

현장궤도 생력화를 위한 도상구조 개선에 관한 연구

A Study on On-Site Railroad Track Structure Performance Improvement Methods for Low-Maintenance

양재성* 이희현** 남보현***
Yang, Jae-Sung Lee, Hee-Hyun Nam, Bo-Hyun

Abstract

There has been recently an on-going effort in railway community to improve the dynamic performance of on-site railroad track with limited track possession time. In this paper, train running test, lateral resistant force test and static/dynamic analyses are conducted before and after sprinkle of the ballast stabilizer in order to investigate the dynamic behaviors and parameters of the railroad track. Based upon the above results, effects of the stabilizer is verified, and a table for the track modulus representing on-site track condition and the methods to reduce the vibration and the transmitting forces of the ballasted track components to the infrastructures are suggested. It is thought that the suggestions made in this paper could be used as the preliminary data for the condition assessment and the maintenance of the track in the future.

요 지

최근에 철도분야에서는 철도차단시간을 최소화하는 상태에서 현장궤도의 동적성능을 향상시키 고자하는 노력이 지속되어 왔다. 본 연구에서는 철도궤도의 거동 및 동특성규명을 위해 운행선 궤 도를 대상으로 도상안정제 살포 전·후 열차주행시험, 횡저항력시험 및 정·동적해석을 실시하였 다. 이들 결과를 토대로 도상안정제의 효과를 확인하였으며, 아울러 궤도상태를 나타내는 궤도계 수 산출을 위한 도표와 도상궤도 구성요소의 진동 및 하부구조로 전달되는 분포력 저감방안을 제 시하였다. 본 연구에서 제시되는 결과는 향후 궤도상태판정 및 유지관리를 위한 기초자료로서 널 리 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

1. 서 론

국내 최초의 철도가 1899년 개통된 이래로 1세기 이상동안 철도궤도에 관한 다양한 경험과 기 술이 축적되어 최근에는 절대 불가피한 교통운송 체계로서 지하철 및 국철이 운영 중에 있으며, 2000년대 초에는 세계에서 다섯 번째로 시속 300km대의 고속철도가 개통될 예정으로 있다.

철도에서 궤도란 열차 주행시 발생하는 하중을 직접 받는 구조로서 철도구조물들 가운데 가장 빈번히 보수를 요하는 구조물 중 하나이고 궤도 구성요소의 상태에 따라서는 승차감 뿐만 아니라 하부구조로 전달되는 하중 및 소음·진동의 크기가 달라지므로, 철도에서 궤도의 상태를 양호하게 보존하는 것은 열차의 운행안전성 확보 및 하부구조물의 유지관리의 견지에서 매우 중요한 사항 이다. 일반적으로 궤도의 상태는 궤도에 발생하는 틀림과 지지계의 강도 또는 강성으로 나타낼 수 있지만 틀림만에 의해서는 궤도구성요소의 정확한 상태를 판단하기 어려우므로 어떠한 원인에 의해 틀림이 발생하는지 파악하는 정보를 제공해 줄 수 있는 궤도계수로서 표시된다. ^{(1)~(3)}

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 공학박사, 정회원

** 한국구조안전기술원 대표이사, 공학박사, 비회원

*** 한국철도기술연구원, 연구원, 비회원

본 연구는 궤도 구조의 상태에 따른 궤도계수, 동특성 및 횡저항력의 변화를 파악하고 이로부터 궤도 구조의 상태를 판정하는 기초자료를 제시하기 위해 실시하였다. 본 연구로부터 도출되는 결과는 향후 열차의 운행안전성 확보 및 궤도의 유지관리를 위한 기초자료로서 널리 활용될 것이다.

2. 시험대상 궤도의 실측응답특성

2.1 시험대상 궤도

2.1.1 시험대상 궤도의 제원 및 특성

시험대상 궤도는 열차통행 빈도가 적고 비교적 궤도상태가 불량한 구간이며, 직선부와 곡선부가 인접한 구간을 선정하였다. 시험대상 구간 궤도의 일반도, 단면도 및 제원은 Fig. 1 과 같다.

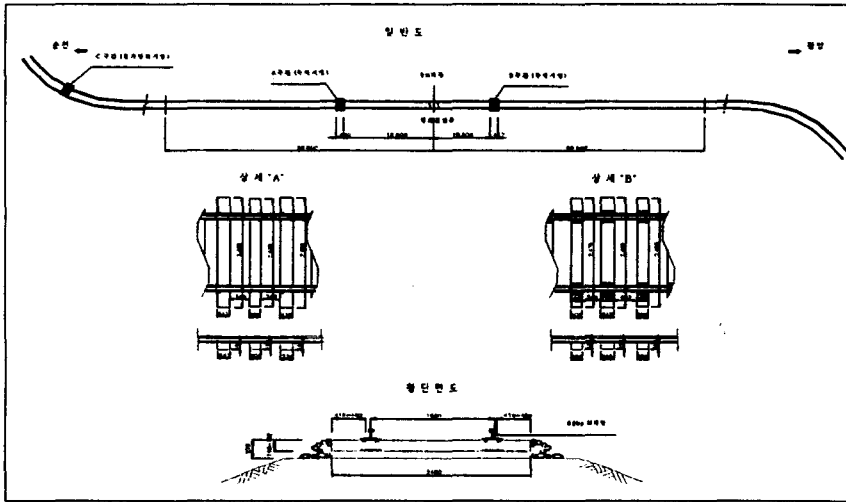


Fig. 1 Approximate schematic of the test track

이 구간에 대한 제원조사 결과, 부설후 오랜 기간이 경과되어, 도상의 두께는 12cm정도였고 목침목의 치수(두께 : 14 ~ 15cm, 폭 : 20 ~ 24.5cm, 길이 : 243 ~ 249cm), 간격(57 ~ 64.5cm) 등도 불규칙하게 설치되어 있음을 알 수 있었다.

2.1.2 시험대상 궤도 톨립량 조사

열차 주행시 궤도의 거동은 궤도 톨립량의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 시험대상 궤도의 궤간, 수준, 고저, 방향 및 평면성의 5가지 톨립량을 조사하였다. 조사결과 시험대상 구간의 레일의 톨립 상태는 비교적 양호하다고 할 수 있다.

2.2 도상안정제

본 연구에서 사용한 도상안정제는 일본에서 생산하고 있는 액체습기경화형 우레탄수지(폴리우레탄 이소시아네티)로서, 그 특성은 Table 1 과 같다. 사용량은 A구간에 대해서는 2kg/cm², C구간에 대해서는 3kg/cm² 이고 살포후 약 20시간이 경과한 후 재하시험 및 횡저항력시험을 실시하였다.

Table 1 Properties of the ballast stabilizer

항목	특성	시험방법
색갈	갈색 액체	
점도	50 ~ 150 cps (25℃)	
비중	1.0 ~ 1.2	
고형분(수지분)	67 ~ 73 %	
용제종별	에틸계 특수 희석액	
점착강도	150 N/cm ² 이상	단축인장 점착강도시험
중량	15 kg / 통	

2.3 재하시험 개요

시험대상 궤도 A, B구간에 설치된 센서배치도는 Fig. 2 와 같다. 시험대상 궤도에 대한 동적 주행시험은 Table 2 와 같이 1999년 11월 12일 ~ 11월 14일 까지 실시하였다. Table 4 에서 통과차량은 기관차 번호를 나타내고 그때의 속도는 스피드건을 이용하여 측정하였다.

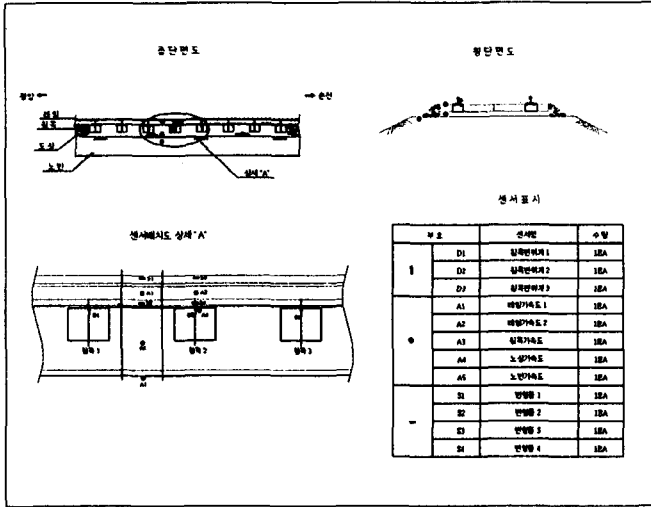


Fig. 2 Sensors arrangement

Table 2 Test date

날짜	구분	차량번호	속도	구분
11.12 (금)	B 구간	SUN-T043	4000	56
		SUN-T044	7300	85
		SUN-T045	7300	56
		SUN-T046	7400	45
		SUN-T047	7100	57
		PH11048	7300	70
11.13 (토)	A 구간 (도상안정계 샬포전) 측정	PH11049	7400	60
		PH11050	7200	20미만
		SUN-3123	7400	48
		SUN-3124	7200	70
		SUN-3125	7500	46
		SUN-3126	7500	59
		SUN-3127	7400	46
		SUN-3128	7400	58
		SUN-3129	7100	60
		SUN-3130	7200	63
11.14 (일)	A 구간 (도상안정계 샬포후) 측정	SUN-3131	7500	경차
		SUN-4201	7110	55
		SUN-4202	4000	48
		SUN-4203	7500	56
		SUN-4225	-	75
		SUN-4226	7200	57
		SUN-4227	7100	67

2.4 현장시험 결과 및 고찰

2.4.1 응답이력곡선

시험대상 궤도 위를 실 통행 열차 통과시 궤도에 발생하는 센서별 응답이력곡선으로부터 최대 응답만을 정리하면 Table 3과 같다. Table 3 으로부터 B궤도의 경우 A궤도에 비해 다소 큰 처짐이 발생하고 특히 상향처짐이 매우 크다는 것을 알 수 있는데 이는 이 구간의 궤도 상태가 비록 어느 정도의 탄성은 확보하고 있으나 분니현상으로 인해 불량하기 때문인 것으로 판단된다.

2.4.2 주파수분석

동적주행시험시 측정된 가속도신호에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 실시하여 파워 스펙트럼을 작성하고 진동수분석을 실시하였다. Table 4 는 작성된 스펙트럼으로부터 추정된 탁월 진동수범위를 정리한 것이다.

Table 3 Measured absolute maximum responses at each section

구분	도상		철거면		노상		노상외곽		노상외곽		최대응답 (x10 ⁻³)	
	상향	하향	상향	하향	상향	하향	상향	하향	상향	하향	상향	하향
A궤도 (도상안정계 샬포전)	0.28	0.84	5.17	5.04	1.73	1.71	2.11	2.03	0.18	0.17	-	233.47
A궤도 (도상안정계 샬포후)	0.15	0.91	5.18	6.79	1.77	2.41	1.09	1.83	0.17	0.18	408.42	205.98
B궤도	0.97	2.14	2.81	4.79	1.27	1.00	0.98	0.66	0.07	0.09	-	-

Table 4 Predominant frequencies measured

구분	도상	철거면	노상
레일 1	110 Hz부근 292 Hz부근	150 Hz부근 390 Hz부근	70 Hz부근 160 Hz부근
레일 2	110 Hz부근 292 Hz부근	150 Hz부근 390 Hz부근	70 Hz부근 160 Hz부근
침목	110 Hz부근	150 Hz부근	70 Hz부근 380 Hz부근
도상	110 Hz부근	150 Hz부근	70 Hz부근 160 Hz부근
노반	75 Hz부근 110 Hz부근	60 Hz부근 150 Hz부근	70 Hz부근

2.5 횡저항력 시험

도상 횡저항력은 곡선부 레일의 횡방향 이동에 큰 영향을 주므로, 시험대상 궤도의 C구간(R=400m의 곡선구간)에서 도상안정제에 의한 횡저항력 증가효과를 확인하기 위해 살포전·후 침목저항 측정기를 이용하여 횡저항력 측정시험을 실시하였다.

Fig. 3 은 C구간 침목2개소에 대한 횡저항력 시험결과를 그림으로 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 횡변위 2mm에 대한 결과를 비교하면 본 연구에서 사용한 도상안정제는 횡저항력을 1.65~2.17배 증가시킬 수 있으므로 궤도보수 재료로서 매우 효과적임을 알 수 있다.

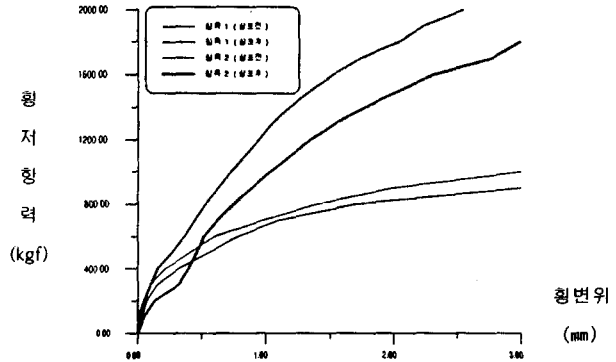


Fig. 3 Measured lateral resistant forces

3. 궤도의 정·동적해석 방법

3.1 선형거동을 하는 궤도의 궤도계수 산출방법

중대 철도 궤도의 설계시 주로 이용되는 방법은 궤도에 작용되는 하중과 궤도에 발생하는 변위의 관계를 Fig. 4 와 같이 선형적으로 거동한다는 가정에서 부터 출발한다.

이때 궤도계수는 레일하부의 수직강성으로 정의되고, 궤도강성은 전체 궤도구조의 수직강성으로 정의된다. 이들은 모두 궤도의 성능과 관계되므로 궤도의 상태를 판정하는 주요 인자가 된다. 그러나 실제 궤도의 상태를 판정하기 위해서는 레일 강성의 영향이 제외된 궤도계수가 주로 이용된다. 실제 철도에서 궤도는, 레일이 침목에 의해 이산적(discrete)으로 지지되어 있으나 궤도 계수를 구하기 위해서는 레일이 Winkler Foundation으로 알려진 탄성기초위에 놓인 보로서 모델링된다. 이러한 모델에서 레일하부에 있는 모든 구성성분의 영향은 궤도계수 k 라고 하는 하나의 매개변수로서 표현된다. 비록 이와 같은 모델은 궤도 구성 성분들의 개개의 특성을 구분하여 고려하지는 않으나 이와 같은 방법의 해석이 간편하여 널리 채택되어 왔다.^{(1),(2)}

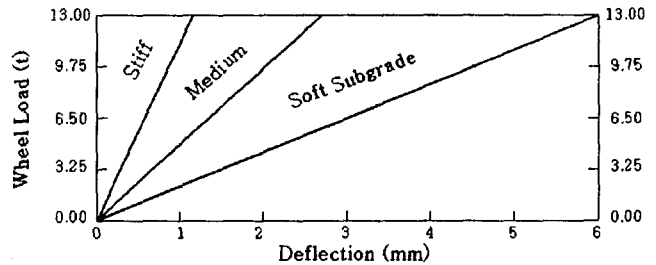


Fig. 4 Load-displacement relationship of the track behaving linearly

탄성기초위 x 축상의 원점에 y 방향으로 하중 P 가 작용할 경우 궤도계수는 식(1)과 같이 주어진다.^{(4),(5)}

$$k = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{P^4}{EIy^4}} \quad (1)$$

3.2 궤도 진동해석

궤도의 진동해석을 위해 주로 사용되는 모델로는 질량모델, 판모델 및 연속보 모델이 있다.⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾ 질량모델은 가장 간단한 해석모델이나 佐藤吉彦⁽⁷⁾에 의하면 질량모델을 사용할 경우 실험결과와 일치하는 부분과 일치하지 않는 부분이 있고 특히 슬래브 궤도의 경우 그 차이가 크

다고 알려져 있다. 그러나 판모델을 사용할 경우 해석이 매우 복잡할 뿐만 아니라 이 모델은 단지 슬래브 궤도에만 적용할 수 있으므로 본 연구에서는 연속보 모델을 사용한다. 본 연구에서는 실험 측정치와 비교하여 궤도 구성요소의 동특성을 규명하는 것이 목적이므로 궤도를 중간질량을 갖는 1중보로 Fig.5와 같이 모델링하여 진동 해석을 수행한다.

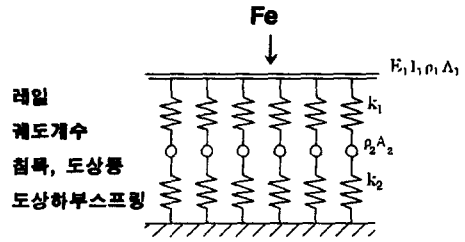


Fig. 5 Single beam model with intermediate mass

4. 시험대상 궤도의 궤도계수 및 동특성 추정

4.1 궤도계수

4.1.1 궤도계수에 따른 응답이력곡선

현장에서 측정된 처짐이력 곡선으로부터 궤도계수를 산출하기 위하여 먼저 기관차가 시험 궤도 위를 주행할 때 탄성지지보상의 궤도에 발생하는 처짐, 레일저부 변형을 및 전단력 이력곡선을 시뮬레이션 하였다. Fig. 7은 이력곡선을 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 이때 사용한 궤도계수는, 고속철도에서 소음·진동을 저감시키기 위해 사용되는 고탄성궤도와 유사한 값 $k=200\text{kg/cm}^2$, 일반철도 궤도에 빈번히 적용되는 값 $k=300\text{kg/cm}^2$ 및 매우 강성이 큰 노반상태의 값, 예를 들면 교량 또는 터널구간의 값 $k=800\text{kg/cm}^2$ 을 각각 사용하였다.

Fig. 7로부터 기관차 주행시 각 응답이력 곡선에는 차륜간격과 거의 같은 간격으로, 차륜수와 같은 수의 피크값이 생기고, 궤도상 어느 한점의 응답은 한 대차의 하중만의 영향을 받으며 다른 대차하중의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

한편 Fig. 6은 현장에서 7000호대 기관차 하중에 의한 처짐측정 결과로부터 손쉽게 궤도계수를 산출할 수 있도록 궤도계수와 처짐의 관계를 정리한 것이다. 다음절에서 궤도계수 산출시 이 그림을 사용하였다.

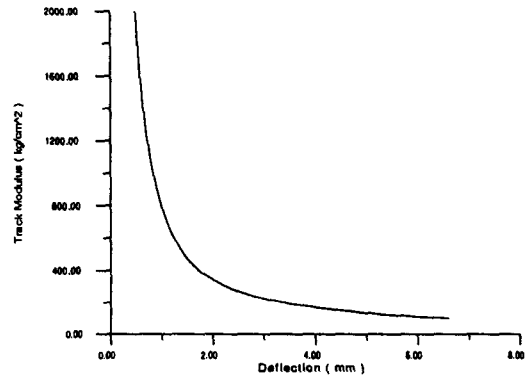


Fig. 6 Relationship between track modulus and deflection due to locomotive

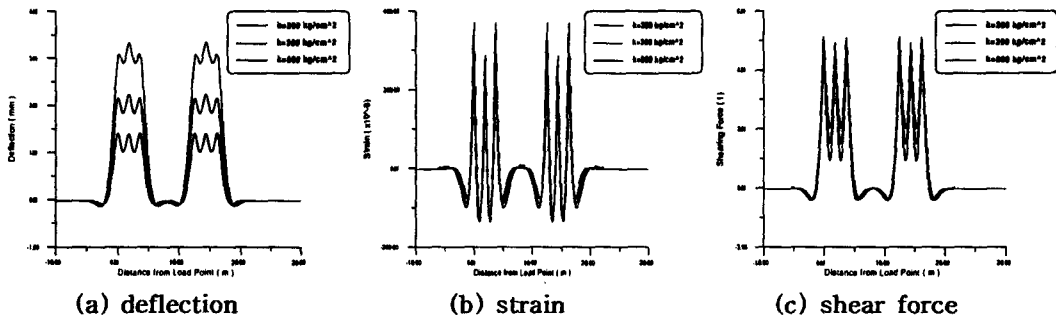


Fig. 7 Response time history curves due to locomotive

4.1.2 시험대상 궤도의 궤도계수

앞절에서 설명한 요령에 따라 처짐을 측정된 결과로부터 침목별 궤도계수의 평균치를 정리하면 Table 5와 같다. Table 5로부터 A구간 궤도의 경우 특히 분기가 심하여 궤도는 매우 단단한 상태이고, B구간은 비록 분기현상은 발생되어 있으나 A구간에 비해 다소 탄성을 확보하고 있

음을 알 수 있다. 한편 침목별 궤도계수를 살펴보면 A 구간 궤도의 경우 도상안정제 살포전에는 3개의 침목에 대한 궤도계수가 유사하나, 도상안정제 살포후에는 침목별 차이가 있으며 특히 2번째 침목의 궤도계수가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 도상안정제 살포시 2번째 침목을 중심으로 좌우 3m씩 살포하였기 때문으로 생각된다. 더욱이 도상안정제 살포후에는 궤도계수가 다소 커지는 것을 알 수 있는데, 이로부터 본 연구에서 사용한 도상안정제는 궤도의 연직강성을 증가시키는데 충분한 역할을 한다고 판단된다.

4.2 유도상 궤도의 동특성

4.2.1 궤도구성요소의 동특성변화에 따른 진동거동

이 절에서는 시험대상 궤도에 대한 진동해석을 수행하여 실측치와 대비하기에 앞서 궤도 구성요소의 동특성 변화에 따라 궤도에 발생하는 진동 및 하부구조로 전달되는 분포력의 변화양상을 살펴보았다. 이로부터 도출되는 결과는 향후 궤도 및 하부구조 설계시 귀중한 참고자료가 될 것이다. 여기서 사용한 입력자료는 궤도 진동해석시 공칭값으로 자주 이용되는 값이다. 이를 정리하면 Table 6 과 같다.

Fig. 8 은 Table 6 의 입력 데이터중 궤도계수를 0.25배, 4배한 경우를 비교한 그림이다. 이 그림으로부터 탁월진동수와 침목에 발생하는 진동가속도는 궤도계수가 감소함에 따라 감소하지만, 레일가속도는 증가함을 알 수 있고, 특히 하부구조에 전달되는 분포력은 저주파 영역으로 이행하면서 증가하므로, 하부구조의 견지에서는 궤도계수를 증가시키는 것이 유리함을 알 수 있다.

Table 5 Mean values of track modulus for each track

궤도구분	도상안정제 살포여부	침목번호	침목별 평균치 (kg/cm ²)	전체 평균치 (kg/cm ²)
A궤도	살포전	1	1308	1254
		2	1145	
		3	1310	
	살포후	1	1100	1439
		2	1857	
		3	1360	
B궤도	살포전	1	735	513
		2	441	
		3	364	

Table 6 Nominal input value for vibration analysis of the ballast track

레일-궤도계수	4.116×10^9 kgf/cm ²
궤도-궤도계수	1,550 kgf/cm ²
도상안정제	5,170 kgf/cm ²
궤도-레일계수	50.4 kg/m
침목-궤도계수	67.2 kg
차륜의 스프링이력계수	1170 kg
차륜-레일 접촉계수	2×10^8 kgf/cm
롤럼의 진동수	1×10^{-1}

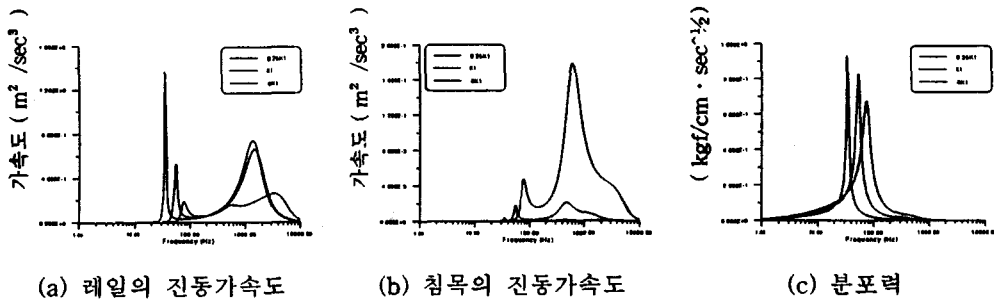


Fig. 8 Effect of track modulus

같은 요령으로 해석에 사용되는 입력자료를 변화시키면서 진동해석을 수행한 결과로부터 궤도에 발생하는 진동 및 하부구조로 전달되는 분포력의 크기를 저감하기 위한 방안을 몇가지 정리하면 Table 7 과 같다. Table 7 은 유도상궤도에서 유지관리시 발생하는 문제점을 해결하는데 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.⁽⁴⁾

4.2.2 실측치와 이론치의 비교

앞에서 언급한 바와 같이 궤도구성요소에 발생하는 진동의 크기 및 탁월진동수는 궤도를 구성하는 여러 가지 인자 뿐 아니라, 통행열차의 특성, 궤도 틀림상태 등에 따라 상당히 달라지므로, 이 절에서는 실측치와 유사한 경향을 나타내는 동특성을 유도하기 위해 탁월진동수의 실측치와 해석치를 비교해 보았다.

시험대상 궤도에 대한 진동해석을 실시하고 탁월진동수를 추정한 결과는 Table 8 과 같다. 이들 결과를 Table 4 의 실측치와 비교해 보면 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 시험대상 궤도 구성요소의 동특성 및 차륜 등에 관한 국내 가용자료가 전무하여 외국의 자료를 인용하였기

때문으로 사료된다. 한편 앞절에서 살펴본 바와 같이 궤도 구성요소에 발생하는 탁월주파수는 동특성의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 실측치와 유사한 탁월주파수를 구하기 위해 궤도계수를 공칭값의 6배(도상안정제 살포전 A궤도와 B궤도), 4배(도상안정제 살포후 A궤도), 도상 및 노반에 의한 부가질량을 2배하여 진동해석을 재 수행하였다. 이로부터 추정된 탁월주파수를 정리하면 Table 9 과 같다.

Table 9를 Table 4와 비교하면 다소의 차이는 있으나 궤도구성요소의 동특성을 변화시키기 전의 값과 비교하면 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 한편 500 Hz이상의 고주파 성분에 대해서는 측정 속도를 1000 Hz로 하여 획득 할 수 없었으나 1000Hz이상의 고주파 진동에 대한 연구를 위해서는 체계적인 계측자료 획득 및 분석을 위한 연구도 필요할 것이다.

Table 7 Reduction method of vibration and transmitting force for the ballasted track

궤도 구성 요소	저감 방안
· 레일 진동	· 속도저감 · 궤도계수 증대 · 도상하부 스프링상수 저감 · 레일 중량 저감 · 톨립량 저감
· 침목 진동	· 속도저감 · 궤도계수 저감 · 도상하부 스프링 상수 증대 · 레일 중량 증대 · 중간질량 증대 · 톨립량 저감
· 분포력	· 속도 저감 · 궤도계수 증대 · 도상하부 스프링상수 저감 · 톨립량 저감

Table 8 Predominant frequencies for the test track using the nominal input values

주파수 구분	탁월진동수 (Hz)		
	A궤도 (도상안정제 살포전)	A궤도 (도상안정제 살포후)	B궤도
f_1	50Hz 부근	60Hz 부근	35Hz 부근
f_2	500Hz 부근	500Hz 부근	430Hz 부근
f_3	1500Hz 부근	1500Hz 부근	1400Hz 부근

Table 9 Predominant frequencies for the test track considering the dynamic characteristics changed

주파수 구분	탁월진동수 (Hz)		
	A궤도 (도상안정제 살포전)	A궤도 (도상안정제 살포후)	B궤도
f_1	80Hz 부근	90Hz 부근	65Hz 부근
f_2	400Hz 부근	400Hz 부근	320Hz 부근
f_3	3000Hz 부근	4000Hz 부근	1600Hz 부근

5. 결론 및 건의사항

- 1) 본 연구에서 사용된 도상안정제는 궤도의 연직방향 강성 및 횡저항력을 증가시키는데 충분한 효과가 있음이 입증되었으므로 곡선부 또는 궤도 상태가 불량한 궤도의 도상안정제로서 널리 이용될 수 있을 것이다. 그러나 균질한 궤도상태를 얻기 위해서는 철저한 시공 관리가 요망된다.
- 2) 본 연구에서는 7000호대 열차가 무작위 통과시 측정된 처짐으로부터 현장에서 손쉽게 궤도계수를 산출할 수 있는 도표를 제시하였으므로 이 도표는 향후 철도현장에서 널리 활용되어 궤도상태를 판정하는데 이용될 수 있을 것이다.
- 3) 더욱이 궤도구성요소의 동특성을 변화시키면서 진동해석을 실시한 결과로부터 유도상궤도의

진동 및 하부구조로 전달되는 분포력 저감방안을 제시하였으므로 이 자료는 향후 유도상 궤도의 유지관리시 발생하는 문제점을 해결하는데 기초자료로서 널리 이용될 수 있을 것이다.

- 4) 궤도계수는 궤도의 상태를 판정하는 가장 기초적인 자료이므로, 향후 본 연구와 같은 이론적·실험적 연구를 병행하여 궤도계수에 따른 궤도상태 판정기준을 정립·제시하면 현장 실무자들이 궤도를 유지관리하는 기준으로 널리 이용될 수 있을 것이다.
- 5) 탁월진동수 실측치를 해석치와 비교한 결과 궤도계수는 공칭값이 4~6배정도, 도상 및 노반에 의한 부가질량은 약 2배 하던 실측치에 근접한 탁월진동수를 예측할 수 있다.
- 6) 현재까지 국내에서는 궤도구성요소의 동특성, 틀림스펙트럼 및 차륜의 동특성 등에 관한 연구가 전무하여 본 연구에서는 주로 외국의 자료를 인용하였으나, 정확한 궤도 진동해석을 위해서는 이 분야에 관한 체계적인 자료구축이 필요할 것이다.

참고문헌

1. Kerr, A. D., and "Shenton, W. III, "Railroad Track Analysis and Determination of Parameters", J. of Eng. Mech., Vol. 112, Vo. 11, 1986
2. Selig, E. T., and Li D., "Track Modulus ; Its Meaning and Factors Influencing It", Transportation Research Record 1470, 1995.
3. Kerr, A. D., "A Method for Determining the Track Modulus using a Locomotive or car on Multi-Axle Trucks", Proc. AREA Bulletin 692, Vol. 84, 1983, pp 269~286
4. 한국철도기술연구원, 한국구조안전기술원, "궤도구조의 동특성추정을 위한 연구", 1999
5. Timoshenko S, Young D. H, "Vibration Problems in Engineering", 3th Ed., D. Van Nostrand, 1955.
6. 佐藤 裕, "軌道振動の構築振動に及ぼす研究", 日本土木學會 論文集, 第240號, 1975.
7. 佐藤吉彦, "軌道に生ずる高周波振動とろの考察", 日本土木學會 論文集, 第77號, 1961.
8. 佐藤 裕, "軌道構造と振動との關係についての理論的考察", 鐵道業務研究資料, 13-8, 1956.
9. 이희현, "궤도 진동 저감방안에 관한 연구(I)", 한국강구조학회 논문집 제7권 제1호, 1995. 3.
10. 이희현, 양신주, 신중서, "저진동 궤도구조에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집(II), 1994. 10, pp. 371~374.
11. 이희현, "차륜-레일 상호작용을 고려한 슬래브 궤도의 진동해석", 전산구조공학회 논문집, 제7권, 제2호, 1994. 6, pp. 77~87.