

수치해석을 통한 180km/h급 틸팅차량 전두부의 주행 공기저항 해석

CFD Analysis of Drag Force on leading Cab of Tilting Train with 180km/h Service Speed

고태환*
Ko, Taehwan

송용수*
Song, Younsoo

한성호**
Han, Seung-Ho

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 with the operation speed at 180km/h. 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 they 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.

1. 서론

열차를 운전할 때에는 열차의 진행을 억제하는 여러 가지의 저항이 수반되는데 그러한 것을 총칭하여 열차저항(train resistance)이라고 한다. 열차저항은 크게 열차의 운전상태에 따라 출발저항, 가속저항, 주행저항으로 그리고 차량의 운행위치에 따라 곡선저항, 구배저항 그리고 터널저항으로 분류한다. 주행저항중 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 계간의 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 차량형상 및 차량기기 등의 형상이 주는 공기조항에 대한 영향

* 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단, 선임연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단, 주임연구원, 비회원

*** 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단, 선임연구원, 정회원

과 기여도를 명확히 파악하여 기여도가 높은 부분의 공기저항을 감소시켜야 한다.

열차의 공기저항 중에서 차량의 전두부와 후미부의 발생되는 압력분포의 차이에 의해 발생하는 압력저항은 열차의 단면적의 크기와 전두부와 후미부의 기하학적 형상에 크게 좌우된다. 따라서 전두부의 형상을 유선화시키고 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.

본 연구를 통해서 180km/h급 틸팅 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. Numerical simulation을 이용한 차량주변의 유동계산은 차량 설계 단계에서 실행하기 힘든 실험적 측정방법을 대신하여 간편하고 신속하게 속도장과 압력장을 얻어냄으로써 설계안에 대한 수정사항을 제시 할 수 있으며, 디자인 측면에서 얻어진 여러 형상에 대하여 공기역학적인 해석을 제공하여 비교 평가 할 수 있게 한다. 본 수치연구에서는 CFD 분야에서 많은 검증을 통해 신뢰성을 인정받고 있는 software인 Fluent version 6.1를 사용하여 유동을 계산하고 해석하였다.



그림 1. 틸팅차량(TTX)의 전두부 형상 디자인 제2안 모델

2. Governing Equations과 경계조건

본 연구에서는 180km/h급 틸팅 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

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

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 발생

하는 응력이 속도 구배에 비례한다는 가정에 기초한 난류모델을 도입할 필요가 있다. 난류에서의 유동의 속도는 시간에 의해 평균한 값과 평균값으로 부터의 변동 량으로 분류하면

$$u = \bar{u} + u' \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 변동성분의 시간 평균값이 0라는 것을 이용하여 운동량 방정식에 대입하여 시간 평균하면, Reynolds stress항 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 이 생성되며, 이는 난류에 의하여 발생하는 응력으로서 난류 해석에서 적절한 modeling을 통하여 해석하여야한다.

Turbulence model은 Reynolds stress을 Mean velocity의 변형량에 비례한다고 가정하면

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(-\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho x \delta_{ij} \quad (4)$$

으로 나타나며, 여기서 난류 점성계수 μ_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho x^2}{\epsilon} \quad (5)$$

난류모델로 많이 이용되고 있는 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.

Turbulence Kinetic Energy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho x) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho x u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_x} \right) \frac{\partial x}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

Dissipation Rate

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{x} (C_{e1} P_k - C_{e2} \rho \epsilon) \quad (7)$$

where

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

위의 방정식에 나오는 각 closure coefficients는 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{e1}=1.44$, $C_{e2}=1.92$, $C_\mu=0.09$ 로 주어진다.

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.

본 해석의 주요 역할은 지금까지 제안되어진 2종류에 전두부 형상안에 대한 비교 분석을 통해 보다 공기역학적으로 압력저항에 의한 주행저항을 감소시킬 수 있는 전두부 형상을 선정하며 선정된 형상안이 180km/h급 열차의 전두부로서의 적절함을 검토함과 동시에 공기역학적인 측면에서의 불이익적인 부분을 지적하여 보완하는데 있다. 따라서 2개의 형상안에 대해서 동등한 경계조건과 numerical scheme을 사용하였다.

차량의 길이는 차량반폭을 $D = 1.45m$ 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.

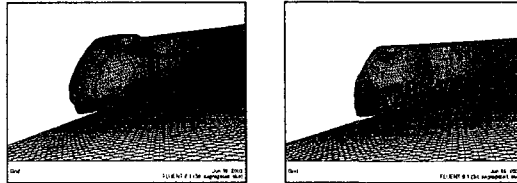


그림 2. 전두부 형상 1안과 2안의 train과 ground의 표면 mesh

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. 그림 2는 각각 킬링차량용 전두부 형상안인 제1안과 제2안에 대한 형상과 train 표면과 ground에 형성된 face mesh를 보여주고 있다.

3. Numerical Scheme

Pressure interpolation scheme에 대해서는 주로 low speed flow에서 수식화가 간단한 관계로 계산시간을 단축하기 위하여 standard pressure interpolation scheme을 사용하지만, body force가 큰 경우, strongly swirling flow 그리고 high Reynolds number convection의 경우에는 해의 정확성이 떨어지는 문제를 가지고 있다. 이런 문제에 대해서는 다른 대안으로 주변에 있는 cells의 pressure 평균값으로 경계면에서의 pressure을 계산하는 linear scheme과 second order 정확성을 가지므로써 좀더 정확한 해를 얻어내지만 unstructured grid 또는 초기 계산단계에서의 사용에 문제가 있는 second-order scheme이 사용되고 있다. 또한 buoyancy와 axisymmetric calculation에 장점을 가지는 body force weighted scheme 그리고 quadrangle과 hexahedron shape mesh에 대하여 많이 사용되는 PRESTO (PREssure STaggering Option) scheme이 있다.

Pressure-velocity coupling algorithm 은 continuity equation으로부터 pressure에 관한 equation을 유도하는 방법으로 주로 SIMPLE, SIMPLEC 그리고 PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)를 사용하고 있다. 여기서 SIMPLE algorithm은 guess 되어진 pressure value를 사용하여 Momentum equation을 풀어 속도를 구한 후, continuity equation를 통해 mass flux를 계산하여 생기는 오차를 pressure의 correction 값으로 하여 pressure value을 update하는 방법으로 가장 보편적으로 사용되고 있다. SIMPLEC와 PISO는 SIMPLE algorithm과 같은 개념을 가지고 있으며 단지 수렴의 속도를 증가하기 위하여 pressure-correction equation을 수정하여 사용하는 것이다.

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 scheme 으로서 위에서 언급한 standard scheme을 그리고 pressure-velocity coupling algorithm으로는 SIMPLE를 사용하였다. 두 가지의 다른 형상에 대해서 모두 동일한 scheme을 사용한다.

4. Analysis of Results

두 개의 전두부 형상안에 대한 Numerical simulation을 실행하기 앞서서 Fluent에 의해서 얻어지는 calculation 결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 various train speed에 대한 numerical simulation 시행하였다. 일반적으로 numerical simulation의 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 얻게 되고 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, U 는 far field와 inlet에서의 유동의 mean velocity로 차량의 speed를 의미한다. 그림 3는 대표적인 속도 180km/h의 경우에 계산의 iteration 동안 x, y, z velocity와 turbulent kinetic energy와 dissipation rate에 대한 residual의 변화를 보여주고 있다. Iteration number 180정도에서 모든 variable에 대한 residual은 $1.0\text{e-}05$ 까지 감소되었으며, 좋은 convergence를 가지고 있음을 보여준다.

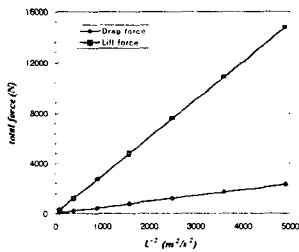


그림 5. 다양한 속도에 따른 차량의 Drag force와 Lift force

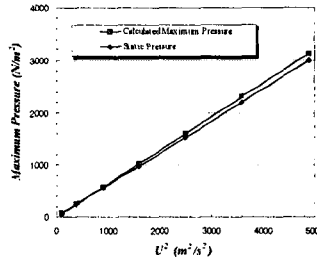


그림 4. 다양한 차량속도의 경우에 대한 최고압력과 이론 static pressure

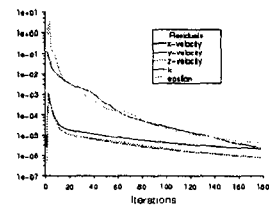


그림 3. Iteration 동안의 Residual의 변화 plot

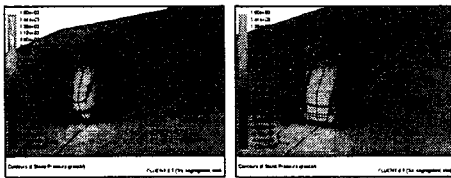
그림 4는 차량의 속도 36km/h, 72km/h, 108km/h, 144km/h, 180km/h, 216km/h 그리고 252km/h인 경우에 Fluent를 이용하여 계산되어진 결과의 최고 압력과 위해서 언급한 이론적인 static pressure의 값을 같은 속도에서 계산하여 비교 하였다. x축의 값은 속도의 제곱으로 나타나고 있으며 maximum pressure가 속도의 제곱에 선형적으로 비례함을 보여준다. 또한 이론값과의 차이는 약 4%로써 calculated value가 비교적 정확한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

그림 5는 다양한 속도에 대한 train에 주어지는 drag force와 lift force를 속도의 제곱에 대하여 보여 주고 있다. Fluid의 flow에 의해서 나타나는 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 주행저항에 공기저항의 부분은 서론에서 언급한 바

와 같이 속도의 증가에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함으로써 고속운행 시 그 비중이 커짐을 확인할 수 있었다.

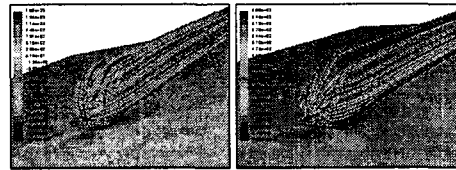
전두부 2개 형상안에 대한 aerodynamic resistance를 계산하기 위하여 실행된 numerical simulation 결과를 통하여 전두부 주위에 형성되는 압력분포와 속도분포를 그림 6과 7에 제시하였다. 차량의 속도는 180km/h로서 톨딩차량의 운행, 최고속도에 대하여 두 개의 형상안에 대하여 유동장을 계산하였다. 그림 6 (a)와 (b)는 각각 형상안 제1안과 제2안에 대한 차량표면의 pressure profile을 보여 주고 있으며, 그림 7 (a)와 (b)는 각각 형상안 제1안과 제2안에 대한 차량표면을 흐르는 유동의 Pathline를 보여 주고 있다. Static pressure의 contour graph에서는 밝은 색은 높은 압력을 그리고 어두운 색은 낮은 압력을 나타내고 있다.

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.



(a) curvaceous model

(b) Lineal model



(a) curvaceous model

(b) Lineal model

그림 6. Pressure profile on leading car for two moldes

그림 7. Pathline around leading car for two models

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% 감쇠효과를 가지고 있음을 볼 수 있다.

표 1. 전두부 형상안 제1안과 제2안에 대한 Drag force 비교

	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

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 것이 장점이다. 그러나 에어컨이 차량의 상부에 취부되는 경우에는 소음억제를 위하여 에어컨의 형상에 좀더 많은 주의가 필요하다.

5. conclusion

이상의 연구결과와 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.

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.

Reference

- [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
- [5] 백남옥의 3인, 철도차량총서, 기전연구소 (1997), p.81-91.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.