

승차감 향상을 위한 궤도관리

Track Maintenance for Riding Quality



서사범 (Sa-Bum Seo)

삼표이앤씨(주) 기술연구소장/공학박사·철도기술사
suh7484@hanmail.net

I. 머리말

철도에서의 쾌적성에는 여러가지 요소가 있다. 최근에는 세계적인 수동(受動) 객연(喫煙) 방지의 흐름에 따라 국내의 모든 역과 열차에서 금연을 하고 있다. 공조나 차내 소음도 일종의 쾌적성이다. 이들의 여러가지 쾌적성 중에서 예전부터 철도기술자를 괴롭히고 기술개발의 목표로 되어 온 것이 좁은 의미의 “승차감”, 즉 차량의 진동이다. 적당한 차량의 흔들림은 기분 좋은 것도 있어 차내에서 앉은 상태로 자는 사람이 있지만, 한편으로 최근에는 차내에서 노트북을 다루는 사람도 많아 과도한 진동은 조작을 방해하게 된다.

그러면, 철도차량은 왜 흔들리는 것일까?

당연한 것이지만, 멈추어 있는 차량은 거의 흔들리지 않는다. 차량이 주행할 때야 말로 진동이 생긴다. 이 진동은 두 가지가 있다. 하나는 차량이 자유로이 흔들리는 “사행동(蛇行動)”이라 부르는 현상, 또 하나는 주행 중인 차량에 무엇인가의 외란(外亂)이 작용하여 생기는 진동이다. 후자의 외란에는 공기력이나 연결기를 통한 힘 등이 있지만 궤도(레일)

의 구부러짐에 따라서 차륜의 주행위치를 강제적으로 변위시키는 것이 큰 요소의 하나이다.

본 고에서는 이 레일의 구부러짐이 차량에 주는 영향과 이 구부러짐을 포착하기 위한 관리방법을 논의한다.

II. 궤도변위의 종류와 측정법

철도의 레일은 얼핏 보기에 똑바로 펴져 있는 것처럼 보이지만 자세히 살펴보면 상하좌우로 수mm의 구부러짐이 있다. 이것을 “궤도변위(궤도틀림)”라고 부른다. 차량이 궤도변위 위를 주행하면 차륜이 상하좌우로 변위되고 더욱이는 차량전체가 상하좌우로 진동하여 승차감이 나쁘게 되며 최악의 경우는 탈선에 이른다. 보선기술자는 이것을 방지하기 위해 정기적으로 궤도변위를 측정하여 필요에 따라서 보수를 하고 있다.

궤도변위는 일반적으로 다음의 5 항목에 대하여 mm 단위로 관리된다.

- ① 고저(면)변위(레일의 상하방향 변위)
- ② 방향(줄)변위(레일의 좌우방향 변위)

- ③ 수평변위(좌우레일 높이의 차이)
- ④ 평면성변위(2줄의 레일이 만드는 평면의 비틀림)
- ⑤ 궤간변위(좌우레일의 간격)

이 중에서 ③~⑤는 어떤 지점에서의 좌우레일의 상대위치이므로 측정이 비교적 용이하다. 한편, 고저·방향변위는 길이방향의 위치이며, 일반적으로는 그림 1에 나타난 것처럼 10m 길이의 줄(弦)을 레일에 잇대어 팽팽하게 하여 이 현의 중앙 위치에서 레일과의 상하·좌우방향 벌어짐을 측정한다. 이 방법을 “10m 현 중앙종거법”이라 부른다.

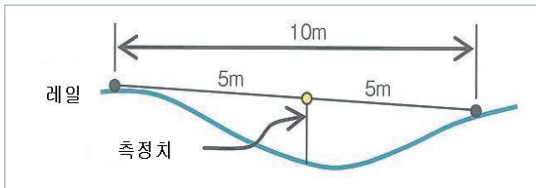


그림 1. 10m 현 중앙종거법

그런데 이 10m 현 중앙종거법으로 측정한 데이터는 레일 길이방향의 실제형상을 나타내고 있는 것이 아니다. 이것은 그림 1에서 현의 길이를 바꾸면 측정치가 변해버리는 점에서 용이하게 상상할 수 있다.

좀 더 상세히 살펴보면 10m 현 중앙종거법으로 이상적인 사인파(정현파) 형상의 궤도변위를 측정할 경우에 그 파장에 따라서 진폭의 측정배율이 변화한다. 구체적으로는 그림 2에 나타난 것처럼 파장 30m의 사인파에서는 원래 진폭의 0.5배로, 파장 50m에서는 0.19배로 된다. 또한, 파장 5m의 사인파를 10m 현 중앙종거법으로 측정하면 진폭은 도처에서 0으로 측정된다. 이와 같은 파장과 측정배율 간의 관계는 그림 3과 같이 된다. 10m 현 중앙종거법에서는 파장이 6.67~20m의 범위에서 측정배율이 1보다 크게 되어 실제의 궤도변위보다도 진폭이 크게 측정된다.

이와 같이 실제형상을 나타내고 있는 것이 아닌 데도 10m 현 중앙종거법을 이용하고 있는 것은 물론 이유가 있다. 그 이유를 이하에 기술한다.

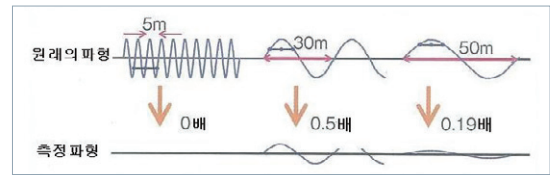


그림 2. 10m 현 중앙종거법에 따른 측정배율

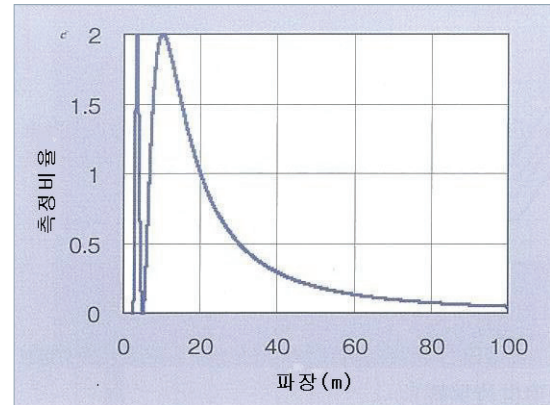


그림 3. 10m 현 중앙종거법에서 파장과 측정배율의 관계

Ⅲ. 차량의 운동특성과 10m 현 중앙종거법

철도차량은 일반적으로 차체에 2개의 대차가 장치되고 각 대차에 2개의 윤축(4개의 차륜)이 장치되어 있다. 각각의 사이에는 스프링과 댐퍼가 장치되어 있어 알맞은 정도로 진동을 흡수하고 있다. 스프링과 질점이 연결된 계는 일반적으로 특정 주파수(1초 동안에 흔들리는 횟수)의 외력을 받는 경우에 진동이 대단히 크게 된다. 이때의 주파수를 “고유진동수”라고 부른다. 철도차량의 고유진동수는 대부분의 경우에 1.0~1.5 Hz의 사이에 있다. 따라서 예를 들어 초속 25m(= 90km/h)로 주행하는 차량은 궤도 측에 파장 25m의 변위가 있으면 정확히 1초 주기로 흔들리기 때문에 같은 진폭으로 파장 10m의 궤도변위가 있는 경우(이 경우에 1초 동안에 $25/10 = 2.5$ 회 = 2.5 Hz로 흔들린다) 보다도 흔들림이 크게 된다. 열차의 흔들림을 억제하기 위해서는 이 고유진동수에 상응하는 파장에 착안하여 진폭을 작게 할 필요가 있다.

열차의 스피드, 궤도변위의 파장과 차량을 가진하

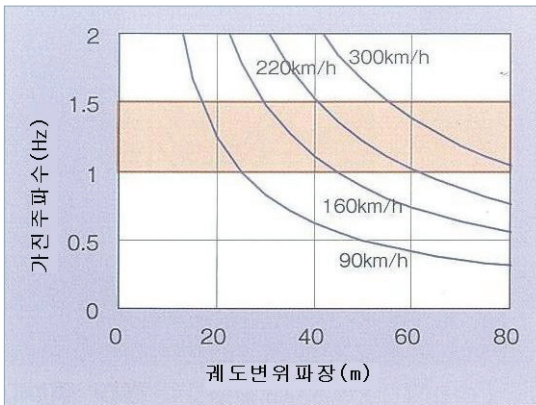


그림 4. 궤도변위의 파장과 차량이 흔들리기 쉬운 주파수와 관계

는 주파수의 관계를 그림 4에 나타낸다. 예를 들어, 시속 130km/h의 경우에는 파장 25m 내지 36m의 궤도변위가 고유진동수에 상당한다.

그림 3과 그림 4를 비교하면, 일반철도에서 일반적인 속도인 90km/h의 경우에 차량이 흔들리기 쉬운 주파수에 상당하는 파장과 10m 현 중앙종거법에서 측정배율이 큰 파장이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 10m 현 중앙종거법은 차량이 흔들리기 쉬운 파장의 궤도변위를 증폭하여 측정하는 방법이라고 말하여진다. 이것이 10m 현 중앙종거법을 이용하는 큰 이유이다. 일반철도의 고속선구나 고속철도에서는 속도에 따라서 20~40m 현 중앙종거법이 이용되고 있다.

IV. 진동가속도와 승차감레벨

그러면, 승차감은 도대체 어떻게 평가하면 좋은가? 궤도변위의 진폭이 그대로 승차감을 나타내고 있다고 생각하면 좋을 것인가?

머리말에서도 기술한 것처럼 협의의 승차감은 차량의 흔들림을 가리킨다. 흔들림을 나타내는 물리량으로서 일반적으로는 변위, 속도, 가속도가 이용되지만 승차감의 평가에는 가속도를 이용한다. 이것은 뉴턴 역학의 법칙에 의거하여 차량의 흔들림에 따라서 차내의 승객이 받는 힘은 그 사람의 체중(정확히는 질량)과 가속도를 곱한 것으로 되기 때문이다. 차량의 흔들림에 따른 불쾌감은 승객이 받는 힘에 비례한다고 생각되므로 승차감을 좋게 하기 위해서는 가속도를 작게 하면 좋게 된다.

승차감의 평가에는 가속도의 크기가 이용되는 일이 많지만 진동하는 것이 사람이므로 철도차량의 경우와 마찬가지로 인체가 흔들림에 민감한 주파수에 착안하여 평가하는 일도 있다. 이 경우의 평가지표에는 크게 나누어 다음의 두 가지가 있다.

1. 승차감계수

승차감계수란 미국자동차협회의 Janeway가 제안한 자동차에 관한 승차감 기준을 참고로 하여 철

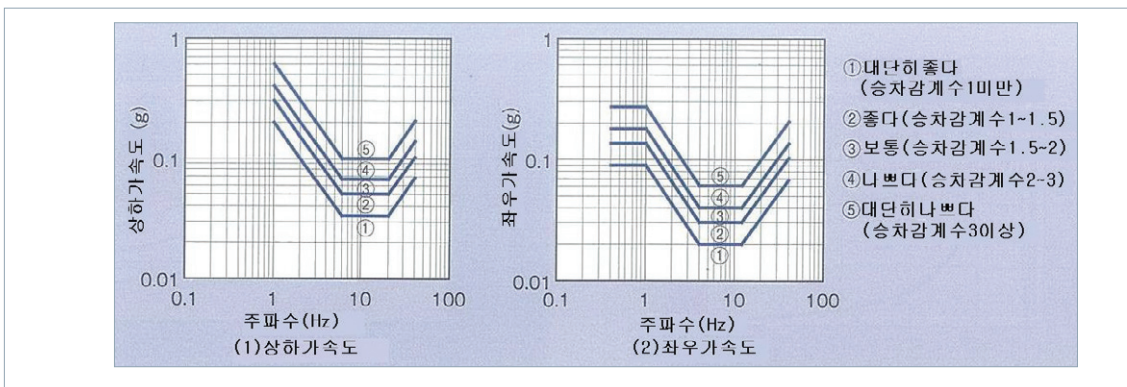


그림 5. 승차감기준(가속도는 편진폭)

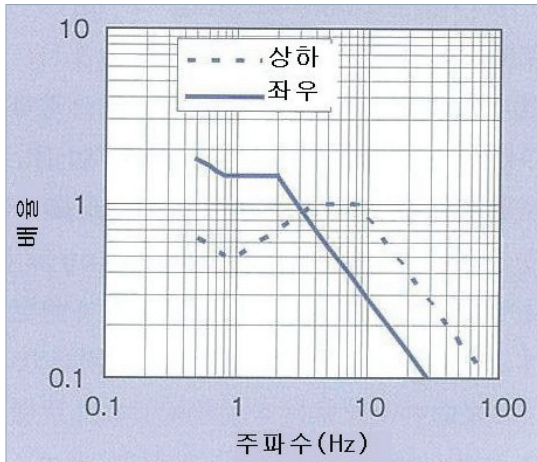


그림 6. 승차감 필터

도용으로 작성된 승차감의 평가지표이다.

승차감계수를 이용한 승차감의 평가에서는 발생된 가속도를 그림 5에 나타난 상하 좌우 각각 4개의 선에 따라 5 단계로 구분한다. 각 선의 세로축은 승차감이 거의 등가임을 나타내고 있다. 예를 들어, 상하가속도의 1번 아래 선의 경우에 1.0Hz에서 0.2g(2.0m/s²)의 가속도와 10Hz에서 0.033g의 가속도는 거의 같다고 한다. 즉, 그림 5에서 선의 높이가 낮은 주파수는 인체가 민감하게 느끼는 = 중요시하여야 하는 주파수로 된다.

2. 승차감레벨

승차감레벨은 국제표준화기구(ISO)가 제안한 “전신 진동폭로에 관한 평가지침”(ISO 2631)을 참고로 하여 철도의 승차감관리기준으로 제안된 것이다. 이것은 가속도에 그림 6에 나타난 승차감 필터에 따른 가중치를 주고 더욱이 그 시간평균을 산출하여 데시벨 값으로 변환한 것이다.

그림 5의 각 선과 그림 6의 선은 상하가 반전된 것처럼 보이지만 그림 5에서 세로축의 값이 작은 주파수는 작은 가속도에서도 중요시되는 점을, 그림

6에서 세로축의 값이 큰 주파수는 가속도에 큰 배율을 곱하여 중요시하는 점을 나타내고 있으며, 주파수마다 가중치의 의미는 같다. 다만, 중요시하여야 할 주파수는 승차감계수와 승차감레벨에서 다르다. 현재, 전자는 주로 속도향상시험시에 발생된 저대 진동의 평가 등에, 후자는 수분간 정도의 구간 평가에 이용되고 있다. 다만, 승차감레벨을 궤도의 보수에 이용하는 경우는 어느 정도 짧은 구간의 평균치를 이용하는 쪽이 사용하기에 좋으므로 평가시간을 2초 정도로 하고 있다.

V. 승차감 평가지표로서 궤도변위

상기의 전반에서는 궤도변위의 측정원리와 그 의미를, 후반에서는 승차감의 평가방법에 관하여 기술하였다. 여기서는 양자를 결부시키는 방법을 고찰한다.

차체의 진동가속도는 가속도계를 이용하면 비교적 용이하게 측정할 수 있다. 그러나 가속도는 차량의 개체차이나 주행속도에 따라서 값이 변화되기 때문에 측정치의 재현성이 높고 현장에서 곧바로 측정할 수 있는 궤도변위를 이용하여 승차감을 평가하는 것이 좋다.

가장 간단한 방법은 궤도변위의 진폭을 평가지표로 하는 것이다. 전술한 것처럼 일반철도 속도대역에서 10m 현 중앙중거법은 차량이 흔들리기 쉬운

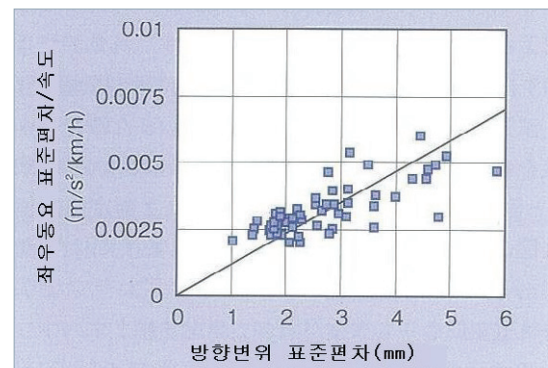


그림 7. 방향(줄)변위의 표준편차와 좌우 진동 표준편차의 관계

파장의 궤도변위를 증폭하여 출력하는 성질을 갖고 있으므로 궤도변위의 진폭이 큰 지점은 가속도도 큰 지점으로 된다. 10m 현 중앙중거 방향(줄)변위의 100m마다의 표준편차와 좌우 진동가속도의 표준편차를 비교한 것을 그림 7에 나타낸다. 분산은 크지만 속도가 같다면 좌우 진동은 방향변위에 거의 비례하여 크게 되는 것을 알 수 있다.

한편, 그림 7의 분산 정도에서 알 수 있는 것처럼 실제의 차량 거동은 궤도변위에 보기 좋게 비례하고 있다고 말할 정도로 단순하지 않으며, 또한 좌우 진동의 경우에 방향변위와 수평변위 쌍방의 영향을 받는다. 이와 같은 점을 고려하여 궤도변위의 측정 데이터에서 차량의 가속도를 시뮬레이션으로 구하는 것이 고려된다. 이 방법이라면 가속도를 측정하는 경우와 비교하여 측정시의 속도나 차량 개체차이의 영향을 받기 어렵고 안정된 결과가 얻어진다. 더욱이, 시뮬레이션 결과로부터 전술한 승차감레벨을 계산할 수 있으므로 보다 인간의 체감에 가까운 평가결과가 얻어진다고 하는 이점이 있다.

다만, 어느 방법이든 이들의 평가지표에서 알 수 있는 것은 어느 지점이 어느 정도 승차감이 좋은가(나쁜가)라고 하는 것 뿐이며 어떻게 보수하면 승차감이 개선되는가라고 하는 것은 알 수 없다. 승차감을 개선하기 위해서는 궤도변위를 작게 하는 보수 방법도 고려할 필요가 있지만 지면관계상 본 고에서는 생략한다.

Ⅵ. 사행동과 궤도

다음에 특히 외란이 없어도 차량이 제멋대로 흔들리는 “사행동(蛇行動)”에 관하여 고찰한다.

차륜과 레일의 위치관계를 그림 8에 나타낸다. 직선에서는 윤축이 궤간의 한가운데를 주행한다(그림 8(1)). 주행위치가 좌우의 어딘가로 벗어난 경우에 한

$$S = 2\pi \sqrt{\frac{d_o r_o}{\tan \theta}} \quad (1)$$

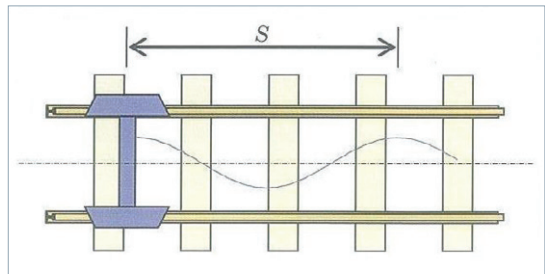


그림 9. 윤축 사행동 파장

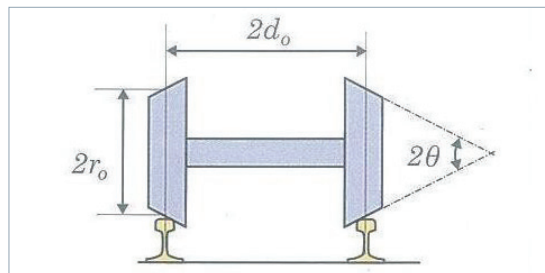


그림 10. 윤축과 차륜의 위치관계

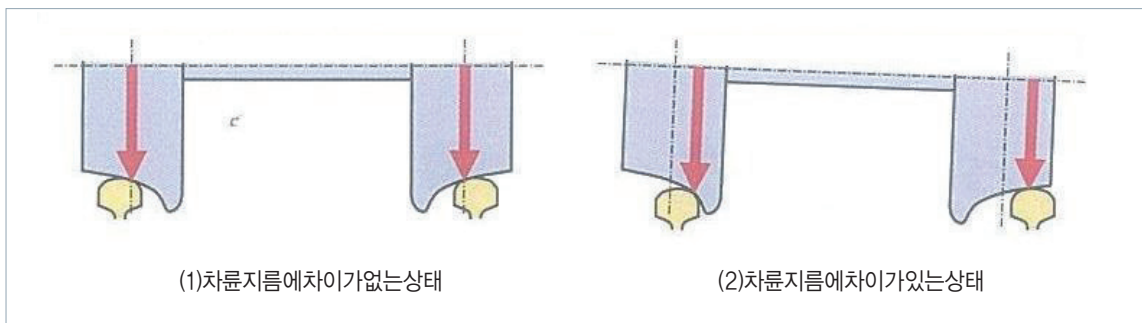


그림 8. 윤축과 레일의 접촉상태

쪽의 차륜반경이 크게 되고 다른 쪽의 차륜반경은 작게 된다(그림 8(2)). 지름이 큰 차륜은 반경이 작은 차륜보다 긴 거리를 진행하려고 하지만 좌우의 윤축이 차축으로 연결되어 있으므로 그림 9와 같이 윤축이 좌우로 운동한다. 이와 같이 윤축이 진행하는 방향에 대하여 S자 모양으로 반복하여 진동하는 것을 뱀의 운동에 비유하여 “사행동”이라고 한다.

사행동에서 윤축이 좌우방향 상의 원래 위치로 되돌려지기까지의 거리(그림 9의 S)를 “(윤축) 사행동 파장”이라고 한다. 사행동 파장은 그림 10에 나타내는 차륜의 반경 r_0 , 레일과 차륜 접촉면의 각도 θ 및 레일과 차륜의 접촉점 간격 $2d_0$ 에서 식 (1)로 나타낸다.

차량의 설계시에는 대차나 윤축을 지지하는 스프링의 강성이나 감쇠계수를 적절하게 설정함으로써 윤축의 고유진동수가 사행동 파장에 대응하는 주파수(≒초속/사행동 파장) 보다도 높게 되도록 한다. 다만, 차륜이 마모되거나 스프링이 열화되면 영업속도의 범위에서 사행동이 발생하는 일이 있다. 궤도와와의 관계에서 말하면, 차륜이나 레일의 마모에 따라서 θ 가 크게 되는 경우에는, 식 (1)에서 S 가 짧게 되어 사행동이 일어나기 쉽게 된다. 이 경우에

차륜이나 레일을 삭정함으로써 사행동이 억제된다. 또한, 차륜의 단면형상이 그림 8과 같이 원호로 되어있는 경우에는 궤간이 좁으면 θ 가 크게 되어 사행동이 발생하는 일이 있다. 이와 같은 경우에는 궤간을 넓혀 θ 가 작은 개소에서 차륜과 레일이 접촉하도록 하면 사행동이 억제된다.

VII. 맺음말

본 고에서 논의한 내용 중에서 궤도관리의 면에서는 지금까지 궤도변위의 관리에 중점이 주어지고 사행동은 차량단독의 성능으로 되어 왔다. 그러나 최근에는 레일의 단면형상이나 궤간변위를 기점으로 하는 사행동이 고속선로, 일반선로 모두에서 발생되고 있어 대책이 필요하다. 이와 같이 향후의 승차감 향상을 위해서는 지금까지 그다지 고려되지 않았던 레일과 차륜간의 접촉상태의 관리가 필요하기 때문에 이것에 대응하는 측정법, 평가법 등의 기술개발이 필요하다고 생각된다. 

기획 : 공정식 편집간사 jskong@korea.ac.kr