

# 측풍 안정성을 고려한 고속열차 전두부 최적설계

## Nose Shape Optimization of High-speed Train for the Consideration of Crosswind Stability

곽민호<sup>\*†</sup>, 윤수환<sup>\*</sup>, 박춘수<sup>\*</sup>

Minho Kwak<sup>\*†</sup>, Suhwan Yun<sup>\*</sup>, Choonsoo Park<sup>\*</sup>

**Abstract** Increasing the train speed for the efficiency improvement increases aerodynamic problems threatening the safety of high-speed train. Because of shape characteristics about high ratio of cross-sectional area to its total length, at higher driving speed, driving stability could be reduced by crosswind incoming from the train side. High-speed train nose is optimized for the improvement of crosswind stability. The base model is already optimized from KTX Sancheon nose for the aerodynamic drag reduction and the objective of the design optimization is the side force coefficient of total 10-car train. Side force coefficient of the optimized shape is reduced by 4.9% when compared to that of the base model. High pressure region forming on the windward side of the train nose is decreased and it reduces the side force coefficient.

**Keywords :** High-speed train, Nose shape, Design optimization, Crosswind stability

**초 록** 고속열차의 운행효율을 향상시키기 위해 운행속도를 증가시키게 되면 고속열차의 안전에 위협이 되는 현상이 증가하게 된다. 단면적에 비해 길이가 긴 열차의 형상적인 특성상 주행 속도가 높아지면 높아질수록 열차의 옆면에서 들어오는 측풍에 의해 주행 안정성이 감소할 수 있다. 고속열차의 안전성을 향상시키기 위해 측풍에 대한 안정성을 고려하여 고속열차 전두부의 최적설계를 수행하였다. 기 수행된 KTX 산천 전두부의 공기저항 저감 최적형상을 설계 기본형상으로 하여 전체 10량 편성차량의 측력 계수를 목적함수로 하였다. 최적설계 결과 기본형상에 비해 측력 계수가 약 4.9% 저감되었다. 전두부 최적형상의 측면에 형성되는 고압영역이 감소하면서 측력계수가 저감되는 것으로 판단된다.

**주요어 :** 고속열차, 전두부 형상, 최적설계, 측풍 안정성

## 1. 서 론

세계의 고속열차는 일반적으로 300km/h에서 운영되어져 왔으나 최근에 들어서 고속열차 차량 자체와 인프라의 효율과 성능을 향상시켜 그 이상의 속도 대에서 운영하는 방법에 대해 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 고속열차의 운영속도가 증가하면 공기저항, 터널 주행 특성, 측풍 안정성, 공력소음, 열차풍, 상호 교행 등 공기역학적 문제점들이 더 심각해지게 되며 그 중에 열차의 측면에서 들어오는 측풍은 고속열차의 주행 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 열차의 안전운행 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(mhkwak@krri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

고속열차의 측풍 안정성은 대부분의 공력 특성들과 유사하게 고속열차의 외부 형상에 영향을 주로 받는다. 전두부 형상, 차체 높이, 차체 단면 형상 등의 영향을 주로 받는 것으로 알려져 있다 [1]. 고속열차의 주행 안정성을 높여서 안전한 운행을 하기 위해서 측풍에 대한 고려가 필요하다.

대부분의 측풍 관련 연구는 고속열차 주변의 열차풍, 유동장과 측풍과의 상호작용에 의한 변화 등에 대한 연구가 많았다 [2]. 본 연구에서는 측풍 상황에서 전두부 형상에 의한 전체 편성 차량의 측력계수의 변화를 살펴보고 그것을 저감하는 최적설계를 수행하였다.

## 2. 연구 기법

### 2.1 열차형상함수

고속열차 전두부 형상을 모사하기 위해서 열차형상함수를 이용하였다. 열차형상함수는 항공기 익형의 설계를 위해 Kulfan이 제안한 내용을 고속열차 전두부 형상을 구현하기 위해 변형하여 적용한 방법이다 [3,4]. Fig. 1과 같은 열차형상함수의 기본곡선을 여러 개 조합하여 2차원 단면 혹은 투영 형상들을 만들 수 있고 다시 그것들을 조합하여 3차원 형상을 구성할 수 있다 [4].

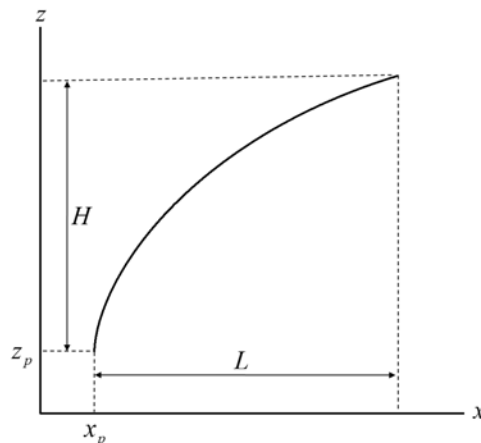


Fig. 1 Basic curve of the Vehicle Modeling Function [4]

### 2.2 수치해석기법

열차 모델은 KTX 산천 10량 길이의 유선형 모델을 이용하였다. 모델의 전반적인 수치들은 KTX 산천을 참고하여, 너비는 2.816m, 높이는 3.46m, 총길이는 201.29m이다 [5]. 열차모델과 지면간의 간극은 한국철도표준규격을 참고하여 열차바닥면과 대차 바퀴형상간의 거리에 레일 높이를 더하여 0.382m로 결정하였다 [6]. 전산수치해석을 위한 계산 영역은 Fig. 2와 같다.

계산 영역의 격자의 총 개수는 약 500만개이고 지면 경계층 등의 복잡한 유동을 모사하기 위해 고속열차 모델의 벽면으로부터 약 10층의 Prism layer를 적용하였다. 고속열차 주변의

유동을 모사하기 위해서 전산수치해석은 상용해석코드인 Ansys Fluent를 이용하였다. 난류 모델은  $k-\omega SST$  모델을 적용하였고 유동의 속도는 열차 주행속도 350km/h로 가정하여 해석하였다. 측풍 상황은 수치해석의 효율을 높이기 위해 유입되는 유동속도 350km/h(97.2m/s)와 유입각 90도로 30m/s의 측풍을 벡터적으로 합산한 유동으로 가정하여 모사하였다.

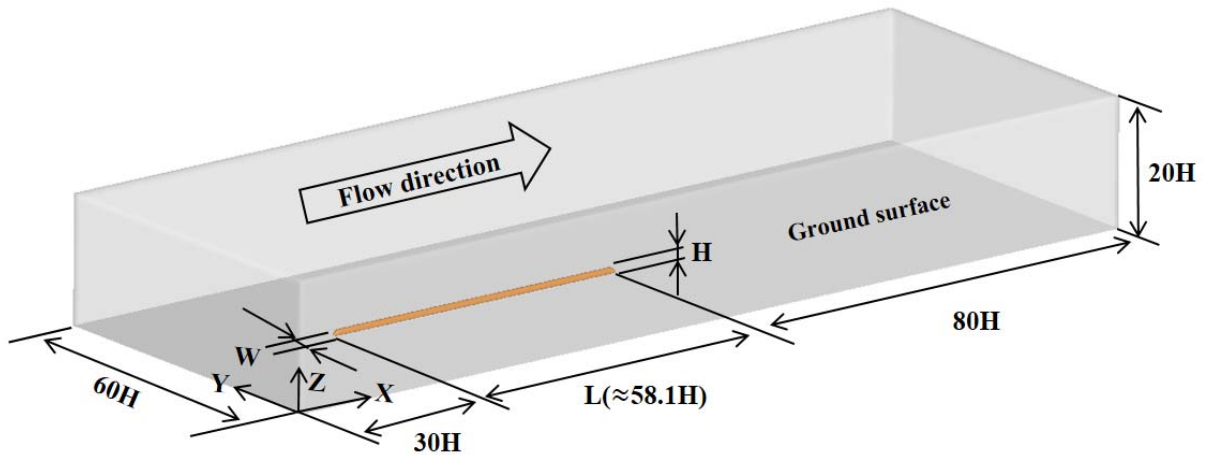


Fig. 2 Dimension of the computational domain [5]

## 2.3 최적설계기법

최적설계를 위한 기본형상의 경우 기존에 설계된 공기저항 저감을 위한 최적형상을 이용하였다 [5]. 설계변수는 전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 하면 곡률 3개가 선정되었다. 각 설계변수는 실제 상용 차량이기 때문에 설계범위를 작게 설정하였다. 설계공간 구성을 위한 실험점 도출은 Maxi-min Latin Hypercube 방법을 적용하였고 총 20개의 실험점을 추출하였다. 비선형 모델에 대한 모사가 좋은 것으로 알려진 인공 신경망 기법을 이용해 근사모델을 구성하였고 최적해 탐색을 위하여 비제약문제에 적절하다고 알려진 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno 알고리즘을 적용하였다.

본 연구에서의 최적설계는 다음의 조건에서 수행되었다.

Determine : 고속열차 전두부 3차원 형상

Minimize : 10량 편성차량 측력계수

$$4.67 \leq \text{전두부길이} \leq 6.67$$

$$0.5 \leq \text{전두부끝단높이} \leq 1.3$$

$$0.2 \leq \text{하면곡률} \leq 0.6$$

### 3. 최적설계 결과

최적형상의 10량 편성차량의 측력계수는 최적설계결과 약 4.9%, 다시 수치해석을 실행한 결과 약 5.8%가 저감되었다. 최적설계 과정이 올바르게 수행되었다고 판단된다. 수치해석 결과를 이용하여 차량별로 측력계수를 비교한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 편성차량 전체의 측력계수는 약 5.8% 저감되었으나 선두차량과 후미차량의 측력계수의 합은 약 11.3% 저감되었다. 중간객차 차량들에 비해 전두부가 포함된 선두차량과 후미차량에서 최적형상에 의한 측력계수 변화가 더 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

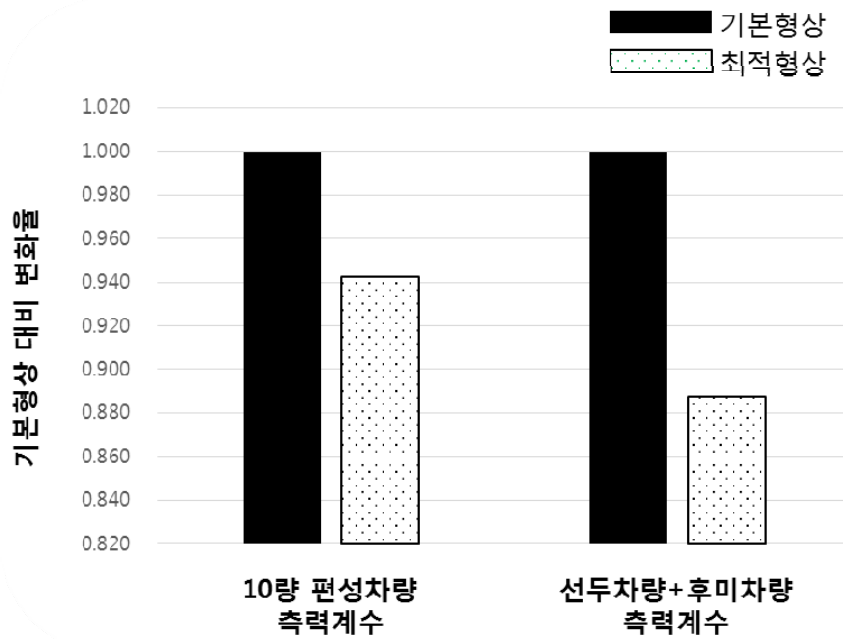


Fig. 3 Comparison of side force coefficients between the base model and the optimized shape

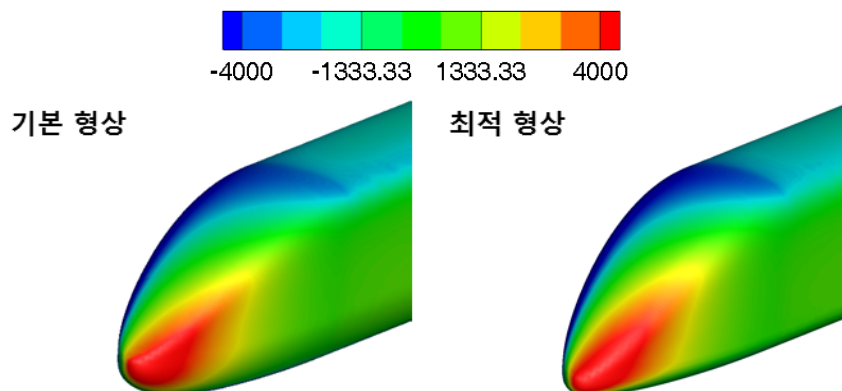


Fig. 4 Comparison of pressure contours of the first car surface between the base model and the optimized shape

Fig. 4는 바람이 불어오는 방향쪽의 선두차량 표면의 압력 컨투어를 나타낸다. 기본형상에 비해 최적형상의 경우 고압 영역의 형태가 약간 얇고 긴 방향으로 변화하면서 일정구역에 집중되는 압력의 크기가 변화한 것으로 생각된다. 이런 압력 변화가 선두차량의 측력계수에 영향을 준 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

고속열차의 주행 안정성에 영향을 미치는 측풍에 대한 안정성을 향상시키기 위해 편성차량의 측력계수를 저감하는 전두부 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 약 5.8%의 측력계수를 저감할 수 있었다. 향후 다른 공력성능을 추가한 다목적 최적설계로 확대하여 수행하면 다양한 공력성능을 만족시킬 수 있는 전두부 형상을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원[과제번호 14RTRTP-B067706-02]에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Ch. Heine, G. Matschke (2001) The Influence of the Nose Shape of High-Speed Trains on the Aerodynamic Coefficients, *WCRR 2001*, Koln, Germany.
- [2] C. Baker (2010) The flow around high speed trains, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(6-7), pp.277-298.
- [3] B. Kulfan (2007) A Universal Parametric geometry representation method – CST, *45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, USA.
- [4] Y. Ku (2009) Two-step multi-objective nose shape optimization of a high-speed train using the vehicle modeling function, Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- [5] M. Kwak, S. Yun, C. Park (2015) Optimal Design for the Nose Shape of Commercial High-speed Train Using Function of Train Configuration, *Journal of the Korean Society for Railway*, 18(4), pp.279-288.
- [6] Korean Railway Standards (2006) KRS TR 0001-12 (R).