

다목적 공력성능향상을 위한 고속열차 전두부 최적형상의 공력 특성 검토

Numerical Study of Aerodynamic Characteristics of Multi-purpose Optimized Train Nose Shape for the Improvement of Aerodynamic Performances

곽민호^{*†}, 윤수환^{*}, 박춘수^{*}

Minho Kwak^{*†}, Suhwan Yun^{*}, Choonsoo Park^{*}

Abstract It is well known that Aerodynamic performances of high speed train take major effects on high speed running. Nose shape optimization of high speed train is done for the improvement of aerodynamic characteristics. The objective functions are the reduction of the aerodynamic drag, the improvement of the side wind stability, and the reduction of the micro-pressure wave at tunnel exits and two stages optimization is progressed. After the optimization for the aerodynamic drag reduction is performed based on KTX-Sancheon train shape, multi-objective optimization is conducted for the improvement of side wind stability and the micro-pressure wave. As a results of study for aerodynamic characteristics of optimized shapes, change ratios through optimization are lower than those through numerical simulations.

Keywords : Aerodynamic characteristics, Multi-objective optimization, High speed train, Nose shape, Numerical study

초 록 고속열차의 공기역학적 성능은 고속 주행에 지배적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 고속열차의 공력성능을 향상시키는 고속열차 전두부 형상의 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 공기저항 저감, 강풍 안정성 향상, 터널 미기압과 저감으로 하여 2단계로 나누어 진행하였다. KTX 산천 열차의 형상을 바탕으로 공기저항 저감 최적설계를 먼저 수행한 후 강풍 안정성과 터널 미기압과 특성을 향상시키기 위한 다목적 최적설계를 수행하였다. 도출된 최적형상의 공력성능을 검토한 결과, 최적설계로 도출된 공력성능 변화율에 비해 전산수치해석을 통해 도출된 변화율이 비교적 더 크게 나타나는 것을 확인하였다.

주요어 : 공력특성, 다목적최적설계, 고속열차, 전두부 형상, 수치적 분석

1. 서 론

고속열차는 친환경성과 에너지 효율성의 장점을 바탕으로 도로교통과 항공교통 등 다른 교통수단의 단점을 보완해줄 수 있는 대체 교통수단으로 전세계적으로 각광받고 있다. 한동안 고속열차의 운영속도는 최고 300km/h에서 정체되어 왔으나, 최근 개발열차의 설계운영속도를 증가시켜 나가고 있고 기술력 향상을 바탕으로 열차 선진국에서는 그 이상의 운영속도를 실현해나가고 있다.

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

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

일반적으로 고속열차의 공기역학적 특성은 주행속도의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 고속열차의 운영속도가 증가하게 되면, 공기저항, 강풍 안정성, 터널 미기압과, 공력소음, 열차풍, 교행 등의 공기역학적 문제점들이 심화되게 된다.

고속열차의 공기역학적 특성은 일반적으로 고속열차의 외부 형상에 주로 영향을 받는다 [1]. 그 중에서도 고속열차의 전두부 형상은 고속열차의 공력특성에 전반적으로 주요하게 영향을 주는 것으로 알려져 있다 [1]. 하지만, 전두부 형상의 변화 경향은 각각의 공력특성에 따라 다르게 나타난다.

기존의 고속열차 전두부와 관련된 연구들은 전두부 형상의 최적설계, 편성열차의 공기저항, 터널 미기압과 분석, 측풍 분석 등이 각각 이루어져 왔다. 본 연구에서는 고속열차의 공력특성을 동시에 고려하는 전두부 형상 다목적 최적설계를 수행하였다. 열차형상함수를 이용하여 고속열차 전두부 형상을 3차원 모델링하고, 공기저항 저감, 강풍안정성 향상, 터널 미기압과 저감을 목적함수로 하여 2단계의 전두부 형상 최적설계를 진행하여 최적형상을 도출한 후, 수치적으로 전두부 최적형상에 대해 분석하였다.

2. 연구 기법

2.1 열차형상함수

고속열차의 전두부 형상을 구현하기 위해 열차형상함수를 이용하였다. 열차형상함수는 항공기 익형의 설계 및 분석에 이용된 내용을 고속열차의 전두부 형상에 맞게 변환하여 적용한 것이다 [2,3]. Fig. 1은 열차형상함수의 기본 곡선으로써 시작점(x_p , z_p)과 폭(L), 높이(H)를 바탕으로 곡률을 조절하여 형상을 결정짓는다. 기본 곡선을 바탕으로 다양한 조합들을 통해 2차원 단면을 구성하고 다시 조합하여 3차원 형상을 만들어낼 수 있다 [3].

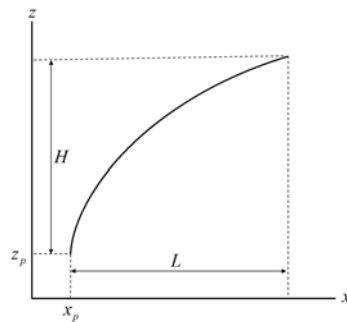


Fig. 1 Basic curve of the Vehicle Modeling Function [3]

2.2 수치해석기법

해석에 사용된 열차 모델은 열차형상함수를 이용하여 도출된 KTX 산천 기본형상을 바탕으로 구성된 10량 길이의 유선형 모델이다. 공기저항과 측풍 해석은 상용해석코드인 Ansys Fluent를 이용하여 3차원 압축성 Navier-Stokes 식과 $k-\omega sst$ 모델을 적용하였다. 열차

의 주행속도는 350km/h로 해석하였고, 측풍 해석은 유입각 90도로 30m/s의 측풍이 유입되는 것을 가정하여 벡터적으로 합산한 유동으로 진행하였다. 전산수치해석을 위한 계산 영역은 Fig.2 와 같다 [4]. 터널 미기압과 해석은 측대칭 압축성 Navier-Stokes 식을 이용하여 진행하였으며, 터널의 사양은 호남고속선 터널을 참고하여 길이 550m에 단면적은 96.7m²이다 [5].

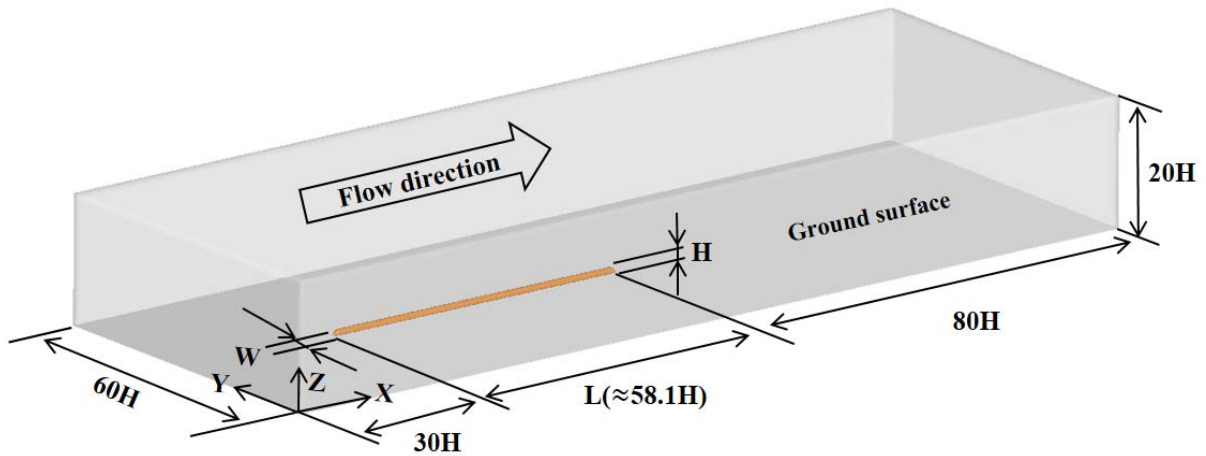


Fig. 2 Dimension of the computational domain [4]

2.3 최적설계기법

최적설계과정은 Fig.3과 같다. 우선 공기저항 저감을 위한 최적설계를 통해 도출된 최적형상을 바탕으로 강풍 안정성 향상과 터널 미기압과 저감을 위한 최적설계를 진행하였다. 설계변수는 민감도 분석을 통해 전두부 길이, 전두부 끝단 높이, 하면 곡률의 3개의 형상변수로 결정하였다. 설계공간을 구성하기 위해 Maxi-min Latin Hypercube 방법을 이용하여 20개의 실험점을 추출하였다. 근사모델 구성에는 비선형 현상을 잘 모사하는 크리깅 모델을 이용하였고, 최적설계 알고리즘은 다목적 최적설계에 적합한 것으로 알려진 NSGA-II 기법을 적용하였다. 기본형상인 공기저항 저감 최적형상의 공기저항계수를 이용하여 제약 조건을 부과하여 기본형상에 비해 비교적 공기저항의 변화가 크지 않게 하였다.

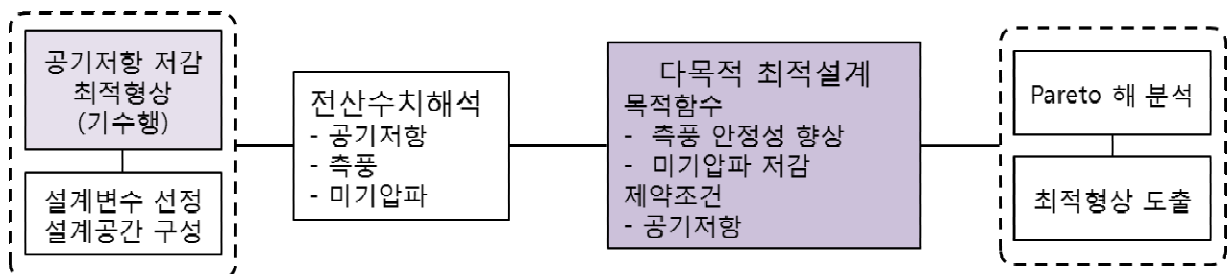


Fig. 3 Multi-objective optimization process for the improvement of aerodynamic characteristics

3. 연구 결과

2.1 최적설계결과

다목적 최적설계의 결과 다양한 최적형상을 선택할 수 있는 파레토해를 도출하였다. Fig.4와 같이 파레토 해의 곡면을 형성하는 파레토 프론트의 여러 최적해 중에 최적설계의 목적에 따라 다양한 최적형상을 선택할 수 있다. 측력계수 최대저감형상은 파레토해의 가장 왼쪽 끝에 위치하여 측력계수를 저감하지만 미기압과의 크기는 다른 것에 비해 비교적 크게 나타난다. 반면 미기압과 최대저감 형상은 기본형상에 비해 미기압과를 가장 크게 저감시키지만 측력계수가 크게 나타나게 된다. 본 연구에서는 호남고속선의 인프라 환경을 고려하여 교량과 터널의 연장의 비율을 적용한 호남고속선 비율 형상을 최적형상으로 선택하였다.

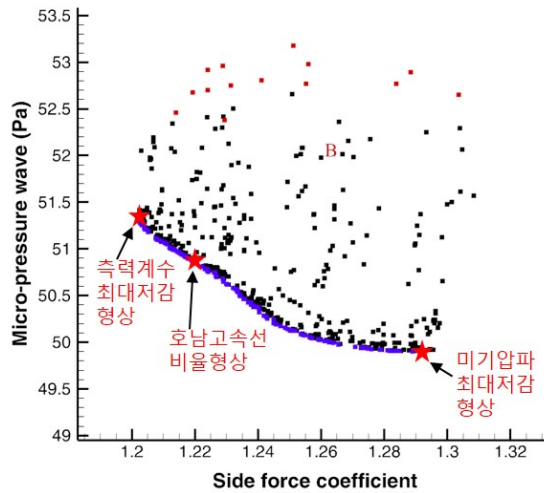


Fig. 4 Pareto solution of multi-objective optimization

2.2 최적설계결과에의 수치적 검토

도출된 최적형상들에 대해 수치적으로 공력성능의 변화에 대해 분석하였다. 도출된 최적형상들의 설계기본형상에 대한 측력계수와 미기압과의 변화율을 최적설계 프로세스를 통한 방법과 수치해석을 통한 방법으로 나누어 Table 1에 비교하였다. 수치해석 결과 측력계수 최대저감형상은 측력계수는 최대로 변화시켰으나 미기압과는 그 변화율이 작은 것으로 나타났다. 반면에 미기압과 최대저감형상은 미기압과는 최대로 저감시켰으나 측력계수는 오히려 증가시키는 것으로 나타났다. 결과적으로 최적설계 결과 나타나는 변화의 경향이 수치적으로도 확인할 수 있었다. 경향은 유사하게 나타났으나, 그 변화율은 최적설계의 결과에 비해 수치해석 결과가 더 크게 나타나고 있음을 역시 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of numerical results for optimum nose shapes with optimization results

	측력계수 변화율		미기압과 변화율	
	최적설계	수치해석	최적설계	수치해석
	결과	결과	결과	결과
측력계수 최대저감 형상	-4.8%	-5.2%	-1.3%	-1.8%
미기압과 최대저감 형상	+2%	+1.6%	-4.1%	-4.8%
호남고속선 비율형상	-3.5%	-3.6%	-2.3%	-2.7%

3. 결론

고속열차의 공력특성을 동시에 고려하는 전두부 형상 다목적 최적설계를 수행하였다. 공기저항 저감, 강풍 안정성 향상, 터널 미기압과 저감을 목적함수로 하여 설계를 진행하였으며, 다목적 최적해인 파레토 해를 도출하여 설계목적에 맞게 다양한 해를 결정할 수 있었다. 최적설계 결과 도출된 최적형상들을 수치해석을 통해 분석한 결과 변화 경향을 같게 나타났으며 변화율은 수치해석을 통한 결과가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 향후 최적설계 조건 변화를 통해 더 다양한 전두부 최적형상을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원[과제번호 15RTRP-B067706-03]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] B. Kulfan (2007) A Universal Parametric geometry representation method – CST, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, USA.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] H.Kwon, T. Kim, D. Lee, M. Kim (2003) Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-Speed Train Passing through a Tunnel, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 217(2), pp.111-124.