

# 외부환경에 따른 마찰재의 마찰계수 변화 특성에 대한 연구

이 길 형<sup>1,2)</sup> · 이 동 규<sup>\*2)</sup>

새론오토모티브 시험팀<sup>1)</sup> · 충북대학교 공업화학과<sup>2)</sup>

## A Study of the Characteristic of Friction Coefficient Variation for the External Environment

Girhyoung Lee<sup>1,2)</sup> · Dongkyu Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Test Team, Saeronautomotive Co., 133 Gajeon 5-gil, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31253, Korea

<sup>2)</sup>Department Engineering Chemistry, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Korea

(Received 2 March 2015 / Revised 5 May 2015 / Accepted 19 June 2015)

**Abstract** : The friction material for automobile is manufactured by mixing several composites to stop the running vehicles. Friction characteristics are changed significantly according to the relative amount of the base materials. However, difference of friction coefficient is sometimes measured at the test for the same friction material. Nevertheless, the study for solving these problems is insufficient. In this paper, the friction tests were carried out by changing the external environment and processing condition when the main ingredients are fixed and also evaluated how the friction coefficient changes. The variables are cooling air speed, humidity (Relative humidity and Absolute humidity), scorching time, soaking time and pad area. And it is analytically considered which environmental factor mainly affects the characteristic of friction coefficient variation by experiment. It is expected that the results from this study can be very useful as a database for development of the friction material.

**Key words** : Friction coefficient(마찰계수), Absolute humidity(절대습도), Cooling air speed(냉각풍속), Pad area(마찰재면적), Scorching time(스코칭시간), Soaking time(방치시간), Relative humidity(상대습도)

### 1. 서론

자동차는 최소 2만여개의 부품들이 모여 구성이 되며, 이들 중 대부분은 자동차에 동력을 전달하여 원활한 주행을 하는데 주요한 역할을 한다.

이러한 다양한 부품 가운데 주행 중인 자동차를 안전하게 감속 또는 정지시키기 위해서 제동장치가 장착되어 있다.<sup>1,2)</sup> 제동장치는 회전하는 디스크에 마찰재를 접촉시켜 마찰에너지를 이용해 운동에너지를 열에너지로 전환하여 차량을 감속시키는 역할을 한다.<sup>3,4)</sup>

최근 자동차의 고성능화, 고기능화가 가속되고 있는 가운데 브레이크 마찰재도 “정확하게 정지시킨다”라는 본래의 기능에서 “쾌적하게 정지시킨다”라는 기능을 추가하는 보다 고도의 성능이 요구되고 있다. 그리고 자동차 산업의 발전으로 차량의 고기능화, 고성능화에 따라 더욱 안전하고 완벽한 신뢰성을 부여하기 위한 제동 장치와 마찰재료에 대한 전문적인 연구가 진행되었다.

브레이크 패드의 경우 적당한 마찰계수를 유지하며, 에너지 소산율이 높고 긴 수명을 보장하도록 내구성이 높은 재료를 필요로 하게 된다. 이는 마찰 계수가 높으면서도 높은 내마멸성 즉 마찰과 마멸이

\*Corresponding author, E-mail: [dklee@cbn.ac.kr](mailto:dklee@cbn.ac.kr)

반비례적 관계가 요구된다.<sup>5)</sup>

이제까지는 많은 연구에도 불구하고 마찰 현상에 대한 정확한 이론을 도출하기에는 아직 해결되어야 할 부분이 많다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이는 마찰 현상을 해석하기 위해서는 다양한 분야의 전문 지식이 필요하고, 또 이를 상호 보완적으로 결합시켜 문제에 적용 시켜야 하는 어려움이 있기 때문이다.<sup>6)</sup>

마찰재는 무기물, 유기물, 섬유류, 금속등의 15 ~ 20여종의 많은 원재료를 여러 가지 형태(분말, 칩상, 섬유상 등등)로 만들어 적절하게 배합하여 제조하는 제품으로 다양한 원재료가 상호 복합적으로 작용하면서 제동력을 생성시킨다. 그러나 브레이크에서는 마찰재가 아닌 다양한 외적 인자에 의해 동일한 마찰재를 사용하더라도 마찰계수의 편차가 생기는 경우가 종종 발생한다.

이러한 마찰계수의 차이가 발생하는 원인에 대한 기초연구 및 분석에 대한 체계적인 연구가 국내에서는 실물크기의 양산품을 이용한 마찰계수 평가 장비 활용의 어려움 등의 이유로 잘 진행되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 자동차 브레이크 시스템에서 마찰계수에 영향을 주는 외적 인자를 찾고, 그 영향도를 조사하여 마찰 계수의 영향인자에 대한 정확한 인식을 공유하여 향후 시스템 개발에 도움이 되었으면 한다. 마찰계수 출력치에 영향을 주는 인자로는 환경조건, 마찰재 조성, 평가설비 및 상대재인 디스크의 조직 특성등도 많은 영향을 미치겠지만 금회 연구에서는 마찰재 재질, 디스크 재질, 평가설비는 고정하고, 제동부품에 미치는 주변 환경 조건으로 적용 가능한 항목인 습도(상대습도, 절대습도), 냉각풍의 온도 및 속도, 방치시간, 그리고 마찰재 제조시 변경가능인자인 스코칭 감량, 마찰재 면적 차이(첵퍼 크기로 조정)를 선정하여 평가를 진행하였다.

## 2. 평가 방법

### 2.1 시험 준비

시험에 영향을 줄 수 있는 다른 인자를 줄이기 위해, 시험부품은 동일한 시기에 제작한 부품을 사용하였으며, 브레이크 패드는 국내 배기량 2000 cc 차량에 적용되는 동일형상의 부품을 사용하였다. 마

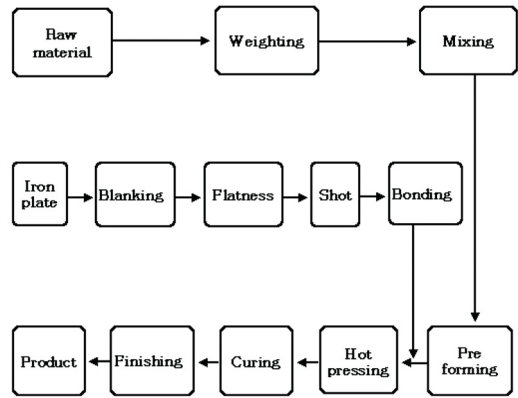


Fig. 1 Manufacturing process of automotive brake pad<sup>7)</sup>

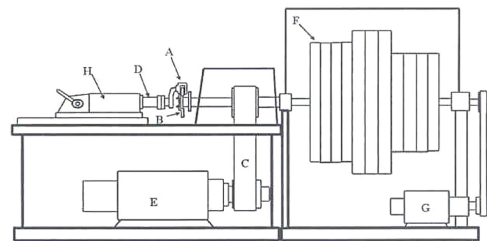
찰재 표면은 기본적으로는 형상 가공이 없는 제품을 사용하여 평가를 진행하였다. 마찰재 제조공정은 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 평가 장비

평가장비는 제동압력, 속도, 풍속 및 온도 제어 가능한 브레이크 전용 다이내모메타(D3900, Link Engineering Co., U.S.A)를 사용하여 평가를 진행하였다. 본 장비는 최대 관성이 25.5 kgms<sup>2</sup>이며 최대 회전 속도는 2,000 rpm으로 유압 Servo식 압력 조절기에 의한 압력범위는 0 ~ 316 kg/cm<sup>2</sup>이며, 최대 감속도는 4 g 까지 가능하다.

시험시 온도, 압력, 감속도, 스톱로크, 토오크, 풍속, 속도, 습도등의 자료는 실시간으로 컴퓨터에 저장되고 시험의 제어 또한 컴퓨터를 이용하여 제어하고 있다. 다이내모미터의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

평가에 사용한 브레이크 시스템(Brake System)은 H社의 Y차종을 사용하여 평가를 진행하였다.



A : Caliper Assembly, B : Brake Rotor, C : Driving Belt, D : Torque Transducer, E : Main Driving Motor, F : Inertia Weight, H : Movable tailstock  
G : Secondary Motor for Continuous Static Torque Measurement

Fig. 2 Schematic diagram of brake dynamometer<sup>7)</sup>

### 2.3 평가 모드

마찰계수 편차에 기여하는 인자의 영향성을 최대한 알아내기 위해서 각 인자별로 평가방법은 다소 차이가 있지만 기본적으로 성능평가는 초기 마찰계수 변화를 확인하기 위하여 사전 길들이기를 차속 50 km/h에서 제동감속도를 0.3 g 조건으로 마찰재 온도는 120 °C에서 10회 실시한 후 제1효력시험을 실시하였다. 이때의 차량 속도는 50 km/h와 100 km/h의 두 조건에서 제동초기 온도는 80 °C에서 제동감속도를 0.1 ~ 0.8 g까지 0.1 g 간격으로 가변하면서 마찰계수를 측정하였다. 이후 마찰재와 디스크의 완전 접촉을 시키기위해 길들이기를 200회 실시한 후 제2효력 시험을 행하였다. 제2효력 시험은 제1효력 시험에 차량속도 구간이 130 km/h 조건이 추가하여 고속 주행조건에서의 마찰계수 변화까지 확인할 수 있도록 구성하였다. 상세 평가 조건은 Table 1에 나타난 방법에 의거하여 평가를 진행하였다.<sup>7,12)</sup> 마모 평가는 Table 2에 나타난 것과 같이 길들이기를 Table 2의 조건으로 300회 실시한 후, 디스크 온도가 230 °C에서 50 km/h에서 0 km/h까지 완전 제동 조건으로 2000회 제동하였다. 이때의 제동 감속도는 0.25 g로 실시하였다. 이후 차속 50 km/h에서 10 km/h까지 속도를 줄이는 조건으로 디스크온도 220 °C에서 제동감속도 0.2 g 조건으로 800회 실시하는 방법으로 시험 샘플의 마모 평가를 진행하였다.

시험 편차를 최대한 줄이기 위해 시험 인자별로

Table 1 Performance test mode of dynamometer<sup>7)</sup>

	Speed [km/h]	Deceleration [g]	IBT [°C]	Brake interval [sec]	Number of stops
Pre-Burnish	50	0.3		120	10
1 <sup>st</sup> effectiveness	50/100	0.1-0.8	80		16
Burnish	65	0.35	80		200
2 <sup>nd</sup> effectiveness	50/100/130	0.1-0.8	80		24

Table 2 Wear test mode of dynamometer<sup>7)</sup>

	Speed [km/h]	Deceleration [g]	IBT [°C]	Number of stops
Burnish	75	0.4	80 (Pad)	300
Full stop	50→0	0.25	230 (Disc)	2,000
Snub stop	50→10	0.2	220 (Disc)	800

n=3으로 평가하여 3회 평균 마찰계수를 사용하여 결과를 정리하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 냉각 풍속에 대한 영향

마찰재의 냉각풍속에 대한 영향성 평가를 위하여 온습도 조건은 25 °C, 60 %Rh로 고정하고, 냉각풍속 조건을 각각 3 m/s, 8 m/s, 11 m/s로 변경하면서 평가를 진행하였다.

평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 평가 결과는 완

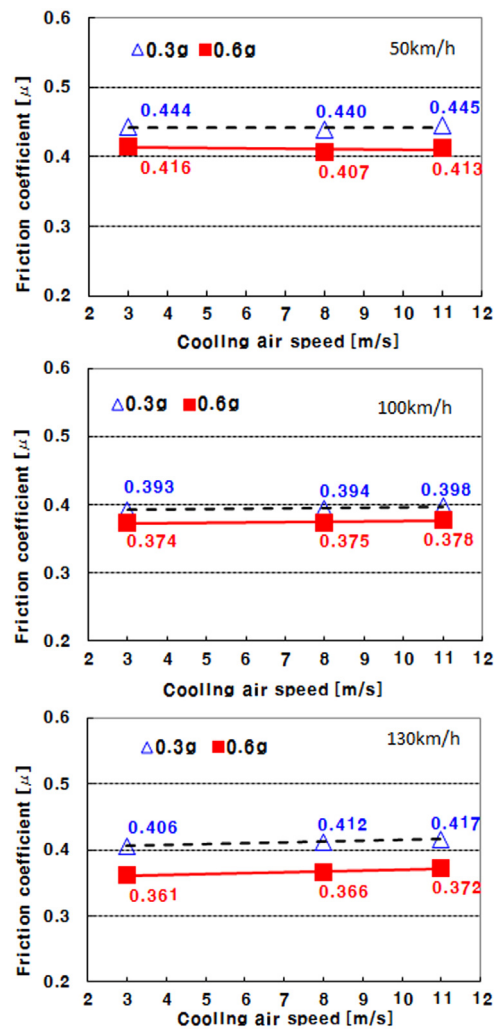


Fig. 3 Result of friction coefficient at 0.3 g & 0.6 g (2nd effectiveness, 50/100/130 km/h) for each cooling air speeds

제동 조건인 감속도 0.3 g와 급제동 조건인 감속도 0.6 g로 제동하였을 때의 측정값으로 분석을 행하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 가장 변화폭이 큰 차량 속도 130 km/h 조건 시험시 냉각풍 속도가 증가함에 따라 동일 감속도 조건으로 제동하였을 때 마찰계수 변화는 0.011(0.3 g 조건에서 풍속 3 m/s일 때 0.406, 11 m/s일 때는 0.417, 0.6 g 조건에서 풍속 3 m/s일 때 0.361, 11 m/s일 때 0.372)로 변화율이 최대 3% 증가하는 경향을 보였으며, 평가 속도가 100 km/h 이하에서는 냉각풍 속도의 변화에 영향이 거의 없음을 Fig. 3의 결과로 알 수 있었다.

마찰계수 차이가 가장 크게 나타나는 구간은 제동 속도가 고속 조건인 130 km/h에서이나, 그 차이는 변화율로 분석할 때 3% 수준 이내에 있음을 알 수 있다.

이와 같이 고속, 고감속도 제동시 마찰계수의 차이가 발생하는 원인은 풍속의 영향이라기 보다는 비석면 유기계(Non Asbestos Organic) 마찰재가 제동시 발생하는 열에너지에 의해, 유기물이 반응하면서 발생하는 가스에 의해 마찰계수가 변화되는 현상이며,<sup>8,9)</sup> 통상적인 사용 환경 수준의 조건에서는 냉각 풍속의 영향에 따른 마찰계수 변화는 거의 없다는 결과를 얻었다.

### 3.2 스코칭에 의한 영향

스코칭(Scorching)이란 마찰재 표면을 인위적으로 고열로 태워서 표면에 존재하는 유기물을 태울 때 발생하는 유기 가스를 제거하는 방법이다. 이렇게 해줌으로써 고속 고감속 제동시 발생할 수 있는 페이드 현상을 개선할 수 있다. 스코칭에 대한 마찰계수 편차 영향성 평가를 위하여 환경조건인 분위기 온도, 습도 조건은 각각 25 °C, 60 %Rh로 고정하고 평가를 진행하였다. 가변 조건인 스코칭 조건은 시간에 따른 유기물 무게 감량으로 판단하였으며, 스코칭 시간을 각각 5 sec, 10 sec, 20 sec, 25 sec 로 변경하면서 평가용 제품을 만들어 시험을 진행하였다.

제동 조건은 Table 1에 나타난 시험모드와 동일하게 실시하였다. 스코칭 시간에 따른 감량관계는 Table 3에 나타내었다. 스코칭 시간에 따른 유기물 무게 감소량은 우리가 일반적으로 예측하는 것과 같이 시간이 증가함에 따라 무게감소량이 증가하는 경향을 볼 수 있다.

Table 3 Weight loss by scorching of test samples

Scorching time [sec]	Weight loss [g]
25	1.01
20	0.81
10	0.39
5	0.19

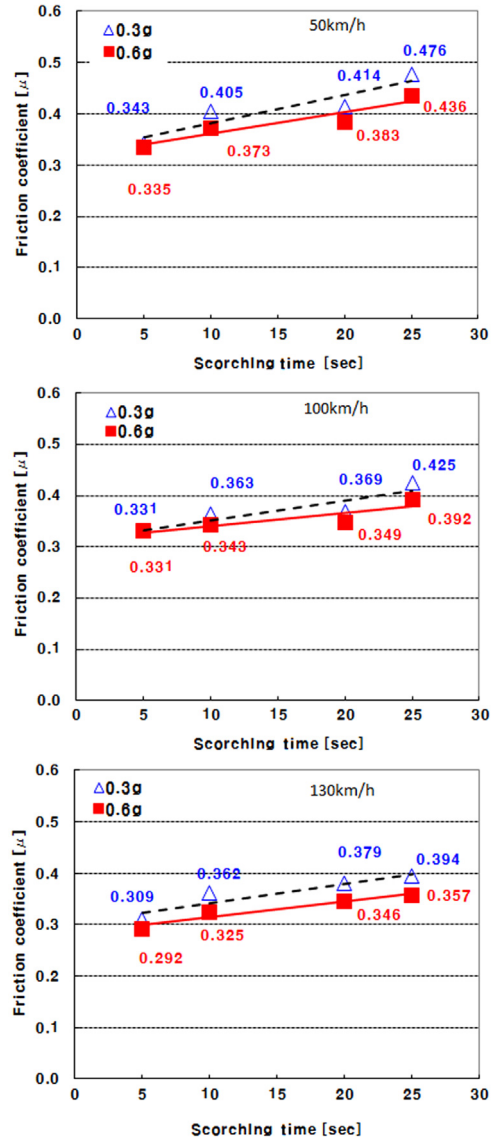


Fig. 4 Result of friction coefficient at 0.3 g & 0.6 g (2nd effectiveness, 50/100/130 km/h) for different scorching times

스코칭 조건 변화에 따른 마찰계수 평가결과를 Fig. 4에 나타내었다. 평가 결과 스코칭 조건(5 sec,

10 sec, 20 sec, 25 sec)이 변화함에 따라, 제동 감속도 조건 변화에 관계없이 시간이 길어질수록 마찰계수는 상승하는 것을 알 수 있다.

스코칭을 전혀 실시하지 않은 샘플과 25 sec 스코칭 실시품을 비교했을 때에도 마찰계수는 0.09정도 증가함을 알 수 있었다. 그러나 스코칭 시간이 20초 이하인 경우는 마찰계수 증가 폭이 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 스코칭 강도에 따라 표면에 잔존하는 유기물이 어느 정도 가스를 방출할 수 있는 조건이 형성되어야만 마찰계수 상승효과가 나타난다고 말할 수 있겠다.

지금까지는 스코칭을 함으로써 내 페이드성을 좋게하고, 초기 효력을 안정화 시키는 효과가 있다고 알고 있었으나,<sup>10,11)</sup> 시험 결과 스코칭 조건에 따라 마찰계수가 전체적으로 상승하는 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 표면 스코칭이 마찰재 표면에만 영향을 주는 것이 아니라 마찰재 내부까지 영향을 주어 스코칭 효과가 길들이기 이후에도 계속해서 남아있는 것을 버니쉬 완료 후 마찰계수 평가 결과 확인할 수 있었다.

### 3.3 습도에 대한 영향

마찰계수 평가시 환경조건인 습도에 대한 영향성을 파악하기 위하여 우선 온도를 25 °C로 고정된 조건에서 상대습도를 30 %, 60 %, 80 %로 변화시키면서 마찰계수의 변화를 평가하였다. 동일한 온도 조건하에서 상대습도 변화에 따른 절대습도와와의 관계는 아래 Table 4에 나타내었다. 그리고 마찰계수 평가 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 평가 결과 마찰계수는 동일한 분위기 온도 조건에서 습도가 증가하면

Table 4 Test condition of absolute humidity for each temperature

RH \ AH	RH			
	7 °C	15 °C	25 °C	30 °C
3 g/m <sup>3</sup>	49 %	29 %		
6 g/m <sup>3</sup>	95 %	56 %	29 %	23 %
9 g/m <sup>3</sup>		84 %	44 %	34 %
12 g/m <sup>3</sup>			59 %	45 %
15 g/m <sup>3</sup>			74 %	56 %
18 g/m <sup>3</sup>			88 %	66 %
21 g/m <sup>3</sup>				77 %

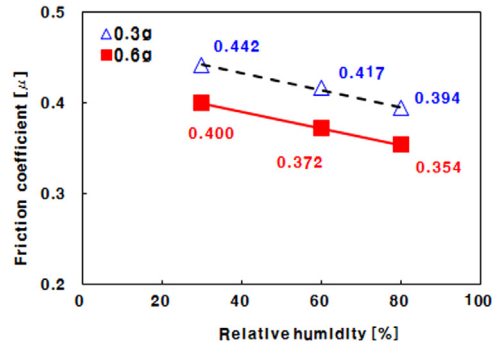


Fig. 5 Result of friction coefficient for each relative humidity at 25 °C (2nd effectiveness, 130 km/h)

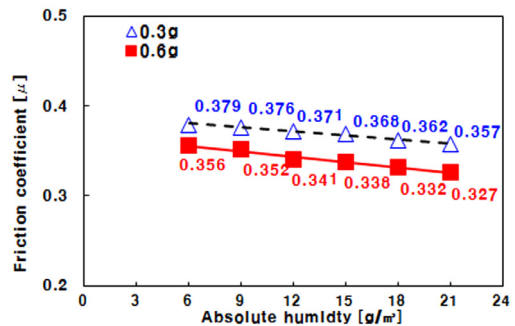


Fig. 6 Result of friction coefficient for absolute humidity at 30 °C (2nd effectiveness, 130 km/h)

마찰계수가 0.044 ~ 0.048정도가 낮아지는 경향을 보였다.

분위기 온도 30 °C 조건에서도 상기와 동일하게 절대습도를 6 g/m<sup>3</sup> ~ 21 g/m<sup>3</sup>으로 각각 변경하면서 평가를 진행하였다. 평가 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 상기 조건으로 절대 습도의 영향성 시험결과, 차속 130 km/h에서 완제동 조건인 0.3 g, 제동시 절대습도가 6 g/m<sup>3</sup>에선 마찰계수는 0.379, 절대습도 21 g/m<sup>3</sup>에서는 0.357 수준이며, 동일한 속도에서 0.6 g로 제동시 마찰계수는 0.356에서 0.327로 절대습도가 높아질수록 마찰계수가 낮아짐을 알 수 있다. 결과에서 절대습도 15 g/m<sup>3</sup>이 증가함에 따라 마찰계수는 0.022 ~ 0.029 정도로 낮아진다는 것을 알 수 있다.

이러한 마찰계수 저하현상이 일어나는 원인은 고 습도 환경에 있어서 디스크 습동면은 수분과 열에 의해 디스크 표면의 산화가 촉진되고, 산화물이 생성되면 디스크 습동면의 열 확산 능력이 저하하여 마찰열이 확산하기 어려워지면서, 디스크 습동부의

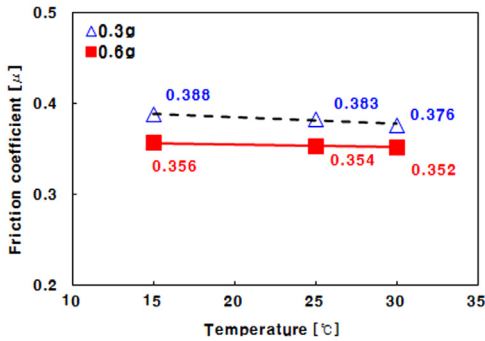


Fig. 7 Result of friction coefficient for each temperature (absolute humidity 9 g/m<sup>3</sup>, 2nd effectiveness, 130 km/h)

온도는 상승하게 되어 마찰면에 유기 피막이 형성된다. 이 피막과 브레이크 패드가 마찰하는 것에서 계면 표층이 연질화가 생기고 마찰계수의 저하가 발생한다. 반대로 시험 분위기의 습도를 9 g/m<sup>3</sup>으로 고정한 후, 분위기 온도만 15 °C, 25 °C, 30 °C로 변경하면서 차속 130 km/h의 조건에서 효력시험한 결과값의 완제동과 급제동 조건인 0.3 g와 0.6 g로 제동시의 마찰계수를 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서 냉각풍의 온도가 증가함에 따라 마찰계수가 약간 감소하는 경향성을 보이지만 습도를 변경하면서 시험한 결과와 비교하면 아주 작은 수준이며, 이것이 발생하는 원인은 냉각풍 온도의 영향성 보다는 분위기 절대 습도가 온도에 따라 달라져서 발생하는 편차로 판단된다.

### 3.4 방치시간에 대한 영향

방치시간에 따른 마찰계수 영향성을 판단하기 위하여 A, B, C 3가지 마찰재를 이용하여 온습도 조건 30 °C, 80 % 환경조건 하에서 버니쉬 후, 방치 시간을 0.5시간에서 15시간까지 변경하면서 평가를 진행하였다. Fig. 8에 평가 결과를 나타내었다.

결과에서 마찰재 재질에는 큰 관계없이 방치시간이 2 hr 이상이면 이후에는 마찰계수가 안정화됨을 볼 수 있었다. 따라서 재질마다 다소 차이는 있었지만, 방치 시간은 2 hr 이상이면 시험결과에 영향이 없음을 알 수 있었다.

### 3.5 마찰재 면적에 대한 영향

마찰재 면적에 따른 마찰계수 및 마모량의 상관

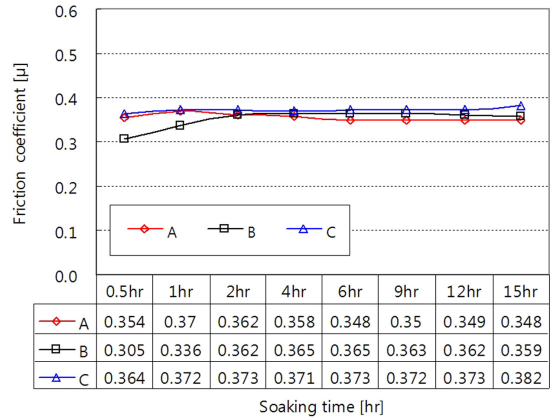


Fig. 8 Result of friction coefficient for soaking times

성을 평가하기 위하여 연마기를 이용하여 패드 표면의 챔퍼(Chamfer) 형상을 변경하여 면적이 Table 5와 같이 3종(면적기준 100 %, 80 %, 54 %)으로 평가를 진행하였다. 시험 시 환경조건인 온도 25 °C, 습도 30 %Rh 조건 하에서 JASO C406 성능평가 및 LA City 마모평가를 실시하였다.

평가 결과를 Table 5에 비교하였다. 평가 결과 마찰재의 수명은 패드면적이 53.9 cm<sup>2</sup>일 때 마모수명은 55,769 km 수준이었으나, 면적이 46 % 정도 줄어든 29.2 cm<sup>2</sup>일 때는 수명이 30,624 km로 면적축소 전과 비교해서 마모수명이 45 % 감소하여 면적에 비례하여 마모수명이 변한다는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 마찰계수는 면적에 따라 감소는 아니지만 면적에 비례하여 감소하지는 않는다.

Table 5 Result of wear life and friction coefficient for each pad area

		No chamfer	15 mm vertical J-CUT	30 mm vertical J-CUT
Pad area [cm <sup>2</sup> ]		53.9 (100 %)	43.4 (80.4 %)	29.2 (54.2 %)
Wear life [km]		55,769 (100 %)	45,493 (81 %)	30,624 (55 %)
Friction coefficient [μ]	50 km/h	0.345 (100 %)	0.327 (95 %)	0.306 (89 %)
	100 km/h	0.326 (100 %)	0.317 (97 %)	0.308 (95 %)
	130 km/h	0.341 (100 %)	0.332 (97 %)	0.322 (94 %)

#### 4. 결론

마찰재료 적인 측면이 아닌 주변 환경 조건, 제어 조건의 변화에 따른 마찰계수 영향에 대해 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 평가 결과 마찰계수 편차에 가장 영향을 많이 미치는 것은 습도이며, 시험의 범위에서 상대습도 (30%에서 80%) 차이에 따른 마찰계수는 최대 0.048 낮아짐을 알았다.
- 2) 냉각 풍속의 변화에 따른 마찰계수 차이는 시험의 범위에서 130 km/h의 차속에서 마찰계수 변화는 0.011로 변화율이 최대 3%로 마찰계수 편차 발생에 대한 영향성은 미미한 수준임을 알았다.
- 3) 시험의 범위에서 스킵 조건별 마찰계수는 스킵을 강하게 할수록 마찰계수는 높아지며, 시간이 25 sec일 때 마찰계수는 0.09, 변화율은 최대 28% 수준이었다.
- 4) 마찰재를 환경 조건하에서 방치할 때, 마찰재질별 다소 차이가 있을 수 있으나 마찰재를 2시간 이상 방치하면, 마찰계수가 안정화되는 것을 확인할 수 있었다.
- 5) 마찰재 면적과 마모수명은 매우 상관성이 높으며, 마찰재 면적이 46%가 줄어들면 비례해서 마모수명도 45% 줄어드는 것을 알 수 있다.  
결론적으로 다시정리하면 마찰계수 편차에 가장 영향을 주는 인자는 절대습도와 스킵 강도이며, 마모수명은 마찰재 면적과 정비례관계가 있음을 알았다.

#### References

- 1) M. G. Jacko, "Physical & Chemical Changes of Organic of Disc Pads in Service," *Wear*, Vol.46, No.1, pp.163-175, 1978.
- 2) K. W. Suh, "Field Correlation for the Wear Life of Brake Pad," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1002-1006, 2002.
- 3) J. T. Park, S. W. Han and N. S. Choi, "Robust Design of the Back-plate Shape of the Disc Brake Pad for Reduction of Uneven Wear," *Transactions of KSAE*, Vol.22, No.1, pp.8-19, 2014.
- 4) J. A. Willians, *Engineering Tribology*, Oxford University Press, London, 1994.
- 5) J. H. Park, T. W. Park, J. H. Lee and M. H. Cho, "Hot Judder Simulation of a Ventilated Disc and Design of an Improved Disc Using Sensitivity Analysis," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.15, No.1, pp.1-6, 2014.
- 6) Y. K. Chang and J. R. Hwang, "Numerical Model for Prediction of Brake Judder due to Wear and Rust," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.14, No.3, pp.375-384, 2013.
- 7) G. H. Lee, *Variation of Friction Coefficient & D.T.V. for Base Fibers in Automotive Friction Material*, M. S. Thesis, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea, 2001.
- 8) T. Yeo, "A Study on Wear Life Prediction of Disk Brake Pads," *Transactions of KSAE*, Vol.10, No.4, pp.199-205, 2002.
- 9) D. Antanaitis, "The Effect of Racetrack/High Energy Driving on Brake Caliper Performance," SAE 2009-01-3027, 2009.
- 10) M. Unno, M. Inoue and Y. Hara, "Decrease of Friction Coefficient of Disc Pads during Low G Braking after Continuous High G Braking," SAE 2005-01-3938, 2005.
- 11) R. Cross, "Increase in Friction Force with Sliding Speed," *Am. J. Phys.*, Vol.73, No.9, pp.812-816, 2005.
- 12) G. H. Lee, K. H. Kang and D. K. Lee, "Characteristics of Aggression and Brake Judder by Different ZrSiO<sub>4</sub> Particle Size," *Transactions of KSAE*, Vol.22, No.7, pp.144-151, 2014.