

실험계획법을 이용한 이륜자동차 브레이크 디스크의 마찰특성에 관한 연구

전환영[†] · 배효준* · 박규정** · 류미라*** · 박흥식****

김해대학 차량 기계계열, *부산정보대학 자동차기계계열, **춘해대학 안경광학과, ***동아대학교 기계공학부

A Study on Friction Characteristics of Motorcycle Disk Brake Using Design of Experiment

Hwanyoung Jeun[†], Hwojun Bae*, Kyujung Park**, Mira Ryu*** and Heungsik Park****

Dept. of Mechanical Automobile, GimHae College

**Dept. of Automobile and Mechanical, Busan Info-Tech College*

***Ophthalmic, ChoonHae College*

****Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University*

Abstract – The effect of manufacturing parameters on friction characteristics of motorcycle break system was studied using a design of experiment. Such parameters conditions have an effect on the frictional factor such as applied load, sliding speed, and number of ventilated disk hole. However, it is difficult to know the mutual relation of these factors. In this study, the friction characteristics using design of experiment containing 3 elements were investigated for an optimal condition for the best motorcycle break system employing full factorial design. From this study, the result was shown that the applied load in frictional factors was the most important, next to sliding speed, number of ventilated disk hole.

Key words – Motorcycle(이륜자동차), Ventilated hole(방열홀), Design of experiment(실험계획법), Full factorial design(완전요인 배치법)

1. 서 론

경제성장으로 인해 급격하게 자동차가 증가되었고, 이와 더불어 자동차의 교통사고는 높은 비율로 증가하고 있다. 이러한 사실은 차량에 의한 교통사고의 예방 차원에서 제동 시스템에 대한 중요성을 크게 인식시키는 계기가 되고 있다.

자동차의 브레이크 시스템은 주행하는 자동차의 디스크와 패드의 운동에너지를 기계적인 마찰에너지로 전환시킴으로서 차량을 안전하게 정지시키는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 디스크-패드식 제동장치는 자동차뿐만 아니라 이륜자동차의 경우에도 미끄럼 마찰에

의한 고온마멸과 열적변형으로 인한 소음과 진동이 발생되고 있으며[1,2], 이를 최소화하기 위하여 방열디스크(Ventilated disk)가 많이 사용되어 지고 있다. 브레이크는 디스크의 마찰면에 작용하는 압력과 미끄럼 속도 등에 따라 고온의 마찰열이 발생되어 열탄성 마멸[3], 열 크랙, 페이드(fade) 그리고 이상떨림(judder)[4] 등으로 인하여 제동성능이 급격히 감소하게 된다.

이를 해결하기 위하여 최근 내마멸성과 열전도율을 높이기 위한 복합재료의 개발[5,6], 이상떨림의 발생원인과 해결책을 위한 연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석[7] 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구를 통하여 브레이크 시스템을 경량화 시키고 정지거리의 단축과 수명을 연장시키기 위하여 사용되고 있는 방열 디스크 브레이크는 미끄럼 마찰면의 크기를 그

[†]주저자 : jhy1970@gimhae.ac.kr

[‡]책임저자 : Parkhs@daunet.donga.ac.kr

대로 유지하면서 대류에 의한 냉각효과를 극대화시켜 열 변형 거동과 소음과 진동을 완화하여 브레이크의 안정성을 확보하면서 수명을 연장시키고 있다. 그러나 실차 주행 모드하에서의 디스크와 패드의 이상 마멸이나 진동의 원인과 해결책을 정량적이고 명확하게 분석하기는 어려운 실정에 있다[8-10].

따라서 디스크와 패드의 열적변화와 마찰상태를 분석하기 위한 새로운 기법이 절실히 요구되고 있다. 완전요인 배치법은 인자의 각 수준에 따른 모든 조합에서 실시되는 실험계획법으로써 주 효과와 교호작용의 효과를 분석할 수 있고 인자들의 특성을 파악하거나 최적 수준 조합을 구하는 데 적합한 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 이륜자동차의 디스크의 방열효과와내마멸성을 향상시키기 위하여 실험 및 분석방법은 마찰인자에 따른 상호 관계를 완전요인 배치법을 이용하여 디스크와 패드의 마멸량에 미치는 주요인자를 분석하고, 작동조건에 따른 변화를 분석하여 이륜자동차의 마찰특성을 조사하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 마찰실험

본 연구에 사용한 재료는 현재 이륜자동차 브레이크 디스크용 소재로 사용되고 있는 SUS410M과 비석면계 패드이며, 이들 재료의 화학 조성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of disk

Chemical compositions (wt.%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
0.195	0.301	0.403	0.021	0.030	10.457	0.341	0.122	

Table 2. Material components of pad

Chemical compositions (wt.%)	
Aramid fiber	2%
Glass fiber	8%
Sema fiber	15%
Barium sulfate	15~25%
Vermiculite	5%
Dry rubber	4~6%
Resin	8%
etc.	30~47%

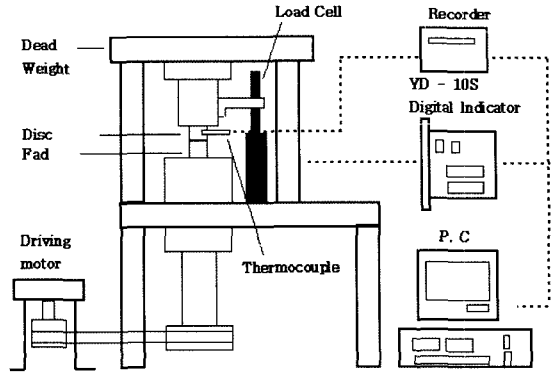
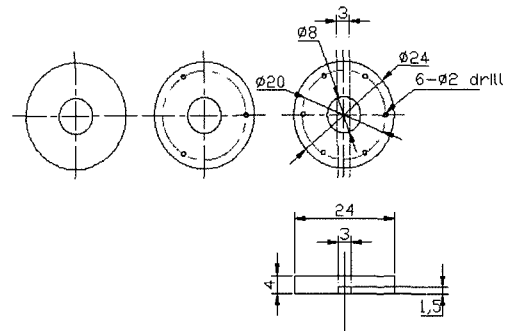
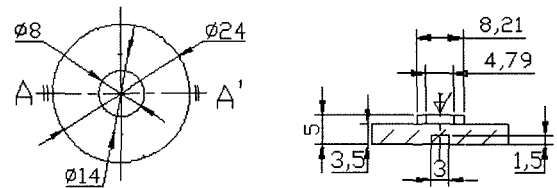


Fig. 1. Schematic diagram of vertical type wear test.



(a) Disk



(b) Pad

Fig. 2. Specimen of disk and pad.

마찰실험을 위하여 수직형 건조 마찰 시험기를 사용하였으며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 그리고 Fig. 2에는 마찰실험에 사용된 이륜자동차 디스크와 패드 시험편의 형상을 나타낸 것으로, 이것은 실차의 약 1/10으로 축소시켜 $\varnothing 24$ mm, 두께는 디스크 4 mm, 패드 5 mm로 제작하였다. 디스크 시험편의 방열특성을 알기 위하여 방열 홀이 없는 솔리드(solid) 형과 $\varnothing 20$ mm의 원주면에 동일한 각도로 3개와 6개의 $\varnothing 2$ mm의 구멍을 가공한 시험편을 사용하였다. 또한 세 시험편의 마찰특성을 비교하기 위한 마찰계수는 시험기의 디스크 시험편 홀더에 로드셀을 부착하여 이의 마찰력 신호를 컴퓨터 내의 자체 구축한 마찰계수 측

Table 3. Experimental conditions

Factors	Level		
	1	2	3
Hole number	0-Hole (solid)	3-Hole	6-Hole
Applied load (kg)	2.5	5.0	7.5
Sliding speed (m/s)	0.1	0.2	0.3

정 알고리즘을 이용하여 구하였다. 또한 마찰실험은 실험 전 디스크와 패드는 표면조도를 $0.5 \mu m R_{max}$ 로 일정하게 하여 실험을 행하였으며, 디스크 방열 홀의 변화에 따른 분석을 위하여 작용하중, 미끄럼 속도 및 마찰시간을 설정하여 측정하였으며, 마찰온도는 마찰면에 열전대를 삽입하여 온도기록계를 통하여 온도변화를 측정하였다.

2-2. 완전요인배치법

완전요인배치법은 실험계획 초기에 관련된 인자가 많을 때 핵심인자를 찾아내는데 좋은 기법이기도 하고, 중요한 인자 중에서 최적치를 찾아주고, 최적치 주위에서 변화를 알아볼 수도 있게 해준다.

본 연구에서는 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 이륜자동차 브레이크 디스크 패드의 마찰특성에 영향을 미치는 작동조건 즉, 마찰인자를 선정하였다. 마찰인자로는 디스크의 방열 홀, 작용하중 및 미끄럼 속도로 3인자 3수준으로 실험횟수는 27번을 시행하였고, 각 인자에 대한 수준은 Table 3과 같이 실험계획을 통해 마찰실험을 실시하였다. 여기서 수준은 본 연구에서 설정한 마찰인자의 실험조건의 설정 값을 나타내며 디스크의 방열 홀 개수는 0, 3 및 6개이며, 작용하중의 크기는 2.5 kg, 5.0 kg 및 7.5 kg, 그리고 미끄럼 속도는 0.1 m/s, 0.2 m/s 및 0.3 m/s로 설정하였고, 미끄럼 거리는 2,000 m로 고정하여 실험한 후 디스크와 패드의 마멸량 변화를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰인자에 따른 디스크 마멸량 분석

본 연구에서는 실험계획법으로 마찰실험을 행하여 Table 4와 같이 디스크와 패드의 실험 전과 후의 무게를 20회 측정하여 그 평균값으로 마멸량을 구하였다. Fig. 3은 디스크 마멸량을 실험계획법을 이용하여 구한 주 효과 그래프이다. 주 효과는 각 인자의 수준을 효

Table 4. Experiments result

No.	Disk design	Applied load(kg)	Sliding speed(m/s)	Wear (Disk)(kg)	Wear (Pad)(kg)
1	0	2.5	0.1	0.0028	0.0071
2	0	2.5	0.2	0.0011	0.0166
3	0	2.5	0.3	0.0207	0.0128
4	0	5.0	0.1	0.0028	0.0302
5	0	5.0	0.2	0.0212	0.0132
6	0	5.0	0.3	0.0397	0.0441
7	0	7.5	0.1	0.0004	0.0121
8	0	7.5	0.2	0.0019	0.0247
9	0	7.5	0.3	0.0010	0.0430
10	3	2.5	0.1	0.0018	0.0106
11	3	2.5	0.2	0.0009	0.0126
12	3	2.5	0.3	0.0030	0.0157
13	3	5.0	0.1	0.0020	0.0130
14	3	5.0	0.2	0.0009	0.0183
15	3	5.0	0.3	0.0008	0.0147
16	3	7.5	0.1	0.0040	0.0196
17	3	7.5	0.2	0.0013	0.0326
18	3	7.5	0.3	0.0004	0.0222
19	6	2.5	0.1	0.0011	0.0081
20	6	2.5	0.2	0.0049	0.0151
21	6	2.5	0.3	0.0011	0.0152
22	6	5.0	0.1	0.0005	0.0103
23	6	5.0	0.2	0.0024	0.0153
24	6	5.0	0.3	0.0072	0.0331
25	6	7.5	0.1	0.0018	0.0171
26	6	7.5	0.2	0.0022	0.0472
27	6	7.5	0.3	0.0024	0.0695

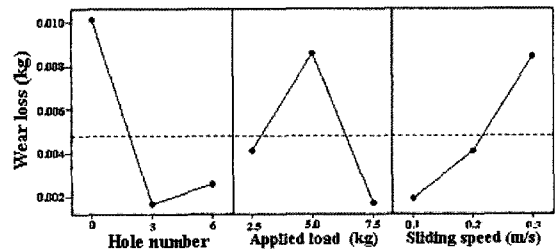


Fig. 3. Main effects plot for disk.

과적으로 파악할 수 있고, 최적의마찰조건을 구할 수가 있다. 즉 그림에서 방열 홀의 개수 3, 작용하중

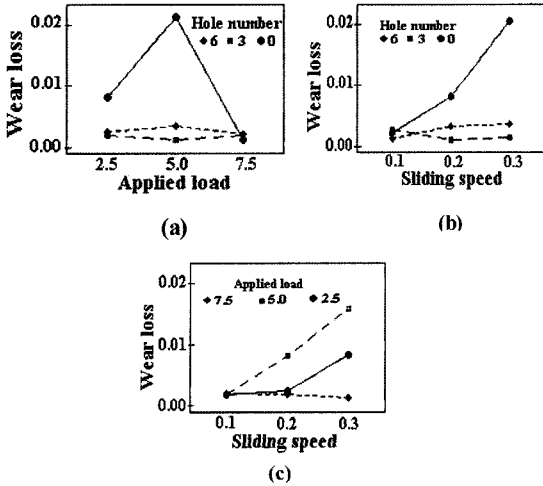


Fig. 4. Interaction plot for disk.

7.5 kg, 미끄럼 0.1 m/s 일 때 가장 마멸량이 최소값으로 나타나는 최적조건임을 알 수 있다. 디스크와 패드의 마멸은 디스크와 패드의 표면 돌기에 의해 접촉이 될 때 응착마멸과 연삭마멸이 일어나게 되고, 이들 돌기들의 임계 접촉 수를 지난 후 돌기는 피로 때문에 탈락하여 마멸입자를 생성시키게 된다. 여기서 방열 홀의 개수가 0일 때 즉, 방열 홀이 0개인 솔리드 그대로의 경우, 마멸량이 가장 많은 이유는 방열 홀이 없어 생성된 마멸입자를 제거하지 못하여 마멸이 증가하게 되고, 이와 함께 마찰면 온도가 방열 홀이 있는 디스크보다 상대적으로 높아 온도 상승으로 인한 디스크의 연화가 촉진되어 마멸량이 증가한 것으로 생각된다. 또한 방열 홀 개수가 3개인 디스크의 마멸량이 적은 것은 방열 홀에 의하여 온도의 상승을 억제하여 디스크의 연화가 감소되어 상대적으로 패드의 마멸량이 적지만, 방열 홀의 개수가 6개의 경우 방열 홀의 edge 부가 증가하여 패드와 접촉시 edge 부에서 충격에 의한 마멸이 디스크의 연화에 의한 마멸보다 더 큰 역할을 한 결과라고 생각된다.

Fig. 4는 디스크 마멸량을 실험계획법을 이용한 교호작용 그래프이다. 그림 중 (a)방열 홀 개수와 작용하중에 대한 교호작용이고, (b)방열 홀 개수와 미끄럼 속도 및 (c)작용하중과 미끄럼 속도에 대한 교호작용이다. 교호작용은 2인자 이상의 특정한 인자수준의 조합에서 일어나는 효과를 말하므로 선이 평행하지 않으면 교호작용이 일어난다고 볼 수 있는데 (a), (b) 및 (c) 모두 교호작용이 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 디스크의 마멸량에는 마찰인자인 방열홀, 작용하중, 미끄럼

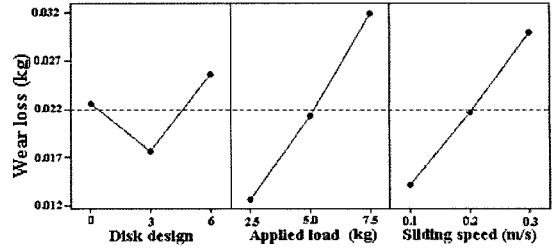


fig. 5. Main effects plot for pad.

속도 순으로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3-2. 마찰인자에 따른 패드 마멸량 분석

Fig. 5는 패드 마멸량을 실험계획법을 이용하여 나타낸 주효과 그래프로써 방열 홀의 개수가 3, 작용하중 2.5 kg, 미끄럼 속도가 0.1 m/s일 때 마멸량이 최소값으로 나타나는 최적조건이라는 것을 알 수 있다. 방열 홀의 개수가 0일 때 마멸량이 많은 이유는 전술한 바와 같이 방열 홀은 솔리드 형의 경우,돌기들에 의하여 탈락한 마멸입자를 방열 홀 내로 제거하지 못하여 계속되는 마찰에 의하여 마멸이 증가하게 된다. 이와 함께 방열 홀이 있는 다른 두 종류의 디스크보다 마찰면 온도가 상승하여 패드의 고온 경도가 낮아짐으로서 마멸량이 증가한 것으로 생각된다. 또한 방열 홀 개수 3개의 패드 마멸량이 최소값을 나타내는 것은 방열 홀에 의한 마찰면 온도 상승을 억제하여 상대적으로 패드의 마멸량이 최소값을 나타내지만, 방열 홀의 개수 6개의 경우에는 디스크의 방열 효과가 크게 되어 디스크의 경도 감소가 다른 두 시험편 보다 적어 이로 인하여 패드의 마멸량이 증가했다고 생각된다. 그리고 작

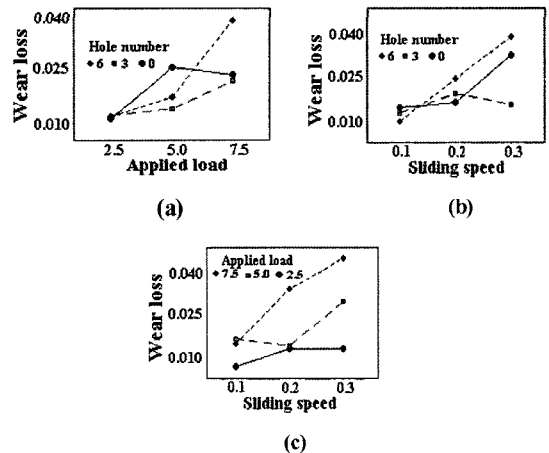


Fig. 6. Interaction plot for pad.

용하중과 미끄럼 속도의 증가에 따라 마멸량이 증가하는 것은 작용하중과 미끄럼 속도의 증가는 마찰면 온도의 상승으로 이어져 이로 인한 패드의 연화가 촉진된 결과라고 생각된다.

Fig. 6은 패드 마멸량을 완전 요인 배치법을 이용한 교호작용 그래프로써 (a)방열 홀 수에 대한 작용하중과 마멸량의 교호관계, (b)방열 홀 수에 대한 미끄럼 속도와 마멸량의 관계 및 (c)작용하중에 대한 미끄럼 속도와 마멸량의 관계를 나타낸 것으로 패드 역시 디스크의 경우와 같이 교호작용이 일어난다는 것을 알 수 있다.

따라서 패드의 마멸량에는 마찰인자인 방열 홀, 작용하중, 미끄럼 속도가 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이륜자동차의 브레이크 디스크의 작동조건에 따른 마찰특성을 알기 위하여, 실험 및 분석방법은 마찰인자에 따른 상호 관계를 실험계획법을 통해 작동조건에 따른 디스크와 패드의 마멸에 미치는 주요한 마찰인자를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이륜자동차의 디스크 마멸량은 방열 홀 수 3개, 작용하중 7.5 kg, 미끄럼 속도 0.1 m/s 인 경우가 가장 적었다.
2. 이륜자동차의 패드 마멸량은 방열 홀수 3개, 작용하중 2.5 kg, 미끄럼 속도 0.1 m/s 인 경우가 가장 적었다.
3. 디스크와 패드 모두 방열 홀 수에 대한 마멸량과 작용하중, 미끄럼 속도 그리고 작용하중에 대한 마멸량과 미끄럼 속도의 관계에서 각각 교호작용이 일어난다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005학년도 동아대학교 학술연구비(공모 과제) 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Jin-Taek Kim, "A Study of Thermal Behaviors on the Effect of Aspect Ratio of Ventilation Hole in Disk Brake", KSTLE Vol. 18, No. 6, pp. 384-388, 2002.
2. Blau P. J., "Composition, functions, and testing of friction brake materials and their additives", Oak Ridge National Laboratory, pp. 2-4, 2001.
3. Yeo. T. I., "Finite Element Analysis of Thermo-elastic Contact Stability with Sliding Friction", J. of KSME, Series A, Vol. 22, No. 7, pp. 1185-1192, 1998.
4. M. A. Tanvir, "On the cooling of disk brakes on a train", Rail International, March, pp. 37-42, 1988.
5. M. Terhech, R.R. Menory and J.H. Hensler, "The Friction and Wear of Automotive Gray Cast Iron under Dry sliding Conditions", Wear 180, pp. 73-78, 1995.
6. M Kubota, T. Hamabe, Y. Nakazono, M. Fukuda and K Doi, "Development of a Light Brake Disk rotor: a Design Approach for Achieving an Optimal Thermal, Vibration and Weight Balance", JSAE Review, pp. 349-355, 2000.
7. Tacin Yeo, "A study on Wear Life Prediction of Disk Brake Pads", KSAE, Vol. 10, No. 4, pp. 199-200, 2002.
8. R. E. Bechhofer and C. W. Dunnett, "Percentage Points of Multivariate Student Distributions", Selected Tables in Thematical Studies, American Mathematical Society, Providencia, R. I., Vol. 11, pp. 57-87, 1988.
9. A. J. Hayter, "A proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative", Annals of Statistics, Vol. 12, pp. 61-75, 1984.