

Honeycomb 스포크로 된 비공기압 타이어의 고유진동수 해석

조홍준* · 이치훈* · 김기홍* · 김감찬* · 김두만**

Natural Frequency Analysis of a NPT with Honeycomb Spokes

Hong-Jun Jo* · Chi-Hoon Lee* · Ki-Hong Kim* · Kam-Chan Kim* · Doo-Man Kim**

ABSTRACT

The vibration characteristic of tires is one of very important issues which heavily affect the noise and comfort on driving. Therefore, when the new tire is designed, the vibration characteristic of tire should be considered. In this paper, the vibration characteristic of non-pneumatic tire is investigated for geometric of NPT which is designed by cell angle of spoke. The analysis is based on the finite element method and used ABAQUS program, which is able to non-linear analysis. The material of NPT is used for the Ogden energy model, which is model of hyperelastic material. This paper investigate natural frequency and modal of NPT and compare result of NPT with it of pneumatic tire.

Key Words: NPT, Honeycomb structure, Natural frequency, ABAQUS, Finite element method

1. 서 론

1888년 영국의 던롭에 의해 만들어진 최초의 실용적인 공기압 타이어는 오늘 날까지도 대부분의 차량에 사용되고 있다.[1] 타이어의 역할은 차량의 차체와 지면사이에서 차체의 구동력을 전달하며 충격을 흡수하는 것이 1차 목적이

다. 오늘 날 차량의 고급화에 따라 이동 수단의 역할을 넘어 차량의 진동을 감소시켜 승차감을 향상시키는 단계까지 발전하고 있다.

차량이 주행할 때 발생하는 진동의 원인에는 여러 가지 인자가 있는데 자동차의 진동원인으로는 엔진, 노면의 요철, 타이어의 불균일성 등을 들 수 있으며 다양한 진동원인으로부터 기인하는 폭넓은 주파수 스펙트럼 분포를 갖는다.[2] 이 중 타이어와 관련된 진동은 노면에서 가진되어 타이어를 통해 차에 전달되는 것과 타이어 자신이 가진 원인이 되는 것인데, 노면에서 가

†2011년 5월25일 접수 ~ 2011년 6월20일 심사완료

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: dmkim@kau.ac.kr

해지는 진동은 주파수가 약 100Hz 이하인 하쉬니스(Harshness)와 100~500Hz의 도로소음으로 구분된다.[3] 특히 저주파 영역에서 타이어의 고유진동수는 차량의 진동특성과 중요한 연관성이 있으므로 그에 따른 타이어의 모달 파라미터에 대한 지식이 필요하다.

모달 분석은 구조물의 동적인 특성을 연구하는 기본적인 방법 중의 하나이고, 분석을 통해 얻은 결과 값으로 타이어 진동을 감소시키는 방향으로 설계에 적용할 수 있다.[4] 이러한 진동 해석의 중요성 때문에 새로운 개념의 타이어인 비공기압 타이어를 개발함에 있어 진동 특성에 대한 연구가 필요하다.

기존의 공기압 타이어는 외부 충격에 의한 파손, 공기에 의한 일정한 내압과 내구성을 유지해야 만 하는 단점을 가지고 있다. 이에 따라 공기압 타이어의 단점을 대체할 수 있는 비공기압 타이어가 개발되고 있다 [5]. 이 논문에서는 공기압 타이어의 공기압을 대체할 수 있는 격자 구조를 가지는 비공기압 타이어를 제안하고자 한다.

본 논문에서 제안한 스포크의 구조인 6각 honeycomb 구조는 out of plane 방향으로 높은 강성을 가지므로 샌드위치 구조와 같은 구조의 경량화를 위해 사용해 왔지만[6] 최근 in-plane 방향의 유연성에 대한 연구가 이루어지고 그에 따라 하중에 따른 목표로 하는 변형을 갖도록 설계가 가능하다. 그러므로 스포크는 차량의 주행 시 반복되는 인장과 압축하중을 받기 때문에 honeycomb의 in-plane 방향의 유연성을 이용하는 비공기압 타이어의 스포크를 제안하고자 한다. 본 논문에서는 비공기압 타이어에 사용되는 스포크의 각도에 따라 모델링하였고, 비하중상태의 저주파 영역내에서 거동하는 각 타이어의 고유진동수와 모드 형상을 구하여 공기압 타이어와 비교분석 하였다.

2. 공기압 타이어의 해석

2.1 공기압 타이어의 모델링 및 물성치

Figure 1은 공기압 타이어를 ABAQUS 프로그램을 이용하여 재현한 모델이다. 공기압 타이어의 구성은 트레드(Tread), 고무 층, 링(Ring), 카카스(Carcass), 그리고 휠(Wheel) 부분은 상대적으로 거의 변형이 일어나지 않기 때문에 강체(rigid body)로 구성하여 해석을 하였다.

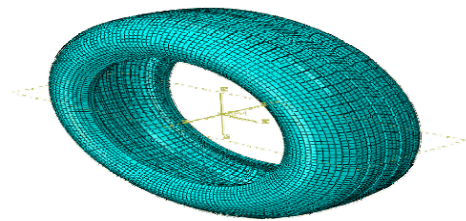


Fig. 1 Pneumatic tire

공기압 타이어의 벨트는 steel cord로 이루어져 있고, 카카스 층은 폴리에스테르(polyester)로 이루어져 있다. 타이어의 표면을 이루는 고무층은 synthetic rubber으로써 물성치는 Ogden 모델을 이용한 Equation(1)을 사용하였고 각 계수는 Table.1과 같다.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_i^{\alpha_i} + \lambda_i^{-\alpha_i} + \lambda_i^{\alpha_i} - 3) \quad \text{Equation (1)}$$

Table.1 Coefficients of the Ogden hyperelastic strain energy function for synthetic rubber

| i | synthetic rubber | |
|---|------------------|------------|
| | μ_i (MPa) | α_i |
| 1 | 13.356 | 1.633 |
| 2 | -6.631 | 1.9 |
| 3 | 0.058 | -2.456 |

2.2 공기압 타이어의 해석 결과

Figure 2는 공기압 타이어의 모드 형상과 각 형상에 따른 고유 진동수를 보여 준다. 1차 모드 형상이 타이어의 폭 방향으로 나타나는 것을 보았을 때, 공기압 타이어는 사이드 월 쪽으로 구조적인 취약점을 가진다고 볼 수 있다.

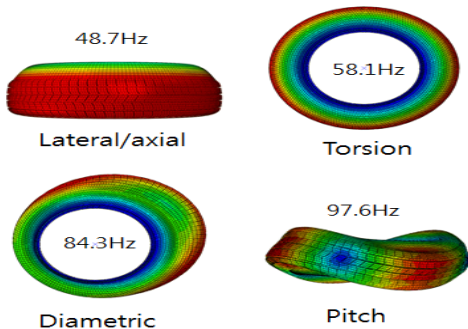


Fig. 2 Mode shapes of a Pneumatic tire

Figure 3은 가진 진동수가 높아질수록 공기압 타이어의 고유 진동수와 모드 형상이 일어나는 방향을 보여준다. Fig.2에서 나타난 고유진동수에서 그래프의 변형이 일어남을 확인할 수 있다.

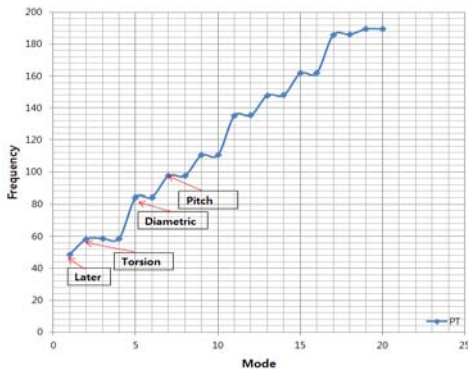


Fig. 3 Natural frequency of a Pneumatic tire

3. 비 공기압 타이어의 해석

3.1 비공기압 타이어의 모델링 및 물성치

Figure 4는 스포크의 셀 각도를 변형 하여 총 세 가지 타입(Regular 15°, 30°, 45°)으로 모델링되어진 비공기압 타이어를 보여준다.

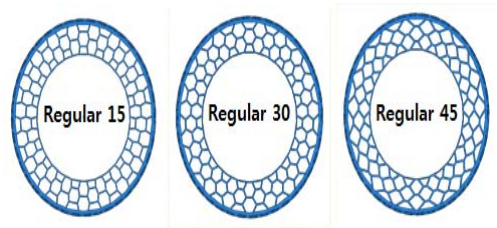


Fig. 4 Non-pneumatic tire

Figure 5에서 보여지는 것처럼 비공기압 타이어의 구성은 지면과 접지하는 트레드(Tread), 전단력을 담당하는 웨어 밴드(Shear band), 밴드 안에서 타이어의 틀을 잡아주는 두 개의 링(Ring), 허브와 웨어 밴드 사이에 위치한 honeycomb 구조의 스포크(Spoke) 그리고 공기압 타이어의 휠의 역할을 하는 허브로 이루어져 있다. 허브는 타이어가 하중을 받을 때 상대적으로 강체에 가깝기 때문에 Fig.6처럼 타이어의 중심을 기준으로 강체로 설정한다. 트레드의 물성치는 비공기압 타이어에서 사용했던 synthetic rubber를 적용하였고, 링의 물성치는 steel 그리고 웨어밴드, 스포크의 물성치는 Equation(1)의 Ogden 식을 적용한 Table.2의 폴리우레탄(polyurethane) 계수들을 사용하였다.

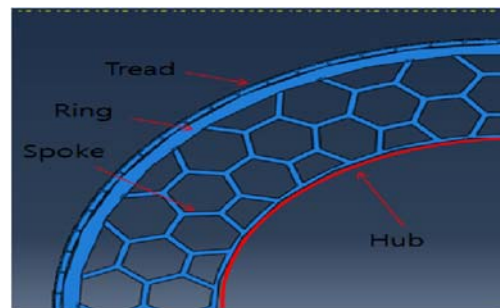


Fig. 5 cross section of a Non-pneumatic tire

Table.2 Coefficients of the Ogden hyperelastic strain energy function for polyurethane

| polyurethane | | |
|--------------|---------------|------------|
| i | μ_i (MPa) | α_i |
| 1 | 13.546 | 1.513 |
| 2 | -2.338 | 2.212 |
| 3 | 0.093 | -2.471 |

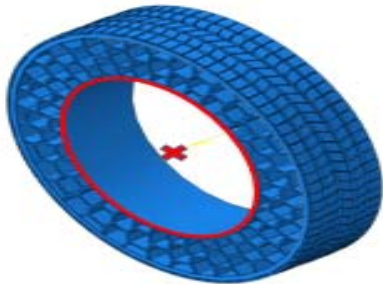


Fig. 6 Boundary conditions of non-pneumatic tire

3.2 비공기압 타이어의 해석 방법

모델링된 비 공기압 타이어의 각 파트들은 해석을 위해 각 파트들 간의 관계를 정의해줘야 한다. 그리고 비 하중상태의 타이어의 고유 진동수를 구하기 위해서 타이어의 중심을 모든 자유도로 구속시켜 타이어를 고정시켜야 하며 이는 figure 6에 도시되어 있다. 타이어의 해석은 2개의 step을 통해 실시되었다. Step-1 에서는 비공기압 타이어의 초기 조건을 설정해 주고, step-2 에서는 고유 진동수와 모드 형상을 구하기 위해 AMS solver를 이용하는 것으로 설정하고, 구하는 주파수의 범위는 도로에 의해 가진 되는 주파수 범위인 100Hz로 설정하였다.

4. 해석 결과

Figure 7은 셸 각이 15° 인 비공기압 타이어의 모드 형상과 그 형상이 가지는 고유 진동수이다. 가진 진동수가 점차 증가하면서 나타나는

모드 형상의 순서는 Torsion, Pitch, Lateral, [2,1]이다.

해석된 결과를 보면, 세 가지 타입 모두 1차 모드 형상에서 전단력에 의한 파손이 나타나는 것을 알 수 있다.

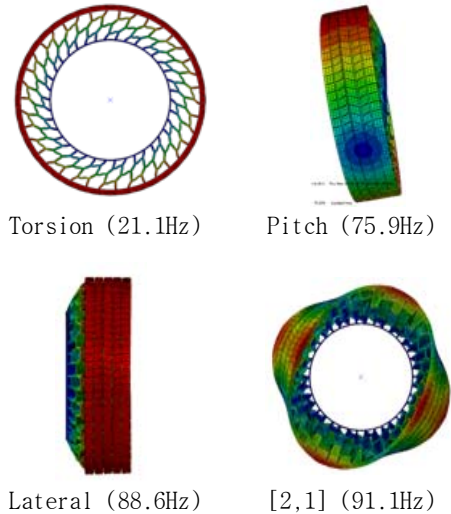


Fig. 7 Natural frequencies of Regular 15°

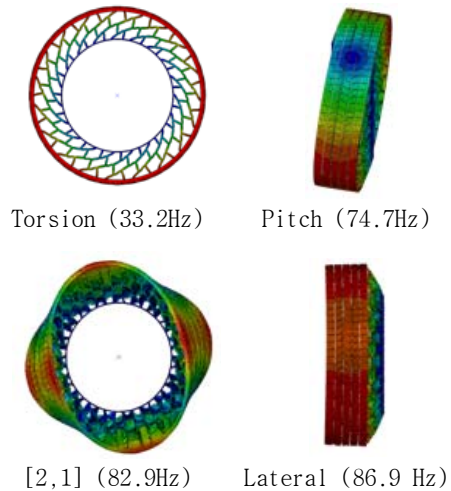


Fig. 8 Natural frequencies of Regular 30°

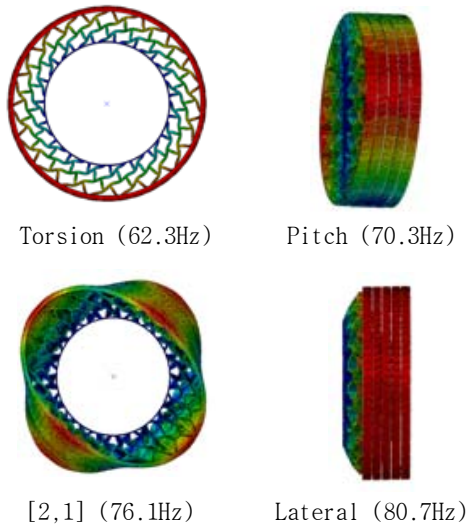


Fig. 9 Natural frequencies of Regular 45°

방향으로 낮은 등가 탄성계수를 가지기 때문이다.

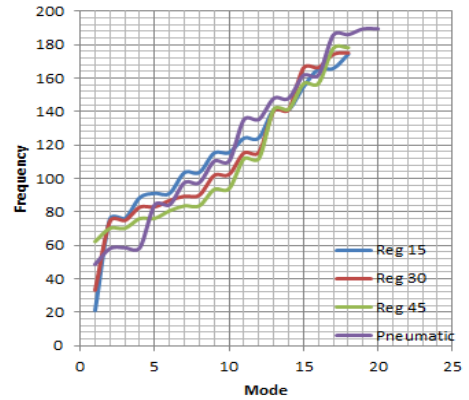


Fig. 10 Natural frequencies of Pneumatic tire and non-pneumatic tires

5. 해석 결과 검토

5.1 공기압 타이어나 비공기압 타이어의 결과 비교

Figure 10 은 공기압 타이어나 비공기압 타이어나의 고유 진동수를 보여 준다. 45°의 셀 각을 가지는 비공기압 타이어나는 1차 모드의 고유 진동수만 다른 비공기압 타이어나보다 높고, 그 이후로는 낮은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 공기압 타이어나와 비교했을 때에도 Regular 45°는 1차 모드가 나타나는 고유 진동수가 더 높다. 구조물의 1차 모드가 가지는 중요성 때문에 진동 측면에서는 공기압 타이어나보다 우수하다고 볼 수 있다.

5.2 비공기압 타이어나의 결과 비교

Figure 11을 보면, 세 가지 비공기압 모델에 진동 해석했을 때 1차 모드 형상이 일어나는 방향은 모두 in-plane 방향의 전단이 발생하는 방향이다. 그리고 고유 진동수를 확인해 보면 스포크 구조의 각도가 커지면서 가지는 고유 진동수가 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 honeycomb 구조가 각이 커짐에 따라 in-plane

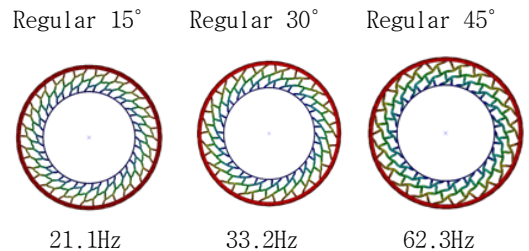


Fig. 11 1st mode shapes of non-pneumatic tires



Fig. 12 Parts of spokes with honeycomb

Figure 12은 honeycomb 구조의 스포크를 가지는 비공기압 타이어나의 디자인 파라미터를 나타낸다. 그림에서 나타난 파라미터들 honeycomb의

등가탄성계수를 구하는 변수들이 되고 각 방향의 등가 탄성계수들은 equation (2)~(4)과 같이 나타난다 [7].

Shear modulus

$$G_{xy} = \frac{(h/L + \sin\theta)}{(h/L)^2(1 + 2h/L)\cos\theta} \text{ Equation (2)}$$

x direction

$$E_{xx} = E_s \left(\frac{t}{L}\right)^3 \frac{\cos\theta}{\left(\frac{h}{L} + \sin\theta\right)\sin^2\theta} \text{ Equation (3)}$$

y direction

$$E_{yy} = E_s \left(\frac{t}{L}\right)^3 \frac{(h/L + \sin\theta)}{\cos^3\theta} \text{ Equation (4)}$$

전단 탄성 계수 값을 스포크 각도에 따라 계산해보면 Table.1 과 같다. 표에서 보는 것과 같이 스포크 각도가 커질 수록 전단탄성계수 역시 증가하기 때문에, Fig.10에서 보는 것과 같이 스포크 각도가 커지면 그에 따른 고유 진동수가 증가하는 것을 설명할 수 있다.

Table.1 Shear modulus of NPT

| | Reg 15 | Reg 30 | Reg 45 |
|----------|--------|--------|--------|
| G_{12} | 2.949 | 3.65 | 6.79 |

Figure 12는 2차 모드 이후의 모드 형상들을 보여주고 있다. 그런데, 1차 모드와는 달리 스포크 각도가 증가 할수록 모드 형상이 나타날 때의 고유 진동수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Table.2의 결과 값처럼 스포크 각도의 증가에 따른 등가 탄성 계수의 변화를 보고 설명할 수 있다.

Table.2 Elastic modulus ratio of NPT

| | Reg 15 | Reg 30 | Reg 45 |
|-----------|--------|--------|--------|
| E_1/E_s | 0.0583 | 0.0187 | 0.0076 |
| E_2/E_s | 0.0153 | 0.0216 | 0.0223 |

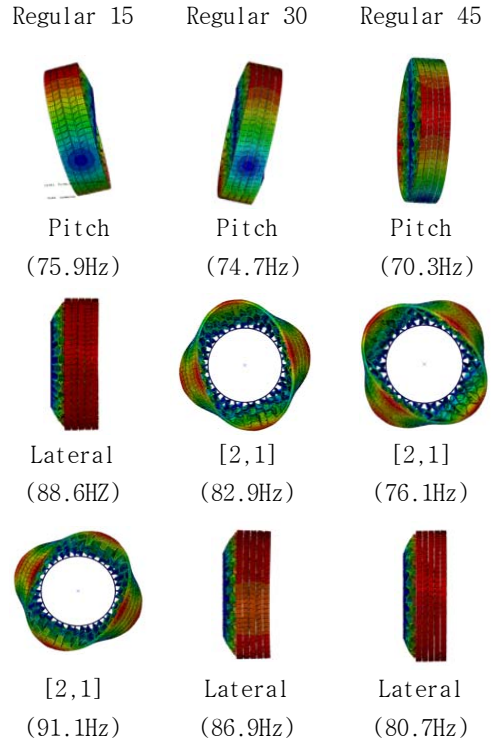


Fig. 12 Mode shapes of non-pneumatic tires

6. 결론

이 논문에서는 각기 다른 셀 각을 가지는 비공기압 타이어와 공기압 타이어의 고유진동수와 모드 형상을 비교 분석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 셀 각이 45° 를 가지는 비공기압 타이어가 공기압 타이어보다 1차 모드가 늦게 발생하므로 진동 성능이 더 우수하다.
- 2) 비 공기압 타이어의 셀 각이 이루는 스포크 각이 커짐에 따라 1차 모드에서의 고유 진동수가 커진다. 비 공기압 타이어의 1차 모드는 전단 방향으로 발생하는데 honeycomb 구조의 특성상 각이 커질 수록 전단 방향으로의 등가 탄성 계수가 높아지기 때문이다.

3) 2차 모드 이후로는 비 공기압 타이어의 셀각이 커질 수록 타이어의 고유 진동수는 낮아진다. 그 이유는 각이 커질 수록 honeycomb 구조의 수평방향으로는 등가 탄성 계수가 낮아지기 때문이다.

결과들을 종합해보면 비공기압 타이어는 각각의 스포크 각도에 따라 진동 특성이 다르게 나타난 것을 확인 할 수 있었고 특히 셀 각이 45° 인 타이어의 경우에는 1차 모드에서 가장 높은 진동수를 갖지만 2차 모드 이후에서는 계속적으로 낮은 고유진동수를 확인 할 수 있었다.

본 연구의 결과로 보아 향후 하중상태와 회전상태에서의 진동특성의 연구를 통하여 비공기압 타이어의 내구성 및 취약부분의 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김병삼, 홍동표, “타이어와 소음”, 한국소음진동공학회지, 제 4권 제4호, pp.404
- [2] 김용우, 최동수, 김병삼, “고정상태에서 경상용차용 타이어의 진동특성”, 순천대학교 자연과학 논문집, Vol 19, pp83~92, 2000
- [3] 이광재, “타이어의 진동 특성”, 타이어 고무, pp 13~23, 1988
- [4] 김병삼, 전형주, “자동차 타이어의 진동특성에 관한 실험적 연구”, Journal of Industrial Technology Institute Vol 11, pp47~62, 1997
- [5] Akshay Narasimhan, "A computational method for analysis of material properties of a non-pneumatic tire and their effects on static load-deflection, vibration, and energy loss from impact rolling over obstacles", pp.1
- [6] Jaehyung Ju, Joshua D.Summers "Hyperelastic Constitutive Modeling of Hexagonal Honeycombs Subjected to In-Plane Shear Loading", Journal of Engineering Materials and Technology.
- [7] Masters, I. G. and Evans, K. E., "Models for the Elastic Deformation of Honeycombs," Composite Structures, vol.35, no, pp.403-22, 1996
- [8] Gent, A.N, and walter, J.D., "The Pneumatic tire", National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC, 1985
- [9] Kim.S.H., "A Comprehensive analytical model for pneumatic tires", The University of Arizona, Ph.D.Dissertation
- [10] Alfredo,R.V., "Airless Tire".,U.S. Patent , US 3, 329192, 1967
- [11] Akasaka,T.,Katoh, M.,Nihei,S., Hiraiwa, M., "Two-Dimensional Contact Pressure Distribution of a Radial tire", Tire Science and Technology, TSTCA, Vol 18, No.2 April-June, pp.80-103, 1990
- [12] Kim. D.M., Park, I.J., Yoo, H.S., Seong, K. J., Kim, S.N., "Effect of Shearing Force on the Contact Stresses of the Tread Rubber Block with Slip", 21th Annual Meeting Conference on Tire Science & Technology, Paper No.2, 2002