

다물체 차량동역학 기반 롤 안전성 해석 및 설계변수 영향도 분석에 관한 연구

권성진

한국자동차연구원 차량안전연구센터

A Study on the Roll Safety Performance Analysis by Using Multi-body Vehicle Dynamics and Effect Analysis of Design Variables

Seong-Jin Kwon

Vehicle Safety R&D Center, Korea Automotive Technology Institute

요약 차량의 전복 사고는 다른 교통사고에 비해 승객에 대한 상해율이 높기 때문에 차량의 전복을 미연에 방지하거나, 전복 발생 시에 승객의 상해를 최소화하는 기술이 주요 관심사로 부각되고 있다. 차량 전복은 차량이 진행방향 축을 중심으로 90° 이상 회전하여 자세를 잃는 현상이다. 최근 차량의 전복을 방지하기 위하여 차량 롤 안전성(roll safety performance) 향상을 위한 다양한 차량 관점과 타이어 관점의 연구가 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 차량 부품 특성 시험을 통한 다물체 차량동역학 모델(multi-body vehicle dynamic model)을 구성하였다. 이를 바탕으로 차량과 타이어 특성인자들에 따른 차량 롤 안전성 해석을 수행하여, 최대 롤각(roll angle), 최대 롤율(roll rate), 타이어 휠 중심(wheel center)의 변화량을 분석하였다. 이를 통하여 차량의 롤율에 가장 큰 영향을 미치는 스테빌라이저 바 강성, 조향 기어비, 타이어 횡방향 마찰계수를 주요 설계변수(design variables)로 도출하여, 각각의 영향도 분석(effect analysis)을 수행하였다.

Abstract Since vehicle rollover accidents have a higher rate of injury to passengers than other traffic accidents, research to prevent the overturning of vehicles or minimize injury to passengers in cases of rollover is emerging as a major concern. Vehicle rollover is a phenomenon in which a vehicle rotates more than 90° around the axis in the traveling direction and loses its posture. Recently, in order to prevent the overturning of a vehicle, diverse research has been conducted from various vehicle perspectives and tire perspectives to improve roll safety performance. In this study, a multi-body vehicle dynamic model was constructed through vehicle component characteristic tests. Also, a vehicle roll safety performance analysis was performed according to vehicle and tire factors to analyze the maximum roll angle, maximum roll rate, and change of the tire-wheel center. Through this analysis, the stabilizer bar stiffness, steering gear ratio, and tire lateral friction coefficient, which have the greatest effect on the roll rate of the vehicle, were derived as the main design variables, and an effect analysis was performed.

Keywords : Roll, Safety Performance, Multi-body Vehicle Dynamics, Design Variables, Effect Analysis

본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 미래차 디지털 융합산업 실증 플랫폼 구축 과제(P0018599)의 지원을 받아 수행되었음

*Corresponding Author : Seong-Jin Kwon(Korea Automotive Technology Institute)

email: sjkwon@katech.re.kr

Received August 1, 2022

Accepted September 2, 2022

Revised September 1, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

최근 무게중심(center of gravity)과 롤 중심(roll center)이 상대적으로 높은 SUV(Sports Utility Vehicle) 차량의 판매가 증가함에 따라 차량 전복(rollover)에 의한 교통사고도 증가하고 있다. 차량 전복은 차량이 진행방향 축을 중심으로 90° 이상 회전하여 자세를 잃는 현상이다. 전복 사고의 발생 원인으로는 선회구간에서의 고속 주행, 노면의 마찰력 감소로 인한 차량 제어 능력의 상실, 운전자의 급격한 조향 입력, 절벽과 같은 지형지물에 의한 사고 등이 있다[1-4].

이에 따라 차량의 롤 안전성 향상을 위한 다양한 측면에서의 연구들이 수행되고 있다. Kazemi 와 Soltani[5]는 차량의 스프링상 질량(sprung mass), 현가계(suspension), 휠(wheels) 및 조향계(steering)를 포함하는 총 16자유도(degrees of freedom)의 차량 모델을 이용하여 무게중심과 롤 축(roll axis)과의 상관관계 및 하중의 분배에 따른 롤 안전성을 분석하였다.

Ghazali 등[6]은 전복 방지와 궤적 추적 간의 영향도를 조사하고, 전복을 방지하고 예측하기 위한 MPC(Model Predictive Control) 알고리즘을 제안하였다. Hac 등[7]은 선회 중 무게중심의 이동과 현가계 구조에 따른 롤 경향성을 분석하였고, 모델 기반의 롤각 평가 알고리즘을 이용하여 전복 지수(rollover index)를 제안하였다. Eger 등의 연구[8]에서는 차량을 스프링상 질량과 스프링하 질량(unsprung mass)의 두 개의 서브시스템으로 구축하고 이를 스프링(spring)과 댐퍼(damper), 회전 조인트(rotational joint)로 구축하여 롤 안전성 특성 해석을 수행하였다.

타이어와 관련한 차량의 롤 안전성 향상 기술은 TPMS(Tire Pressure Monitoring System)와 같은 시스템이 개발되어 적용되고 있지만, 타이어 자체의 성능 관점에서 롤 안전성을 평가하고 저감하기 위한 기술은 미진한 실정이다. 타이어는 차량의 구동력, 제동력, 구심력을 발생시켜 차량의 운동을 가능하게 하는 가장 중요한 자동차 부품이다[9]. 최근 타이어 성능에 대한 소비자의 관심 증대와 더불어 차량의 주행 동특성 및 롤 안전성 향상 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 차량과 타이어를 연계한 차량 롤 안전성 해석을 위하여 차량 부품 특성 시험을 통한 다물체 차량동역학 모델을 구성하였다. 이를 바탕으로 차량과 타이어 특성인자들에 따른 차량 롤 안전성 해석을 수행하여, 최대 물각, 최대 물울, 타이어 휠 중심의 변화량

을 분석하고자 하였다. 이를 통하여 차량 및 타이어 주요 설계변수를 도출하고, 각각의 영향도 분석을 수행하여 최종적으로 차량과 타이어의 복합 설계변수 영향도 분석을 수행하여 차량의 롤 안전성 향상 연구를 수행하고자 하였다.

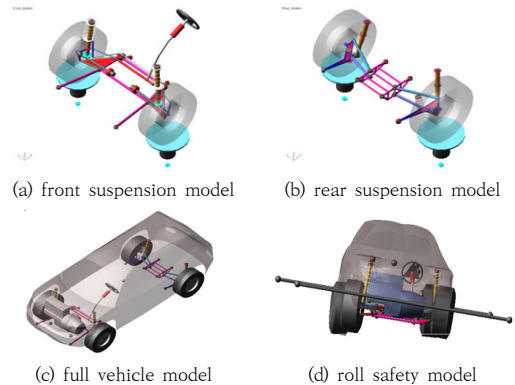


Fig. 1. Vehicle dynamic model

2. 차량 롤 안전성 해석 모델

차량 롤 안전성과 같은 차량 부품간의 복합적인 특성 및 변화를 표현하기 위해서는 다물체 차량동역학 모델이 필요하다. 본 연구에서는 롤 안전성 해석과 관련한 선행 연구[4]에서 개발한 다물체 차량동역학 모델과 해석적 타이어 모델을 이용하였다. 차량 모델은 Fig. 1과 같이 대상차량(SUV급 차량)에 대한 차체, 현가계, 조향계, 구동계, 제동계 및 차륜에 대한 각각의 서브시스템을 구성하고, 각각의 부품별 특성 파라미터를 부가하여 차량동역학 모델을 구성하였다. 이 때, 스프링, 댐퍼, 부쉬, 스테빌라이저 바 강성은 별도의 특성시험을 수행하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하였다. 본 연구에서 구성한 대상차량은 맥퍼슨 스트럿(macpherson strut) 형식의 전륜 현가계, 멀티링크(multi-link) 형식의 후륜 현가계, 랙 & 피니언(rack & pinion) 형식의 조향계, 디스크 브레이크 형식의 제동계 및 디젤 2,000cc 형식의 구동계 등으로 구성되며, 총 86 자유도를 가진다.

차량의 주행 동특성에 가장 큰 영향을 미치는 대상 타이어(245/70 R17)는 타이어 전용 시험기를 통한 별도의 단품 특성 시험 결과[4]를 활용하였다. 특성 시험은 형상(geometry) 관련 시험, 정특성 시험, 힘&모멘트(force & moment) 시험 등으로 구분된다. 시험 기준 하중은

6,357N, 기준 공기압은 33psi, 적용 림은 $17 \times 7.0J$ 를 사용하였다. 이를 바탕으로 타이어 모델의 슬립각, 캠각, 슬립율에 따른 파라미터 및 프로퍼티 특성을 정의하여 MF(Magic Formula) 타이어 모델을 이용하였다.

본 연구에서 사용한 다물체 차량동역학 모델과 타이어 모델의 검증을 위하여 다양한 조건에서 실차 주행시험 결과와 비교하였다. 차선변경 모드에서의 해석 결과와 실차 주행시험 결과를 비교한 결과, 전체적으로 10% 이내의 오차로 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 차량 설계변수 영향도 분석

본 연구에서는 차량 롤 안전성 해석을 수행하기 위하여 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)에서 제안하는 SIS(Slowly Increasing Steer) 시험모드와 롤율 피드백 피쉬훅(roll rate feedback fishhook) 시험모드를 사용하였다[10]. 이를 통하여 우선적으로 차량동역학 모델의 설계변수에 따른 롤 안전성 해석을 수행하였다. 차량동역학 모델의 설계변수는 Table 1과 같이 20개를 3수준으로 선정하였으며, 롤 안전성 해석 결과는 차량 속도에 따른 최대 롤각, 최대 롤율, 타이어 휠 중심의 변화량을 각각 분석하였다. 차량 설계변수는 기준(reference) 설계값을 2수준으로 선정하고, 1수준은 -10%, 3수준은 +10% 값으로 선정하였다. Table 1에서 차량의 휠 얼라인먼트(wheel alignment)에 해당하는 캠각(camber)와 토우(toe) 각은 차량동역학 시뮬레이션을 위한 현가계의 초기값으로 선정하였다. 차량 설계변수 20개에 따른 롤 안전성 해석 결과는 Fig. 2과 같으며, 이 중에서 상대적으로 영향이 큰 차량 스프링 상 질량(sprung mass), 축거(wheelbase), 윤거(tread), 댐퍼 댐핑 계수(damping coefficient), 스테빌라이저 바 강성(stabilizer bar stiffness), 조향 기어비(steering reduction gear ratio)의 6개를 Table 2와 같이 주요 차량 설계변수로 도출하였다.

이를 다시 실험계획법(Design of Experiments, DOE) 기반 6인자 2수준 L16 직교배열표(orthogonal array)를 구성하여 롤 안전성 해석을 수행하였으며, ISIGHT-FD를 사용하여 설계변수 영향도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 NHTSA 시험모드를 기반으로 롤 안전성 해석을 수행하였기 때문에 차량의 초기속도를 4가지(35mph, 40mph, 45mph, 50mph)로 각각 설정

하였다.

차량의 초기속도에 따른 최대 롤율에 대한 설계변수 영향도 분석 결과는 Fig. 3에서 Fig. 6까지와 같다. 차량의 속도가 40mph 이하의 결과에서는 차량 최대 롤율에 영향을 미치는 주요한 설계변수는 A(차량 스프링 상 질량), C(윤거), B(축거)로 동일하게 분석되었다. 이는 Eq. (1)과 같이 정상상태(steady-state)에서 차량의 선회운동 시 작용하는 횡방향 가속도를 중력가속도로 나눈 값으로 롤오버 임계값에 해당하는 SSF(Static Stability Factor)에서도 분석이 가능한 결과와 동일하다.

$$SSF = \frac{d}{2h} \quad (1)$$

Where, d denotes tread, h denotes center-of-gravity height.

하지만 SSF는 차량 전체를 1개의 강체로 가정하고, 서스펜션과 타이어의 변형을 고려하지 못하여 실제 차량의 다양한 주행상태에 따른 동적 롤 안전성 분석 메커니즘을 규명하기에는 한계가 있다. 이에 Eq. (2)와 같이 DSF(Dynamic Stability Factor)는 SSF를 확장하여 표현할 수 있다[11].

$$DSF = \frac{a_y}{g} = \frac{d}{2h} - \theta_1 - \frac{h_2}{h} \theta_2 \quad (2)$$

Where, a_y denotes lateral acceleration, g denotes gravity acceleration, θ_1 denotes roll angle variation due to tire deflection, θ_2 denotes roll angle variation due to suspension deflection, h_2 denotes height between center of gravity and roll center.

본 연구에서는 다물체 차량동역학 기반 롤 안전성 해석을 수행하였기 때문에 Fig. 3에서 Fig. 6까지의 결과와 같이 차량 초기속도에 따라 타이어와 서스펜션의 변형을 고려한 차량 최대 롤율에 영향을 미치는 차량 설계변수의 정량적 분석이 가능하였다. 이를 통하여 차량의 속도가 40mph 이하에서는 A(차량 스프링 상 질량), C(윤거), B(축거) 순으로, 차량의 속도가 45mph 이상에서는 A(차량 스프링 상 질량), C(윤거), E(스테빌라이저 바 강성) 순으로 분석되었다.

Table 1. Design variables of vehicles

	design variables		design variables
1	wheelbase	11	camber angle (R)
2	CG_x	12	toe angle (F)
3	tread	13	toe angle (R)
4	sprung mass (CG_z)	14	wheel offset (F)
5	spring stiffness (F)	15	wheel offset (R)
6	spring stiffness (R)	16	LCA bush stiffness (F)
7	damper coefficient (F)	17	UCA bush stiffness (R)
8	damper coefficient (R)	18	knuckle/LCA hardpoint (F)
9	stab. bar stiffness (F)	19	knuckle/LCA hardpoint (R)
10	camber angle (F)	20	steering gear ratio

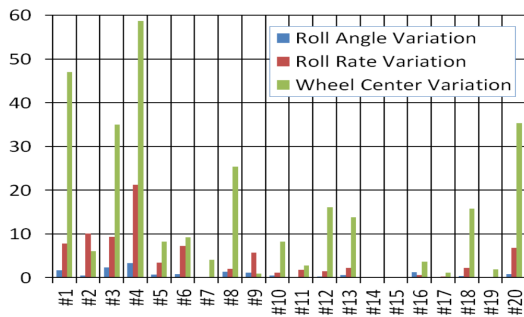


Fig. 2. Roll safety performance analysis result (50mph)

Table 2. Selected design variables of vehicles

	design variables of vehicles
A	sprung mass (CG_z)
B	wheelbase
C	tread
D	damper damping coefficient (rear)
E	stabilizer bar stiffness (front)
F	steering reduction gear ratio

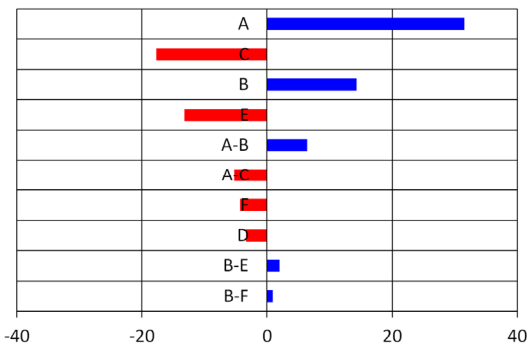


Fig. 3. Sensitivity analysis of vehicle variables (35mph)

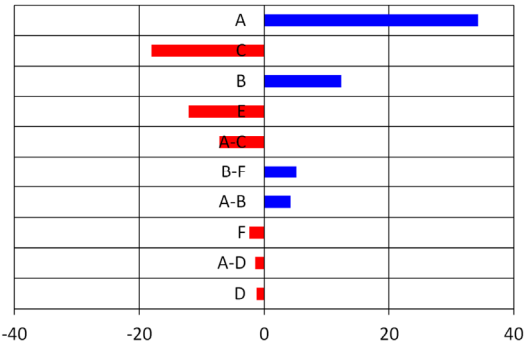


Fig. 4. Sensitivity analysis of vehicle variables (40mph)

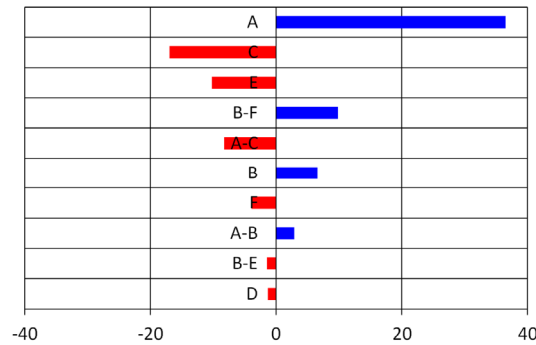


Fig. 5. Sensitivity analysis of vehicle variables (45mph)

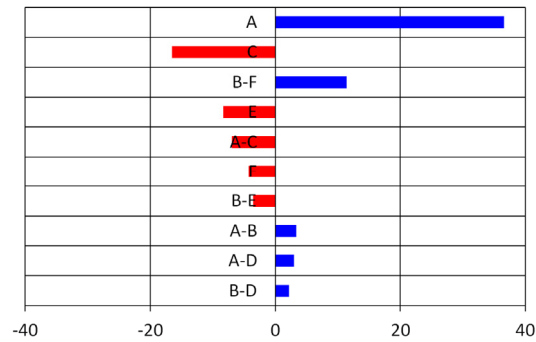


Fig. 6. Sensitivity analysis of vehicle variables (50mph)

4. 차량/타이어 설계변수 영향도 분석

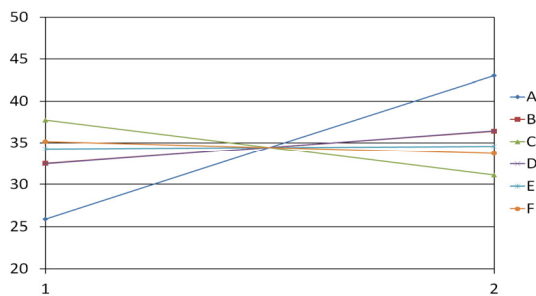
본 연구에서는 차량 설계변수에 따른 영향도 분석과 더불어 타이어 설계변수에 따른 영향도 분석을 수행하였다. 타이어 모델의 설계변수는 차량 모델의 설계변수와 동일하게 20개를 3수준으로 선정하여 롤오버 성능 해석을 수행하였다. 타이어 설계변수는 기준(reference) 설계값을 2수준으로 선정하고, 1수준은 -10%, 3수준은

+10% 값으로 선정하였다. 이를 통하여 도출한 주요 타이어 설계변수는 Table 3과 Table 4에 표기한 횡방향 마찰계수(PDY1), 횡방향 강성(PKY1), 수직방향 강성으로 분석되었다.

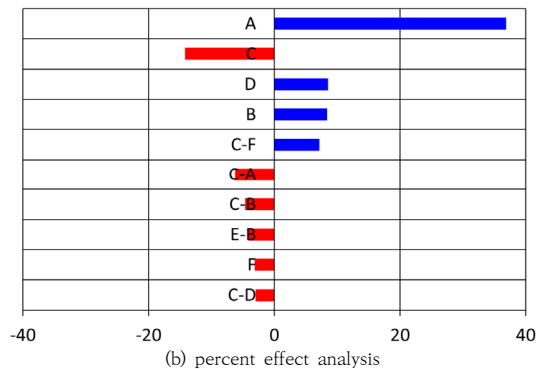
차량/타이어 연계 복합 설계변수 영향도 분석(DOE #1)은 우선적으로 차량 설계변수 영향도 분석에서 주요한 설계변수로 분석된 3개와 타이어 설계변수 3개를 포함한 조합을 Table 3과 같이 구성하였다. 이를 6인자 2수준(-10%, +10%) L16 직교배열표를 구성하여 롤 안전성 해석을 수행하였으며, 차량 최대 롤에 대한 설계변수 영향도 분석 결과는 Fig. 7과 같다. 주요 영향도는 A(차량 스프링 상 질량), C(윤거), D(타이어 횡방향 마찰계수) 순으로 분석되었다. 이는 상대적으로 차량 설계변수인 A와 C의 영향도가 높게 분석된 결과이다.

Table 3. Design variables of vehicles and tires #1

design variables of vehicles and tires		
A	vehicle	sprung mass
B	vehicle	wheelbase
C	vehicle	tread
D	tire	PDY1 (lateral friction μ_y)
E	tire	PKY1 (max. stiffness $K_{fy}/F_{z_{nom}}$)
F	tire	vertical stiffness



(a) main effect analysis



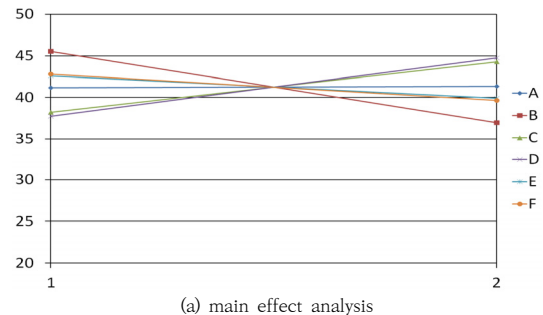
(b) percent effect analysis

Fig. 7. Sensitivity analysis of vehicle/tire variables (DOE #1, 50mph)

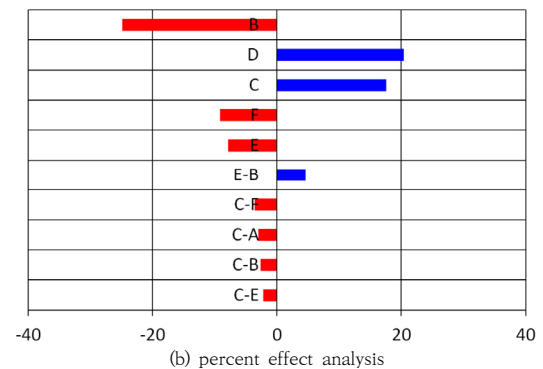
하지만, Table 3과 Fig. 7에서 분석된 차량 설계변수 A(차량 스프링 상 질량), B(축거), C(윤거)는 차량의 제원에 해당하여 실질적으로 차량의 롤 안전성 향상을 위하여 차량의 부품 단계에서 설계변경하기 어려운 인자이다. 이에 차량 설계변수 영향도 분석에서 차량의 제원에 해당하는 설계변수를 제외한 설계변수 3개와 타이어 설계변수 3개를 포함한 조합을 Table 4와 같이 구성하였다. 이를 6인자 2수준(-10%, +10%) L16 직교배열표를 구성하여 롤 안전성 해석을 수행하였으며, 차량 최대 롤에 대한 설계변수 영향도 분석(DOE #2) 결과는 Fig. 8과 같다. 주요 영향도는 B(스태빌라이저 바 강성), C(조향 기어비), D(타이어 횡방향 마찰계수) 순으로 분석되었으며, 차량과 타이어 설계변수 모두 롤 안전성 향상을 위한 부품 설계가이드라인으로 제시할 수 있었다.

Table 4. Design variables of vehicles and tires #2

design variables of vehicles and tires		
A	vehicle	damper damping coefficient (rear)
B	vehicle	stabilizer bar stiffness (front)
C	vehicle	steering reduction gear ratio
D	tire	PDY1 (lateral friction μ_y)
E	tire	PKY1 (max. stiffness $K_{fy}/F_{z_{nom}}$)
F	tire	vertical stiffness



(a) main effect analysis



(b) percent effect analysis

Fig. 8. Sensitivity analysis of vehicle/tire variables (DOE #2, 50mph)

본 연구에서 차량/타이어 복합 설계변수에 따른 영향도 분석을 위하여 사용한 DOE #1과 DOE #2의 직교배열표는 Table 5와 같으며, 이에 따른 각 설계변수 조합에 따른 차량 최대 롤율의 결과를 함께 나타내었다.

Table 5. DOE analysis summary for design variables of vehicles and tires

	orthogonal array						max. roll rate (deg/sec)	
	A	B	C	D	E	F	DOE#1	DOE#2
#1	1	1	1	1	1	1	29.478	37.687
#2	1	1	1	2	2	2	24.370	47.338
#3	1	1	2	1	2	2	25.824	46.906
#4	1	1	2	2	1	1	25.361	52.930
#5	1	2	1	1	2	2	24.748	27.947
#6	1	2	1	2	1	1	32.190	37.570
#7	1	2	2	1	1	1	19.909	37.407
#8	1	2	2	2	2	2	24.809	41.566
#9	2	1	1	1	2	1	39.320	40.597
#10	2	1	1	2	1	2	45.587	42.514
#11	2	1	2	1	1	2	33.915	40.364
#12	2	1	2	2	2	1	35.857	55.719
#13	2	2	1	1	1	2	46.649	31.262
#14	2	2	1	2	2	1	59.520	40.895
#15	2	2	2	1	2	1	39.600	39.731
#16	2	2	2	2	1	2	43.651	39.425

5. 결론

본 연구에서는 차량의 주행 동특성 및 롤 안전성을 향상시키기 위하여 다물체 차량동역학 해석과 차량/타이어 설계변수 복합 영향도 분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 차량동역학 모델의 설계변수 20개를 선정하여 롤 안전성 해석을 수행하였으며, 최대 롤율에 상대적으로 큰 영향을 미치는 차량 스프링 상 질량, 윤거, 축거, 댐퍼 댐핑계수, 조향 기어비의 6개 주요 차량 설계변수를 도출하였다.
- 2) 타이어 모델의 설계변수 20개를 선정하여 롤 안전성 해석을 수행하였으며, 최대 롤율에 상대적으로 큰 영향을 미치는 횡방향 마찰계수, 횡방향 강성, 수직방향 강성의 3개 주요 타이어 설계변수를 도출하였다.
- 3) 차량/타이어 모델의 설계변수 6개를 바탕으로 설계변수 영향도 분석을 수행한 결과, 차량 스프링 상 질량(36.9%), 윤거(14.2%), 타이어 횡방향 마

찰계수(8.6%) 순으로 영향도가 크게 분석되었다.

- 4) 차량 제원에 해당하는 차량 설계변수를 제외하고 차량/타이어 모델의 설계변수 6개를 바탕으로 설계변수 영향도 분석을 수행한 결과, 스테빌라이저 바 강성(24.8%), 타이어 횡방향 마찰계수(20.4%), 조향 기어비(17.6%) 순으로 영향도가 크게 분석되었다.

향후 본 연구를 바탕으로 다양한 차량의 새시 전자제어 시스템을 연계한 차량 롤 성능 향상을 위한 연구와 차량/타이어 설계변수에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] Y. W. Kim, and J. H. Jang, "The effect of roof loading on vehicle dynamic characteristics", *2006 Autumn Conference Proceedings of the KSAE*, Vol.2, pp.1086-1091, 2006.
- [2] W. Wang, W. Zhang, and Y. Zhao, "Integrated stability control strategy of in-wheel motor driven electric bus", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.21, No.4, pp.919-929, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0088-6>
- [3] J. S. Jo, S. H. You, J. Y. Jeong, K. I. Lee, and K. Yi, "Vehicle stability control, system for enhancing steerability, lateral stability, and roll stability", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.9, No.5, pp.571-576, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0067-9>
- [4] S. J. Kwon, C. J. Kim, C. Y. Bae, B. H. Lee, T. Y. Koo, and C. T. Cho, "A study on vehicle rollover analysis due to tire characteristic factors", *2009 Spring Conference Proceeding of the KSAE*, pp.756-761, 2009.
- [5] R. Kazemi, and K. Soltani, "The effects of important parameters on vehicle rollover with sensitivity analysis", *SAE Paper No.2003-01-0170*, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2003-01-0170>
- [6] M. Ghazali, M. Durali, and H. Salarieh, "Vehicle trajectory challenge predictive active steering rollover prevention", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.18, No.3, pp.511-521, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0051-3>
- [7] A. Hac, T. Brown, and J. Martens, "Detection of vehicle rollover", *SAE Paper No.2004-01-1757*, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1757>
- [8] R. Eger, R. Majjad, and N. Nasr, "Rollover simulation based on a nonlinear model", *SAE Paper No.980208*, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.4271/980208>

- [9] B. K. Koo, G. H. Rho, S. J. Kwon, and B. H. Lee, "Semi-empirical Tire Modeling for the Study of Dynamic Characteristics", *2007 Autumn Conference Proceedings of the KSAE*, Vol.2, pp.1132-1137, 2007.
- [10] NHTSA, Rollover research, <https://www.nhtsa.gov/crashworthiness/rollover-research>, 2021.
- [11] R. V. Dukkipati, J. Pang, M. S. Qatu, G. Sheng, and Z. Shuguang, Road Vehicle Dynamics, pp.315-327, *SAE International*. 2008.

권 성 진(Seong-Jin Kwon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 성균관대학교 기계공학부 (공학사)
- 2002년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 성균관대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2006년 3월 : 성균관대학교 Post-Doctor
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 수석연구원/센터장

〈관심분야〉

차량동역학 및 제어, 자율주행차량 및 실도로 실증