

선로연변의 환경진동을 저감하기 위한 궤도 축의 대책과 평가사례



서사범
 (주)서현기술단 부사장
 공학박사/철도기술사
 T.010.6219.1369
 suh7484@hanmail.net

I. 머리말

토피가 작은 터널상부 등에 대한 열차주행 시의 지반진동에는 일반적으로 궤도지지 스프링의 저(低)스프링화가 유효하다고 알려져 있다. 일본에서 고속선로 터널 내 자갈 궤도 구간의 궤도지지 스프링정수를 낮추기 위해 레일패드를 저(低)스프링으로 교환한 후의 조사사례를 보면 2.5m 정도의 파장에 대응하는 주파수대역의 진동이 탁월하였다. 또한, 복원 고저변위(면 틀림)에 대하여도 파장 2.5m의 주기적인 요철이 탁월하였다. 그러므로 궤도에서의 가진력을 저감하기 위한 대책으로서 레일상차로 장파장 레일삭정(블록 삭정)을 실시하고, 각각의 대책 전후에 터널 내에서 진동을 측정하고 영업차량으로 축상(엑셀 박스) 가속도를 측정하여 그들의 효과를 평가하였다. 아울러 레일삭정 전후에 현지에서 측정한 레일요철을 이용해 열차주행의 시뮬레이션을 하여 레일요철이 지반진동에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 본고에서는 이러한 철도선로 연변의 환경진동을 저감하기 위한 궤도 축의 대책과 평가 사례를 소개한다.

II. 레일패드 교환에 따른 효과의 검증

당해 사례의 터널에서는 궤도지지 스프링을 저(低)스프링화하기 위한 일환으로서 건설 시에 이미 자갈궤도 탄성

침목이 부설되어 있다. 그러나 터널 상부의 주택지에서 지반진동이 문제로 되었기 때문에 더욱더 궤도지지 스프링의 저(低)스프링화를 목적으로 하여 레일패드를 공칭 스프링정수 50 MN/m에서 20 MN/m 타입으로 교환하였다.

1. 터널 내 진동특성의 변화

저(低)스프링 타입의 레일패드 교환에 따른 진동저감 효과를 검증하기 위하여 교환 전후에 궤도를 포함한 터널 내 각부의 진동가속도를 측정하였다. 그림 1에 터널 내에서의 진동가속도 측정지점을 나타낸다. 측정지점은 하선의

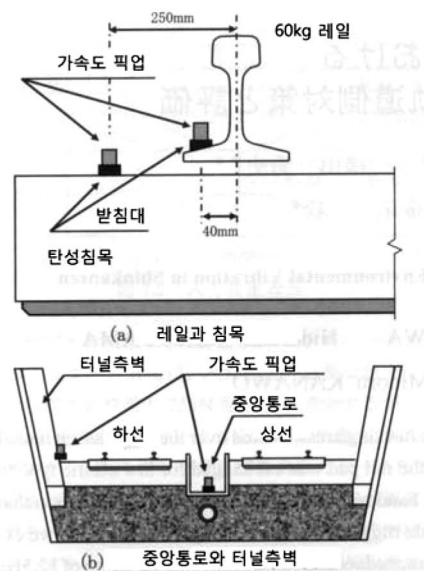


그림 1. 진동가속도의 측정지점

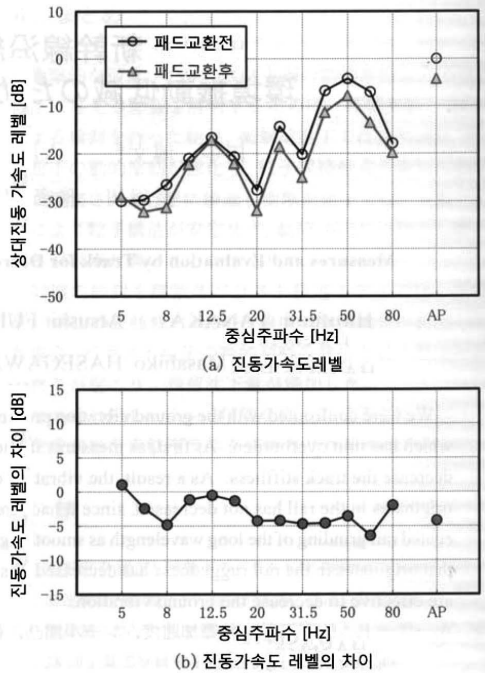


그림 2. 레일패드 교환전후 진동특성 변화의 일례 (터널측벽, 상하진동, V= 120 km/h)

레일, 침목, 중앙통로 및 터널측벽이다.

당해 터널은 흰 화산재 지층에 건설되어 있으며 지하수의 배수를 고려하여 일부 구간엔 과립 슬래그(*granulated slag*)를 이용한 투수성 노반이 채용되어 있다. 진동을 측정 한 구간의 터널 노반도 투수성 노반이었다. 그림 2에 레일 패드의 교환 전후에 측정된 진동측정 결과의 일례로서 터널측벽에서의 1/3 옥타브 밴드의 스펙트럼을 나타낸다. 더욱이, 진동가속도 레벨은 레일패드 교환 전의 올 패스(AP) 값을 0 dB로서 표기하고 있다. 이 그림에서 스펙트럼에는 50 Hz 부근에 피크가 보이고 그 부근의 주파수 대역에서의 진동저감 효과가 보였다. 그에 따라서 진동가속도레벨의 올 패스 값에서도 4 dB 정도의 저하가 보였다. 더욱이, 당해 터널은 역 부근에 위치하고 있어 시험 측선을 통과하는 열차의 주행속도는 200 km/h 미만이다. 그래서 열차속도가 115 km/h인 경우에 궤도의 레일체결장치 간격 0.581 m(43개/25 m)에 따라 여기되는 진동수는 55 Hz 정도로 된다. 또한, 일반적으로 열차의 스프링 하 질량의 고유진동

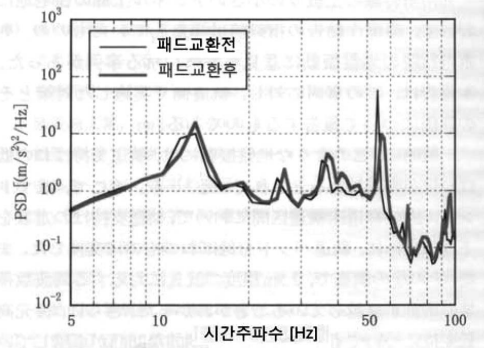


그림 3. 레일패드 교환전후 축상 가속도 스펙트럼의 예 (V= 120 km/h)

수도 50~60 Hz 정도라고 말하여지고 있다. 주요한 피크인 50Hz 대역의 진동이 저감하였기 때문에 올 패스 값도 저하하였다고 생각된다.

더욱이, 10~25 Hz 정도 대역의 진동가속도 레벨에 착안 하면, 12.5 Hz 부근에 예민한 피크가 보이지만 이 피크는 레일패드의 전후에 큰 변화는 보이지 않는다.

2. 축상(액슬 박스) 가속도의 변화

그림 3에 레일패드의 교환전후에 영업차량에서 측정된 축상(액슬 박스) 가속도의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 이 그림으로부터 저(低)스프링 타입의 레일패드 교환전후에 55 Hz 부근의 피크가 저하되어 있고 이 주파수대역에서 궤도로의 가진력이 저감되었음을 알 수 있다. 이에 따라서 그림 2에 나타낸 것처럼 터널측벽의 50 Hz 부근의 피크도 저하되었다고 할 수 있다. 그렇지만, 12.5 Hz 부근의 피크에서는 큰 변화가 보이지 않는다.

Ⅲ. 레일요철의 실태

1. 레일요철의 파악방법

그림 2와 그림 3에 나타낸 것처럼 궤도지지 스프링의 저(低)스프링화에 따라서 50 Hz 대역의 진동이 저감되기는 하였으나 12.5 Hz 부근의 진동이 여전히 탁월함을 알 수 있었다. 그림 4는 당해 구간을 영업차량이 다른 속도로 주

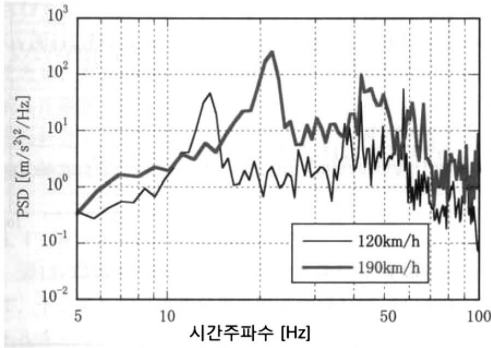


그림 4. 주행속도가 다른 축상 가속도 스펙트럼의 예 (V= 120 km/h 및 V= 190 km/h, 레일패드 교환 후)

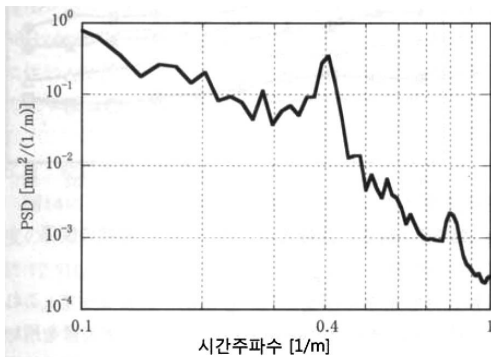


그림 5. 복원고저변위의 스펙트럼의 예

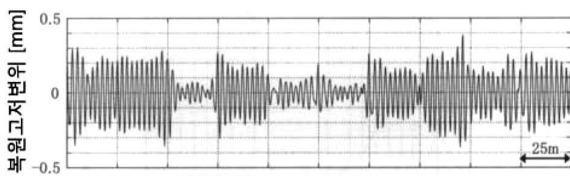


그림 6. 고저변위의 예(파장 1~3m로 복원)

행한 때의 축상(엑셀 박스) 가속도의 파워 스펙트럼이다. 이 그림에서 120 km/h에서는 13 Hz 정도, 190 km/h에서는 21 Hz 정도에 피크가 보인다. 이들의 주파수를 파장으로 환산하면 양쪽 모두 약 2.5 m의 진동성분에 상당하는 점에서 무엇인가의 가진원이 궤도에 존재한다고 예상된다. 또한, 이 피크는 190 km/h의 쪽이 5배 정도 크게 되어 있으며, 열차속도의 증가와 함께 궤도에 대한 가진력이 크게 되어 있는 점도 알 수 있다.

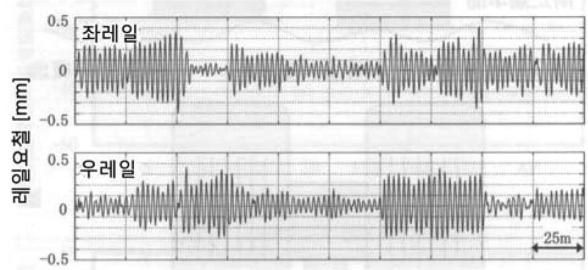


그림 7. 축상 가속도로 구한 좌우레일요철의 예

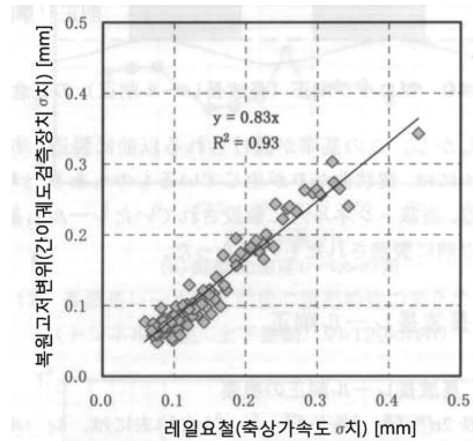


그림 8. 복원고저변위와 레일요철의 관계

그래서 먼저 2 m 현 중앙중거의 간이 궤도검측장치로 터널 내의 고저변위(면 틀림)를 측정하였다. 그림 5에 파장 1~10 m로 복원 처리한 고저변위의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 이 그림으로부터 공간주파수 0.4 [1/m], 파장으로 환산하여 2.5 m의 성분이 탁월하여 있음을 알 수 있다. 그림 6에 파장 2.5 m의 성분을 추출하기 위하여 파장 1~3 m로 대역 패스 필터 처리한 고저변위의 파형을 나타낸다. 이 그림으로부터 레일출하 시의 단위길이인 25 m 주기로 고저변위의 진폭에 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 이 파장 2.5 m의 고저변위는 레일의 요철에 기인할 가능성이 높음을 알 수 있었다.

다음에 영업차량에서 측정하고 있는 축상 가속도를 활용하여 좌우 각각의 레일요철이 큰 구간을 특정하였다. 구체적으로는 측정된 가속도 데이터를 연산이 발산되지 않도록 필터처리를 하면서 2회 적분하여 파장 1~3 m 대역에

서의 레일요철의 진폭을 산정하였다. 그 결과, 그림 7에 나타난 것처럼 그림 6과 마찬가지로 레일출하 시의 단위길이인 25 m 주기로 레일요철의 진폭에 현저한 차이가 생겨있고 게다가 진폭이 큰 구간은 좌우의 레일에서 다르게 되어 있었다. 이에 따라 좌우레일 각각에서 요철이 큰 레일을 특정할 수가 있었다.

더욱이, 이들의 점에서 레일의 요철은 개업 후의 열차주행에 수반하여 생긴 것이 아니고 레일제조 시에 생겼을 가능성이 높다고 할 수 있다.

그림 8에 같은 구간에서의 간이 궤도검측장치의 복원 고저변위와 측상 가속도로부터 추정된 레일요철의 관계를 나타낸다. 게다가 양 데이터 모두 개개 레일의 평균적인 요철상태를 평가하기 위하여 용접부분의 영향을 받는 단부 2.5 m의 데이터를 제거한 후에 중앙부 20 m의 데이터에 대하여 표준편차를 구하였다. 이 그림으로부터 양자의 상관관계가 대단히 높고, 레일요철이 큰 구간을 측상 가속도로부터 높은 정밀도로 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 레일의 파상 굴곡

이와 같은 파장 수 m 정도의 레일요철은 레일제조 시의 롤러 교정기에 기인하여 생긴 것이며, ‘파상 굴곡’이라 부

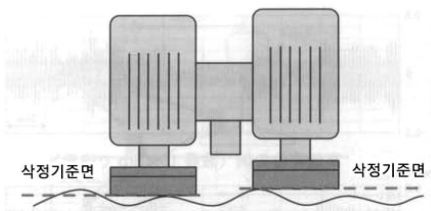


그림 9. 통상의 레일삭정(단파장 레일삭정)의 개념

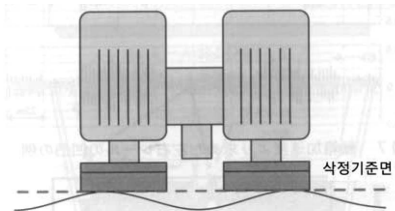


그림 10. 블록 삭정(장파장 레일삭정)의 개념

르고 있다. 또한, 현 시점에서는 파상 굴곡에 관한 기준이 주어지지 않지만, 이와 함께 레일제조 시에는 장척 프로세스(장척 레일을 교정 후에 절단)의 도입, 롤러 교정기의 고(高)강성화 등의 설비개량 등을 함으로써 현저한 파상 굴곡을 억제할 필요가 있다.

IV. 장파장 레일요철의 삭정

1. 장파장 레일 삭정의 개요

파장이 2 m 정도인 긴 레일요철을 제거하기 위해서는 레일교환이 바람직하지만, 영업선로에서의 작업시간 등을 고려하여 레일삭정으로 제거하도록 시도하였다.

통상의 레일삭정에서는 일반적으로 파장이 슯돌(砥石)의 직경 정도까지인 레일의 요철에 대하여 제거효율이 높다. 이것은 그림 9에 나타난 것처럼 레일 삭정차에 탑재되어 있는 복수의 슯돌을 독립하여 제어하고 있으므로 개개의 슯돌 면이 삭정의 기준면으로 되기 때문이다. 이에 대하여 블록 삭정이라고 부르는, 통상의 레일삭정보다도 파장이 긴 요철을 제거하는 방법이 있다. 이것은 그림 10에 나타난 것처럼 레일 길이방향으로 인접하는 복수의 슯돌을 기계적으로 제어해 슯돌 면(삭정 기준면)을 가지런히 하여 삭정하는 것이다. 그렇지만, 블록 삭정에 대한 실시사례는 적다. 또한, 궤도의 동적인 변형이나 삭정차의 기계적 정밀도에 따라서 장파장의 요철을 완전히 제거하는 것은 곤란하게 되어 있다.

2. 장파장 레일요철 제거효과의 검증

측상 가속도를 이용하여 특정된 레일요철이 큰 구간에 대하여 16두식 레일 삭정차를 이용한 블록 삭정을 시험적으로 실시하였으며, 연장은 약 100 m에 걸친다. 그림 11에 레일삭정 전후의 레일요철 파형을 나타낸다. 이것은 삭정차에 탑재되어 있는 레일요철측정 장치를 이용하여 측정된 장파장 요철 데이터(파장 1~3 m로 복원 처리된 레일요철)이다. 이 그림으로부터 블록 삭정으로 장파장의 레일요철이 저감되어 있음을 알 수 있다. 그러나 당해 구간의 총 삭정패스 수는 40 패스로 되어 있어 통상의 레일삭정보다

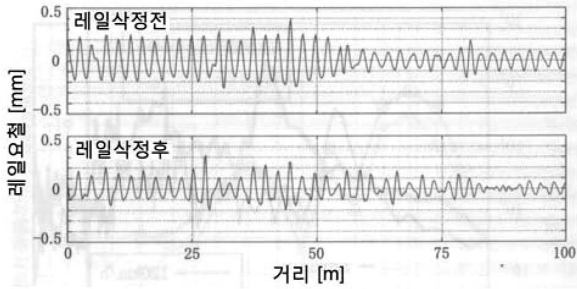


그림 11. 블록 삭정 전후의 레일요철(레일 삭정차로 측정)

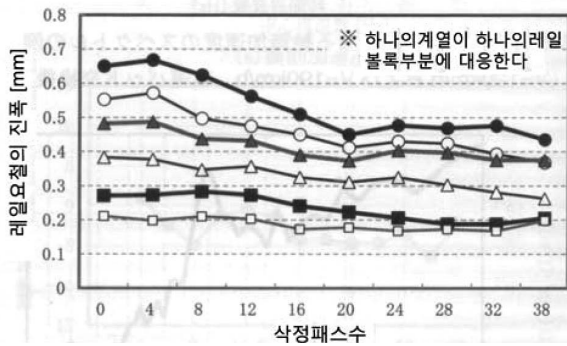
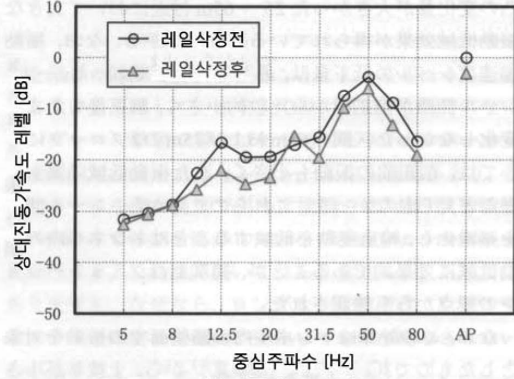


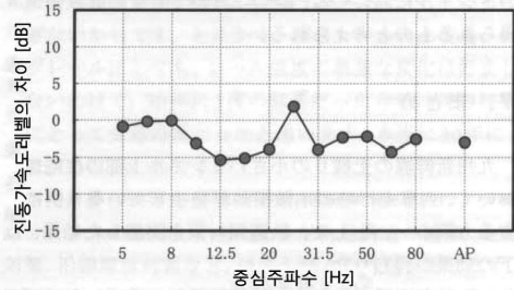
그림 12. 삭정패스 수와 레일요철 전(全)진폭의 관계

도 작업시간이 대폭으로 걸리는 것도 알 수 있었다.

다음에 블록 삭정의 효과를 상세히 검증하기 위하여 삭정차의 차상에서 레일삭정에서의 삭정패스마다의 레일요철 진폭을 측정하였다. 그림 12에 삭정패스 수와 레일요철 전(全)진폭의 관계를 나타낸다. 여기서는 초기 요철의 대소에 착안하여 6개의 레일 블록 부분에 대하여 나타내고 있다. 이 그림으로부터 초기의 요철이 큰 경우는 패스 수의 증가와 함께 진폭이 대폭으로 저하하고 있지만 어느 정도 진폭이 작게 되면 진폭의 저감비율이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 초기 진폭이 작은 경우에도 진폭에는 저감비율이 작고, 어느 정도 진폭이 작게 되면 거의 보합상태의 경향으로 되어 있다. 이 점에서 블록 삭정으로 장파장의 레일요철을 저감시킬 수 있다는 것은 알았지만, 한 편으로 그 저감효과에는 한계가 있다는 점도 알게 되었다.



(a) 진동가속도레벨



(b) 진동가속도레벨의 차이

그림 13. 장파장 레일요철 삭정전후 진동특성 변화의 일례 (터널측벽, 상하진동, V=120 km/h)

V. 장파장 레일요철 삭정효과의 검증

블록 삭정으로 파장 2.5 m의 레일요철이 저감된 효과를 검증하기 위하여 레일삭정 전후에 궤도를 포함한 터널 내 각부의 진동가속도를 측정하였다. 측정항목은 그림 1에 나타난 것과 같게 하였지만, 삭정연장이 짧았기 때문에 측정단면은 저(低)스프링 레일패드의 효과를 평가한 단면과는 다르다. 다만, 레일패드는 저(低)스프링 레일패드로 교환되어 있다. 그 외의 궤도와 구조물 조건도 같다.

1. 터널 내 진동특성의 변화

그림 13에 레일삭정 전후에 진동을 측정한 결과의 일례로서 터널 측벽에서의 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 나타낸다. 또한, 진동가속도 레벨은 레일삭정 전의 올 패스 값을 0 dB로서 표기하고 있다. 이 그림으로부터 파장 2.5 m의 레일요철에 기인하는 12.5 Hz 부근의 진동가속도 레벨이 약 6

dB 저감되어 있음을 알 수 있다. 또한, 50 Hz 부근의 진동도 약간이지만 저감되어 있다. 그에 따라 진동가속도 레벨의 올 패스 값에서도 3 dB 정도의 저하가 보였다.

2. 축상 가속도의 변화

그림 14에는 레일삭정 전후에 영업차량으로 측정된 축상 가속도의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 이 그림으로부터 레일삭정 전후에 12.5 Hz 부근의 피크가 저하되어 있고, 파장 2.5 m의 레일요철에 기인하는 궤도로의 가진력이 저감된 것을 알 수 있다. 이에 따라 그림 13에 나타낸 것처럼 터널 측벽의 12.5 Hz 부근의 피크도 저하되었다고 생각된다.

VI. 시뮬레이션을 이용한 지반진동의 검증

1. 시뮬레이션의 개요

레일삭정으로 파장 2.5 m의 레일요철을 제거한 효과를 검증하기 위해 레일삭정 전후에 실측한 레일요철(그림 11)을 이용하여 차량·궤도·구조물계의 동적 상호작용을 고려한 열차주행 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에는 범용의 교통하중 해석프로그램을 사용하였다. 이 모델에서는 레일, 도상 및 투수성 노반을 보로 하고 침묵은 질점요소로 하였다. 더욱이, 흰 화산재 지층까지를 모델화하였다.

해석 물성치 중에 노반 스프링은 설계표준에 나타난 직접기초의 연직반력 스프링의 고려방식에 따라 설정하였

다. 그 때에 투수성 노반과 흰 화산재 지층의 물성치는 평판재하시험 결과를 이용하였다. 그 외의 차량이나 궤도의 파마미터는 실제로 측정한 값을 이용하였다.

2. 시뮬레이션을 이용한 검증 결과

그림 15에 주행속도 120 km/h에서의 시뮬레이션으로 얻어진 터널 내의 노반 면에서의 진동가속도 레벨 중에서 파장 2.5 m의 레일요철에 대응하는 12.5~16 Hz 대역의 진동가속도 레벨을 나타낸다. 각 로트는 해석구간을 선로방향으로 10 m씩 분할한 때의 각 블록 내에서의 계산결과와 파워평균을 나타내고 있다. 또한, 해석결과와 양단은 경계조건의 영향을 크게 받는다고 생각되므로 양단의 2 블록씩을 제외하고 중앙의 6 블록의 결과에 대하여 나타내고 있다. 또한 진동가속도 레벨은 레일삭정 전의 최대치를 0 dB로 하여 표기하고 있다. 그림 11과 그림 15로부터 초기의 레일요철이 큰 구간에서 레일삭정 전의 진동가속도 레벨이 크게 되어있는 점이나 레일삭정 전후의 레일요철 변화량이 컸던 25~65 m 부근에서 큰 진동저감 효과가 얻어지고 있는 점을 알 수 있었다. 또한, 진동가속도 레벨의 저하량은 최대 약 8 dB이었다. 한편, 레일요철이 삭정 전부터 비교적 작고 삭정 후도 그다지 변화되지 않은 구간의 65 m 및 75 m의 2 블록에서는 삭정 전의 진동도 작고, 또한 진동저감 효과도 거의 보이지 않았다. 이들의 점에서 레일요철을 평활화하여 운하중 저감을 도모하는 것은 터널 내의 진동저감에 효과적임이 열차주행 시뮬레이션의 관점에서도 확인

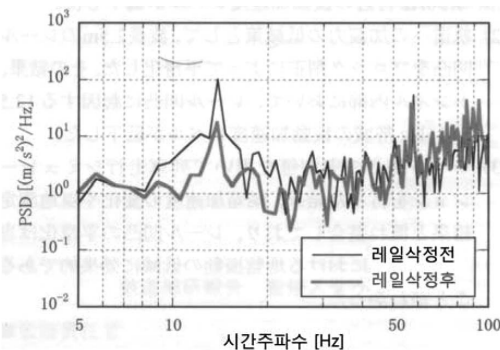


그림 14. 레일요철 삭정전후 축상 가속도 파워 스펙트럼의 예 (V= 120 km/h)

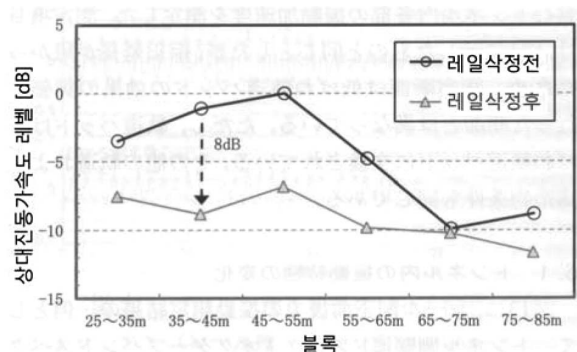


그림 15. 레일요철에 기인하는 진동가속도의 계산결과와의 예 (터널 내 노반면, 상하진동, V= 120 km/h)


되었다.

더욱이, 이 계산은 터널 내 노반 면에서의 진동을 대상으로 한 것이지만, 과거의 식견으로부터 토피가 작은 터널에서는 지상에서도 진동저감 효과가 얻어진다고 생각된다.

VII. 맺음말

토피가 작은 터널 상부의 주택지에서 열차주행 시에 발생하는 지반진동에 대한 대책의 하나로서 궤도 축의 대책을 실시한 사례에서는 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- (1) 궤도지지 스프링의 저(低)스프링화를 목적으로 저(低)스프링 타입의 레일패드로 교환한 결과, 터널 내부에서 스프링下 질량의 고유 진동수에 기인하는 50 Hz 부근의 진동가속도 레벨이 저하되었다.
- (2) 궤도로의 가진력을 저감하기 위한 방책으로서 파장

- 2.5 m의 레일요철을 블록 삭정으로 평활화한 결과, 터널 내부에서 레일요철에 기인하는 12.5~16 Hz 대역의 진동가속도 레벨이 저하되었다.
- (3) 레일요철의 실측치를 이용하여 열차주행 시뮬레이션을 한 결과, 축상(엑셀 박스)의 변화나 현지 측정결과와 대체로 정합하고 있으며, 레일요철의 평활화는 당해 지질조건에서 지반진동의 저감에 효과적이었다. 

♣ 참고 문헌

[1] Hirotsumi TANAKA, Atsushi FURUKAWA, Hidetomi YOKOYAMA, Masahiko HASEGAWA, Minoru KANAWO: Measures and Evaluation by Track for Decreasing Environmental Vibration in Shinkansens, RTRI REOPORT Vo: 24 No. 12, 2010.12

[2] 古川敦: [PDF] 鉄道沿線の地盤振動を低減する, bunkenrtri.or.jp

[3] 横島謙紀: [PDF] 新幹線鉄道騒音・振動に対する被感者の評価報告に関する研究, kamome.lib.ynu.ac.jp/dspace/.../11840044-01.pdf