

수치 해석 방법을 이용한 한국형 틸팅 차량의 측풍 안전성 고찰

윤수환^{*1}, 구요천^{*1}, 김태윤^{*1}, 고태환^{*2}, 이동호^{*3}

Numerical study of the Crosswind Safety on Korean Tilting Train Express

S. H. Yun, Y. C. Ku, T. Y. Kim, T. H. Ko, D. H. Lee

Recently, the weight of train is decreased by using the light material for improvement in energy efficiency. And the length of whole train is more increased for mass transportation of passengers and cargo. However, decrease of the weight and increase of the length of train can cause the train to be overturned or derailed by strong crosswind. In case of Korean Tilting Train eXpress (TTX), the situation can be more severe. TTX will be developed for a quasi-high speed train at 200km/h speed rate and operated on the existing tracks. Moreover, the weight of TTX will be much less than that of conventional train. It is supposed that TTX will be very sensitive to crosswind. In this paper, numerical analysis is used to investigate aerodynamic characteristics around TTX and obtain the induced lateral force by crosswind. After calculating derailment coefficient and overturning coefficient using numerical results, the crosswind safety of TTX is judged. This paper will be good data for judging crosswind safety of TTX.

Key Words: 측풍(Crosswind), 안전성(Safety), 전복(Overturning)

1. 서론

최근 유럽과 일본을 중심으로 한 고속 전철의 개발로 인해 철도 시스템의 운행 속도는 눈부시게 향상 되었다. 이와 함께 경량화 소재 개발 및 이 소재를 이용한 차체의 제작은 같은 무게에 대해 열차 길이가 더욱 길어지는 것을 가능하게 하였다. 이를 통하여 승객 및 화물의 보다 빠른 수송 및 대량 수송을 가능하게 함으로써 철도 시스템 전체의 에너지

효율 향상에 기여하였다. 그러나 전체 차체 길이의 증가 및 차량 경량화로 인하여 전체 철도 차량은 측풍에 매우 민감하게 반응하게 되었다. 이러한 측풍은 열차의 주행 승차감에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 탈선이나 전복과 같은 사고를 일으키기도 한다[1]. 실제로 프랑스, 독일과 일본 등에서는 자국에서 운행되는 열차의 측풍 안전성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 우리 나라에서는 고속 전철 비수해 지역의 기존선 속도 향상을 위해서 틸팅 시스템을 이용하는 한국형 틸팅 차량(Korean Tilting Train eXpress: TTX)의 개발에 집중하고 있다[7]. 하지만, TTX 역시 가벼운 복합 소재를 이용한 차중 감소와 곡선 부에서의 속도 향상이 이루어지기 때문

*1 학생회원, 서울대학교 기계항공 공학부

*2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

*3 정회원 서울대학교 기계항공공학부 교수

에 주행시 측풍에 대하여 민감하게 반응할 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 현재 개발중인 TTX의 형상에 대하여 측풍에 대한 공력 해석을 바탕으로 측풍 안전성에 대한 분석을 하고자 한다

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

지배 방정식은 비압축성 3차원 Navier Stokes 방정식을 이용하였다. 그리고 난류 모델링은 $K - \epsilon$ 모델링을 사용하였다. 지배방정식을 임의의 제어 체적(Control Volume)에 대하여 직교 좌표계(Cartesian)로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V w dV + \oint [F - G] \cdot dA = 0 \quad (1)$$

2.2 해석 기법

본 연구를 위한 해석은 측풍의 상황을 고려해야 하기 때문에 반드시 3차원으로 해석해야 한다. 또한 열차와 같이 복잡한 형상을 고려하고 지면 효과까지 고려해야 하기 때문에 계산하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 해석의 효율을 위하여 상용 해석 프로그램인 Fluent를 사용하였다. 비압축성 유체에서 Navier-Stokes 방정식의 수치적 강건성을 극복하기 위하여 예조건화 기법(Preconditioning Method)를 이용한 Fluent의 Coupled방식을 사용하였다. 기본적으로 유한 체적법(Finite Volume Method)를 사용하며, 격자 경계를 출입하는 플럭스 항에 대하여는 풍상차분법(Upwind difference method)를 사용하였다.

2.3 해석 격자

측풍 해석을 위하여 TTX의 1차 형상과 2차 형상에 대한 hexahedral 격자를 각각 생성하였다(Fig. 1.). 전체적인 해석 격자는 H형 타입으로 격자수는 약 570,000개로 형성하였다.

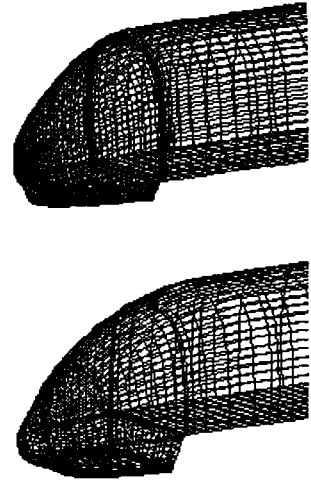


Fig. 1 해석 격자(상: 1차 형상, 하: 2차 형상)

3. 해석 결과 및 분석

3.1 유선 및 표면 압력 분포 변화

Fig. 2는 1차 형상의 TTX가 180km/h로 주행시 측풍의 유·무에 따른 유선 및 압력 분포를 나타낸 것이다. 측풍이 없는 경우 열차 주위의 유동은 전두부 nose에서 열차 표면을 따라 나란히 흐른다. 하지

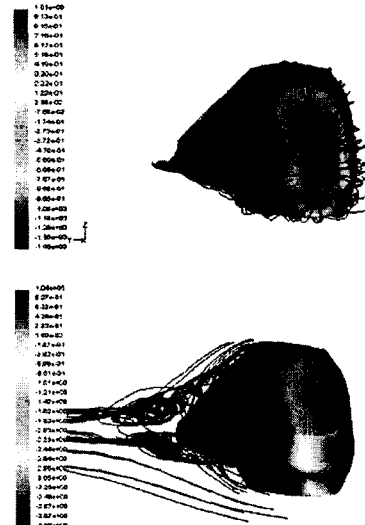


Fig. 2 유선 및 압력 분포 변화 (측풍 0m/s(상), 30m/s(하))

만, 측풍이 유입되는 경우에는 열차 표면을 따라 측풍 방향으로 흐른 유동은 바람이 불어나가는 방향(Leeward)에서 와류를 형성하게 된다. 또한 측풍이 없는 경우 전두부 nose와 후미부 nose에 생성되는 고압의 정체영역은 측풍의 유입으로 인해 Fig. 2에 나타나는 것처럼 바람이 불어오는 방향(windward)로 이동하게 된다. 이로 인해 열차 표면의 압력은 비대칭으로 형성되게 되며, 측력이 발생하게 된다

생성된 와류의 압력이 회복되며, 후미부에서는 열차 후류에 의해 압력 비대칭이 가장 약하게 나타나기 때문이다.

Table 1 차량별 상대적 측력 분포

	Front-car	Mid-car	Rear-car
1st model	43	35	22
2nd model	44	32	23

3.2 차량 형상에 따른 측력 비교

측풍의 유입 속도에 따른 측력을 TTX의 각 형상별로 비교하기 위하여 주행 속도를 180km/h로 고정시키고 측풍 유입속도를 30m/s까지 증가시키면서 해석하였다. Fig. 3에 나타난 측력 계수는 아래식으로 구해진다.

$$C_s = \frac{F_Y}{0.5\rho V_\infty^2 S_{ref}} \quad (2)$$

Fig. 3에 나타나는 것과 같이 측풍의 속도가 약한 10m/s의 경우 두 형상 차이로 나타나는 측력의 영향은 크지 않다. 하지만, 측풍의 속도가 증가 할수록 형상 차이로 인한 영향이 나타나게 되며, 30m/s의 측풍이 유입될 경우 2차 형상이 1차 형상에 대하여 약 5% 정도의 낮은 측력을 나타낸다.

3.3 주행 상황에 따른 측력 비교

틸팅 시스템은 곡선 구간에서 차체를 회전 중심으로 기울여 곡선 주행 속도를 향상시키고 동시에 승객이 받는 횡가속력을 줄여 승차감을 향상시키는 시스템이다. 곡선 구간에서 주행 속도가 증가하면 그만큼 차량이 받는 원심력은 증가하게 될것이다. 이때 원심력 방향으로 강한 측풍이 발생하면 원심력과 측풍에 의한 측력이 중첩되어 보다 위험한 상황이 발생할 수 있다(Fig. 4).

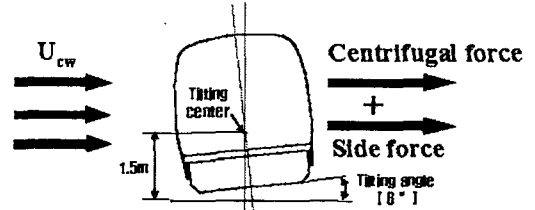


Fig. 4 곡선 주행 개념도

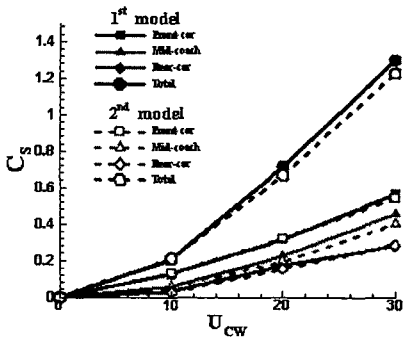


Fig. 3 차량 형상에 따른 측력 비교

Fig. 5는 직선 구간과 곡선 구간(R=400m)을 116km/h로 주행하는 상황에 따른 측력 변화이다.. 그림5의 측력계수 값을 살펴보면, 측풍이 증가할수록 중간 객차와 후미부에서 곡선 주行的 측력이 보다 크게 증가한다. 이것은 곡선 구간을 주행하면서 곡률

Table 1은 각 구성 차량별로 나타나는 측력의 상대적 분포를 나타낸다. 전체 측력에 대하여 각각의 차량이 받는 측력은 전두부, 객차, 후미부 순으로 나타난다. 이것은 전두부에서의 압력 비대칭이 가장 크게 나타나며, 객차를 지나 후미부로 갈수록 Leeward

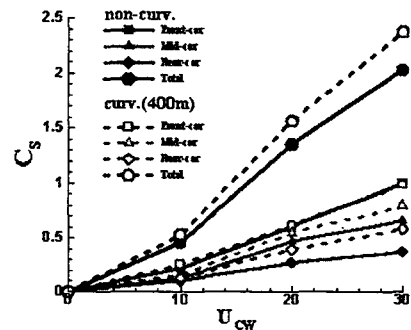


Fig. 5 주행 상황에 따른 측력 변화

에 의해 객차와 후미부에서 받는 측풍 유입각 증가 하기 때문이다

4. 측풍에 대한 안전성 평가

4.1 안전성 평가 계수

열차의 주행 안전성은 탈선 계수(Derailment coefficient)와 전복 계수(Overtuning coefficient)로 평가 할 수 있다. 열차가 주행시 측풍을 받으면 windward의 차륜에서는 전복 계수로, 그리고 Leeward의 차륜에서는 탈선 계수로 판단한다.

4.1.1 탈선 계수(Derailment coefficient)

Fig. 6은 열차가 주행시 열차와 궤도에서 나타나는 작용력을 나타낸다.

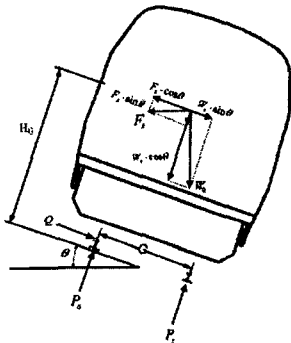


Fig. 6 열차와 궤도의 작용력

여기서 탈선 계수는 횡압에 대한 윤중의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_c = \frac{Q}{P_o}$$

4.1.2 전복 계수(Overtuning coefficient)

안전성 평가 계수 중 전복 계수는 윤중이 감소하는 차륜에 대한 평가 계수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{|P_o - P_i|}{P_o + P_i}$$

위 식으로부터 구해지는 전복 계수는 측력이나 원심력 등의 외력이 없는 경우 0으로 나타나며 외력의 증가로 인해 그 값이 1이 되면 차체에 작용하던 Roll모멘트가 복원 모멘트를 초과하여 전복이 발생한다.

4.2 측풍에 대한 안전성 평가

4.2.1 직선 주행시 안전성 평가

Fig. 7은 1차 형상의 TTX가 180km/h의 주행 속도로 개활지를 주행할 때, 측풍 속도에 따른 탈선 계수를 나타낸 것이다. 그림과 같이 30m/s이하의 범위에서는 탈선이 발생하지 않는다.

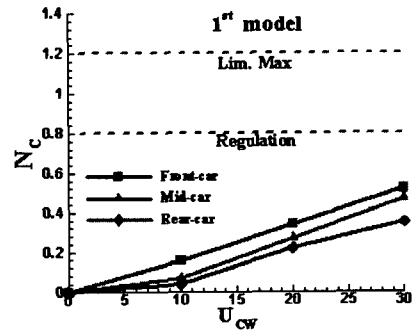


Fig. 7 직선 주행 시 탈선 계수

Fig. 8은 전복 계수를 나타낸 것이다. 전복계수는 측풍이 증가함에 따라 상승하다가 약 28m/s부근에서 그 값이 1을 나타낸다. 따라서 이 지점에서 전복이 발생 할 수 있다.

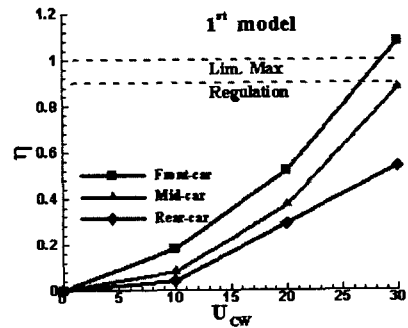


Fig. 8 직선 주행 시 전복 계수

4.2.2 곡선 주행 시 안전성 평가

곡선 주행은 주행 속도 116km/h, 곡률반경 400m에 대한 탈선 계수(Fig. 9)와 전복 계수(Fig. 10)이다. 탈선 계수는 역시 30m/s이하의 측풍에 대하여 규정 값 이하로 탈선이 발생하지 않으나, 전복 계수는 약 26m/s에서 1값을 초과하여 전복이 발생할 수 있다.

후기

본 논문은 철도기술연구개발사업의 지원으로 제작 하였습니다.

참고문헌

- [1] R.G. Gawthorpe, 1994, "Wind effects on ground transportation", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol.52, pp.73-92.
- [2] C.J Baker, 2004, "Wind overturning study: Full scale and wind tunnel measurements to determine the aerodynamic force and moment parameters of Mark 3 and Class 390 vehicles-overview report", Issue4-Final.
- [3] B Diedrichs, "On computational fluid dynamics modelling of crosswind effects for high-speed rolling stock", Proc. Instn Mech. Engrs Vol.217 Part F: J.Rail and Rapid Transit.
- [4] C.J. Baker, 2003, "Measurements of the cross wind forces on trains", The World Congress on Railway Research.
- [5] 윤수환, 김태운, 권혁빈, 이동호, 2004, "한국형 틸팅 차량의 공력 특성 해석", 한국철도학회, 춘계학술대회.
- [6] 김남포, 김정석, 오일근, 2004, "틸팅차량의 곡선 부 틸팅동작 시운중감소율 변화에 대한 고찰", 한국철도학회, 추계학술대회.
- [7] 김남포, 고태환, 2003, "180km/h급 한국형 틸팅차량의 대차 기본설계 연구", 한국철도학회, 추계학술대회.

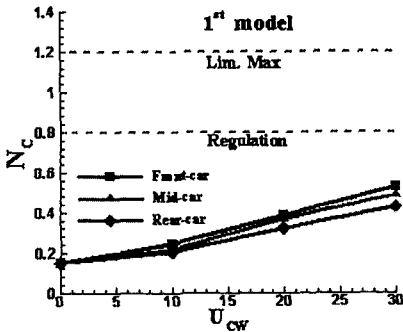


Fig. 9 곡선 주행 시 탈선 계수

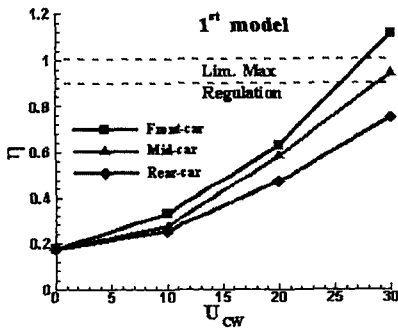


Fig.10 곡선 주행 시 전복 계수

5. 결 론

현재 개발중인 180km/h급의 한국형 틸팅 차량 (Korean Tilting Train eXpress: TTX)에 대하여 측풍 유입으로 인한 공력 특성 변화와 측풍에 대한 안전성 평가를 분석하였다. 이를 통하여 나타난 결론은 다음과 같다.

열차 주행시 측풍에 의해 열차 표면의 압력 분포는 비대칭으로 형성된다. 이러한 비대칭 현상은 형상 변화가 가장 많은 전두부에서 크게 나타난다. 따라서 이로 인해 발행하는 측력 또한 전두부에서 가장 크게 발생한다. 한국형 틸팅차량(TTX)는 30m/s이하의 측풍에 대하여 탈선은 발생하지 않지만, 약 26m/s(곡선 주행), 28m/s(직선 주행)의 측풍에 대하여 전복이 발생할 수 있다.