

# 다꾸지 기법에 의한 이륜자동차 브레이크 디스크의 마찰특성에 관한 연구 A Study on Friction Characteristics for Motorcycle Disk Using Taguchi Experimental Design

전환영·류미라·이상재·박홍식

H. Y. Juen, M. R. Ryu, S. J. Lee and H. S. Park

**Key Words** : Brake Rotor(브레이크 로터), Disk Brake(디스크 브레이크), Hot Sports (적열점), Judder(저더, 이상 떨림), Motorcycle(이륜자동차), Taguchi Robust Experimental Design(다꾸지 기법), Ventilation Hole(벤트, 통풍구)

**Abstract** : The effect of manufacturing parameters on wear and improve cooling of motorcycle break system was studied using a disk-on-pad type friction tester. Such parameters conditions have an effect on the wear and improve cooling factor such as applied load, sliding speed, frictional time and number of ventilated disk hole. However, it is difficult to know the mutual relation of these factor. In this study, the wear and cooling characteristics using design of experiment containing 4 elements were investigated for an optimal condition for the best motorcycle disk break system employing Taguchi robust experimental design. From this study, the result was shown that vents have an effect on convection area improving more cooling ability and reduced wear of the disk.

## 1. 서 론

자동차의 디스크 브레이크 시스템은 고압의 작용 하중으로 차량의 운동에너지를 열에너지로 변환하여 차량을 감속 시킨다. 제동과정에서 발생한 열에너지로 인하여 마찰부위를 중심으로 발생한 마찰열은 관련부품의 온도를 상승시켜 브레이크의 성능을 저하시키는 열 크랙과 페이드(Fade)현상 등의 원인이 된다. 또한 마찰부위의 온도 상승으로 발생한 부적절한열변형은 이상 떨림(Judder)현상과 적열점(Hot spots)<sup>1)</sup>을 유발시키는 가진원 역할을 하게 되었다. 브레이크 이상 떨림 현상은 제동시 디스크 마모로 인해 발생하는 두께변화가 마찰력의 변화를 유발시키는 현상이다. 따라서 이를 최소화하기 위하여 벤틸레이티드 디스크(Ventilated disk)의 형상을 개선하여 냉각효과를 높이는 방법, 복합재료의 개발하여 내마멸성과 열전도를 높이는 방법<sup>2,3)</sup>, 이상

떨림의 발생원인과 해결책을 위한 컴퓨터를 이용한 해석<sup>4)</sup>, 제조 과정 중에 발생하는 디스크의 잔류응력을 제거하는 등의 연구가 진행되고 있다.

이륜자동차용 벤틸레이티드 디스크는 자동차의 벤틸레이티드 디스크와 달리 디스크 마찰표면에 수직방향으로 여러 개의 벤트(Ventilation hole)를 가지고 있다. 벤틸레이티드 디스크에서 벤트는 디스크의 냉각성능 향상, 무게를 줄여주고, 디스크와 패드의 마찰에서 발생한 가스를 방출하거나 이물질 제거하는 기능을 한다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 이륜자동차의 디스크의 방열효과와 내마멸성을 향상시키기 위하여 벤트에 따른 마찰특성을 분석하고자 한다. 실험 및 분석방법은 마찰인자에 따른 상호관계를 다꾸지 기법<sup>6-8)</sup>을 이용하여 마찰온도와 마멸에 미치는 주요한 마찰인자를 분석하고 작동조건에 따른 변화를 분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 마찰 실험

본 연구에 사용한 재료는 현재 이륜자동차 브레이크 디스크용 소재로 사용되고 있는 STS410계열의 스테인레스강과 비석면계 패드를 사용하였다. 그

접수일 : 2005년 9월 2일, 채택확정 : 2006년 7월 25일  
전환영(책임저자) : 김해대학 기계차량계열  
E-mail : jhy1970a@naver.com Tel. 055-320-1713  
류미라 : 동아대학교 생산 및 제어 공학전공  
이상재, 박홍식 : 동아대학교 기계공학과

리고 이들 재료의 화학 조성을 Table 1, Table 2에 나타내었다.

마찰실험을 위하여 수직형 건마찰시험기를 사용하였으며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 마찰 시험에 사용된 이륜자동차 디스크, 패드 시험편은 실차의 약 1/10으로 축소시켜 직경 24mm, 두께는 4mm로 제작하였으며 Fig. 2와 같다. 실험 전 디스크와 패드는 표면조도를 0.1 $\mu$ m Ra로 일정하게 하여 마찰실험을 행하였다. 그리고 디스크 벤트수의 변화에 따른 분석을 위하여 작동하중, 미끄럼속도 및 마찰시간을 설정하여 실험을 실시하였다.

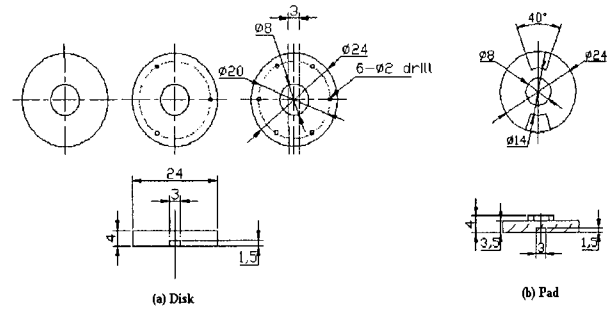


Fig. 2 Specimen of disk and pad

Table 1 Raw material ingredients used in this disk

Chemical compositions (wt.%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.194	0.302	0.401	0.023	0.029	10.457	0.341	0.121

Table 2 Raw material ingredients used in this pad

Chemical compositions (wt.%)	
Aramid fiber	2%
Glass fiber	8%
Sema fiber	15%
Barium sulfate	15 ~ 24%
Vermiculite	5%
Dry rubber	4 ~ 7%
Resin	7%
etc.	30 ~ 48%

그리고 디스크 통풍구의 변화에 따른 분석을 위하여 작동하중, 미끄럼속도 및 마찰시간을 설정하여 실험을 실시하였다. 그리고 두 시험편의 마찰특성을 비교하기 위한 마찰계수는 시험기의 디스크 시험편 홀드에 로드셀(Load-cell)를 부착하여 이의 마찰력 신호를 컴퓨터 내의 자체 구축한 마찰계수 알고리즘을 이용하여 측정하였으며, 표면조도는 Hommel Tester T100을 이용하여 Ra값으로 나타내었다. 조도는 디스크와 패드 표면 열 군데를 측정하여 평균한 값을 대표 값으로 취하였다. 그리고 마멸량은 1/1000g 까지 측정이 가능한 OHAUS의 Explorer를 이용하여 다섯 번을 측정하여 평균한 값을 대표 값으로 취하였다.

## 2.2 다꾸지 기법

본 연구에서 먼저 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 이륜자동차 브레이크 디스크-패드의 마찰특성에 영향을 미치는 작동조건 즉, 마찰인자를 선정하였다. 마찰인자로는 디스크의 벤트, 미끄럼속도, 작용하중, 마찰시간으로 선정하였고, 각 인자에 대한 수준은 Table 3에 나타내었다. 그리고 다꾸지 기법의  $L_9(3^4)$  직교 배열표를 이용하여 실험계획을 수립하여 마찰실험을 실시하였다. 여기서 수준은 본 연구에서 설정한 마찰인자의 실험조건의 설정값을 나타내고 있다.

다꾸지 기법은 직교 배열에 의한 보통 완전요인 설계 수준조합들의 일부분만을 요구하는 실험설계 방법이라 할 수 있다. 다꾸지 설계에서 배열은 직교적인 데 이것이 의미하는 바는 요인 수준들에 동등한 가중치들이 부여되도록 설계가 균형되어 있다는 것이다. 이로 인하여, 직교 배열에서는 각 요인이 다른 모든 요인들과 독립적으로 평가될 수 있다. 따라서 최소의 실험을 통하여 최대의 정보를 얻을 수 있으므로 다른 실험계획에 비하여 시간과 비용면에서 효율적이다.

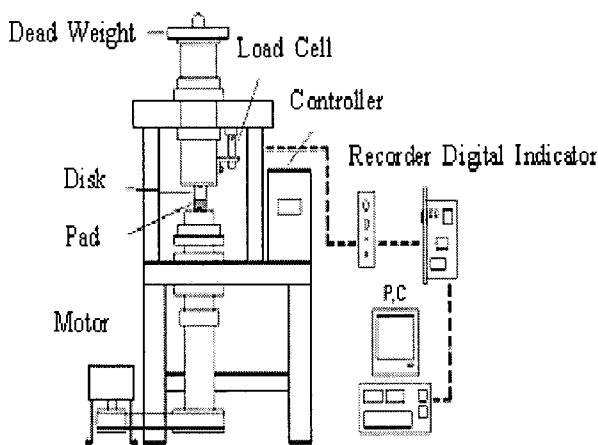


Fig. 1 Schematic diagram of vertical wear test

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$y = \beta M \quad (2)$$

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

$$S/N = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (4)$$

이륜자동차 브레이크 디스크용 소재의 마찰실험에서의 특성치인 마찰계수, 마멸량은 마찰인자 즉, 미끄럼속도, 작용하중 및 마찰시간에 따라 많은 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 각 마찰인자의 변화에 따른 마찰계수는 식 (1)의 표준편차(STDEV)를 이용하여 구하였고, 마찰계수의 동특성을 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 망대특성을 분석하였고 디스크와 패드의 마멸량은 식 (4)에 의한 망소특성으로 분석하였다.

S/N비의 단위는 통신에서 사용되는 데시벨(dB)단위를 사용하며 S/N비는 높을수록 좋고 기울기의 변화가 클수록 작용하중에 많은 영향을 미친다. 다투기 기법을 위한 S/N비를 연구하는 인자는 크게 S/N비를 구하기 위한 신호인자와 잡음인자, S/N비를 비교하기 위한 제어인자인 표시인자로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 망소, 망대, 동특성의 S/N비를 이용하므로 제어인자와 신호인자를 고려했다.

Table 3 Experimental conditions

Factors		Level		
		1	2	3
A	Ventilation hole	solid (0-Hole)	3-Hole	6-Hole
B	Sliding speed(m/s)	0.1	0.2	0.3
C	Applied load(kg)	5	10	15
D	Frictional time(min)	30	60	90

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 마찰인자에 따른 마찰계수 분석

##### 3.1.1 마찰계수의 변화

브레이크 시스템에서 일정한 수준의 마찰계수를 가져야 하며, 마찰조건의 변화에도 그 값은 일정한 범위에서 유지되어야 한다.

Fig. 3은 미끄럼시간에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 실험조건은 6-Hole 디스크, 작용하중 5kg, 미끄럼속도 0.2m/sec이다. 초기 마찰상태는 마찰계수의 진폭이 작고 급격히 증가하고 있으며 미끄럼시간이 4분 이상에서는 진폭이 크고 일정한 마찰계수를 나타내고 있다.

디스크의 초기마찰 상태에서 마찰계수가 급격히 증가하는 것은 실 접촉면의 running-in 과정이며 이후 안정적인 마찰 트랙면을 형성되어 마찰계수가 일정한 진폭으로 형성되고 있다고 생각된다.

마찰계수의 진폭이 크다는 것은 일정한 작용하중에서 마찰계수의 변화가 크다는 것을 나타내고 있다. 이는 마찰계수의 동특성으로 분석하고자 한다. 브레이크 디스크와 패드는 마찰계수가 높을수록 제동성능이 양호하다고 할 수 있으며 이에 따라 다투기 기법의 망대특성으로 마찰인자를 분석하였다.

Fig. 4는 평균마찰계수에 대한 망대특성을 식(3)을 이용하여 S/N비로 나타내었다. 마찰계수에 영향이 가장 큰 인자로는 작용하중으로 나타나있으며 마찰시간, 미끄럼 속도, 디스크 홀의 순으로 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

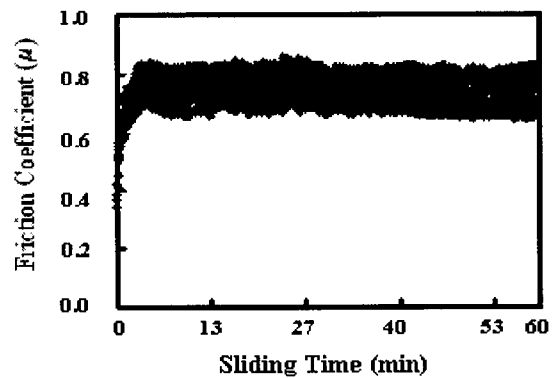


Fig. 3 Variation in friction coefficient sliding time (6-Hole disk, Applied load : 5kg, Sliding speed : 0.2m/sec)

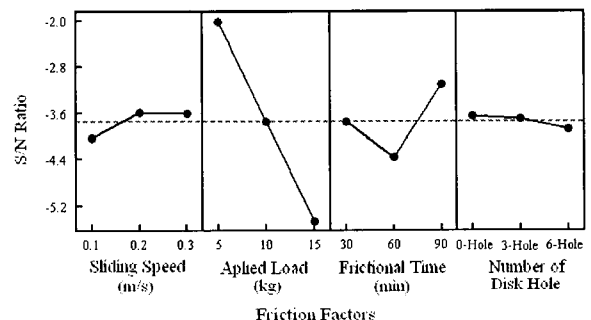


Fig. 4 S/N ratio of average friction coefficient

작용하중이 클수록 마찰계수는 떨어지고 있으며 이는 작용하중의 증가에 따른 마찰면의 온도가 증가하여 디스크와 패드의 연화로 인한 결과라 생각된다.

마찰시간에 따른 마찰계수의 변화에 있어서는 마찰시간이 60min일 때가 가장 낮은 마찰계수를 나타내고 있다는 것 볼 수 있다. 이는 마찰트랙면의 온도가 급격히 상승되어져 디스크와 패드의 접촉면이 열탄성 마멸로 인하여 안정화 되지 못한 결과이다.

### 3.1.2 마찰계수의 동특성

Fig. 5는 작용하중을 신호인자로 설정하고 마찰계수와 식 (1)에 의한 마찰계수의 편차에 대한 동특성 변화를 S/N비로 나타내었다. 마찰계수의 동특성 변화에는 마찰시간, 벤트, 미끄럼속도 순으로 영향을 주고 있다. 마찰시간이 60min에서 마찰계수가 가장 낮은 마찰계수를 나타내고 있다는 것을 볼 수 있는데 이는 마찰트랙면의 온도상승과 접촉면이 불균일하여 발생된다고 생각된다.

Fig. 6 동특성의 기울기를 식(2)를 이용하여 나타낸 것으로 미끄럼속도, 마찰시간, 디스크 홀 순으로 영향을 주고 있다. 미끄럼속도가 증가할수록, 마찰시간이 90min, 솔리드(0-Hole) 디스크에서 기울기 값이 크므로 최적 수준임을 확인 할 수 있다. 따라서 마찰계수의 편차가 적게 발생된다.

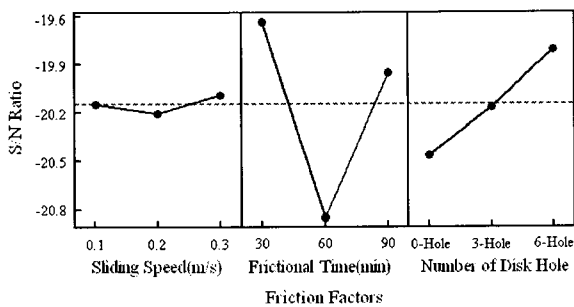


Fig. 5 S/N ratio of dynamic characteristics (signal factor : Applied load)

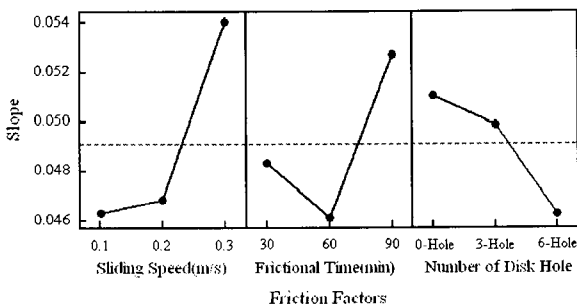


Fig. 6 Slope of dynamic characteristics

Fig. 5와 Fig. 6을 통하여 작용하중의 변화에 따른 마찰계수의 분석결과 마찰계수가 크게 발생하는 조건은 마찰시간 30min, 미끄럼속도 0.1m/sec, 6-Hole디스크이며 마찰계수의 편차가 적게 발생하는 마찰조건은 마찰시간과 미끄럼속도는 동일하나 솔리드(0-Hole) 가장 적다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 마찰인자에 따른 디스크 및 패드 마모량 분석

Fig. 7과 8은 디스크와 패드의 평균마모량에 대한 망소특성을 식(4)를 이용하여 S/N비로 나타내었다. 각 인자의 기울기의 변화가 큰 것이 신호인자에 가장 큰 영향을 미치며, 각 인자에서 S/N비의 값이 큰 것이 좋은 것이다. 따라서 마모량에 영향이 가장 큰 인자는 미끄럼속도로 나타나고 있으며 작용하중, 마찰시간, 디스크 홀의 순으로 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 미끄럼 속도에서 S/N비가 가장 작은 0.3m/s, 즉 미끄럼 속도가 빠를수록 마모량이 많아지고 있으며 이는 미끄럼속도의 증가에 따른 관성( $kg \cdot m^2$ )과 각 속도( $rad/s$ ) 제곱에 반비례하는 결과라 생각 된다. 그리고 하중의 증가는 온도의 상승을 가져오므로 경도가 낮아져 마모량에 영향을 미치므로 마모량은 S/N비 그래프에서 마찰시간과 작용하중이 높은 수준으로 갈수록 S/N비 값이 작아지므로 마모량의 증가에 많은 영향을 주고 있다고 판단할 수 있다. 미끄럼속도에 따른 마모량의 분석결과 마모량이 발생하는 디스크의 조건은 작용하중 15kg, 마찰시간 90min, 솔리드(0-Hole) 디스크이며 패드는 작용하중 15kg 마찰시간 90min, 6-Hole이다. 솔리드(0-Hole) 디스크 일 때 마모량이 많은 이유는 디스크와 패드 표면이 돌기에 의해 접촉이 될 때 응착과 연삭에 의한 마모가 일어날 수 있고, 접촉의 임계 접촉수를 지난 후 돌기는 피로 때문에 떨어져 마모 입자를 만들기 때문이라는 것을 알 수 있다.

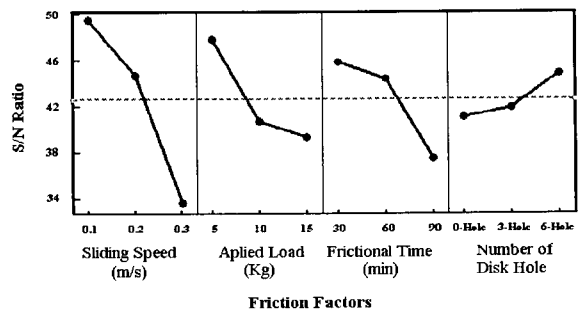


Fig. 7 S/N ratio of average disk wear

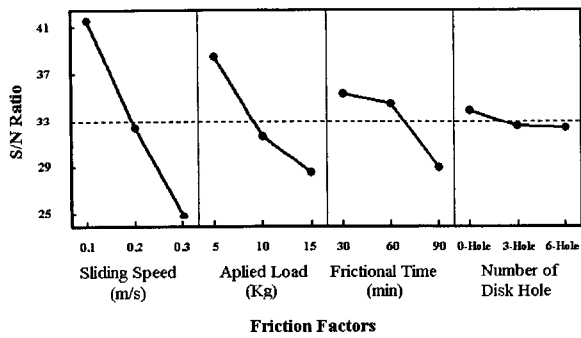


Fig. 8 S/N ratio of average pad wear

이러한 마모입자를 솔리드(0-Hole) 디스크에서는 벤트가 없어서 입자를 제거하지 못하여 마모에 영향을 많이 주었고, 온도가 다른 종류의 디스크보다 높아 온도 상승으로 인한 디스크의 경도가 낮아짐으로서 마모량이 증가한 것으로 생각된다. 그리고 6-Hole 디스크와 접촉한 패드의 마모량이 많은 이유는 벤트가 많아 온도의 상승을 억제하여 디스크의 경도가 다른 디스크에 비해 높아 상대적으로 패드의 마모량이 증가한 것으로 생각된다.

### 3.3 디스크 및 패드의 표면조도 분석

Fig. 9와 10는 디스크와 패드의 평균표면조도에 대한 망소특성을 식(4)를 이용하여 S/N비로 나타내었다. 디스크 및 패드의 표면조도에 영향이 가장 큰

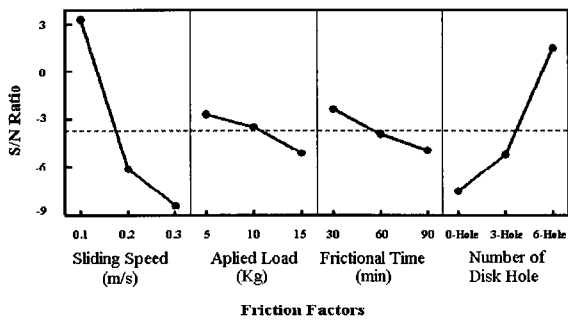


Fig. 9 S/N ratio of average disk surface roughness

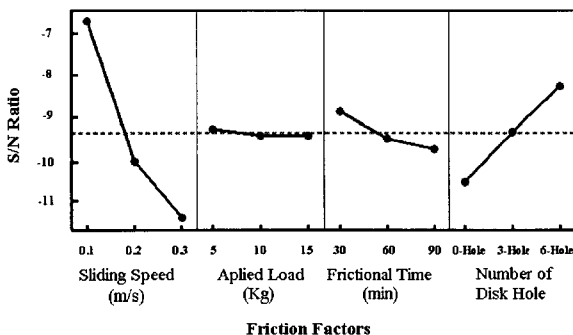


Fig. 10 S/N ratio of average pad surface roughness

인자는 미끄럼속도로 나타나고 있으며 디스크 홀, 마찰시간, 작용하중의 순으로 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 속도가 빠를수록 벤트의 수가 작을수록 온도 상승으로 인한 마모의 증가로 마모 입자가 표면에 영향을 주어 표면조도가 나빠짐을 알 수 있다.

## 4. 결 론

이륜자동차의 벤틸레이티드 디스크는 벤트로 인한 체적감소로 디스크의 열적용량이 감소하지만 설계 시 온도상승과 방열효과를 고려하여 방열면적을 넓히면서 체적감소를 줄이는 방법으로 벤트의 크기 및 수량을 설계한다면 솔리드 디스크보다 벤틸레이티드 디스크가 적당한 마찰계수를 유지 할 수 있고 냉각성능 또한 우수 할 것이라 생각된다. 따라서 디스크와 패드의 마찰실험을 통하여 마찰인자의 수준 변화 따른 마찰계수의 변화와 디스크에 발생하는 온도변화, 디스크와 패드의 마모량 변화를 다루기 기법을 이용하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 디스크와 패드의 마찰작용에 있어서 마찰계수에는 마찰인자인 작용하중, 마찰시간, 미끄럼속도, 디스크 홀의 순으로 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
2. 작용하중에 따른 마찰계수와 그에 따른 동특성에 을 분석한 결과 마찰시간 30min, 미끄럼속도 0.1m/sec, 6-Hole디스크 일 때 마찰계수가 높게 발생하며 동일한 조건에서 솔리드(0-Hole) 디스크일 때가 마찰 계수의 편차가 적다는 것을 알 수 있다.
3. 디스크와 패드의 마찰작용에 있어서 마모량에는 마찰인자인 미끄럼 속도, 작용하중, 마찰 시간, 디스크 홀의 순으로 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다
4. 디스크와 패드의 마찰작용에 있어서 표면 조도에는 마찰인자인 미끄럼 속도, 디스크 홀, 마찰시간, 작용하중의 순으로 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. A. Vries and M. Wagner, "The Brake Judder Phenomenon", SAE Technical Paper Series,

- SAE 920554(SP-914), pp.25-33, 1992.
2. M Terhech, R.R. Menory, and J.H. Hensler, "The Friction and Wear of Automotive Gray Cast Iron under Dry sliding Conditions", *Wear*180, pp73-78, 1995.
  3. 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.
  4. Taein Yeo, "A study on Wear Life Prediction of Disk Brake pads", *KSAE*, Vol.10, No.4, pp199-200, 2002.
  5. 최원락외 3명, "모터싸이클 디스크 브레이크 온도 및 열변형 해석을 통한 형상설계," 한국자동차공학회, 춘계학술대회논문집, pp.680-681, 2002.
  6. R. E. Bechhofer and C. W. Dunnett, "Percentage Points of Multivariate Student Distributions", *Selected Tables in Thematical Studies*, American Mathematical Society, Providenca, R.I., Vol.11, pp.57-87, 1988.
  7. 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.
  8. G. Taguchi, "Introduction to Quality Engineering", American Supplier Institute, Inc., Michigan, pp.58-110, 1987.