

유선형 형상 개선을 통한 고성능 EMU 열차의 공기저항 저감 연구

Aerodynamic Drag Reduction on High-performance EMU Train by Streamlined Shape Modification

권혁빈* · 홍재성

Hyeok-bin Kwon · Jai-sung Hong

Abstract The effect of modifying the shape of a high-performance EMU train on the aerodynamic drag is studied here using Computational Fluid Dynamics(CFD) based on three dimensional Steady-state Navier-Stokes equation and two equation turbulence modeling. FLUENT 12 and Gambit 2.4.6 are employed for a numerical simulation of the aerodynamic drag of a streamlined-shape train as well as a proto type train. The characteristics of the aerodynamic drag of trains in tunnels are analyzed in a comparison with these characteristics in an open space. The contribution of the aerodynamic drag of each case is also investigated to establish principal pertaining to drag reduction for urban trains in tunnels. The aerodynamic drag of a streamlined train was reduced to 9.8% relative to a proto-type train with a blunt nose and a protruding roof facility and underbody shape: the running resistance is expected to be reduced by as much as 4% at a running speed of 80km/h.

Keywords : Aerodynamic drag, tunnel, running resistance, urban train, Aerodynamic design

초 록 고성능 EMU 열차의 형상 개선을 통한 공기저항 저감 효과를 알아보기 위하여 3차원정상 Navier-Stokes 방정식과 2방정식 난류 모델을 이용한 전산유체역학을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 전산시뮬레이션에는 FLUENT ver.13과 Gambit 2.4.6이 사용되었으며, 기본 형상과 유선형으로 개선된 형상에 대하여 계산을 수행하였다. 또한, 터널 내 주행 시의 공기저항 특성을 살펴보기 위하여 개활지에서의 공기저항 계산도 수행하였으며, 차량 별 공기저항 기여도에 대한 분석도 수행되었다. 유선형으로 개선된 형상의 열차는 절편형 전두부와 돌출된 상부 및 하부구조를 가진 기본 형상 열차에 비하여 약 9.8%의 공기저항이 저감된 것을 확인하였으며, 공기저항 저감에 따른 주행저항의 저감은 시속 80km/h에서 약 4%에 이르는 것으로 나타났다.

주요어 : 공기 저항, 터널, 주행저항, 도시철도차량, 공력설계

1. 서 론

열차의 주행저항은 추진장치의 규모를 결정하는 요인의 하나임과 동시에 주행 시 에너지 소모를 결정하는 가장 중요한 요인이다. 열차의 주행저항은 크게 기계적 마찰저항과 공기저항으로 나누어지는데, 이 중 공기저항은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 고속열차의 추진장치 용량 선정과 에너지 소모에 중요한 변수가 된다. 뿐만 아니라 터널 주행 시에는 평지에 비해 공기저항이 크게 증가하기 때문에 도시철도 차량의 경우에도 대부분의 노선이 지하구간인 경우에는 공기저항의 영향이 상대적으로 더 커진다고 볼 수 있다.

열차의 공기저항은 압력저항과 마찰저항으로 나눌 수 있는데, 터널을 주행할 경우 전두부 주위의 압력은 평지보다 더 높아지기 때문에 열차의 압력저항이 더 커지게 되며, 전두부가 밀어낸 공기가 후미부 쪽으로 이동하는 경로가 터널 주행 시에는 터널 내부로 한정되기 때문에 열차 주위 유속

증가로 인한 마찰저항의 증가도 예상된다.

열차의 공기저항을 평가하는 방법은 크게 축소모델을 이용한 풍동시험, 전산유체역학을 이용한 시뮬레이션 및 실차의 타행시험의 세 가지가 사용될 수 있다. 풍동시험은 비교적 정확하면서도 축소모델을 이용하기 때문에 상대적으로 빠르고 효율적인 방법이지만 터널 내에서 주행하는 열차의 경우에는 터널 벽면과 열차의 상대적 운동을 모사하기가 거의 불가능하기 때문에 측정의 신뢰도를 확보하기가 매우 힘들다. 실차시험의 경우에는 가장 정확하고 신뢰할만한 방법이지만, 차량의 제작이 완료된 후 시운전 단계에서 수행 가능한 방법으로 초기 차량 개발 단계에서는 적용이 힘들다는 문제점이 있다. 반면 전산유체역학을 이용한 방법은 터널과 열차의 상대적 운동을 쉽게 구현할 수 있을 뿐 아니라 수치적 형상 모델만으로 유동장을 재현할 수 있기 때문에 설계 초기 단계에서 공기저항에 대한 다양한 파라미터들의 영향을 분석하는데 사용되기에 알맞은 방법이라고 할 수 있다.

김석원[1] 등은 G7 시제차에 대한 타행 시험을 통하여 개활지 및 터널에서 타행시험을 수행하여 주행저항을 측정한 바 있으며, 이 중에서 기계적 저항을 제외한 공기저항 계수를 산출하여 터널 내에서 공기저항이 약 30% 증가한다는 것

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5346, E-mail : hbkwon@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2013

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.169

을 밝혀낸 바 있다. 권혁빈[2,3] 등은 아진공 터널 내부를 주행하는 초고속 열차의 공기저항의 수치적 계산을 진공도, 열차-터널 단면적비 및 열차속도 등의 파라메타를 변화시켜가며 수행한 바 있으며, 각 파라메타들의 공기저항에 대한 영향을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 현재 개발 중인 고성능 EMU 열차의 공기저항을 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산유체역학을 이용하여 계산하였으며, 기본 형상 대비 유선형 형상을 적용한 열차 모델의 공기저항에 대한 비교를 통해 공기저항 및 주행저항 저감을 평가하였다.

2. 수치 해법

2.1 전산해석 기법

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)은 관영역을 수많은 작은 영역으로 나누고, 각각의 작은 영역에 보존법칙들을 적용하여 근사적인 수치적인 해를 얻는 방법으로서, 컴퓨터 하드웨어/소프트웨어, 특히 비정렬 unstructured grid)의 도입으로 인하여 산업체 현장에서의 적용이 매우 활발해지고 있는 분야이다.

본 연구에서는 열차의 공기저항 계산을 위한 전산유체해석 수행을 위해 상용 CFD 프로그램인 FLUENT™ ver.13을 이용하였다. 3차원 정상(Steady) Navier-Stokes 방정식의 계산을 위한 수치해법으로는 Pressure 기반의 수치해법을 이용하였으며, 압력과 속도의 커플링을 위해서 SIMPLE method를 이용하였다. 공간 차분을 위하여 2차 upwind scheme를 적용하였으며, 난류모델로서는 2-equation 모델인 k-ε 모델을 Compressibility Effect를 포함하여 적용하였다.

2.2 해석 조건

공기저항해석을 위해 사용된 열차의 형상은 기존 EMU 열차에 기반한 기본형 열차(proto-type train)와 현재 개발 중인 고성능 EMU 열차에 적용 예정인 전두부, 상부, 하부 등이 유선형화된 유선형 열차(streamlined train)의 2종이다. 아래 Table 1에는 두 열차 형상의 개략 제원이 나타나 있다. 두 열차 형상 모두 6량 편성으로 이루어져 있으며, 전체 길이는 기본형 열차가 119.9m이며, 유선형 열차는 전두부의 길이의 증가로 인하여 이보다 긴 127.6m이다. 또한 기본형 열차에 있던 상부 기기가 제거된 유선형 열차는 최대 단면적이 9.64m²으로 기본형의 11.04m²에 비해 감소하였다.

Fig. 1에는 전산해석을 위해 모델링된 두 열차의 형상이 나타나 있다. 좌측 상단에 보이는 기본형 열차는 절편형 전두부를 갖고 있으며, 상부에 기기가 돌출되어 있고, 하부에도 기기들이 노출되어 복잡한 형상을 갖고 있다. 반면 우측

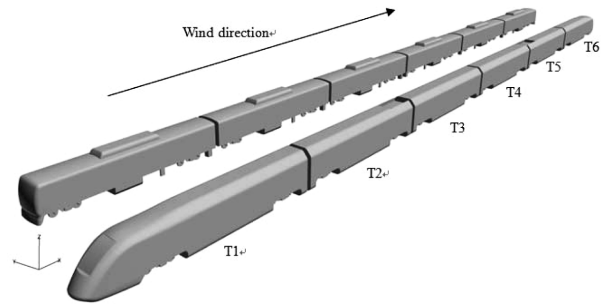


Fig. 1 Shape of the baseline train (upper left) and that of the streamlined train (lower right)

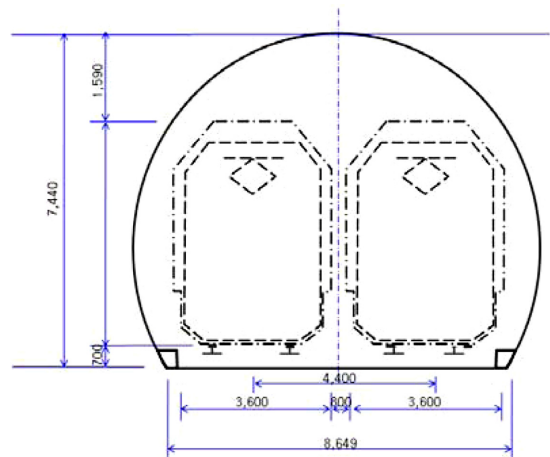


Fig. 2 Cross-sectional shape of tunnel

하단의 유선형 열차는 전두부가 유선형으로 돌출되어 있고, 상단이 매끄러우며 하단의 기기들도 대차부를 제외하고는 막혀져 있음을 알 수 있다.

고성능 EMU 열차의 터널 내 주행저항을 평가하기 위해서는 터널 단면 형상을 정의하여야 하는데, 본 연구에서는 서울시 1기 지하철의 터널형 단면을 이용하였다. 계산에 사용된 터널의 단면적은 59.5m²이며 터널의 단면 형상은 Fig. 2에 나타나 있다.

계산 영역은 열차 전방은 열차 길이의 약 10, 후방은 약 15배로 설정하였으며, 개활지의 경우에는 열차 측면으로 열차 길이의 10배, 전방으로 0.5배의 공간을 계산영역으로 설정하였다. 계산영역을 구성하는 경계면의 표면에는 비정렬 삼각형 격자를 형성하였으며, 해석 공간에는 사면체 격자계를 형성하였는데, 격자 수는 경우에 따라 15백만개에서 17백만개 내외로 나타났다. 개활지의 경우 열차에 의한 유동 교란이 열차 주위에서만 발생하기 때문에 원방경계로 갈수

Table 1. Specifications of train model

Name	Number of cars	Total length	Max. height	Max. width	Max. cross-sectional area
Proto-type train	6	119.9m	4,046mm	3,120mm	11.04m ²
Streamlined train	6	127.6m	4,046mm	3,120mm	9.64m ²

Table 2 Computational domain and mesh information

Train type	Track type	Domain size						Mesh size
		-x	+x	-y	+y	-z	+z	
Proto-type train	Open space	-1972m	1344m	-1268m	1268m	-0.2m	44.8m	14,897,153
	Tunnel	-1972m	1344m	-6.96m	2.96m	-0.7m	6.7m	16,555,148
Streamlined train	Open space	-1972m	1344m	-1268m	1268m	-0.2m	44.8m	15,570,226
	Tunnel	-1972m	1344m	-6.96m	2.96m	-0.7m	6.7m	17,373,037

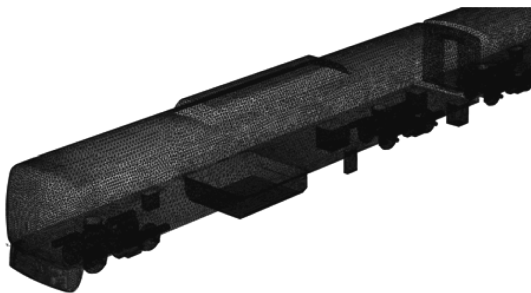


Fig. 3 Surface mesh of the baseline train model

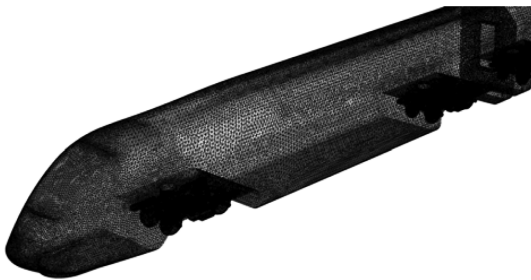


Fig. 4 Surface mesh of the streamlined train model

록 격자의 크기를 크게 형성하였으나, 터널 격자의 경우에는 터널을 따라 유동교란이 전파되므로 격자의 크기를 크게 줄일 수 없기 때문에 터널 격자가 개활지 격자보다 계산영역의 체적이 작음에도 불구하고 격자수는 오히려 약간 증가하였다. 아래 Table 2에는 각 해석 경우에 대한 계산영역의 크기와 격자수를 나타내었으며, Fig. 3과 Fig. 4에는 기본형 열차와 유선형 열차 표면에 형성된 격자계를 각각 보여주고 있다.

계산영역 경계면에서의 경계조건은 열차의 전방경계에서는 열차의 주행속도에 해당하는 velocity inlet 조건을 부여하였으며, 후방 경계에서는 pressure-outlet 조건을 부여하였으며, 열차 표면은 고정벽면 조건을, 터널 벽면의 경우에는 유입류 속도에 해당하는 이동지면 조건을 부여하여 실제 주행 조건을 모사하였다.

2.3 해석 결과

고성능 EMU 열차의 주행 속도인 80km/h에 대하여 해석을 수행하였으며, 통상적으로 공기저항을 공기의 동압과 기준 단면적으로 무차원화하여 표현할 경우 대기압, 온도, 축적에 무관한 무차원화 계수를 얻을 수 있기 때문에 아래 식

(1)과 같이 공기저항 계수로 표현하여 분석을 수행하였다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (1)$$

위 식에서 C_D 는 공기저항 계수이며, ρ 는 공기밀도, U 는 열차속도, S 는 기준면적을 의미하며 본 연구에서는 대략적인 열차 단면적인 $10m^2$ 을 두 형상에 모두 일괄적으로 적용하였다.

두 종류의 열차에 대하여 각각 개활지 주행 및 터널 주행의 조건에 대하여 계산을 수행하였다. 해석결과로부터 공기저항을 계산하여 아래 Table 3에 나타내었다. 아래 표에서 개활지에 의 공기저항계수는 기본형 열차와 유선형 열차가 각각 1.172와 0.960으로서 유선형 열차가 기본형 열차에 비하여 공기저항이 18%낮은 것으로 나타났다. 터널 내 주행 시에는 유선형 열차의 공기저항계수는 1.869로 기본형 열차의 2.069에 비해 약 9.6% 낮게 나타났다.

전두부 길이의 확대, 상하부 돌출물 제거 및 감싸기 등의 공기저항 저감 대책의 효과는 개활지에서 더 큰 효과를 나타내며, 터널 내에서는 열차 전후의 압력이 증가하여 전체적인 공기저항이 큰 폭으로 증가하기 때문에 형상 개선에 따른 공기저항 저감 효과가 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 터널 주행 시 공기저항의 증가율을 통해서도 확인할 수 있는데, 기본형 열차의 경우 개활지에 비해 76.5%가 증가한 반면, 유선형 열차의 경우에는 터널 주행 시에 이보다 큰 94.6% 증가한 것을 알 수 있다.

따라서, 차량의 형상개선을 통한 일반적인 공기저항 저감 외형 설계가 터널 내 주행 시에도 여전히 효과적이지만, 개활지 주행 시 보다는 효과의 크기가 상대적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

Table 3 Aerodynamic drag coefficients

Name	Open space (C)	Tunnel (D)	Drag increase rate (D-C)/C
Proto-type train (A)	1.172	2.068	76.5 %
Streamlined train (B)	0.960	1.869	94.6 %
Drag reduction rate (B-A)/A	18.0 %	9.6 %	

아래 Fig. 5와 Fig. 6에는 각각 개활지 주행 및 터널 주행 시의 열차 별 공기저항 계수를 나타내고 있다.

먼저 개활지 주행 시의 차량 별 공기저항 계수를 살펴보면, 1번과 6번 차량의 경우 유선형 열차가 기본형 열차보다 크게 낮아진 것을 알 수 있으며, 이는 전두부의 길이를 늘리고 유선형화한 효과로 볼 수 있다. 2번 차량의 경우에는 하부 및 상부의 유선형화로 인해 유선형 열차의 공기저항 계수가 기본형 열차에 비해 절반 가까이 낮게 나타나고 있다. 그러나, 3번 및 4번 열차의 경우에는 유선형 열차가 기본형 열차에 비해 공기저항계수가 더 낮게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 기본형 열차의 경우 1,2번 열차에서 상부 및 하부 구조에서 발생한 slipstream 때문에 유속이 감소하여 3,4번 열차의 체감유속을 떨어뜨렸기 때문인 것으로 보인다.

반면 터널 내 주행의 경우 1번 열차의 공기저항이 두 열차 모두 크게 증가하며, 열차 간 편차가 거의 나타나지 않는다. 개활지에서와 마찬가지로 2번 차량의 경우 유선형 열차의 공기저항이 더 작으나 3번, 4번 차량의 경우에는 공기저항이 더 증가하는데, 이는 앞서 설명했듯이 1,2번 차량에 의해 발생한 slipstream의 영향으로 볼 수 있다. 마

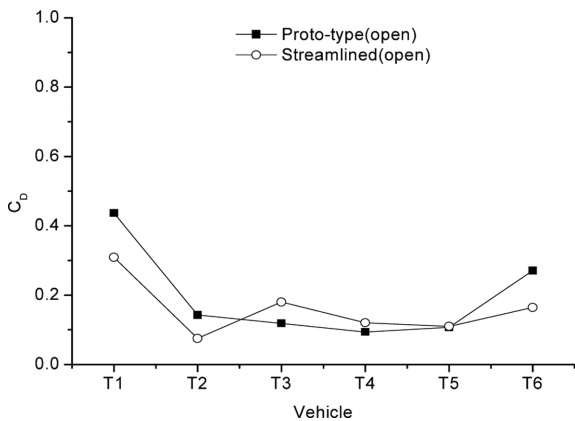


Fig. 5 Aerodynamic drag coefficients of the vehicles (open space)

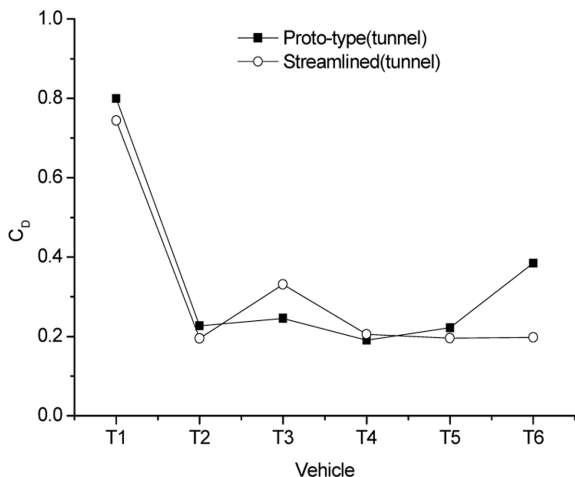


Fig. 6 Aerodynamic drag coefficients of the vehicles (tunnel)

지막 열차의 경우에는 기본형 열차와 유선형 열차의 공기저항계수가 큰 차이를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 이를 통해 유선형 전두부는 후미부의 유동박리를 감소시키어 마지막 차량의 압력저항을 저감하는 효과가 있음을 알 수 있다.

반면 터널 내 주행의 경우 1번 열차의 공기저항이 두 열차 모두 크게 증가하며, 열차 간 편차가 거의 나타나지 않는다. 개활지에서와 마찬가지로 2번 차량의 경우 유선형 열차의 공기저항이 더 작으나 3번, 4번 차량의 경우에는 공기저항이 더 증가하는데, 이는 앞서 설명했듯이 1,2번 차량에 의해 발생한 slipstream의 영향으로 볼 수 있다. 마지막 열차의 경우에는 기본형 열차와 유선형 열차의 공기저항계수가 큰 차이를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 이를 통해 유선형 전두부는 후미부의 유동박리를 감소시키어 마지막 차량의 압력저항을 저감하는 효과가 있음을 알 수 있다.

전두부 및 후미부 주변 속도벡터와 표면 압력분포를 나타낸 Fig. 7 및 Fig. 8를 통해 이러한 사실을 재확인할 수 있다. 먼저 Fig. 7의 전두부 주변 속도벡터를 살펴보면, 기본형 열차의 경우 전두부 주위에서 유속이 급격히 감소하여 전두부 앞면의 압력을 크게 증가시켜 첫 번째 차량의 공기저항이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 유선형 전두부의 경우에도 유동이 보다 원활하게 흘러가기는 하지만, 전두부 끝단 정체점 주위에서 압력이 크게 증가하여 첫 번째 차량의 공기저항을 증가시킬 수 있다.

반면, Fig. 8에 나타난 후미부 주위 대칭면에서의 속도분포를 살펴보면, 기본형 열차의 경우에는 후미부 주위에 큰 박리영역이 형성되어 공기저항을 크게 증가시키는 반면, 유선형 열차의 경우에는 이러한 박리영역이 상대적으로 작기 때문에 공기저항이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다.

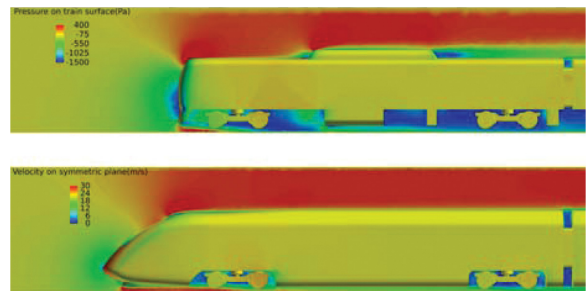


Fig. 7 Pressure distribution and velocity magnitude around the nose

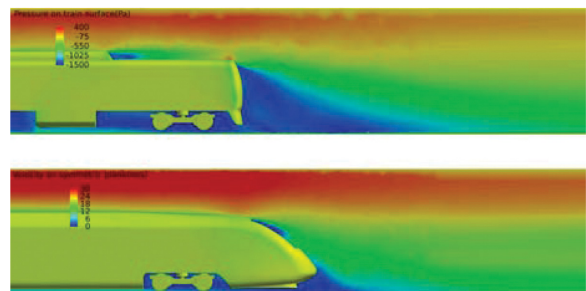


Fig. 8 Pressure distribution and velocity magnitude around the tail

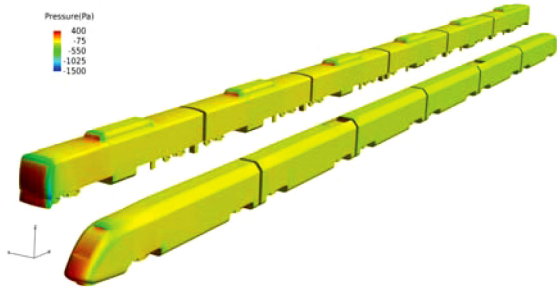


Fig. 9 Pressure distributions on the train surface (upstream view)

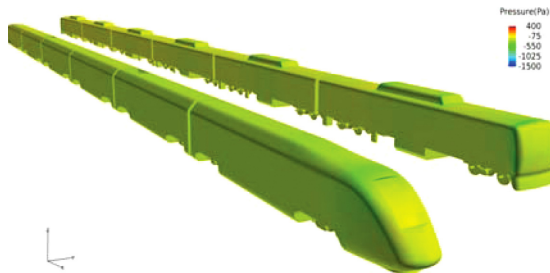


Fig. 10 Pressure distributions on the train surface (downstream view)

Fig. 9와 Fig. 10에는 각각 전방 및 후방에서 바라본 열차 표면 압력 분포를 보여주고 있다. 전방의 높은 압력분포와 후방의 낮은 압력분포를 관찰할 수 있으며, 유선형 열차의 경우 기본형 열차에 비해 상대적으로 압력분포가 완화되어 공기저항이 저감되는 것을 확인할 수 있다.

유선형 열차 형상으로 인한 공기저항의 저감이 주행저항 및 에너지 소모 저감에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위하여 고성능 EMU 열차의 주행식과 본 계산 결과를 비교하여 보았다.

아래에는 고성능 EMU의 개발 지상 및 지하구간에서의 주행저항식이 나타나 있다[4].

- 지상 구간

$$R = (1.65 + 0.024V)Wm + (0.78 + 0.0028V)Wt + (0.028 + 0.0078(n-1))V^2 \text{ [kg]} \quad (2)$$

- 지하 구간

$$R = 1.867 + 0.0359V + 0.000745V^2 \text{ [kg/ton]} \quad (3)$$

- V : 열차 속도 (km/h)

- Wm : 편성중 동력차의 총중량, 실측 중량 기준 (ton)

- Wt : 편성중 부수차의 총중량, 실측 중량 기준 (ton)

- n : 편성차량수

Table 4에 나타난 고성능 EMU 열차의 차량 별 중량을 식 (2)와 식 (3)에 대입하면 아래 식 (4)와 식(5)와 같이 속도에 대한 2차 다항식의 형태로 고쳐 쓸 수 있다.

- 지상 구간

$$R = 275.75 + 3.235V + 0.0067V^2 \text{ [kg]} \quad (4)$$

- 지하 구간

$$R = 404.2055 + 7.77235V + 0.1612925V^2 \text{ [kg]} \quad (5)$$

Table 4 Weight of the EMU train

Vehicle name	Weight	Type
Tc	33ton	Trailer
M	40ton	Power car
M'	42ton	Power car
M''	42ton	Power car
T	27.5ton	Power car
T1	31.2ton	Trailer
total	275.7	Trailer

Table 5 Comparison of aerodynamic drag coefficients

	Estimation	CFD calculation
Open space	1.389	1.172
Tunnel	3.348	2.068

식 (4)와 식 (5)에서 상수항 및 1차항을 제외한 2차항을 공기저항으로 가정하여 식 (1)에 나타난 공기저항 계수 C_D 로 환산하면 아래 Table 5와 같이 나타난다. 표에서 나타났듯이 평지의 경우에는 주행저항식 상의 공기저항 계수는 1.389로 기본형 열차 형상의 전산해석 결과인 1.172보다 다소 높게 나타났으나, 주행저항식이 형상을 특정 짓지 않은 예측 식인 것을 감안하면 전산해석을 통해 예측한 공기저항 값은 합리적인 결과로 보여진다. 터널에서의 공기저항계수도 주행저항식 상에는 3.348로 개활지 대비 약 2.4배의 값을 나타내며, 이러한 예측값이 터널 단면적이 특정되지 않은 것을 감안하면 합리적인 결과로 보여진다.

Table 6에 나타난 공기저항 및 주행저항의 최종 결과를 살펴보면, 공기저항 계수는 기본형 대비 유선형 열차가 18% 감소한 것으로 나타났으며, 개발 사양에 나타난 주행저항식인 식 (5)에 근거하여 열차속도 80km/h에서의 열차 주행저항을 계산한 결과 유선형 열차의 주행저항은 기본형 열차에 비해 4% 정도 주행저항이 저감될 것으로 예측되었다.

Table 6. Aerodynamic drag and resistance to motion

	Baseline	Streamlined	Reduction rate
Aerodynamic drag coefficient(C_D)	1.172	0.960	18.0 %
Resistance to motion at 80km/h	16.4kN	15.7kN	4.0 %

3. 결 론

고성능 EMU 열차의 터널 내 공기저항의 평가 및 형상 개선을 통한 공기저항 감소 효과를 살펴보기 위하여 전산유체역학을 이용한 전산해석을 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 유선형으로 형상이 개선될 경우의 공기저항 저감 효과를 다음과 같이 예측할 수 있다.

- 개활지 주행 시 기본형 열차 형상의 공기저항계수는

1.172이며, 전두부 유선형화, 상부 및 하부 구조 개선을 통한 유선형 열차 형상의 공기저항계수는 0.96으로 공기저항이 18.0% 감소한 것으로 나타났다.

- 터널 내 주행 시 기본형 열차 형상의 공기저항계수는 2.068이며, 유선형 열차 형상의 공기저항계수는 1.869로 공기저항이 9.6% 감소한 것으로 나타났다. 이 경우 공기저항 저감을 통한 주행저항 저감율은 4.0%로 나타났다.

- 유선형 전두부의 공기저항 저감 효과는 개활지에서는 선두부와 후미부 모두에서 나타나지만, 터널의 경우에는 후미부에서 주로 효과를 나타내는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 국토해양부 철도기술연구사업(No. 12PRTD-C061758-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] S.W. Kim, H.B. Kwon, Y.G. Kim, T.W. Park (2006) Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions, *Proc. IMechE*, 220, pp. 449-459.
- [2] H.B. Kwon, B.B. Kang, B.Y. Kim, D.H. Lee, H.J. Jung (2010) Parametric study on the aerodynamic drag of ultra high-speed train in evacuated tube - part 1, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 44-50.
- [3] H.B. Kwon, S.W. Nam, D.H. Kim, Y.J. Jang, B.B. Kang (2010) Parametric study on the aerodynamic drag of ultra high-speed train in evacuated tube - part 2, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 51-57.
- [4] Hyundai-Rotem (2011) Test procedure of next generation EMU.
- [5] H.B. Kwon, J.H. Kwak (2007) A study on the improvement of nose shape of KTX-II train using CFD technique, *Proceedings of KASA fall Conference* (1), Jeju, pp. 156-160.
- [6] H.B. Kwon, S.H. Yun, H.W. Lee (2011) Target and implementation of aerodynamic drag reduction for high-speed train to reach up to 500km/h running speed, *Proceeding of KSR fall Conference*, Jeju, pp. 1320-1326.

접수일(2012년 11월 9일), 수정일(2013년 1월 18일),
게재확정일(2013년 4월 27일)

Hyeok-bin Kwon: hbkwon@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

Jai-sung Hong: jshong@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea