

측풍 영향 감소를 위한 방풍벽에 대한 수치 해석적 연구

Numerical Study on the wind-fence for reduction of the crosswind effects

윤수환* 김덕영* 구요천* 노주현* 이동호** 고태환***
Su-Hwan Yun, Duck-Young Kim, Yo-Cheon Ku,
Joo-Hyun Rho, Dong-Ho Lee, Tae-Hwan Ko

ABSTRACT

Recently, the strong crosswinds have been raised a new issue because of the high speed and light weight of rail-vehicle. For one of the countermeasures on this issue, there is an installation of the wind fence around the railway of the strong wind area. Numerical analysis was used to understand the relation between the wind fence shape and induced aerodynamic force on a rail-vehicle. This paper presents the aerodynamic characteristics of the rail-vehicle under strong crosswinds for various wind fence shape: height of fence, upper shape, slot length between the ground and fence bottom. Through this study, it is found that the cross wind effect are greatly reduced by the increase of wind fence height. And the additional reduction can be obtained by the modification of the upper shape of the wind fence.

1. 서론

열차가 고속으로 주행 시 측면에서 유입되는 강한 바람은 차량의 안정성에 큰 영향을 미친다. 때로는 이러한 강한 측풍에 의해서 전복이나 탈선과 같은 대형 사고가 발생하기도 한다. 현재까지 여러 문헌에 보고된 측풍에 의한 사고는 약 30건 이상 발생하였다[6]. 이 사고 중 대부분은 궤도 간격이 좁은 협궤에서 발생한 것이다. 하지만, 최근에는 철도 차량의 고속화와 경량화로 인해 표준 궤도에서도 측풍에 의한 사고가 발생하며, 그 빈도도 높아지고 있는 추세이다. 이러한 이유로 유럽과 일본에서는 1970년대부터 강한 측풍이 차량에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 수행되었다. 그 중 Baker와 Gawthrope등은 주로 실제 차량을 이용한 실험과 축소 모형을 이용한 풍동 실험 등을 이용하여, 강한 측풍 유입 시 차량에 나타나는 공기 역학적 특성들에 대한 연구를 수행하였다[1,2]. 그리고 Khier, Mancini, Diedrichs등은 수치 해석적 방법을 이용하여 차량 주위의 유동장 및 측풍 특성 곡선 등에 대한 연구를 수행하였다[5,7].

일반적으로, 측풍 사고에 대한 대책은 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다[3].

1. 차량 형상 설계: 측풍의 영향을 줄일 수 있는 차량 형상 설계
2. 운행 속도 제한: 돌풍 경고 시스템을 통한 차량 운행 속도 제한
3. 방풍 구조물 설치: 강한 측풍으로부터 차량을 보호할 수 있는 구조물 설치

첫 번째의 경우, 차량 설계 단계에서 고려해야 하므로 기존 차량에 대해서 적용하기 어렵다. 그리고 두 번째의 경우, 강풍을 예측할 수 있는 복잡한 시스템이 요구될 뿐 아니라 공극적인 해결 방안이 될 수는 없다. 하지만, 세 번째의 경우, 다른 대책에 비해 가장 간단하면서도 효과적으로 측풍 사고를 예방할 수 있다. 그러나 방풍벽과 같은 구조물은 설치 시에 많은 건설비용이 요구되는 단점이 있다.

* 서울대학교 기계 항공 공학부

** 서울대학교 기계 항공 공학부, 교수

*** 한국 철도 기술연구원, 선임연구원

본 논문은 효과적인 방풍벽 형상 설계를 위한 선행 연구로서, 측풍 유입 시 방풍벽 형상과 차량에 나타나는 공력 특성 관계를 이해하기 위하여 수치해석을 이용하였다.

2. 본문

2.1 수치해석

강풍이 부는 상황에서 차량이 고속으로 주행 시 차량에 작용하는 속도성분은 차량의 주행방향에 평행한 성분과 수직인 성분으로 나뉜다. 그 중에서 차량의 안정성에 큰 영향을 미치는 것은 주행방향에 수직인 성분이다. 또한 선로 주위에 설치된 방풍벽이 매우 길다고 가정하면 그림 1과 같은 3차원 공간에서 2차원 해석만으로도 방풍벽에 대한 효과를 예측 가능하다. 따라서 본 연구에서는 차량 단면과 방풍벽 단면이 고려된 2차원 수치해석을 수행하고자 한다.

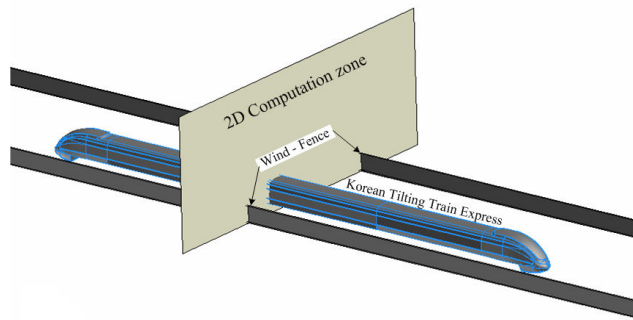


그림 1 해석 영역 설정에 대한 개략도

그림 2는 2차원 해석 영역과 경계 조건을 나타낸 그림이다. 차량 단면과 방풍벽 단면이 포함된 300m×150m의 해석 영역을 설정하였다. 측풍은 왼쪽(Inflow)에서 30m/s로 유입하여 오른쪽(Outflow)으로 유출된다. 차량 모델은 한국형 틸팅 차량(TTX)의 단면을 고려하였으며, 선로 간격 5m의 복선에 대하여 차량은 windward에 위치한다. 방풍벽은 선로중심에서 각각 5m떨어져 위치하며, Solid로 가정한다.

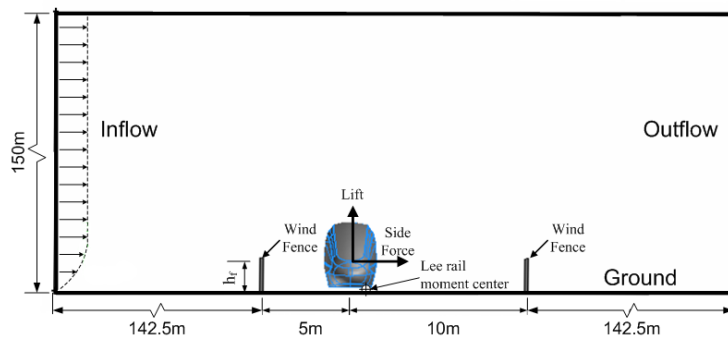


그림 2 2차원 해석 영역 및 경계 조건

그림 3은 본 연구를 위해 구성한 해석 격자이다. 전체 해석 공간은 대부분 비정렬 삼각 격자(Unstructured triangular mesh)를 사용하였다. 하지만 차량 및 방풍벽 표면과 같은 벽면(Wall)에서는 점성 경계층 해석을 위하여 10~15겹의 정렬 격자(Structured mesh)를 사용한 하이브리드 격자(Hybrid mesh)를 사용하였다.

지배 방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 함께 RNG k-e 난류 모델을 사용하였다. 그리고 압력과 속도 성분은 SIMPLE algorithm을 이용하여 결합하였다.

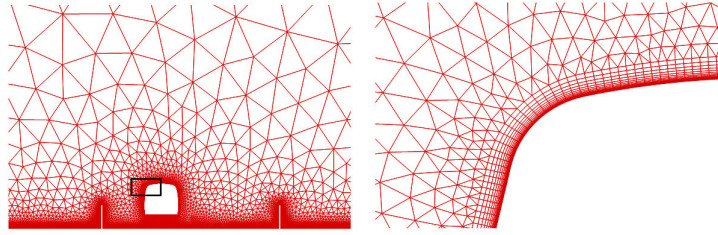


그림 3 해석 격자

2.2 해석 결과

본 논문에서 해석한 방풍벽의 효과는 차량에 나타나는 공력 계수의 평균값으로 평가하였다. 즉, 측풍에 의해서 차량에 나타나는 측력(Side force), 양력(Lift), Leeward의 선로에 대한 롤링 모멘트(M_{lr})를 식 (1)을 통한 무차원 값으로 정의하였다. 그리고 이 값들은 0에 가까울수록 차량은 안정적이며, 방풍벽의 성능도 좋다고 할 수 있다.

$$C_s = \frac{\bar{S}}{0.5\rho \bar{V}^2 h_{ref} l_t} \quad C_l = \frac{\bar{L}}{0.5\rho \bar{V}^2 h_w l_t} \quad C_{m-lr} = \frac{\bar{M}_{lr}}{0.5\rho \bar{V}^2 h_{ref}^2 l_t} \quad (1)$$

\bar{S} : side force, \bar{L} : lift, \bar{M}_{lr} : lee rail roll-moment, h_{ref} : height of train,
 h_w : width of train, \bar{V} : velocity, l_t : unit length of train

2.2.1 방풍벽 높이에 따른 영향

그림 4는 방풍벽의 높이에 따라 차량에 나타나는 공력 계수들을 나타내었다. 방풍벽이 없는 경우, 차량은 측풍의 영향을 크게 받기 때문에 그래프에 나타난 공력 계수들의 절대값은 모두 0에서 크게 벗어나 있다. 1m 이하에서는 높이가 증가함에 따라 C_s 가 다소 감소하지만, C_l 과 C_{m-lr} 은 거의 변화가 없다. 하지만, 1m 이상에서는 높이가 증가할수록 C_s , C_l , C_{m-lr} 의 절대값도 감소한다. 이 값들은 높이 2.5m까지 방풍벽의 높이가 증가함에 따라 급격히 감소하여 방풍벽의 높이 변화에 매우 민감하게 나타난다. 그리고 2.5m 이상의 높이에서는 방풍벽의 높이가 증가하여도 공력 계수의 변화가 거의 없는, 즉 방풍벽의 높이 변화에 큰 영향을 받지 않는 영역이 형성된다. 따라서 1m 이하의 방풍벽은 측풍으로부터 차량을 보호하기에는 부적절하며, 2.5m 이상에서는 방풍벽의 높이를 증가시켜도 큰 효과를 얻을 수 없다.

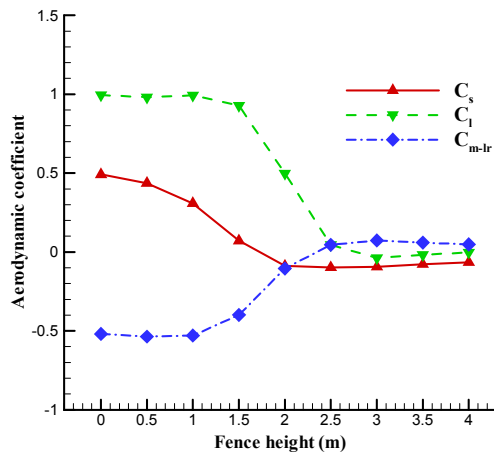


그림 4 높이에 따른 공력 계수

2.2.2 방풍벽 형상에 따른 영향

본 절에서는 방풍벽의 상부 형상에 따른 차량의 공력 계수를 살펴보았다. 그림 5는 방풍벽 상부 형상을 변화시킨 단면도이다. 차량을 중심으로 바깥으로 꺾인 형상을 Bend-out, 차량 방향으로 꺾인 형상을 Bend-in이라고 하였다. 그리고 꺾어진 부분의 높이(h_b)는 0.5m, 꺾인각(α_b)는 $\pm 45^\circ$ 로 고정하였다.

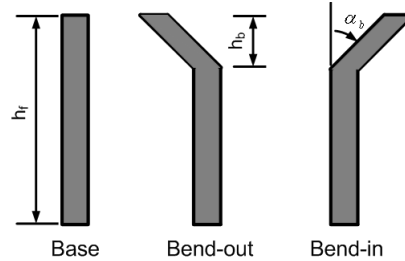


그림 5 방풍벽 형상 변화

그림 6은 방풍벽 형상에 따른 차량 주위의 유선 및 C_p 분포를 나타낸 그림이다. Base와 Bend-out의 경우 방풍벽을 지난 유선은 차량 윗면을 지나 차량과 직접적인 상호작용은 일으키지 않는다. 특히, Bend-out의 경우 방풍벽 형상의 영향에 의해 유선이 Base에 비해 높게 형성되어있다. 따라서 Bend-out의 경우, 같은 높이의 Base에 비해 상대적으로 측풍 효과 감소에 효과적일 것으로 예상된다. 하지만, Bend-in의 경우, 유선이 차량과 만나면서 차량 표면에 정체점이 형성되고, 차량 윗면에 강한 팽창이 나타나므로 측풍의 영향이 크게 나타날 것으로 예상된다.

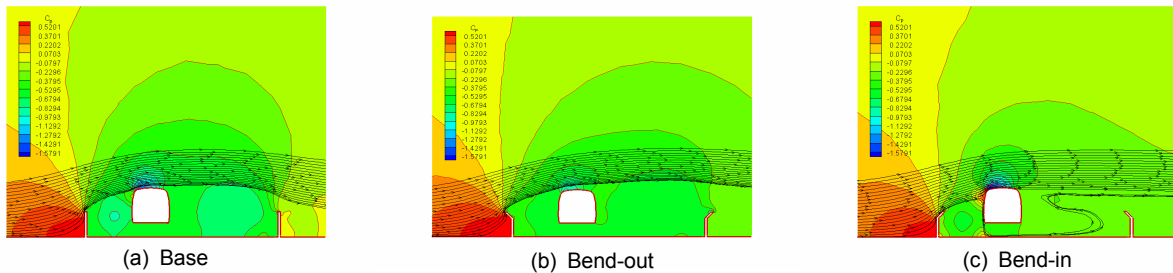


그림 6 형상에 따른 유선 및 C_p 분포

표 1은 상부 형상에 따른 공력 계수를 나타낸 표이다. 앞에서 언급한 것과 같이 같은 높이의 방풍벽에서 그 형상에 따라 공력 계수는 다르게 나타난다. 특히, Bend-out의 경우, 상부 형상 효과로 인해 방풍벽을 지난 유선이 보다 높게 형성되면서, Base 비해 상대적으로 낮은 C_s , C_l 이 나타난다. 따라서 상부 형상을 유동 유입 방향으로 꺾으면 방풍벽 높이를 높이는 효과를 얻을 수 있다. 하지만, Bend-in의 경우, 방풍벽을 지나가는 유선이 차량과 만나면서 상대적으로 C_l 이 높게 나타난다.

표 1 형상별 차량 공력 계수

h_f	Shape	C_s	C_l	C_{m-lr}
1.5	Base	0.0718	0.9286	-0.3988
	Bend-out	0.0254	0.6984	-0.2950
	Bend-in	0.1958	0.9660	-0.4758
2.0	Base	-0.0888	0.4983	-0.1045
	Bend-out	-0.0672	0.2447	-0.0348
	Bend-in	0.0013	0.8224	-0.3109

2.2.3 방풍벽 Slot의 영향

방풍벽의 형상을 간단하게 변화시킬 수 있는 또 하나의 방법으로 Slot을 생각할 수 있다.

그림 7은 Slot 크기에 따른 차량 주위의 유선 및 C_p 분포이고, 표 2는 차량의 공력 계수를 나타낸다. 그림

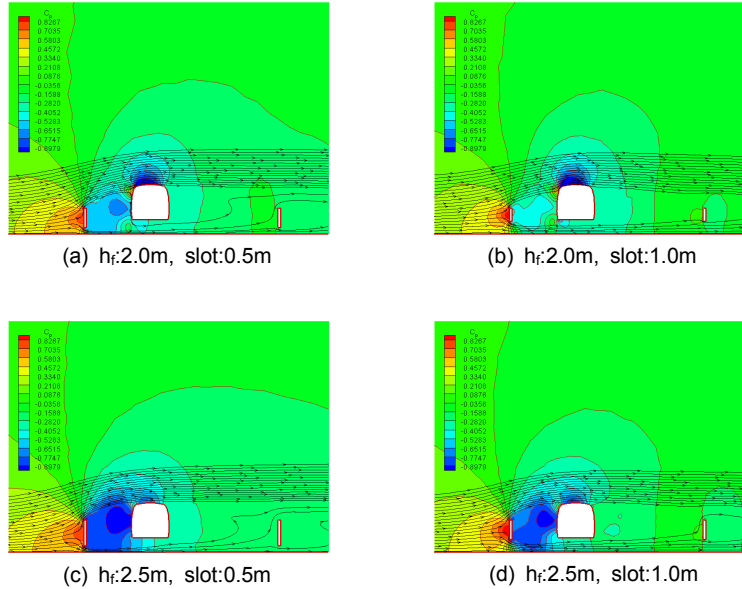


그림 7 Slot 크기에 따른 유선 및 C_p 분포

표 2 Slot에 의한 차량 공력 계수 변화

h_f	h_s	C_s	C_l	C_{m-r}
2.0	0.0	-0.0888	0.4983	-0.1045
	0.5	-0.1345	0.5247	-0.0902
	1.0	0.0515	0.6168	-0.2492
2.5	0.0	-0.0982	0.0448	0.0454
	0.5	-0.4687	0.1507	0.3253
	1.0	-0.3327	0.3212	0.1670

7에 의하면, Slot으로 인해 windward 방풍벽 뒤에서는 저압영역이 발생하고 있다. 특히, 같은 높이의 방풍벽에서 Slot의 높이가 상대적으로 작은 경우에 보다 강한 저압이 나타난다. 이로 인해, 표 2에 나타나는 C_s 는 음의 값을 가지게 되는데, 작은 Slot에서 그 절대값이 보다 크게 나타난다. 그리고 Slot의 크기가 증가하면, 저압이 회복되면서 C_s 의 값도 회복되는 현상이 나타난다. C_l 은 Slot의 크기가 증가할수록, 방풍벽을 지나는 유선이 낮아지면서 그 값은 상승한다. 특히, C_l 은 h_f 에 지배적으로 나타나기 때문에 2.5m의 C_l 값이 2.0에 보다 낮게 나타난다. 또한, C_s 는 Slot의 크기를 증가시키면 음의 값이 회복되는 경향이 있기 때문에 h_f 와 h_s 의 크기를 적절히 설정하면 C_s 와 C_l 를 동시에 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 논문에서는 효과적인 방풍벽의 형상을 결정하기 위해 다양한 방풍벽 형상에 대한 2차원 수치해석을 수행하였다. 방풍벽 형상 즉, 높이, 상부형상, slot 크기에 따라 차량에 나타나는 공기역학적 특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

강한 측풍의 영향을 감소시키기 위한 방풍벽의 효과는 그 높이에 매우 지배적이다. 높이 1m이하의 방풍벽에서는 높이에 따라 C_s 만 다소 감소하고, 나머지 공력 계수들은 거의 변화가 없었다. 하지만, 높이 1m 이상 2.5m 이하에서는 높이가 증가함에 따라 차량의 공력 계수들이 급격히 감소한다. 그리고 높이 2.5m 이상에서는 더 이상 높이가 증가하여도 차량의 공력 계수 감소는 거의 나타나지 않았다.

방풍벽 상부 형상에 대해서는 측풍 유입 방향으로 꺾은 즉, bend-out 형상이 유입 유동을 차량 위로 보다 높이 유도시켜, 방풍벽 높이를 상승시키는 것과 같은 효과가 나타났다. 하지만, Bend-in의 방풍벽 형상에 의해서는 유선이 차량 방향으로 유도되면서 C_f 이 증가하게 된다.

Slot의 경우, 방풍벽 높이와 Slot의 크기를 적절히 설정하면 보다 작은 방풍벽으로도 측풍 차단 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국철도기술연구원의 철도기술연구 개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. C. J. Baker, "Ground vehicles in high cross winds. Part I: steady Aerodynamic Forces", *Journal of Fluids and Structures*, 5, 69-90, (1991).
2. R. G. Gawthorpe, "Wind effects on ground transportation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 52, 73-92,(1994)
3. G. Matschke, B. Schulte-Werning, "Measures and Strategies to minimise the effect of strong cross winds on high speed trains.", *Proceedings of the WCRR World Congress of Railway Research*, Vol.E, Florence, Italy, 569-575, (1997)
4. T. Imai, T. Fujii, K. Tanemoto, T. Shimamura, T. Maeda, H. Ishida, Y. Hibino, " New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1601-1610, (2002)
5. B. Diedrichs, "On computational fluid dynamics modeling of crosswind effects for high-speed rolling stock", *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part F: J. rail and Rapid Transit*, 203-226, (2003)
6. M. Suzuki, K. Tanemoto, T. Maeda, "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 209-218, (2003)
7. G. Mancini, R. Cheli, R. Roberti, G. Diana, F. Cheli, G. Tomasini, R. Corradi, " Cross-wind aerodynamic forces on rail vehicles Wind tunnel experimental tests and numerical dynamic analysis", *Proceedings of WCRR 2003*, 513-522