

반응 표면법을 이용한 이륜자동차 브레이크 디스크 마멸량에 관한 연구 A Study on Wear loss of Motorcycle Brake Disk by Response Surface Method

전 환 영
H. Y. Jeon

Key Words : Motorcycle(이륜자동차), Ventilated Hole(방열 홀), Dsign of Experiment(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

Abstract : In this research, I would like to choose sliding distance and ventilated hole number which affect to the amount of wear of disk and pad as experiment conditions of 'the amount of wear' through wear test of motorcycle brake disk. Also, I analyze the amount of wear according to the variation of coefficient of friction by using design of experiment that is being widely used in diverse areas. With the tests of least, I present the correlation of each experiment condition. Therefore, I analyzed the variation of the amount of wear of disk and pad according to test factors such as ventilated hole number, applied load, sliding speed, and sliding distance in wear test of motorcycle brake disk by applying the design of experiment. Also, I analyzed quantitatively the influence of test factors through Taguchi Robust experimental design, response surface and examined the most suitable level and estimation of the amount of wear of disk. From these, I reached the following conclusions. response surface design, mathematical model was constructed about amount of wear of disk and pad. The amount of wear that decrease according to increase of ventilated hole number, and it's increase according to increase of applied load, sliding speed, and sliding distance.

1. 서 론

최근 자동차나 철도 차량에 사용되고 있는 접촉식 제동시스템은 디스크와 패드에서 발생하는 마찰열을 마찰 면에 균일하게 전이시키고, 방열 홀(ventilated hole)을 통해 대류 냉각시켜 제동 안정성을 유지하도록 하고 있다.¹⁾ 특히 최근 차량의 고속화와 고출력화의 요구에 따라 증가된 마찰열의 원활한 방출로 인한 브레이크 수명, 안전성, 디스크의 냉각과 마멸에 대해서 많은 연구가 수행되어져 왔다.²⁻⁷⁾ 브레이크는 디스크의 마찰 면에 작용하는 하중과 미끄럼 속도 등에 따라 높은 마찰열이 발생되어 열탄성마멸, 열 크랙, 페이드(fade), 이상 떨림(judder) 등으로 인하여 제동성능이 급격히 떨어지게 된다.⁸⁾

제동성능에 문제가 되는 것을 해결하기 위하여

최근 내마멸성과 열전도율이 높은 복합재료의 개발, 이상 떨림의 발생원인과 해결책을 위한 연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 연구를 통하여 브레이크 시스템을 경량화시키고 정지거리의 단축과 수명을 연장시키고자 하고 있는데 방열 브레이크 디스크는 미끄럼 마찰면의 크기를 그대로 유지하면서 대류에 의한 냉각효과를 극대화시켜 열 변형 거동을 가능한 줄여주고, 열탄성 마멸, 소음과 진동을 완화하여 브레이크의 안정성을 확보하면서 수명을 연장시킬 수 있지만, 실차 주행 모드에서의 디스크와 패드의 이상 마멸이나 진동의 원인과 해결책을 정량적이고 명확하게 분석하기는 어려운 실정에 있다.

따라서 디스크의 열적변화와 마찰 상태를 분석하기 위한 새로운 기법이 절실히 요구되고 있다. 반응표면 분산법은 인자의 각 수준에 따라 실시되는 실험계획법으로써 반응표면분석(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수가 복합적인 작용

접수일 : 2008년 2월 14일, 채택확정 : 2008년 4월 15일
전환영(책임저자) : 김해대학 기계차량계열
E-mail : jhy1970@gimhae.ac.kr, Tel : 055-320-1713

을 함으로써 어떤 종속변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 또, 가장 적은 수의 실험으로 가장 좋은 정도를 주는 실험계획법이 무엇인가를 고찰하고, 데이터 분석을 통하여 추정되는 적합한 반응표면의 통계적인 성질을 규명할 수 있다.^{9,10)}

따라서 이러한 통계적 분석방법을 사용하게 되면 본 연구의 목적인 이륜자동차의 브레이크 디스크의 마찰인자들의 상관관계에 대한 수학적 모형의 수립이 가능하여 디스크의 마멸 량에 미치는 주요한 마찰인자를 분석하고, 작동조건에 따른 변화를 분석하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

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. 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 $\phi 24\text{mm}$, 두께는 디스크 4mm, 패드 5mm로 제작하였다. 디스크 시험편의 방열특성을 알기 위하여 방열 홀이 없는 솔리드(solid) 형과 $\phi 20\text{mm}$ 의 원주면에 동일한 각도로 3개와 6개의 $\phi 2\text{mm}$ 의 구멍을 가공한 시험편을 사용하였다. 또한 시험편의 마찰특성을 비교하기 위한 마찰계수는 시험기의 디스크 시험편 홀더에 로드셀을 부착하여 이의 마찰력 신호를 컴퓨터 내의 자체 구축한 마찰계수 측정 알고리즘을 이용하여 구하였다. 또한 마찰실험은 실험 전 디스크와 패드는 표면조도를 $0.5\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 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.

Table 1 Chemical composition of disk

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

Aramid fiber	2
Glass fiber	8
Sema fiber	15
Barium sulfate	15 ~ 25
Vermiculite	5
Dry rubber	4 ~ 6
Resin	8
etc.	30 ~ 47

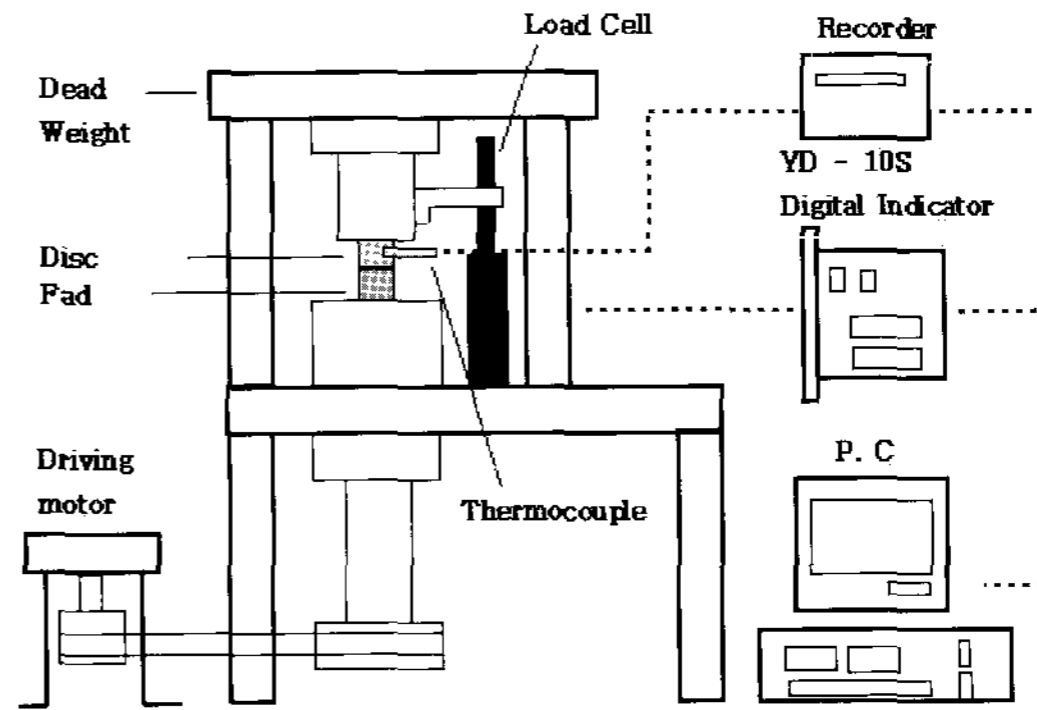


Fig. 1 Schematic diagram of vertical type wear test

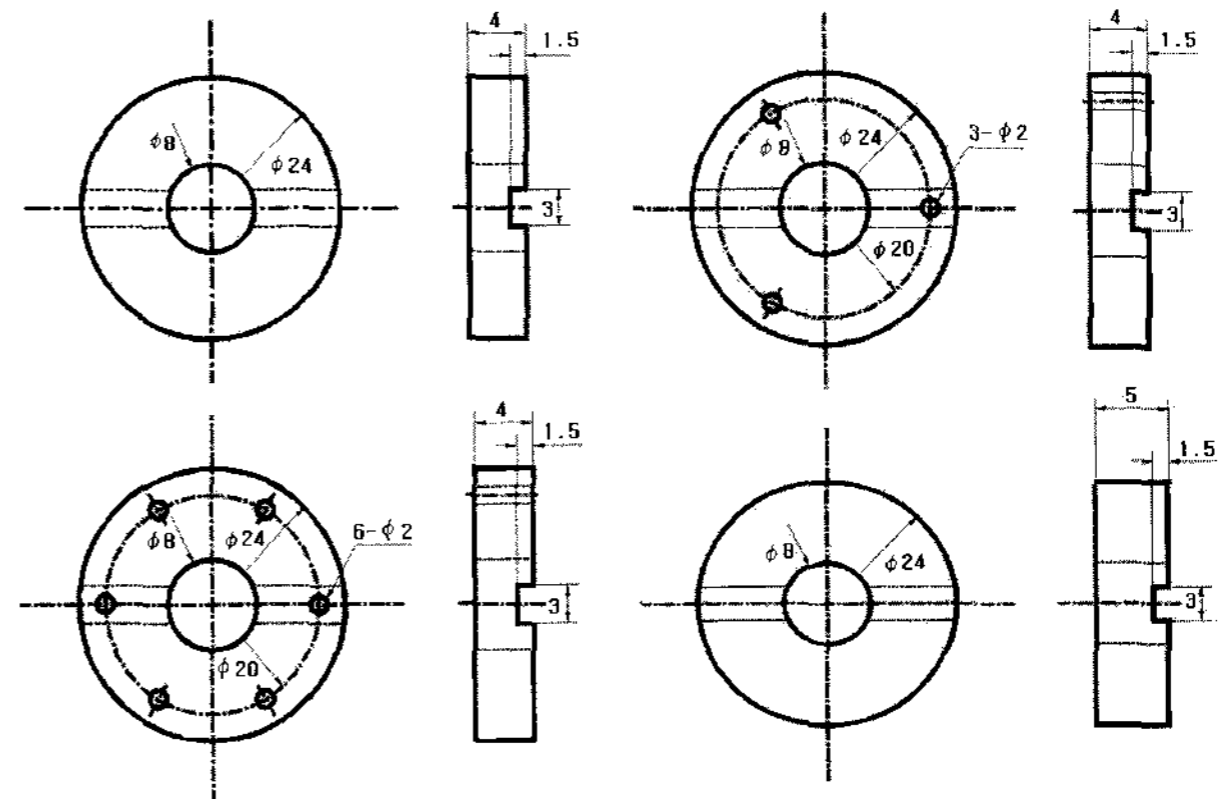


Fig. 2 Specimen of disk and pad

2.2 반응표면분석법

반응표면분석(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 종속변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자이며, 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수이다. 독립변수들과 종속변수간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따라서 종속변수가 어떻게 달라지는가를 예측하고 독립변수들의 어떠한 값에서 반응량이 최적화될 것인가를 찾을 수

있다. 따라서 가장 적은 수의 실험으로 가장 좋은 정도를 주는 실험계획법이 무엇인가를 고찰하고, 데이터 분석을 통하여 추정되는 적합한 반응표면의 통계적인 성질을 규명할 수 있다. 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 와 종속변수 η 간의 미지의 함수를 f 로 나타내면

$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ 가 된다. 여기서 독립변수를 선형변환 시켜서 새로운 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 로 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지수 상수, ε 는 나머지로 정의하여 2차 회귀모형(second order regression model)으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

본 연구에서는 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 이륜자동차 브레이크 디스크의 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 실험조건에 설정 값을 나타내며 디스크의 방열 홀 개수는 0, 3 및 6개이며, 작용하중의 크기는 2.5kg, 5.0kg 및 7.5kg, 그리고 미끄럼 속도는 0.1m/s, 0.2 m/s 및 0.3m/s로 설정하여 실험한 후 디스크의 마멸량 변화를 구하였다.

Table 3 Experimental conditions

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰인자에 따른 디스크 마멸량 분석

본 연구에서는 실험계획법으로 마찰실험을 행하여 Table 4와 같이 디스크의 실험 전과 후의 무게를 20회 측정하여 그 평균값으로 마멸량을 구하였다.

Table 4 Experiments result

Run order	Hole number	Applied load(kg)	Sliding speed(m/s)	Sliding distance(m)	Wear (Disk) (g)
26	0	5	0.1	500	0.0216
7	0	5	0.1	1500	0.00463
10	0	5	0.1	2500	0.0562
5	0	10	0.2	500	0.0598
14	0	10	0.2	1500	0.0613
2	0	10	0.2	2500	0.0762
11	0	15	0.3	500	0.0384
18	0	15	0.3	1500	0.0678
6	0	15	0.3	2500	0.0826
27	3	5	0.1	500	0.0074
25	3	5	0.1	1500	0.0264
19	3	5	0.1	2500	0.0492
8	3	10	0.2	500	0.0257
16	3	10	0.2	1500	0.0402
9	3	10	0.2	2500	0.0511
13	3	15	0.3	500	0.0147
12	3	15	0.3	1500	0.0267
17	3	15	0.3	2500	0.0569
4	6	5	0.1	500	0.0020
22	6	5	0.1	1500	0.0235
20	6	5	0.1	2500	0.0467
15	6	10	0.2	500	0.0041
23	6	10	0.2	1500	0.0166
3	6	10	0.2	2500	0.0450
24	6	15	0.3	500	0.0009
21	6	15	0.3	1500	0.0370
1	6	15	0.3	2500	0.0597

그리고 특성치에 많은 영향을 주고 있는 마찰인자의 수준에 대하여 명확한 특성치의 변화를 분석하기 위해 인접한 마찰인자의 수준으로 나누어 최적의 마찰조건을 분석하고 1차 회귀모형 식(2)을 구축하였다.

$$W_d = 0.00315 - 0.00509 x_1 + 0.00117 x_2 + 0.0499 x_3 + 0.0194 x_4 \quad (2)$$

여기서 x_1 은 방열 홀수이고, x_2 는 작용하중(kg)이고, x_3 는 미끄럼 속도(m/s), x_4 는 미끄럼 거리(m)이다. 이 추정된 식으로부터 디스크 마멸량은 방열 홀 수(x_1)가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 작용하중(x_2), 미끄럼 속도(x_3), 미끄럼거

리(x_4)에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. 식(2)를 이용하여 마찰인자 2개를 중위수준으로 고정시키고 2개의 인자에 대하여 등고선도와 반응표면 곡선의 그래프를 Fig. 3에서 Fig. 14까지 나타내었다.

Fig. 3은 이륜자동차 브레이크 디스크의 방열 홀수와 작용하중에 대한 등고 선도를 나타내며, Fig. 4는 방열 홀수와 작용하중에 대한 반응표면 곡선 그래프를 나타내고 있다. Fig. 3은 방열 홀수가 0일 경우 작용하중이 커지면 마멸량이 증가하는 것을 알 수 있고, Fig. 4에서 방열 홀수가 적고 작용하중은 커질수록 디스크의 마멸량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 이륜자동차 디스크의 방열 홀수와 미끄럼 속도에 대한 등고 선도를 나타내며, Fig. 6은 방열 홀수와 미끄럼 속도에 대한 반응표면 곡선을 나타내고 있다. Fig. 5는 방열 홀수가 0일 경우 미끄럼 속도가 0.2 m/s 일때 디스크의 마멸량이 가장 많은 것을 알 수 있고, Fig. 6에서 방열 홀수는 0이고 미끄럼 속도가 0.2 m/s일 때 디스크의 마멸량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 이륜자동차 디스크의 방열 홀수와 미끄럼 거리 대한 등고 선도를 나타낸 것이며, Fig. 8은 방열 홀수와 미끄럼 거리 대한 반응표면 곡선 그래프를 나타내고 있다. Fig. 7에서 방열 홀수가 적고, 미끄럼거리가 증가할수록 마멸량이 많은 것을 알 수 있고, Fig. 8은 방열 홀수가 작을수록 미끄럼 거리는 증가할수록 디스크의 마멸량이 많은 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 이륜자동차 디스크의 작용하중과 미끄럼 속도 대한 등고 선도를 나타내고 있고, Fig. 10은 작용하중과 미끄럼 속도 대한 반응표면 곡선 그래프를 나타내고 있다. Fig. 9는 작용하중이 클수록 미끄럼 속도가 증가할수록 등고선도 넓이가 좁게 분포하는 것을 알 수 있고, Fig. 10 일 때는 작용하중이 10 kg이고 미끄럼 속도가 0.2 m/s일 때 디스크 마멸량이 증가하다가 다시 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 이륜자동차 디스크의 작용하중과 미끄럼 거리 대한 등고 선도를 나타낸 것이며, Fig. 12는 작용하중과 미끄럼 거리 대한 반응표면 곡선 그래프를 나타내고 있다. Fig. 11은 작용하중과 미끄럼 속도가 증가할수록 디스크 마멸량 등고선도가 좁게 분포하는 것을 알 수 있고, Fig. 12일 때는 작용하중이 15 kg, 미끄럼 거리가 2500 m 일 때 디스크 마

멸량이 가장 많다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 이륜자동차 디스크의 미끄럼 속도와 미끄럼 거리에 대한 등고 선도를 나타낸 것이며, Fig. 14는 미끄럼 속도와 미끄럼 거리에 대한 반응표면 곡선 그래프를 나타내고 있다. Fig. 13은 미끄럼 거리가 증가할수록 디스크의 마멸량은 증가하지만 미끄럼 속도에는 많은 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 14에서 미끄럼 속도는 디스크의 마멸량에 그다지 영향을 주지 않지만, 미끄럼 속도 0.2 m/s에서 마멸량이 가장 많으며, 미끄럼 거리가 증가할수록 마멸량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

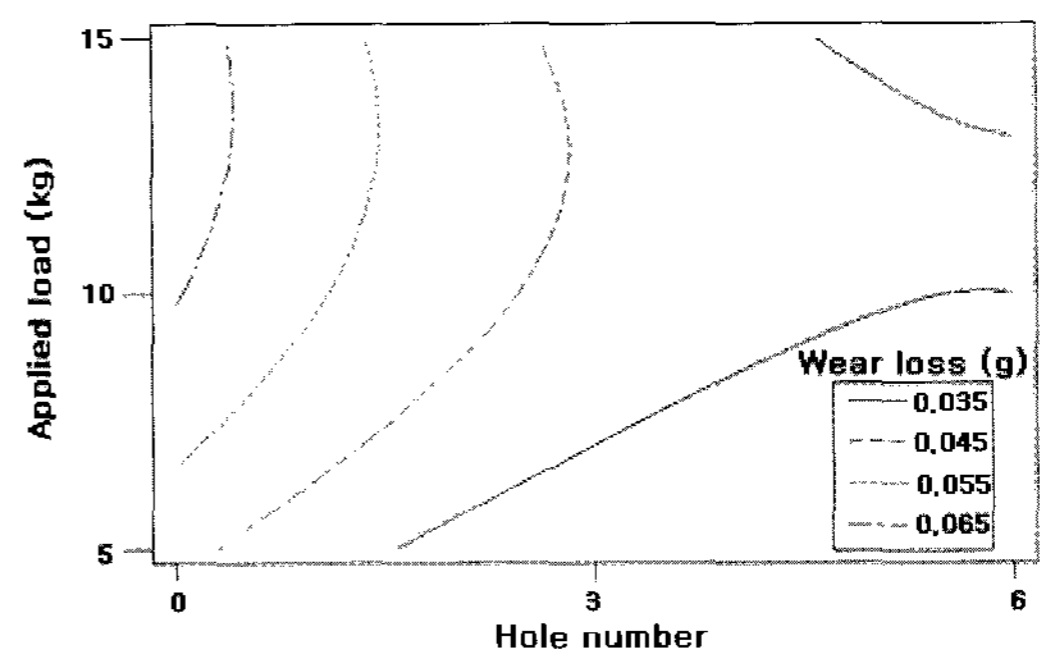


Fig. 3 Contour plot of hole number and applied load for disk wear loss

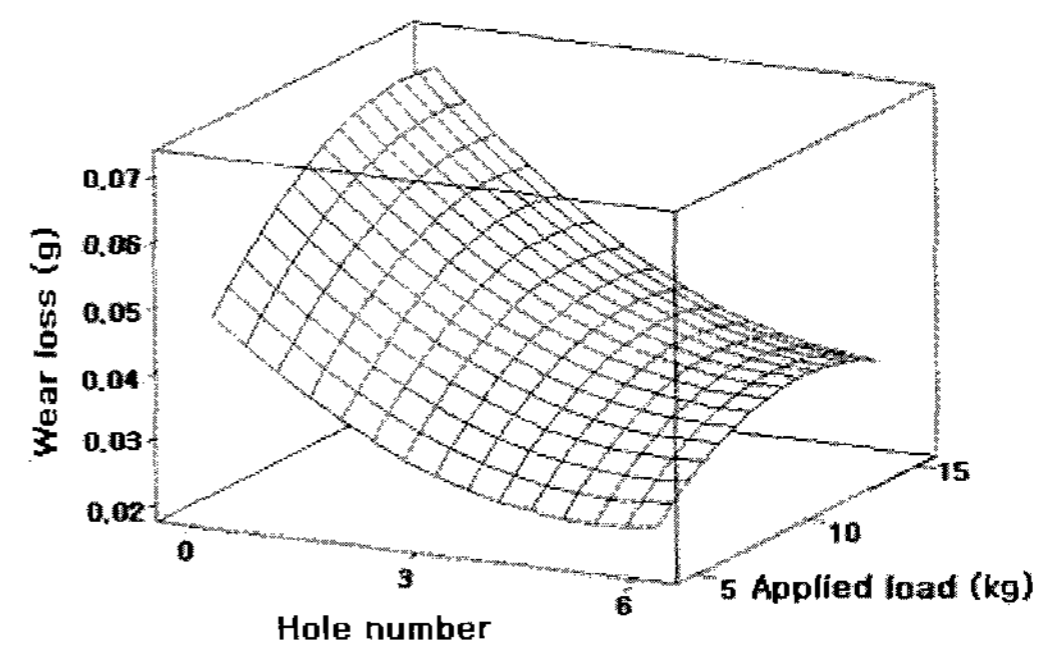


Fig. 4 Response surface curve of disk wear loss on hole number and applied load

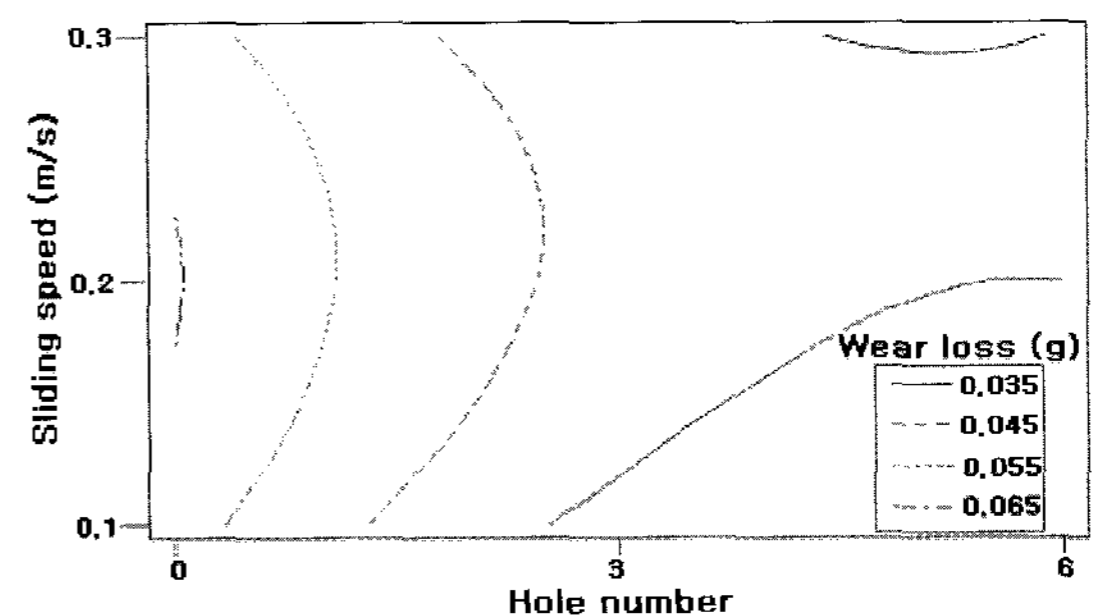


Fig. 5 Contour plot of hole number and sliding speed for disk wear loss

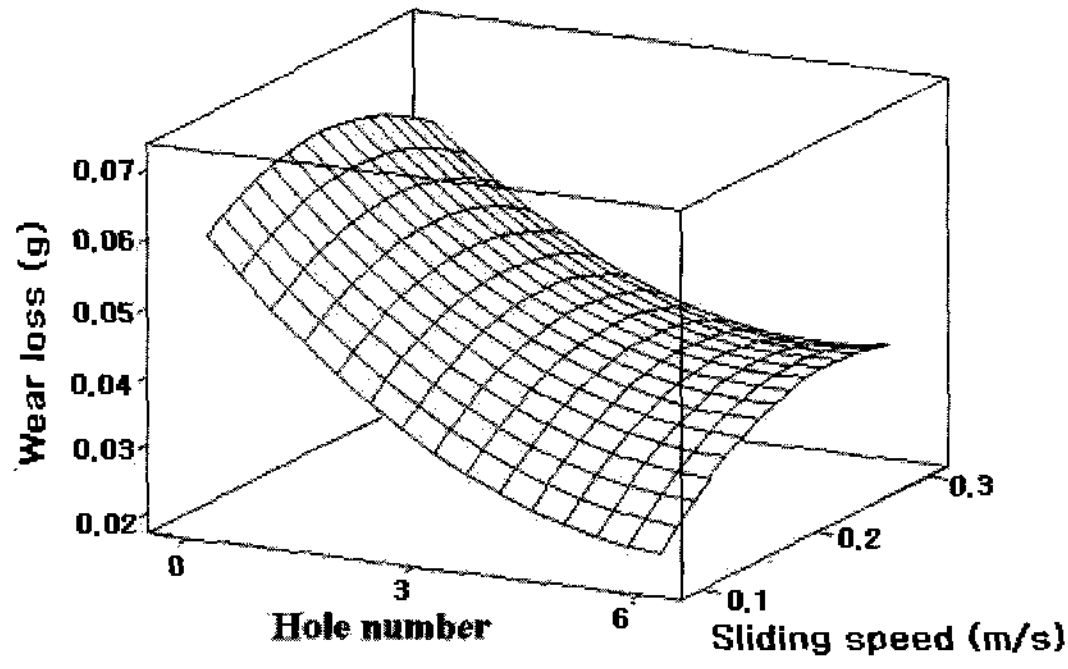


Fig. 6 Response surface curve of disk wear loss on hole number and sliding speed

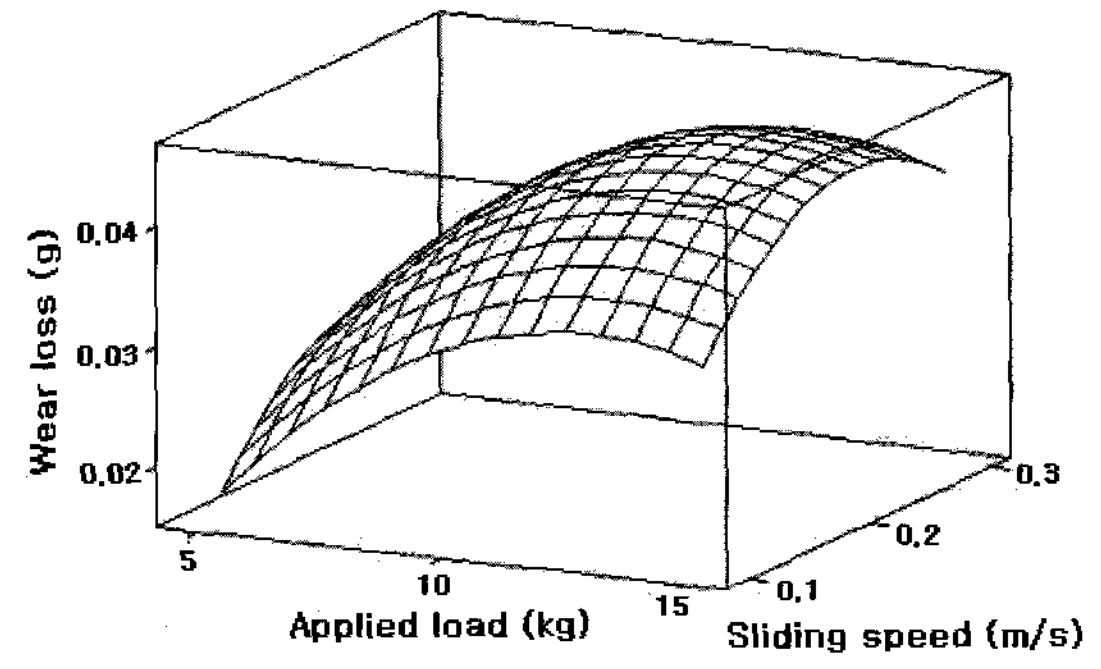


Fig. 10 Response surface curve of disk wear loss on applied load and sliding speed

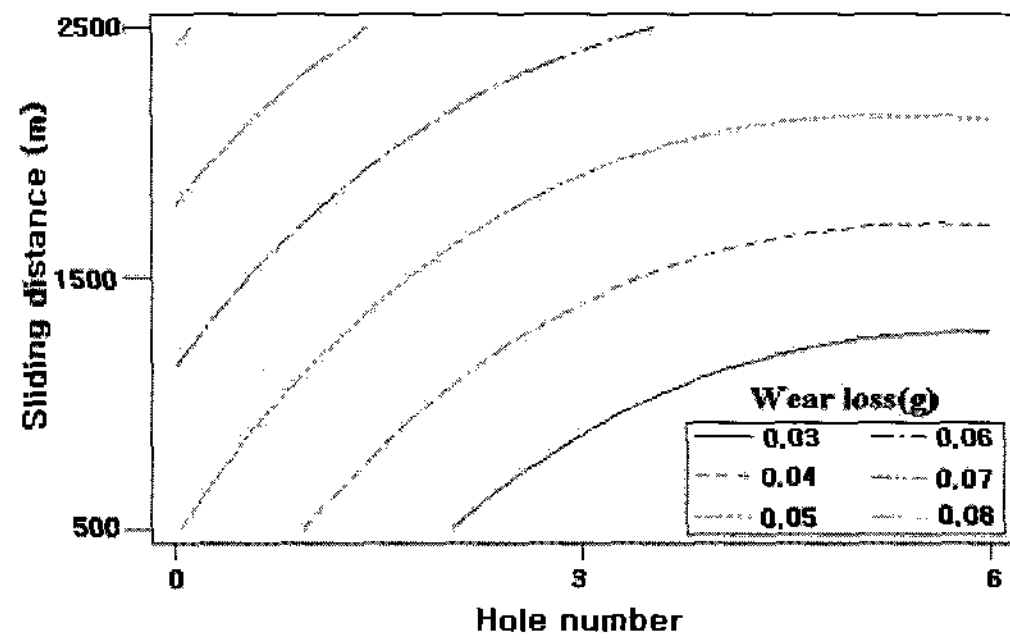


Fig. 7 Contour plot of hole number and sliding distance for disk wear loss

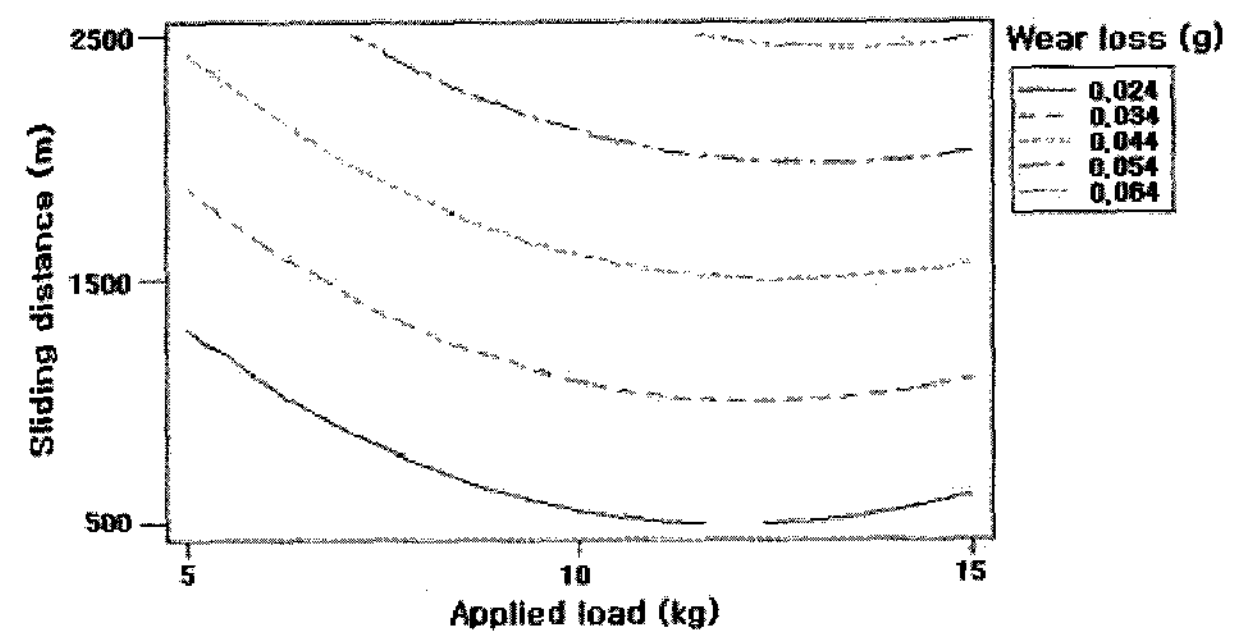


Fig. 11 Contour plot of applied load and sliding distance for disk wear loss

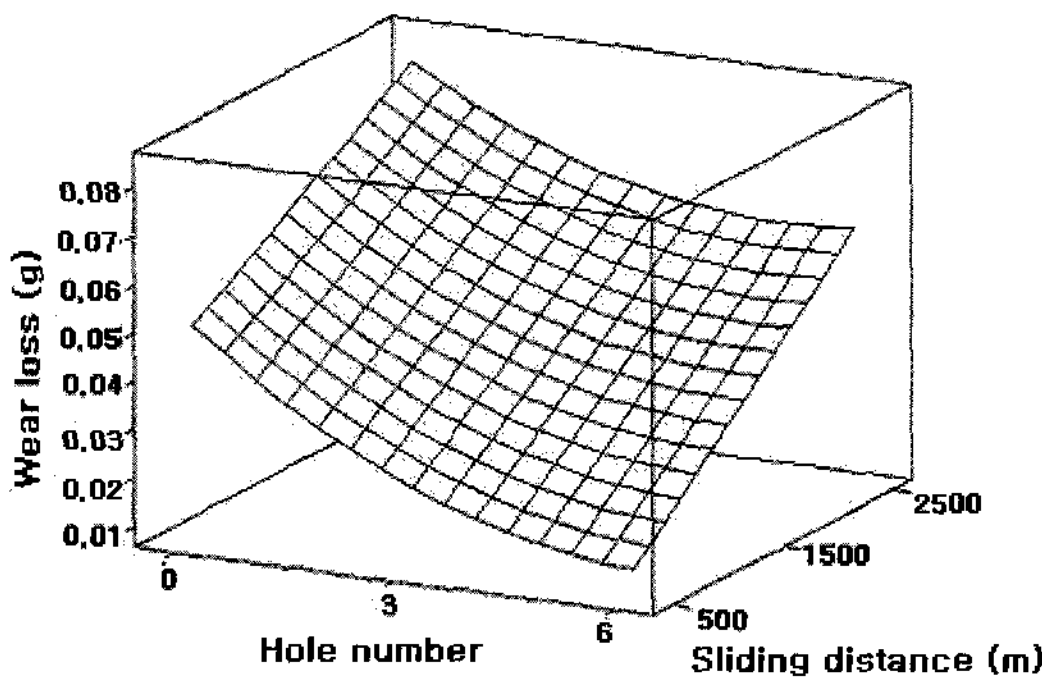


Fig. 8 Response surface curve of disk wear loss on hole number and sliding distance

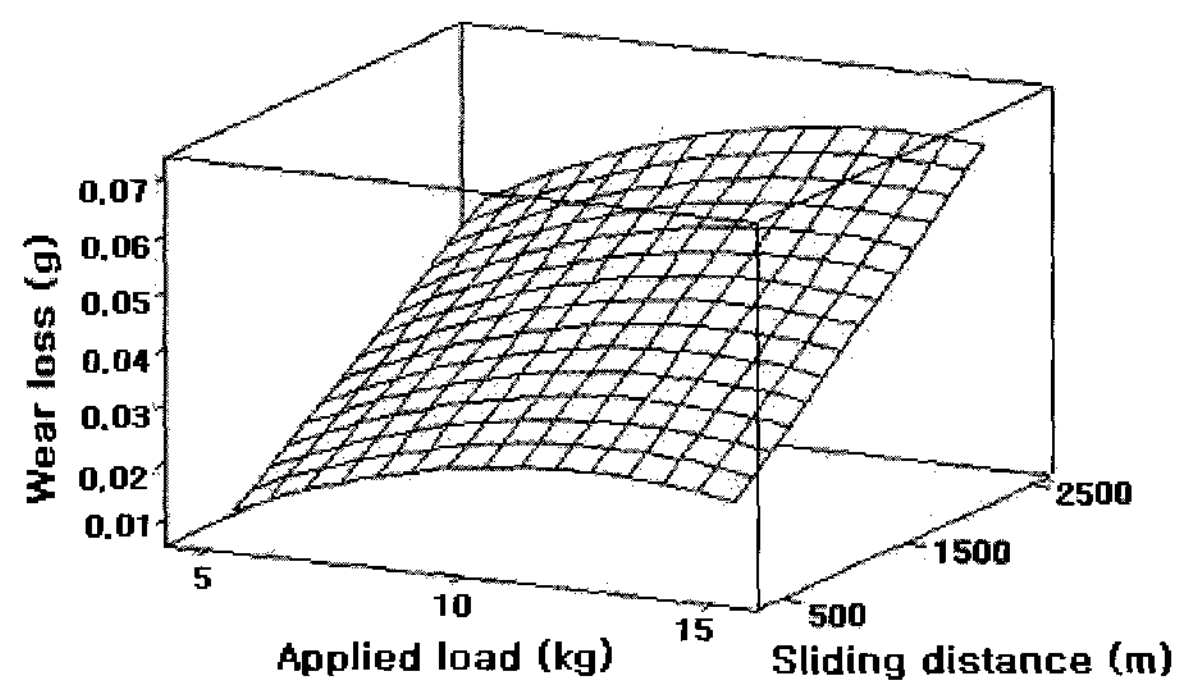


Fig. 12 Response surface curve of disk wear loss on applied load and sliding distance

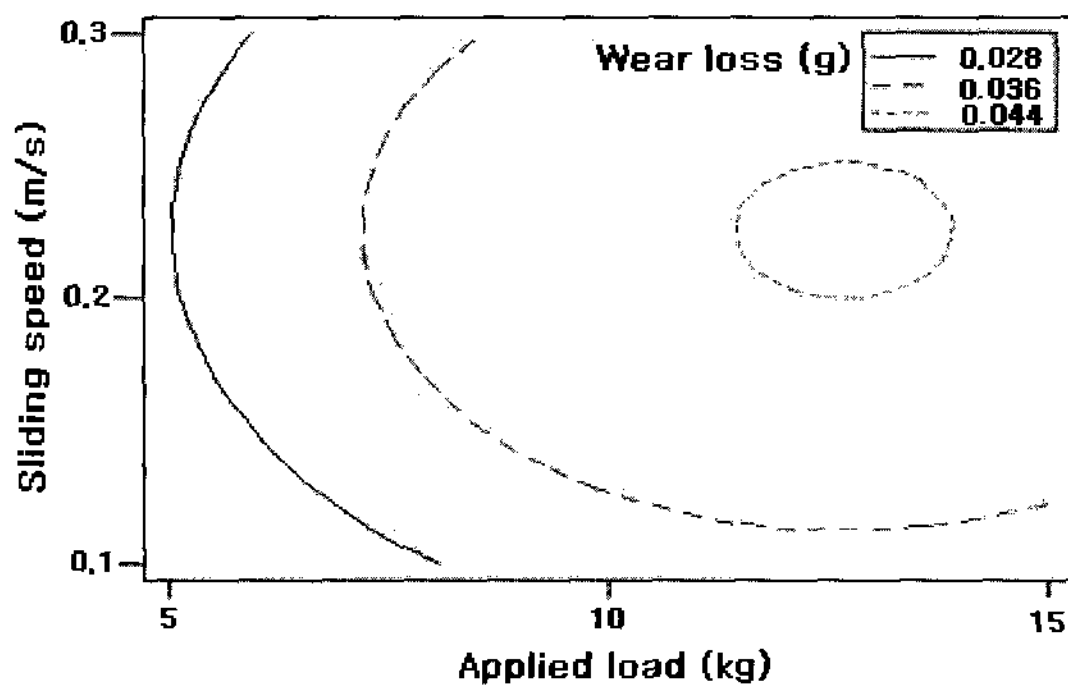


Fig. 9 Contour plot of applied load and sliding speed for disk wear loss

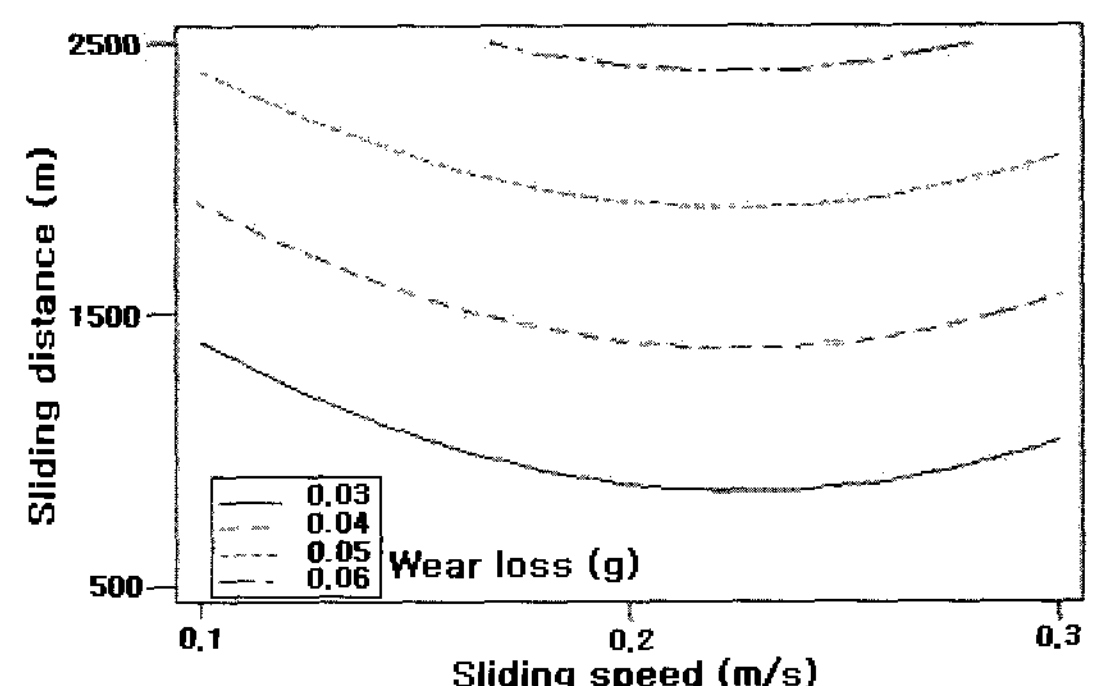


Fig. 13 Contour plot of sliding speed and sliding distance for disk wear loss

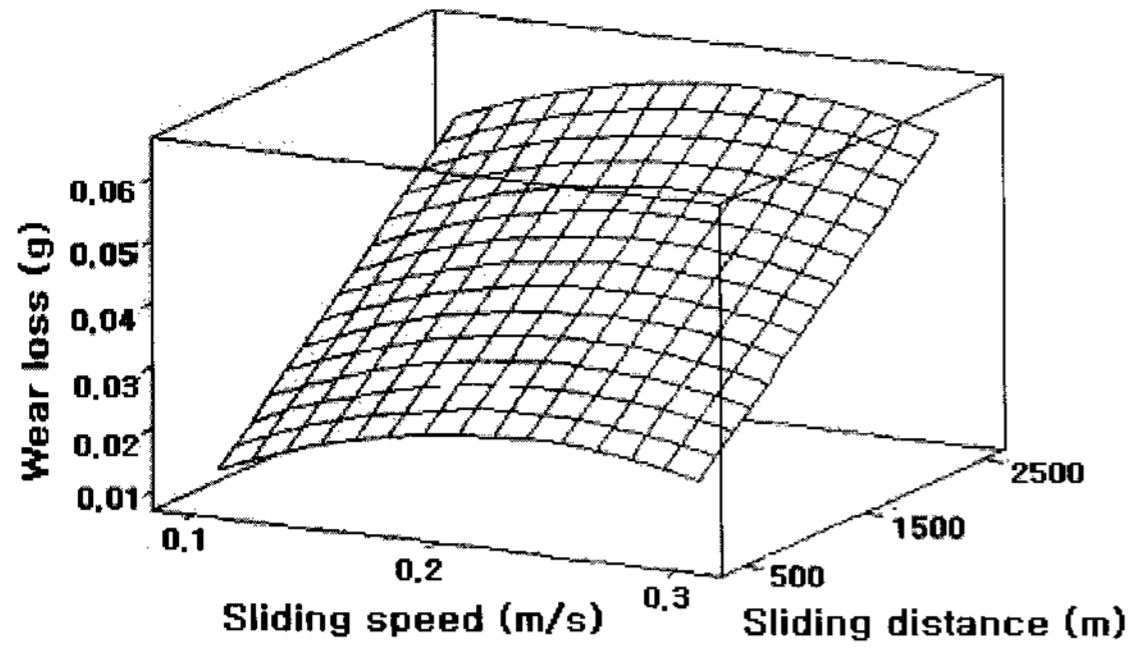


Fig. 14 Response surface curve of disk wear loss on sliding speed and sliding distance

4. 결 론

본 연구에서는 이륜자동차의 디스크의 방열효과와 내마멸성을 향상시키기 위하여 실험 및 분석방법은 마찰인자에 따른 상호 관계를 반응표면분석법을 이용하여 디스크의 마멸량에 미치는 주요한 마찰인자를 분석하고, 작동조건에 따른 변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 반응표면 분석법 등고선도 및 곡선 그래프를 이용하여 마찰인자들 간의 상관관계를 알 수 있었다.
- 2) 반응표면법을 통하여 디스크의 추정 마멸량을 구하는 수학적 모형 식을 구축하였으며, 디스크의 마멸량은 방열 효율이 증가함에 따라 감소하고, 작용하중, 미끄럼 속도 및 미끄럼 거리에 따라 증가한다.
- 3) 본 연구 방법은 다른 이륜자동차 제품뿐만 아니라 자동차 제품에도 적용할 수 있고, 실험단계에서 개선된 방법을 사용하여 실험하는데 유용할 것이다.

참고 문헌

1. Chung Kyun Kim and Jun Tae Hwang, 1999, "Tribological Analysis on the Contact Behaviors of Disk Brakes Due to Frictional Heatings-Cooling Effects by Vent Holes", KSTLE Vol. 15 No. 2, pp. 199~205.
2. Jin-Taek Kim, 2002, "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.
3. P. J. Blau, 2001, "Composition, functions, and testing of friction brake materials and their

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