

고무의 점탄성 특성을 고려한 타이어 수막 성능 예측

김 세 찬* · 정 현 철 · 정 경 문 · 김 기 운

금호타이어 연구개발본부

Prediction of Tire Hydroplaning Performance Based on the Viscoelastic Properties of Rubber

Se Chan Kim* · Hyun Chul Jung · Kyoung Moon Jeong · Kee Woon Kim

R&D Center, Kumho Tire Co. Ltd. 215-21, Saeun-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

Abstract : Accurate material modeling is essential for capturing the viscoelastic behavior and large deformations of tires under dynamic conditions. Because hydroplaning performance is highly sensitive to rubber properties, this study focuses on improving simulation accuracy through implementation of advanced material models. Viscoelastic properties of tread compounds were characterized using Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and incorporated into SOL700-based hydroplaning simulations. A comparative study was performed between conventional hyperelastic models and visco-hyperelastic models to evaluate their predictive capabilities. The simulation results were validated against experimental data, demonstrating that incorporating viscoelastic properties significantly enhances the agreement between numerical predictions and real-world behavior. This approach provides a more reliable framework for virtual tire performance evaluation.

Key words : Tire(타이어), Visco-elastic(점탄성), Prony Series(프로니 급수), Finite Element Analysis(유한요소해석), Fluid-Structure Interaction(유체-구조 연성해석), Hydroplaning(수막 현상)

1. 서 론

타이어는 대변형 고무 구조로 탄성뿐 아니라 점탄성 거동이 동시에 나타난다. 특히 젖은 노면에서 발생하는 수막현상은 타이어와 노면 사이에 물막이 형성되어 접지력이 급격히 감소하는 현상으로 타이어 구조 및 재료 특성의 영향을 받는다¹⁾.

기존 타이어 해석에서는 주로 Hyperelastic 물성 모델을 적용하여 대변형 거동을 표현하였으나, 실제 고무 재료는 에너지 손실 및 시간 의존 특성을 가지는 Viscoelastic 거동을 동시에 나타내므로, 보다 정확한 해석을 위해 Viscoelastic 물성 적용이 필요하다²⁾.

본 연구에서는 DMA 시험 Data 기반으로 트레드 고무의 점탄성 특성 적용 방법을 검토하였다. 또한 점탄성 물성 적용 전후 수막성능 해석 결과를 시험결과와 비교하여 해석 상관도를 평가하였다.

2. 시험 및 해석 모델

점탄성 특성을 평가하기 위한 대표적인 시험 방법은 크리프 시험, 응력 이완 시험, DMA 시험으로 구분된다. 이 중 DMA 시험은 작은 진동 하중을 이용하여 주파수 및 온도 변화에 따른 재료의 동적 거동을 측정할 수 있으며, 저장 탄성률(Storage Modulus, E')과 손실 계수(Loss Factor, $\tan \delta$) 등을 통해 점탄성 특성을 평가할 수 있다.

Nastran SOL700 해석에서는 Hyperelastic과 Viscoelastic 모델을 결합한 Visco-Hyperelastic 모델로 고무 재료의 대변형과 점탄성 거동을 동시에 반영 가능하다.

타이어 트레드는 대변형 조건에서 작동하므로 Hyperelastic 모델만으로는 실제 거동을 충분히 재현하기 어렵기 때문에 Visco-Hyperelastic 모델 적용 가능성을 검토하였다.

* 김세찬, E-mail: sechanis@kumhotire.com

3. 시험 및 해석 결과

트레드 고무의 점탄성 특성을 비교하기 위해 4종의 트레드 컴파운드에 대해 DMA 시험 데이터를 분석하였다. 온도 변화에 따른 Storage modulus와 Tan δ 곡선을 통해 Fig. 1에서 컴파운드의 탄성 및 감쇠 특성을 비교하였다.

분석결과 Storage Modulus에서는 Comp'd A가 상대적으로 높은 탄성 특성을 나타냈으며, Tan δ 결과에서는 Comp'd C가 가장 높은 감쇠 특성을 나타냈다. 본 단계에서는 시험 결과 간 변별력 확인에 중점을 두었으며, 해당 데이터는 점탄성 물성 모델 적용을 위한 기초 데이터로 활용하였다.

재료모델에 따른 수막현상 거동 예측을 위해 Hyperelastic 모델과 Visco-Hyperelastic 모델을 비교하였다. Visco-Hyperelastic 모델은 접지부의 동적 복원력을 효과적으로 모사하였으며, 그 결과 Fig. 2의 실제 수막현상 발생 속도인 75~95 km/h 구간에서 타이어에 수막현상이 발생되었다³⁾.

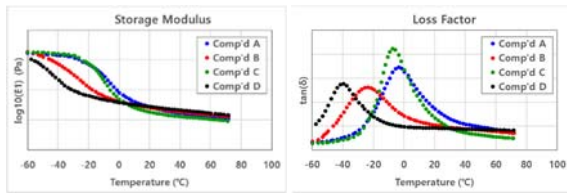


Fig. 1 Viscoelastic sensitivity in tread compounds

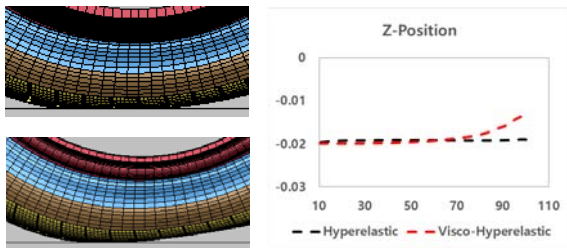
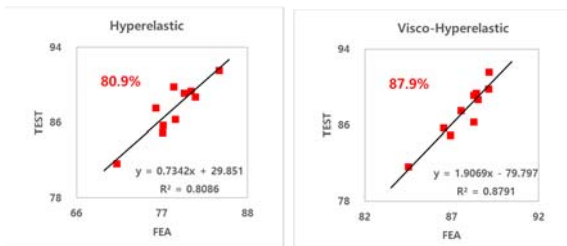


Fig. 2 Tire Z-position variations by speed



(a) Hyperelastic (b) Visco-Hyperelastic

Fig. 3 Correlation between FEA and test results

4. 해석 모델 검증

타이어 사이즈 225/45 R17에 대한 10개 패턴 버전 에 대해 수막성능 시험 결과와 해석결과의 상관도를 비교하였다. 기존 Hyperelastic 물성 적용 해석에서는 상관도 80.9% (Fig. 3-a) 수준을 나타냈다.

반면 점탄성 특성을 고려한 Visco-Hyperelastic 모델 적용 시 상관도는 87.9% (Fig. 3-b)로 향상되었다. 이는 점탄성 물성이 타이어의 실제 거동을 보다 정확히 반영하여 해석 정확도를 개선한 결과로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 타이어 수막성능 해석 정확도 향상을 위해 점탄성 물성 적용 방법을 검토하고 시험 대비 해석 상관도를 분석하였다. DMA 시험을 통해 트레드 컴파운드의 점탄성 특성을 확인하였으며, Visco-Hyperelastic 모델 적용 시 시험 대비 해석 상관도가 향상되는 결과를 확인하였다.

이는 고속 주행 시 발생하는 트레드의 동적 거동을 정확히 모사하는 것이 수막성능 예측에 필수적이며, 타이어 성능 예측 신뢰도를 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

References

- 1) F. Farroni, F. Timpone, and A. Genovese, "Analysis of the Scenarios of Use of an Innovative Technology for the Fast and Nondestructive Characterization of Viscoelastic Materials in the Tires Field" Sensors Vol. 24, 1136, 2024.
- 2) S. J. Kang, Y. J. Chang, D. W. Lee, K. M. Jeong, J. Suhr, K. W. Kim "Effect of Rubber Viscoelastic Properties on Rolling Resistance of Tires" KSAE Annual Conference Proceedings, pp.367-368, 2023.
- 3) M. Koishi, T. Okano, L. Olovsson, H. Saito and M. Makino, "Hydroplaning Simulation Using Fluid-Structure Interaction in Ls-Dyna", 3rd European LS-DYNA Conference, 2001.