

강풍 발생시 고속도로 주행차량의 위험도 판단기준에 관한 연구

김현기*, 김경훈*, 마석오*, 이순희*

*(주)동호

e-mail:hkkim1@dongho.co.kr

A Study on Risk Criteria of Vehicles Driven on Highway under Strong Wind Condition

Hyun-Gi Kim*, Kyung-Hun Kim*, Seok-Oh Ma*, Soon-Hee Lee*

*Dongho Co.,Ltd.

요 약

고속도로를 주행 중인 차량에 강풍이 작용할 경우 차량의 주행안정성 저하와 운전자의 상황에 따른 치명적인 교통사고로 이어질 수 있다. 특히, 최근에 건설되거나 추진 중인 고속도로는 교량과 터널의 연속적인 조합으로 강풍발생위험에 노출되어 있어 적극적인 강풍저감 대책이 필요하다. 효과적인 방풍 시설 설치나 사전예고 시스템의 도입을 위해서는 차량의 동역학적 거동 분석, 주행 중인 차량의 위험도 판단기준 연구, 강풍위험지역의 정확한 풍속 추정기법 연구, 지능화된 방풍벽 개발, 방풍시설 설치 판단 기준 제시, 합리적인 차량 속도 규제정책 등의 연구·개발이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 강풍 발생 구간을 주행하는 차량의 동역학적 거동모델을 제시하고, 이를 기반으로 기존에 제안된 위험도 판단기준의 합리성을 제고하였으며, 운전자의 상황을 고려한 현실적인 차량주행위험도 판단기준 제시를 목표로 하였다.

1. 서 론

최근 신설되거나 추진 중인 고속도로는 도로의 선형을 향상시키기 위하여 계곡을 가로지르는 높은 교량과 터널의 연속적인 조합으로 건설되고 있다. 해안 및 산악지대를 통과하는 고속도로에서는 지역특성상 발생하는 강풍으로 인해 차량 주행안정성의 위협을 받는 경우가 빈번히 발생하고 있으며 주행안정성 확보와 관련한 다양한 문제점들이 지속적으로 제기되고 있는 실정이다. 특히 최근에는 바다를 가로지르거나 육지와 섬을 연결하는 연장이 긴 교량이 많이 신설되고 있기 때문에 강풍에 의한 차량의 주행위험도 증대에 관한 문제는 구조물 설계 단계에서부터 반드시 고려되어야 할 중요한 사안이다. 이에 본 연구에서는 주행중인 차량과 강풍과의 상호관계를 규명하는 관련 연구를 소개하고, 이를 기반으로 기존에 제안된 위험도 판단기준의 합리성을 검토하기 위한 비교연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1. 국내외 연구 동향

국외에서는 독일, 영국 및 일본 등을 중심으로 1960년대부터 강풍에 의한 차량의 주행안정성 저하를 최소화하기 위한 연구를 진행하여 왔다. Bundorf [3]는 외부자극과 차량의 응답에 관한 연구를 최초로 수행하였고, Gawthorpe [13]와 Baker [5]는 횡풍의 영향을 받는 차량의 주행경로이탈 및 차량자체의 전도에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Gawthorpe는 횡풍에 의한 차량의 거동을 규명하기 위해서 차량 시뮬레이션, Scale Effect, Wind Flow 시뮬레이션 및 이동시 모델을 이용한 풍동실험 및 전산유체해석(CFD)의 필요성을 역설하였다. Baker [4-6]는 차량 사고의 기준을 제시하고 강풍이 작용할 경우 차량의 거동을 평행방정식과 적합방정식을 적용하여 수학적으로 계산해 내었다. 또한 도로의 캠버, 곡률반경, 마찰계수 및 운전자의 반응을 고려하여 기존 연구에

서 제안한 수식을 확장하였다. Zomotor [16]는 Single-Track 모델을 이용하여 차량의 거동에 관한 수식을 제안하였으며 Kobayashi & Yamada [10]는 Box형태의 1/10스케일 모형 차량을 이용한 풍동실험 결과와 18자유도 시뮬레이션의 결과가 일치하는 것을 확인하였다. MacAdam [11]은 차량의 횡풍민감도와 운전자의 선호도에 관하여 조사하기 위하여 강풍발생기를 사용하여 실제차량으로 실험을 수행하였다. Pinelli [8]는 소방차, 앰블런스, SUV차량을 이용하여 풍동실험, 실제차량실험 그리고 수치적 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 비교분석하였으며 각 차량의 주행안전 속도를 제시하였다.

국내에서도 최근 내풍설계 및 초장대교량 등과 관련하여 주행중인 차량에 미치는 강풍의 영향에 대한 연구의 필요성이 제기되고 쾌적한 주행환경을 위한 노력과 관심이 증대되고 있으나 풍속에 의한 차량의 동역학적 거동모델 분석이나 주행실험등과 같은 관련 연구의 수준과 양적인 측면에서 매우 부족한 실정이다. 다만 한국도로공사 [2]에서는 풍속추정기법, 위험도판단기준, 방풍시설 설치기준에 관한 연구를 수행한 후 표 1과 같이 차량속도규제(안)을 제시한 바 있다.

[표 1] 차량속도 및 통행제한 기준(안)

풍 속	대 책
15m/s ~ 20m/s	속도제한 : 70km/h
20s ~ 25m/s	속도제한 : 50km/h
25m/s 이상	통행제한

2.2 분석 조건

기준에 제안된 국내외 기준은 풍속에 따른 주행속도 결정에 적용된 수식이 상이하고, 차종별 위험풍속이 제원마다 달라 비교연구사례가 전무하다는 점을 바탕으로 본 연구에서는 Baker의 연구에 사용된 차량제원 및 공기력계수를 한국도로공사 연구에 사용된 MacAdam의 수식에 적용하여 풍속에 따른 차종별 위험속도를 계산하고 제시된 차량속도 및 통행제한기준(안)에 대한 합리성을 검토하였다.

2.2.1 차량제원

Baker의 연구에서 사용되었던 3종류의 4-Wheel 차량인 Car, Coach, Large Van을 적용대상 차량으로 선정하였으며, 차량제원을 표 2에 나타내었다.

[표 2] 비교연구에 적용된 차량의 제원

구분	단위	Car	Coach	Large Van
CG*~앞축	m	1.0	4.0	4.0
CG~뒤축	m	1.5	2.0	2.0
무게중심높이	m	0.5	1.0	1.0
전면적	m ²	2.5	8.0	10.0
총중량	kg	1500	7500	6000
관성모멘트	kgm ²	2000	60000	50000

* CG : 차량의 무게중심

2.2.2 공기력계수

Baker는 Stewart [12]과 Garry [9]의 연구결과를 이용하여 차량속도와 풍속의 상대적인 관계에 의해 결정되는 yaw각에 따라 공기력계수를 산정하기 위한 계산식을 표 3과 같이 제안하였다. 또한 본 연구에서 사용될 차량의 공기력계수를 산정하기 위한 상수를 표 4와 같이 제안하였다.

[표 3] 공기력계수 산정식

공기력계수	산정식
Side force	$C_S = a_1 \psi^{0.382}$
Lift force	$C_L = a_2 \psi (1 + \sin 3\psi)$
Drag force	$C_D = -a_3 \psi (1 + 2\sin 3\psi)$
Yawing moment	$C_Y = -a_4 \psi^{1.77}$
Pitching moment	$C_P = a_5 \psi^{1.32}$
Rolling moment	$C_R = a_6 \psi^{0.294}$

* ψ : yaw각

[표 4] 공기력계수 산정을 위한 상수

상수	Car	Coach	Large Van
a1	1.6	2.25	2.55
a2	0	0.4	0.4
a3	0.25	0.25	0.25
a4	-3.4	2.7	2.0
a5	0	2.6	2.6
a6	0.6	1.7	2.7

2.2.3 선회강성계수

차량이 커브를 주행할 경우 바퀴와 도로면 접촉부위에서 나타나는 횡력은 캠버각이 0°일 때 선회력이라 부르며 식 1과 같이 표현된다[15].

$$F_Y = C_\alpha \alpha \quad [식 1]$$

비례상수인 선회강성계수 C_α 는 미끄럼각 $\alpha = 0$ 에서 α 에 대한 F_Y 곡선의 기울기로 정의되며, 일반적으로 앞차축(C_f)의 경우 40,000N/rad~110,000N/rad

이고 뒷차축(C_r)의 경우 70,000N/rad~160,000N/rad 사이에 존재한다[1]. 본 연구에서는 C_f 및 C_r 의 최대 및 최소값 2가지의 조합으로 연구대상 차량에 적용하였다.

2.2.4 차량의 횡풍에 의한 응답

본 연구에서 차량 주행위험도를 판단하기 위하여 사용된 정적상태일 때 차량의 횡풍에 의한 횡력응답은 다음 식과 같다.

$$\frac{\dot{\psi}}{\beta} = \frac{1}{2} \rho U^2 C_s A \frac{1}{m V_V} \frac{c+d}{c+x_m} \quad [식 2]$$

$\dot{\psi}$: yaw rate A : 전면면적 m : 차량중량

β : 입사하는 바람의 각도 V_V : 차량속도

ρ : 공기의 밀도(일반적으로 약 $1.2kg/m^3$)

U : 차량에 작용하는 상대풍속

c : CG~NSP 거리 $\left(c = \frac{bC_r - aC_f}{C_r + C_f} \right)$

d : CG~CP 거리 $\left(a - \frac{l}{2} + \frac{lC_{yaw}}{C_s} \right)$

a : CG~앞축까지 거리 b : CG~뒤축까지 거리

NSP : 차량의 중립조향점 CP : 차량의 압력중심점

$x_m = \frac{l^2}{mv^2} \frac{C_f C_r}{C_f + C_r}$ l : 차량의 축거

C_f : 앞차축의 선회강성계수

C_r : 뒷차축의 선회강성계수

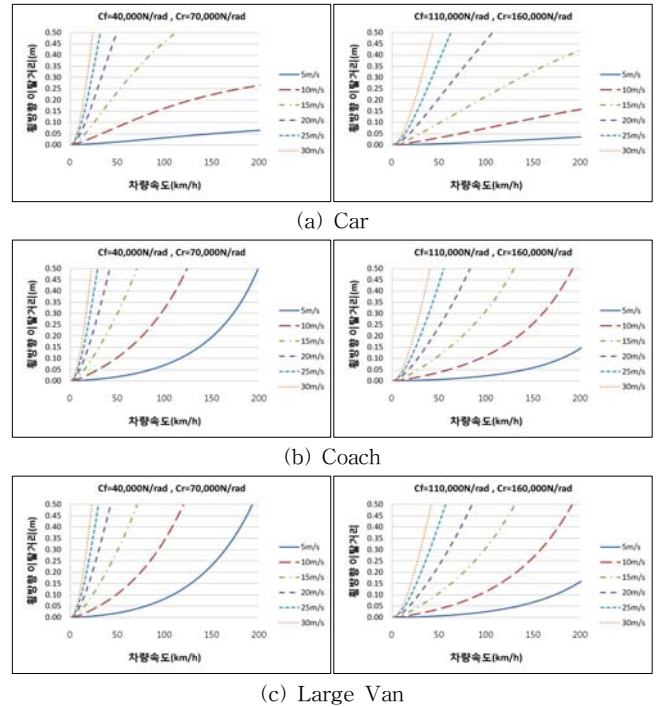
2.2.5 차량 주행 위험도 판단 기준

한국도로공사의 연구 [2]에서는 강풍에 의해 차량 이탈거리가 주어진 기준을 초과하는 경우(차선침범)와 yaw각이 10° 이상인 경우, 그리고 전도가 발생된 경우 차량이 사고가 난 것으로 간주하여 위험속도를 산출하였으나 속도 및 통행제한기준(안)은 차량이탈 거리를 통해 제시되었다. 한편 실제 차량시험을 통해 0.8초 동안은 운전자의 조향반응에 관계없이 거의 동일한 차량주행거동을 나타내므로 [7] 본 연구에서도 동일하게 적용하였다. 차량의 이탈거리는 운전자에게 미치는 영향을 고려하여 Baker가 제안한 0.5m를 이탈할 경우 사고가 난 것으로 가정하였다.

2.3 풍속에 따른 위험속도 산정

2.2절에서 가정한 분석조건에 따라 차량의 위험속

도를 계산하여 풍속에 따른 차량주행 위험속도를 각각 그림 1 및 표 5에 나타내었다.



[그림 1] 차종별 위험풍속 결과 그래프

[표 5] 풍속에 따른 차량위험 속도

풍속 (m/s)	차량위험 속도(km/h)					
	Car		Coach		Large Van	
	I*	II*	I	II	I	II
30	24	44	23	41	23	42
25	32	63	29	55	30	57
20	50	107	42	83	43	85
15	112	253	71	130	71	131
10	∞	∞	124	192	120	192
5	∞	∞	199	256	193	264

* I : $C_f=40,000N/rad$, $C_r=70,000N/rad$

* II : $C_f=110,000N/rad$, $C_r=160,000N/rad$

그림 1과 표 5에 나타난 5m/s~30m/s 사이의 풍속에 따른 차량위험 속도를 통하여 다음의 사항을 확인할 수 있다.

1. 차량의 선회강성계수가 최소일 경우(I)와 최대일 경우(II)를 비교하면 선회강성계수가 큰 경우가 작은 경우에 비하여 전반적으로 풍속에 따른 차량위험 속도가 증가한다. 이는 선회강성계수가 큰 차량일수록 Side Slip에 대한 저항력이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 선회강성계수에 따라 동일한 차종이라도 위험풍속의 차이가 매우 큰 결과를 보이며, 때문에 강풍에 의한 차량의 위험속도 결정시 선회강성계수는 비중 있는 요소로 고려되어야 할 것으로 판단된다.
2. 차종에 따라 차량위험 속도를 비교할 경우 Coach

와 Large Van은 비슷한 위험속도를 나타낸다. 이는 표 2에 보이는 것과 같이 두 차량의 중량, 관성 모멘트, 전면면적 등의 제원이 유사하기 때문인 것으로 사료된다.

3. 한국도로공사 [2]에서 제안한 차량속도규제(안)은 탑차와 버스의 경우 측정된 차량제원이 합리적이지 않아 2가지 차량에 대해서는 차량주행위험 속도를 제안하지 못하고 최종적으로 미니밴의 경우를 적용하였다. 그러나 표 5의 결과를 살펴보면 차량의 위험풍속을 결정하는 차종은 승용차가 아니라 매우 큰 차량인 것으로 나타났다. 이는 풍속에 따라 차량의 위험 속도를 제한할 때, 차종별로 위험속도의 범위가 다양할 수 있으므로 규제기준 역시 다르게 적용되어야 함을 의미한다.

3. 결론

기존에 제안된 풍속에 따른 차량속도제한(안)의 합리성을 검토하기 위해 국내외 유사연구결과를 활용한 비교연구를 수행하였다. 해외연구 실적과 비교할 때 상대적으로 국내연구 실적은 한국도로공사의 연구 외에는 거의 없는 실정이므로 보다 안전하고 편리한 고속도로 건설을 위해서 관련연구가 다양하게 진행되어야 할 것으로 사료된다.

또한, 현대사회의 교통시스템은 국민의 삶의 질을 향상시키고 사회적 비용을 줄이는 중요한 요소이므로 건설주체 뿐만 아니라 기상 또는 자동차 관련 산업분야에서도 보다 진보된 연구를 진행해야 할 시점이다. 특히, 자동차업계와 건설 분야와의 협동연구를 통해 차량거동에 대한 정보공유와 주행실험 등 다각적인 연구를 진행해야 할 것이다. 이러한 연구의 추진은 향후 건설되는 고속도로가 사람중심의 편리함과 쾌적함을 보장하게 만들 것이다. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 국내실정에 맞는 차량주행위험도 판단기준을 제시하고 지능화된 방풍벽 개발 및 방풍 시설 설치 판단 기준에 대한 연구를 지속할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(07기술혁신A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 박보용, 허승진 “차량동역학”, 문운당, 2002.
 [2] 한국도로공사 “고속도로 강풍지역 차량주행 안전성 확보방안 연구” 2003.

[3] Bundorf, R.H., PoUock. D.E. and Hardin, M.C. “Vehicle Handling Response to Aerodynamic Inputs”, GMR-403, 1963.
 [4] C.J. Baker, “A simplified analysis of various types of wind induced road vehicle accidents”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 22, pp. 69-85, 1986.
 [5] C.J. Baker, “Measures to control vehicle movement at exposed sites in windy periods”, J.Wind. Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 25, pp. 151-161, 1987.
 [6] C.J. Baker, “Ground vehicles in high cross winds, Part 3” Interaction of aerodynamic forces and the vehicle system, J. Fluids Struct., Vol. 5, pp. 221-241, 1991.
 [7] Fiala, E., “Lenkreaktionen bei Seitenwind”, VDI-Zwitschrift, Vol. 108, pp. 1333, 1966.
 [8] J.-P. Pinelli, C. Subramanian, M. Plamondon, “Wind effects on emergency vehicles”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 92, pp. 663-685, 2004.
 [9] K. Garry, “Cranfield Institute of Technology”, private communication, 1984.
 [10] Kobayashi, N. and Yamada, M., “Stability of a One Box Type Vehicle in a Cross-Wind, An Analysis of Transient Aerodynamic Forces and Moments”, SAE 881878, 1988.
 [11] MacAdam, C.C., Sayers, M.W., Pointer, J.D. and Gleason, M.. “Passenger Cars and the Influence of Chases and Aerodynamic Properties on Driver Preferences”, Vehicle System Dynamics, Vol. 19, pp. 201-236, 1990.
 [12] M.J. Stewart, “Transient aerodynamic forces on simple road vehicle shapes in simulated cross wind gusts”, Mot. Ind. Assoc. Rep. 77/5, 1977.
 [13] R.G. Gawthorpe, “Wind effects on ground transportation”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 52, pp. 73-92, 1994.
 [14] T. Kobayashi and K. Kitoh, “Cross wind effects and the dynamics of light cars”, Conf. on Impact of Aerodynamics on Vehicle Design, London, 1982.
 [15] Thomas D. Gillespie “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, SAE international, 1992.
 [16] Zomotor, A., “Fahrwerktechnik, Fahrverhalten”, Vogel Verlag, Würzburg, 1987.