

고무 재료와 제품에 대한 마찰 현상의 이해와 연구 사례



윤정환

한국자동차연구원
책임연구원

1. 서론

고무 재료와 상대 표면 사이의 마찰은 타이어, 컨베이어 벨트, 고무 싹 등 다양한 제품과 환경에서 발생하고 관찰된다. 고무의 마찰은 온도와 주파수 의존성, 응력-변형률 관계의 비선형성 때문에 매우 복잡한 주제이다. 또한 모든 고체는 일반적으로 표면 거칠기를 가지며, 이는 접촉 역학에 큰 영향을 미친다. 고무의 마찰과 마모는 고무와 다른 재료 사이의 슬라이딩 마찰에 의해 발생하는 에너지 손실과 관련이 있으며, 제품의 성능과 수명에 영향을 준다. 따라서 고무의 마찰과 마모에 대한 이해는 제품의 성능 개선에 기여할 수 있다.

정밀한 공학적 응용을 위해서는 안정적인 슬라이딩 운동이 설계되어야 한다. 마찰력의 변동성은 위치에 대한 정확성 및 안정성 측면에서 슬라이딩 시스템의 성능을 크게 저하시킬 수 있기 때문이다. 따라서 마찰이 발생하는 계면의 불안정성은 기계공학 분야에서도 매우 중요하게 다뤄진다. 변동(fluctuations) 현상은 스틱-슬립(stick-slip) 운동과 같은 마찰이 유발하는 진동의 발생과 밀접하게 연결된다.¹⁻³

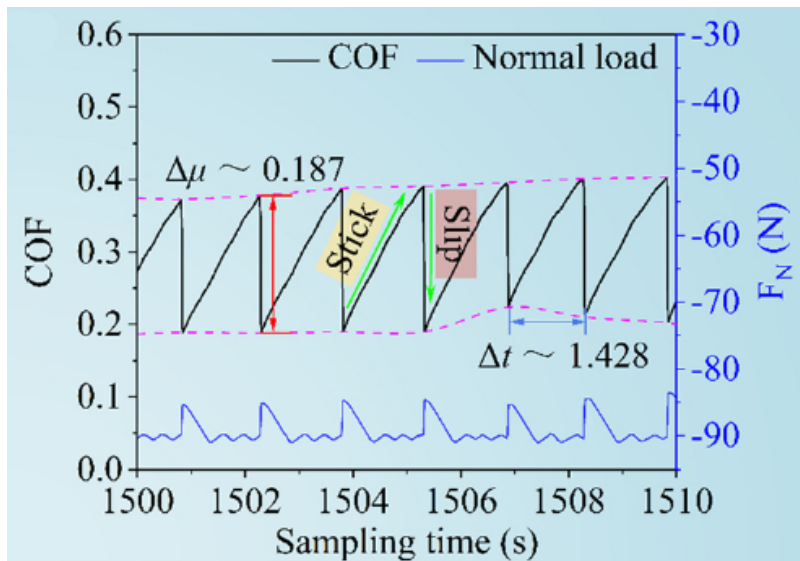


Figure 1. The variation of the coefficient of friction (COF) and the normal force (F_N) of the rubber sample.³

2. 고무 마찰의 특징

대부분의 재료는 다음의 고전적인 마찰 법칙을 따른다.

- (1) 마찰은 수직 하중과 비례한다.
- (2) 마찰은 걸보기 접촉 영역과 무관하다.
- (3) 마찰은 슬라이딩 속도와 무관하다.
- (4) 마찰은 온도와 무관하다.
- (5) 마찰은 표면 거칠기와 무관하다.

그러나 이 법칙은 고무에 적용되지 않는다. 금속과 고무 사이의 접촉은 1번 법칙과 거의 일치하지 않고, 3번 법칙과는 특정 범위의 슬라이딩 속도에서만 일치한다. 나머지 2번, 4번, 5번 법칙은 고무에 적용되지 않는다. 금속과 고무의 접촉은 미시적인 돌기 수준에서 탄성 변형을 일으킨다. 이때, 단일 돌기의 실제 접촉 면적은 2/3의 거둬제곱으로 증가한 하중에 비례한다. 따라서 실제 접촉 면적은 부하에 비례하는 것보다 적게 증가하게 된다. 이에 따라 마찰계수는 하중이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타나기도 한다. 고무와 관련한 접촉에 대한 추가 고려 사항은 점탄성에 의한 기계적 특성의 강한 시간 의존성이다. 변형 속도가 높을수록 고무의 유효 영률도 높아지며, 이는 더 빠른 속도에서 더 낮은 표면 침투로 인

해 더 낮은 실제 접촉 면적과 접촉 마찰을 초래한다. 또한 온도가 상승함에 따라 고무의 영률이 급격히 감소하며 접촉 면적과 접촉 마찰이 증가한다. 온도가 상승하면 고무가 더 부드러워지고 마찰이 증가하여, 실제 접촉 면적이 공칭(nominal) 접촉 면적과 근접하게 된다. 결과적으로, 이러한 고무의 특징은 고무의 마찰에 대하여 다음과 같은 새로운 가정이 적용되도록 한다.

- (1) 고무의 마찰은 수직 하중과 비례하지 않는다.
- (2) 고무의 마찰은 걸보기 접촉 영역과 무관하지 않다.
- (3) 고무의 마찰은 슬라이딩 속도와 무관하지 않다.
- (4) 고무의 마찰은 온도와 무관하지 않다.
- (5) 고무의 마찰은 표면 거칠기와 무관하지 않다.

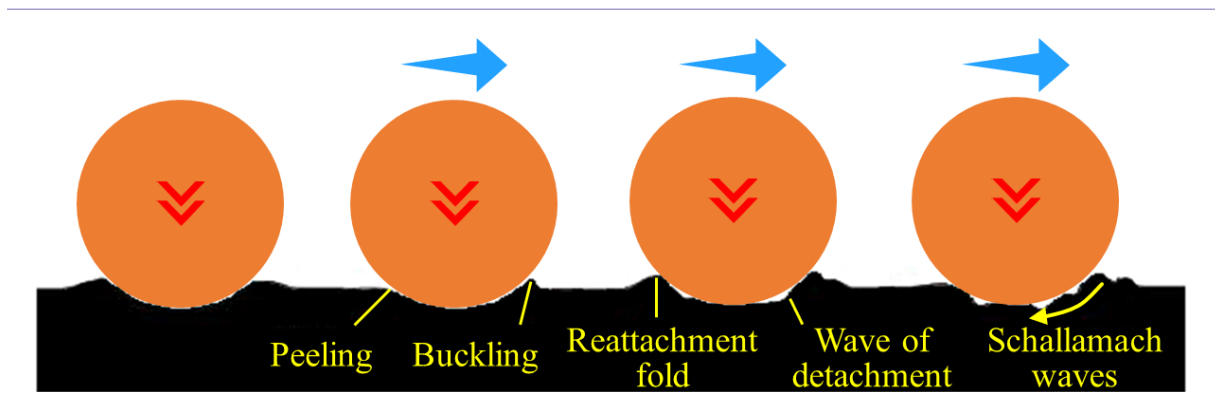


Figure 2. A visual representation of the complex contact phenomenon between rubber and metal.

3. 고무 마찰에 대한 영향 인자

고무의 강성, 점탄성, 내마모성, 내열성, 내화학성 등과 같은 물성이 고무 마찰에 영향을 미친다. 고무의 물성은 고무의 구성 성분, 가교 밀도, 충전제의 종류와 함량, 가공 방법 등에 따라 달라진다. 고무의 물성은 고무의 내부 마찰과 응력 완화 현상에 영향을 주며, 이는 고무 마찰의 주요 기전중 하나이다.⁴ 표면 거칠기는 고무와 상대 표면 사이의 실제 접촉 면적과 압력 분포에 영향을 미친다. 표면은 기하학적 형상, 크기, 방향, 밀도 등에 따라 다양한 특성을 가지며, 고무의 표면에서 Schallamach 파동과 같은 불안정한 변형을 유발한다.⁵

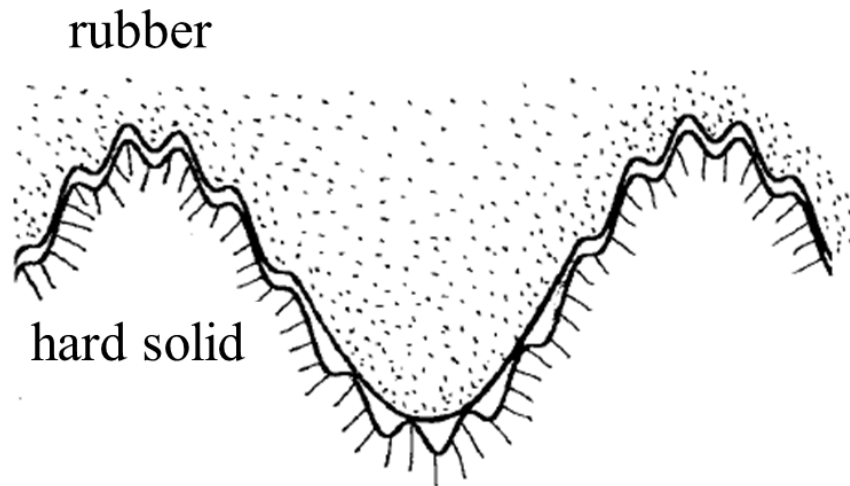


Figure 3. Rubber sliding on a substrate with roughness on two different length scales.⁴

온도는 고무의 점탄성과 내부 마찰에 영향을 미친다. 온도가 높아지면 고무의 탄성률이 감소하고, 내부 마찰이 증가한다. 이는 고무 마찰계수의 온도 의존성을 야기하며, 고무와 상대 표면 사이의 접촉력에도 영향을 미친다. 온도가 높아지면 접촉 면적이 증가하고, 그로 인해 접촉 마찰이 증가한다.⁵ 한편, 습도는 고무와 상대 표면 사이의 접촉력에 영향을 미친다. 습도가 높아지면 고무와 상대 표면 사이에 습기 층이 형성되고, 접촉력이 감소한다. 이는 마찬가지로 고무 마찰계수의 습도 의존성을 야기한다. 또한, 습도는 고무의 물성에도 영향을 미치는데, 습도가 높아지면 고무의 탄성률이 감소하고 내부 마찰이 증가한다.

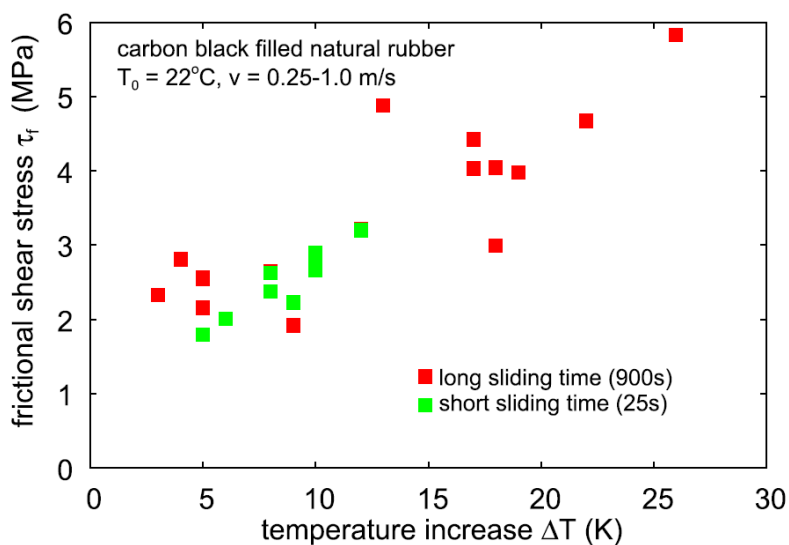


Figure 4. The frictional shear stress in rubber sliding on a smooth surface with increasing temperature.⁵

압력은 고무와 상대 표면 사이의 실제 접촉 면적과 압력 분포에 영향을 미친다. 압력이 높아지면 실제 접촉 면적과 접촉력, 고무의 변형 및 내부 마찰이 증가한다. 압력은 고무의 비선형성과 이력현상(hysteresis)에도 영향을 미치는데, 압력이 높아질수록 고무의 비선형성은 증가하고, 이력현상이 감소한다.⁶

마찰 속도는 고무와 상대 표면 사이의 상대 운동에 따른 마찰력에 영향을 미친다. 속도가 높아지면 고무의 내부 마찰과 마찰력이 증가하고 고무의 응력 완화 시간이 감소한다. 결과적으로 마찰 속도의 증가는 Schallamach 파동의 발생을 증가시킬 수 있고, 고무의 주파수 의존성에 영향을 미친다.⁷ 이와 대조적으로, 슬라이딩 거리의 증가가 마찰력을 감소시킬 수 있다. 일반적으로 슬라이딩 거리가 길어

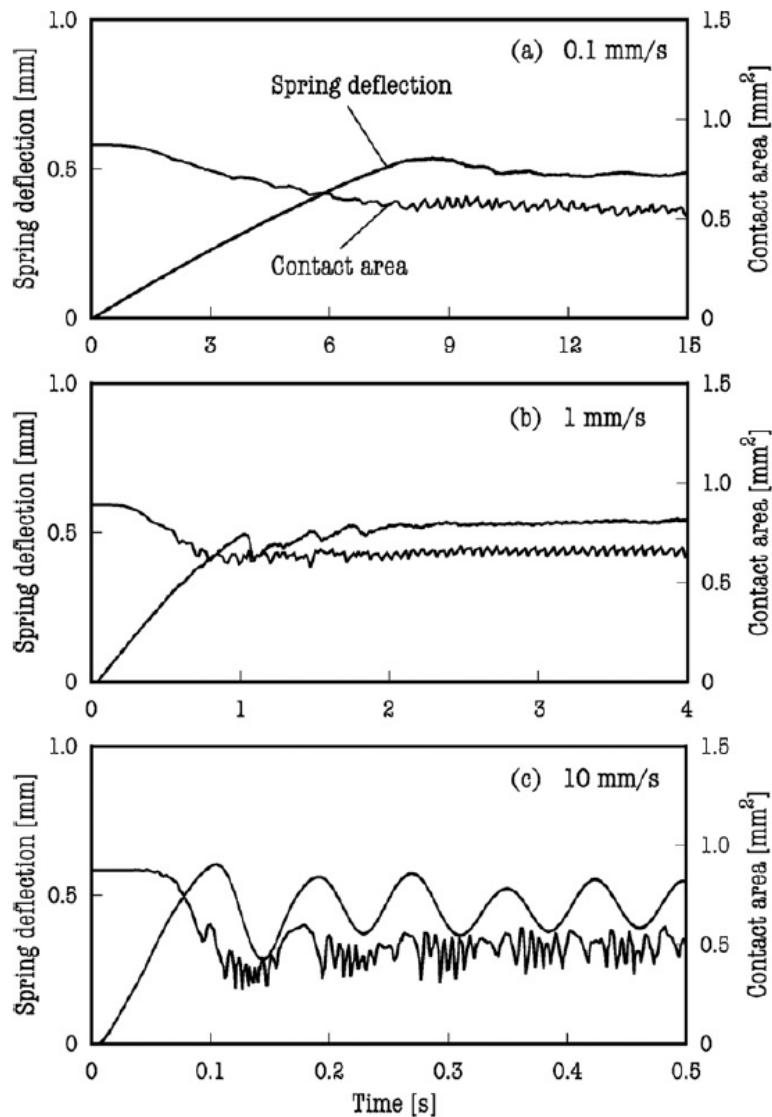


Figure 5. Time evolutions of the spring deflection and contact area for a contact load(W) = 20 mN.⁷

지면 고무와 상대 표면 사이의 오염이 증가하고, 결과적으로 접착력을 감소시킨다. 슬라이딩 거리가 누적되면 고무의 표면 거칠기가 변화하는데, 고무의 마모가 증가하면서 표면 거칠기가 감소하고 접촉 면적이 증가하게 된다.

4. 응력완화와 Schallmach 파동

고무 마찰의 기본 원리 중 하나는 응력완화 현상이다. 응력완화란 고무가 변형될 때 내부 마찰로 인해 일부 에너지가 열로 소실되는 현상을 의미한다. 고무가 변형된 후에 원래의 모양으로 되돌아가는 탄성력과는 반대로, 응력완화는 고무의 이력현상과 연관된다. 응력완화는 고무의 비선형성과 주파수 의존성에도 영

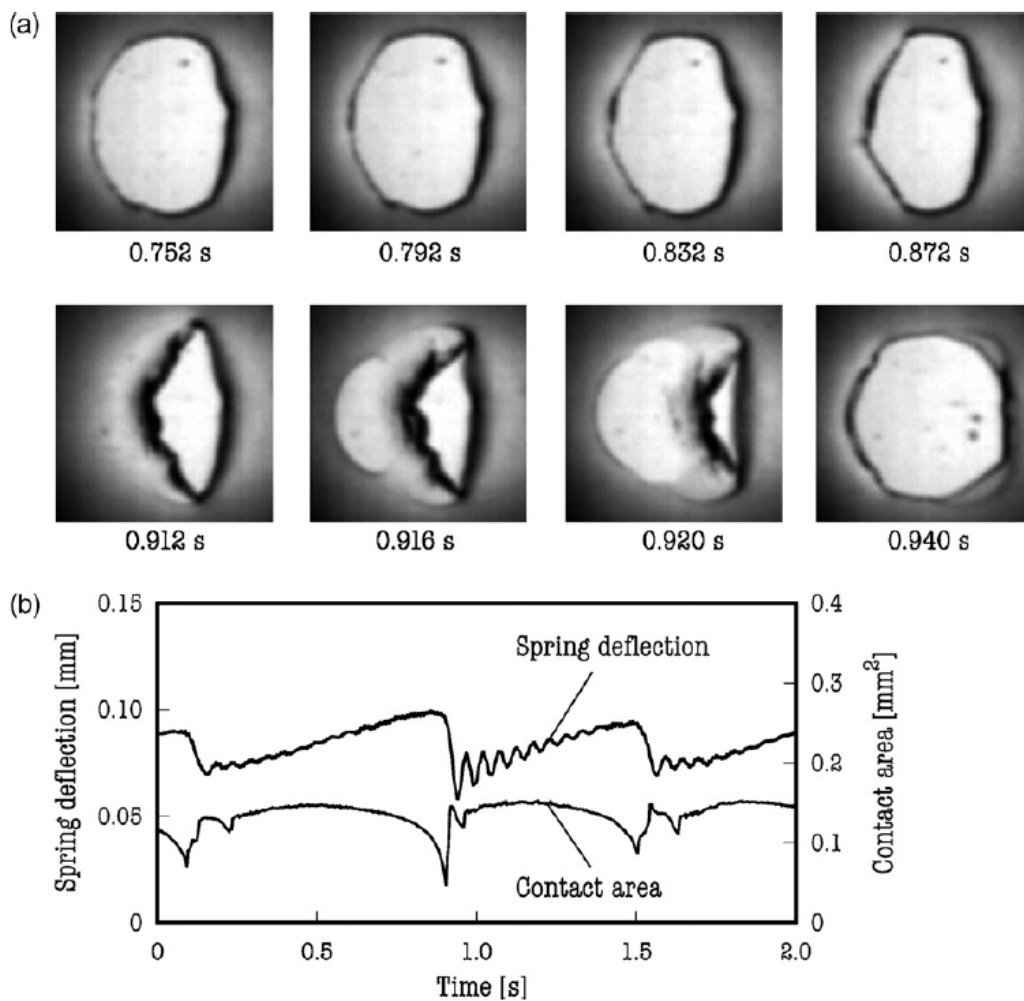


Figure 6. (a) A series of images of the contact zone and (b) time evolutions of the spring deflection and contact area.⁷

향을 미치며, 고무의 마찰에 의해 발생하는 Schallamach 파동의 주요 원인이다.⁸ Schallamach 파동이란 고무와 상대 표면 사이의 접촉면에서 발생하는 불안정한 변형 파동이다. 고무가 상대 표면과 마찰하면 표면에 공기의 터널이나 공극이 생성되고, 이들이 고무의 슬라이딩 방향으로 전파되는 현상을 의미한다. 이러한 파동의 발생과 전파는 고무와 상대 표면 사이의 접착력과 마찰력의 균형에 의해 결정된다. 그리고 앞서 설명한 것처럼 접착력과 마찰력은 고무의 종류, 표면 거칠기, 온도, 습도, 압력, 속도, 슬라이딩 거리 등과 같은 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 따라서 Schallamach 파동의 발생과 전파도 이러한 요인들에 의해 영향을 받는 동시에 고무의 마찰과 마모에 상당한 영향을 미친다. 그리고 고무의 마찰계수와 마찰력의 주기적인 변화를 야기한다.⁹

Schallamach 파동은 Stick-slip의 주요 원인이자 결과이다. Schallamach 파동은 고무와 상대 표면 사이의 접착력과 마찰력의 균형을 깨뜨리고, 고무의 슬라이딩을 방해한다. Schallamach 파동이 발생하면 고무의 마찰력이 급격히 증가하고 고무의 슬라이딩이 멈추는데, 이때 고무는 Stick 상태가 된다. 그리고 다시 파동이 전파되면 고무의 마찰력이 급격히 감소하고 고무의 슬라이딩이 재개되는데, 이때 고무는 Slip 상태가 된다. Schallamach 파동이 반복되면 고무의 마찰력이 주기적으로 변화하고, 고무의 슬라이딩이 간헐적으로 움직이게 되며, 이것이 Stick-slip 현상이다.¹⁰

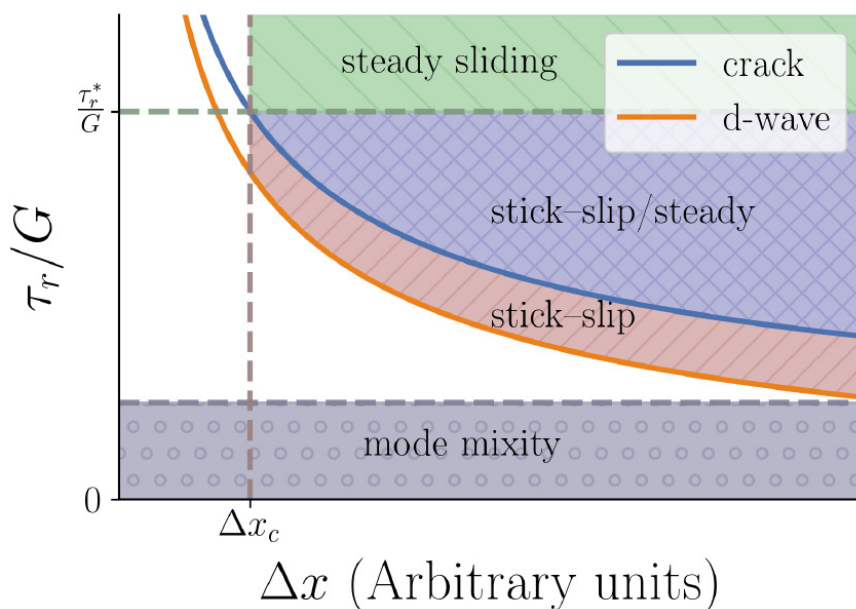


Figure 7. Qualitative phase diagram comparing Schallamach-type detachment waves with shear cracks to predict when stick-slip should occur at the expense of steady sliding; τ_r^* : limiting remote shear stress; G : shear modulus; Δx_c : critical detachment zone size.^{9,11}

5. 제품의 마찰력과 기밀성능

마찰은 자동차 산업의 다양한 공학적 응용 분야에서 중요한 의미가 있다.¹² 그중 고무 씰(seal)은 효율적인 마찰 제어가 필요한 구성 요소이다. 씰은 차량의 기밀성과 음향 성능을 모두 유지하는 데 필수적이므로, 씰의 성능은 많은 엔지니어와 연구자가 주목할 만한 연구 주제이다.¹³⁻¹⁶

자동차 웨더스트립 도어 씰은 마찰계수와 소음을 줄이고, 내구성과 성능을 향상시키며, 자외선 안정성을 향상시키기 위해 특별히 설계된 유기 화합물로 표면이 코팅된다.¹⁷⁻²¹ 그러나 시간이 지남에 따라 이 제품의 표면 특성은 표면 코팅의 고갈 및 마모 현상으로 인한 표면 지형의 변화를 겪는다. 따라서 자동차 성능과 내구성에 대해 계속 증가하는 요구를 충족하려면 이러한 다면적인 마찰 문제를 효과적으로 관리하는 것이 필수적이다.

최근에 발표된 연구에서는 자동차 응용 분야에서 고무 씰의 성능과 내구성을 향상시킬 수 있는 새로운 접근 방식과 보완 특성에 대해 조사되었다.²² 이 연구는 표면 특성의 변화가 기밀성 측면에서 제품의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음을 강조한다.

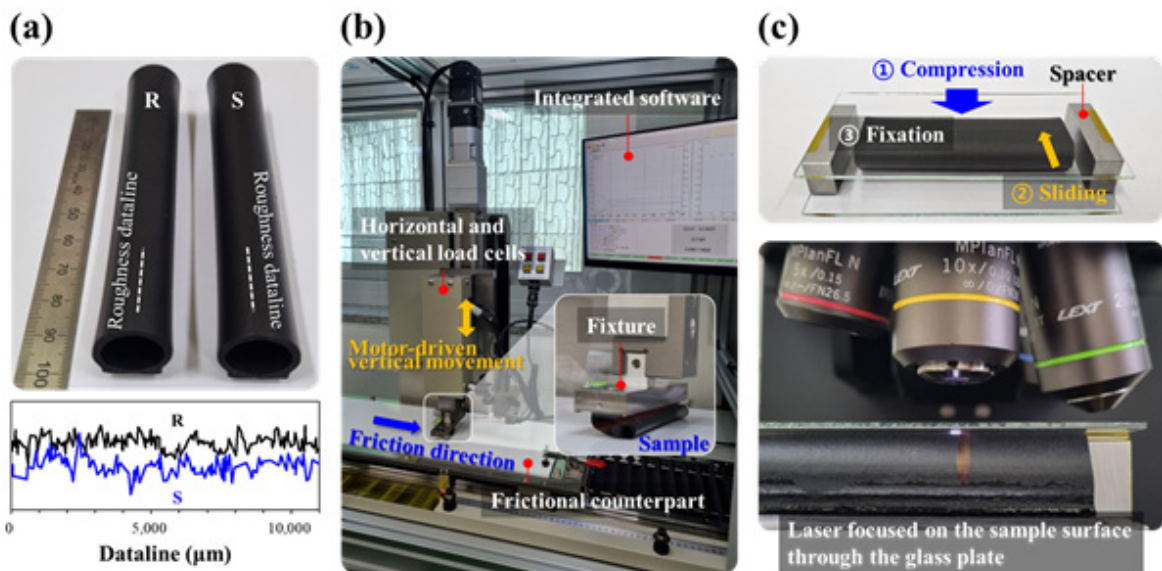


Figure 8. Comprehensive view of the omega seal sample analysis, encompassing (a) sample photographs and line roughness profiles, (b) the friction tester setup, and (c) preparation for simulating friction to observe the surface topography at the interface.²²

이 연구는 마찰계수가 서로 다른 두 오메가 씰(샘플 S와 R)을 사용하여 마찰 변형과 수직 하중의 관계, Stick-slip 현상의 발생, 공칭 접촉 면적과 실제 접촉 면적, 그리고 표면 지형의 변화에 대한 실험적 분석을 기반으로 다음과 같은 결과를 도출했다.

(1) 더 높은 마찰력을 특징으로 하는 샘플 R은 마찰 거리가 길어질수록 F_z 가 많이 감소하는데, 이는 샘플 S에 비해 마찰 방향의 변형이 더 크기 때문이다. 이러한 경향은 높은 압축 수준에서 더욱 두드러진다.

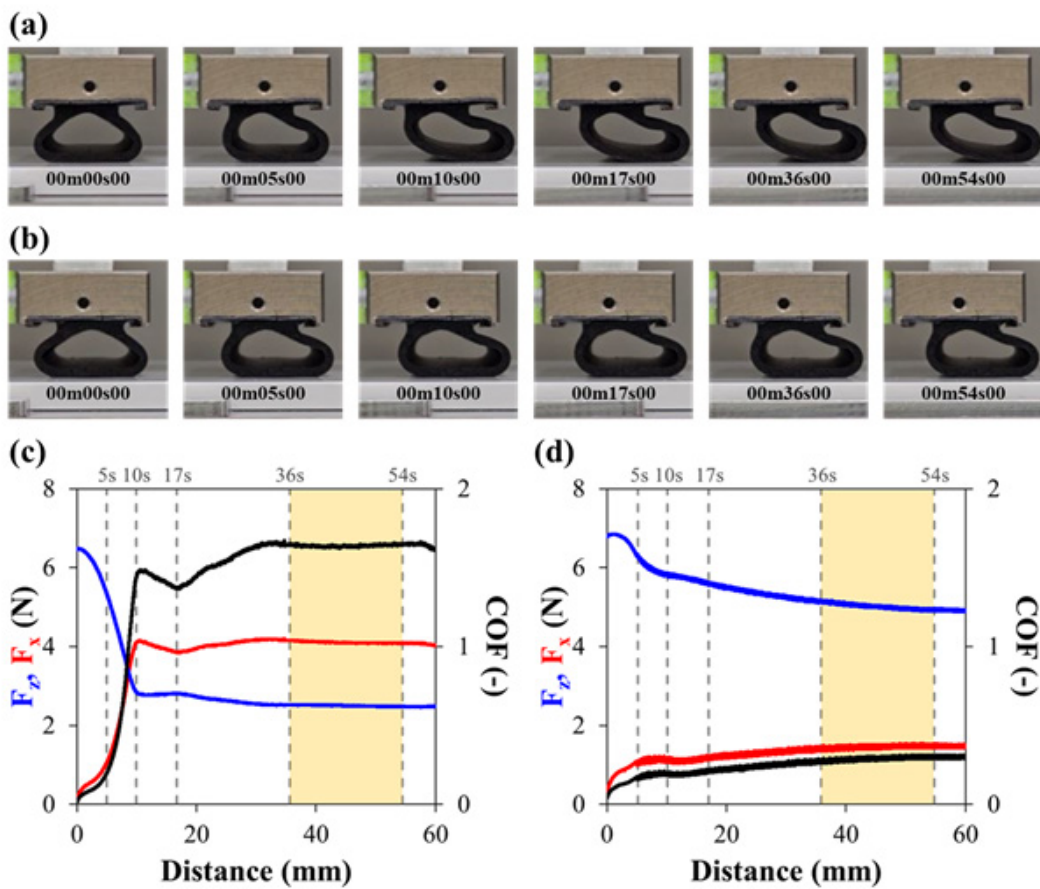


Figure 9. Time-lapsed images and friction test results for (a and c) sample 'R' and (b and d) sample 'S'.²²

(2) 마찰력이 낮은 샘플 S는 샘플 R에 비해 상대 표면과의 접촉 면적이 더 크다. 흥미롭게도 샘플 S의 접촉 면적은 압축 수준이 높아질수록 증가하는데, 이는 다양한 압축 수준에서 일관된 접촉 면적 크기를 유지한 샘플 R과는 극명한 대조를 이룬다.

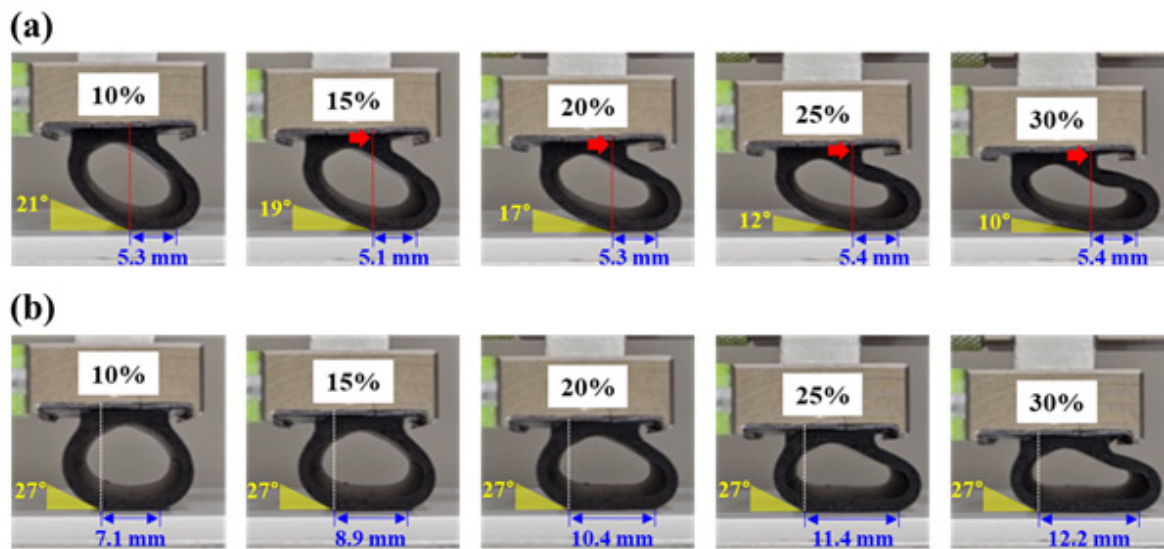


Figure 10. Deformed shapes of (a) sample 'R' and (b) sample 'S' under increasing compression levels at a friction distance of 36 mm.²²

(3) Stick-slip 현상은 샘플 S의 마찰 중에만 나타난다. 또한 압축 수준이 증가함에 따라 Stick-slip 파동의 주파수와 진폭이 모두 강화된다. 이 현상은 샘플 S의 마찰 계면에서 상대적으로 더 부드러운 표면 지형에 기인하며, 표면은 F_z 가 증가할수록 더 매끄러워진다.

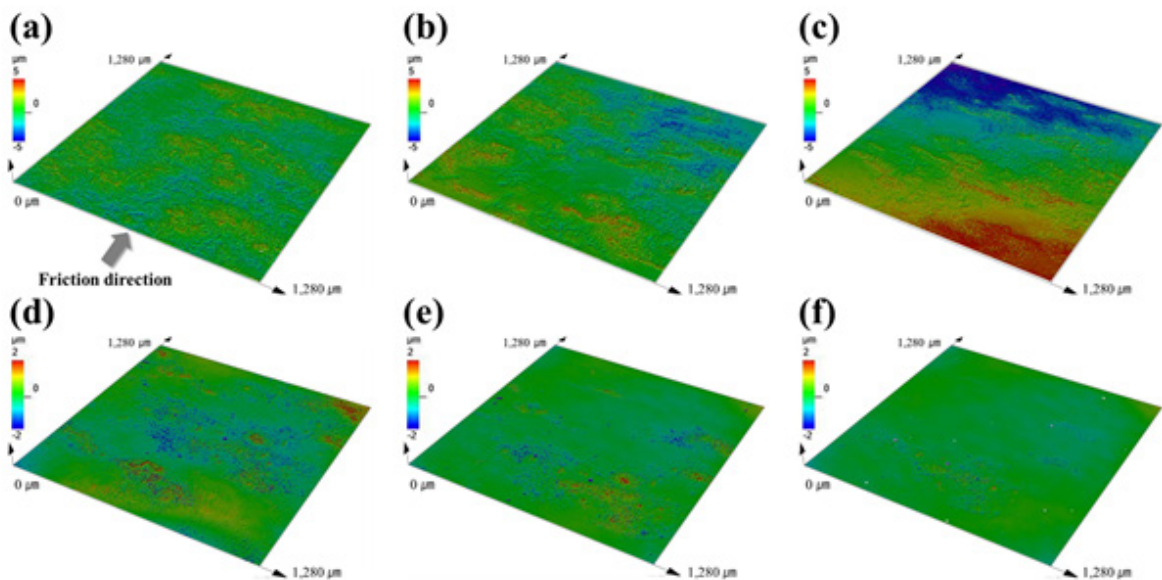


Figure 11. Three-dimensional topographical images for the friction interface of sample 'R' at (a) 10%, (b) 20%, and (c) 30% compression levels and (d-f) for sample 'S' at the same compression levels.²²

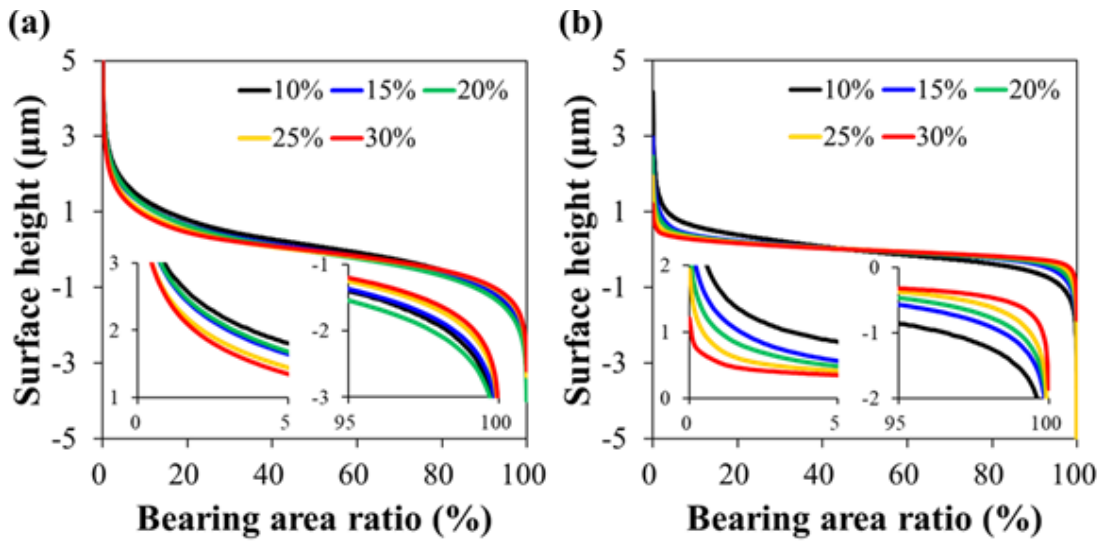


Figure 12. Bearing area curves for the friction interface of (a) sample 'R' and (b) sample 'S' under increasing compression levels.²²

이 연구는 사용 중 변화하는 마찰 조건에 기인하는 자동차 웨더스트립 도어 씰의 기밀성과 내구성이 불균형을 이루는 요인에 대한 새로운 통찰력을 제공한다. 또한 마찰로 인한 소음 발생과 외부 소음원의 감쇠 능력 변화에 대한 이해를 향상시킨다. 이러한 결과는 씰 제품의 성능과 내구성 향상에 있어서 낮은 마찰력을 유지하고 표면 특성의 변화를 제어하는 것이 핵심요소일 수 있다는 점을 다시 한번 강조한다.

6. 결론

본 총설에서는 고무의 마찰에 대한 기본 원리와 메커니즘, 영향을 미치는 여러 요인들, 마찰과 관련된 흥미로운 현상 분석 및 성능 개선 방안 등이 논의되었다. 특히 고무 마찰에 대한 실험적인 측정과 분석, 품질 평가와 성능 개선 분야에서 연구된 사례를 인용하고, 여기에 활용된 분석 기술과 결과가 소개되었다. 그리고 이를 통해 고무의 마찰에 대한 깊이 있는 지식과 통찰력을 제공하고자 하였다. 고무의 마찰은 상대 표면과의 접촉과 상호작용에 의해 결정되는 복잡한 현상이며, 이를 이해하고, 제어하고, 개선하기 위해서는 다양한 연구와 응용이 필요하다. 현재 고무의 마찰은 이론적인 모델링과 시뮬레이션을 포함하여 여러 분야에서 활용되고 있다.

References

- [1] Maegawa, S., Itoigawa, F. & Nakamura, T. "Dynamics in sliding friction of soft adhesive elastomer: Schallamach waves as a stress-relaxation mechanism" *Tribol. Int.* 96, 23-30 (2016).
- [2] Tiwari, A., Tolpekina, T., Benthem, H. v., Gunnewiek, M. K. & Persson, B. N. J. "Rubber adhesion and friction: Role of surface energy and contamination films" *Front. Mech. Eng.* 6, 620233 (2021)
- [3] Zhang, Q. X., Mo, J. L., Xiang, Z. Y., Liu, Q. A., Tang, B., Jin, W. W. & Zhu, S. "The influence of interfacial wear characteristics on stick-slip vibration" *Tribol. Int.* 185, 108535 (2023).
- [4] Persson, B. N. J. "Theory of rubber friction and contact mechanics. *J. Chem. Phys.* 115, 3840-3861 (2001).
- [5] Tiwari, A., Miyashita, N., Espallargas, N. & Persson, B. N. J. "Rubber friction: The contribution from the area of real contact. *J. Chem. Phys.* 148, 224701 (2018).
- [6] Luo, W., Hu, X., Wang, C. & Li, Q. "Frequency- and strain-amplitude-dependent dynamical mechanical properties and hysteresis loss of CB-filled vulcanized natural rubber" *Int. J. Mech. Sci.* 52, 168-174 (2010).
- [7] Maegawa, S. & Nakano, K. "Mechanism of stick-slip associated with Schallamach waves" *Wear* 268, 924-930 (2010).
- [8] Schallamach, A. "How does rubber slide?" *Wear* 17, 301-312 (1971).
- [9] Viswanathan, K. & Chandrasekar, S. "Fifty years of Schallamach waves: from rubber friction to nanoscale fracture" *Philos. Trans. Royal Soc. A*, 380, 20210339 (2022).
- [10] Popov, M. "The influence of vibration on friction: A contact-mechanical perspective" *Front. Mech. Eng.* 6, 69 (2020).
- [11] Svetlizky, I., Kammer, D. S., Bayart, E., Cohen, G. & Fineberg, J. "Brittle Fracture Theory Predicts the Equation of Motion of Frictional Rupture Fronts" *Phys. Rev. Lett.* 118, 125501 (2017).
- [12] Hale, J., Lewis, R. & Carré, M. J. "Rubber friction and the effect of shape" *Tribol. Int.* 141, 105911 (2020).
- [13] Xia, E., Chen, Z., Xue, Z., Qiu, S., Xu, C., He, H. & Li, L. "An equivalent

- NVH model of vehicle door seal strip and its application in door vibration problem" *Appl. Acoust.* 179, 108063 (2021).
- [14] Talay, E. & Altinisik, A. "The effect of door structural stiffness and flexural components to the interior wind noise at elevated vehicle speeds" *Appl. Acoust.* 148, 86-96 (2019).
- [15] Dikmen, E. & Basdogan, I. "Material characteristics of a vehicle door seal and its effect on vehicle vibrations" *Veh. Syst. Dyn.* 46, 975-990 (2008).
- [16] Tuncer, A., Anlas, G. & Yilmaz, Y. "An investigation of the effect of weatherstrip seals on vehicle vibration and acoustics using an alternative modeling technique" *J. Vib. Acoust.* 136, 041018 (2014).
- [17] Xu, Y., Jia, J., Zhang, G., Li, H. & Chen, T. "Effect of rubber substrates on the flexibility and tribological properties of diamond-like carbon coatings" *Surf. Coat. Technol.* 422, 127526 (2021).
- [18] Bui, X. L., Pei, Y. T., Mulder, E. D. G. & De Hosson, J. T. M. "Adhesion improvement of hydrogenated diamond-like carbon thin films by pre-deposition plasma treatment of rubber substrate" *Surf. Coat. Technol.* 203, 1964-1970 (2009).
- [19] Bai, C., Liang, A., Cao, Z., Qiang, L. & Zhang, J. "Achieving a high adhesion and excellent wear resistance diamond-like carbon film coated on NBR rubber by Ar plasma pretreatment" *Diam. Relat. Mater.* 89, 84-93 (2018).
- [20] Ray, S. C., Mukherjee, D., Sarma, S., Bhattacharya, G., Mathur, A., Roy, S. S. & McLaughlin, J. A. "Functional diamond like carbon (DLC) coatings on polymer for improved gas barrier performance" *Diam. Relat. Mater.* 80, 59-63 (2017).
- [21] Shi, J., Gong, Z., Wang, Y., Gao, K. & Zhang, J. "Friction and wear of hydrogenated and hydrogen-free diamond-like carbon films: Relative humidity dependent character" *Appl. Surf. Sci.* 422, 147-154 (2017).
- [22] Shin, K. H., Yoon, J. H., Cho, Y. J., Park, Y. W., Yun, J. H., Lim, D. K., Park, J. H., Kim, H. D. "Experimental analysis of friction properties in omega seals: Influence of a coated surface on deformation and contact topography under compressed conditions" *Tribol. Int.* 190, 109046 (2023).