

신개념의 레일·차륜간 접촉력 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of New Concept for the Contact Force between Rail and Wheel

홍용기[†] · 유원희^{*} · 이희성^{**}

Yong Ki Hong · Won Hee You · Hi Sung Lee

Abstract The derailment is defined as phenomena in which the wheels run off the rail due to inordinate lateral force generated when wheel flange contacts with the rail. Derailment coefficient is typical standard assessing running safety and derailment. The traditional method measuring by strain gage adhered to wheels is very complicated and easy to fail. It also requires too much cost and higher measurement technique. Therefore it can hardly ensure safety because we can't confirm at which time we need to identify safety. In this paper, we principally researched the method measuring easily wheel load generated by contacts between wheel flange and the rail, and lateral force. Correlation of vibration and displacement which was related physical amounts of wheel load and lateral force, was investigated and analyzed through analysis, experiment and measurement. And it is presents new measurement method of derailment coefficient which can estimate derailment possibility only by movement of vibration and displacement, by which we understand the rate for acceleration and displacement to contribute wheel load and lateral force and compare actual data of wheel load and lateral force measured from wheel.

Keywords : Derailment Coefficient, Wheel Load, Lateral Force, Acceleration, Displacement

요 지 탈선은 차륜 플랜지가 레일에 접촉할 때 발생하는 횡방향의 힘이 커져 차륜이 레일을 이탈하는 현상이다. 탈선 또는 주행안전도를 평가하는 대표적인 기준은 탈선계수이다. 차륜에 스트레인게이지를 부착하여 탈선계수를 측정하는 기존방법은 대단히 복잡하고 측정의 실패확률도 높으며, 고도의 측정기술과 고가의 비용이 요구되고 있다. 따라서 안전성확인이 필요한 그 시점에 즉시 확인하지 못하고 있어 안전확보에 어려움을 겪고 있다. 본 논문에서는 차륜과 레일간의 접촉력인 윤중과 횡압을 쉽게 측정할 수 있는 방안을 집중적으로 연구하였으며, 가속도와 변위의 거동만으로 탈선가능성을 예측할 수 있는 새로운 탈선계수 측정방법을 제시하였다.

주요어 : 탈선계수, 윤중, 횡압, 가속도, 변위

1. 서론

철도차량의 주행안전성을 저해하는 요인 중 가장 중요한 요인이 탈선이며, 열차가 탈선하면 대형사고로 이어져 막대한 인적 및 물적 손실을 가져오게 된다. 특히, 탈선문제는 오래전부터 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔음에도 불구하고

고 열차탈선사고가 종종 일어나고 있다.

탈선현상을 연구해서 사고를 예방하는 어려움은 학문적으로 차륜과 레일간의 접촉현상이 단순하지 않고 차량의 복잡한 운동에 지배되어 실제로 차량에 부착된 부품배치와 구조의 차이나 사용에 따른 상태의 변화, 궤도의 뒤틀림이나 레일의 형상 및 상태의 영향, 운전의 조건 등 여러 조건의 결합에 의해 일어나기 때문이다. 이와 같이 탈선이 여러 형태로 발생하는 것과 마찬가지로 탈선을 평가하기 위한 측정도 간단하지는 않다. 철도차량의 안전성평가에 있어서 탈선계수 측정의 기존방법은 대단히 복잡하고 측정의 실패할 확률도 높으며, 고도의 측정기술과 고가의 비용이 요구되고 있다. 이

[†] 책임저자 : 정희원, 서울산업대 철도전문대학원
(한국철도기술연구원 수석연구원)
E-mail : ykhong@krri.re.kr

TEL : (031)460-5501 FAX : (031)460-5749

^{*} 정희원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

^{**} 교신저자 : 정희원, 서울산업대 철도전문대학원, 교수

와 같이 탈선계수의 측정준비 및 측정시험분석 등 여러 시험 조건들의 제약 때문에 안전성확인이 필요한 그 시점에 즉시 확인하지 못하고 있어 안전확보에 큰 어려움이 있다.

본 논문에서는 윤중과 횡압의 비율을 탈선계수로 판정하는 기본 틀은 유지하면서 쉽게 측정할 수 있는 방안을 집중적으로 연구하였으며, 윤중과 횡압에 관련된 물리적인 양인 진동 가속도 및 변위를 해석과 실험을 통하여 상관관계를 검토 분석하였다. 이 진동가속도와 변위들이 윤중과 횡압에 어떠한 영향을 미치며 그 기여하는 정도를 파악하고 차륜으로부터 측정된 실제 윤중과 횡압 데이터와 비교함으로써 진동가속도와 변위의 거동만으로 탈선가능성을 예측할 수 있는 새로운 탈선계수 측정방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

탈선의 문제는 레일과 차륜사이의 접촉력에 작용하는 윤중과 횡압 중에서 횡압을 제거함으로써 모든 문제를 해결한다 해도 과언이 아니다. 그만큼 윤중감소보다 횡압의 증가가 위험하다는 것을 의미하기도 하며, 차륜의 마모저감이나 레일의 유지보수주기 연장 등 매우 많은 문제에 횡압이 관여한다는 것을 의미한다. 열차의 탈선사고는 자주 발생하지는 않지만 한번 발생하면 치명적인 대형사고로 연결된다. 그러한 사고는 차량뿐만이 아니라 궤도, 전기신호 등 여러 시스템이 복합적으로 원인을 제공하는 것이므로 차량 측면에서는 횡압의 저감이 가장 큰 당면과제라고 할 수 있다[1,2].

탈선 또는 주행안전도를 평가하는 대표적인 기준은 탈선계수로서 이를 정확히 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 현재까지 국내에서 사용하고 있는 가장 보편적인 방법은 스트레인게이지를 차륜에 부착하여 차륜이 받는 수직하중과 수평하중을 측정함으로써 탈선계수를 계산하는 것이다. 스트레인게이지를 이용한 탈선계수 측정할 때 회전하는 차륜으로부터 데이터를 확보해야 하므로 측정용 특수 차축과 회전부위의 신호전달을 위한 장비가 필수적이다. 이 경우 스트레인게이지 부착, 브리지 회로 구성, 신호튜닝 등에 많은 시간과 경비가 소요되고, 회전부위에서 장비나 게이지가 파손되는 경우가 있으며, 노이즈로 인한 데이터의 부정확성 등 크고 작은 문제점들이 있다. 이에 따라 회전부위에 직접 센서를 장착하지 않는 방법, 즉, 축 스프링에 변위계를 장착하여 스프링의 변위값으로 하중을 추정하는 법, 진동 가속도계를 차체에 장착하여 차체의 진동가속도특성으로부터 탈선계수를 추정하는 법, 변위계와 가속도계를 동시에 사용하는 법, 또는 레이저 센서 등을 이용하는 법 등이 다양하게 연구되고 있다.

일본과 국내의 일부에서는 차체의 수평 및 수직 진동가속

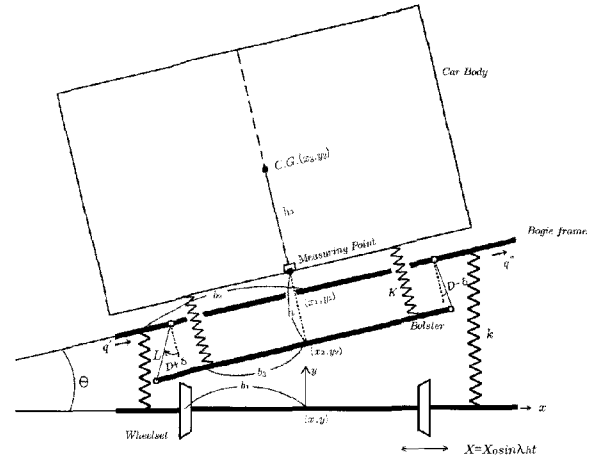


Fig. 1. Model of rolling stock

도 특성으로 차량의 주행안전도를 평가하는 방법을 검토한 바 있으며, 이것은 진동가속도의 특성치 즉, 진폭과 주기 등이 주행안전도에 미치는 영향을 고찰한 것이다.

Fig. 1과 같은 차량모델에서 차체 바닥 중앙을 진동가속도계의 측정점으로 하고 상하진동 및 좌우진동 파라미터인 진폭과 주기가 차륜에 작용하는 횡압과 좌우측 수직압을 수식적으로 표현한 식으로부터 탈선계수와 주행안전도의 관계를 구하면 다음과 같다고 전제하였다[3-5].

$$\begin{aligned}
 [S] > 0 \text{ 일 때, 탈선계수는 } [S]/[R_v] \\
 [S] < 0 \text{ 일 때, 탈선계수는 } [S]/\text{abs}[R_v] \\
 [R_v] < [R_v] \text{ 일 때, 주행안전도는 } [R_v]/[S] \text{ abs} \\
 [R_v] > [R_v] \text{ 일 때, 주행안전도는 } [R_v]/[S] \text{ abs}
 \end{aligned}$$

여기서, R_v, R_h 은 좌우 차륜이 궤도로부터 받는 반력(수직 하중)이며, S 는 차륜이 궤도에 미치는 횡압(우측을 양으로 함)이다.

3. 동특성해석

차량의 동적성능은 차량분야에 있어서 현수장치 및 중량조건 등의 특성에 의하여 좌우되며, 궤도분야에 있어서는 궤도 불규칙도(Irregularity) 및 곡선궤도의 특성에 의하여 영향을 받는다. 본 해석에 사용된 소프트웨어는 AEA Tech(구 BRR)에서 개발된 VAMPIRE Ver4.03(Vehicle Dynamic Modeling Package In a Railway Environment)으로서 영국 국철에서 각종 시험을 통하여 그 신뢰성이 입증된 철도차량 동특성 해석 전용 소프트웨어로 본 연구의 동특성해석이 이용하였다.

3.1 차량 모델링

차량의 동역학 해석을 위해서는 실제의 복잡한 차량 구조

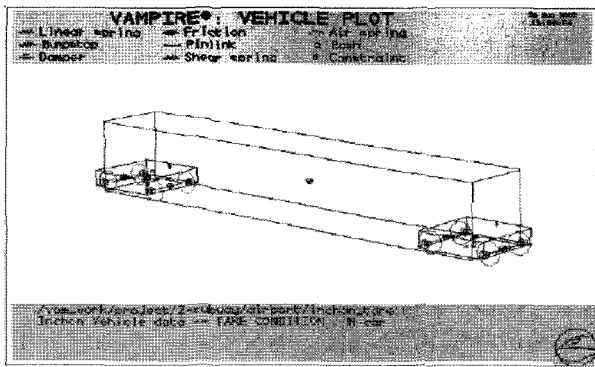
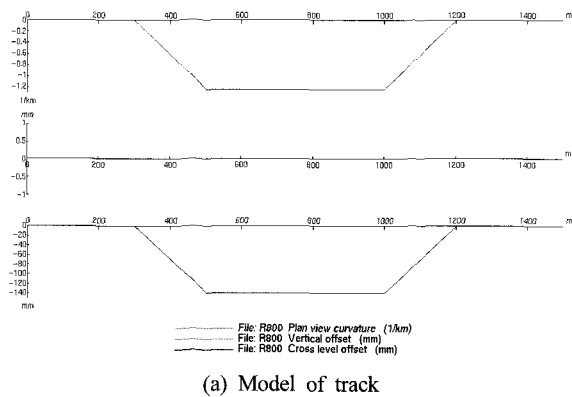
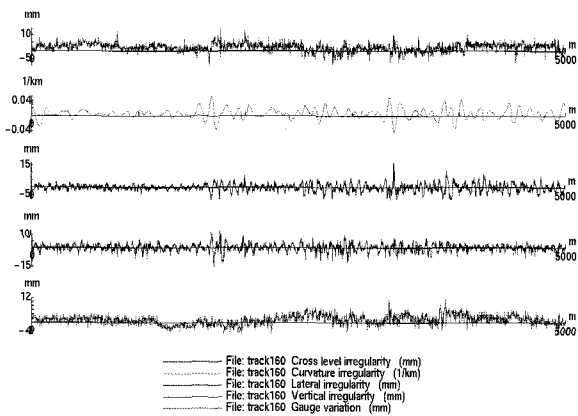


Fig. 2. Model of vehicle by VAMPIRE



(a) Model of track



(b) Track irregularity data

Fig. 3. R800m curve data

를 질량, 스프링 및 댐퍼의 Lumped Parameter로 이루어진 수학적 모델로 Fig. 2와 같이 단순화 시켜야 한다. 본 해석에서는 차체와 2 개의 대차 후레임, 4 개의 차륜 세트를 질량 요소로 하여 그 사이에 적절한 스프링과 댐퍼를 연결시켜 모델화하였다. 좌표축은 차량진행방향을 X 축, 횡방향을 Y 축, 상하방향을 Z 축으로 설정하였다. 동특성 해석을 위하여 차량 1량을 대상으로 만차조건 차량모델을 구성하였으며, 본 해석에서는 차량 총중량 45.66ton의 시험전동차 M-car를 대상으로 하였다.

3.2 궤도 모델

주행동특성 해석을 위한 궤도모델로 곡선반경 800m와 1000m의 곡선구간을 모델링하였다. 궤도모델은 캔트(mm), 곡선반경(1/km), 좌우 불규칙도(Lateral, mm), 상하 불규칙도(Vertical, mm) 및 궤간 불규칙도(mm)로 구성되며, 캔트 및 곡선반경은 상기한 곡선구간의 선형으로 모델링하였고, 궤도틀림량은 기존선 구간 160km/h 주행시의 궤도틀림량을 샘플링하여 모델링하였다.

Fig. 3은 곡선반경이 각각 800m 선로에 대한 궤도모델과 최고속도 160km/h인 선로의 궤도틀림 데이터를 나타낸 그래프이다.

3.3 해석결과

동특성 해석은 곡선반경이 800m와 1000m인 곡선에서 60, 70, 80km/h의 속도로 주행할 때의 윤중, 축상상하변위, 횡압, 차체진동가속도 등에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 4는 해석한 결과 데이터를 나타낸 그림이다. 해석결과를 보면 곡선반경과 속도에 상관없이 전위차륜 Vertical Track Force는 축상 스프링의 횡변위와 유사한 경향으로 파형이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 또한 전위차륜 횡압의 경우도 차체 횡가속도와 비슷한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

4. 차량주행시험

해석결과에서 나타난바와 같이 변위/진동가속도가 윤중/횡압과 선형적임을 검증하기 위하여 탈선계수의 기존 측정방법인 차량의 차륜에 부착한 스트레인게이지로부터 윤중과 횡압을 측정하고 또한 다른 방법으로 윤중과 횡압을 얻기 위해 이와 관련성이 있다고 판단되는 변위 4개 채널과 진동가속도 6개 채널을 정하여 실제 주행시험에서 측정하였다. 시험구간은 인천공항역에서 김포공항역, 시험대상차량은 직통형 차량으로 하중조건은 만차조건으로 하였다.

4.1 측정시스템 구축

윤측에서 발생하는 윤중과 횡압의 하중신호는 윤측의 좌우 축상 끝단에 신호발신기가 내장된 Telemeter를 이용하여 Power Supply, Distributor, Telemetry Receiver, Notebook Computer 등을 이용하여 계측하도록 구성하였으며, 차축이 회전하면서 Telemeter의 구동판을 회전시켜 연결된 리드선을 통해 신호가 전달된다. 이 신호는 Telemeter를 거쳐 차체내부로 전달되어 분배기를 통해 각 채널별 신호로 분리된 다음 수신기를 거쳐 레코더에 저장된다. 진동가속도는 앰프에서 Signal Conditioning 후 데이터 레코더에 저장되도록 하였고, 변위는 앰프

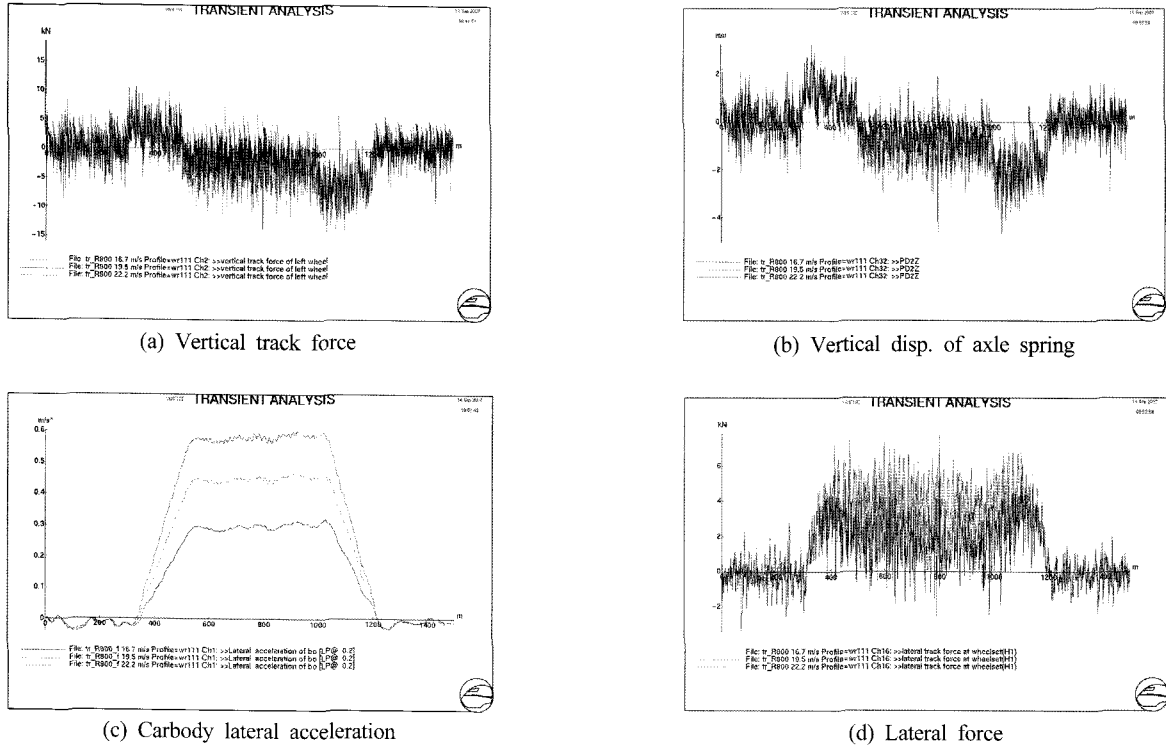


Fig. 4. Analysis result

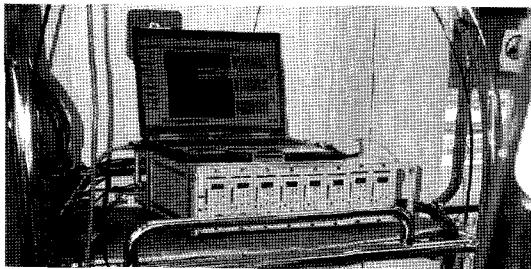


Fig. 5. Measurement system

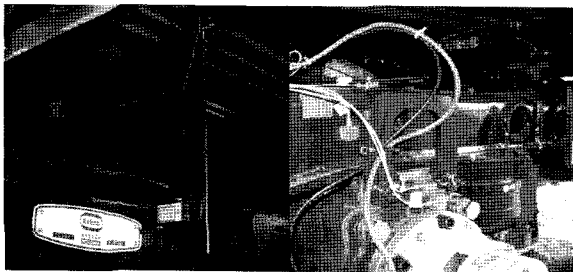


Fig. 6. Displacement & vibration sensor

에서 측정값을 디스플레이하면서 레코더에 저장하도록 Fig. 5와 같이 구성하였다[6].

4.2 진동과 변위의 측정

진동가속도는 K-Beam 타입 센서를 사용하였으며, 차체,

Table 1. Variance value data

LPF	Mean	Variance
1Hz	-0.08831	0.05992
2Hz	-0.09958	0.05073
3Hz	-0.09944	0.06448
5Hz	-0.09949	0.07585
10Hz	-0.09946	0.11888

대차 프레임, 축상 등 3개 지점에서 상하방향과 좌우방향으로 나누어 6채널을 측정하였다. 변위측정에는 100±40mm 용량을 가진 확산 반사형 비접촉 광학센서를 사용하여 차체/대차간 및 대차/운축 간 상대변위를 상하방향과 좌우방향으로 구분하여 측정하였다(Fig. 6).

5. 주행시험 결과 및 분석

기존의 차륜측정방식의 데이터와 진동가속도 및 변위데이터의 환산치를 비교 검토하고 관계식을 찾고자 Origin7.0을 사용하여 시험결과를 분석하였다. 측정한 진동가속도 및 변위데이터는 Table 1과 같이 2Hz로 Low Pass Filtering(LPF)한 결과의 분산값이 적게 나타나 2Hz로 신호처리 하였다.

5.1 윤중과 관련된 신호 성분

상하방향 신호성분들은 모두 윤중의 신호성분에 기여를 하거나 영향을 미칠 것으로 판단하여 측정된 것이다. 특히 차체-대차사이의 변위와 축상-대차사이의 변위는 뚜렷하게 연관성을 갖고 있음을 볼 수 있다.

이 2개 채널의 변위가 윤중에 얼마나 선형적으로 기여하고 있는가를 집중분석하였으며, 그 결과 Fig. 7의 좌측과 같이 차체-대차사이의 변위보다 차축-대차사이의 변위가 윤중과 상관관계가 있음을 알았다.

측정한 차축과 대차간의 수직변위(D_p)를 윤중 데이터로 환산한 것과 기존차륜에 의해 측정된 윤중을 비교한 결과로서 Fig. 7의 우측에 나타내었다.

Fig. 7의 우측 그림은 곡선반경이 1601m인 곡선에서 측정된 윤중데이터를 평균한 값으로 P_L이 왼쪽 윤중이고, P_R이 오른쪽 윤중이다. 차축과 대차간의 수직변위는 진행방향이 선두 차륜으로 달릴 때 왼쪽에 하나만 설치하였는데도 오른쪽 윤중까지도 환산할 수 있었다.

왼쪽과 오른쪽의 윤중은 반대로 작용함을 알았고, 따라서 왼쪽 윤중데이터의 역수로서 오른쪽 윤중을 구할 수 있었다.

곡선반경 1601m의 윤중 평균치를 보면 왼쪽차륜의 경우 차륜에 의한 실측치가 5.13ton, 변위를 환산한 데이터가 5.24ton으로 나타났으며, 이 두 데이터간의 신뢰도는 97.8%로 잘 맞고 있다. 또한, 오른쪽 차륜의 경우 차륜에 의한 실측치는 5.68ton, 변위를 환산한 데이터가 5.76ton으로 신뢰도가 98.4%이었다. 곡선별 실측치와 환산치의 데이터 비교는 Table 2와 같으며, 신뢰도는 95%이상으로 나타났다.

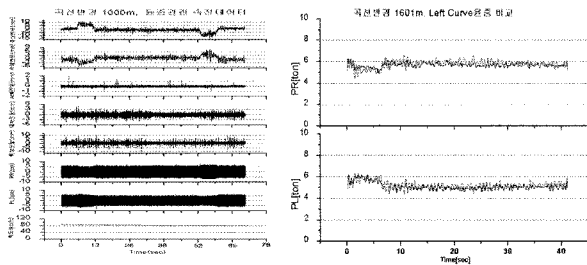


Fig. 7. Vertical force related signal component & comparison of vertical force

Table 2. Vertical force data of actual and conversion data

곡선반경 (m)	501R		1002L		1497R		1601L	
	P _L mean	P _R mean	P _L mean	P _R mean	P _L mean	P _R mean	P _L mean	P _R mean
실측(ton)	5.23	5.45	5.08	5.74	5.24	5.55	5.13	5.68
환산(ton)	5.49	5.53	5.17	5.83	5.31	5.69	5.24	5.76
신뢰도(%)	95.3	98.5	98.0	98.5	98.5	97.3	97.8	98.4

축상의 변위데이터와 윤중사이의 관계 분석은 $F = k\delta$ 식을 기본으로 하였으며, 분석방법은 측정된 D_p 데이터에 수직강성을 곱하고 정적윤중을 더해주면 아래와 같이 윤중(P_L, P_R) 관계식을 얻었다.

$$P_L = kD_p + P_{Lo} \tag{1}$$

$$P_R = -kD_p + P_{Ro} \tag{2}$$

여기서, P_{Lo}, P_{Ro}는 정적상태 윤중(ton), k는 차축스프링강성(ton/mm), D_p는 축상-대차 수직변위(mm)이다.

철도차량이 곡선을 주행할 때의 동적 윤중을 측정하기 위해서는 차축과 대차의 스프링상수와 정적하중을 파악하고 차축과 대차간의 수직변위를 측정하여 윤중환산은 식(1)과 식(2)에 의해 윤중을 구할 수 있었다.

5.2 횡압과 관련된 신호 성분

Fig. 8의 좌측의 횡압과 관련된 좌우방향의 신호들은 곡선부 주행 시에 차체-대차 변위와 축상-대차사이의 변위, 그리고 차체 횡가속도의 정상횡가속도가 뚜렷하게 연관성을 갖고 있음을 볼 수 있다. 이 2개 채널의 변위와 1채널의 횡가속도가 횡압에 얼마나 선형적으로 기여하고 있는가를 집중분석하였으며, 그 결과 Fig. 8과 같이 변위보다는 차체 횡가속도의 정상횡가속도가 곡선별로도 선형적으로 더 기여하고 있음을 알았다.

Fig. 9는 차체횡가속도의 정상횡가속도(a)를 측정된 데이

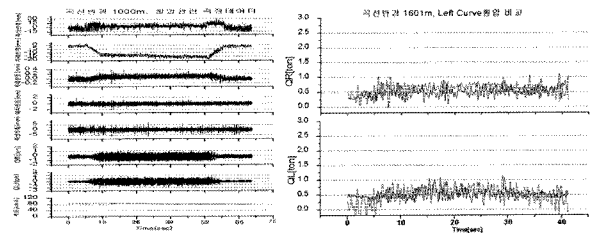


Fig. 8. Lateral force related signal component & comparison of lateral force

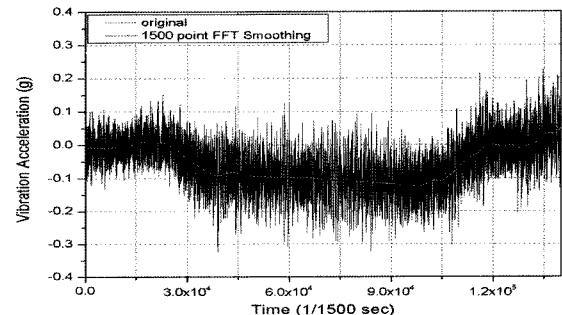


Fig. 9. Lateral vibration acceleration of car body

Table 3. Lateral force data of actual and conversion data

곡선반경 (m)	501R		1002L		1497R		1601L	
	Q _L mean	Q _R mean	Q _L mean	Q _R mean	Q _L mean	Q _R mean	Q _L mean	Q _R mean
실측(ton)	0.71	0.75	0.86	0.80	0.40	0.62	0.50	0.52
환산(ton)	0.90	0.68	0.87	0.75	0.44	0.67	0.49	0.58
신뢰도(%)	78.6	90.5	99.0	94.1	90.7	92.5	97.5	89.3

터로 횡압을 구하기 위해 식을 만들어 적용한 결과를 Fig. 8의 우측에 나타내었다. 실측치와 변환된 데이터가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 차량의 횡방향 하중(횡압)은 $F=ma$ 의 식을 기본으로 하여 차체하중(m)과 가속도(a)의 곱으로 나타낼 수 있으나 실측데이터의 분석결과를 보면 곡선부를 지날 때 외측궤도 부분에서 걸리는 횡압이 내측궤도보다 1.7배 만큼 커지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 측정된 횡가속도가 1.7배 만큼 크게 작용하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 곡선부 외측궤도부분에서 작용하는 횡가속도는 측정된 횡가속도(a)에 보정계수(A=0.7)를 사용하여 $a'=(1+A)a$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 A는 곡선부를 통과할 때 횡가속도의 보정계수이다. 보정계수를 사용하여 아래와 같은 횡압(Q_L, Q_R) 관계식을 얻었다.

$$Q_L = m_L a' = (1+A)m_L a \quad (3)$$

$$Q_R = m_R a' = (1+A)m_R a \quad (4)$$

곡선반경 1601m의 횡압 평균치를 보면 왼쪽차륜의 경우 차륜에 의한 측정방법이 0.50ton, 정상횡가속도로 환산한 데이터가 0.49ton으로 나타났으며, 이 두 데이터간의 신뢰도는 97.4%로 잘 맞고 있다. 또한, 오른쪽 차륜의 경우 차륜에 의한 측정방법은 0.52ton, 변위를 환산한 데이터가 0.58ton으로 신뢰도가 89.3%이었다. 곡선에서의 내측궤도 횡압은 큰 의미가 없으며, 외측궤도 횡압이 왼쪽보다 크기 때문에 탈선계수에 직접 영향을 미친다. 곡선별 실측치와 환산치의 데이터 비교는 Table 3과 같으며, 신뢰도는 90%이상으로 나타났다.

6. 결론

차륜과 레일간의 접촉력을 기존방법이 아닌 다른 방법으로 간단하게 측정하고자 동특성 해석을 통해 윤중과 횡압데이터가 차측-대차의 변위와 차체정상횡가속도에 관련이 있음을 확인하였다. 이에 따라 실측데이터로서 검증하기 위하여 기존의 차륜에 의한 측정 데이터(윤중·횡압)와 변위와 횡가속도에 의한 환산치(윤중·횡압)를 비교한 결과 윤중과 횡압을 환산하는 관계식을 얻었다.

이 관계식에 의한 방법은 차량에서 변위와 횡가속도를 측정, 윤중과 횡압으로 환산하여 탈선계수를 판정할 수 있다. 이

와 같이 차량의 주행안전도는 변위와 횡가속도만의 측정으로 평가할 수 있다. 이 방법으로 측정하여 기준치 이상의 데이터가 평가될 경우 안전성의 위험이 존재하므로 정밀측정을 하거나 위험개소를 정비하거나 개선한다면 차량주행 안전성을 확보할 수 있다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 실차에서 차측과 대차사이의 수직변위를 측정하여 차측스프링강성을 곱해서 차륜과 레일간의 수직하중인 윤중(P)을 예측할 수 있다.
- (2) 차체의 정상횡가속도를 측정하여 보정계수와 차체질량을 곱해서 차륜과 레일간의 횡방향의 힘인 횡압(Q)을 예측할 수 있다.
- (3) 횡가속도와 변위를 통해 예측된 윤중과 횡압으로 철도 차량의 주행안전성을 평가할 수 있을 것으로 본다.
- (4) 새로운 윤중/횡압 추정계산식은 운행 중인 철도차량 탈선계수의 경향을 판정하기 위해 측정하는 용도로 환산식의 적용이 가능하며, 신조차량 또는 대차의 성능에 영향을 주는 개조 등이 있는 경우에는 환산식이 아닌 기존방식에 의한 정밀측정이 요구된다.

향후연구과제

- (1) 이 측정에 의한 평가방법을 이용한 차량주행 안전성 평가 예측시스템을 구축해서 실차에 장착하면 차량의 주행안전성을 상시 모니터링하여 확인할 수 있을 것이다.
- (2) 도출된 환산식 중 윤중관계식은 이번 시험차량이 아닌 다른 차량에도 적용이 가능할 것이나 횡압은 다른 차량에서 좀 더 검증이 필요할 것으로 판단한다.

참고문헌

1. 홍용기 외, 인천국제공항철도 전동차의 주행안전성 평가, 한국철도학회, 한국철도학회 논문집 10권 5호, pp.619-625, 2007.10.31.
2. 홍용기 외, 철도차량의 진동과 변위로부터 유추할 수 있는 탈선가능성에 관한 연구, 한국철도학회 2007년 춘계학술대회 논문집, pp.743-748, 2007. 5. 17.
3. 함영삼, 철도차량의 탈선메커니즘 연구동향, 철도웹진 58호, 한국철도기술 Vol.06, pp.23-29, 2006.
4. 오키시마 키하치, 열차 탈선 방지의 이론과 실제, 1960, 교우사.
5. 오키시마 키하치, 철도차량 특론, 1965, 교우사.
6. 함영삼 외, 인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가, 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006. 11. 9.
7. 홍용기 외, 철도차량의 새로운 탈선계수 측정방법에 관한 연구, 한국철도학회 2007년 추계학술대회논문집, 2007. 11. 8.

(2007년 11월 1일 논문접수, 2007년 12월 4일 심사완료)