

승객 이명감 기준을 만족하는 고속철도 터널 최소 단면적에 대한 연구

권혁빈*

한국교통대학교 교통시스템공학과

A STUDY ON THE MINIMUM CROSS-SECTIONAL AREA OF HIGH-SPEED RAILWAY TUNNEL SATISFYING PASSENGER EAR DISCOMFORT CRITERIA

H.B. Kwon*

Department of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

Pressure change inside cabin as well as in tunnel has been calculated to assess the passenger pressure comfort of high-speed train. C-STATM, a CFD program based on axi-symmetric Navier-Stokes equation and Roe's FDS has been used to simulate the pressure change in tunnel during a high-speed train passing through it. To present the relative motion between the train and the tunnel, a modified patched grid scheme based on the structured grid system has been employed. The simulation program has been validated by comparing the simulation results with field measurements.

Extensive parametric study has been conducted for various train speed, tunnel cross-sectional area and tunnel length to the pressure change in cabin. KTX-Sancheon(KTX2) high-speed train has been chosen for simulation and the train speed have been varied from 200 km/h to 375 km/h. The tunnel length has been varied from 300 m to 7.5 km and tunnel area from 50 m² to 120 m². Total 504 simulations have been conducted varying the parameters.

Based on the database produced from the parametric simulations, minimum tunnel cross-sectional area has been surveyed for various train speeds based on Korean regulation on pressure change in cabin.

Key Words : 고속철도(High-speed railway), 승객 이명감(Passenger ear discomfort), 철도 터널(Railway Tunnel), 전산유체역학(CFD), 기밀도(air-tightness)

1. 서 론

고속철도의 수요 증가에 따라 철도터널의 공기역학 해석 및 설계 기술의 필요성이 늘어나고 있다. 고속철도 터널은 객실 내 압력변동과 그로 인한 승객 이명감, 터널 출구에서 방사되는 미기압파 등의 공기역학적인 문제가 발생하기 때문에 이를 완화하기 위하여 기존 터널보다 단면적이 커지며 이 때문에 건설비가 증가하게 된다. 따라서, 공기역학을 고려한 설계 및 엔지니어링 기술의 적용을 통해 철도터널의 단면적을 적절한 수준으로 결정하여 건설비를 절감하는 것이 필요하다.

철도터널의 단면적을 적정하게 설계하기 위해서는 터널 내 공기압 변동 및 미기압파를 정확하게 예측할 수 있어야 하고,

이를 위해 터널과 열차의 상호 작용에 대한 공기역학적 해석 기술을 확보하는 것이 필요하다.

열차가 고속으로 터널에 진입할 때, 열차 전방에서 압축파가 생성되어 터널 내를 음파의 속도로 진행한다. 터널 출구에서 반사된 압축파는 팽창파로 바뀌어 다시 터널 입구 방향으로 전파되게 되며, 이러한 압축파 및 팽창파로 인하여 터널 내 압력은 지속적으로 급격히 변화하게 되는데, 이러한 압력 변동의 영향으로 열차 내부의 압력도 변화하게 된다. 또한 열차 내부의 압력변동은 승객의 이명감을 유발하게 되는데, 이에 따라 국내에서는 차량의 제작과 선로의 설계 시에 객실 내 기압변화의 기준을 만족할 수 있도록 법률로서 규정하고 있으며[1], 국내의 200 km/h 이상 고속철도는 이를 고려하여 차량의 기밀도, 터널의 단면적 등을 결정하여야 한다.

철도터널과 열차는 진행 방향으로 상대적으로 매우 긴 길이 이를 갖기 때문에 철도터널 내의 공기유동은 1차원 효과에 주로 영향을 받는다. 따라서, 초기의 많은 연구들[2,3]은 철도 터널 내의 공기유동을 1차원으로 간주하여 해석을 수행하였

Received: July 22, 2015, Revised: September 11, 2015,

Accepted: September 11, 2015.

* E-mail: hbkwon@ut.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.3.62>

© KSCFE 2015

으며, 현재에도 이러한 접근방법은 짧은 계산 시간을 요구하는 엔지니어링 설계에 사용되고 있다.

실험적 연구로서는 열차의 형상과 터널을 축대칭으로 모델링하는 비정상 시험기를 이용한 사례[4,5,6]가 다수 있으며, 특히 Fukuda et al.[6]은 축소모형 열차-터널 시험기를 통한 실험에서 축대칭과 3차원 모델에 의한 압력과의 크기와 선두구배가 거의 일치한다는 것을 실험적으로 확인하였다.

한편, 1차원 모델을 이용한 해석보다 더 상세한 결과를 얻기 위하여 열차 및 터널을 2차원 축대칭으로 가정하여 해석을 수행하기도 한다[7,8,9,10]. 2차원 축대칭 방정식을 이용하여 철도터널 내부의 압력변동을 해석하는 방법은 3차원 방정식을 이용하는 방법에 비해 계산량이 비약적으로 줄어들므로 비용-효율적인 방법으로 알려져 있다. 또한, 축대칭 모델은 열차 전두부의 형상, 단순한 형상의 후드나 익스펜션 챔버(Expansion chamber)[8]를 고려할 수 있으므로 1차원 방정식을 이용하는 방법에 비해 보다 상세한 모델을 적용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 고속열차 주행 시 터널 내부 및 열차 내부의 압력변동을 해석하였으며, 열차 속도, 터널 단면적, 터널 길이에 따른 객실내 압력변동의 관계를 조사하였다. 또한, 계산 결과를 국내외 승객이명감 기준과 비교하여 이를 만족하는 최소 터널 단면적을 도출하였다.

2. 철도차량 승객이명감 기준

2.1 국외 기준

철도차량의 터널 통과 시 객실에서 발생하는 승객이명감에 대한 국외 기준을 Table 1에 나타내었다. UIC code 779-11[11]에 따르면 터널에 단수 혹은 다수의 열차가 진입하여 주행할 때 발생하는 압력변동에 의한 승객 이명감을 보장하기 위해

Table 1 International passenger ear discomfort criteria

Name	Train speed (km/h)	Air-tightness	Criteria
UIC 779-11 2nd edition, 2005	Standard modern train (180-220), Streamlined high-speed train (200-350)	Sealed/ Unsealed	○ Unselaed ($\tau_{dyn} < 0.5$ s) - 4.5 kPa/4 sec - 3.0 kPa/4 sec ○ Sealed ($\tau_{dyn} > 0.5$ s) - 1,000 Pa/1 s - 1,600 Pa/4 s - 2,000 Pa/10 s
UIC 660 2nd edition, 2002	High-speed (> 250)	Sealed ($t_j > 18$ s)	- 500 Pa/1 s - 800 Pa/3 s - 1,000 Pa/10 s - 2,000 Pa/60 s

최소 터널 단면적을 규정하게 되며, 이는 현대의 고속철도에서 터널 단면적을 설정하는 가장 중요한 인자가 된다. 승객 이명감의 기준은 국가별, 기밀/비기밀, 단독주행/교행, 서비스 레벨 등에 따라 상이하다.

승객 이명감에 대한 국제적인 기준은 UIC code 779-11와 UIC code 660[12]에서 각각 다루고 있다. UIC code 779-11은 ERRI[13]에서 제시한 기본 승객이명감(Base-line pressure comfort criteria)를 비기밀 차량과 기밀 차량으로 구분하여 제시하고 터널 단면적 설계에 이용할 것을 권고하고 있다. 기밀 차량의 경우 권고하는 승객이명감 기준은 1초간 1000 Pa, 4초간 1600 Pa 및 10초간 2000 Pa이다.

UIC code 660은 유럽 내의 (타국) 고속철도 노선에서 운행하기 위하여 운행속도 250 km/h 이상의 고속열차가 만족하여야 하는 기술적 규정들을 제시하고 있다. 본 규정에서 제시하는 승객이명감 기준은 독일의 기준과 유사하게 객실 내에서 1초간 500 Pa, 3초간 800 Pa, 10초간 1000 Pa 및 60초간 2000 Pa 이하의 압력변동이며, 고속열차의 기밀도 t_j 가 18 sec 이하가 되도록 규정하고 있다.

2.2 국내 기준

철도차량의 터널 통과 시 객실에서 발생하는 승객이명감에 대한 국내 기준을 Table 2에 나타내었다. 국내의 경우에는 2006년 고시된 철도차량 안전기준에 관한 지침[1]에서 차량의 기밀도와 승객 이명감 기준을 규정하고 있는데, 유럽 UIC 660의 규정과 동일하게 객실 내에서 1초간 500 Pa, 3초간 800 Pa, 10초간 1000 Pa 및 60초간 2000 Pa 이하의 압력변동이 발생할 것을 규정하고 있으며, 차량의 기밀도 τ 도 18 sec 이하가 될 것을 규정하고 있다.

한편, 경부고속선 건설 당시 (사)대한터널협회에서 규정한 승객 이명감 기준은 3초간 최대압력변동이 단독주행 시 800 Pa, 복선 터널에서 열차가 교행하는 상황에서는 1250 Pa 이하가 되도록 규정하고 있다. 이는 국가기준인 철도차량 안전기준에 관한 지침에 비해 3초 간의 압력변동만을 규정하고 있으며, 교행의 경우 압력변동 허용치를 3초간 1250 Pa로 더 크

Table 2 Domestic passenger ear discomfort criteria

Name	Train speed (km/h)	Air-tightness	Criteria
Guide for safety standard of Rolling stock	High-speed (> 200)	Sealed ($\tau > 18$ s)	- 500 Pa/1 s - 800 Pa/3 s - 1,000 Pa/10 s - 2,000 Pa/60 s
Special criteria for KTX -Kyeongbu line	High-speed (300)	Sealed ($\tau > 11$ s)	○ Normal case - 800 Pa / 3 s ○ Extreme case* - 1,250 Pa / 3 s

계 함으로써 결과적으로 보다 완화된 규정으로 작용한다.

2006년 국가기준으로 승객이명감 및 열차 기밀도 기준이 제정되었기 때문에 향후 고속선 및 200 km/h 이상으로 고속화되는 개량 기준선에는 상기의 국가 기준을 터널 및 열차의 설계에 적용하여야 할 것이다. 또한, 향후 기준선에 대해서도 상기의 국가 기준을 동일하게 적용하고, 이에 따른 차량의 기밀도를 적절하게 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

3. 수치해석 조건

3.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구에서는 식 (1)에 나타난 2차원 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. Q 는 보존량 벡터, E , F 는 플럭스 벡터, H 는 소스항을 의미하며, F_v , E_v 는 점성 플럭스 벡터, H_v 는 점성 소스항을 나타낸다. 대류항의 플럭스는 Roe의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다[9].

$$\partial_t Q + \partial_x E + \partial_y F + H = \frac{1}{Re_c} \left(\partial_x E_v + \partial_y F_v + H_v \right) \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T$$

$$E = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (\rho e + p)v]^T$$

$$F = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T$$

$$H = \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2, (\rho e + p)v]^T$$

열차의 초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 완만한 출발 (Smooth start) 기법[9]을 사용하였다. 이 방법은 열차를 정지 상태에서 서서히 주행속도까지 가속시키는 것으로서 수치적 파동을 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 속도 변화가 완만하고, 짧은 거리에서도 출발이 가능하므로 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다. 수치 해석의 경계 조건으로서 터널 벽면에서의 유동 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직인 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 또한 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다.

3.2 해석 프로그램

해석에 사용된 프로그램은 한국교통대학교가 개발한 C-STATM 로서 2차원 축대칭 Navier-Stokes 방정식과 상기에서

제시한 수치해법을 이용하여 열차 통과 시 터널 내외부 비정상 압력장을 계산하는 프로그램이다. 또한, 터널 및 열차의 제원 및 전두부 형상 등 최소한의 수치를 입력하여 자동으로 격자를 형성할 수 있어 생산성을 향상시켰으며, 터널 벽면 혹은 차량 표면 등 측정 위치별 압력 히스토리 제공, 기밀도에 따른 객실 내 압력의 계산, 비정상 유동장의 애니메이션 작성 등 다양한 분석 툴을 제공하고 있어 이명감 기준 평가를 비롯하여 전두부 형상 및 터널 단면적의 최적 설계 등에 사용될 수 있는 프로그램이다.

3.3 해석 파라메타

해석에 사용된 열차는 KTX-산천 열차로서 열차 길이는 201.3 m이며, 최대 단면적은 10.008 m², 차체 기밀도는 18 sec 이다.

해석 조건의 경우 열차의 속도, 터널 단면적 및 터널 길이를 아래 Table 3와 같이 변화시켜가며 수행하였으며, 파라메터들의 모든 조합의 경우의 수인 504개 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 해석기법의 검증

해석 기법의 검증을 위하여 2011년 한국철도기술연구원이 경부고속선 복안터널 내에서 수행한 압력 변동 시험[14]과 동일한 조건에서 전산해석을 수행하여 그 결과를 시험 결과와 비교하였다. 측정 대상인 복안 터널의 길이는 3,320 m이고, 단면적은 107 m²이며, KTX 열차가 258 km/h로 터널을 통과할 때 터널 입구로부터 470 m의 위치에서 측정이 이루어졌다.

수치해석을 위해 형성된 격자계는 아래 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 터널 내부 및 입출구부에 총 3개의 고정 영역을 설정하여 정렬 격자를 형성하였으며, 각 영역은 patched grid 기법으로 처리하여 각 영역 간 격자 정보를 전달하도록 하였다. 그리고, 열차 주위에 이동 영역을 설정한 후 정렬 격자를 형성하고 터널 입구 외부에 위치시킨

Table 3 Parameters of the numerical simulation

Tunnel cross-sectional area	Tunnel length	Train speed
120.000 m ²	300 m	200 km/h
110.589 m ²	500 m	225 km/h
99.404 m ²	750 m	250 km/h
80.000 m ²	1000 m	275 km/h
66.120 m ²	1500 m	300 km/h
58.000 m ²	2500 m	325 km/h
50.000 m ²	3500 m	350 km/h
	5000 m	375 km/h
	7500 m	

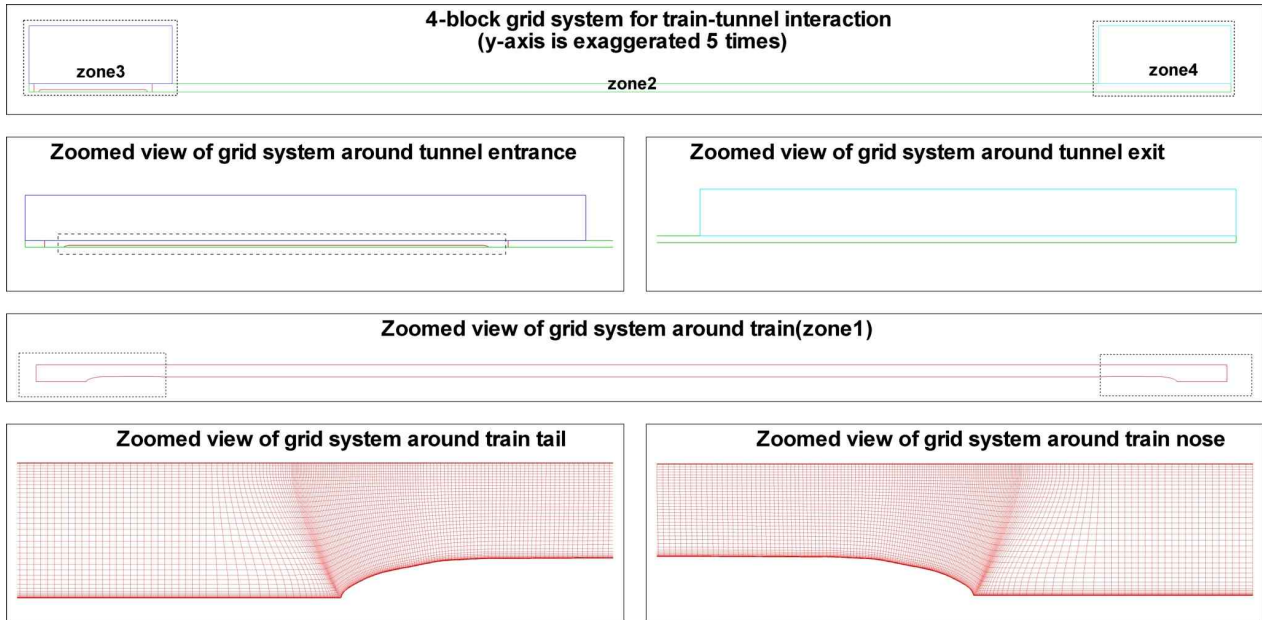


Fig. 1 Computational domain and moving grid around train

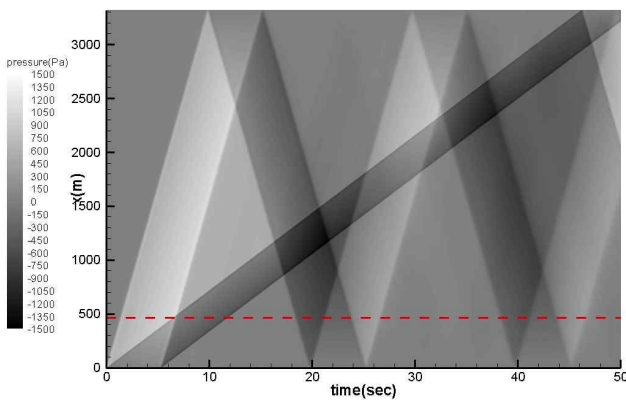


Fig. 2 Tunnel wall pressure calculated by C-STA™

후 열차의 속도에 따라 이동 격자를 이동시켰으며, 각 iteration 마다 유동 계산 후 modified patched grid 기법[9]을 적용하여 고정 격자와 경계에서 유동 정보를 교환하도록 하였다. 본 검증을 위해 사용된 격자계의 총 격자 개수는 230,364 개이다.

비정상 해석 후 각 시간마다 터널 벽면에서의 추출된 압력 값을 그린 t-x 압력 컨투어가 Fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 명암의 대비로 인해 보이는 선들은 압력과 열차 전두부 및 후미부 근방의 압력 변동을 의미하며, 선들의 기울기는 각각 압력과 열차의 속도를 의미한다. 보다 급한 기울기로 나타나는 압력파는 열차 전두부의 터널 진입과 열차 후미부의 터널 진입 시 각각 발생하는 압축파와 팽창파 및 형성된 두 파들이 이후 터널 출구에서 반복하여 나타나는 압력파들로 이루어진다.

t-x 압력 컨투어 상에서 일정 지점에서의 압력을 추출하면 해당 위치에서의 터널 내 압력변동이 되는데, 현장시험 조건과 동일한 터널 입구로부터 470 m에서 측정된 압력 및 전산 해석을 통해 계산된 압력을 Fig. 3에 비교하여 나타내었다.

그림에서 측정값과 해석값 간에 압력의 상승과 하강 시점이 정확하게 일치하며 압력값들 또한 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 본 수치해법 및 프로그램을 이용한 터널 내 압력변동의 계산이 실제 물리적 현상을 잘 반영한다고 볼 수 있다.

4.2 실내압 변동의 계산

전산유체해석을 이용하여 열차가 터널을 통과하는 경우 터

Fig. 3 Pressure change inside tunnel(x = 470 m)

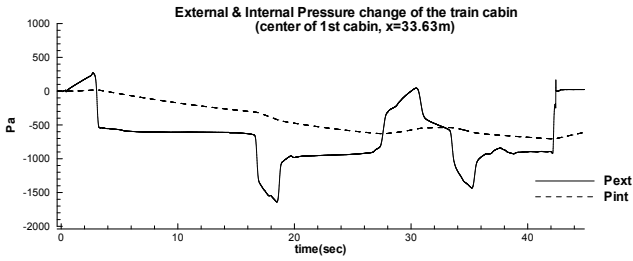


Fig. 4 External and internal pressure change(single run)

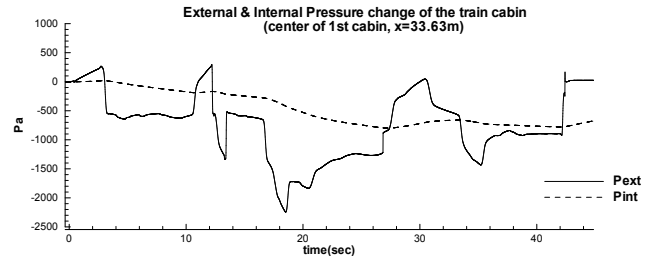


Fig. 6 External and internal pressure change(passing-by)

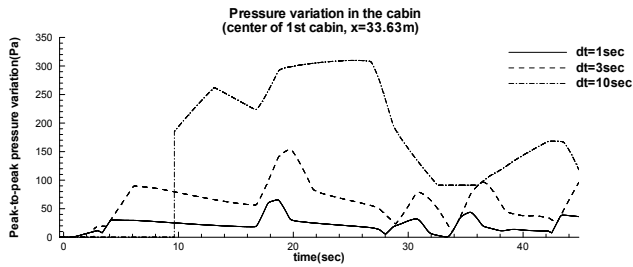


Fig. 5 Peak-to-peak pressure variations during time periods (single run)

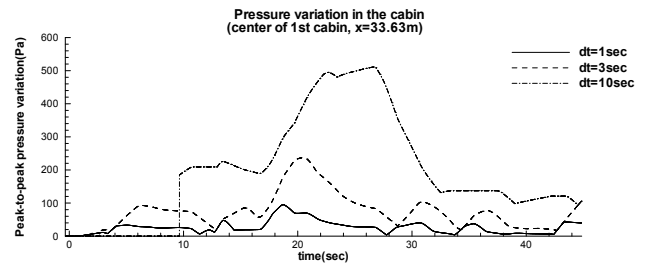


Fig. 7 Peak-to-peak pressure variations during time periods (passing-by)

널 내부의 압력 변동을 계산하고, 계산된 터널 내 압력 중 열차 위치에 해당하는 지점의 압력을 이용하여 열차 외부 압력 변동을 추출하였다.

열차 내부 압력의 계산을 위해 열차의 동적 기밀계수의 정의에 따른 식을 차분하여 아래 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$P_{int}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_{dyn}} (P_{ext}^n - P_{int}^n) \quad (2)$$

위 식에서 P_{ext} 는 객실 외부 압력, P_{int} 는 객실 내부 압력이며, 위첨자 n 은 반복계산 회수를 의미한다. 또한, τ_{dyn} 는 열차의 동적 기밀 계수이며, 본 연구에서는 KTX-산천 열차의 사양에 해당하는 18 sec를 적용하였다.

Fig. 4에는 KTX-산천 열차가 단면적 107 m²에 길이 3.5 km인 터널을 300 km/h의 속도로 통과하는 경우에 첫 번째 객차의 중앙에 해당하는 위치에서의 열차 내외부 압력변동을 나타내었다. 그림에서 실선으로 나타난 외부 압력이 크게 변함에 따라 점선으로 나타난 내부 압력이 외부압력을 추종하는 방향으로 완만하게 변동하는 것을 알 수 있다.

그림 Fig. 5에서는 Fig. 4에 나타난 내부 압력에 대해 각 단위시간 별 극간(peak-to-peak) 압력변동을 시간에 따라 나타내고 있다. 이 경우에는 열차가 터널을 통과하는 시간이 43초에 불과해 60초 간의 시간 변동은 계산하지 않았다. 계산 결과, 1초 간 최대 압력변동은 최대 65.6 Pa, 3초 간 최대 압력변동은 154 Pa, 10초 간 최대 압력변동은 309.8 Pa로 나타났다.

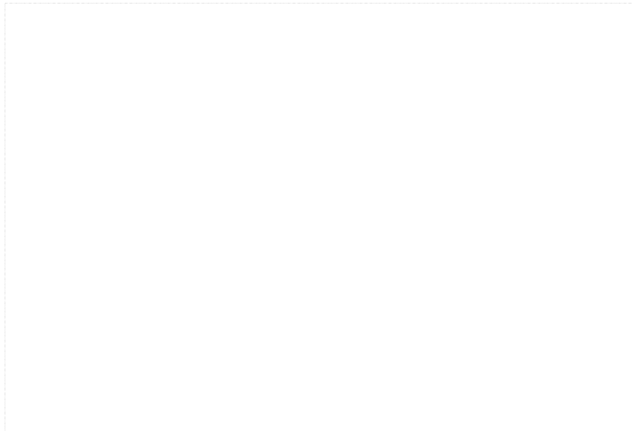
열차가 터널 내에서 마주보며 교행할 경우, 터널 내 압력은 두 열차의 영향을 모두 받는다. 본 연구에서는 두 열차가 터널 내에서 교행할 경우의 터널 내 압력변동은 각 열차에 의해 유발되는 압력변동을 중첩한 결과와 동일하다고 가정하여 해석을 수행하였다. 이러한 가정은 압축파의 선형적인 물리적 특성에 기반한 것으로서 직접적인 교행의 해석이 어려운 경우 비교적 간단하게 교행 시의 터널 내 압력 변동을 계산할 수 있다는 장점이 있다.

교행하는 경우 두 열차가 터널에 진입하는 시간의 차이를 고려하기 위하여 발생할 수 있는 모든 시격에 대하여 계산을 수행하였으며, Fig. 6와 Fig. 7에는 그 중 시격이 -18초, 즉 상대 열차가 18초 먼저 터널을 진입한 경우에 대하여 객실 내외부 압력 변동 및 객실 내 단위시간 당 압력 변동을 각각 나타내었다. 교행의 경우 단독주행에 비하여 상대 열차가 형성한 압력변동에 의하여 실내외 압력변동과 단위시간 당 극간 압력 변동이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

이상의 결과를 이용하여 단독주행 및 교행 시의 단위시간 당 최대 압력변동값을 아래 Table 4에 나타내었다. 그림에 나타난 경우에는 교행 시의 실내외 압력 변동이 대체로 단독주행

Table 4 Maximum pressure variation by number of trains

Number of train	Time period		
	1 sec	3 sec	10 sec
1(single run)	65.6	154.0	309.8
2(passing-by)	119.8	271.2	601.8



(a) Single run

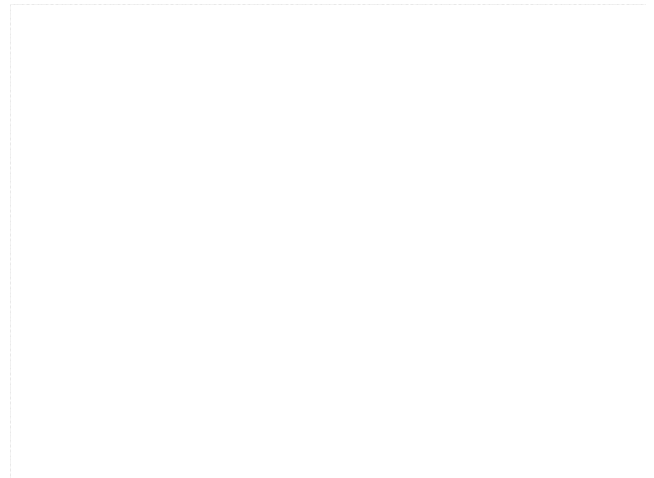


Fig. 9 Pressure variations and restrictions($V_t = 300$ km/h)

(b) By-passing

Fig. 8 Pressure variations within 1 sec

대비 2배에 미치지 못하는 것으로 나타났으나, 이외에 열차 속도 및 터널 길이의 조합에 따라 2배를 약간 상회하는 경우도 발생하였다.

4.3 파라메타에 따른 실내압 변동

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에는 터널 길이와 단면적에 따른 1초간 최대 압력변동을 단독주행 및 교행 시에 대하여 각각 나타내었다. 터널 길이는 열차 길이로, 터널 단면적은 열차와 터널의 단면적 비로 나타내었다. Fig. 8(a)에서 최대 압력변동은 터널 길이가 1 km인 경우, 즉 터널 길이가 열차 길이의 약 5배인 경우($L_m/L_r = 5$)에 최대값을 나타내었으며, 터널 길이가 증가함에 따라 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 터널의 길이가 증가할수록, 즉 열차-터널 단면적비가 감소할수록 최대 압력변동은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 1초간 압력변동의 최대 허용값은 500 Pa이며, 모든 경우에 대하여 이 제한치보다 크게 작게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 8(b)에 나타난 교행 시의 압력변동을 살펴보면, 터널 길이와 단면적에 따른 변화는 단독주행 시와 동일한 경향을 보이나,

Fig. 10 Minimum tunnel area satisfying criteria

압력변동값 자체는 크게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 가장 작은 터널의 경우에는 약 400 Pa의 최대 압력변동을 나타내 제한치에 근접하고 있음을 알 수 있다.

아래 Fig. 9에는 KTX-산천 열차의 300 km/h 주행 시 터널 단면적에 따른 이명감 평가 결과가 나타나 있다. 단독주행 및 교행에서 각 단위시간 당 최대 압력변동은 해당 단위시간의 기준치로 무차원화되어 있으므로 1을 초과하는 경우 기준치를 벗어나는 것으로 볼 수 있다. 단독주행의 경우 60초간 최대 압력변동값이 터널 단면적 약 60.0 m^2 이하에서 초과하는 것으로 나타났으며, 교행의 경우 역시 10초간 최대 압력변동값이 약 74.5 m^2 이하에서 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 최소 단면적은 승객 이명감만을 고려하였을 때의 값이며, 터널 미기압과, 환기 및 화재 등의 조건을 종합적으로 고려하여 최종적인 터널 단면적을 결정하여야 할 것이다.

상기의 최소 터널 단면적 계산을 열차 속도를 변화시켜가며 수행하여 그 결과를 아래 Fig. 10과 Table 5에 나타내었다. 열차 속도가 증가할수록 이명감 기준을 충족시키는 최소 터널 단면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 교행을 고려하였을 때에는 단독 주행에 비하여 최소 터널 단면적이 최소 13%에서 최대 24%까지 증가하는 것으로 나타났다.

또한, Fig. 10에는 영국의 새로운 고속철도인 High speed 2의 터널 건설계획 검토 시 1차원 수치해석으로 계산된 단독주행 시의 열차속도별 최소 터널 단면적이 함께 제시되어 있다. 계산 시 적용된 가정들이나 평가 방법이 본 연구와는 다소 상이하여 정확한 비교는 힘들지만, 결과적으로 도출된 최소 터널 단면적은 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 비정상 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 기반한 전산유체역학 기법으로 터널 통과 시 고속열차 객실 내부의 압력 변동을 열차 속도, 터널 단면적 및 터널 길이를 다양하게 변화시켜가면서 계산하여 승객이명감 기준을 만족하는 최소 터널 단면적을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 축대칭 2차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 터널 내 압력 변동의 계산 결과가 실제 차량이 터널을 통과할 때 나타나는 터널 내 압력변동의 결과와 잘 일치하였다.
- (2) 승객이명감 기준을 만족하는 최소 터널 단면적은 열차 속도 300 km/h일 때 단독주행만을 고려하는 단선 터널의 경우 60 m² 이 최소 터널 단면적으로 나타났고, 열차의 교행을 고려하는 복선 터널의 경우에는 최소 터널 단면적이 74.5 m² 로 나타났다.
- (3) 열차 속도가 증가함에 따라 승객 이명감을 만족하는 최소 터널 단면적은 증가하며, 열차 교행을 고려할 경우 단독주행만을 고려할 때에 비하여 최소 터널 단면적이 13% ~ 24% 증가하는 것으로 나타났다.

Table 5 Minimum tunnel area satisfying criteria

Train speed (km/h)	Minimum tunnel cross-sectional area(m ²)		(B-A)/A (%)
	single track(A)	double track(B)	
250	--	55.3	
275	54.7	65.3	19
300	60.0	74.5	24
325	71.1	81.8	15
350	82.9	93.4	13
375	91.8	104.7	14

후 기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 ‘철도 핵심부품 및 장치 기술개발 2단계’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 2006, Guide for safety standard of Rolling stock, Ministry of Construction & Transportation, No.2006-247.
- [2] 1973, Fox, J.A. and Vardy, A.E., "The Generation and Alleviation of Air Pressure Transients caused by the High Speed Passage of Vehicles through Tunnels," *Proc. of 1st ISAVVT*, pp.G-3.49-64.
- [3] 1979, Vardy, A.E. and Dayman, B., "Alleviation of Tunnel Entry Pressure Transients : 2. Theoretical Modeling and Experiment Correlation," *Proc of 3rd Intl. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels(ISAVVT)*, H2. pp.363-376.
- [4] 1997, Wolf, W.B. and Demmenie, E., "A New Test Facility for the Study of Interacting Pressure Waves and their Reduction in Tunnels for High-speed Trains," *International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*.
- [5] 2001, Auvity, B., Bellenoue, M. and Kageyama, T., "Experimental study of the unsteady aerodynamic field outside a tunnel during a train entry," *Experiments in Fluids*, Vol.30, N.2, pp.221-228.
- [6] 2010, Fukuda, T., Saito, H., Miyachi, T., Kikuchi, K. and Iida, M., "Model Experiments on the Tunnel Compression Wave Using an Axisymmetric and Three-dimensional Train Model," *Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise*, Nagahama, Japan, 18-22 October 2010, pp.397-404.
- [7] 1993, Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K. and Uchida, K., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel," *International Conference on speedup technology for railway and maglev vehicles*, Nov.22-26, 1993, Yokohama, Japan, pp.315-319.
- [8] 1999, Aoki, T., Vardy, A.E. and Brown, J.M.B., "Passive Alleviation of Micro-pressure Waves from Tunnel Portals," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.220, No.5, pp.921-940.
- [9] 2001, Kwon, H.B., *A study on the unsteady compressible*

- Flow Field induced by a high-speed train passing through a tunnel. Ph.D. dissertation, Seoul National University.*
- [10] 2003, Kwon, H.B., Kim, T.Y., Lee, D.H. and Kim, M.S., "Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel," *Proceedings of the IMECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.217, pp.111-124.
- [11] 2005, International Union of Railways, UIC code 779-11 2nd edition: Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
- [12] 2002, International Union of Railways, UIC code 660 2nd edition: Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains.
- [13] 1999, Office for Research and Experiments of the International Union of Railways, Report C 218/RP1: Base-line Comfort Criteria - A "Base-line" pressure comfort criterion for unsealed and sealed train operation in tunnels.
- [14] 2012, Korea railroad research institute, final report of study for railway construction competitiveness achievement (aerodynamics part).
- [15] 2009, Arup, Route Engineering Study Final Report: A report for HS2, Retrieved September 9, 2015, from railways archive : http://www.railwaysarchive.co.uk/documents/HS2_RouteEngineeringStudyAppendices_2010.pdf.