

현장 궤도 동특성 추정에 관한 연구

A Study on Dynamic Properties Estimation of On-Site Railroad Track

이희현¹ · 남보현² · 박용진³ · 이종득⁴

Hee-Hyun Lee, Bo-Hyun Nam, Yong-Jin Park, Jong-Duck Lee

Keywords : railroad track(철도궤도), field test(현장시험), ballast stabilizer(도상안정제), track vibration(궤도진동), correction factor(보정계수)

Abstract

In this paper, train running test and lateral resistant force test are conducted before and after sprinkling the ballast stabilizer in order to investigate the dynamic behaviors and parameters of the railroad track. The measured results are used to confirm the effect of the stabilizer and to validate the numerical results.

From this paper, it is known that the stabilizer used in this study has excellent effect on increasing the vertical rigidity and the lateral resistance, and some correction factors should be considered on masses and rigidities of the track components in order to calculate the vibration magnitude reasonably due to running train.

1. 서론

본 논문에서는 열차주행시 궤도구성요소에 발생하는 진동 및 궤도상태에 따른 궤도계수의 크기를 파악하기 위해 운행선 궤도를 대상으로, 열차가 무작위 통과시 궤도구성 요소에 발생하는 변위, 변형을 및 진동가속도를 측정하였다. 측정된 결과는 문헌[1]의 수치해석 결과와 비교하였으며, 또한 본 논문에서는 도상안정제 살포 전·후 궤도상태의 변화에 따른 궤도계수의 변화를 확인하고 도상안정제의 효과를 확인해 보았다.

2. 시험대상 궤도

현장시험은 Fig. 1 및 Table 1과 같은 제원을 갖는 궤

도를 대상으로 실시하였다. 시험대상 궤도는 철도청 관계자와의 협의에 따라 비교적 열차통행 빈도가 적고 분기현상이 빈번히 일어나는 구간이며 직선부와 곡선부 ($R=400m$)가 인접한 구간이다. 시험 위치는 Fig. 1의 A, B, C 구간이다.

시험당시 이 구간은 분기현상이 발생되어 있음을 확인할 수 있었으며 이 구간에 대한 제원조사 결과, 부설후 오랜 기간이 경과되어, 도상의 두께는 12cm 정도였고 목침목의 치수(두께 : 14 ~ 15cm, 폭 : 20 ~ 24.5cm, 길이 : 243 ~ 249cm), 간격(57 ~ 64.5cm) 등도 불규칙하게 설치되어 있으나, 수치해석을 위해 공칭값을 사용하였다.

한편 열차주행시 궤도의 거동은 궤도 틀림량의 영향을 크게 받으므로 시험실시전 궤간, 수준, 고저, 방향 및 평면성의 5가지 틀림량을 조사하였다. 조사결과 틀림상태는 비교적 양호하여 무시하였다[1].

*1 한국구조안전기술원 대표이사

*2 한국철도기술연구원, 연구원

*3 전주공업대학, 교수

*4 한국철도대학, 교수

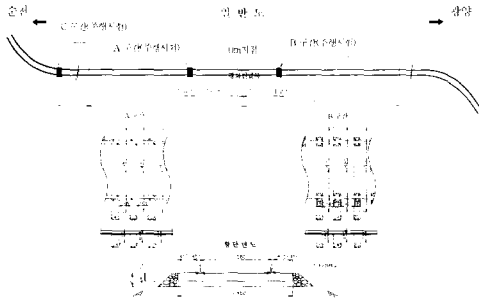


Fig. 1 Scheme of Research Track

Table 1 Properties of Research Track

| | |
|------------|--------------------------------------|
| 레일종류 | 25m 정척레일 |
| 레일종별 | 50kgN |
| 체결방식 | 개못을 이용한 일반체결 |
| 침목의 종류와 크기 | 목침목, 높이(15)×폭(24)×길이(250), 중심간격 60cm |
| 도상두께 및 자갈 | 12cm, 깬자갈 |
| 노반 | 비교적 연약한 지반 |

3. 도상안정제

본 연구에서는, 분니현상이 심한 연약지반상 유도상 궤도의 도상 횡저항력을 증가시키는데 효과적이라고 알려진 도상안정제의 살포에 따른 궤도 변위, 진동 및 횡저항력의 변화를 확인하기 위하여 도상안정제 살포 전·후 열차주행시험 및 횡저항력 시험을 실시하였다.

본 연구에서 사용한 도상안정제는 액체습기경화형 우레탄수지(폴리우레탄 이소시아네트)로서, 그 특성은

Table 2와 같다. 사용량은 A구간에 대해서는 $2\text{kg}/\text{cm}^2$, C구간에 대해서는 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고 살포후 약 20시간이 경과한 후 주행시험 및 횡저항력시험을 실시하였다.

Table 2 Material Properties of Ballast Stabilizer

| 항 목 | 특 성 | 비 고 |
|-----------|--------------------------|----------------|
| 색깔 | 갈색 액체 | |
| 점도 | 50~150cps(25℃) | |
| 비중 | 1.0 ~ 1.2 | |
| 고형분 (수지분) | 67 ~ 73 % | |
| 용제종별 | 에틸계 특수 희석액 | |
| 접착강도 | 150 N/cm ² 이상 | 단축인장 접착강도시험 |
| 중량 | 15 kg / 통 | |

4. 시험 개요

4.1 시험용 센서 및 장비

궤도의 거동 측정을 위해 사용한 센서목록 및 배치도는 Fig. 2와 같다. 현장 작업여건상 A구간 궤도의 경우 광양에서 순천을 바라볼 때 좌측레일을, B구간의 경우 우측 레일을 측정대상으로 하였다. 현재까지 국내외에서 실시한 연구는 정적재하시험을 실시하여 궤도계수를 추정하였지만 본 연구에서는 동적주행시험을 실시하고 그 결과로부터 궤도계수를 산출하였다. 데이터 획득을 위해 사용한 장비는 철도기술연구원에서 보유하고 있는 Bridge Safety and Structure

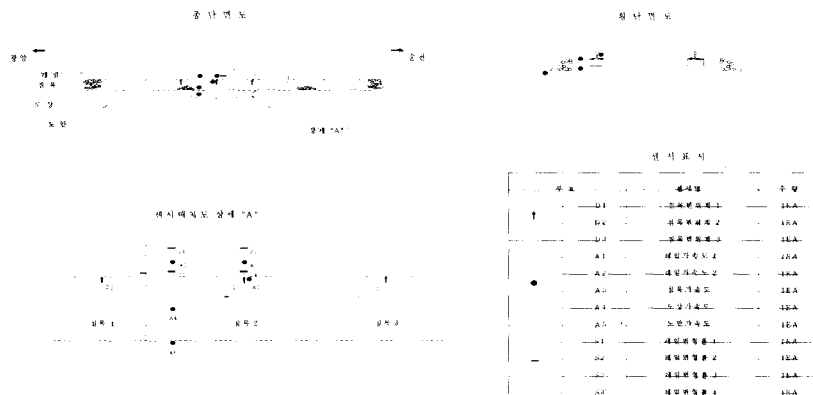


Fig. 2 Sensor Arrangement

Measuring System으로서 이 장비는 32채널의 센서로부터 획득되는 신호를 동시에 샘플링 할 수 있는 동적 데이터로거이다. 한편 도상의 횡저항력은 침목의 체결장치와 타이플레이트를 제거한 후 침목 저항측정기를 사용하여 측정하였다.

Photo 1, Photo 2는 센서배치도와 시험광경을 보여준다.

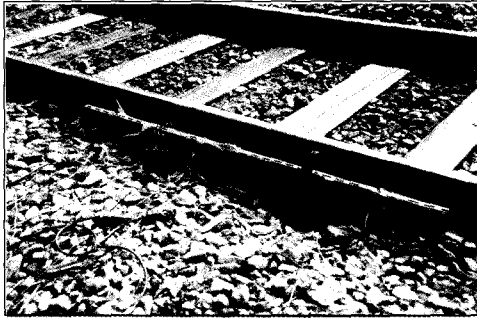
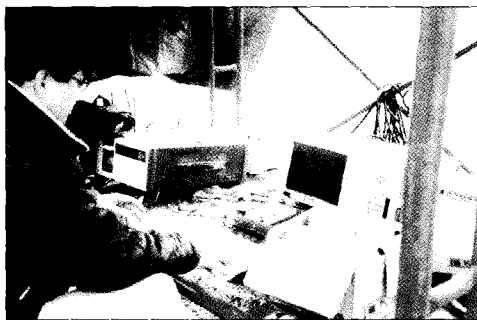


Photo. 1 Sensor Layout



(a) Test Locomotive



(b) Measuring Equipment

Photo. 2 Test Scene

4.2 시험일자

시험대상 궤도에 대한 동적 주행시험 일자는 Table 3과 같다. 표에서 통과차량은 기관차 번호를 나타내고

그때의 속도는 스피드건을 이용하여 측정하였다.

| 일자 | 데이터 번호 | 통과 차량 | 속도 (km/h) | 비고 |
|-------------------------|--------|-------|-----------|--|
| 1999년 11월 12일 (금) | T043 | 4000 | 56 | B 구간 |
| | T044 | 7300 | 85 | |
| | T045 | 7300 | 56 | |
| | T046 | 7400 | 45 | |
| | T047 | 7100 | 57 | |
| | 11048 | 7300 | 70 | |
| | 11049 | 7400 | 60 | |
| 1999년 11월 13일 (토) | 11050 | 7200 | 20미만 | A 구간 (도상안전제 살포전) 도상횡저항력 추정 |
| | 3123 | 7400 | 48 | |
| | 3124 | 7200 | 70 | |
| | 3125 | 7500 | 46 | |
| | 3126 | 7500 | 59 | |
| | 3127 | 7400 | 46 | |
| | 3128 | 7400 | 58 | |
| | 3129 | 7100 | 60 | |
| 1999년 11월 14일 (일) | 3130 | 7200 | 63 | A 구간 (도상안전제 살포후) 도상횡저항력 추정 |
| | 3131 | 7500 | 정차 | |
| | 4201 | 7110 | 55 | |
| | 4202 | 4000 | 48 | |
| | 4203 | 7500 | 56 | |
| | 4225 | - | 75 | |
| | 4226 | 7200 | 57 | |
| 4227 | 7100 | 67 | | |

5. 시험결과 및 고찰

5.1 응답이력곡선 및 최대응답

시험대상 궤도위를 실 열차가 무작위 통과시 궤도에 발생하는 센서별 응답이력곡선의 일례는 Fig. 3과 같다. Fig. 3으로부터 열차주행시 궤도에는 하향처짐외에 상당량의 상향처짐과 부모멘트가 발생하고, 처짐, 변형 율이력곡선에는 차륜수와 같은 수의 피크치가 생기고 그 간격은 차륜간격과 거의 일치하며, 진동가속도 파형에는 tyre flat 또는 연결부 통과시 충격의 영향으로 큰 충격파형이 포함되어 있으며, 그 크기는 레일, 침목, 도상, 노반 순으로 작아짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 문헌[1]의 수치해석 결과와도 비교적 일치하는 사실이다.

더욱이 처짐측정결과를 문헌[1]의 수치해석 결과와 비교하면 단단한(stiff) 상태에 해당되며 이것은 외관상 태 조사 결과와도 일치하는 사실이다.

따라서 본 연구대상 궤도는 처짐·하중의 관계를 선형으로 가정하여도 무방함을 알 수 있다.

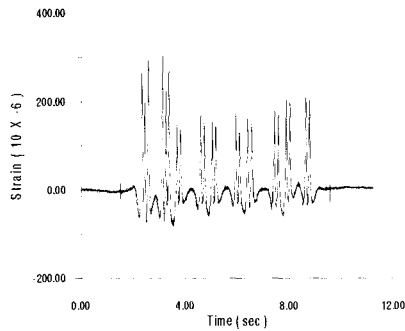
한편 이상과 같은 이력곡선으로부터 각 궤도에 발생

하는 센서별 최대응답만을 정리하면 Table 4와 같다. 이 표로부터 B궤도의 경우 A궤도에 비해 다소 큰 처짐이 발생하고 특히 상향처짐이 매우 크다는 것을 알 수 있는데 이는 이 궤도의 상태가 비록 어느 정도의 탄성은 확보하고 있으나 분니현상으로 인해 상당히 불

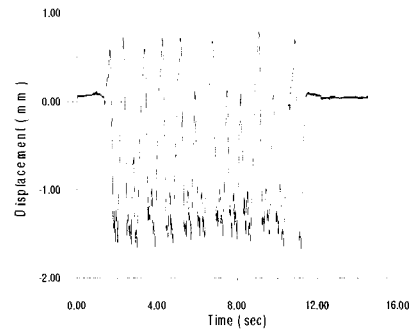
량하기 때문으로 판단된다. 한편 이 표에 의하면 도상안정제 살포후 A궤도 침목의 최대하향처짐은 살포전에 비해 다소 크나, 이것은 통행열차의 중량 등 차량 조건의 차이와 도상안정제 살포로 인한 궤도틀림의 차이 등에 의한 것으로 추측된다.

Table 4 Maximum Response for Each Sensor due to Service Train

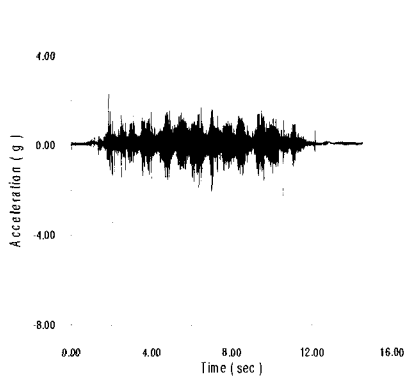
| 궤도 | 침목변위 (mm) | | 레일가속도 (g) | | 침목가속도 (g) | | 도상가속도 (g) | | 노반가속도 (g) | | 레일 변형 ($\times 10^{-6}$) | |
|--------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|----------------------------|--------|
| | 상향 | 하향 | 상향 | 하향 | 상향 | 하향 | 상향 | 하향 | 상향 | 하향 | 인장 | 압축 |
| A궤도 (도상안정제 살포전) | 0.281 | 0.843 | 5.172 | 5.037 | 1.725 | 1.707 | 2.106 | 2.029 | 0.181 | 0.173 | - | 233.47 |
| A궤도 (도상안정제 살포후) | 0.145 | 0.908 | 5.183 | 6.795 | 1.774 | 2.409 | 1.089 | 1.834 | 0.168 | 0.179 | 408.42 | 205.98 |
| B궤도 | 0.967 | 2.139 | 2.805 | 4.788 | 1.267 | 1.003 | 0.996 | 0.657 | 0.072 | 0.086 | - | - |



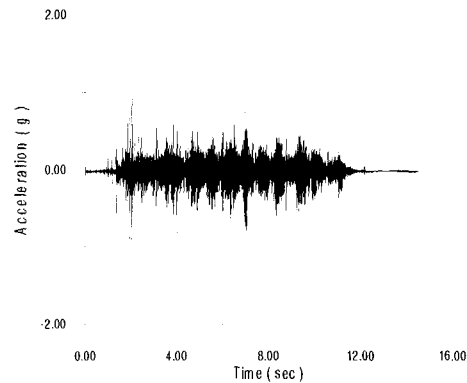
(a) Rail Strain



(b) Sleeper Deflection



(c) Rail Vibration



(d) Sleeper Vibration

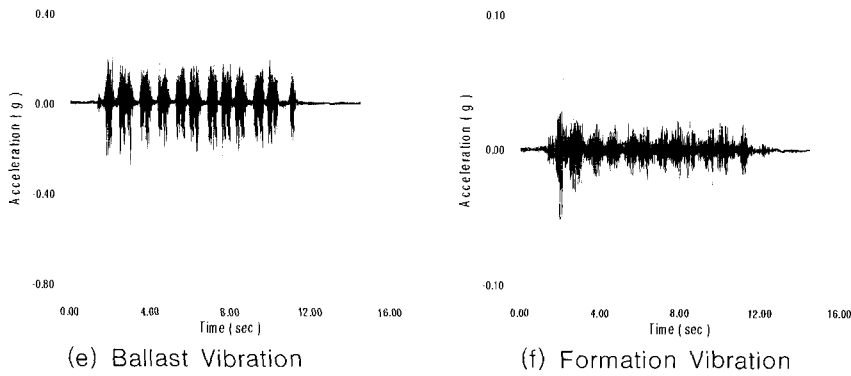


Fig. 3 Example of Response Time History due to Service Train

5.2 측정치에 대한 주파수분석

동적주행시험시 측정된 가속도신호에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 실시하여 파워스펙트럼을

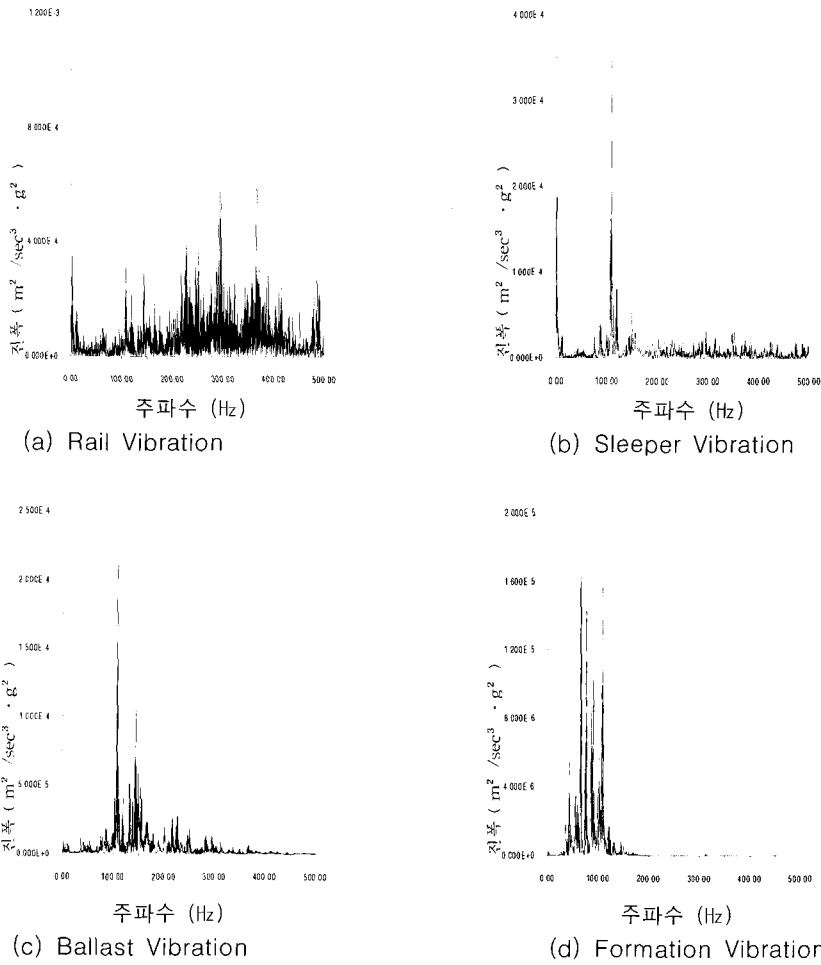


Fig. 4 Power Spectra of Vibrations Before Spreading Ballast Stabilizer at Track A

작성하고 탁월진동수를 분석하였다. Fig. 4는 작성된 파워스펙트럼의 일례를 보여주고, Table 5는 이로부터 추정된 탁월진동수범위를 정리한 것이다. 먼저 이들 그림으로부터 열차주행시 궤도에는 레일틀림, 연결부, 차체진동 등 여러 가지 원인이 중첩되어 다양한 성분의 진동이 기여하고, 파워스펙트럼의 형상은 레일에서부터 노반으로 전달될수록 고주파 진동성분이 소멸되어 점차 단순한형으로 됨을 알 수 있다. 더욱이 Table 5의 결과에 의하면 A구간은 도상안정제 살포후에 강성이 다소 커져 고유진동수도 증가하였음을 알 수 있고, B구간의 경우 고유진동수가 가장 작음을 알 수 있는데 이는 이 구간의 강성이 가장 작기 때문으로 추정된다. 이러한 현상은 앞의 처짐 측정결과와도 일치하는 사실이다. 이들 고유진동 성분의 발생원인에 대해서는 문헌[1]에서 언급하였다.

Table 5 Predominant Frequencies of Track Components (단위: Hz)

| 구분 | A구간 (도상안정제 살포전) | A구간 (도상안정제 살포후) | B구간 | 비고 |
|----|--------------------|--------------------|----------|----------|
| 레일 | 110 Hz부근 | 150 Hz부근 | 70 Hz부근 | |
| | 292 Hz부근 | 390 Hz부근 | 160 Hz부근 | |
| 침목 | 110 Hz부근 | 150 Hz부근 | 70 Hz부근 | 380 Hz부근 |
| | | | | |
| 도상 | 110 Hz부근 | 150 Hz부근 | 70 Hz부근 | 160 Hz부근 |
| | | | | |
| 노반 | 75 Hz부근 | 60 Hz부근 | 70 Hz부근 | |
| | 110 Hz부근 | 150 Hz부근 | | |

5.3 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 침목저항측정기를 이용하여 횡저항력 측정시험을 실시하였다. 일반적으로 도상의 횡저항력은 2mm 횡변위를 일으키는 횡하중으로 표시된다. 여기서 횡변위를 2mm로 한 것은 그 이상의 횡하중이 작용하면 횡변위가 급격히 증가하기 때문이다.

Fig. 5는 C구간 침목2개소에 대한 횡저항력 시험결과를 보여준다. 이들 결과로부터 횡변위 2mm에 대한 결과를 비교하여 정리하면 Table 6과 같다.

이로부터 본 연구에서 사용한 도상안정제는 횡저항

력을 1.65~2.17배 증가시키므로 궤도보수재로서 매우 효과적임을 알 수 있다.

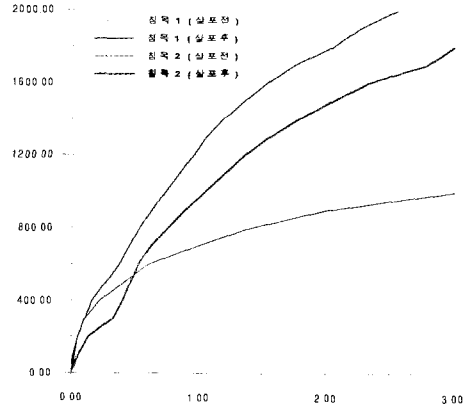


Fig. 5 Test Results of Lateral Resistant Force

Table 6 Test Results of Lateral Resistant Force for 2 mm Lateral Displacement

| 도상안정제 살포전(kgf) | | 도상안정제 살포후(kgf) | |
|----------------|------|----------------|------|
| 침목 1 | 침목 2 | 침목 1 | 침목 2 |
| 823 | 900 | 1783 | 1485 |

5.4 궤도계수

앞절의 측정결과들로부터 하중·처짐관계를 직선으로 가정하여 시험경우별 궤도계수를 산출하고 이로부터 침목별 궤도계수의 평균치 및 전체 평균치를 정리하면 Table 7과 같다. 이 표로부터 A구간 궤도의 경우 특히 분리가 심하여 궤도는 매우 단단한 상태이고, B구간은 비록 분리현상이 발생되어있으나 A구간에 비해 다소 탄성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 한편 침목별 궤도계수를 살펴보면 A구간 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 판단된다. 더욱이 도상안정제 살포후에는 궤도계수가 다소 커지는 것을 알 수 있는데, 이로부터 본 연구에서 사용한 도상안정제는 궤도의 연직강성을 증가시키는데 충분한 역할을 한다고 판단된다.

Table 7 Average Value of Track Modulus

| 궤도 구분 | 도상안정제 살포여부 | 침목 번호 | 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 | |

5.5 진동스펙트럼 비교

앞에서 언급한 바와 같이 궤도구성요소에 발생하는 진동의 크기 및 탁월진동수는 궤도를 구성하는 여러가지 인자 뿐 아니라, 통행열차의 특성, 틀림상태 등에 따라 상당히 달라지므로, 이 절에서는 실측치와 유사한 경향을 나타내는 동특성을 유도하기 위해 레일 및 침목의 진동가속도 스펙트럼 실측치와 해석치를 비교해 보았다. 시험대상 궤도 구성요소의 공칭물성치는 Table 8과 같다. Table 8에서 궤도계수는 가속도센서가 설치된 침목2의 궤도계수 평균값을 사용한다(Table 7 참조).

Table 8 Material Properties of Test Track

| | |
|------------------|---|
| 레일 휨 강성 | 4.116×10 ⁹ kgf · cm ² |
| 궤도계수 | 1,145 kgf/cm ² (A궤도, 도상안정제 살포전) 1,857 kgf/cm ² (A궤도, 도상안정제 살포후) 441 kgf/cm ² (B궤도) |
| 도상하부 스프링상수 | 5,170 kgf/cm ² |
| 레일질량 | 50.4 kg/m |
| 침목, 도상의 질량 | 67.2 kg |
| 차륜의 스프링아래 질량 | 1170 kg |
| 차륜 · 레일 접촉 스프링상수 | 2×10 ⁶ kgf/cm |
| 틀림의 진폭 | 1×10 ⁻⁷ |

Table 8의 입력자료와 앞 논문에서 작성된 프로그램을 이용하여 진동해석을 수행하고 탁월진동수를 추정

한 결과는 Table 9와 같다.

그러나 이들 결과를 Table 5의 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.

Table 9 predominant Frequencies of Track Vibration

| 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 |

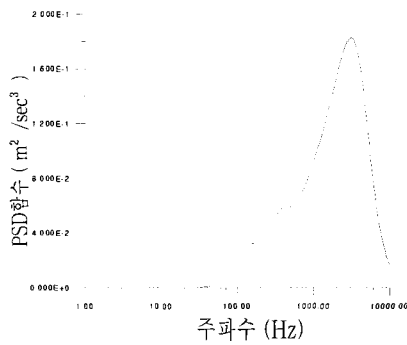
한편 앞 절에서 살펴본 바와 같이 궤도 구성요소에 발생하는 탁월주파수는 동특성의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 실측치와 유사한 탁월주파수를 구하기 위해 궤도계수를 공칭값의 6배(도상안정제 살포전 A궤도와 B궤도), 4배(도상안정제살포후 A궤도), 도상 및 노반에 의한 부가질량을 2배하여 진동해석을 재 수행하였다. 그 결과의 일례는 Fig. 6과 같고 이로부터 추정된 탁월주파수를 정리하면 Table 10과 같다.

Table 10 Predominant Frequencies due to Dynamic Property Change of Track Components

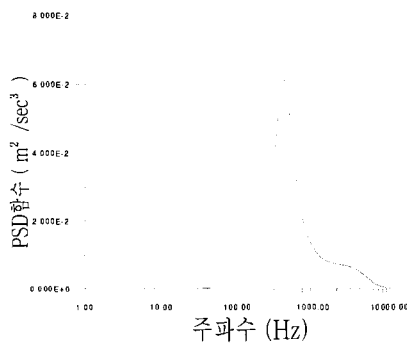
| 주파수 구분 | 탁월진동수 (Hz) | | |
|--------|-----------------|-----------------|-----------|
| | A궤도 (도상안정제 살포전) | A궤도 (도상안정제 살포후) | B궤도 |
| f_1 | 80Hz 부근 | 90Hz 부근 | 65Hz 부근 |
| f_2 | 400Hz 부근 | 400Hz 부근 | 320Hz 부근 |
| f_3 | 3000Hz 부근 | 4000Hz 부근 | 1600Hz 부근 |

Table 10을 Table 5와 비교하면 다소의 차이는 있으나 궤도구성요소의 동특성을 변화시키기 전의 값과 비교하면 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 국내에서도 궤도 형식별 구성요소의 동특성에 관한 체계적인 연구를 수행하면 실제 궤도에서 발생하는 진동거동도 명확히 이해될 수 있으며, 이를 토대로 저진동 · 저

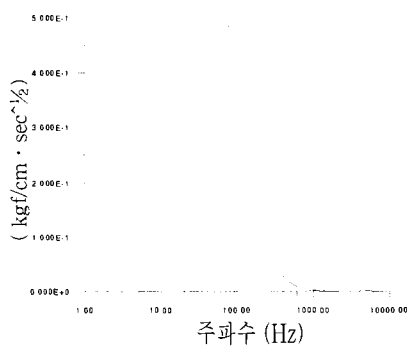
소음 궤도 및 유지관리에 유리한 궤도개발도 가능할 것이다. 한편 500Hz이상의 고주파 성분에 대해서는 측정 속도를 1000Hz로 하여 획득할 수 없었으나 향후 1000Hz이상의 고주파 진동에 대한 연구를 위해서는 체계적인 계측자료 획득 및 분석을 위한 연구도 필요할 것이다.



(a) Rail Vibration



(b) Sleeper Vibration



(c) Transmitting Force

Fig. 6 Vibration Analysis Results considering Dynamic Property Change of Track Components(Track A, Before Spreading Ballast Stabilizer)

6. 결 론

본 연구에서는 궤도 구조의 상태에 따른 궤도계수 및 동특성의 변화를 파악하기 위해 운행선 궤도를 대상으로 열차 주행시험 및 횡저항력 시험을 실시하고 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- ① 본 연구에서 사용한 도상안정제는 궤도의 연직방향 강성 및 횡저항력을 증가시키는데 충분한 효과가 있음이 입증되었으므로 곡선부 또는 불량한 궤도의 도상안정제로서 널리 이용될 수 있을 것이다.
- ② 진동가속도 실측스펙트럼과 해석치를 비교한 결과 궤도계수는 공칭값이 4~6배정도, 도상 및 노반에 의한 부가질량은 약 2배 하면 실측치에 근접한 주파수 성분의 진동을 예측할 수 있다.
- ③ 궤도응답(처짐 및 변형) 이력곡선 측정치를 앞 논문의 해석치와 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다.
- ④ 현재까지 국내에서는 궤도구성요소의 동특성, 트립스펙트럼 및 차륜의 동특성 등에 관한 연구가 미비하여 본 연구에서는 주로 외국의 자료를 인용하였으나, 정확한 궤도 진동해석을 위해서는 이 분야에 관한 체계적인 자료구축이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, 한국구조안전기술원, "궤도구조의 동특성 추정을 위한 연구", 1999.