

〈논 문〉 SAE NO. 97370028

## 고속철도의 터널입구 형상변화에 따른 압력파동 현상에 관한 수치적 연구

### Numerical Study on the Effects of Pressure Wave Propagation for Tunnel Entrance Shape Change in High-Speed Railways

목 재 균\*, 백 남 옥\*, 유 재 석\*\*, 최 윤 호\*\*\*  
J. K. Mok, N. U. Baik, J. Yoo, Y. H. Choi

#### ABSTRACT

When a front head of train enters a tunnel at a high speed, compression wave is generated at tunnel entrance due to the confinement effect and propagated along the tunnel with sound of speed. The propagated compression wave is reflected at tunnel exit due to the abrupt pressure change at passage. The reflected wave is expansion pressure wave. And when the rear head of train goes through the tunnel entrance, another expansion pressure wave is generated and propagated along the tunnel. The pressure drop occurs seriously around train when the two expansion pressure waves come cross on train in the tunnel. In order to reduce the pressure drop, the compression wave front must be controlled because the intensity and magnitude of pressure drop is nearly proportional to that of compression wave at tunnel entrance. This study relates to reduction of the pressure wave gradient with respect to tunnel entrance shape change with various kind of angle and rounding. The results show characteristics of wave propagation in tunnel, usefulness of characteristic curve to estimate proper time domain size in numerical study and measuring time in actual experiment. Also rounding is contributed to improve pressure wave front even if its radius is very small at tunnel entrance. In order to improve of pressure wave front at tunnel entrance, proper angle is preferred to rounding with big radius and an angle of around 14° is recommended according to this simulations. And it is expected to reduce additional pressure drop in tunnel when the location and the size of the internal space for attendant equipment are considered in advance.

주요기술용어 : Compression Wave(압축파), Expansion Wave(팽창파), Superposition(중첩), Pressure Drop(압력강화), Tunnel(터널), High-Speed Railway(고속철도), Blockage Ratio(열차 단면적/터널 단면적)

\* 한국고속철도건설공단 차량연구실  
\*\* 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부  
\*\*\* 아주대학교 기계 및 산업공학부

## 1. 서 론

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 발생하여 이것이 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, 터널내를 진행하는 열차의 속도는 음속의 1/3에서 1/4에 해당하므로 터널 내부에 터널 출구로부터 반사된 팽창파와 입구로 부터의 팽창파가 만나게 된다. 이때 두 팽창파의 중첩에 의하여 극심한 압력 변화가 터널 내부에 발생하게 되며 열차에 탑승한 승객은 큰 불편이 예상된다.<sup>1)</sup> 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.<sup>2)</sup>

종래의 연구 결과에 의하면 실제 고속철도의 터널입구에서 발생하는 압축파는 슬라브 케도 터널인 경우 터널내를 전파함에 따라 그 파면(wave front)이 점차로 급격하게 되며<sup>3)</sup> 그 압력구배의 증가는 터널 출구에서의 소음강도를 높일 뿐만 아니라 터널 출구에서 반사되는 팽창파가 터널 입구에서 발생하는 팽창파와 만나서 발생하는 압력강하도 증가시켜 승차감을 더욱 나쁘게 한다. 따라서 압축파의 파면을 제어하는 것은 매우 중요하며 이에 대한 제어방법으로는 다음과 같이 크게 두가지로 나눌 수 있다.

그 첫번째는 열차가 터널에 진입시 발생하는 압축파 파면의 압력구배(pressure gradient)를 작게 만드는 방법이다. 이를 위하여 열차의 선두부 형상을 최적화하는 방법과 터널입구의 형상을

최적화하는 방법이 있을 수 있다. 또한 이미 건설되어 운행중인 터널에 대해서는 터널입구에 후드(hood)를 설치하여 발생하는 압축파의 파면을 어느 정도 제어할 수 있다. 또한 열차의 후두부가 터널에 완전히 진입할 때 발생하는 팽창파의 파면과 터널 출구에서의 반사파의 파면을 제어하기 위해서는 열차의 선두부나 후두부 형상은 최초로 열차를 설계 및 제작하는 단계에서 이루어져야 하며 열차의 운행 수명으로 볼때 여러가지 방법을 구사하여 연구한 결과가 설계에 구현될 수 있어야 한다. 그러나 대부분의 경우 외기에서 정상운행 될 때의 공기저항이 최소화하도록 결정되고 있는데, 이는 열차가 고속화됨에 따라 더욱 신중을 기할 필요가 있다. 특히 터널입구와 출구에 대한 형상을 최적화하는 방안은 터널이 열차에 비하여 오랜 운행 수명이 예상되므로 최초에 건설할 때부터 선결되어야 할 문제이다. 대부분의 경우 터널건설과 열차의 설계 및 제작사가 다르므로 열차형상의 최적화와 터널입구형상의 최적화 연구가 유리될 수 있는 점을 주목할 필요가 있다. 일본에서는 개선책으로 후드의 형상을 최적화하는 방법과 후드에 슬릿을 설치하는 방법이 연구되고 있는데 국내에서도 열차의 진입속도, 터널의 입구형상 및 열차의 선두부 형상 그리고 후드를 설치할 수 있는 공간등을 고려한 연구가 필요하다.

두번째로는 압력파가 터널내를 전파하는 과정에서 그 에너지를 소산시킴으로써 압력강도를 감소시키는 것이다. 이를 위하여 터널내의 압축된 공기를 터널외부로 축출할 수 있는 구멍(hole) 혹은 갱도(branch)를 설치할 수 있으며 터널내에 액적을 분무한다든지, 선로의 자갈(ballast)을 적절하게 이용하거나 터널벽에 흡음재를 적용시키는 등의 방법이 있을 수 있다. 또한 터널벽에 반사판을 설치하여 에너지 소산 효과를 크게 할 수도 있다.<sup>4), 5)</sup>

특히 국내에서는 지형적인 조건에 의하여 고속철도가 많은 터널을 통과하게 되므로 터널 내부에서의 승차감과 터널 주변의 소음문제를 해결하기 위하여 이에 대한 연구가 시급히 요구되고 있다.

본 연구에서는 이차원적인 계산을 이용하여 열

차의 터널 진입시 발생하는 제반 현상을 설명하였다. 그리고 터널의 입구에서 발생하는 압축파의 압력구배를 제어한 목적으로 터널의 입구형상을 변화시켜 계산하였으며 이에 대한 결과를 비교 검토하였다.

## 2. 고속철도 터널문제에서 수치적 연구의 가치

열차에서의 압력과 문제는 최근의 고속화 경향에 따라 새롭게 부각되는 문제로서 이에 대한 실험이나 개선안에 대한 실제 적용사례가 일본이나 프랑스 등으로 국지적일 수 밖에 없으며 그것 또한 매우 드문 형편이다. 문제를 해결하기 위한 일환으로 실험에 의하여 정량적인 결론을 내리기 위해서는 각각의 매개변수에 대하여 독립적인 실험조건을 구현해야 하는데 열차와 터널을 포함해야 하는 상황이므로 거의 불가능한 일이라고 할 수 있다. 따라서 처음에는 대부분의 경우 모델을 이용한 실험일 경우 유체역학적 상사성을 만족시키는 실험장치, 즉 열차에 상사하는 속도를 발생시키고 이를 제어하기 위하여 특수한 실험장치가 필요하며 측정을 위한 센서의 선정과 앰프 및 필터의 조합에 상당한 기술이 필요하게 된다. 일반적으로 실험장치를 설계하기 위해서는 현상에 대한 정성적인 평가가 우선되어야 하는데 이는 이상적인 조건에서 구한 해를 이용하든지 일차원 수치모델을 이용하는 경우가 많다. 다행히 길이가 매우 긴 터널에 대한 터널 내부에서의 물리적 현상이 일차원적인 가정을 어느정도 만족시키고 있으나 압력파의 발생과 반사가 터널의 입구 및 출구에서 이루어진다면 이는 수치해를 구하기 위한 조건을 설정하거나 실험결과의 해석에 유용할 수 있다. 그러나 압력파가 반사될 때의 시간지연을 고려할 수 없으며 또한 그 변화의 정도는 입구와 출구에서의 입력파면에 의하여 다르게 되므로 터널의 형태에 따른 압력정보를 알아내기 위해서는 매우 많은 수의 압력센서를 설치하여 각각의 경우에 대하여 실험을 하거나 수치해석에 의존할 수 밖에 없다.

더우기 국내에 건설되는 터널은 지형적인 제한

으로 인하여 대부분이 더블트랙으로서 매우 복잡한 압력파의 발생과 전파가 예상되며 이에 대한 연구는 지금까지 찾아보기 힘들다.

따라서 모든 터널문제를 해결하기 위하여 열차가 고속으로 터널을 진입할 때 발생하는 압력파의 파면형상이나 압력구배 등에 대한 정보가 필수적으로 요구되며 이것은 컴퓨터를 이용한 수치적인 계산에 의해서만 얻어질 수 있다. 그러나 수치적 계산을 이용하면 원하는 대부분의 정보를 수치적 센서를 지정하므로써 얻을 수 있는 반면 정량적인 물성치를 제공하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 계산에 의한 정성적인 결과는 실험을 이용한 실험에서 특성값을 찾고 이를 매개로 하여 환산하므로써 비로소 정량적인 데이터를 제공할 수 있게 된다. 본 연구 가정에서 사용하는 TG-FLO프로그램은 미국의 조지워싱턴대학에서 사용하던 FE-FLO프로그램을 프랑스의 ESI가 고속철도에 적용할 목적으로 조지 워싱턴대학의 R. LOHNER 교수와 공동으로 향상시켜 개발한 것으로 프랑스의 GATSA(Gec-Alsthom S.A.) 및 SNCF(French National Railways Company)에서 열차의 선두부 형상에 관한 데이터 및 터널 통과시의 실험 데이터를 제공하여 터널 입구 문제에 대한 적용 타당성을 검증한 것이다.<sup>6),7)</sup> 그러나 이를 이용하여 터널 입구의 형상을 개선하기 위한 연구사례는 아직 발표된 바가 없다.

## 3. TG-FLO의 특징

유체와 물체로 이루어진 계산영역에서의 비정상 문제(Unsteady State Problem)에 대하여 좋은 수치적 결과를 얻기 위해서는 물체 주위의 일부 격자가 상대적으로 움직이도록 해야한다. 즉 상대좌표계와 절대좌표계의 조합이 수치적으로 이루어져야 하며 이를 위하여 본 연구에 사용된 TG-FLO는 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 좌표를 적용하였다.<sup>8)</sup> 그러나 실제의 계산에서는 계산시간(CUP time)을 고려하여 물체주위의 몇몇 층의 격자만 움직이도록 하였으며 물체에서 먼 영역에 대해서는 상대좌표계가 적용되었다. 계산영역 내에서는 물체의 이동에 의해서 물

체 주위의 격자가 변형을 일으키게 되며 일정한 단계가 지나면 계산결과에 영향을 미칠 뿐 아니라, 시간 중분이 급격하게 줄어들게 된다. 따라서 변형된 격자에 대한 영향이 주위에 파급되는 것을 방지하기 위하여 국부적으로 격자를 다시 생성시켜 계산에 적용하게 된다. 이것이 불충분할 때에는 전체의 계산영역에 대하여 격자를 다시 생성시키게 된다. 또한 유동현상에 적절한 격자구성을 위하여 계산과정 중에 격자를 등분하여 작게 만들거나 너무 작은 격자에 대하여는 통합이 이루어지게 된다. 일반적으로 수치적 특성에 의하여 영역내의 유동변화가 큰 경우에는 높은 차수의 수치방법(High-Order Scheme)이 적용되며 유동변화가 큰 경우에는 낮은 차수의 수치방법(Low-Order Scheme)이 적용된다. 그러나 본 코드에서는 FCT(Flux-Corrected Transport)를 이용하여 두개의 스킴을 조합하여 적용시켰다. 또한 신속한 수렴을 위하여 압력 및 속도구배를 기저로 하는 수치는 인공 감쇄항(Artificial Dissipation)을 적용시켰다. 초기의 계산영역에 대하여 격자를 생성시킬 때 백그라운드 격자제어(Background Mesh Size Controlling) 메뉴를 적용하여 격자의 크기 및 분포를 지정할 수 있으며, 특히 소스라인을 이동물체로 지정하면 움직이는 물체 주위에 일정한 격자의 분포를 얻을 수 있다.

4. 계산 과정

TG-FLO 코드를 이용하여 터널문제를 계산하는 과정을 Fig.1에 나타내었다. 먼저 열차의 선두부와 터널형상에 대한 CAD 데이터를 받아서 본 코드의 프리프로세서(Pre-Processor)에 로딩시킨 후 수치해를 계산하기에 적합토록 모델을 만든다. 그리고 프리 프로세서를 이용하여 면격자(Surface Mesh)를 생성시켜 격자크기와 분포의 적합함을 확인하고 체적격자(Volumetric Mesh)를 생성시킨다. 격자크기와 분포를 제어하기 위해서는 백그라운드 격자제어 메뉴와 소스라인 격자제어 메뉴를 적절하게 이용한다. 격자의 생성이 끝나면 열차속도에 해당하는 유동장내에서 열

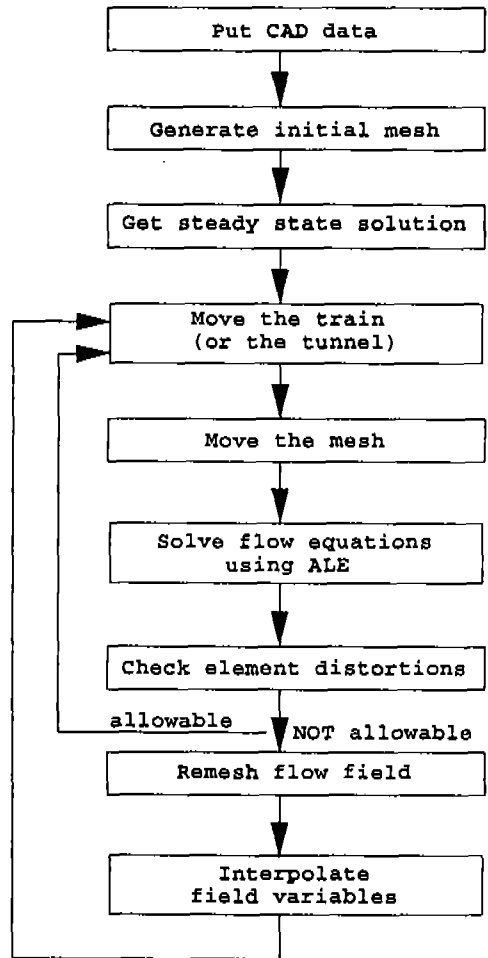


Fig.1 TG-FLO solution methodology for train-tunnel interaction

차 선두부에 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 때에는 FCT프로세서(Main-Processor)를 이용하며 빠른 수렴을 위하여 로컬타임스텝(Local Time-Step)과 인공 감쇄항을 적용한다. 이와같이 구해진 정상해의 영역에 터널을 위치시키고 계산영역에 대한 격자를 다시 생성시켜 열차와 터널을 포함하는 전체 영역에 대하여 격자를 형성한 다음 비정상해를 구해나간다. 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 상대 이동시킨다. 이동하는 물체 주위의 격자는 물체의 이동에 따라 격자형태가 변형되게 된다. 따라서 본 코드에서는 격자의 변형 정도에 한계를 부여하고 이를 한 계산단계마다 확인하며 필요에 따라 국부적으로 또는 전체적으로 격자를 다시 생성하게 된다. 격자의 재생성은 새로운 격자(New Mesh)와 지난 격자(Old Mesh) 사이의 보간(Interpolation)에 의하여 이루어진다. 문제에 적용되는 터널길이, 열차길이 및 속도 그리고 해당 조건에서의 음속을 이용하여 구한 일차원 특성곡선(Characteristic Curve)을 이용하면 터널문제에 대한 압력정보를 얻는데 적합한 열차의 이동 거리를 평가할 수 있으며 계산을 진행하는 동안 포스트프로세서(Post-Processor)를 사용하여 각각의 단계마다 해를 검토한 후 계산을 완료한다.

## 5. 지배방정식 및 경계조건

본 계산에서 적용한 유체는 완전기체(perfect gas)로서 비열비  $\gamma$ 에 의하여 유체의 성질을 표현할 수 있으며 그 상태방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $P$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $e$ 는 총합에너지이고  $u$ 는 유체의 속도이다. 그리고 계산에서 적용한 점성과 열전도성을 무시한 비정상 흐름에 대한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho, \rho u, \rho v, \rho e) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u, \rho u u + P, \rho u v, \rho u e + u P) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v, \rho u v, \rho v v + P, \rho v e + u P) \\ & = (0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

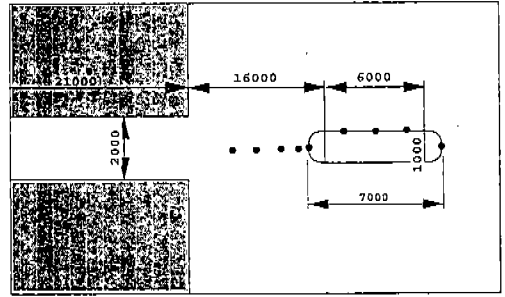


Fig.2 Solution domain & locations of numerical sensors for 2-dimensional tunnel entry problem

터널 및 열차 표면에 대하여는 슬라이딩 조건(sliding boundary condition)을 적용하였으며, 계산영역의 경계에 대해서는 화펠드 조건(far-field boundary condition)을 적용하여 계산영역의 한계를 무한의 외기조건으로 정의하였다.

Fig.2는 계산영역과 수치센서의 위치를 나타낸 것이다. 터널의 길이는 21m, 터널폭은 2m, 열차길이는 7m, 열차의 폭은 1m로 하였다. 즉 터널길이는 열차 길이의 3배이며 터널의 폭은 열차의 2배로 하였다. 열차의 속도는 100m/s이며 대기압은 100kPa, 밀도는 1.2kg/m<sup>3</sup>, 대기의 온도는 20°C이고 비열비  $\gamma$ 는 1.4로 계산하였다.

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1 2차원 비정상 상태의 터널내부 현상

Fig.3은 지금까지 계산을 수행한 2차원 모델을 기준으로 작성한 일차원 특성곡선이다. 열차 모델의 전두부와 후두부의 형상은 반지름이 0.5m인 반원이다. 이때 터널길이 21m, 열차의 길이는 7m이다. 열차는 100m/s로 터널에 진입하고 있다. 이와 같은 특성곡선을 이용하면 급격한 압력변화가 일어나는 위치와 시간을 알아 낼 수 있다. 본 모델은 터널의 길이를 열차 길이의 세배가 되도록 설정한 것으로 비교적 짧은 터널에 대한 것이다. 굵은선은 열차의 선두부와 후두부를 나타내며 가는선은 압력파의 진행경로를 나타낸다. 또한 굵은선의 기울기는 열차의 속도를 의미

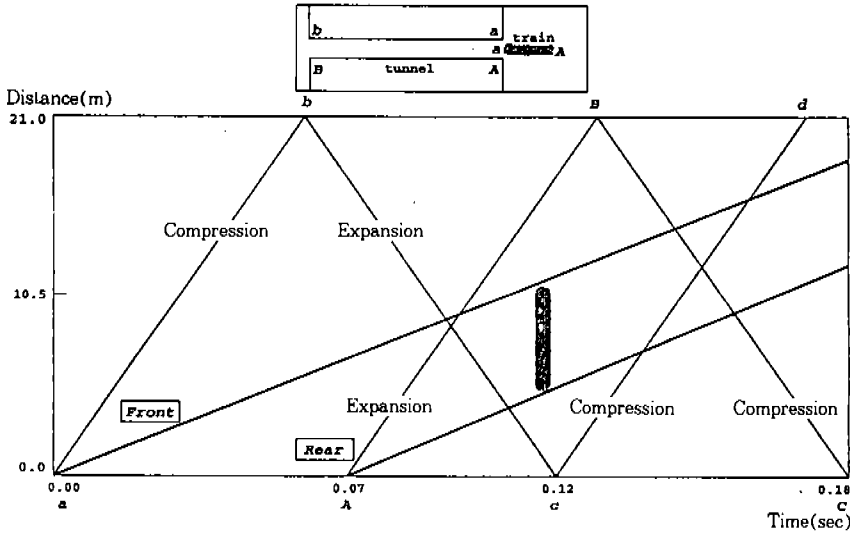


Fig.3 Characteristic curve for train and tunnel

하며, 가는 선의 기울기는 본 계산조건에서의 압력과 전파속도를 의미한다.

Fig.3에 따르면 열차가 터널에 진입하면서 압력파가 발생되어 출구를 향하여 전파되며, 열차가 터널을 따라 9.4m 정도 진행했을때 터널출구에서 반사되어 되돌아오는 팽창파와 만나게 된다. 이것은 열차에 압력강하를 유발시키면서 열차의 진행과 반대방향으로 계속하여 전파되어 간다. 또한 열차의 후두부가 터널로 진입하는 순간 발생하는 팽창파는 열차를 따라 전파되면서 압력강하를 유발시킨다. 터널입구에서 열차의 후두부에 의하여 발생된 팽창파는 열차가 터널입구로부터 9.6m 정도 진행했을때 출구로부터의 또 다른 팽창파와 만나 중첩되며 이에 따라 열차는 극심한 압력강하를 겪게 된다. 두개의 팽창파는 열차를 지나 서로 다른 방향으로 전파되며 터널의 입구 및 출구에 도달하여 다시 반사된다. 반사파는 압축파로서 다시 터널내를 지나고 있는 열차를 향하여 전파되며 두 압축파의 만남으로 인하여 압력상승을 일으키게 된다. 특성곡선에 따르면 열차가 입구로부터 15.7m 정도 진행했을 때 두개의 압축파에 의한 압력상승을 예상할 수 있다. 그러나 특성곡선으로는 압력강하의 정도나 압력구배등에 대한 정보를 얻을 수는 없다.

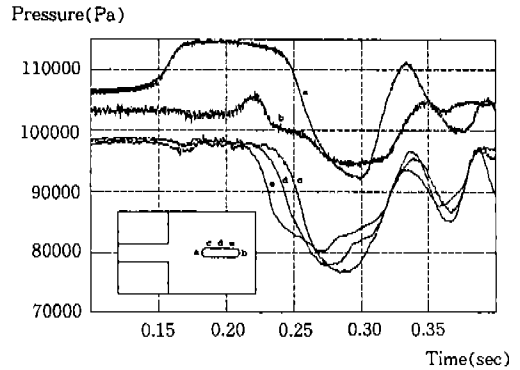


Fig.4 Pressure profiles on train with classical tunnel entrance

Fig.4는 열차의 선, 후두부와 중심 그리고 중심에서 각각 2m 떨어진 지점에 대한 압력변화를 나타낸 것이다. 또한 열차는 터널입구로부터 15.5m 전방에 위치시키고 터널을 상대적으로 이동시켰으므로 0.155sec에 열차의 선두부가 터널입구의 좌표에 위치하게 된다. 따라서 이 순간이 Fig.3의 일차원 특성곡선에서 0.00sec에 해당된다. 즉 Fig.4에서 열차의 터널진입에 따른 압력상승이 0.155sec에서부터 시작되며 이 때 압축파가 발생하여 출구를 향하여 전파된다. 이 압축파가 출구에서 반사되어 되돌아와서 열차 선두부와 만나

는 시간은 열차가 터널에 진입한 후 1.095sec임을 열차속도, 음속 및 터널길이에 대한 간단한 계산으로부터 알 수 있다. 즉 2차원 계산 영역에서는 0.25sec부터 열차 선두부에서 압력강하가 발생하는 것을 예측할 수 있으며 Fig.4의 곡선 a는 이것과 일치한 현상을 보여주고 있다. 곡선 b는 열차 후두부 정점에 대한 압력곡선이며 d는 열차의 중간지점에 대한 것이고 곡선 c, e는 열차의 중간지점에서 전, 후로 각각 2m 떨어진 지점에 대한 그림이다. 수치적 센서의 위치를 고려하면 특성곡선의 경향에 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 특성곡선을 이용하면 압력강하 발생시기와 압력파의 정보를 알기 위한 적절한 계산시간을 알아낼 수 있다.

Fig.5은 열차의 선두부로부터 각각 0.5m, 1.5m, 6.5m, 11.5m 떨어진 지점에 대한 압력변화를 나타낸 것이다. 이것은 실제의 실험결과와 비교하기 어렵지만 현재 열차의 압력차폐(air tight)에 대한 실험이 터널내를 진행하고 있는 열차의 내부에서 간접적으로 평가되고 있으므로 열차의 속도를 가지고 이동하는 수치센서에 대한 압력변화를 표시한 것이다.

Fig.6은 일반적인 터널입구 형상에 대하여 열차의 선두부에서 0.5m 떨어진 지점에 대한 압력변화를 나타낸 것이다. 이것은 터널입구의 형상변화에 따른 각각의 결과와 직접 비교하기 위한 것이다. 일반적으로 터널길이가 매우 긴 경우 출구로부터의 팽창파와 입구로부터의 팽창파가 만

나는데는 어느 정도의 시간이 소요되며 이에 따라 압력강하의 시간적 구배가 상대적으로 작아지게 된다. 또한 열차의 진행속도는 압력파의 전파속도의 1/3~1/4에 해당하므로 열차이외의 터널 내부에서 두개의 압력파가 만나게 된다. 그러나 본 연구에서 선택한 계산영역은 터널길이가 매우 짧은 경우이다. 즉 두개의 팽창파가 발생된 후 짧은 시간내에 중첩되게 되며 터널 길이가 긴 경우에 비하여 압력강하의 시간적 구배가 커지게 된다. 또한 두개의 압력파의 만남이 열차에서 이루어지므로 열차에서 먼 거리의 터널내에서 그 만남이 이루어지는 경우에 비하여 열차 자체에 미치는 시간에 따른 압력변화가 급격하게 된다. 그러나 팽창파는 단열과정을 거치므로 중첩에 의한 압력강하의 양은 어느 경우이든지 동일하다. 따라서 여기서의 계산영역으로도 압력강하의 정도를 평가할 수 있다. 실제적으로는 터널길이에 따라 운전조건을 잘 조합하여 압력파의 만남이 열차에서 이루어지지 않도록 조치하면 터널내에서의 시간에 따른 압력변화를 다소 완화할 수 있다.

6.2 터널입구의 형상변화에 대한 고찰

(1) 터널입구에 서로 다른 기용기를 주었을 경우

위에서 설명한 바와 같이 터널내에서 진행되는 압력파는 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 첫 번째 압축파와 열차 후두부가 터널 입구를 통과할 때 발생하는 첫 번째 팽창파의 파면에 의한 영

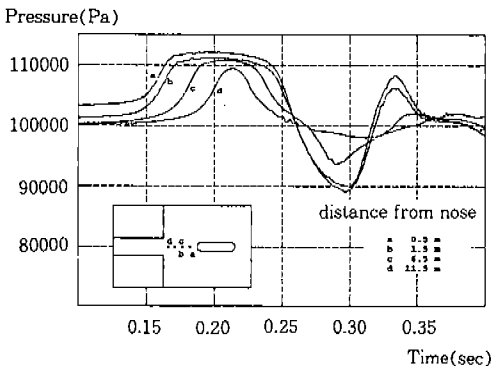


Fig.5 Pressure profiles in front of the train with classical tunnel entrance

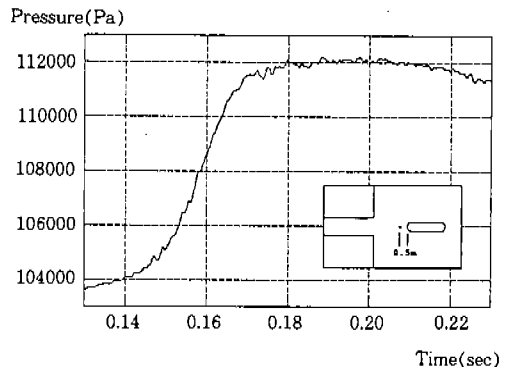


Fig.6 Pressure profile at a point in front of the train

향이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 여기서 압력파의 파면은 열차가 일정한 속도로 진입하는 경우 열차의 선두부나 후두부 형상 및 터널의 입구형상에 좌우된다. 따라서 터널입구에 여러가지 기울기를 주어 계산을 수행하였다. 특히 열차에 대한 3차원 모델링은 매우 오랜 계산시간이 소요되므로 다양한 형상에 대하여 3차원 모델링을 통하여 적정기울기를 찾아내는 것은 매우 힘들다. 즉 2차원 계산의 결과를 이용하여 어느 정도 이 영역을 정하고 이것을 3차원 계산에 적용하는 것이 효율적이다. 본 계산은 이와같은 목적에서 이루어 졌다.

터널의 형상을 변화시키는 대표적인 방법은 입구에 기울기를 주는 것이다. 이를 위하여 터널입구로부터 터널 내부로 2m지점에서부터 서로 다른 각도의 기울기를 부여하였다. Fig.7에는 서로 다른 기울기의 터널입구에 대한 압력형상을 나타내었다. 이 결과를 이용하여 입구 각도에 따른 압력 상승폭과 압력구배를 비교하여 보면 터널입구에 대한 적정 기울기가 있음을 알 수 있으며, 37° 이상에서는 기울기에 대한 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단된다. 또한 Fig.6과 비교해 보면 기울기를 전혀 부여하지 않은 경우에 비하여 압력구배와 상승폭에 많은 향상이 있음을 알 수 있다. 입구 각도가 큰 경우는 실제의 터널을 공사할 때 매우 비경제적인 것을 의미한다. 따라서 터널 입구에서의 압력 상승폭과 압력구배가 작으면서 각도가 작은 경우를 선택해야한다. 본 계

산에 따르면 터널 입구의 적정한 각도는 14.04° 근처임을 알 수 있다.

(2) 터널입구에 서로 다른 반경의 라운드를 주었을 때

Fig.8에는 터널입구에 서로 다른 반지름을 주었을 때의 결과를 나타내었다. Fig.6의 일반적인 형태의 터널에 대한 결과와 비교해 볼 때 아무리 작은 반지름이라도 압력 강도와 압력구배에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 따라서 가능한한 입구에 라운드를 부여하는 것이 바람직하다. 그러나 계산에서와 같이 큰 반지름을 실제에 적용하는 것을 타당하지 않으며 Fig.7과 비교해 볼 때 입구에 기울기를 부여하는 것이 실제 터널을 시공할 때 더욱 경제적인 일 수 있다.

Fig.9에는 터널의 입구로부터 터널 내부로 2m 지점에 변곡점을 두고 서로 다른 곡률반경을 부여하여 계산한 결과를 나타내었다. 이것을 Fig.8과 비교해 보면 터널 입구의 형상을 변화시키기 위해서는 곡률반경을 변화시키는 것이 반지름이 큰 라운드를 주는 것에 비하여 효과적임을 알 수 있다. 그러나 Fig.7의 기울기를 부여한 경우와 비교해 볼 때 적정기울기를 주는 것이 더욱 타당함을 알 수 있다.

### 6.3 터널 내부에 홀(hole)을 설치한 경우

터널 내부에서의 압력변화를 보면 두개의 팽창파가 터널 내부의 중간지점에서 만나게 됨을 알 수 있다. 따라서 터널 내부의 중심에 폭 2m, 길

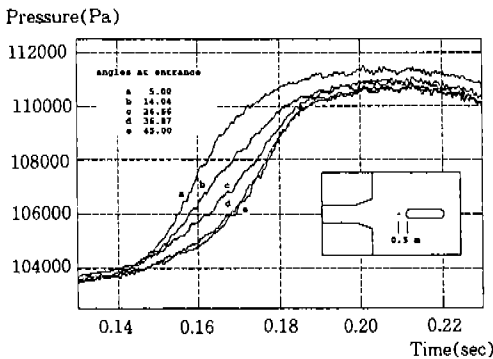


Fig.7 Pressure profile according to slopes on entrance in space

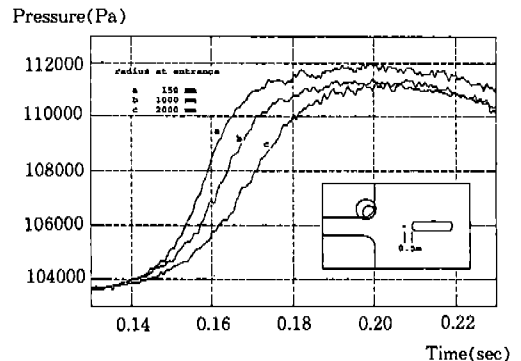


Fig.8 Pressure profiles according to radius at tunnel entrance



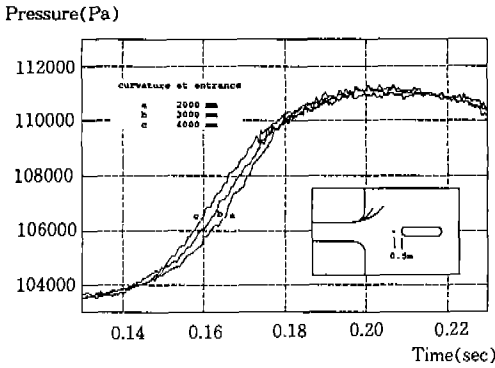


Fig.9 Pressure profiles according to curvature at tunnel entrance

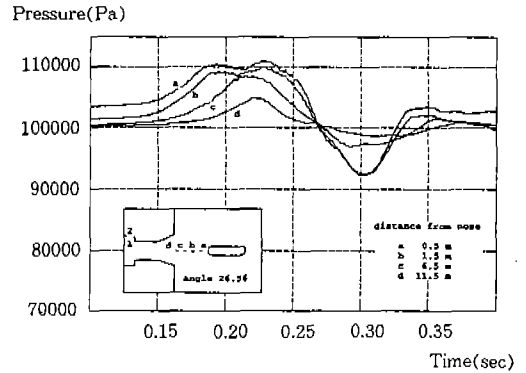


Fig.11 Pressure profiles at the front of train with angle and inner hole in tunnel

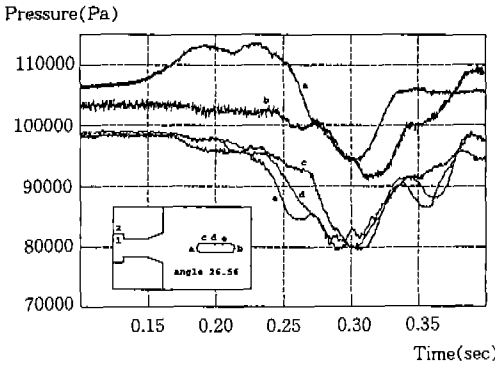


Fig.10 Pressure profiles on train with angle and inner hole in tunnel

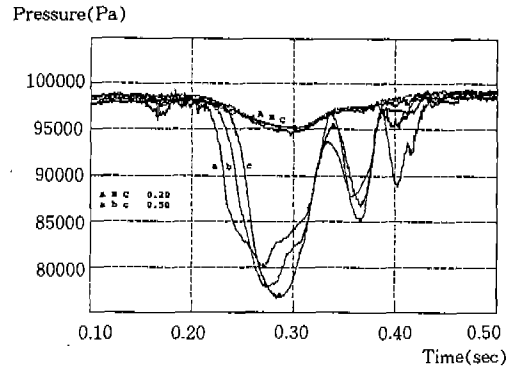


Fig.12 Pressure profiles according to blockage ratio on train

이 1m의 홀을 두고 계산을 수행하였다. 이에 대한 열차표면과 터널 내부에서의 압력변화를 Fig. 10과 Fig.11에 나타내었다. 내부에 홀이 없는 경우와 비교해 보면 입구에서의 압력구배에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서 입구문제와 터널 내부문제를 독립적으로 다루어도 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 압력파가 터널 내부를 이동할 때 홀에 의한 간섭이 생겨 첫번째 압력강화 시기가 지연되었으며 압력강도도 낮아졌다. 그리고 열차 표면에서는 측정위치에 따라 개선 가능성을 볼 수 있다. 만약 터널 내부에 부대시설을 설치해야 할 경우 홀의 위치와 크기에 대한 사전 검토가 이루어 진다면 부가적인 압력 보상효과를 기대할 수도 있다.

#### 6.4 터널의 단면적을 변화시킨 경우

터널의 단면적 변화에 따른 압력변화를 알아보기 위하여 먼저 면적비를 정의하였다. 즉 본 계산에서는 면적비(열차의 단면적/터널의 단면적 = blockage ratio)가 0.2인 경우와 0.5인 경우를 비교하였다. Fig.12는 열차의 중심과 중심으로부터 각각 2m 떨어진 지점에 대한 압력변화를 나타낸 것이다. 또한 Fig.13은 열차의 선두부로부터 각각 0.5m와 1.5m 떨어진 지점에 대한 압력변화를 나타낸 것이다. 그림에서 a, b, c는 단면적비가 0.5인 경우를 나타낸 것이며 A, B, C는 단면적비가 0.2인 경우를 나타낸 것이다. 일반적으로 압력파의 크기는 면적비에 크게 의존하며,

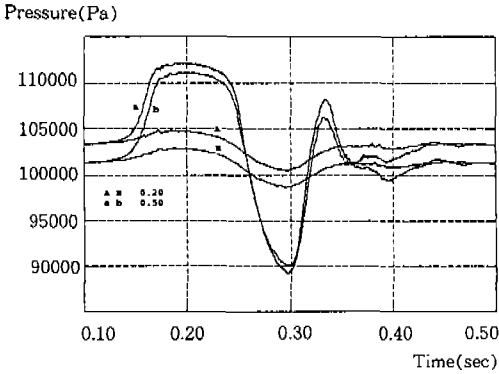


Fig.13 Pressure profiles according to blockage ratio on train

압력파의 구배는 터널입구 형상이나 열차의 선두부 형상에 크게 의존하게 된다. Fig.12와 Fig.13는 이와 같은 현상을 잘 나타내고 있다.

6. 결 론

고속철도의 터널입구 형상변화에 따른 압력변화에 대하여 2차원 수치해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 일차원 특성곡선을 이용하면 수치계산에서 압력에 대한 정보를 얻을 수 있는 적정 계산영역과 실제의 실험을 수행할 때 측정시간을 추정할 수 있다.
- 2) 일반적으로 실제의 터널공사에서 터널입구에 주어지는 모서리에 대한 라운드가 있다면 그 크기가 아무리 작더라도 압력구배를 줄이는데 기여하게 된다.
- 3) 입구의 형상을 변화시키기 위해서는 큰 곡률반경보다 적정의 기울기를 부여하는 것이 바람직하며 2차원 계산결과 14° 근처를 추천 할 수 있다.

4) 터널 내부에 부대시설을 설치해야 할 경우 내부 공간의 위치와 크기에 대한 사전 검토가 이루어 진다면 압력강하에 대한 보상 효과를 부가적으로 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. E. Mestreau, R. Lohner and S. Aita, "TGV Tunnel Entry Simulations Using A Finite Element Code With Automatic Remeshing", AIAA-93-0890, 1993.
2. 김희동, 松尾一泰, "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(1)", 대한기계학회논문집, 제18권, 제10호, pp. 2686~2697, 1994.
3. S.Ozawa, "Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit", RTRI report, No. 1121, 1979.
4. T. Maeda, M. Kinoshita, "Reduction of Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit by Hood with Opening Attached at Tunnel Entrance", Quarterly reports RTRI/JNR, Vol.21, No.2, pp.100~101, 1980.
5. T.Maeda, "Reduction of Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit by Branches in Tunnel", Quarterly reports RTRI/JNR, Vol.23, No.1, pp. 34~37, 1982.
6. S.Aita et al., "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train", SAE 920343, 1992.
7. F. Masbernat et al., "CFD AERODYNAMICS OF THE FRENCH HIGH-SPEED TRAIN", GEC ALSTHOM TECHNICAL REVIEW, No. 11-1993, 1993.
8. TG-FLO User's Manual, ESI, 1992.