

고속열차의 터널 진입시 수직갱의 압력저감효과에 대한 수치해석 연구

김효근¹ · 서상연^{2*} · 하희상³ · 권혁빈⁴

¹비회원, GS건설, 전임연구원

²정회원, GS건설, 선임연구원

³정회원, GS건설, 수석연구원

⁴비회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

A numerical study on the pressure relief by a vertical shaft in a high speed railway tunnel

Hyo-Geun Kim¹, Sang-Yeon Seo^{2*}, Hee-Sang Ha³, Hyeok-Bin Kwon⁴

¹GS E&C, Associated Research Engineer

²GS E&C, Research Engineer

³GS E&C, Principal Research Engineer

⁴Korean National University of Transportation, Professor

ABSTRACT: High speed railway can transport large quantity of people and commodities in a short time and has become one of the most desirable and environmentally friendly transportation. However, it is hard to have a complicated route for high speed railways, construction of tunnels is essential to pass through a mountain area. When a high speed train enters a tunnel, pressure wave is created in a tunnel and the wave causes micro pressure wave and discomfort to passengers. In order to alleviate pressure wave in a tunnel, constructing a vertical shaft is one of the most efficient ways. This study represents a numerical analysis module, which takes into account the effect of a vertical shaft in a tunnel. The module can be used in a numerical program (TTMA) specialized for aerodynamics in a tunnel, and it was validated by comparing numerical results with various measurements in Emmequerung tunnel and results from numerical analysis using Fluent.

Keywords: High speed railway tunnel, Vertical shaft, Pressure wave, CFD, Pressure alleviation

초 록: 고속철도는 대규모의 인원과 물자를 신속하게 운반할 수 있는 친환경 운송수단으로 각광받고 있다. 고속철도는 빠른 속도로 인해 선형이 제한되어 건설되므로 산이 많은 지형에서는 터널이 많아진다. 고속으로 주행중인 열차가 터널에 진입하는 경우에 터널 내부에서 압력파가 발생하는데 이로 인해 이명감과 미기압파라는 문제가 발생한다. 터널 내의 압력파를 완화시키기 위한 다양한 방법 중 수직갱을 이용한 방법도 연구되고 있는데 이 연구에서는 TTMA라는 고속철도 터널 공기역학 해석프로그램을 이용하여 수직갱에 의한 수치해석모듈을 개발하였다. 이를 검증하기 위해 실험결과와 비교하여 그 성능을 검증하였으며 기존의 수치해석결과와 비교하여 그 우수성을 검증하였다.

주요어: 고속철도터널, 수직갱, 압력파, 전산유체해석(CFD), 압력완화

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화와 같은 환경문제가 급증

하면서 운송수단도 큰 변화가 생겼다. 세계 각국에서는 화석연료를 최대한 적게 사용하면서도 많은 인원과 물자를 신속하게 운송할 수 있는 수단으로 고속철도를 계획하고 있다.

고속철도 선진국인 유럽과 일본을 비롯하여 지금은 미국 그리고 중국에서도 고속철도에 대한 연구와 건

*Corresponding author: Sang-Yeon Seo

E-mail: syseo01@gconst.co.kr

Received ** **, 2013; Revised ** **, 2013;

Accepted ** **, 2013

설을 구체적으로 계획하고 있으며 한국과 같이 이미 시공하고 있는 국가도 많다. 일반적으로 열차의 고속 주행은 최적화된 열차형상이 요구되며 관련 인프라도 뒷받침되어야 한다. 또한 고속열차는 빠른 속도로 인해 선형이 제한되므로 가능한 직선으로 건설해야 한다. 따라서 일반적으로 고속철도 구간은 다른 저속열차보다 교량과 터널이 많게 된다.

각국에서 개발하는 고속열차는 그 모양이 모두 제각각이지만 선두부가 유선형이라는 점이 공통점이다. 그 이유는 유선형의 선두부 형상이 고속주행시 공기저항을 최대한 감소시킬 수 있기 때문이다. 하지만 공기저항계수를 고려하여 최적으로 설계된 고속열차라 하여도 주행 중의 열차주변에는 공기압력의 분포가 매우 복잡하게 형성된다. 특히 열차가 개활지가 아닌 터널을 통과하는 경우에는 터널 내부의 협소한 공간으로 인하여 압력분포는 더욱 복잡한 양상을 띄게 된다(Fox et al., 1973, Vardy et al., 1979).

터널에 진입하는 고속열차로 인해 발생하는 압력변화는 여러 가지 문제점을 야기하며 그 중에서 이명감과 미기압파가 대표적이다. 이명감은 열차 외부의 압력변화를 열차 내부의 승객의 귀에서 느껴지는 현상을 말하며, 미기압파는 고속열차의 터널진입시 터널 출구에서 발생하는 압력파를 뜻한다. 이명감은 열차의 기밀도를 높여 외부의 압력변화를 저감하도록 차량을 설계하면 해결할 수 있다. 그러나 미기압파는 열차형상과 터널의 다양한 요소가 깊이 관련되어 있어서 쉽게 해결할 수 없다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔는데, 실험을 통해 터널 내외부의 압력변화 양상에 대한 연구(Fukuda et al., 2010)와 함께 수치해석을 이용한 터널 압력변화해석(Maeda et al., 1993)이 대표적인 연구이다. 특히, Kwon et al. (2009)은 실측 결과를 반영한 수치모형 연구를 통해 더 정교한 결과를 도출하였다. 이러한 여러 가지 연구 결과에서 공통적으로 나타나는 사실은, 열차와 함께 고속으로 움직이는 공기가 터널 내부의 공기를 강하게 압축하면서

큰 압력파를 발생시킨다는 것이다. 터널 내부에서 발생한 압력파는 터널 출구를 향해 음속으로 전파되며, 출구에 도달하면 터널 외부의 정지한 공기와 부딪히면서 다시 터널 안으로 반사된다. 이때 압력파의 일부가 터널 밖으로 방사되면서 저주파의 형태로 넓게 퍼지는데 이를 미기압파(Micro-Pressure Wave)라고 한다. 터널 안으로 반사된 압력파는 고속열차에 의해 형성된 또 다른 압력파와 중첩되면서 터널 내부에서 복잡한 압력변화를 일으킨다.

이러한 압력변화를 감소시키기 위해 열차의 선두부 형상을 변경하거나(Kikuchi et al., 2011) 터널 입출구 형상을 변화시키는 등(Winslow et al., 2005) 여러 가지 방안이 제시되었다. 이 연구에서는 수직갱을 이용한 압력파 감소 효과를 수치적으로 해석하고 터널 내부의 압력변화 및 속도 측정결과와 비교하여 신뢰성이 높은 수치해석 방법을 제안하고자 한다.

2. 수치해석 방법

이 연구에서는 열차의 터널 진입시 터널 내 압력분포를 해석할 수 있는 열차-터널 공기역학 시뮬레이션 프로그램(TTMA)(Kwon et al., 2001)에 수직갱에 의한 압력저감효과를 계산할 수 있는 모듈을 개발하여 수치해석 범위를 확대하였다. 또한 개발된 프로그램을 이용한 수치해석 결과를 실측결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

2.1 TTMA 수치해석 기법

TTMA는 2차원 축대칭에 기반한 고속철도 터널 공기역학 해석프로그램으로 1차원과 3차원 해석의 장점만을 활용한 프로그램이다. 즉, TTMA는 1차원 해석보다 더 구체적인 경계조건(열차형상, 터널 단면)을 입력하여 보다 정확한 결과를 도출할 수 있다. 또한 긴 해석시간이 필요한 3차원 해석에 비해 매우 빠른 속도로 계산이 가능한 2차원 해석을 통해 격자생

성시간과 해석시간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 2차원 해석으로부터 축대칭을 이용하여 3차원 회전체의 해석결과를 도출할 수 있으므로 TTMA는 2.5차원을 가진다고 말할 수 있다(Kwon et al., 2001).

앞서 기술한 바와 같이 TTMA는 2차원 축대칭 프로그램으로 식 (1)과 같이 무차원 축대칭 압축성 Navier-Stoke's equation을 기반으로 작성되었다. 여기서 터널의 환산직경(Hydraulic Diameter) D와 자유 기류(Free stream)의 밀도와 압력을 이용하여 각 물리량을 무차원화하였다.

$$\begin{aligned} \partial_t Q + \partial_x F + \partial_y G + H &= \frac{1}{Re_c} (\partial_x E_\nu + \partial_y F_\nu + H_\nu) \\ Q &= [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T \\ E &= [\rho u, \rho u^2, \rho uv, (\rho e + p)u]^T \\ E_\nu &= [0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, e_{\nu 4}]^T \\ F &= [\rho v, \rho vu, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T \\ F_\nu &= [0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, f_{\nu 4}]^T \\ H &= \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2 (\rho e + p)v]^T \\ H_\nu &= \frac{1}{y} [0, h_{\nu 2}, h_{\nu 3}, h_{\nu 4}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Q 는 보존량 벡터, E 와 F 는 Flux 벡터, H 는 축대칭 해석을 위한 소스항을 의미하며, F_ν , E_ν 는 점성 Flux 벡터, H_ν 는 축대칭 점성 소스항을 나타낸다. 무차원화된 방정식에서 대류항의 Flux는 Roe의 FDS를 이용하였으며, 공간정확도 향상을 위해 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL기법(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)을 활용하였다. 또한 시간적분법은 AF-ADI (Approximate Factorization-Alternate Direction Implicit)(Kwon et al., 2001)를 사용하였다.

2.2 경계조건

TTMA에서 터널과 기차의 벽면에 이용된 경계조

건은 Slip Boundary Condition을 적용하였다. 즉, 터널 벽면의 공기 유동 속도는 열차의 상대적 운동을 통해 얻을 수 있고, 벽면의 압력은 벽면에 수직인 운동량 방정식을 이용하여 계산할 수 있다. 터널 입출구의 외부유동을 계산하기 위해서는 외부공기의 자유흐름 조건과 터널 입출구의 유동방향이 필요하다. 이 2가지 조건을 Riemann 외삽법에 적용하여 터널 입출구 외부공기의 속도, 압력, 밀도를 각각 계산할 수 있다. 터널에서 발생하는 압력파가 수치해석 모형 최외곽 경계에 부딪힌 후 반사되는 것을 막기 위해 해석영역의 최외곽 영역에는 무반사 조건을 적용하였다(Kwon et al., 2001).

2.3 초기조건

터널 내외부에서 발생하는 공기압력 변동은 차량 진행방향에 비대칭이며 주기성이 없으므로 계산영역을 단순화하거나 생략하기 어렵다. 또한 열차를 서서히 가속시키면 수치계산의 오류를 막을 수 있으나, 계산영역과 해석시간이 증가한다. 계산영역과 해석시간을 줄이기 위해 처음부터 열차를 최고속도로 설정하면 인위적인 충격파(Arti-fact)로 인한 오류가 발생하므로 열차의 터널 진입시 속도를 신중하게 고려해야 한다.

이러한 오류를 최소화하기 위해서 열차를 정지상태에서 서서히 가속시켜야 하며, 해석시간을 줄이기 위해서는 해석결과에 정밀도가 허용되는 범위 내에서 격자수를 최대한 줄여야 한다. 이 연구에서는 열차를 서서히 가속시키는 방법으로 열차 가속도를 시간에 따른 함수로 적용하였으며, 여러가지 속도함수 중에서 수치적인 오류가 가장 작은 것을 선정하였다. 이를 식 (2)에 나타내었다(Kwon et al., 2001).

$$V(t) = \frac{a}{20} t^5 - \frac{at_1}{8} t^4 + \frac{at_1^2}{12} t^3 \quad \text{with} \quad a = 120 \frac{V_t}{t_1^5} \quad (2)$$

을 정해야 한다. 즉 수직갱의 지름은 식 (3)과 같으므로

$$D = \sqrt{\frac{A_{shaft}}{4\pi}} \quad (3)$$

폭 Δx 에 해당하는 길이는 식 (4)와 같다.

$$\Delta x = \frac{D^2}{8R} \quad (4)$$

여기서, D 는 수직갱의 지름, A_{shaft} 는 수직갱의 면적, R 은 터널의 반지름을 나타낸다.

3.3 수직갱 수치해석기법

수직갱 수치해석에서 터널과 수직갱의 물리량은 서로 적절하게 전달되어야 한다. 그러므로 터널과 수직갱이 서로 만나지 않는 부분은 벽(Wall) 경계조건으로 설정되어야 하고, 서로 접하는 부분에서는 밀도, 압력, 운동량과 같은 물리량이 서로 전달되어야 한다. Fig. 1에서 터널(Zone1) 내부의 물리량을 $Q^{(1)}$ 으로, 수직갱(Zone2)의 물리량을 $Q^{(2)}$ 로 표현하면 식 (5)를 이용하여 각 Zone의 물리량 전달을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & [Q_1^{(1)}, Q_2^{(1)}, Q_3^{(1)}, Q_4^{(1)}]^T = \\ & [Q_1^{(2)}, 0, Q_2^{(2)}, Q_4^{(2)}]^T, \text{ where Zone1} \\ & [Q_1^{(2)}, Q_2^{(2)}, Q_3^{(2)}, Q_4^{(2)}]^T = \\ & [Q_1^{(1)}, Q_3^{(1)}, 0, Q_4^{(1)}]^T, \text{ where Zone2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, Q_1 은 밀도를, Q_2, Q_3 는 각각 x, y 방향의 운동량을, 그리고 Q_4 는 온도를 의미한다.

4. 해석결과와 분석

4.1 해석조건

2004년 Vardy는 스위스의 SBB2000 고속철도선 중 Emmequerung 터널(Fig. 2)의 공기 속도와 압력을 측정(Vardy et al., 2006)하였다. 또한, 이를 상용 유체 해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 고속열차가 수직갱이 있는 터널에 진입할 때의 공기 유동을 해석한 사례도 있다(Wu et al., 2008, Shin et al., 2011). 이 연구에서는 수직갱 격자와 해석모듈을 적용한 TTMA를 Emmequerung 터널모형에 적용하였다. 그리고 해석 결과를 Emmequerung 터널의 실측결과 및 다른



Fig. 2. Airshaft in Emmequerung tunnel

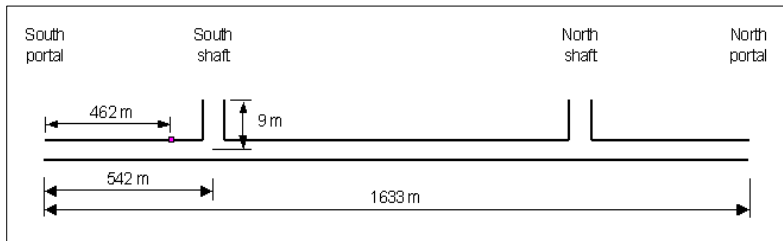


Fig. 3. Schematic diagram of tunnel

전산수치 프로그램 해석 결과와 서로 비교 검토하였다.

Fig. 3과 같이 Emmequerung 터널은 남북방향으로 단면적 75.9 m^2 , 길이 $1,633 \text{ m}$ 이며 터널 내부는 콘크리



Fig. 4. ETR 470 train



Fig. 5. Measurement enclosure on top of shaft

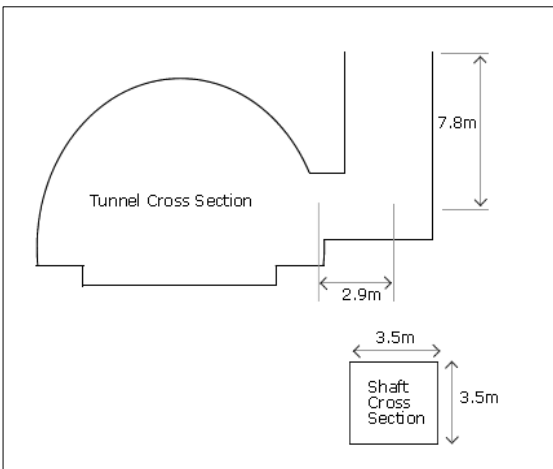


Fig. 6. Tunnel cross section at airshaft

트 라이닝으로 시공되었다. 열차는 Alstom의 ETR 470 모델로(Fig. 4) 유선형 선두부를 가진 길이 236.5 m 의 열차이다. 정확한 단면적이 공개되어 있지 않아서 이 연구에서는 열차단면적을 10 m^2 으로 가정하였으며 TTMA 모델링시 실제 열차속도를 198.5 km/h 로 설정하였다.

Emmequerung 터널의 수직갱은 9 m 높이의 구조물로 터널과 지상을 연결한다. 하지만 Fig. 5와 같이 지상 구조물의 높이가 1.25 m 이므로 수직갱의 실제 높이는 약 7.8 m 이다. 수직갱은 터널의 천정과 직접 연결된 것이 아니라 Fig. 6과 같이 터널 벽면에서 2.9 m 떨어진 지점에서 서로 연결되어 있다. 수직갱의 단면은 한 변의 길이가 3.5 m 인 정사각형이다.

4.2 해석영역 및 격자

TTMA의 모델링영역은 Fig. 7과 같이 총 8개의 Zone으로 이루어져 있다. Zone1은 열차주변, Zone2는 터널의 내부영역, Zone3, 4는 터널 입출구의 외부영역을 나타낸다. Zone5, 7은 수직갱을 나타내며, Zone6, 8은 수직갱과 연결된 외부영역이다. 특히 Zone5, 6은 남쪽 수직갱, Zone7, 8은 북쪽 수직갱을 나타낸다. 이 연구에서는 수직갱이 없는 경우, 1개만 있는 경우, 2개 모두 있는 경우의 3가지 조건에 대하여 모델링을 수행하였다.

Zone1에서 선두부 주변의 상세한 격자는 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 선두부 주변의 격자는 H-Type 으로 격자 크기가 균일하게 분포되어 있으며, 열차 선두부에는 복잡한 유동을 정확하게 해석하기 위해 조밀하게 형성되었다. Fig. 9와 10은 수직갱과 외부 영역의 격자를 나타내고 있다. 터널의 압력파가 수직갱으로 어떻게 전달되는지 정확히 계산하기 위해서 터널에 가까운 수직갱 격자일수록 조밀하게 만들었다. 수직갱과 연결된 외부 영역은 정방형의 일정한 크기를 가지는 격자를 형성하였다.

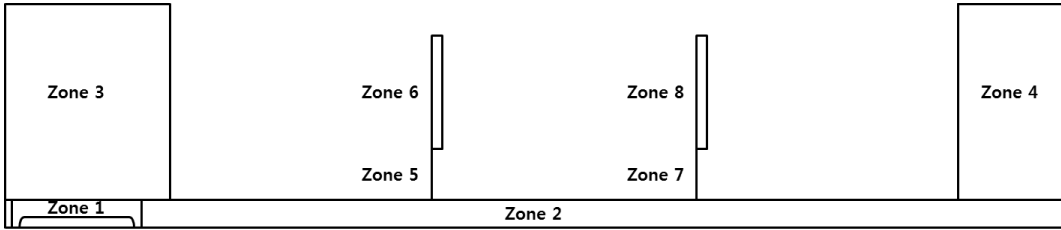


Fig. 7. Computational domain divided by zones

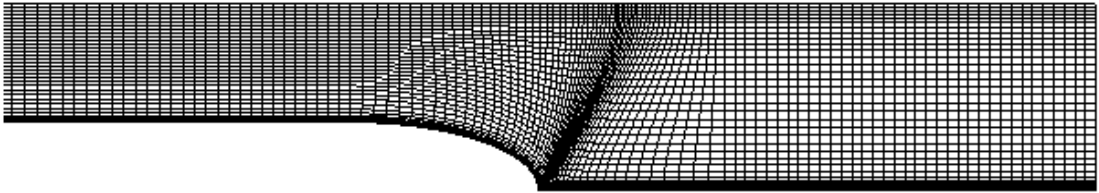


Fig. 8. Grid around train nose (zone1)

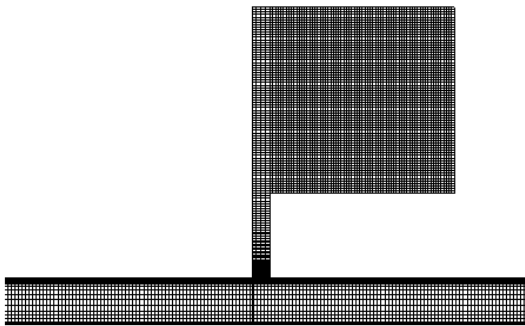


Fig. 9. Grid around air shaft

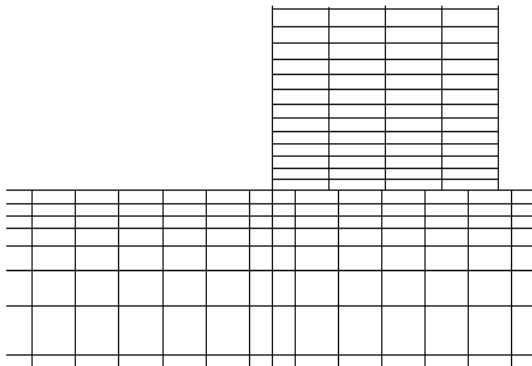


Fig. 10. Grid around air shaft (detailed view)

4.3 해석결과

Fig. 11, 12, 13은 각각 수직갱이 없는 경우, 1개인 경우, 2개인 경우에 대한 x-t 선도로 터널 거리에 따른 시간의 압력변화선도이다. Fig. 11에서는 열차 선두의 압축파와 선미의 팽창파가 명확히 표현되어 있으며 터널 입출구와 부딪혀서 반사되는 형상도 나타나 있다. 하지만 수직갱이 있는 터널의 경우 압축파와 팽창파가 수직갱과 만나면 압력파의 일부가 반사되어 서로 중첩되거나 상쇄되기 때문에 터널 내 압력이 복잡

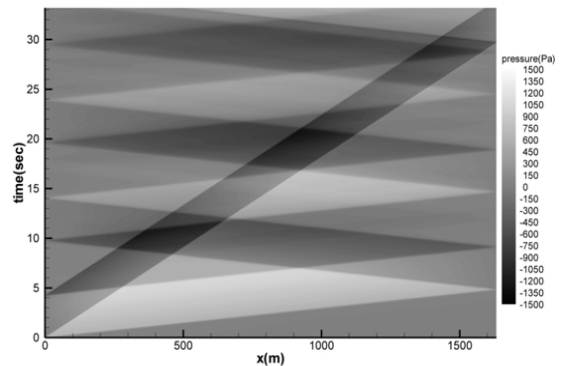


Fig. 11. Tunnel wall x-t diagram (no shaft)

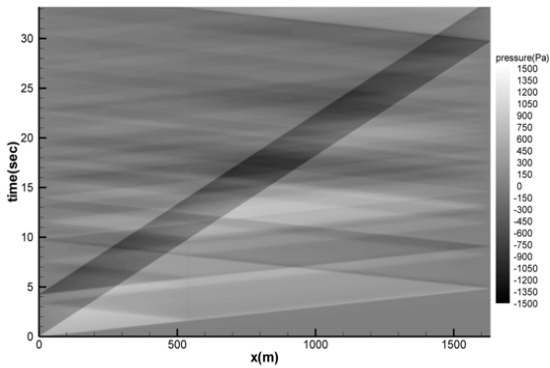


Fig. 12. Tunnel wall x-t diagram (one shaft)

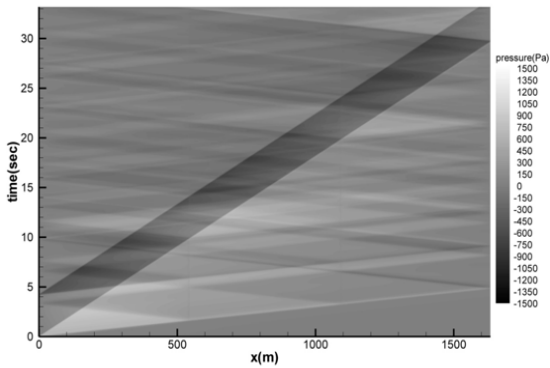


Fig. 13. Tunnel wall x-t diagram (two shaft)

하게 형성된다(Fig. 12, 13). 또한 수직갱 개수가 증가할수록 터널 내 압력은 더 복잡하게 형성된다(Fig. 12, 13). 수직갱이 있는 경우, 압력파의 크기가 완화되거나 수직갱의 개수가 증가하더라도 수직갱의 개수에 비례하여 압력파가 저감되지 않는다.

두 개의 수직갱으로 인한 압력분포는 Fig. 14, 15, 16에 나타난 바와 같다. Fig. 14는 터널 출구를 향해 진행되는 압력과 선도가 첫 번째 수직갱을 지나는 순간의 압력분포를 나타내며, 수직갱에 의해 압력파 선도의 크기가 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 수직갱 부근의 압력은 증가하였는데 이는 터널 Zone과 수직갱 Zone 간의 물리량이 정확하게 전달되었기 때문이다. Fig. 15는 압력과 선도가 첫 번째 수직갱을 지나간 뒤의 압력분포를 나타내며 압력파의 크기가 감소한 것을 알 수 있다. 또한 수직갱과 부딪힌 압력파에 의해 반대방향으로 팽창파가 발생하여 터널 입구방향을 향하여 전파된다. 이렇게 전파된 압력파는 기존의 압력파와 교차하면서 복잡한 압력분포가 형성된다. 이러한 이유로 인하여 터널에 수직갱이 설치되면 x-t 선도가 복잡하게 나타난다. Fig. 16은 압력파 선도가 두 번째 수직갱에 부딪힐 때의 압력분포를 나타내며,

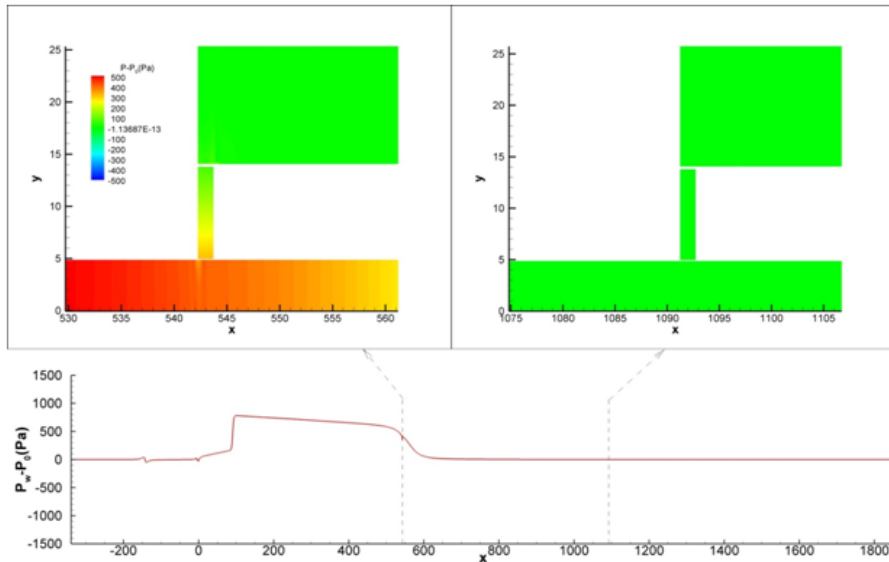


Fig. 14. Pressure distribution on tunnel wall and air shaft (t=1.67sec)

터널 입구방향으로 진행하는 또 다른 팽창파를 볼 수 있다.

Emmequerung 터널 입구에서 462 m 떨어진 지점의 압력파를 Fig. 17과 같이 나타내었다. 수직갱이 없는 경우 압력은 최대 1,042 Pa에서 최소 -1,159 Pa로 압력차가 2,183 Pa이지만, 수직갱이 있는 경우 압력은

최고 697 Pa(2개인 경우는 654 Pa)에서 최소 -481 Pa(2개인 경우는 -492 Pa)로 최고압력은 35%, 최저압력은 60% 감소하였다. 즉 수직갱의 유무에 의해 터널 내 압력파의 세기는 큰 폭으로 완화된다는 것을 정량적으로 알 수 있다. 하지만 수직갱의 개수에 비례하여 압력파의 크기가 감소하지는 않는다. 즉, 최고 압력은

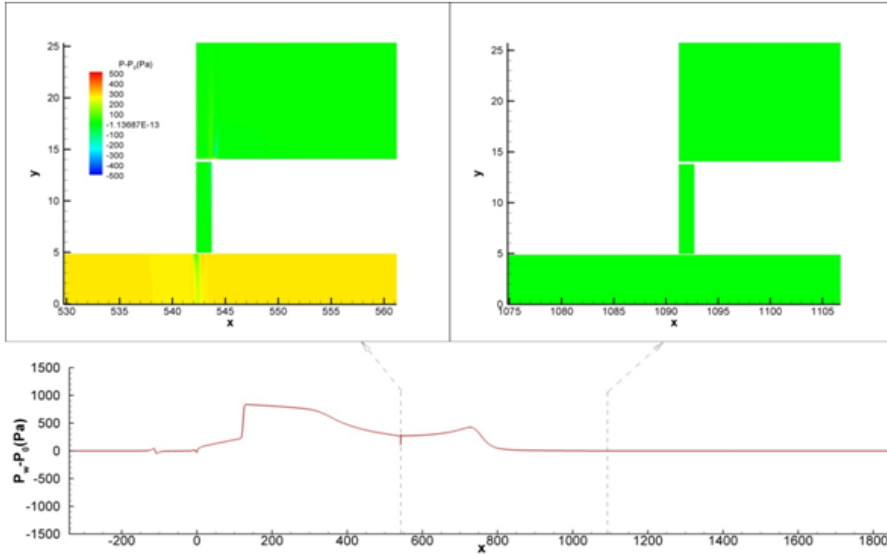


Fig. 15. Pressure distribution on tunnel wall and air shaft (t=2.25sec)

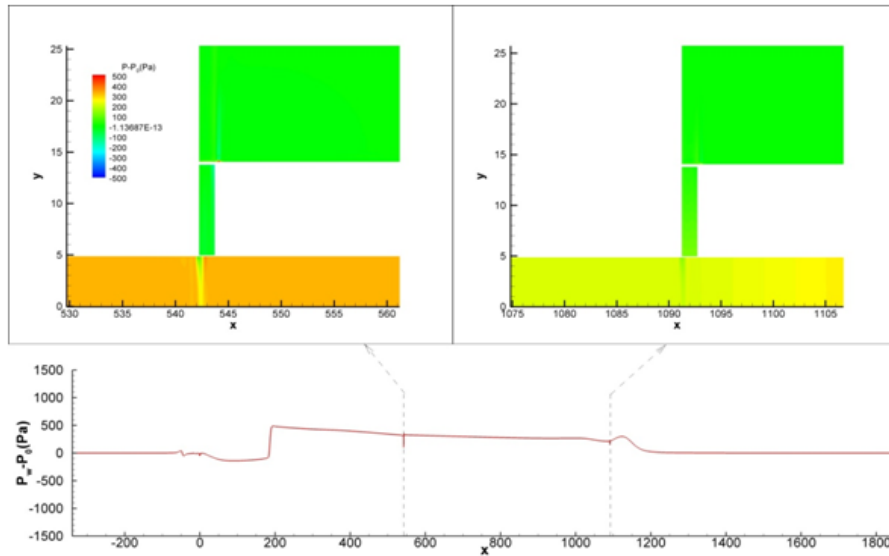


Fig. 16. Pressure distribution on tunnel wall and air shaft (t=3.40sec)

43 Pa 감소했으나 최소 압력은 오히려 11 Pa 더 증가된 결과를 나타낸다. 이는 첫 번째 수직갱에 의해 감소된 압력과 대비 최고압력은 6% 감소, 최저압력은 2% 증가한 결과이다. 위에서도 언급하였듯이 수직갱의 유무는 터널 내 압력파의 세기에 영향을 미친다.

Wu와 Shin등의 Fluent와 그 경계조건(Table. 1)을

이용한 수치해석결과(Wu et al., 2008, Shin et al., 2011)를 TTMA 해석결과와 비교하였다(Fig. 18). 각각의 해석결과는 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있으나 8초에서 12초 사이에서는 실측과 다른 결과를 보이고 있다. 하지만 TTMA는 다른 2개의 수치결과보다 실측과 유사한 값을 나타내고 있는데, 이는 열차가

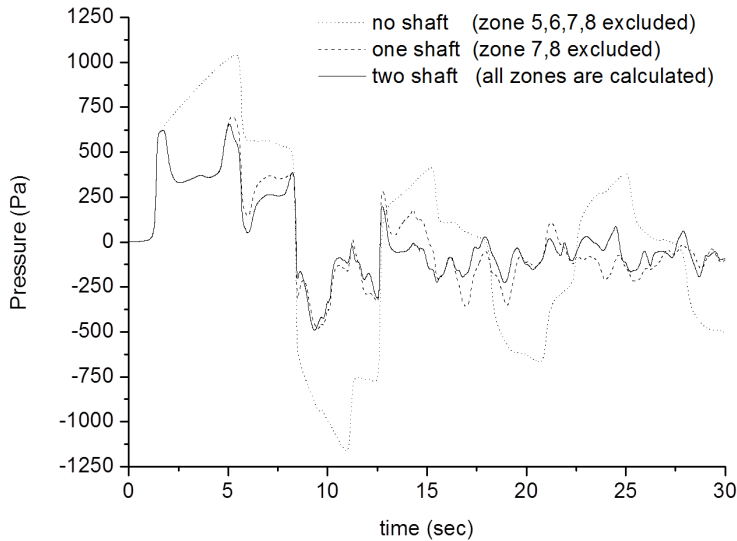


Fig. 17. Pressure variation in tunnel with and without air shaft

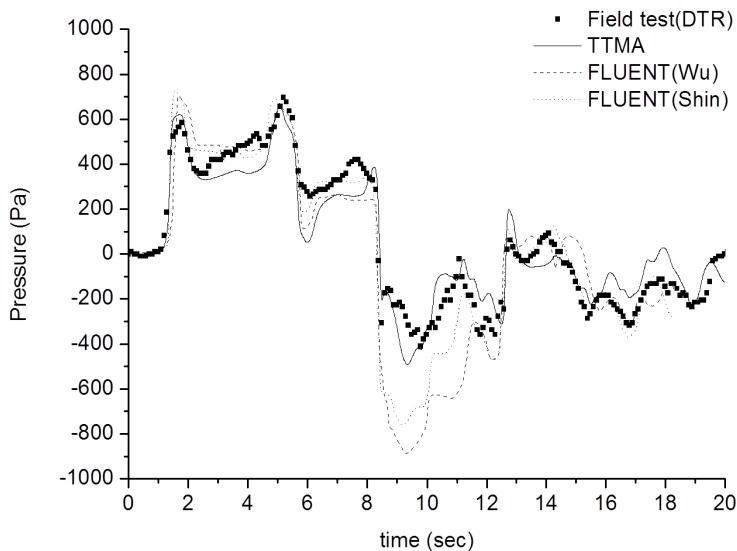


Fig. 18. Pressure variation in tunnel with air shaft

Table 1. Fluent Solver condition

| | |
|------------------|--|
| Solver Condition | - 2D Axisymmetric model - Density Based Solver: 2nd order FDS Scheme, Courant Number = 10 - Inviscid flow & Ideal gas - Sliding mesh with dynamic mesh layering |
| Calculation | - time step = 0.002sec - total run time = 20sec |

이 지점을 지나는 순간에 TTMA가 Fluent보다 정확한 결과를 도출할 수 있기 때문이다. 이러한 원인은 공기의 점성효과에 의한 영향으로, Yoon등에 따르면 고속열차의 유동과 압력 해석시 공기의 점성효과를 무시할 수 있다고 가정하였으나(Yoon et al., 2001), 이 연구에서는 고속열차가 수직갱을 지나는 순간의 압력변화를 정확히 해석하기 위해서는 공기의 점성을 고려해야 함을 보여주고 있다. 즉, TTMA는 공기가 점성 유체인 점을 그대로 반영하기 때문에 TTMA가 Fluent에 비해 실측과 유사한 결과를 도출할 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 수직갱이 있는 터널에 고속열차 진입시 발생하는 압력변화를 모델링하여 수치적으로 해석할 수 있는 모듈을 개발하였다. 이 모듈은 축대칭 수직갱 격자와 이를 이용한 수치해석기법으로 구성되며, 좌표계를 터널 격자와 열차 격자로 분리한 후 각 격자의 물리량을 상호교환하게 하여 안정적이고 빠르게 해석을 수행할 수 있다.

TTMA와 수직갱 모듈을 스위스 Emmequerung 터널에 적용한 결과, 수직갱을 포함한 터널이 그렇지 않은 터널보다 최대압력이 약 60%까지 완화되었으나 두 번째 수직갱에 의한 압력과 감소효과는 6%에 그치고 있다. 즉, 수직갱의 개수와 터널압력 감소는 서로 비례하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 수직갱의 개수보다는 수직갱의 유무가 터널압력 저감에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

상용 유체해석 프로그램인 Fluent를 이용한 수직갱

터널 공압해석결과를 TTMA의 해석결과와 비교한 결과 전체적인 터널 내 압력분포는 유사하나 기차가 수직갱을 통과할 때는 수치해석결과가 서로 다르게 나타났다. 또한 기존연구에서 공기를 비점성 유체로 가정한 해석결과가 실측과 서로 상이한 결과를 나타낸 반면, TTMA는 공기의 점성을 그대로 반영하여 기존의 Fluent 해석결과보다 실측에 더 가까운 결과를 도출하였다.

참고문헌

1. Fox, J.A., Vardy, A.E. (1973), "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.
2. Fukuda, T., Saito, H., Miyachi, T., Kikuchi, K., Iida, M. (2010), "Model experiments on the tunnel compression wave using an axisymmetric and Three-dimensional train model", Proc. of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, Oct. 18-22, 2010, pp. 397-404.
3. Kikuchi, K., Iida M., Fukuda, T. (2011) "Optimization of train nose shape for reducing Micro-pressure wave radiated from tunnel exit", Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol 30, No. 1, pp. 1-19.
4. Kwon, H.B., (2001), "A study on the unsteady compressible flow field induced by a High-speed train passing through a tunnel", Ph.D Dissertation Seoul National University.
5. Kwon, H.B., Nam, S.W., Kwak, J.H. (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*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-71.
6. Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K., Uchida, K. (1993), “Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel”, *International Conference on speedup technology for railway and maglev vehicles*, Yokohama, Japan, Nov. 22-26, 1993, pp. 315-319.
 7. Shin, D.Y., Lee, H.J., Oh, H.J., Kim, H.G., Nam, S.W., Kim, C.J. (2011), “3D analysis on propagation of pressure wave generated by High-speed train traveling in a tunnel using CFD”, *Proceeding of Korean Society for Computational Fluids Engineering*, pp. 320-325.
 8. Vardy, A.E., Dayman, B. (1979), “Alleviation of tunnel entry pressure transient : 2. Theoretical modeling and experiment correlation”, *Proc. of 3rd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (ISAVVT)*, H2. pp. 363-376.
 9. Vardy, A., Hagenah, B. (2006) “Full-scale flow measurements in a tunnel air shaft”, *Proc. 12th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Portoroz, Slovenia, 11-13, Jul, BHR Group, pp. 343-357.
 10. Winslow, A., Howe, M.S., Iida, M. (2005), “Influence of a scarfed portal on the compression wave generated by a High-speed train entering a tunnel”, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 24, No. 4, pp. 203-217.
 11. Wu, K.H. (2008), “Aerodynamic aspects of high-speed railway underground station with adjoining tunnels”, *Ph.D Dissertation HKUST*.
 12. Yoon, T.S., Lee, S., Hwang, J.H., Lee, D.H. (2001) “Prediction and validation on the sonic boom by a high-speed train entering a tunnel”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 247, Issue 2, pp. 195-211.