

터널 주행속도 향상을 위한 고속열차 전두부 형상 최적화

Nose Shape Optimization of the High-Speed Train for the Speed-up in Tunnel

구요천* 윤수환* 노주현* 김규홍** 이동호** 권혁빈***
Ku, Yo-Cheon Yun, Su-Hwan Rho, Joo-Hyun Kim, Kyu-Hong Lee, Dong-Ho Kwon, Hyeok-Bin

ABSTRACT

The next generation of Korean high-speed train under development will be designed for the maximum operating speed of 350km/h and maximum speed of 400km/h. This high-speed operation may cause the noise and vibration problems around tunnel exit due to the higher micro-pressure wave than present level. In this study, the nose shape optimization was conducted for the countermeasure against these problems. Axi-symmetric solver was used for numerical simulation, and response surface was used for efficiency of optimization process. Also the multi-step optimization was conducted to find out more accurate optimal shape. Through these analysis and optimization, it was found out that the optimal nose shapes for minimization of micro-pressure wave are definitely different along the nose length variation. And the mechanism of micro-pressure wave reduction was closely investigated by the analysis of generation process of compression wave in tunnel. The results are expected to be used as design guideline for performance improvement of the next generation of Korean high-speed train.

1. 서론

최근 수십 년간 고속열차의 주행속도는 크게 향상되었다. 일본의 신칸센은 1964년 200km/h를 돌파했고, 1989년에는 프랑스의 TGV가 300km/h 시대를 열었다. 최근에는 300km/h 이상의 고속열차가 세계 각국에서 꾸준히 개발되고 있다. 현재 개발 중인 차세대 한국형 고속열차도 운행속도 350km/h, 최고 속도 400km/h를 목표로 하고 있다. 고속열차의 속도 향상은 여러 가지 공기역학적 문제들과 밀접한 연관을 갖는다. 우선 속도 향상으로 인해 전두부 및 후미부 등의 압력저항과 표면 마찰저항이 크게 증가한다. 열차 속도가 250~300km/h인 경우 열차의 전체 저항 가운데 공기저항이 약 75%~80%를 차지한다고 알려져 있다.[1] 또한 두 열차가 교행할 때의 측력이 증가하고 측풍에 대한 안정성도 크게 저하되며, 팬터 그래프의 공기저항 및 소음 또한 증가하게 된다.

더불어 속도의 증가는 고속열차가 터널을 통과할 때 발생하는 터널 내부 압축파 및 터널 출구 미기압파를 속도의 제곱에 비례하여 증가시키며, 이는 객실 내 승객의 이명감 및 터널 주변의 소음/진동 문제를 발생시키는 원인이 된다.[2] 이러한 터널 압축파 및 미기압파를 저감하기 위한 대책으로는 터널 단면적 증가, 터널 입구 후드 설치, 흡음재 사용, 열차 단면적 축소, 열차 전두부 형상 설계 등이 있다. 2004년 개통된 경부고속철도의 경우 고속 운영을 위한 선로의 직선화로 인해, 터널 구간의 비중이 46%로 크게 증가함으로써 우리나라에서도 터널에서 발생하는 공기역학적 문제의 비중이 그만큼 커졌다고 할 수 있겠다.

* 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원

E-mail : yogoe9@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7399 FAX : (02)882-7927

** 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원

*** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원

본 연구에서 다루고자 하는 열차 전두부 형상의 공기역학적 최적설계와 관련해서는 1990년대부터 본격적인 수치적, 실험적 연구들이 진행되어 왔다. Maeda[3] 등은 1993년에 실험적 방법을 통해 앞 끝이 뾰족하고, 이후 완만한 단면적 분포를 갖는 전두부 형상이 미기압과 저감에 효과적이라는 사실을 발표했다. Ogawa와 Fujii[4,5,6]는 1995년, 수치적 방법을 통해 열차의 터널 주행을 분석하였으며, 1996~1997년에는 미기압과 저감에 효과적인 전두부 형상 설계 결과를 발표하였다. IIDA[7] 등은 2개의 설계변수를 이용한 전두부 형상 최적화를 수행하였으며, 권혁빈[8,9,10] 등은 미기압과와 공기저항을 동시에 저감할 수 있는 전두부 최적설계를 수행하였다. 하지만 기존의 최적형상들은 설계변수의 수가 작아 설계범위가 매우 제한적이었으며 열차 전두부 길이에 따른 최적형상의 변화 또한 고려하지 않았다.

본 연구에서는 축대칭 가정을 바탕으로 열차 전두부 단면적 분포에 대한 최적화를 수행하였다. 가능한 넓은 설계범위를 살펴보기 위해 6개의 설계변수를 사용하였으며, 전두부 길이에 따른 최적형상의 변화를 살펴보기 위해 5m~15m 범위의 전두부 길이에 대해 각각 최적화를 수행하였다. 최적화 과정의 효율성 향상을 위해 반응면을 사용하였고, 보다 정확한 최적형상 도출을 위해 여러 단계에 걸친 최적화 과정을 수행하였다. 이를 통해 각 전두부 길이에 따른 단면적의 최적분포를 도출하고 각 형상의 미기압과 저감원리를 분석하였다.

2. 수치기법

본 연구에서는 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 터널 내부 압축과 및 터널 출구 미기압과를 예측하기 위해 축대칭 해석을 수행하였다. 즉, 열차와 터널의 각 단면을 동일한 면적의 원형 단면으로 가정하였다. 그림 1은 축대칭 해석을 위해 구성한 열차와 터널의 각 zone 및 열차 주변 격자의 확대그림이다. zone 1은 열차 주변의 격자로서 터널 구역인 zone 2를 통과하여 움직이게 되며, zone 3과 4는 터널의 입구 및 출구 구역이다.

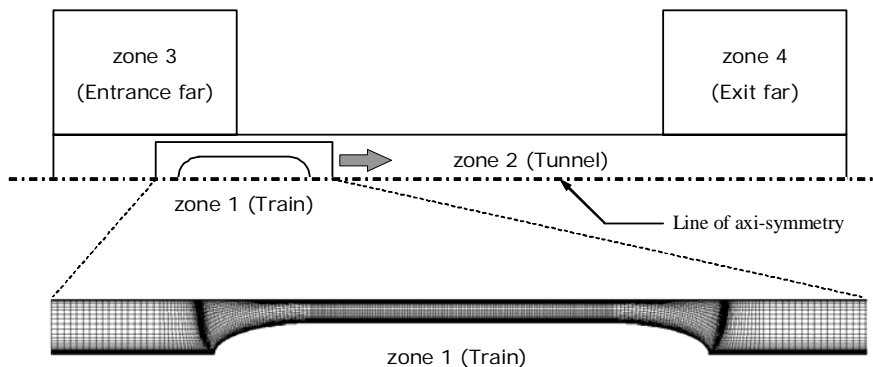


그림 1. 열차와 터널의 zone 및 격자 구성도

열차는 터널 진입 전의 정지 상태에서부터 서서히 가속해주기 위해 다음의 식 (1)과 같은 속도 분포를 사용하였다.

$$V(t) = \frac{a}{20}t^5 - \frac{at_1}{8}t^4 + \frac{at_1^2}{12}t^3 \quad (1)$$

여기서 a 는 $a = 120 V_t/t_1^5$ 으로 정의되며, t_1 는 가속시간을 의미한다. 식(1)을 사용함으로써 가속구간의 시작과 끝 지점에서의 열차 가속도를 0으로 유지할 수 있다.

지배방정식은 아래의 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 여기서 \tilde{Q} 는 $\tilde{Q} = J^{-1} \times [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T$ 으로 정의될 수 있으며, \tilde{F} 와 \tilde{G} 는 flux vector를, \tilde{H} 는 axi-symmetric source term을 의미한다. 보다 자세한 수치기

법은 참고문헌 [8,10]에 상세히 설명되어 있다.

$$\partial_i \tilde{Q} + \partial_\zeta \tilde{F} + \partial_\eta \tilde{G} + \tilde{H} = 0 \quad (2)$$

3. 반응면 기법 및 최적설계기법

본 연구에서 수행한 최적화 과정은 그림 2와 같다. 초기 형상으로부터 출발하여 실험계획법을 이용한 수치해석을 하고, 이를 기반으로 반응면[11]을 구성하여 주어진 설계영역 내에서의 최적형상을 찾는다. 이때, 최적점이 설계범위의 경계면 상에 있으면 현 단계에서의 최적형상으로부터 다시 출발하여 최적화 과정을 반복하는 multi-step optimization을 수행하였다.

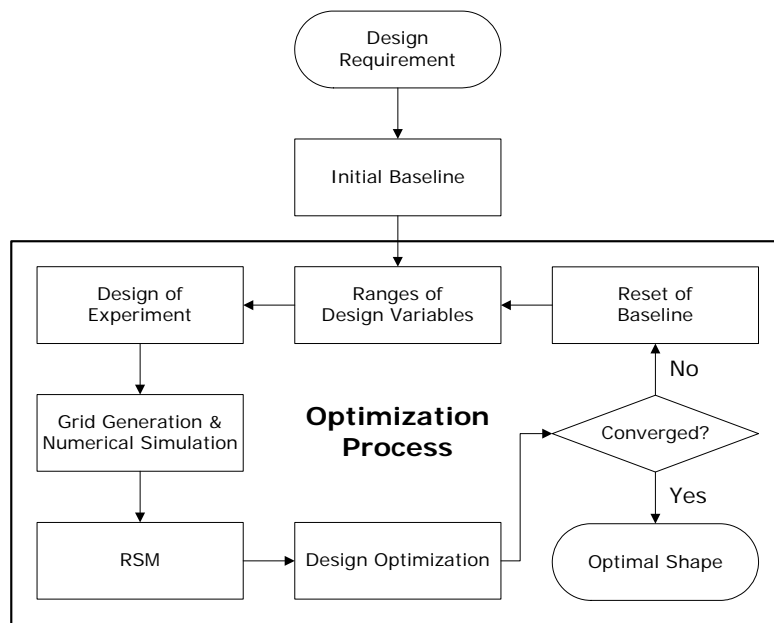


그림 2. 미기압파 저감을 위한 전두부 형상의 최적화 과정

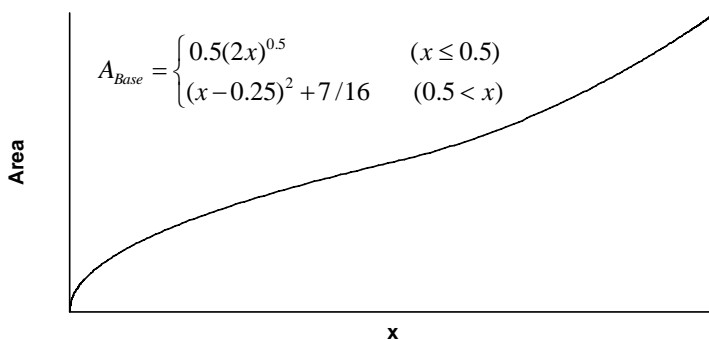


그림 3. 전두부 단면적 최적설계를 위한 초기 형상

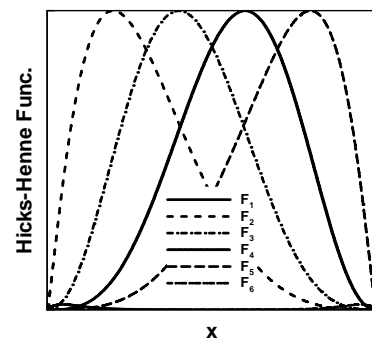


그림 4. Hicks-Henne Function

최적화 단계 이전에 수행한 parametric study를 통해 초기 형상을 그림 3과 같이 결정하였다. 그림 3의 형상은 전두부 앞 끝이 뾰족한 형상을 가지며, 이는 Maeda 등의 실험결과와 같은 경향을 보인다. 단면적 분포는 식 (3)과 같이 정의하였으며, 여기서 F_i 는 그림 4에 표시된 6개의 Hicks-Henne 함수를 의미하고, w_i 는 각 함수의 가중치이자 설계변수이다. 최적화는 구배법의 일종인 BFGS 방법을 이용하여 수

행하였다.[12, 13]

$$A(x) = A_{base} + \sum_{i=1}^6 w_i F_i \quad (3)$$

4. 최적화 결과 및 토의

5가지 전두부 길이(5m, 7m, 10, 12m, 15m)에 대해 미기압파 저감을 위한 전두부 단면적 분포 최적화를 수행한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 x축은 무차원화된 전두부 길이를 의미한다. 전두부 길이가 짧은 경우에는 앞끝이 매우 뾰족하고 이후 단면적이 일정 구간에서 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였으며, 전두부 길이가 길어질수록 단면적이 감소하는 구간이 사라짐을 볼 수 있다.

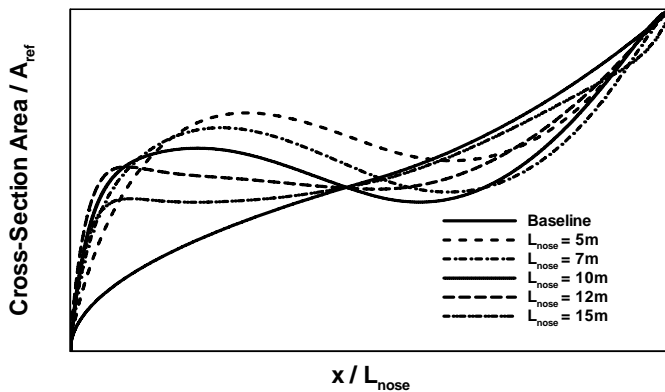


그림 5. 미기압파 저감을 위한 전두부 길이별 최적 단면적 분포

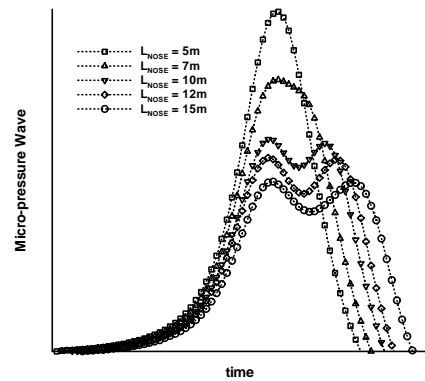


그림 6 전두부 길이별 최적형상의 미기압파 형태

이러한 단면적 분포는 그림 6과 같이 하나의 미기압파를 크기가 작은 두 개의 미기압파로 나누어줌으로써 최대 미기압파 크기를 감소시키게 되며, 이는 일본에서 주로 사용하고 있는 터널 입구 후드와 같은 원리이다. 다만 전두부 길이가 5m, 7m 인 경우에는 길이가 비교적 짧아 미기압파가 두 개의 파로 나뉘는 현상을 확인할 수 없다.

그림 7은 Paraboloid 형상의 전두부와 최적형상의 전두부에 대해 터널 진입 직후 전두부 주위의 압력 분포를 비교한 그림이며 전두부 길이는 두 경우 모두 10m이다.

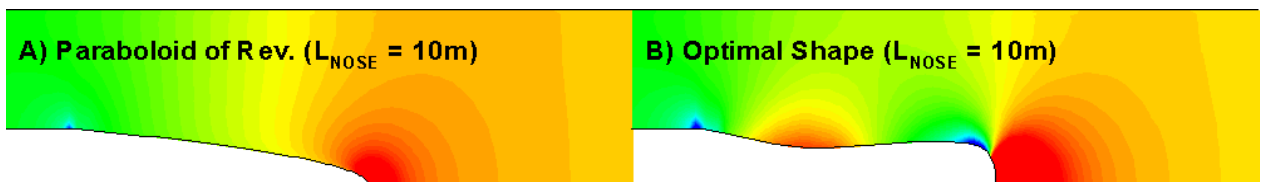


그림 7. 터널 진입 직후의 전두부 주위 압력분포 비교 (Paraboloid of Rev. vs. Optimal Shape, 전두부 길이 10m)

Paraboloid 형상의 경우에는 전두부 앞 끝에서 강한 압축파가 한 번 발생하는 반면에 최적화된 형상은 두 번에 걸쳐 압축파가 발생함을 확인할 수 있으며, 이로 인해 그림 6과 같은 파형이 발생됨을 짐작할 수 있다.

표 1은 전두부 단면적이 일정하게 증가하는 형상인 Paraboloid 형상과 비교하여 미기압과 감소율을 전두부 길이 및 속도별로 나타낸 표이다. 표에서 볼 수 있듯이 전두부 길이가 짧은 경우에는 미기압과 감소를 기대하기 힘들지만, 전두부 길이가 7m 이상으로 길어지게 되면 전두부 형상 최적화를 통해 최소 16%에서 최대 27%까지 미기압과를 감소시킬 수 있다.

표 1. 전두부 길이 및 열차 속도에 따른 미기압과 감소율(Paraboloid 형상과의 비교)

	5m	7m	10m	12m	15m
300km/h	5.16%	18.51%	25.50%	24.48%	23.31%
350km/h	4.47%	17.77%	27.05%	27.13%	26.22%
400km/h	3.79%	16.40%	27.31%	26.47%	24.62%

5. 결론

본 연구에서는 열차의 전두부 길이에 따라 미기압과를 최소화 할 수 있는 단면적 분포가 어떻게 달라지는지를 축대칭 수치해석을 바탕으로 살펴보았다. 그 결과 전두부 길이가 짧은 경우에는 앞 끝이 매우 뾰족하고 이후 단면적이 감소했다가 다시 증가하는 형상이 유리하며, 전두부 길이가 긴 경우에는 앞 끝은 매우 뾰족하나 이후 완만하게 기울기가 증가하는 형상이 유리함을 알 수 있었다. 최적 전두부 형상들은 미기압과를 두 개로 나누어 줌으로써 최대 미기압과 크기를 감소시키게 되며, 이를 미기압과 형태 및 전두부 주위 압력분포를 살펴봄으로써 확인하였다. 이러한 전두부 형상의 최적화 결과는 향후 개발될 고속열차의 속도 향상에서 반드시 고려해야 하는 터널 미기압과 문제의 한 해결책이 될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 ‘차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단’ 및 건설교통부 ‘미래철도 기술개발사업’의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J.L. Peters(1982), Optimising Aerodynamics to Raise IC Performance, Railway Gazette International, pp. 817-819
2. S. Ozawa and T. Maeda(1988), Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit, JSME International Symposium on Scale Modeling
3. Tatsuo Maeda, Tsuyoshi Matsumura, Masanobu Iida, Koji Nakatani, and Kazuo Uchida(1993), Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel, The international Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles
4. Kozo Fujii(1995), Unified Zonal Method Based on the Fortified Solution Algorithm, Journal of Computational Physics, Vol. 118, No., pp 92-108

5. Takanobu Ogawa, Kozo Fujii(1995), Effect of Train Shape on a Compression Wave Generated by a Train Moving into a Tunnel, Proceedings of Korean Society of Computational Fluids Engineering
6. Takanobu Ogawa, Kozo Fujii(1996-7), Theoretical Algorithm to Design a Train Shape for Alleviating the Booming Noise at a Tunnel Exit, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 62, No. 599, pp. 2679-2686
7. M. IIDA, T. MATSUMURA, K. NAKATANI, T. FUKUDA, T. MAEDA(1997), QR of RTRI, Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom, Vol. 38, No. 4, pp. 206-211
8. 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
9. H.B. Kwon, Y.S. Kim, D.H. Lee and M.S. Kim(2001), Nose Shape Optimization of the High-speed Train to Reduce the Aerodynamic Drag and Micro-pressure Wave, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp 373-379
10. H.B. Kwon, T.Y. Kim, D.H. Lee and M.S. Kim(2003), Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-Speed Train Passing through a Tunnel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 217, No. 2, pp. 111-124
11. R. H. Meyers, D. C. Montgomery(1995), Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons
12. J. S. Arora(1989), Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill
13. G. N. Vandreplaats(1999), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design 3rd edition, Vanderplaats Research & Development Inc.