

열차 주행평가를 위한 윤중, 횡압 측정 방법의 검토

Review of Wheel and Lateral Force at Rail for Train running performance

최찬용, 엄기영, 배재훈, 김상수, 유충현
Chan yong, Choi Ki young, Eum Jae hoon, Bae Sang so, Kim Chung hyun, yoo

ABSTRACT

It is of utmost important that track loads at rail induced by running train was usually obtained for track performance evaluation. A reaction force of track was measured wheel loads and lateral force by strain gauges on the rail, and then it was obtained to derailment coefficient and variational ratio of wheel load from its relationship. In this study, a existing monitoring system methods with many manpower working were reviewed about measurements, process of testing, and how to obtain accurately measured data.

1. 서론

열차 운행시 궤도에 발생하는 부담력은 열차의 주행안정성을 평가하는 중요한 항목이다. 열차가 궤도를 주행할 때 열차와 궤도의 상호간에는 작용력이 발생하게 되며, 이 작용력의 크기는 열차의 주행속도, 축중, 선로의 선형 등의 함수로서 적절한 안전율로 설계하게 된다. 주행하는 열차에서 궤도에 전달되는 작용력은 윤중, 횡압, 축방향력이 있다. 윤중과 횡압은 한 개의 차륜(wheel)을 통하여 레일에 작용하는 수직하중과 횡방향 힘을 말한다. 일반적으로 윤중과 횡압은 궤도에 작용하는 정적 하중뿐만 아니라, 시간에 따라 변화하는 동적하중의 영향도 고려할 수 있다. 또한 윤중과 횡압의 두변수를 이용하여 주행안전성 평가에 있어서 중요한 탈선계수, 윤중 변동율 등을 검토할 수 있다. 따라서 윤중과 횡압의 측정은 궤도 역학에서 매우 중요한 측정인자이며, 이를 적절하게 계측하고 분석하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다. 현재 윤중과 횡압을 측정하는 방식은 측정은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착한 후 전단변형을 측정하였다. 횡압은 윤축의 전향과 캔트의 변화에 의한 원심력과 차량 사행 및 주행거동을 파악하기 위해서 측정하였다. 측정은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 저부상면에서 내측에 스트레인 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 힘의 영향을 배제시켜 전단력을 측정하고 있다. 본 논문에서는 현재 사용하고 있는 스트레인 게이지 방법에 대하여 결손방법, 그리고 다양한 인자에 의한 신호의 변화 등을 검토하여 보다 정확한 계측결과를 얻을 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 윤중 및 횡압 측정 방법

2.1 스트레인을 이용한 전단력 측정

그림 1은 1게이지 방식을 이용한 전단력 측정방법의 예이다. 그림에서와 같이 전단응력(τ)은 식 (1)과 같으며 면적으로 환산하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : cychoi@krii.re.kr
TEL : (031)460-5317 FAX : (031)460-5319
* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원
*** 정회원, 국토해양부, 간선철도과

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (\text{식 1})$$

여기서, F : 전단력, S : 단면적 이다.

$$\tau = \frac{W}{b \times h} \quad (\text{식 2})$$

여기서, b : 양의 폭, h : 양의 두께 이다.

또는 전단응력(τ)과 전단 스트레인(γ)의 관계로부터 $\tau = G \times \gamma$ 이며, G =횡 탄성계수로부터 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma = \frac{W}{G \times b \times h} \quad (\text{식 3})$$

전단 스트레인 γ (rad)는 45° 방향의 스트레인 ϵ_0 의 2 배에 상당한 것이므로, ϵ_0 를 구하여 전단응력 (τ)와 전단력(W)를 구하는 것이 가능하다. 그림에서와 같이 1게이지법에 의한 전단력은 가장 쉬운 결손방법으로 변형을 측정할 수 있으나, 리드선의 온도변화에 따른 저항변화와 변형계이지의 변형에 따른 참저항(Real resistance)의 변화를 구할 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 가장 많이 사용하는 방법은 1 게이지 3선법, 2게이지법, 4게이지법을 많이 사용한다.

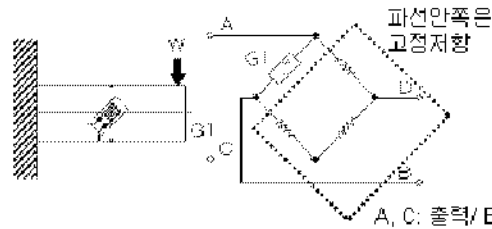


그림 1 스트레인게이지를 이용한 전단력 측정방법

2.2 4게이지(full bridge)

휘스톤 브릿지 회로 4변의 저항을 모두 변형계이지로 구성하는 방법이다. 부재의 응력을 측정하기 보다는 변환효율을 크게하고 온도보상과 측정하지 않는 변형성분을 제거하기 위해 이용되는 경우가 많다. 그림 2은 원주에 변형계이지를 접착하여 4게이지로 브릿지를 구성한 경우로서 종방향과 횡방향으로 변형계이지를 각각 중심축에 대칭인 곳에 접착해 두면 휨변형을 없어진다. 앞서 1게이지 방법으로 전단력을 측정하는 방법보다 리드선의 온도보상도 되면서 변형을 측정할 수 있는 이점이 많은 방법이다.

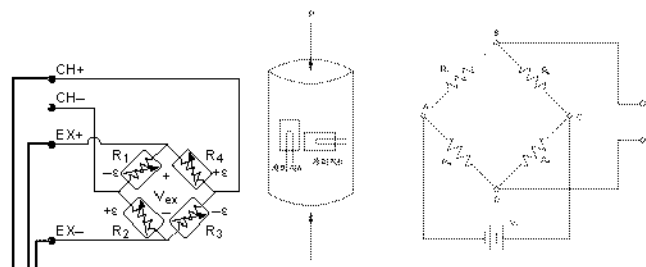


그림 2 원주형 변형계이지 부착과 회로도

2.3 윤중 결손방법

지상에 대한 윤중의 측정은 그림 3에서와 같이 침목중심에서 각 100mm 떨어진 위치에서 중립축에 45°의 각도를 가지고 내외 8방향으로 스트레인게이지를 부착하여 연결하고 단면 휨의 영향을 배제하여 전단력을 측정한다. 그림 4는 윤중 측정의 구조적 원리를 설명하기 위해서 구도를 모델화시킨 것이다. 그림에서와 같이 하중점이 침목2와 A점과의 사이에 있다면 레일의 전단력은 그림과 같다. 이 때 A점의 전단력 S_A 와 B의 전단력 S_B 는 동일하게 된다. 하중점이 AB사이로 이동하여도 S_A 와 S_B 는 역방향으로 작용하며 절대값의 합은 하중 P에 비례한다. 따라서 $S_A - S_B$ 의 값을 측정한다면 하중이 AB간에는 하중 P에 비례하고, 하중이 AB간 이외에 있는 경우에는 측정치는 “0”이 된다. 이러한 의미는 측정값이 인접 축의 영향을 받지 않으며 실제 파형은 그림 5과 같이 A단면의 파형과 B단면의 파형을 합성된 파형이 출력된다.

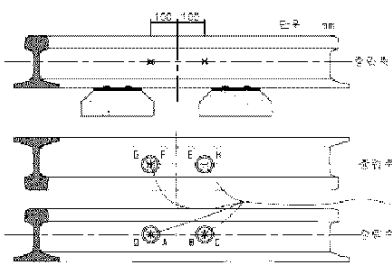


그림 3 윤중 결손도

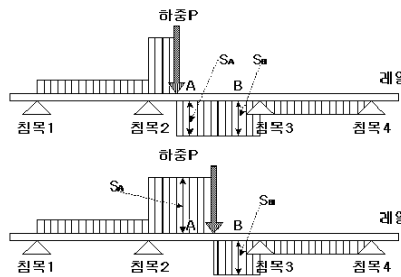


그림 4 궤도모델과 전단력도

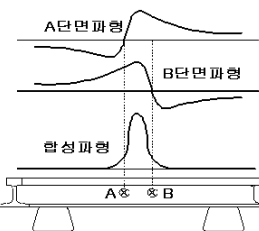


그림 5 실제 출력파형

윤중 게이지를 부착된 이후 윤중게이지의 계측결과와 작동여부 확인과 윤중의 절대량을 구하기 위하여 윤중검증 시험을 실시한다. 윤중검증 시험은 최대 40kN까지 단계별 10kN씩 재하시켜 3회 이상 반복하여 선형회귀분석을 통해 평균값을 교정값으로 사용한다. 일반적으로 윤중은 10kN 당 60~90(10⁻⁶)정도이고 이 범위 이상, 이하의 경우에는 결손의 잘못, 절연불량, 게이지 부착 불량 등의 원인이므로 이를 정확히 파악하여야 한다. 윤중 계측에서 중요한 것은 그림 4와 같이 윤중 결손방법이다. 그림에서와 같이 대부분 기술되어져 있는 논문에서는 개략적으로 명시되어 시험자가 혼돈을 일으킬 수 있으며, 게이지 결손 회로도를 정확하게 이해하지 못하고 부착하는 경우 잘못된 계측결과를 얻을 수 있다. 또한 스트레인 게이지의 방향과 게이지의 입·출력 단자를 연결하는 데이터로거의 사양의 입출력 단자와 맞추어 측정하여야 한다. 그림 5는 그림 3의 윤중 게이지 결손 회로도를 보다 자세하고 사용자가 쉽게 부착하고 게이지의 회로도를 그림으로 나타내었다. 그림에서와 같이 윤중 게이지의 방향은 검은색 게이지가 완전한 전단력을 측정하기 위하여 “V”가 되도록 부착하여야 하며, 브릿지 회로도에서 출력전압과 입력전압의 신호를 정확하게 알고 데이터 로거의 사양에 따라 연결하여야 한다.

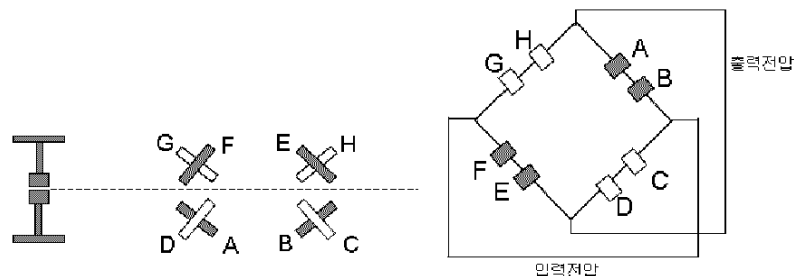


그림 6 윤중게이지 부착과 브릿지 회로도

2.4 횡압 결손방법

횡압의 측정은 수평방향의 힘을 측정하기 위하여 계측한다. 횡압측정은 윤중과 마찬가지로 침목간 중심에서 100mm 떨어진 레일 저부 상면에서 게이지를 부착하고 레일 중첩의 영향을 배제시켜 전단력을

측정한다. 그러나 윤중과 달리 횡압은 중립축에 게이지를 부착하는 것이 어렵기 때문에 레일의 복부에 최대한 가깝게 부착하여야 한다. 따라서 윤중의 경우에는 중립축에 부착되기 때문에 완전한 전단변형 측정이 가능하지만 횡압의 경우에는 레일의 경사와 휨 영향을 완전히 배제할 수 없기 때문에 반드시 검증 시험을 통해 교정값을 구하여야 한다. 횡압검증은 20kN까지 5kN씩 단계별 하중을 재하시켜 3회이상 실험한 후 윤중과 마찬가지로 선형회귀분석을 통해 검증값을 구한다. 횡압은 10kN 당 140~170kN(10-6) 정도이다. 이 범위를 벗어나는 경우에는 윤중과 마찬가지로 결손, 게이지 부착불량 등이 문제가 있으므로 이를 반드시 확인하여야 한다. 그림 7은 기존 논문에서 기술되어져 있는 횡압결손도이다. 윤중과 마찬가지로 사용자가 정확하게 이해하지 못하고 게이지 결손의 이해가 부족할 경우 현장에서 많은 계측오차가 발생할 수 있다. 그림 8은 보다 상세하게 게이지 부착방향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 검은색 게이지의 방향이 윤중과 마찬가지로 구간내의 완전한 전단력을 구하기 위하여 "V"가 되도록 부착하여야 한다. 그림 9는 횡압 결손도에 대하여 4게이지 방식으로 브릿지 회로도를 설계한 것이다. 횡압의 경우에도 정확한 입력, 출력에 맞추어 계측하여야 한다.

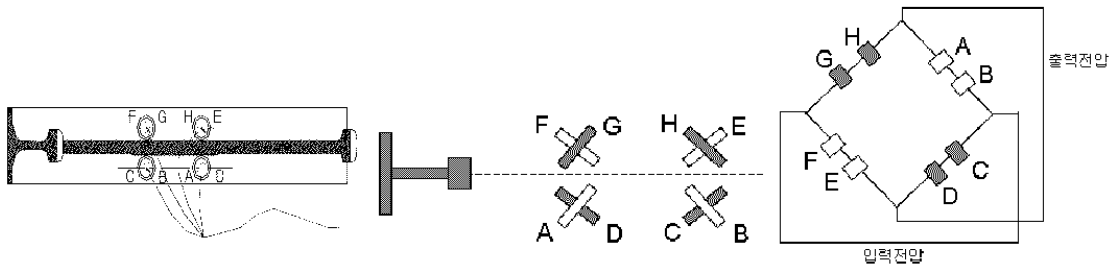


그림 7 횡압 결손도

그림 8 횡압 상세 결손도

그림 9 브릿지 회로도

3. 다양한 외부요인에 따른 계측신호의 변화 관찰

앞서 언급한 윤중, 횡압 게이지의 결손방법과 브릿지 회로도를 통해 보다 정확한 계측을 수행할 수 있을 것이다. 그러나 현장조건은 실험실 조건보다 매우 열악하고 리드선의 영향, 레일온도의 영향 등 외부 환경에 의해 계측하는데 있어서 많은 어려움이 있다. 특히 전기신호를 취급하기 때문에 노이즈의 문제는 필연적으로 발생할 수 밖에 없다. 일반적으로 필터를 이용하거나 접지를 통해 노이즈를 최소화 시키고 있다. 그 밖에 외부요인으로 발생할 수 있는 요인에 대하여 신호에 영향을 주는 인자를 검토하기 위하여 다양한 실험조건을 설정하여 <표 1>와 같이 실험하였다. <표 1>에서와 같이 실험조건은 총 7가지로서 충격, 선 흔들림, 습기, 결손방법의 변경, 온도변화 등에 의해 신호에 영향을 주는 정도를 평가하였다.

<표 1> 실내시험 조건

파일명	실험조건	내용
Test 1	초기상태	-
Test 2	출력신호 바꿈	출력 (+), (-) 바꿈
Test 3	충격	해머를 이용한 충격
Test 4	선 흔들림	손으로 리드선 흔들림
Test 5	습기(물+바람)	스프레어로 뿌림/ 선풍기 바람
Test 6	온도변화	실온 (25℃)
Test 7	온도변화	레일외부 온도 50℃ 이상

그림 10은 각 실험조건별 신호 특성을 나타내었다. Test 1의 경우 초기 결손상태이며, Test 2는 출력 인자에 대하여 (+)와 (-) 신호를 바꾸어서 계측하였다. 출력 단자의 영향은 없으며, 부호가 바뀌어 나오는 것을 확인하였다. Test 3의 경우 해머를 이용한 레일 두부를 타격하였을 때 신호특성이다. 그림에서와 같이 충격되는 지점에서 신호가 발생하는 것을 볼 수 있다. Test 4는 리드선을 흔들었을 경우 신호변화

를 관찰하였다. 리드선을 흔들림에 따라 신호특성이 매우 불규칙하게 흔들리고 있는 것을 볼 수있다. 따라서 계측시 열차풍에 의해 리드선이 움직이는 경우 계측결과에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Test 5의 경우 분무기와 선풍기 바람에 의해 센서부에 영향을 주었을 경우 신호 특성으로 2가지 요인에 의해 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. Test 6과 7은 레일의 온도변화를 관찰하기 위하여 실온과 레일에 열을 가하여 레일외부 온도가 약 50°C 이상이 되도록 한 후 비교하였다. 그림에서와 같이 레일의 온도에 의해 그다지 큰 변화는 없는 것으로 판단된다. 이러한 실험을 통해 현재 사용하고 있는 4게이지 방식의 윤중, 횡압의 측정방법은 매우 안정적이라고 볼 수 있다. 그러나 센서외의 리드선의 영향은 계측 결과에 영향을 미칠것으로 판단되어 이에 주의를 기울여 계측을 하여야 할 것이다.

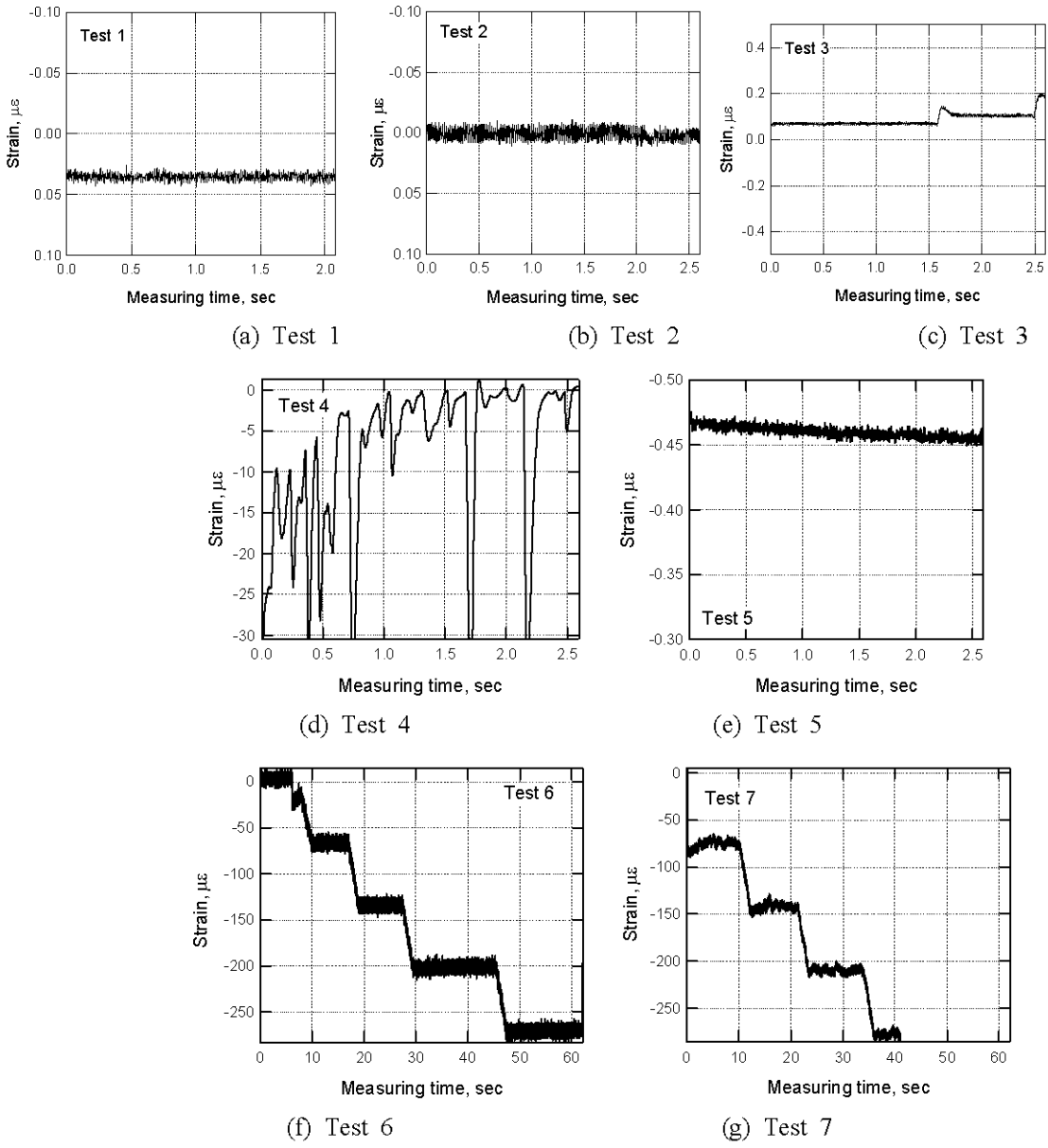


그림 10 실험조건별 신호 변화 특성

4. 결론

본 논문에서는 지상에서 가장 많이 측정하고 있는 실험방법인 윤중과 횡압의 계측방법과 그에 따른 주의사항에 대하여 전반적인 시험과정을 검토하였다. 또한 현장에서 발생할 수 있는 외부요인을 실내시험을 통해 신호특성을 검토하여 외부요인에 대응하는 방법을 제시하였다. 현재 윤중, 횡압 계측방식은

신호의 불필요한 영향을 최소화시키며, 온도보상 등이 필요 없는 4계이지 방법으로 전단력을 측정하고 있다. 본 논문에서는 상세한 윤중, 횡압의 계이지 방향과 결선도를 그려 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 하였으며, 브릿지 회로도를 포함시켜 회로도의 입력과 출력의 단자에 대하여 기술하였다. 이에 따라 계측하는 데이터로거의 사양에 맞추어서 정확한 입력과 출력 단자를 연결하여 계측할 수 있도록 하였다. 또한 외부 요인 실험결과 리드선의 흔들림에 의한 영향을 신호변화를 통해 관찰하였으며 향후 현장에서 측정시 열차풍에 의한 리드선의 흔들림을 최소화하여 실험을 실시하여야 할것으로 판단된다. 마지막으로 검증시험의 경우 열차 하중을 측정하는 중요한 실험값을 구하는 과정이기 때문에 매우 주의를 요하여 실험을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, “고속철도 시운전시험 절차서(확인항목에 관한 측정·평가방법 등의 해설)”,
2. 박용걸, 최정열, 성덕룡, 천대성(2007), “틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선궤도의 거동 특성”, 한국 철도학회 논문집 제10권 제6호 pp. 692~700
3. 에스앤케이 기술자료집, 스트레인게이지에 의한 측정