

연속식 탈선계수 측정기술

Measuring Technology of Continuous Method for Derailment Coefficient

함영삼* 유원희**
Ham, Young Sam You, Won Hee

ABSTRACT

Oscillatory wheel load fluctuation of considerable amplitude is almost always observed on railway vehicle running at high speed. From the acceleration measured on the axle-box, the frequency of this fluctuation is estimated to be approximately within 70 Hz. By the conventional measuring method, continuous outputs of wheel load can not be obtained, so it is difficult to investigate such a high frequency phenomenon exactly. We have developed a new method of measuring the forces and derailment coefficient continuously, using two pairs of strain gauge bridges whose output phases are shifted by 90 degree, and summing up the outputs with a weighting function. This method is available for measuring the forces between wheel and rail up to high frequency. In this paper, continuous method of measuring forces between wheel and rail and derailment coefficient.

1. 서론

탈선이란 사전적으로 기차나 전차 따위의 바퀴가 궤도를 벗어나는 것을 의미하는 것으로서 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인이다. 새로운 차량을 개발하거나 차량의 주행속도를 향상시키고자 할 때에는 차륜과 레일 사이에서 작용하는 윤중과 횡압을 측정하여 탈선의 안전성을 확인하고 있다. 지금까지 시도하였던 탈선계수의 연속측정에서 문제는 감도 저하와 노이즈 문제로 인하여 정확도가 떨어진다는 것이었는데, 본 연구에서는 디지털 회로를 통한 채널간의 합성으로 이를 보완하고자 하였다. 근래 차량의 속도향상과 함께 윤중의 변동이 증대하고 이에 의해 윤중감소와 횡압 발생이 중복되기 때문에 이것들의 현상을 정확히 파악하기 위해서는 종래의 측정 방법으로는 불충분하고, 윤중과 횡압이 완전히 연속적으로 출력될 수 있는 측정법이 필요해지고 있다. 윤중과 횡압의 연속 측정은 이미 외국에서 실용화되어 있지만 이것은 차축의 굽힘응력을 기초로 정현파발생기를 이용하여 연산하는 방법으로, 윤축의 굽힘고유진동수 제약에 의해 약 30Hz까지의 현상밖에 얻을 수 없었다⁽¹⁾.

본 연구에서는 탈선메커니즘에 관한 최근의 연구동향, 그리고 지금까지의 실패경험을 바탕으로 새롭게 시도한 연속측정법의 원리, 장치의 구성 등에 관하여 서술하고자 한다.

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

E-mail : ysham@krri.re.kr

TEL : (031)460-5202 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

2. 측정법의 원리

2.1 탈선계수

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행시의 복잡한 운동으로, 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평방향의 힘을 작용시킨다. 이 수평방향의 힘(횡압 Q)에 대한 수직방향의 힘(윤중 P)의 비(Q/P)를 탈선계수라 하며 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어넘어 탈선을 하게 되므로 주행안전성 검토의 기준이 된다. 탈선계수의 해석은 정적해석과 동적해석으로 구별되며 Fig. 1 과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립한다. 식에서 분자의 -와 분모의 +는 타오르기 탈선, 분자의 +와 분모의 -는 뛰어오르기 탈선을 나타내고, 이것은 차륜이 레일을 미는 힘, 즉 횡압의 작용시간으로 구별하여 1/20 초 이하를 뛰어오르기 탈선, 1/20 초 이상을 타오르기 탈선으로 적용한다.

$$\left(\frac{Q}{P}\right) = \frac{\tan \alpha \mp \mu}{1 \pm \mu \tan \alpha}$$

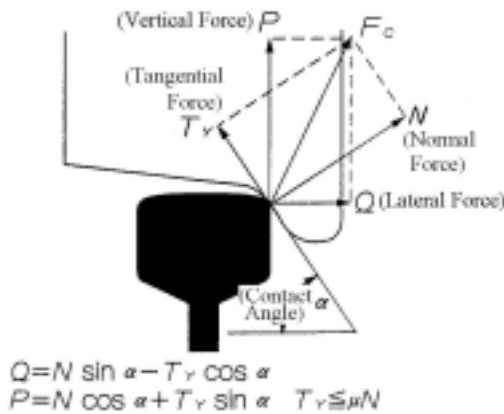


Fig. 1 Forces between wheel and rail

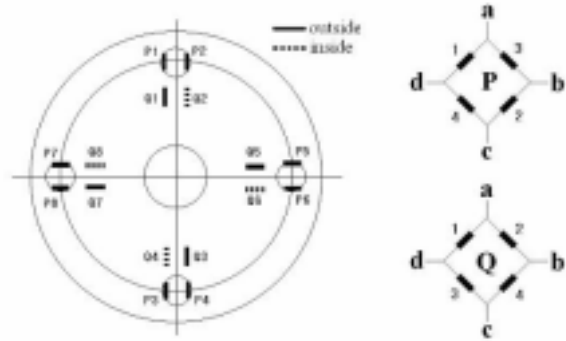


Fig. 2 The positions of strain gauge and Wheatstone bridge connection

2.2 채널합성을 통한 연속측정법

2.2.1 연속측정의 개념

레일 위를 주행하는 차륜에 작용하는 분력을 측정하기 위해 차륜에 스트레인 게이지를 부착하고, 차륜 상의 직교하는 위치에 대응한 두개의 브리지 출력에 각각 하중 작용 위치에 대응한 하중을 가산하여 양자의 조합에 따라 연속된 출력을 얻을 수 있도록 한 것이 연속 측정법이다. 연속법의 브리지 결선은 Fig. 2와 같이 간헐식 결선을 기초로 하고 있다. 종래의 연속식은 브리지를 결선할 때 한쪽 차륜의 윤중 또는 횡압의 모든 게이지를 연결함으로써 연속출력을 얻어왔지만, 본 연속법은 브리지 출력을 디지털 처리함으로써 연속 출력을 얻고 있다⁽²⁾. Fig. 3에 일정한 힘이 작용하는 상태에서 차륜이 1회전할 때, 음과 양이 반전되는 브리지 출력으로부터 윤중, 횡압의 평탄한 연속출력을 얻는 원리를 표시하였다.

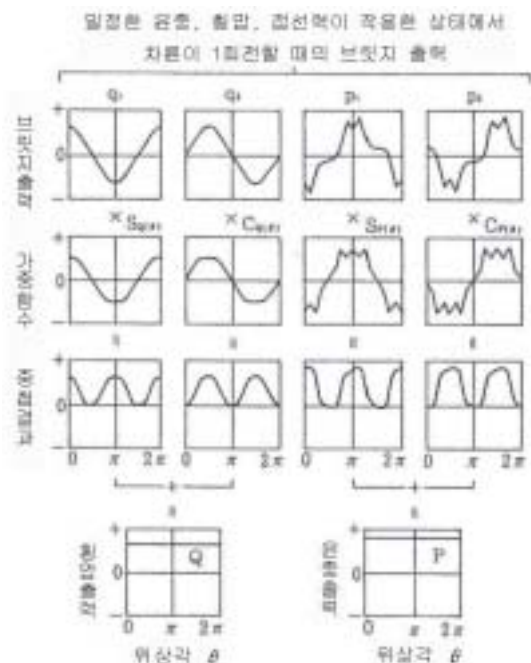


Fig. 3 Principle of continuous measuring method

2.2.2 정하중 시험

스트레인 게이지를 부착한 윤축의 교정값을 산출하기 위하여 정하중시험을 실시하였다. 이것은 특별히 제작된 회전체 로드셀에 대한 Calibration Sheet를 만드는 과정으로서 Fig. 4~5와 같은 교정결과를 도출하였다. 정밀한 윤중과 횡압의 연속적인 신호를 얻기 위해서는 하중부가지점을 늘려야 하지만 회전각도 20° 미만의 검정은 현재의 설비만으로는 한계가 있었다.

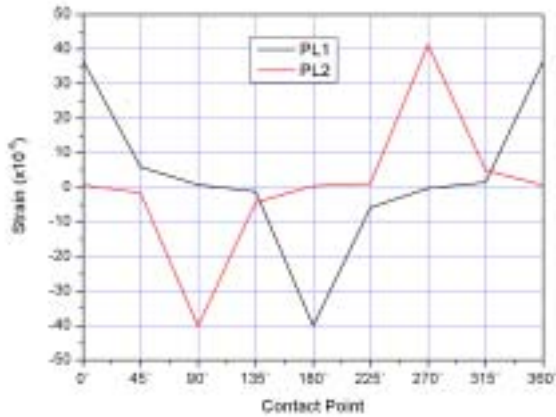


Fig. 4 Calibration result of vertical force

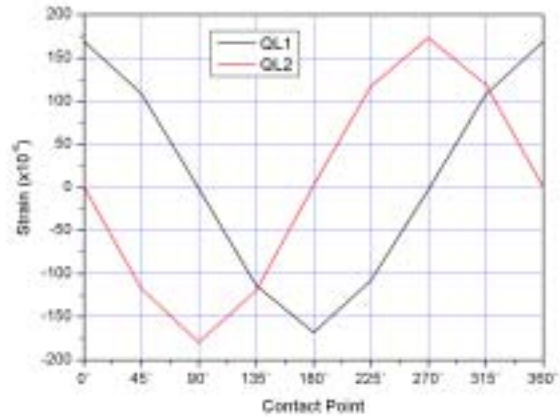


Fig. 5 Calibration result of lateral force

2.2.3 연속식 탈선계수 알고리즘

각각 2채널의 윤중과 횡압을 합성하여 연속적인 하중신호로 표시하면 Fig. 6과 같다.

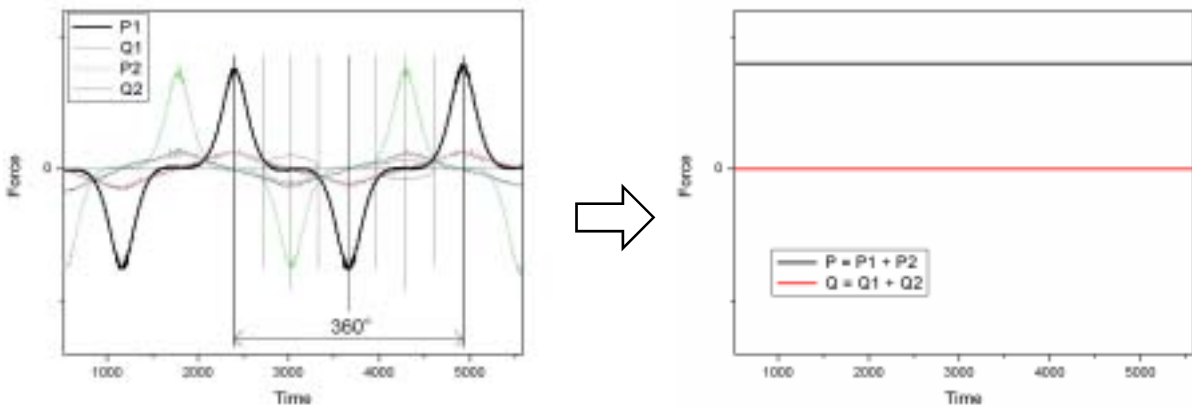


Fig. 6 Algorithm of continuous measuring method

2.3 스트레인 게이지의 배치방법에 따른 연속측정법

2.3.1 차륜 플레이트의 홈에서 접촉력을 측정하는 방법

차륜은 플레이트가 편평한 형상을 사용한다. 스트레인 게이지의 부착위치는 횡압에 의한 간섭을 피하기 위해 8개의 구멍을 뚫어 그 안에 윤중용 스트레인 게이지를 부착한다. 8개 구멍에서의 윤중 출력을 브리지의 마주보는 변으로만 스트레인 게이지를 배치하는 구조로 개조하면 45° 피치에서 직선적인 윤중 신호를 내거나, 최악의 경우 그 사이의 22.5° 위치(1회전 당 8회 발생)에서 출력이 반 정도로 작아질 뿐이다. 윤중용 온도보상저항은 동일 로트의 스트레인 게이지를 사용하여 저항온도계수를 구하는 것이다. 온도보상 게이지는 플레이트 면에서 변형이 발생하지 않는 곳에 부착한다. 윤중 게이지의 근방에서 축 중심으로부터 61.7°(중심의 접선으로부터 28.3°) 기울인다. 단, 차륜 재료의 Poisson비 ν

=0.29로 한다. 부착 오차에 의한 스트레인이 들어가지 않도록 하기 위해, Poisson비의 오차를 고려하여 경사각은 $61.7^\circ + \alpha$ 로 한다. 스트레인 게이지의 저항은 350Ω 로 한다. 길고 폭넓은 그리드로 게이지 전류 용량이 큰 스트레인 게이지를 사용한다. 통상보다 4배 이상 큰 브리지 전원(40V)을 이용한다. 윤중용 브리지 회로는 4액티브 1게이지법을 기본 구성 회로로 하고, 마주보는 변은 2액티브 2더미 게이지법으로 구성한다(Fig. 7). 횡압용 브리지는 4액티브 게이지법으로 구성한다(Fig. 8). 홀을 가공하여 접촉력을 측정할 때의 문제점으로서 횡압 측정용 브리지 회로에서는 차륜의 외면과 내면에 온도차가 발생하면 온도 드리프트가 발생한다는 것이다.

2.3.1.1 1매 2게이지법 윤중측정

스트레인 게이지는 단축 게이지를 구멍 안에 대향으로 2매씩 부착한다. 회전 방향의 굽힘 스트레인을 배제하고 압축 하중에 의한 스트레인을 검출한다. 마주보는 변을 2게이지법에 의해 스트레인에 대한 저항 변화가 두 배가 되지만, 브리지 회로 저항도 두 배가 되기 때문에 결국 1매 게이지와 같다. 브리지 회로의 배선은 매우 복잡하며 각종 중계용 리드선을 길게 할 필요가 있다. 때문에 리드선 저항에 의한 온도 드리프트가 발생하기 쉽다. 판면 방향의 굽힘 스트레인을 배제하는 데는 스트레인 게이지 부착위치의 정밀검토가 필요하다. 스트레인 게이지는 32매를 사용한다(Fig. 7).

2.3.1.2 2매 2게이지법 윤중측정

스트레인 게이지를 대량으로 사용하기 때문에, 게이지 부착작업의 효율을 높이기 위해 단축 게이지 두 매를 평행하게 나란히 사용하여 구멍 안에 대향으로 4매를 부착한다. 회전 방향의 굽힘 스트레인을 배제하여 압축하중에 의한 스트레인을 검출한다. 브리지 회로의 리드선 배선을 약간 절약할 수 있다. 게이지를 여분으로 부착하기 때문에 불필요한 작업이 있을 수 있다. 판면 방향의 굽힘 스트레인을 배제하기 위해서는 스트레인 게이지 부착위치의 정밀검토가 필요하다. 스트레인 게이지는 $32 + 8 = 40$ 매를 사용한다.

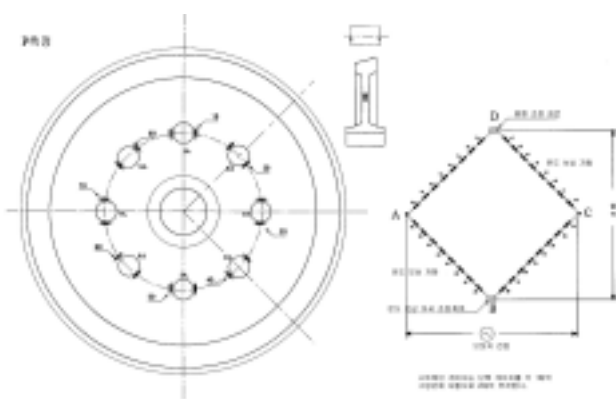


Fig. 7 Strain Gauge Arrangement and Bridge Circuit (for Wheel Load)

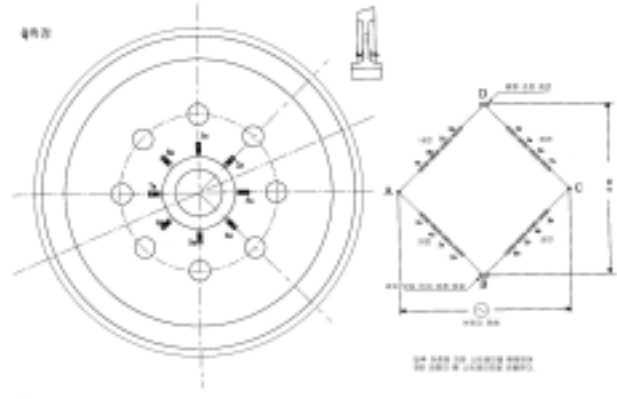


Fig. 8 Strain Gauge Arrangement and Bridge Circuit (for Lateral Force)

2.3.1.3 1점 집중 더미 게이지 방식

온도 보상 저항은 더미 게이지판으로 한군데 모아서 부착한다. 더미 게이지판은 외면용과 내면용으로 두 개를 제작한다. 더미 게이지판은 외력이 작용하지 않도록 차륜의 플레이트면에 부착한다. 이러한 더미 게이지 방식의 특징은 접속 리드선을 짧게 하여 리드선 저항에 의한 영점 드리프트를 저감시키지만, 플레이트 면에서 발생하는 국부적인 온도 변화에 의한 온도 보상을 실시할 수는 없다.

2.3.2 차륜 플레이트 면에서 접촉력을 측정하는 방법

이것은 앞뒷면 각각 24매씩 48매의 스트레인 게이지를 연속해서 부착하고 액티브 게이지로만 사용하여 Fig. 9~10과 같이 2게이지법으로 활용하는 방법이다.

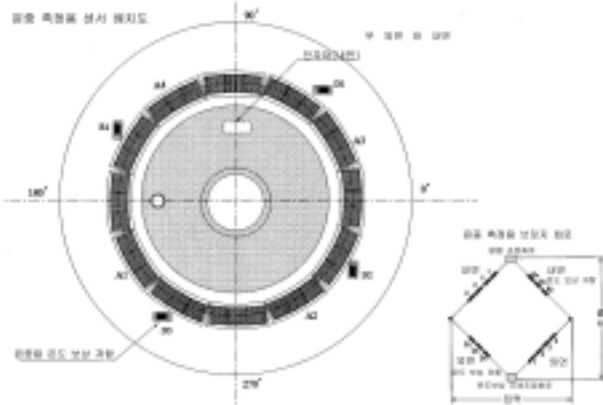


Fig. 9 Arrangement Drawing of Sensor for Measure the Wheel Load

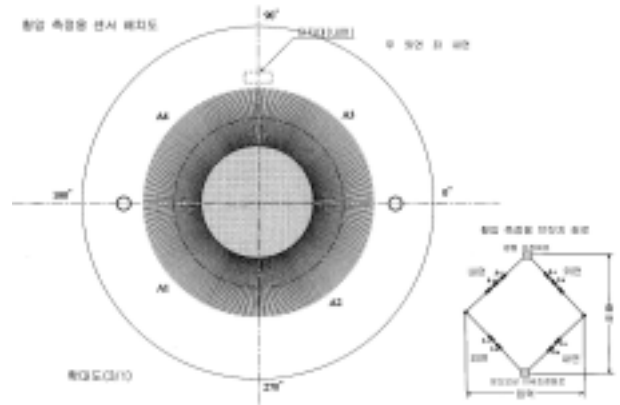


Fig. 10 Arrangement Drawing of Sensor for Measure the Lateral Force

3. 본선주행시험

3.1 공차시험

본 시험데이터는 인천신공항철도의 통근형차량에 대한 주행안전성을 간헐법으로 측정된 것으로서 후처리 과정에서 연속적인 그래프로 나타낸 것이다. 그러므로 실질적인 연속법 데이터라고 할 수는 없지만 연속법으로의 측정결과도 이와 유사하게 표현되어야 할 것이므로 참고적으로 인용하였다. Fig. 11은 측정용 윤축이 열차의 전부에 위치할 때 이동거리에 따른 측정데이터를 종합한 것이며, Fig. 12는 측정용 윤축이 열차의 후부에 위치했을 때의 데이터이다. 두 경우를 비교하여 보면 전부 위치로의 주행시 횡압과 탈선계수가 확연히 증가하여 뚜렷이 대비되는 것을 볼 수 있다.

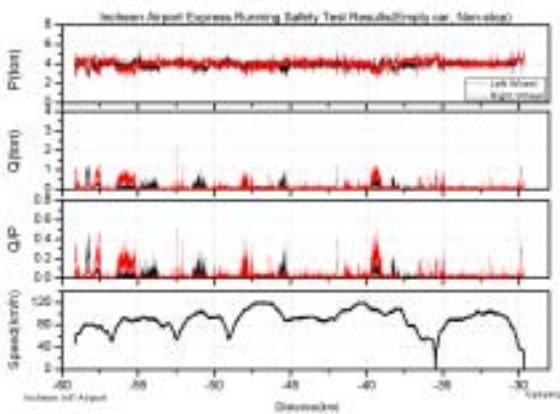


Fig. 11 Test result of empty car(front)

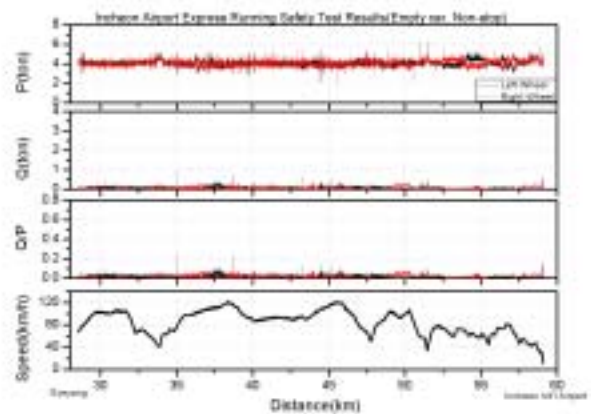


Fig. 12 Test result of empty car(rear)

3.2 만차시험

시험대상차량에 약 24톤의 하중을 적재했을 때의 측정결과이다. Fig. 13은 측정용 윤축이 열차의 전부에 위치할 때 이동거리에 따른 측정데이터를 종합한 것이며, Fig. 14는 측정용 윤축이 열차의 후부에 위치했을 때의 데이터이다. 공차측정결과와 비교하여 보면 윤축의 변동과 횡압의 크기가 증가하였지만 탈선계수는 감소된 것을 볼 수 있다.

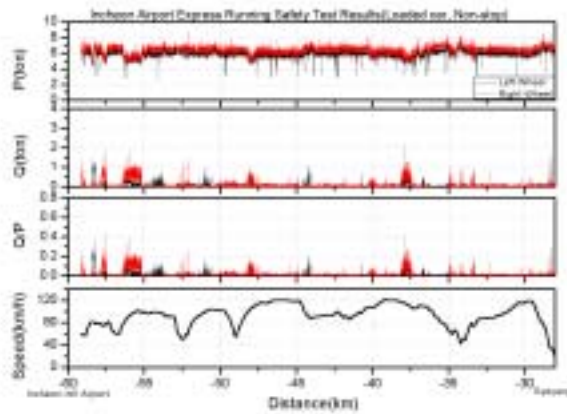


Fig. 13 Test result of loaded car(front)

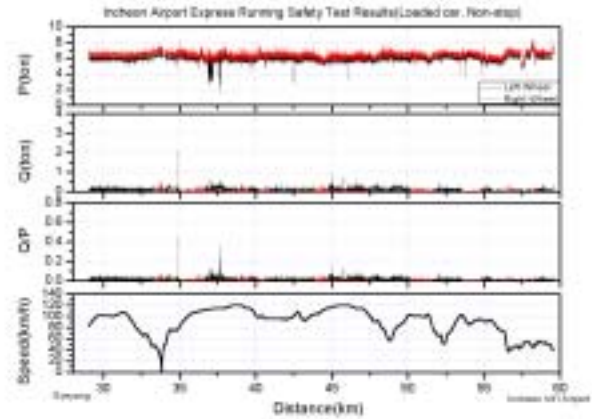


Fig. 14 Test result of loaded car(rear)

4. 결론

간헐법을 응용한 윤중, 횡압, 탈선계수의 연속출력을 얻을 수 있는 측정법을 제시하였다. 횡압의 경우는 감도영역이 넓어 4개의 구멍(차륜의 1/4 영역)에서 출력을 얻을 수 있지만, 윤중의 경우는 감도영역이 좁기 때문에 차륜 전체에 걸친 보다 정확한 출력을 얻으려면 게이지의 포인트를 8개까지 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 향후 추진방향으로, 실차시험결과를 근거로 측정방법의 유용성을 검증하여야 하고 400 km/h 이상에서의 측정에 대한 시스템의 기능확인 및 측정용 차륜의 검·교정방법 등 계속 연구 개발에 정진하여 체계화시켜 나가야 하는 분야임을 밝혀두는 바이다. 또한 스트레인 게이지의 새로운 배치방법으로 윤중과 횡압을 연속적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 이론적으로만 가능할 뿐, 실제 적용시에는 또다른 문제점들이 도출될 수 있으리라 여겨지므로 본 저자를 비롯한 관심 있는 연구자들의 지속적인 검증이 이루어져야 함을 밝히는 바이다.

참고문헌

- (1) 함영삼, 차륜/레일 작용력의 연속적 측정방법, 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 2711 ~ 2714, 2006. 06. 09
- (2) Hiromichi Kanehara, Kiyoshi Ohno, Summer. 2003, "Development of a Continuous Measuring System for Contact Position between Wheel and Rail toward Clarification of Derailment Mechanism", JR EAST Technical Review No.2