

〈논 문〉

## 터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(Ⅱ) — 2열차의 공기역학 —

김 희 동\*  
(1996년 4월 22일 접수)

### Aerodynamic Analysis of Trains Running in a Tunnel(Ⅱ) — Aerodynamics of Two-Trains —

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), Two-Train(2열차)

#### 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 backward 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 can 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 comfort for the passengers in the train. In the present study, the pressure transients and aerodynamic drag for two-trains running in a tunnel were calculated numerically for a wide range of train speed, and compared with the results of the previous tunnel tests and calculations for one train. The present calculation results agreed with ones of the tunnel tests, and the mechanism of pressure transients was made clear.

#### 1. 서 론

고속열차가 터널내에 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<sup>(1)</sup>이 된다. 한편 터널 출구에 도달한 압축파의 일부는 터널 출구면의 개방단(open-

end) 조건에 의하여 팽창파로 터널입구를 향해 전파하게 되며, 이때 진행되는 열차와 복잡한 간섭<sup>(2,3)</sup>을 하게 된다. 이 경우 열차의 기밀이 완전히 되어 있지 않다면(실제 열차에는 차내 환기 등의 목적으로 인하여 완전한 기밀은 사실상 어렵다), 차내 승객은 매우 심한 압력변동을 겪게 된다. 더욱이 이러한 압력파들은 열차의 선두부, 후미부, 터널입구 및 터널 출구면에서 반사를 반복하게 되며, 그 결과 열차에는 개활지 주행에 비해 더욱 큰 압력 및 공기저항 변동이 발생하리라 예상된다. 이와 같이 터널내를 주행하는 열차의 공기역학

\*회원, 안동대학교 기계공학과

적 문제들은 차내 승객의 쾌적성, 차체의 안정성은 물론 차량의 동력 및 차체의 설계 강도적인 면에도 관계하게 되므로, 이 분야에 대한 연구는 열차의 고속화를 추진하는데 있어서 매우 중요하다.

중대 철도에 관한 공기역학적 문제들은 주로 현차시험,<sup>(4)</sup> 모형주행시험,<sup>(5)</sup> 풍동실험<sup>(6)</sup> 및 수치시뮬레이션<sup>(7)</sup> 등에 의하여 연구되어져 왔다. 현차시험은 국내에서는 주로 철도기술연구소,<sup>(8)</sup> 일본의 철도종합기술연구소,<sup>(5)</sup> 프랑스의 국립철도연구소<sup>(9)</sup> 등에 의하여 수행되었다. 모형주행 시험은 터널을 모사한 관내에 모형열차를 주행시켜, 관내를 전파하는 압축파에 의한 압력변동의 측정 및 터널출구로부터 방출되는 충격성 소음에 관하여 연구되었다.<sup>(4)</sup> 한편 프랑스 및 독일에서는 지면을 모사한 이동지면관 장치를 설치한 대형풍동<sup>(9)</sup>을 이용하여, 열차에 작용하는 공기저항이나 마찰 저항을 측정하였다.

한편 Yamamoto<sup>(10)</sup>와 Sockel<sup>(11)</sup>은 일차원 특성곡선법을 이용하여, 터널내를 1대의 열차가 주행하는 경우를 시뮬레이션하여 현차시험이나 모형실험 등의 결과와 비교하였다. Iida<sup>(7)</sup>와 Nakano<sup>(12)</sup> 등은 터널내에서 2대의 열차가 교행하는 경우에 대하여, Yamamoto의 계산법을 개선하여 열차에 작용하는 압력변동, 공기저항 및 터널환기 문제 등을 다루었다. 또 Funabashi<sup>(13)</sup> 등은 2차원 비정상 압축성 흐름에 TVD법을 적용하여, 터널내의 흐름장을 수치해석적으로 모사하였다. 한편 Ikegawa<sup>(14)</sup> 등은 2대의 열차가 교행하는 경우에 차량에 작용하는 압력변동을 계산하였으며, Kawaguchi<sup>(15)</sup> 등은 상대운동을 하는 2개의 구를 이용하여 교행하는 열차의 공기역학을 모사하였다. 그러나 이상의 연구에서는 터널내에서 발생하는 압력변동 및 공기저항의 변동을 상세하게 기술하지 않았으며, 열차의 속도가 변화하는 경우에 충분한 해석이 행하여지지 않았다. 더욱이 열차와 터널의 단면적비를 변화시켜, 터널내에서 발생하는 공기역학적 문제를 체계적으로 조사한 연구는 아직까지 없다. 최근 김회동<sup>(16)</sup>은 터널내에 1열차가 주행하는 경우에 대하여 수치해석법을 적용하여, 열차의 속도, 터널의 길이, 열차와 터널의 단면적비 등을 변화시켜, 열차/터널시스템의 공기역학을 상세하게 조사하였다.

본 연구에서는 고속철도 터널내에서 두 열차가 교행하는 경우에 대하여 공기역학적 문제를 수치해석적으로 연구하였다. 열차/터널계의 공기역학적

계산은 기존의 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도를 100~400 km/h인 범위에 대하여 수행하였으며, 터널의 길이, 열차와 단면적비가 공기역학적 현상에 미치는 영향을 조사하였다. 계산은 특성곡선법을 사용하여 열차에 작용하는 압력변동 및 공기저항의 특성을 조사하였으며, 종래에 보고된 실험결과와 비교하였다.

## 2. 지배 방정식

본 계산에서는 터널을 주행하는 두 열차의 공기역학적 문제들을 해석하기 위하여 터널내의 공기를 완전기체로 가정, 유체 점성을 고려한 질량, 운동량, 에너지 보존식을 이용하였다. 이들 식으로부터 각 특성곡선  $C^+$  및  $C^-$ 를 따라 다음 식들로 주어지는 Riemann 불변량이 얻어진다.

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

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

여기에서  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $u$ 는 유속,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,  $f$ 은 마찰력,  $a$ 는 대기상태에서 공기의 음속,  $\gamma$ 는 공기의 비열비,  $\phi$ 는 에너지 소산함수를 나타낸다.

위의 식 (1)과 (2)에서  $f$ 는 다음 식으로 나타낸 바와 같이 정상마찰항  $f_s$ 와 비정상 마찰항  $f_u$ 의 합으로 쓰여진다.<sup>(17)</sup>

$$f = f_s + f_u \quad (3)$$

한편 위의  $f$ 와  $\phi$ 는 Fig.1에 나타낸 바와 같이

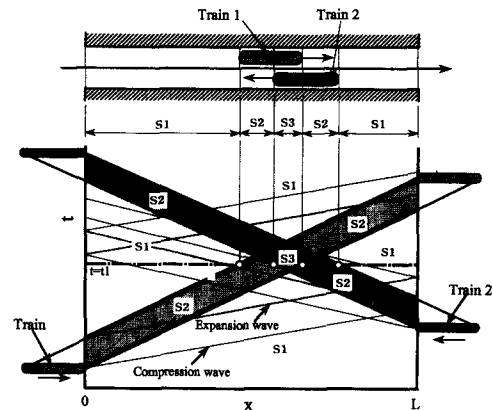


Fig. 1 Wave diagram in two-trains/tunnel system

터널내 열차의 위치에 따라 R1, R2 및 R3의 세 영역으로 각각 나누어 생각할 수 있다.

즉, 열차가 존재하지 않는 영역(S1)에 대하여

$$f_{s1} = -\frac{\lambda}{2d} u_1 |u_1| \quad (4)$$

$$\varphi_{s1} = \frac{\lambda}{2d} |u_1|^3 \quad (5)$$

1열차가 존재하는 영역(S2)에 대하여서는

$$\left. \begin{aligned} f_{s2} &= -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} u_2 |u_2| \\ &- \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} (u_2 - V) |u_2 - V| \\ \varphi_{s2} &= \frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} |u_2|^3 \\ &+ \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} |u_2 - V|^3 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{입구} \\ p = p_0 - \frac{1}{2} \rho u^2 \quad u \geq 0 \\ p = p_0 \quad u < 0 \\ \text{출구} \\ p = p_0 \quad u \geq 0 \\ p = p_0 - \frac{1}{2} \rho u^2 \quad u < 0 \end{array} \right\} (8)$$

또 터널내에서 두 열차가 교행하는 즉, 2열차가 존재하는 영역(S3)에 대하여서는

$$\left. \begin{aligned} f_{s3} &= -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-(R_1+R_2)} u_3 |u_3| \\ &- \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R_1}{1-(R_1+R_2)} (u_3 - V_1) |u_3 - V_1| \\ &- \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R_2}{1-(R_1+R_2)} (u_3 - V_2) |u_3 - V_2| \\ \varphi_{s3} &= \frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-(R_1+R_2)} |u_3|^3 \\ &+ \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R_1}{1-(R_1+R_2)} |u_3 - V_1|^3 \\ &+ \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R_2}{1-(R_1+R_2)} |u_3 - V_2|^3 \end{aligned} \right\} (7)$$

로 쓰여진다. 여기에서  $R$ 은 열차와 터널의 단면적비, 상첨자 '는 열차의 측면, 하첨자 1, 2 및 3은 각각 영역 S1, S2 및 S3의 상태를 나타내며,  $\lambda$ 는 수력학적 마찰계수를 의미한다. 한편 압축파가 터널내를 전파하는 경우에는 압축파 배후에서 발생하는 흐름이 비정상적이기 때문에, 압축파면 부근에서 매우 큰 비정상 마찰력  $f_a$ 가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 비정상 마찰항을 고려하기 위하여 Vardy<sup>(18)</sup> 및 Zieke<sup>(19)</sup>에 의하여 제안된 비정상마찰식을 이용하였다.

### 3. 계산조건 및 데이터 해석

열차의 주행으로 인하여 터널의 출입구에서는 공기의 흐름이 터널내로 향하던가 터널 밖으로 향하

게 되므로, 이러한 유속에 의하여 터널의 출입구에서 압력이 결정된다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 왼쪽에서 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.

일반적으로 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 단순화를 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.

$$\left. \begin{array}{l} \text{선두부} \\ (1-R)(u' - V) = u - V \\ p' + \frac{1}{2} \rho (u' - V)^2 = p + \frac{1}{2} \rho (u - V)^2 = p_s \end{array} \right\} (9)$$

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.

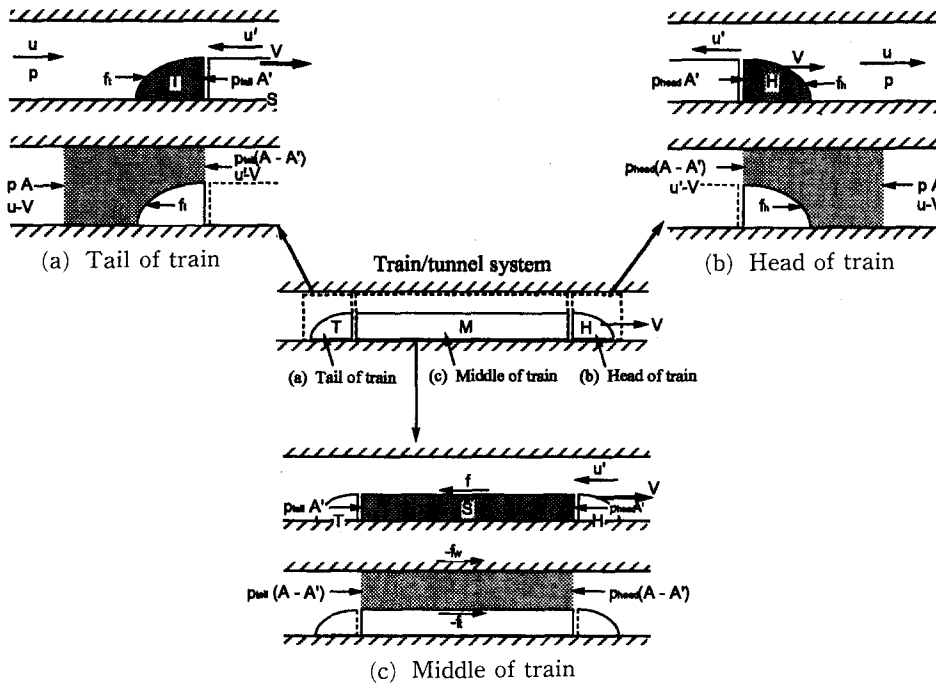


Fig. 2 Schematic control-volumes of train head, middle, and tail

후미부

$$\left. \begin{aligned} u - V &= (1 - R)(u' - V) \\ p + \rho(u - V)^2 &= p' + (1 - R)\rho(u' - V)^2 \\ &\quad - C_{DP}R\frac{1}{2}\rho(u' - V)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기에서  $p_s$ 는 정체점 압력,  $C_{DP}$ 는 압력저항계수를 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 (5, 20)에서 기술된 실험값 및 실측값을 이용하였다. 계산은 위의 식 (1)과 (2)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  $\Delta t$  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 공기저항을 계산하여 열차에 작용하는 전체 공기저항( $D$ )을 다음의 식으로 구하였다.

$$D = D_{head} + D_{middle} + D_{tail} \quad (11)$$

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

$$D_{head} = f_h + p_{head}A' \quad (12)$$

Table 1 Parameters of train and tunnel

Train	Cross-sectional area	$A'$ (m <sup>2</sup> )	12.6
	Hydraulic diameter	$d'$ (m)	3.54
	Train length	$L_t$ (m)	400
	Friction factor	$\lambda'$	0.016
	Pressure drag coeff.	$C_{DP}$	0.15
Tunnel	Cross-sectional area	$A$ (m <sup>2</sup> )	63.4
	Hydraulic diameter	$d$ (m)	8.1
	Friction factor	$\lambda$	0.02
	Tunnel length	$L$ (km)	1.20

따라서 그림의 검사체에 대하여 질량, 운동량 및 에너지의 보존식으로부터 식 (12)는 다음과 같이 주어진다.

$$D_{head} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho R (u - V)^2 A' & \text{터널내} \\ 0 & \text{터널외} \end{cases} \quad (13)$$

또 열차의 측면부에서는 마찰에 의한 저항과 압력차에 의한 저항이 작용하게 되므로 식 (11)의  $D_{middle}$ 는 다음으로 주어진다.

$$D_{middle} = (p_{head} - p_{tail}) A' + f = \Delta p A' + f \quad (14)$$

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

$$D_{fric} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho \frac{\lambda'}{d'} \left\{ \int_{in} (V-u) |V-u| dx + \int_{out} V^2 dx \right\} A' & V > 0 \\ \frac{1}{2} \rho \frac{\lambda'}{d'} \left\{ - \int_{in} (V-u) |V-u| dx + \int_{out} V^2 dx \right\} A' & V < 0 \end{cases} \quad (15)$$

여기에서 적분기호의 하첨자  $in$ 과  $out$ 는 각각 터널내와 터널외에서의 적분을 의미한다.

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

$$D_{tail} = (p_{tail} A' - f_t) + \Delta D_f \quad (16)$$

여기에서  $f_t$ 는 열차후미부에서 마찰력이며,  $\Delta D_f$ 는 열차선두부에서 발생하는 공기저항을 의미한다. 위의 식 (16)의  $D_{tail}$ 은 문헌 (5, 20)에 기술된 바와 같이 풍동실험으로부터 얻어진 압력저항계수  $C_{DP}$ 를 이용하면, 다음 식 (17)으로 주어진다.

$$D_{tail} = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho C_{DP} (u - V^2) A' & \text{터널내} \\ \frac{1}{2} \rho C_{DP} V^2 A' & \text{터널외} \end{cases} \quad (17)$$

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 공기저항을 개활지 주행의 경우와 비교하기 위해서 공기저항의 실험식으로 무차원하였다.

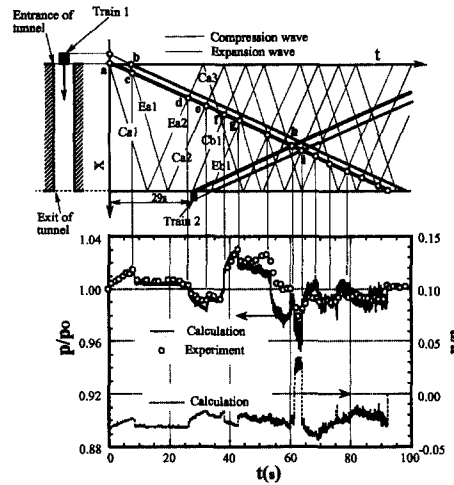


Fig. 3 Pressure and velocity transients on train head (tunnel length ( $L$ )=5305 m, velocity of train1 ( $V1$ )=207 km/h, velocity of train 2 ( $V2$ )=201 km/h, length of train1 ( $Lt1$ )=400 m, length of train 2 ( $Lt2$ )=300 m)

#### 4. 해석 결과 및 고찰

##### 4.1 입력변동 특성

Fig. 3에는 두 열차가 터널내를 주행하는 경우에 터널내에서 발생하는 파동선도 및 열차의 선두부에서 정압의 시간변화와 유속변화를 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 선두부에서의 유속( $u$ )를 대기의 음속 ( $a$ )으로 무차원화한 값을 나타낸다. 계산조건은 터널의 실측값(그림의  $\bigcirc$ 로 나타낸 값)<sup>(21)</sup>과 비교를 위하여 터널의 길이 ( $L$ )를 5305 m, 열차속도  $V1$ (여기에서  $V1$ 은 train 1의 속도)를 207 km/h로 하였으며, train 2(본 논문에서는 train 1을 자열차, train 2를 대향열차라고 한다)의 속도  $V2$ 를 201 km/h로 가정하였다. 또 자열차의 길이  $Lt1$ 을 400 m, 대향열차의 길이  $Lt2$ 를 300 m로 가정하여, 자열차가 터널에 진입하여서부터 29 s 후에 대향열차가 터널의 반대쪽으로부터 진입한 경우를 계산하였다. 그림에서 자열차가 터널에 진입하는 경우, 자열차에 의한 압축파  $Ca1$ 의 전파에 의하여 열차측벽과 터널벽 사이에서 터널 입구방향으로의 유동이 발생하게 되므로, 열차 선두부에서의 압력

은 점 a에서 c까지 점차 상승하게 된다. 그리고 열차 후미부가 터널에 진입함으로써 발생하는 팽창과 Ea1의 전파에 의해 압력은 점 c에서 급격히 감소한다. 한편 열차가 터널 입구에 진입하게 됨으로써 발생하는 압축과 Ca1과 팽창과 Ea1은 터널출구면에서 반사하여, 각각 반사팽창과 Ea2와 반사압축과 Ca2를 형성한다. 이러한 압력파들은 점 d와 e에서 진행하는 열차와 간섭하여, 각각 압력의 급격한 하강과 상승이 발생하게 된다. 그 후 대향열차가 터널의 반대편에 진입함으로써 발생하는 압축과 Cb1과 대향열차의 후미부가 진입함으로써 발생하는 팽창과 Eb1은 터널내를 전파하여 진행해오는 자열차와 각각 점 f와 g에서 간섭하게 된다. 따라서 점 f에서 압력은 급격하게 상승하며, 팽창과 Eb1이 통과하기 직전에 압력은 최대로 된다. 대향열차에 의한 압축과 Cb1과 팽창과 Eb1은 터널입구면에서 각각 반사팽창과 Eb2 및 반사압축과 Cb2로 되지만, 이들 압력파는 자열차에 의한 압력파들과 매우 복잡한 간섭을 하게 된다. 한편 자열차 선두부의 압력은 대향열차와 교행하기 직전 및 직후 점 h에서 급격히 상승 및 하강(점 i에서 최소)하게 되며, 그 후 매우 심한 압력변동이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그림에서 압력의 실측값은 대향열차의 영향이 없는 점 d까지는 매우 잘 일치하지만, 점 d 이후부터는 자열차와 대향열차에 의한 압력파들이 서로 간섭하여 본 계산결과는 단지 정성적으로 일치하고 있음을 관찰할 수 있다. 한편 그림의 열차선두부의 기류속도는 자열차의 선두부를 대향열차의 선두부가 통과할 때, 흐름은 갑작스런 방향변화(흐름이 x의 +방향으로 된다)를 일으키게 되며, 대향열차의 후미부가 통과한 후에 재차 x의 -방향으로 향하게 된다.

한편 위의 그림으로부터 두 열차가 터널내를 주행하는 경우에는 매우 심한 압력변동이 발생하며, 이전 저자에 의해서 수행된 1열차의 경우<sup>(16)</sup>에 비해 압력변동값은 더욱 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 터널내에서 두 열차가 교행하는 경우에 발생하는 압력변동의 최대/최소값은 실측값과 차이를 나타내었다. 이것은 두 열차가 교행하는 경우에 열차와 열차 및 열차와 터널벽 사이에 공기의 흐름이 발생하게 되므로, 흐름장은 매우 복잡한 3차원 형태로 되기 때문이다.

Fig. 4에는 터널과 개활지 주행의 경우에 발생하는 압력변동을 비교하기 위하여 문헌<sup>(22)</sup>의 실측값

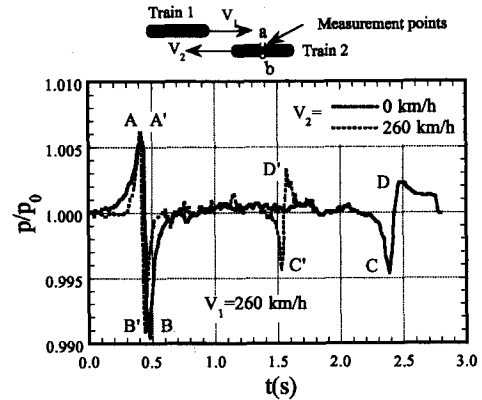


Fig. 4 Pressure transients on middle of train 2 (point a) in open air

을 나타내었다. 그림의 위 부분에 나타난 바와 같이, 자열차(열차1)의 속도  $V_1=260$  km/h, 대향열차(열차2)의 속도  $V_2$ 를 0 km/h(정지해 있는 상태)와 260 km/h인 두 경우에 압력변동을 각각 실선과 점선으로 나타내었다. 그림의 측정점은 대향열차 중간부의 점 a와 b이다. 그림으로부터 두 열차가 서로 접근함에 따라 측정점 a에서 압력은 대향열차(열차2)의 속도가 0 km/h와 260 km/h 두 경우 모두에 대하여 급격하게 상승하여, 점 A(열차2의 속도가 0 km/h인 경우 최대값)와 A'(열차2의 속도가 260 km/h인 경우의 최대값)에서 최대로 된다. 자열차(열차1)의 선두부가 대향열차의 중간부 점 a를 통과한 직후 압력은 급격히 하강하여 각각 압력은 점 B와 B'에서 최소로 된다. 그 후 압력은 일단 대기압 상태로 회복하지만, 자열차의 후미부가 통과할 때 다시 급격히 하강하여, 점 C와 C'에서 최소로 된 후, 점 D와 D'에서 급격한 압력상승을 거쳐 다시 대기압 상태로 된다는 것을 알 수 있다. 한편 그림에는 나타나지 않았지만, 점 a의 반대측 점 b에서 압력의 큰 변동은 발생하지 않고 거의 대기압 상태를 유지하였다. 따라서 자열차에 의하여 대향열차에는 외측으로 강한 하중이 작용하게 되며, 그 후 내측으로의 하중이 작용하게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 작용에 의하여 두 열차는 yawing 운동<sup>(23)</sup>을 하게 되며, 이것은 열차의 주행 안정성은 물론 승차감 등에 바람직하지 못한 결과를 초래한다.

한편 Fig. 3에 나타난 바와 같이 터널내에서는 측정점 a와 b에서 압력변동의 절대값은 개활지 주행에 비해 크게 되지만, 터널 벽면의 존재로 인하

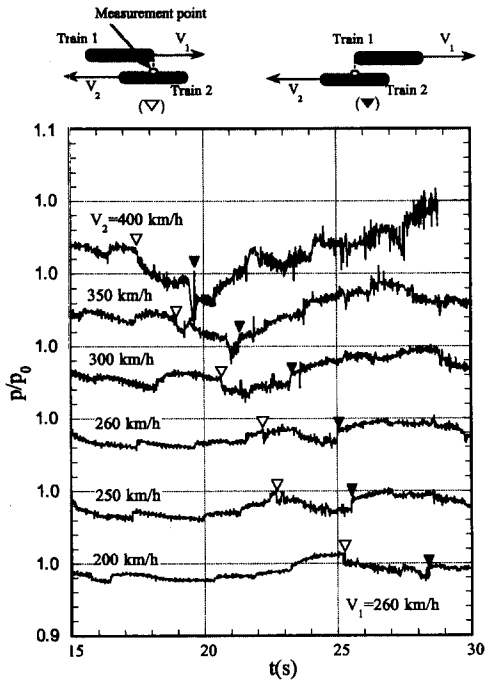


Fig. 5 Pressure transients on middle of train 2 in tunnel  
( $L=3$  km,  $V_1=260$  km/h,  $V_2=200\sim400$  km/h,  $R_1=R_2=0.2$ ,  $L_{t1}=L_{t2}=400$  m)

여 점 a와 b에서 압력변동의 크기가 거의 같았다. 따라서 터널주행의 경우 열차벽면에 작용하는 하중은 개활지 주행에 비해 작다. (Fig. 5와 6 참조) 이 때문에 터널내를 주행하는 경우 열차의 yawing운동은 개활지 주행에 비해 상대적으로 약하다. 그림에서 대향열차의 속도가 변화하는 경우 압력변동의 최대/최소값은 거의 같다. 따라서 개활지 주행의 경우 대향열차의 중간부에 작용하는 압력변동의 최대/최소값은 자열차의 속도만에 의존한다는 것을 알 수 있다. 또 그림으로부터 개활지 주행의 경우 압력변동의 최대/최소값은 열차의 후미부가 통과할 때 보다도 열차 선두부가 통과할 때 더욱 크다.

터널내에서 두 열차가 교행하는 경우에 대한 계산결과를 Fig. 5에 나타내었다. 계산은 터널의 길이  $L$ 을 3 km로, 자열차의 속도를  $V_1=260$  km/h, 대향열차의 속도  $V_2$ 를 200~400 km/h로 변화시킨 경우 대향열차의 중간부에서 압력변동을 나타내었다. 그림으로부터 대향열차의 속도가 400 km/h인 경우 자열차의 선두부가 대향열차의 중간부를 통과할 때,  $\nabla$ 로 나타낸 점에서 압력은 감소하기 시작

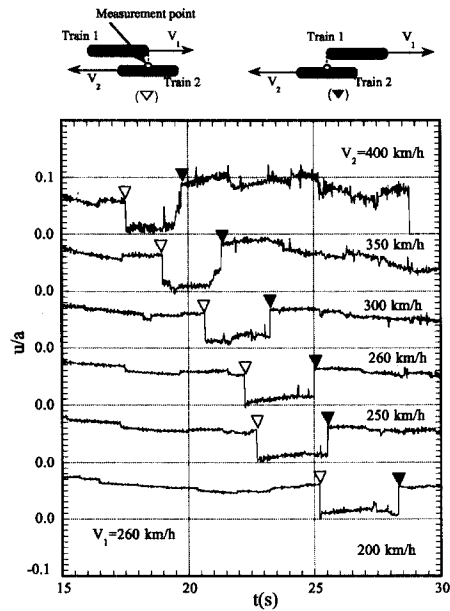


Fig. 6 Velocity transients on middle of train 2 in tunnel  
( $L=3$  km,  $V_1=260$  km/h,  $V_2=200\sim400$  km/h,  $R_1=R_2=0.2$ ,  $L_{t1}=L_{t2}=400$  m)

하여 두 열차의 교행에 의하여 압력은 더욱 감소한 후, 자열차의 후부가 대향열차의 중간부를 통과함으로써  $\blacktriangledown$ 로 나타낸 점에서 압력은 급격히 상승한다. 그 후 압력파들의 전파로 인하여 압력은 매우 심한 변동을 한다. 참고로  $\nabla$ 와  $\blacktriangledown$ 는 그림의 윗부분에 도식적으로 나타낸 바와 같이 두 열차의 교행 상태 즉  $\nabla$ 점은 자열차의 선두부가 대향열차의 중간부에 도달한 상태이며,  $\blacktriangledown$ 점은 자열차의 후미부가 대향열차의 중간부에 도달한 상태이다. 따라서  $\nabla$ 점에서부터  $\blacktriangledown$ 점까지가 두 열차의 교행상태로 된다. 한편 그림으로부터 대향열차의 속도가 350 km/h 이상인 경우에는 두 열차의 교행시에 큰 압력 변동이 발생하지만, 300 km/h 이하에서는 두 열차의 교행시에 발생하는 압력변동은 크지 않다는 것을 관찰할 수 있다. 한편 그림의  $\nabla$ 와  $\blacktriangledown$ 점에서 압력의 급격한 변화는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 대향열차의 중간부에서 발생하는 유속변화에 의하여 이해된다. 그림으로부터 자열차가 대향열차의 중간부를 통과하면 흐름은 급격히 변화하여, 유속은 거의 0에 가깝게 된다. 두 열차가 교행하는 상태에서는 유속은 크게 변동하지 않는다.  $\blacktriangledown$ 점에서 유속은 급격하게 상승하며, 이와 같이 유속에서 급

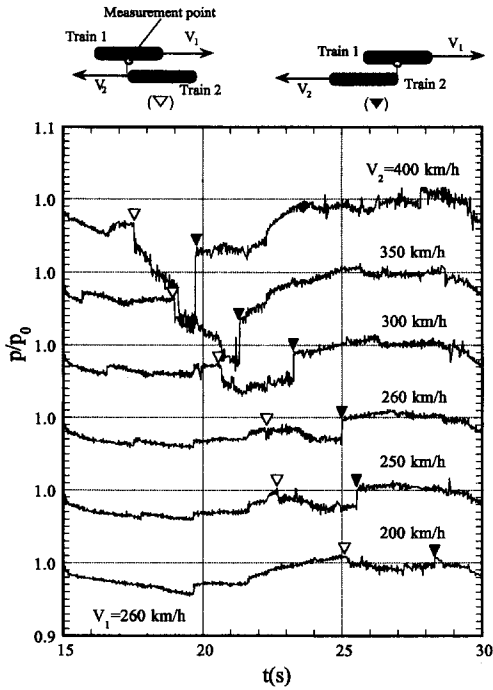


Fig. 7 Pressure transients on middle of train 1 in tunnel  
( $L=3$  km,  $V_1=260$  km/h,  $V_2=200-400$  km/h,  $R_1=R_2=0.2$ ,  $Lt_1=Lt_2=400$  m)

격한 변화의 크기는 대향열차의 속도에 거의 의존하지 않는다.

Fig. 7에는 Fig. 5와 같은 조건에서 자열차의 중간부에 작용하는 압력변화를 나타내었다. 그림으로부터 대향열차의 속도 증가에 따른 압력의 급강하 및 교행동안의 유속변화는 현저하게 커지게 되며, 개활지 주행에 비하여 터널내의 주행의 경우 열차 중간부에 작용하는 압력은 대기압 보다 상당히 낮다는 것을 알 수 있다. 이것은 터널내에서 열차가 교행하는 경우에 두 열차에 의해서 발생하는 팽창파가 서로 중첩되기 때문이다. 이러한 압력변동의 최소값은 대향열차의 속도에 강하게 의존한다. 한편 자열차에 작용하는 압력변동은 두 열차가 터널에 진입하는 시간에 따라서 달라질 수 있다. 더욱이 대향열차가 터널을 빠져 나가고 난 후에도 터널 내에는 한동안 그 열차에 의한 공기의 유동이 존재하게 되므로, 비록 터널내에서 열차의 교행이 없다고 하더라도 이러한 상태에서 자열차가 터널에 진입하는 경우에 자열차에 작용하는 압력변동은 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 터널에 진입하는

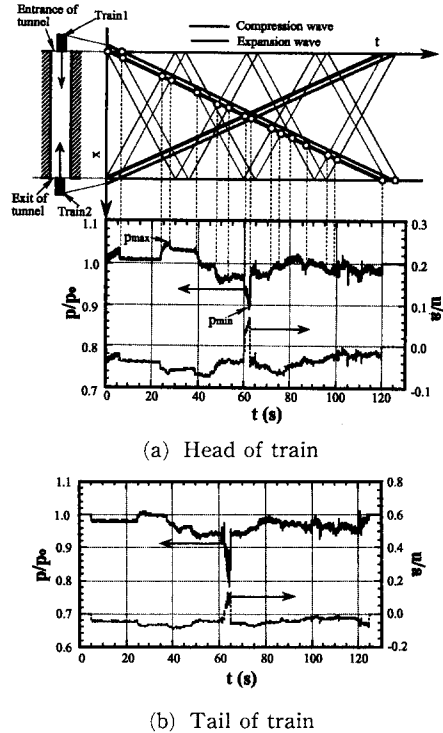
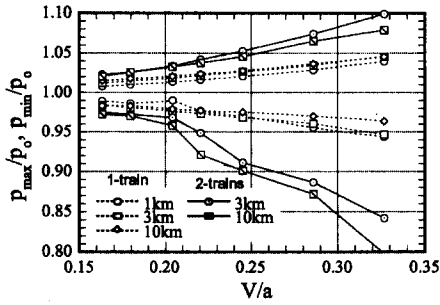


Fig. 8 Pressure and velocity transients on head and tail of train ( $L=10$  km,  $V_1=V_2=300$  km/h,  $Lt_1=Lt_2=400$  m,  $R_1=R_2=0.2$ )

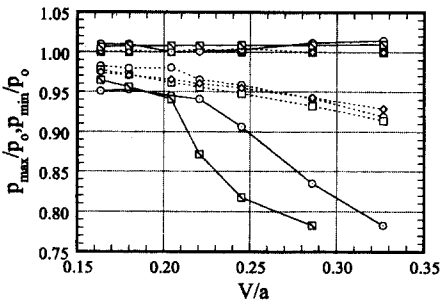
열차의 시간차에 대하여서는 상세하게 다루지 않았다.

Fig. 8에는 터널의 길이  $L=10$  km, 자열차 및 대향열차의 속도가  $V_1=V_2=300$  km/h로 같고 두 열차의 길이가 모두 400 m로 같다고 가정하였으며, 두 열차가 동시에 터널에 진입하는 경우에 발생하는 파동선도 및 압력변동을 나타내었다. 그림의 (a)와 (b)에는 각각 자열차의 선두부와 후미부에 작용하는 압력변동 및 유속변화를 나타내었다. 그림의 파동선도로부터 두 열차의 선두부가 터널에 진입함으로써 발생하는 압축파와 두 열차의 후미부가 진입하는 경우에 발생하는 팽창파가 터널내에서 서로 간섭하여 심한 압력변동을 야기시킨다는 것을 알 수 있다. 두 열차가 교행하기 직전에서 직후까지의 시간에는 압력은 대기압보다 매우 낮게 되며, 이 경우 유속은 순간적으로  $x$ 의 +방향으로 된다. 한편 그림에서 열차의 후미부에서 발생하는 부의 압력은 선두부에서 보다 더욱 크다. 이와 같이 터널내를 두 열차가 주행하는 경우에는 단독주행<sup>(16)</sup>에 비해 부의 압력이 현저하게 크게 된다. 이러한





(a) Head of train



(b) Tail of train

Fig. 9 Max/min pressures on head and tail of train (R1=R2=0.2, V1=V2)

압력변화는 열차의 주행안정성과 차내 승객에 큰 영향을 미치게 되므로, 터널내에서 발생하는 압력변동의 최대/최소값을 아는 것은 매우 중요하다.

Fig. 9에는 두 열차가 같은 속도로 동시에 터널로 진입하는 경우에 자열차의 선두부 및 후미부에 작용하는 압력의 최대/최소값을 터널의 길이  $L$ 을 변수로 하여 나타내었다. 그림의 실선은 두 열차가 주행하는 경우이며, 참고로 1열차 주행의 경우에 발생하는 압력의 최대/최소값을 점선으로 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이, 열차 선두부에 작용하는 압력변동의 최대값은 대향열차에 의해서 발생하는 압축파가 자열차의 선두부를 통과한 후에 발생하였으므로, 압력변동의 최대값은 터널내의 1열차 주행에 비해 1.04~1.05배 정도 크다. 또 압력변동의 최대값은 두 열차의 속도가 증가할수록 커지게 되며, 터널의 길이가 길수록 최대값은 작아진다. 이것은 터널이 긴 경우에 발생하는 압축파의 감쇠<sup>(24)</sup>가 커지기 때문이라고 생각된다. 그림에서 열차의 속도  $V/a$ 가 작은 경우 압력변동의 최대값에 미치는 터널길이의 영향은 크게 나타나지 않는다. 한편 압력변동의 최소값은 두 열차가 교행하는

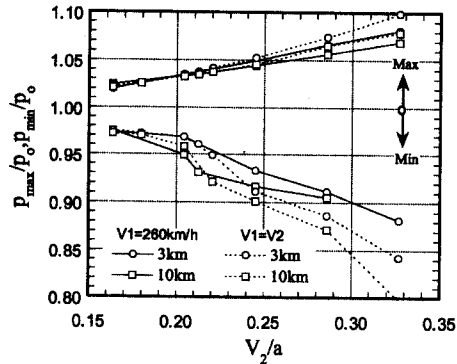


Fig. 10 Max/min pressures on head of train 1 (V1=260 km/h, R1=R2=0.2)

경우에 발생하므로  $V/a$ 가 클수록 상당히 작아지며, 1열차 주행에 비해 10~20% 정도 작다. 그리고 터널의 길이가 길수록 압력변동의 최소값은 작아진다. 그림 (b)에서 열차후미부에 작용하는 압력변동의 최대값은 1열차 주행의 결과와 유사하게 나타나며, 열차의 속도에 크게 의존하지 않는다. 그러나 열차 후미부에 작용하는 압력변동의 최소값은 열차 속도가 증가할수록 작아지며, 이러한 경향은 터널의 길이가 길수록 더욱 뚜렷하게 나타난다.

한편 Fig. 10에는 자열차의 속도  $V1=260$  km/h 이고, 대향열차의 속도  $V2$ 가 변화하는 경우 자열차의 선두부에서 발생하는 압력변동의 최대/최소값을 나타내었다. 그림의 실선은 터널내에 두 열차가 서로 다른 속도로 주행하는 경우에 대한 것이며, 점선은 두 열차가 같은 속도( $V1=V2=260$  km/h)로 주행하는 경우를 나타내었다. 그림으로부터 두 열차의 속도가 다른 경우  $V2/a$ 에 따른 압력변동의 최대/최소값의 변화는 같은 속도로 주행하는 경우와 거의 유사하다. 즉  $V2/a$ 가 증가할수록 압력변동의 최대값은 증가하고, 최소값은 감소한다.  $L=3$  km인 경우에 발생하는 압력변동의 최대값으로부터 자열차의 속도가 느린 경우(260 km/h)라고 할지라도, 대향열차의 속도가 빠른 경우( $V2/a=0.327$ )에는 두 열차가  $V/a=0.286$  ( $V1=V2=350$  km/h)로 같은 속도로 주행하는 경우에 상당하는 압력변동이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에는 압력변동의 최대/최소값에 미치는 열차와 터널의 단면적비  $R$ 의 영향을 나타내었다. 계산은 자열차와 대향열차가 같은 속도(250 km/h)로 동시에 터널에 진입하며, 터널의 길이를 3 km와 10 km로 가정하였다. 그림에서 터널의 단면적

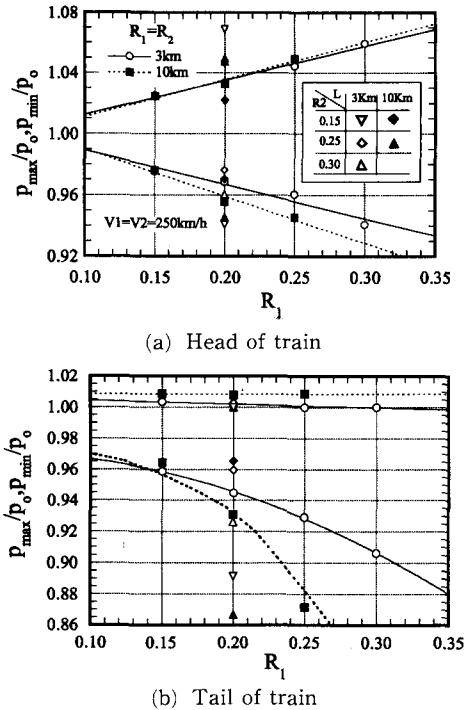


Fig. 11 Max/min pressures on head and tail of train 1 ( $V_1=V_2=250$  km/h)

에 대한 자열차의 단면적비를  $R_1$ , 터널의 단면적에 대한 대향열차의 단면적비를  $R_2$ 로 정의하였다. 그림의 실선과 점선은  $R_1=R_2=R$ 인 경우 각각 터널 길이가 3 km(○점)와 10 km(■점)에 대한 계산점을 곡선근사한 것이다. 그림의 실선과 점선으로부터  $R_1=R_2$ 인 경우 자열차의 선두부에 작용하는 압력변동의 최대값은  $R$ 의 값이 커질수록 커지게 되며, 최소값은  $R$ 의 값이 커질수록 작아지게 된다. 또 단면적비  $R$ 이 커질수록 터널 길이의 영향이 커지게 된다. 한편 그림에서  $R_1=0.20$ 인 경우  $R_2$ 의 값을 0.15, 0.25 및 0.30으로 변화시켜, 터널 길이의 영향을 각각 ▽, ◆, ◇, ▲, △로 나타내었다.  $R_2$ 의 값이 0.15( $R_1=0.20$ )이고, 터널의 길이가 3 km인 경우(▽점), 압력변동의 최대값은 그림의 실선의 값에 비해 상당히 크며, 최소값은 실선에 비해 상당히 작다. 그러나 같은 조건에서 터널의 길이가 10 km인 경우(◆)에 대해서는 최대값을 나타내는 점선의 값보다 작다. 또 터널의 길이가 3 km인 경우  $R_2$ 의 값을 0.30( $R_1=0.20$ )으로 증가(△점)시키면, 압력변동의 최대값은  $R_2=0.15$ 의 경우에 비해서는 작으나 그림의 실선으로 나타낸 값보

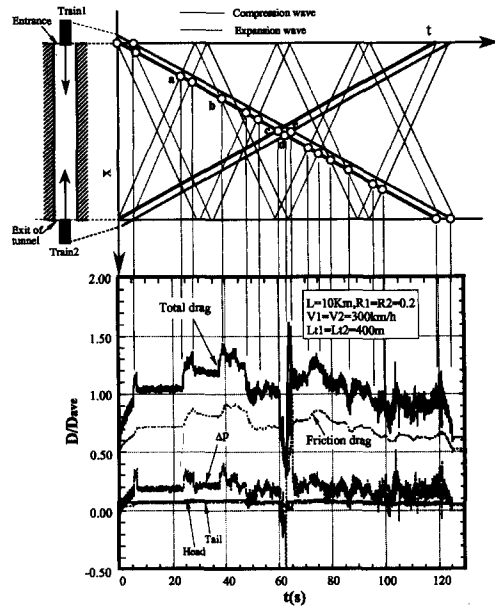


Fig. 12 Aerodynamic drag of train in tunnel and wave diagram ( $L=10$  km,  $V_1=V_2=300$  km/h,  $L_1=L_2=400$  m,  $R_1=R_2=0.2$ )

다는 크다. 한편 그림 (b)에는 그림 (a)와 같은 조건인 경우 열차후미부에 작용하는 압력변동의 최대/최소값을  $R_1$  및  $R_2$ 에 대하여 나타내었다. 그림에서 열차 후미부에 작용하는 압력변동의 최대값은  $R_1$  및  $R_2$ 에 거의 의존하지 않으나, 최소값은  $R_1$ 의 증가에 따라 급격하게 감소한다는 것을 알 수 있다. 이 뿐만 아니라 열차 후미부에 작용하는 압력변동의 최소값은 터널의 길이 및  $R_2$ 의 값에도 강하게 의존한다. 이와 같이 터널내에서 두 열차가 교행하는 경우에는 열차 후미부에서는 압력의 최대값 보다는도 최소값의 변화가 크므로, 차체를 설계하는데 있어서 압력의 최소값을 충분히 고려할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 공기저항 특성

Fig. 12에는 터널의 길이  $L=10$  km, 두 열차가 같은 속도( $V_1=V_2=300$  km/h)로 동시에 터널에 진입하며, 두 열차의 길이가 400 m로 같다고 가정하여 자열차에 작용하는 공기저항을 나타내었다. 열차에 작용하는 전체 공기저항(total drag)은 마찰저항(friction drag), 열차 선두부와 후미부의 압력차( $\Delta p = p_{head} - p_{tail}$ )로 인한 압력저항(pressure

drag) 및 선두부와 후미부에서 마찰저항의 합으로 구성된다고 할 수 있으므로, 이들 각 구성 저항을 평균저항(열차가 터널내를 주행하는 동안의 전체 공기저항의 시간평균,  $D_{ave}$ )으로 무차원화였다. 그림에서 자열차의 선두부에서 작용하는 마찰과 압축파로 인한 압력상승에 의하여 공기저항은 급격히 상승하며, 열차 후미부가 터널에 진입할 때 발생하는 팽창파가 열차 선두부를 통과하기 직전에 최대로 된다. 그 후 대항열차가 터널의 반대편에 진입할 때 발생하는 압축파가 자열차에 도달하여 점 a에서 공기저항은 다시 급격히 상승하게 되며, 대항열차에 의한 팽창파가 자열차에 도달하기 직전에 최대로 된다. 공기저항은 이와 같이 변동을 반복하다가, 두 열차가 교행을 시작(점 c)할 때 공기저항은 급격히 감소하며, 교행이 종료되는 순간(점 e)에 급격히 상승하여 최대로 된다. 따라서 본 계산 결과로부터 터널내를 주행하는 열차의 동력을 설계할 때, 공기저항의 급격한 상승과 감소를 고려하지 않으면 터널내에서 열차들이 공전하거나 진행속도의 급격한 변화를 초래할 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 그림은 터널내를 주행하는 열차의 공기저항의 대부분은 주로 마찰저항과 압력저항으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있으며, 공기저항의 변동값은 터널의 길이나 열차의 속도에 강하게 의존하였다.

Fig. 13에는 터널내에 두 열차가 주행하는 경우에 발생하는 공기저항을 개활지 주행의 경우 ( $D_{open\ air}$ )와 비교하였다. 계산에서 두 열차는 같은 속도(260 km/h)로 동시에 터널에 진입한다고 가정하였으며, 터널의 길이를 3 km와 10 km로 가정하였다. 개활지에서 1열차가 주행하는 경우 전체 공기저항

은 다음의 실험식<sup>(22)</sup>으로 주어지며, 그림에는 굵은 실선으로 나타내었다.

$$D_{open\ air} = (0.013 + 0.00029L_t)V^2 [kg_f] \quad (18)$$

여기에서  $L_t$ 는 열차의 길이이며,  $V$ 는 열차의 속도이다. 또 그림의 가는 실선은 전체 공기저항, 점선은 열차중간부에 작용하는 마찰저항이다. 터널내에서 교행하는 열차에 작용하는 전체 공기저항은 개활지 주행에 비해 70~80% 정도 크며, 1열차 주행<sup>(16)</sup>에 비해 약 20% 정도 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 평균 공기저항은 열차속도에 거의 의존하지 않으나, 열차속도가 작은 경우에는 터널의 길이가 짧을수록 평균 공기저항은 크다. 그러나 열차의 속도가 비교적 큰 경우에는 터널길이의 영향은 나타나지 않는다. 한편 대항열차의 속도가 변화하는 경우에 자열차에 작용하는 공기저항을 Fig. 14에 나타내었다. 계산은 터널길이  $L=3\text{ km}$ 와  $10\text{ km}$ 의 경우 자열차의 속도  $V_1=260\text{ km/h}$ 로 고정하였으며, 대항열차의 속도  $V_2$ 를  $200\sim 400\text{ km/h}$ 로 변화시켜 두 열차가 동시에 터널에 진입한다고 가정하였다. 그림의 종축은 1열차가  $V_1=260\text{ km/h}$ 로 개활지를 주행하는 경우의 공기저항값으로 무차원화였다. 그림으로부터 대항열차의 속도 ( $V_2/a$ )가 증가함에 따라 공기저항은 증가하며, 터널의 길이가 짧을수록 공기저항은 다소 커진다는 것을 알 수 있다. 예를 들면 대항열차의 속도가  $400\text{ km/h}$  ( $V_2/a=0.327$ ) 정도로 되면,  $V_1=V_2=260\text{ km/h}$ 의 경우(Fig. 13 참조)에 비해 공기저항은 약 20% 정도 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15에는 두 열차의 속도가  $V_1=V_2=250\text{ km/h}$ 로 같은 경우 터널의 길이를 3 km와 10 km

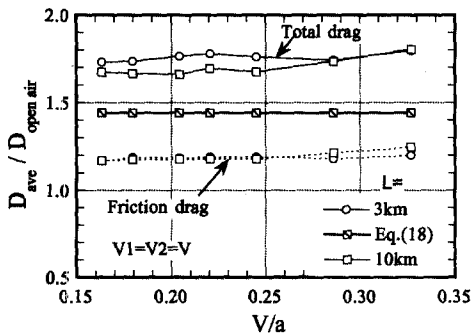


Fig. 13 Total aerodynamic drag and friction drag of train 1 ( $V_1=V_2=V, R_1=R_2=0.2$ )

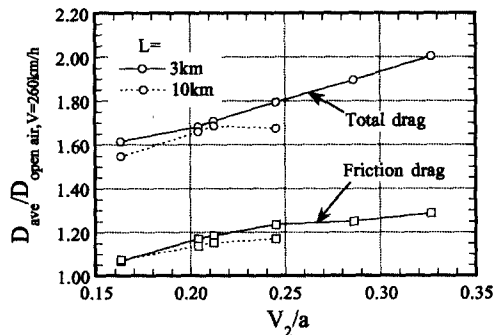


Fig. 14 Relation between total aerodynamic drag in tunnel and  $V_2$  ( $V_1=260\text{ km/h}, R_1=R_2=0.2$ )

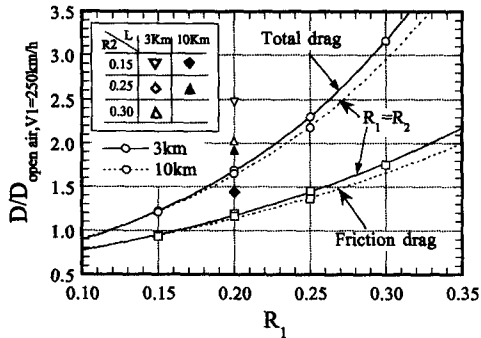


Fig. 15 Relation between aerodynamic drag and  $R_1$  ( $V_1=V_2=250$  km/h)

로 변화시켜, 열차와 터널의 면적비  $R_1$ 와  $R_2$ 가 평균 공기저항에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 실선과 점선은 각각 열차 길이가 3 km와 10 km에 대하여  $R_1=R_2$ 로 가정한 경우에 평균 공기저항의 계산값을 곡선근사한 것이다. 그림의 실선과 점선으로부터 단면적비  $R$ 이 증가할수록 전체공기저항 및 마찰저항은 현저하게 증가하며, 같은  $R$ 에 대해서는 터널 길이가 길수록 공기저항값은 작아진다. 또  $R_1=0.2$ 인 경우 대향열차 단면적비  $R_2$ 가 커질수록 공기저항은 증가한다. 한편 단면적비  $R$ 이 작은 경우에는 터널 길이의 영향은 나타나지 않지만, 단면적비가 증가할수록 터널 길이의 영향은 커지게 된다. 이것은 열차의 교행시에 발생하는 공기저항의 급격한 감소에 기인한다고 생각된다.

## 5. 결 론

고속열차가 터널내에서 교행하는 경우 터널내에서 발생하는 파동현상에 착목하여 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 압력변동과 공기저항의 변동특성을 개활지 주행의 경우와 비교하였다. 본 계산으로부터 터널내에 두 열차가 주행하는 경우에 발생하는 압력변동의 최대값은 두 열차의 속도가 증가할수록, 터널의 길이가 길수록 작다는 것을 알았다. 또 압력변동의 최대값은 열차와 터널의 단면적비  $R$ 이 커질수록 커지며, 압력변

동의 최소값은  $R$ 이 커질수록 작다. 한편 터널내에서 두 열차가 교행하는 경우에 발생하는 전체 공기저항의 평균값은 개활지 주행에 비해 약 70~80% 정도 크며, 터널내를 단독주행에 하는 경우에 비해 약 20% 정도 크다. 이러한 공기저항의 대부분은 열차측면의 마찰저항과 열차 선두부와 후미부의 압력차로 인한 압력저항으로 구성되어 있다. 또 열차에 작용하는 전체 공기저항의 평균값은  $R$ 이 증가할수록 커지지만, 같은  $R$ 에 대해서는 터널의 길이가 길수록 작아진다는 것을 알았다.

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Sajben, M., 1971, "Fluid Mechanics of Train/Tunnel Systems in Unsteady Motion," *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 8, pp. 1535~1545.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 前田, 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.
- (6) Ido, A. Iida, M. and Maeda, T., 1993, "Wind Tunnel Tests for Nose and Tail of Train," *RTRI Report of Japan*, Vol. 7, No. 7.
- (7) 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.
- (8) 金吉昌 外5名, 1993, "列車의 走行抵抗에 관한 研究," 鐵道技術研究所報.
- (9) Guihew, C., 1983, "Resistance to Forward Movement of TGV-PSE Trainsets: Evaluation of Studies and Results of Measurements," *French Railway Review*, Vol. 1, No. 1.
- (10) 山本, 1983, "列車とトンネル의 空氣力學," 鐵

- 道技術總研報告, No. 1230.
- (11) Sockel, H., 1989, "Aerodynamik des Eisenbahntunnels," *ZAMM. Z. Angew.*, Vol. 69, No. 6.
- (12) 中野, 外3名 1992, "高速列車用複線トンネル内の壓力變動解析," 日本機械學會第70期講演論文集 Vol. C.
- (13) 船橋, 外4名, 1993, "高速列車のトンネル突入によって誘起される衝撃波騒音について," 東北大學流體研報告, 第4卷.
- (14) 池川, 外2名, 1991, "新幹線車輛周りの氣流シミュレーション," 可視化情報, Vol. 11, No. 2.
- (15) 川口, 1963, "列車がすれ違う際の空氣の流れの理論的計算," 鐵道技術總研報告, No. 385.
- (16) 김희동, 1996, "터널내를 走行하는 1列車의 空氣力學的 解析," 大韓機械學會論文集 投稿中.
- (17) 김희동, 1996, "直管内를 傳播하는 壓縮波의 減衰와 變形에 관한 數值解析的 研究," 大韓機械學會論文集 第20卷, 第7號.
- (18) 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.
- (19) Zielke, W., 1968, "Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow," *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 90, No. 1.
- (20) Maeda, T., Kinoshita, M., Kajiyama, H. and Tahemoto, K., 1988, "Estimation of Aerodynamic Drag of Shinkansen Trains from Pressure Rise in Tunnel," *6th Intl. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Durham, England.
- (21) 原, 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.
- (22) 山本, 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.
- (23) Maeda, T., 1990, "Numerical Study of Flow around Car on Bridge at Cross-Wind Conditions," *RTRI Report of Japan*, Vol. 4, No. 2.
- (24) 金義東, 外1人, 1995, "高速鐵道 터널에서 發生하는 波動現象에 관한 衝擊波管의 研究2(壓縮波의 非線形效果와 減衰)," 大韓機械學會論文集, 第19卷, 第8號.