

고속철도 차량의 터널 진입 시 압축파에 미치는 점성효과에 관한 연구

A study of the viscous effect to the compression wave when a high-speed train passing through the tunnel

김영매*, 권혁빈*†, 홍석우**, 노주현***

Ying Mei Jin*, Hyeok-Bin Kwon*†, Seok Woo Hong**, Joo-Hyun Rho***

Abstract The relationship between the skin friction effect on the train surface and the magnitude of the secondary rise of the compression wave due to the tunnel-entry has been studied, in order to improve the accuracy of the CFD simulations on it. 3-dimensional unsteady Navier-Stokes equation has been used to calculate the flow field around and in tunnel as well as around the train. The equivalent roughness height of the vehicle body has been employed to present the surface friction effect. The results show that the secondary rise of the compression wave is highly dependent on the equivalent roughness height, and increasing the equivalent roughness height, the magnitude of secondary pressure rise agrees better with that from the field test.

Keywords : High speed train, skin friction, equivalent roughness height, tunnel, CFD

초 록 전산유체해석 기법을 이용한 고속철도 터널 내 압력변동 수치해석의 정확성을 향상시키기 위하여 차체 표면의 마찰 효과와 진입 압축파의 2차 상승 크기와의 관계를 연구하였다. 고속철도 차량이 터널 통과 시 발생하는 터널 압축파는 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식과 난류모델을 이용하여 계산하였으며, 점성효과에 의한 표면 마찰력은 차체의 등가 거칠기(equivalent roughness height)를 이용하여 조절하였다. 계산 결과, 압축파의 2차 상승은 차체의 표면 마찰력에 크게 의존하는 것으로 밝혀졌고, 적절한 등가 거칠기를 적용할 경우 현장시험 및 기존 해석 프로그램의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

주요어 : 고속철도, 표면마찰, 등가 거칠기, 터널, 전산유체해석

1. 서 론

고속철도 차량이 터널에 진입할 때 발생하는 진입 압축파의 크기는 1차적으로 열차의 속도와 열차-터널의 단면적비에 비례한다고 알려져 있지만[1-3], 열차의 차체가 터널에 진입하는 동안 발생하는 진입 압축파의 2차 상승은 열차 주위에 형성되는 경계층의 두께 등 공기의 점성효과와 관련이 있기 때문에 전산유체해석 기법의 이용 시 차량의 외부형상의 모델링 정도에 따라 진입 압축파의 2차 상승 크기가 영향을 받을 수 있다.

† 교신저자: 한국교통대학교 교통대학원 교통계획/교통시스템공학과(hbkwon@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 교통대학원 교통계획/교통시스템공학과

** (주)에프엔에스이엔지, *** 현대로템주식회사

그러나, 3차원 해석의 경우에는 연결부, 하부 및 기타 미소 형상에 대한 상세한 모델링을 적용할 경우 계산 용량과 시간이 매우 커지기 때문에 적절한 형상의 단순화 작업 후 등가 거칠기(equivalent roughness height) 개념을 도입하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 3차원 단순 형상의 열차가 터널을 통과할 때 나타나는 진입 압축파를 해석하는데 있어 등가 거칠기와 진입 압축파의 2차 상승의 관계를 연구하였다. 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식을 이용하여[4] 고속철도 차량과 경부선 터널을 3차원으로 모델링 하여 차량이 터널진입 시 터널 내부의 압력을 시간에 따라 추출한 후 압축파의 파형을 분석하였다.

등가 거칠기에 따른 압축파의 2차 상승 크기를 비교하였으며, 현장시험 결과와 타당하는 등가 거칠기를 조사하였다. 또한, 시간해상도를 변화시켜가며 해석을 수행하여 적절한 해석 조건에 대해서도 조사하였다.

2. 본 론

2.1 모델링 및 해석 조건

2.1.1 모델링

본 연구에서는 전두부 유리창 하부에 스포일러를 부착하고 차량간 연결부와 하부 대차부(bogie)를 고려 하지 않은 상태에서 10량 편성의 KTX-산천 열차 및 경부고속선 터널을 3차원으로 모델링 하였으며, 터널 내 열차공간을 폭 4m, 높이 5m의 직사각 기둥의 형태로 분할한 뒤 열차 속도에 해당하는 속도로 이동하는 sliding mesh 기법을 적용하여 열차와 터널의 상대적 운동을 모사하였다. 열차의 진입과 진출 시 외부 유동을 고려하기 위하여 터널 입출구 외부의 원방경계는 200m의 크기로 설정이었다. 아래 Fig. 1에는 전산해석을 위해 작성된 열차와 터널 및 입출구 주위 원방경계를 포함한 격자계가 나타나 있다.

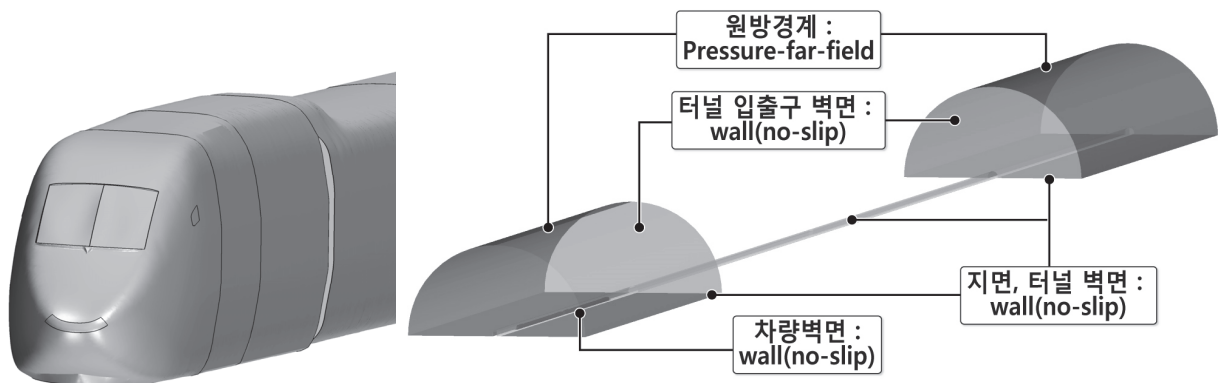


Fig. 1 3차원 모델링 (열차, 터널 및 원방경계 격자계)

2.1.2 열차속도(Smooth starting)

본 해석에 적용된 초기 조건은 일정한 열차속도로 터널을 통과하는 차량에 대한 조건이며, 열차를 정지 상태에서 열차주행속도까지 서서히 가속시키는 것으로서 아래와 같은 식(1)로

표현될 수 있다.

$$V(t) = 0.5V_r \{1 - \cos(t\pi / t_0)\} \quad (1)$$

여기서, V_r 는 최종 열차주행속도, t_0 는 최종 도달 시간(0.5초), t 는 해석시간이다. [5]

2.1.3 시간적분 조건

비정상 계산을 수행하기 위하여 계산 간격(time step) 및 반복계산 횟수(sub-iteration)를 변화시켜가며 계산을 수행하여 적절한 시간 적분 조건을 조사하였다.

아래 Fig. 2에는 경부고속선 차량이 270km/h 속도로 연장 1km의 터널을 통과 시 차량표면 압력 변동 결과를 비교하였다. 계산 간격은 0.01초, 0.005초와 0.002초로 설정하며, 반복계산 횟수를 5회와 10회로 설정하였다.

계산 간격에 따른 결과를 비교 시 0.002초와 0.005초의 압력변동은 큰 차이 나타나지 않았다. 해석결과가 수렴된 것으로 0.005초의 계산 간격으로 설정하여도 계산이 정확한 것으로 판단할 수 있다. 반복계산 횟수는 5회와 10회의 결과를 비교하며, 차량표면 압력 상승 변동은 일치한 것으로 나타나고, 5회로 설정하여도 수렴된 것으로 판단할 수 있다.

해석시간을 줄이기 위해, 본문에 모두 시뮬레이션의 시간해상도는 계산 간격은 0.005초, 반복계산 횟수는 5회로 계산한다.

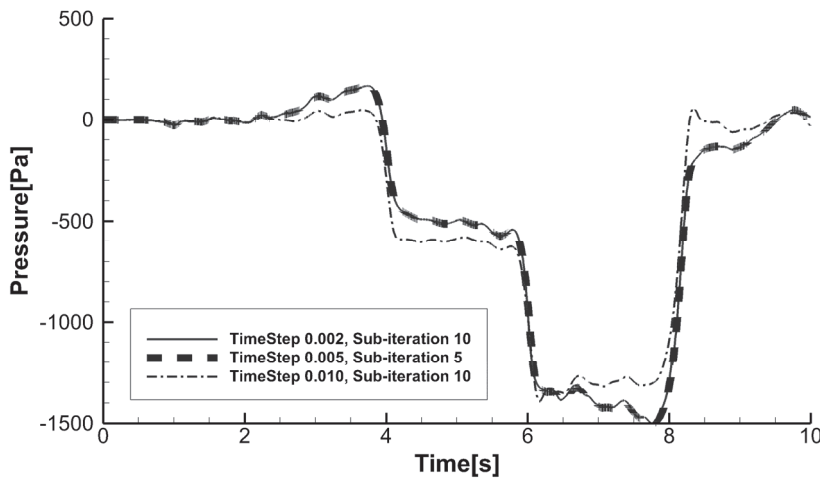


Fig. 2 시간적분 해상도 비교 (1km 경부선 270m/s 단독주행 시)

2.2 해석결과

Table 1과 Fig. 3에서는 경부선 고속차량 KTX(20량)가 대곡2터널(연장 760m) 진입 시 터널 입구부에서 380m 지점의 터널 벽면 압력 측정 결과를 나타냈다.

등가 거칠기를 설정하지 않은 경우(roughness height = 0.000m), 터널 내부 압력과의 2차 상승을 크게 보이지 않았다. 최대 압력이 921.47 Pa로 나타나며, 실측 데이터와 비교하여 156.46 Pa 작게 나타났다.

한편, 등가 거칠기를 0.008m까지 점차 증가시킨 결과, 압력과의 2차 상승이 점차 확연히 나타나며, 등가 거칠기 0.005m에서 시험 결과와 유사한 값을 갖게 되며, 0.008m에서는 거의 시험 결과에 수렴하는 것으로 보여진다.

적정한 등가 거칠기 수치는 실측 데이터(Field Test)와 비교 하며 가장 부합한 압력과의 2상승 결과를 찾을 수 있다. 경부선 대곡2터널의 실측 데이터는 Fig. 3에서 제시하여, 터널 내부 발생하는 압력과의 2차상승은 최대 압력이 1077.93 Pa로 나타났다. Table 1에서는 실측 데이터 결과와 오차가 5.0 Pa 이내의 기준으로 판단하며 등가 거칠기를 0.005m 이상으로 설정하여야 실측 결과와 부합한 것으로 판단할 수 있다.

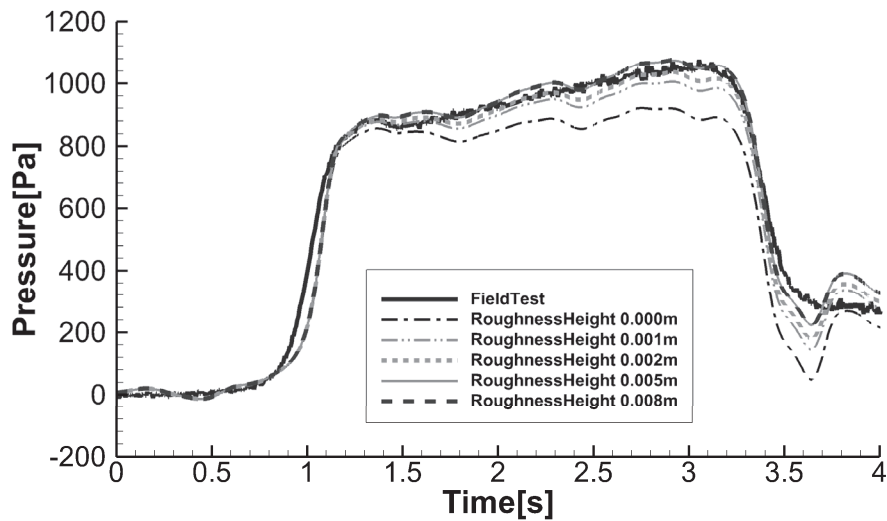


Fig. 3 거칠기에 따라 객실외부 압력 상승 결과와 실측 결과 비교 (경부선 대곡2터널)

Table 1 2차상승 압력파 최대치 비교

Roughness Height [m]	Maximum Pressure [Pa]	Compare with Field Test [Pa]
0.000	921.47	156.46
0.001	1005.80	72.13
0.002	1036.36	41.57
0.005	1074.88	3.02
0.008	1075.29	2.64
Field Test	1077.93	-

이상에는 열차의 차체가 터널에 진입할 때 발생하는 진입 압축파의 2차 상승과 등가 거칠기의 관계를 터널 내부에 고정 위치의 압력 변동으로 측정하여 비교하였고, 아래 Table 2에서는 등가 거칠기에 따른 운행중의 전두차량의 외부 표면압력 수치를 조사하여 나타내었다.

최대 및 최소 압력을 전체적으로 비교하며, 등가 거칠기를 0.000m~ 0.005m 사이에 증가 시킬수록 압력파의 크기가 상승된 것으로 판단할 수 있다. 0.005m 이상 시 큰 변동이 나타나지 않았다. 따라서, 차량 표면압력 변동으로 압력파와 등가 거칠기의 관계를 표현할 수 있다고 판단 한다.

Table 2 등가 거칠기에 따라 전두차량 외부압력 비교

Roughness Height [m]	전두 차량	
	최대압력 [Pa]	최소압력 [Pa]
0.000	-465.81	-2045.48
0.001	-363.24	-1984.98
0.002	-331.48	-1963.19
0.005	-284.31	-1950.41
0.008	-286.57	-1952.00

3. 결론

고속철도 차량이 터널에 진입할 때 발생하는 진입 압축파의 2차 상승은 열차 주위에 형성되는 경계층의 두께 등 공기의 점성효과와 관련이 있다. 본 연구에서는 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 단순 형상의 열차가 터널을 통과할 때 등가 거칠기와 진입 압축파의 2차 상승의 관계를 연구하였다. 등가 거칠기에 따른 압축파의 2차 상승 크기를 비교하였으며, 현장시험 결과와 부합하는 등가 거칠기를 조사하였다. 연구결과는 다음과 같다:

- 등가 거칠기를 설정 없을 경우와 설정한 경우의 결과가 다르게 나타났으며, 이를 통해 열차 표면에서 등가 거칠기는 터널진입 시 2차상승 압력과 구배에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.
- 등가 거칠기를 증가시킬수록 압력과 2차 상승의 크기가 상승하였으나, 0.005m 이상에서는 상승폭이 미미한 것으로 나타났다.
- 현장시험 결과와 타당하는 등가 거칠기를 조사하여 KTX-산천 차량이 경부고속선 터널 진입한 경우는 등가 거칠기를 0.005m 이상 시 부합한 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] H.B Kwon, D.H. Lee, S.G. Lee, D.H. Kim, et al. (1998), An Experimental Study on Propagation of Pressure waves inside the Tunnel and Booming Noise by a High-Speed Train, The Korean Society of Mechanical Engineers, 2(2), pp. 735-740

- [2] Hyeok-bin Kwon, Sung-won Nam, Jong-hyun Kwak(2009), Assessment of the Pressure Transient Inside the Passenger Cabin of High-speed Train Using Computational Fluid Dynamics, Journal of the Korean Society for Railway, 12(1), pp. 65-71
- [3] D.Y. Shin, S.G. Lee, H.J. Oh, H.G. Kim, et al. (2012), 3D GEOMETRY EFFECTS ANALYSIS ON PROPAGATION OF PRESSURE WAVE GENERATED BY HIGH-SPEED TRAIN TRAVELING IN A TUNNEL USING CFD, Korean Society for Computational Fluids Engineering, 17(4), pp.49-55.
- [4] Hyeok-bin Kwon (2001), A Study on the Unsteady Compressible Flow Field Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel, Ph. D thesis, Seoul National Univ.
- [5] Hyeok-bin Kwon, Yu Shin Kim, Dong-ho Lee, Moon sang Kim (2001), Nose Shape Optimization of the High-speed Train to Reduce the Aerodynamic drag and Micro-pressure Wave, The Korean Society of Mechanical Engineers, 1(5), pp. 373-379