

불균일한 지형에서의 충격을 흡수하기 위한 컴플라이언트 스포크 트랙 메커니즘의 설계 및 모델링

Design and Modeling of a Compliant Spoke Track Mechanism for Absorbing Impacts on Uneven Terrain

권 용 호¹ · 김 한 봄¹ · 김 승 준¹ · 양 정 모¹ · 서 태 원[†]

Yongho Kwon¹, Hanbom Kim¹, Seungjun Kim¹, Jeongmo Yang¹, TaeWon Seo[†]

Abstract: This study proposes a Compliant Spoke Track (CST) mechanism that integrates suspensions directly into the rotating components of a single-track system, enabling stable locomotion with a low center of gravity and enhanced impact absorption. The sprocket and roller each consist of an inner axle and an outer parts connected through suspensions, allowing the mechanism to absorb multi-directional impacts during traversal. The suspension placed inside the track belt must simultaneously satisfy ground clearance, belt tension, and impact absorption, which define the key design constraints for determining an appropriate stiffness range. To ensure stable mobility on irregular terrain, a multi-body dynamics simulation with detailed contact modeling was conducted. Through this analysis, spring stiffness of 10 N/mm was identified as the optimal configuration, preventing belt ejection while maintaining high stability. The trajectory tracking performance during linear motion was evaluated using the root mean square error (RMSE), and the CST mechanism demonstrated up to a 58% reduction in lateral deviation compared to a conventional rigid-link track. These results indicate that the proposed mechanism effectively absorbs landing impacts and high-frequency vibrations. Future work will investigate the coupled effects of ground friction, robot velocity, and payload on suspension behavior, and a prototype will be fabricated to experimentally validate the simulation results in real-world terrain conditions.

Keywords: Track Mechanism, In-Wheel Suspension, Dynamic Analysis, Impact Absorption

1. 서 론

최근 이동 로봇은 모래, 자갈, 암석 지형 등과 같이 불규칙하고 다양한 환경에서 임무를 수행하고 있으며, 주행 안정성은 임무 성공에 직접적으로 영향을 미친다. 평지에서는 바퀴 기반 구

동이 높은 주행 효율을 보이지만, 지면 형상이 급격하게 변화하는 환경에서는 장애물 극복 능력과 충격 대응 능력에 한계가 존재한다^[1]. 이러한 이유로 접지 길이를 활용해 하중을 보다 넓게 분산하고, 지면과의 접촉을 안정적으로 유지할 수 있는 트랙 메커니즘이 다양한 현장 로봇에 널리 적용되고 있다^[2].

트랙 메커니즘은 일반형(normal type)과 컴플라이언스형(compliance type)으로 구분된다. 일반형 트랙은 단순한 구조와 넓은 접지 면적을 통해 높은 견인력을 확보할 수 있으며, 이를 기반으로 무게중심을 이동시키거나 구동 모드를 분리하는 방식 등 다양한 구조적 변형을 통해 주행 효율을 향상시키려는 연구가 이루어지고 있다^[3-5]. 반면 컴플라이언스형 트랙은 링크와 관절 구조를 활용하여 높은 장애물 극복 능력과 충격 흡수 성능을 확보하는 특징이 있으며, 수동 서스펜션 부착이나 생체모방 구조 적용을 통해 험지 적응성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다^[6-8].

Received : Dec. 16. 2025; Revised : Mar. 31. 2026; Accepted : Apr. 6. 2026

※ This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) through the Seoul RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Seoul Metropolitan Government. (2025-RISE-01-027-04) and the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Ministry of Science and ICT for Bridge Convergence R&D Program (RS-2024-00421129).

1. Graduate Students, Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea (kevinkwon98, hopebom77, didwdjah5959, jm06115@hanyang.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea (taewonso@hanyang.ac.kr)

그러나 두 유형 모두 장애물을 통과하는 과정에서 발생하는 착지 충격에 대한 고려가 충분하지 않다는 한계가 존재한다. 장애물 통과 직후 발생하는 착지 충격은 순간적인 수직 가속도와 진동을 유발하며, 이는 로봇 본체의 자세 변화와 질량 중심 위치 변동으로 이어진다. 동적 특성은 단순한 충격뿐만 아니라, 지속적인 진동과 궤적의 편차를 증가시켜 전체적인 주행 안정성을 저하시킬 수 있다. 또한, 높은 하중을 견디는 로봇에서는 부품 손상, 센서 오류와 같은 치명적인 문제로 이어질 수 있다. 여러 트랙을 사용하는 멀티 트랙 방식은 적응성을 높일 수는 있으나 다수의 액추에이터와 복잡한 구동계를 필요로 하고 부피와 중량이 증가하기 때문에 이는 근본적인 해결책으로 보기 어렵다⁹⁻¹².

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 트랙 시스템 내부에 서스펜션을 직접 통합한 Compliant Spoke Track(CST) 메커니즘을 제안한다. 이는 최근 자전거 및 차량에서 활용되는 인 휠 서스펜션(in-wheel suspension) 개념을 트랙 구동부에 확장한 것으로, 스프로킷과 메인 롤러의 회전 구성 요소 자체가 충격을 흡수하도록 설계되어 있다¹³. 그 결과 불규칙한 지면에서도 지속적인 접지 안정성을 확보하고, 장애물 등반·하강 과정에서 발생하는 다방향 충격을 효과적으로 완화할 수 있는 장점을 가진다.

하지만 CST 메커니즘은 서스펜션의 가변 범위와 회전 구성 요소 간의 편심 정도가 스프링 강성에 의해 결정되기 때문에, 스프링 강성은 구조적 안정성과 동적 성능을 동시에 좌우하는

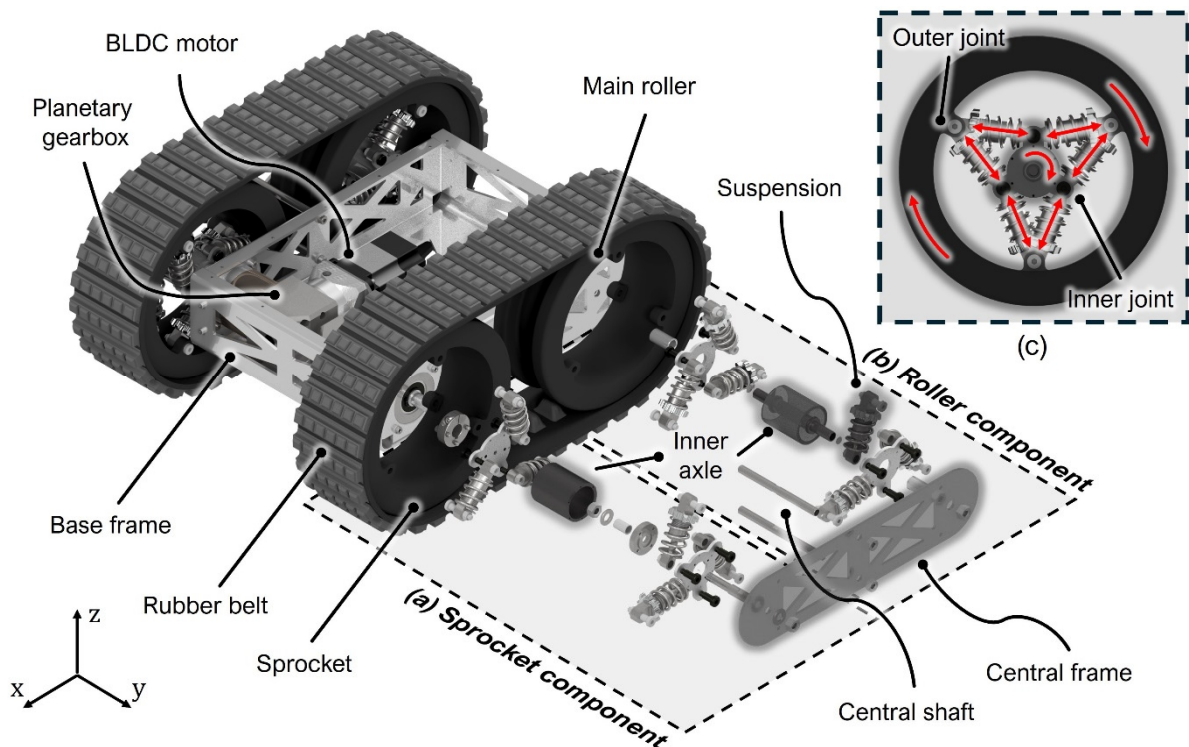
핵심 설계 변수이다. 강성이 지나치게 낮으면 과도한 변형이 발생하여 벨트 이탈이나 맞물림 불안정과 같은 문제가 나타나고, 반대로 강성이 지나치게 높으면 서스펜션이 사실상 강체 링크처럼 동작하여 충격 완화 기능이 저하된다. 이러한 상충관계를 해결하기 위해 본 연구는 다물체 동역학 기반 시뮬레이션을 수행하고 접촉 모델을 적용하여 CST 메커니즘의 동적 거동과 설계 제약을 체계적으로 분석한다.

본 연구에서는 먼저 CST 메커니즘의 구조 및 설계 제약을 소개하고, 이어서 다물체 동역학 모델링과 접촉 해석을 기반으로 한 시뮬레이션 방법을 제시한다. 이후 강성 변화에 따른 성능 평가를 통해 최적 스프링 강성을 도출하며, 마지막으로 기존 트랙 메커니즘과 비교하여 CST 메커니즘의 주행 안정성과 충격 완화 성능을 검증한다. 이러한 과정을 통해 CST 메커니즘이 기존 트랙이 갖는 착지 충격 문제를 해결하고, 향후 다양한 현장 로봇에 적용 가능한 잠재력을 가짐을 확인한다.

2. 로봇 설계

2.1 CST 메커니즘 구성

CST 로봇의 기계 설계는 [Fig. 1]의 (a)에 나타난 스프로킷 구성 요소와 [Fig. 1]의 (b)에 나타난 메인 롤러 구성 요소로 나



[Fig. 1] Design configuration of CST mechanism. (a) is a sprocket component, and (b) is a roller component. (c) presents the working principle

눌 수 있다. 구성은 일반적인 트랙 기반 모바일 플랫폼과 유사하지만, 트랙 벨트 내부에 스프로킷과 메인 롤러가 중공 구조로 설계되어 있다는 점이 특징이다. 스프로킷과 메인 롤러는 모두 트랙 벨트의 회전과 관련되며, 새로운 작동 원리를 가지고 있다. 스프로킷은 서스펜션을 통해 내부 축에 연결되며, 본체에는 [Fig. 1]의 (b)에 나타낸 바와 같이 BLDC 모터와 유성 기어박스가 장착되어 있다. 유성 기어박스를 통해 모터의 동력은 스프로킷의 내부 축으로 직접 전달된다. 내부 축이 회전하면 서스펜션이 링크처럼 상호 작용하여 스프로킷도 회전한다. 마지막으로 스프로킷이 벨트 톱니와 맞물리고 트랙 벨트가 움직이기 시작한다.

메인 롤러는 스프로킷과 유사한 형태를 가지고 있으며, 벨트가 움직일 때 마찰력만으로 회전한다. 스프로킷의 내부 축과 달리 메인 롤러의 내부 축은 프레임에 장착되어 [Fig. 1]의 (b)와 같이 베어링의 도움으로 자유롭게 회전할 수 있다. 각 서스펜션은 [Fig. 1]의 (c)와 같이 inner joint와 outer joint를 통해 연결되고, 내부 축의 비틀림 없이 본체의 하중을 안정적으로 지지할 수 있도록 3점 지지 구조로 설계되었다. 이러한 설계는 로봇의 불필요한 중량 증가를 방지하고 서스펜션 조립의 복잡성을 고려한 것이다. 모든 서스펜션은 일정 길이로 미리 압축되며 조립되며, 작동 중에는 회전 토크, 중력 및 외부 충격에 따라 반복적으로 압축과 복원을 반복한다. 이를 통해 프레임과 트랙 벨트 사이의 지속적인 충격 흡수가 가능해져 로봇의 주행 안정성과 내구성이 향상된다.

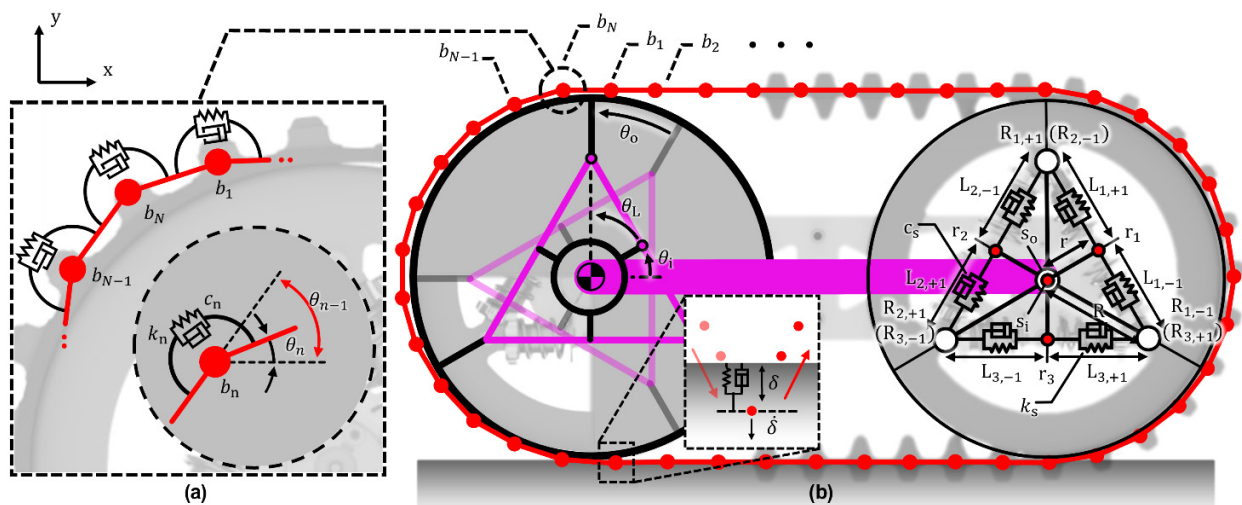
이러한 구조적 특성 덕분에 CST 로봇은 불규칙한 지형에서도 탁월한 다방향 충격 흡수력을 달성할 수 있다. 그러나 서스펜션 변형의 크기, 즉 내부 축과 회전 부품 사이의 편심 정도는

스프링 강성에 크게 좌우된다. 따라서 구조적 신뢰성과 궤도 벨트와의 안정적인 맞물림을 보장하기 위해서는 적절한 강성 선택이 필수적이다. 이 설계에 중요한 매개변수를 정량적으로 분석하기 위해 다음 섹션에서 설명하는 바와 같이 동적 모델링을 수행한다.

3. 시스템 모델링

스프링 강성이 지나치게 낮을 경우, 동일한 하중에서도 서스펜션이 필요 이상으로 변형되어 회전 구성 요소에 큰 편심이 발생한다. 이는 안정적인 회전 요소로서의 기능을 저하시킬 뿐만 아니라 맞물림의 불안정을 초래할 가능성을 높인다. 반대로 강성이 너무 높으면 서스펜션이 거의 강체 링크처럼 거동하여 충격 흡수 성능이 감소하고 조립 난이도가 증가하게 된다. 따라서 기계적 견고성과 동적 안정성을 모두 확보하기 위해서는 적절한 강성 범위를 결정하는 것이 필수적이다. 본 절에서는 설계 매개변수가 다양한 동적 성능 요소에 미치는 영향을 정량화하고, 이를 통해 CST 메커니즘의 안정성을 평가하기 위해 다물체 동역학 분석을 기반으로 새로운 모델링 접근법을 제안한다. 본 메커니즘의 로봇은 x, y 평면에서 다방향 충격을 흡수할 수 있어야 하므로, 이를 직관적으로 검증하기 위해 [Fig. 2]와 같이 2차원 모델링을 수행한다. 전체 시스템 모델은 네 가지 주요 제약조건 또는 접촉 조건으로 구성되며, 다음과 같이 분류된다.

- 고무 재질의 벨트는 회전 스프링-댐퍼 요소를 포함하는 조인트 모델로 표현하였다.
- 스프로킷과 내부 축 사이의 서스펜션 유닛을 연결하였다.
- 메인 롤러와 스프로킷의 접촉 및 마찰력을 고려하였다.



[Fig. 2] Schematic of the CST mechanism. (a) is a detailed view of the belt segment, which is connected as a rotational spring and damper. (b) is a simple suspension structure to define its coordinates and angles

- 벨트-스프로킷 톱니의 맞물림은 접촉 제약 조건으로 모델링하였다.

해당 개략도는 [Fig. 2]에 나타나 있으며 다음 이어지는 벨트 모델링부터 설명된다.

3.1 벨트 모델링

고무 재질의 트랙 벨트는 비선형 변형 특성과 다중 접촉 조건을 가지므로 이를 모사할 수 있는 강체-유연 커플링 동적 모델^[14] (RFDM)을 사용한다. [Fig. 2]에서와 같이 트랙 벨트를 다수의 이산화된 질량점으로 모델링하였다. 각 질량점의 위치를 노드라고 정의하였으며, 인접한 두 노드를 연결하는 요소를 벨트 세그먼트라고 정의하였다. [Fig. 2]의 (a)에서 볼 수 있듯이 벨트는 b_1 에서 b_N 노드로 나뉘어 구속되고, 마지막 b_N 은 b_1 로 구속된 closed-loop 구조를 형성한다. 노드의 개수는 실제 트랙의 그라우저 개수와 동일하게 나뉘며 동일한 재료 및 기하학적 특성을 갖는다. 따라서 모든 회전 스프링과 댐퍼의 계수는 k_n 와 c_n 로 통합된다. 따라서, 각 노드에 적용되는 토크는 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau_1 &= -k_n(\theta_1 - \theta_N) - c_n(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_N) \\ &\quad - k_n(\theta_1 - \theta_2) - c_n(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), \\ \tau_n &= -k_n(\theta_n - \theta_{n-1}) - c_n(\dot{\theta}_n - \dot{\theta}_{n-1}) \\ &\quad - k_n(\theta_n - \theta_{n+1}) - c_n(\dot{\theta}_n - \dot{\theta}_{n+1}), \\ \tau_N &= -k_n(\theta_N - \theta_{N-1}) - c_n(\dot{\theta}_N - \dot{\theta}_{N-1}) \\ &\quad - k_n(\theta_N - \theta_1) - c_n(\dot{\theta}_N - \dot{\theta}_1),\end{aligned}\quad (1)$$

식 (1)에서, τ_1 은 b_1 과 b_N 사이의 회전 각도 차이로 표현되며, n 은 두번째 노드부터 $N-1$ 번째 노드에 적용되며 τ_n 을 통해 일반화된다. τ_N 은 [Fig. 2]의 (a)에서와 같이 b_N 에 적용되는 토크이며, b_{n-1} 과 b_{n+1} 사이의 회전 각도 차이로 표현할 수 있다. τ_N 은 N 번째 노드, 즉 b_N 에 유발되는 토크를 의미하며, b_{N-1} 과 b_1 사이의 회전 각도 차이로 표현된다.

각 노드의 개별적인 응답을 통해 동적 상황에서 벨트 장력과 국부 변형을 연속적으로 구현할 수 있다. 또한, 지면과의 반력도 각 노드에 독립적으로 작용한다. 지면에 대한 접촉력은 선형 Kelvin-Voigt 접촉 모델을 사용하여 정의했다^[15]. 이 모델은 선형 스프링과 댐퍼를 병렬로 결합하여 지면과의 접촉력 방정식을 다음과 같이 표현했다.

$$F_N = K\delta + D\dot{\delta}. \quad (2)$$

여기서 F_N 은 수직 접촉력이고, K 는 강성 계수이며, D 는 감쇠

계수이다. 식 (2)에서 δ 는 접촉 깊이를 나타내고, $\dot{\delta}$ 는 접촉 속도를 나타낸다.

3.2 서스펜션 모델링

CST 메커니즘의 핵심 구성 요소는 내부 축과 외부 부품(스프로킷, 메인 롤러)을 연결하는 3점 지지 구조이다. 서스펜션은 축 방향 변화만 허용하기 때문에, 본 모델에서 트랙의 롤링 모멘트는 무시된다. 스프로킷과 메인 롤러는 같은 형상의 대칭 구조이므로, 일반화된 식들은 스프로킷 모델링을 기준으로 설명하며, 모든 조건은 메인 롤러 모델링과 동일하다. 먼저, 내부 축과 스프로킷을 연결하는 서스펜션은 선형 스프링 댐퍼를 사용하여 모델링했으며, 각 서스펜션의 연결점 위치는 다음과 같이 운동학적으로 일반화할 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_j &= \mathbf{s}_i + \mathbf{r} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_i + \frac{2\pi}{3}(j-1)) \\ \sin(\theta_i + \frac{2\pi}{3}(j-1)) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_{j,\sigma} &= \mathbf{s}_0 + \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 + \sigma\theta_L + \frac{2\pi}{3}(j-1)) \\ \sin(\theta_0 + \sigma\theta_L + \frac{2\pi}{3}(j-1)) \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (3)$$

여기서, $\sigma = (-1, +1)$, $j = (1, 2, 3)$ 이다. [Fig. 2]의 (b)에서 보이는 것과 같이, $\mathbf{s}_i$, $\mathbf{s}_0$ 는 각각 내부 축의 중심, 스프로킷의 중심을 의미하며, $\mathbf{r}_j$ 와 $\mathbf{R}_{j,\sigma}$ 는 내부 축과 스프로킷 기준의 연결점 위치를 일반화한 위치 벡터를 의미한다. 식 (3)에서 $\mathbf{r}$ 은 $\mathbf{s}_i$ 에서 $\mathbf{r}_j$ 까지의 거리이고, $\mathbf{R}$ 은 $\mathbf{s}_0$ 에서 $\mathbf{R}_{j,\sigma}$ 까지의 거리이며, θ_L 은 $\mathbf{R}$ 과 $\mathbf{r}$ 이 이루는 각도를 나타낸다. 연결점의 위치를 도출함으로써 내부 축과 스프로킷 연결점 사이의 고정 길이와 상대 거리를 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}L_0 &= \sqrt{R^2 - r^2}, \\ L_{j,\sigma} &= \|\mathbf{R}_{j,\sigma} - \mathbf{r}_j\|, \\ \dot{L}_{j,\sigma} &= \|\dot{\mathbf{R}}_{j,\sigma} - \dot{\mathbf{r}}_j\|.\end{aligned}\quad (4)$$

식 (4)에서 L_0 은 서스펜션이 조립된 평형 위치에서 연결점이 만드는 기준 길이로서 고정 변수 R 과 r 을 통해 유도할 수 있고, $L_{j,\sigma}$ 는 $\mathbf{R}_{j,\sigma}$ 와 $\mathbf{r}_j$ 의 상태에 따라 달라지는 순간 상대 거리로 정의된다. $\dot{L}_{j,\sigma}$ 는 $\dot{\mathbf{R}}_{j,\sigma}$ 와 $\dot{\mathbf{r}}_j$ 의 상태에 의해 결정되는데, 이는 각 $\mathbf{R}_{j,\sigma}$ 와 $\mathbf{r}_j$ 의 속도를 나타낸다. 식 (4)를 통해, 내부 축과 스프로킷에 작용하는 스프링 댐퍼 힘은 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$F_{j,\sigma} = k_s(L_{j,\sigma} - L_0) + c_s \dot{L}_{j,\sigma} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_i = \sum_{\sigma=\pm 1} \sum_{j=1}^3 F_{j,\sigma} \mathbf{e}_{j,\sigma}, \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_o = -\mathbf{F}_i. \quad (7)$$

식 (5)에서 k_s 와 c_s 는 [Fig. 2]의 (b)에서와 같이 각각 서스펜션의 강성과 댐퍼 계수를 나타낸다. 모든 서스펜션은 동일한 스프링을 사용하기 때문에 같은 수치로 적용된다. $F_{j,\sigma}$ 는 서스펜션의 복원력을 나타내는 힘의 크기를 나타내며, 내부 축에 유도되는 총 힘 $\mathbf{F}_i$ 은 $F_{j,\sigma}$ 서스펜션을 연결하는 방향의 단위 벡터 $\mathbf{e}_{j,\sigma}$ 를 곱하여 정의된 벡터의 합으로 계산된다. 식 (7)에서, 스프로킷에 유도되는 총 힘 $\mathbf{F}_o$ 는 작용 반작용의 관계로, $\mathbf{F}_i$ 와 반대 방향으로 작용하는 합력이며, 힘의 평형을 보장한다.

3.3 벨트 접촉 모델링

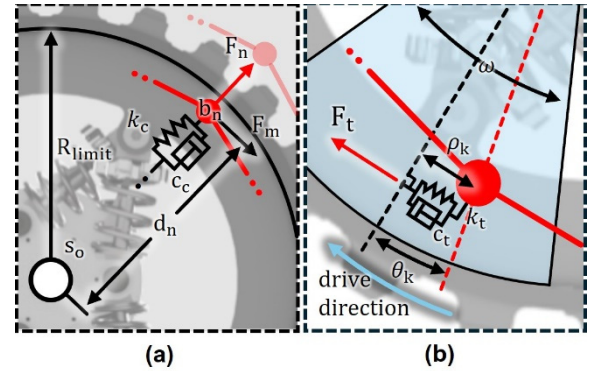
섹션 3.1에서 언급한 것처럼, 트랙 벨트는 스프링 댐퍼로 연결된 유연한 시스템으로 모델링된다. 중력, 서스펜션으로 인해 벨트 구조의 변형을 일으킨다. 이러한 변형과 분포된 벨트 장력의 결과로, 벨트 노드는 스프로킷 및 메인 롤러와 지속적으로 접촉한다. 이번 섹션에서는 벨트 노드와 외부 구성 요소의 상대 거리에 기반한 Kelvin-Voigt 접촉 모델을 적용했다^[15]. 스프로킷과 메인 롤러는 동일한 구조적 구성을 형성하므로, 접촉 조건은 스프로킷을 기준으로 설명한다. 각 노드와 스프로킷 중심 사이의 상대 거리는 다음과 같이 계산할 수 있다. 이로부터 접촉 침투 깊이는 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} d_n &= |b_n - s_o|, \\ \delta &= R_{\text{limit}} - d_n. \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 b_n 는 벨트의 n 번째 노드를 나타내며, 스프로킷의 중심 s_o 와의 상대 거리를 나타내며 [Fig. 3]의 (a)에서 보이는 것처럼 d_n 로 정의하였다. R_{limit} 은 스프로킷의 유효 반경을 나타내며, d_n 과의 거리 차이 δ 를 통해 벨트 노드의 상태를 알 수 있다. 접촉은 $\delta > 0$ 일 때 발생하며, 벨트 노드가 스프로킷 또는 롤러와 접촉하면서 발생하는 반력과 그에 대한 마찰력은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} F_n &= k_c \delta + c_c \dot{\delta}, \\ F_m &= \mu F_n. \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 F_n 은 벨트 노드와 스프로킷(또는 메인 롤러) 사이의 국부적인 변형에 의해 발생하는 접촉 반력을 나타내며,



[Fig. 3] Detailed view to simplify the contact condition of the track robot. (a) is the schematic to explain the belt contact, and (b) is the schematic to explain the belt teeth condition

Kelvin-Voigt 모델을 사용하였다. F_m 는 설계 구조 상 메인 롤러에만 적용되며, 접촉면에 작용하는 접선 방향 마찰력을 나타낸다. 벨트 접촉으로 인해 메인 롤러가 회전할 수 있도록 한다. 스프로킷 구동 조건은 다음 섹션에서 설명한다.

3.4 스프로킷 구동 모델링

CST 메커니즘은 벨트 치형과 스프로킷 치홈의 맞물림을 통해 구동력을 전달한다. 스프로킷에는 여러 개의 치홈이 일정한 각도로 배치되어 있으며, 모델링된 치홈의 개수는 실제 설계상의 스프로킷 개수와 동일하다. 스프로킷과 벨트의 실시간 맞물림을 시뮬레이션하기 위해 치형 사이의 각도와 거리를 기반으로 구동 조건이 적용한다. 벨트 치형은 스프로킷 치홈과 맞물릴 수 있는 반경 내에 있어야 하며, 구동력을 생성하려면 치홈 내 벨트 노드의 위치를 알아야 한다. 이를 바탕으로 구동 모델 조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$|\theta_k| \leq \frac{\omega}{2}, \quad (10)$$

$$R_{\text{limit}} \leq d_n \leq R_{\text{limit}} + h. \quad (11)$$

식 (10)에서 ω 는 스프로킷의 치홈각을 의미하며, [Fig. 3]의 (b)와 같이 θ_k 은 치홈의 중심각과 벨트 노드와 스프로킷 중심이 만드는 각도 차이를 나타낸다. 식 (11)에서, d_n 은 앞서 설명한 것처럼 n 번째 노드의 상태에 따른 상대 거리를 의미하며, h 는 스프로킷 치홈의 허용 깊이를 통해 실제로 벨트가 물릴 수 있는 위치인지 판단한다.

식 (10)과 (11)의 조건이 만족되면 이물림이 유효하다고 가정한다. [Fig. 3]의 (b)에서와 같이, 벨트 노드 위치에서 치홈 중심선 방향으로 수선의 발을 내린다. 그 발까지의 거리를 계산

한다. 이 거리를 기반으로 다음과 같이 치형의 접촉력을 유도할 수 있다.

$$F_t = k_p \rho_k + c_t \dot{\rho}_k. \quad (12)$$

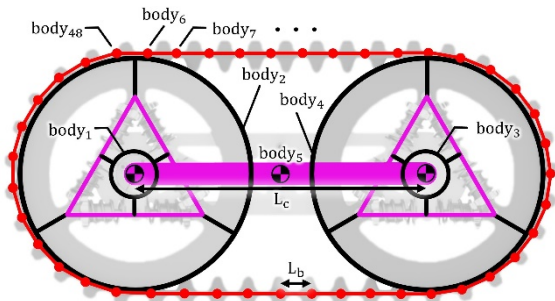
식 (12)에서 ρ_k 는 벨트 노드에서 가장 가까운 치형 중심선까지 투영된 수직 거리를 나타내며, $\dot{\rho}_k$ 는 벨트 노드의 속도를 의미한다. k_t 와 c_t 는 벨트 치형과 스포크 치형 사이의 맞물림 조건을 강화하기 위해 도입된 가상의 스프링 및 감쇠 계수이다. 모델의 수치적 안정성을 유지하면서 치형과 치형 맞물림의 강한 기하학적 제약을 근사화하기 위해 충분히 큰 수치로 적용되었다. 이러한 접근 방식으로 벨트 노드는 구동 중 치형의 중심선에 가깝게 유지되어 안정적인 운동을 보장하며, 치형 접촉 조건을 만족하는 각 벨트 노드의 F_k 는 전체 트랙 벨트를 구동한다.

3.5 다물체 동역학

[Fig. 4]에서 볼 수 있듯이 CST 메커니즘은 5개의 강체(내부 축 및 외부 부품과 메인 프레임)와 N개의 강체(벨트)로 구성된다. 모든 물체는 강체로 모델링되며, 벨트는 회전 스프링 댐퍼로 연결된 강체로 국부적인 변형 및 장력을 표현한다. 또한 요소 간의 접촉 그리고 요소와 지면과의 접촉은 Kelvin-Voigt 접촉 모델을 사용하여 표현된다. $body_i$ 에 대해, 질량 중심은 $[x_i, y_i, \theta_i]$ 로 정의된다. 또한, 질량과 관성 모멘트는 각각 m_i 와 I_i 로 표시된다. 동적 모델의 질량 행렬과 일반화된 힘 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$M = \text{diag}[M_1 \cdots, M_5, \cdots, M_{48}], \quad (13)$$

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1 \cdots \mathbf{q}_5 \cdots \mathbf{q}_{48}]^T. \quad (14)$$



[Fig. 4] Schematic for multibody dynamics. CST mechanism comprises two inner axles ($body_1$, $body_3$), sprocket ($body_2$), main roller ($body_4$), central frame ($body_5$), and belt nodes ($body_6, \cdots, body_{48}$)

여기서, $M_i = [m_i, m_i, I_i]$ 이고 $\mathbf{q}_i = [x_i, y_i, \theta_i]$ 이다. [Fig. 4]에서 볼 수 있듯이, $body_1$ 과 $body_5$, $body_3$ 과 $body_5$, 그리고 $body_6$ 부터 $body_{48}$ 까지 구속이 존재하고, 구속방정식 $\Phi(\mathbf{q})$ 는 다음과 같다.

$$\Phi(\mathbf{q}) = 0. \quad (15)$$

물체 사이의 구속으로 인해, $\Phi(\mathbf{q})$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Phi(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} x_1 - x_5 - \frac{L_c}{2} \cos(\theta_5 + \pi) \\ y_1 - y_5 - \frac{L_c}{2} \sin(\theta_5 + \pi) \\ x_3 - x_5 - \frac{L_c}{2} \cos \theta_5 \\ x_1 - x_5 - \frac{L_c}{2} \cos \theta_5 \\ \vdots \\ x_6 - x_{48} - L_b \cos \theta_{48} \\ y_6 - y_{48} - L_b \cos \theta_{48} \\ x_7 - x_6 - L_b \cos \theta_6 \\ x_7 - x_6 - L_b \cos \theta_6 \\ \vdots \\ x_{48} - x_{47} - L_b \cos \theta_{48} \\ x_{48} - x_{47} - L_b \cos \theta_{48} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

식 (16)에서, L_c 은 $body_1$ 과 $body_2$ 를 연결하는 $body_5$ 링크의 길이를 나타내고, L_b 는 벨트 노드($body_6, \cdots, body_{48}$)가 가지는 단일 세그먼트의 길이를 나타낸다.

본 시뮬레이션의 목적은 외부 힘과 지형 상호작용 하에서 CST 메커니즘의 시간 변화에 따른 동적 거동을 분석하는 것이다. 시간에 따라 변화함에 따라 연결된 구성 요소 간의 기하학적 관계를 유지하기 위해서는 위치, 속도, 그리고 가속도에 대해 구속 방정식이 만족되어야 한다. 식 (15)을 시간에 대해 두 번 미분하면 다음과 같은 가속도 구속 방정식이 도출되며, 수치적 오차를 방지하면서 물리적으로 일관된 가속도를 보장한다.

$$\Phi_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} = \gamma. \quad (17)$$

여기서 Φ_q 는 구속 방정식의 야코비안 행렬이며, $\ddot{\mathbf{q}}$ 는 일반화된 가속도의 벡터이며, γ 는 가속도 구속 조건 방정식의 우변 항을 나타낸다.

일반화된 힘 Q 는 앞 섹션에서 개별적으로 유도한 모델로부터 도출된다. 각 힘 성분은 일반화 좌표로 변환되어 합산되고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_{\text{drive}} + Q_{\text{suspension}} + Q_{\text{contact}} + Q_{\text{friction}} + Q_{\text{teeth}} + Q_{\text{gravity}}. \quad (18)$$

식 (18)에서 $Q = [F_x, F_y, M_z]$ 이고, Q_{drive} 는 식 (1), (2)에서 정의한 스프로킷과 벨트 노드에 가해지는 구동 토크와 지면과의 접촉 힘, $Q_{suspension}$ 은 식 (5), (6), (7)에서 정의한 내부 축과 외부 구성 요소(스프로킷, 메인 롤러) 사이의 서스펜션 힘을 의미한다. $Q_{contact}$, $Q_{friction}$ 은 식 (9)에서 정의한 외부 구성 요소와 벨트 노드 사이의 접촉 반력, 그리고 메인 롤러 사이에 작용하는 마찰력, Q_{teeth} 는 스프로킷과 벨트 노드 사이의 물림 힘을 의미한다. $Q_{gravity}$ 는 [Fig. 4]에서 보이는 것처럼 모든 body가 가지는 중력을 의미한다.

스프로킷과 벨트 노드에 대한 전체 혼합 미분 및 대수 운동 방정식은 다음과 같다^[15].

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix}. \quad (19)$$

식 (19)에서 λ 는 라그랑지 승수 벡터를 의미하며, Q 는 적용된 힘과 토크의 일반화된 벡터이다. 마지막으로, 현재 단계에서 식 (19)로부터 구한 $\ddot{q}$ 를 수치적으로 적분함으로써 다음 단계의 q 를 계산할 수 있고 전체 시스템의 결합된 동적 거동을 나타낼 수 있으며, 이전과 도출된 모든 힘 모델이 통합된 다물체 동적 프레임 워크에 통합된다.

4. 스프링 강성 최적화

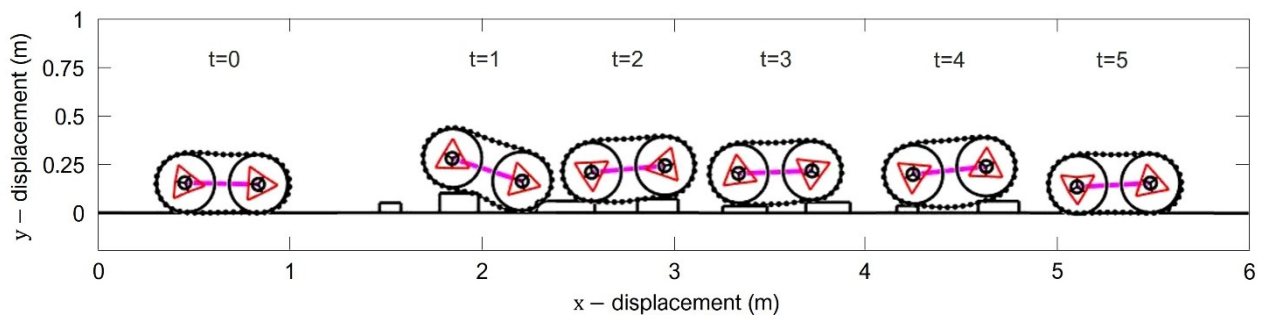
4.1 가상 환경 설정

시뮬레이션은 식 (2)에서 유도한 것처럼 Kevin-Voigt 모델을 적용하여 각 벨트 노드와 지면 간의 접촉 여부를 판단하여 매시간 단계(time step)마다 반복적으로 수행되어 계산한다. 모델링을 기반으로 최적의 스프링 강성을 평가 및 결정하기

위해 환경 변수 설정을 수행하였다. 로봇은 약 6 m 길이의 주행 환경을 이동하며 총 8개의 장애물을 순차적으로 통과하도록 구성하였다. 장애물의 위치, 높이, 그리고 장애물 간의 간격은 불규칙하게 설정하였으며, 이러한 조건을 조합하여 총 다섯 가지의 서로 다른 지형 조건을 구성하였다. 각 지형 조건을 Case 1부터 Case 5까지로 구분하여 정의하였으며, 5가지의 조건 중 대표적인 지형 형상을 [Fig. 5]에 제시하였다. 장애물의 높이는 스프로킷 중심보다 낮게 설정하여, 주행 과정에서 지속적인 진동이 발생하도록 유도하였다. 대표적으로, Case 1의 모든 장애물 높이는 약 0.1m, 폭과 장애물 간의 간격은 0.3m 이하의 조합으로 설정되었다. 또한 충격 흡수에 영향을 받는 작동 조건을 모사하기 위해 트랙의 최대 속도를 기존 트랙들의 성능을 고려하였고, 시뮬레이션 상에서 1.5m/s로 고정하였다.

로봇은 구간을 이동하는 동안 y 방향으로 변위가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 수직 방향 변위의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 평균 제곱근 오차(RMSE)를 사용한다. 장애물 통과 직후 발생하는 착지 충격은 순간적인 수직 가속도와 진동을 유발하며, 이는 로봇 본체의 질량 중심의 변동으로 직접적으로 나타난다. 따라서 착지 충격에 의해 유발되는 동적 특성을 간접적으로 정량화하기 위한 지표로 질량 중심의 수직 변위에 대한 RMSE를 사용하였다. RMSE 계산의 기준이 되는 이상 궤적은 로봇이 장애물을 등반하는 과정에서 따라야 하는 이상적인 경로로 정의된다.

이때 이상적인 경로는 로봇이 장애물의 전면과 최초로 접촉하여 등반을 시작하는 순간의 질량 중심 위치와, 장애물 상단을 통과한 후 장애물의 시작 지점과 로봇의 후방 회전 중심이 동일 선상에 놓이게 되어 등반이 완료되는 순간의 질량 중심 위치를 기준으로 결정된다. 각 장애물마다 이러한 두 순간의 질량 중심 좌표를 계산한 뒤 이를 선형으로 연결하여 전체 구간의 이상 궤적을 구성하였으며, 실제 주행 과정에서 측정된 로봇 질량 중심



[Fig. 5] Simulation setup for optimization of the spring stiffness. The shows representative terrain conditions representing five types. The obstacles in all cases were set at a height lower than the center of the sprocket, and the height, width, and spacing of the 8 obstacles were irregularly combined. Dynamic characteristics for all stiffnesses from 7.5 N/mm to 12.5 N/mm in increments of 0.5 N/mm are verified

의 y 방향 변위와 비교하여 RMSE를 산출하였다. 모델의 이동으로 RMSE 값을 계산하면서 동시에, 벨트 노드와 스포크릿 중심 사이의 상대 거리 변위를 측정함으로써 장애물 통과 중 벨트 이탈이 발생하는 강성 수준을 판별하였다. 이후 스프링 강성을 단계적으로 증가시키면서 각 경우의 결과를 분석하여 적정 강성 범위를 확인하였다.

[Table 1] Parameter of CST mechanism

Length (mm)				Angle (°)	
r	50.25	N	43	θ_L	60.13
R	100.9	L_c	380	ω	14.4
R_{limit}	150.5	L_b	40	h	25
Mass [kg] of body					
m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	$m_6 \sim m_{48}$
9.5	2.8	5.95	2.3	3.8	0.128

[Table 2] RMSE according to stiffness and five terrain cases

Stiffness (N/mm)	RMSE (mm) according to ground cases				
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
7.5	23.81	42.24	30.85	44.76	34.30
8	20.98	38.30	39.69	36.02	42.02
8.5	20.68	39.20	41.73	36.58	34.57
9	20.46	37.64	42.13	38.92	44.77
9.5	24.36	40.32	38.73	38.89	37.06
10	22.60	34.26	38.02	31.68	35.54
10.5	24.84	47.14	37.22	32.23	45.48
11	23.32	58.55	51.06	36.22	37.61
11.5	25.63	45.24	35.44	39.42	45.05
12	26.50	48.56	37.05	30.22	55.52
12.5	23.43	40.40	36.75	45.31	51.50

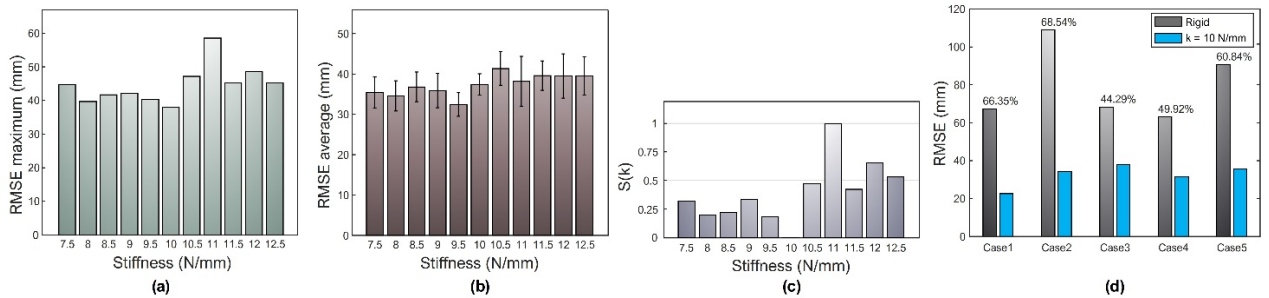
4.2 RMSE 결과 비교

실제 설계의 값들을 적용한 [Table 1]의 매개변수들로 시뮬레이션이 수행되었으며, 7 N/mm의 강성 조건은 벨트 이탈 현상이 확인되어 분석 대상에서 제외하였다. 이에 따라 7.5 N/mm부터 12.5 N/mm까지 0.5 N/mm 간격으로 강성에 따른 RMSE를 평가하였으며, [Table 2]에 요약되어 있다. 강성 선택을 위해 최약성능, 평균성능, 일관성 지표를 종합적으로 반영한 단일 점수 기반의 최적화 방법을 다음과 같이 적용하였다.

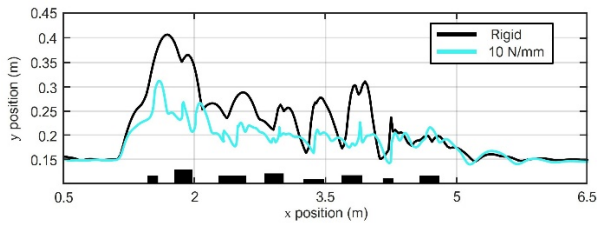
$$S(k) = 0.5\hat{M}(k) + 0.3\hat{\mu}(k) + 0.2\hat{\sigma}(k) \quad (20)$$

식 (20)에서와 같이 $\hat{M}(k)$ 는 모든 시험 조건에 대해 계산된 오차 값들 중 최대값을 의미한다. $\hat{\mu}(k)$ 는 평균 그리고 $\hat{\sigma}(k)$ 는 표준편차를 의미하며, 각 강성 조건에서 도출된 결과를 정규화하였고, 각 그래프를 통한 결과는 [Fig. 6]에서 확인할 수 있다. $\hat{M}(k)$ 가 전체 안정성에 미치는 영향이 가장 크다는 점을 고려하여 해당 항목의 가중치를 가장 높게 부여하였다. 또한 평균 $\hat{\mu}(k)$ 는 전반적인 주행 성능을 나타내므로 중간 수준의 가중치를 적용하였으며, 변동성을 의미하는 표준편차 $\hat{\sigma}(k)$ 는 주행 일관성에 해당하므로 상대적으로 낮은 가중치를 부여하였다. 이러한 기준에 따라 산출된 종합 점수는 세 지표가 균형적으로 반영된 형태로 구성되며, 결과적으로 보다 신뢰성 있게 최적 강성을 도출할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 로봇이 설계 상 가질 수 있는 최대 구동 속도 조건에서 장애물에 대한 별도의 감속 제어 없이 일정한 RPM 입력만으로 주행하도록 설정하여, 고속 주행 시 발생할 수 있는 실제 동적 하중 조건을 재현하고자 하였다. 이러한 조건에서 로봇은 장애물과 전진 방향(x 방향)으로 직접 충돌하면서 큰 충격을 받게 되며, 장애물을 극복한 이후에는 지면이나 다음 장애물과 다시 접촉하면서 서스펜션의 복원력에 의해 반발력이 발생하게 된다. 이와 같은 충돌과 반발의 과정이 연속적으로 반복되



[Fig. 6] Results data for the stiffness optimization. (a) is maximum RMSE for each stiffness level. (b) is an average RMSE with standard deviation. (c) is weighted composite score $S(k)$, showing the minimum at $k = 10$ N/mm. (d) compare the data between the rigid condition and the optimized stiffness 10 N/mm.



[Fig. 7] Flow graph of the case 1 between rigid condition and optimized stiffness value

면서 로봇은 높은 속도로 이동하게 되며, 그 결과 일반적인 저속 조건에서 관찰되는 이상적인 상승 형태가 아닌, 상대적으로 불규칙한 변동성을 가지는 궤적 형태가 나타나게 된다.

[Fig. 7]와 같이 일반적인 트랙과 같은 구조의 강체 트랙과 10 N/mm 강성을 적용한 y축 변위를 비교하였다. 강체의 조건은 장애물을 연속적으로 통과할 때 급격한 피크와 빠른 변동이 반복되는 높은 진동 패턴을 나타낸다. 반면, 10 N/mm 강성 조건에서 진폭이 현저히 감소하며 강체 조건보다 전체적으로 낮은 변동성을 보인다. 특히 초반 장애물 구간에서 강체 조건은 0.4 m 이상까지 변위를 보이는 반면, 10 N/mm의 조건에서 훨씬 작은 변위를 유지한다. 그래프의 흐름뿐만 아니라, [Fig. 6]의 (d)처럼, 각 케이스의 최적 강성의 RMSE는 강체 조건보다 최소 44% 이상 변동성이 적고, 특히 Case2의 RMSE는 68% 이상 저감된다. 이는 서스펜션이 비정형한 지형에서 고속으로 이동할 때 충격을 효과적으로 흡수한다는 것을 검증하며 몸체의 안정성을 기존의 트랙보다 월등히 개선할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 다방향의 충격을 흡수할 수 있는 새로운 메커니즘을 제시하였다. 설계적 제약과 주행 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 서스펜션의 강성을 주요 변수로 설정하고, 다물체 동역학을 기반으로 동적 분석을 하고 시뮬레이션을 수행하였다. 강체 트랙(rigid track)은 장애물을 연속적으로 통과하는 과정에서 큰 진폭의 횡방향 변위와 급격한 진동 피크를 나타내어 불규칙 지형에서 주행 안정성이 크게 저하되는 경향을 보였다. 반면, CST 메커니즘의 최적 강성으로 도출된 10 N/mm 스프링을 적용한 경우, y 방향 변위가 전 구간에서 유의미하게 감소하였으며, 특히 초기 장애물 구간에서 그 차이가 두드러지게 나타났다. 이는 서스펜션이 복합 충격을 효과적으로 흡수하여 동적 흔들림을 억제하고, 트랙의 접지 안정성을 향상시키는 데 기여함을 의미한다.

강체 트랙 대비 CST 트랙의 궤적 오차는 최대 58% 이상 감소하였으며, 강성 변화에 따른 오차 최대값·평균·표준편차를

반영한 종합 점수 또한 10 N/mm에서 최소값이 나타나 해당 강성이 구조적 안정성과 주행 성능 간의 균형을 가장 잘 달성함을 확인하였다. 이러한 결과는 CST 메커니즘이 기존 트랙이 가진 착지 충격 및 고진폭 진동 문제를 효과적으로 완화할 수 있음을 시사한다.

다만, 본 연구는 시뮬레이션 환경을 기반으로 수행되었기 때문에 실제 지형 조건에서의 다양한 마찰·변형·재질 변화가 충분히 반영되지 않았다는 한계가 존재한다. 따라서 제안된 CST 메커니즘의 실용성을 검증하기 위해서는 동일한 조건의 실제 험지 환경에서 일반적인 트랙과 CST 트랙을 직접 비교하는 실험이 반드시 필요하다. 현재 최적 스프링 강성을 적용한 CST 메커니즘의 프로토타입 제작을 진행하고 있으며, 제작이 완료되는 대로 비정형 장애물 환경에서 구동 테스트를 수행하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증할 예정이다.

향후에는 하중 조건, 마찰 계수, 서스펜션 강성의 상호작용을 고려한 심층적인 파라미터 최적화를 수행하여 CST 메커니즘의 성능을 더욱 향상시키고, 다양한 현장 로봇 플랫폼에 적용 가능한 범용적인 설계 가이드라인을 제시하고자 한다.

References

- [1] T. Thuerer and R. Siegwart, "Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots: Metrics and application," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 508-519, May, 2010, DOI: 10.1016/j.robot.2010.01.007.
- [2] J. Y. Wong and W. Huang, "“wheels vs. tracks”-a fundamental evaluation from the traction perspective," *Journal of Terramechanics*, vol. 43, no. 1, pp. 27-42, Jan., 2006, DOI: 10.1016/j.jterra.2004.08.003.
- [3] L. Bruzzone, M. Baggetta, S. E. Nodehi, and P. Bilancia, "Functional design of a hybrid leg-wheel-track ground mobile robot," *Machines*, vol. 9, no. 1, p. 10, Jan., 2021, DOI: 10.3390/machines9010010.
- [4] B. Seo, H. Kim, M. Kim, K. Jeong, and T. Seo, "Flipbot: A new field robotic platform for fast stair climbing," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, no. 14, pp. 1909-1914, Nov., 2013, DOI: 10.1007/s12541-013-0259-8.
- [5] S. Ryu, K. Lim, S. Han, and T. Seo, "Tracker-bogie: A mobile mechanism with integrated half rocker-bogie and track mechanism," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 30, no. 2, pp. 1201-1211, Jan., 2024, DOI: 10.1109/TMECH.2024.3402586.
- [6] A. Ugenti, R. Galati, G. Mantriota, and G. Reina, "Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 182, p. 105237, Apr., 2023, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105237.
- [7] Z. Li, X. Jing, B. Sun, and J. Yu, "Autonomous navigation of a tracked mobile robot with novel passive bio-inspired suspension," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25,

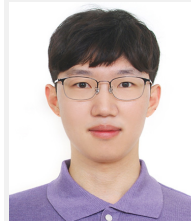
- no. 6, pp. 2633-2644, Dec., 2020, DOI: 10.1109/TMECH.2020.2987004.
- [8] R. Galati and G. Reina, "Terrain awareness using a tracked skid-steering vehicle with passive independent suspensions," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, p. 46, June, 2019, DOI: 10.3389/frobt.2019.00046.
- [9] K. Lim, S. Han, S. Ryu, and T. Seo, "Track-linkage-based compliant robot for high obstacle overcoming capability with stable motion," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 30, no. 5, pp. 3484-3495, Jan., 2024, DOI: 10.1109/TMECH.2024.3475474.
- [10] D. Choi, Y. Kim, S. Jung, J. Kim, and H. S. Kim, "A new mobile platform (rhymo) for smooth movement on rugged terrain," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 3, pp. 1303-1314, June, 2016, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2520085.
- [11] S. Ryu, H. Seo, Y. Kwon, K. Lim, Y. Pi, and T. Seo, "Design and analysis of a four-track-based mobile robot with novel tracker-bogie mechanism," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 31, no. 2, pp. 1265-1275, Apr., 2025, DOI: 10.1109/TMECH.2025.3603504.
- [12] J. Kim, J. Kim and D. Lee, "Mobile robot with passively articulated driving tracks for high terrainability and maneuverability on unstructured rough terrain," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 5389-5400, Dec., 2018, DOI: 10.1007/s12206-018-1037-4.
- [13] M. Corno, G. Panzani, E. Catenaro, and S. M. Savaresi, "Modeling and analysis of a bicycle equipped with in-wheel suspensions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 155, p. 107548, June, 2021, DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107548.
- [14] D. Liang, Y. Song, and T. Sun, "Nonlinear dynamic modeling and performance analysis of a redundantly actuated parallel manipulator with multiple actuation modes based on FMD theory," *Nonlinear Dynamics*, vol. 89, pp. 391-428, July, 2017, DOI: 10.1007/s11071-017-3461-x.
- [15] P. Flores and H. M. Lankarani, "Contact Force Models for Multibody Dynamics," *Springer*, vol. 226, no. 8, p. 171, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-30897-5.



권 용 호

2023 강릉원주대학교 기계공학과(학사)
2024~현재 한양대학교 융합기계공학과
(석사)

관심분야: 로봇 설계, 메커니즘 설계



김 한 봄

2022 한양대학교 기계공학과(학사)
2022~현재 한양대학교 융합기계공학과
(석박사통합과정)

관심분야: 로봇 메커니즘 설계, 로봇 궤적 제어



김 승 준

2025 한양대학교 기계공학과(학사)
2025~현재 한양대학교 융합기계공학과
(석사과정)

관심분야: 모바일 로봇 설계, 동역학 시뮬레이션



양 정 모

2022 한양대학교 기계공학과(학사)
2022~현재 한양대학교 융합기계공학과
(석박사통합과정)

관심분야: 로봇 센싱 및 제어



서 태 원

2003 서울대학교 기계항공공학부(학사)
2008 서울대학교 기계항공공학부(박사)
2018~현재 한양대학교 기계공학부 교수

관심분야: 로봇 설계, 분석, 제어, 최적화, 플래닝