터넬 주행 중 공력기인 고속전철의 승차감

Ride comfort of High Speed Train due to Aerodynamic Force inside Tunnel

신범식* 최연선†

Bum-Sik Shin Yeon-Sun Choi

ABSTRACT

Ride comfort is an important factor for the development of a high-speed train. The aerodynamic force to a high speed train inside tunnels increases the car-body vibration and makes its ride comfort worse. In this study, the aerodynamic force is estimated through a CFD analysis using ADINA, and its car-body vibration and ride comfort are calculated for the aerodynamic force which acts on the side of the train. The numerical results show that the vibration is a lateral mode of the car-body and decreases the ride comfort. On the basis of this numerical simulation, more accurate simulation is necessary for the shape of tunnel and the lateral suspension system of a high speed train.

1. 서론

철도차량 고속주행 중 차량 외부 환경 변화에 따라 급격한 압력변화가 발생하며, 주요 요인으로 터널 진입, 차량교행 등이 있다. 이중 터널이 많은 국내 선로 특성으로 인하여 터널진입 시 발생하는 공력문제가 차량 개발에 있어 중요한 요소로 부각되고 있다. 고속전철의 터널진입 시 차량의 주행 단면적의 급격한 감소로 인한 피스톤 효과가 발생하며, 이로 인하여 차량 및 터널 사이 급격한 압력변화가 발생한다. 압력변화는 차량속도의 증가에 따라 증가하며, 이로 인한 차량 승차감 저하가 예상된다.

철도차량의 고속 터널진입 시 차량 내/외부의 압력변화 연구로 박춘수[1,2]는 한국형 고속전철 주행 시 터널 내 공기의 압축 및 팽창파에 의한 압력 변동하중을 측정하였으며, 차량의 터널 내 주행특성에 따른 압력변동을 비교하였다. KIKKO[3]는 신간센 300시리즈의 차량을 대상으로 터널 진입 시 공력을 모델링 하고, 이를 이용하여 승차감 영향을 예측하였다. SUZUKI[4]는 신간센 터널진입 시 차량 측면의 압력을 측정하고, 이를 시뮬레이션 하였다. SAKUMA[5]는 터널 내 발생하는 공력을 모델링하고, 이를 이용한 차량의 동적 거동을 예측하였다. 윤수환[6]은 한국형 틸팅차량의 터널 주행 시 실내/외 압력변화에 대한 측정을 통하여 압력변동 원인을 분석하였다.

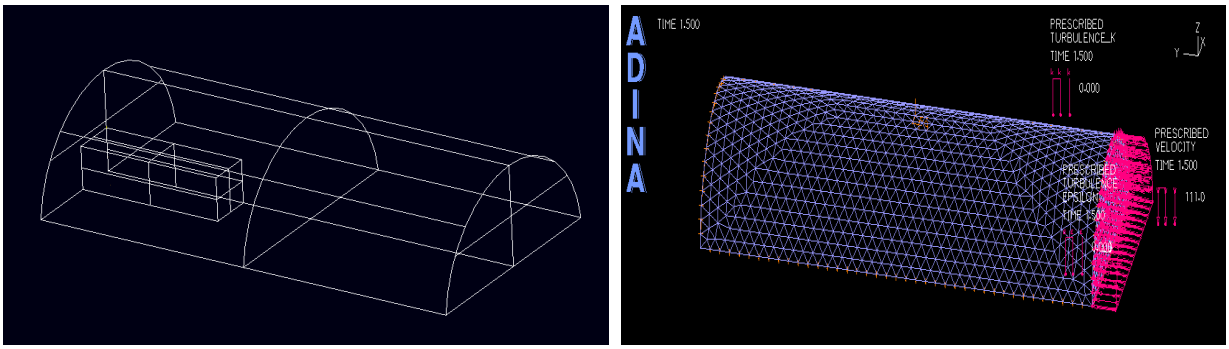
본 연구에서는 공력발생의 주요 인자인 터널진입 시 차량에 가해지는 압력을 ADINA[7]Fluid 해석을 통하여 계산하였다. 해석의 타당성을 위하여 기존 문헌의 시험을 기반으로 해석과 시험결과를 비교함으로써 모델을 검증하였다. 검증된 모델을 이용하여 고속전철 차량의 터널진입 시 차량 외부 압력변화를 계산하고, 계산된 압력을 가진원으로 하여 차체진동을 예측하였다. 차체진동 계산을 위해 상용프로그램인 SAMCEF[8]를 이용하여 강체차량을 모델링 하였으며, 계산된 차체 가속도를 이용하여 승차감 영향을 예측하였다.

† 정회원, 성균관대학교, 기계공학부, 교수
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7440 FAX : (031)290-5889
* 정회원, 성균관대학교, 기계공학부, 박사과정

2. 고속철도 터널통과 시 압력특성

2.1 공력 시뮬레이션

철도차량이 고속으로 터널에 진입 시 피스톤 효과[1]에 의해 급격한 압력변화가 발생한다. 이때 차량 및 터널의 단면적 및 차량 주행조건에 따라 차량의 측면에 발생하는 압력의 크기가 변한다. 이를 해석하기 위하여 유체유동해석 프로그램인 ADINA를 이용하여 고속차량의 터널 진입 시 유체유동해석을 하였다. 그림 1은 해석을 위한 차량모델이다. 해석은 차량 모델은 정지해 있으며, 주변 유체의 속도를 차량의 주행속도와 같이 발생시켜 차량 외부의 압력을 측정할 수 있도록 그림 1(a)와 같이 차량-터널 유체모델을 생성하고, 그림 1(b)와 같이 격자 생성 후 열차 진입 방향의 반대방향에서 차량의 진입속도에 준하는 공기 흐름을 발생하였다. 본 모델은 차량이 주행하지 않음으로 차량 외부의 압력이 시간에 대하여 수렴하는 결과를 얻으며, 이는 차량이 터널을 주행하는 중 발생하는 공기 압축 및 팽창 효과를 예측하는데 한계가 있다. 그러나 차량 및 터널 단면적에 따른 차량 외부 최대 압력을 계산할 수 있음으로, 이를 이용하여 고속철도에 작용하는 최대 압력을 계산하였다. 고속으로 터널 주행 시 공력해석을 위해 그림 2와 같이 모델링 하였다. 모델링 시 터널의 단면적은 국내 고속철도 선로 중 청선산 터널[9]의 설계값을 참고로 하였다. 표 1은 터널 설계값을 나타낸다.



(a) 차량-터널 (b) 경계조건

그림 1 ADINA 해석모델

표 1 터널 설계값

Cross-sectional area, A (m^2)	87.5
Tunnel Length, L_T (km)	0.75
Width, L_w (m)	14.4
Width, L_1 (m)	9.9
Width, L_2 (m)	4.4
Radius, R (m)	7.2

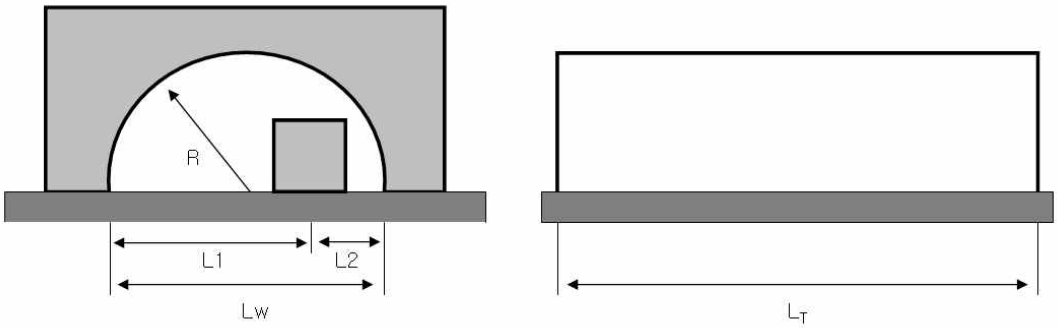
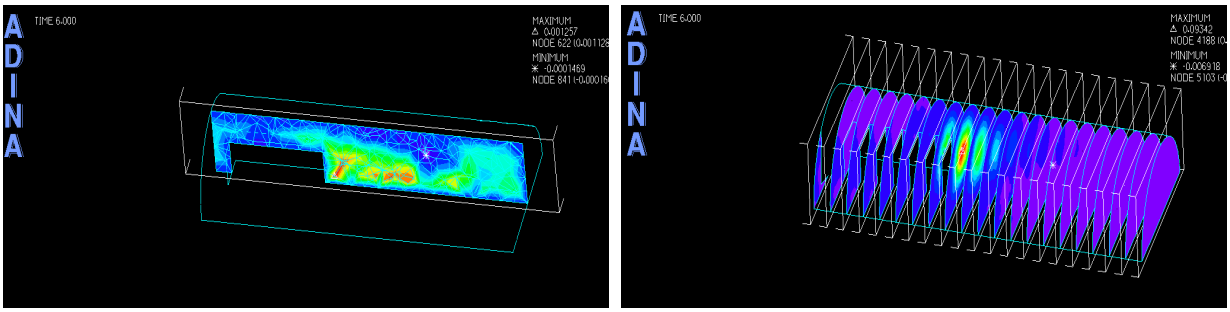


그림 2 터널 형상

해석은 우선 모델의 타당성 검증을 위하여 윤수환[6]의 틸팅열차 시험조건에 준하여 해석모델을 생성하고, 시험과 비교를 통하여 모델을 검증하였다. 그림 3은 차량의 터널 진입 시 유체유동 해석결과를 3차원으로 도시한 결과이다. 그림에서와 같이 차량의 전두부에서 최대 압력이 발생하며, 차량 주변으로 유체흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 틸팅열차가 160 km/h 속도로 터널 진입 시 발생하는 차량 측면압력을 나타낸다. 그림에서와 같이 최대 압력변화가 1050 Pa 발생함을 알 수 있다. 이는 윤수환[6]의 시험에서 측정된 최대 압력변화 1045 Pa과 유사한 결과로써 본 ADINA 해석의 타당성을 확인할 수 있다. 압력 발생 주파수는 1.97 Hz로써 차량의 형상 및 주행속도에 영향을 받을 수 있으며, 원인분석을 위해 추후 연구가 요구된다.



(a) 주행방향 (b) 터널단면

그림 3 터널 내 압력분포

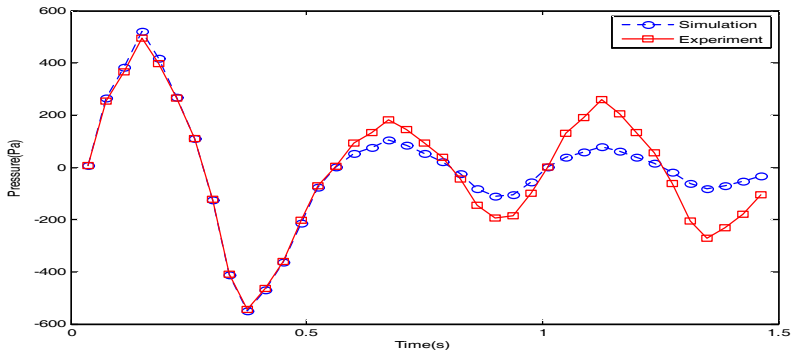


그림 4 틸팅열차 차량측면 압력분포

검증된 모델을 바탕으로 고속철도 차량에 대한 다양한 공력해석을 하였다. 해석 시 차량에 가해지는 압력차를 산출하기 위해 차량 주행 방향의 좌우 측면의 각각 10개 위치에 대하여 압력을 측정 후 이를 평균한 값의 차를 계산하였다. 그림 5는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 터널 외벽 측면 압력이 터널 중심에 비하여 크게 발생함을 알 수 있으며, 이는 터널과 차량 사이의 간격 차이에 따라 발생함을 알 수 있다.

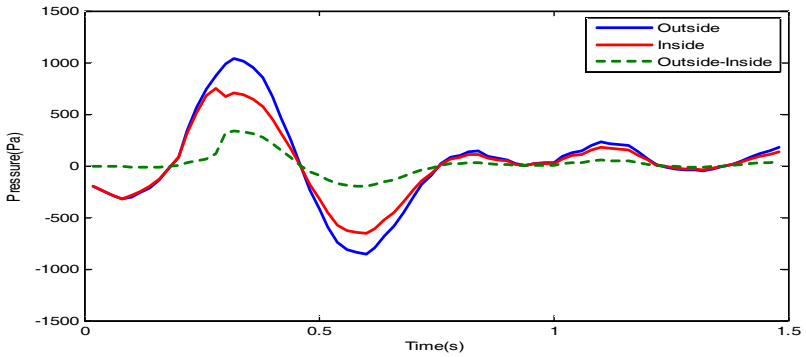


그림 5 고속철도 차량측면 압력분포

2.2 주행 조건별 공력해석

철도차량 터널 주행 조건별 공력해석을 하였다. 그림 6은 해석 모델을 나타낸다. 그림에서 Model 1은 터널입구, Model 2는 터널내부, Model 3은 터널출구를 나타내며, 이 때 각각의 압력분포 결과는 그림 7과 같다. 그림에서와 같이 터널 내부에서의 압력차가 크게 발생함을 알 수 있으며, 터널 입구, 출구 순서로 압력차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 해석 시 터널 출입구 부분 경계조건에 따라 압력이 낮아지며, 터널내부는 터널 벽면의 저항에 따른 유체 압축에 따라 차량벽면의 압력이 높게 나타남 알 수 있다.

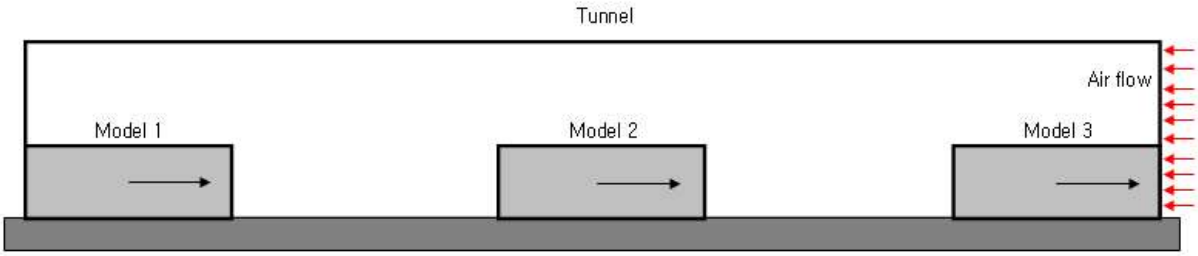


그림 6 터널 주행조건

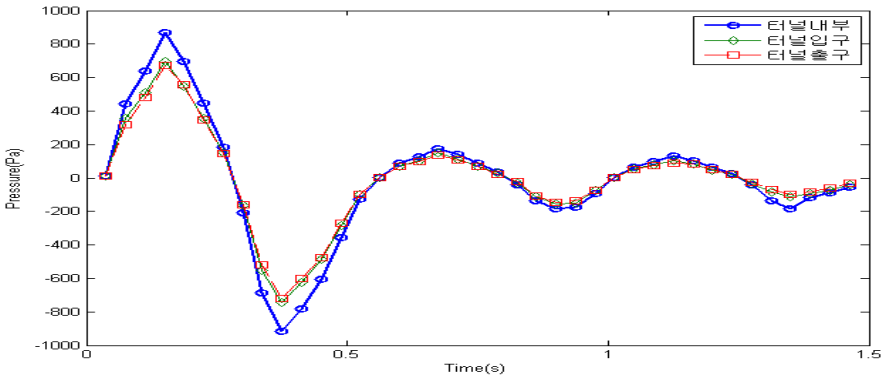


그림 7 터널 주행 조건

3. 승차감평가

3.1 차량모델

터널 진입 시 발생하는 공력에 따른 차량 승차감 영향을 확인하기 위해 그림 8의 차량모델을 구성하였다. 모델은 상용프로그램인 SAMCEF[8]를 이용하여 구성하였으며, 차량가진은 2차 현가장치로 전달되는 대차의 진동 가진력을 이용하였으며, 이를 위해 34 자유도 해석모델[10]을 이용하여 산출하였다. 또한 공력은 차체 측면에 분포하중으로 부여하였고, 승차감 평가를 위하여 차량 바닥 10개 위치에서 차체가속도를 산출하였다. 승차감 측정 속도는 차량의 주행속도 영역인 300 ~ 400 km/h를 25 km/h 간격으로 해석하였다.

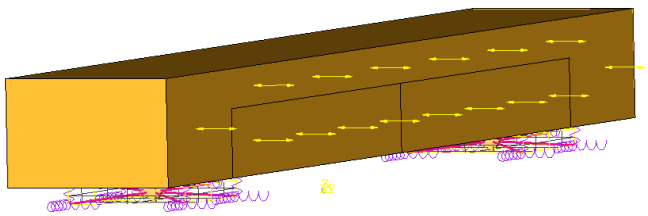


그림 8 승차감 평가를 위한 차량모델

3.2 승차감 평가

국내 고속철도의 승차감 평가 기준은 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)의 UIC 513R[11]을 적용하도록 되어있다. 한국형 고속전철 및 동력분산형 고속전철은 UIC 513R 기준 "Deluxe rolling stock"(승차감 지수 : 2)를 만족하도록 요구하고 있다. 철도차량 해석결과를 통한 승차감 평가방법으로 5분 동안의 주행 중 차량의 바닥에서 측정한 진동신호(5초 간격 진동신호 60개)에 대하여 0.4 ~ 100 Hz 주파수 범위에서 각 주파수에 대한 진동가속도 파워를 산출하고, 인체민감도를 고려한 UIC 513R 가중함수를 적용하여 각 방향에 대한 진동가속도 실효값을 산출한다. 계산된 실효값 중 누적빈도가 95 %인 실효값을 이용하여 승차감 지수 N_{MV}을 구하며, 평가 방법에 따라 3가지로 구분되며, 본 연구에서는 차량바닥 진동에 대한 약식법(simplified method)을 적용하였다.

UIC 513R을 기반으로 강체 공력작용 유무에 따른 승차감을 평가하였다. 그림 9는 주행조건에 따른 속도별 승차감 해석결과이며, 주행조건은 개활지, 터널입구, 터널내부, 터널출구를 각각 해석하였다. 기준이 되는 개활지 승차감은 34자유도 모델의 2차 현가장치 가진력만을 고려한 경우를 기준으로 계산하였으며, 터널 주행 시 2차 현가장치 가진력과 차체 압력변화를 모두 고려하여 해석하였다. 해석결과 고속으로 터널 주행 시 승차감 지수가 최대 0.12 만큼 증가함을 알 수 있으며, 고속 주행 시 승차감 지수가 감소함을 확인할 수 있다. 승차감 지수가 감소하는 원인은 차량 모델이 강체로 구성되어 강체차량 모드와 가진주파수 영역이 달라짐에 따라 나타나며, 이는 유연체 차체 특성이 반영되면 명확한 승차감 지수를 산출할 수 있다.[12] 주행 조건별 승차감 변화로 터널 입.출입 시 보다 터널 내부 주행 시 승차감 지수가 상승함을 알 수 있으며, 이는 차체 압력변화의 크기 차이로 발생하였다.

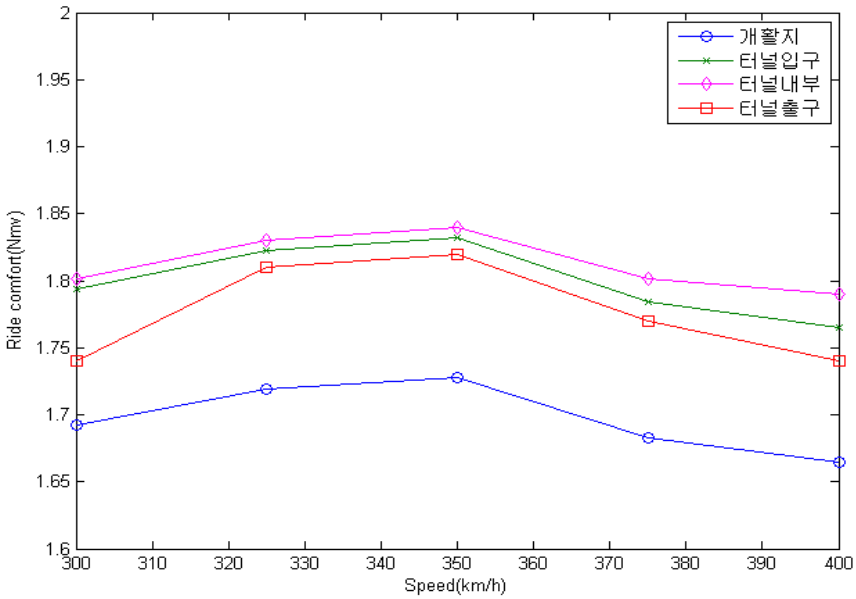


그림 9 터널 내 주행 시 승차감 평가

4. 결론

터널 진입 시 철도차량에 발생하는 공력을 전산해석을 통하여 계산하고, 공력 기인 철도차량의 승차감 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속 주행하는 철도차량의 터널내부 주행 중 좌우진동 크기가 커지며, 승차감은 UIC 513R 승차감 지수 기준 최대 0.12 증가한다.
2. 철도차량의 터널 고속 주행 시 승차감 지수는 터널 내부에서 가장 높으며, 터널입구, 터널출구 순서로 승차감 저하가 나타났다.

3. 터널 진입 시 고속철도 차량 설계 목표값인 승차감 지수 2는 만족하나, 압력변화에 따른 차량 좌우진동을 저감할 수 있는 설계가 필요하다. 이를 위해 차량의 좌우진동 억제를 위한 2차 현가장치 설계가 필요하며, 차체 공력을 발생시키는 주요 요인을 확인하기 위해 차량의 형상에 따른 차체 진동 특성에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박춘수, 서승일, 이억재, 목진용, 김기환, “한국형 고속전철 터널 주행시의 압력 변동 및 빈도의 분석,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 181-186, 2003.
2. 박춘수, 서승일, 김기환, 이억재, “고속열차가 터널내에서 받는 압력변동 특성 분석,” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 12-17, 2004.
3. Katsuya TANIFUJI, Satoshi KIKKO, Kei SAKANOUE, Kouichirou NAMBA, "Modelling of aerodynamic force acting in tunnel for analysis on riding comfort as a train," transactions of the JSME, Vol. 72-720, pp. 2426 - 2432, 2006.
4. Masahiro SUZUKI, Atsushi IDO, Yutaka SAKUMA, Hiroshi KAJIYAMA, "Full-scale measurement and numerical simulation of flow around high-speed train in tunnel," transactions of the JSME, Vol. 1, No. 3, pp. 281-292, 2008.
5. Yutaka SAKUMA, Michael P. PAIDOUSSIS, Stuart J. PRICE, Masahiro SUZUKI, "Aerodynamic forces acting on and lateral translational and rotational motions of intermediate cars travelling in a tunnel," Journal of System Design and Dynamics, Vol. 2, No. 1, pp. 240-250, 2008.
6. 윤수환, 곽민호, 이동호, 권혁빈, 고태환, “한국형 틸팅차량의 터널 주행시 실내/외 압력변화에 대한 실험적 연구,” 한국철도학회논문집, 12권, 2호, pp. 309-314, 2009.
7. ADINA Ver. 8.5. 2009.
8. Samcef field. SAMTECH. 2002.
9. 김동현, 신민호, 박준철, “고속철도 대단면 터널에서 통풍공의 공기역학적 성능,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 15300-1537, 2002.
10. 구자춘, 최연선, 이상원, 이래민, 이필호, 김주섭, “크리피지를 고려한 분산형 고속전철의 34 자유도 동적해석,” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 465-470, 2009.
11. International Union of Railways, 1994, UIC code 513R.
12. 신범식, 최연선, 이승일, “유연체 차체를 고려한 고속철도차량 승차감 해석,” 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 776-781, 2009.