

횡풍에 의한 주행 차량 위험도 해석

Risk Analysis of Travelling Vehicles by Cross Wind

이 일근 Lee, Il-keun
조 병완 Jo, Byung-wan

정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 한양대학교 박사과정 (E-mail : lik@ex.co.kr)
정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 (E-mail : joycon@hanmail.net)

ABSTRACT

Travelling vehicles on roads may slip or overturn due to strong cross wind. This paper presents the path deviation equation and the overturning equation of vehicle, and the process of evaluating the cross wind risk. Case studies for cars and trucks are carried out. It explains the mechanism why the deviation occurs according to the types of vehicles. It shall help to prepare the measures for reducing the risk of travelling vehicles in high wind speeds.

KEYWORDS

vehicle, cross wind, deviation, sideslip, overturning

요지

도로를 주행하는 차량이 강풍구간을 지날 때 바람에 의한 횡력으로 경로를 벗어나 추돌사고를 일으킬 수 있다. 또한 높은 풍속에서는 차량이 전도하면서 대형 사고를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 우선 횡풍에 의한 차량의 경로이탈과 전도에 대한 해석 메카니즘을 고찰하였다. 그리고 차량의 횡풍 위험도를 파악하기 위해 승용차와 트럭 등 10종의 대표 차량에 대한 위험도 해석을 실시하였다. 또한 횡풍 위험도가 차량의 주행속도와 특성 등에 따라 많은 편차가 있으며, 편차 발생 원인을 분석하였다. 본 연구 결과는 강풍이 잦은 도로환경에서 주행안전성 확보 방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용 가능할 것이다.

핵심용어

차량, 횡풍, 경로이탈, 미끄러짐, 전도

1. 서론

서해안고속도로 서해대교와 같은 해상교량을 지나면서, 영동고속도로 대관령구간과 같은 산악지역 통과 노선을 주행하면서 강풍으로 인해 차량이 요잉(yawing)하는 경험은 한두 번 있을 것이다. 일반적으로 해안지역의 도로는 해안선과 나란히 있는 경우가 대부분이므로 바다에서 불어오는 바람을 차량의 옆면에 바로 받게 된다. 또한 산악지대에 위치한 강원도, 충북, 경북 지역에 존재하는 계곡을 가로지르는 교량이나 터널 부근, 또는 높은 능선의 도로 등의 지역에서는 바람이 모아져서 풍속이 빨라지는 현상이 발생하므로, 이러한 지역을 지나는 차량은 지형적인 영향으로 발생하는 강한 횡풍에 의하여

주행 안전성을 위협받을 수 있다.

횡풍에 의한 차량 영향은 크게 전도(overturning accident), 경로 이탈(path deviation), 그리고 경로 이탈과 전도의 복합 현상으로 구분할 수 있다. 차량의 전도는 가장 위험한 상황으로 볼 수 있는데 일반적으로 경로 이탈보다 높은 풍속에서 발생하게 된다. 경로 이탈로 인한 사고는 횡풍에 의해 직진성을 상실하여 인접차선에서 주행 중인 차량과 접촉하거나 도로시설물과 충돌하는 경우로서 비교적 자주 발생하는 현상이다. 경로 이탈로 인한 전도는 직진성을 상실한 차량이 요잉과 롤링을 반복하는 과정에서 전도가 발생하는 것이 그에 해당한다.

권순덕 등(2003)은 횡풍에 의한 차량 사고의 정의와 3개 차종에 대한 풍동 결과를 토대로 위험도를 해석하여 제시하였지만 해석에 필요한 차량 제원은 많은 부분 가정함으로써 신뢰성을 확보하는데 한계를 가지고 있다. 또한 횡력에 의한 차량의 위험도는 차종에 따라 편차가 심하기 때문에 보다 다양한 차종에 대한 해석이 수반되어야 한다. 아울러 편차가 발생하는 매카니즘에 대한 정확한 분석도 결여되어 있어 강풍 대책 수립을 위한 참고자료로서 활용하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 우선 횡풍 위험에 대한 정확한 이해와 차종에 따른 편차 발생 분석을 위해 횡풍에 의한 차량의 경로 이탈과 전도에 대한 위험도 정의와 해석 모델을 고찰하였다. 그리고 횡풍에 의한 차량의 거동 해석에 필요한 일반 제원과 동역학적 특성을 자동차 회사에서 해석용으로 사용하는 Mechanical Simulation Corporation사의 승용차 해석용 CarSim(ver. 7.1a)과 버스 및 트럭 해석용 TruckSim(ver. 7.1) 소프트웨어의 라이브러리(library) 데이터베이스를 활용함으로써 다양한 차종에 대해 위험도 해석을 실시할 수 있었다. 또한 차종에 따라 편차가 발생하는 원인을 해석 모델을 근거로 분석하여 제시하였다.

2. 횡풍에 의한 차량의 경로 이탈(path deviation) 위험도

2.1. 횡풍에 의한 차량 요잉(yawing) 해석모델

조향장치 고정인 2축 차량의 회전 선형 지배 방정식은 다음과 같다(MacADAM, 1989).

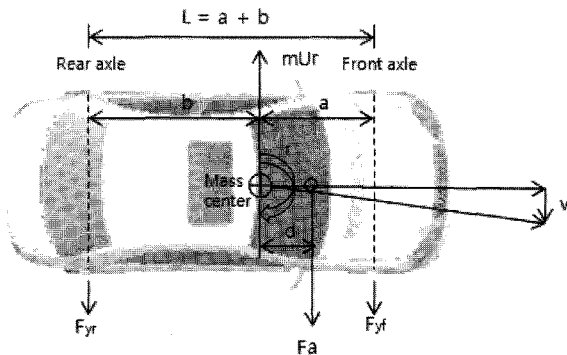


그림 1. 횡풍을 받는 차량의 작용력

$$F_{yf} + F_{yr} + F_a - mUr = 0 \quad (1)$$

$$F_a d + F_{yf} a - F_{yr} b = 0 \quad (2)$$

여기서,

F_{yf} : 전륜의 횡방향 타이어력(total lateral tire force at the front axle)

F_{yr} : 후륜의 횡방향 타이어력(total lateral tire force at the rear axle)

F_a : 공기역학적 횡방향력(aerodynamic force)

m : 차량 중량(vehicle mass)

U : 차량 주행속도(vehicle speed of travel)

r : 차량 요율(vehicle yaw rate)

d : 횡력과 질량중심간 거리(distance forward of mass center ($d = a - \frac{L}{2} + L \cdot \frac{C_{yaw}}{C_s}$))

a : 전륜과 질량중심간 거리(distance of the front axle forward of the mass center)

b : 후륜과 질량중심간 거리(distance of the rear axle behind the mass center)

L : 차량 윤거(vehicle wheelbase)

a, b 는 차량의 질량 분포에 따라 달라지며, 풍압 작용점인 d 는 차량의 동역학 특성과 질량 분포에 의해 결정된다.

선형 횡방향 타이어 접지력은 다음과 같다.

$$F_{yf} = -C_{af}[(v + ar)/U] \quad (3)$$

$$F_{yr} = -C_{ar}[(v - br)/U] \quad (4)$$

여기서,

C_{af} : 전륜 선회 강성(front tire cornering stiffness)

C_{ar} : 후륜 선회 강성(rear tire cornering stiffness)

v : 차량 미끄러짐 속도(vehicle sideslip velocity at the mass center)

식(3), (4)를 식(1), (2)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$F_a = [(C_{af} + C_{ar})/U]v + [(C_{af}a - C_{ar}b)/U + mU]r \quad (5)$$

$$F_a d = [(aC_{af} - bC_{ar})/U]v + [(C_{af}a^2 + C_{ar}b^2)/U]r \quad (6)$$

식(5)의 좌측엔 바람에 의한 횡력을 나타내고 있고, 오른쪽은 각 타이어 위치에서 미끄러짐과 요잉 움직임에 의한 힘(motion force)과 질량 중심에서의 관성력

(inertial force)을 나타내고 있다.

식(5), (6)을 횡력에 대한 효율로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{r}{F_a} = \frac{[(bC_{ar} - aC_{af}) + d(C_{af} + C_{ar})]}{[(a+b)^2 C_{af} C_{ar} / U - (aC_{af} - bC_{ar})mU]} \quad (7)$$

조향점(N.S.P. : neutral steering point)에서 질량 중심까지의 거리인 c 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$c = (bC_{ar} - aC_{af}) / (C_{af} + C_{ar}) \quad (8)$$

중립조향점은 외부 횡력이 차량에 요 현상을 일으키지 않는 차량 하중점으로 정의될 수 있다.

조향점 주위 타이어 요 감쇠 모멘트에 비례하는 모멘트 팔길이(ζ)는 다음과 같다.

$$\zeta = (a+b)^2 C_{af} C_{ar} / [(C_{af} + C_{ar})mU^2] \quad (9)$$

식 (8), (9)를 식(7)에 대입하여 정렬해 보면 다음과 같은 간략화된 식으로 표현가능하다.

$$\frac{r}{F_a} = \frac{1}{mU} \frac{(c+d)}{(c+\zeta)} \quad (10)$$

여기서,

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_s V_v^2 A$$

V_v : magnitude of the relative wind vector

식 (10)의 해석 모델의 이해를 돕기 위해 간략하게 다음 그림 2와 같이 정리할 수 있다.

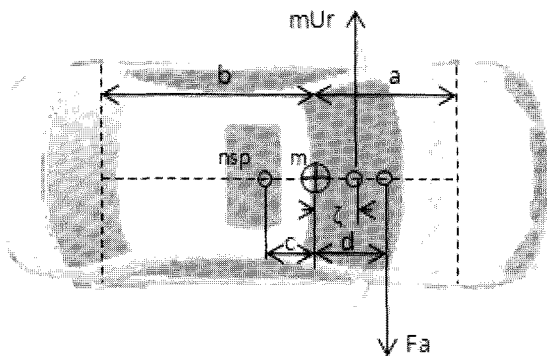


그림 2. 횡력을 받는 차량의 해석 모델

식(10)의 조향점 위치(c)는 타이어 선회 강성과 질량 분포에 영향을 받는다. 그리고 풍압 작용 위치(d)는 차량 형상에 따른 동역학적 특성과 질량 분포에 의해 결정된다. 또한 ζ 는 타이어 선회 강성과 질량 분포에 따라 변하지만, 주로 차량의 주행 속도에 많은 영향을 받는다. 결국, 식(10)에서 우측식의 분자에 해당하는 $(c+d)$ 는 횡력 작용 모멘트팔길이를 나타내며, $(c+\zeta)$ 는 이탈에 저항하는 힘의 모멘트팔길이를 나타내고 있다.

2.2. 횡풍에 대한 경로 이탈 위험도의 정의

식 (10)은 차량을 강체로 보고 횡풍 작용 시 시간에 따른 요잉각의 변화를 나타내고 있다. 실제 차량의 경로 이탈 정도를 파악하기 위해선 추가적인 요인이 포함된다.

즉 횡풍에 의한 차량 주행의 민감성은 운전자에 따라 달라진다. 차량의 이상 거동 시 운전자의 반응을 실험적으로 평가한 결과(Emmelmann, 1981)에 의하면, 이상 거동이 시작되고 0.2~0.4초 후에 운전자가 느낄 수 있다고 한다. 또한 운전자가 이상 거동에 반응하여 조향 장치를 조정하여도 차량이 바로 반응을 하지는 않고, 조향장치의 탄성, 횡풍의 특성 등으로 인하여 평균적으로 0.8초가 지나서야 차량이 운전자의 반응에 작동하기 시작한다고 한다. 따라서 0.8초 동안은 운전자의 성향이나 조정 방법에 상관없이 차량이 자유롭게 움직인다고 가정할 수 있다.

운전자의 성향이나 조정 방법에 상관없이 차량이 움직인 거리를 식으로 나타내면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$y_0 = 0.8U \times \tan(0.8 \left[\frac{\rho C_s V_v^2 A (c+e)}{2mU (c+\zeta)} \right]) \quad (11)$$

또한 Emmelmann(1981)은 차량의 편향과 관계없이 운전대를 고정한 경우(fixed control) 운전자의 조향효과가 나타나는 0.8초 후에도 그 이전까지의 편향량보다 두 배정도 더 발생한다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서의 횡풍 위험도는 0.8초일 때 편향량의 2배를 사용하여 정의하기로 한다.

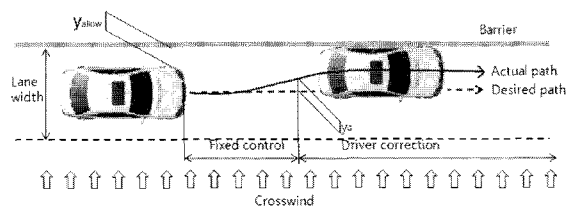


그림 3. 횡풍에 의한 주행 경로 이탈

이 상황을 사고 위험도 지수를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Emmelman 1981).

$$C_f = \sqrt{\frac{1}{1 - (2y_{t=0.8} / y_{allow})}} - 1 \quad (12)$$

식(12)에서 C_f 가 1이 되면 차량이 옆 차선에 도달한 것이므로 사고가 발생한 것으로 간주하여 사고 위험도 지수는 무한대가 된다. 사고 위험도가 약 3을 넘어서면 위험도가 급격히 증가하므로 약간의 안전을 포함하여 $C_f=3$ 을 사고로 정의한 기존의 연구결과를 활용하기로 한다(권순덕 등, 2003).

2.3. 차량에 작용하는 공기력

차량이 도로를 달릴 때 바람은 모든 축에 대하여 힘과 모멘트를 발생시킨다. 이때 발생하는 횡력(F_s), 요잉모멘트(M_{yaw})는 주행 경로를 이탈시키는 주요 원인이고, 롤링모멘트(M_{roll})와 상향력(F_L)은 차량을 전도시키는 주요 요소이다.

차량에 작용하는 공기역학적 힘과 모멘트는 축거와 윤거의 중앙부 바닥에서 측정한다. 각 공기력 계수를 포함한 공기력은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{1}{2} \rho U^2 C_s A, \quad M_{yaw} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{yaw} A l \\ F_L &= \frac{1}{2} \rho U^2 C_L A, \quad M_{roll} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{roll} A l \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$C_s, C_L, C_{roll}, C_{yaw}$: 횡력, 양력, 롤링모멘트, 요잉모멘트 계수

ρ : 공기밀도

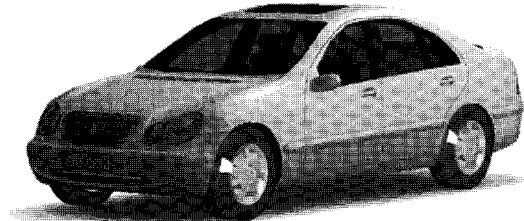
A : 차량 전면부 면적

경로 이탈 해석을 위해선 일반적인 차량의 제원과 동역학적 공기력 계수가 필요하다. 현재 운행 중인 차량의 제원을 확보하기는 용이치 않고 차량의 공기력 계수도 별도로 풍동실험을 실시해야 얻을 수 있는 데이터들이다. 본 연구에서는 CarSim과 TruckSim에 있는 데이터베이스 자료를 토대로 각 차량의 공기력 계수인 횡력계수, 요잉모멘트계수, 롤링모멘트계수 및 양력계수의 근사곡선을 구하여 표 1, 2, 3과 4절에 나타내었다.

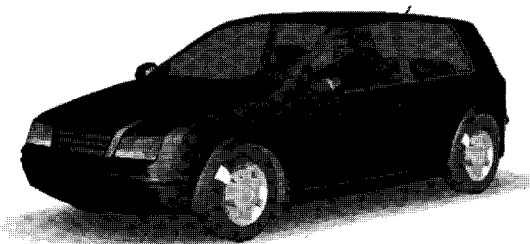
3. 횡풍에 의한 경로 이탈 사례 해석

본 연구에서는 CarSim과 TruckSim 프로그램 내 데이터베이스는 전형적인 승용차와 소형 트럭 모델로서 어느 정도 대표성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

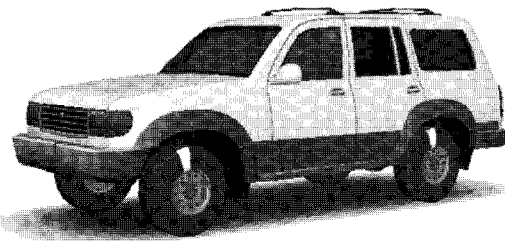
3.1. 대상 차종 제원



(a) sedan



(b) hatchback



(c) SUV

그림 4. 승용차 차량모델

표 1. 승용차의 제원(sedan)

제 원	단위	sedan 1	sedan 2	sedan 3
차량중량(m)	kg	1,370	1,653	1,823
축거(l)	m	2.776	3.048	3.165
윤거(w)	m	1.550	1.6	1.605
정면 면적(A)	m ²	2.51	1.8	1.8
질량중심높이(h)	m	0.54	0.59	0.589
전륜과 질량중심거리(a)	m	1.110	1.402	1.265
후륜과 질량중심거리(b)	m	1.666	1.646	1.90
전륜 선회강성(C_f)	N/deg	4,986	5,269	6,080
후륜 선회강성(C_r)	N/deg	3,507	4,737	4,609
공기력계수	β (degree)	$C_s = 5.199 \times 10^{-9} \beta^4 - 1.8716 \times 10^{-6} \beta^3$ $+ 2.31 \times 10^{-6} \beta^2 + 0.0262 \beta + 0.0008$ $C_{yaw} = 2.47 \times 10^{-10} \beta^4 - 8.89 \times 10^{-6} \beta^3$ $+ 1.097 \times 10^{-6} \beta^2 + 0.0012 \beta + 37.38 \times 10^{-6}$		

표 2. 승용차의 제원(hatchback, SUV)

제원	단위	hatchback 1	hatchback 2	SUV 1	SUV 2
차량중량(m)	kg	1,111	1,274	1,429	1,592
축거(l)	m	2.600	2.578	2.619	2.950
윤거(w)	m	1.481	1.539	1.565	1.575
정면 면적(A)	m ²	1.6	1.6	2.4	2.4
질량중심높이(h)	m	0.54	0.54	0.670	0.719
전륜과 질량중심거리(a)	m	1.04	1.016	1.05	1.18
후륜과 질량중심거리(b)	m	1.56	1.562	1.569	1.77
전륜 선회강성(C_f)	N/deg	4,278	4,783	3,309	3,566
후륜 선회강성(C_r)	N/deg	2,838	3,211	2,207	2,465
공기력계수	β (degree)	$C_x = -1.99 \times 10^{-8} \beta^4 + 1.05 \times 10^{-5} \beta^3$ $-1.425 \times 10^{-3} \beta^2 + 5.757 \times 10^{-3} \beta + 0.0032$ $C_{y_{sw}} = -5.26 \times 10^{-9} \beta^4 + 2.79 \times 10^{-6} \beta^3$ $-3.79 \times 10^{-4} \beta^2 + 1.531 \times 10^{-3} \beta + 8.45 \times 10^{-4}$			

표 3. 소형 트럭의 제원

제원	단위	truck 1	truck 2	truck 3
차량중량(m)	kg	4,457	4,457	4,457
축거(l)	m	5.0	4.3	5.0
윤거(w)	m	2.03/1.86	2.07/1.86	2.03/1.86
정면 면적(A)	m ²	10.0	6.8	6.8
질량중심높이(h)	m	1.173	1.173	1.173
전륜과 질량중심거리(a)	m	1.113	1.103	1.113
후륜과 질량중심거리(b)	m	3.187	3.197	3.187
전륜 선회강성(C_f)	N/deg	6,799	6,799	6,799
후륜 선회강성(C_r)	N/deg	2,662	2,662	2,662
공기력계수	β (degree)	$C_x = -0.0008 \beta^2 + 0.1207 \beta - 0.0764$ $C_{y_{sw}} = -5.0 \times 10^{-6} \beta^3 + 0.000710^2 \beta^2$ $-0.0002 \beta + 0.0002$		

각 차량의 동역학적 공기력 계수는 CarSim과 TruckSim의 수치 데이터를 참고로 풍각(β)을 변수로 하는 추세식으로 표현하였다.

타이어에 횡력 작용 상태에서 타이어는 굴러가면서 횡방향 미끄러짐이 나타난다. 전진방향(direction of heading)과 진행방향(direction of travel) 사이의 각도가 미끄럼각(slip angle) α 라고 할 때, 선회력(tire cornering stiffness)은 미끄럼각에 따라 증가된다. 미끄럼각이 작을 때(5° 또는 이하) 관계는 선형으로 선회력은 다음과 같이 표현된다.

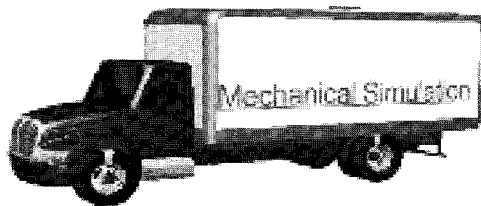
$$F_y = C_\alpha \cdot \alpha \quad (14)$$

이때 C_α 는 코너링 강성(cornering stiffness)로 알려져 있고, 이것은 미끄럼각 $\alpha=0$ 에서 α 에 대한 F_y 곡선의 기울기로 정의된다. 본 연구에서는 CarSim과 TruckSim의 수치 데이터를 참고로 차량에서 전륜과 후륜의 하중에 따라 타이어 선회력 특성곡선을 활용하여 보간법에 의해 해당 축하중에 대한 코너링 강성을 구하였다.

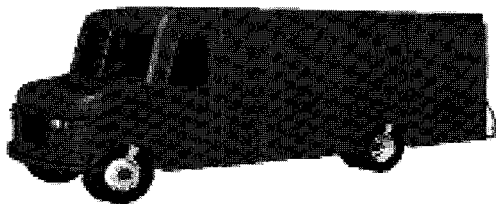
3.2. 경로 이탈 해석 결과

그림 6은 CarSim에 있는 기준 차량으로 sedan 1에 대한 이탈거리 산정 결과를 나타내고 있다. 주행 속도가 같을 경우 풍속의 크기가 커짐에 따라 이탈 거리가 증가함을 알 수 있다. 이는 다른 변수는 동일한 조건에서 상대풍속 v_r 가 증가하기 때문이다.

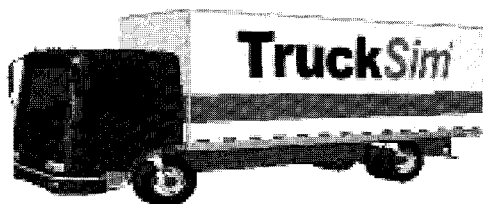
풍속이 같을 경우 주행 속도가 커짐에 따라 이탈거리가 증가함을 알 수 있는데, 이는 식(10)에서 주행속도



(a) Truck 1



(b) Truck 2



(c) Truck 3

그림 5. 소형 트럭의 제원

승용차는 세단형 3종, 해치백형 2종, SUV 2종 등 총 7종에 대해서 해석하였고, 소형트럭은 3종에 대해 분석하였다.

커짐에 의해 ζ 가 감소하게 되어 요율(r)이 증가함이 첫 번째 이유이며, 전진방향으로의 U 의 증가로 인해서도 이탈거리가 커지게 된다.

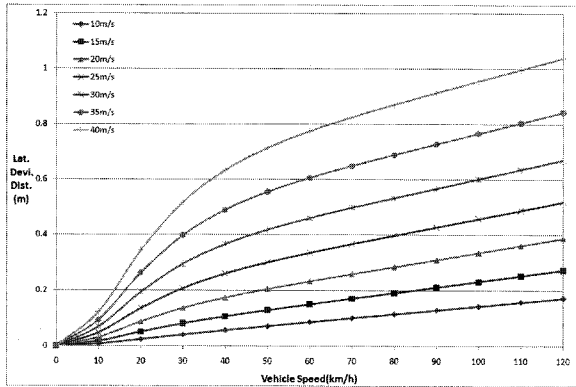


그림 6. 차량 속도별 횡방향 이탈거리(sedan 1)

그림 7은 횡방향 풍속이 20m/s일 경우 횡방향 이탈 거리를 다양한 차종에 따라 해석해 본 결과를 나타내고 있다.

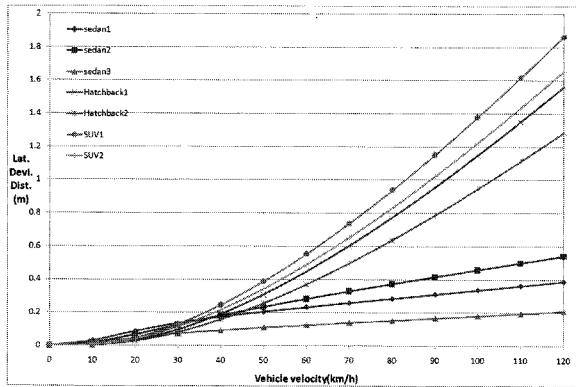


그림 7. 승용차의 횡방향 이탈거리(횡풍속 20m/s)

차종에 따라 이탈 거리의 편차가 있다는 것을 알 수 있다. 같은 세단형 차량일지라도 이탈 거리가 달라지게 되는데 이는 각 차량이 가지는 m, l, w, a, b, C_f, C_r 와 같은 차량의 기계적 특성의 차이와 A, C_s, C_{yaw} 와 같은 동역학적 특성 차이로 인해 발생하게 된다.

대개 고속에서 세단형이 해치백이나 SUV보다 횡방향 안전성이 높다는 것을 알 수 있다. 해치백이나 SUV의 이탈거리가 크게 나온 것은 동역학적 공기력 계수의 차이로 d 가 커짐에 따라 횡풍 작용력의 모멘트 팔길이 인 $(c+d)$ 의 증가로 인한 것이다.

그림 8은 소형 트럭의 횡방향 이탈거리를 나타내는 것으로 승용차에 비해 큼을 알 수 있다. 이는 횡풍 작용으로 인한 모멘트와 관성력에 의한 모멘트 비가 상대적으로 크기 때문이다.

트럭의 경우 20km/h까지는 증가하다가 이후로는 속도의 증가에 따른 증가폭이 상대적으로 작아지는 현상을 보인다. 차량 속도가 증가하면 d, ζ 도 감소하게 되는데 그 감소폭이 다르다. 그래서 $(c+d)/(c+\zeta)$ 의 크기가 속도에 따라 다르게 나타나게 된다. 즉 20km/s 이하에서는 속도가 증가함에 따라 $(c+d)/(c+\zeta)$ 의 크기가 증가하게 되고, 20km/s 이상에서는 오히려 감소함으로써 증가폭이 둔화되는 현상이 나타나게 된다. 따라서 트럭의 경우 일정 속도 이상일 경우 횡방향 이탈로 인한 위험도가 변곡되는 지점이 있음을 알 수 있었다.

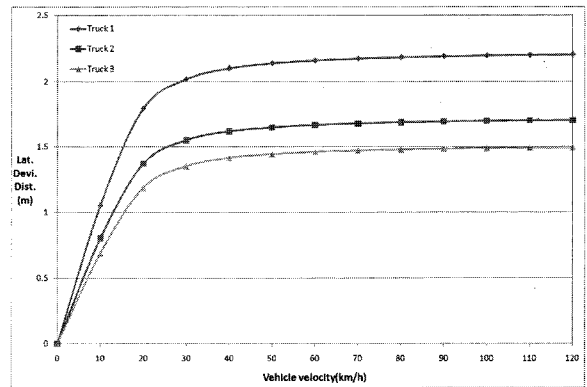


그림 8. 소형 트럭의 횡방향 이탈거리(횡풍속 20m/s)

그림 9는 풍속별 차량속도와 식(12)에서 정의된 사고 위험도 지수의 관계를 보여주고 있다. 이 그래프에서와 같이 승용차에 대해 풍속별로 사고 위험도 지수가 3이 되는 차량 속도를 찾아서 정리하면 다음 그림 10과 같다.

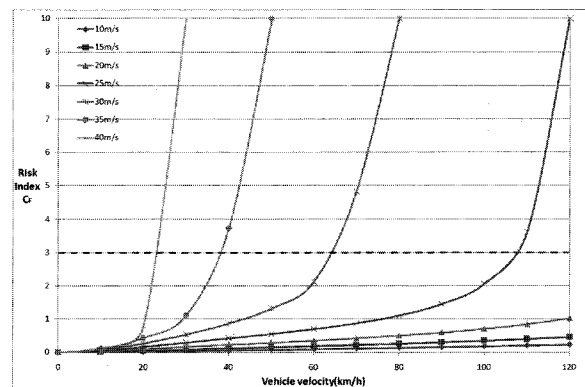


그림 9. 승용차의 속도별 사고위험도(sedan 1)

그림 10은 다양한 차종의 횡풍에 대한 경로 이탈로 인한 사고 위험도를 보여주고 있다. 차종에 따라, 즉 차량의 제원과 동역학적 특성 차이에 따라 위험속도와 위험 풍속에 편차가 있음을 알 수 있다.

해치백형과 SUV의 경우 횡풍속이 20m/s일 경우 주행속도를 60km/h 정도 이하로 감속하는 것이 안전함을

알 수 있고, sedan의 경우 100km/h 이상 주행 시 위험하다는 것을 나타내고 있다. 바람이 30m/s 작용 시에는 대부분의 승용차가 50km/h 이하로 주행함이 안전한 것으로 보인다.

사실 2.1절의 해석모델은 차량의 횡풍 민감도에 영향을 미치는 동역학적 속성을 고려하지 않은 단순화 모델이다. 그래서 횡풍 민감도에 중요한 역할을 하는 것으로 현가 롤 조향 효과를 유발하는 롤 순응(roll compliance)은 간략화된 해석모델에서는 포함되지 않아 실제 차량 거동과 차이가 있을 수 있다. 그러나 기본적인 자료만으로 차량의 사고 위험률을 정량적으로 표현할 수 있고 다양한 차종에 대한 횡풍 민감도를 비교할 수 있기 때문에 강풍 대책 방안 수립을 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

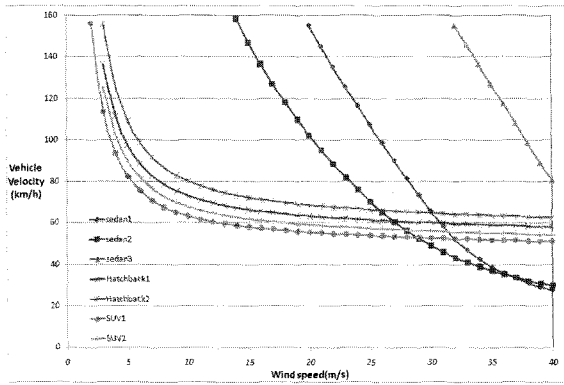


그림 10. 횡풍으로 인한 차량의 경로 이탈 위험도

4. 횡풍에 의한 차량의 전도(rollover) 위험도

횡풍에 의해 발생하는 사고의 위험성만을 생각하면 경로 이탈보다는 전도가 더욱 문제가 될 수 있다. 특히 탑차, 트레일러, 버스 등과 같이 높이가 높고 옆면적이 넓은 차량의 경우에 전도에 의한 사고 발생 확률이 높다.

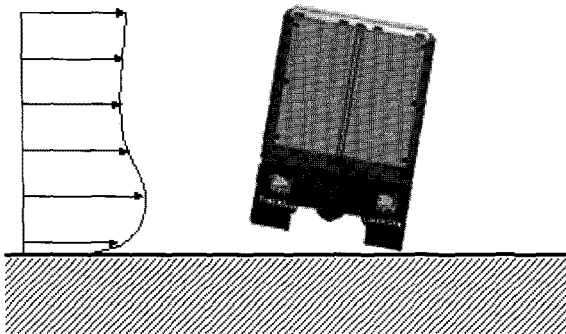


그림 11. 횡풍에 의한 차량의 전도

차량의 전도는 아주 간단한 모델로부터 계산할 수 있다. 양력, 롤링 모멘트는 차량을 전도시키는 힘이고 전

도에 대항하는 힘은 차량의 자중이다. 이러한 힘의 평형 조건으로부터 질량 m 인 차량의 전도 풍속을 구하면 다음과 같다.

$$V_o = \sqrt{\frac{mgw}{\rho A(C_{roll}l + C_L w/2)}} \quad (15)$$

여기서, 전도 풍속(V_o)은 한쪽 바퀴의 수직 반력이 영이 되는 순간을 의미한다.

차량의 전도 해석을 위한 동역학적 공기력 계수를 근사곡선으로 표현하면 풍각 변화에 따른 계산에 편리하다. CarSim과 TruckSim 데이터 베이스에 나타난 롤링모멘트(C_{roll})와 양력 공기력 계수(C_L)의 근사곡선은 다음 식으로 표현할 수 있었다.

■ 승용차(sedan)

$$(C_{roll}) = 1.09 \times 10^{-9} \beta^4 - 3.91 \times 10^{-9} \beta^3 + 4.83 \times 10^{-2} \beta^2 + 0.55 \times 10^{-2} \beta + 0.0002$$

$$(C_L) = -1.28 \times 10^{-8} \beta^6 + 5.43 \times 10^{-11} \beta^5 - 4.7 \times 10^{-9} \beta^4 - 6.95 \times 10^{-7} \beta^3 + 0.1 \times 10^{-3} \beta^2 - 0.6 \beta + 0.111$$

■ 승용차(hatchback, SUV)

$$(C_{roll}) = -4.43 \times 10^{-9} \beta^4 + 2.34 \times 10^{-6} \beta^3 - 3.18 \times 10^{-4} \beta^2 + 1.29 \times 10^{-2} \beta + 0.0007$$

$$(C_L) = -3.1 \times 10^{-9} \beta^5 + 7.64 \times 10^{-7} \beta^4 - 6.26 \times 10^{-5} \beta^3 + 1.63 \times 10^{-3} \beta^2 + 0.0051 \beta + 0.14$$

■ 소형트럭

$$(C_{roll}) = -2.0 \times 10^{-6} \beta^3 - 8.0 \times 10^{-5} \beta^2 + 0.0662 \beta - 0.0006$$

$$(C_L) = 3.45 \times 10^{-7} \beta^4 - 6.44 \times 10^{-5} \beta^3 + 3.24 \times 10^{-3} \beta^2 - 1.26 \times 10^{-2} \beta + 0.0053$$

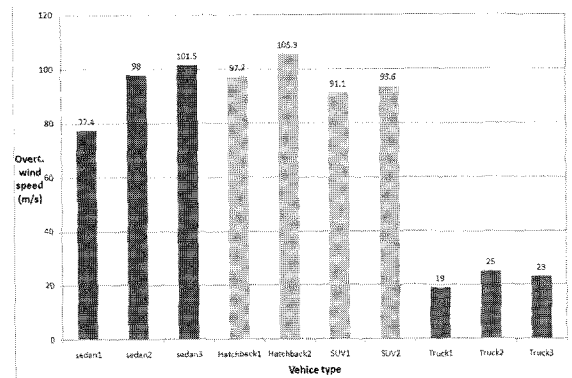


그림 12. 차종별 전도풍속

그림 12는 차종별 전도풍속 산정 결과를 나타내고 있다. 승용차의 경우 전도풍속이 경로 이탈로 인한 사고 위험 풍속보다 상당히 크고, 소형 트럭에 비해 전도에 대한 안전성이 높다는 것을 알 수 있다. 이는 소형트럭의 롤 모멘트계수, 양력 계수가 승용차 보다 상당히 크기 때문이다. 소형 트럭일 경우 횡풍속 20m/s일 경우 한쪽 바퀴의 반력이 영이 될 수도 있음을 알 수 있다.

5. 결론

해안선을 따라 위치한 도로, 산악지역을 통과하는 도로에는 강한 바람에 의해 사고의 위험성이 존재한다. 사고의 위험도를 줄이기 위해선 풍속의 크기에 따라 안전속도로 주행토록 유도하거나 적극적인 대처 방안으로 방풍벽을 설치하는 것도 방안이라 할 수 있다. 이와 같은 방안 수립을 합리적으로 하기 위해선 횡풍과 차량의 거동 분석이 선행되어야 한다.

횡풍으로 인해 발생할 수 있는 사고 유형으로는 차량이 주행하면서 강풍 구간을 지날 때 강한 바람으로 조향점을 축으로 요잉함으로써 경로를 이탈하게 되는 경우와 풍압 면적이 큰 소형 트럭 등이 차량 무게에 의한 저항력보다 롤링 모멘트가 커지면서 한 쪽 바퀴가 들리게 되는 전도로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 승용차 7종과 소형트럭 3종에 대한 해석을 통해 경로 이탈과 전도의 위험도를 분석하였다. 동일한 풍속일 경우 주행 속도가 증가함에 따라 경로 이탈에 대한 위험도는 커지며 이는 횡풍에 대한 저항 성분에서 관성력에 의한 모멘트가 작아짐으로써 발생함을 알 수 있었다.

또한 차량이 가지는 제원과 동역학적 특성 차이로 차종에 따라 편차가 심하게 나타나 현장에서 위험 풍속의 정의, 안전 속도의 제시 등 적절한 관리 수준을 정하기 쉽지 않기 때문에 대표 차종의 선정이 필요함을 알 수 있었다.

소형 트럭은 승용차 보다 경로 이탈 거리가 크게 나타났는데 이는 조향점에서 관성력 작용점까지의 거리가 작아져 저항모멘트가 상대적으로 작아져서 발생한 것으로 보다 실제 거동과 유사하게 하기 위해선 간략화된 해석모델에 부가장치의 영향을 고려한 모델 개발이 필요하다.

횡풍으로 인한 전도 해석에서 승용차의 경우, 전도를 발생시킬 수 있는 풍속이 대략 70m/s 이상이라 전도에 대한 위험은 상당히 낮음을 알 수 있었다. 하지만 소형 트럭에서는 20m/s 정도의 풍속에도 한쪽 바퀴의 반력이 영이 될 수 있는 위험한 상황이 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 정운용 등(2003), "고속도로 강풍지역 차량주행 안전성 확보 방안 연구", 연구보고서, 한국도로공사
- 이일근, 조준상(2008), "고속도로 시설물 내풍설계연구", 연구보고서, 한국도로공사
- 권순덕, 정운용(2003) 강풍에 의한 차량 주행 안전성 평가, *대한토목학회논문집* 제23권 제5A호, 2003.9, pp.977~984
- C.C. MacADAM(1989) Static Turning Analysis of Vehicles Subject to Externally Applied Forces, *Vehicle System Dynamics*, 18, pp.345-357
- CarSim, <http://www.carsim.com>, Mechanical Simulation Corporation
- Emmelmann, H.J.(1981) Driving stability in side winds, *Aerodynamics of Road Vehicles*, Hucho (ed.), Vargel Verlag, pp.201-221.

접 수 일 : 2011. 4. 7
 심 사 일 : 2011. 4. 18
 심사완료일 : 2011. 8. 24