

시뮬레이션을 이용한 고속도로 진출입로에서 차량속도와 곡선반경에 따른 상용차량 전복 연구

박중영* · 이흥국* · 장경진* · 서이정* · 유송민*

A Simulation Study of Commercial Vehicle Rollover in Highway Ramp Section According to Vehicle Speed and Curvature

Joongyoung Park*, Hongguk Lee*, Kyungjin Chang*, Leejung Suh*, Songmin Yoo*

Key Words : Highway(고속도로), Interchange(인터체인지), Junction(분기점), Rollover(전복), Ramp Section(램프 구간), Commercial Vehicle(상용차)

ABSTRACT

Rollover accidents are a common occurrence on the highway ramp section. At highway ramp section, unexpected situations might occur due to demand on complex steering control unlike routine driving maneuver in the main streamline. Commercial vehicles have higher risk of rollover due to their high center of gravity. In this study, the lateral acceleration causing rollover would be found. In addition, sections would be classified as dangerous and safe ones by confirming the maximum lateral acceleration for various speed and curvature.

1. 서론

도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙에 따르면, 출입을 완전히 제한하는 자동차 전용도로와 타 도로와의 교차는 모두 입체 형태를 취하도록 규정되어있다.⁽¹⁾ 이로 인해 일반도로-고속도로간 또는 고속도로-고속도로간 교차에는 연결로(Ramp) 형식의 도로가 사용된다. 이러한 램프구간은 본선에 비해 곡률과 경사도가 크기 때문에 차량이 높은 횡가속도를 받게 되어 사고의 위험이 높다. 특히, 상용차량의 경우 승용차량에 비해 무게중심이 높기 때문에 전복사고의 위험이 크다.

특히 고속도로 연결로는 고속도로 본선 구간에서 고속주행의 단순한 주행 형태에 적용되어있던 운전자

들이 고속도로를 진출하는 과정에서 본선 구간에서 보다 더 복잡한 행동을 요구받게 됨으로써 사고를 일으킬 확률이 높아지는 구간이다.⁽²⁾

2013년 고속도로 교통사고 통계에 따르면 총 3,231건의 사고가 고속도로에서 발생했으며, 그 중 고속도로 유입/유출로에서 발생한 사고는 157건으로 전체 4.9%의 비율을 차지하여 고속도로 주행차로에서 발생한 사고 건수에 이어 두 번째로 많은 사고건수를 차지한다.⁽³⁾

따라서 본 연구에서는, 상용 차량의 전복 사고에 초점을 두어 램프 구간 중 가장 곡률이 큰 루프(Loop) 연결로를 모델링하여 시뮬레이션을 통해 전복 시점을 파악하고자 한다.

* Kyung Hee University
E-mail : joongyeng@khu.ac.kr

Table 1 Type of ramp section

Type	Trumpet	Semi_Direct, Diamond, etc.
Place (%)	296 (67.6 %)	142 (32.4 %)

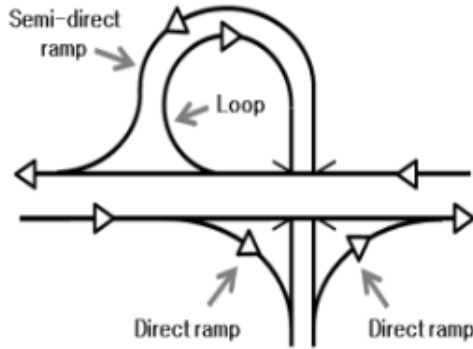


Fig. 1 Basic structure of trumpet ramp

2. 램프구간 모델링

국내 고속도로 램프구간을 형태별로 구분한 결과, Table 1에 나타난 것과 같이 트럼펫 형이 296개소로 총 67.6%의 비율로 가장 널리 쓰이고 있다.⁽⁴⁾

트럼펫 형은 Fig. 1과 같이 일반적으로 2개의 직결 연결로, 1개의 준 직결 연결로, 1개의 루프 연결로로 구성되어 있다. 이 중 본선에 비해 선형이 가장 급격히 변화하는 구간은 루프 연결로이다. 본선에서 진출하는 연결로가 루프로 구성되어 있는 경우, 높은 주행 속도에서 급격한 선형 변화로 인해 사고 위험이 가장 크다.

기본적인 단원(Single circular curve) 루프 연결로는 Fig. 2에 나타난 것처럼 완화 곡선구간, 원곡선의 조합으로 이루어진다. 완화곡선으로는 주로 클로소이드 곡선을 사용한다. Table 2는 루프 연결로에 대한 평면선형 설계규정을 나타낸다.

램프는 고속도로 본선에서 빠져나가는 유출연결로와 고속도로로 진입하는 유입연결로로 나뉜다. 진출입로의 교통사고 심각도 예측연구에 따르면 유출연결로와 유입연결로는 위험도의 차이가 발생한다. 유출연결로는 감속차로의 구간거리가, 유입연결로의 경우 중단 경사가 유효한 위험도를 보인다.⁽⁵⁾

Table 2 Horizontal alignment of loop roadway

Elements	Unit	Value
Design speed	km/h	40
Minimum radius of curve	m	50
Maximum bank	%	8
Minimum length of transition curve	m	25

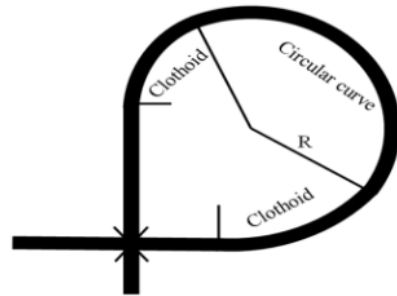


Fig. 2 Basic structure of loop roadway

본 연구에서는 위에서 살펴본 평면선형 설계규정을 토대로 주행 시뮬레이션을 위한 도로 모델을 작성하였다. 도로 모델 작성을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 루프 연결로를 통과하여 연결되는 도로는 본선과 수직이다.
- 2) 루프 연결로는 하나의 원곡선과 두 개의 동일한 완화구간으로 구성된다.

3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 상용차량 동역학 시뮬레이터인 Truck Sim(Mechanical Simulation Corporation, USA)을 사용하였다. 시뮬레이션은 Fig. 3 과 같이 평면선형과 중단선형을 작성하여 작성하였다.

상용차량 모델은 Table 3과 같은 40인승 버스를 이용하였다. 시뮬레이션에 사용한 도로 모델의 제원은 Table 4와 같다. 곡선반경 증가에 따라 완화구간의 길이 또한 비례하여 증가하도록 클로소이드 파라미터를 설정하였다. 경사도는 진입-진출 도로 간 높이차가 10m가 되도록 설정하였으며, 경사가 존재하는 구간은 곡선주행구간으로 하였다.

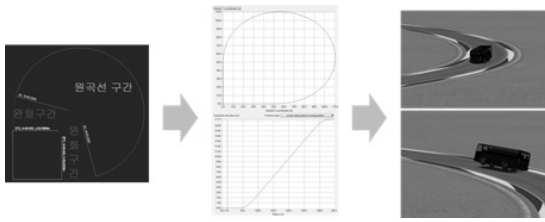


Fig. 3 Simulation design

Table 3 Specification of vehicle model


40man Tour Bus (2 axle)	
Overall length	4490 mm
Overall width	2348 mm
Overall height	2920 mm
Wheel base	3140 mm
Weight	6360 kg
	

Table 4 Specification of Roadway modeling

Elements	Value		
	50m	75m	100m
Radius	50m	75m	100m
Clothoid Parameter	40	45	50
Percent of Slope	3.74%	2.63%	2.02%
Friction Coefficient	0.85		

루프 연결로에서의 주행속도는 운전자가 충분한 감속을 하지 못했다는 가정 하에 도로 설계속도에서 속도를 점차적으로 늘려가며 전복시기를 확인하였다.

일반적인 전복 평가에서 횡가속도 0~0.4g의 경우를 안정적인 상태로 판단하고, 이후를 위험 구간으로 판단한다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 주행속도별 최대 횡가속도를 통해 안전 구간, 위험구간을 판별하고 전복 발생 시의 횡가속도까지 파악하였다.

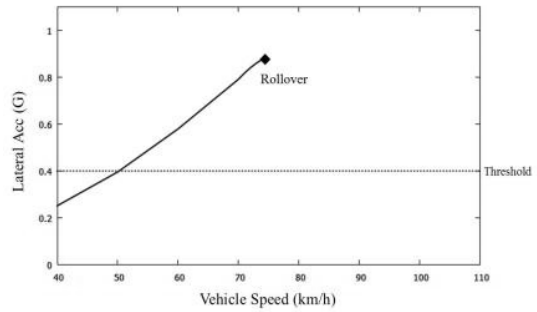


Fig. 4 Maximum Lateral Acc vs Speed (R50, Uphill)

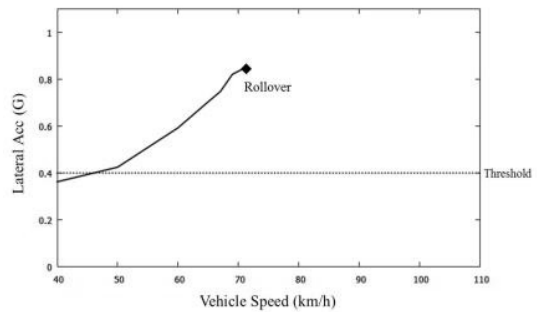


Fig. 5 Maximum Lateral Acc vs Speed (R50, Downhill)

3.1. 곡선반경 50m

Fig. 4과 Fig. 5는 곡선반경이 50m 인 램프 구간의 주행속도별 최대 횡가속도를 나타낸 것이다.

Fig. 4은 오르막 램프로, 74km/h부터 0.877G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 52km/h 부근에서 0.4G를 초과하기 시작한다.

Fig. 5는 내리막 램프로, 71km/h부터 0.847G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 46km/h 부근에서 0.4G를 초과하기 시작한다.

내리막 램프에서는 오르막에 비해 저속에서 횡가속도가 상대적으로 크게 발생한다. 그러나 전복이 발생하는 속도와 횡가속도 값은 큰 차이를 보이지 않는다.

3.2. 곡선반경 75m

Fig. 6와 Fig. 7는 곡선반경이 75m 인 램프 구간의 주행속도별 최대 횡가속도를 나타낸 것이다.

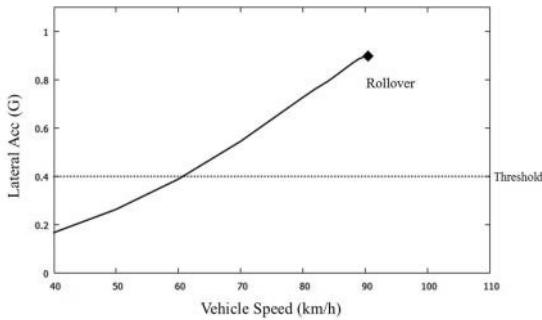


Fig. 6 Maximum Lateral Acc vs Speed (R75, Uphill)

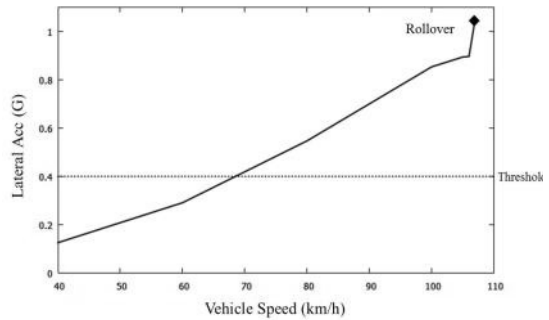


Fig. 8 Maximum Lateral Acc vs Speed (R100, Uphill)

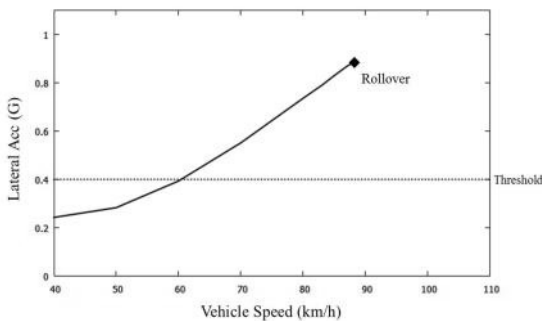


Fig. 7 Maximum Lateral Acc vs Speed (R75, Downhill)

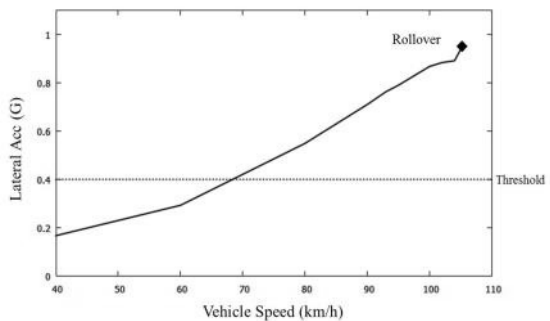


Fig. 9 Maximum Lateral Acc vs Speed (R100, Downhill)

Fig. 6는 오르막 램프로, 90km/h부터 0.897G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 62km/h 부근에서 0.4G를 초과하기 시작한다.

Fig. 7은 내리막 램프로, 88km/h부터 0.847G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 61km/h 부근에서 0.4G를 초과하기 시작한다.

곡선반경이 증가함에 따라 전복 발생 속도와 위험 구간 진입속도가 증가하였다. 내리막과 오르막은 큰 차이를 보이지 않는다.

3.3. 곡선반경 100m

Fig. 8과 Fig. 9은 곡선반경이 100m 인 램프 구간의 주행속도별 최대 횡가속도를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 오르막 램프로, 107km/h부터 1.05G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 68km/h 부근에서 0.4G를 초과하기 시작한다.

Fig. 9은 내리막 램프로, 105km/h부터 0.939G의 횡가속도를 받으면서 전복이 발생하였다. 68km/h 부근에서

서 0.4G를 초과하기 시작한다.

곡선반경이 75m인 경우와 유사한 값을 나타내다, 전복이 발생하기 전 고속구간에서 급격한 횡가속도의 증가를 보인다. 이 구간에서는 전복이 일어나지는 않지만 주행 차선을 벗어나는 움직임이 크게 나타난다.

4. 결론

램프 구간에서 차량은 곡률반경과 주행속도의 크기에 따라 횡가속도를 받게 되어 전복 사고의 위험이 커지게 된다. 각 인자별로 횡가속도의 변화 추이를 통해 전복의 위험구간을 나누어 살펴보았다.

- 1) 진입속도와 횡가속도는 선형적으로 비례한 관계를 보였으며, 위험구간의 크기는 곡선반경 50m의 경우 도로 설계속도인 40km/h와 큰 차이가 나지 않았지만, 곡선반경 75m와 100m의 경우 상대적으로 많은 차이가 있었다.
- 2) 곡선반경과 전복이 일어나는 속도와 상관없이, 전복이 일어나게 되는 횡가속도 값은 비슷하였다. 그러나 곡선반경 100m에서는 고속구간에서

주행안전성이 크게 떨어져 차선을 이탈하고, 상대적으로 높은 횡가속도에서 전복이 발생하였다.

향후 대형 트럭, 트레일러 등 다양한 차종과 편경사, 도로 곡률 등 기존 실험외에 추가적인 도로 설계 인자를 통해 다양한 주행 환경 하에서 보다 자세한 결과를 도출하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(14PTSI-C054118-06)으로 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) 대한토목학회, 2009, “도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙 해설”
- (2) 하태준, 박찬모, 오재철, 2002, “고속도로 진출램프 부근의 교통사고예측모형 개발에 관한 연구,” 대한토목학회 학술발표회, pp. 1054~1057
- (3) 도로교통공단, 2014 “교통사고 통계분석.”
- (4) 한국도로공사, 2014, 정보공개청구자료, 2014-348.
- (5) 윤일수, 박성호, 윤정은, 최진형, 한음, 2012, “유·입·유출특성을 고려한 고속도로 연결로의 교통사고 심각도 예측모형,” 한국도로학회논문집 제14권 제5호, pp. 101~111.