



## A Study on Adhesion Friction Characteristics of Rubber for Tire Tread

Yumrak Oh<sup>†</sup>, Seong-hee Jeon, Dong Youm Lee, Hak-Joo Kim, and Jeong-Heon Kim

Hankook Tire & Technology Co., Ltd. 50, Yuseng-daero 935 beon-gil, Yusenggu, Daejeon, Republic of Korea

(Received September 19, 2019, Revised October 14, 2019, Accepted October 16, 2019)

**Abstract:** Rubber friction properties include adhesion friction characteristics of the interface, hysteresis friction characteristics originating from repeated rubber deformations, and cohesion friction characteristics due to wear and tear. Cohesion friction is generally sufficiently small (< 3%) that it can be ignored, whereas adhesion friction has a relatively large contribution of 15%, but has not been investigated thoroughly. Therefore, through an adhesion friction study, the adhesion mechanism was examined and the relationship between friction characteristics and adhesion friction on dry surfaces was derived. The wet grip characteristics of tread rubber are fully described by the hysteresis characteristics of tires, but friction characteristics on dry roads are difficult to determine without adhesion factors. The results presented herein demonstrate that the combination of hysteresis and adhesion properties in the tread rubber sufficiently explained the characteristics of the dry grip. Based on the results of this study, technologies will be developed to determine the key factors governing adhesion friction characteristics and improve dry tire braking performance.

**Keywords:** adhesion friction, hysteresis friction, dry friction coefficient, wet friction coefficient, road surface texture

### Introduction

일반적으로 자동차는 타이어를 이용하여 노면에 힘과 모멘트를 전달함으로써 제, 구동 및 방향전환을 할 수 있도록 설계되어 있다. 타이어가 이러한 역할을 할 수 있는 원리는 노면과 타이어 트레드 표면의 마찰에 기인한다. 하지만 타이어와 노면간의 마찰 원리는 그리 잘 알려져 있지 않고, 실제 발표된 연구 논문도 부족한 것이 사실이다. 본 고에서는 이러한 현실을 고려하여 노면과 타이어 표면의 마찰 특성에 대한 이론적 고찰과 실험적 검증이라는 원론적 방법을 통하여 실제 노면과 타이어에서 발생하는 마찰 메커니즘을 이해하고자 한다.

타이어를 구성하는 부위와 재료 요소는 기능과 특성에 따라 매우 다양한 것으로 알려져 있다. 간단히 살펴보더라도 트레드, 트레드 윙, 서브 트레드, 사이드 월, 비드 그리고 벨트, 카카스, 인너라이너와 립 쿠션 등 다양하게 구성되어 있고, 각각의 기능에 맞는 역할을 하고 있다. 각 부위들의 재료는 그 역할과 기능을 고려하여 적합한 배합 성분으로 구성되어 있다.

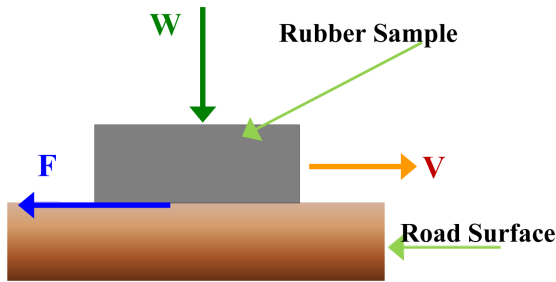
본 고에서는 타이어의 가장 중요한 기능을 담당하고 있는 트레드 고무의 Adhesion Friction 특성에 대하여 논하고자 한다. 고무 접촉이론에서 Friction과 Adhesion의 이해는 매우 중요한 요소이다.<sup>1</sup> 뒤에서 자세히 언급하겠지만 고무와 노면의 접촉 시 Friction을 유발하는 한 구성 요소인 Adhesion은 Dry

노면에서는 비교적 기여도가 큰 편이다. 타이어 트레드부는 운전자의 안전과 밀접한 제동 성능, 타이어 연비와 관련 있는 Rolling Resistance 그리고 타이어 수명을 결정 짓는 마모성능 등과 관련성이 높은 타이어 부위라 할 수 있다. 뿐만 아니라 차량의 주행, 방향전환 등과 관련 있는 조종 안정성 등의 특성을 제대로 이해하기 위해서는, 트레드 고무 특성의 충분한 이해는 필수적이라 할 수 있다. 타이어는 노면과의 마찰로 인하여 감, 가속 그리고 방향전환 등의 기능을 수행할 수 있다. 타이어 제, 구동 그리고 조종안정성 특성 등의 이해뿐만 아니라, 타이어 수명을 의미하는 마모 성능, 연비를 결정 짓는 RR 특성 등의 해석 또는 이해를 위해서는 노면과 트레드 고무의 마찰 특성에 대한 충분한 연구가 반드시 필요하다. 따라서 본 고에서는 이러한 타이어 특성을 이해하기 위하여 가장 중요하고 필수적인 트레드 고무의 마찰 특성과, 이를 구성하고 있는 요소들을 이론적/실험적 방법으로 검증 및 해석을 하고자 한다.

### Theoretical Background

일반적으로 완전 탄성체에 가까운 금속의 마찰 특성과 타이어를 구성하고 있는 고무의 마찰 특성 메커니즘은 상이하다. 마찰이라 함은 Figure 1과 같이 W라는 하중을 받으며 접촉하고 있는 두 물체를 고려할 때, 한 물체가 속도 V로 이동하려고 하고, 이를 저지하기 위하여 반대 방향으로 작용하는

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: [yroh@hankooktech.com](mailto:yroh@hankooktech.com)



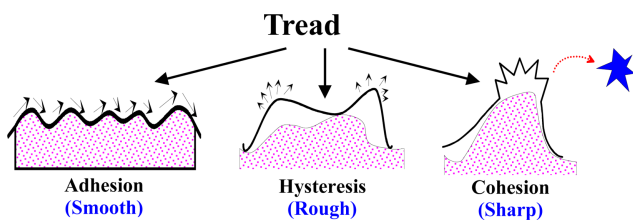
**Figure 1.** Schematic Diagrams for Friction Mechanisms between Rubber and Surface.

힘,  $F$ 를 마찰력이라 한다.

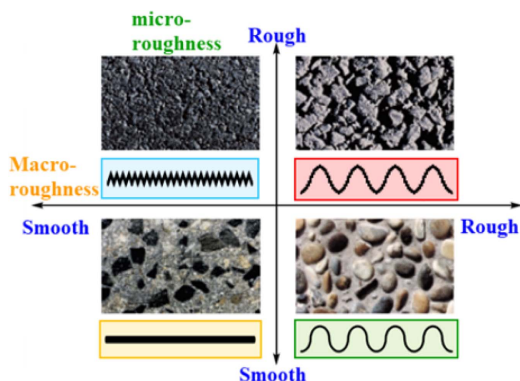
Kummer 교수에 의하면, 접촉하고 있는 물체의 이동을 방해하는 마찰력은 Adhesion Friction, Hysteresis Friction 그리고 Cohesion Friction으로 설명할 수 있다.<sup>2</sup>

일반적으로 노면의 거칠기 특성에 따라 각 마찰인자의 기여도가 결정되는 것으로 알려져 있다. 거칠기가 부드러운 노면에서의 주요 마찰 특성 인자는 Adhesion Friction이며, 거친 노면에서는 Hysteresis Friction의 기여도가 증가한다. 그리고 아주 거칠고 날카로운 노면에서는 Figure 2와 같이 Cohesion Friction의 양이 커질 수 있으나, 일반적으로 Cohesion Friction의 기여도가 너무 낮기 때문에 본 고에서는 제외하기로 한다.

일반적으로 금속의 마찰은 일정한 하중 조건에서는 접촉 면적이나 미끄럼 속도에 무관하다고 설명하고 있다. 반면에 타이어 트레드 재료인 고무는 비록 동일 하중 조건이라 하여도 주행시의 온도, 실 접촉 면적 또는 미끄럼 속도 등 외부환경



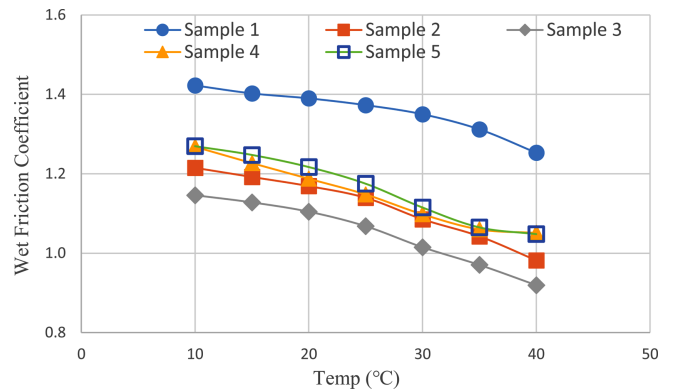
**Figure 2.** Friction factor related to the surface roughness characteristics.



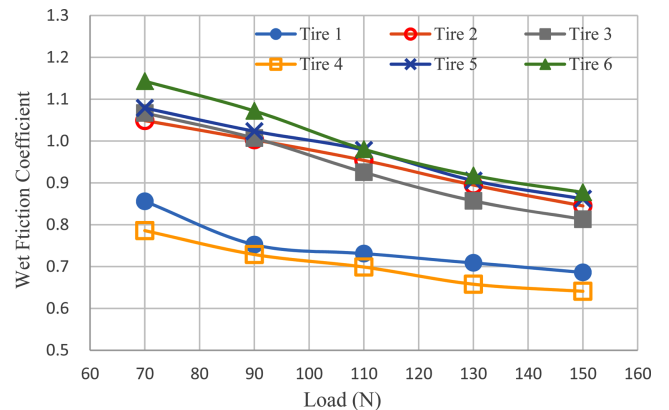
**Figure 3.** Types of road surfaces according to micro & macro texture characteristics.

요인에 따라 마찰력이 크게 변한다. Figure 4, 5, 6은 RTMS (Rotational Traction Measuring System)를 활용하여 Wet 노면에서의 하중, 온도, 속도 등의 인자에 대한 마찰계수 변화 추이를 확인한 결과이다.

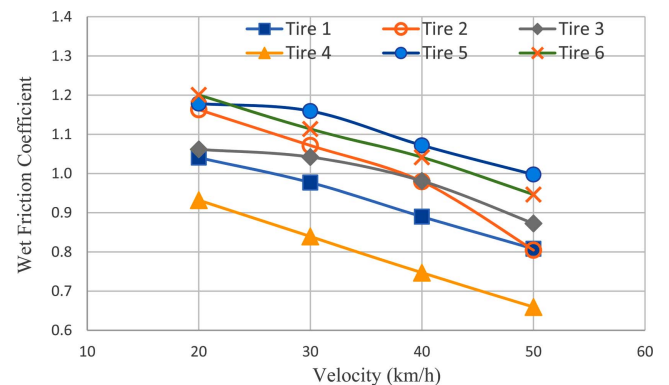
아래 Figure 4에 따르면 온도가 증가하면 마찰계수가 감소하는 것을 잘 알 수 있다. 그 이유는 온도가 증가하면 고무의 Hysteresis 값이 감소하기 때문이다. 따라서 여름보다 기온이



**Figure 4.** Trends in the change of friction coefficients with temperature variation.



**Figure 5.** Trends in the change of friction coefficients with load variation.



**Figure 6.** Trends in the coefficient of friction with changes in sliding velocity.

낮은 봄, 가을의 마찰계수가 높아 타이어의 제동거리는 짧게 된다.

일반적으로 다른 물체와 접촉하고 있는 고무 재료는 하중이 증가하면 마찰 계수가 감소하는 것으로 알려져 있고, Figure 5에 잘 표현되어 있다. 하중이 증가하면 고무 표면에서 발생하는 마찰열로 인하여 온도가 증가하고, 이로 인한 Hysteresis의 감소로 이어지기 때문이다. 일반적으로 고무는 온도 증가 시 Hysteresis 특성치가 감소하는 경향을 갖기 때문이다.

Figure 6은 고무가 노면 위를 미끄러져 이동할 때, 미끄러짐 속도가 빨라지면 마찰계수가 감소하는 현상을 보여주고 있다. 이는 고무 표면에서 발생하는 마찰열로 인한 온도 증가가 Hysteresis의 감소를 유발하기 때문인 것으로 알려져 있다.

고무의 마찰력은 접촉 면적에 민감하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 중소형 차량에 장착할 수 있는 215/50R18 또는 225/45R18, 두 종류 규격의 타이어를 생각해 보자. 타이어 규격 표시 중 앞자리에 해당하는 215 또는 225는 타이어 폭을 의미하며, 단위는 mm이다. 즉 상이한 편평비를 갖는 두 종류의 타이어에 있어서, 전자는 타이어 폭이 215 mm 이고, 후자는 225 mm이다. 즉 후자의 타이어 폭이 전자에 비하여 10 mm가 큰 것을 의미한다. 폭이 큰 타이어가 접지면적이 넓은 만큼 마찰력이 커서 연비는 열악해도 제동력은 우수함을 의미한다. 일반적으로 고무의 마찰력은 어떤 요소들로 구성될까? Kummer 교수에 의하면 식 (1)과 같이 고무의 Total 마찰력은 노면과 타이어의 Adhesion Friction, 타이어 Internal Friction에 의한 Hysteresis Friction 그리고 고무 표면의 마모나 찢김에 의하여 발생하는 Cohesion Friction으로 구성된다.<sup>2</sup> 일반적으로 Cohesion Friction은 아주 날카로운 표면에서는 의미를 갖기도 하지만 Total Friction에 대한 기여도가 워낙 미미하여(3% 미만), 본 고에서는 고려하지 않기로 한다.

타이어용 트레드 고무와 노면간의 총 마찰력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Total} = f_{adhesion} + f_{hysteresis} + f_{cohesion} \quad (1)$$

Adhesion Friction Force,  $F_{adhesion}$ (이하  $F_a$ 라 칭한다)는 노면과 트레드 고무 표면에서 접촉하고 있는 고분자간의 Van der Waals 힘에 의하여 분자간 인력으로 발생하는 Friction Force를 의미하며, Hysteresis Friction Force,  $F_{hysteresis}$ (이하  $F_h$ 라 한다)는 트레드 고무가 노면의 요철에 의하여 변형이 유발되고, 이렇게 발생한 변형이 고무 구성 요소인 Silica, Carbon Black과 같은 충전제, SBR, NR과 같은 고분자 그리고 Sulfur 등이 서로간에 Internal friction를 유발하고 이때 발생하는 마찰력을 의미한다. 그리고 마지막 마찰 인자인 Cohesion Friction,  $F_{cohesion}$ (이하  $F_c$ 라 한다)는 고무의 마모 또는 찢김에 의하여 결정되는 마찰 특성이다.  $F_c$ 가 총 마찰력에 미치는 영향이 미미하므로(기여도가 2~3% 미만으로 알려져 있다), 본

a) Contribution of Friction term on Dry b) Contribution of Friction term on Wet

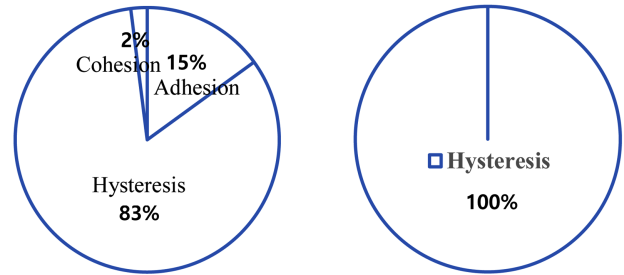


Figure 7. Contribution of individual factors to total friction on dry and wet surfaces.

고에서는 논외로 하기로 한다. Adhesion Friction은 전술한 것처럼 계면에서 트레드 고무의 고분자와 노면의 인력에 의하여 유발되므로, 접촉 면적이 클수록 Total Friction에 대한 Adhesion Friction 기여도는 증가하게 된다.<sup>3</sup> 노면의 거칠기 특성이 거친 노면보다 부드러운 노면일수록 Adhesion Friction의 양은 증가하므로, 부드러운 노면에서의 Adhesion Friction의 역할은 중요하게 된다. 반면에 노면의 거칠기가 비교적 거친 노면에서는 고무의 변형량이 상대적으로 커지기 때문에  $F_h$ 의 중요성이 커지게 된다. 고무의 외부 변형이 크게 발생하는 거친 노면에서는 고무를 구성하는 내부 입자들의 Internal Friction을 유발하기 수월하기 때문이다. 비교적 거친 노면인 Asphalt에서는  $F_h$ 가 중요한 마찰 요소가 되고, Ice 노면이나 대리석 같이 매끄러운 노면에서는 Adhesion Friction이 Total Friction을 결정하는데 상대적으로 중요한 마찰 인자가 된다. 마지막으로 본 고에서는 논외로 하기로 하였던  $F_c$ 는 마모가 발생되기 수월한 아주 날카로운 노면에서 상대적으로 영향도가 커지나, Adhesion 또는 Hysteresis에 비하여 기여도가 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서 노면의 표면 상태(Dry 또는 Wet) 조건에 따라 위에서 설명한 3가지 종류의 마찰력에 대한 기여도를 Figure 7과 같이 표현할 수 있다.

표면에 수막이 형성된 Wet Friction은 수막이 고무와 노면의 접촉을 방해하여 상기 Figure 7(b)처럼  $F_a$ 와  $F_c$ 의 기여도는 무시할 정도의 수준으로 작아지고,  $F_h$ 에 의존하게 된다. 따라서 젖은 노면에서의 고무 그립력 또는 타이어 제동력을 예측 또는 해석할 때는 고무의 Hysteresis 특성을 의미하는 고무의 반복 변형에 따른 점탄성 특성(예 : 0°C G'')에 의존하게 된다.

## Experimental

본 연구에 사용된 트레드 고무는 총 6종으로 인장 및 점탄성 등과 같은 기본적인 물성을 Table 1에 수록하였다. 그리고 하기의 식 (2), (3)의 Dry Grip과 Wet Grip에 Adhesion 인자와 Hysteresis 인자의 영향도를 파악하기 위하여, Ueshima에서 제작한 RTMS라는 실내 마찰 시험기를 활용하여, 마른 노면과 젖은 노면에서의  $F_{Total}$ 을 측정하였다.



Figure 8. Friction tester for measuring rubber samples.

Figure 8로 표현한 실내 마찰 시험기 RTMS는 원통형 고무 시편에 대하여  $\mu$ -Slip ratio 선도를 측정하여 고무의 마찰 특성 또는 제동성능 예측을 할 수 있는 시험기이다. 본 시험에 사용된 마찰시험기인 RTMS의 정확도를 확인하기 위하여 다양한 노면 즉 Dry, Wet 그리고 Ice 노면에서의 RTMS 시험기의 재현성 측정 결과를 Figure 9, 10, 11에 표현하였다. 본 재현성 평가 결과에 따르면 RTMS는 노면 상태에 관계없이 매우 높은 재현성과 정확도를 보이고 있어, 본 연구 수행에 적합한 시험기로 판단하였다. 그리고 이미 잘 알려진 것처럼  $\mu$ -Slip ratio 선도는 타이어 제동 성능을 이해하는데 매우 유용하고 중요한 마찰 특성치이다. Figure 9는 Dry 노면에서의 RTMS 재현성을 의미한다. 특히 타이어  $\mu$ -Slip ratio 선도에서의 Peak Friction Coefficient는 차량의 제동 성능과 매우 높은 상관성을 가지고 있어, 타이어 연구자들이 제동 성능 해석에 매우 유용하게 활용하고 있다. 사실 고무 노면의 Hysteresis Friction은 노면의 거칠기에 매우 민감하게 영향을 받는 것으

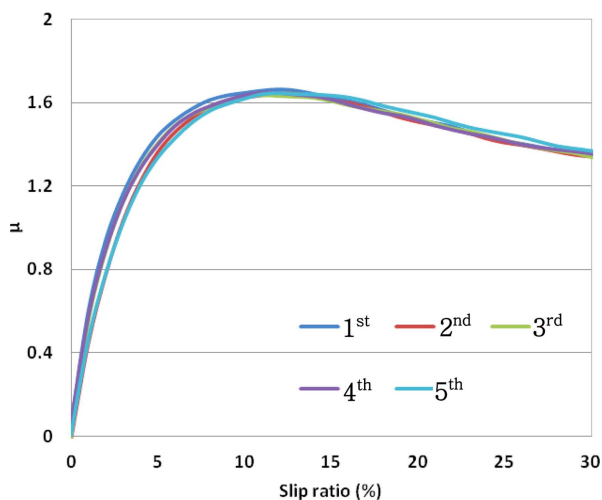


Figure 9. Results of RTMS reproducibility assessment on dry surface.

로 알려져 있다.

일반적으로 노면 거칠기 특성과 수막 유무에 큰 영향을 받는 고무의 변형(Deformation) 특성은 Hysteresis Friction 특성에 중요한 요소이나, 이는 매우 복잡하고 난해하여 본 고에서는 다루지 않기로 한다.

$$F_{Total} = f_{adhesion} + f_{hysteresis} + f_{cohesion} \quad (1)$$

상기 식 (1)을 살펴보면 전술한 것처럼  $F_c$ 은 마찰에 대한 기여도가 낮기 때문에 무시하기로 하였고, 본 고에서는 수막이 있는 Wet 노면에서는 고무의 Friction은 Hysteresis Friction,  $F_h$ 만을 고려하여 분석하기로 한다. 그리고 Dry 노면에서의 Friction은 기여도가 큰 Hysteresis Friction,  $F_h$ 와 Adhesion Friction,  $F_a$ 를 활용하여 마찰 특성을 이해하고자 한다.

$$Dry F_{Total} = f_{adhesion} + f_{hysteresis} \quad (2)$$

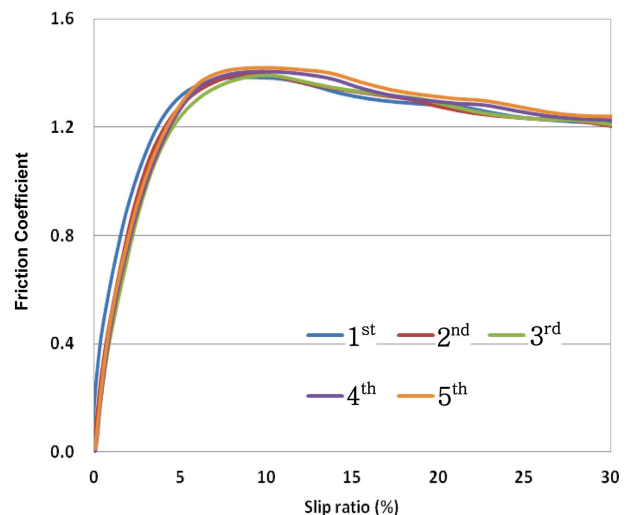


Figure 10. Results of RTMS reproducibility assessment on wet surface.

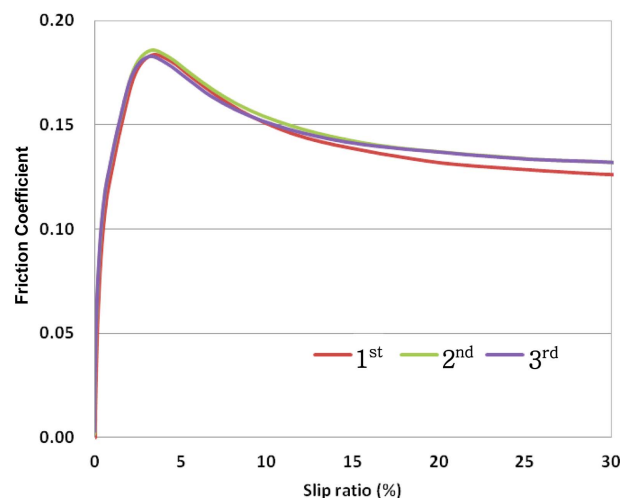


Figure 11. Results of RTMS reproducibility assessment on ice surface.



**Table 1.** Physical Characteristics of Rubber Specimens Used in the Test

		Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
Tension Properties	Hardness	70	70	71	72	69	62
	10% Mod.	7.6	7.9	7.8	8.4	7.6	5.3
	100% Mod.	20	24	25	22	23	16
	300% Mod.	86	103	108	87	97	72
	Elongation	606	568	499	595	528	617
Viscoelastic Properties	0°C G"	1.0E+07	9.3E+06	3.7E+06	5.1E+06	3.8E+06	3.5E+06
	0°C tanδ	0.341	0.386	0.200	0.197	0.199	0.234
	60°C tanδ	0.131	0.122	0.106	0.129	0.110	0.147

$$Wet F_{Total} = f_{hysteresis} \quad (3)$$

Hysteresis Friction은 실제 타이어의 제, 구동과 같은 변형 운동을 할 때 발생하는 내부 에너지 손실을 고무의 점탄성 특성으로 설명하며, 실제로 타이어 분야의 연구자들은 고무의 점탄성 특성을 이용하여 고무의 Hysteresis Friction을 설명하고 있다. 물론 Dry 노면과 Wet 노면의 거칠기 특성이 상이하므로 두 노면에서의 점탄성 시험 조건(온도, Frequency, Strain 등)은 달라 질 수 밖에 없다.

## Results and Discussion

Total Friction에 대한 Adhesion Friction에 대한 관련성과 영향도를 검증하기 위하여 타이어 재료로 사용되는 총 6 종의 고무 시료를 선정하였다. 시편 고무는 Tread 고무로 주요 기본 물성은 Table 1에 수록하였다.

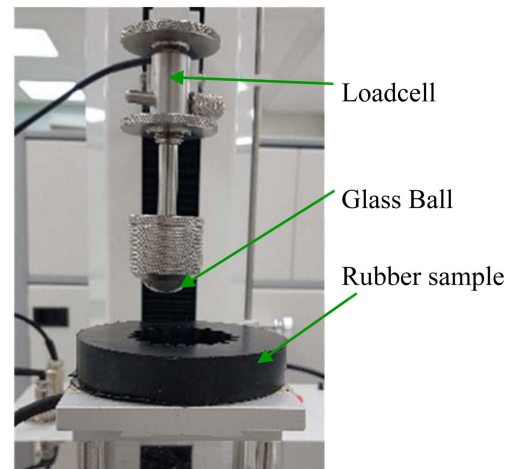
### 1. Adhesion Friction Tester의 소개

본 시험에 사용한 Adhesion Friction Tester는 주)연진에스텍에서 제작한 TXA™ 모델로 Glass Ball과 고무 시편의 Adhesion Friction 측정에 매우 유용하게 설계 되어 있었다. 본 시험에 사용된 시험기는 Figure 12에 잘 표현되어 있으며, Kroger 교수가 Adhesion 측정에 사용한 시험기와 매우 유사

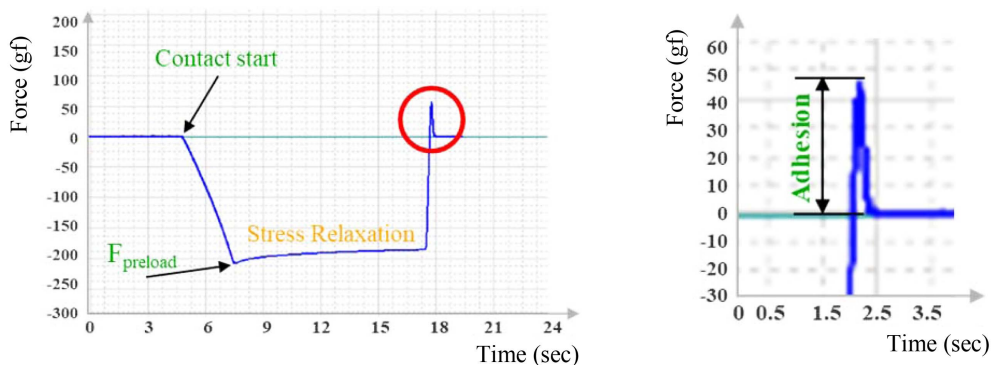
하게 설계되었다.<sup>4,5</sup>

시편과 접촉하는 면은 Glass Ball로 제작하였고, 고무 시편은 변형량을 고려하여 두께가 16 mm인 원통형 형상으로 제작하였다. 그리고 접촉시 Glass ball과 고무 시편의 하중 및 Adhesion Force를 측정할 수 있도록 Glass ball 기둥 상부 내부에 Load cell이 설치되어 있었다.

상기 Figure 12의 시험기로 고무 표면과 Glass ball의 Adhesion Friction Force를 측정하면 Figure 13(a)와 같은 형상



**Figure 12.** Adhesion friction tester for rubber sample measurements.



**Figure 13.** Typical Force Curve: Complete load curve (a), detail of separation process (b).

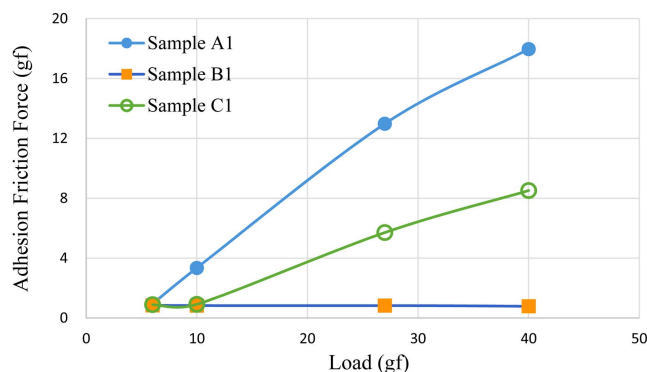
의 Force가 측정된다. 하중을 가하면 Load cell을 통하여 고무와 Glass Ball의 접촉 전후 및 접촉시 가해지는 힘의 변화를 측정할 수 있다. 고무와 Glass Ball의 접촉이 시작되면 고무의 고유한 특성인 Stress Relaxation에 의하여 Load cell에서 측정되는 힘이 서서히 감소하게 된다. 그리고 고무 표면에 가해지는 힘을 완전히 제거하고, Glass ball을 고무표면에서 탈착시키기 위하여 힘을 가하면, Figure 13(a)의 적색 원과 같이 Adhesion Force로 인하여 반대 방향으로 힘이 작용하는 것을 볼 수 있다. 적색 원안의 형상을 확대하면 Figure 13(b)와 같이 Adhesion Friction을 명확하게 볼 수 있다.

## 2. Adhesion Friction에 대한 하중, Contact Duration time 그리고 Separation Speed 민감도

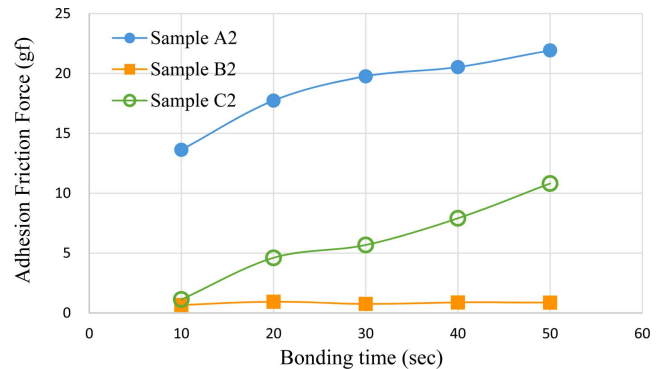
Adhesion Friction에 하중 및 접촉 시간 그리고 탈착 속도 등과 같은 인자들에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있어,<sup>5,6,7</sup> 먼저 이들 인자들에 대한 민감도 시험을 먼저 진행하였다. Fa에 하중, 노면과 고무 시편의 접촉 시간을 의미하는 Bonding time 그리고 접촉하고 있는 고무 시편과 Glass Ball의 탈착 속도를 의미하는 Debonding speed 등 3가지 인자에 대한 민감도 시험을 1차로 진행하였다.

상기 설명된 Adhesion tester를 이용하여 진행한 민감도 시험 결과를 아래 그림들로 표현하였다. 하중 조건을 저하중 (10~40 gf) 조건과 고하중 (100~400 gf) 조건으로 하중 영역을 분리하여 2종류의 하중 영역에서 하중과 Bonding Time 그리고 Debonding 속도 조건을 변경하면서 시험한 결과를 Figure 14~Figure 19에 표현하였다.

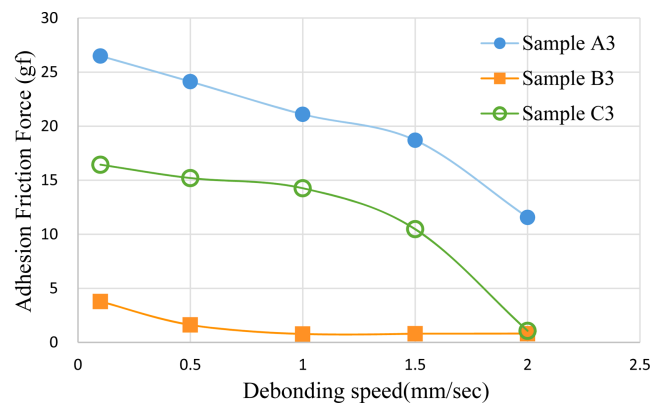
3종의 고무에 대하여 저하중 조건(10~40 gf)에서 하중을 증가시키며 Adhesion Friction Force의 변화 경향을 살펴 보았다. 시험 결과에 따르면 고무 종류에 관계없이 하중이 증가하면 Adhesion Friction Force는 증가하는 경향을 보였다. 이는 하중 증가에 따라 고무와 Glass Ball의 접촉 면적이 증가하여 계면에서의 Van der Waals Force가 증가하기 때문으로 판단된다.



**Figure 14.** Trends of adhesion friction variation with load increase in low load areas.



**Figure 15.** Trends of adhesion friction variation with bonding time increase low load areas.

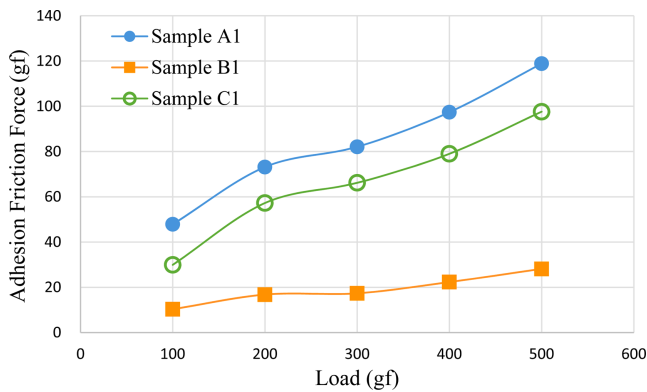


**Figure 16.** Trends of adhesion friction variation with debonding speed increase low load areas.

40 gf의 하중 조건에서 접촉 시간을 의미하는 Bonding 시간을 증가시켰을 때의 Adhesion Force의 변화 양상을 살펴 보았다. Figure 15에 의하면 동일한 하중 조건(40 gf)에서 접촉 시간이 증가하면 Adhesion Force의 크기는 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 접촉 시간의 증가로 고무의 Stress Relaxation 현상으로 실 접촉 면적이 증가하기 때문이다.<sup>8</sup>

Figure 16은 저하중(40 gf) 조건에서의 Debonding 속도 (mm/sec) 변화에 따른 고무와 Glass ball의 Adhesion Friction 변화 양상을 표현하였다. 저하중 조건에서 Debonding 속도가 증가하면 Adhesion Friction은 감소하는 것으로 분석되었다. 고하중 조건(400 gf)에서도 하중 증가에 따른 Adhesion Friction 변화 경향은 저하중 조건과 동일한 결과를 보이고 있다. 하중이 증가함에 따라 Adhesion Friction이 증가하는 경향을 보이고 있다.

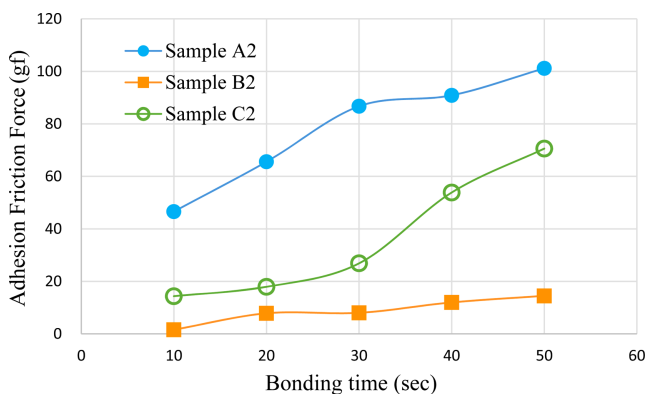
Figure 18에 표현된 것처럼 고하중 조건에서도 Bonding 시간이 증가하면 Adhesion Friction은 증가하는 경향을 보인다. 하중 조건에 관계없이 Bonding 시간이 증가하면 앞에서 언급한 것처럼 접촉 면적의 증가로 Van der Waals 힘이 증가하기 때문이다. 반면에 고하중 조건에서는 Figure 19에 표현된 것처럼, 고무 시편의 특성에 따라 상이한 결과를 보이고 있다. 높은 Adhesion Friction을 보이는 Sample A3의 경우에는



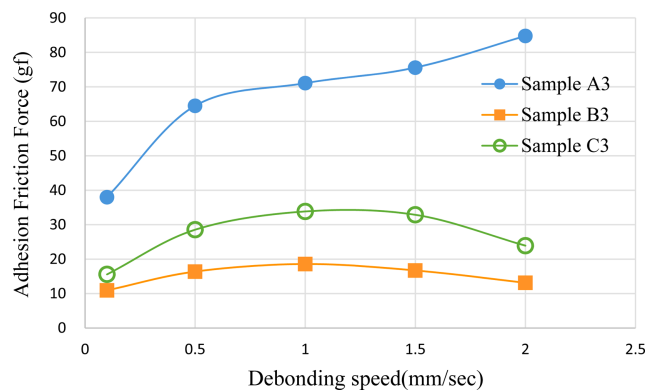
**Figure 17.** Trends of adhesion friction variation with load increase high load areas.

Debonding 속도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이나, Sample B3와 Sample C3는 증가하다 감소하는 Adhesion Force의 Peak 값이 존재한다. 이에 대한 해석은 아직 밝혀지지 않았고, 추후 연구과제에서 규명하여야 할 것이다.

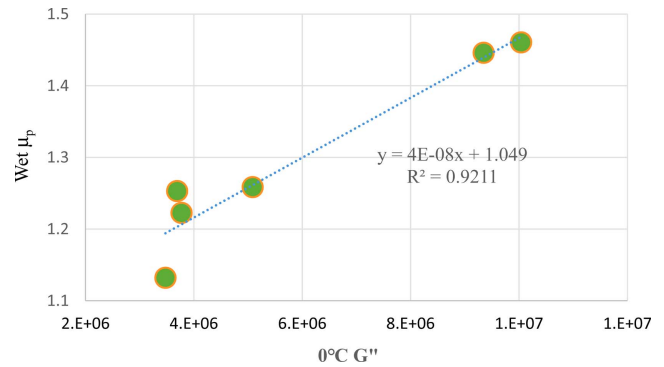
### 3. Wet 노면에서의 Friction에 대한 Hysteresis Friction (0°C G'')과의 상관성



**Figure 18.** Trends of adhesion friction variation with bonding time increase high load areas.



**Figure 19.** Trends of adhesion friction variation with debonding speed increase high load areas.

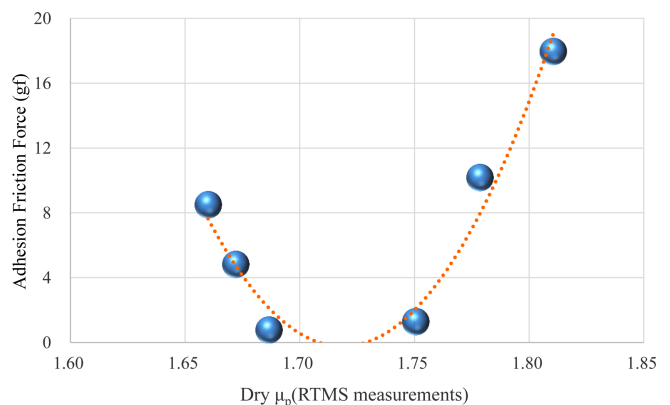


**Figure 20.** Results of correlation analysis between Wet Friction Coefficient and 20°C G''.

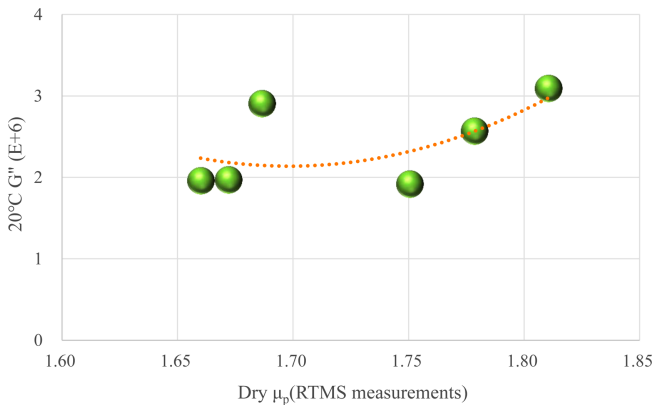
Figure 20은 RTMS를 이용해 측정된 Wet 노면에서의 마찰 특성치인 Peak Friction Coefficient ( $\mu_p$ )와 고무 점탄성 물성인 0°C G'' (Loss modulus) 값과의 상관성 분석 결과를 표현하였다. 분석 결과에 따르면 Wet  $\mu_p$ 와 0°C G''은 매우 높은 상관성을 가지고 있다. 이러한 분석 결과는 기존의 Wet Braking 해석에 활용하고 있는 고무 점탄성 특성치와 동일한 분석 결과로, 젖은 노면에서의 마찰 특성은 Hysteresis Friction에 의하여 결정됨을 의미한다.

### 4. Dry 노면에서의 Friction에 대한 Hysteresis Friction (20°C G'') 및 Adhesion Friction과의 상관성 분석 결과

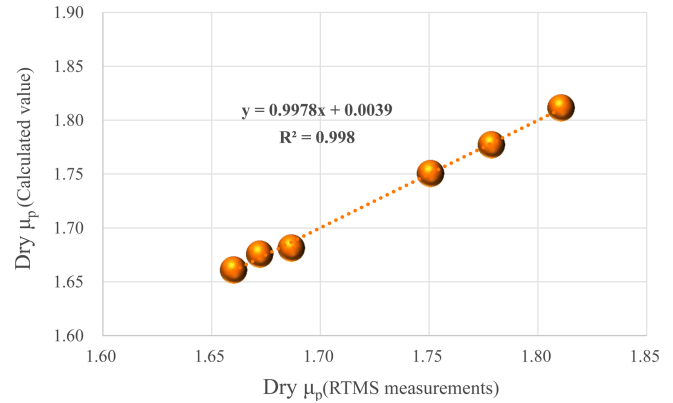
Dry 노면에서의 마찰 특성에 대한 Hysteresis Friction (20°C G'') 또는 Adhesion Friction과의 상관성을 규명하기 위하여 상관성 분석 결과를 Figure 21과 Figure 22에 표현하였다. 분석 결과에 따르면 Adhesion Friction Force 또는 G'' 단독 인자는 Dry Friction과 상관성이 없음을 확인 할 수 있었다. 이는 Dry 노면에서의 Friction 특성을 이해하기 위해서는 Adhesion Friction Force 또는 G''에 대한 개별적 특성치로 설명하기에는 부족함이 있음을 의미한다. 즉 Dry Friction은 Wet Friction과 상이하게 Hysteresis Friction에 의해서만 결정되는 것이 아



**Figure 21.** Results of correlation analysis between dry friction and adhesion friction.



**Figure 22.** Results of correlation analysis between dry friction and 20°C G''.



**Figure 23.** Results of correlation analysis between  $\mu_p$  measured and  $\mu_p$  calculated on the dry road surface.

**Table 2.**  $\mu_p$  Calculated Using Equation 4 and Measured with RTMS

$\mu_p$ (Dry)	RTMS measurements	1.811	1.779	1.672	1.751	1.687	1.660
	Calculated value	1.812	1.777	1.676	1.751	1.681	1.661

니라, 또 다른 마찰 인자의 영향을 받는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위하여 Dry 마찰 계수를 식 (4)와 같이 고무의 Hysteresis Friction Force와 Adhesion Friction Force라는 두 종류의 parameter로 표현하였다.

$$\text{Dry } \mu_p = a * F1 \text{ (Hysteresis Friction Force)} + b * F2 \text{ (Adhesion Friction Force)} + c \quad (4)$$

실제 적용한 값은 식 (5)와 같이 Adhesion Friction은 앞에서 설명한 Adhesion Tester로 측정한 시험값을 사용하였고, Hysteresis Friction 20°C G'' 값을 이용하였다.

$$\text{Dry } \mu_p = a \times F1 \text{ (20°C G'')} + b \times F2 \text{ (Adhesion Friction Force)} + c \quad (5)$$

기울기 a, b와 절편 c는 실험적으로 결정되는 Parameter를 의미한다. Dry 마찰계수와 상관성을 확보할 수 있는 최적의 함수 F1, F2 그리고 기울기 Parameter를 결정하여 식 (6)으로 표현하였다.

$$\text{Dry } \mu_p = 1.31 \times 10^{-7} G''(20^\circ\text{C}) + 0.0367f_a + 1.5058 \quad (6)$$

여기서 G''은 0.5%, 10Hz 조건에서 20°C의 Loss modulus를 의미하며,  $f_a$ 는 Adhesion Friction Force (N)를 표현한다.

Table 2에 표현된 Simulation 값은 식 (6)을 이용하여 계산한 값을 의미한다.

Dry 노면에서의 Adhesion Friction과 Hysteresis Friction을 이용하여 계산한 Simulation 값과 RTMS를 이용하여 측정한  $\mu_p$  값은 매우 높은 상관성을 보임을 Figure 23으로부터 확인할 수 있었다.

## Conclusions

첫째, 고무의 Adhesion Friction Force는 하중이 증가함에 따라 저하중 영역, 고하중 영역 모두에서 증가하는 경향을 보였다. 그리고 접촉 시간을 의미하는 Bonding time이 증가함에 따라 역시 Adhesion Friction Force 모두 증가하는 경향을 보였다.

둘째, 고무의 Wet Friction 특성은 고무의 Hysteresis Friction 특성에만 의하여 결정된다. 본 연구 결과에 의하면 타이어 트레드용 고무의 Wet Friction은 얇은 수막의 영향으로 Adhesion Friction 특성은 고려할 필요가 없고 고무 외부 변형으로 인한 고무 내부 조성 입자들의 Internal Friction에 의해 유발되는 Hysteresis energy만 고려하면 된다.

셋째, Dry Friction의 경우는 고무 Hysteresis 특성과 Adhesion 특성 모두를 고려해야 한다. 본 고에서는 Dry Friction에 분석 결과에 따르면 Hysteresis Friction (20°C G'')과 Adhesion Friction ( $f_a$ )을 모두 고려한 식 (6)과 같이 표현할 수 있었음을 확인하였다.

$$\text{Dry } \mu_p = 1.31 \times 10^{-7} G''(20^\circ\text{C}) + 0.0367f_a + 1.5058 \quad (6)$$

## References

1. P. Moldenhauer, R. NEPP, and M. Kroger, *Plastics, Rubber and Composites*, **40**, 169 (2011).
2. H. W. Kummer, "Unified theory of rubber and tire friction. Pennsylvania Uni.", *Engineering Research Bulletin* **B-94**, 1966.
3. K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts, *Proc. R. Soc. London A.*, **324**, 301 (1971).



4. M. Kroger and K. Popp, "Rauheitseinfluss auf die Adhasion von Elastomeren", *PAMM Proc. Appl. Math. Mech.*, **4**, 99 (2004).
5. M. Kroger and S. Nitzsche, "Adhesion of Rubber on Smooth and Rough Surfaces", *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **4**, 28 (2018).
6. M. Kroger, "Adhesion Effects in the Contact between Rubber and Counterpart", *ECCMR VIII San Sebastian*, 71 (2013).
7. P. Andersson, "Modelling Interfacial Details in Tyre/Road Contact-Adhesion Forces and Nonlinear Contact Stiffness", PhD thesis, Chalmers Uni. of Tech., *Gothenborg*, Sweden (2005).
8. P. Moldenhauer, M. Lindner, M. Kroger, and K. Popp, "Modelling of Hysteresis and Adhesion Friction of Rubber in Time Domain", *Constitutive Models for Rubber IV (ECCMR)*, Stockholm, 515 (2005).