Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 2, April 2009, pp. 102~107
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

회귀분석에 의한 모터싸이클 브레이크 디스크의 열변형량에 관한 연구

류미라† · 변상민 · 박흥식‡
동아대학교 기계공학과

A Study on Thermal Deformation Volume of Motorcycle Brake Disk using Regression Analysis

Ryu Mi Ra†, Byoun Sang Min and Park Heung Sik‡
Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University
(Received January 20, 2009; Revised March 11, 2009; Accepted March 11, 2009)

Abstract – The thermal deformation volume of motorcycle break disk was studied using a disk-on-pad type friction tester. Thermal deformation volume of motorcycle break disk have an effect on the frictional factor such as applied load, sliding speed, sliding distance and number of ventilated disk hole. However, it is difficult to know the mutual relation of these factors on thermal deformation volume. In this study, the thermal deformation volume with ANSYS workbench are obtained by application of temperature from mechanical test. From this study, the result was shown that the motorcycle break disk with ventilated hole 3 have the most excellent thermal deformation characteristics. The regression equation with frictional factors which have a trust rate of 95% for prediction of thermal deformation volume of motorcycle break disk was composed.

Key Words – motorcycle, ventilated disk hole, thermal deformation volume, regression analysis

1. 서 론

현대인의 운송수단 중 하나인 이륜자동차의 제동 시스템은 디스크와 패드로 구성되어 있으며 주행하는 차량의 운동 에너지를 기계적인 마찰 에너지로 전환시킴으로서 차량을 안정하게 정지시키는 것을 목적으로 하고 있으므로 성능의 중요성이 커지고 있다. 정상적으로 작동되는 브레이크 디스크와 패드에서의 마찰에너지는 디스크와 패드 사이의 마찰면에 고르게 발생하다가 발산되지만, 비정상적인 경우에는 마찰열이 국부적으로 발생되고 마찰열도 불균일하게 발산됨으로 써 열적 불안정 현상을 발생시켜 궁극적으로 제동성능을 저하시킨다[1].

이처럼 브레이크 디스크와 패드사이의 마찰열은 디스크 표면에 급격한 온도변화를 발생시키고 그 결과 발생하는 열 변형과 마찰조건에 따라 열탄성마멸이나 열크랙이 발생하면서 자동차의 제동성능에 심각한 영향을 미치게 된다[2].

이러한 열변형 대책에 대한 연구로서는 열변형량을 최소화 할 수 있는 구조로 디스크를 설계하고자 하는 연구, 열원을 차단하거나 억제하는 방법을 적용하고자 하는 연구 그리고 열변형량을 예측하여 이를 보상하고자 하는 연구가 진행되어 왔다[3]. 이러한 연구 중에서 열변형량을 예측하여 보상하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있는데 이러한 연구들은 실험적인 방법과 해석적인 방법으로 구분할 수 있다.

실험적인 방법으로 온도 데이터와 열변형량 데이터를 매핑하여 임의의 온도에 대해 변형을 예측하는 방법에 관한 연구가 진행되어 왔지만 이 방법은 기계의 구조, 운전속도, 가공방법 등의 많은 요인에 영향을 받는다는 문제점을 가지고 있다. 해석적인 방법은 유한요

†주저자 : roriem@empal.com
‡책임저자 : Parkhs@dau.ac.kr

소법 또는 유한차분법들을 적용[4]하게 되지만 기계의 경계조건이나 입력 조건 등에 대한 부정확한 정보에 의해 많은 오차를 수반하게 된다. 이를 위하여 최근 다양한 분야에 널리 사용되고 있는 실험계획법인 회귀분석법에 의한 해석적인 방법[5-7]을 적용하게 되면 열변형량이 마찰조건에 따라 어떻게 분포하고 예측되는지 또한 이를 바탕으로 어떻게 보상되는지를 추정할 수 있으리라 예상된다.

따라서 본 연구에서는 이륜자동차의 디스크와 패드의 고체마찰의 속도 제어를 위한 마찰실험에 의한 온도변화 데이터를 해석프로그램의 온도제어 조건으로 적용시켜 열변형량 분포의 영향을 알아보고 회귀분석법을 사용하여 열변형량 예측을 위한 수학적 모델을 구축하고자 하였다.

2. 실험방법 및 해석방법

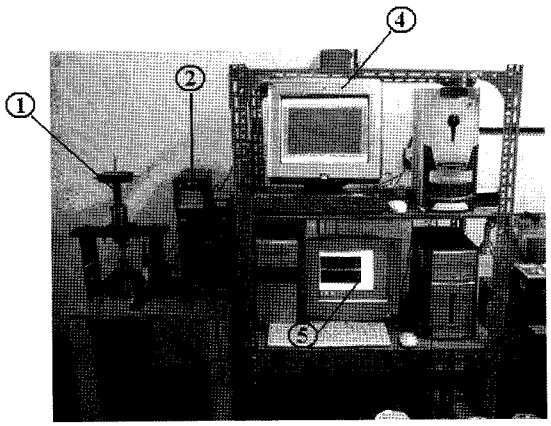
2-1. 실험 방법

본 연구에서는 마찰실험에 있어서 마찰조건이라 할 수 있는 이륜자동차 브레이크 디스크와 패드의 마찰특성에 영향을 미치는 작동조건 즉, 마찰인자를 선정하였다. 마찰인자로는 디스크의 방열 홀 수, 작용하중, 미끄럼 속도 및 미끄럼 거리로 실험횟수는 81번을 시행하였고, 각 인자에 대한 수준은 Table 1과 같이 마찰인자의 실험조건 설정하였다.

본 연구에 사용한 재료는 현재 이륜자동차 브레이크 디스크용 소재로 사용되고 있는 SUS 410M과 비석면계 패드를 사용하였다. 마찰실험을 위하여 Fig. 1의 수직형 건마찰시험기를 사용하였으며, 마찰시험에 사용된 이륜자동차 디스크와 패드 시험편은 실차의 약 1/10으로 축소시켜 직경 24 mm, 두께는 디스크 4 mm, 패드 5 mm로 가공한 후 표면조도를 0.5 μmRmax로 일정하게 하여 실험을 행하였다.

Table 1. 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 distance(m)	500	1500	2500



① Wear test equipment
② Thermocouple recorder
③ YD-10S digital indicator
④ Thermocouple recorder computer
⑤ Coefficient of friction measurement computer

Fig. 1. Photograph of wear experiment equipments.

그리고 본 실험에서 얻어진 온도 데이터를 이용하여 해석프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 마찰조건에 따라 열변형량이 어떻게 변화하는지를 조사하였다.

2-2. 열변형량 해석

열변형량은 마찰실험에서 발생되는 온도에 의하여 디스크와 패드가 변형이 일어나는 것으로써 열의 전도와 대류를 이용한다. 본 연구에서는 디스크와 접하는 대기는 외부로 빠져나가는데 그 대기에 의한 열량은 일정하다고 가정하여 해석하였으므로 열전도만을 사용하였고, 실험에서 얻어진 온도 변화를 해석에 적용하여 열변형량을 구하였다.

Fig. 2는 해석에서 사용한 모델 중 방열 홀이 3개인 것을 나타낸 것으로, (a)해석 모델, (b)외부가 대기와 접해 있다고 가정한 것이고, (c)지그와 접촉하는 부분으로 접촉에 의해 열이 빠져나가는 부분을 가정한 것이며, (d)패드와 접촉하는 디스크 표면의 열을 나타낸 것이다.

열 변형량은 재료에 열을 가했을 때 열에 의하여 변형이 생기는 정도로 열변형량이 적을수록 디스크의 변형이 적게 된다. 제동시 디스크와 패드의 마찰은 모두 열에너지로 변환된다고 가정하고 이때 발생한 열 에너지 즉, 열속(heat flux)을 마찰부위에 적용시켰으며 열속

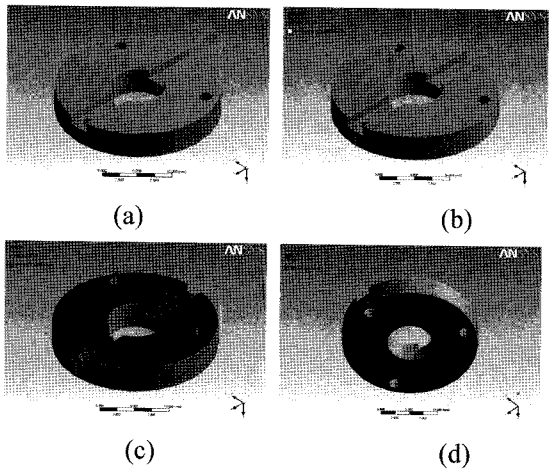


Fig. 2. Analysis model of motorcycle disk.

의 계산은 이륜자동차의 운동에너지를 이용하여 계산하였다. 초기속도 υ_1으로 주행하던 이륜자동차가 υ_2로 감속될 때 잃는 전 에너지는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$TRIANGLETE = \frac{1}{2}\left(m+\frac{I}{r^2}\right)(2\upsilon_1 - at)at \tag{1}$$

여기서, m은 디스크의 질량, r은 디스크의 반경, I는 디스크의 관성 모멘트, t는 시간이다. 이때 발생하는 에너지는 모두 열에너지로 전화되어 디스크와 패드에 각각 분배된다. 본 연구에서는 디스크로 가는 에너지만 필요하기 때문에 식 (2)와 같이 단위 시간당 단위 면적당의 디스크로 가는 열량을 계산하였다[8].

$$\frac{q = a\gamma\left(m+\frac{1}{r^2}\right)2\upsilon_1 - a(t_2+t_1)}{10\pi(R-R)} \tag{2}$$

여기서 α는 감속이고, R은 패드의 반경이다.

이륜자동차 브레이크 디스크의 변형이 일어나는 가장 큰 요인 중에 하나가 열변형량이다. 따라서 열변형을 예측하고 보상하기 위하여 본 연구에서는 식 (2)의 결과로 도출된 열변형량을 중회귀 분석을 행하였다.

중회귀분석은 이륜자동차 디스크 브레이크 마찰실험에서 디스크의 온도변화를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 주고 있는 독립변수(방열 홀 개수, 작용하중, 미끄럼 속도, 미끄럼 거리)를 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 규명하려는 통계적 분석방법이다. 이를 이용하게 되면 가공인자간의 정량적인 함수관계를 파악할 수 있다. 즉, 종속변수 y와 n개의 독립변수 $x_1, x_2, \cdots, x_n$에 대하여 i번째 종속변수 y_i는 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \tag{3}$$

여기서 각 인자에 대한 관찰점 i = 1, 2, … , n 이며, 는 미지의 모수이다. 그리고 는 오차값이며, 관찰점을 벡터로 표시하면

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

이며, n개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬표현식은 식 (4)와 같다.

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{4}$$

여기서

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

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

이다.

그리고 최소제곱법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면

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

가 되며, 이를 β로 미분하여 0으로 두면 다음의 결과를 얻을 수 있으며, 여기서 은 β의 최소 제곱 추정값의 벡터로서 $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \ldots, \hat{\beta}_k)$ 을 의미한다.

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

3. 해석 결과 및 고찰

3-1. 마찰인자에 따른 열변형량

본 연구는 마찰 실험에 의해서 얻어진 온도변화를 해석에 적용하여 열변형량을 구하였다.

Fig. 3은 미끄럼 속도 0.1 m/s, 미끄럼 거리 500 m로 일정하게 한 후 작용하중의 변화에 따른 방열 홀 수의 열 변형량을 나타낸 것이다. 그림에서 작용하중이 증가할수록 열변형량도 증가하며, 작용하중이 5 kg, 10 kg의 경우 방열 홀 수가 3개일 때가 열변형량이 적으며, 작용하중이 15 kg일 때는 방열 홀 수 6개 일 때가 열변형량이 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 작용하중 5 kg, 미끄럼 거리 500 m로 일정하게 하고, 미끄럼 속도의 변화에 따른 방열 홀 수의 열변형량을 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼 속도가 클수록 열변형량도 증가하며, 방열 홀 수가 3개의 경우가 열변형량이 가장 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 작용하중 5 kg, 미끄럼 속도 0.1 m/s로 일정하게 하고 미끄럼 거리의 변화에 따른 방열 홀 수의 열변형량을 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼 거리가 증가할수록 거의 비례적으로 열변형량도 증가하며, 방열 홀 수가 3개 일 때가 역시 열변형량이 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에서 마찰인자인 작용하중, 미끄럼 속도 및 미끄럼 거리가 증가할수록 열변형량이 증가하는 것은 이들 마찰인자가 증가하면 마찰열의 발생이 크기 때문이며, 또한 마찰인자의 증가에 따라 방열 홀 수가 3개일 경우가 열변형량이 적은 것은 다른 두 시험편보다 방열 효과가 크다는 것을 나타낸 준다. 여기서 방열 홀이 없는 것은 방열 홀이 있는 것에 비하여 디스크에 열 축적이 많아 디스크의 수축과 팽창이 크다는 것을 의미하며, 이것은 미끄럼 거리가 증가할수록 그 경향은 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 방열 홀이 6개인 경우는 오히려 방열 홀이 많아짐으로 인하여 공기의 흐름이 크게 되어 디스크의 수축이 방열 홀 수가 3개 보다 크기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 열변형량을 벡터로 표시한 것으로 (a)방열 홀 수가 0이며, 온도는 가장 높은 238.6℃를, (b)홀 수가 3개로써 온도는 제일 높은 274.8℃를, (c)방열 홀수가 6개로써, 온도는 가장 높은 296.7℃를 각각 입력하여 해석한 결과 디스크 외곽부분에 열변형량이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이를 통하여 브레이크 디스크의 열변형량은 외곽부분이 가장 높은 것을 알 수 있다.

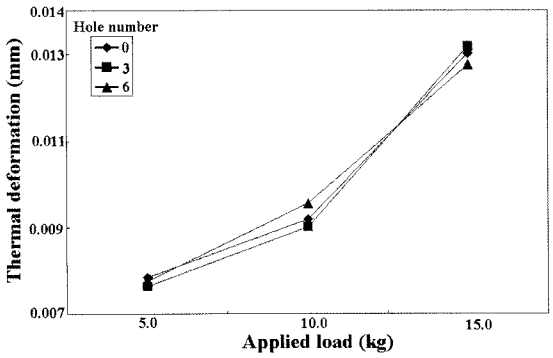


Fig. 3. Variation in thermal deformation with applied load.

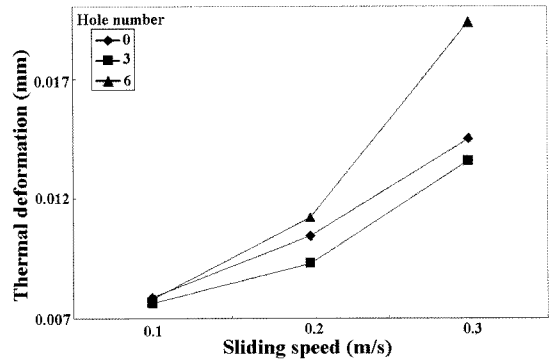


Fig. 4. Variation in thermal deformation with sliding velocity.

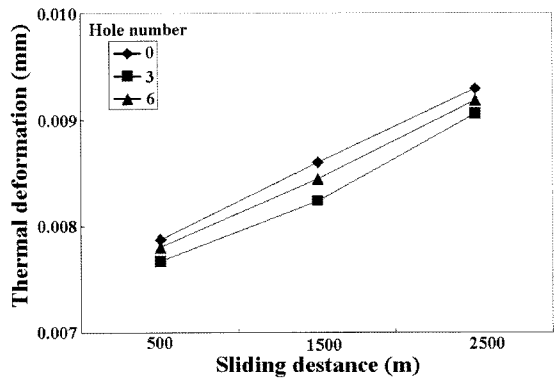
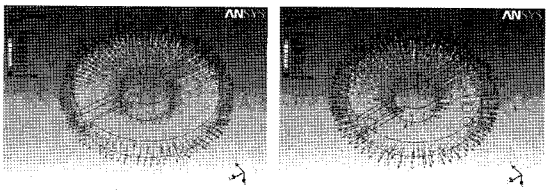


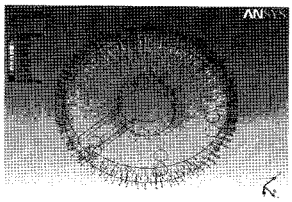
Fig. 5. Variation in thermal deformation with sliding distance.

3-2. 열 변형량 예측

본 연구에서는 이륜자동차 디스크와 패드의 마찰실험을 통하여 구한 온도변화를 해석에 적용하여 열변형량을 구하였다. 해석 후 디스크의 열변형량을 중회귀 분



a) Hold number 0 (b) Hold number 3



(c) Hold number 6

Fig. 6. Vector result of thermal deformation.

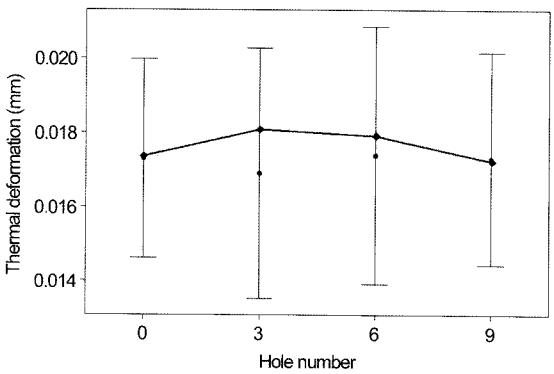


Fig. 7. Predict of thermal deformation volume with hole number.

석을 통한 수학적 모형으로 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_d = -0.00964 + 0.000014x_1 + 0.00114x_2 + 0.0666x_3 + 0.00134x_4 \quad (7)$$

여기서, x_1은 방열 홀 수, x_2는 작용하중, x_3는 미끄럼 속도, x_4는 미끄럼거리이다.

회귀분석을 통한 열변형량의 예측을 위한 수학적 모형인 회귀식 (7)을 검정하기 위하여 방열 홀 개수 9개를 가공하고, 실험계획과 동일한 수준으로 설정하여 실험을 하였고 실험한 온도 데이터를 이용하여 열변형량 해석을 하였다.

Fig. 7은 실험 후 온도데이터를 이용하여 해석한 특성치인 디스크의 열변형량에 대한 95%신뢰구간과 회귀분석에 의한 회귀식을 이용하여 디스크의 열변형량에 대한 예측을 나타낸 것이다. 그림에서 회귀식에 의한 예측은 해석한 디스크의 열변형량에 대한 95%신뢰구간의 범위에 포함되고 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 회귀분석을 통한 수학적 모형을 이용하여 열변형량에 대한 특성을 충분히 설명하고 있으며 방열 홀수에 따른 열변형량의 예측을 위한 회귀식 식 (7)은 충분한 타당성을 가진다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 이륜자동차의 디스크와 패드의 마찰실험에 의한 온도변화 데이터를 해석 프로그램에 적용시켜 열변형량 분포의 영향을 조사하고 회귀분석법을 사용하여 열변형량 예측을 위한 수학적 모델을 구축한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방열 홀 수에 따라서 마찰인자들을 변화시켜 열변형량을 분석한 결과 방열 홀 수가 3개일 때 열변형량이 적다.

2. 열변형량 그래프를 벡터로 표시하여 나타낸 결과 디스크 외곽부분이 가장 많은 변형량을 나타내었다.

3. 본 연구에서 구축한 회귀모형식을 이용하면 디스크의 열변형량 예측이 가능하다.

4. 본 연구방법은 자동차의 구동부품에도 적용할 수 있고, 실험단계에서 개선된 방법을 사용하여 실험하는데 유용할 것이다.

후 기

본 연구는 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Sun Ho Kim, Tae Jo Ko and Jung Hwan Ahn, "Prediction System of Thermal Errors Implemented on Machine Tools with Open Architecture Controller", KSPE Vol. 25, No. 5, pp. 52-59, 2008.
2. 김대열, 김경훈, 최명진, "형상변화에 다른 디스크 브레이크 열응력 해석", 한국정밀공학회 2006년도 추계학술대회논문집, p. 281, 2006.
3. Jin-Taek Kim, "A Study of Thermal Behaviors on the Effect of Aspect Ratio of Ventilation Hole in Disk Brake" KSTLE Vol. 8, No. 6, pp. 384-388, 2002.

4. A. Floquet and M. C. Dubourg, "Nonaxisymme- tric Effects for Three Dimensional Analysis of Brake", ASME Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 401-408, 1994.
5. Tae Hee Lee, Kwangki Lee and Sang Jin Jeong, "Optimal Design for the Thermal deformation of Disk Brake by Using Design of Experiments and Finite Element Analysis", KSME Vol. 25, No. 12, pp. 1960-1965, 2001.
6. Draper, N.R. and Smith. : Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
7. Seber, G.A.F.: Linear Regression Analsis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
8. 김형훈, 이성욱, 한동섭, 한근조, 심재준, "원주 가압형 디스크의 형상변화가 온도분포에 미치는 영향에 관한 연구" 한국자동차공학회 2007년 추계학술대회 논문집, pp. 1444-1449, 2007.