



Received: 2025/08/27
Revised: 2025/09/06
Accepted: 2025/09/29
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Jinwon Jeon
Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1
20, Daewangpangyo-ro 851beon-gil, Sujeong-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13449, Republic of Korea
E-mail: jinwon.jeon@lignex1.com

육로 수송 안정성 확보를 위한 차량 전복 위험성 분석 방법론 연구

A Study on Rollover Risk Analysis Methodology for Ensuring Road Transport Safety of Military Vehicles

전진원^{1*}, 김만수², 남궁영수³, 김진홍¹, 경수민³

¹LIG넥스원 미래전쟁IPS연구소 선임연구원

²LIG넥스원 미래전쟁IPS연구소 수석연구원

³LIG넥스원 미래전쟁IPS연구소 연구원

**Jinwon Jeon^{1*}, Mansoo Kim², Youngsoo Namgoong³, Jinhong Kim¹,
Sumin Kyung³**

¹Research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1

²Chief research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1

³Research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1

Abstract

차량을 이용한 무기체계 육로 수송 중 발생하는 전복 사고는 임무 수행에 심각한 차질을 초래하며, 인명 및 장비 손실을 초래할 수 있다. 본 연구는 차량 속도, 무게중심, 도로 경사, 적재량 등의 주요 원인 변수를 식별하여 전복 위험성을 평가하기 위한 체계적인 방법론을 제안한다. 시뮬레이션 기법을 활용한 안정성 평가방법을 구축하였으며, 시나리오 기반 실험을 통해 그 효과를 검증하였다. 제안된 방법론은 군용차량 수송 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Rollover accidents that occur during the land transport of weapon systems using military vehicles can cause significant disruption to mission execution and result in the loss of personnel and equipment. This study proposes a systematic methodology for assessing rollover risk by identifying key causal factors such as vehicle speed, center of gravity, road slope, and payload. A stability assessment method was developed using simulation techniques, and its effectiveness was validated through scenario-based experiments. The proposed methodology is expected to contribute to improving the safety of military vehicle transport operations.

Keywords

군용 차량(Military Vehicle),
수송 안전성(Transport Safety),
전복위험성(Rollover Risk),
횡하중전이비(Lateral Load Transfer Ratio),
시뮬레이션 기반 평가(Simulation-based Evaluation)

Acknowledgement

이 논문은 2025년도 한국해군과학기술학회
하계학술대회 발표 논문임.

본 연구는 한국자동차연구원 플랫폼안전기술부문과
협업으로 수행된 연구결과임.

1. 서론

차량을 이용한 무기체계의 육로 수송 과정에서 발생하는 전복 사고는 단순한 안전사고에 그치지 않고, 인명 피해와 고가 장비의 손실로 이어질 뿐만 아니라 작전의 효율성과 전투력 유지에도 심각하고 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라, 육로 수송의 안전성과 신뢰성 확보가 과거 어느 때보다 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 상황에서 차량 수송 과정의 위험 요인을 명확히 분석하고, 이를 정량적으로 관리할 수 있는 기술적 접근법의 필요성이 점차 커지고 있다.

이러한 전복 사고는 일반적으로 단일 원인보다는 차량의 속도, 무게중심(center of gravity, CG), 도로 경사각, 적재량 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 발생한다. 특히, 군용 차량은 일반 상용차에 비해 적재 특성이 다양하고, 작전 환경이 비정형적이며 가혹한 조건에 자주 노출되므로, 사고의 발생 가능성과 위험 수준이 상대적으로 높다. 그럼에도 기존의 경험적 기준이나 단순한 정적 평가 방법은 다변량 환경에서의 상호작용 효과를 충분히 반영

하지 못해 정확한 위험 분석에 본질적인 한계를 드러낸다. 이러한 이유로 정밀하고 신뢰성 높은 분석 도구의 도입과 운용이 시급히 요구된다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 차량 속도, 무게중심, 도로 경사 등 전복과 밀접하게 관련된 주요 요인을 반영한 시나리오를 체계적으로 수립하고, 상용차량 동역학 시뮬레이션 프로그램인 TruckSim v2016.1[1]을 활용하여 정적(static) 및 동적(dynamic) 전복안정성 테스트를 수행하는 방법론을 제시한다. 이 과정에서 시뮬레이션 기반 분석의 강점을 최대한 활용하여, 다양한 도로 조건과 적재 형태에 따른 전복안정성 지표를 정량적으로 산출하고 비교·분석하였다.

이와 같은 분석 방법론은 군용차량 수송계획 수립 단계에서 전복 위험성을 사전에 예측하고 관리할 수 있는 체계적 도구로 제안될 수 있으며, 나아가 실제 작전 수행 시 발생할 수 있는 리스크를 최소화하고 군수 지원 체계의 효율성 및 안전성을 향상시키는 데 기여할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안하는 접근법은 향후 모델링 및 시뮬레이션(modeling and simulation, M&S) 기법을 활용한 군수 분야의 안전성 평가 연구로 확장 가능성이 커 보다 정밀한 수송 안정성 평가 체계 구축으로 발전할 수 있다.

2. 평가기준

본 연구에서는 LTR(lateral transfer ratio)를 기준으로 차량의 전복안정성을 평가한다. LTR은 차량의 좌우측 수직하중 분배 비율을 의미하며, -1과 +1 사이의 값을 갖는다. 물리적으로는 LTR이 -1 또는 +1인 경우를 전복으로 정의한다. 다만 본 연구에서는 물리적 전복 이전의 전복안정성을 평가하기 위하여 선행 연구[2]를 참고하여 critical LTR은 20 % 마진을 취한 0.8로 정의하여 전복안정성의 기준으로 삼는다. LTR은 식 (1) - 식 (3)과 같이 산출한다.

$$LTR = \frac{F_{z,R} - F_{z,L}}{F_{z,R} + F_{z,L}} \quad (1)$$

$$F_{z,R} = \sum_{i=1}^n F_{z,Ri} \quad (2)$$

$$F_{z,L} = \sum_{i=1}^n F_{z,Li} \quad (3)$$

여기서, $F_{z,R}$: 우측 i 번째 축에 작용하는 수직방향 힘,
 $F_{z,L}$: 좌측 i 번째 축에 작용하는 수직방향 힘.

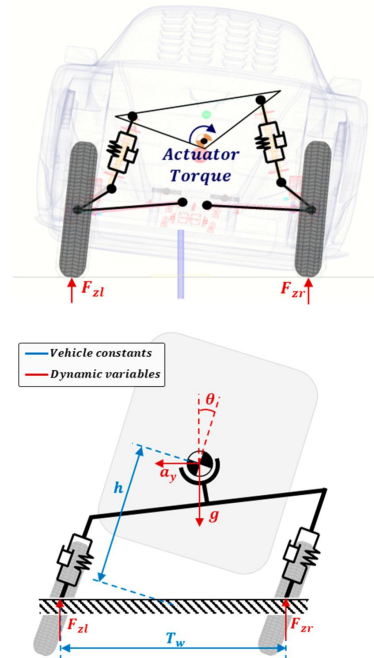


Fig. 1. Normal force during vehicle tilting[3]

2. M&S 방법론 개요

M&S 방법론은 Fig. 2의 흐름도를 따라 진행된다.

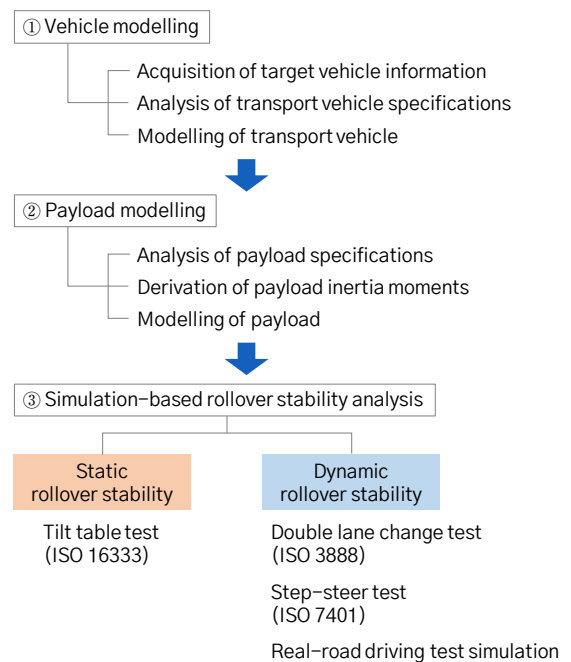


Fig. 2. Overview of the M&S methodology

3. 모델링

3.1 차량 모델링

본 연구에서는 군용 차량의 전복안정성을 분석하기 위해 상용 차량 동역학 시뮬레이션 소프트웨어인 TruckSim v2016.1을 활용하여 대상 차량의 정밀 동역학 모델을 구축하였다. 모델링 과정에서는 실제 차량의 기하학적·물리적 특성과 동역학적 응답 특성을 최대한 정확히 반영하기 위해 차량 구조, 질량 특성, 서스펜션 및 타이어 등의 정보를 확보하고, 파라미터를 기반으로 한 모델링 절차를 수행하였다.

Fig. 3와 같이 전폭, 전고, 전장, 축간 거리 등의 기본 제원을 입력하여 차량의 차체를 모델링하였다. 또한, Fig. 4와 같이 조향축(현가 하 질량 모델링), 조향비 등의 파라미터를 입력하여 차량의 서스펜션 특성을 모델링하였다.

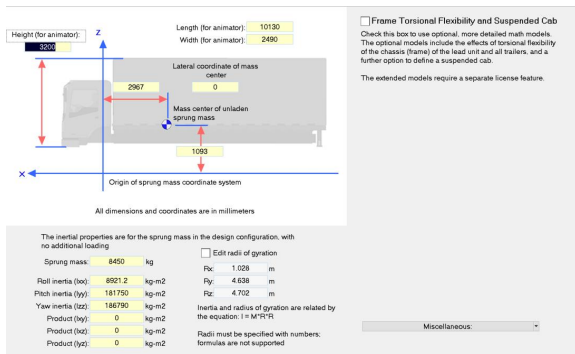


Fig. 3. Vehicle body modeling interface

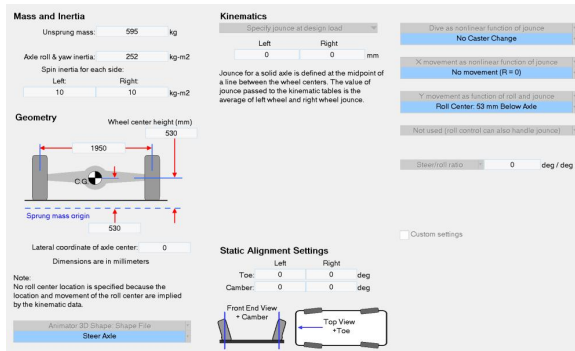


Fig. 4. Vehicle steering axis modeling interface

3.2 적재물 모델링

본 연구에서는 직육면체 형상의 강체를 적재물로

가정하여 적재물 수량에 따른 전복안정성 변화를 분석하였다. 적재물의 물리적 특성과 동역학적 특성을 정밀하게 반영하기 위하여, Fig. 5와 같이 적재물의 제원 분석과 관성모멘트 도출을 기반으로 한 적재물 모델링을 수행하였다. 이를 통해 시뮬레이션 환경에서 다양한 적재 조건을 고려할 수 있는 정량적 파라미터 세트를 구축하였다.

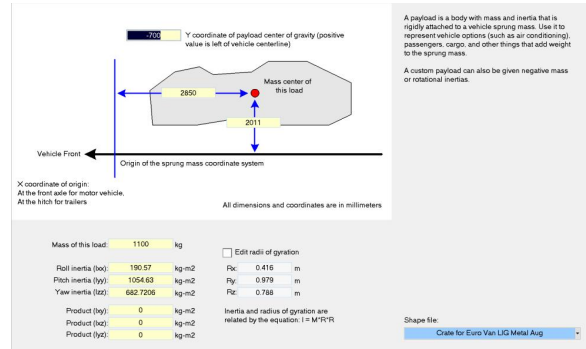


Fig. 5. Payload inertia analysis interface

4. 정적 전복안정성 분석

4.1 Tilt table test

정적 전복안정성 시뮬레이션은 차량이 정지된 상태에서의 전복안정성을 분석하기 위한 시뮬레이션이다. 이는 transient, vibration의 동역학적 영향을 배제하여 차량의 구조가 전복안전성에 미치는 영향을 분석한다. ISO 16333에 따라 Fig. 6와 같이 차량을 정지된 면(tilt table)에 위치시키고 차량이 준정상상태(quasi-steady state)를 유지할 수 있도록 충분히 천천히 기울여 LTR이 0.8에 도달하는 순간의 각도를 측정한다. Fig. 7은 해당 시험의 결과로, 동일 차량에 대한 적재량 별 정적 전복 한계점을 확인할 수 있다.

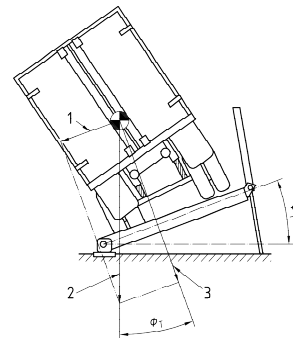


Fig. 6. Schematic diagram of tilt table test(ISO 16333)[4]

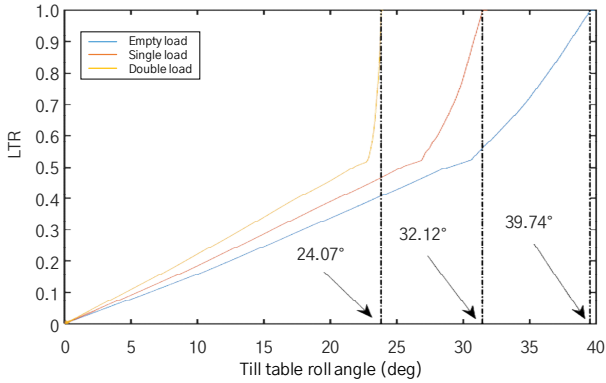
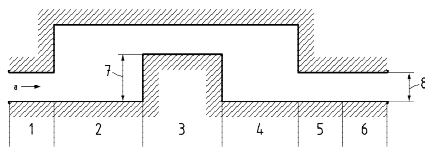


Fig. 7. LTR curves by payload

5. 동적 전복안정성 분석

5.1 Double lane change test

Double lane change test는 ISO 3888[5]에 규정된 시험 규격으로 전방 장애물 회피 등의 사유로 급격한 차선 변경 환경을 가정하여 차량의 전복안정성을 분석한다. Fig. 8과 같은 경로를 설계하고 차량의 주행 조건에 맞는 속도로 경로에 진입하도록 한다.



*1: Section 1, 2: Section 2, 3: Section 3, 4: Section 4, 5: Section 5, 6: Section 6, 7: lane offset, 8: width, a: driving direction

Fig. 8. Double lane change track (ISO 3888) [5]

해당 경로를 주행하는 동안의 LTR을 측정된 결과는 Fig. 9과 같다. 주행 간 LTR 선도를 critical LTR인 0.8과 비교하여 주행 속도별 double lane change 주행 전복안정성을 확인할 수 있다.

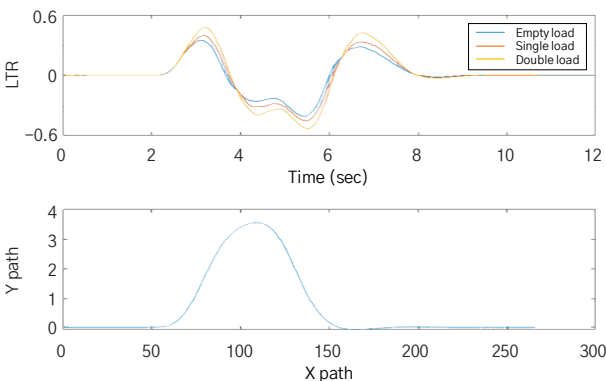


Fig. 9. Double lane change LTR curves

5.2 Step-steer test

Step-steer test는 ISO 7401[6]에서 규정된 시험 규격으로 운전자가 가능한 최대 속도의 조향 상황에서서의 전복안정성을 분석한다. Fig. 10과 같이 차량이 주행 중에 최대 조향 각속도로 운전대를 조향하며 LTR이 0.8에 도달하는 조향각을 측정한다.

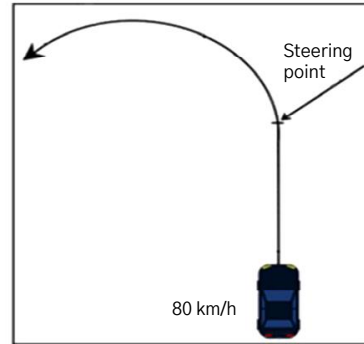


Fig. 10. Step-steer test driving scenario(ISO 74016) [6]

이때 차량 속도를 변경하며 주행 속도별 전복 한계 조향각을 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. Step-steer test를 통해 주행 속도별 최대 허용 조향각을 확인할 수 있다.

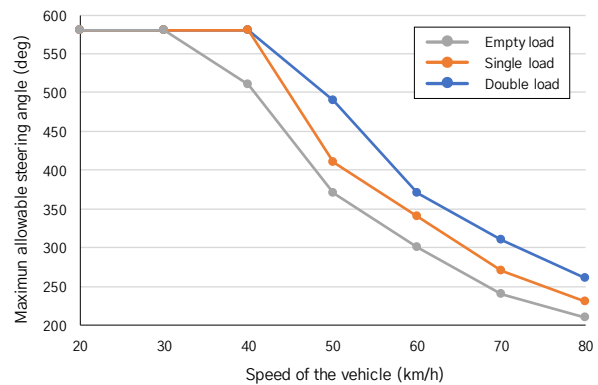


Fig. 11. Rollover threshold graph of the step-steer test

5.3 실도로 모사 test

실도로 모사 test는 수송차량의 보편적인 경로인 고속도로와 일반도로에서의 전복안정성을 확인한다. 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 제19조와 제20조를 바탕으로 도로의 설계속도별 최소 평면곡선 반지름과 적용 최대 편경사를 고려하여 도로를 모델링한다. 본 시험에서는 도로 설계속도에 10 km/h의 마진

을 더한 속도로 주행하며 LTR을 측정한다. 이때 각 조건별 LTR을 critical LTR인 0.8과 비교하여 대한민국의 도로에서의 전복안정성을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 군용차량의 육로 수송 과정에서 발생할 수 있는 전복 위험을 정량적으로 평가하기 위한 체계적이고 재현 가능한 분석 방법론을 제안하였다. 이를 위해 1종의 정적 전복안정성 시험과 3종의 동적 전복안정성 시험을 설계하였으며, 상용 시뮬레이션 도구를 활용하여 다양한 운용 조건을 반영한 시나리오 기반 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 이러한 접근을 통해 차량 속도, 무게중심, 도로 경사, 하중 배치와 같은 주요 변수의 변화에 따른 전복 가능성을 정량적 지표로 산출하고, 조건별 안정성을 비교·평가할 수 있는 구조화된 분석 체계를 구축하였다.

제안된 방법론은 경험적 지식이나 단편적인 안전 기준에 의존하던 기존 전복 위험 평가 방식과 차별화된다. 다양한 운용 조건을 수치적으로 재현할 수 있는 일관된 분석 프레임워크를 제공함으로써, 차량 수송 계획 수립 및 운용 기준 설정 과정의 객관성과 신뢰성을 확보할 수 있는 기반을 마련했다는 점에서 그 의의가 크다. 특히, 실차 실험 수행이 제한되거나 비용·시간 측면에서 비효율적인 군 작전 환경의 특수성을 고려할 때, 본 연구에서 제시한 시뮬레이션 기반 평가 접근법은 실무적 활용성이 높다.

향후 연구에서는 제안된 분석 방법론을 실제 운용 데이터와 연계하여 예측 모델의 정확도를 고도화하고, 실차 시험을 통한 모델 검증 및 보정을 수행할 필요가 있다. 아울러, 다양한 노면 조건, 환경 요인, 운전 행태 등 비정형적 운용 변수를 반영한 확장 연구를 통해 보다 정밀하고 실시간 대응이 가능한 전복안정성 평가 체계로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 후속 연구는 군수 수송 계획의 효율성과 안전성을 동시에 향상시키는 데 기여할 것이며, 나아가 전장 환경에서의 전투력 유지와 작전 지속성 확보에도 실질적인 파급 효과를 제공할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] TruckSim v2016.1 한국총판 (주)신호시스템, https://www.ishinho.com/?page_id=2000
- [2] Xiaotong Dong, Yi Jiang, Zhou Zhong, Wei Zeng, "Rollover Threshold Investigation of a Heavy-duty Vehicle During Cornering Based on Multi-body Dynamics," Sage, Journals Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 7, pp. 1-13, 2018.
- [3] Lee, S., Cho, H., Nam, K. "Dynamic Modeling and Control of a 4-Wheel Narrow Tilting Vehicle," Actuators, 2024, Vol. 13, No. 6, 210. DOI: 10.3390/act13060210
- [4] ISO 16333: 2011, Heavy Commercial Vehicles and Buses — Steady-state Rollover Threshold — Tilt-table Test Method.
- [5] ISO 3888-1: 2018, Passenger Cars — Test Track for a Severe Lane-change Manoeuvre Part 1: Double Lane-change.
- [6] ISO 7401: 2011, Road Vehicles — Lateral Transient Response Test Methods — Open-loop Test Methods.