

〈논 문〉

터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(I) — 1열차의 공기 역학 —

김 희 동*
(1996년 3월 26일 접수)

Aerodynamic Analysis of a Train Running in a Tunnel (I) — Aerodynamics of One-Train —

Heuy-Dong Kim

Key Words : Compressible Flow(압축성 흐름), High-Speed Train(고속열차), Railway Tunnel(철도터널), Pressure Wave(압력파), Aerodynamic Drag(공력저항), Compression Wave(압축파), Shock Tube(충격파관), One-Train(1열차)

Abstract

As a high-speed train enters a tunnel, a compression wave is generated ahead of it due to the piston action of train. The compression waves propagate along the tunnel and reflect at the exit of tunnel. A complex wave phenomenon appears in the tunnel, because of the successive reflections of the pressure waves at the exit and entrance of tunnel. The pressure waves give rise to large pressure transients which impose the fluctuating loads on the running train. It is highly needed that the pressure transients should be predicted to design the trainbody and to improve the comfortableness of the passengers in the train. In the present study, the pressure transients were calculated numerically for a wide range of train speed and compared with the previous tunnel tests. The calculation results agreed with ones of the tunnel tests, and the mechanism of pressure transients was made clear.

1. 서 론

일반적으로 압축성은 고속흐름으로 인하여 유체의 체적변화가 현저하게 발생하거나, 유속으로 인한 밀도변화가 무시될 수 있는 흐름이라도 비정상적 현상이 발생하여 교란(disturbance)이 유한속도로 전파하는 경우에 고려할 필요가 있다. 고속으로 주행하는 열차의 속도 V 를 300 km/h로 가정하는 경우에 열차의 마하수 Mt 는 약 0.25 정도로 되며, 이 경우 유체의 압축성은 무시될 수 있을 정

도이다.⁽¹⁾ 그러나 이러한 속도로 터널내를 주행하는 경우에는 열차의 피스톤 작용에 의하여 터널내에서 복잡한 파동현상이 발생하게 된다.

고속열차가 터널내를 돌입하는 경우, 열차의 피스톤 작용에 의해 열차 전방의 정지 공기를 압축하여, 그 전방에 압축파가 형성된다. 이 압축파는 터널내를 거의 음속에 가까운 속도로 전파하여, 그 일부는 터널 출구로부터 방출, 충격성 소음(impulsive noise)의 원인⁽²⁾이 된다. 한편 터널 출구에 도달한 압축파의 일부는 터널 출구면의 개방단(open-end) 조건에 의하여 팽창파로 터널입구를 향해 전파하게 되며, 이때 진행되는 열차와 복잡한

*회원, 안동대학교 기계공학과

간섭^(3,4)을 하게 된다. 이 경우 열차의 기밀이 완전히 되어 있지 않다면(실제 열차에는 차내 환기 등의 목적으로 인하여 완전한 기밀은 사실상 어렵다), 차내 승객은 격심한 압력변동을 겪게 된다. 더욱이 이러한 압력파들은 열차의 선두부, 후미부, 터널입구 및 터널 출구면에서 반사를 반복하게 되며, 그 결과 열차에는 개활지 주행에 비해 매우 큰 압력 및 공기저항 변동이 발생한다. 이와 같이 터널내의 공기역학적 문제들은 차내 승객의 쾌적성, 안정성은 물론 차량의 동력 및 차체의 설계적인 면에도 관계하게 되므로, 이 분야에 대한 연구는 매우 중요하다.

종래 터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 문제에 관하여 몇몇 연구보고가 출판되어 있지만,^(5,6) 터널내의 파동현상을 고려한 연구는 거의 전무하다. 더욱이 현재 우리나라에서 추진하고 있는 고속열차의 속도는 300 km/h 이상으로 계획하고 있으므로, 현재까지 제외국에서 비교적 저속주행에 관하여 수행된 몇몇 연구결과로부터 예상될 수 있는 이상의 문제들이 발생할 수 있다. 따라서 고속열차의 공기역학에 관한 새로운 관심이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 고속열차가 터널내를 단독주행(1열차)하는 경우에 대하여, 터널내에서 발생하는 파동현상에 착안하여, 공기역학적 문제를 수치해석적으로 연구하였다. 계산은 기존의 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도가 100~400 km/h인 범위에 대하여 수행하였다. 계산은 특성곡선법을 사용하였으며, 열차와 터널의 단면적비, 터널의 길이와 열차의 길이 등을 변화시켜, 열차에 작용하는 압력변동 및 공기저항의 특성을 조사하였으며, 종래에 보고된 실험결과와 비교하였다.

2. 지배 방정식

열차의 공기역학적 문제는 항공기 주변의 흐름과는 달리, 지면의 효과, 터널과 같은 폐공간내에서의 주행, 열차가 매우 긴 물체라는 점, 특히 터널내에서 전파하는 압력파가 존재하는 흐름장을 열차가 주행하는 점 등의 문제 때문에 흐름장을 이해하기가 매우 곤란하다. 더욱이 흐름장은 반드시 비정상적 현상들이 지배하므로, 이러한 공기역학적 문제들은 열차와 터널에서 일어나는 고유의 문제로

취급하지 않으면 안된다. 열차/터널의 공기역학적 문제들은 일반적으로 열차 및 터널의 단면적이 거의 일정하고, 이들의 단면 등가직경에 비해 터널의 길이가 매우 길기 때문에 흐름장은 1차원 비정상흐름으로 모델화할 수 있다. 이 경우 터널내의 공기를 완전기체로 가정하여, 유체 점성을 고려한 지배방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존식으로부터 다음으로 주어진다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{1}{\rho T} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\varphi}{T} \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 공기의 밀도, u 는 유속, t 는 시간, p 는 압력, f 는 마찰력, s 는 엔트로피, T 는 온도, k 는 열전도율, x 는 공간거리를 나타내며, φ 는 에너지 소산함수를 나타낸다. 위의 식 (3)에서 열전달 효과를 무시하여 식 (1)과 식 (2)를 변형하면,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f \quad (4)$$

$$a^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (\gamma - 1) \varphi \quad (5)$$

여기에서 a 는 공기의 음속, γ 는 비열비를 나타낸다. 위의 식 (4)와 (5)를 변형하면 각 특성곡선 C^+ 및 C^- 를 따라 각각 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{d}{dt} (p + \rho a u) = (\gamma - 1) \rho \varphi + \rho a f \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} (p - \rho a u) = (\gamma - 1) \rho \varphi - \rho a f \quad (7)$$

위의 식 (4)와 (5)에서 비선형항인 $u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)$ 및 $\frac{u}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ 를 무시하여 변형하게 되면, 특성곡선 C^+ 를 따라 Riemann 불변량이 얻어진다. 한편 식 (4)에서 f 는 다음 식 (8a)로 나타낸 바와 같이 정상 마찰항 f_s 와 비정상 마찰항 f_u 의 합으로 쓰여진다.⁽⁷⁾

$$f = f_s + f_u \quad (8a)$$

한편 위의 f 와 φ 는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 터널내 열차의 위치에 따라 R1 및 R2의 두 영역으로 각각 나누어 생각할 수 있다.

즉, 열차가 존재하지 않는 영역(R1)에 대하여

$$f_{s1} = -\frac{\lambda}{2d} u |u| \quad (8b)$$

$$f_{s2} = \frac{\lambda}{2d} |u|^3 \quad (9)$$

또 열차가 존재하는 영역(R2)에 대하여서는

$$\left. \begin{aligned} f_{s2} &= -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} u' |u'| \\ &- \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} (u' - V) |u' - V| \\ \varphi_{s2} &= \frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} |u'|^3 + \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} |u' - V|^3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

로 쓰여진다. 여기에서 R 은 열차와 터널의 단면적 비, 상첨자 '는 열차의 측면을 나타내며, λ 는 수력

학적 마찰계수를 의미한다. 한편 압축파가 터널내를 전파하는 경우에는 압축파와 배후에서 발생하는 흐름이 비정상적이기 때문에, 압축파면 부근에서 매우 큰 비정상 마찰력 f_u 가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 비정상 마찰항을 고려하기 위하여 Vardy⁽⁶⁾ 및 Zieke⁽⁹⁾에 의하여 제안된 비정상마찰식을 이용하였다.

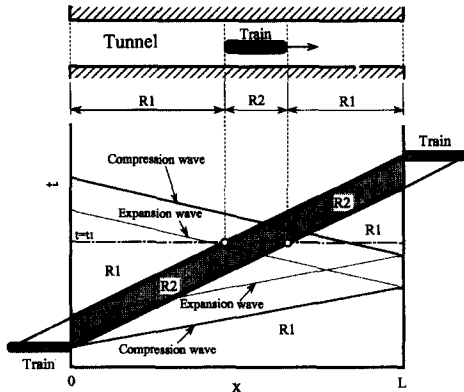


Fig. 1 Wave diagram in railway train/tunnel system

3. 계산조건 및 경계조건

열차의 주행으로 인하여 터널의 출입구에서는 공기의 흐름이 터널내로 향하던가 터널밖으로 향하게 되므로, 이러한 유속에 의하여 터널의 출입구에서 압력이 결정된다. Fig.2에 나타낸 바와 같이 왼쪽

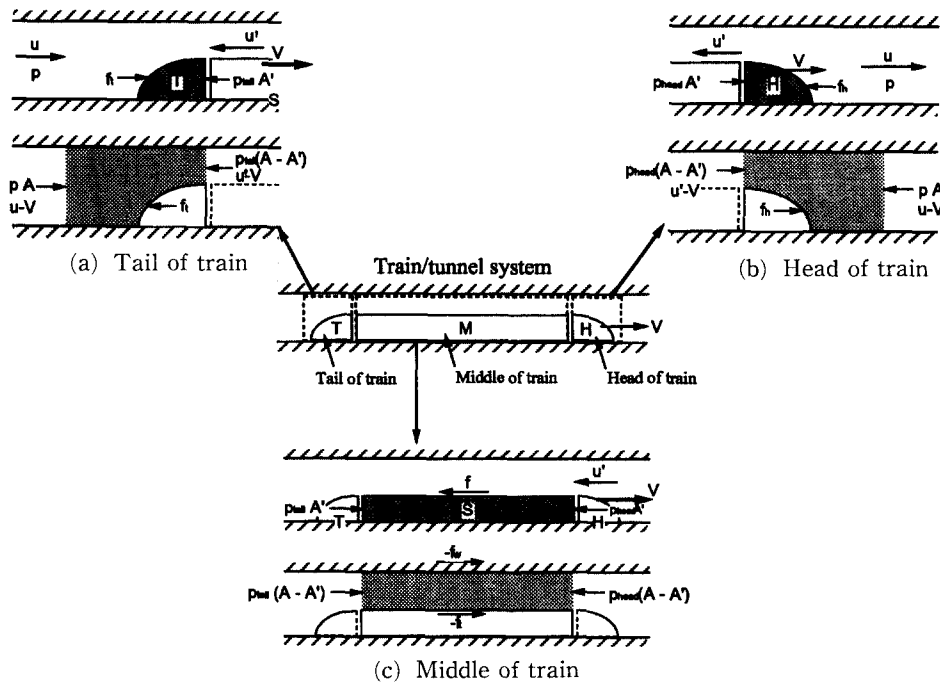


Fig. 2 Schematic control-volumes of train head, middle, and tail

에서 오른쪽으로의 흐름방향을 +로 하는 경우, 즉 외부로부터 터널내로 흐름이 발생하는 경우에는 축류작용에 의하여 압력이 동압만큼 감소한다고 가정한다. 또 터널내로부터 외부로의 흐름에 대하여 출구에서 압력은 대기압(p_0)으로 가정한다. 따라서 터널입구 및 출구에서 각각 다음 식이 주어진다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{입구 } p=p_0-\frac{1}{2}\rho u^2 \quad u \geq 0 \\ \quad \quad \quad p=p_0 \quad \quad \quad u < 0 \\ \text{출구 } p=p_0 \quad \quad \quad u \geq 0 \\ \quad \quad \quad p=p_0-\frac{1}{2}\rho u^2 \quad u < 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

한편 압력파가 터널 입구 및 출구에서 반사하는 경우, 실제로는 완전 반사가 일어나지 않고, 압축파의 일부는 외부로 방출되기 때문에 압력파의 에너지 손실이 발생하게 되며, 따라서 압력파는 점차 감쇠하게 된다. 그러나 본 계산에서는 간단하게 하기 위하여 완전반사를 가정하였다. 또 열차의 선두부 및 후미부 형상의 변화는 고려하지 않고, 선두부 및 후미부에서 흐름의 박리로 인하여 발생하는 에너지 손실을 무시하였다.

Fig. 2(b)에 모식적으로 나타낸 검사체적을 고려하여, 열차의 선두부에서는 흐름이 박리하지 않으며, 등엔트로피적으로 흐른다고 가정한다. 이 경우 질량 및 에너지에 대한 보존법칙은 다음으로 쓰여진다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{선두부} \\ (1-R)(u'-V)=u-V \\ p'+\frac{1}{2}\rho(u'-V)^2=p+\frac{1}{2}\rho(u-V)^2=p_s \end{array} \right\} \quad (12)$$

또 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 열차 후미부에서는 흐름이 박리하여, 그 하류에 큰 혼합영역이 존재하게 되지만, 본 연구에서는 이러한 혼합영역이 무한히 작다고 가정하였다. 따라서 다음과 같이 보존법칙이 적용된다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{후미부} \\ u-V=(1-R)(u'-V) \\ p+\rho(u-V)^2=p'+(1-R)\rho(u'-V)^2 \\ -C_{DP}R\frac{1}{2}\rho(u'-V)^2 \end{array} \right\} \quad (13)$$

여기에서 p_s 는 정체점 압력, D_{DP} 는 압력저항계

Table 1 Parameters of train and tunnel

Train	Cross sectional area A' (m ²)	12.6
	Hydraulic diameter d' (m)	3.54
	Train length L_t (m)	400
	Friction factor λ'	0.016
	Pressure drag coeff. C_{DP}	0.15
Tunnel	Cross sectional area A (m ²)	63.4
	Hydraulic diameter d (m)	8.1
	Friction factor λ	0.02
	Tunnel length L (km)	1~20

수를 나타낸다. 계산에서는 $t=0$ 에서 터널내 공기는 정지하여 있으며($u=0$), 대기압 p_0 의 조건에 있다고 가정하였다. 또 본 계산에서는 실제 압력파의 통과로 인한 공기의 밀도 변화가 그다지 크지 않으므로 간단화를 위해 밀도 변화를 무시하였다. 한편 Table 1에 나타낸 바와 같이 열차의 형상 및 터널의 형상, 벽면마찰계수, 압력저항계수 등에 관해서는 문헌 (10)에서 기술된 실험값 및 실측값을 이용하였다. 계산은 위의 식 (6)과 (7)을 차별화하여 각 특성곡선 C^+ 와 C^- 를 따라 수행하였으며, 터널의 길이를 n 등분하여 시간 t 에서 격자점 $i-1$ 과 $i+1$ 의 값으로부터 Δt 시간후의 격자점 i 에서의 값을 구하였다.

본 연구는 1차원적 계산이므로, 터널내 열차에 작용하는 압력변동 및 공기저항은 열차를 선두부, 중간부 및 후미부로 나누어 생각하였다. 따라서 열차의 각 부분에 작용하는 공기력을 계산하여, 열차에 작용하는 전체 공기저항을 다음의 식으로 구하였다.⁽¹¹⁾

$$D=D_{head}+D_{middle}+D_{tail} \quad (14)$$

한편 열차가 터널내를 주행하는 경우, 선두부에는 $p_{head}A'$ 와 f_n 의 힘이 작용하게 된다. Fig. 2(b)에 모식적으로 나타낸 바와 같이 f_n 의 값은 열차선두부 형상에 따라 달라질 수 있지만, 본 계산은 일차원 흐름에 대한 것이므로, 선두부에 작용하는 공기저항을 압력과 마찰력의 합으로 가정하였다.

$$D_{head}=f_u+p_{head}A' \quad (15)$$

따라서 그림의 검사체적에 대하여 질량, 운동량

및 에너지의 보존식으로부터 식 (15)는 다음과 같이 주어진다.

$$D_{head} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho R (u - V)^2 A', & \text{터널내} \\ 0, & \text{터널외} \end{cases} \quad (16)$$

또 열차의 측면부에서는 마찰에 의한 저항과 압력차에 의한 저항이 작용하게 되므로 식 (14)의 D_{middle} 는 다음으로 주어진다.

$$D_{middle} = (p_{head} - p_{tail}) A' + f \quad (17)$$

여기에서 f 는 원관에서 수력학적 마찰저항과 같다고 가정하여, 열차속도와 열차측면과 터널벽 사이의 흐름의 상대속도를 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{fric} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho \lambda' \left\{ \int_{i,n} (V-u) | V - u | dx + \int_{o,u,t} V^2 dx \right\} A', & x > 0 \\ \frac{1}{2} \rho \lambda' \left\{ - \int_{i,n} (V-u) | V - u | dx + \int_{o,u,t} V^2 dx \right\} A', & x < 0 \end{cases} \quad (18)$$

한편 Fig. 2(a)에 바와 같이 열차후미부에 작용하는 공기저항은 다음으로 주어진다.

$$D_{tail} = (p_{tail} A' - f_t) + \Delta D_f \quad (19)$$

여기에서 f_t 는 열차후미부에서 마찰력이며, ΔD_f 는 열차선두부에서 발생하는 공기저항을 의미한다. 위의 식 (19)의 D_{tail} 은 문헌 (10, 11)에 기술된 바와 같이 풍동실험으로부터 얻어진 압력저항계수 C_{Dp} 를 이용하면, 다음 식 (20)으로 주어진다.

$$D_{tail} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho C_{Dp} (u - V)^2 A', & \text{터널내} \\ \frac{1}{2} \rho C_{Dp} V^2 A', & \text{터널외} \end{cases} \quad (20)$$

위에서 기술한 공기저항값은 터널내 압력파의 전파에 의해 시간적으로 변동하여 피크값을 나타내게 되지만, 터널내에서 열차에 작용하는 공기저항을 평균적으로 계산하기 위해서는 터널 통과시간 동안의 평균값으로 계산하였다. 또 이러한 공기저항은 개활지 주행의 경우와 비교하기 위해서 공기저항의 실험식으로 무차원하였다.

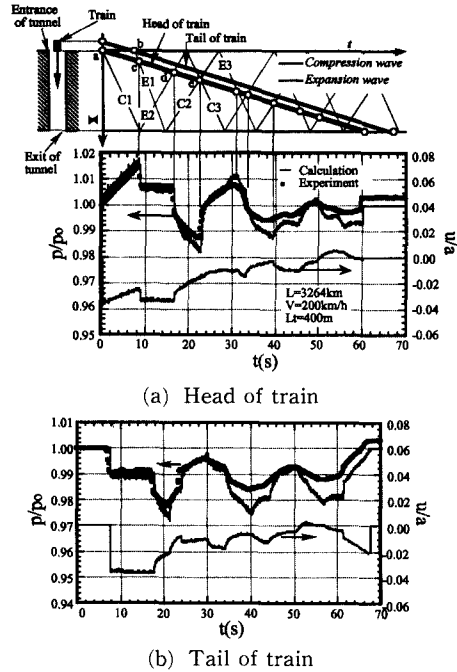


Fig. 3 Pressure transients on head and tail of train

4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3에는 열차가 터널내를 주행하는 경우에 터널내에서 발생하는 파동선도 및 열차의 선두부와 후미부에서 정압의 시간변화와 열차선두부 및 후미부 측면에서 측정된 실측값을 나타내었다. 그림의 횡축은 열차의 선두부가 터널입구에 도달하여서 부터 경과한 시간 t 를 나타내며, 왼쪽 종축은 대기압 p_0 으로 무차원화한 정압, 그리고 오른쪽 종축은 열차의 선두부 및 후미부에서의 유속(u)를 대기의 음속(a)으로 무차원화한 값을 나타낸다.

계산조건은 터널의 실측값과 비교를 위하여 터널의 길이 (L)를 3264 m, 열차속도 V 를 200 km/h로 하였으며, 열차길이 L_t 를 400 m로 가정하였다. 그림의 파동선도($x-t$ 선도)로부터 열차의 선두부와 후미부가 터널에 돌입할 때 발생하는 압축파 $C1$ 및 팽창파 $E1$ 이 터널내로 전파하게 되며, 이들 압력파는 터널 출구와 입구, 그리고 열차의 선두부 및 후미부에서 반사를 반복하게 되어 열차는 심한 압력변동을 받게 된다. 한편 열차측면과 터널벽 사이를 통하여 터널입구 방향으로 유기되는 흐름에는, 벽마찰로 인하여 선두부 방향으로 역압력구배가 발

생한다. 그 결과 터널입구에서 압력은 대기압으로 고정되어 있으므로 열차 선두부에서 압력은 점a로부터 점c까지 상승하게 된다. 열차의 후미부가 점b에서 터널내로 진입함으로써 발생하는 팽창파 E1는 점c에서 열차의 선두부와 만나게 되며, 팽창파 E1이 열차와 만나기 직전에서 압력은 최대값으로 된다. 그후 압력은 팽창파로 인하여 급격히 낮아지게 된다. 한편 압축파 C1과 팽창파 E1은 터널 출구면에서 반사하여 각각 팽창파 E2와 압축파 C2를 형성한다. 이 팽창파 E2가 열차선두부를 통과하면 점d에서 압력은 급격히 강하여져, 점e에서 최소로 된다. 또 팽창파 E2는 터널입구에서 다시 반사하여 압축파 C3을 형성하게 되므로 점 e에서부터 압력은 다시 급격히 상승한다. 이와 같은 압력파의 반복반사로 인하여 열차에는 매우 심한 압력변동이 발생하는 것을 본 계산 결과로부터 알 수 있다. 그러나 본 계산값은 초기에는 실제의 터널의 측정값과 상당히 잘 일치하지만, 시간이 경과함에 따라 실측값과 점차 차이가 발생한다. 이것은 실제 터널의 출입구에서 압력파가 완전반사하지 않는다는 사실과 터널측면과의 열전달 등의 효과에 기인한다고 생각된다. 한편 유속의 시간변화로부터 열차가 터널내를 주행하는 동안, $t=54s$ 근방을 제외하면, 대부분 터널입구쪽으로 흐름을 관찰할 수 있다. 열차 후미부에서의 압력변동은 선두부에서와 유사한 경향을 나타내고 있지만, 실측값과의 차이는 선두부에서 보다 크다. 이것은 열차 선두부에서부터 발달한 경계층의 영향이나 벽면 열전달 혹은 압력파가 완전반사 하지 않기 때문이다. 더욱이 열차후미부의 압력은 시간평균적으로 선두부에서 보다 약간 낮다. 이 때문에 열차측면의 흐름은 압력파의 전파에 의해 변화하게 되지만, 열차가 터널내를 주행하는 동안에는 선두부로부터 후미부쪽으로 향하는 흐름이 발생한다.

Fig. 4에는 Fig. 3과 동일한 조건하에서 터널의 길이 $L=3\text{ km}$, 열차의 속도 V 를 300 km/h 로 변화시킨 경우, 열차 선두부, 측면 및 후미부에서 발생하는 압력변동과 무차원 속도를 함께 나타내었다. 그림으로부터 열차 선두부에서 발생하는 압력변동은 Fig. 3과 정성적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 압력의 시간에 대한 변화는 열차 속도에 따라 상당히 변화하며, 압력변동의 피크값도 열차속도에 따라 상당히 변화한다는 것을 알 수 있다. 한편 열차 측면부 및 후미부에서 발생하

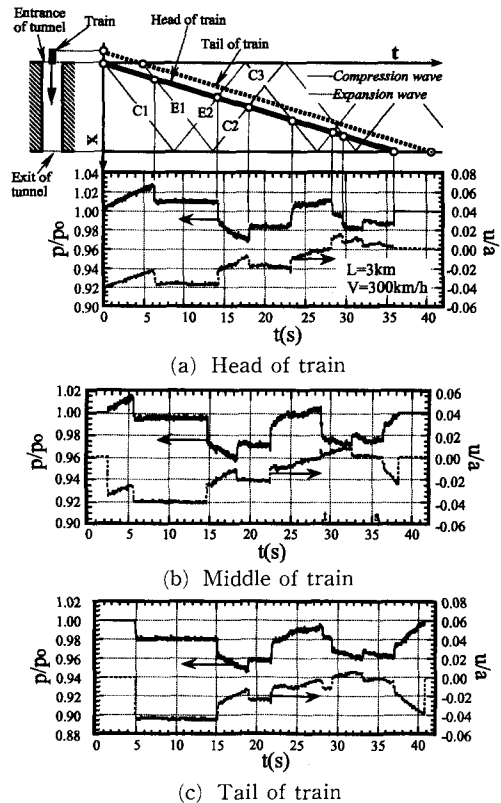
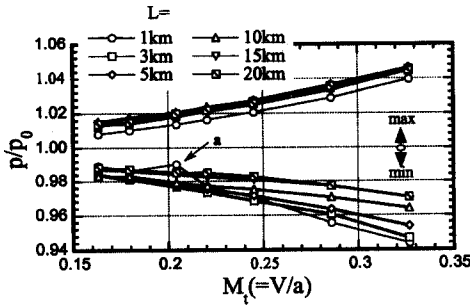


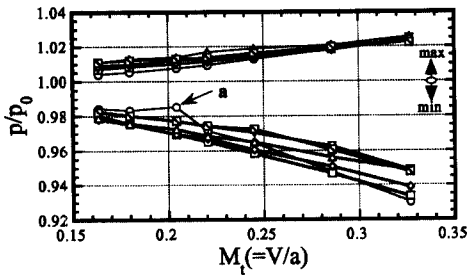
Fig. 4 Pressure transients on train head, middle and tail

는 압력변동의 파형은 선두부의 파형과 매우 유사한 형태이지만, 변동의 시간평균값은 열차 후미부가 낮다.

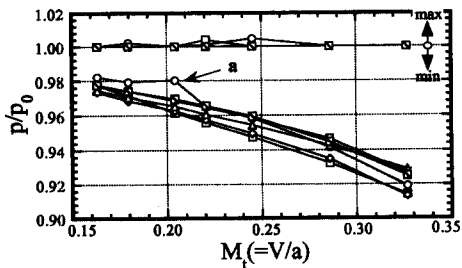
한편 고속열차가 터널내를 주행하는 동안 발생하는 큰 압력변동은 차체의 강도 및 승차감에 영향을 미치게 되므로 압력변동의 피크값을 아는 것은 차체의 설계나 안정성 등에 있어서 매우 중요하다. Fig. 3 및 4와 같은 압력변동의 파형을 이용하여, 고속열차가 터널을 통과하는 동안, 열차에 작용하는 압력의 최대·최소값을 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 횡축은 대기의 음속으로 무차원화한 열차의 속도 (V/a) 즉 열차의 마하수 Mt 를 나타내며, 종축은 열차 각부에 작용하는 압력의 최대·최소값을 대기압으로 무차원하여 나타내었다. 계산에서는 열차의 길이 Lt 를 400 m , 열차와 터널의 단면적비 (R) 를 0.20 로 하였으며, 터널의 길이를 $L=1\text{ km}$ 에서 20 km 로 변화시켰다. 그림으로부터 열차의 속도 증가에 따라 압력의 최대값은 증가하며, 터널



(a) Head of train



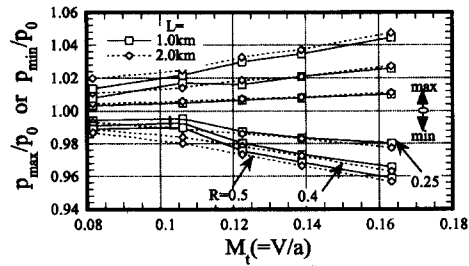
(b) Middle of train



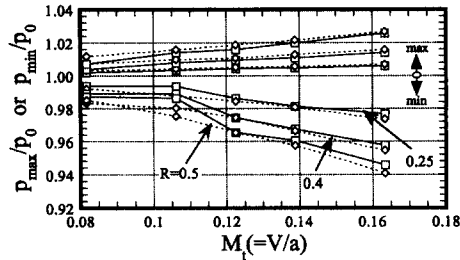
(c) Tail of train

Fig. 5 Max/min pressures on train head, middle and tail

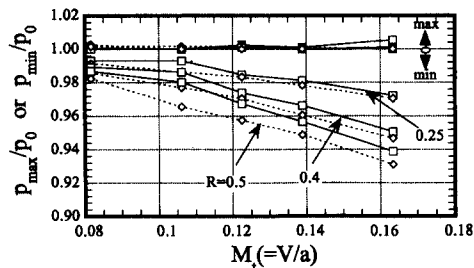
의 길이의 변화에 대하여서는 $L=1$ km의 경우가 약간 낮은 것을 제외하면 그다지 변화하지 않는다. 그러나 압력변동의 최소값은 터널의 길이가 길수록 크게 되며, 따라서 압력의 최대와 최소값의 차는 작아진다. 이러한 경향은 열차 마하수가 클수록 뚜렷하게 나타난다. 그림중에 a점으로 나타낸 $L=1$ km, $V/a(=Mt)=0.205$ 에서 최소압력값의 변화는 Fig. 3의 파동선도에 나타낸 바와 같이 터널출구에서 반사팽창파 E2가 터널 입구에 도달하여 반사압축파 C3로 된 후, 열차 후미부가 터널에 진입할 때 발생하는 팽창파 E1의 반사압축파 C2와 중복으로 간섭하게 되어 열차 선두부를 통과하는 압력파를 약하게 하기 때문이다. 이 상태에서 열차속도를 V_c 라고 정의하면, 압력파가 음속으로 전파한다고



(a) Head of train



(b) Middle of train



(c) Tail of train

Fig. 6 Max/min pressures on train head, middle and tail

가정하여 V_c 는 다음 식으로 주어진다.

$$V_c = \frac{L_t a}{2L} \quad (21)$$

위의 식 (21)를 만족하는 조건에서는 터널내의 파동이 어느 정도 약해지게 되므로 열차에 작용하게 되는 압력의 최소값이 크게 되며, 따라서 압력변동의 절대값은 터널의 길이가 긴 경우에 비해 상당히 작아진다. 본 계산조건인 $L=1$ km, $L_t=400$ m에 대하여 열차속도 V_c 는 약 240 km/h로 계산된다. 한편 열차의 중간부 및 후미부에 작용하는 압력의 최대·최소값은 선두부에서와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 열차의 후미부인 경우, 압력의 최대값은 열차의 속도에 관계없이 거의 일정하게

나타난다.

Fig. 6에는 열차의 단면적 A'와 터널의 단면적 A의 비 $R(=A'/A)$ 을 변화시킨 경우 열차의 각 부분에 작용하게 되는 압력의 최대·최소값을 나타내었다. 참고로 일본의 신간선의 경우 R의 값은 대략 0.21정도이지만, 우리나라의 종래 철도터널인 경우(단선)에 대하여서는 약 $R=0.5\sim 0.8$ 로 추정된다. 그림에는 터널의 길이 L 이 1.0 km와 2.0 km(열차의 길이는 200 m로 고정)인 경우에 대하여 R의 값을 0.25, 0.4 및 0.5로 변화시켰다. 그림으로부터 압력의 최대·최소값은 R의 증가에 따라 급격히 증가하며, R의 값이 클수록 속도변화에 대한 압력 변동값이 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 열차속도가 $V_c=240$ km/h($M_t=0.2$)일 때의 압력 변동과 거의 같은 크기의 압력변동은, $R=0.5$ 인 경우, 열차속도가 108~144 km/h($M_t=0.09\sim 0.12$)일 때 발생한다는 것을 알 수 있다. 한편 열차 중간부와 후미부에서 발생하는 압력의 최소값은 열차 선두부에서 발생하는 압력과 정성적으로 유사한 경향을 나타내고 있지만, 열차 후미부에서 발생하는 압력의 최대값은 R의 값에 그다지 의존하지 않는다.

Fig. 6에는 터널의 길이가 $L=3$ km, $V=300$ km/h, $Lt=400$ m인 경우의 열차 전체가 받게 되는 공기저항을 터널내의 공기저항의 평균값 D_{ave} (열차의 선두부가 터널에 진입하여서부터 열차 후미부가 터널을 빠져 나갈 때까지의 시간에 대한 평균 공기저항)로 무차원화하여 나타내었다. 그림에는 비교를 위하여 열차 선두부 및 후미부에서 공기저항 및 열차측면에서의 마찰, 그리고 열차전후의 압력차 Δp 를 각각 나타내었으며, 참고로 파동선도도 함께 나타내었다. 그림으로부터 열차가 터널에 돌입하면, 열차측면에서 발생하는 유체마찰 및 선두부에서 압력상승으로 인하여 전체 공기저항은 크게 상승한 후, 열차 후미부가 돌입할 때 발생하는 팽창파가 열차 선두부를 통과하기 직전에 최대(평균 공기저항값의 약 1.4배정도)로 된다. 그 후 압력파가 터널내를 전파하여 열차와 간섭하게 되므로 공기저항은 심한 변동을 반복해가며 점차 감소하게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 공기저항의 대부분은 유체마찰항과 압력차의 항으로 구성되어 있다.

Fig. 8에는 열차가 개활지를 주행하는 경우의 공기저항 $D_{open air}$ 로 무차원화한 터널주행의 평균공

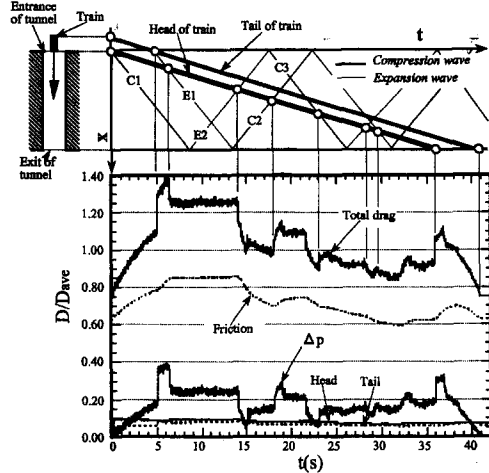


Fig. 7 Aerodynamic drag of train running in tunnel ($L=3$ km, $V=300$ km/h, $Lt=400$ m)

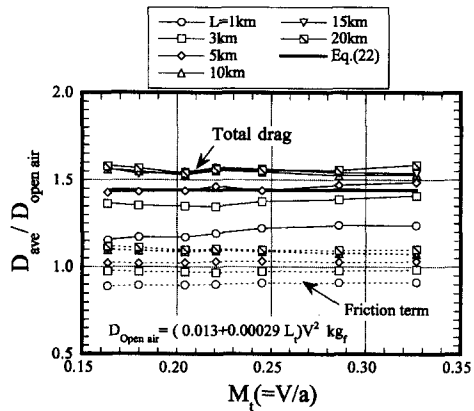


Fig. 8 Total aerodynamic drag and friction term in tunnel

기저항을 터널의 길이와 열차의 속도에 대하여 나타내었다. 그림의 종축은 다음 식 (22)⁽¹²⁾으로 나타내는 바와 같이 개활지 주행의 경우에 발생하는 공기저항 $D_{open air}$ 의 실험식으로 무차원화한 터널주행의 공기저항 $D_{in tunnel}$ ⁽¹²⁾을 나타내었다. 그림 중에 굵은 실선은 터널내 주행시의 공기저항에 대한 다음의 실험식을 나타내었다.

$$\left. \begin{aligned} D_{open air} &= (0.013 + 0.00029 L_t) V^2 [kg_f] \\ D_{in tunnel} &= (0.05 + 0.00034 L_t) V^2 [kg_f] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

식 (22)에서 L_t 는 열차의 길이, V 는 열차의 속도를 나타내며, 터널주행 및 개활지 주행에서 공기저항값은 모두 열차속도 V 의 제곱 및 열차길이 L_t 에 비례한다는 것을 나타낸다. 한편 그림의 가는

실선은 본 계산에 의한 전체 공기저항을, 점선은 열차측면에 작용하는 마찰력을 나타내었다. 그림으로부터 본 계산결과는 터널내의 공기저항에 대한 실험식과 거의 일치하며, 터널내의 주행시 발생하는 공기저항은 개활지의 주행의 공기저항에 비해 약 1.3~1.6배 정도 크지만, 그 비율은 열차 속도에 거의 의존하지 않는 것을 알 수 있다. 한편 공기저항 및 마찰력은 터널의 길이가 길수록 증가한다. 터널의 길이가 더욱 길어지는 경우, 압력파가 터널내를 전파함으로써 발생하는 공기저항의 변동의 주기는 길어지게 되며, 공기저항은 터널의 길이가 무한대인 경우의 값에 접근하기 때문에, L=15 km와 20 km에 대한 공기저항의 차는 그다지 나타나지 않게 된다.

Fig. 9에는 열차에 작용하는 전체공기저항(D_{total})을 구성하는 각 성분들의 평균값을 전체공기저항의 평균값으로 무차원하여, 그 비 D/D_{total} 를 열차의 속도(열차의 길이 $L_t=400$ mm)에 대하여 나타내었다. 그림으로부터 열차중간부의 벽마찰에 의한 저항이 전체 공기저항의 약 70% 이상을 차지하며, 열차 선두부와 후미부의 압력차에 의한 저항이 약 15%(이 중에서 열차선두부에서 약 7~8%이며, 열차 후미부가 약 6% 정도이다)이다. 열차측

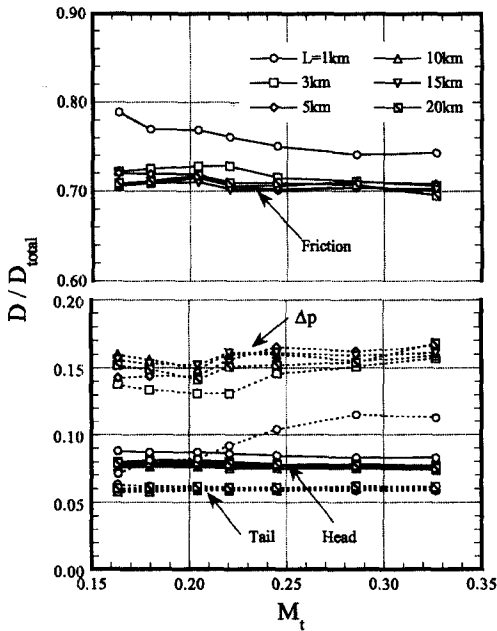


Fig. 9 Average friction and pressure difference (Δp) of total aerodynamic drag

면에서 마찰과 압력차로 인한 저항을 열차 중간부의 공기저항이라고 할 수 있으므로, 따라서 열차 중간부에 작용하는 공기저항이 전체 공기저항의 85% 이상을 차지한다는 것을 알 수 있다. 이러한 비율은 터널의 길이가 매우 짧은 경우($L=1$ km)를 제외하면, 크게 변화하지 않으며, 따라서 비교적 긴 터널을 주행하는 열차의 공기저항은 열차의 선두부 및 후미부의 형상에는 그다지 의존하지 않는다는 것을 의미한다. 여기에서 터널의 길이가 짧은 경우($L=1$ km), 전술한 바와 같이 터널내에서 압력파가 중첩되어, 파동을 서로 상쇄하기 때문에 압력차의 비율이 작아지게 되며, 상대적으로 마찰항의 비율이 커지기 때문이다.

Fig. 10에는 열차와 터널의 단면적비(R)가 열차의 공기저항에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 개활지 주행의 경우에 대한 공기저항($D_{open\ air}$)으로 무차원한 터널내 공기저항(D)을 나타내었다. 계산은 터널의 길이를 $L=3$ km와 15 km로 하였으며, 열차속도 V 는 250 km/h, $L_t=400$ m로 설정하였다. 그림 중에는 열차측벽의 마

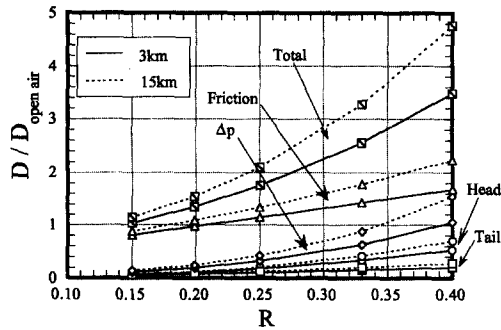


Fig. 10 Relation between aerodynamic drag and cross-sectional area ratio of train to tunnel

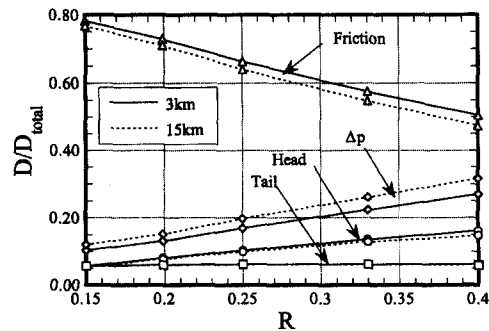


Fig. 11 Relation between aerodynamic drag and cross-sectional area ratio of train to tunnel

찰, 열차 선두부와 후미부에서의 압력차 등을 함께 나타내었다. 그림으로부터 단면적비 R 이 증가할수록 공기저항은 증가하게 되며, 또 터널의 길이의 영향이 뚜렷하게 나타나게 된다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 터널의 길이를 $L=3$ km인 경우, 단면적비 R 을 0.40에서 0.15로 줄이게 되면, 전체 공기저항은 약 1/4 정도로 감소하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에는 열차에 작용하는 전체 공기저항중, 마찰력과 열차선두부와 후미부에서의 압력차 등이 차지하는 비율을 열차와 터널의 단면적비 R 의 함수로 나타내었다. 그림의 실선은 터널의 길이가 3 km인 경우이며, 점선은 터널의 길이가 15 km인 경우에 대한 계산값을 나타낸다. 그림에서 단면적비 R 이 클수록 전체 공기저항중 마찰력은 감소하게 되며, 반대로 압력차는 증가하게 된다. 이것은 열차단면적이 커질수록 열차가 터널에 돌입할 때, 발생하는 압축파 및 팽창파가 강하게 되며, 이로 인하여 터널내를 주행하는 열차에는 보다 큰 압력 변동이 발생하게 된다. 더욱이 열차 단면적이 커질수록 열차측벽과 터널벽 사이의 간격이 좁아지며, 이로 인하여 열차측면의 기류속도가 증가한다. 따라서 열차 선두부와 후미부에서 압력차는 커지게 된다.

5. 결 론

고속열차가 터널내를 단독주행하는 경우, 터널내에서 발생하는 파동현상에 착안하여 공기역학적 문제를 수치해석적으로 조사하였다. 계산은 기존의 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도가 100~400 km/h인 범위에 대하여 수행하였으며, 열차와 터널의 단면적비, 터널의 길이와 열차의 길이 등을 변화시켜 특성곡선법으로 시뮬레이션하였다. 그 결과 터널내부에서 발생하는 압력 변동과 저항변동 특성을 알 수 있었다. 특히 터널이 비교적 긴 경우, 열차 각부에서 발생하는 압력 변동의 최대값은 터널의 길이에 그다지 의존하지 않았으며, 열차선두부에서 발생하는 압력변동의 최대값은 열차속도가 증가할수록 크게 나타났다. 그러나 열차 후미부에서 압력변동의 최대값은 열차속도에 의존하지 않았다. 한편 열차가 터널내를 주행하는 경우에 열차에 작용하는 공기저항은 개활지주행에 비해 약 1.3 내지 1.6배 정도 크며, 전체

공기저항의 대부분은 열차중간부의 마찰과 열차전후의 압력차에 의해 발생한다는 것을 알았다.

참고문헌

- (1) Liepmann, H. W. and Roshko, A., 1960, *Elements of Gasdynamics*, John Wiley & Sons.
- (2) 김희동, 1994, “고속鐵道 터널에서 發生하는 流體力學的 波動現象,” 大韓機械學會 學會誌, 第34卷10號.
- (3) 飯田, 前田, 1990, “トンネル内の壓力變動シミュレーション,” 鐵道技術總研報告, 第4卷, 第7號.
- (4) Fox, J. A. and Vardy, A. E., 1973, “The Generation and Alleviation of Air Pressure Transients Caused by The High Speed Passage of Vehicles through Tunnels,” *Proc. 1st International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. G3.49~G3.64.
- (5) Sajben, M., 1971, “Fluid Mechanics of Train/Tunnel Systems in Unsteady Motion,” *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 8, pp. 1535~1545.
- (6) Hara, T., Kawaguti, M., Fukuchi, G. and Yamamoto, A., 1968, *Aero-Dynamics of High-Speed Train*, IRCA-UIC High-Speed Symposium, Vienna. pp. 1~26.
- (7) 김희동, 1996, “直管内를 傳播하는 壓縮波의 減衰와 變形에 관한 數値解析的 研究,” 大韓機械學會論文集, 第20卷 7號.
- (8) Vardy, A. E., Lun, H. k. and Brown, J. M. B., 1993, “A Weighting Function Model of Transient Turbulent Pipe Friction,” *J. of Hydraulic Research*, Vol. 31, No. 4.
- (9) Zielke, W., 1968, “Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow,” *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 90, No. 1.
- (10) 前田達夫, 1987, “新幹線電車(0系, 200系, 100系)의 空氣抵抗,” 鐵道技術總研報告, 第1卷, 第3號.
- (11) 原朝茂, 1967, “トンネル内を走る列車の空氣抵抗,” 鐵道技術總研報告, No. 608.
- (12) 山本彬也, 1973, “新幹線トンネルの壓力變動, 空氣抵抗, トンネル換氣,” 鐵道技術總研報告, No. 871.