



자율주행 화물차의 전복 및 미끄럼 방지 최적 주행 속도 결정

김 평 안¹⁾ · 유 성 식²⁾ · 이 흥 식^{*2)}

중부대학교 미래자동차융합공학과¹⁾ · 중부대학교 스마트모빌리티공학과²⁾

Decision of Optimal Driving Speed for Preventing Rollover and Skidding in Autonomous Heavy Vehicles

Pyeongan Kim¹⁾ · Sung Sic Yoo²⁾ · Heung-Shik Lee^{*2)}

¹⁾Department of Future Vehicle Convergence Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 412480, Korea

²⁾Department of Smart Mobility Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 412480, Korea

(Received 10 October 2025 / Revised 6 November 2025 / Accepted 7 November 2025)

Abstract : Heavy vehicles are particularly prone to rollover and skidding accidents on curved road segments due to their high center of gravity and extended braking distances. This study proposes a method of determining the optimal driving speed of heavy vehicles by incorporating road geometry and pavement friction coefficients. The approach is anchored on a generalized safe speed formulation that simultaneously considers both rollover and skidding constraints while ensuring computational stability. The proposed method was validated using TruckSim - MATLAB co-simulations utilizing real accident data. Results indicate that the method effectively reduces the risk of rollover and skidding accidents and enables stable driving across a wide range of friction conditions ($\mu = 0.2 - 0.7$). Furthermore, applicability of the method was demonstrated via the ISO 3888-1 Double Lane Change (DLC) test, confirming its robustness in abrupt lane-change scenarios. The findings provide a foundation for autonomous heavy vehicles to adapt to real-time road conditions, contributing to enhanced road safety and logistics efficiency.

Key words : Heavy vehicle(대형 상용차), Rollover(전복), Skidding(미끄러짐), Lateral-load transfer ratio(횡 방향 하중 전달 비율), Simulation(시뮬레이션)

Nomenclature

h : vehicle cg height, m
 T : vehicle track, m
 C : safety factor, -
 α : longitudinal slope, deg
 β : cross slope, deg
 R : road radius, m

Subscripts

x : longitudinal
 y : lateral

1. 서론

대형 화물차는 물류 산업에서 핵심적 역할을 담당하지만, 사고 발생 시 사회·경제적 피해가 매우 크다. 특히 곡선 구간에서는 차량의 고중량, 높은 무게중심, 긴 제동거리 등의 특성으로 인해 전복이나 미끄러짐 사고 위험이 크게 증가한다. Nurzaki¹⁾는 차량의 동적 안전성을 결정하는 요소로 횡가속도(Lateral acceleration)를 종속변수로, 차량 속도, GVW (총중량), 도로 마찰 계수(CoF), 곡률 반경을 독립변수로 하여 각각 최대 횡가속도에 영향을 미치는 정도를 평가하였다. 해당 연구에 따르면 가장 영향력이 큰 요소는 차량의 주행 속도로 지목하였다. 이러한 요소로부터 주행 안전성을 확보하기 위한 기존의 연구는 접근 방식에 따라 크게 두 가지 범주로 나

*Corresponding author, E-mail: jsheung@joongbu.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

낼 수 있다.

- 1) 도로 설계 기준 기반 연구: AASHTO²⁾ 등은 곡률 반경과 일정한 마찰계수를 기반으로 속도 제한을 제시하지만, 이는 적재 하중이나 실시간 노면 상태 변화를 고려하지 않아 보수적으로 설정되어 실제 운행 속도와 괴리가 크거나, 반대로 위험을 과소평가할 수 있다.
- 2) 차량 동역학 기반 연구: 차량이 미끄러지는 한계속도 또는 전복되는 한계속도를 개별적으로 계산하는 방식^{3,5)}이 제안되었으나, 실제로는 두 현상이 동시에 발생할 수 있음에도 불구하고 이를 종합적으로 반영하지 못하였고 중·횡 경사, 하중 이동 효과, 그리고 마찰계수의 시간적 변화를 고려하지 못하였다.

도로 설계 기준 기반 연구의 경우 최근에는 하중센서 기반 추정,⁶⁾ 영상·라이다 기반 표면 인식, 딥러닝 기반 마찰계수 추정⁷⁾ 등 다양한 접근이 개발되면서, 노면 마찰계수를 실시간으로 추정하는 것이 가능해졌다. 따라서 자율주행 트럭이 경로를 계획할 때, 이 정보를 활용하여 실시간으로 안전 속도를 조정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 도로의 기하정보와 노면 마찰계수를 이용하여 화물차의 전복 및 미끄러짐을 방지하기 위한 최적 주행속도를 계산하는 방법을 연구하였다.

차량 동역학 기반 연구의 경우 화물차의 전복을 방지하는 최적의 주행 속도를 도출하려면, 차량의 동적 안전성을 예측할 수 있어야 한다. 차량의 전복 여부를 판단하기 위해 몇 가지 지표들이 제안되었다. 예를 들어, 횡방향 하중 전이 비율(LTR),⁸⁾ 전복까지의 시간(TTR)^{9,10)} 등이 연구되고 있다. LTR은 횡방향 하중 비율로, 차량의 좌우측 타이어에 작용하는 수직하중의 비율이다. LTR은 직접 측정하기 어려우며, 단독으로는 차량의 전복 가능성을 정확히 판단하기 어렵다. TTR은 타이어 들림까지의 시간을 의미하며, 입력되는 조향각이 고정된 상태로 유지된다고 가정할 때, 차량의 롤 각도가 정의된 임계 수치를 초과하기까지의 시간을 예측하는 것이다. TTR은 차량의 조향에 따른 전복 여부를 예측하여 주행 제어에 사용할 수 있지만, TTR 예측을 위해 차량의 롤 임계 수치와 같은 요소가 필요하여 실제 운행 차량에 적용하기에 어려움이 있고, 노면 마찰계수에 의한 차량의 미끄러짐을 판단할 수 없다. 이처럼 기존 지표들은 전복 여부를 예측할 수는 있으나, 미끄러짐 판단이 어렵거나 실제 적용성이 떨어지는 한계가 있다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해, 전복과 미끄러짐을 동시에 고려한 일반화된 최적 속도 산출식을 제안한다. 특히 최근 발전한 하중 센서, 영상 기반 마찰 추정, 딥러닝 기반 마찰계수 예측 기술을 결합하면, 차량은 단일 고정 수치가 아닌 시간·공간적으로 변화하는 마

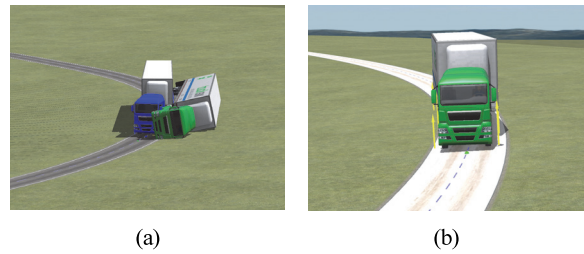


Photo. 1 TruckSim Simulation: (a) Actual data vs proposed speed profile, (b) Simulation on $\mu = 0.2$

찰계수를 입력 변수로 활용할 수 있다. 이는 자율주행 화물차 경로 계획에서 중요한 진전이며, 단순히 사고 방지를 넘어 주행 효율성까지 고려할 수 있게 한다.

본 연구에서는 Zhang¹¹⁾의 실제 사고 데이터를 활용해 도로 정보를 반영하고, 이를 기반으로 화물차 전복 및 미끄러짐 사고 방지 최적 속도 도출 방법을 제안하였다.

본 연구의 기여는 다음과 같다.

- 1) 중·횡 미끄러짐과 전복 조건을 동시에 고려한 일반화 속도 상한식을 제안한다.
- 2) 자율주행 적용을 고려하여 거리 기반 제약식으로 변환하였다.
- 3) 실시간 추정 마찰계수 μ_s 를 반영하여 도로 상태 적응형 안전 속도 산출을 가능하게 한다.
- 4) TruckSim-MATLAB 연동 시뮬레이션을 통해 기존 방식 대비 향상된 안전성을 정량적으로 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 차량 전복 안전성

일반적인 도로 환경에서 차량은 미끄러짐 보다 바퀴 들림에 대한 영향을 더 크게 받는다. 차량의 전복은 좌우 바퀴 중 한쪽이 지면에서 떨어져 제어를 상실하는 현상을 의미한다. Fig. 1은 차량의 횡가속도 증가에 따라 차체가 외측 방향으로 회전하려는 모멘트가 발생하고, 이때 무게중심 위치와 트레드 폭에 의해 전복 여부가 결정됨을 개념적으로 설명한 것이다. 이는 모멘트 평형 관점에서 전복 조건을 해석하기 위한 기본 도식이며, 이를 외측 바퀴에 대한 모멘트 평형식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$ha_y \cos(\beta) - \frac{T}{2} a_y \sin(\beta) = \frac{T}{2} g \cos(\beta) + h g \sin(\beta) \quad (1)$$

차량에 작용하는 횡가속도는 차량의 주행 속도와 도로의 반경을 이용해 식 (2)와 같이 계산된다.

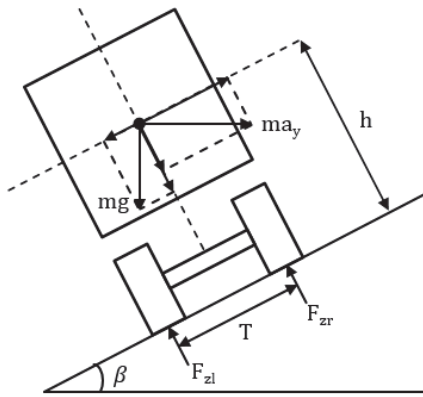


Fig. 1 Vehicle force balance diagram during cornering

$$a_y = \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

이를 전복 임계 속도 $v_{rollover}$ 에 대한 식으로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$v_{rollover} = C \sqrt{Rg \frac{T \cos(\beta) + 2h \sin(\beta)}{2h \cos(\beta) - T \sin(\beta)}} \quad (3)$$

본 연구에서 사용한 안전계수 C 는 차량의 동적 안정성 여유를 반영하는 무차원 설계 파라미터로, 차량 제원과 도로 기하 조건에 의해 결정되는 이론적 한계 속도에 추가적인 안정 마진을 부여하기 위한 계수이다. C 는 차량 하중 조건, 서스펜션 강성, 타이어 특성, 노면 상태 등에 따라 실제 주행 가능 한계가 이론치보다 낮아질 수 있다는 점을 고려하여 도입하였으며, 이를 통해 주행 속도 프로필을 한계속도 미만으로 제한한다.

도로의 곡률과 횡경사를 통해 계산한 전복 임계 속도 미만으로 제한하는 것으로 차량의 선회주행시 전복하지 않는 최적 속도를 설정할 수 있지만 안전한 주행을 위해서는 전복뿐만 아니라 노면 마찰에 따른 미끄럼도 함께 고려해야 한다.

2.2 차량 미끄러짐 안전성

차량의 전복과 동시에, 도로 노면의 마찰에 의한 차량의 미끄러짐 또한 고려되어야 한다. 미끄러짐을 방지하려면 곡선 구간 진입 전에 충분한 감속 거리를 확보하는 것이 중요하다. 실제 도로 환경에서는 곡선 시작 지점 직전에 직선 구간이 존재하는 경우가 많으며, 이를 통해 감속을 수행할 수 있다. 감속 과정에서 차량이 미끄러지지 않기 위해서는 차량에 작용하는 가속도가 타이어에 작용하는 마찰원보다 작아야 한다. 차량의 마찰원 조건은

식 (4)와 같다.

$$F_{lon}^2 + F_{lat}^2 \leq (C\mu_s N)^2 \quad (4)$$

여기서 μ_s 는 실시간 추정 마찰계수이다.

도로 종경사 α , 횡경사 β 고려 시 바퀴에 작용하는 종방향 하중 F_{lon} , 횡방향 하중 F_{lat} 은 식 (5)와 (6)과 같다.

$$F_{lon} = m \left(\frac{dv}{dt} + g \sin(\alpha) \right) \quad (5)$$

$$F_{lat} = m \left(\frac{v^2}{R} \cos(\beta) - g \sin(\beta) \right) \quad (6)$$

이를 질량으로 나누고 $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{ds}$ 를 적용하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$v^2 \left(\frac{dv}{ds} \right)^2 = A^2 - B^2 - (g \sin(\alpha))^2 \quad (7)$$

여기서,

$$A = (C\mu_s) \left(\frac{g \cos(\alpha) - \frac{v^2}{R} \sin(\beta)}{\cos(\beta)} \right) \quad (8)$$

$$B = \frac{v^2}{R} \cos(\beta) - g \sin(\beta) \quad (9)$$

이다.

식 (7)을 v^2 로 나누어 제곱근을 취하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{dv}{ds} = \sqrt{\frac{A^2 - B^2 - (g \sin(\alpha))^2}{v^2}} \quad (10)$$

주행 속도를 산정할 때는 사고 방지를 위해 보수적인 기준을 적용한다. 따라서 차량의 가속이 필요한 경우 속도의 기준은 가속 이전에서의 속도가 기준이 된다. 이는 가속도의 한계 내에서 속도를 조정할 때, 감속 후의 속도는 낮출 수 있지만 이전 구간의 속도를 높일 수 없기 때문이다. 같은 이유로, 감속 시의 속도 기준은 감속 후의 속도가 된다. 감속 전의 속도를 낮출 수는 있지만 감속 후의 속도를 높일 수 없기 때문이다. 따라서 가속과 감속에 대한 속도 v 를 Forward pass와 Backward pass¹²⁾로 이산

화하여 식 (11), (12)로 2가지를 사용하여 Profile을 생성하고, 낮은 수치를 v_{skid} 로 사용한다.

$$v_{n+1} = v_n + \Delta s \cdot \sqrt{\frac{A_n^2 - B_n^2 - (g \sin(\alpha))^2}{v_n}} \quad (11)$$

$$v_n = v_{n+1} + \Delta s \cdot \sqrt{\frac{A_{n+1}^2 - B_{n+1}^2 - (g \sin(\alpha))^2}{v_{n+1}}} \quad (12)$$

최종 안전 속도는 식 (13)과 같이 전복 방지 속도와 미끄러짐 방지 속도중 낮은 수치를 사용한다:

$$v_{max} = \min(v_{skid}, v_{rollover}) \quad (13)$$

이와 같은 과정을 통해 다양한 도로 환경 및 주행 시나리오에서 차량이 미끄러지지 않고 전복되지 않는 최적의 속도를 도출할 수 있다.

3. 시뮬레이션 모델 생성

3.1 실 데이터 기반 램프 구간 모델

실제 사고 데이터를 활용한 연구는 자료의 희소성과 안전성 문제로 인해 매우 드물다. 따라서 본 연구는 Zhang¹¹⁾의 데이터와 TruckSim을 활용하여 실제 도로 상황을 반영한 시뮬레이션을 수행하였다.

차량 모델은 실제 사고 차량과 동일하게 트랙터-트레일러 구조의 2바디 모델을 적용하였고, 각각의 제원과 하중 또한 동일하게 적용하였다. 주행로의 기하 정보는 Zhang¹¹⁾의 연구에서 제시된 실제 사고 현장의 데이터를 사용하였고, 노면마찰계수는 동일하게 0.7을 적용하였다. 도로의 형상은 Fig. 2와 같으며, 50 m 길이의 직선 구간, 96.8 m 길이의 Clothoid 곡선 구간, 반경 125 m, 길이 126.122 m의 곡선 구간, 54.315 m 길이의 Clothoid 곡선 구간, 반경 60 m, 길이 73.799 m의 곡선 구간, 106.667 m 길

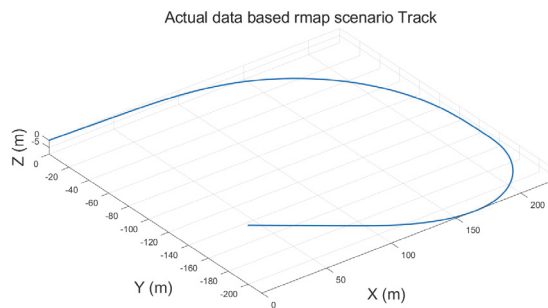


Fig. 2 Road geometry of the accident case¹¹⁾

이의 Clothoid 곡선 구간, 50 m 길이의 직선 구간으로 시뮬레이션에 입력하였다. 도로의 종경사를 시작 지점 부터 401.036 m 까지 -2.45 %, 507.703 m 까지 0.893 %, 이후 종점까지 0 %를 적용하였고, 횡경사를 시작 지점 부터 50 m 지점 까지 -2 %, 272.922 m 까지 6 %, 401.036 m 까지 7 %, 507.703 m 까지 2 %, 종점 까지 -2 %로 적용하였다.

또한, 본 연구에서는 다양한 노면 마찰 조건(빙판, 우천, 습윤, 건조)을 고려하여 속도 프로파일 생성 방법을 검증하였다. 다양한 도로 노면 환경에 대한 유효성 검증을 위해 노면 마찰계수를 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이는 자율주행 화물차가 특정 환경에 국한되지 않고, 여러 가지 주행 조건에서도 안전성을 확보해야 하기 때문이다. 노면의 마찰계수는 Yang 등의 연구¹³⁾에서 ice 0.2, snowy 0.35, wet 0.5, dry 0.7로 정의하였으며, Jones와 Childer¹⁴⁾는 ice 0.15 ~ 0.3, wet 0.7 ~ 0.8, dry 0.8 ~ 1.0으로 정의하였다. 본 연구에서는 실제 도로 환경에서 대표적으로 나타나는 마찰 조건을 반영하기 위해 각각 0.2, 0.35, 0.6, 0.7로 구분하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3.2 Double Lane Change 시나리오 모델

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 ISO-3888-1¹⁵⁾의 Double Lane Change (DLC) 시험 방법을 토대로 시뮬레이션 모델을 구축하였다. ISO-3888-1 DLC 시험은 차량이 도로에서 돌발적으로 장애물을 회피하거나 급격히 차선을 변경해야 하는 상황을 모사한 국제 표준 시험이다. 따라서 단순한 곡선 주행뿐 아니라, 실제 도로에서 발생할 수 있는 긴급 회피 상황에서도 제안된 속도 프로파일의 적용 가능성을 검증할 수 있다. 이를 통해 자율주행 화물차의 실시간 경로 재계획 및 위험 회피 알고리즘과 결합할 수 있을 것이다. DLC 시험로의 전체적인 형상은 Fig. 3과 같다. 여기에 추가로 속도 프로파일에 의한 감속 구간을 확보하기 위해 DLC 트랙의 시작점 전에 150 m의 직선 구간을 추가하여 TruckSim에 입력하였다. 시뮬레이션 경로는 Fig. 4와 같다. 시작 속도는 4가지 모델 모두

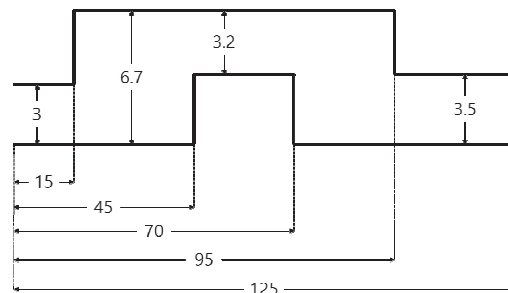


Fig. 3 Double lane change track layout (m)¹⁶⁾

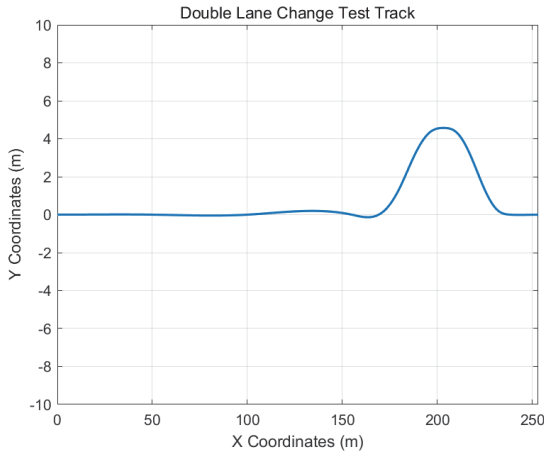


Fig. 4 Double lane change test trajectory

80.5 km/h 로 설정하였고, 속도 프로필에 따라 직선 구간에서 감속 후 DLC 구간을 통과하였다.

4. 연구 결과

4.1 실제 사고 사례 기반 시뮬레이션 결과

Zhang¹¹⁾의 연구에 사용된 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 실제 데이터를 이용해 생성한 트랙 모델에서 본 연구에서 제안한 최적 속도 프로필을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 조건은 속도를 제외하고 동일하게 적용하였다. 시작 속도는 사고 당시와 동일하게 77 km/h로 적용하였다.

Fig. 5는 실제 사고 데이터와 본 연구에서 제안한 속도 프로필을 비교한 결과이다. 그래프의 세로축은 차량 속도를, 가로축은 주행거리를 나타낸다. 원본 속도 데이터의 경우 77 km/h의 속도로 시작하여 서서히 속도를 낮추고, 406 m 지점에서 차량의 전복으로 인해 주행이 종료되었다. 반면 본 연구에서 제안한 모델은 곡선 진입 직전 속도를 더 낮게 제한하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 적용한 안전계수 C 가 곡선 주행 시 허용되는 최대 횡가속도를 조정하여, 실제 차량이 전복 위험에 도달하기 전에 충분한 감속을 유도하기 때문이다. 따라서 Fig. 5는 동일한 수식 적용처럼 보이지만, 제안된 방법이 더 보수적이고 안정적인 속도 계획을 제시함을 보여준다.

실제 사고는 두 번째 곡선 구간 진입 시 속도가 지나치게 높아 횡가속도의 한계를 초과하면서 발생하였다. 이에 따라 약 320 m 지점에서 LTR 지수가 급격히 상승하며 차량이 전복되었다. 반면 본 연구에서 제안한 방법은 곡선 구간 진입 전부터 속도를 횡가속도 한계 이하로 낮추고 유지함으로써 안정적으로 구간을 통과할 수 있었다.

Fig. 6의 LTR 그래프를 자세히 보면, 392 m 지점에서 원

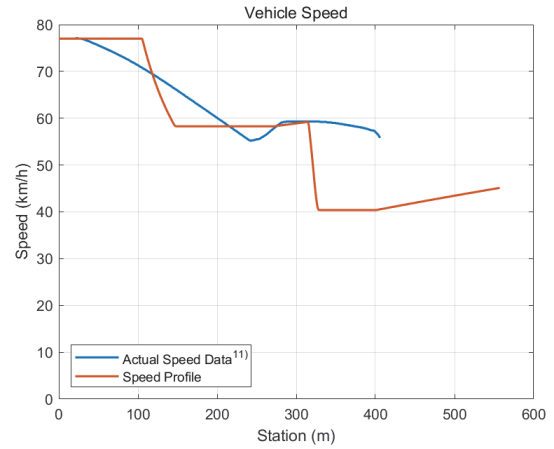


Fig. 5 Vehicle speed accident data vs. proposed profile

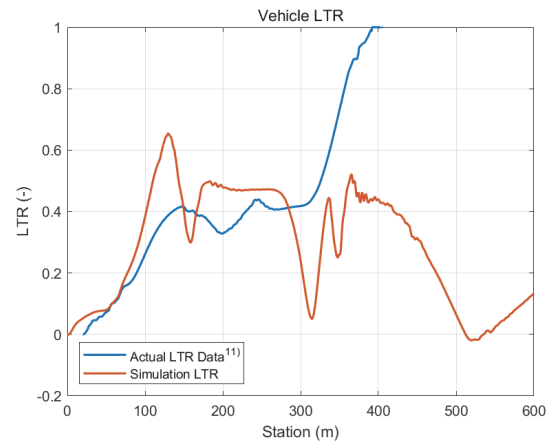


Fig. 6 Lateral load transfer ratio (LTR) comparison

본 데이터의 LTR 지수가 1에 도달하면서 차량이 전복되었다. LTR 지수가 1이 되는 것은 차량의 하중이 한쪽에 집중되는 것으로, 차량의 좌·우측 바퀴 중 어느 한쪽이 지면에 접하지 않고 있는 것이다. 이는 곡선 구간에서 차량의 횡가속도가 전복 임계치를 초과했음을 의미한다. 반면, 본 연구에서 제안한 모델에서는 최대 LTR 지수가 0.7 이하로 유지되는데, 이는 차량의 좌우 타이어 모두가 지면과 접촉을 유지하고 있음을 나타내고, 사고 발생 지점에서의 LTR은 0.436으로 이는 내측 바퀴에 차량 총 중량의 28%에 해당하는 하중이 분배되고 있음을 의미한다.

특히 최대 LTR 지수 0.7은 실제 주행 안정성 확보 측면에서 충분한 여유가 있음을 보여주며, 제안된 방법이 단순히 전복 임계점을 피하는 것을 넘어 추가적인 안전 마진을 제공한다는 점을 의미한다. 따라서 Fig. 6은 본 연구에서 제안한 속도 프로필이 전복 위험을 효과적으로 억제할 수 있음을 정량적으로 뒷받침한다.

4.2 마찰계수에 따른 램프 구간 시뮬레이션 결과

일반적인 도로 환경이 아닌 빗길 및 눈길, 빙판길 등의 기상악화로 인한 마찰력 저하 상황에 대한 주행 안전성 확보를 위해 최적 속도 프로필을 적용하여 마찰계수 0.2, 0.35, 0.6의 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 모든 조건에서 차량은 곡선 구간을 안정적으로 통과하였으며 미끄러짐이나 전복이 발생하지 않았다. 이는 제안된 속도 프로필이 실제 도로의 다양한 마찰 조건에서도 안전하게 작동함을 보여준다.

특히, 낮은 마찰계수(0.2) 조건에서도 차량은 곡선 구간을 이탈하지 않고 주행이 가능하였으며, 높은 마찰계수(0.7) 조건에서는 불필요하게 낮은 속도로 제한되지 않고 효율적인 주행이 가능하였다.

Fig. 7은 도로 마찰계수 조건(0.2, 0.35, 0.6, 0.7)에 따른 속도 프로필을 나타낸다. 마찰계수가 낮을수록 차량이 확보할 수 있는 제동력이 줄어들기 때문에, 곡선 구간 진입 전 감속 구간에서 더 긴 제동 거리가 필요하다. 실제로 마찰계수 0.2의 경우 감속 곡선이 완만하게 이어지며 낮은 속도까지 줄어드는 모습을 보인다. 반면 마찰계수 0.6 이상에서는 감속 패턴이 거의 유사하게 나타나는데, 이는 이 구간에서는 전복 발생 위험이 미끄러짐 사고 발생 위험보다 더 지배적인 요인임을 의미한다. 따라서 Fig. 7은 제안된 알고리즘이 도로 조건의 변화에 따라 유연하게 속도 계획을 조정함을 잘 보여준다.

마찰계수가 가장 낮은 0.2 모델에서 주행 속도가 가장 낮은 모습을 보이며, 감속을 위한 거리는 가장 긴 결과를 보인다. 이는 곡선 구간을 주행하는 과정에서 차량의 횡방향 미끄러짐에 대한 횡가속도 한계가 전복에 대한 횡가속도 한계 보다 낮기 때문이고, 종방향 미끄러짐에 대한 종가속도 한계 또한 낮아 감속 거리 또한 보다 긴 거리가 필요하기 때문이다. 반면 마찰계수 0.35 이상의 모델들에서는 곡선구간 주행 속도가 모두 동일하게 나타나며, 이는 횡방향 미끄러짐에 대한 가속도 한계가 전복에 대한 가속도 한계 보다 높음을 의미한다. 반면 감속 거리는 마찰계수가 0.35인 모델이 다른 두 모델보다 더 길게 나타났으며, 이는 종방향 가속도로 인한 미끄러짐 사고가 발생할 가능성이 있음을 의미한다.

Fig. 8은 주행 중 차량이 원래 주행로에서 횡방향으로 얼마나 이동했는지를 나타낸 그래프이다. 횡방향 이동량은 차량이 미끄러짐으로 인해 차선을 벗어날 가능성을 직접적으로 보여주는 지표다. 네 가지 마찰계수 조건 모두에서 최대 횡방향 이동량은 0.45 m를 넘지 않았으며, 이는 실제 차선 폭(3.5 m) 대비 충분한 여유를 확보한 수치이다. 특히 마찰계수가 0.2인 조건에서도 차량이 차선을 이탈하지 않았다는 점은, 제안된 속도 프로필이 극한

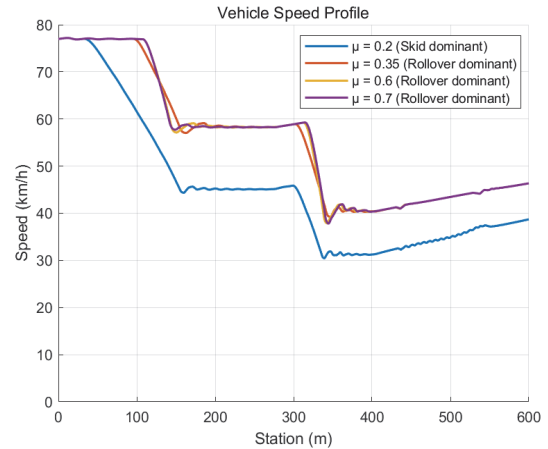


Fig. 7 Speed profiles under road friction coefficients

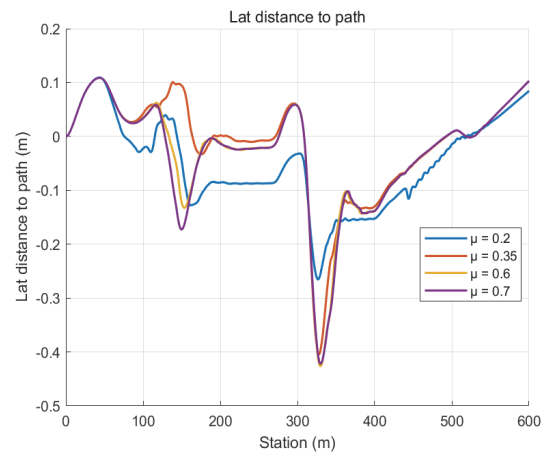


Fig. 8 Lateral displacement of vehicle under different road friction coefficients

조건에서도 차량 제어 가능성을 보장한다는 중요한 결과다. 또한 마찰계수가 0.35인 경우 마찰계수가 높은 두 조건보다 감속 거리가 길어지면서 약간 더 큰 횡이동을 보였는데, 이는 종방향 제동 과정에서 노면 마찰 한계가 더 크게 작용했기 때문이다.

4.3 Double Lane Change 시나리오 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제시하는 방법의 급격한 경로 변경 상황에 대한 유효성을 검증하기 위해 DLC 시뮬레이션을 진행하였다. DLC 시뮬레이션 결과에서도 차량은 최적 속도 프로필을 적용하여 주행이 가능하였으며, 급격한 차선 변경 상황에서도 미끄러짐 및 전복 사고 위험이 발생하지 않았다.

Fig. 9는 ISO-3888-1 DLC 시험 조건을 기반으로 한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 모든 모델이 동일한 초기 속

도에서 출발하지만, 마찰계수 조건에 따라 감속이 시작되는 지점과 감속 속도가 달라지는 양상을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 마찰계수가 0.2인 모델은 약 40 m 지점부터 감속을 시작하여 130 m 이상 긴 제동 구간을 확보해야 한다. 이는 노면 마찰계수에 의해 차량의 증가속도 한계가 낮아진 것으로, 차량이 제어력을 잃지 않기 위해 충분한 거리적 여유가 필요한 것을 의미한다. 반면 마찰계수가 0.35인 모델의 경우 108.4 m 지점에서 감속이 시작되어 64.2 m 가량의 감속 거리로 목표 속도까지 감속할 수 있다. 또한, DLC 시나리오에서 노면 마찰계수가 더 높은 2개 모델과 주행 속도는 유사한 모습을 보이는데, 이는 횡방향 가속도로 인한 미끄러짐 발생 가능성 보다 전복 발생 가능성이 더 높음을 의미한다. 따라서 해당 조건에서는 전복 및 미끄러짐 요소를 모두 고려한 주행 계획이 요구됨을 확인할 수 있다. 반면 마찰계수 0.6 이상에서는 감속 곡선이 비교적 짧고 급격하여, 노면 마찰력이 충분히 확보될 경우 불필요하게 긴 감속 거리를 두지 않고도 안전하게 차선 변경이 가능함을 보여준다. 이는 제안된 속도 프로필이 단순히 보수적으로 감속하는 것이 아니라, 도로 및 차량 조건에 맞춰 효율적인 속도 제어가 가능함을 보여준다.

Fig. 10의 LTR 지수 그래프는 DLC 시나리오에서 전복 안정성을 평가한 결과이다. 네 가지 마찰계수 조건 모두에서 LTR 지수는 1을 넘지 않아 전복은 발생하지 않았다. 4가지 시뮬레이션 모델 전부 미끄러짐 또한 발생하지 않았지만 LTR 지수는 모두 다른 양상을 보인다. 마찰계수가 낮은 0.2 모델의 경우 최대 LTR 지수가 0.296으로 가장 낮게 나타났음에도 불구하고, 실제 주행 안정성은 오히려 가장 취약하다는 것이다. 이는 LTR 지수만으로는 미끄러짐 사고 위험을 평가할 수 없다는 점을 보여준다. 마찰계수 0.35 모델의 경우 그보다 높은 0.562로 동일한 조건 하에 마찰계수 0.2 모델 보다 미끄러짐 사고에서 안전할 수 있지만 Fig. 8에서 마찰계수가 더 높은 두 모델 보다 감속 거리에서 더 긴 여유를 확보하였기에 나타난 결과로 이는 해당 조건에서 종방향 제동력 부족이 미끄러짐 위험 요인으로 작용함을 의미한다. 반대로 마찰계수 0.6 이상에서는 LTR 지수가 상대적으로 높게 나타났지만, 실제 미끄러짐 사고 위험은 거의 없었다. 따라서 Fig. 10은 전복 안정성 지표(LTR)와 미끄러짐 안정성 지표를 동시에 고려해야 한다는 본 연구의 문제의식과 직접적으로 연결된다. 이를 통해 경우에 따라선 주행 시나리오의 수정이 필요함을 판단할 근거가 될 수 있다.

이러한 시뮬레이션 결과를 통해 본 연구에서 제시한 방법으로 DLC 시나리오에서 최적의 주행 속도를 도출

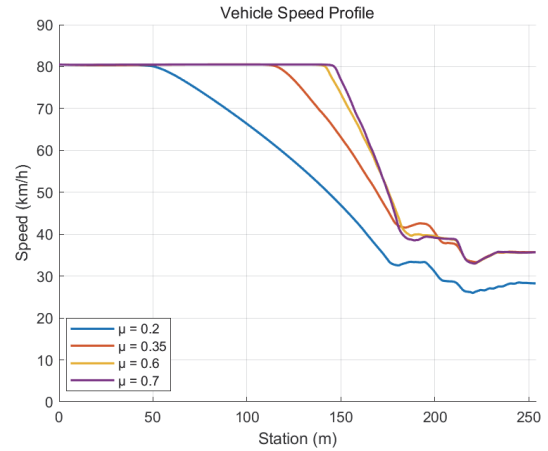


Fig. 9 Vehicle speed response in DLC simulations with varying friction

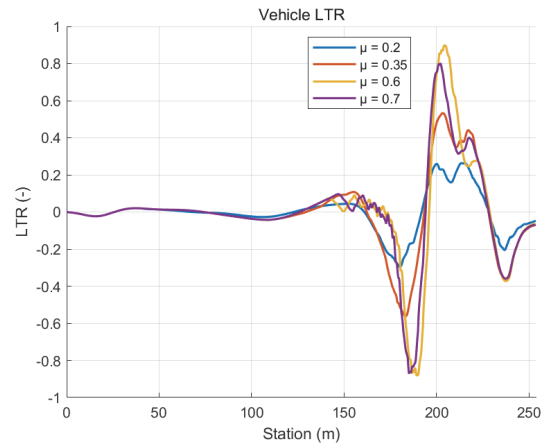


Fig. 10 LTR index in DLC simulations

할 수 있으며, 이를 응용하면 차량이 주행하는 상황의 정보를 토대로 주행 시나리오를 수정할 수 있고, 이는 주행 중의 장애물 회피, 차간 거리 확보를 위한 속도 조절, 군집주행의 후속 차량 유도 등에 적용할 수 있다. 이는 본 연구에서 제시한 방법이 단순한 곡선 주행뿐만 아니라, 자율주행 차량의 다양한 주행 시나리오에 적용될 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 도로 기하정보와 노면 마찰계수를 활용하여 화물차의 전복 및 미끄러짐 사고를 방지할 수 있는 최적 속도 예측 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 다음과 같은 의미를 가진다.

- 1) 기존 연구들은 전복 또는 미끄러짐 중 하나만 평가하여 속도를 제한했지만, 본 연구는 두 사고 메커니즘을

통합 고려하여 하나의 안전 속도 상한을 산출한 점에서 차별성이 있다.

- 2) 실제 사고 데이터¹¹⁾와 국제 표준 시험 규격¹⁵⁾을 기반으로 구현한 TruckSim-MATLAB 연동 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 타당성을 검증하였다.
- 3) 마찰계수 0.2 ~ 0.7 조건에서 모두 안정적인 주행이 가능함을 확인하였으며, 마찰계수와 곡률이 시간적으로 변하는 실도로 환경에서도 적용 가능한 형태로 거리 기반 속도 프로필을 생성할 수 있다는 점에서 자율주행 제어에 연결 가능한 장점이 있다.
- 4) 이를 통해 자율주행 차량은 실시간 도로 상태에 적응해 최적 속도 계획을 수립할 수 있다. 이 과정에서 과속으로 인한 사고를 예방하면서도, 불필요한 저속 주행으로 인한 교통 효율 저하를 최소화할 수 있다.

향후 연구에서는 다양한 화물 적재 조건, 악천후와 같은 비정상 환경(눈, 비, 강풍 등) 및 복합 곡선 도로 조건을 고려한 확장 연구가 필요하다. 또한, 실차 실험을 통해 제안된 알고리즘의 실제 적용 가능성을 검증하는 것이 중요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 “자율주행기술개발혁신사업” 지원으로 수행되었음(과제번호: 21AMDP-C162388-01).

References

- 1) N. Ikhsan, A. Saifizul and R. Ramli, “The Effect of Vehicle and Road Conditions on Rollover of Commercial Heavy Vehicles during Cornering: A Simulation Approach,” *Sustainability*, Vol.13, No.11, Paper No.6337, 2021.
- 2) AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 7th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
- 3) T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, 1992.
- 4) J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 4th Edition, Wiley, 2008.
- 5) R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd Edition, Springer, 2012.
- 6) H. Grip, L. Imsland, T. A. Johansen, T. I. Fossen and J. Kalkkuhl, “Estimation of Road Friction for Vehicle Control Applications,” *European Journal of Control*, Vol.15, No.3–4, pp.341–358, 2009.
- 7) X. Zhang, D. Zhao and J. Wang, “Deep Learning-Based Road Friction Estimation for Autonomous Driving,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.70, No.6, pp.5404–5415, 2021.
- 8) C. Larish, D. Piyabongkarn and V. Tsourapas, “A New Predictive Lateral Load Transfer Ratio for Rollover Prevention Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.62, No.7, pp.2928–2936, 2013.
- 9) B. C. Chen and H. Peng, “Differential-Braking-Based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-Loop Evaluations,” *Vehicle System Dynamics*, Vol.36, No.4-5, pp.359–389, 2001.
- 10) H. Dahmani, M. Chadli, A. Rabhi and A. El Hajjaji, “Vehicle Dynamic Estimation with Road Bank Angle Consideration for Rollover Detection: Theoretical and Experimental Studies,” *Vehicle System Dynamics*, Vol.51, No.12, pp.1853–1871, 2013.
- 11) S. Zhang, X. Yang, Y. Liu, L. Wang, P. Li, H. Li, Y. Luo, Y. Li and Q. Liu, “TruckSim-Based Study of the Rollover Accident Mechanisms of Container Semitrailers on Freeway Interchange Loop Ramps,” *PLoS ONE*, Vol.19, No.9, Paper No.e0309139, 2024.
- 12) N. R. Kapania, J. Subosits, J. Christian Gerdes, “A Sequential Two-Step Algorithm for Fast Generation of Vehicle Racing Trajectories,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.138, No.9, Paper No.091005, 2016.
- 13) J. D. Yang, Y. K. Chen, Q. Shi, Y. M. Li, F. C. Wang and L. Zhu, “Variable Speed Limits on Circular Curved Road Sections under Various Weather Conditions,” *Proceedings of the 15th COTA International Conference of Transportation Professionals*, Beijing, China, pp.3242–3253, 2015.
- 14) A. A. Kordani, O. Rahmani, A. S. A. Nasiri and S. M. Boroomandrad, “Effect of Adverse Weather Conditions on Vehicle Braking Distance of Highways,” *Civil Engineering Journal*, Vol.4, No. 1, pp.46–57, 2018.
- 15) International Organization for Standardization, “ISO 3888-1:2018. Passenger Cars – Test Track for a Severe Lane-Change Manoeuvre – Part 1: Double-Lane Change,” ISO, Geneva, Switzerland, 2018.
- 16) P. Kim, S. Yoo and H. Lee, “A Machine Learning-Based Study for Predicting Rollover Safety of Self-Driving Trucks,” *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.1, pp.9–15, 2025.