

< 논 문 >

미기압파에 의한 터널 출구 소음 저감을 위한 고속철도 터널 형상 개선에 관한 연구

A Study on Tunnel Entry Design Considering the Booming Noise Resulting from Micro-Pressure Wave

목재균* · 최강윤* · 유재석**

J. K. Mok, K. Y. Choe and J. Yoo

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 8월 20일 심사완료)

Key Words : Korea High Speed Rail(한국고속철도), Compression Wave Front(압축파면), Three-Dimensional Euler Equation(3차원 오일러방정식), Tunnel Entrance(터널입구), Three-Dimensional Compressible Flow(3차원 압축성 흐름), Tunnel Hood(터널후드)

ABSTRACT

In general, the booming noise intensity at tunnel exit is strongly related to the gradient of the compression wave front created by high speed train entering the tunnel. This paper presents some results in relation with the compression wave front produced when the high speed train enters a tunnel. Four kinds of tunnel entrance shape with real dimensions were studied to investigate the formation of compression wave front inside tunnel by train entering tunnel. Computations were carried out using three-dimensional compressible Euler equation with vanishing viscosity and conductivity of fluid. According to the results, the flow disturbances occurred at tunnel entrance were eliminated by tunnel hood with same cross sectional area. The compression wave front is formed completely at 30~40m from tunnel entrance. The maximum pressure gradient of compression wave front is reduced by 29.8% for the inclined tunnel hood and reduced by 21.5% for the tunnel hood with holes at the top face with tunnel without hood. The length of the inclined hood is 15m and the length of the hood with holes is 20m.

기 호 설 명

1. 서 론

γ : 비열
 ρ : 밀도
 p : 압력
 e : 총합에너지
 u, v, w : 유체의 속도

열차가 고속으로 터널로 진입하는 경우 터널입구에서는 유로의 단면적 변화로 인하여 압축파가 발생하게 되며 이 압축파는 터널을 따라 음속에 해당하는 속도로 터널 출구를 향하여 전파된다. 또한 출구에 도달한 압축파는 급격한 압력 변화에 의하여 터널 쪽으로 팽창파가 발생하며 이것

* 정회원, 한국고속철도 건설공단 차량연구실

** 아주대학교 공과대학 기계공학과

이 다시 진행하는 열차를 향하여 전파된다. 한편 열차의 후두부가 터널입구로 완전하게 진입하는 순간 터널입구에서는 팽창파가 발생하여 터널을 따라 열차와 동일한 방향으로 진행하게 된다. 일반적으로 압력파의 진행속도는 음속에 해당하며, 터널 내를 진행하는 열차의 속도는 음속의 1/3에서 1/4에 해당하므로 터널 내부에서 터널 출구로부터 반사된 팽창파와 입구로부터의 팽창파가 만나게 된다. 이때 두 팽창파의 중첩에 의하여 극심한 압력 변화가 터널 내부에 발생하게 되며 열차에 탑승한 승객은 큰 불편이 예상된다⁽¹⁾. 다른 한편으로 열차가 터널 진입시에 터널입구에서 발생된 압축파가 터널을 따라 전파되어 출구에 도달하면 압축된 공기가 외부로 급격하게 방출되게 되므로 매우 큰 음압레벨(sound pressure level)을 가진 충격음에 가까운 소음이 발생하며 이것은 터널에 인접한 구조물이나 거주인에게 큰 장애를 유발할 수 있다⁽²⁾. 즉 고속철도와 터널 사이에 발생하는 문제는 고속철도가 터널을 통과할 때 동일부호의 압력파가 중첩되면서 야기되는 승객의 승차감 악화와 터널출구에서의 충격성 소음문제로 대별된다. 두 문제에 대한 심각성은 압력의 크기와 그 구배에 밀접한 관계가 있다. 특히 터널 내부의 압력강하량은 열차의 터널진입에 따른 입구에서의 압력상승량과 직접적으로 관련되어 있다. 일반적으로 터널입구에서의 압력상승은 열차와 터널의 단면적과 열차의 속도에 의하여 결정되므로, 주어진 조건에 대하여 이것을 줄이기 위해서는 터널 내부에 여러가지의 압력파 전파에 대한 에너지손실기구를 설치하는 방안이 강구되고 있다^(3,4). 압력강하량 이외에 승차감악화의 주요원인은 압력강하구배이다. 승차감악화에 대한 대비책으로 널리 적용되는 것이 차량의 밀폐이며 결국 압력강하의 구배를 줄이는 것이 차량밀폐의 목적인 것이다. 한편 일련의 연구결과에 따르면 터널출구에서의 소음강도는 터널출구에 도달된 압축파의 구배에 직접적으로 관련되어 있는 것으로 보고되고 있으며, 압축파의 전파과정이 등엔트로피적이라면 터널입구에서의 압축파면과 출구에서의 압축파면은 동일하게 된다. 따라서 열차의 터널진입시 터널입구에서 압축파면의 형상을 제어하는 것은 매우 중요하다. 이에 대한 제어방법으로는 열차의 선두부 형상을 최적화하는 방법과 터널 입구의 형상을 최적화하는 방법이 있을 수 있다. 또한 이미 건설되어 운행중인 터널에 대해서는 터널 입구에 후드(hood)를 설치하여 발생하는 압축파면의 형상을 어느 정도 제어할 수 있다.

그러나 다양한 입구형상에 따른 압축파면을 알아내기 위해서는 수치적인 해석방법이 매우 유용할 수 있다. 왜냐하면 상사조건을 만족하는 실험장치의 구성이 매우 어려울 뿐만 아니라 터널입구의 다양한 형상에 대응되는 압축파면을 취득하는 것은 더욱 힘들기 때문이다. 일반적으로 이와 관련하여 몇가지 경우의 실험과 이론식으로 부터 구한 반경험식을 이용하여 입구에서의 압축파면을 가정하고 내부에서의 압력파 전파에 대한 연구를 수행하던지⁽⁵⁾ 또는 일차원적인 계산을 수행하되 터널입구에서는 시간에 따라 유로의 단면적을 변화시키는 방법으로 입구형상을 모사하고 있는 실정이다⁽⁶⁾. 그러나 열차가 고속으로 터널에 접근해감에 따라 터널입구에서 3차원 유동효과와 압축성 효과가 매우 중요하게 되므로 이에 대한 계산이 필수적으로 요구되어 진다. 실제의 터널 및 열차형상에 대한 수치계산은 형상의 복잡성과 방대한 계산영역 그리고 이동하는 물체에 대한 수치격자의 생성이 매우 어려우므로 이에 관련된 연구사례가 많지 않은 실정이다.⁽⁷⁾ 즉 고속으로 터널에 진입하는 상황을 수치해석하기 위해서는 조건에 대한 최적의 프로그램이 구성되어야 하며 이동하는 물체에 대한 격자생성이 용이해야 한다. 본 연구에 사용된 수치해석 프로그램은 프랑스의 Gec-Alsthom SA, SNCF 그리고 ESI가 공동으로 수행한 연구결과물이며 SNCF에서 수행된 실험결과를 이용하여 검증된바 있다⁽⁸⁾.

본 연구에서는 실제의 한국형 고속철도의 선두부 형상과 수직한 터널 입구형상을 적용한 비정상해를 구하여 터널입구에서의 압축파면을 비교하므로써 후드의 역할을 알아보았다. 또한 터널입구에서 발생된 압축파가 터널내부로 전파될 때 일차원적인 압축파면이 생성되는 위치를 찾아내었다. 이에 대한 결과는 압축파면을 알고자하는 계산에서 소요되는 최소한의 열차 이동거리를 알아낸 것이다. 그리고 현재 적용되고 있는 대표적인 입구후드 형태 즉, 경사진 터널후드의 경우와 구멍이 있는 터널후드에 대한 결과를 비교 검토하였다.

2. 계산방법

본 연구에서는 4면체 수치격자를 적용하는 유한요소법을 이용하였다. 공간분할을 위하여 갤러킨 가중잔차법(Galerkin weighted residual method)을 적용하였으며, 시간적분을 위하여 양함수의 런지쿠타 다단계스킴(explicit Runge-Kutta multistage scheme)을 적용하였다^(9,10). 본 연구에 사용된 프

로그를 이용하여 터널문제를 계산하는 과정을 Fig. 1에 나타내었다⁽¹¹⁾. 먼저 열차의 선두부와 터널형상에 대한 CAD 데이터를 받아서 본 프로그램의 프리프로세서(pre-processor)에 로딩시킨 후 수치해를 계산하기에 적합하도록 모델을 만든다. 그리고 프리프로세서를 이용하여 면격자(surface mesh)를 생성시켜 격자크기와 분포의 적합함을 확인하고 체적격자(volumetric mesh)를 생성시킨다. 이 때 백그라운드 격자제어메뉴를 사용하여 계산영역 전체의 기본적인 격자분포를 지정하고 또한 소스라인 격자제어메뉴를 사용하여 유동특성에 부합하는 세밀한 격자분포를 지정한다. 격자의 생성이 끝나면 열차속도에 해당하는 유동장내에서 열차선두부에 대한 정상해를 구한다. 이 과정에서는 비정상해를 구하기 위하여 정상해 영역내에 터널을 위치시켜도 열차 주위에 터널로 인한 유동장애가 일어나지 않을 만큼의 계산영역을 확보하여야 한다. 정상해를 구할 때는 FCT(Flux-Corrected Transport) 프로세서를 이용하며 빠른 수렴을 위하여 국소시간중분(local time-step)과 수치적인 가상점성계수(artificial viscosity)를 적절히 적용한다. 이와같이 구해진 정상해의 영역에 터널을 위치시키고 계산영역에 대한 격자를 다시 생성시켜 열차와 터널을 포함하는 전체 영역에 대하여 격자를 형성한 다음 비정상해를 구해 나간다. 일반적으로 열차의 선두부는 매우 복잡한 곡선으로 구성되어 있기 때문에 열차를 이동시킨다는 것은 수치적인 면에서 비경제적이므로 비교적 그 형태가 단순한 터널을 열차속도에 해당하는 속도로 열차를 향하여 상대이동시킨다. 이동하는 물체 주위의 격자는 물체의 이동에 따라 격자형태가 변형되게 된다. 따라서 본 프로그램에서는 격자의 변형 정도에 한계를 부여하고 이를 한 계산단계 마다 확인하며 필요에 따라 국부적으로 또는 전체적으로 격자를 다시 생성시키게 된다. 격자의 재생성은 새로운 격자(new mesh)와 지난 격자(old mesh) 사이의 보간(interpolation)에 의하여 이루어진다.⁽¹²⁾ 문제에 적용되는 터널길이, 열차길이 및 속도 그리고 해당 조건에서의 음속을 이용하여 구한 일차원 특성곡선(characteristic curve)을 이용하면 터널문제에 대한 압력정보를 얻는데 적합한 열차의 이동거리를 평가할 수 있으며 계산을 진행하는 동안 포스트프로세서(post-processor)를 사용하여 일정한 단계마다 해를 검토한 후 계산을 완료한다.

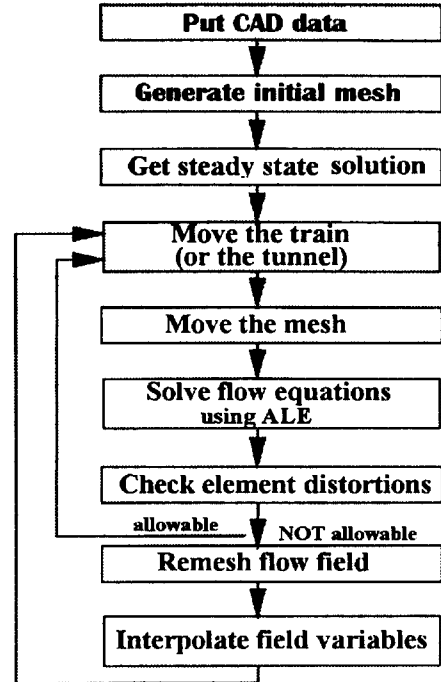


Fig. 1 Solution methodology for train-tunnel interaction

3. 지배방정식 및 계산조건

본 계산에서 적용한 유체는 완전가스(perfect gas)로서 비열비 γ 에 의하여 유체의 성질을 표현할 수 있으며 그 상태방정식은 다음과 같다.

$$P = (\gamma - 1)\rho \left[e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \right] \quad (1)$$

여기서 P 는 압력, ρ 는 밀도, e 는 총합에너지이고 u, v, w 는 유체의 속도 성분이다. 그리고 계산에서 적용한 유체의 점성과 열전도성을 무시한 비정상 흐름에 대한 3차원 지배방정식은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

여기서 보존량 Q 와 플럭스 벡터 E, F, G 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v w \\ \rho v^2 + p \\ \rho v w \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho w v \\ \rho w^2 + p \\ \rho w v \\ (\rho e + p)w \end{bmatrix}$$

터널 및 열차 표면에 대하여는 슬라이딩 조건 (sliding boundary condition)을 적용하였으며, 계산영역의 경계에 대해서는 화필드 조건 (far-field boundary condition)을 적용하여 계산영역의 한계를 무한의 외기조건으로 정의하였다. 열차의 속도는 300 km/h이며 대기압은 101.3 kPa, 밀도는 1.2 kg/m³, 대기의 온도는 293 °K이고 비열비 γ 는 1.4로 계산하였다.

4. 수치계산 영역과 모델링

Fig. 2는 본 연구에 적용된 열차와 터널의 단면적을 나타낸 것이다. 여기서 열차의 단면적은 9.8 m²이며 대응되는 터널의 단면적은 81 m²이다. 따라서 열차와 터널의 단면적비(이하 블록키지라고 함)는 0.12에 해당된다. 열차의 터널진입속도는 300 km/h이다. 또한 터널내부에서의 압력정보를 얻기 위한 일련의 수치센서는 터널의 길이방향에 따른 대칭면과 천정이 만나는 선을 따라 10 m 간격으로 위치시켰다.

Fig. 3-1은 본 연구에 적용된 터널의 입구형상을 나타낸 것이다. 그림에서 경우 (1)은 터널입구에 아무것도 설치되지 않은 상태를 나타내며 이를 "normal entry"라고 하였다. 경우 (2)는 터널의 단면과 동일한 후드가 단순히 터널길이의 방향으로 연장된 경우이며 "extrusion entry"라고 하였으며 경우 (1)에서 열차의 터널 돌입시 예상되는 벽면효과를 비교하기 위한 것이다. 경우 (3)은 입구가 31°

만큼 경사져 있는 것으로 "31-entry"라고 하였으며 본 연구에서 적용한 한국형 고속철도의 선두부 단면의 기울기와 유사하다. 이와 같은 형상은 독일에서 적용하고 있는 터널입구후드의 전형적인 형태이다. 경우 (4)는 경우 (2)의 형상에 홀이 설치된 것으로 "hood with holes"이라고 하였다. 이것은 일본에서 수행한 일련의 연구결과에 따라 추천된 입구후드와 유사한 형태이다. Fig. 3-2는 Fig. 3-1에서의 경우 (4)에 대한 홀의 위치와 크기를 나타낸 것으로 일본에서 실험적으로 연구를 수행한 경우와 유사하다⁽²⁾. Fig. 3-1에서 나타난 흑점과 화살표는 수치센서의 기준점을 나타낸 것이다. 각각의 경우 수치센서의 위치를 나타내는 기준점이 다른 것은 터널 내부에 아무런 유로의 단면적변화가 없는 곳을 기준으로 하였기 때문이다.

열차가 터널에 진입할 때 터널입구에서 발생하는 압축파면을 계산하기 위해서는 수치센서의 위치가

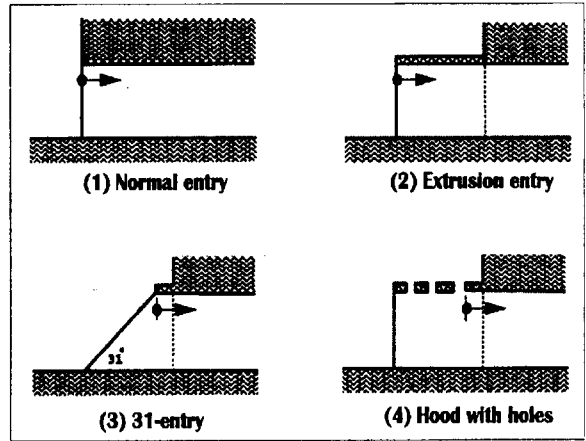


Fig. 3-1 Tunnel entry shapes calculated in this study

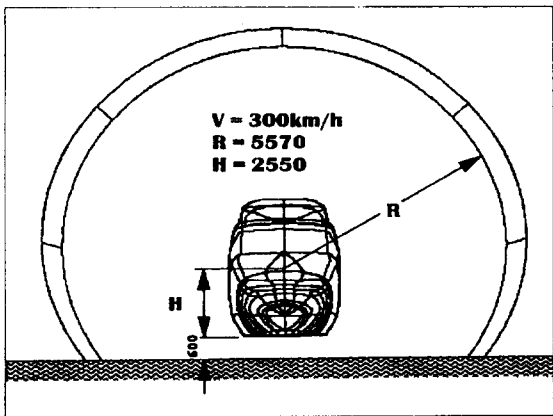


Fig. 2 Picture for cross-sectional area of train and tunnel

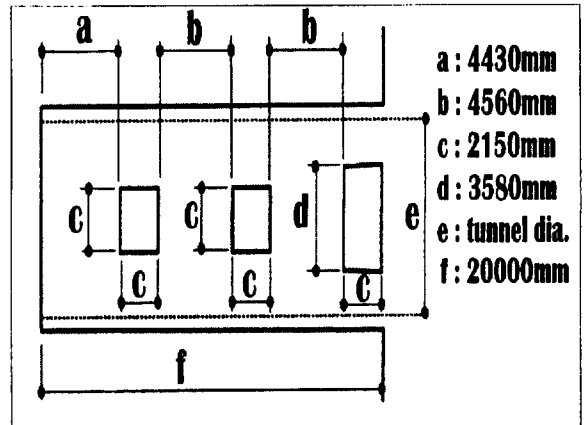


Fig. 3-2 Specifications of hood with holes

서로 다르기 때문에 발생하는 압력상승의 시기의 차이는 결과를 검토하는데 아무런 영향이 없다. 왜냐하면 3차원 유동효과와 압축성효과를 포함한 압축파가 터널입구에서 생성되어 어느정도 터널내부로 전파된 후에는 그 전파거동을 일차원적으로 취급할 수 있기 때문이다. 계산방법에 따르면 정상해 영역에 터널을 위치시킬 때 열차 주위에 유동의 동요가 없는 초기거리를 확보해야 한다. 따라서 각각의 계산에서 터널과 열차 선두부와 초기거리는 일정하게 유지할 필요가 있다. 본 연구의 전단계로서 압축파 현상을 충분히 기술해낼 수 있는 수치격자의 크기와 분포 그리고 열차선두부와 터널사이의 적절한 초기거리를 알아내기 위하여 간단한 모델열차에 대하여 여러 가지 계산을 수행하였다. 왜냐하면 터널 내부에 생성된 격자의 수가 전체 계산영역에 대하여 많은 부분을 차지하고 있으며 또한 열차선두부와 터널사이의 초기거리가 지나치게 멀면 그 만큼 터널입구에서의 압력파면을 얻기위한 열차의 진행거리가 길어지기 때문이다. 수행된 계산결과에 따라 본 연구에서 열차 선두부와 터널사이의 거리는 15 m로 설정하였다. 또한 수치격자는 사면체 형태로서 터널 내부에는 사면체 한변의 길이가 80 cm 정도 크기의 수치격자를 분포시켰다. 수치해석을 수행한 전체 계산영역의 크기는 가로와 세로가 각각 50 m의 정방형이며 길이는 300 m이다. 이와같은 계산영역에 열차 선두부 및 객실부를 포함한 길이가 70 m인 열차를 위치시키고 정상해를 구하였다. 또한 비정상해를 구하기 위하여 각각의 터널입구형태를 포함하여 215 m 길이의 터널을 정상해 영역에 위치시켰다. Fig. 4에는 한국고속철도의 실제 선두부 형상에 대한 유동정상해를 구하기 위한 수치격자의 구성을 나타내었다. 열차 선두부의 선단 부분에 4 cm의 최소격자를 밀집하였으며, 열차의 바닥면과 선로면사이에는 2~3개의 격자를 생성시켰다. 또한 다음과 같이 수치계산을 위하여 모델을 단순화시켰다. 우선 열차 선두부의 아래 부분에 장착된 스포일러(spoiler) 주위의 유동을 표현하기 위해서는 매우 작은 크기의 격자가 필요하였으나 이 부분은 터널입구에서의 압력파형에 거의 영향을 미치지 못하므로 그 형상을 단순화시켰다. 또한 선두부 조종석의 창에는 작은 돌기가 있었으나 같은 이유로 인하여 무시하였다. 그리고 첫번째 열차와 두번째 열차를 연결하는 부분은 작은 틈이 있지만 계산을 위하여 하나의 몸체로 단순화시켰다. 본 연구에서의 계산영역은 단일선로에 대한 대칭의 영역이므로 열차의 반쪽 부분만 포함된 것이다. 정상해를 구하기 위해 사용된 총 수치격자수는 약 14만개이다.

Fig. 5는 열차의 속도가 300 km/h일때 열차 선두부에 대한 정상상태의 압력분포를 나타내었다. 열차가 터널에 진입할 때의 비정상해를 계산하기 위해서는 구해진 정상해 영역에 터널단면이 Fig. 2와 같고 터널입구의 형상이 Fig. 3-1과 같은 터널을 위치시켜 상대이동시키게 된다. 비정상해를 구하기 위해 사용된 전체의 수치격자수는 약 25만개 정도이다. 이것은 전체의 계산영역 중에서 터널이 차지하는 영역이 비교적 클 뿐만아니라 압축파의 전파거동을 알아보기 위해서는 비교적 크기가 작은 수치격자를 터널내부에 분포시킬 필요가 있기 때문이다. 전체 계산과정 중에서 계산을 위한 시간증분은 0.12×10^{-4} sec 정도이다. 그러나 계산과정에서 열차의 진행에 수반되는 최소격자의 찌그러짐 정도에 따라 약간의 차이가 있다.

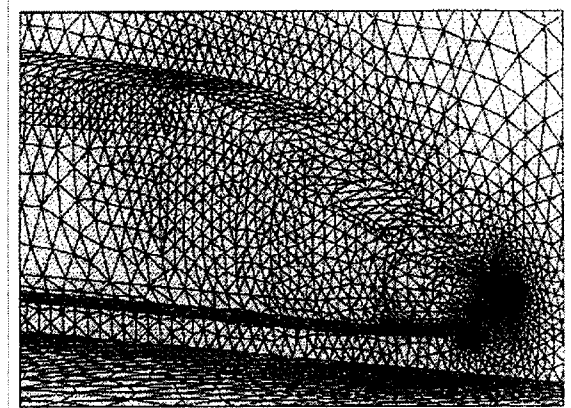


Fig. 4 Mesh configuration at train nose for steady state simulation

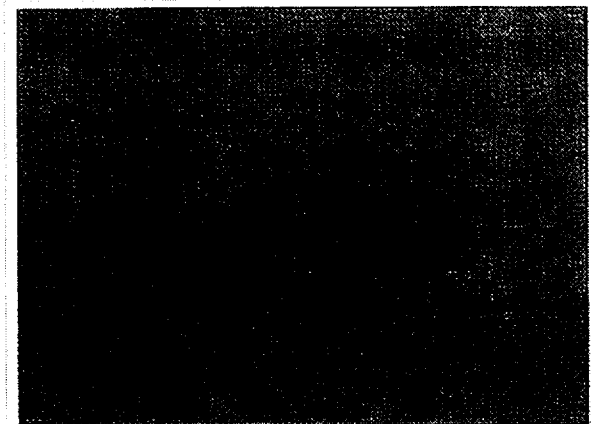


Fig. 5 Pressure distribution on train head in steady state flowfield

5. 결과 및 고찰

5.1. 터널의 입구형상 경우 (1)과 경우 (2)의 비교

Fig. 6은 Fig. 3-1의 경우 (1)과 경우 (2)와 같은 터널의 입구형상을 적용하여 구한 터널입구에서의 압력파면이다. 그림에서 각각의 경우에 세개의 압력파면을 보여주고 있는데 이것은 Fig. 3-1에 표시된 수치센서의 기준점으로 부터 터널 내부로 각각 20 m, 30 m 그리고 40 m 지점에서의 압력파면을 의미한다. 경우 (1)에 대한 압력파면은 a, b 그리고 c로 나타내었으며 경우 (2)에 대한 압력파면은 1, 2 그리고 3으로 나타내었다. 일반적으로 터널의 입구형상이 경우 (2)와 같을 때에는 경우 (1)에 비하여 매우 매끄러운 압력곡선을 보여주고 있다. 모든 압력곡선은 시작점에서 동일한 대기압을 나타내고 있으며 이는 비정상해를 구하기 위한 열차 선두부와 터널입구의 초기거리가 적절하게 선택되었다는 것을 의미한다. 열차가 진행하는데에 따른 압축성효과로 인하여 모든 압력곡선의 초기에 작은 압력상승을 볼 수 있다. 또한 경우 (1)에 대한 초기 압력상승이 경우 (2)에 비하여 약간 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 터널입구에서 열차접근에 의하여 유기되는 흐름의 차단 정도에 따른 것이다. 즉 터널의 입구에서 길이 방향으로 돌출된 부위가 유기흐름을 차단하는 것으로 판단된다. 또한 압력상승 후반기에는 열차가 터널입구에 근접함에 따라 터널입구의 수직벽에 생성된 유동과 열차의 선두부가 터널입구를 통과하면서 유전형의 선두부가 유도하는 유동의 간섭으로 흐름의 교란이 나타난다. 즉 압력곡선 a에는 열차의 터널돌입에 따른 흐름의 교란이 현저하며, 압력곡선 b와 c에 연하여 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 압력곡선의 형태로 볼 때 터널 내부로 상당한 거리를 전파한 이후에야 일차원적인 압력파면이 생성될 수 있음을 알 수 있다. 즉 그 만큼의 열차진행거리가 더 필요하며 긴 계산시간이 소요된다. 0.4 sec 이후의 압력곡선 a에 나타나는 강력한 팽창파는 열차의 선두부가 기준점으로 부터 20 m의 거리(압력곡선 a를 나타내는 수치센서 지점)를 통과하기 때문이다. 이러한 현상은 압력곡선 1에서도 마찬가지이다. 결과에 따르면 기준점으로 부터 터널 내부로 20 m 지점에서는 충분한 압력상승이 이루어지기 전에 열차가 이점을 통과하고 있다. 그러나 압력곡선 2와 압력곡선 3을 비교하면 동일한 압력구배를 나타내고 있으며 두 압력곡선이 나타내는 최대압력도 같은 것을 볼 수 있다. 즉 본 연구에 적용된 계산조건에 대하여 터널입구에서 일

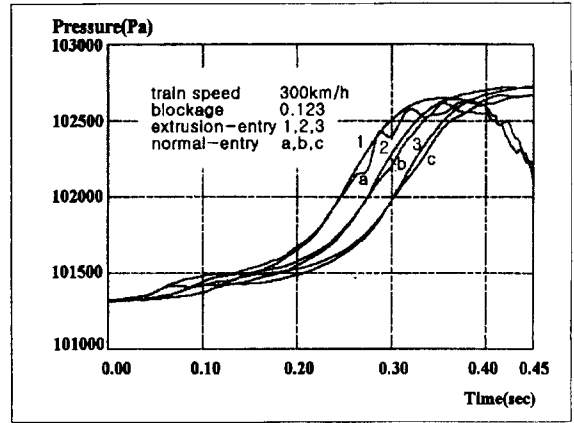


Fig. 6 Pressure time-history in tunnel for extrusion-entry and normal-entry

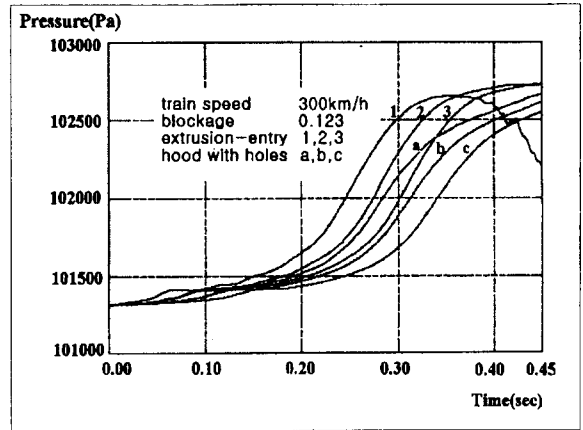


Fig. 7 Pressure time-history in tunnel for extrusion-entry and hood with holes

차원적으로 발달된 압력파면을 얻기 위해서는 터널의 단면적 변화가 없는 지점으로 부터 터널 내부로 30~40 m 지점이면 충분한 것을 알 수 있다.

5.2. 터널의 입구형상 경우 (2)과 경우 (4)의 비교

Fig. 7은 Fig. 3-1의 경우 (2)과 경우 (4)와 같은 터널의 입구형상을 적용하여 구한 터널입구에서의 압력파면이다. 그림에서 각각의 경우에 세개의 압력파면을 보여주고 있는데 이것은 Fig. 3-1에 표시된 수치센서의 기준점으로 부터 터널 내부로 각각 20 m, 30 m 그리고 40 m 지점에서의 압력파면을 의미한다. 경우 (2)에 대한 압력파면은 1, 2 그리고 3으로 나타내었으며 경우 (4)에 대한 압력파면은 a, b 그리고 c로 나타내었다. Fig. 6에 대한 결과로서 압력곡선 3과 압력곡선 c는 충분히 발달된 압력파면으로 간주할 수 있다. 압력상승의 초기에는 두 경우 모두 유사한 경향을 보여주고 있다.

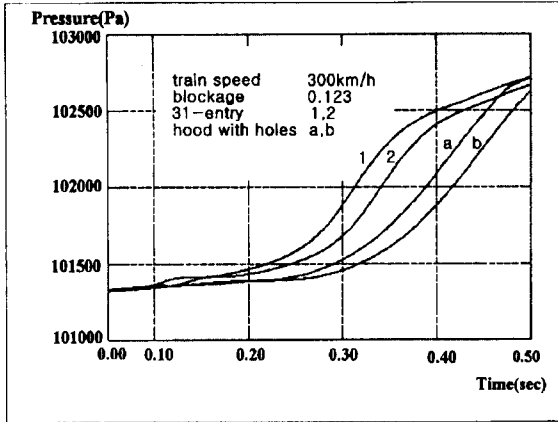


Fig. 8 Pressure time-history in tunnel for 31-entry and hood with holes

이것은 두 경우에 있어서 터널입구의 단면 모양이 같으며 또한 경우 (4)는 후드입구로부터 4.43 m의 길이 만큼 경우 (2)와 동일한 입구형상을 가졌기 때문이다. 반면 압력상승 말기에는 경우 (2)에 비하여 경우 (4)의 압력파면에서의 압력구배가 후드에 장착된 홀들의 영향으로 현저하게 작아졌다. 특히 후드에 있는 홀에 의해서 완화된 압력구배가 터널 내부로의 상당한 전파거리에 까지 유지될 수 있다는 것을 경우 (4)에 대한 압력상승 말기의 경향으로 알 수 있다. 경우 (2)의 입구형상에 대하여 압력곡선 3이 나타낸 압력구배는 11,448 Pa/s이며, 경우 (4)의 입구형상에 대하여 압력곡선 c가 나타낸 압력구배는 8,985 Pa/s이다. 즉 경우 (4)의 홀이 있는 후드는 홀이 없는 경우 (2)에 비하여 21.5 % 만큼 압력구배를 줄이는 효과를 나타내었다.

5.3. 터널의 입구형상 경우 (3)과 경우 (4)의 비교

Fig. 8은 Fig. 3-1의 경우 (3)과 경우 (4)와 같은 터널의 입구형상을 적용하여 구한 터널입구에서의 압력파면이다. 그림에서 각각의 경우에 두개의 압력파면을 보여주고 있는데 이것은 Fig. 3-1에 표시된 수치센서의 기준점으로 부터 터널 내부로 각각 20 m와 30 m 지점에서의 압력파면을 의미한다. 경우 (3)에 대한 압력파면은 1과 2로 나타내었으며 경우 (4)에 대한 압력파면은 a와 b로 나타내었다. 경우 (3)에 대한 터널후드의 길이는 15 m이며 경우 (4)에 대한 터널후드의 길이는 20 m이다. 결과에 따르면 경우 (4)의 압력곡선에서는 초기에 작은 압력상승을 볼 수 있다. 이것은 열차의 접근에 따른 터널입구에서의 유체의 압축성효과에 기인한

것이다. 경우 (3)에서는 터널입구가 31°로 경사져 있기 때문에 터널입구로 인한 유체의 압축성효과를 구분할 수 없다. 두 경우는 매우 다른 터널입구 형상으로 인하여 압력파면 또한 매우 다른 양상을 보이고 있다. 결과에 따르면 단순히 경사져 있는 경우 (3)에 대한 압력상승 말기의 압력구배가 경우 (4)에 비하여 매우 크다. 그러나 후두의 길이가 짧은 경우 (3)의 최대압력구배는 후두의 길이가 긴 경우 (4)에 비하여 작다. 즉 압력곡선 b에서의 최대압력구배는 8,985 Pa/s이며 압력곡선 2에서의 최대압력구배는 8,035 Pa/s이다. 이것을 Fig. 7의 경우 (2)에서의 최대압력구배 11,448 Pa/s를 기준으로 비교할 수 있다. 즉 터널의 입구를 31°로 경사지게 하면 경우 (2)의 결과에 비하여 29.8% 만큼 압력구배를 약화시킬 수 있다.

6. 결 론

터널내부를 진행하는 열차가 격는 압력강화로 객실내 승객의 이명현상과 터널 출구에서의 소음강도를 약화시키기 위한 기초연구로 고속철도가 터널에 진입할 때 유발하는 3차원 압력파면을 구하는 것은 매우 중요한 일이다. 이에 대한 결과는 객실의 여압장치를 설계할 때 바로 사용할 수 있는 자료이다. 또한 지금까지 반경험식에 의하여 가정되어온 터널입구에서의 압력파면을 대신하여 본 연구결과에 따른 압력파면 형상을 적용한다면 터널 내부유동에 대한 에너지 손실을 고려한 일차원적인 수치계산을 더욱 가치있게 수행할 수 있게 된다. 결과에 따르면 터널의 단면형태로 입구를 돌출시키면 열차가 고속으로 터널로 돌입할 때 터널입구 벽면에서 발생하는 유동의 교란을 제거할 수 있었다. 이때 수치적으로 완전한 형태의 압축파면을 형성시키기 위해서는 터널의 유로가 변하지 않는 곳을 기점으로 30~40 m의 거리에 수치센서를 마련해야 한다. 또한 입구가 경사진 터널후드를 적용하였을 때에는 후드에 유로 변화가 없는 경우에 비하여 29.8% 만큼 최대압력구배를 약화시킬 수 있었다. 만약 터널입구에 홀이 있는 터널후드를 적용하면 아무런 유로변화가 없는 후드에 비하여 21.5% 만큼의 최대압력구배를 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 터보동력기계 연구센터의 일부 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) E.Mestreau, R.Lohner and S.Aita, 1993, "TGV Tunnel Entry Simulations Using A Finite Element Code With Automatic Remeshing," AIAA-93-0890.
- (2) Ozawa,S., 1979, "Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," RTRI report, No.1121(In Japanese).
- (3) Maeda,T., Kinoshita,M., 1980, "Reduction of Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit by Hood with Opening Attached at Tunnel Entrance," Quatterly reports RTRI.JNR, Vol.21, No.2, pp.100~101.
- (4) Maeda,T., 1982, "Reduction of Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit by Branches in Tunnel," Quatterly reports RTRI.JNR, Vol.23, No.1, pp.34~37.
- (5) Maeda T., Matsumura T., Iida M., Nakatani K., Uchida K., 1993, "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel," The International Conference on Speed-Up Technology for Railway and Maglev Vehicles vol2, PS3-8, pp.315~319.
- (6) Kazuyuki Kage, Toyoyasu Okubayashi and Shigetoshi Kawagoe, 1993, "Numerical Study of Entry Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel," The International Conference on Speed-Up Technology for Railway and Maglev Vehicles Vol 2, PS3-1, pp.273~277.
- (7) S.Aita, A.Tabbal, F.Masbernat et al., 1992, "CFD Aerodynamics of the French high-Speed Train," SAE 920343, pp.85~99.
- (8) Gec-Alsthom and ESI(internal Research Report), 1990, "Simulation of Train and Tunnel Interaction Problem."
- (9) K.H.Huebner, E.A.Thornton, 1982, *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons
- (10) D.A.Anderson, J.C.Tannehill, R.H.Pletcher, 1984, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, McGraw-Hill
- (11) F.Masbernat, Y.F.Wolffhugel, J.C.Dumas, 1993, "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train," GEC Alsthom Technical Review No.11, pp.23~34.
- (12) R. Lohner, "Adaptive remeshing for transient problems," 1987, Proc.8th., Conf. on Computing Methods in Science and Engineering, Paris December 14-18
- (13) J.D.Anderson,Jr., 1982, *Modern Comp-Ressible Flow*, McGraw-Hill