

음의 각을 가지는 허니컴 스포크를 사용한 비 공압타이어의 접지압 분포

김광원* · 김두만**

Contact Pressure of Non-Pneumatic Tires with Auxetic Honeycomb Spoke

Kwangwon Kim* · Dooman Kim**

ABSTRACT

An airless tire has advantages over the conventional pneumatic tire in terms of flat proof and maintenance free. According to the recently disclosed inventions on the airless tire, non-pneumatic tire (NPT) consists of the flexible polygon spokes. Considering the NPT structure, the spokes undergo the tension-compression cyclic loading while the tire rolls. Therefore the spokes of NPT are required to have both stiffness and resilience under the cyclic tensile-compressible loading. In general, if a material has a high stiffness, it shows a low elastic strain limit. In this paper, using the auxetic honeycomb structure with negative poisons' s ratio, the spokes of NPT tire are designed to have both stiffness and resilience. Finite element based numerical simulation of the contact pressure of a NPT is carried out with ABAQUS.

Key Words: Non-Pneumatic Tires(비 공압 타이어), Airless Tire(비 공압타이어), Spoke(바퀴살), Honeycomb(허니컴), Auxetic(팽창 물질), Contact Pressure(접지압)

기호설명

E_s : 재료의 탄성계수 [Pa]
 E_{11}^* : x방향의 등가 탄성계수 [Pa]
 E_{22}^* : y방향의 등가 탄성계수 [Pa]
 G_{12}^* : In-plane 방향의
 등가 전단 강성계수 [Pa]

h : Honeycomb의 높이 [mm]
 t : Honeycomb의 두께 [mm]
 l : Honeycomb 대각선의 길이 [mm]
 θ : Honeycomb cell의 각도 [$degree$]

1. 서 론

최근 발표된 non-pneumatic tire(NPT)는 운전 중 펑크에 대한 위험이 없을 뿐 아니라 타이어 내부의 적절한 공압 유지가 필요 없다는 장점이

* 학생회원, 한국대학교 항공우주공학과

** 종신회원, 한국항공우주연구원

연락처 : 김 두만, E-mail: dmkim@kau.ac.kr

있다[1-7]. 이 NPT의 발명에 따르면 NPT는 유연한 다각형 spoke와 탄성체 층을 가지는 내,외부 링으로 이루어진다. NPT의 spoke는 타이어가 구르는 동안 인장, 압축의 사이클 하중을 받는다[8,9].

Honeycomb은 높은 out-plane 방향의 강성이 요구되는 가벼운 샌드위치 구조에 주로 사용되어져 왔다[10,11]. 그러나 honeycomb의 in-plane 방향의 강성은 out-plane 방향의 강성 보다 2-3배 정도 약하다. 최근 목표 하중에서 큰 변형이 필요한 MEMS 구조나 비행기의 변형 날개 구조에서 유연한 honeycomb의 in-plane 방향의 강성을 사용하려는 노력이 이루어지고 있다[12-15].

최근 6각 honeycomb 뿐 아니라 삼각형, 사각형 등의 셀 구조를 가지는 honeycomb의 구조의 등가 탄성계수의 연구가 진행 되었다[16-23]. 이 연구에 따르면 삼각형과 마름모 셀의 honeycomb은 높은 탄성계수를 필요로 하는 구조 설계에 좋은 honeycomb으로 알려져 있다[22]. 반대로 육각 셀의 honeycomb은 유연한 구조설계에 유리한 것으로 알려져 있다[22]. 이러한 육각 셀의 honeycomb축과 전단 방향 모두에 유연할 뿐 아니라 셀 각의 변화를 통해 목표한 in-plane 방향의 강성을 가지는 honeycomb 설계가 가능하다.

보통의 재료는 인장 하중을 받게 되면 높이가 줄어드는 특성을 가지고 있다. 그러나 음의 각을 가지는 육각 honeycomb은 인장 하중을 받게 되면 높이가 늘어나는 팽창특성을 갖고 이러한 구조를 auxetic 구조라 한다.

NPT의 spoke는 반복적인 인장 압축 하중 하에서 강성과 탄성이 모두 요구된다. 일반적으로 강성과 탄성은 반대되는 조건이다. 만약 재료가 높은 강성을 가지면 그 재료는 낮은 탄성변형 한계를 보인다. 본 연구는 음의 각을 가지는 육각 honeycomb을 spoke에 적용시킴으로써 auxetic 구조의 팽창특성이 pneumatic tire의 공압과 같

은 역할을 하며 높은 강성과 탄성을 모두 만족하는 spoke를 연구하고자 한다.

2. Pneumatic Tire

2.1 Pneumatic tire의 모델링

일반적인 타이어의 구성은 Fig.1 에서 보여주는 것과 같이 타이어를 rim에 장착시키는 역할을 하는 bead와 타이어의 골격이 되는 carcass, carcass를 보호하고 유연한 굴신운동을 함으로써 승차감을 좋게 하는 sidewall, 타이어의 강성을 높여주는 belt, 마지막으로 노면과 접촉하는 부분으로 두꺼운 고무 층으로 이루어진 tread로 구성된다.

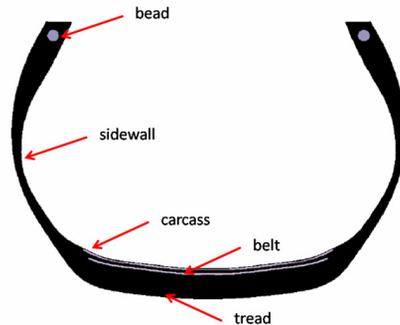


Fig.1 Pneumatic tire의 단면

본 연구에서 사용한 Pneumatic tire의 모델은 205/65R14의 타이어를 사용하였으며 Fig.2와 같이 모델링되었다. Pneumatic tire의 bead, sidewall, 및 tread는 8절점의 solid type의 C3D8R 요소를 사용하였으며 carcass와 belt는 4절점의 shell type의 S4R 요소를 사용하였고 각 부분의 물성은 Table1과 같이 belt cord는 steel을 사용하였으며 carcass는 polyester를 사용하였고 road는 concrete를 사용하였다.

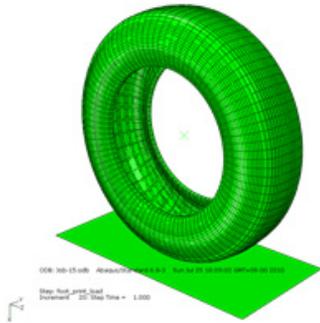


Fig.2 Pneumatic tire의 3D 모델

Table 1 Pneumatic tire의 물성

Part	Material	Young' s Modulus	Poisson' s Ratio
Belt	Steel cord	172.2GPa	0.3
Carcass	polyester	9.87GPa	0.33
Ground	Concrete	48GPa	0.2

2.2 Pneumatic tire의 해석 결과

Pneumatic tire의 static stress analysis는 2개의 스텝으로 해석이 진행 되었다. 첫 번째 스텝은 pneumatic tire의 내부에 공기압이 작용하는 스텝으로 205/65R14의 적정 공기압인 210kPa을 적용시켰으며 두 번째 스텝은 첫 번째 스텝이 진행 된 상태에 3000N의 수직 하중을 rim의 중앙부분에 작용시켰다.

Fig.3은 pneumatic tire의 force-deflection curve를 보여준다. pneumatic tire의 force-deflection curve를 보면 수직하중의 증가에 따라 pneumatic tire의 변형이 비선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 타이어의 수직강성을 나타내는 force-deflection curve의 기울기는 pneumatic tire의 경우 하중이 증가함에 따라 수직강성도 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 3의 붉은 원은 NPT의 설계 시 pneumatic tire와 비슷한 수직강성을 갖게 하기 위하여 설정한 reference point로써 pneumatic

tire가 1500N의 수직하중에서 9.4mm의 변위를 가지는 위치이다.

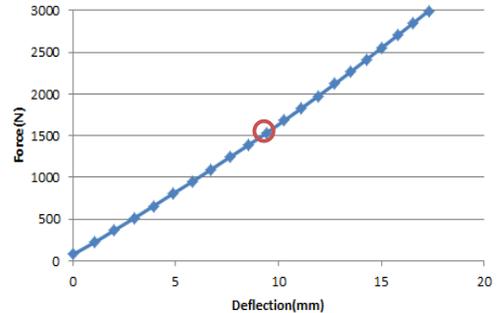


Fig.3 Force-Deflection curve of Pneumatic tire

Fig.4는 수직하중의 증가에 따른 pneumatic tire의 static contact pressure의 분포를 보여 준다. 최대 contact pressure는 0.453MPa이었으며 shoulder 부분과 crown 부분의 contact pressure 차이는 0.22MPa이었다. Pneumatic tire의 static contact pressure의 분포는 최초 convex 형상의 분포를 보이다가 하중이 증가함에 따라 점차 접지면 중앙의 contact pressure 값이 낮아지면서 concave 형상으로 변하는 것을 확인 할 수 있었다.

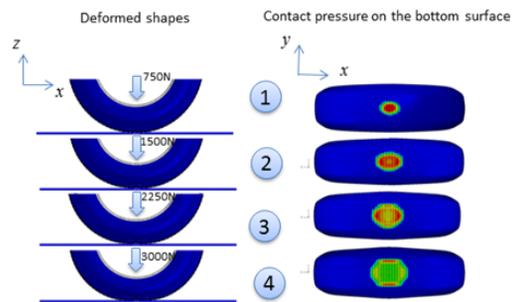


Fig.4 수직하중에 따른 Pneumatic tire의 contact pressure 분포

Fig.5는 pneumatic tire의 contact pressure 계산 결과를 3D 그래프로 나타낸 것이다. longitudinal 방향의 contact pressure 결과는 crown 부분에서는 contact pressure 분포가 convex 형상이지

만 shoulder 부분에서 concave형상인 것을 확인할 수 있다. lateral 방향의 contact pressure 결과는 접지면의 edge부분에서는 균일한 contact pressure를 보여주지만 중심 부분에서는 concave형상의 contact pressure 분포를 확인할 수 있다.

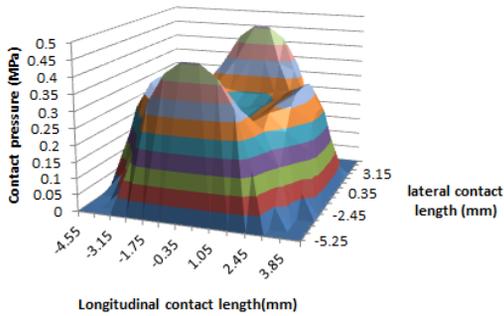


Fig.5 Pneumatic tire의 3D contact pressure 분포

3. NPT 해석 모델

3.1 등가 탄성계수

육각 honeycomb의 등가 탄성계수는 cellular material theory(CMT)에 의해 다음 Eq. 1~3과 같이 주어진다[17,18].

$$E_{11}^* = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos\theta}{(h/l + \sin\theta) \sin^2\theta} \quad \text{Eq.1}$$

$$E_{22}^* = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\cos^3\theta} \quad \text{Eq.2}$$

$$G_{12}^* = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{(h/l)^2 (1 + 2h/l) \cos\theta} \quad \text{Eq.3}$$

CMT에 의해 제안된 식은 육각 honeycomb의 h , l , 그리고 θ 를 변수로 사용하고 각 변수는 Fig. 6에 나타난 것과 같다.

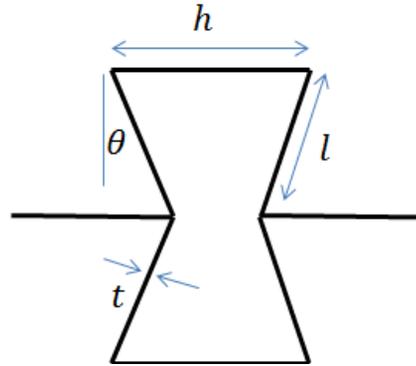


Fig.6 Geometric parameters of honeycomb

3.2 NPT의 구조

본 연구의 대상은 Fig.7과 같이 외경 317mm와 내경 216mm의 NPT이다. NPT는 차체와 연결되는 부분으로 0.5mm의 aluminum 판으로 만들어진 hub와 pneumatic tire의 공기압을 대신하는 polyurethane 소재의 honeycomb spoke, pneumatic tire의 belt와 같은 역할을 하는 steel-polyurethane-steel 소재의 15mm두께를 가지는 shear band, 노면에 접지하는 부분인 고무소재의 tread로 구성되어있다.



Fig.7 Non-Pneumatic Tire의 구조

NPT 각 부분들의 물성은 Table 2와 같이 주어진다. 내부 및 외부 링은 Steel ($E=210\text{GPa}$, $\nu=0.28$)을 사용 하였고 접지 도로는 Concrete ($E=480\text{GPa}$, $\nu=0.22$)를 사용 하였다. 스포크와 Shear Band는 폴리우레탄을 사용하였으며 폴리

우레탄의 물성치는 Hyper elastic 모델을 사용하였고 고무의 물성치는 viscoelatic 모델을 사용하였다.

Table 2 비 공압 타이어의 각 파트별 물성치

파트	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	Viscoelastic model	

4. NPT 해석 결과

4.1 Force-Deflection

본 연구에서는 -45°C 의 Honeycomb spoke의 cell 각도를 사용하였으며 앞 절에서 선정한 pneumatic tire의 reference 값과 같은 값을 갖도록 spoke의 두께를 7.3mm를 적용하였다. 해석 결과 NPT의 force-deflection은 Fig.8와 같은 결과를 보였다. Force-deflection curve는 타이어의 수직강성을 보여준다. Fig. 9를 보게 되면 NPT의 spoke 두께를 7.3mm로 설정하면 2000N의 수직하중까지는 pneumatic tire와 비슷한 수직강성을 보이지만 2000N 이상의 수직하중에서는 pneumatic tire보다 낮은 수직강성을 보인다. 또한 NPT의 하중에 따른 변위가 pneumatic tire보다 더 비선형적인 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.

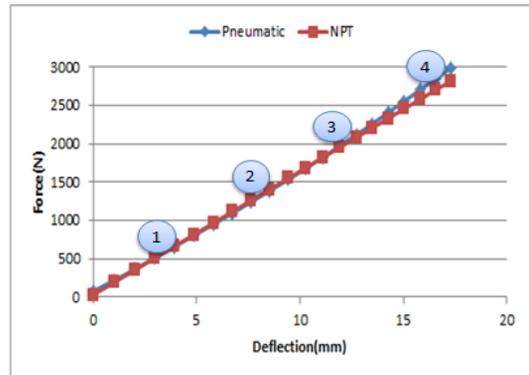


Fig. 8 Force-Deflection curve of NPT and Pneumatic tire

Fig. 10은 NPT spoke의 하중에 따른 변형을 보여준다. -45°C 의 Honeycomb spoke의 cell 각도를 사용한 NPT는 하중의 증가에 따라 spoke의 셀이 찌그러지는 것을 확인할 수 있으며 fig. 9의 4번째 그림에 표시된 부분에서 Max. local stress가 약 1.8MPa 발생하였다.

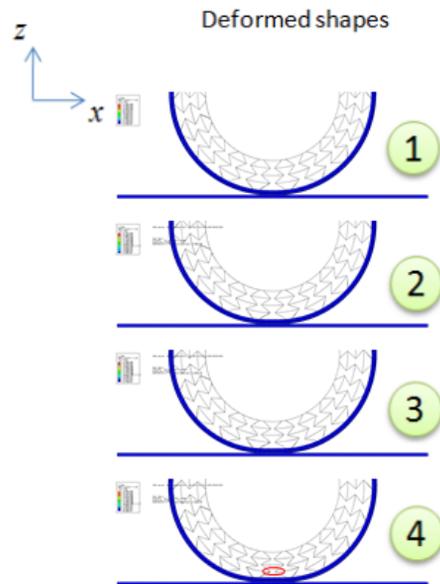


Fig. 9 Deformed shapes of NPT

4.2 Contact pressure

Fig.10은 NPT의 접지압을 하중에 따라 나타낸 그림이다. Fig.10에서 보는 것과 같이 750N의 수직하중에서는 접지압이 line형태로 집중되다가 1500N의 수직하중이 에서는 좀 더 넓은 면적에 분포되는 것을 볼 수 있다. 2250N과 3000N의 수직하중에서는 1500N의 수직하중보다 더 넓은 접지면적을 가지며 접지압 분포가 2개의 line 형태로 갈라지는 것을 확인 할 수 있다.

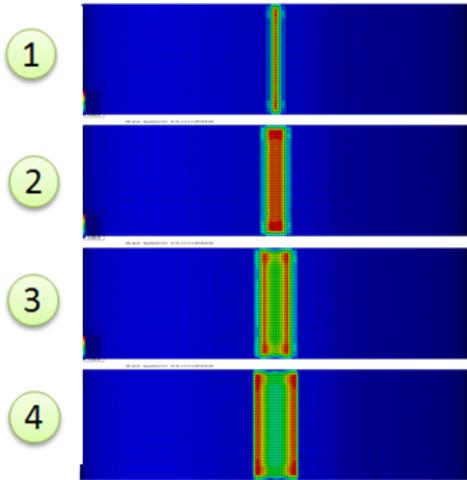


Fig.10 Contact pressure on bottom surface of NPT

Fig.11은 750N의 수직하중이 작용할 때 NPT의 접지압을 3D로 나타낸 것이다. 앞선 Fig.10의 첫 번째 그림과 같이 타이어 접지면의 중심부분에 가장 높은 접지압 약 0.35MPa 발생하고 lateral 방향으로 line 형태로 나타난다. 접지압 형상을 살펴보면 타이어의 lateral 방향으로는 접지압의 형상이 거의 변화가 없고 longitudinal 방향으로 convex 형상을 보인다.

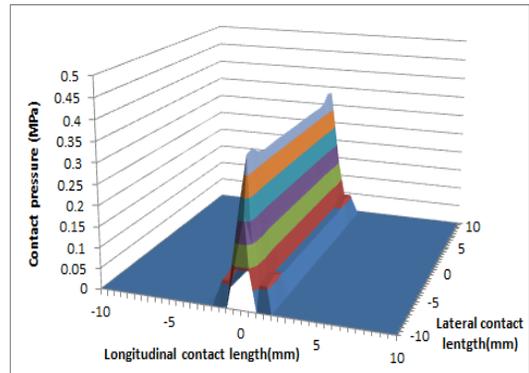


Fig.11 3D plot of contact pressure for a vertical force of the 750N

Fig.12는 NPT에 1500N의 수직하중이 작용할 때의 3D 접지압 분포를 보여준다. 최대 접지압은 750N보다 낮은 0.28MPa이 발생한다. 1500N의 수직하중이 작용할 때 역시 lateral 방향의 접지압은 큰 차이를 보이지 않고 longitudinal 방향으로 750N과 보다는 꼭대기가 뭉개진 convex 형상을 보인다.

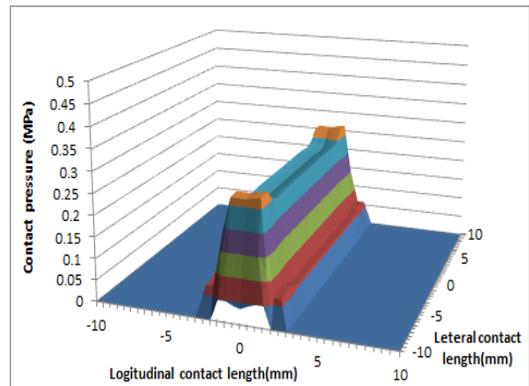


Fig.12 3D plot of contact pressure for a vertical force of the 1500N

Fig.13은 2250N의 수직하중이 작용할 때 NPT의 접지압을 3D로 나타낸 것이다. 최대 접지압은 1500N보다 높지만 750N보다는 낮은 약 0.31MPa의 접지압이 발생하였다. 접지압 형상은 lateral 방향으로 접지압의 큰 변화가 없는 반면 longitudinal 방향의 접지압은 형상은 750N과 1500N과는 다르게 concave 형상을 보였다.

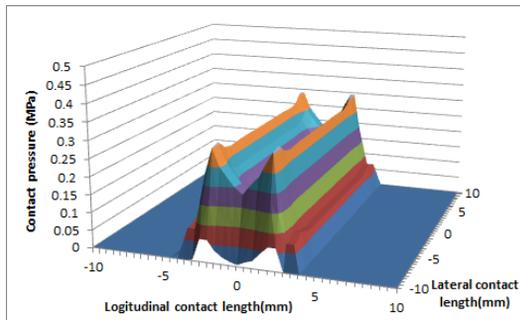


Fig.13 3D plot of contact pressure for a vertical force of the 2250N

Fig.14는 NPT에 3000N의 수직하중이 작용할 때의 3D 접지압 분포를 보여준다. 3000N의 수직하중이 작용할 때 약 0.38MPa의 가장 높은 접지압이 발생하였다. 접지압 형상은 longitudinal 방향으로 접지면 중심부분이 매우 낮은 접지압을 보이면서 2250N 보다 심한 concave 형상을 보였다.

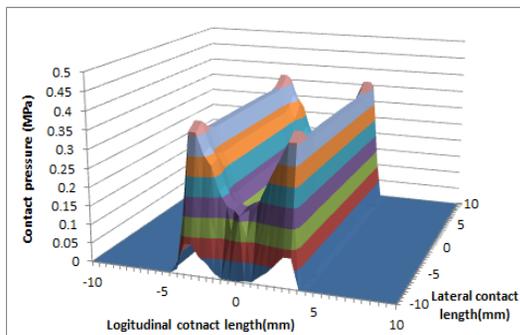


Fig.14 3D plot of contact pressure for a vertical force of the 2250N

5. 결 론

본 연구에서는 -45°C 의 auxetic 구조의 honeycomb을 spoke에 적용시켜 3000N의 수직하중이 작용할 때의 변형과 접지압을 pneumatic tire와 비교 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 수직하중에 따른 NPT의 수직변위는 pneumatic tire의 수직변위 보다 더 비선형적인 거동을 보였다.
- NPT의 spoke를 7.3mm로 design하면 pneumatic tire와 비슷한 수직강성을 가지는 NPT 설계가 가능하다.
- NPT의 최대 접지압(0.38MPa)은 pneumatic tire의 최대 접지압(0.46MPa) 보다 낮은 접지압을 보였다.
- NPT의 접지압 분포는 하중이 증가함에 따라 longitudinal 방향으로 convex 형상에서 concave 형상으로 변하는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구의 결과로 보아 향후 다양한 형태의 spoke 형태에 관한 연구와 rolling resistance 부분의 연구 등이 진행 된다면 auxetic honeycomb 구조의 spoke를 가지는 NPT의 개발이 가능 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Cozatt, C.P., 1924, Spring Wheel, U.S. Patent, US 2,502,908
- [2] Alfredo, R.V., 1967, Airless Tire, U.S. Patent, US 3,329,192
- [3] Kubica, W. and Schmidt, O., 1979, Self-Supporting Motor Vehicle Tire, U.S. Patent, US 4,169,494
- [4] Palinkas, R.L. and Page, G.J., 1989, Non-Pneumatic Tire with Supporting and

- Cushioning Members, U.S. Patent, US 4,832,098
- [5] Pajtas, S.R., 1990, Honeycomb Non-Pneumatic Tire with a Single Web on One Side, U.S. Patent, US 4,945,962
- [6] Panaroni, V.F., 1992, Airless Tire with Circumferential Band Reinforcement, U.S. Patent, US 5,086,815
- [7] Johnson, T.J., 1993, Wheel Assembly, U.S. Patent, US 5,251,965
- [8] Rhyne, T. and Cron, S. M., 2006, "Development of a Non-Pneumatic Wheel," *Tire Science and Technology*, Vol. 34, pp.150- 169
- [9] Manesh, A., Terchea, M., Anderson, B., Meliska, B., Ceranski, F, Tension-Based Non-Pneumatic Tire, 2008, World Intellectual Property Organization, WO 2008/118983 A1
- [10] Bitzer, T. (1997), *Honeycomb Technology*, Chapman & Hall, London, UK
- [11] Vinson, J.R., (1999), *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic, Lancaster, PA
- [12] Larsen UD, Sigmund O, Bouwstra S. (1997), Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6(2) :99-106.
- [13] Olympio, K.R. and Gandhi, F., (2007), Zero- ν Cellular Honeycomb Flexible Skins for One-Dimensional Wing Morphing, In Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA2007-1735, Honolulu, Hawaii
- [14] Bubert, E., Woods, K.S., Kothera, C.S., Wereley, N.M., (2008), Design and Fabrication of a Passive 1-D Morphing Aircraft Skin, In Proceedings of the 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA2008-2045, Schaumburg, IL
- [15] Spadoni, A. and Ruzzene, M. (2007), Static Aeroelastic Response of Chiral-core Airfoils, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.18, pp.1067-1075
- [16] 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.
- [17] 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
- [18] Masters, I. G. and Evans, K. E., (1996), "Models for the Elastic Deformation of Honeycombs," *Composite Structures*, vol. 35, no. pp. 403-22,
- [19] Bezazi, A., Scarpa, F., and Remillat, C., (2005), "A Novel Centresymmetric Honeycomb Composite Structure," *Composite Structures*, vol. 71, no. 536-64,
- [20] Balawi, S. and Abot, J. L., (2008), "A Refined Model for the Effective in-Plane Elastic Moduli of Hexagonal Honeycombs," *Composite Structures*, vol. 84, no. pp. 147-58,

- [21] Gonella, S. and Ruzzene, M., (2008), "Homogenization and Equivalent in-Plane Properties of Two Dimensional Periodic Lattices," International Journal of Solid and Structures, vol. 45, no. pp. 2897-915,
- [22] Wang, A. J. and McDowell, D. L., 2004, In-Plane Stiffness and Yield Strength of Periodic Metal Honeycombs, Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 126: 137-56,
- [23] ASME International Design Engineering Technical Conferences, DETC2009-87730, San Diego, CA.
- [24] Ohm, T.R., 2003, Resilient Wheel Structure, U.S. Patent, US 6,615,885 B1
- [25] Laurent, D., Delfino, A., and Hinc, H., 2003, Non-Pneumatic Resilient Tire, U.S. Patent, US 6,640,859 B1