

지형적응 바퀴-궤도 설계

이영채*, 이채정*, 정진우*, 김상현*

*한성대학교 기계전자공학부

Terrian Adaptive Hybrid Wheel-Track Mechanism

Yeong-Chae Lee*, Chae-Jung Lee*, Jin-Woo Jung* and Sang-Hyun Kim*

Division of Mechanical and Electronics Engineering, Hansung University

요약

현대 이동 로봇은 다양한 지형과 환경에서 요구되지만, 기존 바퀴형은 험지 기동성이 부족하고 궤도형은 평탄지 효율성이 낮아 제약이 따른다. 이러한 단점을 해결하기 위해 가변형 주행 메커니즘이 연구되었으나, 다수의 모터 사용과 복잡한 제어로 실용성이 떨어지는 한계가 있다. 본 연구에서는 단일 입력만으로 세 가지 형상 변환이 가능한 하이브리드 바퀴-궤도 시스템을 설계하고, 바퀴형과 궤도형 주행 방식 변환을 위해 도그 클러치를 이용한 주행 변환 장치를 설계했다. 또한 Ansys를 통한 구조 해석으로 안전성을 검증하고, 3D 프린팅으로 제작한 프로토타입을 통해 작동 가능성을 확인했다. 제안된 시스템은 향후 재난 구조, 탐사 및 물류 등 다양한 분야의 자율 이동 로봇 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 로봇 산업이 성장함에 따라 다양한 분야와 장소에서 자율 이동 로봇이 다양한 분야와 장소에서 사용되고 있어 여러 종류의 지형에서도 주행 안전성과 기동성을 확보할 수 있어야 한다. 이동 로봇은 크게 세 가지 방식으로 나눌 수 있다. 복잡한 지형에서의 이동에 적합하고 장애물을 극복할 수 있지만 제어 난이도가 높은 보행형 방식(stepping type), 단단하고 평탄한 지반에서 주행 효율이 높지만, 연약지반에서 침하 현상이 발생할 수 있는 바퀴형 주행 방식(wheeled type), 그리고 연약지반 주행에 유리하지만, 상대적으로 속도와 에너지 효율이 낮은 궤도형 주행 방식(tracked type)이다[1-4].

따라서 본 연구에서는 바퀴형과 궤도형의 장점을 결합하고 단점을 상호 보완하는 바퀴-궤도-궤도 시스템을 제안한다. 지형 상황에 따라 접지 면적과 접근각을 변화시켜 단단한 지반에서는 주행 효율성을 높이고, 연약 지반에서 침하 위험을 낮추고자 하였으며 장애물을 극복할 수 있는 메커니즘을 고안했다. 링크를 이용하여 한 번의 입력으로 형상이 변경되도록 설계하였으며, 바퀴형 주행일 때에는 바퀴와 같이 내부 형상, 트랙이 함께 회전하고 궤도형 주행일 때에는 내부 링크는 고정되고 트랙만 미끄러지는 방식이 가능하도록 했다. UG NX를 사용하여 설계를 진행하였으며 Ansys Workbench 정적 구조 해석을 통해 안정성을 확인하였고, 실제 제작을 통해 형상 변경과 주행 성능을 확인했다.

2. 설계 핵심 내용

2.1 설계 배경

최근 다양한 주행 환경 극복을 위해 복합형 이동 방식이 연구되고 있으며, 다수의 리니어 액추에이터를 사용한 기기, Watt II 형식의 6절 링크 기구, 기어 기반 접이식 또는 확장식 변형 기구 및 가이드 로드-슬라이드 조합 구조 등을 활용해 가변형 휠-궤도 장치, 이중 4절 링크 기구를 이용하여 메커니즘이 제안되었으며, 다양한 기구학 해석과 시제품 실험이 수행되고 있다[5-8].

앞선 연구에서는 다수의 모터와 액추에이터를 사용하여 제어가 복잡하거나 형상이 변경되더라도 주행 방식이 궤도형 주행 방식으로 단일화되어 있어 기동성 및 고속 주행 효율성을 활용하지 못하는 경우가 있다. 또한, 장애물이 있는 지형에 대비하여 휴머노이드 로봇이나 다족 보행 로봇이 개발되고 있으나 바퀴형과 궤도형 로봇과 비교하여 구조와 제어가 복잡하다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 문제점을 해결하기 위해 바퀴형과 궤도형의 장점을 결합한 기구를 설계했다. 기구학을 기반으로 하였으며, 단일 입력을 주었을 때 연속적으로 형상이 바뀔 수 있도록 했다. 아울러 주행 방식에 따라 동력 전달 및 주행 모드를 변경할 수 있도록 했다. 바퀴형에서는 동력 샤프트가 회전함에 따라 전체가 함께 회전 하도록 하였으며, 궤도형의 경우 중심축에 가해지는 동력을 구동륜으로 전달시켜 구동륜의 회전으로 인해

외부 트랙이 외주를 따라 슬라이딩할 수 있도록 했다.

지형 적응 바퀴-레도는 제어 편의 및 주행 효율을 증가시키기 위해 단일 입력으로 형상 변경이 가능하도록 설계하였으며, 이때 기구의 운동성은 식 (1)에 나타난 쿠츠바흐(Kutzbach) 판별식을 통해 결정된다[9]. M 은 운동성, n 은 링크의 수, j_1 과 j_2 는 각각 자유도가 1과 2인 조인트를 의미한다.

$$M = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (1)$$

2.2 설계

본 연구에서는 형상 변경을 통해 단단한 지형(Hard-type), 연약지반(Muddy-type) 그리고 장애물 지형(Obstacle-type)에서의 지형 적응 바퀴-레도 메커니즘을 설계하는 것을 목적으로 한다. H-type 설계를 위해 일반적으로 사용되는 바퀴의 반지름 R 값을 고정했다. 이러한 원형 바퀴가 연약지반에 진입할 경우, 침하(sinkage) 현상이 발생하여 행이 불가능한 상황이 발생하기도 한다. 따라서 연약지반과 같은 환경에서는 접지력 확보가 추진력 및 주행 성능을 결정하며, 이를 계산하기 위해 식 (2)의 접지압(ground pressure) 공식을 적용할 수 있다. P 는 접지압, m 은 이동 로봇의 질량, g 는 중력가속도, n 은 바퀴의 개수, L 은 지면과 닿는 밀면 길이, w 는 폭을 의미한다. 진흙, 눈 등 연약지반에서 일반적으로 주행하기 위해서는 접지압이 50kPa 이하로 유지되어야 한다. 식 (2)를 통해 최소 접지 길이 L 을 타겟으로 선정했다. 이동 로봇이 장애물을 만나게 된다면 구조상 극복 가능한 장애물의 높이가 제한된다. 바퀴형의 경우 일반적으로 바퀴 반지름의 0.5배만 되어도 장애물을 넘어가기 어렵다[10]. 레도형의 경우에는 장애물과 가장 처음 만나는 보조륜의 높이가 장애물보다 높아야 장애물을 극복할 수 있다. 따라서 바닥으로부터 보조륜의 높이 h 를 목표값으로 산정하였으며 0.5R보다 큰 값을 갖도록 했다. 더하여 장애물로 접근할 때 지면과 접촉하는 레도의 진행 방향 끝자락에 위치한 보조륜과 장애물과 접촉하는 보조륜을 직선으로 이었을 때 바닥과 레도가 이루는 각인 접근각이 40~45°일 때가 가장 효율적이므로 접근각을 목표값으로 선정을 O-type의 목표값으로 선정했다. 형상이 변경되었을 때 주행 효율을 위하여 장력 조절 장치와 같은 추가 장치를 부착하지 않기 위해 각 타입에 따른 외주 둘레를 동일하게 설계했다.

$$P = \frac{m \times g}{n \times L \times w} \quad (2)$$

2.2.1 링크 기구 설계

바퀴형의 경우 바퀴의 중심이 드라이브 샤프트와 연결되기 때문에 입력의 위치가 형상의 중심에 올 수 있도록 하는 것이 낫다고 판단했다. 사용자의 편의를 위해 운동성 1을 목표로 개념 설

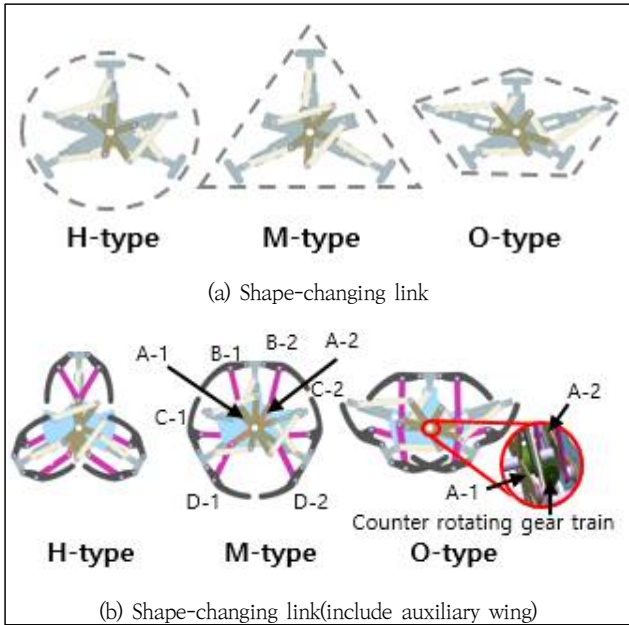
계를 진행했다. 식 (1)에서 2 자유도 조인트가 추가되면 기구가 복잡해지므로 j_2 를 0으로 고정했다. $M=1$ 을 만족하는 여러 숫자 쌍 중 $n=4, j_1=4$ 의 경우 해당 4절 링크 기구는 회전 또는 병진 운동만 가능하여 앞서 목표한 3가지 형상 변경을 만족하지 않아 제외했다. $[n=6, j_1=7]$ 인 6절 링크는 일반적으로 이중 4절 링크 구조이며 회전 또는 병진운동이 동시에 일어난다. 이 역시 3가지 형상 변경을 만족하지 않아 제외했다. 입력 방식을 slider, crank로 분류하였으며 $[n=8, j_1=10]$ 크랭크 방식은 바퀴형 형상의 중심이 치우쳐 있고 슬라이더 방식은 바퀴형 형상이 나오지 않아 링크의 개수를 늘리는 것으로 결정했다. 동일 방식으로 개념 설계를 진행했을 때 $[n=10, j_1=13]$ 크랭크 방식은 O-type에서의 접근각을 만족시키기 어려워 제외하였고 슬라이더 방식은 바퀴형 형상의 중심이 치우쳐져 있다. 동일한 이유로 $[n=12, j_1=16]$ 일 때 슬라이더 방식의 기구 역시 제외했다. 3가지 형상을 모두 만족하는 $[n=12, j_1=16]$ 크랭크 방식의 링크 기구를 최종적으로 선택했다.

선정한 기구를 바탕으로 링크들의 길이를 결정했다. 제안된 링크 기구는 5가지 방향의 슬라이드와 하나의 입력 링크, 슬라이드와 입력 링크를 연결하는 커플러, 고정부(프레임)으로 구성되며 입력 링크가 회전함에 따라 링크들이 슬라이드를 따라 이동한다. M-type일 때 120° 대칭인 슬라이드 3개가 최대로 펼쳐지며 다른 2개의 슬라이드는 가장 안쪽으로 모인다. O-type일 때는 반대로 120° 대칭인 슬라이드 3개가 가장 안쪽으로 모여며 사이트에 위치한 2개의 링크가 최대로 펼쳐진다. 링크가 최대로 펼쳐질 때 토글 위치에 걸리는 것을 방지하기 위해 링크가 최대로 펼쳐질 때에도 인접한 두 링크가 180°가 되지 않도록 했다.

주요 설계 변수를 최적화하여 바퀴라는 제한된 공간 내에서도 형상 변경과 연약지반 주행에 필요한 최소 접지 길이, 장애물 등반에 유리한 접근각을 확보할 수 있도록 하였으며, 장력 조절기 등 추가 부품을 사용하지 않도록 각 형상의 외곽 둘레를 동일하게 했다. n 은 12개, j_1 는 16개이다. 식(1)에 대입해 운동성이 1임을 확인했다. 내부 부품 중심에 놓인 입력 링크의 단일 회전으로 3가지 타입의 형상 변경이 되는 것을 확인했다.

그림 1(a)에 가변 링크 기구를 포함한 전체 형상 변경 메커니즘을 나타냈다. 프레임과 링크만으로는 안정적으로 원형 바퀴의 외형을 유지하기 어려워 전체 시스템 외형을 형성하면서 슬라이더를 지지하는 보조 구조체인 윙(wing)을 추가했다. 윙은 원형 바퀴 형상을 기준으로 곡선 형태를 가지며 슬라이더, 프레임과 연결되어 있다. 그림 1(b)에서 윙 B-1, D-2는 링크 A-1와 B-2와 D-1은 링크 A-2, C-1과 C-2는 프레임과 연결되어 있다. 형상을 변경할 때 링크 A-1과 A-2는 서로 반대 방향으로 회전한다. 윙을 포함한 전체 기구는 $[n=25, j_1=35]$ 를 가지며, 식 (1)에 대입해 보면 운동성은 2이다. 하나의 입력으로 형상 전환을 위해 링크 A-1과 A-2 사이에 베벨기어를 추가하여 counter rotating

gear train 구조를 만들었다.



[그림 1] Schematic drawing of the complex variable linkage mechanism

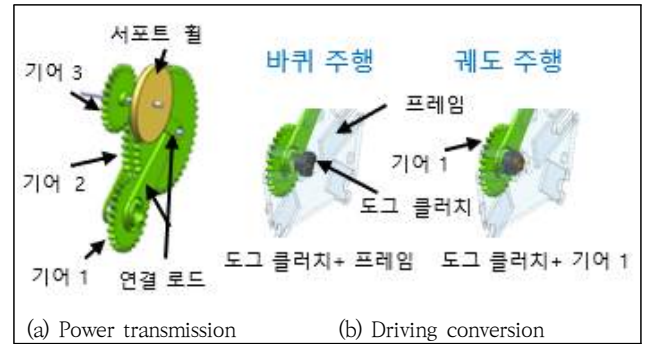
2.2.2 주행 변환 장치 설계

바퀴형과 궤도형 주행 방식에 차이점이 있다. 바퀴형 주행 방식에서는 동력을 엔진에서 드라이브 샤프트를 통해 바퀴 중심축으로 전달받아 바퀴 전체가 함께 회전하게 된다. 궤도형 주행에서는 바퀴 내부 구조는 병진운동을 하고, 구동륜이 회전하여 궤도만 미끄러진다. 일반적으로는 구동륜에 별도의 모터나 엔진을 연결하기도 하지만 별도의 동력을 사용하지 않기 위해서는 드라이브 샤프트의 동력을 궤도로 전달할 수 있도록 하는 동력 전달 장치 및 주행 변환 장치가 필요하다.

이를 위해 동력 전달 장치와 주행 모드 변환 장치를 설계하였으며 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)와 같이 동력 전달 장치는 드라이브 샤프트와 연결된 2층 구조의 다단 기어 및 서포팅 휠 (supporting wheel)로 이루어져 있다. 각 슬라이더의 끝에 서포팅 휠을 추가하여 다단 기어와 같은 축을 공유하는 서포팅 휠은 구동륜의 역할을, 다른 4개의 서포팅 휠은 보기륜의 역할을 한다. 다단 기어는 기어 1, 2, 3으로 구성되어 있으며 기어 1은 드라이브 샤프트와 연결되어 동력을 전달한다. 동력은 복층으로 이루어진 기어 2를 거쳐 기어 3까지 전달되어 구동륜을 회전시킨다. 형상이 변환되면 드라이브 샤프트와 구동륜 축 간의 거리가 변화를 연결 로드로 이어진 기어 2의 축의 위치가 보상한다.

바퀴형 주행일 때는 드라이브 샤프트와 프레임이 같이 회전해야 하고 궤도형 주행일 때는 다단 기어만 회전하여 서포팅 휠을 통해 궤도만 회전해야 한다. 주행 방식을 변환하기 위해 고안한 도그 클러치 메커니즘을 그림 2(b)에 나타내었다. 기어 1과 프레임 뒷면에는 톱니가 있으며 기어 1과 프레임 사이에 도그 슬리브

를 배치 했다. 도그 슬리브가 프레임의 도그 톱니와 결합하면 바퀴형 주행 모드가 되며, 도그 슬리브가 기어 1의 도그 톱니와 결합하면 궤도형 주행 모드가 된다.

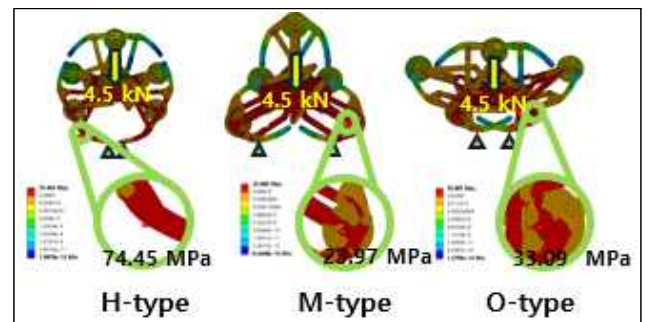


[그림 2] Configuration of the wheel-track system with driving mode transition device

3. 안정성 검증과 제작

본 연구에서는 차량 바퀴용으로 널리 사용되는 알루미늄 합금 (A356-T6: 항복강도 200MPa)을 선정하였으며[11], ANSYS Workbench를 이용한 유한요소해석(FEA)을 통해 구조 안전성을 평가했다.

그림 3은 해석에 사용된 하중과 경계 조건 및 H-type과 M-type, O-type 각각의 응력 분포 결과를 나타낸다. 하중은 초기 기준 차량인 기아 소렌토의 공차 중량(1,815kg)을 기준으로 중력가속도를 고려하여 바퀴 1개당 약 4.5kN의 집중 하중으로 환산하여 드라이브 샤프트 중심에 수직 방향(-y축)으로 부여했다. 지면에 접촉하는 부분을 fixed support 조건으로 고정했다. 최대 응력의 크기는 각각 H-type: 74.45MPa, M-type: 23.97MPa, O-type: 33.09MPa로 나타났으며, 가장 낮은 안전계수는 H-type에서 2.69로 계산되었고 세 가지 형상 모두 구조적 안정성을 지닌 것으로 여겨진다.

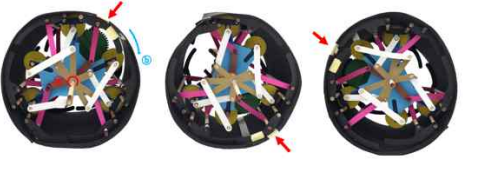




[그림 3] Stress analysis of the complex variable linkage

제한한 하이브리드 주행 시스템의 형상 변경과 주행을 확인하기 위해 프로토타입을 제작했다. 시간과 비용을 고려하여 3D 프

린터를 이용하였으며 재료는 PLA 필라멘트를 사용했다. 3D 프린터의 베드 크기와 필라멘트 강도로 인해 링크의 두께는 유지한 채 링크의 폭만 실제 크기의 2/3 수준으로 축소하여 제작했다. 표 1은 프로토타입의 주행 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과, 클러치의 위치에 따라 M-type과 O-type은 궤도형 주행 방식이, H-type은 바퀴형 주행 방식이 이뤄지는 것을 확인했다.

[표 1] Prototype of driving process

주행 모드	주행 과정
H-type	
M_type	
O-type	

4. 결론

본 연구에서는 다양한 지반이 복합적으로 존재하는 지형 조건에서 이동 로봇의 주행 효율성 및 주행 안정성을 확보하기 위해 형상 변경이 가능한 지형 적응 바퀴-궤도를 설계했다. 본 연구는 링크 구조를 기반으로 하며 12개의 링크와 16개의 1 자유도 조인트를 조합하여 단일 입력만으로 연속적인 변환이 가능하다. 바퀴형 주행 방식과 궤도형 주행 방식은 드라이브 샤프트에 연결한 도그 클러치와 기어 열을 이용해 구현했다. 프로토타입 제작 및 주행 테스트 결과, 3가지 형상일 때 2가지 주행 방식 모두 원활함을 확인했다.

지형 적응 바퀴-궤도 시스템은 단단한 평지, 연약 지반, 장애물과 같은 복합 지형 조건에서도 높은 주행 효율과 안정성을 확보할 수 있으며, 추가적인 공간이나 모터가 필요하지 않다는 점에서 다양한 산업과 환경에서 활용 가능하다. 본 연구는 기존 하이브리드 주행 시스템의 한계를 극복하고 새로운 방향성을 제시함으로써, 추후 자율 이동 로봇 기술의 고도화 및 실용화를 위한 기술의 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] R. Raj and A. Kos, "A Comprehensive Study of Mobile

Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives," Applied Science, Vol. 12, pp. 6951–6976, July, 2022.

[2] J.H. Lee, H.J. Kim, J.H. Lee, Dat Thanh Truong, H.Y. Lee and H.R. Choi, "Elastic Structure-Based Foot Design for Improving Walking Performance of Bipedal Robots," ICROS, Vol. 40, pp. 185–186, June, 2025.

[3] J.H. Oh, "Implementation and issues of bipedal locomotion," Journal of the KSME, Vol. 46, No. 5, pp. 56–60, May, 2006.

[4] L. Yan, X. Xu, Y. Tang, Y. Jiang, G. Chen and G. Zhang, "The static analysis of reconfigurable wheel-track transformation mechanism." Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2383, pp. 012148, 2022.

[5] Z. Luo, J. Shang, G. Wei and L. Ren, "A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage," Mechanism and Machine Theory, Vol. 128, pp. 16–32, June, 2018.

[6] D. Cui, X. Gao and W. Guo, "Mechanism Design and Motion ability Analysis for wheel/track mobile robot," Advances in Mechanical Engineering, Vol 8, No. 11, pp. 1–13, November, 2016.

[7] D.E. Raja, S.P. Singh and T. Prabhuram, "Design and analysis of hybrid reconfigurable wheel for armoured vehicles," Materials Science and Engineering, Vol. 764, pp. 012002, 2020.

[8] Z. Li, L. Xu, J. Liu and X. Sui, "Mechanism Design and Mechanical Analysis of Reconfigurable Wheel-track Wheel Based on Offset Guide Rod Mechanisms," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2402, pp. 012019, 2022.

[9] J.J. Uicker, G.R. Pennock and J.E. Shigley, Theory of Machines and Mechanism, Oxford, NewYork, 2003.

[10] M.G. Bekker, Theory of land locomotion: The mechanics of vehicle mobility, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956.

[11] B.J. Yoo, J.H. Kim, H.S. Yoon and S.C. Ur, 2014, "Mechanical Properties of Low Pressure Die Cast A356-T6 alloys for Automotive Wheels," Vol. 34, No. 1, pp. 6–13, February, 2014.