

경사면에서 선회운동하는 SUV차량의 롤거동 해석

방정훈*¹⁾ · 이병훈²⁾

부산대학교 대학원 기계공학과 · 부산대학교 기계공학부

A Roll-behavior Analysis of SUV in Turning Motion on a Slope

Jeonghoon Bang*¹⁾ · Byunghoon Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 25 September 2013 / Revised 30 December 2013 / Accepted 17 January 2014)

Abstract : The SUV has a risk of rollover because of the highness of center of mass. In this paper the roll-behavior of a SUV in turning motion is analyzed. Dynamic model of the vehicle on the slope is developed and simulation is carried out using the software ADAMS/Car. The results show that the relational expression between the ground force acting on the tire and the roll motion is well established. It is also identified that the driving state of the vehicle becomes unstable at the lower or upper position of the slope.

Key words : Roll behavior(롤거동), Turning motion(선회운동), Lateral slope(횡방향 경사), Slip angle(미끄럼각), Side slip angle(옆미끄럼각)

Nomenclature

- a : vehicle acceleration
- v : vehicle velocity
- l : wheel base
- t : wheel tread
- θ : longitudinal slope angle
- ψ : lateral slope angle
- ϕ : roll angle
- F_x : longitudinal force
- F_y : lateral force
- F_z : vertical force
- K_ϕ : roll stiffness

Subscripts

- f, r : front, rear
- i, o : inner, outer

1. 서론

오늘날 레저, 캠핑 등 야외여가생활을 선호함에 따라 SUV(Sports Utility Vehicle)차량의 비중이 증가하고 있다. 이러한 차량은 타 승용차량에 비해 질량 중심이 높기 때문에 차량전복사고의 가능성이 크며 전체 교통사고 중에서 차지하는 비율은 높지 않지만 탑승자에게 치명적인 상해를 유발하며¹⁾ 2012년 교통사고통계자료²⁾에 의하면 전도·전복과 도로이탈에 의하여 그리고 평지보다 내리막에서 사망률이 높았음을 알 수 있다. 이에 따라 차량전복에 영향을 미치는 요인을 제어, 시험 및 해석하는 연구³⁾와 경사진 노면에서의 제어를 위한 상태정보인 미끄럼각, 마찰계수, 종·횡속도 등을 정확하게 획득하기 위한 연구⁴⁾가 수행되고 있다. 그러나 경사면을 포함한 다양한 도로상태 및 주행조건에 따른 롤거동에 관한 정보를 제공하는데 부족하며 이를 위한 연구의 필요성이 요구된다.

*Corresponding author, E-mail: dafrcon@pusan.ac.kr

본 논문에서는 경사면에서 선회하는 차량의 물거동을 해석하기 위하여 차량 종방향과 횡방향 경사각을 포함한 동역학 모델을 만들고 바퀴에 작용하는 지면력과 물운동 및 차량의 횡방향 가속도와 물운동사이의 관계를 유도하여 시뮬레이션 결과와 비교한다. 여기서 시스템의 동역학 해석은 실차시험의 한계 및 단점을 보완하기 위해 다물체동역학 해석프로그램인 ADAMS/Car⁵⁾를 이용하여 차량과 3차원 도로 및 주행조건을 모델링하고 시뮬레이션한다. 차량은 여러 가지 마찰계수를 가지는 평지 또는 경사면에서 일정한 속력으로 주행하도록 유지시킨 가운데 스텝조향에 의하여 선회운동을 할 때 차량 횡방향 경사각 및 노면의 마찰상태가 차량의 물거동에 미치는 영향과 주행상태에 대하여 평가한다.

2. 차량의 동역학 모델

경사면에서 선회하는 차량은 차량의 주행위치에 따라 차체 종방향과 횡방향으로 기울어지며 이러한 각 방향 경사상태에서의 단순모델과 전차량모델을 통하여 차량에 작용하는 힘들과 물거동의 관계를 해석한다.

Fig. 1은 종방향 경사각이 θ 인 경사면을 따라 아래로 주행하는 차량의 단순모델이다. x 축은 차량의 길이 방향이며 z 축은 차량의 수직방향으로 설정하였다. W 는 차량의 전체 중량이고 타이어와 도로의 접지면에 작용하는 전·후륜의 수직력(F_{zf} , F_{zr})은 타이어 중심으로 작용하며 종력(F_{xf} , F_{xr})은 차량의 가속 또는 제동에 의해 차량의 길이방향으로 작용하는 힘이다.

경사면에서 전·후륜의 타이어에 작용하는 수직력 F_{zf} , F_{zr} 는 A, B점에서의 모멘트 평형을 이용하여 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$F_{zf} = W(\cos\theta \cdot l_r + \sin\theta \cdot h - a_x h/g)/l \quad (1)$$

$$F_{zr} = W(\cos\theta \cdot l_f - \sin\theta \cdot h + a_x h/g)/l \quad (2)$$

여기서 l_f , l_r 은 각각 질량중심 G에서 앞·뒤축 사이의 종방향 거리이며 h 는 경사면에서 질량중심 G까지의 거리이다.

위 식에서 차량이 길이방향으로 가속(a_x)이 되면

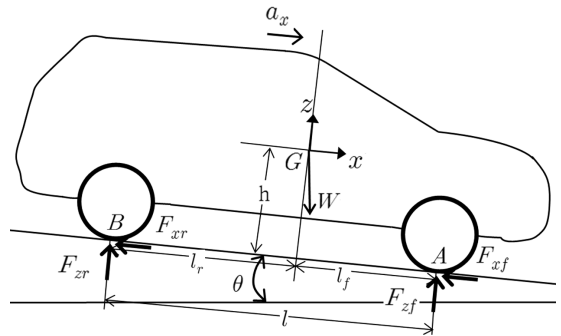


Fig. 1 Simple vehicle model on a longitudinal slope

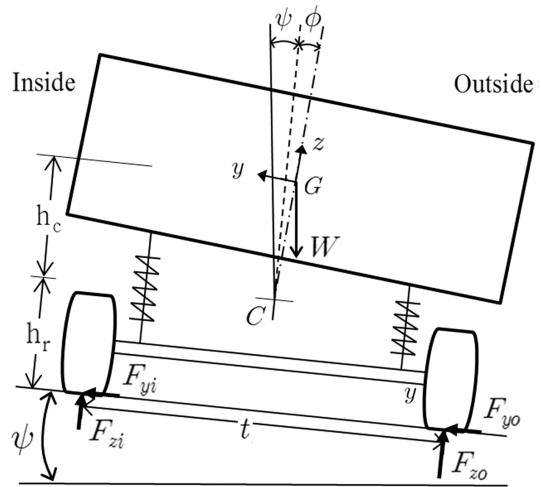


Fig. 2 Simple vehicle model on a lateral slope

전륜의 수직력은 감소하고 후륜의 수직력은 증가하게 됨을 알 수 있다. 그러나 이 경우 차량의 물운동에는 영향을 미치지 않는다.

Fig. 2는 경사면에서 선회 시 좌·우륜에 작용하는 수직력 및 횡력과 차체의 물각의 변화를 파악하기 위하여 차량의 yz 평면에서 나타난 모델이다. 차량이 선회를 하면 차체는 물중심 C를 중심으로 물운동하여 선회하는 방향의 외측으로 기울게 된다.

물중심 C에 대한 지면력(횡력과 수직력)의 모멘트와 물운동 사이의 관계는 다음과 같다.⁶⁾

$$(F_{zo} - F_{zi}) \frac{t}{2} - (F_{yo} + F_{yi}) h_r = K_\phi \phi \quad (3)$$

여기서 F_{zo} , F_{zi} 및 F_{yi} , F_{yo} 는 각각 내측, 외측 바퀴에 작용하는 수직력과 횡력이며, ϕ 은 차체의 물각,

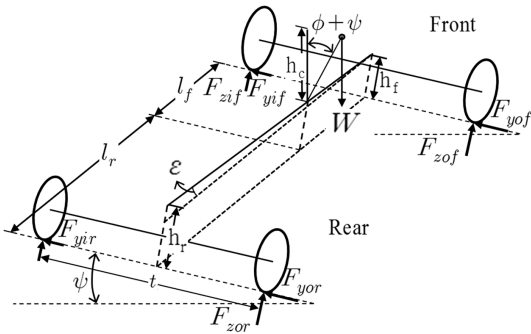


Fig. 3 Full vehicle model on a lateral slope

h_r 은 지면과 롤중심 C사이의 거리, K_ϕ 는 앞·뒷바퀴에 장착된 현가스프링 특성에 의해 주어지는 차체의 롤 강성이다.

경사면의 차량 종방향 경사각 θ , 횡방향 경사각 ψ 및 차체의 롤각 ϕ 이 작다고 가정하면, 곡률반경 R로 선회하는 차체의 롤중심 C에 대한 모멘트와 롤운동 사이의 관계는 다음과 같다.

$$K_\phi \phi = Wh_c v^2 / (R \cdot g) + Wh_c (\phi + \psi) \quad (4)$$

따라서 롤각과 차체의 횡방향 가속도 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{Wh_c (v^2 / (R \cdot g) + \psi)}{K_\phi - Wh_c} \quad (5)$$

여기서 h_c 는 롤중심 C와 질량중심 G 사이의 거리이다.

Fig. 3은 경사면에서 전·후륜의 롤중심을 연결한 직선인 롤축을 중심으로 롤거동을 하는 전차량모델이다. 위의 식 (3)을 전차량모델에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & (F_{zof} + F_{zor} - F_{zif} - F_{zir}) \frac{t}{2} \\ & = (F_{yof} + F_{yif}) h_f + (F_{yor} + F_{yir}) h_r + K_\phi \phi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 롤축의 경사각 ε 는 미소하다고 가정하면 $h_f = h_r (= h_{fr})$ 이 되며, 내·외측바퀴 수직력의 합 $F_{zif} + F_{zir} = F_{zi}$, $F_{zof} + F_{zor} = F_{zo}$, 모든 횡력의 합 $F_{yof} + F_{yif} + F_{yor} + F_{yir} = F_y$ 로 두면 위식은 다음과 같이 된다.

$$(\Delta F_z) \frac{t}{2} = F_y h_{fr} + K_\phi \phi \quad (7)$$

여기서 $\Delta F_z = F_{zo} - F_{zi}$ 이다.

3. 시뮬레이션

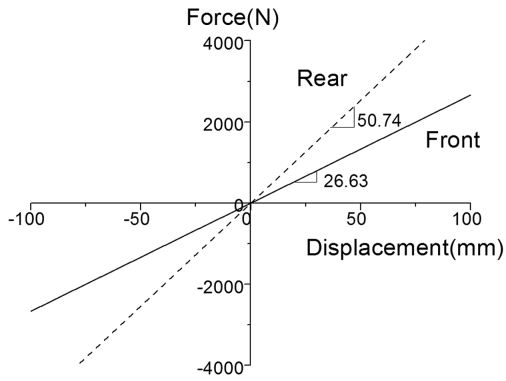
차량은 차체, 동력전달계, 조향 및 현가장치, 타이어, 제동장치로 구성된다. 차량의 물성치 및 제원은 Table 1과 같다. 현가장치는 보편적으로 사용하는 방식으로 전륜은 맥퍼슨 스트럿을 후륜은 멀티링크(코일스프링)를 적용하였다. 전륜 현가장치의 하부암과 타이로드는 너클과 구면조인트, 하부암과 프레임은 회전조인트로 연결되어 있고 후륜 현가장치에서 상부, 하부암과 너클은 구면조인트로 프레임과는 회전조인트로 연결되어 있다. 조인트와 마운트에서는 부상요소가 장착되어 있다. 조향시스템은 랙과 피니언으로 조합되어 현가장치와는 구면조인트로 연결하였다. Fig. 4는 각각 현가스프링과 댐퍼의 특성을 나타낸 것으로 전륜보다 후륜의 강성을 높게 하였다. 타이어는 ADAMS /Car에서 제공하는 PAC2002 type의 195_65/R15타이어⁷⁾를 이용하여 모델링하였다.

노면은 평지에서 출발하여 경사면(경사도 12%)에 진입하도록 삼각패치 모델을 이용하여 경사면에 대한 3차원의 도로형상을 작성하였다. 차량이 경사면에 진입을 할 때 발생하는 차량의 수직운동을 줄이기 위하여 경사 진입로에 라운드를 주었다. 경사도에 따른 롤거동 해석에서는 노면마찰계수를 0.8로 하였으며 노면의 마찰상태에 따른 해석에서는 마찰계수를 0.8, 0.6, 0.4 세 가지 경우로 하였다.

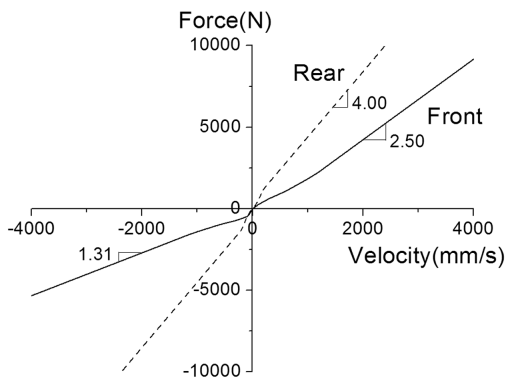
차량은 브레이크 및 연료조절판의 작동으로 60km/h의 일정한 속력으로 주행하도록 하였으며 평지 및 경사면에서 직진주행을 하다가 왼쪽으로 선

Table 1 Properties of the vehicle

Chassis	Mass (kg)		1900
	Mass moment of inertia (kg · m ²)	Ixx	660
		Iyy	3130
		Izz	3150
	Wheel base (m)	2.6 ($l_j = 1.2$)	
Wheel tread (m)	1.5		
CG height (m)	0.7		
Suspension	Mass (kg)	100	
Tire	Mass (kg)	25	



(a) Spring characteristics



(b) Damper characteristics

Fig. 4 Characteristics of the suspension

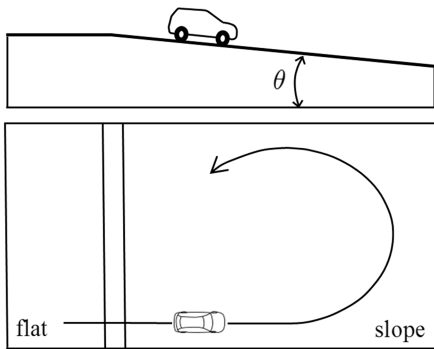


Fig. 5 Road shape and vehicle motion

회를 하도록 조향하였다. 즉 경사면 진입 후 차량의 운동이 정상상태에 도달하는 주행 시작 4초 이후 핸들을 180°/sec로 0.1초 동안 스텝조향하여 핸들조향각 180°, 전륜의 조향각이 9.73°를 유지하게 하여 차량이 선회운동을 하도록 하였다(Fig. 5).

4. 해석결과 및 검토

4.1 경사도에 따른 롤거동

경사면에서 차량에 작용하는 힘들의 변화와 롤거동을 파악하기 위하여 평지와 경사면에서 선회주행을 하였으며 Fig. 6은 차량 질량중심의 궤적이다. 그림에서 시간은 차량의 요각이 90, 180, 270° 일 때의 시각을 나타낸다. 식 (1), (2)에서 등속($a_x=0$)으로 주행할 때 노면의 차량 종방향 경사각에 따라 전륜의 수직력은 증가하고 후륜의 수직력은 감소한 상태에서 선회를 시작하게 된다.

구동바퀴를 조향하면 바퀴가 횡방향 힘을 받아 차량은 선회운동을 하며 이때 발생하는 횡가속도에 따른 관성력으로 차체는 롤운동을 한다. 이에 따라 선회 바깥쪽 바퀴의 수직력은 증가하고 안쪽바퀴의 수직력은 감소하게 된다. Fig. 7(a)는 바퀴에 작용하는 횡력의 합(F_y), Fig. 7(b)는 내·외측 바퀴의 수직력 차이(ΔF_z), Fig. 8은 차체의 물각(ϕ)을 나타낸다. 횡력의 합과 수직력의 차이가 유사한 형태를 보이는데 대하여 물각도 같은 모양으로 나타난 것을 통해 식 (7)이 잘 만족됨을 보여준다. 또한 주행 중인 차량의 운동관련정보(속도, 주행궤적의 곡률반경, 노면의 횡방향경사각)를 추출하여 식 (5)의 물각을 MATLAB으로 계산한 결과(Fig. 9)와 모의실험의 결과(Fig. 8)가 유사한 경향을 보여 제시된 동역학모델이 타당함을 확인할 수 있다.

평지주행에서는 전·후륜에 미끄럼각이 일정하게 발생하여(Fig. 10) 중립조향의 특성을 보이며 반

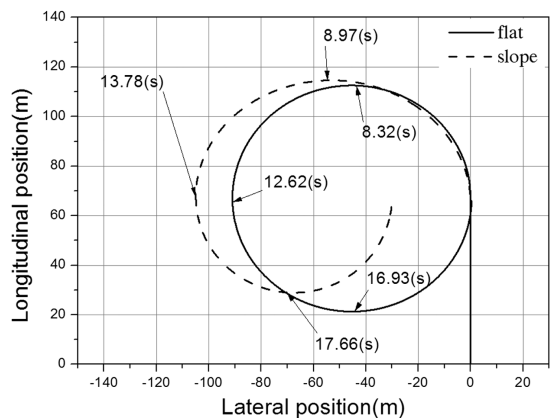
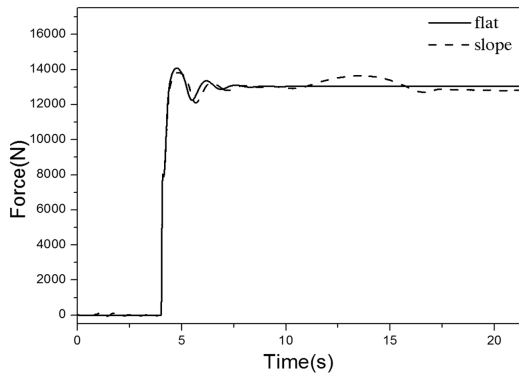
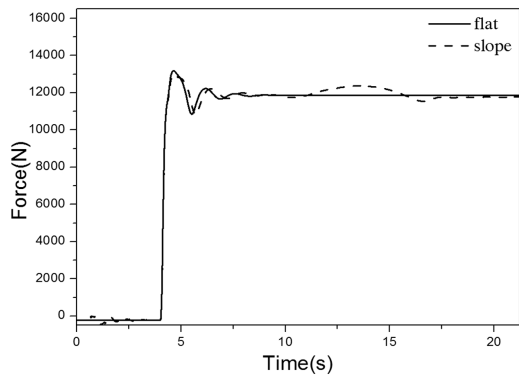


Fig. 6 Trajectories of the SUV model for a slope



(a) Sum of the lateral forces



(b) Difference of vertical forces between inner and outer wheels

Fig. 7 Forces acting on the wheels

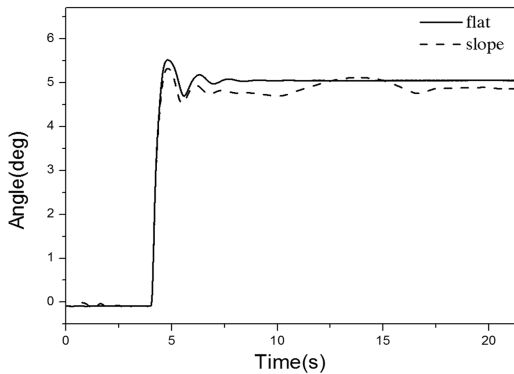


Fig. 8 Roll angles

경 약 45m의 원형궤적을 그리며 운동하였다. 그러나 경사주행에서는 횡방향 경사각이 커지게 되는 경사면 아래쪽에서는 차체의 무게로 인하여 구심력이 감소함에 따라 선회운동의 곡률반경이 크게(횡가속도는 작게) 되고 식 (5)에 의하여 알 수 있듯이

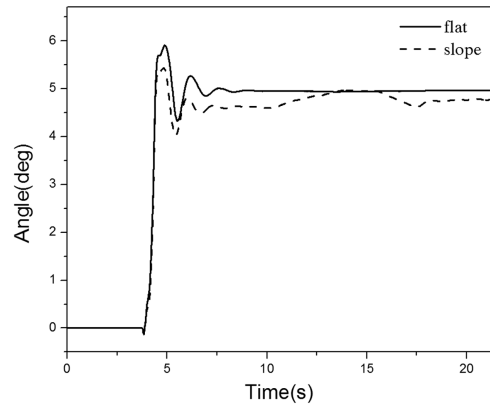


Fig. 9 Roll angles (MATLAB)

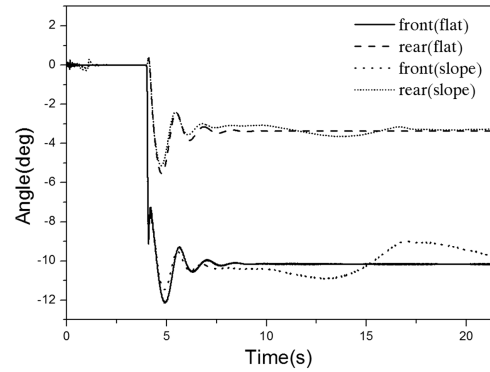


Fig. 10 Slip angles of front and rear wheels

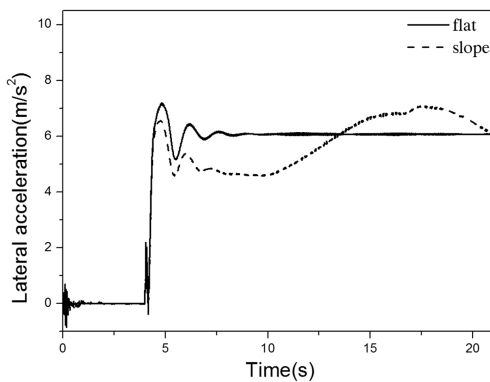


Fig. 11 Lateral accelerations

물각이 평지주행에 비하여 작아지게 된다(Fig. 8, Fig. 11). 이때 전·후륜의 미끄럼각의 차이가 증가하여 전륜이 크게 미끄러지는 부족조향을 한다. 그리고 경사면 위쪽에서는 차체의 횡방향에 대한 중력과 관성력이 반대방향으로 작용하여 곡률반경이

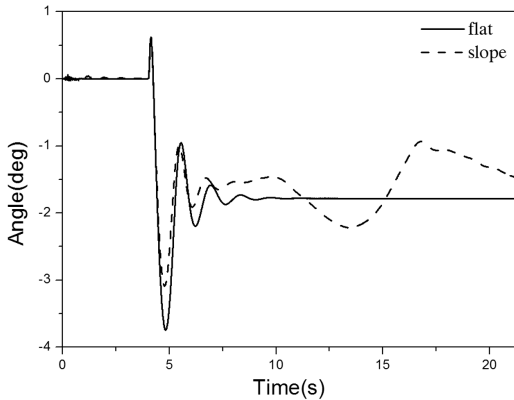


Fig. 12 Side slip angles

작게(횡가속도는 크게) 되지만 식 (5)에서 횡방향 경사각의 부호가 바뀌며 결과적으로 롤각이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 미끄럼각의 차이가 감소하여 차량은 후륜이 크게 미끄러지는 과대조향을 함을 알 수 있다. 또한 주행방향이 반대가 되어 횡방향 경사각의 영향이 없는 위치에서는 평지에서와 유사한 롤거동을 보인다. 따라서 주어진 조향 입력에 대해 평지주행에서는 횡력과 수직력이 일정하게 작용하여 원운동을 하는 것에 비하여 경사면 주행에서는 불안정한 롤거동 및 주행형태를 보여준다. 이는 주행속도 방향과 차체길이 방향의 차이를 나타내는 옆미끄럼각 변동을 통해서도 확인할 수 있다(Fig. 12).

4.2 마찰상태에 따른 롤거동

Fig. 13은 경사면(경사도 12%)의 여러 가지 마찰 상태에서 차량이 선회할 때 질량중심의 궤적을 나타낸 그래프로서 마찰계수가 작아질수록 차량은 선회 바깥방향으로 크게 미끄러지는 것을 알 수 있다. 마찰상태가 다른 경사면에서 선회하는 경우에도 각 바퀴에 작용하는 횡력의 합(Fig. 14(a))과 내·외측 바퀴의 수직력 차이(Fig. 14(b)) 및 차체의 롤거동(Fig. 15)이 유사한 모양으로 나타나 식 (7)이 잘 성립함을 알 수 있다. 노면의 마찰계수가 작아질수록 횡력은 감소하였으며 경사면 아래쪽에서는 횡방향 경사각의 영향이 중첩되어 곡률반경이 큰 선회운동을 한다. 이에 따라 식 (5)에서 확인할 수 있듯이 차체의 롤각은 작아지게 된다.

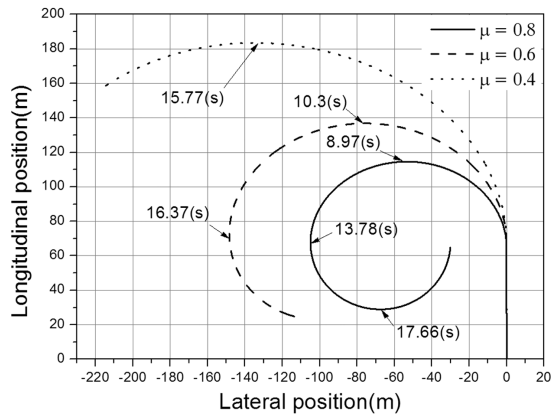
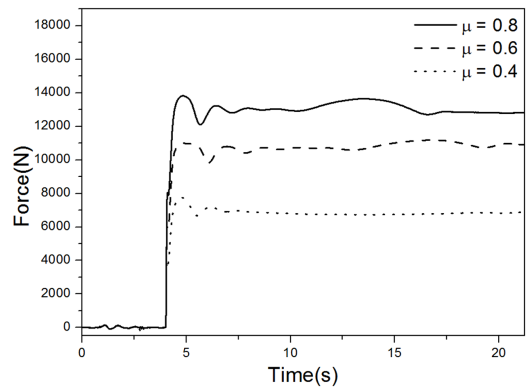
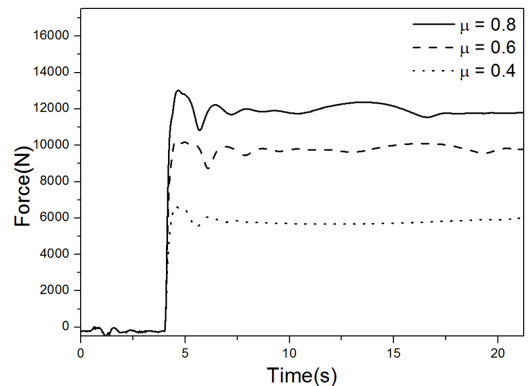


Fig. 13 Vehicle trajectories



(a) Sum of the lateral forces



(b) Difference of vertical forces between inner and outer wheels

Fig. 14 Forces acting on the wheels

5. 결론

경사면에서 선회하는 차량의 롤거동을 해석하기 위하여 차량의 동역학 모델을 만들고 범용프로그램

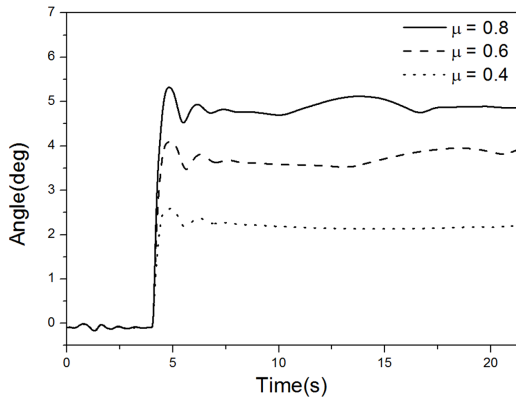


Fig. 15 Roll angles

인 ADAMS/Car를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 차체의 롤중심에 대한 모멘트 및 지면력(내·외측 바퀴의 수직력 차이와 횡력의 합)과 롤운동 사이의 관계식이 잘 성립함을 확인하였다.

차량이 일정한 속력으로 경사면을 선회할 때 횡방향 경사각이 커지는 경사면 아래쪽이나 위쪽에서 차량에 작용하는 횡력의 변화와 이에 따른 전·후륜 미끄럼각 차이의 변화에 따라 부족조향 또는 과대조향으로 차량의 주행이 불안정한 상태가 됨을 확인하였다. 이는 경사면에서의 차량선회는 실제 도로에서 이탈하거나 횡방향 경사각의 중첩에 의해 불안정한 롤거동을 함으로써 전복사고로의 발전가능성을 높게 한다.

이러한 해석결과는 차량의 주행안전성을 높이는 능동형 현가장치 등 차량설계에 도움이 될 것이라

사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) A. M. Eigen, Review of NMVCCS Rollover Variables in Support of Rollover Reconstruction, NHTSA, Report No. DOT HS 811 235, 2010.
- 2) TAAS, Traffic Accident Statistics, 2013.
- 3) J. Yoon, R. Chung, T. Chung and K. Yi, "Development of Rollover Index Using Vehicle Roll Extimeter," KSAE05-L0021, 2005.
- 4) S. Lee, I. Kim, D. Lee and K. Huh, "Vehicle Longitudinal Velocity Estimation on Inclined Road," Transactions of KSAE, Vol.20. No.1, pp.14-19, 2012.
- 5) MSC.ADAMS.2005 Users Manual, MSC Software, USA, 2005.
- 6) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992.
- 7) H. B. Pacejka and I. Besselink, Tire and Vehicle Dynamics, 3rd Edn., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2012.