

# 고속전철의 터널입구 형상이 공력특성 및 터널입구 압축파에 미치는 영향

정수진<sup>1)</sup> · 김우승<sup>2)</sup> · Ming Zhu<sup>3)</sup>

동해대학교 자동차공학과<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>2)</sup> · Engineering Systems International<sup>3)</sup>

## Effect of Tunnel Entrance Shape of High Speed Train on Aerodynamic Characteristics and Entry Compression Wave

Soo-Jin Jeong<sup>1)</sup> · Woo-Seung Kim<sup>\*2)</sup> · Ming Zhu<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Donghae University, Gangwon 240-713, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

<sup>3)</sup>ESI Software S. A. 20, rue Saارين Parc d'Affaires Silic 94588 Rungis Cedex France

(Received 17 May 2004 / Accepted 24 August 2004)

**Abstract** : The work presented in this paper concerns the aerodynamic characteristics and compression wave generated in a tunnel when a high speed train enters it. A large number of solutions have been proposed to reduce the amplitude of the pressure gradient in tunnels and some of the most efficient solutions consist of (a) addition of a blind hood, (b) addition of inclined part at the entrance, and (c) holes in the ceiling of the tunnel. These are numerically studied by using the three-dimensional unsteady compressible Euler equation solver with ALE, CFD code, based on FEM method. Computational results showed that the smaller inclined angle leads to the lower pressure gradient of compression wave front. This study indicated that the most efficient slant angle is in the range from 30° to 50°. The maximum pressure gradient is reduced by 26.81% for the inclined angle of 30° as compared to vertical entry. Results also showed that maximum pressure gradient can be reduced by 15.94% in blind hood entry as compared to 30° inclined tunnel entry. Furthermore, the present analysis showed that inclined slant angle has little effect on aerodynamic drag. Comparison of the pressure gradient between the inclined tunnel hood and the vertical entry with air vent holes indicated that the optimum inclined tunnel hood is much more effective way in reducing pressure gradient and increasing the pressure rise time.

**Key words** : High speed train(고속전철), Aerodynamic simulation(공력해석), Compression wave(압축파), Tunnel entrance shape(터널입구형상), Micro-pressure wave(미기압파)

### 1. 서론

터널 내에 열차의 진입 시 열차의 피스톤 효과로 인한 충격성 소음(impulsive noise)과 열차에 탑승한 승객의 청각 장애는 고속전철 설계 시 해결해야 할 중요한 과제이다. 특히 한국 고속전철의 경우 열차

의 목표속도가 350km/hr(Ma=0.283)이며 경부고속전철의 경우 한국의 산악지형 특성상 전체선로(437km)의 44%에 해당하는 구간에 75개의 터널이 설계되어 있으므로 전철의 터널 진입에 따른 공기역학적 문제와 공기 음향학적 문제의 해결이 급선무이다. 따라서 이러한 기술적인 문제들을 극복하기 위하여 많은 연구가 국내외적으로 연구되어지고 있다.<sup>1-5,8)</sup> 그 결과 터널 내에서 발생하게되는 압력변

\*To whom correspondence should be addressed.  
wskim@hanyang.ac.kr

동이나 터널출구에서 발생하는 충격성 소음은 모두 터널 내를 전파하는 압축파의 특성과 밀접하게 관련되어 있으며 특히 터널 입구에서 압력구배에 직접적인 연관이 있음을 알 수 있었다. 따라서 현재까지 수행된 대부분의 연구들은 터널 내의 압축파의 거동을 이해하고 이를 적절히 제어함으로써 압력변동이나 충격성 소음의 경감을 도모하기 위한 것이었다.<sup>4)</sup> 지금까지 이와 관련되어 수행된 연구결과는 2가지 범주로 분류할 수 있는데 첫 번째는 고속전철의 전두부 형상 및 터널의 입구형상<sup>2,3,8)</sup>을 최적화시킴으로써 압축파의 발생과정에 수정을 가하여 터널에서의 압력상승 시간을 늘이는 방법이며 이는 전두부 형상을 변경하거나 터널 입구에 터널보다 넓은 단면적의 후드를 설치하거나 같은 단면적의 경사진 후드를 설치함으로써 실현되었다.<sup>1-3,5,7)</sup> 두 번째는 터널에 통기구멍<sup>2)</sup> 및 다공성벽면<sup>15)</sup> 또는 음향학적 임피던스를 설치하여 터널 내 압축파 전파시 파면(wave front)의 형상을 변화시키는 방법이다.<sup>5)</sup> 이에 관한 연구들은 대부분 특성곡선법을 이용한 일차원 해석에 의존하였거나 축소된 모형 터널을 이용한 실험적 연구가 대부분이어서 실질적인 전두부 및 터널 입구의 3차원형상이 터널 입구 내의 유동특성이나 압력구배 등에 대한 실질적인 상세정보는 얻을 수 없었다. 이는 특성곡선법을 사용한 1차원적 해석에서는 차체표면에서 일어나는 3차원적인 복잡한 유동해석이 불가능하고 풍동실험 역시 빠른 속도로 움직이는 차체표면의 압력 및 속도를 측정하기에 어려움이 많기 때문이다.

한편 최근에 발전이 두드러진 전산유체역학 기법을 사용하여 90년대 후반들어 국,내외적으로 터널 입구 형상이나 전두부 형상이 터널 내의 압력과 거동에 미치는 영향에 대해 연구가 수행되어져 왔다.<sup>2,7,8)</sup> 그러나 이들 연구들의 대부분이 터널진입시의 일반적인 유동특성 해석에 관한 것으로서 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음감소를 위한 터널 입구의 후드형상 최적화에 관한 연구는 미미한 실정이다. 이는 움직임 격자 사용으로 인한 격자생성의 어려움과 긴 계산시간 및 터널 주행 시의 급격한 속도 및 압력변화로 인한 수치적 안정성 문제 때문으로 생각되어진다.

본 연구에서는 열차의 터널 진입 시 발생하는 충격성 소음을 억제하기 위한 다양한 터널입구 설계 방법을 통합적으로 분석하기 위하여 TGV-K와 유사한 전두부 형상을 지닌 모델을 대상으로 유한요소법을 사용하여 3차원 압축성 유동해석을 수행하여 터널입구에서의 압축파의 압력구배 및 열차의 공력 특성을 분석하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 터널 내의 유동을 3차원 압축성 유동으로 고려하였다. 열차의 터널 진입을 모사하기 위해서는 격자일부가 상대적인 움직임을 가져야 하므로 압축성 Euler 방정식에 ALE(Arbitrary Lagrangian- Eulerian)의 체계를 적용하였으며 이는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \rho u^x \\ \rho u^y \\ \rho u^z \\ \rho e \end{pmatrix}_{,i} + \begin{pmatrix} (u^i - w^i)\rho \\ (u^i - w^i)\rho u^x + p \\ (u^i - w^i)\rho u^y \\ (u^i - w^i)\rho u^z \\ (u^i - w^i)\rho e + u^i p \end{pmatrix}_{,i} = -S \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u^x \\ \rho u^y \\ \rho u^z \\ \rho e \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\rho, u^i, e, p$ 는 각각 밀도, 직교좌표 속도 성분, 총비에너지 그리고 압력을 나타내며 격자의 이동속도  $w$ 와 그 발산은 아래와 같다.

$$w = (w^x, w^y, w^z), \quad S = \nabla \cdot w \quad (2)$$

식 (1)의 생성항  $S$ 는 움직임 격자의 체적변화를 의미한다. 본 계산에서 적용한 유체는 완전가스로서 비열비  $\gamma$ 에 의하여 유체의 성질을 표현할 수 있으며 그 상태방정식은 아래와 같다.

$$p = (\gamma - 1)\rho[e - 0.5(u^x u^x + u^y u^y + u^z u^z)] \quad (3)$$

방정식 (1)의 이산화는 4번째 수치격자를 이용하는 갤러킨 가중 잔차법(Galerkin weighted residual)을 사용하였고 시간적분에는 명시적 다단계 런지쿠터 방법(Multi-stage Runge-Kutta explicit scheme)을 사용하였으며 CFL=0.25로 사용하였다.<sup>2,4,10)</sup> 이와 같은 계산을 수행하기 위하여 본 연구에서는 상용 열 유체 프로그램인 PAM-FLOW<sup>10)</sup>를 사용하였다.

## 2.2 계산 과정

격자형성을 위하여 CAD 데이터의 표면에 표면삼각요소(surface triangulation)를 형성시킨다. 또한 격자의 크기 및 분포의 적합성을 확인한 후 해당 면과 라인에 경계조건을 지정하고 지배방정식을 계산하기 위한 수치제어를 입력한다. 이후 해석 영역내의 표면삼각요소를 이용하여 체적 유한요소격자(volumetric finite element mesh)를 형성하기 위하여 Front-Advancing scheme<sup>11)</sup>을 사용하였다. 본 연구의 비정상 고속전철 터널 유동해석에 사용된 격자수는 약 700,000개이다. 열차의 이동현상을 모사하기 위하여 ALE방법을 사용하였다. 이때 이동하는 물체 주위에는 국부 격자 재생성(local remeshing)을 통하여 새로운 격자로 채워 넣는다. 일반적으로 열차의 선두부는 매우 복잡한 곡선으로 구성되어 있기 때문에 열차를 이동시킨다는 것은 수치적인 측면에서 비경제적이므로 비교적 그 형태가 단순한 터널을 열차 속도에 해당하는 속도로 열차를 향하여 상대 이동시킨다.<sup>2)</sup> 격자의 재생성 후에 미지값들은 Löhner<sup>12)</sup>의 2차 정도의 최적보간법을 이용하여 새로운 격자와 전 단계 격자 사이의 보간에 의하여 결정되어진다.

## 2.3 초기 및 경계조건

우선 개활지에서의 정상상태의 유동해석을 수행한 후 그 결과를 초기조건으로 사용하였으며 비정상 상태의 계산은 전철이 초기에 정지해 있다가 출발순간 갑자기 주행속도로 움직이기 시작하는 것으로 고려하였다. 터널 및 열차 표면에 대해서는 비점착 조건(sliding boundary condition)을 적용하였으며, 계산영역의 경계에 대해서는 자유 방출조건(far-field boundary condition)을 적용하여 계산영역의 한계를 무한의 외기조건을 부여하였다.<sup>10)</sup>

Fig.1에 계산초기의 터널 및 열차의 위치 그리고 주요치수를 표시하였다.

열차의 주행속도는 마하수 0.25(300km/h), 열차의 높이를 특성길이로 계산한  $Re=2.1 \times 10^7$ 에 해당되며 터널 입구에서 15m(열차길이의 0.21 배) 떨어진 곳에서부터 움직이기 시작한다. 터널은 단일 열차용이며 열차의 단면적은  $7.135m^2$ 이고 터널과 열차간의 폐쇄비는 0.12이다. 대기압은 100kPa, 밀도는

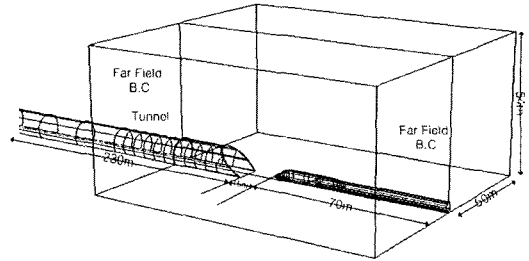


Fig. 1 Initial tunnel imbedding

$1.2kg/m^3$ , 비열비  $\gamma=1.4$ 로 계산하였다.

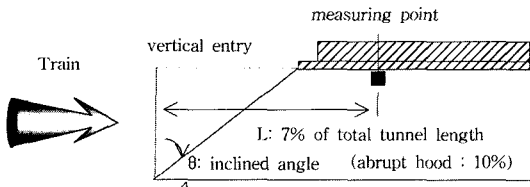
## 2.4 해석모델 및 검증

본 연구에서는 열차의 터널진입 시 충격성 소음 저감 및 승객의 쾌적성 향상을 위해서 Fig. 2와 같은 5가지의 입구형상에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다. Fig. 2(a)는 터널 입구에 터널 단면적과 동일한 경사진 후드를 설치한 경우로 독일과 같은 유럽에서 많이 적용하고 있는 후드이다. 그러나 경사각 변화에 따른 압축파 거동에 대한 연구가 이루어지지 않아 본 연구에서는 경사각  $30^\circ \sim 70^\circ$ 의 범위에서 압축파 및 열차의 공력특성을 해석하였다. Fig. 2(b)는  $1 \times 2m$ 의 7개의 구멍을 터널 천정에 수평으로 설치한 경우이며 Fig. 2(c)는 같은 크기의 구멍을 수직방향으로 배열한 경우이다. Fig. 2(d)는 김<sup>5)</sup>이 1차원적 해석을 통하여 불연속 후드의 최적형상으로 결정한 후드 단면적과 터널단면적 비가 2.5인 경우의 불연속후드를 나타낸 것이다. Fig. 2(e)는 입구에  $31^\circ$ 경사각을 지닌 빗살무늬 후드를 설치한 경우이다.

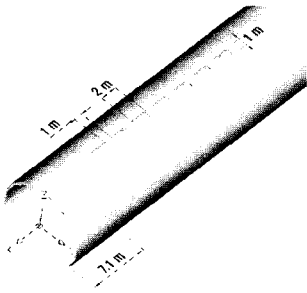
Fig. 3에는 Fig. 2(d)의 불연속 후드의 터널 및 전철의 격자구조를 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 급격한 속도 및 압력구배가 형성될 것으로 예상되어지는 열차 선두부 전면 및 열차 표면주위와 터널 주위에 밀집격자가 형성되어 있으며 이러한 격자분포는 격자 이동 중에도 유지된다.

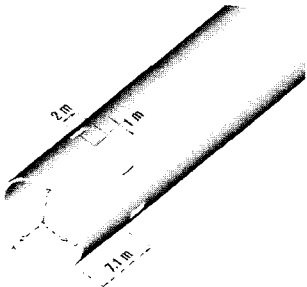
본 연구를 수행하기 전에 본 연구에서 사용된 프로그램 및 수치기법의 예측정확도를 검증하기 위하여 기존의 실험데이터<sup>17)</sup>를 사용하였다. 실험의 목적은 원추형의 선두부를 지닌 발사체가 정지상태에서 106m/s의 속도로 원통으로 진입할 때의 발사체 nose



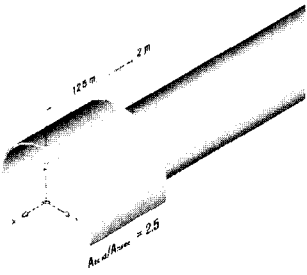
(a) Inclined entry



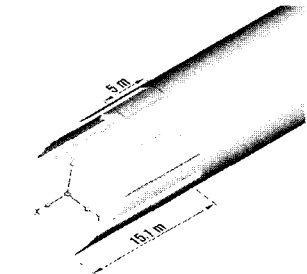
(b) Holes in hood ceiling



(c) Holes in vertical array



(d) Abrupt hood



(e) Comb-like entry

Fig. 2 Tunnel entry shapes studied in this study

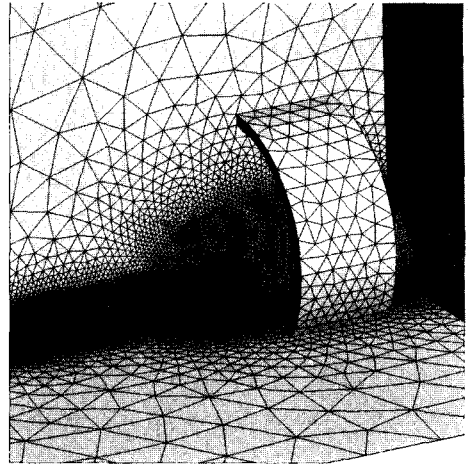
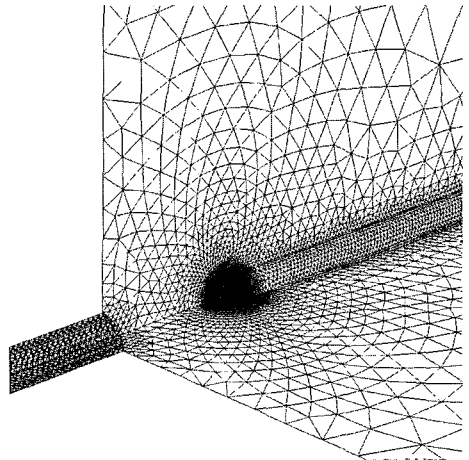
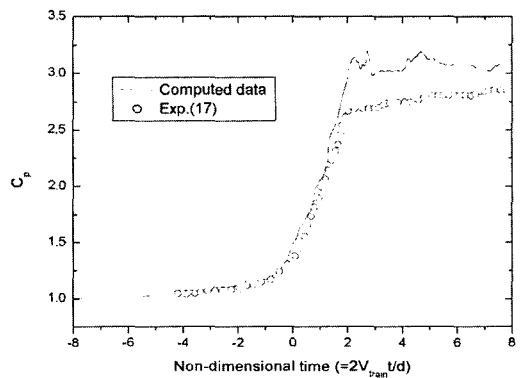


Fig. 3 Computational mesh distribution of abrupt hood



(a) Computational grids



(b) Pressure at nose tip

Fig. 4 Comparison between Experiment<sup>17)</sup> and computational results of pressure at nose tip

끝에서의 압력변화를 조사하는 것이다. Fig. 4(a)에 계산영역의 격자를 나타내었으며 해석결과와 실험 결과와의 비교를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 실험결과가 해석결과보다 매끄러우며 압력과의 상호간섭으로 인한 비정상적 진동이 보이지 않는데 이는 센서의 감응도와 실험결과와의 과도한 여과과정 때문으로 생각되어진다. 이에 반해 수치적 결과는 아무런 여과처리(filtering process)를 하지 않았기 때문에 비정상적 진동현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 해석결과는 터널 진입 시의 물체 표면에서의 압력변동을 정상적으로 잘 나타내 주고 있음을 확인 할 수 있다. 이때  $d$ ,  $V_{train}$ 은 각각 발사체의 직경과 속도를 나타내며  $t_c$ 는 발사체의 시간과 발사체가 터널 입구에 도달한 시간과의 차이를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

실제 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상은 압력과의 파인압력보다도 파면의 형상 즉 파면의 압력구배에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 그러므로 터널 입구에서의 비정상적 압력구배는 충격성 소음을 최소화하기 위한 해석 파라미터 중 가장 중요한 의미를 가진다. 경사진 후두의 경사각 변화에 따른 터널 통과 시 나타나는 터널 입구에서의 비정상적 압력( $C_p = p - p_{atm} / \frac{1}{2} \rho V_{train}^2$ ) 분포 및 압력구배를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 압력구배를 무차원화하기 위하여 아래식과 같은 무차원수,  $K_{gr}$ 을 사용하였으며 터널 내의 측정위치는 전체 터널 길이의 13%에 해당되는 터널 중심축 천정이다.

$$K_{gr} = \frac{dC_p}{dt^*} \quad (4)$$

또한 본 연구에서 사용한 무차원 시간은 아래식과 같다.

$$t^* = \frac{V_{train} \times (t - t_c)}{L_{train}} \quad (5)$$

여기서  $V_{train}$ 은 열차의 주행속도,  $t_c$ 는 전철의 주행 시간,  $t$ 는 열차 전두부가 터널 입구에 도달하는데

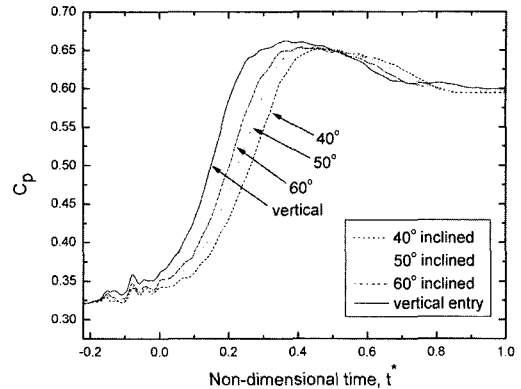


Fig. 5 Non-dimensional compression waves for different inclined hood angles

걸리는 시간 그리고  $L_{train}$ 은 열차의 총 길이이다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 압력계수의 비정상적 변화양상은 전철이 터널로 접근함에 따라 폐쇄효과로 인하여 터널 내의 압력은 급격히 상승하여 압축파가 형성되고 있음을 볼 수 있으며 이후 최고값에 도달한 후 전철이 측정점을 통과함( $t^* \geq 0.42$ )에 따라 공기가 팽창 가속됨으로 인하여 점차 압력이 감소한다. 한편  $t^* > 0.8$  이후에는 일정한 압력을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 압력곡선의 초기에 작은 압력상승을 볼 수 있는데 이는 열차가 진행하는데 따른 압축성효과에 기인한다. 최고  $C_p$ 값을 압력구배가 0이 되는 시간의  $C_p$ 값으로 정의한다면 후드각의 변화에 따른 최고  $C_p$ 값의 변동은 표준편차  $3.81 \times 10^{-2}$  내로 그 변화가 미미하다. 즉 후드각의 변화는 터널 내에서 발생하는 압축파의 파인압력에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

후드 경사각의 변화가 터널 내의 압력구배에 미치는 영향은 Fig. 6으로부터 알 수 있듯이 경사각이 감소할수록 압축파면의 최대압력구배는 감소함을 알 수 있으며 최고 압력구배에 도달하는 시간은 점차 지연되고 있다. 최대압력구배는 경사각이 50°~90° 범위에서 경사각이 감소할수록 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있으며 50° 이하에서는 감소폭이 현저히 감소함을 알 수 있다. 따라서 실제 터널의 높이와 폭을 고려한다면 30°~50°의 경사후드각이 최적값이라고 할 수 있다. 본 연구의 경우, 수직후드의 경우에 비해 30°의 경사각을 가진후드의 경우 최

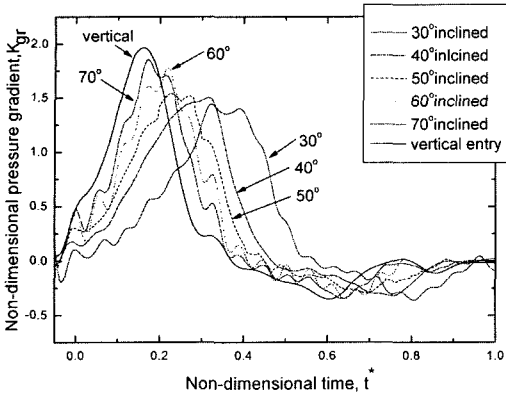


Fig. 6 Non-dimensional pressure gradients for different inclined hood angles

대압력구배를 26.81% 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 터널 내를 전파하여 출구에 도달하는 압축파면의 압력의 시간미분에 비례하므로 이 결과로부터 최적 경사각을 지닌 경사진 후드는 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 상당부분 감소시킬 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있다.

열차가 터널의 고속진입 시에 해결해야 할 중요한 또다른 문제는 개활지에 비해 급격히 상승하는 항력이다. 급격히 증가하는 항력은 연비 및 조정 안정성을 저하시키므로 고정된 터널의 폐쇄비 및 전두부 형상과 주행속도의 경우 후드의 형상변화가 전철 자체의 공력성능에 미치는 영향에 관한 연구가 절실하다고 할 수 있다. Fig. 7에 터널 진입 시 열차가 받는 항력(drag force)계수를 시간에 따라 나타냈으며 열차의 속도와 전두부의 전단면적(frontal cross-sectional area)으로 정규화 하였다. 모든 경우에 있어서 항력은 열차가 터널에 접근하자 급격히 상승하였으며 최대치에 도달한 후 열차의 터널 진입이 계속되자 전두부 전방의 압력이 일정하게 유지되므로 일정한 항력이 유지되고 있다. 수직터널의 경우 터널 진입 전,후의 최대 항력변화는 약 1.1% 정도였다. 그림에서 볼 수 있듯이 후드 경사각이 감소할수록 항력증가율이 둔화되고 있다. 또한 후드 경사각이 최대 항력값에 미치는 영향은 표준편차 0.005 이내로 미미하였다.

Fig. 8에는 Fig. 2에 나타난 다양한 터널입구 형상

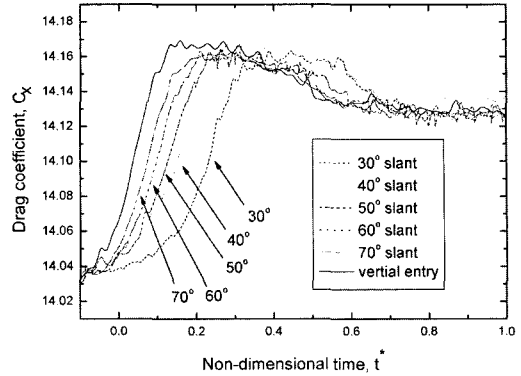


Fig. 7 Temporal variation of drag coefficient for different inclined angles

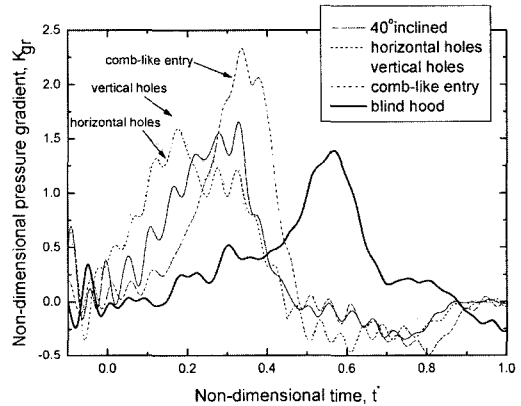


Fig. 8 Non-dimensional pressure gradients for various hood shapes

에 대하여 압력구배 변동을 시간에 대하여 나타낸 것이다. 최대압력구배를 살펴보면 30°의 경사각을 가진후드를 기준으로 불연속 후드의 경우 최대압력구배를 15.94% 감소시킬 수 있었으며 천정에 수평으로 구멍을 배열한 경우는 3.96% 감소시킬 수 있었다. 그러나 구멍을 수직으로 배열한 경우는 최대압력구배가 2.71% 증가하였으며 빗살무늬 후드의 경우는 40%나 증가하였다. 본 결과로부터 충격성소음을 억제하는데 있어서 불연속후드가 가장 효과적임을 알 수 있으며 통기구멍의 위치는 천정 위에 수평으로 배열하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또한 빗살무늬 후드의 경우는 터널입구에서의 압력구배 감소의 효과가 미미함을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 입구후드 형상에 대한 열차의 터널진입 시의 항력변화를 나타낸 것이다. 각 경우에 대한

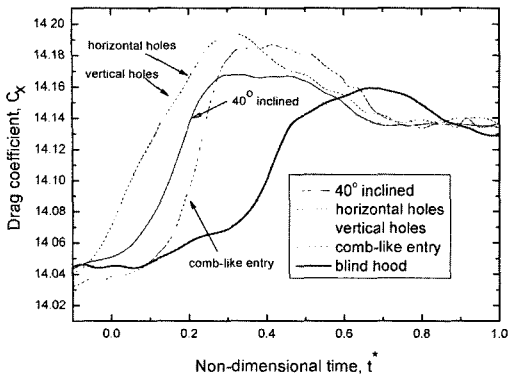


Fig. 9 Temporal variation of drag coefficient for various hood shapes

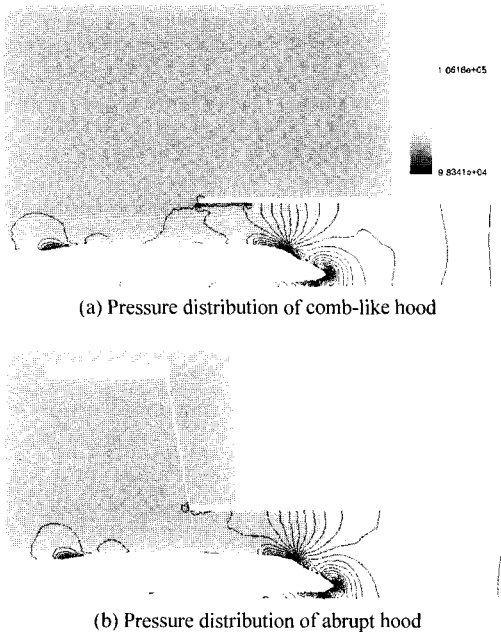


Fig. 10 Pressure(Pa) contours at centerline cross-section

최대항력값은 최대변동폭 0.15%정도이었으며 불연속후드의 경우가 제일 낮았으며 30° 경사진 후드의 경우가 그 다음을 나타내었으며 그 밖의 후드 형상들은 그 차이가 미미하였다. 시간에 따른 항력증가율은 매우 큰 차이를 나타내었는데 불연속후드, 빗살무늬 후드, 30° 경사진후드 순으로 증가하였다.

결국 불연속후드가 열차의 터널진입 시 충격성 소음완화 및 주행안정성 측면에서 제일 우수함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 2(d)에서 볼 수 있듯이 터널 단면 보다 큰 후드틀을 실 설계에 적용하기는 비용 및

시간 측면에서 많은 어려움이 따르므로 경사진 후드의 폐쇄효과 지연방식이 비용 대비 성능이 효과적인 방법이라고 생각되어진다.

Fig. 10은 빗살무늬 후드와 불연속후드의 경우 Fig. 8에서 보인바와 같이 최대압력구배가 발생하는 시점에서의 중앙단면에서의 등압력선도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 터널입구에서의 압력구배가 빗살무늬 후드의 경우가 더욱 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며 압축파의 파면의 압력구배 역시 불연속후드에 비해 크게 나타나고 있다. 이와같이 불연속후드의 터널입구에서의 압력구배와 압축파면의 압력구배가 빗살무늬 후드의 경우보다 작은 것은 터널 입구에서의 두 차례의 압력상승으로 인한 압축파의 긴 파장 때문인 것으로 생각된다.<sup>5)</sup>

#### 4. 결론

본 연구에서는 고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감시킬 목적으로 5가지의 터널 입구형상에 대하여 고속전철이 터널 진입 시 터널입구의 압축파면의 압력구배 및 전철의 공력학적 특성에 미치는 영향을 3차원 유동해석을 통하여 연구하였다. 해석결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 경사각이 있는 후드의 경우 경사각이 작아질수록 터널 입구에서의 최고 압력구배가 낮아졌으며 최적 경사각은 30°~50° 였다. 본 연구의 결과 터널 입구에 후드 경사각을 준 터널은 수직터널 입구에 비해 전철 진입 시 최대압력구배를 최대 26.81% 감소시킬 수 있었다. 그러나 후드의 경사각은 압축파의 과잉압력에는 큰 영향을 미치지 않았다. 후드 경사각이 터널 진입 시 발생하는 전철의 최대항력에 미치는 영향은 미미하였으나 항력증가율을 둔화시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 최대압력구배를 살펴보면 30°의 경사각을 가진 후드를 기준으로 불연속 후드의 경우 최대압력구배를 15.94% 감소시킬 수 있었으며 천정에 수평으로 구멍을 배열한 경우는 3.96% 감소시킬 수 있었다. 그러나 구멍을 수직으로 배열한 경우는 최대압력구배가 2.71% 증가하였으며 빗살무

의 후드의 경우는 40%나 증가하였다. 본 결과로부터 충격성소음을 억제하는데 있어서 불연속 후드가 가장 효과적임을 알 수 있었다.

- 3) 각 입구후드 형상에 대한 열차의 터널진입 시의 최대항력값은 최대변동폭 0.15%정도이었으며 불연속후드의 경우가 제일 낮았으며 30° 경사진 후드의 경우가 그 다음을 나타내었으며 그 밖의 후드 형상들은 그 차이가 미미하였다. 시간에 따른 항력증가율은 매우 큰 차이를 나타내었는데 불연속후드, 빗살무늬 후드, 30° 경사진후드 순으로 증가하였다.

### References

- 1) M. Bellenoue, V. Moriniere and T. Kageyama, "Experimental 3-D Simulation of the Compression Wave, due to Train-tunnel Entry," J. of Fluids and Structures, Vol.16, No.5, pp.581-595, 2002.
- 2) J. K. Mok and J. Yoo, "Numerical Study on High Speed Train and Tunnel Hood Interaction," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.89, pp.17-29, 2001.
- 3) H.-D. Kim, T.-H. Kim, J.-S. Lee and D.-H. Kim, "Characteristics of High-Speed Railway Tunnel Entry Compression Wave," Transactions of the KSME, B, Vol.23, No.2, pp.234-242, 1999.
- 4) L. T. Kisielewicz and A. Tabbal, "Validated computational aerodynamics for trains," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.49, pp.449-458, 1993.
- 5) H.-D. Kim, T.-H. Kim and D.-H. Kim, "Effect of Tunnel Entrance Hood on Entry Compression Wave," Transactions of the KSME, B, Vol.23 No.1, pp.58-68, 1999.
- 6) F. Masbernat, Y. F. Wilffugel and J. C. Duman, "Aerodynamics of the French High Speed Train," GEC ALSTHOM Technical Review No.11, 1993.
- 7) B. Marc, A. Bruno and K. Tadachi, "Blind Hood Effects on the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.25, pp.397-407, 2001.
- 8) C.-H. Shin and W.-G. Park, "Numerical Study of Flow Characteristics of the High Speed Train Entering into a Tunnel," Mechanics Research Communications, Vol.30, pp.287-296, 2003.
- 9) O. Takanobu and F. Kozo, "Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel," Computers & Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585, 1991.
- 10) PAM-FLOW Version Users' Manual, PAM System International S. A., 2002.
- 11) R. Löhner, "Automatic Unstructured Grid Generators," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.25, pp.111-134, 1997.
- 12) R. Löhner, "Vectorized Search Procedures for Interpolation on Unstructure Grids," J. Comp. Physics, Vol.96, No.1, pp.1-12, 1995.
- 13) H. Luo, J. D. Baum and R. Löhner, "Edge-based Finite Element Scheme for the Euler Equations," AIAA Journal, Vol.32, No.6, pp.1183-1190, 1994.
- 14) P. L. Roe, "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," J. Comp. Phys., Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 15) H.-D. Kim and T. Setoguchi, "Numerical Study of Compression Waves Propagating Through Porous Walls," Transactions of the KSME, B, Vol.21, No.11, pp.1403-1412, 1997.
- 16) W. Khier, F. Breuer and F. Durst, "Flow Structure around Trains under Side Wind Conditions: a Numerical Study," Computers & Fluids, Vol.29, pp.179-195, 2000.
- 17) M. C. Swarden, "Vehicle Tunnel Entry at Subsonic Speeds," MIT Report, 1973.