

실차 상태에서의 제동시 이상떨림 현상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Brake Judder of Braking on Vehicle

홍 일 민* · 이 원 섭* · 이 종 수†

Ilmin Hong, Wonsub Lee and Jongsoo Lee

(2001년 12월 8일 접수 ; 2002년 3월 27일 심사완료)

Key Words : DTV(디스크 두께변화), Brake Judder(브레이크 저더), Runout(런아웃), Dynamic DTV(동적 디스크 두께변화), Static DTV(정적 디스크 두께변화)

ABSTRACT

The study presents a new testing and analysis method for brake judder on vehicle. For the identification of the excitation mechanism of a brake judder, it is necessary to measure the dynamic brake disc geometry during braking on vehicle. The non-contact sensor system was used to monitor the brake disc geometry. Brake torque variation (BTV) caused by disc thickness variation (DTV) is the primary excitation for brake judder. The mechanical effects generating BTV are linked not only to initial manufacturing tolerances but also to uneven wear. Therefore, the brake disc geometry should be strictly managed to initial condition. The aim of this study has been to measure the dynamic DTV and runout on vehicle and analyze the influence of test parameters on brake judder and compare the disc component with vehicle matching about the DTV profile. As a result of this study, The amplitude of brake judder is proportional to vehicle speed and fluid pressure fluctuation on braking. The major sources of brake judder are directly related to disc thickness variation and side runout variation of corner assembly(disc, hub, bearing).

1. 서 론

제동장치는 자동차의 운동에너지를 브레이킹(braking)을 통해 관련 부품간의 마찰작용으로 차량의 운동 속도를 감소시키는 기계요소이며 제동의 확실성과 신뢰성이 요구된다. 제동시 발생한 열의 대부분은 브레이크 디스크, 허브 등을 통해 전도되며 나머지는 복사열로 대기중에 방출된다. 이때 발생한 열은 관련 브레이크 부품을 마모시키거나 부품의 형상을 변화시켜 브레이크 디스크의 마찰면(friction rim)에 작용하는 수직력의 크기를 변화시키며, 또한 브레이크 패드의

마찰계수를 변화시킨다.⁽¹⁾ 그 결과, 디스크 제동면에 제동력의 변화가 생기게 되고 이는 제동 토크의 불균일 현상(brake torque variation, BTV)을 유발하여 차량의 이상떨림 현상인 저더(judder)를 발생시키는 가진원(excitation source)이 된다. 브레이크 저더(brake judder)는 제동시 브레이크 시스템에서 발생하는 BTV의 여기(excitation)가 현가장치 및 차체를 경로수단으로 하여 핸들떨림, 차체 진동 혹은 브레이크 페달떨림 등으로 운전자에게 전달되는 진동현상이다.⁽²⁾ 브레이크 저더는 크게 냉간저더(cold judder)와 열간저더(hot judder)로 나누어지며 이는 발생원인 및 주파수에 의해 분류된다. 냉간저더는 이론적으로 낮은 주파수에서 발생하며 보통 1차 혹은 2차의 주파수를 갖는다. 브레이크 디스크의 초기 치수 불량 및 반복되는 마찰열에 의한 마찰면의 영구변형으로 인하여 디스크의 런아웃 및 두께변화가 심해져 발생한다.

† 책임저자, 정회원, 연세대학교 기계공학부
E-mail: jleej@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4474 Fax : (02) 362-2736
* 대우자동차 기술연구소 제동설계팀

냉간 저더는 차량의 휠 속도에 종속적이며 제동시 핸들 떨림 및 브레이크 페달진동을 통해 운전자가 느낄 수 있다.⁽³⁻⁵⁾ 열간저더는 냉간저더에 비해 높은 주파수에서 발생하며(6차 이상) 브레이크 디스크의 일부 부위가 국부적으로 열 집중을 받아 다른 부위에 비해 열팽창 차이로 인한 열점(hot spots) 생성으로 브레이크 디스크가 일시적으로 뒤틀리는 현상에 의해 저더가 발생한다.^(6,7)

본 논문에서는 실차 운행조건을 기초로 하여 브레이크 저더 발생시 고려해야 할 관련 부품의 문제점을 분석하고자 한다. 브레이크 저더 발생의 가장 큰 원인인 디스크 런아웃 및 디스크 두께 변화(disc thickness variation, DTV)를 제동 초속도 및 페달 압력의 변화를 통한 실차 상태에서의 실제적인 변화를 파악하기 위하여 비접촉 변위센서 및 앰프를 이용하였다.⁽⁸⁾ 고품(old disc, OD) 및 신품(new disc, ND) 디스크에 대해 일정 초기 속도로 제동시, 제동 시간 변화에 따른 DTV 및 런아웃 변화를 측정하였고, 일정 페달 압력으로 제동시, 제동시간 변화에 따른 차량 속도별 DTV 및 브레이크 액압 변동량을 측정하였으며 일정한 제동 초속도에서의 페달 압력별 제동시간 변화에 따른 DTV 및 브레이크 유압 변동량을 측정하였다. 또한, 실차 조립 상태에서의 관련 부품과의 조립공차에 의한 영향과 조립상태에서 노면과의 마찰에 의한 영향을 비교하기 위하여 차량을 리프트에 올렸을 때와 저속으로 주행시의 런아웃 및 DTV를 측정하였고,^(9,10) 제동말기의 휠 1회전 당 일정유압에서의 브레이크 액압변동 및 DTV를 측정하여 분석하였다. 본 연구에서는 브레이크 저더의 또 하나의 큰 원인 제공품인 브레이크 마찰재는 동일한 재질을 사용하였으므로 마찰재의 특성변화에 따른 영향은 배제하였다.

2. 시험방법

저더의 발생 원인인 BTV는 주로 DTV에 의해 결정되므로 브레이크 저더를 개선하기 위해서는 DTV에 대한 조사가 필수적이다. 저더는 디스크와 패드사이에서 발생하는 진동이 운전자에게 어떻게 전달되는가에 많은 영향을 받지만, 시험차량에서 나타나는 브레이크 저더를 개선하기 위하여 차량의 주행량 증가에 따라 비정상적으로 증가하는 DTV의 거동에 초

점을 맞추었다. 이를 위해 변위측정 장비를 사용하여 브레이크 저더 발생 디스크와 신품 디스크에 발생된 DTV 특징을 비교 분석하고 차량 주행 또는 제동시 DTV의 거동을 분석하였다. 디스크의 DTV를 측정하기 위하여 비접촉 변위 측정기(accumeasure system : AS-9000)를 사용하였다. 본 측정장비는 센서와 디스크 사이의 전기적 정전용량(electrical capacitance)을 전압 출력으로 변환 시킴으로써 거리, 변위 또는 운동을 측정하는 비접촉 변위측정 장비이다. Fig. 1과 같이 변위센서는 센서중앙부에 감지부위가 있고 주변에 넓은 보호대역으로 구성되어 있다. 데이터 획득 방법은 정밀한 앰프에서 정전류를 센서 감지면에서 측정물체에 흘리면 거리에 비례한 유전율(K)이 생성되며 이 값을 선형적으로 증폭하고 정류하여 거리에 비례한 전기적 신호로 출력되며, 측정 대상물과 같은 축상에 있는 전극(sensing electrode) 사이의 전기용량을 측정하여 변위로 나타낸다. 본 시험에 사용된 센서의 외경은 16 mm이고 길이는 20 mm, 전극의 직경은 2.5 mm이며 측정변위는 0~2000 μ m, 직선정밀

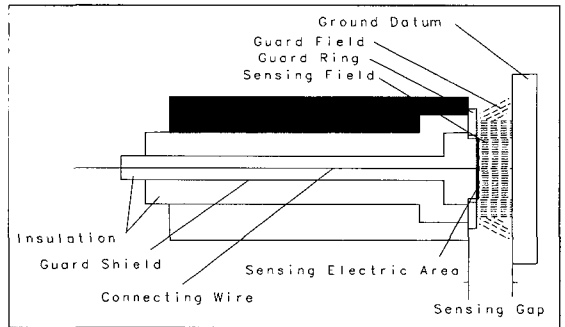


Fig. 1 Non-contact displacement sensor section

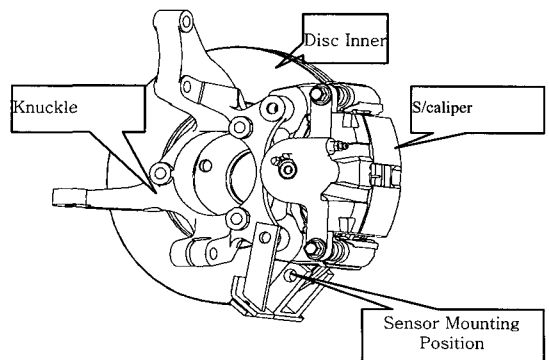


Fig. 2 Front corner assembly

Table 1 Brake judder test conditions

	Test condition			Test condition	
	Pressure (bar)	Initial speed (kph)		Pressure (bar)	Initial speed (kph)
OD	10	140	ND	20	140
	20	140			
	30	140		20	160
	40	140			
	20	160		20	180

도 $\pm 0.05\%$ 이며 측정된 값은 전극과 동일 축상에 있는 디스크에서 약 8mm 면적사이의 거리를 평균하여 나타내었다.

변위 측정 센서는 캘리퍼를 고정시키는 취부부위에 장착할 수 있는 지그를 제작하여 Fig. 2와 같이 디스크의 제동면에 수직인 방향으로 디스크 끝단에서 10mm 떨어진 지점에 양쪽으로 장착하였으며, 패드와 디스크의 마찰이 일어난 직후의 디스크 거동을 측정하기 위하여 캘리퍼 아래쪽에 설치하였다. 센서 장착용 지그는 두 개의 센서를 'C'자 형상의 구조물에 함께 설치할 수 있도록 하여 차량 움직임에 의한 진동 발생시 두 개의 센서가 동시에 진동하도록 설계하였다. 측정 데이터는 1500 Hz로 고려하여 차량이 140 kph로 주행할 때 바퀴 1회전당 약 64개의 유효 데이터를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 브레이크 wu더 발생정도를 상대 비교하기 위해 앞쪽 브레이크 파이프에 유압계를 설치하여 제동시 유압변동도 함께 측정하였다. 시험 샘플은 실차 내구시험 차량에서 브레이크 저더가 발생하여 탈거한 고품 디스크(시험 주행거리 : 20,034 km, 샘플명을 "OD"로 표기)를 좌측에, 신품 디스크(샘플명을 "ND"로 표기)를 시험차량의 우측에 장착하여 비교 시험하였으며 Table 1에 시험조건을 나타내었다.

3. 저더 시험결과

3.1 차량 주행시 DTV측정

정적 상태에서의 DTV 측정은 차량을 리프트 위에 올려놓고 변속 레버를 "D"위치로 변속한 후 실시하였고, 이를 정적(static) DTV 라고 정의 하였다. 또한, 차량주행시 측정한 DTV는 동적(dynamic) DTV 라고 정의하였다. 차량 주행시 DTV 측정은 평평한

Table 2 Static DTV and dynamic DTV

Test sample	Static DTV (μm)	Dynamic DTV (μm)		
		Low speed		Acceleration
		< 5 kph	60 kph	120 kph
OD(LH)	40	43	43	43
ND(RH)	5	6	6	6

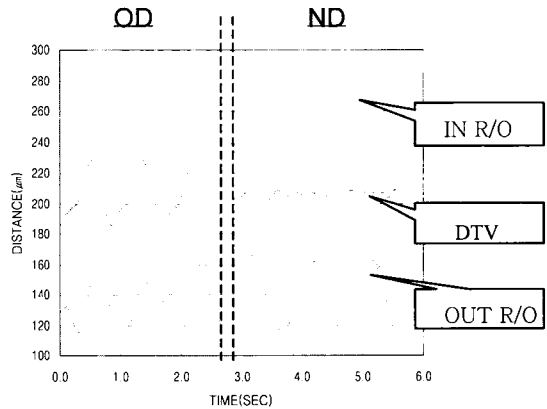


Fig. 3 Disc runout and DTV in low speed (about 5 kph)

도로에서 변속 레버를 "D"위치로 변속하여 가속하지 않은 상태(약 5 kph 이하)에서 실시하였고, 가속 상태에서는 60 kph에서 120 kph까지 급가속 하여 측정하였다. 정적 DTV와 동적 DTV의 측정 데이터를 Table 2에 나타내었으며, 저속(약 5 kph 이하) 주행시 디스크의 런아웃과 DTV 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

브레이크 저더 발생 디스크인 OD(시험차량 좌측)의 DTV주기 패턴은 런아웃 주기 패턴과 유사하며 특히, DTV 변화 주기는 내부 런아웃 주기와 일치함을 Fig.3에서 알 수 있다. 그러나 신품 디스크인 ND(시험차량 우측)의 DTV 변화주기는 내부 런아웃의 1 주기에 약 4 사이클의 변화 주기를 나타내는데, 이는 저더 발생 디스크의 DTV는 런아웃 주기와 밀접한 관계가 있으며 브레이크 저더는 디스크의 불균일 마모로 인해 DTV가 증가하는 전형적인 냉간저더로 판단된다. 또한 차량 주행시 디스크의 DTV변화는 OD 및 ND 모두 주행속도에 관계없이 일정함을 알 수 있다.

3.2 차량 제동시 DTV 측정

차량 제동시 동적 DTV 측정은 일정한 유압(20 bar)에서 차량의 초기속도(140, 160, 180 kph)변화

Table 3 DTV and maximum fluid pressure variation

Disc	Condition		DTV(m)		DTV increment	Maximum pressure variation (bar)
	Initial velocity (kph)	Pressure (bar)	Before breaking	After breaking		
OD	140	10	40	58	18	3.5
	140	20	40	54	14	4.0
	140	30	39	49	10	4.0
	140	40	39	49	10	4.5
	160	20	40	65	25	5.0
ND	180	20	39	79	40	6.0
	140	20	6	12	6	0.7
	160	20	6	15	9	1.2
	180	20	6	25	19	1.5

및, 차량의 초기 속도가 일정한 상태(140 kph)에서 유압을 10, 20, 30 그리고 40 bar로 변화하여 실시하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

시험품 OD, ND 모두 제동 시간이 증가함에 따라 DTV가 증가하였으며, DTV 증가량은 제동시 차량 초속이 높을수록 커졌다. 또한 제동시 발생하는 최대 유압 변동량은 OD가 ND보다 상당히 큰 값을 가지며 유압 변동량이 클수록 브레이크 저더 발생 정도도 비례적으로 증가했다. Figs. 4, 5는 제동시 초기속도가 60 kph에서 20 bar의 유압으로 제동할 때 디스크의 런아웃과 DTV, 유압을 나타내었고, Figs. 6, 7은 제동시 DTV 변화와 유압 변동량을 제동 시간에 따라

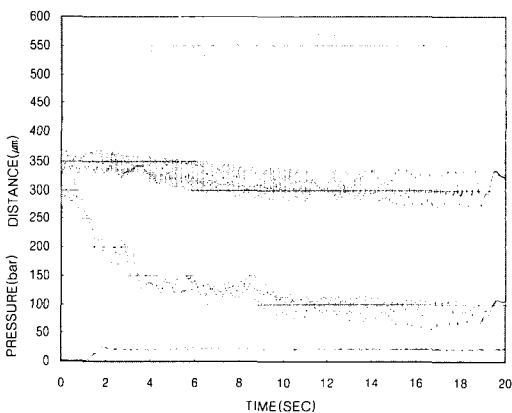


Fig. 4 OD runout and DTV on braking(initial speed : 160 kph, 20 bar)

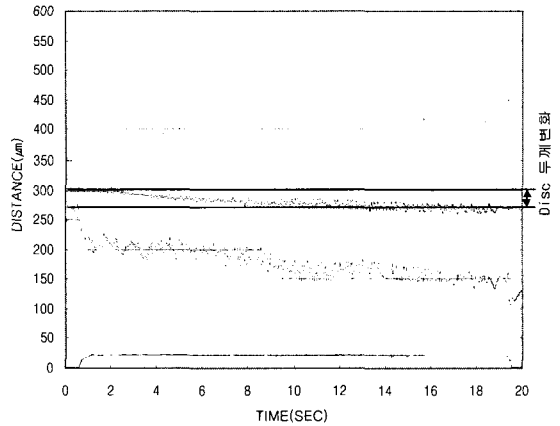


Fig. 5 ND runout and DTV on braking(initial speed : 160 kph, 20 bar)

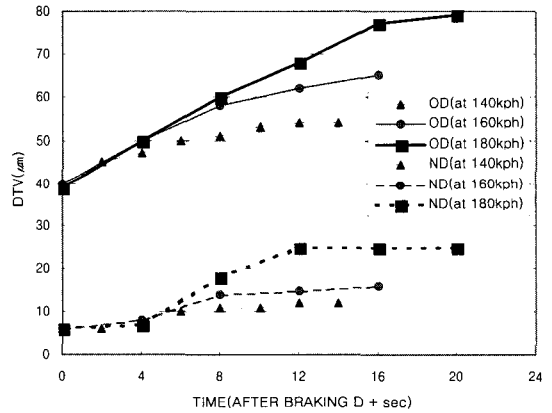


Fig. 6 Brake disc DTV on braking(at 20 bar)

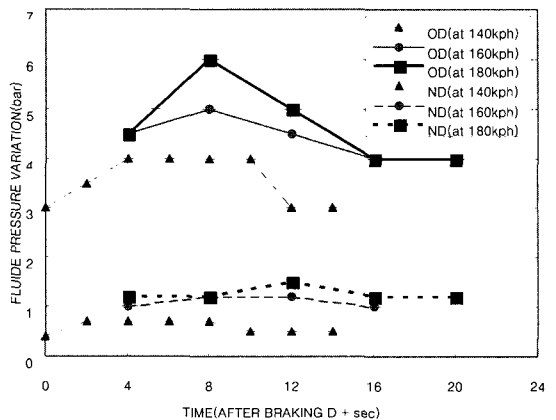


Fig. 7 Fluid pressure variation on braking(at 20 bar)

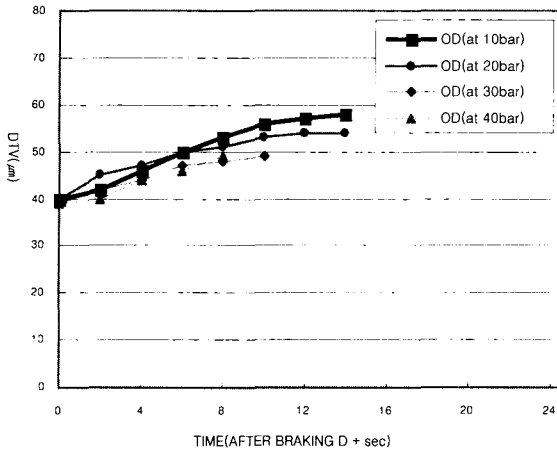


Fig. 8 OD DTV on braking(initial speed : 140 kph)

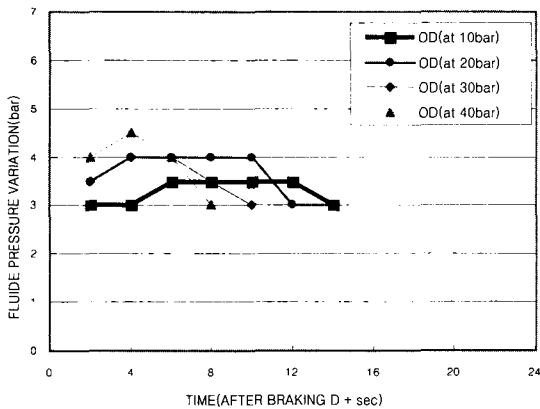


Fig. 9 OD fluid pressure variation on braking (initial speed : 140 kph)

나타내었다. 또한 Figs. 8, 9는 초기 속도가 140 kph에서 제동시 유압이 10, 20, 30, 40 bar일때 OD의 DTV 변화와 유압 변동량을 나타내었으며 ND의 변화정도는 크지 않아 본 경우는 언급하지 않았다.

차량 제동시 디스크의 런아웃과 DTV 거동을 보면 (Figs. 4, 5) 제동 초기에는 외측 센서와 디스크 사이의 거리가 급격하게 감소하고 내측 센서와 디스크 사이의 거리는 반대로 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 제동할 때 차량의 무게가 앞쪽으로 이동하면서 발생하는 서스펜션 형상(suspension geometry)의 변화 때문에 일어나는 현상이라고 볼 수 있다. 제동 초기가 지나면 외측 센서와 디스크 사이의 거리는 서서히

감소하고, 내측 센서와 디스크 사이의 거리는 반대로 서서히 증가하지만, 그 변화 정도는 전자보다 작다. 이것은 디스크의 온도가 증가되어 디스크 제동면의 두께가 증가하면서 디스크의 제동면이 바깥쪽으로 변형(coning)되기 때문이며, 이후 제동말기가 지나면서 디스크는 공냉 상태로 들어가 다시 복귀되나 열로 인한 영구변형은 남게 되는데 이런 현상이 반복되어 DTV변화가 커지므로 브레이크 저더가 발생하는 것이다. 제동시 DTV 증가량은 OD와 ND 시험품 모두 제동 초기 속도와 제동시간 증가에 따라 커짐을 Fig. 6에서 볼 수 있는데, 이것은 디스크 두께가 얇은 곳보다 두꺼운 부분에서 발생하는 마찰열이 커지게 되므로 제동 시간이 클수록 즉 제동말기에 불 균일한 열팽창이 일어나기 때문이다. Fig. 7의 결과에서는 제동 초기 속도가 클수록 제동시 유압 변동도 증가하며, 이에 따라 저더 발생 정도도 정량적으로 커짐을 알 수 있다. 또한 제동초기, 즉 제동 후 약 4 ~ 8초 사이에 최대 유압 변동이 생기므로 운전자가 가장 민감하게 저더를 느끼는 구간이라 할 수 있다.

Fig. 8과 9는 일정 제동 초속도에서 브레이크 페달 답력을 10, 20, 30, 40 bar로 변화시켰을 때의 DTV 변화 및 유압 변동량에 대한 내용으로 페달 답력이 적을수록 즉 저 감속으로 제동했을 때 제동시간 증가에 따라 DTV 증가량이 커지며 40 bar로 밟았을 때 유압 변동은 가장 크지만 제동시간이 지남에 따라(약 4초 경과 후) 유압 변동이 가장 작아지므로 오히려 운전자는 저 답력에서 가장 심한 떨림 현상을 느끼게 된다.

3.3 비접촉 센서(non-contact sensor)에 의한 디스크의 런아웃 및 DTV측정

브레이크 저더 발생에 가장 밀접한 관계에 있는 브레이크 디스크의 런아웃 및 DTV의 상세 변화를 관찰하기 위해 OD와 ND 단품의 런아웃과 DTV 주기를 원주 방향으로 11.25도 간격으로 각각 32 개를 측정하여 Figs. 10, 11에 나타내었다. 차량에 장착하여 차량을 lift에 올려 놓은 상태에서 바퀴를 회전시킬 때 OD와 ND의 런아웃과 DTV 변화는 Figs. 12, 13에, 차량의 속도가 5 kph 이하로 주행할 때는 Figs. 14, 15에, 차량의 속도가 160 kph에서 20 bar의 유압으로 감속시 제동 말기에서는 Figs. 16, 17에 나타내었다. 단품 상태에서의 측정은 0.001 mm 분해능의

Table 4 Disc runout and DTV measuring data

Test condition	OD			ND			
	Inner R/O	Outer R/O	DTV (μm)	Inner R/O	Outer R/O	DTV (μm)	
Component	62	62	35	21	21	6	
On Vehicle	Lift	15	29	41	35	39	6
	Low speed	38	41	43	50	52	6
	Braking	35	37	66	21	25	15

Mitutoyo 마이크로미터를 사용하였고, 실차 장착상태에서는 비접촉 센서를 사용하여 정밀성을 제고하였으며, 이를 Table 4에 정리하였다.

신품 디스크 단품의 런아웃과 DTV 경향을 보면 내측 및 외측 런아웃이 원주방향에 따라서 1회전 당 서로 대칭적으로 1주기를 나타내고 있으며, DTV는 4 주기로 나타났다. (Fig. 11) 신품 디스크가 장착된 차

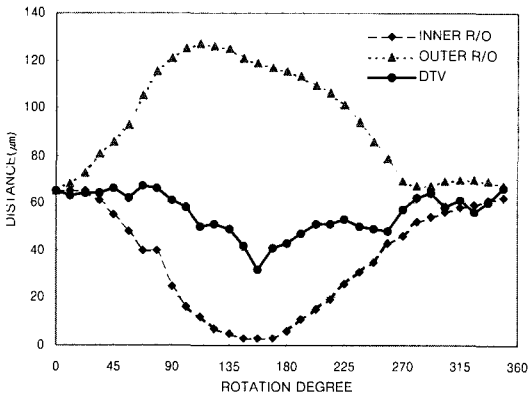


Fig. 10 OD runout and DTV (component)

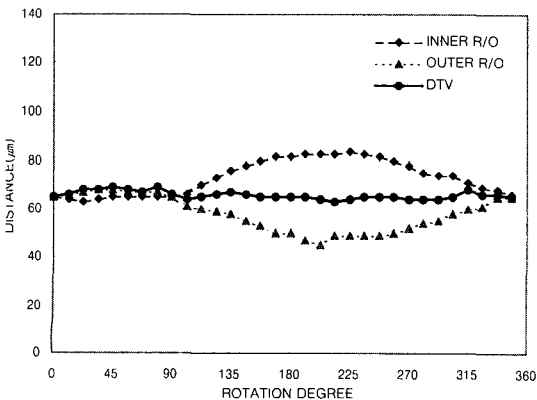


Fig. 11 ND runout and DTV (component)

량을 리프트에 올려놓은 상태에서의 디스크 런아웃은 단품과 비슷한 서로 대칭적 주기를 보이며 크기는 증가(약 15 μm)하였으나, DTV의 경우는 패턴과 크기가 유사하였다. 또한 차량이 저속으로 주행할 때, DTV는 동일하지만 런아웃의 크기는 실차상태 보다 약 15 μm 증가함을 볼 수 있었다. (Figs. 13, 15). 실차 장착 상태에서의 런아웃이 단품 상태보다 큰 이유는 실차에서 허브 및 베어링 자체의 런아웃이 있기 때문이며, 차량 주행 상태와 리프트에 올려놓은 상태에서의 런아웃이 다른 이유는 차량 주행시는 차량 하중에 의해 서스펜션 형상이 달라지기 때문이라 판단된다.⁽¹¹⁾ 차량 제동시에는 패드가 디스크변화를 구속하므로 오히려 런아웃은 감소하지만 DTV는 증가함을 알 수 있다.(Fig. 17)

저더가 발생하는 OD에서는 ND와는 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 단품 상태에서의 내측 및 외측 런아웃 패턴이 부분적으로 비대칭 하게 나타났고(Fig. 10), 실차 장착 상태에서는 내측 런아웃 패턴이 외측 런아웃과 같은 패턴으로 변화되어 브레이크 디스크의 DTV를 악화시키는 것으로 나타났다. 차량을 리프트에 올렸을 때와 차량 주행시의 DTV 주기는 내측 런아웃과 유사한 패턴으로 변함을 알 수 있었는데(Figs. 12,14), 이 사실은 기존의 디스크 단품 측정 만으로는 알 수가 없는 결과였으며 비 접촉 센서를 이용한 실차 상태에서의 측정에서 확인할 수 있었다. ND와 비교해 볼 때 브레이크 저더가 발생한 OD의 경우는 차량의 주행 거리가 누적됨에 따라 내측 런아웃 패턴이 DTV를 악화시키는 방향으로 변화되면서 DTV를 증가시키는 것으로 판단된다. Fig. 16

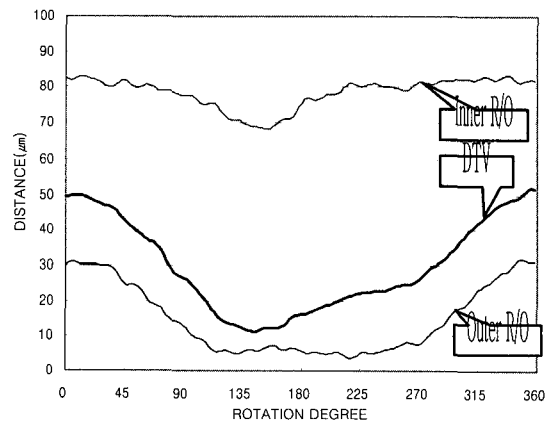


Fig. 12 OD runout and DTV (vehicle matching)

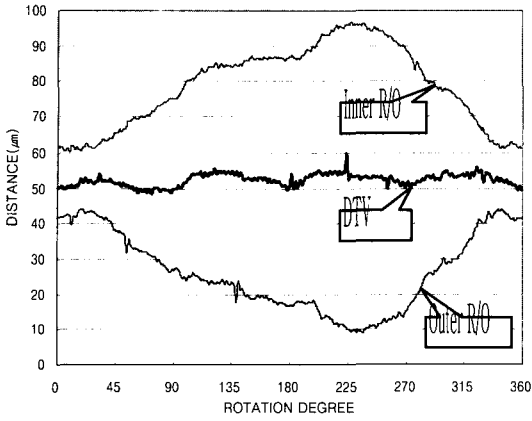


Fig. 13 ND runout and DTV(vehicle matching)

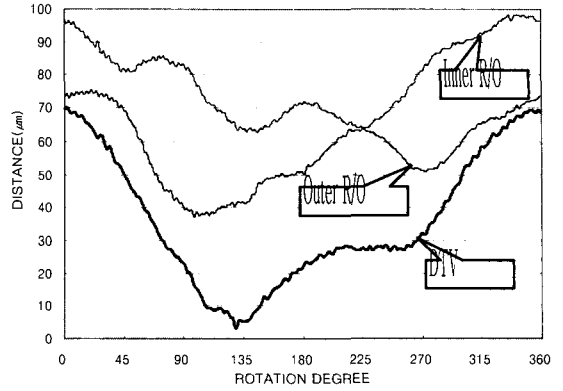


Fig. 16 OD runout and DTV(on braking)

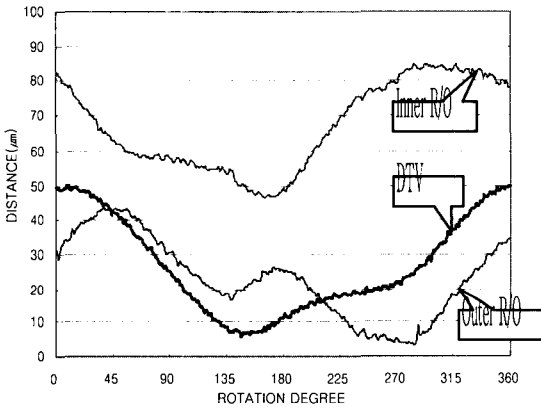


Fig. 14 OD runout and DTV(low speed(5 kph) driving)

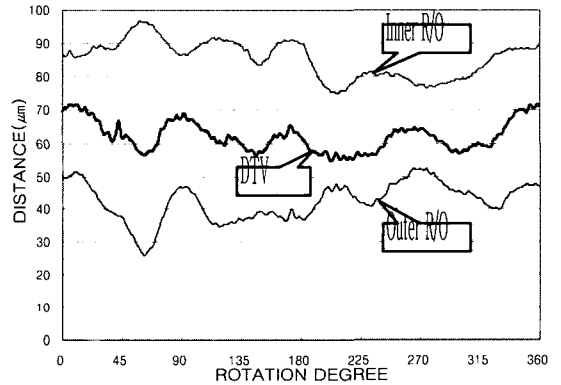


Fig. 17 ND runout and DTV(on braking)

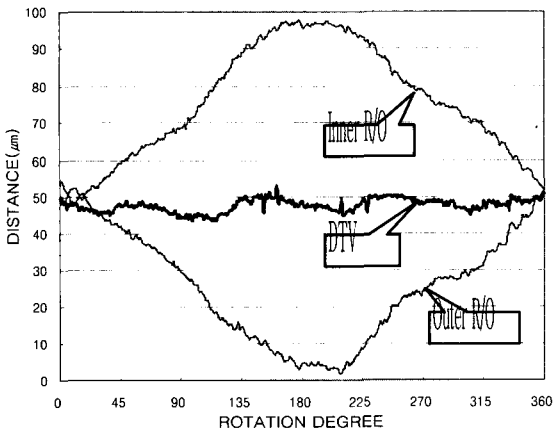


Fig. 15 ND runout and DTV(low speed(5 kph) driving)

에서는 신품 디스크의 경우와 마찬가지로 런아웃의 크기는 단품 상태에 비하여 감소하나 DTV의 경우는 크게 증가함을 나타낸다.

이상에서와 같이 브레이크 디스크의 런아웃과 DTV의 변화되는 모습을 연속적으로 비교 분석한 결과, 디스크의 신품상태에서의 차량 휠1회전당 DTV의 주기 패턴이 차량 주행량이 증가되어 DTV가 증가함에 따라 초기대비 굴곡(wave)수가 감소하며 저더가 심하게 발생하는 차량의 경우는 약 1개의 굴곡을 가짐을 알 수 있었다. 이는 브레이크 저더의 발생 감소를 위해서는 기존의 신품 브레이크 디스크의 일률적인 DTV크기 관리(일반적으로 max. 10 μm)에서 벗어나 초기 가공에 따른 DTV의 굴곡수에 따라 DTV의 크기 관리를 세분화하여 관리하는 것이 필요함을 알 수 있다

4. 결 론

실차상태에서 고품 및 신품 디스크의 런아웃 및 DTV에 대한 정량적인 측정결과를 정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

디스크 저더 발생 디스크 및 신품 디스크의 차량 주행시 DTV는 주행 속도에 영향을 받지않고 거의 일정하다. 또한 신품 디스크에 대해 단품 상태 및 실차 상태에서의 런아웃 차이가 15 μ m정도 인 것으로 보아 실차 상태에서의 허브 및 베어링 조립공차에 의한 측면방향의 런아웃 변화(side runout variation, SRV)는 브레이크 저더에 영향을 주므로 장착 런아웃의 관리가 필요함을 알 수 있다.

차량 제동시 DTV는 제동 시간의 증가에 따라 증가하고 차량의 제동 초기속도가 높을수록 DTV 증가량은 커진다. 저더발생 디스크의 DTV 증가량이 ND에 비해 약 2배로 큰 것으로 보아 차량의 주행량이 증가할수록 DTV는 악화됨을 알 수 있다.

차량 제동시 최대 유압 변동량은 차량의 제동 초속도가 높을 수록 큰 값을 가지며 OD의 유압 변동량이 ND에 비해 약 4배 정도 큰 것으로 보아 유압 변동량이 클수록 브레이크 저더 발생 정도가 심함을 알 수 있다.

일정 초속도로 제동시 페달 답력 변화에 의한 브레이크 저더의 발생정도는 40 bar에서 제동 초기에(약 1초) 가장 큰 유압 변동량을 나타냈으며 제동시간의 변화에 대한 유압 변동량은 20 bar에서 전 시간에 걸쳐 가장 큰 값을 나타내었다. 이것은 페달 답력이 클수록 초기 저더 발생 정도는 심하나 순식간에 감소하여 오히려 답력이 작을수록 오랜 제동 시간에 걸쳐 저더가 발생하여 운전자가 더욱 심하게 느낌을 알 수 있다.

ND의 DTV변화 주기(4 Cycle/Rev.)는 런아웃 변화 주기(1 Cycle/Rev.)와 다르지만, 브레이크 저더 발생 디스크의 DTV변화 주기(1 Cycle/Rev.)는 런아웃 변화 주기와 일치함을 볼 수 있으며, 이것으로부터 ND는 차량 주행량이 증가함에 따라 내측 런아웃 패턴 변화에 의한 불균일 마모 때문에 DTV가 증가하는 전형적인 냉간 저더로 판단된다.

비접촉 변위 측정 장비를 사용하여 OD 및 ND의 런아웃과 DTV 주기의 변화를 객관적인 데이터로 확

인하여 DTV를 증가 시키는 관련인자를 추정할 수 있었으며, 실차 장착 상태에서 DTV 변화주기를 통해 데이터 분석만으로 브레이크 저더 발생 유무를 파악할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) De Vries, A. and Wagner, M., 1992, "The Brake Judder Phenomenon" SAE 920554.
- (2) Stringham, W., Jank, P., Pfeifer, J. and Wang, A., 1993, "Brake Roughness-disc Brake Torque Variation, Disc Distortion and Vehicle Response" SAE paper No. 930803.
- (3) Wolfgang, K., Frank, S. and Horst, M., 1985, "Vibration and Hum of Disc Brake under load" SAE paper No. 850079.
- (4) Lang, A. M. and Smales, H., 1983, "an Approach to the Solution of Disc Brake Vibration Problems " Imech C37.
- (5) Stefan, G. and Hans, G. E., 1993, "Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder" SAE Paper No.931880.
- (6) Mohamed, K. A., 1997, "Brake judder Analysis : Case Studies" SAE Paper No.972027.
- (7) Lee, K. and Ralph B, D., 1998, "Condition of Frictional Contact in Disk Brake and Their Effect on Brake Judder" SAE Paper No.980598.
- (8) Kubota, M., Suenaga, T. and Doi, K., 1998, "A Study of the Mechanism Causing High Speed Brake Judder" SAE Paper No.980594.
- (9) Haigh, M. J., Smales, H. and Abe, M., 1993, "Vehicle Judder under Dynamic Braking Caused By Disc Thickness Variation" London, I. Mech. E C444/022/93.
- (10) Engel, H. J., Hassiotis, V. and Tiemann, R., 1994, "System Approach to Brake Judder" SAE Paper No.945041.
- (11) Kim, M. G. and Jeong, H. I., 1996, "Sensitivity Analysis of Chassis System to Improve Shimmy and Brake Judder Vibration on Steering Wheel" SAE Paper No.960734.