

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.2.25>

JIIBC 2013-2-4

매개변수에 따른 커브 길에서 차량 선회특성에 관한 연구

A Study on Turning Characteristics of Vehicle Based on Parameters of Curved Road

양성훈*, 이학용*, 윤준규**

Sung-Hoon Yang, Hak-Yong Lee, Jun-Kyu Yoon

요 약 차량이 곡선도로를 선회함에 있어 차량 내부적 요소인 차량의 진입속도, 차량에 작용하는 횡가속도, 전복과 관련된 롤 각, 그리고 외부적 요소인 노면과 타이어와의 마찰 및 도로의 구조는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 교통사고 재현을 위한 PC-Crash 프로그램을 이용하여 차량의 진입속도와 도로의 편경사, 노면상태에 따른 마찰계수를 변수로 두어 선회 시 차량의 상태변화를 분석하였다. 그 결과로, 곡선도로 선회시 한계속도 설정에 관해 도로구조와 노면상태에 따른 마찰계수가 중요한 요소가 된다는 것을 확인하였다.

Abstract Entry speed of the vehicle and lateral acceleration acting on the vehicle, roll-angle associated with the overthrow, and then the structure of the road, the friction of road surface are important factors in turning on the curved road. In this study, we analyzed the state change of the vehicle causing entry speed of the vehicle and superelevation of the road, the friction coefficient by using a PC-crash Program for traffic accident reconstruction. As a result, when vehicle is turning the curved road, we could ascertain that the structure of the road and state of the road surface are a major factor about the set up of limited speed.

Key Words : Entry Speed, Lateral Acceleration, Roll-Angle, Friction Coefficient, Superelevation

1. 서 론

우리나라의 지형은 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 있으며 특히 북부지방에는 높은 산지가 펼쳐져 있어 다른 나라에 비해 도로가 굽어져있는 곳이 많으며 자동차 시장의 발달로 인해 차량의 성능이 날이 갈수록 높아지고 있다. 이로 인해 시민들이 커브길 주행 시 도로이탈과 같은 위험을 간과하는 경향을 많이 보이고 있다. 차량이 곡선부를 주행할 때 곡선의 외측으로 원심력이 작용하게 되며, 그 원심력은 편경사와 타이어와 노면

의 횡방향 마찰력으로 상쇄하여 안전하게 주행하도록 도로의 횡단면을 설계·시공한다. 그러나 원곡선반경이 작거나 차량의 속도가 높을 경우 기상상태에 따라 노면의 마찰력이 충분하지 못하면 차량은 곡선부의 외측으로 미끄러지게 되고, 노면의 마찰력이 충분하더라도 차량의 무게중심이 높은 경우 전복될 우려가 있다.

도로를 설계할 때 설계속도에 따른 최소곡선반경보다 큰 곡선반경을 설치하여 시공하고 있으나, 일부 차량은 설계속도보다 높은 속도로 운행하다가 곡선부의 외측으로 미끄러지거나 전복되는 사고가 발생하기도 한

*정회원, 가천대학교 기계·자동차공학과

**정회원, 가천대학교 기계·자동차공학과

접수일자 2012년 8월 20일, 수정완료 2013년 2월 2일

게재확정일자 2013년 4월 12일

Received: 20 August 2012 / Revised: 2 February 2013 /

Accepted: 12 April 2013

**Corresponding Author: jkyoon@gachon.ac.kr

Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Gachon University, Korea

다. 대표적인 곳으로는 고속도로의 루프형 연결로에서 같은 유형의 사고가 발생할 우려가 높다. 고속으로 주행하던 차량이 연결로로 진출하면서 속도를 충분히 감속하지 않을 경우 무게중심이 높은 차량은 미끄러지거나 전복할 우려가 높다. 또한 도시부 도로에서는 좌·우회전 시 동일한 사고가 발생할 수도 있다.

이에 따른 연구동향으로서 Ok 등^[1]은 차량의 거동을 분석하기 위하여 차량 모델링을 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS를 이용하여 그 중 운전자 관련 모듈인 ADAMS/Driver 모듈을 이용하여 차량동역학 해석을 수행하였고, Lee^[2]는 차량의 운동특성을 여러 설계변수의 변화에 따라 각 변수들이 조종안정성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 현가장치나 조향장치 특성이 포함된 코너링 강성을 고려한 차량의 조종안정성 모델에 대하여 민감도 해석을 수행하였으며, Kang 등^[3]은 선회와 제동을 동시에 고려한 집중질량계로 이루어진 17 자유도계 차량모델을 제시하여 선회 시 제동이 가해질 때의 동특성을 시험을 통해 알아보기 위해 계단과 조향입력과 제동을 동시에 가하는 시험과 정상원선회 시 제동을 가하는 두 가지 차량 시험을 수행하였다. 또한 Yun 등^[4]은 차량의 롤운동과 각종 설계변수의 영향을 포함할 수 있는 모델을 설정하여 정상상태 선회주행시의 횡가속도와 조향각의 관계를 검증하였으며, Lee^[5]은 차량 시뮬레이션 프로그램인 CarSIM을 기반으로 One-track 기준모델의 중요변수인 코너링 강성을 몇 가지 알고리즘을 이용하여 실시간으로 추정하여 코너링 강성에 영향을 주는 인자들의 모델링을 통해 기존의 모델보다 비선형성을 포함하고 있는 고정도의 차량 제어용 기준모델을 개발하였으며, 그밖에 실제의 교통사고를 과학적, 객관적으로 차량동역학 등의 역학적 해석과 함께 시뮬레이션의 결과를 분석하여 교통사고의 원인을 해석하는 연구가 활발히 진행되고 있어 그 신뢰성은 한층 높아지면서 사고예방을 도모하고 있다.^{[6]-[8]}

본 연구에서는 교통사고 재현프로그램인 PC-Crash를 이용하여 커브길의 사고사례를 검증하였고, 차량진입속도, 편경사 및 마찰계수 등의 변화를 매개변수로 하여 횡가속도, 롤 각, 좌우측의 타이어 횡력 등을 해석하여 차량의 선회주행특성을 고찰하였다.

II. 사고사례

1. 사고개요

본 사고는 2010년 7월 15일 23시경 강원도 남강릉 톨게이트 커브길에서 과속으로 인한 사고사례로서 도로는 최고제한속도가 50km/h인 고속도로 램프구간이다. 도로 편경사가 6%인 내리막 직선로에서 곡선반경이 약 100m인 우커브 곡선구간으로 이어지고 있다. 본 사고로 사고현장 우커브 곡선구간에는 사고차량이 도로를 미끄러지면서 발생시킨 타이어 흔적이 확인되고 가드레일이 시작부분에서 약 26m 가량 손상되었다. 사고차량이 가드레일을 타고 넘어가 도로를 이탈, 전복되는 과정에서 탑승자 2명이 좌측 노면에 낙하되었다. 사고차량이 도로를 이탈하는 주행과정을 감안할 때 사고차량은 커브구간에 진입하면서 약 112km/h 이상의 속도로 주행한 것으로 추정된다. 한편, 사고지점도로의 곡선반경이 100m(편경사 9%)이기 때문에 차량이 원심력에 의해 횡방향 미끄럼을 일으키지 않기 위한 설계속도는 50~60km/h가 된다. 그림 1은 사고도로 및 사고차량 주행경로를 나타낸 것으로 사고의 재현결과로, 도로에서 사고차량 운전자가 급격한 커브구간에 도달하기 전 속도를 줄이지 않고 105km/h의 속력을 가지고 선회시작 구간을 통과하여 과속으로 인해 조향불능상태에서 언더스티어링이 발생하여 좌측의 가드레일과 충돌 후 전복되어 도로를 이탈하는 것을 확인하였다.



그림 1. 사고도로 및 사고차량 주행경로
Fig. 1. Road and covering route of accident vehicle

III. 해석범위

1. 사고차량의 제한

본 연구에서는 차량의 선회특성을 알아보기 위하여 차량으로 YF소나타를 선정하였다. 그림 2는 PC-Crash

프로그램 상에서 시뮬레이션을 할 가상의 차량을 시험 차량과 동일하게 하기 위하여 차량의 제원을 입력한 화면을 나타낸 것이다.

그림 2. 시험차량의 제원
Fig. 2. Specification of test vehicle

2. 편경사 시험범위와 규정

표 1. 편경사 규정

Table 1. Superelevation regulations

Design velocity (km/h)	Minimum radius of horizontal curve (m)		
	6%	7%	8%
20	15	15	15
30	30	30	30
40	60	55	50
50	90	85	80
60	140	135	130
70	200	190	180
80	280	265	250
90	380	360	340
100	460	440	420
110	600	560	530
120	710	670	630

곡선도로에서의 편경사는 시설기준에 관한 규칙 제2조에서 자동차가 곡선구간을 주행할 때 작용하는 원심력에 저항할 수 있도록 회전중심으로 부터 바깥쪽을 일정한 비율로 높게 지정하여 경사를 높여주는 것이다. 일반적으로 도로를 설계하기에 앞서, 도로를 주행하던 자동차가 회전하게 될 경우 발생하는 원심력에 영향을 최대한 적게 받도록 하기 위해 곡선반경, 횡방향 마찰력, 편경사 등을 적절히 적용하여 설계한다. 표 1은 편경사

규정으로 6%, 7%, 8%와 설계속도에 따른 최소 평면곡선반경을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 편경사에 따른 시뮬레이션을 하기 위하여 주행속도를 60km/h로 고정하여 편경사를 0%, 6%, 8%를 변수로 설정하였다.

3. 마찰계수

표 2는 노면상태에 따른 마찰계수와 최대 감속도를 나타낸 것이다.

표 2. 마찰계수와 감속도

Table 2. Friction coefficient and deceleration

Road conditions	Friction coefficient	Max. deceleration
Dry	0.8	7.85
Wet	0.5	4.91
Very wet	0.4	3.92
Snow	0.3	2.94
Ice	0.1	0.98

본 연구에서는 노면이 건조상태인 마찰계수 0.8과 비가 많이 오는 경우를 가정하여 노면이 매우 축축한 상태인 마찰계수 0.4를 변수로 정하여 시뮬레이션을 하였다.

4. 타이어 횡력과 횡가속도

전륜과 후륜에 작용하는 타이어 횡력은 차량의 질량과 횡가속도와의 곱으로 다음과 같이 나타난다.

$$F_{yf} = \frac{M \cdot c}{L} \frac{V^2}{R} \tag{1}$$

$$F_{yr} = \frac{M \cdot b}{L} \frac{V^2}{R} \tag{2}$$

여기서 b, c는 무게중심에서 전후차축과의 거리(m), M은 차량질량(kg), R은 도로반경(m), L은 축거(m), V는 차량속도 (m/s)을 나타낸다. 따라서 횡가속도의 크기는 차량속도의 제곱에 비례하고 도로반경에 반비례하게 된다.

IV. 결과 및 고찰

위의 사고도로의 제원을 기본으로 차량진입속도, 편경사 및 마찰계수의 여러 환경적 요인들에 변화를 주어

시뮬레이션을 실시하였다. 충분한 속력을 얻어내기 위하여 처음 97m구간까지는 직진도로로 설계하였으며 그 이후부터는 사고사례와 같이 100m의 반경을 가지는 도로를 설계하였다. 또한 고속주행시 도로를 벗어나지 않도록 충분히 도로의 폭을 넓혀 주도록 하였다. 또한 반경 100m에서 정상선회 시 필요한 조향각인 1.62°를 0.5초간 조향하도록 설정하였다.

1. 차량진입속도에 따른 영향

그림 3은 차량진입속도를 40km/h에서 100km/h까지 20km/h씩 증가시켰을 때 거리에 따른 감속의 폭을 나타낸 것이다. 차량진입속도가 낮은 40km/h와 60km/h에서는 각각 4%, 6%로 감소폭이 낮은 반면에, 높은 속도인 100km/h에서는 감소폭이 18%로 크게 나타나 차량진입속도에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 차량이 높은 속도로 진입할 때 노면에서 타이어의 슬립이 커지기 때문에 속도가 급격히 감소한다.

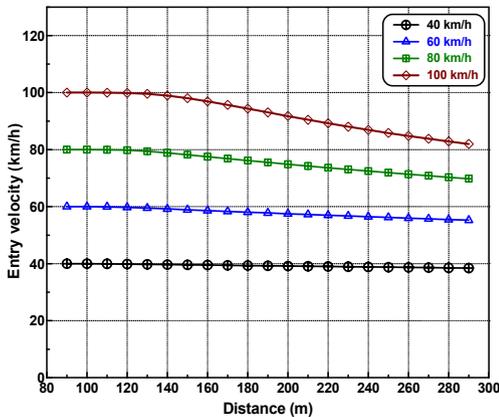


그림 3. 진입속도에 따른 거리와 속도의 관계
Fig. 3. Relationship of between velocity and distance according to entry velocity

그림 4는 차량진입속도에 따른 거리와 롤 각의 특성을 나타낸 것이다. 롤 각은 차량진입속도 40km/h부터 20km/h 씩 증가할수록 각 속도 구간의 롤 각의 최대치는 점점 크게 나타나어 속도에 따른 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 이는 속도가 높을수록 차량의 무게중심에 작용하는 횡가속도도 증가하기 때문이다. 이로 인해 횡력의 크기도 차이가 나게 되고 상대적으로 무게중심의 위치가 차량의 중심에서 멀어지게 된다.

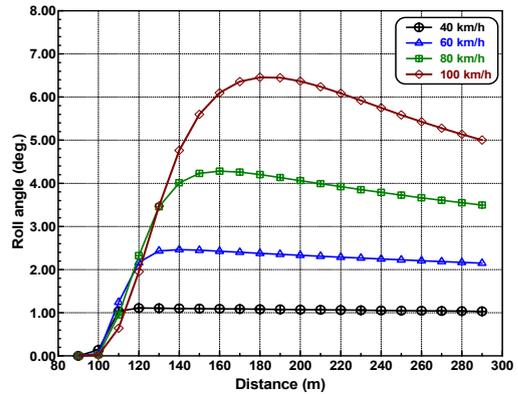


그림 4. 속도에 따른 롤 각의 변화
Fig. 4. The change of roll angle according to speed

그림 5는 차량진입속도에 따른 거리와 횡가속도의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 진입속도가 증가할수록 차량의 무게중심에 작용하는 최대 횡가속도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 특히 최대의 차량진입속도 100km/h인 경우 거리 180m에서 횡가속도가 가장 크고 이후에는 감소함을 알 수 있다. 결론적으로 횡가속도가 커지면 롤 각 커짐으로 그림 4의 특성과 비슷함을 알 수 있다.

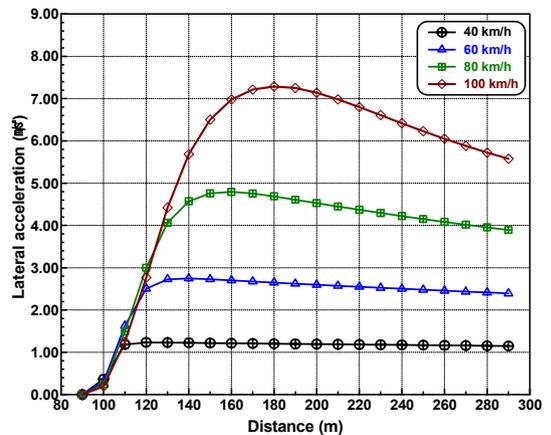


그림 5. 속도에 따른 횡가속도 변화
Fig. 5. The change of lateral acceleration according to speed

그림 6는 차량진입속도에 따른 좌우측 횡력 차이의 특성을 나타낸 것이다. 차량진입속도 40km/h로 정상선회하는 경우와 비교했을 때 20km/h씩 증가할수록 각각

5.2배, 16배, 37.3배로 증가함을 보여 선회시 진입속도가 증가할수록 좌우 타이어의 횡력의 급격한 차이를 나타내어 속도에 따른 영향이 크게 작용함을 알 수 있다. 이는 진입속도가 높을수록 차량의 수직하중의 이동이 커지기 때문이며, 선회시 필요한 타이어횡력의 크기가 급격히 커지는 것을 나타낸다.

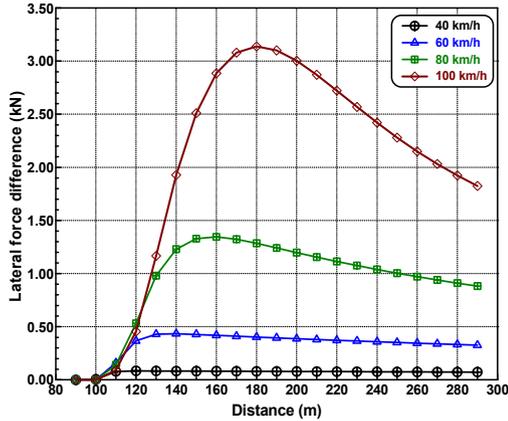


그림 6. 속도에 따른 좌우측 타이어 횡력 차이
Fig. 6. The tire lateral force difference of left and right side according to the speed

2. 편경사에 따른 영향

편경사에 따른 데이터의 상관관계를 분석하기 위하여 차량속도를 60km/h로 고정하여 편경사를 0%, 6% 및 8%로 변화하여 해석하였다.

그림 7는 편경사와 속도 감소폭의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 편경사가 없는 경우 감속의 그래프가 거의 직선으로 나타나는 반면에 편경사가 있는 경우에 그에 따른 영향으로 거리가 멀어질수록 감속 그래프가 완만하게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 편경사가 6% 및 8%로 주어져 있는 두 경우에는 일반도로에 비해 1km/h가량 덜 감속하는 것을 볼 수 있다. 이는 프로그램 특성상 정상선회하려 하도록 설정되어 있기 때문이라 사료된다. 만약 초기 입구속도를 더욱 높게 설정할 경우에는 그 차이의 폭은 더욱 커질 것이다.

그림 8는 편경사와 횡가속도의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 편경사의 유무에 상관없이 횡가속도의 크기는 거의 비슷한 특성을 나타낸다. 이는 자동차의 횡가속도는 차량속도의 제곱에 비례하고, 도로의 회전반경에 반비례하기 때문에 도로의 회전반경을 모두 동일한

값으로 설정한 본 연구에서는 횡가속도의 수치는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

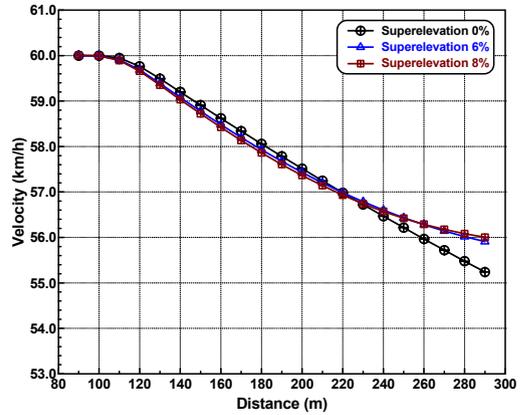


그림 7. 편경사와 속도 감소폭의 관계
Fig. 7. The relationship of between superelevation and speed decline

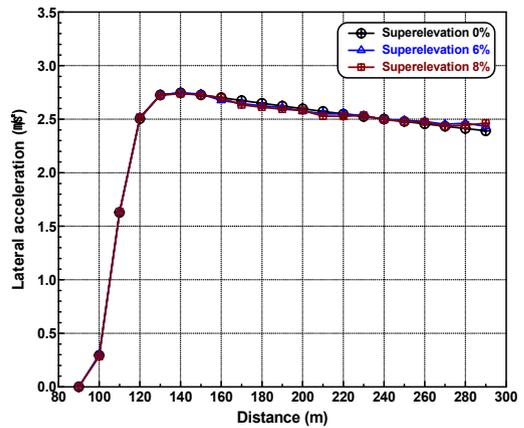


그림 8. 편경사와 횡가속도의 관계
Fig. 8. The relationship of between superelevation and lateral acceleration

그림 9는 편경사에 따른 타이어 횡력의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 편경사가 없는 도로에 비해 있는 도로에서는 최대 17%의 타이어 횡력의 감소를 보였다. 이는 선회시 더 적은 타이어 횡력으로 선회가 가능하다는 것이며 그 만큼 편경사에 의해 선회시 도움을 받는다는 것을 알 수 있다.

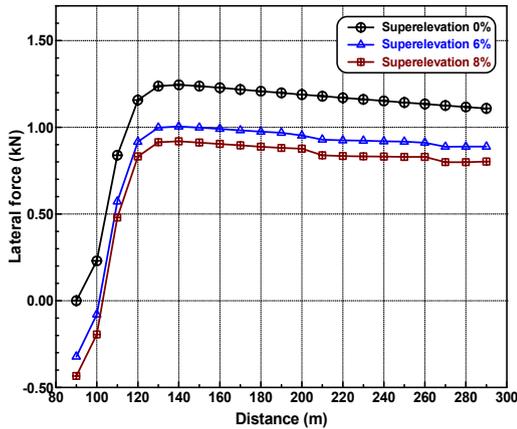


그림 9. 편경사에 따른 타이어 횡력의 변화(LF)
Fig. 9. the change of tire lateral force according to the superelevation

그림 10은 편경사에 따른 좌우측 타이어 횡력의 차이를 나타낸 것이다. 그 결과로 편경사가 없는 도로에서 재현하였을 때에 비하여 편경사를 6% 주었을 경우 차량의 좌우측 타이어 횡력의 차이는 최대 40.8%까지 감소하였고, 편경사를 8% 주었을 경우 51.7%까지 감소함을 나타내었다. 이는 좌우측 타이어에 작용하는 수직하중의 크기가 클수록 차량의 무게중심에 작용하는 횡가속도 즉, 횡력의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

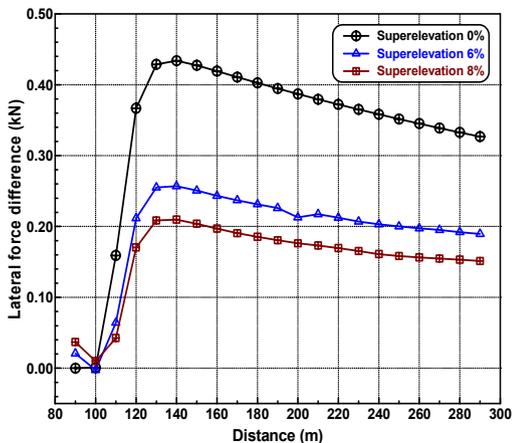


그림 10. 편경사에 따른 좌우측의 타이어 횡력의 차이
Fig. 10. The tire lateral force difference of left and right side according to the superelevation

따라서 이것보다 더 작은 횡력을 가지고도 편경사가

있는 도로에서는 정상선회에 가까운 주행을 할 수 있음을 알 수 있다.

3. 마찰계수에 따른 영향

마찰계수에 대하여 해석하기에 앞서 노면의 마찰계수는 건조한 상태($\mu=0.8$)와 노면이 젖은 상태($\mu=0.4$)로 나누었으며, 편경사는 생략하였고, 차량속도는 80km/h로 고정시키도록 하였다. 보다 명확한 차이를 비교하기 위해 빙판길에서의 시뮬레이션결과 타이어와 노면과의 마찰력이 너무 작아 곡선도로 진입시 이미 슬립이 발생하였고 결과를 비교하는데 어려움이 발생하였다.

그림 11은 노면상태에 따른 좌우측 타이어 횡력차이의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 좌우측 타이어 횡력의 최대차이는 마찰계수 $\mu=0.8$ 에서는 1.34kN, 마찰계수 $\mu=0.4$ 에서는 0.95kN이었으며 41.3% 감소하였다. 따라서 노면이 건조할수록 좌우측 횡력의 차이가 증가함을 나타낸다. 따라서 노면의 마찰계수가 감소할수록 차량의 미끄러움이 일어나기 때문에 선회시 필요한 타이어 횡력을 발생시키기 힘들다는 것을 알 수 있다.

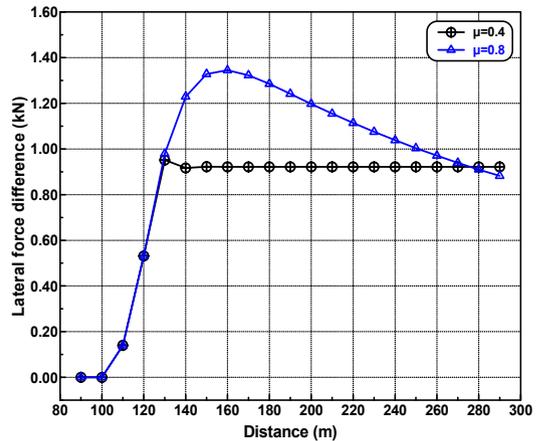


그림 11. 노면상태와 좌우측 타이어횡력 차이와의 관계
Fig. 11. The relationship of between road conditions and tire lateral force difference of left and right side

그림 12에서는 노면상태에 따른 속도의 관계를 나타낸 것이다. 그 결과로 프로그램 내에 저장되어있는 설정 특성상 입력한 경로를 최대한 수행하려하기 때문에 마찰계수 $\mu=0.8$ 에서의 경우 주행한계속도가 높게 측정되어 약 10km/h 감속하는 반면에, 마찰계수 $\mu=0.4$ 인 도로

에서는 입력한 경로를 이탈하는 정도가 크기 때문에 정상선회 하기 위해 22km/h를 자체적으로 감속시켰다.

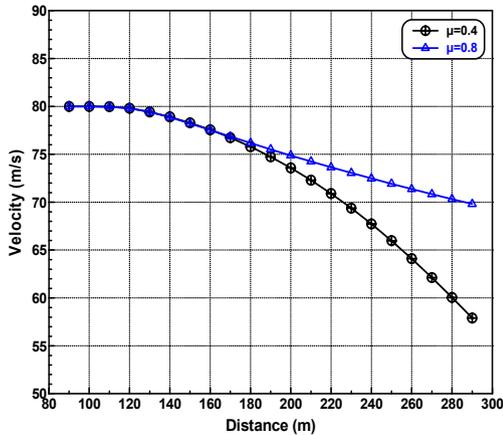


그림 12. 노면상태와 속도의 관계
Fig. 12. The relationship of between road conditions and velocity

그림 13은 노면상태에 따른 횡가속도의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 노면의 마찰계수가 0.4인 도로에서는 130m의 주행거리구간에서 슬립이 발생하였으며, 최대 횡가속도는 마찰계수 $\mu=0.8$ 에서 $4.8m/s^2$ 이고, 마찰계수 $\mu=0.4$ 에서는 $3.9m/s^2$ 로 산출되었다. 이는 도로의 노면상태 즉 마찰계수에 따라 선회주행 시 획득 가능한 최대 횡가속도가 다르다는 것을 알 수 있다.

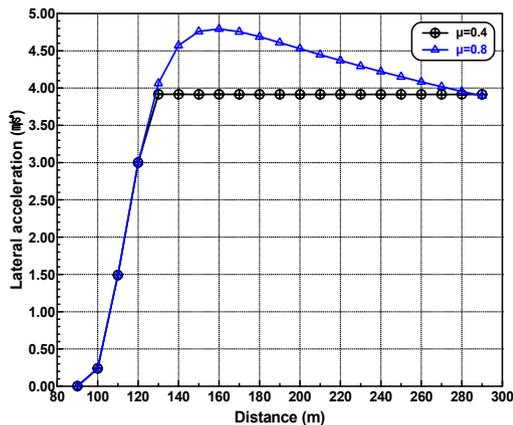


그림 13. 노면상태와 횡가속도의 관계
Fig. 13. The relationship of between road conditions and the lateral acceleration

V. 결론

본 연구에서는 차량의 곡선 선회 주행상태 특성을 고찰하기 위하여 실제 사고사례와 차량진입속도, 편경사 및 마찰계수를 변수로 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 진입속도 변화에 따른 차량주행은 도로의 제한 속도에 가까운 40km/h, 60km/h의 지속주행은 4~6%로 감속하고, 가장 높은 재현속도인 100km/h에서는 18%로 감속하는 결과를 나타내었다. 또한 롤 각과 횡가속도의 특성은 차량진입속도의 증가에 따라 급격히 증가함을 나타냈다.
- (2) 편경사에 따른 차량주행은 거리가 멀어질수록 감속의 차이가 선형적으로 증가하였으며, 최대 1km/h까지 차이가 났으며, 타이어 횡력은 편경사를 가진 도로가 편경사가 없는 도로보다 훨씬 감소함을 나타냈다.
- (3) 마찰계수에 따른 차량주행은 노면이 건조하고 마찰계수가 증가할수록 좌우측 횡력의 차이가 증가하며, 속도와 횡가속도는 감소함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Jin-Kyu Ok, Kwang-Suk Kim, Jeong-Hyun Sohn, Wan-Suk Yoo and Yong-Seok Kim, "Evaluation of Running Stability of Vehicle According to Superelevation and Friction Coefficient", Korean Society of Road Engineers, 2006
- [2] Chang-Ro Lee, "Application of Sensitivity Analysis to Vehicle Handling with Equivalent Cornering Stiffness", Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk University, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 13, No. 4 pp. 1434-1439, 2012.
- [3] Ju-Seok Kang, Jung-Rak Yun, Hyun-Ki Min and Jang-Moo Lee, "Analysis of Dynamic Characteristics of a Vehicle Undergoing Turning and Braking", SAE NO. 953741, 1995.
- [4] Jung-Rak Yun, Sang-Woo Bae, Joo-Seok Kang, Jang-Moo Lee and Tae-Oh Tak, "An Analytic Study on the Steady State Cornering of a Vehicle",

- The Korean Society of Automotive Engineers, 1996.
- [5] Jong-hyun Lee, “Adaptive One-track reference modeling for Vehicle Dynamic Stability Control System”, Kookmin University, Graduate School Master’s Thesis, 2007.
- [6] Jong-Dal Lee, Young-Uk Lee, Kee-Uk Kwon and Kyu-Soo Jeong. “A Study on The Improvement of Highway Superelevation Considering Gravity Center of Vehicles - The Case of S curve in I.C.-”, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 11, No. 1-D, pp. 53-59, 2001.
- [7] In-Oh Jeon, Sang-Won Kang, Hae-Sool Yang, “Development of Security Quality Evaluate Basis and Measurement of Intrusion Prevention System,” Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 11, No. 4, pp. 1449-1457, 2010.
- [8] Dong-Kyun Lee, Joon-Hee Kwon, “Social Search Algorithm considering Recent Interests of User”, Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 9, No 4, pp. 187-194, 2011.

저자 소개

양 성 훈(정회원)



• 2013년 : 가천대학교 기계·자동차공학과 재학
 <주관심분야 : 자동차사고분석>

이 학 용(정회원)



• 2013년 : 가천대학교 기계·자동차공학과 졸업
 <주관심분야 : 자동차사고분석>

윤 준 규(정회원)



• 1981년 : 조선대학교 기계공학과 학사
 • 1987년 : 경희대학교 기계공학과 석사
 • 2001년 : 명지대학교 기계공학과 박사
 • 1996년 ~ 현재 : 가천대학교 교수
 <주관심분야 : 지능형 교통시스템, 자동차사고분석>