

터널을 통과하는 고속철도차량에 의해 형성되는 비정상 유동장의 수치해석

Numerical Simulation of the Unsteady Flow Field Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel

권혁빈¹, 이동호², 김문상³

Hyeok-Bin Kwon, Dong-Ho Lee, Moon-Sang Kim

Keywords : High-Speed Train(고속열차), Pressure wave(압력파), Train-Tunnel Interaction(열차-터널 상호작용), Zonal method (다중영역기법), Hybrid-dimensional Approach(혼합차원기법)

Abstract

In this study, the unsteady flow field induced by a high-speed train passing through a tunnel is numerically simulated by using an axi-symmetric Euler Equation. The modified patched grid scheme applied to a structured grid system was used to handle the relative motion of a train. The hybrid-dimensional approach which mixed 1D and axi-symmetric dimension was used to reduce the computation time and memory storage. By employing the hybrid-dimensional approach, a long tunnel as much as 5 km was able to be simulated efficiently.

The results show that the maximum pressure rise in the tunnel by the entrance of the train is a function of both train speed and train-tunnel cross-sectional area ratio. The unsteady pressure fluctuation in the tunnel and around the train was also investigated in the real condition; Korean high-speed train on the Seoul-Pusan line.

1. 서론

철도차량이 고속으로 터널을 통과하게 되면 공기의 압축성효과로 인해 압축파가 발생하며 터널 내부와 차량 주위에 복잡한 비정상 압축성 유동장을 형성하게 된다. 이로 인하여 터널 내부와 열차주위의 공기압력이 급격하게 변화하여 차량 내 승객에게 청각적 불편감을 주게 되며,

압축파가 출구에 도달하면서 터널 외부로 미기압파가 방사되어 출구 주변에서 환경공해를 야기시키는 충격성 소음을 발생시킨다.

이처럼 복잡한 물리적 현상을 수반하는 터널 내 열차 진입으로 인한 비정상 유동장을 연구하기 위하여 이동호 등[1]은 네덜란드 항공우주연구소(NLR)의 비정상시험기를 임대하여 실험적으로 연구를 수행한 바 있고, 최근 국내에서는 G7 고속전철기술개발 사업의 일환으로 서울대학교와 철도기술연구원에 공기압축방식을 이용한 비정상시험장치를 설치하여 열차-터널간의 공기역

*1 정희원, 서울대학교 항공우주공학과 대학원

*2 정희원, 서울대학교 기계항공공학부, 교수

*3 항공대학교 항공우주 및 기계공학부, 조교수

학적 상호작용의 기본적인 메카니즘을 연구하였으며, 열차 속도 및 차량 길이 등에 따른 많은 실험 데이터를 축적하였다[2, 3].

한편 급속도로 발전하는 하드웨어의 개발과 더불어 꾸준히 개발된 전산유체역학(CFD)의 기법은 실험적으로 어려움이 따르는 열차-터널 상호작용의 수치적인 유동장의 해석을 가능하게 하였다. 김희동[4, 5]은 Method of Characteristic을 이용하여 1차원 수치해석을 수행하였고, 김인선 등[6]은 3차원 형상에 대한 열차의 터널진입 문제를 정상 해석의 결과를 이용하여 근사적으로 해석하였다. Maeda 등[12]은 축대칭 Euler 방정식을, Ogawa 등[9]은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 각각 이용하여 열차의 터널진입을 수치적으로 모사하여 기초적인 유동장의 물리적인 이해에 도달하였으며, 황재호 등[7]은 비정상 정렬격자계를 이용하여 열차의 터널진입 및 터널 내 교행을 비정상 3차원 Euler 방정식을 사용하여 해석하였으며, 이를 통해 교행 시 대행차량에 의해 나타나는 비정상 공기역학적 하중의 생성 메카니즘을 규명하였다.

본 연구에서는 한국형 고속전철의 경부선 터널 진,출입 문제를 수치적으로 해석하였으며, 이를 위해서 권혁빈[8]이 제안한 혼합차원기법(Hybrid-dimensional approach)을 이용한 축대칭 해석코드(TTMA)를 개발하였다. 혼합차원기법은 계산 시간 및 전산 장비의 기억 용량 문제로 1차원적으로만 해석이 가능했던 5 km의 긴 터널에 대해서도 축대칭 모델을 이용한 정확한 해석을 가능하게 해 주었다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구를 위해서 일반 곡면 좌표계에서 유도된 축대칭 비정상 압축성 Euler 방정식을 사용하였다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + H = 0 \quad (1)$$

$$\hat{Q} = Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix}$$

$$\hat{E} = \frac{1}{J} (\xi_x E + \xi_y F) = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + p \xi_x \\ \rho v U + p \xi_y \\ (\rho e + p) U - p \xi_t \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} (\eta_x E + \eta_y F) = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + p \eta_x \\ \rho v V + p \eta_y \\ (\rho e + p) V - p \eta_t \end{bmatrix}$$

$$H_v = \frac{1}{J} H_v$$

이때 U, V 는 반전 속도로서 다음과 같이 정의된다.

$$U = \xi_\tau + \xi_x u + \xi_y v$$

$$V = \eta_\tau + \eta_x u + \eta_y v$$

대류항의 플럭스는 Roe의 플럭스 차이 분할기법(Flux Difference Splitting)과 Van Leer의 플럭스 벡터 분할기법(Flux Vector Splitting)을 이용한 유한체적법을 사용하여 계산하였으며, 공간상 정확도를 높이기 위해서 Koren differential limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였다. 시간적분법으로는 AF-ADI를 사용하였고 시간간격은 동일 시간간격(constant time stepping)을 적용하였다.

한편 터널 내부의 경우는 식 (2)에서 보여 주듯이 터널 벽면에서의 마찰을 고려한 1차원 Euler 방정식을 사용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + G = 0 \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho e_t + p)u \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ D_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D_g = \frac{2f}{D} \rho u \Delta x$$

위 식에서 D 는 터널의 반지름이며 f 는 경험적으로 정의되는 마찰계수로써, 본 연구에서는 $f=0$ 을 사용하였다.

2.2 초기조건 및 경계조건

비정상 문제는 정상 문제와는 달리 적절한 초기조건이 필수적으로 요구된다. 열차의 터널 진입 문제의 경우 일반적으로 급작스런 출발 (Impulsive start)[9] 방법이 주로 사용되고 있으나 이 방법은 급작스런 출발로 인해서 발생하는 수치적인 압축파가 해에 영향을 미치지 않도록 하기 위해서 열차를 터널 입구로부터 아주 먼 거리에서 출발시켜야 한다. 본 연구에서는 권혁빈[10]이 제안한 완만한 출발(Smooth start) 방법을 사용하였다. 이 방법은 속도의 2차 미분까지 연속되도록 하는 5차 다항 방정식을 이용하여 열차를 정지상태에서 주행속도까지 가속시키는 것으로써 수치적 파동을 완전히 제거시킬 수 있을 뿐 아니라 짧은 거리에서도 출발이 가능하기 때문에 기억 용량과 계산 시간을 크게 줄일 수 있다.

터널 내부와 입/출구 벽면 및 고속전철 표면은 미끄럼 경계조건을 사용하였으며, 원방 경계조건은 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량에 근거한 특성형태의 경계조건과 무반사 조건을 적용하였다.

3. 영역분할기법 및 혼합영역기법

3.1 영역분할기법

열차가 터널에 진출입하는 경우와 같이 물체 간의 상대적인 운동이 있는 경우 단일화된 격자 형성이 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 정렬격자계를 이용한 영역분할기법

(zonal method)을 이용하였다. 그리고, 영역 간의 유동정보의 교환을 위해서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자경계면에서 빠르고 정확하게 유동정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법[11]을 이용하였다.

3.2 혼합차원기법

철도차량과 터널의 상호작용 문제는 3차원 혹은 축 대칭 차원으로 해석해야 하지만, 차량이 없는 터널 내부는 1차원으로 가정하여 해석하여도 크게 문제가 되지 않는다. 이처럼 유동장의 성질에 따라 물리적 차원을 적절하게 가정하여 해석하는 방법을 혼합차원기법[11]이라 부르는데 이러한 방법은 계산용량과 계산시간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 축 대칭 단일차원 및 축대칭-1차원 혼합차원을 이용하여 해석하였으며, Fig. 1은 해석에 사용된 격자계를 보여주고 있다.

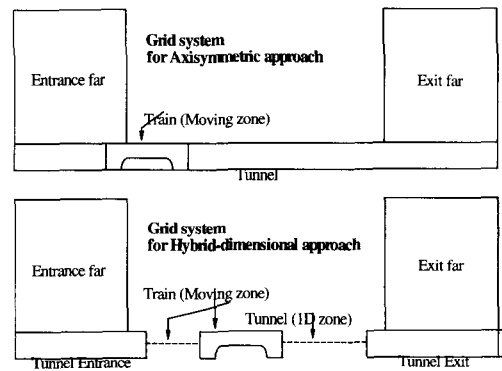


Fig. 1 해석에 사용된 격자계 (축대칭 격자계, 혼합차원 격자계)

4. 계산조건

계산에 사용된 차량의 형상은 현재 개발중인 한국형 고속전철 3차년도 모델을 기준으로 하였

다. 이에 따라 차량의 단면적은 동력차의 최대 단면적인 8.9 m²로 결정하였고, 전두부의 형상은 길이 방향으로 3차원 형상과 동일한 면적분포를 갖는 축 대칭 형상으로 결정하였다. 터널의 단면적은 현재 경부고속전철 선로에 건설 중인 터널을 기준으로 하여 단면적을 107 m²로 결정하였으며, 이에 따라 열차와 터널의 단면적 비는 0.083이 된다. 이 때 단면적비 0.083은 통상의 디젤열차뿐만 아니라 현재 운행되는 여타의 고속전철시스템과 비교하여도 훨씬 낮은 값이다.

Table 1은 해석에 사용된 차량 및 터널의 길이와 열차의 속도, 그리고 해석에 사용된 격자수를 보여주고 있다. 여기서 열차길이 140 m는 시험차량인 7량 편성에 해당되며, 400 m는 운용예정인 20량 편성의 열차에 해당된다. 터널 길이는 현재, 경부선에 건설될 예정인 터널들 중 가장 많은 빈도를 가진 1~5 km를 기준으로 선정하였으며, 1 km 이상의 터널에 대해서 열차의 진, 출입 전과정을 축대칭 이상의 차원으로 해석하는 것은 이전의 연구에서는 찾아볼 수 없는 새로운 시도이다.

Table 1에서 Case01은 축 대칭 단일차원으로 해석한 경우이고 그 외는 모두 축 대칭-1차원 혼합기법을 사용하여 해석한 경우이다. 동일한 조건에서 해석한 Case01과 Case02를 비교해 보면 혼합차원기법을 쓴 경우(Case02)가 그렇지 않은 경우(Case01)에 비해서 계산 격자수를 약 27% 까지 감소시킬 수가 있다. 이러한 격자수 감소율은 터널의 길이가 길어질수록 더욱 커지는데, 예를 들어 터널의 길이가 5 km인 Case04의 경우를 보면 단일차원으로 해석할 경우 필요한 격자의 개수는 155,776으로써 혼합차원기법을 사용할 경우 약 66%의 계산 용량을 절감시킬 수 있다.

5. 계산 결과

먼저 본 연구에서 개발한 수치해석 코드의 축 대칭 단일차원 기법과 혼합차원기법의 검증을

Table 1 차량의 터널 진,출입 해석 시 해석조건

	Tunnel Length(km)	Train Length(m)	Train Speed(km/h)	Number of Grids
Case01	1.0	140	300	63,656
Case02	1.0	140	300	46,927
Case03	3.0	140	300	50,217
Case04	5.0	140	300	53,507
Case05	1.0	140	350	46,927
Case06	1.0	400	300	98,059

위하여 서울대학교에서 NLR의 비정상 시험장치를 임대하여 수행한 시험치[1]와 비교해보았다.

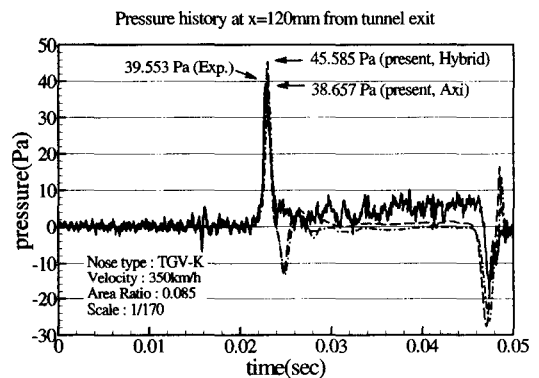


Fig. 2 터널 출구에서 방사되는 미기압파 (시험치와 계산치)

Fig. 2는 1/170 축적의 NLR 비정상 시험장치를 사용하여 350 km/h의 열차속도와 0.085의 열차/터널 단면적 비의 조건에서 시험한 경우로 터널 출구에서 120 mm떨어진 위치에서 측정된 압력의 history이다. 열차의 터널 진입으로 인하여 발생한 압축파가 터널 출구에 도착하면 터널 외부로 미기압파가 방사되는데, 축 대칭 단일차원 기법이나 혼합차원 기법 모두 미기압파의 크기와 파형을 비교적 정확하게 잡아내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3과 4는 열차가 통과하는 동안 터널 내부에서 발생하는 충격파와 팽창파에 대한 x-t 선도

를 보여주고 있다. 열차의 전두부가 터널 입구에도달하는 시점을 0 sec으로 잡았을 때, 열차의 터널 진입과 동시에 압축파가 형성되어 터널 출구로 진행됨을 알 수 있다. 압축파는 약 3 sec에 터널 출구에서 팽창파로 반사되어 입구 방향으로 진행하며, 열차가 터널을 빠져나가는 순간까지 이러한 과정을 한 번 반복한다. 이때, 열차주위로는 팽창파, 압축파, 팽창파가 교대로 진행해 나가면서 열차 주변의 압력을 크게 변화시키고 있다.

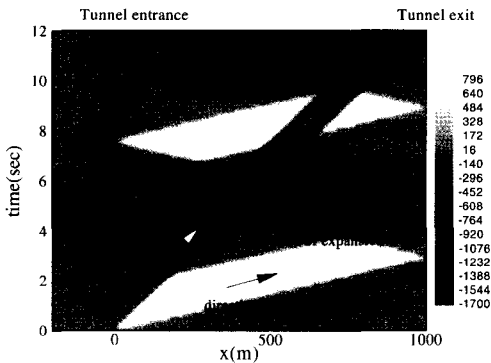


Fig. 3 열차가 통과하는 동안 터널 내부의 x-t 선도 (Case02)

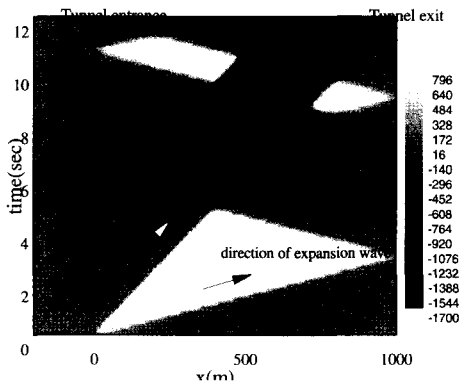


Fig. 4 열차가 통과하는 동안 터널 내부의 x-t 선도 (Case06)

차량 길이가 400 m인 Fig. 4를 보면 차량 길이가 300 m인 Fig. 3에 비해서 검은색으로 나타나는 저압부가 훨씬 많은 것을 볼 수 있는데 이것은 차량이 길어짐으로 인해서 차량 주위의 저압부가 압력파와 좀 더 오랜 시간동안 상호작용을 일으키기 때문에 일어나는 현상이다.

아래 Fig. 5는 2.5 sec의 시점에서 계산영역 내의 압력분포와 터널벽면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 열차 주위의 축대칭 영역에서 형성된 압력파가 1차원 영역으로 잘 전파되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서 압축파로 인한 최대 압력 상승은 약 850 Pa로써 Maeda 등[12] 제안한 식 (3)에서 계산된 값 825.5 Pa과 3 % 이내의 오차를 보이고 있다.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - V/C)[V/C + (1 - R)^2]} \quad (3)$$

여기서, V : 열차의 속도, R : 열차와 터널의 단면적비, ρ : 공기의 밀도, C : 음속

5.1 터널내부의 압력변화

아래 Fig. 6은 터널의 길이가 각각 1 km(Case02), 3 km(Case03), 5 km(Case04)일 때 터널 입구로부터 250 m 지점의 벽면에서 추출한 압력값의 변화를 나타낸 그림이다. 터널길이 1 km일 경우, 열차 후미부의 진입으로 인한 팽창파가 전방으로 지나간 직후 터널 출구에서 반사된 팽창파가 후방으로 지나가는 것을 알 수 있으며, 터널길이가 길어질수록 두 번째 팽창파가 도달하는 시간은 점점 더 길어짐을 알 수 있다. 따라서, 터널의 길이가 짧을수록 터널 벽면이 겪는 압력변동의 주기가 더 짧아짐을 알 수 있다

아래 Fig. 7 및 Fig. 8에는 기본조건인 Case01에서 차량 속도를 350 km/h로 증가시킨 경우 (Case05)와 차량길이를 400 m로 바꾼 경우 (Case06)의 해석 결과로서 터널 입구로부터 각각

y-coordinated is five times exaggerated than x-coordinate

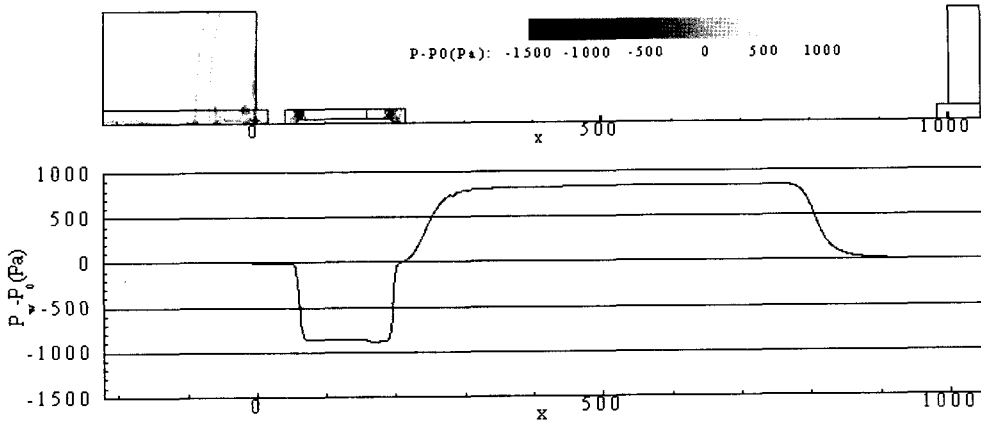


Fig. 5 계산영역 내의 압력분포 (Case02, t=2.5 sec)

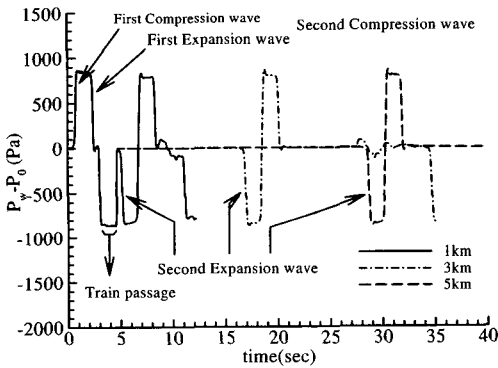


Fig. 6 터널 입구로부터 250 m 지점의 압력변화 (터널길이 1, 3, 5 km)

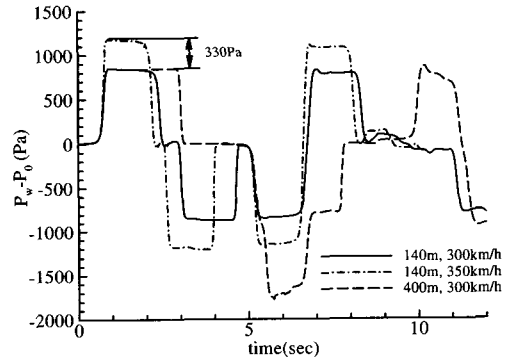


Fig. 7 터널 입구로부터 250 m 지점의 압력변화 (차량길이, 속도 변화)

250 m, 500 m 지점에서의 압력변동을 보여주고 있다.

Fig. 7 및 Fig. 8에서 알 수 있듯이 차량의 속도가 빨라질 경우, 첫 번째 팽창파가 도달하는 시점은 더 빨라지나 이후에 압력파가 도달하는 시점은 시간간격이 일정하게 유지됨을 알 수 있는데, 이것은 차량의 속도에 관계없이 압력파는 음속으로 움직이기 때문이다. 차량의 속도가 빨라질 경우 최고압력, $(P_w - P_0)_{max}$ 는 약 330 Pa 높아지는데, 이것은 식 (3)에서 예측한 값과 잘 일치한다.

차량의 길이가 400 m로 길어질 경우에는 140 m일 경우에 비해 터널 내부의 최저압력, $(P - P_0)_{min}$ 는 절대값이 두 배정도 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 차량의 길이가 길어짐에 따라 차량 후미부의 진입에 의한 두 번째 팽창파가 도달하는 시점이 점점 늦어지게 되며 이에 따라 터널 출구에서 반사되어 도달하는 팽창파와 겹쳐지는 시간이 늘어나기 때문이다.

일반적으로 터널내부의 최대압력, $(P_w - P_0)_{max}$ 는 ΔP_{max} 와 비슷한 크기를 갖게되지만, 터널 내부의 최소압력, $(P_w - P_0)_{min}$ 는 열차의 진입

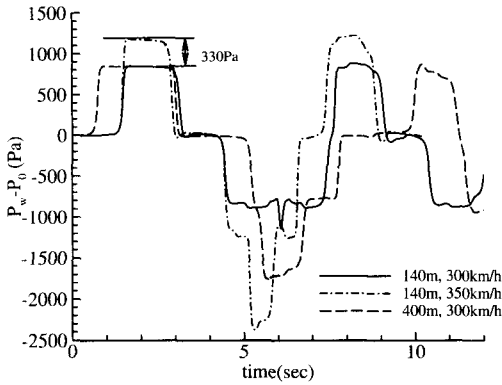


Fig. 8 터널 입구로부터 500 m 지점의 압력변화 (차량길이, 속도 변화)

으로 인한 팽창파가 열차 주위의 음압영역과 겹치게 될 경우 ΔP_{max} 의 두 배가 된다. 그러나, 터널 내부의 유동장은 기본적으로 차량의 진입에 의한 압축파로 인하여 격심한 압력변화를 겪게 되며 이러한 압축파의 최대압력상승치, ΔP_{max} 는 열차의 속도, 열차와 터널의 단면적비 등에 의해 결정된다. 그러나, 압축파의 진행과 반사로 인해 터널 내부의 압력파는 차량과 터널의 길이에 따라 매우 복잡한 특성을 가진다.

열차속도가 350 km/h일 경우 Fig. 7에서는 최소압력의 절대값이 ΔP_{max} 와 동일한 크기를 갖지만, Fig. 8에서는 ΔP_{max} 의 두 배의 크기를 갖는 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 조건 하에서도 터널 내의 위치에 따라 나타나는 최소압력의 크기가 다를 수 있다는 것을 의미한다.

한 가지 더 지적되어야 할 사항은 본 연구의 유동조건처럼 열차-터널 단면적비, R 이 매우 작을 경우에는 선형적인 예측이 잘 맞지만, R 이 클 경우에는 압력파가 차량에서 반사되는 효과를 무시할 수 없기 때문에 최대압력과 최소압력이 더 큰 값을 가질 수도 있는 것이다. 따라서, R 이 큰 경우에는 반드시 개별 차량-터널 조합에 대한 해석을 통해서만 열차의 터널 통과로 인한 터널 내부의 최대, 최소압력을 정확히 예측할 수 있다.

5.2 차량 주위의 압력변화

아래 Fig. 9 및 Fig. 10은 차량 표면에서의 압력변화를 나타낸 그림이다.

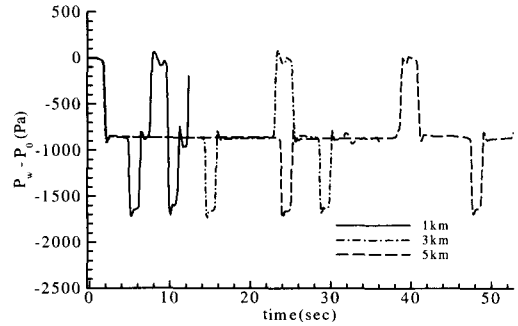


Fig. 9 차량표면의 압력변동 (차량 정중앙, 터널길이 1, 3, 5 km)

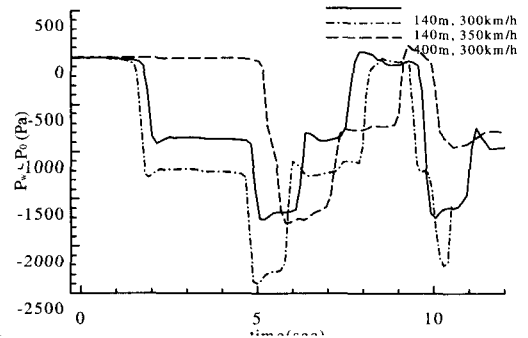


Fig. 10 차량표면의 압력변동 (차량 정중앙, 차량 길이, 속도 변화)

압축파와 팽창파가 진행하면서 압력이 상승하거나 하강하는 부분을 제외하고는 일정한 압력을 보여주고 있는데, 대기압과의 차이가 -850 Pa 정도로 ΔP_{max} 와 절대값이 일치함을 알 수 있다. 최대압력은 압축파가 지나가는 시점에서 형성되며 대기압과 거의 비슷한 수준이며, 최소압력은 두 번째 팽창파가 지나가는 시점에서 형성되며 절대값은 ΔP_{max} 의 두 배가 됨을 알 수 있다. 터널벽면에서의 압력변화와 마찬가지로 열차의 진입으로 인한 팽창파가 열차 주위의 음압영

역과 겹치게 될 경우 최소압력은 ΔP_{max} 의 두 배까지 내려갈 수 있다.

6. 결론

정렬격자를 이용한 다중영역기법(Zonal Method)과 혼합차원기법(Hybrid-dimensional Approach)을 결합하여 경부선 터널에 한국형 고속철도차량이 통과하는 과정을 수치적으로 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 혼합차원기법을 이용하여 5 km의 긴 터널에 대해서 열차의 진입과 터널내 주행, 진출의 전 과정을 축대칭 차원의 정확도로 해석할 수 있었으며, 계산 시간을 66 %까지 단축할 수 있었다.
- (2) 한 대의 열차가 터널을 통과할 때 터널 내에서의 최대 압력상승치, ΔP_{max} 는 열차속도가 시속 300 km/h일 경우에 850 Pa, 350 km/h일 경우에 1,180 Pa이었다. 최대압력은 ΔP_{max} 와 거의 같은 값을 갖지만, 최소압력은 차량과 터널의 길이에 따라 각각 다르며 ΔP_{max} 의 두 배까지 나타났다.
- (3) 열차가 터널에 진입할 경우, 차량 주위의 압력은 터널내에 최대 압력상승인 ΔP_{max} 만큼 하강하는 것으로 나타났다. 그리고, 최대압력은 대기압과 비슷하며, 최소압력은 ΔP_{max} 의 두 배까지 내려가는 것으로 나타났다.
- (4) 열차-터널 단면적비가 커질수록 압력파가 열차에 반사되는 효과가 커지므로 선형적인 예측이 어려워지며, 따라서 개별 열차-터널 조합에 대한 해석을 통해 최대, 최소압력을 예측하는 것이 보다 예측의 정확도를 높일 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환인 "고속전철 공력설계 및 해석기술 개발"의 연구 결과 중 일부를 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다. 또한 과제수행을 일부 지원한 BK21 Project에도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 권혁빈, 이동호, 이수갑, 김동현, 강신재, "고속철도 차량에 의한 터널내 압력변동과 미기압파에 관한 실험적 연구", 98년 대한기계학회 추계학술대회 논문집(B), pp. 735~740, 1998
2. 김태윤, "고속열차의 터널 진입시 발생하는 압력파의 실험적 연구", 서울대학교 석사학위논문, 2000
3. 김동현, 오일근, "철도터널 내 압력변동 및 터널 미기압파 저감 시험장치 개발에 관한 연구", 대한기계학회 2000년 춘계학술대회 논문집 B, pp. 611~618, 2000
4. 김희동, "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석 (I)", 대한기계학회논문집 제21권 제8호 pp. 963~972, 1997
5. 김희동, "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석 (II)", 대한기계학회논문집 제21권 제8호 pp. 983~995, 1997
6. 김인선, 육호남, "고속전철의 터널진입 시 공력특성 해석 및 전두형상 최적화 연구", 항공우주학회지 제26권 제 1호, pp. 17~26
7. Jaeho Hwang, Dong-Ho Lee, "Unsteady Aerodynamic Loads on High Speed Trains Passing by Each Other", KSME International Journal, Vol. 14, No. 8, pp. 867~878, 2000
8. 권혁빈, 이동호, "혼합차원 다중영역기법을 이용한 철도차량과 터널의 상호작용 해석", 대한기계학회 유체공학부문 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 402~407, 1999
9. T. Ogawa, K. Fujii "Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible flows induced by a train moving into a tunnel", Computer & Fluids Vol. 26, No. 6, July 1997
10. 권혁빈, 이동호, "터널에 진입하는 고속전철의 수치 해석을 위한 초기조건 연구", 96년 항공우주학회추계학술대회 논문집, 1996년
11. 권혁빈, 이동호, "고속전철의 터널진입 해석을 위한 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법의 연구", 98년 항공우주학회추계학술대회 논문집, 1998년
12. T. Maeda, T. Matsumura, M. Iida, etc., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel", Proc. International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles", Yokohama, Japan, Vol.2, pp. 315~319, JSME, 1993