

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.719

Auxetic Spoke로 설계된 비공기압 타이어의 접지압

김광원*, 김두만**

Contact Pressure of Non-Pneumatic Tires with Auxetic spokes

Kwangwon Kim* and Doo-Man Kim**

ABSTRACT

A Non-Pneumatic tire (NPT) has spoke to replace air of the pneumatic tires. A NPT appears to have advantages over the conventional pneumatic tire in terms of flat proof and maintenance free. And a NPT can also be used in the space environment since it uses no air for inflation. In this study, the static contact pressure of NPTs with auxetic honeycomb spokes is investigated as a function of vertical loading and is compared with that of a pneumatic tire. The finite element based numerical simulation of the local stress of an airless tire is carried out with ABAQUS for varying vertical force and honeycomb spokes geometries.

초 록

비공기압 타이어(Non-Pneumatic tire)는 공기압 타이어와는 다르게 스포크(Spoke)로 공기압의 역할을 담당하는 새로운 타이어이다. 이 타이어는 공기압 타이어의 펑크에 대한 위험과 공기압 유지가 필요 없는 장점을 가졌으며, 공기가 존재하지 않는 우주에서도 사용이 가능하다. 본 연구에서는 음의 각으로 이뤄진 허니컴 구조의 비공기압 타이어를 수직 하중에 따른 접지압을 구하여, 이를 공기압 타이어와 비교하였다. 비공기압 타이어의 하중해석을 위해 ABAQUS를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

Key Words : Non-Pneumatic tire(비공기압 타이어), Spoke(바퀴살), Auxetic(팽창물질), Lattice(격자모양), Honeycomb(허니컴)

1. 서 론

1888년 던롭에 의해 처음 공기압 타이어가 발명된 이래로 공기압 타이어(Pneumatic tire; NPT)는 단단한 바퀴보다 안락한 승차감과 낮은 에너지손실, 낮은 접지압, 낮은 무게라는 장점으로 세계 타이어 시장에서 100년 이상 판매되어 왔다[1]. 그러나 공기압 타이어(pneumatic tire)는 운전 중의 펑크에 대한 위험과 타이어 내부의

적절한 공기압 유지가 필요하며 복잡한 제조과정 등의 단점을 가지고 있다[1].

이에 따라 탄성 중합체로 메우거나 공기압 타이어의 공기압을 대신할 스포크(spoke)를 설계하는 등의 비공기압 타이어를 제작하려는 시도를 해오고 있고, 최근에는 유연한 다각형 스포크와 탄성체 층이 삽입된 내, 외부 링으로 이루어진 비공기압타이어가 발표되었다[2-3]. 이러한 구조의 타이어는 낮은 접지압과 구름 저항을 갖는 장점이 있다. 이 밖에도 공기압을 유지할 필요가 없으므로 공기가 없는 우주 분야에서도 많은 활용 가치가 있다.

허니컴(honeycomb)은 2차원의 셀 모양의 meso-structure가 주기적으로 반복되는 구조를

† 2011년 4월 18일 접수 ~ 2011년 7월 15일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : dmkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

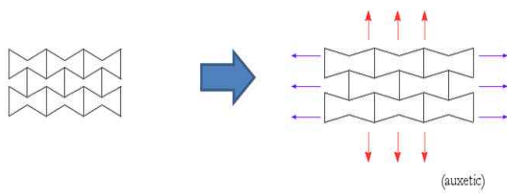


Fig. 1. Characteristic of Auxetic Honeycomb

가지고 있다. 이 허니컴은 out-of-plane 방향의 높은 강성 때문에 가벼운 샌드위치구조에 주로 사용되어져 왔다[4-5]. 그러나 허니컴의 in-plane 방향의 물성은 out-of-plane 방향의 강성과는 반대로 2~3배정도 약한 것으로 알려져 있다. 6각형의 셀 구조를 가지는 허니컴은 축 방향과 전단 방향 모두에 유연한 것으로 알려져 있고, 셀의 각을 변화시킴으로써 목표한 강성에 적합한 설계가 가능하다[10-15].

비공기압 타이어에서의 스포크는 공기압 타이어의 공기압을 대신하여 차량의 주행 중 반복되는 인장과 압축하중을 받게 된다. 그러므로 적절한 강성과 탄성이 필요하다. 일반적인 재료는 높은 강성을 가지면 낮은 탄성을 갖거나, 낮은 강성을 가지면서 높은 탄성을 갖는다. 스포크의 설계에 있어 최근 양의 각을 갖는 6각의 허니컴 구조가 제안되었다. 일반적인 재료는 길이가 늘어나면서 높이가 줄어든다. 그러나 음의 각을 가진 허니컴은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 길이가 늘어나면서 동시에 높이도 늘어나게 하여 포와송비가 음의 값을 가지게 된다[6]. 이러한 특징을 가진 물질은 auxetic이라고 부른다.

본 연구는 6각의 허니컴 스포크의 형상에 대하여 음의 각을 가진 허니컴 개발을 위하여 2가지의 음의 각을 제안하고, 이를 공기압 타이어와 비교 하였다. 비공기압 타이어의 스포크 설계를 위해 상용코드인 ABAQUS를 이용하였다. 구조 해석을 통해서 비공기압 타이어의 force-deflection 관계를 해석하고, 하중에 따른 스포크의 응력을 비교하여 새로이 설계된 비공기압 타이어의 스포크 특성을 알아보려고 한다.

II. 본 론

공기압 타이어의 해석은 비공기압 타이어 개발에 있어 참고(reference)가 되는 데이터의 확보를 위해 수행 하였다.

2.1 공기압 타이어

일반적인 타이어의 구성은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 타이어를 림(rim)에 장착시키는 역할을 하는 비드(bead)와 타이어의 골격이 되는 카카스(carass), 카카스를 보호하고 유연한 굴신 운동을 함으로써 승차감을 좋게 하는 사이드월(sidewall), 타이어의 강성을 높여주는 벨트(belt), 마지막으로 노면과 접촉하는 부분으로 두꺼운 고무 층으로 이루어진 트레드(tread)로 구성된다.

본 연구에서 사용한 공기압 타이어의 모델은 205/65R15의 타이어를 사용하였으며, 유한요소 해석모델과 그 수치는 Fig. 3과 같이 모델링되었다. 공기압 타이어의 비드, 사이드월, 및 트레드는 8절점의 solid type의 C3D8R 요소를 사용하였으며, 카카스와 벨트는 4절점의 shell type의 S4R 요소를 사용하였다.

유한요소 해석에 사용한 경계조건은 콘크리트 바닥면을 고정 시켰으며 하중조건은 타이어의 림 중앙부에 집중하중을 가하였다. 이때 타이어의 림 중앙부의 포인트와 타이어 림 파트는 MPC 조건 중 tie조건으로 결합시켜 타이어 림에 집중하중이 가해질 때 타이어의 림이 림 중심점과 함께 거동하도록 해석을 실시하였다.

공기압 타이어의 각 부분의 물성은 Table 1과

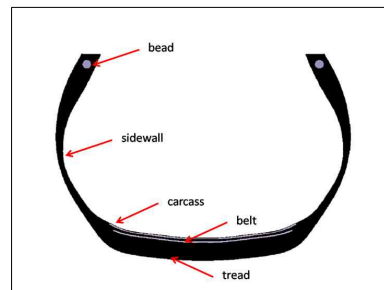


Fig. 2. Cross-section of Pneumatic tire

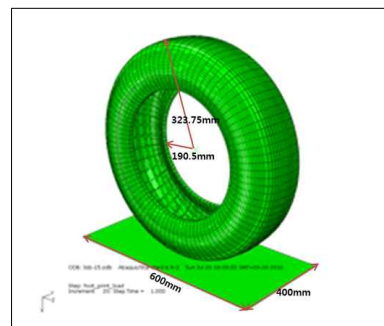


Fig. 3. 3D model of Pneumatic tire

Table 1. Material Properties of Pneumatic

Part	Material	Young's Modulus	Poisson's Ratio
Belt	Steel cord	172.2GPa	0.3
Carcass	polyester	9.87GPa	0.33
Road	concrete	480GPa	0.22
Tread	synthetic rubber	Hyperelastic model	

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

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

같이 벨트 코드는 steel을 사용하였으며, 카카스는 polyester를 사용하였고, 바닥은 concrete를 사용하였으며, 크기는 600mm×400mm×10mm의 크기로 모델링 하였다.

타이어의 트레드에 사용한 고무의 물성치는 hyperelastic 모델 중 Ogden 에너지 함수를 사용하였으며 해석에 사용한 에너지 함수 및 함수의 계수는 Equation 1과 Table 2에 나타나 있다.

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

ABAQUS를 사용한 공기압 타이어의 static stress analysis는 2개의 스텝으로 해석이 진행 되었다. 첫 번째 스텝은 공기압 타이어의 내부에 공기압이 작용하는 스텝으로 205/65R15의 적정 공기압인 210kPa을 적용시켰으며, 두 번째 스텝은 첫 번째 스텝이 진행 된 상태에 3,000N의 수직 하중을 림의 중앙부분에 작용시켰다.

Fig. 4는 공기압 타이어의 중심점에 대한 force-deflection curve를 보여준다. Fig. 4를 보면 수직하중의 증가에 따라 공기압 타이어의 변형이 비선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 비선형 거동은 타이어 내압의 가압과정에서 타이어 재료의 비선형의 거동과 하중이 증가하면서 발생하는 사이드 월의 변형에 따른 비선형 거동 때문에 타이어의 전체적인 거동이 비선형으로 나타난다. 타이어의 수직강성을 나타내는 force-deflection curve의 기울기는 공기압 타이어의 경우 하중이 증가함에 따라 수직강성도 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

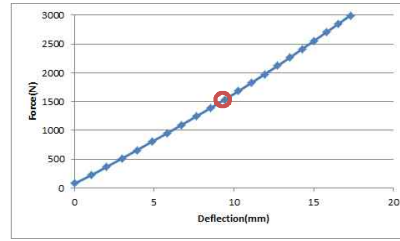


Fig. 4. Force-deflection of Pneumatic tire

Fig. 4의 붉은 원은 비공기압 타이어의 설계 시 공기압 타이어와 비슷한 수직강성을 갖게 하기 위하여 설정한 기준 점으로써 공기압 타이어가 1,500N의 수직하중에서 9.4mm의 변위를 가지는 위치이다. 이 기준점은 타이어의 load capability를 일치시키기 위하여 선정된 포인트로 같은 하중에서 같은 변위를 갖는 타이어를 설계함으로써 비슷한 거동을 보이는 타이어들을 설계하고 그 결과를 비교하기 위해 선정한 기준 점이다.

유한요소 해석의 결과 최대 접지압은 0.453 MPa 이었으며, shoulder 부분과 crown 부분의 접지압 차이는 0.22MPa이었다.

2.2 비공기압 타이어 디자인

비공기압 타이어의 구조는 Fig. 5와 같이 공기압 타이어와 같은 트레드와 타이어를 차량과 결합하는 허브(hub)와 공기압을 대신하는 스포크, 공기압 타이어의 벨트 역할을 하는 shear band, 타이어 형상을 유지하는 내·외부 링으로 구성되어 있다.

허니컴 구조의 스포크를 가지는 비공기압 타이어는 Fig. 6과 같이 2가지 형상으로 모델링 하였다.

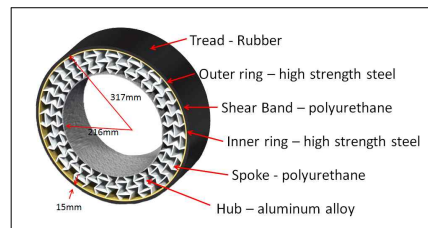


Fig. 5. Composition of NPT

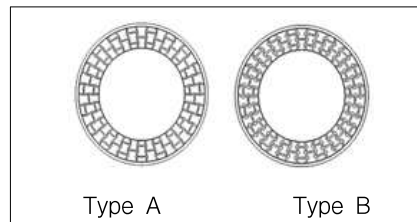


Fig. 6. Spoke Types of NPT

2.3 유한요소 모델

Fig. 7은 비공기압 타이어의 유한요소 모델로 허브는 변형이 일어나지 않는 강체로 모델링 되었으며, 스포크와 내·외부 링은 shell 요소로 모델링 되었다. 비공기압 타이어의 shear band와 트레드 및 접지 도로는 solid type의 요소로 모델링 되었다.

유한요소 해석을 위한 비공기압 타이어의 각 부분의 물성치는 Table 3과 같다. 내부 및 외부 링은 Steel ($E=210\text{GPa}$, $\nu=0.28$)을 사용하였고, 접지 도로는 concrete ($E=480\text{GPa}$, $\nu=0.22$)를 사용하였다. 스포크와 shear band는 폴리우레탄을 사용하였으며, 폴리우레탄의 물성치는 Uni-axial, Bi-axial, Planer tension의 실험 결과를 ABAQUS의 Hyperelastic 모델의 input 으로 사용하였으며, 고무의 물성치는 공기압 타이어의 고무 물성과 같은 물성치를 사용하였다.

Table 3. NPT properties for each part

Part	Material	Young's Modulus	Poisson's ratio
Ring	ANSI 4340	210GPa	0.28
Road	Concrete	480GPa	0.22
Spoke & Shear Band	Polyurethane	Hyperelastic model	
Tread	Rubber	Hyperelastic model	

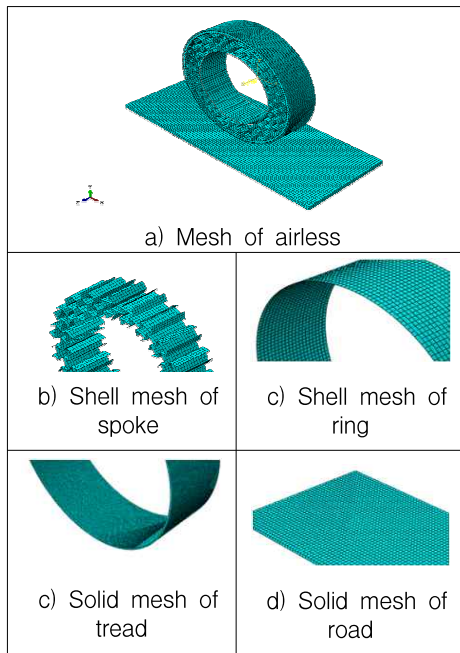


Fig. 7. Mesh type of NPT

2.4 해석 결과

Fig. 8은 수직하중의 증가에 따라 -15° Auxetic 구조의 스포크가 변형되는 형상과 트레드 접지면의 접지압 분포를 보여준다. Type A의 접지압 분포는 작은 하중에서 접지압 집중되는 선이 발생하고, 수직하중이 커짐에 따라 집중되는 접지압 선이 두 개로 갈라지는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 -15° Auxetic 구조의 스포크를 가지

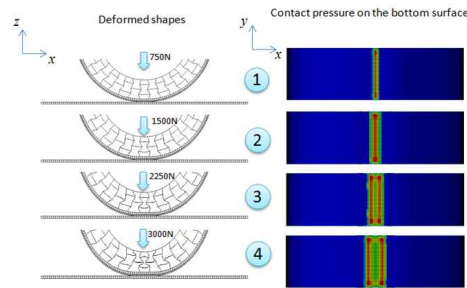


Fig. 8. Deformed shapes and contact pressure on the bottom surface of -15° auxetic spoke (Type A)

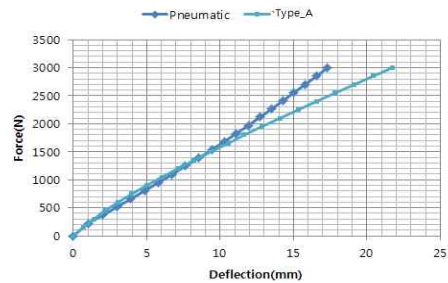


Fig. 9. Force-deflection curve of -15° auxetic spoke (Type A)

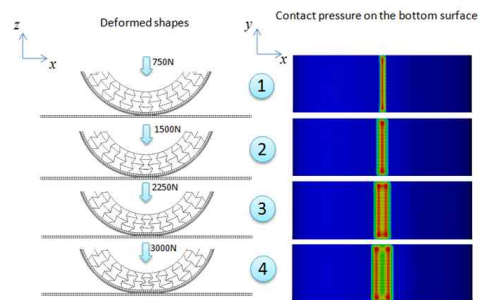


Fig. 10. Deformed shapes and contact pressure on the bottom surface of -30° auxetic spoke (Type B)

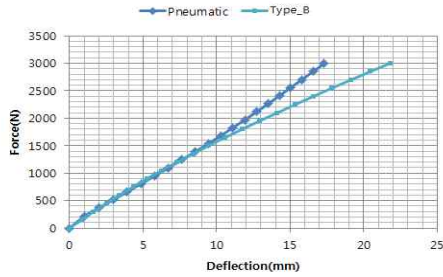


Fig. 11. Force-deflection curve of -30° auxetic spoke (Type B)

는 비공기압 타이어의 force-deflection curve를 공기압 타이어의 결과와 비교한 것이다. -15° Auxetic 구조는 공기압 타이어의 거동과 비교해서 비선형성이 더 뚜렷한 거동을 보인다. -15° Auxetic 구조는 1,500N 이하의 하중에서는 더 높은 강성을 갖지만 수직하중이 커짐에 따라 공기압 타이어보다 낮은 강성을 보인다. 또한 3,000N의 수직하중이 비공기압 타이어에 작용할 때 수직변위는 21.8mm 발생하였다.

Fig. 10은 수직하중의 증가에 따라 -30° Auxetic 구조의 스포크가 변형되는 형상과 트레드 접지면의 접지압 분포를 보여준다. Fig. 10에서 보는 것과 같이 Type B의 접지압 분포는 Type A와 비슷한 경향을 보인다.

비공기압 타이어에 작은 수직하중이 작용하면 접지압이 집중되는 선이 발생하고, 수직하중이 커짐에 따라 집중되는 접지압 선이 두 개로 갈라지는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11은 -30° Auxetic 구조의 스포크를 가지는 비공기압 타이어의 force-deflection curve를 공기압 타이어의 결과와 비교한 것이다. -30° Auxetic 구조는 공기압 타이어의 거동과 비교해서 비선형성이 더 뚜렷한 거동을 보인다. Type A의 force-deflection curve는 1,500N에서 공기압 타이어 보다 높은 강성을 갖지만 -30° Auxetic 구조는 1,500N 이하의 하중에서는 공기압 타이어와 같은 강성을 보인다.

그러나 1,500N이상의 하중에서는 Type A와 같이 공기압 타이어 보다 낮은 수직강성을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 3,000N의 수직하중이 비공기압 타이어에 작용할 때 수직변위는 Type A와 같이 21.8mm 발생하였다.

Table 4는 공기압 타이어와 NPT의 해석결과를 비교한 표이다. 각각 750N, 1,500N, 2,250N, 3,000N의 수직하중에 따라 최대 접지압, 스포크의 최대 로칼 스트레스(local stress), 및 타이어

Table 4. Compare the analysis results of NPT with Pneumatic tire

Vertical Force (N)	Condition	Pneumatic tire	NPT with Type A	NPT with Type B
750	maximum contact pressure (MPa)	0.387	0.30	0.30
	contact pressure difference between center and edge in the longitudinal direction (MPa)	N/A	N/A	N/A
	maximum local stress on the spoke (MPa)	N/A	0.6	0.4
1500	maximum contact pressure (MPa)	0.355	0.30	0.32
	contact pressure difference between center and edge in the longitudinal direction (MPa)	0.058	N/A	N/A
	maximum local stress on the spoke (MPa)	N/A	1.3	0.9
2250	maximum contact pressure (MPa)	0.346	0.25	0.27
	contact pressure difference between center and edge in the longitudinal direction (MPa)	0.096	0.10	0.08
	maximum local stress on the spoke (MPa)	N/A	1.6	1.4
3000	maximum contact pressure (MPa)	0.43	0.28	0.29
	contact pressure difference between center and edge in the longitudinal direction (MPa)	0.1	0.13	0.10
	maximum local stress on the spoke (MPa)	N/A	2.4	2.0

의 진행방향의 접지압 차이를 비교하였다. 비교 결과 전반적으로 비공기압 타이어가 공기압 타이어 보다 낮은 접지압을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 스포크의 로칼 스트레스는 auxetic 구조의 셀의 각도가 커짐에 따라 낮게 나타난다. 또한 타이어의 진행 방향의 접지압 차이역시 로칼 스트레스와 비슷하게 auxetic 구조의 셀의 각도가 커짐에 따라 낮게 나타난다.

III. 결 론

이 논문에서는 6각형의 셀을 가진 비공기압 타이어를 셀의 각도에 따라 2가지 타입으로 구분하여 각 타입의 force-deflection curve, 접지압 및 로칼 스트레스를 비교 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 비공기압 타이어의 force-deflection curve는 2가지 타입 모두 비선형적인 거동을 보였으며, 각이 커짐에 따라 3,000N의 수직하중에 발생하는 변위가 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

- 비공기압 타이어의 로칼 스트레스는 셀의 각이 커짐에 따라 그 값이 점점 작아지는 것을 확인 할 수 있었다.

- 비공기압 타이어가 공기압 타이어 보다 낮은 접지압을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과들을 종합해보면 비공기압 타이어의 수직강성과 로칼 스트레스는 6각 허니컴의 셀 각이 커질수록 낮아지며, 이를 통하여 비공기압 타이어의 스포크는 각이 큰 6각 허니컴을 사용하면, 스포크의 두께 조절을 통해 수직강성을 조절할 수가 있다. 앞으로 타이어의 성능을 결정하는 구름저항에 대한 연구와 내구성 및 진동 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Gent, A.N, and Walter, J.D. 1985, The Pneumatic tire, National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC.
- 2) Gough V.E., (1958), "Tyre-To-Ground Contact Stress", Stress Analysis Group Conference on Contact Stress, Vol. 2, No. pp. 126-59.
- 3) Cho J.R., Kim K.W., Yoo W.S., and Hong S.I., (2004), "Mesh generation considering detailed tread blocks for reliable 3D tire analysis", Advances in engineering software, Vol. 35, No. pp. 105-113.
- 4) Manuel J. Fabela-Gallegos, Ricardo Hernandez-Jimenez, Alberto Reyes- Vidales, (2007), "Effect of Load and Inflation Pressure on contact Force and Pressure Distribution for Two Types of Light Duty Truck Tires", Society of Automotive Engineers Inc, Vol. 2146, No. pp. 15-22.
- 5) Mohsenimanesh A., Ward S.M., and Gilchrist M.D., (2009), "Stress analysis of a multi-laminated tractor tyre using nonlinear 3D finite element analysis", Materials and Design, Vol. 30, No. pp. 1124-1132.
- 6) Jeong H.S., Kim N.J., and Kim K.W., (2002), "Tread Shape Optimization for Optimum Contact Pressure", Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 5, No. pp. 63-68.
- 7) Kim S.H., (2002), "A Comprehensive analytical model for Pneumatic tires", The University of Arizona, Ph.D. Dissertation.
- 8) Julien Cesbron, Fabienne Anfosso-Ledee, Denis Duhamel, (2009), "Experimental study of tyre/road contact forces in rolling conditions for noise prediction", Journal of sound and vibration, Vol. 320, No. pp. 125-144.
- 9) 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, 1990, pp. 80-103.
- 10) 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. 9.
- 11) Alfredo, R.V., 1967, Airless Tire, U.S. Patent, US 3,329,192.
- 12) Kubica, W. and Schmidt, O., 1979, Self-Supporting Motor Vehicle Tire, U.S. Patent, US 4,169,494.
- 13) Manesh, A., Terchea, M., Anderson, B., Meliska, B., Ceranski, F, Tension-Based Non-Pneumatic tire, 2008, World Intellectual Property Organization, WO 2008/118983 A1.
- 14) Rhyne, T. and Cron, S. M., 2006, "Development of a Non-Pneumatic Wheel", Tire Science and Technology, Vol. 34, pp. 150-169.
- 15) Ju, J., Ananthasayanam, B, Summers, J.D., and Joseph, P., 2010, Design of Cellular Shear Bands of a Non-Pneumatic tire - Investigation of Contact Pressure, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 3(1):598-606.
- 16) J. Ma, J. Ju, J.D. Summers*, and P. Joseph, Effects of Cellular Shear Bands on Interaction between a Non-Pneumatic tire and Sand, In Proceedings of the SAE 2010 World Congress and Exhibition, 10AC-0108, Detroit, MI.
- 17) Jaehyung Ju, Balajee Ananthasayanam, Joshua Summers, and Paul Joseph, 2010, "Design of Cellular.
- 18) Shear Bands of a Non-Pneumatic tire - Investigation of Contact Pressure", SAE International.
- 19) Abd El-Sayed, F. K., Jones, R., and Burgess, I. W. (1979), A Theoretical Approach to the Deformation of Honeycomb Based Composite Materials, Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 209 - 214.
- 20) Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G.S. and Robertson, C. I. (1982), The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials, Proceedings of The Royal Society A, 382, pp. 25-42.
- 21) Masters, I. G. and Evans, K. E., (1996), "Models for the Elastic Deformation of Honeycombs", Composite Structures, Vol. 35, No. pp. 403-22.