論文

실험적, 수치적 방법을 이용한 고속전철 주변의 유동장 연구

황재호* , 이민섭**, 이동호***, 김종암***

Experimental, Numerical Study on Flowfield around a High Speed Train

Jaeho Hwang*, Min-Seop Lee**, Dong-Ho Lee*** and Chongam Kim***

ABSTRACT

1/20 scale wind tunnel tests are performed about one configuration at 8 different flow conditions and numerical analysis are performed for eight different shapes. In order to study effect of Reynolds number and ground simulation on the experimental results, 4 wind speeds and tangential blowing technique at ground are chosen for the experiments. By measuring surface pressures, the effects of the Reynolds number variation and the ground simulation is presented. Solutions of 3 dimensional Navier-Stokes equations are obtained using FDS for the spatial discretization and AF-ADI for the time integration. Current computational results are verified with the experimental results, and after the numerical analysis of the eight different cases, it is shown that the dependency of the pressure drag on existence of skirt, sectional shape and nose length is clarified.

초 록

복잡한 전두부 형상을 가지는 고속전철의 개활지 주행특성을 규명하기 위하여 한가지 형상에 대한 1/20 축소모델의 아음속 풍동 실험과 여덟가지 형상에 대한 수치해석을 통해 고속전철의 정상주행특성에 대한 연구를 수행하였다. 레이놀즈수에 대한 영향을 파악하기 위해 4가지 유속에 대하여 실험을 수행하였으며, 지면효과의 영향을 수평분출로 모사하여 지면모사에 대한 영향을 파악하였다. 표면압력 측정을 통하여, 유동조건이 임계영역에 존재하는 것을 파악하였으며, 후미부 영역에서의 레이놀즈수와 지면모사의 효과를 파악하였다. 수치해석시에는 3차원 Navier Stokes 방정식을 지배방정식으로 하였으며, 공간차분은 FDS 기법을, 시간적분은 AF-ADI 기법을 이용하여 해석을 수행하였다. 실험모델에 대한 수치해석을 통하여 격자계와 해석기법을 검증하였으며, 다양한 형상에 대한 해석결과 고속전철 전두부의 Skirt, 단면형상 및 길이에 대한 압력저항의 변화경향을 파악할 수 있었다.

I. 서 론

기술의 발전과 사회적 요구에 따라 수송기관의 고속화가 추진되어 오면서, 세계 각국에서는 고속전철의 연구개발 및 실용화가 이루어지고 있다. 우리나라를 포함하여 세계 10여개국 이상이 운용속도 250 - 350km/h의 고속전철 공사를 계획중이거나, 진행중이다.[1]

열차의 공기역학적 성능향상을 위한 다양한 연구는 독일, 프랑스, 일본을 주축으로 진행되었으며[2][3][4], 국내에서는 전두부의 형상과 관련하여 몇가지 형상 파라메터의 조합으로 형성된 계통적 후보형상에 대한 실험 및 수치해석적인 연

† 2000년 6월 5일 접수

* 정회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
** 아주대학교 의용공학과
*** 정회원, 서울대학교 항공우주공학과

구가 진행되었으며[5] 쐐기형상의 지면 근접체에 대한 최적화 연구[6]등이 이루어졌다. 보다 실제적인 형상에 대한 연구는 최근에 보고되고 있다.[7][8] 구체적인 설계안을 제시하고 실제 설계에 응용되기 위해서는, 실험적, 수치적 연구의 자체적 연구방법이 가지는 한계를 고려하여 열차의 실제형상에 가까운 형상에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 전반적인 열차주변의 공기역학적 특성 및 복잡한 후미부 유동장 특성을 연구하기 위해 실제 형상에 가까운 열차형상에 대하여 지면모사유무와 유속의 변화에 따라, 표면 압력분포의 측정을 위한 풍동 실험 연구를 수행하였으며, 실제형상에 가까운 8가지 열차모델에 대한 3차원 점성 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였으며, 주요 형상요소에 대한 정성적인 특징을 연구하였다.

II. 실험개요

본 연구의 풍동실험연구는 한국항공우주연구소의 아음속풍동에서 수행하였으며, 풍동의 제원은 다음과 같다.

- 풍동형식 : 단일 순환식 아음속풍동
- Test Section : 4 × 3 × 10 m
- 유속 : 4 ~ 120 m/s
- Balance : Pyramidal Type External Balance

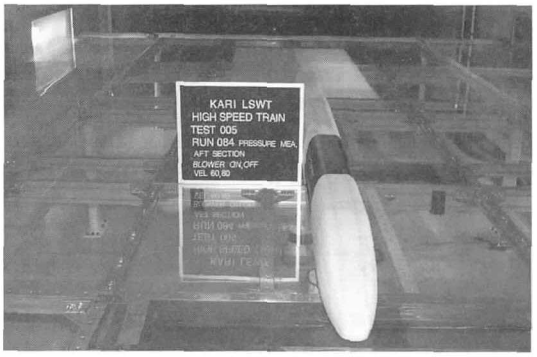
고속전철과 같은 지상운송체는 항공기와는 달리 지면에 대해 상대속도를 가지기 때문에 풍동시험에서도 이러한 지면의 효과를 고려하여야 한다. 이를 위해서 이미지 방법, 지면판(Ground Plate), 흡입(Suction), 수평분출(Tangential Blowing), 이동지면(Moving Belt Ground Plane, MBGP)등의 장치를 이용하는 방법이 있으며[9][10], 본 연구에서는 지면효과를 재현하기 위한 장치로서 ground plate를 설치하고, ground plate에 3곳의 blowing 장치를 설치하였다. Blowing 장치는 경계층의 성장을 제어하기 위하여 사용하는 knife edge를 사용하였다.

실험모델은 한국형 고속전철의 여러 설계모델중 하나를 솔리드 모델링 소프트웨어중 하나인 SolidWorks™을 이용하여 skirt부분을 단순화하여 설계하였다. 모델의 축척은 1/20이며, 모델은 Rapid Prototyping 기술을 이용하여 정밀하게 제작되었다. 모델의 형상은 다음 표 1에 정리되어 있다. 실험모델은 skirt가 없는 하부구조가 간단한 형상이며, 단면적의 변화는 실수치를 기준으로 하였을 때, 표 3에 언급된 것처럼 6.8m까지는 급격한 변화를 보이다 12.8m까지는 완만한 변화를 보인다. 실험모델의 형상은 그림 1에 보인바와 같이 쐐기형상과 유사하며, 이때 객차부분의 단면형상은 그림 2-a)에 주어져 있다.

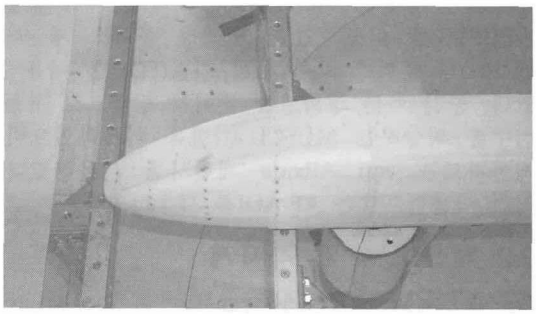
표 1. 실험모델의 제원

	실수치(m)	1/20 Scale(mm)	무차원화 수치
길이(L)	42.9	2143.5	11.289
높이(H)	3.80	190.2	1.000
폭(W)	2.82	141.1	0.742

전후두부의 압력측정을 위하여, 전두부의 대칭면과 전두부 끝단으로부터 5곳의 각 단면위치에 대하여 총 55개의 압력측정점을 두었다. 각 단면 측정점의 위치는 무차원화된 위치로 전두부 끝으로부터 각각 x/H = 0.192, 0.480, 0.930, 1.482, 2.239이며, 실제 실험모델에서는 전두부 끝단으로부터 각각 x = 36.5, 91.4, 177, 282, 426 mm 이다. (그림 1)



a) 풍동에 장착된 실험모델



b) 모델표면의 압력측정점

그림 1. 풍동실험모델 형상

표 2. 아음속 풍동시험 Cases

Cases	Freestream Mach Number	Reynold's Number	Ground Simulation
M=0.137 GS ON	0.137	5.90×10^{5}	ON
M=0.137 GS OFF	0.137	5.90×10^{5}	OFF
M=0.151 GS ON	0.151	6.50×10^{5}	ON
M=0.151 GS OFF	0.151	6.50×10^{5}	OFF
M=0.176 GS ON	0.176	7.58×10^{5}	ON
M=0.176 GS OFF	0.176	7.58×10^{5}	OFF
M=0.237 GS ON	0.237	1.02×10^{6}	ON
M=0.237 GS OFF	0.237	1.02×10^{6}	OFF

실험은 속도를 변화시켜가며 4가지 레이놀즈수에 대하여, 각각 지면모사(Ground Simulation)를 수행한 경우와 수행하지 않은 경우에 대하여, 총 여덟 가지 경우에 대하여 수행하였으며, 표 2와 같이 정리된다. 이때 레이놀즈수는 열차의 높이를 기준으로 정의하였다.

III. 수치해석개요

3.1 수치해법개요

지배방정식으로는 정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며, 3차원 x, y, z 직교 좌표계에서 무차원화된 보존형(conservative form) 벡터 형식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial F}{\partial y}+\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial E_v}{\partial x}+\frac{\partial F_v}{\partial y}+\frac{\partial G_v}{\partial z}\right)$$

공간차분법으로 유한체적법(FVM)을 이용하였으며, 플럭스 계산 방법으로는 유동 특성의 전파를 고려한 풍상차분법을 이용하였으며, 선형화 행렬의 구성에는 Van Leer의 플럭스 벡터 분할 기법(FVS)을 이용하였고, 비점성 플럭스 계산에는 Roe의 플럭스 차이 분할 기법(FDS)을 이용하였다. 공간 차분 정확도를 높이는 방법으로 유동변수를 외삽하는 MUSCL 기법을 이용하였으며, 제한자로는 van Albada 제한자를 사용하였다. 시간 적분법으로는 AF-ADI를 사용하였다.

3.2 계산모델 및 격자계

본 연구에서는 개발된 격자기법 및 해석기법을 검증하기 위해 실험모델에 대한 수치해석을 수행하였으며, 검증된 기법을 이용하여 열차의 실제 형상과 유사한 여덟 가지 형상모델에 대하여 3차원 수치해석 연구를 수행하였다. 계산에 사용된 형상 모델의 이름 및 재원은 표 3에 정리되어 있다. 계산 모델명에서 S는 Section을 의미하며 N은 Nose를 의미하며, 뒤의 첨자는 각 단면과 전두부 형상을 의미한다.

표 3. 실제 모델 형상 변수

Models	Section Geometry	Nose Length	Comments
SENE	Experiment	6.8m-12.8m	Wedge Type
SENE-S	Experiment	6.8m-12.8m	SENE with Skirt
S1N1	Section 1	15m	Cone Type
S1N1-C	Section 1	15m	S1N1 with Cockpit
S2N1	Section 2	15m	Cone Type
S1N2	Section 1	6.64m	Cone Type
S3N1	Section 3	15m	Cone Type
S3N2	Section 3	6.64m	Cone Type

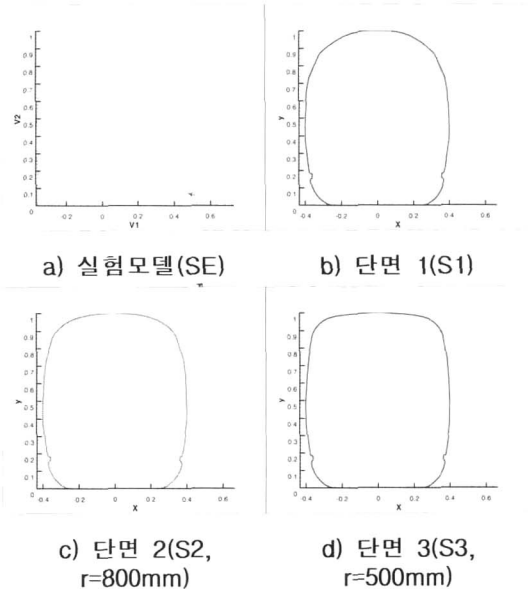


그림 2. 각모델의 단면비교

그림 2에는 높이로 무차원화된 각 단면(SE, S1, S2, S3)의 형상을 보이고 있는데, 4가지 모델의 단면의 폭은 동일하지만, 실험모델의 단면(SE)는 높이가 상대적으로 높다. 단면 1(S1)과 비교할 때 단면 2(S2)와 단면 3(S3)은 열차의 지붕부분의 곡률반경이 각각 800mm, 500mm로 점차로 작아지는 경우이다. 실험모델의 단면(SE)의 지붕부분 곡률반경은 S2와 S3의 그것의 사이값이다. 열차의 전두부 및 후미부 형상은 표 3에 주어진 바와 같이 NE, N1, N2와 같이 표시되는 단면적 변화 구간과 단면의 모양과 그 연결방식(comments)으로 표시될수 있다. 이때 실험모델(NE)의 전두부

길이는 6.8m까지는 급격한 단면적 변화를 보이며 그후 12.8m까지는 완만한 변화를 보이는 것이며, N1은 그 변화구간이 15m로 긴 전두부에 해당되며, N2는 6.64m로 짧은 전두부에 해당된다. 실험모델의 변형인 SENE-S는 실험모델에 skirt가 부착된 경우이며, S1N1-C는 길고, 지붕의 곡률이 작은 기본모델인 S1N1에 돌출된 운전석(cockpit)이 존재하는 경우이다.

표면 격자의 형성은 설계된 솔리드모델파일(STL 포맷)로부터 자동 변환하여 그림 3에 주어진 실험모델(SENE)의 표면격자와 같이 형성되며, 전체계산 격자는 변환된 표면격자를 이용하여 타원형격자로 형성되었다. 실험모델에 skirt가 부착된 변형형상(SENE-S)와 기본모델에 운전석이 부착된 변형형상(S1N1-C)의 전체계산격자가 각각 그림 4와 그림 5에 주어져 있다.

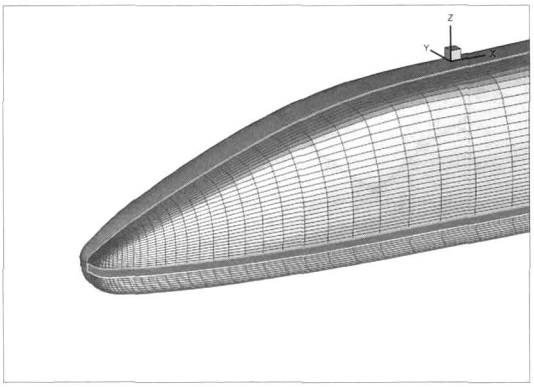


그림 3. 실험모델(SENE) 의 표면격자

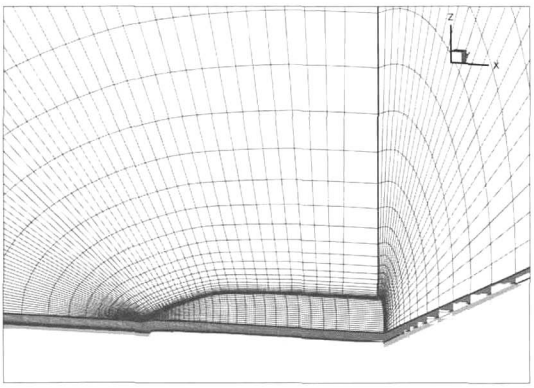


그림 4. 변형형상(SENE-S)의 계산격자
(5Block Multi-Block Grid System, 249,186개)

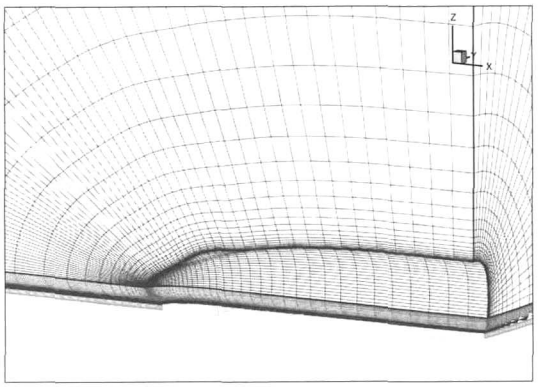


그림 5. 변형형상(S1N1-C)의 계산격자
(5Block Multi-Block Grid System, 249,186개)

모든 형상에 대한 격자의 수는 5개 분할영역에 대하여 249,186개로 동일하며, 모델형상과 격자형성에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [8]을 참조하기 바란다.

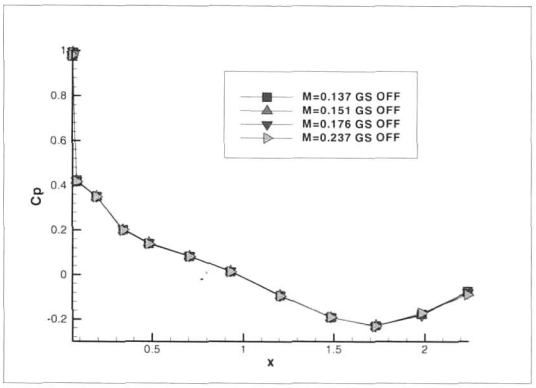
IV. 결과 및 논의

4.1 풍동실험

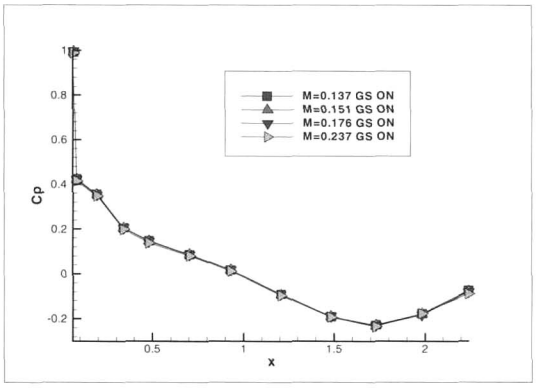
전두부와 후미부 대칭면의 측정된 압력계수를 보면, 전두부의 경우(그림 6), Reynolds수(유속)와 지면모사(Ground Simulation)의 유무에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나, 후미부 유동장의 경우 후미부 끝 부분에서 압력값의 차이를 확인할 수 있다. 이때 x는 전두부 끝단으로부터의 무차원화된 길이를 의미한다.

그림 7을 보면 레이놀즈수의 증가에 따라 후미부의 압력회복정도가 지면모사의 유무에 관계없이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 지면모사를 수행하지 않는 경우(그림 7-a, GS OFF)에 더 확연하게 나타난다. 이러한 지면모사에 따른 유동특성의 차이는 후미부 유동장이 지면모사를 수행하는 경우 원만한 후미부 유동의 배출로 인해 유동이 더 안정적이기 때문이다. 압력회복의 수준은 지면모사를 수행하지 않는 경우가 전반적으로 높은데, 실험 수행시 지면모사를 수행하지 않는 경우 공기저항을 상대적으로 적게 예측할 가능성이 있음을 보인다.

본 연구에서 수행된 1/20 풍동실험 결과, 지면모사를 수행하지 않는 경우의 후미부 끝단에서의 차이를 제외하면, 8가지 경우의 유동조건에 대한 표면 압력분포는 거의 동일하며, 이로부터 Willemsen[11]에 의해 제시된 바와 같이 실험영역은 초임계영역임을 유추할 수 있다.

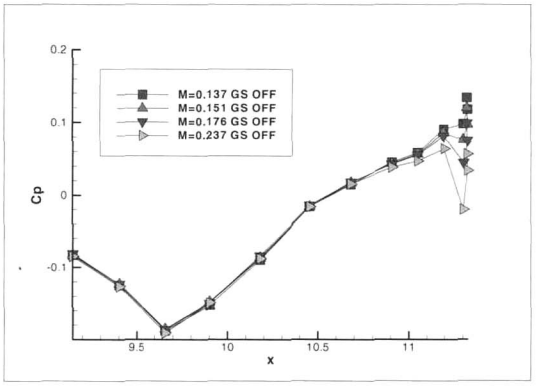


a) GS OFF

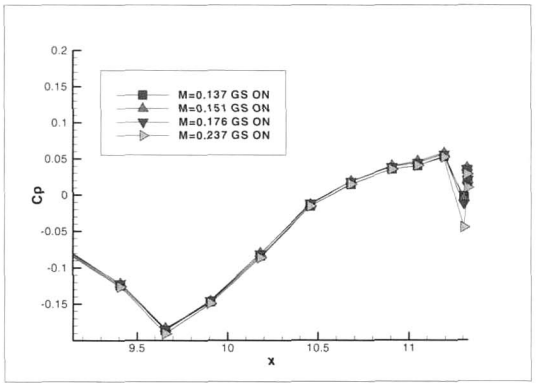


b) GS ON

그림 6. 전두부 대칭면의 압력계수분포(실험)



a) GS OFF



b) GS ON

그림 7. 후미부 대칭면의 압력계수분포(실험)

그림 1-b)에 주어진 모델의 끝 단면(x/H = 0.192)에서 전두부 대칭면으로부터의 곡선길이를 열차의 높이로 무차원화한 길이인 s로 Cp의 분포를 보인 그림 8에서 후미부 끝단에서의 유동장의 차이를 보다 자세하게 살펴보면, 지면모사를 수행하지 않는 경우의 압력회복이 4가지 유속에 대하여 모두 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 언급된 바와 같이 분출에 의한 에너지의 유입-지면경계층 제거-로 차량하부유동의 배출이 원활해지기 때문이다. 지면모사의 유무와 관련된 압력계수의 차이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소되는 경향을 살펴볼 수 있다. 또한, 풍동실험시 지면모사를 수행하지 않을 경우의 압력저항은 수행할 경우의 압력저항값보다 작게 예측할 것을 다시 확인할 수 있으며, 주어진 Cp 분포의 차이로부터 그 차이는 10^0%의 오더를 가질 것으로 예상된다. 지면모사는 차량하부구조물과 지면과의 상호작용에 더 큰 영향을 주므로 열차전체편성안의 저항값에 대한 영향은 예측할 수는 없다.

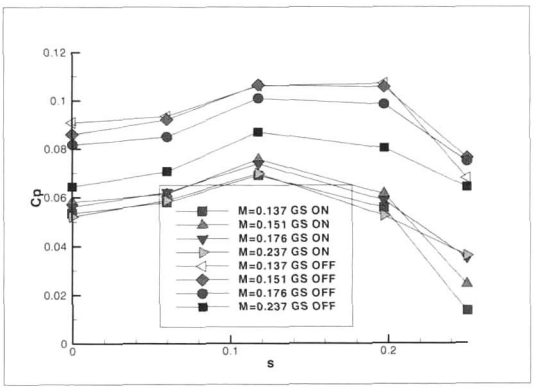


그림 8. 후미부 단면의 압력계수(x/H = 0.192)

4.2 수치해석

실험모델에 대한 수치해석은 자유류 속도(마하수) 0.137과 0.237의 경우에 대하여 실험모델과

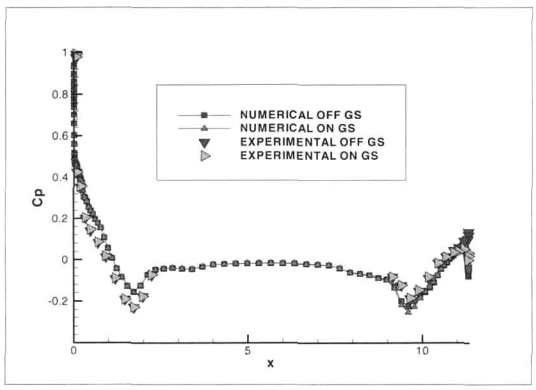
비교되어 수치해석 연구의 타당성을 확인하였으며, 자유류 속도 0.283의 경우는 개발중인 한국형 고속전철의 최고운행속도인 350km/h에 해당되는 속도로서 다른 수치해석 결과와 비교, 분석되었다.

정상 해석결과에 대한 수렴조건은 공력계수의 수렴도로 결정하였으며 10^{-4}의 수렴조건을 부여하였다. 3000번 이상의 반복계산시는 미세한 진동을 보이며 위 수렴조건을 만족시키므로, 10주기 이상의 저항값을 평균하여 저항값을 결정하였다.

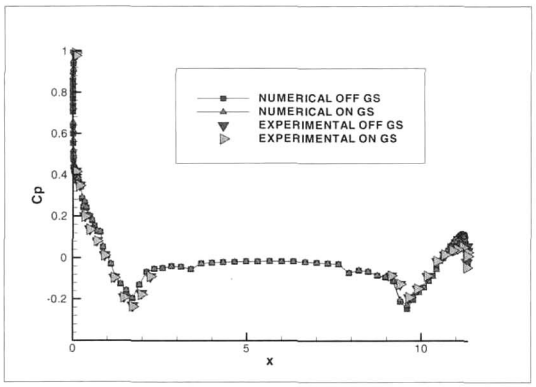
그림 9에서는, 대칭면에서의 압력계수에 대하여 수치해석결과를 실험치에 대하여 각각 마하수 0.137과 0.237에서 비교하였다. 전반적인 경향은 지면모사(Ground Simulation)의 수행여부와 관계없이 일치하며, 전두부 부분의 경우 주어진 위치에 대하여 열차어깨에 해당되는 팽창부에서의 압력을 약간 크게 계산하고 있음을 확인할 수 있다. 후미부의 경우에는 후미부 끝단에서의 회복압력을 약간 크게 예측하는 것을 제외하고는 계산치와 실험치가 유사한 것을 확인할 수 있다.

후미부 대칭면의 압력계수분포만을 자세하게 살펴보면(그림 9), 후미부 끝단 정체점 부근에서 계산치가 약간 높은 압력값을 예측하고 있으며, 후미부 끝단에서 수치적인 모사에 의한 지면모사의 효과를 확인할 수 없었다. 이는 국부적인 3차원 박리현상을 수치적으로 적절하게 모사하고 있지 못함을 의미한다. 적절한 난류모델링의 도입과 보다 향상된 격자계를 이용함으로 이러한 차이를 극복할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 10과 그림 11에는 x/H = 0.480 과 1.482인 단면에 대하여, 대칭면으로부터의 곡선길이 s에 대하여 전두부와 후미부에서의 압력분포를 실험치와 비교하고 있다. 전두부의 경우 열차단면의 대칭면에서 0.1정도의 큰 값을 보이고 있지만, 전반적인 수치해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 후미부의 경우도 해석치와 실험치의 중대한 차이는 발견되지 않으며, 이에 따라 수치해의 적분특성도 열차 형상의 변화에 따라 정성적, 또한 준 정량적으로 일치하는 값을 제공할 것으로 판단된다.

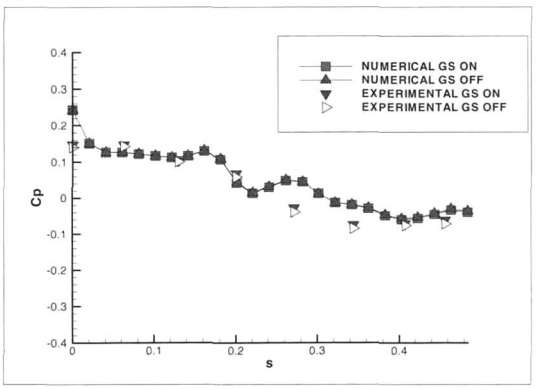


a) M = 0.137

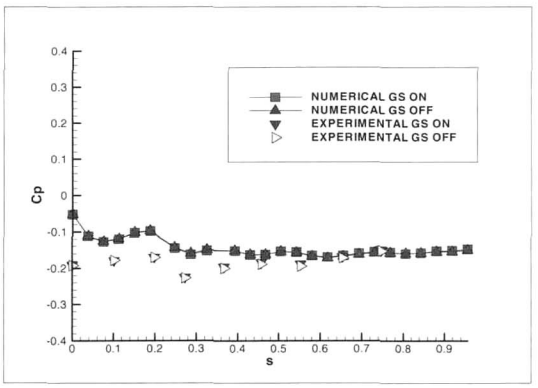


b) M = 0.237

그림 9. 대칭면에서의 실험치 압력계수 비교

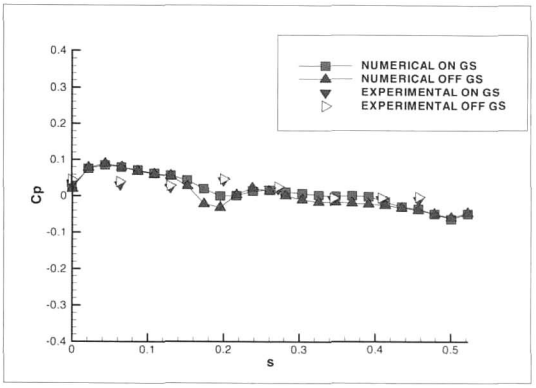


a) x/H = 0.480

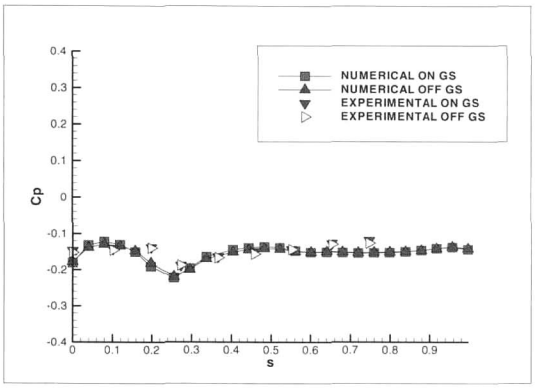


b) x/H = 1.482

그림 10. 전두부 단면의 압력계수비교(M=0.137)



a) x/H = 0.480



b) x/H = 1.482

그림 11. 후미부 단면의 압력계수비교(M=0.137)

실제 고속열차의 형상 변화에 대한 공력저항 특성을 연구하기 위하여, 표 3에 주어진 8가지 형상모델에 대하여 3차원 점성 수치해석을 수행하였다. 이때 자유류 속도는 모든 경우에 M = 0.283(350km/h)이며 지면모사를 수행하기 위해 이동지면조건을 부과하였다. 총 격자수는 8가지 경우에 대하여 모두 동일하다.

총 8가지 수행 결과에 대한 저항 계수 비교가 표 4에 정리되어 있다. 전두부 형상의 공기역학적 성능을 판단하는 압력저항계수(C_{dp})의 계산결과를 살펴보면 전후두부의 압력 저항의 크기는 약 0.1부터 0.14까지 분포되어 있으며, 이는 0.1-0.12의 크기를 갖는다고 알려져 있는 ICE나, 0.1에서 0.2정도의 크기를 가지는 TGV, 0.15-0.20의 크기를 갖는 신간센등의 압력저항계수와 비교할 때, 거의 비슷한 차수를 갖는 크기이다.[2] 그림 12에는 기본모델인 S1N1모델의 압력저항을 기준값으로 압력저항의 상대적인 비교를 그래프로 도시하였다.

표 4 8가지 모델 수치계산의 저항계수 비교 (M = 0.283(350km/h), GS ON)

Models	Cdp	Cdf	Cd	Cd Comp	Cdp Comp
SENE	0.0968	0.0367	0.1336	1.0978	**0.9938**
SENE-S	0.1289	0.0205	0.1495	1.2284	**1.3234**
S1N1	0.0974	0.0243	0.1217	1	**1**
S1N1-C	0.1001	0.0230	0.1230	1.0107	**1.0277**
S2N1	0.0998	0.0258	0.1250	1.0271	**1.0246**
S1N2	0.1277	0.0265	0.1542	1.2671	**1.3111**
S3N1	0.1047	0.0172	0.1219	1.0016	**1.0749**
S3N2	0.1316	0.0160	0.1476	1.2128	**1.3511**

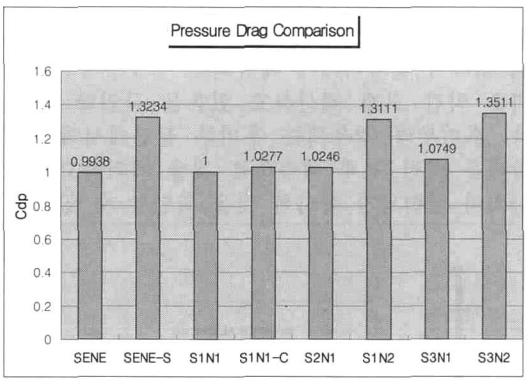


그림 12. 모델별 압력저항 비교

먼저 skirt의 유무에 따른 특성을 파악해보면 변형모델(SENE-S)의 압력저항 수치가 실험모델보다 33.1%가량 큰 값을 보이고 있다. 이러한 압력저항의 증가는 전두부 부근의 정체압력영역이 skirt의 존재에 의해서 차량의 하부에도 존재하기 때문이며, 특히 skirt의 형상중 이중곡선의 교차점(saddle point)부분이 잘 설계되지 않는다면 훨씬 큰 값을 가질 수 있음을 의미한다.

운전석(S1N1-C)이 첨가된 경우에는 S1N1과 경우와 비교하여, 약 2.7% 정도의 압력저항이 증가하였으며, 이는 잘 설계된 돌출부의 경우 저항증가에 대한 영향은 미미하다는 것을 의미한다.

단면상부의 꺾임 곡률반경의 감소에 따라 S1N1과 S2N1, S3N1을 비교하면, 각각 2.5%, 7.5% 만의 압력증가를 보이지만, S1N1을 기준으로 하여 전두부(Nose) 길이만 6.64m로 짧아진 S1N2의 경우 31.1%의 증가를 보이며, 단면이 곡률반경이 500mm이고 길이가 6.64m로 짧아진 S3N2의 경우에는 35.1%의 압력저항이 증가하였다. 실험모델은 전두부의 길이가 6.8m까지 급격하게 변하므로 Nose 길이가 짧은 경우에 해당되는데,

SENE-S 의 경우도 S1N1에 비하여 압력저항이 32.3%가량이 증가한 것을 확인할 수 있다.

열차전두부 형상에 대한 압력저항의 크기는 단면의 곡률반경이 작아질수록, 또 Nose의 길이가 짧아질수록 증가하며, 이 경우 Nose길이의 영향이 주도적인 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 후미부의 박리영역과 그 강도의 변화 때문인 것으로 파악된다.[8] 전두부 길이(단면적의 변화구간)의 증가는 열차의 터널진입에 의한 압축파(compression wave)의 구배 감소에도 효과적으로[3] 전두부 설계시 다른 제한조건이 허락하는 한 열차 전두부 길이는 길게 하는 것이 공기역학적인 성능향상을 위한 가장 효과적인 방법이다.

V. 결 론

복잡한 전두부 형상과 유동조건을 가지는 고속전철의 개활지 주행특성을 파악하기 위하여 실험적, 수치해석적 연구를 수행하였다. 각각의 방법이 가지는 한계를 고려하여 실험적 연구에서는 레이놀즈수와 지면모사의 영향을, 수치적 연구에서는 열차의 3차원 형상에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 풍동실험시, 수평분출(Tangential blowing) 수행여부에 따른 비교결과, 후미부 유동장은 지면모사시 더 낮은 압력회복을 보임을 파악하였다. 이는 풍동실험시 지면모사를 수행하지 않을 경우 더 적은 저항을 측정할 수 있음을 보인다.
2. 풍동실험시 레이놀즈수(유속)의 증가에 따라, 후미부 끝단에서 압력회복이 감소하는 경향을 보였으며, 지면효과를 모사할때 그 차이가 감소하는 것을 확인하였다.
3. 수치해석과 실험치의 비교결과 유동의 정성적인 특징들뿐만 아니라, 정량적인 압력분포도 잘 일치하는 것을 확인하였으나, 박리가 심한 후미부 유동의 수치해석 정확도를 높이기 위해선 적절한 난류 모델링을 포함한 계산이 필요하며, 보다 양질의 격자형성이 요구된다.
4. 실제형상에 가까운 8가지 고속전철 전두부 형상에 대한 해석결과, skirt의 유무, 열차단면의 모양, 전두부의 길이에 따른 압력저항의 일반적인 변화경향을 파악할 수 있었다.
5. 열차단면 상부의 꺾임 곡률 반경보다는 열차의 길이가 전두부 압력저항에 주도적인 영향을 주며, 이때 열차의 길이는 길수록 압력저항값은 감소한다.

후 기

본 연구결과는 G7 고속전철기술개발사업 중 "I-1-2 고속전철설계기반기술개발" 과제의 위탁과제 "고속전철 공력설계 및 해석기술 개발"의 연구결과 중 일부입니다. 본 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었습니다.

참고문헌

[1] 장경수,백남욱,김기환, 세계의 고속철도, 골든-벨, 1999
[2] J.L. Peters, "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential", Int. J. of Vehicle Design, Technological Advances in Vehicle Design Series, SP3, Impact of Aerodynamics on Vehicle Design, pp. 308-341, 1983
[3] T. Ogawa and K. Fujii, "Numeracal Simulation of Compressible Flows induced by a Train Moving into a Tunnel," Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 3, No. 1, 1994.
[4] A. Tabbal, E. Mestreau, N. Montmayer, etc., "CFD Aerodynamics of the French High Speed Train", SAE Technical paper series 920343.
[5] 김인선, "고속전철 형상의 Navier-Stokes 유동해석 및 풍동시험", 한국항공우주학회지 제25권 제6호 pp56~65, 1997.12
[6] 임경호, 고속 철도 차량의 수치적 공력해석 연구, 서울대학교 공학석사 학위논문, 1998
[7] 이동호 외, 고속전철 기술개발사업 공력설계, 해석기술 및 전두부 개발, 2차년도 연차보고서, 1998
[8] 황재호, 이동호, "고속전철형상의 공력해석", 한국항공우주학회 추계 학술발표회 논문집, 1998
[9] Reiner Mueller, Norbert Singer and Winfried Eckert, "Moving Belt with Distributed Suction in the Prosche Model Wind Tunnel", SAE Paper 1999-01-0650, 1999
[10] E. Mercker, J. Wiedermann, "Comparison of different ground simulation techniques for use in automotive wind tunnels", SAE Paper 900321, 1990
[11] E. Willemsen, "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 (1997) pp437-447, 1997