

고속철도 터널내 압력과 측정과 공기압 해석모델에 대한 기초연구

김효규^{1*} · 최판규² · 홍유정³ · 유지오⁴

¹정회원, ㈜주성지앤비 대표이사

²정회원, ㈜주성지앤비 CFD 사업부 팀장

³비회원, ㈜주성지앤비 부설연구소 연구원

⁴정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

A comparative study of field measurements of the pressure wave with analytical aerodynamic model for the high speed train in tunnels

Hyo-Gyu Kim^{1*}, Pan-Gyu Choi², Yoo-Jung Hong³, Ji-Oh Yoo⁴

¹CEO, JS G&B Inc.

²Team Manager, Div. of CFD Engineering, JS G&B Inc.

³Junior Researcher, Div. of R&D Center, JS G&B Inc.

⁴Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

ABSTRACT: The pressure wave formed by the piston effects of the train proceeds within the tunnel when a train enters the tunnel with a high speed. Depending on the condition of tunnel exit, the compression waves reflect at a open end, change to the expansion waves, transfer to tunnel entrance back. Due to interference in the pressure waves and running train, passengers experience severe pressure fluctuations. And these pressure waves result in energy loss, noise, vibration, as well as in the passengers' ears. In this study, we performed comparison between numerical analysis and field experiments about the characteristics of the pressure waves transport in tunnel that appears when the train enter a tunnel and the variation of pressure penetrating into the train staterooms according to blockage ratio of train. In addition, a comparative study was carried out with the ThermoTun program to examine the applicability of the compressible 1-D model(based on the Method of Characteristics). Furthermore examination for the adequacy of the governing equations analysis based on compressible 1-D numerical model by Baron was examined.

Keywords: High-speed train, Railway tunnel, Pressure wave, Field measurement, Aerodynamics model

초 록: 열차가 고속으로 터널내를 진입할 때 열차의 피스톤 작용에 의해 형성되는 압력파는 터널내를 진행하고, 출구에 도달한 압축파는 터널 출구면의 개구단 조건에 따라 팽창파로 터널입구로 다시 전파된다. 이에 따른 터널내 주행열차와의 간섭현상으로 인해 차량내 승객은 심한 압력변동을 느끼게 되며, 이러한 압력파는 열차의 설계와 운행에 영향을 미치고, 에너지 손실과 소음, 진동, 승객의 이명현상의 원인이 된다. 본 연구에서는 열차가 고속으로 터널내부를 진입시 나타나는 터널내 압력파의 전파특성과 열차의 기밀도에 따른 객실내로 침투하는 압력 변화량을 현장 실험내용과 비교분석을 수행하였다. 또한, 압축성 1-D 모델(MOC)의 적용 가능성을 살펴보기 위해 ThermoTun 프로그램과의 비교연구를 수행하였고, Baron의 압축성 1-D 수치모델에 기초한 지배방정식 해석의 적정성을 검토하기 위해 비교연구도 병행하였다.

주요어: 고속열차, 철도터널, 압력파, 현장실험, 공기역학모델

*Corresponding author: Hyo-Gyu Kim

E-mail: hgkim@gnbeng.com

Received April 17, 2015; Revised April 28, 2015;

Accepted April 30, 2015

1. 서론

고속으로 주행하는 열차의 속도 V 를 350 km/h로 가정할 경우, 열차의 마하수(M_t)는 약 0.29 정도이다. 일반적인 등엔트로피 과정(Isentropic process)에서 비열비(γ)를 1.4라고 가정할 경우, 마하수 0.32 이하 영역에서 유체의 밀도변화량이 5% 미만으로 충분히 비압축성 유동으로 해석할 수 있다(Anderson, 2011). 그러나, 이 경우 유체의 압축성은 거의 무시할 수 있지만, 고속으로 터널내를 주행하는 경우에는 열차의 피스톤 효과(Piston effect)에 의해 터널내 복잡한 파동현상이 발생하게 된다. 즉, 고속으로 열차가 터널내를 진입하는 경우 열차의 피스톤 작용이 열차 전방의 임의의 지점에서 정지공기를 압축하게 되고, 그 전방으로 압축파(Compression wave)가 형성된다. 이 압축파는 터널내를 음속에 가까운 속도로 전파하며 그 일부는 터널출구로 방출하여 충격성 소음(Impulsive noise)을 일으키게 된다. 한편 터널출구에 도달한 압축파의 일부는 터널 출구면의 개구단(Open-end) 조건에 의하여 팽창파(Expansion wave)로 터널입구를 향해 전파하게 되며 이때 진행하는 열차와 복잡한 간섭현상을 일으키게 된다. 이 경우 열차의 기밀이 완전하지 않으면 차량내 승객은 심한 압력변동을 느끼게 된다. 터널내 이러한 압력파는 열차의 설계와 운행에 영향을 미치고, 에너지 손실과 소음, 진동, 승객의 이명현상(Aural discomfort)의 원인이 된다. 두 대 이상의 열차가 동시에 터널을 이동할 때에는 이러한 문제가 더욱 심각해 질 수 있으며, 이러한 이명현상은 신규터널의 건설이나 기존터널의 최대 열차속도를 결정하는 중요한 요인 중 하나이다. 국제철도연합(International Union of Railways; UIC)의 현 지침에서는 최대 압력증가를 4초내 4 kPa 미만으로 권장하고 있다(UIC, 2005).

열차터널에서 압축성 비정상류 흐름에 대한 초기연구는 Tollmien (1927)에 의해 수행된 연구가 있으며, 당시 열차의 속도는 100 km/h에 불과하였다. Hara

(1960)는 압축성을 포함한 터널내 열차의 정상류 흐름에 대하여 연구하였고, Ozawa (1979) 및 Yamamoto (1983)는 열차의 속도와 터널내 차폐율(Blockage ratio)에 대한 영향에 대하여 특성화방정식(MOC)에 기초한 해석을 수행하였다. Howe (1998)는 열차의 속도와 차폐율에 의존한 압축파의 생성을 마하수와의 관계로 연구하였고, Sibilla 등(2001) 및 Baron 등(2006)은 1차원 준정상 수치해석 기법(Quasi 1-D Numerical Method)을 기반으로 다양한 파라메타 연구를 수행하였다. Vardy와 Brown (2002)은 관유동(Pipe flow)에서의 비선형 난류마찰항을 고려한 압축파의 전파특성을 자신들의 기존 MOC (Method of Characteristics) 코드에 추가한 확장연구 등을 수행하였고, Miyachi 등(2011)은 Hartunian의 열전달 모델(신칸센 현지실험과 잘 일치하는 모델)과 Vardy 등에 의한 난류의 정상 마찰항 및 비정상 마찰항의 선형결합 모델을 이용하여 1-D CFD (Computal Fluid Dynamics)의 기초방정식을 이론해석에 적합한 1변수 편미분방정식으로 변형한 모델을 개발하였다. Kaoua 등(2006)은 열차속도, 열차 전두부(Nose)형상, 궤도형상, 터널연장 및 환기구 위치 등에 관한 다양한 파라메타 연구를 수행하여 터널내 압력파의 전파특성 및 미기압특성에 관한 자료를 제시하였고, Palmero 등(2014)은 터널제원(고도변화, 터널 경사도와 열차속도, 터널연장 등)에 따른 터널내 압력변동을 연구하여 승객의 귀 건강기준으로 제시하고자 하였다. 국내 연구로는 오 등(2012)은 지하정거장내 압력과 거동 및 환기구 위치에 따른 압력과 변화를 연구하였고, 최 등(2013)은 200 km/h급 대심도 급행열차(GTX) 노선을 대상으로 열차속도 증가에 따른 차량 선두부의 형상을 변화시키면서 터널내 열차 내부압력 변화를 분석하여 터널내 압력변동 규정을 만족하는 차량의 전두부 형상과 기밀도 관계를 도출하고자 하였으며, 홍 등(2014)은 설계최고속도 200 km/h 주행조건에서 역사 간 가감속 주행패턴을 반영하여 터널 압력변동과 객실 압력변동을 예측하여 복선구간과 단선구간에서의 차

량의 기밀도 요구성능을 도출한 사례가 있다.

따라서 본 연구에서는 열차가 고속으로 터널내부를 진입시 나타나는 터널내 압력과의 전파특성과 열차의 기밀도에 따른 객실내로 침투하는 압력 변화량을 현장 실험내용과 비교분석을 수행하였다. Vardy의 특성 화방정식에 기초한 압축성 모델의 적용 가능성을 살펴보기 위해 ThermoTun 프로그램과의 비교연구를 수행하였고, Baron 등(2006)이 제시한 압축성 1-D 수치모델에 기초한 지배방정식 해석의 적정성을 검토하기 위해 비교연구도 병행하였다.

2. 터널내 공기역학 이론과 이명현상

2.1 지배방정식

열차의 주행운동(Moving motion)에 의한 터널내 비정상 유동장을 FVM (Finite Volume Method) 지배방정식으로 표현할 경우, 터널내 유동은 1차원 준정상류(Quasi 1-D) 압축성 유동으로 가정할 수 있고 터널내 공기역학을 지배하는 방정식은 다음의 식 (1)로 간결하게 표현할 수 있다(Baron 등, 2006).

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega(t)} \mathbf{w} d\Omega + \oint_{\Sigma(t)} \mathbf{f} d\Sigma = \int_{\Omega(t)} \mathbf{s} d\Omega \quad (1)$$

여기서, $\Omega(t)$ 유효체적, $\Sigma(t)$ 유효체적에 대한 제어면적(Surface) 이다. 위의 지배방정식에서 \mathbf{w} 는 보존물성치, \mathbf{f} 는 유한체적면의 플럭스(Flux) 그리고 \mathbf{s} 는 소스항을 나타내는 벡터이며, 식 (2)와 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ E^t \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (E^t + p)u + k \frac{\partial T}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{A} \left[p \frac{\partial A}{\partial x} - C_{f_t} \frac{1}{2} \rho u |u| P_g - C_{f_g} \frac{1}{2} \rho (u - V_t) |u - V_t| P_t \right] \\ \frac{1}{A} \left[-p V_t \frac{\partial A_t}{\partial x} - C_{f_t} \frac{1}{2} \rho (u - V_t) |u - V_t| P_t V_t \right] + \dot{Q} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 공기밀도[kg/m³], u 는 터널내 공기속도 [m/s], V_t 는 열차속도[m/s], $E^t (= \rho e + \frac{1}{2} \rho u^2)$ 는 토탈 에너지[J/m³], e 는 내부에너지[J/kg], p 는 공기압력 [Pa], T 는 공기온도[K], k 는 열전도도[W/(m·K)], P_g 는 터널접수길이[m], P_t 는 열차접수길이[m], A 는 터널유효단면적[m²], A_t 는 열차단면적[m²], C_{f_g} 는 터널 표면 마찰계수, C_{f_t} 는 열차표면 마찰계수, \dot{Q} 는 단위체 적당 열발생율[W/m³] 이다.

열역학적 상태방정식(Perfect gas EOS (Equation Of State))으로부터 압력(p)과 내부에너지(e)는 식 (4)와 식 (5)의 관계가 성립하고, 오일러 방정식에 적합한 Tammann EOS를 적용하면 음속(α)은 식 (6)의 관계가 성립된다.

$$p = \rho R T \quad (4)$$

$$e = C_v T \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho} (p + p_c)} \quad (6)$$

여기서 R 은 기체상수[J/(kg·K)], C_v 는 정적비열 [J/kg·K], γ 는 공기의 비열비(=1.4), p_c 는 압력상수 (Pressure constant)를 의미한다.

2.2 이명현상

이명(Aural discomfort) 현상이란 고속열차의 터널내 주행시, 엘리베이터내 수직 이동시, 비행기의 이착륙시 등의 기압변동에 의해 생기는 “귀가 멍해지는 불쾌감”의 총칭으로 이명감, 귀의 통증 등의 여러가지 용어로 표현되기도 한다. 일반적으로 사람의 외이(外

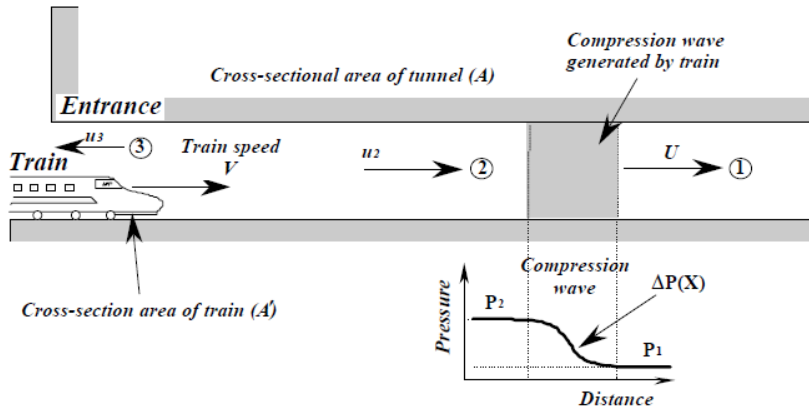


Fig. 1. One-dimensional flow model of compression wave

耳)와 중이(中耳)의 압력차가 커지면 불쾌감을 느끼는 것으로 알려져 있다. 열차가 터널을 통과하는 동안 승객이 느끼는 이명감은 객차 내부의 압력변동으로 인해 유발되며 이것은 터널 내부의 압력변동이 차량의 틈새를 통해 객차내부로 전달되면서 발생하게 된다. 열차가 고속으로 터널에 진입할 때 터널 내부의 공기는 순간적으로 압축되어 압력파가 발생하며, 압력파는 압축파(Compression wave)의 형태로 음속으로 터널 출구로 진행하여 일부는 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파(Expansion wave)의 형태로 반사되어 터널내부로 전파된다. Fig. 1은 열차가 고속으로 터널에 진입할 때의 압축파 발생을 표현한 것이다.

이러한 압력파는 열차가 터널을 통과하는 동안 반복적으로 발생하여 터널내부로 전파되며 터널 내부압력의 급격한 변화를 유발시켜 객차내 승객에게 이명 현상을 일으키게 된다. 이러한 터널에서의 압력변동은 열차의 주행속도, 열차의 선두부 형상, 열차/터널의 단면적 비율, 터널 입출구의 형상, 터널내부의 단면적 변화 및 열차의 교행여부 등에 따라 영향을 받는다.

2.3 열차의 기밀도와 등가누기면적

앞서 기술한 이명현상을 최소화 하기 위해서는 열차의 기밀도를 개선할 필요가 있다. 객차내부의 압력 변동은 열차자체의 성능과 밀접한 관련이 있으며 열

차의 기밀이 우수한 경우에는 터널의 압력변동이 열차내부까지 전달되는 데 상당한 시간이 소요되므로 승객이 느끼는 이명현상은 매우 미미하지만, 기밀이 떨어지는 경우에는 터널의 압력변동이 직접적으로 승객에게 전달되어 이명현상을 유발시킨다. UIC 779-11에서는 차량의 기밀도(τ_{dyn})를 다음과 같이 식 (7)로 정의하고 있다. 이러한 열차의 기밀도는 항상 양의 값을 나타내며, 비기밀열차(Unsealed train)의 τ_{dyn} 는 0이고 완전 기밀열차(Sealed train)의 τ_{dyn} 는 ∞ 이다.

$$\tau_{dyn} = - \frac{\Delta p(t)}{dp_{int}/dt} \quad (7)$$

여기서, $\Delta p(t)$ 는 t 시간에서의 압력변화(= $p_{ext} - p_{int}$), p_{ext} 는 열차 외부압력(= $p_{ext}(t)$), p_{int} 는 열차 내부압력(= $p_{int}(t)$)이다.

또한 열차객실내부의 등가누기면적(S_{eq} ; Equivalent leak surface)은 터널과 열차내부의 압력차에 의한 누기면적으로 정의할 수 있으며, 신형 열차의 내부를 공기로 가압한 후 압력강하 시간을 측정하여 식 (8)과 같이 등가누기면적을 산출할 수 있다. KTX 열차의 객실내부 밀폐도를 게이지 압력 3,000 Pa에서 100 Pa 까지 강하하는데 걸리는 시간이 40초로 제작사양

이 명시되어 있으므로 식 (8)에 대입하여 계산해 보면 등가누기면적 값은 $S_{eq} = 18.34 \text{ cm}^2$ 이다.

$$S_{eq} = \frac{V}{\gamma P_{atm} t} \sqrt{2\rho} [\sqrt{\Delta P(0)} - \sqrt{\Delta P(t)}] \quad (8)$$

여기서, V 는 열차내부 체적[m³] 이고, γ 는 비열비, P_{atm} 는 대기압[Pa], t 는 초기압력 $\Delta P(0)$ 에서 내부압력 $\Delta P(t)$ 까지 경과한 시간[sec]이고, $\Delta P(0)$ 와 $\Delta P(t)$ 는 게이지 압력[Pa]을 의미한다.

3. 현장실험 및 수치해석 비교

3.1 현장실험 측정개요

현장실험은 경부고속철도 열차(KTX)를 대상으로 수행하였으며, 객차내부의 압력은 열차의 선두, 중간 및 후미 객차에서 동시에 측정하였다. 경부고속철도의 열차 1편성은 총길이가 약 388 m로서 선두부와 후미부의 간격이 길어 측정개소를 3개소로 선정하였다. Fig. 2는 열차 1편성에서 객차내부 압력측정 시스템의 배치 개요도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 객차내부의 압력을 측정하기 위한 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. Fig. 4~6은 실험열차 및 측정장비를 나타내고 있다.



Fig. 4. Test train (KTX)



Fig. 5. Measurement system

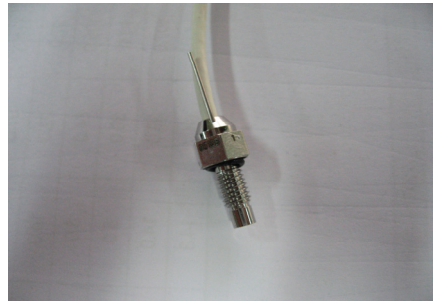


Fig. 6. Pressure transducer3

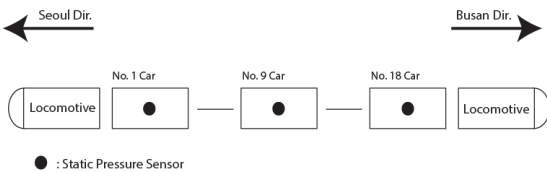


Fig. 2. Layout of pressure sensors in train

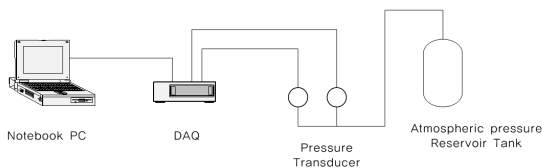


Fig. 3. Instrumental system in train

며, 압력측정에 사용된 기자재 현황은 Table 1과 같다.

3.2 대상터널 제원

대상터널은 경부고속철도 노선상의 5개 터널을 대상으로 열차의 주행속도별에 따른 차량내 압력변화를 측정하였으며, 화신5터널은 터널내 압력변동을 측정하였다. 대상터널의 주요 제원은 Table 2와 같고, 수치해석을 위한 주요 입력값은 Table 3과 같다.

Table 1. Status of pressure measurements in train

Type	Specifications	EA	Maker
Data logger system	· Notebook Computer - CPU : 2.0 GHz - Memory : 1.0 Gb	1	
	· DAQ(Data Acquisition) - 8 Module slot - Bridge : 24 Bit, 4 Ch, 50 kS/s/ch	1	NI Company
Pressure transducer	· Model NO : 8510B-1 - Range : 6 kPa - Sensitivity : 100 +55/-25 mV/psi	2	ENDEVCO Company
Atmospheric pressure reservoir tank	· Type : Cylindrical vertical model · material : Aluminium	1	

Table 2. Tunnel characteristics and train speed

Tunnel name	Length	Grade	Train speed	Direction	Remark
Seobong-1	1,349 m	+11‰ (1,279 m) -13‰ (70 m)	290 km/h	Busan	In train
Yongwa	1,760 m	+1‰	170 km/h	Seoul	In train
Unju	4,030 m	+8‰	296 km/h	Seoul	In train
Gunghyeon	930 m	+2‰	304 km/h	Seoul	In train
Hwasin-5	6,247 m	+24‰ (2,722 m) -6‰ (3,525 m)	261.6~283.3 km/h	Busan	In Tunnel

Table 3. Parameters in simulation

Type		Input values
Tunnel	Cross sectional area [m ²]	107.9
	Perimeter [m]	41.29
	Friction factor (f)	0.00625 ($\lambda = 0.025$)
	Etc	Patm: 101.325 Pa, Temp: 15°C, CFL: 1.0
Train (KTX)	Cross sectional area [m ²]	9.76
	Perimeter [m]	11.78
	Skin friction factor	0.003~0.01
	Head/Tail pressure loss	0~0.038
	Nose Shape factor	0.6
	Equivalent leak surface [cm ²]	18.34 ($\tau_{dyn} = 11$ sec)

3.3 객차내부 압력변동 측정결과

3.3.1 현장측정 결과

각 터널의 객차내부 압력변동 측정결과는 Fig. 7 ~ Fig. 10과 같다. 서봉1터널 경우는 선두부 열차에서 -305.2~+186.3 Pa, 후미부 열차에서 -746.1~+42.1

Pa 정도, 용와터널 경우는 선두부 열차에서 -335.9 ~+61.7 Pa, 후미부 열차에서 -195.7~+46.8 Pa 정도, 운주터널 경우는 선두부 열차에서 -700.0~+279.9 Pa, 후미부 열차에서 -589.4~+259.1 Pa 정도, 공현터널 경우는 선두부 열차에서 -386.7~+100.9 Pa, 후미부 열차에서 -2.7~+179.3 Pa 정도로 측정되었다.

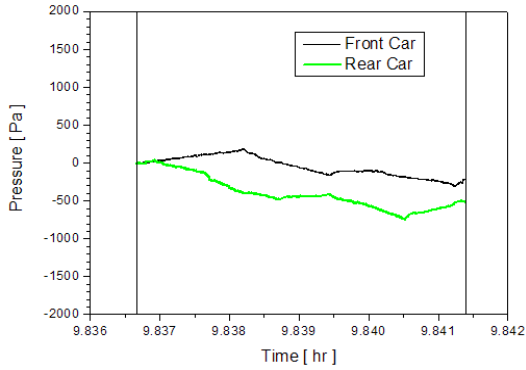


Fig. 7. Seobong-1 tunnel (Busan Dir.)

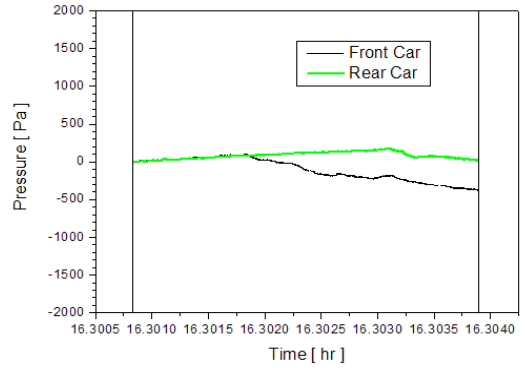


Fig. 10. Gunghyeon tunnel (Seoul Dir.)

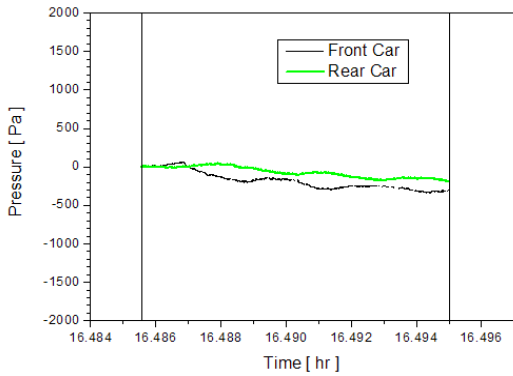


Fig. 8. Yongwa tunnel (Seoul Dir.)

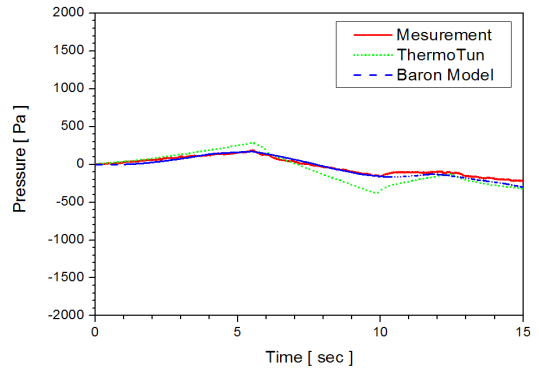


Fig. 11. Seobong-1 tunnel (Busan Dir.)

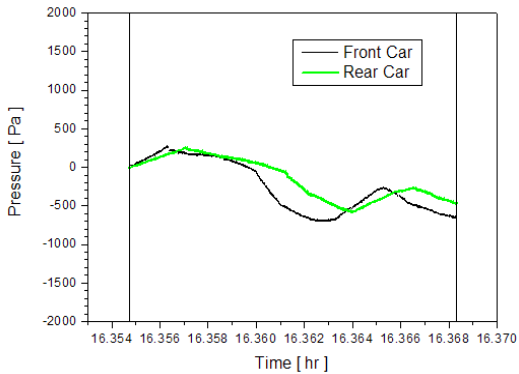


Fig. 9. Unju tunnel (Seoul Dir.)

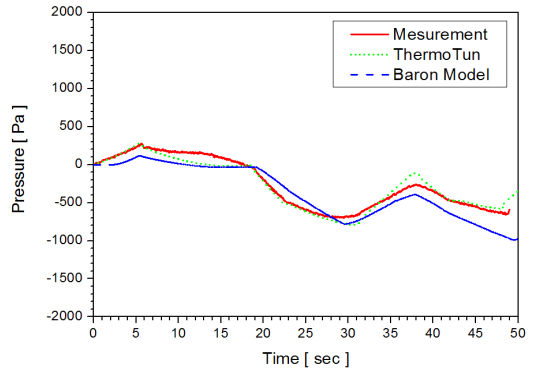


Fig. 12. Unju tunnel (Seoul Dir.)

3.3.2 수치해석 모델에 의한 비교분석

서봉1터널, 운주터널, 궁현터널의 압력변동에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 터널제원 및 열차속도

는 현장측정 조건과 동일하게 입력하였으며, 수치시뮬레이션 결과를 현장측정 결과와 비교분석하여 수치시뮬레이션 수행내용이 적정한지를 검증하였다. Fig.

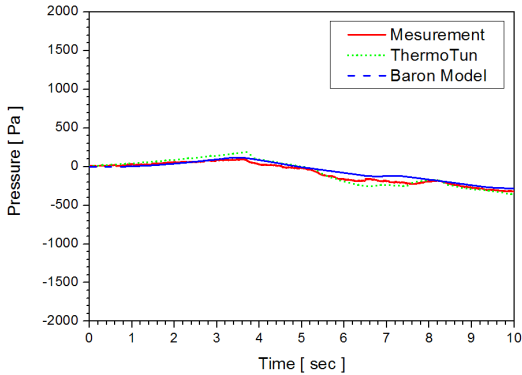


Fig. 13. Gunghyeon tunnel (Seoul Dir.)

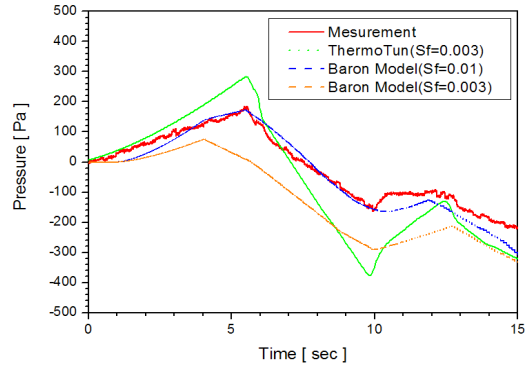


Fig. 14. Seobong-1 tunnel (detail comp.)

11~Fig. 13은 각 터널별로 현장측정 결과와 1-D 모델 간의 수치시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.

ThermoTun 프로그램에 의한 수치해석 결과를 현장측정 결과와 비교한 결과, 압력변동은 거의 동일한 경향을 나타내고 있으며 압력변동값도 거의 일치하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 서봉1터널은 다소 차이를 나타내었는데, 이는 출구부 경사도의 변화로 인한 초기 압력파가 터널 출구부에서 반사하는 4초를 전후하여 발생한 것으로 분석된다. 상세 분석(Fitting) 결과, 서봉1터널은 열차의 표면마찰계수(Skin factor)를 $Sf = 0.01$ 로 고려한 Baron의 수치해석법이 ThermoTun의 해석법보다는 현장측정치와 잘 일치하는 경향을 보였다. 따라서 이명현상과 관련된 열차내부의 압력 변동값은 열차의 기밀도(τ_{dym}) 외에 열차의 표면마찰 계수에 영향을 받는 것으로 분석되며, Sf 값이 작을수록 열차 내부압력값의 급격한 변화를 보이고 있다.

3.4 터널내부 압력변동 측정결과

Fig. 15~19와 같이 터널내부의 압력은 터널의 시점부와 종점부에서 터널내부로 100 m 안쪽 지점에서 동시에 측정하였다. 압력측정에 사용된 계측기의 사양은 Tabel 1과 같으며, 압력측정은 화신5터널을 대상으로 수행하였다. 열차가 운행되는 시간 동안에는 터널내에 출입이 통제되기 때문에 측정계측기는 열차가

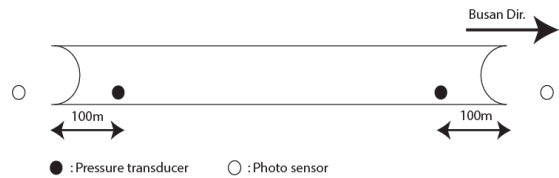


Fig. 15. Layout of pressure sensors in tunnel

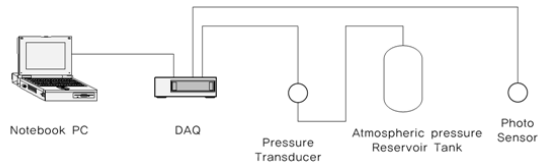


Fig. 16. Instrumental system in tunnel



Fig. 17. Measurement system

운행하지 않는 야간에 설치하였으며, 압력의 측정은 열차가 운행하는 동안 포토센서에 의한 원격조정에 의해서 수행하였다. 화신5터널은 콘크리트 도상으로



Fig. 18. Pressure transducer



Fig. 19. Patm reservoir tank

써 터널제원은 Table 2와 같고, 열차속도는 261.6~283.3 km/h 이다. 비교연구를 위해 수치해석시 사용한 시뮬레이션 입력값은 Table 3과 같다.

3.4.1 현장측정 결과

Fig. 20(a)~(e)는 화신터널에서 총5회 측정된 압력변동을 나타낸 것으로 측정위치는 전술한 바와 같이 입구부 100 m 지점(Entrance+100 m)과 출구부 100 m 지점(Exit-100 m)이다. 터널내 압력변동은 압력파에 의해서 급격한 압력증가를 보이고 있으며, 주행속도별 5회에 대한 현장 측정값과 Hara의 이론식(Hara, 2006)에 의한 계산값, ThermoTun에 의해서 해석된 압력파의 강도값을 나타내면 Fig. 20(f)와 같다.

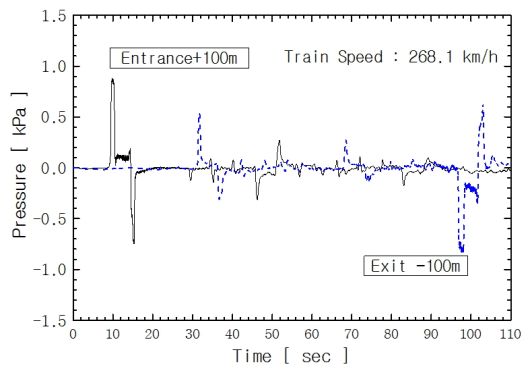
터널입구부 압력파의 강도는 현장측정값이 Hara의 이론식보다 평균 18.2% 정도, Baron 모델보다는 평균

8.7% 정도, ThermoTun 보다는 평균 2.6% (-4.4~4.6%) 정도 높게 나타나고 있다. 전체적으로 ThermoTun에 의한 해석결과가 측정결과와 잘 일치하는 것으로 평가된다. ThermoTun과 Baron 모델간의 평균 오차는 약 8.5% 정도이나 현장 측정값과의 오차가 10% 이내이므로 터널내 공기압 해석의 공학적 관점에서 적용성에는 비교적 문제는 없으나, Hara 이론식은 10% 이상의 오차를 나타내고 있어 국내 경부고속철도 터널과 같이 폐색율($\beta = A_t/A_r = 107.9/9.765 = 0.091$)이 작은 터널에서는 적용상에 신중한 검토가 필요해 보인다.

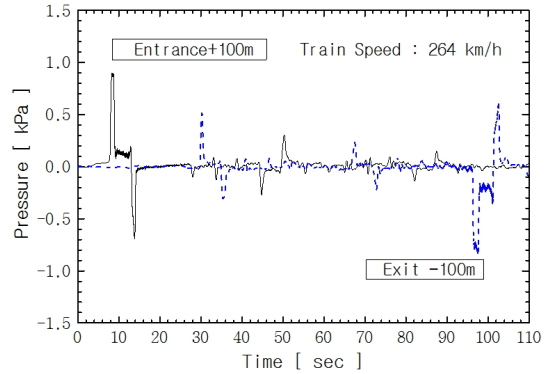
3.4.2 수치해석 모델에 의한 비교분석

Fig. 21은 1-D 모델의 적용성을 평가하기 위해서 주행속도가 264 km/h인 경우에 대해서 터널내부 압력변동에 대한 수치해석결과와 측정결과값을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 21(a)와 (b)는 각각 터널입구부 및 출구부에서 압력변동을 나타낸 것으로 수치해석결과는 터널내부의 압력변동을 비교적 잘 예측하는 것으로 평가된다. 압력과 측정 초기에는 ThermoTun의 예측값이 다소 높게 나타나나 시간이 지날수록 압력파의 전파감쇄가 실측값과 비교적 잘 일치하는 경향을 보인다. 반면 Baron 모델은 ThermoTun과 같은 파형골은 잘 일치하고 있으나 골의 피크값은 다소 높게 나타는 것으로 분석된다. 두 모델 모두 시간이 지날수록 실제 측정값과는 다소 골의 형성에 부분적인 압력변동의 불일치가 발생하는데, 이는 터널내 열차의 운행속도가 일정하지 않기 때문으로 판단된다. 또한 출구부에서 측정된 압력파의 크기가 해석결과보다 상당히 작게 나타나고 있는데, 이는 터널내 기재경이나 압력을 저감할 수 있는 부차물의 영향으로 인해서 실제터널에서는 압력저감이 발생하기 때문으로 판단된다.

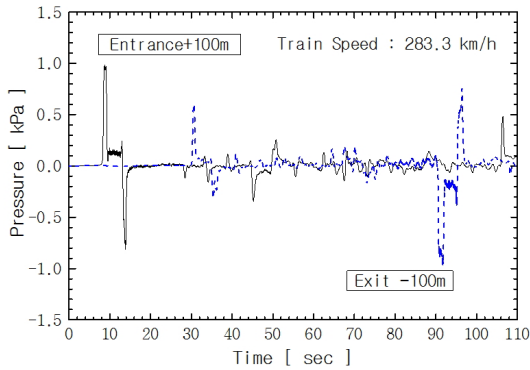
Fig. 22는 김 등(2006)에 수행된 현장측정값과 수치해석 모델에 압력해석 결과를 비교분석한 내용이다. 대상터널은 경부고속철도 노선상의 상봉2터널($L_r =$



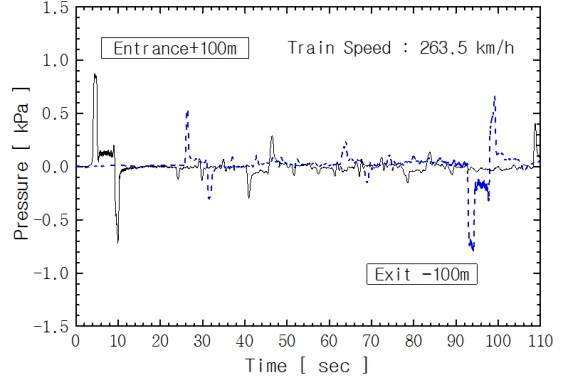
(a) 1st Measurement (V=268.1 km/h)



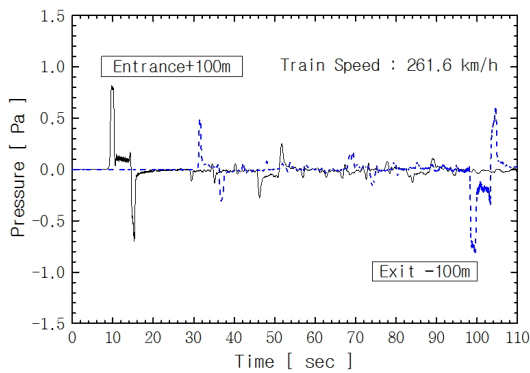
(b) 2nd Measurement (V=264.0 km/h)



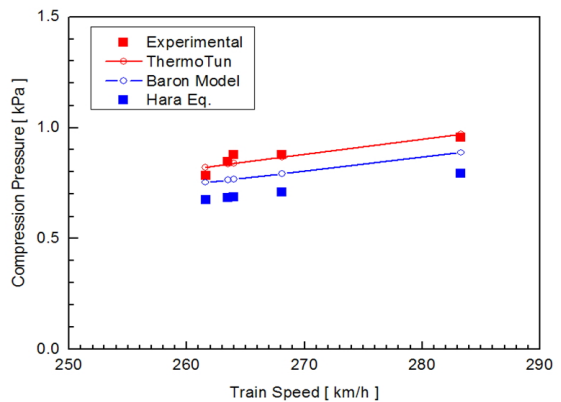
(c) 3th Measurement (V=283.3 km/h)



(d) 4th Measurement (V=263.5 km/h)



(e) 5th Measurement (V=261.6 km/h)



(f) Comparison of entry pressure rise

Fig. 20. Profiles of pressure wave for Hwasin-5 tunnel

720 m)이며, 열차 주행속도는 301 km/h 이다. 압력파의 측정위치는 620 m 지점이며, 기타 제원은 Table 3과 같다.

전술한 바와 같이 두 수치해석 모델 모두 터널내부의 압력변동을 비교적 잘 예측하는 것으로 평가된다. ThermoTun은 시간에 따른 압력파의 전파감쇄가 실

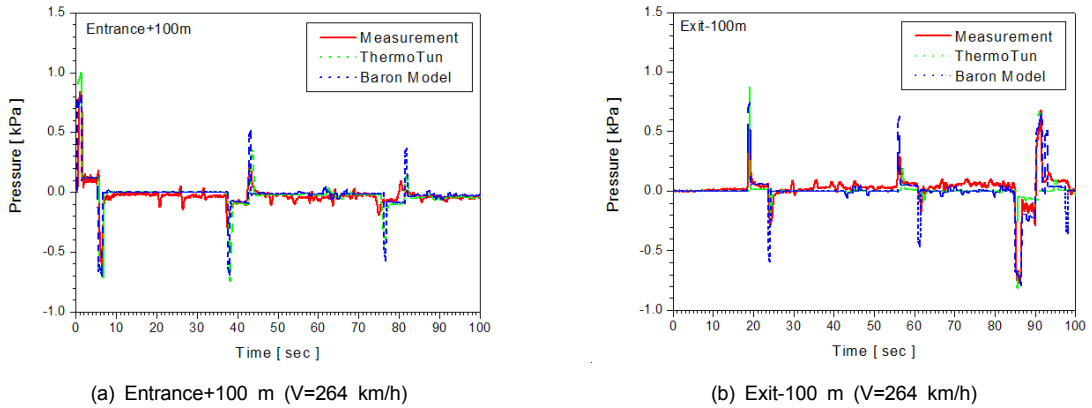


Fig. 21. Profiles of pressure wave for Hwasin-5 tunnel

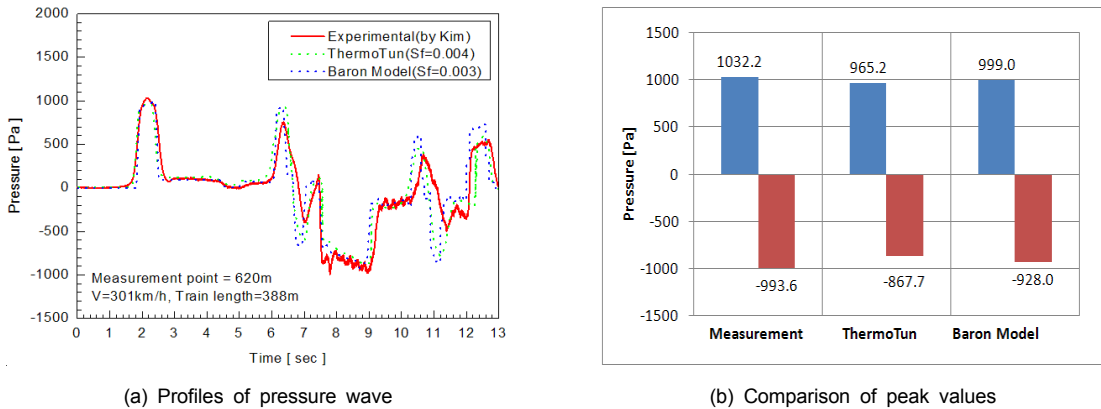


Fig. 22. Profiles of pressure wave for Sangbong-2 tunnel (Vt=301 km/h)

측값과 비교적 잘 일치하는 경향을 보이는 반면 Baron 모델은 ThermoTun의 해석결과와 비교할 때 골의 피크값은 다소 높게 나타는 것으로 분석된다. 그러나 실측값에 대한 최대, 최소값과 비교해 보면, ThermoTun은 평균 9.6%(최대값 6.5%, 최소값 12.7%), Baron 모델은 평균 4.9%(최대값 3.2%, 최소값 6.6%)의 오차를 보이고 있다.

이상의 공기압 해석모델 분석에서 특성화방정식(MOC)에 의한 분석방법(ThermoTun)이나 지배방정식에 기초한 1-D 수치해석적 방법(Baron Model) 모두 현장측정치와 비교적 잘 일치하는 것으로 분석된다. 따라서 3-D CFD가 아닌 1-D 모델로도 입력 파라메타가 적정할 경우, 터널제원 및 열차속도 등의 입력조건

을 변경하여 수행한 다양한 해석결과 및 계산결과도 충분히 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 터널내 공기압 변동에 따른 이명감 분석

KTX 차량(기밀도 11)을 대상으로 이명감 분석을 위해서, ThermoTun에 의한 터널단면적별(90.3, 95.1, 100.1, 107.9 m²) 터널연장별(200~8000 m), 열차의 주행속도별(300, 350 km/h), 열차의 운행특성별(단독, 교행)을 주요변수로 하여 3초간 최대 압력변동을 분석하였으며, Fig. 23에 해석결과를 나타내었다. 국내 이명감 기준은 3초간 최대 압력변동이 단독시 0.8

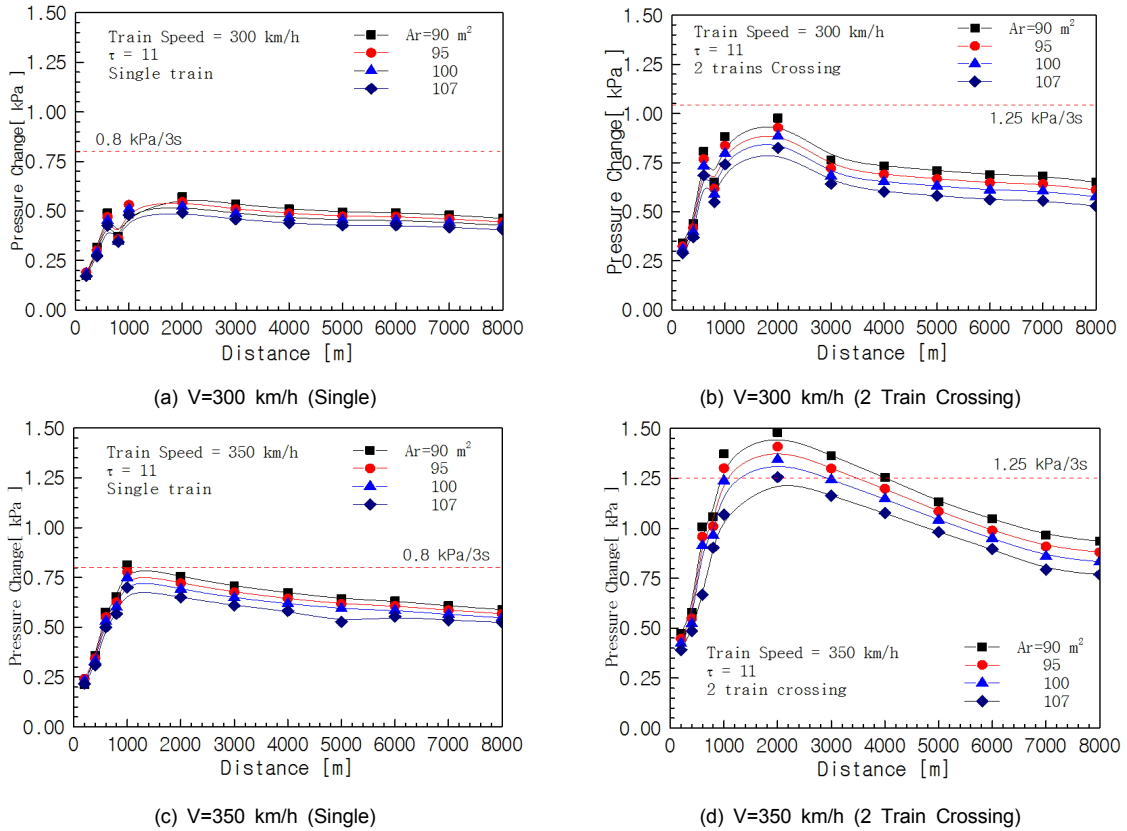


Fig. 23. Pressure changes by ThermoTun program

kPa, 교행시 1.25 kPa을 기준하고 있다.

Fig. 23(a)는 단독으로 300 km/h로 주행하는 경우, (b)는 교행으로 주행하는 경우 압력변동을 나타낸 것으로 압력변동의 최대치는 터널연장이 증가하면 급격하게 증가하여 2,000 m 범위에서 최대값을 보인 후에 8,000 m까지 서서히 감소하는 경향을 보인다. 또한 터널연장이 동일한 경우에 압력변동의 최대값은 단면적이 감소하면 증가하는 것으로 분석되며, 단독이나 교행시 기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Fig. 23(c)와 (d)는 350 km/h로 주행하는 경우에 압력변동의 최대값이며, 각각 단독주행하는 경우와 교행하는 경우이다. 터널연장이 1,000~2,000 m 범위에서 최대 압력변동이 발생하고 있으며, 터널연장이 2,000 m 이상에서는 연장이 증가할수록 최대압력 변동값은 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대압력 변동값은 단

독시에는 단면적이 90 m²인 경우에는 허용기준을 초과하고 있으며, 교행시에는 107 m²를 제외한 단면에서 연장 1,000~3,000 m 범위에서 이명감에 대한 허용기준을 초과하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 KTX (300 km/h) 열차가 터널에서 단독주행 혹은 교행하는 조건에서도 검토범위의 모든 단면적에 대해서 이명감 허용기준을 만족하는 것으로 분석되며, 같은 기밀도를 가진 열차를 350 km/h로 주행시 연장 1,000~3,000 m 범위에서 단독주행에서는 단면적 90 m² 이하, 교행시 단면적 107 m² 이하에서 기준을 만족하지 못하므로 열차속도가 300 km/h 이상 운행할 경우는 압력저감을 위한 방법장구(예를들어 단면 확대, 후드 및 환기구 설치 등)나 열차자체의 기밀도를 상향할 필요가 있는 것으로 분석된다.

5. 결론

고속주행인 KTX 차량을 대상으로 터널내 압력변동에 대한 공기압 영향을 현장측정 자료와 비교분석을 수행하였다. 또한 현장측정값과 특성화방정식(MOC) 모델인 ThermoTun 프로그램 및 Baron의 수치해석적 접근법에 따른 1-D 압축성 수치해석모델을 통한 비교검증을 수행하였다. 이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 고속주행 열차의 터널진입과 동시에 터널내 압력파가 형성된다. 이때 형성된 압축파는 음속도로 터널내부를 전파해 가게 되고 터널 출구부에 도달한 압력파는 일부는 터널 외부로 방출되고, 일부는 팽창파 형태로 다시 되돌아 오게 된다. 이때, 터널내 주행열차와 마주한 압력파는 복잡한 간섭을 일으키며 터널내 압력파의 변형을 가져온다.
2. 경부고속철도 노선상의 터널내을 대상으로 압력파의 현장측정한 결과, 터널내 압력변동은 $-746.1 \sim 279.9$ Pa 정도로 분석되었다. 1-D 수치해석 모델에 의한 비교분석결과, 이명현상과 관련된 열차내부의 압력변동값은 열차의 기밀도(τ_{dyn}) 외에 열차의 표면마찰계수(Skin factor)에 영향을 받는 것으로 분석되며 이 값이 작을수록 열차 내부압력값의 급격한 변화를 보이는 것으로 분석되었다.
3. 화신5터널($L_r = 6.247$ km)을 대상으로 열차의 주행속도별($261.6 \sim 283.3$ km/h) 터널입구부의 압력파 강도를 분석한 결과, 입출구부 100 m 지점에서 측정된 압력변동값은 각각 1.0 kPa 이내로 나타나며, 터널입구부에서 생성된 압력파의 강도값은 현장측정값이 Hara의 이론식보다 평균 18.2% 정도, Baron 모델보다는 평균 8.7% 정도, ThermoTun 프로그램보다는 평균 2.6%($-4.4 \sim 4.6\%$) 정도 높게 나타났다.
4. ThermoTun 프로그램과 Baron 모델간의 평균 오차는 약 8.5% 정도이나 현장 측정값과의 오차가 10% 이내이므로 터널내 공기압 해석의 공학적

관점에서 적용성에는 비교적 문제는 없으나, Hara 이론식은 10% 이상의 오차를 나타내고 있어 국내 경부고속철도 터널과 같이 폐색율($\beta = A_t/A_r = 107.9/9.765=0.091$)이 작은 터널에서는 적용상에 신중한 검토가 필요해 보인다.

5. 연장별, 단면적별, 주행방식별 3초간 최대 압력변동을 검토한 결과, 300 km/h 급 KTX-1 열차($\tau=11$)에 대해서는 단면적 90 m² 이상인 터널에서 이명감 기준을 만족하나, 350 km/h 급 KTX-2 ($\tau=11$) 열차 연장 1,000~3,000 m 범위에서 기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되어 열차의 고속주행을 위해서는 터널내 압력변동을 낮출 수 있는 방법에 대한 연구가 필요해 보인다.
6. 터널내 압력파는 주행중인 열차의 차체기밀도에 따라 열차내외부의 압력차이로 인한 누기현상이 발생되며, 이때 누기된 압력의 영향에 의해 승객들은 귀울림 현상인 이명현상에 노출하게 된다. UIC 기준(4초간 4 kPa 이내)이나 국내 기준(단독시 800 Pa/3s, 교행시 1.25 kPa/3s) 그리고 의학적 한계값인 10 kPa을 넘지 않는 범위에서 열차속도를 제한하거나 터널 단면적을 증대하거나 압력파 크기를 줄이기 위한 후드 혹은 환기구 등이 건설이 필요하게 된다. 따라서 경제적인 터널건설을 위해서는 사전 공기압을 해석할 수 있는 모델의 개발이 필요하며, 현재 개발된 1-D 모델에 기초한 수치해석 방법이 현장측정값과 10% 이내의 오차를 나타내고 있어 향후 이에 대한 개선 및 보완연구가 필요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(13SCIP-B066321-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

References

1. Anderson (2011), *Fundamentals of aerodynamics*, 5th Edition, McGraw-Hill, pp. 572-575.
2. Baron, A., Molteni, P., Viegevano, L. (2006), "High-speed trains: Prediction of micro-pressure wave radiation from tunnel portals", *Journal of Sound and Vibration*, No. 296, pp. 59-72.
3. Choi, J.K., Jeong, S.M., Kim, K.H. (2013), "Pressure change inside the train according to an increase in speed of the train travelling in tunnels", *Conference of THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY*, KSR2013A130.
4. Hara, T. (1960), "Aerodynamic problems when train is running into tunnel with large velocity", *Railway Technical Research Report(In Japanese)*, No. 153(12), pp. 1-20.
5. Hong, S.W., Yun, S.H., Cho, T.H., Kwon H.B. (2014), "Study on the required Air-tightness performance of passenger train operated in the a line of GTX network", *Conference of THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY*, KSR2014A387.
6. Howe, M.S. (1998), "Mach number dependence of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", *Journal of Sound and Vibration*, No. 212(1), pp. 23-36.
7. International Union of Railways (2005), "Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations", *International Union of Railways (UIC)*, 2nd edition, pp. 11-16.
8. Kaoua, J.N., Pope, C.W., Henson, D.A. (2006), "A parametric study into the factors affecting the development and alleviation of micro-pressure waves in railway tunnels", *12th AVVT*, pp. 789-804.
9. Miyachi, T., Ozawa, S., Fukuda, T., Iida, M., Arai, T. (2011), "A new simple equation governing distortion of compression wave propagating through shinkansen tunnel with slab tracks", *Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 79, No. 785, pp. 60-73.
10. Oh, H.J., Shin, D.Y., Lee, S.G., Kim, D.H. (2012), "Numerical study of pressure wave in underground station with vent shaft position", *Conference of THE KOREAN OF COMPUTATIONAL FLUIDS ENGINEERING*, No. 11, pp. 306-313
11. Ozawa, S. (1979), "Studies of micro-pressure wave radiated from a tunnel exit", *Railway Technical Research Report(In Japanese)*, No. 1121(7), pp. 1-92.
12. Palmero, N.M., Vardy, A. (2014), "Tunnel gradients and aural health criterion for train passengers, proceedings of the institution of mechanical engineers part F-journal of rail and rapid transit", No. 228(7), pp. 821-832.
13. Sibilla, S., Baron, A., Mossi, M. (2001), "The alleviation of the aerodynamics drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 89, pp. 365-401.
14. Tollmien, W. (1927), "Der luftwiderstand und druckverlauf bei der fahrt von zugen in einem tunnel", *VDI-Zeitschrift* Vol. 71, pp. 199-203.
15. Vardy, A., Brown, J. (2002), "An overview of wave propagation in tunnels", *TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation*, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 79, pp. 249-266.
16. Yamamoto, A. (1983), "Aerodynamics of train and tunnel", *Railway Technical Research Report (In Japanese)*, No. 1230(3), pp. 1-70.