mm), 그리고 σ_f 는 레일 강재의 인장강도(N/mm²)를 나타낸다.

KTX 차륜이 일반적으로 마모된 경우 반경을 450mm 정도로 가정하면, UIC 60 레일의 인장강도는 900N/mm² 이므로 차륜과 레일이 접촉력에 대한 허용 윤중은 약 302.1kN 정도가 된다.

한편 레일의 휨 피로파괴 방지를 위한 UIC60 레일의 허용 휨응력(전진폭)은 220MPa 정도로 볼 수 있다[12]. 여기서 횡압에 의해 작용하는 응력을 최대 60MPa로 가정하고, 편진폭율을 0.8로 보면[13], 실제 허용 응력은 $0.8 \times (220 - 60) = 128\text{MPa}$ 이 된다

앞서 결함개소 해석결과는 케도틀림(고저틀림)이 고려되지 않았기 때문에 실제보다는 윤중 및 레일응력이 다소 과소평가한 값들이라고 할 수 있다. 따라서 정확한 평가를 위해서는 결함이 없는 일반개소에서 고저틀림에 따른 윤중 및 레일 저부 휨응력이 부가되어야 할 것이다.

고저틀림에 따른 윤중 및 레일 저부 휨응력을 산정하기 위해서는 대상 선로의 고저틀림 크기를 정확히 반영하는 것이

Fig. 8 Vertical track irregularity PSD at short and long wavelength range

매우 중요하다. 국내에서는 0.15~3m 이내의 단파장 궤도틀림을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 장비가 구비되어 있지 않은 실정이다. 따라서 경부고속철도 자갈궤도구간에서 측정된 장파장 고저틀림(3~50m)[14]은 그대로 사용하되 단파장 고저틀림은 독일고속철도에서 측정된 데이터(파장 ≤ 7m)[15]

를 사용하였다. Fig. 8은 단파장 및 장파장 대역에서의 합성 PSD를 나타낸다.

고저틀림에 의해 발생하는 윤증과 레일 휨응력을 산정하기 위하여 주파수영역에서의 차량/궤도 상호작용해석 기법을 적용하였다. 주파수영역 차량-궤도 상호작용 해석은 문헌[14,18]에서 제시한 방법에 의하여 수행하였다. 해석 모델은 2.1절에서 제시한 시계열 해석 모델과 동일하나 차량과 레일 사이의 헤르츠(Hertzian) 접촉 스프링은 시계열에서 사용한 비선형 스프링과 달리 선형 스프링으로 모델링한다. Fig. 9는 Table 1의 차량 및 궤도 제원을 이용하여 KTX 열차와 자갈궤도의 주파수 영역 상호작용 해석을 통하여 얻은 윤증 및 레일 저부 휨응력의 표준편차를 나타낸 결과이다. 이들 결과로부터 윤증 표준편차의 최대값은 레일패드강성이 600kN/mm일 때 18.1kN이고 레일 저부 휨응력 표준편차의 최대값은 레일패드강성이 125kN/mm일 때 9.0MPa이다. 따라서 결함 발생 지점에서 레일 표면 결함의 영향을 제외한 일반적인 고저틀림에 의해 추가될 수 있는 윤증 및 레일 저부 휨응력의 동적 증분은 일반 구간에서의 누적빈도 97.5%에 대응하는 크기로 가정하여 2×표준편차(2σ)를 적용하면 각각 36.2kN 및 18.0MPa가 된다. 그러므로 레일 표면 결함에 의하여 허용될 수 있는 윤증 및 레일 저부 휨응력은 265.9kN과 110.0MPa가 된다.

Fig. 9 Standard deviation of wheel load and rail bottom bending stress due to vertical track irregularity according to rail pad stiffness

Fig. 10 Allowable limit for depth of rail surface defects

Table 4 Present guidelines for maintenance of rail surface defect in Korea [3]

Items	Guidelines for maintenance according to inspection results				Inspection period
	Depth of defects h (mm)	Area of defects A_d (mm ²)			
		$100 < A_d \leq 250$	$250 < A_d \leq 400$	$400 < A_d$	
Rail surface defects	$0.1 \leq h < 0.2$	C1	C1	C2	Monthly
	$0.2 \leq h < 0.3$	C1	C2	C2	
	$0.3 \leq h$	C3	C3	C3	

Note) C1: Step for maintenance with caution – to perform inspection with the periodic inspection plan

C2: Step for maintenance with special attention – to perform periodic inspection and additional frequent inspection when available

C3: Step for maintenance with repair plan – to perform repair in time with the repair plan

Table 3(a)에서 윤중이 가장 크게 예측되는 Type 3 유형의 결함이 발생할 경우 허용 윤중에 대응하는 요철 깊이는 0.2mm이며, 표 3(b)에서 레일 휨응력이 가장 크게 예측되는 Type 2 유형의 결함이 발생할 경우 허용 레일 휨응력에 대응하는 요철 깊이는 0.43mm가 된다(Fig. 10 참조). 따라서 허용할 수 있는 요철 깊이는 한계 충격 윤중으로부터 결정되며, 그 값은 0.2mm 정도임을 알 수 있다. 이 기준값은 열악한 개소의 궤도틀림이 고려되었고, 윤중이 가장 크게 발생하는 Type 2를 대상으로 하였으므로 어느 정도 안전측으로 유도되었다고 판단된다. 또한 해석에서는 자갈궤도만을 대상으로 하였으나, 일반적으로 자갈궤도가 콘크리트궤도에 비해 상대적으로 더 열악한 조건이 되므로 보수적인 관점에서 콘크리트궤도에도 이 기준을 동일하게 적용할 수 있다고 판단된다.

현재 국내의 레일 표면 결함 관리 기준은 Table 4에 나타난 바와 같다. 이 기준은 프랑스의 기준을 준용한 것으로 알려져 있으나 그 근거는 정확히 알려져 있지 않다. 보다 이론적 근거가 명확한 본 연구의 결과를 적용하면 요철의 면적보다는 요철의 깊이를 관리하는 것이 더 중요하며, 요철 깊이가 0.2mm 이상인 경우 레일표면에 소성변형의 발생이 시작하는 단계이므로 “보수계획 수립에 반영하여 적기 조치”하는 수준으로 관리지침을 정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 레일 표면에 발생한 자갈 임프린트, 스쿼트 등의 결함이 궤도에 미치는 영향을 차량과 궤도의 상호작용 해석을 수행함으로써 분석하였다. 경부고속철도 1단계 구간인 궤도구조 및 궤도관리 조건과 차량 및 운영조건을 토대로 도출된 입력자료를 사용하였으며, 해석은 경부고속철도 1단계 자갈궤도구간의 표면 결함부에서 측정된 43개 개소의 요철을 대상으로 수행되었다.

해석결과 레일 표면 결함이 발생할 경우 레일 표면 결함의 폭보다는 결함 깊이가 충격윤중 및 레일 휨응력과 상관이 높은 것을 알 수 있었으며, 발생 윤중과 레일 휨응력 모두 표면 결함 깊이에 선형 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 또한 해석결과로부터 표면 결함은 레일의 휨 피로

파괴 방지의 측면보다는 결함부에서 발생한 충격 하중이 레일 표면에 국부 소성변형을 발생시키는 것을 방지하기 위한 측면에서(레일 두부의 전단 응력 제한) 관리되어야 함을 알 수 있었으며, 엄격한 조건을 반영하여 평가할 때 허용 요철 깊이를 0.2mm로 제시할 수 있다.

본 논문에서 도출한 연구결과는 수치해석 결과를 토대로 제시한 것으로서 수치해석기법에 대한 신뢰도는 문헌[4,5]에서 제시한 바와 같이 여러 가지 수치해석 예를 통하여 검증된 바 있다. 그러나 해석에서 차량 및 궤도의 물성값은 많은 부분 추정된 값을 사용하였으며, 또한 구성품 자체의 거동을 대부분 선형적으로 가정함으로써 해석결과가 실제와는 다소 차이가 있을 수 있다고 판단된다. 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 현장에서 윤중 및 레일 저부 휨응력을 측정하고 이들을 토대로 관리기준을 도출할 필요가 있다. 그러나 이 경우에도 통계적 신뢰성을 확보하기 위해서는 매우 많은 개소에서의 측정이 요구되므로 현실적으로 매우 어려운 접근방법이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(과제명: 고속화 차량 인프라 인터페이스 기반기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Z. Li, X. Zhao, R. Dollevoet and M. Molodova (2008) Differential wear and plastic deformation as causes of squat at track local stiffness change combined with other track short defects, *Vehicle System Dynamics*, Vol.46, No.1, pp.237-246.
- [2] UIC code 712 (2002) Rail defects, 4th ed., International Union of Railways (UIC).
- [3] Evaluation Criteria for Inspection Results of Track Inspection Car (2008) Dept of Track Maintenance, Korail (in Korean).
- [4] S.C. Yang (2009) Enhancement of the finite-element method for the analysis of vertical train-track interactions, Proc. IMechE Part F: *J. Rail and Rapid Transit*, Vol.223, pp.609-620.
- [5] S.C. Yang, C.K. Hong (2007) A method for the analysis of

- train/slab track interaction on settled roadbed, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(3), pp. 296-305 (in Korean).
- [6] W. Zhai, Z. Cai (1997) Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track, *Computer & Structures*, 63(5), 987-997.
- [7] X. Lei, N.A. Noda (2002) Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile, *J. of sound and vibration*, 258(1), 147-165.
- [8] Y.Q. Sun, M. Dhanasekar (2002) A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system, *Int. J. of Solids and Structures*, 39(5), 1337-1359.
- [9] M.C. Kim (2003) Development of a quasi-three dimensional train/track/bridge interaction analysis pro-gram for evaluating dynamic characteristics of high speed railway bridges, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 16(2), pp. 141-151 (in Korean).
- [10] S.B. Seo (2002) *Railway Track Engineering*, revised edition, Eul & AI, Seoul (in Korean).
- [11] R.G. Dong, R.V. Dukkipati (1994) A finite element model of railway track and its application to the wheel flat problem, *Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, Vo. 208, pp. 61-72.
- [12] C. Esvelde (2001) *Modern Railway Track*, 2nd ed., MRT Productions.
- [13] Design Standards for Railway Structures and Commentary - Track Structure "Ballasted Track" - Draft (1997) Railway Technology Research Institute, Ministry of Transport of Japan (in Japanese).
- [14] S.C. Yang (2009) A study on relevant replacement period of rail faster for high-speed railway, Research Report, Korea Railway Research Institute, Korea Rail Network Authority (in Korean).
- [15] C. Onorii, (2009) Mechanical behavior of traditional and anti-vibration railway tracks with recycled rubber materials, Doctoral thesis, Università Degli Studi Di Napoli Federico II.
- [16] E.G. Berggren, M.X.D. Li, J. Spannar (2008) A new approach to the analysis and penetration of vertical track geometry quality and rail roughness, *Wear*, Vol. 265, pp. 1488-1496.
- [17] ISO 3095 (2001) Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles, International Organization of Standards (ISO).
- [18] S.C. Yang, Y.S. Kang, M.C. Kim (2000) Evaluation method of vibration-reduction efficiency of slab track, *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No.4-D, 427-435 (in Korean).
- [19] S.C. Yang, S.Y. Jang, E. Kim (2011) Determination of Upper-limit of rail pad stiffness for ballasted and concrete track of high-speed railway considering running safety, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6), pp. 526-534 (in Korean).

접수일(2011년 6월 20일), 수정일(2011년 8월 17일),
게재확정일(2011년 11월 3일)