

# 고속도로 주행차량의 강풍에 대한 안전성 확보 방안

김현기\*, 마석오\*, 김도\*, 이순희\*

\*(주)동호

e-mail:hkkim1@dongho.co.kr

## A Method to Improve the Driving Stability of Vehicles Driven on Highway under Strong Wind Condition

Hyun-Gi Kim\*, Seok-Oh Ma\*, Do Kim\*, Soon-Hee Lee\*

\*Dongho Co.,Ltd.

### 요 약

고속도로를 주행하는 차량에 작용하는 순간적인 강풍은 차량의 주행경로이탈, 차체의 수평회전 과다와 전도를 발생시키는 원인이 되며, 이로 인한 교통사고는 치명적인 대형사고로 이어질 가능성이 높다. 최근에 건설되거나 추진중인 고속도로는 고속운행에 필요한 도로선형을 확보하기 위해 계곡부를 통과하는 높은 위치에 교량을 건설하거나 산악터널을 내는 경우가 많으며, 지형적인 특성으로 발생하는 국지적인 강풍의 영향이 매우 크기 때문에 적극적인 강풍저감대책이 필요하다.

본 연구에서는 강풍 발생지역을 주행중인 차량의 안전성 및 쾌적성확보를 위하여 차량의 동역학적 거동을 규명하고 차종별 주행속도와 순간풍속의 상관관계를 정립하였다. 또한 차량사고의 영향인자별 분석을 통하여 기존에 제시된 연구결과와 기준안에 대한 고찰을 실시하였고, 강풍발생 지역을 통과하는 차량에 대한 규제와 운영방법에 대해 위험풍속을 정의하고 차량속도규제(안)을 제시하였다.

### 1. 서론

이상기후로 인해 고속도로 구간에 발생한 강풍은 정상적인 차량주행을 방해하여 운전자의 주행안전성을 저해하고 심지어 치명적인 대형 교통사고의 원인이 되기도 한다. 고속도로 구간에 방풍시설을 설치하거나 사전예고시스템을 도입하는 등의 방풍대책을 수립하기 위해서는 강풍에 따른 주행차량의 동역학적 거동 규명, 주행차량의 위험도 판단기준 정립, 강풍위험지역의 정확한 풍속추정기법 연구, 지능화된 방풍벽 개발 및 합리적인 차량속도 규제정책 등의 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 강풍에 대비한 주행차량의 안전성과 운전자의 쾌적성이 확보되는 고속도로의 건설을 위한 연구의 일환으로 강풍 발생시 주행차량의 동역학적 거동에 영향을 미치는 다양한 요소에 대한 연구를 수행하여 각 요소들의 영향을 고려한 차량속도규제기준(안)을 제시하고 활용방안을 모색하였다.

### 2. 본론

#### 2.1. 국내외 연구 동향

해외에서는 독일, 영국 및 일본 등을 중심으로 1960년대부터 횡풍에 대한 차량민감도에 관한 연구, 횡풍과 관련한 차량의 동역학적 거동에 관한 연구 및 차량 타이어에 관한 연구 등을 수행하여 강풍에 의한 차량의 주행안전성을 확보하기 위해 관련연구를 지속적으로 수행하였다. Bundorf(1963)는 과산화수소 로켓 모터를 이용하여 외부 자극을 발생시켜 외부자극과 차량의 응답에 관한 연구를 최초로 수행하여 실험과 컴퓨터 모델의 결과가 일치함을 밝혔다. Gawthorpe(1994)와 Baker(1986, 1987, 1991)는 강풍의 영향을 받는 차량의 주행경로이탈 및 전도에 관한 연구를 수행하였고, 특히 Baker(1986)는 주행이탈, 전도, 수평회전에 의한 사고기준을 제안하고 "Standard Vehicle"의 차량제원을 이용하여 강풍레벨에 따른 위험차량속도를 산정해 내었다. 또한 도로의 캠버, 곡률반경, 마찰계수 및 운전자의 반응을 고려하여 기존 연구에서 제안한 수식을 확장하였다. Zomotor(1987)와 MacAdam(1990)은 횡풍에 따른 차량거동에 관한 모델 및 수식을 제안하였으며 Kobayashi와 Yamada(1988)는 Box형태의 1/10스케

일 모형 차량을 이용한 풍동실험 결과와 18자유도 시뮬레이션의 결과가 일치하는 것을 확인하였다. Pinelli 외(2004)는 소방차, 앰블런스, SUV차량을 이용하여 풍동실험 및 실차실험과 수치적 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교분석하였으며 각 차량의 주행 안전 속도를 제시하였다.

국내에서도 최근 강풍 발생에 대비한 차량안전성을 확보와 운전자의 쾌적한 주행환경 개선을 위한 관심과 노력이 증대되고 있으나 관련분야의 전문가 및 실험시설 부족 등의 원인으로 연구의 수준과 양적인 측면이 아직은 해외선진국에 비해서 매우 부족한 실정이다. 다만 한국도로공사에서는 풍속추정기법, 차량 위험도판단기준, 방풍시설 설치기준에 관한 전반적인 연구를 수행하여 강풍에 따른 차량의 주행 위험도를 판단하여 차량속도규제(안)을 표 1과 같이 제시한 바 있으며 김현기 외(2009)은 강풍 발생시 고속도로 주행차량의 위험도 판단기준에 관한 연구를 수행한 바 있다.

[표 1] 차량속도 및 통행제한 기준(안)

풍속	대책
15m/s ~ 20m/s	속도제한 : 70km/h
20s ~ 25m/s	속도제한 : 50km/h
25m/s 이상	통행제한

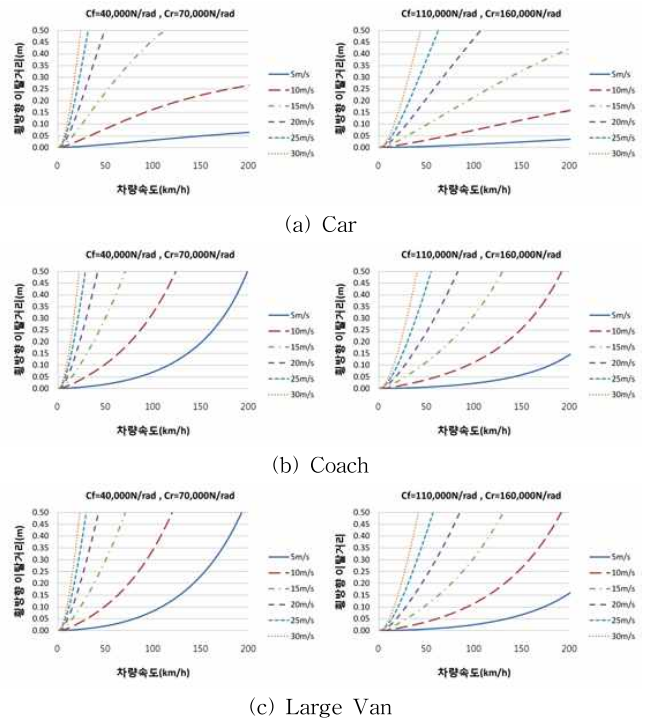
2.2 풍속에 따른 위험속도 산정

기존에 제안된 국내외 기준은 풍속에 따른 주행속도 결정에 적용된 수식이 상이하고, 차종별 위험풍속이 제원마다 달라 비교연구사례가 전무하다는 점을 바탕으로 본 연구에서는 Baker(1986)의 연구에 사용된 차량제원 및 공기력계수를 MacAdam(1990)의 수식에 적용하여 풍속에 따른 차종별 위험속도를 계산하고 제시된 차량속도 및 통행제한기준(안)에 대한 합리성을 검토하였다.

한국도로공사(2003)에서는 강풍에 의해 차량이탈거리가 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 차량이탈거리를 통해 제시되었다. 한편 실제 차량시험을 통해 0.8초 동안은 운전자의 조향반응에 관계없이 거의 동일한 차량주행거동을 나타내므로 (Fiala, 1966) 본 연구에서도 동일하게 적용하였다. 차량의 이탈거리는 운전자에게 미치는 영향을 고려하여 Baker

(1986)가 제안한 0.5m를 이탈할 경우 사고가 난 것으로 가정하였다.

위에서 가정한 분석조건에 따라 차량의 위험속도를 계산하여 풍속에 따른 차량주행 위험속도를 각각 그림 1에 나타내었다. 차량의 횡풍에 의한 횡력응답과 적용 차량의 제원, 공기력 및 선회강성계수는 김현기 외(2009)에 제시되었다.



[그림 1] 차종별 위험풍속 결과 그래프

2.3 풍향각에 따른 위험차량속도 산정

Baker(1986)는 강풍환경 하에서 주행하는 차량의 동역학적 거동을 규명하여 시간이 긴 교량과 같이 강풍에 노출된 지역의 차량속도규제 및 차량통행제한 기준에 관한 연구를 수행하였다. 강풍이 작용할 경우 주행중인 차량의 동역학적 거동을 규명하기 위하여 평형방정식과 타이어의 변위를 고려한 적합방정식을 이용하여 유도한 무차원화된 속도, 이탈거리 및 회전각은 다음과 같다.

$$\bar{v} = 1 - e^{-\bar{t}} \tag{식 1}$$

$$\bar{y} = e^{-\bar{t}} + \bar{t} - 1 \tag{식 2}$$

$$\bar{\phi} = \frac{\bar{t}^2}{2} + \alpha \left( \frac{\bar{t}^2}{2} - \bar{t} + 1 - e^{-\bar{t}} \right) \tag{식 3}$$

여기서,  $\bar{t}$  : 무차원 시간

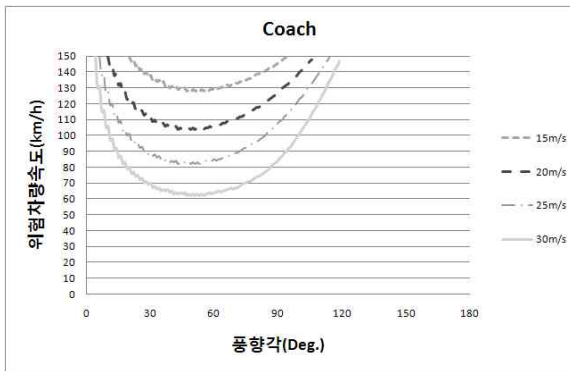
$$\alpha = \left[ \left( \frac{s+r}{s+r-kq} \right) C_P + \left\{ \left( \frac{2n+k}{2} \right) - \left( \frac{n(s+r+ks)}{s+r-kq} \right) \right\} C_L \right] \times \left( \frac{C_S}{C_L^1} \right) \times \left[ C_Y + C_R \left\{ \frac{(2n+k)}{2} \right\} \right]$$

$p, q, r, s$  : 차량제원

$n$  : 종방향 마찰계수( $n=-0.0075$ )

$C_P, C_L, C_S, C_Y, C_R$  : 공기력계수

위 식을 적용하여 풍향각의 변화에 따른 풍속별 위험차량속도를 산정하였다. 주어진 풍속에 대하여 풍향각을 0°부터 180°까지 증가시키면서 각 공기력계수를 산정하고, 산정된 공기력계수를 제안식에 적용하여 차량의 속도를 150km/h까지 증가시키면서 횡방향이탈, 수평회전 그리고 전도에 대하여 기준조건을 벗어나는 차량속도를 위험차량속도로 결정하였다. Coach의 풍향각에 따른 풍속별 위험차량속도를 그림2에 나타내었으며 풍향각의 변화에 따라 결정된 위험차량속도와 기존연구에서 적용한 풍향을 90°로 가정하였을 때 결정되는 위험차량속도와의 차이를 표 2에 제시하였다.



[그림 2] Coach의 풍향각에 따른 위험차량속도

[표 2] 풍향각에 따른 위험차량속도 차이 비교

풍속 (m/s)	Coach			Large Van		
	속도1 (풍향각)	속도2	증감 (km/h)	속도1 (풍향각)	속도2	증감 (km/h)
15	128(52)	146	-18	82(49)	100	-18
20	104(49)	127	-23	62(49)	80	-18
25	82(48)	108	-26	44(52)	58	-14
30	62(51)	84	-22	-	-	-

여기서, 속도1은 팔호 안의 풍향각일때 차량의 위험속도이고 속도2는 풍향각 90°일때의 위험속도이다. Car의 경우는 풍향각이 90°에 도달하기 이전에 수평회전과다로 인한 사고가 발생하므로 결과 비교

에서 제외하였고 Coach 및 Large Van에 대해서만 위험차량속도를 비교하였다. 위험차량속도를 결정하는 풍향각은 90° 횡풍이 아니라 차종별, 풍속별로 다소 차이가 있으나 대략 50°의 풍향각에서 위험차량속도가 결정되는 것으로 나타났다. 그리고 50° 부근에서 결정된 위험차량속도와 90° 횡풍에서의 결과를 비교하면 Coach의 경우는 26km/h, Large Van의 경우는 19km/h의 속도차이가 발생하여 풍향각 및 차종에 따라 최대 26km/h까지의 결과차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 풍속에 따른 위험차량속도를 산정할 경우 풍향각은 반드시 고려되어야 하는 중요한 요소임을 확인해 주는 결과이다.

위의 연구를 통하여 다음과 같은 사항을 확인할 수 있다.

1. 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.
2. 차량의 선회강성계수가 크면 작은 경우에 비하여 풍속에 따른 차량위험 속도가 증가한다. 또한 선회강성계수에 따라 동일한 차종이라도 위험풍속의 차이가 매우 큰 결과를 보이기 때문에 강풍에 의한 차량의 위험속도 결정시 선회강성계수를 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.
3. 풍향각은 공기력계수, 상대풍속 결정요인, 도로 선형에 따른 풍향의 변화 등을 고려했을 때 반드시 고려해야 하는 중요한 요소이다. 90°횡풍과 비교했을 때 풍향각 약 50° 정도에서 위험차량속도가 산정되었으며 속도차이는 최대 약 20km/h 정도를 나타내었다.

#### 2.4 차량속도 규제기준(안)

위의 연구를 통하여 차량속도규제기준(안)을 제시하기 위해 속도규제의 시작은 차량이 80km/h이상으로 주행할 수 없는 시점으로 하고, 전면통제는 차량이 50km/h이하로 주행해야 하는 시점으로 결정하였다. 최근 해외선진국들의 교통정책은 VMS (Variable Message Signs)나 VSL(Variable Speed Limit)등의 실시간 교통안내시설을 이용한 지능형 교통시스템을 구축하는 추세이며, 향후 VMS, VSL 등에 활용하기 위해서 차량속도규제를 10km/h의 단위로 세분화하여 차종별 위험차량속도, 위험풍속별

안내문구 및 안전대책을 포함하여 표 3과 같이 차량 속도 규제기준(안)을 제시하였다.

[표 3] 차량속도 규제기준(안)

풍속 (m/s)	화물차량	승용차량	안내문구 및 대책 (VMS 이용시)
10~13	경고안내	-	화물차량:강풍주의
~15	80km/h	-	화물차량:80km/h제한,외곽차선이용
~18	70km/h	경고안내	화물차량:70km/h제한,외곽차선이용 승용차량:강풍주의
~20	60km/h	80km/h	화물차량:60km/h제한,외곽차선이용 승용차량:80km/h제한
~22	50km/h	70km/h	화물차량:50km/h제한,외곽차선이용 승용차량:70km/h제한
~24	전면통제	70km/h	화물차량:통행제한,외곽차선정차 승용차량:70km/h제한
~27		60km/h	화물차량:통행제한,외곽차선정차 승용차량:60km/h제한
27이상		전면통제	강풍위험,차량전면통제

### 3. 결론

기존에 제안된 풍속에 따른 차량속도제한(안)의 합리성을 검토하기 위해 선회강성계수 및 풍향각을 고려한 위험차량속도를 산정하였으며 실시간 교통안내를 위한 차량속도규제(안)을 제시하였다. 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. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 국내실정에 맞는 차량주행위험도 판단기준을 제시하고 지능화된 방풍벽 개발 및 방풍시설 설치 판단 기준에 대한 연구를 지속할 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

- [1] 김현기, 김경훈, 마석오, 이순희(2009) “강풍 발생시 고속도로 주행차량의 위험도 판단기준에 관한 연구”, 한국산학기술학회 추계 학술발표논문집, pp. 821-824.
- [2] 한국도로공사 (2003) “고속도로 강풍지역 차량주행 안전성 확보방안 연구”
- [3] Baker, C.J. (1986) “A simplified analysis of various types of wind induced road vehicle accidents”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 22, pp. 69-85.
- [4] Baker, C.J. (1987) “Measures to control vehicle movement at exposed sites in windy periods”, J.Wind. Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 25, pp. 151-161.
- [5] Baker, C.J. (1991) “Ground vehicles in high cross winds, Part 3” Interaction of aerodynamic forces and the vehicle system, J. Fluids Struct., Vol. 5, pp. 221-241.
- [6] Bundorf, R.H., PoUock. D.E. and Hardin, M.C. (1963) “Vehicle Handling Response to Aerodynamic Inputs”, GMR-403.
- [7] Fiala, E. (1966) “Lenkreaktionen bei Seitenwind”, VDI-Zwitschrift, Vol. 108, pp. 1333.
- [8] Gawthorpe, R.G. (1994) “Wind effects on ground transportation”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 52, pp. 73-92.
- [9] Kobayashi, N. and Yamada, M. (1988) “Stability of a One Box Type Vehicle in a Cross-Wind, An Analysis of Transient Aerodynamic Forces and Moments”, SAE 881878.
- [10] MacAdam, C.C., Sayers, M.W., Pointer, J.D. and Gleason, M. (1990) “Passenger Cars and the Influence of Chases and Aerodynamic Properties on Driver Preferences”, Vehicle System Dynamics, Vol. 19, pp. 201-236.
- [11] Pinelli, J.P., Subramanian, C. and Plamondon, M. (2004) “Wind effects on emergency vehicles”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn, Vol. 92, pp. 663-685.
- [12] Zomotor, A. (1987) “Fahrwerktechnik, Fahrverhalten”, Vogel Verlag, Würzburg.