

# 공기저항과 미기압과 저감을 위한 고속전철 전두부형상의 최적화설계

권혁빈\* · 김유신\*\* · 이동호\*\*\* · 김문상\*\*\*\*

## Nose Shape Optimization of the High-speed Train to Reduce the Aerodynamic drag and Micro-pressure Wave

Hyeok-bin Kwon, Yu Shin Kim, Dong-ho Lee, Moon sang Kim

**Key Words:** High-speed trains(고속전철), Aerodynamic drag(공기저항), Micro-pressure wave(미기압파), Sonic boom(충격성 소음), Nose shape optimization(전두부형상 최적화), Response Surface Methodology(반응면기법).

### Abstract

When a train runs into a tunnel at high-speed, aerodynamic drag suddenly increases and the booming noise is generated at the exit of tunnel. The noise shape is very important to reduce the aerodynamic drag in tunnel as well as on open ground, and the micro-pressure wave that is a source of booming noise is dependent on nose shape, especially on area distribution. In this study, the nose shape has been optimized employing the response surface methodology and the axi-symmetric compressible Navier-Stokes equations. The optimal designs have been executed imposing various conditions of the aerodynamic drag and the micro-pressure wave on object functions. The results show that the multi-objective design was successful to decrease micro-pressure wave and aerodynamic drag of trains.

### 1. 서 론

고속전철은 현재 유럽과 일본에서 운행 중이며 한국을 비롯한 몇몇 나라에서는 미래의 교통수단으로 건설되고 있다. 현재 국책과제로 개발중인 차세대 한국형 고속전철은 정상 주행속도가 350 km/h 이며 최대 속도는 380 km/h 로 이는 음속의 약 30%에 달한다. 이와 같이 열차가 고속으로 달릴 경우 기계적 마찰저항 등을 포함한 총 주행저항의 80 % 이상이 공기저항임은 잘 알려진 사실

이다<sup>(1)</sup>. 특히, 열차가 터널을 주행할 경우, 공기저항은 전체 에너지 소비의 90%를 차지할 정도로 거저므로, 터널주행을 고려한 고속전철의 저저항 설계는 매우 중요하다.

열차의 공기저항을 저감하기 위해서는 기본적으로 열차의 단면적과 길이를 최소화함으로써 표면의 마찰저항을 줄이는 일이 가장 중요하지만, 이는 열차의 수송능력과 관련이 되므로 단위승객에 대한 에너지소모율의 측면에서 본다면 큰 효과를 기대하기 힘들다. 열차의 하부형상을 매끄럽게 하거나 대차에 커버를 장착함으로써 하부저항을 저감시키는 노력은 매우 큰 효과를 가져올 수 있으며, 현재 개발중인 차세대 한국형 고속전철에도 적용되고 있다. 마지막으로 차량의 전두부 형상을 전두부와 후미부에서 유동이 심한 박리가 발생하지 않도록 설계하는 함으로써 공기저항을 줄이는 방법은 매우 효율적인 성능의 향상

\* 정희원, 서울대학교 항공우주공학과 박사과정

\*\* 서울대학교 항공우주공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

\*\*\*\* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 부교수

을 가져올 수 있으므로 고속전철의 전두부 설계에서 필수적으로 고려되어야 하는 사항이다.

열차의 고속화로 인한 중요한 공기역학적 문제로는 앞서 언급한 공기저항의 증가와 함께 미기압과의 발생을 들 수 있다. 열차가 터널에 진입하게 되면 공기의 압축성 효과로 인하여 압축파가 발생하게 되며 터널 내부를 음속으로 진행하다가 터널출구에서 일부는 팽창파로 반사되며 일부는 미기압파(Micro-pressure wave)로 방사된다. 미기압파는 터널 출구 주변에서 심각한 환경소음 문제를 야기하는 충격성 소음(Booming noise)의 원인이므로 발생매커니즘과 저감책이 오래전부터 연구되었다.

일반적으로 미기압파의 크기는 압축파의 파두구배에 비례한다고 알려져 있다. 그리고, 압축파의 파두구배, 즉 최대압력변화율은 열차의 속도, 열차-터널 단면적비, 전두부의 세장비, 전두부의 단면적분포 등에 의해 결정된다. 즉, 열차의 속도가 작을수록, 열차-터널 단면적비가 클수록, 그리고 전두부의 세장비가 클수록 미기압파는 크기가 작아진다. 그러나, 열차의 속도를 낮추면 운행시간이 늘어나고, 열차-터널 단면적비의 감소를 위해 터널 단면적을 크게 하면 높은 터널건설비용이 소요된다. 따라서, 적절한 전두부 길이를 선택하여 단면적분포를 최적화시키는 것은 미기압파 저감설계에서 매우 효율적인 대안이 될 수 있다.

Maeda<sup>(1)</sup> 등은 전두부형상을 축대칭으로 모델링한 뒤, 미기압파를 최소화하는 전두부 면적분포에 대해 연구를 수행하였으며, 권혁빈<sup>(2)</sup> 등은 반응면 기법과 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 차량의 속도, 열차-터널 단면적비, 전두부 세장비 등의 다양한 파라메타에 대해 미기압파를 저감시키는 전두부형상의 최적화설계를 수행하였다.

본 연구에서는 열차의 터널진입 및 주행의 조건에서 공기저항과 미기압파를 동시에 고려한 최적화설계를 수행하였다. 해석에 사용된 지배방정식은 비정상 축대칭 Euler 방정식이며 비정상 유동장에 적합하도록 이동격자계를 도입하였고 격자간의 유동정보교환을 위해서는 Patched grid 기법이 적용되었다. 최적화 과정에서 설계점을 선택하고 목적함수와 경계조건의 수치적 모델을 구성하기 위해서 반응면기법(Response Surface Methodology)이 사용되었다.

## 2. 수치해법

### 2.1 지배방정식 및 수치해법

수치해석에 적용된 지배방정식은 아래에 나타난 일반화된 곡선 좌표계(generalized curvilinear coordinate)로 변환한 축대칭 비정상 압축성 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식이다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + H \\ & = \frac{1}{Re_c} \left[ \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v \right] \end{aligned} \quad (1)$$

위의 방정식을 차분화하여 해를 구하는 과정에서는 풍상차분법(upwind scheme)을 이용한 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하였으며, 수치해석기법으로는 Roe의 플럭스차이 분할기법(FDS; Flux Difference Splitting)과 Van Leer의 플럭스벡터 분할기법(FVS; Flux Vector Splitting)을 이용하였다. 공간 정확도를 높이기 위해 물리 변수를 외삽하는 MUSCL기법을 사용하였으며, Koren differential limiter를 도입하였으며 난류모델링은 Baldwin-Lomax 난류모델링을 사용했다. 시간 적분에는 Euler 후방 차분의 내재적 방법을 사용하였으며, 시간간격은 동일시간간격(constant time stepping)을 사용하였으며, 행렬 처리에는 AF-ADI 기법을 도입하였다.

### 2.2 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 권혁빈<sup>(2)</sup>이 제안한 완만한 출발(Smooth start)조건을 사용하였다. 이 방법은 속도의 2차 미분치까지 연속하는 조건을 만족시키는 5차 다항방정식을 이용하여 열차를 정지상태에서 주행속도까지 가속시키는 방법으로 정상해를 구해 일정속도로 출발시키는 급작스런 출발(impulsive start)에 비해 수치적 파동을 완전히 제거하면서 계산시간을 줄일 수 있다.

영역의 외부경계는 각각의 물리적 성질에 따라 벽면에 해당하는 터널 내부와 입/출구벽면 및 고속전철 표면은 미끄럼 경계조건을 주었고, 나머지 외부에 해당하는 경계는 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량에 근거한 특성형태의 경계조건을 부여하거나, 무반사조건을 사용하였다.

### 2.3 영역분할기법

열차가 터널에 진출입하는 것과 같이 물체간의 상대적인 운동이 있는 경우 단일화된 격자의 형성이 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 정렬격자계를 이용한 영역분할기법(zonal method)을 이용하였다. 그리고, 영역 간의 유동정보의 교환을 위해서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자경계면에서 빠르고 정확하게 유동정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법<sup>(4)</sup>을 이용하였다.

## 3. 최적설계기법

### 3.1 반응면 기법(Response Surface Methodology)

반응면 기법은 실험을 통해 얻은 결과를 실험에 영향을 주는 독립변수들로 구성된 다항식으로 모델링하고 이를 분석하는 일련의 수리통계적 과정이다. 따라서 소수의 실험(물리적 혹은 수치적 실험)의 시행을 통해 전체 설계공간 내에서의 독립변수들의 변화가 주는 영향을 파악하기 위한 목적으로 사용되며, 이러한 특징은 실험의 시행에 많은 비용이 요구되는 경우 유용하게 활용될 수 있다<sup>(5)(6)</sup>.

#### 3.1.1 반응면의 구성

반응(Response)이란 독립변수들의 변화에 의해 결정되는 실험결과를 의미하며 설계공간 내의 반응의 변화가 반응면(Response Surface)을 형성하게 된다. 본 연구에서는 반응면을 식(2)의 2차 다항식으로 구성된 2차반응면모델을 사용하였다.

$$y^{(\rho)} = C_0 + \sum_i C_i x_i^{(\rho)} + \sum_{1 \leq i \leq j \leq n_s} c_{ij} x_i^{(\rho)} x_j^{(\rho)} + \epsilon$$

$$\rho = 1, \dots, n_s \quad (2)$$

여기서  $y^{(\rho)}$ 는 반응,  $x_i^{(\rho)}$ ,  $y_i^{(\rho)}$ 는  $n_s$ 개의 설계변수,  $n_s$  ( $n_s \geq n_v$ )는 해석의 횟수이며,  $C_0$ ,  $C_i$ ,  $c_{ij}$ 는 미결정 계수이다.

위 식은  $n_t = \frac{(n_s + 1)(n_s + 2)}{2}$  개의 계수를 갖게 되며 다음과 같은 행렬로 표현될 수 있다.

$$y^{(\rho)} = \bar{x}^{(\rho)T} c, \quad c = [C_0, C_1, \dots, C_{n_t-1}] \quad (3)$$

위 식(3)은 다음과 같은 행렬식으로 나타난다.

$$\vec{y} \approx \vec{X}c$$

$$\vec{y} = [y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)}]^T \quad (4)$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & \dots & (x_n^{(1)})^2 \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^{(n)} & \dots & (x_n^{(n)})^2 \end{bmatrix}$$

구성된 반응면을 완성하기 위해서는 다항식의 각 항에 존재하는 미결정 계수들을 합리적으로 결정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서 미결정 계수를 구하는 방법으로는 최소제곱법(Least Square Method)이 사용되었다.

#### 3.1.2 수치실험점의 결정

구성된 설계공간에 대해서 적절한 수치실험점을 선택하여야 하는데, 수치실험점의 적절한 선택은 반응면 모델의 정확도를 높인다. 본 연구에서는 D-optimal Method를 이용하여 적은 점에서 높은 정확성을 갖도록 수치실험점을 선택하였다.

#### 3.1.3 ANOVA와 회귀분석

수치실험의 결과를 바탕으로 미계수들의 값을 결정하고 각 항의 타당성을 검증하는 과정이 ANOVA(Analysis of Variance)와 회귀분석(Regression Analysis)이다. 결정된 계수로 구성되는 특정 항들이 반응함수에서 제고됨으로써 반응모델의 성능이 향상될 수도 있으며 각 항들의 포함여부를 결정하기 위한 지수로서 t-static 이 사용되었다.

$$t = \frac{C_{j-1}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 (X^T X)^{-1}_{jj}}} \quad (5)$$

구성된 모델의 신뢰도를 평가하는 방법으로  $R_{adj}^2$  가 사용되었다.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/DOF_{SSE}}{SYY/DOF_{SYY}} \quad (6)$$

여기서 SSE는 오차제곱의 합이며 SYY는 반응

함수 제공값의 합이다. 전체 반응모델의 신뢰도를 감소시키는 항을 제거할 경우  $R_{adj}^2$ 이 증가하는 경향을 보이며, 반응 모델의 신뢰도를 향상시키는 값을 제거할 경우에는  $R_{adj}^2$ 이 감소한다. 따라서  $R_{adj}^2$ 의 값이 클수록 정확한 반응 모델이 구성되었음을 알 수 있으며, 0.9~1.0 사이의 값을 가질 경우 타당한 반응 모델이라고 할 수 있다.

### 3.2 형상함수를 이용한 형상정의

보다 일반적인 설계공간을 얻기 위해 항공기 익형설계에서 널리 쓰이는 Hicks-Henne 형상함수(shape function)를 도입하였다. Hicks-Henne 형상함수는 아래 식(4)와 같이 표현된다.

$$Y = Y_{base} + \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (7)$$

여기서  $Y_{base}$ 는 기본형상(Baseline)을 의미하며  $F_i$ ,  $W_i$ 는 각각 형상함수와 이에 대한 가중치를 의미한다. 본 연구에서는 sine 함수를 이용하여 6개의 형상함수를 정의하였으며 설계에 사용된 형상함수들 및 가중치의 범위는 아래의 식 (5)와 같이 나타나 있다.

$$\begin{aligned} F_1 &= \sin(\pi x^{0.356})^3 & ; -0.03 < W_1 < 0.12 \\ F_2 &= \sin(\pi x^{0.553})^3 & ; -0.03 < W_2 < 0.12 \\ F_3 &= \sin(\pi x^{0.818})^3 & ; -0.03 < W_3 < 0.12 \\ F_4 &= \sin(\pi x^{1.239})^3 & ; -0.06 < W_4 < 0.06 \\ F_5 &= \sin(\pi x^{2.060})^3 & ; -0.09 < W_5 < 0.03 \\ F_6 &= \sin(\pi x^{4.497})^3 & ; -0.07 < W_6 < 0.03 \end{aligned} \quad (8)$$

반응면기법의 적용에 있어서 형상함수와 가중치의 범위의 조절을 통한 설계공간의 적절한 선정은 매우 중요하다. 위 식 (8)에서 정의한 설계공간의 타당성을 조사하기 위하여 Fig.1.에 설계공간을 전두부의 단면적분포로 나타내었다. 기본형상인 포물형 전두부가 설계공간 내에 완전히 들어가 있으며, 전두부의 앞, 뒤 부분에서 충분한 설계공간을 가지고 있음을 알 수 있다.

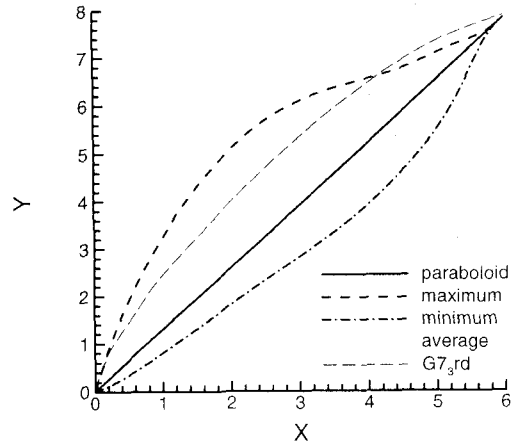


Fig. 1 Design space for nose optimization

## 4. 결과

### 4.1 해석조건

해석에 사용된 차량과 터널의 재원 및 주행조건은 현재 G7과제로 추진중인 한국형 고속전철의 제 3차년도 모델에 근거하여 아래 표 1과 같이 결정되었다.

Table 1 Test condition of train and tunnel

열차 속도(km/h)	350
열차-터널 단면적비, R	0.083
전두부 세장비, a/b	3.82
열차 길이(m)	40
터널 길이(m)	140

차량의 속도는 개발목표속도인 350 km/h 이고, 열차-터널 단면적비(R)는 0.083이다. 전두부 세장비(a/b)는 전두부의 형상변화가 이루어지는 길이(a)와 원으로 가정된 열차 단면적의 반지름(b)과의 비로 정의되는데, 3차년도 모델의 경우, 이 값은 10.36이다. 그러나, 현실적으로 전두부의 형상은 동력차 내부공간과 운전석 시야의 확보 등의 이유로 동력차의 형상변화는 제한받기 때문에 전두부로부터 6m까지의 길이만을 설계대상으로 삼았으며, 이 경우 설계에 고려된 전두부의 세장비

는 3.92가 된다. 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 열차 길이와 터널길이는 각각 40m와 140m로 정했다.

열차의 공기저항은 열차가 터널을 통과하는 동안 시간에 대해 적분한 값을 사용하였고, 미기압파는 터널 출구로부터 50m 떨어진 지점에서 측정하였다.

#### 4.2 제약조건을 준 최적설계

공기저항을 제약조건으로 주고 미기압파를 최적화시키는 방법으로 최적설계를 수행하였다. 사용된 목적함수 및 제약조건은 다음과 같다.

$$F_1 = \min(\text{Micro-pressure wave})^* \quad (9)$$

$$G = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (\text{Drag}) dt}{\int_{t_1}^{t_2} (\text{Drag of baseline}) dt} < 1 \quad (10)$$

위 식 (9)~(10)에서 뒀첨자 \*는 baseline의 값으로 나누었다는 의미이며,  $t_1$ 과  $t_2$ 는 각각 열차가 터널에 진입하기 시작한 시점과 터널로부터 진출을 끝낸 시점을 의미한다. 목적함수  $F_1$ 은 미기압파의 크기이며, 제약조건  $G$ 는 시간에 대해 평균한 항력의 값이 baseline의 항력의 값보다 작도록 설정되었다. 제약조건에서 항력의 기준이 되는 baseline은 포물형과 한국형 고속전철 3차년도 형상 두 가지를 사용하여 설계하였다.

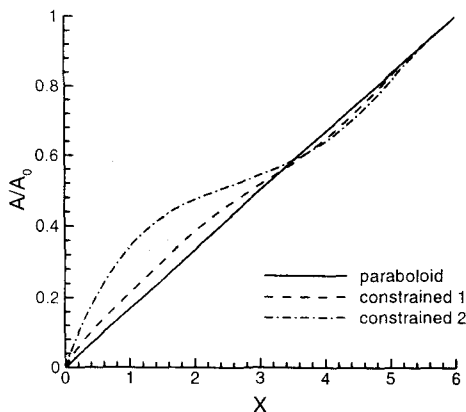


Fig. 2 Optimized nose shape (Constrained design)

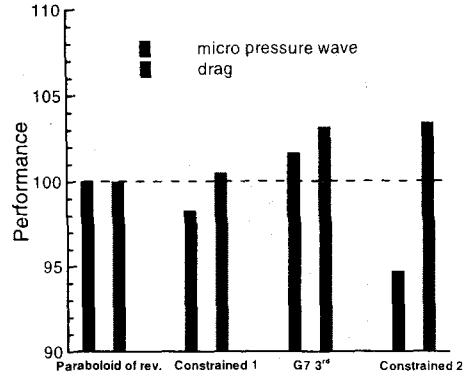


Fig. 3 Performance of optimized nose shape (Constrained design)

위 Fig. 2과 Fig. 3은 각각 최적화된 전두부 형상과 그것들의 성능을 나타낸다. 기본형상을 포물형 전두부로 하였을 때(constrained 1), 미기압파는 약 2%정도 감소하였고 공기저항은 약간 증가함을 볼 수 있다. 이와 같이 포물형 전두부는 공기저항이 작고 미기압파의 발생이 적은 특성을 갖기 때문에 이를 설계의 제약조건으로 하여 설계할 때 형상의 변화 및 성능의 개선이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 제약조건을 좀 더 완화시키기 위해 기본형상을 한국형 고속전철로 하였을 때(constrained 2)에는 주어진 항력의 제약조건을 잘 만족시키면서 미기압파 감소율이 6%로 나타났다. 이를 통해 좀 더 완화된 제약조건에 의해 최적화된 형상변화 및 성능의 개선이 더 커짐을 알 수가 있다.

#### 4.3 가중함수에 따른 최적설계

공기저항과 미기압파에 각각 가중치를 부여하고 그 비율을 달리하여 최적설계를 수행하였다. 사용된 목적함수는 다음과 같다.

$$F_2 = \omega \cdot F_1 + (1 - \omega)G \quad (11)$$

위 식(11)에서  $F_1$ 과  $G$ 는 각각 식(9)와 식 (10)에 정의된 제약조건 설계에서의 목적함수와 동일하며 기본형상으로는 포물형 전두부를 사용하였다. 가중치  $\omega$ 를 0에서 0.2씩 증가시키며 총 6번의 설계를 수행하였다.

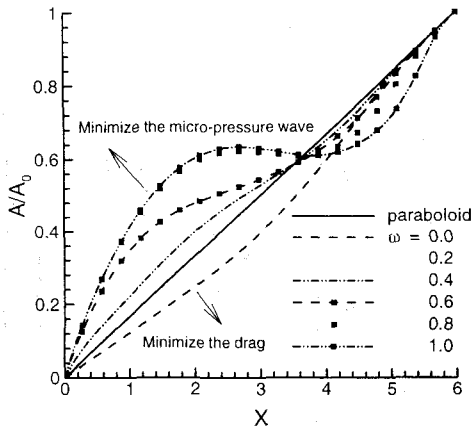


Fig. 4 Optimized nose shape  
(Weighted design)

위 Fig. 4에는 가중치에 따른 최적화된 전두부 형상이 나타나 있다. 먼저, 공기저항만을 고려하였을 경우 ( $\omega=0.0$ )에 전두부의 형상은 포물형에 비해 약간 낮은 곡선을 그리고 있으며 그 변화가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 반대로 미기압과만을 고려하였을 경우( $\omega=1.0$ )에는 전두부의 형상이 크게 변화하였는데, 포물형에 비해 전두부의 앞부분에서는 단면적이 더 크며, 후미부에서는 더 작은 결과를 나타내었다.

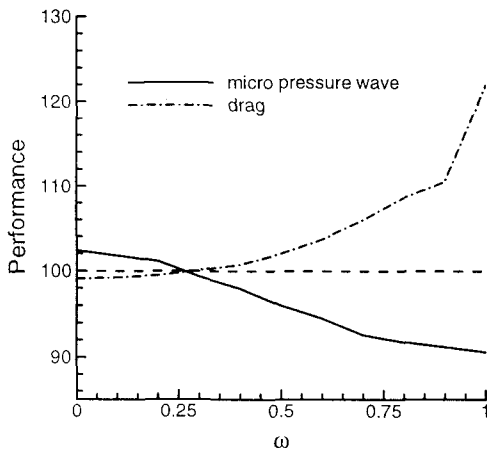


Fig. 5 Performance of optimized nose shape  
(Weighted design)

위 Fig. 5에는 최적화로 인한 성능을 가중치의 함수로 나타내었다. 먼저, 공기저항만을 고려하였을 경우 ( $\omega=0.0$ )에 최적설계로 인해 나타난 공기저항의 감소는 1%미만으로 나타났으며, 미기압과는 2%이상 증가하였다. 반대로 미기압과만을 고려하였을 경우( $\omega=1.0$ )에는 미기압과는 약 10%까지 줄어든 반면 공기저항은 20%이상 증가함을 알 수 있다. 가중치( $\omega$ )가 0에서 1로 증가함에 따라 공기저항은 서서히 증가하다가  $\omega=1$ 에서 급격히 증가하였으며, 미기압과는 서서히 감소하다가  $\omega=0.6$ 이후로는 감소율이 작아짐을 알 수 있다. 공기저항과 미기압과가 동시에 기본형상과 같아지는 점은  $\omega=0.3$ 인데, 여기서부터  $\omega=0.7$ 정도까지는 미기압과의 감소율이 크고 공기저항의 증가율이 작으므로 이 영역에서 효율적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

## 5. 결론

고속철도차량의 터널 진입 시 공기저항과 미기압과를 최적화시키기 위해 제약조건을 주거나 가중치를 변화시키는 방법으로 주고 전두부 형상의 최적설계를 수행하였으며 이를 통해 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1. 미기압과에 최적화된 전두부 형상은 앞부분이 뚱뚱하고 뒷부분이 가늘며, 공기저항을 최소화시키는 전두부 형상은 가늘고 긴 형상이다.
2. 가중치를 변화시켜가며 최적설계를 수행한 결과, 공기저항과 미기압과의 저감을 동시에 만족시키는 설계결과를 얻을 수 없었으며, 한 설계목적의 감소는 또 다른 설계목적의 증가를 유발하였다.
3. 포물형 전두부는 미기압과와 공기저항의 측면에서 매우 우수한 형상이며, 특히 공기저항의 측면에서 최적화의 효과가 거의 나타나지 않는다.
4. 한국형 고속전철을 공기저항의 제약조건으로 하여 최적설계를 수행하였을 경우, 공기저항의 변화 없이 미기압과를 약 6% 감소시키는 설계결과를 얻을 수 있었다.

## 후기

본 연구결과는 G7 고속전철기술개발사업 중 "I-1-2 고속전철설계기반기술개발" 과제의 위탁과제 "고속전철 공력설계 및 해석기술 개발"의 연구결과 중 일부를 밝히는 바입니다.

## 참고문헌

- (1) Iida, M., Matsumura, T., Nakatani, K., Fukuda, T. and Maeda, T., 1997, "Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom" *QR of RTRI*, Vol. 38, No. 4, pp.206-211
- (2) 권혁빈, 이관중, 이동호, 2000, "미기압과 저감을 위한 고속전철 전두부 형상의 최적화설계" 2000년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 506-513
- (3) 권혁빈, 이동호, 1996, "터널에 진입하는 고속전철의 수치해석을 위한 초기조건 연구" 96년 항공우주학회추계학술대회 논문집
- (4) 권혁빈, 이동호, 1998, "고속전철의 터널진입 해석을 위한 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법의 연구" 98년 항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp61~66
- (5) Myers, R. H. and Montgomery, D. C., 1995, *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, Inc.
- (6) 성용재, 1999, "반응면기법을 이용한 근세장비를 갖는 천음속 날개의 공력-구조설계 최적화 연구", 서울대학교 석사논문.