

<학술논문>

# 상용차량의 브레이크 시스템과 차량 시스템 주파수 분석을 통한 브레이크 저더의 실험적 고찰

문일동\* · 김종대\* · 오재윤\*\*  
(2006년 9월 5일 접수, 2007년 11월 9일 심사완료)

## An Experimental Study on Brake Judder via the Frequency Analysis of the Brake System and Vehicle System of a Commercial Vehicle

Il-Dong Moon, Jong-Dae Kim and Chae-Youn Oh

**Key Words :** Brake Dynamometer Test(브레이크 다이내모 시험), Brake System(제동장치), Commercial Vehicle(상용차량), Drum Brake(드럼 브레이크), Frequency Analysis(주파수 분석), Brake Judder(브레이크 저더, 이상떨림), Unsprung Mass(스프링 하질량)

### Abstract

This paper studies experimentally on the building-up process for the amplitude of a commercial truck vibration induced by brake judder. A front axle drum equipped with a drum brake system is utilized for this experiment. A brake dynamo test, a real vehicle ride test and a real vehicle braking test are performed for the analysis of brake judder. The brake dynamo test measures judder by applying brake chamber pressures of 1, 2 and 3 bar at initial brake pad temperatures of 100°C and 150°C. In order to assess the vertical acceleration at the front axle, the real vehicle ride test on a straight test road with velocities of 20, 40, 60 and 80 km/h is performed. The real vehicle braking test is carried out at the deceleration rate of 0.2g from a velocity of 90km/h for evaluating the vertical, lateral and longitudinal accelerations both at the front axle and at the cab floor under the driver's seat. The magnitudes and frequencies of the measured peak accelerations from the brake dynamo test, the real vehicle ride test and the real vehicle braking test are comparatively analyzed. This paper shows that the vibration produced by brake judder is built up due to the brake system's peak acceleration frequency being close to the vehicle ride mode's frequency.

### 1. 서 론

전국적으로 고속도로의 확장 및 도시와 도시를 연결하는 고속화 도로의 건설로 인하여 자동차와 함께하는 시간이 길어지고 있다. 이에 따라 운전

자들의 차량 승차 성능에 대한 관심과 요구가 더욱 증대되고 있다. 상용차의 경우에도 최근 들어 승용차에 버금 가는 차량 승차 성능을 요구하는 추세이다. 이에 따라 국내 상용차 제작업체들도 상용차의 승차 성능 향상을 위해 많은 연구 노력을 기울이고 있는 추세이다.

상용차의 경우 고속 주행 중에 브레이크를 작동하는 경우에 큰 진폭의 저주파 진동 현상인 저더(judder) 현상이 발생할 수 있다. 이 같은 저더 현상은 고속주행에서 급제동까지의 중간 단계로부터 시작된다. 만일 제동이 반복된다면 저속에서도 저더 현상이 발생될 수 있다. 발생된 저더는 허브(hub), 차축(axle), 현가장치, 조향장치 등을 통하여

† 책임저자, 회원, 현대-기아자동차(주) 상용선형개발팀  
E-mail : moonid68@hyundai-motor.com  
TEL : (031)368-4619

\* 회원, 전북대학교 대학원

\*\* 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부 자동차신기술 연구소

E-mail : ohcy@chonbuk.ac.kr  
TEL : (063)270-2377 FAX : (063)270-2388

차체와 운전자에게 전달된다. 이것은 승차감을 저하 시킬 뿐 아니라 운전자에게 불안감을 유발할 수 있는 요인이 되므로 저더 현상을 개선하기 위한 많은 노력을 기울이고 있다.

브레이크 시스템과 관련된 회전하는 부품인 브레이크 드럼, 디스크 휠, 허브, 타이어의 재질 및 형상의 불균일성은 제동할 때 브레이크 토크 변동을 유발시킨다. 이 브레이크 토크 변동에 의하여 차량의 이상 떨림 현상인 브레이크 저더가 발생한다. 일반적으로 브레이크 저더에 의한 이상 진동 현상을 개선하기 위하여 진동원인 드럼, 디스크 휠, 허브, 타이어 등과 같은 회전부품의 강성 및 진원도를 확보하거나, 진동 전달체인 현가장치, 각종 마운트류, 차체 등의 진동특성을 조율하는 방안을 연구해왔다.

저더에 대한 연구는 1990년대에 들어서면서부터 발생원인 규명과 해결 방안을 강구하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 디스크 또는 드럼 브레이크에서 디스크와 드럼의 두께 변화가 제동시 진동 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구<sup>(1)</sup>가 진행되었다. 브레이크 저더 가진원과 저더에 의해 발생한 진동의 전달 경로에 대한 연구<sup>(2)</sup>도 수행되었다. 또한 브레이크 디스크의 런 아웃(run-out)과 두께 변화가 브레이크 저더에 미치는 영향에 대한 연구<sup>(3)</sup>가 수행되었다. 맥퍼슨 현가장치로 구성된 승용차의 실차시험과 4포스터를 이용한 상하 가진시험 및 마그네틱 가진기를 이용한 전후 가진시험을 수행하여 승용차의 모드특성을 파악하고 저더에 영향을 주는 주요 모드들을 확인하기 위한 연구<sup>(4)</sup>가 수행되었다. 중형버스에서 브레이크 저더 발생시 스티어링 휠 진동 현상에 대한 해석적인 연구<sup>(5)</sup>가 수행되었다. 저더 현상이 발생하면 차량 전체 시스템의 주파수 특성과 연계되어 증폭된 형태로 운전자에게 전달 될 수 있다. 그러나 현재까지 상용차량에서는 저더 현상과 차량 전체 시스템의 주파수 특성과 연계하여 수행한 연구는 보고 되지 않았다.

본 논문에서는 전문 제동장치에 드럼 브레이크를 장착한 상용차량을 제동 할 때 발생하는 브레이크 저더 현상을 분석하기 위하여 브레이크 다이내모 시험과 실차 주행시험 및 실차 제동시험을 수행한다. 이 같은 시험결과를 이용하여 브레이크 저더 현상을 차량 전체 시스템 주파수 특성과 연계해서 분석하고자 한다.

## 2. 브레이크 다이내모 시험

차량의 하중 적재상태, 차량의 주행속도와 감가 속도, 브레이크 라이너의 열 이력, 운전자의 제동 특성 등은 실차 제동시험 결과에 영향을 미치는 많은 인자들 중 일부이다. 이 같은 인자들 중에는 실차 제동시험을 반복해서 수행할 때 매번 동일한 시험 조건을 구현하기가 매우 어려운 인자들이 있다. 즉, 실차 제동시험을 수행할 때는 매번 제동조건을 동일하게 재현할 수 없기 때문에 브레이크에 작동하는 토크가 매 시험 때마다 폭 넓게 변할 수 있다는 어려움을 가지고 있다.

브레이크 드럼을 모터로 회전시키며 유압에 의해 브레이크 라이너를 브레이크 드럼과 마찰시켜 제동 특성을 평가하는 브레이크 다이내모 시험은 실험실 내에서 수행된다. 브레이크 다이내모 시험은 브레이크 제동특성에 영향을 미치는 인자들을 매번 동일한 조건으로 재현할 수 있다. 따라서 브레이크 다이내모 시험으로부터 얻어진 데이터는 동일한 시험조건으로 수행된 다른 제동관련 부품에서 얻어진 데이터와 직접 비교 평가할 수 있다. 그래서 브레이크 다이내모 시험은 다양한 제동특성을 비교평가하기 용이하므로 제동장치의 개발 및 제동관련 부품의 실차 적용을 위한 안전성 및 규격 만족도를 측정하는 시험방법으로 널리 사용되고 있다.

Fig. 1은 본 논문에 이용된 상용차량의 제동장치 드럼 브레이크의 개략도이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 브레이크 라인 압력이 브레이크 챔버(chamber)에 힘을 가하면 이 힘에 의하여 푸시 로드(push rod)가 직진 방향으로 운동을 하게 된다. 푸시 로드와 조인트로 연결된 슬랙 어드저스터(slack adjuster)가 "S" 캠(cam)을 작동하여 브레이크 슈(brake shoe)를 양쪽으로 미는 힘으로 변환한다. 이 힘에 의해 브레이크 슈는 드럼내에서 확장하여 브레이크 라이너(brake liner)가 드럼에 밀착되도록 한다. 라이너가 드럼에 밀착되면서 발생된 마찰력이 차륜을 제동한다.

Fig. 2는 본 논문에서 구성한 브레이크 다이내모 시험장치를 보여주는 사진이다. 브레이크 다이내모 시험은 Fig. 2에 나타난 것처럼 브레이크 드럼을 모터로 회전시키며 유압에 의해 브레이크 라이너를 브레이크 드럼과 마찰시켜 제동특성을 평가하였다. 브레이크 패드 온도는 브레이크 드럼과 라이너의 마찰력에 영향을 미친다. 브레이크 드럼

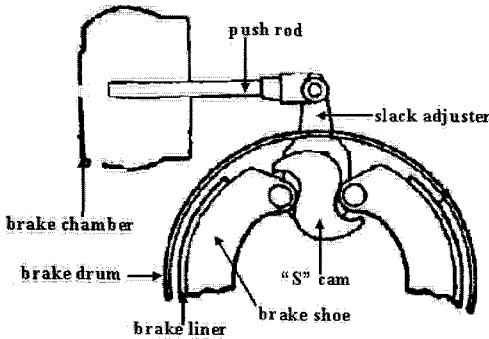


Fig. 1 Schematic diagram of a drum brake system

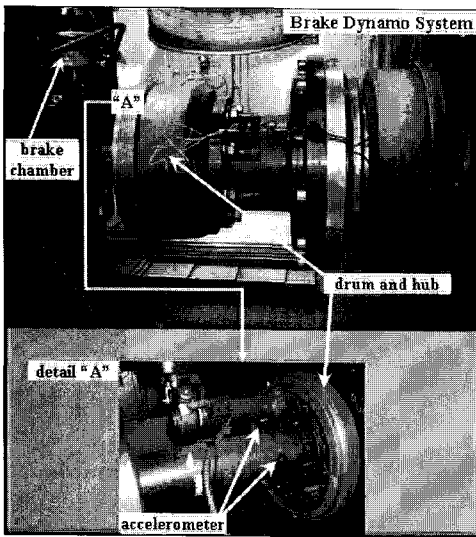
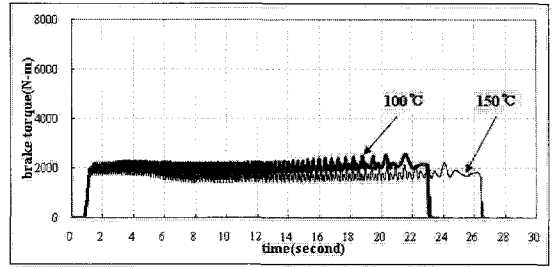


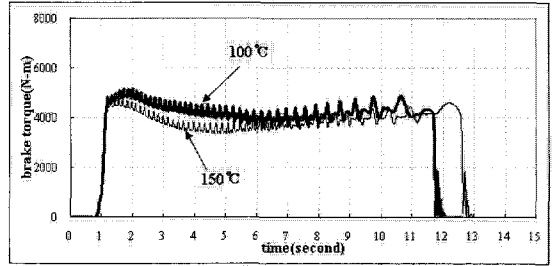
Fig. 2 Picture of a brake dynamometer test equipment

과 라이너의 마찰력 변화는 브레이크 토크에 영향을 미치므로 브레이크를 작동할 때 발생하는 진동특성에도 영향을 미치게 된다. 그래서 브레이크 라이너의 온도를 측정하기 위하여 라이너 중간부위에 열전대를 설치하였다. 또한 브레이크 드럼의 제동시 발생하는 진동특성을 평가하기 위하여 차축 원주상에 가속도계를 Fig. 2에서 보는 바와 같이 90° 위상차를 두고 2개를 부착하였다. 브레이크 토크는 스트레인 게이지(strain gage)를 이용하여 측정하였다.

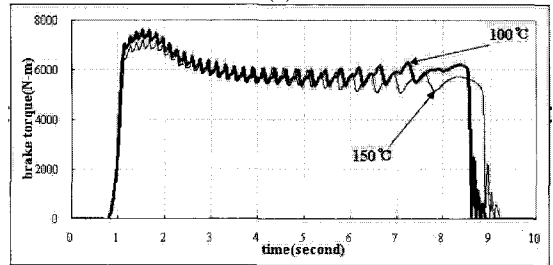
브레이크 다이내모 시험은 차량 속도 90km/h에 상응하는 속도로 브레이크 드럼을 회전시킨 상태에서 브레이크 챔버에 압력을 가하여 감속시키면서 브레이크 드럼의 진동특성 및 브레이크 토크 변동을 측정하였다. 브레이크 다이내모 시험은 브레이크 패드의 초기온도가 100℃와 150℃인 두 경우에 대하여 브레이크 챔버의 압력을 각각 1.0, 2.0, 3.0bar로 변화시키면서 수행하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 The brake torque variation of front brake system in brake dynamo test at chamber pressure (a)1.0bar (b)2.0bar (c)3.0bar

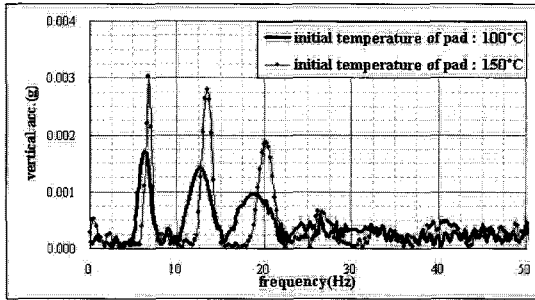
Fig. 3은 드럼 브레이크의 브레이크 다이내모 시험을 수행하여 구한 브레이크 토크 변동을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 브레이크 챔버의 압력이 1.0bar인 경우이고, Fig. 3(b)는 브레이크 챔버의 압력이 2.0bar인 경우이며, Fig. 3(c)는 브레이크 챔버의 압력이 3.0bar인 경우에 대한 결과이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 브레이크 토크는 브레이크 패드의 초기 온도에 따라 약간 다른 경향을 보인다. 이것은 브레이크 패드의 온도가 브레이크 드럼과 라이너의 마찰력에 영향을 미쳐서 브레이크 토크에도 영향을 미치기 때문이다. 그리고 브레이크 챔버의 압력이 높아짐에 따라 초기 브레이크 토크 피크 값이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 브레이크 다이내모 시험 장치에서 브레이크 드럼 원주에 부착한 가속도계를 통해 측정된 가속도의 주파수 특성을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 브레이크 챔버의 압력이 1.0bar인 경우이고, Fig. 4(b)는 브레이크 챔버의 압력이 2.0bar인 경우이며, Fig. 4(c)는 브

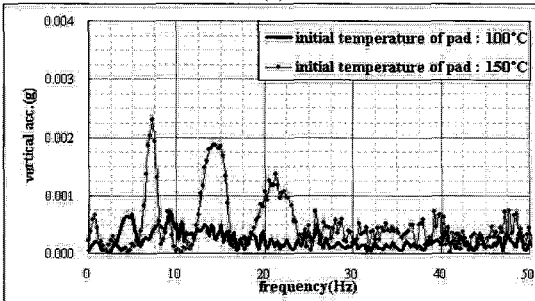
레이크 챔버의 압력이 3.0bar인 경우이다. 본 논문에서는 브레이크 저더 현상을 전체 시스템의 주행 모드와 연계하여 분석하고자 한다. 그래서 본 논문에서 이용한 차량의 전륜 하질량(unsprung mass)의 바운스 주파수 대역인 10~15Hz 부근 이외에서 발생하는 브레이크 시스템 주파수 대역을 고려하지 않았다. 챔버 압력 1.0 bar를 가한 Fig. 4(a)의 시험결과를 보면 브레이크 패드의 온도가 100℃의 경우는 12.8Hz에서 150℃의 경우는 13.5Hz에서 피크 주파수가 발생하였다. Fig. 4(b)의 시험결과를 보면 브레이크 패드의 온도가 100℃의 경우는 9.3Hz에서 150℃의 경우는 14.5Hz에서 피크 주파수가 발생하였다. Fig. 4(c)의 시험결과를 보면 브레이크 패드의 온도가 100℃의 경우는 10.3 Hz에서 150℃의 경우는 12.8Hz에서 피크 주파수

가 발생하였다. 이와 같이 브레이크 패드 초기 온도가 증가하면 피크 주파수는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 챔버 압력과 피크 주파수와는 큰 상관 관계를 보이지 않았다.

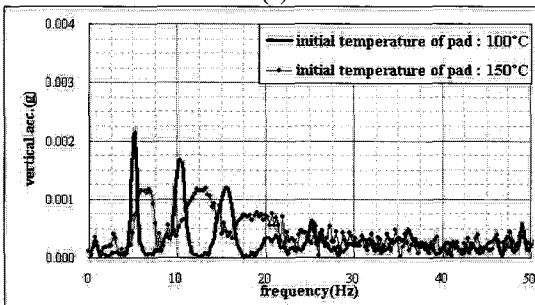
Fig. 4의 결과로부터 제동시 발생하는 피크 가속도는 브레이크 챔버 압력이 1.0bar와 2.0bar인 경우는 브레이크 패드 온도가 높은 경우에 컸다. 그러나 브레이크 챔버 압력이 3.0bar 인 경우는 이와 반대로 브레이크 패드 온도가 낮은 경우에 피크 가속도가 컸다. 특히 챔버 압력이 2.0bar이고 브레이크 패드 온도가 100℃인 경우에 9.3Hz의 주파수에서 발생한 피크 가속도 값이 다른 조건에 비하여 상당히 작았다. 이와 같이 드럼 브레이크는 챔버의 압력과 브레이크 패드의 온도에 따라서 피크 가속도 주파수와 피크 가속도 크기가 변하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 The vertical acceleration of front brake system in brake dynamo test at chamber pressure. (a) 1.0 bar (b) 2.0 bar (c) 3.0 bar

### 3. 실차 주행 및 제동시험

본 논문은 상용차량을 제동할 때 발생하는 브레이크 저더 현상이 차량 시스템의 주행 모드와 공진에 의하여 증폭되어 차량의 승차감 저하 및 운전자의 불안 요인으로 발전하는 지를 검토하기 위하여 실차 직진 주행시험과 실차 제동시험을 수행하였다.

Table 1은 본 논문의 실차 주행 및 제동시험에서 이용한 상용차량의 전방 현가장치와 후방 현가장치의 기본적인 제원을 기술하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 전방 현가장치는 테이퍼 판스프링(tapered leaf spring)을 사용하였으며 스프링 강성은 107.9N/mm이다. 후방 현가장치는 다판 스프링(multi-leaf spring)과 테이퍼 판스프링의 조합으로 이루어져 있으며, 주스프링(main spring)의 강성은 137.3N/mm이고 보조스프링(helper spring)를 고려한 강성은 568.7N/mm이다.

Table 1 Specification of a truck

item		Specification
front system	frame width(mm)	860
	spring tread(mm)	880
	wheel tread(mm)	1942
	spring Constant(N/mm)	107.9
rear system	frame width(mm)	860
	spring tread(mm)	1025
	wheel tread(mm)	1701
	spring constant(N/mm)	main spring=137.3 with helper spring=568.7

3.1 실차 직진 주행시험

본 논문에서는 상용차량이 직진 주행을 할 때 진동특성을 분석하기 위한 실차 시험을 수행하였다. 실차 직진 주행시험은 정상적인 일반도면에서 공차상태로 수행하였다. 그리고 주행속도 20, 40, 60, 80km/h에서 수행하였다. 가속도계를 제동장치에 가장 가까운 위치의 전륜 차축에 부착하여 수직가속도를 측정하였다.

Fig. 5는 직진 주행시험을 수행하여 측정한 전륜 차축 수직가속도의 주파수 분석 결과이다. 주행속도 20km/h에서는 피크가속도 주파수가 12.5Hz, 주행속도 40km/h에서는 피크가속도 주파수가 12.5Hz, 주행속도 60km/h에서는 피크가속도 주파수가 11.6Hz, 주행속도 80km/h에서는 피크가속도 주파수가 12.5Hz였다. 이와 같이 차량의 주행속도에 관계없이 11~13Hz 사이의 주파수 대역에서 피크 가속도가 발생하였다. 이는 전방 하질량의 바운스 진동모드이다. 피크 가속도 크기는 차이를 보였으며, 주행속도 60, 80km/h에서는 다른 주행속도에 비교해서 피크 가속도 주파수가 상당히 크게 발생하였다. 만약 이 피크 가속도 주파수 대역에서 다른 시스템의 피크 가속도 주파수 대역과 겹치는 경우가 발생한다면 상당히 심한 공진 상태가 발생할 것이다.

3.2 실차 제동시험

일반적으로 브레이크 저더는 90km/h 이상으로 주행 중이던 차량이 제동될 때 감속되는 과정에서 60-80km/h 차속 구간에서 발생되며, 발생 주파수 대역은 10~20Hz이다. 브레이크 저더가 발생하면 브레이크 패달이 맥동할 뿐 아니라 스티어링 휠, 시트 및 차체/캡에서 진동을 유발하는데, 특히 조향 휠에서 저더 현상이 크게 느껴져서 운전자에게 불안감을 줄 수 있다.

본 논문에서는 상용차량을 제동할 때 발생하는 브레이크 저더 현상을 차량 시스템의 주행 모드와 연계하여 분석하기 위하여 자동차 제조사에서 사용하는 실차 제동시험 방법에 따라 제동시험을 수행하였다. 즉, 일반도로에서 상용 주행속도인 90km/h까지 가속한 후 차량을 0.2g의 감가속도로 제동하는 실차 제동시험을 수행하였다. 실차 제동시험에서는 적재하중이 브레이크 저더에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공차상태(C.V.W ; Curb Vehicle Weight)와 5톤의 하중을 등 간격으로 적재함에 적재한 상태(G.V.W ; Gross Vehicle Weight)의 두 경우를 고려하였다. 실차 제동시험 중 발생하는 저더 현상을 측정하기 위하여

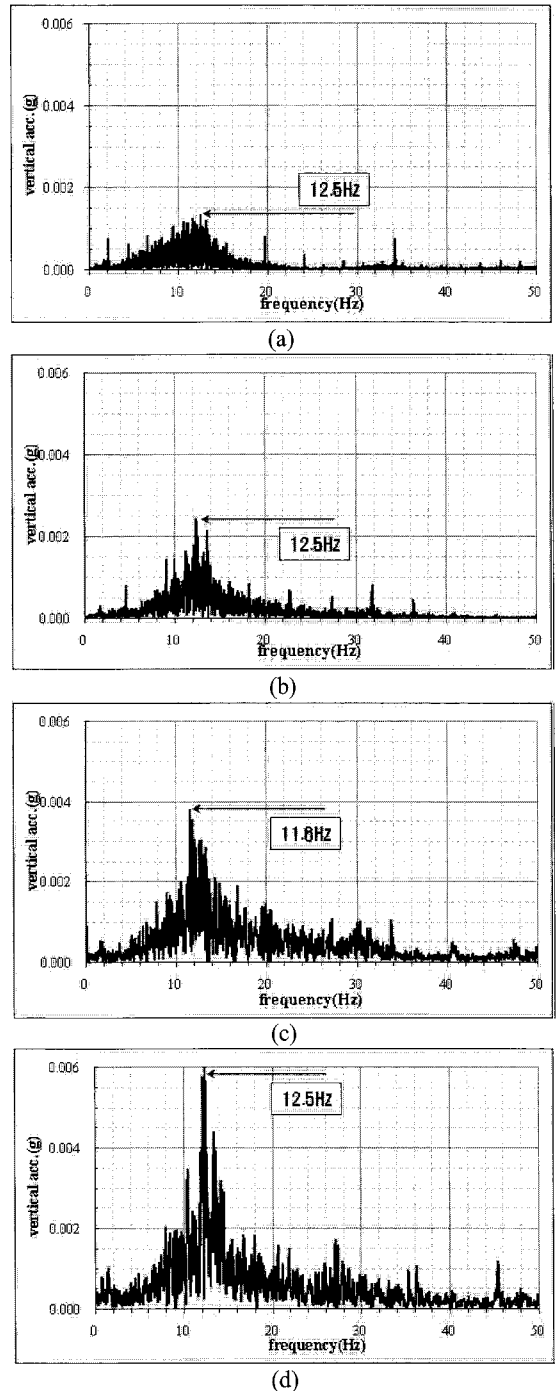
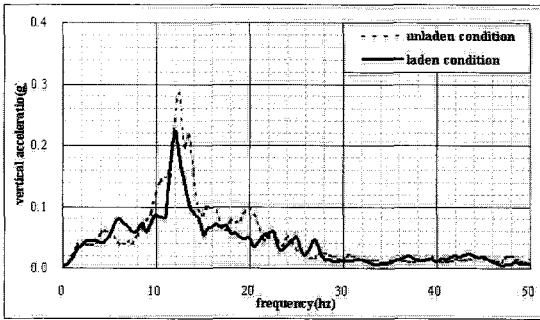
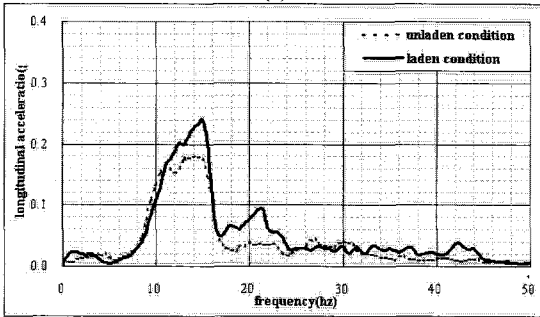


Fig. 5 The vertical acceleration of front axle in the straight road driving test. (a) 20km/h (b) 40km/h (c) 60km/h (d) 80km/h

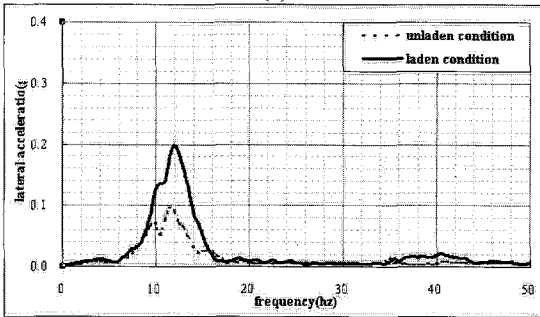
전륜 차축과 캡 운전석 바닥면에 가속도계를 부착하였다.



(a)

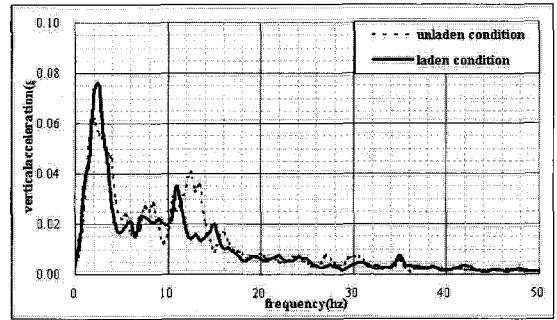


(b)

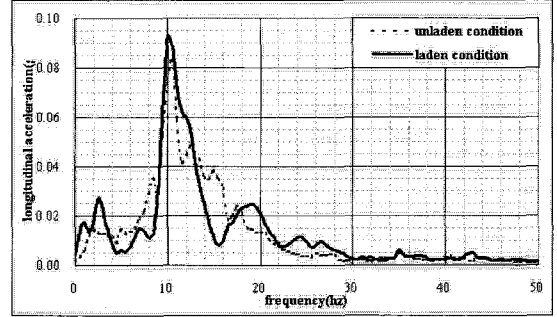


(c)

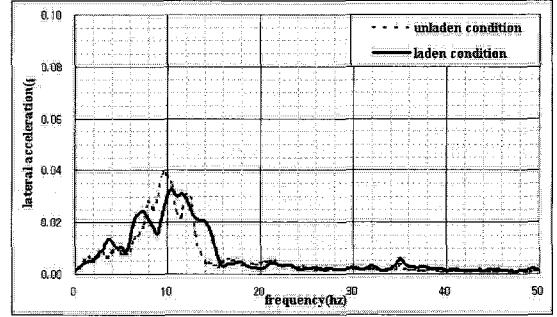
Fig. 6 The acceleration of front axle in the straight road braking test. (a) vertical acceleration (b) longitudinal acceleration (c) lateral acceleration



(a)



(b)



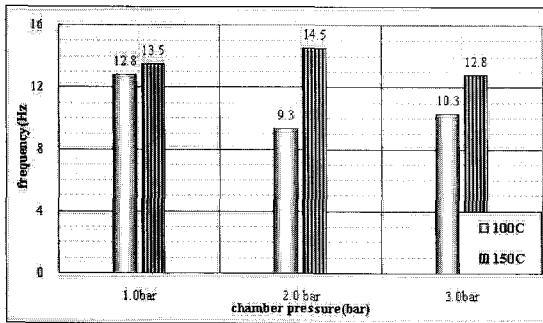
(c)

Fig. 7 The acceleration of cab floor of driver's seat in the straight road braking test. (a) vertical acceleration (b) longitudinal acceleration (c) lateral acceleration

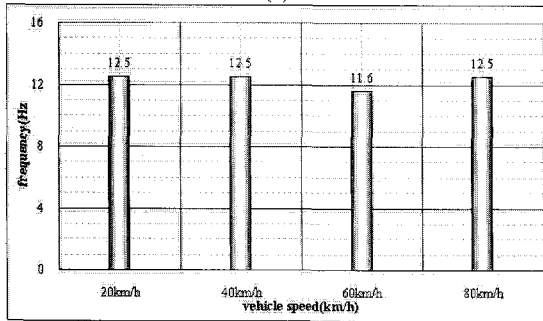
Fig. 6은 실차 제동시험에서 전륜 차축에 부착한 가속도계로부터 측정된 가속도 주파수 분석결과이다. Fig. 6(a)는 저더 현상에서 가장 중요한 방향인 수직 방향의 가속도 특성을 보여주고 있으며 Fig. 6(b)는 종방향 가속도 특성, Fig. 6(c)는 횡방향 가속도 특성을 각각 보여 주고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 11~15Hz 주파수 대역에서 수직방향, 종방향, 횡방향 가속도 피크가 발생하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 수직방향 가속도 피크 값은 공차 상태가 적차 상태보다 크게 발생하였으며 종방향 및 횡방향 가속도 피크 값은 적차 상태보다 크게 발생하였다. 그러나 차량의 적차 상태에 따라 피크 가속도 주파수 변화는 거의 없

었다. 특히 이 주파수 대역은 앞 절의 실차 주행 시험에서 확인한 전륜 하질량의 바운스 진동모드의 피크 가속도 주파수 대역 및 드럼 브레이크 단품의 다이노 시험을 통하여 구한 피크 가속도 주파수 대역과 비슷하였다. 실차 제동시험에서 측정된 피크 가속도의 크기는 실차 주행시험이나 다이노 시험에서 측정된 피크 가속도의 크기 보다 매우 컸다.

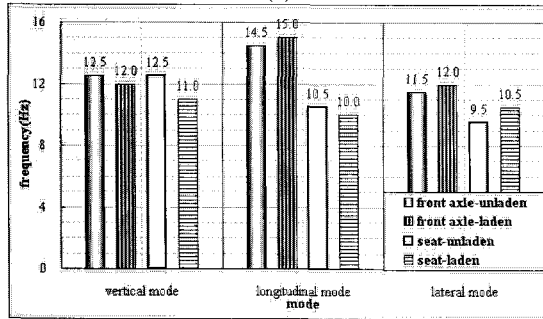
Fig. 7은 캡 운전석 바닥면에서 발생하는 3축 가속도를 계측하여 주파수 분석을 수행한 결과이다. Fig. 7(a)는 수직 방향의 가속도 특성, Fig. 7(b)는 종방향 가속도 특성, Fig. 7(c)는 횡방향 가속도 특성을 각각 보여 주고 있다. Fig. 7(a)의 2Hz 부근에서



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Peak frequency in (a) brake dynamo test (b) straight road driving test and (c) straight road braking test

발생한 1차 피크 주파수는 캡 바운스 주파수이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 9~13Hz에서 수직방향, 종방향, 횡방향 가속도 피크가 발생하였다. 이는 제동시 브레이크 드럼의 피크 가속도 주파수와 전륜 하중량의 피크 가속도 주파수의 공진에 의하여 발생하는 것으로 생각된다.

3.3 고찰

본 논문에서는 제동장치가 드럼 브레이크로 구성된 상용차량의 제동시 발생하는 이상진동 현상인 브레이크 저더를 차량 시스템 차원에서 분석하기 위하여 브레이크 다이내모 시험과 실차 주행 및 제동시험을 수행하였다.

Table 2 comparison of peak acceleration

		peak acceleration(g)	
		front axle	floor under driver's seat
brake dynamo test	1.0bar	100℃ 0.0014	150℃ 0.0030
	2.0bar	0.0007	0.0020
	3.0bar	0.0017	0.0010
straight road driving test	20km/h		0.0013
	40km/h		0.0024
	60km/h		0.0038
straight road braking test	unladen	0.2851	0.0403
	laden	0.2239	0.0351

Fig. 8은 드럼 브레이크 제동장치로 설계된 상용차량의 제동시 발생하는 이상진동 현상인 저더를 규명하기 위하여 본 논문에서 수행하여 측정된 시험 결과를 보여주고 있으며 Table 2는 피크 가속도 결과를 도표로 정리하여 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 브레이크 다이내모 시험 결과이다. Fig. 8(b)는 실차 주행시험 결과이다. Fig. 8(c)는 실차 제동시험 결과이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 브레이크 다이내모 시험으로부터 여러 브레이크 챔버 압력과 두 브레이크 패드 온도에서 브레이크 시스템의 피크 가속도 주파수가 9~15Hz부근에서 발생하였다. 실차 주행시험으로부터 차량의 전륜 차축 수직가속도는 차량 속도에 관계없이 11~13Hz에서 피크 주파수가 발생하였다. 실차 제동시험으로부터 전륜 차축에서는 11~15Hz에서 수직방향, 종방향, 횡방향 가속도 피크가 발생하였다. 그리고 캡 운전석 바닥면에서는 9~13Hz에서 수직방향, 종방향, 횡방향 가속도 피크가 발생하였다. 이와 같이 브레이크 시스템과 차량의 주행 모드에서 피크 수직가속도 주파수 대역이 비슷하였다.

Table 2는 본 논문에서 수행하여 측정된 피크 가속도를 비교하여 보여준다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 실차 제동시험에서 측정된 차축과 캡 바닥면에서의 피크 가속도 크기는 브레이크 단품의 다이내모 시험과 실차 주행시험의 피크 가속도 크기보다 매우 컸다. 이것은 브레이크 시스템과 차량 주행 모드의 피크 가속도 주파수 대역이 비슷하여 공진이 되므로 브레이크를 제동할 때 발생하는 저더 현상이 증폭되기 때문이다.

차량을 제동할 때 발생하는 브레이크 저더 현상은 브레이크 시스템을 완벽하게 제작하기는 불가능하기 때문에 피하기는 어려운 현상일 것이다.

그러나 본 논문을 통해서 고찰한 바와 같이 브레이크 시스템과 차량의 피크 가속도 주파수 대역이 비슷해서 브레이크를 제동할 때 발생하는 저더 현상이 증폭되는 현상을 방지할 수 있다면 브레이크 저더 현상에 의한 승차감 저감과 운전자 불안 요소를 어느 정도 완화 시킬 수 있을 것이다. 따라서 차량을 설계하는 단계에서부터 차량시스템의 진동 피크 주파수대역과 제동 시스템의 진동 피크 주파수 대역이 겹치지 않게 설계한다면 제동할 때 발생하여 운전자에게 좋지 않은 승차감을 주고 불안감을 느끼게 하는 저더 현상을 완화 할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 상용차량의 제동시 발생하는 저더 현상의 원인을 분석하기 위하여 다양한 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차량 속도 90km/h에 상응하는 속도로 브레이크 드럼을 회전시키고 브레이크 패드의 초기온도가 100℃와 150℃인 상태에서 브레이크 챔버 압력 1.0, 2.0, 3.0bar를 가하는 브레이크 다이내모 시험을 수행하였다. 드럼 브레이크 시스템은 9~15Hz 부근에서 피크 가속도가 발생하였으며, 챔버의 압력과 브레이크 패드의 온도에 따라서 피크 가속도 주파수와 피크 가속도 크기가 변하는 것을 확인하였다.

(2) 상용차량 전륜 차축에 가속도계를 부착하여 주행속도 20, 40, 60, 80km/h에서 수직가속도를 측정하는 실차 직진 주행시험을 수행하였다. 차량의 주행속도에 관계없이 피크 가속도는 11~13Hz 주파수 대역에서 발생하였다. 피크 가속도 크기는 차량 속도에 따라 차이를 보였으며, 주행속도 60, 80km/h에서는 다른 주행속도에 비교해서 피크 가속도가 상당히 크게 발생하였다.

(3) 전륜 차축과 캡 운전석 바닥면에 가속도계를 부착하여 90km/h에서 0.2g의 감가속도로 제동하는 실차 제동시험을 수행하였다. 전륜 차축에서는 11~15Hz에서 수직방향, 종방향, 횡방향 가속도

피크가 발생하였고 캡 운전석 바닥면에서는 9~13Hz에서 가속도 피크가 발생하였다. 이 같이 실차 제동시험에서 피크 가속도의 주파수 대역은 브레이크 시스템과 차량의 주행 모드의 피크 가속도 주파수 대역과 비슷하였다. 그리고 실차 제동 시험에서 차축과 캡 바닥면에서의 피크 가속도 크기는 브레이크 단품의 브레이크 다이내모 시험과 실차 주행시험의 피크 가속도 크기보다 매우 컸다. 이것은 브레이크 시스템과 차량 주행 모드의 피크 가속도 주파수 대역이 비슷하여 공진이 되므로 브레이크를 제동할 때 발생하는 저더 현상이 증폭되어 차량 각 부위에 전달되기 때문이다. 그러므로 브레이크 단품의 피크 가속도 주파수 대역과 차량 주행 모드의 피크 가속도 주파수 대역이 겹치지 않게 설계 된다면 제동시 발생하는 브레이크 저더가 궁극적으로 운전자에게 전달되는 정도가 많이 완화될 수 있을 것이다. 일반적으로 차량 주행 모드의 피크 주파수는 현가장치의 스프링 강성에 영향을 받는 인자이며, 현가장치는 차량의 승차감 및 조종안정성에 주도적인 영향을 미치는 인자이다. 따라서 저더 현상을 개선하기 위해서는 브레이크 시스템의 피크 주파수 대역을 변경하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) Abdelhamid, M. K., 1997, "Brake Judder Analysis : Case Studies," SAE 972027.
- (2) Gassmann, S. and Engel, H. G., 1993, "Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder," SAE 931880.
- (3) Youn, S. W. and Han, M. C., 1997, "Study on Brake Judder Caused by Disc Run-out and Disc Thickness Variation," *Trans. of KSAE*, Vol. 7, No. 2, pp. 378~386.
- (4) Hwang, I. J. and Park, G.J., 2005, "System Mode and Sensitivity Analysis for Brake Judder Reduction," *Trans. of KSAE*, Vol. 13, No. 6, pp. 142~153.
- (5) Lee, K. S., Suh, K. H., Kuk, J. Y. and Chyun, I.B., 1999, "Analytical Study in Brake Judder Reduction of Medium Bus," *Trans. of KSAE*, Vol. 9, No. 4, pp. 148~156.