

## 진공튜브 내 초고속열차의 공기저항 파라메타 연구 - 1

### Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube - Part 1

권혁빈<sup>†</sup> · 강부병\* · 김병윤\*\* · 이두환\*\*\* · 정연주\*\*\*\*

Hyeok-bin Kwon · Bu-byoung Kang · Byeong-Yun Kim · Du-hwan Lee · Hyun-Ju Jung

**Abstract** This study is devoted to understand the basic characteristics of the flowfield around a train in evacuated tube and to suggest an efficient numerical method to calculate the flowfield. To get steady-state solution in minimum calculation domain, various boundary condition have been tried for steady calculation and have been compared to the solution of unsteady calculation. At the train velocity of 300km/h, the aerodynamic drag results of both calculation method agreed very well. The drag ratio between on the open filed and in the tube from the calculation result by the suggested numerical method lied in the same fitting curve with that from the filed test of high-speed trains running in the line.

**Keywords** : Tube-Vehicle System, Ultra High-speed Train, Evacuated Tube, Aerodynamic Drag, Computational Fluid Dynamics

요 지 본 연구에서는 튜브-열차 시스템의 기본적인 유동장의 특성을 파악하고, 튜브열차의 공기저항을 계산할 수 있는 보다 효율적인 수치 해법을 제시하고 계산 결과에 대한 타당성을 논하였다. 최소한의 계산 영역 내에서 정상상태의 해를 찾기 위하여 비정상 해석의 결과를 기준으로 하여 경계조건의 부여 방법을 변화시킨 정상 해석의 결과를 비교한 결과, 열차속도가 300 km/h일 경우에는 공기저항의 값이 정상해석 결과와 비정상해석 결과가 잘 일치하였으며, 동일 속도 대역에서의 고속열차 현장시험 결과와 비교한 결과 열차/터널 단면적비에 따라 공기저항의 비가 동일한 추세를 나타나는 것으로 나타났다.

주 요 어 : 튜브-열차 시스템, 초고속 열차, 진공튜브, 공기저항, 전산유체역학

## 1. 서 론

공기 중에서 운동하는 모든 물체는 공기의 관성 과 점성으로 인하여 일정한 공기저항을 경험하게 된다. 유동이 층류에서 난류로 바뀌는 천이영역에 있지 않다면 대체로 공기저항의 크기는 속도의 제곱에 비례하는데, 항공기, 철도, 자동차 등 대부분의 교통수단의 공기저항도 이러한 특성을

을 지닌다고 볼 수 있다.

철도시스템에서 요구되는 열차의 추진력은 이러한 공기저항을 포함한 주행저항의 크기에 비례하는데, 300km/h 이상의 고속철도에 있어서는 공기저항이 주행저항의 70-80% 이상을 차지하기 때문에[1] 철도시스템의 속도 증가에 있어 가장 중요한 제약요소로 생각되어질 수 있다.

프랑스, 일본, 독일, 한국 등에서 고속철도의 개발 및 운영이 본격화되기 시작한 이후 철도시스템의 속도를 증가시키기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그 중 하나가 자기부상기술을 철도에 접목하려는 시도이고[2], 다른 하나가 진공튜브를 이용하여 철도시스템의 속도한계를 극복하고자하는 시도이다[3-6].

전자는 휠/레일 방식의 추진시스템이 갖는 점착력의 한계를 극복하여 고속에서도 큰 추력을 얻고, 고속에서의 휠

<sup>†</sup> 책임저자, 교신저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원

E-mail : hbkwon@krri.re.kr

TEL : (031)460-5346 FAX : (031)460-5023

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

\*\* (주)백스ٹی이엔에스, 중공업/건설그룹, 부장

\*\*\* (주)백스ٹی이엔에스, 중공업/건설그룹, 과장

\*\*\*\* (주)백스ٹی이엔에스, 중공업/건설그룹, 대리

과 레일의 마모로 인해 유지보수 비용이 급격히 증가하는 문제점을 해결할 수 있다는 면에서 초고속열차의 추진시스템으로 크게 각광받고 있다.

후자의 경우에는 속도의 제공에 비례하여 증가하는 공기저항을 낮은 공기밀도의 환경을 조성함으로써 대폭 감소시켜 고속운행 시 소요되는 큰 추진에너지를 크게 절감할 뿐만 아니라, 속도의 3승에서 6승에 비례하는 공력소음을 발생 및 전파를 원천적으로 배제하여 환경에 대한 영향을 최소화시킬 수 있다는 장점이 있다.

튜브열차 시스템은 열차가 튜브에 둘러싸인 상태에서 고속으로 이동하는 특성을 갖기 때문에 열차와 튜브 사이의 유동은 외부유동과 내부유동의 특성을 동시에 갖는다. 즉, 열차 주위의 유동은 열차의 형상에 의해 영향을 받는 외부유동의 특성을 나타내지만, 전체 유동장이 튜브 내에 있기 때문에 관 유동과 같은 내부유동의 특성을 갖기도 한다. 더군다나, 열차의 길이에 비하여 튜브의 길이가 상대적으로 매우 길기 때문에 열차 주위 외부유동과 튜브 내 내부유동의 유동스케일이 크기가 매우 차이가 나는 복합적인 유동 특성을 나타내고 있다.

외부유동의 특성을 파악하기 위해서는 일반적으로 풍동시험 기법을 많이 사용한다[7-9]. 특히, 항공기와 같이 지면이나 선로 등 고정체와의 상호작용이 없는 경우 축소모델을 이용한 풍동시험을 통하여 비교적 정확하게 유동장을 재현할 수 있으며, 여러 측정도구를 이용하여 상세한 유동의 분석이 가능하다. 철도차량과 같이 열차와 지면의 상대속도가 존재하는 경우, 일반적으로 사용되는 풍동 내에서는 정확한 유동의 재현이 불가능하며, 이를 위해서 이동지면장치, 유동의 흡입 및 분출, 지면판, 이미지 기법 등 다양한 방법으로 지면효과를 모사하기도 한다[10,11].

그러나, 튜브열차의 경우에는 열차와 튜브의 상대적 운동으로 인하여 풍동시험 기법의 적용이 매우 힘들다. 왜냐하면 튜브가 열차 주위를 비교적 가까운 거리에서 완전히 감싸고 있는 형태이기 때문에 정지된 열차 모형에 대해 상대적으로 움직이는 튜브 모형의 제작이 매우 힘들기 때문이다. 또한, 튜브트레인 시스템은 열차의 이동으로 인한 유동의 교란이 튜브 내로 지속적으로 전파되기 때문에 일정한 교란범위를 갖는 외부유동과 달리 매우 광범위한 유동영역에 대한 시험이 수행되어야 하므로 한정된 길이의 시험부를 갖는 풍동시험 기법을 적용하기 곤란하다.

튜브열차 시스템과 같이 상대적 운동을 갖는 경우뿐만 아니라 극초음속, 기상현상 등 실험적 접근이 어려운 유동현상들에 대해서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic)을 이용한 전산 시뮬레이션 기법이 널리 사용되고 있으며, 비교적 짧은 시간에 저렴하게 유동장의 특성을 파악할 수

있다는 측면에서 본격적인 연구개발에 앞서 개략적인 유동장 특성을 파악하는 데에도 유용하게 사용되고 있다 [12-19].

본 연구에서는 튜브-열차 시스템의 기본적인 유동장의 특성을 파악하고, 튜브열차의 공기저항을 계산할 수 있는 보다 효율적인 수치 해법을 제시하고 계산 결과에 대한 타당성을 논하였다.

## 2. 튜브열차 전산유체해석 기법 개발

### 2.1 튜브열차 시스템 유동장의 특성

#### 2.1.1 시간적, 공간적 경계조건

튜브 내에서 열차가 정지 상태에서 고속으로 주행하게 되면 열차의 전방은 공기가 압축되고 후방은 공기가 팽창하게 된다. 정지 상태에서 일정 속도로 가속되는 시점까지 열차 전, 후방에는 압력의 구배가 발생하는데, 열차 전방에서는 압축파가, 후방에는 팽창파의 형태로 각각 전, 후방으로 진행하게 된다. 이때, 압축파 및 팽창파의 파두는 가속되는 시간에 의존하는 변수로서 가속시간이 짧을수록 파두는 더 급격해지지만, 압축파와 팽창파의 전파 속도는 항상 음속과 같은 속도를 갖는다[17].

실제 유동에서는 이러한 압축파와 팽창파가 튜브 내를 전파하면서 튜브 벽면에서의 마찰에 의해 점차 소산되어 없어지게 되며, 이러한 전, 후방 압력파가 소산되는 거리까지를 열차의 공기저항에 영향을 미치는 유동 경계조건으로 볼 수 있다.

이 경우, 튜브열차 시스템 내부는 본질적으로 비정상 유동(Unsteady flow)이며, 열차가 일정 속도에 도달한 후 열차 주위의 유동이 정상 상태(Steady state)에 도달한 이후에도 전후방으로 전파하여 소산되는 순간까지 비정상 특성을 갖게 된다.

하지만, 압력파가 소산되는 거리는 일반적으로 열차의 길이에 비하여 매우 길기 때문에 유동 경계조건이 커질 뿐만 아니라 정상 상태에 도달하는 시간도 매우 길어지기 때문에 수치해석에 소요되는 시간과 기억용량이 매우 커진다.

본 연구에서는 열차의 공기저항을 다양한 파라미터에 대해 평가하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 공간적으로는 최소한의 계산 영역을 가지고, 시간적으로는 최종적인 정상 상태에서의 유동장을 빠른 시간 내에 얻을 수 있는 계산 기법을 연구하였다.

#### 2.1.2 비정상 해석 및 정상 해석

앞에서 언급한 바와 같이 열차가 일정속도에 도달한 후 열차 주위의 유동은 정상상태(Steady state)에 도달하게 된

다. 이 경우, 열차 전방은 압축파가 통과한 후의 상대적으로 높은 압력상태이며, 열차 후방은 팽창파가 통과한 후의 상대적으로 낮은 압력상태가 된다. 따라서, 전, 후방의 압력조건을 적절히 부여할 수 있다면, 열차 주위의 유동장을 정상 상태로 보고 해석을 수행할 수 있다. 이처럼 유동장을 정상 상태로 가정할 경우 유체의 지배방정식은 시간에 따른 유동장 교란을 정확히 모사할 필요가 없어지므로 각 격자 별로 최적의 수렴해를 찾아가는 local time stepping 기법[17] 등 수렴 가속화 기법을 적용할 수 있기 때문에 비정상 유동에 대한 해석에 비해 매우 빠른 시간 내에 수렴해를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 튜브열차 시스템에서 열차 주위 유동장의 파악을 위하여 열차 주위의 유동장을 정상 상태로 가정하여 해석을 수행하여 해석시간을 크게 절감하여 다양한 파라메타를 변화시켜가면서 열차의 공기저항을 평가할 수 있는 기법에 대해 연구하였다. 이를 위하여 비정상 해석의 결과를 기준으로 하여 경계조건의 부여 방법을 변화시킨 정상 해석의 결과를 비교함으로써 최적의 정상해석 기법을 도출하였다.

## 2.2 비정상 해석

### 2.2.1 공력 모델링 및 전산해석기법

튜브트레인 시스템의 비정상 해석을 위하여 아래 Table 1과 같이 열차 모형을 정의하였다. 해석 기법의 검증은 위해서는 다수의 비정상 시뮬레이션의 수행이 필요하므로 축대칭 모델을 이용하여 계산을 수행하기로 한다. 열차의 전두부 형상은 미사일과 같은 축대칭 형상의 초고속 비행체의 전두부에 많이 사용되는 Tangent Ogive 형상을 이용하였으며, 전두부 길이는 10m, 전체 열차 길이는 100m이며, 열차와 튜브의 직경은 각각 3m와 6m이다.

Table 1. Aerodynamic model for numerical simulation

Nose shape	Tangent Ogive
Nose Length (m)	10
Total Length (m)	100
Train Diameter (m)	3
Tunnel Diameter (m)	6

Fig. 2에는 열차와 튜브의 비정상 축대칭 해석영역과 계산 영역 내부에 형성된 격자계를 보여주고 있다. 열차의 출발 시 발생하는 압력파가 튜브 벽면에서 반사되는 것을 막기 위하여 튜브 길이를 열차 길이의 21배로 충분히 하였으며, 이 경우 압력파가 튜브 입출구에 도달하기 이전에 열차 주위 유동장이 정상상태에 도달할 것으로 예상된다. 정상 해석 시에는 Zone A에 해당하는 부분을 생략하고 튜브 출구 및 입구에서 경계조건을 적용하였다.

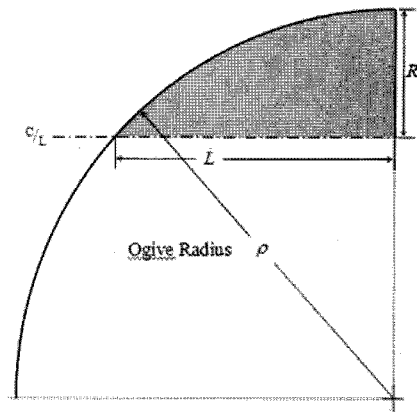


Fig. 1. Tangent Ogive

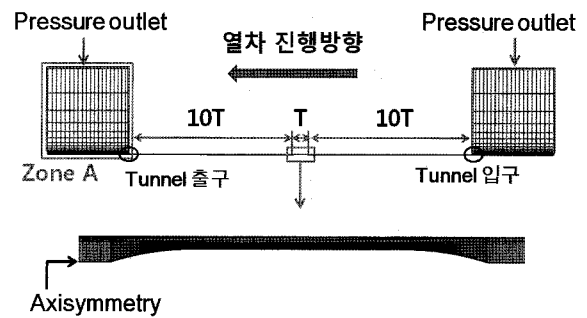


Fig. 2. Computational domain

튜브열차 시스템의 공력 모델링 및 격자계 형성을 위해서는 Pre-Processing인 GAMBIT™ Ver.2.3.16을 사용하였고, 전산유체해석 수행을 위한 Solver로는 FLUENT™ ver.6.3.26이 이용되었다. 그리고, 튜브와 열차의 상대적 운동을 모사하기 위해서 FLUENT에서 제공하는 MDM(Moving Dynamic Mesh) 해석 기법을 이용하였다. 아래 Table 2와 Table 3에는 Fluent로 해석 시 부여한 해석 조건 및 경계조건을 나타내고 있다.

Table 2. 축대칭 Tangent Ogive 모델의 비정상 해석 조건

Solver Selection	Unsteady Axisymmetry, Density based, Implicit Absolute Velocity Formulation
Turbulence	k-omega(2eq) SST, Compressibility Effect

Table 3. 축대칭 Tangent Ogive 모델의 비정상 해석 경계 조건

Outside	Pressure-outlet	Operating Pressure = 0 Pa Gauge Pressure = 101325 Pa Turbulence Intensity = 0.5% Turbulence Viscosity Ratio = 1
Train	wall	Moving Wall (300 km/h, 700 km/h)
Tunnel	wall	No slip wall

2.2.2 비정상 해석 결과

튜브 내에 위치한 열차를 정지 상태에서 0.1초 간 주형 속도로 가속하여 비정상 해석을 수행하였다. Fig. 3에는 시간에 따른 열차의 항력계수(Cd)를 나타내고 있다. 출발 이후에는 항력이 급격히 증가하다가 ①-② 정점에 도달한 후 ② 점차 항력이 감소하여 일정하게 유지되는 ③ 것을 확인할 수 있다.

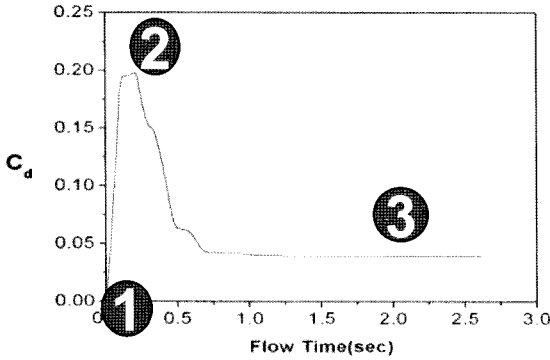


Fig. 3. History of drag coefficient

Fig. 4에서 Fig. 6에는 각 시점에서의 열차 표면 및 열차 전후 압력을 보여주고 있다. 열차의 출발 직후(Fig. 4)에는 열차 전방 및 후방에 각각 고압과 저압의 압력장이 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 좀 더 시간이 지난 Fig. 5에는 압축파와 팽창파가 각각 전후방으로 다소 더 전진해 있는 것을 볼 수 있으며, Fig. 6에서는 이들 압축파와 팽창파가 열차와 완전히 분리되어 각각 전후로 진행하고 있는 것을 확인할 수 있다.

본 계산에서는 계산시간을 줄이기 위하여 0.1초라는 다소 비현실적인 가속시간을 설정하였기 때문에 가속 시 발생하는 압축파의 크기가 매우 크게 나타났다. 만일 가속 시간을 승차감과 추진성능 등을 고려하여 현실적으로 충분히 크게 설정한다면 압축파의 크기는 열차 전방의 고압부 크기 이상으로 증가하지는 않을 것이다.

급작스런 가속에 의해 발생한 수치적인 압력파와 팽창파는 열차와 분리된 이후 열차의 저항에는 아무런 영향을 미치지 않고 있음을 항력계수 히스토리를 통해 확인할 수 있었다. 따라서, 열차 주위 유동은 출발 시 유동의 불안정성이 제거된 이후에는 정상 상태를 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, 압력파의 통과 후 나타나는 전, 후방 압력경계에서의 압력 변화를 잘 반영한다면 열차 주위의 유동을 정상 상태로 가정하여 해석을 수행하여도 열차의 공기저항을 비롯한 열차 주위의 유동장을 잘 모사할 수 있을 것으로 보인다.

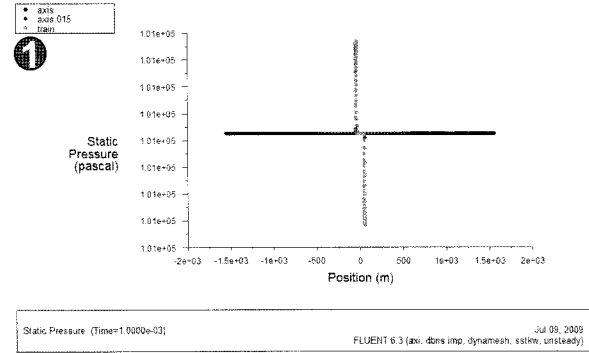


Fig. 4. Surface pressure distribution at time ①

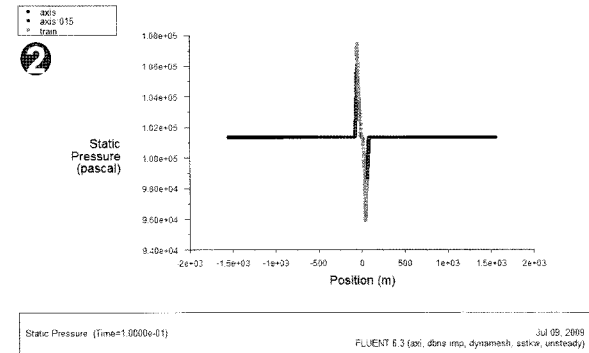


Fig. 5. Surface pressure distribution at time ②

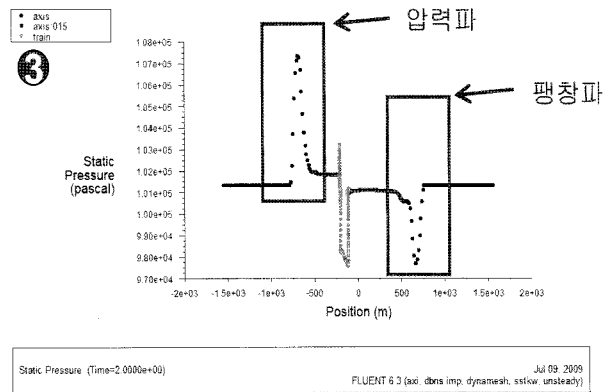


Fig. 6. Surface pressure distribution at time ③

2.3 정상해석 및 결과 비교

2.3.1 정상 해석 조건

튜브 내 열차 주위의 유동장에 대하여 정상해석을 수행하였다. 정상해석에서는 비정상 해석과 동일한 solver 타입과 난류모델을 적용하였으며, 전후방 경계도 비정상 해석과 마찬가지로 열차 길이 10배 전후로 설정하였다. 정상 해석에서는 비정상 해석과 달리 열차의 전방과 후방의 경계조건을 특정하여야 하는데, 본 연구에서는 몇 가지 경계조건 부여 방안을 적용하여 정상해석을 수행한 후 비정상 해석 결과와 비교하였으며, 전방을 Pressure-far-filed, 후방을

Pressure-outlet으로 설정한 경우 비정상 해석 결과를 이용하지 않고 독립적인 정상해석만으로 열차의 공기저항을 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 4. 축대칭 Tangent Ogive 모델의 정상 해석 조건

Solver Selection	Steady Axisymmetry, Density based, Implicit Absolute Velocity Formulation
Turbulence	k-omega(2eq) SST, Compressibility Effect

Table 5. 축대칭 Tangent Ogive 모델의 정상 해석 경계 조건

Fluid	fluid	Moving Zone (300 km/h, 700 km/h)
Forward Train	Pressure-far-field	Operating Pressure = 0 Pa Gauge Pressure = 101325 Pa Mach Number = 0 Turbulence Intensity = 0.5% Turbulence Viscosity Ratio = 1
		Gauge Pressure = 101325 Pa Turbulence Intensity = 0.5% Turbulence Viscosity Ratio = 1
Backward Train	Pressure-outlet	Moving Wall (300 km/h, 700 km/h)
Train	wall	Slip wall

위 경계조건 중 Pressure-outlet 조건은 경계의 압력을 일정한 값으로 고정하고 나머지 유동변수들은 외삽하여 구하는 방법이다[20]. Pressure-far-field 조건은 Riemann 불변량을 이용한 무반사 경계조건의 일종이다[20].

### 2.3.2 정상 및 비정상 해석 결과 비교

계산에 사용된 CPU는 작동클럭이 3.0GHz인 Intel Xeon 5450 프로세서로서 이더넷으로 16core를 연결하여 계산하였다. 한 case 당 소요된 계산시간은 축대칭 비정상해석의 경우에는 7일, 정상해석의 경우에는 4시간이 소요되어 정상해석이 비정상해석에 비해 42분의 1로 계산시간이 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 열차속도 300km/h와 700km/h에서의 열차 표면 및 대칭축에서의 압력 분포를 각각 나타내고 있다. 먼저, 열차속도가 300km/h일 경우(Fig. 7)에서는 비정상 해석과 비교하여 모든 위치에서 전반적으로 100Pa 내외로 압력이 크게 나타났지만, 압력의 분포는 거의 동일하게 나타났다. 반면 700km/h의 열차 속도(Fig. 8)에서는 정상해석이 비정상에 비해 다소 높은 압력값을 나타내기는 하지만 일부 영역에서는 역전되는 현상도 보이는 등 압력 분포에도 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

각각의 열차 속도에서 수렴 시의 속도 분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 전반적으로 두 경우 모두 전두부 및 후미부에서의 압력분포가 매우 유사하게 나타났으며, 후미부의 튜브 벽면에서 등압선이 비정상 해석의 경우에는 벽

면에 평행한 데 반하여 정상해석의 경우에는 벽면에 수직으로 분포하는 차이점을 보였다. 또한, 열차속도 300km/h에 비해 700km/h일 경우에는 후미부의 속도분포가 다소 차이를 보였는데, 정상 해석 시에는 비정상 해석 시에 압력회복이 다소 빠르게 나타나며, 이로 인해 유속의 구배도 더 완화된 것으로 보인다.

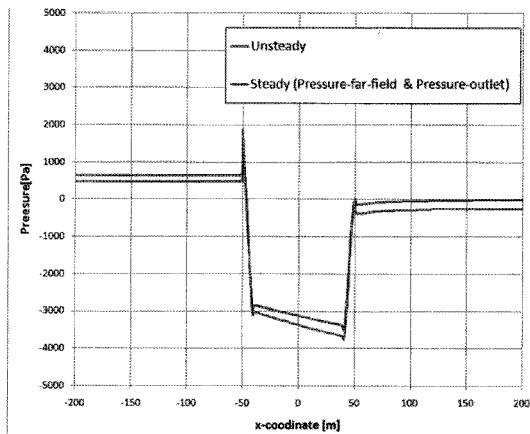


Fig. 7. Pressure distribution at the surface of train (train speed = 300km/h)

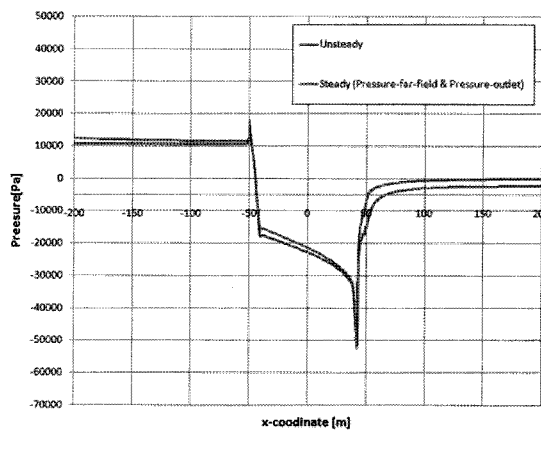


Fig. 8. Pressure distribution at the surface of train (train speed = 700km/h)

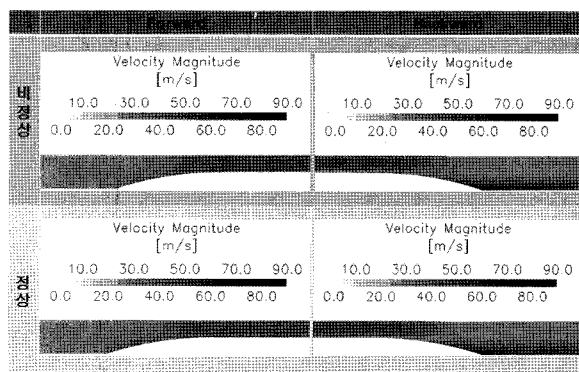


Fig. 9. Velocity contour around nose and tail of train (300km/h)

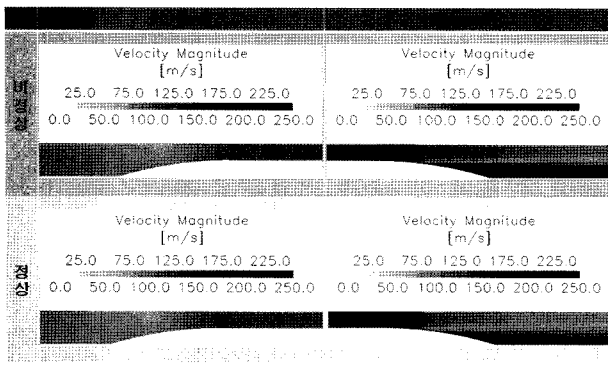


Fig. 10. Velocity contour around nose and tail of train (700km/h)

Table 6에는 각각의 속도와 해석기법에 따른 열차의 공기저항을 나타내고 있다. 먼저, 열차속도가 300km/h일 경우에는 공기저항의 값이 정상해석 결과와 비정상해석 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 총 저항 뿐만 아니라 압력저항과 점성저항으로 성분별로 비교하여도 두 경우가 잘 일치했다. 반면, 열차속도 700km/h에서는 전체 저항이 약 20% 정도의 차이를 보이고 있으며, 이는 점성저항은 5% 이내에서 일치하는 반면 압력저항이 정상 해석 시가 비정상 해석 시에 비해 다소 낮기 때문이며, 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 정상 해석 시에는 비정상 해석에 비해 후미부의 압력 회복이 다소 빠르게 나타나는 것이 원인인 것으로 보인다.

Table 6. Aerodynamic drag in unsteady and steady calculation

Train velocity	300 km/h			700 km/h		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Unsteady	6.13	10.60	16.73	191.93	51.87	243.80
Steady	6.14	10.48	16.62	152.70	53.07	205.77

### 2.4 수치해석 기법 타당성 검증

본 연구에서 수행된 수치해석 기법의 타당성 검증을 위하여 기존의 고속열차에서 측정된 평지와 터널 내에서의 공기저항을 계산된 튜브열차의 공기저항과 비교하여 아래 Fig. 11에 나타내었다.

현재 운행되고 있는 KTX 열차와 KTX-II 열차는 운행속도가 300km/h이고, 열차의 단면적비는 9.1%에서 9.3%이며, 이 때 터널 내에서의 공기저항은 평지에서의 공기저항에 비해 약 1.22에서 1.27배가 된다[21]. 본 연구에서 터널 단면적이 가장 클 경우는 터널 직경이 7 m인 경우이며, 이 때 열차와 튜브의 단면적비는 18.4%로서 고속철도보다 약 2배 정도 크게 되는데, 동일한 열차속도 300km/h에서의 공기저항은 개활지에 비해 약 1.6배가 된다. 터널의 단면적이

작아질수록 공기저항은 급격히 증가하며, 터널의 단면적이 가장 작은 터널직경 4m인 경우에는 평지에 비해 8.6배의 공기저항을 나타내게 된다. 터널/열차 공기저항비는 열차/터널 단면적비의 대략 자승에 비례하는 것으로 나타나며, 기존 고속열차의 시험결과 값과 본 연구의 수치해석 값이 동일한 선상에 존재하는 것으로 볼 수 있다.

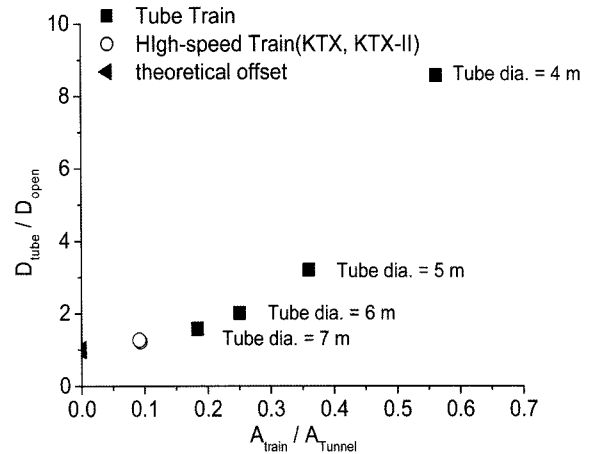


Fig. 11. Drag force in tube relative to in open space (Train speed = 300 km/h)

### 3. 결론

본 연구에서는 튜브-열차 시스템의 기본적인 유동장의 특성을 파악하고, 튜브열차의 공기저항을 계산할 수 있는 보다 효율적인 수치 해법에 대해 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 튜브열차 시스템은 내부유동과 외부유동의 특성을 동시에 갖고 있으며, 고속의 유동이기에 때문에 실험적인 연구에 앞서 전산유체역학을 이용한 수치해석으로 유동장의 기본적인 특성을 파악할 수 있다.
2. 튜브-열차 시스템의 유동장은 다양한 유동스케일과 매우 긴 시간적 경계를 갖기 때문에 전산유체역학을 이용하여 공기저항을 평가하는 경우에는 최소한의 계산 영역 내에서 정상상태의 해를 찾을 수 있는 계산기법이 보다 효율적이다.
3. 비정상 해석의 결과를 기준으로 하여 경계조건의 부여 방법을 변화시킨 정상 해석의 결과를 비교한 결과, 열차속도가 300km/h일 경우에는 공기저항의 값이 정상해석 결과와 비정상해석 결과가 잘 일치하였으며, 속도가 700km/h로 증가한 경우에는 압력저항의 증가에 따라 전체 저항이 약 20% 정도의 차이를 보인다.
4. 300km/h 속도 대역에서 개활지와 튜브 내에서의 공기저항 계산 결과를 기존의 고속열차 현장시험 결과와 비교

한 결과 열차/터널 단면적비에 따라 공기저항의 비가 동일한 추세를 나타나는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 권혁빈, 김석원, 김영국, 박춘수 (2007), "한국형 고속열차의 주행저항식 예측," 한국철도학회 2007년 춘계학술대회 논문집.
2. H. W. Lee, K. C. Kim, and J. Lee (2006), "Review of Maglev Train Technologies," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925.
3. W. P. Trzaskoma (1970), "Tube Vehicle System (TVS) Technology Review."
4. <http://www.swissmetro.ch/>
5. Z. Y. Shen (2005), "On developing high-speed evacuated tube transportation in China," Journal of Southwest Jiaotong University, Vol. 40, No. 2, pp. 133-137.
6. Y. Sato et al. (2006), "SUPERMETRO - Super-High-Speed-Train in Low Pressure Tunnel," World Congress on Railway and Research 2006.
7. J. L. Peters (1893), "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential," Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3.
8. C. J. Baker and N. D. Humphreys (2002), "Forces on vehicles in cross winds from moving model tests," Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 41-44, pp. 2673-2684.
9. H. B. Kwon, S. W. Nam, and W. H. You (2008), "Wind tunnel testing on crosswind aerodynamic forces acting on railway vehicles," The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference.
10. E. Mercker and H. W. Knappe (1989), "Ground simulation with moving belt and tangential blowing for full-scale automotive testing in a wind tunnel," SAE Paper 890367.
11. H. B. Kwon, Y. W. Park, D. H. Lee, and M. S. Kim (2001), "Wind tunnel experiments on Korean high-speed train using various ground simulation technique," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, No. 13, pp. 1179-1195.
12. F. Masbernat, Y. F. Wolfhugel, and J. C. Dumas (1992), "CFD aerodynamics of the french high-speed train," SAE Technical paper series 920343.
13. E. Mestreau, S. Aita, and R. Loehner (1993), "TGV tunnel entry simulations using a finite element code with automatic remeshing," AIAA-93-0890.
14. T. Ogawa and K. Fujii (1997), "Numerical investigation of three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel," Computer & Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585.
15. B. S. Holmes, J. Dias, S. M. Rifai, J. C. Buell, Z. Johan, T. Sassa, and T. Sato (1999), "Solution of train-tunnel entry flow using parallel computing," Computational Mechanics, Vol. 23, pp. 124-129.
16. H. B. Kwon, K. H. Jang, Y. S. Kim, K. J., Yee, and D. H. Lee (2001), "Nose shape optimization of high-speed train for minimization of tunnel sonic boom," JSME International Journal Series C, Vol. 44, No. 3, pp. 890-899.
17. 권혁빈 (2001), "터널을 통과하는 고속철도차량에 의한 비정상 압축성 유동장에 대한 연구," 서울대학교 박사학위논문.
18. B. Diedrichs (2003), "On computational fluid dynamics modeling of crosswind effects for high-speed rolling stock," Proceedings of IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 217, pp. 203-226.
19. H. B. Kwon, T. Y. Kim, D. H. Lee, and M. S. Kim (2003), "Numerical simulation of unsteady compressible flows induced by a high-speed train passing through a tunnel," Proceedings of the IMechE Part F Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 217, pp. 111-124.
20. FLUENT 6.3 User's Guide
21. S. G. Kim, H. B. Kwon, Y. G. Kim, and T. W. Park (2007), "Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions," Proceedings of the IMechE Part F Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 220, pp. 449-459.
22. 권혁빈, 남성원, 차창환 (2006), "철도시스템 전산유체 표준 프레임워크를 이용한 KTX 차량 주변 압력장에 대한 수치해석," 한국철도학회논문집, 제 9권, 제 5호, pp. 1-6.

접수일(2009년 11월 16일), 수정일(2010년 1월 14일),  
 게재확정일(2010년 2월 18일)