

한국형 틸팅 열차 주위 유동장 수치 해석

The Numerical Analysis of the Flow-field Around the Korean Tilting Train Express

윤수환¹ · 김태윤¹ · 고태환² · 권혁빈² · 이동호³

Su-Hwan Yun · Tae-yoon Kim · Tae-Hwan Ko · 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. Fluent 6.0 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. 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.

Keywords : Korean Tilting Train Express(TTX, 한국형 틸팅 열차), Crossing Event(교행), Pressure wave(압력파), Micro Pressure Wave(충격성 소음)

1. 서론

2004년 개통된 경부고속전철 시스템은 최고 속도 300 km/h로 설계가 되었으며, 현재 안전하게 상용 운행을 하고 있다. 또한 국내 독자 기술로 개발된 한국형 고속전철은 350km/h의 주행 속도를 목표로 개발이 되었으며, 시험 운행을 통해서 현재 310km/h까지 주행을 성공하여 그 성능을 입증하였다. 그러나 경부 고속전철의 운행 구간은 한정되어 있기 때문에 국토의 균형 발전과 철도의 경쟁력 제고를 위해서는, 기존 노선에서의 고속 서비스 제공의 필요성이 강하게 대두되고 있다[1,2].

따라서 이를 위하여 곡선궤도가 많고 상대적으로 교통 수요가 많지 않은 구간(중앙선, 장항선 등)에 원심력을 상쇄시키기 위해서 대차를 기울이는 틸팅 차량을 투입 운행

하기 위한 방안이 강구되고 있다. 열차의 속도 향상 및 틸팅 주행은 열차 주위의 유동장에 많은 영향을 미치고, 이는 주행 효율, 안정성 및 소음 등의 문제점들을 수반하게 된다. 또한 기존의 저속 철도 시스템(새마을), 고속 시스템(G7)과 함께 준속(TTX) 철도 시스템을 구축할 수 있다면 21세기 철도 강국으로 부상할 수 있을 것이다.

특히, 틸팅 차량은 주행하면서 상하 좌우로 대차를 움직여야 하므로, 시제 차량의 공력 특성 해석은 안전성 측면에서 반드시 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 현재 개발 중인 한국형 틸팅 차량(TTX)의 형상 모델을 이용하여 여러 주행 환경에 따라 나타나는 공력 현상 파악에 중점을 두었다. 이를 위해서 공력 해석 상용 프로그램인 Fluent[1]를 사용하여 개활지 일반 주행과 곡선 구간의 틸팅 주행 그리고 개활지에서의 일반 교행 및 틸팅 교행을 해석하였다. 열차/터널 상호 작용 해석 프로그램[2]을 사용하여 틸팅 차량이 터널 주행 시 발생하는 터널 내 압력 변동에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 앞으로 개발될 한국형 틸팅 차량

1 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

2 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

3 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

(TTX)의 공력 효율 및 성능 향상을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 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 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로, 표준 k-ε 난류 모델링을 사용하였다. 정상 해석에서는 Segregated-implicit, 비정상 해석에서는 Coupled-implicit를 Solver로 각각 사용하였다[4].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V HdV$$

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{Bmatrix}, \quad F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v v + p \hat{j} \\ \rho v w + p \hat{k} \end{Bmatrix}, \quad G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \end{Bmatrix}$$

H=body force, ρ: density, v: velocity, p: pressure, τ: viscous stress tensor

2.2 개활지 정상 주행 해석

틸팅 차량(TTX)의 공력 특성을 알아보기 위해서 14.5m, 36m(2량), 54m(3량)의 길이의 차량에 대해서 각각 격자를 생성하였다. 격자 생성은 복잡한 3D 형상에 효율적인 Tetrahedral/Hybrid mesh scheme을 이용하였다. 열차 형상은 개발 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. Fig. 1은 TTX 차량 전두부 격자이며, 열차 높이(D=3.417m)를 특성 길이로 하여, 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 Inlet은 열차속도인 180km/h로 설정하고, 열차의 진행 효과를 모사하기 위하여 지면은 열차에 대해 180km/h의 상대 속도를 가지는 moving wall로 처리하였다.

Fig. 2는 TTX 중심선에서 길이 방향으로 압력 분포 및 유선을 나타낸 그림이다. 전두부 정체 영역에서의 고압부와 어깨 부근 팽창 영역에서의 저압부를 확인할 수 있다. 후미부 중심선에서는 박리가 발생하지 않고 부드럽게 배출되고

있으나, 양쪽 어깨 saddle point에서는 박리가 발생한다. TTX 형상이 뭉뚱하기 때문에 어깨 팽창 영역에서 압력 강하 현상이 강하며, 후미부에서 압력 회복도 작다.

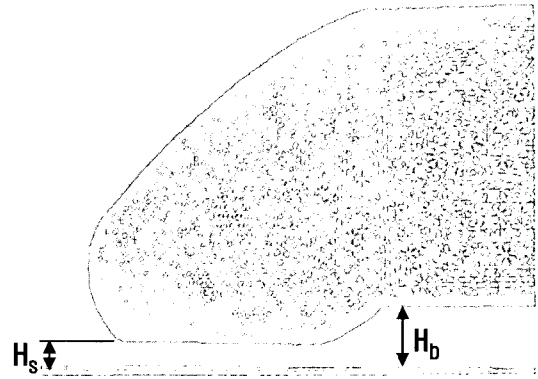


Fig. 1. 전두부 격자 시스템

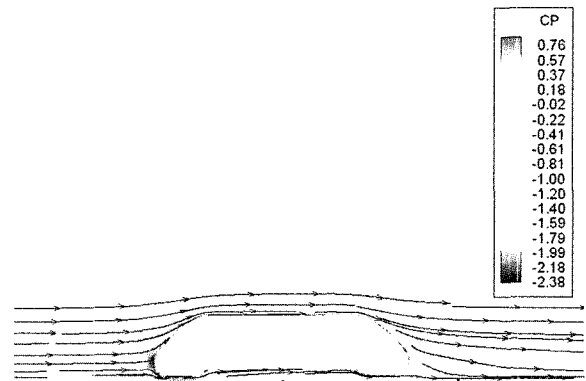


Fig. 2. 중심선에서 압력 분포 및 유선

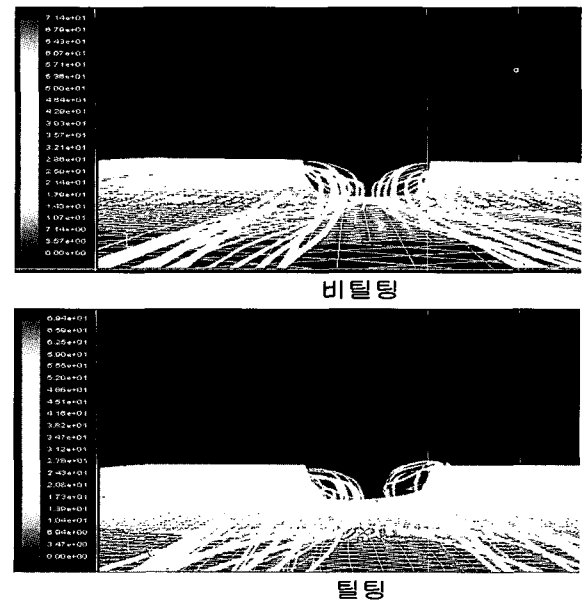


Fig. 3. 후미부 와류 유동장 패턴

Fig. 3은 TTX의 탈링 시와 비탈링 시에 후미부의 와류 유동장 패턴을 보여준다. 탈링이 되면 하부의 간극 증가로 하부로부터 후미부로의 유동 공급이 더 활발해져서 후미부의 와류 유동장이 더 강해진다. 비대칭적인 와류 유동장이 형성됨을 확인할 수 있다.

열차 표면에서의 압력 분포는 열차의 형상에 지배적이기 때문에 탈링 주행과 비탈링 주행에 대한 upper surface에서의 C_p 분포는 거의 일치한다[2]. 이는 탈링의 영향이 상부에는 거의 없다는 것을 의미한다. 그러나 열차 바닥에서는 탈링으로 인한 지면과의 간극 차이로 인해 압력 분포의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 탈링 주행 시 지면과의 간극이 커지면서 하부 유동속도가 상대적으로 작아지기 때문이다. Fig. 4는 TTX 하부 압력 분포를 나타내며, $X=5$ 지점은 전두부 스키트 영역으로 유선 확산으로 인해

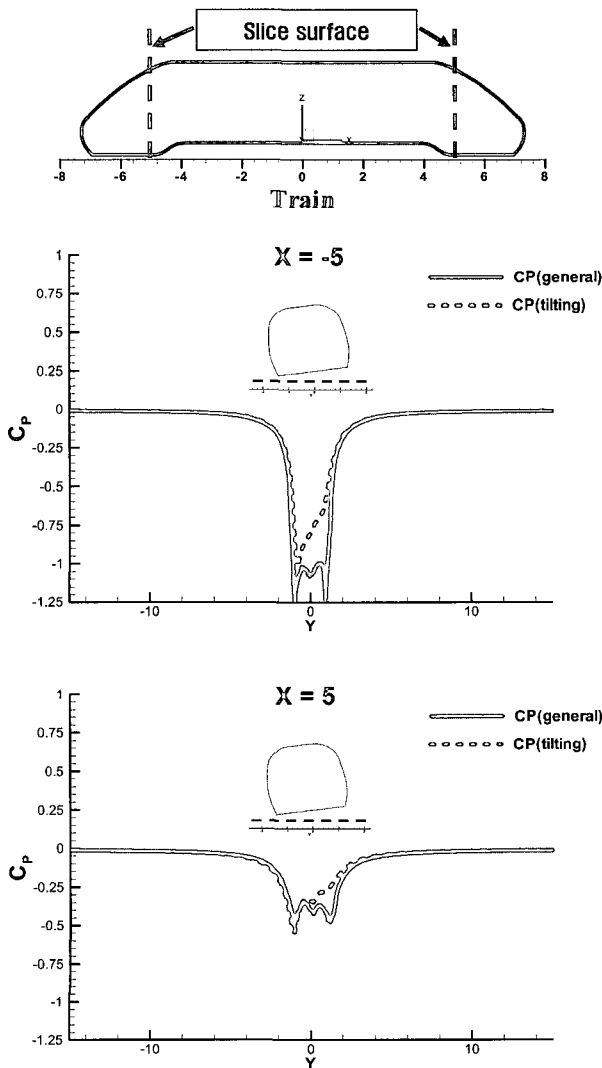


Fig. 4. TTX 하부 압력 분포

압력 강하가 발생한다. 비탈링 시에는 좌우 대칭의 압력 분포를 보이나, 탈링 시에는 진행 안쪽 영역에 더 높은 압력 강하가 발생하고, 외부로 갈수록 선형적으로 압력 상승이 발생한다. $X=5$ 지점에서도 유사한 패턴의 압력 변화를 확인할 수 있으며, 차이점은 후미부 스키트 정체 영역 때문에 압력 상승이 발생하여 전두부에 비해서 압력 강하가 작다.

Fig. 5~7은 열차 길이에 따른 일반 주행과 탈링 주행의 마찰 항력, 압력 항력 및 축력 계수를 나타낸 그래프이다. C_{Dp} 는 차량의 압력 저항, C_{Dr} 는 점성 저항 그리고 C_s 는 축력을 나타낸다. C_{Dp} 는 열차의 전두부 및 후미부 형상에 주된 영향을 받으므로 열차 길이에 큰 차이를 보이지 않지만, 구

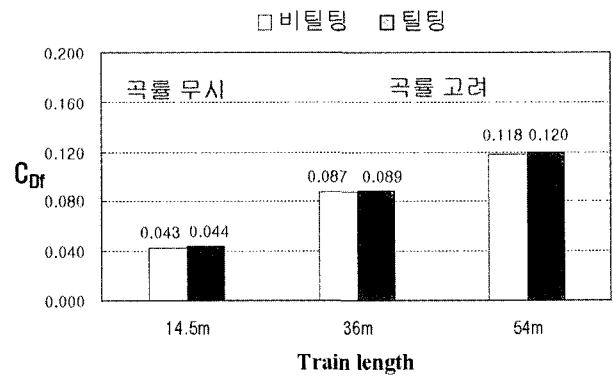


Fig. 5. 마찰 항력 비교(탈링, 곡률 유무)

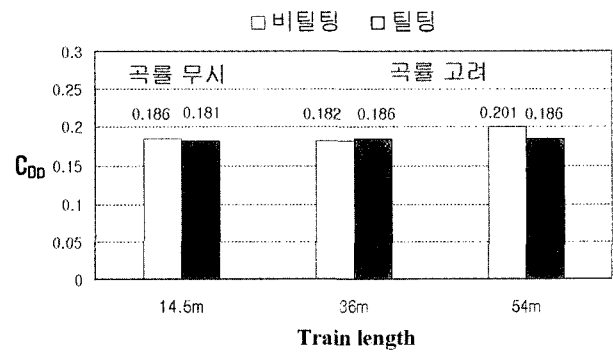


Fig. 6. 압력 항력 비교(탈링, 곡률유무)

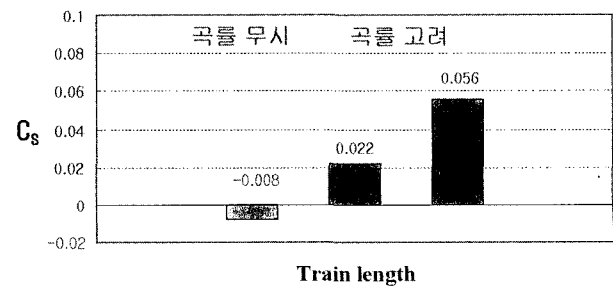


Fig. 7. 축력 비교(탈링, 곡률 유무)

배를 고려한 경우에는 투영 면적의 차이로 인하여 압력 항력에 변화가 발생한다. 반면, C_{Dr} 는 점성의 영향으로 열차의 특성 길이에 큰 영향을 받기 때문에, 열차의 주행 상황에 상관없이 길이에 따라 일정하게 증가한다. C_s 그래프에서 음수는 회전 중심 방향으로, 양수는 바깥 방향으로 힘을 나타낸다. 14.5m의 경우, 선로의 곡률이 무시되었기 때문에 열차의 톨팅 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 축력으로 작용하기 때문이다.

2.3 비정상 교행 해석

톨팅 차량이 교행 시 일어나는 공력 특성 변화를 알아보기 위해서 Fig. 8과 같이 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.

Fig. 9는 시간에 따라 톨팅 시와 비톨팅 시 TTX의 기준 열차에 작용하는 축력의 변화를 나타낸다. 축력의 양의 값

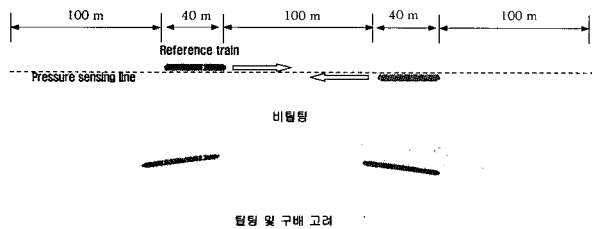


Fig. 8. TTX 교행 해석 격자계

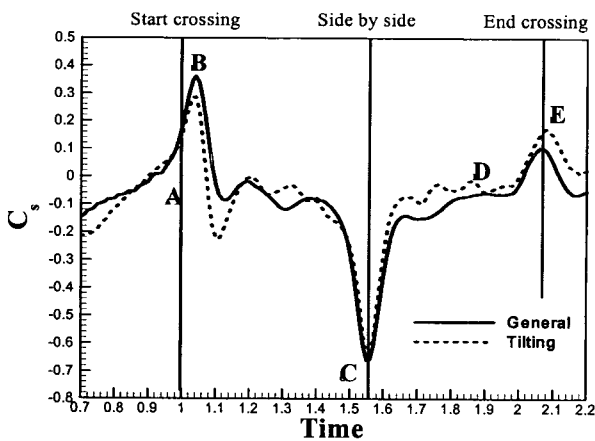


Fig. 9. 시간에 따른 축력 분포

은 두 열차가 서로 밀어 내는 척력을, 음의 값은 서로 당기는 인력을 나타낸다. 교행 시 나타나는 축력의 경향은 크게 네 가지로 압축 할 수 있다(Table 1 참조).

교행 시작 후 각 열차는 전두부에 형성된 고압 영역에 의해 척력을 받게 되며, Fig. 10과 같이 어깨 지점이 일치하는 B 지점에서 가장 높은 척력을 받게 된다(A-B). 이때 교행 중심선의 압력 분포는 주위보다 상대적으로 낮아서 열차에 척력을 작용한다.

열차의 어깨 지점이 교차 후, 열차의 측면 사이에서는 낮은 압력이 형성되기 시작한다. 이로 인해 교행이 진행 될수록 척력은 감소하여 인력으로 바뀌고, Fig. 11과 같이 열차가 나란히 위치하는 C지점에서 가장 큰 인력과 가장 낮은 압력 분포가 발생한다(B-C).

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(C-D). 열차의 후미부가 교행 하는 구간에서는 다시 약한 척력이 발생하게 되는데(D-E), 이것은

Table 1. 교행 시 열차의 위치 및 상태

구간	열차 상태
A-B	각 열차의 전두부가 어깨 지점 일치
B-C	전두부가 상대 열차의 옆면에 위치
C-D	후미부가 상대 열차의 옆면에 위치
D-E	각 열차의 후미부가 교행

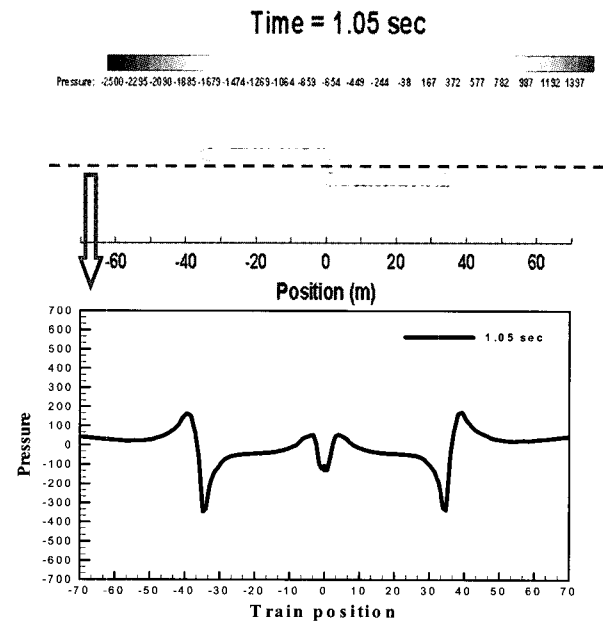


Fig. 10. TTX 교행 시 압력 분포(최대 척력)

전두부의 고압영역 보다 상대적으로 낮은 고압영역이 후미부에 형성되기 때문이다. 그리고 B-E 구간에 상대 열차의 어깨 지점을 지나면서 갑자기 낮아졌던 전두부의 고압영역이 일시적으로 회복되면서 나타나는 현상이다[7].

Fig. 12는 시간에 따른 항력 분포이다. 열차가 교행하면 기준 열차는 대향 열차 전두부 고압 영역, 전두부 팽창 영역의 음압, 후미부의 음압, 후미부의 고압의 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 틸팅 시와 비 틸팅 시의 항력 및 측력의 차이는 곡선 구배에 의한 측력이 유도 항력으로 영향을 준 것과 원심력의 영향으로 분석할 수 있다.

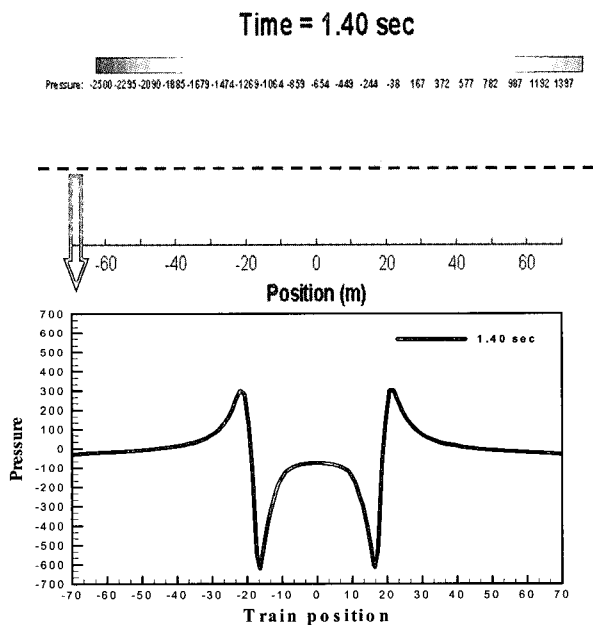


Fig. 11. TTX 교행 시 압력 분포(최대 인력)

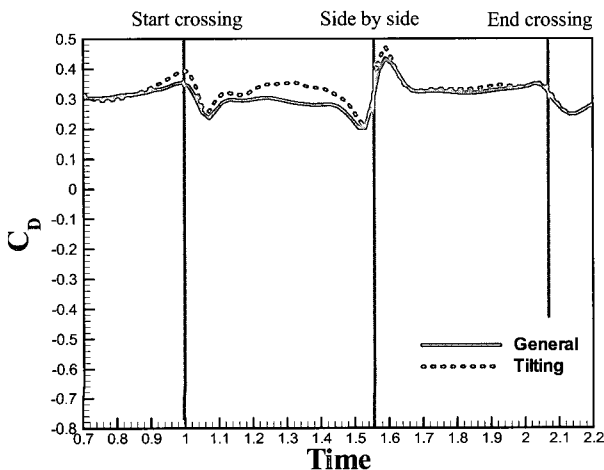


Fig. 12. 시간에 따른 항력 분포

2.4 열차 터널 상호 작용 해석

TTX의 터널 진입 시 발생하는 공력 현상을 해석하기 위하여 권혁빈이 개발한 열차/터널 상호작용 프로그램을 이용하였다[6]. Fig. 13은 TTX가 300m 터널에 다양한 속도로 진입 시 발생하는 압력 변화 그래프다. 열차의 터널 진입으로 발생하는 압력파는 열차의 속도, 전두부 형상 및 터널과 열차 차폐율에 큰 영향을 받는다. TTX 차량은 터널 단면적이 작은 기존선 터널을 주행 예정이므로 매우 높은 압력 값 및 압력 변화가 예측된다. TTX가 130km/h로 터널 통과 시 최고 +200Pa와 최저 -400Pa정도의 압력이 발생하며, 약 2.0kPa/sec의 압력 변화율을 보인다. 이것은 틸팅 차량의 전두부 형상이 짧고 뭉툭한 형태이며 터널의 단면적(차폐율 16.3%)이 작기 때문이다. 따라서, TTX의 터널 통과 시 승차감 저하 방지를 위해 열차 기밀, 추가적인 여압 시스템 개발의 대책이 요구된다[8].

Fig. 14는 시간에 따른 열차와 압축파/팽창파의 상대적 위치를 나타낸 그래프이다. x=50m 지점, 2초 근처에서는 열차 터널 진입으로 생성된 압축파의 터널 출구에서 반사된 팽창파와 열차와의 상호 작용으로 매우 낮은 음압장이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 터널 내부의 압력 변화율이며, Fig. 16은 터널 출구에서의 충격성 소음을 나타낸 그래프이다. 터널 출구에서의 충격성 소음은 열차 진입에 의해 발생한 첫 번째 압축파의 파두에 의해 결정된다. 압축파의 압력 변화율은 열차 속도에 따라 비선형적으로 증가하기 때문에 터널 출구에서의 충격성 소음 및 승객의 승차감을 위해서는 효율적인 열차 전두부 설계 및 충분한 열차/터널 단면적비가 보장되어야 한다.

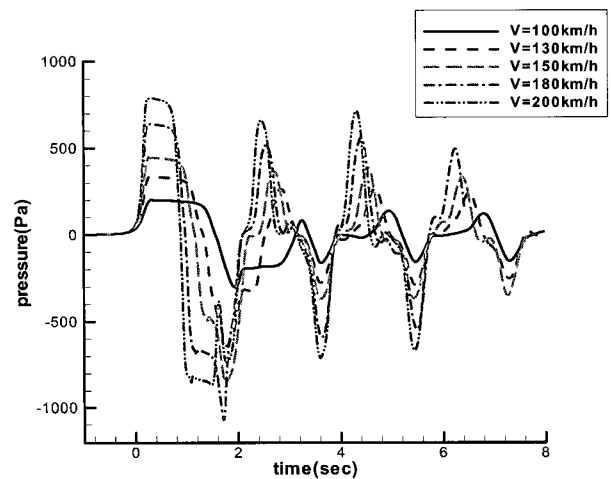


Fig. 13. 속도와 터널 압력 변화(차폐율 16.3%)

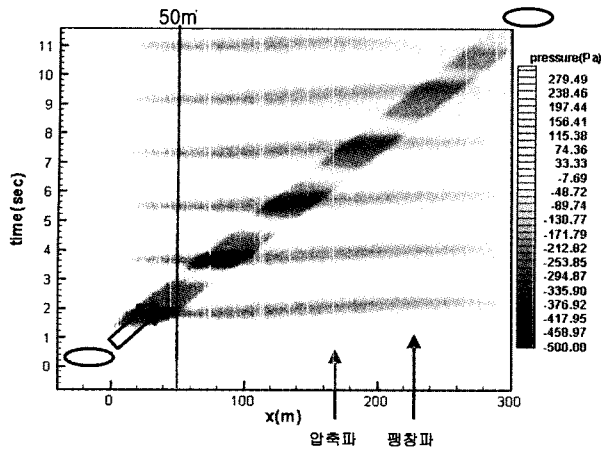


Fig. 14. X-t 선도

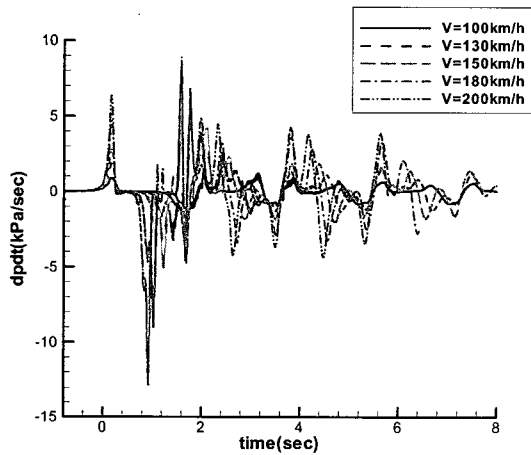


Fig. 15. 터널 내부의 압력 변동율(x=50m)

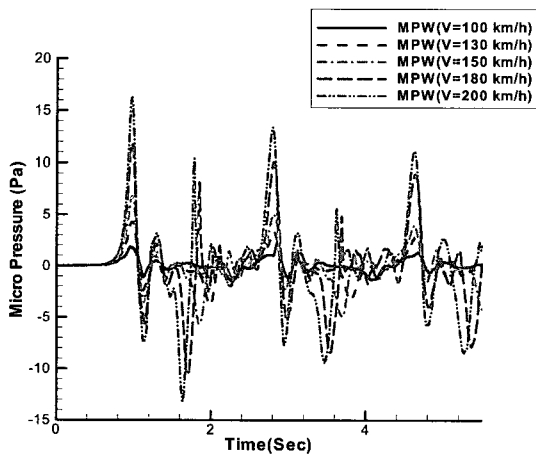


Fig. 16. 터널 출구 미기압과 크기(터널 길이 300m)

Table 2는 열차 속도, 터널 길이, 터널 출구에서 측정 위치에 따른 충격성 소음의 크기를 나타낸 표이다. TTX 속도 100km/h일 때 터널 출구에서 101dB의 높은 소음이 예측되

Table 2. 충격성 소음 크기 (dB)

열차속도 (km/h)	터널길이 (m)	출구 (dB)	40m (dB)	100m (dB)
100	300	101	69	61
130	300	107	75	67
150	300	111	79	71
180	300	115	83	75
200	300	118	86	78
100	500	99	67	59
130	500	106	74	66
150	500	111	78	71
180	500	115	83	75
200	500	118	86	78
100	1000	98	66	58
130	1000	106	74	66
150	1000	110	78	70
180	1000	115	83	75
200	1000	118	86	78

는데, 이는 이륙하는 비행기 옆에서 측정된 소음 크기와 비슷한 결과이다. 또한 충격성 소음은 3차원 효과를 갖기 때문에 측정 거리에 반비례하여 40m, 100m에서 각각 69dB, 61dB로 그 크기는 감소한다. 이는 앞에서 밝힌바와 같이 기존선의 작은 터널 단면적비가 가장 큰 원인이다.

3. 결론

본 연구에서는 개발 중인 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 인하여 원심력을 상쇄하는 방향으로 측력이 발생하였다. 그러나 구배를 고려하면 투영 면적과 원심력의 영향으로 틸팅 열차 동안정성을 불안정하게 하는 원심력 방향으로 측력이 작용한다. TTX 차량의 교행 시에 두 열차는 위치에 따라서 인력과 척력이 나타나며, 전두부 팽창 영역이 증첩될때 최대 척력이 작용하며, 두 열차가 나란히 위치 할 때 최대 인력이 작용한다. 따라서, 교행 시 최대 인력과 측풍의 증첩으로 발생할 수 있는 탈선에 대한 대비가 필요하다. 터널 주행에서는 TTX 차량의 뒤편 전두부 형상과 기존선의 낮은 터널 단면적으로 인하여 터널 내부에서 높은 압력 변화가 수반되며, 이는 열차 내부 승객의 승차감과 차량에 구조적 피로를 가중시킬 수 있다. 또한 이런 높은 압력 변화는 TTX가 100km/h 주행 시 터널 출구에서 약 101dB의 높은 충격성 소음에 예

측되므로 이를 저감할 수 있는 대책을 마련해야 할 것이다.

후 기

본 연구 결과는 “서울대 BK21 기계분야 사업단” 및 “틸팅 차량의 공기 역학적 성능 향상 및 기술 개발” 연구 결과의 일부분임을 밝히며, 당 해당기관에 감사의 말씀을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Fluent Inc., FLUENT & GAMBIT user's manual
2. 윤수환, 김태윤, 권혁빈, 이동호, “한국형 틸팅 차량의 공력 특성 해석”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2004.
3. 박춘수, 서승일, 김기환, 이억재, “고속열차가 터널내에서 받는 압력변동 특성 분석”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2004.
4. 고속 전철 기반기술 개발사업 - 공력 설계 및 해석 기술 개발, 2단계 1, 2, 3 차년도 보고서.
5. 기존선 속도 향상 실용 기술 개발 - 시스템 통합 및 연계기술 개발, 1, 2 차년도 보고서.
6. 권혁빈, 김태윤, 권재현, 이동호, 김문상, “G7 시제 차량의 터널 내부 압력파에 대한 수치 해석”, 한국 철도 학회지, 2002년 12월 호 제5권 4호, pp.260-266.
7. Ogawa, T. and Fujii, K., “Aerodynamics of high speed trains passing by each other”, Comp & Fluids, Vol.24, No.8, pp. 897-908, 1995.
8. Ogawa, T. and Fujii, K., “Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows induced by a Train moving into a Tunnel”, Computer and Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585, 1997.