

FEA와 다이내모미터를 이용한 자동차 디스크 브레이크의 열적 거동에 관한 연구

A Study on the Thermal Behaviour of Automotive Disc Brakes Using FEA and Dynamometer

박 범 식* · 손 영 지(동아대학원) · 장 성 규(동의공업대) · 전 언 찬(동아대)
Bum-Sik Park* · Young-Ji Son · Seong-Gyu Chang · Eon-Chan Jeon

Abstract

While braking cars, a large amount of energy is taken into the brake system in a short period of time. This leads to some problems ; cracking of the disc, non-uniform wear of pad and disc, fade. Thus it is important to measure the contact thermal behaviour precisely between disc and pad. The measurements must be considered to design the brake system.

The paper describes methods to analysis the problem of the thermal behavior on the ventilated disc with ANSYS-a program of FEA and a brake dynamometer. According to this way, the paper can present the error between the data by the dynamometer and the results of analysis by ANSYS.

Key Words : Thermal behavior, Ventilated disc, Fade, FEA(finite element analysis), Brake dynamometer

1. 서 론

벤틸레이티드 디스크-패드식 제동시스템은 차량의 운동에너지를 디스크와 패드사이에서 기계적인 마찰열에너지로 변환시킴으로써 자동차를 정지시키는 메카니즘으로 이루어져 있다. 마찰식

제동장치를 사용하고 있는 자동차의 제동안전성과 효율성은 디스크와 패드사이의 트라이볼로지적 특성변화에 크게 의존한다. 특히 운반차량의 고속화와 고효율화 추구는 마찰열에 의한 벤틸레이티드 디스크(ventilated disc)의 열변형 거동이 브레이크의 마멸, 소음과 진동, 수명에 중대한 영향을 미치기 때문에 그 동안 많은 연구를 진행되어져 왔다. 그러나 높은 시험비용과 시험시 발생하는 변수에 의해 측정값이 변화하므로 이를 검증하기 위해서 최근에 해석용 프로그램의 획기적인 발달로 실제의 현상과 대단히 유사한 브레이크 제동모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션기법이 많이 도입되고 있다.

일반적으로 마찰재와 로터사이의 마찰계수는 정지시험 시 일정하게 유지되지 않으며 속도가 감소함에 따라 마찰열의 증가로 변화한다. 이때 속도의 감소에 따라 마찰계수가 감소하는 현상을 페이드(fade)현상이라고 한다.¹⁾ 특히 이 현상은 제동시 운전자의 안전과 직결되므로 마찰재 개발 시 fade율의 고려는 매우 중요하다. 따라서 마찰재 시험 시 페이드율 변화 항목은 필수항목이고 보통 50% 이상이면 안정성을 인정받는다.²⁾

본 연구에서는 브레이크 성능 측정기기로 이용되고 있는 듀얼 브레이크 다이내모미터(dual brake dynamometer)를 사용하여 접촉식 제동 시스템으로 사용중인 모회사의 벤틸레이티드 디스크 브레이크에 대해 현재 개발중인 마찰재의 제동특성 시험측정데이터(제2 페이드 중점)중 온도와 유한요소해석(FEA)프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석한 온도를 비교 분석하고 마찰열 접촉거동 문제를 열하중을 적용한 상태에서 공기의

냉각효과를 고려하였을 때의 디스크의 열변형 거동을 FE로 해석하는데 그 목적이 있다.

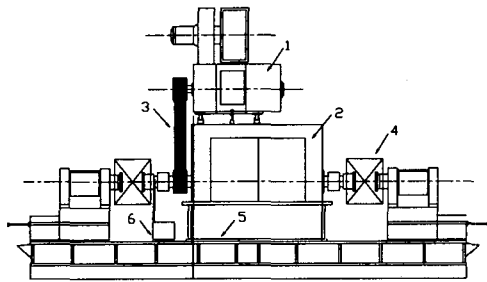
2 다이나모메터 Test

본 시험에는 제동 시 발생하는 토크의 변화와 압력, 온도 및 그때의 마찰계수를 측정하기 위해 현재 모 마찰재 생산업체에서 사용중인 벨트 구동식 듀얼 브레이크 다이나모메터(KPW社)를 사용하였다. 고정관성(kgm/s^2) 0.5, 최대관성 16.25, 이동관성은 총6개(4.0, 8.0, 1.0, 0.25, 0.5, 2.0)로써 관성력을 조정할 수 있다.

최대회전속도는 3,000rpm, 최대감속도는 2G, 유압서보식 압력조절기에 의해 압력범위는 250kg/cm²까지 가능한 제품이다.

Fig. 1은 시험에 사용된 듀얼 브레이크 다이나모메터의 본체를 나타내었으며, 이외도 조작 제어반인 Control box, Control console, Remote control unit, Slide control box 및 Data처리용 CPU unit으로 구성되어 있다.

그리고 듀얼타입이므로 다이나모테스트를 실차상태와 같이 제품을 양쪽으로 시험을 할 수 있으나, 본 시험은 한쪽만 사용하였다.



1-DC motor, 2-Inertia support, 3-Belt, 4-Test area/Duct, 5-Bed, 6-Rotary encoder

Fig. 1 Schematic diagram of the dual brake dynamometer.

시험에 사용된 디스크는 현재 승용차에 장착중인 냉각효과가 우수한 벤틸레이티드 디스크로서 회주철 제품이며 냉각효과를 위해 vane hole이 37개가 고안되었고, 주조후 표면에 기계가공을 한 것이다. Table 1은 그 조성

비를 나타내었다.

마찰재는 업체에서 자체 개발한 제품을 시험 모델로 사용하였고 약 20여 종류의 다른 원료로 구성된 복합재료로서 그 구성성분은 본문에서는 언급하지 않도록 한다.

Table 1 Chemical composition of the gray cast iron rotor (wt.%)

C	Cr	Cu	Mo	Mn	Nb	Si	S	Ti	V	Fe
3.20	0.32	0.22	0.023	0.66	0.003	2.41	0.13	0.05	0.01	Bal.

Fig. 2는 시험을 위해 다이나모메터 본체에 디스크와 캘리퍼를 장착한 상태를 나타내었다.

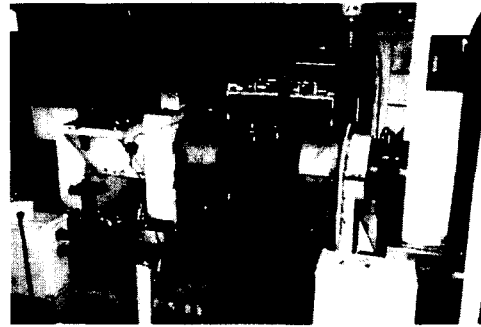


Fig. 2 Setting disc rotor and caliper on the dynamometer

본 연구에서의 다이나모시험은 크게 7단계로 나누어지고 이것은 FMVSS 코드에 의한 시험방법이다.³⁾ 관성은 7.49kgm/s^2 , 타이어반경은 0.315m, 실린더면적은 28.55cm², 축중량은 735kg인 조건에서 시험하였다.

마찰시 발생하는 열에 의한 온도상승을 측정하기 위해서 마찰재와 로터 중심부분에 표면으로부터 1mm 깊이에 열전대를 심어놓았다.

시험은 진행순서는 크게 길들이기(Burnising), 끌기(Drag), 제동(Stop)으로 이루어지며, Table 2에 실험에 사용된 전시험단계를 나타내었다. 각 항목의 data는 마찰재 성능을 측정하는데 중요한 자료이고 각각의 규격을 만족시켜야만 제품으로 출시가 될 수가 있다.

본 연구에서는 6번째 단계인 제2 페이드 및 회복 항목에서 얻어진 온도데이터와 FEA에 의해

얻어진 온도데이터를 비교 분석하여 시험과 해석의 정확성을 판단하고자 하였다.

순화시켰다.

Table 2 Test procedure in the work

Measurement items & specifications			
1	Preburnish	20 cycle	48 km/h
2	Burnishing	100/200 cycle	64 km/h
3	Eff. Test (0.6G)	2 Eff.	48 km/h
			96 km/h
			128 km/h
		4 Eff.	48 km/h
			96 km/h
			128 km/h
		Eff.(high speed)	160 km/h
		2 Eff.	96 km/h
GS change	0.6G base		
2 Eff.	96 km/h base		
SS change	48/128 km/h		
4	Experience change	2/4 Eff.	48 km/h
5	The first fade & recovery	Change of Bf values in fade	
		fade	
		Change of Bf values in recovery	
6	The second fade & recovery	Change of Bf values in fade	
		fade	
		Change of Bf values in recovery	
7	etc.	recovery	
		fad wear	

3. 유한요소해석

디스크-마찰재에서 마찰열에 관련된 비선형 열적 거동에 대해서 실물 형상적 접근 해석은 많은 노력과 시간 그리고 고성능컴퓨터를 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 형상을 2차원으로 단순화 시켜 열적 거동문제를 비교적 쉽게 해석하였다. 해석프로그램으로는 요즘 상용화되고 있는 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

벤틀레이티드 디스크는 방열면적의 증가와 공기유동에 의한 방열효과를 증대시키기 위해 Fig. 3과 같이 중공으로 만들어져 있다. 그림에서 패드가 지나가는 부분은 열이 공급되고 패드로 덮이지 않은 부분은 대류에 의한 방열이 발생한다. 따라서 디스크는 원형으로서 모델은 축대칭 모델을 사용하여 필렛부는 생략하여 모델부를 단

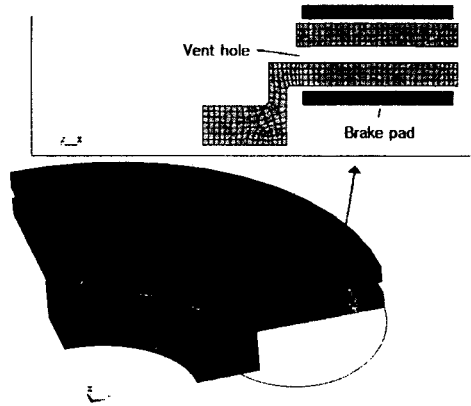


Fig 3. Simple modeling of the disc rotor

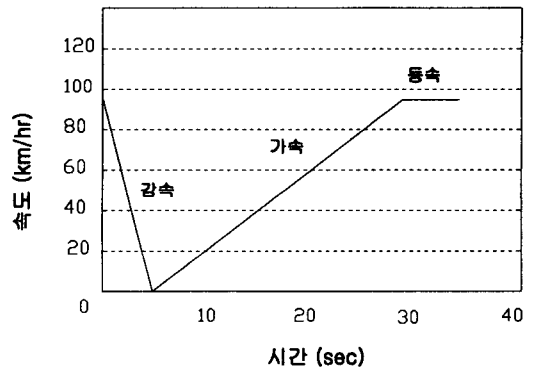


Fig. 4 Condition of thermal loads (FMVSS code 기준)

축대칭 요소를 사용할 경우 vent hole 부분이 나타나지 않는다. vent hole 부분에서는 관류동에 의해 바깥쪽과는 대류의 특성이 다르다. 이 효과를 적용하기 위해 경계조건 h값을 계산해서 정의하였다.

Fig. 4는 열하중에 대한 조건을 나타낸 것으로 96km/h의 속도로 달리던 자동차가 0.6G로 4.57초 동안 감속하고, 이후 25초 동안 가속을 하여 96km/h의 속도에 이르면 등속도로, 5.43초 동안 주행한 전체 사이클을 1step으로 나타내었다.

실험에서 15 step정도를 반복하면 요구되는 표면온도와 시간에 따른 온도분포를 알 수가 있다. 제동할 때 패드와 마찰에 의하여 차량의 운동에

너지는 100% 열에너지로 변환하고, 디스크의 회전 시에 강제대류가 발생한다고 가정한다. 초기 온도는 60℃이고 패드와의 마찰에 의한 열에너지가 발생하므로 열속(q)을 계산하여 적용한다. 패드와 닿는 부분에서 열속이 적용되고 이는 감속 시간 중에만 적용이 된다. 열속계산은 차량이 주행 중에 발생하는 운동에너지와 위치에너지를 가지고 본 시험에 적용된 조건에 맞는 열속의 계산식을 식(1)~(3)과 같이 산출하였다.^{4), 5)}

$$q = \frac{a\dot{q}(m + I/R_o^2)[2V_1 - a(t_2 - t_1)]}{10\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (1)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{1 + \sqrt{\eta}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_r c_r k_r} \left(= \frac{\text{Pad의 물성치}}{\text{Rotor의 물성치}} \right) \quad (3)$$

a : 자동차의 감속도

\dot{q} : 열유동율

I : 바퀴의 회전관성 모멘트

R_r : 타이어의 유효반경

V_1 : 차량의 초기속도

R_o : Pad의 외측원의 반경

R_i : Pad의 내측원의 반경

감속 중에는 열속 뿐만 아니라 대류 열전달도 같이 일어난다. vent hole 부분은 관유동 특성을 보이므로 바깥쪽과는 대류의 특성이 다르다.

층류와 난류에서 h 값이 다르다. Re 에 의해 어느 속도에서 층류와 난류가 되는가를 보고 이 값에 의해 식(4)~(7)에 의해 각각의 h 값을 구한다. Solid 부분에서는

$$\text{층류의 경우, } h = 0.70(k/D)Re^{0.55} \quad (4)$$

$$\text{난류의 경우, } h = 0.04(k/D)Re^{0.8} \quad (5)$$

Vent hole 부분에서는

층류의 경우,

$$h = 1.86(RePr)^{1/3}(d/I)^{0.33} \times (k/d) \quad (6)$$

(d =hydraulic 지름, I = vent의 길이)

난류의 경우,

$$h = 0.023[1 + (d/I)0.67]Re^{0.8}Pr^{0.33} \times (k/d) \quad (7)$$

가속구간과 등속구간은 열속이 없고 대류에

의한 열전달만 일어난다고 가정하고 이때 초기온도는 60℃로 하였다. 디스크사이에는 관유동 현상을 일으키리라 생각되지만 패드와의 협소한 공간으로 인해 vent hole 대류 열전달을 무시하고 열속이 적용되지 않는 나머지 부분과 같이 solid 대류조건만을 적용하여 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에는 디스크의 온도변화(제 2 페이드)를 알아보기 위해 시험과 해석을 동시에 해보았다. Table 3 은 실험과 해석 각각의 데이터를 나타낸 것이다.

Table 3 Data of the second fade by dynamometer test and FEA

step	speed[km/h]		temp[℃]		pressure [kg/cm ²]	μ	temp[℃] by FEA
	high	low	start	max			
1	97.0	1.6	60	146	45.6	0.394	99.874
2	96.6	1.1	126	262	48.9	0.363	176.78
3	97.0	1.5	187	343	51.0	0.348	238.97
4	97.0	1.4	239	381	51.3	0.346	298.68
5	97.0	0.7	281	412	49.4	0.360	342.15
6	96.6	1.1	315	417	48.0	0.369	386.79
7	96.5	1.4	341	455	49.6	0.358	428.79
8	96.9	1.4	364	445	52.8	0.336	466.49
9	96.5	1.5	382	489	55.2	0.321	500.65
10	96.6	1.2	399	500	57.2	0.310	532.40
11	96.5	1.1	410	511	60.3	0.295	561.73
12	97.0	1.6	420	516	61.5	0.289	588.53
13	96.9	1.2	427	526	62.7	0.284	613.04
14	97.0	1.0	434	531	63.4	0.281	626.05
15	96.5	1.4	437	535	64.2	0.278	636.14

제 2 페이드시 페이드율은 0.278/0.394, 즉 70.56%로 나타났다. 이는 규정값인 50%이상이므로 마찰재와 디스크사이에는 안정된 마찰계수 값을 갖는 것알 수 있다.

Fig. 5는 측정온도와 해석온도의 비교 그래프이다. 후반부(8 step)이후로 구간오차가 커지는 것을 알 수가 있다. 이는 장치 세팅 시의 문제뿐

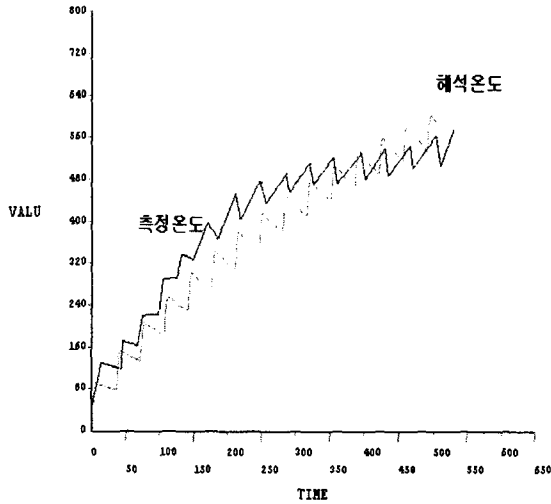


Fig. 5 Comparative graph of the results in the second fade

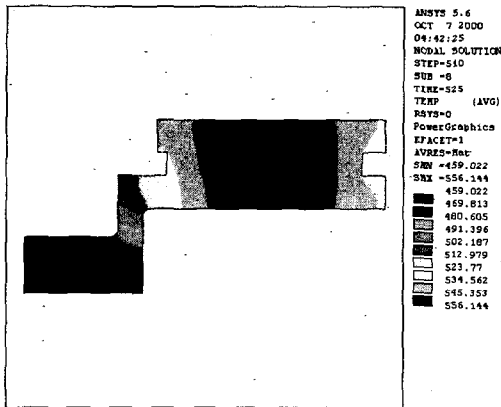


Fig. 6 Thermal distribution on the disc

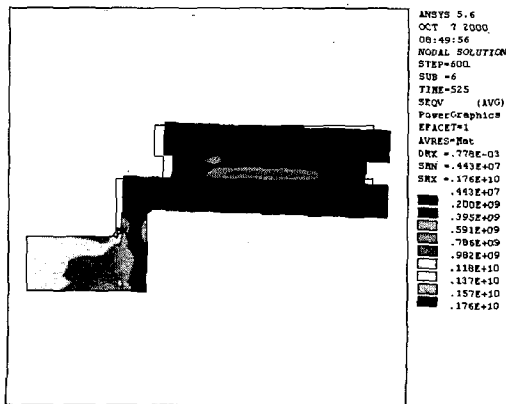


Fig. 7 Stress and deformation on the disc

만 아니라 모델형상의 단순화에 의해 mesh수가 적은 것이 원인으로 추측된다.^{6), 7)}

Fig. 6은 디스크의 온도분포결과를 나타낸 것이다.

Fig. 7은 시간의 변화에 따른 열응력의 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 8은 디스크의 열응력의 분포 및 그때의 변형을 나타내었다.

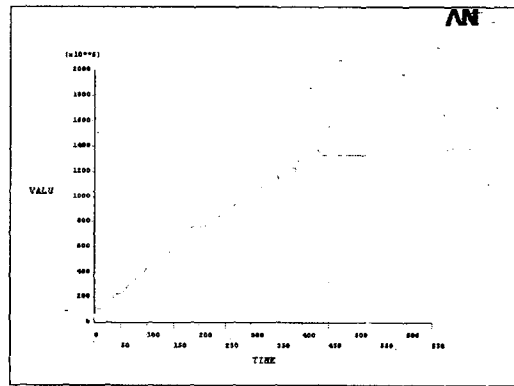


Fig. 8 Result of stress after last step

Fig. 9는 열변형이 발생할 때의 디스크의 끝부분의 4점의 y축의 변위를 알아본 것이다. 이러한 디스크의 변형은 운전자가 브레이크를 작동할 때 생기게 된다. 이러한 변형은 패드에 진동을 가하며 이 진동은 운전자의 발까지 전달되어 승차감에 영향을 미칠 뿐 만 아니라 소음과 마멸을 동반한다.^{8),9)}

Table 4 Wear quantity of the pad

구분 온도(°C)	Inner	Outer	AVE	누적량
50	0.051	0.071	0.061	
100	0.015	0.034	0.0245	0.0885
150	0.033	0.036	0.0345	0.12
200	0.264	0.260	0.262	0.382
250	0.167	0.183	0.175	0.557
300	0.184	0.160	0.172	0.729
350	0.294	0.207	0.2505	0.9795
400	0.126	0.112	0.119	1.0985
450	0.105	0.082	0.0935	1.192

패드의 마모량 시험은 Table 4와 같이 측정되었다. 열응력에 의한 로터의 변위에서 알 수 있듯

이 측정결과 또한 온도가 증가할수록 안쪽 부의 마찰재의 마모가 증가하는 것을 알 수가 있다.

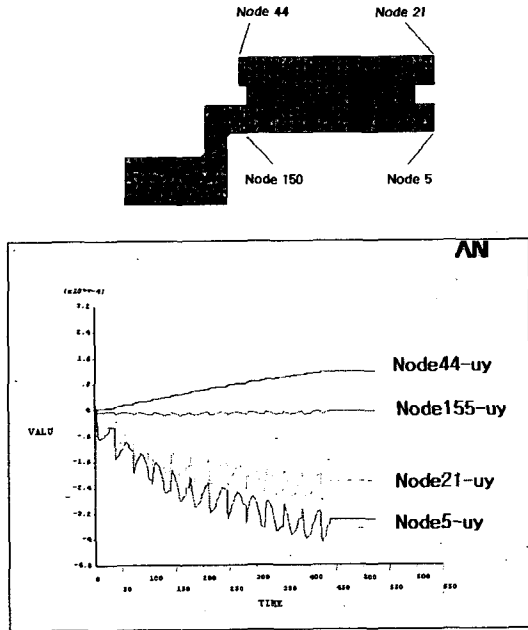


Fig. 9 Displacement of 4 nodes

5. 결론

마찰재와 디스크 사이의 마찰에 의하여 발생된 마찰열을 유한요소로 해석하여 디스크 접촉 운동면에서의 온도분포, 열응력, 열변형 거동문제를 해석한 결과 다음과 같이 결론을 얻었다.

1. 다이내모메타의 제 2 페이드의 온도변화량과 해석에 의한 결과가 서로 같은 결과를 나타내고 있으나 모델링 시 node수의 제약으로 인해 mesh수가 적음으로 열의 누적현상을 발생하게 되므로 8step 이후로는 오차가 증가하였다.
2. 디스크 로타로 전달된 마찰열에 의해 열거동 현상은 마찰열이 디스크 내부에서 불균일 소산된다면 디스크 로타는 동심원으로 회전하지 않고 불규칙하게 회전하기 때문에 거시적 진동과 마멸이 크게 발생하게 된다. 따라서 열소산의 비균일성이 크면 클수록 열적 뒤틀림 현상(Thermal distortions)은 더욱 크게 발생

하며 이에 따른 진동과 소음, 마멸이 발생하게 된다.

3. 유한요소해석으로 열적 거동에 의한 디스크의 형상변화의 원인을 알 수 있었고, 이것은 마찰재 인너 패드의 마모가 아웃패드보다 증가하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Rudolf Limpert, "Brake Design and Safety", SAE, 1995
2. JASO C403-79, "Service Brake: Road Test Performance Requirements - Passenger Car,
3. FMVSS-105-75
4. 정상진, "열전달 해석", 태성에스엔이
5. 김용수, "FE를 이용한 브레이크 드럼의 열변형에 관한 연구", 공학석사논문, 동아대학교, 2000
6. Saeed Moaveni, "Finite Element Analysis", Prentice Hall
7. 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", 태성에스엔이
8. Andreas Rinsdorf, "Evaluation of the Energy Input in Pad and Disc During a Brake Application", 942086, SAE
9. 이병현, "유한요소법을 이용한 승용차용 디스크브레이크의 열해석", 공학석사논문, 한국항공대학교, 1998