

전체 공기저항 저감을 위한 전후대칭열차 전두부 형상 최적설계

Nose Shape Optimization of Front-Rear Symmetric Train
for the Reduction of the Total Aerodynamics Drag곽민호*[†], 윤수환*, 김석원*, 박춘수*Minho Kwak*, Suhwan Yun*[†], Seogwon Kim*, Choonsoo Park**

Abstract Nose shape optimization of the high speed train have to aim the reduction of the total aerodynamic drag considering the driving in the both way. Therefore, 3-D shape modeling is necessary for the accurate simulation of the wake area behind the train. Nose shape optimization is performed with the Vehicle Modeling Function which is 3-D modeling available. The 3-car long streamlined train shape is constructed and viscous compressible flow solver is adopted with unstructured meshes to predict the aerodynamic drag. The total aerodynamic drag of the train with the optimized shape was reduced by 5.8% when compared to the base model. The low-risen and long vertical nose shape of the optimized shape weakens the whirled flow around the nose tip behind the train rear nose and reduces the total aerodynamic drag. The flow change around the rear nose is dominant than that around the front nose.

Keywords : Front-rear symmetric train, Total aerodynamic drag, Nose shape, Design optimization, Vehicle Modeling Function

초 록 고속열차의 전두부 형상 설계는 양방향으로 운행되는 특성을 고려하여 전체 편성 차량의 공기저항을 목표로 해야 한다. 이를 위해 특히 후미부에서의 정확한 후류 모사가 필요하므로 3차원 형상 모델링이 필수적이다. 3차원 형상을 자유롭게 모사할 수 있는 열차형상함수를 이용하여 고속열차 전두부 형상 최적설계를 수행하였다. 열차형상은 3량길이의 유선형 형상으로 구성하였고 Navier-stokes 방정식을 이용하여 공기저항 해석을 진행하였다. 전체공기저항을 고려한 전두부 형상을 적용한 열차 모델은 기본형상모델에 비해 전체공기저항이 약 5.8% 감소하였다. 최적 전두부 형상의 낮게 깔리면서 세로로 긴 형상 특징은 열차 뒤쪽 전두부 끝단 근처의 회전 유동을 약화시켜 전체 공기저항을 감소시킨다. 선두차량 주변보다는 후미차량 주변에서의 유동의 변화가 공기저항 감소에 더 많은 기여를 하였다.

주요어 : 전후대칭열차, 전체공기저항, 전두부, 최적설계, 열차형상함수

1. 서 론

최근의 고속열차의 연구 개발 경향은 일반적인 운영속도인 300km/h를 넘어 초고속으로 달릴 수 있는 고속열차 개발이다. 고속열차의 설계속도가 증가함에 따라 심각하게 떠오르는 공기역학적 문제점은 공기저항이다. 고속열차의 공기저항은 주행속도의 제곱에 비

[†] 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(mhkwak@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

레하기 때문에 고속열차의 속도가 올라갈수록 주행저항에서 공기저항이 차지하는 비율은 증가하게 된다 [1].

고속열차의 공기저항은 고속열차의 외부형상에 주로 영향을 받고 그 중 전두부 형상은 특히 압력저항에 많은 영향을 미친다. 고속열차의 경우 양방향으로 운행되는 특성으로 인해 선두차량과 후미차량의 형상이 방향만 다를 뿐 같은 전두부 형상이다. 고속열차 전두부 설계는 선두차량인 경우와 후미차량인 경우를 모두 고려해야 하므로 전체공기저항의 저감을 설계목표로 설정해야 한다. 전체 공기저항을 고려하기 위해서 후미차량의 형상을 제대로 구현하여 주변의 유동을 제대로 모사할 수 있는 형상 구현 방법이 필요하다. 기존의 고속열차 전두부 최적설계의 경우 2차원 형상으로 설계하거나 선두차량의 전두부 형상만 고려하는 등, 후미차량 주변의 유동을 제대로 모사하지 못했다 [2]. 구요천 등이 제안한 열차형상함수는 3차원 형상을 자유롭게 모사할 수 있어 3차원 형상 최적설계에 적합하다 [2,3].

본 연구에서는 열차형상함수를 이용하여 고속열차 전두부 형상 최적설계를 수행하였다. 3량길이의 유선형 모델을 바탕으로 하여 Navier-stokes 방정식을 이용하여 공기저항 해석을 수행하였다. 공기저항 저감의 원인을 분석하기 위해 최적형상과 기본형상에 대해 형상특징과 주변유동 변화를 비교하였다.

2. 배경이론

2.1 열차 형상 함수

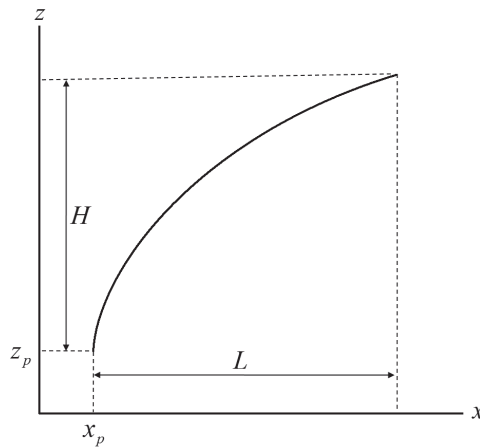


Fig. 1 Basic curve shape of the Vehicle Modeling Function [2]

고속열차의 3차원 형상을 모사하기 위해 열차형상함수를 이용하였다. 식 (1)은 열차형상함수의 기본식으로써 시작점(x_p, z_p)와 폭(L), 높이(H)를 바탕으로 곡률 A_1, A_2 를 조절하여 형상을 결정하는 식이다 [2]. Fig. 1은 식(1)에 해당하는 기본형상을 나타낸다. 기본 곡선들을 다수 조합하면 2차원 형상들을 표현할 수 있다.

$$Z(x) = \frac{H}{L^{A_1+A_2}} (x - x_p)^{A_1} [2L - (x - x_p)]^{A_2} + z_p \quad (1)$$

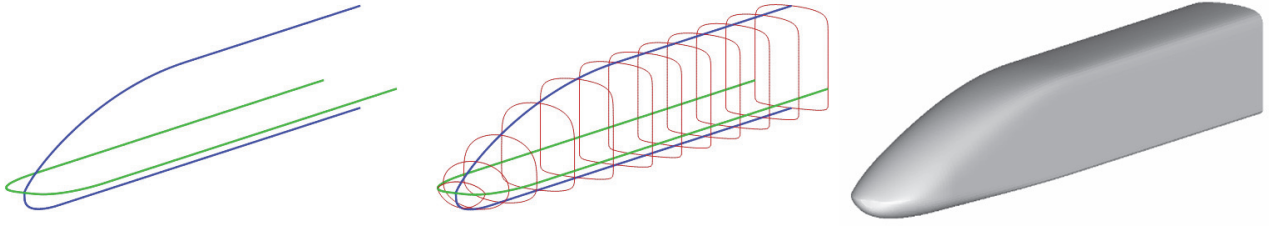


Fig. 2 The 3d shape modeling process by the Vehicle Modeling Function [2]

Fig. 2는 열차형상함수를 이용하여 고속열차 3차원 형상을 정의하는 과정을 보여주고 있다. 측면과 평면 방향에서 바라보는 2차원 단면 형상을 기본 골격으로 구성하고 정면 방향에서 바라보는 길이 방향의 단면 형상들을 정의하여 3차원 형상을 구성한다 [2].

2.2 전산수치해석

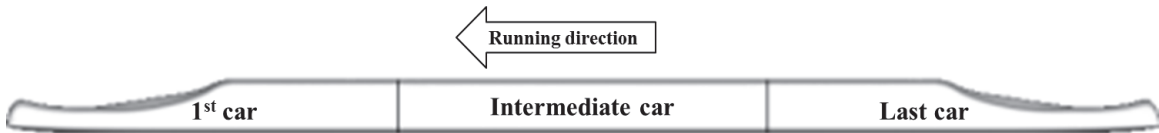


Fig. 3 3-car streamlined model with no bogie wheel [4]

Fig. 3과 같은 3량의 유선형 모델을 기본으로 하였으며 열차모델의 기본 수치들은 HEMU-430x의 수치들을 이용하였다. 복잡한 고속열차 전두부 형상을 구현하기 위해 비정렬 격자를 사용하였고, 열차 모델 주변의 유동을 더 정확하게 모사하기 위해 10개의 경계층을 적용하였다 [4].

본 연구에서는 전산수치해석을 위해 상용 CFD 해석 코드인 Ansys Fluent를 사용하였다. 지배방정식은 3차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였고 난류 모델은 $k-\omega$ sst 모델을 이용하였다. 수치해석은 운행속도 500km/h에서 수행하였고, 레이놀즈 수는 열차의 높이를 바탕으로 계산했을 때 약 3.36×10^7 이다 [4]. 후미부의 불안정한 유동으로 인해 공기저항이 주기적으로 변화하므로 안정적인 범위에 들어선 이후의 값들을 평균하여 공기저항 값으로 사용하였다.

3. 공기저항 저감 최적설계

3.1 최적설계 정의

본 연구에서 최적설계의 목적함수는 고속열차 3량 유선형 모델의 전체 공기저항을 저감하는

것이다. 설계변수는 형상을 조절하는 변수 중에 열차모델의 기본형상의 공기저항에 영향을 많이 미치는 변수 5개를 선정하였다. 설계변수는 각각 전두부 끝단 높이, 측면단면형상의 첫번째 곡선과 두번째 곡선이 만나는 점의 좌표, 두번째 곡선의 곡률, 그리고 평면단면형상의 곡선의 곡률이다. 기본형상과 설계공간은 열차 고유의 형상적인 특징과 열차의 최대 수치들을 고려하여 결정하였으며, 설계변수의 범위는 Table 1과 같다.

Table 1 Ranges of the design variables [4]

| | Lower bound | Base model | Upper bound |
|----------|-------------|------------|-------------|
| H_N | 0.5 | 1.0 | 1.5 |
| X_{IN} | 5.0 | 7.5 | 10 |
| Z_{IN} | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| A_{U2} | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| A_T | 0.01 | 0.505 | 1.0 |

최근 전산실험의 경우에 많이 사용되는 Latin Hypercube 방법을 이용하여 25개의 실험점을 추출하였다. 추출된 25개의 실험점을 가지고 인공신경망기법을 이용하여 근사모델을 구성하였다. 근사모델의 R^2_{adj} 는 0.99로 매우 잘 구성된 것으로 나타났으며 최적해 탐색을 위하여 비제약문제에 적절한 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno 알고리즘을 적용하였다.

3.2 최적설계 결과

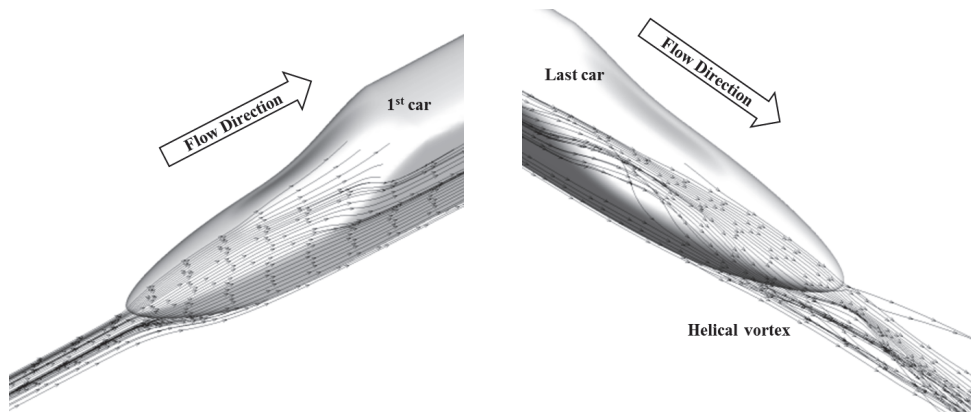


Fig. 4 Numerically computed streamlines around 3-car base model [4]

기본형상 주변의 유동 특성은 Fig. 4에 나타난다. 유동은 크게 복잡한 영역 없이 열차 표면형상의 변화에 따라 흘러간다. 후미차량 주변에서 유동은 열차의 형상적인 특징으로 인해 낮은 방향으로 흘러가는 경향을 보이고 대부분의 유동이 혼합되면서 그들 중 일부는 helical vortex를 형성하게 된다.

최적설계 결과 기본형상에 비해 최적형상은 전체 공기저항이 약 5.8% 감소한 것으로 나타났다. 첫번째 차량만의 경우 2.8% 감소하였지만 후미차량의 저감율이 크게 나타나면서 전체 공기저항이 더 크게 저감된 것이다.

Fig. 5는 기본형상과 최적형상의 2차원 단면 형상을 비교한 것이다. 기본형상에 비해 최적형상은 측면형상의 경우 좀 더 볼록한 운전창 모양을 보이고 있으며 전두부 끝단의 높이가 낮

아저 전두부 형상이 낮은 방향으로 지향하는 형태로 나타난다. 평면의 단면 형상의 경우 곡선 부분의 곡률이 기본형상에 비해 더 작게 변화된 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 기본형상과 최적형상의 3차원 형상을 보여주고 있다. 기본형상의 경우 마치 일본의 E5 고속열차와 유사한 형상을 보여주고 있다. 기본형상의 전두부 끝단은 약간 뭉툭한 반면 최적형상의 전두부 끝단은 마치 새의 부리 같은 모양으로 일반적인 전투기들의 형상과 유사한 형상을 보여주고 있다. 기본형상에 비해 최적형상은 전두부 끝단이 낮은 쪽으로의 방향성을 보이고 있으며 가로보다는 세로방향으로 좀 더 긴 형상을 보여주고 있다.

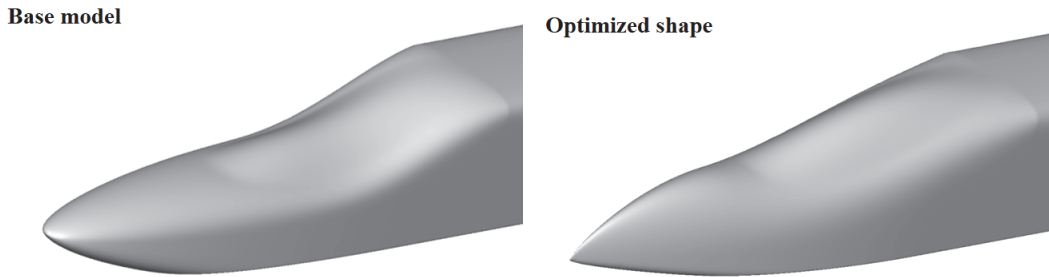


Fig. 5 Comparison of 3d shape between the base model and the optimized shape [4]

최적형상에 의한 공기저항 저감의 원인을 분석하기 위해 기본형상과 최적형상 후미부에서의 유선 형태를 Fig. 6에 나타냈다. 기본형상의 경우 약간의 윗방향 흐름이 발생하면서 전두부 끝단 주변에서 유동이 회전하는 모양을 나타낸다. 하지만 최적형상 주변의 경우 유동이 형상을 따라 부드럽게 흘러나가는 것을 볼 수 있다. 최적형상의 형상적인 특징으로 인해 후미차량 주변에서의 유선들이 복잡하게 섞이지 않고 부드럽게 흘러나가면서 공기저항을 저감시킨 것으로 보인다.

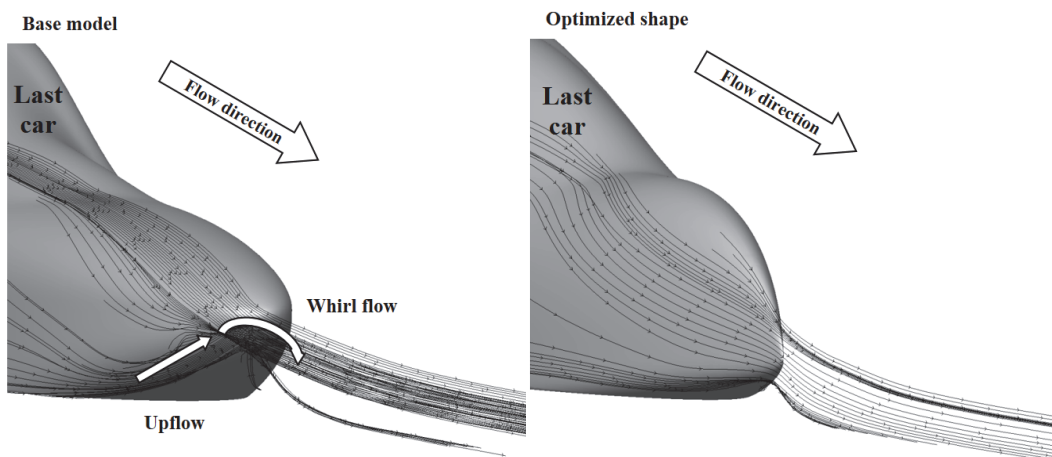


Fig. 6 Comparison of streamlines around the base model and the optimized shape [4]

3. 결 론

3차원 형상을 자유롭게 모사할 수 있는 열차 형상 함수를 이용하여 고속열차의 양방향 운행 특성을 고려한 편성차량 전체 공기저항을 저감하는 고속열차 전두부 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 최적형상은 기본형상에 비해 전체 공기저항이 약 5.8% 감소하였다. 최적 전두부 형상의 낮게 깔리면서 끝단이 뾰족하고, 세로로 긴 형상 특징은 후미차량 뒤쪽의 회전 유동을 약화시켜 전체 공기저항을 감소시킨다. 열차 형상 함수는 3차원 형상을 매우 잘 모사하여 성공적인 형상 최적설계를 수행할 수 있게 하였다. 향후 대차와 팬터그래프 커버 등의 열차 외부의 복잡한 형상을 적용한 형상에 대해서도 최적설계를 수행하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원[과제번호 13RTRP-B067706-01]에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J.L. Peters (1982) Optimizing Aerodynamics to Raise IC Performance, *Railway Gazette International*, pp. 817-819.
- [2] Yocheon Ku, (2009) Two-Step Multi-Objective Nose Shape Optimization of a High-Speed Train using the Vehicle Modeling Function, PhD Thesis, Seoul National University.
- [3] Minho Kwak, Suhwan Yun, Yeongbin Lee, Hyeokbin Kwon, et al. (2013) Optimum nose shape of a front-rear symmetric train for the reduction of the total aerodynamic, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(12), pp. 3733-3743.
- [4] Minho Kwak, (2013) A Study on Optimum Nose Shape of a Front-Rear Symmetric Train for the Reduction of the Total Aerodynamic Drag, PhD Thesis, Seoul National University.