한국형 틸팅 차량의 공력 특성 해석

Analysis of aerodynamic characteristics on the Korean Tilting Train Express

윤수환* 김태윤* 권혁빈** 이동호***

Su - Hwan Yun Tae - Yoon Kim Hyeok - bin Kwon Dong - Ho Lee

ABSTRACT

Numerical analysis of aerodynamic characteristics was differently performed according to the running situation of the Korean Tilting Train eXpress(TTX) that would be introduced for an improvement in efficiency of the used railroad track. Fluent6.0 was used for the analysis of Non - tilting case, Tilting case and Passing - by case with the model of TTX. As a result, the aerodynamic drag had little difference between Tilting and Non - tilting case. However, pressure contour under the train of Tilting case was not symmetry because the gap between a train and the ground was different at both sides. And this disparity of pressure worked on the side force. In Passing - by case attraction and counterattraction occurred alternately and affected to the opposite train. When two trains were side by side, the maximum attraction was generated especially. Through an analysis of pressure wave in tunnel a large variation of pressure was generated by the bluff nose of TTX. The results in this study would be good data for the aerodynamic characteristic on TTX and provide important information to judgment of running safety.

1. 서 론

기존선(중앙선)에서 열차의 운행 속도 향상을 위해 국내 기존선 환경에 맞는 틸팅 차량의 도입이 진행되고 있다. 특히 곡선 구간이 많은 국내 기존선의 상황을 고려한다면 곡선 구간에서도 속도의 감속 없이 운행할 수 있는 틸팅 차량의 도입은 필수적이라 할 수 있다. 열차의 속도 향상 및 틸팅 주행은 열차 주위의 압력 변화에 많은 영향을 미치고 이러한 압력 변화는 주행 효율, 안정성 및 소음 등 공력으로 인한 많은 문제점들을 수반하게 된다. 특히, 틸팅 차량은 주행하면서 상하 좌우로 대차를 움직여야 하므로, 시제 차량의 공력 특성 해석은 안전성 측면에서 반드시

* 서울대학교 기계항공공학부 석사과정, 회원

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정, 회원

** 한국 철도 기술연구원 , 선임연구원 , 회원

** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 회원

선행되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 현재 개발중인 한국형 틸팅 차량(TTX)의 model을 이용하여 여러 주행 환경에 따라 나타나는 공력 현상 파악에 중점을 두었다. 이를 위해서 공력 해석 상용 프로그램인 Fluent6.0(서울 대학교 전산실 보유)을 이용하여 개활지 일반 주행과 곡선 구간의 틸팅 주행 그리고 개활지에서의 일반 교행을 해석하였다. 또한 '고속 전철 기술 개발 사업'을 통해 권혁빈[2]이 개발한 프로그램을 이용하여 틸팅 차량이 터널 주행 시 발생하는 터널 내 압력 변동에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 앞으로 개발될 한국형 틸팅 차량(TTX)의 공력 효율 및 성능 향상을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 차량에 부착되는 여압 시스템 개발에 필요한 정보로 이용될 수 있다. 또한, 틸팅 차량의 주행 안전성 판단의 자료 및 소음 방지를 위한 방음벽 설치 등에 대한 자료로 활용 될 수 있다.

2. 본 론

2 .1 지배방정식 및 수치 기법

본 연구는 3D incompressible Navier - Stokes (1) 방정식을 지배 방정식으로, κ - ε turbulence modeling 을 사용하였다. 정상 해석에서는 Segregated - implicity, 비정상 해석에서는 Coupled - implicity 를 Solver 로 각각 사용하였다.[6]

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_v W\,dV + \oint [F-G]\cdot dA = \int_v H dV \quad \cdots\cdots (1)$$

$$W=\begin{Bmatrix} r \\ r u \\ r v \\ r w \end{Bmatrix},\quad F=\begin{Bmatrix} r v \\ r vu+p\hat{i} \\ r vv+p\hat{j} \\ r vw+p\hat{k} \end{Bmatrix},\quad G=\begin{Bmatrix} 0 \\ t_{xi} \\ t_{yi} \\ t_{zi} \end{Bmatrix},\quad \text{H=body force}$$

r : density , u : velocity , p : pressure , t : viscous stress tensor

2.2 개활지 정상 주행 해석

(1) 격자 구성 및 경계 조건

틸팅 차량(TTX)의 공력 특성을 알아 보기 위해서 14.5m, 36m(2량), 54m(3량)의 길이의 차량에 대해서 각각 격자를 생성하였다. 격자 생성은 복잡한 3D 형상에 효율적인Tetrahedral /Hybrid mesh scheme을 이용하였다. 열차 형상은 개발된 중인 틸팅 차량(TTX)의 model 형상을 고려하였으며, 곡선 구간에서의 틸팅 효과를 알아보기 위하여 실제 선로의 회전 곡률 반경(600m)을 고려하여 열차를 6° 틸팅 시킨 경우(36m, 54m)와 선로의 곡률을 무시한, 열차의 틸팅 효과만을 고려한 경우(14.5m)에 대한 격자를 각각 생성하였다. 그림1.은 길이 36m차량에 대한 격자 구성도이다. 열차 높이(D=3.417m)를 특성길이로 설정하여, 지면에서 열차 Skirt와의 간격은 0.112D(0.38m), 지면과 열차 바닥의 간격은 0.2D(0.7m)로

구성하였으며, 열차 바퀴나 레일과 같은 복잡한 구조물에 대하여는 고려하지 않았다. 경계조건은 그림1.과 같이 구성하였으며, Inlet은 열차의 주행 예정속도인 50m/s(180km/h)로 설정하고, 열차의 진행 효과를 모사하기 위하여 지면은 열차에 대해 50m/s(180km/h)의 상대 속도를 가지는 moving wall로 처리하였다.

도표 1. 해석 Case 및 구성표

	State	Train length(m)	Radius of curvature(m)
Case A	General	14.5	0
	Tilting	14.5	0
Case B	General	36	0
	Tilting	36	600
Case C	Tilting	54	600

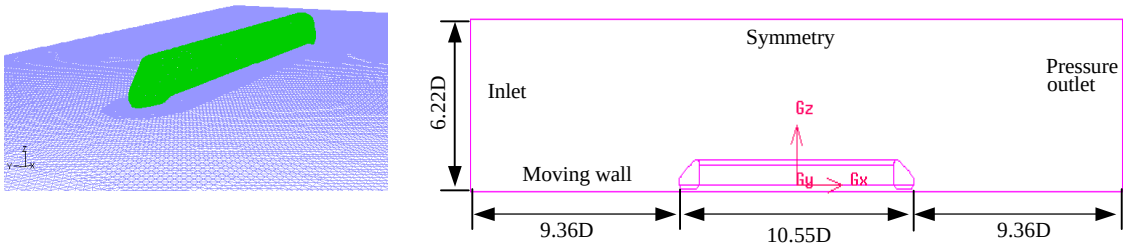

그림 1. 틸팅 차량 격자 및 경계 조건

(2) 해석 결과 및 고찰

그림 2.는 전두부와 후미부의 형상을 모두 갖춘 길이 14.5m의 열차에 대한 열차 대칭면에서의 압력 분포를 나타낸다. 주행하는 열차 표면(upper surface)에서의 압력 분포는 열차의 전두부와 후미부에서 고압 영역이 그리고 형상 변화가 끝나는 어깨 지점에서는 저압 영역이 나타난다[1]. 열차 표면에서의 압력 분포는 열차의 형상에 지배적이기 때문에 틸팅 주행과 일반 주행에 대한 upper surface에서의 Cp분포는 거의 일치한다. 그러나 열차 바닥에서는 틸팅으로 인한 지면과의 간극 차이로 인해 압력 분포의 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 틸팅 주행 시 지면과의 간극이 커지면서 하부 유동속도가 상대적으로 작아지기 때문이다.

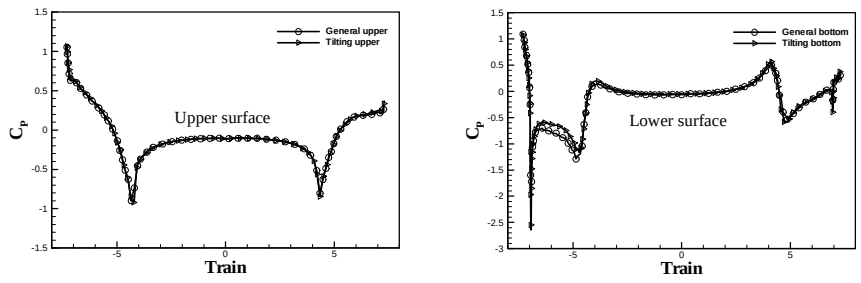

그림 2. 열차 표면 압력 분포

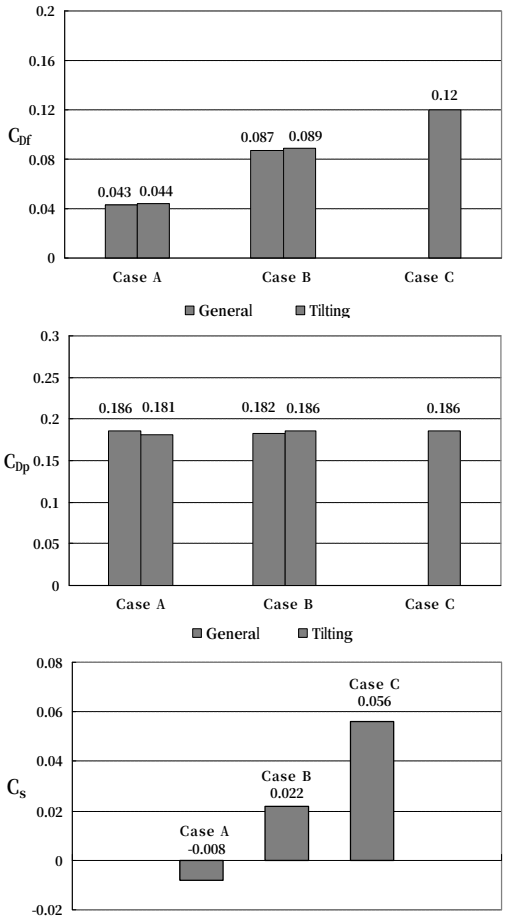

그림 2. 항력 및 측력 계수

그림3.은 열차 길이에 따른 일반 주행과 틸팅 주행의 항력 및 측력 계수를 나타낸 그래프이다. C_{Dp}는 차량의 압력 저항, C_{Df}는 점성 저항 그리고 Cs는 측력을 나타낸다. 그래프에 나타난 C_{Dp}는 열차의 전두부 형상에 주된 영향을 받으므로 큰 차이를 보이지 않는 반면, C_{Df}는 열차의 주행 상황에 상관 없이 길이에 따라 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. Cs그래프에서 음수는 회전 중심 방향으로, 양수는 바깥 방향으로 힘을 나타낸다. 14.5m의 경우, 선로의 곡률이 무시되었기 때문에 열차의 틸팅 효과에 의해 회전 중심으로 힘이 작용하지만, 나머지 경우 회전 곡률에 의해 바깥 방향으로 힘이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 곡선 구간 주행에 의해 열차 진행 방향으로의 투영 면적이 증가하고, 증가한 면적만큼 열차가 받는 동압이 측력으로 작용하기 때문이다.

2.3 비정상 교행 해석

(1)격자 구성

틸팅 차량이 교행 시 일어나는 공력 특성 변화를 알아보기 위해서 전두부와 후미부를 모두 갖춘 2량(40m)를 각각 1개 block씩 총 2개의 block으로 구성하였다. 그리고 선로 간격은 2.2m, 초기 열차 전두부 사이 간격은 100m로 하여 각각의 block이 time step마다 열차 속도만큼 진행방향으로 이동하면서 해석하는 Sliding mesh를 사용하였다(그림 4.).

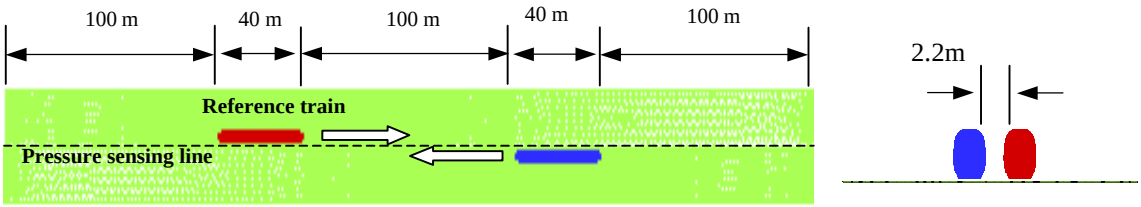

그림 2. 교행 해석 개념도

(2) 해석 결과 및 고찰

그림5.는 시간에 따라 Reference Train에 작용하는 측력의 변화와 교행 시 두 열차 사이, 지면으로부터1.5m 높이의 압력 분포이다(그림 4.). 그림 5.에서 Side force의 양의 값은 두

열차가 서로 밀어 내는 척력을, 음의 값은 서로 당기는 인력을 나타낸다. 교행 시 나타나는 측력의 경향은 크게 네 가지로 압축 할 수 있다(도표2.). 교행 시작 후 각 열차는 전두부에 형성된 고압 영역에 의해 척력을 받게 되며, 어깨 지점이 일치하는 B시점에서 가장 높은 척력을 받게 된다(A - B). 열차의 어깨 지점이 교차 후, 열차의 측면 사이에서는 낮은 압력이 형성되기 시작한다. 이로 인해 교행이 진행 될수록 척력은 감소하여 인력으로 바뀌고, 열차가 나란히 위치하는 E지점에서 가장 큰 인력과 가장 낮은 압력 분포가 발생한다(B - E). 전두부가 상대 열차를 지나고 나면 후미부에 형성된 고압 영역이 다시 상대 열차에 영향을 주며, 동시에 열차 사이에 형성된 낮은 압력의 영향은 줄어든다. 이로 인해, 인력은 급속하게 회복되게 된다(E - F). 열차의 후미부가 교행하는 구간에서는 다시 약한 척력이 발생하게 되는데(F - G), 이것은 전두부의 고압영역 보다 상대적으로 낮은 고압영역이 후미부에 형성되기 때문이다(그림 2.). 그리고 C - D 구간은 상대 열차의 어깨 지점을 지나면서 갑자기 낮아졌던 전두부의 고압영역이 일시적으로 회복되면서 나타나는 현상이다[3].

도표 2. 측력 변화에 따른 구간 설정

A-B	각 열차의 전두부가 교행 후 어깨 지점이 일치하기까지 구간
B-E	전두부가 상대 열차의 옆면을 지나 나란히 위치하기까지 구간
E-F	후미부가 상대 열차의 옆면을 지나는 구간
F-G	각 열차의 후미부가 교행하는 구간

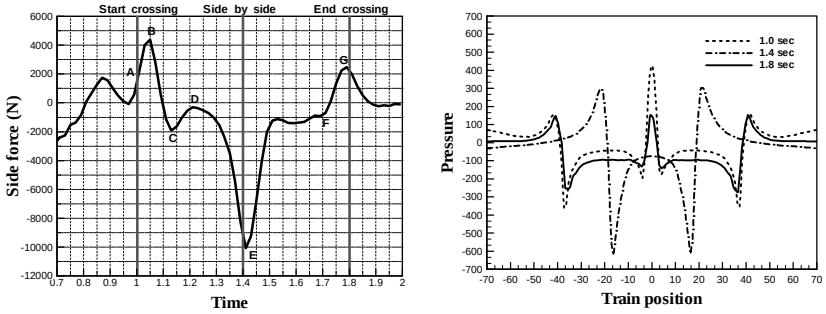

그림 2. Side force history 및 압력 분포

2.4 열차 터널 상호 작용 해석

열차가 터널에 진입하면 전두부에서는 압축파를, 후미부에서는 팽창파를 각각 발생시킨다. 압축파는 음속에 가까운 속력으로 터널 출구로 진행하여, 일부는 충격성 소음 형태로 외부로 방사되고 나머지는 다시 팽창파 형태로 터널 안쪽으로 돌아온다. 팽창파 역시 터널 출구에서 일부 반사되어 압축파로 돌아 온다[2]. 그림6.은 틸팅 차량이 130Km/h의 속도로 300m의 터널 진입 시 나타나는 압력 변화 그래프다. 열차의 터널 진입으로 발생되는 압력파는 열차의 속도, 전두부 형상 그리고 터널과 전두부의 차폐율에 큰 영향을 받는다. 그림6.을 보면 틸팅 차량이 터널 통과 시 최고 +900pa와 최저 -1800pa정도의 압력이 발생하는 것으로 나타난다. 이 값은 G7시제 차량이 300km/h의 속도로 터널 진입 시 발생되는 값으로, 열차의 속도에 비해 큰 값이다[2].

이것은 틸팅 차량의 전두부 형상이 짧고 뭉툭한 형태이며 터널의 직경이 작기 때문이다. 따라서, 틸팅 차량의 터널 통과 시 승차감 저하 방지를 위한 여압 시스템 개발과 터널 주위 소음 방지에 대한 대책에 요구된다.

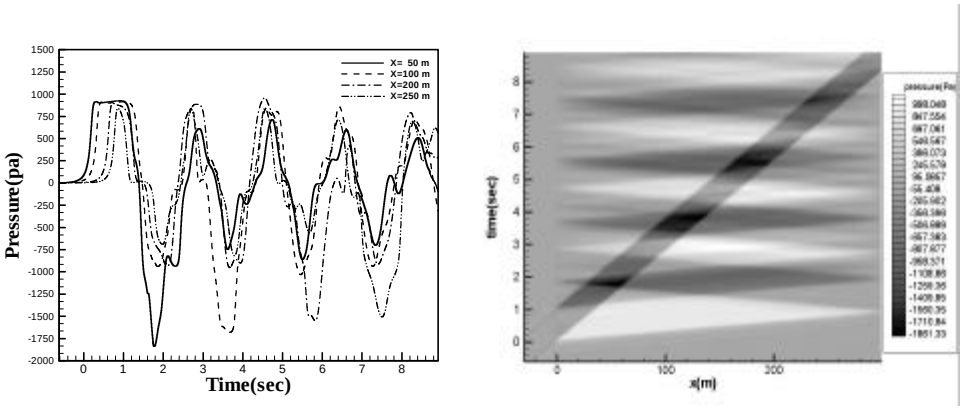

그림 3. Pressure history 및 X - T 선도

3. 결론

본 연구에서는 한국형 틸팅 차량(TTX)의 주행 상황에 따른 공력 특성을 해석하였다. 단독 주행 시 열차에 작용하는 힘은 저항 측면에서는 일반 주행과 틸팅 주행에 큰 차이가 없는 반면, 열차 하부의 압력장 변동으로 인한 측력이 발생하였다. 특히, 교행 시 두 열차는 위치에 따라서 인력과 척력이 나타나며, 나란히 위치 할 때 가장 큰 인력이 발생한다. 따라서, 교행 시 최대 인력과 측풍의 중첩으로 발생할 수 있는 탈선에 대한 대비가 필요하다. 터널 주행에서는 틸팅 차량의 뭉툭한 전두부 형상으로 인해 비교적 큰 압력 변동이 발생한다. 이런 압력 변동은 다시 승차감과 소음에 직결되므로 이에 대한 여압 시스템과 소음 방지책이 요구된다.

후 기

본 논문은 “2004년도 두뇌한국 21” 사업과 “틸팅 차량의 공기 역학적 성능 향상 및 기술개발”의 연구 결과의 일부분임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 고속 전철 기반기술 개발사업, 2 단계 1, 2, 3 차년도 보고서
2. 권혁빈,김태윤,권재현,이동호,김문상 “G7 시제 차량의 터널 내부 압력파에 대한 수치 해석” 한국 철도 학회지, 2002 년 12 월호 제 5 권 4 호, pp.260 - 266
3. Ogawa, T. and Fujii, K., "Numerical Investigation of Three - dimensional Compressible Flows induced by a Train Moving into a Tunnel", *Comp & Fluids* Vol.26, No.6 pp. 565 - 585, 1997.
4. Ogawa, T. and Fujii, K., “ Aerodynamics of high speed trains passing by each other ”, *Comp & Fluids* Vol.24, No.8 pp. 897 - 908, 1995
5. Fluent Inc., FLUENT & GAMBIT user's manual