

터널을 주행하는 열차의 풍압에 대한 특성해법 해석

Characteristics Method Analysis of Wind Pressure of Train Running in Tunnel

남성원* · 권혁빈 · 윤수환

Seong-won Nam · Hyeok-bin Kwon · Su-Hwan Yun

Abstract Pressure waves are generated and propagate in tunnel when train enters a tunnel with high speed. Compression wave due to the entry of train head propagates along the tunnel and is reflected at tunnel exit as expansion wave. While expansion wave due to the entry of train tail propagates along the tunnel and is reflected at tunnel exit as compression wave. These pressure waves are repeatedly propagated and reflected at tunnel entrance and exit. Severe pressure change per second causes ear-discomfort for passengers in cabin and micro pressure wave around tunnel exit. It is necessary to analyze the transient pressure phenomena in tunnel qualitatively and quantitatively, because pressure change rate is considered as one of major design parameters for an optimal tunnel cross sectional area and the repeated fatigue force on car body. In this study, we developed the characteristics method analysis based on fixed mesh system and compared with the results of real train test. The results of simulation agreed with that of experiment.

Keywords : High speed train, Pressure wave, Characteristics Method, Ear-discomfort, Micro pressure wave

초 록 열차가 터널에 고속으로 진입하면, 압력파가 발생한다. 열차 선두부의 진입에 의하여 발생한 압축파는 터널을 따라 진행되어 터널 출구에서 반사되어 팽창파로 되돌아오며, 후미부의 진입에 의하여 발생한 팽창파도 터널을 따라 진행되어 터널 출구에서 압축파로 반사되어 터널 입구로 되돌아 온다. 열차 선두부 및 후미부에 의하여 발생한 이러한 압력파는 터널 입구 및 출구에서 각각 반사되어 터널 내부를 왕복하며, 차량 객실에 탑승한 승객들에게는 이명감을 일으키고, 터널 출구에서는 환경소음의 일종인 미기압파를 발생시킨다. 터널에서의 큰 압력 변동은 터널의 최적 단면적 설계에도 주요 인자로 고려되고 있으며, 차체의 반복 피로 하중으로 작용하므로, 이에 대한 정량적 및 정성적 분석이 필요하다. 본 연구에서는 고정 격자계를 이용한 특성 해법을 개발하였으며, KTX를 이용한 실차 시험 결과와 비교하였으며, 해석 결과는 시험 결과와 잘 일치하였다.

주요어 : 고속 열차, 압력파, 특성 해법, 이명감, 미기압파

1. 서 론

철도 차량이 고속으로 터널에 진입하면, 급격한 단면적 변화로 인하여 큰 압력 변동이 발생한다. 열차 선두부의 진입에 의하여 압축파가 발생하며, 열차 후미부의 진입에 의하여 팽창파가 발생된다. 이들 압력파들은 터널을 따라 진행하여 터널 출구에서 팽창파 및 압축파로 반사되어 터널 입구쪽으로 전파되는 현상이 반복된다. 터널내에서 발생한 이러한 큰 압력 변동이 차량 내부에 전달되면, 객실내 승객들은 이명감을 느끼게 되며, 터널 출구에서 반사될 때 일부는 터널 외부로 방사되어 환경 소음의 일종인 미기압파를 발생기도 한다. 고속 차량의 경우, 환기 장치의 외부 공기 취입구에 개폐 차단 장치를 갖추거나 연속 환기 장치를 장착하며, 미기압파의 발생을 완화시키기 위하여 터널 입출구에

후드를 설치하거나 터널 입출구 형상을 벨마우스 형태로 건설하기도 한다. 터널내 압력 상승은 열차의 진입속도의 2승에 거의 비례하기 때문에 향후 초고속 열차의 개발에 따르는 차체 구체의 응력 증대, 터널내 작업 환경, 터널내 공기 저항 증가, 최적 터널 단면적 설계 등을 검토하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 터널내 압력 변동 현상을 정확히 파악하기 위하여는 실제 열차를 이용한 현장 측정이 가장 좋은 방법이지만, 시험에 필요한 제반 여건, 인력 및 장비 등을 고려하면, 다양한 파라메타에 대한 검토가 거의 불가능하므로, 수치 해석에 많이 의존하고 있다. 터널내 압력 변동 해석 연구로는 3D모델을 이용하거나[1,2], 2차원 축대칭 모델을 사용한 사례[3]가 있다. 그러나, 이러한 해석법은 두 열차의 교행 해석이나 터널 길이가 길어지면, 계산에 필요한 격자수가 크게 증가하므로, 다양한 파라메타에 대하여 검토하기에는 계산 용량 및 소요 시간에 애로 사항이 적지 않다. 한편, 터널내 공기 유동이 횡단면에서 거의 일정하다는 가정하에 1차원 모델로 해석한 사례는 Hara[4] 및 Yamamoto [5,6]에 의하여 정식화되고 Maeda[7]에 의하여 발전되었으

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5244, E-mail : swnam@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.436>

며, 그후 Vardy[8] 및 Kim[9] 등이 이를 응용하여 터널 압력 변동을 해석하였다. 1차원 해석에 적용한 특성 곡선법을 이용한 해석법은 Rudinger[10]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 그러나 대부분의 선행 연구들은 변동 격자계를 이용하여 매 시간마다 특성곡선과 열차의 위치를 계산하였으나, 본 연구에서는 이러한 것들을 간략화 시키기 위하여 미리 설정한 고정 격자계를 사용하였다. 특성 방정식을 이용한 해석 결과와 KTX를 이용한 시험 결과를 비교하였으며, 정량적 및 정성적으로 양호한 일치를 보임을 알 수 있었다.

2. 수치 해법

2.1 지배 방정식

열차가 터널에 주행할 때의 유동 변화가 횡단면에서 일정하다고 가정하면, 다음과 같은 1차원 방정식으로 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f \quad (1)$$

$$a^2 \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (\gamma - 1) \phi \quad (2)$$

음속 및 밀도는 일정하며, 압력파의 전파는 음속과 거의 같다는 가정하에 특성 곡선법에 따라 편미분 방정식 (1), (2)를 특성 곡선상의 C+ 및 C-를 따라서 다음과 같이 상미분 방정식으로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}(p + \rho au) = (\gamma - 1) \rho \phi + \rho af \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(p - \rho au) = (\gamma - 1) \rho \phi - \rho af \quad (4)$$

여기서, u 는 유속, p 는 압력, a 는 음속, ρ 는 밀도, γ 는 비열비, f 는 마찰력, ϕ 는 에너지 소산을 나타내며, 열차가 있는 지역과 열차가 없는 지역에 따라 각각 아래와 같이 주어진다[6].

열차가 없는 지역 1:

$$f_1 = -\frac{\lambda}{2d} u_1 |u_1| \quad (5)$$

$$\phi_1 = \frac{\lambda}{2d} |u_1|^3 \quad (6)$$

열차가 1대 있는 지역 2:

$$f_2 = -\frac{\lambda}{2d1-R} u_1 |u_1| - \frac{\lambda'}{2d'1-R} (u_2 - V_1) |u_2 - V_1| \quad (7)$$

$$\phi_2 = \frac{\lambda}{2d1-R} |u_2|^3 + \frac{\lambda'}{2d'1-R} |u_2 - V_1|^3 \quad (8)$$

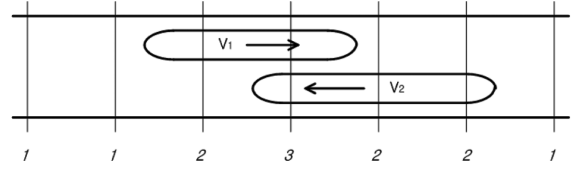


Fig. 1 Definition of domain groups

열차가 2대 있는 지역 3:

$$f_3 = \frac{\lambda}{2d1-2R} u_3 |u_3| - \frac{\lambda'}{2d'1-2R} (u_3 - V_1) |u_3 - V_1| - \frac{\lambda'}{2d'1-2R} (u_3 - V_2) |u_3 - V_2| \quad (9)$$

$$\phi_3 = \frac{\lambda}{2d1-2R} |u_3|^3 + \frac{\lambda'}{2d'1-2R} |u_3 - V_1|^3 + \frac{\lambda'}{2d'1-2R} |u_3 - V_2|^3 \quad (10)$$

여기서, λ 는 터널벽면의 마찰계수, λ' 는 열차 표면의 마찰계수, d 는 터널 수력직경, d' 는 열차 수력직경, R 은 열차-터널 단면적비, V_1 및 V_2 는 각 열차의 속도를, u_1 , u_2 , u_3 는 각각 domain group 1, 2, 3에 해당하는 유속을 나타낸다. 따라서, 궤도가 발라스트 혹은 슬라브 구조인가에 따라서 적절한 값으로 그 영향을 반영할 수 있으며, 차량 구조 또한 유선형 정도에 따라 적절한 마찰 계수값을 적용할 수 있다.

또한, 터널 입출구에서의 조건은 유속의 방향에 따라서 각각 다음과 같이 주어질 수 있다.

터널 입구:

$$p = -\frac{1}{2} \rho u^2 : u > 0 \text{ 일 경우} \quad (11)$$

$$p = 0 : u \leq 0 \text{ 일 경우}$$

터널 출구:

$$p = \frac{1}{2} \rho u^2 : u < 0 \text{ 일 경우} \quad (12)$$

$$p = 0 : u \geq 0 \text{ 일 경우}$$

열차의 선두부 및 후미부에서의 단면적이 불연속으로 변하지만, 각각, 유량 및 에너지 보존 법칙과 유량 및 운동량 보존 법칙을 적용하면 1-2 지역 경계에서는 다음과 같다.

열차 선두부:

$$(1-R)(u_2 - V) = u_1 - V \quad (13)$$

$$p_2 + \frac{1}{2} \rho (u_2 - V)^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho (u_1 - V)^2 \quad (14)$$

열차 후미부:

$$u_1 - V = (1-R)(u_2 - V) \quad (15)$$

$$p_1 + \rho (u_1 - V)^2 = p_2 + (1-R) \rho (u_2 - V)^2 - \frac{1}{2} \rho C_d R (u_2 - V)^2 \quad (16)$$

마찬가지로, 열차 2대가 교행하는 2-3지역 경계에서는 단면적비 R 대신 $R/(1-R)$ 을 사용하여 표현할 수 있으며, C_d 는 열차의 압력 저항 계수값으로 0.2를 사용하였다

2.2 계산 방법

본 연구에서는 기존의 선행 연구들과는 달리 고정 격자 및 계산 시간 간격을 사용하였다. 고정 격자 및 고정 시간 간격을 사용하면, 변동 격자에서 처럼 특성 곡선 C+ 및 C-가 만나는 점을 매번 별도로 계산하지 않아도 되는 장점이 있다[12].

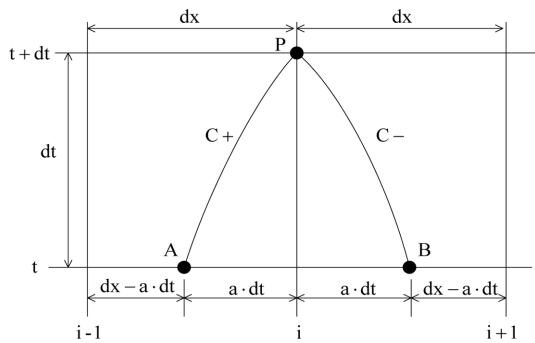


Fig. 2 Rectangular mesh for characteristics method

Fig. 2에서 곡선 C+를 따라서 P점과 A점간에, 곡선 C-를 따라서 P점과 B점간에 Riemann 불변량이 얻어진다. 즉 시간 $t+\Delta t$ 경과후의 P점의 압력과 유속은 시간 t 에서의 좌표 $i, i+1$ 및 $i-1$ 의 값들로부터 구하며, A 및 B점의 값들은 각각 $i-1$ 과 i 및 $i+1$ 과 i 점의 값을 보간하여 구하며 각각 다음과 같다.

$$U_A = U_i + \frac{dt}{dx} a(U_{i-1} - U_i) \quad (17)$$

$$U_B = U_i - \frac{dt}{dx} a(U_i - U_{i+1}) \quad (18)$$

수식 (3) 및 (4)를 각각 C+(PA) 및 C-(PB) 특성 곡선에 따라 차분식으로 구하면, 계산 영역 내부의 격자점 P점의 유속 및 압력은 다음과 같다.

$$U_P = \frac{Q_A - Q_B}{2\rho a} \quad (19)$$

$$P_P = \frac{Q_A + Q_B}{2} \quad (20)$$

여기서,

$$Q_A = [(\gamma-1)\rho\phi + \rho a f]_A dt + P_A + \rho a U_A$$

$$Q_B = [(\gamma-1)\rho\phi - \rho a f]_B dt + P_B - \rho a U_B$$

한편, 터널 입구 및 출구 조건과 차량 전후부의 접촉 격자점에서는 마찰항의 역할이 미미하다는 가정하에 이를 생략하여 식 (3), (4) 및 (11), (12)와 (13)~(16)을 연립하여 구

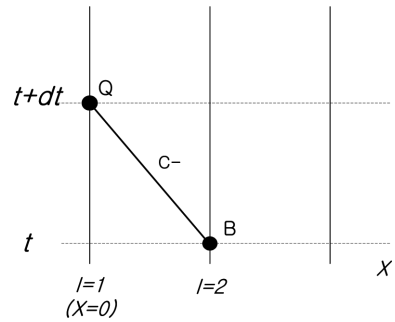


Fig. 3 Inlet condition of tunnel

할 수 있다.

예를 들면, 터널 입구 조건에서는 특성곡선 C+가 무의미하므로 식 (4)와 식 (11)를 연립하여 구한다.

$$U_B \leq \frac{P_B}{\rho a} \text{ 일 때:}$$

$$U_Q = U_B - \frac{P_B}{\rho a}, P_Q = 0 \quad (21)$$

$$U_B > \frac{P_B}{\rho a} \text{ 일 때:}$$

$$U_Q = -a + \sqrt{a^2 + 2aU_B - \frac{2P_B}{\rho}}, P_Q = -\frac{1}{2}\rho U_Q^2 \quad (22)$$

마찬가지로, 열차 선두부의 접촉조건은 식 (3), (4)와 (13), (14)를 연립하여 구할 수 있다.

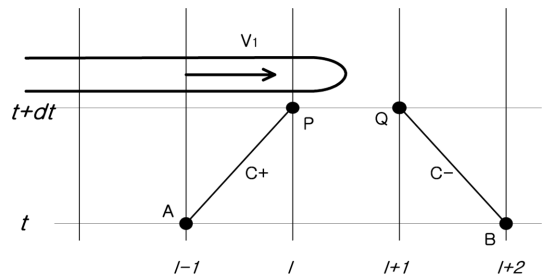


Fig. 4 Front condition of train

즉, 어떤 시각에서의 열차의 위치가 Fig. 4와 같을 때, 열차 선두부는 격자점 P와 Q의 사이에 있으며, 특성곡선 C+(PA선)를 따라서 수식(3), C-(QB선)를 따라서 수식 (4)가 성립한다. 따라서 수식 (3), (4), (13) 및 (14)를 적용하면,

$$(P + \rho a U)_P - (P + \rho a U)_A = 0 \quad (23)$$

$$(P - \rho a U)_Q - (P - \rho a U)_B = 0 \quad (24)$$

$$(1-T)(U_P - V_1) = U_Q - V_1 \quad (25)$$

$$P_P + \frac{1}{2}\rho(U_P - V_1)^2 = P_Q + \frac{1}{2}\rho(U_Q - V_1)^2 \quad (26)$$

위의 식들을 연립하여 정리하면, 열차 선두부를 사이에 둔

격자점 P 와 Q 에서의 유속 및 압력은 다음과 같다[11].

$$U_P = \frac{1}{1-R}Z + V_1 \quad (27)$$

$$U_Q = Z + V_1 \quad (28)$$

$$P_P = P_A + \rho a(U_A - U_P) \quad (29)$$

$$P_Q = P_B + \rho a(U_Q - U_B) \quad (30)$$

여기서, $Z = \frac{(1-R)a}{R} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2R}{(2-R)a^2} H} \right]$

$$H = 2aV_1 + \frac{P_B - P_A}{\rho} a(U_A + U_B)$$

또한, 계산 시간 간격 Δt 는 계산 격자 크기 및 음속으로 부터 다음과 같이 설정하였다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{Ca} \quad (31)$$

위에서 상수 C 는 CFL 조건에 따라 1.0이상의 값이면 무방하지만, 본 계산에서는 CFL조건을 위배하지 않을 충분한 값으로 2.0으로 하였다.

위에서 언급한 수식을 바탕으로 계산 절차를 정리하면 다음과 같다. 터널을 등간격의 격자로 분할한 다음, 시간 $t=0$ 에서의 초기 조건($U=0, P=0$)을 부여한다. 계산 영역내의 내부 격자에 대하여는 수식 (19), (20)으로 유속 및 압력을 구하고, 동시에 열차의 속도에 따라 열차 선두부 및 후미부의 위치를 구한다. 열차 선두부 및 후미부를 사이에 두고, 두 개의 격자점으로 부터 특성 곡선식을 적용하여 각각 선두부 조건 혹은 후미부 조건식을 연립하여 유속 및 압력을 구하며, 터널 입구 및 출구에 대하여도 경계 조건식으로부터 $t+dt$ 에서의 값을 갱신하고 다음 시간 step을 진행시킨다. 이러한 절차를 따라 열차가 터널 출구를 통과할 때까지 계산을 반복한다.

3. 해석 결과 및 분석

특성 해법을 이용한 해석 결과를 비교 분석 하기 위하여, 경부 고속 선로에서 KTX를 이용한 실차 실험 결과를 이용하였다. 비교 대상 터널은 운주 터널(4030m)이며, 터널에 진입하는 KTX의 속도는 265km/h이다. Fig. 5에 운주 터널을 통과하는 차량 선두부의 측압을 나타내었다. 대기압계를 이용하였기 때문에 터널 입구와 출구에서의 대기압이 약 387Pa의 차이가 있는데, 이는 운주 터널의 경우 선로가 8%의 구배가 있으므로 길이 4030m의 터널 입출구간에는 약 32.24m의 표고 차이가 있기 때문이다. X-t선도에서 보는 바와 같이, 열차가 터널에 진입함에 따라 압력 상승이 일어나며, 열차 후미부의 진입으로 발생한 팽창파와 열차 선두부의 진입에 의하여 발생한 압축파가 터널 출구에서 반사되어 돌아

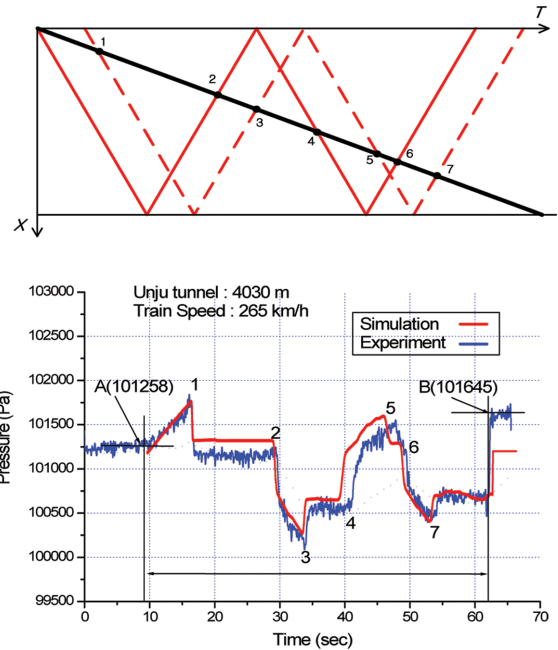


Fig. 5 Result of simulation and experiment

오는 팽창파와 만나는 2점에서 다시 큰 압력 강하가 발생한다. 이처럼 압축파 및 팽창파와 만날때마다 압력 상승 및 압력 강하가 일어나며, 열차가 터널을 빠져나가는 시점까지 1~7점에서 큰 압력 변동을 수반한다.

실험 결과와의 비교를 위하여 특성방정식을 이용하여 구한 해석 결과를 그림에서 빨강색 실선으로 표시하였다. 시험 결과와 마찬가지로, 터널을 주행하는 열차가 압축파 및 팽창파와 만나는 각 점(1~7)에서 급격한 압력 상승 및 저감 형태를 보이며, 정성적인 패턴도 거의 동일함을 알 수 있다. 다만, 터널 중후반부 이후부터는 실험과 해석간의 압력 변동 패턴에 시간적인 차이를 나타내는데, 이는 해석에서는 압축파 및 팽창파가 음속으로 진행된다고 가정하였으나, 실제 터널에서는 압력파의 진행이 여러가지 방해 요소로 인하여 항상 음속으로 전파되지는 않을 것으로 예측되기 때문이다.

정량적으로는, 열차가 터널 진입후 압력 상승하는 1점까지의 압력변화의 시험 및 해석 값은 각각 650Pa 및 700Pa이며, 압력 변동폭이 가장 크게 일어나는 2-3점간의 압력 변화값은 시험 결과가 1162Pa, 해석 결과가 1306Pa로서, 실제 터널의 고도 차이를 고려하면 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은 열차의 수력 마찰계수의 영향을 나타낸 것으로, 열차 형상의 거칠기 정도를 대변하는 것이다. 즉, 마찰 계수가 클수록 열차 상부 및 하부의 형상이 복잡하며, 이 값이 작을수록 차체의 페어링이 잘되어 매끈하다는 것을 의미한다. 해석 결과로부터 열차 표면의 수력 마찰 계수값이 클수록 열차 진입시의 압력 상승값이 증가함을 알 수 있다. 이 결과로부터, 열차를 유선형으로 디자인하는 것이 터널내 압력 상승을 저감시키는 데에 유효한 수단중에 하나임을 알 수 있다.

Fig. 7은 열차의 터널 진입속도에 따른 영향을 나타내었

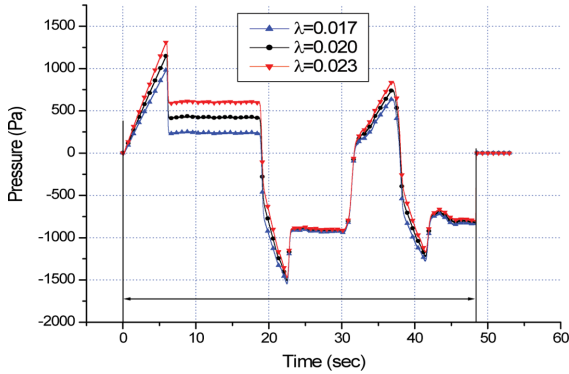


Fig. 6 Effects of friction coefficient

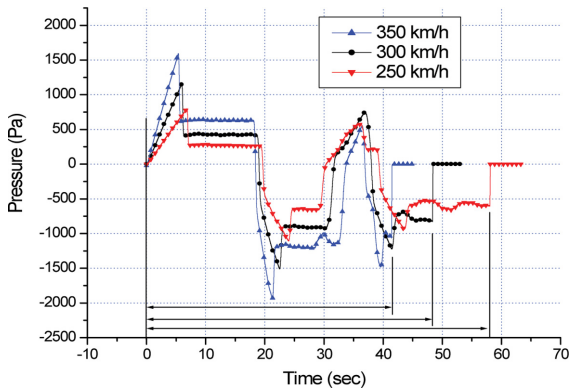


Fig. 7 Effects of train velocity

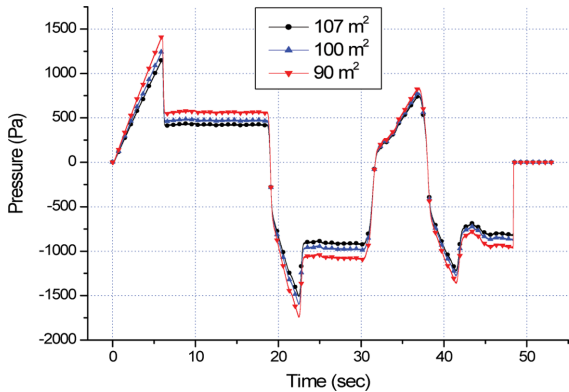


Fig. 8 Effects of tunnel cross-section area

다. 열차속도가 증가함에 따라 각각 250km/h에서 772Pa, 300km/h에서 1130Pa, 350km/h에서 1525Pa의 압력상승이 발생하여, 속도 증가비율이 각각 1.2배 및 1.4배 임에도 불구하고, 압력 상승 비율은 각각 1.46배 및 1.97배로 증가하여, 터널내 압력 상승이 열차 속도의 제곱에 거의 비례한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 터널 단면적 변화에 따른 압력 변화를 비교하였다. 열차-터널 단면적 비율은 각각 0.0915, 0.0979 및 0.1088 이며, 이때의 압력 증가값은 1160Pa, 1245Pa 및 1414Pa이

었다. 이들 값으로부터 터널 단면적 축소 변화율이 압력 증가율에 거의 비례함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 특성 방정식을 이용하여 열차가 터널을 주행할 때의 압력 변동을 해석하였다. 기존의 연구와는 달리 고정 격자계를 이용하여 해석의 용이함을 도모하였으며, 계산 결과를 KTX를 이용한 시험 결과와 비교하여 정량적 및 정성적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 본 해석 방법의 유효성을 확인하기 위하여, 열차의 표면 수력 마찰 계수, 열차의 터널 진입속도 및 터널 단면적을 변화시켜 가며, 결과 값을 비교하였다. 열차의 마찰 계수값은 차체의 형상에 따른 표면 거칠기를 대변하는 상수로서, 이 값이 작을수록 차량이 유선형으로 차체 상하부 기기들에 대한 페어링이 잘되어 있는 차량이며, 마찰 계수값이 클수록 대차 및 차량 상하부 형상에 요철이 심한 것을 의미한다. 해석 결과, 마찰 계수값이 작을수록 열차 진입에 따른 터널내 압력 상승이 작았다. 즉, 유선형 차량일수록 압력 상승 저감에 유효하다는 것을 나타낸다. 열차 진입속도에 대한 비교에서 차량 속도의 제곱에 비례하여 압력 상승이 커졌으며, 열차-터널 단면적비의 증가 비율은 압력 상승율에 비례하였다. 이상과 같은 연구 결과로부터, 특성 해법을 이용한 터널내 압력 해석은 터널 및 차량 조건, 해석에 필요한 계산 용량과 시간에 거의 제약을 받지 않으면서도 다양한 설계 파라메타에 대하여 해석할 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 향후에는, 좀 더 현실적인 열차 운행 및 터널 현황에 맞출 수 있도록 터널에서의 열차 속도를 가변적으로 부여할 수 있도록 하는 점과 장대 터널 중간에 설치되는 기제강 및 수직구등의 영향을 검토하는 연구가 수행될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국철도시설공단의 연구 용역인 “철도 건설 경쟁력 확보를 위한 제반 연구”와 한국철도기술연구원의 주요 사업인 “레일 방식 초고속 철도 핵심 기술 개발” 사업의 보조로 수행되었으며, 일본 RTRI의 Maeda박사로부터 Private communication을 통하여 유익한 참고 및 조언을 받은 것에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] P.K.H. Wu (2000) Prediction of Pressure wave generation by high-speed train entering tunnel using a commercial CFD code, *BHR Group 2000 Vehicle Tunnels*, 1, pp. 767-777.
- [2] M. Suzuki (2000) Aerodynamic Force acting on Train in Tunnel, *RTRI Report*, 14(9), pp. 37-42(in Japanese).
- [3] H.B. Kwon, T.Y. Kim, D.H. Lee, M.S. Kim. (2003) Numerical simulation of unsteady compressible flows induced by a high-speed train passing through a tunnel, *Proc.Inst.Mech.Engrs. Part F:J Rail and Rapid Transit.*, 217, pp. 111-124.

- [4] T. Hara. (1967) Aerodynamic Drag of a Train in a Tunnel, *RTRI Report*, 608, pp. 1-12(in Japanese).
- [5] A. Yamamoto (1973) Pressure Variation, Aerodynamic Drag and Tunnel Ventilation in Shinkansen Type Tunnel, *RTRI Report*, 871, pp. 1-74(in Japanese).
- [6] A. Yamamoto (1983) Aerodynamics of Train and Tunnel, *RTRI Report*, 1230, pp. 1-70(in Japanese).
- [7] T. Maeda (1998) Aerodynamic Characteristics of Train and Countermeasures for Decreasing Micro-pressure Wave, *RTRI Report*, 20, pp. 196-229(in Japanese).
- [8] A.E. Vardy, B. Dayman (1979) Alleviation of Tunnel Entry Pressure Transients : Theoretical Modelling and Experimental Correlation, *3rd Int. Symp.on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 363-375.
- [9] H.-D. Kim (1997) Aerodynamic Analysis of a Train Running in a Tunnel(1)-Aerodynamics of One-Train, *J. KSME(B)*, 21(8), pp. 963-972(in Korean).
- [10] G. Rudinger (1955) Wave Diagrams for Nonsteady Flow in Ducts, D.Van Nostrand Co. Inc., New York.
- [11] T. Maeda (2011) Private Communication.
- [12] C.Y. Chow (1979) An Introduction to Computational Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc.
- 접수일(2012년 7월 6일), 수정일(2012년 8월 19일),
게재확정일(2012년 8월 22일)
-
- S.W. Nam** : swnam@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woram, Uiwang-city,
Gyeonggi-do 437-757, Korea
- H.B. Kwon** : hbkwon@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woram, Uiwang-city,
Gyeonggi-do 437-757, Korea
- S.H. Yun** : shyun@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woram, Uiwang-city,
Gyeonggi-do 437-757, Korea