

고속 틸팅열차의 틸팅 판토티그래프 공력 특성 연구

고 태 환^{*1}, 김 기 남^{*2}, 구 동 회^{*3}Study of aerodynamic characteristic for a pantograph
for Tilting train eXpress (TTX)

T. H. Ko, G. N. Kim and D. H. Goo

The development of a tilting train with construction of electric line on the conventional railway is required for speed-up on the conventional railway with many curving sections. For development of tilting train, the study and development of the tilting system and tilting bogie having the different mechanism with a general high speed train will play a main role for improving the technology in the field of Korean railway. The study and development of the pantograph tilting mechanism in order to keep a good contact behavior between a pantograph and a contact wire by tilting a pantograph on the opposite direction of the vehicle tilting direction. In this study, we analyzed the aerodynamic characteristic of a developing pantograph on the tilting train and obtained the contact force with catenary by aerodynamic lift force by the aerodynamic analysis. We also performed the numerical analysis for design the device controlling lift force on a pantograph. From the aerodynamic simulation and parameter study for a device to control the lift force, we will suggest the various shape and the optimal shape of it corresponding to a developing tilting pantograph. The Fluent software is used for the calculation of flow profile in this study.

Key Words: 철도차량 공기역학(Railway Aerodynamics), 틸팅열차(Tilting train), 양력(Lift force), 판토티그래프(Pantograph), 양력조절장치(Pantograph airfoil)

1. 서 론

궤도를 주행하는 전기차량은 주행중에 차량에 전원을 공급받기 위해 전차선과 직접적인 접촉을 유지하는 판토티그래프라는 장치를 가지고 있다. 차량의 주행에도 불구하고 전차선이나 전원 궤도와 접촉을 유지하기 위해 다양한 형태의 판토티그래프들은 전차선과 전원궤도에 무리를 주지 않는 정도의 접촉력을 유지하도록 제작되어져 있다. 일반적인 전동차에 적

용되고 있는 판토티그래프는 차량의 지붕에 설치되어 적당한 압상력으로 전차선과 접촉을 유지하면서 주행하는 차량에 계속적인 전원을 공급한다.

전기 철도차량의 고속화에 따라 공기저항이 차량에 미치는 영향이 대두되면서 이미 차량 형상 설계에 공기저항을 고려한 연구가 진행되고 있다. 이와 더불어 차량의 외부에 도출되어 차량의 주행에 따른 공기 저항뿐만 아니라 양력의 영향을 가장 크게 받게되는 판토티그래프의 설계에 있어서 공력 특성 연구는 전차선과의 이선을 줄이기 위해 필수적인 고려사항으로 대두되었다. 판토티그래프는 일정한 압상력을 가지고 전차선과 접촉을 유지하지만 판토티그래프의 형상에 따라 주행 속도에 따라 압상력이 변화하고 이에 따라 전차선과의 이선이 증가되며 때로는 전차

*1 정희원, 한국철도기술연구원

*2 유진기공업주식회사

*3 한국철도기술연구원

*E-mail : thko@krii.re.kr

선에 무리한 힘을 가하게 되거나 판토티그래프 집전판의 마모를 증가시키는 경우가 발생한다.

주행 방향에 따라서 변화되는 양력의 방향과 크기의 변화를 줄이기 위한 양력조절장치를 판토티그래프의 형상에 맞추어 설계함으로써 판토티그래프의 형상이 가지는 공력에 대한 문제점을 해소시킨다. 또한 유동해석의 결과는 차량의 소음원 중에 큰 부분을 차지하고 있는 판토티그래프에 의해서 발생하는 공력소음의 분석과 예측을 위한 기반 자료로써 사용되어질 뿐만 아니라 판토티그래프의 장착을 위한 고정부의 구조해석을 위한 입력 자료로써 활용되어진다.

본 연구에 적용되는 판토티그래프는 틸팅 차량에 사용되는 것으로 곡선부에서 차량을 틸팅시킴에 따라 발생하는 전차선과 판토티그래프의 변위를 줄이기 위해 차량의 틸팅 반대방향으로 판토티그래프 틸팅 메커니즘을 구동시켜 판토티그래프의 중앙이 항상 전차선과 일치하게 한다. 따라서 다른 판토티그래프에 비해 횡운동이 추가되며 또한 횡진동에 대한 우려가 발생되며 측풍에 의해 판토티그래프의 틸팅에 큰 영향이 발생하게 된다. 본 연구를 통해서 이런 특징을 가지고 있는 판토티그래프의 공력 특성을 분석하며 측풍과 주행 속도에 의해 발생하는 양력과 측력을 예측하여 이를 최소화하기 위한 양력장치를 설계하는 기본 자료로 사용하고자 한다. 본 수치연구에서는 CFD 분야에서 많은 검증을 통해 신뢰성을 인정받고 있는 상용 전산유체 program인 Fluent version 6.1를 사용하여 유동을 계산하고 해석하였다.

2. Governing Equation과 Numerical Scheme

2.1 Governing Equations

본 연구에서는 180km/h급 틸팅 차량이 직선선로의 개활지를 주행시 판토티그래프 주변의 속도와 압력에 대한 profile을 얻어내기 위해서 사용되는 지배방정식은 아래와 같이 3차원 연속방정식과 운동량 방정식인 Navier-Stokes Equation으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

본 수치해석에 사용된 k-ε two equation turbulent model은 Reynolds stress가 평균속도 구배에 비례한다는 Boussinesq approximation과 이 응력이 모든 방향에 대하여 등방향 길이를 갖는다는 가정에 기초한 model로 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

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

where

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

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.

2.2 Numerical scheme

본 연구에서는 discretization equation에 대해서는 nonlinear differential equation을 finite volume method를 적용하여 linear algebraic equation으로 변환하였으며, momentum equation의 해를 구하기 위해서 Second order upwind scheme을 채택하였다. Pressure interpolation scheme에 대해서는 body force가 큰 경우, strongly swirling flow 그리고 high Reynolds number convection의 경우에는 해의 정확성이 떨어지는 문제를 가지고 있지만, 주로 low speed flow에서 수식화가 간단한 관계로 계산시간을 단축하기 위하여 standard pressure interpolation



(a) 판토티그래프 3D 모델 (b) 판토티그래프 표면격자

Fig.1 판토티그래프의 모델링과 표면격자

scheme을 사용한다. Pressure-velocity coupling algorithm 은 continuity equation으로부터 pressure 에 관한 equation을 유도하는 방법으로 주로 SIMPLE, SIMPLEC 그리고 PISO 를 사용하고 있으며, 여기서는 SIMPLE algorithm을 사용하였다.

2.3 Modeling과 Boundary Conditions

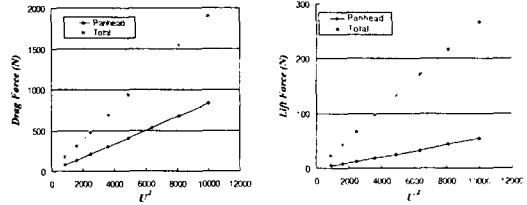
본 연구는 판토티그래프의 양력조절장치의 형상을 설계하기위한 판토티그래프의 공력특성을 도출하는 단계로써 한국형 틸팅차량의 판토티그래프로써 상세설계가 이루어진 판토티그래프의 형상에 대한 특성을 검토하여 보완사항을 제시하며 수정이 어려운 부분에 대해서는 개별적인 양력조절장치를 설계하여 제안하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 중점적으로 판토티그래프의 모델링을 통한 판토티그래프 주변에 발생되는 유동현상을 다양한 방향에서 검토하고자 한다. 그림 1(a)는 틸팅판토티그래프의 3D 모델의 모습이며 그림 1(b)는 유동해석을 위해 단순화된 판토티그래프 모델의 주요 관심 부분인 팬헤드 표면에 형성된 triangular face mesh의 모습을 보여주고 있다.

판토티그래프의 주변 유동해석을 위한 계산영역에 생성된 3D 격자는 Unstructured Tetrahedral Mesh 약 1M개를 사용하였다. velocity inlet boundary와 pressure outlet boundary에는 rough한 격자를 그리고 no slip condition으로 처리된 판토티그래프 주변에는 fine한 격자를 생성하여 판토티그래프 주변의 복잡한 유동변화를 계산하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 차량의 진행 속도와 방향에 따른 영향

차량의 진행 경로에 따라 판토티그래프의 방향을 동일시 하기위해 일반적으로 전기차량은 두개의 판토티그래프를 각각 반대방향으로 설치하여 진행 방향에 따라 정해진 판토티그래프를 사용한다. 또는 진행방향



(a) Drag force (b) Lift force

Fig.2 차량이 전진시 속도 30 ~ 100m/s에서 U²에 대한 lift and drag force 변화

에 무관하게 공기에 대한 양력에 의한 변화가 크지 않도록 판토티그래프를 설계하여 사용하기도 한다. 후자의 판토티그래프는 판토티그래프의 형상의 특성상 나타나는 방향에 따른 양력의 변화를 감소하기위해 별도의 양력조절장치를 설치하게 된다. 또한 전자의 경우에도 판토티그래프의 고장에 대한 대안으로써 역방향의 판토티그래프를 사용하여야 하는 경우를 고려하여 별도의 양력조절장치를 필요로 한다.

한국형 틸팅차량의 주행최고 속도는 50m/s로 되어있으며 역풍이 있는 경우는 최고속도 100m/s의 속도로 주행하는 차량이 갖는 공력의 영향을 받게된다. Fig. 2는 차량이 팬헤드를 뒤로하고 차량속도 30m/s에서부터 100m/s로 전진시 판토티그래프 전체와 팬헤드에 나타나는 drag force와 lift force의 변화를 속도의 제곱에 대하여 나타내고 있다. 판토티그래프 주변의 유동은 Reynolds number가 1×10⁵ 이하로써 층류 유동에 해당하며 Re의 변화에 따라 Drag and Lift coefficient가 일정한 것으로 나타난다.

판토티그래프의 진행 방향에 따른 변화를 분석하기 위해 판토티그래프를 역방향으로 하여 실시한 해석 결과는 Table 1에 순방향에 대한 결과와 비교하여 제시되어 있다. Drag and Lift coefficient가 Re에 무관하기 때문에 역방향에 대해서는 속도 50m/s와 100m/s인 경우에 대해서만 수치해석을 시행하였다. 그림3은 각 방향에 대한 판토티그래프 표면의 압력구배를 보여주고 있다. 위의 결과에 따라 팬헤드를 뒤로하여 진행하는 경우 판토티그래프를 상승시키는 힘이 우세하게

Table 1 판토티그래프 진행방향에 따른 양/항력 비교

방향 \ 속도	Lift force (N)		Drag force (N)	
	50m/s	100m/s	50m/s	100m/s
전진시	67	267	477	1902
후진시	-7	-38	481	2984



(a) 전진방향 (b) 후진방향

Fig.3 전후진시 판토티그래프 표면에 형성되는 압력구배

작용하여 전차선과의 이선율을 감소시키기도 또한 항력도 속도가 증가함에 따라 역방향보다 상당히 감소되기는 하지만 전차선과의 마모가 증가한다는 문제점을 가지고 있다.

3.2 바람의 방향에 따른 영향

일반적으로 태풍과 같이 국부적인 풍속이 상당히 높은 바람이 차량의 진행방향과 다른 다양한 방향에서 불어올 때 판토티그래프의 공력특성을 검토하기 위하여 우선적으로 차량의 진행방향과 수직으로 불어오는 바람에 대해서 해석을 시행하였다. 차량의 속도와 풍속이 동일하게 50m/s일 때 실질적일 판토티그래프에 유입되는 풍속과 방향은 45°로 70m/s의 속도를 가지게 된다. Fig. 4는 수직풍에 대하여 판토티그래프에 주변의 pathline과 팬헤드 표면에 압력구배를 보여주고 있다. 바람의 방향이 변화함에 따라 가장 크게 양력의 영향을 나타내는 부분은 팬헤드로써 양 끝단의 날개부분에 큰 압력이 작용하면서 팬헤드를 누르는 힘이 작용한다. 이에 따라 직진시에 비해 상승력이 상당히 줄어드는 결과를 나타냈다. 그러나 전체적인 양력은 여전히 판토티그래프를 상승시키는 힘으로 나타남으로써 이선율에는 문제가 없을 것으로 추정된다.



(a) Pathline (b) 압력구배

Fig.4 수직풍에 대한 판토티그래프 주변의 압력구배와 pathline

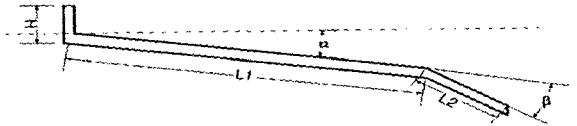


Fig. 5 양력조절장치의 형상(안)

4. 결 론

이선율을 최소 시키기 위해서 그리고 측풍에 의한 하강력을 줄이기 위해 판토티그래프의 설치 방향을 팬헤드가 뒤에 놓이는 것으로 하는 것이 적합한 것으로 보이나 상승력이 다소 큰 관계로 전차선과의 마모를 줄이기 위해 전진시 상승력을 감소시킬 수 있는 양력조절장치의 형상이 필요하다.

Fig. 5에는 일반적으로 사용되는 판토티그래프의 양력을 조절하는 판의 형상을 제시하였다. 판토티그래프의 형상과 최적으로 부합되는 양력조절장치의 형상을 선정하기 위하여 그림에 표시된 다양한 치수에 대한 유동해석이 필요하며 이를 통해 각 변수의 양력에 미치는 특성을 파악해야 한다. 판토티그래프의 전후진시 발생하는 양력의 변화에 대하여 방향에 무관한 양력을 도출할 수 있는 양력조절장치의 형상설계가 요구된다.

후기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Raghunathana, R.S., Kim H.D., Setoguchic, T., "Aerodynamics of high-speed railway train," Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) p.469-514.
- [3] Wilcox, D.C., "Turbulence Modeling for CFD," DCW industries, Inc. 2nd ed. (1998)
- [4] Fluent, User Guide, Version 6.1, Fluent Inc p.24.2-24.3