

## 진공튜브 내 초고속열차의 공기저항 파라메타 연구 - 2

### Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube - Part 2

권혁빈<sup>†</sup> · 남성원\* · 김동현\* · 장용준\* · 강부영\*\*

Hyeok-bin Kwon · Seong-Won Nam · Dong-hyeon Kim · Yong-jun Jang · Bu-byoung Kang

**Abstract** The aerodynamic drag of ultra high-speed train in evacuated tube have been calculated using computational fluid dynamics and the variation of aerodynamic drag for the change of major system parameter of tube-vehicle system such as the train speed, air density, and the tunnel diameter. The aerodynamic drag in the tube increases with increasing train speed, however, the ratio of drag increase in tube is larger than that on the open field, the V square rule. The aerodynamic drag decreases with increasing tunnel diameter and increasing air density, and the drag increasing for air density is almost linear just like that on open field. For some combination of the parameters, the trend of aerodynamic drag of train showed irregularity.

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

요 지 본 연구에서는 진공튜브 내 초고속열차의 공기저항을 전산유체역학을 이용하여 계산하였으며, 튜브-열차 시스템의 주요 시스템 파라메타인 열차 속도, 공기밀도, 터널 직경을 변화시켜가면서 공기저항의 변화를 살펴보았다. 튜브 내에서의 열차 공기저항은 속도의 제곱보다 더 급격히 증가하며, 튜브 직경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 공기밀도가 감소함에 따라 개활지와 마찬가지로 거의 선형적으로 감소하는 특성을 보여주었으며, 특정 파라메타 공간에 대하여 파라메타에 따른 공기저항 변화의 불규칙성이 다소 나타났다.

주요어 : 튜브-열차 시스템, 초고속 열차, 진공튜브, 공기저항, 전산유체역학

## 1. 서론

진공 튜브를 이용한 초고속 열차는 철도시스템의 속도 한계를 뛰어넘고자 하기 위한 혁신적인 시도일 뿐만 아니라, 청정에너지인 전기에너지를 이용하여 그동안 항공기가 담당하였던 대륙간 장거리 초고속 운송을 분담할 수 있는 새로운 교통수단의 등장을 가능하게 할 수 있으며, 나아가서는 향후 세계의 중심으로 급부상하고 있는 동북아 지역에서 대한민국이 최고 중심국가의 위상을 차지하기 위한 전략의 핵심적인 역할을 담당할 가능성도 있다.[1]

미국[2]에서는 교통부 철도관리국의 고속지상운송연구소의 주도 아래 튜브-차량 시스템(Tube Vehicle System, TVS)에 대한 타당성을 판단하기 위한 연구를 수행한 바 있으며, 이를 통해 TVS의 형태를 분류하고 다양한 차량시스템의 개념을 제시하였다.

스위스[3]에서는 산악지형에 적합한 초고속 지상운송수단 개발을 위하여 1987년부터 스위스메트로(Swissmetro) 프로젝트를 시작하였으며, 현재는 기초연구를 완료하고, 실용화를 준비하고 있다.

스위스메트로로는 내경 5m인 두 쌍의 단선 터널을 전 구간 지하에 건설하고, 추진에 소요되는 에너지를 절감하기 위하여 터널 내 압력을 아진공으로 유지하여 500km/h 이상의 속도로 주행 가능한 선형전동기를 이용한 추진시스템으로 선로와 직접적인 마찰이 없도록 자기부상 및 제어 방식을 적용하여 운행되는 초고속 자기부상 튜브-열차시스템으로

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

E-mail : hbkwon@krii.re.kr

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

\* 정회원, 한국철도기술연구원 철도환경연구실, 책임연구원

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

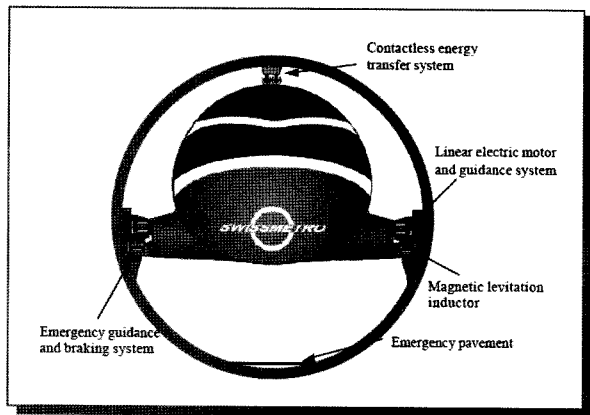


Fig. 1. Schematic of SWISSMETRO

기본개념을 정립하였으며, 장기적으로는 목표속도 600~700 km/h로 1,000km 반경 내에서 운행되는 중단거리 항공 교통에 대한 효과적이고 환경친화적인 대안이 될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

중국의 경우, 서남교통대에서 초전도 응용연구의 일환으로 2000년 12월 31일 세계 최초의 탑승용 HTS 자기부상열차 시제차 “Century호” 개발에 성공하였으며, 초고속 자기부상열차 기술은 필수적으로 진공튜브와 같은 공간에서 적용이 가능할 것으로 판단하여 이에 대한 중장기 연구계획을 발표한 바 있다[4]. 여기서 밝힌 기술 개발의 주요 이슈를 살펴보면, 튜브열차의 개발을 위해서는 터널 내의 압력·속도관계, 저항계수, 그 외 기간(基幹)기술과 같은 진공터널고속열차의 기본문제에 대한 이해가 반드시 필요하며, 이를 통해 열차가 적절한 공기저항계수를 갖도록 터널과 열차의 단면적 및 터널 내 압력을 결정하는 것이 필요하고, 이상의 기본설계를 바탕으로 진공터널 건설기술, 추진기술 및 자기부상열차기술이 필요한 것으로 밝히고 있다.

일본에서는 현재 개발 중인 초고속자기부상열차에 튜브 열차 개념을 적용하는 연구를 수행한 바가 있다[5]. 이 연구에 따르면, 터널 내의 압력을 0.5기압에서 0.1기압까지 감소시킴으로써 터널 단면적을 줄여 전체 건설비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고, 이와 같은 구상이 대심도 지하터널의 건설과 결합되면, 소음과 지반진동을 완전히 배제하는 환경친화적인 시스템을 구성할 수 있으며, 이 같은 컨셉을 SUPERMETRO라고 제안하였다.

현재 야마나시 초고속 자기부상열차 시험선 내의 단면적 116.8m<sup>2</sup>(경부고속선의 경우 107m<sup>2</sup>)의 터널에서 최고속도 581km/h를 기록한 바 있는데, 상기 연구에 따르면 1단계로 터널 내 압력 0.5기압 상태에서 터널 단면적을 55.4m<sup>2</sup>로 낮추어 500km/h로 주행하거나, 동일한 터널 단면적에서 700 km/h로 주행할 수 있으며, 2단계로 터널 내 압력 0.1기압

상태에서 터널 단면적을 55.4m<sup>2</sup>로 낮추어 700km/h로 주행하거나, 동일한 터널 단면적에서 900km/h로 주행할 수 있을 것으로 예측하고 있다.

본 연구에서는 진공튜브 내 초고속열차의 공기저항을 전산유체역학을 이용하여 계산하였으며, 튜브-열차 시스템의 주요 시스템 파라메타인 열차 속도, 공기밀도, 터널 직경을 변화시켜가면서 공기저항의 변화를 살펴보았다.

## 2. 튜브 열차 공기저항 해석

### 2.1 해석 조건

#### 2.1.1 전산해석 기법

전산유체해석 수행을 위해 상용 CFD 프로그램인 FLUENT<sup>TM</sup> ver.6.3.26을 이용하였다. 3차원 정상(Steady) Navier-Stokes 방정식을 Density based, Implicit 시간적분 옵션을 선택하여 해를 구하였으며, 난류 모델로서는 2- equation 모델인 k-omega SST 모델을 Compressibility Effect를 포함하여 적용하였다. 또한, 튜브와 열차의 상대적 운동을 모사하기 위해서 FLUENT에서 제공하는 MDM(Moving Dynamic Mesh) 해석 기법을 이용하였다.

#### 2.1.2 튜브열차 공력 모델링

튜브 내에서의 열차 공기저항을 평가하기 위하여 튜브열차의 공력 형상을 정의하였다. 튜브와 열차의 단면적 비에 따른 공기저항을 개략적으로 살펴보는 것이 본 연구의 목적이므로 튜브와 열차의 단면 형상은 원형으로 결정하였다. 가이드웨이 구조는 아직 확정되지 않았기 때문에 생략하였고, 열차 단면의 중심을 튜브 단면의 중심과 일치하게 단순화 하였다.

Table 1에는 튜브 열차 공력모델의 주요 제원을 나타내고 있다. 전두부의 길이는 10m이며 3차원 형상으로 작성하였다. 작성된 전두부 형상은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 열차의 길이는 총 100m이며 대략 5량의 편성이 가능하도록 설정하였다. 열차의 직경은 3m이며, 튜브의 직경은 4m에서 7m까지 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

Table 1. Aerodynamic model for Tube train Proto-type

Nose shape	3D shape
Nose Length (m)	10
Total Length (m)	100
Train Diameter (m)	3
Tunnel Diameter (m)	4, 5, 6, 7

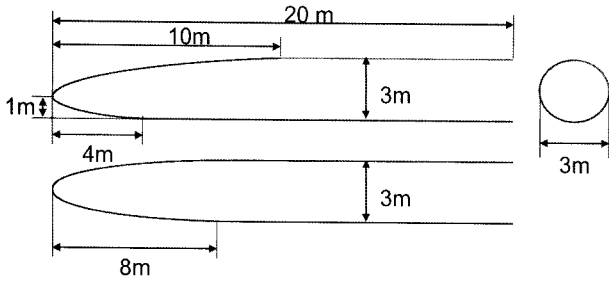


Fig. 2. Nose shape of Tube Train proto-type

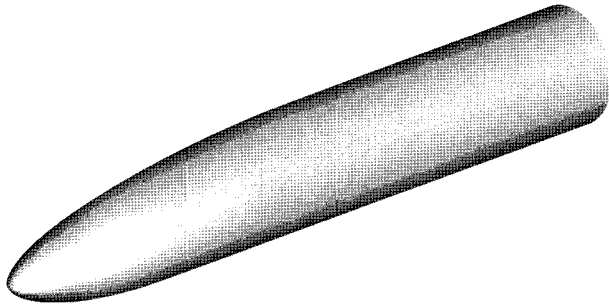


Fig. 3. Nose shape of Tube Train proto-type (3-dimensional view)

### 2.1.3 격자계 형성 및 해석 기법

Fig. 4와 Fig. 5에는 해석을 위해 설정된 계산 영역과 격자계를 나타내고 있다. 튜브 내를 주행하는 경우(Fig. 4)에는 열차의 길이의 10배 만큼 전방과 후방으로 계산영역을 설정하였으며, 튜브가 없는 조건에서의 공기저항을 살펴보기 위하여 공중을 비행하는 조건으로 계산하는 경우에는 열차 주위로 열차 길이의 5배 상하로 계산영역을 확장하였으며, 이 경우 자유류 경계조건을 전후방 및 측면 경계조건에 부여하였다. 계산에 사용된 경계조건은 Table 2에 나타나 있다.

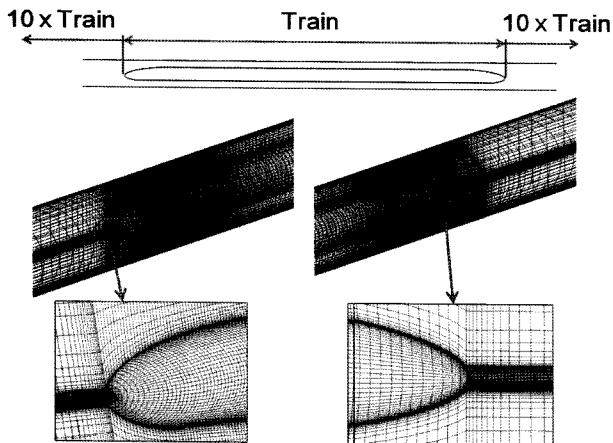


Fig. 4. Computational domain and grid for tube train

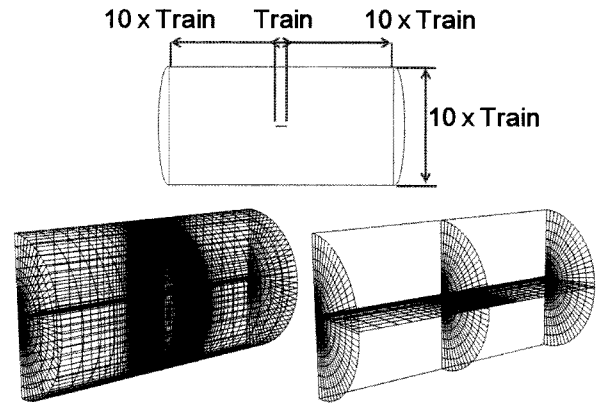


Fig. 5. Computational domain and grid for tube train in open space

Table 2 Boundary condition for 3D calculation

Boundary type	Tube Train	Open space Train
Forward train	Pressure-far-field (101,325 Pa)	Pressure-far-field (101,325 Pa)
Backward train	Pressure-outlet (101,325 Pa)	Pressure-far-field (101,325 Pa)
Fluid zone	Moving zone	Stationary zone
Mesh size	약 490 K cells	약 740 K cells

## 2.2 계산 결과

### 2.2.1 개활지 주행과의 비교

Table 3에는 개활지에서의와 튜브 내에서의 공기저항을 비교하였다. 튜브의 직경은 6m이고, 기준 기압은 모두 1atm으로 설정하였다. 먼저, 열차 속도가 300km/h인 경우에는 튜브 내에서의 공기저항이 19.76kN으로 개활지에서의 공기저항 9.84kN의 약 2배로 나타났다. 공기저항 증가를 성분 별로 나누어 살펴보면 압력저항이 약 2.6배 증가하고 점성저항은 약 1.7배 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 튜브 내에서 주행 저항 증가에는 전두부와 후미부에 형성되는 강한 압력장에 의한 압력저항의 증가가 1차적인 원인이며, 몸체와 튜브 사이의 좁은 공간으로 더 빠르게 흐르는 기류로 인한 점성저항의 증가도 상당한 기여를 하는 것으로 보인다.

반면 열차속도가 300km/h에서 700km/h로 증가할 경우 개활지에서의 공기저항은 속도증가의 제곱에 비례하여 53.28 kN로 증가하게 되나, 튜브 내에서의 공기저항은 속도 증가의 제곱보다 더 큰 211.93kN으로 나타났다. 이 경우 개활지와 비교해서는 4배의 공기저항을 나타남을 알 수 있다.

요약하자면, 튜브 내에서 주행하는 경우 공기저항은 개활지에 비하여 압력저항이 크게 증가하고 점성저항도 상당히 증가하게 되는데, 속도가 증가할수록 공기저항의 증가가 더 커지는 것으로 나타났다.

Table 3. Aerodynamic drag in tube and open space

Train velocity	300 km/h			700 km/h		
	Pressure Drag	Viscous Drag	Total Drag	Pressure Drag	Viscous Drag	Total Drag
Tube Tunnel Train	9.14	10.62	19.76	157.954	53.976	211.93
Open Space Train	3.52	6.3	9.84	23	30.28	53.28

2.2.2 속도에 따른 공기저항 특성

Fig. 6에서 Fig. 9에는 열차 속도에 따른 공기저항의 변화를 튜브 직경 별로 각각 나타내었다. 앞서 밝힌 대로 개활지에서는 공기저항이 속도의 제곱에 비례하지만 튜브 내에서는 그 이상으로 증가함을 확인하였다. 튜브 직경이 가장 작은 4m일 경우(Fig. 6)에는 속도에 따른 공기저항의 증가가 모든 기압 조건에 대하여 포물선에 가까운 형태로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 튜브 직경이 가장 큰 7m일 경우에도(Fig. 9)에도 나타나며, 두 경우 모두 회귀분석을 수행한 결과 각각 속도의 2.27승 및 2.37승에 비례하여 공기저항이 증가하는 것으로 나타났다. 통상적인 자유류 환경 내에서 공기저항은 속도의 2승에 비례하는 것에 비해 본 연구의 결과가 다소 차이가 나는 것을 알 수 있는데, 이것은 튜브 내 주행 시 튜브 벽면의 영향에 의해 속도 증가에 따른 공기저항의 증가가 개활지보다 더 커지는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

튜브 직경이 5m와 6m일 경우에도 속도에 따라 공기저항이 증가하며, 속도가 높을수록 공기저항의 증가율은 증가한다. 하지만 이 경우에는 공기저항의 증가율이 더 크며, 고속에서의 증가 경향이 압력 별로 다소 불규칙한 부분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 특정 속도와 튜브/열차 단면적비, 그리고 공기밀도의 조합에서 유동장의 천이 등 불안정성이 존재하여 나타나는 현상으로 추측된다.

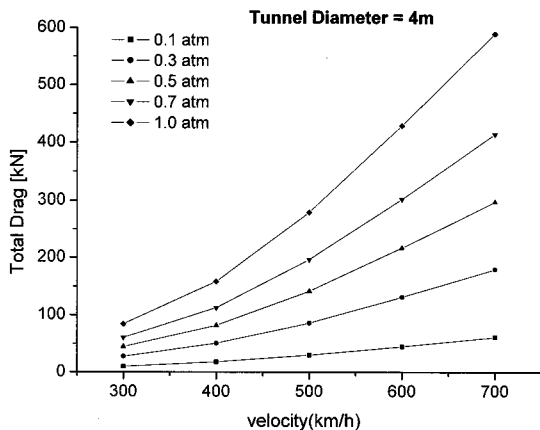


Fig. 6. Aerodynamic drag versus train speed (Tunnel diameter=4m)

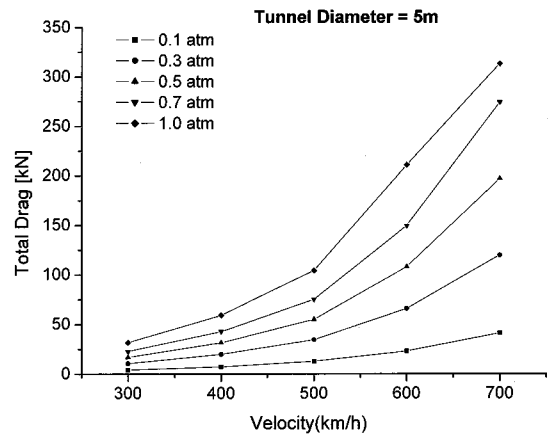


Fig. 7. Aerodynamic drag versus train speed (Tunnel diameter=5m)

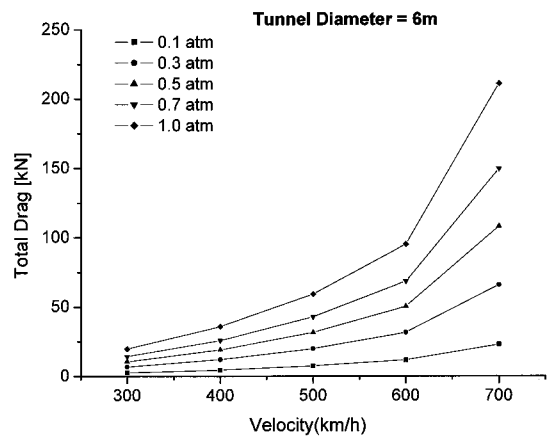


Fig. 8. Aerodynamic drag versus train speed (Tunnel diameter=6m)

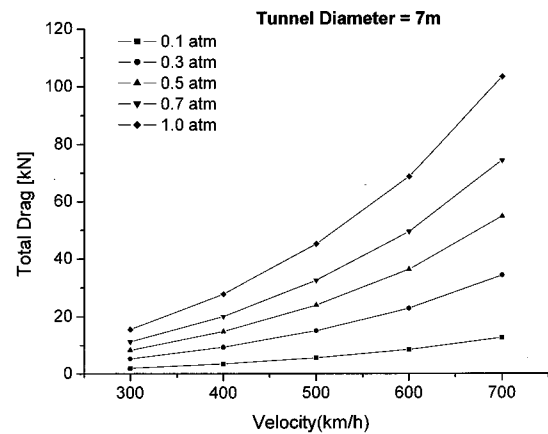


Fig. 9. Aerodynamic drag versus train speed (Tunnel diameter=7m)

2.2.3 튜브 직경에 따른 공기저항 특성

Fig. 10에서 Fig. 14에는 튜브 직경에 따른 공기저항을 기준 기압 별로 각각 나타내었다. 모든 경우에서 튜브 직경에 커질수록 공기저항은 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 튜브의 단면적이 증가하여 전, 후미부의 압력장이 약화되기 때문에 압력저항이 감소하고, 이와 동시에 열차와 튜브 사이의 간격이 넓어져 유동의 속도가 감소하여 점성

저항의 크기도 감소하기 때문으로 생각된다. 대기압(Fig. 14) 조건에서는 터널 단면적이 4m에서의 공기저항 값이 두드러지게 커지는 경향을 보였으나, 튜브 내 기준 기압이 대기압보다 낮을 경우에는 보다 완만하며 공기저항이 감소하며, 각 기준 압력에 대하여 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

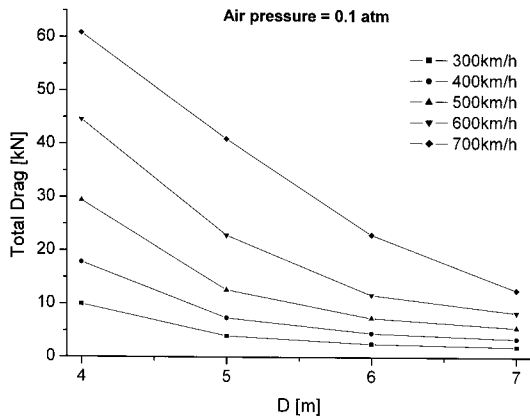


Fig. 10. Aerodynamic drag versus tunnel diameter (Air pressure=0.1atm)

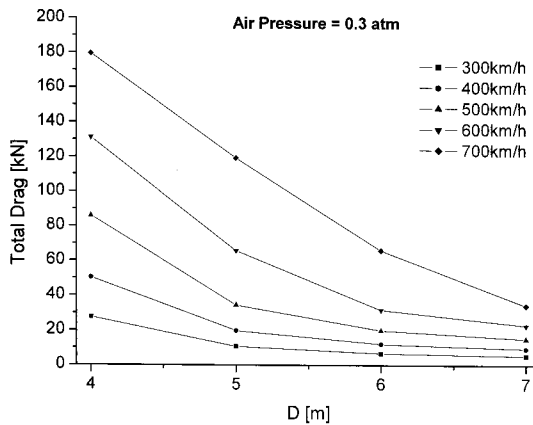


Fig. 11. Aerodynamic drag versus tunnel diameter (Air pressure=0.3atm)

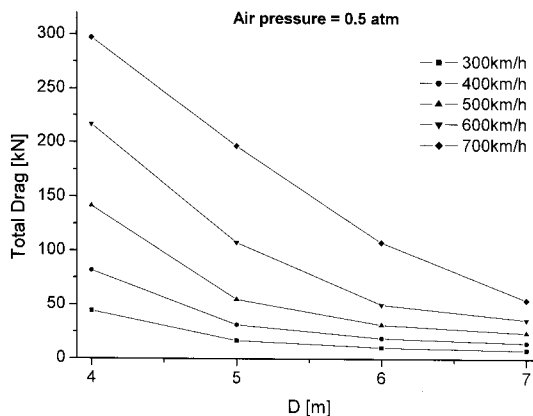


Fig. 12. Aerodynamic drag versus tunnel diameter (Air pressure=0.5atm)

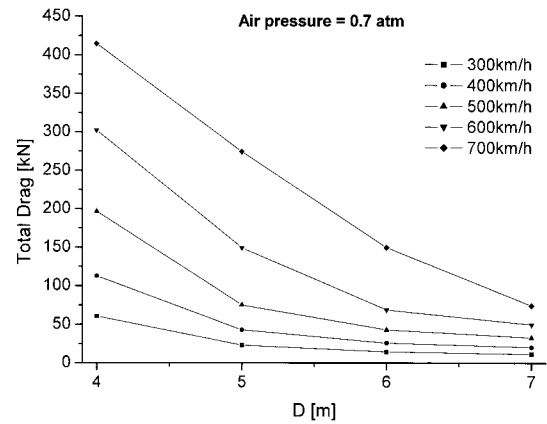


Fig. 13. Aerodynamic drag versus tunnel diameter (Air pressure=0.7atm)

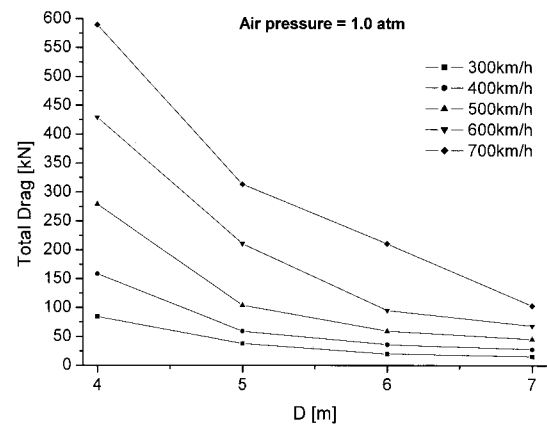


Fig. 14. Aerodynamic drag versus tunnel diameter (Air pressure=1.0atm)

#### 2.2.4 공기밀도에 따른 공기저항 특성

Fig. 15에서 Fig. 18에는 튜브 내 기준 압력 즉, 공기밀도에 따른 공기저항을 튜브 직경 별로 각각 나타내고 있다. 대기압(1atm)에 대하여 공기밀도를 낮추어 간다고 생각했을 때, 진공도를 높일 수록 공기저항은 감소하게 되는데, 이러한 공기저항의 감소 비율은 거의 공기밀도에 비례하여 감소하게 된다. 이러한 현상은 개활지에서 이동하는 물체에 대해서는 매우 자연스러운 현상인데, 이는 밀도와 속도의 제곱항으로 나누어지는 항력계수가 일정 속도 영역 내에서는 항상 일정하기 때문이다. 본 연구에서 튜브 내의 열차에 대한 해석 결과를 통해 튜브 열차의 공기저항은 개활지에서와 마찬가지로 공기 밀도에 비례한다는 결론을 얻을 수 있다.

다만, Fig. 16에서 보이듯이 터널 직경 5m, 열차 속도 700km/h인 경우에는 이러한 경향성이 공기 압력 1atm 부근에서 성립하지 않는 것을 알 수 있는데, 이것은 앞서 속도에 따른 공기저항의 변화를 살펴보았을 때와 마찬가지로 특정 속도와 튜브/열차 단면적비, 그리고 공기밀도의 조합

에서 유동장의 천이 등 불안정성이 존재하기 때문일 것으로 추측된다.

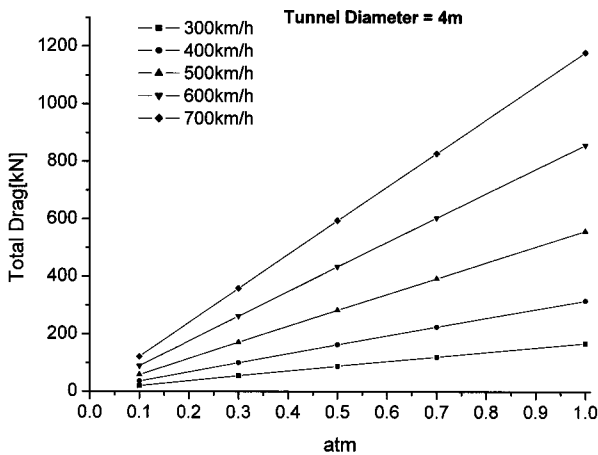


Fig. 15. Aerodynamic drag versus air pressure (Tunnel diameter =4m)

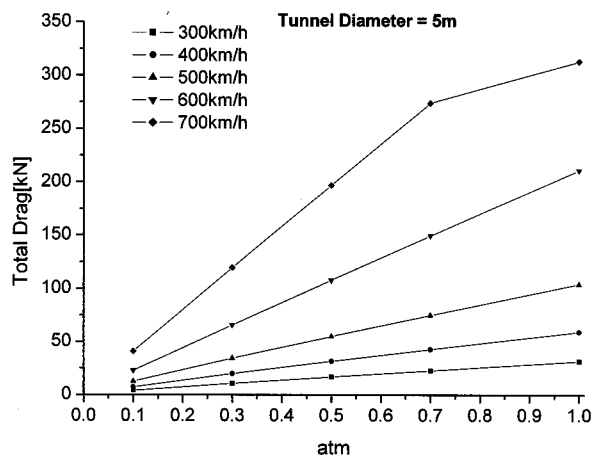


Fig. 16. Aerodynamic drag versus air pressure (Tunnel diameter=5m)

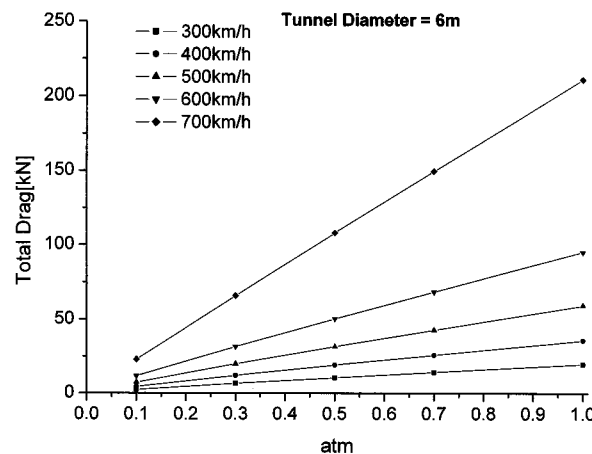


Fig. 17. Aerodynamic drag versus air pressure (Tunnel diameter =6m)

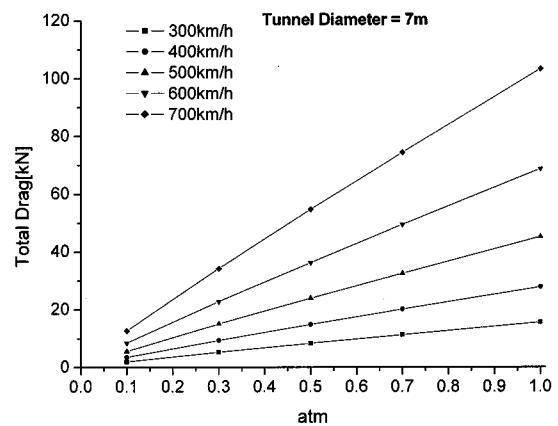


Fig. 18. Aerodynamic drag versus air pressure (Tunnel diameter =7m)

### 3. 결론

본 연구에서는 튜브열차 시스템의 주요 파라메타인 열차 속도, 공기밀도, 터널 직경에 따른 공기저항의 특성을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 튜브 내에서 주행하는 경우 공기저항은 개활지에 비하여 압력저항이 크게 증가하고 점성저항도 상당히 증가하게 되는데, 속도가 증가할수록 공기저항의 증가가 더 커지는 것으로 나타났다.
2. 개활지에서는 공기저항이 속도의 제곱에 비례하지만 튜브 내에서는 이보다 더 크게 증가하며, 본 연구에서 수행한 열차/터널 단면적비에 대해서는 대략 2.3승 내외로 증가하였다.
3. 튜브 직경에 커질수록 공기저항은 감소하는 것으로 나타났으며, 전, 후미부의 압력장이 약화되기 때문에 압력저항이 감소하고, 이와 동시에 열차와 튜브 사이의 간격이 넓어져 유동의 속도가 감소하여 점성저항의 크기도 감소하기 때문으로 생각된다.
4. 튜브 열차의 공기저항은 개활지에서와 마찬가지로 공기밀도에 비례한다는 결론을 얻을 수 있었다.
5. 특정 속도와 튜브/열차 단면적비, 그리고 공기밀도의 조합에서 파라메타에 대한 공기저항 변화 경향의 불규칙성이 나타났으며, 이는 유동장의 천이 등 불안정성이 존재하여 나타나는 현상으로 추측된다.

### 참고문헌

1. 최성규 (2009), "초고속자기부상튜브열차 개발의 필요성," 한국철도학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 13-18.
2. W. P. Trzaskoma (1970), "Tube Vehicle System(TVS) Technology Review."

3. <http://www.swissmetro.ch/>
  4. 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.
  5. Y. Sato et al. (2006), "SUPERMETRO - super-high-speed-train in low pressure tunnel," World Congress on Railway and Research 2006.
  6. 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 23일), 수정일(2010년 1월 14일),  
게재확정일(2010년 2월 18일)