

Boomerang 스포크 구조를 갖는 비공기압 타이어의 최적 설계

황순욱* · 조병현 · 곽철우 · 임원진 · 정경문

금호타이어 중앙연구소

Optimal Design of Non-Pneumatic Tire with Boomerang Spokes

Soon Wook Hwang* · Byung Hyun Cho · Chul Woo Kwark · Won Jin Lim · Kyoung Moon Jeong

R&D Center, Kumho Tire Co. Inc., 215-21, Saeun-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17076, Korea

Abstract : Non-pneumatic tires (NPT) were developed to overcome the limitations of pneumatic tires, such as puncture risk and air pressure maintenance. This study focuses on optimizing the spoke structure of NPT, which plays a vital role in load support and shock absorption. A structural analysis was performed on a NPT with a boomerang-shaped spoke structure, evaluating displacement and deformation energy when a 350kgf load was applied. The design factors of the spoke, including radius, thickness, and height ratio were analyzed using a fractional factorial design. Results showed that spoke thickness had the greatest impact on displacement and deformation energy, while height ratio influenced displacement and decreased deformation energy. Further research should consider the shear band to fully optimize NPT performance.

Key words : Non-pneumatic Tire(비공기압 타이어, NPT), Design of Experiment(실험 계획법), Fractional Factorial Design(부분 요인 실험)

1. 서 론

비공기압 타이어는 공기압 타이어가 가지는 여러 단점 중 펑크에 대한 위험성과 내부의 적절한 공기압 유지 문제에 대한 해결을 위해 연구되어 왔다. 그리고 현재까지 많은 타이어 제조사에서 비공기압 타이어의 구조 및 재료에 대한 연구를 진행해 오고 있다. 비공기압 타이어는 공기압을 대신하는 스포크, 벨트부를 대신하는 전단밴드, 트레드로 구성된 단순 구조로 이루어져있으며, 유연한 스포크를 설계 및 제작하려는 시도를 해오고 있다.

스포크는 방사형, 곡선형, 격자형, X자형 등 다양한 구조로 구성되어 하중 지지 및 충격 완화 역할을 수행하며, 형상에 따라 비공기압 타이어 성능에 영향을 미치게 된다. 그렇기 때문에 스포크 구조의 설계 요소는 중요한 인자 중 하나이다.¹⁾ 따라서, 스포크 구조의 여러 설계인자 분석을 통해 영향도를 분석하여 최적의 스포크 구조를 도출하였다.

2. 본 론

비공기압 타이어의 구조는 트레드, 전단밴드, 스포크, 림으로 구성되며, 본 논문의 비공기압 타이어는 트레드 패턴 형상을 적용하지 않고, Boomerang 구조 형상의 스포크에 대한 설계인자를 설정하여 구조 해석을 하였다. 구조 해석은 타이어 구조 중심에서 하중을 부여하고, 이때 지면과 접촉하여 하중을 지지하고 있을 때의 타이어 변위 및 스포크부에 발생하는 변형에너지 값을 계산하였다.²⁾

비공기압 타이어 해석 모델은 Fig. 1과 같이 연결된 격자 무늬의 스포크 구조를 가지며, 트레드와 스포크 사이에 전단밴드가 적용된다. 비공기압 타이어는 공기압 타이어 175/65 R14 규격으로 설계하였다.

비공기압 타이어의 스포크 구조 형상은 다양한 형태로 적용될 수 있으나, 본 논문에서는 격자 무늬의 스포크 구조를 이루는 주요 설계인자를 선정하

* 황순욱, E-mail: november4@kumhotire.com

였다. 비공기압 타이어 변위 및 변형에너지에 대한 영향도 평가를 위한 스포크 설계인자는 격자 구조의 반경 R1, R2, 두께 T, 연결부 높이 비율 H로 설정하였다. 그리고 각 설계 변수는 Table 1과 같이 스포크 설계 상한과 하한 범위를 설정하였다. 실험 계획법은 부분 실험계획법을 적용하여 8개의 설계 조합과 중간값을 포함하여 총 9개의 설계 조합을 하였다. 각 설계 조합에 대한 변위와 변형에너지 평가를 위해 타이어 중심에 하중 350kgf를 가하는 해석을 진행하였다.³⁾

실험 계획법의 설계 조합에 대해 변위 및 변형에너지 해석 결과 스포크 설계 인자에 따른 구조적 차이를 확인할 수 있었다. 주요 인자 분석을 통한 효과도 분석 결과는 Fig. 2와 같이 스포크 두께(T)가 변위 및 변형에너지에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 높이 비율(H)는 유의한 영향 인자이며, 비율이 증가하면 변위는 증가하지만, 변형에너지가 감소한다. 반경(R1, R2)은 상대적으로 영향도가 낮게 분석되었다. 그로 인해 Ver. 8의 설계 조합(R1 80mm, R2 80mm, H 60%, T 5mm)은 가장 낮은 변형에너지를 가지며, 구조적 강성이 우수함을 보였다. 하지만, 변위 결과를 고려할 경우, 가장 인자 영향도가 높은 두께(T)에 대한 최적화가 필요함을 알 수 있다.

실험 계획법 결과를 토대로 최적화 분석을 진행하였다. 목적함수는 변위 10mm, 변형에너지 최소화로 설정하였다. 그 결과 최적 설계는 R1 41.31mm, R2 40.38mm, H 60%, T 4.94mm이며, 이때 변위 9.43mm, 변형에너지 61.74psi 결과를 보였다.⁴⁾

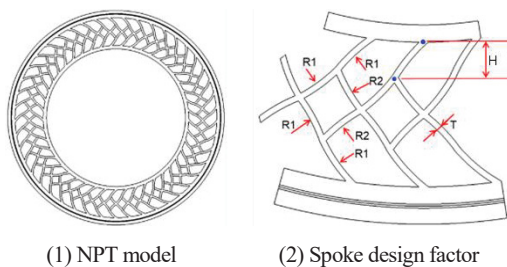


Fig. 1 NPT and spoke designs

Table 1 Spoke design factors and levels

Factor	R1(mm)	R2(mm)	H(%)	T(mm)
Low	40	40	40	4
High	80	80	60	5

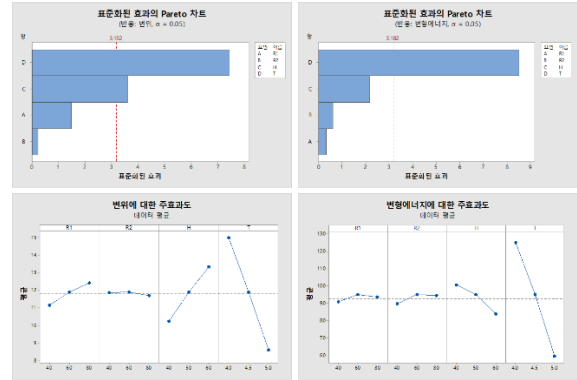


Fig. 2 Effect of design factors on performance of NPT

3. 결 론

비공기압 타이어의 스포크 구조 특성을 파악하고, 최적화하기 위해 실험계획법을 적용하여 각 설계 변수의 영향도를 분석하였다. 그 결과 설계 변수 중 스포크 두께(T)가 가장 중요한 설계 인자이며, 연결부 높이 비율(H)도 변위 결과에 영향을 주는 주요 인자로 나타났다. 본 연구에서는 스포크 구조에 한정적으로 분석하였지만, 비공기압 타이어의 구성 요소 중 하나인 전단 밴드도 변위, 변형에너지 성능에 중요한 인자 중 하나이다.⁵⁾ 그렇기 때문에 향후 연구에서는 전단 밴드 인자를 고려하여 비공기압 타이어 전체적인 특성을 파악할 필요가 있다.

References

- 1) S. W. Hwang, K. W. Kim, "Feasibility Study on Non-pneumatic Tire Having Innovative Spoke Structure", Auto Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.41, No.10, pp. 19-25, 2019.
- 2) ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.14, Dassault Systemes-Simulia Corp, USA, 2014.
- 3) W. Liu, C. Li, Q. Zhang, "Influence of Spoke Parameters on Load Capacity of Non-Pneumatic Tires Using Orthogonal Study and Analysis of Variance", Int. J. Auto. Tech., Vol.25, pp. 235-247, 2024.
- 4) J. M. Kim et al., "A Study on the Parameter Optimization of NPT for Reducing Rolling Resistance", Trans. Kor. Soc. Auto. Eng., Vol.30, No.4, pp. 287-295, 2022.
- 5) Z. Hryciów et al., "The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties", Int. J. Auto. Mech. Eng., Vol.17, pp. 8168-8178, 2020.