

# 고속전철 시스템의 공기역학적 특성

## 목 차

1. 서 론
2. 고속전철 주행시의 공기저항
  - 2.1. 열차의 공기저항에 영향을 주는 요인
  - 2.2. 열차의 공기저항 이론
3. 기존 고속전철 시스템의 공기 역학적 특성 비교
  - 3.1. 평지 주행
  - 3.2. 터널주행시의 공기저항 비교
  - 3.3. 공력 설계 측면에서의 차량 특성
  - 3.4. 공기저항에 영향을 주는 요소
4. 고속전철 주행시 공력 특성 해석
  - 4.1. 유동해석 기술
  - 4.2. 평지 주행 상태에서의 공력 특성 해석
  - 4.3. 터널 내부 주행 상태에서의 공력 특성
5. 결 론

## 1. 서 론

최근들어 우리나라의 교통문제는 자동차 수의 급격한 증가로 기존 도로망이 포화상태에 도달하여 심각한 상황이며, 늘어나는 이동인구와 화물의 신속하고 원활한 수송이 불가능해짐에 따른 경제적 손실이 막대한 실정이다. 이러한 심각한 교통문제를 해결하기 위해서는 획기적인 육상 교통수단의 보급이 요구되고 있으며, 이에 따라 한꺼번에 다수의 승객을 빠른 속도로 수송할 능력이 있는 고속전철사업이 추진중에 있다. 고속전철은 그 주행속도가 매우 빠르기 때문에 차체와 차체 주위의 공기와의 접촉으로 인하여 주행시 여러가지 공기역학적인 문제를 수반하게 된다. 그중에서도 특히 차체 주행속도가 250km/h 이상일 경우에는 차체에 작용하는 주행저항 중 75% 이상을 공기와의 접촉으로 인한 공력저항이 차지하므로 고속주행을 위해서는 공력저항을 최소화할 수 있는 차체 형상의 설계가 필수적으로 요구된다. 또한 주행시 차체와 공기와의 접촉은 차체 주행의 안정성과 차내 승객의 승차감에도 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 열차의 고속주행시 차체 내·외부에서 발생하는 여러가지 공기역학적 현상을 고찰하여 열차의 주행성능, 주행 안정성, 그리고 승객의 승차감을 향상 시키기 위한 연구를 열차의 공기역학적 연구라고 정의한다.

고속전철사업에 있어서 열차의 공기역학적 연구는 열차의 주행속도 상승에 따른 공력저항의 크기를 감소시켜 추진에 필요한 동력을 절감하는데 기여할 수 있을뿐만 아니라, 승객의 안전하고 쾌적한 여행환경을 제공하고 열차주행이 주위환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 필수적

손 정 략 (한국기계연구소 열유체기계시스템 연구실 선임연구원)

이 동 호 (서울대학교 항공우주공학과 교수)

백 제 현 (포항공과대학 기계공학과 교수)

모 규 경 (현대정공 기술연구소 선임연구원)

으로 수행되어야 한다.

우리나라에서도 고속전철 사업을 시작하려는 현 단계에서 부터 열차 공기역학에 관한 연구를 수행함에 바람직하다고 본다. 여기서, 우리나라 고속전철 사업에 있어서 열차 공기역학에 관한 연구가 필수적으로 요구되는 이유를 정리해 보면 아래와 같이 요약되어질수 있다.

- ① 차체개발에 필요한 예산을 최소화하기 위해서는 여러가지의 형상을 설계, 제작하는 과정을 피해야 하며 이를 위해서는 개발 초반기부터 공기저항을 최소화 할 수 있는 열차형상의 공기역학적 최적설계를 시도하여야 한다.
- ② 고속전철사업에 필요한 국토의 이용 면적을 최소화하고 토목공사에 필요한 경비를 절감하기 위해서는 공기역학적으로 문제가 되지 않는 범위내에서 열차의 교행폭과 터널 단면적을 최소화 시켜야 한다.
- ③ 특히, 터널 및 지하 주행구간이 많은 현 정부 고속전철 사업에서는 승객의 승차감 향상을 위하여 터널 내부를 열차가 주행할 경우의 공기역학적 특성에 관한 이해가 필수적이다.
- ④ 우리나라와 같이 국토가 좁은 경우 열차 선로가 주거지역을 통과할 경우가 많을 것이므로 이와 관련된 환경문제, 특히 공력소음을 줄이는 문제에 관한 연구가 수행되어야 한다.
- ⑤ 마지막으로, 만약 외국의 기존 고속전철을 기본으로 본 사업이 추진 될 경우 외국의 열차가 그대로 우리나라 국토위를 달린다는 것은 국민들의 자존심에 큰 상처를 줄 것이며, 대외적으로도 국내 기술수준의 홍보 면에서 치명적인 타격을 줄 가능성이 있으므로 본 사업의 초반기 부터 우리나라 고유의 열차형상을 창출하는데 각별한 관심을 기울일 필요가 있으며 이를 위해서는 공기역학적 최적 형상의 도출이 반드시 요구되어진다.

이상과 같은 요구로 인한 열차 공기역학에 관한 연구를 수행하기 위해서는 국내 공기역학 전문

가들의 이 분야 연구 필요성에 관한 이해와 함께 국가 단위의 연구소를 중심으로 산·학·연의 연구 공동체를 구성하여 장기적으로 연구업무를 추진하는 것이 바람직하다. 정부 고속전철 사업에 있어서 열차 공기역학 연구팀의 역할은 단계별로 아래와 같이 정리되어 질 수 있다.

- ① 조사단계  
외국의 기존 고속전철 시스템의 공력특성을 조사하여 분석하고 외국의 공력소음 및 차내환경 제어 규정들을 분석한다.
- ② 토목 및 차체 제작단계  
토목분야에 있어서는 공기역학적으로 문제가 되지 않는 최적의 선로폭, 교행폭, 터널 단면적의 크기 및 형상을 결정하며, 차체 분야에 있어서는 차체 형상의 공기역학적 최적 형상을 설계하고 환기설비를 설계, 제작한다.
- ③ 시운전 단계  
시운전 구간에서의 실차실험을 통하여 제작된 차체의 공력 특성을 최종 분석하여 공력저항 및 공력소음의 저감 대책을 확립하며 차체 내·외부의 환경제어를 위한 규정을 마련한다.

본 연구는 이를 위한 준비 단계로 고속전철 주행시 발생 가능한 여러가지 공기역학적 특성에 대하여 물리적 현상을 중심으로 분석하는 것을 목적으로 하고 있다.

## 2. 고속전철 주행시의 공기저항

### 2.1. 열차의 공기저항에 영향을 주는 요인

열차의 공기저항에 영향을 주는 요인은 열차의 주행조건과 차체에서 발생하는 요인으로 크게 나눌 수 있다.

열차의 주행조건으로는

- 열차의 주행속도
- 터널의 형상
- 열차의 교행폭
- 선로 및 선로주변의 상태

- 주행시의 기후
  - 바람의 속도와 방향
- 열차의 차체조건으로는
- 열차의 길이 및 단면적
  - 선두부와 후미부의 형상
  - 열차표면의 거칠기
  - 차체사이의 간격
  - 창문, 문, 손잡이등의 돌출 여부
  - 차량의 연결부(Gang Way)
  - 대차부(Bogie)의 형상
  - 열차밀면의 돌출물
  - 열차윗면의 돌출물
  - Pantograph의 형상 및 갯수
  - 열차의 공기 흡입구와 배출구

등을 들 수 있다. 따라서 열차의 주행에 관계되는 거의 모든 조건과 차체 각 부위의 형상은 열차의 공기저항에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

## 2.2. 열차의 공기저항 이론

일반적으로 물체에 작용하는 공기저항은 공기 저항계수( $C_D$ )를 통하여 평가되므로 공기저항  $D_a$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$D_a = (1/2)\rho U^2 C_D A' \quad (2.1)$$

여기서,  $C_D$ : 공기저항계수,  $U$ : 속도,  $A'$ : 기준 단면적,  $\rho$ : 공기밀도이다. 그러나 열차의 특성상 열차의 길이가 변할수 있고 그에 따라 마찰저항의 크기도 변하기 때문에 단일  $C_D$ 로 열차의 공기저항을 나타내는 것은 불가능하다. 그래서 열차의 공기저항은 아래의 식과 같이 열차의 길이와 무관한 압력저항과 열차의 길이에 의존하는 마찰저항으로 분리하여 표시한다.

$$D_a = (1/2)\rho A U^2 \{C_{D_0} + (\lambda l/d')\} \quad (2.2)$$

여기서  $A'$ : 열차 단면적,  $U$ : 열차 주행속도,  $C_{D_0}$ : 열차 압력저항계수,  $\lambda$ : 열차 측면의 수력적 마찰저항계수,  $d'$ : 열차 단면의 수력직경( $4 \times A'/$  열차단면의 둘레길이),  $l$ : 열차의 길이이다. 윗

식에서 괄호안의 첫번째 항은 열차의 압력저항(Form Drag)을 의미하며, 두번째 항은 열차의 마찰저항을 의미한다.

이러한 공기저항을 감소시키기 위해서는 우선 공기역학적인 제반현상의 세밀한 분석이 필요하다. 그리고 차량의 형상 및 차량기기등의 형상이 주는 공기저항에 대한 영향과 기여도를 명확히 파악하여 기여도가 높은 부분의 공기저항을 감소시켜야 한다.

### 2.2.1. 열차의 압력저항

열차의 공기저항에 있어서 열차의 길이에 의존하지 않는 압력저항은 열차의 선두부와 후미부의 비대칭 압력분포에 의한 Form Drag의 값을 의미한다. 열차의 압력저항에 영향을 주는 요소로는 열차 단면적의 크기와 선두부 및 후미부의 기하학적 형상등이며, 압력저항을 최소화하기 위해서는 선두부와 후미부의 기하학적 형상을 유선화 시키고 열차의 단면적을 최소화 시켜야 한다. 그러나 선두부의 기하학적 형상은 열차의 압력저항 뿐만 아니라,

- ① 바람으로 인한 양력(Lift Force), 세로진동 Moment, 횡방향 저항력,
- ② 열차 통과시의 열차풍,
- ③ 열차 교행시의 압력변동,
- ④ 터널내에서의 압력과 진행,
- ⑤ 공력소음

등에도 영향을 준다. 그러므로 공기역학적으로 열차선두부의 최적형상 설계란 위의 선두부형상이 주는 영향을 종합적으로 최소화하여 압력저항 감소 및 열차의 주행안정성과 승객의 승차감을 최대화할 수 있는 열차 형상의 도출을 의미하는 것이다.

### 2.2.2. 열차의 마찰저항

열차의 마찰저항이란 열차의 공기저항에서 선두부와 후미부에 작용하는 압력저항을 제외한 모든 저항을 의미하며, 열차 측면에 작용하는 표면 마찰저항과 대차부에서의 공기저항, Pantograph에서의 공기저항, 차량의 연결부, 여러장치들의 돌출로 인한 모든 공기저항이 포함된다.

열차의 마찰저항의 크기는 열차의 길이에 비례하므로 열차의 길이가 길어짐에 따라 전체 공기저항중 마찰저항이 차지하는 비율도 커진다. 그러므로 마찰저항을 최소화 시킨다는 것은 열차의 공기저항을 감소시킨다는 점에서 매우 중요하다 볼 수 있다. 순수한 열차 표면의 마찰저항에서 볼때 열차가 공기와 접하는 면적과 표면의 거칠기가 변수가 되므로

- ① 열차의 표면면적을 최적의 최소면적으로 감소시키고,
- ② 열차표면의 매끄러움을 최대화하고,
- ③ 창문, 문, 손잡이등과 같은 돌출물을 평면화시키고,
- ④ 차체 연결부 같은 곳은 덮개를 씌우는 것 등으로 열차의 표면 마찰저항을 감소시킬 수 있다.

순수한 표면 마찰저항 외에 차체 밑면의 대차부(Bogies) 및 여러장치들의 돌출로 인한 공기저항은 열차의 마찰저항에 있어 매우 큰 비중을 차지하고 있고, 개선의 여지를 가장 많이 갖고 있기 때문에 이 부분에 대한 세심한 배려가 요구된다. 우선 대차부와 여러장치들의 돌출부에 대한 최대한의 평면화가 요구되며, 열차의 밑면과 지면사이를 흐르는 공기의 강한 난류유동이 주는 열차측면에 대한 간섭저항의 연구도 필요하다. 또한, 차체 윗면에서도 돌출부분을 평면화시키고, Pantograph의 수를 줄임으로서 마찰저항을 줄일 수 있다.

### 2.2.3. 터널내부 주행시의 공기저항

경부 고속전철 사업에 있어 선로구간의 상당한 부분이 지하터널 및 산악터널로 건설될 것으로 계획되고 있다. 도시지역에 있어서의 지하터널은 대중에게 주는 소음과 진동등의 환경공해를 없앨 수 있고, 선로건설을 위한 고가의 도시지역 땅을 취득할 필요가 없는 이점을 갖고 있다. 또한, 우리나라와 같이 산이 많은 지역에서는 선로의 구배를 최소화 시키고 곡률반경을 최대화 시켜야 하는 고속열차의 선로조건을 만족하기 위해서는 산악지역의 터널은 필수적이라 할 수 있다.

열차가 주행하고 있는 터널내의 공기의 유동은 압축성 난류유동으로 공기역학적 현상은 터널밖에서의 열차주행보다 매우 복잡하며 이는 다음의

요인들에 의해 영향을 받는다.

- ① 열차의 주행속도,
- ② 터널의 단면적, 길이, 벽면의 거칠기, 입출구의 형상,
- ③ 열차의 형상, 단면적, 길이, 표면거칠기,
- ④ 터널내에서 열차의 위치,
- ⑤ 열차의 교행조건

이상의 요인으로 인하여 터널을 주행하는 열차의 공기역학적 저항은 일반적으로 터널 밖에서의 저항보다 크다. 따라서 이들 요인에 따른 공기저항의 변화에 대해 정확한 분석과 평가가 요구된다. 본 장에서는 터널내에서의 공기의 유동을 정상모델(Steady Flow Model)로 가정한 공기저항의 측정식을 소개하기로 한다.

터널구간에서의 공기저항은 열차의 터널 돌입으로 발생한 압력파가 터널 내부를 왕복하게 되어 시시각각으로 변화한다. 그러나 터널의 길이가 매우 긴 경우, 열차의 터널주행으로 발생하는 터널내 공기의 속도를 무시하고, 터널 전구간을 통과하는 시간적 평균치가 정상모델의 값에 가까워진다고 가정하면 터널구간에서의 공기저항  $D_a$ 는 다음과 같다.

$$D_a = \frac{1}{2} \rho A' U^2 \left\{ (C_{op} + R)(1 - R) + \frac{\lambda}{d} R^2 + \frac{\lambda l}{d'} \right\} \frac{1}{(1 - R)^3} \quad (2.3)$$

여기서,  $R$ : 열차 터널의 단면적비(열차단면적/터널단면적),  $\lambda$ : 터널 벽면의 수력적 마찰 저항계수,  $d$ : 터널 단면의 수력직경이다.

열차가 터널내부를 주행할 경우 공기저항의 증가외에도 터널 진입 초기에 발생하는 터널내부에서의 압축파의 거동은 차체에 갑작스런 저항을 주기도 할 뿐만 아니라 차내 승객의 귀에 이명 현상을 가져와 승차감을 저해시키는 요인이 되기도 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 터널내부 압력거동 파악을 위한 해석 및 실험을 수행하여 압력파의 크기를 예측한 뒤 이를 이용해서 터널 입·출구의 형상을 개선하거나 터널내부에 공기 배출통로를 설치하기도 한다.

표 3-1) 각국 차량에 대한 주행 저항식

차량	주행저항식
프랑스 (TGV)	Resistance = 2910 + 38.0V + 0.596V <sup>2</sup> (N)* = 296.64 + 3.8736V + 0.06075V <sup>2</sup> (kgf)
일본 (SKS)	Resistance = (1,356 + 0.01363V)W + (0.0105 + 0.000234L)V <sup>2</sup> (kgf) = 1041.408 + 10.468V + 0.1041V <sup>2</sup> (kgf) = 10216.2 + 102.7V + 1.02122V <sup>2</sup> (N)* 주: L; 차량 길이(m), W; 차량 중량(ton)
독일 (ICE)	Resistance = 11.4W + (0.025W + 17.86D)V + (0.17 + 0.0428n)D TV <sup>2</sup> (N)* 주: T <sub>r</sub> ; 1.0, W; 차량 중량(872.0 ton), D; 공기 밀도(1.225 kg/m <sup>3</sup> ) n; 차량 수

### 3. 기존 고속전철 시스템의 공기 역학적 특성 비교

#### 3.1. 평지주행

선진 3개국(프랑스, 독일, 일본)의 주행 저항에 대하여 살펴보기 전에 주행 최고 속도를 알아보면 TGV-A는 시험 최고 속도가 515km/h이며 운영 최고 속도는 300km/h이고 일본 신간선-300계는 시험 최고 속도가 300km/h이고 운영 최고 속도는

270km/h이다.

또한 독일의 ICE는 시험 최고 속도가 406.9km/h이고 운영 최고 속도는 280km/h이다. 이상에서도 알수 있듯이 실제 운영 최고 속도가 시험 최고 속도에 비하여 많이 떨어지는 것을 보아도 고속 주행시 공력 문제가 많은 것을 알 수 있다. 주행 저항식을 알아보면 표 3-1과 같다. 이 주행 저항식을 이용하여 운영 속도 범위를 0-350km/h로 설정한후 3개 기종에 대하여 속도에 대한 주행 저항을 도시하였다.(그림 3-1)

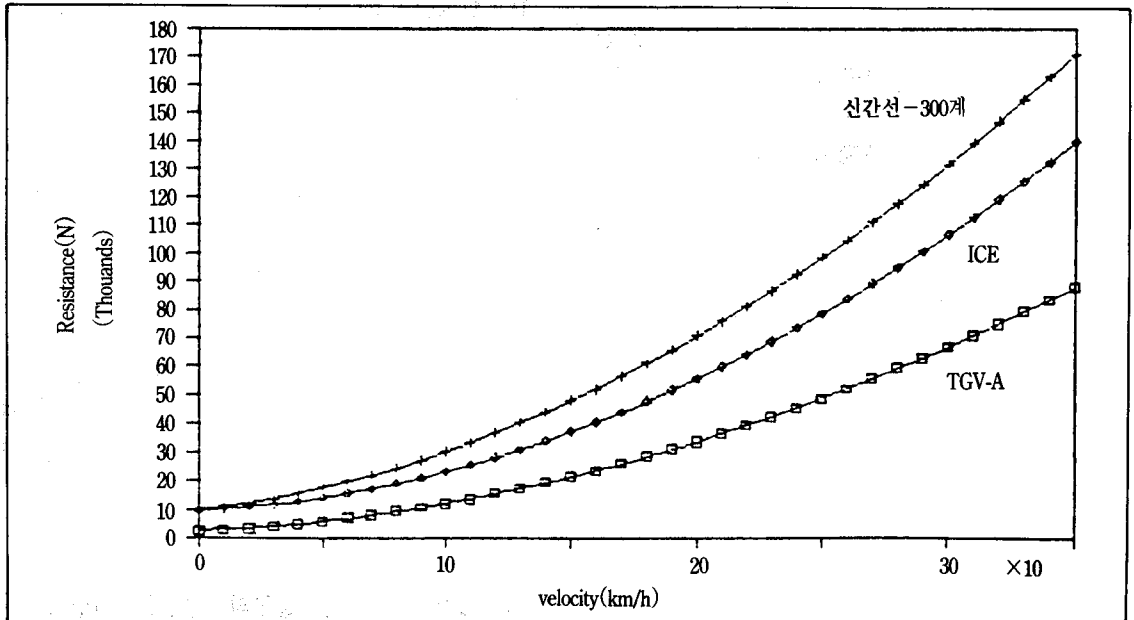


그림 3-1) 속도에 대한 각 차종의 주행 저항 비교

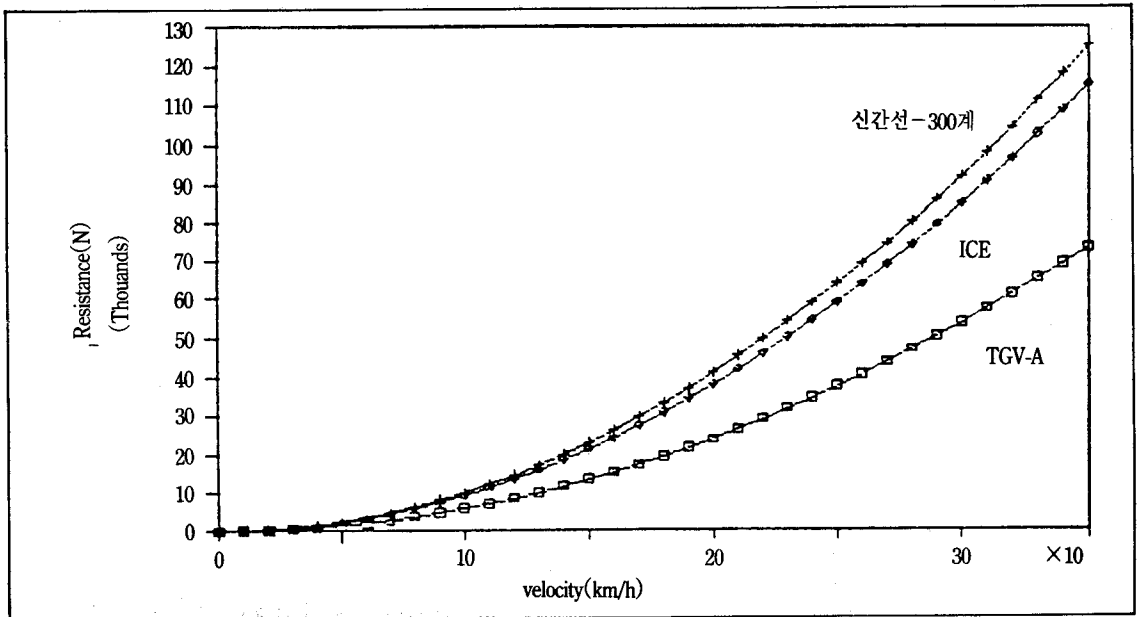


그림 3-2) 속도에 대한 각 차종의 공기 저항 비교

표 3-2) 속도별 각 차종의 공기 저항 비교

단위 : N

차 종	250km/h 기준	최고 속도 기준
TGV-A	$3.725 \times 10^4$	$5.364 \times 10^4$ (300km/h)
신간선-300계	$6.3826 \times 10^4$	$7.4472 \times 10^4$ (270km/h)
ICE	$5.8892 \times 10^4$	$7.3874 \times 10^4$ (280km/h)

표 3-3) 각국 차량에 대한 주행 저항식(in tunnel)

차량	주 행 저 항 식
일본	Resistance = $1.273 + 0.001V + 0.0002569V^2$ (kgf/ton) 주 : 신간선-100계
독일	Resistance = $11.4W + (0.025W + 17.86D)V + (0.17 + 0.0428n)DT_fV^2$ (N)* = $9940.8 + 43.6785V + 1.319178V^2$ (N) = $1.162 + 0.0051V + 0.000154V^2$ (kgf/ton) 주 : $T_f$ : 1.4, W : 차량 중량(872.0 ton), D : 공기 밀도(1.225 kg/m <sup>3</sup> ) n : 차량 수(14, $12 \leq n \leq 14$ )

저속에서를 제외하고는 전 속도 영역에서 주행 저항이 신간선-300, ICE, TGV-A 순으로 작아진다. 각 차종의 최고 속도에 따른 주행 저항 값을 보면 다음과 같다.

TGV-A<sub>300km/h</sub> :  $6.795 \times 10^4$ (N)

신간선-300계<sub>270km/h</sub> :  $1.1239 \times 10^5$ (N)

ICE<sub>280km/h</sub> :  $9.6045 \times 10^4$ (N)

각 차종에 대하여 공기 저항 및 기계 저항을

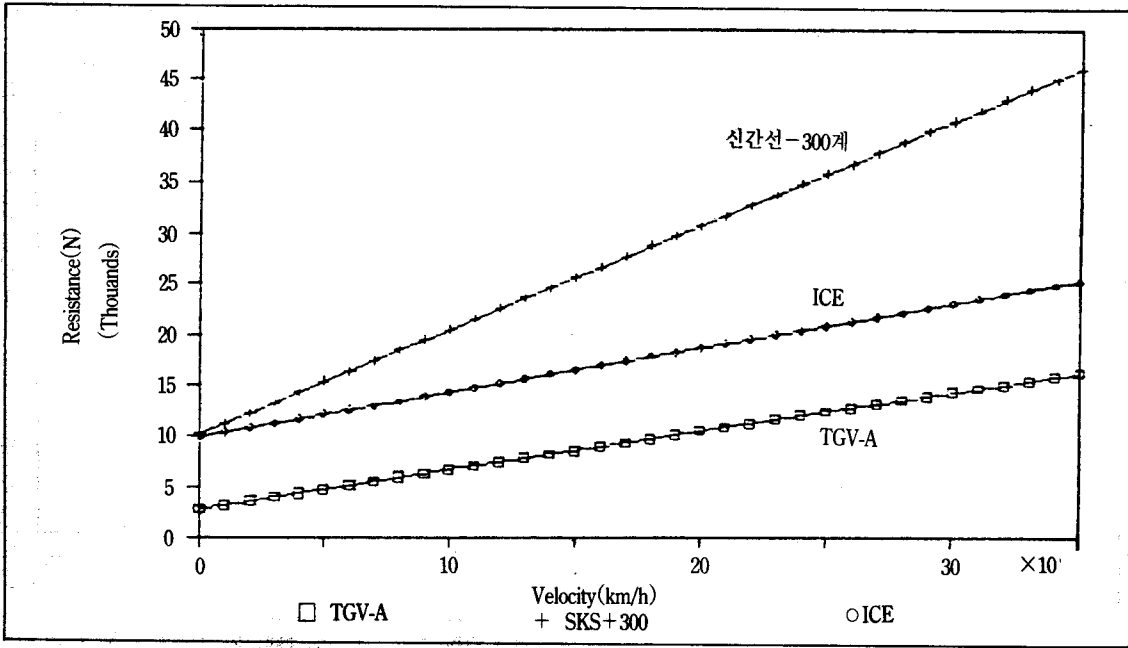


그림 3-3) 속도에 대한 각 차종의 기계 저항 비교

살펴보면

A+BV가 기계 저항에 해당된다. 이것을 그래프화 하였다.(그림 3-2, 3-3)

$$R = A + BV + CV^2 \quad (3.1)$$

그림 3-2에서 공기 저항을 주행 속도에 대하여 살펴보면 앞의 표 3-2와 같다.

위 식 (3.1)에서  $CV^2$  항이 공기 저항에 해당되며

그림 3-3에서는 신간선-300계가 주행 속도의

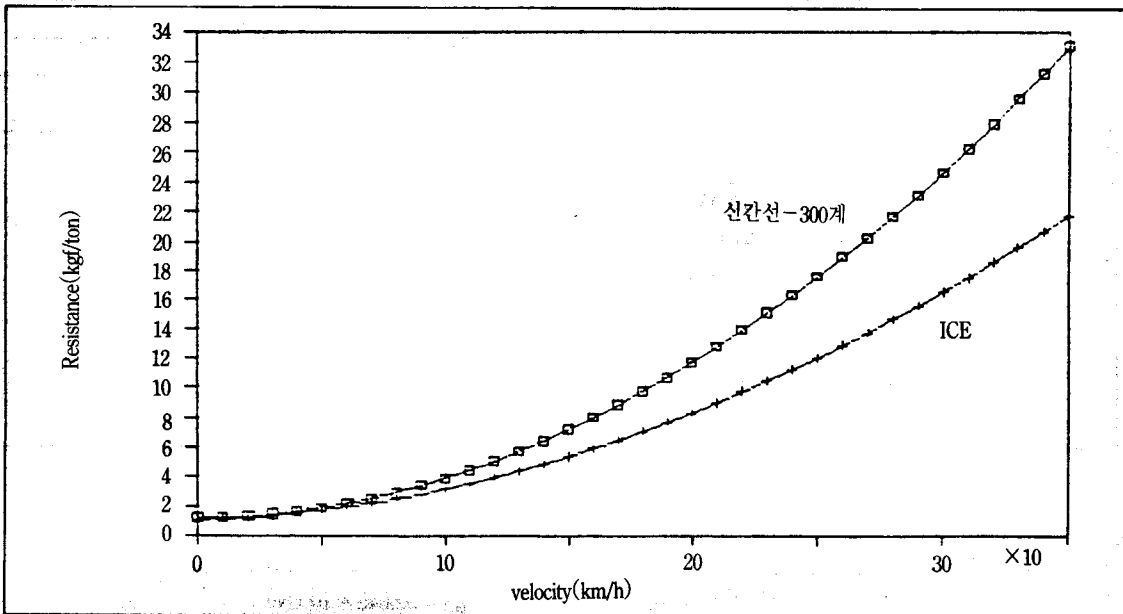


그림 3-4) 속도에 대한 각 차종의 주행 저항 비교(in tunnel)

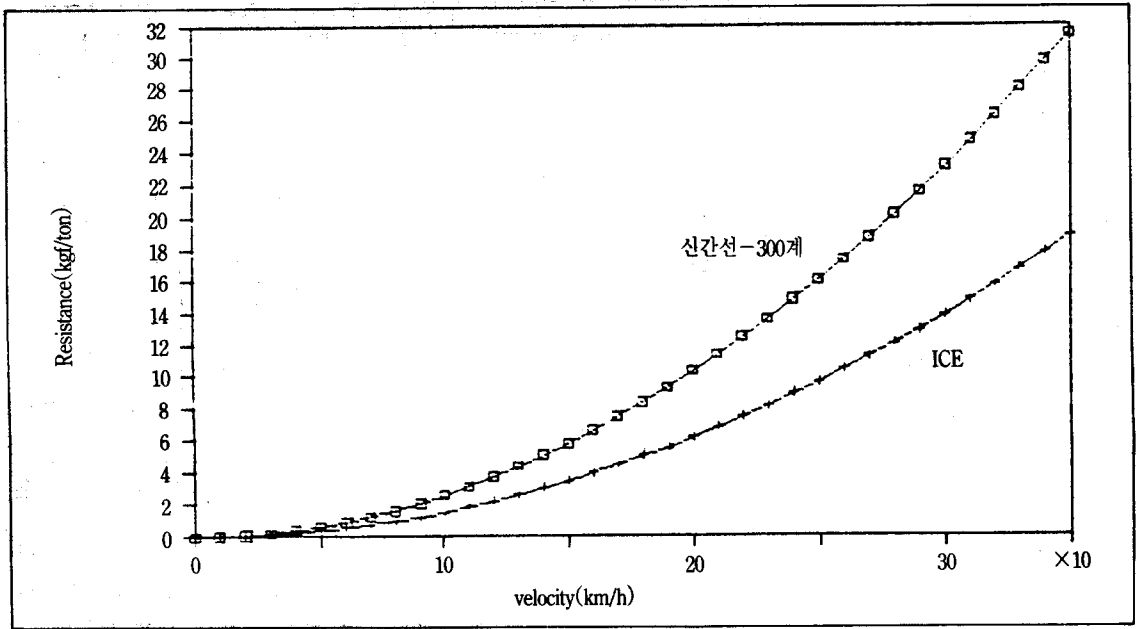


그림 3-5) 속도에 대한 각 차종의 공기 저항 비교(in tunnel)

증가에 따라 다른 기종에 비하여 높은 기울기를 갖고 증가함을 볼 수 있다.

### 3.2. Tunnel 주행시의 공기 저항 비교

고속 전철의 tunnel 주행시 주행 저항을 살펴 보면 다음 표 3-3과 같다. 여기서 일본의 신간선-300계에 가장 유사한 100계의 주행 저항식을 나타내었다.

위의 저항식을 이용하여 주행 저항과 공기 저항을 그림 3-4, 3-5에 도시 하였다.

각국의 터널에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.2.1. 신간선의 터널 구조

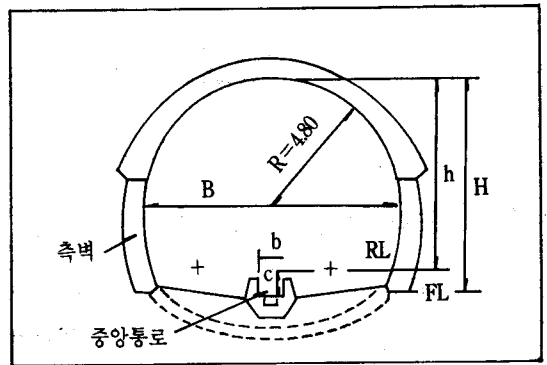


그림 3-6) 신간선의 터널 단면

표 3-4) 신간선의 각선에 대한 단면 치수

		H	h	B	b	c
동해도	직	7.80	7.15	9.60	1.00	0.90
	곡	0.15	7.45	〃	〃	〃
산양(강산 까지)	직	8.10	7.40	〃	1.20	1.20
	곡	〃	〃	〃	〃	〃
산양(박이 까지)	직	7.80	〃	〃	1.00	0.09
	곡	〃	〃	〃	〃	〃



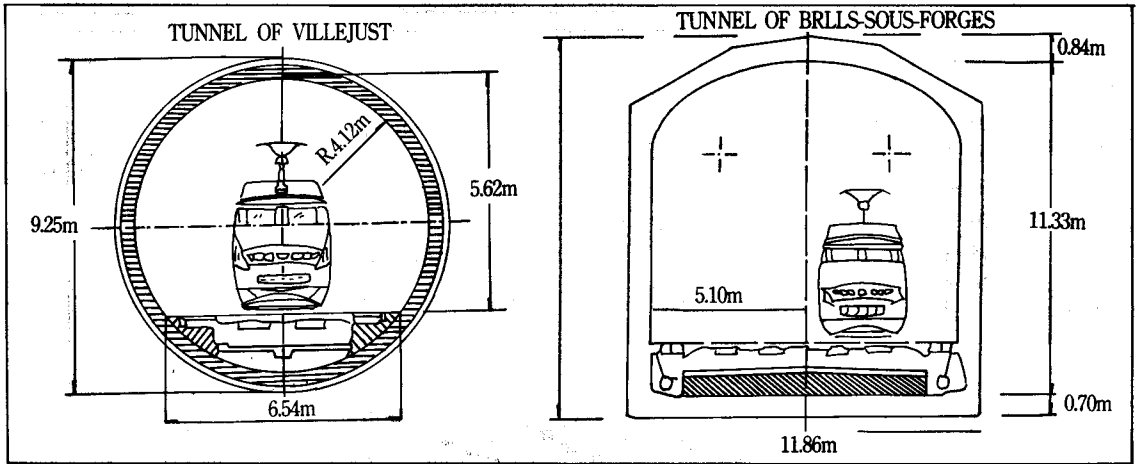


그림 3-7) TGV-A의 터널 단면

3.2.2. TGV-A의 터널 구조

TGV-A의 터널 단면은 70-90m<sup>2</sup>이며 하나의 터널을 크게 뚫어 교행하는 것 보다 track마다 별개의 터널을 뚫는 것이 소음 감소에 유리하기 때문에 이 방법을 채택하였다.

공기 저항은 차량의 길이와 단면적에 비례하는데 앞 표 3-5에서 보면 그림 3-6의 결과와 같음을 알 수 있다. 공기 저항에 가장 중요한 각 차량의 선두부 형상을 그림 3-8에서 비교하였다.

3.2.3. ICE의 터널 구조

- 터널 단면적 : 81 m<sup>2</sup>
- 슬뤼흐레르너 터널(Schluchterner Tunnel) : 47 m<sup>2</sup>
- 센게베르크 터널(Sengeberg Tunnel) : 82 m<sup>2</sup>

3.3.1. TGV

프랑스의 TGV 차량은 고속 운전에 적합한 안 전도 뿐아니라 저렴한 가격으로 고속 운행을 할 수 있는 경제적 성능을 갖고 있다. TGV의 가장 특기할 만한 사항으로는 관절형 대차의 채택이다. 이 관절 차량 방식(Articulated System)은 각 차량과 연결부에 대차를 공유케하는 대차 취부 방법으로써 다음과 같은 장점을 갖는다.

3.3. 공력 설계 측면에서의 차량 특성

TGV-A(프랑스), 신간선-300(일본), ICE(독일)을 공력 설계 측면에서 기본 형상에 대하여 표 3-5에서 비교하였다.

- ① 주요 횡단면을 감소시켜 공기 역학적 효과를 개선
- ② 대차의 수를 줄이므로서 주행 저항을 감소
- ③ 대차 상부에 승객실이 없게되므로 승객의

표 3-5) 각국 고속 차량의 형상 비교

내 용	단 위	TGV-A	ICE	신간선-300계
편 성	-	1P + 10T + 1P	1P + 12T + 1P	10M + 6T
운 영 최 고 속 도	km/h	300	280	270
단 면 적	m <sup>2</sup>	10	11.6	12.17
차 량 길 이	m(1 편성)	237.6	357.8	400
차 량 중 량	ton	490	872	768
궤 도 구 조	-	ballast	ballastless	slab

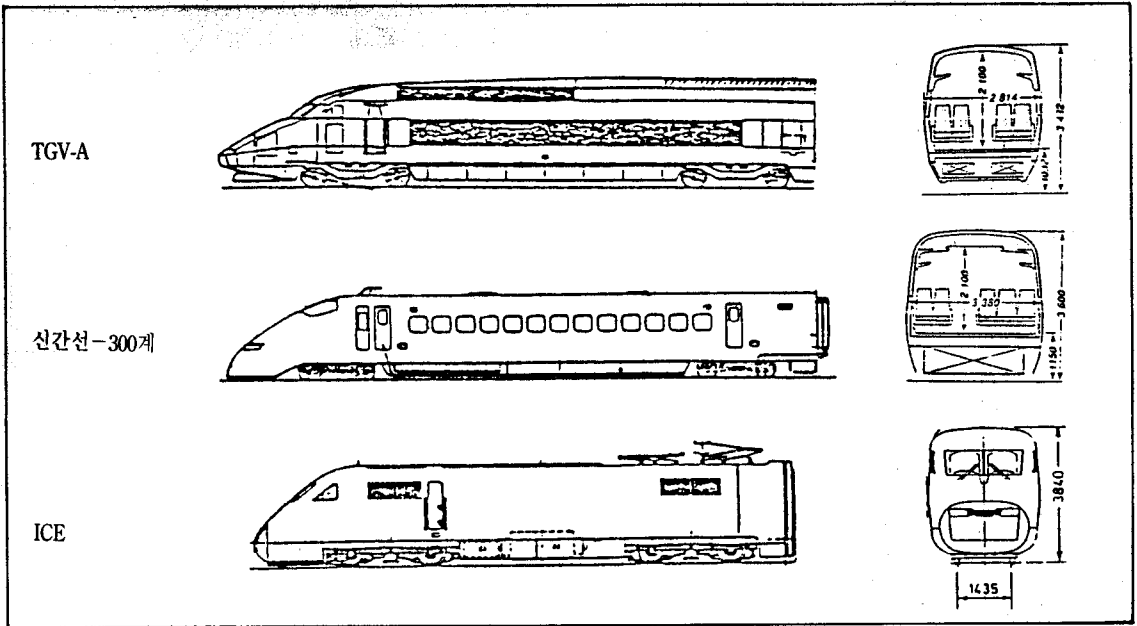


그림 3-8) 각국의 고속 전철 선두부 형상 비교

안락성 향상

TGV-A에 채택된 관절형 차량 방식은 260km/h의 운용 속도일때의 에너지 소모량을 비교해 보면 재래의 보통 차량이 이 속도를 내기 위해 마력을 증가 시킬때 보다 약 30% 정도 절감 효과가 있다.

TGV-A에서는 관절형 대차로 전체 대차수의 20%를 줄임으로써 주행 저항면에서 상당한 감소를 가져왔다. 만약 관절형 대차로 하지 않았을 경우 총주행 저항이 12% 증가가 예상된다. 그외의 공기 저항 감소를 위한 차량 특성을 살펴보면

- ① 두 차체의 간격을 줄임
- ② 차체의 frontal area 축소
- ③ 견인 대차의 크기(중량 포함) 보다 크지 않은

motor bogie 적용

- ④ 공기 저항이 적은 팬토그래프 형상

3.3.2. 신간선-300계

신간선-100계 보다 1량당 25% 가량의 무게를 줄이므로서 진동 문제를 감소 시켰으며 차체 단면이 작아지므로 인하여 공력 소음 및 공기 저항을 줄였다. 또한 팬토그래프 부위의 형상 변경에 따라 공력 소음과 집전음을 줄였다. 신간선-100계와 신간선-300계를 비교하면 표 3-6과 같다.

신간선-300계의 주요 개선 내용을 표 3-7에 나타내었다.

3.3.3. ICE

표 3-6) 신간선-100계와 300계의 비교

	100계	300계	비 고
열 차 구 성	동력 분산 방식 12M + 4T	준 동력 집중 방식 10M + 6T	경량화
열 차 중 량	927 ton	768 ton	고속화, 경량화
열 차 길 이	400m (25m × 16)	400m (25m × 16)	
운 영 최 고 속 도	225 km/h	270 km/h	고속화

표 3-7) 신간선-300계의 주요 특징

	목 적	주 요 내 용
경량화	<ul style="list-style-type: none"> <li>전동음, 구조물음의 감소</li> <li>지반 진동의 감소</li> <li>속도 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>교류 모터의 채택</li> <li>bolsterless 대차</li> <li>동력 장치의 분산 배치</li> <li>차체의 aluminum화</li> <li>좌석의 인테리어 부품 경량화</li> <li>작은 창문</li> </ul>
유선형화 평면화	<ul style="list-style-type: none"> <li>공기음의 감소</li> <li>터널 미기압과의 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>선두 형상의 slant화</li> <li>창과 외판과의 거리 단축</li> <li>프로그 도어 채택</li> </ul>
팬토그래프 주위 공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>집전음의 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>팬토그래프 카바의 최적화</li> <li>팬토그래프 수의 삭감</li> </ul>
적은 단면 낮은 중심	<ul style="list-style-type: none"> <li>공기음의 감소</li> <li>터널 미기압과의 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기기(공기 조화 기기등)를 언더프레임 하부에 배치</li> </ul>

ICE의 공력 설계에서는 낮은 중심의 단면과 측풍에 가장 작은 반력의 발생, 대차 면적의 최소화, 차량의 연결과 지붕 구조의 최적화에 치중하였다.

공기 역학적 측면에서 ICE의 형상 특성은 다음과 같다.

- ① 각진곳이 없는 전두부 및 후미부 형상
- ② 부드러운 지붕 형상
- ③ Streamline화 된 중간 차량
- ④ 외판과 같은 평면에 있는 창문과 도어
- ⑤ 공기 역학적으로 항력을 줄일 수 있는 팬토그래프 형상
- ⑥ 차량의 연결부에서의 공력 소음 및 공기 저항의 극소화 형상

### 3.4. 공기 저항에 영향을 주는 요소

철도 차량의 경우 공기 저항은 크게 차량에 의한 공기 저항과 대차에 의한 공기 저항으로 나누어 볼 수 있다. 차량에 의한 공기 저항의 경우, 표면 마찰 저항 및 전두부와 후미부의 공기 저항은 현재의 고속 차량과 같이 최적화된 상태에서는 형상의 변화에 의하여 높은 저항 감소를 기대하기가 어렵다. 반면에 대차에 의한 차체 하부 공기 저항은 형상의 변화에 대하여 높은 공기 저항

감소를 기대할 수 있다.

이러한 차체 하부의 공기 역학적 측면에서는 독일 및 신간선 보다 프랑스의 TGV가 상당히 진보된 모습을 보이고 있다.

SNCF와 British Rail에서 1/10 풍동 시험 모델을 사용한 저항 측정 결과치를 보면 다음과 같다.

- 전체 공기 저항 100%
- 차체 하부 저항 : 39%
- 전 차체 표면 마찰 저항 : 27%
- 판토그래프+천정케이블 저항 : 17%
- 전두부 및 후미부 형상 저항 : 3%
- 갱웨이, 브레이크 디스크의 : 5%

앞의 시험 결과에서 볼 수 있듯이 공기 저항에서 가장 영향을 많이 차지하는 부분이 차체 하부 저항이므로 차체 하부에 스커트의 취부로서 저항을 줄여 줄 수 있을 것이다. 또한 차체 하부에 대하여는 주행중 측풍에 대한 영향이 대단히 크기 때문에 공기 저항의 감소 및 안정성에 대하여 중요 연구과제로 사료된다.

## 4. 고속전철 주행시 공력특성 해석

### 4.1. 유동해석 기술

최근 들어 비행기, 자동차 등 수송기관의 공력

특성을 해석하기 위하여 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics)적 기법에 의한 유동해석 기술이 널리 이용되고 있다. 과거에는 수송기관의 공력특성은 풍동실험에 대부분 의존하여 행하였으나, 최근의 Computer의 급속한 발달과 유동해석기술의 향상은 Computer를 이용한 전산 모사(Computational Simulation)의 실용 가능성을 높여 주고 이를 이용한 공력 특성 해석이 풍동실험보다 더욱 경제적이도록 만들었다.

이러한 유동해석 기술은 최적의 공력특성을 가지는 열차 차체 형상의 최적화를 위하여 고속전철 차체 형상 설계에도 동일한 개념으로 응용이 가능하며 이미 일본 등지에서는 이를 실용화시켜 실제 설계 과정에서 응용하고 있다. 여기서는 본 연구팀에 의해서 개발하여 수행한 유동해석 기술에 의한 고속전철 주위의 공력특성 해석의 예를 보여주려고 한다.

#### 4.2. 평지 주행 상태에서의 공력특성 해석

계산대상인 고속전철의 형상은 그림 4-1과 같다. 선두부의 길이에 따라 긴 모델(측면에서 본 경사 27도), 짧은 모델(경사 45도)로 나누었고 전체 길이는 높이의 10, 50, 100배로 변경시키며 계산하였다. 운행속도는 200km/h로 하였으며, 높이에 대한 레이놀즈수는  $1 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ 로 하였다. 그림에서 X축은 피트(0.3m) 단위이다. 레이놀즈수  $1 \times 10^6$ 은 높이 0.3m,  $1 \times 10^7$ 은 3m에 해당된다.

그림 4-2는 유동해석 결과로서 선두부 압력 분포를 나타내었는데 선두부를 길게하면 고압력 영역이 상대적으로 좁아지며 결과적으로 공기저항이 차체에 미치는 영향이 줄어들음을 알 수 있다. 그림 4-3은 선두부 부근에서의 차체표면에 작용하는 압력 분포를 차체 중앙선을 따라 나타낸 것이다.

차체 주행시 측면 바람의 효과를 알아보기 위하여 진행 방향에 수직으로 부는 바람에 의한 영향을 계산하였다. 이 경우 열차의 진행 속도는 200km/h, 풍속을 50km/h로 하였으며 이로 인한 합성속도 방향은 진행방향에서 14도 방향이다.

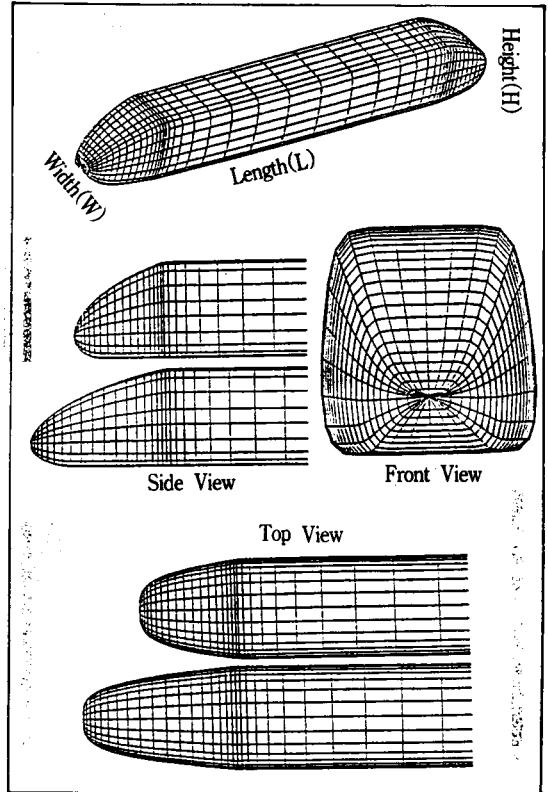


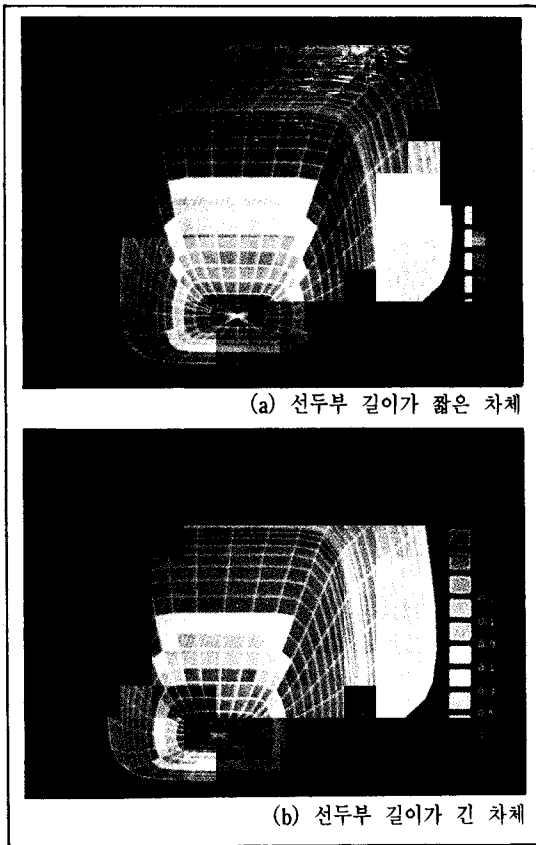
그림 4-1) 유동해석에 사용된 차체형상

그림 4-4는 측면 바람이 있을때 차체 선두부에서의 속도 분포를 보여주고 있으며 이러한 비대칭 유동현상은 차체의 측면에서 힘을 발생시킴을 알 수 있다.

#### 4.3. 터널 내부 주행 상태에서의 공력 특성

여기서는 무한 길이의 Tunnel 속을 주행하는 열차 주위의 정상 상태 유동장을 해석하였다. 본 계산에 사용된 열차는 열차 길이/높이비(L/H)가 8.6, 주행 속도는 300km/hr(Mach No=0.25), 열차 윗면과 tunnel 바닥 사이의 거리( $H_b/H$ )는 0.3, 열차 윗면과 tunnel 천정 사이의 거리( $H_u/H$ )는 1.5인 경우이다. 본 계산에서 열차 높이(H)에 기초한 Reynolds 수는  $6 \times 10^6$ 이며 전 유동장을 층류로 가정하여 계산하였다.

그림 4-5에는 본 계산에서 구한 열차 주위에



(a) 선두부 길이가 짧은 차체

(b) 선두부 길이가 긴 차체

그림 4-2) 차체 선두부 압력분포

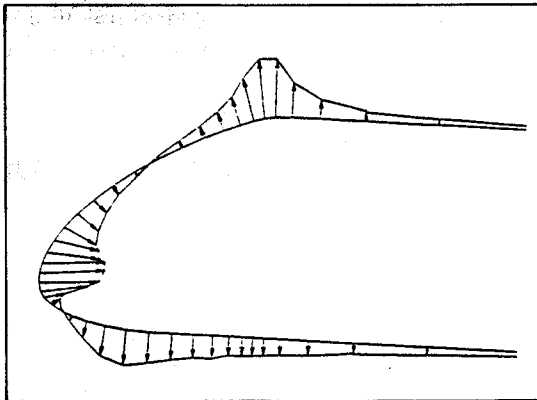


그림 4-3) 차체 표면에 작용하는 압력분포

서의 등밀도 분포, 등압력 분포 및 등 Mach수 분포를 나타내었다. 그림 4-6에는 열차 선두부와 후미부에서의 속도장을 나타내었는데 전체적으로 박리는 일어나지 않고 있으나 후미부의 윗면과

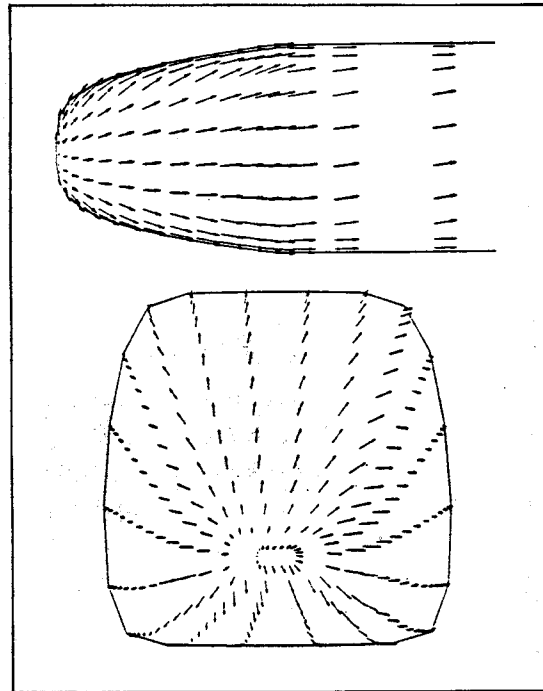


그림 4-4) 측면 바람이 있을 경우 차체 선두부에서의 속도분포

아랫면의 경사진 부분에서 박리가 일어나면서 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 그림 4-7에는 열차 표면에서의 압력 계수 분포를 나타내었다. 이 그림에 의하여 선두부에서 압력이 최대가 되고 선두부와 열차 본체의 윗면의 연결 부분에서 최소 압력이 발생하며 열차 밑면에서는 선두부 및 후미부 부근을 제외하고는 channel 유동에서와 같이 균일한 압력 강하가 이루어짐을 알 수 있다. 열차 윗면에서는 선두부 윗부분의 곡률에 의하여 최대 압력 강하와 이를 뒤이은 압력 회복이 있고 그 후는 거의 동일한 압력을 유지하고 있음을 알 수 있다. 열차의 후미부 부근에서 압력 분포에 약간의 fluctuation이 있음을 목격할 수 있는데 이는 그림 4-6에서 열차의 후미부에서 보이는 박리 현상을 뒷받침하고 있다.

## 5. 결 론

이상에서 고속전철 주행시 발생 가능한 공기

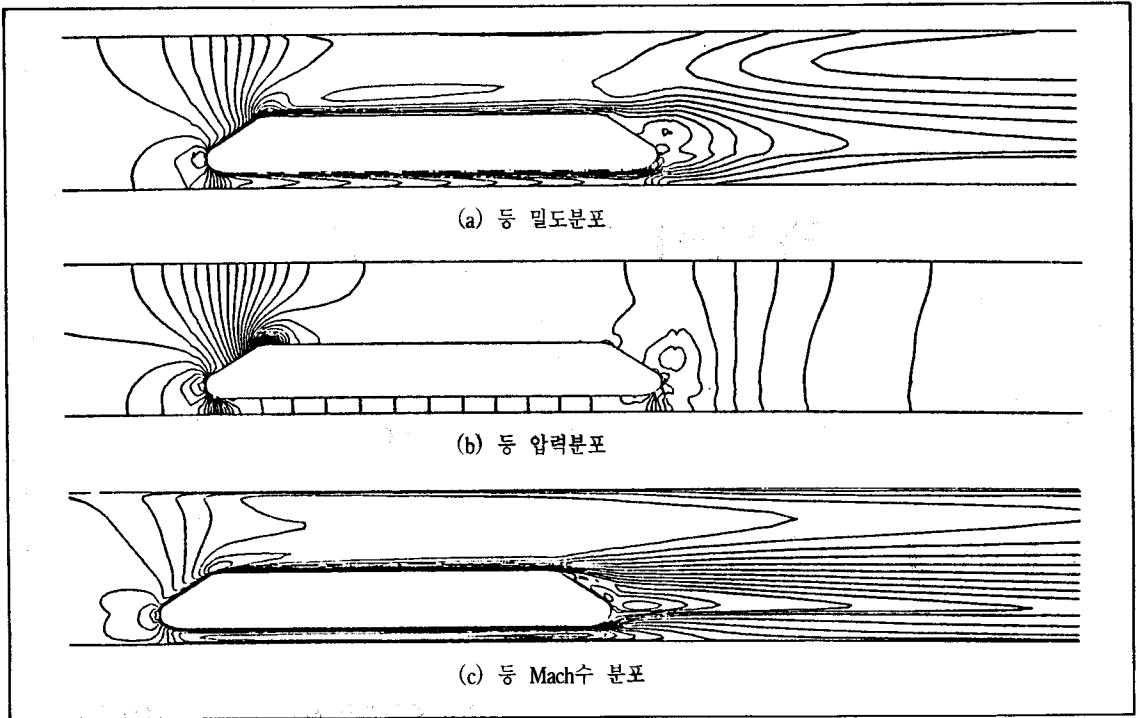


그림 4-5) 터널내 주행중인 열차 주위 유동현상

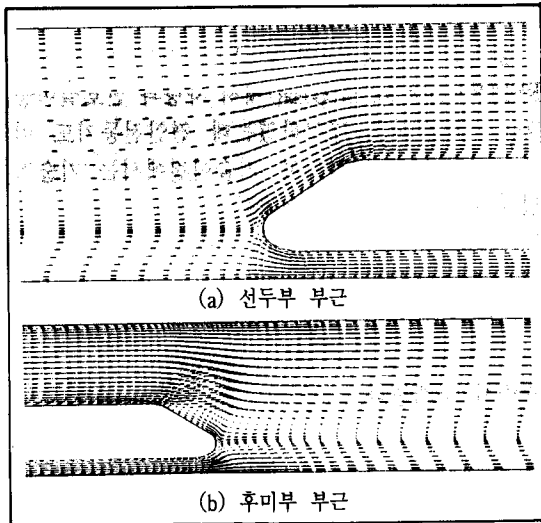


그림 4-6) 차체 선두부 및 후미부 부근의 속도분포

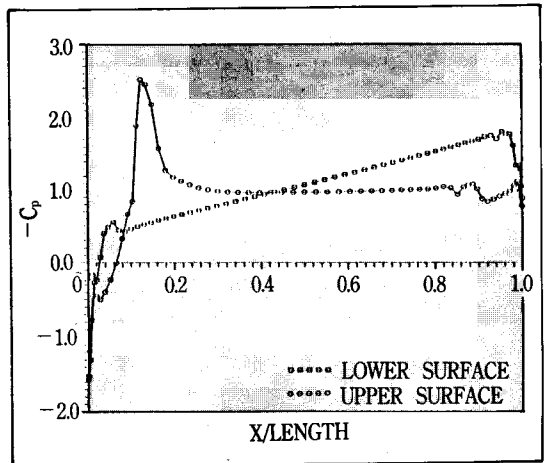


그림 4-7) 열차 표면에서의 압력계수분포

역학적 현상과 기존 고속전철 시스템의 공기역학적 성능 비교, 그리고 고속전철 차체의 공기역학적 설계를 위한 유동해석 기법의 적용에 대해서 알아보았다. 고속전철 시스템의 진정한 국산화

위해서는 우리나라 고유의 차체 모델 개발이 필요하며 이를 위해서는 차체 형상의 공기역학적 최적설계가 수행되어야 한다. 이를 위하여는 열차 공기역학 연구를 위한 전문인력 양상이 필요하며 이들에 의한 공력설계 기술축적이 시급히 요구된다고 생각한다.