

복합재 철도차량 전두부의 공기저항 특성 분석을 위한 유동해석

고태환* · 송용수** · 허진***

CFD Analysis of Characteristic for Drag Force on leading Cab made of Composite Material

Tachwan Ko, Younsoo Song, Jin Hu

Abstract

The optimal design for a leading car considering the aerodynamic resistance is required on the high-speed train due to increasing of ratio of drag force with proportion for the square of velocity. The aerodynamic analysis using CFD in the stage of concept design offers more economical analysis method which is used to estimate the influence of flow and pressure around the leading car than the experimental method using the Mock-up. In this study, we want to assist the artistic design with aerodynamics analysis in order to get the optimal design for leading car made of composite material. The results of aerodynamic analysis for two leading car models, which one is expressed with lineal beauty and the other is with curvaceous beauty, are compared with each other and offer the proposal of modification for two models in order to decrease the drag force. The shape of curvaceous model is better for the pressure force but slightly worse for the viscous force than the other. The Fluent software is used for the calculation of flow profile in this study.

Key Words: 철도차량 공기역학(Railway Aerodynamics), 복합재료(Composite material), 전두부(Leading car). 공기저항(Aerodynamic drag), 압력저항(Pressure force). 점성저항(Viscous force)

1. 서론

공기저항은 열차의 고속화에 따라 부각되는 부분으로써 전두부의 형상과 차량의 외부 형상에 따라 저항을 감소시킬 수 있다. 공기저항은 열차가 주행중에 주위의 공기를 밀어 헤쳐서 진행하기 때문에 발생하게 되는 것으로서 열차 전두부에 가해지는 고압력의 공기에 의한 저항, 열차 후두부에 발생하는 저압력 진공상태에 의한 저항, 차량간의 연결부에서 발생하는 공기와류(vortex)에 의한 저항, 열차하부 구조물이나 대차

부분에서 발생하는 공기저항과 열차 측면과 공기와의 마찰저항 등으로 분류할 수 있다.

공기저항은 열차의 중량과는 무관하며 속도의 제곱에 비례하는 저항으로서 공기저항계수는 전두부압력 저항계수와 표면마찰 저항계수, 차량 단면적과 길이 등의 효과가 모두 고려되어 지므로 차량의 형상, 단면적, 연결 차량수, 기타 케간의 대소, 선로의 상태 및 기후 조건 등에 따라 달라진다. 고속이 될수록 주행저항 중에서 공기저항이 차지하는 비중이 커지며 따라서 고속열차에서는 공기저항을 줄이기 위한 대책이 매우 중요하다. 공기저항을 감소시키기 위해서는 공기역학적인 제반형상의 세밀한 분석이 필요하고 차량 형상 및 차량기기 등의 형상이 주는 공기조항에 대한 영향과 기여도를 명확히 파악하여 기여도가 높은 부분의 공기저항을 감소시켜야 한다.

* 한국철도기술연구원
** 한국철도기술연구원
*** 한국화이바(주)



Fig. 1. Two models for design of leading car made of composite material for TTX

열차의 공기저항 중에서 차량의 전두부와 후미부의 발생하는 압력분포의 차이에 의해 발생하는 압력저항은 열차의 단면적의 크기와 전두부와 후미부의 기하학적 형상에 크게 좌우된다. 따라서 전두부의 형상을 유선화 시키고 단면적을 최소화하는 것이 중요하다. 또한 열차 전두부의 기하학적 형상은 열차의 압력저항 뿐만 아니라 바람으로 인한 양력, 열차 통과시의 열차풍, 열차 교행시의 압력변동 등에 영향을 주므로 공기역학적으로 열차 전두부를 최적형상으로 설계하고 해석함으로써 전두부가 주는 영향을 최소화하여야 한다. 복합재료를 이용한 전두부 제작은 전두부의 형상의 유선화 측면에서 다른 재료에 비해 제약조건이 작기 때문에 해석결과에 의해 최적화된 형상을 적용하는데 이점을 가지고 있다.

본 연구를 통해서 복합재틸팅 차량의 전두부 형상안에 대한 공기역학적인 최적형상을 구현하기 위한 자료를 제공하고자 한다. 그림 1은 각각 틸팅 차량의 전두부 형상안의 모형을 보여주고 있다. 틸팅 차량의 전두부 형상으로서 제안된 2가지 형상안에 대한 공역해석을 통해 각 형상안에 대한 공기역학적인 문제점을 제시하며 비교 평가하여 보다 최적에 가까운 형상안을 제안하는데 그 목적을 두고 있다. 수치해석을 이용한 차량주변의 유동계산은 차량 설계 단계에서 실행하기 힘든 실험적 측정방법을 대신하여 간편하고 신속하게 속도장과 압력장을 얻어냄으로써 설계안에 대한 수정사항을 제시할 수 있으며, 디자인 측면에서 얻어진 여러 형상에 대하여 공기역학적인 해석을 제공하여 비교 평가할 수 있게 한다. 또한 공기저항에 의해 발생하는 차량 표면의 압력구배는 차체의 골조형상과 복합재의 두께 결정을 위해 수행되는 구조해석에 표면하중 값으로 사용되어 질 것이다.

2. Governing Equations와 Boundary Conditions

본 연구에서는 복합재틸팅 차량이 직선선로의 개활지를 주행시 전두부의 주변의 속도와 압력에 대한 profile을 얻어내기 위해서 사용되는 지배방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

Continuity Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Momentum Conservation Equations

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = & - \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구를 통해서 전두부에 형성되는 압력장에 관심을 가지고 있으며, 압력의 분포에 따라 공기역학적인 형상안의 최적설계를 얻고자 함으로 에너지 방정식에 대한 계산은 첨가하지 않기로 한다. 다만 Reynolds number의 증가로 인하여 유동의 난류화에 의해서 발생하는 영향력을 검토하기 위하여 위해서 언급된 연속방정식, Navier-Stokes 방정식과 함께 난류 모델을 사용한다.

난류를 수치해석으로 특별한 model을 사용하지 않고 직접 구하는 것은 단순한 유동 형태를 제외하고는 시간적인 면과 경제적인 면을 고려할 때 많은 어려움이 있다. 따라서 난류에 의하여 발생하는 응력이 속도 구배에 비례한다는 가정에 기초한 난류모델을 도입할 필요가 있다.

난류모델로 많이 이용되고 있는 k-ε two equation turbulent model은 Reynolds stress가 평균 속도 구배에 비례한다는 Boussinesq approximation과 이 응력이 모든 방향에 대하여 등방향 길이를 갖는다는 가정에 기초한 model로 다음과 같이 표시할 수 있다.

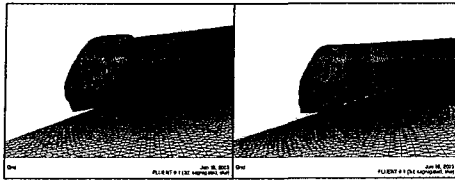
Turbulence Kinetic Energy

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

Dissipation Rate

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 방정식에 나오는 각 closure coefficients는 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$, $C_\mu=0.09$ 로 주어진다.



(a) Curvaceous model (b) Lineal model

Fig. 2 Surface mesh on train and ground for leading car models

본 연구에서는 계산영역의 경계에는 far field 경계조건을 주었으며, 외부 유동의 inlet zone에는 velocity inlet 조건을 주었다. Flow가 계산영역을 빠져나가는 outlet zone에는 pressure outlet 경계조건을 주었으며, 차량의 전두부 및 차체 표면은 no slip condition을 가지는 stationary wall로 처리하였다. 또한 ground는 정지해 있는 차량에 대해서 차량의 진행속도로 외부 유동과 함께 움직이는 moving wall로 처리되었다. 또한 유동의 방향이 차량의 길이 방향과 평행하며 차량의 중심선으로부터 좌우의 유동이 symmetric 하므로 중심면을 symmetric boundary로 설정하여 차량 반쪽의 외부 유동을 계산 영역으로 설정하였다.

차량의 길이는 차량반폭을 $D = 1.45\text{m}$ 에 대해서 33D로 하였으며 계산영역의 크기는 높이가 21D, 폭은 24D 그리고 길이는 49D이다. 따라서 차량의 최전단부와 inlet boundary까지의 거리는 16D로 하여 차량에 의한 유동장의 변화가 far field와 inlet에서의 속도구배에 영향을 미치지 않을 정도로 충분한 거리를 확보하였다. 차량의 바닥과 ground의 간격은 0.3m이며 계산시간과 modeling의 시간을 감소하기 위해 대차, 차륜 그리고 레일등의 modeling은 생략하였다.

Boundary 와 차량 face에는 triangular shape mesh를 사용하였으며, 내부 계산영역에는 unstructured tetrahedral 격자로 구성하였다. 곡선형으로 구성된 전두부 형상안 제1안에 대해서는 전체 계산 cell 수는 약 50600개, node 수는 약 104000로 그리고 직선형인 제2안에 대해서는 약 50800개의 cell과 약 106000개의 node로 구성하여 두 개의 안에 대해 비교적 비슷한 격자수를 유지하였다. Fig. 2 (a)와 (b)는 각각 틸팅차량용 전두부 형상안인 제1안과 제2안에 대한 형상과 train 표면과 ground에 형성된 face mesh를 보여주고 있다.

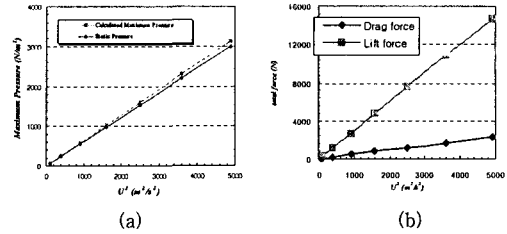


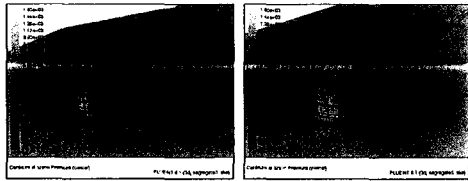
Fig. 3 (a) Calculated maximum pressure and theoretical static pressure for various speeds (b) Drag and lift force for various speeds

3. Analysis of Results

두 개의 전두부 형상안에 대한 수치해석을 실행하기 앞서서 Fluent에 의해서 얻어지는 calculation 결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 various train speed에 대한 수치해석 시행하였다. 일반적으로 수치해석의 결과의 검증을 위해서 experimental data와 비교하여야 하지만 이번 연구의 실험적 결과를 가지고 있지 못한 관계로 다양한 speed에서 얻어진 drag force와 lift force 그리고 maximum pressure의 결과를 가지고 결과의 적합성을 평가하고자 한다. External flow의 경우 유동의 속도가 가장 작은 곳에서 가장 높은 압력을 얻게되고 그 value는 far field에서의 유동속도 제곱에 비례한다. 다시 말해서 최고의 압력은 속도가 zero인 부분, 즉 stagnation point에서 발생하며 static pressure와 far field의 pressure와의 차이는 $0.5 \rho U^2$ 로 나타난다. 여기서 ρ 는 공기의 밀도로 1.225kg/m^3 를 사용하며, U는 far field와 inlet에서의 유동의 mean velocity로 차량의 speed를 의미한다.

Fig. 3(a)는 차량의 속도 36km/h, 72km/h, 108km/h, 144km/h, 180km/h, 216km/h 그리고 252km/h인 경우에 Fluent를 이용하여 계산되어진 결과의 최고 압력과 위해서 언급한 이론적인 static pressure의 값을 같은 속도에서 계산하여 비교하였다. x축의 값은 속도의 제곱으로 나타내고 있으며 maximum pressure가 속도의 제곱에 선형적으로 비례함을 보여준다. 또한 이론값과의 차이는 약 4%로써 calculated value가 비교적 정확한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 다양한 속도에 대한 열차에 주어지는 drag force와 lift force를 속도의 제곱에 대하여 보여 주고 있다. 유체의 유동에 의해서 나타나는



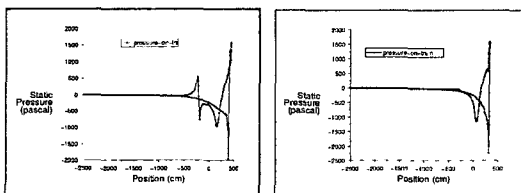
(a) curvaceous model (b) Lineal model

Fig. 4 Pressure profile on leading car for two moldes

차량에 가해지는 force는 크게 주행을 방해하는 drag force와 차량을 떠오르게 하는 lift force로 나누어진다. 이 두 forces는 다시 각각 차량 주변에 나타나는 압력의 분포에 의해서 나타나는 pressure force와 유동과 차량의 마찰저항을 대표하는 viscous force로 구분할 수 있다. 그림에 나타난 것처럼 force는 속도의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

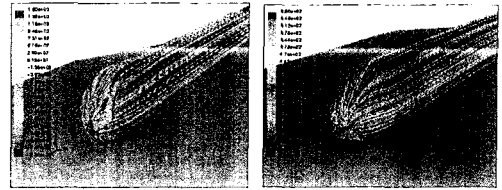
본 계산을 통해서 차량 표면에 나타나는 주행 저항에 공기저항의 부분은 서론에서 언급한 바와 같이 속도의 증가에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함으로서 고속운행 시 그 비중이 커짐을 확인할 수 있었다.

전두부 2개 형상안에 대한 aerodynamic resistance를 계산하기 위하여 실행된 수치해석 결과를 통하여 전두부 주위에 형성되는 압력분포와 속도분포를 Figs. 4 ~ 6에 제시하였다. 차량의 속도는 180km/h로서 톨팅차량의 운행 최고속도에 대하여 두 개의 형상안에 대하여 유동장을 계산하였다. Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 형상안 제1안과 제2안에 대한 차량표면의 pressure profile을 보여 주고 있으며, Fig. 6 (a)와 (b)는 각각 형상안 제1안과 제2안에 대한 차량표면을 흐르는 유동의 Pathline를 보여 주고 있다. Fig. 5는 전두부 표면의 중심선을 따라 표면에 작용하는 압력을 보여 주고 있다. Static pressure의 contour graph에서는 밝은 색은 높은 압력을 그리고 어두운 색은 낮은 압력을 나타내고 있다.



a) curvaceous model (b) Lineal model

Fig. 5 Pressure distribution on leading car for two moldes



(a) curvaceous model (b) Lineal model

Fig. 6 Pathline around leading car for two models

형상안 제1안에 대해서는 전두부의 nose부분에서 stagnation point가 형성되면서 최고 압력이 나타나며, 전두부의 좌우 측면에 있는 곡선 hump의 뒷부분과 상단의 돌출부의 뒷부분에 separation된 flow가 다시 차량표면에 reattach 되면서 생성되는 약간의 높은 압력분포가 나타난다. 또한 어두운 색으로 나타나는 저압력구배는 좌우의 hump와 차량의 전면부의 상단 가장자리는 flow의 separation에 의한 vortex의 형성에 기인한 것으로 분석된다.

제2안에 대해서는 제1안에 비하여 전면부에 나타나는 고압력 부분의 영역이 다소 넓으며, 전면부의 가장자리에 나타나는 저압력부분의 영역 또한 제1안에 비해 넓음을 볼 수 있다. 이는 제2안이 공기역학적인 부분에 있어서 제1안에 비해 유선형이 부족한 것으로 압력저항이 전면부에 보다 넓게 발생하며 가장자리에서도 전방향에 걸쳐서 vortex를 유발하는 형상을 가지고 있음을 의미한다. 표 1은 제1안과 제2안의 Drag force를 비교한 표로써 위에서 언급한 분석 결과를 뒷받침한다. 제1안은 2안에 비해 pressure force에 있어서 유선형의 영향으로 약 43N 정도의 저항감소를 얻을 수 있는 반면, viscous force에 있어서는 오히려 제2안이 단면적의 차이에 따라 약 3.5%정도 저항감소를 가지고 있다. 따라서 total drag coefficient에 대해서 제1안이 제2안보다 0.024정도의 감소를 가지므로써 제2안에 비해 약 20% 감

Table 1 Comparison of drag force on leading car for two models

	Pressure Force (N)	Viscous Force (N)	Total Force (N)	Drag Coefficient
곡선형 제1안	511	693	1,205	0.08
직선형 제2안	904	669	1,575	0.10
비교 (2안-1안)	393	-24	370	0.02

최효과를 가지고 있음을 볼 수 있다.

속도구배에 대해서는 두 형상모두 양호한 흐름을 보여 주고 있으나, 제 2안의 경우에 전두부 전면하단의 좌우부분에서 복잡한 유동이 형성되고 있다. 그러나 두형상 모두 전두부에서의 유동의 흐름은 nose를 중심으로 많은 유동이 상부로 흘러가게 설계되어 있어서 좌우로의 유동량이 적은 점이 장점이다. 그러나 에어컨이 차량의 상부에 취부되는 경우에는 소음억제를 위하여 에어컨의 형상에 좀더 많은 주의가 필요하다.

4. 결 론

이상의 연구결과의 분석과 비교를 통해서 전두부 형상안에 대한 공기역학적인 주행저항을 감소시킬 수 있는 형상은 보다 유선형으로 설계되어 있는 제1안이 적합하다고 말할 수 있다. 그러나 전두부 형상 제1안의 단면적에 의한 viscous force의 값이 큰 것을 고려할 때, 단면적을 줄일 수 있는 수정안이 필요하다고 여겨진다. 또한 제1안의 압력구배 결과를 통해서 알 수 있는 것처럼 전두부 상단의 돌출부의 후미에 발생하는 vortex의 영향은 좀더 세밀한 분석을 요구하며, 차량의 상부에 취부되는 air-conditioner의 형상에 많은 제약 조건을 가지게 될 거라고 생각한다.

복합재료를 이용한 전두부 제작은 예술적인 감각을 표현하게 하였으며, 공기저항 측면에서도 유선화를 실현하므로 미적 부분과 경제적인 부분에서 많은 이점을 가져올 것으로 여겨진다.

이번 연구에서는 전두부의 형상의 전면저항을 고려하였지만 향후 연구에서는 전두부가 후미에 놓여 있는 경우까지 고려하여 전두부의 형상의 주행 저항을 분석할 것이다. 이 경우 제1안의 상부 돌출부의 후미에 형상의 유선형에 좀더 많은 고려가 필요할 것으로 여겨진다. 향후 차량의 형상에 의한 공기역학적인 영향을 검토하는 과제를 통하여 형상의 공력소음의 측면을 검토할 것이며, 더 나아가 압력변동이 큰 차량의 교행시 그리고 터널통과시 전두부의 형상과 차량의 형상에 대한 영향력을 검토하고 최적의 전두부 형상안을 제시하고자 한다.

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Suzuki, M., Tanemoto, K., Maeda, T., "Aerodynamic characteristics of train under cross-winds," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 91, (2003), p.209-218.
- (2) Kwon, H.B., Park, Y.W., Lee, D.H., Kim, M.S., "Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 89, (2001) p.1179-1195.
- (3) Raghunathana, R.S., Kim H.D., Setoguchic, T., "Aerodynamics of high-speed railway train," Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) p.469-514.
- (4) Wilcox, D.C., "Turbulence Modeling for CFD," DCW industries, Inc. 2nd ed. (1998)
- (5) Fluent, User Guide, Version 6.1, Fluent Inc., p.24.2-24.3
- (6) 백남옥외 3인, 철도차량총서, 기전연구소 (1997), p.81-91.