

G7 및 TTX 차량의 측풍 해석

Analysis of crosswind around G7 and TTX

김태윤* 이보성** 권혁빈*** 고태환*** 이동호****
Tae-yoon Kim, Bo-sung Lee Hyeok-Bin Kwon Tae-hwan Ko Dong-ho Lee

Abstract

In this study, the cross-wind stability of the G7 train and TTX running under the high speed was investigated by using 2-dimensional Reynolds Averaged Navier-Stokes equations. It is very important to analysis the aerodynamic characteristic of bluff body located near a ground at the field of the aeronautical, wind engineering, ground vehicle system. To the point of running stability, it is meaningful to analysis the cross-wind effect to the G7 train and TTX developed by domestic technology. The aerodynamic characteristics of the G7 train equipped by bogie-cover is more superior to the case without bogie-cover. Also 2nd model of TTX has stream-shape body has the more good performance than 1st model of TTX.

1. 서 론

2004년도에 시작된 KTX의 상용 서비스로 국내 철도 기술은 비약적인 발전을 하게 되었다. 더욱이 국내 독자기술로 개발된 한국형 고속열차(G7)는 시험 운영을 통하여 최고 속도가 350km/h에서도 그 안정성을 확인하였으며, 고속 열차의 해박을 받지 못하는 중앙선에 투입될 틸팅 열차(TTX)가 현재 개발 중에 있다. 일반적으로 뚱뚱한 물체 주위의 유동장은 정체, 박리, 재부착, 와류 배출 등의 복잡한 패턴을 보이게 되는데, 더욱이 이러한 뚱뚱한 물체가 지면 근처에 존재하게 되면 지면에 존재하는 점성 경계층의 영향으로 더욱 복잡한 유동장이 생성된다. 특히 교량, 철도 차량은 형상이 매우 뚱뚱하고, 높이에 비하여 길이가 길기 때문에 측풍의 영향이 더 크며, 이러한 비정상 유동장은 차량에 동적 불안정성과 공력 저항 증가 등을 발생시킨다. 이에 본 연구에서는 한국형 고속전철과 TTX 차량의 단면에 측풍 작용 시 발생하는 비정상 유동장을 해석하여, 향후 발생할 수 있는 차량의 불안정성을 파악하여 그 대책을 수립하고자 한다.

뚱뚱한 물체 후류에서 발생하는 비정상 와류 배출은 물체의 종횡비, 지면으로부터의 간극 높이가 매우 중요한 변수이다. 즉, 고정 지면의 경우 지면에서 점성에 의한 박리 전단층과 함께 시계 방향의 와도가 생성되는데 이는 뚱뚱한 물체 하부에 발생하는 반시계 방향의 와도를 약화시켜 사각주 후면의 와류 배출을 억제하게 되고 이로 인해 사각주 후면에서 압력 회복이 빨라진다[1]. 고정 지면의 경우 지면과 운동체간의 상대 운동을 정확하게 모사하지 못하므로 전혀 다른 유동 현상이 나타날 수 있다. 이로 인하여 효과적인 지면 재현을 위해서는 특수한 풍동 실험 장비들이 필

* 서울대학교 기계항공공학부, 정회원
** 한국과학기술정보연구원, 비회원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
**** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 정회원

요하며, 수치해석의 경우에도 적절한 경계조건을 적용하여야만 보다 정확한 유동 해석 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 열차가 정지했을 경우 측풍에 대한 영향만을 고려하기 위해서, 고정 지면 경계 조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 한국형 고속열차에 대차 커버가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우, TTX 차량의 1차, 2차 모델의 경우에 대하여 10, 20, 30m/s의 측풍이 작용했을 경우에 열차 주위에 작용하는 공기력 및 순간적인 유동장 분포를 해석하였다. 또한 본 연구의 목적은 G7과 TTX 차량의 공기역학적 성능 비교가 아닌, 열차 단면 형상이 부력 및 측력에 미치는 영향을 분석하는 것에 있다. 또한 G7 차량과 TTX 차량은 설계 운용 조건이 다르기 때문에 두 차량간의 절대적인 수치 비교는 의미가 없다는 것을 밝혀둔다.

2. 지배방정식 및 수치 기법

본 연구에서는 식(1), 식(2)와 같이 2차원 비정상 비압축성 평균 Navier-Stokes 방정식에 인공 압축성(pseudo-compressibility)을 도입하여 해석을 수행하였다. 그리고, 물리적 시간인 t 에 대해서 2차의 후향 차분법을 적용하여 소스항으로 처리하면서 pseudo time항인 τ 를 도입하는 dual time step 방법을 적용하여 비정상 유동장을 해석하였다[1]. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \nu_i) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{\partial u_i}{\partial t} \end{aligned}$$

식(2)에서 와점성계수 ν_i 는 대규모 박리 유동장에 적합하게 제안된 ϵ -SST 난류 모델[1]을 사용하여 구하게 된다. 비점성항의 공간차분에는 3차의 상유 차분법을 사용하였으며 점성항의 차분에는 중심 차분법을 적용하였다. 시간적분방법에는 병렬처리에 적합한 DP-SGS 알고리즘을 사용하여 영역분할기법을 통해 병렬해석을 수행하였다.

열차 높이 D와 자유류 속도 U_∞ 를 기준으로 레이놀즈수 ($Re = U_\infty D / \nu$)는 측풍이 10, 20, 30m/s로 불었을 때 각각 6.7×10^5 , 1.34×10^6 , 2.1×10^6 으로 고정시켰고, 유입류는 사각주의 전면으로부터 6.7D 지점에서 1/7승 법칙을 적용하여 경계층 두께(δ/D)가 4가 되도록 적용하였다. 사각주 벽면과 지면에서는 점착 조건 조건을, 계산 영역의 윗면에서는 대칭경계조건, 출구에서는 외삽 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

3. 2차원 단면 격자계 형상 및 경계 조건

측풍 작용 시 열차 주위의 유동을 정확히 해석하기 위해서는 단면 주위의 계산 격자계의 형성이 매우 중요한데, 단면의 좌우에 있는 흐름을 고려하면 격자의 형성 자체가 어려워지게 된다. 본 연구의 목적은 열차 전반적인 형상에 따른 유동 계수를 구하는 것이므로, 단면 좌우의 흐름을 최대한 단순화하여 격자를 형성하였다. 또한, 단면과 지면 사이에 매우 복잡한 유동현상이 일어날 가능성이 많으므로 단면을 지면으로부터 떨어뜨린 상태에서 격자를 형성할 필요가 있는데, 이를 위해서 다중 블록 격자(Multi-block Grid System)를 사용할 수도 있으나 다중 블록 격자를 사용할 경우 병렬처리 프로그램의 전면적인 수정이 필요할 뿐만 아니라 격자 형성에도 문제가 발생하기 때문에, 좀 더 쉬운 격자 형성을 위해 계산 영역에 H 타입의 직사각형의 격자를 형성한 뒤 단면 형상의 내부를 벽면으로 처리하는 방식을 도입하였다 [3]. 격자는 G7과 TTX 차량의 카티아 데이터로부터 단면 데이터를 뽑아내어, 높이를 1로 무차원화하고 지면과의 간극 및 열차 폭을 결정하여 격자를 형성하였다. 표 1은 G7 및 TTX 차량의 제원을 나타낸다. G7 차량이 TTX보다 더 좁은 너비를 갖고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 더 고속으로 주행하기 때문에 발생할 수 있는

공력 저항과 터널 출구에서의 미기압과 때문에 슬림한 형상을 갖는다. TTX는 2차 모델이 1차 모델에 비하여 높아지면서, 폭은 오히려 감소하는 형상을 갖고 있다. 실제 3차원 모델을 비교하여도 2차 모델이 1차 모델에 비하여 더 유선형이다.

	높이(mm)	폭(m)	폭/높이
G7-bogie	3,783	2,971	0.743
G7-no	3,783	2,812	0.785
TTX-1st	3,481	3,063	0.880
TTX-2nd	3,793	2,967	0.782

표 1 G7 및 TTX 차량의 제원

그림 1은 열차 단면 주위의 단일 블록 격자계로, 그림 중앙의 흰 부분이 단면이 위치하는 부분이며, 실제 격자는 단면 안에도 존재하지만 벽면으로 처리한다. 벽면으로 처리된 격자는 계산상에서 제외되고, 점착조건이 부여된다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 G7 차량의 대차가 설치된 경우와 제거된 경우를 나타내고, 그림 1(c), (d)는 TTX 차량의 1차 모델과 2차 모델을 나타낸다. 단면 형상으로부터 보면 TTX는 1차와 2차 모델 사이의 큰 차이는 없다. 이때 격자수는 198×158이다.

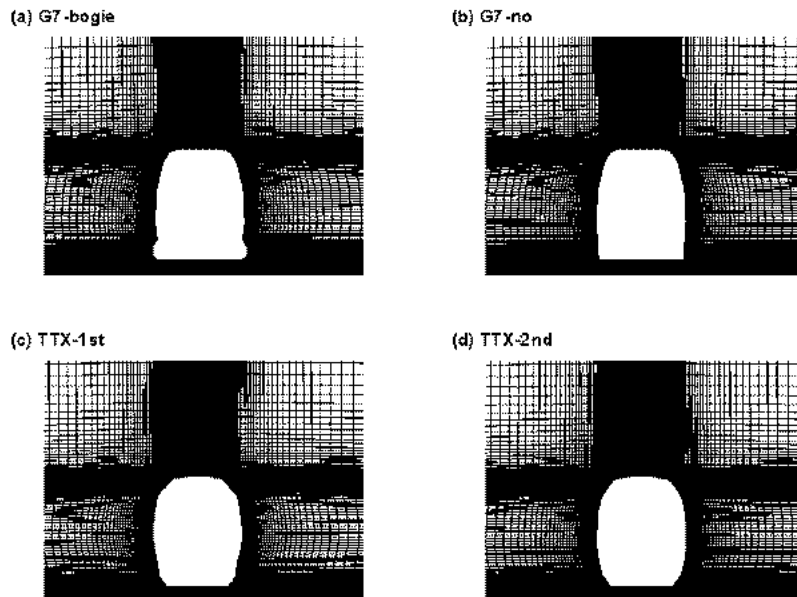


그림 1 G7 및 TTX 차량의 격자계

4. 수치해석 결과 및 분석

그림 2는 시간에 따른 G7과 TTX 차량의 공력 계수 변화를 나타낸 그림이다. 초반에는 순간적인 유동 교란으로 인하여 차량 후류에 와류 배출 발생으로 인하여 높은 진동이 발생하지만, 이런 영향은 점점 감소하여 50초 이후에는 와류 배출이 없는 정상 상태로 바뀌게 된다. 전체적으로 G7 차량이 TTX 차량에 비하여 좋은 공력 특성을 보이고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 G7 차량과 TTX 차량의 운용 설계 조건이 다르기 때문이다. G7 차량은 300km/h의 고속으로 주행하기

때문에 높은 공력 저항을 저감할 수 있는 최적 설계가 되어 있는 반면에, TTX 차량은 180km/h로 G7 차량에 비하여 저속으로 운행한다. 따라서 설계 시 공력보다는 더 넓은 승차감 또는 곡선 주행 시 대차의 기울임 등에 더 민감하게 형상을 설계하게 된다. 또한 대차 커버가 존재하는 G7 차량이 그렇지 않은 차량에 비하여 부력 및 측력에서 더 좋은 효과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 서울대 [3]에서 발표한 연구 자료에 의하면 대차 커버의 존재 및 부속되는 차량에 따라 각각 그 성능이 달라진다고 하였으며, 그 형상 또한 매우 중요한 파라미터라고 언급하였다.

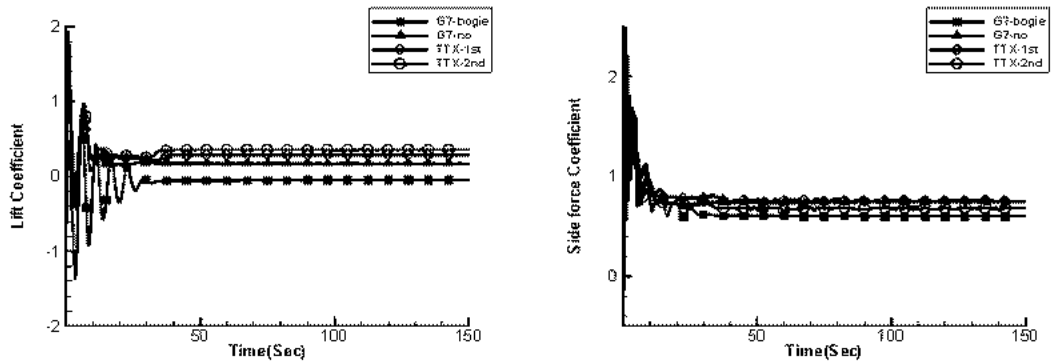


그림 2 시간에 따른 G7과 TTX 차량의 부력 및 측력 계수

그림 3은 측풍이 30m/s로 불어올 때 G7과 TTX 차량에 작용하는 순간적인 와도 분포와 유선을 나타낸 그림이다. 시계방향의 강한 박리 전단층이 열차 상부 앞부분에서 박리되고, 열차 하부에서는 시계반대방향의 전단층이 박리되고, 후류에서 상호 작용이 없기 때문에 주기적인 와류 배출이 없이 커다란 재순환 영역만이 존재한다. 열차와 같이 뚱뚱한 물체가 지면 근처에 존재할 때는 전면에 존재하는 정체점은 레이놀즈수 및 간극에 따라 거의 변화하지 않기 때문에 열차에 작용하는 측력은 전면과 후류에서의 압력 차이에 기인한다. 또한 지면과 열차 하부를 통과하는 유동의 존재로 인하여 열차에 작용하는 부력은 형상에 따라 강한 영향을 받는다.

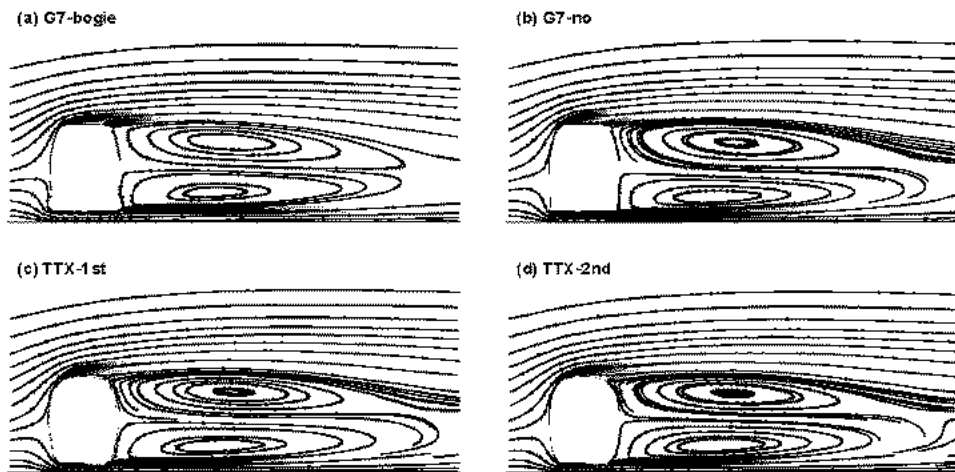


그림 3 측풍 30m/s일 때 G7 및 TTX 차량의 Vorticity Contours 및 Streamline

그림 4는 측풍 강도에 따른 열차의 측력 계수를 나타낸 그래프이다. 예상대로 G7-bogie 형상이 측풍에 가장 안정적인 특성을 보이고 있으며, G7 형상에 대차가 부착되지 않은 경우에는 오히려 TTX 2차 모델보다 더 높은 측력 계수를 갖는다. 각 모델의 측력 계수는 측풍의 속도에 따라 크게 민감하지 않으며, G7-bogie 형상은 측풍이 강하게 불수록 더 좋은 측력 특성을 보인다. 표 2는 각 모델의 양력 및 측력을 정리한 것이다. G7-bogie 형상은 매우 좋은 양력 특성을 보이고 있는데, 이는 부착된 대차가 측면에서 불어오는 유동을 저면과 열차 하부 사이의 간극으로 강하게 빨려서 하부로 강한 부(-)의 부력을 생성시키기 때문이다.

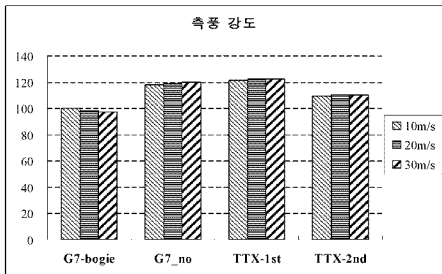


그림 4 측풍 강도에 따른 측력 계수 비교

	10m/s		20m/s		30m/s	
	양력	측력	양력	측력	양력	측력
G7-bogie	0.006	0.622	-0.035	0.611	-0.049	0.604
G7-no	0.180	0.732	0.183	0.740	0.173	0.746
TTX-1st	0.291	0.751	0.291	0.758	0.288	0.760
TTX-2nd	0.360	0.676	0.359	0.681	0.355	0.683

표 2 G7와 TTX 차량의 평균 공력 특성 비교

그림 5는 모델의 단면 형상을 비교한 그림이다. G7 형상이 TTX 형상에 비하여 평면의 측면력과 저풍의 평상을 갖는데, 이것이 부력 측면에서는 더 좋은 효율을 보이기 때문이다 [3][4]. 그러나 TTX는 G7 형상에 비하여 동그랗게 튀어나온 측면면의 형상과 저풍을 갖으며, 이로 인하여 측력에서는 더 좋은 특성을 보인다. TTX 2차 모델은 하부 형상에서 1차 모델보다 더 완만한 형상 변화를 보이기 때문에 1차 모델에 비하여 더 좋은 공력 특성을 보인다고 할 수 있다. 물론 대차가 부착되어 있는 G7-bogie 형상이 4 모델 중에서 가장 좋은 부력, 측력 특성을 보이는데, 이는 G7 형상 자체의 공력 최적 설계 영향도 있지만, 부착된 대차 형상이 더 영향을 더 강화시켰다고 할 수 있다. 물론 대차의 형상 및 부착 위치의 공력 특성에 대한 정확한 영향 분석을 위해서는 3차원 형상에 대하여 해석이 필수적이다.

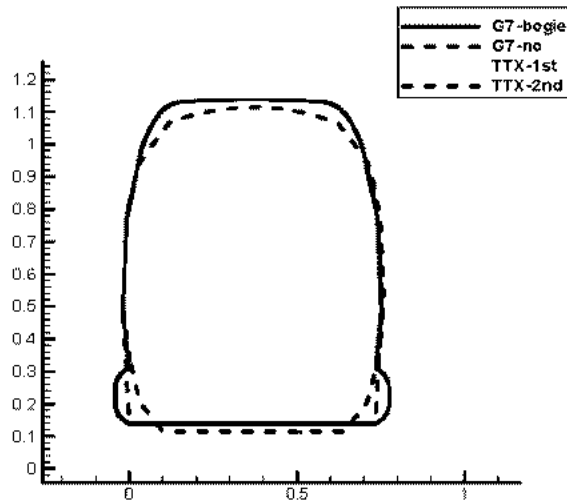


그림 5 G7 차량과 TTX 차량의 단면 형상 비교

5. 결론

본 연구에서는 G7과 TTX 열차 2차원 단면 형상에 대하여 비정상 측풍 해석을 수행하였다. 해안 및 교량 위를 주행 시 또는 태풍 등의 강한 측풍에 대하여 각 열차 형상들의 부력 및 측력 해석을 통하여 대차가 부착된 G7 형상이 가장 좋은 부력, 측력 특성을 보인다는 것을 확인하였다. 또한 TTX 2차 모델이 1차 모델에 비하여 하부 형상이 좀 더 부드럽게 변함에 따라 측력에서는 더 좋은 효율을 보이게 되었으나, 부력에서는 손실이 발생하였다. 이는 열차 단면적 형상에서 측면과 상부 형상이 측력과 부력에 강한 영향을 준다는 것을 의미하며, 각 열차에 대한 정확한 측력 해석을 위해서는 지면과의 상대적인 운동 및 레일 등을 고려한 3차원 비정상 해석이 필수적이다.

후 기

본 연구는 2005년도 서울대 두뇌한국21 사업의 연구지원을 받았으며, 철도기술연구원의 “차량 하부 유동장 해석 및 자갈비산방지 기술 개발” 및 “틸팅 차량이 공기역학적 성능향상 및 기술 개발” 사업 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Tae-yoon Kim, Bo-sung Lee, Dong-ho Lee, "Study on the unsteady wakes past a square cylinder near a wall," Journal of Mechanical Science and Technology, accepted.
2. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, “자갈비산 매커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험” 한국철도학회 추계 학술대회 발표 논문, 2003
3. 한국형 고속전철 공력 해석 및 기술 개발 최종보고서, 2002, 서울대학교
4. Peters, J-L (1983년), “Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential”, Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3
5. 윤수환, 김태윤, 고태환, 권혁빈, 이동호, “한국형 틸팅 열차 주위 유동장 수치 해석,” 한국철도학회지, 제 7권, 제 3호, 2004.