

축상 가속도를 이용한 레일요철의 관리



| 서 사 범 |

삼표이앤씨(주) 기술연구소장
공학박사 · 철도기술사

1. 머리말

열차의 고속화에 따라 레일표면이 가지런하지 않게 되는 등 단파장 영역의 궤도변위에 기인하는 윤하중변동이 증대하는 경향이 생기게 된다. 이들의 윤하중변동을 검출하기 위해서는 레일 두부상면의 요철 등을 직접 측정하는 것이 확실한 방법이지만, 비효율적인 지상 작업이 수반된다. 본고에서는 간접적인 상태 감시방법으로서 유효한 축상(軸箱, axle box) 가속도를 이용한 단파장 궤도변위의 관리방법을 논의한다.

2. 축상 가속도의 측정

축상 가속도란 차축과 대차 프레임을 연결하는 축상 위에 설치한 가속도계로 측정되는 상하(上下) 진동가속도를 말한다. 레일 두부상면에 잔 요철이 있는 개소를 차량이 주행하면 차륜이나 축상이 가 진되며 그 때의 상하진동을 측정하면 레일요철을 검출할 수가 있다.

다만, 축상 가속도를 측정하기 위해서는 그 설치 개소나 방법에 유의할 필요가 있다. 예를 들어, 축상 덮개의 상부에 설치하거나 취부블록을 이용하면, 덮개나 블록에 의한 고유진동의 영향을 받을 가

능성이 있다. 그러므로 이들의 영향을 없애기 위하여 가속도계는 접착제 등을 이용하여 강고하게 직접 설치하는 것이 바람직하다. 또한, 이용하는 센서는 0~1,000Hz의 주파수 범위를 측정할 수 있고 상한(上限) 가속도가 500m/s²인 가속도 센서의 사용이 권장되며, 가격 등도 고려하여 저항선형(抵抗線型) 가속도계를 이용하고 있다.

3. 축상 가속도의 특성

3.1 윤하중과 축상 가속도

먼저, 고속선로에서의 윤하중과 축상 가속도의 파형 예를 그림 1에 나타낸다. 이 그림에서 윤하중과 축상 가속도의 파형이 대단히 유사한 것을 알 수 있다. 여기서, 윤하중과 축상 가속도의 관계를 구하면, 그림 2에 나타낸 관계가 얻어진다.

그림에서 축상 가속도와 윤하중은 대단히 높은 상관성이 있는 것을 알 수 있다. 이 관계에서 윤하중(P)은 정지 윤하중(P_0)에 스프링 하 질량의 관성력을 더한 것이 식(1)로 나타낼 수가 있다.

$$P = \kappa_1 P_0 + \kappa_2 M \alpha \quad (1)$$

여기서, P : 동적 윤하중, P_0 : 정지 윤하중, M : 스프링 하 질량, α : 축상 가속도, κ_1, κ_2 : 보정계수(표 1)

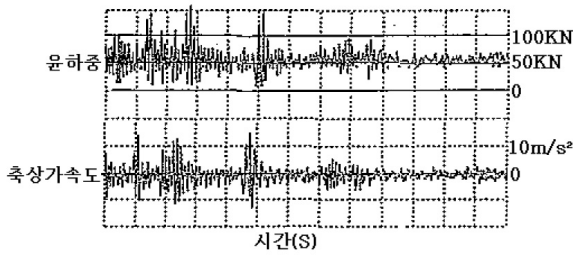


그림 1. 윤하중과 축상 가속도의 파형

표 1. 보정계수

	K_1	K_2
슬래브궤도	1.0	0.7~0.8
자갈궤도	1.2	0.6~0.7

이다. 여기에서 축상 가속도를 측정하면 동적인 윤하중을 추정할 수 있게 된다.

3.2 축상 가속도의 주파수특성

축상 가속도에는 낮은 주파수에서 높은 주파수까지의 성분을 포함한 랜덤 변동이 생긴다. 여기에는 차체나 대차, 더욱이는 차륜의 진동도 포함된다. 그러므로 먼저 축상 가속도의 주파수특성을 검토한다. 그림 3에는 슬래브궤도에서의 윤하중과 축상 가속도의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 양자 모두 상사(相似)한 주파수특성으로 되어 있으며, 60Hz 부근에서 현저한 피크를 갖고 있다. 이 피크는 스프링 하 질량의 변동에 기인한다고 생각된다.

다음에 주행속도 275km/h, 230km/h의 각 속도단계에

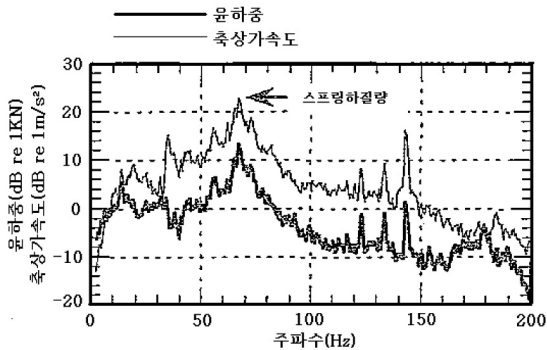


그림 3. 축상 가속도와 윤하중의 파워 스펙트럼 밀도

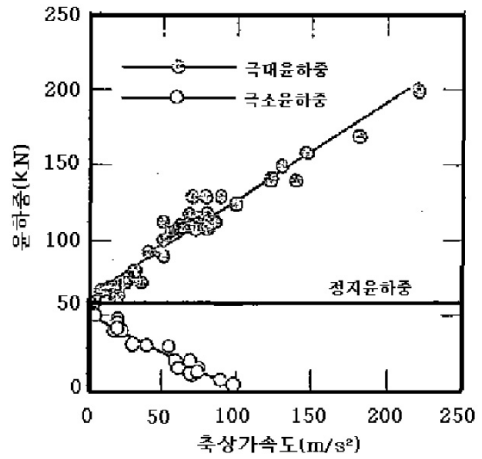


그림 2. 윤하중과 축상 가속도의 관계

서의 파워 스펙트럼 밀도를 구하여 그림 4의 상단에는 가로축을 주파수로 한 결과를, 하단에는 가로축을 파장으로 한 결과를 나타낸다.

그림 4의 상단에서 주행속도가 높아지면 파워 스펙트럼 밀도도 전반적으로 크게 되는 점을 알 수 있다. 또한, 230km/h로 주행 시에 110Hz, 275km/h로 주행 시에 130Hz에서 현저한 피크가 보인다. 이들은 레일체결장치 간격에 의존하기 때문이라고 생각되며, 가로축을 파장으로

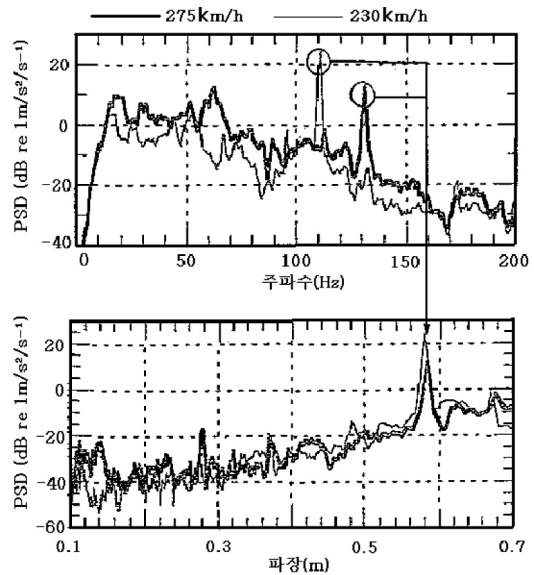


그림 4. 축상 가속도의 파워 스펙트럼 밀도

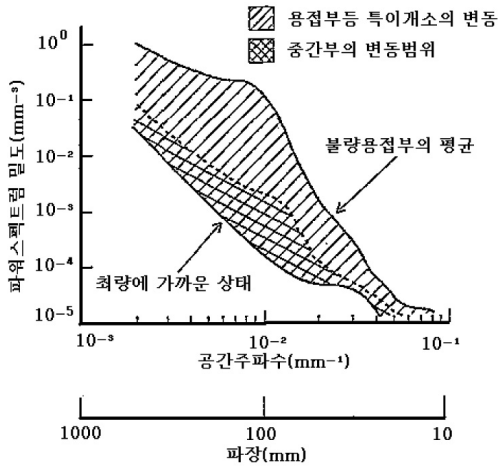


그림 5. 레일요철의 파워 스펙트럼

로 한 그림 4의 하단에서 파장이 0.58m로 되는 점을 알 수가 있다.

4. 운하중변동 발생원인의 추정

4.1 레일용접부의 요철

고속선로에서 고속주행 시의 운하중변동은 레일용접부를 주체로 발생하는 경향이 있다. 일반적으로 그림 5에 나타난 레일요철의 파워 스펙트럼과 같이 레일요철에는 현저한 탁월성분이 보이지 않고 파장이 짧게 됨에 따라서 진폭도 작게 되는 특징을 갖고 있다. 다만, 레일용접부에서는 10 cm 정도의 성분이 약간 탁월한 경향으로 된다.

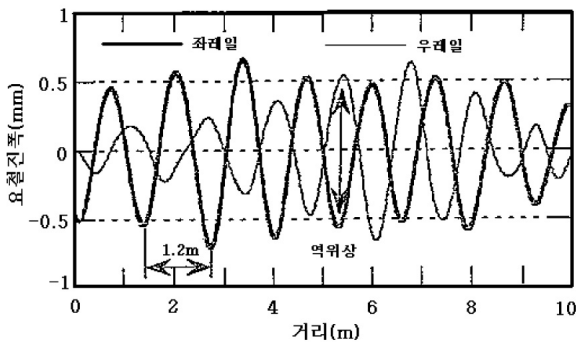


그림 7. 레일 파상마모의 파형 예

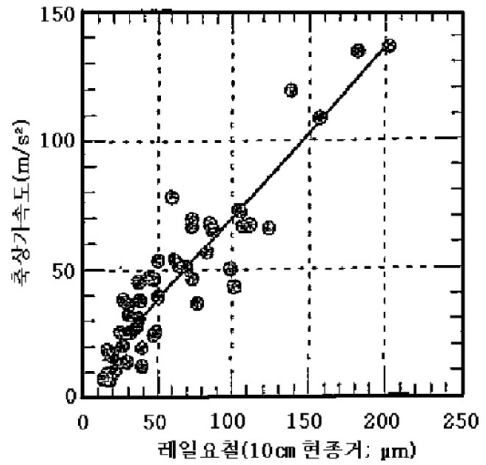


그림 6. 레일요철과 축상 가속도의 관계

그러므로 레일요철의 평가지표로서 10cm 현 중앙종거를 이용하여 축상 가속도와 관계를 구한다(그림 6). 그림에서 양자의 사이에는 약간의 분산이 있기는 하나 거의 비례관계가 있음을 알 수 있다.

4.2 레일 파상마모

고속선로에서는 레일 파상마모가 적지만 특수한 경우에는 파장 1.2m 정도의 레일 파상마모가 발생된다.

이 파상마모는 그림 3에 나타난, 스프링 하 질량의 관성력에 의한다고 상정되는 약 60Hz의 주파수 피크와 일치한다. 또한, 이 파상마모는 그림 7에 나타난 것처럼 전(全)진

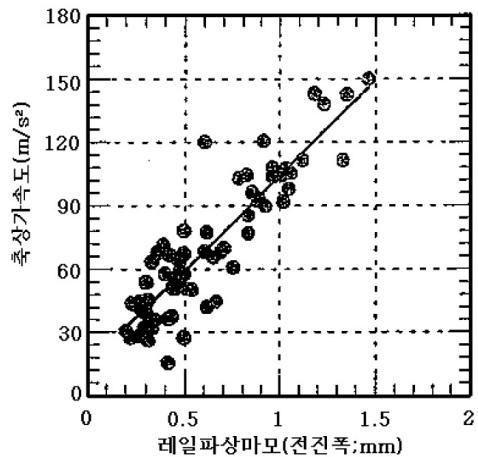


그림 8. 레일 파상마모와 축상 가속도의 관계

폭으로 1mm 이상으로 되는 대단히 큰 요철이며, 게다가 좌우 레일에 대하여 위상이 반전되어 있는 특징을 갖는다. 그림 8은 230km/h 주행 시의 축상 가속도와 파상마모(전진 폭)의 관계를 나타내며, 축상 가속도와 파상마모 구간의 레일요철과는 비례관계에 있는 점을 알 수 있다.

5. 축상 가속도의 구간평가

5.1 구간평가지표

레일 삭정차가 어떤 구간에서 연속하여 이용되는 일이 많은 점에서 축상 가속도의 관리는 단발적인 저대치의 관리는 물론이고 궤도변위지수 P값과 같은 어떤 일정구간 관리지표의 확립도 필요하게 된다. 그러므로 먼저 축상 가속도의 확률밀도함수를 산출하였다(그림 9). 그림에서 축상 가속도의 분포가 거의 정규분포로 근사(近似)되며 축상 가속도의 변동이 큰 곳과 작은 곳의 차이가 큰 점에서 구간 평가지표로서 표준편차를 이용하는 것이 가능하다고 생각 된다.

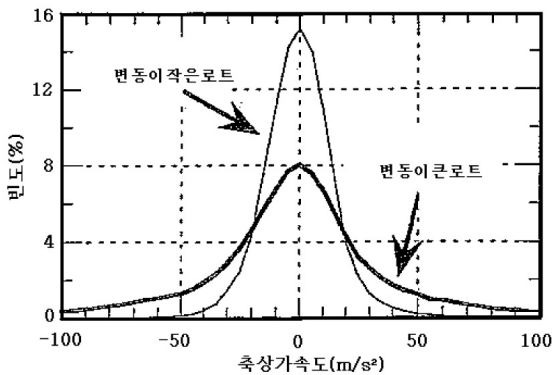


그림 9. 축상 가속도의 히스토그램

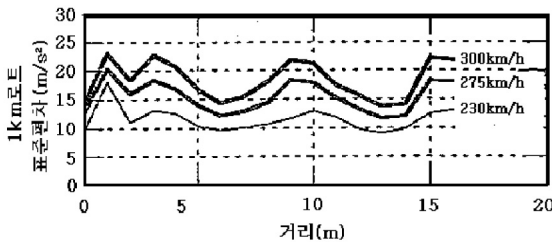


그림 10. 축상 가속도의 속도 의존성

5.2 주행속도 보정

축상 가속도는 일반적으로 주행속도의 증가와 함께 크게 되는 특징을 갖고 있다. 따라서 이것을 평가지표 등에 이용하는 때에는 주행속도에 대한 보정이 필요하게 된다.

고속선로에서 동일개소를 각 속도단계로 주행시킨 때에 대한 1km 로트 표준편차의 예를 그림 10에 나타낸다. 그림에서 각 속도단계 차이의 크기는 거의 일정한 값으로 되며, 속도가 높을수록 축상 가속도가 크게 되는 점을 알 수 있다. 그러므로 축상 가속도와 속도의 관계를 검토한 결과, 통상의 주행속도 영역에서 축상 가속도는 거의 주행속도에 1차 비례하는 관계가 얻어졌다. 그러나 이 관계를 저속 주행영역으로까지 확장하면 저속도영역에서 과대한 보정 배율로 되기 때문에 지수함수 근사에 의한 방법이 제안되고 있다(그림 11).

5.3 레일요철의 구간관리

다음으로 50m · 500m · 1km 로트의 표준편차를 구한 예를 그림 12에 나타낸다. 그림에서 로트길이가 짧을수록

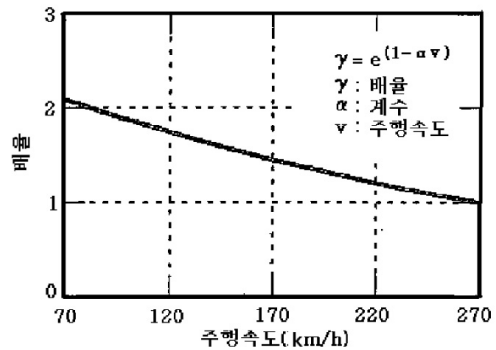


그림 11. 주행속도 보정배율(주행속도 270 km/h 기준)

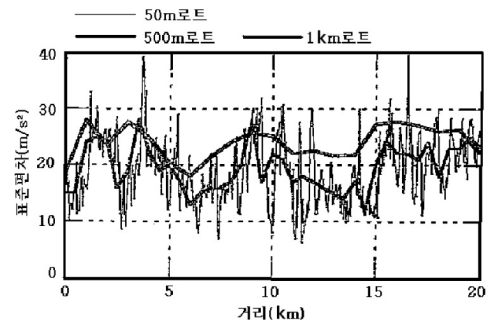


그림 12. 구간로트 길이마다의 표준편차

예민하게 되는 점을 알 수 있다. 따라서 50m 로트에서는 응급적인 시공구간을 파악할 수 있고 1km 로트에서는 큰 시공구간의 파악이 용이하게 된다. 그러므로 예를 들어 1km 로트의 표준편차를 이용하여 보수개소의 중점화를 도모한다고 하는 이용방법이 고려된다. 따라서 평가구간 길이는 작업내용이나 보수량에 따라서 검토하면 좋다고 생각된다. 또한, 표준편차를 이용함으로써 구간마다의 상대비교가 가능하게 되는 점에서 삭정량의 조정이나 시공 순위의 결정을 효율적으로 행할 수가 있다고 생각된다.

6. 축상 가속도를 이용한 궤도의 유지관리

이상으로부터 축상 가속도 데이터를 레일의 요철관리에 이용할 수가 있다고 생각된다. 레일의 요철은 삭정으로 제거할 수가 있지만, 윤하중변동은 레일요철에 기인할 뿐만

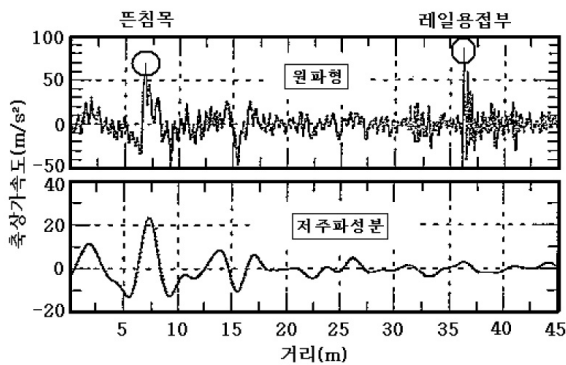


그림 13. 축상 가속도에 의한 뜬 침목의 검출

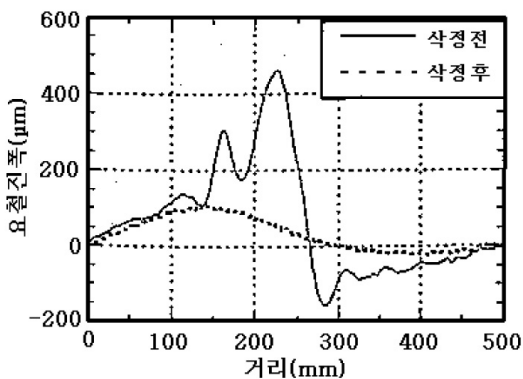


그림 14. 레일용접부 요철의 파형 예

아니라 도상의 열화, 특히 뜬 침목 등에 의해서도 발생된다. 그 때문에 궤도를 보수하기 위해서는 윤하중변동의 원인을 확인할 필요가 있다.

이 뜬 침목과 같이 파장이 수 m 정도인 궤도변위는 일반적으로 이용되고 있는 10m 현 중앙중거법에 의한 고저(면)변위에서는 그 특성 때문에 검출이 곤란하다. 그러므로 축상 가속도 데이터로 30Hz 차단(cut-off)의 저역통과 필터(LPF) 처리를 하여 파장 2~5m 정도의 성분을 추출하여 뜬 침목의 검출을 시도하였다. 그림 13에 뜬 침목 등이 확인되고 있는 개소의 축상 가속도 원(原)파형(상단)과 LPF 필터 처리 후의 데이터(하단)를 나타낸다. 원파형에서는 그림 왼쪽에 뜬 침목, 그림 오른쪽에 레일용접부로 인한 축상 가속도의 큰 변동이 확인되며 저대 윤하중이 양자 모두에 발생되고 있음을 알 수 있다. 여기에 LPF 처리를 하여 저주파 성분만을 추출하면 레일용접 등에 기인하는 고주파의 변동이 제거되어 뜬 침목 개소만을 추출할 수가 있다.

따라서 예를 들어 그림에 나타낸 뜬 침목의 위치에 레일 용접부가 있으면 레일용접부의 요철에 기인하여 뜬 침목이 발생되었다고 생각되므로 도상수선과 레일삭정을 동시에 행한다고 하는 판단이 가능하게 되며 효율적으로 보수할 수가 있다.

7. 일반철도에서 축상 가속도의 적용

일반철도에서 레일 두부상면 요철(이하에서는 “레일요철”이라고 호칭한다)이나 레일 파상마모라고 하는 레일표면의 이상을 효율적으로 검출하는 방법의 확립이 요망되고 있다. 이하에서는 일반철도의 궤도검측차에 설치되어 있는 축상 가속도를 활용한 레일요철이나 레일 파상마모의 검출법과 뜬 침목 등과 같은 도상지지상태의 가지런하지 않음을 검출하는 방법에 관하여 논의한다.

8. 레일요철과 레일 파상마모

레일요철은 일반적으로 레일용접부에서 다소 크게 되며 급(急)곡선 안쪽 레일의 파상마모가 두드러지는 경향이 있다.

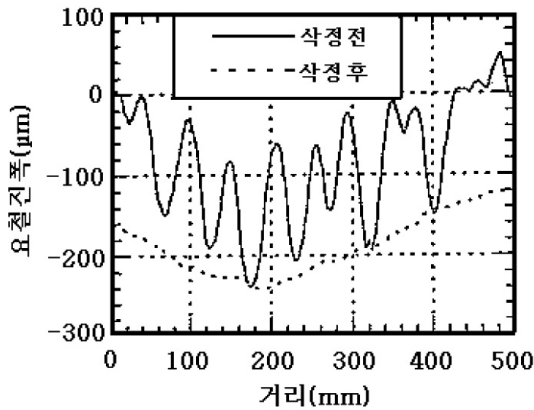


그림 15. 레일 파상마모의 파형 예(직선부)

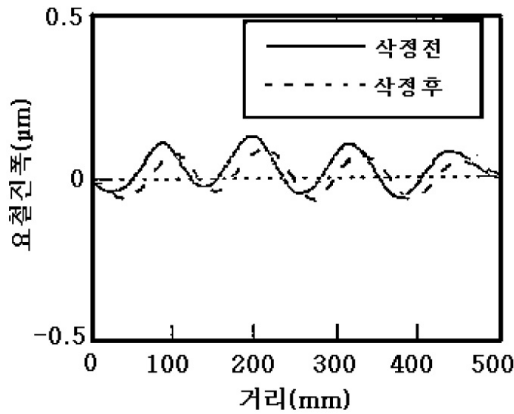


그림 16. 급(急)곡선 안쪽 레일의 파상마모

레일용접부에서는 그림 14에 나타난 것처럼 전(全)진폭 0.5mm 정도의 큰 레일요철이 눈에 띄는 일도 있지만 이와 같은 개소의 레일을 삭정한 결과, 대체로 매끈한 요철로 되는 것을 알 수 있다. 또한, 레일 파상마모로서는 그림 15에 나타난 것처럼 직선부에서 파장 약 6cm의 레일 파상마모가 드물게 발생하는 일이다. 레일삭정 후는 대체로 매끈한 레일표면 상태를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 그림 16에는 급(急)곡선 안쪽 레일에서 자주 발생하는 파상마모의 파형을 나타낸다. 이러한 파상마모의 파장은 약 15cm로 되어 있다.

레일요철의 파장이나 진폭의 특성을 파악하기 위해서는 파워 스펙트럼 밀도를 이용한 해석이 유효하게 된다. 레일요철은 통상적으로 파장이 짧게 됨에 따라서 요철진폭도 작게 되므로 파워 스펙트럼 밀도는 오른쪽이 매끄럽게 내

러가는 경향을 나타낸다. 일례를 그림 17에 나타낸다. 그다지 양호하지 않은 레일요철 상태의 개소에서 레일을 삭정한 경우에는 파워 스펙트럼 밀도가 똑같이 저감되고 파장 5~10cm에서 양자의 차이는 8~10dB 정도로 되는 것을 알 수 있다. 이때에 레일요철에 기인하는 전동음도 8~10dB 정도 저감되는 것으로 알려지고 있다. 또한, 고속철도와 일반 철도를 통한 해석결과를 기초로 레일삭정으로 실현할 수 있는 레일요철 상태는 그림 17의 굵은 선 정도로 된다고 추정하고 있다. 그림의 굵은 선과 같은 때의 레일요철 진폭은

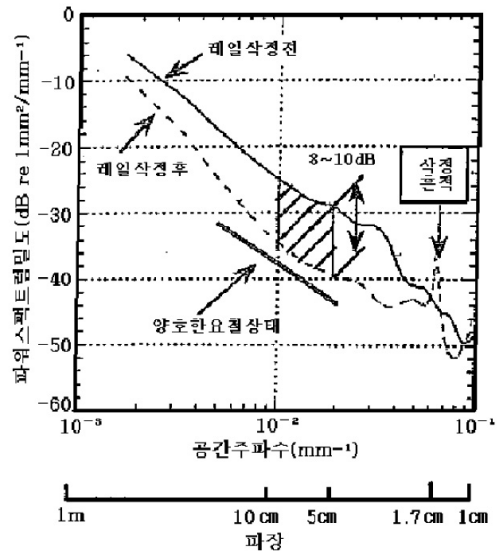


그림 17. 레일요철의 파워 스펙트럼 밀도

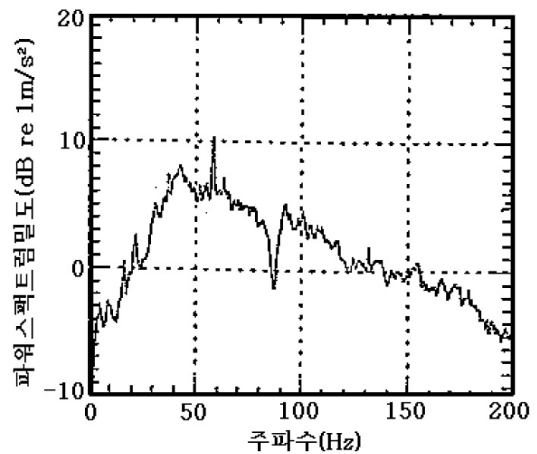


그림 18. 고속가속도의 파워 스펙트럼 밀도 (200 Hz 이하, 주행속도 : 80 km/h)

파장 5~10cm에서 3~4 μ m로 된다.

다만, 레일삭정에 의한 요철의 저감량은 삭정 전의 요철 상태에 의존하며, 레일삭정 전이 양호한 상태인 경우에는 저감이 예상되지 않으므로 불요(不要)한 레일삭정을 하지 않도록 사전의 상태감사가 중요하게 된다. 여기서, 레일삭정 후의 공간주파수 0.06 mm⁻¹(파장 약 1.7 cm) 부근에 작은 피크가 보인다. 이것은 레일삭정 시에 생기는 삭정흔적이며, 일반적으로는 차량의 주행에 따라 서서히 제거되어 매끈하게 되는 것으로 알려져 있다.

9. 축상 가속도를 이용한 단파장 궤도변위의 검출

9.1 운하중과 축상 가속도의 관계

제3장에 나타난 것처럼 고속선로에서 축상 가속도와 운하중의 사이에는 명확한 비례관계가 얻어지고 있다. 일반 철도의 영업차에서도 마찬가지로의 상관성이 얻어지고 있으며, 예를 들어 정지 운하중의 2배로 되는 동적 운하중 80 kN에 대응하는 축상 가속도는 약 110m/s²이다.

9.2 축상 가속도의 주파수특성

축상 가속도의 활용법을 확립하기 위해서는 그 주파수 특성을 파악하는 것이 중요하게 된다. 궤도검측차의 축상 가속도를 파워 스펙트럼 해석한 결과를 그림 18에 나타낸다. 이 그림은 200Hz 이하의 저주파영역을 확대한 스펙트럼이다. 그림에서 40~60Hz의 주파수에서 크며, 40Hz 부근에서 스프링 하 질량에 의존하는 피크가, 58Hz의 주파수에서 레일체결장치 간격에 의존하는 현저한 피크가 생기고 있다.

9.3 레일요철의 검출

일반철도에서의 레일요철과 축상 가속도의 관계에 대하여 궤도검측차로 측정한 축상 가속도와 레일요철의 관계를 해석한 결과를 그림 19에 나타낸다. 그림에서 가로축의 레일요철은 10cm 현 중앙중거로 나타내며, 세로축의 축상 가속도는 기준 주행속도를 80km/h로 하여 보정한 값을 이용하였다. 그림에서 양자의 관계는 다소 분산이 있기는 하나 거의 비례하고 있다. 레일요철의 관리지표를 10cm 현 중

양중거로서 0.3mm라고 가정하면, 축상 가속도는 약 100m/s²로 된다.

9.4 레일 파상마모의 검출

레일요철과 마찬가지로 급곡선 안쪽 레일이나 드물게 직선부에서 발생하는 레일 파상마모와 축상 가속도의 관계를 구하였다. 레일 파상마모는 그림 19와 그림 20에 나타난 것처럼 일정한 파장의 연속한 요철이다. 축상 가속도로 검출하기 위해서는 양자의 관계를 파악할 필요가 있다. 먼저 직선부 레일 파상마모와 축상 가속도 간에는 그림 20과 같이 대체로 양호한 관계가 얻어지며 축상 가속도를 이용하여 레일 파상마모의 검출도 가능하다. 그림 21은 주행속도 75km/h, 곡선반경 400m의 안쪽레일 파상마모와 축상 가

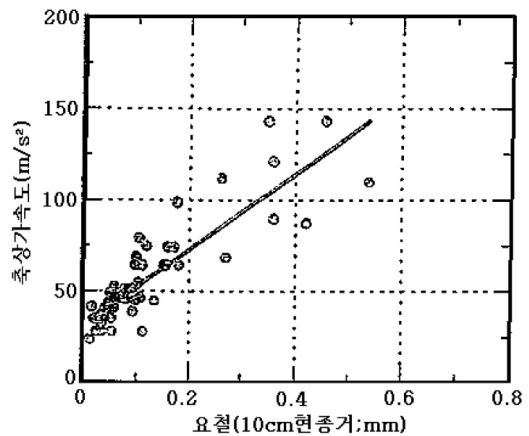


그림 19. 축상 가속도와 레일요철의 관계(주행속도 : 80 km/h)

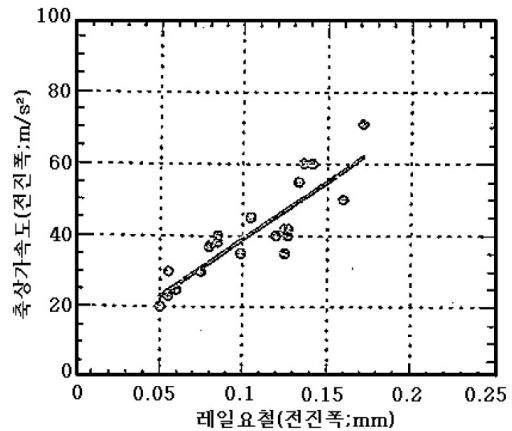


그림 20. 직선부 레일 파상마모와 축상 가속도(주행속도 : 80 km/h)

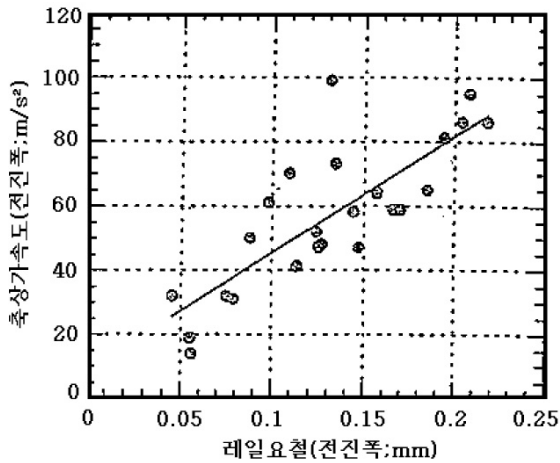


그림 21. 곡선 안쪽레일 파상마모와 축상 가속도(주행속도: 75 km/h)

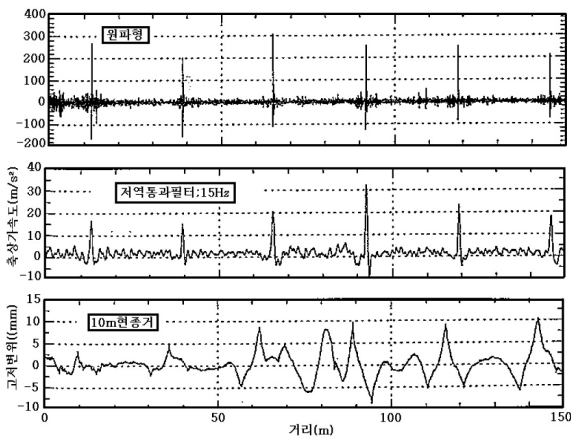


그림 22. 축상 가속도의 지역통과 필터처리와 고저변위의 파

속도 간의 관계를 구한 것이다. 양 그림 모두 약간의 분산이 있기는 하였으나 대체로 비례 관계에 있다. 전진폭 0.15mm의 레일 파상마모에 대한 축상 가속도는 약 60m/s²로 됨을 알 수 있다.

9.5 뜬 침목 검출법에 관한 검토

다음으로 축상 가속도와 뜬 침목의 관계에 대하여 검토한다. 고속철도와 마찬가지로 지역통과(low pass) 필터 처리방식으로 뜬 침목을 검출하면 대단히 효율적이라고 생각된다. 그래서 그림 18의 파워 스펙트럼에 나타난 40~60Hz의 큰 성분을 제거하기 위하여 수 종류의 차단(cut off) 주파수를 설정하여 지역통과 필터 처리를 하였

다. 이 처리를 이음매 궤도에 적용한 결과를 그림 22에 나타낸다. 이 그림에서는 15Hz 차단의 지역통과 필터 처리를 한 결과를 나타내고 있다. 그림에는 10m 현 중앙중기로 측정된 고저(변) 변위의 파형도 아울러 나타내었다. 그림에 나타낸 이음매 궤도의 예에서는 상단에 나타낸 원(原)파형에서 25m마다의 레일 이음매 간격으로 축상 가속도가 저대치로 되어 있는 것을 알 수 있다. 또한, 같은 위치에서 15Hz의 지역통과 필터 처리 후의 파형에도 현저한 저대치가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림의 하단에 나타낸 고저변위의 파장을 보아도 이음매 부근에서 짧은 파장성분으로 인한다고 추정되는 예각(銳角)적인 변동이 보인다. 다만, 축상 가속도의 저대치와 궤도변위의 예각적인 변동이 발생되고 있는 위치에 차이가 있는 것은 양자의 측정위치가 약 5m 떨어져 있기 때문이다.

이와 같이 축상 가속도의 저주파 성분과 고저변위에는 무엇인가의 상관이 있다고 예상할 수 있다. 그러므로 축상 가속도와 고저변위 간의 코히어런스(주파수마다의 상관 함수)를 구하면, 그림 23과 같은 결과가 얻어진다. 그림에서 20Hz 이하의 주파수에서 코히어런스는 0.5 이상으로 되어 있으며, 축상 가속도와 고저변위는 대체로 양호한 상관 관계에 있는 관계이다. 그리고 그림에서 골로 되어 있는 주파수가 수 개소 있는 것은 고저변위의 측정법이 10m 현 중앙중기이기 때문에 5m, 2.5m, 이하 고차 수까지 검출배율이 0으로 되어 있기 때문이다.

이상의 해석결과에서 축상 가속도를 이용한 뜬 침목의

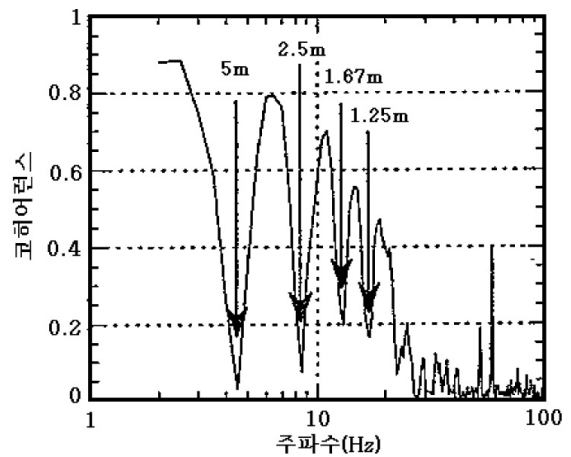


그림 23. 축상 가속도와 고저변위의 코히어런스(주행속도: 80 km/h)

검출은 15Hz 차단의 저역통과 필터처리를 이용할 수가 있다고 생각된다.

10. 맺음말

본고에서는 축상 가속도를 이용한 단과장영역의 궤도변위 등의 검출방법이나 양호한 레일요철 상태를 실현하기 위하여 레일삭정 시에 유의하여야 할 사항에 대하여 기술하였다. 고속철도, 일반철도를 통하여 레일삭정의 중요성이 높아져 가는 중이므로 가일층 효율적인 레일요철 관리방법의 확립도 필요하게 된다고 생각된다. ☺