

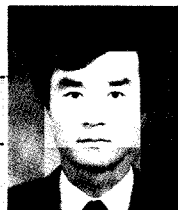
# 고속전철의 공기역학적 특성 및 해석 기술현황



**김인선**

(항공우주연구소 공력성능연구그룹)

- '80. 2 서울대학교 항공공학(학사)
- '80-'81 대한항공(주)
- '81-'83 대림산업(주)
- '86. 8 Texas 주립대(Arlington) 항공공학(석사)
- '91. 5. North Carolina State Univ. 항공공학(박사)
- '91. 4-현재 항공우주연구소 선임연구원



**하성도**

(KIMM 신교통기술연구부)

- '77. 2 연세대학교 기계공학과(학사)
- '77-'81 과학기술처 국제협력과(기계기좌)
- '84. 12 Texas 주립대학교 기계공학과(석사)
- '89. 7 Oklahoma 주립대학교 기계공학과(박사)
- '90. 8-현재 한국기계연구원 선임연구원



**김재무**

(항공우주연구소 공력성능연구그룹)

- '78. 2 서울대학교 항공공학(학사)
- '78-'84 국방과학연구소
- '86. 8 Texas 주립대(Arlington) 항공공학(석사)
- '93. 8 Georgia Institute of Technology 항공공학(박사)
- '94. 3-현재 항공우주연구소 선임연구원

## 1. 머릿말

고속전철은 시속 300km 또는 그 이상에서 운행되게 되는데 이 속도는 음속의 25% 이상에 해당하는 속도로 이 경우 공력저항이 총 주행저항의 80%를 차지하게 되고 또한 고속으로 인한 심각한 공력소음의 발생 등 많은 공기역학적인 문제점들이 대두되게 된다. 따라서 고속전철의 공기역학적 설계는 항공기 개발에서와 마찬가지로 고속전철 개발시 중요한 역할을 차지한다. 고속전철의 공력특성은 고속전철의 선두부 형상, 차량 단면 형상, 그리고 판토틀레프 등의 차량 외부 부착물 등에 의해 좌우되므로 이러한 부분에 대한 공력해석이 차량 설계시 선행되어야 한다. 또한 한국내 선로의 30%가 터널을 통과하게 되어 있어 터널 통과 안전성 및 터널 공사비 절감을 위한 터널 공력설계가 필요하다. 본 내용에서는 고속전철과 관련된 공기역학적 문제점들을 검토하고 국내의 관련기술 현황 및 공력해석 기술을 살펴보고자 한다.

## 2. 고속전철의 공기역학적 문제점

### 2.1 공기 저항

열차의 주행저항은 열차가 일정 속도로 주행하기 위해 공급되어야 할 힘으로 기계적 저항과 공기저항으로 분류할 수 있다. 주행저항은 출발시를 제외하고는 주행속도에 따라 증가하게 되는데 일반적으로 다음의 실험식이 알려져있다.

$$R = A + BV + CV^2$$

여기서, R : 주행 저항  
 V : 주행 속도  
 A, B, C : 상수

위 식에서  $A + BV$  항은 기계적 저항이고  $CV^2$ 항은 공기저항이다. 기계적 저항은 열차 주행시 베어링과 회전축, 레일과 바퀴 등 각종 접촉부의 마찰에 의한 저항이다. 기계적 저항은 열차의 속도에 비례하며 열차의 무게, 선로조건 등이 기계적 저항의 크기와 직접적 연관이 있다.

공기저항은 주행시에 열차에 작용하는 공기의 저항력으로서 열차의 무게와 무관하지만, 열차의 크기와 형상에 따라 변하며 열차 주행 속도의 2승에 비례하여 증가한다. 그림 2.1-1에 나타난 바와 같이 주행 속도가 증가함에 따라 열차의 총 주행저항에서 공기저항이 차지하는 비율이 기계적 저항에 비하여 급속하게 증가하여 300km/h 이상에서는 80% 이상을 공기저항이 차지하게 된다. 공기저항은 열차의 선두부와 후미부에 작용하는 압력저항과 열차 표면에 작용하는 마찰저항으로 구분할 수 있다. 열차의 압력저항은 선두부와 후미부의 형상과 직접적으로 관계가 있으므로 압력저항의 감소를 위해서는 이들에 대하여 최적의 유선형 형상이 요구된다. 열차의 마찰저항은 순수한 표면 마찰(skin friction)과 열차 표면의 각종 돌출물에 의한 저항으로서 열차의 길

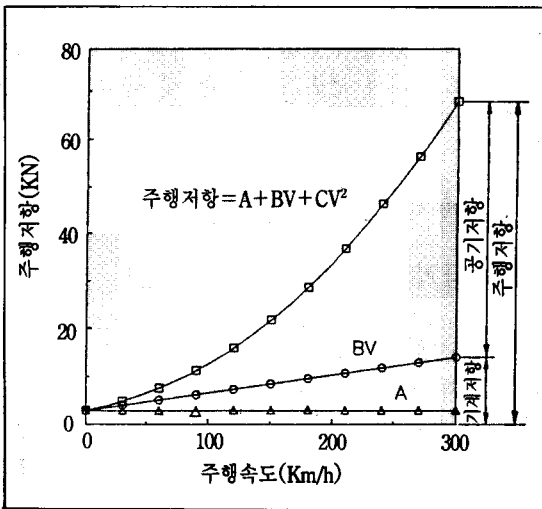


그림 2.1-1 프랑스 TGV-Atlantique 열차의 속도에 대한 주행저항

이, 표면 거칠기, 각종 돌출물의 갯수에 좌우되며 열차의 경우 단면적에 비해 길이가 훨씬 긴 세장형이어서 공기저항중 압력저항에 비하여 마찰저항이 큰 비중을 차지한다. 열차의 공기저항에 영향을 주는 요인은 주행속도 등 주행조건과 열차의 길이, 선두부 형상 등의 차체조건으로 크게 나눌 수 있다.

## 2.2 공력소음

공력소음은 주행소음 중의 하나로서 열차의 주행시에 차체와 차체 주위의 공기와의 마찰에 의하여 발생한다. 공력소음은 열차 표면에서의 유동박리(flow separation)에서 발달되는 난류 경계층 유동이나 미소 와류(vortex)가 동반되는 비정상 유동에 의하여 발생한다. 이론적으로 공력소음의 크기는 열차 주행속도의 6승에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있으며 고속으로 주행하는 열차의 경우 전체 주행소음중 공력소음이 차지하는 비중이 매우 크다(그림 2.2-1 참조). 고

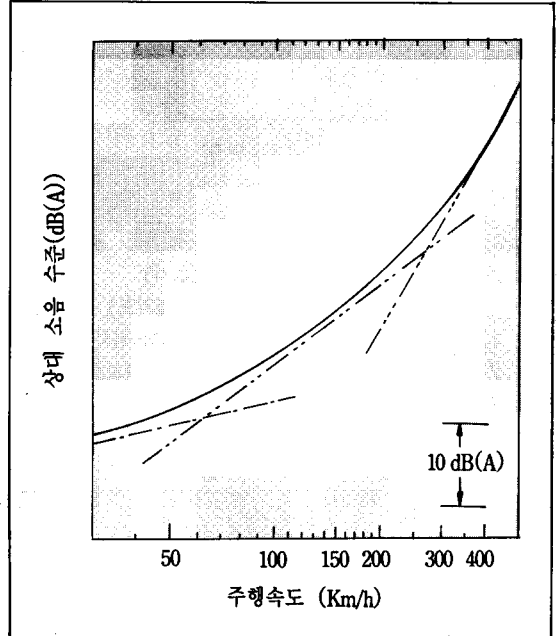


그림 2.2-1 선로 중심으로 부터 25m 거리에서 측정된 주행속도에 대한 상대 소음 수준 : (—)전체소음, (-·-)기계소음, (-·-·-)바퀴소음, (-····-)공력소음

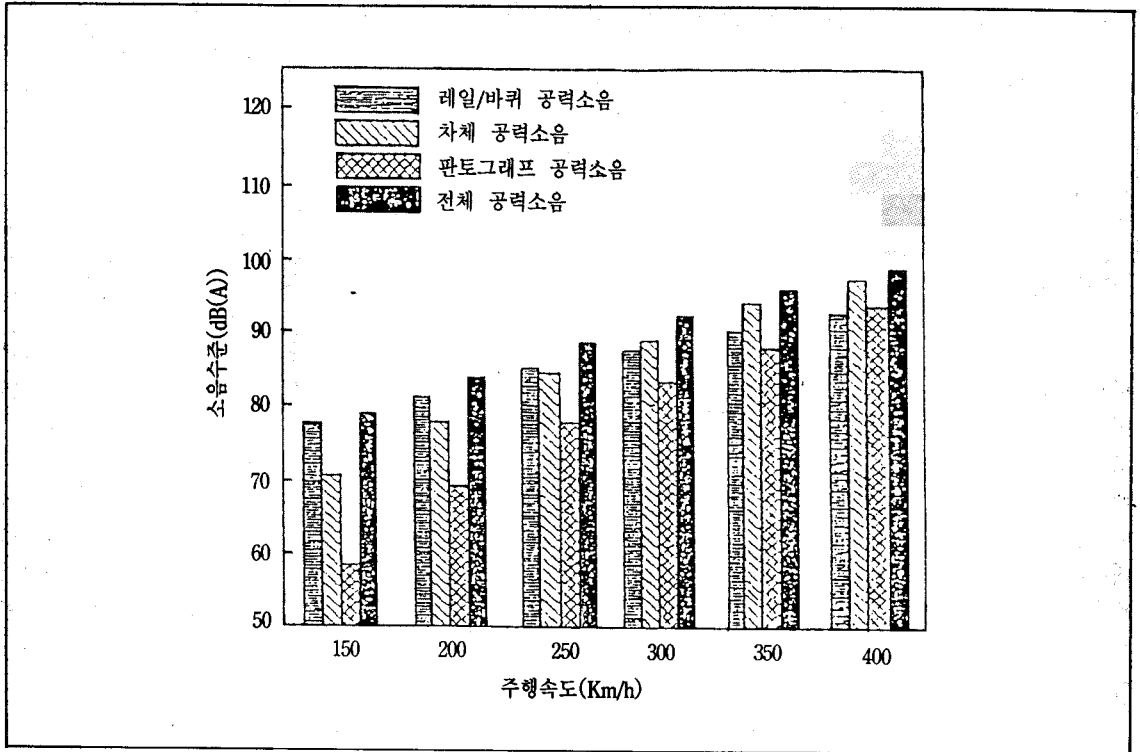


그림 2.2-2 ICE 열차의 주행속도에 대한 소음원별 소음수준 및 전체 소음수준

속전철에 있어서 공력소음은 열차 표면과 판토타그래프에서 주로 발생하는데 특히 판토타그래프에서 발생하는 소음은 그 강도가 클 뿐 아니라 소음원이 높은 곳에 위치하여 방음벽 등에 의한 제어가 어려워 판토타그래프 설계시 우선적으로 고려하여야 한다. 그림 2.2-2는 ICE 열차의 속도에 대한 소음수준을 소음원 별로 표시하고 있는데, 250 km/h 이상의 속도에서는 차체와 판토타그래프에서 발생하는 공력소음이 커짐을 알 수 있다. 공력소음의 감소를 위하여 열차 선두부 형상의 유선화, 표면 부착물의 평면화, 판토타그래프 구성 부품의 형상 최적화 등으로 유동 박리 현상을 최소화하여야 한다.

### 2.3 터널내의 압력변동

열차가 터널내를 고속으로 주행할 때에 터널 내에는 커다란 압력변동이 발생한다. 이러한 압력변동이 열차내로 그대로 전달되면 승객에게 이

명현상과 같은 불쾌감을 주게되어 승차감의 저하를 초래하게 된다. 터널내의 압력변동은 열차 속도의 2승에 거의 비례하여 증가되므로 고속철도 차량의 개발에 있어서는 구체 용력의 증대, 기밀 구조화 및 환기 장치의 개량과 같은 문제가 먼저 해결되어야 한다.

열차가 터널에 진입하는 것은 원통내부를 피스톤으로 밀어내는 것에 비유할 수 있는데 차량 선두부의 진입시는 압축파가 발생하고 후미부의 진입시는 팽창파를 수반한다. 이러한 압력파들은 터널의 입구와 출구, 열차의 선두부와 후미부에서 반사되며 터널 내부를 왕복하면서 열차 주변에 심각한 비정상 압력변동을 야기한다(그림 2.3-1). 터널내에서 두 열차가 서로 교차 주행하는 경우에는 이 비정상 압력변동이 더욱 증폭되어 발생한다. 압력변동의 크기를 결정하는 주요 인자는 열차속도와 열차와 터널의 단면적비이며, 열차속도의 증가, 터널 단면적의 감소 및 열차 단면적의 증가에 따라 터널내의 압력변동은 증가

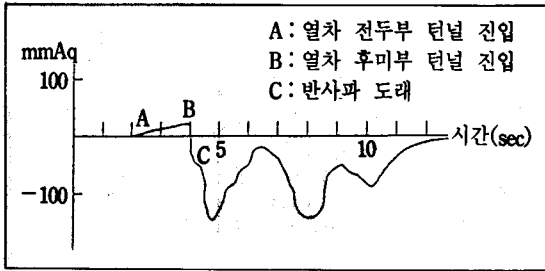


그림 2.3-1 기밀하지 않은 차량의 객실내의 압력 변동

한다. 터널통과시 승객이 경험하게 되는 불쾌한 이명현상은 이 비정상 압력변동에 기인하는 것으로 주로 그 압력변동의 크기 및 변동 속도에 비례한다. 터널 입, 출구 및 단면의 형상 및 크기는 이 압력변동과 직접적 관련이 있으며 또한 터널 내부 주행시의 저항 증가 정도를 결정하게 되므로 고속전철용 터널의 경우 터널 통과시의 안전성 및 터널 굴착의 경제성을 고려한 터널 공력설계가 필요하다.

열차의 터널 통과와 관련된 또다른 문제점은 소음 발생이다. 차량 선두부의 터널 진입시에 발생한 압축파가 터널 출구에서 반사될 때 일부

가 펄스 형태의 압력파로 터널 외부로 방출하여 충격음(impulsive noise)으로서 터널 바깥 주위로 전파하게 된다(그림 2.3-2). 이 펄스 형태의 압력파는 미기압파라고도 불리우며, 터널 주변 환경에 대한 소음 문제를 야기시키므로 이에 대한 해결책이 마련되어야 한다.

### 2.4 열차풍

열차풍은 열차의 주행시 열차 주위의 공기가 점성마찰에 의해 열차의 진행 방향으로 끌려가면서 발생하는 공기의 흐름이다. 공기의 마찰력은 속도 구배에 비례하므로 열차풍은 열차속도의 증가에 따라 커진다. 열차풍의 형태는 열차의 선두부, 측면부 및 후미부에서 매우 다른 양상을 나타내고 있다(그림 2.4-1). 1) 선두부 부근에서 빠른 풍속이 발생하여 옆 방향으로 밀리는 공기의 흐름에 의해 발생하는 용출류(erupting flow), 2) 열차 선두부와 후미부 사이의 구간에서 열차 주위의 공기가 열차 측면의 마찰에 의해 열차 측면을 따라 흐르는 경계층류(boundary layer flow), 3) 열차 후미부에서의 압력이 감소된 영역

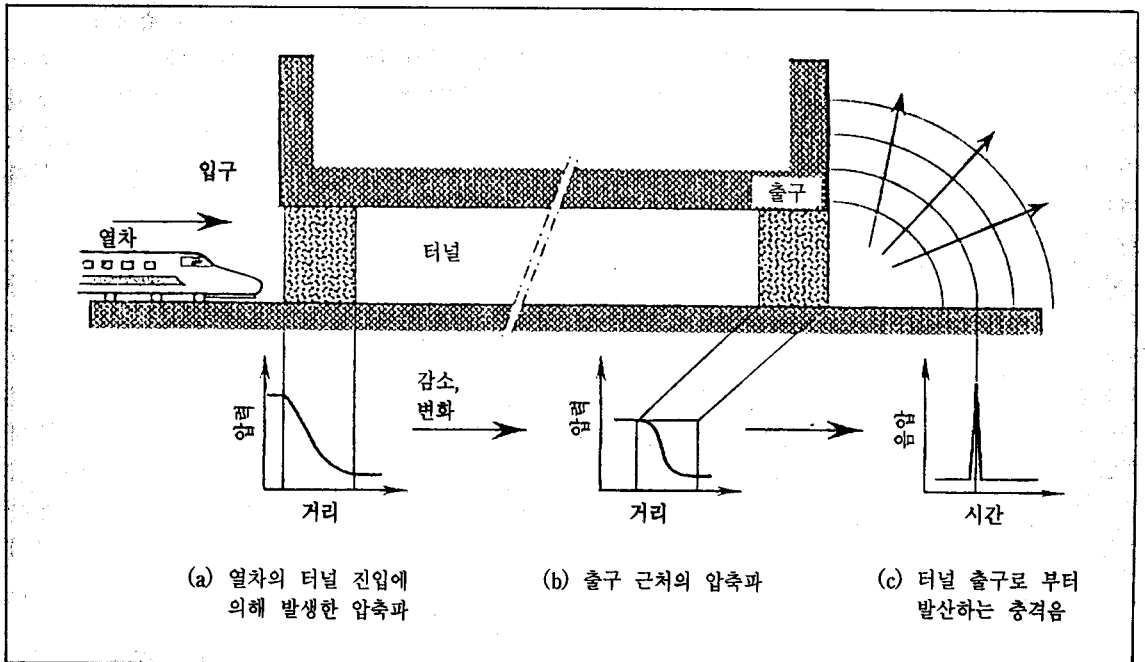


그림 2.3-2 고속철도 터널에서의 충격음 발생 메커니즘

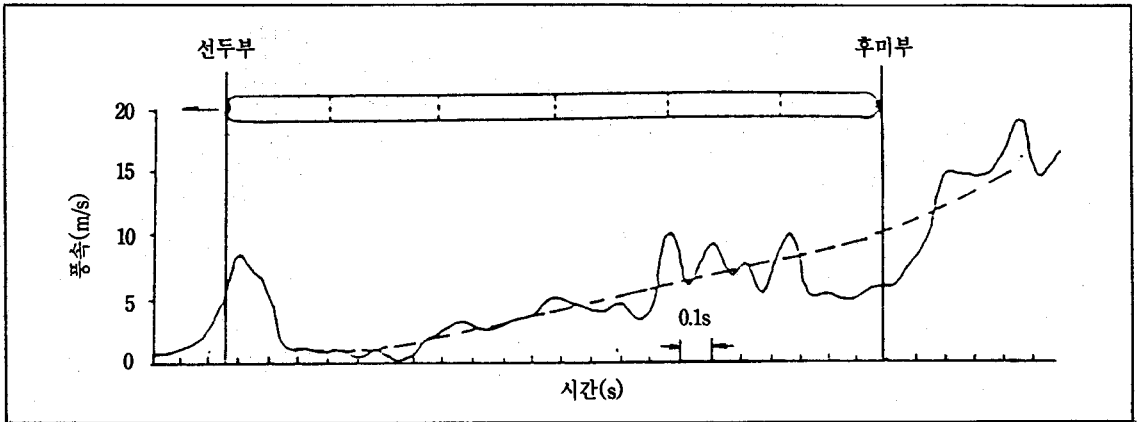


그림 2.4-1 열차풍의 측정예(열차속도 235km/h, 열차 측면으로부터 1m 거리)

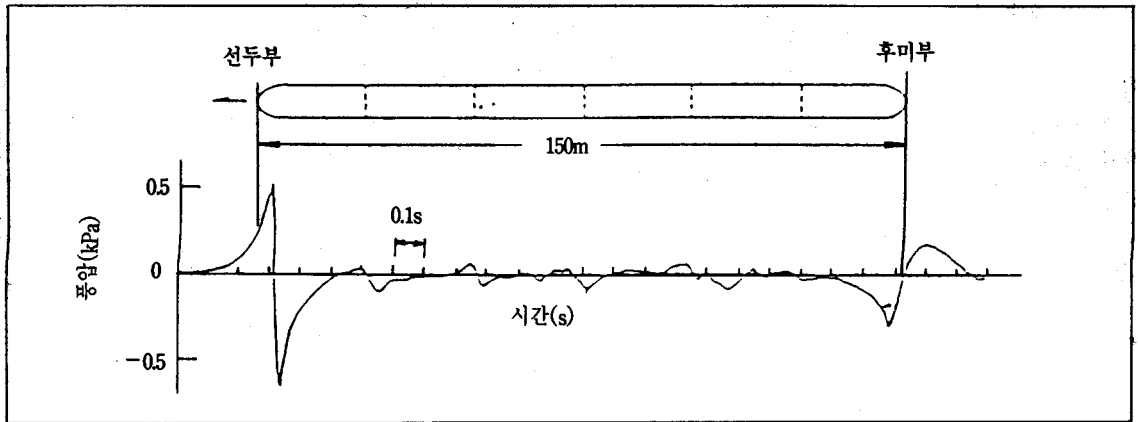


그림 2.4-2 열차풍압의 측정예(열차속도 270.7km/h, 열차 측면으로부터 0.65m 거리, 지상 1m)

에 대한 열차 측면 및 후면으로부터 흘러드는 공기의 흐름에 의해 발생하는 와류(wake)가 있다. 주행하는 열차 주위의 벽면에는 열차의 선두부가 통과하는 전후에 있어 양과 음의 풍압의 잇따른 최대 풍압이 발생하며, 그 이후의 풍압은 작게 변동하여 후미부 통과시에 다시 음과 양의 풍압이 발생한다(그림 2.4-2). 이러한 열차 풍압의 변동의 영향으로는 역내 승강장 위의 대기 승객의 안전성, 선로 주변 지상 구조물의 강도 및 두 열차 교행시의 안전 운행 등이 있다. 열차풍의 압력변동은 열차의 선두부와 후미부의 현상에 크게 의존하므로 열차의 선두부와 후미부 형상의 최적 설계를 통하여 풍압을 최소화시켜야 할 것이다.

이상과 같은 여러가지 공기역학적인 문제를

해결하여 안전하고 쾌적한 운행을 위하여 공기저항이 적은 최적의 열차 형상을 개발하여 열차 표면에서 유동박리(flow separation) 영역을 최소화하고 열차 선두부 근처에서의 커다란 압력 파동(pressure fluctuations)이 없도록 고속전철의 공력설계가 이루어져야 한다.

### 3. 국내의 기술 동향

#### 3.1 국외 기술 동향

고속전철을 실용화하여 상용 운행중인 프랑스, 독일 및 일본에서는 고속전철 개발 초기 단계부터 공력설계에 관한 연구개발을 지속적으로 추진하여 고속전철의 실용화에 활용하여 왔다.

프랑스의 경우, SNCF(French National Railway)의 지원하에 GEC ALSTHOM사의 공력설계 연구팀에서 공력설계 연구개발을 추진하여 TGV-A 열차의 개발에 참여하였다. 이 열차에 있어서는 차체 사이의 간격 축소, 차체의 단면 축소 및 판토그래프 형상의 최적화 등으로 공기저항을 감소시켰다. 또한 350km/h 상업 운영을 목표로 고성능, 안전성 및 승차감에 대한 연구가 계속되고 있다. 특히 성능 향상이 공력설계의 개선에 의존한다고 보고 공기저항을 축소시키기 위한 열차의 선두부 형상의 최적 설계를 목표로 1/20 축소 모형의 풍동 실험과 실차 상황에 대한 유동장 해석, 유동 특성에 대한 형상 수정의 영향 분석 등의 연구를 추진하고 있다. 그리고 터널 형상 설계의 기술 향상을 위한 연구도 지속적으로 추진하고 있다.

독일의 경우, 열차 선두부 형상의 최적 공력설계를 통한 공기저항의 절감으로 인한 소요 동력, 환경소음 및 압력파의 최소화를 ICE 개발의 주요 목표로 설정하였었다. BMFT (Federal Ministry of Research and Technology)의 지원하에 DLR 공력설계연구소(Institute of Design Aerodynamics) 및 유체공학연구소(Institute of Experimental Fluid Mechanics)에서 공력설계에 관한 연구를 수행하여 공기저항을 최소화할 수 있는 ICE 열차의 형상을 설계하였다. 이들 연구소에서는 30개의 서로 다른 선두부 형상을 설계하고, 이들 중에서 열차의 첫번째 대차 및 운전실에 대한 공간 여유를 전제 조건으로 하여 8개의 선두부 형상을 선정하였다(그림 3.1-1, 이들 중에서 (a) 및 (b)는 전제 조건을 만족시키지 않으나 공기역학적 최적 형상에 대한 자료를 제공하기 위해 포함됨). 이들 8개의 형상에 대하여 이론 해석, 수동 및 풍동 실험 등 전반적인 공기역학적 연구를 실시하여, 항력계수(drag coefficient), 공력소음 및 운전요건 등의 관점에서 (h)를 선택하고, 운전요건 측면에서 수정하여 그림 3.1-2와 같은 선두부 형상을 최종적으로 개발하여 ICE에 적용하였다. 현재에도 차체 각 부위에 있어서의 공기저항 및 공력소음을 줄이기 위한 연구가 계속 진행 중에 있다.

일본의 경우, 일본 철도총합기술연구소 내의

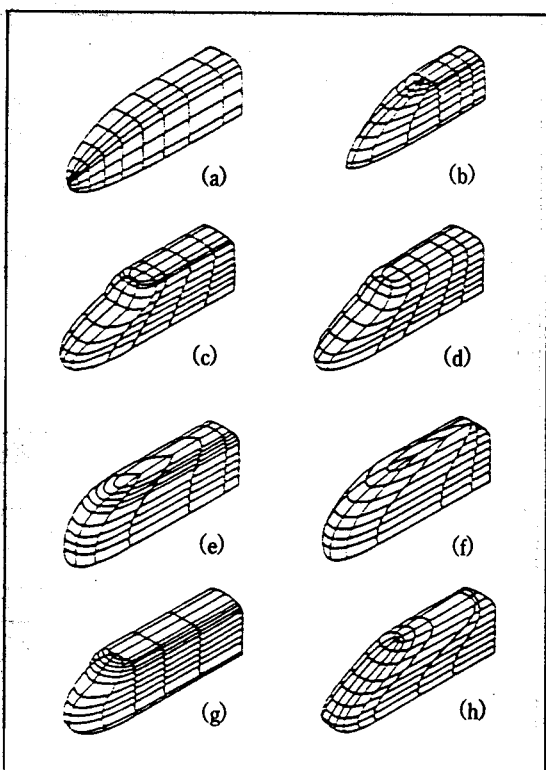


그림 3.1-1 ICE 열차 선두부 형상 설계를 위해 선정된 8개의 선두부 형상

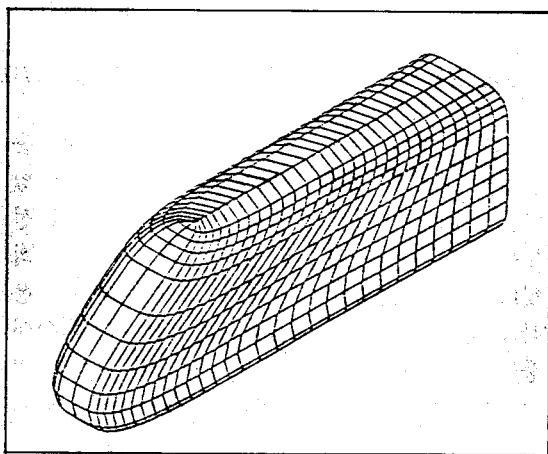


그림 3.1-2 최종 선택된 선두부 형상의 판넬 모델

공력설계팀을 중심으로 하여 고속전철개발사업 초창기 부터 공력설계에 관한 연구를 지속적으로 추진하여 신간선의 속도 향상을 위한 새로운 열

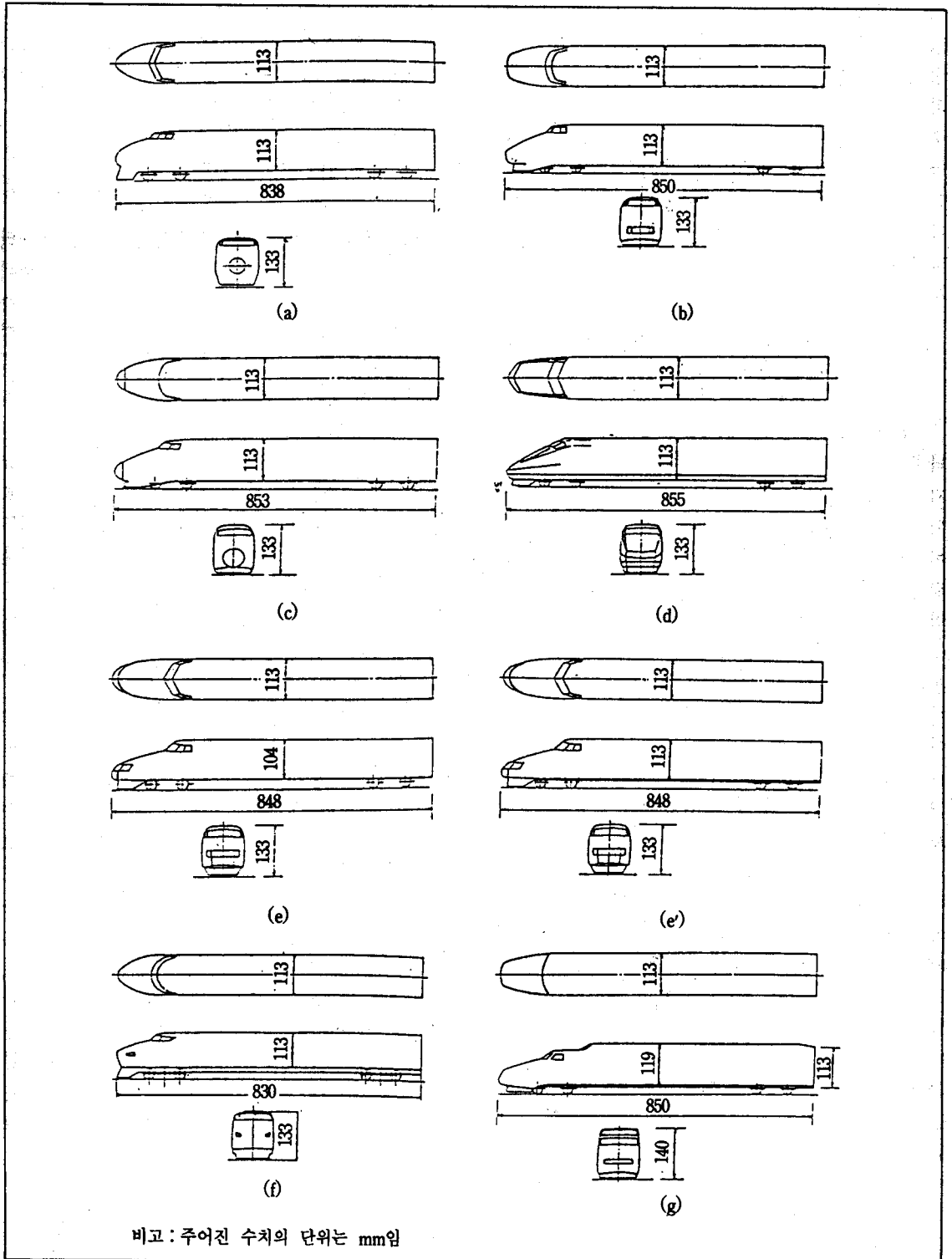


그림 3.1-3 신간선 열차 선두부 형상 설계를 위해 선정된 7개의 선두부 형상

차 형상을 개발하였다. 신간선 전철의 선두부 형상의 최적 공력설계를 위하여 7종류의 선두부 형상을 설계하고 이들에 대하여 공기저항 및 교차 주행시의 압력변동에 대한 풍동실험 연구를 수행하였다(그림 3.1-3). 또한, 터널내의 공기역학적 현상에 관련하여 운행 안전성, 승차감 향상 및 환경소음 등에 관한 연구가 꾸준히 추진되어 왔다. 현재에도 공기저항과 공력소음의 감소 및 터널내의 공기역학적인 문제 해결을 위한 연구가 계속 진행중에 있다.

### 3.2 국내 기술 동향

국내에서는 선로의 취약성, 철도운송에 대한 낙후된 관념과 인식 부족 등으로 1970년대 말까지는 기존의 저속철도의 유지 보수에만 전념하여 왔다. 그러다가 1980년대 초반에 들어와서 국내에서도 고속전철사업의 가능성이 제기되고 논의됨에 따라 1982년 과학기술처 지원하에 대우중공업(주) 주관으로 수행된 “고속전동열차 개발연구”의 일환으로 서울대학교에서 열차 외형의 기본 형상에 관한 연구가 최초로 수행되었다. 또한, 1985년 신형 새마을기관차의 개발과 관련하여 동 대학에서 열차 선두부의 공력설계를 위한 1/15 축소 모델에 대한 풍동실험 연구를 수행하였다. 이러한 연구는 모두 중저속 열차의 공력설계에 관한 연구에 치우쳤다.

그후, 1990년 말부터 과학기술처 지원하에 한국기계연구원 주관으로 수행된 “고속전철시스템의 속도향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구”의 일환으로 공력설계에 있어서의 주요 문제점 및 연구개발 분야를 제시하였고, 서울대학교에서 열차 모델의 형상을 선정하여 특정 운행 조건에 대한 공기력을 계산하였다. ICE의 선두부 형상과 유사한 선두부 형상으로 2가지 모델을 선정하고, 판넬법을 사용하여 압력계수, 선두부와 후미부의 압력분포 및 속도분포 등을 계산하였으며 또한 측면 방향의 바람에 의한 영향도 계산하였다. 또 항공대에서는 무한 길이 터널속을 주행하는 열차 주위의 정상 상태 유동장을 Navier-Stokes 방정식을 사용한 수치해법을 통하여 열차 선두부와

후미부의 속도분포 및 열차 표면에서의 압력계수 분포 등을 계산하였다. 그렇지만 아직까지 국내에서는 고속전철 공력설계를 위한 직접적인 연구 개발이 본격적으로는 착수되지 못한 실정이다.

## 4. 공력해석 기술

고속전철에 대한 공력해석 방법으로는 컴퓨터를 이용해 유동현상을 모사해내는 전산유동해석 기법, 축소모형을 풍동내에 장치하여 유동을 측정하는 풍동실험 기법과 실차 또는 축소 모델의 주행시험에 의한 방법이 있다. 고속전철의 공력해석을 위해서는 항공기나 자동차 등의 해석을 위해 발전되어온 기술이 사용될 수 있으나 고속전철의 경우 형상이 세장형이며 판도그래프 등의 부착물의 해석이 중요하게 다루어져야 하는 등의 특수성을 가지고 있으며 또한 터널주행시의 비정상 유동해석이 중요하여 고속전철의 특성을 고려한 기술개발이 이루어져야 한다.

### 4.1 전산 유동해석

전산 유동해석 기법은 근래의 computer의 속도 및 용량 증대와 해석 알고리즘의 발달에 힘입어 항공기 및 자동차 등의 공력설계에 활발히 사용되고 있는 방법으로 실험에 의한 해석보다는 아직 신뢰도가 떨어지나 빠른 시간내에 경제적으로 해석이 가능하여 형상설계에 활발히 쓰이고 있다. 현재 초기 설계 단계에 많이 쓰이는 potential 유동장을 해석하는 패넬법에 의한 해석뿐만 아니라 상세설계에 사용될 수 있는 공기의 압축성과 점성등 실제적 유동특성을 모두 고려한 삼차원 유동해석이 가능하므로 고속전철의 특성에 적합한 해석방법의 개발 등을 통한 핵심 설계/해석 기술 확보가 필요하다. 특히 고속주행에 따른 압력과 및 안정성이 문제시되는 차량의 교행 또는 터널통과시 등의 비정상 유동현상은 풍동실험이 곤란한 부분이어서 이 분야에 대한 적극적인 기술개발이 요구된다. 본문에서는 프랑스에서 시속 350Km급의 차세대 TGV의 형상설계를 위해 개발한 전산유동해석 방법으로 우리나라



에도 유사한 연구개발 노력이 필요하다고 생각되는 해석방법을 소개하고자 한다.

**정상 유동해석**

프랑스에서 TGV의 정상 유동해석(평지 주행 상태 해석)을 위해 사용중인 해석 code로는 PAM-FLUID가 있다. PAM-FLUID는 유한요소법에 의해 압축성 Navier-Stokes방정식을 풀어 내며 난류모델로는 Smagorinsky Subgrid Scale 모델, Boldwin-Lomax모델, 또는 K-ε모델을 사용한다. 해석 알고리즘은 Galerkin의 이산화 방법 및 Flux Corrected Transport 알고리즘을 사용한다. 격자계 생성을 위해 사용하는 software는 IDEAS-FEM라는 것으로 CATIA에서 만들어진 형상의 표면 data를 기본으로해서 격자계를 생성한다. PAM-FLUID와 IDEAS-FEM을 사용한 이들의 해석은 다음과 같이 이루어진다(그림 4.1-1 참조).

- 패넬법에 의한 초기 유동해석 (신속한 Initialization)
- local time stepping 등 수렴 가속화 기법을 사용한 Navier-Stokes 해석

- 실험결과와의 비교/검토
- 필요시 비정상 유동특성 해석

**비정상 유동해석**

앞절에서 언급한 바와 같이 고속전철의 터널 주행시의 비정상 유동특성 규명은 고속전철 및 터널의 공력설계시 반드시 이루어져야 한다. 프랑스에서는 TGV의 터널 주행특성 해석을 위해 TG-FLO라는 software를 개발 사용하고 있다. TG-FLO code는 유한요소법에 의해 Euler 방정식을 ALE(Arbitray-Lagrange-Euler) Solver에 의해 해석한다. 이들의 터널주행문제 해석은 다음과 같이 이루어진다(그림 4.1-2 참조)

- Advancing Front Gridding 기법에 의한 초기 격자 생성, 이때 기차는 터널의 영향이 미치지 않는 충분히 떨어진 곳에 위치.
- FEM-FCT Solver에 의한 정상유동 해석
- ALE Solver에 의한 기차가 터널에 접근시의 비정상 유동해석, adaptive grid 기법을 사용한 격자 구성
- 유동장의 distortion발생 check, 필요시 격자 재구성

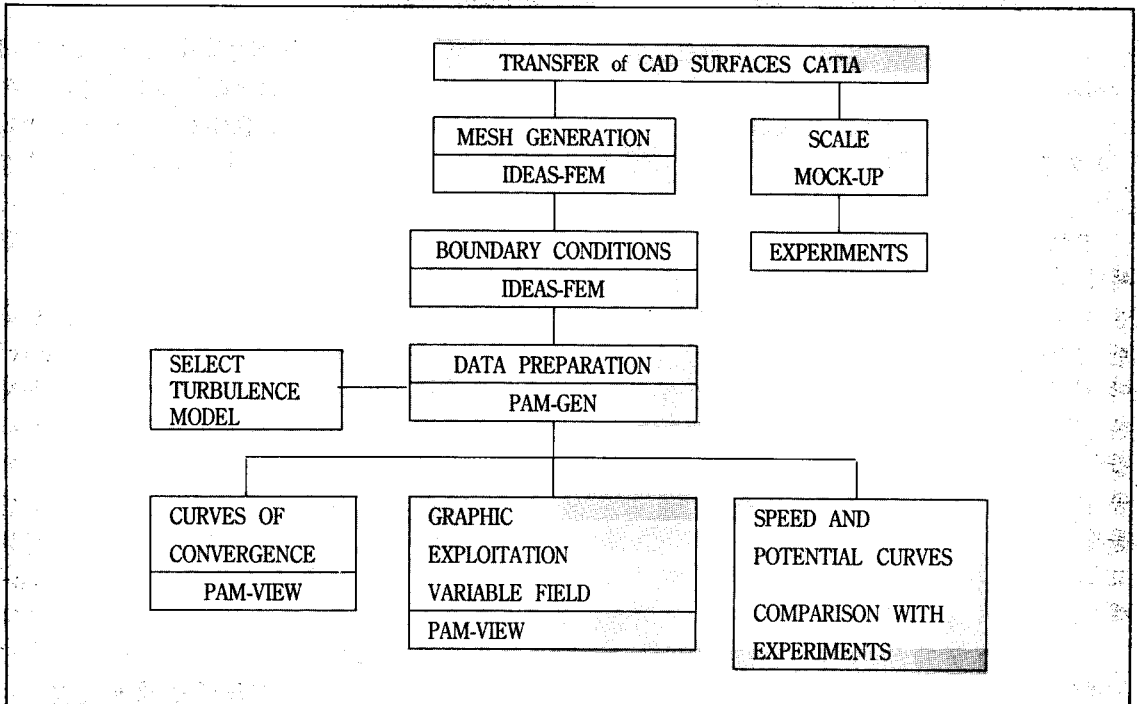


그림 4.1-1 GEC-ALSTHOM의 정상공력 해석 계통도

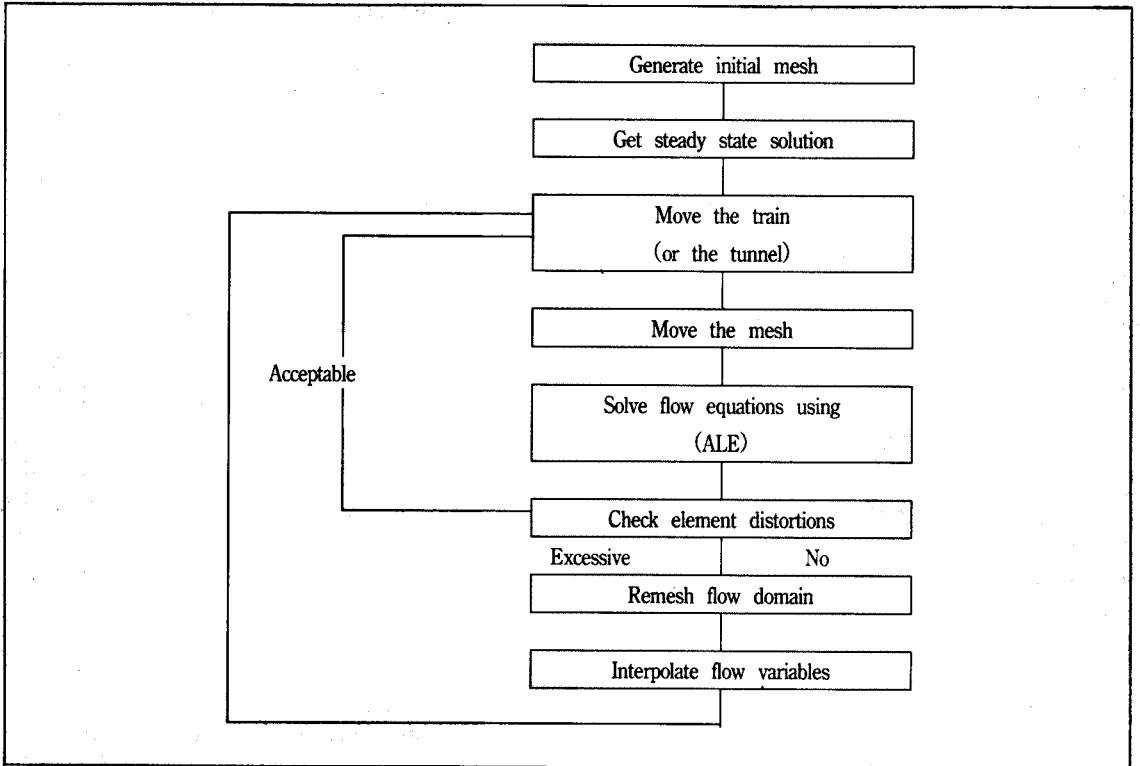


그림 4.1-2 비정상 터널공력 해석 계통도

- 터널과 기차의 주요 상호 간섭 현상이 소멸시 까지 분석

#### 4.2 고속전철의 실험

전산유동해석에 의한 공력해석은 확실히 차체와 터널의 개념적인 형상설계에 획기적인 공헌을 하고 있으나 아직 복잡한 형상에 대한 정확한 공력측정은 실험적인 방법을 통하여 확인되어야 한다. 공력소음에 대한 문제도 여러가지의 이론적인 모델이 이용되고 있으나 실험적인 확인이 필수적으로 수반되어야 한다. 따라서 고속전철의 공기역학적 문제는 현재까지 발전되어온 전산유동해석과 실험적으로 접근하여온 공력해석기술을 고속전철에 적절히 응용함으로써 효과적인 문제 해결을 보리라 생각한다.

실험은 실제적인 차체의 크기로 실제적인 속도에서 하는 것이 가장 정확하나 모델의 대형화에 의한 모델제작비 증가, 실험장치의 대형화

(300km/h 이상을 가속/제동하기 위한 장거리 레일도 필요) 등의 문제로 소형화된 실험장치의 이용이 가장 현실성이 있다. 실제적으로 열차의 종합적 소음측정, 터널 통과시의 비정상적 압력 측정 등은 기 제작된 차량을 이용하여 하고 있으나 새로운 공력설계중이거나 개조중인 열차는 모델 실험을 필수적으로 하고 있다.

일반적으로 모델에 대한 공기역학적 실험을 위하여는 역학적인 상사성(Dynamic Similarity)이 유지되어야 한다. 이 역학적인 상사성이 유지될 때에 모델 주위의 흐름이 기하학적으로 유사하고, 속도, 압력, 온도의 분포가 유사하게 되어 모델 실험에 의하여 얻어진 공력자료를 직접 설계에 이용할 수 있게 된다. 이 역학적인 유사성은 실험상태의 매개변수인 마하수(Mach Number)와 레이놀즈 수(Reynolds Number)가 실제의 흐름상태와 동일하여야 유지된다. 마하수는 유체 압축성의 척도이고 레이놀즈 수는 유체 점성력의 척도이다. 풍동실험시 이 2가지의 매개 변수를

동시에 일치시켜야 가장 정확한 자료를 얻을 수 있는데 이는 실제크기의 모델을 풍동실험하는 대형 풍동에서의 실험실험(Full Scale Test)과 작은 모델을 저온 풍동(Cryogenic Tunnel)에서 실험하므로써 가능한데 모두 고가의 실험장비 시설비와 실험경비가 소요된다. 따라서, 아주 정확한 공력자료가 필요한 경우에만 이러한 풍동들이 이용된다.

고속전철 실험의 경우에 마하수는 미소한 압축성 효과의 영향을 받는 영역에 있으나 교행하는 기차의 경우에는 어느정도 압축성 효과의 영향을 받는 영역에 있다. 레이놀즈 수는 모델의 크기와 주행속도에 비례하므로 모델이 작을 경우 레이놀즈 수를 맞추기 위하여 속도를 증가시키면 마하수가 증가하게 되어 상사성을 잃게 된다. 풍동실험이 실제 주행과 일치하지 않는 매개변수의 상태에서 실험된 모델의 실험의 경우에는 오차가 포함되어 있는데 이러한 오차는 실험비용과 반비례하여 증가하는 것이 일반적이다. 따라서, 하나의 모델로 모든 것을 다 구할 수가 없고 추구하는 공력자료의 종류에 따라서 여러가지 모델로 여러가지 조건에서 실험을 하여야 한다.

#### 4.2.1. 공기 저항 실험

고속전철 모델의 공기저항은 크게 압력저항과 마찰저항으로 분류될 수 있는데 마찰저항은 주로 열차의 앞면과 뒷면의 압력분포의 차에 의해서 결정되므로 이 압력저항을 줄이기 위한 실험을 할 경우에는 열차의 전장을 포함하는 모델을 사용하지 않고도 실험이 가능하다.

그러나, 마찰저항을 포함한 전 열차의 저항을 풍동실험으로 측정할 경우에는 많은 실험시설비와 실험비용이 요구될 것이다. 특히 항공기나 자동차의 실험을 위하여 제작된 풍동을 이용하여 비교적 긴 열차의 전체 길이를 모델로 제작하여 풍동시험부(시험부 넓이/길이 = 2 - 3)에 장착할 경우 낮은 레이놀즈 수로 많은 오차가 포함된다. 열차의 실험에 적합한 긴 시험부를 가진 특수 풍동을 제작하려면 많은 비용이 소요되므로 통상적으로 풍동시험은 각각 다른 공기역학적 문제의 상황에 따라 적절한 모델과 풍동을 선정하여 하는 것이 바람직하다.

현재까지의 추세로 보아 열차의 선두부와 후미부의 유선형화로 압력저항은 거의 극소화되었고 판토품과 열차 상면과 측면의 공기저항도 팔목할 만하게 감소되었다. 반면에 차체 하부의 저항은 그 비중이 전체 공기저항의 40% 정도가 되는 많은 부분을 차지할 뿐 아니라 개선의 여지도 많이 남아 있다. 이러한 차체 하부 저항을 정확하게 실험하기 위해서는 보통 풍동의 바닥과는 달리 특수한 장치가 필요하다. 그림 4.2-1에서 보는 바와 같이 풍동의 바닥에 운송체의 주행속도에 해당하는 속도로 움직이는 Moving-belt를 장치하거나 공기 접선 사출장치(Tangential blowing device)를 설치하여 풍동 바닥의 경계층(Boundary layer)을 제거하여 보다 정확한 실험을 할 수 있다.

#### 4.2.2. 열차와 터널의 간섭효과 실험

열차와 터널의 간섭효과는 독립된 운동체의 실험과는 달리 풍동실험이 적합하지 않고 터널과 열차를 축소한 모델을 만들어서 할 수 있다. 터널의 모형을 한 튜브에 열차모양을 한 모델을 피아노 선으로 당기어 움직이게 하는 방법이나 발사체(Projectile)의 실험을 하는 Gun tunnel의 원리를 이용하여 열차 모양의 발사체를 Tube 안으로 발사시켜 실험하는 방법이다. 이 방법들은 터널 벽의 비정상 압력을 재는데 이용할 수 있으나 열차 표면의 압력이나 열차모델 주위의 속도 등을 측정하는데는 적합하지 않다. 그 이유는 움직이는 열차표면의 압력신호나 모델 주위의 속도신호가 자료획득장치에 전달되기가 어렵고 반복적인 간섭효과를 만들기가 어렵기 때문이다.

이러한 이유로 열차/터널 간섭효과를 측정하는 데는 헬리콥터 회적의 실험 등에서 이용하는 방법을 써서 정지된 원형의 터널 형상 Tube에 회전하는 열차 모델을 진입시켜서 열차/터널 상대운동시의 비정상 공기역학적 유동 현상을 측정할 수가 있다. 특히 이 방법을 이용하면 매 회전 반복되는 열차 표면의 압력과 열차 주위 속도 분포를 앙상블 평균(Ensemble average)값으로 구하여 비정상 유동현상을 측정할 수 있다. 이 실험에서 운동하는 열차모델 표면의 압력분포는 회전축에 장치되어 있는 슬립 링(Slip ring)을 이

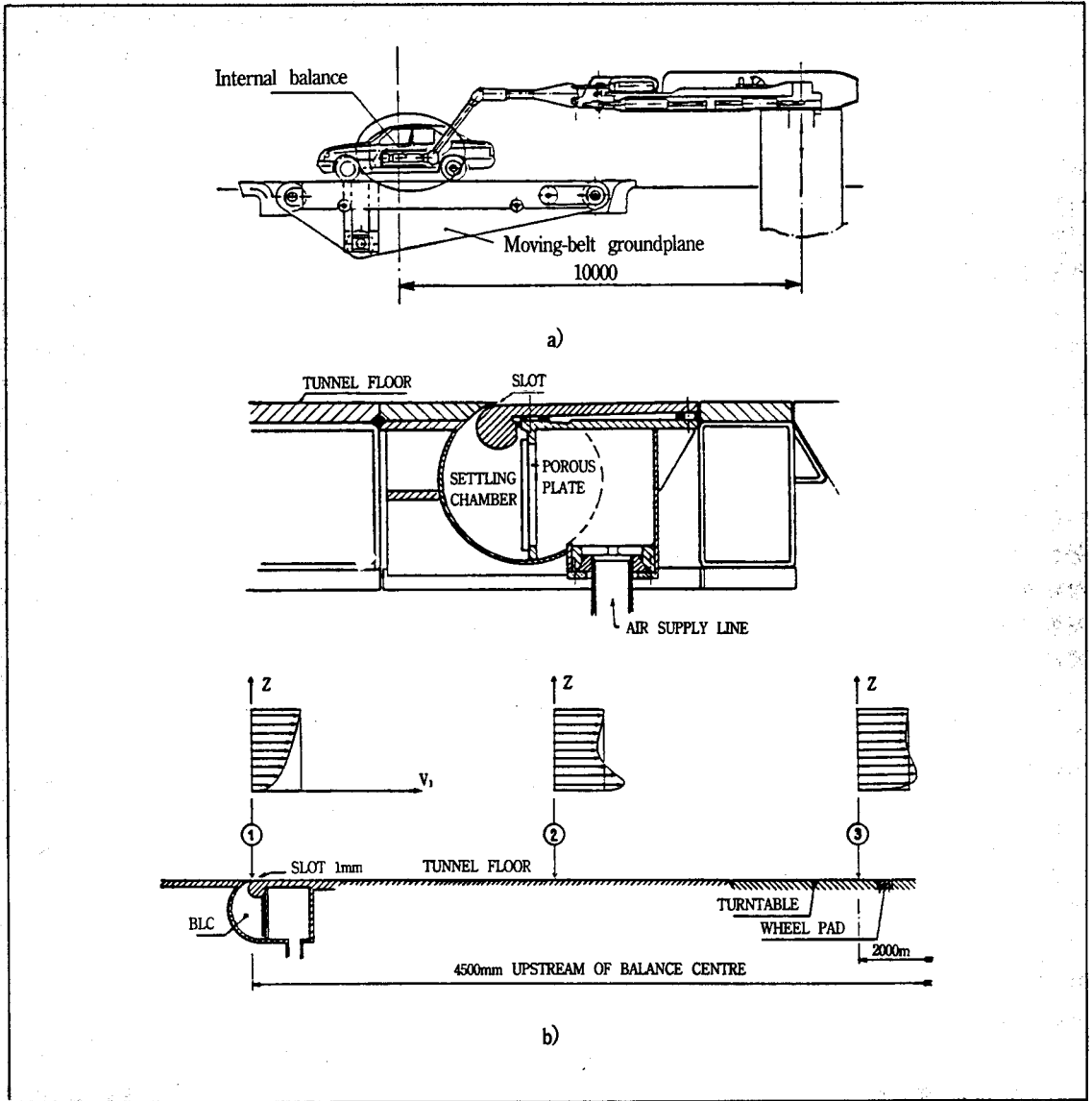


그림 4.2-1 운송체와 지면과의 간섭효과 실험을 위한 장치  
 a) Moving Belt 장치 b) 공기사출장치(tangential blowing)

용하여 자료획득장치에 전달될 수 있다. 이 실험에서 주의할 점은 열차의 회전에 의한 공기의 원심력적 영향이 작도록 큰 회전반경을 선택하거나 많은 영향이 있을 경우 보정할 수 있는 적절한 방법을 찾아야 한다.

4.2.3. 공력소음 실험

열차의 공력소음을 풍동내에서 실험할 수 있는데 보통 풍동은 고속전철 주행시 소음상태 이

상의 소음이 풍동내에 항존하고 있어 공력소음 측정이 불가능하다. 1980년대 이전까지 여러 형태의 저소음 풍동이 작은 규모의 실험실에 산재해 있었으나 1980년대 초에 네델란드에 DNW 풍동이 완성되어 헬리콥터의 소음측정에 이용되고 있다. 이 풍동은 특수한 방음벽 처리로 풍동내의 소음을 85dB 이하로 줄일 수 있었다.

최근에 일본에서는 약 7000만불의 예산으로

고속 전철용 저소음 풍동이 건설되고 있다. 이 풍동은 75dB 정도의 저 소음으로 실제크기의 판토틀로그래프를 시험부에 넣어서 실험할 수 있고 Moving belt가 설치되도록 설계되어 있다.

### 5. 맺음말

본문에서는 고속전철의 공력설계를 위한 기술 조사 단계로써 설계시 고려해야 할 공기역학 분야의 문제점들을 살펴보고 관련 기술의 현황 그리고 고속전철의 공력해석 방법들을 살펴보았다. 고속전철에 대한 공력설계 분야는 국내에서 아직 본격적인 연구가 이루어진 적이 없는 만큼 경부간에 부설될 한국형 TGV의 건설 및 향후의 독자적 속도향상 계획을 고려하여 충분한 연구 검토가 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

[1] 송달호, "고속전철 R&D 프로그램(안)" 고속 전철 기술기획단, 1994.4  
 [2] 송달호, "고속전철 시스템의 속도향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구", 한국 기계연구소, 1991.6  
 [3] 이동호, "철도차량의 공기역학", 고속철도 심포지움 논문집, 한국고속철도건설공단, 1993. 10  
 [4] Dietmar Lubke, "High-tech on Rails", Hestra-Verlag, 1991  
 [5] 이동호, "신형 기관차 선두 형상 모델에 대한 공기저항 실험 연구" 서울대학교 생산기술 연구소, 1985  
 [6] Kozo Fujii and Takanobu Ogawa, "Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other", Proc. of the 5th Int.

Symp. of Computational Fluid Dynamics, Sendai(1993).  
 [7] 장낙영, "고속 전동열차 개발" 대우중공업 (주) 기술연구소, 1983  
 [8] 김인선, 하성도, 허남진, "고속전철의 공력설계 기술 개발", 대한기계학회지 제 34권 제 6호, 1994  
 [9] 손정락, 이동호, 백제현, 모규경, "고속전철 시스템의 공기역학적 특성", 기계와 재료 제 3권 제 3호, 1991  
 [10] F. Masbernat, Y. F. Wolfhugal, J. c. Dumas, "CFD Aerodynamics of the French High Speed Train", SAE Paper 920343, 1992.2  
 [11] E. Mercker and H.W.Knape, "Ground Simulation with Moving Belt and Tangential Blowing for Full Scale Automotive Testing in a Wind Tunnel", SAE Paper 890367, Detroit, 1989  
 [12] 김희동 등 "고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상", 안동대, 기계공학과, 1994.  
 [13] 박진모 등 "고속철도와 연관된 소음분석을 위한 조사연구", 고속철도기술보고서, 한국 고속철도건설공단, 1992.10.  
 [14] W.F. King III et al "The Aerodynamics and Acoustics of High Speed Tracked Vehicles", DLR Institute for Experimental Fluid Mechanics, 1993.  
 [15] 前田達夫 등 "신간선 전차 선두부 형상 모델 변경을 위한 풍동실험", 철도기술연구보고서, 1983.  
 [16] Chung-Hwan Chun, "Aerodynamic Problems of High Speed Train-A Review and Perspectives", AFR-92-B02, 첨단유체공학연구센터 연구보고서, 1994.2