

터널에서의 고속철도 압력파에 관한 x-t선도 이론 해석

Theoretical x-t Diagram Analysis on Pressure Waves of High Speed Train in Tunnel

남성원¹ · 권혁빈²

Seong-Won Nam · Hyeok-Bin Kwon

Abstract

Theoretical study has been conducted to clarify pressure characteristics of KTX (Korea Train eXpress) in tunnel. The severe pressure change in tunnel may give rise to the ear-discomfort for passenger and fatigue for car body. Critical tunnel lengths which are induced by x-t diagram analysis can be applied to the experimental results measured by using the running test with atmospheric pressure sensors and portable data acquisition system in previous study. In this study, the tunnels from 200m to 4000m in length have been chosen for the investigation of tunnel length effects. We found that there are similar patterns of external pressure change for each critical tunnel length. The critical tunnel lengths are governed by train speed, train length and sonic velocity. And, the patterns of pressure wave in tunnel are classified into eight groups.

Keywords : Pressure variation(압력변동), KTX(한국 고속전철), Ear-discomfort(귀 불쾌감), Expansion wave(팽창파), Compression wave(압축파), Critical Tunnel length(임계터널길이)

1. 서론

우리나라에서도 최고속도 300km/h로 주행하는 고속철도가 운행되면, 차량 속도가 이에 비하여 비교적 느린 기존의 열차에서는 경험하지 못한 여러 가지 공기역학적 문제가 대두될 것으로 예상되며, 이러한 문제들을 해결하기 위한 방안을 여러 각도에서 검토할 필요가 있다. 열차 속도가 증가하면 차량 공력소음은 속도의 5~6승에 비례하여 증가하며, 양력에 의한 가선과 판토틀의 이선, 차량 주행 저항의 증가, 선로변 및 통과역의 열차풍 및 객실내외의 압력변동으로 인한 귀의 불쾌감 및 차체 피로하중 증가 등과 같은 공기역학 관련 문제들이 새로이 야기된다.

철도차량이 터널을 고속으로 주행하면 터널내부에는 압력변동이 발생하며, 그 압력이 객실내부에 전파되어 일정 허용압력 이상이 되면 승객에게 불쾌감을 주게된다. 해외 선진국에서는 고속철도 뿐만아니라 기존선에서도 고속화

가 진행되어 단선 터널의 경우, 터널내 압력 변동이 고속철도에 필적할 정도로 증가하는 경우도 발생하였다. 이처럼 차량외부의 압력변화는 공조환기장치 및 출입문과 같은 차량의 기밀취약 부분을 경유하여 객실내 압력변화를 일으키며 이러한 객실내 압력변화는 인체의 외이(外耳)와 중이(中耳)간의 압력차이를 야기하여 불쾌감을 느끼게 된다 [1-2].

또 다른 문제점은 고속철도 차량이 터널을 주행할 때 yawing과 같은 좌우 동요가 개활지보다 더 크게 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 차량 동요의 원인으로는 궤도틀림, 사행동, 공기압력 등을 들 수 있으나, 특히 터널에서 더 크게 된다는 점에서는 전자의 두 요소보다 후자가 주 요인으로 추정된다[3].

그 외에도 터널에서의 압력 변동은 차량과 터널에 대하여 피로 반복하중을 부가하여 차량의 창문이나 차체의 균열과 터널 내부의 콘크리트 박리를 촉진시키는 결과를 가져온다. 한편, 고속철도와 관련된 압력문제를 다룬 연구들도 활발히 진행되어 왔으나[4-5] 실제 차량을 이용한 사례

1 정회원, 한국철도기술연구원
2 정회원, 한국철도기술연구원

는 그다지 많지 않다. 본 연구에서는 경부 고속철도 서울-대전 구간에서 최고 속도로 터널을 주행할 때에 차량 주위의 압력 변동 특성을 터널 길이별로 분류하였으며, 이러한 압력 변동 유형에 대한 정량적 및 정성적인 특징을 해석하였다.

2. 터널에서의 압력 변동 기구

Fig. 1에 고속철도 터널에서 발생하는 압력파에 대한 개략도를 나타내었다. 열차가 터널에 고속으로 진입할 때에 발생하는 압력변동은 다음과 같은 3가지 원인에 기인하는 것으로 알려져 있다. 열차 전두부의 진입에 의한 압축파의 전파, 열차 후미부의 진입시에 발생하는 팽창파의 전파, 열차가 터널에 돌입할 때에 받는 압력 상승이다.

각각에 대한 메카니즘은 다음과 같다. 열차 전두부가 터널에 진입할 때에 열차 전면에는 압축파가 형성된다. 이 압축파는 음속으로 터널 출구로 전파되어 터널 출구에서 펄스상의 압력파가 되어 외부로 방사되며 이를 미기압파라 한다. 그 때에 터널 출구에서는 팽창파가 되어 반사되어 터널 입구 방향으로 진행되며, 터널입구에서 다시 반사되어 압축파가 되어 터널 출구 방향으로 진행하는 것을 반복하게 된다. 열차의 후미부가 터널에 진입할 때에는 열차 후면에서는 압력이 저하하여 팽창파가 형성된다. 이 팽창파도 음속으로 터널 출구 방향으로 진행하여 위와 같은 과정을 반복하게 된다. 한편, 열차가 터널에 진입할 때에 열차의 외부 압력이 증가하는 압력 상승은 열차의 후미부 돌입에 의한 팽창파와 부딪히면서 없어진다[6-10].

2.1 전두부 및 후미부에 의한 압력파의 전파

Fig. 2 및 Fig. 3에 전두부 차량과 후미부 차량이 터널 진입시에 발생하는 압력 변동 기구를 나타내었다. 전두부가 터널에 진입할 때에 형성되는 압축파는 터널 출구에서 반사되어 팽창파로 되돌아오며, 입구에서 다시 반사되어 압축파

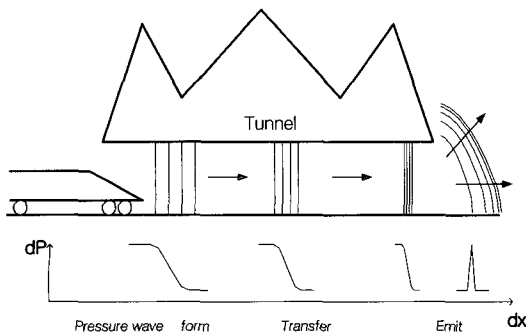


Fig. 1. Pressure Waves in Tunnel

로 전파된다. 경부 고속 철도 차량이 최고속도 300km/h로 주행할 때에 전방으로부터 오는 팽창파를 2회, 후방에서 오는 압축파를 1회 받게 된다. 이 때에 열차가 압력파가 만나는 시간 및 거리와의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

첫번째 압력파인 전방에서 오는 팽창파와 만나는 시간을 t_1 , 그 때의 거리를 L_1 이라고 하면,

$$t_1 = \frac{L_1}{V} \quad t_1 = \frac{L_t + (L_t - L_1)}{V_p} \quad (1)$$

따라서,
$$\frac{L_1}{L_t} = \frac{2V}{V_p + V} \quad (2)$$

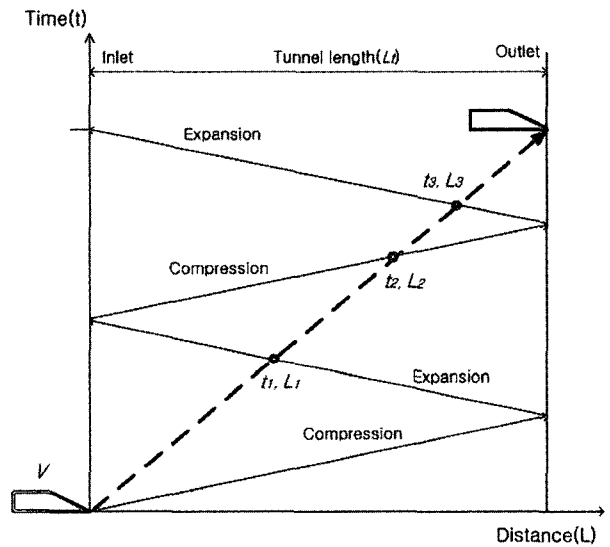


Fig. 2. Pressure waves by the entry of train nose

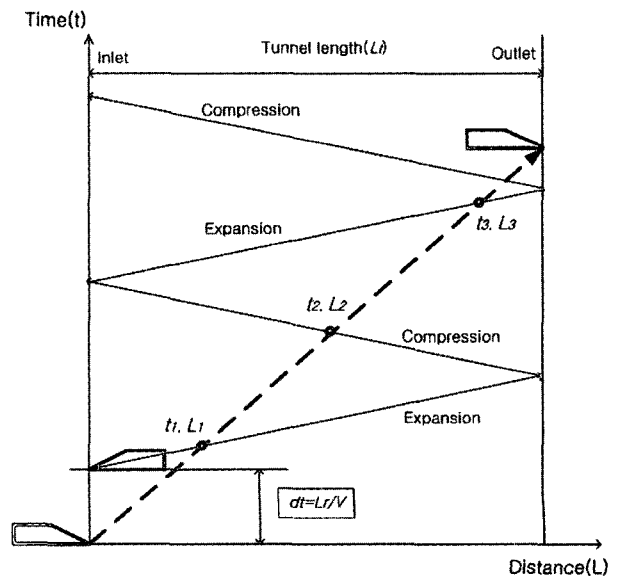


Fig. 3. Pressure waves by the entry of train tail

두번째 압력파인 후방에서 오는 압축파와 만나는 시간을 t_2 , 그 때의 거리를 L_2 라고 하면,

$$t_2 = \frac{L_2}{V} \quad t_2 = \frac{2L_t + L_2}{V_p} \quad (3)$$

따라서,
$$\frac{L_2}{L_t} = \frac{2V}{V_p - V} \quad (4)$$

세번째 압력파인 전방에서 오는 팽창파와 만나는 시간을 t_3 , 그 때의 거리를 L_3 라고 하면,

$$t_3 = \frac{L_3}{V} \quad t_3 = \frac{3L_t + (L_t - L_3)}{V_p} \quad (5)$$

따라서,
$$\frac{L_3}{L_t} = \frac{4V}{V_p + V} \quad (6)$$

식 (2), (4), (6)으로부터 일정한 규칙을 찾을 수 있으며, 전방에서 오는 팽창파와 만나는 거리는

$$\frac{L_i}{L_t} = \frac{2iV}{V_p + V} \quad \because i=1,2,\dots \quad (7)$$

후방에서 오는 압축파와 만나는 거리는

$$\frac{L_j}{L_t} = \frac{2jV}{V_p - V} \quad \because j=1,2,\dots \quad (8)$$

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 전두부 보다 시간 $dt = L_r/V$ 만큼 늦게 터널에 진입하는 열차 후미부에 의하여 형성되는 팽창파는 터널 출구에서 압축파로 반사되어 전파되고 입구에서 다시 팽창파로 반사된다.

첫번째 압력파인 후방에서 오는 팽창파와 만나는 시간을 t_1 , 그 때의 거리를 L_1 이라고 하면,

$$t_1 = \frac{L_1}{V} \quad t_1 = \frac{L_1}{V_p} + \frac{L_r}{V} \quad (9)$$

따라서,
$$L_1 = \frac{V_p L_r}{V_p - V} \quad (10)$$

두번째 압력파인 전방에서 오는 압축파와 만나는 시간을 t_2 , 그 때의 거리를 L_2 라고 하면,

$$t_2 = \frac{L_2}{V} \quad t_2 = \frac{L_t + (L_t - L_2)}{V_p} + \frac{L_r}{V} \quad (11)$$

따라서,
$$L_2 = \frac{2VL_t + V_p L_r}{V_p + V} \quad (12)$$

세번째 압력파인 후방에서 오는 팽창파와 만나는 시간을

t_3 , 그 때의 거리를 L_3 라고 하면,

$$t_3 = \frac{L_3}{V} \quad t_3 = \frac{2L_t + L_3}{V_p} + \frac{L_r}{V} \quad (13)$$

따라서,
$$L_3 = \frac{2VL_t + V_p L_r}{V_p - V} \quad (14)$$

식 (10), (12), (14)로부터, 후방에서 오는 팽창파와 만나는 거리는

$$\frac{L_i}{L_t} = \frac{2(i-1)V L_t + V_p L_r}{L_t(V_p - V)} \quad \because i=1,2,\dots \quad (15)$$

전방에서 오는 압축파와 만나는 거리는

$$\frac{L_j}{L_t} = \frac{2jV L_t + V_p L_r}{L_t(V_p + V)} \quad \because j=1,2,\dots \quad (16)$$

2.2 차량속도 범위 및 압력파 유형

Fig. 4에 다양한 차량 속도에 대한 압력파의 거리-시간 선도를 나타내었다. 속도에 따라서 차량의 속도 선도인 선분 OT는 (1)~(5)까지 이동할 수 있으나, A점 아래인 (1)과 같이 되는 경우는 전두부 진입에 따른 압축파가 터널출구에 도달하는 시간보다 빠른 경우이므로 차량속도가 1224km/h 이상인 경우에 해당된다. 마찬가지로 AB구간에 들어 올 수 있는 차량속도는 압력파가 3회 진행한 속도 이내이므로 이 때

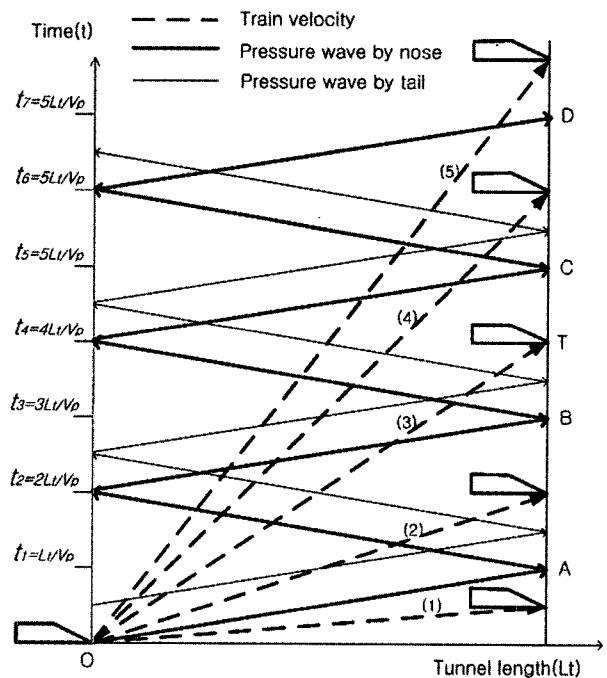


Fig. 4. x-t diagram for train velocity

의 차량속도는 408~1223km/h인 경우이며, BC구간에 들어올 경우는 245~407km/h, CD구간의 경우는 175~244km/h이다. 세계 각국에서 상업 운행중인 고속철도의 속도를 고려하면 AB구간은 비현실적이며, CD구간도 일반적으로 200km/h 이상을 고속철도라고 하며, 터널 입출구에서 압력파가 반사될 때에 그 크기가 약 70%수준으로 감소되므로 C 점에서 반사될 때에는 원래 크기의 17% 수준이 되므로 압력파 문제가 미미해 진다고 할 수 있다. 따라서, 300km/h로 주행하는 KTX의 경우는, 차량선도를 BC구간에서 고려하는 것이 적절하다.

Fig. 5는 KTX 차량이 속도 295km/h로 4000m의 터널을

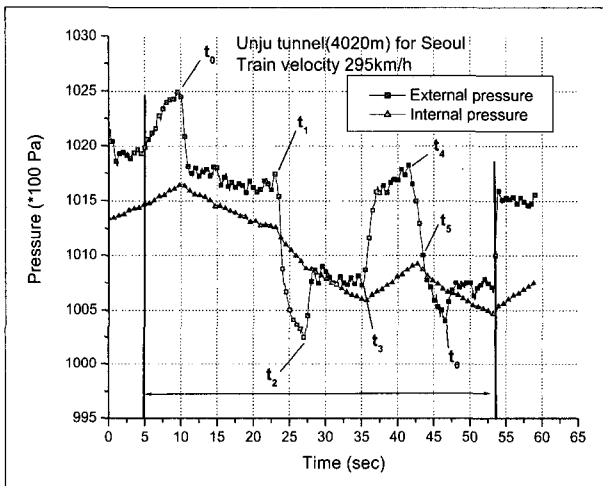


Fig. 5. Pressure Change in Tunnel[11]

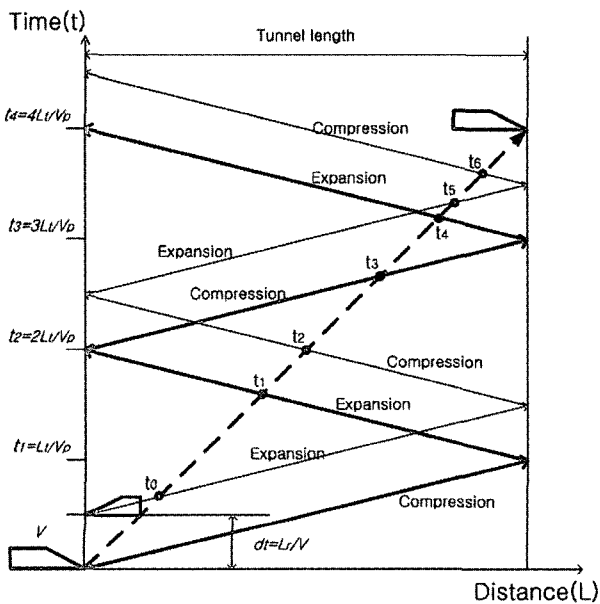


Fig. 6. Pressure waves produced by the entry of train nose and tail

통과할 때의 압력 변화를 나타낸 것이며, 차량 전두부 및 후미부의 터널 진입으로 생성된 각각의 압력파가 차량 속도선도와 만나는 시간을 x-t선도로 표시한 것이 Fig. 6이다. 차량 전두부가 터널에 진입한 후, 후미부 진입으로 생성된 팽창파를 만나는 시간 t_0 까지는 압력상승이 일어나며, 팽창파와 만나는 t_0 에서 압력하강이 일어난다. 터널출구에서 반사되어 오는 팽창파와 만나는 시간 t_1 에서 압력하강, 압축파와 만나는 시간 t_2 에서 압력상승이 일어나며, 이러한 압력 변화는 열차가 터널내를 주행하는 동안 시간 t_6 까지 압력파를 만날 때마다 압력상승과 하강을 반복하게 된다.

3. 압력파형별 임계 터널길이

터널내 압력 변화는 정해진 차량 제원과 차량속도 및 터널 크기에 대하여 터널 길이별로 각각 다른 압력변동 유형을 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 압력변동의 유형별 터널 길이는 터널내에서의 압력파의 전파에 소요되는 시간과, 차량 속도 선도를 같이 표시하는 x-t 선도로부터 유형별로 경계를 구분하는 터널 길이를 산출할 수 있다. Fig. 7에서 후미부 진입으로 인한 팽창파(가는실선)는 전두부 진입으로 인한 압축파(굵은실선)보다 일정시간 $dt=L_r/V$ 만큼 늦게 진행된다. 동일한 열차 길이와 속도에서 터널길이가 짧아지면 dt 는 t_1 보다 커지며, 극단적으로 짧아지면 t_3 보다 커지게 된다. 이처럼 터널이 짧아지면 압력파가 터널내를 이동하는 시간 ($t_1 \sim t_4$)도 작아져서 x-t선도의 변화는 Fig. 13과 같이 될 때까지 차량속도 선도(점선)가 만나는 압력파의 순서가 각각의 임계 터널 길이를 경계로 다르게 된다. 따라서 dt 가

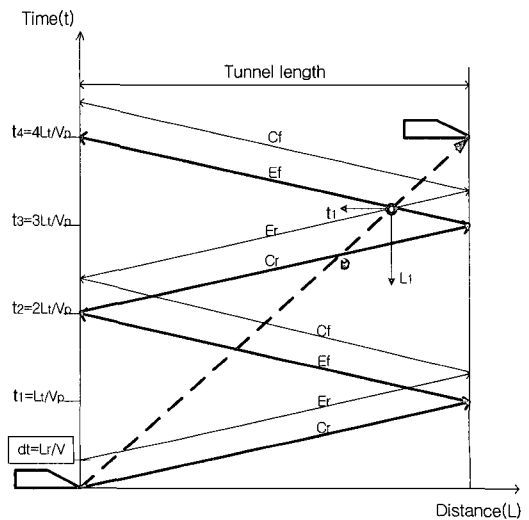


Fig. 7. Pressure waves (pattern 1)

0에 가까운 지점부터 t_3 이상까지 변하는 동안에 압력파의 변화 유형은 Fig. 7~Fig. 13에서 구한 7개의 형태로 나눌 수 있다. 즉, 각각의 그림에서 정한 임계 터널 길이를 경계로 압력파 성분과 방향이 다르게 되며, 이는 차체 및 터널 내벽에 부가되는 압력파의 영향이 달라진다는 것을 의미한다. 장대터널에서의 압력파의 유형은 열차 후미부 진입 지연시간 dt 가 거리 L_1 에 해당하는 시간 t_1 이하까지는 같은 유형을 나타내며, 차량 속도 선도와 만나는 압력파는 팽창파(Er)-팽창파(Ef)-압축파(Cf)-압축파(Cr)-팽창파(Er)-팽창파(Ef)-압축파(Cf)의 순서로 만나게 된다. 여기서, 영문 (E)는 팽창파, (C)는 압축파를 나타내며, 압력파가 진행되어 오는 방향이 전두부는 (f), 후미부는 (r)로 표기하였다.

Fig. 7에서 차량속도 선도, 열차 전두부 진입에 의하여 생

성되는 압축파 및 후미부 진입에 의한 팽창파 선도로부터 시간 t_1 은 거리 L_1 을 차량속도 V 로 소요되는 시간, 전두부의 압력파가 음속 V_p 로 거리 $4L_1-L_1$ 까지 도달하는데에 소요되는 시간, 그리고 후미부 진입으로 인한 팽창파가 전파되는 시간 $(2L_1+L_1)/V_p$ 와 진입 지연시간 L_r/V 와의 합이다.

$$t_1 = \frac{L_1}{V}$$

$$t_1 = \frac{4L_1 - L_1}{V_p} \tag{17}$$

$$t_1 = \frac{L_r}{V} + \frac{2L_1 + L_1}{V_p}$$

$$L_t = \frac{L_r V_p (V_p + V)}{2V(V_p - 3V)} \quad (\text{pattern 1}) \tag{18}$$

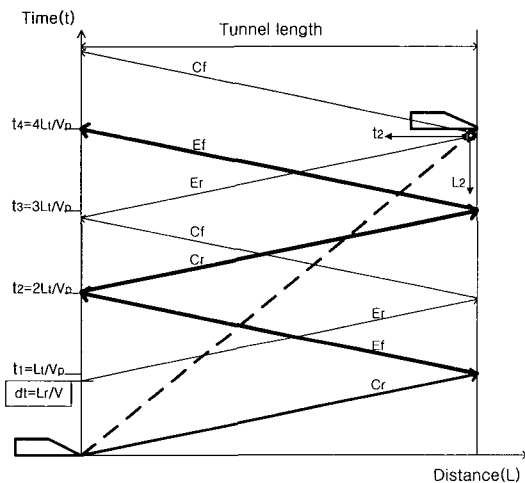


Fig. 8. Pressure waves (pattern 2)

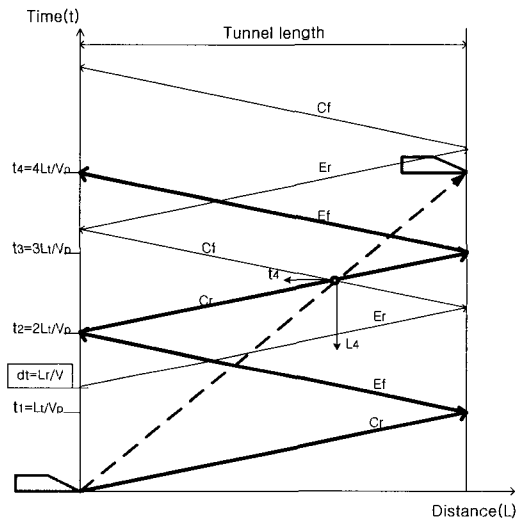


Fig. 10. Pressure waves (pattern 4)

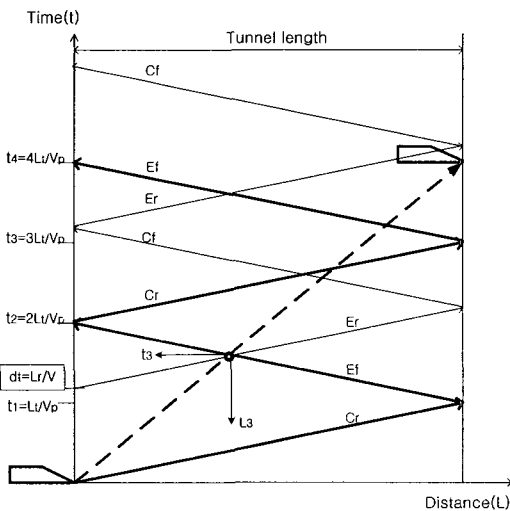


Fig. 9. Pressure waves (pattern 3)

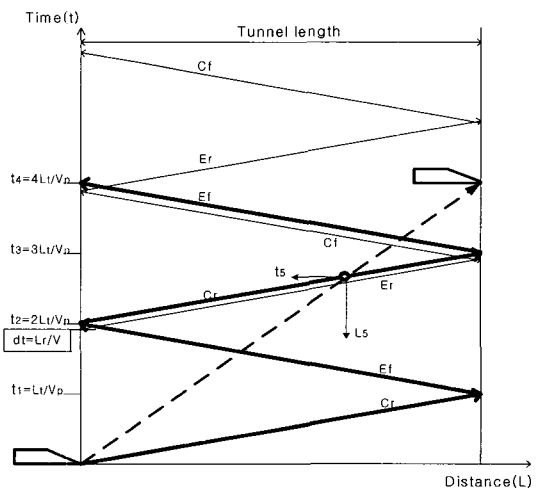


Fig. 11. Pressure waves (pattern 5)

차량길이 $L_r=387\text{m}$, 음속 $V_p=340\text{m/s}$, 차량속도 $V=83.3\text{m/s}(300\text{km/h})$ 에 대하여 $L_t=3713\text{m}$ 이다.

유형2에 해당하는 그래프를 Fig. 8에 표시하였다. 유형1과 달라지는 시간 t_2 에 대하여

$$t_2 = \frac{L_t}{V} \quad (19)$$

$$t_2 = \frac{L_r}{V} + \frac{3L_t}{V_p}$$

$$L_t = \frac{L_r V_p}{V_p - 3V} \quad (\text{pattern 2}) \quad (20)$$

식 (18)과 동일한 조건에서 $L_t=1462\text{m}$ 이다.

Fig. 9의 유형3에 대한 시간 t_3 는

$$t_3 = \frac{L_3}{V}$$

$$t_3 = \frac{2L_t - L_3}{V_p} \quad (21)$$

$$t_3 = \frac{L_r}{V} + \frac{L_3}{V_p}$$

$$L_t = \frac{L_r V_p (V_p + V)}{2V(V_p - V)} \quad (\text{pattern 3}) \quad (22)$$

이며, 임계 터널길이는 $L_t=1302\text{m}$ 이다.

Fig. 10의 유형4에 대한 시간 t_4 는

$$t_4 = \frac{L_4}{V}$$

$$t_4 = \frac{2L_t + L_4}{V_p} \quad (23)$$

$$t_4 = \frac{L_r}{V} + \frac{2L_t - L_3}{V_p}$$

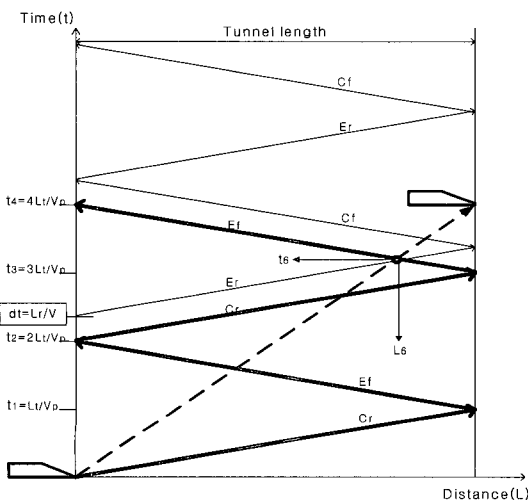


Fig. 12. Pressure waves (pattern 6)

$$L_t = \frac{L_r V_p (V_p - V)}{4V^2} \quad (\text{pattern 4}) \quad (24)$$

이며, 임계 터널길이는 $L_t=1217\text{m}$ 이다.

Fig. 11의 유형5에 대한 시간 t_5 는

$$t_5 = \frac{L_5}{V}$$

$$t_5 = \frac{3L_t - L_5}{V_p} \quad (25)$$

$$t_5 = \frac{L_r}{V} + \frac{L_5}{V_p}$$

$$L_t = \frac{L_r V_p (V_p + V)}{3V(V_p - V)} \quad (\text{pattern 5}) \quad (26)$$

이며, 임계 터널길이는 $L_t=868\text{m}$ 이다.

Fig. 12의 유형6에 대한 시간 t_6 는

$$t_6 = \frac{L_6}{V}$$

$$t_6 = \frac{4L_t - L_6}{V_p} \quad (27)$$

$$t_6 = \frac{L_r}{V} + \frac{L_6}{V_p}$$

$$L_t = \frac{L_r V_p (V_p + V)}{4V(V_p - V)} \quad (\text{pattern 6}) \quad (28)$$

이며, 임계 터널길이는 $L_t=651\text{m}$ 이다.

Fig. 13과 같은 유형7에 대한 시간 t_7 는

$$t_7 = \frac{L_t}{V} \quad (29)$$

$$t_7 = \frac{L_r}{V} + \frac{L_t}{V_p}$$

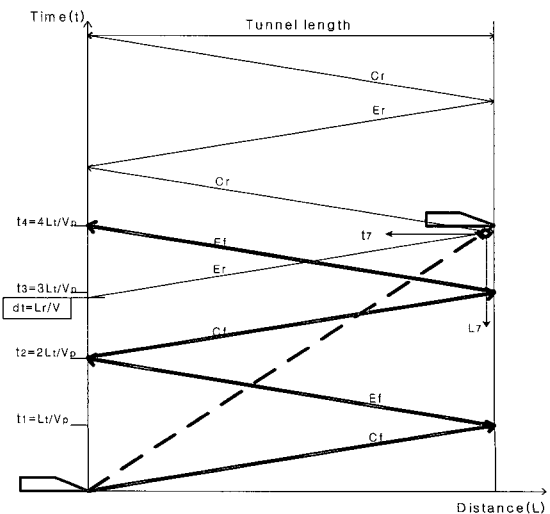


Fig. 13. Pressure waves (pattern 7)

$$L_t = \frac{L_r V_p}{V_p - V} \quad (\text{pattern 7}) \quad (30)$$

이며, 임계 터널길이는 $L_t=513\text{m}$ 이다.

이상과 같이, 동일한 차량크기 및 터널크기, 차량길이 및 차량속도에 대하여도 터널 길이별로 터널을 통과하는 차량에 부딪히는 압력파의 종류 및 방향이 각각 다르게 나타남을 알 수 있다.

각각의 유형에 대한 임계 터널길이별 압력파의 성분을 Table 1에 정리하였다. 유형1과 유형2는 압력파 성분의 순서는 같으므로 1462m 이상의 터널에서 계측한 차량 외부 압력파의 파형은 같으나, 압력파의 진행 방향은 다르게 구성되어 있음을 알 수 있다. 유형3~유형5의 압력파 성분도 동일하지만, 각각의 압력파가 진행되어 오는 방향은 다르게 구성되어 있다. 한편, 유형6 및 유형7도 같은 압력파 성분으로 구성되어 있으나 진행방향은 다르며, 터널길이가 513m 이하인 경우는 유형8과 같은 압력파 성분과 만나게 된다.

압력파의 성분별로는, 유형1~2, 유형3~5, 유형6~7, 유형8의 4가지로 분류할 수 있으나, 각각의 압력파가 진행되어 오는 방향까지 고려하면 표 1과 같이 8가지 유형으로 나눌 수 있다. Fig. 5의 결과로부터 운주터널의 압력 파형은 유형 1에 속함을 알 수 있으며, 그 외의 터널에 대한 결과는 문헌11에서 분석하였다.

한편, 이러한 압력 변화 유형을 참고로 하여 차량 제작시에는 기밀 설계와 차체 구조 설계에 진동 및 하중으로 인한 피로 외에도 공기역학적 하중도 고려하여야 할 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서는 터널내 압축파 및 팽창파의 전파를 x-t선도로 해석할 때에, 터널내 압력파의 진행을 1차원적으로 가정하여 분석하였으나, 실제 유동에서는 터널내벽 및 궤도와의 접촉면의 거칠기 및 점성의 영향에 의하여 형성되는 경계층 부근에서의 압력파의 감쇄 및 상호 간섭이 있으

므로 향후에는 이러한 경계층 효과도 고려한 이론식 개발이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 경부고속 철도 차량 KTX의 터널 주행시, 터널내부에서 형성되는 압력파의 특성에 관한 이론적 연구를 수행하였다. 열차의 운행 최고 속도로 다양한 길이의 터널을 통과할 때에 야기되는 압력변화 유형을 x-t선도를 이용하여 길이별로 구분하여 각각에 대한 임계 터널길이를 구하였으며, 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 다양한 길이의 터널에 대하여 경부고속전철이 최고속도로 주행할 때에 차량/터널의 압력파 변동 특성을 정성적 및 정량적으로 규명하였다.
- (2) 차량길이 387m의 고속전철이 300km/h의 최고속도로 터널을 통과할 때에 발생하는 압력 변화 유형은 압력파 성분별로는 4가지로 구분할 수 있으며, 터널길이가 1462m 이상의 경우는 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파-팽창파-압축파 순서로, 868m 이상에서는 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파, 513m 이상에서는 팽창파-압축파-팽창파-팽창파-압축파, 513m이하 터널에서는 팽창파-압축파-팽창파의 순서로 만나게 된다.
- (3) 터널내에서의 압력파가 진행되어 오는 방향 성분까지도 고려하면 터널내 압력파 유형은 8가지로 분류할 수 있으며, 이때의 임계 터널길이는 각각 3713m, 1462m, 1302m, 1217m, 868m, 651m, 513m이다.

참고 문헌

1. Kim, H. D., 1996, "Aerodynamics of High Speed Railway(III)", *J. of the KSME*, Vol.36, No.5, pp.470-486 (in Korean).
2. Raghunathan, R. S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2002, "Aerodynamics of High Speed railway Train", *Progress in Aerospace Science*, Vol.38, pp.469-514.
3. Suzuki, M, 1996, "Aerodynamical Studies of the Vibration of a Train in a Tunnel", *Report of RTRI*, No.8 (in Japanese).
4. Kim, H. D., Setoguchi, T. 1997, "Numerical study on the Interaction Between Unsteady Compression and Unsteady Expansion Wave", *Trans. of KSME*, Vol.21, No.11, pp.1413-1421 (in Korean).
5. Kim, H. D., 1997, "Aerodynamic Analysis of a Train running in a Tunnel", *Trans. of KSME*, Vol.21, No.8, pp.963-972 (in Korean).
6. Schetz, J. A., 2001, "Aerodynamics of High speed Trains",

Table 1. Pressure wave patterns

Pattern	Tunnel length (m)	Pressure waves
1	$L_t \geq 3713$	Er-Ef-Cf-Cr-Er-Ef-Cf
2	$3713 > L_t \geq 1462$	Er-Ef-Cf-Cr-Ef-Ef-Cf
3	$1462 > L_t \geq 1302$	Er-Ef-Cf-Cr-Ef
4	$1302 > L_t \geq 1217$	Ef-Er-Cf-Cr-Ef
5	$1217 > L_t \geq 868$	Ef-Er-Cr-Cf-Ef
6	$868 > L_t \geq 651$	Ef-Cr-Er-Ef-Cf
7	$651 > L_t \geq 513$	Ef-Cr-Ef-Er-Cf
8	$L_t < 513$	Ef-Cr-Ef

Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.33, pp.371-414.

7. Kwon, H. B., 2001, "A Study on the Unsteady Compressible Flow Field Induced by a High Speed Train Passing through a Tunnel", Ph.D Thesis, Seoul National Univ.
8. Hara, T., Kawaguti, M., Fukuchi, G., and Yamamoto, A., 1968, "Aerodynamics of High Speed Train", *IRCA-UIC High Speed Symposium*, Vienna, pp.1-26.
9. Maeda, T., 1998, "A Study on Aerodynamical Characteristics and Counterplan for Micro Pressure wave in High Speed Train", *Report of RTRI*, No.20 (in Japanese).
10. Hukuda, M., 1999, "A Study on the Pressure Wave Propagating into High Speed Railway Tunnel", *Report of RTRI*, No.28 (in Japanese).
11. Nam, S. W., 2004, "A Study on the Characteristics of Internal and External Pressure Variation for KTX", *J. of KSR*, Vol.7, No.1, pp:26-31 (in Korean).