



지프차량의 전복성향 해석

Rollover Propensity Analysis of A Jeep Vehicle

백 운 경*

Woon-Kyung Baek

(1999년 10월 7일 접수, 1999년 11월 18일 채택)

ABSTRACT

Vehicle rollover is an important issue for the traffic safety. Rollover can occur from the driver's action, the vehicle characteristics, or the road condition. This study is about the rollover propensity analysis of a jeep vehicle using the steering and braking maneuver, which is the combined result by the driver and the vehicle. Simple equations of roll motion is used to analyze the roll motion and a special purpose vehicle dynamics program is used to simulate the rollover of the jeep vehicle. From the simulation, an incipient rollover motion of the vehicle was found. However, the more complete rollover propensity analysis would require further investigation using roll dynamic sensitivity study.

1. 서 론

차량 전복은 차량사고 중에서도 대단히 치명적인 결과를 유발할 수 있는 사고이다. 차량사고는 여러 가지 이유로 인해 발생할 수 있다. 주행 중인 차량은 운전자, 차량, 및 운전환경의 세가지 구성요소의 유기적인 관계에 의해 움직인다. 이 세가지 구성요소 중 어느 하나가 비정상적일 때 사고가 발생할 수 있다. 예를 들면, 운전자의 졸음운전, 예기치 못한 미끄러운 노면,

그리고 차량자체의 불안정한 요인 등은 사고의 요인이 된다. 특히, 사고를 회피하기 위하여 운전자가 급조향 및 급제동을 할 때에 전복사고가 많이 일어난다는 것이 알려져 있다¹⁾. 전복사고는 곧 충돌로 인한 인명사고로 이어질 수 있기 때문에 차량사고 중에서도 아주 치명적인 사고이다.

차량의 전복에 대한 연구는 주로 지상고가 높은 대형상용차에 대해 많이 수행되어 왔으나 80년대에 들어와서는 소형트럭 또는 지프차량이

* 부경대학교 기계·자동차공학부

증가함에 따라 이들 차량의 전복사고도 많이 발생하고 있다.

따라서 미국의 고속도로안전관리국(NHTSA)을 포함한 선진국의 교통관련 연구기관에서는 이들 소형차량의 전복현상에 대한 연구를 계속 수행하고 있다²⁻⁴⁾.

이러한 연구 결과로써, 차량자체의 특성이 전복성향에 영향을 끼칠 수 있다는 사실이 알려지고 있다. 즉, 차량이 횡방향에 대한 동적 안정성을 상실하여 전복이 일어날 수 있다. 이러한 차량의 전복성향에 대한 척도로서 차폭과 지상고와의 비율인 Track Width Ratio, 차량을 정상조향상태의 횡가속도를 사용한 Side Pull Ratio Test, 경사각도의 조절이 가능한 플랫폼을 사용한 Tilt Table Ratio Test 등의 방법들이 개발되었다^{5,6)}. 차량의 전복은 차량이 도로 가장자리의 턱이나 비포장 조건에 의해 걸려 넘어지는 전복과 포장도로의 노면 상에서 갑작스러운 운전조작에 의해 넘어지는 전복으로 나눌 수 있다.

후자의 경우는 운전자가 갑작스러운 조향과 제동조작을 할 경우 차량의 불안정한 동적응답으로 인한 전복현상을 말한다. 운전자의 이러한 조향 및 제동입력으로 인한 평지에서의 전복현상에 연구가 발표되었다^{7,8)}. 즉, 차량에 대한 갑작스러운 조향 및 제동입력이 차량의 현가장치에 대한 횡방향의 고유진동 특성을 자극하여 전복이 되는 현상에 대한 연구이다. Allen과 Rosenthal⁹⁾은 차량동역학 전용 해석 프로그램인 VDANL¹⁰⁾을 사용하여 차량의 동적 불안정성에 대해 연구하였다. 그들은 운전자의 운전입력에 의하여 차량이 spin-out 및 rollover 등의 불안정한 상태에 이를 수 있음을 보였으며 상태 평면도에 의하여 이를 판별하였다.

따라서, 본 연구에서는 승용차보다는 상대적으로 전복성향이 높을 것으로 예상되는 지프차량의 컴퓨터 모델을 사용하여 차량의 물운동 특성과 평지에서의 전복성향에 대해 연구하였다.

2. 차량의 전복성향 해석을 위한 수학적 모델

차량의 전복성향을 분석하기 위한 모델로서 간단한 준정적 모델에서부터 복잡한 다물체 모델까지 다양한 모델을 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용된 지프차량의 동역학모델에 사용되는 파라메타는 Table 1과 같다. 이 차량은 총중량이 약 1,700 kg_r, 차폭(track width)이 약 1.47 m, 그리고 축거(wheelbase)가 약 2.58 m인 중형 차량이다.

Table 1 Vehicle parameters

Vehicle parameter		Value
Vehicle weight, W		16,311 (Newton)
Track width	Front	1.471 m
	Rear	1.476 m
Wheelbase		2.578 m
C.G. height		0.682 m
Roll center height	Front	0.462 m
	Rear	0.480 m
C.G. from front axle		1.147 m
Roll moment of inertia, I _x		653 kg·m ²
Pitch moment of inertia, I _y		2,498 kg·m ²
Yaw moment of inertia, I _z		2704 kg·m ²
Product moment of inertia, I _{xz}		85 kg·m ²
Suspension rate	Front	25,687 N/m
	Rear	22,648 N/m
Shock absorber Damping coefficient	Front	2,295 N·s/m
	Rear	2,107 N·s/m
Tire stiffness		224,639 N/m
Axle height	Front	0.332 m
	Rear	0.342 m
Roof height		1.664 m

2.1 준정적 모델

가장 간단한 모델은 Fig. 1과 같이 차량 전체를 강체로 보고 차량이 선회시에 받는 횡가속도를 고려한 모델이다.

차량이 정상선회시에는 Fig. 1에서와 같이 원심력에 의해 선회반경의 바깥쪽으로 횡가속도가 생기게 된다. 선회반경 바깥쪽의 점 B에 대해 모멘트의 평형을 구하게 되면 다음 식과 같다.

$$M_a y_h + N_t t - M g t / 2 = 0 \dots\dots\dots(1)$$

위 식을 횡가속도에 대해 정리하면

$$a_y/g = [t/2 - (N_L t)/(Mg)]/h \dots\dots\dots(2)$$

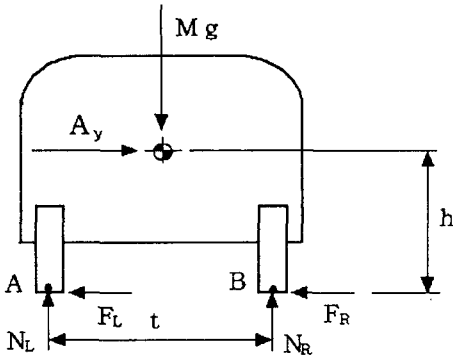


Fig. 1 Quasi-static vehicle roll model

차량의 전복은 선회반경 안쪽의 바퀴가 노면 위로 뜨면서 시작되기 때문에 식 (2)에서 선회반경 안쪽 바퀴의 수직반력인 N_L 을 0으로 하면

$$a_y/g = (t/2)/h \dots\dots\dots(3)$$

식 (3)은 전복이 시작되기 위한 조건이며 TWR(Track Width Ratio)라고 불린다. 이것은 차량의 무게중심의 높리와 차폭만 알면 되기 때문에 가장 간단한 방법이다. 식 (3)을 이용하면 본 연구에서 사용된 지프차량의 TWR 값은 1.08이다. 승용차의 TWR이 보통 1.2정도임에 비교하면 약간 낮은 값이므로 승용차보다는 상대적으로 전복성향이 높을 것으로 예상된다.

한편, 실제로 차량이 선회할 때에는 스프링상부 차체의 롤운동으로 인해 무게 중심이 선회반

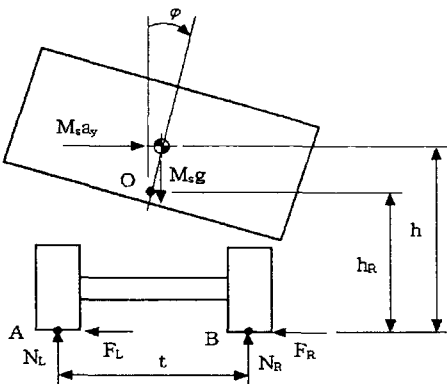


Fig. 2 Suspended vehicle roll model

경 바깥쪽으로 이동하게 되어 차량의 무게중심에 대한 모멘트팔이 짧아지게 되어 전복운동에 저항하는 효과가 감소하게 된다. 따라서 이러한 차체의 롤운동을 고려한 모델은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 선회반경 바깥쪽의 타이어 접촉점 B에 대하여 모멘트 식을 구하면,

$$M_s a_y h - M_s g [t/2 - \phi(h-hr)] = 0 \dots\dots\dots(4)$$

식 (4)를 정리하면

$$a_y/g = (t/2h) - (\phi/h)(h-hr) \dots\dots\dots(5)$$

이므로, 식 (5)에서 보는 바와 같이 스프링상부 차체의 롤운동으로 인해 Track Width Ratio 값이 더 작아지게 된다.

2.2 과도적 모델

차량이 정상적으로 선회할 때 일정한 횡가속도를 받게 된다는 가정하에서 만들어진 준정적 모델과는 달리 과도적 모델은 차량의 과도적인 횡가속도를 고려한 모델이다. Fig. 3은 이러한 과도적인 롤운동을 해석하기 위한 모델을 보여준다.

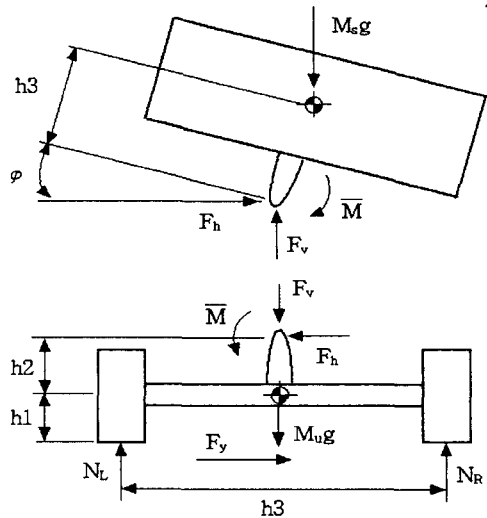


Fig. 3 Two degrees of freedom roll dynamics

Fig. 3의 모델에서 스프링상부 차체의 무게중심에 대해 힘의 평형을 구하면,

$$F_h = M_s \ddot{y} + M_s h_3 \ddot{\phi} \cos \phi - M_s h_3 \dot{\phi}^2 \sin \phi \dots\dots(6)$$

$$F_v = M_s g - M_s h_3 \ddot{\phi} \sin \phi - M_s h_3 \dot{\phi}^2 \cos \phi \dots (7)$$

차량의 롤강성을 k_t 라하고 롤댐핑을 c_t 라 하면 스프링상부 차체에 전달되는 롤모멘트는 다음 식과 같이 된다.

$$\overline{M} = -k_t \phi - c_t \dot{\phi} \dots (8)$$

$$-F_h h_3 \cos \phi + F_v h_3 \sin \phi + \overline{M} = I_s \ddot{\phi} \dots (9)$$

식 (9)에 식 (8)을 대입하면,

$$I_s \ddot{\phi} + c_t \dot{\phi} + k_t \phi + F_h h_3 \cos \phi - F_v h_3 \sin \phi = 0 \dots (10)$$

식 (10)에 식 (6)과 (7)을 대입하여 선형화하면,

$$(I_s + M_s h_3^2) \ddot{\phi} + M_s h_3 \ddot{y} + c_t \dot{\phi} + (k_t - M_s g h_3) \phi = 0 \dots (11)$$

이고, 이 식 (11)은 차량의 롤운동에 대한 특성을 나타내는 운동방정식으로서 이 식에 지프차량의 파라미터(Table 1 참조)를 적용하면 롤운동의 고유진동수는 1.48 Hz로 계산된다.

한편, Fig. 3의 스프링하부 차체의 무게중심에 대해 힘의 평형을 구하면,

$$F_y - F_h = M_u \ddot{y} \dots (12)$$

식 (12)에 식 (6)을 대입하면,

$$(M_u + M_s) \ddot{y} + M_s h_3 \ddot{\phi} \cos \phi - M_s h_3 \dot{\phi}^2 \sin \phi = F_y \dots (13)$$

식 (13)을 선형화하면,

$$(M_u + M_s) \ddot{y} + M_s h_3 \ddot{\phi} = F_y \dots (14)$$

으로서, 식 (11)과 (14)는 각각 스프링상부 차체와 하부 차체에 대한 2자유도 운동방정식이 된다.

F_y 를 입력으로 하여 식 (11)과 (14)를 연립하여 풀면 롤운동에 대한 출력이 나온다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 Impulse와 Step함수를 사용한 입력에 대한 롤각의 출력을 나타낸 것이다. 이 두 그림에서 롤운동의 고유진동수는 약 1.48 Hz임을 확인할 수 있으며, 이 때의 최대 롤각은 0.361 rad로 나타났다. 따라서 식 (5)에 의하면 이 때의 TWR 값은 약 0.97이 된다. Step함수의 입력 F_y 값으로는 0.25g에 해당하는 4,092 Newton을 사용하였으며 롤 각은 정상상태에서 0.0218 rad이다.

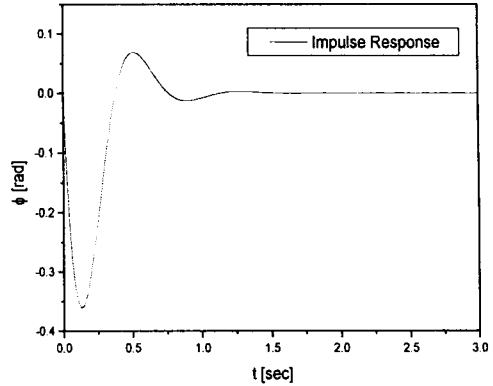


Fig. 4 Impulse response

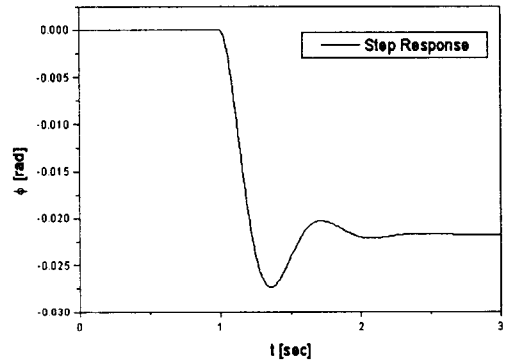


Fig. 5 Step response

3. 차량 운동해석 전용 프로그램을 사용한 모델

지프차량의 진복성향을 해석하기 위하여 차량 운동해석 전용 프로그램인 VDANL¹⁰⁾을 사용하였다. VDANL 프로그램을 이용한 지프차량 모델은 스프링 상부질량의 롤각, 피치각, 수직운동 및 횡방향 가속도, 차량의 요각 및 종방향의 속도, 바퀴의 조향각, 전륜차축과 후륜차축의 수직운동, 롤운동 및 횡방향 가속도 그리고 네 바퀴의 회전속도를 포함하여 총 17 자유도를 가지고 있는 모델이다.

3.1 모델의 검증

먼저 모델의 롤운동에 대한 특성을 알아보기 위하여 J-turn 및 Slalom Test를 적용하였다.

Fig. 6은 차량모델이 차속 40 km/h 의 속도로 정속 주행하면서 조향각 1 rad을 사용하여 J-turn 할 때의 롤각, 롤레이트, 횡가속도의 결과를 각각 보여준다. 여기에서 횡가속도는 0.25g이며 롤각은 0.0180 rad이다. 여기에서 롤각 값이 2자유도 모델의 경우인 0.0218보다 약 17%의 차이를 보인다. 이것은 VDANL 모델이 2자유도 선형 모델보다 실제적인 비선형 모델이기 때문이다.

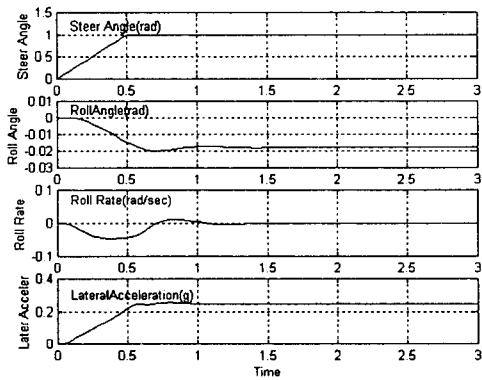


Fig. 6 J-turn simulation

Fig. 7은 차량모델에 조향각이 점진적으로 증가되는 정현파 입력과 이에 대한 롤각의 출력을 보여준다. 이 출력 롤각에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)해석을 한 결과 약 1.5Hz 부근에서 롤각의 진폭이 커짐으로서 이것이 롤운동의 고유진동수임을 확인하였다. 즉, 정현파 조향

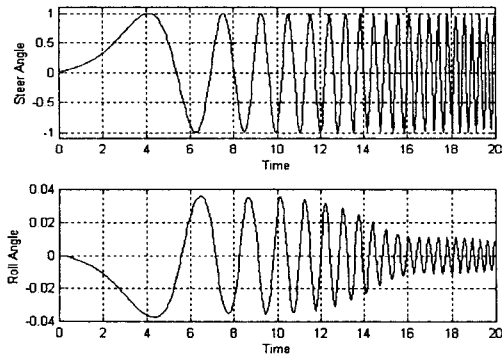


Fig. 7 Roll angle response for sinusoidal sweep steering

입력의 진동수가 롤운동의 고유진동수와 유사하게 되면 롤 공진을 일으키게 된다.

Fig. 8은 이 고유진동수를 사용한 정현파 조향입력을 가하여 반복장애물 통과시험(slalom test)에 대한 시뮬레이션을 한 결과인데 공진을 일으켜 롤각이 점차 증가함을 보여준다.

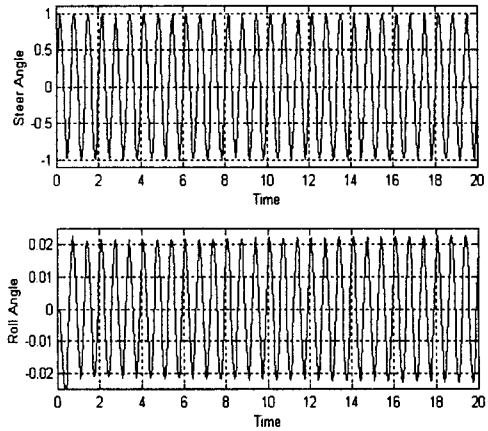


Fig. 8 Roll response for sinusoidal steering input with frequency of 1.5 Hz

3.2 전복 시뮬레이션

Fig. 9는 역조향(reversed steer) 입력에 대한 롤운동 출력을 보여준다. 이 때의 최대 횡가속도는 0.86g이다. 이 때의 타이어의 수직하중을 관찰한 결과 전복이 일어나지 않았다.

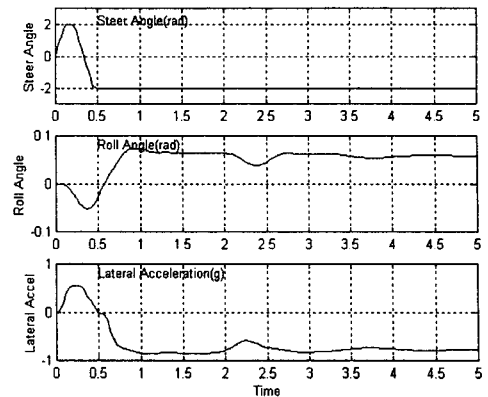


Fig. 9 Roll response for the reversed steer

Fig. 10은 역조향 입력을 사용하여 최대 횡가속도가 생길 때 제동임펄스를 순간적으로 가한 경우인데 횡가속도가 거의 0.9g가 됨을 보여주고 있다. 이 때의 타이어의 수직하중을 Fig. 11에 보여준다. Fig. 11을 보면 선회반경 안쪽 바퀴의 수직하중(F_{zLF} , F_{zLR})이 0이 되는 순간이 발생하는데 이것은 바퀴가 노면에서 뜨는 것이다. 이것은 어디까지나 전복이 시작되는 초기조건이므로 이후 다시 차량이 안정화되어 바퀴가 지면과 재접촉하는 것을 알 수 있다.

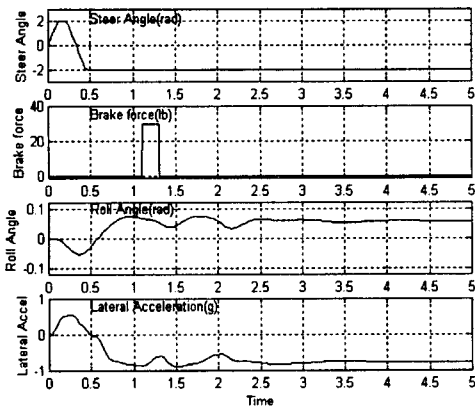


Fig. 10 Roll response for reversed steer and brake input

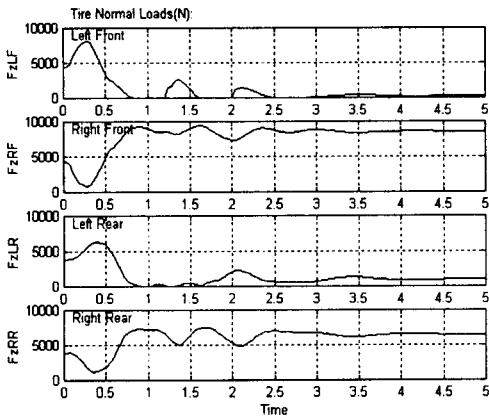


Fig. 11 Tire normal load

Fig. 12는 도요다 자동차회사의 롤성향 시험 기준인 Fish-Hook maneuver를 구현하기 위한

시뮬레이션 결과이며, Fig. 13은 Fish-Hook maneuver의 주행경로를 보여주고 있다. 즉, 시속 40 km의 속도로 주행하다가 역조향을 하면서 횡가속도를 최대화하기 위하여 갑작스런 제동임펄스를 가하는 시뮬레이션이다. Fig. 14는 이 때의 전복성향을 살펴보기 위하여 노면에 대한 네 바퀴의 수직하중을 보여주는 그림이다. 순간적으로 바퀴가 노면과 접촉을 상실하였으나 다시 접촉하여 안정을 회복할 수 있음을 알 수 있다.

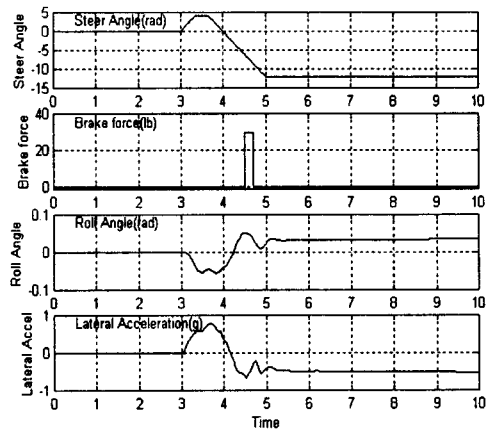


Fig. 12 Roll response for fish-hook maneuver

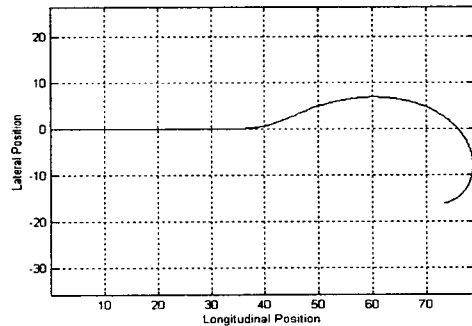


Fig. 13 Path of fish-hook maneuver

Fig. 15는 Fish Hook maneuver 시뮬레이션에서 상태변수인 롤각(roll angle)과 롤각속도(roll rate)의 상태평면도를 나타내며, 발산하지 않고 안정화 되어가는 경향을 보여주고 있다. Fish-Hook maneuver에서는 제동시기가 차량의 롤은

동(roll motion)에 중요한 영향을 미친다.

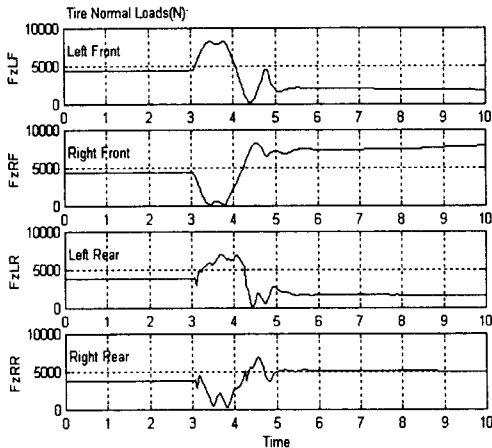


Fig. 14 Tire normal load for fish-hook maneuver

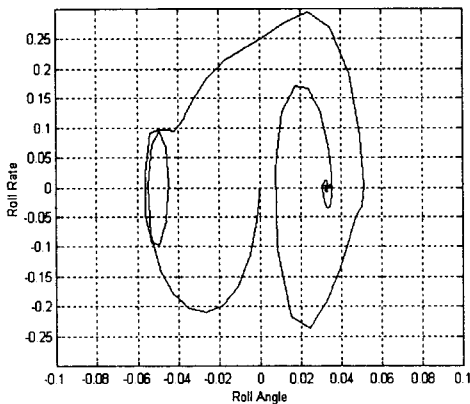


Fig. 15 Phase plane for roll angle and roll rate

4. 결 론

본 연구에서는 2자유도 모델을 사용하여 차량의 롤운동에 대한 기본적인 운동방정식을 유도하였으며, 차량운동해석 전용 프로그램을 사용하여 지프차량의 전복성향에 대하여 연구하였다. 지프차량은 Track Width Ratio가 작으므로 승용차에 비해 비교적 전복성향이 높은 차량이라고 할 수 있다.

간단한 준정적 모델과 과도적 모델을 사용하여 지프차량의 롤운동에 대한 기본 특성을 알아

보았으며, 차량운동해석을 위한 전용 프로그램인 VDANL을 사용한 지프차량의 비선형모델에 대하여 전복성향을 알아보았다. 준정적 롤운동 해석과 과도적 롤운동해석을 통해 롤운동의 고유진동수와 TWR 값을 구하였다. 또한, J-turn, Sinusoidal steering을 통하여 롤운동특성을 살펴보았으며 Reversed Steer 및 Fish Hook maneuver 시뮬레이션을 하여 전복성향을 알아보았다. 그 결과 바퀴가 지면에서 뜨게 되는 전복초기현상은 발견되었지만 차량의 완전한 전복은 나타나지 않았다. 순수한 조향만으로는 완전한 전복에 필요한 충분한 횡가속도를 얻기가 힘들기 때문에 조향과 병행하여 순간적인 제동입력을 가하는 것이 차량의 불안정한 롤운동을 유발하는데 효과적이다.

본 연구에서는 제한된 운전입력 조건을 사용하였는데 보다 다양한 운전조건을 사용한 시뮬레이션이 필요하며 이 경우 롤운동에 대한 민감도해석이 더욱 효과적일 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) T.M. Klein, "A Statistical Analysis of Vehicle Rollover Propensity and Vehicle Stability", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #920584, 1992.
- 2) R.S. Rice, et al., "Development of Vehicle Maneuver", U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Final Report, June 1978.
- 3) R.W. Allen et al., "Vehicle Dynamic Stability and Rollover", Systems Technology, Inc., Technical Report No.1268-1, June 1992.
- 4) Vehicle Dynamics and Rollover Propensity Research, Society of Automotive Engineers, SP-909, 1992.
- 5) J. Hinch, S. Shadle, and T. M. Klein, "NHTSA's Rollover Rulemaking Program-Results of Testing and Analysis", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #920581, 1992.

- 6) J.P. Chrstos and D. Guenther, "The Measurement of Static Rollover Metrics", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #920582, 1992.
 - 7) J. Bernard, J. Shannan, and M. Vanderploeg, "Vehicle Rollover on Smooth Surfaces", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #891991, 1989.
 - 8) W.R. Garrott and G.J. Heydinger, "An Investigation, Via Simulation, of Vehicle Characteristics that Contribute to Steering Maneuver Induced Rollover", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #920585, 1992.
 - 9) R.W. Allen and T.J. Rosenthal, "A Computer Simulation Analysis of Safety Critical Maneuvers for Assessing Ground Vehicle Dynamic Stability, SAE Paper #930760, 1993.
 - 10) Vehicle Dynamic Analysis Non-Linear User's Guide, Systems Technology, Inc., 1989.
-