

편경사와 마찰계수 변화에 따른 차량 주행 안정성 평가

Evaluation of Running Stability of Vehicle According to Superelevation and Friction Coefficient

옥진규* · 김광석** · 손정현*** · 유완석**** · 김용석*****

Ok, Jin Kyu · Kim, Kwang Suk · Sohn, Jeong Hyun · Yoo, Wan Suk · Kim, Yong Seok

1. 서론

도로(road)는 자동차가 안전하게 주행할 수 있고, 승객이 느끼는 주행의 쾌적성을 고려하여 설계해야 한다. 도로의 선형은 평면선형과 종단선형으로 조합되어 입체 선형을 이룬다. 도로의 평면선형은 자동차의 주행궤적에 따르도록 직선, 완화곡선, 원곡선으로 구성되어야 하고, 이 세 가지 요소는 적절한 길이 및 크기로, 연속적이며 일관성 있는 흐름을 갖도록 설계되어야 한다. 그리고 종단선형은 자동차 주행에서 등판능력과 시거확보를 만족하도록 직선과 곡선으로 구성된다.

도로의 안전주행과 선형과의 관계를 분석하여, 도로의 설계에 대한 연구가 진행되어 왔다. 미국의 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에서는 도로와 가로에 있어서 시거와 설계속도와의 관계를 연구하여 설계의 기준을 제시하였고, 도로의 기하학적 구조설계에 관한 광범위한 지침서를 제시하였다(AASHTO, 1990). 한국의 건설교통부에서는 도로의 구조, 시설 기준에 관한 규칙을 제시하여 운전자와 보행자의 편의시설 강화와 도로정보시설 설치기준 등을 마련하였다(건설교통부, 2000). 그러나 이러한 연구는 자동차를 질점(particle)으로 취급하였으므로 자동차의 기구학적인 영향과 현가장치(suspension system)의 특성은 고려되지 않았다.

차량동역학(vehicle dynamics)을 사용한 차량 거동해석은 경험적 방법(experiments method)과 해석적인 방법(analytical method)으로 분류할 수 있다. 해석적인 접근은 해석 모델을 확립하기 위해 차량, 타이어 성질과 관심이 있는 힘 또는 운동 사이의 관계를 대수 방정식이나 미분 방정식으로 표현하는 것이다. 이러한 방법으로 차량 현가장치의 기구학 해석(kinematic analysis), 차량의 승차감(ride quality) 및 안정성을 해석할 수 있다(Gillespie, 1992). 차량동역학 해석 및 다물체 동역학(multibody dynamics) 해석 프로그램의 개발과 해석을 하고 있는 부산대학교 CAE 연구실에서는 독자적인 해석용 프로그램인 AUTODYN7(AUTOmobile DYNamics in G7)을 개발하였다(부산대학교, 1998). 본 연구에서는 이러한 차량동역학 이론 및 해석기술을 이용하여 주행속도별 차량의 거동을 시뮬레이션 하고자 한다.

주행속도별 차량의 거동을 살펴보기 위해 국내에서 생산된 차량을 대상으로 차량 동역학 해석용 차량 모델을 MSC/ADAMS 프로그램을 이용하여 모델링 하였다. 차량은 전·후진 및 회전이 가능하도록 모델을 구성하였으며, UA(University of Arizona) 타이어 모델을 사용하였다. 차량은 반경 R=200m인 직선, 완화곡선, 원곡선으로 구성된 도로를 편경사 0, 4, 6 %일 때 각각에 대하여 주행속도를 증가하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 타이어와 노면의 편경사의 영향을 고려하여 건조한 노면, 젖은 노면, 결빙 노면에 대해 해석을 수행하였다.

* 부산대학교 기계설계공학과 · 박사과정 · 051-510-1457 (E-mail : jkok@pusan.ac.kr)

** 인하공업전문대학 자동차과 부교수 · 공학박사 · 032-870-2364 (E-mail : kskim@inhac.ac.kr)

*** 부경대학교 기계공학부 조교수 · 공학박사 · 051-620-1539 (E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr)

**** 부산대학교 기계공학부 교수 · 공학박사 · 051-510-2328 (E-mail : wsyoo@pusan.ac.kr)

***** 한국건설기술연구원 도로연구부 도로안전팀 선임연구원 · 031-910-0178 (E-mail : safeys@kict.re.kr)

2. 차량 동역학 모델 및 도로

2.1 차량모델 및 노면 마찰계수

본 연구에서는 국내에서 생산된 중형 SUV(Sports Utility Vehicle)를 대상으로 전차량 모델(full vehicle model)을 만들었으며, 전륜 현가장치는 맥퍼슨 스트럿(McPherson strut), 후륜 현가장치는 멀티 링크(multi link), 조향장치는 랙-피니언 타입(rack-pinion)이다. 상용 다물체(multi body) 동역학 해석 프로그램인 ADAMS로 차량 모델링을 생성하였다. 차량은 전체 52개의 강체 요소(rigid body), 59개의 조인트(joint), 3개의 커플러(coupler), 3개의 운동 구속(driver constraint), 전·후륜 각각 2개의 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 구성되어 있으며, 타이어모델은 타이어의 자세 및 속도에 대해 노면과의 슬립률을 계산하고 이를 이용해 타이어에 작용하는 힘을 해석적으로 계산하는 UA(University of Arizona) 타이어 모델을 사용하였다(Gim, 1988). 실제 타이어에 근접한 해석 결과를 도출하고, 단순한 Fiala 타이어 모델보다 더 나은 결과를 제공하기 때문에 동역학 해석에 많이 사용된다(Blundell, 2004). 차량 모델의 전체 자유도(degrees of freedom)는 50이며, 전·후진 및 회전이 가능하도록 모델을 구성하였다. ADAMS로 모델링한 차량 모델을 그림 1에 도시하였다. 타이어와 도로 사이의 마찰계수(friction coefficient)는 슬립률(slip ratio)의 함수로 식 (1)과 같이 계산되고, 이를 그림 2에 나타내었다(MSC Software, 2003).

$$\mu = \mu_0 - (\mu_0 - \mu_1)S_{s\alpha\gamma} \tag{1}$$

여기서, $S_{s\alpha\gamma}$ 는 차량 진행방향의 슬립률과 슬립각 및 캠버각에 의한 횡방향 슬립률이 동시에 작용할 때의 슬립률이다. μ_0, μ_1 은 각각 $S_{s\alpha\gamma} = 0, S_{s\alpha\gamma} = 1$ 일 때의 마찰계수이다.

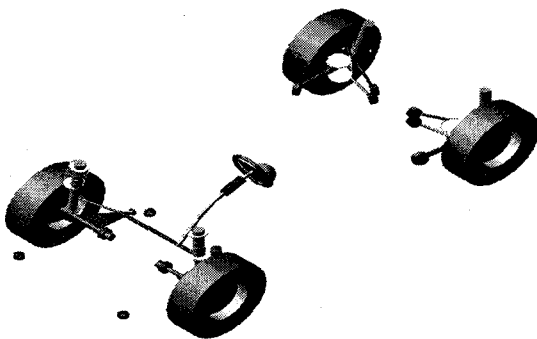


그림 1. ADAMS를 이용한 차량모델

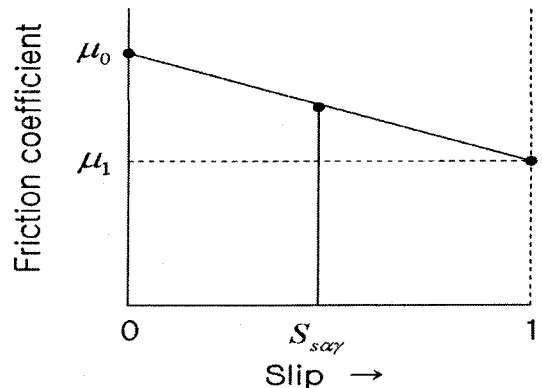


그림 2. 타이어 슬립율과 마찰계수의 관계

본 연구에서는 타이어와 도로와의 마찰을 건조한 아스팔트, 젖은 도로, 빙판길과 같은 3가지 경우에 대해서 각각 적용하였고, 마찰계수를 표 1에 표시하였다(곽상국 등, 2001).

표 1. 타이어와 도로의 마찰계수

Pavement	Friction coefficient
Dry asphalt pavement	0.8 - 0.9
Wet asphalt pavement	0.3 - 0.5
Icy pavement	0.1 - 0.2



2.2 도로의 선형

도로의 평면선형은 경제적 여건이 허락하는 한도 내에서 주행의 안정성, 쾌적성 및 연속성을 고려하여야 하며, 도로의 설계속도에 따라 자동차가 주행하기에 무리가 없도록 직선, 완화곡선, 원곡선으로 구성되어야 한다. 이 세 가지 요소는 적절한 길이 및 크기로, 연속적이며 일관성 있는 흐름을 갖도록 하여야 하며, 특히 평면곡선부인 원곡선과 완화곡선 구간에서는 설계속도와 평면 곡선 반경과의 관계는 물론 편경사, 도로 폭의 설계요소들이 조화를 이루어야 한다(건설교통부, 2000).

자동차가 평면 곡선부를 주행할 때에는 원심력에 의하여 자동차는 곡선 바깥쪽으로 힘을 받게 되며 원심력은 자동차의 속도 및 중량, 평면곡선반경, 타이어의 포장면의 횡방향 마찰력 및 편경사와 관련하여 자동차에 작용하게 된다. 이와 같이 평면 곡선부를 주행하는 자동차에 작용하는 힘의 요소들에 대하여 주행의 안정성과 쾌적성을 확보할 수 있도록 횡방향 마찰계수와 편경사의 향으로 설계속도에 따른 최소 평면곡선반경을 산정하게 된다. 본 연구에서는 이러한 사항을 고려하여 그림 3과 같은 도로를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

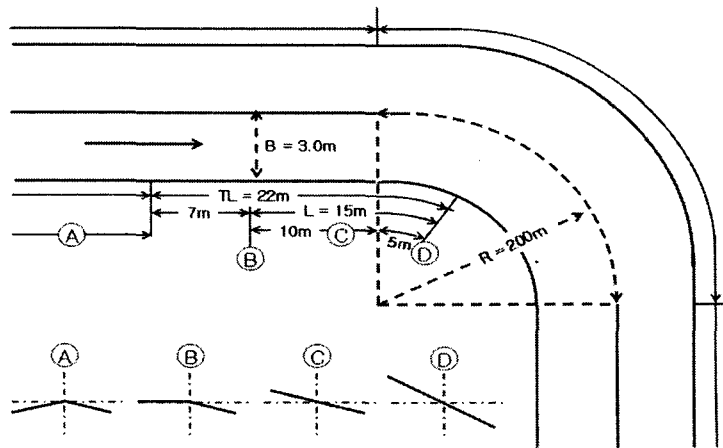


그림 3. 편경사와 평면 곡선부, 완화곡선을 고려한 도로

3. 주행 시뮬레이션

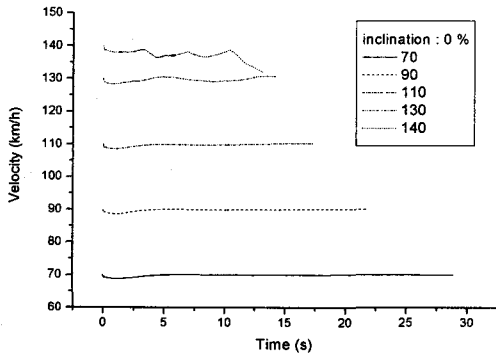
3.1 주행 속도별 차량의 거동

2장의 그림 3과 같은 도로를 차량의 속도와 표 1에 표기한 타이어와 노면의 마찰계수를 변화시켜 가면서 차량이 목표로 한 라인을 잘 따라가도록 ADAMS/Driver 모듈을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. ADAMS/Driver는 정상원 주행(steady state turn), 차선변경(lane change), 슬라럼(slalom) 시험 등과 같은 자동차 주행 시뮬레이션 중에 운전자가 취해야 하는 조향(steering), 제동(braking), 가속(accelerating), 그리고 기어 변속과 클러치(clutch) 조작 등을 수행하는 모듈이다. 따라서 ADAMS/Driver를 이용하여 주행 시험의 도로 형태와 초기 속도 및 가·감속 속도 조건 등에 따라 조향각과 토크(torque), 가속 위치, 제동력(brake pedal force), 기어 선택(gear shift) 등을 결정하여 주행하게 된다(MSC Software, 2003).

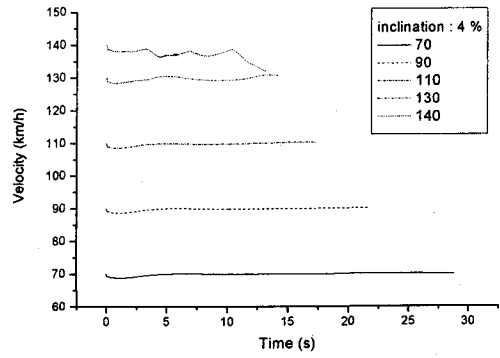
3.1.1 편경사의 영향

(1) 시간에 대한 진행방향 속도와 주행궤적

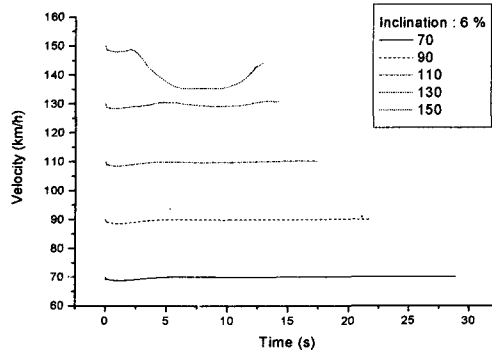
그림 3과 같은 직선, 완화곡선, 평면곡선부가 있는 도로를 편경사가 0, 4, 6 %일 때, 속도 70 km/h에서 20 km/h 씩 증가시키면서 차량이 도로를 벗어나는 속도를 측정하였다. 시간에 대한 차량의 진행방향 속도, 진행방향에 대한 횡방향의 이동 거리를 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다.



(a) 편경사 0 %

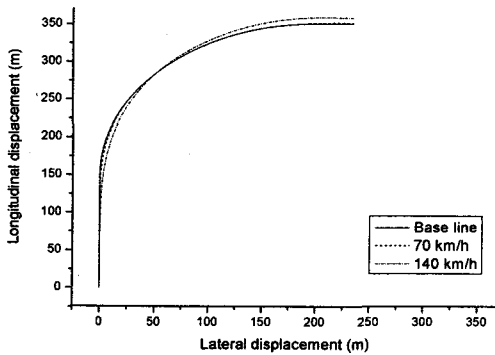


(b) 편경사 4 %

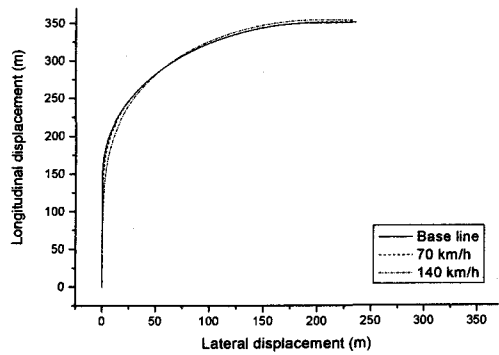


(c) 편경사 6 %

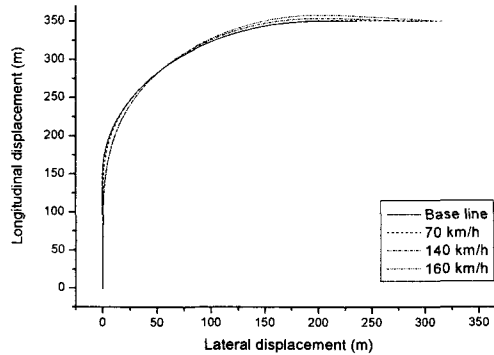
그림 4. 시간에 대한 차량의 진행방향 속도 변화



(a) 편경사 0 %



(b) 편경사 4 %



(c) 편경사 6 %

그림 5. 차량의 진행방향에 대한 횡방향의 이동 거리

ADAMS/Driver를 이용한 차량 시뮬레이션에서 주어진 라인을 따라가면서 속도를 일정하게 유지하도록 설정하였다. 그러나 두 가지 설정을 모두 만족할 수 없다면 속도를 감속하더라도 주어진 라인을 따라가도록 우선 설정을 하였다. 편경사 0 %, 4 %인 포장면에서는 차량의 속도가 70 km/h에서 130 km/h까지는 속도를 일정하게 유지하지만, 140 km/h일 때 주어진 라인을 따라가기 위해 속도가 감속됨을 확인할 수 있다. 그러나 초기 진입속도가 과도했기 때문에 그림 4 (a), (b)에서 편경사 0 %, 4 %일 때 각각 8.5 m, 4.1 m 도로를 벗어난 것을 확인할 수 있다. 편경사가 6 %인 도로에서는 70 km/h에서 130 km/h까지는 주행시 속도를 일정하게 유지하였으며, 140 km/h를 넘어선 속도 구간에서는 주어진 도로를 따라가기 위하여 속도가 감속됨을 확인할 수 있다. 편경사 0 %, 4 % 도로와 달리 편경사가 6 %일 때에는 그림 4 (c)와 같이 속도가 160 km/h에서 주어진 라인을 8.2 m 이탈함을 확인할 수 있다. 이와 같이 동일한 반경에서 편경사의 각이 커질수록 차량의 한계 속도는 증가하는 것을 알 수 있다.

(2) 횡방향 가속도

표 2. 차량의 주행속도 증가에 따른 횡가속도의 변화

속도(km/h)	횡가속도(G)		
	편경사 0 %	편경사 4 %	편경사 6 %
70	0.228	0.194	0.193
80	0.271	0.261	0.257
90	0.336	0.329	0.328
100	0.428	0.410	0.407
110	0.519	0.495	0.482
120	0.618	0.607	0.573
130	0.705	0.702	0.684
140	0.793	0.757	0.753
150			0.776
160			0.792

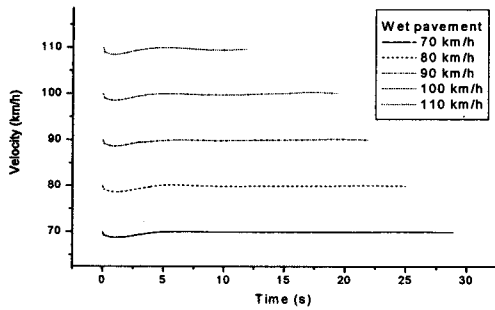


위의 표 2는 차량의 주행속도 증가에 따른 횡가속도의 변화를 정리한 데이터이다. 각 데이터 값은 최대 피크 값을 취한 것으로 시뮬레이션시 가속도 변동에 의한 영향을 받으므로 계산에 의한 값보다는 약간 큰 것을 볼 수 있다. 같은 속도에서 편경사가 증가함에 따라 횡가속도는 감소하게 되고, 편경사의 기울기가 커질수록 차량의 한계 속도는 증가한다. 그리고 같은 속도로 주행하더라도 횡가속도의 크기가 작을수록 운전자는 안정감 있게 주행할 수 있을 것이다.

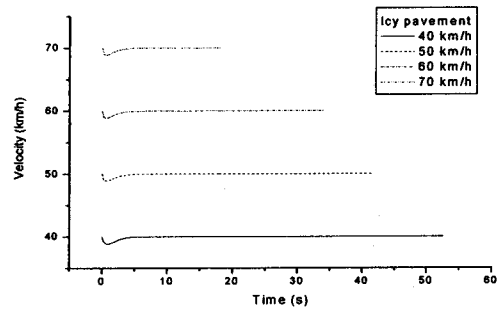
3.2.2 노면의 영향

(1) 시간에 대한 진행방향 속도와 주행궤적

그림 3과 같은 직선, 완화곡선, 평면곡선부가 있는 도로를 편경사가 6 %일 때, 젖은 노면과 결빙 노면 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 젖은 노면조건에서는 속도를 70 km/h에서 10 km/h씩 증가시키면서 시뮬레이션하였고, 결빙 노면 조건에서는 속도 40 km/h에서 10 km/h씩 증가하면서 차량의 운동성능을 시뮬레이션 하였다. 각 노면에 대해 시간에 대한 차량의 진행방향 속도와 진행방향에 대한 횡방향의 이동 거리를 각각 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 6, 그림 7에서 보면 젖은 노면에서는 속도 110 km/h 근처에서 도로를 이탈하는 것이 관측되었고, 결빙 노면에서는 속도 70 km/h 부근에서 도로를 21.8 m 이탈하는 결과를 얻었다. 노면의 마찰력이 작아질수록 같은 반경을 선회하더라도 한계속도는 줄어드는 것이 확인되었다.

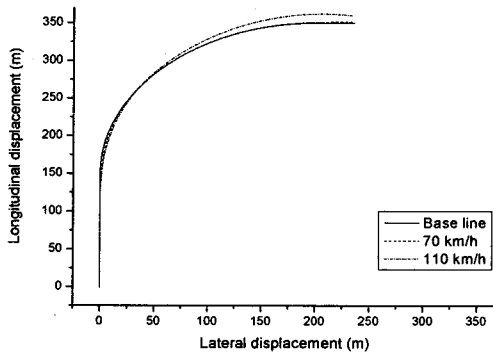


(a) 젖은 노면($\mu=0.3 - 0.5$)

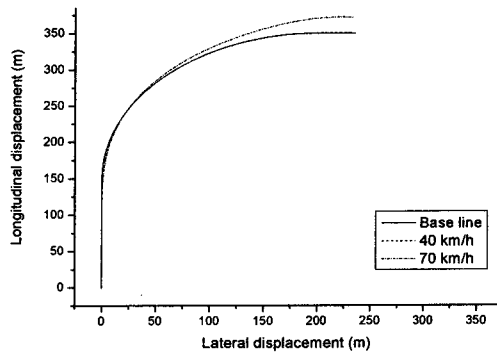


(b) 결빙 노면($\mu=0.1 - 0.2$)

그림 6. 젖은 노면과 결빙 노면에서의 차량 주행속도



(a) 젖은 노면($\mu=0.3 - 0.5$)



(b) 결빙 노면($\mu=0.1 - 0.2$)

그림 7. 젖은 노면과 결빙 노면에서의 차량 주행궤적



(2) 횡방향 가속도

표 3. 주행속도 증가에 따른 횡가속도의 변화, 젖은 노면과 결빙 노면

속도(km/h)	횡가속도(G)		
	마른 노면	젖은 노면	결빙 노면
40			0.063
50			0.098
60			0.142
70	0.193	0.191	0.175
80	0.257	0.258	
90	0.328	0.325	
100	0.407	0.407	
110	0.482	0.493	

표 3에서 주행속도가 증가하게 되면 횡가속도 또한 증가하며, 도로를 이탈하지 않는 조건에서는 타이어와 노면의 마찰력에 구애받지 않고 횡가속도는 같은 값을 갖는다. 약간의 차이가 발생하는 것은 시뮬레이션 데이터에서 피크값을 취할 때의 오차로 볼 수 있다. 일반적으로 원심력에 의하여 자동차는 전복(roll-over)보다는 횡방향 미끄럼의 영향을 먼저 받게 되므로 횡방향 미끄럼에 안전할 수 있는 한계치의 최소 평면곡선반경을 결정하게 되며 그 값은 식 (2)와 같다.

$$R = \frac{V^2}{127(i + f)} \tag{2}$$

여기서, V 는 차량의 속도, i 는 편경사, f 는 횡방향 미끄럼마찰계수이다.

식 (2)에 $V = 70 \text{ km/h}$, $i = 0.06(6 \%)$, $f = 0.13$ 을 대입하면 $R = 203 \text{ m}$ 가 계산된다. 즉, 횡방향 마찰계수가 0.13, 편경사 6%, 차량의 속도가 70 km/h이면 필요한 최소 선회반경은 203 m는 되어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 시뮬레이션 결과 그림 7 (b)에서 보듯이 결빙노면에서 차량의 속도가 70 km/h일 때 도로를 이탈하였다. 더욱 정확하게는 속도 69 km/h에서부터 차량은 원래 주어진 노면 궤적을 따라가지 못하고 차선을 이탈함을 확인할 수 있었다. 이는 수식적 계산에서 사용된 횡방향 마찰계수와 실제 시뮬레이션에서 사용하는 마찰계수의 차이로 인해 발생할 수 있다고 사료된다. 실제 시뮬레이션에서는 타이어의 종방향 슬립률과 횡방향 슬립률을 계산하여 전체 발생하는 슬립률을 계산하고 이로부터 마찰계수를 계산한다. 반면 수식적 모델에서는 횡방향 마찰계수만 고려함으로써 본 연구의 결과와는 약간의 차이를 가짐을 알 수 있다. 실 주행시에도 차량의 마찰력 특성은 구동력(또는 제동력)과 선회력의 합력의 크기가 최대 마찰력의 크기보다 클 수 없으므로 한 방향 힘의 증가가 발생하면 다른 방향의 힘은 줄어들게 된다.

본 연구에서는 주어진 노면 궤적을 따라갈 수 있도록 구속조건을 주었는데 이때 운전자 모델을 사용하여 약간의 속도 증감(가·감속)이 가능하도록 하였다. 이때 선회시 노면 궤적을 따라가면서 종방향 속도의 증가와 함께 횡방향 선회력의 감소가 발생할 수 있는데 이것이 실제 절점동역학으로 계산된 한계속도와와의 차이가 발생하는 이유라고 사료되며 전체적으로 근거있는 결과를 얻을 수 있었다.



4. 결 론

본 연구에서는 차량의 거동을 분석하기 위하여 차량 모델링을 다물체동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하였고, 그중 운전자 관련 모듈인 ADAMS/Driver 모듈을 이용하여 차량 동역학 해석을 수행하였다.

직선, 완화곡선, 평면곡선부가 있는 도로를 편경사가 0, 4, 6 %일 때, 속도 70 km/h에서 10 km/h씩 증가하면서 차량이 도로를 이탈하는 속도를 측정하였다. 동일한 반경 $R = 200m$ 일 때 같은 속도 구간에서는 편경사가 증가함에 따라 횡가속도는 감소하고, 편경사의 기울기가 커질수록 차량의 한계 속도는 증가하였다. 그리고 타이어와 도로의 마찰계수가 낮아질수록 같은 반경을 선회하더라도 한계속도는 감소되었다.

타이어와 노면과의 슬립률에 대한 마찰계수를 절점동역학에서는 고려될 수 없는 실제 타이어와 노면에서 발생하는 메카니즘을 사용함으로써 해석의 정확성을 기하였다. 결과적으로 빙판길을 기준으로 반경 200 m, 편경사 6 %인 도로를 한계차속 68 km/h로 주행이 가능하다는 것을 확인하였다. 이 값은 절점동역학에서 계산된 한계속도 70 km/h보다 2 km/h 작은 값으로 이는 수식적 계산에서 사용된 횡방향 마찰계수와 실제 시뮬레이션에서 사용하는 마찰계수의 차이로 인해 발생할 수 있다고 사료되며, 향후 연구에서 보다 정확한 타이어 모델과 노면 모델의 사용에 의해 다시 한 번 규명해 볼 예정이다.

향후 연구에서는 보다 정확한 차량모델 및 타이어 모델, 노면 모델을 사용함으로써 선회시 차량의 거동에 대한 보다 정밀한 분석과 함께 실차 시험 결과와 비교, 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 위탁연구사업의 지원으로 이루어졌으므로 지원기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 박상국 외 3인, 2001, 자동차 새시, 선학출판사.
2. 건설교통부, 2000, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙-해설 및 지침.
3. 부산대학교 CAE연구실, 1998, AUTODYN7 Users's Manual.
4. AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials), 1990, A Policy on Geometric Design of Highway and Streets, USA.
5. M. Blundell, D. Harty, 2004, Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics, Elsevier, USA.
6. MSC Software Inc., 2003, ADAMS Users's Manual, USA.
7. T. D. Gillespie, 1992, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, USA.
8. G. H. Gim, 1988, Vehicle Dynamic Simulation With a Comprehensive Model For Pneumatic Tires, Ph.D Thesis, The University of Arizona. USA.