

고속열차 전두부 및 팬터그래프 공력성능 향상기술 연구

Study on the Aerodynamic Advancements of the Nose and Pantograph of a High-Speed Train

노주현*, 구요천*, 윤수환*, kwak민호*, 박훈일*,
Rho, Joo-Hyun Ku, Yo-Cheon Yun, Su-Hwan Kwak, Min-Ho Park, Hoon-Il
김규홍**, 이동호**
Kim, Kyu-Hong Lee, Dong-Ho

ABSTRACT

Recent high-speed trains around the world have achieved remarkable improvement in speed. In Korea, the new high-speed train with maximum speed of 400km/h has been developing through the 'Future High-Speed Rail System Project'. The improvement in train speed brings numerous aerodynamic problems such as strong aerodynamic resistance, noise, drastic pressure variation due to the crosswind or passing by, micro-pressure wave at tunnel exit, and so on. Especially, the nose shape of high-speed train is closely related to the most of the aerodynamic problems. Also the pantograph has to be considered for noise prevention and detachment problems. In this paper, the project, 'Research on the Aerodynamic Technology Advancement of the High-Speed EMU' is introduced briefly, which is one of the efforts for the speed improvement of the 'HEMU400x'. Finally, two main results of train nose and pantograph will be shown. First, the optimization of the cross-sectional area distribution of the high-speed train nose to reduce tunnel micro-pressure wave, and second, robust design optimization of the panhead shape of a pantograph.

국문요약

최근 세계 각국의 고속열차들은 속도 향상 측면에서 비약적인 발전을 보이고 있으며, 국내에서도 2007년부터 '차세대 고속철도 기술개발 사업'을 통해 최고속도 400km/h급의 고속열차 개발을 진행 중에 있다. 고속열차의 주행속도가 증가함에 따라 이전에는 제기되지 않았던 공기저항, 공력소음 문제, 열차의 교행 및 측풍에 의해 발생하는 압력변동, 터널출구에서 발생하는 미기압파 등의 문제들이 대두되고 있으며 이와 같은 문제들은 열차의 고속화를 제약하는 요인이 된다. 특히, 고속열차의 전두부 형상은 이러한 공기역학적 문제들과 밀접하게 연결되어 있으며, 팬터그래프의 소음 및 안정적인 집전 성능 확보 등도 속도 향상을 위해 반드시 고려해야하는 사항이다. 본 논문에서는 고속열차의 속도향상 노력의 일환으로 진행되고 있는 '공력해석 향상 기술'의 연구 내용과 더불어, 터널 미기압파 저감을 위한 전두부 형상 최적화 결과와 팬터그래프 공력성능 향상을 위한 강건 최적화 결과를 소개한다.

* 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원

E-mail : donghlee0@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7386 FAX : (02)887-2662

** 서울대학교, 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소

2. 개요

현재 차세대 고속철도 기술개발 사업에서 개발되고 있는 고속열차는 350km/h의 속도로 서비스하게 된다. 이 속도의 경우 공력저항이 총 주행저항 중 80% 이상을 차지하며, 공력소음, 열차의 교행/측풍에 의해 발생하는 압력변동, 터널출구에서 발생하는 미기압과 문제 등 공기역학적인 문제들이 더욱 심해진다. 특히 고속열차의 전두부 형상은 공력저항(특히 압력저항)과 교행/측풍 안정성, 터널 미기압과 문제 등에 지대한 영향을 미치며, 팬터그래프와 같은 외부 부착물은 공력소음, 공기저항 증가 등의 문제를 발생시키고, 속도 증가시 진동으로 인하여 전차선과 집전판을 손상시킬 수 있다. 따라서 차세대 고속열차의 고속주행 신뢰성 및 안정성 확보를 위해 고속철도 전두부 형상에 대한 종합적인 공력성능 평가가 필요하며, 팬터그래프의 소음 및 안정적인 집전성능의 확보를 위한 신개념 팬터그래프의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 고속열차에서 발생하는 여러 공기역학적 문제 중 전두부 공력형상 모델링 기법과 미기압과를 최소화하기 위한 최적 전두부 단면적 분포 및 팬터그래프의 팬헤드에 대한 강건 최적 설계 연구 결과를 소개한다.

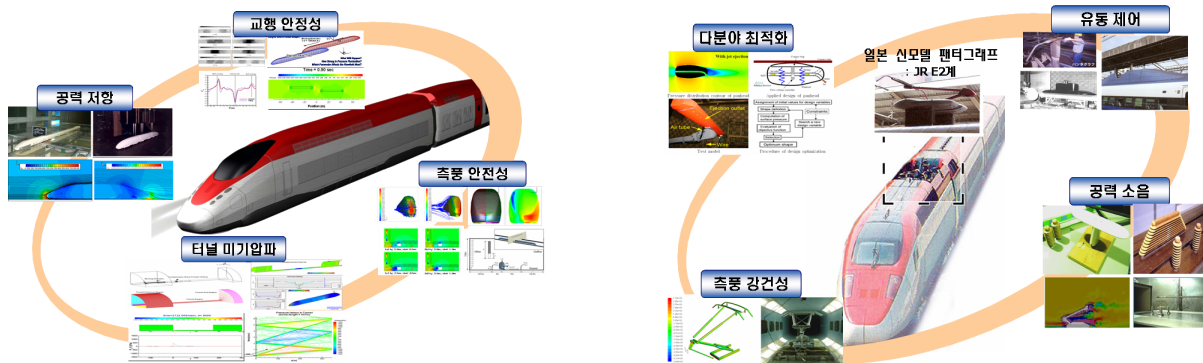


그림 1. 한국형 고유 전두부 형상 개발 및 고효율 팬터그래프 팬헤드 개발

3. 전두부 공력성능 향상기술

3.1 형상함수를 이용한 3차원 고속열차 전두부 모델링기법 개발

공력형상 최적설계를 효과적으로 수행하기 위해 형상함수를 이용한 고속열차 전두부 모델링기법을 개발하였다. 본 기법에서는 열차의 각 세부 형상을 식 (1)과 같은 함수로 정의하여 이를 연결함으로써 3차원의 전체 형상을 구현할 수 있다.

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

형상함수의 중첩을 이용하여 복잡한 전두부 형상 및 운전석의 wind shield 부분도 구현이 가능하며, 다음 그림 2는 그 예제이다. 이러한 기법은 3차원 형상 구현이 간편하고 직관적이며, 유선형 물체 모델링이 쉬운 장점이 있다.

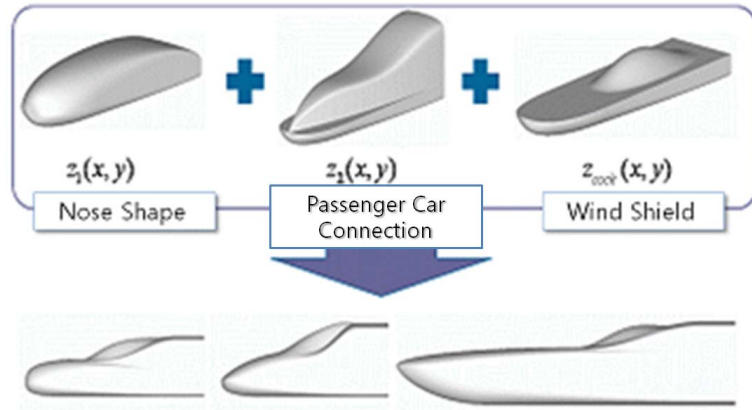


그림 2. 함수의 중첩을 이용하여 구현한 3차원 전두부 형상

3.2 전두부 길이 및 형상 변화에 따른 공력저항 수치해석

3.1절에서 소개한 형상함수를 사용하면 3D 형상을 함수로 정의할 수 있으며, 이는 자동격자 구성이 가능하여 수치해석에 용이하다는 장점이 있다. 이를 이용하여 전두부 길이 및 형상 변화에 따른 공력저항 수치해석을 수행하였으며, 그림 3과 4는 이러한 수치해석을 이용한 공력성능의 Parametric Study의 한 예이다.

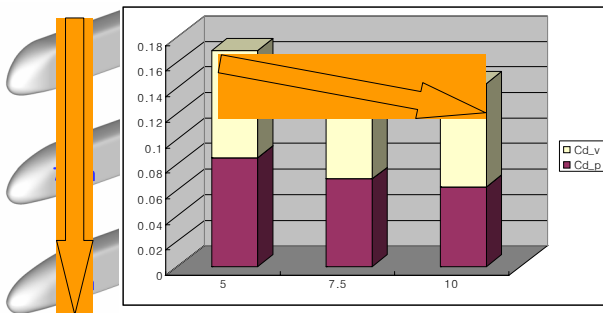


그림 3. 길이에 따른 전두부 형상 및 저항계수(전두부 길이 = 5m, 7.5m, 10m)

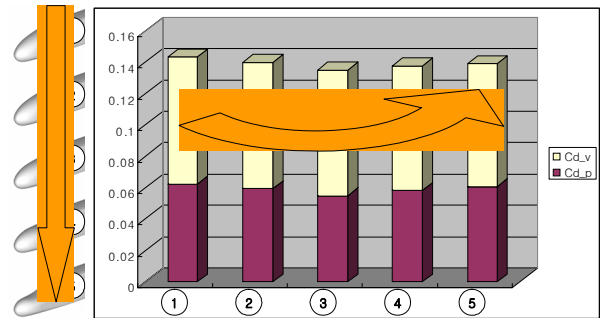


그림 4. 2-Box Model에 따른 전두부 형상 및 저항계수

그림 3은 전두부 길이 변화(5m, 7.5m, 10m)에 대한 3차원 공력저항 계수를 보여준다. 그림에서 노란색으로 표시된 부분(Cd_v)은 마찰저항계수이고, 붉은색으로 표시된 부분(Cd_p)은 압력저항계수이다. 마찰저항계수는 주로 전체 열차 길이에 의해 결정되므로 전두부 길이에 따른 큰 변화가 없지만, 압력저항계수는 전두부 길이가 길어질수록 그 크기가 감소함을 알 수 있다.

그림 4는 앞서 설명한 2-Box model 전두부 형상에서 (L_E, H_E)의 위치를 변경시키면서 해석을 수행한 결과이다. 해석 범위 내에 공력저항을 최소로 하는 형상이 존재함을 알 수 있었으며, 이후 연구에서 보다 정밀한 최적설계를 통해 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 보여준다.

3.3 미기압과 저감을 위한 전두부 단면적분포 최적설계

축대칭 코드를 이용하여 다음 그림 5와 같이 전두부 단면적 분포에 대한 미기압과 수치해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 5가지 전두부 길이(5m, 7m, 10m, 12m, 15m)에 대해 미기압과 최소화를 위한 전두부 단면적 분포 최적화를 수행하였다.

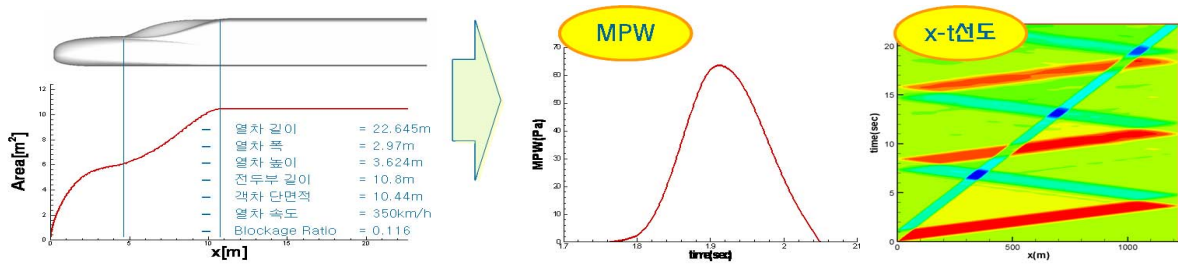


그림 5. 차량 단면적 분포를 이용한 터널 미기압과 해석

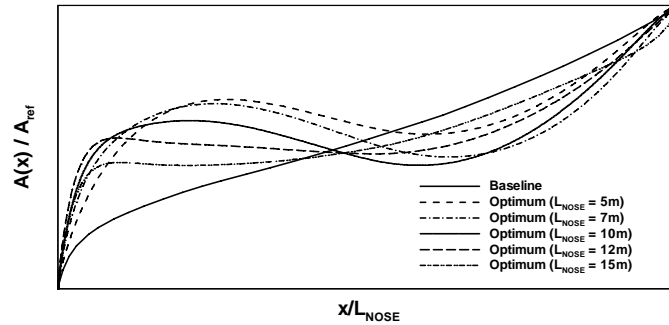


그림 6. 미기압과 저감을 위한 전두부 초기 형상과 최적형상 (전두부 길이 = 5m, 7m, 10m, 12m, 15m)

그림 6은 미기압과를 최소화하는 전두부 단면적 분포 최적화 결과이다.[1, 2] 최적화된 형상은 전반적으로 전두부 앞 끝이 뾰족한 형태이며, 이후 일정구간 감소 후 다시 증가하는 형태이다.

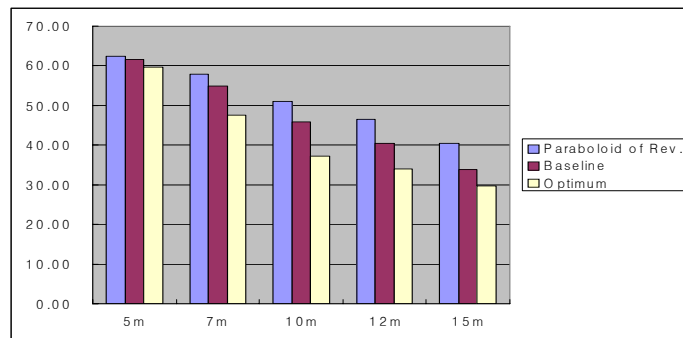


그림 7. 전두부 형상 및 길이에 따른 미기압과 강도 (열차 속도 350km/h)

그림 7은 앞서 그림 6에 나타난 최적화 된 전두부 단면적 분포에 대한 미기압과 강도 해석 결과이다. 최적화된 형상은 포물형 전두부 형상이나 기존의 최적형상에 비해 최대 27%의 미기압과 저감 효과를 보이고 있으며, 전두부 길이가 10m 근처일 때 저감 효과가 가장 좋다.[3]

4. 팬터그래프 공력성능 향상기술

4.1 팬터그래프 팬헤드 2D 단면형상 강건 최적 설계

본 연구에서는 전산유체역학 해석과 최적화 기법을 이용하여 팬터그래프의 팬헤드 단면 형상에 대한 강건 최적 설계를 수행하였다.[5] 팬헤드의 형상은 그림 8에서와 같이 기본 타원형에서 앞쪽 곡률(n), 뒤쪽 곡률(m) 그리고 축 길이(a_1, a_2)와 같은 설계 변수에 의해 정의하였다.

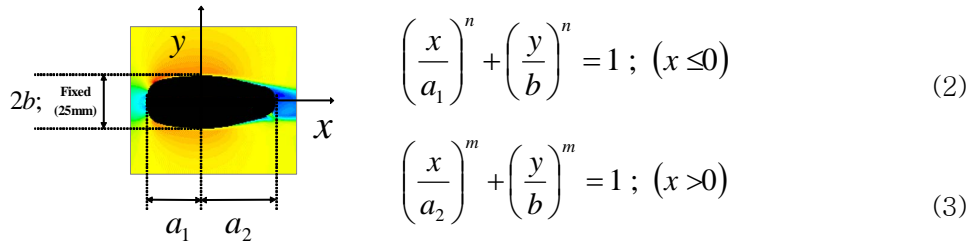


그림 8. 팬헤드 2D 형상 함수정의

Latin Hypercube 샘플링을 이용해 크리깅 모델을 구성한 후, 유전 알고리즘을 이용한 강건 최적화 과정을 수행하였다. 팬헤드의 안정성과 강건성을 위해 주행속도가 350km/h일 때 팬헤드의 $C_{l,max}$ 를 200N이하인 조건에서 C_d 와 C_l 진폭, $\frac{dC_l}{d\alpha}$ 를 최소화 하였다.

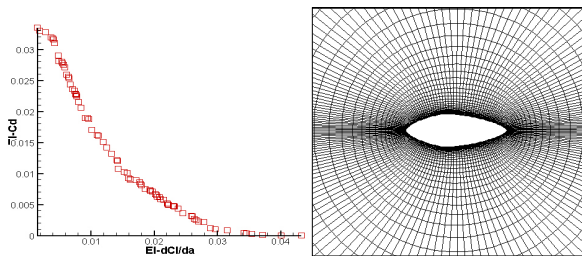


그림 9. The optimized shape and EI values

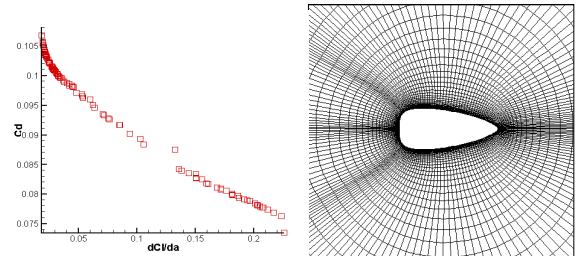


그림 10. The optimized shape and palette set

팬헤드의 강건 최적화 형상은 뿔뿔한 사각주에서 발생하는 와류 볼텍스가 억제되며 C_l 진폭, 즉 압상력 변화율이 매우 작아지는 양호한 특성을 보이며, $\frac{dC_l}{d\alpha}$ 도 작아져 외부 유동변화에 있어서도 강건한 특성을 잘 보여주고 있다.

4.2 강건 최적 설계 팬헤드 풍동실험과 스모그와이어 및 PIV 가시화 실험

강건 최적 설계된 팬헤드 형상에 대하여, 공기역학적 특성을 더욱 정확히 파악하고 측풍과 같은 외란에 대한 원천 기술을 개발하기 위하여 풍동 실험을 수행하였다. 먼저 가속되는 유동 하에서의 유동특성을 검토하기 위하여 서울대 아음속 교육용 풍동에서 기본실린더 형상을 가지고 연구하였으며, 자유류의 속도가 가속되는 유동 하에서는 박리점의 이동 및 모멘텀 공급으로 저항이 일반적인 경우보다 낮은 레이놀즈수에서는 더 작게, 높은 레이놀즈수에서는 더 크게 나타날 수 있음을 그림 11과 같이 확인할 수 있었다.[5]

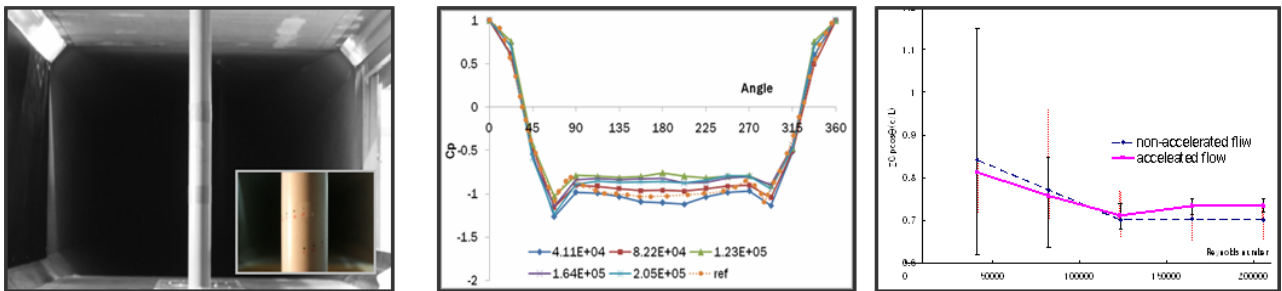


그림 11. 가속유동 상태에서의 공기역학 특성검토 풍동실험

또한 강건 최적 설계된 팬헤드 기본 형상에 대하여 공군사관학교 교육용 풍동에서 각 형상에 대한 실제 크기(두께 25mm, 길이 35mm~150mm)의 풍동실험 모델을 설치하여 공력특성 실험과 스모그 와이어 및 PIV 가시화 실험을 수행하였다. 그 결과를 보면 현재 운용중인 팬헤드 기본 형상인 사각주 형상

(그림 12,15)과 원형 실린더 형상(그림 13,16)에서는 물체의 후류에서 주기적인 볼텍스가 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 진동을 발생시켜 구조물의 진동수와 간섭을 일으킬 수도 있다. 본 연구에서 강건 최적 설계된 형상(그림 14,17)의 실험결과를 보면 사각 실린더와 같은 일반적인 형상에서 나타나는 주기적인 볼텍스는 급격히 감소하며, 월등한 항력감소와 팬헤드의 주요 소음인 강한 다이폴 소음원을 감소시켜 전체 소음 음압레벨을 감소시킬 수 있음을 보여준다.

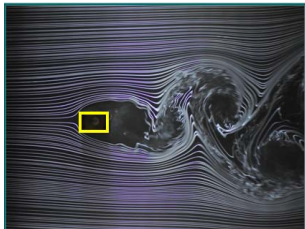


그림 12. 사각주형상 연기가시화

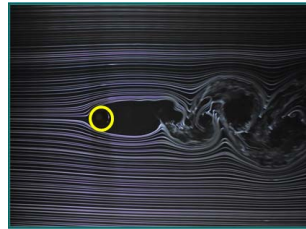


그림 13. 원형 실린더 연기가시화

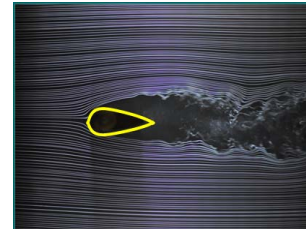


그림 14. 최적형상 연기가시화

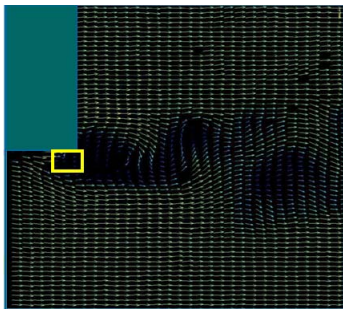


그림 15. 사각주형상 주변의 PIV 유속분포

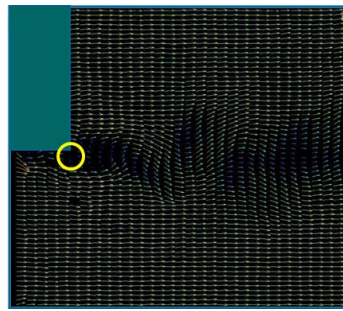


그림 16. 원형 실린더 주변의 PIV 유속분포

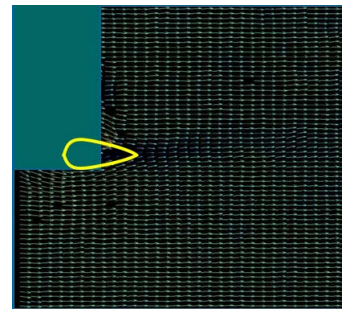


그림 17. 최적형상 주변의 PIV 유속분포

후 기

본 연구는 서울대학교 “차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단” 및 국토해양부 “미래철도기술개발사업”의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

1. 참고문헌

1. M. IIDA, T. MATSUMURA, K. NAKATANI, T. FUKUDA, T. MAEDA (1997), “Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom”, QR of RTRI, Vol. 38, No. 4, pp. 206-211
2. H.B. Kwon, K.H. Jang, Y.S. Kim, K.J. Lee and D.H. Lee (2001), “Nose Shape Optimization of High-Speed Train for Minimization of Tunnel Sonic Boom”, JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 3, pp. 890-899
3. 구요천, 노주현, 윤수환, 곽민호, 이동호 (2008), “형상함수를 이용한 열차 전두부 설계기법 연구”, 한국철도학회 춘계학술발표회
4. 노주현, 곽민호, 강형민, 정지훈, 정신규, 이동호 (2007). “고속열차 팬터그래프 팬헤드 형상의 강건 최적설계”, 대한기계학회 추계학술대회
5. 노주현, 이영빈, 김규홍, 이동호, 조환기 (2008), “비정상 가속유동의 공기역학적 특성 파악을 위한 실험적 연구”, 한국항공우주 학술대회 논문집