

터널내에서 교행하는 열차의 풍압 변동에 관한 전산 해석

Development of Simulation Program for Pressure Transient of Railway Tunnel

남성원*†, 윤수환*

Seong-Won Nam*†, 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 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 based on fixed mesh system and boundary conditions for crossing trains and analyzed with X-t diagram. The results of simulation show that the pattern of pressure variation in tunnel varies for the entry condition of crossing train.

Keywords : Pressure wave, Characteristics method, Ear-discomfort, Micro pressure wave

초 록 열차 선두부 및 후미부의 터널 진입에 의하여 발생한 압력파는 터널 입구 및 출구에서 각각 반사되어 터널 내부를 왕복하며, 차량 객실에 탑승한 승객들에게는 이명감을 일으키고, 터널 출구에서는 환경소음의 일종인 미기압파를 발생시키는 원인이 된다. 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 터널내에서 교행하는 열차의 풍압 변동 해석을 위하여 고정 격자계를 이용하여 특성 방정식에 대한 전산 해석법을 개발하였다. 교행시의 열차 선두부 및 후미부의 경계 조건식을 이용하여 X-t선도와 같이 해석하였다. 교행시의 터널진입 조건에 따라 압력 변화가 달라짐을 정량적으로 분석하였다.

주요어 : 압력파, 특성법, 이명감, 미기압파

1. 서 론

열차가 고속으로 터널을 주행할때에 터널내에 큰 압력 변동이 발생한다. 터널내 압력 변동 현상들을 파악하기 위하여는 현장시험, 모형실험, 전산해석과 같은 방법이 있으나, 각각 장단점이 있어서 경우에 따라 적절한 접근법을 선택할 필요가 있다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (swnam@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

현장시험은 실제 철도차량이 운행되는 노선에서 이루어지므로 다양한 파라미터에 대한 시험을 하기에는 많은 인력과 시간을 필요로 하며, 모형 실험은 고속의 조건을 맞추기 위한 레이놀즈수 상사와 같은 제한 조건이 있다. 이러한 제약 조건들을 극복하기 위하여 전산유체해석 기법들이 많이 응용되고 있다. 주로 상용 해석 프로그램을 이용한 3D 해석은 열차 모델을 실제 차량과 유사하게 모사할 수 있다는 장점이 있으나, 터널 길이가 길어지고, 교행 해석을 할 경우에는 격자수가 많아져서 해석시간이 크게 증가한다. 따라서, 다양한 파라미터에 대하여 해석을 하기에는 시간적인 제한이 없지 않다. 한편 축대칭 2D모델을 이용한 해석사례도 보고되고 있으나, 축대칭 모델의 물리적인 한계로 인하여 교행 모델에는 근본적으로 적용할 수 없으며, 수직구나 by-pass갱 등이 있을 경우에는 물리적인 형상을 그대로 적용하기 어려운 특징이 있다. Rudinger[1]에 의하여 개발된 특성법은 공기 유동이 터널내 횡단면에서 거의 일정하다는 가정하에 압축과 및 팽창과의 이동을 해석하는 것으로서, 그 이후에 Yamamoto[2], Maeda[3], Nam[4] 등이 이를 응용하여 철도 터널에서의 압력 변동 해석에 이용하였으며, 실험 결과와도 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 고정 격자계를 사용한 특성 방정식으로 두 열차가 터널내에서 교행할때의 압력 변동을 해석하였다. 두 열차가 교행할 때에는 각각의 열차에 의하여 발생하는 압축과 및 팽창과 뿐만아니라 터널내 차량간 선두부 및 후미부가 교차할 때에도 큰 단면적 변화가 있으므로 또 다른 압력 변동이 발생하는 복잡한 메커니즘을 나타낸다. 이러한 현상을 X-t선도를 이용하여 정성적인 패턴을 규명하였으며, 해석에 필요한 교행 열차의 선두부 및 후미부간의 교차 조건에 대한 식들을 유도하였으며, 이를 이용하여 교행 압력 해석을 하였다.

2. 해석 방법

열차가 터널에 주행할 때의 유동 변화가 횡단면에서 일정하다고 가정하고, 음속 및 밀도는 일정하며, 압력과의 전파는 음속과 거의 같다는 가정하에 유동은 특성 곡선상 C+ 및 C- 를 따라서 다음과 같이 상미분 방정식으로 표현할 수 있다.

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

$$\frac{d}{dt}(\rho - \rho au) = (\gamma - 1)\rho\phi - \rho af \quad (2)$$

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 다르게 표현된다.

열차가 없는 지역 1 :

$$f_1 = -\frac{\lambda}{2d}u_1|u_1| \quad (3)$$

$$\phi_1 = \frac{\lambda}{2d}|u_1|^3 \quad (4)$$

열차가 1대 있는 지역 2 :

$$f_2 = -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} u_1|u_1| - \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} (u_2 - V_1)|u_2 - V_1| \quad (5)$$

$$\varphi_2 = \frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} |u_2|^3 + \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} |u_2 - V_1|^3 \quad (6)$$

열차가 2대 있는 지역 3 :

$$f_3 = -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-2R} u_3 |u_3| - \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-2R} (u_3 - V_1) |u_3 - V_1| - \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-2R} (u_3 - V_2) |u_3 - V_2| \quad (7)$$

$$\varphi_3 = \frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-2R} |u_3|^3 + \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-2R} |u_3 - V_1|^3 + \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-2R} |u_3 - V_2|^3 \quad (8)$$

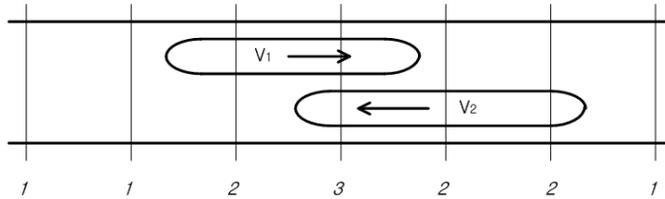


Fig. 1 Definition of domain groups

Figure 2에서, 좌측에서 우측으로 진행하는 1번째 열차의 위치와 우측에서 좌측으로 진행하며 교행하는 2번째 열차의 위치를 X-t diagram에 나타내었다. 1번째 열차의 전두부와 후미부가 터널 내에서 교행 열차의 전두부 및 후미부와 만나는 영역이 교집합 영역인 3 구역이며, 열차 전두부-교행열차 전두부, 열차 전두부-교행열차 후미부, 열차 후미부-교행열차 전두부, 열차 후미부-교행열차 후미부의 4지점에서 급격한 단면 변화를 겪게 되므로 이에 대한 X-t선도를 다음 그림에 나타내었다.

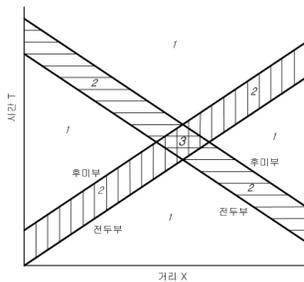


Fig. 2 X-t diagram

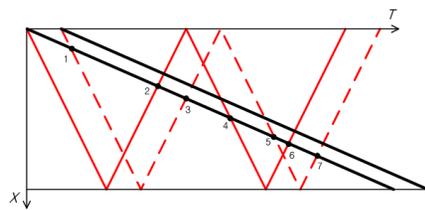


Fig.3 X-t diagram (one train)

Figure 3은 단독 열차에 대한 X-t선도 이므로, 전두부 진입에 의한 압축파와 후미부 진입에 의한 팽창파의 전파 및 반사를 각각 붉은색 실선과 파선으로 나타내었다. 열차 진행에 따라 선두부에서 측정된 압력파는 1~7 점에서 각각 급격한 압력 변화를 겪게 된다. 이에 비하여, 교행 열차에 대한 X-t선도인 Fig. 4에서는 상대 열차에 의한 압력파들과 겹쳐져서 훨씬 더 복잡한 양상을 나타낸다.

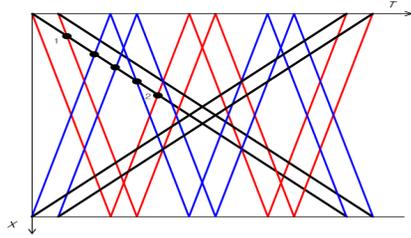


Fig.4 X-t diagram 1 (two trains)

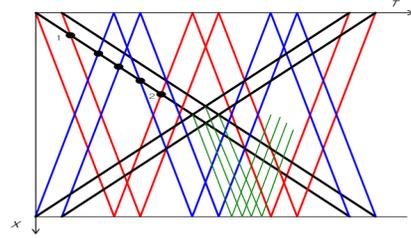


Fig. 5 X-t diagram 2 (two trains)

Figure 4에서 알 수 있듯이, 단독 열차의 경우에 열차 선두부가 압력파와 처음 만나는 1~2 지점 사이에, 교행 열차에 의한 압력파가 중첩되어 3점이 더 존재함을 알 수 있다. 또한, 교행 열차가 터널 내부에서 서로 마주치는 지점에서도 큰 단면적 변화가 있으므로, 이 부분에서도 급격한 압력 변화가 일어난다. 예를들면, 터널 면적을 $A1(100m^2)$, 열차 면적을 $A2(10m^2)$ 라고 가정하면, 열차 1대가 있는 구역의 열차-터널 단면적비는 0.1, 열차 두대가 교행하는 구간의 열차-터널 단면적비는 0.2 이므로 단면적비가 2배로 커짐을 알 수 있다. 즉 터널내 여유공간이 작아져 압력파가 발생하기 쉬운 조건이라고 할 수 있다. 따라서, 이들을 고려한 교행에 대한 X-t선도는 Fig.5와 같이 표현할 수 있다. 즉, 열차 선두부-교행열차 선두부, 열차 선두부-교행열차 후미부, 열차 후미부-교행열차 선두부, 열차 후미부-교행열차 후미부의 교차점인 네 지점에서 큰 단면적 변화로 인한 압력 변화가 일어나므로 이를 고려할 필요가 있다. 열차끼리 터널내에서 교행할 때에 발생하는 압력파들도 터널의 입출구쪽 양방향으로 전파되어 터널 입출구에서 다시 반사되는 과정을 반복하지만, 본 열차가 지나온 터널 입구쪽으로 전파되는 압력파들은 열차가 진행하는 터널 출구쪽의 압력 변동에는 영향을 끼치지 않게 되므로 열차끼리 교행할때에 발생하는 압력파중에서 터널 출구쪽으로 전파되는 압력파들만 차량 궤적선과 만나게 된다. 이로 인하여 본 열차 터널 진입에 따른 압력파(붉은색)와 교행 열차의 터널 진입에 따른 압력파(파란색) 및 열차간 교차 지점에서 발생한 압력파 중에서 열차 진행방향으로 전파되는 파(녹색)들이 복합되어 단독 열차때보다 훨씬 더 복잡한 압력 변동 현상이 열차 교행시에 일어나게 됨을 알 수 있다.

3. 해석 결과 및 분석

Figure 9 및 10은 단독 열차 주행과 교행 열차일 때의 압력파 변동을 나타내었다. 앞의 X-t선도에서 비교하였듯이 단독 열차가 터널에 진입하였을 때의 압력 상승 과정과 첫 번째 압력파인 열차 후미부 진입으로 발생한 팽창파와 만나는 지점에서의 급격한 압력 강하를 잘 나타내고 있으며, 교행 열차 해석 결과에서는, 열차 진입에 의한 압력 상승(1지점), 열차 후미부 진입에 따른 팽창파에 의한 압력 강하(2지점), 교행 열차의 선두부 진입에 따른

압축파에 의한 압력 상승(3지점), 교행 열차의 후미부 진입에 따른 팽창파에 의한 압력 강하(4지점), 교행 열차의 선두부 진입에 따른 압축파가 반사되어 발생한 팽창파에 의한 압력 강하(5지점), 열차 선두부의 진입에 따른 압축파가 반사되어 발생한 팽창파에 의한 압력 강하(6지점)의 순서로 압력 변동이 격변함을 알 수 있다. 또한, 터널 중앙부에서의 교행 열차의 교차로 인하여 추가적으로 발생한 압력파들의 영향이 교차점 이후에 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있다. Figure 10에서 열차 선두부끼리 만나는 지점 A에서 큰 압력 변화가 있음을 알 수 있다. 지점 B는 열차 후미부끼리 교차하는 시점을 나타낸다.

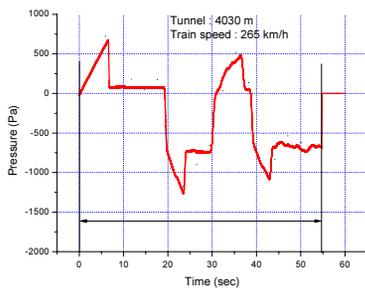


Fig. 9 Result of Calculation (1-train)

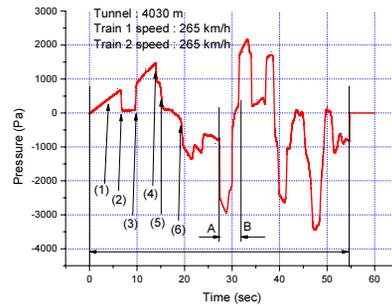


Fig. 10 Result of Calculation (2-trains)

Figure 11은 상대 열차의 터널 진입 시간을 다르게 하였을 때의 결과이다. Figure 11과 같이 상대 열차가 10초 늦게 터널에 진입한 경우, Fig. 10에서 보는 초기의 압력 상승-본 열차의 후미부에 의한 팽창파-상대 열차의 선두부에 의한 압축파로 인한 압력 변화 유형은 같지만, 시간적으로는 지연되어 있음을 알 수 있다. 압력파 간의 상쇄 효과를 보기 위하여 상대 열차의 터널 진입 지연 시간을 본 열차의 터널 진입에 의하여 발생한 압축파가 터널 내부로 전파되어 터널 출구에서 팽창파로 반사되는 시간과 같이 하였다. 터널 길이가 4030m이고 압력파의 전파속도를 340m/s로 가정하였으므로 본 열차 선두부 진입에 의하여 발생한 압축파가 터널 출구에 도달하는 시간은 약 11.853초 이므로, 상대 열차의 터널 진입 지연 시간을 이와 같게 하였다. Figure 11과 달리 초기의 압력 상승-본 열차의 후미부에 의한 팽창파 후에, 본 열차의 선두부에 의하여 발생한 압축파가 터널 출구에서 반사되어 팽창파로 되돌아 오는 것과 상대 열차의 선두부 진입에 의한 압축파가 중첩되어 더 이상의 압력 상승은 일어나지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 상대 열차간의 터널 진입 시간 차이에 의하여도 압력 변화의 패턴이 크게 달라짐을 알 수 있다.

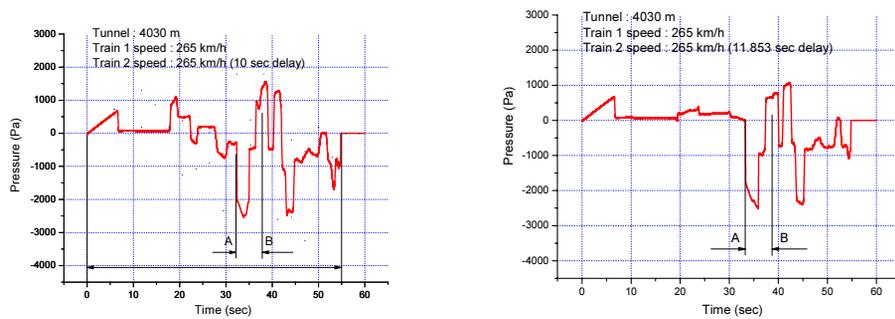


Fig. 11 Result of Calculation (two trains)

4. 결 론

본 연구에서는 터널내 압력 변동이 터널길이 방향으로 1차원적으로 변화한다는 가정에 특성 방정식을 이용하여 열차가 터널을 주행할 때의 압력 변동을 해석하였다. 계산 결과의 검증에 위하여 KTX를 이용한 시험 결과와 비교하여, 특성법 해석 결과가 시험결과와도 정량적 및 정성적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 교행 열차에 대한 해석에서도 X-t선도에서 보는바와 같이 두 열차에 의한 압력파들의 중첩과 교행 전후의 전두부간 및 후미부간의 교행시 발생하는 추가적인 압력파들을 잘 묘사할 수 있었다. 상대 열차의 터널 진입 시간을 다르게 함에 따라 터널내 압력파들의 중첩 작용으로 압력 변동 패턴이 달라짐을 알 수 있었다. 상대 열차의 진입시간이 본 열차의 진입에 의하여 생성된 압축파가 전파되어 터널 출구에 도달할 때와 같게되면, 압력파간의 상쇄 및 중첩에 의하여 특정 시간에서는 쇠퇴함을 알 수 있다. 두 열차의 교행 조건을 다양하게 변화시켜서도 압력파 변형 패턴이 다르게 변화함을 알 수 있었다. 이상과 같은 연구 결과로부터, 특성 해법을 이용한 터널내 압력 해석은 단독 열차 뿐만아니라 교행 열차에 대하여도 적용할 수 있음을 알 수 있으며, 이 값들을 이용하여 열차의 터널 진입에 따른 압력파의 전파가 터널 출구에서 방사될 때의 압력 구배를 계산함으로써 미기압파를 분석하는 데에도 적용할 수 있을 것으로 사료되며, 차량의 기밀도 정도를 이용하면 터널내 압력 변화가 차량 내부로 어느 정도 전달되는지를 파악하여 이명감 분석에도 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] G.Rudinger (1955) Wave Diagrams for Nonsteady Flow in Ducts, D.Van Nostrand Co. Inc., New York.
- [2] A.Yamamoto. (1983) Aerodynamics of Train and Tunnel, *RTRI Report*, 1230, pp. 1-70.(in Japanese)
- [3] T.Maeda (1998) Aerodynamic Characteristics of Train and Countermeasures for Decreasing Micro-pressure Wave, *RTRI Report*, 20, pp. 196-229.(in Japanese)
- [4] Seong won Nam, Hyeok-bin Kwon, Su-hwan Yun (2012) Characteristics Method Analysis of Wind Pressure of Train running in Tunnel, *J.KSR*, 15(5), pp.436-441.(in Korean)