

고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상

김 회 동

Wave Phenomenon in High-Speed Railway Tunnel

Heuy-Dong Kim



- 김회동(안동대 기계공학과)
- 1961년생
- 압축성유체공학을 전공하였으며, 충격파역학, 고속제트, 고속내부흐름, 소음, 초음속풍동 및 충격파관의 연구에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근 산업발전에 부응하여 수송능력이 매우 높은 고속철도의 필요성이 선진 여러 나라에서 대두되고 있으며, 우리나라에서도 신문지상이나 뉴스에서 고속철도에 관한 기사들을 자주 접할 수 있다. 우리나라에서는 몇년 전부터 고속철도를 계획, 현재 활발하게 건설중에 있다. 이와 같은 고속철도에 있어서 요구되는 것은 무엇보다도 안전성, 신뢰성 및 승차감의 쾌적성 등은 물론이거니와 열차의 고속주행으로 인하여 발생하는 주변 환경에 대한 소음문제는 지금부터 해결하여야 하는 매우 중요한 기술적인 문제로 남아 있다.

일반적으로 철도소음에는 차륜의 전동음, 차체를 지나는 공력소음(aerodynamic noise) 등 여러 소음원(noise source)이 있으나, 열차가 고속화됨에 따라 지금까지의 소음과는 전혀 다른 성질의 소음, 즉 터널의 출구로부터 발생하는 충격음(impulsive noise)이 문제화되고 있으며, 이것은 열차의

속도와 매우 깊은 관련을 가지므로 열차의 고속화와 병행하여 연구되어야 할 공학적 과제로 사료된다.

이와 같은 충격음의 발생기구는 그림 1에서 쉽게 이해할 수 있다. 열차가 고속으로 터널로 돌입하게 되면, 열차의 피스톤작용에 의해 열차의 전면에 압축파(compression wave)가 형성된다. 이 압축파는 터널내를 전파하여 터널 출구에서 반사하게 된다. 이때 반사파는 팽창파(expansion wave)로 되어 터널의 입구쪽으로 전파하여, 진행하는 열차와 복잡한 간섭(interference)을 일으키게 된다. 이 경우 만일 차량의 기밀이 완전하게 되어 있지 않은 상태(실제의 열차에서는 환기팬 등으로 인하여 완전한 기밀은 어렵다)라고 하면, 열차 내의 승객은 매우 급격한 압력변동, 즉 귀가 '멍'하게 되는 현상⁽¹⁾을 겪게 된다. 이 때문에 열차의 돌입에 의해 터널 내부에 발생하는 압력변동에 대하여 지금까지 많은 연구⁽²⁻⁷⁾가 행하여져 왔다.

한편, 터널 내를 전파한 압축파가 터널 출구에서 반사될 때, 일부는 펄스 형태의 압력파로 되어 터널 외부로 방출하여 충격음

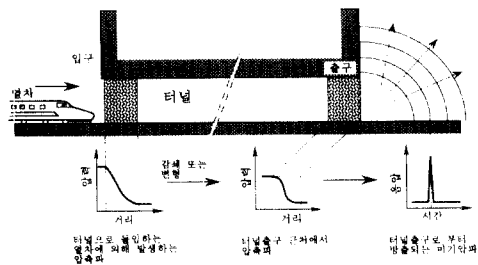


그림 1 고속철도 터널에서 발생하는 미기압파

(impulsive noise)으로서 주위로 전파하게 된다. 이 펄스형태의 압력파는 고속철도 관계자들 사이에서 미기압파(impulsive wave, 微氣壓波)⁽⁸⁾로 불리워지고 있으므로, 이 글에서도 이 용어를 사용하기로 한다. 이 미기압파는 현재 고속철도 주변의 환경에 대하여 지대한 소음문제로 대두되어, 그의 시급한 해결을 요하고 있는 실정이다.

이 글에서는 이와 같은 터널소음 문제를 해결하기 위하여 과거 수년간 서일본 철도 주식회사와 공동으로, 고속철도 터널에서 발생하는 미기압파 및 터널 내에서 발생하는 유체역학적 파동현상에 대해서 연구한 결과의 일부를 소개한다. 연구 프로그램은 고속철도 터널에서의 파동현상을 시뮬레이션하기 위한 충격파관의 성능 및 적합성 검토, 관내를 전파하는 압축파의 특성에 관한 이론해석 및 수치계산, 관내를 전파하는 압축파의 실험, 관단으로부터 방출되는 압력파의 거동에 관한 실험, 미기압파의 제어에 관한 실험 및 이론해석 등으로 이루어졌다. 여기에서는 고속철도 터널의 출구로부터 방출되는 미기압파에 착목하여, 종래의 연구동향과 본 프로그램의 연구 결과의 개략적인 면을 소개하고, 미기압파의 저감법에 대하여 기술하기로 한다.

2. 터널 입구에서 열차에 의해 형성되는 압축파

고속열차에 의해 터널입구 부근에서 형성

되는 흐름은 일반적으로 3차원 비정상 압축성 흐름이라고 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 흐름을 그림 2에서 나타내는 바와 같이 1차원 흐름으로 모델화함으로써 흐름의 특징이나 물리적 현상들을 비교적 간단하게 이해할 수 있다. 즉 단면적 A_2 를 가진 열차가 속도 V 로서 단면적 A_1 의 터널으로 돌입하게 되는 경우, 터널입구에서 형성되는 압축파의 압력파형을 $\Delta P_{comp}(x)$ 라고 하고, 이 압축파에 의한 압력상승을 $\Delta P_{21}(=P_2-P_1)$ 라 정의한다.

여기에서 P_1 는 압축파 전방의 압력(대기압)이며, P_2 는 압축파 바로 직후의 압력(정압)이다. 또 터널의 입구상태를 상태 ③이라고 하면, 열차의 돌입에 의해 터널내의 공기의 일부는 터널입구로부터 밖으로 유출하게 되므로, 그림에서 표시한 바와 같이 유속 u_3 는 왼쪽방향을 +로 하였다. 그림에서 압축파는 유한의 폭을 가지며, 그의 전파속도 U 는 유한진폭파의 전파특성⁽⁹⁾에 의하여 국소 압력 P 에 의존하게 되므로, 파 내부의 각점에서 다른 값을 가지게 된다. 이와 같은 경우, 설령 흐름을 일차원이라고 가정한다고 하더라도 ΔP_{21} 의 값을 해석적으로 얻는 것은 불가능하며, 정밀한 수치계산을 필요로 하게 된다. 따라서 이 글에서는 해석해를 얻기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 압축파의 폭은 얇고, 그의 전파속도는 파면의 전체에 걸쳐 일정하다.

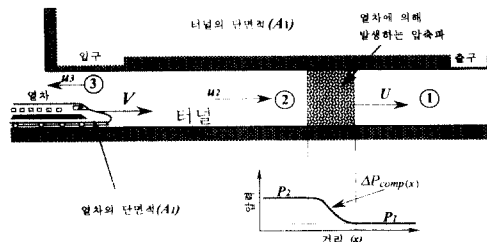


그림 2 터널입구 근처에서 발생하는 압축파에 대한 일차원 흐름 모델

- (2) ΔP_{21} 은 대기압 P_1 에 비해 작으며, 압축파는 미소 진폭파로 간주한다.
- (3) 압축파의 배후의 상태 ②로부터 상태 ③으로의 흐름은 등엔트로피적이다. 따라서 흐름은 열차의 선두형상에 의존하지 않는다.
- (4) 터널입구의 압력 P_3 는 대기압 P_1 과 같다.

위와 같은 가정을 이용하여 ΔP_{21} 을 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta P_{21} = \frac{1}{2} \gamma P_1 M_t^2 \frac{1 - \phi^2 / (1 + \zeta)}{\frac{\phi^2}{(1 + \zeta)} + \left(1 - \frac{\phi^2}{(1 + \zeta)}\right) M_t - \gamma M_t^2 \left\{1 - \frac{\phi^2}{2(1 + \zeta)}\right\}} \quad (2)$$

여기에서 ζ 는 그림의 상태 ②와 ③ 사이, 즉 압축파 전후 흐름의 전압손실 ($P_{02} - P_{03}$)을 상태 ③의 운동에너지로 무차원화한 값으로 식 (3)으로 정의된다.

$$\Delta P_{21} = \frac{1}{2} \gamma P_1 M_t^2 \frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) M_t - M_t^2} \quad (1)$$

여기에서 γ 는 공기의 비열비 (specific heat ratio), M_t 는 열차의 마하수 (train mach number), 즉 V/a_1 (a_1 은 상태 ①, 즉 대기압 상태에서 음속)이며, ϕ 는 단면적비 (흐름의 blockage)이라고도 한다, 즉 $(A_1 - A_2)/A_1$ 를 나타낸다. Pope⁽¹⁰⁾에 의하면, 열차의 선두부근의 흐름의 손실을 고려하여 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$\zeta = (P_{02} - P_{03}) / \left(\frac{1}{2} \rho_3 u_3^2\right) \quad (3)$$

만일 식 (2)에서 압축파 전후의 전압손실을 무시하게 되면, 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$\Delta P_{21} = \frac{1}{2} \gamma P_1 M_t^2 \frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) M_t - \gamma M_t^2 \left\{1 - \frac{\phi^2}{2}\right\}} \quad (4)$$

위의 식은 식 (1)과 약간 다르지만, 이것은 각각의 식을 유도할 때에 사용된 가정이 다르기 때문이다.

식 (1)에서 ϕ 를 열차와 터널의 단면적비 (열차의 blockage) $R = A_2/A_1 = 1 - \phi$ 로 변환하여, 이것을 변수로 하여 압축파의 강도 (strength of compression wave; ΔP_{21})와 열차속도 (train velocity; V)와의 관계를 그림 3에 나타낸다.

그림에서 공기의 비열비는 1.4, P_1 은 대기압, 즉 101.3 kPa, a_1 은 340 m/s로 가정하였다. R 의 값이 1.0의 극단적인 경우는 긴 원관에 피스톤을 전진시키는 경우, 보다 구체적으로 대포나 총신에서 발생하는 압축파 강도를 나타낸다고 생각할 수 있다. 또 그림 3(a)에서 $R=0.216$ 의 곡선은 일본의 山陽新幹線 (차량단면적 A_2 : 약 13.7 m², 터널단면적 A_1 : 약 63.4 m², 따라서 $A_2/A_1=0.216$)

에 대한 계산기값으로서, 실제로 측정된 값 (그림의 ○, ■, □로 표시)과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 경우 압축파의 강도는 열차의 돌입속도의 제곱에 거의 비례하며, R 이 작을수록 압축파의 강도가 작아진다는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)는 고속열차에 의하여 터널 입구에서 발생하는 압축파를 유한진폭 (finite amplitude)의 충격파 (shock wave)로 간주하는 경우의 충격파의 마하수 (M_s)를 나타내며, M_s 는 1에 매우 가까운 값이라는 것을 알 수 있다. 즉, 시속 400 km/h 이하의 속도로 주행하는 열차에 의해서 발생하는 압축파는 거의 음속으로 전파한다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 고속열차가 터널에 돌입함으로써 발생하는 터널입구의 압축파의 강도는 열차의 선두형상에 거의 의존하지 않는다. 그러나 터널 입구에서 형성되는 압축파의 파형

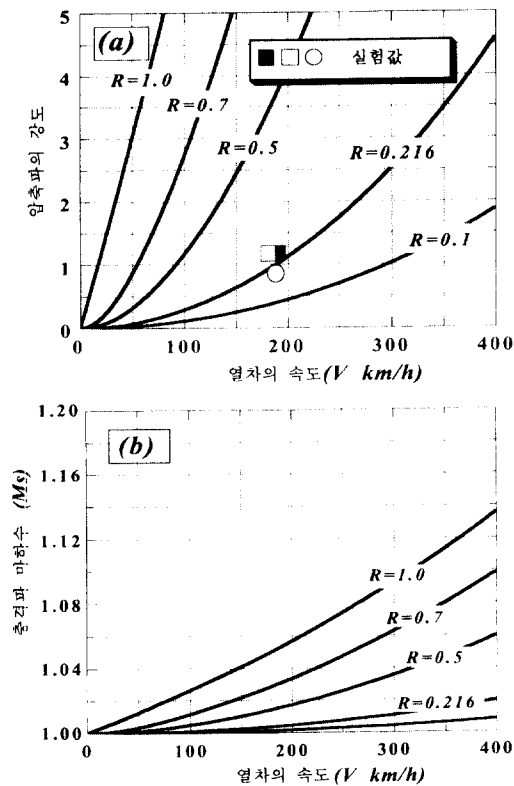


그림 3 터널입구 근처에서 발생하는 압축파의 강도와 충격파 마하수의 변화

($\Delta P_{comp}(x)$)은 열차의 돌입속도와 그의 선두형상, Blockage비 등에 의존하는 것으로 예상되며, 해석적인 방법으로 해를 얻기는 매우 곤란하다. 이 때문에 수치계산^(11,12) 및 실험적 연구⁽¹³⁾가 행하여지고 있다. 참고로 다음과 같은 반경험식⁽⁸⁾이 실험값과 잘 일치하는 근사식으로서 알려져 있다.

$$\Delta P_{comp} = \Delta P_{21} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{V_t}{0.3D} \right) \right\} \quad (5)$$

여기에서 t 는 파형의 중심을 원점으로 하는 시간, V 는 열차속도, D 는 터널의 등가직경 (equivalent diameter)을 나타낸다.

3. 터널내를 전파하는 압축파

고속열차에 의해 터널 입구에서 형성되는

압축파가 터널 내를 전파하는 속도(U)는, 공기의 점성이나 열전도성을 무시하여, 압축파가 유기하는 흐름을 등엔트로피흐름이라고 가정하면, 다음과 같은 식⁽¹⁴⁾으로 쓰여진다.

$$\frac{U}{a_1} = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - \frac{2}{\gamma-1} \quad (6)$$

위의 식으로부터 압축파 내의 입자의 전파속도는 압력 P 가 높은 부분에서의 음속(sound velocity)이 상대적으로 낮은 부분에서 보다 음속이 더 크므로, 더 빠른 속도로 전파하게 된다. 이 때문에 압축파의 파형은 터널 내를 전파함에 따라 점차 급격하게 된다. 그러나 실제에 있어서 공기는 어느 정도의 점성과 열전도성을 가지므로, 흐름 상태량의 구배 (gradient)를 완만하게 하는 확산작용을 하게 된다. 일반적으로 파형이 전파함에 따라 점차로 급격하게 변화해가는 것을 비선형 작용 혹은 비선형효과(nonlinear effect)라고 하며, 구배를 완만하게 하는 작용을 확산작용이라 하고 있다. 따라서 파의 비선형성에 의해 구배가 급격하게 되려고 하는 작용과 확산작용의 대소에 의해 전파하는 압축파의 파형이 결정된다고 생각할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 또 일반적으로 공기의 점성은 압축파의 강도를 약하게 한다. 이것은 압축파에 의해 유기되는 흐름에 경계층이 형성되어 유체마찰에 의한 손실이 발생하기 때문이다.

그림 4는 전파하는 압축파의 파형변화를 나타낸다. 실험은 저압실 (low pressure chamber)이 대기에 개방되어 있는 충격파관 (shock tube)에서 행하여졌다. 고압실 (high pressure chamber)의 압력 P_4 는 112 kPa이며, 단면적이 19×31 mm인 충격파관의 저압실 내부의 4점에서 측정된 압력의 시간변화를 나타낸다. 그림으로부터 압축파에 의한 압력상승 (압축파의 강도) ΔP_{21} 은 관입구로부터 거리 x 가 증가함에 따라 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이들로부터 임의의 점 x 에서 압축파의 강도 ΔP_{21} 과 $x=0$ 에서의 압축파의 강

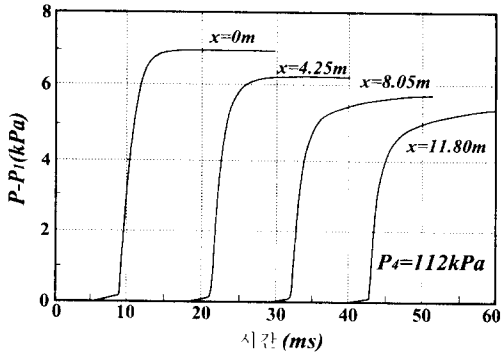


그림 4 충격파관 내를 전파하는 압축파의 감쇄

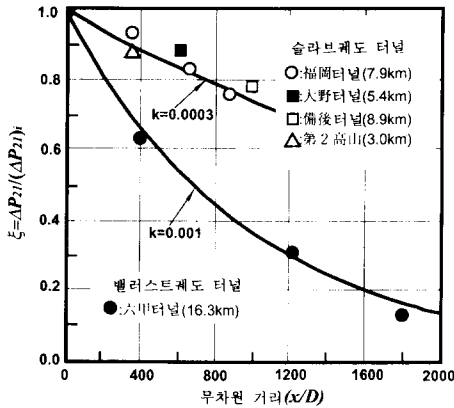


그림 5 터널 내를 전파하는 압축파의 감쇄

도 ΔP_{21i} 의 비 $(\Delta P_{21} / \Delta P_{21i})$ 를 ξ 라고 할 때, ξ 와 거리 x 와의 관계는 다음의 근사식⁽¹⁶⁾으로 주어진다.

$$\xi = \frac{\Delta P_{21}}{(\Delta P_{21})_i} = \text{Exp}(-k \cdot \frac{x}{D}) \quad (7)$$

여기에서 k 는 감쇄계수 (coefficient of attenuation)이며, 압축파의 강도, 관 내벽의 표면거칠기 (surface roughness) 등에 의존하는 것으로 생각된다.

실제 新幹線터널 내부에서 측정된 압축파의 감쇄에 관한 데이터들을 그림 5에 나타낸다. 그림의 두 곡선은 식 (7)의 감쇄계수 k 를 각각 0.0003과 0.001로 하여 계산한 결과이며, 전자는 선로가 슬라브로 된 터널(이하

slab궤도 터널로 명명한다)에서의 실험치와 잘 일치하고 있으며, 후자는 선로가 밸러스트로 덮여 있는 터널(이하 ballast궤도 터널로 명명)에서의 실험값과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 밸러스트궤도 터널(ballast track tunnel)에서 압축파의 감쇄는 슬라브궤도 터널(slab track tunnel)보다 매우 크며, 또 밸러스트는 터널내의 압축파의 전파에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

한편 터널 내를 주행하는 고속 열차에 미치는 힘^(17,18)은 터널내 전영역에 걸친 압력의 시간변동을 해석할 필요가 있다. 더욱이 복선철도의 경우, 터널 내부에서 열차가 서로 교차하게 되는 경우의 파동현상⁽¹⁹⁾들은 매우 복잡하며, 더 많은 실험 및 이론적 데이터의 축적이 요망되고 있다.

4. 미기압파의 생성

4.1 공력음향의 해석

단면적이 일정한 관한 출구로부터 공기가 방출되는 경우에 대하여, 관의 외측에서 관 끝을 포함하는 어떤 체적 V_0 의 영역(음원으로 되는 영역이며, 일반적으로 내부영역이라고 한다)을 고려한다고 하자. 이때 이 영역에서 공기의 단위체적에 대하여, 단위시간당 q ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$)의 질량이 더해진다고 하면, 음원에 대하여 원거리장(far field)에 있는 어떤 점의 압력변동 ΔP 에 관한 lighthill의 파동방정식(wave equation)은 다음과 같이 표시된다.⁽²⁰⁾

$$\frac{1}{a_1^2} \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial t^2} - \nabla^2 \Delta P = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (8)$$

식 (8)의 근사해로서 음원으로부터 거리 r 만큼 떨어진 점의 압력변동 $\Delta P(r, t)$ 은 다음식으로 주어진다.

$$\Delta P(r, t) = \frac{1}{4\pi r} \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right) \quad (9)$$

여기에서 \dot{m} 는 관으로부터 방출하는 단위 시간당 질량(kg/s)이며, 식 (8)의 q 와 다음의 관계가 있다.

$$\dot{m} = \iiint_{V_0} q \left(t - \frac{r}{a_1} \right) dV \quad (10)$$

그림 6에서 표시한 바와 같이, 어떤 압축파가 개구단(open end) O 를 향하여 왼쪽으로부터 오른쪽으로 전파하고 있는 경우, 그 압축파에 의한 압력상승 ΔP_{comp} 에 의해 유기되는 유속을 u_{comp} 라고 한다. 이때, 압력상승과 유속과의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P_{comp} = q_1 a_1 u_{comp} \quad (11)$$

또 개구단에서 공기의 유출속도를 u_e 로 하고, 전파하는 압축파가 개구단에서 팽창파로 반사되는 조건을 이용하면, 식 (12)와 같으며 더욱이 개구단으로부터 유출되는 질량유량 \dot{m} 은 관의 단면적을 A_t 라고 하면 식 (13)과 같다.

$$u_e \approx 2u_{comp} \quad (12)$$

$$\dot{m} = q_1 A_t u_e \quad (13)$$

이상의 식 (11~13)을 이용하여 식 (9)를 변형시키면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P(r, t) = \frac{A_t}{2\pi r a_1} \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial t} \right)_{comp} \quad (14)$$

위의 식은 음원으로부터 발생한 음이 3차원 공간으로 퍼져나가는 경우를 나타낸다. 예를 들면, 실제 고속철도 터널의 출구에서 방출되는 미기압파와 같이, 地面이 있으므로 해서 반공간으로 퍼져가는 경우에는 위 식을 2배로 하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P(r, t) = \frac{A_t}{\pi r a_1} \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial t} \right)_{comp} \quad (15)$$

식 (15)에 의하면, 원거리장에 있어서 음압(sound pressure; P)는 거리 r 에 반비례한다. 또 위치 r 을 고정하게 되면, 음압 $P(t)$ 는 압축파에 의한 압력상승의 시간적 변화

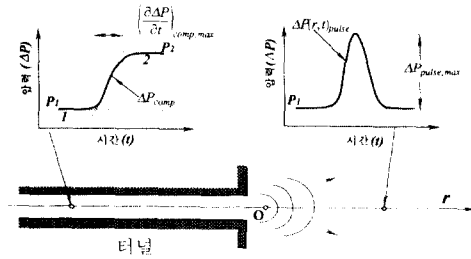


그림 6 터널 출구로부터 방출된 미기압파와 터널 내의 압축파와의 관계

($\partial \Delta P / \partial t$)_{comp}에 비례하게 된다. 그러므로 그림 6의 왼쪽에 나타내는 바와 같은 압축파의 파형 ΔP_{comp} 을 시간에 대하여 미분하면, 그림의 오른쪽과 같은 펄스형태의 파형 ΔP_{pulse} 가 얻어진다. 이것이 앞에서 기술한 미기압파이다. 따라서 이 미기압파의 피크값(peak value)은 압축파의 최대 압력구배(maximum pressure gradient)에 비례함을 알 수 있으며, 식 (15)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P_{pulse,max} = \frac{A_t}{\pi r a_1} \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial t} \right)_{comp,max} \quad (16)$$

이상에서 기술한 이론해석에 대해 관의 개구단보정(open end correction)⁽²¹⁾을 적용시켜 해석하는 방법, 개구단으로부터의 반사과정에 관한 많은 연구^(22~24)가 현재 수행되고 있다.

4.2 공력음향의 수치해석

그림 7에 나타낸 바와 같이, 무한히 큰 배플벽(baffle wall)이 관축에 수직하게 관끝에 설치되어 있는 경우를 고려하여, 개구원관(open circular tube)의 직경을 D 라고 가정한다. 이때 어떤 압축파가 이 관의 내부의 왼쪽으로부터 오른쪽으로 전파하여, 개구단에서 대기로 방출한다고 한다.

이와 같은 압축성 축대칭 흐름에 대하여 TVD(Total variation diminishing)차분법을

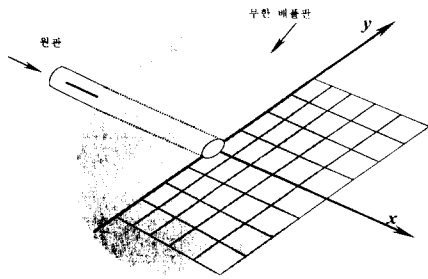


그림 7 흐름장과 계산영역

적용하여 수치계산한 일례를 그림 8에 나타내었다. 이들은 실제 일본의 山陽新幹線 터널의 등가직경 (D)과 같은 $D=9\text{ mm}$ 로 하였으며, 고속열차가 200 km/h 로 터널에 돌입한 경우에 형성되는 압축파가 원관으로부터 방출된다고 가정하였다. 이때, 압축파의 강

도 $\Delta P_{21}=1\text{ kPa}$, 압축파의 폭 $L=12.5\text{ m}$ (여기서 L 은 편의상 그림 9와 같이 정의하였다). 최대 압력구배 27.2 kPa/s 를 초기 파형으로 가정하였으며, 이들은 실제의 터널(길이: 7900 m)에서 측정된 데이터를 근거로 하여, 미기압파의 시간 및 공간적인 전파거동을 조사하였다. 그림 8은 터널 출구로부터 방출된 미기압파의 x - y 평면상의 분포를 나타내며, 시간 0.05 sec 간격으로 미기압파의 시간 및 공간적인 거동을 표시하였다. 그림으로 부터 터널 출구 부근의 미기압파는 터널 직경의 영향 때문에 관이 중심축 부근에서 평면파와 같은 형상을 취하고 있지만, 터널 출구로부터 멀어질수록 전체적으로 균일한 원의 형태로 변화하며, 공간적으로 감소하면서 전파하여 가는 것을 쉽게 알 수 있다.

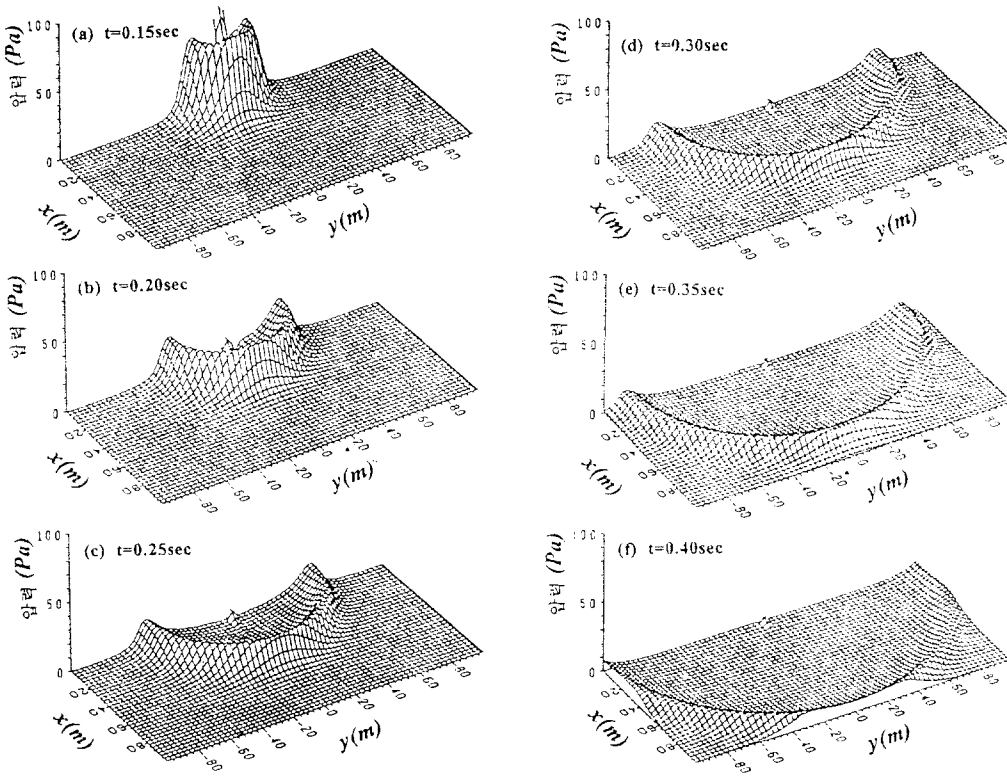


그림 8 수치계산에서 사용된 초기 압축파의 파형

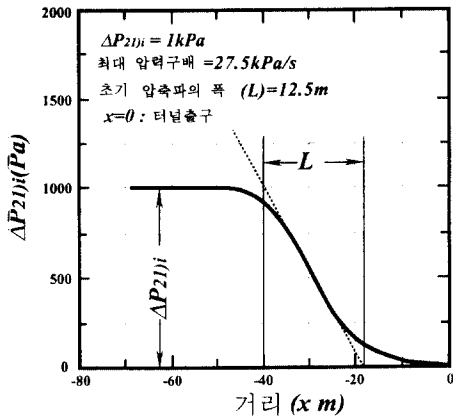


그림 9 x-y 평면 상에서 미기압파의 전파거동

5. 미기압파의 강도

위의 식 (16)에 의하면, 미기압파의 피크 값, 즉 미기압파의 강도는 터널 출구로 전파해가는 압축파의 최대 압력구배에 비례한다는 것을 알 수 있다. 또 앞의 2절과 3절의 결과로부터 터널 출구로부터 방사되는 미기압파의 강도는 다음과 같은 인자들에 의해 영향받는 것으로 생각할 수 있다.

- (1) 열차의 돌입속도
- (2) 열차와 터널의 단면적의 비
- (3) 선로의 종류(밸러스트 혹은 슬라브레도)
- (4) 터널의 길이
- (5) 터널의 입구와 출구형태
- (6) 터널내의 표면형상 등

그림 10에는 실제 新幹線의 출구로부터 약 20 m 떨어진 지점에서 측정된 미기압파의 강도를 나타내었다. 그림의 실선은 위의 식 (16)에서 압력상승이 열차의 속도 V 의 제곱에 비례($\Delta P \propto V^2$)하고, 또 압력상승의 시간이 열차의 속도에 반비례한다고 가정하여, 그 결과 미기압파의 강도($\Delta P_{pulse,max}$)가 열차속도의 3승에 비례하는 경우의 $\Delta P_{pulse,max}$ 와 열차속도와의 관계를 나타내며, 이것을 열차

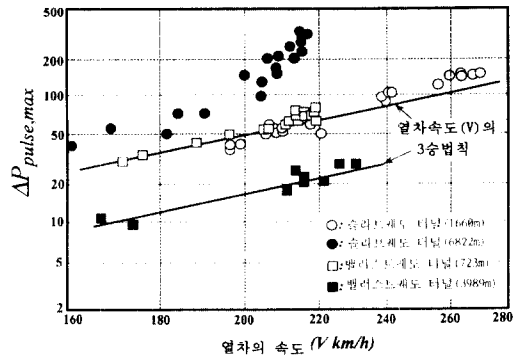


그림 10 열차의 속도와 미기압파의 강도와와의 관계

속도의 3승법칙이라고 부른다. 그림으로부터 비교적 짧은 터널에 대한 미기압파의 강도는 선로의 종류에 관계없이 열차속도의 3승법칙에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 상대적으로 긴 밸러스트레도를 가진 터널에서의 압축파는 터널내부를 전파해가는 과정에서 상당히 감쇄하여, 그 파형이 완만하게 되기 때문에 미기압파는 약하게 되지만, 열차속도의 3승법칙과 잘 일치하고 있다. 한편, 긴 슬라브레도 터널에서는 압축파가 터널 내부를 전파하여 갈 때, 약간 감쇄하게 되지만, 파형 자체는 전파함에 따라 보다 급격하게 변화하며, 즉 앞에서 기술한 바와 같이 확산효과보다도 파의 비선형효과가 지배적으로 된다. 이 때문에, 그림으로부터 열차속도 V 의 증가에 대한 미기압파의 강도 변화는 열차속도의 3승법칙과 일치하지는 않지만, 열차속도 V 가 증가할수록 역시 증가하고 있음을 알 수 있다.

6. 미기압파의 거리감쇄

식 (16)에서도 알 수 있는 바와 같이, 일반적으로 매우 작은 음원으로부터 3차원 공간으로 전파해가는 구면음파(spherical sound wave)의 음압은 음원으로부터 거리

r 에 반비례하여 감쇄⁽²⁵⁾하게 된다. 따라서 음원으로부터 거리 r_0 만큼 떨어진 지점에서의 음압레벨 (SPL ; sound pressure level)을 Lp_0 (dB)라고 한다면, 이 점보다도 먼 어떤 거리 r 에서의 음압레벨 Lp (dB)은 다음의 식으로 주어질 수 있다.

$$Lp = Lp_0 - 20 \log_{10}(r/r_0) \quad (17)$$

위의 식으로부터 $r/r_0=2$ 인 경우, 우변의 제 2항은 -6.02 dB로 된다. 즉, 구면음파는 거리가 2배로 증가(double distance ; 이하 dd로 표시)되면, 약 6 dB씩 감쇄하는 것으로 된다.

그림 11은 앞의 그림 9와 동일한 조건의 압축파가 어떤 개구단으로부터 방출되어 형성되는 미기압파에 대하여 개구단으로부터 거리 x 에 따른 변화를 나타낸다. 그림은 식 (16)에 개구단 보정을 적용한 경우의 계산값과, 앞절의 수치계산에 의한 미기압파의 강도를 음압레벨로 환산한 경우를 비교하였다. 또 그림 중에는 참고로 -6 dB/dd의 경사도 표시하였다. 식 (16)은 원거리장의 음향이론(acoustic theory)에 근거를 둔 것이기 때문에, $x > 10$ mm의 영역에서는 식 (16)과 잘 일치하고 있지만, $x < 10$ mm의 영역에서는

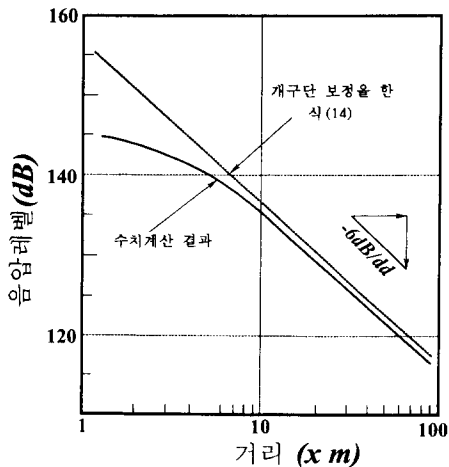


그림 11 거리에 따른 미기압파 강도의 변화

6 dB/dd보다 작은 감쇄를 나타내고 있다. 따라서 이 영역은 음향이론의 근거리장(near field)⁽²⁶⁾으로 생각할 수 있다.

7. 미기압파의 저감대책

터널 출구로부터 방사되는 미기압파의 강도를 저감하는 대책으로는, 열차의 형상을 적절하게 제작하여 저감하는 방법과, 터널에 여러 기술 혹은 장치를 적용하는 방법이 생각될 수 있다.

열차의 형상에 대한 대책으로서, 열차의 선두형상을 최적화하여 터널 입구에서 형성되는 압축파의 파형을 가능한 한 완만하게 할 필요가 있다. 또한 열차와 터널의 단면적 비가 작을수록 터널 입구에서 형성되는 압축파는 약하게 되기 때문에, 열차의 단면적을 축소하거나 터널의 단면적을 크게 하는 것도 한 방법으로 생각할 수 있다. 그러나 열차 단면적의 축소는 차내의 공간확보 문제 등과 관련되므로 효과적이지 않을 수 있으며, 터널의 단면적을 크게 하는 것도 경제적인 문제 등을 고려하지 않을 수 없다.

다음으로 터널에 실시하는 대책으로는 터널 입구, 터널 내부 및 터널 출구로 나누어서 생각할 수 있다. 먼저 터널 입구에 실시하는 방법으로서, 입구에 완공층이라 불리는 후드(hood)를 설치하면, 터널 입구에서 형성되는 압축파의 파형이 완만하게 된다. 후드에는 터널의 단면적보다도 큰 입구 단면적으로부터, 열차의 진행 방향으로 갈수록 서서히 작아져서 터널 입구에 접속시키는 형

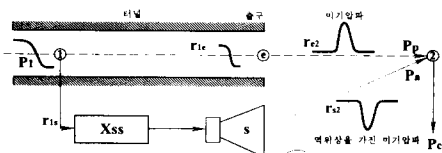


그림 12 터널 출구에서 발생하는 미기압파의 능동제어

태^(3~5)와, 단면적은 일정하지만, 슬릿벽(slit wall)이나 다공질벽(porous wall)을 측벽으로 하는 방법^(8,27) 등이 생각될 수 있다. 이러한 기술들은 현재 실용화되어 많은 고속철도 터널에 적용되고 있다. 그러나 후드의 길이는 열차속도가 증가하면 할수록 길어질 필요가 있으며, 그의 성능이나 공사비의 면으로부터 보면, 후드만에 의한 대책으로는 한계가 있는 것으로 생각된다.

터널 내부에 실시하는 대책으로서는, 터널 내부와 대기가 서로 통할 수 있는 구멍 혹은 갱도를 설치하여, 압축파에 의하여 압축된 공기를 외부로 축출할 수 있도록 해주는 방법,⁽³⁾ 터널 내의 water curtain을 설치하거나, 수적 혹은 다른 액적을 분무시켜 전파하는 압축파를 감쇄시키는 방법,⁽¹³⁾ 터널 내부 공기의 온도구배를 인위적으로 만들어 전파하는 압축파의 전파 방향을 바꾸어 주는 방법,⁽²⁸⁾ 또한 앞에서 기술한 바와 같이 밸러스트레드 터널에서는 압축파의 감쇄가 크기 때문에 밸러스트의 효과를 적절하게 이용하는 방법 등이 생각될 수 있다.

한편, 고속철도 터널의 출구에 실시하는 대책으로서는 active noise control(ANC)을 적용하는 방법이 있다. 이 방법은 각종 소음에 대하여, 역위상(inverse phase)의 음파 간섭시켜서 원래의 소음을 제거하려는 기술로서, 최근 여러 분야에서 활발하게 연구가 행하여지고 있으며, 실제로 많은 곳에서 적용되고 있다. 이 방법을 고속철도 출구에서 발생하는 미기압파에 적용하는 데에는 매우 강한 부의 펄스(negative pulse)를 만들어낼 수 있는 장치의 개발이 필요하다.

여기에서 고속철도 터널 출구에서 발생하는 미기압파의 제어장치로서 사용되는 ANC에 대하여 간략히 소개하기로 한다. 그림 12는 터널로부터 방출된 미기압파에 대한 ANC의 원리를 나타낸다. 터널로부터 미기압파가 방출되는 것과 동시에, 터널 출구에 설치한 부가음원(additive sound source)으

로부터 미기압파와 강도가 같고, 반대의 극성을 가진 부의 미기압파를 발생시켜, 파의 간섭을 이용하여 ANC를 행하게 된다. 이 ANC방법은 실제 터널 출구로부터 방출되는 3차원 음장의 미기압파에 대하여 地面上의 2차원 평면상에서 음을 저감시키려는 방법이 된다. 그림의 압축파 P_1 은 압력센서 ①에 의해 검출되어, 그의 전기적인 신호는 임펄스 응답(impulse response) X_{ss} 를 가지는 시그널 프로세서(signal processor)를 통과하여, 부가음원 S를 구동하게 된다. 측정점 ②에서 미기압파의 파형 P_c 는 터널로부터의 미기압파 P_b 와 부가음원으로부터의 부의 미기압파 P_a 의 합성값로 된다. 따라서 이들의 파형은 다음의 식으로 쓸 수 있다.

$$P_b = P_1 \cdot r_{1e} \cdot r_{e2} \quad (18)$$

$$P_a = P_1 \cdot r_{1s} \cdot r_{s2} \cdot X_{ss} \quad (19)$$

여기에서 r_{1e} 는 점 ①로부터 터널 출구까지의 임펄스 응답이며, r_{e2} 는 터널 출구로부터 참조점 ②까지의 임펄스 응답이다. 또한 r_{1s} 은 점 ①의 압력센서 ①에서 전기적 출력에 대한 임펄스 응답이며, r_{s2} 는 부가음원으로부터 참조점 ②까지의 임펄스 응답이다. 이 시스템에서 부가음원으로부터의 시그널과 압력센서 ①의 시그널과의 음향결합(acoustic coupling)은 무시할 수 있다고 가정한다면, 미기압파의 저감은 다음의 식이 만족될 때 완전히 성립하게 된다.

$$X_{ss} = -r_{1e} \cdot r_{e2} / r_{1s} \cdot r_{s2} \quad (20)$$

이때 참조점 ②에서 미기압파의 강도는 영(zero)으로 된다. 따라서 터널 출구로부터 방출되는 미기압파에 대해 ANC를 적용하는 경우에는 먼저 임펄스 응답을 아는 것, 특히 압축파의 파형으로부터 미기압파의 파형을 예측하는 것은 매우 중요하다. 실제로 이와 같은 시스템을 이용하여 여러 차례 모형실험 및 수치계산을 수행하였으며, 또 다년간에 걸친 연구 결과, 강력한 부의 미기압파 발생

장치를 제작하는데 성공하였다. 이들의 실험 데이터 및 수치계산 결과는 다음 기회에 보고하기로 한다.

8. 맺음말

이 글에서는 고속철도 터널에서 열차에 의해 발생하는 압축파의 특성과 그의 전파거동에 관하여 기술하였다. 또 터널내에서 발생한 압축파가 터널 출구에서 충격음(미기압파)으로 방출되어 주변의 환경에 큰 영향을 미치고 있다는 문제점을 지적하였으며, 이러한 소음의 발생 메카니즘과 소음의 저감 및 제어방법에 대하여 개괄적으로 기술하였다.

저자는 다년간에 걸친 연구 결과, 고속철도의 터널에서 발생하는 소음문제에 관하여 많은 새로운 것을 알게 되었다. 이 글에서는 고속철도 소음문제에 대한 연구 배경과 내용을 간략히 소개하고, 장래의 연구 방향의 설정에 주안을 두었다. 따라서 구체적인 연구 결과들은 다음 기회에 보고하기로 하며, 여기에서 제기되어진 많은 공학적인 문제들이 현재 건설중인 우리나라의 고속철도 사업에 고려되었으면 하는 바람이다.

참고문헌

(1) 川口光年, 1967, “流體力學の鐵道分野における應用,” 數理科學, pp. 49~55.
 (2) Fox, J. A. and Henson, D. A., 1971, “The Prediction of the Magnitude of Pressure Transients Generated by a Train Entering a Single Tunnel,” *Proc. Inst. Civil Eng.*, Vol. 49, pp. 53~69.
 (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. Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, G3, pp. 49

~64.
 (4) Dayman, B. and Vardy, A. E., 1979, “Alleviation of Tunnel Entry Pressure Transients (Report 1); Experimental Program,” *Proc. 3rd Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 343~362.
 (5) Vardy, A. E. and Dayman, B., 1979, “Alleviation of Tunnel Entry Pressure Transients(Report 2); Theoretical Modeling and Experimental Correlation,” *Proc. 3rd Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 363~376.
 (6) Woods, W. A. and Pope, C. W., 1981, “A Generalized Flow Prediction Method for the Unsteady Flow Generated by a Train in a Single-Track Tunnel,” *Journal Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, No. 3, pp. 331~360.
 (7) Sockel, H., 1989, “Aerodynamik des Eisenbahntunnels,” *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 69, pp. 541~551.
 (8) 小澤智, 1979, “トンネル微氣壓波の研究,” 鐵道技術研究報告, No. 1121.
 (9) 生井武文, 松尾一泰, 1983, “衝擊波の力學,” コロナ社.
 (10) Pope, C. W., 1976, “Transient Pressures in Tunnels-A Formula for predicting the Strength of the Entry Wave Produced by Trains with Streamlined and Unstreamlined Noses,” *British Railway Board, Tech. Memo. AERO 12*.
 (11) 鹿毛一之, 川越茂敏, 松尾一泰, 1992, “高速列車によつて發生するトンネル入口波の數値解釋,” 日本機械學會論文集(B編), Vol. 58, No. 547, pp. 815~821.
 (12) 池川昌弘, 廣喜充, 海保真行, 1991, “新幹線車兩周りの氣流シミュレーション,” 可視化情報, Vol. 11, 増刊2, pp. 179~182.

- (13) Ozawa, S. et al., 1991, "Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," *Proc. 7th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Elsevier Applied Science, p. 253.
- (14) 生井武文, 松尾一泰, 1977, "壓縮性流體の力學," 理工學社.
- (15) 日本流體力學會編集, 1989, "流體における波動," 朝倉書店.
- (16) Matsuo, K., et al., 1991, "Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," *Proc. 7th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Elsevier Applied Science, p. 239.(12)
- (17) 中野晋, 坪内邦良, 檜垣博, 1991, "トンネル内壓力波傳ばシミュレーション," 可視化情報, Vol. 11, 増刊2, pp. 183~186.
- (18) 山本彬也, 1975, "列車とトンネルの空氣力學," 第11回 鐵道研究所講演論文集.
- (19) 中野晋, 坪内邦良, 檜垣博, 岡崎正人, 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 全國大會講演論文集, C編, pp. 109~111.
- (20) Blake, W. K., 1986, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration," Vol. 1, Academic Press.
- (21) 松尾一泰, 青木俊之, 檜村秀男, 野中嘉治, 1992, "管内を傳ばする壓縮波の開口端からの反射," 日本機械學會論文集(B編), Vol. 58, No. 546, pp. 35~41.
- (22) Rudinger, G., 1955, "On the Reflection of Shock Waves from an Open End of a Duct," *Journal of Applied Physics*, Vol. 26, No. 8, p. 981.
- (23) Schultz, M. and Sockel, H., 1991, "Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," *Proc. 7th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Elsevier Applied Science, p. 221.
- (24) Matsuo, K. et al., 1992, "Computers in Railways," Edited by Murthy, T.K.S. et al., *Computational Mechanics Publications*, Vol. 2, p. 455.
- (25) 小橋豊, 1969, "音と音波," 裳華房.
- (26) Setoguchi, T., Matsuo, K., Kawagoe, S. and Kaneko, K., 1990, "Discharge of a Weak Shock Wave from an Open End of a Tube," *Proc. 1989 National Symp. on Shock Wave Phenomena*, pp. 31~40.
- (27) 小澤智, 塚本京市, 前田達夫, 1976, "トンネル微氣壓波低減對策に關する模型實驗," 鐵道技術研究報告, No. 990.
- (28) 若井和憲, 落合孝哉, 志水昭史, 山田賢市, 1992, "トンネルを傳ばする衝擊波の密度勾配部通過による制御," 日本機械學會 第70期 全國大會講演論文集, C編, pp. 106~108. 