

철도시스템 전산유체해석 표준 프레임워크를 이용한 KTX 차량 주변 압력장에 대한 수치해석

A Numerical Analysis on the Pressure Field Around KTX Train Using the Standard Framework of CFD Analysis for Railway System

권혁빈[†] · 남성원* · 차창환**

Hyeok-Bin Kwon · Sung-Won Nam · Chang-Hwan Cha

Abstract

A standard framework of CFD(Computational Fluid dynamics) analysis for railway system has been developed to evaluate the overall aerodynamic performance of railway system and has been adopted to numerical simulation of the pressure field around KTX train. The framework is composed of standard aerodynamic model and standard aerodynamic performance to customize the general CFD solution process reflecting the characteristics of railway system such as various operation mode and performance factors. The results show that the standard framework of CFD analysis for railway system can provide objectivity and consistency to the CFD analysis for railway system and the pressure field around KTX train has been successively solved.

Keywords : Standard Framework(표준프레임워크), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Aerodynamics(공기역학), KTX Train(KTX열차)

1. 서론

급속도로 발전하는 하드웨어와 더불어 꾸준히 발전하고 있는 전산유체역학(CFD)은 실험적으로 어려움이 따르는 다양한 열유체 공학의 영역에 응용되고 있으며, 이와 더불어 철도시스템에의 응용도 더욱 활발해지고 있다. 1960년대 후반 이후 철도시스템은 신칸센, TGV 등 고속철도의 등장과 함께 비약적인 속도향상을 이루어냈고, 이에 따라 공기저항, 주행안전성, 공력소음 등 공기역학적 성능의 평가 및 향상 방안이 초미의 관심사로 대두되었다.

이전까지 철도시스템의 공력성능 평가를 위해 주로 사용되었던 방법으로는 실차시험과 풍동시험이 있는데, 실차시험은 공력성능의 분석에 필요한 충분한 데이터를 확보하기 힘들고 시험에 막대한 시간과 비용이 소요되는 문제점이 있으며, 풍동시험은 철도차량의 긴 길이(최장 400m)와 지면, 터널 등과의 상대운동의 모사 등의 어려움 때문에 그 적용에

제한이 따른다는 문제점이 있다. 따라서 상대적으로 저렴하고 물리적인 제약이 없으며, 다양한 유동정보를 제시할 수 있는 전산유체역학을 이용한 수치시뮬레이션이 고속철도의 등장과 더불어 각광을 받게 되었다.

3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 철도시스템의 수치해석이 본격적으로 시작된 것은 1990년대으로서 1992년 TGV를 개발한 GEC Alsthom사의 Masbernat[1] 등에 의해서 PAM-FLUEIDTM을 이용하여 TGV차량의 정상해석 및 터널진입 해석이 이루어졌으며, 이듬해인 1993년 Mestreau[2] 등도 TG-FLOTM를 이용하여 TGV차량의 터널진입 문제를 수치적으로 해석하였다. 일본의 경우에는 1990년대에 Fujii와 Ogawa[3,4]가 FSA알고리즘을 이용하여 교행하는 열차와 터널에 진입하는 열차 주위의 3차원 유동장을 해석하였다. 또한 1999년에는 Holmes[5] 등이 병렬컴퓨팅 기법과 SPECTRUMTM을 이용하여 복선터널에 진입하는 철도차량 주위 유동을 해석하였으며, 진입 시 차체에 가해지는 하중을 계산하여 주행안전성을 평가하였다.

가장 최근의 주목할 만한 성과로서는 2003년 Bombardier Transportation의 Diedrichs[6]가 수행한 연구를 들 수 있을 것이다. 그는 STAR-CDTM, FluentTM, CFD++TM 등을 이용하여

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 시스템안전연구본부
E-mail : hbkwon@krii.re.kr
TEL : (031)460-5346 FAX : (031)460-5279

* 한국철도기술연구원, 시스템안전연구본부, 선임연구원

** 한국철도기술연구원, 시스템안전연구본부, 연구원

ICE 2고속차량에 미치는 측풍의 영향을 해석하고 주행안전성을 평가하였다. 또한 그는 격자밀도, 격자의 질, 난류모델, 수치해법, 전방 및 후방경계의 위치, 난류강도 및 해석 소프트웨어에 따른 수치해의 민감도를 조사하여 수치해석의 신뢰도를 높였다.

본 연구에서는 전산유체역학을 이용한 철도시스템의 공력 성능 평가체계 구축의 기초작업으로서 철도시스템 전산유체 해석 표준 프레임워크를 제시하였다. 그 동안 국내외에서 이루어진 대부분의 전산유체역학 연구는 터널 진입, 교행, 측풍 등 개별적인 물리현상의 특징들을 분리하여 이에 맞는 모델링과 해석기법을 적용하여 왔는데, 이 때문에 차량 전체의 또는 차량과 시설물을 동시에 고려한 시스템 차원의 접근방법이 확립되지 못한 실정이다. 물론, 이는 항공기와 달리 장대하고 복잡한 구조를 갖는 철도차량의 외부형상 때문에 전체 시스템을 한 번에 고려하여 해석하기 힘들다는 문제점에 기인한 바 크다. 그러나, 최근 컴퓨터 하드웨어의 발전과 함께 여러 가지 성능을 동시에 고려하여야 하는 최적화 설계의 필요성이 대두됨으로 인하여 철도 시스템의 종합적인 공력성능을 해석하는 틀의 중요성이 점점 증대하고 있는 상황이다. 또한, 전산유체역학의 특성상 대상체의 모델링과 격자계 형성 및 수치해석 기법의 적용 등 주관적인 요소가 개입될 여지가 많다.

따라서, 본 연구에서는 철도시스템의 특성에 맞는 전산유체해석의 표준 프레임워크를 개발하였으며, 이를 KTX차량 주위 압력장 분석에 적용하여 전산유체해석의 객관성 및 일관성을 평가하였다.

2. 철도시스템 전산유체해석 표준 프레임워크

2.1 개요

Fig. 1에는 일반적인 전산유체해석의 과정을 나타내었다. 먼저, 해석의 대상이 되는 시스템을 정의하게 되는데, 철도시스템의 경우에는 차량의 종류, 터널이나 교량, 방음벽, 둑 등 선로구축물의 유무를 결정해야 하고, 주행속도, 교행 여부 등 운행모드, 공기저항, 주행안전성, 공력소음 등 해석하고자 하는 성능 등이 해당된다. 이러한 시스템의 정의가 이루어진 다음에는 이에 해당하는 공기역학적인 모델을 구성하게 되는데, 예를 들어 터널 진출입 문제 같이 터널 내부의 거대 유동영역에 관심을 갖는 경우에는 가능한 차량 형상을 단순화하여 모델링을 하게 되지만, 반면에 공기저항을 평가하고자 할 때에는 전체적인 형상 뿐만 아니라 하부형상, 연결부, 판토프 등 공기저항에 큰 기여를 하게 되는 여러 형상요소들을 모두 고려하여야만 한다.

이러한 모델이 구성되고 난 이후에는 해당 모델의 3차원

형상요소들을 이용하여 격자를 형성하게 되고, 형성된 격자계에 대해서 정상 또는 비정상 수치계산을 수행하게 된다. 해석결과는 동일한 조건에서의 시험치가 있는 경우에는 직접적인 비교를 통해, 시험치가 없는 경우에는 이론해석이나 적절한 물리적 가정에 대입함으로써 수치해를 검증하게 되며, 수치해의 적절성이 입증되면 공력성능의 도출이 완료되며, 적절하지 않다고 판단될 경우에는 격자형성부터 다시 진행하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 일반적인 전산유체해석의 과정 중 공력모델(aerodynamic model)과 공력특성(aerodynamic performance)을 철도시스템의 특성에 맞게 표준하고, 격자형성 및 수치계산의 과정에는 상용 CFD 프로그램 또는 in-house code를 이용하는 방법으로 철도시스템 전산해석 표준 프레임워크를 구성하였다.

2.2 표준 공력모델 체계(standard aerodynamic model system)

Fig. 2에는 본 연구에서 제시하는 표준 공력모델 체계를 나타내고 있다. 아래 모델체계에서 먼저 사양(specification)이란 철도시스템의 설계 시 결정되는 제원, 편성, 형상 등의 항목으로서 이것은 다시 일반사양과 공력형상변수로 나뉜다. 일반사양(general specification)이란 시스템사양에 제시된 일반사항 중 공력모델과 관련된 항목으로 보통 차량 또는 선로 구축물의 사양서에 나타나 있는 정보들이다. 공력형상변수(aerodynamic variable)는 일반사양 외에 공력모델링을 위해 추가적으로 요구되는 항목으로서 전두부 형상, 단면형상 등 2차원 또는 3차원의 CAD 데이터로 정의된다. 이러한 사양들은 공력모델을 구축할 때마다 하나하나 검토되어 선별, 가공

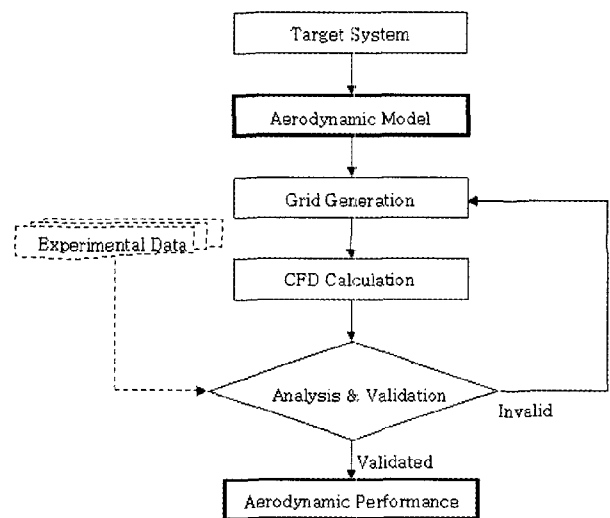
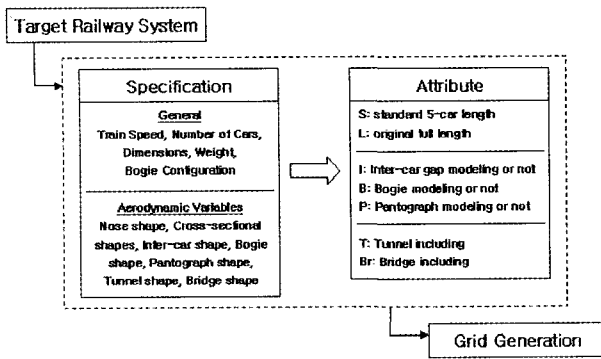


Fig. 1. General Process of CFD Analysis



- S : 동력차 2량 포함5량 1편성의 표준 모델
- L : 대상열차의 전량 편성 모델
- I : 연결부 모델링을 포함하는 속성
- B : 대차부 모델링을 포함하는 속성
- P : 판토품레프 모델링을 포함하는 속성
- T : 터널을 포함하는 속성
- Br : 교량을 포함하는 속성

Fig. 2. Standard Aerodynamic Model System

되어야 하는 값들인데, 본 표준 공력모델 체계에서는 속성(attribute)이라는 개념을 도입하여 사양에 나타난 물성치들을 그룹화하여 일괄적으로 공력모델구축에 활용할 수 있도록 하였다. 즉, 속성(attribute)은 사양 중 특정 구성요소(열차길이, 차량형상, 선로구조물 등)와 관련 있는 항목들을 그룹화하여 나타낸 항목으로 정의되며, 아래와 같은 영문 이니셜로 표기 되도록 하였다. 고속철도 차량의 경우에 대하여 표준 공력모델 체계 구축을 위한 필요한 사양들과 각각에 해당하는 속성 작성을 위해서는 한국형 고속철도차량 사양서[7]를 참조하였다.

2.3 표준 공력성능 체계(standard aerodynamic performance system)

Table 1에는 표준 공력성능 체계와 각각의 성능을 도출하기 위해 필요한 속성 및 속성의 조합에 대해 나타내었다. 먼저, 철도시스템의 공력성능을 주행저항, 열차풍, 측풍, 교행, 터널통과, 공력소음의 6가지 분야로 구분하고 각각에 대해 총 17가지 성능을 분류하였다. 각각의 성능지표에 대하여 공력모델의 속성이 미치는 영향을 살펴보면, 먼저 주행저항의 경우에는 전두부, 연결부, 하부, 판토품레프 등 요소별 공기저항에 해당하는 성능의 경우에는 해당 형상요소의 속성과 짧은 표준길이(S, 5량 1편성)의 속성을 조합하여 획득할 수 있는 반면, 마찰저항의 경우에는 차량의 길이가 주요 변수이므로 실제 편성차량의 길이 속성(L)을 가져야 한다. 또한, 주행저항식의 예측을 위해서는 각 형상요소의 공기저항의 산술적 합산에 의해서는 상호간의 간섭현상을 반영할 수 없으므로

Table 1. Standard aerodynamic performance system

구분	성능(performance) 분류	속성					모델명
		S	L	I	B	P	
공기 저항	압력저항	O					S
	마찰저항		O				L
	연결부저항	O		O			S-I
	하부(대차)저항	O			O		S-B
	판토품레프저항	O				O	S-P
	주행저항식		O	O	O	O	L-IBP
열차풍	전두부/후미부 통과 시 압력변동	O					S
	열차 통과 시 선로변 열차풍		O				L-I
	열차 통과 시 차량하부 열차풍		O		O		L-B
측풍	동력차 주행 시 전복하중	O					S
	편성차량 주행 시 전복하중		O	O	O		L-IB
교행	교행 시 동력차 측력	O					S
	교행 시 편성차량 측력		O				L
터널 통과	터널 통과 시 미기압파	O					S
	터널 통과 시 압력변동		O				L
공력 소음	전두부 공력소음	O					S
	판토품레프 공력소음		O			O	S-P

모든 속성을 종합적으로 모델링(L_IBP)하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 마찬가지로, 나머지 분야의 공력성능을 산출하기 위해서는 각각의 성능에 미치는 속성들을 적절히 조합한 모델을 사용하여야만 타당한 공력성능의 평가가 가능할 것으로 생각된다.

2.4 공력모델의 단계(cascade of aerodynamic model)

Table 2에는 공력모델을 단계별로 제시하고 각 단계별로 필요한 사양 및 도출가능 성능을 제시하였다. 각 단계는 모두 7개의 수준(level)로 정의되며, 각 수준은 S 부터 L-IBP까지의 속성으로 정의된다. 각 단계에서 도출가능한 것으로 표시된 공력성능은 다른 단계에서 도출가능할 수도 있고, 아닐 수도 있다. 그러나, Level 1 모델이 도출가능한 성능은 이후 모든 단계의 모델에서 획득 가능하고, level 7 모델은 그 전단계의 모든 모델이 도출하는 성능을 모두 도출할 수 있다. 만약, 충분한 계산 자원과 전문인력을 보유한 상태라면, 앞의 단계를 거치지 않고 바로 Level 7 모델로 전산해석을 수행할 수도 있을 것이다. 그러나, 아직 세계적으로 Level 7모델에 대해 전산해석을 시도한 사례가 없을 정도로 막대한 계산용량과 시간 및 모델링 시간이 소요될 것으로 예상된다. 또한, 수치해의 검증에 대한 문제점도 쉽게 해결할 수 없을 것으로 예상된다. 즉, 이전 단계에서 도출되는 모든 공력성능에 대한 검증작업

Table 2. Cascade of aerodynamic model

단계	사양	속성	성능
Level 1	G3-2, G3-3, G3-4, A1, A2	S	압력저항, 전두부/후미부 통과 시 압력변동, 동력차 주행 시 전복하중, 교행 시 동력차 측력, 터널 통과 시 미기압파, 전두부 공력소음
Level 2	G3-2, G3-3, G3-4, A1, A2, A3	S-I	연결부 저항
Level 3	G3-2, G3-3, G3-4, G4, G6, A1, A2, A3, A4	S-IB	대차저항
Level 4	G3-2, G3-3, G3-4, A1, A2, A5	S-P	판토그래프 저항, 판토그래프 공력소음
Level 5	G2, G3, A1, A2	L	마찰저항, 교행 시 편성차량 측력, 터널통과 시 압력변동
Level 6	G2, G3, G4, G6, A1, A2, A3, A4	L-IB	열차 통과 시 선로변/차량 하부 열차풍, 편성차량 주행 시 전복하중
Level 7	G, A	L-IPB	주행저항식

이 한꺼번에 이루어져야 하며, 이는 격자의 형성 및 수치계산에 소요되는 막대한 시간이 반복적으로 소요되는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같이 공력모델의 단계를 정의하여 하위단계에서부터 순차적으로 전산해석 및 검증작업을 수행해나가는 단계적 접근전략(cascadal approach)을 제안하여 보다 현실적인 프레임웍의 구성이 가능하도록 하였다. 물론, 하드웨어와 수치기법이 나날이 발전하고, 이러한 단계적 접근법에 의한 기술적 노하우들이 축적될 경우에는 직접적인 접근법이 보다 효율적인 방안이 될 수도 있을 것이다.

3. Fluent를 이용한 전산유체해석 및 표준 프레임웍의 적용

3.1 표준 공력모델의 구축 및 해석

본 연구에서는 앞 장에서 제안한 철도시스템 전산유체 표준 프레임웍을 이용하여 시속 300km/h로 주행하는 KTX차량에 대한 승강장 주위의 압력변동을 Level 1 모델을 적용하여 전산유체 해석을 수행하였다. 격자형성 및 CFD 계산에는 GAMBIT™ ver 2.2.30, TGrid™ ver 3.6.8과 FLUENT™ ver 6.2.16이 각각 이용되었다. KTX차량의 Level 1 모델(S-model)의 구축에 필요한 사양은 일반사양 3종과 공력사양 8종으로 아래 Table 3에 나타나 있다.

아래 Fig. 3에는 GAMBIT과 Tgrid를 이용해 생성한 격자의 단면형상을 나타내었다. 또한, 해석영역의 원방, 경계조건 및

Table 3. Specifications of 5-car KTX train-set model

Code	항목	값
G3-2	동력차 길이	22.607m
G3-3	객차 길이	18.7m
G3-4	기타차량(동력객차) 길이	21.845m
A1-1	전두부 길이	KTX.stl
A1-2	전두부 단면적 분포	KTX.stl
A1-3	전두부 형상	KTX.stl
A2-1	동력차 최대 단면적	9.616658m ²
A2-2	동력차 최대단면 형상	KTX.stl
A2-3	객차 단면적	8.265484m ²
A2-4	객차 단면 형상	KTX.stl
A2-5	기타차량(동력객차) 형상	KTX.stl

Table 4. Identification of test conditions

Stage	component	value
Grid Identification	Characteristic length, D[m]	3.6
	Front	28D
	Rear	56D
	Side	5D
	Upper	15D
	Number of Grid	782,946
Boundary Type	Computational Domain	Pressure Far Field
	Bottom wall	83.3m/s
	Train wall	no-slip
Run Identification	Govern. Eqn.	N-S Turb.
	Viscous Model	$\kappa-\epsilon$ Std.
	Time	Steady
	Converge check	Drag
	Iteration	911

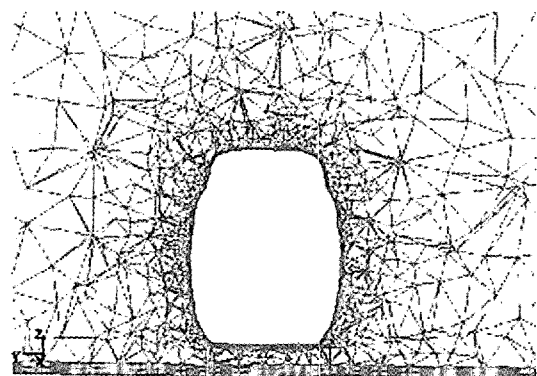


Fig. 3. Crosswise cut through the Grid domain

해석정보등을 Table 4에 나타내었으며, 모멘텀 계산에서는 2차 상류차분 스킴(second order upwind scheme)을, 압력계산에는

SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), 난류에너지 및 소산율 계산에는 2차 상류차분 스킴을 각각 사용하였으며, 원방을 정의하고 격자를 형성한 최종적으로 형성된 격자계의 총 격자 수는 782,946개이다. 해석을 위해서는 Intel Pentium 4 CPU 3GHz와 한국과학기술정보원 슈퍼컴퓨팅 센터의 슈퍼컴퓨터를 이용하였으며, Microsoft의 Windows™ 환경 하에서 해석 프로그램을 구동하였다.

3.2 공력성능의 평가 및 검증

KTX차량 S-model의 주행시 승강장 주위의 압력변동에 관한 공력성능을 평가하였다. 고속열차의 통과로 인하여 주변 시설물등은 반복되는 압력장의 변동에 노출됨으로써 시설물의 피로파괴 및 안전문제를, 경우에 따라서는 승객의 이명감 문제를 야기할수 있다. 압력변동에 관련한 현상에 영향을 주는 요소로는 열차속도, 열차 단면적, 열차로부터의 거리, 전두부 형상등이 있다. 압력변동에 의한 영향은 풍압이 속도의 제곱에 비례하므로 300km/h 의 고속운행시 큰 문제가 될 수 있으며, 이에 고속열차의 공기역학적 설계가 매우 중요한 요소로 간주되어진다.

먼저, KTX 열차 통과시 승강장에서 압력변동을 아래 Fig. 4에 나타내었다. 열차통과에 의한 압력변동은 열차전두부 통과 시 먼저 최대양압(peak overpressure)가 관측되고 그 뒤를 최대부압(peak suction pressure)이 따르게 된다. 이후 열차 후미부 통과 전까지는 작은 압력변동이 대기압부근에서 관측되는 것을 알수 있으며, 열차 후미부 통과 시에는 부압 그리고 양압의 순서로 나타남을 알수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전두부 통과 시 압력변동은 수치해석결과와 시험치[8]

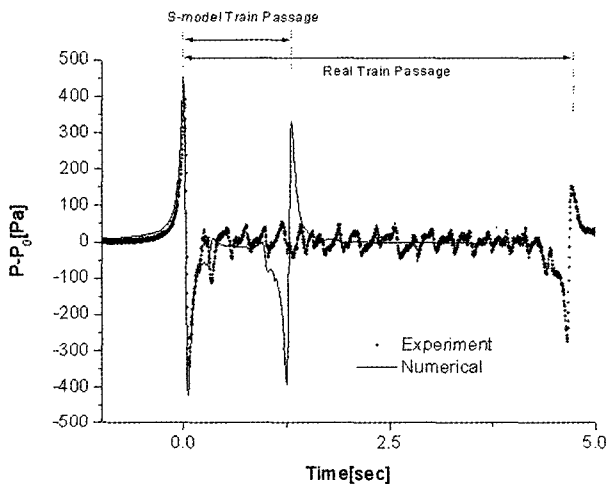


Fig. 4. Comparison between experiment and numeric on the Pressure fluctuation at Platform

가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 열차 통과 시 발생하는 작은 크기의 압력변동은 수치해석에서는 나타나지 않았는데, 이는 수치해석에 쓰인 S-model 이 연결부가 생략되어 있기 때문인 것으로 보인다. 또한, 후미부의 압력변동은 해석치와 실험치가 매우 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 실험차가 20량의 장대편성 모델이기 때문에 긴 열차길이에 대해 생성되는 두터운 경계층으로 인하여 후미부의 압력변동이 짧은 모델에 비해 크게 줄어들기 때문인 것이다. 따라서, 보다 현실과 근접한 결과를 얻기 위해서는 열차 세부형상을 반영한 공력모델을 해석하는 것이 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 철도시스템의 공력성능을 종합적으로 평가하기 위한 표준 프레임워크를 제시하고 상용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT™을 이용하여 이를 구현하였다. 연구결과;

- 산발적으로 흩어져 있는 사양(specification)에 대한 정보를 체계적인 그룹화를 통한 속성(attribute) 정보로 정의되는 표준 공력모델(standard aerodynamic model)을 이용함으로써, 공력모델의 객관성과 구축 시 효율성을 증대할 수 있었으며,
- 표준화된 공력 성능모델 체계(standard aerodynamic performance system)를 단계별 접근전략(cascadal approach)에 대응시킴으로써 해석기술의 일관성과 신뢰성을 유지할 수 있었으며, 또한, KTX차량 주위 압력장에 대해 상기 표준 프레임워크를 이용하여 공력성능을 평가한 결과;
- 전두부 주위 압력변동에 대하여 수치해석결과와 시험치가 잘 일치하였으며,
- 표준 프레임워크의 적용을 통하여 객관적이고 효율적인 단계별 공력성능 평가와 철도 시스템의 종합적인 성능평가에 적용가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 공공기술연구회에서 지원하는 ‘차량성능향상 핵심기술개발’ 과제와 한국과학기술정보연구원의 ‘Grand Challenge 지원 프로그램’을 통해 수행되었으며, 연구예산을 지원하여 주신 공공기술연구회와 컴퓨팅 자원을 제공하여 주신 슈퍼컴퓨팅센터 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. Masbernat, F., Wolfhugel, Y. F., Dumas, J. C. (1992), "CFD aerodynamics of the French high-speed train", SAE Technical paper series 920343.
2. Mestreau, E., Aita, S., Loehner, R. (1993), "TGV tunnel entry simulations using a finite element code with automatic remeshing", AIAA-93-0890.
3. Fujii, K., Ogawa, T. (1995), "Aerodynamics of high speed trains passing by each other", Computers&Fluids, Vol.24, No.8, pp. 897-908.
4. Ogawa, T., Fujii, K. (1997), "Numerical investigation of three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel", Computer & Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585.
5. Holmes, B. S., Dias, J., Rifai, S. M., Buell, J. C., Johan, Z., Sassa, T., Sato, T. (1999) "Solution of train-tunnel entry flow using parallel computing", Computational Mechanics, Vol.23, pp.124-129.
6. Diedrichs, B. (2003), "On computational fluid dynamics modeling of crosswind effects for high-speed rolling stock", Proceedings of Imech Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.217, pp.203-226.
7. 한국철도기술연구원 (1998), G7 고속전철 시제차량 기본사양.
8. 한국철도기술연구원 (2004), 철도시스템 선진화 기술연구(선로구축물 핵심기술 연구)보고서.
9. 한국철도기술연구원 (2004), 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발(2차년도 연차보고서).