

회귀분석을 이용한 모터사이클 브레이크 디스크의 마멸량 예측

전환영[†] · 배효준* · 김영희** · 류미라*** · 박흥식***[‡]

김해대학 차량 기계계열, *부산정보대학 자동차기계계열,
동아대학교 신소재공학과, *동아대학교 기계공학부

Wear Loss Presumption of Motorcycle Disk Brake Using Regression Analysis

Hwanyoung Jeun[†], Hwojun Bae*, Younghee Kim**, Mira Ryu*** and Heungsik Park***[‡]

Dept. of Mechanical Automobile, GimHae College

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

***Dept. of Material Science and Engineering, Dong-A University*

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

Abstract – The friction test using disk-on-pad type was carried out and regression analysis with friction parameters was applied for wear loss presumption of motorcycle break disk. The wear loss has 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 on wear loss of motorcycle break disk. From this study, the result was shown that the regression analysis equation containing 4 elements were constructed and this equation had a trust of 95% in wear loss presumption of motorcycle break disk. It is possible to apply for another automobile parts.

Key words – Motorcycle(모터사이클), Ventilated disk hole(방열홀), Design of experiment(실험계획법), Regression analysis(회귀분석)

1. 서 론

최근 자동차나 철도 차량에 사용되고 있는 접촉식 제동시스템은 디스크와 패드에서 발생하는 마찰열을 마찰면에 균일하게 전이시킴과 함께 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 마찰면에 작용하는 하중과 미끄럼 속도 등에 따라 높은 마찰열이 발생되어 열탄성마멸, 열 크랙, 페이드(fade), 이상떨림(judder) 등으로 인하여 제동성능이 급

격히 떨어지게 된다[8]. 제동성능에 문제가 되는 것을 해결하기 위하여 내마멸성과 열전도율을 높이기 위한 복합재료의 개발, 이상떨림의 발생원인과 해결책을 위한 연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석 등의 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구를 통하여 자동차의 브레이크 시스템을 고속화 및 경량화시키고 정지거리의 단축과 수명을 연장시키고 있다. 방열 디스크 브레이크는 미끄럼 마찰면의 크기를 그대로 유지하면서 대류에 의한 냉각효과를 극대화시켜 열변형 거동을 가능한 줄여주고, 열탄성 마멸, 소음과 진동을 완화하여 브레이크의 안정성을 확보하면서 수명을 연장시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 실차 주행 모드에서의 디스크와 패드의 이상 마멸이나 진동의 원인과 해결책을 정량적이고 명확하게 분석하기는 어려운 실정에 있다.

이를 위하여 최근 다양한 분야에 널리 사용되고 있

[†]주저자 : jhy1970@gimhae.ac.kr

[‡]책임저자 : Parkhs@daunet.donga.ac.kr

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%

는 회귀분석은 실험조건에 대한 마찰인자들의 상관관계를 수학적 모형을 수립할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 실험인자들에 따른 디스크의 마멸량을 추정할 수 있으리라 예상된다[9,10].

따라서 본 연구에서는 이륜자동차의 디스크의 방열 효과와내마멸성 향상을 위한 방열 홀에 따른 마멸특성을 분석하고자 한다. 실험 및 분석방법은 마찰인자에 따른 상호 관계를 회귀분석법을 이용하여 디스크의 마멸량에 미치는 주요한 마찰인자를 분석하고 작동조건에 따른 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 마찰실험

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

마찰실험을 위하여 수직형 건 마찰 시험기를 사용하였으며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 마찰시험에 사용된 이륜자동차 디스크와 패드 시험편은 실제 부품의 약 1/10으로 축소시켜 $\varnothing 24$ mm로 하였고, 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 사용

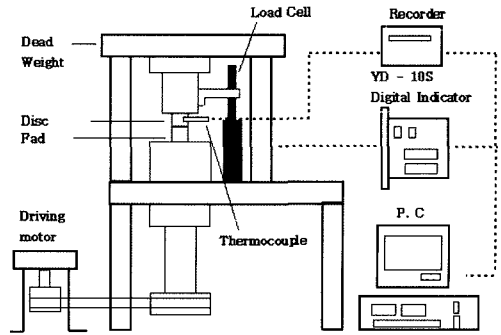
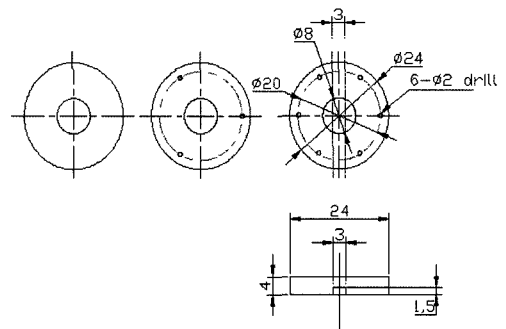
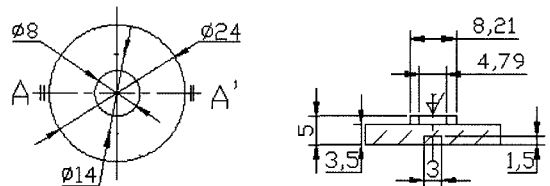


Fig. 1. Schematic diagram of vertical type wear test.



(a) Disk



(b) Pad

Fig. 2. Specimen of disk and pad.

하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

실험 전 디스크와 패드는 표면조도를 $0.5 \mu\text{mRmax}$ 로 일정하게 하여 마찰실험을 행하였다. 그리고 두 시험편의 마찰특성을 비교하기 위한마찰계수는 시험기의 디스크 시험편 홀더에 로드셀 (load cell)를 부착하여 이의 마찰력 신호를 컴퓨터내의 자체 구축한 마찰계수 측정 알고리즘을 이용하여 측정하였다. 마찰면 온도는 마찰면 원주면 하부에 $\varnothing 2$ mm의 구멍을 뚫어 여기에 열전대를 삽입한 후 온도기록계를 통하여 마찰면 온도 변화를 측정하였다.

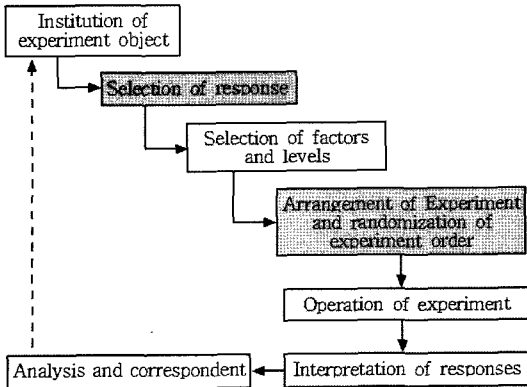


Fig. 3. Flow chart for experiment design.

2-2. 실험계획법

실험계획법에 의한 실험순서는 Fig 3과 같이, 실험의 목적을 선정하고 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰 실험에 있어서 마멸량을 미치는 특성치라 할 수 있는 실험조건 즉, 마찰인자를 선정해야 한다. 본 연구에서는 마찰인자로는 방열 홀 개수, 작용하중, 미끄럼 속도 및 미끄럼 시간을 인자로 선정하였고, 각 인자는 3 수준으로 하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다. 다음 직교배열표를 이용하여 실험 조건을 선정하고 실험을 한 후 특성치에 대해서 분석을 한다.

실험은 4인자 3수준의 $L_{27}(3^4)$ 직교 배열표를 이용하여 실험계획을 수립하여 실험을 실시하였다. 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰 실험에 있어서 마찰 인자에 따른 디스크 마멸량을 특성치로 설정하여 각 조건에 따른 회귀분석을 이용하여 정량적인 수학적 모형을 추정하고자 하였다.

또, 회귀분석을 통한 수학적 모형인 회귀식을 이용하여 방열 홀 개수 9개의 디스크 마멸량을 예측을 검정하기 위하여 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰 실험을 하여 결과를 얻었다.

어떤 종속변수의 변화는 두 개 이상의 독립변수에

Table 3. Experimental conditions

Factors	Level		
	1	2	3
Hole number	0-Hole (solid)	3-Hole	6-Hole
Applied load(kg)	5.0	10.0	15.0
Sliding speed(m/s)	0.1	0.2	0.3
Sliding time(hour)	0.5	1.5	2.5

의하여 영향을 받으며, 독립변수 k를 여러 개 잘 선택하여 이들의 함수로서 종속변수의 변화하는 특성을 설명할 수 있을 경우에 단순회귀에 비하여 보다 정도 좋은 예측을 할 수 있다. 본 연구에서의 중회귀분석은 디스크 마멸량을 종속변수로 하고 여기에 영향을 주고 있는 독립변수(방열 홀 개수, 작용하중, 미끄럼 속도, 미끄럼 시간)를 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 규명하려는 통계적 분석방법으로, 이를 이용하여 실험인자 사이의 정량적인 함수관계를 파악하고자 하였다. 이처럼 종속변수 y와 n개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_n 에 대하여 i 번째 종속변수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \tag{1}$$

여기서 각 인자에 대한 관찰점 $i=1, 2, \dots, n$ 이며, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지의 모수이다. 그리고 ϵ_i 는 오차 값이며, 관찰점을 벡터로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$y_i = (1, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \epsilon_i \tag{2}$$

n개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬표현식은 식 (3)과 같다.

$$y = X\beta + \epsilon \tag{3}$$

여기서

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

이다.

그리고 식 (4)를 최소제곱법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면 식 (5)와 같다.

Table 4. ANOVA for multiple linear regression model

Factor	S	V	F ₀	P
Regression	SSR	k	MSR	MSR/MSE P _R
Residual Error	SSE	n-k-1	MSE	
Total	SST	n-1		

where

SSR(Regression sum of squares) = $\hat{\beta}' X'y - n(\bar{y})^2$

SSE(Residual sum of squares) = $y'y - \hat{\beta}' X'y$

SST(Total sum of squares) = $y'y - n(\bar{y})^2$

MSR(Regression mean square) = SST/k

MSE(Residual mean square) = $SSE/(n-k-1)$

Table 5. Experiment result

No.	Hole number	Applied load (kg)	Sliding speed (m/s)	Sliding time (h)	Wear loss (Disk)(kg)
1	0	5.0	0.1	0.5	0.0216
2	0	5.0	0.1	1.5	0.0463
3	0	5.0	0.1	2.5	0.0562
4	0	10.0	0.2	0.5	0.0598
5	0	10.0	0.2	1.5	0.0613
6	0	10.0	0.2	2.5	0.0762
7	0	15.0	0.3	0.5	0.0384
8	0	15.0	0.3	1.5	0.0678
9	0	15.0	0.3	2.5	0.0826
10	3	5.0	0.2	0.5	0.0074
11	3	5.0	0.2	1.5	0.0264
12	3	5.0	0.2	2.5	0.0492
13	3	10.0	0.3	0.5	0.0257
14	3	10.0	0.3	1.5	0.0402
15	3	10.0	0.3	2.5	0.0511
16	3	15.0	0.1	0.5	0.0147
17	3	15.0	0.1	1.5	0.0267
18	3	15.0	0.1	2.5	0.0569
19	6	5.0	0.3	0.5	0.0020
20	6	5.0	0.3	1.5	0.0235
21	6	5.0	0.3	2.5	0.0467
22	6	10.0	0.1	0.5	0.0041
23	6	10.0	0.1	1.5	0.0166
24	6	10.0	0.1	2.5	0.0450
25	6	15.0	0.2	0.5	0.0009
26	6	15.0	0.2	1.5	0.0370
27	6	15.0	0.2	2.5	0.0597

$$S = \varepsilon'\varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) = y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta \quad (5)$$

이를 β 로 미분하여 0으로 두면 다음의 결과를 얻을 수 있으며, 여기서 $\hat{\beta}$ 은 β 의 최소제곱 추정값의 벡터로서 $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)$ 을 의미한다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (6)$$

따라서 식 (7)과 같이 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 의 최소 제곱 추정 값이 된다.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \cdots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \cdots & \sum x_{2i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{1i}x_{ki} & \sum x_{2i}x_{ki} & \cdots & \sum x_{ki}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ki}y_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

회귀분석을 통한 회귀선은 그 적합성을 검증하기 위하여 분산분석의 작성이 필요하다. 여기서 추정된 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 측도(measure)는 Table 4와 같으며 F_0 의 값이 크면 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 말할 수 있다. 그리고 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination)로서, 이것은 식 (8)과 같이 R^2 으로 나타내고

$$R^2 = SSR/SST \quad (8)$$

이 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖는다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 디스크 마멸량에 대한 수학적 모형 추정

본 연구에서는 완전요인 배치법으로 이륜자동차 디스크와 패드의 마찰실험을 행하여 Table 5와 같은 실험전과 후의 무게를 20회 이상 측정하여 그 평균값으로 마멸량을 구하였다.

Fig. 4는 디스크 브레이크의 마찰실험후 특성치에 대한 잔차분석을 나타낸 것으로, (a)정규성 그래프에서 잔차의 분포상태를 나타내며 선형일수록 정규 분포를 나타내게 된다. (b) 차트는 개체차트로서 중심선 위 아래로 관리한계에 기대되는 변동을 표시한 것으로 그림에서 평균선을 기준으로 분포상태의 변동은 특별한 이상이 없음을 나타내고 있다. 그리고 (c)잔차의 히스토그램으로 하나의 정점과 대칭적 종모양을 갖고 있으

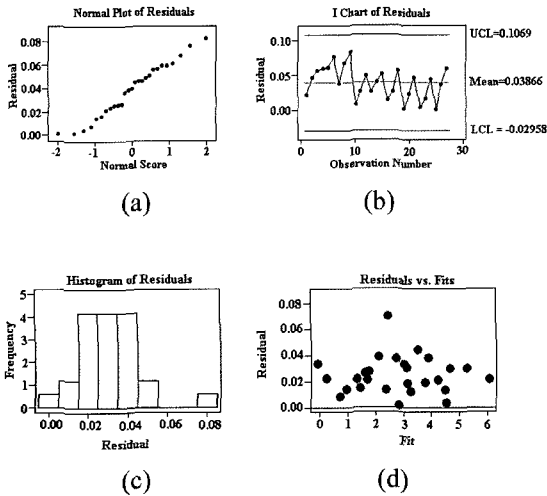


Fig. 4. Residual model diagnostics for wear loss

Table 6. ANOVA of Multiple linear regression model for disk wear loss

Factor	S	V	F ₀	P	
Regression	0.00120241	4	0.0030060	40.68	0.000
Residual Error	0.0016257	22	0.0000739		
Total	0.0136498	26			

므로 정규분포하고 있음을 알 수 있다. (d)잔차 대 적합 값의 그래프로서 선형적 또는 일정한 규칙성이 발견되지 않으므로 정규적인 분포를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 디스크 마멸량의 중회귀분석을 통한 수학적 모형은 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$Ra = 0.00315 - 0.00509x_1 + 0.00117x_2 + 0.0499x_3 + 0.0194x_4 \quad (9)$$

여기서 x_1 은 방열홀수, x_2 는 작용 하중, x_3 은 미끄럼 속도, x_4 는 미끄럼 시간이다.

Table 6은 디스크 마멸량에 대한 중회귀의 분산분석을 나타낸 것으로, 추정된 회귀방정식 P-검정에서 마찰실험 조건에 따른 디스크 마멸량을 충분히 설명할 수 있으며, 결정계수 R^2 은 88%의 정도를 나타내고, MSE가 0.0000739으로 데이터의 산포는 신뢰성이 양호하다고 할 수 있다.

따라서 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰실험에 있어서의 마찰인자, 즉 방열 홀 개수, 작용하중, 미끄럼 속도, 미끄럼 시간에 따른 회귀방정식으로 디스크 마멸량을 나타낼 수 있으며, 이 결과를 적용하게 되면

Table 7. Disk wear loss of hole number 9

Standard order	Hole number	Applied load (kg)	Sliding speed (m/s)	Sliding time (h)	Wear loss (Disk)(kg)
1	9	5.0	0.1	0.5	-0.0197
2	9	5.0	0.1	1.5	-0.0014
3	9	5.0	0.1	2.5	0.0160
4	9	10.0	0.2	0.5	0.0003
5	9	10.0	0.2	1.5	0.0083
6	9	10.0	0.2	2.5	0.0276
7	9	15.0	0.3	0.5	0.0000
8	9	15.0	0.3	1.5	0.0179
9	9	15.0	0.3	2.5	0.0389

마찰실험 조건의 변화에 따른 디스크 마멸량에 대한 예측이 가능할 것으로 생각된다.

3-2. 수학적 모형에 의한 디스크 마멸량 예측

디스크 예측 마멸량을 나타내는 수학적 모형인 회귀식의 검증을 위하여 디스크에 방열 홀 개수 9개를 뚫어 디스크 브레이크 마찰실험을 하여 Table 7과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 5는 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰실험에 있어서 마찰인자인 방열 홀 수 0개, 3개, 6개 및 9개로 설정하여 작용하중, 미끄럼 속도와 미끄럼 시간으로 이루어진 회귀방정식에 의한 예측 마멸량과 과 마찰실험을 통하여 얻어진 디스크 마멸량과의 관계를 나타낸 것이다. 이것은 회귀분석을 위한 실험계획과 동일한 수준으로 설정하여 실험한 후 특성치인 디스크의 마멸량에 대한 95% 신뢰구간과 회귀식에 의한 예측에 있어서 실제 마찰실험에서의 디스크 마멸량에 대한 95%

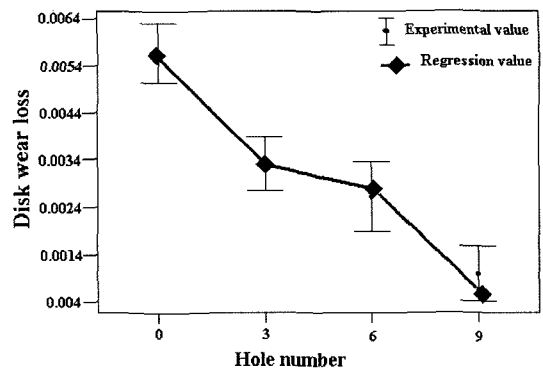


Fig. 5. Predict of disk wear loss with hole number.

신뢰구간의 범위에 포함되어 있다.

따라서 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰실험에 있어서 회귀분석에 의한 수학적 회귀모형은 디스크 마멸량에 미치는 마찰인자의 영향과 회귀식에 의한 마멸량 예측이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 이륜자동차의 디스크의 방열효과와내 마멸성을 향상시키기 위하여 방열 홀에 따른 마찰특성을 분석하였고, 마찰인자에 따른 상호 관계를 회귀분석법을 이용하여 디스크 마멸량을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회귀분석을 통하여 이륜자동차 디스크의 마멸 량에 대한 수학적 모형인 회귀방정식을 구축 하였다.
2. 디스크 마멸량에 대한 회귀식의 결정계수는 약 88%이상으로 설정한 마찰인자와 수준에 대한 마찰특성을 충분히 설명할 수 있다.
3. 본 연구에서 구축한 회귀식에 의한 디스크 마멸량 예측에 있어서 95%의 신뢰성을 가진다.
4. 본 연구방법은 자동차 부품의 마멸량을 추정하는데 적용할 수 있고, 실험단계에서 개선된 방법을 사용하여 실험하는데 유용하다.

참고 문헌

1. C. K. Kim and J. T. Hwang, "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, 1999.
2. J. T. 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.
3. Blau P. J., "Composition, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives," Oak Ridge National Laboratory, pp. 2-4, 2001.
4. 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.
5. M. A. Tanvir, "On the Cooling of Disk Brakes on a Train," Rail International, March, pp. 37-42, 1988.
6. M. Terhech, R.R. Menory and J.H. Hensler, "The Friction and Wear of Automotive Gray Cast Iron under Dry sliding Conditions," Wear180, pp. 73-78, 1995.
7. 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.
8. Taein Yeo, "A study on Wear Life Prediction of Disk Brake pads," KSAE, Vol. 10, No. 4, pp. 199-200, 2002.
9. 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.
10. 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.

1. C. K. Kim and J. T. Hwang, "Tribological Analysis on the Contact Behaviors of Disk Brakes Due to Frictional Heatings-Cooling Effects by Vent Holes,"