

노면 특성을 고려한 고무 마찰 예측 연구

남 승 국* · 오 염 락 · 전 성 희

한국타이어 중앙연구소

The Prediction of Rubber Friction considering Road Characteristics

Seungkuk Nam* · Yumrak Oh · Seonghee Jeon

R&D Center, Hankook Tire Co. Ltd., 112 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-725, Korea
(Received 28 August 2013 / Revised 13 December 2013 / Accepted 18 December 2013)

Abstract : This paper presents the hysteresis friction of a sliding elastomer on various types of surfaces. The hysteresis friction is calculated by means of an analytical model which considers the energy spent by the local deformation of the rubber due to surface asperities. By establishing the fractal character of the surfaces, the contribution to rubber friction of roughness at different length scales is accounted for. High resolution surface profilometer is used in order to calculate the main three surface descriptors and the minimal length scale that can contribute to hysteresis friction. The results show that this friction prediction can be used in order to characterize in an elegant manner the surface morphology of various surfaces and to quantify the friction coefficient of sliding rubber as a function of surface roughness, load and speed.

Key words : Macro roughness(마크로 거칠기), Micro roughness(마이크로 거칠기), Rubber friction(고무 마찰), Fractal dimension(프랙탈 차원), Hysteresis(히스테리시스), HDCF(높이차 상관 함수), Self affine(자기 아파인)

Nomenclature

- ξ_h : horizontal cut-off length
- ξ_v : vertical cut-off length
- H : hurst exponent
- D : fractal dimension
- μ_{Hys} : hysteresis friction force coefficient
- F_{Hys} : hysteresis friction force
- F_N : normal force
- G'' : loss modulus
- σ_0 : nominal contact pressure
- $\langle \delta \rangle$: mean excitation depth
- $\langle Z_p \rangle$: mean penetration depth

1. 서 론

노면 마찰 관점에서 차량 주행 중 안정성을 확보 하기 위해 가장 중요한 것 중 하나는 큰 마찰을 주어 차량의 미끄러짐을 최소화하는 능력이다.¹⁾ 초기 연구에서는 노면 마찰의 두 주요 성분으로서 점착 (adhesion)과 히스테리시스 (hysteresis)의 존재를 강조하였다.²⁾ 점착 성분은 도로와 타이어 표면 사이의 분자 간 접촉지점의 전단 때문에 발생한다. 이 성분은 도로가 매끄러울 때 특히 더 중요하다. 그렇지만, 도로가 거칠고 젖어 있는 경우에, 점착은 큰 의미가 없어진다.²⁾ 히스테리시스는 골재의 마이크로 거칠기 및 아스팔트 콘크리트 노면의 마크로 거칠기 특성에 의하여 타이어 고무가 주기적으로 변형하는 데에서 생겨난다. 두 가지의 표면 구조, 곧 마이크로 거칠기(1 μ m ~ 0.5mm) 및 마크로 거칠기(0.5mm ~

*Corresponding author, E-mail: 20600014@hankooktire.com

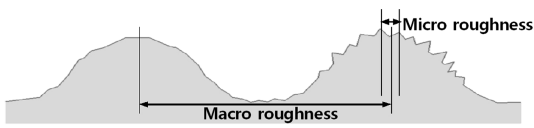


Fig. 1 Macro roughness and micro roughness

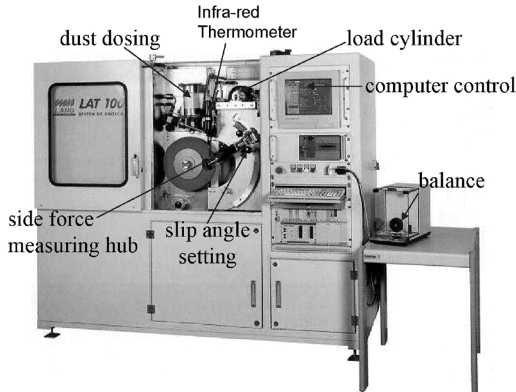


Fig. 2 Photograph of the LAT-100

50mm)가 마찰에 영향을 준다(Fig. 1). 특히 젖고 거친 노면의 경우, 히스테리시스만이 마찰에 영향을 주는 성분으로 남게 되므로,²⁾ 이는 중요한 연구 과제이다. 본 연구에서는, 마찰 표면이 고무 마찰에 기여하는 부분을 조사하였으며, 이를 위해 LAT-100 마찰 장비에서 제공해주는 다양한 커런덤 노면을 활용하였다(Fig. 2). 이 장비는 속도, 하중, 온도 등을 조절하는 것이 가능하며 Dry, Wet, Ice 조건에서 마찰 평가가 가능한 장비이다.

그 중요성에도 불구하고 노면에서 미끄러지는 고무의 히스테리시스를 정량적으로 예측하는 것은 여전히 만만치 않다. 실험에서 얻은 결과를 보면, 마찰은 노면 형태의 다양한 길이 척도에 따라 달라지며, 또한 미끄럼 속도, 하중 및 온도와 같은 여러 가지 변수에 크게 의존한다. 실제 응용에서 이 효과들의 영향과 기여를 분리하기 어렵기 때문에, 수학적 모델은 이러한 효과들을 분리하는 데에 적합한 도구이며, 따라서 고무 마찰의 기초적인 원리를 좀 더 분명하게 이해하는 데에 도움을 준다.

본 논문에서는, 자기 아파인 표면에 관해서 먼저 소개한 다음, Heinrich와 Kluppel³⁾이 개발한 접근법에 기초하여 노면에 대한 고무 마찰 히스테리시스의 일반화된 모델링을 소개한다. 세 가지 종류의 노

면에서 고무가 미끄러질 때의 상호작용을 분석한다. 이 때의 노면은 커런덤 #24, 커런덤 #60, 커런덤 #180을 사용한다. 노면 거칠기는 비접촉식 거칠기 측정 장비를 사용하여 프로파일을 얻었다. 이 프로파일의 길이는 150mm이며 매 0.01mm마다 샘플링을 하였다.

2. 마찰 표면의 자기 아파인 특성

표면 거칠기는 그 이상적인 형태로부터 실제 표면의 수직 편차 $z = h(x, y)$ 로 정의되고 정량화된다. 이 편차가 클수록 표면은 더 거친 것으로 간주되며 편차가 작다면 표면은 매끄러운 것으로 분류된다. 거칠기는 대개 산술 평균 Ra , 제곱 평균 Rq 또는 평균 표면 거칠기 Rz 와 같은 단순한 변수를 이용하여 규정된다. 그렇지만, 대부분의 표면은 거의 자기 아파인 프랙탈이 되는 경향이 있으며, 이러한 변수는 다소 낮은 배율에서 관측 가능한 표면 거칠기가 지배적이므로, 이러한 변수로는 거칠기를 올바르게 설명할 수 없다. 지난 20여 년 사이에, 여러 표면들의 프랙탈 성질이 규명되었다. 본 접근법에서는 마찰 표면의 자기 아파인 특성을 이용한다. 자기 아파인 프랙탈 표면은, 만일 평행(평면) 방향과 비교하여 표면에 수직인 방향으로 각각 다른 확대 배율로 표면의 일부를 확대한 경우에 “똑같이 보이고” 이렇게 척도 변경을 했을 때 통계적인 특성이 변함이 없다는 특징이 있다(Fig. 3).

즉 중요한 정보를 잃어버리지 않고 여러 다른 길이 척도에서 표면 거칠기를 설명하는 가장 좋은 방법은 표면의 프랙탈 특성을 이용하는 방법이라 할 수 있다.

표면을 특징짓기 위하여 표면 프랙탈 차원 D 를

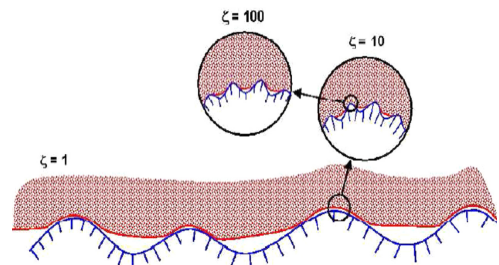


Fig. 3 Contact region with magnification ζ

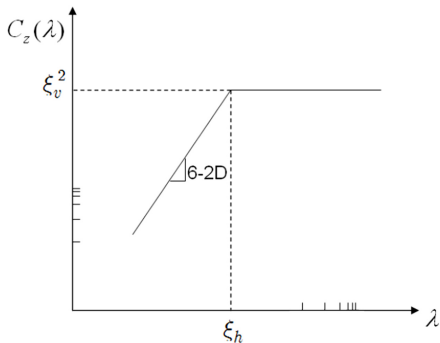


Fig. 4 Height difference correlation function

규명해야 하는데, 이것은 상위 차단 길이보다 길이 척도가 더 작은 표면 거칠기의 정량적인 척도이다. 물리적으로, 상위 차단 길이(수평 및 수직 상관 길이 ξ_h 및 ξ_v 으로 특징지어짐)는 가장 큰 표면 기복으로 규명되는 한편, 하위 차단 길이는 기본적으로 측정 기기의 공간 해상도에 의하여 한계가 정해진다.

앞에서 정의한 변수들을 계산하기 위해서 사용할 수 있는 여러 가지 상관 함수들 중, 식 (1)에 나타난 것과 같은 높이차 상관 함수를 사용하였다.

$$C_z(\lambda) = \langle (z(x+\lambda) - z(x))^2 \rangle \quad (1)$$

이것은 수평 길이 척도 λ 에 따른 표면의 평균 제곱 높이 변동을 의미한다. 자기 아파인 표면의 경우, 두 가지 서로 다른 그래프 부분으로 구분할 수 있다(Fig. 4). λ 값이 작은 경우, 상관 함수는 거듭제곱법칙을 따른다. (여기에서는 노면이 자기 아파인 특성을 보인다.) 프로파일의 수평 차단 길이를 넘어서면, 자기 아파인이 깨지고 상관 함수는 일정한 값을 갖는다.

$$C_z(\lambda) = (\lambda/\xi_h)^{2H} \xi_v^2 \quad \text{여기서, } \lambda < \xi_h \quad (2)$$

$$C_z(\lambda) = \xi_v^2 \quad \text{여기서, } \lambda > \xi_h \quad (3)$$

이 높이차 상관 함수를 활용하면 표면의 거칠기 특성을 명쾌하고도 시각적으로 비교하고 표현하는 것이 가능할 뿐만 아니라, 그 다음 절에서는 프랙탈 표현이 고무-노면 상호작용의 마찰 특성을 결정하는 데에 특히 더 적합함을 설명할 것이다.

2.1 프랙탈 이론을 정현파 표면에 응용

실제 마찰 표면의 특성을 조사하기 전에, 마이크

로 거칠기와 진폭이 상관 함수의 형태에 미치는 영향을 입증하기 위하여, 이 절에서는 세 가지 서로 다른 정현파 프로파일을 조사한다. 프로파일에 연관된 함수를 식 (4), (5) 및 (6)에 나타내었다.

4번 함수의 프로파일은 마이크로 거칠기 없이 마크로 거칠기만 발달된 프로파일이고, 5번, 6번 함수의 프로파일은 마이크로 및 마크로 거칠기가 동시에 발달된 프로파일 형태이다.

$$f_1 = \cos\left(2\pi \frac{x}{20}\right) \quad (4)$$

$$f_2 = \cos\left(2\pi \frac{x}{20}\right) + 0.25 \cos\left(2\pi \frac{x}{3}\right) \quad (5)$$

$$f_3 = \cos\left(2\pi \frac{x}{20}\right) + 0.55 \cos\left(2\pi \frac{x}{3}\right) \quad (6)$$

Fig. 5에 표현된 정현파 트랙을 고려하여, Fig. 6에 그려진 통계 특성을 얻을 수 있다.

정현파 트랙의 미세 구조를 증가시키면, 1mm보다 작은 길이 척도에서 높이차 상관 함수가 이동할 뿐만 아니라 3 ~ 10mm 범위에서 심하게 진동하는 거동을 보임을 알 수 있다. 각 정현파 프로파일의 진폭이 같기 때문에, Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 모든 트랙에 대하여 차단 길이가 같을 것이다.

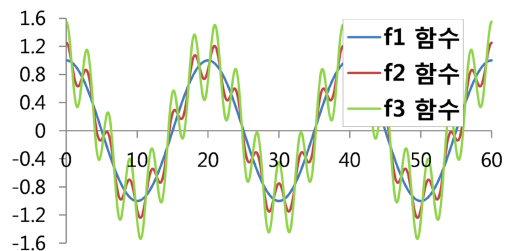


Fig. 5 Various sinusoidal track functions

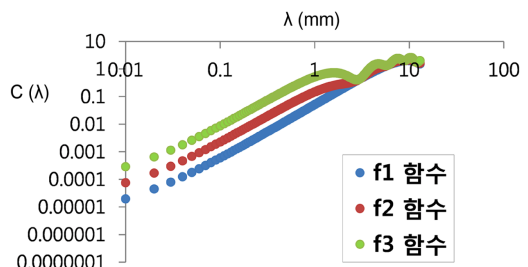


Fig. 6 Fractal characterization of sinusoidal tracks

2.2 이론을 LAT-100 커런덤 노면에 응용

LAT-100 마찰장비에서 제공하는 세 가지 종류의 노면(커런덤 #24, 커런덤 #60, 커런덤 #180)을 프랙탈 이론을 이용하여 분석한다. (참고 : 숫자가 높을 수록 점점 더 Smooth 함.)

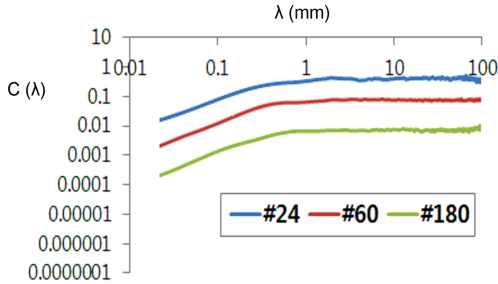


Fig. 7 HDCF for corundum tracks

Fig. 7은 시험한 세 가지 종류의 노면에 대한 높이 차 상관 함수를 보여준다. 위의 결과를 기초로 하여, 커런덤 #24 노면의 경우, 마크로 거칠기 뿐만 아니라 마이크로 거칠기에서도 가장 크게 표면의 기복이 있다는 것을 알 수 있다. 그렇기 때문에 고무가 커런덤 #24 노면 위를 미끄러지는 동안 다른 노면 대비 에너지 히스테리시스의 관점에서, 고무가 변형되는 양이 클 것이다.

Table 1 Characterization for corundum tracks

Descriptors	#24	#60	#180
H	0.480	0.549	0.587
ξ_v^2	0.386	0.089	0.009
ξ_h	0.487	0.501	0.524

3. 고무-노면 히스테리시스 마찰 모델링

Grosch^{4,5)}가 미끄럼 속도와 온도가 고무의 마찰에 미치는 영향에 관하여 수행한 기초 연구는 본 주제의 연구에 큰 영향을 끼쳤다. Grosch는 미끄러지고 있는 조건 하에서 마찰 계수 대 속도(로그 스케일) 그래프가 종 (bell) 모양임을 나타낸다고 발표하였으며, 그래프는 점탄성 재질에 대한 시간-온도 등가 원리를 이용하여 속도와 온도가 마찰에 미치는 영향을 연관 짓는다.

Persson^{6,7)}과 Heinrich와 Kluppel³⁾은 현상을 이론

적으로 이해하는 데에 큰 기여를 하였다. 다음 논의에서는 Heinrich와 Kluppel의 모델에 집중한다. 그렇기는 하지만, 현상을 분명히 하기 위해 Persson방법에 몇 가지 의견을 제시한다.

Persson^{6,7)}은, 낮은 탄성계수 때문에 계면의 자유 에너지가 고무를 변형시키고 나노 스케일로 표면의 공동을 채운다고 명시한다. 미끄럼 속도가 낮은 경우에 이것은, 고무로 하여금 강제로 짧은 파장의 표면 거칠기 프로파일을 따르도록 하여 점착 성분이 마찰을 지배하게 한다. 젖어 있는 상태에서는, 전체 마찰 중에서 점착 성분은 현저하게 줄어들지만, 히스테리시스 마찰은 그대로 남는다. 이 말은, 현재 물이나 세제를 활용하고 있는 실험실 시험 조건에서, 마찰 계수는 대개 히스테리시스 마찰에 의존함을 뜻한다. 단축 변형이라는 가정 하에, 마찰 이력은 에너지 히스테리시스와 관련 있기 때문에, 다음과 같이 응력 σ 및 변형률 ϵ 의 함수로 계산할 수 있다.⁸⁾

$$\Delta \tilde{E}_{diss} = \int_0^V \int_0^T d^3x dt \sigma \dot{\epsilon} \quad (7)$$

응력과 변형률에 푸리에 변환을 도입하면, 식 (8)과 식 (9)를 얻을 수 있으며, 이와 복소 탄성 계수 식 (10)을 식 (7)에 대입하면, 에너지 소산은 식 (11)과 같이 얻어진다.

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega \hat{\sigma}(\omega) e^{-i\omega t} \quad (8)$$

$$\epsilon(t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega \hat{\epsilon}^*(\omega) e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$E(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) = \begin{pmatrix} \hat{\sigma}(\omega) \\ \hat{\epsilon}(\omega) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta \tilde{E}_{diss} = \frac{V}{2\pi} \text{Im} \int d\omega \int d\omega' \omega' \delta(\omega - \omega') E(\omega) \hat{\epsilon}^*(\omega') \quad (11)$$

여기에서 $\delta(\omega - \omega')$ 는 디랙 델타 함수이다. 이력 마찰력에 의하여 생성된 힘에 따른 시간 단위 당 히스테리시스 된 에너지를 규명하면, 다음과 같다.

$$\frac{\Delta E_{diss}}{T} = F_H V \quad (12)$$

히스테리시스 마찰 계수는 다음과 같이 얻을 수 있다.⁸⁾

$$\mu_{Hys} = \frac{F_{Hys}}{F_N} = \frac{1}{2(2\pi^2)} \frac{\langle \delta \rangle}{\sigma_0 \nu_s} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} d\omega \omega G''(\omega) \frac{H\xi_v^2}{2\pi\nu\xi_h} \left(\frac{\omega}{\omega_{min}}\right)^{-\beta} \quad (13)$$

점탄성 마스터 커브 G'' 는 주파수의 함수로 실험적으로 결정 되어야 하기 때문에, 식 (13)을 사용할 때에는 고무의 특징을 제대로 규명할 필요가 있다. 이에 이어 Le Gal⁹⁾의 연구에서, 식 (13)에서 고무가 표면 안으로 들어가는 평균 침투 깊이 $\langle z_p \rangle$ 는 $\langle \delta \rangle$ 로 치환되었다. $\langle \delta \rangle$ 는 고무가 표면의 거칠기와 접촉함으로써 가진된 층이다. 두 변수의 치환은 가진된 히스테리시스 체적을 적게 예측할 가능성을 감안하여 이를 수정하는 변수 b 를 사용한다.¹⁰⁾

$$\langle \delta \rangle = b \langle z_p \rangle \quad (14)$$

각진동수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega = 2\pi v / \lambda \quad (15)$$

$$\omega_{min} = 2\pi v / \xi_h \quad (16)$$

$$\omega_{max} = 2\pi v / \lambda_{min} \quad (17)$$

식 (13)의 마찰 모델을 이용하여 실리카 필러가 보강된 고무의 히스테리시스 마찰 성능 예측을 실시했으며, 이 결과를 젖은 노면에서의 LAT-100 마찰 시험 결과와 비교하였다.

마찰 예측 결과와 측정 결과 간에 절대 값의 차이

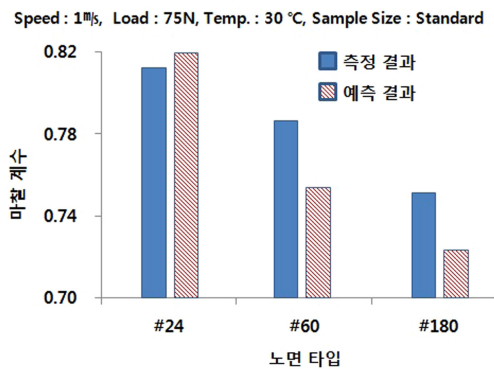


Fig. 8 Measuring & Prediction

는 있었으나 둘 간의 상관성은 높은 상관성을 보여 주었다. 하지만 #60, #180 노면에서의 예측 결과는 #24 노면에서의 예측 결과에 비해 상대적으로 큰 차이를 보여주었는데 이에 대해서는 마찰의 두 주요 성분 중 하나인 점착의 영향으로 인한 것이라 판단된다. 젖은 노면에서의 마찰 시험 조건에서는 고무와 노면의 직접 접촉을 수막이 방해하기 때문에 히스테리시스를 고무 마찰의 지배적인 요인이라 보고 점착으로 인한 영향을 배제하여 단순화 시켰지만 실제 예측 결과에서 알 수 있듯이 점착의 특성이 예측 결과의 정확성에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결론 및 전망

현재 타이어-노면 사이의 마찰 현상을 정확하게 설명하고 마찰 계수를 예측하는 것은 많은 어려움을 내포하고 있다. 그러나 기업에서 타이어 디자인을 위한 시뮬레이션은 사실상 필수적이며, 그곳에서는 마찰 계수의 설정이 중요한 문제가 된다. 하지만 타이어의 연구 개발에 있어서 마찰 계수의 설정은 실험값을 이용하고 있는 것이 현실이다. 그러나 실험에 의해 얻어진 마찰 계수는 분석 정확도에 문제가 있을 수 있으며, 또한 실험은 많은 비용과 시간을 요구한다. 따라서 마찰 계수를 정확하게 예측할 수 있는 수학적 모델을 구축하고 다양한 조건에서의 마찰 계수를 이론적으로 구할 수 있다면, 타이어 개발에 있어서 비용 절감 및 개발 기간 단축, 시뮬레이션 정밀도의 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 노면의 자기 아파인 프랙탈 특성을 이용하여 정량화 하고 이를 이용하여 여러 가지 노면에서 미끄러지는 고무의 마찰을 예상하는 데에 마찰 예측 모델을 적용하는 것을 제시하였다. 결과를 보면 마찰 예측 결과와 측정 결과 간에 절대 값의 차이는 있었으나 둘 간의 상관성은 높은 상관성을 보여 주었으며 이로 미루어 보아 마찰 예측 모델은 각 인자에 대한 효과들을 분리하는 데에 적합한 도구이며, 따라서 고무 마찰의 기초적인 원리를 좀 더 분명하게 이해하는 데에 도움을 줄 수 있다고 판단을 내릴 수 있었다. 하지만 점착의 영향이 마찰 예측 정확도에 영향을 주었다라고 판단되어 이에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- 1) Y. N. Lee and S. J. Park, "Measurement of Friction Coefficients for Motorcycles Sliding in Various Conditions," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2588-2596, 2012.
- 2) D. F. Moore, The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier, New York, 1975.
- 3) M. Kluppel and G. Heinrich, "Rubber Friction on Self Affine Road Tracks," Rubber Chemistry & Technology, Vol.73, No.4, pp.578-606, 2001.
- 4) K. A. Grosch, "Relation between the Friction and Visco-elastic Properties of Rubber," Proceedings at Royal Society London, A274, Vol.274, No.1356, pp.21-39, 1963.
- 5) K. A. Grosch, "Rubber Friction and Its Relation to Tire Traction," Rubber Chemistry and Technology, Vol.80, No.3, pp.379-411, 2007.
- 6) B. N. J. Persson, Sliding Friction: Physical Principles and Applications. Springer Verlag, Berlin, 2001.
- 7) B. N. J. Persson, "Theory of Rubber and Contact Mechanics," Journal of Chemical Physics, Vol.115, No.8, pp.3840-3861, 2001.
- 8) G. M. Kluppel and T. A. Vilgis, "Evaluation of Self-affine Surfaces and Their Implication for Frictional Dynamics as Illustrated with a Rouse Material," Computational and Theoretical Polymer Science, Vol.10, No.1, pp.53-61, 2000.
- 9) A. Le Gal and M. Kluppel, "Investigation and Modelling of Rubber Stationary Friction on Rough Surfaces," J. Phys. Condens. Matter, Vol.20, No.1, pp.1-13, 2008.
- 10) S. Westermann, F. Petry, R. Boes and G. Thielen, "Experimental Investigations into the Predictive Capabilities of Current Physical Rubber Friction Theories," KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Vol.57, No.12, pp.645-650, 2004.