

# 형상함수를 이용한 열차 전두부 설계기법 연구

## Study on the Design Method for the Train Nose Shape Using the Configuration Function

구요천\*, 노주현\*, 윤수환\*, 광민호\*, 이동호\*\*  
Ku, Yo-Cheon Rho, Joo-Hyun Yun, Su-Hwan Kwak, Min-Ho Lee, Dong-Ho

### ABSTRACT

A nose shape is strongly related with the aerodynamic performances of train. Therefore shape definition and aerodynamic performance analysis are important for train nose shape design. In this study, a new design method was suggested for train nose shape design by configuration function. To this end, the nose shape was classified by box type and each box shape is defined. After that the 3-D shape of train was defined as several mathematical functions by combination of each box shape. Also it was shown that the wind shield of driver's seat and complex curves of surface can be expressed using superposition of functions. This methodology can be used for grid generation of numerical analysis, and applied to aerodynamic optimization design of nose shape.

### 1. 서 론

열차의 속도 향상을 위한 주요 조건 가운데 하나가 빠른 주행으로 인해 발생하는 공기역학적 문제들에 대한 해결책이다. 공기역학적 문제들은 열차의 외부 형상에 의해 결정되며, 이 가운데 특히 전두부 형상은 대부분의 공기역학적 특성과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 전두부 설계단계에서부터 미학적 디자인과 공학적 디자인이 동시에 고려되어야 한다. 이러한 동시 설계를 위해서는 디자인 팀과 공기역학 팀의 정보 및 의견교환이 필수적이다. 즉, 공기역학적인 관점에서의 설계 가이드라인을 바탕으로 디자인이 이루어지고, 다시 이에 대한 성능평가 및 개선안을 제시하는 반복과정이 필요하다. 이를 위해서는 열차의 형상을 공학적으로 정의할 수 있어야 하고, 이에 대한 성능평가가 용이해야 하며, 체계적인 해석 및 최적화를 통해 디자인 가이드라인을 제시할 수 있어야 한다.

공학적 디자인 방법은 특히 항공 분야에서 다양하게 개발되어왔다. 대표적인 방법 가운데 하나는 1978년 R. M. Hicks와 P. Henne[1]의 디자인 방법으로써, 수학적으로 간단하게 정의된 몇 개의 함수를 이용하여 항공기 익형을 설계하는 방법이다. 최근에는 B. M. Kulfan[2,3] 등이 Bernstein 다항식을 이용해 익형을 설계하는 방법을 발표하였다. 하지만 열차 전두부에 대한 공학적 디자인은 그 중요성에 비해 아직 미흡한 단계이다.

본 연구에서는 Bernstein 다항식을 변형한 열차 전두부 설계기법을 제안하였다. 이를 위해 열차 전두부를 측면형상 기준으로 1-box model과 2-box model로 분류하였으며, 열차의 각 세부 형상을 하나의 함수 형태로 표현하였다. 이를 조합하여 전두부의 2차원 삼면도를 생성하고 단면형상을 전두부 길이에

\* 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원  
E-mail : yogoe9@snu.ac.kr  
TEL : (02)880-7399 FAX : (02)882-7927  
\*\* 서울대학교, 기계항공공학부, 정회원

대해 정의함으로써 최종적으로 전두부의 3차원 형상을 하나의 형상함수로 표현하였다. 또한 이를 응용하여 보다 복잡한 형상의 전두부 구현, 운전석의 wind shield 형상 구현 및 수치해석을 통한 성능평가 및 형상최적화가 가능함을 확인하였다.

## 2. 형상함수

열차 전두부 형상 구현을 위한 형상함수는 Bernstein 다항식을 응용한 식 (1)과 같은 기본 식에서부터 출발한다.

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

식 (1)은 그림 1과 같이 시작점( $x_p, z_p$ )과 폭( $L$ ), 높이( $H$ )가 결정되었을 때, 계수  $A_1, A_2$ 에 의해 그 형상이 결정되는 곡선을 나타낸다.

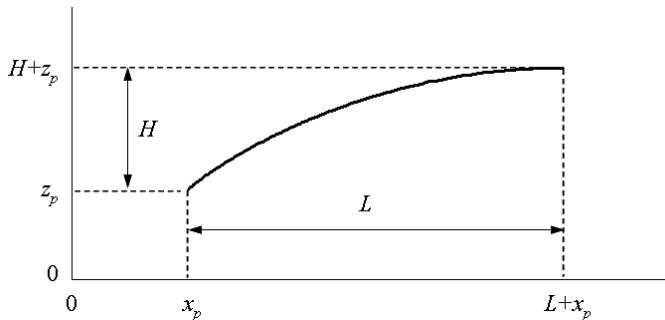


그림 1.  $z(x) = \frac{H}{L^{A_1+A_2}}(x-x_p)^{A_1}[2L-(x-x_p)]^{A_2} + z_p$ 의 그래프

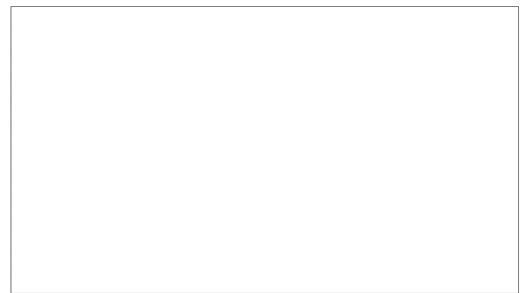


그림 2.  $A_1, A_2$ 에 따른 곡선의 변화

$A_1, A_2$ 가 같다고 가정했을 경우 계수에 따른 곡선의 변화는 그림 2와 같다. 계수 값이 0에 가까울 경우 뾰족한 모서리 형태를 표현할 수 있고 계수가 0.5인 경우에는 원 또는 타원형상이 되며, 1보다 큰 경우에는 변곡점을 갖는 곡선이 된다.

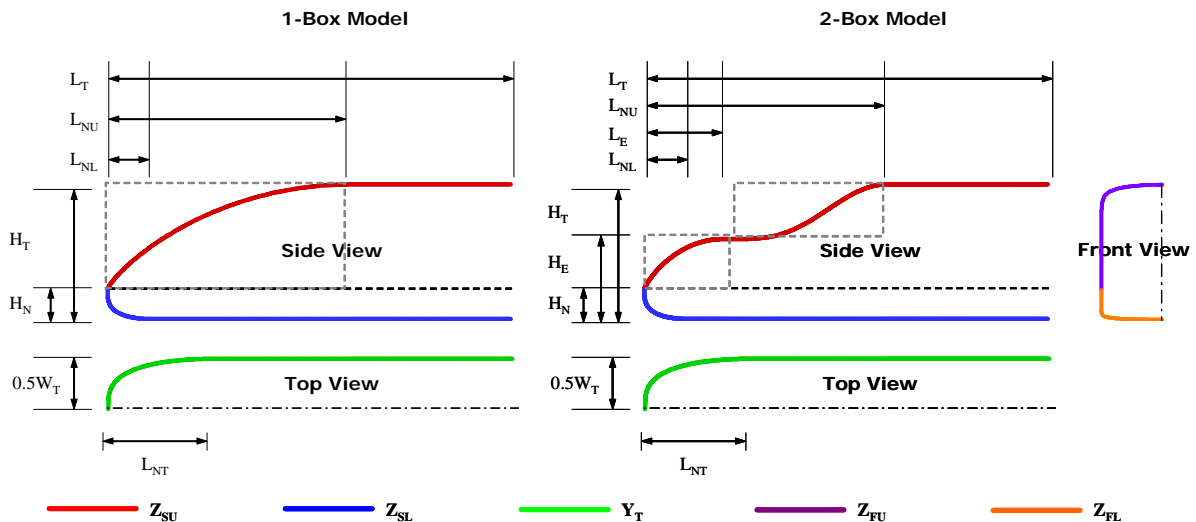


그림 3. 전두부 형상 파라미터 및 3면도 구성을 위한 2차원 형상함수

### 3. 2차원 형상 정의

형상함수를 이용하여 고속열차 전두부를 모델링하기 위해 우선 열차 전두부 정의에 필요한 형상 파라미터들을 그림 3과 같이 정의하였다. 주요 파라미터는 열차 전두부의 3면도를 기준으로 열차 높이, 폭, 길이 및 전두부 앞 끝의 높이, 측면도에서의 형상변화길이, 평면도에서의 형상변화길이 등이다. 열차 전두부가 2-box 형상인 경우에는 변곡점의 위치( $L_E, H_E$ )를 새로운 파라미터로 추가했다.

측면도를 구성하는 2차원 형상함수는 전두부 앞 끝을 기준으로 윗부분이  $Z_{SU}(x)$ , 아랫부분이  $Z_{SL}(x)$ 이며, 평면도를 구성하는 2차원 형상함수는  $Y_T(x)$ 이다. 정면도는 측면도와 마찬가지로 전두부 앞 끝의 높이를 기준으로  $Z_{FU}(x)$ 와  $Z_{FL}(x)$ 로 나뉜다. 즉, 총 5개의 2차원 형상함수를 이용해서 열차 전두부의 삼면도를 구성하게 된다. 2차원 형상함수는 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 전두부 형상 구현을 위한 2차원 형상함수와 적용 범위

		CONFIGURATION FUNCTION	RANGE	SHAPE
SIDE	$Z_{SU}(x)$ (1-Box)	$\frac{H_T - H_N}{L_{NU}^{A_1 + A_2}} x^{A_1} (2L_{NU} - x)^{A_2} + H_N$	$0 \leq x \leq L_{NU}$	
		$H_T$	$L_{NU} \leq x \leq L_T$	
	$Z_{SU}(x)$ (2-Box)	$\frac{H_E - H_N}{L_E^{A_1 + A_2}} x^{A_1} (2L_E - x)^{A_2} + H_N$	$0 \leq x \leq L_E$	
		$\frac{H_T - H_E}{(L_{NU} - L_E)^{A_1 + A_2}} (x - L_E)^{A_1} (2L_{NU} - L_E - x)^{A_2} + H_E$	$L_E \leq x \leq L_{NU}$	
	$Z_{SL}(x)$	$H_T$	$L_{NU} \leq x \leq L_T$	
		$Z_{SL}(x)$	$\frac{-H_N}{L_{NL}^{A_1 + A_2}} x^{A_1} (2L_{NL} - x)^{A_2} + H_N$	$0 \leq x \leq L_{NL}$
TOP	$Y_T(x)$	$0$	$L_{NL} \leq x \leq L_T$	
		$\frac{0.5 W_T}{L_{NT}^{A_1 + A_2}} x^{A_1} (2L_{NT} - x)^{A_2}$	$0 \leq x \leq L_{NT}$	
FRONT	$Z_{FU}(y)$	$\frac{Z_{SU}(x') - H_N}{Y_T(x')^{A_1 + A_2}} [Y_T(x') + y]^{A_1} [Y_T(x') - y]^{A_2} + H_N$	$0 \leq y \leq Y_T(x')$	
	$Z_{FL}(y)$	$\frac{Z_{SL}(x') - H_N}{Y_T(x')^{A_1 + A_2}} [Y_T(x') + y]^{A_1} [Y_T(x') - y]^{A_2} + H_N$	$0 \leq y \leq Y_T(x')$	

### 4. 3차원 형상 정의

3장에서 정의한 2차원 함수  $Z_S(x)$ 와  $Y_T(x)$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 3차원 전체 형상을 정의할 수 있다. 식 (2)에서  $z \geq H_N$ 인 경우에는  $Z_S(x) = Z_{SU}(x)$ 이고,  $z \leq H_N$ 인 경우에는  $Z_S(x) = Z_{SL}(x)$ 이다.

$$Z(x,y) = \frac{Z_S(x) - H_N}{Y_T(x)^{A_1+A_2}} [Y_T(x) + y]^{A_1} [Y_T(x) - y]^{A_2} + H_N \quad \begin{matrix} (0 \leq x \leq L_T) \\ (-0.5W_T \leq y \leq 0.5W_T) \end{matrix} \quad (2)$$

형상함수를 이용한 열차 전두부의 3차원 형상 구현과정은 그림 4와 같이 요약하여 표현할 수 있다. 먼저 2차원 함수인  $Z_S(x)$ 와  $Y_T(x)$ 를 이용하여 측면 및 평면 형상을 완성하고, 이를 바탕으로 전두부 길이방향에 따른 각 단면의 형상을  $Z_{FU}(y)$ 와  $Z_{FL}(y)$ 으로 정의해주면 최종 3차원 형상이 완성된다.

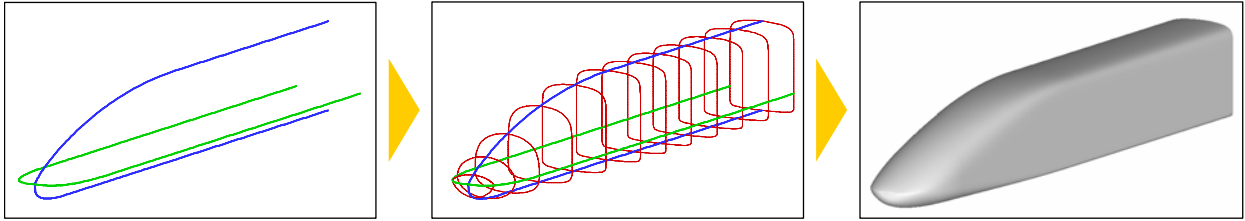


그림 4. 형상함수를 이용한 열차 전두부 형상 구현과정

## 5. 형상함수의 응용

### 5. 1 전두부 중첩 및 wind shield 를 고려한 복잡한 형상의 전두부 구현

앞서 정의한 형상함수를 응용하여 보다 복잡한 형상의 구현도 가능하다. 전두부의 길이방향으로 각 단면 형상이 복잡한 경우 몇 개의 형상함수를 중첩하여 표현이 가능하다. 전두부의 각 특징을 반영할 수 있는 두 형상을 구현하여 이를 각각  $Z_1(x,y)$ ,  $Z_2(x,y)$ 라고 한다면 다음과 같이 두 전두부 형상을 중첩함으로써 최종 형상을 구현할 수 있다.

$$Z(x,y) = \text{Max}\{Z_1(x,y), Z_2(x,y)\} \quad (3)$$

전두부의 wind shield 또한 형상함수를 이용하여 표현할 수 있다. 우선 wind shield의 최고 높이( $H_{WS}$ ), 최대 폭( $W_{WS}$ ) 및 길이( $L_{WS}$ )를 설정한 후, 경계선을 식(4,5)와 같이 정의한다.

$$Y_B(x) = \frac{0.5W_{WS}}{(0.5L_{WS})^{A_1+A_2}} (x - x_{WS})^{A_1} [2L_{WS} - (x - x_{WS})]^{A_2} \quad (4)$$


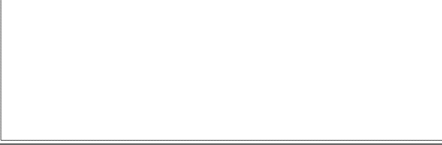

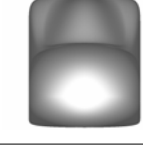
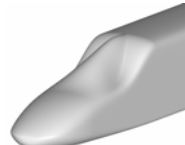



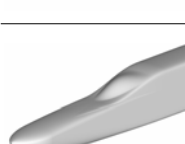


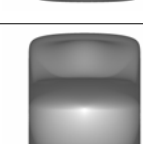
$$Z_B(x) = \frac{0.5H_{WS}}{(0.5L_{WS})^{A_1+A_2}} (x - x_{WS})^{A_1} [2L_{WS} - (x - x_{WS})]^{A_2} \quad (5)$$

최종적으로 식(4,5)를 이용하여 전두부 wind shield의 3차원 형상을 식(6)과 같이 정의할 수 있으며 이 형상을  $Z(x,y)$ 에 더해줌으로써 wind shield가 돌출된 전두부 형상을 간단히 구현할 수 있다.

$$Z_{WS}(x,y) = \frac{Z_B(x)}{Y_B(x)^{A_1+A_2}} y^{A_1} [2Y_B(x) - y]^{A_2} \quad (6)$$

표 2 는 전두부 형상을 중첩하고 운전석의 wind shield 형상을 추가함으로써 복잡한 전두부 형상을 구현한 예이다.

표 2. 전두부 중첩 및 wind shield를 고려하여 구현한 복잡한 형상의 전두부 예

3-D SHAPE	SIDE	TOP	FRONT
			
			
			

## 5. 2 수치해석 및 최적화에의 응용

형상함수를 이용하여 구현한 전두부 형상의 경우, 모든 표면이 함수의 형태로 정의되어 있으므로 전두부의 단면적 분포를 간단하게 구해낼 수 있다. 식 (1)에서  $x_p = z_p = 0$ 으로 가정하면, 곡선  $z(x)$  아래 부분의 면적은 적분을 통해 식 (7)로부터 구해낼 수 있다. 이러한 단면적 분포는 열차의 터널 주행 시 발생하는 터널 내부 압축파 및 미기압파 예측을 위한 데이터로 사용될 수 있다.

$$Area = \frac{H}{L^{A_1+A_2}} \left[ \frac{(2L)^{A_2}}{A_1+1} \cdot \frac{L^{A_1+1}}{0!} - \frac{A_2(2L)^{A_2-1}}{A_1+2} \cdot \frac{L^{A_1+2}}{1!} + \frac{A_2(A_2-1)(2L)^{A_2-2}}{A_1+3} \cdot \frac{L^{A_1+3}}{2!} - \dots \right] \quad (7)$$

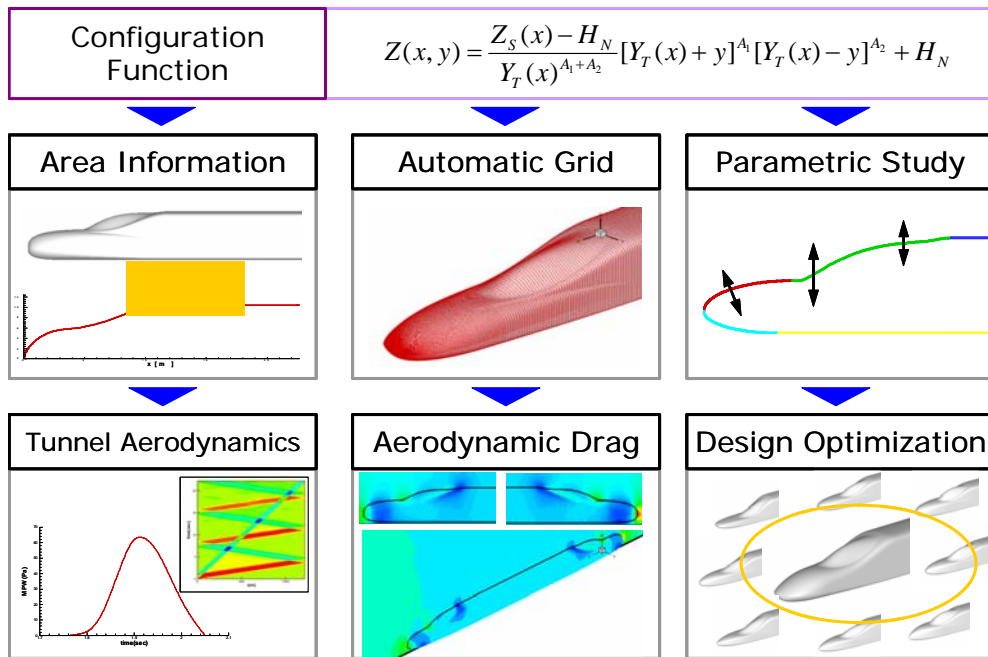


그림 5. 형상함수를 이용해 구현한 열차 전두부 형상의 응용 예

또한 표면 형상 데이터로부터 수치해석을 위한 격자 시스템을 효율적으로 생성할 수 있으며, 형상함수의 설계변수를 조절함으로써 체계적인 수치해석이 가능하다. 이러한 체계적인 수치해석 과정은 향후 전두부 공력성능 향상을 위한 형상 최적설계를 위해 반드시 요구되는 조건이다. 그림 5는 앞서 설명한 내용을 바탕으로 형상함수를 이용한 설계 방법이 터널 미기압과, 3차원 형상의 공기저항 해석 및 형상 최적화에 응용될 수 있음을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 열차 전두부의 공학적 성능을 고려한 설계를 위해 형상함수를 이용한 열차 전두부 설계기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 열차 전두부 형상을 2가지 타입으로 분류하였으며, 주요 형상 파라미터들을 정의하였다. 간단한 수학적 함수를 이용해 전두부의 2차원 측면 및 평면 형상을 구현하고 이를 바탕으로 각 단면 형상을 정의함으로써 운전석 wind shield를 포함한 전두부 3차원 형상을 함수 형태로 표현할 수 있음을 확인하였다. 이러한 설계기법은 형상이 함수로 정의되어 있으므로 터널 미기압과 해석을 위한 단면적 분포 도출이 용이하고 3차원 격자 생성과정도 자동화할 수 있으며, 향후 형상 최적화에도 응용될 수 있음을 간단한 예제들을 통해 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. R. M. Hicks and P. A. Henne(1978), Wing Design by Numerical Optimization, Journal of Aircraft, Vol. 15, No. 7, pp. 407-412
2. B. M. Kulfan and J. E. Bussolletti(2006), Fundamental Parametric Geometry Representations for Aircraft Component Shapes, 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, Virginia
3. B. M. Kulfan(2007), A Universal Parametric Geometry Representation Method - CST, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada