



오그제틱 구조를 활용한 소형 재난 탐사 주행장치용 에어리스 타이어 개발

김동건^a, 최환옥^a, 김정후^a, 박민서^a, 최승규^a, 곽성웅^b, 박정우^{a,*}

Development of an Airless Tire with Auxetic Structures for Miniature Disaster Exploration Vehicle

DongGeon Kim^a, HwanOk Choi^a, JungHoo Kim^a, MinSeo Park^a, SeungGyu Choi^a,
SeongUng Kwak^b, JeongWoo Park^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Chosun University^b Institute of Advanced Technology Convergence, Kunsan National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 September 2025
Revised 30 October 2025
Accepted 12 November 2025

Keywords:

Airless tire
Auxetic structure
Re-entrant structure
3D printing
Disaster exploration vehicle

ABSTRACT

Disaster exploration robots operate in environments where it is difficult for humans to access, search, detect, and collect data. Conventional tires face risks of damage and instability owing to road breaks, debris, and sudden terrain changes at disaster sites. In this study, an airless tire is designed and fabricated using a spoke structure suitable for rough terrains and disaster conditions. The design applies an auxetic re-entrant spoke structure that enhances shock absorption and recovery. Finite element analysis predicted the stress distribution and deformation under static and dynamic loads, leading to an optimized structure. The 3D tire was tested on a custom disaster robot platform. The results showed reduced structural damage and sufficient elastic recovery, confirming stable operation in disaster environments. This design has the potential for application in small exploration robot tires.

1. 서론

재난 탐사 로봇은 인간이 접근하기 어려운 환경에서 수색, 탐지, 정보 수집 등의 임무를 수행하며, 붕괴 구조물, 불안정 지형, 장애물이 많은 험지에서도 안정적인 주행이 요구된다. 그러나 이러한 환경에서 기존 공기압 타이어는 펑크, 공기압 저하, 구조 손상 등의 문제로 주행 안정성이 저하된다^[1]. 특히 재난 상황에서 타이어 손상은 임무 수행에 치명적인 영향을 미치므로, 내구성과 주행 안정성을 동시에 확보할 수 있는 대체 기술이 필요하다. 트랙이나 보행 메커니즘을 적용한 로봇은 험지 주행 성능은 우수하지만, 구조가 복잡하고 구동계의 에너지 효율이 낮아 소형 탐사 로봇에는 적합

하지 않다. 또한 방향 전환 제어가 까다롭고 파손 시 유지보수가 까다로운 한계가 있다. 반면 바퀴형 주행 방식은 단순한 구동 구조, 낮은 중량, 우수한 주행 속도 등의 장점을 가져 제한된 전력과 하중 조건을 갖는 소형 재난 탐사 로봇에 적합하다^[2,3]. 에어리스 타이어 (airless tire)는 내부 공기 대신 탄성지지 구조를 사용하여 하중을 지지하는 방식으로, 공기 누출 위험이 없고 유지보수가 용이하다는 장점이 있다^[4]. Fig. 1의 (a)는 재난 탐사 로봇, (b), (c)는 에어리스 타이어의 예시를 나타낸다. 대표적인 구조로는 허니컴 구조 (honeycomb structure), 오그제틱 구조(auxetic structure), 재진입 구조 (re-entrant structure) 등이 있으며, 이러한 구조는 음의 포아송 비(negative Poisson's ratio)를 통해 충격 완화 성능(impact

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7277

E-mail address: jwoopark@chosun.ac.kr (JeongWoo Park).

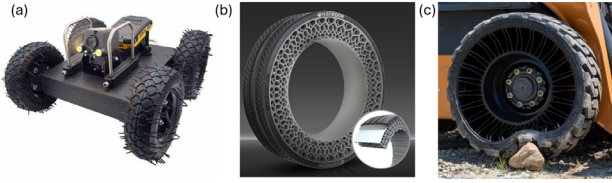


Fig. 1 (a) Disaster exploration robot; (b), (c) examples of airless tire (Hankook Tire i-Flex, MICHELIN TWEEL)

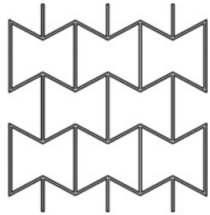


Fig. 2 Re-entrant structure

mitigation performance)과 동적 복원 능력(dynamic recovery capability)을 향상시킨다^[5,6]. 오그제틱 구조를 활용한 에어리스 타이어는 기존 허니컴 구조 대비 높은 에너지 흡수 성능과 변형 복원력을 가지며^[7,11], 구조 파라미터(셀 각도, 두께, 배열)에 따라 강성, 유연성을 조절 할 수 있다. 또한 주행 시 발생하는 진동 특성을 고려한 설계가 가능하여 재난 탐사 로봇과 같은 저속, 험지 환경에서의 활용 가능성이 높다^[8-10]. 특히 재진입 구조는 인장 시 가로 방향 치수가 함께 증가하고 압축 시 가로 방향 치수가 함께 감소는 음의 포아송 비 특성을 나타낸다. 이러한 변형 거동은 충격 에너지를 효과적으로 흡수하고 외력 제거 후 빠르게 원래 형상으로 복원되는 능력을 제공한다. 따라서 재진입 구조는 하중 분산, 충격 완화 성능, 동적 복원 능력 측면에서 기존의 허니컴 구조보다 우수하며 반복 하중이 가해지는 재난 탐사 로봇용 타이어 스포크 설계에 적합하다. Fig. 2는 재진입 구조를 나타낸다.

본 연구에서는 재난 탐사 주행장치용 에어리스 타이어를 설계, 제작하고 스포크 형상 변화와 재진입 구조를 적용하여 충격 완화 성능 및 동적 복원 능력을 향상시킴으로써 주행 중 전복 방지를 목표로 한다. 이를 위해 COMSOL Multiphysics를 이용한 정적, 동적 하중 해석과 3D 프린팅 시제품 제작, 실제 주행 실험을 수행하였으며, 구조적 성능 및 주행 안정성을 종합적으로 평가하였다.

2. 실험 방법 및 시뮬레이션

2.1 에어리스 타이어 모델링

본 연구에서 제작한 에어리스 타이어는 허브(hub)와 이를 둘러싸는 스포크 구조(spoke structure)로 구성된다. 허브는 로봇의 바퀴 축과 직접 연결되어 하중과 구동력을 전달하는 중심부이고 스포크 구조는 기존 공기압 타이어의 내부 공기 역할을 대체하여 하

Table 1 Design types of re-entrant spoke structure

Type	Spoke shape	Cell structure feature
A	Straight	Re-entrant cell structure
B	Curved	Re-entrant cell structure
C	Straight	Horizontally aligned re-entrant cell
D	Straight	Horizontally aligned re-entrant cell with inner fill

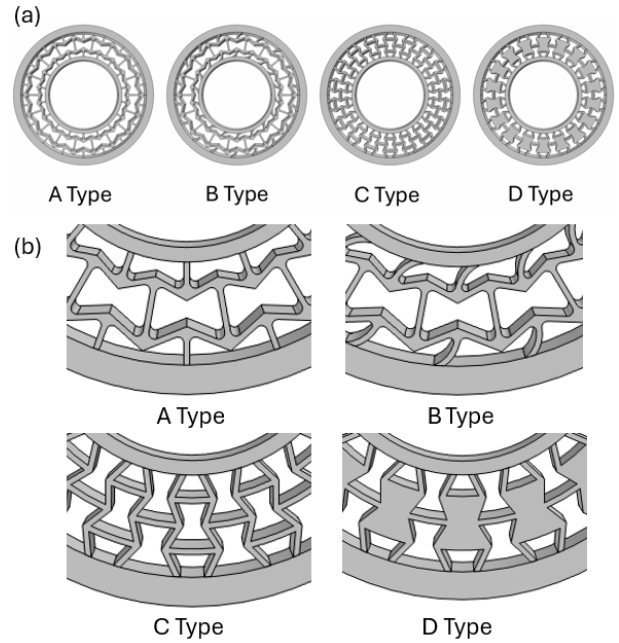


Fig. 3 (a) Various spoke structures; (b) detailed spoke structure for each type

중 지지와 충격 흡수를 담당한다. 스포크 구조에는 재진입 구조 셀을 기반으로 기하학적 변형을 적용하여 네 가지 타입을 설계하였다. 선행 연구에서는 재진입 구조가 아닌 다양한 형태의 에어리스 타이어를 설계하여 성능을 검토하였으나, 그 결과 재진입 구조 스포크 형상이 충격 완화 성능 및 동적 복원 능력 측면에서 상대적으로 우수한 성능을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 주행 안정성 확보를 위해 재진입 구조를 기본 설계 개념으로 채택하였다. Table 1은 A~D Type의 셀 구조 특징에 대하여 나타내고 있고, Fig. 3(b)는 A-D Type의 셀 형상을 나타낸다. A Type은 기본 재진입 구조, B Type은 곡선 스포크를 적용한 구조, C Type은 이를 90° 회전시킨 구조, D Type은 C Type의 중앙 셀을 채운 구조이다.

2.2 재료 특성 및 3D 프린팅

타이어 제작에는 유연성을 가지는 Thermoplastic Polyurethane(TPU) 소재를 사용하였으며 37 MPa의 인장강도로 높은 탄성과 내마모성을 갖추고 있어 반복 하중 조건에서도 원형 복원이 가능하다. 3D 프린팅 제작 공정에는 적층 제조 방식 중 하나인

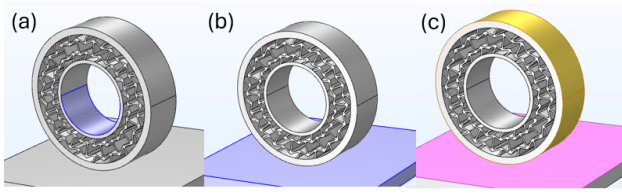


Fig. 4 Simulation 1 boundary condition: (a) load condition; (b) fixed constraint; (c) contact pair

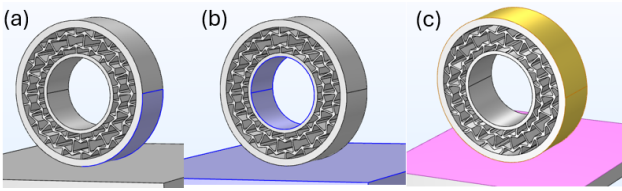


Fig. 5 Simulation 2 boundary condition: (a) load condition; (b) fixed constraint; (c) contact pair

Fused Deposition Modeling(FDM)을 적용하여 각 설계 타입을 제작하였다. FDM 방식은 열가소성 필라멘트를 일정한도로 가열해 용융시킨 후, 노즐을 통해 압출하여 층층이 적층하는 방법으로 복잡한 형상의 제작이 용이하고 재현성이 높다는 장점이 있다. 세부 조건으로는 적층 높이 0.2 mm, 내부 충전을 약 15% 조건을 적용하였다. 프린팅 시 필라멘트 온도, 노즐 직경, 채움 패턴을 동일하게 유지하여 오차를 최소화하였다.

2.3 유한요소해석

유한요소해석은 COMSOL Multiphysics 프로그램을 이용하여 시간에 따른 응력 및 변위 변화를 해석하였다. 타이어에 밀도 1100 kg/m³, 영 계수(Young's modulus) 8.0×10⁶ Pa, 포아송비 0.45의 선형 탄성체 모델을 적용하였다.

해석은 두 가지 조건으로 나누어 수행하였다. 시뮬레이션 1에서는 Fig. 4(b)와 같이 허브 부분을 고정하지 않고 지면만 고정하였으며 하중은 Fig. 4(a)와 같이 허브 하단부에 지면 방향으로 가하였다. 하중조건은 $-5ramp1(t)$ 함수를 사용하여 시간에 따라 선형적으로 증가하는 형태로 설정하였다. 시뮬레이션 2에서는 Fig. 5(b)와 같이 허브 부분과 지면을 모두 고정하였고 장애물을 넘는 상황을 가정하여 Fig. 5 (a)와 같이 타이어 진행 방향 쪽 바깥면에 하중을 부여하였다. 이때 하중은 $-100(step1(t)-step1(t-0.1))$ 함수를 사용하여 0초 시점부터 0.1초 동안만 작용하는 사각 펄스 형태의 충격하중으로 구현하였다. 두 경우 모두 Fig. 4(c)와 Fig. 5(c) 그림처럼 접촉 조건(contact pair)은 동일하게 설정하였으며, 타이어와 지면이 맞는 부분을 선택하여 접촉 해석을 수행하였다.

2.4 주행 실험 방법

주행 실험은 실제 험지 환경을 모사하기 위해 돌, 자갈, 흙 등

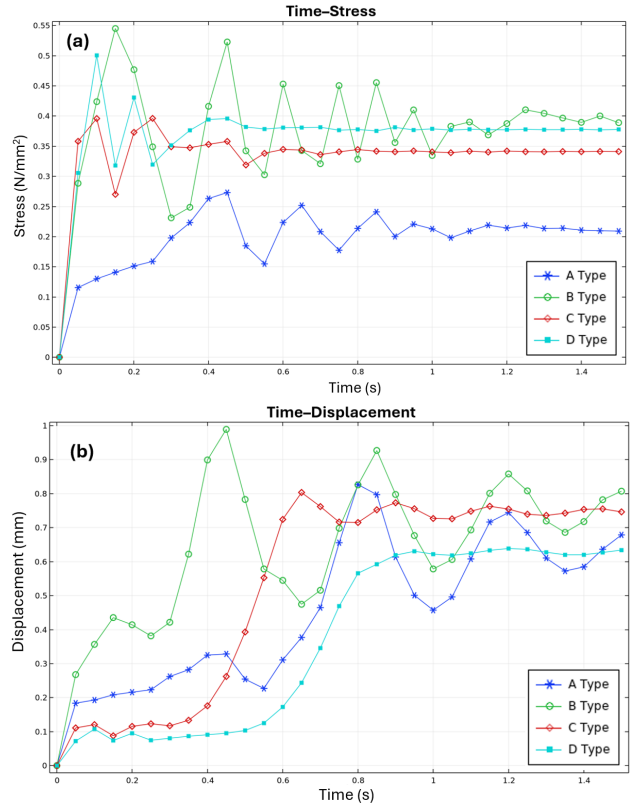


Fig. 6 (a) Time-Stress; (b) Time-Displacement responses of the airless tire structure under ramp load

불규칙한 장애물이 분포된 지면을 조성하여 수행하였다. 장애물의 평균 높이는 약 40 mm로 설정하였으며, 이는 재난 현장 내 잔해물의 크기를 고려함과 동시에 본 실험에서 제작한 타이어의 외경 (100 mm)에 비례하여 설정한 값이다. 실험 코스는 평지와 장애물 구간으로 구성하였으며, 모든 타입은 동일 조건에서 반복 주행 테스트를 진행하여 결과의 신뢰성과 공정성을 확보하였다. 제작된 타이어는 재난 탐사 로봇에 장착하고 저속 조건(약 1 m/s)과 20 N의 하중에서 주행하도록 제어하였다. 이때 타이어 변형 거동은 슬로모션 카메라(240 fps)로 촬영하였으며, 촬영 영상을 분석하여 최대 변형 발생 시점부터 원형으로 복원되기까지의 시간을 측정하였다. 또한 복원률(변형량 대비 복원량)과 변형 지속 시간을 함께 평가하고 주행 중 장애물 통과 여부와 주행 안정성 정도를 함께 관찰하여 각 타입의 충격 완화 성능과 동적 복원 능력을 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 시뮬레이션 1(램프함수 함수 하중 조건)의 결과로, (a)는 시간-응력, (b)는 시간-변위 그래프이다. Fig. 7은 시뮬레이션 2(스텝함수 하중 조건)의 결과를 나타내며, 동일하게 (a)는 시간-

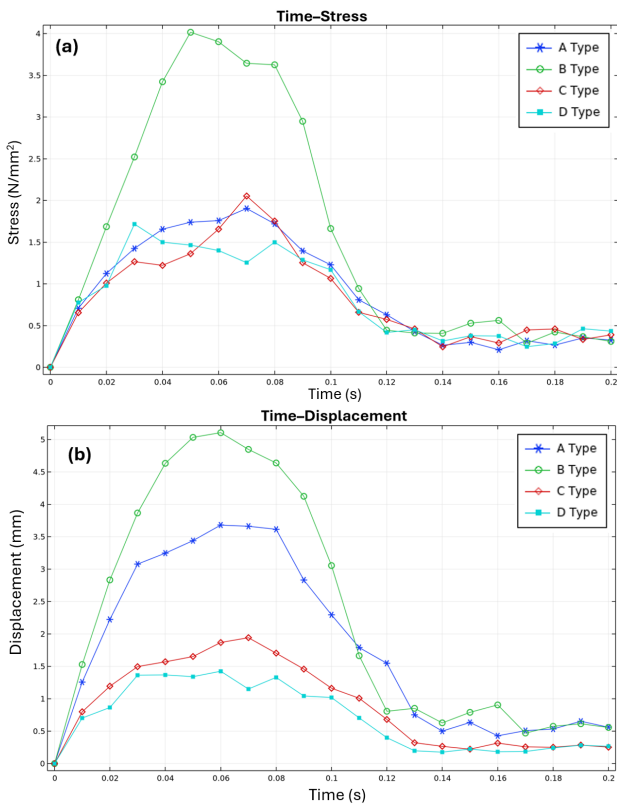


Fig. 7 (a) Time-Stress; (b) Time-Displacement responses of the airless tire structure under impact load

응력, (b)는 시간-변위 그래프이다. 시뮬레이션 1에서는 허브의 자유도가 존재하여 하중 인가 후 반발 진동이 발생하면서 변동(fluctuation)이 나타났다. 반면 시뮬레이션 2에서는 허브와 지면을 동시에 고정하여 진동이 억제되어 변동이 발생하지 않았다. 두 시뮬레이션 모두 TPU 소재의 인장강도(37 MPa) 이하로 최대 응력이 나타나 구조적 안정성은 확보되었다. 시뮬레이션 1에서는 최대 변위값이 B Type(약 1 mm), A Type(약 0.82 mm), C Type(약 0.8 mm), D Type(약 0.63 mm) 순으로 작아지며, B Type은 최대 변형이 약 0.45초로 가장 빨리 발생 후 감쇠하므로 충격 완화 성능이 가장 우수하였다. 시뮬레이션 2에서는 최대 변위값이 B Type(약 5.1 mm), A Type(약 3.7 mm), C Type(약 1.9 mm), D Type(약 1.4 mm), 순서로 작아지고, B Type은 A Type 대비 복원 시간당 복원량이 38% 높고, C Type과 D Type에 비해서는 각각 153%, 178% 향상되어, 네 가지 설계 중 가장 탁월한 동적 복원 능력을 나타냈다. A Type의 최대 변위는 약 3.7 mm로 A~D Type 중 중간 수준의 성능을 보였고, C Type과 D Type의 최대 변위(1.9 mm, 1.4 mm)는 A Type 대비 각각 49%, 62% 작고, B Type 대비 각각 63%, 73% 작아 충격 완화 성능이 부족하다고 판단하였다. Fig. 8은 100 N의 하중을 주었을 때 발생하는 최대 변위를 나타낸다. 종합적으로 B Type은 시뮬레이션 1에서 A, C,

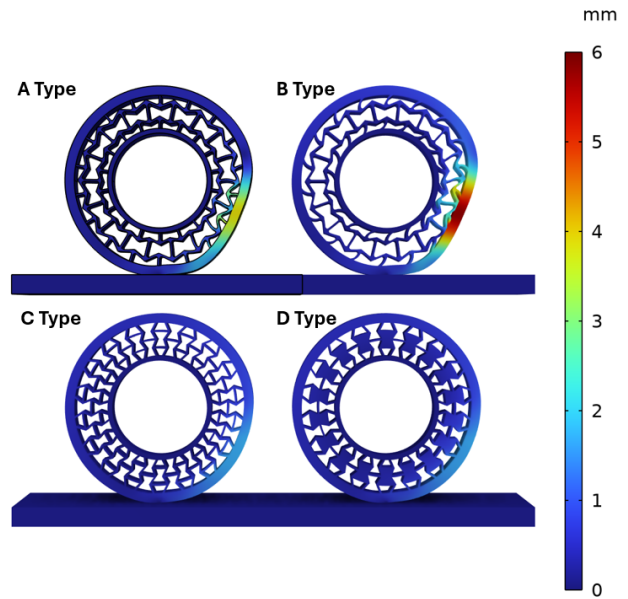


Fig. 8 Maximum displacement distribution of each airless tire type (A-D) under 100 N load

Table 2 Obstacle driving test results

Type	Recovery time (s)	Relative recovery rate (%)*
A	0.16	100
B	0.12	133

* Relative recovery rate: Ratio of deformation recovery speed compared to A type.

D Type 대비 탁월한 충격 완화 성능을, 시뮬레이션 2에서는 뛰어난 동적 복원 능력을 보였으며 이는 장애물 극복 시 전복 가능성을 줄이는데 유리할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 B Type의 곡선 스포크 형상이 하중 전달 경로를 분산시켜 응력 집중을 완화하고, 복원 과정에서 비선형적인 변형 복원 특성을 보이기 때문으로 해석된다. 따라서 동일한 TPU 소재임에도 불구하고 다른 설계 대비 충격 완화 성능과 동적 복원 능력이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 주행 실험 결과

시뮬레이션 결과를 바탕으로 설계된 A-D Type 에어리스 타이어를 TPU 소재로 Fig. 9와 같이 3D 프린팅하여 제작하였다. C Type과 D Type은 비교적 낮은 성능을 보였기 때문에 주행 실험에서는 제외하고 A Type과 B Type만을 재난 탐사 로봇에 장착하여 Fig. 10처럼 평지 및 장애물 주행 실험을 수행하였다. 평지 주행 실험에서 두 타입은 큰 차이 없이 안정적인 주행을 하였다. 반면 장애물 주행 실험에서는 A Type은 최대 변형 후 약 0.16초 만에 복원되고 B Type은 최대 변형 후 약 0.12초 만에 복원되어 더 짧은 복원 시간을 보였다. 최대 변형량도 A Type보다 B Type이 더 크게



Fig. 9 3D-printed airless tires

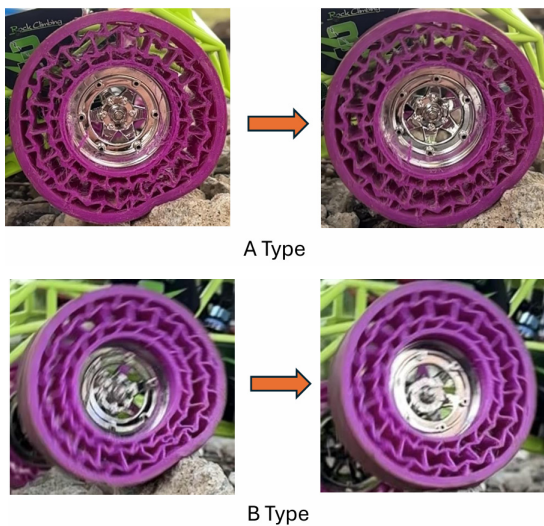


Fig. 10 Driving test of 3D printed airless tire (A type, B type)

나타나 하중을 효과적으로 흡수할 수 있음을 확인하였다. 또한 Fig. 8의 시뮬레이션에서 나타난 변형이 실제 실험에서도 유사하게 나타났음을 확인하였다. 이러한 결과는 B Type이 A Type 대비 충격 완화 성능과 동적 복원 능력에서 모두 우수함을 보여주며 장애물 통과 시 로봇의 자세 안정성 유지에 유리하다고 판단 가능하다. 따라서 시뮬레이션과 실험 결과를 종합할 때, B Type이 재난 탐사 로봇용 에어리스 타이어로 가장 적합한 구조임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 재난 탐사 주행장치의 주행 안정성과 내구성을 확보하기 위해, 오그제틱 재진입 구조를 적용한 스포크형 에어리

스 타이어를 설계, 제작하고 유한요소해석과 실제 주행 실험을 병행하여 성능을 종합적으로 검증하였다. 해석 및 실험 결과, 네 가지 설계안(A-D Type) 중 B Type이 가장 뛰어난 성능을 나타냈다. 특히 충격 완화 성능, 동적 복원 능력, 최대 변위량 측면에서 우수한 결과를 보였으며 장애물 통과 시 전복 가능성이 낮고 주행 안정성이 높다고 판단 가능하다. 이러한 특성은 험지와 불규칙한 지형이 많은 재난 현장에서의 운용에 매우 유리할 것으로 판단된다. 또한 오그제틱 재진입 구조는 하중 인가 시 가로 변형이 동반되는 음의 포아송 비 효과를 나타내어 충격 에너지를 다방향으로 분산시켜 구조적 손상을 완화하는 장점이 있다. 그러나 셸 코너 부근에서는 국부 응력 집중이 발생할 수 있으며, 장기 반복 하중에서는 피로 균열의 위험이 존재할 수 있음을 확인하였다. 이번 연구를 통해 스포크 구조 변화가 타이어의 주행 특성에 어떤 영향을 주는 지 수치로 확인했으며, 이 결과는 향후 설계 개선의 참고 자료로 활용될 수 있다. 향후 TPU 소재 이외의 다른 소재를 적용하여 비교 실험을 진행하고, 스포크 구조뿐만 아니라 타이어 외부 표면에 다양한 트레드 패턴을 적용하여 접지력과 주행 안정성에 미치는 영향을 분석할 계획이다. 더 나아가 비선형 해석과 피로해석을 포함한 추가 연구를 수행하여 본 연구의 한계를 보완하고자 한다. 이를 통해 구조적 설계뿐만 아니라 소재와 표면 형상이 성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 광주광역시시의 재원으로 광주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-05-013).

References

- [1] Kim, K.-W., Kwark, C.-W., 2019, Introduction to Technology Trends, Problems and Solutions of Non-Pneumatic Tires, *Auto Journal*, 41:10 26-31. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09219969>.
- [2] Bruzzone, L., Nodehi, S. E., Fanghella, P., 2022, Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review, *Machines*, 10:8 648, <https://doi.org/10.3390/machines10080648>.
- [3] Shafaei, S. M., Mousazadeh, H., 2023, Experimental Comparison of Locomotion System Performance of Ground Mobile Robots in Agricultural Drawbar Works, *Smart Agric. Technol.*, 3 100131, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022>.

100131.

- [4] Hankin, H., Gagen, J., Peters, W., Crann, A., Chen, Y., Fares, S., Sareh, P., 2025, Airless Tires: Structural Concepts, Mechanical Design, and Application Prospects, *Materials & Design*, 253 113933, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113933>.
- [5] Farshbaf, S., Dialami, N., Cervera, M., 2025, Large Deformation and Collapse Analysis of Re-Entrant Auxetic and Hexagonal Honeycomb Lattice Structures Subjected to Tension and Compression, *Mech. Mater.*, 210 105457, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105457>.
- [6] Kim, K., Kim, D.-M., 2011, Contact Pressure of Non-Pneumatic Tires with Auxetic Spokes, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 39:8 719-724, <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.8.719>.
- [7] Kim, D. Y. Kim, H. S. Kamath, S. S. Choi, J. W. Park, S. H., 2023, Analysis of Deformation Behavior of Airless Tire with Auxetic Structure, *Proc. Korean Society of Manufacturing Process Engineers Autumn Conference*, 523-523.
- [8] Jo, H.-J., Lee, C.-H., Kim, K.-H., Kim, K.-C., Kim, D. -M., 2011, Natural Frequency Analysis of a NPT with Honeycomb Spokes, *Journal of Aerospace System Engineering*, 5:2 33-39, <https://doi.org/10.20910/JASE.2011.5.2.033>.
- [9] Jo, H., Lee, C., Kim, D.-M., Kim, H., 2011, Vibration Characteristic Analysis of Non-Pneumatic Tire with Auxetic Spokes, *Proc. Korean Society of Mechanical Engineers Fall Conference*, 367-372.
- [10] Lim, D., Kim, E., 2024, Analysis of Vibration Characteristics of Non-Pneumatic Tire Spoke Structure, *Proc. Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, 48-48.
- [11] Conversion, A. P., 2025, Design Optimization of Auxetic Metamaterial for Airless Tire Using Finite Element Method and Machine Learning, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1500 012042, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1500/1/012042>.



DongGeon Kim

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include Structural Analysis and Machining Processes. E-mail: rlaehdrjs1113@chosun.kr



HwanOk Choi

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include Structural Analysis and Machining Processes. E-mail: ghksdhr219@naver.com



JungHoo Kim

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include Structural Analysis and Machining Processes. E-mail: fprhsdl@naver.com



MinSeo Park

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include Structural Analysis and Machining Processes. E-mail: pms4328@naver.com



SeungGyu Choi

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include Structural Analysis and Machining Processes. E-mail: tmdrb311@naver.com



SeongUng Kwak

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering at Chosun University. His research interests include the Autonomous Manufacturing of Electrochemical Polishing Processes. E-mail: cocb23@chosun.ac.kr



JeongWoo Park

Professor in School of Mechanical Engineering at Chosun University. His research interests include Ultra-precision Machining, Micro-nano Fabrication, and Non-traditional Machining and Systems. E-mail: jwoopark@chosun.ac.kr