

터널진입시 비정상 유동특성이 고속전철의 공력성능에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

정수진* · 김태훈** · 성기안***

Numerical study on the effect of three-dimensional unsteady tunnel entry flow characteristics on the aerodynamic performance of high-speed train

S-J Jeong* · T-H Kim** · K-A Sung***

Key words : High Speed train (고속전철), Compressible Flow(압축성 유동), Aerodynamic Simulation(공력 해석)

Abstract

The three-dimensional unsteady compressible Euler equation solver with ALE, CFD code, PAM-FLOW based on FEM method has been applied to analyze the flow field around the high speed train which is entering into a channel. From the present study, the pressure and flow transients were calculated and analyzed. The generation of compression wave was observed ahead of train and the high pressure in the gap between the train and the tunnel was also found due to the blockage effects. It was found that abrupt fluctuation in pressure exists in the region from train nose to shoulder of train corresponding to 10% of total length of train during tunnel entry. Computed time history of aerodynamic forces of train during tunnel entry show that drag coefficient rapidly rises and saturates at about non-dimensional time 0.31. The total increase of drag coefficient before and after tunnel entry is about 1.1%. Transient profile of lift force shows similar pattern to drag coefficient except abrupt drop after saturation and lift force in the tunnel increases 0.08% more than that before tunnel entry.

1. 서 론

최근에 최고속도가 마하 0.25에서 0.3에 달하는 초고속도로 운행되는 고속전철이 일부 국가

에서 운행되어지고 있다. 한국에서 운행될 TGV형 경부 고속전철의 속도는 시속 300km이며 그리고 이후의 다른 노선은 그 이상에서의 운행이 예상되는데 이 속도는 음속의 25% 이상

* 동해대학교 자동차공학과
** 마산대학 기계자동차계열
*** 강원전문대학 기계과

에 해당하는 속도로 이 경우 고속으로 인한 공기역학적인 문제점들이 대두되게 된다. 특히 한국형 차세대 고속열차의 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. 이러한 고속전철의 공기역학적인 기술은 철도 선진국들이 자국의 경쟁력을 유지하기 위해 외국으로의 유출을 기피하는 추세이므로 독자적인 기술을 보유하기 위하여 기술개발이 불가피하다. 터널 내에 열차가 돌입하게 되면, 열차의 피스톤 효과로 인하여 터널입구 부근의 공기가 압축되어 압축파가 형성된다. 이러한 압축파는 터널 출구를 향해 전파되게 되며 터널의 출구에서는 팽창파로서 반사하게 된다. 이 경우에는 압축파는 완전반사하지 않고 그의 일부는 미기압파(impulsive wave)로 불리는 펄스형태의 압력파로 되어 터널의 외부로 전파하게 된다. 이 때 발생하는 충격성 소음(impulsive noise)은 선로의 주변 환경에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 압력파의 진행속도는 음속이며 터널 내를 진행하는 열차의 속도는 음속의 1/3에서 1/4에 해당하므로 터널 내부에 터널 출구로부터 반사된 팽창파와 입구로부터의 팽창파가 만나게 된다. 이때 두 팽창파의 중첩에 의해서 극심한 압력 변화가 터널 내부에 발생하게 되며 열차에 탑승한 승객은 심각한 청각 장애를 받게 된다. 따라서 열차 및 터널 계에서 발생하는 파동현상에 관한 해명은 매우 중요한 공학적인 과제임에 틀림없다. 터널 내를 주행하는 열차의 공기역학적인 문제들은 열차의 고속화와 관련되어 상당히 많은 기술적인 문제들을 내포하고 있다. 최근에 이러한 기술적인 문제들을 극복하기 위하여 많은 연구가 국내외적으로 연구되어지고 있다.⁽¹⁻⁵⁾⁽⁸⁾ 그 결과 터널 내에서 발생하게 되는 압력변동이나 터널출구에서 발생하는 충격성 소음은 모두 터널 내를 전파하는 압축파의 특성과 밀접하게 관련되어 있으며 특히 터널 입구에서 압력구배에 직접적인 연관이 있다. 따

라서 현재까지 수행된 대부분의 연구들은 터널 내의 압축파의 거동을 이해하고 이를 적절히 제어함으로써 압력변동이나 충격성 소음의 경감을 도모하기 위한 것이었다.⁽⁴⁾ 지금까지 이와 관련되어 수행된 연구결과는 2가지 범주로 분류할 수 있는데 첫 번째는 고속전철의 전두부 형상 및 터널의 입구형상⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾을 최적화시킴으로써 압축파의 발생과정에 수정을 가하여 터널에서의 압력상승 시간을 늘이는 방법이며 두 번째는 터널 입구에 후드를 설치하여 터널 내 압축파 전파시 파면(wave front)의 형상을 변화시키는 방법이다.⁽⁵⁾⁽⁷⁾ 그러나 이러한 연구들은 대부분 특성곡선법을 이용한 일차원 해석에 의존하였거나 축소된 모형 터널을 이용한 실험적 연구가 대부분이어서 실질적인 전두부 및 터널 입구의 3차원형상이 터널 입구 내의 압력강하의 정도나 압력구배등에 대한 정보는 얻을 수 없었다.

한편 최근에 발전이 두드러진 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics: CFD)기법은 난류모델 등의 문제점은 있지만 이동경계의 처리가 가능하여 고속전철에의 적용에 몇가지 유리한 점이 있다. 따라서 90년대 후반들어 국, 내외적으로 터널 입구 형상이나 전두부 형상이 터널 내의 압력과 거동에 미치는 영향에 대해 연구가 수행되어져 왔다.⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 특히 고속전철이 터널 내를 주행시 미기압파로 인한 실외소음 뿐만 아니라 고속전철 표면에서 발생하는 난류경계층, 유동박리 등에 의해 유체압력 변동이 차체벽에 작용하여 발생하는 실내 공력소음 역시 승객의 쾌적성 측면에서 매우 중요한 설계인자이다. 또한 300km/h 이상의 주행속도에서는 100Hz 이하에서 공력소음이 실내소음을 지배하므로 터널 주행 중 발생하는 고속전철 표면에서 발생하는 유동특성 및 공력성능의 세밀한 연구가 필요하다. 그러나 기존의 연구는 대부분 터널 내에서 발생하는 압력파 거동해석에 그 초점이 맞추어져 있었다. 이는 특성곡선법을 사용한 1차원적 해석에서는 차체표면에서 일어나는 3차원적인 복잡한 유동해석이 불가능하고 풍동실험 역시 빠른 속도로 움직이는 차체표면의 압력 및 속도를 계측하기에 어려움이 많기 때문이다.

그러나 이러한 개활지로 부터의 터널 돌입, 교차 시의 공력성능에 관한 CFD 해석은 움직임 격자를 써야하며 터널 주행 시의 급격한 속도 및 압력변화로 인한 수치적 안정성 문제로 인하여 현재로서는 쉽지 않은 과제이나 점차 효과적인 해석 및 설계 도구로서 이용되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널 주행 중 일어나는 고속전철의 공력성능 및 차체의 각 부위가 겪는 비정상적 유동특성을 분석하기 위하여 현재 한국형 고속철도와 유사한 터널 입구 후드형상을 지닌 터널과 TGV-K와 유사한 전두부 형상을 지닌 모델을 대상으로 유한요소법을 사용하여 3차원 압축성 유동해석을 수행하였으며 해석된 결과는 향후 고속전철의 전두부 형상의 최적화에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 터널 내의 유동을 3차원 압축성유동으로 고려하였다. 압축성 Euler 방정식을 ALE(Arbitrary Lagrangian- Eulerian)의 기준 프레임으로 고려한다면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$u_{,t} + \nabla \cdot (F^a - F^v) = -u \nabla \cdot w + s \quad (1)$$

여기서

$$u = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_i \\ \rho e \end{pmatrix}, F_j^a = \begin{pmatrix} (v_j - w_j)\rho \\ (v_j - w_j)\rho v_i + p\delta_{ij} \\ (v_j - w_j)\rho e + v_j p \end{pmatrix}, F_j^v = \begin{pmatrix} 0 \\ \delta_{ij} \\ v_i \sigma_{ij} + kT_{,j} \end{pmatrix}$$

이고,

$\rho, P, T, k, e, v_i, w_i, \sigma_{ij}$ 는 각각 밀도, 압력, 온도, 열전도 계수, 총합에너지, x_i 방향에서의 유체 및 이동격자 속도 그리고 점성응력텐서를 의미하며 생성항인 s 는 중력 및 원심력과 같은 외력을 의미한다.

본 연구에서는 점성 플럭스항인 F^v 항을 무시하여($F_j^v=0$) 압축성 오일러 방정식(compressible Euler equation)으로 해석하였다. 본 계산에서 작

용한 유체는 완전가스로서 비열비 γ 에 의하여 유체의 성질을 표현할 수 있으며 그 상태방정식은 아래와 같다.

$$p = (\gamma - 1)\rho [e - \frac{1}{2} v_j v_j], T = 1/c_v [e - \frac{1}{2} v_j v_j] \quad (2)$$

유체와 물체로 이루어진 계산영역에서의 비정상 문제를 계산하기 위해서는 물체 주위의 일부 격자가 상대적으로 움직이도록 해야 한다. 즉 상대좌표계와 절대좌표계의 조합이 수치적으로 이루어져야 하며 이를 위하여 본 연구에서는 ALE 좌표를 사용하였다. 식(1)에 표현된 지배방정식의 공간 차분에는 유한요소법을 사용하였으며 비점성 플럭스 계산에는 Roe의 플럭스 차이 분할기법⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 공간 차분 정확도를 높이는 방법으로 유동변수를 외삽 하는 Van Albada 제한자⁽¹⁵⁾를 사용하였다. 시간 적분법으로는 Runge-Kutta 명시적(explicit) 시간 적분법⁽⁹⁾을 사용하였으며 CFL=0.25으로 계산하였다.

위와 같은 계산을 위해서 본 연구에서는 상용 열유체프로그램인 PAM-FLOW⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

2.2 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 방출 조건(far-field boundary condition)을 적용하여 계산영역의 한계를 무한의 외기조건으로 아래와 같이 정의하였다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} v_t &= v_t^* ; p = p_\infty \\ \rho &= \rho_* + (p_\infty - p_*)/c^2 \\ v_n &= v_n^* + (p_\infty - p_*)/(\rho c) \end{aligned} \quad (3)$$

하첨자 t, n 은 각각 점선방향과 수직방향을 나타내며, c 는 음속, 그리고 $*$ 는 예측단계 값을 의미한다.

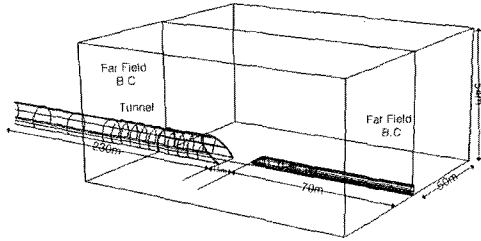


Fig.1 Initial tunnel imbedding.

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

열차의 주행속도는 마하수 0.25(300km/h), $Re=2.1 \times 10^7$ 이며 터널 입구에서 15m(열차길이의 0.21배) 떨어진 곳에서부터 움직이기 시작한다. 터널은 단일 열차용이며 열차의 단면적은 $7.135m^2$ 이고 종횡비(L/H)는 26.73이고 터널과 열차간의 폐쇄비는 0.12이다. 대기압은 100kPa, 밀도는 $1.2kg/m^3$, 비열비 $\gamma=1.4$ 로 계산하였다.

2.3 계산 과정

터널 문제를 계산하기 위해서는 우선 CAD 데이터 받아서 해석 코드의 전처리장치에 로딩시킨 후 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 체적유한요소격자(volumetric finite element mesh)를 형성하기 위하여 Front-Advancing scheme⁽¹¹⁾을 사용하였다. 격자크기와 분포를 제어하기 위해서 소스라인(source line) 격자제어를 적절하게 사용하였다. 초기의 계산영역에 대하여 격자를 생성시킬 때 백그라운드 격자제어(background grid control)를 사용하여 격자의 크기 및 분포를 지정할 수 있으며, 특히 소스라인을 이동물체로 지정하면 움직이는 물체 주위에 일정한 격자의 분포를 얻을 수 있다. 본 연구의 비정상 고속전철 터널 유동해석에 사용된 격자수는 총 716,699개이다. Fig.2에 비정상적 격자 재배열에 의한 격자분포를 시간대별로 나타내었다. 이 그림으로부터 터널 내를 통과하는 열차 및 터널 주위에 형성되어진 격자를 볼

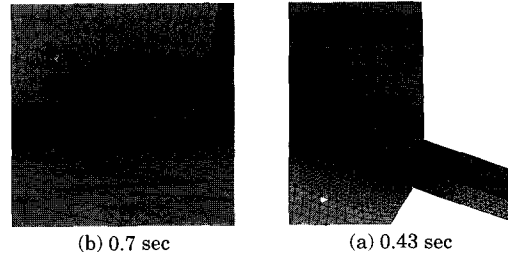


Fig.2 Computational mesh distribution in the whole domain by transient re-meshing.

수 있다. 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 이동중에도 유지되어지고 있다.

본 연구에서는 격자생성이 끝난 후 열차속도에 해당하는 유동장 내에서의 열차에 대한 3차원 정상해를 구하였다. 이러한 정상상태 계산을 통하여 정상해 영역 내에 터널 위치가 열차 주위에 유동에 영향을 받지 않도록 터널과 열차와의 거리를 적절히 조절한다. 이후 계산 영역에 대한 격자를 다시 생성시켜 열차와 터널을 포함하는 전체 영역에 대하여 격자를 형성한 다음 비정상해를 구하여 나간다. 열차의 이동현상을 모사하기 위하여 ALE방법을 사용하였다. 이때 이동하는 물체 주위에는 격자 뒤틀림(grid distortion)이 일어나는데 이러한 격자는 각 시간단계 마다 검사하여 제거한 후 이 영역을 백그라운드 격자를 사용하여 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 열차속도에 해당하는 속도로 열차를 향하여 상대 이동시킨다⁽¹²⁾

격자의 재생성 후에 미지값들은 Löwner⁽¹²⁾의 최적보간법을 이용하여 새로운 격자와 전 단계의 격자 사이의 보간에 의하여 결정되어진다. Fig.3에 비정상 상태 계산에서의 열차의 시간대 따른 이동거리(m) 및 주행속도(m/s)를 나타내었다.

본 연구의 계산은 HP 700 workstation에서 수

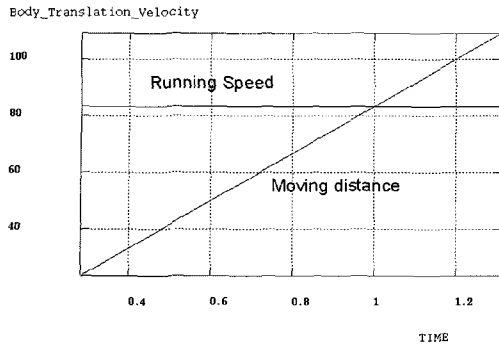


Fig.3 Temporal moving distance and running speed of train

행되어 개활지 정상상태 계산은 12시간 30분 15초가 소요되었으며 비정상 터널주행 해석에는 99시간 2분 31초가 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구를 수행하기 전에 본 연구에서 사용된 프로그램 및 수치기법의 예측정확도를 검증하기 위하여 기존의 실험데이터⁽¹⁷⁾를 사용하였다. 실험의 목적은 Fig.4에 나타난 것과 같이 원추형의 전두부를 지닌 발사체가 정지상태에서 106m/s의 속도로 원통으로 진입할 때의 발사체 nose 끝에서의 압력변화를 조사하는 것이다. 이를 수치적으로 모사하기 위하여 모델의 대칭성을 고려하여 Fig.5와 같이 격자를 형성하였다. 해석방법은 앞에서 설명한 바와 동일하다.

해석결과와 실험결과와의 비교를 Fig.6에 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 실험결과와 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 정성적으로 잘 나타내 주고 있음을 확인할 수 있다. 이때 d , V_{train} 은 각각 발사체의 직경과 속도를 나타내며 t 는 발사체의 시간

과 발사체가 터널 입구에 도달한 시간과의 차이를 나타낸다.

본 연구에서는 이러한 검증된 프로그램 및 수치해법을 사용하여 열차의 터널 진입시 발생하는 고속전철 주변의 여러 가지 유체역학적 비정상 터널 공력 특성을 연구하였으며 이와 같은 실질적 3차원 해석으로부터 터널 진입 시 발생하는 차체주위의 압력 변동 및 미기압과 강도에 직결되는 압축과 압력구배를 해석하였다. 터널 내를 주행시 발생하는 열차 주위의 속도분포를 나타내기 위하여 Fig.7에 0.7, 0.95sec 에서의 열차 및 터널 벽에서의 속도벡터 및 분포선을 나타내었다.

그림으로부터 열차의 전두부 상단에서 유동이 정체된 후 전두부 상부와 skirt 아래쪽으로 빠르게 가속되어 흐르고 있다. 전두부 상부쪽으로 가속된 유동은 방풍유리(windshield)를 타고 흐르며 전두부 shoulder에서 빠르게 가속 팽창되어 열차의 천정부위를 타고 흐르고 있음을 알 수 있다. 또한 전

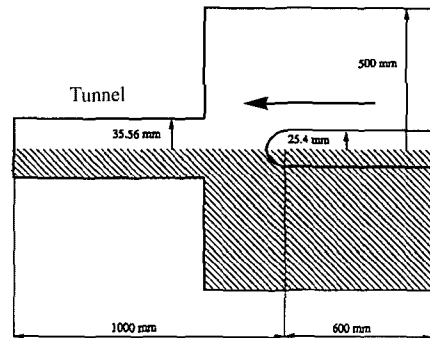


Fig.4 Train entering tunnel experiment[17].

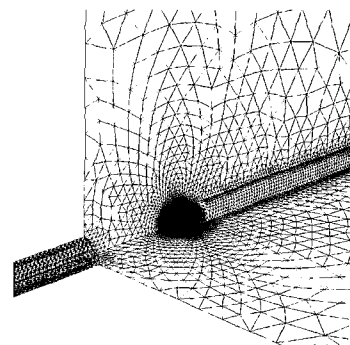


Fig.5 Computational grid for 3D train-tunnel validation simulation.

두부 상면의 흐름이 전두부 모서리를 돌아 측면으로 가속되어 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 터널을 주행 중 열차 전두부 전면에서 경사진 속도 불연속면을 발견할 수 있으며 이는 열차의 전두부의 형상, 열차와 터널간의 폐쇄비, 주행속도에 영향을 받는다.

Fig.8는 대칭면에서의 등압력선도를 각 진행 시간대별로 도시하였으며 열차의 전두부 선단이 정지된 상태에서 터널의 입구까지 도달하는 시간은 0.46sec이다. 고속전철이 터널에 진입할 때의 유동변화를 살펴보면, 전철이 터널 입구 근처에서 터널

내부를 향하여 진행함에 따라 전철 전방의 압력이 서서히 증가되고 있으며 열차가 터널에 진입할 때 주행 방향과 반대방향으로 터널 내부의 유체가 밖으로 빠른 속도로 빠져나가고 있음을 Fig.8(a)에 보여지고 있다. 전철이 터널의 입구에 도착하면 (Fig.8(b)) 유사피스톤 현상에 의하여 전철 전두부 상의 정체점 주위 압력의 급격한 상승이 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 열차의 항력에 급격한 증가의 원인으로 작용하며 열차의 전방에 1차원 평면과 형태의 압축파를 발생시키고 있음을 볼 수 있다. 또한 열차와 터널간의 폐쇄효과로 인하여 열차의 방풍유리 상단부에서 전두부 shoulder 사이의 영역과 터널의 벽면사이에는 매우 조밀한 압력구배가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 그리고 열차가 점차 터널 깊숙이 진입하면서 열차 전방에 압축파가 상류로 전파되고 있음을 알 수 있다. 이 압축파는 터널 출구면에서 반사되어 팽창파로 반사되어 열차의 선두부를 향해 움직이게 되고 이러한 팽창파가 후미부에서 발생하는 팽창파와 열차의 선두부에서 중첩하게 될 때 항력은 급상승하게 되며 이러한 압축파의 거동이 차량의 내,외부의 압력변동을 심하게 변동시켜 이명현상등을 유발하므로 승객의 쾌적성은 저하된다. 따라서 설계시 이러한 터널 내의 압력파의 거동 해석은 매우 중요하다. Fig.8(c),(d)에서 볼 수 있는 것처럼 열차의 점진적인 진입이 계속되는 동안 전두부 주위의 압력분포는 그대로 유지되고 있으며 특히 열차의 전두부 표면과 터널 벽면 사이에는 매우 급격한 압력변화가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경우 횡단면 속도성분이 증가하므로 전두부 주위의 열차표면에는 압력파 거동에 의한 공력소음이 발생하게 된다. Fig.8(d)에서 볼 수 있듯이 열차 천정 후미부의 오목한 부위가 터널을 통과할 때 터널 벽과의 상호 폐쇄작용으로 인하여 또 다른 조밀 압력구배 영역이 형성되고 있음을 볼 수 있다.

Fig.9은 열차가 터널 내에 진입하는 순간 전두부 표면에 분포하는 압력분포와 같은 주행속도로 개활지를 운행할 경우의 압력분포를 나타내었다. 정체점의 위치나 shoulder에서의 가속영역, 그리고 전두부 상면에서 측면으로의 가속으로 인한 큰 압력구배의 발생위치는 크게 다르지 않으나 터널 내

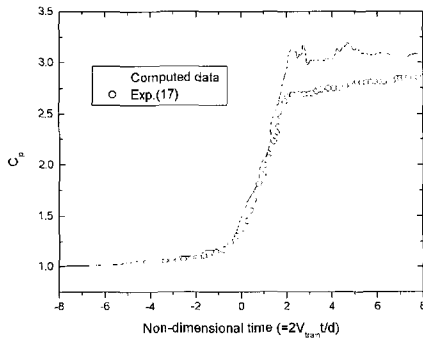


Fig.6 Comparison between experiment[17] and Computational results of pressure at nose tip.

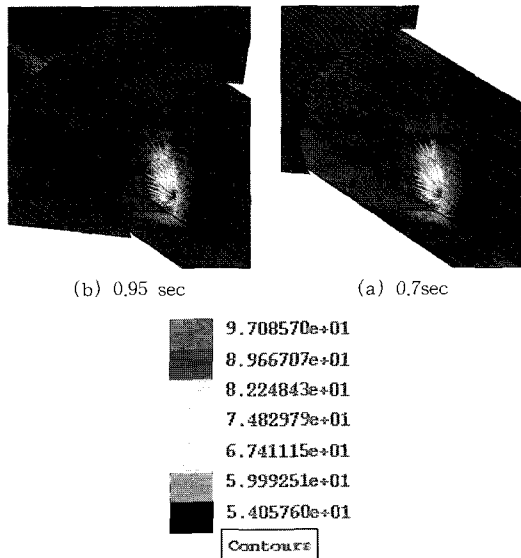


Fig.7 Instantaneous velocity vectors and contours generated during tunnel entry.

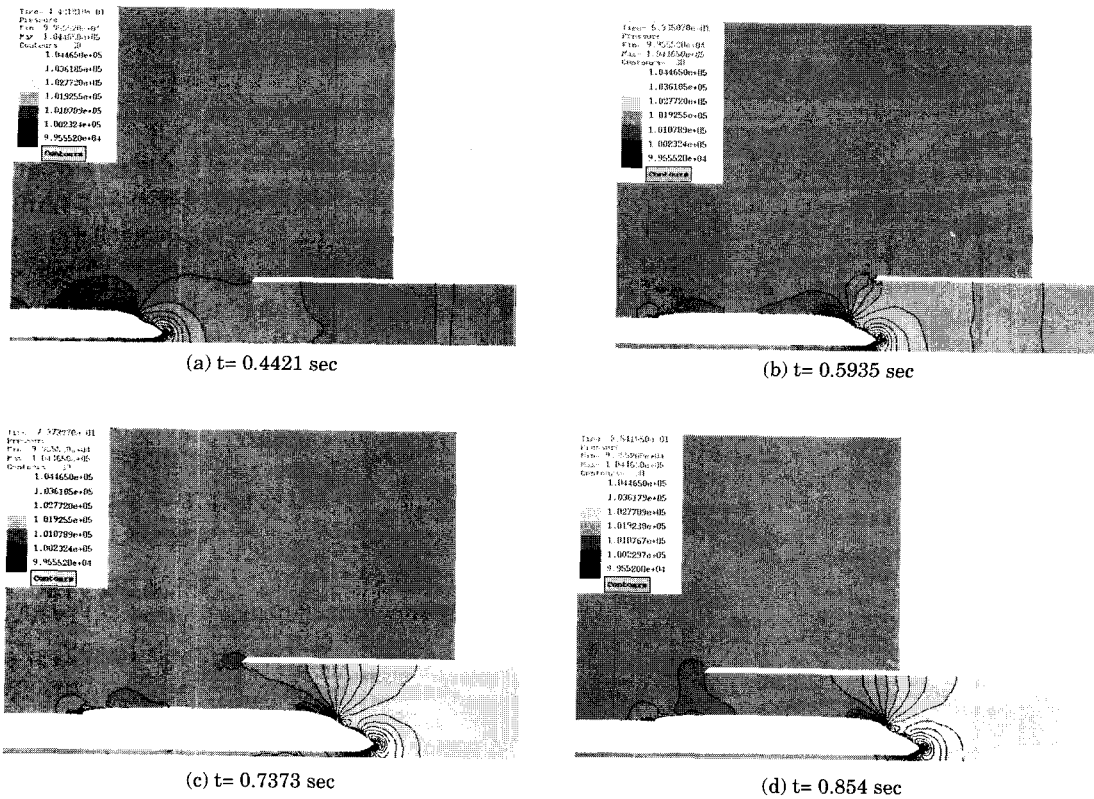


Fig.8 Temporal variation of instantaneous pressure(Pa) contour generated during tunnel entry.

에 진입하는 경우는 터널벽면과 전두부 사이의 폐쇄효과로 인하여 개활지 주행의 경우에 비하여 shoulder 모서리로부터 천정 하류로의 압력구배와 전두부 상면부모서리에서 측면으로의 압력구배가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 터널 진입 시 열차 표면의 압력은 개활지의 경우보다 전두부 선단에서 최고 2223Pa 정도 상승함을 알 수 있다.

Fig.10은 열차표면의 상부 대칭면 중 9개의 위치에서의 터널 진입시의 압력변화를 시간에 따른 압력계수($c_p = p-p_0 / \frac{1}{2} \rho u^2$)로 나타내었다. 여기서 p_0 는 대기압이며 u 는 열차의 주행속도이다. 우선 열차의 유사 피스톤 효과로 인하여 열차가 진입함에 따라 점차적으로 압력이 상승하며 최고치에 도달한 후 일정한 값을 유지하고 있다. 최고값에 도달하는 시간은 대략 아래식으로 계산된 무차원 시간으로 0.282 정도이다.

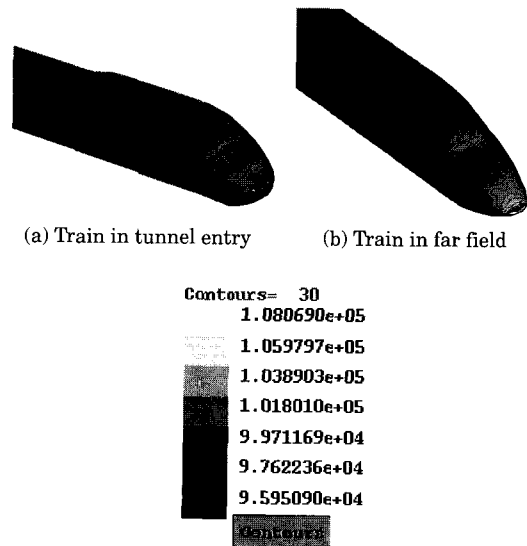
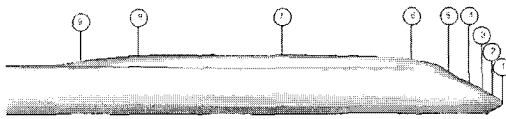


Fig.9 Comparison of pressure(Pa) distribution on the surface of train in tunnel entry and far field.

$$t^* = \frac{V_{train} \times (t_{max} - t_c)}{L_{train}} \quad (4)$$

여기서 V_{train} 은 열차의 주행속도, t_{max} 는 최고압력에 도달하는데 걸리는 시간, t_c 는 열차 전두부가 터널 입구에 도달하는데 걸리는 시간 그리고 L_{train} 은 열차의 총 길이이다.

열차가 터널에 진입시 가장 급격한 압력변화를 겪는 것은 정체압이 걸리는 전두부의 nose 부분이



P1=0.0, P2=0.0025, P3=0.0096, P4=0.025, P5=0.056, P6=0.1
P7=0.286, P8=0.37, P9=0.42

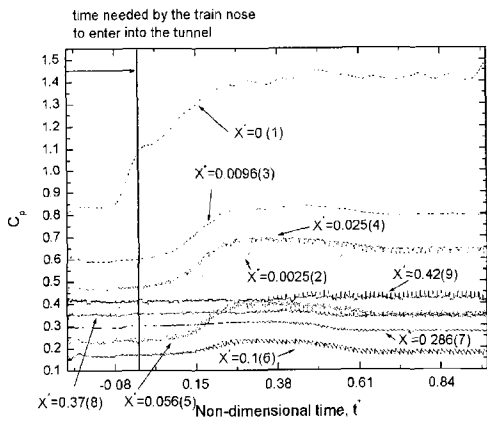


Fig.10 Temporal variations of C_p on the upper centerline of train surface.

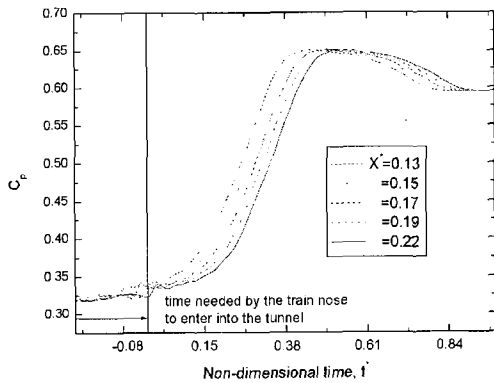


Fig.11 Temporal variations of C_p on the upper centerline of tunnel wall.

다. 이후 상면부의 볼록한 위치까지 급격한 압력변화를 받는데 p2의 위치보다 p3의 위치에서 보다 높은 압력값이 존재하는 것은 이 상면부 볼록한 위치에서 유체가 감속되기 때문이고 2번 위치에서는 nose에서 정체된 후 급격하게 유체가 팽창 가속되기 때문이다. 이후 유체는 다시 가속되며(3번위치) 방풍유리 하단부의 볼록한 영역에 도달해서 유체는 급격하게 감속된다(4번위치). 이후 유체는 방풍유리에서 shoulder 모서리(6번)까지 가속된다. 여기서 볼 수 있듯이 압력과의 파면은 열차가 일정한 속도로 진입하는 경우 열차의 선두부 형상 및 터널의 입구형상에 좌우된다. 따라서 고정도 CFD해석을 통하여 압력과의 적정 기울기를 찾아내는 것이 매우 중요하다. 이후 전철의 점진적인 진입이 계속되는 동안 전철 전두부 전방($X^* < 0.1$)의 압력은 상승된 채로 계속 유지되고 $X^* = 0.1$ 이후 영역의 열차 표면 상부 압력은 내부유동의 팽창으로 인하여 열차의 터널 진입에 따른 영향을 거의 받지 않고 일정한 값을 유지하고 있으며 열차 천정과 터널벽면과의 폐쇄효과로 하류로 갈수록 점차 압력이 상승하고 있다. 여기서 무차원 거리 X^* 는 아래식으로 정의된다.

$$X^* = (x - x_0) / L \quad (5)$$

여기서 X_0 는 전두부 nose의 축방향 위치, L 은 열차의 전체길이이다.

이 결과로부터 주목할 점은 터널 내로 진입시 열

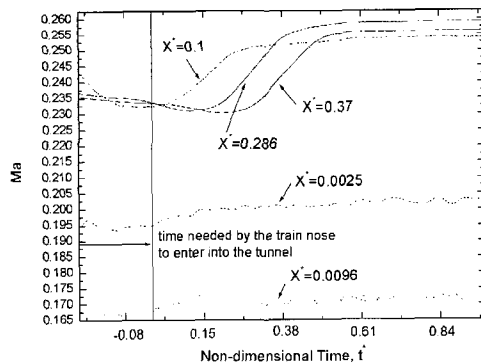


Fig.12 Temporal variation of Mach number on the side surface of train.

차 표면의 압력상승이 존재하는 영역은 nose에서부터 전두부의 shoulder 위쪽 모서리까지의 영역(본 연구의 경우 전체길이의 10%)이라는 점이다.

Fig.11은 터널입구에서부터 $X^*=0.13, 0.15, 0.17, 0.19, 0.22$ 떨어진 위치에 있는 터널 대칭면 상면에서의 비정상 압력거동을 나타내었다. 무차원 거리 X^* 는 식(4)를 이용하였으며 이때 L은 전체 터널이며 X_0 는 터널입구의 축방향 위치이다. 결과에서 보듯이 상하면에서의 압력분포는 거의 유사한 양상을 보이고 있으며 열차가 터널에 접근할수록 터널의 압력이 상승하여 최고치($C_p=0.63$)에 도달한 후 열차의 shoulder가 측정점을 지나가면서 앞서 설명한대로 shoulder의 낮은 압력으로 인하여 압력이 강하하다가 무차원시간 $t^*=0.91$ 이상에서는 동일한 압력이 유지된다.

Fig.12은 지면에서 0.286m 높이의 고속전철 측

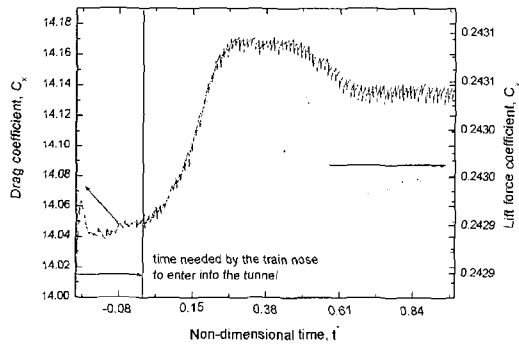


Fig.13 Temporal variation of drag and lift forces.

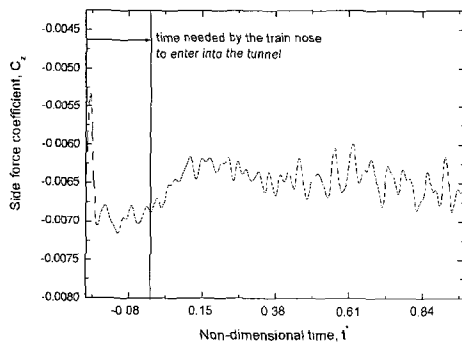


Fig.14 Temporal variation of side force

면에서의 속도분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 전두부 nose 영역에서는 유선형 설계로 인하여 폐쇄효과로 인한 유체의 압축이 미미하여 터널에 진입 시의 속도변동이 미미하나 shoulder 하류쪽에서는 전철이 터널에 접근하며 속도가 감소하나 터널 진입 후에는 피스톤 효과로 인하여 열차 측면의 속도가 회복되고 있음을 알 수 있으며 이후 압축파와 팽창파의 상호 간섭으로 미소한 속도의 변동이 지속되고 있음을 알 수 있다.

Fig.13과 Fig.14는 터널 진입 시 열차가 받는 항력(drag force), 양력(lift force) 및 측력(side force) 계수를 시간에 따라 나타냈으며 열차의 속도와 전두부의 전단면적(frontal cross-sectional area)으로 정규화 하였다. 항력은 열차가 터널에 접근하자 급격히 상승하였으며 무차원 시간 $t^*=0.31$ 에서 최대치를 나타냈다. 이후 열차의 터널 진입이 계속되자 전두부 전방의 압력이 일정하게 유지되므로 일정한 항력이 유지되고 있다. 터널 진입 전,후의 최대 항력변화는 약 1.1%정도였다. 양력의 경우도 항력 비슷한 양상을 보이나 터널 진입 후 최대값에 도달한 후 급격히 떨어지며 1.0sec 이후에 정상상태를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 양력의 경우 터널 진입 전, 후의 최대 변화는 0.08% 정도였다. 측력은 열차가 터널을 통과한 직후에 증가한후 미소변동을 유지하고 있음을 볼 수 있으며 이는 열차가 터널을 통과 시 벽면쪽으로 밀려들어감을 의미하는데 이는 터널 통과 시 열차와 벽면 사이의 압력이 감소하기 때문이다.

4. 결 론

본 논문은 고속전철의 외형설계시 가장 중요한 터널 고속주행시 공기역학적인 문제점을 해결하기 위하여 유한요소법을 사용한 CFD 코드인 PAM-FLOW Version 2000을 이용하여 복잡한 KGV-K 전두부 형상의 고속전철이 터널 통과 시의 비정상 압축성 유동해석을 3차원적으로 수행하였으며 수치해석 정확도를 높이기 위하여 국부격자재생성 방법을 사용하여 격자 움직일 시에도 열차 및 터널 주위에 양질의 격자를 생성하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

전철 전두부에서 발생하는 압축파의 생성 및 터널 외부로의 전파특성을 명백히 규명하였으며 전철의 터널 진입에 따른 전철의 복잡한 형상의 전두부에서 발생하는 압력과 속도분포의 비정상적 변화를 예측하였다. 해석결과 터널 주행 시 전두부 nose에서부터 shoulder의 상측 모서리까지의 영역에서 터널 진입시 급격한 압력변동이 발생함을 알 수 있었으며 이는 본 해석의 경우 전체 열차길이의 10%에 해당한다. 이 영역에서의 비정상 압력 변동이 터널 입구에서 압축파의 압력구배를 결정하므로 이 영역에 대한 최적화가 요구된다. 또한 이 영역에서의 열차표면에서의 압력은 터널 진입시 급격히 상승하며 무차원 시간(t^*)으로 0.282에서 최고값에 도달한다.

터널 주행 중 발생하는 열차의 공기역학적 특성 변화를 해석한 결과, 항력은 열차가 터널에 접근하자 급격히 상승하였고 무차원 시간 $t^*=0.31$ 에서 최대치를 나타내었으며 터널 진입 전,후의 최대 항력변화는 약 1.1%정도였다. 양력의 경우도 항력 비슷한 양상을 보였으며 터널 진입 후 최대값에 도달한 후 급격히 떨어지며 무차원 시간 0.64 이후에 정상상태를 유지하고 있음을 볼 수 있었다. 양력의 경우 터널 진입 전, 후의 최대 변화는 0.08% 정도였다. 측력은 열차가 터널을 통과한 직후에 증가한 후 미소 변동을 유지하고 있음을 볼 수 있었다.

따라서 본 연구에서 해석된 결과는 향후 고속전철의 전두부 형상 최적화에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2001년도 마산대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Matsuo, K., et al., "Emission of a Propagating Compression Wave from an Open End of a Tube," JSME Journal, Vol.58, No.546, pp.331-337,1992.
- (2) 목재균, 백남옥, 유재식, 최윤희, "고속철도의 터널 입구 형상변경에 따른 압력파동 현상에 관한 수치적 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제5권, 제2호, pp.50-59,1997.
- (3) 김희동, 김태호, 이종수, 김동현, "고속철도 터널 입구에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제2호, pp.234-242, 1999.
- (4) Kisielewicz, L.T. and Tabbal, A., "Validated Computational Aerodynamics for Trains," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.49, pp.449-458,1993.
- (5) 김희동, 김태호, 김동현, "입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제1호, pp.58-68, 1999.
- (6) Masbernat, F., Wilffugel, Y. F. and Duman, J. C., "Aerodynamics of the French High Speed Train," GEC ALSTHOM Technical Review No.11,1993.
- (7) Marc, B., Bruno, A. and Tadachi, K., "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) 신창훈, 박원규, "썰기형 전두부를 가진 고속전철의 터널진입에 의한 유동변화 해석," 한국항공우주학회지, Vol.28, No.5, pp.99-105,2000.
- (9) Takanobu, O. and Kozo, F., "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 2000 Users' Manual, PAM System International S. A.,1999.
- (11) rm L ddoto hner, R., "Automatic Unstructured Grid Generators," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.25, pp.111-134,1997.
- (12) rm L ddoto hner, R., "Vectorized Search Procedures for Interpolation on Unstructure Grids," J. Comp. Physics, Vol.96, No.1, pp.1-12, 1995.
- (13) Luo, H., Baum, J. D., and rm L ddoto hner, R., "Edge-Based Finite Element Scheme for the Euler Equations," AIAA Journal, Vol.32, No.6, pp.1183-1190, 1994.
- (14) Roe, P. L., "Approximate Rieman Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," J.

Comp. Phys., Vol.43, pp.357-372, 1981.

- (15) 최성욱, 김인선, "CHIMERA 격자기법을 이용한 고속전철 주위의 전산유동해석," 한국전산유체공학회지, 제1권, 제1호, pp.81-87, 1996.
- (16) 황재호, 이민섭, 이동호, 김종암, "실험적, 수치적 방법을 이용한 고속전철 주변의 유동장 연구," 한국항공우주학회지, 제28권, 제7호, pp.32-39, 2000.
- (17) Swarden, M. C., "Vehicle Tunnel Entry at Subsonic Speeds," MIT Report, 1973.

저 자 소 개



정수진 (丁守鎭)

1965년 2월 28일생. 1991년 인하대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1993년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 2001년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1993.8 - 1997.3 쌍용자동차 중앙연구소 차량연구개발실 주임연구원. 1994.2 - 1994.8 한국과학기술원(KIST) 객원 연구원. 1998.6 - 현재 한국 ESI(주) 선임연구원. 2001.3 - 현재 동해대학교 자동차공학과 교수. 당학회 회원.



김태훈 (金台勳)

1962년 11월 8일생. 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1988년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1995년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 2001년 차량기술사. 1994년 ~ 현재 마산대학 기계자동차계열 부교수. 당학회 회원.



성기안 (成禧安)

1965년 8월 25일생. 1988년 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1990년 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학석사). 2001년 한양대학교 대학원 기계공학과 박사수료. 1990.1~1999.2 현대자동차 남양연구소 차량개발팀 과장. 1996.8~1997.8 MIT 기계공학과 객원연구원. 1999.3 ~ 현재 도립 강원전문대학 기계과 조교수.