

# 지상운송체의 풍동시험을 위한 지면재현의 연구

권혁빈\* · 이동호\*\*

## Experimental Studies on Various Ground Simulations for a Wind Tunnel Test of Road Vehicles

Hyeok-bin Kwon, Dong-ho Lee

**Key Words:** High speed trains, ground simulation, Reynolds number effect, moving ground, tangential blowing, aerodynamic drag, drag coefficients, wind tunnel test

### Abstract

A series of wind tunnel test were conducted on Korean high speed train model to understand the flow physics around the vehicle related to the aerodynamic drag. For the wind tunnel test on high-speed ground vehicle, a moving ground simulation is necessary to predict the aerodynamic drag accurately. So, the models were tested in three wind tunnels with various ground simulation facility including moving belt ground plane system and tangential blowing system. The test results including measured aerodynamic drag and flow visualization showed that a tangential blowing method can be an alternative ground simulation method in short time using conventional wind tunnel.

### 1. 서 론

고속전철은 현재 유럽과 일본에서 운행 중이며 한국을 비롯한 몇몇 나라에서는 미래의 교통수단으로 건설되고 있다. 현재 국책과제로 개발중인 차세대 한국형 고속전철은 정상 주행속도가 350 km/hr 이며 최대 속도는 380 km/hr로 음속의 약 30%에 달한다. 이와 같이 고속으로 달릴 경우 기계적 마찰저항 등을 포함한 총 주행저항의 80% 이상이 공기저항임은 잘 알려진 사실이다(1). 공기저항은 터널을 주행할 경우 전체 에너지 소비의 90%를 차지할 정도로 커지며 강한 횡풍이 있을 경우 50%까지 증가할 수 있다. 그러므로 공기저항의 저감은 에너지 소비를 줄이기 위한 가장 중요한 방법이다(2).

공기저항은 모든 지상고속운송체에서 중요하며

항력을 발생시키는 매커니즘은 종종 항공기의 경우보다 더 복잡하다. 풍동시험은 여러 공기역학적인 연구방법 중 가장 편리하고 또 일반적으로 가장 비용-효율적인 것으로 알려져 있다. 그러나, 통상적인 풍동에서는 근접해 있는 지면과 모델의 상대속도를 고려할 수 없기 때문에 지상운송체의 공기저항을 예상하고 결정하는 일은 매우 어렵다. 그러므로, 자동차나 열차에 대한 풍동시험의 경우에는 이동지면에 대한 요구가 커져 왔다(3).

이동지면장치란 모델 아래에 위치한 풍동 실험실의 바닥면이 유속과 같은 속도로 움직이게 함으로써 실제 조건과 동일하게 지면효과를 재현하는 것으로서 주로 Belt를 Roller로 회전시킴으로써 바닥면을 움직이게 한다. 일반적으로 자동차와 같은 짧은 모델보다 기차와 같이 상대적으로 매우 길고 거친 하부를 가진 열차모델의 풍동시험에 있어서 특히 이동지면장치가 필수적이라고 알려져 있다(4). 그러나 이동지면장치는 비용이 높으며 운용하기가 쉽지 않기 때문에 좀 더 간단하고 저렴한 기술들이 개발되어 왔다. 이 들 중에는 이미지모델법, 지면판, 경계층 흡입, 수평

\* 정희원, 서울대학교 항공우주공학과 박사과정  
\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

하고 저렴한 기술들이 개발되어 왔다. 이 들 중에는 이미지모델법, 지면판, 경계층 흡입, 수평분출(5) 등이 개발되었으며 널리 이용되고 있다. 이들 대안적인 기술들은 통상적인 풍동에서도 지면의 상대적인 운동을 잘 모사할 수 있다.

지면재현의 문제와 함께 레이놀즈수 효과는 고속전철의 항력저항 측정을 위한 풍동시험에 있어서 중요한 어려움이다. 다행히도, 대략  $2 \times 10^6$ 에서  $4 \times 10^6$  사이에 있는 존재하는 임계레이놀즈수보다 높은 조건에서는 압력저항 값은 실질적으로 상수이므로 실제 모델로의 정확한 외삽이 가능하다. 그리고, 마찰저항값은 레이놀즈수에 대해서는 감소함수이고 표면거칠기에 대해서는 증가함수이므로 이 두 가지 효과의 상쇄에 의해 오차가 작게 나타난다. 그러나, 레이놀즈수가 임계레이놀즈수보다 작을 경우에는, 항력측정값은 비현실적인 값을 나타낸다(6).

본 연구에서는 한국형 고속전철의 축소모델을 제작하여 풍동시험을 수행하였다. 시험은 세 개의 풍동에서 수행되었으며 각각의 풍동에서 사용한 지면재현기법들을 비교하였다. 영국 맨체스터에 소재한 Flow science 아음속풍동은 이동지면장치를 구비하였으며 자동차와 기차에 대한 많은 시험경험을 가지고 있다. 항공우주연구소의 대형 아음속 풍동에는 수평분출방식의 지면재현장치가 이번 시험을 위해 설치되었으며 포항공대의 아음속 풍동은 지면판이 설치된 고정지면에서의 항력계수들을 측정하기 위하여 사용되었다.

시험모델은 축소비와 길이에 따라 두 가지를 사용하였다. 축소비 1/20의 모델은 총 길이 2.4m로 3개의 차량으로 구성되어 있다. 축소비 1/25의 모델은 총 길이 5.28m로서 동력차, 동력객차, 동력차 등 총 6개의 차량으로 구성되어 있는데, 1/20모델보다 실제차량에 더 가깝게 제작되었다. 1/25모델은 항우연풍동에서만 시험하였으며 1/20 모델은 세 풍동에서 모두 시험하여 지면재현장치의 성능을 비교할 수 있도록 하였다.

본 시험에서는 열차모형의 항력을 측정하고 모델 표면과 시험부 바닥에서의 표면유선을 가시화하여 고속전철에 작용하는 항력의 유동메커니즘을 연구하였다. 시험결과와 분석을 통하여 고속전철모델의 풍동시험에 미치는 지면재현장치의 효과와 레이놀즈수의 영향에 대해 논하였다.

## 2. 풍동시험

### 2.1 풍동 및 지면재현장치

#### 2.1.1 Flow science 아음속 풍동 : 이동지면장치

Flow science 아음속 풍동은 측정실의 크기가 2.75m(W) × 2.23m(H) × 5.5m(L)이며 1.05m(H) × 2.67m(L)의 이동지면(MBGP) 장치를 갖춘 폐쇄형 아음속풍동으로 최대속도가 70m/s 이나 이동지면의 속도가 최대 60m/s이므로 본 연구의 시험속도는 최대 60m/s로 제한된다. 이동지면의 경우 풍동 시험부의 바닥으로부터 모델을 지지할 수 없으므로 모델 내부에 internal balance를 설치하고 이로부터 상부까지 연결하였다. 그림 1에 이동지면 및 흡입장치의 개념도가 나타나 있다. 이동지면의 후방은 풍동바닥과 수평으로 이어져 있으나 전방은 풍동바닥보다 약간 높여 위치하여 있는데 이 틈에 흡입구가 설치되어 있는데 풍동속도와 모델 크기 등에 따라 흡입량을 조절함으로써 전방에서 형성된 경계층을 제거하도록 되어 있다.

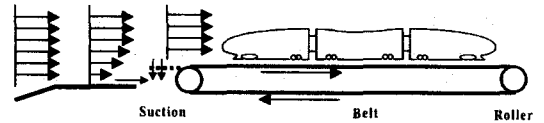


그림 1 이동지면 및 흡입장치의 개념도

#### 2.1.2 항공우주연구소 아음속풍동 : 수평분출장치

항공우주연구소의 아음속풍동은 측정실의 크기가 4m(W) × 3m(H) × 10m(L)인 폐쇄형 방식이며 전방류의 경계층을 제거하기 위하여 1m의 높이의 지면판을 설치하였다. 지면판 후방 끝단에 설치된 플랩의 각도를 조절함으로써 유동을 균일하게 만들었다. 지면의 상대적 운동을 모사하기 위하여 수평분출장치가 개발되어 설치되었다.(그림 2) 외부에 설치된 송풍기에서 가속된 공기는 관을 따라 이동하여 지면판에 설치된 knife edge에서 분출된다. knife edge에서의 분출속도는 최고 160m/s이다.

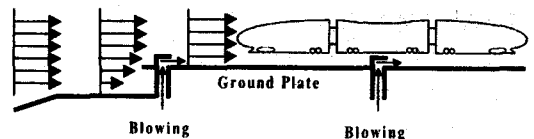


그림 2 수평분출장치의 개념도



### 3. 시험결과

#### 3.1 분출에 따른 경계층 속도분포의 변화

아래 그림 5는 항우연풍동에 장착된 수평분출 장치를 시험하기 위하여 모델을 장착하지 않은 상태에서 시험부 바닥의 경계층을 측정된 그림이다. 측정은 분출구로부터 흐름 방향으로 각각 10mm, 510mm, 1010mm 위치에서 높이를 3mm에서 180mm까지 변화시키면서 분출이 있는 경우와 없는 경우에서 수행되었다.

측정결과를 보면 먼저 rake5의 위치에서는 분출된 유동이 3mm 높이의 공기들을 자유류 속도 40m/s에서 최대 1.5배정도 가속시키고 있으며 그 위의 유동에서는 분출이 없을 때와 거의 흡사한 분포를 나타내고 있다. rake6과 rake7에서는 아래층의 가속된 공기의 흐름이 위쪽의 유동과 혼합하여 경계층의 모습을 크게 바꾸어 놓았는데, 결과적으로 유동의 속도분포가 균일하게 변화하여 경계층의 크기가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러나, 분출속도가 160m/s로 일정하기 때문에 자유류의 속도가 증가할수록 수평분출의 효과는 점점 감소하여 자유류 속도 85m/s의 경우 이러한 분출의 효과가 거의 미미함을 알 수 있다.

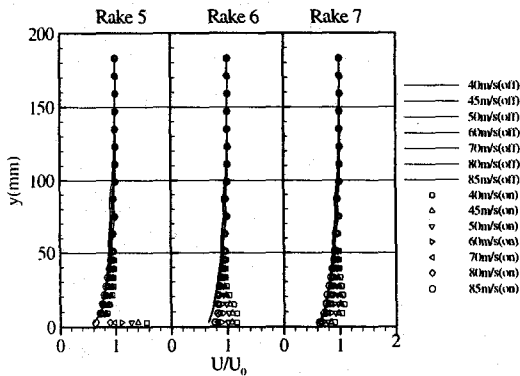


그림 5 수평분출 시의 경계층 속도분포, 항우연 풍동, (레이크 위치: 분출구로부터 rake 5 = 10mm, rake 6 = 510mm, rake 7 = 1010mm 후방 위치)

#### 3.2 지면재현방법에 따른 항력계수의 변화

그림 6에는 지면재현장치를 달리한 경우 각각의 속도에 따른 1/20모델의 항력계수의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 포

항공대에서 측정된 고정지면 상에서의 항력계수는 Flow science 풍동에서 측정된 이동지면 상에서의 항력계수보다 0.06정도 감소한 것으로 나타났다. 이러한 항력계수의 차이는 이동지면 상의 항력계수에 대해 15%의 크기이며 이러한 차이는 지면재현효과의 영향이다. 통상적인 고정지면의 경우, 차량의 하부로 흐르는 공기는 마찰효과와 차폐효과에 의해 에너지를 잃게되고 따라서 속도가 감소된다. 이러한 관점에서 매끄럽지 않은 하부를 가진 긴 길이의 열차모델의 경우 고정지면 상에서의 풍동시험은 항력계수의 측정오차가 더 커지게 되므로 지면의 상대적인 운동을 재현하는 일이 무엇보다 중요하게 된다.

다양한 지면재현장치에 따른 항력계수의 변화를 살펴보면 자유류 속도 40m/s에서 항우연 풍동에서 분출을 한 경우와 하지 않은 경우의 항력계수의 차이값이 0.06으로 이동지면과 고정지면에서의 항력계수의 차이값인 0.06과 거의 일치하였다. 이것은 항우연 아음속풍동에 장착된 수평분출장치가 지면의 상대적 운동을 정확하게 모사하고 있음을 의미한다. 그러므로, 수평분출 속도가 160m/s인 경우 자유류 속도 40m/s에서는 이동지면의 효과를 대체할 수 있는데, 이것은 참고문헌 7에 나타나 있듯이 지면재현을 위한 적절한 분출 속도가 자유류 속도의 4배 이상이라는 결과와 일치한다.

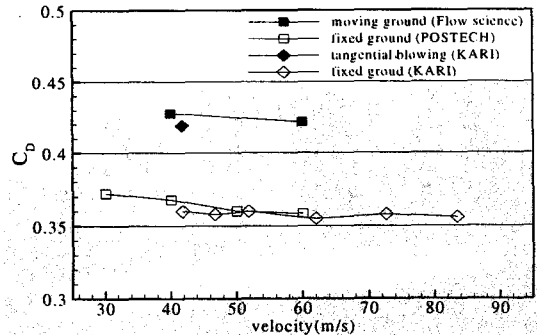


Fig. 6 속도에 따른 항력계수, 1/20th scale model

#### 3.3 수평분출에 따른 후류의 변화

그림 7과 그림 8은 항우연 풍동에서 수평분출을 하였을 경우와 하지 않았을 경우, 열차 후미부와 근방 바닥면에서의 표면유선을 가시화한 그림들이다. 그림 7에서 후미부 후방에 형성된 유

선을 살펴보면 대칭선을 따라 유동이 분기하고 있으며 분기된 유동은 좌우 측면에서 수렴하여 포물선 형태의 수렴선을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 열차의 하부는 난류유동임과 동시에 상대적인 운동을 하는 유동이다. 또한 열차후미부의 바닥면에서 흘러나오는 유동이 베이스 영역을 채워줌으로써 후류의 형상을 결정짓는다. 그림에서 나타난 풍동 바닥의 분기선과 수렴선은 열차 후미부로부터 강력한 후류가 발생하고 있다는 것을 말해준다.

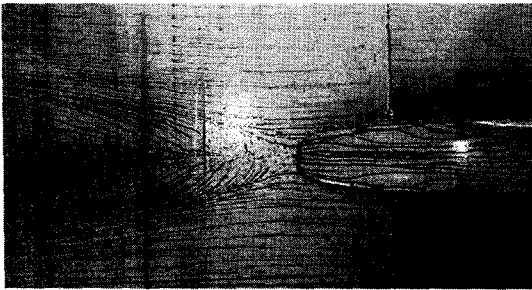


그림 7 모델 후미부 표면과 풍동 바닥면에서의 유선 (항우연풍동, 1/25모델, 수평분출 시)

그림 8에서는 앞에 나타난 분기선과 수렴선이 없는 상반된 결과를 보여주고 있는데 이를 통하여 고정지면 상에서는 공기저항뿐만 아니라 후류의 모습 또한 큰 변화를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 고정지면에서는 열차 바닥면에서 공기가 흘러나와 베이스 영역을 채워주지 않기 때문에 모델 윗면의 공기가 강한 속도로 후미부 표면을 따라 흐르게 되며 이 때문에 후류의 소용돌이가 상대적으로 약화되고 있는 것을 알 수 있다.

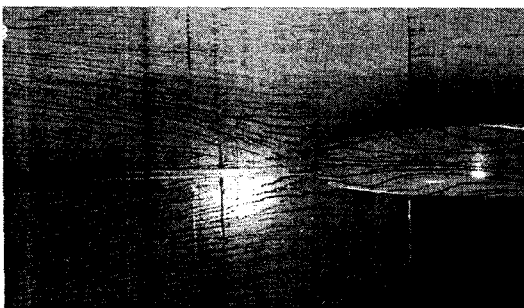


그림 8 모델 후미부 표면과 풍동 바닥면에서의 유선 (항우연풍동, 1/25모델, 고정지면)

### 3.4 형상변화에 따른 항력의 변화

본 시험에서는 전두부와 연결부 등 열차의 다양한 형상요소의 변화에 따른 항력의 변화를 두 모델에 걸쳐 다양하게 연구하였으나 이 논문에서는 대표적으로 열차의 전두부 형상변화에 대한 항력계수의 변화를 그림 9에 나타내었다.

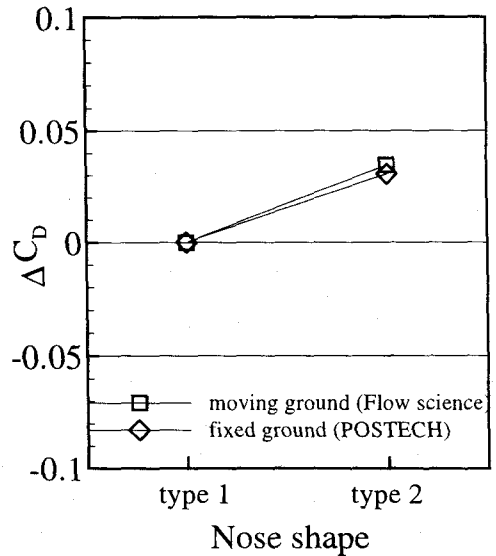


그림 9 전두부 형상에 따른 항력계수의 변화. 이동지면 및 고정지면, 1/20모델

그림에서 형상 1은 형상 2보다 세장비가 더 크며 이로 인하여 0.035의 항력계수가 더 작게 나타남을 알 수 있다. 이러한 항력계수의 감소는 전두부의 압력감소와 더불어 동일한 형상의 후두부에서 박리후류영역을 감소시키켜 압력을 회복시키기 때문이다.

또한 고정지면에서 시험한 결과는 이동지면에서의 시험치와 형상변화에 따른 항력계수의 변화 값은 거의 일치함을 보여주고 있는데, 고정지면을 이용한 고속전철의 풍동시험이 비록 전체 차량의 항력계수를 예측하기에는 많은 오차를 가지고 있지만, 부분적인 형상의 변형에 따른 항력의 상대적인 차이를 측정하고자할 때에는 적은 비용으로 효과적인 측정이 가능하다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

#### 참고문헌

현재 국책과제로 개발 중인 한국형 고속전철에 대하여 1/20 및 1/25 축적의 축소모형을 제작하였고, 영국 맨체스터의 Flow science, 항공우주연구소 및 포항공대의 대형 아음속풍동에서 이동지면과 수평분출 및 지면판 등 다양한 지면재현장치를 사용하여 풍동시험을 수행하였으며 항력계수 측정 및 유동가시화를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지면의 상대적 운동에 대한 적절한 모사는 열차모델의 풍동시험에서 필수적이며 특히 하부가 거칠고 다수의 차량을 갖는 모델에 있어서 그 중요성은 더욱 커진다. 본 연구에서 지면재현장치를 사용한 경우에 고정지면에 비해 3량편성 모델의 경우 15%의 항력계수 증가를 보이는 등 매우 큰 오차를 가져옴을 확인함으로써, 지상운송체의 풍동시험에 있어 적절한 지면재현장치의 사용은 필수적임을 확인하였다.

2. 일반적으로 이동지면장치는 지면의 상대적 이동을 모사하는데 있어 물리적으로 가장 적합한 방식이지만 수평분출방식은 통상적인 풍동을 이용하여 짧은 시간에 적은 비용으로 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 본 연구에서 수평분출방식을 이용하여 시험한 결과 적절한 분출속도 하에서는 수평분출을 통한 지면재현이 이동지면과 거의 동일한 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

3. 형상 요소의 변형에 따른 상대적인 항력의 차이를 측정할 경우, 고정지면풍동을 이용한 결과가 이동지면장치풍동의 결과와 매우 근접함을 보임으로써, 고정지면풍동시험 결과가 적은 비용으로 효과적인 상대적 설계변경에 이용될 수 있음을 확인하였다.

#### 후기

본 연구결과는 G7 고속전철기술개발사업 중 "I-1-2 고속전철설계기반기술개발" 과제의 위탁과제 "고속전철 공력설계 및 해석기술 개발"의 연구결과 중 일부를 밝히는 바입니다. 이번 시험에 함께 참여하여 많은 도움을 주신 Flow science와 항공우주연구소 및 포항공대 관계자 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

- (1) Gawthorpe, R.G., "Energy consumption at high speed", Railway Gazette International, 1975
- (2) A.P.Gaylard, A.B.Howlett, D.J.Harrison, "Assessing drag reduction measures for high-speed train", BRR Report, 1995
- (3) J.S.Tyll, et al., "Experimental studies of magnetic levitation train aerodynamics", AIAA Journal Vol.34 No. 12, 1996
- (4) Peters, J-L, Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential, Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3, 1983
- (5) E. Wilemsen, 1997, "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 pp437-447
- (6) Jean-Luc Peters, 1985, "Aerodynamische Gestaltung von Schienenfahrzeugen fur den schnellverkehr", AET(40)
- [7] E. Mercker, H.W. Knappe, 1989, "Ground simulation with moving belt and tangential blowing for full-scale automotive testing in a wind tunnel", SAE Paper 890367
- (8) J.D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, New York, 1984
- (9) Peters, J-L, 1982, "Optimising aerodynamics to raise IC performance", Railway Gazette International, 1982, 10, pp817-819,
- (10) Jean-Luc Peters, 1986, "Influence of moving ground belt on the aerodynamic drag of wind tunnel models", Presentation 3D workshop on the aerodynamic drag of trains, Derby, UK, 8-9 April 1986
- (11) E. Mercker, J. Wiedemann, 1990, "Comparison of different ground simulation techniques for use in automotive wind tunnels", SAE Paper 900321
- (12) S.H.Kang, D.H.Lee, et al., 1988, "Experimental studies on the estimation of wind-load of a container crane and its development", KSME Journal, v.12, n.4, pp.892-899