

강한 측풍에 대한 한국형 고속 틸팅 열차의 안전성 고찰

Investigation on the Safety of TTX in Strong Cross wind

김덕영* · 윤수환* · 하종수*** · 노주현* · 권혁빈** · 고태환** · 이동호†

Duck-Young Kim · Su-Hwan Yun · Jong-Soo Ha · Joo-Hyun Rho · Hyeok-Bin Kwon ·
Tae-Hwan Ko · Dong-Ho Lee

Abstract

The Korean Tilting Train eXpress (TTX) development program is in progress for the purpose of running speed or passenger's comfort improvement at the curved track. However, the speed up and light weight of train make poor the dynamic safety of the TTX in strong cross wind. In this paper, 3-dimensional numerical analysis on the flow field around the TTX under strong cross wind is performed for each operating condition, such as the train speed, cross wind speed, tilting/nontilting condition, and so on. Due to the strong cross wind, the pressure distribution around the train becomes asymmetric, especially at the leading car. Asymmetrical pressure distribution causes the side force and strong instability. The side force on the train is proportional to the train speed and cross wind speed. Based on the numerical results, the overturning coefficients are predicted for investigation of the train stability, and all of them are less than the critical value, 0.9. The results in this study would be a good data for providing importance to judgement of cross wind safety of TTX.

Keywords : TTX, Cross wind, Safety, Overturning
한국형 고속틸팅열차, 측풍, 안전성, 전복

1. 서론

현재 국내의 고속철도기술은 2004년 KTX의 보급과 한국형 고속전철(HSR-350)의 개발로 인하여 급속한 성장을 이룩하였다. 이와 더불어, 기존선의 속도 향상을 위해서 주행속도 약 200 km/h 수준의 한국형 고속 틸팅 열차(Korean Tilting Train eXpress: TTX)의 개발이 진행되고 있다. 틸팅열차는 곡선궤도에서 횡가속도 감소를 위한 능동적인 자세제어를 통해 곡선부 통과속도 향상과 승차감 향상을 동시에 해결할 수 있는 차량이다. 특히 기존선을 이용하기 때문에 적은 초기투자 비용으로 속도향상을 이룰 수 있는 장점이 있으며 이미 유럽과 일본 등에서 실용화 하고 있다. 하지만 개발 중인 한국형 틸팅 열차의 경우, 에너지 효율을 증가시키기 위하여 강재 차체가 아닌 가벼운 신소재 복합재료를 이용하여

상대적으로 차중이 적으며, 곡선 궤도를 주행할 경우에는 차체를 기울이면서 고속으로 주행해야 한다. 따라서 강한 측풍과 같은 외부교란이 발생할 때 측풍 그 자체의 동압과 곡선부 고속주행 시의 원심력으로 인해 차량의 불안정성이 가중될 수 있다. 이때 심한 경우 탈선이나 전복과 같은 대형 사고를 발생시킬 수도 있다[1,2].

일반적으로 해안가, 터널 출구, 계곡 등과 같은 지역에서는 강한 바람이 자주 발생하기 때문에 이러한 지역에서는 사고의 위험이 증가한다. 실제로 프랑스, 독일, 일본 등에서는 자국에서 운행되는 열차의 측풍 안전성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-8].

본 논문에서는 현재 개발 중인 TTX의 3차원 형상에 대한 수치해석을 기반으로 TTX의 측풍 안전성 분석 및 평가를 하고자 한다.

† 책임저자 : 정회원, 서울대학교, 기계항공공학부
E-mail : donghlee@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7386 FAX : (02)887-2662

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 정회원, 철도기술연구원

*** 현대자동차

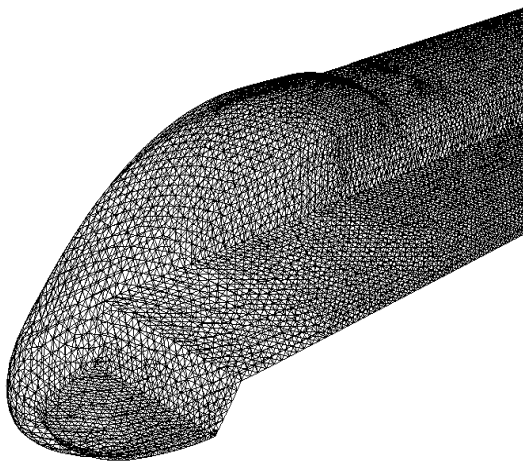


Fig. 1. 해석 격자

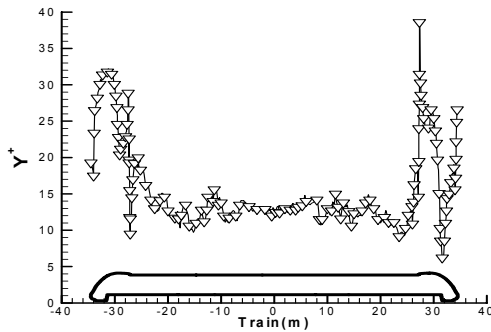


Fig. 2. Y⁺값의 분포

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 수치해법

측풍 유입 시 차량에 작용하는 공력산출을 위해서 3차원 형상의 차량모델에 대한 유동장 해석이 필요하다. 수치해석을 위해 다음과 같은 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석을 수행하였고, 난류모델은 RNG k-ε 모델을 사용하였다. 3차원 형상의 수치해석 연구를 위해 상용전산해석 프로그램인 Fluent 6.2를 사용하였다[12].

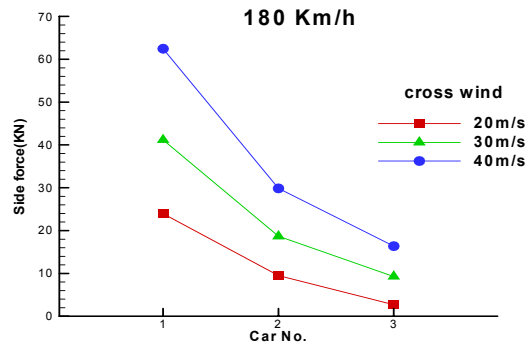
$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{v}\vec{v}) = -\frac{1}{\rho}[\nabla p - \nabla \cdot (\vec{\tau})] \tag{2}$$

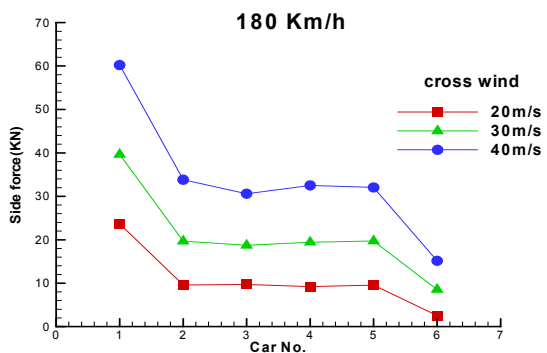
(ρ: 밀도, v: 속도, p: 압력, τ: 응력 텐서)

2.2 해석격자

측풍 해석을 위하여 TTX의 표면형상에 대해 Fig. 1과 같이 격자를 생성하였다. 전체 해석격자는 약 600,000개의 비정렬



(a) 3량 해석 시 측력 분포



(b) 6량 해석 시 측력 분포

Fig. 3. 3량 및 6량의 측력분포 비교

격자로 구성하였고, 점성 경계층 해석을 위하여 열차표면에는 Prism layer를 형성한 hybrid 격자를 구성하였다. Fig. 2.는 Y=0(TTX 길이 방향에 대한 대칭면)에서의 Y⁺값으로서, 그 값을 40이하로 유지하였다.

또한, 동일한 조건에서 해석을 수행했을 때 3량 1편성일 때와 6량 1편성일 때의 전두부, 객차부, 후미부(각각 car 1, car 2, car 3)의 측력은 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 수치해석의 효율성 증대를 위해 실제 6량 1편성의 TTX를 3량으로 상사하여 해석을 수행하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 측력의 변화

일반적으로 열차가 바람이 없는 개활지를 고속으로 주행하는 경우 열차에 측력이 작용하지 않는다. 하지만 열차측면에서 바람이 불어오는 경우 Fig. 4-6과 같이 열차주위의 압력분포는 열차 진행방향에 대해 좌우 비대칭적으로 형성된다.

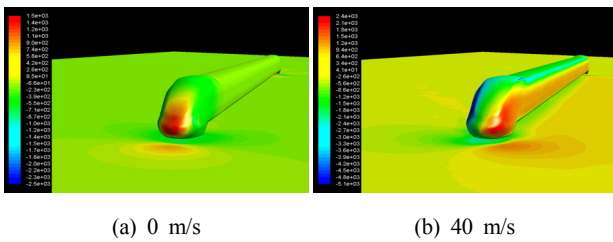


Fig. 4. 측풍유입 시 표면 압력분포

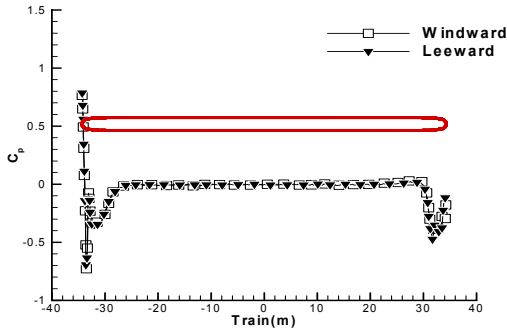


Fig. 5. 측풍속도 0 m/s일 때 Cp분포(Z=1.4 m)

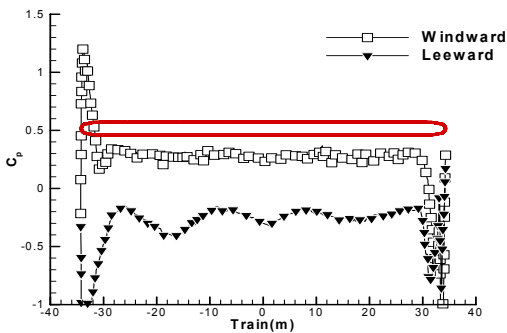


Fig. 6. 측풍속도 40 m/s일 때 Cp분포(Z=1.4 m)

열차 주행 시 측풍이 유입되면 열차 전두부의 압력저항과 측풍으로 인한 측면 압력저항이 동시에 발생한다. 따라서 열차 주변의 압력 분포는 열차 진행 방향에 대해 비대칭적으로 형성된다. 이로 인해, 차량 대칭면을 기준으로 표면 정압차가 발생하며, 열차에 측력을 발생시킨다. 이러한 경향은 Fig. 6과 같이 전두부에서 가장 크게 나타난다.

3.1.1 측풍 및 차량속도에 따른 측력 변화

Fig. 7~9는 열차가 각각 120, 180, 200 km/h의 속도로 주행할 경우에 대해 측풍 속도의 변화에 따른 각 차량의 측력을 비교한 선도이다.

각각의 주행속도 및 측풍속도 영역에서 전두부에 작용하는 측력이 가장 크게 나타나며, 속도변화에 따른 측력의 변화도 가

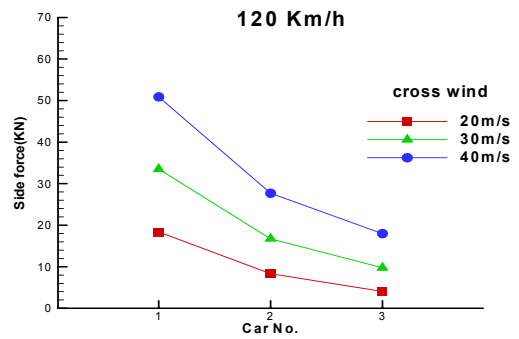


Fig. 7. 측풍 속도에 따른 측력변화 (Vtrain = 120 km/h)

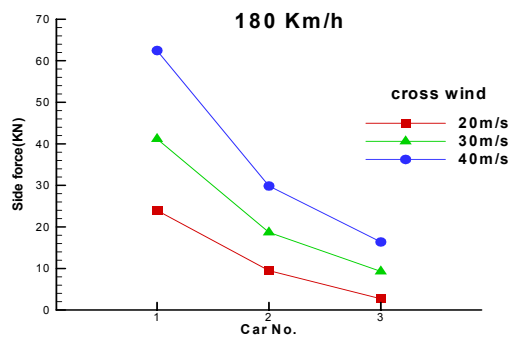


Fig. 8. 측풍 속도에 따른 측력변화 (Vtrain = 180 km/h)

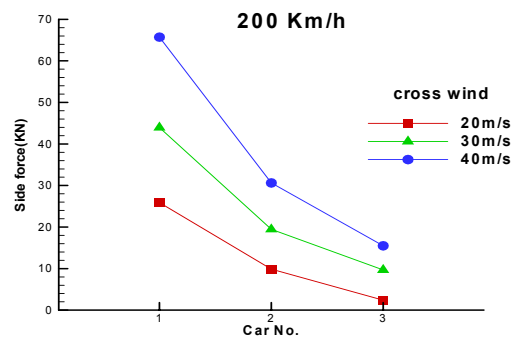


Fig. 9. 측풍 속도에 따른 측력변화 (Vtrain = 200 km/h)

Table 1. 측풍 및 차량 속도에 따른 측력(전두부)

	120 km/h	180 km/h	200 km/h
20 m/s	18 KN	24 KN	27 KN
30 m/s	34 KN	42 KN	44 KN
40 m/s	52 KN	62 KN	66 KN

장 크다. 즉, 전두부만으로 측력의 정량적인 비교가 가능하다.

측풍 및 주행속도가 증가할수록 전두부에 작용하는 측력은 Table 1과 같이 증가하며 높은 속도 영역에서는 측력의 증가량도 더욱 커진다.

Table 2. 틸팅 효과 분석을 위한 해석 조건

	주행속도	틸팅각	캔트	곡률반경
Base	116 km/h	0°	0 mm	∞ m
Case A		8°	100 mm	∞ m
Case B		8°	100 mm	400 m



Fig. 10. 틸팅 직선주행 개념도

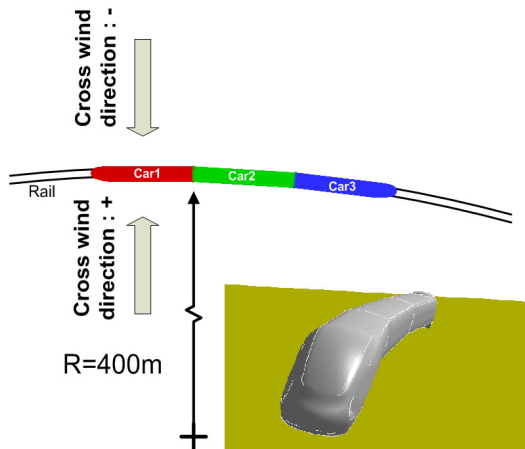


Fig. 11. 틸팅 곡선 주행 개념도(Case B)

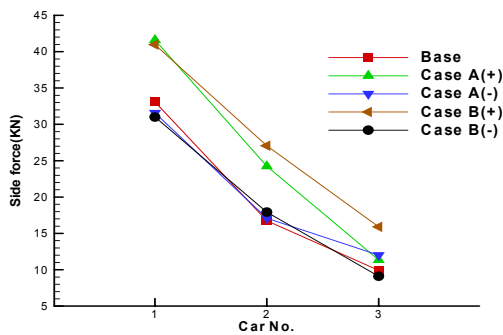


Fig. 12. 틸팅에 의한 측력 변화

3.1.2 틸팅 효과에 따른 영향

한국형 틸팅 열차는 곡선궤도의 속도향상을 위해서 곡선 주행 시 차량의 곡률 중심으로 차체를 기울여 주행하게 된다. 이때 차량이 받는 측력에 대한 변수는 다음과 같이 크게 두 가지로 설명할 수 있다.

- 1) 평지에 대한 차량의 기울어짐, 즉 캔트 또는 틸팅각
- 2) 차량의 진행 방향에 대한 측풍 유입각

본 논문에서는 두 변수의 영향을 분석하기 위해서 두 단계로 해석을 수행하였다. Table 2는 각 변수의 영향을 분석하기 위해 해석한 조건을 나타낸 것이다.

Base는 개활지 직선주행의 경우이고, Case A는 차량이 기울어진 각도의 영향을 분석하기 위해 직선 궤도를 주행하는 차량이 곡선궤도를 주행하는 각만큼 틸팅한 가상의 상황에 대한 해석이다. 이 때 기울어진 각도(θ)는 틸팅각 8°와 곡률반경 400 m에 대한 캔트 100 mm에 해당하는 4°를 합한 총 12°이다.

Case B는 곡선 궤도를 주행하는 실제 상황을 해석하기 위해 틸팅 각도와 캔트 및 곡률반경 400 m를 고려하였다. Base, Case A, Case B 모두 30 m/s의 측풍이 유입된다고 가정했고, 측풍 유입방향이 원심력과 같은 방향일 때 ‘+’, 반대 방향일 때 ‘-’로 표시하여 총 5 case의 해석을 수행했다.

Fig. 12는 5가지 주행상황에 따라 열차의 각 차량에 작용하는 측력의 변화를 나타내고 있다. Case A(+)와 Case B(+)의 경우 Car 1과 Car 2에서 측력이 Base에 비해 높아진 것을 확인할 수 있다. 이는 차량이 측풍 유입방향을 향해 기울어질 경우, 표면 정압차의 증가로 인해 보다 큰 측력이 발생함을 의미한다.

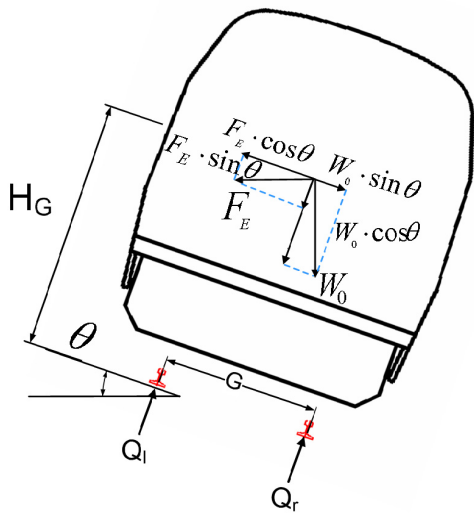
Car 3의 측력은 Case B(+)의 경우 Case A(+)보다 크고, Case B(-)의 경우 Case A(-)보다 작다. 이는 Case B(+)와 Case B(-)의 경우 곡률에 의해 차량 주행속도와 측풍 유입속도가 이루는 각이 변화되어 측풍의 상대 유입각도가 Case A(+)와 Case A(-)에 비해 각각 증가 및 감소되기 때문이다.

3.2 측풍 안전성 평가

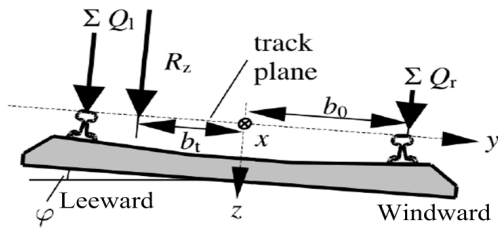
일반적으로 측풍에 대한 차량의 전복안전도에 대한 평가는 windward wheel의 unloading 정도로 결정하고, 이를 결정하는 기준은 Fig. 13과 같이 Vector Intercept 방법(VI)을 이용한다. VI는 외력(F_e)과 차량 하중(W_0)의 합력(R_z)방향이 레일 중심으로부터 떨어진 정도를 이용하여 판단하는 방법이다. 외력(측풍에 의한 풍력/곡선주행 시 원심력)이 증가하면 합력 R_z 의 위치는 leeward로 이동하고 leeward rail 면에 도달하면 Q의 값이 0이 되면서 전복된다.

그림 (a)에서 F_e 는 측풍이나 원심력으로 인한 외력, H_G 는 열차 무게중심의 높이를, W_0 는 열차의 하중을, R_z 는 레일에 수직으로 작용하는 힘의 합력을 나타낸다[4].

따라서 wheel unloading의 정도를 전복계수(η_{VI})라 하여 다음과 같이 정의할 수 있다.



(a) 작용력의 분포



(b) Vector intercept 개념도

Fig. 13. Vector intercept 개념도 및 작용하는 힘의 분포

$$\eta_{VI} = \frac{b_t}{b_o} = \frac{\sum Q_l - Q_r}{\sum Q_l + Q_r} \quad (3)$$

여기서,

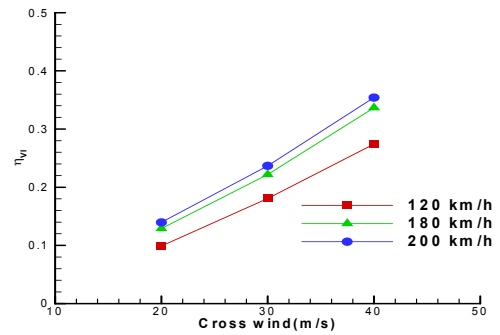
$$Q_r = \frac{1}{2} (W_o \cos \theta + F_e \sin \theta) - \frac{H_G}{G} (F_e \cos \theta - W_o \sin \theta)$$

$$Q_l = \frac{1}{2} (W_o \cos \theta + F_e \sin \theta) + \frac{H_G}{G} (F_e \cos \theta - W_o \sin \theta)$$

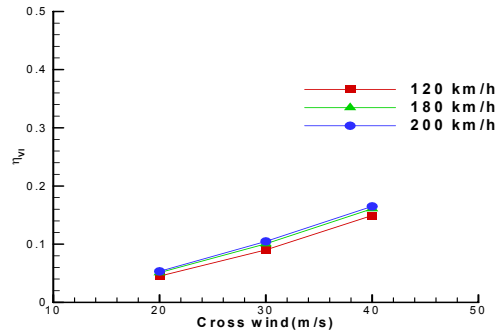
위 식에서 η_{VI} 의 값이 1이 될 때, windward rail의 Q_r 이 0이 되어 전복이 시작되는데, η_{VI} 의 safety margin을 0.1로 하여 0.9를 그 한계로 설정하여 차량의 안전성을 판단한다 [9-11].

3.2.1 직선궤도 주행 시 측풍 안전성 평가

Fig. 14는 각각 직선궤도를 주행하는 차량에 대하여 측풍의 유입속도에 따른 Car 1과 Car 2의 전복계수를 나타낸 선도이다. 여기서 차량 주행속도는 120, 180, 200 km/h 이며 측풍유



(a) Car 1



(b) Car 2

Fig. 14. Car 1과 Car 2의 전복계수

입속도는 20, 30, 40 m/s이고 각 조건에서 차량이 측풍에 의해 받는 힘에 의한 전복계수를 식(3)을 이용하여 구한 값이다. 앞서 설명한 것과 같이 측풍의 영향은 측풍유입속도와 주행속도가 증가할수록 커지며, 전복계수의 경향도 이와 유사하다. Car 1에서의 전복계수를 살펴보면 주행속도 200 km/h, 측풍 속도 20 m/s일 때는 약 0.14, 동일속도에서 측풍 속도 40 m/s일 때는 약 0.38로 상승한다. 하지만 이는 η_{VI} 의 한계인 0.9보다 작은 값으로 전복은 발생하지 않는다. 각 차량에서 측풍의 영향은 다르게 나타난다. Car 1은 측풍의 영향을 가장 많이 받으므로 Car 2에서의 전복계수는 Car 1보다는 전체적으로 낮은 값을 나타내며 경향성은 Car 1과 일치한다.

3.2.2 곡선궤도 주행 시 측풍 안전성 평가

차량이 곡선 궤도를 주행할 때는 관성에 의해서 회전 중심 바깥방향으로 원심력이 작용한다. 이러한 상황에서 원심력과 같은 방향으로 측풍이 유입되면, 차량에는 원심력과 측풍에 의한 공력이 중첩되어 사고위험이 증가한다. 또한 캔트가 있는 곡선궤도를 차체를 기울인 상태로 주행하면, 측풍 유입각이 차량의 위치에 따라 변한다. 따라서 곡선 궤도를 주행하는 상황에 대해서는 측풍이 회전 중심방향으로 유입되는 경우와

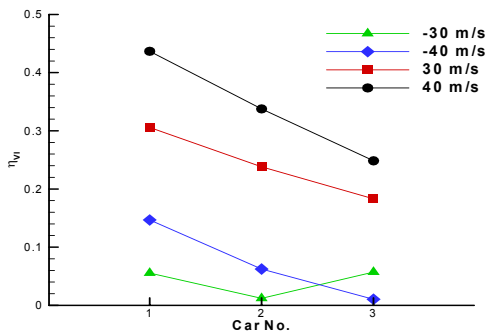


Fig. 15. 곡선 궤도 주행 시 전복계수

회전 중심 반대방향으로 유입되는 경우 모두에 대해서 고려되어야 한다.

Fig. 15는 곡률반경 400 m의 곡선궤도를 116 km/h의 속도로 주행하는 차량에 대한 전복계수를 나타낸 것이다. 전체적으로 ‘(+)’방향이 ‘(-)’방향에 비해 큰 전복계수 값을 나타낸다. 이것은 ‘(+)’방향의 경우 원심력 방향으로 공력이 작용하여 원심력과 중첩되기 때문이다. 각 측풍 유입조건에서 Car 1에서의 전복계수를 살펴보면 전체적으로 0.5이하 이고 이는 η_{vi} 의 한계인 0.9보다 작은 값으로 전복은 발생하지 않는다.

4. 결론

본 논문에서는 현재 개발 중인 한국형 고속 틸팅 열차(Korean Tilting Train eXpress: TTX)에 대하여 측풍이 유입되는 여러 가지 상황에 대한 공력 해석을 통해 측력의 변화와 측풍에 대한 안전성 평가를 분석하였다. 이를 통하여 나타난 결론은 다음과 같다.

열차 주행 시 측풍이 유입되면, 열차 측면의 표면정압이 증가하게 되고, 열차 표면의 압력 분포가 비대칭적으로 형성되어 측력이 발생한다. 특히, 전두부에서는 측풍유입으로 발생하는 표면정압차가 객차부와 후미부에 비해 크게 나타나며, 따라서 측력 또한 가장 크게 발생한다.

전두부에서 측풍에 의해 발생하는 측력은 차량의 주행속도가 증가함에 따라, 그리고 측풍 유입속도가 증가함에 따라 증가한다. 본 연구의 해석결과, 180 km/h로 주행하는 TTX에 20 m/s~40 m/s의 측풍이 유입될 경우 전두부에서는 약 24 KN~62 KN의 측력이 발생할 것으로 예상된다.

곡선 틸팅 주행 시 측풍이 유입되는 방향에 따라 열차에 작용하는 측력은 다르게 나타난다. 즉, 측풍 유입방향으로 차체가 기울어진 경우, 전두부에서 보다 큰 측력이 나타난다.

전복계수 η_{vi} 분석을 통해 TTX의 측풍 안전성을 평가한 결과, 본 연구의 연구범위(주행속도 120~200 km/h, 측풍 유입

속도 20~40 m/s)에서 η_{vi} 의 값은 직선주행 시 최고 0.36, 곡선주행 시 최고 0.44로 각각 나타났다. 이 값은 한계값인 0.9 미만으로, 본 연구범위에서 전복은 발생하지 않을 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 2단계 BK 21 사업과 철도기술연구개발사업의 지원으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. T. Johnson (1996), "Strong wind effects on railway operations - 16th October 1987", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.60, 251-266.
2. Toshiaki Imai, Toshishige Fujii, Katsuji Tanemoto, Taisuke Shimamura, Tatsuo Maeda, Hiroaki Ishida, Yu Hibino (1994), "New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.90, 1601-1610.
3. C.J. Baker (2003), "Measurements of the cross wind forces on trains", The World Congress on Railway Research.
4. E Andersson, J Haggstrom, M sima and S stichel, "Assessment of train-overtuning risk due to strong cross-winds", Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part F: J.Rail and Rapid Transit.
5. Gerd Matschke, Peter Deeg, Burkhard chulte-Werning (2001), "Effects of Strong Cross Winds on High-Speed Trains : A methodology for risk assessment and development of countermeasures", The World Congress on Railway Research, Cologne.
6. Gerd Matschke, Thorsten Tielkes, Peter Deeg, Burkhard Schulte-Werning (2000), "Effects of Strong Cross Winds on High-Speed Trains-a Risk Assessment Approach", International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management, Osaka, Japan.
7. P-E Gautier, T Tielkes, F Sourget, E Allain, M grab, C Heine (2003), "Strong wind risks in rilways: the DEUFRAKO crosswind program", The World Congress on Railway Research.
8. R.G. Gawthorpe (1994), "Wind effects on ground transportation", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol.52, 73-92.
9. B Diedrichs, M Ekequist, S Stichel, H Tengstrand (2004), "Quasi-static modelling of wheel-rail reactions due to cross-wind effects for various types of high-speed rolling stock", Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part F: J.Rail and Rapid Transit.
10. 윤수환 (2005), "한국형 틸팅 차량의 측풍 안전성에 대한 수치 해석적 연구", 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 공학석사학위논문.
11. 윤수환, 구요천, 김태운, 고태환, 이동호 (2005), "수치 해석 방법

을 이용한 한국형 킬링 차량의 측풍 안전성 고찰”, 한국전산유체
학술대회 논문집, pp.109~113.

12. Fluent Inc., Fluent & Gambit user's manual.

(2007년 2월 7일 논문접수, 2007년 4월 18일 심사완료)