알루미늄 디스크 브레이크의 성능 실험 및 해석에 관한 연구

류미라*, 이대희#, 이성범**, 박정호***, 심재준****

(*,#,**인제대학교,***문성대학교,****부산과학기술대학교)

Study on Performance Experiment and Analysis of Aluminum Disc Brake

Mi-Ra Ryu*, Dae-Hee Lee#, Seong-Beom Lee**, Jeong-Ho Park***, Jae-Joon Shim****

(Received 2 September 2013; received in revised form 4 December 2013; accepted 12 December 2013)

ABSTRACT

The present research aims to develop aluminum disc brakes to replace existing cast iron disc brakes in automobiles. The foundation for developing an aluminum disc is laid by investigating the performance characteristics of existing cast iron disc brakes and comparing those characteristics with those of aluminum disc brakes. This study involves FEM thermal/structural analysis of disc materials and experimental tests using a brake dynamometer. The results of this study show that, aluminum discs have not only better thermal/mechanical properties than existing cast iron discs, including better heat, wear, and crack resistance, but also that aluminum discs weigh less than existing cast iron discs, which results in improved maneuverability. Aluminum discs will become a more essential part of automobiles as electric cars become the major means of transportation.

Key Words : Brake Disc(브레이크 디스크), Aluminum(알루미늄), Brake Dynamometer(브레이크 다이내모), Strength(강도), Wear(마모), Thermal analysis(열해석)

1. 서 론

* Advanced Vehicle core parts Research Group, Inje University

Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, High Safety Vehicle Core Technology Research Center, Inje University

E-mail : mechdho@inje.ac.kr

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, High Safety Vehicle Core Technology Research Center, Inje University

***Division of Automotive and Mechanical Engineering, Changwon Moonsung University,

****Division of Automobile and Busan Institute of Science and Technology

국내·외적으로 자동차 수의 급격한 증가로 인한 대기오염 및 지구 온난화가 심각해지고 있는 가운데, 현재 상용화되고 있는 주철 브레이크 디스크는 가공 후 디스크 코팅작업과 녹이 발생하여 심각한 환경공해를 유발하고 있다. 따라서 자동차 업계는 이러한 단점을 획기적으로 보완하여 기계적 성질과 외관 특성이 우수하고, 가공성이 뛰어난 환경 친화적인 브레이크 디스크 개발의 필요성을 절감하고 있다. 본 연구는 기존 제품의 이러한 문제점을 획기적으로 보완하여 디스크의 내마모성을 높이고 제동 특성을 향상시켜 승차감을 개선할 뿐

만 아니라, 디스크를 경량화하여 차량의 연비를 향상시키는 브레이크 디스크를 개발하는데 목적을 두고 있다^[1-3].

전 세계 알루미늄의 용도별 사용량은 수송 분야가 대부분의 지역에서 가장 큰 수요를 차지하고 있다. 일본에서는 수송용 다음으로 건축용, 포장용 순으로 수요비중이 큰 반면 미국은 수송용 다음으로 포장용 수요나 건축용 수요에도 큰 비중을 차지하고 있다. 유럽에서는 다른 지역과는 달리 기계 분야의 수요가 큰 것으로 나타나고 있다.

알루미늄은 경량성 뿐만 아니라 강도, 내식성 및 열전도도 등이 우수하여 자동차용 재료로 사용되면 최고 40%가량 경량화를 이룰 수 있으며, 종래 자동차 생산라인의 설비를 약간 혹은 그대로 사용할 수 있다는 장점으로 자동차 경량화를 위한 대체 재료로 주목받고 있다. 경량성 뿐만 아니라 90% 이상 자원 재활용이 가능한 알루미늄 합금은 급격한 산업화로 인해 초래된 자원고갈과 환경오염이라는 측면에서도 사용비율을 꾸준히 증가하였으나 90년대에는 6~12%로 증가하였으며, 최근에는 사용비율이 15%이상으로 꾸준히 증가하였다^[4].

국내·외에서 자동차 경량화에 많은 연구개발이 진행되고 있으며, 주로 재활용 측면에서 알루미늄 합금이 경량화의 주요 소재로 사용되고 있다. 자동차의 경량화 시에 스프링 하 질량(Under Spring Mass)을 경량화시키면 승차감이 향상되고, 자동차의 연비 향상에 따른 고성능화에 큰 효과를 거둘 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 주철 브레이크 디스크(Matiz)와 알루미늄 6061, 7075 디스크를 제작하여 제동성능 실험과 열해석을 비교 분석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 브레이크 시스템

주행하는 차량을 정지시키기 위해 브레이크 페달을 밟으면 페달의 레버비 만큼 곱한 힘이 부스터의 푸쉬 로드를 누르게 되고, 이 힘은 부스터 내부에서 배력되어 마스터 실린더를 통하여 액압으

로 변환하여 브레이크 파이프, 조인트 그리고 브레이크 호스트를 거쳐 전륜은 캘리퍼내의 피스톤으로 후륜은 전·후륜 제동력 배분에 맞게 설계된 유압 콘트롤 밸브를 통하여 감압된 적정한 유압이 드럼 브레이크 내의 휠 실린더로 전달되어 피스톤을 작동시키거나, 브레이크 디스크가 장착된 경우에는 캘리퍼내의 피스톤을 작동시킨다^[5].

승용차에 적용되고 있는 브레이크에는 브레이크 디스크와 드럼 브레이크 그리고 디스크와 드럼의 장점을 고안한 드럼 인 햇 형 브레이크(Drum in Hat)가 사용되고 있다.

Fig. 1은 브레이크를 나타내었으며, 브레이크 효력 성능은 여러 가지 사용 조건하에서 마찰계수의 변화가 적고 안정되어야하므로 자동차 제작사에서는 성능에 대한 목표치를 정립하여 설계에서부터 평가에 이르기까지 기준을 만족하도록 육성하고 있다. 본 연구에서는 북미 법규인 FMVSS 135를 사용하고 있다.

FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standards)는 National Traffic and Motor Vehicle Safety Act of 1966(80 Stat. 718)에 의해 제정된 자동차 및 관련 설비·기기에 관한 규제로 모든 주에 적용되고 있다. CFR Title 49 "Transportation", Part 571 속에 규정된다. 규격은 3자리 숫자로 표시. MVSS규격으로 불리우는 경우도 있다. 그 중 FMVSS 135는 라이트 차량의 브레이크 시스템에 대한 규제이다.

Fig. 1 Disc brake assembly

2.2 알루미늄 특성

알루미늄의 경우 단일 소재로의 사용보다는 다양한 형태의 합금 및 복합재료 등으로 제조하여 사용할 경우 더 나은 기계적 특성을 보이는 것이 일반적이다. 특히 세라믹 강화 복합소재의 경우 강도, 탄성률 등이 우수하고 낮은 열팽창계수를 갖는 특징으로 인하여 알루미늄합금의 대체소재로 개발이 활발하나 가격이 비싸고 제조상의 문제점으로 인한 한계를 가지고 있다.

알루미늄은 가볍고 열 및 전기의 양도체이고, 전성과 연성이 풍부하여 가공하기가 쉽다. 또한, 공기 중에서 녹이 잘 슬지 않으나 산과 알칼리에 부식되므로 전기 제품, 장식품, 합금용 재료, 식품 포장재에 사용하고 있다. 그러나 알루미늄의 기계적 성질은 좋지 못하여 알루미늄 합금을 많이 사용한다. 알루미늄의 열전도율은 Cu의 열전도율의 60% 이상이며, 가볍고 내식성이 있으므로 전선에 많이 사용된다. 순 알루미늄보다는 강도가 큰 합금선이 송전선 등에 이용하기도 한다. 알루미늄의 기계적 성질은 그 재료의 순도·가공도·열처리 조건·시험 온도 등에 따라 달라진다. 순도가 높을수록 연질이 되며, 불순물 중 문제가 되는 Fe, Si, Cu 등의 함량에 따라서 성질이 변한다.

또한, 알루미늄은 표면에 생기는 산화피막의 보호 작용 때문에 내식성이 좋다. 대기 중에서는 일반적으로 내식성이 좋으나 부식률은 대기 중의 습도와 불순물량·질 등에 영향을 받는다. 중성 수용액에서는 내식성이 좋으나 염화물 용액 중에서는 나빠진다. 산성용액 중에서는 수소이온농도의 증가에 따라 부식이 증가하고, 황산·회 질산·인산 중에서는 침식되며, 특히 염산에서는 빠르게 침식된다. 그러나 80%이상의 질산에는 잘 견디며, 질산이나 기타 유기산에는 내식성이 좋다. 암모니아수 중에서는 잘 견디나 기타의 알칼리수용액 중에서는 침식된다.

본 연구에서는 알루미늄 6061과 7075를 사용하여 실험하였다. 알루미늄 6061은 용접성 내식성이 용이하며 연강과 비슷하여 냉간 가공이 용이해서 형제 및 관 등 구조물에 널리 이용되고 있다. 또한, 7075는 알루미늄 2024보다 강도가 높으며 최고의 강도를 유지하며 항공기 용재, 구조재, 운동기

기, 고속 회전체 등에 사용되는 소재이다.

2.3 열해석^[6]

열 해석은 물체 내부의 온도가 변화하는 동안 물체 전체 혹은 물체 일부분의 강제된 움직임 때문에 발생하는 응력으로써 열의 전도와 대류를 이용한다. 그러나 본 연구에서는 대류를 가정하여 해석을 하였으므로 열의 전도만을 사용하였고, 실험에서 얻어진 온도 변화를 해석에 적용하여 열응력과 열변형량 결과를 구하였다.

열 응력은 물체 내부의 온도가 변화하는 동안 물체 전체 혹은 물체 일부분의 강제된 움직임 때문에 발생하는 응력으로써 열의 전도와 대류를 이용한다.

변위 함수와 관련된 변형률뿐만 아니라 온도변화, 용기 등의 다른 원인들에 의해서 발생하는 변형률이 물체 내부에 있을 수 있다. 그러나 온도변화에 의한 변형률 ϵ_T 만을 고려하면 초기 변형률 ($\epsilon_0 = \epsilon_T$), 선형응력-변형률 관계를 나타내고, 식 (1)을 얻는다.

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \epsilon_T \quad (1)$$

만약, 일반적으로 $1/E = D^{-1}$ 라고 한다면, 식 (1)은 식 (2)와 같이 일반 행렬 형태로 쓸 수 있다.

$$\epsilon = [D]^{-1}\sigma + \epsilon_T \quad (2)$$

식 (2)를 σ 에 대해 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_T) \quad (3)$$

단위 부피당 변형 에너지는 $\sigma - \epsilon$ 선도의 아랫부분 면적이다.

$$u_0 = \frac{1}{2}\sigma(\epsilon - \epsilon_T) \quad (4)$$

여기서, 식 (3)과 식 (4)를 이용하면 식 (5)와 같다.

$$u_0 = \frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon_T)^T D(\epsilon - \epsilon_T) \quad (5)$$

식 (5)에서 일반적으로, 행렬의 곱셈을 하기 위해서는 변형률 행렬의 전치행렬이 필요하다. 따라서 총 변형 에너지는 식 (6)과 같다.

$$U = \int_V u_0 dV \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하면 식 (7)을 얻는다.

$$U = \int_V \frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon_T)^T D(\epsilon - \epsilon_T) dV \quad (7)$$

이제 $\epsilon = Bd$ 를 사용하여 식 (7)을 정리하면 식 (8)과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V (Bd - \epsilon_T)^T D(Bd - \epsilon_T) dV \quad (8)$$

식 (8)을 풀어서 쓰면 식 (9)를 얻는다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V (d^T B^T D B d - d^T B^T D \epsilon_T - \epsilon_T^T D B d + \epsilon_T^T D \epsilon_T) dV \quad (9)$$

식 (9)의 첫 번째 항은 기계적 하중에 의한 응력 때문에 발생하는 보통의 변형 에너지이다. 즉, 식 (10)과 같다.

$$U_L = \frac{1}{2} \int_V d^T B^T D B d dV \quad (10)$$

식 (9)의 두 번째, 세 번째 항은 동일하므로 모두 식 (11)로 쓸 수 있다.

$$U_T = \int_V d^T B^T D \epsilon_T dV \quad (11)$$

식 (9)의 마지막 항은 상수이고 최소 포텐셜 에너지의 원리를 적용하면 식 (12)와 같이 없어진다.

$$\frac{\partial U}{\partial d} = 0 \quad (12)$$

그러므로 $U = U_L + U_T$ 라고 하고, 식 (10)과 식 (11)을 식 (12)에 대입하면 식 (13)과 식 (14)를 얻는다.

$$\frac{\partial U_L}{\partial d} = \int_V B^T D B d dV \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_T}{\partial d} = \int_V B^T D \epsilon_T dV = f_T \quad (14)$$

식 (13)의 적분항은 요소 강성행렬 k 의 일반적인 형태이고, 식 (14)는 요소 내 온도 변화 때문에 발생하는 하중 혹은 하중 벡터라는 것을 알 수 있다.

또, 열변형량은 재료에 열을 가했을 때 열에 의하여 변형이 생기는 정도로 열변형량이 적을수록 디스크의 변형이 적게 된다. 제동 시 디스크와 패드의 마찰은 모두 열에너지로 변환된다고 가정하고 이때 발생한 열 에너지 즉, 열속(heat flux)을 마찰부위에 적용시켰으며 열속의 계산은 모터사이클의 운동에너지를 이용하여 계산하였다.

초기 속도 v_1 으로 주행하던 모터사이클이 v_2 로 감속될 때 잃는 전 에너지는 식 (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta TE = \frac{1}{2}(m + \frac{I}{r^2})(2v_1 - at)at \quad (15)$$

여기서, m 은 디스크의 질량, r 은 디스크의 반경, I 는 디스크의 관성 모멘트, t 는 시간이다. 이때

발생하는 에너지는 모두 열에너지로 전환되어 디스크와 패드에 각각 분배된다. 본 연구에서는 디스크로 가는 에너지만 필요하기 때문에 식 (16)과 같이 단위 시간당 단위 면적당의 디스크로 가는 열량을 계산하였다.

$$q = \frac{a\gamma(m + \frac{1}{r^2})2v_1 - a(t_2 + t_1)}{10\pi(R_0^2 - R_i^2)} \quad (16)$$

여기서 a 는 가속도이고, R 은 패드의 반경이다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 브레이크 디스크 제작

본 연구에서는 가공성이 좋은 Al 6061과 7075를 기존에 상용화된 Matiz와 동일하게 제작하였다. Fig. 2는 제작할 알루미늄 디스크의 2차원 도면을 나타낸 것이고 이 도면을 바탕으로 Fig. 3과 같이 알루미늄 환봉을 이용하여 가공을 하였다. 브레이크 디스크 제작에서 다이캐스팅 제작과 환봉으로 제작한 것은 기계적 성질이 다르므로 Table 1과 같이 알루미늄 6061과 7075의 기계적 성질을 나타내었다.

3.2 브레이크 다이내모메타

Fig. 2 Drawings of brake discs

Fig. 3 Brake disc production process

Table 1 Mechanical properties of Aluminum

	Tensile yield strength	Ultimate tensile strength	Elongation	Brinell hardness
	MPa	MPa	%	-HB
6061	55	124	25	30
7075	103	228	16	60

Fig. 4 Brake Dynamometer

Fig. 4는 실험 장치를 나타낸 것으로 유압으로 가동하는 브레이크 시스템의 성능을 시험하는 장비이다. 승용 및 상용 차량에 장착되어있는 브레이크 부품의 성능 시험, 내구 시험을 수행하고, 실차 시험에서 실시한 시험결과를 이용하여 다이내모메타 상에서 동일한 실차 시험조건으로 브레이크 성능 시험을 수행한다. 국제 규격(JASO, FMVSS) 및 각 업체에서 요구하는 부품의 성능 조건을 만족시키는 성능 시험 및 내구 시험을 수행하는데 본 연구에서는 FMVSS 135를 사용하고 있다. 또, 브레이크 다이내모미터 시스템에서의 시험은 국제 규격

및 부품업체의 성능 규격을 기초로 하여 burnish test, wear test, high speed wear test, water recovery test, parking brake test 등의 시험을 수행한다.

3.3 실험조건

본 연구에서는 기존에 상용되고 있는 디스크와 Al 6061, 7075재료를 사용하여 가공한 디스크를 사용하여 FMVSS 135규격을 바탕으로 제동성능을

실험하였다.

실험 시편은 기존에 상용되고 있는 마티즈와 가공한 Al 6061과 7075를 사용하였으며 패드는 기존에 상용되고 있는 것을 사용하여 Fig. 5에 나타내었고, 디스크의 무게를 Table 2에 나타내었고, 패드의 무게는 280 g이다.

Table 3는 FMVSS 135규격을 나타내고 있는데 토크를 0.3에서 0.9까지 변화를 주어서 마찰계수와 온도를 결과를 나타내었다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 제동성능 실험

본 연구에서는 브레이크 다이내모메타를 사용하여 디스크의 제동성능을 시험하여 마찰계수, 온도의 결과를 얻었다. 실험 후 디스크의 무게를 측정하여 Table 4에 나타내었는데 각 소재의 마찰계수와 밀도를 식(17)로 계산하여 Table 5로 나타내었다.

$$V = \frac{W}{\rho \times g} \quad (17)$$

여기서, V 는 부피, W 는 무게, ρ 는 각 소재의 밀도 인데 Matiz의 밀도는 7.87 g/cm^3 이고, Al 6061과 Al 7075의 밀도는 2.7 g/cm^3 이다. 중력가속도는 980 cm/s^2 이다.

식 (17)에 의해서 계산 한 결과 Matiz가 마모량이 가장 적고 Al 7075, Al 6061순으로 마모량이 많은 것을 알 수 있었다.

Table 6에서 8은 실험의 결과는 나타내고 있는데

Fig. 5 disc and pad

Table 2 Disc weight of previous experiments

	Matiz	Al 6061	Al 7075
Wight (g)	3630	1415	1460

Table 3 Standard of FMVSS 135

Item	Velocity (km/h)	Retardation (g)	Braking Temperature (°C)	Interval (sec)	Number of Braking
Burnish	80	0.3	100		200
Base Line	100	0.9	80		6
Fade	120→60	0.3	65	45	15

Table 4 After the experiment, the disc weight

	Matiz	Al 6061	Al 7075
Wight (g)	3615	1385	1450

Table 5 The wear of the disk

	Matiz	Al 6061	Al 7075
Volume (cm^3)	1.9×10^{-3}	11.3×10^{-3}	3.8×10^{-3}

Table 6 Result of Matiz

Torque ($N \cdot cm$)	Coefficient of friction	Temperature ($^{\circ}C$)
0.3	0.370	188
0.4	0.360	202
0.5	0.345	212
0.6	0.329	220
0.7	0.315	229
0.8	0.302	212

Table 7 Result of Al 6061

Torque ($N \cdot cm$)	Coefficient of friction	Temperature ($^{\circ}C$)
0.3	0.409	217
0.4	0.375	229
0.5	0.349	240
0.6	0.327	249
0.7	0.311	255
0.8	0.296	261

Table 8 Result of Al 7075

Torque ($N \cdot cm$)	Coefficient of friction	Temperature ($^{\circ}C$)
0.3	0.429	232
0.4	0.444	234
0.5	0.442	243
0.6	0.403	249
0.7	0.359	256
0.8	0.319	259

Table 6은 기존의 상용화 되어 있는 마티즈 디스크, Table 7은 Al 6061디스크, Table 8은 Al 7075 디스크의 결과를 나타내고 있다. 결과를 바탕으로 각각의 디스크의 마찰계수와 온도를 비교한 그래프를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 4는 각각의 디스크의 마찰계수를 비교하였는데 토크가 클수록 마찰계수가 내려가는 것을 알 수 있고, Al 7075가 마찰계수가 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 토크에 따른 온도를 나타내고 있는데

Fig. 6 Comparison of coefficient of friction vs. torque

Fig. 7 Comparison of temperature vs. torque

토크가 0.3일 때는 Al 7075의 온도가 높았으나 토크가 높을수록 Al 6061의 온도가 높아지는 것을 알 수 있다. 이 모든 결과로 보아 Al 7075가 마찰량은 Matiz보다 높지만 마찰계수가 높고, 토크가 클수록 온도가 작은 것을 알 수 있다. 브레이크 디스크는 제동성능은 Al 6061보다 마찰량이 적으면서 마찰계수가 높고 온도가 낮으면 좋은 디스크라고 할 수 있는데 이 조건에 가장 적합한 것은 Al 7075이라고 볼 수 있다.

4.2 열 해석

본 연구는 제동 성능 실험에 의해서 얻어진 온도변화를 해석에 적용하여 열응력과 열변형량 결과를 얻어서 경향성을 분석하였다. Table 9는 각 소재에 따른 열응력을 나타낸 것이고 Table 10은

Table 9 Result of thermal stress

Torque	Matiz (MPa)	Al 6061(MPa)	Al 7075 (MPa)
0.3	666.06	618.56	394.14
0.4	672.39	656.56	427.14
0.5	700.88	691.39	450.71
0.6	719.88	719.88	469.57
0.7	742.05	738.88	490.79
0.8	751.54	757.88	450.71

Table 10 Result of thermal deformation

Torque	Matiz (mm)	Al 6061(mm)	Al 7075 (mm)
0.3	0.66172	0.61444	0.25635
0.4	0.66803	0.65227	0.27801
0.5	0.6964	0.68694	0.29347
0.6	0.71531	0.71531	0.30585
0.7	0.73738	0.73423	0.31977
0.8	0.74683	0.75314	0.29347

Fig. 8 Comparison of thermal stress vs. torque

Fig. 9 Comparison of thermal deformation vs. torque

각 소재에 따른 열변형량을 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9는 Table 9, 10의 결과를 바탕으로 결과를 비교하기 위하여 그래프로 나타내었는데 Fig. 8은 각 소재를 토크에 따라 열응력을 비교한 결과 Al 7075가 Matiz와 Al 6061보다 현저히 열응력이 작을 것을 알 수 있다. Fig. 9는 각 소재의 토크에 따라 열변형량을 비교한 결과가 Al 7075가 Matiz와 Al 6061보다 현저히 열변형량이 작을 것을 알 수 있다. 열응력과 열변형량은 경향이 같은 것을 알 수 있고 토크에 따라서 비례하여 변형하는 것을 알 수 있으며 Al 7075가 결과가 가장 낮아서 디스크 소재로서 가장 적합한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 주철 브레이크 디스크와 알루미늄 6061, 7075 디스크를 제작하여 제동성능 실험과 열해석을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 브레이크 다이내모메타를 사용하여 디스크의 제동성능을 시험한 결과 Matiz가 마모량이 가장 적고 알루미늄 7075, 알루미늄 6061순으로 마모량이 많은 것을 알 수 있었다.
2. 브레이크 다이내모메타를 사용하여 디스크의 제동성능을 시험한 결과 마찰계수와 온도가 Al 7075가 가장 낮은 것을 알 수 있었다.
3. 브레이크 다이내모메타를 사용하여 디스크의 제동성능을 시험한 결과 중 온도를 이용하여 열응력과 열변형량 해석을 한 결과 Al 7075가 가장 낮은 것을 알 수 있었다.
4. 이 결과들로 미루어 보아 Al 7075가 디스크의 소재로는 가장 적합한 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임.

REFERENCES

1. Mi-Ra Ryu, Ji-Woong Choi, Dae-Hee Lee, Seong-Beom Lee, Jeong-Ho Park, "A Study Temperature of Break Disc using Two-way Layout," KSMPE Vol.11, No. 6, pp. 94-99, 2012.
2. Hyung Man No, "Development of the Light-Weight Disk Brake for Automobile," Incheon University, 2004.
3. Chung Kyun Kim, Buo Yong Sung, "Numerical Analysis on the Thermal Characteristics of a Ventilated Disc Brake," KSTLE Vol.14, No.1, pp.37-44, 1998.
4. Anoop, S. Natarajan, S. P. Kumaresh Babu, "Analysis of factors influencing dry sliding wear behaviour of Al/SiCp-brake pad," 2009.
5. Mi-Ra Ryu , Hui-Eun Bae, Hyun-Su Kim, Dae-Hee Lee, Seong-Beom Lee, Jeong-Ho Park, "A Study on Braking Performance of Break Disc," KSMPE Vol. 12 No. 3, pp 13-20, 2013.
6. Mi Ra Ryu , "A Study on Prediction of Thermal Stress and Thermal Deformation of Motorcycle Brake Disk Using Design Experiment," DongA University, pp.24-28, 2009.